



# **COSMOLOGIA**

Dos Mitos ao Centenário  
da Relatividade

ELCIO ABDALLA

ALBERTO SAA

**Blucher**

# COSMOLOGIA

---

dos Mitos ao  
Centenário da Relatividade

---

**Blucher**

**Elcio Abdalla**

Instituto de Física  
Universidade de São Paulo

**Alberto Saa**

Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica  
Universidade Estadual de Campinas

# **COSMOLOGIA**

---

dos Mitos ao  
Centenário da Relatividade

---

*Cosmologia: dos Mitos ao Centenário da Relatividade*  
© 2010 Elcio Abdalla  
Alberto Saa  
Editora Edgard Blücher Ltda.

---

# Blucher

---

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar  
04531-012 - São Paulo - SP - Brasil  
Tel 55 11 3078-5366  
editora@blucher.com.br  
www.blucher.com.br

Segundo Novo Acordo Ortográfico, conforme 5. ed.  
do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*,  
Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer  
meios, sem autorização escrita da Editora.

---

Todos os direitos reservados pela Editora Edgard  
Blücher Ltda.

---

## FICHA CATALOGRÁFICA

---

Abdalla, Elcio  
*Cosmologia, dos mitos ao centenário da  
relatividade / Elcio Abdala, Alberto Saa, - -*  
São Paulo: Blucher, 2010.

Bibliografia.  
ISBN 978-85-212-0553-1  
1. Astronomia 2. Cosmologia  
3. Cosmologia - Obras de divulgação  
I. Saa, Alberto. II. Título.

10-09673

CDD-523.1

---

Índices para catálogo sistemático:

1. Cosmologia: Astronomia	523.1
2. Universo: Astronomia	523.1

# Prólogo

Olhar para os céus fascina, desde a mais remota Antiguidade. Na verdade, desde que o homem teve consciência de sua própria existência. É lá que nasceu a ciência prática da previsão do tempo, observando-se as constelações e sabendo-se em que época do ano se estava. Nessas mesmas constelações, encontramos os deuses, heróis, mitos. Procuramos nossa origem, nosso destino.

Apresentamos aqui o cosmos do ponto de vista da física, não sem um olhar um pouco mais lírico de mitos e esperanças do homem. O cosmos, que nem sempre foi ciência, veste-se aqui, como consequência das modernas leis da física, como ciência. Na China, a astronomia era considerada uma ciência humana, catálogo de efemérides. No ocidente, teve ambos os papéis, mas hoje o cosmos é visto como um teste de teorias físicas ao mesmo tempo em que usamos a física para melhor compreender nossa evolução.

Procuramos nos abster de escrever equações. A linguagem é, tanto quanto possível, acessível a um leitor bem informado. Esperamos ter, neste livro, uma introdução à estrutura de teorias físicas com especial atenção para os céus.



*As armas e os barões assinalados  
Que, da Ocidental praia lusitana,  
Por mares nunca dantes navegados  
Passaram ainda além da Taprobana,  
E em perigos e guerras esforçados,  
Mais do que prometia a força humana,  
Entre gente remota edificaram  
Novo reino, que tanto sublimaram;*

*E também as memórias gloriosas  
Daqueles reis que foram dilatando  
A Fé, o Império, e as terras viciosas  
De África e de Ásia andaram devastando,  
E aqueles que por obras valerosas  
Se vão da lei da Morte libertando:  
Cantando espalharei por toda a parte,  
Se a tanto me ajudar o engenho e arte.*

Luís de Camões,  
*Os Lusíadas* (1572)  
Canto I, 1-2





# Conteúdo

<b>1</b>	<b>As Origens nas Preocupações do Homem</b>	<b>13</b>
1.1	A descrição dos céus	21
1.1.1	O sistema de duas esferas de Eudoxo	21
1.1.2	Os epiciclos e os deferentes	26
1.2	O calendário	28
1.3	A revolução de Copérnico	31
1.4	Nossa posição diante do universo	33
1.5	Uma longa jornada	34
<b>2</b>	<b>O Nascimento da Ciência Moderna: o Método Científico</b>	<b>37</b>
2.1	O método científico	38
<b>3</b>	<b>A Mecânica de Newton e a Gravitação Universal</b>	<b>43</b>
3.1	Tycho Brahe e as Leis de Kepler	43
3.1.1	Leis de Kepler	45
3.2	Isaac Newton e a mecânica clássica	47
3.2.1	Leis de Newton	50
3.2.2	Lei da gravitação universal	51
3.3	O universo mecânico	53
<b>4</b>	<b>Maxwell e o Eletromagnetismo</b>	<b>59</b>
4.1	Faraday e o conceito de campo	59
4.2	As equações de Maxwell	62
4.2.1	A luz como um fenômeno eletromagnético	64
4.3	O eletromagnetismo e a segunda Revolução Industrial	66

<b>5</b>	<b>As Grandes Revoluções Científicas do Século XX.....</b>	<b>69</b>
5.1	A física clássica.....	70
5.1.1	Limites da física clássica.....	70
5.1.2	Energia, tempo e leis de conservação.....	72
5.2	Espaço, tempo, matéria: a teoria da relatividade especial.....	76
5.2.1	O espaço-tempo .....	80
5.2.2	A ordem temporal.....	83
5.3	A teoria da relatividade geral .....	85
5.4	A mecânica quântica.....	86
5.5	Átomos, prótons, elétrons e outros – qual é o fundamental? .....	90
5.6	Impacto da nova física no século XX .....	92
<b>6</b>	<b>Novas Ideias Científicas e as Teorias Universais.....</b>	<b>95</b>
6.1	Teoria das partículas elementares.....	95
6.2	A questão da unificação .....	97
6.3	A inclusão da gravitação .....	105
6.3.1	Supersimetria – bósons e férmions.....	106
6.3.2	Teorias duais .....	107
6.4	Descrição quântica do universo como um todo: a teoria quântica da gravitação e o cosmos .....	108
<b>7</b>	<b>O Universo em Expansão.....</b>	<b>111</b>
7.1	O universo quântico e o Big Bang.....	114
7.2	Novos fatos e ideias.....	118
<b>8</b>	<b>A Visão do Século XXI .....</b>	<b>121</b>
8.1	A ciência dos dias de hoje.....	121
8.2	O modelo cosmológico padrão.....	127
8.3	A evolução do universo .....	131
8.4	A mecânica quântica e a cosmologia .....	136
8.5	Matéria escura e energia escura .....	137
8.6	Rumo ao futuro sobre a necessidade de uma teoria quântica da gravitação .....	139
8.7	Cordas .....	142
8.7.1	Dimensões .....	144
8.7.2	O estilo teorias de cordas.....	146
8.7.3	<i>M</i> de mistério.....	146
8.7.4	Cosmologia de Branas.....	148
8.7.5	Testando a gravidade na Brana.....	148
8.8	Outros modelos e ideias.....	150
8.8.1	Atalhos gravitacionais.....	150
8.8.2	Revisões do <i>Big Bang</i> .....	151

9	Considerações Finais.....	155
	Apêndice: Sistema Solar .....	157
	1 Mercúrio.....	159
	2 Vênus .....	163
	3 Terra.....	163
	4 Marte .....	163
	5 Júpiter.....	164
	6 Saturno.....	166
	7 Urano.....	167
	8 Netuno .....	168
	9 Plutão .....	169
	10 Cinturão de asteroides.....	170
	11 Cinturão Kuiper e os cometas .....	172
	Bibliografia .....	176



## CAPÍTULO 1

---

# As Origens nas Preocupações do Homem

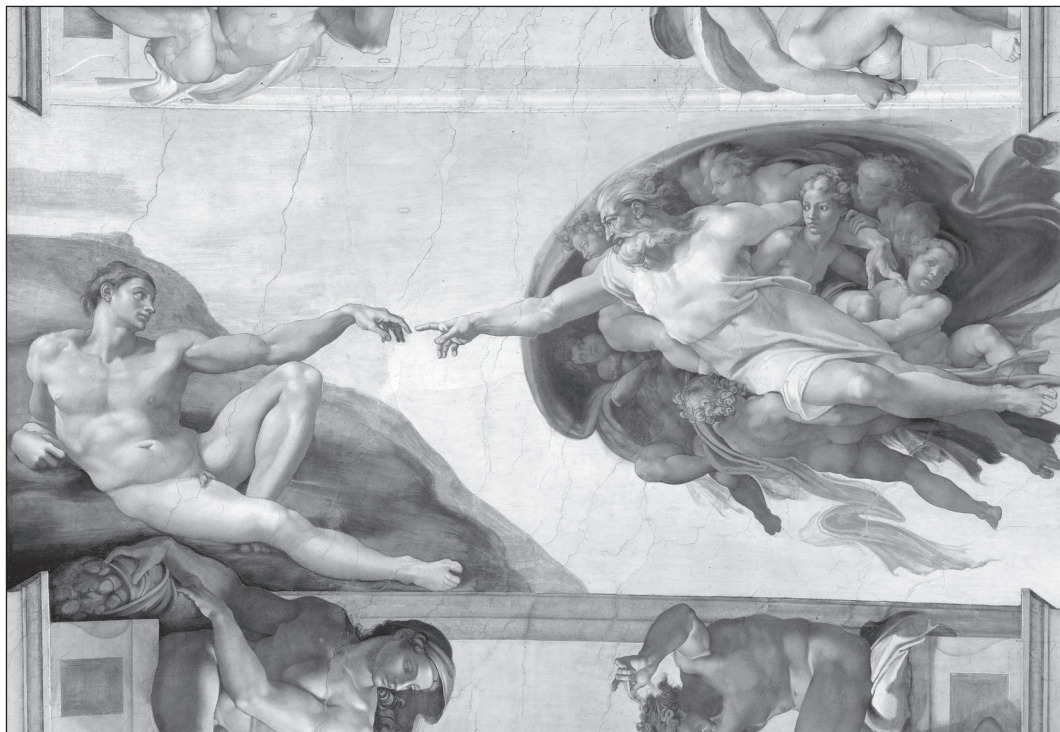
---

A vida humana consciente está pautada sobre o tripé formado pelo conhecimento, pelo prazer e pelo altruísmo. Desde que o homem olhou à sua volta, em uma atitude consciente, viu o céu e tentou compreendê-lo. Ali enxergou a beleza, sentindo prazer. Transmitindo o que vira a seus companheiros de jornada e utilizando o que aprendeu, socializou-se. No conhecimento e em sua utilização, obteve ciência, cultura e técnica. Por meio da introspecção dessas experiências, chegou ao misticismo e à religiosidade.

