

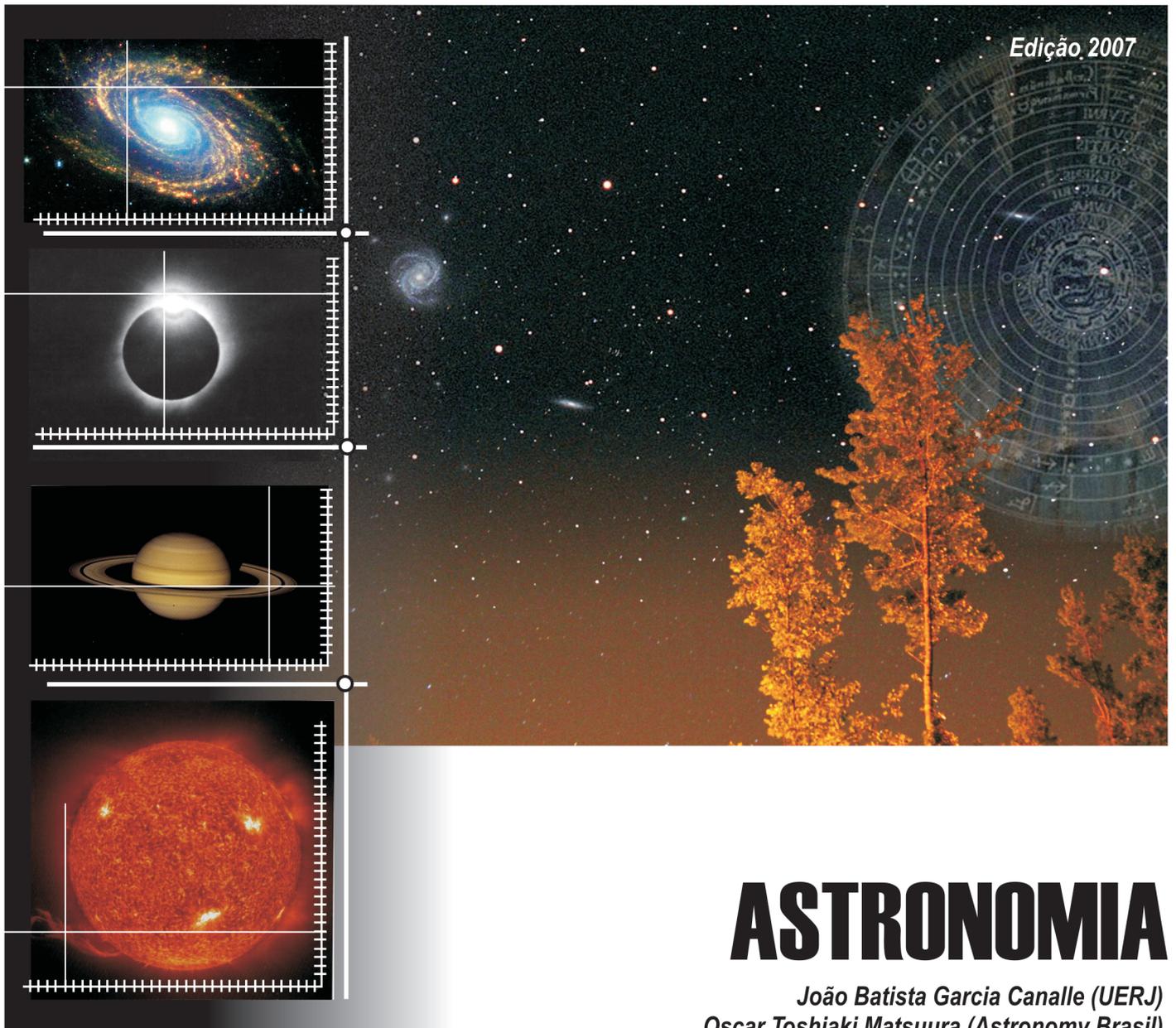
AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA



FORMAÇÃO CONTINUADA DE PROFESSORES

CURSO ASTRONÁUTICA
E CIÊNCIAS DO ESPAÇO

Edição 2007



Ministério da
Educação

Ministério da
Ciência e Tecnologia





João Batista Garcia Canalle é bacharel e licenciado em Física pelas Faculdades Oswaldo Cruz, doutor em Astronomia pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP, pós-doutorado em Astrofísica na University College London. Trabalhou nas Faculdades Oswaldo Cruz e na Pontifícia Universidade Católica de São Paulo e desde 1995 é professor adjunto do Instituto de Física da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Desde 1999 é o coordenador nacional da Olimpíada Brasileira de Astronomia e Astronáutica, liderou a equipe brasileira à Olimpíada Internacional

de Astronomia entre 1998 e 2000. Foi fundador e coordenador da Comissão de Ensino da Sociedade Astronômica Brasileira, participou de várias Comissões de Análise e Avaliação de Livros Didáticos do MEC, tem dezenas de artigos publicados em revistas especializadas internacionais na área de plasma astrofísico de estrelas binárias cataclísmicas, publicou também dezenas de artigos de ensino de astronomia e física. Participou de muitas dezenas de eventos relacionados à pesquisa científica ou ensino e divulgação de física e ou astronomia.

Dr. João Batista Garcia Canalle
Instituto de Física - UERJ.

São Francisco Xavier, 524/3023-D, Maracanã 20559-900 Rio de Janeiro - RJ
Tel/fax. (UERJ) 55 21 25877150
Tel/fax. (Res./home) 55 21 22580586 Cel. 55 21 82723810
SKYPE: joaocanalle
Email: canalle@uerj.br / jbcanalle@terra.com.br



Oscar Toshiaki Matsuura é bacharel em Filosofia e em Física, mestre em rádio-astronomia solar pelo Centro de Rádio-Astronomia e Astrofísica da Universidade Mackenzie, e doutor em astronomia de cometas pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP. Alí liderou o Grupo de Astrofísica do Sistema Solar até se aposentar como professor associado em 1997. Trabalhou depois em divulgação e ensino básico de Astronomia e História da Astronomia no Museu de Astronomia e Ciências Afins (MAST/MCT) no Rio de Janeiro. De meados

de 2002 até o fim de 2005 foi Diretor do Planetário e Escola Municipal de Astrofísica "Prof. Aristóteles Orsini", do Parque Ibirapuera, São Paulo, SP. A partir de 2006 é Editor Associado da revista Astronomy Brasil. Autor de inúmeras contribuições científicas em revistas especializadas sobre suas áreas de pesquisa (processos hidromagnéticos em estruturas da atmosfera solar e na cauda gasosa de cometas, poeira cometária e circunstelar), também escreveu inúmeros trabalhos de divulgação: artigos, capítulos e livros, tais como, como "Cometas: do mito à ciência" (Ícone), "Atlas do Universo" (Scipione), "Teoria da Relatividade" (SuperInteressante/Abril) e "Astrobiologia e Ensino de Ciências: Vida fora da Terra", Informes e Documentos (Editora Moderna).

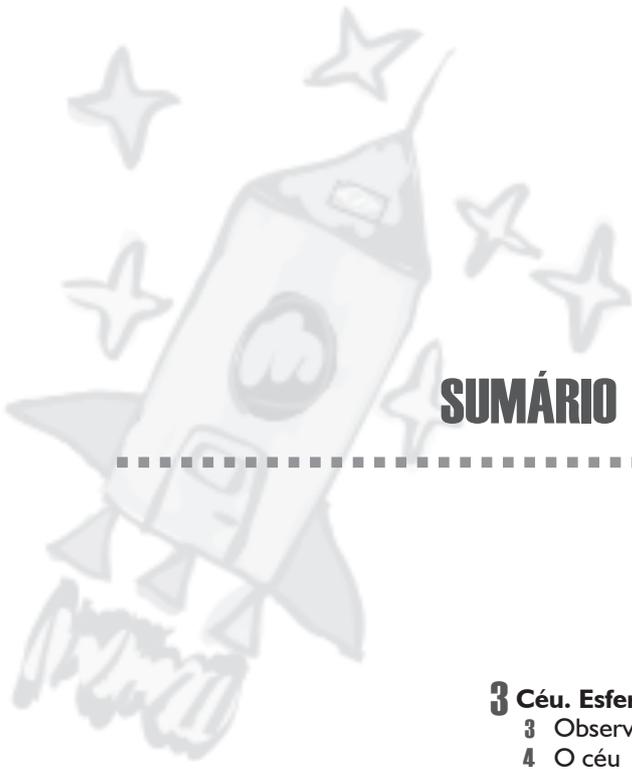
Astronomy Brasil
Rua Raul Pompéia, 1066 conj. 1
05025-011 São Paulo – SP
Telefone: (11)3673-4253
E-mail: matsuura@editoraandromeda.com.br

Capa

Leonardo Nemer
Programa AEB Escola

Projeto Gráfico e Diagramação

Sueli Prates
Programa AEB Escola



SUMÁRIO

3 Céu. Esfera Celeste

- 3 Observação do céu a olho nu
- 4 O céu
- 4 Fenômenos celestes visíveis a olho nu
- 7 Efeitos atmosféricos
- 10 Esfera celeste
- 11 Sistema horizontal de coordenadas celestes
- 15 Referências
- 15 Sugestões de atividades práticas

17 Terra: Rotação e Forma

- 17 Rotação da Terra
- 22 Estrelas fixas
- 24 Sistema equatorial de coordenadas celestes
- 25 Forma da Terra
- 29 Referências
- 29 Sugestões de atividades práticas

31 Sol: Movimento Aparente

- 32 Movimento aparente do sol
- 41 Atividade Solar
- 44 Referências
- 44 Sugestões de atividades práticas
- 45 **O movimento aparente do Sol**
- 47 **Gnômon e os Pontos Cardeais**
- 49 **Relógio de Sol**
- 54 **Estações do Ano**
- 56 **Ato de Fé ou Conquista do Conhecimento?**

61 Lua e Planetas: Movimento Aparente

- 61 A Lua
- 63 Movimento aparente da Lua
- 71 Movimento aparente dos planetas
- 74 Predição do movimento dos astros no espaço
- 75 Referências
- 75 Sugestões de atividades práticas
- 76 **Eclipses e fases da Lua**
- 80 **O Sistema Solar em escala**
- 82 **O Sistema Solar numa representação teatral**
- 90 **Comparação entre os tamanhos dos planetas e do Sol**
- 98 **Comparação entre a órbita lunar e o diâmetro solar**
- 100 **Comparação entre os tamanhos da Terra e da Lua**

- 102 Primeira Lei de Kepler - Lei das órbitas
- 107 Segunda Lei de Kepler - A Lei das áreas
- 109 Terceira Lei de Kepler - Lei dos períodos
- 111 O achatamento dos Planetas

113 Fenômenos Observáveis a Olho Nu

- 113 Astrofísica
- 117 Fenômenos do Sistema Solar
- 128 Fenômenos externos ao Sistema Solar
- 143 Referências
- 145 Sugestões de atividades práticas
- 146 **Simplificando a luneta com lente de óculos**
- 153 **Anexo - Fotos ilustrativas da montagem da luneta com lente de óculos**

159 Origens

- 159 Origem e evolução do Universo
- 167 Origem do Sistema Solar
- 172 Origem da vida. Vida extraterrestre
- 178 Referências

179 Glossário



CÉU. ESFERA CELESTE

A origem do conhecimento é sensorial. Mas toda experiência sensível que visa ao conhecimento, pressupõe uma teoria.

O *céu* é o palco natural dos fenômenos astronômicos. Neste capítulo descreveremos o céu contemplado a olho nu de um ponto qualquer da superfície da Terra.

O observador no solo está debaixo da *atmosfera da Terra*, cujas influências na observação astronômica também serão discutidas aqui. Em seguida, procederemos a uma geometrização do céu, quando surge o conceito de *esfera celeste* com os vários *sistemas de referência* para a localização precisa dos astros.

1.1 Observação do céu a olho nu

Aproveitando o contexto, discutiremos agora as limitações de uma observação astronômica a olho nu. De um lado há a necessidade de uma quantidade mínima de luz chegando aos nossos olhos para que a retina se sensibilize e perceba a presença do astro. No céu noturno esse limite é quantificado por uma estrela de 6ª *magnitude* (caixa ao lado).

Para as dimensões da pupila de nossos olhos, é impossível formar em nossas retinas a

Brilho ou magnitude. Luminosidade

O brilho de um astro numa observação a olho nu refere-se à intensidade da sensação luminosa. Essa intensidade está diretamente relacionada com o fluxo de luz que chega aos nossos olhos. Para um mesmo astro, o brilho depende da distância do observador. No vácuo, o brilho decresce no inverso do quadrado da distância.

É importante distinguir brilho, de *luminosidade*. O primeiro, como dissemos, depende da distância do observador à fonte luminosa, portanto, envolve subjetividade. O último é uma propriedade *intrínseca* ou objetiva da fonte luminosa. A luminosidade de uma estrela é análoga à potência luminosa de uma lâmpada, p. ex., 60 Watts, 120 Watts etc.

A *magnitude* quantifica o brilho de um astro. Por uma convenção tradicional, ela é menor quando o brilho é maior. Uma estrela de magnitude 1 brilha mais que uma de magnitude 2. À variação de 1 magnitude corresponde uma variação de brilho pelo fator $\approx 2,5$.

imagem de qualquer estrela visível à noite. Portanto o que vemos é apenas uma concentração de luz que, por mais que ampliemos, jamais formará uma imagem da estrela. Se um astro for suficientemente brilhante, podemos indagar qual é o limite para que os nossos olhos possam formar uma imagem dele. Numa observação noturna, com a pupila dilatada por causa do escuro, nosso olho é capaz de discriminar somente objetos que subtendem mais que cerca de $0,5'$. Assim, dentre os planetas é possível formarmos, em princípio, uma imagem de Júpiter e, ocasionalmente, de Marte e de Vênus.

1.2 O céu

Vivemos na superfície da Terra. Por isso, é de algum ponto dessa superfície que fazemos nossas observações ordinárias dos astros. É dessas observações que trataremos aqui, não daquelas que um astronauta pode realizar fora da Terra.

Fora de recintos fechados podemos ver a paisagem circundante (*Figura 1.1*). Essa paisagem compreende a terra e o céu. Terra aqui não é a totalidade do Planeta, pois, estando na superfície da Terra, um observador só pode

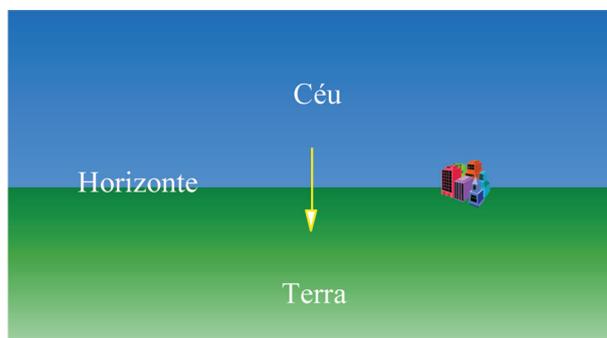


Figura 1.1. Representação da paisagem com o céu e a terra (chão). O horizonte separa o céu, da terra. Um fio-de-prumo indica a terra para baixo, e o céu para cima

ver uma pequena porção dessa superfície ao seu redor. Terra aqui é o que vulgarmente chamamos chão com tudo o que ele abriga. É aí que tem lugar a maior parte das atividades humanas. Na terra as pessoas nascem, vivem e morrem, trabalham e descansam, constroem e destroem.

Contrapondo-se à terra está o céu, fato este que um simples fio-de-prumo pode atestar empiricamente (*Figura 1.1*). Esta distinção empírica sugeriu ao influente filósofo grego Aristóteles (384-322 aC) a ainda arraigada dicotomia céu-terra como se fossem dois reinos incomunicáveis e de naturezas irredutíveis, com a impermanência das coisas terrestres contrastando com a aparente permanência das coisas do céu.

Na paisagem, o céu é separado da terra pela linha do horizonte, denominada simplesmente *horizonte sensível* do observador (*Figura 1.1*). É nessa linha que se diz poeticamente que a terra parece encontrar o céu.

1.3 Fenômenos celestes visíveis a olho nu

O céu não é vazio, mas é o cenário de uma grande variedade de fenômenos. Pelo fato de que, intermediando o solo e o espaço cósmico, existe a atmosfera da Terra, devemos distinguir no céu dois tipos de fenômenos: atmosféricos (meteorológicos) e cósmicos (astronômicos).

A atmosfera da Terra é uma camada gasosa cuja densidade decresce exponencialmente com a altura. Sua parte mais densa, que faz parte da nossa biosfera, tem apenas alguns quilômetros de espessura. Ela constitui, portanto, uma delgada pele do nosso Planeta. Apesar disso, ela influencia a nossa observação astronômica de diversas maneiras. Mas sobre isso falaremos mais adiante.

Dentre os fenômenos atmosféricos naturais podemos citar as aves que voam, as nuvens, a cerração, as chuvas, os raios, os trovões, os tornados, os arco-íris, os halos solares e lunares, as auroras polares e os meteoros.

Os arco-íris e os halos são fenômenos ópticos resultantes da interação da luz solar (ou lunar) com gotas de água e cristais de gelo em suspensão na atmosfera.

As *auroras polares*, cuja ocorrência é nula em nossas latitudes, consistem em fenômenos luminosos resultantes da penetração nas regiões mais altas da atmosfera da Terra, de partículas elétricas ejetadas pelo Sol (*Figura 1.2*). Luz é emitida pelos átomos e moléculas da nossa atmosfera depois de terem sido excitados (energizados) pela colisão com partículas solares. As auroras ocorrem preferencialmente nos pólos magnéticos da Terra, pois lá as linhas do campo magnético que atuam como dutos, estão orientadas mais verticalmente em relação à superfície da Terra. Os pólos magnéticos não coincidem exatamente com os



Figura 1.2. A aurora se parece com cortinas se agitando ao vento e brilhando intermitentemente (Chaisson and McMillan, Prentice Hall, 1998, 156)

pólos geográficos, mas estão relativamente próximos. As auroras boreais são as que ocorrem no hemisfério norte, e as austrais, no hemisfério sul. A ocorrência de auroras é modulada pela atividade solar que tem um ciclo de pouco mais de 11 anos.

Meteoro é sinônimo de estrela cadente (*Figura 1.3*). Falaremos mais sobre ele na aula sobre “Fenômenos Observáveis a Olho Nu”. Trata-se de um fenômeno que ocorre na atmosfera da Terra, mas cujo agente causador é um fragmento sólido de origem cósmica.

No céu ainda podemos observar fenômenos artificiais na atmosfera da Terra, tais como, aviões, balões, asas delta, planadores etc.

Os fenômenos que ocorrem além da atmosfera da Terra, portanto no espaço cósmico, são na grande maioria astronômicos. Não podemos omitir aqui os *satélites artificiais*, muitos deles visíveis da Terra a olho nu em horários apropriados. A predição da passagem desses satélites por localidades específicas da Terra pode ser obtida, por exemplo, em <http://www.heavens-above.com/>.

Os objetos astronômicos visíveis a olho nu no céu são: o Sol, a Lua, os *planetas* Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno, cerca de 2 mil estrelas visíveis à noite acima do horizonte (de um total de 6 mil em toda a esfera celeste), a Via Láctea, as Nuvens de Magalhães, a Nebulosa de Andrômeda, a Luz Zodiacal e a Nebulosa de Órion junto às Três Marias. Ocasionalmente podemos também ver a olho nu algum *cometa* e, mais raramente, alguma *supernova*.

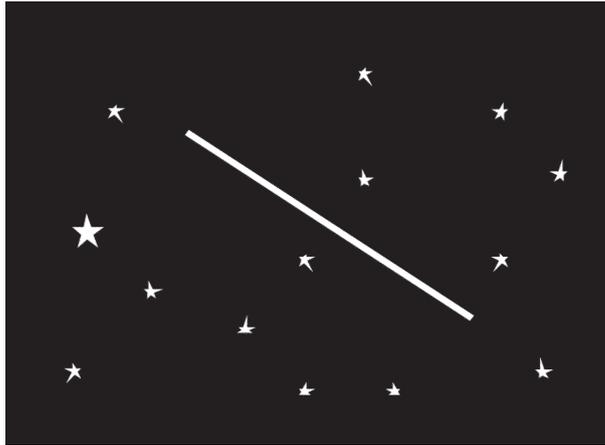


Figura 1.3. Desenho de um meteoro riscando momentaneamente o céu



Figura 1.4. Foto-composição da Via Láctea do Hemisfério Sul. John P. Gleason (<http://antwarp.gsfc.nasa.gov/apod/ap990224.html>)

A Via Láctea é uma faixa de brilho fraco e esbranquiçado que dá uma volta na esfera celeste (Figura 1.4). Consiste na nossa própria Galáxia vista por nós, de seu interior (Figura 1.5). A projeção de uma faixa se deve a que a Galáxia não é esférica, mas tem a forma de um disco que abriga os braços espirais. A faixa de brilho é a projeção na esfera celeste do disco contendo gás, poeira e uma miríade de estrelas que não discriminamos individualmente a olho nu.

Na seqüência dos astros visíveis a olho nu, são duas as Nuvens de Magalhães: a Grande e a Pequena. Ambas são *galáxias*, assim como Andrômeda. A Nebulosa de Órion é uma *nuvem interestelar* de gás e poeira no interior da nossa Galáxia, em que ocorre atualmente intensa formação de novas estrelas. Sobre *cometas* e *supernovas* falaremos em detalhe na aula sobre “Fenômenos Observáveis a Olho Nu”.

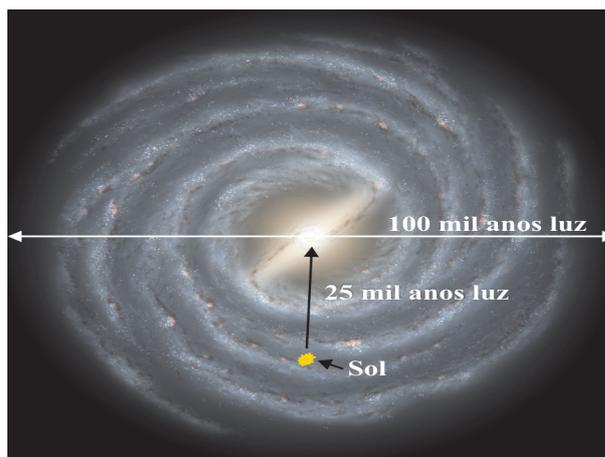


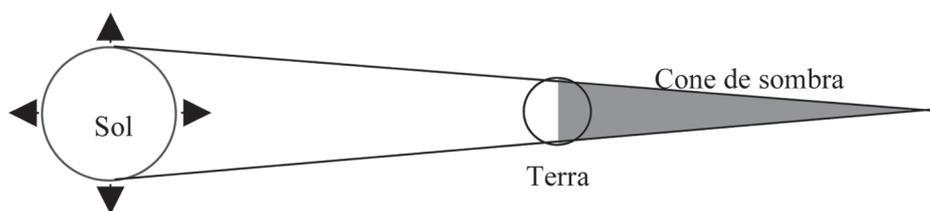
Figura 1.5. Representação artística da Via Láctea com a posição do Sol. (NASA/JPL/Caltech/R. Hurt)

1.4. Efeitos atmosféricos

A atmosfera da Terra é constituída de uma mistura de *moléculas* de nitrogênio, oxigênio, gás carbônico e água, e de átomos de argônio. Além disso ela tem minúsculos *grãos* de poeira em suspensão levantadas do solo por ventos, ou ejetadas por vulcões, ou produzidas pelo homem em queimadas, indústrias e motores de veículos a combustão.

O Sol irradia luz para todas as direções. Mas a Terra é um corpo aproximadamente esférico e opaco. No hemisfério da Terra que se acha voltado para o Sol, a luz solar incide diretamente. Esse é o *hemisfério diurno* ou iluminado. O outro hemisfério, não-iluminado pelo Sol, é chamado *hemisfério noturno* (Figura 1.6). A alternância entre noite e dia numa localidade se deve a que a Terra gira.

Figura 1.6 (fora de escala). A incidência dos raios solares ocorre só no hemisfério voltado para o Sol, ou diurno. O hemisfério oposto, ou noturno, se encontra no cone de sombra. Esse cone se forma porque a Terra é opaca e os raios solares se propagam em linha reta. Do interior desse cone não se pode observar o Sol



1.4.1 Céu diurno

O mais espetacular efeito astronômico da atmosfera é a *difusão* da luz solar pelos gases e poeira da atmosfera. Essa difusão pode ser ilustrada por meio de um feixe intenso de luz (por exemplo, de um projetor de diapositivos) numa sala escura. O feixe só se torna visível pela luz que os minúsculos grãos de poeira em suspensão espalham na direção dos nossos olhos.

Por causa da *difusão* da luz solar, o céu diurno se torna claro. Sem a atmosfera não haveria a difusão e, então, o céu permaneceria escuro como, p. ex., na superfície da Lua ou no espaço cósmico. As estrelas que na Terra são visíveis apenas de noite, continuariam sendo visíveis de dia juntamente com o Sol. Portanto o desaparecimento das estrelas de dia resulta do ofuscamento delas pelo brilho do céu diurno.

Esse ofuscamento deixa de existir excepcionalmente durante os breves instantes da totalidade do eclipse solar. Então, em pleno dia, podemos ver estrelas no céu. Nesse caso o obscurecimento do céu se deve a que a Lua impede a incidência dos raios solares, não sobre toda a Terra, mas sobre uma região de algumas centenas de quilômetros.

Um ofuscamento semelhante, porém bem mais fraco, é produzido também pela Lua Cheia à noite. Então as estrelas de brilho mais fraco desaparecem.

Os astrônomos se queixam da poluição luminosa que limita e, às vezes, inviabiliza a observação noturna do céu. O céu se torna claro, como acontece de dia, tendo como fonte luminosa não o Sol, mas as luzes das cidades. Estrelas de 6ª magnitude são as de brilho mais fraco que podemos perceber a olho nu, mas esse limite vale apenas para locais cujo céu noturno é escuro.

Numa cidade só podemos perceber estrelas mais brilhantes. Os astrônomos não reivindicam obviamente que as luzes sejam apagadas. Em geral, o fecho de luz das luminárias públicas não é dirigido só para os objetos de interesse, mas espalhado inutilmente para todas as direções, inclusive para o céu. A reivindicação é a de que essas luminárias tenham um desenho mais racional, até porque isso representaria também uma significativa economia de energia elétrica a longo prazo.

A luz do Sol tem componentes de várias cores. O céu diurno é azulado porque as moléculas e os menores grãos de poeira da atmosfera espalham mais eficientemente a componente azul, do que a componente vermelha.

1.4.2 Janelas espectrais

Outro efeito astronômico importante da atmosfera da Terra são as suas *janelas espectrais* através das quais a radiação dos astros pode chegar até o nível do solo. A radiação natural dos astros consiste em *ondas eletromagnéticas* que podem ter os mais variados comprimentos. Começando pelos raios γ , cujos *comprimentos de onda* são os mais curtos, vêm a seguir os raios X, os raios ultravioletas, a luz visível (violeta, azul, verde, amarelo, alaranjado e vermelho), a radiação infravermelha, as microondas e as ondas de rádio (*Figura 1.7*). A radiação se propaga livremente no vácuo mas, na atmosfera, pode interagir com os seus componentes sofrendo absorção ou difusão. Quando isso acontece, a composição espectral da radiação observada no solo já não é a original, pois foi alterada.

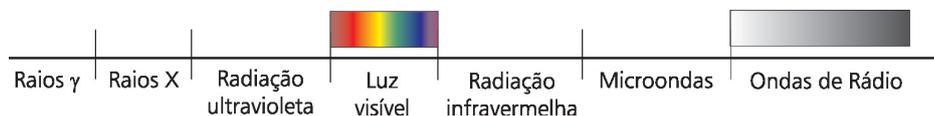


Figura 1.7 (fora de escala). Representação esquemática das ondas eletromagnéticas de diferentes comprimentos. O comprimento de onda cresce para a direita

As duas janelas atmosféricas que permitem a passagem da radiação cósmica se situam na faixa espectral da luz visível e das ondas de rádio (*Figura 1.7*). Esta última janela se fecha para comprimentos de onda ≥ 10 m (frequências ≤ 30 MHz) que são refletidas pela ionosfera, uma camada a cerca de 100 km de altitude constituída de cargas elétricas (elétrons e íons). A reflexão tanto impede a penetração das ondas que vêm do espaço, como também possibilita os longos trajetos das ondas curtas usadas nas comunicações terrestres, através de reflexões sucessivas entre a ionosfera e o solo.

Parte das microondas e da radiação infravermelha é absorvida pelos compostos moleculares da baixa atmosfera. Outras radiações são absorvidas já na alta atmosfera. Fora das janelas a observação só é possível em grandes elevações, ou a bordo de balões ou satélites.

Mesmo a janela da luz visível se fecha ocasionalmente quando chove ou o céu fica nublado. Também a presença de poeira e névoa seca, que se agrava com as queimadas em períodos de estiagem, causa a *extinção* (enfraquecimento)

da luz estelar. Essa extinção é mais intensa perto do horizonte. Dissemos antes que há cerca de 6 mil estrelas visíveis em toda a esfera celeste mas que, com o céu escuro, podemos observar estimativamente apenas 2 mil estrelas. Há primeiro uma redução pela metade porque só temos acesso a um hemisfério celeste. A perda de umas mil estrelas é por conta da dificuldade de observação perto do horizonte. Lá o trajeto do raio luminoso dentro da atmosfera da Terra é mais longo do que na vertical. Por isso a extinção da luz é mais severa. Por isso é preferível observar um mesmo astro perto da passagem meridiana do que perto do nascer ou ocaso. O Sol avermelhado perto do horizonte em dias de névoa seca se deve a grãos de poeira muito pequenos, do tamanho do comprimento de onda da luz visível ou menores. Esses grãos desviam para outras direções a luz de comprimentos de onda mais curtos (azul), de modo que o avermelhamento se deve à componente espectral remanescente da luz solar original.

1.4.3 Cintilação

Outro efeito importante da atmosfera é a *cintilação*. Consiste na variação intermitente do brilho e na agitação da imagem de uma estrela (*Figura 1.8*). Isso pode ser notado até mesmo a olho nu. Por causa desse efeito (*Figura 1.8* à esquerda) é que se estabeleceu a representação de estrelas como objetos pontudos, mas isso nada tem a ver com a forma real das estrelas que, de um modo geral, são esféricas. Numa fotografia astronômica tirada com tempo de exposição mais longo, a imagem sai borrada como se estivesse fora de foco (*Figura 1.8* à direita). Esse é um efeito nocivo, pois tira a nitidez das imagens e prejudica a precisão da posição dos astros. Essa é a razão que justifica projetos onerosos como o Telescópio Espacial Hubble. Mesmo as observações na luz visível se justificam no espaço por causa da melhoria da qualidade de imagem.

Figura 1.8. No lado esquerdo está representada a agitação da imagem de uma estrela devida à cintilação atmosférica. No lado direita, a imagem dessa mesma estrela fotografada com longo tempo de exposição



A causa da cintilação é a *turbulência* atmosférica. Mesmo à noite, células de ar de diferentes temperaturas, portanto com diferentes *índices de refração*, aquecidas durante o dia pelo Sol, se agitam e produzem esse efeito. A cintilação pode ser notada em luzes terrestres distantes, especialmente numa noite quente. Também na imagem através do ar aquecido nas proximidades do chão quente ou de uma chama. É uma pena que a luz estelar, depois de caminhar centenas de anos-luz, sofra esses efeitos bem no finalzinho de tão longa viagem.

1.4.4 Refração atmosférica

O último efeito da atmosfera terrestre de que trataremos aqui é a **refração atmosférica**. A refração é o desvio de um raio luminoso ao atravessar meios com índices de refração diferentes. Pelo fato de que o ar é mais denso nas camadas mais baixas, e mais rarefeito nas superiores, a refração causada nas diferentes camadas produz um encurvamento dos raios de luz provenientes dos astros. Isso faz com que a direção observada de um astro seja falseada. O observador tem a falsa impressão de que o astro está mais alto em relação ao horizonte (Figura 1.9). A discrepância é máxima no horizonte, decresce com a elevação tornando-se nula na vertical. Uma consequência desse efeito é a possibilidade de um observador enxergar um astro que ainda esteja abaixo do horizonte.

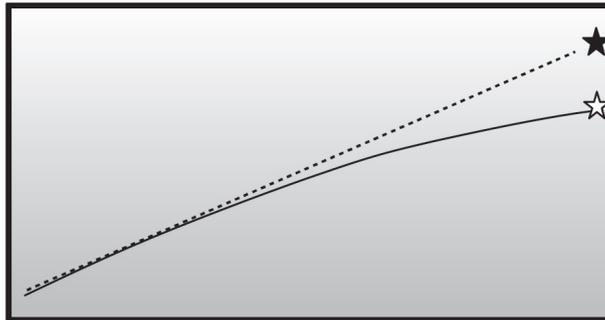


Figura 1.9. As camadas mais densas da atmosfera, nas quais o encurvamento dos raios de luz é mais pronunciado, ficam mais perto do solo. A estrela branca está na posição verdadeira. Mas o observador tem a impressão de que ela se encontra mais elevada, na posição da estrela preta. Para o observador a estrela parece estar na direção da tangente (linha tracejada) à trajetória da luz no local de observação

1.5 Esfera celeste

Para podermos descrever quantitativamente a posição dos astros no céu, a paisagem acima descrita será geometrizada. Em primeiro lugar, o observador deve se imaginar ocupando o centro de uma enorme esfera, a **esfera celeste**. Não é necessário definir o tamanho exato do raio dessa esfera, mas ele deve ser muito maior do que o próprio observador, o raio da Terra, a distância da Terra ao Sol etc.

A **esfera celeste** não tem nenhuma realidade física. É apenas uma construção mental. Quando observamos o céu estrelado, de fato, umas estrelas estão mais perto de nós, outras mais longe (Figura 1.10). Há, portanto, uma distribuição de astros no espaço tridimensional ao nosso redor.

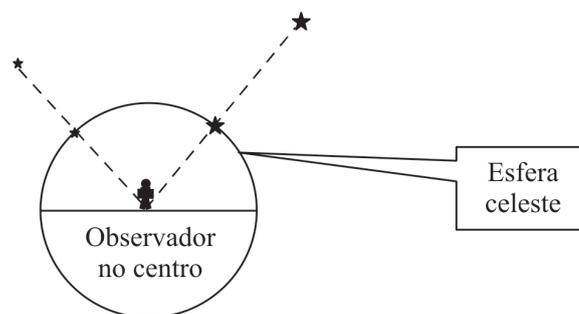


Figura 1.10 (muito fora de escala pois, ou o observador deveria ser bem menor, ou a esfera celeste bem maior). O fato de que os pés do observador estão no centro da esfera celeste, e não os seus olhos, é irrelevante, pois o altura de um ser humano é totalmente desprezível neste contexto. É mostrada a projeção sobre a esfera celeste, de duas estrelas que estão a diferentes distâncias

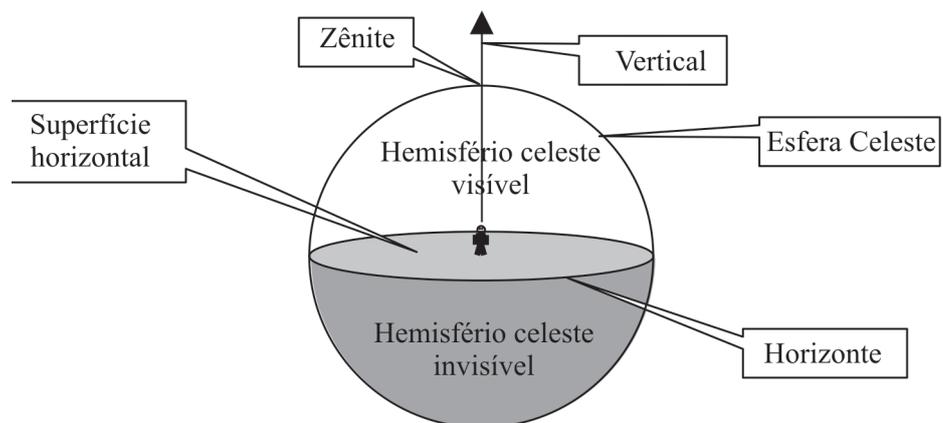
Nesse espaço a posição de um astro requer a definição de 3 coordenadas, uma das quais é a distância ao observador. Mas, quando apelamos para o uso da esfera celeste, ignoramos intencionalmente as diferentes distâncias dos astros. Fingimos que todos estão projetados numa espécie de cúpula, como a de um gigantesco planetário. Portanto, todas estariam supostamente à mesma distância do observador (Figura 1.10). Na prática, estamos reduzindo o espaço cósmico tridimensional ao espaço bidimensional da superfície da esfera celeste. No espaço bidimensional a posição do astro

requer a definição de apenas 2 coordenadas. São elas que, como veremos, definem a direção do astro no céu.

1.5.1 Plano horizontal do observador

O chão do observador também precisa ser geometrizado. De um modo geral o chão na superfície da Terra é irregular, com inclinações, morros e vales. O chão geometrizado é a *superfície horizontal do observador* (Figura 1.11). Na prática ele pode ser determinado com um nível de pedreiro. Essa superfície é perpendicular à vertical do observador que pode ser determinada com um fio-de-prumo.

Figura 1.11 (fora de escala). O horizonte astronômico é a interseção da esfera celeste com a superfície horizontal do observador. O zênite e os hemisférios celestes que ficam acima e abaixo do plano horizontal também são mostrados



1.5.2 Horizonte astronômico

O *horizonte astronômico ou geométrico* é a interseção da superfície horizontal do observador com a esfera celeste (Figura 1.11). No continente, quase sempre o horizonte astronômico difere do horizonte sensível. Este tem irregularidades devido a montanhas e vales. No mar a superfície é mais regular devido à fluidez que acomoda a superfície da água no plano horizontal. O *horizonte sensível* visto da superfície da água (nível zero) coincide com o horizonte astronômico. Já o horizonte sensível que vemos quanto mais acima do nível da água, estará tanto mais rebaixado em relação ao horizonte astronômico, por causa da esfericidade da Terra.

O horizonte astronômico divide a esfera celeste em dois hemisférios: o visível (para o observador) que fica acima do horizonte, e o invisível que fica abaixo do horizonte (Figura 1.11).

Concluimos esta parte definindo o *zênite* que corresponde à direção vertical do observador na esfera celeste (Figura 1.11).

1.6 Sistema horizontal de coordenadas celestes

Com base na geometrização que acabamos de expor, podemos definir o *sistema horizontal de coordenadas celestes*. Este é um dos sistemas que possibilita quantificar precisamente a posição dos astros na esfera celeste.

Se um astro se move no céu, seu movimento pode ser também descrito quantitativamente pelo tabelamento da posição em sucessivos instantes de tempo. Mas, neste sistema de coordenadas celestes, a descrição da posição e movimento dos astros é referida ao observador, ou melhor, à posição do observador na superfície da Terra.

Cada sistema de coordenadas celestes baseia-se num plano fundamental. Neste caso o plano fundamental é a superfície horizontal do observador.

No plano horizontal o observador deverá definir os *pontos cardeais* (Figura 1.12): N (norte), S (sul), L (leste) e O (oeste). Planos verticais podem ser construídos, todos eles se interceptando na vertical do observador. A intersecção dos planos verticais com a esfera celeste define os *círculos verticais*. Um deles é especial: aquele que passa pelos pontos cardeais N e S. Esse é o círculo meridiano ou simplesmente *meridiano do observador* (Figura 1.12).

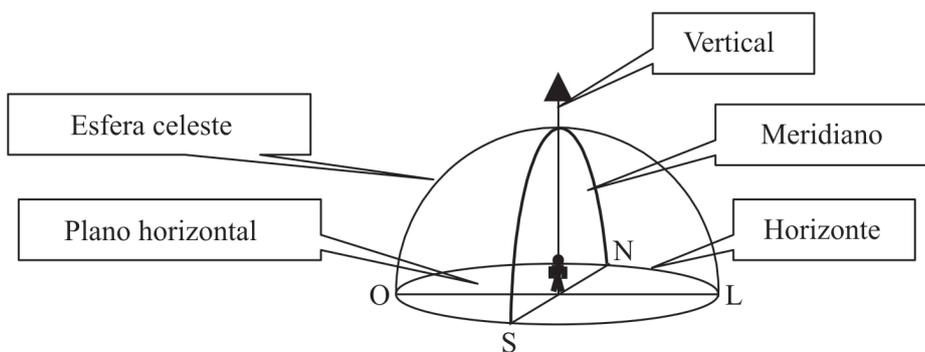


Figura 1.12. São mostrados os pontos cardeais no horizonte do observador. Uma infinidade de planos pode passar pela vertical (seta para cima). A intersecção desses planos com a esfera celeste define uma infinidade de círculos verticais, mas a Figura só mostra o círculo vertical que passa pelos pontos cardeais N e S. Esse círculo vertical (em traço mais grosso) é o meridiano do observador

Vimos que a posição de um astro na esfera celeste fica perfeitamente definida se especificarmos apenas a sua direção. A sua distância pode ser ignorada. Portanto precisamos determinar apenas duas coordenadas. No sistema horizontal elas são a *altura* e o *azimute* (Figura 1.13). A altura é o ângulo medido, a partir do horizonte até o astro, ao longo de um círculo vertical que passa pelo astro. A *altura* de qualquer objeto no horizonte é 0° e no zênite, 90° .

O *azimute* é o ângulo medido ao longo do horizonte a partir do S no sentido S-O-N-L. Os azimutes dos pontos cardeais S, O, N e L são, respectivamente, 0° , 90° , 180° e 270° . Alguns autores adotam o N para origem dos azimutes mantendo o mesmo sentido de rotação para a contagem.

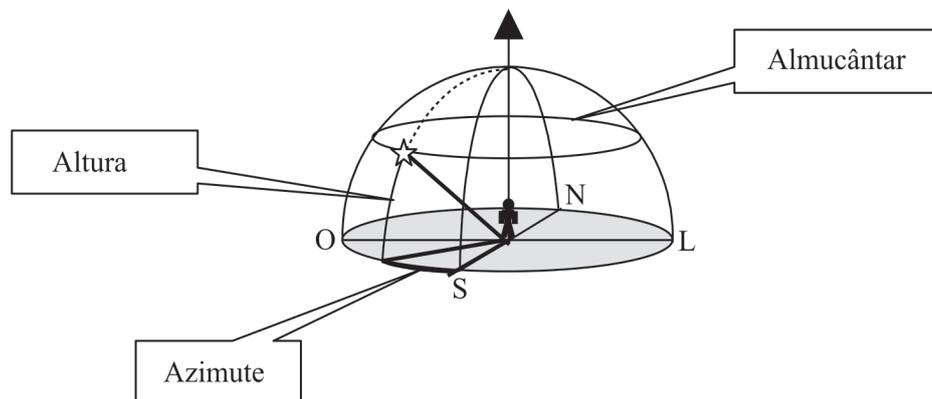


Figura 1.13. Altura e azimute de uma estrela, e o almucântar na altura dessa mesma estrela

Almucântares são círculos da esfera celeste paralelos ao plano horizontal. Num almucântar a altura é constante. A *Figura 1.13* mostra o almucântar referente à altura da estrela exemplificada.

1.6.1 Medição de ângulos

No contexto da presente discussão, o astrônomo não precisa fazer mais que medir ângulos na esfera celeste. Um método grosseiro, mas que dispensa instrumentos, consiste em estender o braço e considerar que o dedo mínimo subtende 1° , o polegar 2° e a largura do punho cerrado, 10° (*Figura 1.14*).

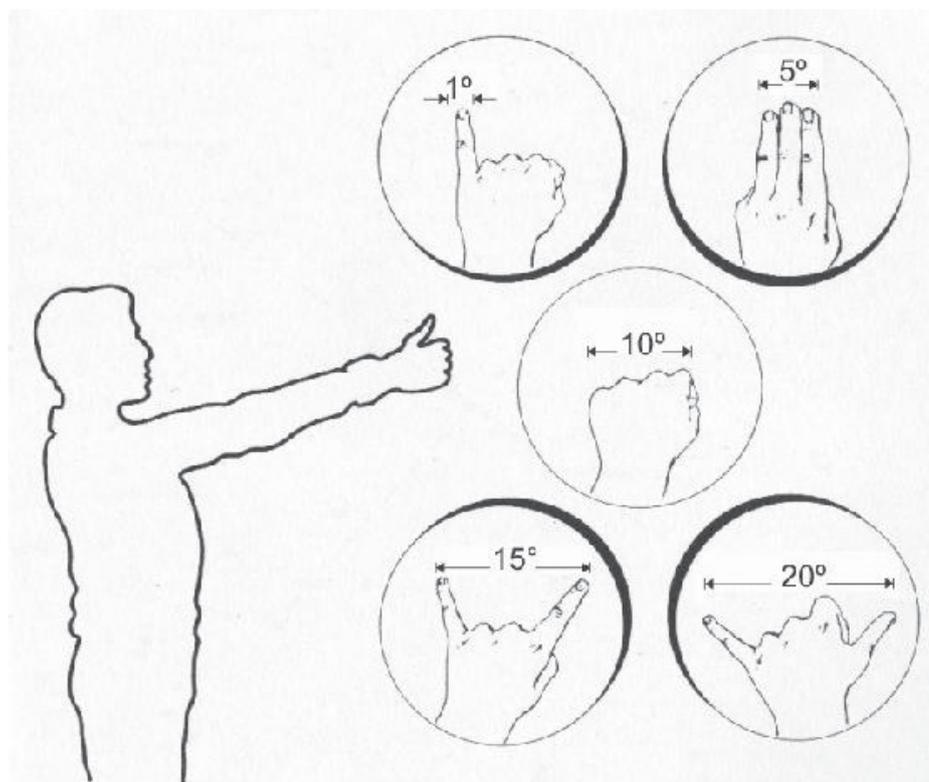


Figura 1.14. Método simples para medição de ângulos no céu

Um instrumento simples é a *balestilha* que consiste em duas hastes transversais: uma longa na direção da linha-de-visada e graduada; outra mais curta, chamada travessa, que desliza ao longo da primeira (*Figura 1.15*).

Com o olho numa extremidade da haste longa e deslizando-se a travessa, o tamanho aparente do objeto é ajustado de modo a subtender a travessa. A medida angular do objeto, α , em graus, será dada por

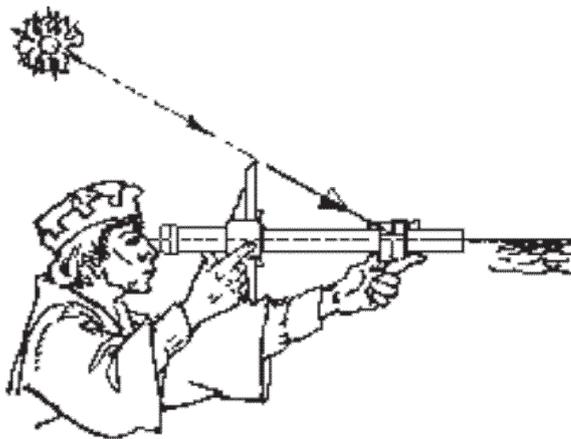


Figura 1.15. O observador está usando a balestilha para determinar a altura angular do Sol. À direita está representada a superfície do mar. A travessa está na vertical

onde x é a distância

$$\alpha [^\circ] = \frac{360^\circ}{2\pi} \cdot \frac{y}{x} \approx 57,3 \cdot \frac{y}{x} [^\circ]$$

[mm] medida sobre a haste longa, desde a travessa até onde incide a sua sombra, e y é a largura [mm] da travessa.

A **alidade** consiste em duas hastes pivotadas numa das extremidades. Uma delas, com nível de bolha, fica sempre no plano horizontal. A outra é apontada para o astro através de uma mira (par de orifícios ou pínulas). Assim se mede a altura dos astros em relação ao horizonte.

Instrumentos mais sofisticados são os sextantes e quadrantes. Um instrumento contemporâneo baseado no sistema horizontal de coordenadas e com o qual podemos medir a altura e o azimute dos astros é o **teodolito**.

Referências

Bozko, Roberto e Leister, Nelson Vani: "Astronomia Clássica", Cap. 3, *Astronomia, Uma Visão Geral do Universo*, 35, Edusp, 2000

Matsuura, Oscar T.: *Atlas do Universo*, Editora Scipione, São Paulo, Edição com Errata, 1996

Matsuura, Oscar T.: "Radiação eletromagnética", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.7, 1998 www.observatorio.diadema.com.br e www.revistaastronomy.com.br.

Matsuura, Oscar T.: "Sol: Luminosidade e Temperatura", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.11, 1998 www.observatorio.diadema.com.br e www.revistaastronomy.com.br.

Matsuura, Oscar T.: "Céu: cenário de fundo", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.14, 1999, www.observatorio.diadema.com.br e www.revistaastronomy.com.br.

Matsuura, Oscar T. e Picazzio, Enos: "O Sistema Solar", Cap. 6, *Astronomia, Uma Visão Geral do Universo*, 103, Edusp, 2000

Sugestões de atividades práticas:

- Identificar o céu, a terra e o horizonte sensível numa paisagem
- Observar a olho nu os fenômenos celestes mencionados no texto
- Examinar o funcionamento óptico de uma luneta ou telescópio simples
- Fazer uma observação comparativa de planetas e de estrelas ao telescópio e a olho nu
- Observar a cintilação atmosférica
- Observar a extinção da luz estelar perto do horizonte
- Observar a luz solar espalhada pelo céu diurno
- Observar os diferentes brilhos e as diferentes cores estelares
- Com ajuda de uma lâmpada incandescente comum distinguir os conceitos de luminosidade e brilho
- Provocar a turbulência convectiva do ar com um ferro elétrico e observá-la com ajuda de um retroprojeto
- Visualizar o cone de sombra da Terra através da observação de satélite artificial
- Determinar com ajuda de um nível de pedreiro e de um fio-de-prumo o plano horizontal e o zênite e visualizar o horizonte astronômico, o meridiano e almucântares
- Determinar a altura e o azimute de astros com um teodolito
- Medir distâncias angulares



TERRA: ROTAÇÃO E FORMA

Na Astronomia, extrapolar as escalas domésticas, realizar “a passagem ao limite quando $x \rightarrow \infty$ ”

Nesta aula trataremos da influência da *rotação* e da *forma da Terra* nas observações astronômicas. Discutiremos o movimento diurno e a orientação na Terra definida pelo *eixo de rotação da Terra*. Aproveitaremos a oportunidade para introduzir a noção de *estrelas fixas*. Em seguida apresentaremos um novo sistema de referência que decorre naturalmente da rotação da Terra: o *sistema equatorial de coordenadas celestes*. Por fim, descreveremos a influência da forma da Terra delimitando o hemisfério celeste visível e alterando a inclinação dos círculos do movimento diurno em diferentes latitudes do globo; e a influência do tamanho da Terra possibilitando a medição da paralaxe diurna.

2.1 Rotação da Terra

Os dados brutos ou diretos da observação astronômica nos revelam o movimento *aparente* dos astros. É assim que os astrônomos designam o movimento dos astros tal como ele aparece aos nossos sentidos. Não há no adjetivo *aparente* nenhuma conotação pejorativa como se tratasse de algo falso. A observação do movimento aparente é cientificamente válida e objetiva. Mas, nem sempre o movimento aparente é o movimento do astro em relação a nós, na suposição ingênua e intuitiva de que somos observadores em repouso, senão o reflexo do nosso próprio movimento. É o caso da rotação diurna da esfera celeste, reflexo da rotação da Terra; ou do movimento anual do Sol na eclíptica, reflexo da translação da Terra ao redor do Sol. Para o movimento ser descrito nos devidos termos, o movimento aparente precisa ser interpretado à luz da *relatividade do movimento*.

2.1.1 Relatividade do movimento

Até a publicação de *De Revolutionibus Orbium Coelestium* de Nicolau Copérnico (1473-1543), pensava-se que a Terra estivesse imóvel no espaço e que, portanto, os fenômenos celestes eram observados por nós de um sistema de referência em repouso absoluto. Pensava-se que a nossa posição no Universo era privilegiada e que todos os astros moviam-se ao nosso redor. Na verdade, a Terra não só não está parada, mas tem um movimento

complexo. Sendo inelutavelmente arrastados pelo seu movimento, ao observarmos os astros, acabamos enxergando neles um movimento que, em boa parte, é o nosso próprio movimento!

Qualquer movimento que observemos é sempre relativo ao nosso próprio movimento. Esse é o enunciado da **relatividade do movimento**. Este fato pode ser atestado empiricamente quando andamos de carro numa estrada. Se andamos a 100 km/h atrás de outro veículo que corre nessa mesma velocidade, estamos parados em relação a ele. Se um outro veículo vem no sentido contrário nessa mesma velocidade, estaremos a 200 km/h em relação a ele. Porém, esta simples regra da soma vetorial das velocidades, só vale quando as velocidades envolvidas são muito menores do que a **velocidade da luz** (ver a caixa ao lado). Apesar das velocidades vertiginosas dos astros, eles ainda se movem muito mais devagar do que a luz. Assim, o movimento dos astros que observamos no céu é um caso da mecânica clássica, pois, não envolve velocidades relativísticas. A seguir destacaremos uma importante componente do movimento da Terra: a **rotação**.

Teoria Especial da Relatividade

Embora seja contra-intuitivo, é um fato estabelecido experimentalmente que a **velocidade luz** independe do movimento relativo entre a fonte de luz e o observador. Esse fato é a base da Teoria Especial da Relatividade proposta em 1905 por Albert Einstein (1879-1955). Essa Teoria trata da influência do movimento do sistema de referência do observador na medição do espaço e do tempo, trazendo novos resultados no caso de objetos que se movem a velocidades relativísticas, isto é, próximas à da luz.

2.1.2 Movimento diurno da esfera celeste

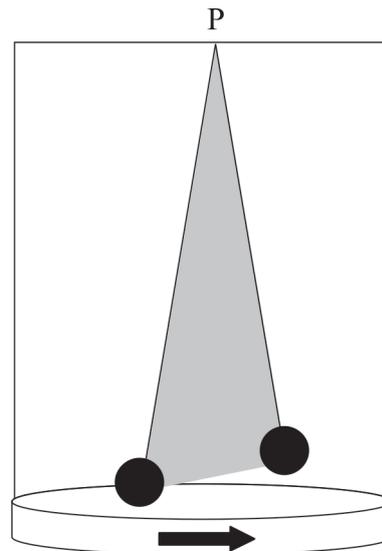
Em nossas latitudes vemos astros que nascem no **horizonte leste** (ver caixa ao lado), descrevem um círculo sobre as nossas cabeças, e se põem no **horizonte oeste**. Isso acontece com o Sol, a

A expressão *horizonte leste* ou *oeste* não é equivalente a *ponto cardinal leste* ou *oeste*. Enquanto o *ponto cardinal* se refere a uma direção precisa, *horizonte* denota um setor de certa amplitude, no qual os astros nascem nas proximidades do leste, ou se põem nas proximidades do oeste.

Lua, os planetas e as estrelas. Temos a impressão de que somos estacionários e que os astros descrevem o **movimento diurno** em torno de nós.

Na verdade, o movimento diurno é um **movimento aparente** que resulta da **rotação da Terra**. Por causa da relatividade do movimento, a mera observação do movimento diurno do céu não nos fornece nenhuma informação para sabermos se é a Terra que gira de oeste para leste, ou se é a esfera celeste que gira no sentido oposto. São observações independentes que atestam que a Terra gira de oeste para leste. Um experimento clássico é o do pêndulo de Foucault (1819-68). Para entendê-lo precisamos conceber a

Figura 2.1. A orientação do plano de oscilação do Pêndulo de Foucault, representada em cinza, deve ser invariante. Essa invariância é assegurada pela homogeneidade e simetria do pêndulo, do fio de suspensão etc. Assim, a oscilação não é afetada por forças externas. Como a base circular debaixo do pêndulo é o chão que gira com a Terra, a orientação do plano de oscilação girará em relação ao chão



direção do plano de oscilação do pêndulo como invariante, ou seja, ela não é influenciada pela rotação da Terra apesar de o pêndulo estar apoiado na superfície da Terra (*Figura 2.1*). Mais modernamente pudemos atestar que a Terra gira através de observações diretas feitas no espaço.

A rotação não é um privilégio do nosso Planeta. É uma propriedade praticamente universal de todos os astros. No Sistema Solar o sentido de rotação da Terra, de oeste para leste, é também o sentido de rotação do Sol e do movimento orbital dos planetas. Excetuando alguns casos, é também o sentido usual da rotação dos planetas e do movimento orbital dos seus satélites.

O movimento aparente no céu de oeste para leste é *direto* e o movimento no sentido contrário é *retrógrado*.

2.1.3 Eixo da Terra

Pelo fato de que a Terra gira, segue-se que ela possui um *eixo de rotação* com orientação definida no espaço. Essa orientação tem importância fundamental para a nossa orientação na Terra e para a Astronomia. Portanto os pontos cardeais são uma decorrência da rotação da Terra e não é correto ensinar os pontos cardeais sem falar antes da rotação da Terra.

Os *pólos* da Terra são os pontos em que o eixo de rotação fura a superfície da Terra. O *equador* é o plano perpendicular ao eixo de rotação que passa pelo centro da Terra. Com base no equador e nos pólos são definidos os *paralelos* e *meridianos* terrestres na superfície da Terra, os primeiros orientados na direção leste-oeste e os últimos na direção norte-sul.

O prolongamento do eixo da Terra fura a esfera celeste nos *pólos celestes* norte e sul (*Figura 2.2*). A interseção do plano equatorial da Terra com a esfera celeste define o *equador celeste* (*Figura 2.2*). O equador celeste divide a esfera celeste nos *hemisférios celestes* norte e sul, correspondentes aos hemisférios da Terra com os mesmos nomes.

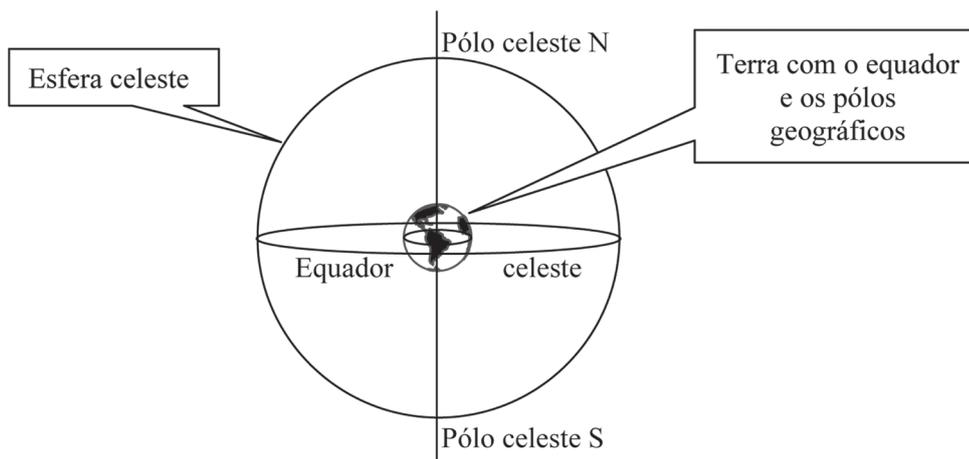


Figura 2.2 (fora de escala). Os pólos e o equador celestes são as projeções na esfera celeste dos pólos e do equador da Terra

Numa ilustração astronômica como esta é de suma importância a indicação de que ela está fora de escala. Não teria sentido essa advertência se fosse possível fazer uma ilustração em escala. Mas isso é simplesmente impossível. Ou a Terra teria que ser reduzida a um objeto invisível, ou a esfera teria que ser ampliada a dimensões muito maiores do que a página do texto.

2.1.4 Período de rotação da Terra

O *período de rotação* da Terra não é 24h como encontramos muitas vezes, mas 23h 56m 04,09053s. A duração de 24h é do *dia solar médio*, um valor médio dos *dias solares verdadeiros* ao longo do ano (trópico). Os dias solares verdadeiros são desiguais. Para cronometrá-los teríamos que acelerar nossos relógios quando o dia fosse mais curto, e vice-versa. Para evitar essa inconveniência prática, criou-se o dia solar médio que é fictício e tem duração constante de 24h. O verdadeiro período de rotação da Terra não pode ser medido em relação ao Sol que, por sua proximidade, não permanece fixo na esfera celeste. Deve ser medido em relação às estrelas distantes. O tempo para que uma mesma estrela distante cruze duas vezes sucessivas o meridiano do observador (aula anterior), é o *dia sideral*. Este, sim, corresponde ao período de rotação da Terra no espaço. Chama-se *passagem meridiana* o fenômeno em que um astro em seu movimento diurno cruza o meridiano do observador.

2.1.5 Pontos cardeais

A determinação local dos *pontos cardeais* é uma atividade prática fundamental na Astronomia. Já vimos a importância desses pontos no sistema horizontal de coordenadas celestes. O termo *pontos* não é apropriado, pois, trata-se de direções. Todavia ele é mantido pela força da tradição. Há métodos precisos para a determinação dos pontos cardeais fazendo uso do teodolito. Com ele o meridiano pode ser determinado na *culminação* de algum astro. Na culminação o astro em seu movimento diurno atinge a altura máxima em relação ao horizonte.

Mas há métodos aproximados de execução rápida e que dispensam equipamentos sofisticados. Um deles é diurno e faz uso do *gnômon* (ou haste vertical)

que deve ter cerca de 1 m de altura. Tendo o gnômon sido espetado verticalmente no chão horizontal em A (*Figura 2.3*), a sombra da sua extremidade projetada pelo Sol é marcada no chão antes do meio-dia em B (*Figura 2.3*). Com um cordão pode-se traçar um círculo centrado em A, cujo raio seja igual a AB (círculo pontilhado na *Figura 2.3*). Deve-se esperar o momento após o meio-dia em que a sombra da ponta do gnômon volte a incidir sobre o círculo (C na *Figura 2.2*). O mesmo círculo desenhado antes deve ser redesenhado duas vezes, uma vez com centro em B e outra com centro em C. Os círculos se interceptarão em A (já conhecido) e D. O segmento de reta AD estará na direção norte-sul. A perpendicular a AD estará na direção leste-oeste. Na data do equinócio o Sol se encontra no equador celeste, e a sombra da ponta do gnômon já descreve uma reta na direção leste-oeste.

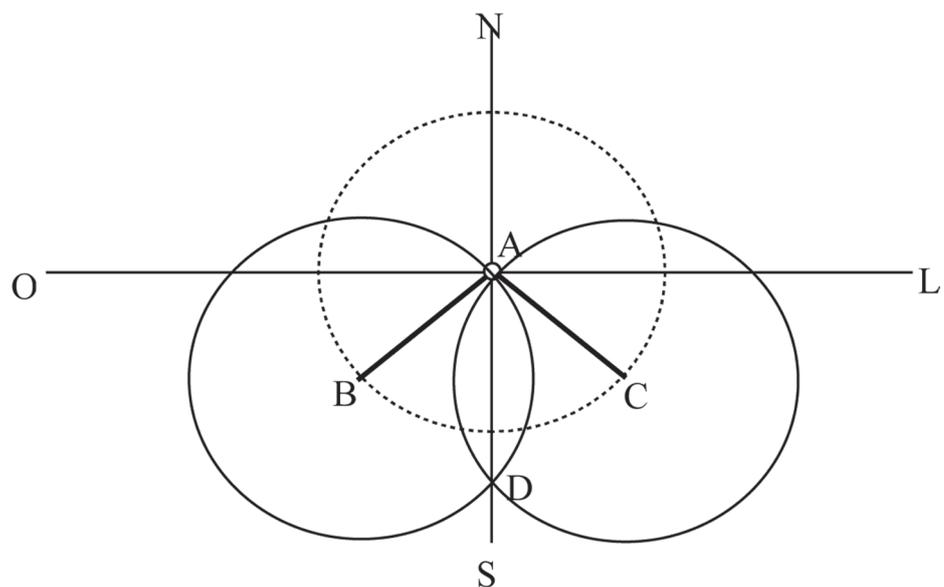


Figura 2.3. Método prático para a determinação dos pontos cardeais

Nos demais dias a trajetória da sombra tem um encurvamento, mas sempre a sombra tem o menor comprimento na direção norte-sul.

Outro procedimento rápido consiste em utilizar uma *bússola*, porém deve-se conhecer a *declinação magnética*, ou seja, o ângulo de desvio entre o ponto cardeal norte¹ e o *norte magnético*. A declinação magnética varia de lugar para lugar e com o tempo. No Brasil, o ponto cardeal norte está entre 10° e 20° para leste do norte magnético (*Figura 2.4*). O valor preciso da declinação magnética pode ser obtido junto ao Departamento de Geofísica do Observatório Nacional do Rio de Janeiro. Em São Paulo o norte verdadeiro está cerca de 20° a leste do norte magnético.

¹O ponto cardeal norte é também designado norte verdadeiro ou norte geográfico.

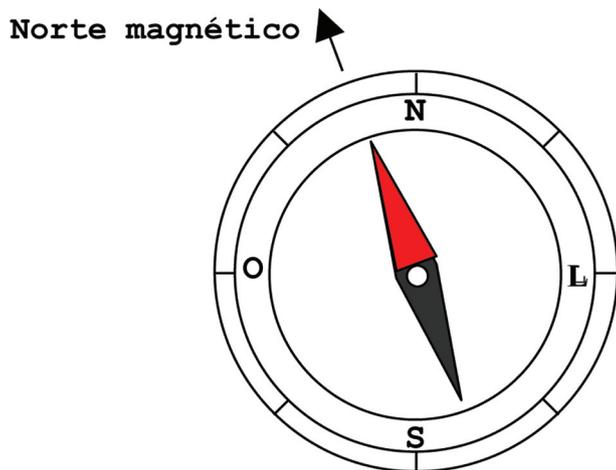


Figura 2.4. No Brasil o norte geográfico está desviado entre 10° e 20° para leste do norte magnético indicado pela bússola.

