

ASTRONOMIA CLÁSSICA

Roberto Boczko e Nelson Vani Leister

AS PRIMEIRAS MEDIDAS DO CÉU

Ao longo do tempo fomos, progressivamente, classificando e descrevendo a constituição do Universo, determinando, para cada estrutura, uma distância, um tamanho e uma idade, desvendando, assim, a arquitetura e a história dos astros e do Cosmos. A Antigüidade pré-helênica, que se estendeu de aproximadamente 3 000 a.C. até aproximadamente 1 000 a.C., caracterizou-se pela edificação das pirâmides e dos templos egípcios, assim como, de monumentos de pedras, cujas orientações obedeceram certas direções associadas a eventos astronômicos. Um exemplo é o monumento pré-histórico de Stonehenge, na Inglaterra.

Observações das posições aparentes do Sol, da Lua e dos agrupamentos das estrelas (constelações), permitiram conhecer, com certa precisão, as unidades de tempo convenientes para descrever os ciclos da agricultura e para ajudar na orientação das viagens marítimas.

A medição do tempo, desde a Antigüidade, está ligada ao movimento da Terra. O conhecimento astronômico desenvolvido na Grécia, África do Norte e no mundo árabe conduziu a um modelo de universo geocêntrico. Para Thales (600 a.C.) a Terra era plana e flutuava na água sob a imensa abóbada celeste.

Pitágoras (530 a.C.) e seu discípulo Eudócio (de Cnido, 355 a.C.) imaginavam uma Terra esférica e em rotação em torno de um fogo central, circundada por dez esferas concêntricas contendo as estrelas e os planetas.

Aristarco de Samos (280 a.C.) propôs a idéia revolucionária de um Universo centrado no Sol e não na Terra; esta visão heliocêntrica foi somente adotada 1 800 anos mais tarde. Pela idéia de que a Terra girava sobre seu eixo e ao redor do Sol foi acusado de perturbar o descanso dos deuses.

Eratóstenes (250 a.C.) determinou o raio da Terra. Observou que em um dia do solstício de verão, ao meio-dia, o Sol estava na vertical na cidade de Siena (hoje Assuã, no Egito) projetando-se no fundo de um poço. No mesmo dia, em Alexandria, situada a 800 km ao norte de Siena, observava-se uma sombra produzida por uma haste (conhecida como Gnômon) que definia um ângulo de aproximadamente 7° (Figura 3.1). Estas medidas permitiram, dois séculos antes de nossa era, obter o valor de 6 400 km para o raio da Terra, com um erro menor que 1%!

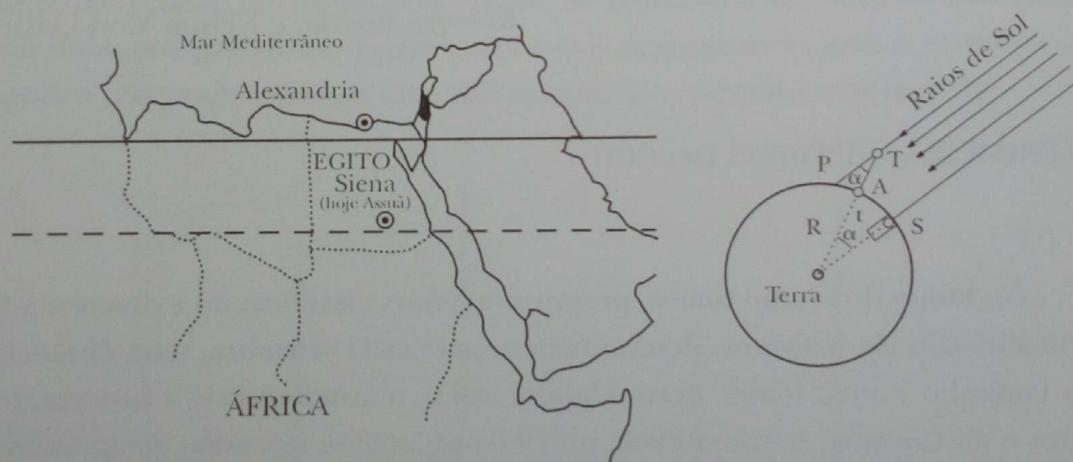


Figura 3.1. Diagrama ilustrando como Eratóstenes estimou o raio da Terra. A parte esquerda da figura apresenta um mapa da região nordeste da África, com as posições de Alexandria e Siena. O diagrama do lado direito mostra a geometria do problema.

Hiparco (150 a.C.) preparou o primeiro catálogo de estrelas, classificando cerca de 800 delas segundo seis “grandezas” em função do seu brilho. Estudou a duração das estações do ano, calculou a distância da Terra à Lua com os eclipses e fez a notável descoberta da precessão dos equinócios.

Ptolomeu (150 d.C.) reuniu em sua obra, *O Almagesto*, o conhecimento da astronomia da época; descreveu de uma maneira bastante completa um modelo do Sistema Solar que permaneceu em vigor durante 1 300 anos. Nele, a Terra ocupava o centro do mundo e tudo o mais girava em seu redor. Esse sistema foi inferido a partir da observação do movimento diário aparente dos astros.

A disposição dos astros em torno da Terra foi obtida admitindo-se que quanto mais distante um deles estivesse da Terra, mais tempo levaria para dar uma volta em torno dela. Assim, nessa ordem vinham a Lua, Mercúrio, Vênus, Sol, Marte, Júpiter e Saturno; englobando tudo estavam as estrelas.

Esse modelo, se bem que muito razoável, apresentava alguns inconvenientes: na época admitia-se que o céu era um local perfeito e, portanto, os astros deveriam realizar movimentos perfeitos: circulares e uniformes. Acontece que além das “estrelas fixas”, que realmente realizavam movimentos bastante uniformes, havia sete astros (Sol, Lua e cinco planetas) que fugiam completamente dessa regra: eles se moviam com relação às estrelas fixas e seus movimentos diferiam muito do que se achava ser um movimento celeste perfeito.