Nesse ir e vir de sensações e conhecimentos, podemos dizer que um dos pontos centrais veio a ser a preocupação humana com o problema de nossas origens, que remonta ao início das preocupações conscientes do homem, haja vista a enorme quantidade de lendas acerca do fato em sociedades mais primitivas e a sua presença em conteúdos mitológicos de várias religiões politeístas, que culminam nas gêneses das religiões monoteístas.

Podemos apreciar, por exemplo, nas pinturas da Capela Sistina (ver Figura 1.1), que o problema da criação passa pela arte de conteúdo religioso. Também observamos a satisfação do pensamento na característica hierárquica da criação, como após a separação entre a luz e as trevas quando temos, nas pinturas renascentistas, a criação do Sol, e finalmente a criação humana.

A busca da compreensão do cosmos motivou gerações de pesquisadores em todas as áreas do conhecimento. O ser humano, tornado consciente, passa a viver



**Figura 1.1** A criação de Adão, Michelangelo – 1511. Detalhe do teto da Capela Sistina, Roma.

o mito do herói e a planejar a compreensão de si mesmo e de seu mundo exterior, principalmente por meio da ciência, almejando poder descrever a criação do mundo, suas leis e consequências. É assim que a preocupação humana, desde os antigos, tomou forma em objetos longínquos, primeiramente no macrocosmo. Não havia, na época, como se preocupar com o microcosmo, por falta da técnica adequada. Foi somente ao final do século XVIII, que este caminho em direção ao micro começou a ser trilhado e, posteriormente, pavimentado.

O início do pensamento humano sistemático é bem antigo. Os egípcios conheciam metais, faziam medidas, tinham uma matemática primitiva. Faltou-lhes a filosofia. Sem ela, não construíram uma cosmologia e sua ciência não prosperou. Os mesopotâmios iniciaram-se na observação dos astros, mas tampouco desenvolveram uma filosofia. Os gregos foram capazes de perscrutar e desenvolver uma filosofia, marchando em direção a uma ciência através da iniciação ao misticismo. O misticismo faz tomar forma, no inconsciente, a busca de uma causa. O misticismo é uma procura interior, vindo a desenvolver uma mitologia que, ainda que não científica, tenta uma explicação dos fatos. Esta busca de uma explicação eventualmente toma a forma de uma ciência. Vejamos como se dá esse crescimento interior.

Os mitos, crenças e religiões formam o inconsciente humano. As dúvidas sobre a natureza e o culto aos mortos são uma pequena parte daquilo que chamamos

religião. Uma pesquisa sobre as ciências religiosas deve andar em grande parte em direção ao que a religião e a mitologia querem saber, além de indagar sobre o que o homem quer sentir.

Não sabemos exatamente como nasceram a mitologia e a religiosidade. Os mitos, no entanto, sempre fizeram parte do imaginário humano. Ao serem repetidos e recontados acabam se moldando ao inconsciente coletivo, sendo um espelho deste.

Na antiga Grécia pré-helênica havia mitos selvagens de povos primitivos. Os cultos dionisíacos eram bastante selvagens. Dionísio, cujo nome latino é Baco, foi originariamente um deus dos Trácios, um povo agricultor, visto como bárbaro pelos gregos. Era um dos deuses da fertilidade. Quando os trácios descobriram o álcool, nas formas de cerveja e de vinho, fizeram homenagem a Dionísio.

O culto a Dionísio penetrou então na Grécia que, tendo adquirido civilização de modo rápido, tinha certo apego pelo primitivo, segundo Bertrand Russell [1]. No ritual dionisíaco, havia um grande entusiasmo. A palavra entusiasmo, etimologicamente, significa que os deuses penetraram o sujeito, que se identifica com o deus. Na sua forma original, as festas dionisíacas, chamadas bacanais pelos romanos, eram bastante selvagens. Dilaceravam-se animais para comê-los crus; as mulheres gritavam freneticamente em êxtase e se consumia álcool. O costume de dilacerar animais e comê-los é a imagem do mito segundo o qual, sendo Dionísio filho de Zeus e Perséfone,<sup>1</sup> foi dilacerado, quando criança, pelos Titãs, os quais ganharam divindade ao comê-lo. Zeus o fez renascer comendo seu coração.

Estes costumes já vigoravam por volta de 12 a 14 séculos antes de Cristo. Orfeu reformou os ritos dionisíacos, transformando-os em uma forma mais sutil. Ele teria vindo da Trácia ou de Creta. Esta última, influenciada pelos egípcios, tinha uma forma religiosa com uma doutrina que incluía a transmigração da alma, por meio da qual o homem deveria procurar se purificar. Portanto, o orfismo foi um movimento de reforma dos mitos dionisíacos.

O pitagoreanismo é um movimento que continuou o orfismo. O orfismo era uma protoreligião. Pitágoras inaugurou uma ligação entre o místico e o racional, uma dicotomia que sempre permeou a história do pensamento humano, não tendo, todavia, uma união harmônica no ocidente depois dos gregos antigos. Na Grécia Antiga, os mitos anteriores acerca de deuses e ritos menos civilizados foram transformados nos mitos acerca dos deuses olímpicos por Homero, já que um povo guerreiro, de grandes heróis, necessitava de deuses condizentes com tal descrição. Bastante humanos, os deuses olímpicos tinham poder e majestade, e, de modo geral, já falavam em justiça.

---

<sup>1</sup> Numa outra versão, Dionísio seria filho de Zeus e Semele.



Ainda assim, pode-se dizer que a Mitologia tenha sido o início da ciência, como vemos nos pitagóricos que foram o elo de ligação entre o Orfismo e uma protociência.

Interessa-nos aqui a questão da criação: a cosmogonia. Em muitas civilizações, a criação do universo tem caráter similar a uma criação que inclui até mesmo o advento do tempo (o que de fato é correto na concepção da relatividade geral, que viria a ser descrita muitos séculos mais tarde). A criação, entre os gregos, em algumas de suas vertentes, apresenta um aspecto geral bastante parecido com a criação judaica. Para os gregos, há várias versões da história da criação. Em uma delas, Caos juntou-se com a Noite (Nix) com quem teve vários filhos. Posteriormente, Érebo (Escuridão) casou-se com Nix, gerando Éter (Luz) e Hemera (Dia) que, por sua vez, com a ajuda do filho Eros, gerou o Mar (Pontus) e a Terra (Gaia). Gaia gerou o Céu (Urano). Gaia e Urano geraram os doze titãs, entre os quais Cronos e Rhea, pais de Zeus, três ciclopes e os três gigantes Hecatônqueires. Gaia estava farta do apetite sexual de Urano e pediu ajuda aos filhos, que lhe negaram, com exceção de Cronos. Armado de foice afiada, Cronos esperou o pai em uma emboscada e o castrou. Jogou os restos ao mar, de onde, em uma das versões mitológicas, nasceu Afrodite e, do sangue, as Erínias. Urano então previu que o reinado de Cronos terminaria ao ser ele vencido pelo próprio filho. O equivalente de Cronos na mitologia romana era Saturno, que nomeou o planeta mais distante conhecido na época.

Cronos representa o tempo. Receoso da concretização da profecia paterna, devorava seus filhos logo após o nascimento de cada um. Esta é também uma personificação daquele que cria para destruir, tal como o próprio tempo. Rhea, sua esposa, salva Zeus do destino delineado por Cronos a seus filhos, ao dar uma pedra embrulhada para que Cronos comesse no lugar desse novo filho. Tendo enganado o marido, leva Zeus para o Monte Ida, onde Zeus passou a infância escondido do pai. Quando crescido, rebela-se contra o pai, resgatando os irmãos do interior paterno. Exilou Cronos e os titãs no Tártaro e reinou absoluto. Casou-se com Hera, sua irmã. Gerou a vários outros deuses olímpicos, tanto de Hera, como de outras deusas e mortais. Também gerou filhos só, como foi o caso de Palas Atena, que saiu, até mesmo com sua armadura, de um buraco aberto pelo machado de Hefesto em seu crânio. As nove filhas de Mnemosine (deusa da memória) e de Zeus foram as musas. Inspiraram poetas, literatos, músicos, dançarinos, astrônomos e filósofos. Urânia era a musa da astronomia.

Esta brevíssima história, que em suas versões originais são ricas de detalhes sobre o psiquismo humano, mostra a preocupação do homem com a criação do mundo e seu destino [2]. Os deuses olímpicos preocuparam-se com os homens e suas lutas como se fossem questões deles mesmos. Foram deuses humanizados, tanto no melhor quanto no pior sentido, tal como na história bíblica de Jó [3]. Os deuses Olímpicos nos trouxeram a preocupação com as ciências, com as artes e

com a medicina. Palas Atena foi a mais sábia das deusas, e Febo Apolo foi o pai de Asclépio, o fundador da Medicina, cujos filhos Macáone e Podalírio foram médicos que participaram da guerra de Troia ao lado dos gregos.

