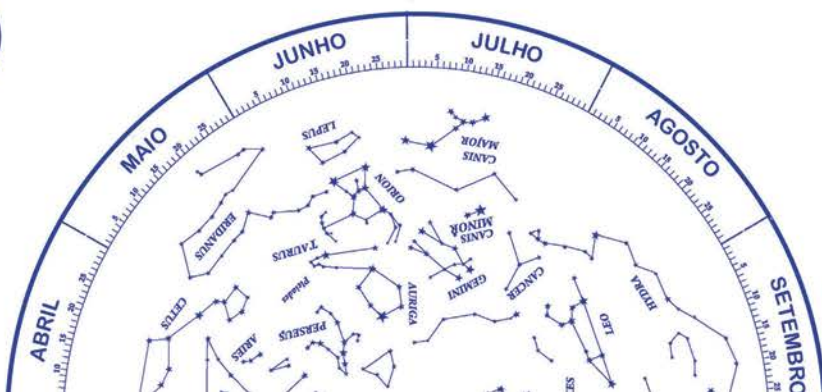
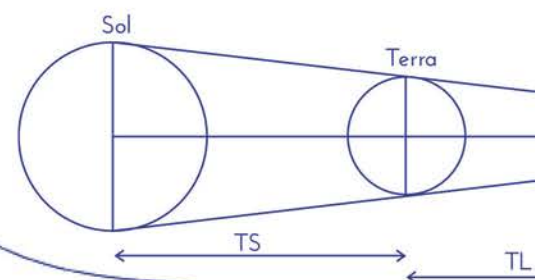
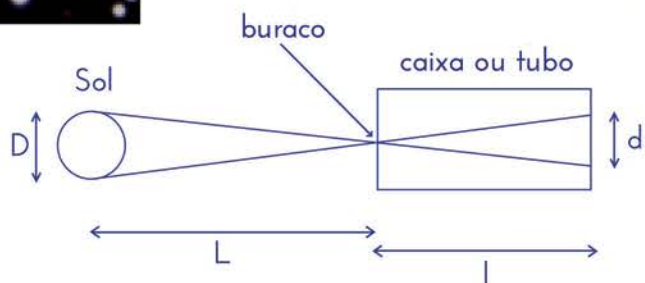
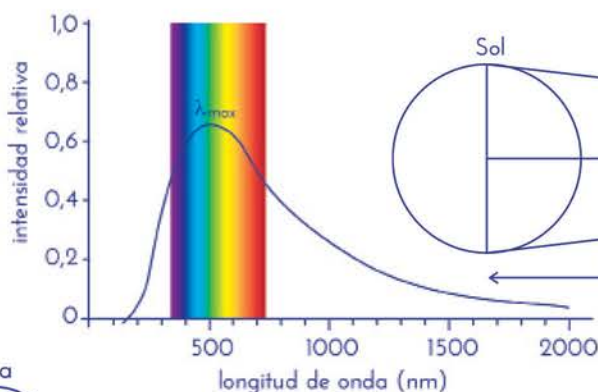
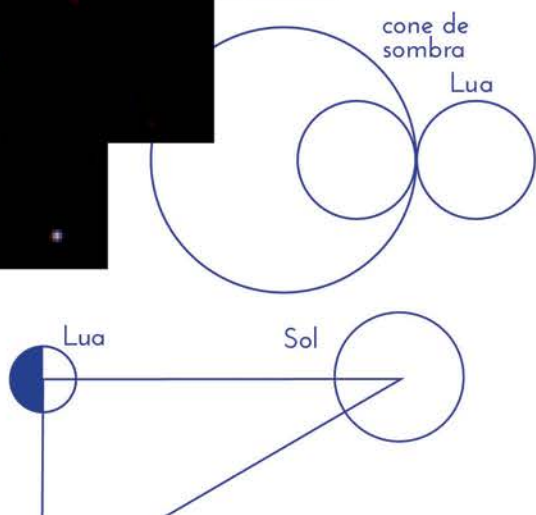


# 14 passos para o Universo

Curso de Astronomia para professores e pós-graduados em ciências

União Astronômica Internacional UAI  
Rede NASE para a educação astronômica na escola

Editoras: Rosa M. Ros e Beatriz García





# 14 passos para o Universo

Curso de Astronomia para  
professores e pós-graduados  
em ciências

União Astronómica Internacional UAI

Editoras: Rosa M. Ros e Beatriz García

Rede NASE para a educação astronómica na escola



[www.naseprogram.org](http://www.naseprogram.org)



Primeira edição: Novembro de 2018

© NASE

© Textos de: Francis Berthomieu, Alexandre da Costa, Susana Deustua, Julieta Fierro, Beatriz García, Mary Kay Hemenway, Ricardo Moreno, Jay M. Pasachoff, John Percy, Rosa M. Ros, Magda Stavinschi, 2012.

Editoras: Rosa M. Ros e Beatriz García

Design gráfico: Maria Vidal

Impreso na EU

ISBN:

Impressão:

# Índice

Introducción	5
Evolução das estrelas	6
Cosmologia	16
História da astronomia	22
Sistema Solar	32
Horizonte Local e Rélogios de Sol	48
Simuladores estelar, solar e lunar	60
Sistema Terra-Lua-Sol: Fases e eclipses	74
Mala do jovem astrónomo	82
Espectro solar e manchas solares	94
Vida das estrelas	104
Astronomia fora do visível	114
Expansão do Universo	124
Planetas e exoplanetas	136
Preparação de observações	152
Arqueoastronomia e o seu potencial educacional	164



# Introdução

Para melhorar a presença da astronomia nas escolas é essencial formar os professores. A NASE tem como objetivo principal a realização de cursos de formação de qualidade em todos os países interessados no desenvolvimento da astronomia nos seus diferentes níveis de ensino, incorporar questões relacionadas com esta disciplina em diferentes áreas curriculares e introduzir os jovens na ciência através do estudo do universo. Estes cursos estão divididos em 14 secções (incluindo conferências e oficinas práticas) que constituem uma formação inicial de professores em astronomia. Esses 14 passos iniciais na compreensão do Universo, compilados nesta publicação, representam o trabalho de vários astrónomos profissionais e professores que desenvolveram cursos ao longo de vários anos, tal como podem ser encontrados na página na Internet da NASE.

Deve-se referir que todas as atividades propostas aumentam a participação ativa, a observação e, se aplicável, a construção de modelos para melhor entendimento dos conteúdos científicos. Todas as escolas têm um pátio escolar pelo que se propõe a utilização deste espaço como um "laboratório de astronomia", com o propósito de fazer observações astronómicas e fazer com que os alunos se tornem nos principais intervenientes da sua própria aprendizagem.

Agradecemos a todos os autores pela colaboração na preparação de materiais. Também queremos destacar a grande ajuda recebida para a tradução e revisão das duas versões deste livro (Espanhol/Português), assim como a preparação e revisão de figuras e gráficos, a Miguel Neta e a Alexandre J. da Costa e Ederlinda Viñuales pela revisão final dos textos.

Para saber mais sobre os cursos desenvolvidos até agora, atividades e novos cursos que surgiram depois do curso inicial, convidamos o leitor a consultar a página na Internet da NASE. O programa não se limita

a ministrar cursos de formação pelo que, após as várias ações, consegue formar grupos de trabalho com os professores de determinado local, que é quem mantém a chama acesa, criando mais materiais e novas atividades, disponibilizando-as integralmente na Internet.

Na Internet também é possível encontrar diversos materiais complementares que oferecem um universo de possibilidades ao professor que acompanhou os cursos da NASE, para poder ampliar os seus conhecimentos e atividades na sua escola.

Finalizaremos esta apresentação com uma citação de Confúcio (551 - 479 a.C.) que se ajusta muito bem com o projeto e com os seus objetivos:

Eu ouvi e esqueci,  
Eu vi e lembrei-me,  
Eu fiz e entendi

O principal objetivo da NASE é levar a astronomia a todos, para que todos possam entender e desfrutar do processo de assimilação de novos conhecimentos

# Evolução das estrelas

John Percy

União Astronómica Internacional, Universidade de Toronto (Canadá)

---

## Resumo

Este artigo contém informações sobre as estrelas e a evolução estelar que podem ser úteis aos professores de Física do ensino secundário. Também aborda temas específicos dos currículos de disciplinas de ciências gerais e sugere algumas atividades relevantes para alunos.

## Objetivos

- Compreender a evolução estelar e os processos que a determinam.
  - Compreender o diagrama de Hertzsprung-Rusell.
  - Compreender o conceito de magnitude absoluta e aparente.
- 

## Introdução

A evolução estelar discute as mudanças que ocorrem nas estrelas, desde o seu nascimento, passando pela sua longa vida, até à sua morte. A gravidade obriga as estrelas a irradiar energia. Para equilibrar essa perda de energia, as estrelas produzem energia através da fusão nuclear de elementos mais leves em elementos mais pesados. Este processo muda lentamente sua composição química e, portanto, as outras propriedades. Com o tempo, as estrelas consomem todo o seu combustível nuclear e morrem. Compreender a natureza e a evolução das estrelas permite-nos entender e apreciar a natureza e a evolução do nosso Sol, a estrela que torna possível a vida na Terra. Ajuda-nos a entender a origem do nosso Sistema Solar, dos átomos e moléculas que compõem tudo o que existe, incluindo a vida. Permite-nos responder a questões tão fundamentais como “é possível que outras estrelas produzam suficiente energia, vivam o suficiente e permaneçam estáveis o tempo suficiente para que a vida se possa desenvolver e evoluir nos planetas que as orbitam?” Por estas e outras razões a evolução estelar é um tema interessante para os estudantes.

## As propriedades do Sol e das estrelas

O primeiro passo para entender a origem e a evolução do Sol e das estrelas é entender as suas propriedades. Os estudantes devem entender como são conhecidas estas propriedades. O Sol é a estrela mais próxima e será tema abordado noutras palestras deste curso. Nes-

te artigo, estudamos o Sol do ponto de vista da evolução estelar. Os estudantes necessitam entender as propriedades, a estrutura e a fonte de energia do Sol, porque os mesmos princípios permitem aos astrónomos determinar a estrutura e a evolução de todas as estrelas.

## O Sol

As propriedades básicas do Sol são relativamente fáceis de determinar em comparação com as propriedades de outras estrelas. A sua distância média é de  $1,495978715 \times 10^{11}$  m; distância denominada como uma *Unidade Astronómica*. A partir desta unidade, o seu raio angular observado (959,63 segundos de arco) pode ser transformado, através da trigonometria, num raio linear:  $6,96265 \times 10^8$  metros ou 696 265 quilómetros. O fluxo observado ( $1\,370 \text{ W/m}^2$ ) à distância da Terra pode ser convertido em potência total:  $3,85 \times 10^{26} \text{ W}$ .

A sua massa pode ser determinada a partir da força de atração gravitacional sobre os planetas, utilizando as leis de Newton do movimento e da gravitação:  $1,9891 \times 10^{30}$  kg. A temperatura de sua superfície radiante —a camada da qual provém sua luz— é de 5 780 K. O seu período de rotação é de aproximadamente 25 dias, mas varia com a latitude no Sol, e é quase esférico. É constituído principalmente por hidrogénio e hélio. Na atividade 2 os alunos podem observar o Sol, a estrela mais próxima, para ver o seu aspeto.

## As estrelas

A propriedade observável mais evidente de uma estrela é seu brilho aparente. O brilho aparente é calculado como uma magnitude, que é uma medida logarítmica do fluxo de energia que nós recebemos.

A escala de magnitudes foi desenvolvida pelo astrónomo grego Hiparco (190-120 a.C.) que classificou as estrelas em magnitude 1, 2, 3, 4 e 5. Esta é a razão pela qual as estrelas menos brilhantes possuem magnitudes mais positivas. Mais tarde, constatou-se que, como os nossos sentidos reagem de maneira logarítmica aos estímulos, havia uma relação fixa de brilho (2,512), correspondente a uma diferença de 1,0 na magnitude. A estrela mais brilhante no céu noturno apresenta uma magnitude de -1,44. A estrela mais tênue, visível com

um grande telescópio, tem a magnitude de aproximadamente 30.

O brilho aparente,  $B$ , de uma estrela depende de sua potência,  $P$ , e da distância,  $D$ . De acordo com a lei do inverso do quadrado da distância: o brilho é diretamente proporcional à potência e inversamente proporcional ao quadrado da distância:  $B \cong P/D^2$ . Nas estrelas mais próximas, a distância pode ser medida por paralaxe. Na atividade 1, os estudantes podem fazer uma demonstração da paralaxe para demonstrar que a mesma é inversamente proporcional à distância do objeto observado. A potência das estrelas pode ser calculada a partir do brilho medido e da lei do inverso do quadrado da distância.

Diferentes estrelas possuem cores ligeiramente diferentes, comprovadas com facilidade ao observar as estrelas Rigel (Beta Orionis) e Betelgeuse (Alpha Orionis) na constelação Oriente (figura 1). Na atividade 3, os estudantes podem observar as estrelas ao longo da noite e experimentar a maravilha e a beleza do céu real. As cores das estrelas decorrem das diferentes temperaturas das camadas de radiação das estrelas. As estrelas frias são levemente avermelhadas; estrelas quentes são levemente azuis. (É o oposto das cores que vemos nas torneiras de água fria e quente na casa de banho!) Isto ocorre devido à forma como os nossos olhos respondem à cor, uma estrela vermelha aparece branca avermelhada, e uma estrela azul aparece de cor branco azulado. A cor pode ser medida com precisão usando um fotômetro com filtros de cor, e a temperatura pode ser determinada a partir da cor.



Fig. 1: Constelação de Oriente. Betelgeuse, a estrela da parte superior esquerda, é fria, por isso aparece avermelhada. Deneb, a estrela inferior direita, é quente, por isso aparentemente azulada.

A temperatura da estrela também pode ser determinada a partir do seu espectro – distribuição de cores ou comprimentos de onda na luz da estrela (figura 2). Esta figura ilustra a beleza das cores da luz das estrelas. Esta luz passou pela atmosfera exterior da estrela e os iões, átomos e moléculas na atmosfera absorvem comprimentos de onda específicos do espectro. Isto produz linhas escuras, ou cores que faltam no espectro (figura 2). Dependendo da temperatura da atmos-

fera, os átomos podem ser ionizados, estimulados, ou combinados em moléculas. O estado observado dos átomos, no espectro, fornece informação sobre a temperatura.

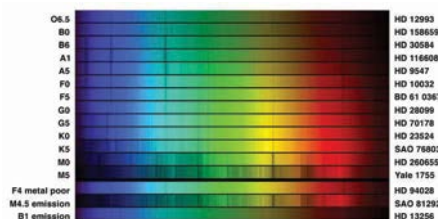


Fig. 2: Espectros de muitas estrelas, desde a mais quente (O6.5: em cima) até a mais fria (M5: em baixo). As diferentes aparências dos espectros ocorrem devido às diferentes temperaturas das estrelas. Os três espectros de baixo são de estrelas de alguma maneira peculiares. (Fonte: Observatório Nacional de Astronomia Ótica).

Há um século atrás, os astrónomos descobriram uma relação importante entre a potência, ou luminosidade, de uma estrela e a sua temperatura: para a maioria (mas não todas) das estrelas, a potência aumenta com a sua temperatura. Mais tarde foi descoberto que o fator determinante é a massa da estrela: estrelas mais massivas são mais luminosas e mais quentes. O gráfico de potência-temperatura é conhecido como diagrama de Hertzsprung-Russell (figura 3). É muito importante que os estudantes aprendam a construir gráficos deste tipo e a interpretá-los.

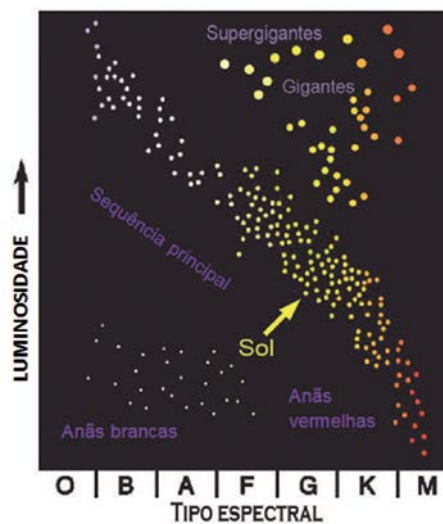


Fig. 3: Diagrama de Hertzsprung-Russell, um gráfico da energia ou da luminosidade estelar versus temperatura. Por razões históricas, o aumento da temperatura é para a esquerda. As letras OBAFGKM são os tipos espectrais que se relacionam com a temperatura. As linhas diagonais mostram o raio das estrelas; as estrelas maiores (gigantes e supergigantes) encontram-se na parte superior direita, as menores (anãs) encontram-se na parte inferior esquerda. Observe a sequência principal (main sequence) desde a parte inferior direita até a parte superior esquerda. A maioria das estrelas encontram-se nessa sequência. São indicadas as massas das estrelas da sequência principal e a localização de algumas estrelas conhecidas. (Fonte: Universidade da Califórnia Berkeley).

Um objetivo importante da astronomia é determinar a potência de estrelas de diferentes tipos. Então, se esse tipo de estrelas se observam noutras partes do Universo, os astrónomos podem usar o seu brilho medido “B” e sua potência assumida, P, para determinar sua distância D, a partir da lei do inverso do quadrado:  $B \cong P/D^2$ .

Os espectros das estrelas (e das nebulosas) também revelam do que são constituídos: a curva de abundância cósmica (figura 4). São compostas por aproximadamente  $\frac{3}{4}$  de hidrogénio,  $\frac{1}{4}$  hélio e 2% de elementos mais pesados, sobretudo carbono, nitrogénio e oxigénio.

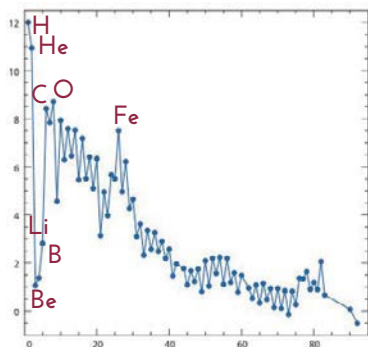


Fig. 4: Abundância dos elementos no Sol e nas estrelas. O hidrogénio e o hélio são os mais abundantes. Há pouquíssimo lítio, berílio e boro e bastante carbono, nitrogénio e oxigénio. As abundâncias dos demais elementos diminuem consideravelmente com o aumento do número atômico. O hidrogénio é  $10^{12}$  vezes mais abundante que o urânio. Os elementos com número par de prótons são mais abundantes que os elementos com número ímpar de prótons. Os elementos mais leves que o ferro são produzidos pela fusão nuclear nas estrelas. Os elementos mais pesados que o ferro são produzidos por captura de neutrões em explosões de supernovas. (Fonte: NASA).

Aproximadamente metade das estrelas próximas do Sol são binárias, ou estrelas duplas – duas estrelas que orbitam uma em redor da outra. As estrelas duplas são importantes porque permitem aos astrónomos medir as massas das estrelas observando o movimento da segunda estrela e vice-versa. Sirius, Procyon e Capella são exemplos de estrelas duplas. Também há estrelas múltiplas: três ou mais estrelas em órbita uma ao redor da outra. Alpha Centauri, a estrela mais próxima do Sol, é uma estrela tripla. Epsilon Lyrae é uma estrela quádrupla.

Como foi anteriormente referido, existe uma importante relação entre a potência de uma estrela e a sua massa: a potência é, aproximadamente, proporcional ao cubo da massa, denominada *relação massa-luminosidade*.

As massas das estrelas variam entre 0,1 a 100 vezes a do Sol. As potências oscilam entre 0,0001 e 1 000 000

vezes a do Sol. As estrelas mais quentes apresentam uns 50 000 K, as mais frias, ao redor de 2 000 K. Quando os astrónomos estudam as estrelas, percebem que o Sol é mais massivo e potente que os 95% de todas as estrelas na sua vizinhança. As estrelas massivas e de grande potência são extremamente raras. O Sol não é uma estrela mediana. Está acima da média!

## A estrutura do Sol e das estrelas

A estrutura do Sol e das estrelas é determinada, principalmente, pela gravidade. A gravidade faz que o Sol líquido seja quase perfeitamente esférico. Nas profundidades do Sol, a pressão aumenta devido ao peso das camadas de gás por cima. De acordo com a lei dos gases, que se aplica a um gás perfeito, a densidade e a temperatura também serão maiores se a pressão for maior. Se as camadas mais profundas são mais quentes, o calor fluirá para o exterior, já que o calor flui sempre do mais quente para o menos quente. Isto pode ocorrer por radiação ou convecção. Estes três princípios fundamentam a lei de massa-luminosidade.

Se o calor flui para fora do Sol, então as camadas mais profundas irão ser arrefecidas, e a gravidade fará com que o Sol se contraia – a não ser que seja produzida energia no centro do Sol. De facto o Sol não se contrai mas sim mantido pela pressão de radiação criada através do processo da fusão termonuclear, que se descreve mais adiante.

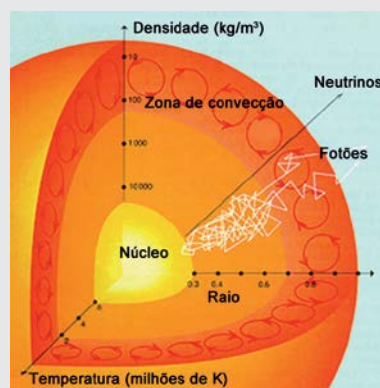


Fig. 5: Uma seção do Sol, determinada a partir de modelos do Sol. Na zona exterior, a energia é transportada por convecção, por baixo dessa zona, a energia é transportada por radiação. A energia é produzida no núcleo. (Fonte: Instituto de Física Teórica da Universidade de Oslo).

Estes quatro princípios simples aplicam-se a todas as estrelas. Podem ser expressos por equações e podem ser resolvidos num computador. Isto oferece um modelo do Sol ou qualquer estrela: a pressão, densidade e fluxo de energia em cada uma das distâncias desde o centro da estrela. Este é o método básico através do qual os astrónomos conhecem a estrutura e evolução das estrelas. O modelo é construído para uma suposta massa e composição específica da estrela, e deve ser

capaz de prever o raio da estrela, a potência e outras propriedades observadas.

Os astrónomos desenvolveram recentemente um método muito eficaz para testar os seus modelos da estrutura do Sol e das estrelas – a heliosismologia ou, noutras estrelas, astrosismologia. O Sol e as estrelas vibram suavemente em milhares de diferentes padrões ou modos. Estas vibrações podem ser observadas com instrumentos sensíveis e comparadas com as propriedades das vibrações estabelecidas pelos modelos.

### A fonte de energia do Sol e das estrelas

Os cientistas questionaram-se durante muito tempo acerca da fonte de energia do Sol e das estrelas. A fonte mais óbvia era a combustão química de matéria, como o petróleo ou o gás natural, mas, devido à altíssima potência do Sol ( $4 \times 10^{26}$  W), esta fonte duraria somente alguns poucos milhares de anos. Entretanto, até há alguns séculos, pensava-se que a idade da Terra e do Universo era de somente alguns milhares de anos, porque era o que a Bíblia parecia dizer!

Após os trabalhos de Isaac Newton, que desenvolveu a Lei da Gravitação Universal, os cientistas perceberam que o Sol e as estrelas poderiam gerar energia a partir de lentas contrações. A energia gravitacional (potencial) da matéria poderia ser convertida em calor e radiação. Esta fonte de energia poderia durar poucas dezenas de milhões de anos. Entretanto, a evidência geológica indicou que a Terra, e consequentemente o Sol, eram bem mais antigos.

No final do século XIX, os cientistas descobriram a radioatividade, como um produto da fissão nuclear. No entanto, os elementos radioativos são muito raros no Sol e nas estrelas pelo que não poderiam contribuir com a sua potência durante bilhões de anos.

Finalmente, no século XX, os cientistas descobriram que os elementos leves podiam fundir-se e transformar-se em elementos mais pesados, um processo denominado fusão nuclear. Se a temperatura e densidade eram suficientemente altas, estas produziriam grandes quantidades de energia – mais que suficiente para dar a potência do Sol e das estrelas. O elemento com a maior energia potencial de fusão é o hidrogénio, que é o elemento mais abundante no Sol e nas estrelas..

Nas estrelas de pouca massa, como o Sol, a fusão do hidrogénio é produzida numa série de passos denominados cadeia protão-protão ou pp. Dois protões fundem-se para formar deutério. Outro protão une-se ao deutério para formar hélio-3. Os núcleos de hélio-3 fundem-se em núcleos de hélio-4, o isótopo normal de

hélio (figura 6).

Nas estrelas massivas, o hidrogénio transforma-se em hélio através de uma série diferente de etapas chamadas ciclo CNO, no qual o carbono-12 é utilizado como catalisador (figura 7). O resultado, em cada caso, é que quatro núcleos de hidrogénio fundem-se para formar um núcleo de hélio. Uma pequena fração da massa dos núcleos de hidrogénio é convertida em energia. Já que os núcleos normalmente se repelem entre si, por causa das suas cargas positivas, a fusão é produzida somente se os núcleos chocarem com grande energia (alta temperatura) e frequentemente (alta densidade).

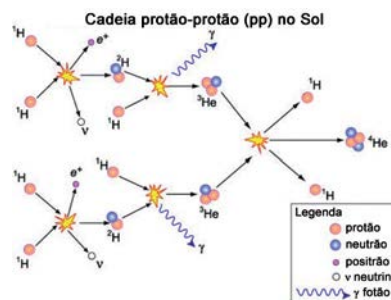


Fig. 6: A sequência de reações protão-protão pela qual o hidrogénio se funde em hélio, no Sol e noutras estrelas de menor massa. Nesta figura, e na seguinte, os neutrinos ( $\nu$ ) são emitidos em algumas das reações. A energia é emitida em forma de raios gama (raios  $\gamma$ ) e energia cinética dos núcleos. (Fonte: Austrália Telescope Facility Nacional).

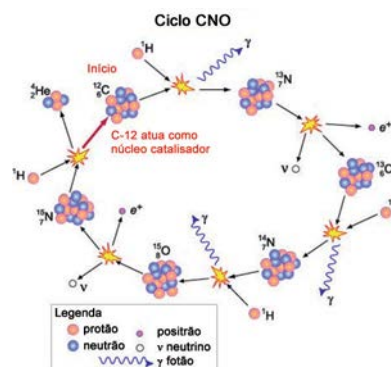


Fig. 7: O ciclo CNO, mediante o qual o hidrogénio se funde em hélio nas estrelas mais massivas que o Sol. O carbono-12 (marcado como "start") atua como um catalisador e participa no processo, sem ser utilizado no mesmo. (Fonte: Austrália Telescope Facility Nacional).

Se a origem da energia do Sol é a fusão nuclear, então as reações de fusão devem produzir um grande número de partículas subatômicas denominadas neutrinos. Normalmente, estas passam através da matéria sem interagir com ela. Existem bilhões de neutrinos que passam através dos nossos corpos em cada segundo. Observatórios de neutrinos podem detetar alguns destes neutrinos. Os primeiros observatórios de neutrinos detetaram apenas um terço do número de neutrinos previsto. Este "problema dos neutrinos Solares" durou mais de 20 anos, mas foi casualmente resolvido

pelo Observatório de Neutrinos Sudbury (SNO), no Canadá (figura 8). O coração do observatório é um grande tanque de água pesada – água na qual alguns dos núcleos de hidrogênio são deutério. Estes núcleos ocasionalmente absorvem um neutrino e emitem um flash de luz. Há três tipos de neutrinos. Dois terços dos neutrinos provenientes do Sol transformam-se noutros tipos. SNO é sensível aos três tipos de neutrinos, e detetou o número total de neutrinos previstos pela teoria.

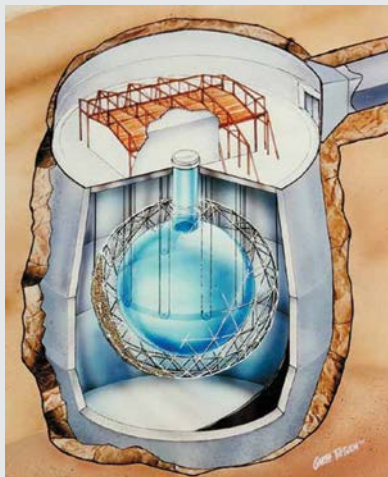


Fig. 8: O Observatório de Neutrinos de Sudbury, onde os cientistas confirmaram os modelos da fusão nuclear no Sol, observando o fluxo de neutrinos previsto. O coração do observatório é um grande tanque de água pesada. Os núcleos de deutério interagem ocasionalmente com um neutrino para produzir um flash de luz observável. (Fonte: Observatório de Neutrinos de Sudbury).

## Vida do Sol e das estrelas

Dado que o “o método científico” é um conceito tão fundamental no ensino da ciência, devemos começar por explicar como é que os astrónomos entendem a evolução das estrelas:

- Mediante o uso de simulações por computador, baseadas nas leis da física, tal como se descreveu anteriormente;
- Mediante a observação das estrelas no céu, que se encontram em diferentes fases de evolução, localizando-as numa “sequência evolutiva” lógica;
- Mediante a observação de aglomerados estelares: grupos de estrelas que se formaram ao mesmo tempo da mesma nuvem de gás e pó, mas com diferentes massas. Há milhares de aglomerados de estrelas na nossa galáxia, incluindo cerca de 150 aglomerados globulares que estão entre os objetos mais antigos de nossa galáxia. As Híades, as Plêiades e a maioria das estrelas da Ursa Maior são grupos que podem ser vistos a olho nu. Os aglomerados são “experiências da natureza”: grupos

de estrelas formados do mesmo material, no mesmo lugar, ao mesmo tempo. As suas estrelas apenas diferem na massa. Visto que diferentes aglomerados têm diferente idade, podemos observar como uma coleção de estrelas de diferentes massas pode ser vista quando atinge diferentes idades depois de seu nascimento;

- Mediante a observação direta de etapas rápidas da evolução; estas serão incomuns, já que duram somente uma pequena fração da vida das estrelas;
- Mediante o estudo das mudanças nos períodos de estrelas variáveis pulsantes. Estas mudanças são pequenas, mas observáveis. Os períodos destas estrelas dependem do raio da estrela. Como o raio muda devido à evolução, o período também o fará. A mudança no período é medida através de observações sistemáticas das estrelas a longo prazo.

O primeiro método, o uso de simulações por computador, foi o mesmo método utilizado para determinar a estrutura da estrela. Assim que a estrutura da estrela é conhecida, sabemos a temperatura e a densidade em cada ponto da estrela, e calculamos como é que a composição química é alterada pelos processos termonucleares que ocorrem. Estas mudanças na composição podem ser incorporadas no modelo seguinte na sequência evolutiva.

As estrelas variáveis pulsantes mais famosas são denominadas Cefeidas, devido à estrela Delta Cephei, que é um exemplo típico. Existe uma relação entre o período de variação de uma Cefeida e a sua potência. Medindo o período, os astrónomos podem determinar a potência e, portanto, a distância, usando a lei do inverso do quadrado da distância. As Cefeidas são uma ferramenta importante para determinar o tamanho e a escala de idade do Universo.