Para tentar explicar o movimento de pelo menos dois deles, Heráclides, no século IV a.C., sugeriu um sistema misto: a Terra estaria no centro do Mundo, mas Mercúrio e Vênus, que nunca eram vistos muito distantes do Sol, girariam em torno deste e não da Terra.

Ainda na vigência do sistema geocêntrico, começaram a aparecer problemas: conforme os métodos e instrumentos de observação astronômica foram ficando mais refinados, as posições observadas passavam a diferir cada vez mais das posições previstas pelos modelos adotados para explicar os movimentos.

Para minorar o problema, passaram a adotar o modelo geocêntrico com epiciclos: o planeta giraria em torno de um ponto abstrato que por sua vez giraria em torno da Terra. A órbita do ponto abstrato chamava-se deferente e a órbita do planeta em torno do ponto abstrato seria o epiciclo.

A sucessiva melhoria das teorias e das observações exigiu que o primeiro epiciclo passasse a ter um segundo deferente, ao qual se ligava novo epiciclo. E assim sucessivamente. Apesar de conveniente, do ponto de vista de representar as posições observadas com razoável precisão, o método tinha a desvantagem de ser bastante complexo para a época.

A visão heliocêntrica do Universo chega com Copérnico, em 1543, em seu tratado *De Revolutionibus*, onde ele propõe um modelo simples do Sistema Solar, com o Sol no centro do sistema.

Note que essa idéia não era absolutamente original, visto que Aristarco e Nicolau de Cusa já a haviam aventado. Mesmo no antigo Egito, por volta do século XIV a.C., Amenofis IV propôs o Sol no centro do mundo, mas nesse caso o motivo parece ter sido unicamente religioso, sem nenhum fundamento científico. Ao que tudo indica, Copérnico foi o primeiro a dar uma forma científica ao sistema heliocêntrico.

Não havia nenhuma prova de que o sistema heliocêntrico fosse verdadeiro. A primeira comprovação de que a Terra não era o centro de todos os movimentos celestes veio com Galileu, por volta do início do século XVII, quando ele

direcionou sua luneta para o planeta Júpiter e pôde perceber que quatro astros (mais tarde chamados satélites galileanos de Júpiter) descreviam órbitas em torno de Júpiter e não da Terra. Foi a pá de cal no sistema geocêntrico. Apenas argumentos não científicos podiam manter a Terra como centro do mundo.

Utilizando-se de instrumentos denominados quadrantes e sextantes, montados em seu castelo em uma ilha situada entre a Dinamarca e a Suécia, Tycho Brahe reuniu um conjunto de observações de Marte. Essas observações, não obstante feitas a olho nu, apresentaram uma precisão de 1 minuto de grau. Medindo a paralaxe de alguns cometas, Tycho pôde provar que eles eram objetos celestes e não fenômenos meteorológicos, como se supunha.

Kepler, em 1610, enuncia as leis que descrevem o movimento dos planetas ao redor do Sol. Galileu, com a ajuda de sua luneta astronômica, descobre o relevo lunar, os quatro principais satélites de Júpiter, as manchas no Sol, identifica a estrela dupla Mizar e, entre outros, enuncia o princípio da inércia.

Römer, a partir de observações de eclipses de Io, satélite de Júpiter, mede a velocidade da luz em 1676. Estas observações foram feitas no Observatório de Paris, fundado em 1667 por Cassini. Também em 1676, Flamsteed funda o Observatório de Greenwich, voltado para a determinação das longitudes geográficas necessárias à navegação marítima. Em 1682, Halley calcula a órbita do cometa que leva seu nome e prevê sua volta para 1759.

Newton (1687) enuncia a Lei da Gravitação Universal.

Em 1751, Bradley, através da aberração da luz, consegue provar que a Terra gira em torno do Sol.

Herschel (1784) construiu vários telescópios. Observador constante, publica um catálogo com pouco mais de 400 estrelas duplas, descobre Urano e várias nebulosas. Estudando a distribuição das estrelas, propõe uma nova estrutura para a Galáxia, uma espécie de elipsóide centrado no Sol (capítulo 9).

Bessel, em 1838, determinou a primeira paralaxe, correspondente à estrela 61 Cygni, e no mesmo ano, Struve obteve a paralaxe da estrela Vega. A paralaxe da estrela α Centauri foi medida em 1839, por Henderson.

Em 1852, Foucault, através de um pêndulo, prova o movimento de rotação da Terra.

O MOVIMENTO APARENTE DOS CORPOS CELESTES

Quando se olha para o céu pode-se imaginar que este é um enorme hemisfério, com o observador situado no centro de uma esfera: a Esfera Celeste. Durante o dia, o observador tem a impressão de que o Sol nasce de um lado,

chamado de Nascente ou Oriente, move-se pela Esfera Celeste e, finalmente, se põe do outro lado, chamado Poente ou Ocidente. À noite, as estrelas também parecem nascer no lado do oriente e se deslocam pela abóbada celeste até se porem do lado do ocidente.

As estrelas parecem não modificar suas posições umas com relação às outras; isso levou os antigos a denominarem-nas estrelas fixas (como as estrelas, excetuando-se o Sol, estão muito distantes, seus movimentos relativos são desprezíveis). Essa aparente “fixidez” das estrelas fez com que elas fossem, para efeito de reconhecimento, associadas em grupos puramente subjetivos chamados Constelações. Hoje adota-se a existência de 88 constelações.

Alguns corpos, contudo, pareciam se mover em relação às estrelas fixas e foram denominados planetas, palavra de origem grega significando errante. Dessa maneira, os antigos conseguiram reconhecer os cinco planetas visíveis a olho nu: Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno (Figura 3.2).