2.2 Estrelas fixas

Este é um momento oportuno para introduzirmos a noção de *estrelas fixas*, pois para bem entendê-la devemos abstrair o movimento diurno que acabamos de discutir. Como vimos, o movimento diurno consiste na aparente rotação global da esfera celeste. Esse movimento global ou coletivo não afeta em nada a posição relativa entre os astros. Conseqüentemente, também não deforma as constelações. Portanto, quando falamos de estrelas fixas, estamos nos referindo à permanência do desenho das constelações e à fixidez da posição relativa das estrelas na esfera celeste. Mesmo que essa esfera gire em seu movimento diurno, as estrelas fixas são denominadas fixas porque aparentam estar permanentemente coladas à esfera celeste. Tudo se passa como se a esfera celeste tivesse colado a ela um cenário permanente de estrelas fixas.

As estrelas fixas tinham impressionado tanto os antigos que as colocavam na última e mais externa das esferas cristalinas chamada Firmamento. Diferentemente da esfera celeste que é um artifício mental, as esferas cristalinas eram tidas como reais.

Mas nem todos os astros são estrelas fixas. Fixos aparentam ser os astros que se encontram muito longe de nós, tais como as estrelas visíveis à noite. Em relação ao pano-de-fundo das estrelas fixas movem-se os astros que se encontram mais perto² de nós. Esses astros são os membros do Sistema Solar: Sol, Lua, os planetas e os cometas. Por não serem fixos na esfera celeste, esses astros não se prestam para a determinação do dia sideral. O deslocamento em relação às estrelas fixas pode ser devido ao *movimento próprio* e à *paralaxe* sobre os quais falarei mais adiante.

²Perto no contexto astronômico.

Constelações são ajuntamentos de estrelas na esfera celeste a que foram arbitrariamente atribuídas formas de objetos, monstros ou heróis mitológicos. Raramente podemos achar que essas formas sejam apropriadas. O Cruzeiro do Sul, o Escorpião e o Triângulo Austral são algumas das poucas exceções. Em geral a configuração resulta de mero efeito de perspectiva. Se estivéssemos em outro local do Universo, as figuras seriam diferentes. Mas

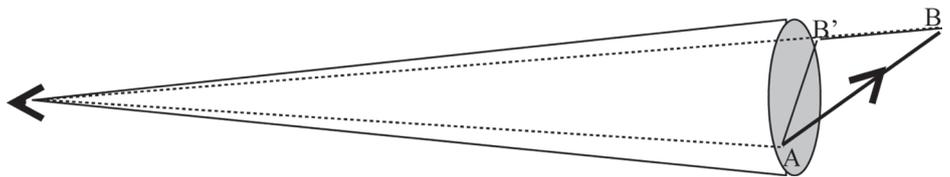
há ajuntamentos de estrelas que consistem em aglomerados reais de estrelas com parentesco físico. É o caso dos *aglomerados estelares* das Plêiades e Híades, ambos pertencentes à constelação do Touro. Em cada aglomerado estelar as estrelas nasceram junto de uma mesma nuvem interestelar, e se encontram à mesma distância de nós.

Em 1930 a União Astronômica Internacional oficializou a divisão da esfera celeste em 88 constelações.

2.2.1 Movimento próprio

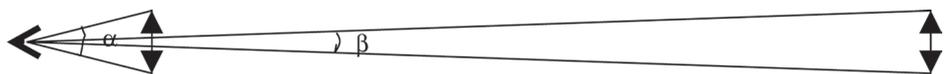
O movimento de um astro no espaço se decompõe em (Figura 2.5): (i) *movimento próprio* que se projeta na esfera celeste como um deslocamento angular; e (ii) *movimento radial*, isto é, ao longo da linha-de-visada, que não produz projeção na esfera celeste. O movimento radial pode ser medido através do *efeito Doppler* (ver seção 5.1.4 adiante) em linhas espectrais ou, no caso de objetos do Sistema Solar, por meio de sinais de radar ou da variação do tamanho angular.

Figura 2.5. Mostra-se um cone que abrange uma pequena porção da esfera celeste (em cinza). Um astro se move no espaço de A para B. A projeção desse movimento na esfera celeste é o movimento próprio AB'. A componente radial desse movimento é B'B



As estrelas distantes realizam no espaço movimentos não muito diferentes daqueles realizados pelo Sol. Mas, para um mesmo deslocamento linear, perpendicular à linha de visada, correspondente um deslocamento angular inversamente proporcional à distância (Figura 2.6).

Figura 2.6. As duas setas duplas representam o mesmo deslocamento linear a distâncias diferentes do observador. O ângulo subtendido é inversamente proporcional à distância e, por isso, $\beta < \alpha$. Quando a distância se torna muito grande ($\rightarrow \infty$), o ângulo se torna muito pequeno, desprezível ($= 0$)



A distância das estrelas vistas à noite é sempre muito, muito maior que a distância do Sol e de outros objetos do Sistema Solar. Por isso o deslocamento angular delas, ou movimento próprio, tende a se tornar imperceptível.

Uma forma dramática de visualizar o movimento próprio de astros do Sistema Solar é notar que, sendo eles o objeto de interesse, aparecem fixos na parte central das fotografias astronômicas. No entanto as estrelas de fundo aparecem em rastros luminosos, tanto mais longos quanto mais longo for o tempo de exposição (Figura 2.7).

2.2.2 Paralaxe

Além do deslocamento na esfera celeste causado pelo movimento do astro no espaço, devemos considerar o seu deslocamento aparente devido ao movimento do observador (ou da Terra). Este é o efeito da *paralaxe*. Podemos visualizar a paralaxe colocando um lápis em pé à nossa frente com um braço estendido. Ao olharmos o lápis alternadamente com o olho

direito, depois com o esquerdo, veremos o lápis se projetando em direções diferentes sobre o cenário de fundo. A mudança de direção do objeto devido à mudança da posição do observador (olho direito e olho esquerdo), é a paralaxe.



Figura 2.7. Atrás do cometa Giacobini-Zinner fotografado em 1959, traços deixados pelas estrelas de fundo (Chaisson and McMillan, Astronomy, Prentice Hall, 1998, 112)

A paralaxe de estrelas (Figura 2.8) pode ser medida entre dois pontos de uma linha-de-base separados de 2 UA (UA é a distância média da Terra ao Sol que vale aproximadamente 150 milhões km). Uma observação é feita numa data e a outra, seis meses depois, quando a Terra se encontra na posição diametralmente oposta à primeira. Somente para estrelas muito próximas a paralaxe pode ser medida desta forma. Em 1838 a primeira paralaxe estelar de cerca de 0,3" foi medida pelo alemão Friedrich Wilhelm Bessel com a estrela 61 do Cisne.

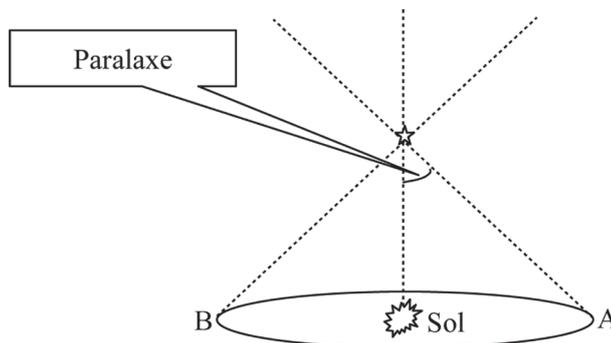


Figura 2.8 (fora de escala). A Terra orbita ao redor do Sol. A observação da mesma estrela é feita quando a Terra está em A e, depois, em B. A mudança de direção sob a qual a estrela é vista é a paralaxe. A paralaxe é o ângulo indicado na Figura, cuja linha-de-base tem 1 UA. Quando esse ângulo vale 1", a distância da estrela é 1 parsec \approx 3,26 AL.

Estrelas fixas são portanto aquelas que se encontram tão longe que não apresentam nem movimento próprio, nem paralaxe. As estrelas mais próximas podem apresentar paralaxe e movimento próprio.

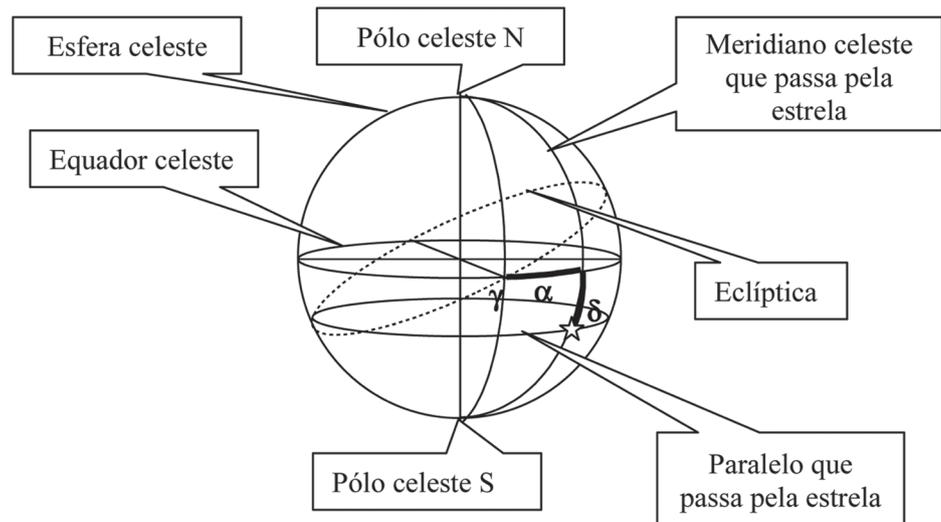
2.3 Sistema equatorial de coordenadas celestes

Assim como as localidades na superfície da Terra são definidas pelas coordenadas geográficas: *latitude* e *longitude*, assim também na esfera celeste a posição dos astros pode ser definida pelas *coordenadas celestes equatoriais*. Conforme o nome indica, este sistema tem como plano fundamental o equador da Terra. Os meridianos da Terra têm como contrapartida celeste os *meridianos celestes* e os paralelos da Terra, os *paralelos celestes*. As coordenadas de um astro neste sistema são: *declinação* e *ângulo horário*. A declinação é medida ao longo do meridiano celeste que passa pelo astro, sempre a partir do equador celeste. As declinações do hemisfério celeste

norte são positivas e as do hemisfério sul, negativas. O ângulo horário é medido de 0h a 24h ao longo do equador celeste, a partir do meridiano do observador até o meridiano celeste do astro caminhando para oeste.

O ângulo horário é uma medida referida ao local do observador. Mas ela pode assumir caráter universal e as coordenadas celestes equatoriais passarão a ser *declinação* e *ascensão reta* (Figura 2.9). A contagem da ascensão reta é feita para o leste, a partir do ponto vernal ou γ , aquele ponto do equador celeste que o Sol cruza vindo do hemisfério celeste sul quando ocorre o equinócio de outono no nosso hemisfério. Sobre esse ponto teremos oportunidade de falar mais adiante.

Figura 2.9. Sistema equatorial de coordenadas celestes. O plano fundamental é o equador. Com base nele define-se os pólos celestes. A posição de uma estrela é especificada pela declinação δ e ascensão reta α . A trajetória do Sol na esfera celeste é a eclíptica aqui representada apenas para definir a localização do ponto vernal γ



De acordo com as explicações acima, é fácil concluir que a *distância zenital* de um astro na passagem meridiana é

$$Z_0 = \delta - \varphi$$

sendo φ a latitude geográfica local. Distância zenital positiva significa que o astro está ao norte do zênite, e vice-versa.

Conhecendo o ângulo horário, H , de um astro e a sua ascensão reta, α , saberemos a hora sideral local S :

$$S = H + \alpha$$

Vemos assim que a hora sideral local é o ângulo horário do ponto vernal ($\alpha=0h$) ou a ascensão reta do astro que está cruzando o meridiano local ($H=0h$).

2.4 Forma da Terra

A Terra não é perfeitamente esférica, mas é sensivelmente esférica. A principal deformação consiste no achatamento dos pólos e no aparecimento de um bojo equatorial. Essa deformação é causada pela rotação. Além disso, há uma distribuição não simétrica de massa que faz com que a Terra tenha a forma que lembra uma pera.

2.4.1 Plano horizontal tangente à superfície da Terra

Em relação à Terra considerada como um Planeta sensivelmente esférico, a superfície horizontal do observador é um plano tangente à Terra no local do observador. Se a Terra fosse perfeitamente esférica, o prolongamento das verticais de observadores postados em diferentes pontos da Terra sempre convergiriam no centro da Terra (*Figura 2.10*). Mas isso não ocorre porque, como já dissemos, a Terra não é perfeitamente esférica. O prolongamento das verticais de alguns pontos da Terra (principalmente de latitudes intermediárias) não cruza o centro da Terra (*Figura 2.10*). Na prática, porém, cada observador deve determinar o seu plano horizontal com o nível de bolha e a sua vertical com o fio-de-prumo. A latitude assim determinada astronômicamente fornece a **latitude geográfica** que é usada nos mapas e atlas.

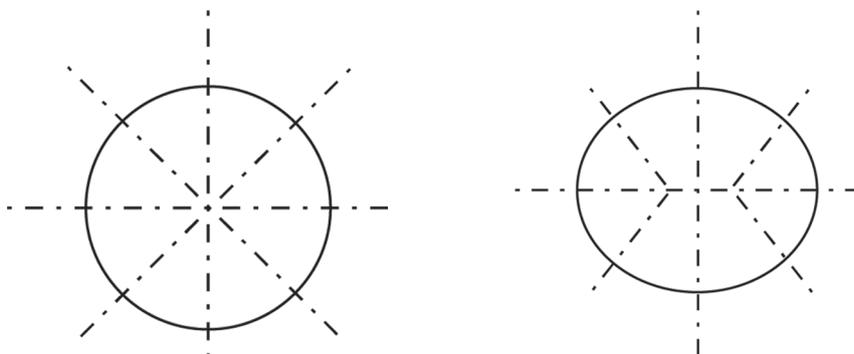


Figura 2.10. À esquerda, uma Terra idealmente esférica. Nela os prolongamentos das verticais se interceptam no centro. À direita a Terra achatada. Os prolongamentos das verticais de latitudes intermediárias já não passam pelo centro

É fácil perceber que a orientação do plano horizontal depende de lugar para lugar. Uma vez que esse plano delimita o hemisfério celeste visível, conclui-se que esse hemisfério é diferente de um lugar para outro (*Figura 2.11*). Por exemplo, o hemisfério visível por um observador no pólo norte é complementar ao hemisfério visível por um observador no pólo oposto. Um observador no equador tem o privilégio de poder ver os dois pólos celestes ao mesmo tempo. O hemisfério celeste visto no equador na longitude λ será complementar ao visto no mesmo instante também no equador, na longitude $\lambda + 180^\circ$. Esta é uma das conseqüências da forma da Terra. Os navegadores do século XV já sabiam que as diferentes constelações do hemisfério sul eram uma conseqüência da esfericidade da Terra.

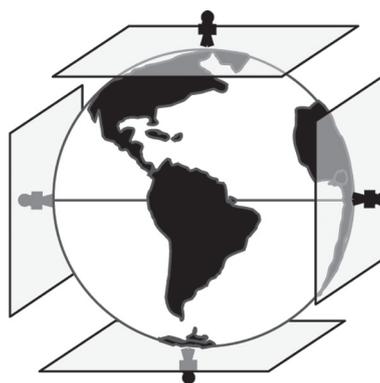


Figura 2.11 (fora de escala). São mostrados os planos horizontais de 4 observadores, 2 nos pólos e 2 no equador em longitudes diametralmente opostas

2.4.2 Paralaxe diurna

O fato de a Terra girar e ter um raio equatorial de cerca de 6380 km, também possibilita a medição da paralaxe. Com efeito, num intervalo de tempo de 12 horas, um observador que permanece na mesma localidade é transportado, pela rotação da Terra, de uma extremidade a outra de uma linha de base cujo

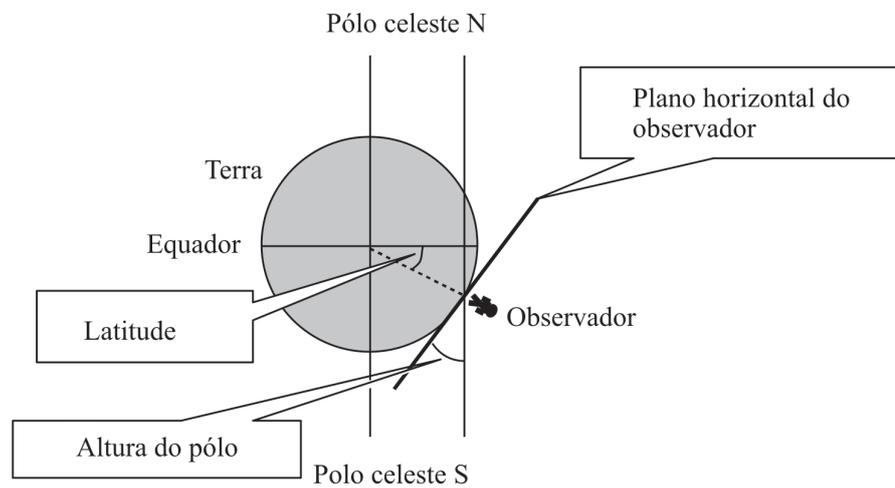
comprimento é comparável ao raio da Terra. Essa paralaxe é chamada *paralaxe diurna*. Ela foi útil somente para os objetos mais próximos do Sistema Solar. Para astros mais distantes ela pode ser ignorada. Para uma linha-de-base igual ao raio da Terra a paralaxe da Lua é 57' e a do Sol, 8,79".

2.4.3 Localização do pólo celeste

Em qualquer lugar que seja feita uma observação astronômica, é importante localizar o pólo celeste. Afinal é em torno dele que a esfera celeste realiza o movimento diurno. Somente estando no equador da Terra é que podemos ter acesso simultâneo aos dois pólos celestes. Fora dele, o pólo visível acima do horizonte é o correspondente ao hemisfério geográfico do observador.

Por considerações geométricas elementares podemos concluir que o pólo celeste tem as seguintes coordenadas horizontais: o azimute é o ponto cardinal norte ou sul, dependendo do hemisfério do observador. A altura é igual ao valor absoluto da latitude geográfica (Figura 2.12).

Figura 2.12. Um observador se encontra numa latitude sul, como a de São Paulo, SP. O pólo celeste que fica acima do horizonte é o sul. Sua altura é igual ao valor absoluto da latitude já que, como a Figura acima nos mostra, esses dois ângulos têm os lados perpendiculares entre si. O pólo celeste está representado por uma paralela ao eixo da Terra. De fato, duas paralelas apontam para a mesma direção na esfera celeste e a distância que as separa é desprezível em relação ao raio da esfera celeste



A Figura 2.13 ilustra a situação acima descrita no local do observador. O eixo que aponta para o pólo celeste é chamado *eixo polar*.

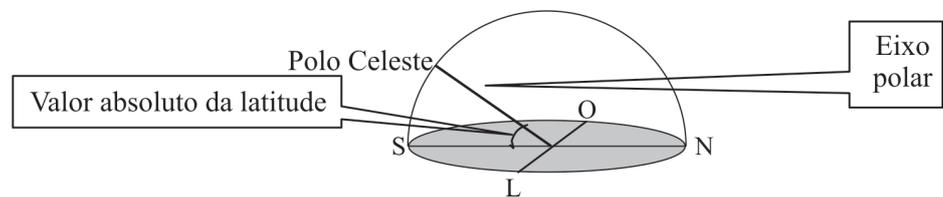


Figura 2.13. É mostrada a direção do pólo celeste sul

A haste mais longa da constelação do Cruzeiro do Sul está orientada aproximadamente na direção norte-sul. Uma vez que essa constelação descreve um círculo ao redor desse pólo, a extremidade sul dessa haste aponta sempre para o pólo celeste sul. Se numa noite traçarmos o prolongamento dessa haste em várias observações, esses prolongamentos se interceptarão num ponto no céu que estará próximo do pólo celeste sul. Esse ponto pode ser encontrado também prolongando-se a haste mais longa do Cruzeiro para o sul cerca de 5 vezes.

2.4.4 Movimento diurno em diferentes latitudes

No movimento diurno os astros descrevem círculos na esfera celeste em torno do eixo da Terra. Portanto os planos desses círculos são paralelos ao equador, ou perpendiculares ao eixo dos pólos. O movimento diurno difere de um local para outro em função das diferentes inclinações do eixo polar (*Figura 2.14*). Por exemplo, no equador da Terra os círculos são verticais, isto é, não tombam nem para o norte, nem para o sul. Já nas latitudes intermediárias do nosso hemisfério, esses círculos ficam tombados para o norte. Nos pólos, eles são horizontais.

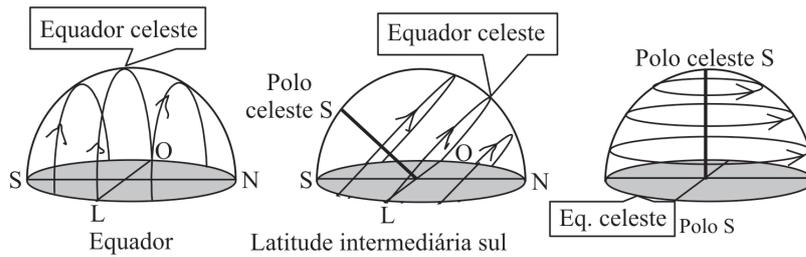


Figura 2.14. O movimento diurno da esfera celeste em diferentes latitudes. Esse movimento consiste em círculos concêntricos ao eixo de rotação da Terra (linha grossa). As setas indicam o sentido do movimento. Nos pólos não se definem os pontos cardeais. Ao redor do pólo celeste sul os astros descrevem círculos no sentido horário. Ao redor do pólo celeste norte eles descrevem círculos no sentido anti-horário.

Com ajuda da *Figura 2.14* podemos perceber também que, no equador, podemos observar estrelas com quaisquer valores de declinação, desde o pólo celeste norte (90°) até o pólo celeste sul (-90°). Lá todas as estrelas nascem e se põem no horizonte, à exceção de algum astro que esteja exatamente num pólo celeste.

No pólo sul, só podemos observar estrelas do respectivo hemisfério celeste, ou seja, com declinação entre 0° (equador celeste) e -90° (pólo celeste sul). Lá nenhum astro nasce ou se põe no horizonte. Todos são circumpolares, ou seja, dão volta ao redor do pólo celeste sem nunca se esconderem abaixo do horizonte.

Numa latitude intermediária do hemisfério sul não podemos observar estrelas que estejam na esfera celeste ao norte da declinação igual ao complemento do valor absoluto da latitude (*Figura 2.15*). P. ex., se a latitude é -23° , não podemos enxergar estrelas com declinação $\delta > (90-23)^\circ = 67^\circ$. Essa privação tem uma compensação. Pois, se olharmos para a *Figura 2.15*, podemos perceber que há uma calota da esfera celeste (em preto) ao redor do pólo celeste, cujas estrelas são circumpolares. Para a mesma latitude de -23° , a declinação das estrelas dessa calota é $-90^\circ \leq \delta \leq -(90-23)^\circ = -67^\circ$.

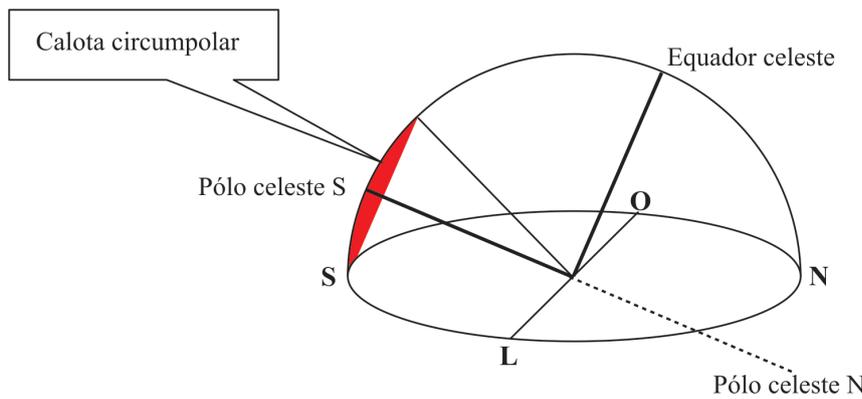


Figura 2.15. Calota circumpolar ao redor do pólo celeste para um observador numa latitude intermediária sul

Referências:

Bozko, Roberto e Leister, Nelson Vani: "Astronomia Clássica", Cap. 3, *Astronomia, Uma Visão Geral do Universo*, 35, Edusp, 2000

Matsuura, Oscar T.: *Atlas do Universo*, Editora Scipione, São Paulo, Edição com Errata, 1996

Matsuura, Oscar T.: "Céu: cenário de fundo", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.14, 1999 www.observatorio.diadema.com.br e www.revistaastronomy.com.br.

Matsuura, Oscar T.: "Movimento diurno dos astros", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.15, 1000 www.observatorio.diadema.com.br e www.revistaastronomy.com.br.

Sugestões de atividades práticas:

- Realizar um experimento simples que evidencie a relatividade do movimento
- Observar e comparar o movimento diurno do Sol, da Lua e de estrelas fixas
- Medir mentalmente (Gedanken) o ângulo subtendido pelo movimento próprio e paralaxe de um objeto distante
- Visitar um Pêndulo de Foucault
- Medir o dia sideral
- Determinar os pontos cardeais com um gnômon e com uma bússola
- Medir a paralaxe na paisagem terrestre
- Manusear um telescópio com montagem equatorial
- Comparar as coordenadas celestes equatoriais com as coordenadas geográficas com a ajuda de um globo terrestre e de um globo celeste
- Ver uma Esfera Armilar
- Localizar o pólo celeste
- Fotografar estrelas circumpolares



SOL: MOVIMENTO APARENTE

Aparente é subjetivo, i.é, dependente do observador, mas não falso

O Sol ocupa lugar de destaque dentre todos os astros observáveis. Para início de conversa, ele é o mais brilhante de todos, e a ele devemos a claridade diurna, o aquecimento e a dinamização da vida na Terra.

Apesar de ser visível de dia, e somente de dia, o Sol é uma **estrela**. Ele é a estrela do Sistema Solar. Isto significa que o Sol irradia luz própria, pois tem dentro uma usina geradora de energia. Essa usina realiza reações de **fusão nuclear**: quatro núcleos de hidrogênio formam um de hélio. Como o produto da fusão tem massa menor que os ingredientes, conquanto essa diferença seja ínfima, há um desaparecimento de massa ou matéria. Essa massa desaparecida é convertida em energia segundo a famosa equação de Einstein $E = mc^2$ onde c é a velocidade da luz.

O Sol concentra 99,866% de toda a massa do Sistema Solar. Por isso ele mantém orbitando ao seu redor os planetas, seus satélites, asteróides e cometas, através da **atração gravitacional**.

Considerando que a luz se propaga no vácuo a uma velocidade constante $c \approx 300$ mil km/s, podemos quantificar distâncias astronômicas pelo tempo gasto pela luz para percorrê-las. Assim se define o ano-luz (AL), distância percorrida pela luz durante 1 **ano trópico** (ver adiante). $1 \text{ AL} = 63.280 \text{ UA} \approx 9,5$ trilhões km (**UA: Unidade Astronômica**, é a distância média da Terra ao Sol, cerca de 150 milhões km). A luz do Sol demora 8 minutos para chegar à Terra e 05h 27m para chegar ao planeta mais afastado, Plutão. Por outro lado, a estrela mais próxima (Proxima do Centauro, uma companheira de α do Centauro) está a 4,3 AL. Adotando a distância de Plutão ao Sol para caracterizar o tamanho do Sistema Solar, a grande discrepância temporal entre 05h 27m e 4,3 anos nos mostra quão paroquial é o Sistema Solar na Galáxia, e quão isolado estamos do resto do Universo. Por isso podemos dizer com propriedade que o Sistema Solar é o nosso lar, e o Sol é a nossa estrela.

Nesta aula falaremos dos **movimentos diurno e anual do Sol**, cujos ciclos nos levam naturalmente às várias definições de dia e ano, ao tema dos calendários e a um novo movimento da Terra além da **rotação** e **translação**: a

precessão. Sendo o Sol uma estrela, falaremos de suas propriedades globais, origem e evolução numa outra aula, mas falaremos aqui da atividade solar que rege as **relações solares-terrestres.**

Por ser muito importante sobretudo para educadores e divulgadores, fazemos aqui uma breve, porém, necessária advertência sobre os **perigos** potenciais da observação inadequada do Sol. Por causa de seu brilho muito intenso, o Sol nunca deve ser encarado diretamente, ainda que por uma fração de segundo. Os riscos são de lesão irreversível nos olhos e até mesmo cegueira. Os movimentos do Sol podem ser observados indiretamente através da sombra do gnômon, ou de sua imagem projetada num recinto escuro por meio de um orifício ou de um pequeno espelho plano. Para a observação do disco solar há filtros recomendáveis, como o de "mylar" duplamente aluminizado (importado) ou de óculos de soldador No.14. Negativos fotográficos, principalmente os coloridos, radiografias, vidros esfumados, insulfilm, óculos escuros etc não são recomendados. O disco solar pode ser observado de forma segura para os olhos se for projetado num anteparo. Mas o brilho solar é tão intenso que cuidado redobrado é necessário para não danificar também os instrumentos ópticos.

3.1 Movimento aparente do Sol

O Sol é uma estrela, mas não uma estrela fixa, pois está muito perto da Terra. Portanto ele se desloca em relação às estrelas fixas de fundo. Para compreendermos esse movimento podemos considerar o Sol estacionário e a Terra orbitando ao seu redor. O movimento aparente do Sol resulta do movimento orbital da Terra (*Figura 3.1*).

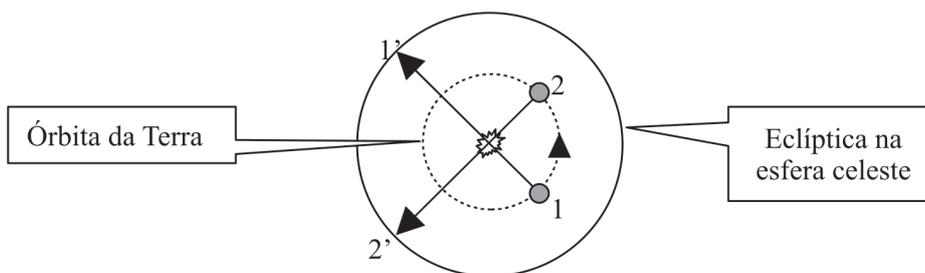
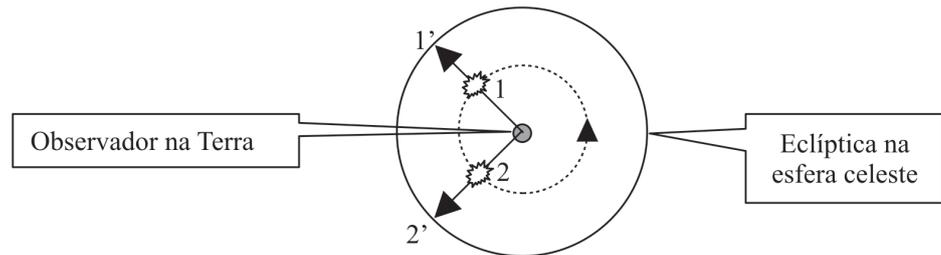


Figura 3.1 (fora de escala). A órbita da Terra ao redor do Sol é a curva tracejada. O plano dessa órbita (plano do papel) é chamado plano da eclíptica. Quando a Terra se encontra no ponto 1, o observador vê o Sol projetado na esfera celeste em 1'. Quando a Terra se encontra no ponto 2, o observador vê o Sol projetado em 2', e assim por diante. Quando a Terra completa um giro em sua órbita, o movimento aparente do Sol também completará um giro na esfera celeste.

A trajetória do Sol na esfera celeste também é chamada **eclíptica**. O termo eclíptica, de origem grega, tem a mesma raiz de eclipse. Na próxima aula veremos que os eclipses do Sol e da Lua só ocorrem quando, além da Terra e do Sol, a Lua também se encontra na eclíptica ou perto dela.

Podemos converter a representação heliocêntrica da *Figura 3.1* numa representação centrada no observador (*Figura 3.2*).

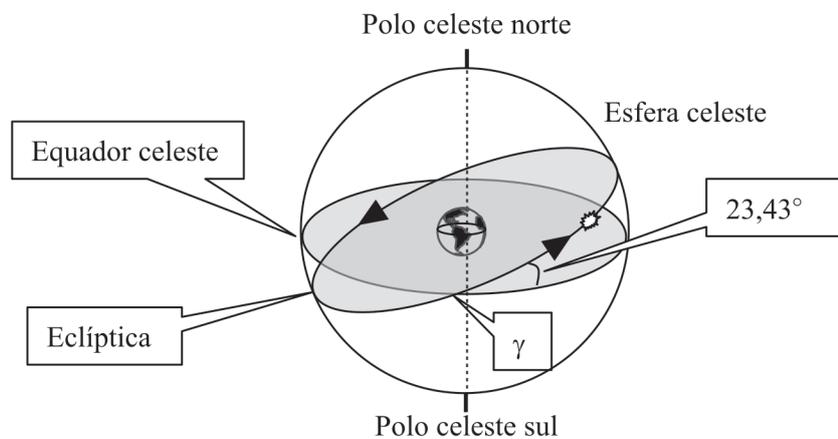
Figura 3.2. O observador no centro da esfera celeste vê o movimento aparente do Sol projetado na esfera celeste



3.1.1 Trajetória do Sol na esfera celeste: Eclíptica

Vejamos como se orienta a eclíptica na esfera celeste, no sistema equatorial de coordenadas (Figura 3.3). O observador continua no centro da esfera celeste. Ali desenhamos o globo terrestre apenas para ajudar a visualização do equador.

Figura 3.3. O plano da órbita da Terra não coincide com o plano do equador, mas eles formam entre si um ângulo de $23,43^\circ$ chamado obliquidade da eclíptica. Portanto, o eixo da Terra não coincide com a perpendicular à eclíptica, mas desvia-se dela $23,43^\circ$. Medidas aproximadas da obliquidade da eclíptica podem ser obtidas com um gnômon. Os globos terrestres didáticos têm o eixo oblíquo, devendo ser subentendido que o plano da mesa representa o plano da eclíptica. As setas na Figura indicam o sentido do movimento aparente do Sol



A obliquidade da eclíptica pode variar até $\pm 1,3^\circ$ numa escala de tempo que vai de centenas a milhares de anos. Há indicações de que a Lua exerce uma estabilização na orientação do eixo da Terra. Não fosse ela, a variação poderia chegar a $\pm 25^\circ$, o que já comprometeria a sobrevivência da vida na Terra dos organismos mais complexos.

O movimento aparente anual do Sol ao longo da eclíptica está diretamente relacionado com a sucessão das estações do ano. Vemos na Figura 3.3 que metade da eclíptica fica no hemisfério celeste norte (lado direito) e metade no hemisfério sul (lado esquerdo). Há dois pontos em que a eclíptica intercepta o equador celeste. Eles são diametralmente opostos. A passagem do Sol por esses pontos é o **equinócio**. No ponto voltado para o leitor, o Sol passa do hemisfério celeste sul para o norte, e é o **ponto vernal** γ do qual falamos na aula anterior. Esse ponto foi adotado para o início da contagem da ascensão reta. A passagem do Sol pelo ponto γ é o equinócio de outono no nosso hemisfério (equinócio da primavera no hemisfério norte). A passagem do Sol pelo ponto diametralmente oposto é o equinócio da primavera no nosso hemisfério (equinócio de outono no hemisfério norte). Notar, portanto, a inversão das estações do ano em relação aos hemisférios norte e sul da Terra.

Na eclíptica representada na *Figura 3.3* podemos notar outros dois pontos diametralmente opostos nos quais o Sol atinge a máxima declinação para o norte (lado direito) e para o sul (lado esquerdo). A passagem do Sol por esses pontos é o *solstício*. A linha que une esses dois pontos é perpendicular à reta que une os dois pontos dos equinócios. O termo solstício vem do latim e significa Sol estacionário, ou seja, o Sol pára de continuar caminhando para o norte, ou para o sul, a fim de inverter o sentido do movimento. A passagem do Sol pela sua máxima declinação norte ($\delta = +23,43^\circ$) é o solstício de inverno no nosso hemisfério (de verão no hemisfério norte). A passagem pela máxima declinação sul ($\delta = -23,43^\circ$) é o solstício de verão no nosso hemisfério (de inverno no hemisfério norte).

A passagem do Sol pelos pontos de solstício e de equinócio define as *estações do ano*. As estações do ano na seqüência cronológica são: primavera, verão, outono e inverno. Há uma inversão das estações em relação aos hemisférios norte e sul. Para a seqüência acima no nosso hemisfério corresponde a seqüência outono, inverno, primavera e verão no hemisfério norte. Daqui em diante, a menos que avisemos o contrário, estaremos nos referindo às estações do nosso hemisfério.

A primavera começa no equinócio da primavera e termina no solstício de verão. O verão começa no solstício de verão e termina no equinócio de outono. O outono começa no equinócio de outono e termina no solstício de inverno. O inverno começa no solstício de inverno e termina no equinócio da primavera.

3.1.2 Movimento diurno do Sol. Dia solar

Já vimos que o dia sideral, o verdadeiro período de rotação da Terra, é medido em relação às estrelas fixas. O dia solar é medido em relação ao Sol. É fácil concluir que o dia solar não tem a mesma duração do dia sideral, pois o Sol não permanece fixo na esfera celeste, mas se desloca ao longo da eclíptica. A *Figura 3.4* ilustra isso.

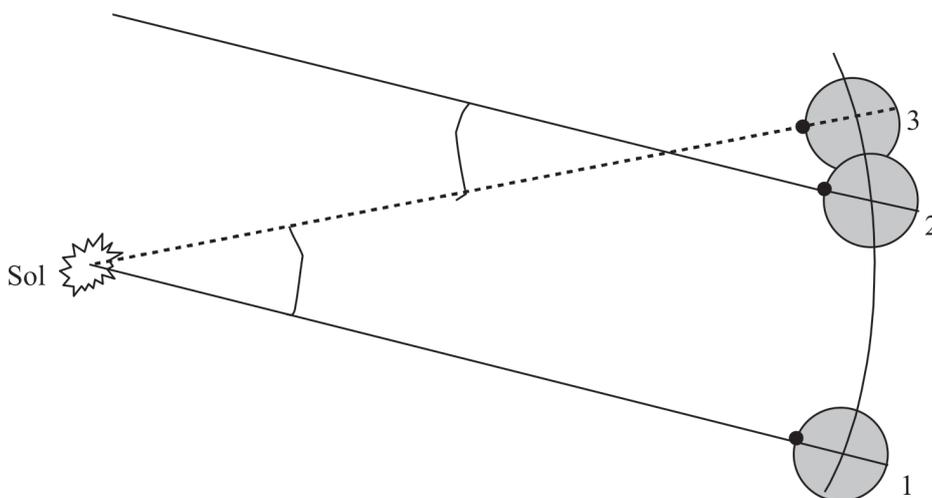


Figura 3.4 (fora de escala). O plano do papel representa o plano orbital da Terra ou a eclíptica. A reta que une o Sol à Terra na posição 1 indica a passagem meridiana do Sol para um observador na Terra indicado com uma bolinha preta. Passado 1 dia sideral, a Terra estará em 2 quando ocorrerá a passagem meridiana daquele ponto da esfera celeste em que o Sol se encontrava no dia anterior. Mas o Sol não estará mais lá. Para ocorrer a passagem meridiana do Sol, a Terra precisará girar e caminhar um pouco mais. Ao se deslocar de 2 para 3, a Terra girará de um ângulo adicional³ (indicado na Figura) para que ocorra a passagem meridiana do Sol. Por isso o dia solar é mais longo que o dia sideral, mas as coisas se invertem se, por exemplo, a Terra girasse no sentido oposto

³Considerando o número de dias do ano, vemos que esse ângulo adicional, igual ao arco da órbita descrito pela Terra em um dia, mede aproximadamente 1° .

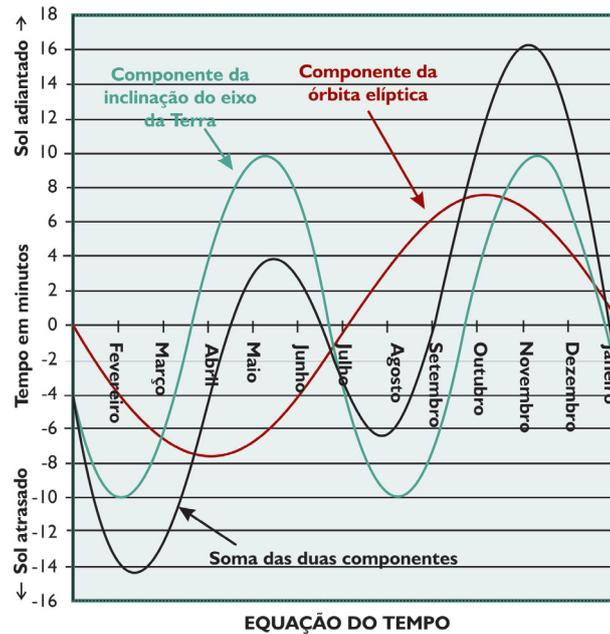


Figura 3.5. Equação do tempo ao longo do ano

O dia que rege as nossas atividades cotidianas é o dia solar, não o sideral. Mas o *dia solar verdadeiro* não tem a mesma duração todos os dias do ano. São duas as causas: (i) a velocidade orbital da Terra não é constante, pois a órbita não é circular, mas, elíptica; a variação é senoidal e anual (curva em vermelho *Figura 3.5*); (ii) a projeção do movimento do Sol no equador é afetada pela

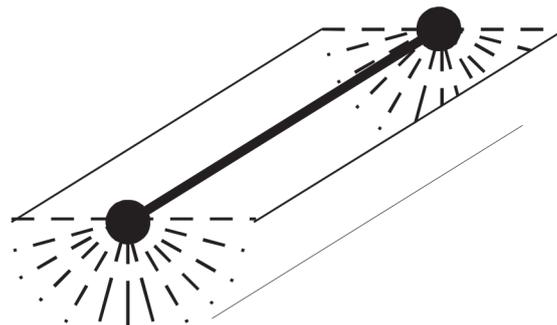
obliquidade da eclíptica; esta variação é senoidal com período semestral (curva em azul *Figura 3.5*). A adoção pura e simples do dia solar verdadeiro para reger as nossas atividades teria assim graves inconvenientes. Para sermos pontuais, cada dia teríamos que acertar o ritmo dos nossos relógios. Para evitar esse inconveniente, se definiu o *dia solar médio* cuja duração é constante e vale exatamente 24 horas. A duração do dia solar médio é igual à média da duração dos dias solares verdadeiros ao longo do ano trópico.

A diferença entre o dia solar verdadeiro e o dia solar médio em diferentes datas do ano é chamada *equação do tempo* (*Figura 3.5*).

3.1.3 Relógio de Sol. Analema

Figura 3.6. Relógio de Sol simples. O eixo polar (traço grosso) é paralelo ao eixo de rotação da Terra. Conseqüentemente aponta para o pólo celeste.

A vantagem do cilindro concêntrico ao eixo polar é que, em qualquer data do ano, a sombra do eixo descreverá nele um arco de 15° para cada hora solar verdadeira, indicado na Figura pela projeção das pontas do eixo (linhas tracejadas). Assim a divisão das horas inteiras no mostrador consiste em linhas paralelas eqüidistantes



aquele em que a sombra do *eixo polar* produzida pelo Sol se projeta num cilindro concêntrico a esse eixo (*Figura 3.6*).

Há muitas outras versões de relógio de Sol. Mas esta é a que melhor se presta para mostrar conceitualmente o seu funcionamento. Todas as outras versões podem ser facilmente entendidas a partir deste modelo simples.

Raramente a hora solar verdadeira do relógio de Sol coincide com a *hora legal* dos relógios comuns de pulso. A discrepância pode chegar a 45 minu-

⁴O que não quer dizer que outras horas solares sejam falsas

tos! Há dois fatores que contribuem para essa diferença. A primeira é a já mencionada equação do tempo. Só por causa dela a diferença pode chegar a ± 15 minutos. Além disso, segundo uma convenção de interesse prático, a hora legal é a mesma (comum) dentro de cada fuso horário. Numa reunião em Washington em 1884, que reuniu 25 países inclusive o Brasil, decidiu-se que o meridiano de longitude zero seria o de Greenwich, perto de Londres, e que o globo terrestre fosse dividido em 24 fusos, cada um com largura de 15° em longitude. Greenwich ficaria na longitude média do 1º. fuso. Na prática, os contornos dos fusos nem sempre seguem rigorosamente os meridianos. Bons atlas trazem mapas com os fusos horários.

No Brasil são 4 fusos horários desde os penedos de São Pedro e São Paulo até o Acre (Figura 3.7). A hora legal do fuso é a hora solar média na longitude média do fuso. O fuso brasileiro que inclui São

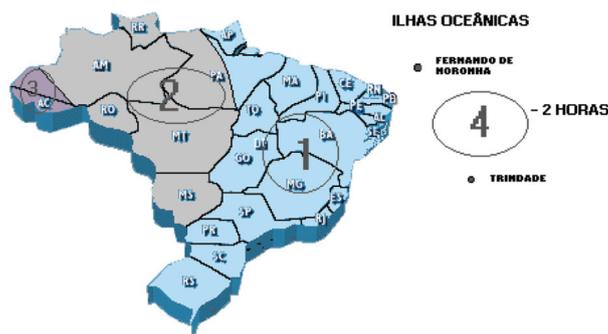


Figura 3.7. Os quatro fusos horários do Brasil.
 Fonte: <http://www.calendario.cnt.br/AFINS/Calendar600.htm>

Paulo, Rio de Janeiro e Brasília, é o terceiro a oeste do de Greenwich. A hora legal é a hora solar média de Greenwich menos 3 horas (não estando em vigor o horário de verão), ou a hora solar média na longitude 45° a oeste de Greenwich. O meridiano com essa longitude passa perto do ponto médio entre São Paulo e o Rio de Janeiro.

Na extremidade leste do fuso, a hora legal estará atrasada meia-hora em relação à hora solar média. Na extremidade oeste, estará adiantada. No meridiano central de um fuso a coincidência entre a hora solar verdadeira e a hora legal poder ocorrer 4 vezes no ano. Mas além de 4° desse meridiano, em longitude, a coincidência nunca ocorre. Somando todas as parcelas, concluímos que a discrepância máxima é de ± 45 minutos.

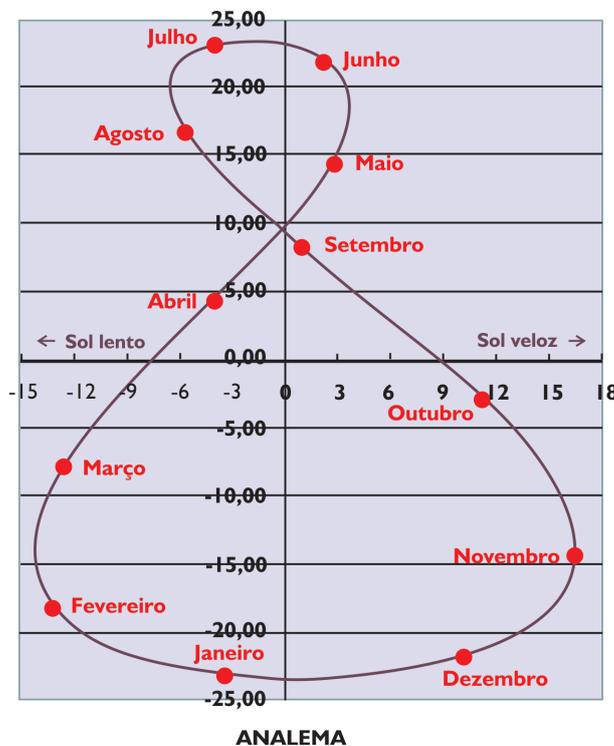


Figura 3.8. O analema no meridiano central de um fuso. Equação do tempo (minutos) na horizontal e a declinação do sol (graus) na vertical.
 Fonte: <http://www.analemma.com/Pages/framesPage.html>

A *Figura 3.8* mostra a curva conhecida como *analema*. Ela tem forma parecida com a do algarismo “8” e fornece a posição da sombra da extremidade de um gnômon ao meio-dia civil no meridiano central de um fuso. A cada grau de longitude a leste ou oeste da longitude do meridiano central, deve-se acrescentar ou subtrair 04 minutos de tempo à equação do tempo.

O meridiano a 180° de Greenwich é chamado Linha Internacional da Data. Sua localização é tão convencional e arbitrária quanto a escolha de Greenwich para a longitude zero. Mas essa Linha define a mudança da data. O novo dia na Terra tem início nessa Linha e dali se propaga para o oeste à medida que a Terra gira. No fuso com essa Linha, a hora legal é a mesma a oeste e a leste da Linha, mas a data a oeste está adiantada 1 dia em relação à data a leste. Os viajantes que atravessam a linha de leste para oeste devem adiantar 1 dia no relógio sem mexer na hora legal, e vice-versa quando atravessam no sentido contrário.

3.1.4 Estações do ano

3.1.4.1 Ano trópico

Percorrendo a eclíptica, a declinação do Sol está variando continuamente. Mas essa variação é periódica e completa um ciclo em 1 *ano trópico*. O ano trópico é chamado também *ano das estações*. O ano trópico é o intervalo de tempo entre dois sucessivos equinócios de outono e corresponde a 365,242191 dias. Podemos dizer também que o ano trópico é o tempo transcorrido entre duas passagens sucessivas do Sol pelo ponto vernal γ . A duração de cada estação é cerca de $\frac{1}{4}$ do ano trópico, mas não exatamente. Este fato já era conhecido dos antigos como *desigualdade das estações*.

Eis algumas conseqüências da variação da declinação do Sol. O Sol nasce no ponto cardeal leste e se põe no ponto cardeal oeste somente nos equinócios de outono e de primavera, pois nessas datas o Sol está cruzando o equador celeste.

Em todas as outras datas (excluindo-se os lugares onde o Sol se torna circumpolar) no hemisfério sul (norte) o Sol nasce no sudeste e se põe no sudoeste durante a primavera e o verão (o outono e o inverno), e nasce no nordeste e se põe no noroeste durante o outono e o inverno (primavera e o verão). Portanto é um erro afirmar que todos os dias o Sol nasce no leste e se põe no oeste.

A altura do Sol na passagem meridiana também varia ao longo do ano. Nos equinócios, no nosso hemisfério, o Sol se encontra no azimute norte a uma altura igual ao complemento do valor absoluto da latitude (*Figura 3.9*). Em outros dias do ano o Sol poderá estar até $23,4^\circ$ mais ao norte ou ao sul do equador celeste (*Figura 3.9*).

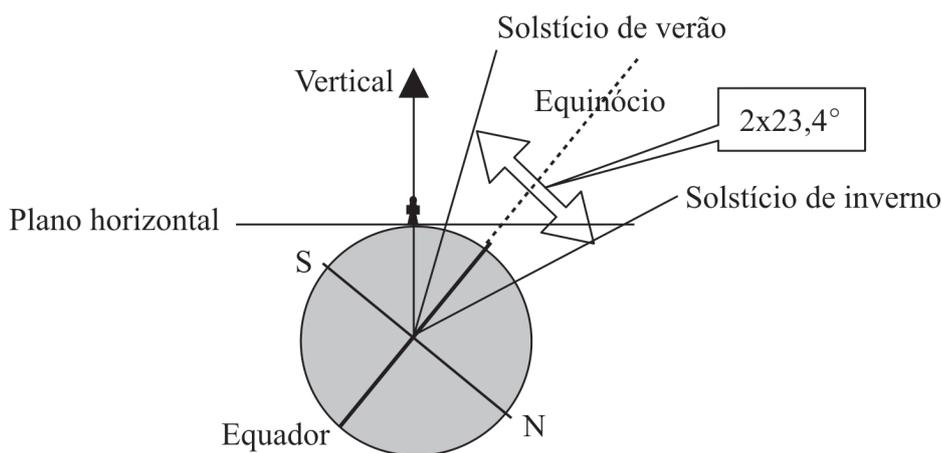


Figura 3.9. O observador se encontra numa localidade do hemisfério sul. O plano do papel contém o meridiano desse observador. Ao longo do ano, o Sol na passagem meridiana é visto por esse observador em diferentes alturas. No equinócio o Sol é visto no equador celeste (linha tracejada). No solstício de inverno a altura meridiana do Sol é mínima e, no solstício de verão, máxima. As direções em que o Sol é visto podem ser transportadas para o local do observador por meio de paralelas

A variação sazonal da altura meridiana do Sol pode ser facilmente constatada por meio da sombra de um gnômon na passagem meridiana do Sol.

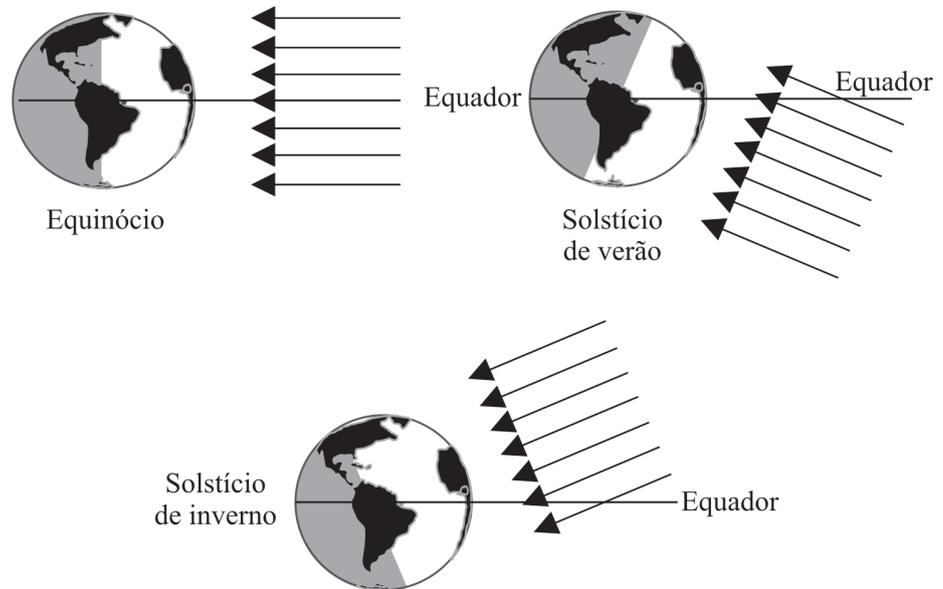
Nos dias do equinócio o período iluminado e o período escuro do dia têm igual duração em todos os pontos do globo. Em qualquer hemisfério, norte ou sul, no solstício de inverno o período claro é o mais curto e, no solstício de verão, o mais longo. Aqui estamos falando da simetria ou assimetria na divisão do dia entre os períodos claro e escuro. Na linguagem vulgar a palavra **dia** significa, às vezes, o período claro, e então se diz que no solstício temos o dia mais curto, ou mais longo. Isso não deve ser confundido com a duração do dia significando o intervalo de tempo entre duas sucessivas passagens meridianas de um mesmo astro.

No nosso hemisfério, o círculo diurno na esfera celeste fica tombado para o norte. Pelo fato de que o Sol está ao sul do equador celeste na primavera e verão, mais da metade desse círculo fica acima do horizonte. Por isso, nessas estações o período iluminado é mais longo do que o período escuro. Quanto mais nos aproximamos do pólo, mais o período diurno é maior que o noturno, até o Sol se tornar circumpolar. Então o período noturno se torna nulo. No outono e inverno ocorre o contrário.

Mas os efeitos mais dramáticos da variação da declinação do Sol são as influências climáticas que caracterizam as quatro estações do ano. A causa das estações é a variação do ângulo de incidência dos raios solares numa localidade da Terra em diferentes épocas do ano. Quando a incidência é perpendicular à superfície da Terra, a captação de energia solar é máxima, mas ela diminui quanto mais obliqua. Isso pode ser entendido por meio da analogia simples da captação da água da chuva com um balde. Se a chuva cai verticalmente, a captação será máxima se o balde estiver com a boca voltada para cima e nula se estiver deitado. A captação é proporcional à área da boca do balde vista pela chuva, ou projetada no plano horizontal. Essa área varia com $\cos\theta$ sendo θ o ângulo entre a direção da chuva e a perpendicular ao plano da boca do balde.

A Figura 3.10 mostra que a variação da declinação do Sol altera a incidência dos raios solares entre os hemisférios norte e sul do globo. A incidência nos solstícios define na Terra os trópicos de Capricórnio e de Câncer, e os círculos polares Antártico e Ártico. Na faixa tropical o Sol pode passar pelo zênite na passagem meridiana. Nos círculos polares o Sol pode se tornar circumpolar.

Figura 3.10. A incidência dos raios solares no equinócio não favorece nenhum dos hemisférios. Mas no solstício de verão favorece o hemisfério em que ocorre, assim como no solstício de inverno desfavorece o hemisfério em que ocorre. No hemisfério favorecido a incidência tende a ser mais vertical. Esta Figura ajuda a entender porque as estações são invertidas entre os hemisférios norte e sul



Às vezes se tem dito que as estações são devidas à variação da distância da Terra ao Sol. Esta explicação é equivocada, pois se a proximidade fosse a causa do verão, como estaria ocorrendo o inverno ao mesmo tempo no outro hemisfério? As estações ocorrem porque a Terra orbita ao redor do Sol mantendo o eixo de rotação oblíquo em relação à eclíptica.

3.1.4.2 Calendário

O *calendário* controla o fluxo dos dias do *ano civil*. Este tem um número inteiro de dias: 365 ou 366 se o ano for bissexto. Por outro lado, é necessário que o calendário mantenha sincronismo com o ano trópico, já que esse ciclo natural rege o plantio, a colheita, as férias escolares etc. Mas, já vimos que o ano trópico não tem um número inteiro de dias. O ano trópico tem 365,242199 dias solares médios. Toda a dificuldade de se elaborar um bom calendário reside na fração 0,242199 do dia. Se o calendário ignorar essa fração, ao cabo de n anos ficará defasado $n \times 0,242199$ dias. Depois de vários anos essa diferença pode alcançar seis meses e, então, as estações do ano estarão invertidas!

A inserção de 1 dia a cada 4 anos foi introduzida na reforma juliana promovida pelo ditador romano Caio Júlio César (100-44 aC) em 46 aC. Esse procedimento tem a vantagem de manter o ano civil com um número inteiro de dias, mas equivale a considerar que o ano trópico tenha $365 + \frac{1}{4}$ dias, ou seja, 365,25 dias. Esse valor comparado com o valor correto dado acima,

mostra que a correção é exagerada. As conseqüências desse exagero foram se acumulando com o tempo e, já na idade média, passaram a atrapalhar a fixação da data para a comemoração da Páscoa. Por isso uma nova reforma foi promovida pelo papa Gregório XIII (1502-85) em 1582. Para manter o início da primavera no hemisfério norte, e o início do ano no dia 21 de março, onze dias foram eliminados por decreto e novas regras foram estabelecidas, que eliminavam alguns anos bissextos previstos na reforma juliana. Com essas regras, em vigor até hoje, o ano trópico teria

$$365 + \frac{1}{4} - \frac{1}{100} + \frac{1}{400} = 365,2425 \text{ dias.}$$

Permanece ainda um exagero na correção, mas o calendário ficará adiantado de 1 dia somente depois de 3.236 anos. Fica esse problema para ser herdado pelas futuras gerações.

Desde que foi instituído, o calendário gregoriano procura coincidir o equinócio de outono com 21 de março ou perto dessa data. Assim o solstício de inverno, o equinócio da primavera e o solstício de verão ocorrem, respectivamente, por volta de 21 de junho, 23 de setembro e 22 de dezembro.

3.1.4.3 Ano sideral

Zodiaco é uma faixa da esfera celeste ao longo da eclíptica com cerca de 16° de largura. Nessa faixa estão as constelações zodiacais que, tendo no passado nomes de animais, deram origem ao nome zodiaco que tem a mesma raiz da palavra zoológico e significa círculo dos animais. A importância do zodiaco é que por ele transitam o Sol, a Lua e os planetas. É que esses objetos se encontram no plano da eclíptica ou não muito longe dele.

Hoje o Sol passa pelas constelações zodiacais nos meses indicados na *Figura 3.11*.

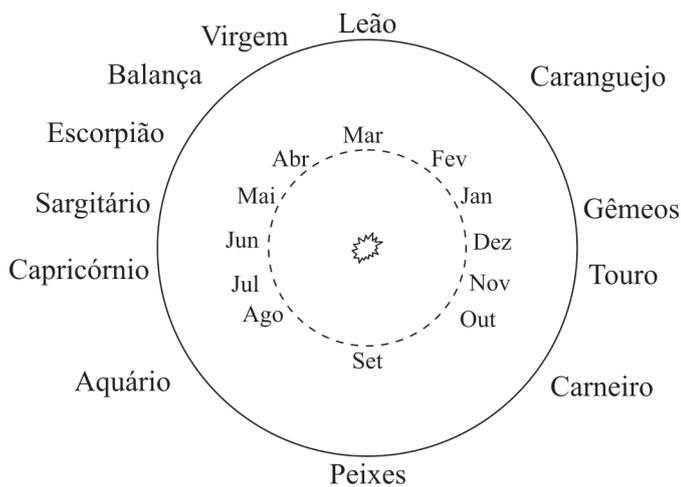


Figura 3.11. O plano do papel é a eclíptica. Na órbita da Terra (tracejada) os meses indicam a posição da Terra de onde o Sol é atualmente visto projetado nas constelações zodiacais. A representação é esquemática

A constelação zodiacal pela qual o Sol transita hoje numa determinada data do ano, não é a mesma pela qual ele transitava na mesma data do ano por volta de 2 mil aC quando os babilônios estipularam os *signos* zodiacais utilizados ainda hoje para fins astrológicos.

Os egípcios antigos controlavam o início do ano monitorando o *nascer helíaco* de Sótis, que hoje conhecemos como a estrela Sirius, a mais brilhante depois do Sol. Quando essa estrela era vista no horizonte leste pouco antes do nascer do Sol, depois de vários meses sem ser vista, era sinal de que logo começaria a cheia do rio Nilo. Portanto, nessa época do ano, o Sol se aproximava dessa estrela do Cão Maior enquanto transitava na constelação de Gêmeos. Se esse método continuasse sendo usado, o nascer helíaco de Sirius também teria perdido o sincronismo com a cheia do Nilo controlada pelas estações do ano.

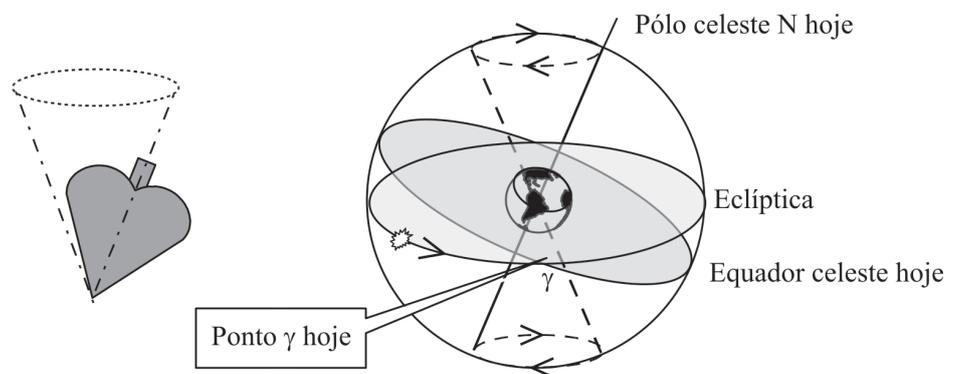
A explicação desse descompasso é que o Sol, após completar 1 ano trópico, retorna ao ponto vernal γ , mas ainda não completou uma volta na esfera celeste. Ele somente completará essa volta uns 20 minutos depois. Isto significa que o ponto vernal γ não é fixo na esfera celeste, mas se desloca lentamente no sentido oposto ao do movimento do Sol na eclíptica. Trata-se de uma diferença pequena, mas ela se torna grande e perceptível depois de se acumular por muitos anos.

O tempo para o Sol completar uma volta de 360° na esfera celeste é o *ano sideral* cuja duração é de 365,256363 dias. Compare a duração do ano sideral com a do ano trópico.

3.1.5 Precessão do eixo da Terra

A causa do deslocamento do ponto γ é um lento movimento do eixo de rotação da Terra chamado *precessão*. Embora a obliquidade se mantenha praticamente inalterada, o eixo da Terra realiza um movimento como o do eixo de um pião que bamboleia (*Figura 3.12*).

Figura 3.12. À direita, a Terra e o seu eixo de rotação hoje. Mantendo a mesma obliquidade com a eclíptica, a Terra precessiona como um pião, à esquerda. O eixo da Terra descreve um movimento cônico, cuja projeção na esfera celeste é mostrada. Conseqüentemente os pólos celestes descrevem um movimento cônico na esfera celeste. Notar que o sentido da precessão é invertido em relação ao movimento do Sol na eclíptica. O equador, por ser solidário ao eixo da Terra, também precessiona. Ora, o ponto vernal γ é a interseção da eclíptica com o equador celeste. Portanto esse ponto também precessiona no sentido inverso ao movimento do Sol. Por isso o Sol retorna ao ponto γ antes de dar uma volta completa



O período da precessão é de aproximadamente 26 mil anos. Cada um dos 12 signos zodiacais abrange um arco de 30° na eclíptica. Portanto, o deslocamento de um signo ocorre em 2200 anos aproximadamente.

A causa da precessão é a atração gravitacional da Lua e do Sol no bojo equatorial da Terra que, por sua vez, é causado pela rotação da Terra. Por causa da precessão, um mapa celeste em coordenadas equatoriais muda com o tempo e deve mencionar a época que convencionalmente varia a cada 50 anos. Por exemplo: época 1950,0, época 2000,0 e assim por diante.