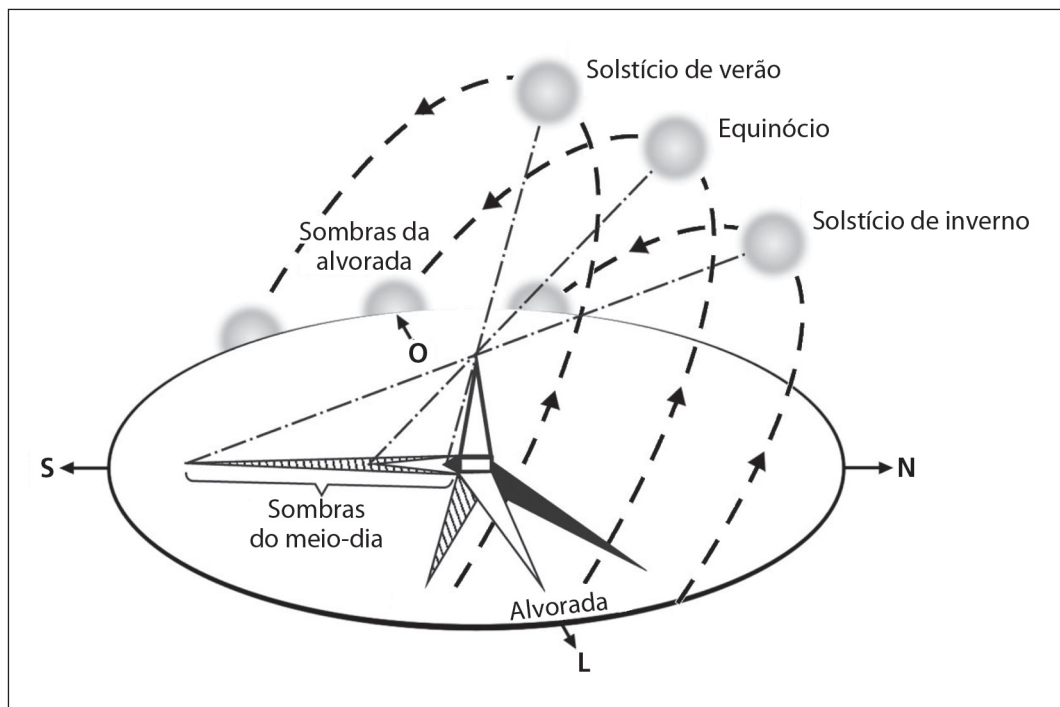
A cosmogonia mitológica foi uma importante peça na estrutura do pensamento humano, já que dá um caráter divino às atribuições humanas, fazendo dos céus um habitat dos deuses paralelo à Terra. Toda civilização tem alguma resposta para a pergunta sobre a estrutura do universo. Os babilônicos tiveram sua cosmogonia. No santuário de Eridu, era na água a origem de tudo; o mundo habitado saiu do mar, e ainda está cercado por ele. Fora disto, estaria o deus-sol cuidando de seu rebanho. Certamente se conhece, no ocidente, a gênese mosaica. Mas foi na civilização helênica que o homem foi-se aproximando de uma resposta a partir da observação dos céus, uma resposta que andava na direção do racional, apesar de partir do irracional, do onírico.

A ciência grega era, no entanto, uma protociência. Conhecia-se muito, mas, apesar disto, os conceitos estavam, dentro do aspecto da ciência moderna, equivocados. Todavia, foram essenciais para a posterior evolução do pensamento humano. Em particular, o conhecimento dos céus, primeiramente através da antiga crença astrológica vinda já desde os babilônicos, posteriormente através da observação direta dos céus, foi bastante grande, tendo evoluído para o universo ptolomaico que discutiremos adiante.

Eram duas as vertentes da ciência dos céus na antiguidade. Por um lado, os místicos, os astrólogos e os sacerdotes se preocupavam com questões de princípios, com os deuses, com a origem, formando o imaginário mitológico e religioso. Por outro lado, havia preocupações quotidianas com as medidas de tempo; afinal, o homem depende muito, principalmente no início da civilização, do ciclo anual que rege as colheitas, do verão e do inverno. A medida do tempo também era parte do cotidiano, assim como o é hoje, já que todos temos um relógio à disposição para nos localizarmos nesta tão transcendente direção que é a temporal. As medidas de tempo, assim como as observações astrológicas, levaram a uma astronomia, enquanto as preocupações místicas e mitológicas foram o princípio de uma cosmologia.

Mais de 1.000 anos antes da era cristã, já havia observações precisas dos movimentos do sol, através da variação do tamanho da sombra de uma vara vertical, o gnomon, durante o dia e de um dia para outro; combinando-se com relógios d'água, havia uma marcação do tempo.

Os movimentos das estrelas são mais regulares que os do Sol ou da Lua, porém sua observação é mais complexa, pois é necessário que se reconheçam estrelas, distinguindo-as de uma noite para outra. São excelentes para marcações de tempo. Isto hoje nos é claro, pois o movimento aparente das estrelas está relacionado quase exclusivamente com a rotação da Terra. Como as estrelas estão a uma enorme distância da Terra, efeitos locais inerentes ao sistema solar não interferem, o que não é verdade



**Figura 1.2** Elevação do Sol.

para o movimento aparente do Sol. O fato é que o dia solar aparente<sup>2</sup> não é constante ao longo do ano. A maioria das constelações reconhecidas pelos antigos foram colocadas em correspondência a figuras mitológicas, de onde temos uma pré-protociência, a astrologia, que mistura observações precisas com elementos mitológicos. Note-se que as constelações não são, necessariamente, objetos reais, pois o que observamos são projeções dos objetos na esfera celeste. Dois objetos projetados em pontos próximos na esfera celeste podem estar a enormes distâncias um do outro, na direção dos raios que os ligam a nós.

Foi assim que se começou a descrever o céu, na antiga babilônia, por meio da astrologia. Os sacerdotes, responsáveis pelas obrigações junto aos templos, como a adoração dos astros, sabiam muito sobre o movimento dos corpos celestes. Mas foi com os gregos que este conhecimento se transformou em uma primeira forma de ciência, por meio de uma melhor descrição quantitativa dos céus.

Os pitagóricos foram provavelmente os primeiros a pensar na esfericidade da Terra. Foi Pitágoras quem primeiro usou a expressão cosmos para falar dos céus. Antes deles, as ideias ainda estavam bastante aquém de uma compreensão

<sup>2</sup> O dia solar aparente corresponde ao intervalo de tempo entre duas posições subsequentes do sol ao meio-dia. O período de rotação das estrelas é 3 minutos e 56 segundos menor, devido ao movimento de translação da Terra.

direta, e até Thales, sabia-se tanto quanto soubera Homero. Heródoto já sabia que havia povos no extremo norte, cuja noite durava seis meses, e que os fenícios supostamente já haviam circum-navegado a África, tendo o Sol à sua direita ao navegar para o poente. Apesar de grandes imprecisões e dúvidas, os pitagóricos formularam um tipo de teoria geocêntrica do universo. Era uma prototeoria que continha um enorme número de imprecisões, tendo sido formulada por Philolaus. Tais imprecisões continuaram por algum tempo, já que Platão, um continuador natural, preocupou-se pouco com o mundo físico, e sua compreensão das ciências naturais foi pouco além de seus antecessores. Em particular, apesar de conhecerem algo sobre os planetas e seu movimento errante pelo céu, não tinham uma explicação precisa para o fato.

Para que as observações feitas aqui na Terra fizessem sentido, caracterizou-se o movimento dos céus através de duas grandes esferas que, em uma interpretação moderna, se referem aos movimentos da Terra. Desse modo, uma esfera contendo as estrelas move-se para oeste, com uma rotação a cada 23 horas e 56 minutos.<sup>3</sup> Por que não a cada 24 horas? O tempo de adiantamento, de quase 4 minutos em relação ao dia solar, se soma, em um ano, a cerca de  $360 \times 4/60$  horas, o que corresponde a 24 horas, ou um dia. Isso porque a cada ano, mesmo que a Terra não girasse, se passaria um dia solar em decorrência de seu giro em torno do Sol. Outro modo mais direto de se compreender esse fato é verificando-se que, ao passar 24 horas, uma estrela não estará no mesmo lugar, pois a Terra terá se movido de  $1/365$  de sua revolução, ou seja,  $1/365$  de uma rotação completa. Isso mostra também, de outro modo, que a direção de rotação da Terra, em relação a seu eixo e aquela em relação ao Sol, se fazem no mesmo sentido. De fato, quase todos os astros do sistema solar<sup>4</sup> se movem no mesmo sentido, qual seja, de oeste para leste, provocando uma sensação de que o universo ao nosso entorno se move de leste para oeste no movimento diário. Em seu movimento anual, o Sol se move de oeste para leste, tendo a esfera celeste como fundo. Foi assim que se inventaram as constelações astrológicas, o zodíaco, em cuja região o Sol vai caminhando: quando o Sol passar na esfera celeste na região onde está a constelação de Virgem, dizem os astrólogos que estamos sob a influência de Virgem.

Consideremos a grande esfera celeste, onde imaginamos as *estrelas fixas* que formam, por exemplo, as constelações, e que estão paradas na esfera celeste. As estrelas nascem e morrem, respectivamente, a leste e a oeste. Há um grande círculo, a eclíptica, com uma inclinação de  $23\frac{1}{2}^\circ$ , e o Sol se move uma vez a cada  $365\frac{1}{4}$  dias pela eclíptica, de oeste para leste, quando projetado na esfera celeste. Isso corresponde à revolução da Terra em torno do Sol, mas vista desde a Terra. Mais pre-

---

<sup>3</sup> O que corresponde a um dia sideral.

<sup>4</sup> Vênus e Urano são exceções, no que tange à revolução em torno do próprio eixo, veja o Apêndice. Quanto à revolução em torno do Sol, o movimento da Terra pode, por vezes, parecer retrógrado, ou seja, de leste para oeste.