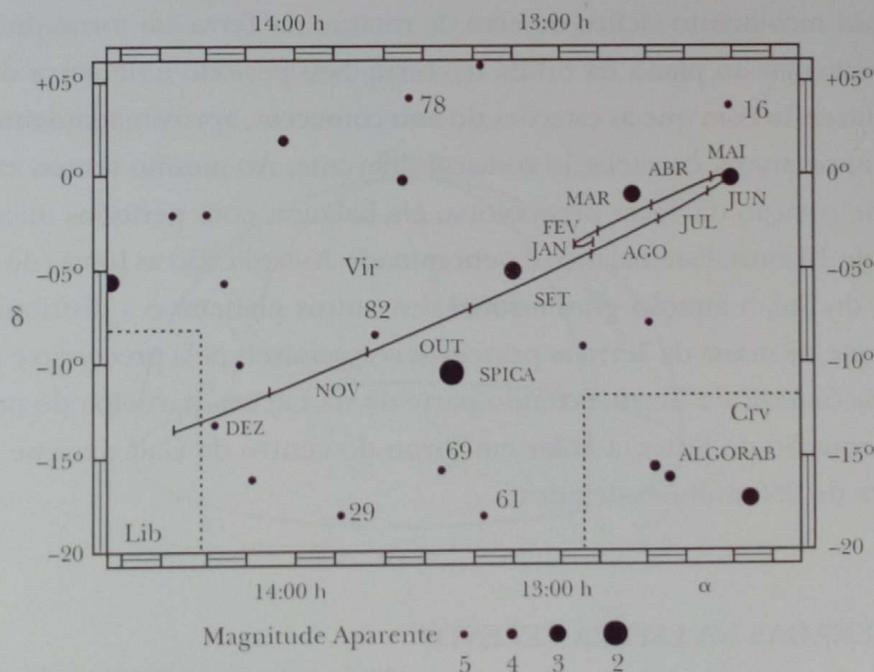


Figura 3.2. Movimento anual aparente de Júpiter em 1993. As datas representam as posições de Júpiter com relação às estrelas.

Algumas estrelas estão sempre acima do horizonte. São denominadas circumpolares e parecem descrever circunferências concêntricas em torno de um ponto no céu denominado pólo celeste. Ora, as estrelas do hemisfério norte parecem girar no sentido anti-horário em torno do Pólo Norte, enquanto que as do hemisfério sul parecem girar no sentido horário. Isso foi interpretado pelos antigos como se o céu fosse uma imensa esfera – a esfera celeste – que

girava, com um período de cerca de um dia, em torno de um eixo de rotação que passava pelos pólos de uma Terra fixa no centro do Universo. Na verdade, este movimento da esfera celeste é apenas aparente e é devido ao fato de a Terra estar em rotação.

A rotação é apenas uma das componentes do movimento da Terra. As principais dessas componentes são:

- *Rotação*: movimento da Terra em torno de um eixo que passa pelos pólos norte e sul. Dele resulta o dia e a noite. Com relação ao Sol, esse movimento tem um período médio de 24 horas, variável devido às irregularidades de seu movimento de translação. Com relação às estrelas, esse movimento é bem mais uniforme, com período de cerca de 23 h 56 m 04 s.
- *Translação*: movimento orbital da Terra em torno do Sol, dando origem ao Ano Solar, com cerca de 365 d 06 h. Esse movimento, associado ao fato de o eixo de rotação não ser perpendicular ao plano da órbita da Terra, causa, como veremos, as estações do ano.
- *Precessão*: movimento cíclico do eixo de rotação da Terra em torno de um eixo perpendicular ao plano da órbita da Terra. Seu período é de cerca de 26 000 anos, fazendo com que as estações do ano comecem, aproximadamente, a cada 2 000 anos, numa constelação zodiacal diferente. Ao mesmo tempo em que o eixo de rotação da Terra precessiona, ele balança, com períodos máximos de cerca de 19 anos. Esse balanço é denominado *Nutação*. São as forças de maré da Lua e do Sol, a atração gravitacional dos outros planetas e a distribuição não uniforme de massa da Terra as principais responsáveis pela precessão e nutação.
- *Rotação Galáctica*: a Terra, fazendo parte da via Láctea, participa do movimento de rotação do Sistema Solar em torno do centro da Galáxia; esse período é cerca de 250 milhões de anos.

COORDENADAS NA ESFERA CELESTE

Considere um observador em um certo ponto da superfície da Terra. A linha vertical que passa pelo observador fura a esfera celeste exatamente acima de sua cabeça num ponto que se chama zênite. O ponto diametralmente oposto recebe o nome de nadir.

O plano perpendicular à linha vertical, denominado de Plano do Horizonte, intercepta a esfera celeste numa circunferência chamada Linha do Horizonte.

Qualquer semiplano contendo a linha vertical do observador intercepta a esfera celeste numa semicircunferência chamada de *circunferência vertical*. A cir-

cunferência vertical que passa pelo Pólo norte intercepta a linha do horizonte num ponto chamado de *ponto norte geográfico* (N). Já a circunferência vertical que passa pelo Pólo sul intercepta a linha do horizonte no *ponto sul geográfico* (S). A reta, no plano do horizonte, que passa pelos pontos N e S e pelo observador recebe o nome de linha norte-sul. A linha leste-oeste é perpendicular à linha norte-sul, sobre o plano do horizonte.

Vejamos agora como podemos determinar posições de astros sobre a esfera celeste. Para isso são necessários apenas dois ângulos de posição.

Consideremos, inicialmente, o chamado sistema de coordenadas horizontais locais. A posição de um astro neste sistema é caracterizada pelo azimute e pela altura (Figura 3.3). O azimute é o ângulo medido a partir do norte, para leste, sobre o horizonte, até a circunferência vertical que passa pelo astro cuja posição se deseja determinar. A altura é o ângulo medido desde o plano do horizonte, ao longo da circunferência vertical do astro, até o astro. Um problema com este sistema de coordenadas é que, devido ao movimento aparente da esfera celeste, a posição de um astro neste sistema de coordenadas varia com o tempo.