3.2 Atividade solar

O Sol como estrela será discutido em outra aula quando falaremos de sua estrutura interna, composição química, origem, idade e evolução. Aqui nos limitaremos a falar da *atividade solar* que se repete ciclicamente a cada 11,2 anos e produz alguns efeitos na Terra e fenômenos observáveis a olho nu.

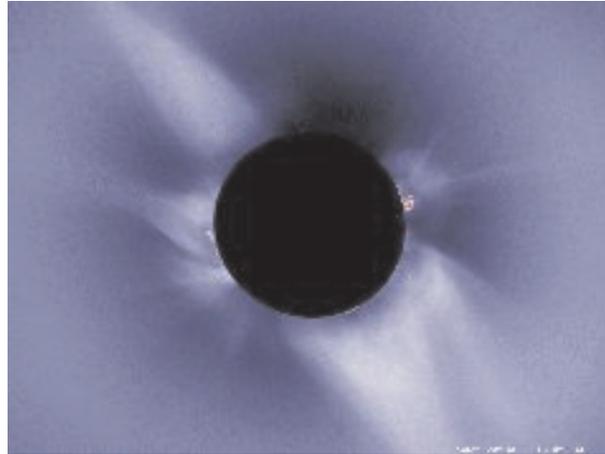
A atividade solar tem origem nas *manchas solares*, estruturas escuras que surgem ocasionalmente na superfície do Sol. No mundo ocidental elas foram descobertas somente em 1611, logo depois que a luneta passou a ser utilizada para fins astronômicos por Galileu Galilei (1564-1642). As manchas são regiões fortemente magnetizadas, cerca de 2 mil K mais frias do que o meio circundante (6 mil K). Os antigos eventualmente viram grandes manchas a olho nu, observando o Sol através de nuvem ou névoa relativamente homogênea. Uma forma de medir a rotação do Sol é acompanhar, dia após dia, o deslocamento das manchas no disco solar. Vista da Terra, uma mancha dá uma volta no Sol em cerca de 27 dias. Esse é o *período sinódico*. Descontando-se o movimento orbital da Terra, o verdadeiro período de rotação, ou *período sideral*, é de 25 dias. Mas esse é o período de rotação no equador do Sol. A rotação do Sol é mais lenta em direção aos pólos. Em suma, o Sol não gira como um corpo rígido.

Uma mancha individual nasce e sobrevive tipicamente poucas rotações solares. Mas a quantidade total de manchas na superfície do Sol, e a área de todas as manchas visíveis no disco, varia ciclicamente. Às vezes o Sol não tem nenhuma mancha. Mas, passando-se os anos começam a surgir as primeiras manchas até o Sol ficar cheio de manchas. Depois elas começam a diminuir. A periodicidade é de 11,2 anos aproximadamente.

Uma conseqüência da atividade que pode ter sido registrada pelos antigos é a mudança da forma da *coroa solar*. A coroa solar é a parte mais externa e extensa da atmosfera do Sol (*Figura 3.13*). Sua temperatura é elevadíssima, cerca de 2 milhões K. Por isso, o hidrogênio que é o elemento majoritário, encontra-se *ionizado*. Um átomo de hidrogênio consiste num próton e num elétron. O primeiro tem carga elétrica positiva, e o segundo, negativa. No entanto a carga do átomo é nula, pois os sinais opostos se neutralizam. Porém, quando a temperatura é muito elevada, a colisão entre os átomos é tão violenta que pode romper a ligação entre o próton e o elétron. Por outras palavras, o elétron se torna livre e deixa de fazer parte do átomo. O gás aquecido pode ser considerado uma mistura gasosa de prótons e elétrons ou *plasma*. Assim é a coroa. Ora, a coroa solar também é magnetizada e as cargas elétricas tendem a seguir as linhas-de-força do campo magnético, e a se acumular onde o campo é mais fraco (garrafa magnética). Os elétrons livres, por sua vez, espalham a luz solar. Assim, quando ocorre um eclipse total do Sol, a coroa que nos dias ordinários é ofuscada pelo brilho do céu diurno, torna-se visível. O brilho da coroa é cerca de um milionésimo do brilho do disco solar. A *Figura 3.13* revela as estruturas magnéticas da coroa solar,

mas essas estruturas variam com a atividade solar. Quando o Sol está em mínima atividade, a coroa tende a se alongar na direção equatorial do Sol. Quando está em máxima atividade, a coroa tende a ser mais arredondada, porém, sua estrutura fina é mais complexa.

Figura 3.13. Coroa solar na luz branca fotografada no eclipse total de 1991. Fonte: <http://science.nasa.gov/sslpad/solar/corona.htm>



Um efeito observável na Terra, embora indireto, são as *auroras polares*. Podem ser boreais ou austrais. Esse fenômeno está associado ao campo magnético da Terra. Sua ocorrência, como dissemos, depende da ejeção de cargas elétricas pelo Sol durante

erupções solares. O local dessas erupções está associado às manchas e a ocorrência delas é maior em época de maior atividade solar. Já se relacionou um período de ausência de registros de auroras no hemisfério norte a uma ausência anômala de atividade solar entre 1645 e 1715, um período de 70 anos conhecido como mínimo de Maunder.

A atividade solar só começou a ser monitorada depois da descoberta das manchas. Mas há métodos indiretos de se diagnosticar a atividade solar no passado mais remoto. Um deles consiste na medição da abundância do isótopo ^{14}C em anéis de seções de troncos de árvores. Esse isótopo é produzido por raios cósmicos na atmosfera da Terra, mas a penetração dos raios cósmicos é modulada pela atividade solar. Quanto mais ativo o Sol, menor é a penetração. Parece que sedimentos lacustres australianos do pré-cambriano também registram o ciclo solar já há 680 milhões de anos.

Os efeitos da atividade solar também podem ser notados através da alteração das condições de propagação de ondas de rádio que se refletem na ionosfera da Terra, ou pelas variações do campo magnético da Terra. Alguns efeitos climáticos, tais como variações na temperatura média, também têm sido alegados, mas ainda não foram completamente comprovados.

Referências:

Bozko, Roberto e Leister, Nelson Vani: "Astronomia Clássica", Cap. 3, *Astronomia, Uma Visão Geral do Universo*, 35, Edusp, 2000

Matsuura, Oscar T.: *Atlas do Universo*, Editora Scipione, São Paulo, Edição com Errata, 1996

Matsuura, Oscar T.: "Solstício de Verão", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.1, 1997
www.observatorio.diadema.com.br e www.revistaastronomy.com.br.

Matsuura, Oscar T.: "Calendário", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.2, 1998
www.observatorio.diadema.com.br e www.revistaastronomy.com.br.

Matsuura, Oscar T.: "Equinócio", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.4, 1998
www.observatorio.diadema.com.br e www.revistaastronomy.com.br.

Matsuura, Oscar T.: "Feliz Ano Novo!", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.13, 1998
www.observatorio.diadema.com.br e www.revistaastronomy.com.br.

Matsuura, Oscar T.: "Eclíptica", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.16, 1999
www.observatorio.diadema.com.br e www.revistaastronomy.com.br.

Matsuura, Oscar T. e Picazzio, E.: "O Sol", Cap. 5, *Astronomia, Uma Visão Geral do Universo*, 81, Edusp, 2000

Sugestões de atividades práticas:

- Construir e manipular um relógio de Sol simples
- Comparar a hora solar verdadeira do relógio de Sol com a hora legal
- Por meio de observações noturnas feitas no mesmo horário, mas separadas alguns meses, constatar o movimento do Sol em relação às estrelas fixas
- Medir com um gnômon a altura meridiana do Sol em diferentes datas do ano e relacioná-la com as estações do ano
- Comparar o seu signo com a constelação zodiacal do Sol no seu aniversário
- Observar o Sol na luz branca usando um método seguro para os olhos, p. ex., uma câmara escura com orifício

O MOVIMENTO APARENTE DO SOL

João Batista Garcia Canalle
João Vianey Augusto
Instituto de Física - UERJ

Introdução

Já aprendemos que o Sol é o centro do sistema do solar e que os planetas giram ao seu redor, numa órbita elíptica. Mas aparentemente não é o que observamos.

Observando da Terra vemos o Sol executar um movimento diário ao redor da Terra, mas na realidade, esse movimento é explicado pela rotação da Terra em torno do seu eixo geográfico, também chamado de eixo norte-sul. Além disso, observamos que o Sol passa pelo meridiano local, mais próximo do zênite no verão (ou mais alto) e mais afastado deste (mais ao Norte, ou mais baixo) no inverno.

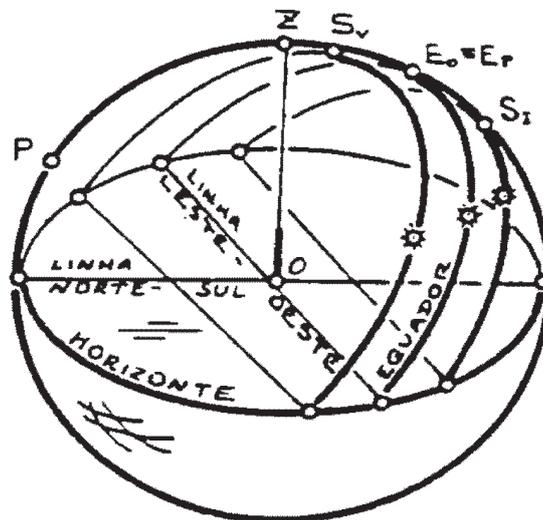


Figura 3.14. Representação esquemática do movimento aparente do Sol no solstício de verão, solstício de inverno e equinócio de outono e de primavera.

Pelo fato da declinação do Sol variar ao longo do ano, seu movimento diurno aparente tem trajetórias diferentes ao longo do ano. Na figura abaixo estão representados os movimentos diurnos nos solstícios de verão e inverno, bem como nos equinócios de outono e primavera. Se admitirmos como sendo um gnômon a parte mais

espessa da vertical representada, é fácil ver que o tamanho de sua sombra variará nas passagens meridianas ao longo do ano (Boczko, 1984)³.

³R. Boczko, Conceitos de Astronomia, Editora Edgard Blücher Ltda, 1984, p.122.

O experimento para visualizar o movimento do Sol

Vamos representar o horizonte do observador por um quadrado de madeira com lado de aproximadamente 25 cm. Tracemos sobre este disco as direções dos 4 pontos cardeais (Leste, Oeste, Norte, Sul).

Corte 3 pedaços de arame com comprimentos de 50 cm, 46 cm e 42 cm. Curvemos o arame de 46 cm de comprimento para formar um semicírculo. Este arame representará a trajetória aparente do Sol nos equinócios do outono e da primavera. Para representar o Sol, fixamos uma esfera de isopor de cerca de 2,5 cm de diâmetro, sobre o centro, por exemplo, do arame. Fixemos as pontas deste arame no pontos Leste e Oeste. Mas como não

estamos sobre o equador terrestre e sim a cerca de 23° graus ao Sul do equador, inclinemos o plano do arame deste mesmo ângulo (em relação ao zênite) na direção Norte.

Faça o mesmo com o arame de 42 cm mas fixe-o mais ao Norte do arame de 46cm como mostra a figura anterior, e idem com o arame de 50 cm mas fixe-o mais ao Sul do arame de 46 cm, de forma que seus planos fiquem paralelos entre si. Observe que o Sol nunca vai passar sobre o Zênite.

Manuseando o experimento

Pode-se explorar o experimento para localidades de outras latitudes, como por exemplo: segurando o arame de 46 cm (retire os outros) pelas suas extremidade (fazendo com que elas coincidam com os pontos leste e oeste), de tal forma que ele fique perpendicular ao plano do horizonte, teremos o movimento aparente do Sol visto por um observador situado na região equatorial (região próxima ao equador da Terra), durante os equinócios.

Para outras regiões (outras latitudes) do hemisfério sul, por exemplo, basta inclinarmos o arame e, portanto, o plano que o contém de um ângulo igual ao da latitude do local. Para quem está no hemisfério sul esta inclinação deve ser contada da vertical do quadrado em direção ao Norte.

Por exemplo, a latitude da cidade de Pato Branco (PR) é de -26,2°, logo, o plano da trajetória aparente do Sol deve ser inclinado 26,2° a partir da vertical do quadrado na direção do Norte.

Devemos levar em consideração ainda, que o plano da trajetória do Sol se desloca mais para o Norte durante nosso inverno e mais para o Sul, durante nosso verão, então, além de inclinarmos o arame, conforme a latitude do lugar, devemos, também deslocar o arame mais para o Norte (no nosso inverno) e mais para o Sul (no nosso verão).

Conclusão

Com a união dos dois movimentos (inclinação e deslocamento) do plano da trajetória aparente (arame) do Sol, podemos explicar: a) o movimento aparente do Sol, b) a diferença da duração do dia e da noite ao longo do ano, c) as estações do ano e d) o porquê das regiões polares terem somente um dia e uma noite de 6 meses cada.

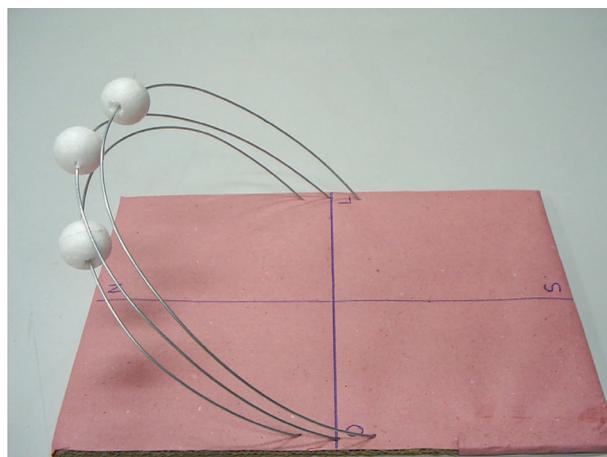


Figura 3.15

GNÔMON E OS PONTOS CARDEAIS

João Batista Garcia Canalle
Instituto de Física – UERJ

Introdução

Define-se o lado leste como sendo aquele em que o Sol nasce e de lado Oeste aquele no qual o Sol se põe. A direção norte é aquela que ficaria à sua frente se você estendesse seu braço direito para o Leste e o esquerdo para o Oeste. A direção Sul é oposta à Norte e portanto, estaria à suas costas. A estas quatro direções chamamos de *Pontos Cardeais*. Mas se você não quiser esperar o dia todo para saber onde o Sol nasce e se põe, apresentamos abaixo um método alternativo e um pouco mais preciso que o anterior para determinar os *Pontos Cardeais*.

Os Pontos Cardeais

Pegue um *Gnômon*, isto é, finque uma vara na vertical sobre um plano horizontal (é melhor colocar uma folha de cartolina debaixo dessa vareta e riscar no chão a posição da cartolina, pelos motivos que mostraremos a seguir). Numa hora qualquer antes do meio dia, risque sobre a cartolina a sombra da vareta e meça seu comprimento. Depois do meio dia espere a sombra ficar do mesmo comprimento da sombra da manhã e quando isto acontecer risque-a no chão também. Estas duas sombras definirão um certo ângulo; ache a bissetriz desse ângulo (reta que divide ao meio o ângulo). Veja a *Figura 3.16* abaixo.

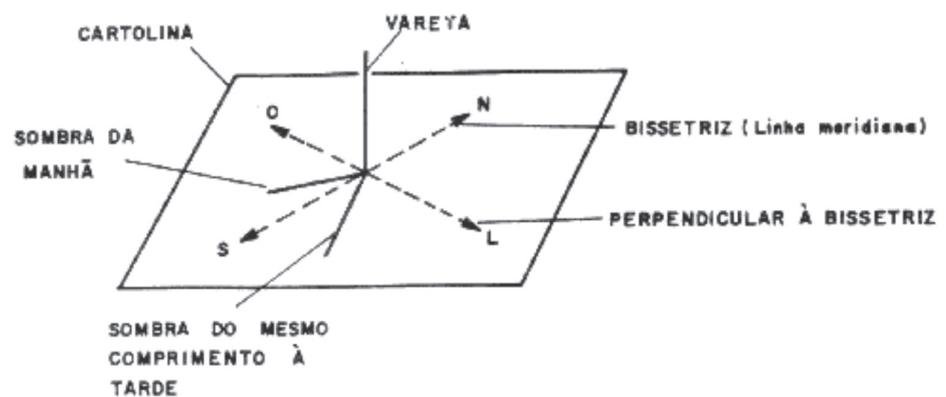


Figura 3.16. Determinação dos pontos cardeais

À direção da bissetriz chamamos de linha meridiana e ela define as direções Norte e Sul, e a reta perpendicular a ela define as direções Leste e Oeste. Se você se colocar no mesmo local da vareta e abrir seus braços, com o direito apontando para o Leste, o esquerdo apontará para o Oeste, à sua frente estará o Norte e às suas costas o Sul.

O Chapéu

Uma atividade que pode ser feita para esta ocasião é a seguinte: peça para que cada aluno faça um chapéu, tipo Napoleão, para ser usado durante as atividades extra classe (demarcações das sombras). Depois de determinados os pontos cardeais peça para que escrevam a letra L na mão direita e a letra O na mão esquerda (lembrando que a mão direita aponta para a direção Leste e a mão esquerda aponta para a direção Oeste). Para gravarem melhor que o Norte está à frente deles, ao invés de escrever um N em suas testas, escreve-se sobre o chapéu, e para que não se corra o risco de colocarem o chapéu de trás para frente, pede-se para desenharem dois olhos no lado do chapéu no qual se colocou a letra N. Nas costas do chapéu escreve-se a letra S.

RELÓGIO DE SOL

João Batista Garcia Canalle
Instituto de Física - UERJ

Introdução

Talvez um dos mais antigos instrumentos astronômicos conhecidos, o relógio de sol, ainda hoje desperta a curiosidade das pessoas, pois com apenas a sombra de seu indicador temos a marcação das horas.

Claro que hoje temos instrumentos mais precisos, que nos fornecem as mesmas informações que o Relógio de sol, mas para um primeiro contato e também para desvendar alguns pequenos segredos que envolvem o Relógio de sol, idealizamos um relógio de fácil construção, e que pode ser feito inclusive com as folhas de caderno, de cartolina ou até mesmo (para os mais habilidosos) de madeira.

Como sabemos, um relógio é composto por um indicador das horas, um ponteiro e um conjunto de engrenagens que vão fazê-lo funcionar. O Relógio de sol também é composto de um indicador das horas e um ponteiro, mas o conjunto de engrenagens será substituído pelo nosso Sol.

Passamos a descrever abaixo, como podemos montar um Relógio de sol com mostrador horizontal de horas.

O Mostrador

Para a confecção do mostrador, utilizaremos uma folha de sulfite onde traçaremos as linhas horárias (ou as linhas que indicam as horas).

Para isso, alguns conhecimentos de trigonometria e da latitude do local (latitude onde está localizada a sua cidade) serão necessários, pois temos que calcular os ângulos que definirão as linhas horárias, os quais são obtidos com as informações acima e com a seguinte expressão:

$$x = \arctg\{tg[15(12 - \text{hora})]\text{sen}(\phi)\}$$

Onde :

X = ângulo, em graus, que a linha das horas faz com a linha das doze horas, ou linha meridiana do relógio;

Φ = latitude do local;

$6 < \text{hora} < 12$

Como o Sol descreve aparentemente um círculo (360°) em 24 horas, temos que cada hora corresponde a 15 graus. Para hora = 6 ou 12 horas, temos tangente

de 90° e 0° a qual não é definida, mas para as 6 horas da manhã a linha das horas coincide com a direção leste-oeste e para as 12 horas a linha das horas coincide com o meridiano local (linha central da base do relógio de sol.)

Para traçarmos a linha das doze horas, dobramos o papel sulfite exatamente ao meio e então traçamos a reta que passa exatamente pelo meio do papel, de um lado ao outro.

Feito isto, desenharemos um retângulo na folha com lado menor de 20 cm e lado maior de 29,5 cm, como mostra a *Figura 3.17*. Neste ponto, devemos marcar na origem da linha das 12 horas o ponto cardinal norte e no extremo oposto o ponto cardinal sul.

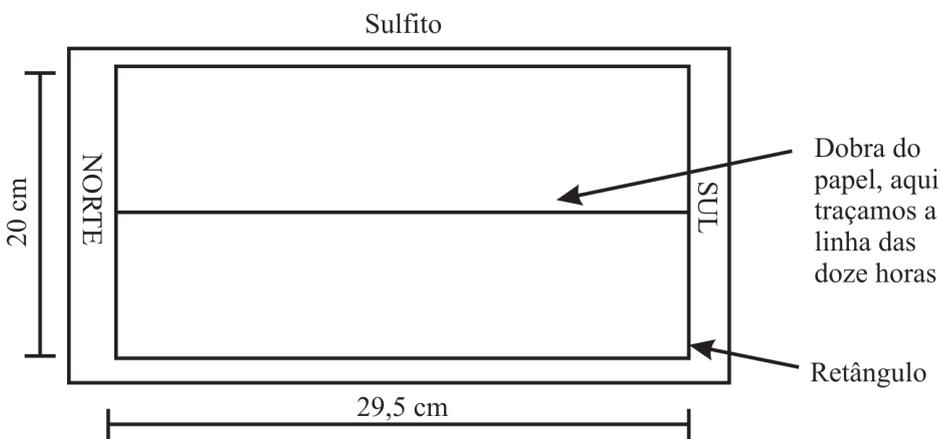


Figura 3.17. Linha das 12 horas

As Linhas Horárias

Para a determinação das linhas horárias (ou linha das horas) vamos tomar como exemplo a latitude de -22°54', que corresponde à cidade do Rio de Janeiro.

Utilizando a expressão descrita anteriormente, chegamos a valores do ângulo X os quais podem ser vistos na tabela seguinte:

LINHAS DAS HORAS	ÂNGULO (x) (EM RELAÇÃO ÀS 12 HORAS) (EM GRAUS)
12	0,0
11 e 13	5,9
10 e 14	12,6
09 e 15	21,2
08 e 16	33,9
07 e 17	55,4
06 e 18	90,0

Observação: Devemos lembrar também que os ângulos são válidos tanto para o lado esquerdo da linha das 12 horas quanto para o lado direito.

Uma das maneiras para prosseguir o trabalho a partir deste ponto é escolhermos uma origem na linha horária das 12 horas, e a partir deste ponto, marcarmos os ângulos encontrados para as linhas horárias. Feito isto, traça-

mos, finalmente, as linhas horárias e marcamos em seus extremos as horas correspondentes. Ver *Figura 3.18*.

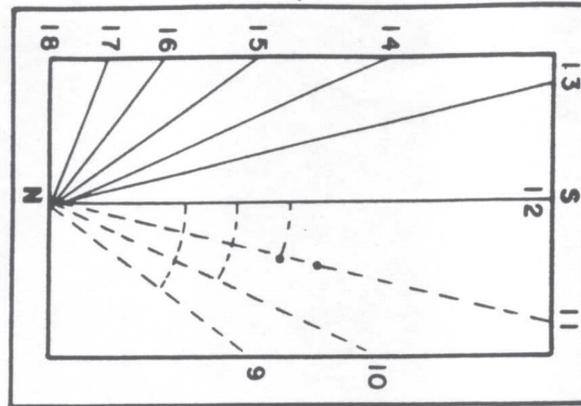


Figura 3.18. Esquema da base do relógio de Sol

O Ponteiro

Para confeccionar o ponteiro, basta que numa folha de papel tracemos uma reta, a qual chamaremos de reta 1 com 20,0 cm de comprimento, e com um transferidor

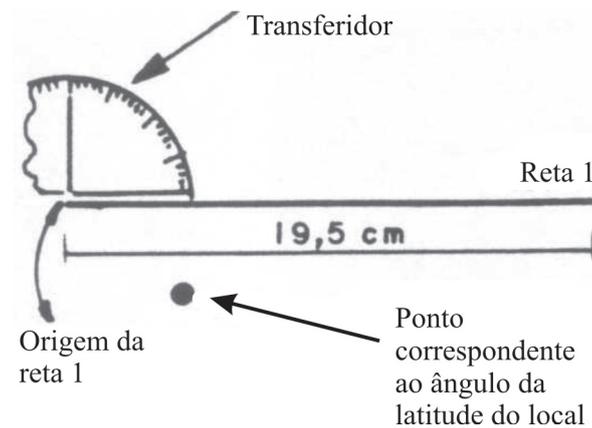


Figura 3.19. Determinação do ângulo correspondente à latitude local

transferidor marcar o valor do ângulo que a latitude do local faz com essa reta, a partir de uma origem, acima e abaixo da reta como mostra a *Figura 3.19*. Traçamos as retas (as quais indicaremos como retas 2 e 3) entre o ponto marcado do ângulo e a reta 1.

Após esta etapa, traçamos uma reta paralela às retas 2 e 3 distantes a 1 cm das retas 2 e 3. Liga-se, então, os pontos como mostra a *figura 3.20*.

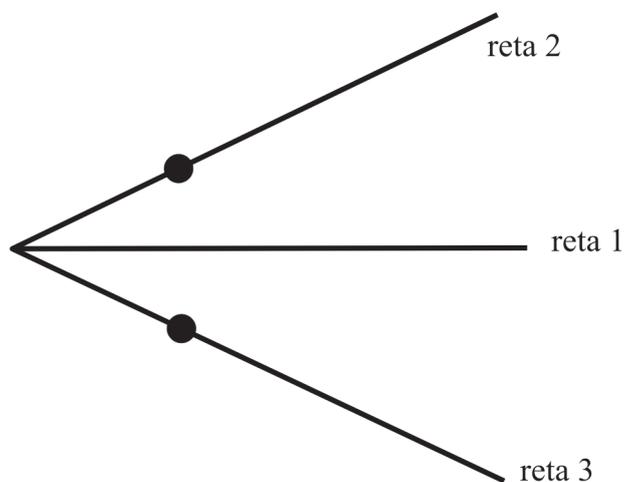


Figura 3.20. Esquema das retas 2 e 3 referente ao ângulo da latitude local

Estando prontas as marcações do ponteiro, recortamos e dobramos como mostra a *Figura 3.21*.

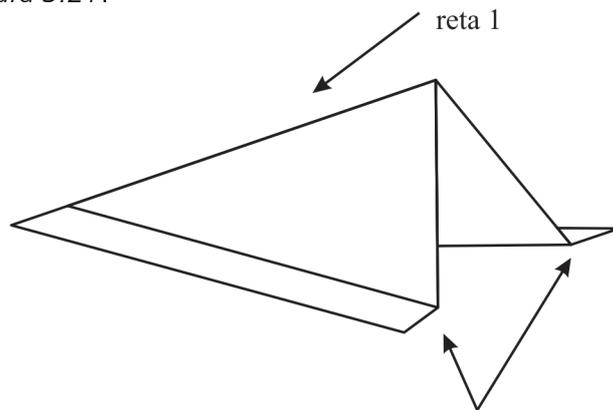


Figura 3.21. Indicação de como dobrar o ponteiro

Estando dobrado o ponteiro, colamos a parte de dentro do ponteiro, e após isto colamos o mesmo com sua parte mais baixa (ponta) coincidindo com a marcação do norte do relógio exatamente por cima e ao longo das doze horas, como ilustra a *Figura 3.22*.

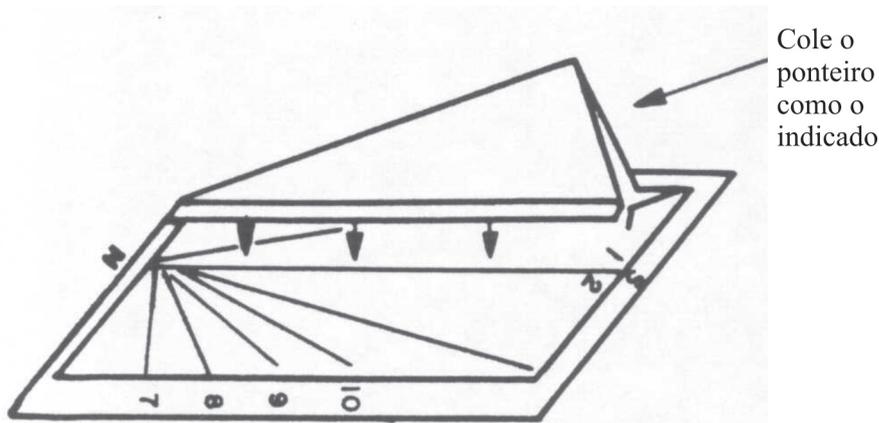


Figura 3.22. Indicação de como colar o ponteiro sobre a base do relógio de sol

O Posicionamento do Relógio

As marcações dos pontos norte e sul, como poder-se-ia pensar a princípio que seria apenas para indicar os pontos cardeais, tem uma simples, mas importante função. Qual seria ela?

Claro! Direcionar o relógio do sol na linha norte-sul, para que possamos ter a sombra projetada do Sol no mostrador, pois como sabemos o Sol faz um movimento do leste para o oeste e, portanto se o ponteiro está perpendicular a este movimento, teremos as sombras projetadas.

Para isso, podemos utilizar três recursos práticos: 1) utilizar uma bússola e encontrar a posição norte magnética (a qual é próxima da geográfica, tendo uma diferença de mais ou menos 18 graus, e desta maneira direcionar o relógio de sol), ou 2) utilizarmos de nosso próprio relógio, para posicionarmos o relógio de sol (talvez este seja o mais fácil) e 3) fazermos uso de um gnômon.

Observando o relógio de sol

Se fixarmos um relógio de sol num local, e observarmos ao longo dos meses, num mesmo horário, verificaremos que o relógio adianta-se, atrasa-se ou se iguala em relação ao seu relógio mecânico ou digital.

Os modernos relógios que usamos, nos informam o Tempo Legal que é uma variedade do que chamamos Tempo Médio. Este Tempo Médio é o tempo ditado pela marcha do chamado “Sol médio”, um Sol fictício ou imaginário, que faria seu caminho exatamente igual no céu dia após dia.

Como você já viu anteriormente neste curso, o Sol tem um movimento aparente que modifica sua posição com o passar dos meses fazendo, portanto, com que o nosso bom relógio de sol se atrase, se adiante ou se iguale com nossos relógios de pulso.

Conclusão

Ao dar a oportunidade aos alunos de confeccionar o relógio de sol, podemos além de ensinar alguns conceitos básicos de astronomia, tais como movimento aparente do Sol, Tempo Médio, etc; podemos também utilizar conceitos matemáticos de trigonometria e geometria, além de desenvolver suas habilidades manuais.

ESTAÇÕES DO ANO

João Batista Garcia Canalle
Instituto de Física - UERJ

Introdução

Este fenômeno que atinge a todos é de fácil explicação para quem já o entendeu e de difícil compreensão para quem está tentando entendê-lo, principalmente quando se está usando os livros e suas figuras para entendê-lo. Como já tivemos oportunidade de constatar junto a professores da Rede Pública de Ensino, da pré-escola ao segundo grau, as dificuldades dos professores em entenderem este fenômeno a partir de textos e figuras, desenvolvemos o experimento abaixo descrito, que é de fácil construção e de baixo custo, para facilitar a compreensão deste fenômeno.

A Montagem do Experimento

Providencie cerca de 3 m de fio branco paralelo, conecte um plug numa das extremidades e um soquete na outra. Fixe este soquete num pedaço de madeira (use soquete que já tenha um furo em seu interior próprio para passar um parafuso e assim fixar na madeira). Isole com fita isolante os terminais do fio no soquete. Coloque uma lâmpada de 60 W neste soquete e sobre a lâmpada fixe, com fita adesiva (durex), um disco de papel alumínio com cerca de 5 cm de diâmetro, para que ela não ofusque sua vista e a dos alunos que estarão ao seu redor.

Se você dispuser de um globo terrestre, use-o, caso contrário, providencie uma bola de isopor de 15 a 30 cm de diâmetro. Essas bolas são separáveis em dois hemisférios que se encaixam. Separe os dois hemisférios e fure-os em seus centros (de dentro para fora) com uma vareta de pipa ou similar. Feche a bola e atravesse-a com a vareta. A vareta representará o eixo de rotação da Terra. Providencie algum suporte para a lâmpada (livros, cadernos, caixa de sapatos, etc) tal que seu filamento fique aproximadamente na mesma altura do centro da bola de isopor. Ligue o plug numa tomada e terá o "Sol" aceso e iluminando a Terra (bola de isopor). Claro que para isso você precisa de um ambiente escurecido. Também é bom que se chame à atenção para o fato de que a bola de isopor e a lâmpada que representam a Terra e o Sol estão fora de escala.

A Explicação do Fenômeno

Geralmente se realiza esta demonstração sobre uma mesa. Note, então, que se a vareta (eixo da Terra) estiver perpendicular à mesa, os dois hemisférios da Terra são igualmente iluminados e se assim fosse, não haveria estações do ano, pois a luz solar atingiria os mesmos pontos da Terra sempre com a mesma intensidade. Incline, então, o eixo da Terra (vareta de pipa que você

esta segurando) cerca de 23,5 graus (ou seja, aproximadamente $\frac{1}{4}$ de 90 graus). Veja a *Figura 3.23* abaixo.

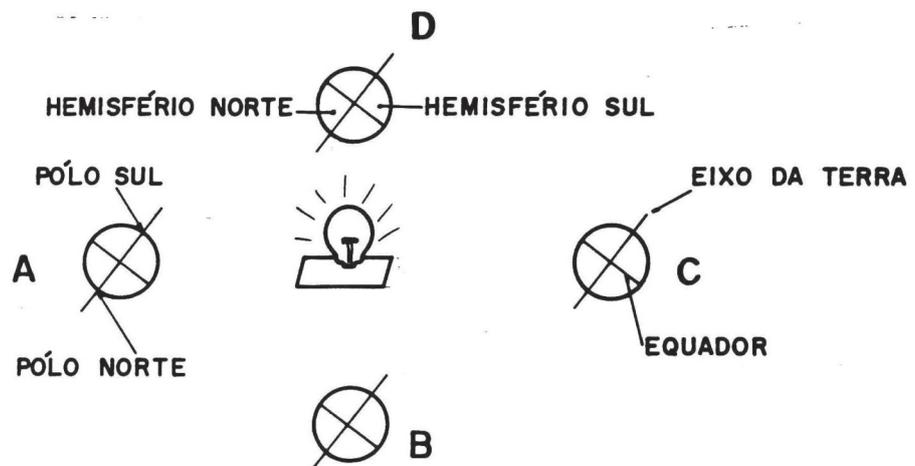


Figura 3.23. Esquema das posições A, B, C e D do globo

Agora sim é visível que um hemisfério está mais iluminado do que o outro. Naquele mais iluminado é verão e no outro é inverno.

Vamos supor que você começou inclinando sua Terra (bola de isopor) como mostramos no ponto A, então é verão no hemisfério Sul e inverno no Norte, se você deslocar a bola para a posição C (posição da Terra 6 meses depois de A) você verá que o hemisfério Sul está menos iluminado do que o Norte, logo, será inverno no hemisfério Sul e verão no Norte. Nas posições B e D ambos hemisférios são igualmente iluminados, como você pode ver se fizer a experiência (ou conseguir imaginá-la). Em B, no hemisfério Sul, será outono e no Norte será primavera. Em D, no hemisfério Sul será primavera e no Norte será outono. Se você estiver usando um globo terrestre o eixo já vem inclinado de 23,5 graus, pois esta é a inclinação do eixo da Terra em relação ao plano da sua órbita (trajetória) ao redor do Sol. O globo tem o pólo sul na sua parte inferior, mas isso é só costume do fabricante em colocá-lo assim, nada impede que você inverta seu globo. Se você quiser aumentar mais o contraste entre a parte mais iluminada e a menos iluminada, incline um pouco mais o eixo da Terra, digamos uns 45 graus, mas avise seus alunos que você está exagerando.

Outro ponto fundamental desta demonstração é que o eixo da Terra está sempre paralelo a ele mesmo, ou seja, se você começou a demonstração com o eixo da Terra apontando em direção a uma parede da sua sala, por exemplo, então ele deverá continuar apontando da mesma forma para a mesma parede quando a bola passar pelos pontos A, B, C e D.

Como você está vendo a explicação não tem nada a ver com a distância da Terra ao Sol.

ATO DE FÉ OU CONQUISTA DO CONHECIMENTO?⁶

Um episódio na vida de Joãozinho da Maré
Professor Rodolpho Caniato

O Joãozinho de nossa história é um moleque muito pobre que mora numa favela sobre palafitas espetadas em um vasto mangue. Nosso Joãozinho só vai à escola quando sabe que vai ser distribuída merenda, uma das poucas razões que ele sente para ir à escola. Do fundo da miséria em que vive, Joãozinho pode ver bem próximo algumas das conquistas de nossa civilização em vias de desenvolvimento (para alguns). Dali de sua favela ele pode ver bem de perto uma das grandes Universidades onde se cultiva a inteligência e se conquista o conhecimento. Naturalmente esse conhecimento e a ciência ali cultivadas nada tem a ver com o Joãozinho e outros milhares de Joãozinhos pelo Brasil afora.

⁶Publicado no Boletim da Sociedade Astronômica Brasileira, ano 6, número 2, abril / junho de 1983, páginas 31 a 37.

Além de perambular por toda a cidade, Joãozinho, de sua favela, pode ver o aeroporto internacional do Rio de Janeiro. Isso certamente é o que mais fascina os olhos de Joãozinho. Aqueles grandes pássaros de metal sobem imponentes com um ruído de rachar os céus. Joãozinho, com seu olhar curioso, acompanha aqueles pássaros de metal até que, diminuindo, eles desapareçam no céu.

Talvez, por freqüentar pouco a escola, por gostar de observar os aviões e o mundo que o rodeia, Joãozinho seja um sobrevivente de nosso sistema educacional. Joãozinho não perdeu aquela curiosidade de todas as crianças; aquela vontade de saber os “como” e os “porque”, especialmente em relação às coisas da natureza; a curiosidade e o gosto de saber que se vão extinguindo em geral, com a freqüência à escola. Não há curiosidade que agüente aquela “decoreba” sobre o corpo humano, por exemplo.

Sabendo por seus colegas que nesse dia haveria merenda, Joãozinho resolve ir à escola. Nesse dia, sua professora se dispunha a dar uma aula de Ciências, coisa que Joãozinho gostava. A professora havia dito que nesse dia iria falar sobre coisas como o Sol, a Terra e seus movimentos, verão, inverno, etc.

A professora começa por explicar que o verão é o tempo do calor, o inverno é o tempo do frio, a primavera é o tempo das flores e o outono é o tempo em que as folhas ficam amarelas e caem.

Em sua favela, no Rio de Janeiro, Joãozinho conhece calor e tempo de mais calor ainda, um verdadeiro sufoco, às vezes.

As flores da primavera e as folhas amarelas que caem ficam por conta de acreditar. Num clima tropical e quente como do Rio de Janeiro, Joãozinho não viu nenhum tempo de flores. As flores por aqui existem ou não, quase independentemente da época do ano, em enterros e casamentos, que passam pela Avenida Brasil, próxima à sua favela.

Joãozinho, observador e curioso, resolve perguntar porque acontecem ou devem acontecer tais coisas. A professora se dispõe a dar a explicação.

- Eu já disse a vocês numa aula anterior que a Terra é uma grande bola e que essa bola está rodando sobre si mesma. É sua rotação que provoca os dias e as noites. Acontece que, enquanto a Terra está girando, ela também está fazendo uma grande volta ao redor do Sol. Essa volta se faz em um ano. O caminho é uma órbita alongada chamada elipse. Além dessa curva ser assim alongada e achatada, o Sol não está no centro. Isso quer dizer que, em seu movimento, a Terra às vezes passa perto, às vezes passa longe do Sol. Quando passa perto do Sol é mais quente: é VERÃO. Quando passa mais longe do Sol recebe menos calor: é INVERNO.

Os olhos de Joãozinho brilhavam de curiosidades diante de um assunto novo e tão interessante.

- Professora, a senhora não disse antes que a Terra é uma bola e que está girando enquanto faz a volta ao redor do Sol?

- Sim, eu disse. - respondeu a professora com segurança.

- Mas, se a Terra é uma bola e está girando todo dia perto do Sol, não deve ser verão em toda a Terra?

- É, Joãozinho, é isso mesmo.

- Então é mesmo verão em todo lugar e inverno em todo lugar, ao mesmo tempo, professora?

- Acho que é, Joãozinho, vamos mudar de assunto.

A essa altura, a professora já não se sentia tão segura do que havia dito. A insistência, natural para o Joãozinho, já começava a provocar uma certa insegurança na professora.

- Mas, professora, - insiste o garoto - enquanto a gente está ensaiando a escola de samba, na época do Natal, a gente sente o maior calor, não é mesmo?

- É mesmo, Joãozinho.

- Então nesse tempo é verão aqui?

- É, Joãozinho.

- E o Papai Noel no meio da neve com roupas de frio e botas? A gente vê nas vitrinas até as árvores de Natal com algodão. Não é para imitar a neve? (A 400 no Rio).

- É, Joãozinho, na terra do Papai Noel faz frio.

- Então, na terra do Papai Noel, no Natal, faz frio?

- Faz, Joãozinho.

- Mas então tem frio e calor ao mesmo tempo? Quer dizer que existe verão e inverno ao mesmo tempo?

- É, Joãozinho, mas vamos mudar de assunto. Você já está atrapalhando a aula e eu tenho um programa a cumprir.

Mas Joãozinho ainda não havia sido domado pela escola. Ele ainda não havia perdido o hábito e a iniciativa de fazer perguntas e querer entender as coisas. Por isso, apesar do jeito visivelmente contrariado da professora, ele insiste.

- Professora, como é que pode ser verão e inverno ao mesmo tempo, em lugares diferentes, se a Terra, que é uma bola, deve estar perto ou longe do Sol? Uma das duas coisas não está errada?

- Como você se atreve, Joãozinho, a dizer que a sua professora está errada? Quem andou pondo essas suas idéias em sua cabeça?

- Ninguém, não, professora. Eu só tava pensando. Se tem verão e inverno ao mesmo tempo, então isso não pode acontecer porque a Terra tá perto ou tá longe do Sol. Não é mesmo, professora?

A professora, já irritada com a insistência atrevida do menino assume uma postura de autoridade científica e pontifica:

- Está nos livros que a Terra descreve uma curva que se chama elipse ao redor do Sol, que este ocupa um dos focos e, portanto, ela se aproxima e se afasta do Sol. Logo, deve ser por isso que existe verão e inverno.

Sem dar conta da irritação da professora, nosso Joãozinho lembra-se de sua experiência diária e acrescenta:

- Professora, a melhor coisa que a gente tem aqui na favela é poder ver avião o dia inteiro.

- E daí, Joãozinho? O que tem a ver isso com o verão e o inverno?

- Sabe, professora, eu acho que tem.

A gente sabe que um avião tá chegando perto quando ele vai ficando maior. Quando ele vai ficando pequeno é porque ele tá ficando mais longe.

- E o que tem isso a ver com a órbita da Terra, Joãozinho?

- É que eu achei que se a Terra chegasse mais perto do Sol, a gente devia ver ele maior. Quando a Terra estivesse mais longe do Sol, ele deveria aparecer menor. Não é, professora?

- E daí, menino?

- A gente vê o Sol sempre do mesmo tamanho. Isso não quer dizer que ele tá sempre da mesma distância? Então verão e inverno não acontecem por causa da distância.

- Como você se atreve a contradizer sua professora? Quem anda pondo "minhocas" na sua cabeça? Faz quinze anos que eu sou professora. É a primeira vez que alguém quer mostrar que a professora está errada.

A essa altura, já a classe se havia tumultuado. Um grupo de outros garotos já havia percebido a lógica arrasadora do que Joãozinho dissera. Alguns continuaram indiferentes. A maioria achou mais prudente ficar do lado da "autoridade". Outros aproveitaram a confusão para aumentá-la. A professora

havia perdido o controle da classe e já não conseguia reprimir a bagunça nem com ameaças de castigo e de dar “zero” para os mais rebeldes.

Em meio àquela confusão tocou o sinal para o fim da aula, salvando a professora de um caso maior. Não houve aparentemente nenhuma definição de vencedores e vencidos nesse confronto.

Indo para casa, a professora, ainda agitada e contrariada, se lembrava do Joãozinho que lhe estragara a aula e também o dia. Além de pôr em dúvida o que ela ensinara, Joãozinho dera um mau “exemplo”. Joãozinho, com seus argumentos ingênuos, mas lógicos, despertara muitos para o seu lado.

- Imagine se a moda pega... - pensa a professora. - O pior é que não me ocorreu qualquer argumento que pudesse enfrentar o questionamento do garoto.

- Mas foi assim que me ensinaram. É assim que eu também ensino- pensa a professora. - Faz tantos anos que eu dou essa aula, sobre esse assunto...

À noite, já mais calma, a professora pensa com os seus botões:

- Os argumentos do Joãozinho foram tão claros e ingênuos... Se o inverno e o verão fossem provocados pelo maior ou menor afastamento da Terra em relação ao Sol, deveria ser inverno ou verão em toda a Terra. Em sempre soube que enquanto é inverno em um hemisfério, é verão no outro. Então tem mesmo razão o Joãozinho. Não pode ser essa a causa do calor ou frio na Terra. Também é absolutamente claro e lógico que se a Terra se aproxima e se afasta do Sol, este deveria mudar de tamanho aparente. Deveria ser maior quando mais próximo e menor quando mais distante.

- Como eu não havia pensado nisso antes? Como posso ter “aprendido” coisas tão evidentemente erradas? Como nunca me ocorreu, sequer, alguma dúvida sobre isso? Como posso eu estar durante tantos anos “ensinando” uma coisa que eu julgava Ciência, e que, de repente, pode ser totalmente demolida pelo raciocínio ingênuo de um garoto, sem nenhum outro conhecimento científico?

Remoendo essas idéias, a professora se põe a pensar em tantas outras coisas que poderiam ser tão falsas e inconsistentes como as “causas” para o verão e o inverno.

- Haverá sempre um Joãozinho para levantar dúvidas? Por que tantas outras crianças aceitaram sem resistência o que eu disse? Por que apenas o Joãozinho resistiu e não “engoliu”? No caso do verão e do inverno a inconsistência foi facilmente verificada. Se “engolimos” coisas tão evidentemente erradas, devemos estar “engolindo” coisas mais erradas, mais sérias e menos evidentes. Podemos estar tão habituados a repetir as mesmas coisas que já nem nos damos conta de que muitas delas podem ter sido simplesmente acreditadas; muitas podem ser simples “atos de fé” ou credence que nós passamos adiante como verdades científicas ou históricas.

Atos de fé em nome da ciência

É evidente que não pretendemos nem podemos provar tudo aquilo que dizemos ou tudo o que nos dizem. No entanto, o episódio do Joãozinho levantara um problema sério para a professora.

Talvez a maioria dos alunos já esteja “domada” pela escola. Sem perceberem, professores podem estar fazendo exatamente o contrário do que pensam ou desejam fazer. Talvez o papel da escola tenha muito a ver com a nossa passividade e com os problemas do nosso dia-a-dia.

Todas as crianças têm uma nata curiosidade para saber os “como” e os “porque” das coisas, especialmente da natureza. À medida que a escola vai ensinando, o gosto e a curiosidade vão-se extinguindo, chegando frequentemente à aversão.

Quantas vezes nossas escolas, não só a de Joãozinho, pensam estar tratando de Ciência por falar em coisas como átomos, órbitas, núcleos, elétrons, etc... Não são palavras difíceis que conferem à nossa fala o caráter ou “status” de coisa científica. Podemos falar das coisas mais rebuscadas e, sem querer estamos impingindo a nossos alunos “atos de fé”, que nada dizem ou não são mais que uma credence, como tantas outras. Não é à toa o que se diz da escola: um lugar onde as cabecinhas entram redondinhas e saem quase todas “quadrinhas”.



LUA E PLANETAS: MOVIMENTO APARENTE

A Gravitação Universal explica os movimentos aparentes, mas preenche com artefatos mentais nossa ignorância sobre as causas

Nesta aula falaremos da Lua, dos planetas visíveis, de seus movimentos aparentes e da ocorrência de eclipses solares e lunares.

4.1 A Lua

Hoje a distância da Lua pode ser determinada com alta precisão medindo-se o tempo de ida e volta de sinais de *radar*. Esses sinais de ondas de rádio viajam no espaço com a velocidade da luz. Mas no passado essa distância foi obtida por paralaxe. Para uma linha de base equivalente ao raio da Terra, a paralaxe lunar é $57'$, quase 1° . Usando esse dado podemos concluir que a Lua dista da Terra 384 mil km.

A Lua tem praticamente o mesmo tamanho angular do Sol, cerca de $0,5^\circ$. Combinando esta informação com a distância obtida antes, podemos saber que o seu raio mede 1.738 km. Apenas para dar uma idéia aproximada, isso corresponde à distância, por rodovia, entre São Paulo e Rio Grande, RS, ou entre São Paulo e Monte Pascoal, BA.

Diz-se que a Lua orbita ao redor da Terra, mas, rigorosamente a Lua e a Terra orbitam o centro comum de gravidade. Esse centro se encontra mais próximo do objeto com massa maior, no caso, a Terra. Não é tão fácil determinar a massa da Lua. Essa tarefa foi realizada com grande precisão através da análise do movimento de satélites artificiais que orbitaram ao redor dela. No passado ela foi calculada localizando-se o centro comum de gravidade⁷. A massa da Lua é 1,23% da massa da Terra. Portanto o centro de gravidade encontra-se na reta que une os centros da Terra e da Lua, a 1,23% de seu comprimento ou 4.723 km do centro da Terra. O centro de gravidade encontra-se portanto dentro da Terra. Comparativamente a outros satélites, a Lua tem massa grande em relação à da Terra, o que justifica se falar num Sistema Terra-Lua.

A órbita da Lua ao redor do Sol apresenta ondulação com período igual ao período orbital da Lua ao redor da Terra (*mês sideral*), todavia ela mantém sempre forma côncava como mostra a *Figura 4.1*.

⁷Mediu-se a *desigualdade lunar*, uma anomalia mensal na longitude do Sol devida ao movimento da Terra numa pequena elipse ao redor do centro de massa do sistema Terra-Lua.



Figura 4.1. Órbita do Sistema Terra-Lua ao redor do Sol. Fonte: Mehlin, T. G. "Astronomy", John Wiley & Sons, Inc., New York, 302-303 (1966)

Dividindo-se a massa da Lua pelo seu volume obtém-se a densidade: $3,3 \text{ g/cm}^3$. Essa densidade é menor do que a da Terra: $5,5 \text{ g/cm}^3$ e é comparável com a densidade do manto da Terra, não do núcleo. O manto tem um teor menor de ferro e níquel.

A Lua não tem atmosfera, portanto, lá não há propagação do som, nem fenômenos meteorológicos. Lá o céu diurno não fica claro como aqui na Terra.

Mesmo a olho nu podemos notar que a superfície da Lua tem partes escuras e claras (Figura 4.2). As partes escuras, por causa da aparência, foram denominadas *mares*, nome mantido até hoje a despeito de termos a certeza de que lá não há massas de água. Essas regiões são planas, baixas e de formação mais recente. Elas foram preenchidas por lavas derretidas (basaltos). As partes



Figura 4.2. Os principais mares e cratera da lua. Nomes das crateras em preto. Fonte: <http://reference.aol.com>

claras são chamadas *continentes*. Elas são mais claras, mais elevadas e mais antigas. São constituídas de rochas de menor densidade que, quando o interior da Lua ainda estava quente e fundido, flutuaram até a superfície espontaneamente, ou após colisões com objetos cósmicos. Tanto os mares como os continentes estão marcados por crateras resultantes de impactos com fragmentos cósmicos. Pela ausência de atmosfera e hidrosfera, essas crateras não foram obliteradas pela erosão, como na Terra. A contagem das crateras de certas regiões lunares, combinada com a datação de rochas desses mesmos locais, trazidas pelos astronautas, nos permite estimar a idade das formações lunares e inferir que, entre 4,1 e 3,9 bilhões de anos atrás, a Lua foi intensamente bombardeada por fragmentos cósmicos.

O calor interno da Lua devido à energia gravitacional dos fragmentos que a compuseram, e devido ao decaimento nuclear de elementos pesados como o urânio, plutônio e tório (radioatividade), praticamente já foi irradiado para o espaço e perdido. Isso acontece mais rapidamente em corpos menores, pois o tempo de resfriamento é diretamente proporcional ao volume do corpo que contém o calor, e inversamente proporcional à superfície que irradia. Portanto o tempo de resfriamento é proporcional ao raio. Quanto menor o corpo, mais

rapidamente ele se resfria e se torna inativo. Enquanto na Terra ainda ocorrem atividades geológicas (vulcanismo, movimento de placas tectônicas etc), elas praticamente já cessaram na Lua há cerca de 3,2 bilhões de anos.

Várias teorias foram propostas para a origem da Lua. Uma propunha que ela se formou no mesmo processo que formou a Terra. Mas essa teoria é inaceitável, pois as composições químicas são diferentes. Outra propôs que ela teria se formado longe da Terra, mas teria sido capturada ao passar perto. Mas cálculos demonstram que tal captura pela atração gravitacional da Terra é impossível. Outra teoria propôs que a Lua teria escapado da Terra porque esta girava muito rapidamente. Mas os cálculos mostraram que essa hipótese também não era plausível.

Hoje a teoria mais aceita é que a Lua se formou logo nos primórdios do Sistema Solar quando a Terra sofreu um esbarrão com um corpo do tamanho de Marte. As colisões eram então muito mais frequentes. Houve a fragmentação desse corpo e de uma parte do manto da Terra. As partes densas desse corpo se sedimentaram na Terra, mas os fragmentos menos densos arremessados para o espaço, se juntaram e formaram a Lua que logo passou a orbitar ao redor da Terra.

O Sistema Solar, como veremos na última aula, se formou há 4,6 bilhões de anos. Os planetas, satélites e asteróides se formaram pela acumulação de *planetesimais* (seção 6.2.2), fragmentos sólidos com dimensões quilométricas. Apesar de ser um produto de colisão, a Lua também teria nascido praticamente no primeiro momento do Sistema Solar. Há 4,4 bilhões de anos a crosta da Lua já estava solidificada e formou os continentes. Entre 4,1 e 3,9 bilhões de anos ocorreu aquele intenso bombardeamento que atingiu também os demais corpos do Sistema Solar, inclusive a Terra, por planetesimais que tinham sobrado no espaço interplanetário, sem terem sido aproveitados para formar planetas, satélites e asteróides. O posterior derramamento de basalto que formou os mares ocorreu enquanto o interior da Lua ainda não tinha se resfriado.

4.2 Movimento aparente da Lua

4.2.1 Mês sideral

A Lua completa uma volta na esfera celeste a cada 27,321662 dias. Esse período, medido em relação às estrelas fixas, é chamado *mês sideral* e corresponde ao período orbital da Lua ao redor da Terra. Se a Lua caminha 360° em 1 mês sideral, por uma simples regra-de-três concluiremos que ela caminha $0,55^\circ$ /hora em relação às estrelas fixas. Esse deslocamento é relativamente rápido, pois corresponde aproximadamente a um diâmetro da Lua por hora. Assim, numa mesma noite, em poucas horas podemos notar o deslocamento da Lua em relação às estrelas fixas.

A maior parte desse deslocamento é para o leste (portanto direto), ou seja, no sentido contrário ao do movimento diurno do Sol. Por isso, cada dia a lua se atrasa em relação ao Sol. Com a taxa de deslocamento acima, a Lua se atrasa 13,2°/dia em relação às estrelas fixas, o que corresponde a 53 minutos/dia. Esse é o atraso médio da Lua em relação ao Sol. O atraso real das passagens meridianas da Lua não é de 53 minutos todos os dias, mas varia entre 39 e 77 minutos. As causas dessa variação são: (i) a velocidade orbital da Lua não é constante; (ii) a órbita da Lua não coincide com o equador. Nem tampouco coincide com a eclíptica, mas forma com ela um ângulo de 05,13°. Por isso a projeção do movimento no equador varia de dia para dia.

O atraso do nascer e do ocaso varia ainda mais, pois depende também da inclinação da órbita da Lua em relação ao horizonte leste e oeste na localidade do observador.

4.2.2 Fases da Lua. Mês sinódico

A Lua muda periodicamente de aspecto, ou de aparência. Essa mudança consiste nas *fases da Lua*. As fases sucessivas são: nova, quarto crescente, cheia, quarto minguante e nova outra vez. A *Figura 4.3* mostra que as fases da Lua resultam da observação dos hemisférios iluminado e não-iluminado pelo Sol, de diferentes posições relativas da Terra.

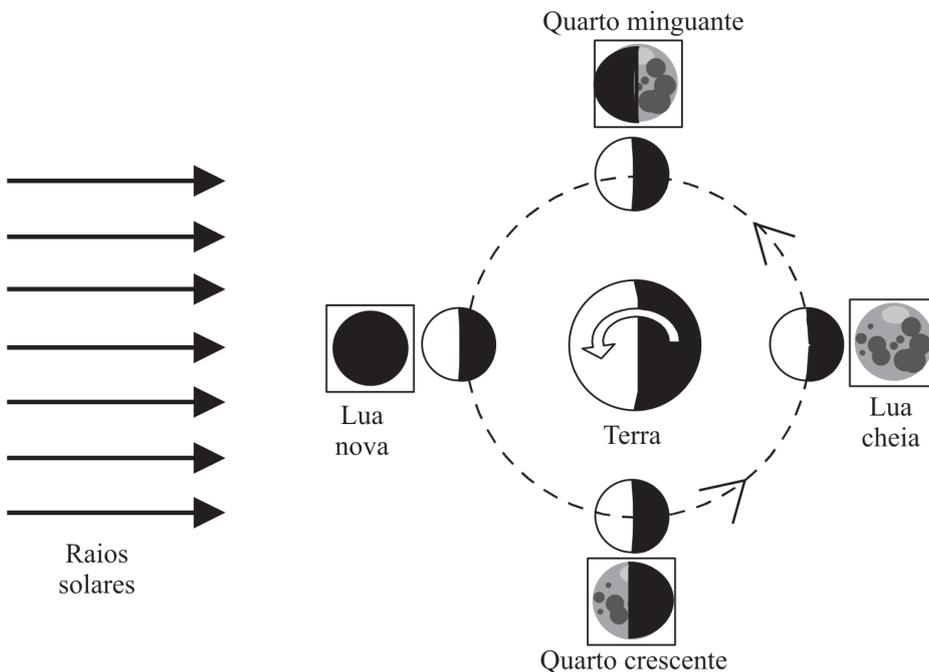
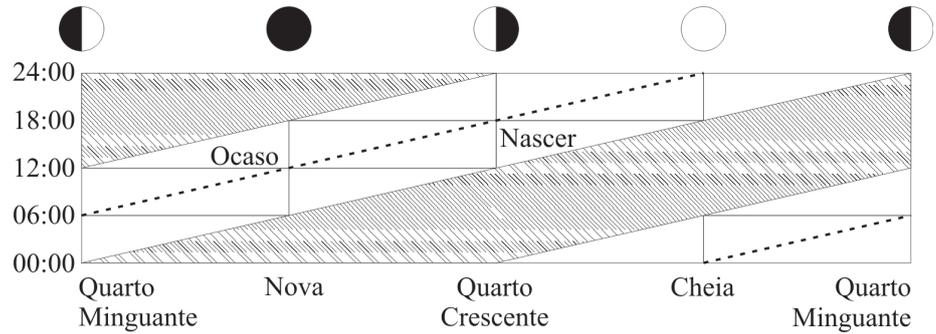


Figura 4.3 (fora de escala). Fases da Lua. O plano do papel é o plano da órbita da Lua ao redor da Terra. O sentido de rotação da Terra e do movimento orbital da Lua é o visto de um ponto do hemisfério celeste norte. Devido à grande distância do Sol, seus raios (à esquerda) chegam praticamente paralelos ao sistema Terra-Lua mas, em geral, eles não jazem no plano do papel. Quando jazem, ocorrem eclipses (ver seção 4.2.4.2 adiante). Nos quadros são mostradas as fases vistas por um observador do hemisfério sul da Terra

Com ajuda da Figura acima é fácil entender que, para um observador na Terra, a lua nova nasce e se põe praticamente com o Sol, pois ambos se encontram no céu quase na mesma direção. Já a lua cheia, por estar diametralmente oposta ao Sol, nasce praticamente quando o Sol está se pondo e vice-versa. Considerando que a Lua se atrasa praticamente 1 hora por dia em relação ao Sol, e que cada fase da Lua dura aproximadamente 1 semana, podemos

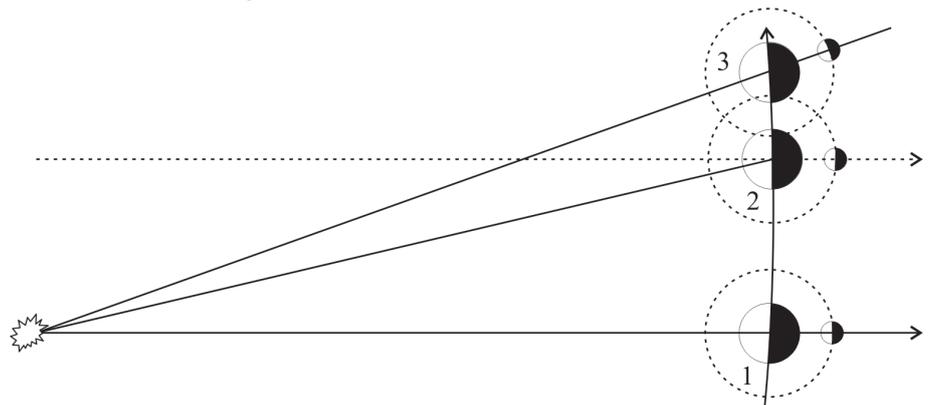
construir o seguinte gráfico de valores aproximados do nascer, passagem meridiana e ocaso para cada fase da Lua (Figura 4.4).

Figura 4.4. Este gráfico relaciona as fases da Lua com a sua posição no céu e a hora local. As áreas hachuradas indicam os horários em que a Lua não é visível acima do horizonte. A linha vermelha indica a passagem meridiana da Lua



As fases da Lua se repetem, não com a periodicidade do mês sideral, mas do *mês sinódico* cuja duração é 29,530589 dias. O mês sinódico é também chamado *lunação*. A razão pela qual o mês sinódico é mais longo do que o mês sideral é semelhante à razão pela qual o dia solar é mais longo do que o dia sideral (Figura 4.5).

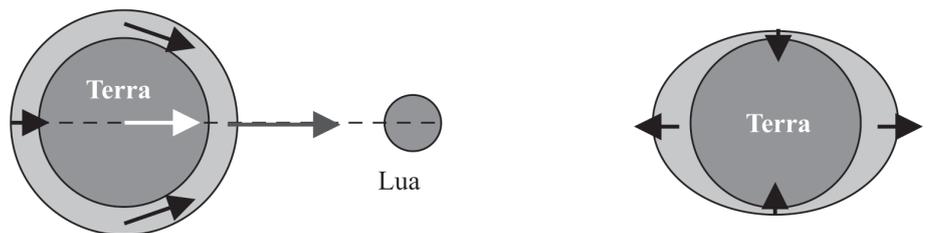
Figura 4.5 (fora de escala). O plano do papel é o plano da eclíptica. É mostrado um trecho da órbita da Terra. Na posição 1 é lua cheia. Na posição 2 a Lua é vista da Terra, na mesma direção em relação às estrelas fixas, portanto, passou-se um mês sideral e a Lua completou uma volta ao redor da Terra. Mas somente quando a Terra chega ao ponto 3 é que ocorre uma nova lua cheia. Portanto o mês sinódico é mais longo do que o mês sideral



4.2.3 Marés. Diminuição da rotação da Terra

Num local à beira-mar podemos notar a ocorrência de duas marés altas e duas baixas por dia. A rigor o período de recorrência das marés não é o dia solar, mas um período de tempo, em média, 53 minutos mais longo. A maré é uma deformação da massa fluida dos oceanos causada pela atração gravitacional da Lua (Figura 4.6). Ocorre também uma deformação menos perceptível na parte sólida da Terra, assim como na atmosfera. A deformação num corpo por força gravitacional ocorre quando ela atua diferencialmente em partes desse corpo.

Figura 4.6 (fora de escala). A Figura do lado esquerdo mostra a atração gravitacional exercida pela Lua em diversos pontos da Terra: no centro (seta branca) e em quatro pontos do fluido oceânico (setas



A Lua não está sempre no plano equatorial da Terra como na Figura acima. Pode se afastar desse plano até $28,56^\circ$ ($23,43^\circ + 5,13^\circ$). Nesse caso, um observador num ponto da Terra verá pares assimétricos de marés.

O Sol se encontra muito mais distante da Terra do que a Lua, mas sua massa é incomparavelmente maior. Por isso ele torna as marés mais pronunciadas quando ele se alinha juntamente com a Terra e a Lua. Isso ocorre nas luas cheias e novas. O efeito é oposto no quarto minguante e crescente.

A Lua mostra sempre a mesma face para a Terra. A outra face é oculta. Isso não quer dizer que a Lua não gire. Ela tem uma rotação cujo período coincide com o período orbital ao redor da Terra. Esse período é o mês sideral. Isso não é mera coincidência, mas uma consequência da dissipação de energia nas marés que a Terra também exerce na Lua. É que a deformação não é produzida, nem destruída instantaneamente. Há uma inércia e o retardamento faz com que a maré não fique perfeitamente alinhada, pois a Lua já girou um certo ângulo e caminhou em sua órbita. Há uma tendência natural para suprimir esse retardamento através do ajustamento do período orbital ao período de rotação. Quando isso acontece a dissipação de energia das marés é minimizada. Movimentos orbitais em que o período de rotação é igual ao período orbital são chamados *síncronos* e ocorrem com relativa frequência no Universo. A Lua se acomodou de tal forma que, na face voltada para a Terra a crosta é mais fina do que na chamada "face oculta" e a ocorrência de mares é maior.