Os alunos podem observar estrelas variáveis, através de projetos como Citizen Sky, que possibilita o desenvolvimento de uma variedade de competências em ciência e matemática, enquanto fazem ciência real e talvez contribuam para o desenvolvimento de conhecimentos astronómicos.

## Vida e morte do Sol e das estrelas

A fusão do hidrogênio é um processo muito eficiente. Proporciona energia às estrelas durante a sua longa vida. As reações de fusão são mais rápidas no centro da estrela, onde a temperatura e a densidade são mais altas. A estrela desenvolve assim um núcleo de hélio que, pouco a pouco, se expande para o exterior. Quando isto ocorre, o núcleo da estrela reduz-se e torna-se mais quente, e o hidrogênio em redor do núcleo do

hélio aquece o suficiente para se fundir. Esta ação faz com que as camadas externas da estrela se expandam – lentamente no começo, e depois mais rapidamente. Converte-se numa estrela gigante vermelha, até cem vezes maior que o Sol. Por último, o núcleo central de hélio aquece o suficiente para que o hélio se funda em carbono. Esta fusão equilibra a força no centro da gravidade, mas não por muito tempo, porque a fusão do hélio não é tão eficiente como a fusão do hidrogênio. Logo, o núcleo de carbono contrai-se, tornando-se mais quente, e as camadas externas da estrela expandem-se para se converter numa gigante ainda maior de cor vermelha. As estrelas mais massivas expandem-se até um tamanho ainda maior e convertem-se em estrelas supergigantes vermelhas.

Uma estrela morre quando o seu combustível acaba. Não há outra fonte de energia para manter o interior da estrela quente e produzir uma pressão suficiente do gás em direção ao exterior com o intuito de deter a contração gravitacional da estrela. O tipo de morte depende da massa da estrela.

A duração da vida da estrela também depende da sua massa: as estrelas de menor massa possuem baixa potência e tempo de vida extremamente longo – dezenas de milhares de milhões de anos. As estrelas de grande massa possuem potência muito alta e tempos de vida curtíssimos, de milhões de anos. A maioria das estrelas é de massa muito baixa e o seu tempo de vida superará a atual idade do Universo.

Antes de sua morte, uma estrela perde massa. Após usar o último hidrogênio, e depois o que restava de hélio, expandir-se-á transformando-se numa estrela gigante vermelha, de mais de cem vezes o raio do Sol e mais de bilhões de vezes o seu volume. Os estudantes podem fazer um modelo à escala que permita visualizar as enormes mudanças no tamanho da estrela à



Fig. 9: A nebulosa Helix (Hélice), uma nebulosa planetária. Os gases da nebulosa foram expulsos da estrela a fase evolutiva de gigante vermelha. O núcleo da estrela é uma anã branca quente. É observável, ténue, no centro da nebulosa. (Foto: NASA).

medida que evolui. A gravidade nas camadas exteriores de uma gigante vermelha é muito baixa. Também começa a pulsar, numa rítmica expansão e contração. Devido ao grande tamanho de uma gigante vermelha, cada ciclo da pulsação dura meses ou anos, o que acaba por expulsar as camadas exteriores da estrela para o espaço, formando uma bela nebulosa planetária em lenta expansão ao redor da estrela que morre (figura 9). Os gases na nebulosa planetária são estimulados, pela luz ultravioleta que provém do núcleo quente da estrela, até produzir fluorescência. Finalmente, a nebulosa afasta-se da estrela e une-se com outro gás e pó para formar novas nebulosas das quais nascerão novas estrelas.

A vida das estrelas massivas é um pouco diferente das estrelas de menor massa. Nas estrelas com pouca massa, a energia é transportada do núcleo para o exterior pela radiação. No núcleo de estrelas massivas, a energia é transportada por convecção, pois o núcleo da estrela está completamente misturado. Quando acaba o hidrogênio no núcleo, a estrela muda rapidamente e transforma-se numa gigante vermelha. No caso de estrelas de menor massa, a transição é mais gradual.

As estrelas devem ter uma massa de mais de 0,08 vezes a do Sol. Caso contrário, os seus centros não serão suficientemente quentes e densos para que o hidrogênio se funda. As estrelas mais massivas apresentam massas de quase centenas de vezes a do Sol e possuem tanta potência que sua própria radiação impedirá que permaneçam estáveis.

### Estrelas comuns, de menor massa

Nas estrelas com uma massa inicial inferior a oito vezes a do Sol, a perda de massa final deixa um núcleo de menos de 1,4 vezes a massa do Sol. Este núcleo não possui combustível termonuclear. A força gravítica na direção do centro é equilibrada pela pressão de elétrons no sentido do exterior, que resistem a qualquer nova contração, devido ao princípio de exclusão de Pauli – uma lei da teoria quântica que determina um limite no número de elétrons que pode existir num determinado volume. Estes núcleos são denominados de anãs brancas e contêm massas inferiores a 1,44 vezes a do Sol. Este é o conhecido limite de Chandrasekhar, devido ao astrónomo indiano-estadunidense, e Prémio Nobel, Subrahmanyan Chandrasekhar ter demonstrado que uma anã branca mais massiva que este limite colapsaria sobre seu próprio peso.

As anãs brancas são os pontos finais normais da evolução estelar de estrelas de menor massa. São muito comuns na nossa galáxia, mas são difíceis de serem vistas, pois não são maiores do que a Terra. Apesar de

estarem quentes, apresentam uma área de radiação pequeníssima e são, portanto, pouco brilhantes. As suas potências são milhares de vezes menores que a do Sol. As estrelas brilhantes Sirius e Procyon possuem anãs brancas a orbitar em seu redor. Estas anãs brancas não possuem nenhuma fonte de energia para além de seu calor armazenado. São como brasas de carvão, arrefecendo numa lareira. Depois de bilhões de anos, arrefecerão por completo, e tornar-se-ão frias e escuras.

### As raras estrelas massivas

As estrelas massivas são quentes e de grande potência, porém muito raras. Possuem uma vida curta, de poucos milhões de anos. Os seus núcleos são suficientemente quentes e densos para fundir elementos até ao ferro. O núcleo de ferro não possui energia disponível, seja devido a fusão ou a fissão. Não há uma fonte de energia para manter o núcleo quente e para resistir à força da gravidade. A gravidade colapsa o centro da estrela num segundo, convertendo-o numa bola de neutrões (ou até de matéria mais estranha), libertando enormes quantidades de energia gravitacional. Isto faz com que as camadas externas da estrela explodam como uma supernova (figura 10). Estas camadas externas são expulsas com velocidades de até 10 000 km/s e a estrela converte-se em supernova.



Fig. 10: A Nebulosa do Caranguejo, o remanescente de uma explosão de supernova registada pelos astrónomos na Ásia em 1054 d.C. O núcleo da estrela que explodiu é uma estrela de neutrões em rápida rotação, o pulsar, dentro da nebulosa. Uma pequena fração de sua energia de rotação é transferida à nebulosa, permitindo que brilhe. (Foto: NASA).

Uma supernova, na sua luminosidade máxima, pode ser tão brilhante como uma galáxia inteira com centenas de bilhões de estrelas. Tycho Brahe e Johannes Kepler observaram e estudaram supernovas brilhantes, em 1572 e 1604, respetivamente. Segundo Aristóteles, as estrelas eram perfeitas e não mudavam, porém Brahe e Kepler demonstraram o contrário. Nenhuma supernova foi observada na Via Láctea nos últimos 400 anos. Uma supernova, visível a olho nu, foi observada em 1987 na Grande Nuvem de Magalhães, uma pequena galáxia satélite da Via Láctea.

A massa do núcleo da supernova é maior que o limite

de Chandrasekhar. Os prótons e elétrons no núcleo que colapsa fundem-se para produzir neutrões e neutrinos. As explosões de neutrinos poderiam ser detetadas por um observatório de neutrinos. Se a massa do núcleo é menor que três vezes a massa do Sol, será estável. A força da gravidade na direção do centro está equilibrada pela pressão quântica, para fora, dos neutrões. O objeto denomina-se estrela de neutrões. O seu diâmetro é de aproximadamente 10 km. Sua densidade é a mais de  $10^{14}$  vezes a da água. Pode ser visível com um telescópio de raios X se estiver muito quente, mas as estrelas de neutrões foram descobertas de uma maneira muito inesperada - como fontes de pulsos de ondas de rádio, denominadas pulsares. Os períodos do pulso são de aproximadamente um segundo, às vezes muito menos. Os pulsos são produzidos pelo forte campo magnético da estrela de neutrões, sendo expelidos, quase à velocidade da luz, pela rápida rotação da estrela.

Há um segundo tipo de supernova que é produzida em sistemas de estrelas binários nos quais uma estrela que morreu se converteu numa anã branca. Quando a segunda estrela começa a expandir-se, pode expelir gás na direção da sua companheira anã branca. Se a massa da anã branca se torna maior que o limite de Chandrasekhar, a anã branca deflagra; o seu material funde-se, quase instantaneamente, em carbono, libertando suficiente energia para destruir a estrela.

Numa explosão de supernova, todos os elementos químicos que foram produzidos pelas reações de fusão são ejetados para o espaço. Elementos mais pesados que o ferro são produzidos na explosão, apesar de em quantidades pequenas, quando neutrões irradiam os núcleos mais leves que estão a ser ejetados.

### As estrelas raríssimas muito massivas

As estrelas muito massivas são muito raras – uma em mil milhões. Possuem potências até milhões de vezes a do Sol, e vidas muito curtas. São tão massivas que, quando a sua energia termina e o núcleo colapsa, a sua massa é mais de três vezes a massa do Sol. A gravidade supera inclusive a pressão quântica dos neutrões. O núcleo continua a colapsar até ficar tão denso que a sua força gravitacional impede que algo escape dele, inclusive a luz. Converte-se num buraco negro. Os buracos negros não emitem radiação, mas, se possuírem uma estrela normal como companheira, obrigam-na a mover-se em órbita. O movimento observado dessa colega permite aos astrónomos detetar o buraco negro e medir a sua massa. Mais: uma pequena quantidade de gás da estrela normal pode ser atraída para o buraco negro, é aquecido até que brilha em raios X antes de cair no buraco negro (figura 11). As proximidades dos

buracos negros são, portanto, fortes fontes de raios X e detetam-se com telescópios de raios X.

No centro de muitas galáxias, incluindo a Via Láctea, os astrónomos descobriram buracos negros supermassivos, milhões ou bilhões de vezes mais massivos que o Sol. A sua massa é medida a partir do efeito sobre as estrelas visíveis próximas dos centros das galáxias. Os buracos negros supermassivos parecem ter-se formado como parte do processo do nascimento da galáxia, mas não está claro como isso aconteceu. Um dos objetivos da astronomia do século XXI é compreender como é que as primeiras estrelas, galáxias e buracos negros supermassivos se formaram, pouco depois do nascimento do Universo.



Fig. 11: Conceção artística da estrela binária, fonte de raios X, Cygnus X-1. Trata-se de uma estrela normal massiva (esquerda) e um buraco negro (direita), de aproximadamente 15 vezes a massa do Sol, em órbita mútua. Parte dos gases da estrela normal são empurrados para um disco de acreção ao redor do buraco negro e, finalmente, caem no buraco negro. Os gases aquecem até temperaturas muito altas o que provoca emissão de raios X. (Fonte: NASA).

### Estrelas variáveis cataclísmicas

Aproximadamente metade de todas as estrelas são estrelas binárias, de duas ou mais estrelas em órbita mútua. Frequentemente, as órbitas são muito grandes, e as estrelas não interferem com a evolução uma da outra. Mas se a órbita for pequena, as duas estrelas podem interagir, sobretudo quando uma se expande como gigante vermelha. E se uma estrela morre para transformar-se numa anã branca, numa estrela de neutrões ou num buraco negro, a evolução da estrela normal pode ejetar material sobre a estrela morta e muitas coisas interessantes podem acontecer (figura 12). O sistema de estrelas binário varia em brilho, por diversas razões, e é conhecida como estrela variável cataclísmica. Como foi indicado anteriormente, se uma parceira anã branca recebesse suficiente massa esta poderia explodir como uma supernova. Se a estrela normal derrama material rico em hidrogénio sobre a anã branca, esse material pode explodir, devido à fusão do hidrogénio, como uma nova. O material que cai na anã branca, na estrela de neutrões ou no buraco negro, pode simplesmente aquecer bastante, à medida que a sua energia potencial

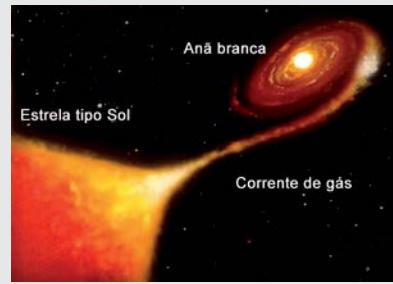


Fig.12: Estrela variável cataclísmica. A matéria é arrastada da estrela normal (esquerda) para a anã branca (à direita). A matéria golpeia o disco de acreção em redor da anã branca e provoca um aumento de brilho. A matéria eventualmente cai na anã branca, onde pode fulgurar ou explodir. (Fonte: NASA).

gravitacional se converte em calor e produz radiação de alta energia, tais como Raios X.

Na conceção do artista de um buraco negro (figura 11), é possível ver o *disco de acreção* de gás ao redor do buraco negro e a corrente de gás da estrela normal que flui para o mesmo.

### O nascimento do Sol e das estrelas

Há estrelas a nascer neste instante! Devido ao facto de que as estrelas mais massivas possuem uma vida útil de apenas poucos milhões de anos, e da idade do Universo ser de mais de dez mil milhões de anos, conclui-se que as estrelas massivas conhecidas provavelmente nasceram recentemente. A sua localização oferece-nos uma dica: estão próximas, e no interior, de grandes nuvens de gás e poeira conhecidas como nebulosas. O gás é constituído por iões, átomos e moléculas, especialmente hidrogénio, um pouco de hélio e poucas quantidades dos elementos mais pesados. O pó é formado por grãos de silicato e grafite, com tamanhos menores que um micrómetro. Há menos pó que gás, porém o pó possui um papel importante na nebulosa. Permite que as moléculas se formem, protegendo-as da intensa radiação das estrelas próximas. A sua superfície pode servir de catalisador para a formação de moléculas. A nebulosa mais próxima, grande e brilhante, é a Nebulosa de Oriote (figura 13). As estrelas quentes na nebulosa provocam o brilho dos átomos do gás por fluorescência. O pó é quente e emite radiação infravermelha. Também bloqueia a luz das estrelas e o gás por trás, causando as manchas escuras na nebulosa.

A gravidade é uma força atrativa, por isso não é de estranhar que partes de uma nebulosa se contraíam lentamente. Isto ocorrerá se a força gravitacional for maior que a pressão da turbulência nessa região da nuvem. As primeiras etapas da contração podem ser ajudadas por uma onda de choque de uma supernova próxima ou pela pressão da radiação de uma estrela

massiva próxima. Logo que a contração gravitacional se inicia, continua. Aproximadamente a metade da energia libertada, pela contração gravitacional, aquece a estrela. A outra metade é irradiada. Quando a temperatura do centro da estrela atinge cerca de 1 000 000 K, começa a fusão termonuclear do deutério; quando a temperatura for um pouco maior, é iniciada a fusão termonuclear do hidrogénio. No momento que a energia produzida é igual à energia irradiada, a estrela nasceu “oficialmente”.



Fig. 13: A Nebulosa de Oriente, uma grande nuvem de gás e pó na qual estão a ser formadas estrelas (e seus planetas). O gás brilha por fluorescência. O pó produz manchas escuras de absorção que podem ser vistas, especialmente na parte superior esquerda da foto. (Foto: NASA).

Quando a contração gravitacional começa, o material tem uma rotação (momento angular) muito pequena devido à turbulência na nuvem. À medida que a contração continua, “a conservação do momento angular” faz que com que a rotação aumente. Este efeito é comumente visto na patinagem artística; quando o patinador faz uma rotação rápida, coloca os braços o mais perto possível do seu eixo de rotação (seu corpo) e a velocidade da sua rotação aumenta. À medida que a rotação da estrela em contração continua, a “força centrífuga” (comumente mencionada, contudo de maneira incorreta) provoca o aplanamento do material ao redor da estrela, formando um disco. A estrela nasce no centro, denso, do disco. Os planetas formam-se no próprio disco – os planetas rochosos próximo da estrela e os planetas gasosos e de gelo, no disco exterior frio.

Nas nebulosas como a Nebulosa de Oriente, os astrónomos observaram estrelas em todas as etapas de formação. Observaram protoplanetários nos quais planetas como o nosso estão em formação. A partir de 1995, os astrónomos descobriram exoplanetas ou planetas extrassolares – planetas em redor de outras estrelas semelhantes ao Sol. Esta é uma prova evidente de que os planetas se formam realmente como subproduto normal da formação estelar. Podem existir muitos planetas, como a Terra, no Universo!

---

## Bibliografia

Bennett, J et al., *The Essential Cosmic Perspective*, Addison-Wesley, 2005.

Kaler, J.B., *The Cambridge Encyclopaedia of Stars*, Cambridge University Press, 2006.

Percy, J.R., *Understanding Variable Star*, Cambridge University Press, 2007

## Fontes da Internet

American Association of Variable Star <http://www.aavso.org/vsa>

Página de Chandra X-Ray: [http://chandra.harvard.edu/edu/formal/stellar\\_ev/](http://chandra.harvard.edu/edu/formal/stellar_ev/)

Kaler's “stellar” website: <http://stars.astro.illinois.edu/sow/sowlist.html>

Stellar Evolution en Wikipedia: [http://en.wikipedia.org/wiki/Stellar\\_evolution](http://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_evolution)



# Cosmologia

## Julieta Fierro, Beatriz García

União Astronómica Internacional, Universidade Nacional Autónoma do México (México DF, México), Universidade Tecnológica Nacional (Mendoza, Argentina)

### Resumo

Compreender a evolução do Universo, mesmo quando cada objeto celeste possui encantos particulares, costuma ser um tema fascinante. Pensar que apesar de estarmos ancorados à Terra temos a possibilidade de saber tanto acerca do Universo é animador.

No século XIX o objetivo era conhecer as propriedades individuais de cada objeto celeste: planetas, estrelas, nebulosas e galáxias. No final do século XX o foco alterou-se para as propriedades das categorias de objetos: aglomerados de estrelas, formação de galáxias e a estrutura do Universo. Sabemos, agora, a idade e a história do Universo e que a sua expansão é acelerada mas desconhecemos a natureza da matéria escura. Novas descobertas continuam a ser feitas.

A seguir descreveremos algumas propriedades das galáxias, integrantes das grandes estruturas do Universo. Abordaremos também o modelo padrão do *Big Bang* e as evidências que suportam esse modelo.

### Objetivos

- Compreender como o Universo evoluiu desde o Big Bang até nossos dias.
- Conhecer como está organizada a matéria e a energia no Universo.
- Analisar de que maneira os astrónomos podem conhecer a história do Universo.

### As Galáxias

As galáxias são compostas por estrelas, gás, poeira e matéria escura e podem ser muito grandes, com mais de 300 000 a.l. de diâmetro. A galáxia a qual pertence o Sol possui cem mil milhões de estrelas. No Universo existem milhares de milhões destas galáxias.

A nossa galáxia possui uma forma espiral, semelhante à de Andrómeda (fig. 1a). O Sol precisa de 200 milhões de anos para dar uma volta em redor do seu centro, mesmo quando se desloca a 250 quilómetros por segundo. O Sistema Solar está submerso no disco da galáxia e por isso não podemos observá-la na sua tota-

lidade – é como pretender ver um bosque de longe estando dentro dele. A nossa galáxia tem o nome de Via Láctea. À vista desarmada podemos observar muitas estrelas individuais e uma cintura composta por um enorme número de estrelas e nuvens interestelares de gás e poeira. A estrutura da nossa galáxia foi descoberta através de observações com telescópios nas zonas do visível e do rádio, e observação de outras galáxias. São empregues ondas de rádio para analisar a nossa galáxia porque estas conseguem atravessar nuvens que são opacas à luz visível, de modo semelhante ao facto de podermos receber uma chamada telefónica num telemóvel quando estamos dentro de um edifício.



Fig. 1a: Galáxia de Andrómeda. Galáxia espiral muito similar à Via Láctea. O Sol encontra-se na borda exterior de um dos braços da nossa galáxia. (Foto: Bill Schering, Vanessa Harvey/REUprogram/NOAO/AURA/NSF) Fig.1b: Grande Nuvem de Magalhães. Galáxia irregular satélite da Via Láctea, pode ser observada a olho nu a partir do hemisfério sul. (Foto: ESA e Eckhard Slawik).

Podemos classificar as galáxias em três tipos. As irregulares são as menores e abundantes, e costumam ser ricas em gás, isto é, possuem grande capacidade de formar novas estrelas. Muitas delas são satélites de outras. A Via Láctea possui 30 galáxias satélites, tendo sido as Nuvens de Magalhães, que são vistas a olho nu a partir do hemisfério sul, as primeiras a ser descobertas.

As galáxias espirais, como a nossa, possuem em geral dois braços, mais ou menos enroscados, em espiral que emanam da parte central chamada bolbo. Nos núcleos das galáxias como a nossa costuma existir um buraco negro com milhões de vezes a massa do Sol. O nascimento das novas estrelas acontece principalmente nos braços, já que nestes há maior densidade de matéria

interestelar cuja contração origina as novas estrelas.

Quando os buracos negros nos núcleos das galáxias atraem nuvens de gás ou estrelas, a matéria aquece e, antes de cair ao buraco negro, parte dela emerge em forma de jatos de gás incandescente que avançam pelo espaço e aquecem o meio intergaláctico. Este fenómeno é conhecido como núcleo ativo e uma grande parte das galáxias espirais possuem estes núcleos.

As maiores de todas as galáxias são elípticas (embora também existam as elípticas pequenas). Acredita-se que estas, assim como as espirais gigantes, são formadas à custa das pequenas através de um processo conhecido como canibalismo galáctico, durante o qual há fusão de galáxias. Evidência deste fenómeno é a diversidade de idades e composição química dos diversos grupos estelares que as constituem uma galáxia fundida.

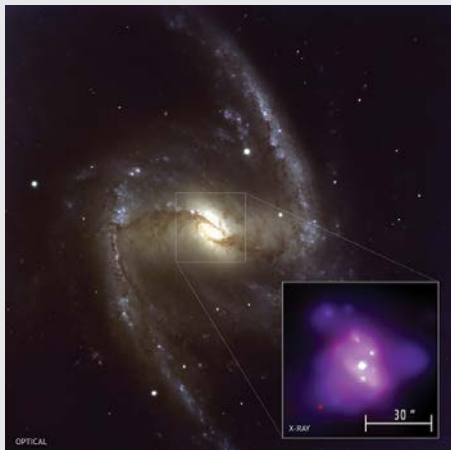


Fig. 2a: Imagem óptica da Galáxia NGC 1365 tirada com o VLT de ESO e a imagem de Chandra de raios X do material próximo do buraco negro central. Fig. 2b: Mostra de canibalismo galáctico onde interagem duas galáxias fundindo-se num processo muito espetacular. (Foto: NASA, ESA, the Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration, and A. Evans (University of Virginia, Charlottesville/NRAO/Stony Brook University)).

As galáxias formam aglomerados de galáxias, com milhares de componentes. As elípticas gigantes costumam estar nas regiões centrais e algumas possuem dois núcleos em resultado recente da fusão de duas galáxias.

Os aglomerados e super aglomerados de galáxias estão distribuídos no Universo formando estruturas filamentosas que rodeiam vazios imensos, carentes de galáxias. É como se o Universo, em larga escala, fosse um banho de espuma onde as galáxias estivessem na superfície das bolhas.



Fig. 3: Aglomerado de galáxias Abell2218. Podem-se distinguir arcos derivados do efeito de lentes gravitacionais. (Foto: NASA, ESA, Richard Ellis (Caltech) e Jean-Paul Kneib (Observatoire Midi-Pyrenees, France)).

## Cosmologia

A seguir descreveremos algumas propriedades do Universo em que vivemos. O Universo é formado por matéria, energia e espaço, evoluindo com o tempo. As suas dimensões temporal e espacial são bem maiores do que as utilizadas no nosso dia-a-dia.

A cosmologia tenta oferecer-nos respostas a perguntas fundamentais sobre o Universo: De onde viemos? Qual é o futuro do Universo? Onde estamos? Qual a idade do Universo?

Vale a pena mencionar que a ciência evolui. Quanto mais conhecemos mais temos consciência do muito que ignoramos. Assim como um mapa é útil, ainda que só seja uma representação de um lugar; a ciência permite-nos ter uma representação da natureza, conhecer alguns de seus aspetos e prever acontecimentos, tudo baseado em hipóteses razoáveis que devem necessariamente confrontar-se com medidas e dados.

## As dimensões do Universo

As distâncias entre estrelas são imensas. A Terra está

a 150 000 000 km do Sol; Plutão está 40 vezes mais longe. A estrela mais próxima está 280 mil vezes mais distante, e a galáxia mais perto está a 10 000 000 000 vezes mais. A estrutura em filamentos de galáxias é 1 000 000 000 000 de vezes maior que a distância da Terra ao Sol.

### A idade do Universo

O Universo iniciou sua evolução há 13,7 mil milhões (13 700 000 000) de anos. O Sistema Solar formou-se bem mais tarde: 4,6 mil milhões de anos. A vida na Terra surgiu há 3,8 mil milhões de anos e os dinossauros extinguiram-se há 65 milhões de anos. O homem moderno surgiu há somente 150 000 anos.

Sabemos que o Universo onde vivemos teve uma origem porque observamos que se encontra em expansão acelerada. Isto é, todos os aglomerados de galáxias estão a afastar-se uns dos outros e quanto mais distantes estão mais rapidamente o fazem. Se medirmos a velocidade de expansão podemos estimar quando é que todo o espaço esteve compactado. Deste cálculo resulta uma idade de 13,7 mil milhões de anos. Esta idade não contradiz a evolução estelar, já que não são observadas estrelas e galáxias mais velhas que 13,5 mil milhões de anos. O evento do qual surgiu a expansão do Universo é conhecido como *Big Bang*.

### Medição de velocidade

É possível medir a velocidade de uma estrela através do efeito Doppler. No quotidiano também podemos verificar o efeito Doppler quando notamos a mudança de tom de uma sirene de uma ambulância, ou de um carro da polícia, à medida que este se aproxima e, depois, se afasta. Se alguém colocar um despertador a tocar dentro de uma bolsa e girar a bolsa acima da sua cabeça, poderemos detetar que o tom do som muda quando o despertador se aproxima ou se afasta de nós. Poderíamos calcular a velocidade do despertador escutando a alteração de tom, que é maior quanto maior for a velocidade.

A luz emitida pelos astros também sofrem uma mudança de frequência, ou cor, que pode ser medida dependendo da velocidade com que se aproximam ou se afastam. O comprimento de onda da luz fica maior (desvio para o vermelho) caso a fonte de luz se afaste de nós, e menor (desvio para o azul) caso se aproxime.

Quando o Universo estava mais compactado, as ondas sonoras que o atravessaram produziram regiões de maior e menor densidade. Os super aglomerados de galáxias formaram-se nas regiões de maior densidade. À medida que o Universo se expandiu, o vazio entre as regiões de maior densidade aumentou de volume. As

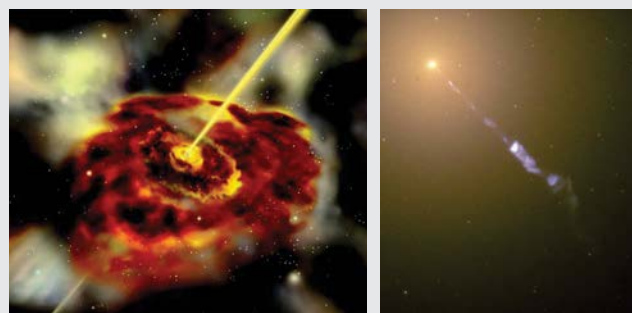


Fig. 4a: Ilustração de artista de um buraco negro no centro de uma galáxia. (Foto: NASA E/PO - Sonoma State University, Aurore Simonnet) Fig. 4b: Galáxia M87, exemplo de galáxia real com um jato que a acompanha. (Foto: NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

estruturas filamentosas do Universo são o resultado da expansão do Universo.

### Ondas sonoras

O som desloca-se através de um meio, como o ar, a água ou a madeira. Quando produzimos um som, este gera uma onda que comprime a matéria em seu redor. Esta compressão viaja através da matéria até chegar a nosso ouvido onde comprime o tímpano, conduzindo o som até às nossas células nervosas sensíveis. Não escutamos as explosões do Sol, nem as tormentas de Júpiter, porque o espaço entre os astros está quase vazio e por isso não há meio de propagação das compressões do som.

Convém mencionar que não existe nenhum centro da expansão do Universo. Fazendo uma analogia bidimensional, imaginemos que estávamos em Paris e que a Terra estivesse em expansão. Observaríamos que todas as cidades se afastariam umas das outras, mas não teríamos elementos para dizer que estamos no centro da expansão, pois todos os habitantes das outras cidades observariam a mesma expansão.

Ainda que, do nosso ponto de vista, 300 mil quilómetros por segundo seja uma velocidade extremamente rápida, não é infinitamente rápida. A luz das estrelas demora centenas de anos para chegar à Terra e a das galáxias milhões de anos. Toda a informação do cosmos demora tanto tempo para chegar que sempre observamos os astros vemos como foram no passado e não como são agora.

Existem corpos tão distantes que a sua luz ainda não teve tempo de chegar até nós e por isso não os podemos ver. Não é que não estejam lá, simplesmente nasceram após a radiação dessa região do céu ter tempo de nos alcançar.



Fig. 5: Até a data foram localizadas mais de 300 nuvens escuras e densas de pó e gás onde estão a ocorrer processos de formação estelar. Super Cúmulo Abell 90/902. (Foto: Hubble Space Telescope, NASA, ESA, C. Heymans (university of British Columbia) e M. Gray (University of Nottingham)).

A velocidade finita da luz apresenta várias consequências para a astronomia. As distorções do espaço afetam as trajetórias da luz, de modo que se virmos uma galáxia num determinado lugar, ela poderá não estar lá, porque a curvatura do espaço modifica a sua posição. Além disso, ao observar uma estrela, ela já não está onde a vemos porque as estrelas estão em movimento. Também não são como as observamos. Vemos sempre os objetos celestes como foram, e quanto mais distantes estiverem mais no passado as observamos. Assim, analisando objetos semelhantes a diferentes distâncias equivale a ver um mesmo astro em tempos diferentes da sua evolução. Por outras palavras, podemos identificar a história das estrelas se analisamos aquelas que julgamos semelhantes, mas a distâncias distintas.