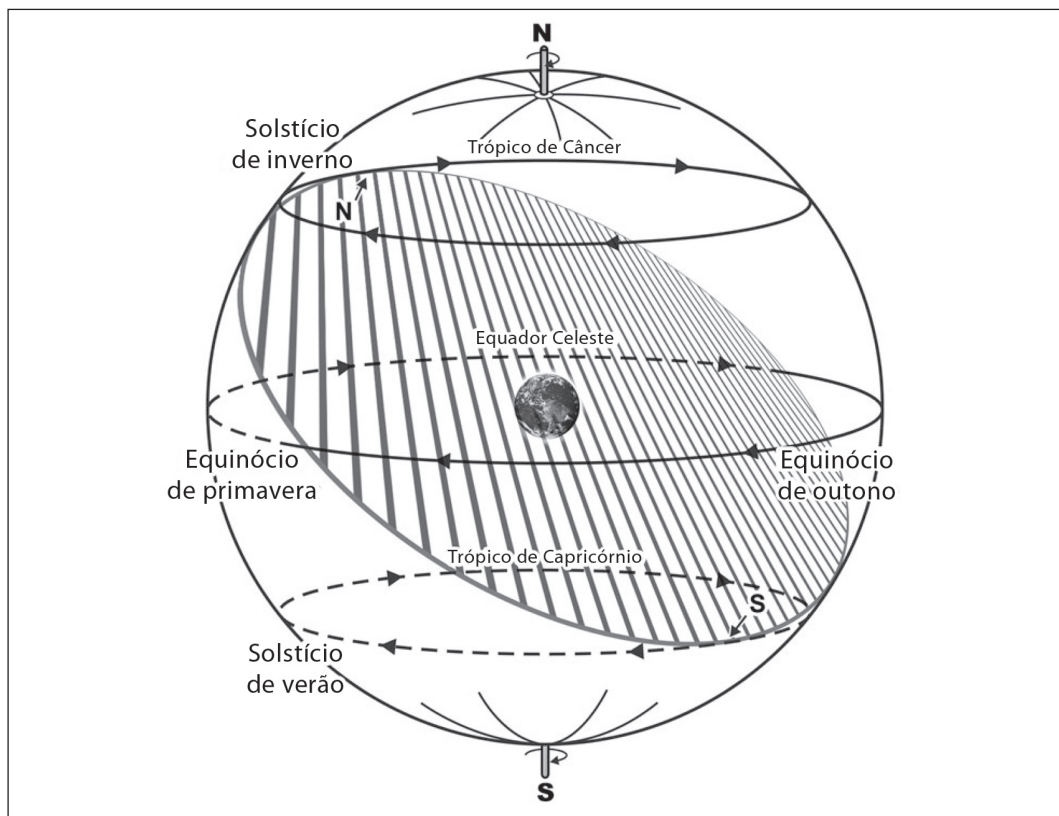
**Figura 1.3** Movimento retrógrado do planeta Marte.

cisamente, se localizarmos o Sol, na esfera celeste, sempre em uma mesma hora do dia, este ponto fará nela um grande círculo, e este círculo se chama eclíptica, e não corresponde ao equador celeste, o círculo máximo da esfera celeste, pois a Terra, conforme sabemos hoje, tem um eixo de rotação inclinado de  $23\frac{1}{2}^\circ$  em relação ao seu plano de revolução em torno do Sol.

Porém, algumas estrelas tinham movimentos bastante distintos, pois, em certa época do ano, andavam em sentido contrário, em movimento retrógrado (ou seja, dia após outro, encontram-se mais a oeste, indo de leste a oeste com o passar dos dias). Foram chamadas de *planetas*, palavra que, em grego, traz o sentido de *movimento errante*. Hoje sabemos que esses movimentos estão ligados ao movimento dos planetas em torno do Sol. Sabemos ainda que nosso sistema solar é muito pequeno em relação às estrelas. Na Antiguidade, esse fato era completamente desconhecido.

A descrição dos céus foi ficando mais sofisticada. Nessa nova descrição, os planetas movem-se em círculos, em torno de outros círculos, ao redor da Terra, os epiciclos e os deferentes. Este sistema deu origem ao que podemos chamar de sistema ptolomaico de descrição dos céus. Recebido pelos árabes, os guardiães da ciência e da filosofia durante a Idade Média, o sistema foi aperfeiçoado a ponto de ter uma precisão de até 8 minutos de arco!<sup>5</sup> A ciência moderna teve início mais de mil anos mais tarde, com a revolução de Copérnico acerca de nosso conhecimento sobre o cosmos.

<sup>5</sup> Um círculo completo tem 360 graus, e cada grau, 60 minutos. Portanto, com o passar de 1 hora, um astro se move 15 graus.



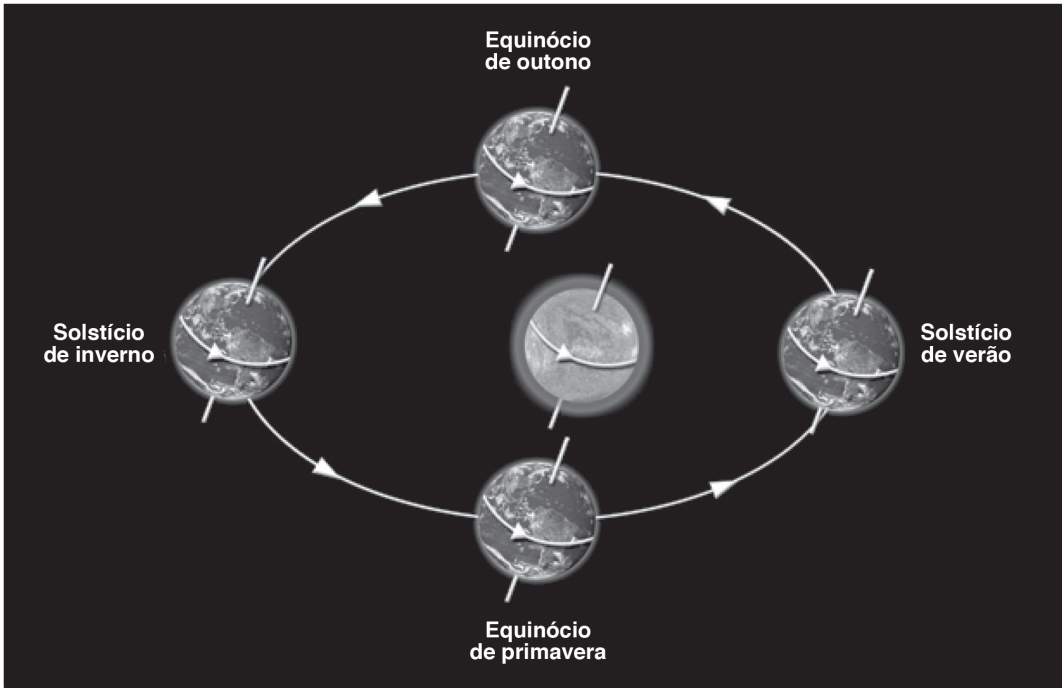
**Figura 1.4** A esfera celeste. Na visão dos antigos, a esfera celeste contém os astros e gira de leste para oeste, com um período de aproximadamente 23h 56min, correspondendo à rotação da Terra. Nela, estão as chamadas “estrelas fixas” e os “planetas”, dentre os quais se incluía o Sol, que se desloca, em seu movimento anual, na eclíptica, definida pelo círculo hachurado na figura. Para um observador no hemisfério sul, o ponto N corresponde à posição do Sol no solstício de inverno e o ponto S, ao solstício de verão. O equinócio de outono se dá na intersecção da eclíptica com o equador celeste, à direita da figura, e o equinócio de primavera, na mesma posição do lado esquerdo.

## 1.1 A descrição dos céus

### 1.1.1 O sistema de duas esferas de Eudoxo

Após o que convencionaremos chamar de *era mitológica*, incluindo desde astrologia até pouco antes da ideia de uma Terra esférica, passando pelos mitos da criação, podemos dizer que o primeiro conceito de universo, baseado em observações, veio com as *esferas de Eudoxo*.

Eudoxo foi um grande matemático; dizem mesmo que teria sido o responsável pelo quinto livro de Euclides. Estudou com Platão e também no Egito. Propôs o ciclo de quatro anos para o Sol, incluindo o ano de 366 dias, três séculos antes de Júlio Cesar, que o efetivou. Seu esquema de esferas concêntricas chegou até nós por meio da metafísica de Aristóteles e de um comentário de Simplício.



**Figura 1.5** Estações sob o ponto de vista do hemisfério sul (para o hemisfério norte, basta trocar verão por inverno e primavera por outono). As proporções não correspondem à realidade, tendo sido exageradas para uma melhor compreensão.

Coloquemos alguns *prolegômena*. Conforme sabemos hoje, a Terra gira em torno do Sol, mas de maneira um tanto irregular. Há uma inclinação do eixo da Terra em relação ao plano de revolução em torno do sol. Há dois dias no ano em que este eixo está no plano perpendicular ao plano de rotação da Terra, passando pela Terra e pelo Sol. Estes são os pontos mais próximo e mais longínquo, respectivamente, do Sol (ver Figura 1.5). O exato dia pode mudar ligeiramente (de um dia) de um ano para outro. Em 2004, por exemplo, foram os dias 21 de junho (hora de Greenwich 0h 57min) e 21 de dezembro. O dia 21 de junho marcou o início do inverno no hemisfério sul, quando o hemisfério norte esteve virado em direção ao Sol. Aconteceu o oposto no dia 21 de dezembro, quando o hemisfério sul esteve virado para o Sol, e tivemos o início do verão no hemisfério sul. Essas duas datas marcaram os *Solstícios* de 2004; dia 21 de junho de 2004 foi o solstício de inverno no hemisfério sul, ou o solstício de verão no hemisfério norte. Quando, por outro lado, temos o meio caminho entre os dois solstícios, em que o eixo de rotação está no plano perpendicular ao definido anteriormente, o dia e a noite terão a mesma duração. Isto se deu nas datas de 20 de março de 2004 e de 22 de setembro de 2004, correspondendo, respectivamente, ao equinócio de outono e ao equinócio de primavera no hemisfério sul, ou equivalentemente, ao equinócio de primavera e ao equinócio de outono do hemisfério norte. No equinócio, dia e noite têm a mesma duração. Note-se, na Figura 1.5, que o Sol não está exatamente no centro, conforme sabemos hoje. Esse fato

é responsável por uma diferença de seis dias entre o período vernal do hemisfério sul e o correspondente período no hemisfério norte.<sup>6</sup>

Como vimos, há diferentes contribuições aos movimentos da Terra. Sua rotação é bastante simples, e também vimos que pode servir para acomodar uma grande esfera, na qual estão todas as estrelas distantes. Tomemos esta primeira esfera como a primeira descrição dos céus. Para cada outro astro do sistema solar, precisamos de outra esfera para acomodar cada planeta. De acordo com os gregos, havia sete planetas: a Lua, o Sol, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno.