Acredita-se que há bilhões de anos, Terra e Lua estavam mais próximos e a rotação da Terra era mais rápida. Essa rotação teria diminuído, não só pela dissipação de energia rotacional pelas marés, mas também pela transferência de momento angular (propriedade física que se conserva) para o movimento orbital da Lua. O já mencionado retardamento na formação e desaparecimento das deformações de marés, rompe a simetria na distribuição da massa lunar. A atração da Terra atuando nessa assimetria possibilita, ainda hoje, a transferência de momento angular. Ao mesmo tempo em que a rotação da Terra diminui, a Lua se afasta da Terra. O período de rotação da Terra aumenta cerca de 0,0017 s por século. Isso é pouco, mas o efeito cumulativo em 2 mil anos corresponde a 3 horas. Isso precisa ser levado em conta nos registros antigos de eclipses e outros eventos astronômicos. Teoricamente daqui a vários milhões de anos, o dia será igual ao mês sideral, mas ambos corresponderão a 47 vezes o dia atual. Então a Lua não terá mais movimento diurno. Ficará fixa no céu para os observadores que estiverem morando num hemisfério da Terra.

A dissipação de energia por marés explica a atual atividade vulcânica do satélite Io, de Júpiter. Sendo um satélite pequeno, seu calor interno de origem gravitacional ou radioativa já foi irradiado. As deformações devidas à maré se intensificam quando um objeto se aproxima de um outro cuja massa é grande. Elas podem chegar a causar a ruptura e a destruição do objeto. Isso

pretas). Nos três pontos sobre a linha que une a Terra à Lua, a atração é orientada segundo essa mesma linha para o centro da Lua, porém, decresce segundo o inverso do quadrado da distância. Nos dois pontos que estão fora dessa linha, a atração é orientada para o centro da Lua. Particularmente a atração que a Lua exerce no centro da Terra, atua na Terra como um todo. Se cada uma das forças que atua em diferentes pontos do fluido oceânico fosse igual à que atua no centro em intensidade (tamanho da seta) e direção, a Lua atrairia a Terra como um todo, sem que esta sofresse deformação. Mas não é esse o caso. Na Figura da direita as setas representam as forças subtraídas da força que atua no centro da Terra. São as forças diferenciais. Elas são as chamadas forças de maré que deformam a massa oceânica, pois tendem a arrancá-la no lado voltado para a Lua e no lado oposto, e a comprimi-la na direção perpendicular. Considerando o eixo de rotação da Terra perpendicular ao plano do papel, entendemos a ocorrência, num mesmo ponto da Terra, de duas marés altas e duas baixas a cada 25 horas aproximadamente

tem acontecido com cometas que se aproximam muito do Sol ou de Júpiter. O *limite de Roche* definido por Édouard Roche (1820-83), é a distância $r \approx (2M/\rho)^{1/3}$ entre um corpo com densidade média ρ e outro com massa M que, se ultrapassada, causa a ruptura do primeiro. Supõe-se que o objeto que se rompe tinha suas partes ligadas pela atração gravitacional. Acredita-se que a ruptura de um satélite que tenha se aproximado excessivamente explique a formação de alguns anéis em redor de planetas, como Saturno.

Apesar da rotação síncrona da Lua, daqui da Terra podemos observar até 61% de sua superfície. O acesso a mais do que 50% é devido a vários fatores: variação da velocidade orbital da Lua, inclinação do eixo de rotação da Lua de $06^\circ 40'$ em relação ao seu plano orbital, paralaxe diurna e libração física em torno do eixo Terra-Lua.

4.2.4 Eclipses

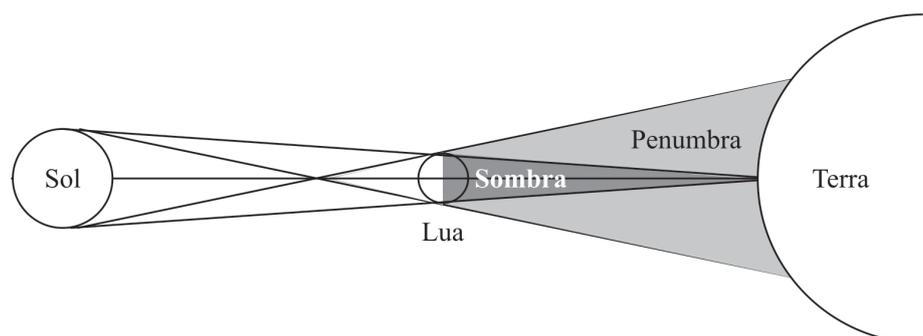
Em seu movimento no céu a Lua pode ocultar astros mais distantes. *Ocultações* de estrelas ocorrem mais freqüentemente do que as de planetas. A cronometragem precisa do início e fim da ocultação feita por observadores em diferentes pontos da Terra é valiosa para aprimorar a determinação do complicado movimento da Lua, e o mapeamento dos acidentes do bordo lunar.

4.2.4.1 Eclipse solar

A ocultação do Sol pela Lua é o *eclipse solar*. Uma coincidência no mínimo curiosa é que, assim como o diâmetro do Sol é umas 400 vezes maior que o da Lua, a distância da Terra ao Sol também é umas 400 vezes maior que a distância à Lua. Por essa razão, o Sol e a Lua têm dimensões angulares muito parecidas, cerca de $0,5^\circ$. Se não houvesse essa coincidência, o fenômeno dos eclipses totais do Sol seria impossível.

A geometria do eclipse solar é mostrada esquematicamente na *Figura 4.7* abaixo.

Figura 4.7 (fora de escala).
Associado ao hemisfério escuro, a Lua tem um cone de sombra. Um observador que esteja no interior desse cone não pode enxergar o Sol. Um cone de penumbra circunda o cone de sombra. Da região de penumbra um observador só enxerga parte do Sol



Levando em conta que o diâmetro do Sol é 400 vezes maior que o da Lua, o comprimento do cone de sombra é $1/400$ da distância entre eles, ou seja, $(1 \text{ UA})/400 = 375$ mil km. Essa distância é pouco menor que a distância média da Terra à Lua.

Para que ocorra um *eclipse total do Sol* é necessário que o cone de sombra atinja um ponto da superfície da Terra. A área atingida tem

uma extensão típica de algumas centenas de km. Nela o eclipse é total. Circundando essa área há uma região mais extensa, de milhares de km, na qual o eclipse é *parcial*.

O cone de sombra não permanece estacionário num mesmo local da Terra. A Lua orbita ao redor da Terra para o leste, de modo que o cone de sombra varre a superfície da Terra também para leste a cerca de 3 mil km/h, embora a Terra gire para leste. A trajetória da sombra pode se estender sobre vários milhares de km. Em cada localidade ao longo dessa trajetória será visto o eclipse total, porém, em instantes diferentes.

Para um observador estacionado num ponto da trajetória da sombra, todo o eclipse durará cerca de 2h 40m. Ao mesmo tempo em que o Sol se desloca de leste para oeste, a Lua cujo movimento diurno é mais lento, será visto caminhar no sentido oposto em relação ao Sol (*Figura 4.8*). O **primeiro contato** ocorrerá portanto no lado oeste do disco solar. Depois o disco lunar irá cobrindo cada vez mais o disco solar até cobri-lo inteiramente. Será então o **segundo contato**. Por alguns minutos (7,5 min no máximo), o disco lunar (maior que o solar) caminhará sobre o disco solar. São os instantes da **totalidade do eclipse**. Quando o bordo oeste começar a ficar descoberto será o **terceiro contato**. Em seguida, porções cada vez maiores do Sol ficarão expostas até que, no **quarto contato**, todo o disco solar voltará a ficar inteiramente descoberto.

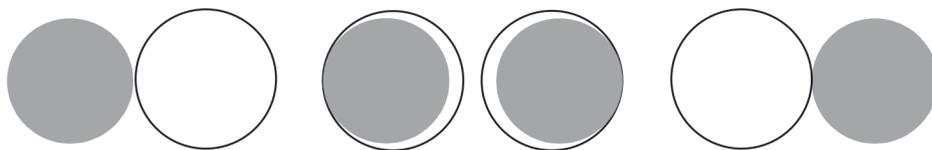


Figura 4.8. Os quatro contatos num eclipse total do Sol. O disco lunar (escuro) é levemente maior que o disco solar (claro). Ele cruza o disco solar aproximadamente na direção oeste (esquerda) leste (direita)

Durante a totalidade o céu fica escuro em pleno dia. Estrelas podem ser observadas, particularmente as da constelação pela qual o Sol está passando naquela época do ano, assim como a coroa do Sol e **protuberâncias** avermelhadas bem perto da borda do disco solar (*Figura 4.9*).

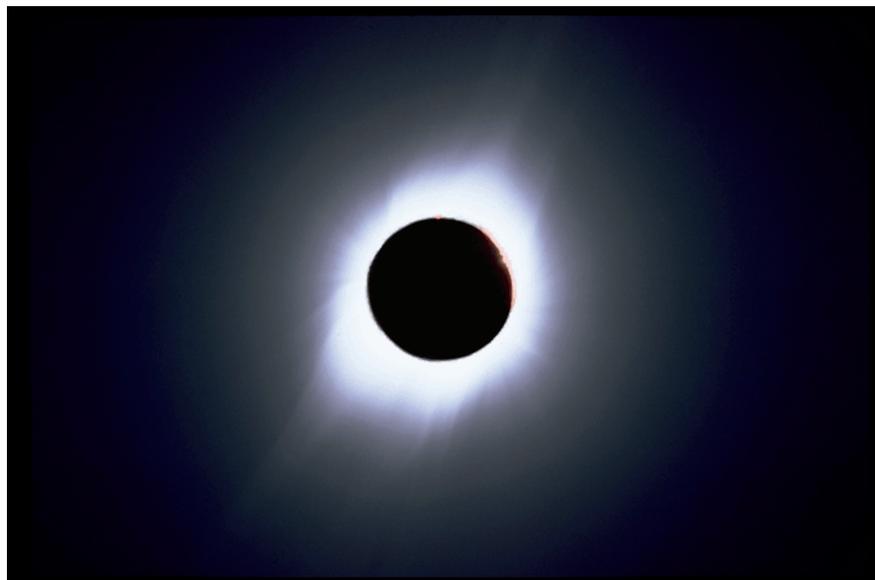
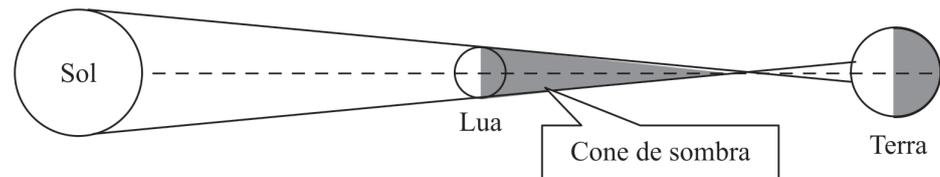


Figura 4.9. Imagem da coroa solar obtida pela expedição do MAST/MCT ao eclipse de 26/02/98 em Aruba, e processada digitalmente na UNESP, Guaratinguetá, SP

Eclipse parcial do Sol é aquele em que só o cone de penumbra atinge a superfície da Terra.

Não só a distância do Sol à Lua pode variar, mas também a distância da Lua à Terra. Quando a Lua se encontra mais perto do Sol e mais longe da Terra, as condições são favoráveis para que a Terra não seja atingida pelo cone de sombra, mas pelo seu prolongamento além do vértice (*Figura 4.10*). Tem-se então um **eclipse anular do Sol**. O observador verá o disco solar maior que o disco lunar, portanto, no auge do eclipse verá um anel brilhante circundando um disco lunar escuro.

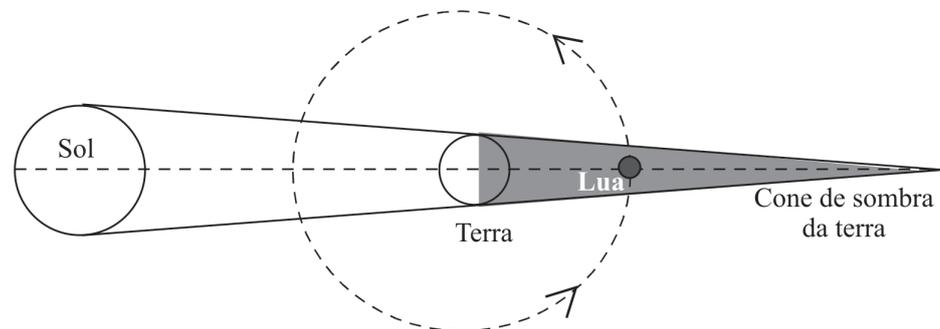
Figura 4.10 (fora de escala). Quando a Terra se encontra além do vértice do cone de sombra, o eclipse é anular



4.2.4.2 Eclipse lunar

Os **eclipses lunares** não consistem propriamente num fenômeno de ocultação. Sua geometria está representada esquematicamente na *Figura 4.11*. Onde a Lua cruza o cone de sombra da Terra, o diâmetro do cone é aproximadamente o triplo do diâmetro da Lua. Se a Lua passar pelo centro da sombra, o eclipse lunar dura tipicamente 3h 40m.

Figura 4.11 (fora de escala). A Lua orbita ao redor da Terra. A lua cheia ocasionalmente ingressa no cone de sombra da Terra. Quando isso acontece, temos um eclipse lunar



Em alguns eclipses lunares a Lua ingressa apenas no cone de penumbra da Terra. Então o eclipse lunar é **penumbral**, cuja percepção visual é difícil.

Uma diferença fundamental entre o eclipse solar e lunar é que neste, a entrada da Lua no cone de sombra, e a saída, são vistas ao mesmo tempo por todos os observadores no hemisfério noturno (*Figura 4.11*). Na verdade um eclipse lunar pode ser visto de mais da metade da superfície da Terra, cerca de $2/3$. Há simultaneidade na observação dos instantes relevantes do eclipse para observadores postados em diferentes longitudes. No passado, quando não havia o rádio para a transmissão quase-instantânea da hora, nem cronômetros confiáveis para o transporte da hora certa em longas viagens, os eclipses lunares serviam para a difícil tarefa da determinação da longitude. Em duas localidades distintas a posição de uma ou mais estrelas fixas era medida simultaneamente a

algum instante relevante do eclipse lunar. A diferença da posição das estrelas fixas fornecia a diferença horária do movimento diurno, o que era equivalente a determinar a diferença de longitude.

É fácil entender porque num eclipse solar a fase da Lua é necessariamente nova e, num eclipse lunar, cheia. Mas há muitas luas novas sem eclipse solar, e muitas luas cheias sem eclipse lunar. Podemos então dizer que a fase nova é condição necessária para um eclipse solar, mas não suficiente. O mesmo podemos afirmar sobre a fase cheia em relação ao eclipse lunar. O motivo é que o plano da órbita da Terra não coincide com o plano da eclíptica, mas forma um ângulo de $5,13^\circ$ (Figura 4.12). Assim, o movimento da Lua no céu é parecido com o do Sol na eclíptica, mas enquanto o Sol oscila entre $23,43^\circ$ para o norte e para o sul do equador celeste, a Lua oscila entre ângulos compreendidos entre $(23,43 + 5,13)^\circ = 28,56^\circ$ e $(23,43 - 5,13)^\circ = 18,30^\circ$ com periodicidade de 18 anos e 7 meses.

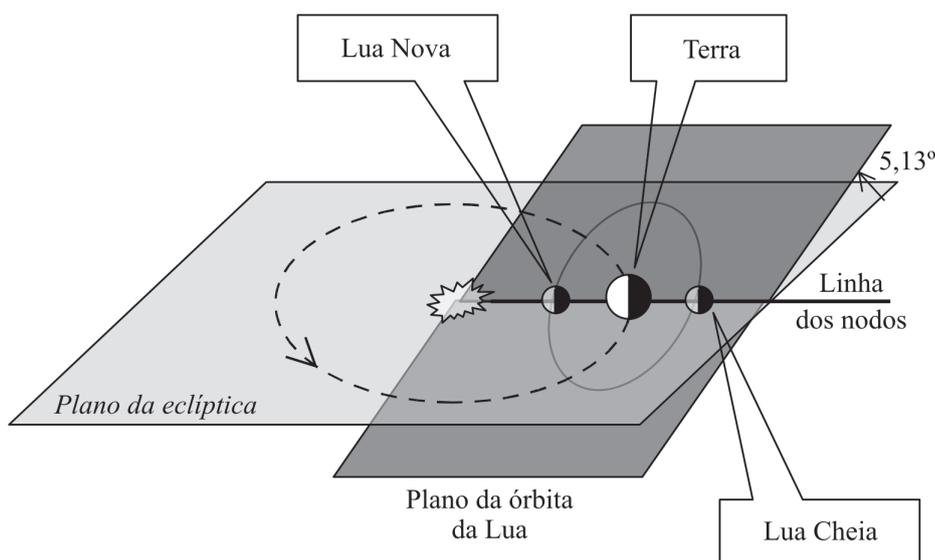


Figura 4.12 (fora de escala). Mostra-se o plano da órbita da Lua formando um ângulo de $5,13^\circ$ com a eclíptica. A interseção entre esses dois planos é a linha dos nodos. Para que ocorra um eclipse é preciso que a Lua esteja também nessa linha ou perto dela. Por outras palavras, para que ocorra um eclipse é preciso que a Lua esteja no plano da eclíptica, ou perto dela

Um eclipse pode ocorrer até 19 dias antes ou depois da passagem da Terra pela **linha dos nodos**. Se a linha dos nodos tivesse orientação fixa, eclipses deveriam ocorrer a cada 6 meses. Mas ela gira. Dá uma volta a cada 18 anos e 7 meses no sentido contrário ao do Sol na eclíptica. Por isso as chamadas estações dos eclipses nas quais eclipses lunares e solares ocorrem em sucessivas luas novas e cheias, se repetem 9,3 dias antes de se completar 6 meses.

Na Terra toda devem ocorrer cada ano pelo menos 2 eclipses solares e, no máximo, 5. O número máximo de eclipses solares e lunares é 7 por ano. Então, as combinações possíveis são: 5 eclipses solares e 2 lunares, ou 4 solares e 3 lunares. O número de eclipses lunares num ano pode variar de 0 até 3.

Uma série de 70 eclipses com as mesmas características, 41 do Sol e 29 da Lua, repete-se a cada ciclo de 223 lunações. Esse período chama-se **saros**. Esse período envolve a fração 0,32 do dia, de modo que os eclipses da série

seguinte se atrasam cerca de 8 h, ou seja, ocorrem numa longitude cerca de 120° para o oeste.

4.3 Movimento aparente dos planetas

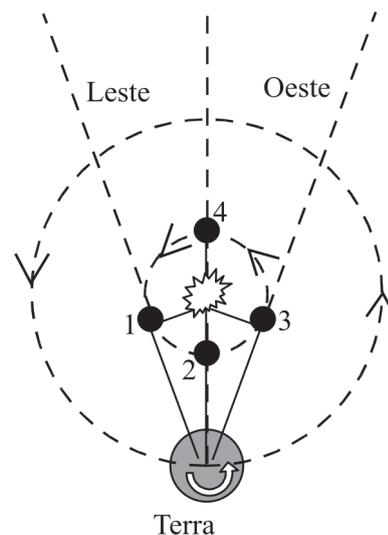
Os planetas também se movimentam no céu na faixa do zodíaco. Mas enquanto o Sol e a Lua têm movimento direto (para leste), os planetas ocasionalmente têm *movimento retrógrado* (para oeste).

Figura 4.13. O plano do papel representa o plano da eclíptica visto do hemisfério celeste norte. As setas indicam os movimentos orbitais e a rotação da Terra no sentido direto. A Terra está num ponto de sua órbita de onde um planeta interior é visto em pontos especiais de sua órbita que definem as configurações planetárias. Nos pontos 1 e 3 o planeta interior está na elongação máxima do Sol, ou seja, ele nunca se afasta angularmente do Sol além desse ângulo. O segmento que une a Terra e o planeta nesses pontos é perpendicular ao segmento que une o planeta ao Sol. Em 1 o planeta interior está na elongação máxima leste, e em 3, na elongação máxima oeste. É que para o observador na Terra, no meridiano que passa pelo Sol, o lado direito da Figura está a oeste do Sol, e o lado esquerdo, a leste. No ponto 2 o planeta interno está em conjunção inferior com o Sol e no ponto 4, em conjunção superior. O planeta interior fica mais perto da Terra na conjunção inferior, e mais longe na conjunção superior

Nas discussões que faremos em seguida suporemos que todos os planetas, inclusive a Terra, orbitam ao redor do Sol. Para simplificar, suporemos que todas as órbitas são coplanares e circulares, com o Sol ao centro. Devemos distinguir dois tipos de planetas: os *interiores* e os *exteriores* conforme as órbitas estejam dentro ou fora da órbita da Terra. Os planetas interiores são Mercúrio e Vênus. Os exteriores: Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Netuno e Plutão, mas os três últimos não são visíveis a olho nu. O movimento aparente de um planeta é a projeção na esfera celeste, vista da Terra também em movimento ao redor do Sol, do movimento que o planeta realiza no espaço.

4.3.1 Movimento aparente de planetas interiores

O movimento orbital de um planeta interior é representado na *Figura 4. 13*.



A

elongação máxima de Mercúrio chega a 28° e a de Vênus, 48° . Portanto, os planetas interiores, além de estarem sempre no zodíaco, nunca se afastam do Sol no céu por um ângulo maior que sua elongação máxima. Por essa razão esses planetas são normalmente vistos pouco antes do nascer-do-Sol, ou pouco depois do pôr-do-Sol.

Num mesmo intervalo de tempo, o arco descrito por um planeta interior corresponde a um ângulo maior do que o do arco descrito pela Terra. Assim, usando a *Figura 4.13* podemos concluir que o movimento do planeta interior é direto (para leste) desde a elongação máxima oeste até

a elongação máxima leste, e retrógrado (para oeste) desde a elongação máxima leste até a elongação máxima oeste. Basta acompanhar o sentido do movimento descrito na esfera celeste pelo prolongamento do segmento de reta que une a Terra ao planeta interior, enquanto este se desloca em sua órbita. O movimento de um planeta interior na esfera celeste parece a oscilação de um pêndulo ao redor do Sol. No meio do movimento direto ocorre uma conjunção superior e, no meio do movimento retrógrado, uma conjunção inferior.

Desde uma conjunção superior até a seguinte conjunção inferior o planeta interior é vespertino, tornando-se matutino desde essa conjunção inferior até a seguinte conjunção superior (Figuras 4.13 e 4.14). Durante o ciclo em que o planeta é vespertino ocorre a elongação máxima leste, quando o movimento direto se torna retrógrado. Durante o ciclo em que o planeta é matutino ocorre a elongação máxima oeste, quando o movimento retrógrado se torna direto.

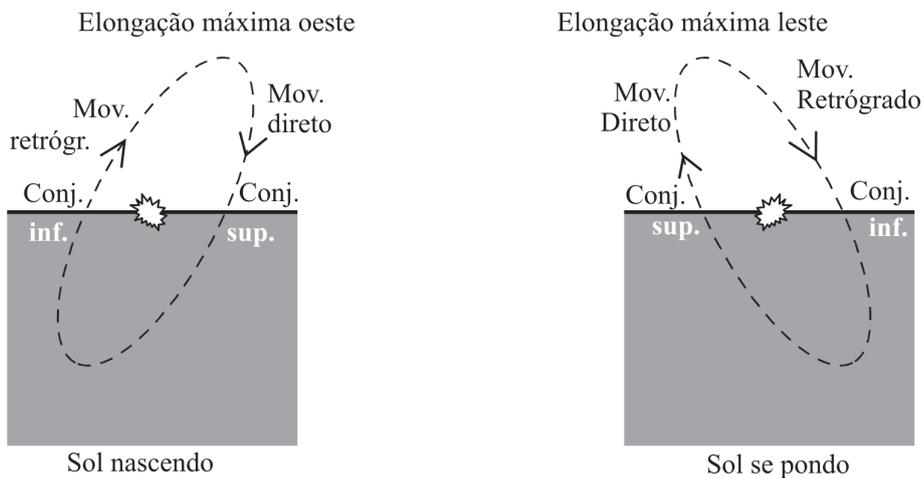


Figura 4.14. À esquerda o Sol se encontra no horizonte leste e à direita, no horizonte oeste

Dependendo da época, Vênus pode se tornar o astro mais brilhante depois do Sol e da Lua e, então, pode ser visto até mesmo à luz do dia. O brilho é maior cerca de 1 mês antes da elongação máxima oeste, quando Vênus é matutino, ou 1 mês depois da elongação máxima leste, quando é vespertino.

Os planetas interiores apresentam **fases**, como a Lua, que são dificilmente perceptíveis a olho nu. Na conjunção inferior, embora o planeta assuma o máximo tamanho angular, seu brilho é mínimo, pois só vemos o hemisfério escuro do planeta. Também não é na conjunção superior que o brilho é máximo, pois embora observemos todo o hemisfério iluminado, o planeta se encontra no ponto mais afastado da Terra e seu tamanho angular é mínimo.

O **período sinódico** de um planeta interior é o tempo para a repetição de uma mesma **configuração planetária**. Uma vez que esse período é medido em relação ao Sol e não a uma estrela fixa, ele não é o período orbital ou sideral do planeta interior. Mas, o período sideral pode ser determinado

através desta simples equação:

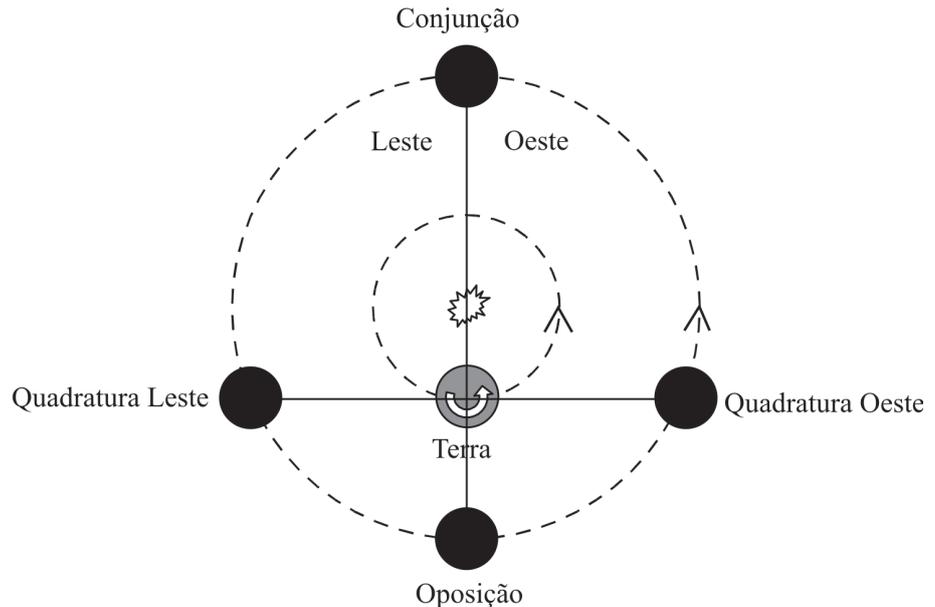
$$1/(\text{Período sideral}) = 1/(\text{Período sinódico}) + 1/(\text{Ano sideral})$$

sendo o ano sideral = 365,256363 dias. O período sinódico de Mercúrio é 116 dias e o de Vênus, 586 dias.

4.3.2 Movimento aparente de planetas exteriores

As *configurações planetárias* dos planetas exteriores estão representadas na *Figura 4.15*.

Figura 4.15. O plano do papel representa o plano da eclíptica visto do hemisfério celeste norte. As setas indicam o sentido direto do movimento orbital dos planetas e da rotação da Terra. A bola preta representa um planeta exterior. O lado direito da Figura está a oeste do Sol e o lado esquerdo a leste para um observador na Terra no meridiano que passa pelo Sol



Tendo uma órbita maior do que a da Terra, os planetas exteriores não são vistos no zodíaco só nas proximidades do Sol, como os planetas interiores. Portanto os planetas exteriores não são necessariamente matutinos ou vespertinos, mas podem ser vistos no céu a qualquer hora da noite.

Tanto na *conjunção* quanto na *oposição*, o planeta exterior fica na situação equivalente à da lua cheia. Mas a distância à Terra é máxima na conjunção e mínima na oposição. Inversamente o tamanho angular é máximo na oposição e mínimo na conjunção. O resultado é que o brilho é máximo na oposição e mínimo na conjunção. Além disso, na conjunção o brilho do planeta é ofuscado pelo Sol. Um leve efeito de fase que consiste numa espécie de minguante ou crescente ocorre perto das quadraturas, mas ele só pode ser bem percebido em Marte, assim mesmo com a ajuda de um telescópio.

Para um certo intervalo de tempo, o ângulo correspondente ao trecho da órbita descrito pela Terra é maior do que o do trecho da órbita descrito pelo planeta exterior. Numa representação simplificada podemos considerar que o planeta exterior fica parado enquanto a Terra descreve um pequeno arco. Com ajuda da Figura acima e considerando que, num dado intervalo de tempo, o arco descrito por um planeta exterior é menor que o arco descrito pela Terra, podemos concluir que, se o planeta exterior estiver num ponto da órbita entre

a quadratura oeste e a quadratura leste (acima da linha das quadraturas), o movimento projetado na esfera celeste será direto. Se o planeta estiver no restante da órbita, o movimento projetado será retrógrado. No meio do trecho com movimento retrógrado ocorre a oposição. O Sol estará no lado oposto da esfera celeste. Portanto quando o planeta está em oposição, sua passagem meridiana ocorre por volta da meia-noite local. No meio do trecho do movimento direto ocorre a conjunção, quando o planeta é visto perto do Sol, portanto é ofuscado por ele. Pouco antes da conjunção o planeta é um astro matutino, depois da conjunção, vespertino.

4.4 Predição do movimento dos astros no espaço

Até aqui falamos do movimento aparente dos astros do Sistema Solar na esfera celeste. Esse movimento é a projeção na esfera celeste de um movimento que se realiza no espaço tridimensional e é visto da Terra, um planeta que orbita o Sol. O movimento dos astros no espaço é governado pela lei da gravitação universal proposta por Isaac Newton (1642-1727) em 1687 em *Principia Mathematica Philosophiae Naturalis*. Aplicando essa teoria a registros do instante e da posição aparente de um astro na esfera celeste, podemos determinar a sua órbita e a sua posição na órbita no espaço. Inversamente, com base nas informações sobre a órbita, podemos prever a posição dos astros. Esta última tarefa é denominada *cálculo das efemérides*. Hoje em dia é possível ter fácil acesso a esses cálculos graças à popularização dos microcomputadores. Um programa muito versátil é o SkyMap cuja versão demonstrativa pode ser obtida gratuitamente de <http://www.skymap.com>. Sobre esse programa falaremos mais na próxima aula.

Referências:

- Bozko, Roberto e Leister, Nelson Vani: "Astronomia Clássica", Cap. 3, *Astronomia, Uma Visão Geral do Universo*, 35, Edusp, 2000
- Ferraz-Mello, Sylvio e Klafke, Júlio César: "A Mecânica Celeste", Cap. 4, *Astronomia, Uma Visão Geral do Universo*, 51, Edusp, 2000
- Matsuura, Oscar T.: *Atlas do Universo*, Editora Scipione, São Paulo, Edição com Errata, 1996
- Matsuura, Oscar T.: "Eclipse Solar", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.3, 1998 www.observatorio.diadema.com.br e www.revistaastronomy.com.br
- Matsuura, Oscar T.: "Lua, o satélite natural da Terra", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.12, 1998 www.observatorio.diadema.com.br e www.revistaastronomy.com.br
- Matsuura, Oscar T.: "Movimentos da Lua", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.17, 1999 www.observatorio.diadema.com.br e www.revistaastronomy.com.br
- Matsuura, Oscar T.: "Movimentos dos planetas interiores", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.18, 1999 www.observatorio.diadema.com.br e www.revistaastronomy.com.br
- Matsuura, Oscar T.: "Movimentos dos planetas exteriores. Teoria Universal da Gravitação", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.19, 1999 www.observatorio.diadema.com.br e www.revistaastronomy.com.br
- Matsuura, Oscar T. e Picazzio, E.: "O Sol", Cap. 5, *Astronomia, Uma Visão Geral do Universo*, 81, Edusp, 2000

Sugestões de atividades práticas:

- Medir o diâmetro angular da Lua
- Observar a superfície da Lua e os acidentes lunares com binóculo, luneta ou telescópio
- Observar numa noite o movimento aparente da Lua
- Observar a sucessão das fases da Lua
- Com ajuda do gráfico da *Figura 4.4*, relacionar a hora local com a fase e a posição da Lua no céu
- Se estiver à beira-mar, anotar os instantes de maré alta e baixa e confrontar essas informações com a posição da Lua no céu
- Ver um vídeo ou imagens de eclipses lunares e solares
- Observar planetas interiores e exteriores numa sucessão de dias
- Utilizar o programa SkyMap num microcomputador para obter efemérides planetárias, lunares e eclipses

ECLIPSES E FASES DA LUA

João Batista Garcia Canalle
Instituto de Física – UERJ

Resumo

Fenômenos comuns ao cotidiano dos alunos, os eclipses e as fases da Lua, são geralmente, explicados nos livros didáticos usando figuras, as quais, normalmente não atingem seus objetivos. Procurando simplificar e aperfeiçoar o ensino destes fenômenos, desenvolvemos um experimento didático, simples de ser construído, que usa materiais de baixo custo, disponíveis no comércio, para mostrar as fases da Lua e sua relação com as marés. O experimento também permite entender porque o eclipse da Lua só ocorre na fase de Lua Cheia e o do Sol na fase de Lua Nova, além de permitir ver a diferença entre sombra e penumbra.

Introdução

A idealização deste experimento tenta preencher uma lacuna existente nos livros didáticos, pois os mesmos quando abordam os tópicos em questão, o fazem utilizando figuras, e por mais que o (a) professor(a) se esforce para explicá-los, os mesmos podem não ficar claros ou não serem entendidos por alguns alunos.

Este experimento, sendo tridimensional, torna mais simples a explicação por parte do (a) professor (a) e de fácil compreensão e visualização por parte dos alunos.

A Montagem do Experimento

Usaremos a mesma bola de isopor com um eixo, especificada no experimento referente às estações do ano e a lâmpada conectada no soquete preso numa base de madeira. Retire o disco de 'papel alumínio que estava sobre a lâmpada. Para representarmos os raios de luz provenientes do Sol, que chegam praticamente paralelos entre si, façamos um tubo cilíndrico de papel alumínio, com um diâmetro igual ao da lâmpada e com comprimento de 30 cm. Coloque o tubo de papel alumínio ao redor da lâmpada e quando acessa teremos um fecho de luz que pode ser direcionado, tal qual o de uma lanterna, aliás, esta também pode ser usada, ou então, o fecho de um retroprojektor ou projetor de slides.

Como o Experimento Funciona

a) As fases da Lua

O manuseio deste experimento pode ser feito com duas ou três pessoas. Uma deve segurar o fecho de luz (que representa a luz proveniente do Sol)

sempre apontando para a Lua, mas de forma que o fecho de luz seja sempre emitido na mesma direção ou seja, a pessoa que segura a fonte do fecho de luz deve andar para a esquerda ou para a direita para que o fecho seja emitido sempre na mesma direção. Uma pessoa representa a Terra e fica girando sobre si mesma lentamente. Outra pessoa segura a Lua e faz esta girar sobre si e ao redor da Terra de modo que esta sempre veja a mesma face da Lua. O fecho de luz deve ser direcionado sobre a Lua. Como o plano da órbita da Lua não coincide com o plano da órbita da Terra, o plano da órbita da Lua deve ser inclinado em relação ao da Terra, uma vez que este está sendo suposto paralelo ao chão.

Lua Nova

Sugerimos começar o movimento com a Lua entre a Terra e Sol mas não na mesma linha, pois se assim estivessem haveria um eclipse solar. Coloque, então, a Lua abaixo da linha imaginária que liga a Terra ao Sol. Neste instante em particular, a Lua não é visível da Terra pois o Sol não vai estar iluminando a face da Lua voltada para a Terra. Esta é a fase chamada de Lua Nova, a qual não dura uma semana e sim apenas um dia. No dia seguinte começa a fase da Lua Crescente.

Lua Crescente

Fazendo a Lua girar lentamente ao redor do aluno-Terra, no sentido horário, o aluno-Terra que representa um observador qualquer do hemisfério Sul verá apenas uma fração da Lua iluminada. Quem estiver de fora da brincadeira verá que o Sol continua iluminando completamente uma face da Lua. A fração iluminada visível pelo aluno-Terra terá a forma de um "C" (ou de uma banana) e será visível logo após o pôr do Sol, portando ela terá sua fração iluminada visível da Terra, voltada para o Oeste. Enquanto a Terra gira sobre si, a Lua se desloca somente cerca de 15 graus, de modo que no dia seguinte ela estará "mais alta" no céu após o pôr do Sol. A Lua continuará "crescendo" (aumentando a fração iluminada visível da Terra) sucessivamente, até atingir a Lua Cheia, sendo que nesse "crescimento" ela passará por uma noite em que exatamente $\frac{1}{4}$ (um quarto) da superfície da Lua será visível da Terra. Essa noite chamamos de noite do Quarto Crescente.

Quarto Crescente

Durante o período de aumento da fração iluminada da Lua visível da Terra ela passará por uma noite em que exatamente $\frac{1}{4}$ (um quarto) de sua superfície será visível da Terra. Essa noite chamamos de noite do Quarto Crescente. Ele dura só uma noite e não uma semana como pensam muitas pessoas. Quando o Sol se puser ela estará sobre o meridiano local.

Lua Cheia

Com o passar das noites, observamos um aumento da fração iluminada da Lua visível da Terra. O período de aumento da fração iluminada da Lua visível da Terra terminará na noite em que toda a face iluminada da Lua é

visível da Terra. Essa noite chamamos de noite de Lua Cheia. Ele dura só uma noite e não uma semana como pensam muitas pessoas. Nessa noite ela estará nascendo no horizonte leste no momento em que o Sol estiver se pondo no oeste. Nessa noite a Terra é que está entre a Lua e o Sol. Mas a Lua não está na mesma linha que liga a Terra ao Sol. Como na Lua Nova nós supusemos que ela estava abaixo desta linha Terra-Sol, agora ela deve estar acima da linha Terra-Sol.

Lua Minguante

A noite seguinte ao da Lua Cheia observamos que uma pequena porção do disco (que era todo iluminado na noite anterior -Lua Cheia) iluminado já não é mais visível. E noite após noite, observamos que vai diminuindo a fração iluminada da Lua que é visível da Terra. A Lua continuará "minguando" (diminuindo a fração iluminada visível da Terra) sucessivamente, até atingir a Lua Nova novamente. Sendo que nesse período "minguante" ela passará por uma noite em que exatamente $\frac{1}{4}$ (um quarto) da sua superfície será visível da Terra. Essa noite chamamos de noite do Quarto Minguante. Após a Lua Cheia, o lado iluminado da Lua, visível da Terra, fica voltado para o Leste e ela nasce cada vez mais tarde depois do pôr do Sol.

b) Os eclipses

b.1) Eclipse Solar total, parcial e anular

O Eclipse solar pode ser visto facilmente do experimento acima, bastando para isso saber que a linha definida pela intersecção dos planos das órbitas da Lua e da Terra (linha dos nodos) gira e com isso vai haver ocasiões em que a Lua Nova estará exatamente na linha que liga Terra-Sol e a Lua estará próxima do seu perigeu (ponto de maior proximidade com a Terra), de modo que partes da Terra ficarão sob a ponta do cone de sombra da Lua, ocorrendo nestas regiões o eclipse solar total. Regiões próximas a estas estarão sob a penumbra e observarão o eclipse parcial. Regiões da Terra mais afastadas do cone de sombra não observarão eclipse nenhum.

Em outras ocasiões, a Lua Nova poderá estar passando na mesma linha que liga ao Terra ao Sol, mas a Lua estará próxima do apogeu (ponto de maior afastamento da Lua à Terra). Quando isso ocorre observa-se o eclipse anular.

b.2) Eclipse Lunar total, parcial e penumbral

O Eclipse lunar pode ser visto facilmente do experimento acima, bastando para isso saber que a linha definida pela intersecção dos planos das órbitas da Lua e da Terra (linha dos nodos) gira e com isso vai haver ocasiões em que a Lua Cheia estará exatamente na linha que liga Terra-Sol e assim sendo, ela passará dentro do cone de sombra da Terra, ocorrendo o eclipse lunar total, ou se apenas parte dela passar sob o cone de sombra da Terra, será o eclipse lunar parcial e quando a lua passar pela penumbra da Terra será o eclipse lunar penumbral.

c) O “São Jorge” lunar

Por que vemos sempre o mesmo lado da Lua? Isto se dá porque a Lua gira uma vez sobre si mesma exatamente no mesmo tempo em que dá uma volta ao redor da Terra. E isso o experimento também permite visualizar.

d) As marés

São uma prova da existência de forças de atração entre os corpos materiais. Chama-se de preamar ou maré cheia ao maior nível atingido pelo oceano e ocorre na Lua Nova, enquanto que o mínimo nível chama-se baixa-mar ou maré vazia e ocorre na Lua Cheia. A maré cheia e a vazia recebem o nome de marés de Sизigia (do grego: ficar numa mesma linha). Durante as fases de Lua Quarto Crescente ou Minguante, as marés apresentam os menores desníveis e recebem o nome de marés de Quadratura. Estes desníveis ocorrem porque, enquanto a Lua faz subir as águas do oceano, o Sol as faz descer, ocorrendo então, os desníveis. As marés decorrem do efeito conjugado do Sol e da Lua, se bem que o efeito lunar é cerca de 2,2 vezes maior que o solar. Isto é explicado devido à maior proximidade da Lua, apesar de sua menor massa.

Conclusão

Este experimento proporciona uma explicação mais simples para os eclipses do Sol e da Lua, as fases da Lua, o efeito das marés e o porquê de vermos sempre a mesma face da Lua. Estes fenômenos, embora comuns ao nosso cotidiano, não são facilmente entendidos pelos alunos, por mais que os professores tentam explicá-los, pois os mesmos recorrem às figuras, as quais dão margem para interpretações, por vezes, errôneas por parte dos alunos. Sendo este modelo tridimensional, o mesmo torna a explicação para estes fenômenos mais simples de ser dada e torna, também, mais fácil e visualização e compreensão dos mesmos por parte dos alunos.

Este modelo não tem a pretensão de ser absoluto ou perfeito, modificações e simplificações poderão ser feitas segundo a criatividade e ou necessidade dos professores ou de outras pessoas que porventura venham a utilizá-lo.

O SISTEMA SOLAR EM ESCALA

João Batista Garcia Canalle
 Instituto de Física – UERJ

Resumo

Mostrar as dimensões do Sistema Solar, representando os Planetas e o Sol por esferas em escala reduzida e na mesma escala as distâncias médias dos Planetas em relação ao Sol.

Introdução

O Sistema Solar aparece em vários livros didáticos, através de figuras esquemáticas, onde é mostrado fora de uma escala definida, dificultando assim, sua compreensão.

Esta forma de apresentação do Sistema Solar pode causar uma série de confusões com relação ao tamanho dos Planetas. O mesmo ocorre com relação às distâncias ao Sol.

Este trabalho tem por finalidade mostrar as dimensões do Sistema Solar de forma simples, com os diâmetros e as distâncias dos Planetas, numa mesma escala.

Procedimento

Adotamos uma escala onde o Sol será representado por uma esfera de 80,0 cm de diâmetro que corresponderá a um comprimento da ordem de 1.392.000 km (que é o diâmetro do Sol) e por simples “regra de três” os diâmetros dos planetas, da Lua e as distâncias médias dos planetas ao Sol poderão ser calculadas.

A tabela 1, mostra a massa e o diâmetro médio dos Planetas e suas distâncias médias ao Sol; o diâmetro do Sol (80,0 cm) e dos Planetas (em milímetros) na escala mencionada, bem como suas distâncias médias (em metros), na mesma escala. Para a Lua a distância dada é em relação à Terra.

TABELA I

ASTRO	MASSA (KG)	DIÂMETRO		DISTÂNCIA	
		(KM)	(MM)	(KM)	(M)
Sol	$1,99 \times 10^{30}$	1.392.000	800,0	--	--
Mercúrio	$0,33 \times 10^{24}$	4.860	2,8	57.900.000	33,3
Vênus	$4,87 \times 10^{24}$	12.100	7,0	108.000.000	62,1
Terra	$5,97 \times 10^{24}$	12.760	7,3	149.600.000	86,0
Marte	$0,64 \times 10^{24}$	6.800	3,9	228.000.000	131,0
Júpiter	1899×10^{24}	143.000	82,2	778.000.000	447,1
Saturno	568×10^{24}	120.000	69,0	1.430.000.000	821,8
Urano	$87,2 \times 10^{24}$	50.800	29,2	2.870.000.000	1.649,4
Netuno	102×10^{24}	49.400	28,4	4.500.000.000	2.586,2
Plutão	$0,02 \times 10^{24}$	2.740	1,6	5.900.000.000	3.390,8
Lua	$73,5 \times 10^{21}$	3.840	2,0		

Para representarmos o Sol usaremos uma bexiga de aniversário cheia de ar com diâmetro de 80,0 cm, para enchê-la é só colocar na saída de ar de um aspirador de pó. Para determinarmos o diâmetro da bexiga usaremos um barbante com comprimento de 2,51 m com suas pontas amarradas, o qual colocaremos ao redor da bexiga, conforme ela for enchendo através da saída de ar do aspirador de pó.

Para colocarmos os planetas nas respectivas distâncias ao Sol, usaremos 90,0 m de linha grossa (quase um carretel) ou barbante, e bolinhas de durepoxi que representarão Mercúrio, Vênus, Terra e Lua. Enquanto o durepoxi das bolinhas estiver mole, fixamos um pedaço de linha nas bolinhas, as quais serão, então, amarradas nas seguintes distâncias Mercúrio 33,3 m, Vênus 62,1 m e a Terra a 86,0 m, sobre o barbante ou a linha usada.

A Lua será representada por uma bolinha de durepoxi com diâmetro de 2,0 mm que estará presa a 20,0 cm da Terra, conforme é apresentado na Tabela 1.

Demonstração

Um aluno vai segurar a bexiga (o Sol) e uma ponta da linha, outro em Mercúrio, outro em Vênus e outro na Terra esticando a linha. Os demais alunos poderão, então ter uma idéia das distâncias dos Planetas ao Sol, assim como dos seus tamanhos em relação ao Sol.

Veja no na *Figura 4.16*, o nosso Sistema Solar representado sem escala, (Sol até a Terra).

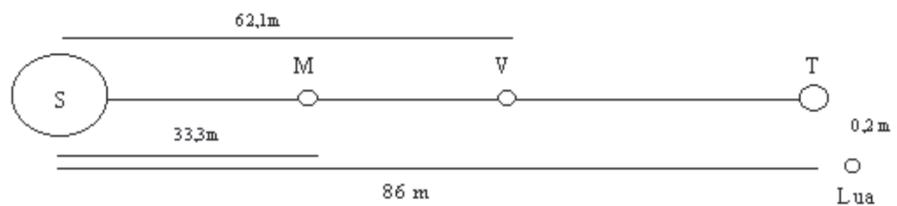


Figura 4.16. Esquema de como fica o experimento sugerido

Comentários

Com esta demonstração prática dos tamanhos e distâncias dos três primeiros planetas (Mercúrio, Vênus e Terra com sua Lua), é possível ver a imensidão do Sistema Solar. Não representamos os demais planetas porque precisaríamos de muito mais linha e espaço.

Nesta escala, Marte estaria a uma distância de 131,0 m e para Plutão o mais afastado estaria, a uma distância de 3.390,8 m ou seja a 3,39 km! Esta distância é cerca de 40 vezes a distância entre a Terra e o Sol.

O SISTEMA SOLAR NUMA REPRESENTAÇÃO TEATRAL⁸

João Batista Garcia Canalle
Instituto de Física - UERJ

Resumo

Durante os cursos de aperfeiçoamento que ministrei, para professores de primeiro grau da Rede Pública do Município de São Paulo e do Núcleo Regional de Pato Branco, Sudoeste do Paraná, foram desenvolvidas as atividades abaixo descritas, que têm a finalidade de propor uma forma alternativa para ensinar os movimentos dos planetas, luas e cometas do sistema solar. Inicialmente é apresentado um modo “gráfico” de se visualizar as distâncias dos planetas ao Sol, fazendo-se uso de uma escala apropriada. Utilizando esta escala, pede-se ajuda aos alunos para desenharem círculos sobre uma quadra de esportes. Sobre estes círculos, que representam as órbitas dos planetas, os alunos caminham, correm, giram, etc., mostrando, assim, o sistema solar em movimento. O movimento dos satélites (luas) também é representado. Usando a mesma escala dos círculos, um barbante e duas pequenas estacas, mostramos como desenhar a elipse referente à órbita do cometa Halley. O seu movimento também é representado por um aluno que anda (e corre) sobre esta elipse. Esta ativa participação dos alunos na confecção dos círculos, elipse e movimentação como planetas, luas e cometas é que chamamos de representação teatral. O tema “Sistema Solar” geralmente é abordado na quinta ou sexta série do primeiro grau, depende da seqüência do currículo elaborado pelas Secretarias de Educação dos Estados. Nos cursos de formação de professores de primeiro grau é ensinado pelos professores de Física. Nestas atividades o professor tem a oportunidade de fazer o aluno participar ativamente de sua aula, tornando-a prática e, como verão, também divertida. Além de astronomia, os alunos também estarão trabalhando, praticamente, com a geometria, ao traçarem no chão, círculos e elipses. Os professores que exercitam o salutar hábito de questionar seus alunos antes de explicar, descobrirão alunos com “explicações intuitivas” das mais absurdas; algumas citarei no texto. Professores de pré-escola que tiveram contato com estas atividades disseram que elas são parcialmente aplicáveis também na pré-escola!

⁸Caderno Catarinense de Ensino de Física, v. 11, nº 1, p. 27 - 32, 1994

Introdução

Quando os livros abordam o tema “Sistema Solar”, geralmente trazem uma figura esquemática do mesmo. Esta figura, normalmente é constituída pelo Sol e planetas, sendo que não estão em escala os diâmetros do Sol e dos planetas e nem tão pouco as distâncias dos planetas ao Sol e não há nenhuma referência nos textos para esse fato. Apesar de não estarem em escalas, os planetas maiores são representados por círculos grandes e os planetas

menores por círculos pequenos, mas tão fora de escala que a Terra parece ser a metade de Júpiter e este, 3 ou 4 vezes menor que o Sol. Um procedimento experimental para resolver este problema será apresentado num outro artigo. Outro problema dos livros didáticos é sobre as distâncias dos planetas ao Sol. Estas figuras nunca obedecem a uma escala para as distâncias. A figura passa a noção errada de que os planetas estão equidistantes uns dos outros. Quando o livro tenta ser mais claro ele coloca uma tabela com as distâncias ao Sol. São números enormes, sendo que ninguém consegue imaginar tais distâncias, e eles não conseguem dar nenhuma noção, aproximada que seja, da distribuição dos planetas ao redor do Sol. É objetivo deste trabalho oferecer uma solução simples para este problema.

Outro problema que está implícito nestas figuras esquemáticas do sistema solar é que elas costumam representar os planetas enfileirados, um ao lado do outro. Além da figura não dar nenhuma idéia dos movimentos dos planetas, ela permite que as pessoas pensem que os planetas giram ao redor do Sol desta forma, ou seja, um ao lado do outro, sempre em fila. Este autor já teve a oportunidade de encontrar professores que acreditavam nisso e explicaram que pensavam assim, porque viram a figura nos livros.

Damos, a seguir, uma sugestão de como resolver estes problemas, com a participação dos alunos, numa forma “teatral”.

As distâncias dos planetas ao Sol

Para darmos uma idéia correta das distâncias médias dos planetas ao Sol, sugerimos que sejam reduzidas as distâncias médias, dos planetas ao Sol, através de uma escala(1) . Por exemplo, se adotamos a escala de 10 milhões de quilômetros para cada 1 cm de papel, teremos Mercúrio a 5,8 cm do Sol, pois sua distância média ao Sol é de 58 milhões de quilômetros; Vênus estaria a 10,8 cm do Sol, pois sua distância média é de 108 milhões de quilômetros, e assim para os demais planetas.

Desenvolvemos esta atividade com os alunos da seguinte maneira: providenciamos tiras de papel, com largura de, aproximadamente, 7 cm e comprimento de 6m. Desenhamos uma bolinha (com 1 ou 2 mm de diâmetro) numa das extremidades da tira para representar o Sol, a partir dessa bolinha desenhamos outra a 5,8 cm para representar Mercúrio, Vênus estaria a 10,8 cm do Sol, a Terra fica a 15,0 cm do Sol, Marte fica a 22,8 cm, Júpiter a 77,8 cm, Saturno a 143,0 cm, Urano a 287,0 cm, Netuno a 450,0 cm e, finalmente, Plutão a 590,0 cm do Sol (todas as distâncias são em relação ao Sol (primeira bolinha)). Colocamos o nome do Sol e de cada planeta sobre cada bolinha. Esticamos a tira e teremos uma visão exata da distribuição das distâncias médias dos planetas ao Sol. Numa escala ainda menor, mostramos na *Figura 4.17* um pedaço da tira.



Figura 4.17. As letras sobre os pontos (planetas) representam M(Mercúrio), V(Vênus), T(Terra), M(Marte), J(Júpiter), etc.

Esta é uma atividade que o aluno pode fazer em casa ou em sala aula e, é claro, a tira fica com ele, para que possa mostrá-la aos familiares e amigos.

Só mesmo fazendo a tira toda para percebermos como os planetas mais distantes estão incrivelmente mais distantes do Sol, do que os planetas Mercúrio, Vênus, Terra e Marte.

O movimento dos planetas ao redor do Sol

Para mostrar que os planetas giram ao redor do Sol (todos no mesmo sentido) fazemos o seguinte: sobre a tira de papel do item anterior, colocamos um barbante esticado, e sobre o Sol e cada planeta damos um nó. Enrolamos o barbante num cabo de vassoura (de aproximadamente 10 cm de comprimento) para não embaralhar o barbante. Em seguida vamos a uma quadra de esportes e no centro dela seguramos fixo o nó que representa o Sol, mantendo esticado o barbante e segurando um giz no nó que representa Mercúrio, traçamos um círculo sobre a quadra. Repetimos este procedimento traçando um círculo para cada planeta.

Traçados os 9 círculos no piso da quadra, colocamos um aluno, representando o Sol, sobre o centro dos círculos (onde está o Sol). Colocamos outro aluno para andar sobre o círculo de Marte, outro sobre o círculo de Júpiter, outro para andar sobre o círculo de Saturno e idem para Urano, Netuno e Plutão. Sobre os círculos de Mercúrio, Vênus e Terra, não é possível colocar ninguém, pois eles estão próximos demais do aluno que representa o Sol. Feito este posicionamento inicial, sugiro, abaixo, uma série de procedimentos para ilustrar o movimento dos planetas, seus satélites e cometas.

1º - Explicar que a velocidade dos planetas diminui com a distância dele ao Sol; assim sendo, o aluno que representar Marte deve correr sobre a órbita (círculo) de Marte, aquele que representar o movimento de Júpiter deverá correr mais devagar, quem representar Saturno apenas andar, e assim sucessivamente, tal que o aluno-Plutão caminhará pé-ante-pé.

2º - Explicar que o tempo gasto pelo planeta, (aluno) para dar uma volta ao redor do Sol é chamado de período de translação e representa a duração do ano do planeta. A Terra gasta 365,25 dias para fazer este movimento. Os planetas mais próximos do Sol gastam menos tempo que a Terra e aqueles que estão mais distantes gastam mais tempo que a Terra. Pode-se observar do movimento dos alunos, que aqueles que estão mais próximos do Sol, gastam muito menos tempo para dar uma volta ao redor do Sol do que aqueles que estão mais distantes.

- 3º - Coloque os alunos a se moverem, representando o sistema solar, e dê as explicações 1 e 2 acima. Depois de algumas voltas dos alunos, pare-os e explique que, além dos planetas girarem ao redor do Sol, eles giram ao redor de si mesmos, vamos pedir, então, para que os alunos-planetam também façam isso, ou seja, caminhar sobre os círculos enquanto giram sobre si mesmos. Para que possam combinar os dois movimentos é preciso que transladem mais devagar, para se evitar quedas.
- 4º - Explicar, também, que o tempo gasto pelo planeta para girar sobre ele mesmo é chamado de período de rotação. A Terra executa esse movimento em 24 horas (aproximadamente). É esse movimento que dá origem ao dia e à noite. Na translação todos planetas giram no mesmo sentido, horário, digamos, mas na rotação 8 planetas giram sobre si no mesmo sentido, horário, por exemplo, sendo que Vênus gira no sentido contrário. Também é preciso lembrar que o eixo de rotação dos planetas não é perpendicular ao plano de sua órbita, ao contrário do que vemos na quadra, onde o eixo de rotação dos alunos-planetam é perpendicular ao plano da quadra.
- 5º - Explicar o dia e a noite da seguinte maneira: supondo que a cabeça dos alunos que estão orbitando (circulando) o Sol, seja a Terra, quando o aluno está de frente para o Sol é dia no seu rosto e noite na sua nuca, e quando ele está de costas para o Sol é dia na sua nuca e noite no seu rosto, pois ele não está vendo o Sol.
- 6º - Além desses movimentos (translação e rotação) os planetas executam outros movimentos, mas que não são factíveis de serem representados com o corpo humano.
- 7º - Também é preciso chamar a atenção para o fato de que o plano das órbitas dos planetas não são coincidentes, como ocorre na quadra, mas que na verdade, estão ligeiramente inclinados uns em relação aos outros.
- 8º - Falta ainda esclarecer que as órbitas dos planetas não são exatamente círculos, como desenhados no chão, na verdade são órbitas ligeiramente achatadas, que chamamos de elipses e serão estudadas mais adiante.

O movimento das luas ao redor dos planetas

Depois dos movimentos de translação e rotação dos alunos-planetam e da explicações acima, podemos incluir as luas (satélites naturais) nos movimentos do sistema solar. Com exceção de Mercúrio e Vênus, todos os demais planetas possuem luas que giram ao redor deles. Vejamos como representar o movimento das luas ao redor dos planetas.

- 9º - Inicialmente vamos ilustrar o movimento da Lua ao redor da Terra. Vamos fazer um aluno representar a Terra, e como a órbita (círculo)

da Terra está muito próxima ao pé de aluno que está representado o Sol, vamos usar o círculo que representa a órbita de Urano. Os demais planetas (alunos) não participam desta atividade, apenas observam. Enquanto o aluno-Terra gira sobre si e ao redor do Sol (muito lentamente), outro aluno, que representa a Lua, deve girar ao redor da Terra, mas sempre olhando para a Terra, pois a Lua sempre mostra a mesma face para a Terra. O aluno-Terra não fica olhando para a "Lua". Já encontrei pessoas que acreditavam que o ocidente via uma face da Lua e que o oriente via só a outra face da Lua. Outras pessoas não imaginam que a Lua gira sobre si mesma. Esta atividade ajuda a esclarecer tais dúvidas.

10º - Marte tem duas luas, chamadas Fobos e Deimos. Vamos representá-las de modo análogo ao que fizemos para o sistema Terra-Lua. Substituí-se os alunos Terra e Lua, por outro que será Marte e outros dois que representarão as luas Fobos e Deimos. Marte gira ao redor do Sol e sobre si mesmo, enquanto que suas luas giram ao seu redor. Também é preciso usar o círculo que representa a órbita de Urano, pelo motivo exposto no item 9. Ainda não é sabido se as luas dos demais planetas apresentam sempre a mesma face para eles, como faz a lua da Terra.

11º - O mesmo procedimento fazemos para Júpiter e suas luas. Como este é o maior dos planetas, usamos sempre o maior dos alunos para representá-lo. Como ele tem 16 luas, também devemos usar o círculo que representa a órbita de Urano, pelo motivo explicado no item 9.

12º - Analogamente se faz para Saturno e suas 17 luas. Como Saturno tem anéis, pedimos ao aluno que representa Saturno para girar com os braços abertos para representar os anéis. Também pode-se usar um bambolê.

13º - Analogamente para Urano e suas 15 luas.

14º - Idem para Netuno e suas 8 luas.

15º - Idem para Plutão com sua única lua.

O movimento dos cometas ao redor do Sol

Mas, além do Sol, planetas e luas, o sistema solar também tem os cometas. Vejamos como podemos representá-los na quadra. Vamos usar, como exemplo, o cometa Halley. Este cometa é periódico e tem órbita bastante excêntrica, isto é, sua órbita é uma elipse bastante achatada.

16º - Para desenhar a órbita do Halley na mesma escala usada para os planetas, corta-se um barbante com 10,4 m de comprimento e dá-se um nó a 5,1 m de uma das pontas. Veja esquema na *Figura 4.18*.

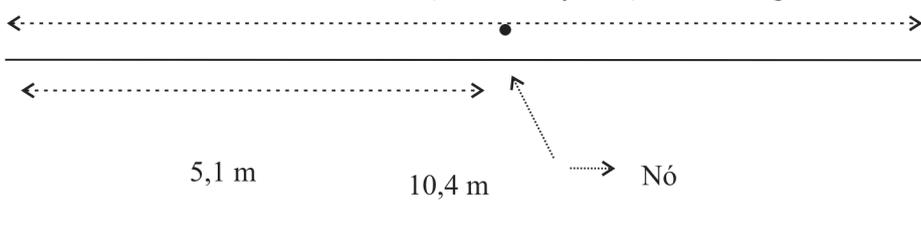


Figura 4.18. Esquema da posição do nó sobre o barbante usado para a construção da elipse do cometa Halley.

A seguir amarra-se as pontas. Pressiona-se, então verticalmente, a tampa de uma caneta (ou de um pedaço de cabo de vassoura) contra o centro dos círculos (Sol) e de outra a 5,1 m do Sol (a distância entre os 2 nós do bastante). Coloca-se o barbante ao redor dessas tampas de canetas, estica-se o barbante e risca-se o chão com um giz, conforme ilustra a *Figura 4.19*. A posição onde estão as canetas chamamos de focos da elipse e o Sol está num desses focos, como diz a 1ª lei de Kepler.

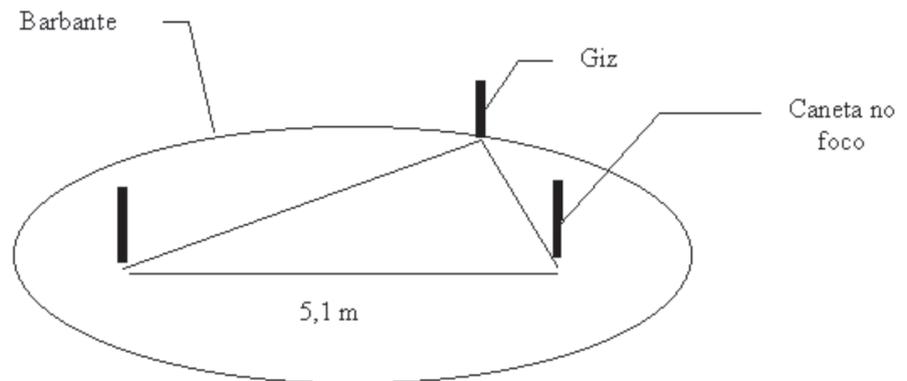


Figura 4.19. Esquema do procedimento usado para desenhar a elipse

17º - Para representarmos, esquematicamente, a cauda do cometa riscamos o chão, conforme ilustra a *Figura 4.20*. Observe que a cauda é sempre radial ao Sol.

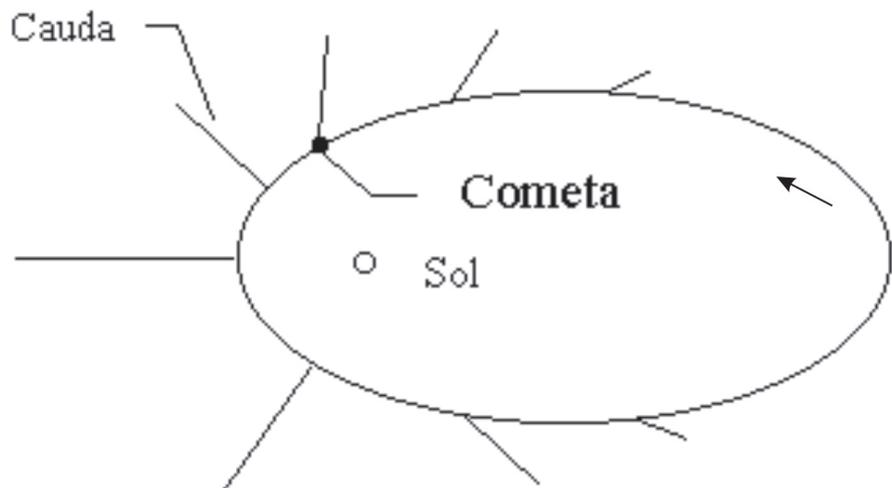


Figura 4.20. Esquema da cauda do cometa

18º - Para representarmos o movimento do cometa pede-se para um aluno representar o Sol (que fica no centro dos círculos, girando lentamente sobre si mesmo) e outro representar o cometa. O aluno-cometa deve andar lentamente quando está longe do Sol, aumentar gradativamente sua velocidade enquanto se aproxima do Sol, correr quando passa próximo do Sol e diminuir gradativamente sua velocidade enquanto se afasta do Sol, pois é assim que faz o cometa. A movimentação do aluno-cometa deve ocorrer sobre a elipse desenhada no item 17º.