Não podemos ver o limite do Universo porque a sua luz ainda não teve tempo de chegar até à Terra. O Universo é infinito e por isso só vemos uma seção, 13,7 mil milhões de anos-luz de raio, ou seja, de onde a luz teve tempo para viajar desde o Big Bang. Uma fonte de luz emite luz em todas as direções de modo que diferentes lugares do Universo são conhecidos em diferentes tempos. Nos vemos os astros como eles eram no tempo em que emitiram a luz que agora observamos, porque a luz demora um tempo finito a chegar até nós. Isto não significa que estejamos numa posição privilegiada do universo, qualquer observador noutra galáxia observaria algo equivalente ao que nós detetamos.

Como em qualquer ciência, também na astronomia e na astrofísica, quanto mais sabemos acerca do nosso Universo, mais questões colocamos. Discutiremos agora a matéria e a energia escura para ter uma ideia do muito que desconhecemos.

A matéria escura não interage com a radiação eletromagnética, por isso não absorve nem emite luz. A ma-

téria comum, tal como a que existe numa estrela, pode produzir ou absorver luz, assim como uma nuvem de pó interestelar. A matéria escura é insensível a qualquer tipo de radiação, tem massa, pelo que tem atração gravitacional. Descobriu-se porque afeta o movimento da matéria visível. Por exemplo, se uma galáxia possui um movimento de translação em torno de um espaço aparentemente vazio, temos a certeza de que algo a está a atrair. Assim como o Sistema Solar se mantém unido porque o Sol, devido a sua força gravitacional, obriga os planetas a permanecer em órbita, a galáxia em questão tem um movimento de rotação porque algo a atrai. Sabemos agora que a matéria escura está presente nas galáxias, individualmente, e nos aglomerados de galáxias, e que aparenta ser o alicerce da estrutura filamentosa do Universo. A matéria escura é a matéria mais comum do Universo.

Também sabemos que a expansão do Universo está a acelerar. Isto quer dizer que há uma força que contraria o efeito da gravidade. A energia escura é o nome dado pelos astrónomos a este fenómeno recentemente descoberto. Na ausência da energia escura, a expansão do Universo deveria desacelerar.

O nosso conhecimento atual acerca da matéria-energia contida no Universo é que 74% é energia escura, 22% é matéria escura e apenas 4% é a normal, luminosa, matéria (todas as galáxias, estrelas, planetas, gás, poeira). Basicamente, a natureza e as propriedades de 96% do Universo ainda estão por descobrir.

O futuro do nosso Universo depende da quantidade de matéria visível, matéria escura e energia escura. Antes da descoberta da matéria escura e da energia escura, pensava-se que a expansão acabaria, e que a gravidade reverteria a expansão resultando num Big Crunch, onde tudo retornaria a um ponto único. Mas desde que a matéria escura foi descoberta a teoria foi modificada. Agora, a expansão atingirá um valor constante num tempo futuro infinito. Mas agora que conhecemos a existência da energia escura, é esperada uma aceleração da expansão assim como do volume do Universo. O fim do Universo será bastante frio e escuro, num tempo infinito.



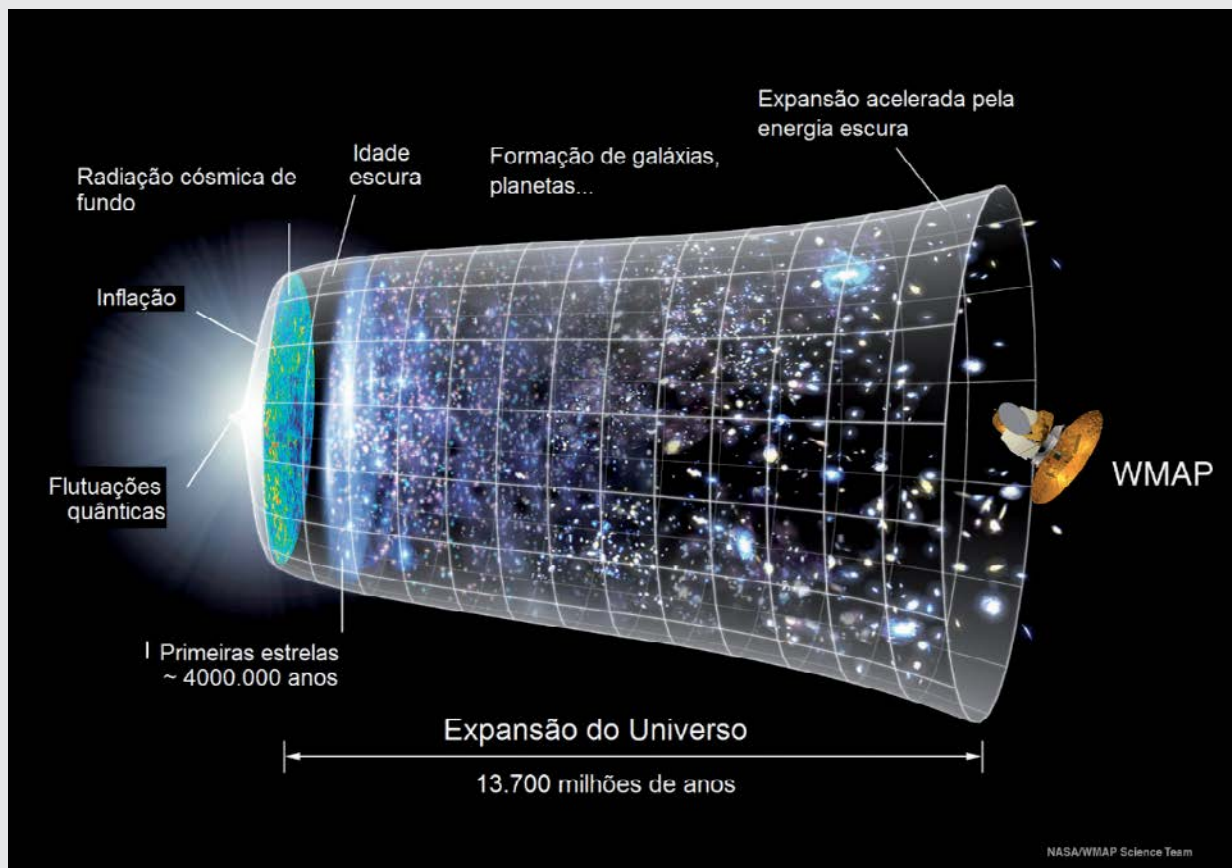


Fig. 6: Expansão do Universo. (Foto: NASA).

## Bibliografia

Greene, B., *The Fabric of the Cosmos: Space, Time, and the Texture of Reality* (2006) / *El tejido del cosmos* (2010)

Fierro, J., *La Astronomía de México*, Lectorum, México, 2001.

Fierro, J, Montoya, L., “La esfera celeste en una pece-  
ra”, *El Correo del Maestro*, núm 47, p.10-17, México,  
2000.

Fierro J, Domínguez, H, *Albert Einstein: un científico  
de nuestro tiempo*, Lectorum, México, 2005.

Fierro J, Domínguez, H, “La luz de las estrellas”, Lec-  
torum, *El Correo del Maestro*, México, 2006.

Fierro J, Sánchez Valenzuela, A, *Cartas Astrales, Un  
romance científico del tercer tipo*, Alfaguara, 2006.

Thuan, Trinh Xuan, *El destino del universo: Después del  
big bang* (Biblioteca ilustrada) (2012) / *The Changing  
Universe: Big Bang and After* (New Horizons) (1993).

Weinberg, Steven, *The First Three Minutes: A Modern  
View of the Origin of the Universe*. Weinberg, Steven y  
Nestor Miguez, *Los tres primeros minutos del universo*  
(2009)

## Fontes da Internet

The Universe Adventure, [http://www.universead-  
venture.org/](http://www.universeadventure.org/) or <http://www.cpepweb.org>

Ned Wright’s Cosmology Tutorial (in English, French  
and Italian) [http://www.astro.ucla.edu/~wright/  
cosmolog.htm](http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm)



# História da astronomia

Jay Pasachoff, Magda Stavinschi,  
Mary Kay Hemenway

União Astronômica Internacional, Williams College (Massachusetts, EUA), Instituto Astronômico da Academia Romena (Bucareste, Roménia), Universidade do Texas (Austin, EUA)

---

## Resumo

Esta breve resenha da História da Astronomia oferece uma descrição acerca da natureza da astronomia e das suas origens, seguido de um resumo dos principais acontecimentos no desenvolvimento da astronomia na Europa ocidental até à época de Isaac Newton.

## Objetivos

- Oferecer uma visão geral da história da astronomia em diferentes partes do mundo de modo superficial, mas com o objetivo de mostrar que a astronomia tem sido e é do interesse de todos os povos.
  - Mencionar as grandes figuras da história da astronomia que contribuíram, antes de Newton, de forma relevante para o desenvolvimento desta disciplina: Tycho Brahe, Copérnico, Kepler e Galileu.
  - O resumo necessário para uma conferência não permite desenvolver a história da astronomia contemporânea da atualidade, mas estes conteúdos estão presentes em outros capítulos deste livro.
- 

## Pré-História

Com o céu escuro, os povos antigos podiam ver as estrelas: levantavam-se na parte oriental do céu, moviam-se para cima, punham-se no oeste. Numa direção, as estrelas moviam-se em círculos diminutos. Hoje em dia, quando olhamos para o norte, vemos uma estrela nessa posição – a Estrela do Norte, ou Polar. Não é uma estrela muito brilhante: 48 estrelas no céu são mais brilhantes que ela, mas está num lugar interessante. Em tempos antigos, outras estrelas alinharam-se com o Polo Norte da Terra, ou, às vezes, não existiam estrelas na vizinhança do polo.

Desde que as pessoas começaram a olhar o céu, perceberam que alguns dos objetos mais brilhantes não nascem e se põem exatamente com as estrelas. Claramente, a Lua é, de longe, o objeto mais brilhante do céu noturno. Sobe quase uma hora mais tarde a cada noite, e aparece num contexto diferente das estrelas. A

sua forma também muda, o que agora chamamos de fases.

Mas algumas destas luzes no céu movimentam-se de forma diferente das outras. Estas foram denominadas pelos gregos de errantes, ou planetas. Praticamente todas as civilizações da Terra perceberam e nomearam estes objetos.

Alguns povos antigos construíram monumentos: círculos como Stonehenge, em Inglaterra, ou tumbas como as de Menorca, em Espanha, que estavam alinhadas com o Cruzeiro do Sul, em 1000 a.C. Os babilônios foram grandes estudiosos dos fenómenos astronômicos, mas foram os gregos quem construíram a disciplina que trata de explicar o firmamento.

## Os gregos

Tal como Aristóteles (384 a.C. - 322 a.C.), a maioria dos gregos antigos pensava que a Terra estava no centro do Universo e era composta de quatro elementos: Terra, Ar, Fogo e Água. Além da Terra existia um quinto elemento, o éter (ou quinta essência), que constituía os pontos da luz no céu.

Perceberam que alguns dos objetos se moviam de forma diferente do resto das estrelas. Estes foram batizados de “errantes”, ou planetas. Na sua maioria, movem-se na mesma direção que as estrelas: nascem a leste e movimentam-se para o oeste. Mas, às vezes, parece que fazem uma pausa e movimentam-se para trás em comparação ao deslocamento das estrelas. Este movimento para trás é denominado movimento “retrógrado”, para diferenciar do movimento para frente, chamado “direto”.

O astrónomo grego Cláudio Ptolomeu (90-168) trabalhou em Alexandria, norte da África, no século II d.C. Ptolomeu queria prever as posições dos planetas e chegou a uma solução matemática. Seguindo Aristóteles, pôs a Terra no centro do Universo. A Lua e os planetas estavam ao redor da Terra em círculos concêntricos que aumentavam com a distância. O que aconteceria caso os planetas se movessem realmente

em pequenos círculos cujos centros estivessem nos círculos grandes? Nessa situação, alguns dos movimentos dos pequenos círculos mover-se-iam mais rapidamente para trás em relação aos centros destes círculos do que se movimentariam para adiante. Desde a Terra, veríamos que os planetas movimentar-se-iam para trás. Esses pequenos círculos chamam-se “epíclis”, e os grandes círculos são conhecidos como “deferentes”. A ideia de Ptolomeu de que os círculos se movem em círculos teve influência na ciência ocidental por muito tempo. Partindo da observação para a teoria, o uso da matemática foi um passo único e importante no desenvolvimento da ciência ocidental.

Praticamente todas as culturas na Terra olhavam para o céu, apesar de não possuírem os mesmos nomes para os objetos que observaram. Eles usaram a informação para a elaboração de calendários, anunciar os ciclos das estações para semear, colher ou caçar, e também para as cerimônias religiosas. Como os gregos, alguns deles desenvolveram sofisticadamente a matemática para prever os movimentos dos planetas ou eclipses; contudo, não quer dizer que se tratou do que poderíamos chamar uma teoria científica. Aqui segue alguns exemplos:

### África

Este povo posicionou pedras em posição vertical, em Nabta, no Deserto de Núbia, aproximadamente 1.000 anos antes de Stonehenge. Os egípcios utilizaram a astronomia para alinhar as suas pirâmides e ampliar suas crenças religiosas ao incluir a ciência das estrelas. Petróglifos em Namoratunga (Quênia) compartilham aspectos de marcas de gado. A tradição das estrelas vem de todas as áreas da África, da região de Dogon de Malí, da África Ocidental, da Etiópia e da África do Sul.

### Astronomia islâmica

Muitos dos avanços astronômicos foram realizados no mundo islâmico, especialmente durante a Idade de Ouro Islâmica (séculos VIII ao XV) e na sua maioria escritos em língua árabe. Grande parte dos progressos foi desenvolvido no Oriente Médio, Ásia Central, Al-Andalus, norte de África, e mais tarde no Longínquo Oriente e na Índia. Um número significativo de estrelas no céu, como Aldebarã e Altair, e termos astronômicos, tais como alidade, azimute e almicantarado, são derivados dos seus nomes árabes. Os árabes inventaram os números árabes, incluindo o uso do zero. Eles estavam interessados em determinar a posição do Sol e a hora do dia (já que eram úteis para os seus serviços religiosos). Também fizeram muitas descobertas em ótica. Um grande número de obras gregas foram con-

servados para a posteridade através das suas traduções para o árabe.

As primeiras observações regulares realizadas pelos islâmicos foram realizadas sob o patrocínio de Al-Maamun (786-833). Aqui, e em muitos outros observatórios particulares de Damasco a Bagdade, foram medidos os graus do meridiano, estabeleceram-se os parâmetros solares e empreenderam-se observações detalhadas do Sol, da Lua e dos planetas. Alguns instrumentos usados pela Astronomia Islâmica foram: globos celestes e esferas armilares, astrolábios, relógios de sol e quadrantes.



Fig. 1: Astrolábio Árabe.

### As Américas: América do Norte

Os povos nativos da América do Norte também deram nome às suas constelações do céu e contavam histórias que foram transmitidas através da tradição oral. Alguns artefactos, tais como rodas de pedra ou os alinhamentos na construção, permanecem como evidência do uso da astronomia na vida quotidiana.

### Astronomia maia

Os maias foram uma civilização mesoamericana, destacada por ser a única que apresentou uma língua escrita totalmente desenvolvida da América pré-colombiana, arte, arquitetura, matemática e sistemas astronômicos. As cidades maias, estabelecidas durante o período Pré-clássico (2000 a.C. a 250 d.C.), atingiram o seu mais alto grau de desenvolvimento no período Clássico (c. 250 d.C. a 900 d.C.), continuando durante o período pós clássico, até à chegada dos espanhóis. O povo maia não desapareceu, nem no período de declínio que ocorreu no período clássico, nem com a chegada dos conquistadores espanhóis e a posterior colonização espanhola das Américas.

A astronomia maia é uma das mais antigas do mundo já conhecidas, sobretudo devido a seu famoso calendá-

rio, atualmente mal interpretado como uma previsão do fim do mundo. A civilização maia parece ser a única cultura pré-telescópica a demonstrar o conhecimento da Nebulosa de Oriente como difusa, ou seja, não como um ponto estelar.



Fig. 2: Chichén Itzá (México) são importantes restos arqueológicos da astronomia maia.

Os maias estavam interessados nas passagens zenitais, momento em que o Sol passa diretamente sobre a cabeça do observador. As latitudes da maioria das suas cidades encontram-se abaixo do Trópico de Câncer, pelo que estas passagens zenitais aconteceriam duas vezes por ano, equidistantes do solstício. Para representar esta posição do Sol sobre as suas cabeças, os maias tinham um deus chamado Deus Descendente (*Diving God*).

Vénus era o objeto astronómico mais importante para os maias, até mais do que o Sol. O calendário maia era um sistema de calendários e almanaques utilizados na civilização maia da Mesoamérica pré-colombiana, e em algumas comunidades maias modernas no altiplano de Guatemala e Oaxaca, México.

Mesmo que o calendário mesoamericano não tenha surgido com os maias, as suas posteriores ampliações e melhorias foram as mais sofisticadas. Juntamente com os dos astecas, os calendários maias são os melhores documentados e mais compreendidos.

### Astronomia asteca

Os astecas eram grupos étnicos do centro do México, em particular os grupos que falavam a língua nauatle, e que dominaram grande parte da Mesoamérica nos séculos XIV, XV e XVI, num período conhecido como o pós-clássico tardio na cronologia mesoamericana.

A cultura e a história asteca são conhecidas, principalmente, através das provas arqueológicas encontradas em escavações, como a do famoso Templo Maior na Cidade de México e em muitas outras. Também é apreciada por causa dos códices indígenas de cascas de papel, pelas descrições dos séculos XVI e XVII da cultura asteca, incluindo até os relatos de conquistadores

espanhóis e a história escrita por religiosos espanhóis e letrados astecas que conheciam o idioma espanhol ou nauatle.

O Calendário Asteca ou Pedra do Sol é o primeiro monólito que resta da cultura pré-hispânica na América Central e na América do Sul. Estima-se que foi talhado por volta do ano 1479. Este é um monólito circular com quatro círculos concêntricos. No centro aparece o rosto de Tonatiuh (Deus Sol), adornado com jade e sustentando uma faca na boca. Os quatro sóis ou “mundos” anteriores estão representados por figuras de forma quadrada que ladeiam o Quinto Sol, no centro. O círculo exterior consta de 20 áreas que representam os dias de cada um dos 18 meses que conformaram o calendário asteca. Para completar o ano solar de 365 dias, os astecas incorporaram 5 dias de sacrifício, ou Nemontemi.

Da mesma forma que quase todos os povos antigos, os astecas agruparam em associações as estrelas aparentemente brilhantes (as constelações): Mamalhuaztli (Cinturão de Oriente), Tianquiztli (as Plêiades), Citlaltlactli (Gêmeos), Citlalcolotl (Escorpião) e Xonecuilli (Ursa Menor ou Cruz do Sul para outros, etc.). Os cometas foram chamados de “estrelas que fumam”.

Os grandes períodos de tempo estão definidos por eras de sóis diferentes na cosmologia asteca, cada um dos finais foi determinado por desastres cada vez mais significativos, como a destruição dos jaguares, furacões, incêndios, inundações ou terremotos.

### Astronomia Inca

A civilização Inca é uma civilização pré-colombiana do Grupo Andino. Teve início no princípio do século XIII na bacia do Cuzco, no atual Peru, e depois cresceu ao longo do Oceano Pacífico e dos Andes, cobrindo a parte ocidental da América do Sul. No seu apogeu, estendeu-se desde a Colômbia até à Argentina e Chile, através do Equador, Peru e Bolívia.

Os incas consideravam o seu Rei, Sapa Inca, o “filho do Sol”. Os seus membros identificavam na Via Láctea várias áreas escuras ou nebulosas escuras como animais e associavam o seu aparecimento com as chuvas das estações.

Os incas usaram um calendário solar para a agricultura e um calendário lunar para as festas religiosas. Segundo as crônicas dos conquistadores espanhóis, nas proximidades de Cuzco, no atual Peru, existia um grande calendário que podia ser visto de longe e consistia em 12 colunas de 5 metros de altura cada uma através do qual as pessoas podiam saber a data. Ce-

lebravam duas grandes festas, o Inti Raymi e Capac Raymi, o solstício de inverno e verão, respectivamente.

Os incas tinham as suas próprias constelações: o Yutu (perdigão) era a zona escura da Via Láctea à qual chamamos o Saco de Carvão. As Plêiades eram conhecidas como cúmulo Qollqa. Com as estrelas da constelação de Lyra, fizeram um desenho de um dos animais mais conhecidos por eles e chamaram-no de Pequena Lhama de Prata ou Lhama de cor, cuja estrela mais brilhante (Vega) foi Urkuchillay, entretanto, considerado por outras fontes como o nome de toda a constelação. Para além delas estavam a Machacuay (serpente), a Hamp'atu (sapo), a Atoq (zorro), o Kuntur, etc.

As grandes cidades foram construídas seguindo os alinhamentos celestes e o uso dos pontos cardeais.

Nas proximidades de Cuzco, havia um importante templo dedicado ao Sol (Inti), do qual saíam algumas linhas de forma radial que dividiam o vale em 328 templos. Esse número é ainda um mistério, mas uma possível explicação relaciona-o com a astronomia: coincide com os dias que contém doze meses lunares. Os 37 dias que faltam até os 365 dias do ano solar coincidem com os dias em que o cúmulo das Plêiades não é observável a partir de Cuzco.

## Índia

A primeira menção textual que aparece na literatura religiosa da Índia (segundo milénio a.C.) converteu-se numa tradição estabelecida no primeiro milénio a.C., quando as diferentes áreas auxiliares da educação começaram a desenvolver-se.

Durante os séculos seguintes, uma série de astrónomos indianos estudou vários aspetos das ciências astronómicas e seguiu um discurso global com outras culturas. Gnómones e esferas armilares eram instrumentos comuns.

O calendário indiano utilizado na antiguidade sofreu muitas mudanças no processo de regionalização, e hoje em dia existem vários calendários regionais da Índia, assim como um calendário nacional. No calendário indiano, o dia começa com o nascer do Sol local. São vinculados cinco “propriedades”, as denominadas angas.

A eclíptica divide-se em 27 nakshatras, que são denominadas indistintamente casas lunares ou asterismos. Estas refletem o ciclo da lua versus as estrelas fixas, de 27 dias e 72 horas, sendo a parte fracionária compensada intercalando um nakshatra 28. Os cálculos dos nakshatra parecem ter sido bem conhecidos na época

do Rig Veda (segundo e primeiro milénio a.C.).

## China

Os chineses poderiam ser considerados como os observadores mais persistentes e precisos dos fenómenos celestes em qualquer parte do mundo antes dos árabes. Fizeram registos detalhados das observações astronómicas que foram iniciadas durante o período dos Reinos Combatentes (século IV a.C.) e prosperaram a partir do período Han.

Alguns elementos da astronomia indiana chegaram à China com a expansão do budismo após a Dinastia Han (25-220), mas a incorporação mais detalhada da Astronomia Indiana ocorreu durante a dinastia Tang (618-907).

A astronomia revitalizou-se sob o estímulo da cosmologia e da tecnologia ocidental depois dos jesuítas terem estabelecido as suas missões. O telescópio foi introduzido no século XVII. O equipamento e a inovação utilizada pela astronomia Chinesa: esfera armilar, globo celeste, a esfera armilar de acionamento hidráulico e a torre do globo celeste.

A astronomia chinesa centrou-se mais nas observações do que na teoria. Segundo os escritos dos jesuítas que visitaram Pequim no século XVII, os chineses tinham informações desde o ano 4000 a.C., entre eles a explosão de supernovas, os eclipses e o aparecimento de cometas.

No ano 2300 a.C. desenvolveram o primeiro calendário solar conhecido, e no ano 2100 a.C. registaram um eclipse solar. Em 1200 a.C. descreveram manchas solares, que foram denominadas de “pontos escuros” no Sol. No ano 532 a.C., deixaram evidência do aparecimento de uma estrela supernova na constelação de Águia, e em 240 e 164 a.C. confirmaram a passagem do cometa Halley. No ano 100 a.C. os chineses inventaram a bússola com a qual marcaram a direção norte.

Em tempos mais recentes, determinaram que a precessão dos equinócios era de 1 grau a cada 50 anos, registaram mais supernovas e descobriram que a cauda dos cometas aponta sempre na direção oposta à posição do Sol.

No ano 1006 foi observado o aparecimento de uma supernova tão brilhante que era vista durante o dia. Trata-se da supernova mais brilhante que foi conhecida. Em 1054, observaram uma supernova, cujos restos foram mais tarde chamados de Nebulosa do Caranguejo.

SA sua esfera celeste difere da ocidental. O equador ce-

leste dividiu-se em 28 partes, chamadas “casas”, e teve um total de 284 constelações com nomes como Ursa, Três Passos, Palácio Supremo, trípode, lança ou arpão. O Ano Novo Chinês começa no dia da primeira lua nova depois do Sol entrar na constelação de Aquário.

O erudito cientista chinês Shen Kuo (1031-1095) não só foi a primeira pessoa na história que descreveu a bússola com agulha, como também fez uma medição mais precisa da distância entre a Estrela Polar e o Norte verdadeiro que podia ser utilizado para a navegação. Shen Kuo e Pu Wei também estabeleceram um projeto de observação astronômica noturna num período de cinco anos consecutivos, um intenso trabalho que inclusive conseguiu competir com o trabalho posterior de Tycho Brahe na Europa. Para este projeto também delineararam as coordenadas exatas dos planetas num mapa de estrelas e criaram as teorias do movimento planetário, incluindo o movimento retrógrado.

## Europa Ocidental

Após a queda de Roma, o conhecimento obtido pelos gregos foi mal transmitido através do trabalho de monges, que frequentemente copiavam manuscritos que não tinham nenhum sentido para eles. Com o surgimento das escolas ligadas às catedrais e das primeiras universidades, os acadêmicos começaram a enfrentar os enigmas que a ciência oferecia. Através do comércio (e saque) novos manuscritos vieram do oriente através das Cruzadas, e o contacto com os eruditos Islâmicos (especialmente na Espanha) permitiram realizar as traduções para o latim. Alguns eruditos tentaram extrair a informação numa forma que se adaptasse ao ponto de vista cristão.

### Gênio matemático: Nicolau Copérnico da Polónia

Em 1500, Nicolau Copérnico (1473-1543) chegou à conclusão de que o Universo seria mais simples se o Sol, em vez da Terra, fosse o seu centro. Então, o movimento retrógrado dos planetas poderia acontecer inclusive se todos os planetas simplesmente orbitassem em círculos ao redor do Sol. O movimento para trás seria uma ilusão ótica que se produziria quando passamos outro planeta. Do mesmo modo, se estamos num carro parado no semáforo, e há outro à direita, enquanto começamos primeiro a movimentar-nos, poderíamos pensar que o outro está a mover-se para trás.

Copérnico compartilhou as suas ideias com os matemáticos, mas não as publicou até que um jovem cientista, Georg Rheticus, o convenceu e o ajudou a publicar noutra cidade. Uma cópia impressa de *De revolutionibus orbium Coelestium* apareceu quando Copérnico estava a morrer, em 1543. Copérnico nunca

viu o prefácio escrito pelo editor, e este, sem assinar, indicava que o livro era uma forma matemática para calcular a posição, não a verdade real. Seguindo Aristóteles, Copérnico usou círculos e acrescentou alguns epiciclos. O seu livro seguiu a estrutura do livro de Ptolomeu, mas a sua devoção à simplicidade matemática foi influenciada por Pitágoras.

O livro de Copérnico inclui (figura 3) o diagrama talvez mais famoso da história da ciência. O Sol é posto no centro de uma série de círculos. Copérnico calculou as velocidades com que os planetas giravam ao redor do Sol, pois sabia quais se descolavam mais rapidamente no céu. Deste modo obteve a ordem correta dos planetas: Mercúrio, Vénus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, e conseguiu as distâncias relativas dos planetas, também corretas. No entanto, os seus cálculos não prediziam melhor as posições dos planetas do que o método de Ptolomeu.

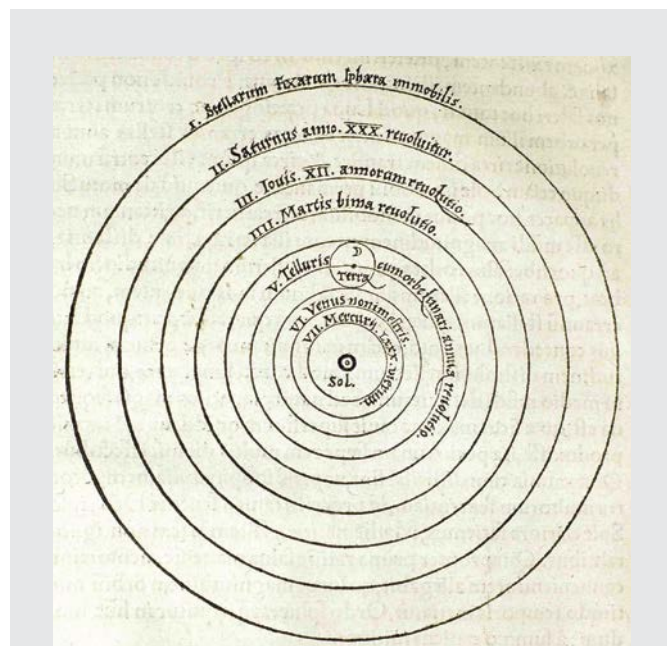


Fig. 3. Diagrama de Copérnico que mostra pela primeira vez o Sol no centro, no que é atualmente denominado Sistema Solar. Este diagrama está na primeira edição de *De revolutionibus orbium Coelestium* (Sobre as Revoluções das Órbitas Celestes), publicado em 1543.

Em Inglaterra, Leonard Digges escreveu um livro, em inglês, sobre a Terra e o Universo. Em 1576, o seu filho Thomas escreveu um apêndice no qual descrevia as novas ideias de Copérnico. No apêndice, apareceu pela primeira vez uma versão em inglês do diagrama de Copérnico. Digges também representou as estrelas a diferentes distâncias do Sistema Solar, não só numa esfera celeste.



Fig. 4. Primeiro diagrama de Copérnico em inglês do apêndice de Thomas Digges, retirado do livro escrito por seu pai, Por um prognóstico eterno, publicado em 1556. Continha apenas um diagrama de Ptolomeu. O apêndice de Thomas Digges foi exposto pela primeira vez em 1576. Este diagrama é de 1596, data da impressão.

### Gênio observacional: Tycho Brahe da Dinamarca

O aristocrata dinamarquês Tycho Brahe (1546-1601) responsabilizou-se por uma ilha em frente à costa de Copenhague e recebeu o aluguer dos residentes. Nesta ilha, Hven, utilizou a sua riqueza para construir um amplo observatório com grandes e aperfeiçoados instrumentos. Apesar de estes instrumentos serem pré-telescópicos, eram notáveis porque permitiam medidas mais precisas das posições das estrelas e dos planetas.

Tycho geria a sua casa como uma universidade atual, recebendo cientistas que vinham trabalhar com ele. Ele inventou melhores dispositivos de observação para medição das posições das estrelas e dos planetas, e mantinha registos precisos.

Entretanto, por causa do zelo científico, esqueceu-se de algumas responsabilidades para com o seu monarca, e quando um novo rei e rainha chegaram, foi expulso. Ele optou por mudar-se para Praga, no continente Europeu, levando as suas máquinas de impressão, as páginas que já tinham sido impressas, os seus registos e os instrumentos móveis.