A esfera solar está inclinada de  $23\frac{1}{2}^\circ$  em relação à esfera celeste. O Sol vai para oeste, mas um pouco mais devagar que as estrelas, para que se leve em conta o movimento anual do Sol, de modo que ele se atrase  $1^\circ$  por dia, ou em termos de tempo, 4 minutos por dia, razão pela qual o dia solar tem 24 horas, enquanto o ciclo da esfera celeste é de 23h e 56 min.

Aristóteles já falava, quatro séculos antes de Cristo, sobre medidas do raio da Terra. Eratóstenes, o bibliotecário de Alexandria, foi o primeiro a estimar o raio da Terra com precisão, por volta do terceiro século antes de Cristo. Foi o primeiro passo para uma visão quantitativa do universo, pois passamos a ter uma ideia da dimensão do nosso mundo. Esse cálculo é simples. Ele observou a sombra de um *gnomon*,<sup>7</sup> em Alexandria, em um certo dia em que o Sol estava a pino em Siena, uma outra cidade egípcia, a uma distância de cerca de 5.000 estádios. O ângulo medido foi de  $\frac{1}{50}$  do círculo máximo, ou seja,  $7\frac{1}{5}^\circ$ , o que levou Eratóstenes a estimar a circunferência da Terra em 250.000 estádios. Hoje, não sabemos ao certo o valor do estádio, mas estima-se que o valor obtido esteja apenas 5% abaixo do valor exato. Como os valores mencionados, usados por Eratóstenes, são estimativas já devidamente arredondadas, podemos dizer que o valor obtido foi excelente.

As observações de Aristarco de Samos são as mais interessantes. Aristarco é também conhecido por ter sido quem propôs o sistema heliocêntrico bem antes de Copérnico. Aristarco fez medidas muito apreciáveis. Para medir a distância relativa até o Sol e até a Lua, ele observou a Lua quando estava exatamente com aparência de meia-lua. Essa observação, sem instrumentos, é, na prática, extremamente difícil. Medindo o ângulo entre a direção da Lua e a do Sol, ele pôde estimar tais distâncias relativas.

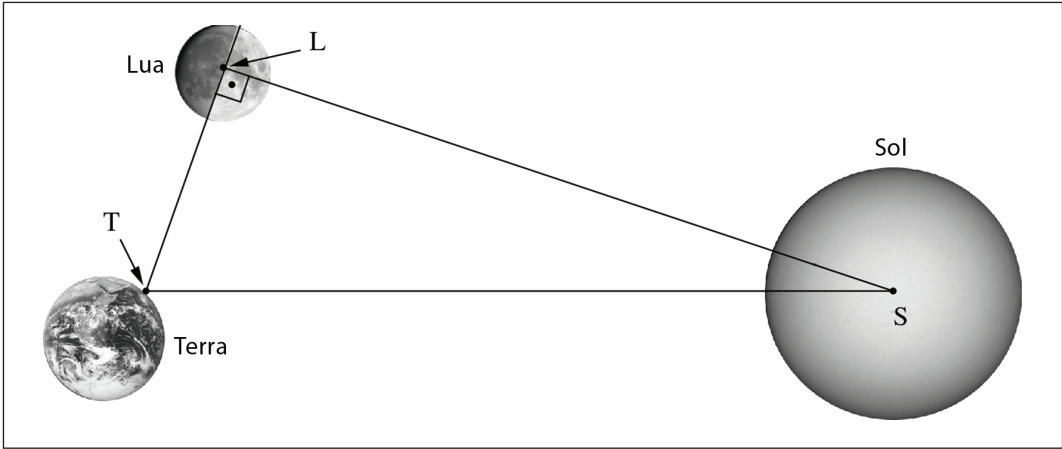
Pelas observações de Aristarco, o ângulo é de  $87^\circ$ , quando o correto seria de  $89^\circ 51'$ . O valor relativo entre a distância Terra-Sol e a distância Terra-Lua obtido por Aristarco foi de 19, enquanto o valor correto é de 400. Embora haja um erro de um fator de 20, consideramos que, para uma observação sem qualquer instrumento, a olho nu, o resultado desta estimativa, para a época, é plenamente satisfatório.

---

<sup>6</sup> Ou seja, o dia do equinócio não se dá exatamente a meio caminho entre dois solstícios.

<sup>7</sup> Uma vara vertical.





**Figura 1.6** Medida efetuada por Aristarco das distâncias relativas entre a Terra, a Lua e o Sol.

Aristarco usou duas outras observações mais simples. A primeira mostra que, durante um eclipse solar, a Lua cobre exatamente o Sol. Em outras palavras, mesmo sem observar um eclipse solar, verificamos que o ângulo subtendido pelo Sol ou pela Lua é o mesmo, qual seja,  $0,5^\circ$ . Assim, a relação entre o diâmetro do Sol e o da lua é dado pela relação entre suas distâncias até nós, ou seja, 19 para Aristarco, e 400 para nós. Falta-nos ainda um dado para completar o quebra-cabeça. Esse dado suplementar é fornecido pelo eclipse lunar, quando se verifica, conforme feito por Aristarco, que o diâmetro da Lua corresponde à metade do tamanho do cone de sombra (veja Figura 1.7). Assim, Aristarco tinha as relações

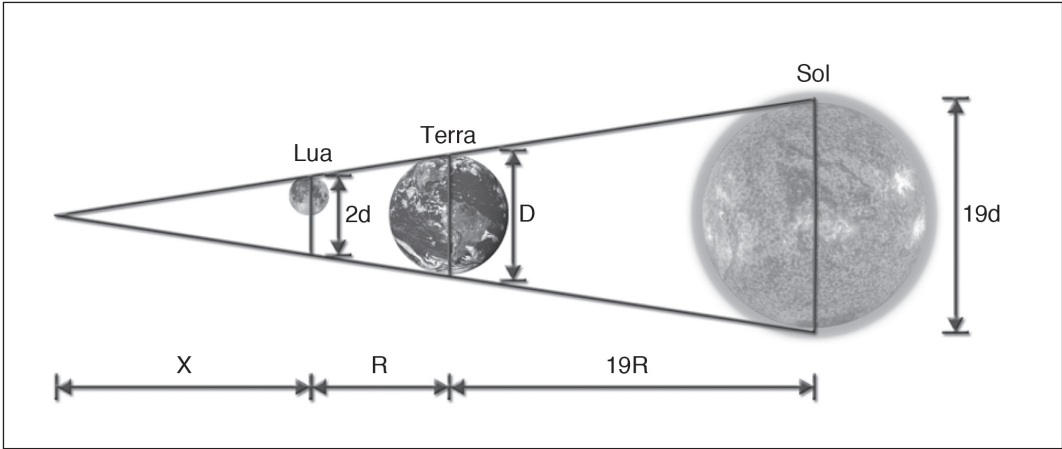
$$\frac{x}{2d} = \frac{x + 20R}{19d} = \frac{x + R}{D},$$

enquanto nós teríamos

$$\frac{x}{2d} = \frac{x + 401R}{400d} = \frac{x + R}{D}.$$

Aristarco resolveu as equações, obtendo  $d = 0,35D$  e, portanto,  $R_{\text{sol}} = 6,6R_T$ . Se fizemos o cálculo sem o erro original devido à medida imprecisa de ângulo, obtemos  $D = 3d$ , e  $R_{\text{sol}} = 130R_T$ . Para comparação com valores observados hoje, temos  $D = 3,67d$  e  $R_{\text{sol}} = 109R_T$ , de modo que a ideia foi brilhante. Note-se ainda que, para o diâmetro da Lua, obtemos, aproximadamente,  $1/3$  do diâmetro da Terra, que corresponde à realidade. Se usarmos o fato, já bem conhecido, que o tamanho aparente da Lua corresponde a um ângulo de  $1/2^\circ$ , obtemos a distância Terra-Lua,

$$\text{sen} \frac{1}{2} = \text{sen} \frac{\pi}{360} \simeq \frac{\pi}{360} = \frac{\frac{2}{3}R_T}{D_{TL}}.$$



**Figura 1.7** Método de Aristarco baseado em um eclipse lunar.

Portanto,

$$D_{TL} \simeq 75R_T,$$

ou seja, a distância Terra-Lua corresponde, aproximadamente, a 75 vezes o raio da Terra. Os valores atuais são

$$\text{Raio da Terra } R_T \simeq 6.378 \text{ km},$$

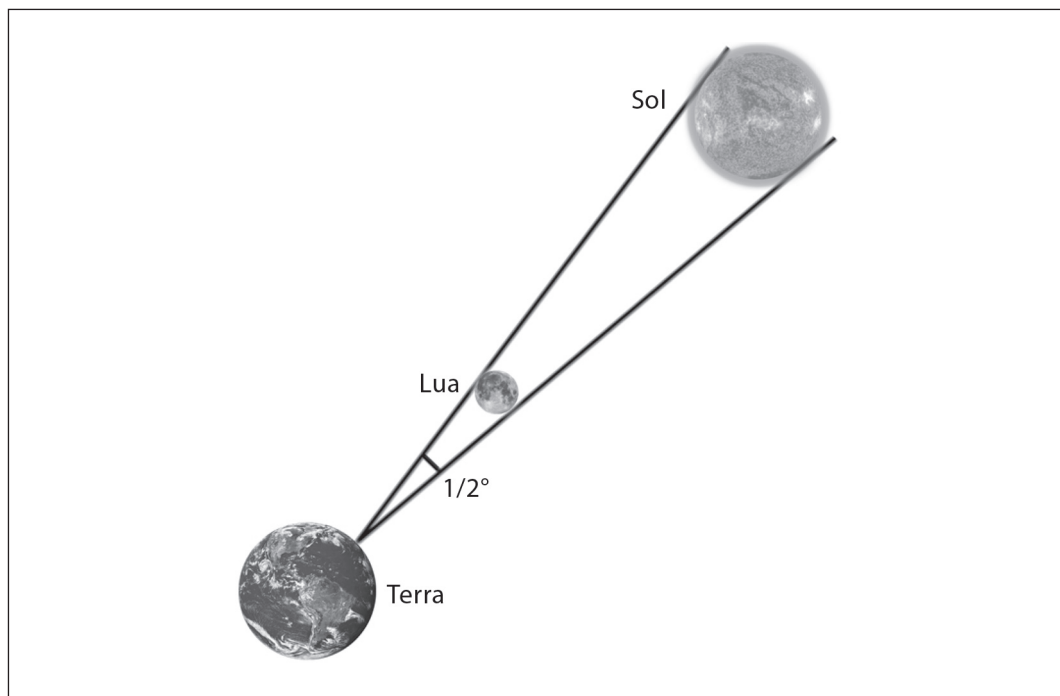
$$\text{Raio da Lua } R_L \simeq 1.740 \text{ km},$$

$$\text{Distância Terra-Lua } D_{TL} \simeq 384.000 \text{ km} \simeq 60R_T.$$

O sistema de duas esferas dava uma excelente visão do universo, no que tangia às estrelas e mesmo ao Sol, e configura de modo apenas razoável o movimento lunar.