19º - Para finalizar, coloca-se todos os alunos-planetas, o aluno-Sol e o aluno-cometa para se moverem simultaneamente ao redor do Sol. Mas como o Sol não é uma estrela fixa, faça o aluno-Sol caminhar em direção a um dos cantos da quadra, carregando consigo todo o sistema solar.

Conclusão

Com as atividades acima descritas, o professor melhor ilustra sua explicação sobre o movimento dos planetas, luas e cometas ao redor do Sol. O aluno, por outro lado, tende a entender melhor estas explicações, pois além de estar ouvindo e vendo, ele está participando delas.

Referências

(1) Laboratório Básico Polivalente de Ciências - para 1º grau, FUNBEC, p. 157-163, 2ª edição, 1986.

TABELA COM AS DISTÂNCIAS MÉDIAS DOS PLANETAS AO SOL

PLANETA	DISTÂNCIA MÉDIA AO SOL (KM)	DISTÂNCIA AO SOL NA ESCALA ADOTADA (CM)	DISTÂNCIA AO PLANETA ANTERIOR (CM)
Mercúrio	57.910.000	5,8	5,8
Vênus	108.200.000	10,8	5,0
Terra	149.600.000	15,0	4,2
Marte	227.940.000	22,8	7,8
Júpiter	778.330.000	77,8	56
Saturno	1.429.400.000	142,9	65,1
Urano	2.870.990.000	287,1	144,2
Netuno	4.504.300.000	450,4	163,3
Plutão	5.913.520.000	591,4	141,0
<i>Estrela Alfa Centauro</i>	$4,1 \times 10^{13}$ km	4.067.800 (= 40,7 km)	4.067.208,6

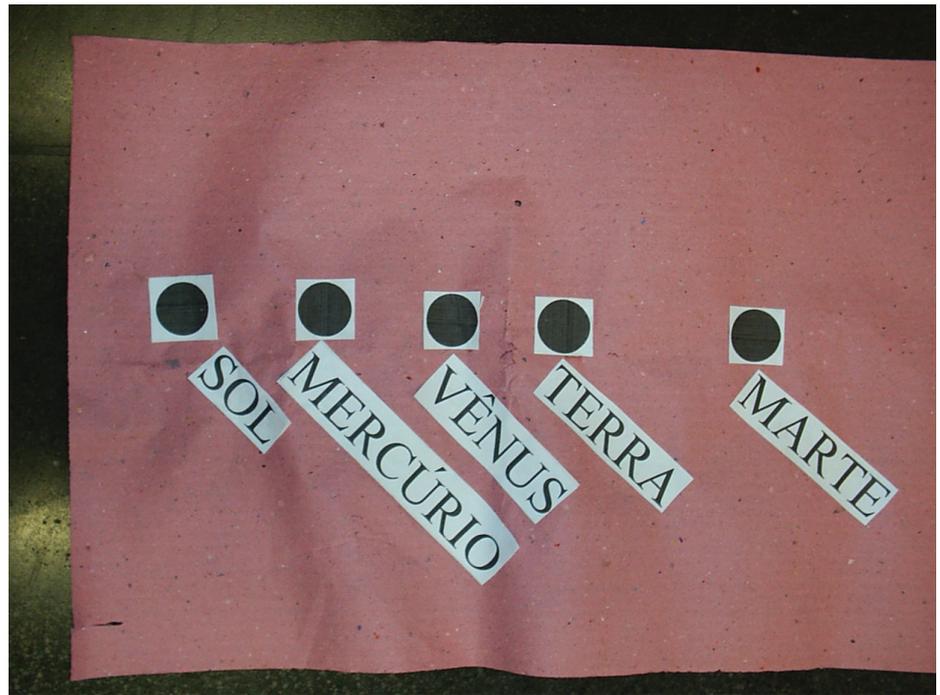


Figura 4.21



Figura 4.22

COMPARAÇÃO ENTRE OS TAMANHOS DOS PLANETAS E DO SOL⁹

João Batista Garcia Canalle
Instituto de Física - UERJ

Resumo

Como é possível dar uma visão concreta do tamanho dos planetas e do Sol aos alunos da pré-escola, do ensino fundamental e médio sem recorrer aos números? Escolhendo uma escala apropriada, representamos o Sol por uma esfera de 80,0 cm de diâmetro e, conseqüentemente, os planetas são representados por esferas com os seguintes diâmetros: Mercúrio (2,9 mm), Vênus (7,0 mm), Terra (7,3 mm), Marte (3,9 mm), Júpiter (82,1 mm), Saturno (69,0 mm), Urano (29,2 mm), Netuno (27,9 mm) e Plutão (1,3 mm). As bolinhas que representam os planetas, construímos com argila ou durepoxi (ou até mesmo usando sementes e frutas). O Sol (80,0 cm), por outro lado, só poder ser representado por uma bexiga de aniversário, de tamanho gigante, enchida na saída do ar de um aspirador de pó, para alegria da criançada e espanto de todos.

⁹Caderno Catarinense de Ensino de Física, v. 11, nº 2, p. 141 - 144, 1994

Introdução

Quando os livros didáticos abordam o tema "SISTEMA SOLAR", geralmente apresentam uma figura esquemática do mesmo. Nesta figura o Sol e os planetas são desenhados sem escala e isto não é escrito no texto, o que permite ao aluno imaginar que o Sol e os planetas são proporcionais àquelas bolinhas (discos) lá desenhados. Apesar de não estarem em escala, os planetas maiores são representados por bolinhas grandes e os menores por bolinhas pequenas, mas sem nenhuma preocupação com escalas. Em alguns livros o diâmetro do Sol é comparável ao de Júpiter, o que é um absurdo, claro!

Alguns livros apresentam, além das figuras esquemáticas, uma tabela com os diâmetros do Sol e dos planetas. Esta tabela também não ajuda muito, porque não se consegue imaginar as diferenças de tamanho dos planetas e do Sol apenas vendo os números dos seus diâmetros.

Sugerimos abaixo um procedimento experimental, que os alunos podem executar como tarefa extraclasse, reproduzindo (ou não) o material do professor e que permite visualizar corretamente a proporção dos tamanhos dos planetas e do Sol, sem recorrer aos valores reais dos seus diâmetros.

Comparação entre os tamanhos dos planetas e do Sol através de esferas

Para darmos uma visão concreta do tamanho dos planetas e do Sol, representamos o Sol por uma esfera de 80,0 cm de diâmetro e, conseqüentemente, os planetas serão representados, na mesma proporção, por esferas com os seguintes diâmetros: Mercúrio (2,9 mm), Vênus (7,0 mm), Terra (7,3 mm),

Marte (3,9 mm), Júpiter (82,1 mm), Saturno (69,0 mm), Urano (29,2 mm), Netuno (27,9 mm) e Plutão (1,3 mm). A *Figura 4.23* representa, no plano, os discos dos planetas.

Usamos argila para fazer as esferas correspondentes aos planetas Júpiter e Saturno, que são os dois maiores. Escolhemos argila porque é um material de baixo custo, facilmente encontrada em papelarias e apenas 1 kg de argila é suficiente para fazer as referidas esferas. Há entretanto um detalhe: argila, quando seca, encolhe um pouco, portanto recomendamos fazer as duas esferas um pouco maiores, isto é, Júpiter com 90,0 mm e Saturno com 75,0 mm de diâmetro, pois quando secos, atingirão (ou ficarão próximos) dos diâmetros corretos.

Recomendamos fazer as esferas dos demais planetas usando durepoxi (uma caixa pequena é suficiente). Este material praticamente não encolhe quando seco e sua secagem é mais rápida que a da argila.

Nada impede que se faça as esferas de Júpiter e Saturno com durepoxi (exceto o custo), mas é possível fazer as bolinhas com papel amassado (colocando fita ao redor para fixar o papel) de diâmetro pouco menor que o recomendado e colocar, então uma camada final de durepoxi ao redor das bolinhas de papel, até atingirem o diâmetro desejado. A vantagem das bolinhas com argila ou durepoxi é que elas podem ser pintadas, mas se você não estiver interessado neste detalhe, uma outra opção de, custo zero, é fazer as bolinhas só com papel bem amassado, envoltas em fita adesiva. Certamente quem se dispuser a procurar materiais alternativos para esta atividade, vai encontrar vários. Os autores agradeceriam se fossem informados.

Se for usado um material que não encolhe (ou encolhe muito pouco) quando seco, basta fazer as bolinhas e colocá-las sobre os círculos, da *Figura 4.23*, para verificar se estão do tamanho correto.

Os planetas podem ser pintados depois de prontos e secos. Se for colocado um clipe dentro da bolinha enquanto ela estiver mole, teremos um gancho para pendurarmos os planetas na forma de móbil.

Para representarmos o Sol, usamos uma bexiga (amarela, de preferência) de aniversário, tamanho grande (aquela que geralmente é colocada no centro do salão de festas, com pequenos brindes dentro dela e é estourada ao fim da festa), a qual é encontrada em casas de artigos para festas (ou atacadistas de materiais plásticos). Existem diversos tamanhos de bexigas grandes, de diversos fabricantes e, portanto, de diversos preços.

Enchemos a bexiga no tamanho certo, usando um pedaço de barbante de comprimento (C) igual a $2,51 m$, com as pontas amarradas, pois $C = 3,14 D$, sendo $D = 80 \text{ cm}$ (o diâmetro que a bexiga deve ter). À medida que a bexiga vai sendo enchida (na saída do ar do aspirador de pó), colocamos o barbante no seu equador até que o barbante circunde perfeitamente a bexiga. É fundamental que o barbante seja posicionado no equador (meio) da bexi-

ga durante o enchimento, pois se ele ficar acima ou abaixo do equador da bexiga, ela poderá estourar, para a alegria da criançada.

Conclusão

Esta atividade permite ver a gigantesca diferença de volume existente entre o Sol e os planetas. Só mesmo enchendo a bexiga e fazendo as bolinhas que representam os planetas, tomaremos consciência da enorme diferença que existe entre os volumes do Sol e dos planetas.

Os alunos participam animadamente desta atividade. Esta é uma atividade que, uma vez feita, dificilmente se esquece, pois ela é muito marcante.

Fica ainda como sugestão que na impossibilidade de se fazer esta atividade tal como descrita acima, ela seja feita só com discos. Emenda-se duas cartolinas amarelas e recorta-se um disco com 80 cm de diâmetro. Recorta-se e pinta-se também discos de papel com os diâmetros dos planetas e pronto: temos o SISTEMA SOLAR nas mãos para comparações, o que é melhor que tabelas com números e figuras desproporcionais.

Referência

Anuário Astronômico, Instituto Astronômico e Geofísico - USP, São Paulo, 1994.

TABELA COM OS DIÂMETROS EQUATORIAIS DO SOL E DOS PLANETAS

ASTRO	RAIO EQUATORIAL (KM)	$\frac{R_{ASTRO}}{R_{TERRA}}$	RAIO NA ESCALA (MM)	DIÂMETRO ¹⁰ NA ESCALA (MM)	DIÂMETRO EQUATORIAL (KM)
Sol	695.000	109,0	400,0	800	1.390.000
Mercúrio	2.439,7	0,4	1,4	2,8	4.879,4
Vênus	6.051,8	0,9	3,5	7,0	12.103,6
Terra	6.378,14	1,0	3,7	7,3	12.756,28
Marte	3.397,2	0,5	2,0	3,9	6.794,4
Júpiter	71.492	11,2	41,1	82,3	142.984
Saturno	60.268	9,4	34,7	69,4	120.536
Urano	25.559	4,0	14,7	29,4	51.118
Netuno	24.746	3,9	14,2	28,9	49.492
Plutão	1.160	0,2	0,7	1,3	2.320

¹⁰Diâmetro - 2 x Raio

$$R_{escala} = \frac{R_{astro}}{R_{Sol}} \cdot 400$$

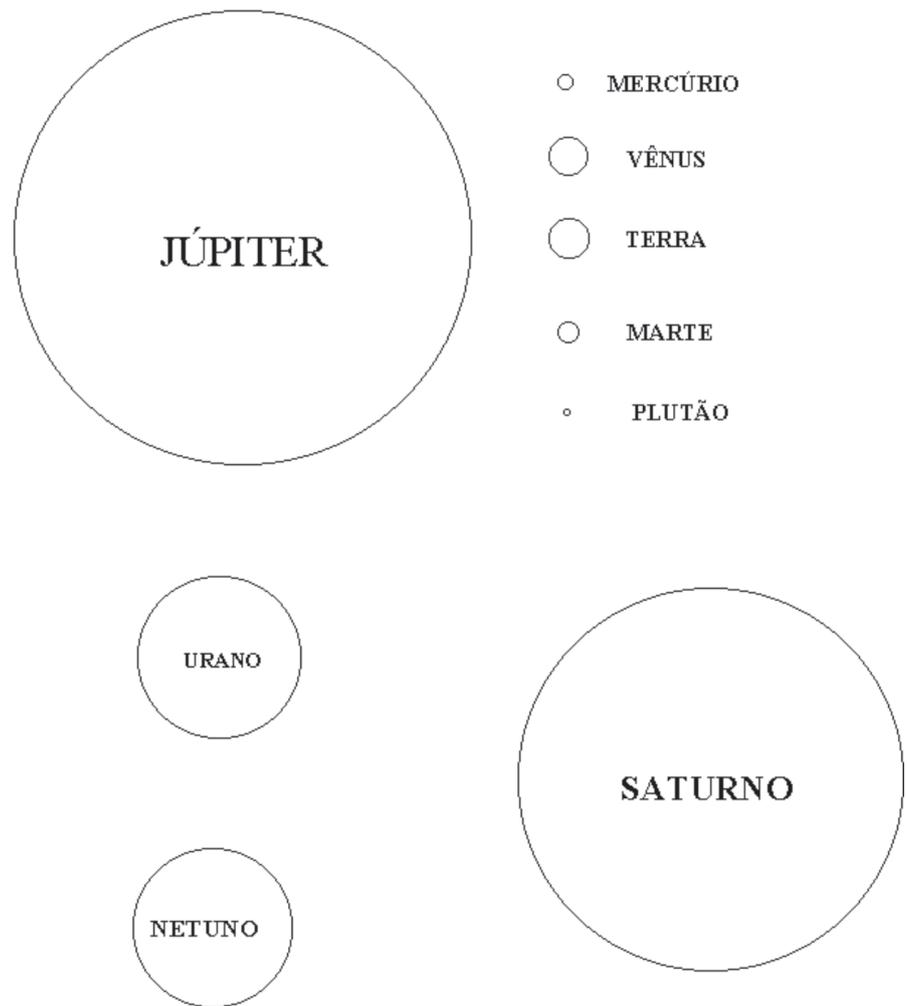


Figura 4.23. Discos dos planetas na escala adotada

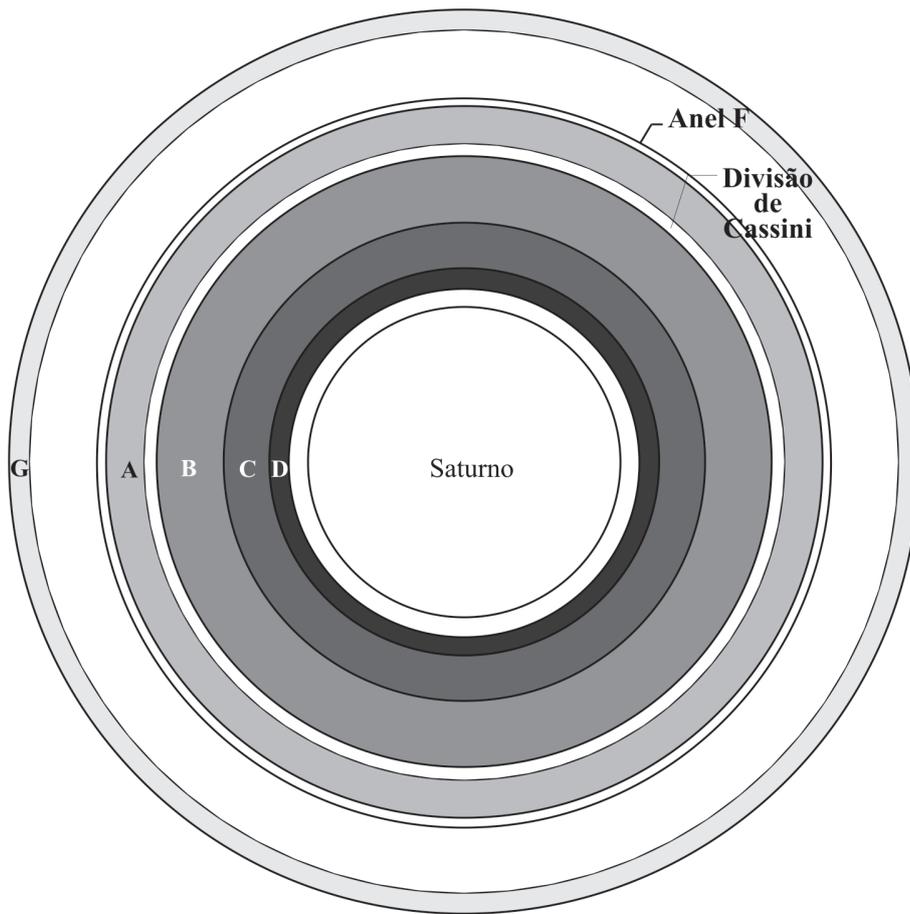


Figura 4.24. Saturno e seus anéis na mesma escala usada para desenhar os planetas.

NOME DA REGIÃO	DISTÂNCIA ¹¹ (KM)	LARGURA (KM)	ESPESSURA (KM)	MASSA (KG)
D	67.000	<u>7.500</u>	?	?
C	74500	<u>17.500</u>	?	$1,1 \times 10^{18}$
B	92.000	<u>25.700</u>	0,1 - 1	$2,8 \times 10^{19}$
Divisão de Cassini	117.500	<u>4.700</u>	?	$5,7 \times 10^{17}$
A	122.200	<u>14600</u>	0,1 - 1	$6,2 \times 10^{18}$
F	140.210	<u>30 - 500</u>	?	?
G	165.800	<u>8.000</u>	100 - 1000	$6-23 \times 10^6$

¹¹A distância mencionada é medida do centro do planeta à borda interna do anel.

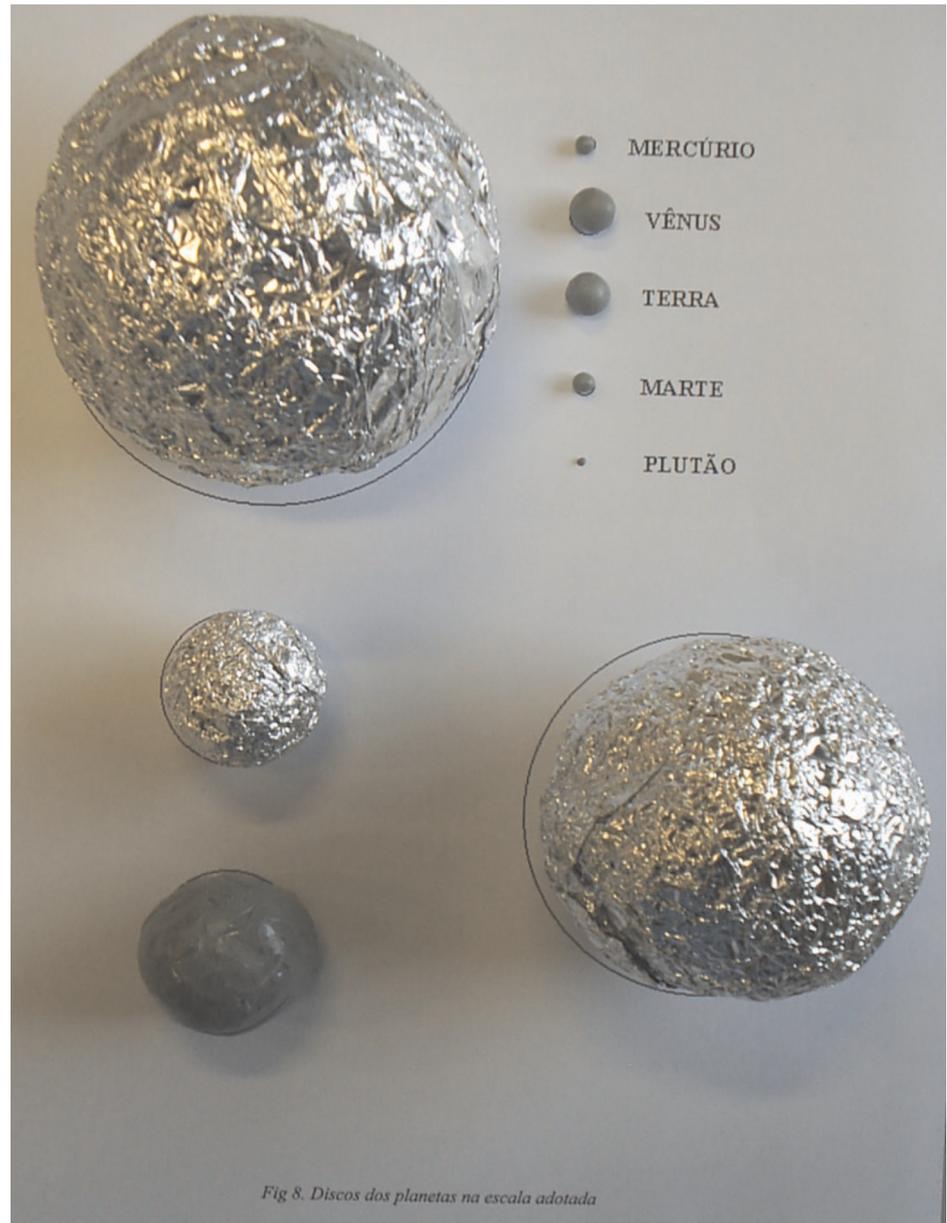


Figura 4.25. Discos dos planetas na escala adotada



Figura 4.26



Figura 4.27



Figura 4.28



Figura 4.29

COMPARAÇÃO ENTRE A ÓRBITA LUNAR E O DIÂMETRO SOLAR

João Batista Garcia Canalle
Instituto de Física - UERJ

Resumo

Nesta atividade comparamos o tamanho do diâmetro do Sol com o diâmetro da órbita lunar. Será que o Sol passaria entre a Terra e Lua, se ele pudesse fazer isso?

Introdução

Sabemos que o Sol tem um diâmetro de 1.392.000 km e que a distância média Terra-Lua é de 384.000 km, logo, a pergunta acima formulada fica imediatamente respondida, mas se essa mesma pergunta for feita para alunos das primeiras séries escolares, que nem sequer sabem ler esses números astronômicos, a resposta não será tão óbvia. Contudo, não se precisa recorrer a esses números para igualmente mostrar que o diâmetro solar é muito maior que o diâmetro da órbita lunar. Vamos supor que a Terra seja colocada no centro do Sol. Assim sendo, onde estaria a Lua?

Atividade

Para ilustrar a situação proposta sugerimos reduzir o disco solar para um disco de 80 cm de diâmetro, conseqüentemente o diâmetro da órbita lunar fica reduzido proporcionalmente para 44,1 cm¹². Recorta-se um disco de cartolina com 80 cm de diâmetro e inscreve (com centro coincidente) um círculo pontilhado de 44,1 cm de diâmetro, que representaria o trajetória da Lua ao redor da Terra se esta estivesse no centro do Sol. Teremos, então, nas mãos uma comparação entre o diâmetro solar e o diâmetro da órbita lunar.

¹²Pode-se usar o disco de 80 cm que foi confeccionado no experimento anterior.

Conclusão

Com esta atividade o aluno pode ter uma melhor idéia do que seja o tamanho do Sol comparado ao sistema Terra-Lua.

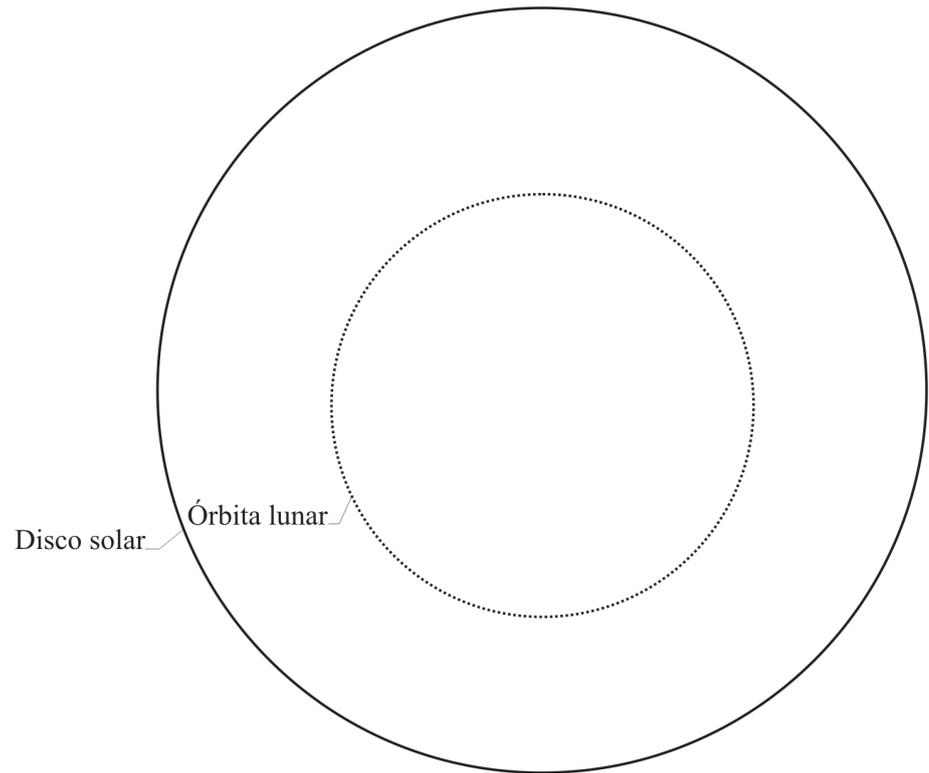


Figura 4.30. Esquema de como fica a atividade proposta com a inserção da órbita lunar dentro do disco solar

COMPARAÇÃO ENTRE OS TAMANHOS DA TERRA E DA LUA

Resumo

Aparentemente a Lua e o Sol têm o mesmo tamanho, pelo menos é o que parece quando olhamos os dois lá no céu. O tamanho angular dos dois é quase o mesmo, mas isso porque a Lua está muito mais próxima da Terra do que o Sol. Já se teve a oportunidade de comparar a Terra e os demais planetas com o Sol noutra atividade. Nesta os tamanhos da Terra e da Lua serão comparados.

Introdução

Vamos fazer a comparação entre os tamanhos da Terra e da Lua comparando seus discos. Sabendo que o diâmetro da Terra¹³ é 12.756 km e que o da Lua é de 3.476 km, vamos reduzir ambos pela mesma proporção de tal forma que a Terra fique com, por exemplo, 15 cm de diâmetro, conseqüentemente a Lua ficará com um disco de apenas 4,1 cm.

¹³Estaremos sempre nos referindo ao diâmetro equatorial, exceto quando mencionado explicitamente o contrário.

Atividade

Recorta-se um disco de cartolina, azul por exemplo, para representar a Terra, com 15 cm de diâmetro e recortemos um disco de cartolina amarela com 4,1 cm para representar a Lua. Passa-se a ter nas mãos uma forma de comparar os discos da Terra e da Lua, que é mais eficiente para fazer o aluno perceber a grande diferença que existe entre os tamanhos da Terra e da Lua do que comparando os números de seus diâmetros ou volumes. Se for usada uma cartolina branca para ambos os discos, pode-se por exemplo, pintá-los com as cores típicas da Terra e da Lua, ou seja, azul e dourada. Porém, se quiser-se fazer uma comparação ainda mais concreta, transforme os discos em esferas, usando para isso massa de modelar, argila, durepox, bolas de isopor, massa de pão, ou simplesmente amassando papéis.

Os dois discos abaixo são proporcionais aos discos da Terra e da Lua.

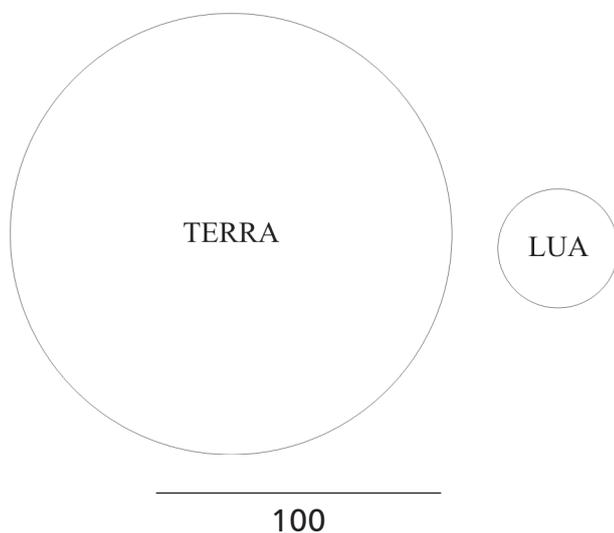


Figura 4.31. Comparação entre os discos da Terra e da Lua

DADOS GERAIS DO SISTEMA SOLAR

	MERCÚRIO	VÊNUS	TERRA	MARTE	JÚPITER	SATURNO	URANO	NETUNO	PLUTÃO
Massa (Terra = 1)	0,055	0,81	1	0,11	318	95,18	14,15	17,14	0,0022
Diâmetro equatorial (km)	4.878	12.103	12.756	6.786	142.984	120.536	51.118	49.528	2.300
Volume (Terra = 1)	0,056	0,86	1	0,15	1323	744	67	57	?
Densidade média (g/cm ³ ; água = 1g/cm ³)	5,42	5,25	5,52	3,94	1,33	0,69	1,27	1,71	2,03
Gravidade superficial equatorial (Terra = 1)	0,38	0,86	1	0,38	2,5	1,1	1,1	1,1	?
Velocidade equatorial de escape (km/s)	4,3	10,3	11,2	5	59,5	35,6	21,2	23,6	1,1
Inclinação axial (graus)	2	2	23,4	24	3,1	26,7	97,9	28,8	57,5
Período rotacional (duração do dia)	58,65 d	243,01 d*	23,93 h	24,62 h	9,92 h	10,67 h	17,23 h*	16,12 h	6,38 d*
Temperatura superficial média (°C)	-170 a 430	464	15	-40	-120	-180	-210	-220	-220
Número de anéis conhecidos	0	0	0	0	1	7	11	4	0
Número de luas	0	0	1	2	16	18	15	8	1
Magnitude máxima aparente	-1,4	-4,4	-	-2,8	-2,8	-0,3	5,5	7,8	13,6
Afélio (milhões de km)	69,7	109	152,1	249,1	815,7	1.507	3.004	4.537	7.375
Periélio (milhões de km)	45,9	107,4	147,1	206,7	740,9	1.347	2.735	4.456	4.425
Distância média do Sol (milhões de km)	57,9	108,2	149,6	227,9	778,3	1.427	2.869,6	4.496,6	5.900
Velocidade orbital média (km/s)	47,89	35,03	29,79	24,13	13,06	9,64	6,81	5,43	4,74
Inclinação orbital (graus)	7	3,39	0	1,85	1,3	2,49	0,77	1,77	17,2
Período orbital (duração do ano) / (a = ano terrestre; d = dia terrestre)	87,97 d	224,7 d	365,26 d	1,88 a	11,86 a	29,46 a	84,01a	164,79 a	248,54 a

* = rotação retrógrada

PRIMEIRA LEI DE KEPLER - LEI DAS ÓRBITAS

João Batista Garcia Canalle
 Instituto de Física -UERJ

Resumo

Nesta atividade vamos desenhar as órbitas dos planetas e de alguns cometas, usando as excentricidades conhecidas das respectivas órbitas. Observaremos que as órbitas dos cometas periódicos são, em geral, muito excêntricas enquanto a dos planetas são pouco excêntricas. Objetivamos também, mostrar que, aqueles que conhecem esta lei, fazem uma idéia completamente errada da excentricidade das órbitas dos planetas, pois as consideram muito mais excêntricas do que realmente o são, isto devido, principalmente, aos desenhos destas órbitas que se vê nos livros didáticos.

Introdução

O enunciado da primeira lei de Kepler, ou lei das órbitas, diz que:

“Todo planeta descreve uma órbita elíptica ao redor do Sol, estando este num dos focos da elipse.”

Define-se uma elipse como o conjunto dos pontos cuja soma das distâncias (d_1 e d_2) destes pontos a dois pontos fixos (F_1 e F_2), chamados **focos**, é uma constante (k), isto é:

$$d_1 + d_2 = k$$

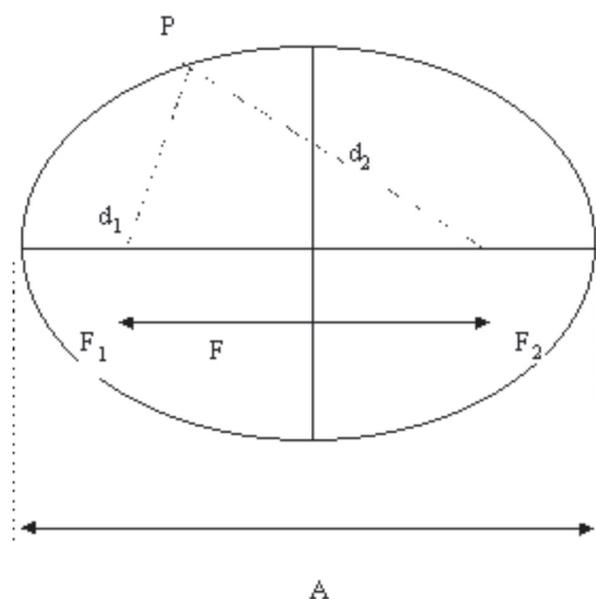


Figura 4.32

Definimos a excentricidade (“achatamento”) da elipse como sendo a razão entre a distância entre os focos ($F = F_1 F_2$) (ou distância interfocal) e o

comprimento do eixo maior (A). Representamos a excentricidade da elipse pela letra "e", assim sendo:

$$E = \frac{F}{A}$$

Um círculo é um caso particular de uma elipse, isto é, o círculo é uma elipse sem "achatamento" algum, ou como chamamos, de excentricidade nula, pois os focos são coincidentes com o centro do círculo e assim sendo, $F = 0$, e, portanto, $e = 0$

EXCENTRICIDADE DAS ÓRBITAS DOS PLANETAS

PLANETA	EXCENTRICIDADE
Mercúrio	0,2
Vênus	0,007
Terra	0,02
Marte	0,09
Júpiter	0,05
Saturno	0,06
Urano	0,05
Netuno	0,009
Plutão	0,25

Procedimento

Para desenharmos as órbitas precisamos executar dois passos:

1. Descobrir qual é a distância entre os focos. Mas conhecida a excentricidade "e" e escolhido o comprimento do eixo maior "A", arbitrariamente, como sendo, por exemplo 20 cm, obtemos a distância interfocal F, pelo produto:

$$F = e \cdot A$$

Por exemplo, para a excentricidade de Mercúrio ($e = 0,2$) e $A = 20$ cm, temos que $F = 0,2 \times 20 = 4,0$ cm

2. Descobrir qual é o comprimento "L" do barbante a ser usado para desenhar a elipse. Vamos usar o método do jardineiro. Esse comprimento é dado pela soma de F mais A, ou seja:

$$L = F + A$$

Em nosso exemplo, $A = 20$ cm e $F = 4,0$ cm, logo $L = 24$ cm, assim sendo, é só cortar um pedaço de barbante com pouco mais de 24 cm, por exemplo, 28 cm, para que possamos amarrar as pontas (CD) do barbante, que definem o comprimento $L = 24$ cm, como mostra a figura abaixo:

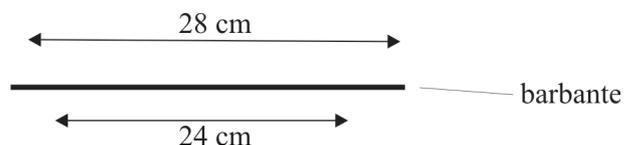


Figura 4.33

Em seguida é só abrir um compasso com a separação F (ou fincar dois pregos separados pela distância F), envolver as pontas do compasso com o barbante do item 2 acima e, com um lápis sempre na vertical, e o barbante sempre esticado, traçar a elipse, como ilustra a figura abaixo.

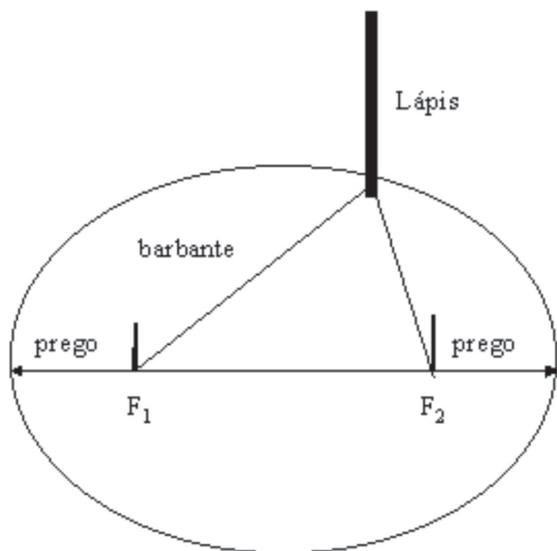


Figura 4.34. Esquema do método do jardineiro para desenhar uma elipse

Exemplo de elipses com 10 diferentes excentricidades

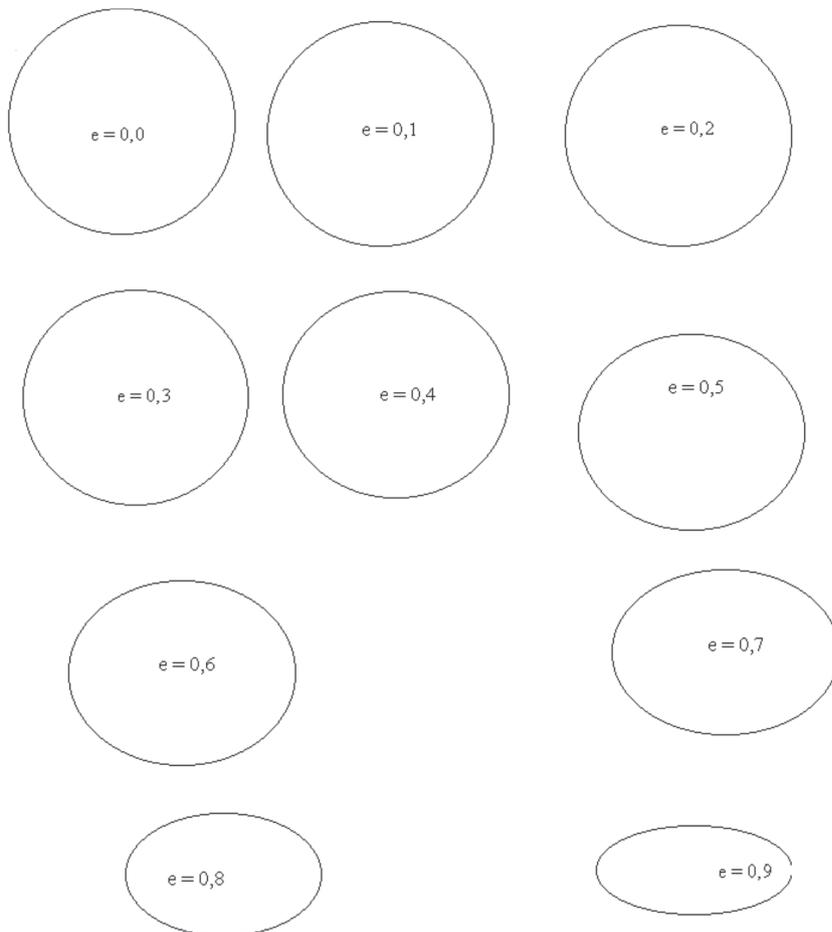


Figura 4.35a. Esquema do método do jardineiro para desenhar uma elipse

Conclusão

Conhecendo-se a definição de excentricidade, conhecendo-se as excentricidades das órbitas dos planetas e desenhando-se as mesma vemos que estas órbitas são muito aproximadamente circulares, ao contrário do que comumente se pensa. A órbita dos cometas, por outro lado, são muito mais excêntricas que as dos planetas e se assemelham mais à figura referente a $e = 0,9$. A órbita de Plutão, o planeta cuja órbita tem a maior excentricidade entre todos os planetas dos sistema solar está desenhada, em escala, na página seguinte. A posição do Sol na *figura 4.35b*. está no local correto também.

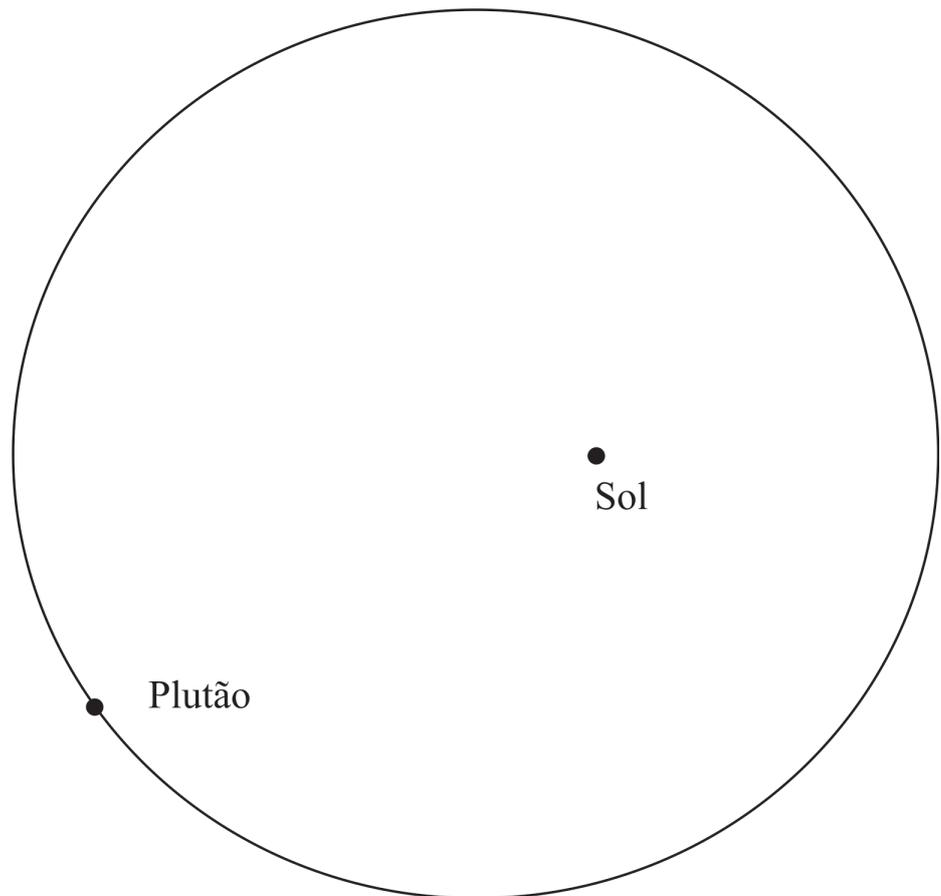


Figura 4.35b. Órbita de Plutão. Excentricidade: 0,25

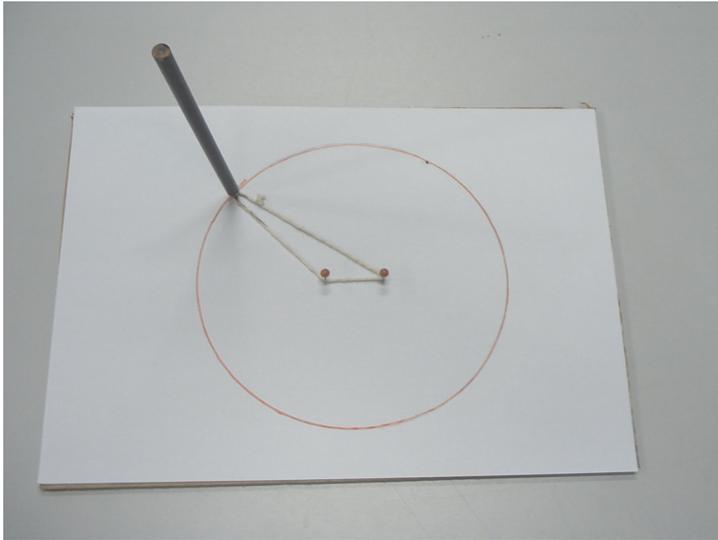


Figura 4.36

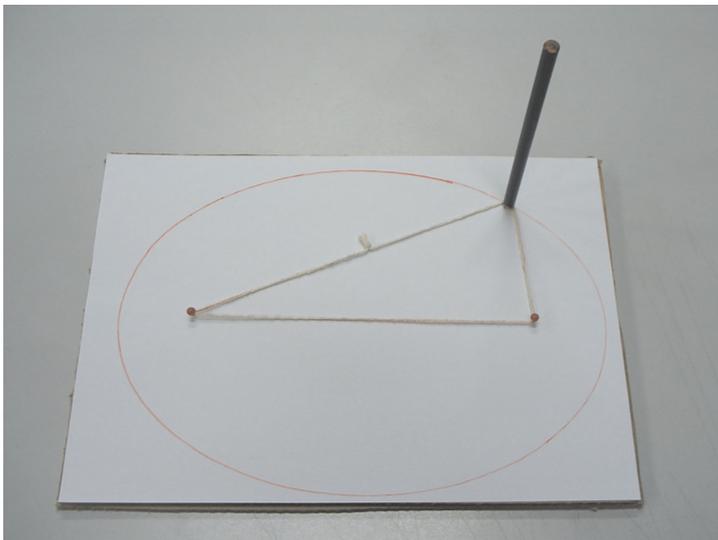


Figura 4.37

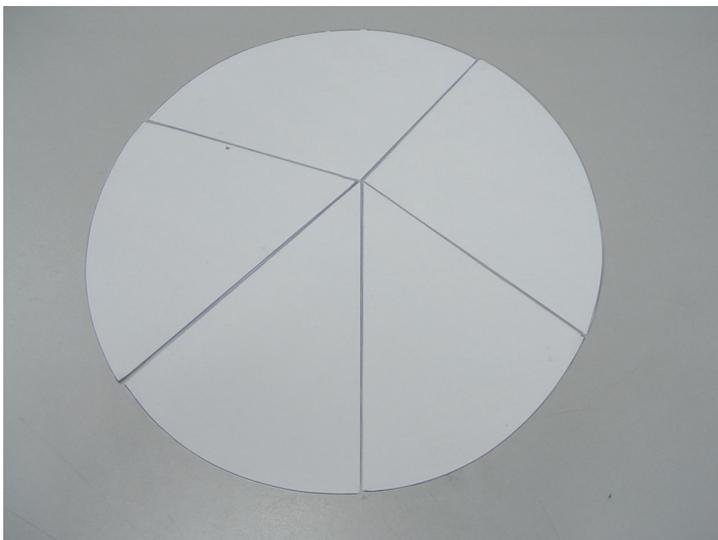


Figura 4.38

SEGUNDA LEI DE KEPLER - A LEI DAS ÁREAS

João Batista Garcia Canalle
Instituto de Física - UERJ

Resumo

Nesta atividade faremos medições de áreas varridas pela linha que liga Plutão ao Sol, em idênticos intervalos de tempo (~ 50 anos), mas em diferentes posições do planeta ao redor do Sol, para comprovarmos que estas áreas são iguais. Repetiremos a atividade para um cometa para vermos que a lei continua válida.

Introdução

O enunciado da segunda lei de Kepler ou lei das áreas é o seguinte:

“Linha que une o planeta ao Sol varre áreas iguais em iguais intervalos de tempo”

Aprendemos que a órbita dos planetas são elípticas e que o Sol está num dos focos dessa elipse (primeira lei de Kepler ou lei das órbitas), assim sendo, ora o planeta está mais próximo do Sol, ora está mais longe, e como a força gravitacional que une estes dois astros diminui com o inverso do quadrado da distância, ela é maior quando o planeta está próximo e menor quando está distante, e com isso varia também a velocidade do planeta ao redor do Sol. Kepler descobriu que apesar da velocidade do planeta variar, a linha imaginária que liga o Sol ao planeta varre áreas iguais em iguais intervalos de tempo. Por exemplo, o período de translação de Plutão é de 248 anos, divididos por, por exemplo, 5, obtemos 5 intervalos iguais de aproximadamente 50 anos cada.

Usemos a órbita de Plutão e de um cometa, já divididas em iguais intervalos de tempo para verificarmos se as áreas são de fato iguais.

Procedimento

Pegar duas “áreas” da órbita de Plutão e copiá-las sobre uma folha de papel milimetrado, em seguida calcular a área. Para medir a área de cada pedaço façamos o seguinte:

1. Contar todos o “centímetros quadrados” do papel milimetrado que estiverem inteiramente dentro do “pedaço” da “área”. Multiplique esse número por 4 pois nossa unidade de área será, na verdade o quadradinho com 5 mm de lado, ou seja, um quarto de centímetro quadrado.
2. Na fronteira contamos todos os quadradinhos (de 5 milímetro de lado) em que a linha da fronteira passa por eles. Somemos esses quadradinhos e dividamos por 2.

3. Somando os resultados obtidos nos dois itens anteriores obtemos a área da seção medida.
4. Repete-se o procedimento para outra "área" e observaremos que as áreas são iguais ou então muito aproximadamente semelhantes, uma vez que usamos um método relativamente grosseiro para calcular a área.

Conclusão

Esta atividade mostrou que tendo-se a órbita do planeta (ou cometa) já desenhada, em escala e dividida em iguais intervalos de tempo, podemos calcular a área varrida pela linha imaginária que liga o Sol ao planeta (ou cometa) e confirmarmos que estas áreas são iguais.

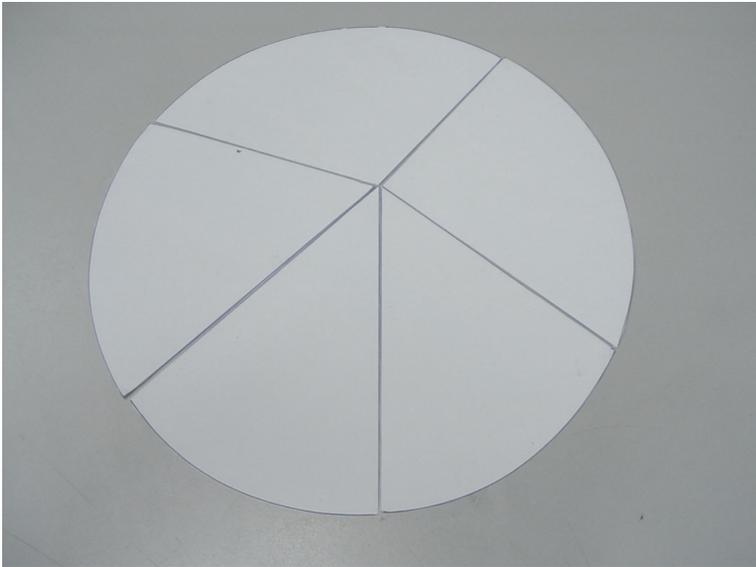


Figura 4.39

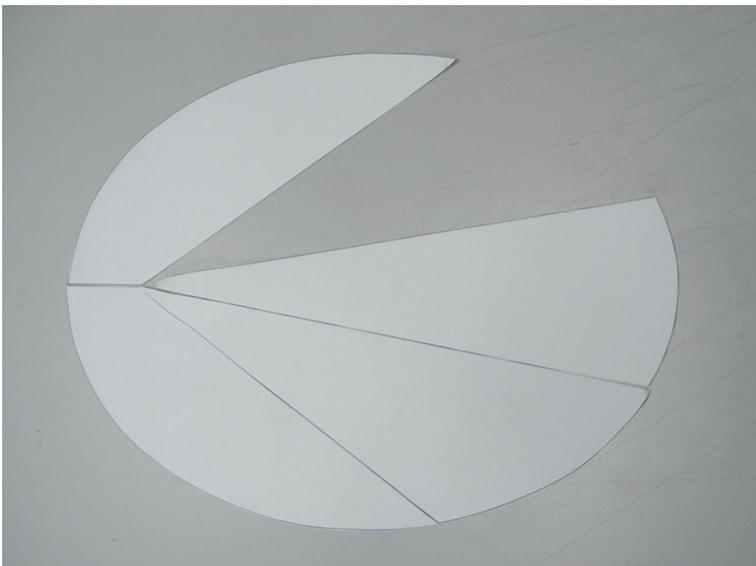


Figura 4.40

TERCEIRA LEI DE KEPLER - LEI DOS PERÍODOS

João Batista Garcia Canalle
Instituto de Física – UERJ

Resumo

Nesta atividade vamos calcular o valor da constante mencionada nesta Lei. Vamos usá-la para descobrir os períodos de outros planetas e ilustrar graficamente a relação matemática que representa a terceira lei de Kepler, ou Lei dos Períodos.

Introdução

Kepler conhecia os períodos de translações dos planetas, conhecidos naquela época (de Mercúrio a Saturno), em termos do período de translação da Terra e conhecia também para estes mesmos planetas, suas distâncias médias ao Sol, em termos, também, da distância média da Terra ao Sol. Chamamos a distância média Terra-Sol de Unidade Astronômica e a representamos por UA (1 UA = 149.600.000 km). Enfim, Kepler tinha a seguinte tabela de valores em suas mãos:

PLANETA	PERÍODO (T - EM ANOS TERRESTRES)	DISTÂNCIA (D - EM UA)
Mercúrio	0,24	0,39
Vênus	0,62	0,72
Terra	1,00	1,00
Marte	1,88	1,52
Júpiter	11,86	5,20
Saturno	29,46	9,54

Com esses valores ele descobriu a relação matemática que existe entre T e D, a qual recebeu o nome de Lei dos Períodos, que diz:

“A razão entre o quadrado do período pelo cubo da distância é uma constante.”

Lembrando que o período mencionado é o de translação do planeta e a distância mencionada é a distância média do planeta ao Sol.

Atividades

1. Descobrir qual é o valor da constante mencionada na Lei dos Períodos. Para tanto basta calcular o quadrado de cada período e dividi-lo pelo cubo da respectiva distância. Ache o valor dessa constante para cada planeta e calcule seu valor médio, isto é, some seus valores e divida pelo número deles.

2. Posteriormente foram descobertos os planetas Urano, Netuno e Plutão, com as seguintes distâncias médias ao Sol, em Unidades Astronômicas (UA): 19,19, 30,08 e 39,46 respectivamente. Use a Lei dos Períodos e encontre os períodos de translações destes planetas¹⁴.
3. Complete a tabela acima com os valores encontrados no item 2 e faça um gráfico do quadrado dos períodos (no eixo das ordenadas) em função do cubo das distâncias médias dos planetas ao Sol (no eixo das abcissas) e trace a reta média através destes pontos. Verifique que o coeficiente angular desta reta é igual ao valor médio da constante da Lei dos Períodos.

¹⁴Resposta: 84, 164 e 247 anos terrestres, respectivamente.

Conclusão

Com as três Leis de Kepler ficam estabelecidas as leis que regem os movimentos de todos os planetas e cometas. Elas modificam o conhecimento que se tinha até então, sobre o movimento dos planetas, dados por Ptolomeu¹⁵.

¹⁵ Cláudio Ptolomeu, astrônomo, geógrafo e matemático alexandrino, que viveu entre 90 e 160 d.C. Sua principal obra é o Grande Sistema Astronômico, em grego, que ficou conhecido como Almagesto na versão árabe. Sua principal contribuição à astronomia foi ter elaborado a teoria geocêntrica para o movimento dos planetas

O ACHATAMENTO DOS PLANETAS

João Batista Garcia Canalle
Instituto de Física - UERJ

Resumo

Devido à rotação, os planetas sofrem forças que tendem a fazer o diâmetro polar ser menor que o diâmetro equatorial. Nesta atividade sugerimos a construção de um pequeno experimento que quando colocado em rotação se achata, ilustrando assim, o fenômeno que ocorre nos planetas.

Introdução

Os planetas não são corpos inteiramente rígidos. A Terra, por exemplo, tem um núcleo rígido, mas entre a crosta e esse núcleo rígido existe uma região chamada manto que não é rígida. Embora a rotação da Terra seja lenta, existe uma diferença de 40 km entre os diâmetros equatorial e polar. Obviamente essa diferença é relativamente pequena comparado com os 12.756 km de diâmetro equatorial.

Vamos definir o achatamento (A) do planeta pela razão entre seus diâmetros polar (D_p) e equatorial (D_e).

$$A = \frac{D_p}{D_e}$$

Na tabela¹⁶ abaixo fornecemos o achatamento¹⁷ dos planetas para os quais esse parâmetro é conhecido.

PLANETA	ACHATAMENTO
Mercúrio	-
Vênus	-
Terra	0,996
Marte	0,995
Júpiter	0,938
Saturno	0,904
Urano	0,938
Netuno	0,980
Plutão	-

A tabela ao lado mostra que os planetas chamados "gasosos" (Júpiter, Saturno, Urano e Netuno) têm o maior achatamento, além do que eles têm período de rotação menor do que a Terra.

Atividade

Um modo simples de ilustrar que tudo que gira e não é rígido tende a se achatar, isto é, ter seu diâmetro ao longo do eixo de rotação menor que seu diâmetro medido perpendicular a este, é construindo-se um anel com um material flexível

¹⁶Efemérides Astronômicas para 1987, Boletim Técnico nº 6, elaborado pela Equipe Técnica do Planetário e Escola Municipal de Astrofísica de São Paulo, p.74.

¹⁷A definição usada aqui está relacionada com a definição de Achatamento Geométrico (Dicionário Enciclopédico de Astronomia e Astronáutica, Mourão, R.R.F., Editora Nova Fronteira, 1987), que é:

$\alpha = \frac{(d - d_p)}{d}$, pois $A = 1 - \alpha$

(como por exemplo uma chapa plástica), colocando-se um eixo de rotação e dando-se um impulso angular para colocá-lo em rotação. Uma vez em rotação observa-se o mesmo fenômeno que ocorre com os planetas.

Como o mencionado impulso angular faz com que o experimento gire muito mais rápido que os planetas e por ser muito menos rígido que os planetas, o anel se achata muito, o que não acontece com os planetas pois suas velocidades de rotações são pequenas comparada ao do experimento mencionado.

Segurando-se o gira-gira na horizontal, com as duas mãos, com o indicador, por exemplo, da mão direita pode-se dar um impulso angular e colocá-lo em rotação, observando o conseqüente achatamento.

Conclusão

Esta é uma atividade que serve para ilustrar o que ocorre com os planetas, mas é muito importante que fique claro ao aluno que os planetas não giram tão rápido quanto o experimento, não são tão flexíveis quanto o experimento e, portanto, não se achatam tanto como observamos no gira gira.

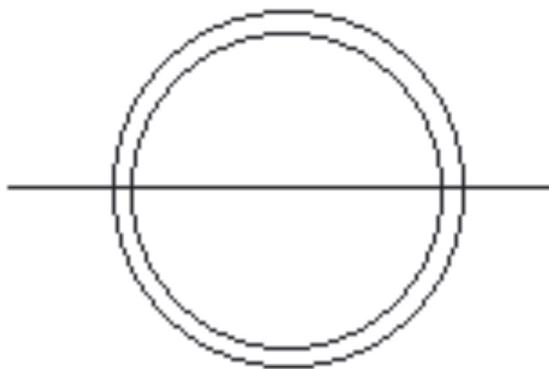


Figura 4.41. Esquema do gira gira.

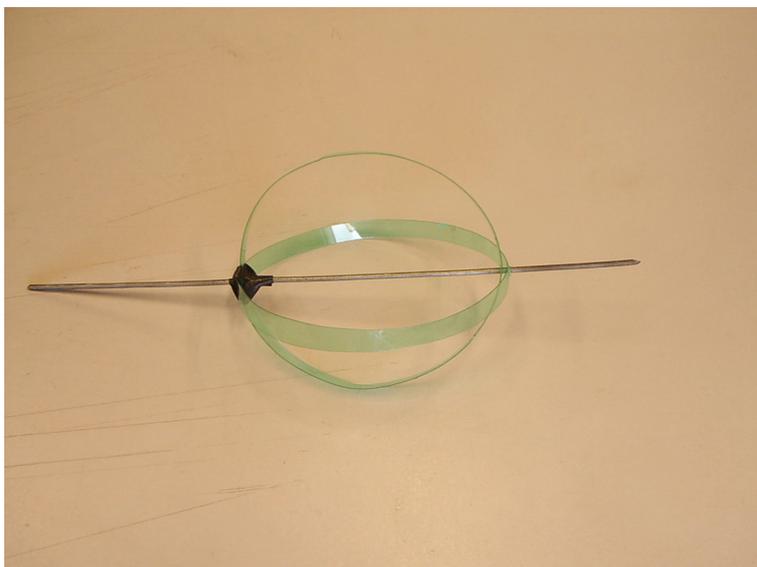


Figura 4.42



Mensagem trazida pela luz decodificada pela espectroscopia

FENÔMENOS OBSERVÁVEIS A OLHO NU

Até aqui falamos do *movimento aparente* do Sol, da Lua e dos planetas visíveis a olho nu na esfera celeste. Vimos que, através das medições da paralaxe, podemos retornar ao Universo tridimensional determinando a distância dos astros, pelo menos dos mais próximos. Mas, a partir de agora, discutiremos a *natureza* dos astros visíveis a olho nu. Falar da natureza dos astros requer explicações *astrofísicas*. Por isso, logo no início, faremos uma exposição bem resumida dos conceitos e métodos básicos da *astrofísica*. Primeiro trataremos da natureza dos astros do Sistema Solar e, depois, da natureza dos astros externos ao Sistema Solar.

5.1 Astrofísica

5.1.1 Espectroscopia

Desde meados do século XIX, os astrônomos passaram a contar com a *espectroscopia*, a importante técnica observacional que possibilitou o estudo da composição química e do estado físico dos astros. Sobre essa nova base observacional surgiu um novo e fecundo ramo da astronomia chamado *astrofísica*.

A luz natural de um astro é uma mistura de *radiação eletromagnética* de diferentes *comprimentos de onda*. Assim é a luz do Sol, também chamada *luz branca*. O que ocorre no fenômeno do arco-íris é a decomposição da luz do Sol em componentes de diferentes cores ou comprimentos de onda.

O *espectroscópio* é o instrumento utilizado pelo astrônomo para analisar a composição espectral da luz proveniente dos astros. O mais simples consiste num *prisma* (Figura 5.1). Numa de suas faces se faz incidir um feixe de luz. No interior do prisma a luz de diferentes comprimentos de onda sofre diferentes desvios angulares. Da outra face do prisma a luz emerge com as diferentes cores separadas formando o *espectro*. No espectro podemos medir a quantidade de luz nos diversos comprimentos de onda e, assim, determinar a composição espectral da luz incidente.

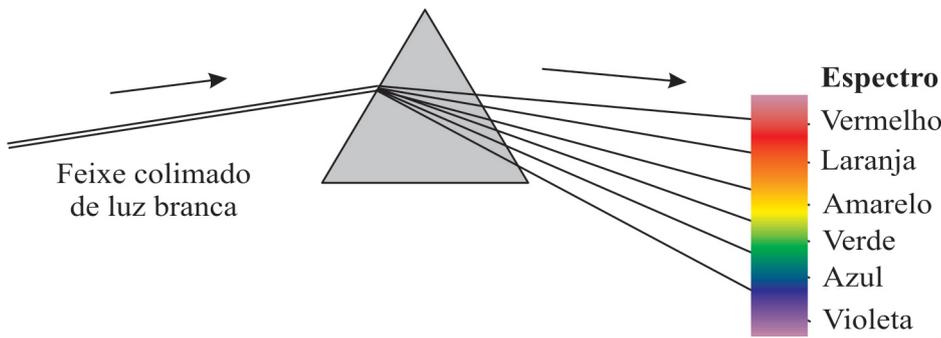


Figura 5.1. Espectroscópio com prisma

5.1.2 Corpo negro

Objetos opacos (suficientemente densos), quando aquecidos, emitem radiação em todos os comprimentos de onda. Mas a quantidade de radiação emitida não é igual em todos os comprimentos de onda. Os físicos idealizaram os corpos opacos através do conceito teórico de **corpo negro**. A Figura 5.2 mostra a distribuição de energia irradiada por corpos negros de diferentes temperaturas (*lei de Planck*). Os corpos opacos quando irradiam se comportam aproximadamente como os corpos negros teóricos.

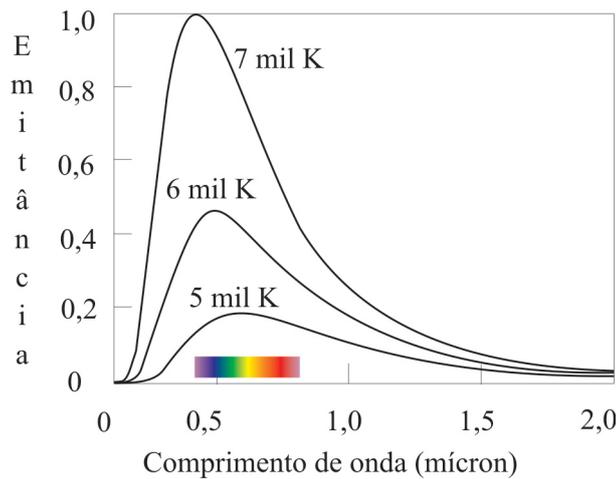


Figura 5.2. Composição espectral da radiação emitida por corpos negros de diferentes temperaturas. O eixo vertical tem uma escala relativa. No eixo horizontal a unidade adotada é o micron (1 milionésimo do metro). A luz visível está compreendida entre 0,4 e 0,8 micron

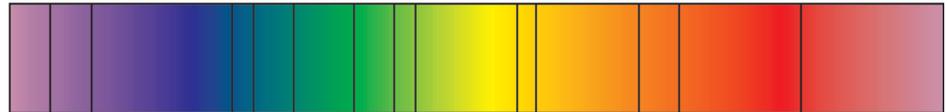
Uma característica do espectro de um corpo negro é a distribuição contínua de energia em todos os comprimentos de onda. Basicamente esse é o espectro de uma estrela. O Sol tendo a temperatura de 6 mil K em sua superfície, irradia grosso modo como o corpo negro da Figura acima com essa temperatura. Outra característica importante é que, com o aumento da temperatura, maior parte da radiação tende a ser irradiada em comprimentos de onda mais curtos. Notar que o pico das curvas da Figura 5.2 se desloca para a esquerda conforme a temperatura aumenta. Assim um objeto a 1 mil K nos parecerá avermelhado. O Sol com 6 mil K é amarelado. Uma estrela com 20 mil K é azulada.