Tycho conseguiu melhorar a exatidão das observações científicas. As suas observações precisas de um cometa, a diferentes distâncias, mostraram-lhe que as esferas não necessitavam ser concêntricas com a Terra no centro. Portanto, ele fez o seu próprio modelo do

Universo —um híbrido entre o modelo de Ptolomeu e o de Copérnico: o Sol e a Lua giram ao redor da Terra, enquanto os outros planetas giram ao redor do Sol. O modelo de Tycho ainda possuía círculos, mas ao contrário de Aristóteles, ele permitiu que os círculos se cruzassem entre si.

Tycho é valorizado principalmente pela preciosa observação das posições do planeta Marte relativamente às estrelas. Tycho convidou um jovem matemático, Johannes Kepler, para trabalhar com ele em Praga. É através de Kepler que a fama de Tycho permanece.

### Utilizando a Matemática:

#### Johannes Kepler da Alemanha

Como professor em Graz, Áustria, o jovem Johannes Kepler (1571-1630) recordava a sua infância interessado na astronomia, devido ao cometa e ao eclipse lunar que tinha observado. Ele percebeu que há cinco formas sólidas constituídas por faces iguais, pelo que pensou que se estes sólidos fossem concêntricos e separados por esferas, poderiam corresponder aos seis planetas conhecidos. No seu livro, *Mysterium Cosmographicum* (Mistério do Cosmos), publicado em 1596, continha um dos esquemas mais belos da história da ciência (figura 5). Nele colocou um icosaedro, um oc-

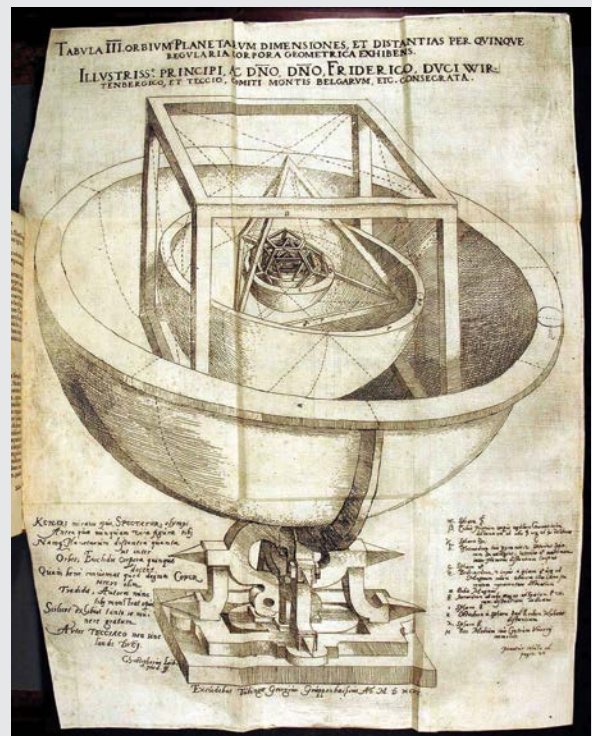


Fig. 5: Diagrama desdobrável de Kepler de seu *Cosmographicum Mysterium* (Mistério do Cosmos), publicado em 1596. A sua conceção da distribuição geométrica do Sistema Solar foi substituído na década seguinte pelas disposições dos planetas de acordo com as duas primeiras das suas três leis do movimento planetário, um sistema que é válido até hoje.

taedro, um dodecaedro, um tetraedro e um cubo, com vinte, oito, doze, quatro e seis lados, respetivamente, encaixados um dentro do outro, para representar a distância dos planetas então conhecidos. O diagrama, apesar de muito belo, está completamente errado.

Entretanto, a habilidade matemática de Kepler proporcionou-lhe uma entrevista com Tycho. Em 1600, Kepler converteu-se num dos assistentes de Tycho, e fez cálculos com as informações que Tycho tinha acumulado. Posteriormente, Tycho foi a um jantar formal e bebeu demais. Conforme a história, o protocolo impediu-o de levantar-se da mesa o que provocou um reventamento da sua bexiga. A sua morte, rápida e dolorosa, foi descrita minuciosamente no seu diário e está bem documentada.

Após a morte de Tycho, Kepler não obteve as informações imediatamente. Por um lado, os dados eram uma das poucas coisas valiosas que os filhos de Tycho podiam herdar, já que Tycho tinha casado com uma plebeia e por isso não pôde legar bens reais. No entanto, Kepler acabou por finalmente ter acesso aos dados de Tycho sobre Marte, e tentou realizar os seus próprios cálculos. Para realizar cálculos precisos, Kepler elaborou inclusive a sua própria tabela de logaritmos.

Os dados que Kepler tinha de Tycho eram da posição de Marte contra um fundo de estrelas. Tentou calcular o que deveria ser o movimento real ao redor do Sol. Durante muito tempo tentou aplicar um círculo ou em uma órbita em forma de ovo, mas não conseguiu relacionar as observações com suficiente precisão. Finalmente, tentou com uma figura geométrica chamada elipse, uma espécie de círculo amassado. Encaixava-se! É uma das maiores descobertas na história da astronomia, e apesar de Kepler a ter aplicado pela primeira vez para Marte e depois para outros planetas de nosso Sistema Solar, atualmente aplicamo-la para centenas de planetas que descobrimos ao redor de outras estrelas.

O livro de Kepler de 1609, *Astronomia Nova* (Nova astronomia), continha as duas primeiras (das suas três) leis do movimento:

*Primeira lei de Kepler: A órbita dos planetas ao redor do Sol são elipses, com o Sol num dos seus focos.*

*Segunda lei de Kepler: Uma linha que une um planeta e o Sol varre áreas iguais em tempos iguais.*

Uma elipse é uma curva fechada que possui dois pontos cravados nela, conhecidas como focos. Para desenhar a sua própria elipse, coloque dois pontos numa folha de papel, cada um é um foco. A seguir, pegue num pedaço de corda mais comprida que a distância

entre os focos. Prenda-as nos focos. A seguir, coloque um lápis na corda, puxando (esticando-a), e suavemente mova o lápis de lado a lado. A curva gerada será um lado de uma elipse, logo, é simples mover o lápis para desenhar o outro lado. Esta experiência com a corda mostra um dos pontos-chaves que definem uma elipse: a soma das distâncias desde um ponto da elipse a cada foco mantém-se constante. Um círculo é um tipo especial de elipse onde os dois pontos estão um em cima do outro.

Kepler manteve a busca de harmonias nos movimentos dos planetas. Ele associou as velocidades dos planetas com notas musicais: as notas agudas correspondem aos planetas que se deslocam mais rapidamente, especificamente, Mercúrio e Vénus. Em 1619, publicou a sua obra mais importante, *Harmonices Mundi* (A harmonia dos mundos). Nela (figura 6), incluía além dos pentagramas com as notas, a denominada terceira lei do movimento planetário:

*Terceira Lei de Kepler do movimento planetário: O quadrado do período da órbita de um planeta ao redor do Sol é proporcional ao cubo do tamanho de sua órbita.*



Fig. 6: *Harmonices Mundi* de Kepler (A harmonia do mundo), publicado em 1619.

Os astrónomos costumam medir as distâncias entre os planetas em termos de Unidades Astronómicas, que correspondem à distância média entre a Terra e o Sol, ou 150 milhões de quilômetros.

Mercúrio	0.387 ua	0.240 anos
Vénus	0.723 ua	0.615 anos
Terra	1 ua	1 ano
Marte	1.523 ua	1.881 anos
Júpiter	5.203 ua	11.857 anos
Saturno	9.537 ua	29.424 anos

Tabela 1: Distâncias desde o Sol e períodos dos planetas na época de Kepler.

Elevando ao quadrado a primeira coluna e ao cubo a segunda coluna, veremos que são bastante semelhantes. As diferenças provêm da aproximação, não do mundo real; mesmo que tivessem mais decimais, as influências dos outros planetas poderiam ser detetadas.

**Descobertas com o telescópio:**

**Galileu Galilei da Itália**

O ano 2009 foi o Ano Internacional da Astronomia, declarado inicialmente pela União Astronômica Internacional, depois pela UNESCO e finalmente pela Assembleia Geral das Nações Unidas. Por quê? Foi comemorado o uso do telescópio nos céus, por Galileu, 400 anos antes, em 1609.

Galileu (1564-1642) foi professor em Pádua, parte da República de Veneza. Galileu soube da existência de um invento holandês que possibilitaria ver mais de perto objetos distantes. Apesar de nunca ter visto nenhum, descobriu o que as lentes deveriam conter e construiu um. Mostrou o seu dispositivo aos nobres de Veneza como um projeto militar e comercial, o que permitiria ver os barcos no mar mais distantes que nunca. A sua invenção foi um grande sucesso.

Teve então a ideia de direcionar um telescópio para cima. Apesar de o telescópio ser difícil de manusear, não possuir muita mobilidade e ter uma área de visão muito estreita, Galileu teve êxito ao ver parte da Lua e percebeu que esta continha muitas estruturas. Por causa da sua formação como pintor na Itália do Renascimento, compreendeu que as estruturas representavam luz e sombra, portanto estava vendo montanhas e crateras. Pela longitude das sombras e a forma de como se modicavam com a iluminação do Sol, podia até imaginar o quão altas eram. Alguns meses antes, o inglês



Fig. 7a: Um dos dois telescópios restantes de Galileu chegou ao Instituto Franklin na Filadélfia em 2009, na sua primeira visita aos Estados Unidos. É de notar que a parte externa da lente está coberta com um anel de papelão. Ao ocultar a parte exterior da lente, que é a parte menos precisa, Galileu melhorou a qualidade das suas imagens (Foto: Jay M. Pasachoff).

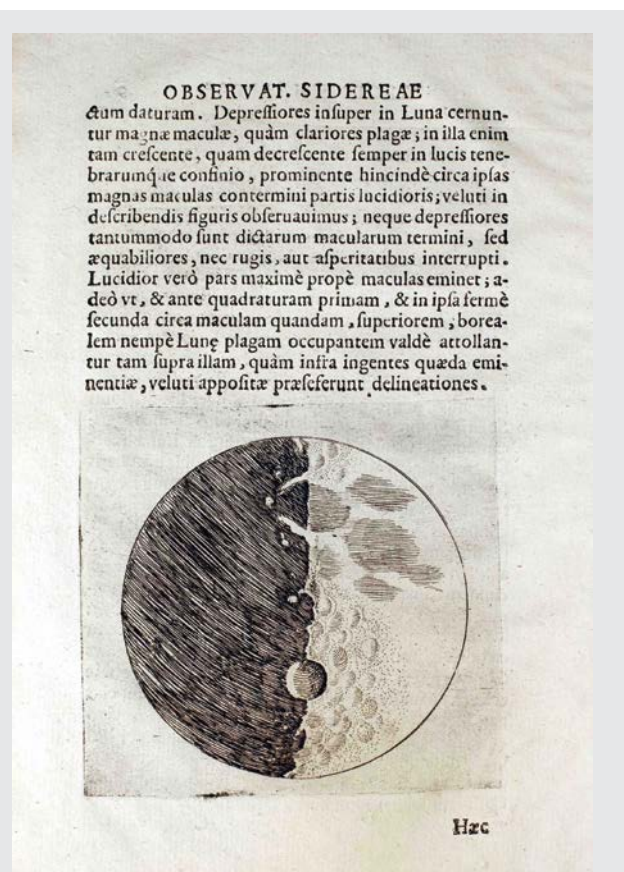


Fig. 7b: Uma página do Sidereus Nuncius de Galileu (O mensageiro dos astros), publicado em 1610, mostrando uma gravura da Lua. O livro foi escrito em latim, a língua dos eruditos europeus. O livro inclui uma ampla cobertura do movimento relativo das quatro luas principais de Júpiter.

Thomas Harriot apontou à Lua com um telescópio similar, mas só tinha desenhado alguns garranchos e rabiscos. Harriot não estava interessado na publicação ou na glória, e a sua obra não foi conhecida até depois de sua morte.

Uma lente que Galileu utilizou para as suas descobertas conserva-se, rachada, no Museu de História da Ciência em Florença, Itália, e dois telescópios completos, que sobraram, também estão no Museu (figura 7a).

Galileu começou a escrever as suas descobertas no final de 1609. Não só observou montanhas e crateras na Lua, mas também que a Via Láctea estava constituída por muitas estrelas, da mesma forma que certos asterismos. Logo, em janeiro de 1610, deparou-se com quatro 'estrelas' próximas de Júpiter que se moviam com o planeta e mudavam de posição a cada noite. O acontecimento marcou a descoberta das principais luas de Júpiter, atualmente denominados satélites galileanos. Galileu registou as suas descobertas no pequeno livro intitulado *Sidereus Nuncius* (O mensageiro dos astros), que foi publicado em 1610 (figura 7b). Desde Aristóteles e Ptolomeu que se acreditava que a Terra era o único centro de revolução. Aristóteles foi considerado infalível. Porém, a descoberta dos satélites de Júpiter

foi um golpe tremendo para a ideia geocêntrica, pois mostrou que Aristóteles teria estar equivocado e, portanto, um ponto forte a favor da teoria heliocêntrica de Copérnico.

Galileu tentou dar às luas o nome de Cosme de Medici, seu patrão, para ganhar sua boa vontade. Esses nomes não perduraram. Alguns anos depois, Simon Marius propôs os nomes que são utilizados atualmente (Marius, pode ter visto as luas um pouco antes que Galileu, mas publicou bem mais tarde). Da esquerda à direita, são Io, Europa, Ganmedes e Calisto (figura 9). Com um pequeno telescópio amador é possível ver e observar, numa noite clara, que no intervalo de algumas horas estas mudam de posição. As luas orbitam Júpiter em períodos de poucos dias.

Até mesmo com os melhores e maiores telescópios terrestres, os astrónomos não puderam obter uma visão clara da estrutura da superfície dos satélites galileanos. Somente quando a NASA, com os satélites Pioneer 10 e 11, e depois Voyager 1 e 2, voou próximo do sistema de Júpiter, observamos com suficiente detalhe os satélites e suas superfícies para poder caracterizá-los. A partir de observações terrestres e espaciais, os astrónomos ainda estão descobrindo luas de Júpiter, apesar de que as recém-descobertas são bem menores e menos brilhantes que os satélites galileanos.

Galileu utilizou as suas descobertas para conseguir um trabalho melhor, em Florença, com um salário mais alto. Infelizmente, Florença, que servia como intermediária bancária do Papa, estava mais perto da autoridade papal em Roma, e era menos liberal que a República da Veneza. Galileu continuou a escrever sobre uma variedade de temas científicos, tais como as manchas solares, cometas e corpos flutuantes. Cada descoberta parecia contradizer algum argumento dos estudos de Aristóteles. Descobriu que Vénus possuía fases – e assim sendo comprovou que Vénus orbita o Sol. O fato não provou que a Terra orbitava o Sol, pois a cosmologia híbrida de Tycho poderia explicar estas fases. Entretanto, Galileu compreendeu esta descoberta como uma prova de suporte a Copérnico.

Em 1616, foi informado por funcionários da Igreja de Roma para que não ensinasse o copernicanismo, que era o Sol, e não a Terra, o centro do Universo. Guardou silêncio durante muito tempo, mas em 1632 publicou o *Diálogo* (Diálogo sobre dois máximos sistemas do mundo), no qual três homens discutiam os sistemas geocêntrico e heliocêntrico. Ele tinha permissão oficial para publicar o livro, mas a obra tornou evidente a sua preferência pelo sistema heliocêntrico de Copérnico. Foi julgado por sua desobediência e condenado à de-



Fig. 8. No ano de 2009, para comemorar o 400º aniversário do primeiro uso do telescópio no céu por Galileu, uma placa foi posta numa coluna na parte superior do campanário, uma torre do século XV (reerguida no século XX após seu colapso em 1902), em Veneza. Esta comemoração é referente à demonstração do telescópio de Galileu aos nobres de Veneza, mediante a observação de barcos relativamente distantes no mar, antes que ele apontasse com seu telescópio para o alto. A inscrição na placa pode ser traduzida mais ou menos como "Galileu Galilei, com a sua luneta, no dia 21 de agosto de 2009, ampliou os horizontes do homem, há 400 anos atrás" (Foto: Jay M. Pasachoff).

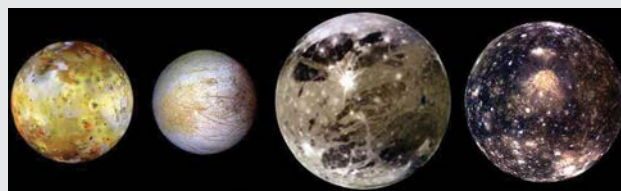


Fig. 9. O próprio Galileu ficaria surpreso ao ver o que a sua nave homônima e suas predecessoras mostraram dos "Medician satellites" (que ele descobriu em 1609). Aqui é mostrada, em imagens, a verdadeira escala relativa. Da esquerda para a direita, vemos Io, recentemente ressurgiu com duas dúzias de vulcões em erupção contínua. Em segundo lugar está Europa, principal suspeito para a busca de vida extraterrestre por causa do mar encontrado abaixo da capa de gelo suave. Em terceiro lugar, Ganímedes, a maior lua do Sistema Solar, mostrando, principalmente, uma parte fascinante de sua superfície acanalada. E à direita, Calisto, mais longe que os outros e coberto de gelo duro que conserva as cicatrizes da superposição de impactos de meteoritos que foram produzidos durante bilhões de anos. (NASA: Missão de Galileu, PIA01400).

tenção domiciliária, onde permaneceu até ao resto da sua vida.

### A Nova Física: Isaac Newton da Inglaterra

Muitos acreditam que os três melhores físicos de todos os tempos são: Isaac Newton, James Clerk Maxwell e Albert Einstein. Um resumo: Newton descobriu a lei da gravidade, Clerk Maxwell unificou a eletricidade e o magnetismo, e Einstein descobriu a relatividade especial e geral.

Sabemos da história que o jovem Isaac Newton (1642-1727) foi enviado para sua casa, desde a Universidade de Cambridge para Woolsthorpe, próximo de Lincoln, na Inglaterra, quando as universidades inglesas fecharam devido à praga. Enquanto em casa, viu uma

maçã cair da árvore e percebeu que a mesma força que controlava a queda da maçã era, sem dúvida, a mesma força que controlava o movimento da Lua.

Entretanto, Newton voltou ao Trinity College, Cambridge. Enquanto um grupo de cientistas, em Londres, se reúne num café para formar uma sociedade (atualmente a Royal Society), o jovem Edmond Halley viajou até Cambridge para conseguir os serviços de um brilhante matemático, Isaac Newton, que poderia colaborar com uma questão científica importante. A viagem de carruagem, desde Londres até Cambridge, era muito mais longa e difícil do que a atualmente correspondente hora de comboio.

Halley perguntou a Newton que se existisse uma força que atraísse conforme o quadrado da distância, que forma teria essa órbita? Newton respondeu que seria uma elipse. Excitado, Halley perguntou se ela tinha comprovado esse raciocínio, e Newton disse que estava registrado nuns papéis que não podia encontrar (talvez fosse uma forma para ganhar tempo e avaliar se realmente queria entregar as suas análises). De qualquer modo, Newton foi convidado a escrever algumas das suas conclusões matemáticas. Em poucos anos, os seus estudos conduziram ao seu livro mais famoso, o *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (Princípios Matemáticos de Filosofia Natural), no qual o que é denominado como Filosofia é o que hoje chamamos ciência.

O *Principia* de Newton foi publicado em latim, em 1687. Newton era ainda um professor universitário, e passou muito tempo até que fosse nomeado cavaleiro pelo seu trabalho posterior. Halley teve que pagar a impressão do livro de Newton, e defendeu-o, tendo inclusive escrito o prólogo. O famoso *Principia* inclui a lei de Newton que mostrava como a gravidade diminui com o quadrado da distância, e prova das leis de Kepler sobre as órbitas planetárias. O livro também inclui as leis do movimento de Newton, conhecidas como “leis”, em latim; enquanto as leis de Kepler estão ocultas no seu texto.

As Leis do movimento de Newton são:

*Primeira lei do movimento de Newton: Um corpo em movimento tende a permanecer em movimento, e um corpo em repouso tende a permanecer em repouso.*

*Segunda lei do movimento de Newton (versão moderna):*  
*Força = massa vezes aceleração*

*Terceira lei do movimento de Newton: Para cada ação há uma reação igual e oposta.*

Newton alicerçou as bases através da física matemática o que conduziu a ciência ao tempo moderno.

### Continua a investigação em astronomia

Assim como os povos antigos tinham curiosidade sobre o céu, e quiseram encontrar o seu lugar no Universo, os astrónomos de hoje basearam-se nas descobertas do passado com a mesma motivação. Descobertas teóricas e observações transformaram o entendimento sobre o nosso lugar no Universo, da visão geocêntrica de Ptolomeu à hipótese heliocêntrica de Copérnico, da descoberta de que o Sistema Solar não estava no centro de nossa galáxia ao nosso entendimento das galáxias distribuídas por todo o Universo..

A astronomia moderna depara-se com a investigação sobre a natureza da matéria escura e da energia escura. A teoria da relatividade de Einstein indica não só que a nossa galáxia não é o centro do Universo como também que a ideia de “centro” é algo sem sentido. Descobertas mais recentes de centenas de exoplanetas que orbitam outras estrelas evidenciaram o quão extraordinário é o nosso Sistema Solar. Novas teorias de formação planetária surgem em paralelo com a observação de inesperados e diferentes sistemas planetários. O caminho da descoberta mostra que os astrónomos da época moderna fazem o mesmo que fizeram os astrónomos há milhares ou centenas de anos atrás.

### Bibliografia

Hoskin, M. (editor), *Cambridge Illustrated History of Astronomy*, Cambridge University Press, 1997.

Pasachoff, J and Filippenko A, *The Cosmos: Astronomy in the New Millennium*, 4th ed., Cambridge University Press 2012.

### Fontes da Internet

[www.solarcorona.com](http://www.solarcorona.com)

<http://www.astrosociety.org/education/resources/multiprint.html>

<http://www2.astronomicalheritage.net>

# Sistema Solar

## Magda Stavinschi

União Astronómica Internacional, Instituto Astronómico da Academia Romena (Bucareste, Romênia)

### Resumo

Sem dúvida, de tudo o que falamos do Universo, estrelas e sistemas solares, planetas e exoplanetas, o sistema melhor conhecido é o Sistema Solar. Quem não sabe o que é o Sol, o que são planetas, cometas e asteroides? Mas é realmente assim? Se queremos saber isto a partir do ponto de vista científico, é necessário distinguir as regras que definem um sistema.

Quais os corpos que se enquadram nestas categorias (conforme a resolução da União Astronómica Internacional, de 24 de agosto de 2006)?

- planetas
- satélites naturais dos planetas
- 3 planetas anões
- outros corpos menores: asteroides, meteoritos, cometas, poeira, objetos da Cintura de Kuiper, etc.

Por semelhança, qualquer estrela rodeada por corpos celestes, de acordo com as mesmas leis, denomina-se sistema estelar. Qual é o lugar do Sistema Solar no Universo? Estas são algumas das perguntas a que tentaremos responder neste capítulo.

### Objetivos

- Determinar o lugar que o Sol ocupa no Universo.
- Determinar quais os objetos que formam o Sistema Solar.
- Conhecer detalhes sobre os diferentes corpos do Sistema Solar, especialmente dos mais importantes.

### Sistema Solar

O que é um sistema?

Um sistema é, por definição, um conjunto de elementos (princípios, normas, forças, etc.), que interagem entre si de acordo com uma série de princípios ou regras.

O que é um Sistema Solar?

Para definir um Sistema Solar vamos indicar os elementos do conjunto: o Sol e todos os corpos que o rodeiam estão a ele unidos pela força da gravidade.

Qual é o lugar do Sistema Solar no Universo?

O Sistema Solar está situado num dos braços exteriores

de nossa galáxia, também chamada Via Láctea. Este braço chama-se o braço de Oriente. Está situado numa região de densidade relativamente pequena.

O Sol, juntamente com todo o Sistema Solar, está em órbita em redor do centro da galáxia, situado a uma distância de 25 000 - 28 000 anos-luz (quase a metade do raio da galáxia), com um período de revolução de aproximadamente de 225 - 250 milhões de anos (ano galáctico do Sistema Solar). A velocidade com que se desloca ao longo desta órbita circular é de aproximadamente 220 km/s, enquanto a direção está orientada à posição atual da estrela Vega.

A nossa galáxia é composta por aproximadamente 200 mil milhões de estrelas juntamente com os seus planetas e por mais de 1 000 nebulosas. A massa de todo o conjunto é de aproximadamente 750 - 1 000 mil milhões de vezes maior que a do Sol; e o diâmetro é de 100 000 ano-luz.

Bem próximo está o sistema de Alpha Centauri (a estrela mais brilhante da constelação de Centauro). Este sistema é composto por três estrelas, um par de estrelas que constituem um sistema binário (Alpha Centauri A e B), semelhantes ao Sol, e uma terceira estrela, Alpha Centauri C, que provavelmente orbita as outras duas. Alpha Centauri C é uma anã vermelha com luminosidade relativamente pequena, a uma distância de 0,2 anos-luz das outras duas. Esta última é a estrela mais próxima do Sol, a uma distância de 4,24 anos-luz, motivo pelo qual também é conhecida como “Proxima Centauri”.

A nossa galáxia é parte de um grupo de galáxias chamado Grupo Local, composto de três galáxias grandes e uma série de outras 30 menores.

Nossa galáxia possui a forma de uma espiral enorme. Os braços desta espiral contêm, entre outras coisas, matéria interestelar, nebulosas e aglomerados de estrelas que se formam a partir dessa matéria. O centro da galáxia é composto por estrelas mais velhas, muitas vezes concentradas em aglomerados de forma esférica, denominados aglomerados globulares ou enxames globulares. A nossa galáxia possui aproximadamente 200

destes grupos, dos quais apenas 150 são bem conhecidos. O Sistema Solar está situado a 20 anos-luz acima do plano de simetria equatorial e a 28 000 anos-luz de distância do centro galáctico.

O centro da galáxia encontra-se na direção da constelação de Sagitário, a 25 000 - 28 000 anos-luz de distância do Sol.

## O Sol

A idade do Sol é de aproximadamente 4,6 mil milhões de anos. Atualmente, o Sol completou cerca de metade de seu ciclo de evolução. Durante o principal estágio da sua evolução, o seu núcleo de hidrogénio transforma-se em hélio através de fusão nuclear. No núcleo do Sol, mais de quatro milhões de toneladas de matéria é convertida em energia, em cada segundo, gerando neutrinos e radiação solar.

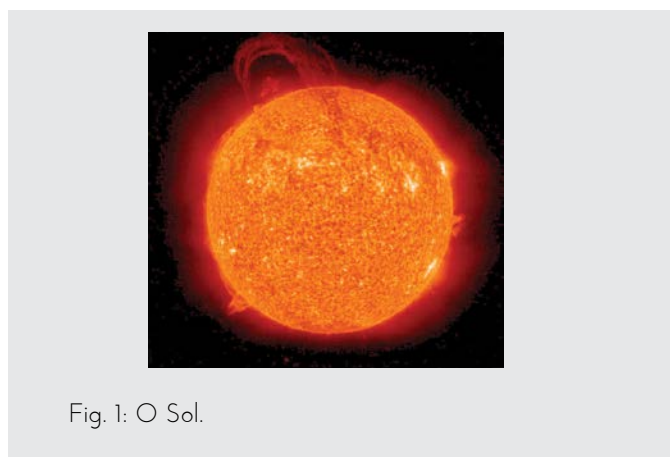


Fig. 1: O Sol.

### O ciclo de vida do Sol

Daqui a cerca de 5 mil milhões de anos o Sol converter-se-á numa gigante vermelha e depois numa anã branca, período após o qual nascerá uma nebulosa planetária. Finalmente, acabará o hidrogénio o que proporcionará mudanças radicais, a destruição final, com a Terra incluída. A atividade solar, mais especificamente a sua atividade magnética, produz um número de fenómenos incluindo manchas na sua superfície, erupções solares e variações do vento solar, que transportam matéria para todo o Sistema Solar e inclusive para além deste.

O Sol é composto maioritariamente por hidrogénio e hélio. O hidrogénio é aproximadamente 74%, e o hélio aproximadamente 25%, enquanto o resto são elementos pesados como oxigénio e carbono.

### A formação e evolução do Sistema Solar

O nascimento e a evolução do Sistema Solar motivaram as teorias mais extravagantes. Nem sequer as descobertas dos últimos séculos conseguiram aproximar-nos ao correto entendimento destes processos. Os

novos avanços da era espacial, o conhecimento de outros mundos semelhantes ao nosso Sistema Solar, assim como os avanços na física nuclear, ajudaram-nos a compreender melhor os processos fundamentais que ocorrem dentro de uma estrela e de como as estrelas funcionam.

A teoria atualmente aceite de como o Sol e o Sistema Solar foram formados (assim como outras estrelas) foi inicialmente proposta, em 1775, por Emmanuel Kant e, de forma separada, também por Pierre-Simon Laplace. De acordo com esta teoria as estrelas são formadas em grandes e densas nuvens de hidrogénio molecular. Estas nuvens são gravitacionalmente instáveis e colapsam em aglomerados menores e mais densos. No caso do Sol este aglomerado é chamada nebulosa solar. Este aglomerado iniciais colapsam ainda mais até forma estrelas e um disco de material, em seu redor, que poderão vir a ser planetas. A nebulosa solar deverá ter tido, originalmente, um diâmetro de 100 UA e uma massa de 2,3 vezes maior que a do Sol. À medida que a nebulosa ia colapsando sobre si mesma, a conservação do momento angular permitiu que esta começasse a rodar cada vez mais rápido, causando um aquecimento do centro da nebulosa. Este facto ocorreu há aproximadamente 4,6 mil milhões de anos. É aceite que hoje em dia o Sistema Solar é completamente diferente do original.

## Planetas

Será utilizada a definição da União Astronómica Internacional (UAI), na sua 26ª Assembleia Geral, realizada em Praga, em 2006.

No Sistema Solar, um planeta é um corpo celeste que:

1. está em órbita ao redor do Sol,
2. possui massa suficiente para manter o equilíbrio hidrostático (forma quase redonda), e
3. contribuiu para “limpar a vizinhança” ao redor da sua órbita.

Um corpo não-satélite que cumpra apenas os dois primeiros destes critérios é classificado como um “planeta anão”. Segundo a UAI, os planetas e os planetas anões são duas classes distintas de objetos. Um corpo não-satélite que cumpra só o primeiro critério é denominado “pequeno corpo do Sistema Solar” (SSSB).

Os rascunhos iniciais de reclassificação dos corpos previam a inclusão dos planetas anões como uma subcategoria dos planetas, mas como este projeto poderia conduzir ao acréscimo de dezenas de novos planetas no Sistema, essa intenção foi abandonada. Em 2006, foram acrescentados três planetas anões (Ceres, Éris e

Makemake) e reclassificado de um (Plutão). Desta forma, o Sistema Solar possui, atualmente, cinco planetas anões: Ceres, Plutão, Makemake, Huamea e Éris.