Outra estimativa possível, mas que não chegou a ser imaginada pelos antigos é através da paralaxe. Este método, apesar de simples, jamais foi usado. Por paralaxe temos de observar a posição da Lua desde dois pontos diferentes, com mesma longitude, comparando os ângulos observados.

O movimento solar, como vimos, é bastante complexo. Do hemisfério sul, vemos o Sol nascer a Sudeste, fazer um grande círculo no Norte, e colocar-se a Sudoeste. Conforme chegamos perto do solstício de verão, o Sol fica, próximo ao meio-dia (horário solar), mais próximo ao Sul. O Trópico de Capricórnio corresponde à linha onde o Sol está a pino, ao meio-dia no solstício de verão. Para pontos ao sul do Trópico de Capricórnio, o Sol sempre fica abaixo dos  $90^\circ$ , e ao meio-dia aponta para o Norte. Entre o Trópico e o Equador, o Sol pode estar, ao meio-dia, tanto ao Norte (na maior parte do tempo) quanto ao Sul e, por duas vezes no ano, fica a pino ao meio-dia.



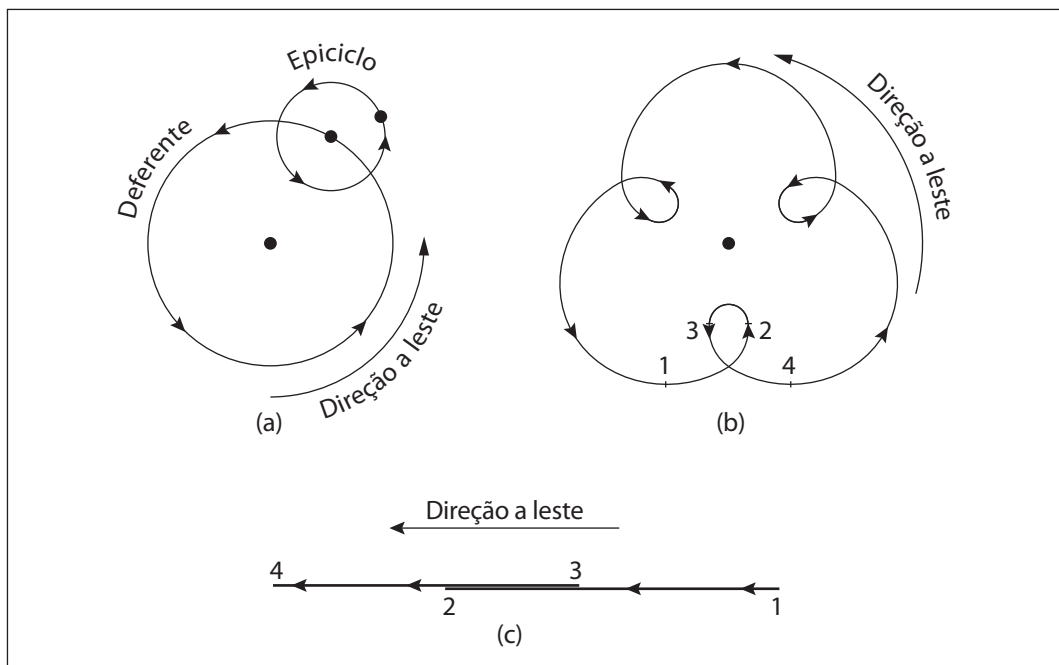
**Figura 1.8** Sol e Lua compreendidos sob o mesmo ângulo, vistos a partir da Terra. Com os cálculos de Aristarco, a distância Terra-Sol seria cerca de 1.200 vezes o raio da Terra. O valor correto é cerca de 20 vezes maior.

A Lua poderia ser outro astro de medida do tempo, e de fato é muito mais simples obter uma medida de tempo a médio prazo através da Lua. Seu período é de cerca de  $27\frac{1}{3}$  dias através do zodíaco, e uma Lua nova ocorre a cada  $29\frac{1}{2}$  dias. No entanto, pode haver diferenças grandes, de até dois dias, e poucos povos mantiveram o uso do calendário lunar por muito tempo. A divisão em quatro semanas, de acordo com as fases da Lua, fornece uma divisão bastante natural do tempo.

De modo similar, o movimento dos planetas é também muito complicado. Vênus e Mercúrio, os chamados planetas interiores, movem-se, do ponto de vista da Terra, sempre no entorno do Sol, o primeiro dentro de um ângulo de  $45^\circ$ , e o segundo dentro de  $28^\circ$ . Os planetas exteriores são diferentes e podem mover-se em qualquer abertura.

## 1.1.2 Os epiciclos e os deferentes

O movimento dos planetas, ao contrário daquele das estrelas, é muito complexo. Não tocamos no caso da Lua, complexo demais para nosso intuito. O mais simples destes astros é o Sol. Do ponto de vista moderno, está claro que, mesmo visto da Terra, o sistema solar tem um movimento razoavelmente simples. Ainda assim há problemas. Um deles é o fato, já percebido na Antiguidade, de que o período que



**Figura 1.9** Epíclis e deferentes implicando o movimento retrógrado aparente de certos astros.

vai do equinócio de primavera ao equinócio de outono no Hemisfério Norte é cerca de 6 dias mais longo que o período correspondente no Hemisfério Sul.

A explicação dada pelos astrônomos da antiguidade, baseada em esferas, pode ser vista como uma maneira de se compreender o movimento real por aproximações sucessivas. De fato, da Terra vemos o Sol movendo-se anualmente na eclíptica, de oeste para leste. Sabemos hoje que os planetas se movem em torno do Sol. É natural, do nosso ponto de vista, que os planetas façam revoluções em torno de um ponto (o Sol) que gira em torno de nós. Apesar de os antigos não saberem de tal teoria, era o que eles observavam, como nos óbvios casos de Vênus e de Mercúrio.

A solução proposta foi que os planetas se movem em círculos, chamados epíclis, cujo centro, o deferente, move-se ao redor da Terra, em um outro movimento circular (veja Figura 1.9).

Essas correções foram, com o tempo, tornando-se cada vez mais complexas e sofisticadas. A diferença de 6 dias do movimento do Sol entre o verão no Hemisfério Norte comparado ao verão no Hemisfério Sul que descrevemos acima, e que sabemos hoje ser devido à forma elíptica da órbita da Terra, foi explicada também através de um pequeno epíclis, cujo raio correspondia a cerca de 4,17% da distância Terra-Sol. Isso equivale a desviar a Terra do centro do movimento do Sol por uma distância também equivalente a 4,17% da distância Terra-Sol. Assim, caminhava-se para a descrição cada vez mais exata do movimento dos astros, por argumentos complexos mas sem um real conhecimento de causa.



**Figura 1.10** Claudius Ptolemaeus, ou Ptolomeu (Alexandria, Egito, aproximadamente de 85 a 150 d.C.), conforme gravura do século XVI. Astrônomo, matemático e geógrafo helênico. Compilou muito do conhecimento astronômico, astrológico e geométrico da antiguidade. Sua obra, conservada e atualizada durante a Idade Média pelos árabes, ficou conhecida como *Almagest* (do árabe: “A grande obra”).

Coube a Ptolomeu a compilação do conhecimento astronômico grego e egípcio. Sua obra, preservada e difundida pelos árabes, ficou conhecida como *Almagest*. Foi uma das obras mais fecundas do mundo helênico. Sobre Claudius Ptolemaeus, seu nome latino, sabe-se muito pouco. Viveu em Alexandria, entre o primeiro e o segundo século de nossa era. Aparentemente pertencia a uma família grega que vivia no Egito e era cidadão romano. Deixou também importantes contribuições à matemática, como sua aproximação de  $\pi$  por  $3^{17/120} = 3.14166$  e diversas tabelas trigonométricas, assim como à geografia, como seu mapa-múndi que já incluía a Taprobana (Ceilão, atual Sri Lanka) e a China. Aperfeiçoou e ajustou todos os modelos baseados em epiciclos e deferentes previamente propostos, principalmente baseados nos dados de Hiparco e em suas próprias observações, atingindo a precisão incrível de  $8'$  na descrição do movimento dos planetas. O modelo ptolomaico perduraria por mais de um milênio.

## 1.2 O calendário

Podemos dizer que uma visão mais realista do universo, desde a Antiguidade Clássica até tempos bastante recentes, tenha se baseado em problemas de calendário. O calendário e as medições de tempo estiveram sempre entre as mais importantes preocupações do homem. Há várias medições de tempo: relógios de água e varas verticais medindo a sombra do Sol; são medições razoavelmente simples. Para medidas de longo tempo, é melhor a observação das estrelas, que não são apenas bastante parecidas de local para outro, mas também constituem observações mais precisas.