Mesmo a olho nu podemos perceber a coloração das estrelas. Essa coloração denuncia a temperatura na superfície.

5.1.3 Linhas de absorção

Mas o óptico alemão Joseph von Fraunhofer (1787-1826) descobriu em 1814 que o espectro solar não era contínuo. Ele era entrecortado por centenas de **linhas de absorção**. Logo depois se descobriu que essa não é uma peculiaridade do Sol, mas uma característica geral de todas as estrelas, com muito raras exceções. As linhas de absorção consistem em ausências de luz em certos comprimentos de onda. O espectro, em vez de ser contínuo, apresenta falhas ou descontinuidades (*Figura 5.3*).

Figura 5.3. Representação esquemática de um espectro com linhas de absorção

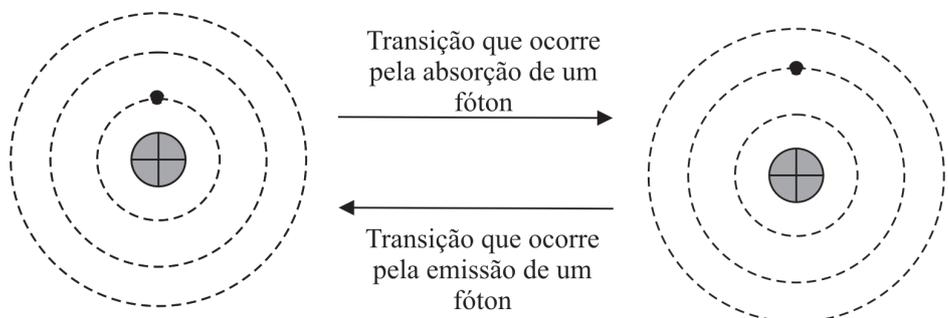


O surgimento das linhas de absorção se deve a que a estrela está envolva por uma atmosfera mais fria do que a superfície da estrela. Se fosse mais quente, as linhas apareceriam em emissão, o que ocorre em alguns casos muito raros. No espectro de absorção, a luz de certos comprimentos de onda é absorvida pelos átomos (e moléculas) da atmosfera, daí as falhas.

O importante é que o átomo de um determinado elemento só absorve (ou emite) luz de certos comprimentos de onda que lhe são característicos. Por outras palavras, observando-se o conjunto de linhas espectrais absorvidas (ou emitidas), é possível identificar o átomo causador. Assim, através da espectroscopia o astrofísico consegue diagnosticar a **composição química** dos astros. A análise detalhada do perfil das linhas de absorção permite diagnosticar a *pressão*, a **temperatura**, a **densidade** e ainda, como veremos, os **movimentos** do gás. Podemos agora compreender o enorme alcance conseguido pelos astrônomos através da espectroscopia.

Figura 5.4. Representação esquemática de algumas órbitas eletrônicas do átomo de hidrogênio. No centro um próton. O elétron é representado por uma bolinha preta. Segundo o modelo de átomo idealizado pelo físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962), o elétron não pode ter órbitas de raios quaisquer. Somente órbitas de certos tamanhos definidos são permitidas. Isso define a estrutura do átomo. A energia do fóton emitido ou absorvido é igual à diferença de energia envolvidos numa absorção ou emissão

Átomos e íons de diferentes elementos químicos têm, cada um, seu conjunto característico de linhas espectrais porque a energia de um fóton absorvido (ou emitido) é precisamente igual à diferença de energia entre duas de suas órbitas eletrônicas. Por sua vez, as órbitas são características da estrutura de cada átomo ou íon (*Figura 5.4*).



O Sol é constituído majoritariamente de H (71%) e He (27 %). As porcentagens são em massa. Os elementos mais pesados são, na ordem, O, C, N, Si, Mg, Ne, Fe e S. Essa mistura química compõe o Sol. Devido às elevadas tem-

peraturas no seu interior, esses elementos se encontram *ionizados*. Apesar de a *densidade* no centro atingir 100 g/cc, podemos dizer que todo o Sol é uma grande massa gasosa em *equilíbrio hidrostático*. A gravidade tende a comprimir a matéria solar. Se somente ela agisse, o Sol seria colapsado a um ponto. Mas a matéria solar tem uma *pressão* cujo decréscimo de uma camada concêntrica para outra imediatamente externa, atua no sentido de expandi-la. O Sol se encontra em equilíbrio hidrostático porque duas forças que atuam em sentidos opostos se equilibram, isto é, se cancelam em todos os pontos dentro do Sol.

5.1.4 Efeito Doppler

As linhas espectrais oferecem ainda uma possibilidade observacional adicional de valor inestimável. Elas sofrem o *efeito Doppler*. Esse efeito acontece também com as ondas sonoras. Quando uma ambulância se aproxima de nós, o som da sirene nos parece mais agudo, tornando-se mais grave depois que ele cruza por nós. O movimento relativo de aproximação ou afastamento da fonte de ondas sonoras faz com que a repetição do fenômeno ondulatório se processe mais rapidamente, ou mais lentamente do que se estivesse em repouso.

A onda circular que se propaga na superfície de um lago tranqüilo ilustra isso (Figura 5.5).

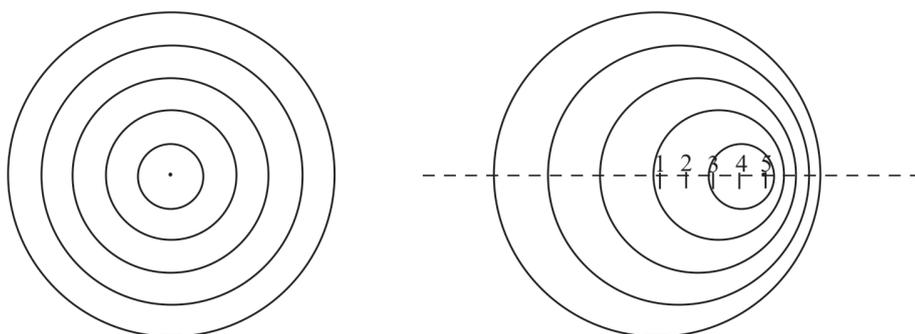


Figura 5.5. Ilustração do efeito Doppler. O plano do papel representa a superfície de um lago. No lado esquerdo, no centro, uma pessoa perturba periodicamente a superfície do lago. As sucessivas ondas se propagam em círculos concêntricos. O raio desses círculos é proporcional ao tempo decorrido desde a perturbação. O comprimento de onda é constante. No lado direito a pessoa que perturba se desloca para a direita, passando sucessivamente pelos pontos 1, 2,...5. No ponto 5 a onda nem teve tempo para se propagar. Esses pontos são os centros instantâneos das ondas, mas estas agora não são mais concêntricas. A causa é o movimento da fonte. Notar que agora o comprimento de onda na direção do movimento (lado direito) é mais curto, e no sentido oposto é mais longo. Devido à relatividade do movimento, o efeito Doppler seria o mesmo se, em vez da fonte, o observador se movimentasse

Quando um astro se aproxima ou se afasta de nós, também ocorre o efeito Doppler no espectro de radiação que pode ser medido com precisão pelo deslocamento das linhas espectrais. Quando o astro se aproxima, o deslocamento espectral é para comprimentos de ondas mais curtos. Diz-se que o deslocamento é *para o azul*. Quando ele se afasta, o deslocamento é para comprimentos de ondas mais longos e diz-se que o deslocamento é *para o vermelho*. A posição da linha quando a fonte está em repouso pode ser determinada com grande precisão em laboratório.

Assim, através do efeito Doppler, o astrônomo passa a contar com um método para medir a *componente radial* da velocidade dos astros no espaço. Como vimos na seção 2.2.1, o movimento radial não produz nenhum efeito no movimento próprio. Mas, combinando as observações do movimento próprio e do efeito Doppler, podemos diagnosticar a velocidade do astro no espaço.

O efeito Doppler permite diagnosticar, além do movimento dos astros no espaço, movimentos que ocorrem no próprio astro, tais como, rotação, turbulência, ejeção de jatos etc. Permite também diagnosticar a temperatura, pois, esta é uma medida da velocidade média da agitação térmica dos átomos e moléculas. Um gás aquecido em repouso pode não ter movimento coletivo, mas as partículas que o compõem têm movimento microscópico ou térmico. Nesse caso a linha espectral não se desloca, mas se alarga.

5.2 Fenômenos do Sistema Solar

5.2.1 Cometas

Um *cometa* brilhante, com uma cauda que se estende na esfera celeste por dezenas de graus, é um fenômeno ao mesmo tempo impressionante e não muito freqüente. O brilho e o tamanho angular variam muito de cometa para cometa. É fácil identificarmos as seguintes partes morfológicas em um cometa visível a olho nu: o **núcleo**, a **coma** ou cabeleira e as **caudas** (Figura 5.6).

O **núcleo** designa um ponto ou pequena região de brilho mais intenso. Esse é o **núcleo fotométrico**. Mais adiante falaremos de um **núcleo sólido**, a famosa bola de gelo sujo. De um modo geral, o núcleo fotométrico deve coincidir em posição com o núcleo sólido. Mas é importante termos em mente que, tendo este último apenas 5 a 10 km, não pode ser observado diretamente nem mesmo com os maiores telescópios em solo. E outras palavras, o núcleo fotométrico não é imagem do núcleo sólido, pois subtende um ângulo inferior ao poder de resolução dos telescópios.

A **coma** que circunda o núcleo fotométrico é uma nebulosidade difusa, com forma aproximadamente esférica. Seu diâmetro tem tipicamente algumas centenas de milhares de quilômetros. A coma é tão rarefeita que, através dela, podemos enxergar as estrelas de fundo mais brilhantes.

Como se a matéria da coma escoasse para uma direção, formam-se as **caudas**. Uma cauda bem desenvolvida pode chegar a ter 1 UA. Há dois tipos de cauda: a **de gás**, mais estreita, mais retilínea e mais estruturada; e a **de poeira**, bem larga, mais encurvada e com distribuição mais homogênea de brilho. Ambas as caudas apontam sistematicamente para a direção oposta à do Sol (**direção anti-solar**). Se, por exemplo, vemos um cometa de madrugada no horizonte leste antes do Sol nascer, ou no começo da noite no horizonte oeste, a cauda sempre estará no prolongamento da reta que une o Sol (abaixo do horizonte) ao cometa (Figura 5.6).

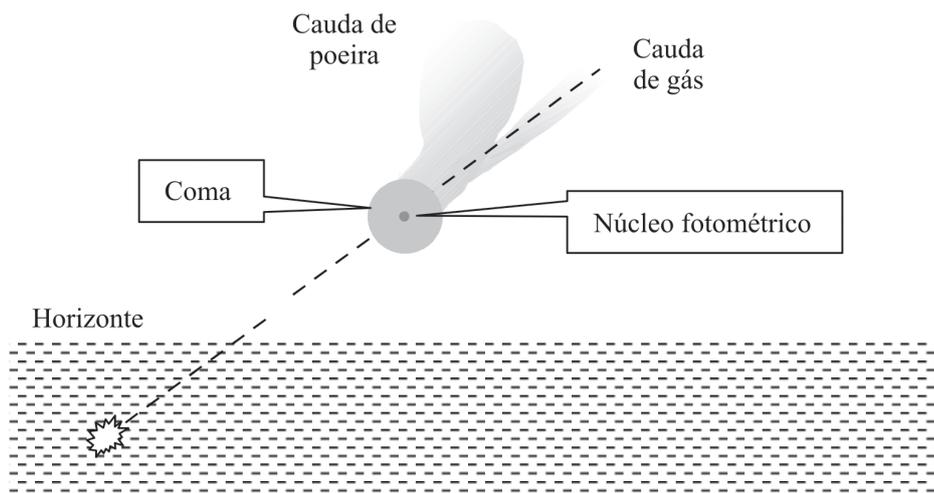


Figura 5.6. Representação esquemática das partes morfológicas de um cometa e da direção anti-solar das caudas

Não é sempre que um cometa exhibe cabeleira e caudas. Diferentemente dos planetas cujas órbitas são sensivelmente circulares, as órbitas dos cometas são, em geral, bastante excêntricas (Figura 5.7). Consistem em elipses bastante achatadas, tendo o Sol num dos focos. Por isso, a maioria dos cometas passa a maior parte do tempo bem longe do Sol. Só quando se aproximam dele desenvolvem coma e caudas.

Somente na década de 1950 é que se chegou ao conhecimento de que os cometas consistem em ***bolas de gelo sujo***, isto é, bolas de água congelada (gelo comum), dióxido de carbono congelado (gelo seco) e hidratos congelados (de dióxido de carbono, metano e amônia). Fragmentos cósmicos de todos os tamanhos, inclusive finos grãos de poeira, misturam-se com o gelo tornando-o sujo. Os fragmentos consistem em matéria ***refratária*** (não volátil) no estado sólido. Assim, quando um cometa se aproxima do Sol a uma distância menor que a de Júpiter, a superfície do núcleo sólido é aquecida pela radiação solar a ponto de iniciar a vaporização da matéria congelada. A atração gravitacional do núcleo do cometa é tão fraca, que todos os gases evaporados são perdidos de forma definitiva. Os fragmentos cósmicos de menor tamanho são também arrastados pelo fluxo dos gases. Da expansão desse fluxo de gás e poeira resulta a coma.

As caudas são extensões da coma. A cauda de poeira é empurrada na direção anti-solar pela luz solar. Embora não sintamos, a luz exerce pressão ao incidir na matéria. O efeito se torna perceptível em grãos de poeira micrométricos ou submicrométricos. É que a força devida à ***pressão da radiação*** é proporcional à seção reta (área vista pelo fluxo de radiação) do grão, ou seja, ao quadrado do raio do grão. Já a força de atração gravitacional do Sol é proporcional ao volume do grão, ou seja, ao cubo de seu raio. Portanto a razão entre essas duas forças é inversamente proporcional ao raio do grão. Conforme o tamanho do grão diminui, essa razão cresce havendo um tamanho crítico abaixo do qual os grãos sofrem mais a repulsão da radiação, do que a atração do Sol. O encurvamento maior ou menor da cauda se deve à predominância menor ou maior da pressão de radiação.

Na cauda gasosa muitos átomos e moléculas não são eletricamente neutros, mas estão ionizados. A ionização (perda de um ou mais elétrons) é devida principalmente à radiação ultravioleta do Sol. Um gás de cargas elétricas interage com o campo magnético. O vento solar ejetado continuamente pelo Sol consiste em matéria magnetizada. O gás ionizado do cometa é incorporado ao vento solar por intermediação do campo magnético, e depois é arrastado com ele na direção anti-solar.

O brilho e o tamanho da coma e cauda dos cometas dependem do tamanho do núcleo sólido e do teor de matéria volátil em relação à refratária. Num cometa que se aproxima pela primeira vez do Sol, esse teor é alto, mas nas aproximações posteriores ele será cada vez menor, o que reduz a capacidade de vaporizar.

Por outro lado, o auge da atividade de um cometa ocorre quando ele se encontra mais perto do Sol, no ponto da órbita chamado *periélio*. Mas, nesse momento a Terra pode estar orbitando o Sol num ponto próximo ou distante do cometa (*Figura 5.7*). Por isso, um mesmo cometa no periélio pode apresentar grande brilho e tamanho angular, mas não reeditar isso na seguinte aproximação.

Figura 5.7 (fora de escala). A Terra descreve uma órbita quase circular ao redor do Sol. O cometa, uma elipse com alta excentricidade. Teoricamente a atividade do cometa é máxima quando ele se encontra no periélio (P). Aí ele será observado com brilho e tamanho angular maior se a Terra estiver em A, e menor se estiver em B



Considera-se identificado um cometa somente quando se conhece a sua órbita. A órbita é conhecida quando se tem um conjunto de seis parâmetros. Cinco deles são os *elementos orbitais* que definem o tamanho, a forma e a orientação da órbita no espaço. O sexto parâmetro é o instante da *passagem pelo periélio* que define a posição do cometa na órbita. O catálogo de cometas identificados cresce com o tempo. Hoje contém cerca de milhares de cometas. Uns 17% têm período orbital < 200 anos e são chamados *cometas de curto período*. Suas órbitas geralmente estão perto da eclíptica. Acredita-se que esses cometas vêm do *Cinturão de Kuiper*¹⁸, um anel na eclíptica que começa depois da órbita de Netuno e se estende até 100 UA. Esse Cinturão contém estimativamente dezenas de trilhões de cometas que se formaram lá mesmo, mas não se agregaram num planeta devido a perturbações gravitacionais de Netuno.

Os restantes 83% têm órbitas muito maiores e que não se restringem às proximidades da eclíptica. Portanto o movimento aparente desses cometas não se confina ao zodíaco. Presume-se que esses cometas estão hibernados numa espécie de concha ao redor do Sistema Solar entre 50 mil e 100 mil UA. Essa já é uma fração apreciável da distância do Sol às estrelas vizinhas. A concha é chamada *Nuvem de Oort*¹⁹ e apenas poucos membros dela são ocasionalmente projetados para as proximidades do Sol tornando-se visíveis da Terra. Em nenhuma época houve matéria suficiente na própria Nuvem

¹⁸Gerard Peter Kuiper (1905-73), astrônomo holandês que fez carreira nos Estados Unidos estudando o Sistema Solar.

¹⁹O astrônomo holandês Jan Hendrik Oort (1900-1992) propôs a hipótese dessa concha em 1950.

de Oort para formar cometas. Portanto os cometas dessa Nuvem foram ejetados para lá depois de terem se formado nas proximidades de planetas gigantes, tais como, Saturno e Urano.

Todos os cometas constituem apenas 0,0003% de toda a matéria do Sistema Solar. Apesar dessa insignificância em termos de massa, os cometas são preciosas relíquias do Sistema Solar primitivo. Precisamente por serem pequenos, eles praticamente não sofreram alterações físico-químicas desde que se formaram. Já planetas e seus satélites, sofreram forte compressão gravitacional, aquecimento e fracionamento no seu interior. Hibernando a maior parte do tempo bem longe do Sol, os cometas de hoje se prestam de forma única ao reconhecimento das condições da Nebulosa Solar Primitiva que deu origem ao Sistema Solar. Como veremos mais adiante, os **meteoritos condríticos carbonáceos** (ver seção 5.2.5) também são relíquias preciosas da Nebulosa Solar Primitiva.

5.2.2 Asteróides

Nenhum **asteróide** pode ser visto ordinariamente da Terra a olho nu. Por isso, à primeira vista, esta seção pode parecer inapropriada. No entanto, mais adiante, teremos que falar de seus fragmentos que produzem efeitos observáveis a olho nu, tais como a **poeira zodiacal**, as **crateras** que resultam de seus violentos impactos e os **meteoritos** que podem ser coletados e analisados em laboratório. Por essa razão aqui falaremos brevemente sobre eles.

Asteróides são fragmentos rochosos que orbitam ao redor do Sol, na eclíptica, num largo anel entre Marte e Júpiter chamado **Cinturão dos Asteróides**. Um asteróide grande tem tipicamente algumas centenas de km. Há ainda várias dezenas de asteróides chamados Troianos que descrevem a mesma órbita de Júpiter, porém formam dois grupos, um 60° na frente, outro 60° atrás desse planeta. Há também asteróides transviados com órbitas excêntricas que cruzam a órbita de Marte, da Terra e de Vênus. Esses, em geral, têm dezenas de km. Os que cruzam a órbita da Terra suscitam preocupação, pois podem colidir com o nosso Planeta.

O Cinturão dos Asteróides não é inteiramente preenchido, mas apresenta lacunas chamadas **falhas de Kirkwood**. Elas correspondem a órbitas instáveis porque o período orbital do asteróide dividido pelo período orbital de Júpiter é uma razão entre dois números inteiros. Nesse caso a ação gravitacional de Júpiter se torna **ressonante**, ou seja, se repete nas mesmas condições possibilitando a amplificação dos efeitos. Um fragmento produzido numa colisão, que eventualmente ocupe esse tipo de órbita, rapidamente será expelido dela. Essa pode ser a origem dos asteróides que cruzam a órbita da Terra. Os asteróides da parte interna do Cinturão tendem a ser ferrosos; os da periferia tendem a ser ricos em carbono, apresentando uma composição química compatível com os **meteoritos condríticos carbonáceos** (seção 5.2.5); e os das regiões intermediárias tendem a ser rochosos.

Por um tempo se acreditou na idéia do astrônomo amador alemão Heinrich Wilhelm Olbers (1758-1840) que, no lugar dos asteróides um planeta teria explodido. Mas hoje sabemos que essa idéia é fisicamente impossível. Asteróides devem ser *planetesimais* (seção 6.2.2), isto é, agregações da Nebulosa Solar Primitiva que não conseguiram participar da formação de um planeta, talvez pela proximidade de um grande planeta como Júpiter.

5.2.3 Meteoros. Chuvas de meteoros

A designação popular de *meteoro* é *estrela cadente* (Figura 1.3). Apesar do nome, a estrela cadente não envolve nenhuma estrela. Esse nome tradicional se justifica apenas porque se pensava que uma estrela estava mudando de lugar.

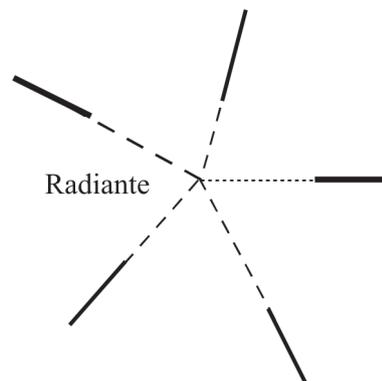
O meteoro consiste naquele traço luminoso efêmero que ocasionalmente podemos ver a olho nu no céu, longe da iluminação artificial das cidades. Resulta da penetração de um fragmento cósmico em alta velocidade (entre 40 mil e 200 mil km/h) na atmosfera da Terra. O tamanho típico do fragmento é o de um grão de areia. Sendo a velocidade muito alta, a atmosfera da Terra exerce um intenso atrito no fragmento que se aquece, se inflama e produz o fenômeno luminoso. Cada dia caem na Terra cerca de 100 toneladas de fragmentos cósmicos.

Sublinhamos que meteoro designa o traço luminoso, não o fragmento que o produz. Por isso expressões como: "Queda do meteoro", "Catar o meteoro" etc, não têm sentido.

Nem todos os fragmentos cósmicos são pequenos e, portanto, inofensivos. Alguns podem ser bem grandes, mas, felizmente, eles constituem uma minoria. Quando caem produzem fenômenos luminosos mais espetaculares denominados *bolas de fogo*. Às vezes o fenômeno é acompanhado de explosão no ar ou no solo e, então, é chamado *bólido*. Outra vez pode ser acompanhado de violento impacto no chão seguido de formação de *cratera*.

Ocasionalmente os riscos luminosos ocorrem com maior freqüência e, se traçarmos o seu prolongamento no céu, todos parecerão convergir para um único ponto no céu (Figura 5.8). Esse ponto é chamado *radiante*.

Figura 5.8. São representados vários meteoros (traços grossos) de uma chuva. O ponto de convergência de seus prolongamentos é o radiante. O radiante tem movimento diurno



O radiante costuma receber um nome associado à constelação em que ocorre. Por exemplo, Perseidas (Perseu), Oriônidas (Órion), Táuridas (Touro), Leônidas (Leão) etc.

Os meteoros que têm um radiante comum constituem uma *chuva de meteoros*. A chuva ocorre quando a Terra, orbitando ao redor do Sol, cruza a órbita de algum cometa de curto período (*Figura 5.9*). Essa órbita, pela qual o cometa passou inúmeras vezes, contém fragmentos deixados pelo cometa. Os meteoros são produzidos pela penetração desses fragmentos na atmosfera da Terra, e o radiante resulta de um efeito de perspectiva. A chuva tende a se repetir anualmente na mesma época.

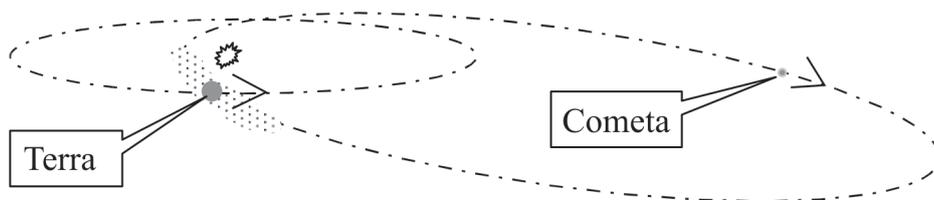


Figura 5.9 (fora de escala). A Terra e um cometa orbitam ao redor do Sol. Do cometa desprendem-se fragmentos quando ele se aproxima do Sol. Enxames de fragmentos podem ficar vagando nas proximidades da órbita percorrida pelo cometa. A Figura mostra o instante em que a Terra cruza um desses enxames

Abaixo incluímos uma lista das chuvas de meteoros mais importantes visíveis de nossas latitudes.

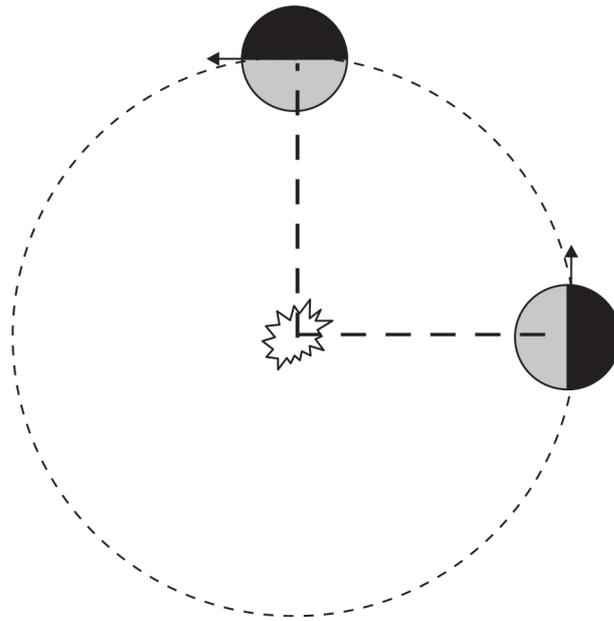
Chuva de meteoros	Período	Atividade máxima
Líridas*	16 a 25 de abril	21 de abril
η Aquáridas* (Halley)	19 de abril a 28 de maio	05 de maio
δ Aquáridas Austral	12 de julho a 19 de agosto	27 de julho
Oriônidas (Halley)	02 de outubro a 07 de novembro	21 de outubro
Leônidas* (Temple-Tuttle)	14 a 21 de novembro	17 de novembro
Púpidas-Vélicas	01 a 15 de dezembro	07 de dezembro
Gemínidas	07 a 17 de dezembro	13 de dezembro

Tabela das principais chuvas de meteoros visíveis do nosso hemisfério. As datas podem variar lentamente com os anos. O asterisco indica chuvas visíveis só depois da meia-noite. O cometa associado é indicado entre parênteses. Uma lista das chuvas pode ser encontrada em <http://www.imo.net/calendar/cal01.html>

Os meteoros que ocorrem isoladamente, sem associação com uma chuva, são chamados esporádicos e pertenceram a chuvas que já se dispersaram. Podemos então concluir que a maioria dos meteoros é produzida por fragmentos de cometas. Mas meteoros podem também ser produzidos por fragmentos de asteróides.

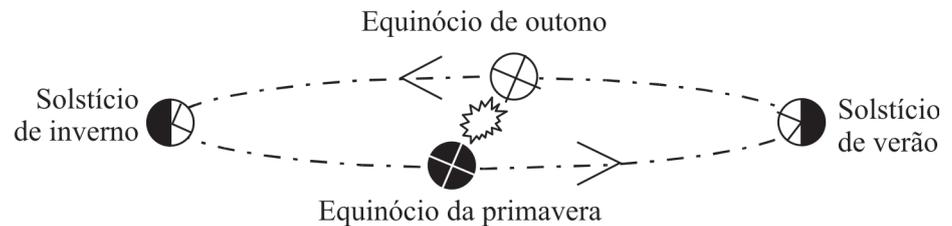
A probabilidade de ocorrência de meteoros esporádicos é maior na direção para a qual a Terra se move (*Figura 5.10*). Em seu movimento orbital a Terra se desloca a quase 30 km/s numa direção da esfera celeste na eclíptica que fica 90° a oeste do Sol. Nessa direção a probabilidade de colisão com objetos cósmicos é maior e a velocidade relativa também é maior. Pela *Figura 5.10* podemos constatar que, para um observador na Terra, essa direção alcança as maiores alturas no céu quando a hora local é 06:00 h.

Figura 5.10 (fora de escala).
O plano do papel representa o plano da eclíptica visto do hemisfério celeste norte. Mostra-se a Terra em dois pontos de sua órbita. As setas apontam para o ápex do movimento anual da Terra. No local onde está indicada a seta a hora local é 06:00 h



Considerando ainda que o plano da eclíptica concentra maior quantidade de fragmentos, a probabilidade de ocorrência de meteoros esporádicos às 06:00 h no hemisfério sul será ainda maior perto do equinócio de outono, quando a eclíptica fica mais elevada no céu (Figura 5.11).

Figura 5.11 (fora de escala).
A eclíptica, plano da órbita da Terra ao redor do Sol, fica mais elevada no céu para um observador do hemisfério sul às 06:00 h, no equinócio de outono



5.2.4 Poeira zodiacal

Muitos fragmentos cósmicos do tamanho de um grão de areia ou maiores, permanecem orbitando perto da eclíptica formando uma nuvem chamada *poeira zodiacal*. Sendo maiores do que os grãos de poeira vistos na cauda cometária, não são expulsos como estes pela pressão de radiação. Ao orbitarem ao redor do Sol, esses fragmentos espiralam e se aproximam do Sol.

O espiralamento é devido ao *efeito Poynting-Robertson*. Tudo se passa como se o meio interplanetário fosse viscoso para os grãos de poeira zodiacal. Rigorosamente não é isso que acontece, pois o meio interplanetário é bastante rarefeito. Mas o grão que orbita “enxerga” o Sol, não na direção em que ele realmente se encontra, mas numa direção levemente diferente. Trata-se da *aberração da luz* que pode ser explicada por meio de uma analogia simples. Suponhamos que estamos parados e que uma chuva cai verticalmente. Se, no entanto, nos deslocarmos com uma certa velocidade, teremos a impressão de que a chuva passou a cair contra nós, como se ela viesse de uma direção à nossa frente. Mesmo que mudemos a direção do movimento, a impressão sempre será de que a chuva cai contra nós (Figura 5.12).



Figura 5.12. No lado esquerdo o observador parado vê a chuva cair verticalmente. No lado direito ele corre para a direita. Devido à relatividade do movimento, a velocidade da queda da chuva vista por ele adquire uma componente horizontal no sentido oposto ao de seu movimento. Em suma, a chuva parece cair contra ele

Para o fragmento que orbita, a radiação solar aparenta incidir no sentido oposto ao de seu movimento. A pressão de radiação atua, portanto, sobre ele como uma força resistiva ou viscosa. Conseqüentemente o fragmento perde energia e é forçado a caminhar numa órbita menor. Dois destinos finais são possíveis, a depender do material constituinte: ou o fragmento espirala até cair no Sol, ou antes disso, devido ao aquecimento, sofre vaporização e é destruído. A escala de tempo para o espiralamento até o Sol é da ordem de dezenas de milhares de anos, um tempo bem menor do que a idade do Sistema Solar. Por isso, para que a poeira zodiacal subsista é preciso que novos fragmentos substituam os que desaparecem. A poeira zodiacal deve ser continuamente realimentada por novos fragmentos produzidos tanto por cometas quanto por colisões entre asteróides.

Cada grão de poeira zodiacal espalha luz, e o efeito coletivo pode ser observado na forma da *luz zodiacal*. Consiste esta luz num brilho difuso que pode ser observado em locais de céu muito limpo, em datas apropriadas, perto do Sol, quando este se encontra pouco abaixo do horizonte. As condições favoráveis para a observação ocorrem quando a eclíptica (ou o zodíaco) se apruma mais verticalmente no horizonte leste antes do amanhecer, ou no horizonte oeste logo após o pôr-do-Sol. As ocasiões preferenciais no nosso hemisfério são logo depois do anoitecer perto do equinócio da primavera ou antes do amanhecer perto do equinócio de outono.

5.2.5 Meteoritos

Quando um fragmento cósmico que atinge a Terra é suficientemente grande, ele pode sobreviver à travessia pela atmosfera e chegar ao solo. O tamanho original deve superar cerca de 10 cm. *Meteorito* designa o objeto cósmico que chega ao solo, qualquer que seja o seu tamanho. Alguns meteoritos são enormes, têm vários metros e podem pesar várias toneladas.

Na Antigüidade a origem celeste foi corretamente atribuída a estranhas massas de ferro encontradas no solo. A estranheza consistia na ausência do mesmo material nas adjacências, ou na pureza do ferro, ou na enormidade de peças monolíticas. A Pedra Negra no santuário de Caaba na mesquita de Meca, seria um meteorito que assumiu um caráter sagrado.

Mas o naturalista suíço Konrad von Gesner (1516-65), sem saber que se tratava de fósseis animais ou instrumentos pré-históricos, defendeu que certos objetos recolhidos por ele haviam caído do céu. No início do século XVIII, quando a origem terrestre desses objetos foi estabelecida, a idéia de pedras caídas do céu caiu em descrédito geral.

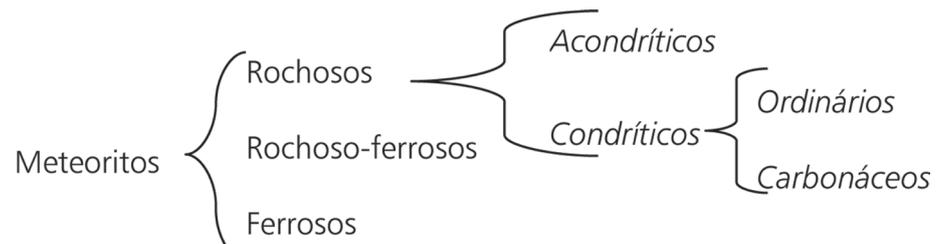
Em 1794 o físico alemão Ernst Friedrich Chladni (1756-1827) voltou a defender a origem cósmica dos meteoritos. Mas só com as pesquisas feitas pelo físico francês Jean-Baptiste Biot (1774-1862) sobre um meteorito que caiu em Aigle, na Normandia, em 26 de abril de 1803, a origem cósmica dos meteoritos voltou a ser aceita pelos cientistas.

Há cerca de 3 mil meteoritos catalogados, mas o seu número cresce rapidamente. Nos últimos anos buscas produtivas têm sido feitas em depressões da Antártida para onde os meteoritos são arrastados e onde podem ser facilmente reconhecidos. Antes que as missões espaciais trouxessem rochas lunares em 1969, à exceção dos *raios cósmicos* (núcleos atômicos de alta energia) coletados em grandes elevações, os meteoritos eram a única matéria extraterrestre que podia ser coletada no solo e analisada em laboratório.

Meteoritos coletados depois que a sua queda foi vista, são chamados *meteoritos de queda*. Aqueles que são encontrados sem que a queda tenha sido vista, são chamados *meteoritos achados*. Na coleção atual 1/3 é do primeiro tipo e 2/3, do segundo.

Quanto à composição química os meteoritos podem ser *ferrosos* (Fe e Ni), *rochosos* ou *rochoso-ferrosos* (mistos). Os rochosos (especialmente os condríticos ordinários) constituem maioria absoluta entre os meteoritos de queda, e os ferrosos entre os meteoritos achados. Isso tem uma explicação. O material rochoso produz espetáculo pirotécnico mais espetacular e maior abrasão durante a queda, e sofre mais a ação da intempérie, ao contrário do material ferroso. O Bendegó, o mais famoso meteorito brasileiro, foi achado em 1784 no interior da Bahia. É ferroso, tem 5,4 toneladas, e está exposto no Museu Nacional do Rio de Janeiro.

Apresentamos abaixo uma divisão esquemática dos diferentes tipos de meteoritos:



O que distingue um meteorito rochoso condrítico, de outro acondrítico, é a incrustação de *côndrulos* no primeiro. Côndrulos são esferas milimétricas de rocha fundida a alta temperatura. Por sua vez os meteoritos acondríticos são formados de matéria ígnea e se parecem com rochas lunares ou basaltos terrestres. Podem ter aspecto de brechas, i. é, fragmentos irregulares e pontudos cimentados por compressão durante violento impacto ocorrido na superfície do corpo progenitor. Fonte de acondríticos são a Lua, Marte e o asteroide Vesta.

Nos meteoritos condríticos carbonáceos, côndrulos mais claros estão incrustados numa matriz bem escura formada de grãos finos de silicatos hidratados condensados a baixas temperaturas (200 K). A cor escura se deve a substân-

cias orgânicas com alto teor de carbono. Portanto a matriz e os côneulos se formaram separadamente a temperaturas diferentes e depois se juntaram. Depois que se formou, a matriz nunca mais foi aquecida a mais que 200 K. Se o gás que formou o Sol se condensasse a essa temperatura, teria a composição química dessa matriz. Por isso os meteoritos condriticos carbonáceos são preciosas relíquias da Nebulosa Solar Primitiva e podem se originar dos asteróides carbonáceos que se encontram na periferia do Cinturão de Asteróides.

Os meteoritos condriticos ordinários não têm os minerais hidratados, nem a matéria orgânica volátil. Sua matriz corresponde a minerais de alta temperatura, é mais dura e mais clara. Sofrem fusão parcial. Eles parecem descender dos asteróides que cruzam a órbita da Terra.

Todos os tipos de meteorito, exceto os condriticos, descendem de corpos que sofreram diferenciação, ou seja, aquecimento, fusão e segregação gravitacional que separa o núcleo, o manto e a crosta com diferentes composições químicas. Isso requer que os corpos progenitores sejam suficientemente grandes, ficando então definitivamente excluídos os cometas. Esses meteoritos devem ser fragmentos de grandes asteróides. Podemos correlacionar núcleo, manto e crosta com meteoritos ferrosos, rochoso-ferrosos e acondriticos respectivamente. Os asteróides da parte interna do Cinturão, mais próximos do Sol, são em geral ferrosos, e os da parte intermediária são em geral silicatados. Dos primeiros devem se originar os meteoritos ferrosos e dos últimos os rochoso-ferrosos e acondriticos. Assim, não há uma contrapartida para condriticos ordinários no Cinturão dos Asteróides.

Não é tarefa trivial distinguir um meteorito, de uma amostra terrestre comum. Em geral o meteorito tem uma crosta preta fundida. A superfície apresenta marcas como se tivessem sido impressas por dedos. Contém minerais metálicos que o tornam magnético. A agulha de um ímã deve responder à presença de um verdadeiro meteorito. Com ajuda de um esmeril pode-se verificar num canto se a superfície apresenta brilho metálico ou contém pintas metálicas. Meteoritos rochosos têm o interior com granulação muito variada e a cor assume os vários tons de cinza. Mas há seixos rolados, fragmentos de artefatos espaciais que caem, escórias de fundição, concreções de óxido de ferro etc com aparência de meteorito. Em meteoritos verdadeiros o ferro não se apresenta como gotas fundidas, nem é poroso. O melhor em caso de dúvida é consultar um especialista. De qualquer forma nunca se deve fazer testes mecânicos ou térmicos que possam inutilizar a amostra para a pesquisa científica.

5.2.6 Crateras de colisões

O impacto de objetos cósmicos no solo é sempre impressionante. A energia envolvida é proporcional à massa do objeto que cai e o quadrado da velocidade de impacto. Essa velocidade é tão grande que uma gigantesca quantidade de energia, muito mais concentrada do que numa massa equivalente de explosivo químico, é forçada a se dissipar subitamente. Tudo se passa como se um projétil fosse lançado num líquido.

Marcas de colisão com objetos cósmicos estão presentes na superfície sólida da Lua, da Terra (*Figura 5.13*) e demais planetas, satélites e asteróides. Dissemos que a contagem das crateras na Lua revelou uma fase de intenso bombardeamento que só terminou há 3,9 bilhões de anos. Depois disso as colisões continuaram ocorrendo até hoje, mas com frequência bem menor. É que o espaço interplanetário abrigava muitos corpos de diversos tamanhos descrevendo as mais variadas órbitas. Esses corpos eram fragmentos residuais do recém-formado Sistema Solar. Uns colidiram com planetas

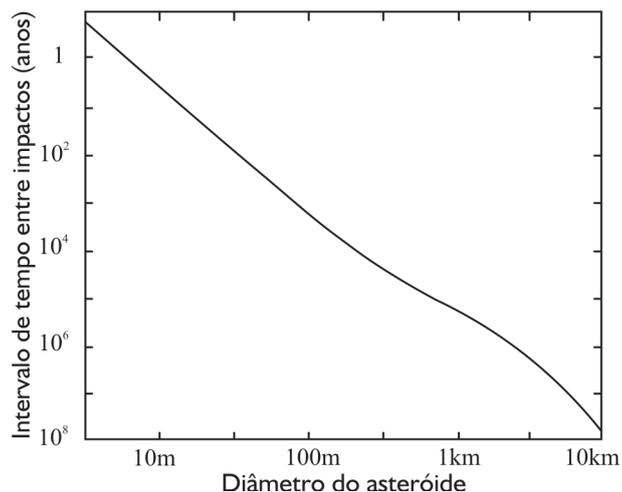
Figura 5.13. A Cratera do Meteoro no Arizona com 1,2 km de diâmetro e 200 m de profundidade resultou de um impacto cósmico há 25 mil anos (Chaisson and McMillan, *Astronomy*, Prentice Hall, 1998, 119)



e satélites, formaram crateras e foram destruídos. Outros tiveram suas órbitas desviadas e acabaram expulsos do Sistema Solar.

A análise das crateras revela que, felizmente, o número atual de fragmentos cósmicos decresce conforme o tamanho deles aumenta. Por isso a probabilidade de colisão da Terra com um objeto maior é pequena, todavia não é nula. A colisão anunciada dos fragmentos do cometa Shoemaker-Levy9 com Júpiter, ocorrida em julho de 1994, atesta que a probabilidade de colisão de um planeta com um cometa não é nula. Cerca de duas dezenas de fragmentos desse cometa resultaram do efeito de maré, quando ele se aproximou bastante de Júpiter em 1992. À medida que as observações se intensificam, cada vez mais têm sido descobertos asteróides com cerca de 1 km que passam a apenas a centenas de milhares de km da Terra. Mas, se não podemos estar totalmente seguros de que tal colisão jamais venha a ocorrer, a probabilidade de sua ocorrência é suficientemente pequena para que continuemos nos preocupando mais com os perigos mais iminentes do dia-a-dia (*Figura 5.14*).

Figura 5.14. Probabilidade de impacto cósmico em função do tamanho do objeto. Fonte: Jakosky, B.: *The Search for Life on Other Planets*, Cambridge University Press, 25 (1998)



Um asteróide ou um cometa com cerca de 10 km certamente colidiu com a Terra há 65 milhões de anos, em cujo episódio se costuma inserir a extinção dos dinossauros. A cratera produzida teria uma centena de km. Uma colisão dessas proporções deve ocorrer estimativamente a

cada 100 milhões de anos (*Figura 5.14*). Além dos efeitos catastróficos locais (formação de cratera, destruição da vegetação circundante por incêndio e onda de choque, fusão e solidificação do material do solo, chuva ácida etc), teriam ocorrido efeitos globais, tais como, propagação de tsunamis destrui-

dores pelos oceanos, prolongada obstrução à chegada dos raios solares ao solo por uma nuvem densa de poeira envolvendo todo o globo etc.

A queda de um objeto quilométrico tem probabilidade de uma ocorrência a cada 300 mil anos (*Figura 5.14*). No interior do Maranhão, a cratera da Serra da Cangalha produzida por um impacto cósmico, tem 12 km de diâmetro. A probabilidade de queda de um meteorito com centenas de metros é de uma ocorrência a cada 10 mil anos. Na zona sul do Município de São Paulo, em Vargem Grande, sub-distrito de Parelheiros, há uma cratera de possível origem cósmica com 3,6 km de diâmetro.

5.3 Fenômenos externos ao Sistema Solar

5.3.1 Estrelas

Os astros que vemos em maior quantidade a olho nu numa noite são as *estrelas*. Segundo Aristóteles, a Terra e tudo o que se encontra abaixo da órbita da Lua, se compunha dos quatro elementos: terra, água, ar e fogo. Aí os objetos eram imperfeitos e perecíveis, e o movimento natural era retilíneo, orientado para o centro da Terra. Acima da órbita da Lua, o Universo era perfeito e, por isso mesmo, imutável. Os objetos não eram constituídos dos quatro elementos, mas de uma quintessência incorruptível ou éter. Os movimentos eram circulares.

Essa visão dicotômica do Universo prevaleceu durante muitos séculos. As primeiras refutações foram apresentadas por Galileu Galilei (1564-1642) depois de observar, através de uma luneta, imperfeições celestes tais como os acidentes na superfície da Lua e as manchas solares. Outras evidências observacionais foram surgindo que derrubaram de vez essa dicotomia. Hoje sabemos que em todo o Universo observado os corpos são constituídos dos mesmos elementos químicos encontrados aqui na Terra, e obedecem as mesmas leis físicas que regem os fenômenos investigados em nossos laboratórios. Faz parte do método científico a adoção do *Princípio da Uniformidade da Natureza* segundo o qual as leis físicas estabelecidas aqui na Terra têm validade em todos os lugares do Universo. O primeiro grande triunfo da ciência moderna ocorreu quando Newton demonstrou que as leis da mecânica eram as mesmas tanto no céu quanto na terra.

Aplicando as leis físicas no estudo das estrelas, os astrônomos desenvolveram a disciplina chamada Estrutura e Evolução Estelar. Assim chegamos ao conhecimento de que as estrelas não são eternas, mas um dia se formaram, atravessam diversas fases evolutivas e um dia deixarão de brilhar. Esse conhecimento se deveu, antes de tudo, à observação de estrelas num número muito maior do que o acessível a olho nu. Enquanto a olho nu só enxergamos estrelas mais próximas ou mais brilhantes da nossa própria Galáxia, os telescópios nos permitem observar até estrelas de outras galáxias. Além disso, foi preciso também analisar a composição da luz dos astros. Isso foi feito através da espectroscopia, a base experimental da Astrofísica.

5.3.1.1 Diagrama H-R

Já dissemos que a *cor* das estrelas indica a **temperatura** na superfície. Mas a análise do espectro de absorção possibilitou determinar essa temperatura com muito maior precisão.

Mesmo através de uma comparação visual, os espectros de absorção das estrelas podem ser classificados em um número relativamente pequeno de **tipos espectrais**. Por outro lado, a análise teórica permitiu associar uma temperatura de superfície a cada tipo espectral. Assim, uma vez que uma estrela é classificada pelo seu tipo espectral, sua temperatura de superfície já está determinada. Os principais tipos espectrais são denominados O, B, A, F, G, K, M. Eles correspondem a temperaturas que decrescem de 30 mil K a 3 mil K.

Além da temperatura da superfície, é muito importante conhecer a **luminosidade** da estrela. A luminosidade, como dissemos, é a potência irradiada. A luminosidade do Sol é equivalente a 4 setilhões de lâmpadas de 100 Watts. Mas a observação nos fornece apenas o **brilho**. Para determinarmos a luminosidade a partir do brilho, precisamos conhecer também a **distância** da estrela, pois sabemos que o brilho decresce no inverso do quadrado da distância.

O método básico para determinarmos a distância de uma estrela é a **paralaxe anual** (seção 2.2.2). Mas esse método só é praticável a umas poucas estrelas que estão mais perto. Para distâncias maiores os astrônomos precisam recorrer a outros métodos, mas sempre o novo método depende das distâncias determinadas pelo método anterior. Isto significa que a determinação das maiores distâncias astronômicas depende da precisão com que determinamos antes o raio da Terra, a UA, a distância das estrelas por paralaxe anual etc.

Um dos métodos mais importantes explora a seguinte propriedade empírica descoberta por Henrietta Swan Leavitt (1868-1921), do Observatório de Harvard, nas estrelas chamadas **cefeidas**. Esse nome é devido à estrela protótipo, δ da constelação de Cefeus. Cefeidas podem ser do Tipo I ou II, mas não entraremos nesses detalhes. Elas são estrelas **supergigantes** (Figura 5.15) amarelas que variam de brilho com periodicidade que varia de 1 a 45 dias. A causa da variação de brilho é a pulsação da estrela que, ao pulsar, varia de tamanho e de temperatura. Foi constatado que o período de pulsação mantém uma relação com a luminosidade dessas estrelas. Assim, conhecendo o brilho e o período de pulsação de uma cefeida, podemos determinar a sua distância. Sendo estrelas intrinsecamente luminosas, o método pode ser aplicado até para galáxias vizinhas cujas distâncias podem, então, ser conhecidas.

Uma vez determinada a distância da estrela por um ou mais métodos, o brilho observado poderá ser convertido em luminosidade, de modo que teremos, ao final, duas informações da estrela: **temperatura de superfície e luminosidade**.

Nos catálogos a luminosidade é simbolizada por algarismos romanos. I denota as **supergigantes**, II as **gigantes brilhantes**, III as **gigantes normais**, IV as **subgigantes** e V as estrelas da **Seqüência Principal** e as **anãs** (Figura 5.15). Uma combinação da letra indicativa do tipo espectral, com

o algarismo romano indicativo da luminosidade, denota a posição de uma estrela no *Diagrama H-R* sobre o qual falaremos em seguida.

Tendo uma amostra de estrelas cuja temperatura de superfície e luminosidade sejam conhecidas, podemos construir o seu Diagrama H-R (*Figura 5.15*).

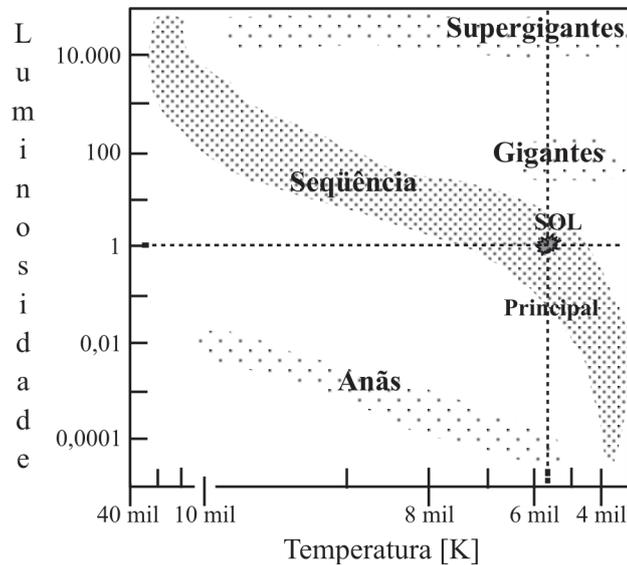


Figura 5.15. Diagrama H-R. A sigla H-R denota os sobrenomes do dinamarquês Ejnar Hertzsprung (1873-1967) e do americano Henry Norris Russell (1877-1957) que, independentemente, construíram esse Diagrama nas primeiras décadas do século XX. Fugindo do usual, a temperatura no eixo horizontal cresce da direita para a esquerda

A temperatura de superfície das estrelas se confina entre 3 mil e 40 mil K, e a luminosidade entre 100 milionésimos e 100 mil vezes a luminosidade do Sol. Notar na *Figura 5.15* que o Sol ocupa uma posição mediana. A estrela α do Centauro que faz parte de um sistema triplo, é uma das que se encontram mais perto da Terra. Trata-se de uma estrela muito semelhante ao nosso Sol, portanto ocupa a mesma posição no Diagrama H-R.

É importante notar que as estrelas não se distribuem aleatoriamente sobre todas as partes do Diagrama, mas somente em certas regiões. A grande maioria faz parte da *Seqüência Principal*. Outros agrupamentos menores são formados pelas estrelas *gigantes*, *supergigantes* e *anãs brancas*.

Se considerarmos apenas as 20 estrelas mais brilhantes, excluindo o Sol, 10 pertencem à Seqüência Principal, 7 são gigantes e 3 supergigantes. Nenhuma é anã branca. Metade tem temperatura de superfície > 10 mil K. Dessas 20 estrelas, a mais distante se encontra a 1.400 AL. Como veremos, essa distância é praticamente a espessura do disco da nossa Galáxia.

O fato de, numa amostra tomada ao acaso, encontrarmos uma maioria de estrelas da Seqüência Principal, indica que essas estrelas estão na etapa mais longa de suas vidas.

O estudo da estrutura e evolução estelar basicamente consiste em explicar o Diagrama H-R com base em leis físicas. Cálculos são feitos levando em conta, ao mesmo tempo, o equilíbrio hidrostático, a geração de energia nuclear, o transporte de energia do interior à superfície. Uma composição química inicial deve ser estipulada. A equação de estado (que relaciona a

pressão com a densidade e a temperatura), a opacidade e a taxa de geração de energia nuclear devem ser especificadas de acordo com a composição, a temperatura e a densidade. Ao reproduzirem a temperatura de superfície e a luminosidade observadas, os cálculos nos informam o raio, a massa, a idade e a estrutura interna da estrela.

5.3.1.2 Formação estelar

O espaço entre as estrelas não é vazio, mas contém nuvens de gás e poeira. Na nossa Galáxia a *matéria interestelar* compõe 2% da matéria visível, ou seja, 4 bilhões de sóis. Em alguns locais essas nuvens são mais densas. São as *nuvens moleculares* nas quais a formação de moléculas detectadas pela *radioastronomia* é propiciada pela maior densidade dos gases e pela presença da poeira. Seus grãos promovem a formação de moléculas em suas superfícies e protegem o interior das nuvens, da ação *ionizante* e *dissociativa* da radiação ultravioleta de estrelas próximas.

As nuvens moleculares se conectam umas às outras formando complexos com cerca de 150 AL contendo gás e poeira equivalente a milhões de sóis. Conhecemos cerca de mil nuvens moleculares na nossa Galáxia. Uma delas, ao sul das Três Marias, no meio da espada de Órion, tem ao centro a Nebulosa de Órion que pode ser vista a olho nu. Essa nebulosa é visível porque abriga estrelas quentes recém-formadas, em torno das quais se acendem as *nebulosas de emissão (Regiões HII)*. Ao redor da Nebulosa de Órion há nuvens moleculares que podem ser detectadas em ondas de rádio ou no infravermelho.

Numa nuvem molecular atuam duas forças contrárias. A gravidade que tende a comprimi-la, e a força originária da pressão do gás que tende a expandi-la. Se as duas forças se contrabalançam em cada ponto, a nuvem estará em equilíbrio. Mas esse é um equilíbrio precário. Em algum ponto da nuvem esse equilíbrio pode ser rompido, dando lugar a uma condensação fortuita. Isso pode ser deflagrado pela compressão causada pela brusca ignição de uma estrela quente nas proximidades, por uma onda de choque gerada pela explosão de uma *supernova* etc. Uma contração abrangendo cerca de 10 AL, envolvendo gás e poeira equivalente a milhares de massas solares, pode evoluir na forma de um colapso gravitacional irrefreável. É que a condensação intensifica localmente a gravidade. Mas quanto mais a gravidade se intensifica, mais matéria é atraída num processo galopante.

Todavia, da contração de uma nuvem molecular não resulta uma única estrela com milhares de massas solares. Num estágio da contração, a nuvem se subdivide em milhares de fragmentos, cada um com massa não muito diferente da massa solar. Cada fragmento vai depois continuar se contraindo até formar uma estrela ou, se a rotação for muito rápida, um sistema binário ou múltiplo. A proporção é 1/3 de estrelas solitárias para 2/3 de sistemas binários ou múltiplos. O resultado é a formação de milhares de estrelas que inicialmente fazem parte de um *aglomerado de estrelas*. Após bilhões de anos essa aglomeração pode se desfazer. Assim, estrelas de aglomerados têm

a mesma composição química, a mesma idade e a mesma distância à Terra. Esta última propriedade é importante, pois, o brilho se torna diretamente proporcional à luminosidade.

Um fragmento individual se contrai rapidamente no início. A energia da queda gravitacional se converte em calor e a parte central se aquece. Mas sendo a densidade ainda baixa, o calor é rapidamente irradiado para o exterior, de modo que o fragmento se contrai sem que a pressão interna possa crescer e se opor à contração. A radiação emitida nesse estágio é principalmente a infravermelha pois, para os padrões estelares a temperatura ainda é baixa. A temperatura do proto-Sol era de 3 mil K, a luminosidade mil vezes maior que a atual e o raio, 100 vezes. O fragmento que assim irradia é chamado **proto-estrela**. Ainda não é estrela porque a energia irradiada tem origem gravitacional, não provém de reações nucleares. Com o passar do tempo, a densidade aumenta e, com ela, a opacidade. A radiação já não pode escapar livremente como antes. A temperatura e a pressão no interior da protoestrela começam a aumentar. A contração diminui o ritmo gradativamente até cessar.

Quando a temperatura central atinge cerca de 10 milhões K, as reações de fusão do H em He começam. Termina então a fase protoestelar, pois uma nova estrela acaba de nascer. Mas, para que isso possa acontecer, a massa deve ser maior que 8 centésimos da massa do Sol, ou maior que 80 vezes a massa de Júpiter. Abaixo desse limite é impossível a temperatura central chegar a 10 milhões K e deflagrar as reações nucleares. Vários objetos foram descobertos recentemente com massa maior do que a de um planeta gigante como Júpiter, porém menor que esse limite. Esses objetos irradiam principalmente radiação infravermelha de origem gravitacional, e estão fadados a se resfriarem cada vez mais. Eles são chamados **anãs marrons**. Não são planetas, nem chegam a ser estrelas.

Na nossa Galáxia se formam atualmente cerca de 10 novas estrelas por ano. Isso consome matéria interestelar. Mas ao mesmo tempo, estrelas em fases mais avançadas de sua evolução (gigantes, supergigantes, nebulosas planetárias e supernovas) devolvem matéria ao meio interestelar. Por causa desta reciclagem o meio interestelar acaba ficando com teor cada vez mais elevado de elementos mais pesados do que o hidrogênio e o hélio, pois a evolução das estrelas ao longo do tempo implica na produção desses elementos através da fusão nuclear. A matéria prima das primeiras estrelas era praticamente só hidrogênio e hélio; a das novas gerações é cada vez mais enriquecida de elementos pesados.

5.3.1.3 Seqüência Principal

Assim que uma estrela nasce, ela já ingressa na **Seqüência Principal**. O raio do Sol media, então, 1 milhão km, sua luminosidade era 1/3 da atual e sua temperatura, 4500 K. Durante a permanência na Seqüência Principal, ocorrem na região central das estrelas as reações nucleares de fusão de 4 núcleos de H em um núcleo de He. Uma protoestrela precisava se contrair para irradiar. Isso

não é mais necessário na Seqüência Principal. A estrela irradia sem que seu tamanho mude apreciavelmente, todavia a sua composição química muda.

A massa das estrelas varia de 1/10 a cerca de 100 massas solares. O limite inferior já foi explicado há pouco. O limite superior é imposto pela luminosidade cuja pressão de radiação simplesmente desintegraria a estrela.

Na Seqüência Principal as estrelas de maior massa têm luminosidade e temperatura mais elevadas (ramo superior da *Figura 5.15*). As de menor massa têm menor luminosidade e temperatura (ramo inferior da *Figura 5.15*). Embora as de maior massa tenham mais combustível para queimar, a taxa de queima é mais elevada para dar conta das maiores luminosidades. Isso abrevia a permanência dessas estrelas na Seqüência Principal que pode ser de apenas 10 milhões de anos. Já uma estrela de pequena massa pode permanecer 10 bilhões de anos, um período de tempo que já se compara à idade do Universo.

O tempo de permanência do Sol na Seqüência Principal é 10 bilhões de anos, dos quais ele já cumpriu cerca da metade.

5.3.1.4 O Sol após a Seqüência Principal

Quando o hidrogênio acaba na região central, as reações nucleares cessam aí. Essa região fica inerte, se resfria e começa a se contrair. Mas a contração é acompanhada de um reaquecimento, graças ao qual, numa concha concêntrica imediatamente externa, começa a fusão do H em He numa taxa crescente. Em pouco tempo a produção de energia aí se torna maior que na Seqüência Principal. Para dar vazão a essa energia, a estrela reage se estufando. Torna-se uma ***gigante vermelha***. No Sol o raio triplicará e a temperatura de superfície cairá para 4 mil K. Mantendo depois essa temperatura de superfície, a luminosidade aumentará até umas 10 mil vezes e o raio ficará 100 vezes maior que o atual. O Sol engolirá Mercúrio em sua órbita. Um exemplo de gigante é a estrela Aldebarã da constelação do Touro. Ela fica quase no meio da reta que une Betelgeuse, a mais brilhante do quadrilátero de Órion, com as Plêiades.

Nesse interim, a região central que continua se contraindo, acaba atingindo temperatura suficiente para fundir três núcleos de He em um de C. Quando as reações voltam a ocorrer na parte central, a estrela esboça no Diagrama H-R um retorno à Seqüência Principal: a temperatura da superfície volta a aumentar para 5 mil K e o Sol encolherá para 10 vezes o seu tamanho atual. Ocorrerá a queima simultânea do He na região central e do H numa concha contígua. Mas logo depois terá acabado o He na parte central. No Sol a contração já não elevará a temperatura na região central o suficiente para deflagrar a queima do novo combustível nuclear, o C. Mas ocorrerá a queima de He naquela concha que queimou o H, enquanto que uma outra concha mais externa passará a queimar o H. Neste ponto a luminosidade será enorme. O Sol será uma ***supergigante vermelha*** que engolirá a Terra e alcançará o Cinturão dos Asteróides. Exemplos de supergigantes são Antares, a cabeça do Escorpião, e Betelgeuse em Órion.

Por causa da grande luminosidade e da fraca gravidade na superfície de uma supergigante tão estufada, a camada externa será arrancada e lançada para o meio interestelar a milhares de km/s formando uma *nebulosa planetária*. Essa camada se expande por cerca de 100 mil anos tendo no interior um objeto rico de C, com metade da massa do Sol e apenas o tamanho da Terra. A densidade é da ordem de 1 ton/cc e a temperatura, 300 milhões K. Esse pequeno objeto será depois uma *anã branca*. Sem fontes internas de energia, ela irradiará o calor interno que, com o tempo, se esgotará. Então a anã branca se apagará e será uma *anã preta* invisível.

Esse é o destino final previsto para o nosso Sol. A estrela Sirius B, uma companheira de Sirius, é uma anã branca. Por não contarem com nenhuma fonte interna de energia, as anãs brancas representam um estágio terminal da evolução estelar. A matéria nelas está tão comprimida que já não se comporta como aquela com a qual lidamos habitualmente. Ela é *chamada gás degenerado de elétrons*. Por causa da extrema compressão, os elétrons ficam tão próximos uns dos outros que já não pertencem a átomos individuais, mas ao objeto todo. Um exemplo do comportamento estranho é que, com o aumento da massa, o raio da anã branca diminui! Quando a massa atinge 1,4 massas solares, o raio se anula. Portanto uma anã branca nunca pode ter mais do que 1,4 massas solares. Esse é o *limite de Chandrasekhar* previsto teoricamente pelo astrofísico paquistanês Subrahmanyam Chandrasekhar (1910-1995).

Desde a saída da Seqüência Principal até se tornar uma anã branca o Sol terá gasto apenas alguns centésimos do tempo que permaneceu na Seqüência Principal.

Quando estrela tem 8 massas solares, ou mais, a evolução após a Seqüência Principal toma outros rumos que descreveremos na próxima seção quando falarmos das *supernovas do Tipo II*.

5.3.1.5 Novas e supernovas

As *novas* e *supernovas*, conhecidas desde a Antigüidade, são fenômenos estelares, isto é, associados a estrelas. A distinção entre *nova* e *supernova* é relativamente recente. No passado se designava genericamente *nova* toda estrela cujo brilho variava consideravelmente e de forma abrupta. A olho nu parecia que uma *nova estrela* tinha surgido onde antes nada havia, daí o nome. Na verdade, uma estrela já pré-existia, apenas não era percebida a olho nu.

Há referências à nova do Escorpião de 134 aC que, segundo alguns autores, teria motivado Hiparco (II aC), o maior astrônomo observacional da Antigüidade, a elaborar o seu catálogo de estrelas. Mas as novas que causaram maior impacto foram as de 1054, 1572 e 1604. A primeira, na constelação do Touro, foi registrada nas crônicas chinesas e japonesas. A segunda, observada por Tycho Brahe em Cassiopéia, serviu como argumento para refutar a imutabilidade do céu. A última foi observada por Kepler no Serpentário. Todas essas três novas são classificadas hoje como supernovas.

Numa *nova* o brilho aumenta subitamente dezenas de milhares de vezes dentro de algumas horas até alguns dias. Depois o brilho decresce, porém, mais lentamente em meses ou anos. São conhecidas algumas centenas de

novas da nossa Galáxia e outro tanto de galáxias vizinhas. Num mesmo ano se observa em média várias dezenas de novas na nossa Galáxia.