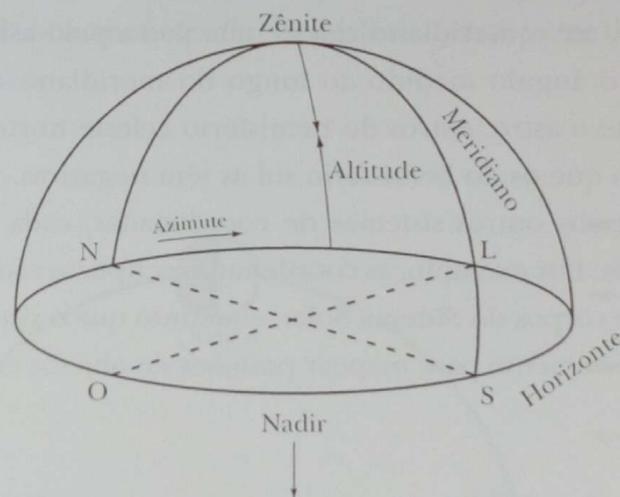


Figura 3.3. Elementos locais da esfera celeste.

O sistema de coordenadas mais usado em Astronomia é o chamado sistema equatorial, que é fixo na esfera celeste e se move com ela (Figura 3.4). Definamos o *equador celeste* como o círculo máximo formado pela intersecção do plano perpendicular ao eixo de rotação da Terra que passa pelo centro da Terra, isto é, ele é a projeção do equador da Terra sobre a esfera celeste. Cada uma das infinitas semicircunferências que se inicia no pólo celeste norte e finda no pólo celeste sul recebe o nome de *meridiano celeste*.

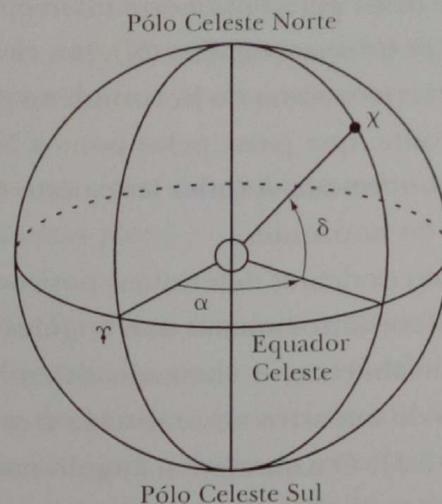


Figura 3.4. Coordenadas Equatoriais. A ascensão reta α é contada a partir do ponto γ (γ), enquanto que a origem das declinações (δ) é o equador celeste.

As coordenadas que caracterizam o sistema equatorial são a ascensão reta e a declinação. A ascensão reta (α) é o ângulo medido sobre o equador celeste, contado a partir do chamado *ponto vernal* (ou *ponto γ* ou *equinócio da primavera boreal*, relativo ao hemisfério norte), no sentido anti-horário quando visto do pólo celeste norte, até o meridiano celeste que passa pelo astro em questão. A declinação (δ) é o ângulo medido ao longo do meridiano do astro, desde o equador celeste até o astro. Astros do hemisfério celeste norte têm declinações positivas enquanto que os do hemisfério sul as têm negativas.

Existem diversos outros sistemas de coordenadas, cada um útil para um certo tipo de estudo. Por exemplo, as coordenadas eclípticas são úteis para descrever movimentos de corpos do Sistema Solar, enquanto que o sistema de coordenadas galácticas é conveniente para mapear posições de objetos em nossa Galáxia.

AS FASES DA LUA E O MÊS

Desde a mais remota Antigüidade fenômenos cíclicos, como o nascer e o ocaso do Sol, ou as estações do ano, nortearam a vida dos homens. O calendário surge como uma forma de se controlar a passagem do tempo: ele é um conjunto de regras que permitem agrupar um número inteiro de dias em períodos maiores.

Entre os períodos escolhidos, alguns tinham caráter artificial e místico, como é o caso da semana. Embora a semana corresponda à duração aproximada de cada fase lunar, em várias línguas é patente a associação dos dias da sema-

na a sete corpos celestes importantes, tanto do ponto de vista astronômico quanto mitológico: Sol, Lua, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno. Outros períodos, contudo, se baseavam em fenômenos observáveis, como o mês lunar e o ano das estações.

O aspecto da Lua muda periódica e ciclicamente: as fases lunares. Foi Aristarco, no século III a.C., quem primeiro explicou o motivo das fases (Figura 3.5). A Lua, como a Terra, é iluminada pelo Sol, sempre apresentando um hemisfério iluminado e outro escuro. A parte iluminada visível da Terra, contudo, varia de instante em instante porque a Lua está girando em volta da Terra. Quando o disco lunar aparece completamente iluminado dizemos que a Lua está entrando na fase de Lua cheia. Neste caso, a Terra encontra-se mais ou menos entre o Sol e a Lua. Com o passar dos dias, vemos que o disco lunar vai diminuindo sua área iluminada e, cerca de uma semana depois, apenas metade do disco lunar estará iluminado: dizemos que começa a fase de Lua quarto minguante. No hemisfério sul, a parte iluminada lembra vagamente a letra D maiúscula. Uma semana depois e a Lua praticamente deixa de ser vista da Terra: inicia-se a fase de Lua nova. Agora é a Lua que encontra-se entre a Terra e o Sol. Logo depois a Lua começa a ser vista “crescendo” até que atinge a fase de Lua quarto crescente, quando o disco lunar estiver iluminado pela metade. Do hemisfério sul, a parte iluminada lembra a letra C maiúscula.