No entanto, as medições de tempo pelos vários processos não são completamente equivalentes, na medida em que os movimentos compostos não são simples. Como exemplo, vimos que o dia solar tem 24 horas, enquanto o dia sideral 23 horas e 56 minutos. Enquanto a observação dos céus foi ganhando forma, problemas de interpretação foram aparecendo, levando a uma forma de ciência, uma astronomia rudimentar.

No início, no calendário dos babilônicos, o ano era de 360 dias, o que condizia com a base 60 da contagem babilônica. A definição de ano é necessária para a marcação de colheitas. No entanto, um ano de 360 dias acaba por atrasar o início de datas dependentes do calendário solar que rege a safra agrícola. O equinócio de primavera, no hemisfério norte, que de acordo com o calendário hoje em vigor chega aos 21 dias do mês de março, fica atrasado em média cinco dias em um ano de trezentos e sessenta dias. Foi assim que os egípcios introduziram cinco dias adicionais para a espera do próximo ano, já que eventos sazonais importantes, como a cheia do Nilo, ocorreriam sempre mais e mais tarde. No entanto, mesmo para esse tipo de calendário, havia um atraso significativo, e a cada quarenta anos os eventos sazonais acabavam por se atrasar cerca de dez dias.

Os romanos possuíam um calendário próprio, o *Fasti*, que sofreu diversos ajustes durante sua história. Crê-se que, inicialmente, o calendário romano tenha sido adaptado do antigo calendário lunar grego. A origem lendária é atribuída ao próprio Rômulo, um dos fundadores de Roma. Iniciava-se no equinócio de primavera e, curiosamente, terminava no solstício de inverno. O inverno não era contabilizado no *Fasti* primitivo. O ano era dividido em 10 meses. Os nomes setembro, outubro, novembro e dezembro são reminiscências dos quatro últimos meses do calendário romano. Os outros meses eram: *Martius*, mês do deus da guerra Marte; *Aprilis*, mês em que as flores deveriam se abrir (*aperire*, em latim), ou ainda, numa outra interpretação, mês da deusa do amor Vênus, Afrodite em grego, também *Aphrilis* em latim. *Maius* era dedicado à *Bona dea* romana, a boa deusa da fartura e fertilidade, identificada com a deusa grega *Maia*, sempre representada com a cornucópia. *Junius* era o mês de Juno, esposa de Júpiter; *Quintilis* e *Sextilis*, o quinto e o sexto mês, respectivamente.

Inicialmente, os meses romanos tinham 30 ou 31 dias. Alguns dias do mês tinham nomes especiais. *Calendas* correspondiam ao primeiro dia do mês; *nonas*, ao quinto ou ao sétimo, dependendo do mês; e *idos*, ao décimo terceiro ou décimo quinto, também dependendo do mês. As *calendas*, que deram origem ao termo calendário, eram muito importantes; diversas atividades mercantis e sociais ocorriam sempre nas *calendas*. O calendário romano sofreu diversas modificações; as durações dos meses foram alteradas; dois novos meses de inverno foram introduzidos após dezembro: janeiro e fevereiro, meses dedicados, respectivamente, aos deuses Jano, dos portais e entradas, e *Februus*, entidade etrusca da purificação, que poderia ter acabado entre os romanos como *Febris*, o deus protetor contra a *malária*



**Figura 1.11** A cornucópia, grande chifre preenchido por frutos, cereais e flores, símbolo da fartura dos romanos desde o século V a.C.

(do Latim, *mau ar*). Incluiu-se também um *Mensis Intercalaris*, o *Mercedonius*, após fevereiro, de tempos em tempos, a fim de se ajustar o calendário ao período solar. O *Fasti* acabou convergindo ao calendário atual, sem a existência dos anos bissextos, em que fevereiro tem 29 dias. Júlio César, com a ajuda de astrônomos gregos e egípcios, introduziu um novo dia a cada quatro anos e eliminou o *Mercedonius*. Modificou, em sua própria homenagem, o nome do quinto mês para Julius. Surgiu, então, o calendário dito juliano, instituído oficialmente no ano 46 a.C., que sobreviveu até a Idade Moderna. César Augusto, sobrinho-neto de Júlio Cesar, também em auto-homenagem, modificou o nome do mês *Sextilis* para Augustus. Além disso, exigiu que seu mês tivesse também 31 dias, para que não ficasse mais curto que o de seu tio-avô.

Para os romanos, os anos eram numerados de acordo com imperadores, cônsules e, já no final do império, papas. Com o fim do império no ocidente, alguns povos continuaram a considerar o início do ano no equinócio de primavera, outros no

solstício de inverno, outros ainda na páscoa. Foi no século VI que a Igreja instituiu a contagem dos anos a partir do suposto nascimento de Jesus Cristo, no ano 1 d.C. A contagem dos anos segundo a Era Cristã foi difundida pela Europa por Carlos Magno. Foi somente no século XVI, porém, que se instituiu o dia primeiro de janeiro como o início do ano. Outros problemas com o calendário sobrevieram ainda no século XVI. Uma nova reforma, que veremos mais adiante, levou ao calendário gregoriano, usado até hoje em todos os países do mundo.

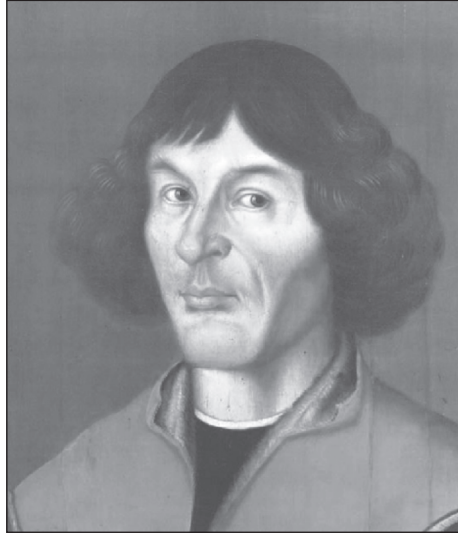
### 1.3 A revolução de Copérnico

A ciência moderna teve início com a revolução de copérnico acerca de nosso conhecimento sobre o cosmos. Estando as festividades da páscoa recaindo a cada ano cada vez mais distante na marcação de tempo solar baseada no calendário Juliano, a Igreja Católica encomendou ao sacerdote polonês Nicolau Copérnico um estudo detalhado. O pedido foi feito pelo próprio papa Paulo III. O novo calendário, devidamente corrigido, foi instituído pelo Papa Gregório XIII, cerca de quarenta anos após os estudos de Copérnico, em sua bula *Inter gravissimas*, de 24 de fevereiro de 1582 [4]. Nela, instituiu-se que ao dia 4 de outubro de 1582, quinta-feira, seguiria-se o dia 15 de outubro de 1582, sexta-feira. Além disso, os anos bissextos múltiplos de 100, mas não de 400, foram eliminados. Segundo a bula, os dez dias perdidos não poderiam ser contabilizados para nenhum efeito civil. No calendário gregoriano, o erro em relação ao período solar é menor que um dia para cada três mil anos. O calendário gregoriano foi rapidamente aceito pelo mundo católico. Os protestantes tardaram um pouco mais; os britânicos o adotaram no século XVIII. Alguns outros povos, como os russos, só o implementaram muito depois, já no início do século XX.

Nicolau Copérnico nasceu em Torun, atual Polônia, em uma família de bom nível e muito religiosa. Estudou matemática, astronomia e teologia na tradicional Universitas Jagiellonica de Cracóvia, Polônia. Em 1497, foi nomeado, pelo polêmico Papa secular Alexander VI (Rodrigo Borja), bispo de Warmia, na Polônia. Participou das festividades do grande jubileu de 1500, em Roma, fazendo observações de um eclipse e dando diversas palestras públicas. Na mesma época, trabalhou também para autoridades da Prússia oriental, produzindo um tratado sobre o valor do dinheiro, um dos primeiros textos sobre economia do mundo moderno.

Os estudos astronômicos de Copérnico foram por ele reunidos em sua obra seminal *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, As Revoluções das Esferas Celestiais, numa tradução direta [5]. Começou a ser escrita em 1506, foi terminada em 1530, mas só foi publicada no ano de sua morte, 1543. A obra é dedicada ao Papa Paulo III. O prefácio adverte aos leitores que sua teoria devia ser vista como uma ferramenta matemática para a descrição dos movimentos dos corpos celestes, não como uma proposta de uma nova realidade física. As preocupações e os





**Figura 1.12** Nicolau Copérnico (\*Torun, Polônia, 1473; † Frombork, Polônia, 1543). Clérigo, matemático e astrônomo polonês. Seu *De revolutionibus orbium coelestium*, publicado no ano de sua morte, assentou as bases do sistema heliocêntrico.

conflitos do clérigo Copérnico são compreensíveis. Sua obra propunha o abandono do modelo geocêntrico Ptolomaico, aceito por mais de um milênio e perfeitamente adequado aos dogmas e interesses da Igreja. Mais ainda, propunha o abandono de um modelo que funcionava satisfatoriamente. De fato, com as correções introduzidas pelo matemático e astrônomo alemão Johannes Müller (*Regiomontanus*, em Latim), o sistema ptolomaico chegou à incrível precisão de  $8'$  de arco em suas observações [6]. Nenhuma observação desafiava as previsões do modelo ptolomaico. Porém, os epiciclos e deferentes necessários passaram a ser cada vez mais complexos. A proposta heliocêntrica de Copérnico não oferecia, em geral, uma precisão melhor, mas representava uma considerável simplificação nos cálculos. Por isso, segundo Copérnico, deveria ser vista simplesmente como uma hipótese simplificadora, uma ferramenta adequada, e não como uma afronta ao geocentrismo, que certamente seria considerado como heresia, talvez pelo próprio Copérnico.