Numa *supernova* o brilho também aumenta subitamente, mas por um fator até um milhão de vezes maior que nas novas. No auge o brilho rivaliza com o brilho de toda a galáxia em que ela ocorre. A escala de tempo do decaimento do brilho é semelhante ao das novas. Numa mesma galáxia ocorre em média uma supernova a intervalos de alguns séculos. Portanto é um fenômeno raro. Mas, com telescópios, elas podem ser observadas também em outras galáxias. Um exemplo é a supernova SN1987A observada em 1987 na Grande Nuvem de Magalhães.

As novas ocorrem em *sistemas binários* em que uma estrela é anã branca e a outra, uma estrela da Seqüência Principal ou gigante. Estando muito próximas, o forte campo gravitacional da anã branca pode arrancar matéria da estrela companheira. Por causa do movimento orbital, a matéria não cai diretamente sobre a anã, mas espirala antes num disco de acreção onde a matéria em queda se aquece e irradia radiação visível e ultravioleta. O súbito aumento de brilho é devido a reações de fusão do H na superfície da anã. O surto de brilho pode se repetir várias vezes para a mesma nova, o que não acontece com as supernovas cujo surto de brilho é acompanhado da destruição definitiva da estrela.

Supernovas podem ser de dois tipos: *Tipo I* e *Tipo II*. À semelhança das novas, as supernovas do Tipo I ocorrem também em *sistemas binários* em que uma das estrelas é uma anã branca. Se ao receber matéria da companheira, a massa da anã ultrapassar o limite de Chandrasekhar, ela não suportará o próprio peso e colapsará catastróficamente. Haverá um aquecimento violento da anã e terá início a queima nuclear do carbono, mas de forma explosiva. A estrela toda explode.

A supernova do Tipo II é a explosão final de uma estrela solitária de grande massa. Tendo mais que 8 massas solares, depois de abandonar a Seqüência Principal uma estrela pode promover na região central e nas conchas concêntricas, a sucessiva fusão de elementos cada vez mais pesados. Quando um combustível nuclear se esgota na região central, esta se contrai e se aquece a ponto de deflagrar a queima nuclear do produto da reação anterior. Ao mesmo tempo, na concha contígua estará queimando o combustível da reação anterior. A estrela terá várias conchas concêntricas, cada qual queimando o produto da reação da concha externa vizinha, formando uma estrutura como a de uma cebola queimando diferentes elementos.

Quando o produto da queima é o Fe, já não é mais possível continuar produzindo energia por fusão, já que a fusão do Fe consome energia em vez de produzi-la. Só então a região central contendo Fe ficará inerte, envolvida por conchas sucessivas contendo, de dentro para fora, Si, Mg, Ne, O, C, He e H (*Figura 5.16*). A região central então se contrairá e a temperatura central poderá chegar a 10 bilhões K. Tão elevada temperatura está associada

a um intenso campo de radiação tão energética, capaz de desintegrar o núcleo do Fe em prótons e nêutrons. Num meio tão denso, os elétrons combinarão com os prótons formando nêutrons e emitindo *neutrinos*. Neutrino é uma partícula elementar sem carga elétrica, com massa ínfima, que viaja à velocidade próxima à da luz. Ela atravessa a matéria ordinária com extrema facilidade, por exemplo, atravessa a Terra de um lado a outro. Por isso a sua detecção é difícil, mas mesmo assim tem sido realizada. Com a emissão dos neutrinos a região central da estrela, agora composta só de nêutrons, se resfria rapidamente e a pressão diminui. Em conseqüência, em apenas alguns segundos, o núcleo colapsa sob a própria gravidade. A pressão dos nêutrons fará oposição à contração gravitacional, de modo que a região central encontrará uma nova configuração de equilíbrio. Teremos então uma *estrela de nêutrons*, uma outra modalidade de estágio terminal de uma estrela, com densidade de 100 milhões de toneladas/cc (densidade do núcleo atômico) e raio de apenas dezenas de quilômetros!

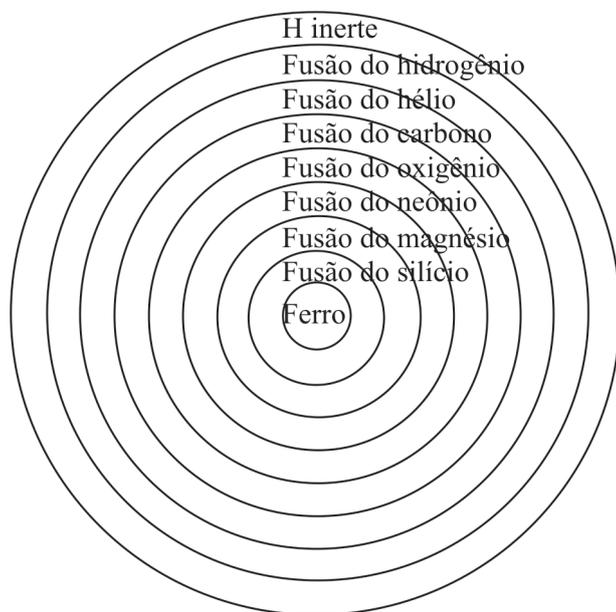


Figura 5.16. Corte de uma estrela massiva bastante evoluída

A matéria externa à região central perde sustentação repentinamente e cai com alta velocidade sobre o núcleo que reage como um sólido incompressível. Na colisão é gerada uma intensa onda de choque que, ao se propagar para fora, ejetará violentamente para o meio interstelar tudo o que encontrar pela frente. Neste breve lapso de tempo ocorrem reações nucleares de captura de nêutrons que produzem elementos mais pesados do que o ferro, tais como cobre, chumbo, ouro e urânio. Nesse episódio o meio interstelar é enriquecido de elementos pesados.

Portanto as supernovas do tipo II resultam do colapso do núcleo de uma estrela solitária cuja massa inicial estava compreendida entre 8 e 20 massas solares. A supernova SN1987A era desse tipo, assim como a supernova de 1054, cuja detonação formou a Nebulosa do Caranguejo (nome dado p-or

causa da forma) que até hoje se expande a milhares de km/s. No centro dessa nebulosa se detectou um *pulsar*, uma fonte que irradia pulsos de ondas de rádio com periodicidade da ordem de 1 segundo. Um pulsar pode emitir também pulsos de raios X e de luz visível. O pulsar é a própria estrela de nêutrons com um intenso campo magnético girando muito depressa. A rotação veloz e o intenso campo magnético são resultantes do colapso. A bailarina rodopia mais depressa quando encolhe os seus braços. Isso é conhecido como *conservação de momento angular* e ocorre também no colapso de uma estrela. Quanto ao campo magnético, o seu fluxo se conserva num fluido condutor de eletricidade tal como a matéria do interior estelar. Assim o fluxo magnético se concentra quando a matéria se comprime. Nos pólos magnéticos do pulsar os elétrons acelerados irradiam. Quando o pulsar gira, um desses pólos pode ficar momentânea e periodicamente voltado para a Terra. Portanto o pulso é como o fecho periódico de um farol que gira.

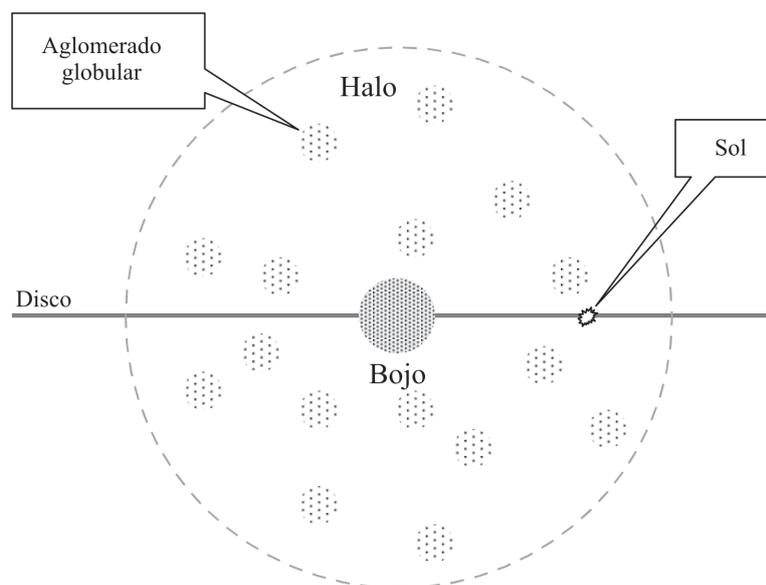
5.3.2 Galáxias

5.3.2.1 A Via Láctea

O Sol é uma estrela que faz parte de um gigantesco sistema estelar, a *Galáxia ou Via Láctea*. Numa das primeiras utilizações astronômicas da luneta, Galileu constatou que a Via Láctea continha uma miríade de estrelas. Em 1785 William Herschel (1738-1822), depois de fazer a contagem de estrelas em diferentes direções do céu, concluiu que a Via Láctea era um sistema de estrelas não esférico, mas com forma de *disco*. De fato, a Via Láctea tem um disco que concentra a maior parte do gás, da poeira interestelar e das estrelas. O Sol se encontra nesse disco (*Figura 1.5*). Mas o disco não é totalmente preenchido. Nele se estendem os *braços espirais* que emanam do centro. Estando dentro da Via Láctea, vemos esse disco projetado na esfera celeste na forma de uma faixa.

Além do disco, a Via Láctea tem outras componentes morfológicas que mostramos na *Figura 5.17*.

Figura 5.17. Corte perpendicular ao disco da Galáxia. O disco tem 100 mil AL de diâmetro e mil AL de espessura. O bojo é uma concentração esférica de estrelas com 20 mil AL de diâmetro. O halo é uma componente esférica que envolve praticamente toda a Galáxia e contém aglomerados globulares de estrelas. Sobre eles falaremos mais adiante



5.3.2.1.1 Halo

Aglomerados de estrelas

Nossa Galáxia abriga vários *aglomerados de estrelas*. Neles as estrelas não apenas estão espacialmente próximas, mas compartilham da mesma composição química da nuvem que as formou, da mesma idade e da mesma distância à Terra. Há dois tipos de aglomerados: (i) *abertos* ou *galáticos*; (ii) *globulares*.

(i) Aglomerados abertos

Estes aglomerados têm as seguintes características: ocorrem no disco galático; têm poucas estrelas (10 a 100) fracamente ligadas entre si pela gravidade, muito luminosas e quentes (pertencem ao ramo superior da Seqüência Principal). Por terem se formado mais recentemente, sua composição química envolve teor mais elevado de elementos pesados. Por estarem no disco onde se concentra o gás e a poeira interestelar, esses aglomerados estão numa região da Galáxia em que a formação estelar continua ocorrendo. As estrelas que compõem esses aglomerados são chamados de *População I*. Exemplos: Plêiades e Híades.

(ii) Aglomerados globulares

Os aglomerados globulares, como o nome diz, têm forma esférica. Eles se localizam no halo galático (Figura 5.17). Cada um contém milhões de estrelas fortemente ligadas gravitacionalmente. Um exemplo é ω do Centauro, visível a olho nu como uma pequena nebulosidade. Fica no vértice norte de um triângulo equilátero tendo α e β do Centauro num vértice e o Cruzeiro do Sul no outro. Os aglomerados são velhos, têm quase a idade da Galáxia. Suas estrelas têm teor mais baixo de elementos pesados. As estrelas do ramo superior da Seqüência Principal já evoluíram, de modo que esse ramo já desapareceu no Diagrama H-R. Restam as estrelas do *ramo inferior* da Seqüência Principal, *gigantes* e *supergigantes*. As estrelas desses aglomerados são chamadas de *População II*.

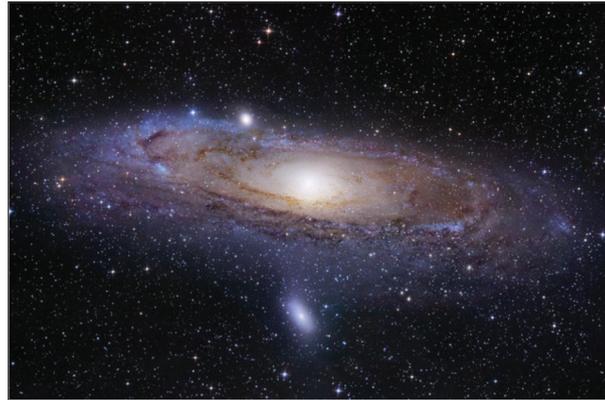
No halo estão os aglomerados globulares. O halo não tem gás nem poeira, por isso lá a formação estelar já cessou há muito tempo. Usando cefeidas, o americano Harlow Shapley (1885-1972) determinou as distâncias dos aglomerados globulares. Considerando que eles faziam parte da nossa Galáxia, mas notando que elas não se distribuíam igualmente em todas as direções, concluiu que o Sol não ocupava o centro da Via Láctea (Figura 5.12). Em 1918 publicou um trabalho estimando o tamanho da Via Láctea. Sua estimativa estava correta, mas causou surpresa porque então se fazia a idéia errônea de que o Universo era bem menor.

5.3.2.1.2 Disco

As estrelas do disco participam do movimento coletivo de rotação em torno do centro galático. Já os aglomerados globulares do halo orbitam independentemente nas mais diversas direções, a maioria cruzando o disco galático.

Vários aspectos morfológicos e dinâmicos da Via Láctea podem ser visualizados através da observação de uma galáxia considerada gêmea da nossa, Andrômeda (Figura 5.18). Ela se encontra a 2,3 milhões AL. Mas há meios de estudar as propriedades da Via Láctea mesmo estando dentro dela. Na luz vi-

Figura 5.18. Galáxia vizinha de Andrômeda.
Crédito: Robert Gender



sível podemos observar o *movimento próprio* das estrelas vizinhas, a extinção da luz estelar pela poeira interestelar, a distribuição de regiões HII e de aglomerados abertos. Com ondas de rádio podemos observar a distribuição de pulsares e de restos

de supernovas. Com a radiação de 21 cm do hidrogênio atômico podemos diagnosticar a estrutura e a rotação do disco galáctico.

O Sol orbita o centro galáctico a 220 km/s, mas o disco não gira como um corpo rígido exceto bem perto do centro. Considerando a velocidade orbital do Sol na Galáxia, podemos concluir que a massa da Via Láctea contida no interior da órbita do Sol²⁰ é equivalente a 100 bilhões de sóis ou cerca de 100 bilhões de estrelas. O número total de estrelas na Galáxia é estimativamente 200 bilhões. Mas, para grande surpresa, a velocidade nos bordos da Galáxia não decresce como era de se esperar se toda a matéria consistisse na matéria visível na forma de estrelas e nuvens. Isso é tomado como evidência da existência de matéria escura, invisível, que corresponderia ao dobro da matéria visível.

Aqui é oportuno falarmos de um outro movimento do Sol, o movimento para o *ápex*. Os textos se referem a ele como o deslocamento do Sol a cerca de 20 km/s na direção de um ponto da constelação de Hércules. Esse ponto é o ápex. Esse movimento pode ser estudado através da observação do movimento próprio das estrelas vizinhas. A rotação galáctica do Sol e dessas estrelas é praticamente comum. Mas, se o Sol se desloca individualmente para um ápex, esse movimento que também é nosso transparecerá no movimento aparente das estrelas vizinhas. As estrelas do hemisfério centrado no ápex parecerão se aproximar de nós, enquanto que as estrelas do hemisfério oposto parecerão estar se afastando a uma velocidade comum. Certamente as outras estrelas têm também seus movimentos peculiares, mas o movimento do Sol para o ápex é obtido como uma média estatística avaliada sobre um grande número de estrelas.

Os *braços espirais* não são estruturas permanentes do disco, mas são causados por ondas de compressão que estão se propagando. Onde elas passam, comprimem temporariamente a matéria. Portanto a matéria do braço não é sempre a mesma. A estrutura espiral gira como um todo, porém mais lentamente do que a matéria do disco. A compressão promove a formação de novas estrelas e explica, em parte, os objetos de População I encontrados nos braços espirais.

²⁰Se um corpo orbita circularmente um outro corpo de massa M , então $M = vr^2/G$ onde v é a velocidade orbital e r , a distância radial.

5.3.2.1.3 Centro

As observações na luz visível na direção do plano galáctico são prejudicadas por causa da *extinção da luz pela poeira interestelar*. As ondas de rádio e a radiação infravermelha são menos suscetíveis a essa extinção. O estudo do centro da galáxia é feito através dessas radiações. O centro galáctico se projeta na esfera celeste na direção da constelação do Sagitário. A declinação é -30° , portanto a observação é favorecida no nosso hemisfério.

Recentemente os astrônomos chegaram à conclusão de que o centro da Galáxia abriga *um buraco negro supermassivo*. Uma massa equivalente a 2,6 milhões de sóis se concentra numa região do tamanho apenas do Sistema Solar. Isso não é privilégio da Galáxia, mas tende a se confirmar como uma propriedade geral de todas as galáxias.

O conceito rigoroso de buraco negro é fornecido pela Teoria Geral da Relatividade proposta por Albert Einstein (1879-1955) em 1919. Mas uma idéia qualitativa pode ser formada com base no conceito newtoniano da gravidade. Todos sabemos que na superfície de um corpo esférico com massa M e raio R , a *velocidade de escape* é a raiz quadrada de $2GM/R$. No caso da Terra a velocidade de escape é 11 km/s. Imaginemos agora uma máquina colossal que seja capaz de comprimir toda a Terra a um volume menor. Tendo em vista que M não muda, mas só R , a velocidade de escape aumentará. Ela atingirá a velocidade da luz quando R for reduzido a cerca de 1 cm. Ora, nada pode viajar com velocidade superior à da luz. Assim nem mesmo fótons poderão escapar. A Terra assim comprimida será um *buraco negro* porque nenhum observador externo poderá receber luz dela ou qualquer outro sinal.

Buracos negros se formam no estágio terminal da evolução de estrelas muito massivas. Se após a explosão de uma supernova do Tipo II a massa da região central exceder cerca de 3 massas solares, nem mesmo os nêutrons serão capazes de assegurar o equilíbrio. Nada mais existe que possa se opor à gravidade. O núcleo da estrela colapsará indefinidamente até se reduzir a um ponto.

Buracos negros podem se formar também a partir de uma estrela de nêutrons que faça parte de um sistema binário. Com a acreção de matéria da estrela companheira, a estrela de nêutrons pode ultrapassar 3 massas solares e colapsar num buraco negro. A confirmação dos buracos negros, objetos que antes não passavam de mera especulação teórica, foi feita em sistemas binários que irradiam raios X. Nesses sistemas eles continuam invisíveis, mas sua presença pode ser inferida pela atração gravitacional que exercem na estrela companheira, esta sim, observável.

A Galáxia deve ter se formado há mais de 10 bilhões de anos pela fusão de vários sistemas menores. Gás e poeira formaram primeiro um sistema esférico no qual surgiu uma primeira geração de estrelas que hoje se encontra nos aglomerados globulares. A rotação então era lenta. Depois a nuvem de gás e poeira se contraiu. A rotação aumentou e deu origem ao disco onde a formação de estrelas continua até hoje.

5.3.2.2 Outras galáxias

Foi longa a caminhada até chegarmos ao conhecimento da estrutura da Galáxia e do Universo. Quando os telescópios eram menos potentes, todos os objetos de aparência nebulosa eram genericamente denominados *nebulosas*, mas entre eles se misturavam tanto objetos da nossa própria Galáxia, quanto objetos externos.

Nebulosas pertencentes à Galáxia eram vários tipos de nuvens interestelares, por exemplo, *nebulosas de emissão* (regiões HII e nebulosas planetárias), *nuvens escuras* de poeira (Saco de Carvão no Cruzeiro do Sul), *nebulosas de reflexão* (nuvens de poeira que refletem a luz estelar, como nas Plêiades) e *restos de supernova* (Nebulosa do Caranguejo na constelação do Touro). Com telescópios pequenos, aglomerados estelares pertencentes à nossa Galáxia também pareciam nebulosas.

Muitos outros objetos classificados também como nebulosas eram, no entanto, outras galáxias. A de Andrômeda, com aparência nebulosa a olho nu, por muito tempo foi chamada Nebulosa de Andrômeda. Ela pode ser vista no começo da noite no fim do ano, bem ao norte, a nordeste do quadrilátero de Pégaso. As Nuvens de Magalhães são duas galáxias-satélite da nossa que até hoje continuam sendo chamadas Nuvens.

Uma importante característica espectral das galáxias é que a sua luz é praticamente a soma da luz de suas estrelas, portanto seu espectro também apresenta linhas de absorção. Por isso, o espectro de galáxias não difere muito do de um aglomerado globular. Já as nebulosas de emissão, como o nome diz, apresentam espectro de emissão.

Depois de estudar a distribuição dos aglomerados globulares na nossa Galáxia, o americano Harlow Shapley (1885-1972) defendeu equivocadamente com alguns astrônomos que as nebulosas espirais, hoje sabidas como galáxias externas à nossa, seriam como os aglomerados globulares: sistemas estelares menores do que a Via Láctea e satélites dela.

Em 1917, usando estrelas *novas*, o americano Heber Doust Curtis (1872-1942) tinha determinado, com base no brilho de supernovas, a distância de várias nebulosas espirais e anunciou que elas estavam muito longe para fazerem parte da Via Láctea. Mas a conclusão de Curtis não teve aceitação geral. Curtis e Shapley foram então convidados a participar de um debate em 1920 na Academia Nacional de Ciências em Washington quando ninguém convenceu ninguém.

Com o novo telescópio de 2,5 m do Observatório de Monte Wilson, na Califórnia, em 1924 Edwin Powell Hubble (1889-1953) conseguiu discriminar estrelas em algumas nebulosas espirais, dentre as quais Andrômeda. Usando o método das cefeidas demonstrou definitivamente que elas estavam fora da Galáxia e que se tratava de outras galáxias semelhantes à nossa, mas independentes da nossa.

5.3.2.3 Aglomeração hierárquica

Nossa Galáxia faz parte de um sistema com cerca de 20 membros chamado *Grupo Local*. Desse Grupo fazem parte Andrômeda e as Nuvens de Magalhães. Estas últimas se encontram a apenas 200 mil AL. O Grupo Local tem um raio da ordem de 3 milhões AL e consiste num *aglomerado de galáxias*. Ou seja, as galáxias tendem a se aglomerar. O outro aglomerado mais próximo é o da Virgem a uns 50 milhões AL.

Os aglomerados, por sua vez, tendem a se juntar formando os *superaglomerados de galáxias* com centenas de milhões AL. O Superaglomerado Local tem o Grupo Local, o Aglomerado da Virgem e o Aglomerado da Ursa Maior. Seu centro está mais próximo do Aglomerado da Virgem. Em escala ainda maior, todavia inferior a 1 bilhão AL, a distribuição das galáxias forma *filamentos, paredes e vazios*, como que numa esponja.

5.3.2.4 Classificação

As *galáxias normais* são classificadas morfologicamente (*Figura 5.19*) em *espirais* (exemplos: Via Láctea, Andrômeda), *irregulares* (exemplos: Nuvens de Magalhães) e *elípticas* (exemplo: Virgo A ou M87). Cada uma dessas classes admite subdivisões.

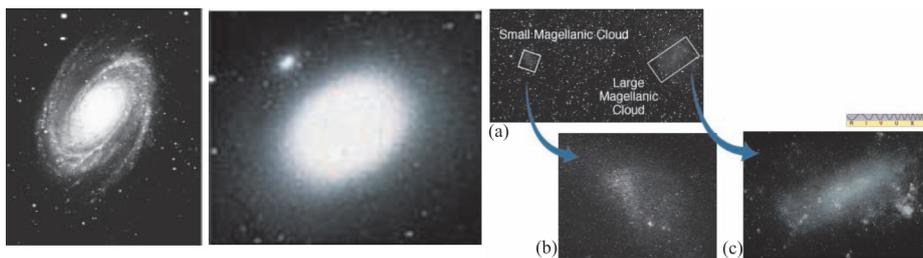


Figura 5.19. A galáxia à esquerda, M81 é espiral. A seguinte, M84 é elíptica. As duas da direita são as Nuvens de Magalhães, galáxias irregulares (Chaisson and McMillan, *Astronomy*, Prentice Hall, 1998, 421,423,425)

Há a classe de galáxias consideradas *anormais* porque são muito mais luminosas, não na luz visível, mas em infravermelho e ondas de rádio. São as *galáxias ativas*. Em geral elas se encontram mais longe, a radiação dominante não vem das estrelas, mas de um *núcleo ativo* com dimensões tão reduzidas quanto às do Sistema Solar. As que emitem ondas de rádio (*radiogaláxias*) têm um par de lóbulos com milhões AL perpendiculares ao plano equatorial de uma galáxia elíptica. Filamentos que consistem em jatos relativísticos conectam o núcleo ativo com os lóbulos.

Quasares são poderosas fontes de ondas de rádio associadas a objetos de aparência estelar (pontual) na luz visível. São considerados da mesma natureza dos núcleos ativos de galáxias, mas num estágio evolutivo anterior. Encontram-se a vários bilhões AL. Quasares e núcleos ativos abrigam um buraco negro supermassivo cuja massa corresponde a alguns bilhões de sóis. A acreção de matéria num buraco negro explica as suas incríveis luminosidades.

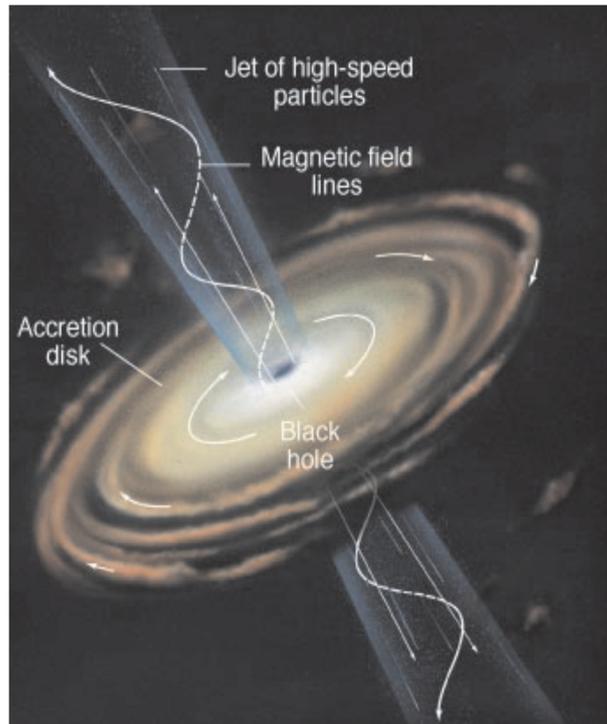


Figura 5.20. A acreção gravitacional de matéria num buraco negro é a fonte de energia de galáxias ativas e de quasares. (Chaisson and McMillan, *Astronomy*, Prentice Hall, 1998, 459)

Referências:

- Anjos, Sandra dos, e Souza, Ronaldo E. de: "Galáxias", Cap. 10, *Astronomia, Uma Visão Geral do Universo*, 195, Edusp, 2000
- Dal Pino, Elisabete M. de Gouveia e Jatenco-Pereira, Vera: "Galáxias Ativas e Quasares", Cap. 11, *Astronomia, Uma Visão Geral do Universo*, 201, Edusp, 2000
- Damineli Neto, Augusto: "Estrelas", Cap. 7, *Astronomia, Uma Visão Geral do Universo*, 139, Edusp, 2000
- Friaça, Amâncio C. S. e Sodré Jr., Laerte: "A Distribuição das Galáxias no Universo", Cap. 12, *Astronomia, Uma Visão Geral do Universo*, 219, Edusp, 2000
- Horvath, Jorge Ernesto: "Objetos Estelares Compactos", Cap. 8, *Astronomia, Uma Visão Geral do Universo*, 165, Edusp, 2000
- Maciel, Walter Junqueira: "A Galáxia", Cap. 9, *Astronomia, Uma Visão Geral do Universo*, 179, Edusp, 2000
- Magalhães, Antonio Mário: "O Nosso Universo", Cap. 1, *Astronomia, Uma Visão Geral do Universo*, 13, Edusp, 2000
- Magalhães, Antonio Mário: "As Ferramentas do Astrônomo", Cap. 2, *Astronomia, Uma Visão Geral do Universo*, 23, Edusp, 2000
- Matsuura, Oscar T.: "Bem-vindo, Halley!", *Ciência Hoje*, 4, 21, 32, 1985
- Matsuura, Oscar T.: *Atlas do Universo*, Editora Scipione, São Paulo, Edição com Errata, 1996

Matsuura, Oscar T.: "Radiação Eletromagnética", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.7, 1998 www.observatorio.diadema.com.br

Matsuura, Oscar T.: "Radiação de Corpos Opacos", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.8, 1998 www.observatorio.diadema.com.br

Matsuura, Oscar T.: "Radiação em Gases", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.9, 1998 www.observatorio.diadema.com.br

Matsuura, Oscar T.: "Efeito Doppler", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.10, 1998 www.observatorio.diadema.com.br

Matsuura, Oscar T.: "Estrelas: Formação. Meio interestelar", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.20, 1999 www.observatorio.diadema.com.br

Matsuura, Oscar T.: "Estrelas: Seqüência Principal. Aglomerados de Estrelas", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.21, 1999 www.observatorio.diadema.com.br

Matsuura, Oscar T.: "O Sol após a Seqüência Principal", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.22, 1999 www.observatorio.diadema.com.br

Matsuura, Oscar T.: "Estágios Avançados da Evolução Estelar", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.23, 1999 www.observatorio.diadema.com.br

Matsuura, Oscar T.: "Galáxias", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.24, 1999 www.observatorio.diadema.com.br

Matsuura, Oscar T.: "Cometas e Asteróides. Poeira Zodiacal", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.27, 2000 www.observatorio.diadema.com.br

Matsuura, Oscar T.: "Meteoros, Meteoritos e Meteoróides", *FICHA DE ASTRONOMIA* No.28, 2000 www.observatorio.diadema.com.br

Matsuura, Oscar T. e Picazzio, E.: "O Sol", Cap. 5, *Astronomia, Uma Visão Geral do Universo*, 81, Edusp, 2000

Matsuura, Oscar T. e Picazzio, E.: "O Sistema Solar", Cap. 6, *Astronomia, Uma Visão Geral do Universo*, 103, Edusp, 2000

Picazzio, Enos: "Meteoritos", *Ciência Hoje*, 4, 22, 68, 1986

Sugestões de atividades práticas:

- Manusear o SkyMap num microcomputador para obter o mapa celeste e efemérides de cometas, satélites artificiais etc
- Consultar um "site" sobre chuvas de meteoros
- Observar um satélite artificial
- Observar um cometa se possível
- Observar meteoros a olho nu
- Tentar observar a luz zodiacal
- Ver o funcionamento de um espectroscópio

- Observar estrelas de magnitude, tipo espectral e classe de luminosidade conhecidos
- Observar a Nebulosa de Órion e o Saco de Carvão a olho nu
- Observar ao telescópio aglomerados globulares (p. ex., w do Centauro) e abertos (p. ex., Plêiades)
- Observar a Nebulosa do Caranguejo ao telescópio
- Observar as Nuvens de Magalhães a olho nu
- Tentar observar a Nebulosa de Andrômeda ao telescópio
- Observar a Via Láctea a olho nu e identificar a região observada
- Ver vídeos e diapositivos de fenômenos astronômicos visíveis a olho nu
- Visitar museus que tenham coleção de meteoritos

SIMPLIFICANDO A LUNETTA COM LENTE DE ÓCULOS

João Batista Garcia Canalle (canalle@uerj.br)

Adelino Carlos Ferreira de Souza (carlinho@uerj.br)

Instituto de Física – UERJ

A principal ferramenta de trabalho do astrônomo é o telescópio. O manuseio do mesmo é sempre motivo de enorme curiosidade por parte de alunos do ensino fundamental ou médio e até mesmo dos respectivos professores. Visando propiciar o acesso destes a uma luneta de fácil construção, com materiais alternativos, de fácil localização no comércio, de baixo custo, resistente ao manuseio de alunos, simplificamos a montagem de uma luneta construída com lente de óculos, de 1 ou 2 graus positivos, e monóculo de fotografia, publicado por Canalle (1994). Esta luneta, a qual permite ver as crateras lunares, apresentava como maior dificuldade de construção o tripé e a determinação do local de formação da imagem. Neste trabalho estas duas dificuldades foram solucionadas, pois substituímos o tripé de madeira por uma simples garrafa PET e o monóculo de fotografia (ocular) foi encaixado dentro de uma bucha de redução curta a qual pode deslizar dentro de um tubo de PVC até que a imagem se forme na extremidade deste tubo. Deste maneira, a montagem inicial que já era simples ficou ainda mais simples, mais barata e mais confortável para o uso.

Palavras chaves: luneta, tripé, baixo custo, lente de óculos.

1. Introdução.

A construção da luneta descrita por Canalle (1994) está sendo muito útil para muitos professores, alunos e demais interessados em astronomia em geral, pois ela é de simples construção, usa materiais acessíveis no comércio de quase qualquer cidade do país, é resistente ao manuseio e permite ver, em condições adequadas, as crateras lunares.

Neste trabalho vamos apresentar uma simplificação no encaixe da ocular e uma grande simplificação na construção do tripé. Este é fundamental para o uso da luneta, por isso é imprescindível que ele também seja construído.

2. As lentes da luneta e seus encaixes

Os materiais críticos para a construção de uma luneta são as lentes, as quais são difíceis de se encontrar e de preços elevados, por isso vamos continuar usando lente de óculos no lugar da lente objetiva e um monóculo de fotografia no lugar da ocular.

A distância focal (f) da lente é dada, em metros, pela seguinte equação $f = 1/(\text{grau da lente})$. Assim, se você quiser lente de 1 m de distância focal, compre a lente de 1 grau, se quiser lente de 0,5 m de distância focal, compre uma lente de 2 graus, ou seja, a distância focal (em metros) é o inverso do “grau”, o qual tem que ser positivo e a lente incolor.

No artigo de Canalle (1994) foi descrita a montagem de uma luneta na qual se usou uma lente de 1 grau, portanto, a distância focal era de 1 metro. Neste artigo vamos estar descrevendo a montagem da mesma luneta mas usando uma lente de dois graus, ou seja, lente com 0,5 m de distância focal. O diâmetro original da lente é de 65 mm, mas é só pedir para o vendedor reduzir o diâmetro para 50 mm. Como é lente para luneta, ela deve ser incolor e de grau positivo.

Quando for comprar a lente, leve junto uma luva simples branca de tubo de esgoto (conexão de PVC) de 50 mm. Veja o item A da *figura 5.20*. Solicite ao vendedor para ele reduzir o diâmetro da lente para 50 mm, para que ela se encaixe livremente dentro da luva.

A segunda lente da luneta é chamada de ocular, atrás da qual se forma a imagem. Vamos usar a lente contida nos monóculos de fotografias. Peça de letra J na *Figura 5.20*.

Compre uma bucha de redução curta marrom de 40 x 32 mm (conexão de PVC). Depois de revestidas as paredes internas do monóculo com cartolina preta e retirada a sua "alça", é só encaixar o monóculo dentro da bucha de redução. Peça de letra I' da *figura 5.20*. A abertura retangular do monóculo deve ser introduzida na bucha marrom, no mesmo sentido que seria colocado um cano d'água, de 1", dentro da bucha. A frente retangular do monóculo se encaixa perfeitamente dentro da bucha (veja a *Figura 5.20*, apesar de fora de escala). Para preencher os espaços laterais entre o monóculo e a bucha, use durepoxi ou massa de modelar ou simplesmente papel amassado, para que o monóculo fique preso e não passe luz pelas laterais do monóculo. A *foto 1* do anexo mostra à esquerda a bucha de redução, no meio o monóculo e à direita o monóculo encaixado na bucha.

Com a lente de óculos no lugar da lente objetiva e a lente do monóculo no lugar da lente ocular, estão improvisadas as partes mais difíceis de serem conseguidas da luneta, agora é só questão de encaixá-las nas extremidades de dois tubos que corram um dentro do outro.

3. A montagem da luneta.

Lista de materiais necessários para a construção da luneta:

LETRA	QUAN-TIDADE	DESCRIÇÃO DE MATERIAL
A	I	luva simples branca de esgoto de 2" (= 50 mm)
B	I	lente incolor de óculos de 2 graus positivos
C	I	disco de cartolina preta (ou papel camurça preto) de 50 mm de diâmetro, com furo interno de 20 mm de diâmetro
DE	I	tubo branco de esgoto com diâmetro de 2" (= 50 mm) e com 30 cm de comprimento
FG	I	tubo branco de esgoto com diâmetro de 1 1/2" (= 40 mm) e com 30 cm de comprimento
H	I	tubo branco de esgoto de com diâmetro 1 1/2" (= 40 mm) e com 10 cm de comprimento

LETRA	QUAN-TIDADE	DESCRIÇÃO DE MATERIAL
I'	1	bucha de redução curta marrom de 40 x 32 mm
J	2	monóculos de fotografia (ou visor de fotografia)
L	1	plug branco de esgoto de 2" (= 50 mm)
	1	lata de tinta spray preto fosco ou cartolina preta
	1	rolo de esparadrapo de aproximadamente 12 mm de largura por 4,5 de comprimento
	1	caixa pequena de durepoxi ou similar

Pinte as paredes internas dos tubos DE, FG e H com tinta spray preto fosco ou forre-os internamente com cartolina preta. Antes de pintá-las (ou revesti-las) coloque um anel de esparadrapo na extremidade E da parede interna do tubo DE e outro anel de esparadrapo na extremidade externa F do tubo GF (veja a *figura 5.20*).

Depois de completada esta pintura retire os dois anéis de esparadrapo acima mencionados, pois eles estarão sujos de tinta. No lugar do anel que estava na extremidade interna E, coloque tantos anéis sobrepostos de esparadrapo quantos forem necessários para que o tubo GF possa passar pela extremidade E do tubo DE e deslizar dentro deste sem muito esforço.

No lugar do anel de esparadrapo que estava na extremidade externa F, coloque tantos anéis de esparadrapos quantos forem necessários para que o tubo GF possa deslizar dentro do tubo ED sem precisar esforço, mas sem escorregar sozinho se os tubos ficarem na vertical. Obviamente será preciso fazer a extremidade G, do tubo GF, entrar pela extremidade D, do tubo ED e sair pela extremidade E, e, então, verificar se eles deslizam suavemente sem muito esforço.

Seqüência de montagem: coloque o tubo FG dentro do tubo ED, conforme descrito no parágrafo anterior. Coloque estes tubos na vertical, com a extremidade D para cima. Sobre esta extremidade (D) coloque o disco de cartolina preta (C). A finalidade deste disco é diminuir a aberração cromática; este é o nome dado à dispersão da luz branca (separação de todas as cores) após ela passar pela lente. Sem este disco (C) nem a Lua é visível. Continuando a seqüência de montagem: sobre o disco C coloque a lente (limpe-a bem) com o lado convexo (veja letra B na *Figura 5.20*) para cima e, então, encaixe a luva A, conforme indicado na *figura 5.20*. É importante que o corte da extremidade D do tubo tenha sido feito perpendicularmente ao eixo do tubo DE.

O monóculo J já está encaixado na bucha marrom I I', e em Canalle (1994) era só encaixar a bucha na luva H e esta, por sua vez, encaixar na extremidade G do tubo GF. A simplificação que estamos introduzindo é justamente neste ponto. Ou seja, ao invés de usarmos a luva H usaremos um pedaço de 10 cm de comprimento do próprio tubo branco de 40 mm de diâmetro. Vamos inclusive chamá-lo de H também e a localização dele

é exatamente a mesma da luva H. Mas como este pedaço de tubo tem o mesmo diâmetro do tubo GF e o mesmo diâmetro da bucha marrom II', temos que serrar a parede deste pedaço de tubo ao longo do seu comprimento. Fazendo isso devemos inserir a bucha marrom dentro do cano H e também devemos sobrepor cerca de 2 cm deste mesmo cano H na extremidade G do cano GF (veja *Figura 5.21*).

Como a imagem se forma a uns 4 ou 5 cm atrás da lente ocular, a qual ficava exatamente como mostra a *Figura 5.20* no trabalho de Canalle (1994), isto trazia um certo desconforto ao observador, pois a tendência natural das pessoas é encostar o olho na ocular. Na montagem descrita no presente trabalho há um espaço de aproximadamente 4 cm entre a lente da ocular e a extremidade esquerda do tubo H (*Figura 5.21*), de modo que o observador poderá encostar o olho (ou sobrelance) na extremidade esquerda do tubo H, pois lá estará se formando a imagem. Veja a *foto 2* do anexo.

A imagem é invertida, afinal esta é uma luneta astronômica e em astronomia, cabeça para baixo ou para cima é só uma questão de referencial.

A aproximação (ou aumento) que esta luneta proporciona é igual à razão entre a distância focal da objetiva pela distância focal da ocular, portanto: $50 \text{ cm} / 4 \text{ cm} = 12,5$. Para duplicar este aumento e só encaixar mais um monóculo dentro daquele que está preso na bucha marrom. Não se esqueça de revestir as paredes internas deste monóculo com a cartolina preta. Este revestimento e a pintura dos tubos DE e FG é para evitar a reflexão da luz dentro da luneta. Agora a imagem estará se formando a uns 2 cm da lente da ocular, por isso, neste caso, aumente a sobreposição (em cerca de mais 2 cm) do cano H sobre a extremidade G do cano GF, para que a imagem continue se formando rente à extremidade esquerda do cano H.

Como a bucha marrom e a extremidade F do cano GF possuem o mesmo diâmetro, o cano H fica aberto ao longo do seu comprimento. Recomendamos fechar esta abertura forrando-o com cartolina preta.

A peça L da *figura 5.20* é um plug branco de esgoto de 5 cm e sua função é proteger a lente quando a luneta estiver fora de uso. Obviamente esta peça é opcional.

Como você rapidamente percebe ao usar a luneta, seu braço fica cansado ao segurar a luneta e a imagem treme muito. Se apoiar o braço em algo facilita a observação, mas o ideal é ter um tripé. Canalle (1994) apresentou uma sugestão de tripé muito trabalhosa, por isso desenvolvemos um tripé extremamente simples e que usa basicamente uma garrafa PET de 2,5 litros e dois suportes de fixação de trilhos de cortinas, conforme descrevemos na seção seguinte.

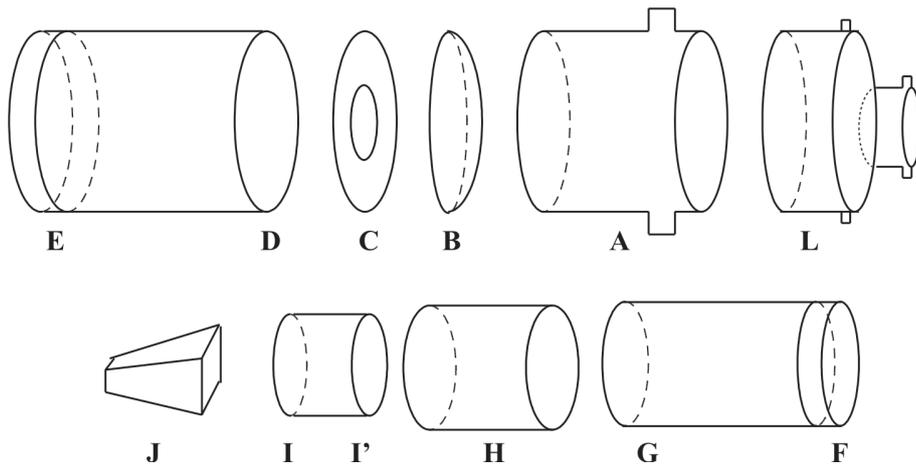


Fig.ura 5.21. Esquema explodido da luneta. L é um plug, A é a luva, B é a lente de óculos, C é um disco de cartolina, DE e FG são tubos brancos de esgoto de 50 mm e 40 mm de diâmetro, respectivamente, H é um tubo de 40 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento, I I' é uma bucha de redução e J é o monóculo de fotografia (ou visor de fotografia).

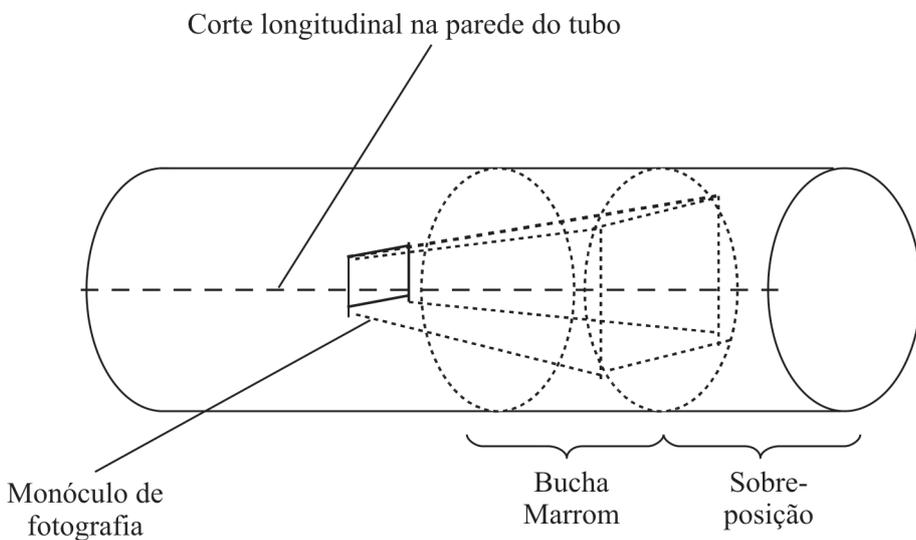


Figura 5.22. Peça H com a bucha de redução (I') e o monóculo de fotografia dentro desta.

O tripé

O corpo da luneta será apoiado num tubo com as mesmas características do tubo externo dela, mas com 10 cm de comprimento, com um corte ao longo de sua lateral e um furo na região central dele e oposto ao local do corte longitudinal, conforme mostra a parte superior da *Figura 5.22*.

Este tubo que serve de suporte da luneta deve ficar perpendicular ao suporte de trilho de cortina (*Figura 5.22*). Um parafuso de 3/16" x 1/2" com porca borboleta prende o suporte da luneta ao suporte de trilho de cortina (linha tracejada A) (*Figura 5.22*).

O suporte de trilho de cortina sob o tubo de PVC é conectado a outro igual a ele, por outro parafuso igual ao acima descrito (este pode ter 1" de comprimento) e pode-se fixar duas porcas borboletas em sentidos opostos sendo uma de cada lado do suporte do trilho de cortina (linha tracejada B) para facilitar o apertar e afrouxar deste parafuso, pois o movimento vertical da luneta será obtido através da inclinação do suporte do trilho de cortina que está debaixo do tubo de PVC.

O suporte do trilho de cortina inferior, por sua vez, será fixado numa simples tampinha de de garrafa PET (*Figura 5.22*) por outro parafuso, igual ao acima descrito, com porca borboleta ao longo da linha tracejada C. A tampinha, por sua vez, deve ficar numa garrafa de refrigerante, de preferência de 2,5 litros, e completamente cheia de água (ou de areia), que não está desenhada na *Figura 5.22*. O movimento horizontal da luneta é obtido girando-se lentamente a tampinha sobre a própria garrafa de refrigerante. A *foto 3* do anexo mostra esta peça já montada e a *foto 4* mostra a luneta montada e apoiada sobre seu tripé.

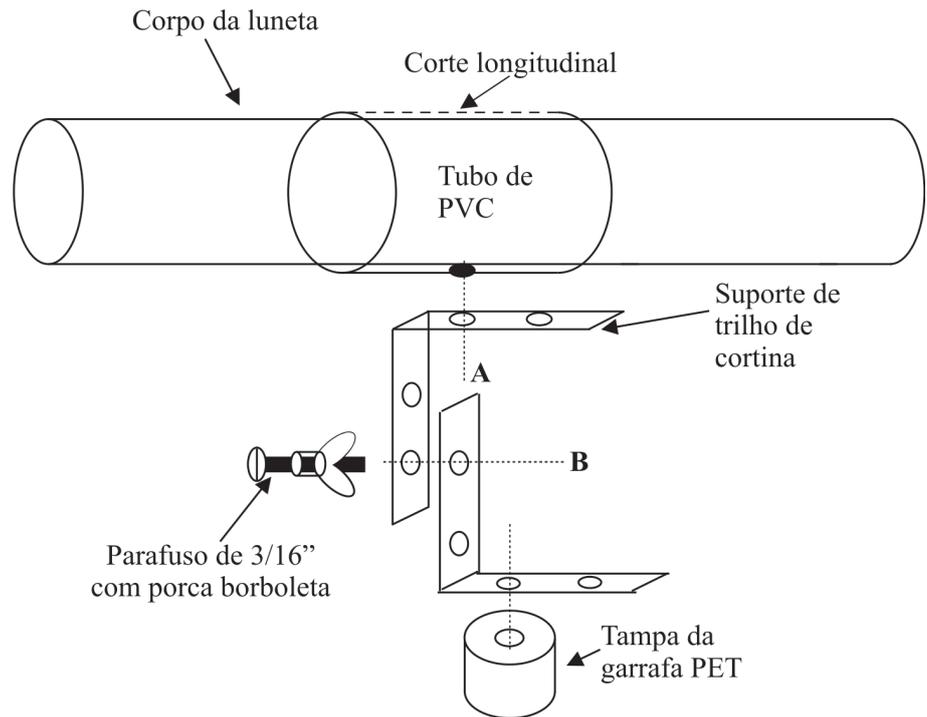


Figura 5.23. Esquema, fora de escala, da montagem do tripé sem o desenho da respectiva garrafa PET. O corpo da luneta representa o local onde ela se encaixa.

Conclusão

Esta luneta permite ver as crateras lunares e seu relevo, principalmente quando observada durante as noites de lua crescente ou minguante. Como a distância focal desta luneta é de 50 cm (= 2 graus) e aquela descrita por Canalle (1994) tinha distância focal de 100 cm (= 1 grau), o aumento desta é de apenas 12,5 vezes enquanto que a outra era de 25 vezes. Este mesmo aumento pode ser obtido desde que se substitua o monóculo de fotografia por uma lente ocular de 20 mm de distância focal, mas como estas lentes não são de simples localização no comércio, preferimos descrever a montagem ainda usando o monóculo de fotografia.

A presente montagem também pode ser usada para se construir uma luneta com 100 cm de distância focal. Neste caso o tripé ainda funcionará bem, mas precisará de um pouco mais de paciência do observador, pois a vibração do conjunto como um todo será maior.

Com esta luneta o professor poderá desmistificar a complexidade da construção da luneta astronômica e terá um experimento didático que despertará a curiosidade dos alunos para o tema de astronomia que estiver sendo estudado. Além disso, devido ao baixíssimo custo da sua construção, nada impede que os alunos interessados possam fazer a própria luneta.

Recomendação importantíssima: não observe o Sol através da luneta, pois ficará cego.

Referências

Canalle, J.B.G, A luneta com lente de óculos. Caderno Catarinense de Ensino de Física, v. 11, n. 3, p. 212- 220, dez. 1994

ANEXO**Fotos ilustrativas da montagem da luneta com lente de óculos**

Foto 1. À esquerda a bucha de redução, no meio o monóculo e à direita o monóculo encaixado na bucha.



Foto 2. Mostra o monóculo inserido na bucha de redução e esta dentro do tubo H. Do lado esquerdo da figura pode-se ver a distância entre a ocular do monóculo e a extremidade esquerda do tubo H.





Foto 3. Detalhe do tripé com a tampinha de garrafa PET, dois suportes de cortina pequenos e sobre eles o “berço” da luneta, pois esta será encaixada neste tubo de pvc o qual tem um corte longitudinal na sua parte superior, não visível na foto.



Foto 4. Montagem completa da luneta apoiada em seu “berço” e este preso no suporte do trilhe de cortina

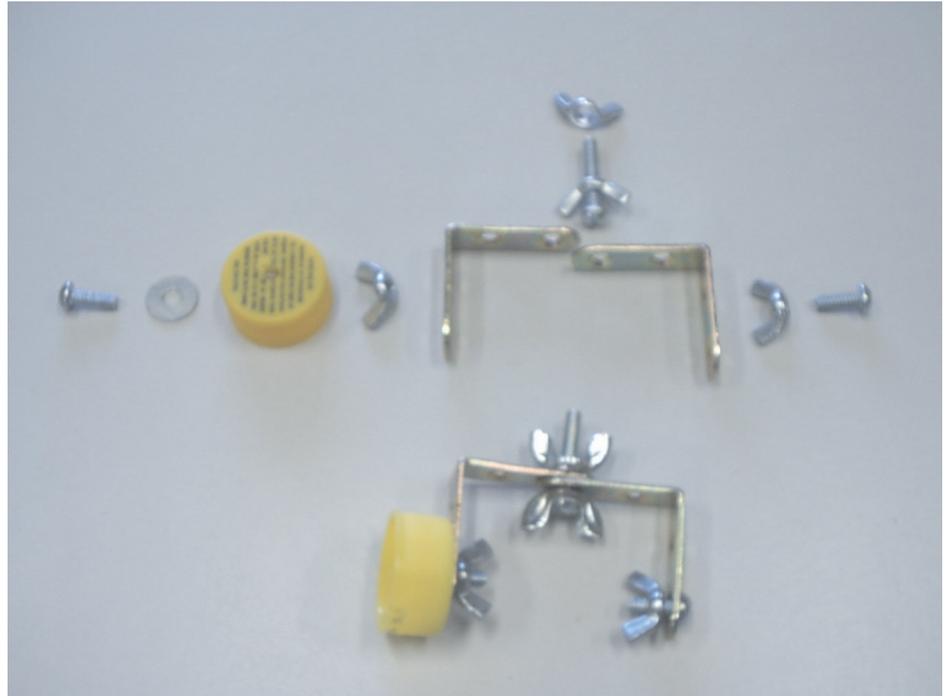


Foto 5



Foto 6

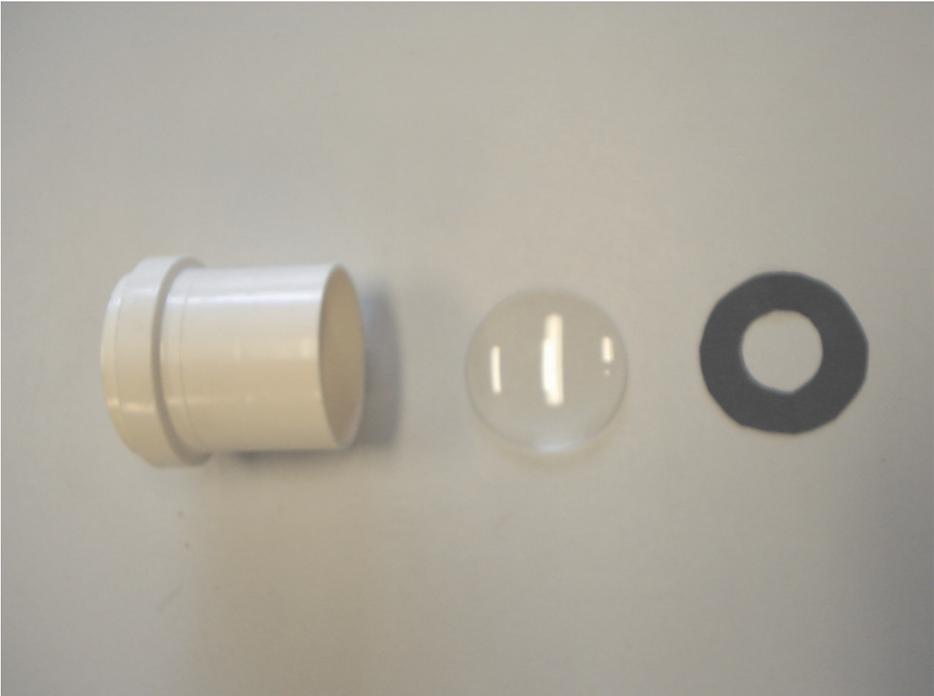


Foto 7



Foto 8

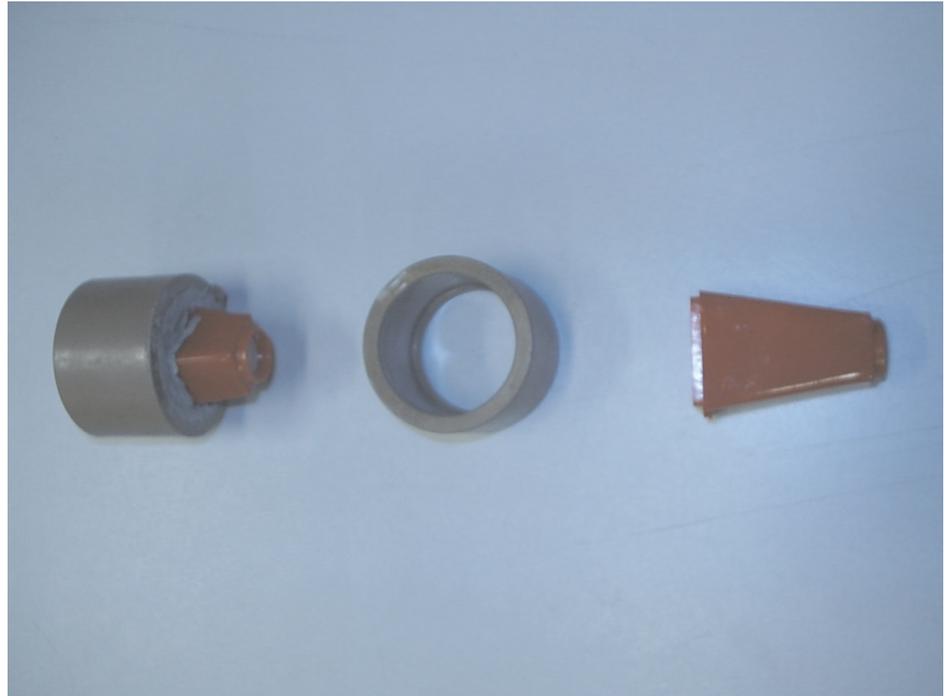


Foto 9

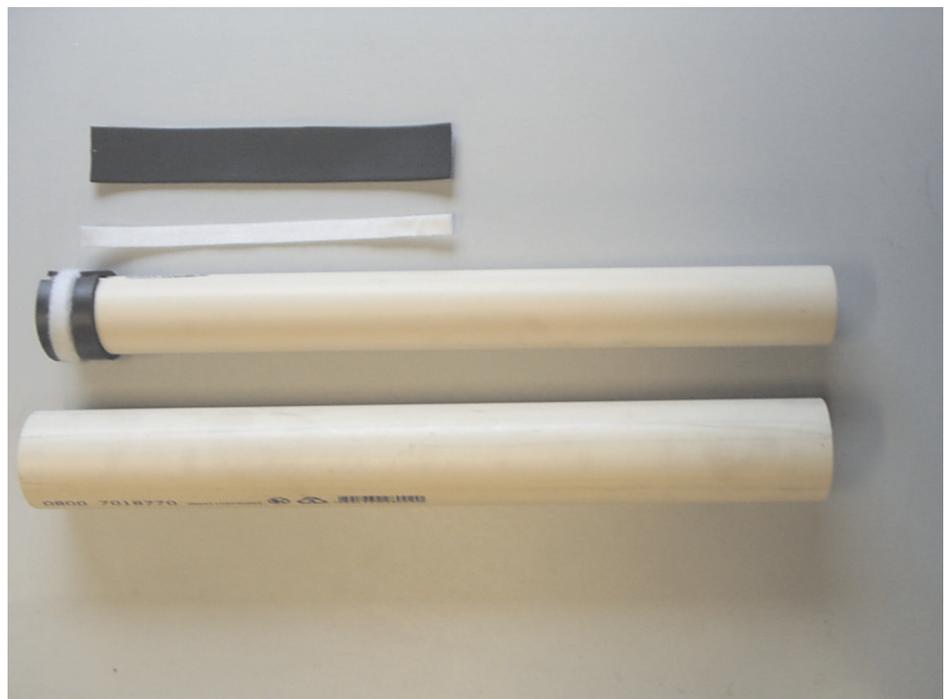


Foto 10



ORIGENS

Esboçando respostas para perguntas arquetípicas que não se calam

Reservamos esta última aula para abordamos o problema das origens, pois este é o tema central e recorrente dos mitos de origem. Apresentaremos a versão oferecida hoje pela ciência sobre a origem da evolução do Universo (Cosmologia), tema este que abrange a origem da matéria, da energia, do tempo e do espaço. Depois, sobre a origem do Sistema Solar (Cosmogonia) e, finalmente, sobre a origem da vida na Terra e a possibilidade dela fora da Terra (Exobiologia).

6.1 Origem e evolução do Universo

6.1.1 O Universo em grande escala

O objeto de estudo da Cosmologia é o Universo como um todo. Cosmologia não é a somatória dos conhecimentos sobre os constituintes do Universo (estrelas, sistemas planetários, galáxias, aglomerados de galáxias, superaglomerados, etc) mas o estudo do Universo em grande escala.

Essa grande escala só pode ser bem entendida, se levarmos em conta que a matéria no Universo se aglomera hierarquicamente, desde a escala microscópica dos átomos até a escala macroscópica do Universo (ver seção 5.3.2.3, página 142 do Capítulo anterior). Sistemas planetários como o nosso Sistema Solar são associados a estrelas. Por sua vez as estrelas se aglomeram e formam estruturas maiores que são as galáxias. Por meio dos telescópios mais poderosos podemos observar até cerca de centenas de bilhões de outras galáxias. Elas também se aglomeram hierarquicamente em estruturas cada vez maiores conforme vimos na aula anterior. As maiores estruturas cósmicas observadas têm cerca de 500 milhões de anos-luz. Grande escala é uma distância cósmica, digamos, superior a 1 bilhão de anos-luz, uma vez que sobre tais extensões, as propriedades físicas observáveis, tais como, movimentos, número de galáxias, distribuição da radiação, já não variam significativamente de uma direção para outra. Nessas escalas o Universo começa a parecer homogêneo, portanto, as suas propriedades não se referem mais a entidades locais, mas ao Universo como um todo.

Concluindo, a Cosmologia estuda as propriedades do Universo nessas grandes escalas. O Universo observável é uma entidade singular. Por isso é impossível uma cosmologia comparativa experimental. Porém, teoricamente, podemos conjecturar sobre um conjunto de muitos universos possíveis (multiversos), dos quais o nosso seja apenas um exemplar. Essa abordagem é invocada por alguns cosmólogos preocupados em explicar a sintonia fina de parâmetros físicos macroscópicos e microscópicos que viabilizam o aumento de complexidade da matéria até a emergência da vida e da inteligência.

6.1.2 Princípio Cosmológico

Um modelo cosmológico é uma representação mental para descrever e explicar as propriedades do Universo como um todo. Para isso, ele se baseia em leis físicas (leis da natureza). É importante frisar que a Cosmologia pressupõe a uniformidade da Natureza discutida na aula anterior. Mas não sabemos se a validade das nossas leis físicas pode ser estendida ao próprio Universo como um todo. Em todo o caso, a Cosmologia enquanto empreendimento científico se distingue dos mitos e das explicações religiosas na medida em que estes envolvem agentes supranaturais.

A teoria física envolvida na Cosmologia é a Teoria Geral da Relatividade de Einstein. O estudo do Universo envolve naturalmente o conceito de espaço-tempo, pois as observações são limitadas pela velocidade da luz. Observar Andrômeda que está a 2,3 milhões AL é testemunhar um evento ocorrido lá há 2,3 milhões de anos. Há uma relação inextricável entre espaço e tempo que impõe a definição de um tecido do Universo chamado espaço-tempo.

Além disso, um Universo que expande sem ter nada fora dele, nem mesmo o espaço, não pode ser descrito pela teoria de Newton. A expansão é governada pela matéria e energia presente no Universo. Segundo a teoria Geral da Relatividade, a matéria não exerce propriamente uma atração, como propôs Newton, nem preenche o espaço circunvizinho com um campo gravitacional. A matéria induz curvatura no espaço-tempo circunvizinho e essa curvatura (propriedade geométrica) determina o movimento dos corpos e também da luz.

Uma outra teoria física que entrou em cena mais recente é a física das partículas elementares. Ela é importante nos instantes verdadeiramente iniciais do Universo quando as energias envolvidas eram extremas e irreprodutíveis em laboratório.

Por algum tempo houve disputa entre dois modelos cosmológicos rivais. Um era o modelo do estado estacionário segundo o qual o Universo em grande escala é imutável, portanto não evolui no tempo nem teve origem, pois sempre existiu. Mas a confirmação experimental de fatos previstos pelo outro modelo, o do Big Bang, conquistou para essa teoria o consenso de praticamente todos os astrônomos contemporâneos. É esse modelo que será exposto a seguir.

Para que o Big Bang possa ser devidamente entendido é preciso admitir o chamado Princípio Cosmológico. Trata-se de um postulado ou pré-requisito

conceitual que não tem prova ou demonstração, embora também não possa contradizer fatos observados. Assim se enuncia o Princípio Cosmológico:

Em qualquer local do Universo um observador (que participe da expansão do Universo) verá as mesmas propriedades em grande escala, inclusive a mesma história evolutiva. Esse princípio relaciona o Universo observável com o Universo como um todo.

No fundo, o Princípio Cosmológico é uma ampliação da hipótese de Copérnico e equivalente ao chamado Princípio de Mediocridade, segundo o qual o observador presumivelmente não se encontra numa posição privilegiada do Universo. Uma consequência do Princípio Cosmológico é que o Universo observável não tem fronteira nem centro, pois seriam locais privilegiados de observação.