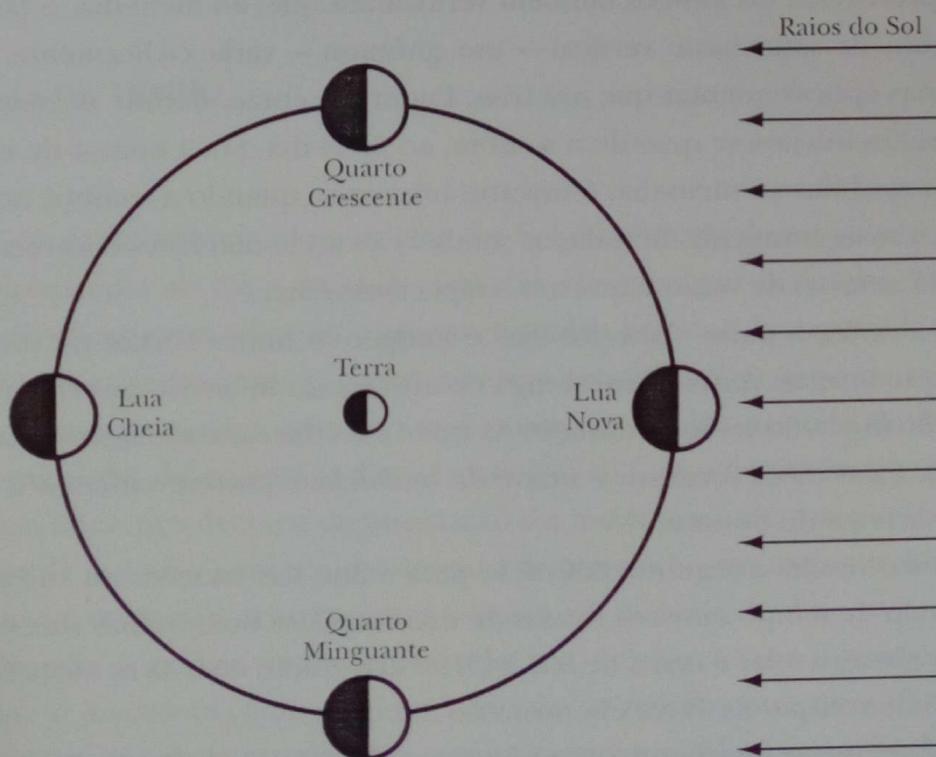


Figura 3.5. As fases da Lua.

É interessante notar que a rotação da Lua em torno de seu eixo é síncrona com sua revolução em torno da Terra (os dois movimentos têm o mesmo período). Em conseqüência, a Lua apresenta sempre a mesma face para nós.

Esta sincronicidade é conseqüência das marés que a Lua produz na Terra e, também, que a Terra produz na Lua. As marés dissipam energia e, em conseqüência, a energia de rotação da Terra e da Lua diminui. A rotação da Lua foi freada e forçada a uma rotação síncrona. Ao mesmo tempo, a Terra também é freada e estima-se que a duração do dia esteja aumentando a uma taxa de 2 segundos por milênio. Ademais, para conservar o momento angular do sistema, a distância entre a Terra e a Lua deve aumentar progressivamente (capítulo 4).

O ciclo lunar demora pouco mais de 29 dias e meio (29 d 12 h 44 m 3 s) e é chamado de *lunação*. Para desconsiderar a parte fracionária da lunação, alguns povos da Antigüidade instituíram o mês lunar, que consistia em períodos alternados de 29 ou 30 dias, de modo que, em média, valessem cerca de 29,5 dias.

AS ESTAÇÕES E O ANO

O conceito de Ano deve ter se originado da observação das estações. De fato, as condições climáticas tendem a variar de forma mais ou menos cíclica, alternando épocas quentes com outras frias, cada uma com períodos razoavelmente previsíveis. Os antigos também verificaram que, ao meio-dia, o tamanho da sombra de uma haste vertical – um gnômon – varia ciclicamente, sendo menor nas épocas quentes que nas frias. Puderam, então, definir as estações do ano: o verão iniciava-se quando a sombra, ao meio-dia, era a menor de todas as sombras medidas ao meio-dia; o inverno iniciava-se quando a sombra, ao meio-dia, era a mais comprida de todas as sombras ao meio-dia. Estes dias recebem o nome de *solstícios* de verão e inverno, respectivamente.

No verão, a parte clara dos dias é longa e as noites curtas; no inverno a situação se inverte. A noite mais longa do ano é a do início do inverno e a mais curta a do início do verão. A duração da noite e do dia claro são iguais duas vezes por ano. Essas datas recebem o nome de *equinócios* e correspondem aos inícios da primavera e do outono.

Disto resulta a seguinte definição para o ano das estações ou ano solar: é o intervalo de tempo entre os inícios de duas estações homônimas sucessivas. A duração do ano solar é cerca de 365,242199 dias (365 d 05 h 48 m 46 s). Este é o período de rotação da Terra em torno do Sol.

Note que as estações do ano não dependem da distância da Terra ao Sol. Como o eixo de rotação da Terra está inclinado de aproximadamente 23,5° com

relação à perpendicular ao plano de sua órbita em torno do Sol, a iluminação dos hemisférios norte e sul varia ao longo do ano (Figura 3.6). Durante cerca de seis meses o Sol está no hemisfério norte da Terra, fazendo com que esse hemisfério receba mais calor que o outro. Nos seis meses seguintes ocorre o inverso, ocorrendo o verão no hemisfério sul. Assim, as estações do ano estão relacionadas com a inclinação com que os raios solares chegam à superfície da Terra.