Houve várias propostas heliocêntricas na antiguidade. Aristarco já havia proposto, no século III a.C., um modelo heliocêntrico para a descrição dos movimentos dos corpos celestes. Houve também propostas heliocêntricas entre árabes e indianos. Todos esses modelos, porém, foram suplantados pela visão ptolomaica, a qual, além de ser perfeitamente adequada para descrever os movimentos dos corpos celestes então conhecidos, era também adequada às pretensões da Igreja, como já dissemos. A obra de Copérnico, no entanto, influenciou profundamente seu tempo e sua sociedade. Sua riqueza de dados e tabelas e a clareza de suas ideias ali expostas contaminaram muitas e muitas mentes, algumas das quais terminaram ousando desafiar o paradigma ptolomaico. A lista dos que pagaram por

tal ousadia na fogueira é grande e inclui diversos nomes célebres, como Giordano Bruno. Foi Galileo, no século seguinte, quem definitivamente sepultou o modelo ptolomaico por meio das primeiras observações com luneta. Primeiro, identificou quatro luas de Júpiter: Io, Europa, Ganimedes e Calisto. Foi a primeira evidência de corpos celestes que não orbitavam em torno da Terra. Depois, mostrou que Vênus possuía fases como a nossa Lua, algo impossível de ser explicado num modelo geocêntrico; finalmente a hipótese heliocêntrica foi confirmada. Galileo quase foi queimado pela Inquisição. *Eppur si muove*,<sup>8</sup> teria murmurado Galileo após se retratar no tribunal da Inquisição.

## 1.4 Nossa posição diante do universo

Os pensadores da antiguidade observavam com muita frequência o seu esplendoroso céu. Desde muito cedo souberam da forma esférica da Terra. Como já vimos, ao medir o ângulo gerado pelos raios solares, ao meio-dia, por uma vara vertical e comparando-o com uma localidade onde o Sol no mesmo instante estava a pino, Eratóstenes, o bibliotecário de Alexandria, foi capaz de calcular, aproximadamente, o raio da Terra por volta do terceiro século antes de Cristo.

Como observadores perspicazes que eram, os antigos elaboraram mapas para a localização dos astros celestes. Na teoria de Ptolomeu, a Terra era o centro do universo. Já sabemos que Ptolomeu viveu em Alexandria, durante o segundo século depois de Cristo. Sua teoria era bem aceita pela Igreja, já que propunha que o homem era um ser privilegiado pela divindade, no centro do universo. Além disso, pode-se imaginar que a teoria alimentava o orgulho dos poderosos, que não apenas eram os donos do poder no lugar em que habitavam: apropriaram-se do próprio centro do universo. Esta situação psicológica ainda persiste hoje, quando muitos acreditam que há vida em outros planetas, enquanto outros insistem que isto é impossível. O *Almagest* de Ptolomeu juntamente com o *Elementos* de Euclides são os mais antigos textos científicos da humanidade. O *Almagest* foi refinado pelos autores árabes, o que posteriormente deu subsídio estrutural a Copérnico e Kepler.

Segundo Aritóteles, os corpos caem devido à sua tendência natural de ficar no centro do universo, e o centro do universo seria o centro da Terra. Isto nos leva a uma visão de mundo homocentrada, na qual todo o universo está naturalmente relacionado com a existência da Terra, cuja posição é privilegiada. Neste ponto, a física de Aristóteles e a astronomia de Ptolomeu acabam por se completar e, de fato, não podem admitir reinterpretações que, como vimos, terminaram por mudar completamente a visão de mundo, a partir de observações muito simples.

---

<sup>8</sup> Porém, se move, numa tradução livre, referindo-se ao movimento da Terra em torno do Sol.

O caminho das observações da antiguidade até a cosmologia moderna foi muito longo. Veremos como a revolução copernicana desembocou na grande revolução científica do século XVIII e na visão mecânica no universo, que acabou por modificar profundamente a relação entre o homem e a natureza, o que, em última análise, foi causa e motivação do fantástico avanço tecnológico posterior.

## 1.5 Uma longa jornada

Felizmente, a ciência não se desenvolve baseada apenas em opiniões, mas em fatos. Como vimos, Copérnico descobriu que as complicadas tabelas de Ptolomeu ficavam muito mais simples se, ao invés da Terra ser considerada como centro do universo, o Sol o fosse. Copérnico não teve problemas com o clero, pois deixou claro que isso era considerado apenas como uma hipótese de trabalho, e não como uma realidade. Quando outros filósofos, como Giordano Bruno, tomaram as ideias de Copérnico como verdades científicas, houve uma intensa reação – Giordano Bruno foi considerado herege, e queimado vivo. Todavia, com o tempo, os fatos impuseram-se. De acordo com a teoria de Ptolomeu, segundo a qual os planetas se movem em epiciclos (círculos menores cujos centros estavam por sua vez em círculos maiores em torno da Terra), Vênus nunca poderia ter fases como tem a Lua. Porém, essas fases foram observadas por Galileo, com o advento da luneta. Mais que isso, as observações mais modernas foram dando corpo a uma nova teoria, muito precisa e com maior poder de previsão.

Faremos uma breve revisão dos principais fatos que nos levaram da revolução de Copérnico até a cosmologia moderna. Obviamente, seria impossível fazer-se, num espaço tão curto, uma revisão de todos os avanços científicos, filosóficos e técnicos compreendidos nesse período sem algumas omissões.

As anotações astronômicas de Tycho Brahe, feitas em seus observatórios da ilha de Hven, localizada entre as atuais Dinamarca e Suécia, deram os subsídios necessários para o alemão Johannes Kepler formular três leis, conhecidas como Leis de Kepler. A primeira lei dizia que os planetas se moviam em elipses, com o Sol em um dos focos. A próxima, que a área varrida pelo planeta ao circum-navegar o Sol, por unidade de tempo, é constante. Finalmente, a terceira reza que o cubo do raio médio da órbita é proporcional ao quadrado do período de revolução. O inglês Isaac Newton mostrou que essas leis são consequência de outras mais simples e, muito importante, mais gerais: em primeiro lugar há um conceito de força. Agindo sobre os corpos, a força é proporcional à aceleração do corpo. A constante de proporcionalidade é igual à massa do corpo. Além disso, há uma força gravitacional entre os corpos proporcional ao produto das massas e ao inverso do quadrado da distância. Assim nascera a teoria newtoniana da gravitação universal. Newton precisou inventar o cálculo diferencial para resolver suas equações. Ao resolvê-las, mostrou que delas seguiam, como consequência, as leis de Kepler para o movimento planetário.

O universo passa a ter uma aparência completamente diferente: não há um centro privilegiado, nem a Terra, nem o Sol, mas uma infinidade de astros sujeitos à ação de uma lei fundamental, universal, regendo seus movimentos e suas trajetórias. Nascia, assim, a primeira descrição científica do cosmos.

Após Newton, vários desenvolvimentos seguiram-se dentro da física. Dois grandes campos firmaram-se. Por um lado, a física do pequeno, com a hipótese atômica ganhando força e finalmente se impondo, e de outro lado, a união de dois tipos de força conhecidos milenarmente: o magnetismo (do antiquíssimo ímã) e a eletricidade (do pré-histórico relâmpago). Foi com grande surpresa que se verificou, no século XIX, que as leis que regem o eletromagnetismo são diferentes das leis que regem a mecânica dos corpos – aquela descoberta séculos antes por Isaac Newton. Para acomodar esses dois tipos de leis, foi proposto que os fenômenos eletromagnéticos (e a luz é um destes fenômenos) só ocorreriam em um tipo de geleia universal chamada éter, que preenche todo o espaço. Todavia, foram vãs as tentativas de se detectar o éter.

Em 1905, Albert Einstein, que trabalhava no departamento de patentes em Berna, na Suíça, propôs que todas as leis devem ter a mesma forma. Não importava de onde observássemos um fenômeno, seja de um trem em movimento, seja parados vendo-os acontecer, tanto o fenômeno eletromagnético como o mecânico devem se comportar da mesma maneira. Assim, ele modificou as leis de Newton – na verdade, a modificação era muito pequena e, com os aparelhos da época, não podia ser observada em fenômenos mecânicos, pois era da ordem (tamanho) do quadrado da relação entre a velocidade do objeto e a velocidade da luz! Lembremos que a velocidade da luz é de 300.000 quilômetros por segundo! Dessa maneira, a modificação em fenômenos do dia a dia (movimento de uma pessoa ou de um carro, por exemplo) não poderia ser notada por ser menor que uma parte em mil trilhões! No entanto, quando aplicada ao macrocosmo, a teoria da relatividade traz várias consequências. Desse modo, a teoria da gravitação de Newton também foi mudada para ser relativística, ou seja, para obedecer à teoria da relatividade.

Einstein acreditava que o universo fosse estático. Tentou resolver suas equações para a relatividade geral (assim foi chamada a nova teoria da gravitação), para obter um universo estacionário, e encontrou dificuldades, sendo possível encontrar tal solução apenas no caso de se modificarem as equações com um termo chamado cosmológico. Outras soluções existiam, as quais, todavia, não eram estáticas e que sugeriam um universo em expansão.

Em 1929, o astrônomo Edwin Hubble verificou que as estrelas distantes estavam se afastando de nós, e que a velocidade de afastamento era proporcional à distância que estivessemos da estrela. Ora, se tomarmos um elástico, pintarmos nele pontos equidistantes e começarmos a esticá-lo, vamos verificar que também a velocidade relativa de um ponto a outro é proporcional à distância – isso significa que as observações de Hubble implicam em um universo em expansão, de acordo

com as equações originais da teoria da relatividade geral! E mais, se o universo está em expansão, houve um dia em que tudo estava comprimido numa pequena região do espaço. A origem do universo, portanto, estaria associada a um tipo de grande explosão. Foi, contudo, uma explosão bastante peculiar, diferente das que estamos acostumados: todos os pontos do espaço explodem simultaneamente, ou seja, não há um centro privilegiado! Pela primeira vez na história, estamos nos aproximando da origem de nosso universo. Hoje, estamos em condições de descrever grande parte da mais fantástica das jornadas: a história do nosso universo.