6.1.3 Expansão do Universo. Lei de Hubble

Por volta de 1912 já se sabia que as galáxias distantes apresentavam um espectro deslocado para o vermelho. Depois se notou que esse deslocamento era tanto maior, quanto maior a distância da galáxia. Na década de 20 Hubble chegou à importante constatação empírica de que o Universo está em expansão. O deslocamento do espectro para o vermelho denuncia o afastamento das galáxias pela expansão do Universo. Não se trata propriamente de efeito Doppler pois, neste caso, as galáxias não se afastam num espaço pré-existente do Universo, mas se afastam à medida que o espaço-tempo se expande. Neste caso o deslocamento espectral é chamado deslocamento Cosmológico e o aumento do comprimento de onda da radiação está associado à expansão do Universo. Devemos entender as galáxias como pontos materiais (traçadores) da expansão do Universo. Para uma amostra de várias galáxias, Hubble relacionou dois parâmetros de cada galáxia individual: sua distância e sua velocidade de afastamento (deduzida do deslocamento espectral). O Universo está em expansão e segundo a lei de Hubble, a velocidade de afastamento é diretamente proporcional à distância. A constante de proporcionalidade H_0 se chama constante de Hubble, cujo valor é ainda

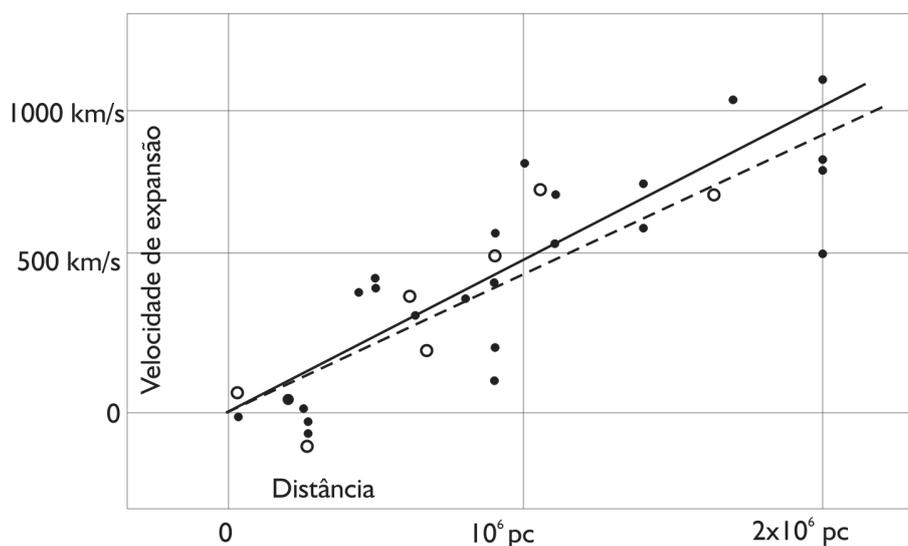


Figura 6.1. Gráfico original da Lei de Hubble. O eixo vertical indica a velocidade da expansão e o eixo horizontal, a distância.

bastante impreciso. O fato de estarmos vendo as galáxias se afastando de nós pode nos induzir a pensar equivocadamente que estamos num local privilegiado do Universo, o centro de sua expansão. Mas, de fato, outro observador postado em qualquer outro ponto do Universo veria a expansão da mesma forma. Suponhamos bolinhas pintadas num balão. Quando o balão é inflado, um observador hipotético postado numa bolinha qualquer verá as demais se afastarem dele como se estivesse no centro da expansão. Esta é uma analogia do que acontece na expansão do Universo.

A lei de Hubble dá uma solução ao intrigante paradoxo de Olbers. O astrônomo amador alemão Henrich W. M. Olbers (1758-1840) popularizou esse paradoxo. Se o Universo fosse infinito e estacionário, haveria dentro dele um numero infinito de galáxias. À noite, qualquer que fosse a direção observada, fatalmente nossa linha-de-visada cruzaria uma estrela brilhante por mais longe que ela estivesse. Estendendo este raciocínio para todas as direções no céu, o céu noturno deveria ser todo ele brilhante como a superfície do Sol. Mas, claramente não é isso que observamos. Daí o paradoxo. Independentemente de o Universo ser finito ou infinito, o fato de que o Universo teve início há uns 13 bilhões de anos implica em que só temos acesso a uma porção finita do Universo. Não podemos receber luz de uma região de onde a luz não teve tempo de chegar até nós, mesmo que tenha sido emitida no início do Universo. Esse Universo observável se encontra dentro do nosso horizonte de eventos (ver box ao lado) que, a cada ano, cresce cerca de 1 ano-luz por conta da velocidade da luz e mais porque o Universo está se expandindo. Hoje o Universo observável é cerca de 3 vezes maior do que o tempo de viagem da luz desde o início do Universo. Além disso, se o Universo está em expansão, os fótons provenientes das regiões mais distantes sofrem maior deslocamento para o vermelho, ou seja, têm cada vez menos energia.

6.1.4 Instante do Big Bang

Uma consequência imediata de grande importância é que, passando de trás para diante o filme da expansão do Universo, chegaremos a um instante inicial em que toda a matéria esteve concentrada num único ponto. O nome Big Bang alude à explosão desse ponto na origem do Universo.

O inverso da constante de Hubble dá uma estimativa da idade do Universo, ou seja, $1/H_0 = 13$ bilhões de anos. Essa estimativa vale para um Universo idealmente vazio em que a expansão não fosse desacelerada.

Os instantes verdadeiramente iniciais do Universo são cada vez mais obscuros. Então o Universo tinha menos que 10^{-36} s. Todo o Universo se resumia a uma partícula microscópica e o seu comportamento era governado pelas leis da mecânica quântica. Os estudos são feitos com base na física de partículas elementares e respectivas teorias de campo. Mas o início do Universo só poderá ser explicado, talvez por uma teoria quântica da gravitação que ainda inexistente. Para alguns autores, o espaço-tempo nesses instantes iniciais

não seria contínuo, mas caracterizado por flutuações quânticas. Então a noção usual de tempo talvez nem faça sentido.

Um difícil problema da Cosmologia é o das condições iniciais na medida em que a justificação e a explicação delas não deve estar fora do Universo, mas dentro dele.

6.1.5 Local do Big Bang?

À primeira vista podemos ter a impressão de que o Big Bang viola o Princípio Cosmológico, pois parece sugerir um local privilegiado ou centro da explosão. Na verdade, no momento da explosão, todo o Universo, por conseguinte, todo o espaço-tempo se resumia a um ponto. Esse ponto não era um lugar privilegiado no Universo, mas o próprio Universo. Seria diferente se a explosão ocorresse num espaço pré-existente, mas não é esse o caso.

6.1.6 O futuro

Atualmente o Universo está em expansão. Irá essa expansão continuar até quando? Esta é uma questão fundamental que pode ser investigada à luz da teoria geral da relatividade. Quando um projétil é lançado da superfície da Terra para o alto, a mecânica clássica prevê que esse projétil pode retornar e cair, ou escapar para sempre. Se a velocidade inicial de lançamento superar a velocidade de escape, o projétil se afastará da Terra indefinidamente.



Figura 6.2. Rádio-telescópio com o qual Arnold Penzias e Robert W. Wilson detectaram pela primeira vez, em 1964, a radiação cósmica de fundo.

A Teoria Geral da Relatividade também prevê duas possibilidades: ou a expansão prosseguirá indefinidamente ou parará algum dia para ceder lugar para a contração. No primeiro caso o Universo seria ilimitado, no segundo, limitado. O futuro da expansão

depende de a densidade média de matéria no Universo ser maior ou menor que a densidade crítica, aquela que separa os dois regimes. A densidade crítica hoje corresponde a 6 átomos de hidrogênio por m^3 . Mas qual é a densidade média do Universo hoje? A resposta não é simples. Contabilizando a matéria luminosa (não só visível, mas em todo o espectro eletromagnético) os astrônomos chegam a apenas 1% da densidade crítica. Fosse só essa matéria existente no Universo, a expansão jamais pararia. Mas sabidamente existe também matéria escura (ver *Disco* em 5.3.2.1.2. A Via Láctea, Capítulo 5, página 138). Embora a matéria escura não seja perceptível através da radiação, ela pode ser inferida através dos efeitos gravitacionais que produz. O movimento orbital de estrelas da Via Láctea e de outras galáxias, assim como galáxias em aglomerados de galáxias é muito veloz para que possa ser

explicado só pela matéria luminosa. Surpreendentemente a matéria escura é majoritária. Nas galáxias e nos aglomerados de galáxias ela é 20 a 30 vezes a matéria luminosa e, por isso, detém o controle dinâmico dessas estruturas. Contabilizando essa matéria escura dinâmica, a densidade do Universo passa a ser 30% da densidade crítica. Mas os astrônomos conhecem apenas a matéria escura dinâmica em aglomerados de galáxias mais próximos. Pode ser que a contribuição dessa matéria seja crescente em escalas maiores. Pode ser que aqueles vazios na estrutura vesicular de grande escala não sejam vazios, mas contenham substancial quantidade de matéria escura.

Cálculos independentes relacionados com a produção de deutério e do hélio através da nucleossíntese primordial, prevêem uma densidade de matéria ordinária (constituída de prótons, nêutrons e elétrons) correspondente a, no máximo, 10% da densidade crítica. Claramente boa parte da matéria ordinária está incorporada na matéria escura. Mas, se a matéria escura já é estimada em 30% da densidade crítica, somos forçados a concluir que pelo menos 2/3 da matéria escura não é ordinária, mas exótica. Esse é o nome dado a uma matéria de natureza ainda desconhecida, que efetivamente pode ter desempenhado papel decisivo na formação das galáxias, mas que dissimula a sua presença porque praticamente não interage nem com a luz, nem com a matéria ordinária. Atualmente se acredita que 3% do Universo são matéria ordinária (luminosa ou escura) e 27% matéria escura exótica. Os restantes 70% seriam energia escura, necessária para explicar a aceleração da expansão do Universo inferida da observação de que supernovas distantes (mais antigas) se encontram mais afastadas do que se presumia.

Não se sabe ao certo a densidade média do Universo. Mas, apesar das incerteza, o seu valor flutua sempre muito proximamente do valor crítico. Isso pode ser significativo, pois teoricamente se a densidade média divergisse do valor crítico, a tendência durante a evolução do Universo seria um crescimento exponencial dessa divergência que, todavia, não é observada. Assim sendo, parece justificado considerar que a densidade do Universo seja exatamente igual à densidade crítica. Nesse caso a expansão continuará indefinidamente no tempo.

Com base em diferentes métodos (constante de Hubble e radiação cósmica de fundo), a idade do Universo pôde ser calculada recentemente com maior precisão e atualmente é estimada é 13,7 bilhões de anos.

6.1.7 Nucleossíntese primordial

O físico nuclear norte-americano de origem russa, Georg Gamow (1904-68), predisse na década de 40 que a matéria no Big Bang seria extremamente quente e teria formado o hélio nos primeiros minutos do Universo. Na verdade, nos instantes iniciais tudo era energia, isto é, radiação. Com o resfriamento foram sendo criadas, primeiro, as partículas elementares, depois os elétrons, prótons e nêutrons, depois os núcleos atômicos. Após a nucleossíntese primordial o Universo ficou basicamente com 75% de hidrogênio e 25% de hélio. Assim também se formou o deutério e o lítio, porém em diminutas quantidades.

O hélio existente hoje no Universo já supera um pouco 25% em massa. Mas toda essa quantidade não pode ter sido produzida pelas estrelas. Há uma quantidade básica que é explicada pela nucleossíntese primordial, nos primeiros minutos do Universo e antes da formação das estrelas.

6.1.8 Radiação cósmica de fundo

Gamow predisse também a existência de uma radiação fóssil dessa época que, tendo se resfriado com a expansão do Universo, hoje teria cerca de 3K. Em 1964 os engenheiros de telecomunicações Arno Allan Penzias (1933-) e Robert Woodrow Wilson (1936-), da Bell Telephone Laboratories em New Jersey, captaram acidentalmente essa radiação em ondas de rádio de 7,35 cm. Estavam eles estudando interferências indesejáveis nas comunicações por satélites, quando perceberam a presença de um ruído de fundo que vinha de todas as direções do céu a qualquer hora do dia. A descoberta foi considerada tão importante que os dois engenheiros receberam o Prêmio Nobel de Física de 1978. Dados mais recentes obtidos em 1989 com o satélite COBE (Cosmic Background Explorer) confirmaram essa radiação como sendo a de um corpo negro a 2,7 K. A radiação é a mesma em todas as direções e as inhomogeneidades seriam inferiores a uma parte em 100 mil. Ela teria sido irradiada quando o Universo tinha cerca de 3 mil K, 380 mil anos e era 1500 vezes menor. Então a temperatura já havia baixado o suficiente para que os átomos pudessem se recombinar tornando o Universo transparente para a radiação poder escapar. Só então as galáxias começaram a se formar. A detecção da radiação cósmica de fundo corroborou fortemente a teoria do Big Bang.

6.1.9 Inflação cósmica

Na década de 70 os cosmologistas se defrontavam com dois grandes problemas:

(i) Problema do Horizonte

Já falamos que a radiação de fundo é igual em todas as direções. O mesmo vale para a expansão do Universo.

O Universo deixou de ser opaco para a radiação cósmica de fundo quando tinha cerca de 380 mil anos. Criou-se então uma fotosfera (esfera de fótons) que cresce por causa da expansão do Universo e da velocidade de propagação da luz. Na superfície dessa fotosfera estão partículas que irradiaram a radiação de fundo quando o Universo tinha 380 mil anos. Além dessa superfície o Universo é opaco. Aquém dele é transparente.

Ora, o horizonte de eventos de cada partícula que emitiu a radiação de fundo tinha, no máximo, 380 mil anos-luz. Portanto regiões separadas por mais de 380 mil anos-luz estavam casualmente desconectadas. Alguém poderia argumentar que no Universo primordial a comunicação eletromagnética era mais fácil do que hoje porque as distâncias eram menores. Mas não é bem assim. Com o tempo a gravidade diminui a taxa de expansão do Universo. No passado a expansão era mais rápida. Se a escala da distância era menor,

a do tempo era menor ainda, de modo que o sinal dispunha de menos tempo de vôo entre dois pontos.

Consideremos agora duas direções opostas nas quais a radiação de fundo é a mesma. Concluímos que, quando o Universo se tornou transparente, essas duas regiões já eram semelhantes. Mas como poderiam ser, se elas não tinham tido tempo para interagirem, nem sequer para se comunicarem? Não há nenhuma outra razão a não ser o acaso, mas esta é uma explicação inaceitável porque muito pouco plausível. Nisso consiste o problema do horizonte.

(ii) Problema da Planura

Tudo indica que a densidade do Universo é a crítica ou muito próximo dela. Nesse caso a curvatura do espaço-tempo do Universo seria plana. Também não há nenhuma justificação aparente para que a curvatura do Universo seja essa. Todavia, por menor que fosse, um desvio inicial da planura tenderia a crescer exponencialmente e hoje seria flagrantemente maior. Ora, não é isso que acontece.

Estes dois problemas nos remetem a uma época do Universo anterior à nucleossíntese primordial. Nas décadas de 70 e 80 os físicos teóricos estavam unificando as forças não-gravitacionais da natureza: força eletromagnética, força nuclear forte e fraca, postulando uma superforça no contexto da grande unificação (GUT: Grand Unified Theories). A temperaturas muito elevadas as três forças se tornam indistinguíveis. Quando a temperatura abaixa a um valor crítico, as forças se diferenciam com suas características próprias. Ocorre então algo semelhante à transição de fase da água que, embora tenha condições de se congelar, permanece super-resfriada no estado líquido.

Quando o Universo atingiu a temperatura crítica, durante um breve lapso de tempo as forças permaneceram unificadas. O Universo entrou num estado exótico chamado *falso vácuo* que encerrava uma enorme quantidade de energia latente. O falso vácuo é exótico porque, diferentemente de um gás normal aquecido cuja expansão representa perda de energia térmica média, sua expansão representa aumento de energia que causa a expansão cósmica. Assim, num brevíssimo período de inflação a expansão do Universo teria sido acelerada de forma espantosa. O Universo teria crescido cerca de 10^{50} vezes! Depois a expansão retomou o ritmo inicial, as forças se diferenciaram e a energia latente teria sido liberada na forma de calor.

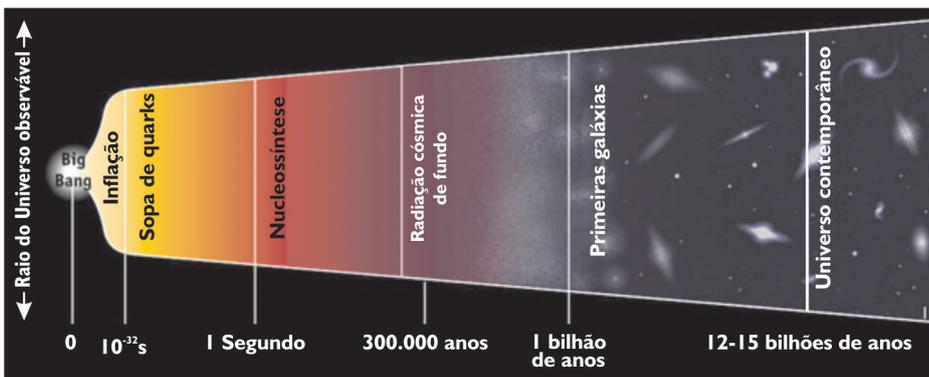


Figura 6.3. A inflação e a evolução do Universo.

A inflação dá uma solução natural para os dois problemas acima apontados. Ela teria atuado sobre uma região inicialmente menor do que o horizonte de eventos, na qual teria havido tempo suficiente para possibilitar a uniformização. Também qualquer curvatura que existisse no Universo teria sido aplainada.

Mas a teoria da inflação ainda é preliminar e especulativa. O russo Andrei Linde defende uma variante, a inflação caótica segundo o qual o nosso Universo é apenas um de um multiverso eterno e infinito que gera continuamente novos universos independentes que sofrem inflação. Neste caso a teoria da inflação passa a explicar o Big Bang e elimina o caráter de privilegio do instante de sua ocorrência.

É importante lembrar que a sintonia fina da densidade do Universo é também que define a formação de entidades complexas e da vida. Fosse a densidade maior, não haveria tempo para isso. Fosse menor, essas entidades não se formariam.

6.1.10 Inomogeneidades

Se o Universo fosse perfeitamente homogêneo, não haveria galáxias, aglomerados de galáxias, superaglomerados, paredes, vazios e filamentos. As grandes estruturas do Universo surgiram do crescimento de minúsculos desvios da homogeneidade que já devem ter existido no Universo primordial. Esses desvios têm origem em fenômenos quânticos microscópicos. Eles foram detectados na radiação cósmica de fundo com um valor de uma parte para 100 mil. A razão desse valor ainda não é óbvia.

Uma consequência da teoria da inflação é que o congelamento nunca é uniforme. Sempre tem defeitos de cristalização que podem servir de núcleos iniciais para a condensação de inomogeneidades. Os defeitos seguiriam preferencialmente os desvios microscópicos de homogeneidade pré-existent.

Condensações de matéria se contraíram depois, sob a ação da gravidade, formando estrelas e galáxias. Mas as inomogeneidades não envolvem só a matéria luminosa. A matéria escura exótica (que interage fracamente com a radiação e a matéria ordinária) pode ser responsável pela formação das estruturas de grande escala.

6.2 Origem do Sistema Solar

6.2.1 Propriedades do Sistema Solar

O Sistema Solar apresenta varias regularidades que datam de sua formação: (a) a distância dos planetas ao Sol obedece a lei de Bode: $(3 \times 2^{n-1} + 4) \times 10$ UA com $n = 1, 2, 3...$ a partir de Vênus. Para Mercúrio $n = -\infty$. Na posição dos asteróides ($n=4$) se achava que um grande planeta tinha se fragmentado, hipótese rejeitada por impossibilidade física; (b) as órbitas planetárias são coplanares (Mercúrio e Plutão são exceções); (c) as órbitas são quase circulares, com exceção de Mercúrio e Plutão;

(d) o sentido de rotação é direto (Vênus e Urano são exceções); (e) os satélites e anéis são para os planetas gigantes o que os planetas e asteróides são para o Sol; (f) há uma diferença sistemática na composição química. Os planetas internos, Mercúrio,

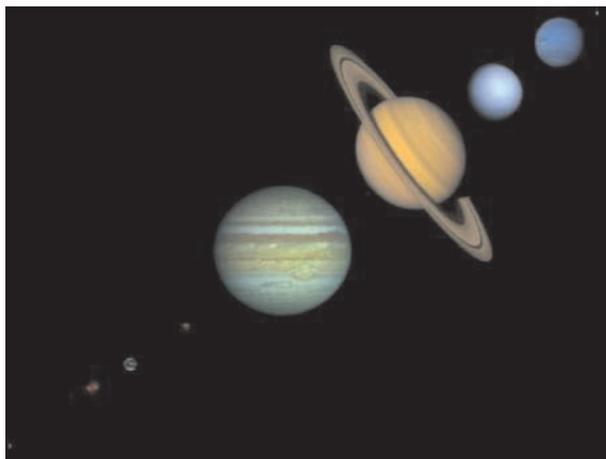


Figura 6.4. Sistema Solar: planetas na escala de tamanho

Vênus, Terra e Marte, são telúricos, isto é, têm composição semelhante à da Terra contendo materiais refratários tais como, silicatos, ferro e níquel. Os planetas externos, Júpiter, Saturno e Urano, são compostos de H, He e de compostos voláteis, assemelhando-se mais ao Sol.

Outro fato importante é que, embora o Sol tenha 99,87% da matéria do Sistema Solar, tem apenas 0,5% do momento angular (movimento de rotação) 99,0% do momento angular está nos planetas.

Todas essas propriedades do Sistema Solar devem ser explicadas através de uma teoria que envolva o menor número de suposições. Entre as várias teorias cosmogônicas que disputavam até meados do século XX, uma vem atraindo o consenso geral e sendo corroborada. Para isso foram necessários subsídios de diferentes áreas: a exploração espacial, a meteorítica, a simulação numérica de processos dinâmicos, o estudo da formação de estrelas em nuvens moleculares do meio interestelar e a descoberta de sistemas planetários extra-solares.

6.2.2 Teoria da Nebulosa Solar Primitiva (NSP)

A Cosmogonia aceita atualmente nasceu de uma proposta do filósofo Immanuel Kant (1724-1804) feita em 1755, desenvolvida depois por Pierre-Simon Laplace (1749-1827) em 1796. Ela é conhecida também como a teoria da NSP. Segundo a mesma, a formação de um sistema planetário está fisicamente associada à formação da estrela central. A formação do Sol há 4,6 bilhões de anos se deu concomitantemente à formação do Sistema Solar. Foram portanto descartadas as propostas de que os planetas teriam se formado de uma supernova que teria explodido perto do Sol, ou da matéria do Sol arrancada, por efeito de maré, na aproximação de uma outra estrela fina. Enfim, a matéria-prima dos planetas, satélites é a mesma matéria interestelar que formou o Sol, não a matéria estelar oriunda do Sol já formado, ou de uma outra estrela.

Que a matéria planetária tenha origem interestelar atestam as abundâncias relativas de elementos como o deutério, hidrogênio, lítio, silício e ferro. Elas são praticamente iguais nos planetas e no meio interestelar. No Sol as

abundâncias do deutério e lítio são menores, mas é que esses elementos são destruídos às elevadas temperaturas de seu interior.

Que a idade do Sol e dos planetas seja a mesma atestam a teoria da evolução estelar, a radioatividade fóssil de meteoritos condríticos e a determinação das eras geológicas com a ajuda da datação radioativa.

A NSP é um daqueles fragmentos em que uma nuvem que colapsa gravitacionalmente se subdivide (aula anterior). Isso aconteceu há 4,6 bilhões de anos. Como é de se esperar, a NSP tinha uma rotação inicial. À medida que ela se contraiu para formar o proto-Sol, a velocidade de rotação foi aumentado. Se a rotação fosse muito alta, poderia ocorrer a ruptura da estrela central dando origem a uma estrela dupla ou múltipla. Não foi o caso do Sol. A rotação deu origem a um disco no plano equatorial do proto-Sol (Figura 6.1). A situação é análoga à do achatamento da Terra pela rotação. Sem a rotação, a gravidade atrairia a matéria igualmente de todas as direções para o centro da NSP que é o centro do proto-Sol. Mas, com a rotação tudo se passa como se a gravidade atraísse menos no plano equatorial. Aí a matéria

permanece sem ser tragada pelo proto-Sol dando lugar a processos que formam planetas, satélites, asteróides e cometas.

Durante a sedimentação do gás e da poeira da NSP no disco, principalmente mais perto do proto-Sol onde a densidade é mais elevada, o atrito promoveu

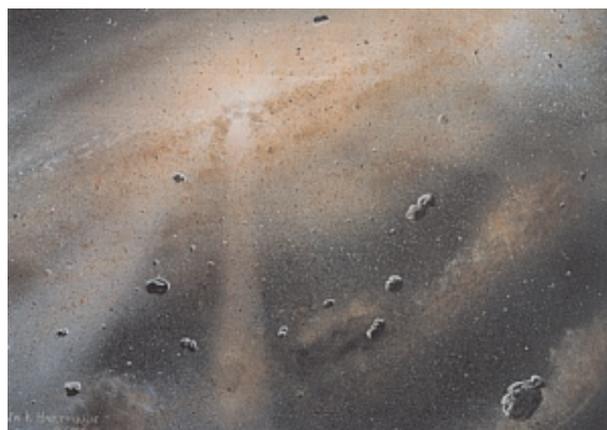


Figura 6.5. Planetesimais na região dos planetas terrestres da NSP. Concepção artística.

forte aquecimento. A uma distância menor que a de Mercúrio, os grãos foram totalmente vaporizados. Bem perto do proto-Sol a matéria se ionizou. Por intermediação do campo magnético do proto-Sol, ela foi forçada a girar com o proto-Sol como se fosse um corpo rígido. Orbitando com velocidade maior do que a prevista pela lei de Kepler, essa matéria se afastou do Sol e, ao mesmo tempo, removeu o grosso do momento angular do Sol. Além da órbita de Júpiter os grãos puderam sobreviver.

Mais tarde a temperatura no disco baixou e teve início a recondensação. Gases como o H e o He jamais puderam se condensar. Mas os compostos de C, N, O e H, tais como água, dióxido de carbono, metano e amônia puderam se condensar além da distância de Júpiter. Grãos de matéria refrataria, tais como silicatos e óxidos, puderam se condensar a distâncias menores do Sol. Assim o disco protoplanetário sofreu uma segregação na constituição dos grãos em função da distância. Essa foi a matéria-prima dos planetas, satélites, cometas e asteróides.

Com a sedimentação dos grãos, a densidade numérica deles no plano do disco aumentou. A turbulência propiciou colisões entre eles e a coalescência. Em cerca de 100 mil anos formaram-se objetos com dimensões quilométricas chamados planetesimais. Até então a coalescência tinha sido assistida por forças eletrostáticas na superfície dos grãos, colagem ou fusão. Os planetesimais que se formaram além da órbita de Júpiter tinham maior proporção de matéria volátil congelada. Os que se formaram mais perto do Sol tinha composição semelhante à dos meteoritos condríticos ordinários.

Planetesimais são capazes de exercer atração gravitacional entre si e, assim, se juntar para formar objetos maiores. Assim foi o início da formação de todos os planetas. Não podendo girar como corpo rígido, pois segundo as leis de Kepler a velocidade orbital decresce segundo o inverso da raiz quadrada da distância heliocêntrica, o disco na região dos planetas telúricos se fragmentou em anéis. Dentro de cada anel a velocidade orbital seria quase a mesma favorecendo a coalescência dos planetesimais. A coalescência foi favorecida pela presença de gás, pois este freia o movimento das partículas sólidas de modo a diminuir a velocidade de colisão. Velocidades elevadas promovem antes da fragmentação do que a agregação. Entre os próprios planetesimais há concorrência: os maiores crescem mais depressa agregando com mais eficiência os menores. Ao cabo de 1 milhão de anos restaram centenas de embriões planetários do tamanho da Lua ou de Marte, cujo movimento orbital aproximadamente circular era uma espécie de média do movimento das partículas agregadas.

Mas esses embriões também se perturbavam gravitacionalmente de modo que suas órbitas inicialmente circulares se tornaram excêntricas. Numa escala de tempo de 10 a 100 milhões de anos, a colisão entre os embriões formou os planetas telúricos. Na fase final da formação da Terra, um embrião do tamanho de Marte colidiu de esbarrão com a Terra. Dos fragmentos desse impacto se formou a Lua. Essas últimas colisões foram decisivas para determinar a inclinação do eixo de rotação, o período de rotação dos planetas etc.

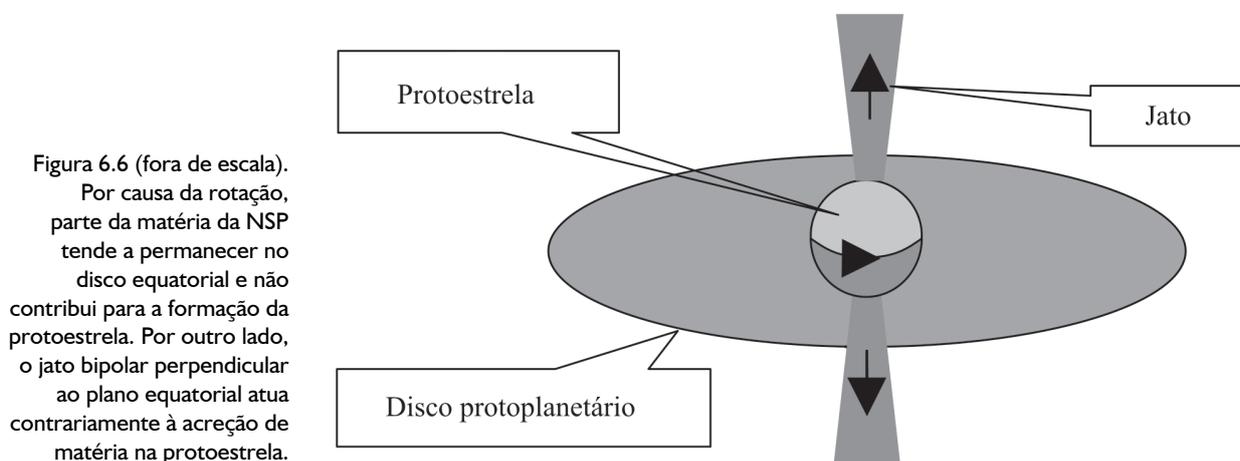
Embriões que cresceram entre as órbitas de Marte e Júpiter foram perturbados pelo último planeta e não puderam se agregar para formar um planeta. Muitos foram ejetados para fora do Sistema Solar, outros foram lançados para o interior do Sistema Solar e ajudaram a formar os planetas telúricos. Alguns com a composição dos meteoritos condríticos carbonáceos e cujos remanescentes se encontram ainda hoje na parte externa do Cinturão dos Asteróides, colidiram com os planetas telúricos e trouxeram para a Terra compostos orgânicos e de nitrogênio, e minerais hidratados.

A formação dos planetas jovianos também teria começado com a acumulação de embriões. Devido ao maior teor de compostos voláteis congelados, essa acumulação foi acelerada por causa da maior aderência natural dos gelos. Quando finalmente a massa acumulada atingiu cerca de 15 massas da Terra, teve início a

acresção gravitacional que tragou rapidamente todo o gás circunvizinho da NSP. Nesse ponto a formação dos planetas jovianos seguiu uma história diferente e pode ter se completado antes da formação dos planetas telúricos.

Júpiter e Saturno têm praticamente a mesma composição química do Sol. Urano e Netuno têm um déficit de H e He. Talvez nestes últimos a agregação dos embriões foi mais lenta e a acresção gravitacional só teve lugar quando a H e o He já tinham sido removidos. No estágio T Tauri que ocorre a dezenas de milhões de anos da formação da protoestrela, o gás e a poeira remanescente são removidos por um intenso vento estelar.

As estrelas do tipo T Tauri, assim denominadas pela estrela paradigma, estão no fim do estágio proto-estelar e estão em vias de ingressar na Seqüência Principal. Além de ejetarem intenso vento estelar, sua poeira circundante irradia radiação infravermelha e as últimas porções do gás que caem intermitentemente em sua superfície produzem radiação ultravioleta. Muitas T Tauri apresentam um par de jatos brilhantes perpendiculares ao plano equatorial (*Figura 6.1*). A acreção da matéria em sistemas com rotação é invariavelmente associada à perda concomitante de matéria através de jatos. Esses jatos são conhecidos como objetos Herbig-Haro. Numa escala incomparavelmente maior, aqueles jatos relativísticos que emanam de galáxias ativas têm origem similar tendo no lugar de um proto-Sol, um buraco negro. Considerando os jatos e o intenso vento estelar, concluímos que a formação de uma estrela com uma massa solar requer um fragmento com o dobro da massa ou até mais, pois a eficiência da acreção não é 100%.



Muitos embriões de matéria volátil congelada formados além da órbita de Saturno foram perturbados por esse e outros planetas gigantes e lançados para a Nuvem de Oort. Alguns devem ter colidido com os planetas telúricos, inclusive com a Terra trazendo água e compostos orgânicos.

Uma evidência indireta de que os discos protoplanetários existem foi obtida através do satélite IRAS (InfraRed Astronomical Satellite) na década de 80. Muitas estrelas apresentavam, além do seu próprio espectro, um espectro

adicional em infravermelho denunciando a existência de matéria sólida na forma de fragmentos e poeira a centenas de graus K orbitando a estrela central. Mais recentemente, imagens obtidas em solo ocultando artificialmente o brilho da estrela central β da constelação do Pintor, revelaram diretamente a existência de um disco protoplanetário. Isso

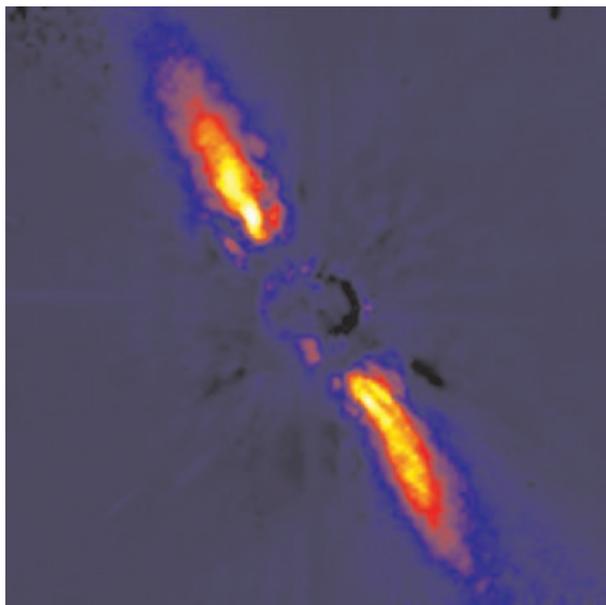


Figura 6.7. Disco protoplanetário em torno da estrela β do Pintor eclipsada artificialmente. J.-L. Beuzit et al., Obs. Grenoble/ESO

foi confirmado com imagens da silhueta dos disco contra o fundo brilhante de nuvens de gás, obtidas com o Telescópio Espacial Hubble.

Recentemente foram descobertos vários sistemas planetários extra-solares. A observação ainda não é direta, mas através dos efeitos gravitacionais produzidos por supostos planetas nas estrelas centrais. Este assunto foi tratado no artigo Matsuura (1998). Os interessados poderão encontrar informações em <http://www.obspm.fr/planets>.

6.3 Origem da vida. Vida extraterrestre

Desde o Big Bang há 13,7 bilhões de anos, o estado inicial de alta energia do Universo foi decaindo para estados de energia cada vez menor. Assim o Universo foi perdendo simetria. Um resultado é a diferenciação das forças da natureza hoje em quatro tipos: gravitacional, eletromagnética, nuclear forte e nuclear fraca. Ao mesmo tempo, estruturas cada vez mais complexas foram surgindo no Universo até culminar no aparecimento da vida e do homem na Terra. Mas a única vida de que temos conhecimento até agora é a vida na Terra. Há vida na Terra. Há vida fora da Terra? É sobre isso que especularemos a seguir.

6.3.1 Evolução das espécies

Na Terra os seres vivos são classificados em espécies. Espécie é um conjunto de indivíduos morfológicamente semelhantes que se reproduzem entre si. Há 1,4 milhões de espécies catalogadas, mas alguns biólogos estimam que 99% sofreram extinção. Com a ajuda da paleontologia foi possível ordenar as espécies ao longo das eras geológicas. Primeiro surgiram as espécies mais rudimentares, talvez por isso mesmo mais resistentes, cujos microfósseis datam 3,85 bilhões de anos. As espécies mais complexas só começaram a surgir há 600 milhões de anos.

A teoria que melhor explica a multiplicidade das espécies e a sua distribuição ao longo do tempo é a teoria da evolução proposta em 1859 por Charles Darwin (1809-82). Segundo a mesma, todas as espécies descendem de um ancestral comum. As espécies são sujeitas a mutações genéticas. A seleção natural favorece a sobrevivência e procriação das espécies que melhor se adaptam ao meio ambiente e às suas alterações.

6.3.2 Evolução molecular

Em 1953 a transmissão de características genéticas pela hereditariedade foi explicada em termos moleculares. As moléculas envolvidas são os ácidos nucleicos, nome esse alusivo ao núcleo das células onde são encontrados. Os ácidos nucleicos RNA e DNA contêm o plano de montagem de sua própria cópia. Consistem em longas cadeias de nucleotídeos. Durante a duplicação do DNA, fatores externos como raios X ou cósmicos, ou alguma substância química, podem induzir erros. Eles causam mutações genéticas de modo que é no DNA que a evolução darwiniana atua.

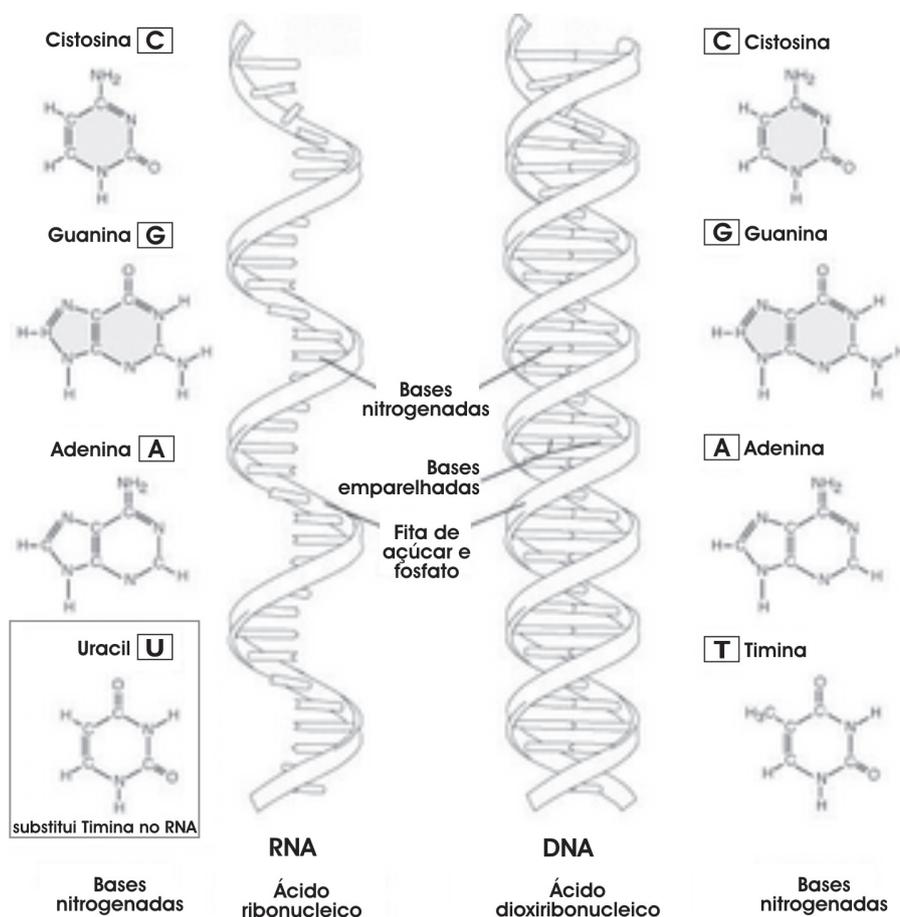


Figura 6.8. RNA e DNA

Se os ácidos nucleicos guardam o plano de montagem da cópia, a produção da cópia é realizada pelas proteínas. Cada proteína é uma cadeia molecular com cerca de 100 aminoácidos. Há uns 70 tipos de aminoácidos, mas

somente 20 participam dos processos vitais. Portanto, sob o ponto de vista molecular, os processos vitais consistem na interação entre os aminoácidos e as proteínas. É o RNA que controla a síntese das proteínas nas células. As semelhanças e diferenças entre as espécies estão radicadas nas semelhanças e diferenças entre as proteínas que, por sua vez, estão definidas nos ácidos nucleicos.

Cada seqüência de 3 nucleotídeos do RNA especifica um e somente um aminoácido. Esta correspondência descoberta nos anos 50 é denominada código genético e se aplica a todos os seres vivos, sem exceção.

		Segunda base				
		U	C	A	G	
Primeira base	U	UUU } Phe UUC } UUA } Leu UUG }	UCU } UCC } Ser UCA } UCG }	UAU } Tyr UAC } UAA Stop UAG Stop	UGU } Cys UGC } UGA Stop UGG Trp	U C A G
	C	CUU } CUC } Leu CUA } CUG }	CCU } CCC } Pro CCA } CCG }	CAU } His CAC } CAA } Gln CAG }	CGU } CGC } Arg CGA } CGG }	U C A G
	A	AUU } AUC } Ile AUA } AUG Met	ACU } ACC } Thr ACA } ACG }	AAU } Asn AAC } AAA } Lys AAG }	AGU } Ser AGC } AGA } Arg AGG }	U C A G
	G	GUU } GUC } Val GUA } GUG }	GCU } GCC } Ala GCA } GCG }	GAU } Asp GAC } GAA } Glu GAG }	GGU } GGC } Gly GGA } GGG }	U C A G

Figura 6.9. Código genético

A energia liberada na respiração ou fermentação nunca é utilizada diretamente na atividade celular, mas temporariamente armazenada na molécula ATP (trifosfato de adenosina). Quando essa molécula sofre a hidrólise, ela se transforma no ADP (difosfato de adenosina). Um fosfato se desliga e energia é liberada. Essa intermediação do ATP também é universal nos seres vivos.

Aminoácidos e açúcares são moléculas que têm quiralidade. A palavra quiralidade, assim como quiromante, tem a raiz grega que significa mão. Nossa mão direita é morfologicamente diferente da esquerda. A imagem especular de uma mão não coincide com essa mão. As moléculas cuja estrutura não coincide com a sua imagem especular são chamadas quirais. Sintetizados em laboratório, os aminoácidos e os açúcares têm as duas formas quirais em quantidades estatisticamente iguais. Louis Pasteur (1822-95) descobriu em 1848 que nos seres vivos eles existem em apenas uma dentre as duas formas possíveis. Isso foi considerado por ele um critério demarcador entre a síntese biológica e a síntese em laboratório.

A universalidade desses fenômenos biomoleculares revela um único esquema molecular para toda a vida na Terra. Uma evolução molecular envolvendo apenas cerca de 30 compostos químicos básicos deve ter precedido a evolução biológica. Não há geração espontânea de seres vivos a partir da matéria inorgânica. Mas tudo indica que a vida primordial surgiu da não-vida numa etapa crucial da evolução molecular.

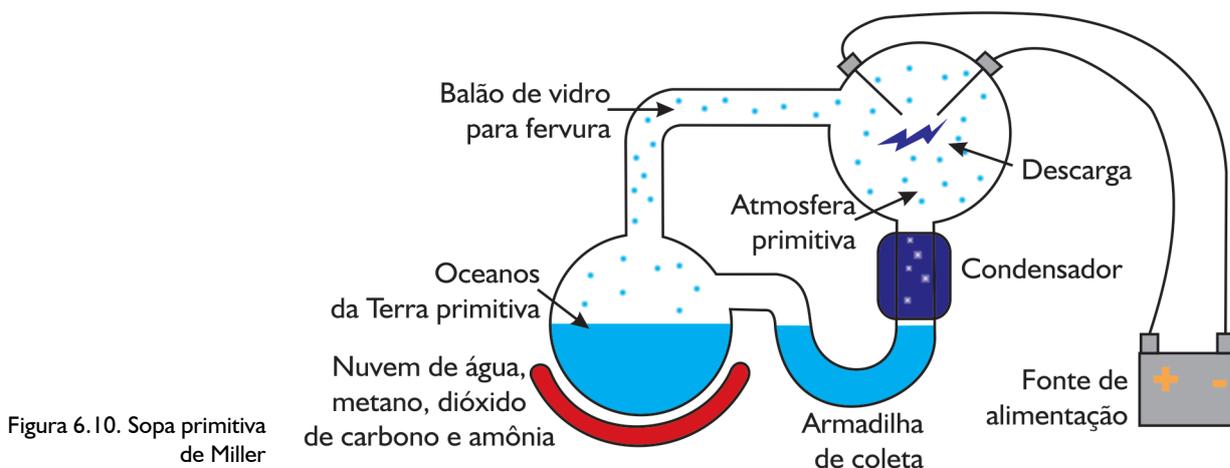
Continua um abismo ainda intransponível entre uma molécula complexa e a mais simples célula, sede das primeiras manifestações da vida. Mas é possível que o primeiro ser vivo nem tivesse que ser tão complexo quanto

uma célula. Desde a década de 60 já se acreditava que o RNA precedeu o DNA e que a capacidade do primeiro de se autoduplicar teria sido usurpada de superfícies de argilas às quais esteve aderido.

6.3.3 Sopa primitiva de Miller

Em 1953 o então estudante da Universidade de Chigaco, Stanley L. Miller (1930-) realizou o famoso experimento da sopa primitiva. Esta era uma mistura de água, dióxido de carbono, metano e amônia, cujos vapores eram submetidos a descargas elétricas. Após alguns dias foram encontrados diversos aminoácidos presentes nas proteínas dos seres vivos. Outros experimentos utilizando outras fontes de energia produziram partes de nucleotídeos. Mas nunca se conseguiu formar sequer um segmento do DNA. Ficou todavia demonstrado que moléculas complexas requeridas pela vida podem ser sintetizadas a partir da matéria ambiental, sem envolvimento de um ser vivo.

Os ingredientes da sopa primitiva pressupõem uma atmosfera primitiva na Terra bastante redutora. Mas para muitos geoquímicos a atmosfera não era assim. Seria antes composta de água, dióxido e monóxido de carbono e hidrogênio molecular. Metano e amônia seriam rapidamente destruídos pela radiação solar, cuja componente ultravioleta ainda não era bloqueada pelo ozônio que, assim como o oxigênio, praticamente inexistiam.



6.3.4 Origem extraterrestre das moléculas prebióticas

Há vários conceitos astronômicos mais recentes que apontam para a possibilidade de que aqueles 30 compostos básicos para a evolução molecular já podem ter sido sintetizados fora da Terra e trazidos para cá.

De fato, desde a descoberta da amônia em 1968 pela radioastronomia em nuvens moleculares, mais de uma centena de moléculas complexas foram descobertas, inclusive açúcares e aminoácidos. Experimentos em laboratório também confirmaram que irradiando-se água, monóxido e dióxido de carbono, metano e amônia congelados em superfícies de grãos, formam-se moléculas orgânicas complexas como as encontradas nas nuvens moleculares.

Durante a formação do Sistema Solar agregaram-se planetesimais que, além da órbita de Júpiter, seriam compostos principalmente de matéria volátil congelada. Teriam a composição dos cometas que se encontram hoje no Cinturão de Kuiper ou na Nuvem de Oort. Vimos antes que embriões ou planetesimais com composição similar à dos cometas colidiram com a Terra nos estágios finais de sua formação. Embriões formados entre Marte e Júpiter com a composição dos meteoritos condríticos carbonáceos também podem ter colidido com a Terra. Assim a Terra pode ter recebido água, compostos orgânicos e do nitrogênio para a formação da atmosfera e dos oceanos. Uma dúvida que nos resta se refere às alterações da matéria interestelar resultantes do aquecimento, vaporização e recondensação na NSP.

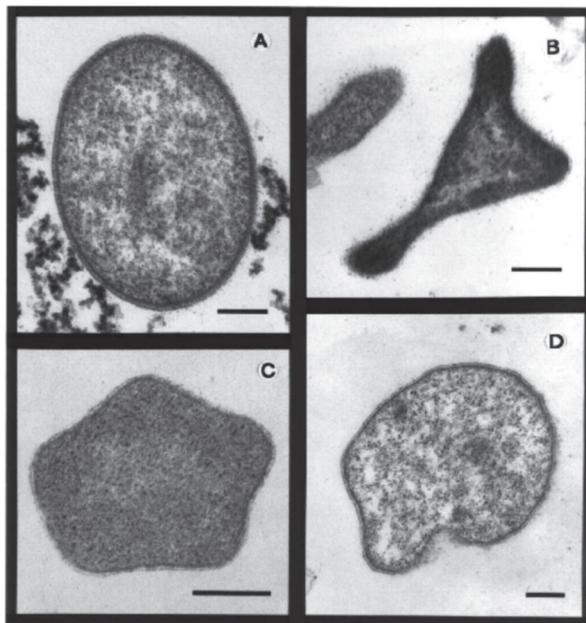
A atmosfera primordial da Terra liberada pelo interior quente pelo processo conhecido como degasamento, era pobre de água e substâncias voláteis tanto quanto os planetesimais que formaram a Terra. O deutério que é o isótopo pesado do hidrogênio, foi criado no Big Bang e todos os processos cósmicos tendem a destruí-lo. Portanto a sua abundância só pode decrescer. No entanto, nas nuvens moleculares a abundância do deutério relativamente ao hidrogênio medida nas moléculas de água, é maior do que no meio interestelar onde as medidas são feitas no hidrogênio ionizado e molecular. Por outro lado, na água dos nossos oceanos, a abundância do deutério é a das nuvens moleculares. No Sol e em Júpiter, compostos majoritariamente pelo hidrogênio, a abundância de deutério é a do meio interestelar.

A atual escassez do gás raro neônio, de peso molecular próximo ao do nitrogênio e oxigênio, indica que a atmosfera primordial foi praticamente perdida, e que a atmosfera atual é secundária. Pois a perda e ganho deveria ser praticamente a mesma para esses gases. O excesso de nitrogênio e oxigênio se explica pelo bombardeamento de cometas. Estes não teriam trazido neônio, pois esse gás não se condensa em gelos.

6.3.5 Exobiologia

Embora a hipótese da origem extraterrestre das moléculas prebióticas ainda não tenha sido confirmada, com base em sua plausibilidade se especula se a vida não teria também surgido e evoluído fora da Terra. Afinal, a Astronomia ensina que a Terra não é um local privilegiado. Os mesmos elementos químicos que existem aqui, também existem em todas as partes do Universo. As leis físicas que governam os fenômenos aqui são as mesmas no Universo todo. Portanto o surgimento e a evolução da vida não seriam o resultado de processos casuais, mas de processos causais que podem ter ocorrido em outros pontos do Universo. Esta é a base racional da nova disciplina chamada Exobiologia ou Bioastronomia. Ela estuda a origem, evolução e distribuição da vida do Universo, e a influência dos fenômenos e ambientes físico-químicos de potenciais nichos de vida, nos processos vitais.

Figura 6.11. Extremófilos termofílicos sobrevivem na água a elevadas temperaturas perto de saídas vulcânicas no fundo de oceanos.



Mas devemos distinguir dois tipos de vida: uma evoluída, inteligente, capaz de desenvolver uma tecnologia de rádio-comunicação interestelar; outra rudimentar, por exemplo, de organismos unicelulares procarióticos. Não resta dúvida de que a probabilidade de vida extraterrestre deste último tipo é muito maior, pois a vida inteligente resultou de uma evolução mais longa

que implicou transições cruciais, cujo caráter fortuito ou acidental temos dificuldade de avaliar. Por isso mesmo, se as pesquisas objetivando a captação de sinais inteligentes extraterrestres é mais simples na sua execução, ela também padece de probabilidades menores de sucesso. A descoberta de micróbios a vários quilômetros de profundidade em rochas ígneas ou sedimentares, de organismos que suportam até 169 C em dorsais oceânicas, aumenta o otimismo em relação à possibilidade de vida rudimentar, a despeito da hostilidade do meio.

As pessoas interessadas neste assunto poderão encontrar mais informações na rede eletrônica em:

<http://www.angelfire.com/mi/SETI>;

<http://www.setileague.org/homepg.htm>;

<http://www.seti-inst.edu/Welcome.html>;

<http://www.seti.planetary.org>;

Referências:

- Costa, Roberto D. Dias da: "Cosmologia", Cap. 13, *Astronomia, Uma Visão Geral do Universo*, 227, Edusp, 2000.
- Jakosky, Bruce: "The Search for Life on Other Planets", Cambridge University Press, 1998
- Matsuura, Oscar T.: "Exploração do Universo e Busca de Vida Extraterrestre", Cap. 6, *Marte, Novas Descobertas*, 163, USP e Diagrama&Texto, 1997
- Matsuura, Oscar T.: "A busca por novos sistemas planetários", *Ciência Hoje*, 24, 144, 16, 1998
- Matsuura, Oscar T.: "Cosmologia", FICHA DE ASTRONOMIA No. 25, 1999 www.observatorio.diadema.com.br e www.revistaastronomy.com.br
- Matsuura, Oscar T.: "Vida no Universo", FICHA DE ASTRONOMIA No. 26, 2000 www.observatorio.diadema.com.br e www.revistaastronomy.com.br
- Matsuura, Oscar T. e Picazzio, E.: "O Sistema Solar", Cap. 6, *Astronomia, Uma Visão Geral do Universo*, 103, Edusp, 2000
- Rees, Martin: "Before the Beginning", Perseus Books, Reading, Massachusetts, 1998
- Reeves, Hubert: "Últimas notícias do cosmos. De regresso ao primeiro segundo", *Ciência Aberta*, Gradiva, Lisboa, 1995
- Reeves, Hubert: "O primeiro segundo. Últimas notícias do cosmos, Vol.2", *Ciência Aberta*, Gradiva, Lisboa, 1995
- Ward, Peter D. and Brownlee, Donald: "Rare Earth, Why Complex Life Is Uncommon in the Universe", Copernicus, New York, 2000



GLOSSÁRIO

A

AFÉLIO

O ponto mais distante que um corpo atinge em sua órbita em torno do Sol. (Ver também Periélio.)

ANÃ BRANCA

Estrela colapsada, pequena e muito densa, que está gradualmente se resfriando.

ANÃ VERMELHA

Estrela pequena com temperatura superficial baixa e a mais fraca luminosidade de todas as estrelas da seqüência principal. (Ver Estrela da seqüência principal.)

ANO

O intervalo de tempo que leva um planeta para completar uma órbita ao redor do Sol. O ano sideral é o intervalo de tempo gasto em descrever uma órbita medida usando as estrelas fixas como ponto de referência posicional. Um ano trópico é uma órbita que se mede usando, como ponto de referência, uma posição específica do Sol sobre a esfera celeste. (Ver também Esfera celeste, Órbita.)

ANO-LUZ

Unidade de distância igual à percorrida pela luz (ou outra radiação eletromagnética) no vácuo em um ano. Um ano-luz equívale a 9,6 trilhões de km, ou 63,240 unidades astronômicas, ou 0,3066 parsecs. Um segundo-luz equívale a 299.792 km. (Ver também Unidade astronômica, Parsec.)

APOGEU

O ponto mais afastado da Terra na órbita da Lua ou de um satélite artificial ao redor da Terra.

ASTERÓIDE (PEQUENO PLANETA)

Um pequeno corpo rochoso orbitando o Sol, usualmente na faixa de asteroídes entre Marte e Júpiter.

ATMOSFERA

A camada gasosa mais externa ao redor de um planeta, satélite ou estrela. Não possui fronteira exterior definida, tornando-se cada vez mais tênue até atingir o espaço.

B

BURACO NEGRO

Uma região do espaço ao redor de uma estrela colapsada onde a gravidade é tão intensa que nada, nem mesmo a luz, pode escapar. (Ver também Horizonte de eventos.)

C

COMETA

Pequeno corpo de gelo orbitando o Sol em uma longa e excêntrica órbita.

CONSTELAÇÃO

Desenho formado por um grupo de estrelas no céu. As estrelas não são necessariamente associadas fisicamente, uma vez que podem estar a diferentes distâncias da Terra.

D

DIA

Intervalo de tempo para um planeta completar uma rotação ao redor do seu eixo. Um dia sideral é o tempo decorrido para uma estrela retornar à mesma posição no céu. Um dia solar é o intervalo entre o nascer do sol e o seguinte.

DIAGRAMA HERTZSPRUNG-RUSSELL

Gráfico que mostra as luminosidades e os tipos espectrais (cor) das estrelas. Outros fatores, tais como as temperaturas estelares, também podem ser incluídos.

DISCO DE ACRESÇÃO

Um disco de matéria espiralando ao redor de um objeto, como um buraco negro, devido à gravidade.

E

ECLIPSE

Obscurecimento total ou parcial de um corpo celeste por outro. No eclipse solar, a Lua passa entre o Sol e a Terra escondendo parcial ou totalmente o Sol para uma pequena área da Terra. No eclipse lunar, a terra está entre a Lua e o Sol, e a Lua passa através da sombra da Terra.

ECLÍPTICA

Plano no qual a terra orbita ao redor do Sol.

EIXO DE ROTAÇÃO

Linha imaginária ao redor da qual o corpo gira. A inclinação axial é o ângulo entre o eixo de rotação e a perpendicular ao plano orbital. (Ver também Órbita.)

ESFERA CELESTE

Uma esfera imaginária sobre a qual os objetos celestes parecem colados, quando vistos da Terra. O equador celeste é marcado pela projeção do equador terrestre sobre a esfera celeste. Os pólos celestes são os pontos sobre a esfera celeste acima dos pólos norte e sul da Terra.

ESPECTRO

Uma faixa ou série de linhas de radiação eletromagnética produzida por dispersão de radiação em seus comprimentos de onda, por exemplo, as cores do arco-íris são causadas pela dispersão da luz branca que atravessa as gotículas de água existentes na atmosfera.

ESTRELA

Bola luminosa de gás que brilha devido à energia gerada no seu interior por reações nucleares.

ESTRELA ANÃ

Uma estrela da seqüência principal. (Ver Estrela da seqüência principal.)

ESTRELA BINÁRIA

Um par de estrelas em que uma orbita a outra. Cerca de metade de todas as estrelas conhecidas pertencem a um grupo de duas ou mais.

ESTRELA DA SEQÜÊNCIA PRINCIPAL

Estrela que cai dentro de uma faixa diagonal bem definida no diagrama Hertzsprung-Russell. Estrelas da seqüência principal produzem energia pela fusão de hidrogênio para formar hélio em seu núcleo. (Ver também Diagrama Hertzsprung-Russell.)

ESTRELA DE NÊUTRONS

Caroço estelar que se colapsou até se tornar quase inteiramente de nêutrons. Tem uma massa entre 1,5 e 3 massas solares, mas um diâmetro muito pequeno (geralmente cerca de 10 km). As estrelas de nêutrons são detectadas como pulsares. (Ver Pulsar.)

ESTRELAS GIGANTES E SUPERGIGANTES

Estrelas grandes com uma alta luminosidade. As gigantes são 10 a 1.000 vezes mais brilhantes que o Sol, com um diâmetro de 10 a 100 vezes maior. As supergigantes são as maiores e mais luminosas estrelas, milhares de vezes mais brilhantes e com diâmetros superiores a 1.000 vezes o Sol.

ESTRELA VARIÁVEL

Estrela cujo brilho varia.

F

FASES

Mudança aparente na forma da lua e de alguns planetas, que depende da posição.

G

GALÁXIA

Um conjunto de estrelas, gás e poeira ligados pela gravidade. As galáxias são classificadas como espirais, elípticas e irregulares, de acordo com sua forma. Elas usualmente ocorrem em grupos conhecidos como aglomerados.

GRAVITAÇÃO

Força de atração entre os corpos, que depende de sua massa e da distância entre elas. Ela mantém os corpos de pequena massa em órbita ao redor dos de maior massa, assim como os planetas ao redor do Sol.

GRUPO LOCAL DE GALÁXIAS

Aglomerado de pelo menos 28 galáxias ao qual nossa galáxia (a Via Láctea) pertence.

H

HORIZONTE DE EVENTOS

A fronteira de um buraco negro. A luz emitida do interior do horizonte de eventos não pode escapar; assim, é impossível observar os eventos que ocorrem em seu interior. (Ver também Buraco Negro.)

L

LUA

Satélite natural de um planeta.

LUMINOSIDADE

O brilho de um corpo luminoso (por exemplo, estrela), definido pela energia total que irradia em um determinado momento.

M

MAGNITUDE

Medida do brilho de uma estrela ou de outro corpo celeste. magnitude aparente é o brilho de um objeto como é visto da Terra. Magnitude absoluta é a magnitude que um objeto teria se observado de uma distância padrão de 10 parsecs. Ver também Luminosidade.)

METEORÓIDE

Partícula de poeira ou rocha percorrendo o espaço a alta velocidade (um meteoro (também chamado estrela cadente) é o rastro de luz visto quando um meteoróide se queima na atmosfera da Terra. Um meteorito é um meteoróide maior que entra na atmosfera e alcança a superfície da Terra. uma chuva de meteoros ocorre quando a Terra passa por uma nuvem de fragmentos no espaço.

MOVIMENTO RETRÓGRADO

Movimento contrário ao deslocamento dos ponteiros de um relógio (visto de cima) de um corpo ao redor do Sol, ou de um satélite ao redor de seu planeta, ou de um planeta ao redor de seu eixo de rotação.

N

NEBULOSA

Nuvem de gás e poeira interestelares. As nebulosas são detectáveis como nebulosas de emissão, que brilham; as nebulosas de detecção, que dispersam a luz estelar, e as nebulosas escuras que obscurecem a luz das estrelas e nebulosas mais distantes.

NEUTRINO

Partícula elementar, sem carga elétrica e quase nenhuma massa, que se desloca com a velocidade da luz. Os neutrinos muito raramente interagem com outra matéria.

O

ÓRBITA

Trajectoria curva de um corpo no espaço, influenciado pela atração gravitacional de um corpo de maior massa. O plano orbital é o plano no qual a órbita é descrita. A inclinação orbital é o ângulo entre um plano orbital e um ângulo de referência, por exemplo, a eclíptica. O período orbital é o intervalo de tempo que um corpo leva para completar uma órbita.

P

PARSEC

Unidade de distância igual a 3,26 anos-luz ou 206265 unidades astronômicas. (Ver também Unidade astronômica, Ano-luz.)

PERIÉLIO

Ponto mais próximo ao Sol na órbita de um planeta ou outro corpo ao redor do Sol. (Ver também Afélio.)

PERIGEU

Ponto mais próximo à Terra na órbita da Lua ou de um satélite artificial ao redor da Terra. (Ver também Apogeu.)

PLANETA

Corpo relativamente grande em órbita ao redor do Sol ou de outra estrela. Os planetas brilham somente pela luz refletida do Sol.

PROTO-ESTRELA

Estágio mais inicial na vida de uma estrela, quando ela começa a condensar-se em uma nebulosa, porém antes de tornar-se uma estrela de sequência principal.

PULSAR

Fonte regularmente pulsante de ondas de rádio (algumas vezes de luz e outras radiações). Acredita-se que os pulsares sejam estrelas de nêutrons em rotação.

Q

QUASAR

Um objeto compacto, extremamente luminoso, que aparece como uma estrela quando visto da Terra. Conhece-se pouco acerca dos quasares, mas eles são provavelmente núcleos de galáxias ativas, com um buraco negro de massa gigantesca como fonte de energia.

R

RADIAÇÃO

Ondas ou partículas emitidas por uma fonte. A radiação eletromagnética é energia deslocando-se em forma de onda, incluindo raios gama, raios x, radiação ultravioleta, luz visível, radiação infravermelha, microondas e ondas de rádio. A radiação de partículas inclui partículas elementares, tais como os prótons e elétrons, no vento solar.

S

SATÉLITE

Corpo em órbita ao redor de um corpo principal maior. Os satélites naturais dos planetas são chamados luas. Os satélites artificiais têm sido colocados em órbita ao redor da Terra, da Lua, e de alguns outros planetas. (Ver também Lua.)

SINGULARIDADE

Ponto ou região do espaço-tempo onde as leis da física não valem. A teoria prevê uma singularidade com densidade e pressão infinitas no centro de um buraco negro.

SISTEMA DE ANEL

Disco fino de poeira, rocha ou partículas de gelo orbitando no plano equatorial de alguns grandes planetas.

SISTEMA SOLAR

O Sol e todos os corpos que orbitam ao seu redor devido à gravidade.

SOL

Estrela central do Sistema Solar. É uma estrela de seqüência principal de tamanho e luminosidades médios.

SUPERNOVA

Explosão catastrófica de uma estrela de grande massa no fim de sua vida, durante a qual ele pode se tornar tão brilhante como toda uma galáxia. O resto de uma supernova é a nuvem em expansão deixada por ela.

T

TEORIA DO BIGUE-BANGUE

Teoria segundo a qual o universo começou quando o espaço, o tempo e a matéria vieram à existência em uma gigantesca explosão (a Grande Explosão) entre 10 e 20 bilhões de anos atrás.

U

UNIDADE ASTRONÔMICA (UA)

Unidade de distância igual à distância média entre a Terra e o Sol: 149.597.870 km.

V

VIA LÁCTEA

A faixa tênue de luz que atravessa o céu noturno proveniente de uma multiplicidade de estrelas em nossa galáxia.

AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA



INSTITUIÇÕES PARCEIRAS

Apoio:

Realização:



Ministério da Educação

Ministério da Ciência e Tecnologia



AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA

Programa AEB Escola

SPO - Área 5 - Quadra 3 - Bloco Q - Salas 03 a 09 - CEP: 70610-200 Brasília DF

Fone: (61) 3411-5678 | 3411-5517

<http://www.aeb.gov.br> | e-mail: aebescola@aeb.gov.br