De acordo com a definição, há atualmente oito planetas e cinco planetas anões conhecidos no Sistema Solar. A definição distingue planetas de corpos menores e não é útil fora do Sistema Solar, onde não é possível detectar os corpos menores com a tecnologia atual. Os planetas extrassolares, ou exoplanetas, são tratados separadamente por diretrizes complementares de 2003 para a definição de planetas, que os distingue das estrelas anãs, que são maiores.

Vamos apresentar cada um dos corpos que integram o Sistema Solar:

## MERCÚRIO

Mercúrio é o planeta mais próximo do Sol e o menor planeta do Sistema Solar. É um planeta rochoso<sup>1</sup> (ou telúrico), no interior do Sistema Solar. Recebeu o nome do deus romano Mercúrio.

Não possui nenhum satélite natural. É um dos cinco planetas que pode ser visto da Terra a olho nu. Foi observado com o telescópio somente a partir do século XVII. Ultimamente, foi estudado por duas sondas espaciais: Mariner 10 (três vezes em 1974-1975) e Messenger (duas vezes em 2008).

Apesar de ser visto a olho nu, não é facilmente observável porque é o planeta mais próximo do Sol. Mercúrio apenas pode ser observado perto das elongações, um pouco antes do nascer do Sol e um pouco depois do por do Sol, e a sua posição no céu é sempre perto do

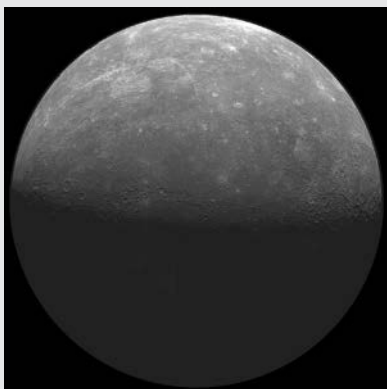


Fig. 2: Mercúrio.

Sol. Entretanto, as missões espaciais proporcionaram informação suficiente para mostrar que Mercúrio é, surpreendentemente, muito semelhante à Lua.

Vale a pena mencionar algumas características do planeta: é o menor do Sistema Solar e o mais próximo do Sol. Possui a órbita mais excêntrica ( $e = 0,2056$ ) e também a mais inclinada, em sentido contrário à eclíptica ( $i = 7^\circ 005$ ). O período sinódico é de 115,88 dias, o que significa que três vezes por ano está situado numa posição de máxima elongação a oeste do Sol (também é conhecido como “a estrela da manhã”, e nas três posições de máxima elongação a este do Sol é chamado “a estrela da tarde”). Em qualquer destes casos, a elongação não excede os  $28^\circ$ .

O seu raio de 2 440 quilômetros torna-o o menor planeta do Sistema Solar, menor, inclusive, que os dois satélites galileanos de Júpiter: Ganimedes e Calisto. A densidade de  $5,427 \text{ g/cm}^3$  transforma-o o planeta mais denso depois da Terra ( $5,5 \text{ g/cm}^3$ ). O ferro poderá ser o principal elemento pesado (70% contra 30% de matéria rochosa), o que contribuirá para a extremamente alta densidade de Mercúrio. Geralmente afirma-se que Mercúrio não tem atmosfera, o que é incorreto porque tem uma atmosfera extremamente rarefeita.

Mercúrio é o único planeta, para além da Terra, com um campo magnético significativo que, mesmo sendo da ordem de 1/100 comparativamente ao campo magnético terrestre, é suficiente para criar uma magnetosfera capaz de se estender até 1,5 raios planetários, que no caso da Terra é de 11,5 raios. Por último, há outra analogia com a Terra: o campo magnético é bipolar, com um eixo magnético inclinado  $11^\circ$  relativamente ao eixo de rotação.

As temperaturas variam enormemente em Mercúrio. Quando o planeta passa pelo periélio, a temperatura pode chegar a  $427^\circ\text{C}$  no equador ao meio dia, isto é, suficiente para provocar a fusão de um metal como o zinco. No entanto, imediatamente após o anoitecer, a temperatura pode baixar até aos  $-183^\circ\text{C}$ , fazendo que a variação diurna seja de  $610^\circ\text{C}$ ! Nenhum outro planeta sofre uma variação tão grande, que pode ser devido à intensa radiação solar durante o dia, à ausência de uma atmosfera densa e à duração do dia de Mercúrio (o intervalo entre o amanhecer e o entardecer é de quase três meses terrestres), suficiente longo para guardar calor ou, de igual modo, libertar calor durante a noite, em igual proporção).

<sup>1</sup>Un planeta telúrico es un planeta que está compuesto principalmente de rocas de silicato. Dentro del Sistema Solar, los planetas terrestre (o telúrico) son los planetas interiores más cercanos al Sol.

Características Orbitais, Época J2000	
Afélio	69 816 900 km, 0,466 697 UA
Periélio	46 001 200 km, 0,307 499 UA
Semieixo maior	57 909 100 km, 0,387 098 UA
Excentricidade	0,205630
Período orbital	87,969 1 dias, (0,240846 anos), 0,5 dia solar de Mercúrio
Período sinódico	115,88 dias
Velocidade média orbital	47,87 km/s
Anomalia média	174,796°
Inclinação	7,005° sobre a eclíptica
Longitude do nodo ascendente	48,331°
Argumento do periélio	29,124°
Satélite	Nenhum

Características Físicas	
Raio médio	2 439,7 ± 1,0 km; 0,3829 Terras
Achatamento	0
Superfície	7,48 10 <sup>7</sup> km <sup>2</sup> ; 0,147 Terras
Volume	6,083 10 <sup>10</sup> km <sup>3</sup> ; 0,056 Terras
Massa	3,3022 10 <sup>23</sup> kg; 0,055 Terras
Densidade média	5,427 g/cm <sup>3</sup>
Gravidade superficial no equador	3,7 m/s <sup>2</sup> ; 0,38 g
Velocidade de escape	4,25 km/s
Período sideral	58,646 dias; 1 407,5 h
Albedo	0,119 (Bond); 0,106 (geométrico)
Temperatura da superfície	mín      média      máx
0° N, 0° W	100 K    340 K    700 K
85° N, 0° W	80 K     200 K    380 K
Magnitude aparente	-2,3 a 5,7
Momento angular	4,5" - 13"

### Atmosfera:

Traços da pressão na superfície

### Composição:

42% oxigénio molecular, 29,0% sódio, 22,0% hidrogénio, 6,0% hélio, 0,5% potássio. Vestígios de árgon, nitrogénio, dióxido de carbono, vapor de água, xénon, cripton e néon.

### Temos que dizer algumas coisas sobre a superfície do planeta

As crateras de Mercúrio são muito similares às da Lua em morfologia, forma e estrutura. O mais notável é a cratera Bacia Caloris, criada por um impacto tão poderoso que gerou erupções de lava, deixando um grande anel concêntrico (com 2 km de altura) em redor da cratera.

Os impactos que geram bacias são os acontecimentos mais catastróficos capazes de afetar a superfície de um planeta. Podem causar alterações de toda a crosta planetária e inclusive desordens internas. Isto foi o que ocorreu quando a cratera Caloris, com um diâmetro de 1 550 quilómetros, foi criada.

### O avanço do periélio de Mercúrio

O avanço do periélio de Mercúrio está confirmado. Como qualquer outro planeta, o periélio de Mercúrio não é fixo, possui um movimento regular ao redor do Sol. Durante muito tempo foi considerado que este movimento era de 43 segundos de arco por século, mais rápido do que as previsões da mecânica celeste clássica "newtoniana". Este avanço do periélio foi previsto pela teoria geral da relatividade de Einstein, sendo originada pela curvatura do espaço como consequência da massa solar. A coincidência entre o avanço observado no periélio e o anunciado pela relatividade geral foi uma prova a favor da validade desta última.

### VÊNUS

Vénus é um dos oito planetas do Sistema Solar e um dos quatro planetas rochosos do sistema interior, sendo o segundo, em distância, ao Sol. Deve o seu nome à deusa romana do amor e da beleza.

A sua proximidade ao Sol, a estrutura e a densidade da atmosfera de Vénus possibilitam que seja um dos corpos mais quentes no Sistema Solar. Conta com um campo magnético muito fraco e não apresenta satélites naturais. É um dos planetas com um movimento de rotação retrógrado e o único com um período de rotação maior que o período da revolução. É o corpo mais brilhante no céu, depois do Sol e da Lua.

É o segundo planeta mais próximo do Sol (situado entre Mercúrio e a Terra), a aproximadamente 108,2 milhões quilómetros do Sol. A trajetória de Vénus em redor do Sol é quase um círculo: a sua órbita tem uma excentricidade de 0,0068, isto é, a menor do Sistema Solar. Um ano de Vénus é mais curto que um dia sideral de Vénus, numa razão de 0,924.

O seu tamanho e a sua estrutura geológica são similares à da Terra. A atmosfera é muito densa. A mistura de CO<sub>2</sub> e densas nuvens de dióxido de enxofre criam o maior efeito de estufa do Sistema Solar, com temperaturas de aproximadamente 460 °C. Mesmo que Vénus esteja aproximadamente duas vezes mais afastado do Sol que Mercúrio, e só receba aproximadamente 25% da radiação solar que Mercúrio recebe; a temperatura da superfície de Vénus é maior que a temperatura de Mercúrio. A superfície do planeta possui um relevo quase uniforme. O seu campo magnético é muito fra-

co, porém arrasta uma cauda de plasma com o comprimento de 45 milhões de quilômetros, observada pela primeira vez pela SOHO em 1997.

A característica mais notável de Vénus é a sua rotação retrógrada: gira em redor de seu eixo muito lentamente e em sentido contrário aos ponteiros do relógio, enquanto os planetas do Sistema Solar o fazem frequentemente em sentido horário (há outra exceção: Urano). O seu período de rotação é conhecido desde 1962. Esta rotação – lenta e retrógrada – produz dias solares bem mais curtos que o dia sideral, sendo estes dias mais longos nos planetas com rotação em sentido horário<sup>2</sup>. Em consequência, há menos de 2 dias completos em cada ano solar de Vénus.



Fig. 3: Vénus.

As causas da rotação retrógrada de Vénus ainda não foi determinada. A explicação mais provável seria uma colisão gigante com outro corpo de grandes dimensões durante a formação dos planetas do Sistema Solar. Outra hipótese poderia ser que a atmosfera de Vénus, devido à sua grande densidade, influenciasse a rotação do planeta.

### Vénus - a irmã gêmea da Terra. Analogia.

- Nasceram ao mesmo tempo, a partir do mesmo gás e nuvens de pó, há 4,6 mil milhões de anos.
- Ambos são planetas do Sistema Solar interior.
- As suas superfícies possuem um terreno variado: montanhas, campos, vales, planaltos, vulcões, crateras de impacto, etc.
- Ambos possuem um número relativamente pequeno de crateras, indicativo de uma superfície relativamente jovem e de uma atmosfera densa.
- Possuem composições químicas parecidas.

### Trânsito de Vénus

O trânsito de Vénus acontece quando o planeta passa entre a Terra e o Sol, e a sombra de Vénus cruza o disco solar. Por causa da inclinação da órbita de Vénus, relativamente à terrestre, este fenómeno é muito raro na nossa escala de tempo. Acontece duas vezes em 8

Características Orbitais, Época J2000	
Afélio	108 942 109 km, 0,72823128 UA
Periélio	107.476.259 km, 0,71843270 AU
Semieixo maior	108.208.930 km, 0,723332 AU
Excentricidade	0,0068
Período orbital	224,70069 dias, 0,6151970 año, 1,92 Venus día solar
Período sinódico	583,92 dias
Velocidade orbital média	35,02 km/s
Inclinação	3,39471° sobre elíptica, 3,86° Ecuador del Sol
Longitude do nodo ascendente	76,67069°
Argumento do periélio	54,85229°
Satélites	Nenhum

Propriedades	Vénus	Terra	Relação Vénus/Terra
Massa	4,8685 x 10 <sup>24</sup> kg	5,9736 x 10 <sup>24</sup> kg	0,815
Raio Equatorial	6 051 km	6 378 km	0,948
Densidade média	5,204 g/cm <sup>3</sup>	5,515 g/cm <sup>3</sup>	0,952
Semieixo maior	108 208 930 km	149 597 887 km	0,723
Velocidade orbital média	35,02 km/s	29,783 km/s	1,175
Gravidade superficial	8,87 m/s <sup>2</sup>	9,780327 m/s <sup>2</sup>	0,906

<sup>2</sup> O dia solar corresponde ao intervalo (médio) entre duas passagens sucessivas do Sol pelo meridiano. Por exemplo, a Terra tem um dia (médio) solar de 24 horas e um dia sideral de 23h 56min 4,09s. Em Vénus o dia solar corresponde a 116,75 dias terrestres (116 dias 18 horas), enquanto o dia sideral tem 243,018 dias terrestres.

Características Físicas	
Raio médio	6,051.8 ± 1,0 km, 0,9499 Terras
Achatamento	0
Superfície	4,60 10 <sup>8</sup> x km <sup>2</sup> , 0,902 Terras
Volume	9,38 10 <sup>11</sup> x km <sup>3</sup> , 0,857 Terras
Massa	4,8685 x 10 <sup>24</sup> kg, 0,815 Terras
Densidade media	5,204 g/cm <sup>3</sup>
Gravidade superficial no equador	8,87 m/s <sup>2</sup> , 0,904 g
Velocidade de escape	10,46 km/s
Período sideral	-243,0185 dias
Albedo	0,65 (geométrico); 0,75 (Bond)
Temperatura da superfície (média)	461,85°C
Magnitude aparente	Até -4.6 (crescente), -3.8 (cheio)
Momento angular	9.7" a 66.0"

anos, sendo este duplo trânsito separado do seguinte por mais de um século (105,5 e 121,5 anos). Os últimos trânsitos aconteceram a 8 de junho de 2004 e 6 de junho de 2012. O próximo trânsito deverá acontecer no dia 11 de dezembro 2117.

#### Atmosfera:

Pressão na superfície 93 bar (9,3 MPa).

#### Composição:

~96,5% dióxido de carbono, ~3,5% nitrogénio, 0,015% dióxido de enxofre, 0,007% argon, 0,002% vapor de água, 0,001 7% monóxido de carbono, 0,001 2% hélio, 0,000 7% néon.

## TERRA

A Terra é o terceiro planeta do Sistema Solar mais perto do Sol e o quinto em dimensões. Pertence aos planetas interiores. É o maior planeta telúrico e o único no Universo conhecido no que acomoda vida. A Terra formou-se aproximadamente há 4,57 mil milhões de anos atrás. O seu único satélite natural, a Lua, iniciou a sua órbita pouco depois da Terra, há 4,533 mil milhões anos. A idade do Universo é de aproximadamente



Fig. 4: Terra.

13,7 mil milhões de anos. 70,8% da superfície da Terra está coberta por água; o restante, 29,2% é sólido e “seco”. A zona coberta de água é dividida pelos oceanos, e a terra é dividida pelos continentes.

Existe uma interação permanente entre a Terra e o resto do Universo. Por exemplo, a Lua é a causadora das marés. Além disso, influencia de forma contínua a velocidade do movimento de rotação da Terra. Todos os corpos que orbitam em torno da Terra são atraídos para a Terra. Esta força de atração é denominada gravidade, e a aceleração com a qual estes corpos caem no campo gravitacional chama-se aceleração gravítica (é indicado por um “g” = 9,81 m/s<sup>2</sup>).

Acredita-se que o aparecimento dos oceanos na Terra foi uma “chuva” de cometas no período inicial de for-

Características Orbitais, Época J2000	
Afélio	152 097 701 km; 1,0167103335 UA
Periélio	147.098.074 km; 0,9832898912 UA
Semieixo maior	149.597.887,5 km; 1,0000001124 UA
Excentricidade	0,016710219
Período orbital	365,256366 dias; 1,0000175 anos
Velocidade orbital média	29,783 km/s; 107,218 km/h
Inclinação	1,57869
Longitude do nodo ascendente	348,73936°
Argumento do periélio	114,20783°
Satélites	1 (Lua)

Características Físicas	
Raio médio	6 371,0 km
Raio equatorial	6 378,1 km
Raio polar	6 356,8 k
Achatamiento	0,003352
Superfície	510 072 000 km <sup>2</sup>
Volumen	1,0832073 x 10 <sup>12</sup> km <sup>3</sup>
Masa	5,9736 x 10 <sup>24</sup> kg
Densidad media	5,515 g/cm <sup>3</sup>
Gravedad superficial en el ecuador	9,780327 m/s <sup>2</sup> ; 0,99732 g
Velocidad de escape	11.186 km/s
Período sideral	0,99726968 dias; 23h 56 m 4,100 s
Albedo	0,367
Temperatura superficial (media)	mín      médio      máx -89 °C    14 °C    57,7 °C

mação da Terra. Mais tarde, os impactos de asteroides ajudaram a modificar o meio ambiente de maneira decisiva. As mudanças na órbita do planeta podem ser consideradas como as responsáveis pelas eras glaciares, que cobriram a superfície terrestre com uma camada de gelo.

#### Atmosfera:

Pressão na superfície: 101,3 kPa

#### Composição:

78,08% nitrogénio (N<sub>2</sub>), 20,95% oxigénio (O<sub>2</sub>), 0,93% árgon, 0,038% dióxido de carbono; 1% vapor de água (varia com o clima).

## MARTE

Marte é o quarto planeta mais perto do Sol no Sistema Solar e o segundo em tamanho após Mercúrio (o menor). Pertence ao grupo dos planetas telúricos. Possui o nome do deus romano da guerra, Marte, devido à sua cor vermelha.

Várias missões espaciais estudaram o planeta desde 1960 para descobrir o máximo possível a respeito de sua geografia, clima e outros detalhes. Marte pode ser observado a olho nu. É menos brilhante que Vénus, algumas vezes mais brilhante que Júpiter, contudo incomum. Ultrapassa este último durante as suas configurações mais favoráveis (oposições).

De todos os corpos do Sistema Solar, o planeta vermelho é o que mais atraiu a maioria dos autores de ficção científica. A principal razão são seus famosos canais, assim denominados pela primeira vez em 1858, por Giovanni Schiaparelli, considerados como o resultado de construções.

A cor vermelha de Marte é devido ao óxido de ferro III (também chamado hematite), encontrado nos minerais da sua superfície. Marte possui um relevo muito abrupto: tem a montanha mais alta do Sistema Solar (o vulcão Monte Olympus), com altura de aproximadamente 25 km, e também o maior desfiladeiro (o Vales Marineris), com uma profundidade média de 6 km. Marte possui no centro um núcleo de ferro com um diâmetro de aproximadamente 1 700 quilómetros, coberto com um manto olivina e uma crosta basáltica, com uma largura média de 50 km.

Marte está rodeado por uma atmosfera ténue, composta principalmente de dióxido de carbono. Costumava conter uma hidrosfera ativa, isto é, já existiu água em Marte. Possui dois satélites naturais, Fobos e Deimos, provavelmente asteroides capturados pelo planeta.

O diâmetro de Marte é metade do da Terra e sua superfície é igual à dos continentes terrestres. A sua massa é cerca de uma décima parte da terrestre. A sua densidade é a menor dos planetas telúricos, o que faz com que a sua gravidade seja pouco menor que a de Mercúrio, ainda que a sua massa seja duas vezes maior.

A inclinação do eixo de Marte é semelhante ao da Terra, por isso é que em Marte há estações como na Terra. As dimensões das calotas polares variam enormemente durante as estações através da troca de dióxido de carbono e da água com a atmosfera.

Outro ponto em comum: o dia marciano é somente 39 minutos maior que o terrestre. Pelo contrário, devido à sua relativa distância do Sol, o ano marciano dura um pouco mais de 322 dias a mais do que o ano terrestre.



Fig. 5: Marte.

Marte é o planeta exterior mais próximo da Terra. A distância é menor quando Marte está em oposição, ou seja, quando se encontra em frente do Sol, visto da Terra. Dependendo da elipticidade e da inclinação das órbitas, o momento exato da maior aproximação pode variar alguns dias.

Em 27 de agosto de 2003, Marte estava a apenas 55 758 milhões de km de distância da Terra, isto é, a apenas 0,3727 UA, a menor distância registrada nos últimos 59 618 anos. Tal evento propiciou todo o tipo de fantasias, como por exemplo, que Marte iria ser observado tão grande como a Lua Cheia. Com um diâmetro aparente de 25,13 segundos de arco, Marte pode ser visto, a olho nu, como um ponto, enquanto a Lua se estende sobre um diâmetro aparente de aproximadamente 30 minutos de arco. Uma proximidade similar acontecerá em 28 de agosto 2287, quando a distância entre os dois planetas será de 55 688 milhões de km.

Características Orbitais, Época J2000	
Aféio	249 209 300 km; 1,665861 UA
Periélio	206 669 000 km; 1,381497 UA
Semieixo maior	227 939 100 km; 1,523679 UA
Excentricidade	0,093315
Período orbital	686,971 dias; 1,8808 anos Julianos
Período sinódico	779,96 dias; 2,135 anos Julianos
Velocidade orbital média	24,077 km/s
Inclinação	1,850° na eclíptica; 5,65° ao equador do Sol
Longitude do nodo ascendente	49,562°
Argumento do periélio	286,537°
Satélites	2

Características Físicas	
Raio equatorial	3 396,2 ± 0,1 km; 0,533 Terras
Raio polar	3 376,2 ± 0,1 km; 0,531 Terras
Achatamento	0,005 89 ± 0,000 15
Superfície	144 798 500 km <sup>2</sup> ; 0,284 Terras
Volume	1,6318 x 10 <sup>11</sup> km <sup>3</sup> ; 0,151 Terras
Massa	6,4185 x 10 <sup>23</sup> kg; 0,107 Terras
Densidade média	3,934 g/cm <sup>3</sup>
Gravidade superficial no equador	3,69 m/s <sup>2</sup> ; 0,376 g
Velocidade de escape	5,027 km/s
Período sideral	1,025957 dias
Albedo	0,15 (geométrico); 0,25 (Bond)
Temperatura superficial	mín      médio      máx -87 °C    -46 °C    -5 °C
Magnitud aparente	+1,8 a -2,91
Diâmetro angular	3,5" – 25,1"

### Atmosfera:

Pressão na superfície: 0,6-1,0 kPa.

### Composição:

95,72% dióxido de carbono; 2,7% nitrogénio; 1,6% árgon; 0,2% oxigénio; 0,07% monóxido de carbono; 0,03% vapor de água; 0,01% óxido nítrico; 2,5 ppm néon; 300 ppb cripton; 130 ppb formaldeído; 80 ppb xénon; 30 ppb ozono; 10 ppb metano.

## JÚPITER

Júpiter é o quinto planeta mais perto do Sol e o maior de todos os planetas de nosso Sistema Solar. O seu diâmetro é 11 vezes maior que o da Terra, a sua massa 318 vezes maior e seu volume de 1 300 vezes maior.

- Órbita: 778 547 200 km do Sol
- Diâmetro: 142 984 km (Equatorial)

- Massa: 1 8986 × 10<sup>27</sup> kg

Júpiter é o quarto objeto mais brilhante do céu (depois do Sol, da Lua, de Vénus e às vezes de Marte). É conhecido desde os tempos pré-históricos. A descoberta de seus quatro grandes satélites, Io, Europa, Ganimedes e Calisto (conhecidos como os satélites galileanos), por Galileu Galilei e Simon Marius, em 1610, foi a primeira descoberta de um centro de movimento aparente não centrado na Terra. Foi um importante ponto a favor da teoria heliocêntrica do movimento planetário de Nicolau Copérnico. A confirmação por Galileu da teoria do movimento de Copérnico trouxe-lhe problemas com a Inquisição. Antes das missões Voyager, eram conhecidos apenas 16 de seus satélites, que se sabe atualmente serem mais de 60.

### Composição:

Júpiter possui, provavelmente, um núcleo de material sólido, que ascenderá até 10 ou 15 vezes a massa da Terra. Acima deste núcleo está a parte principal do planeta, composta por hidrogénio metálico líquido. Devido à temperatura e pressão no interior de Júpiter o hidrogénio está no estado líquido e não gasoso. É um condutor elétrico e a fonte do campo magnético de Júpiter. Esta camada contém um pouco de hélio e alguns restos de “deriva de gelo”. A camada da superfície é composta principalmente por hidrogénio molecular e hélio, líquida por dentro e gasosa por fora. A atmosfera que vemos é só a parte superior desta camada profunda. Água, dióxido de carbono, metano, assim como outras moléculas simples, também estão presentes em pequenas quantidades.

### Atmosfera:

Composta por aproximadamente 86% de hidrogénio e hélio 14% (segundo o número de átomos, aproxima-



Fig. 6: Júpiter.

damente 75/25% em massa) com vestígios de metano, água, amoníaco e “pedra”. Esta composição é muito parecida com a estrutura original da nebulosa solar, de cujo material todo o Sistema Solar foi formado. Saturno tem uma composição similar, enquanto Urano e Neptuno têm menos hidrogénio e hélio.

A **Grande Mancha Vermelha** (GRS) foi observada pela primeira vez pelos telescópios terrestres, há mais de 300 anos. Tem forma oval de aproximadamente 12 000 por 25 000 km, suficientemente grande para abranger duas Terras. É uma região de alta pressão, cujas nuvens superiores são bem mais altas e mais frias que as zonas circundantes. Estruturas similares observaram-se em Saturno e Neptuno. A forma como este tipo de estrutura resiste tanto tempo ainda não foi desvendada.

Júpiter, assim com outros planetas gasosos, apresenta ventos a alta velocidade em grandes bandas a diferentes latitudes. Os ventos sopram em direções opostas em bandas adjacentes. As pequenas diferenças de temperatura ou de composição química são responsáveis pelas distintas colorações das bandas, um aspeto que domina a imagem do planeta. A atmosfera de Júpiter é muito turbulenta. Isto demonstra que os ventos são impulsionados, em grande parte, pelo calor proveniente do interior do planeta e não do Sol, como acontece na Terra.

#### Magnetosfera:

Júpiter possui um campo magnético enorme, 14 vezes mais forte que o campo da Terra. A sua magnetosfera estende-se até uns 650 milhões de km (para além da órbita de Saturno). Os satélites de Júpiter incluem-se na sua magnetosfera o que explica, parcialmente, a atividade em Io. Um grande inconveniente para as viagens espaciais do futuro, assim como um problema para os projetistas das sondas Voyager e Galileu, é que no meio circundante de Júpiter há grandes quantidades de partículas capturadas pelo campo magnético do planeta. Esta “radiação” é semelhante, porém bem mais intensa, que a observada nas cinturas de Van Allen da Terra. Seria letal para qualquer ser humano sem proteção.

A sonda Galileu descobriu uma nova e intensa radiação entre os anéis de Júpiter e os estratos superiores da atmosfera. Esta nova cintura de radiação apresenta uma intensidade aproximadamente 10 vezes maior que a das cinturas de Van Allen na Terra. Surpreendentemente, esta nova cintura contém íões de hélio de alta energia, de origem desconhecida.

**Anéis de Júpiter:** Júpiter possui anéis, tal como Satur-

no, contudo bem mais ténues e pequenos. Ao contrário dos anéis de Saturno, os anéis de Júpiter são escuros. São provavelmente compostos por pequenos grãos de material rochoso. Ao contrário dos anéis de Saturno, estes não parecem conter gelo. Muito provavelmente, as partículas dos anéis de Júpiter não permanecem lá durante muito tempo (por causa da atmosfera e da atração magnética). A sonda Galileu encontrou provas claras que indicam que os anéis são continuamente alimentados pelo pó formado por impactos dos micro-meteoritos com as quatro luas interiores.

Características Orbitales, Época J2000	
Afelio	816.520.800 km (5,458104 AU)
Perihelio	740.573.600 km (4,950429 AU)
Semi-eje mayor	778.547.200 km (5,204267 AU)
Excentricidad	0,048775
Periodo orbital	4,331572 días; 11,85920 años; 10,4758 días solares de Júpiter
Periodo sinódico	398,88 días
Velocidad orbital media	13,07 km/s
Anomalia media	18,818°
Inclinación	1,305° de la eclíptica; 6,09° del ecuador del Sol
Longitud del nodo ascendente	100,492°
Argumento del perihelio	275,066°
Satélites	63

Características Físicas	
Radio ecuatorial	71.492 ± 4 km; 11,209 Tierras
Radio polar	66,854 ± 10 km; 10.517 Tierras
Achatamiento	0,06487 ± 0,00015
Superficie	6,21796 10 <sup>10</sup> km <sup>2</sup> ; 121,9 Tierras
Volumen	1,43128 10 <sup>15</sup> km <sup>3</sup> ; 1.321,3 Tierras
Masa	1,8986 10 <sup>27</sup> kg; 317,8 Tierras; 1/1047 Sol
Densidad media	1,326 g/cm <sup>3</sup>
Gravedad superficial en el ecuador	24,79 m/s <sup>2</sup> ; 2,528 g
Velocidad de escape	59,5 km/s
Período sideral	9,925 h
Albedo	0,343 (bond); 0,52 (geom.)
Magnitud aparente	-1.6 a -2.94
Diámetro angular	29.8" – 50.1"

### Atmosfera:

Pressão na superfície: 20-200 kPa (camada de nuvens).

### Composição:

89,8 ± 2,0% hidrogênio (H<sub>2</sub>), 10,2 ± 2,0% hélio, ~0,3% metano, ~0,026% amoníaco, ~0,003% hidrogênio deutério (HD), 0,0006% etano, 0,0004% água; gelos de: amoníaco, água e hidrossulfito de amônia (NH<sub>4</sub>SH).

### SATURNO

Saturno é o sexto planeta mais distante do Sol no Sistema Solar. É um planeta gigante gasoso, o segundo em massa e volume, depois de Júpiter. Possui um diâmetro aproximado de nove vezes maior que o diâmetro da Terra e é composto maioritariamente de hidrogênio. Tem o nome do deus romano Saturno.

### Massa e dimensões:

Saturno apresenta uma forma de esferoide aplanado: é achatado nos polos e inchado no equador. O seu diâmetro equatorial e polar difere aproximadamente em 10%, como consequência da rápida rotação ao redor de seu eixo e de uma composição interna muito fluída. Os outros planetas gasosos gigantes do Sistema Solar (Júpiter, Urano, Neptuno) também são aplanados, embora menos.

Saturno é o segundo planeta mais massivo do Sistema Solar, 3,3 vezes menor que Júpiter, mas 5,5 maior que Neptuno e 6,5 vezes maior que Urano. É 95 vezes mais massivo que a Terra. O seu diâmetro é de quase 9 vezes maior que o da Terra. Saturno é o único planeta do Sistema Solar cuja densidade média é menor que a da água: 0,69 g/cm<sup>3</sup>. Isto significa que apesar do seu núcleo ser mais denso que a água, a sua densidade média é menor que a da água devido à sua grande atmosfera gasosa.