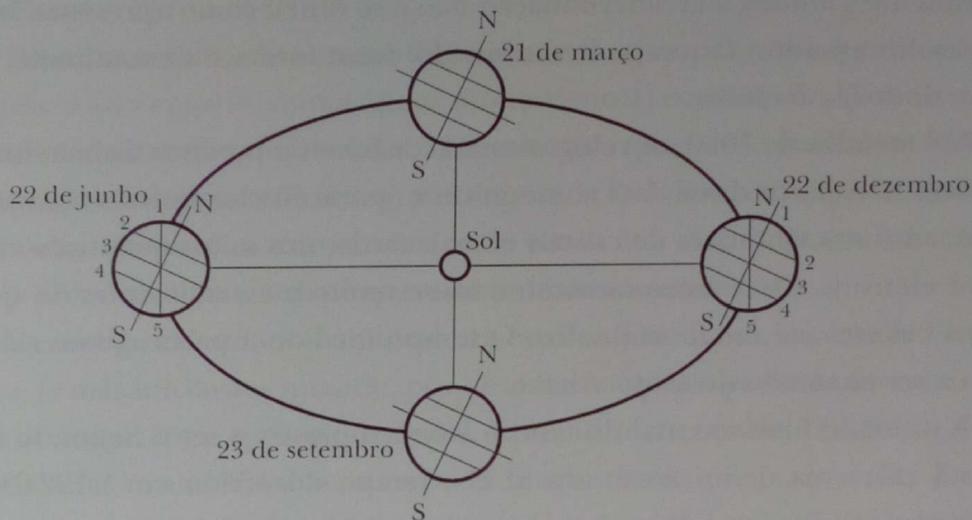


Figura 3.6. As estações do ano. São indicadas as datas dos solstícios (22 de junho e 22 de dezembro) e dos equinócios (21 de março e 23 de setembro). Também são indicadas as latitudes dos (1) Círculo Ártico ($66,5^{\circ}$ N), (2) Trópico de Câncer ($23,5^{\circ}$ N), (3) Equador (0°), (4) Trópico de Capricórnio e (5) Círculo Antártico ($66,5^{\circ}$ S).

MEDIDAS DE TEMPO

A escala de tempo cujo ponteiro é o Sol é chamada de *tempo solar*. Ela se baseia no suceder do dia e da noite. Um *dia solar* tem, por definição, 24 horas solares. Verifica-se, no entanto, que um dia solar, isto é, o intervalo de tempo entre dois nascimentos sucessivos do Sol, não tem uma duração constante ao longo do ano. Definiu-se então o *dia solar médio* como sendo um período de duração igual à média das durações dos dias verdadeiros ao longo de um ano.

Essa diferença decorre da associação do movimento de rotação da Terra em torno de seu eixo com seu movimento de translação em torno do Sol. Esse último não é uniforme, acarretando a variação da duração do dia.

Quando o relógio usado é baseado nas estrelas temos o *tempo sideral*. Definiu-se o *dia sideral* como sendo o intervalo de tempo entre duas passagens sucessivas de uma dada estrela pelo mesmo meridiano. Ele é cerca de 3 m 56 s mais curto que o dia solar: um dia sideral dura 23 h 56 m 04 s de tempo solar.

Apesar de o tempo sideral ser bem mais uniforme que o tempo solar, ainda assim nota-se que existem pequenas irregularidades no seu decorrer. Isso traz uma dificuldade, pelo menos teórica, nas equações da Mecânica, onde o tempo é considerado o argumento independente e, portanto, uniforme. O tempo perfeitamente uniforme é denominado de *tempo das efemérides*. Sua determinação, na prática, era feita a partir de observações de astros do Sistema Solar, em particular da Lua. Face ao movimento rápido da Lua e a suas dimensões aparentes relativamente grandes, sua determinação não é só difícil como apresenta imprecisões muito grandes. O tempo determinado dessa forma é denominado, hoje em dia, de *tempo dinâmico*.

Até meados de 1950, os relógios mais confiáveis e precisos tinham origem astronômica. A partir dessa data começaram a operar os chamados *relógios atômicos*, baseados nas vibrações de cristais e, mais tarde, nos saltos quânticos efetuados por elétrons. Esses sistemas mostraram-se muito mais uniformes do que os relógios celestes até então utilizados. O tempo medido a partir desses relógios passou a ser chamado de *tempo atômico*.

A unidade fundamental do tempo atômico passou a ser o Segundo Internacional (SI) cuja definição é: um SI é o tempo decorrido em 9 192 631 770 ciclos de transição entre dois níveis hiperfinos do estado fundamental do césio 133. Este número de ciclos foi escolhido para que um SI fosse parecido com o segundo inicialmente definido de forma astronômica.

Vimos que o movimento de rotação da Terra não é estritamente uniforme. Assim, com o passar do tempo, a hora fornecida pelos relógios atômicos deixou de ter relação direta com os fenômenos astronômicos. Isso significa que, sem que se façam as devidas correções, com o passar do tempo o nascer e o ocaso do Sol poderiam estar muitas horas defasados em relação aos relógios atômicos. Para contornar esse problema, definiu-se o *tempo universal coordenado*, que é um tempo de escala atômica mas que é acertada na origem cada vez que sua diferença com relação ao tempo astronômico ultrapassa um determinado valor. É essa a hora disseminada pelos chamados *rádio-relógios*.

CALENDÁRIOS

Já mencionamos que o calendário surge como uma forma de se controlar a passagem do tempo, a partir da definição de intervalos característicos como o dia (uma rotação da Terra), o mês (lunação) e o ano (as estações; período de translação da Terra em torno do Sol). A duração da semana não está relacionada com nenhum fenômeno astronômico; ela é de origem puramente mitológica.

Note, porém, que: não há um número inteiro de dias numa luação (29,530589 dias); não há um número inteiro de dias num ano solar (365,242199 dias); não há um número inteiro de luações num ano solar ($365,242199/29,530589 = 12,368267$). Estes períodos são incomensuráveis, isto é, não se pode medir um período em função do outro número inteiro comum. Esse é o maior problema para a criação de um bom calendário. Com um ano de exatamente 365 dias, por exemplo, os inícios das estações vão progressivamente se defasando do calendário.