### Atmosfera:

Tal como Júpiter, a atmosfera de Saturno está organizada em bandas paralelas, ainda que estas sejam menos visíveis do que as de Júpiter e sejam maiores perto do equador. Os sistemas de nuvens de Saturno (bem como as tempestades de longa duração) foram observados pela primeira vez pelas missões Voyager. A nuvem observada em 1990 é um exemplo de uma mancha branca grande, um fenómeno efêmero de Saturno que acontece a cada 30 anos. Se a periodicidade é a mesma, a próxima tempestade acontecerá provavelmente em 2020. Em 2006, a NASA observou uma tempestade com dimensões de um furacão que continha um olho bem definido, estacionado no polo Sul. É o único olho observado noutro planeta para além da

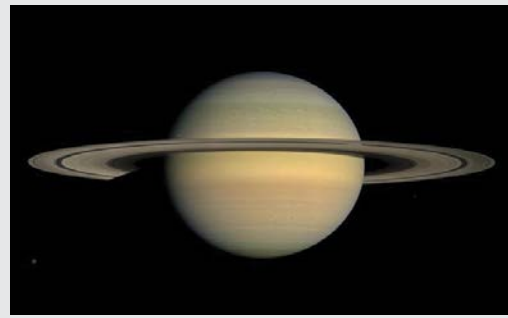


Fig. 7: Saturno.

Terra. A atmosfera de Saturno está submetida a uma rotação diferencial.

Os anéis de Saturno são um dos espetáculos mais belos do Sistema Solar e constituem a sua principal característica. Ao contrário dos outros dois planetas gasosos gigantes com anéis, estes são muito brilhantes (albedo entre 0,2 e 0,6) e podem ser vistos com binóculos. Possuem uma atividade permanente: colisões, acumulações de matéria, etc

Saturno possui um grande número de satélites. É difícil dizer quantos possui, já que qualquer pedaço de gelo dos anéis pode ser considerado um satélite. Em 2009 estavam identificados 62 satélites, 53 foram confirmados e nomeados. A maioria deles é pequena: 31 têm um diâmetro de menos de 10 km, enquanto 13 são de menos de 50 km. Somente sete deles são suficientemente grandes para assumir uma forma esférica, sob a influência de sua própria gravidade. Titã é o maior deles, maior que Mercúrio e Plutão, e o único satélite do Sistema Solar com uma atmosfera densa.

Características Orbitais, Época J2000	
Afélio	1 513 325 783 km; 10,11595804 UA
Periélio	1 353 572 956 km; 9,04807635 UA
Semieixo maior	1 433 449 370 km; 9,58201720 UA
Excentricidade	0,055723219
Período orbital	10 759,22 dias; 29,4571 ano
Período sinódico	378,09 dias
Velocidade orbital média	9,69 km/s
Anomalia média	320,346750°
Inclinação	2,485240° na eclíptica; 5,51° ao equador do Sol
Longitude do nodo crescente	113,642811°
Argumento do periélio	336,013862°
Satélites	~ 200 observados (61 com órbitas estáveis)

Características Físicas	
Raio ecuatorial	60 268 ± 4 km; 9,4492 Terras
Raio polar	54 364 ± 10 km; 8,5521 Terras
Achatamento	0,09796 ± 0,00018
Superfície	4,27 x 10 <sup>10</sup> km <sup>2</sup> ; 83,703 Terras
Volume	8,2713 x 10 <sup>14</sup> km <sup>3</sup> ; 763,59 Terras
Massa	5,6846 x 10 <sup>26</sup> kg; 95,152 Terras
Densidade média	0,687 g/cm <sup>3</sup> ; (menor que a água)
Gravidade superficial no equador	10,44 m/s <sup>2</sup> ; 1,065 g
Velocidade de escape	35,5 km/s
Período sideral	10,57 horas; (10 h 34 m)
Velocidade de rotação equatorial	9,87 km/s; 35 500 km/h
Inclinação axial	26,73°
Albedo	0,342 (Bond); 0,47 (geométrico)
Magnitude aparente	+1,2 a -0,24
Diâmetro angular	14,5" a 20,1" (excluindo os anéis)

#### Atmosfera:

Escala de altura: 59,5 km

#### Composição:

~96% hidrogénio (H<sub>2</sub>), 3% hélio, ~0,4% metano, ~0,01% amoníaco, ~0,01% deutério de hidrogénio (HD), 0,0007% etano, gelos de: amoníaco, água, hidrossulfito de amónia (NH<sub>4</sub>SH).

## URANO

Urano é um planeta gigante gasoso. É o sétimo mais afastado do Sol, no Sistema Solar, o terceiro em dimensões e o quarto em massa. Tem o nome do pai de Cronos (Saturno) e do avô de Zeus (Júpiter). É o primeiro planeta descoberto na época moderna. Ainda que possa ser visto a olho nu, tal como os outros 5 planetas clássicos, por causa da sua pouca luminosidade não era facilmente identificável como planeta. William Herschel anunciou sua descoberta em 13 de março de 1781, ampliando desta forma as fronteiras do Sistema Solar pela primeira vez na época moderna. Urano é o primeiro planeta descoberto através do telescópio.

Urano e Neptuno possuem composições internas e atmosféricas diferentes dos outros grandes planetas gasosos, Júpiter e Saturno. Por isso, os astrónomos às vezes os classificam em uma categoria diferente, a dos gigantes gelados ou subgigantes.

A atmosfera de Urano é composta principalmente por hidrogénio e hélio, contendo grandes quantidades de gelo de água, amoníaco e metano, e ainda vestígios de hidrocarbonetos. Urano apresenta a atmosfera mais fria do Sistema Solar, atingindo um mínimo de -224

°C. Contém uma complexa estrutura de nuvens: a estrutura dos estratos mais baixos será constituída por água e nos estratos superiores por metano.

Tal como os outros planetas gigantes gasosos, Urano apresenta um sistema de anéis, uma magnetosfera e numerosos satélites naturais. O sistema de Urano é único no Sistema Solar porque o seu eixo de rotação está praticamente na órbita de seu plano de revolução em redor do Sol. Os seus polos, Norte e Sul, estão onde os outros planetas possuem o equador. Em 1986 a Voyager 2 obteve imagens de Urano, no visível, que mostram um planeta sem características especiais, sem camadas de nuvens ou tempestades, como nos outros planetas gasosos. No entanto, observações recentes mostraram sinais de mudança de estação e um aumento da atividade meteorológica, num período em que Urano se aproximava ao seu equinócio de dezembro de 2007. O vento na sua superfície pode atingir a velocidade de 250 m/s.

#### Órbita e rotação:

O período de revolução de Urano em redor do Sol é de 84 anos terrestres. A distância média ao Sol é de aproximadamente 3 mil milhões de quilómetros. A intensidade do fluxo solar em Urano é de aproximadamente 1/400 da intensidade que a Terra recebe.

O período de rotação das camadas interiores de Urano é de 17 horas e 14 minutos. Entretanto, na atmosfera superior há ventos violentos no sentido da rotação, como ocorre com todos os planetas gigantes gasosos.

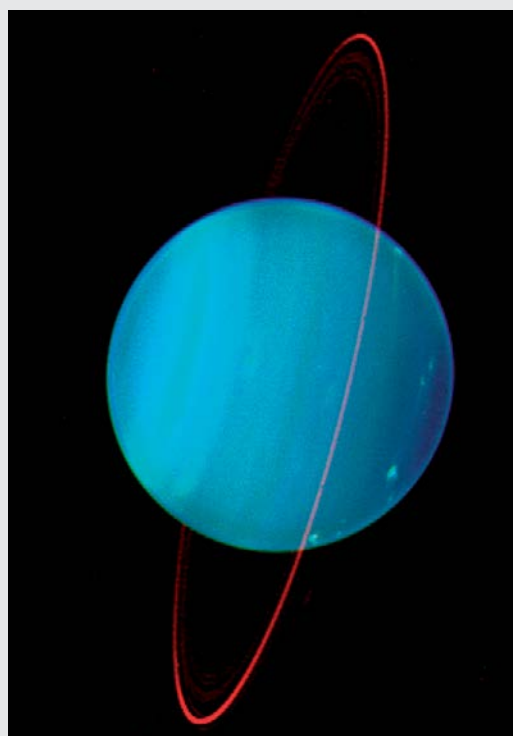


Fig. 8 Urano.

Em consequência, ao redor dos 60° de latitude, as partes visíveis da atmosfera viajam mais rápido e completam uma rotação completa em menos de 14 horas.

Urano é um planeta gigante, como Júpiter, Saturno e Neptuno. Mesmo conhecendo pouco acerca da sua composição interna, sabemos que é diferente de Júpiter ou Saturno. Modelos da sua estrutura interna mostram que deverá ter um núcleo sólido de silicatos de ferro, com diâmetro de aproximadamente 7 500 km, cercado por um manto formado por gelo de água misturado com hélio, metano e amoníaco, com 10 000 km de comprimento, seguido por uma atmosfera superficial de hidrogénio e hélio líquido, de aproximadamente 7 600 quilómetros. Ao contrário de Júpiter e Saturno,

Características Orbitais, Época J2000	
Afélio	3 004 419 704 km, 20,08330526 UA
Periélio	2 748 938 461 km, 18,37551863 UA
Semieixo maior	2 876 679 082 km, 19,22941195 UA
Excentricidade	0,044405586
Período orbital	30 799 095 dias, 84 323 326 años
Período sinódico	369,66 dias
Velocidade orbital média	6,81 km/s
Anomalia média	142,955717°
Inclinação	0,772556° à eclíptica, 6,48° ao equador do Sol
Longitude do nodo ascendente	73,989821°
Argumento do periélio	96,541318°
Satélites	27

Características Físicas	
Raio equatorial	25.559 ± 4 km, 4,007 Terras
Raio polar	24.973 ± 20 km, 3,929 Terras
Achatamento	0,0229 ± 0,0008
Superfície	8,1156 x 10 <sup>9</sup> km <sup>2</sup> , 15,91 Terras
Volume	6,833 x 10 <sup>15</sup> km <sup>3</sup> , 63,086 Terras
Massa	(8,6810 ± 0.0013) x 10 <sup>25</sup> kg, 14,536 Terras
Densidade media	1,27 g/cm <sup>3</sup>
Gravidade superficial no equador	8,69 m/s <sup>2</sup> , 0,886 g
Velocidade de escape	21,3 km/s
Período sideral	-0,71833 dias, 7 h 14 m 24 s
Velocidade de rotação equatorial	2,59 km/s, 9.320 km/h
Inclinação axial	97,77°
Albedo	0,300 (Bond), 0,51 (geométrico)
Magnitude aparente	5,9 a 5,32
Diâmetro angular	3,3" - 4,1"

Urano não é suficientemente massivo para conservar o hidrogénio em estado metálico ao redor de seu núcleo.

A cor verde azulada é devida à presença de metano na atmosfera, que absorve o vermelho e o infravermelho.

Urano tem pelo menos 13 anéis principais.

Distintamente de qualquer outro planeta do Sistema Solar, Urano apresenta um eixo de rotação muito inclinado, quase paralelo a seu plano orbital. Poderíamos dizer que gira na sua órbita e expõe ao Sol seu polo Norte e seu polo Sul, sucessivamente.

Uma consequência desta orientação é que as regiões polares recebem mais energia do Sol que as equatoriais. No entanto, Urano permanece mais quente no equador do que nos polos, um mecanismo ainda não explicado. Nenhuma teoria sobre a sua inclinação pode ignorar a ideia de uma colisão catastrófica com outro corpo antes de sua formação atual.

Urano possui pelo menos 27 satélites naturais. Os dois primeiros foram descobertos por William Herschel em 13 de março de 1787 e foram nomeados Titânia e Oberon.

#### Atmosfera

#### Composição:

(abaixo de 1,3 bar): 83 ± 3% hidrogénio (H<sub>2</sub>), 15 ± 3% hélio, 2,3% metano, 0,009% (0,007–0,015%) deutério de hidrogénio (HD). Gelos de: amoníaco, água, hidrossulfito de amónia (NH<sub>4</sub>SH), metano (CH<sub>4</sub>).

## NEPTUNO

Neptuno é o oitavo planeta e o mais distante do Sol no Sistema Solar. É também o último planeta gigante gasoso. Foi descoberto pelo astrónomo alemão Johann Gottfried Galle, no dia 23 de setembro de 1847, seguindo as indicações de Urbano Le Verrier, que, como o astrónomo inglês John Couch Adams, tinha previsto através de cálculo a região do céu onde o planeta podia ser encontrado.

Tem o nome do deus romano dos mares, Neptuno. Neptuno não é visível a olho nu e não é visto como um disco de cor verde azulado através de telescópio. Apenas foi visitado uma vez, pela sonda espacial Voyager 2, em 25 de agosto de 1989. O seu maior satélite é Tritão.

A sua composição interna é similar à de Urano. Acredita-se que possui um núcleo sólido formado de silicatos e ferro, quase tão grande como a massa da Terra. O seu núcleo, igual ao de Urano, está supostamente coberto

com uma composição bastante uniforme (rochas em fusão, gelo, 15% de hidrogénio e um pouco de hélio), e não possui nenhum tipo de estrutura em “camadas” como Júpiter e Saturno.

A sua cor azulada é devida, principalmente, ao metano, que absorve a luz nos comprimentos de onda do vermelho. Parece que outra composição dá a Neptuno sua característica cor azulada, mas ainda não foi definida.

Tal como os outros planetas gigantes gasosos, possui um sistema eólico formado por ventos muito rápidos em bandas paralelas ao equador, com fortes tormentas e vórtices. Os ventos mais rápidos em Neptuno sopram a mais de 2 000 km/h. Durante a visita da Voyager 2, a formação mais interessante observada foi a “Grande Mancha Escura”, com tamanho semelhante ao da “Grande Mancha Vermelha” em Júpiter. Esta mancha não foi observada, cerca de 5 anos depois, quando o telescópio espacial Hubble efetuou observações de Neptuno. Os ventos podem soprar a 300 m/s (1 080 km/h) ou inclusive até 2 500 km/h. Esta mancha poderia ser um furacão gigante escuro que supostamente viaja a quase 1 000 km/h.

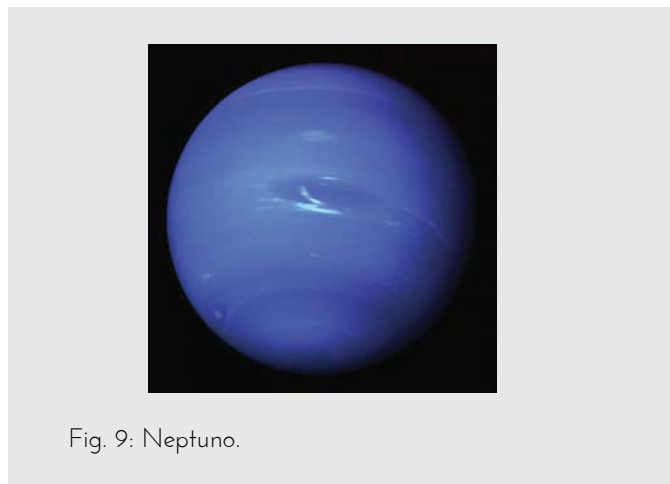


Fig. 9: Neptuno.

Neptuno tem anéis planetários pouco visíveis. São escuros e a sua origem é ainda desconhecida.

Neptuno possui pelo menos 13 satélites naturais, entre os quais o maior é Tritão, descoberto por William Lassell somente 17 dias após a descoberta de Neptuno.

### Atmosfera

#### Composição:

80 ± 3,2% hidrogénio (H<sub>2</sub>), 19 ± 3,2% hélio, 1,5 ± 0,5% metano, ~0,019% hidrogénio deutério (HD), ~0,00015 etano, gelos de: amoníaco, água, hidrossulfeto de amónia (NH<sub>4</sub>SH), metano.

Características Orbitais, Época J2000	
Afélio	4 553 946 490 km, 30,44125206 UA
Periélio	4.452.940.833 km, 29,76607095 UA
Semieixo maior	4.503.443.661 km, 30,10366151 UA
Excentricidade	0,011214269
Período orbital	60,190 dias, 164,79 anos
Período sinódico	367,49 dias
Velocidade orbital média	5,43 km/s
Anomalia média	267,767281°
Inclinação	1,767975° à eclíptica, 6,43° ao equador do Sol
Longitude do nodo ascendente	131,794310°
Argumento do periélio	265,646853°
Satélites	14

Características Físicas	
Raio equatorial	24 764 ± 15 km; 3,883 Terras
Raio polar	24 341 ± 30 km; 3,829 Terras
Achatamento	0,0171 ± 0,0013
Superfície	7,6408 x 10 <sup>9</sup> km <sup>2</sup> , 14,98 Terras
Volume	6,254 x 10 <sup>13</sup> km <sup>3</sup> , 57,74 Terras
Massa	1,0243 x 10 <sup>26</sup> kg, 17,147 Terras
Densidade media	1,638 g/cm <sup>3</sup>
Gravidade superficial no equador	11,15 m/s <sup>2</sup> , 1,14 g
Velocidade de escape	23,5 km/s
Período sideral	0,6713 dias, 16 h 6 m 36 s
Velocidade de rotação equatorial	2,68 km/s, 9.660 km/h
Inclinação axial	28,32°
Albedo	0,290 (Bond); 0,41 (geométrico)
Magnitude aparente	8,0 a 7,8
Diâmetro angular	2,2" - 2,4"

## Outros Corpos no Sistema Solar

### O meio interplanetário

Além da luz, o Sol irradia um fluxo contínuo de partículas carregadas (plasma) chamado vento solar. Este fluxo é dissipado a uma velocidade de 1,5 milhões de km/h, criando assim a heliosfera, uma fina atmosfera que cerca o Sistema Solar até aproximadamente 100 UA (marcado a heliopausa). A matéria que constitui a heliosfera é denominada meio interplanetário. O ciclo solar de 11 anos, bem como as frequentes erupções solares e ejeções de massa coronal, perturba a heliosfera e criam um clima espacial. A rotação do campo magnético solar atua sobre o meio interplanetário, constituindo a camada heliosférica atual, que é a maior estrutura do Sistema Solar.

O campo magnético terrestre protege a atmosfera do vento solar. A interação entre o vento solar e o campo magnético terrestre provoca as auroras boreais.

A heliosfera assegura uma proteção parcial do Sistema Solar dos raios cósmicos, que é maior nos planetas com um campo magnético.

O meio interplanetário possui pelo menos duas regiões de poeira cósmica sob a forma de disco. A primeira, a nuvem de pó zodiacal, está no Sistema Solar interior e produz a luz zodiacal. Provavelmente foi formada através de uma colisão no interior da cintura de asteroides causado pelas interações com os planetas. A segunda estende-se entre 10 e 40 UA e provavelmente formou-se durante colisões similares na cintura de Kuiper.

### A CINTURA DE ASTEROIDES

Os asteroides são pequenos corpos do Sistema Solar, formados por rochas e minerais metálicos não voláteis. A cintura de asteroides ocupa uma órbita situada entre Marte e Júpiter, a uma distância entre 2,3 e 3,3 UA do Sol. Foi formada a partir da nebulosa solar primordial como um grupo de planetesimais, os percursos dos planetas. Estes planetesimais foram fortemente perturbados pela ação gravítica de Júpiter.

O tamanho dos asteroides varia desde centenas de quilômetros até microscópicas partículas de pó. Todos, exceto o maior, Ceres, são considerados pequenos corpos. Alguns dos outros maiores asteroides, como Vesta e Hygeia, ainda classificados como pequenos corpos, poderão vir a ser classificados como planetas anões se, no futuro, for demonstrado que atingiram equilíbrio hidrostático.

A cintura de asteroides possui milhares, ou mesmo milhões, de corpos com um diâmetro superior a um quilômetro. No entanto, a massa total da cintura é apenas 4% da massa da Lua.

Ceres (2,77 UA) é o maior corpo na cintura de asteroides e o único planeta anão (classificado assim em 2006). Com um diâmetro de quase 1 000 km, e massa suficiente em equilíbrio hidrostático e tem uma forma esférica.

### COMETAS

Os cometas são pequenos corpos do Sistema Solar, com diâmetros da ordem de quilômetros. São geralmente compostos por gelos voláteis. Apresentam órbitas muito excêntricas, com o periélio às vezes no Sistema Solar interior, enquanto o afélio permanece além de Plutão. Quando um cometa entra no Sistema Solar interior, a sua proximidade ao Sol provoca a sublimação e ionização da sua superfície, criando uma cauda: uma longa

cauda formada por gás e pó.

Os cometas de período curto (por exemplo, o cometa Halley) completam a sua órbita em menos de 200 anos e parecem ser originários da cintura de Kuiper. Cometas de período longo (por exemplo, o cometa Hale-Bopp) possuem uma periodicidade de milhões de anos e talvez surjam da nuvem de Oort. Finalmente, existem alguns cometas que possuem uma trajetória hiperbólica e parecem escapar do Sistema Solar. Cometas velhos que perderam a maior parte dos seus componentes voláteis são normalmente considerados asteroides.



Fig. 10: Cometa Halley

Os **Centauros**, situados entre as 9 e 30 UA, são corpos de gelo semelhantes aos cometas, que orbitam entre Júpiter e Neptuno. O maior centauro conhecido, Chariklo, possui um diâmetro de 200 a 250 km. O primeiro centauro descoberto, Quíron, foi inicialmente considerado um cometa, já que desenvolveu uma cauda como estes. Alguns astrónomos classificam aos centauros como corpos da cintura de Kuiper.

A **cintura de Kuiper** é um grande anel formado pelos resíduos provenientes dos escombros de um anel imenso, semelhante ao da cintura de asteroides, mas composto principalmente por gelo. A primeira parte da cintura de Kuiper estende-se entre 30 e 50 UA do Sol e termina no “penhasco de Kuiper”, onde começa a segunda parte até às 100 UA. Acredita-se que esta região é a fonte de cometas de curto período. É composta principalmente de pequenos corpos e por alguns maiores, como Quaoar, Varuna ou Orcus, que poderão vir a ser classificados como planetas anões.

A cintura de Kuiper pode ser, basicamente, dividida em objetos “clássicos” e em objetos em ressonância com Neptuno. Um exemplo disto são os plutinos que

completam duas órbitas enquanto Neptuno completa três.

## PLUTÃO E CARONTE

Plutão (39 UA de distância média), um planeta anão, é o maior corpo conhecido da cintura de Kuiper. Descoberto em 1930, foi considerado um planeta e reclassificado em agosto de 2006. Plutão possui uma órbita excêntrica inclinada  $17^\circ$  relativamente ao seu plano eclíptico. A distância orbital de Plutão varia entre as 29,7 UA no seu periélio e as 49,5 UA no afélio.

O maior satélite de Plutão, Caronte, é suficientemente grande para que o conjunto grave em volta de um centro de gravidade localizado acima da superfície de cada um dos corpos. Outros dois pequenos satélites, Nix e Hidra, orbitam o sistema Plutão-Caronte. Plutão está em ressonância orbital de 3:2 com Neptuno (o planeta orbita duas vezes o Sol, enquanto Neptuno orbita três). Os corpos da cintura de Kuiper que participam nesta ressonância são denominados plutinos (isto é, pequenos Plutos).

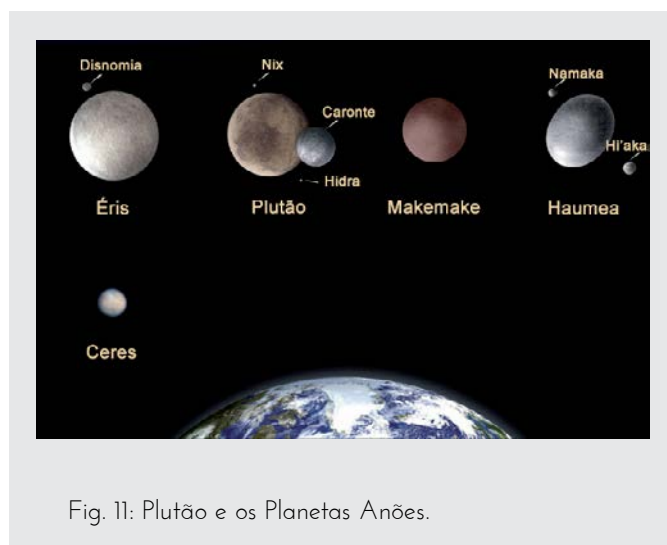


Fig. 11: Plutão e os Planetas Anões.

---

## Bibliografía

Collin, S, Stavinschi, M., *Leçons d'astronomie*, Ed. Ars Docendi, 2003.

Kovalevsky, J, *Modern Astrometry*, Springer Verlag, 2002.

Nato A., *Advances in Solar Research at eclipses, from ground and from space*, eds. J.P. Zahn, M. Stavinschi, Series C: Mathematical and Physical Sciences, vol. 558, Kluwer Publishing House, 2000.

Nato A, *Theoretical and Observational Problems Related to Solar Eclipses*, eds. Z. Mouradian, M. Stavinschi, Kluwer, 1997.



# Horizonte Local e Rélogios de Sol

Rosa M. Ros

União Astronômica Internacional, Universidade Politécnica da Catalunha (Barcelona, Espanha)

## Resumo

O estudo do horizonte é fundamental para promover as primeiras observações dos alunos nos centros educativos. Um modelo simples, que será construído para cada escola, permite facilitar o estudo e o entendimento dos primeiros instrumentos astronômicos. Este modelo é apresentado como um simples modelo de relógio equatorial e, a partir dele, poderão ser elaborados outros modelos (horizontal e vertical).

## Objetivos

- Compreender o movimento diurno e movimento anual do Sol.
- Compreender o movimento da abóbada celeste.
- Compreender a construção de um relógio de Sol elementar.

## A Terra roda e translada

Como é bem conhecido, a Terra roda sobre o seu eixo, o que resulta em dia e noite. O eixo desta rotação era denominado pelos antigos astrónomos de eixo da Terra por termos a percepção que o céu gira em torno deste eixo (céu de dia e céu de noite). Mas a Terra também executa uma translação, numa elipse, com o Sol num dos seus focos. Porém, podemos considerar que este é um movimento circular (já que a excentricidade do eclipse é quase nula, ou seja, é quase uma circunferência).

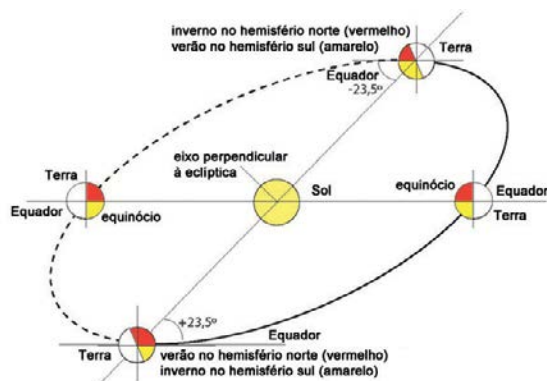


Fig. 1: Esquema do movimento de translação. O ângulo entre o plano do equador terrestre e o plano da eclíptica é de  $23,5^\circ$ . O ângulo entre o eixo de rotação terrestre e o eixo perpendicular ao plano da eclíptica também é de  $23,5^\circ$ .

A Terra precisa de um ano para completar uma volta completa em redor do Sol, mas fá-lo num plano,

o plano da eclíptica, que não é perpendicular ao eixo de rotação da Terra: é inclinado. Mais especificamente, o ângulo entre o eixo de rotação terrestre e o eixo perpendicular à eclíptica é de  $23,5^\circ$ . De igual forma, o ângulo entre o plano do equador terrestre e o plano da eclíptica é também  $23,5^\circ$  (figura 1). É esta inclinação que provoca as estações do ano. Para poder visualizar este fenómeno, construiremos um pequeno modelo (figura 2).

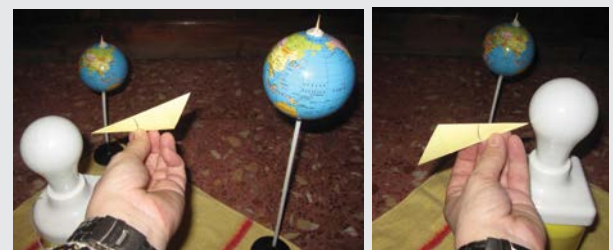


Fig. 2a, 2b y 2c: Disposição das 4 esferas representando a Terra com a lâmpada representando o Sol no meio. Devem ser distribuídas as posições relativas de forma que o ângulo da linha desde o centro do Sol ao centro da Terra forme aproximadamente  $23^\circ$  com o solo, que representa o plano do equador.

lustraremos este efeito com 4 esferas e uma lâmpada, representando o Sol, para ser colocada no centro. É boa ideia desenhar a superfície terrestre de forma a distinguir o equador e os polos. A seguir, são dadas as distâncias relativas ao tamanho das esferas que servem de modelo para a Terra, neste caso, 8 cm de diâmetro. Precisaremos de um pequeno pedaço de toalha de papel, ou tecido, quadrado de aproximadamente 25 cm de diagonal. Colocamos as 4 esferas em forma de cruz, uma em frente da outra (figura 2) sobre palitos

de altura 3, 15, 25 e 15 cm respetivamente. Os valores mencionados estão calculados para que a inclinação do equador com relação ao plano da eclíptica seja de aproximadamente de  $23^\circ$ .

Colocaremos o modelo num quarto escuro e acenderemos a lâmpada (também pode ser utilizada uma vela, desde que a altura seja equivalente). É evidente que a Terra na posição A recebe mais luz no hemisfério norte do que a colocada no lugar C (figura 3), enquanto a zona iluminada do hemisfério sul é maior na posição C que na A. Nas posições B e D ambos os hemisférios estão igualmente iluminados: estes correspondem aos equinócios de primavera e outono. Quando há mais zona iluminada, é verão, e quando há menos, é inverno. Conclui-se assim que, como a Terra está na posição A, é verão no hemisfério norte e inverno no hemisfério sul. Desta forma, quando a Terra está na posição C, é inverno no hemisfério norte e verão no hemisfério sul.



Fig. 3: Modelo do movimento de translação que explica as estações. Quando a Terra está na posição A, é verão no hemisfério norte e inverno no hemisfério sul. Quando a Terra está na posição C, é inverno no hemisfério norte e verão no hemisfério sul. Enquanto a Terra está nas posições B e D, estão igualmente iluminadas e surgem os equinócios. O dia e a noite são iguais.

Este modelo oferece muitas oportunidades de estudo porque se imaginarmos uma pessoa que viva num dos hemisférios, veremos que ele/ela verá o Sol a diferentes alturas dependendo da estação do ano. Imaginemos que há uma pessoa no hemisfério norte quando estamos na posição A, logo esta pessoa vê o Sol por cima do plano do equador  $23,5^\circ$  (figura 4a), o que não acontecerá se estiver no hemisfério norte. Entretanto, se estiver no hemisfério norte mas posição C, observa o Sol por baixo do equador  $-23,5^\circ$  (figura 4b). Quando está nas posições B e D, o vê-o exatamente sobre o

equador, isto é, a  $0^\circ$  sobre o plano equador.

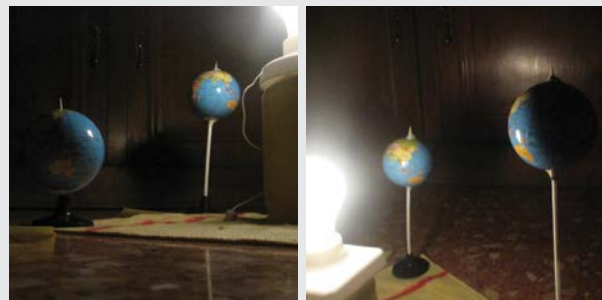


Fig. 4a. En la posición A es verano en el hemisferio norte y el Sol está  $23,5^\circ$  por encima del ecuador. En cambio en el hemisferio sur es invierno.

Fig. 4b. En la posición C es invierno en el hemisferio norte y el Sol está  $23,5^\circ$  por debajo del ecuador. En cambio en el hemisferio sur es verano.

### A Terra paralela

A posição de que usufruímos no modelo anterior, “Terra do exterior”, não é fácil de observar da nossa localização na superfície da Terra. De facto, parece quase impossível dado que estamos ‘colados’ à Terra e apenas um astronauta, a partir da sua nave espacial, poderá ver a Terra do exterior. Mas há uma estratégia simples que nos permite ver a Terra do exterior, de uma área iluminada a cada dia e cada hora. Para isso, vamos usar uma Terra paralela, isto é, um globo iluminado da mesma forma que a Terra, pela mesma fonte, que é o Sol.

Se um holofote iluminar duas esferas produz nelas iguais áreas de luz e sombra (figura 5), pelo que, se orientarmos o globo corretamente teremos relações iguais de luz e sombra, no globo e no nosso planeta, e poderemos observar o globo como se fôssemos um astronauta localizado muito mais longe que a ISS da Terra.

Usaremos o globo removendo o seu suporte e colocando-o num copo, com o eixo de rotação do globo na mesma direção tal como o da Terra (usaremos uma



Fig. 5: Um holofote ilumina duas esferas da mesma forma e produz igual área de luz e sombra.

bússola para indicar a direção norte-sul). Sabemos que a posição da nossa localidade deverá estar no topo do globo.

Usaremos uma bússola para saber a direção norte-sul de modo a orientar o eixo do globo e colocaremos a nossa localidade na posição mais elevada (figure 6a). Para saber se o globo está corretamente posicionado podemos tentar equilibrar um lápis nesse ponto (a nossa localização). Se o lápis cair é necessário corrigir a posição do globo até que o lápis fique numa posição estável. Podemos ilustrar esta posição colocando um boneco que nos represente (figure 6b).

Com pedaços de argila podemos construir a linha de divisão luz/sombra e verificar que ela se move lentamente ao longo da superfície do globo à medida que as horas passam até que chegue a hora em que será noite. Podemos colocar pequenos pedaços de palitos que servirão de gnômons e observar as sombras e como elas se movem ao longo do dia e visualizar os efeitos do movimento de rotação na Terra (figure 6b).



Fig. 6a. O globo com o suporte habitual não serve de modelo. O globo deve ser colocado sobre um copo e orientado, com o nosso local de observação no topo para que seja um modelo perfeito.



Fig. 6b. Podemos colocar um boneco indicando a nossa posição e pedaços de argila para indicar a linha de divisão luz/sombra. Com a passagem das horas esta linha de separação luz/sombra mudará. Também podem ser usados pedaços de palitos para estudar as suas sombras.

Mas o mais interessante é visualizar o movimento de translação: como é que a linha luz/sombra se situa ao longo do ano. Isto pode ser observado no verão (figure 7a), inverno (figure 7b) e equinócios (figure 7c) tal como no modelo inicial das quatro estações (figure 3).



Fig. 7a. No hemisfério norte, o polo norte encontra-se na área iluminada por isso é verão nesse hemisfério e estamos a observar o fenómeno do Sol da meia-noite. No hemisfério sul, o polo sul está na sombra e no inverno.



Fig. 7b. O polo norte está na área da noite, pelo que é inverno no hemisfério norte. No hemisfério sul o polo sul está iluminado por isso é verão.

Após considerar estes dois modelos acreditamos ser necessário introduzir o modelo “real” para o observador que está ligado à Terra e que observa que todos os dias as estrelas se movem relativamente ao horizonte. Construímos um modelo no horizonte local do observador: Modelo Local do Horizonte.

### A Observação

Professores de diferentes áreas da ciência (mecânica, eletricidade, química, biologia, etc.) podem afirmar que é difícil trabalhar de forma correta numa escola de ensino básico e/ou secundário sem um laboratório. Neste aspeto, os professores de astronomia estão contentes porque eles dispõem sempre de um “laboratório de astronomia”. Todas as escolas possuem um lugar para as brincadeiras dos alunos: o pátio. O pátio além de ser um ambiente de recreio, também é um laboratório de astronomia: é um espaço que oferece a possibilidade de realizar atividades práticas de astronomia. Se toda escola tem à disposição um laboratório, parece oportuno usá-lo!



Fig. 8 Representação clássica da esfera celeste.

Um problema que surge quando o estudante está no pátio para desenvolver atividades práticas de astronomia é a diferente posição relativa da esfera celeste, ou seja, é diferente do momento em que o professor explica dentro de uma sala de aula, e fora dela, no pátio da escola.

Quando o professor, no quadro negro, em textos ou maquetes, fala de meridianos e paralelos, de coordenadas de posição, apresenta figuras parecidas à figura 8. Este procedimento não é muito difícil e, normalmente, os estudantes entendem sem problemas. As figuras que os alunos veem diante de si são análogas às que foram usadas quando estudam geografia (figura 9).

Os problemas começam quando estamos a observar o céu e não aparece nenhuma linha no céu. Não é possível ver o eixo de rotação e não é simples encontrar referências no firmamento. O principal obstáculo agora é que o estudante está situado no interior da esfera celeste, enquanto na sala de aula apresentamos toda a informação observando o céu a partir do exterior da esfera celeste. Logo, é difícil compreender a nova situação, vista de dentro da esfera (figura 10).

Obviamente, após esta experiência poderíamos pen-

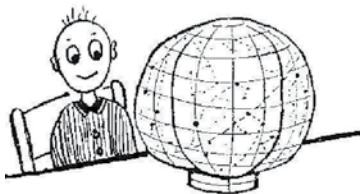


Fig. 9: A esfera celeste a partir do exterior.

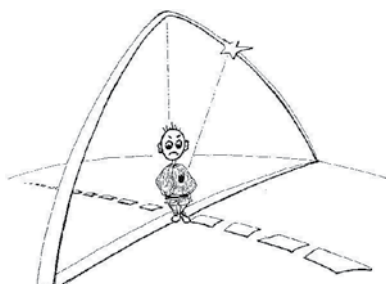


Fig. 10: A esfera celeste a partir do interior.

sar numa modificação na forma de apresentar a nossa aula. É possível fazer em sala de aula uma exposição do ponto de vista do interior da esfera. Esta percepção é mais similar à situação real do observador, contudo é desinteressante oferecer apenas esta apresentação. Os estudantes devem ser capazes de ler qualquer livro de astronomia e poder entender a abstração correspondente à observação da esfera celeste desde o exterior, situação normal na literatura científica. Nestas circunstâncias é possível pensar em construir um modelo para os estudantes que permita comparar ambos os pontos de vista e que também permita “tornar visíveis” as linhas do céu e proporcionar uma melhor compreensão do próprio horizonte.

### Modelo local do horizonte

Iniciamos fotografando o horizonte. Com uma câmara sobre um tripé, é muito simples tirar várias fotografias do horizonte a partir de um determinado lugar do pátio da escola – caso as construções em volta o permitam – ou de um terraço com o horizonte aberto. (Marcaremos a posição do tripé sobre o solo com tinta, para aproveitar novamente o lugar na posição exata).

É muito importante selecionar bem o lugar porque a proposta é pôr o modelo na mesma posição de onde as fotografias foram tiradas, em cada observação. Ao tirar cada foto é necessário que o enquadramento tenha uma zona comum na fotografia seguinte, para depois colocar as cópias sobre um papel, uma sobreposta à outra, e obter um horizonte como uma corrente de fotografias em continuidade.

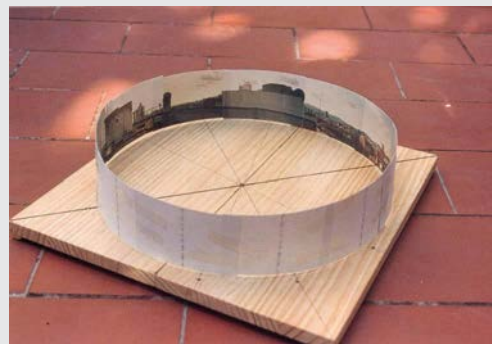


Fig. 11: O horizonte local.

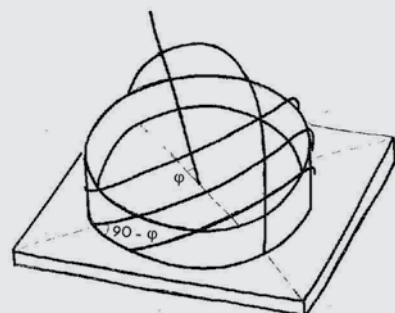


Fig. 12: Modelo mostrando o horizonte e o eixo polar

Com todas as fotografias podemos uni-las. Fixar as cópias uma ao lado da outra, de forma contínua, formando um cilindro que depois assentaremos sobre uma base quadrada de madeira no mesmo lugar onde se tiraram as fotografias (figura 12). É muito importante situar todas as fotografias de acordo com o horizonte real.

A seguir é introduzido o eixo de rotação terrestre. Conhecendo o valor da latitude do lugar é colocado um arame na maquete com esta inclinação (figura 12).

Com este valor é possível fixar o eixo de rotação do modelo. Entretanto, como o modelo está orientado conforme o horizonte local, o prolongamento do arame serve para ajudar a visualizar o eixo real e localizar o polo sul, portanto é útil também para imaginar a posição do ponto cardeal sul (figura 13).



Fig. 13: Modelo com o horizonte em anel e o eixo polar



Fig. 14: Modelo com o meridiano local.

Obviamente, é fácil introduzir o ponto cardeal norte e o polo norte. A seguir, é possível desenhar a reta norte-sul sobre o modelo e também no solo do pátio ou no terraço onde é feita a atividade (usando o processo normal de determinação da reta norte-sul). É muito importante determinar esta reta, porque de cada vez que o modelo for usado este deverá ser orientado, por isso é útil dispor desta reta norte-sul real para facilitar o trabalho. (Com uma bússola é possível comprovar esta direção).

O próximo passo consiste em localizar o meridiano do

lugar. É fácil definir o meridiano local, porém não é um conceito simples de assimilar pelos estudantes (talvez, em parte, porque cada um possui o seu meridiano do lugar). É possível fixar um arame que passe pelos pontos cardeais norte e sul e através do eixo de rotação da Terra (figura 14). Este arame é a visualização do meridiano do lugar no modelo, e permite imaginar a linha do meridiano local sobre o céu. Agora é fácil imaginar porque inicia-se no mesmo lugar do modelo que o estudante pôde observar. O meridiano local começa no mesmo edifício que da fotografia, mas no horizonte real, e após passar acima de sua cabeça acabará no mesmo edifício que é visto graças ao arame no horizonte de fotografias.

O processo para introduzir o equador é um pouco mais complicado. Uma possibilidade consiste em traçar a linha este-oeste. Esta solução é muito simples, mas não contribui em nada do ponto de vista pedagógico. Com objetivo educacional é mais conveniente usar novamente a fotografia. É possível colocar de novo a câmara sobre o tripé exatamente na mesma posição em que se tiraram as fotografias do horizonte na primeira ocasião em que se começou a desenvolver a maquete (é por este motivo que o solo foi pintado com as marcas correspondentes, para situar o tripé no mesmo lugar). Com a câmara sobre o tripé é fotografado o nascer e o pôr-do-sol no primeiro dia de primavera ou de outono. Neste caso, teremos duas fotografias da posição precisa dos pontos cardeais este e oeste, respectivamente, relativamente ao horizonte das fotografias e, obviamente, sobre o horizonte real.

O equador é simulado por meio de um arame perpendicular ao eixo de rotação terrestre que inicia e finaliza nos pontos cardeais este e oeste (sobre o horizonte, na reta perpendicular ao norte-sul). Porém, não é simples fixar o círculo de arame perpendicular ao arame que simboliza o eixo de rotação, porque o mesmo eixo está inclinado e obviamente o equador também deverá estar inclinado. Além disso, com que inclinação deve ser inserido?

Serão fotografadas quatro ou cinco imagens do nascer do Sol no primeiro dia de primavera ou de outono. É perigoso fotografar o Sol quando está muito elevado, mas é seguro durante o nascer ou pôr-do-sol, quando a atmosfera atua como um filtro. Juntaremos todas as fotografias com o mesmo enquadramento, usando um software apropriado, sobrepondo-as uma a uma (teremos uma referência do horizonte) e poderemos distinguir a inclinação do Sol sobre o horizonte. Esta fotografia servirá para inserir a inclinação apropriada no arame que representa o equador no modelo (figura 16). Desta forma são conhecidos os pontos onde fixar e a

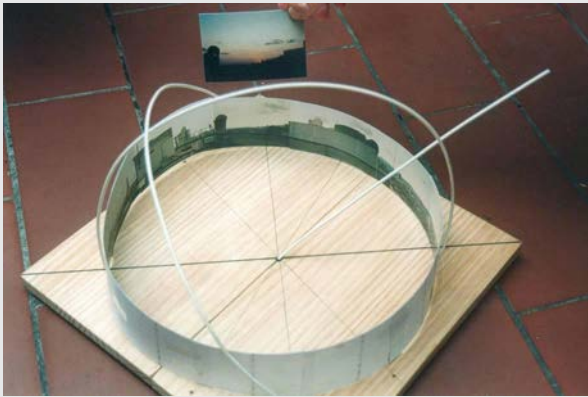


Fig. 15: Ponto do pôr-do-sol no dia do equinócio de primavera ou de outono.

inclinação, logo é possível segurar o arame sobre a madeira e também segurar o meridiano local (figura 16).

Se considerarmos o Sol como uma estrela normal (o Sol é a estrela mais importante para nós porque é a mais próxima, mas o seu comportamento não é muito diferente das outras estrelas) a inclinação do movimento das estrelas pode ser obtida quando estas se elevam ou se põem sobre o horizonte. Para isso, basta captar duas fotografias deste instante próximas do ponto cardinal este ou oeste (figura 17).

Pode ser que não seja possível tirar as fotografias mencionadas no parágrafo anterior a partir da localidade onde a escola está construída. Nesse caso será necessário ir até ao campo, num lugar que não seja afetado



Fig. 16: Traços do nascer do Sol.

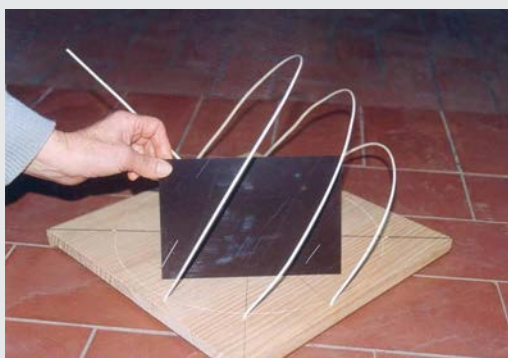


Fig. 17: Traços das estrelas no este.

pela poluição luminosa, e captar as fotografias com uma câmara reflex, sobre um tripé e com cabo disparador. Aproximadamente 10 minutos de exposição são suficientes. É muito importante colocar a câmara paralela ao horizonte (pode ser utilizado um nível para realizar esta operação).

É importante aproveitar esta ocasião para obter uma pequena coleção de fotografias. Por exemplo: é possível fotografar uma da zona em intervalos de 15 minutos de exposição, depois, fotografar outra por cima da zona seguindo o meridiano local; após, outra seguindo também o mesmo meridiano e assim sucessivamente até conseguir a imagem que já está rasante no horizonte. A ideia é fotografar todo o meridiano local desde o norte até o sul, passando por cima de nossas cabeças. Evidentemente, o meridiano local do lugar onde se decidiu obter as fotografias não é o mesmo meridiano da escola, mas os alunos podem compreender esta pequena diferença facilmente.

Quando temos em mãos todas as fotografias, podemos construir uma faixa do meridiano. Com esta faixa os estudantes podem compreender melhor o movimento da esfera celeste ao redor do eixo de rotação da Terra. Com o mesmo tempo de exposição é interessante observar que a trajetória desenhada por uma estrela altera de longitude. É mínima ao redor do polo e máxima no equador. Também muda de forma. No equador a trajetória desenha uma linha reta. Na zona próxima à polar as linhas são curvas côncavas e abaixo do equador são convexas. Se fizermos cópias em papel suficientemente grandes das fotografias, podemos situar a faixa sobre a cabeça dos estudantes, permitindo que visualizem e compreendam melhor o movimento.

Usando as duas fotografias dos pontos cardiais este e oeste, é possível conhecer a inclinação dos traços das estrelas no equador e, portanto, também estabelecer o arame que simboliza o equador sem problemas. Como já se sabe o lugar e a inclinação dos pontos onde fixar o arame, é possível prende-lo sobre a madeira e segurá-lo no meridiano local (figura 14).

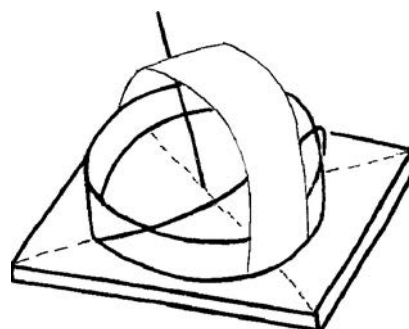


Fig. 18: O meridiano local com fotografias.

Evidentemente é possível introduzir a faixa de fotografias do meridiano local sobre o modelo. Basta fazer algumas fotocópias e furá-las no ponto que indica a posição polar para introduzir o eixo de rotação. Observa-se que o arame do equador faz correspondência com os traços em linha reta da faixa (figura 18).

Com este modelo é possível oferecer aos estudantes as duas possibilidades de visualizar a esfera celeste a partir do interior e a partir do exterior.

Se forem fotografadas duas imagens do primeiro dia de inverno e de verão, no momento do nascimento e pôr-do-sol, os alunos verão que as situações extremas na sua cidade são muito diferentes. É surpreendente a diferença que há entre uma e outra. Também é possível fixar os Trópicos de Câncer e de Capricórnio com as fotografias que forneceram a inclinação do equador, já que os paralelos seguem esta mesma inclinação. Com um simples transferidor verifica-se que o ângulo interior entre o Trópico de Câncer e o equador é de aproximadamente  $23^\circ$ , e este ângulo também é o mesmo formado entre o equador e o Trópico de Capricórnio (figuras 19 e 20).

Para treino dos estudantes é interessante que observem que o Sol não nasce e se põe na mesma posição, e que esta posição nem sempre coincide com o este e o oeste, respetivamente. Muitos livros mencionam que o Sol nasce a este e se põe a oeste. Os estudantes podem comprovar este fenómeno duas vezes ao ano, e que não acontece nos restantes dias (figuras 19 e 20).

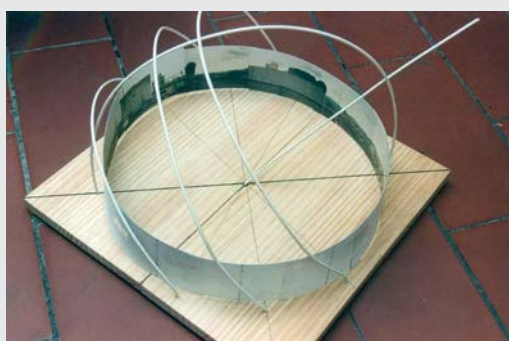


Fig. 19: Trajetórias do Sol no primeiro dia de cada estação. Os pontos do nascer e pôr-do-sol não coincidem exceto em dois dias: nos equinócios.

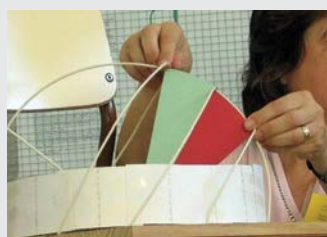


Fig. 20: O ângulo entre duas trajetórias do primeiro dia de duas estações consecutivas é de  $23,5^\circ$ .

Desta forma os alunos observam de maneira prática e simultânea, a esfera do interior (a esfera real) e do exterior (o modelo). Com este modelo os estudantes podem entender melhor o seu ambiente, e as atividades de orientação realizadas na escola são resolvidas de forma muito simples. Também podem visualizar a zona que corresponde ao movimento do Sol, entre os paralelos do modelo, e imaginá-lo sobre o céu e o horizonte real da cidade. A orientação transforma-se numa brincadeira de crianças.

## Relógios de Sol

Há outras possibilidades de aplicação do modelo. A maquete é nada mais que um grande relógio de Sol. É fantástico explicar de uma forma simples e didática a construção de um relógio considerando apenas o horizonte e o movimento do Sol. Em primeiro lugar, é muito fácil ver que o eixo de rotação da Terra se transforma no ponteiro do relógio.

Se introduzirmos um plano na direção do plano equatorial e movermos uma lanterna sobre o Trópico de Câncer, é possível ver a sombra do ponteiro (arame que representa o eixo de rotação terrestre) percorrendo o plano do quadrante equatorial. Mas quando se move a lanterna sobre o Trópico de Capricórnio, então a sombra aparece na zona abaixo do plano, e é evidente que, quando a lanterna é colocada sobre o equador, não se obtém sombra. Desta forma, é simples comprovar que o relógio equatorial funciona no verão e na primavera mostrando as horas sobre a superfície do relógio, no inverno e outono debaixo do mesmo. Há dois dias no ano em que não funciona: nos dias de ambos os equinócios.

Se considerarmos o plano equatorial, o horizontal e o vertical (este-oeste), é possível ver que a lanterna aponta a mesma hora nos três quadrantes (figura 21). Além disso, é possível observar as horas da manhã e da tarde para o mesmo ponteiro (o eixo de rotação terrestre). Obviamente, é a mesma hora nos três relógios. Comprova-se facilmente em que zona deverão ser desenhadas as horas da manhã e da tarde em cada relógio. (Todos os professores receberam, alguma vez, um desenho com as horas erradas num relógio solar; usando este modelo o erro não acontecerá).

Ao mover a lanterna sobre os Trópicos de Capricórnio e Câncer, observa-se facilmente que o raio de luz emitido pela lâmpada produz sobre o plano uma cônica diferente. No primeiro caso (no primeiro dia de verão) a cônica é quase uma circunferência e a área fechada é claramente menor que no segundo caso. Quando se segue o outro paralelo (primeiro dia de inverno) a seção é

elíptica e a área fechada é bem maior. Então, os alunos podem compreender que a radiação está mais concentrada na primeira situação, ou seja, a temperatura superficial é maior no verão. Como também é evidente no modelo, o número de horas de insolação solar é maior, a consequência natural é que no verão faz mais calor que no inverno (figura 22).

tempo não é o mesmo encontrado nos relógios que usamos no nosso pulso. Temos que considerar vários ajustes.

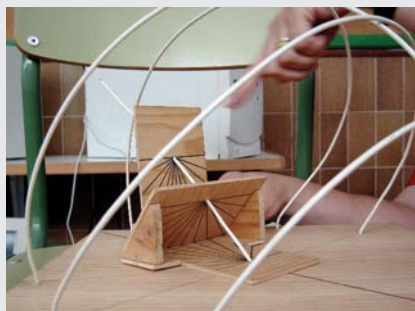


Fig. 21: Este modelo é um enorme relógio de Sol. Podemos considerar três tipos.

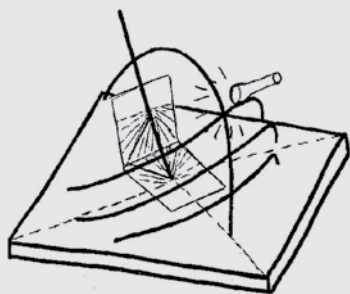


Fig. 22: Os relógios e as estações.

Aproveitaremos esta oportunidade para mencionar alguns elementos que é necessário conhecer para construir um relógio de Sol.

É muito simples fazer o relógio equatorial. Basta posicionar o ponteiro na direção do eixo de rotação terrestre, isto é, na direção norte-sul (uma bússola pode ajudar) e com uma altura sobre o plano do horizonte igual à latitude do lugar (figuras 23 e 24). O ponteiro de qualquer relógio é colocado sempre da mesma maneira.

As linhas horárias do relógio equatorial são desenhadas a 15 graus (figuras 26a e 26b), já que o Sol dá uma volta de 360° em 24 horas. Se dividirmos 360 por 24 teremos 15° em cada hora.

As linhas horárias de um relógio orientado, horizontal ou vertical, obtêm-se por projeção das linhas equatoriais e considerando simplesmente a latitude do lugar (figuras 25a, 25b, 25c e 25d).

### Tempo solar e tempo do relógio de "pulso"

Os relógios de Sol oferecem o tempo solar, mas este

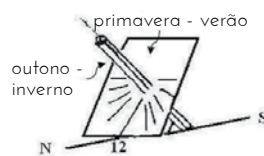


Fig. 23: Relógio equatorial usado no hemisfério norte.

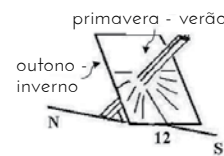


Fig. 24: Relógio equatorial usado no hemisfério sul.

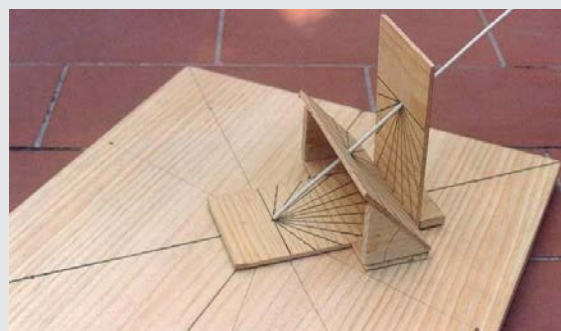
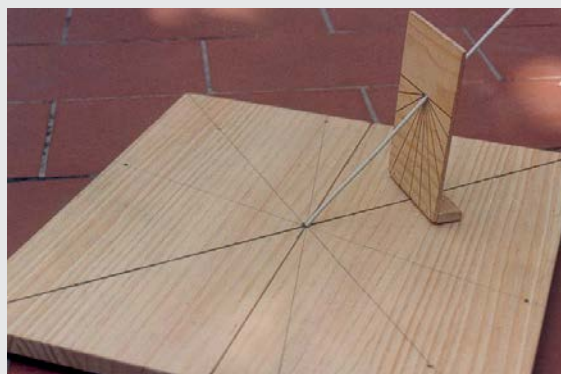
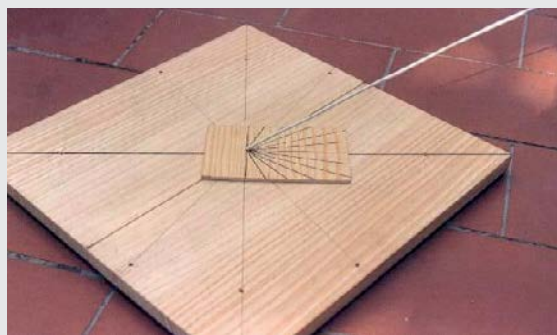
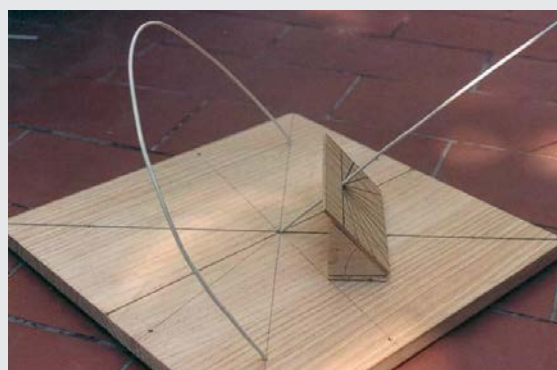


Fig. 25a, 25b, 25c y 25 d: Diversas fotos dos três relógios.