Diferentes povos buscaram diferentes soluções para esse problema. Por exemplo, o ano egípcio, numa época muito remota, consistia de 12 meses de 30 dias cada e mais 5 dias no final dos 12 meses para que o ano perfizesse 365 dias. Os egípcios, contudo, verificaram que, depois de 365 dias, a sombra do gnômon, ao meio-dia, não voltava exatamente onde estava 365 dias atrás; apenas a cada 4 anos de 365 dias e mais 1 dia é que este fenômeno ocorria.

Já o antigo calendário babilônio era estritamente lunar, contendo 12 meses lunares. O mês iniciava-se quando, por observação direta, podia-se ver o início do crescente lunar, logo após o pôr-do-sol. Com 12 luações de 29,530589 dias, o ano babilônico tinha 354 dias, ou seja, 11 dias a menos que o ano solar. Assim, a cada 3 anos o calendário babilônio defasava de cerca de 1 mês (3×11 dias) com relação às estações do ano. Algumas tentativas, não sistemáticas, de intercalação de um décimo terceiro mês foram feitas para sincronizar o calendário com as estações do ano (calendário luni-solar) mas apenas por volta de 480 a.C. é que começaram a ser criadas regras bastante convenientes para organizar as intercalações. Uma dessas regras se baseava no *ciclo metônico* de 19 anos.

O grego Méton, por volta de 430 a.C., descobriu que em 19 anos solares havia 6940 dias ($19 \times 365,242199$); verificou também que em 235 luações existiam os mesmos 6940 dias ($235 \times 29,530589$), ou seja, em 19 anos solares ocorriam quase que exatamente 235 luações. Esse ciclo de 19 anos passou a ser chamada ciclo metônico. Em 19 anos babilônios existiam apenas 228 luações (19×12), faltando, pois, 7 para completar as 235 necessárias num ciclo metônico. Isso significa que em cada 19 anos babilônios deve-se intercalar 7 meses lunares extras de modo que o calendário lunar não defase muito das estações.

O calendário babilônio, com suas intercalações de um décimo terceiro mês, quando necessário, sobrevive ainda hoje no calendário judaico.

As festas religiosas católicas são também regidas por um calendário lunar. Assim, o Concílio de Niceia, em 325 d.C., definiu a data do domingo de Páscoa como o primeiro domingo depois da primeira Lua cheia (eclesiástica) que ocorre após ou no início da primavera boreal (eclesiástica). Note: o início da primavera eclesiástica, isto é, aquela definida pela igreja católica, é sempre no dia 21 de março (o que nem sempre coincide com o fato real); a Lua cheia eclesiástica

ocorre 14 dias depois da Lua nova eclesiástica (o que nem sempre é verdade, pois o movimento da Lua é bastante irregular); a Lua nova eclesiástica é definida através do ciclo de Méton, o qual pode ter erro de 1 dia.

O calendário muçulmano é estritamente lunar, com doze meses perfazendo 354 dias. O Ano Novo é o primeiro dia do mês de Mouharram, que se inicia quando o crescente lunar (da Lua Nova) aparece visível pela primeira vez ao anoitecer.

O calendário judaico, inicialmente lunar, de há muito é luni-solar, contendo doze meses com um décimo terceiro intercalado sob regras bem-definidas para que haja, em média, uma correspondência entre as datas do calendário e as estações do ano.

O calendário atualmente em vigor na maior parte do mundo é o gregoriano, adotado em 1582. A anos de 365 dias intercalam-se os anos bissextos. Seriam bissextos todos os anos divisíveis por 4, exceto os anos centenais (terminados em 00) que não fossem múltiplos de 400. Assim, 1900 não é bissexto, mas 2000 o é.

OS ECLIPSES

Eclipses são fenômenos envolvendo as posições relativas do Sol, da Lua e da Terra.

Um eclipse solar ocorre quando a Lua se interpõe entre o Sol e a Terra, impedindo que todos, ou parte dos raios solares atinjam a Terra (Figura 3.7). O eclipse será *solar total* se o observador não puder receber nenhum raio do Sol; caso parte do Sol continue visível, o eclipse é dito *solar parcial* (Figura 3.8). Se, em particular, a Lua encobrir apenas a região central do Sol, restando um anel brilhante em torno de um centro obscurecido, então o eclipse é chamado de *solar anular*.

Se a Terra fica entre o Sol e a Lua, ela pode impedir que os raios de Sol atinjam a Lua (Figura 3.9). Se a Lua ficar completamente na região de sombra da Terra, diz-se que houve um *eclipse lunar umbral total*. Caso apenas parte da Lua fique obscurecida pela sombra, teremos um *eclipse lunar umbral parcial*. Umbra é a região que não recebe luz de nenhum ponto da fonte luminosa (é a região do cone de sombra entre as tangentes externas ao Sol e à Terra). Penumbra é a região que não recebe luz de todos os pontos da fonte luminosa (é a região compreendida entre as tangentes internas ao Sol e à Terra, excluídas as partes pertencentes à umbra). Quando a Lua entra completamente na região de penumbra temos o *eclipse penumbral total* da Lua; caso apenas parte da Lua penetre na penumbra temos o *eclipse penumbral parcial* da Lua. Devido à pequena diminuição de brilho da Lua durante um eclipse penumbral, é muito difícil, se não impossível, perceber-se tal eclipse a olho nu.

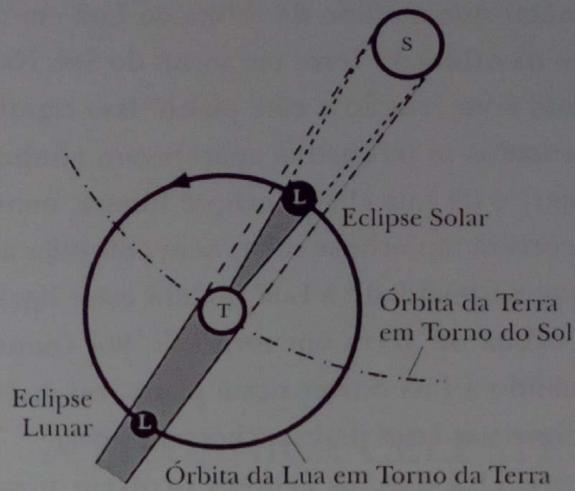


Figura 3.7. Tipos de eclipses.

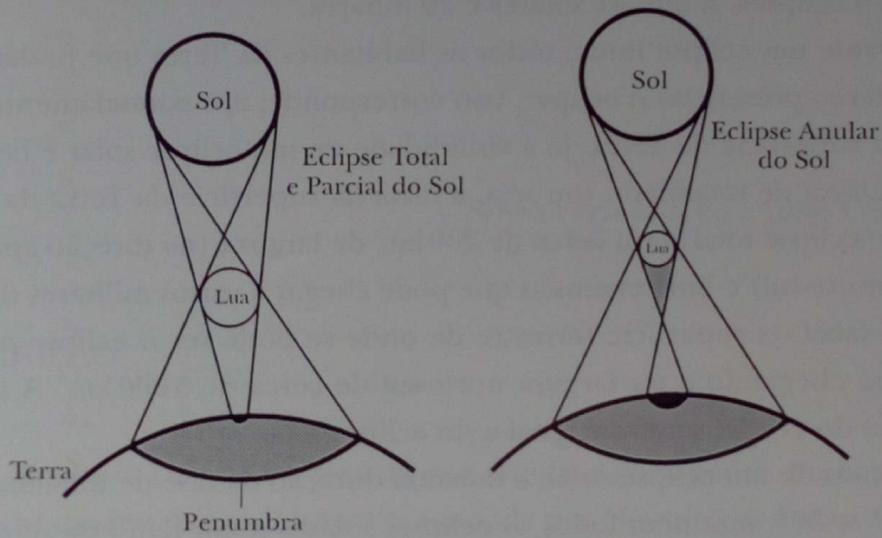


Figura 3.8. Eclipses do Sol.

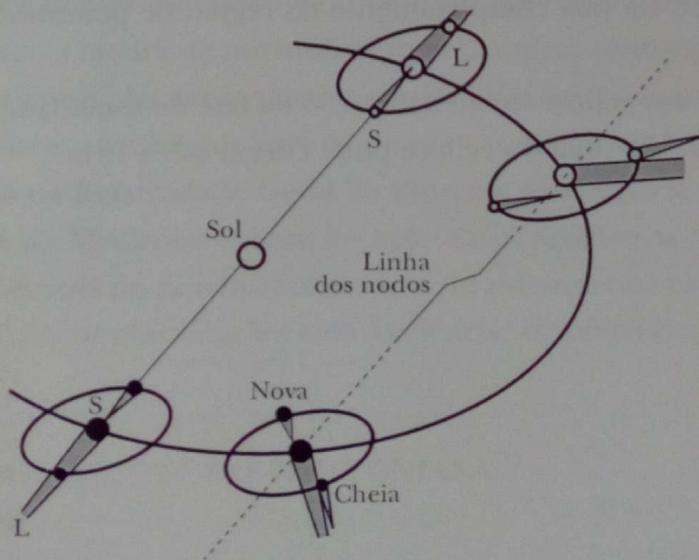


Figura 3.9. Eclipses da Lua. Note que os planos das órbitas da Terra em torno do Sol e da Lua em torno da Terra não coincidem, o que impede que ocorram eclipses em todas as Luas novas e cheias.

É importante notar que o plano da órbita da Lua em torno da Terra não coincide com o plano da órbita da Terra em torno do Sol. Na realidade, ele está cerca de $5,2^\circ$ inclinado com relação a esse plano. Isso significa que, apesar de nos esquemas apresentados os três astros aparecerem alinhados nas épocas de Lua nova (eclipse solar) e de Lua cheia (eclipse lunar), nem sempre quando a fase é de Lua nova ocorrerá um eclipse solar, nem em todas as Luas cheias haverá eclipse lunar, já que na realidade a Lua poderá estar ligeiramente acima ou abaixo do plano da órbita da Terra em torno do Sol (denominado plano da eclíptica). Apenas quando a Lua estiver neste plano, ou muito próximo dele, é que poderá haver eclipse nas fases de Lua cheia ou nova.

A cada 18 anos e 11,3 dias, os eclipses ocorrem novamente na mesma ordem; esse período é chamado de *período de Saros*. Em cada um desses períodos ocorrem 70 eclipses, sendo 41 solares e 29 lunares.

Durante um eclipse lunar, todos os habitantes da Terra que puderem ver a Lua poderão presenciar o eclipse. Isso corresponde, aproximadamente, a $1/3$ da área da superfície da Terra. Já a visibilidade de um eclipse solar é bem mais restrita. A faixa de totalidade (ou seja, a faixa da superfície da Terra da qual se pode ver o eclipse total) tem cerca de 200 km de largura (na direção aproximadamente norte-sul) e uma extensão que pode chegar a vários milhares de quilômetros. A faixa da superfície terrestre de onde se pode ver o eclipse parcial é bem maior, chegando a ter largura norte-sul de cerca de 5 000 km. A faixa de visibilidade do eclipse anular é igual a do eclipse total.

No caso de um eclipse solar, a máxima duração da fase de totalidade é de cerca de $7'$ e $30''$, mas nem todos os eclipses solares totais têm essa duração. A duração total do eclipse, desde quando a Terra começa a entrar na região de penumbra até que ela saia completamente da região de penumbra, é de cerca de 6 h 15 m.

No caso de um eclipse lunar, a duração da fase de totalidade pode chegar a 1 h 45 m e a duração total do eclipse pode chegar a 6 h 19 m.