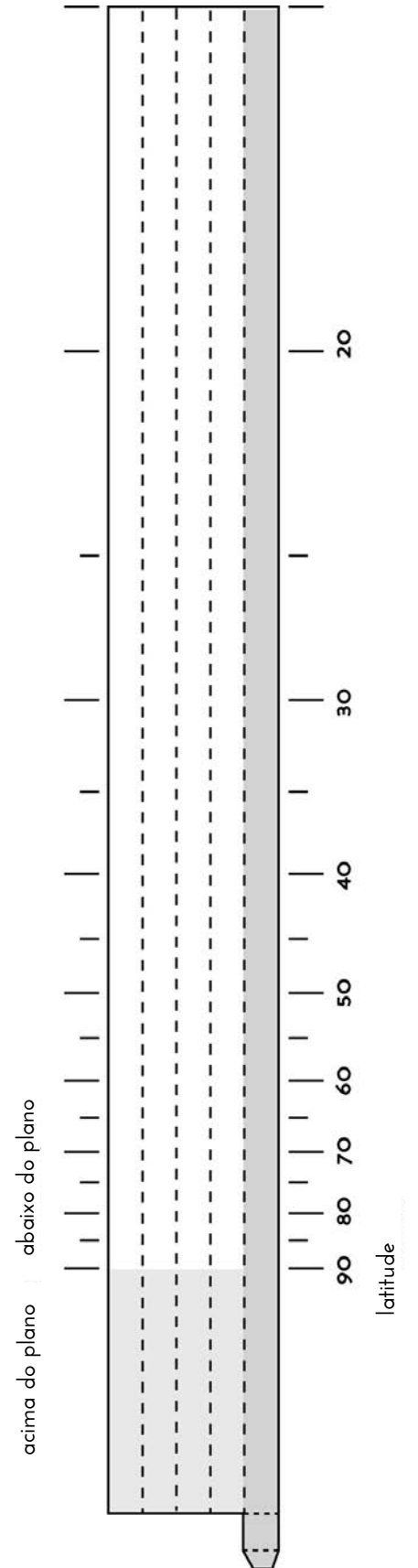
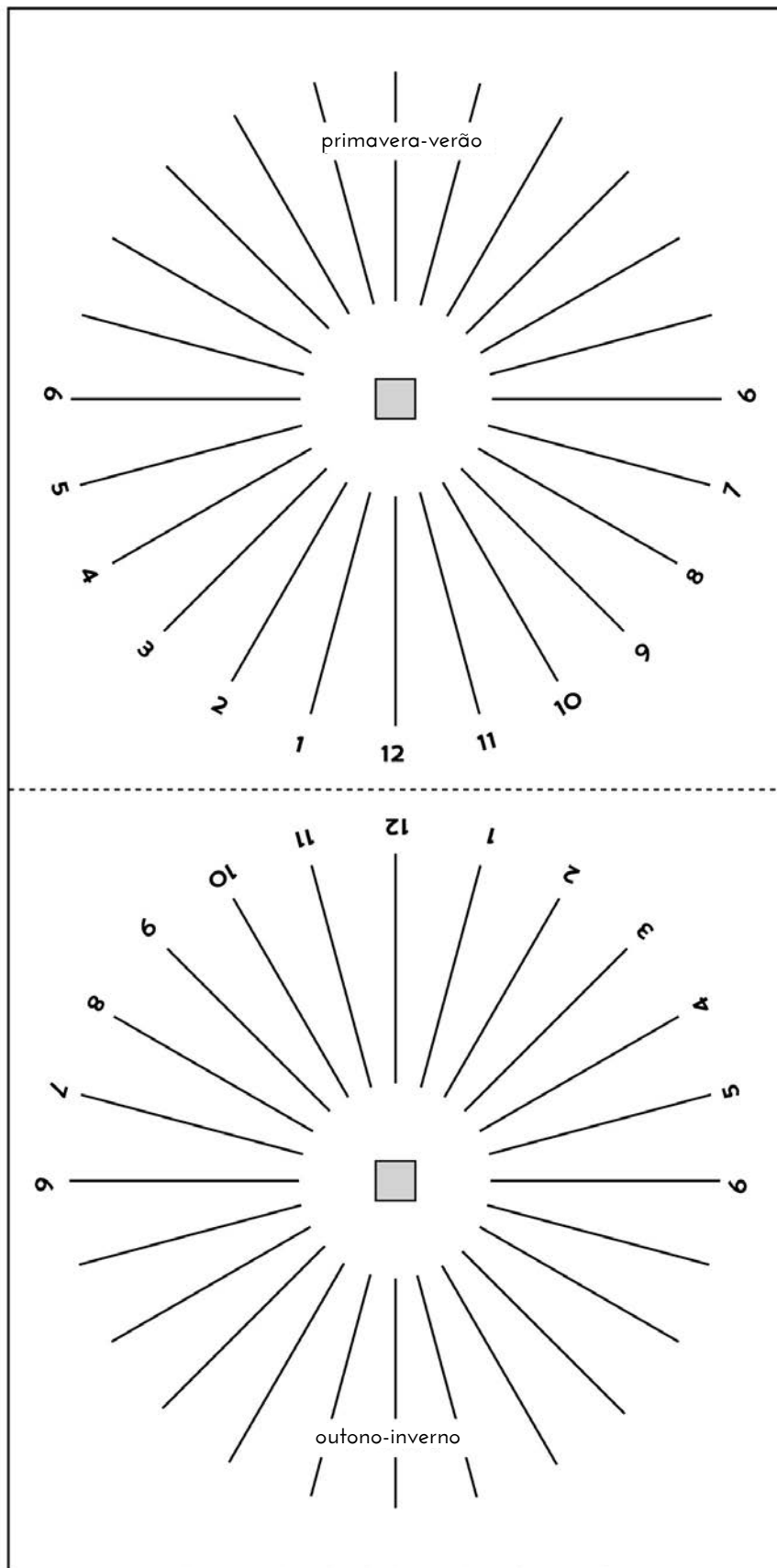


Fig. 26a e Fig. 26b: Recortável do relógio equatorial.

### Ajuste de Longitude

O mundo divide-se em 24 zonas de tempo a partir do primeiro meridiano ou meridiano de Greenwich. Para fazer o ajuste de longitude é necessário conhecer a longitude local e a longitude do meridiano “Standard” da sua região. Acrescenta-se o sinal + para o este e o sinal – para o oeste. É indispensável expressar as longitudes em horas, minutos e segundos (1 grau = 4 minutos de tempo).

### Ajuste de verão/inverno.

Quase todos os países possuem o horário de verão e o de inverno. Costuma-se acrescentar uma hora no verão. A mudança de horário de verão/inverno é uma decisão do governo do país.

### Ajuste da Equação de Tempo

A Terra gira entorno do Sol, numa elipse, conforme a Lei das Áreas de Kepler, ou seja, não é um movimento constante, o que significa um problema sério para os relógios mecânicos. Desta forma, o tempo médio (dos relógios mecânicos) é definido com a média ao longo de um ano completo do tempo. A Equação de Tempo é a diferença entre o «Tempo Solar Real» e o «Tempo Médio». Esta equação aparece tabelada na tabela 1.

Exemplo 1: Barcelona (Espanha) 24 de Maio.

Ajuste	Comentário	Resultado
1. Longitude	Barcelona está na mesma zona “standard” que Greenwich.	-8.7 m
2. Horário de verão	Maio possui horário de verão + 1h	+ 60 m
3. Equação de Tempo	Lemos a tabela para o dia 24 de Maio	-3.6 m
Total		+47.7 m

Por exemplo, às 12h do tempo solar, o nosso relógio de pulso assinala.

*(Tempo solar) 12h + 47.7 m = 12h 47.7 m (Tempo no relógio de pulso)*

dias	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	+3.4	+13.6	+12.5	+4.1	-2.9	-2.4	+3.6	+6.3	+0.2	-10.1	-16.4	-11.2
6	+5.7	+5.1	+11.2	+2.6	-3.4	-1.6	+4.5	+5.9	-1.5	-11.7	-16.4	-9.2
11	+7.8	+7.3	+10.2	+1.2	-3.7	-0.6	+5.3	+5.2	-3.2	-13.1	-16.0	-7.0
16	+9.7	+9.2	+8.9	-0.1	-3.8	+0.4	+5.9	+4.3	-4.9	-14.3	-15.3	-4.6
21	+11.2	+13.8	+7.4	-1.2	-3.6	+1.5	+6.3	+3.2	-6.7	-15.3	-14.3	-2.2
26	+12.5	+13.1	+5.9	-2.2	-3.2	+2.6	+6.4	+1.9	-8.5	-15.9	-12.9	+0.3
31	+13.4		+4.4		-2.5		+6.3	+0.5		-16.3		+2.8

Tabela 1: Equação de Tempo

Exemplo 2: Tulsa, Oklahoma (Estados Unidos) 16 de Novembro.

Ajuste	Comentário	Resultado
1. Longitude	Meridiano “standard” de Tulsa está a 90° W.	+24 m
2. Horário de verão	Novembro não tem horário de verão	
3. Equação do Tempo	Lemos a tabela para 16 de novembro	-15.3 m
Total		+ 8.7 m

Por exemplo, às 12h do tempo solar, o nosso relógio de pulso assinala:

*(Tempo solar) 12h + 8.7 m = 12h 8.7 m (Tempo no relógio de pulso).*

### A orientação

Outra dificuldade dos alunos é a orientação. Num curso de astronomia geral, é necessário introduzir o sentido da orientação. Pode ser que os nossos alunos não estudem astronomia novamente. O resultado mínimo esperado de um curso (único) de astronomia consiste em que os alunos sejam capazes de reconhecer onde está o norte, saber qual é a trajetória do Sol sobre o horizonte sul e quais são os planetas que se movem sobre este horizonte e, especialmente, aprender a localizar os diferentes acidentes geográficos da sua localidade.

Por exemplo, no horizonte de Barcelona (figuras 27a e 27b) os estudantes podem considerar diversas possibilidades relativas à posição do Sol, da Lua e certas constelações sobre o horizonte. As duas montanhas que vemos estão aproximadamente em posição oposta, mas para os estudantes isto não significa nada e normalmente apresentam dificuldade em distinguir que certos desenhos são possíveis enquanto outros não o são. Conhecem a teoria, mas a prática não é suficiente se eles não entendem as diferentes possibilidades.

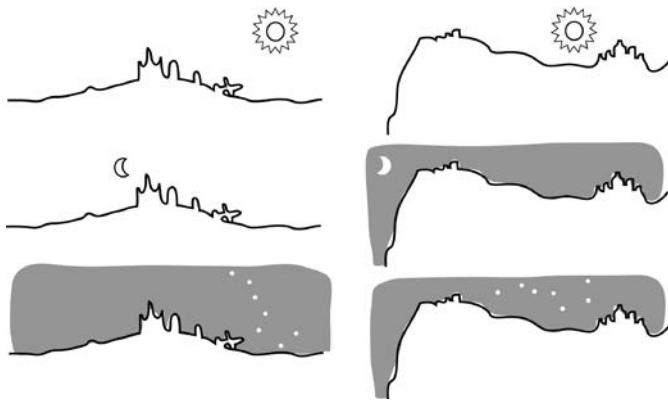


Fig. 27a: Horizonte nordeste de Barcelona.

Fig. 27b: Horizonte sudoeste de Barcelona.

A utilização do modelo, pensado para resolver os inconvenientes mencionados no parágrafo anterior, foi eficiente para esclarecer muitas questões relativas à orientação no horizonte local de uma forma que inicialmente não estava prevista.

É bom mencionar que este modelo é útil para explicar a situação local da esfera celeste durante o dia e durante a noite. Ajuda, de facto, a compreender melhor o movimento do Sol (e de outros elementos do Sistema Solar que se movimentam na zona próxima). Usando o modelo proposto, os alunos entendem que um astro brilhante na zona da Polar ou da Cruz do Sul nunca pode ser um planeta.



Fig. 28: O modelo em grande escala no Parque das Ciências de Granada.

É um bom investimento produzir um modelo em grande escala. Nesse caso, os alunos e inclusive os adultos, podem entrar e verificar a posição do Sol em comparação com o equador e os paralelos que correspondem ao primeiro dia dos solstícios de verão e inverno. Em alguns museus da ciência já se construíram este tipo de modelo (figura 28).

Após usar o modelo, os alunos podem discernir conteúdos que antes não tinham imaginado. Por exemplo, agora é claro que o Sol não nasce e se põe perpendicularmente ao horizonte, exceto no equador.

## Bibliografia

Alemany, C., Ros, R.M., *Parallel Earth*, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, EU-UNAWA, Barcelona, 2012.

Lanciano, N., *Strumenti per i giardino del cielo*, Edizioni junior, Spaggiari Eds, Roma, 2016.

Ros, R.M., “De l’intérieur et de l’extérieur”, *Les Cahiers Clairaut*, 95, p.1-5, Orsay, 2001.

Ros, R.M., “Laboratorio de Astronomía”, *Tribuna de Astronomía*, 154, p.18-29, 1998.

Ros, R.M., “Sunrise and sunset positions change every day”, *Proceedings of 6th EAAE International Summer School*, 177, 188, Barcelona, 2002.

Ros, R.M., Capell, A., Colom, J., *El planisferio y 40 actividades más*, Antares, Barcelona, 2005.

Ros, R.M., Lanciano, N., “El horizonte en la Astronomía”, *Astronomía Astrofotografía y Astronáutica*, 76, p.12-20, 1995.





No nosso caso, o simulador inclui algumas constelações que foram divididas conforme as suas diferentes declinações (sem considerar as suas ascensões retas porque não é o objetivo). É aconselhável utilizar constelações conhecidas pelos alunos. Estas podem variar em ascensão reta para dispor de constelações visíveis em diversos meses do ano (figura 2).

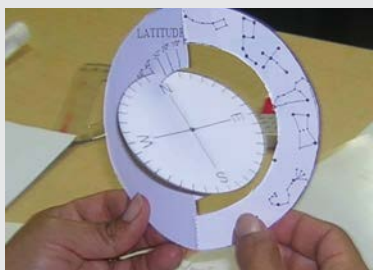


Fig. 2: Usando o simulador: este é um exemplo de simulador para o hemisfério norte usando constelações conforme a tabela 1.

Na escolha das constelações que serão desenhadas, é preciso escolher apenas as estrelas mais brilhantes, pois assim será mais fácil reconhecer a forma de cada uma delas. É preferível não utilizar as constelações que estão no mesmo meridiano, mas sim as mais conhecidas (tabela 1). Caso esteja interessado em fazer um simulador para cada estação do ano, pode construir quatro simuladores diferentes, um para cada estação, para o seu hemisfério. Deve utilizar constelações que possuem diversas declinações, mas com ascensão reta entre 21h e 3h para o outono (primavera), entre 3h e 9h para o inverno (verão), entre 9h e 14h para a primavera (outono) e finalmente entre 14h e 21h para o verão (inverno), para o hemisfério norte (sul).

Constelação	Máxima declinação	Mínima declinação
Ursa Menor	+90°	+70°
Ursa Maior	+60°	+50°
Cisne	+50°	+30°
Leão	+30°	+10°
Órion e Sirius	+10°	-10°
Escorpião	-20°	-50°
Cruzeiro do Sul	-50°	-70°

Tabela 1: Constelações que aparecem no simulador da figura 1.

Se considerarmos apenas uma estação, pode ser difícil escolher uma constelação entre, por exemplo, 90°N e 60°N, outra entre 60°N e 40°N, outra entre 40°N e 20°N, outra entre 20°N e 20°S, e assim sucessivamente, sem sobrepor nenhuma até atingir os 90°S. Se também desejamos selecionar constelações bem conhecidas pelos alunos, com apenas algumas estrelas brilhantes e que sejam suficientemente grandes para

cobrir todo o meridiano, torna-se difícil atingir o nosso objetivo. Como as grandes, brilhantes e bem conhecidas constelações não cobrem todo o céu, ao longo de todo o ano, é mais fácil construir apenas um simulador para todo o ano.

Há também outro argumento para construir um único simulador. As diferenças relativas entre as estações só acontecem em certas latitudes de ambos os hemisférios.

### Construção do simulador

Para obter um simulador adequado (figura 3a e 3b), uma boa ideia é colar ambos os pedaços (figuras 4 e 5) sobre uma cartolina antes de os recortar. É usual construir um simulador maior, com o dobro do tamanho para uso do professor.

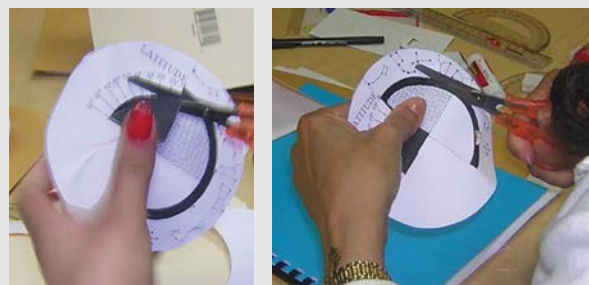


Fig. 3a e 3b: Construção do simulador estelar.

As instruções para a construção do simulador são as que se seguem.

### Simulador para o hemisfério norte

- Faça uma fotocópia das figuras 4 e 5 numa cartolina.
- Recorte ambas as peças ao longo da linha contínua exterior (figuras 4 e 5).
- Quite a área negra do pedazo principal (figura 4).
- Dobre a peça principal (figura 4) ao longo da linha pontilhada reta. É necessário dobrar bem a peça para facilitar o uso do simulador.
- Corte um encaixe pequeno no “N” do disco do horizonte (figura 5). O encaixe deve ser suficientemente grande para que a cartolina possa passar através dele.
- Cole o quadrante nordeste do disco do horizonte (figura 5) sobre o quadrante cinza da peça principal (figura 4). É muito importante ter a linha norte-sul de acordo com a linha dobrada da peça principal. Para além disso, o “W” no horizonte deve coincidir com a latitude 90°.
- Quando introduzir o disco do horizonte na peça principal, tenha o cuidado de o fazer de modo a que as duas peças fiquem perpendiculares.
- É muito importante colar cuidadosamente as diversas peças para obter a máxima precisão.

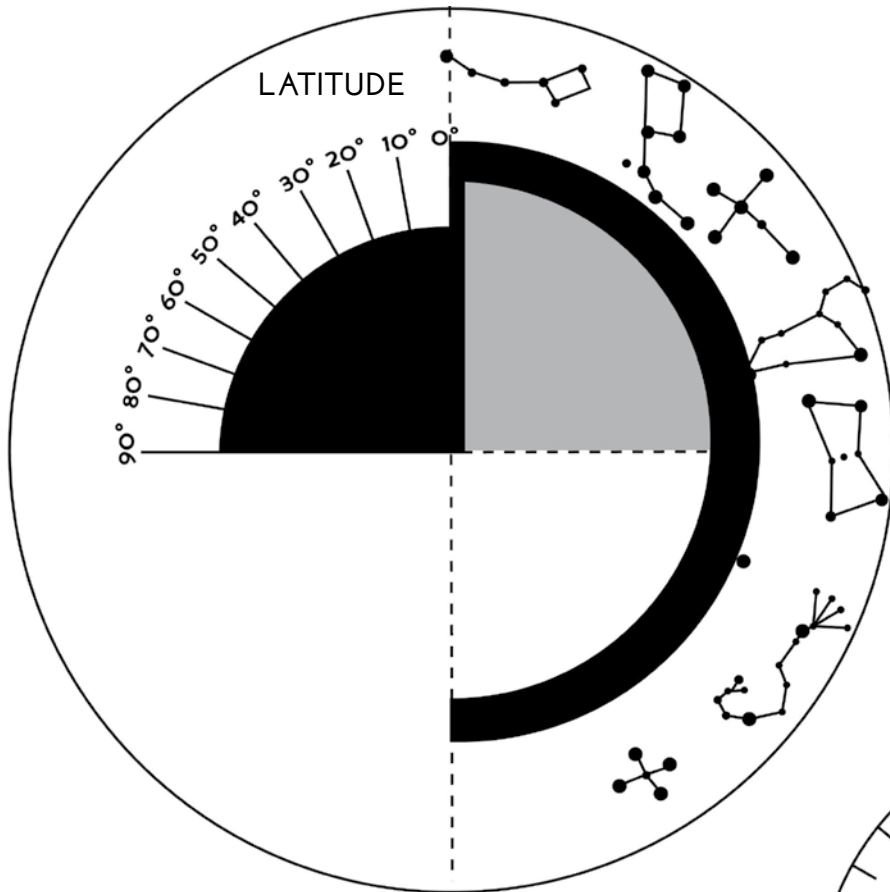


Fig. 4: Peça principal do simulador estelar para o hemisfério norte.

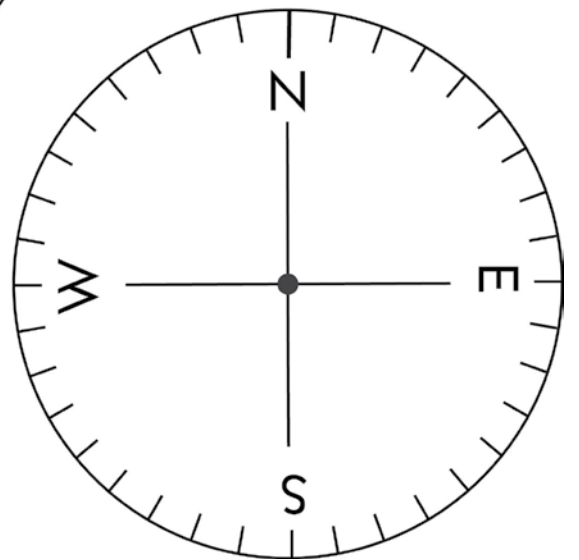


Fig. 5: Disco do horizonte.

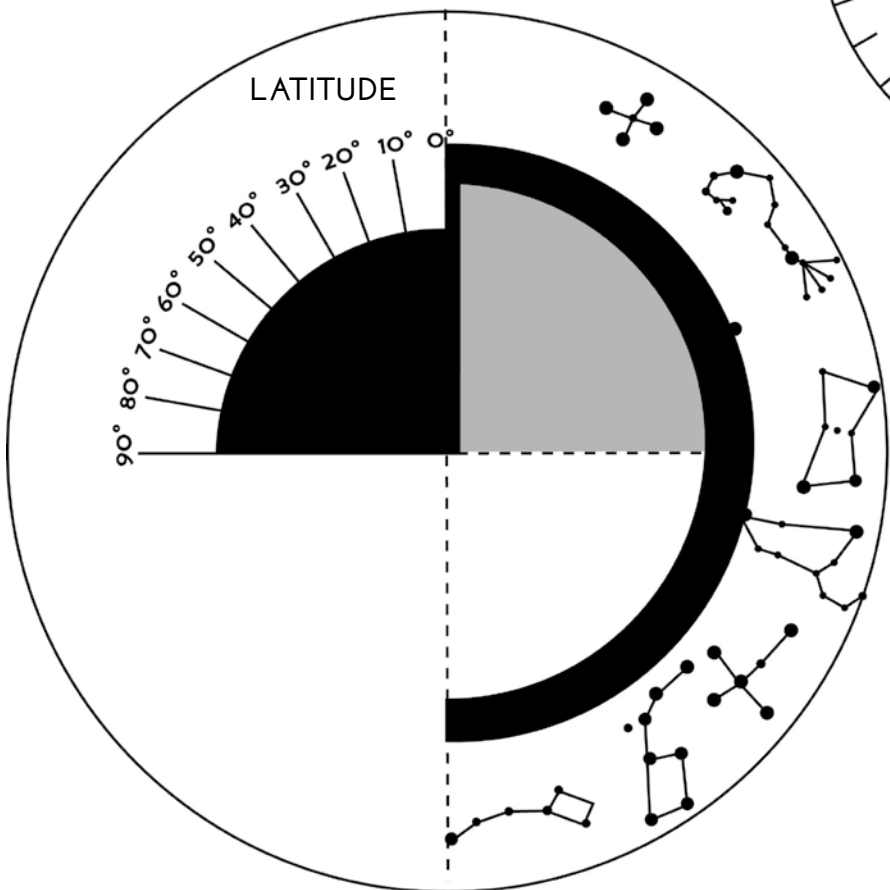


Fig. 6: Peça principal do simulador estelar para o hemisfério sul.

## Simulador para o Hemisfério sul

- Faça uma fotocópia das figuras 5 e 6 numa cartolina.
- Recorte ambas as peças ao longo da linha contínua exterior (figuras 5 e 6).
- Retire as áreas pretas da peça principal (figura 6).
- Dobre a peça principal (figura 6) ao longo da linha pontilhada reta. É necessário dobrar bem a peça para facilitar o uso do simulador.
- Corte um encaixe pequeno no “S” do disco do horizonte (figura 5). O encaixe deve ser suficientemente grande para que a cartolina possa passar através dele.
- Cole o quadrante sudoeste do disco do horizonte (figura 5) sobre o quadrante cinza da peça principal (figura 6). É muito importante ter a linha norte-sul de acordo com a linha dobrada da peça principal. Para além disso, o “E” no horizonte deve coincidir com a latitude  $90^\circ$ .
- Quando introduzir o disco do horizonte na peça principal, tenha o cuidado de o fazer de modo a que as duas peças fiquem perpendiculares.
- É muito importante colar cuidadosamente as diversas peças para obter a máxima precisão.

Escolha qual dos simuladores irá construir, dependendo do lugar onde vive. Também pode construir um

simulador selecionando as constelações que quiser seguindo diferentes critérios.

Por exemplo, pode incluir apenas as constelações visíveis para uma única estação, ou as constelações visíveis num determinado mês, etc. Para isso, deve considerar somente as constelações com ascensões retas entre dois valores específicos. Depois use a figura 7 para desenhar as constelações usando os seus valores da declinação. Tenha em consideração que cada setor corresponde a  $10^\circ$ .

## Aplicações do simulador

Para começar a utilizar o simulador é preciso introduzir a latitude do local de observação. Podemos percorrer a superfície da Terra numa viagem imaginária usando o simulador.

Segure a peça principal do simulador (figura 4 ou 6) pela área em branco (abaixo do quadrante da latitude) com a sua mão esquerda. Selecionada a latitude movendo o disco do horizonte até que corresponda com a latitude pretendida. Com a mão direita, mova a zona com as constelações desenhadas, da direita para a esquerda, várias vezes.

É possível observar quais são as constelações que estão

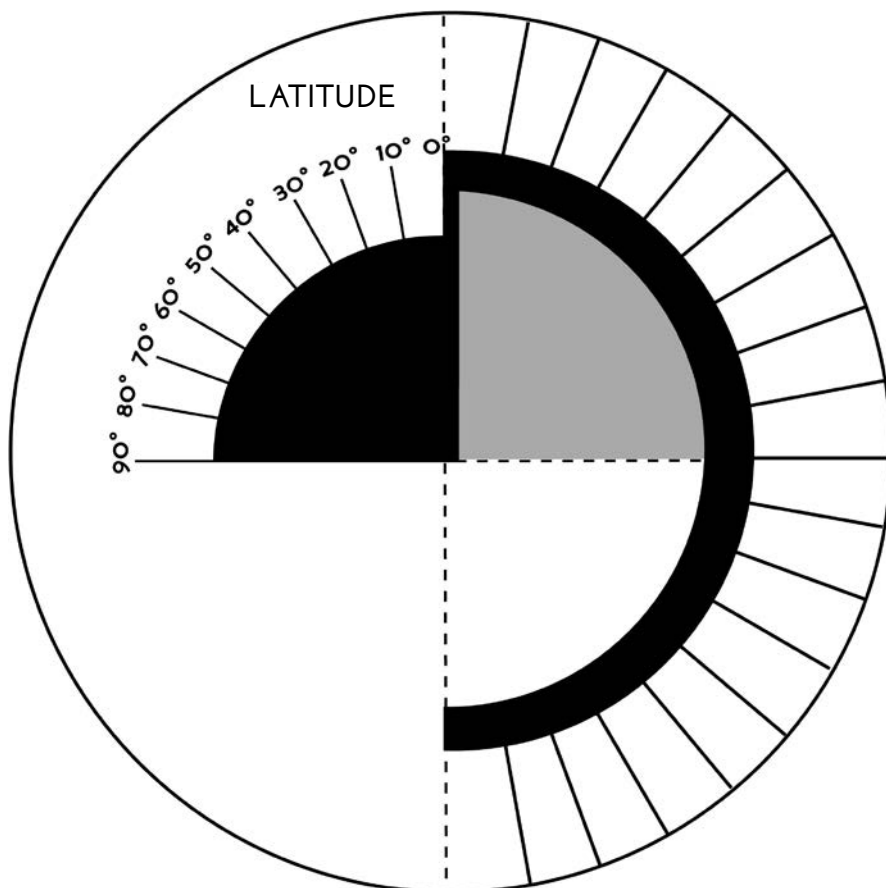


Fig. 7: Peça principal do simulador estelar para qualquer hemisfério.

sempre acima do horizonte (circumpolares), as constelações que nascem e se põem, e quais delas estão sempre abaixo do horizonte (invisíveis).

### *Inclinação dos traços das estrelas sobre o horizonte*

Com o simulador é fácil observar que como é que o ângulo do traço das estrelas sobre o horizonte se altera com a latitude (figuras 8, 9 e 10).

Se o observador vive no equador (latitude  $0^\circ$ ) este ângulo é de  $90^\circ$ . Por outro lado, se o observador vive no polo norte ou o polo sul (latitude  $90^\circ\text{N}$  ou  $90^\circ\text{S}$ ), as trajetórias das estrelas são paralelas ao horizonte. Geralmente, se o observador vive numa localidade de latitude  $L$ , a inclinação dos traços das estrelas sobre o horizonte é  $90^\circ - L$ .



Fig. 8a e 8b: Ocaso das estrelas em Enontekiö, Lapónia  $68^\circ\text{N}$  (Finlândia). O ângulo das trajetórias das estrelas, relativamente ao horizonte, é  $90^\circ$  menos a latitude. De notar que os rastros das estrelas são menores do que as da foto seguinte porque a existência de auroras forçou a uma exposição fotográfica menor (Foto: Irma Hannula, Finlândia).



Fig. 9a y 9b: Nascer das estrelas em Montseny  $41^\circ\text{N}$  (perto de Barcelona, Espanha). O ângulo das trajetórias das estrelas, relativamente ao horizonte, é  $90^\circ$  menos a latitude (Foto: Rosa M. Ros, Espanha).



Fig. Fig 10a e 10b. Traços das estrelas perto de Matuhuala (México)  $23^\circ\text{N}$ . O ângulo das trajetórias das estrelas, relativamente ao horizonte, é  $90^\circ$  menos a latitude (a colatitude). (Foto: Luis J de la Cruz, México).

Podemos verificar isto analisando as figuras 8, 9 e 10. A figura da figura 8a foi tirada na Lapónia (Finlândia), a da figura 9a em Montseny (perto de Barcelona, Espanha) e a da figura 10a em San Luis Potosi (México). A latitude em Lapónia é maior que em Barcelona, e San Luis Potosi, logo a inclinação das trajetórias é menor.

Usando o simulador desta forma é possível realizar diversas atividades:

- 1) Se introduzimos uma latitude igual a  $90^\circ\text{N}$ , o observador está no polo norte. Podemos ver que todas as constelações do hemisfério norte são circumpolares. Todas as do hemisfério sul são invisíveis e não há constelações com nascer e pôr.
- 2) Se a latitude é  $0^\circ$ , o observador está no equador e podemos ver que todas as constelações nascem e se põem (perpendicularmente ao horizonte). Nenhuma é circumpolar ou invisível.
- 3) Se a latitude é  $20^\circ$  (N ou S), há menos constelações circumpolares do que se a latitude fosse  $40^\circ$  (N ou S, respetivamente). Mas há bem mais estrelas que nascem e se põem se a latitude for  $20^\circ$  do que se for  $40^\circ$ .
- 4) Se a latitude for  $60^\circ$  (N ou S), há muitas constelações circumpolares e invisíveis, mas o número de constelações que nascem e se põem é reduzido, se comparamos com uma latitude de  $40^\circ$  (N ou S, respetivamente).

### Simulador solar: porque é que o Sol não nasce sempre no mesmo ponto??

É simples explicar os movimentos do Sol observados da Terra. Os estudantes sabem que o Sol nasce e põe-se diariamente, mas surpreendem-se quando descobrem que nasce e põe-se em diferentes pontos a cada dia. Também é interessante considerar as diferentes trajetórias solares de acordo com a latitude local. E pode ser difícil tentar explicar o fenómeno do Sol da meia-noite ou da passagem solar pelo zénite. O simulador pode ser muito útil para entender o movimento da translação e justificar algumas diferenças para latitudes diferentes.

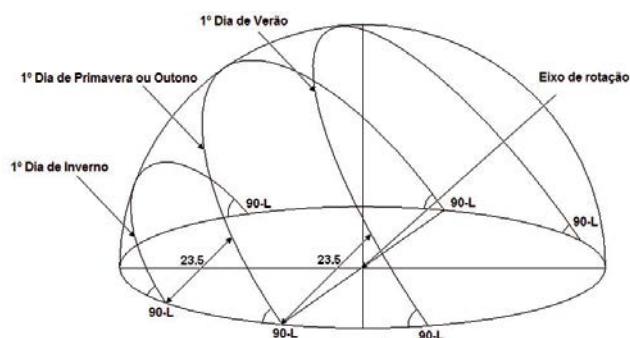


Fig. 11: Três trajetórias solares (1º dia de primavera ou outono, 1º dia de verão e 1º dia de inverno).

## Construção do simulador

Se desejarmos construir o simulador solar, é importante considerar a declinação solar, que muda diariamente. Então, precisamos construir um simulador que proporcione aos estudantes a possibilidade de alterar a posição do Sol de acordo com a época do ano (segundo a sua declinação). Para o primeiro dia de primavera e de outono, a declinação é  $0^\circ$ , o Sol movimenta-se ao longo do equador. No primeiro dia do verão (inverno no hemisfério sul), a declinação

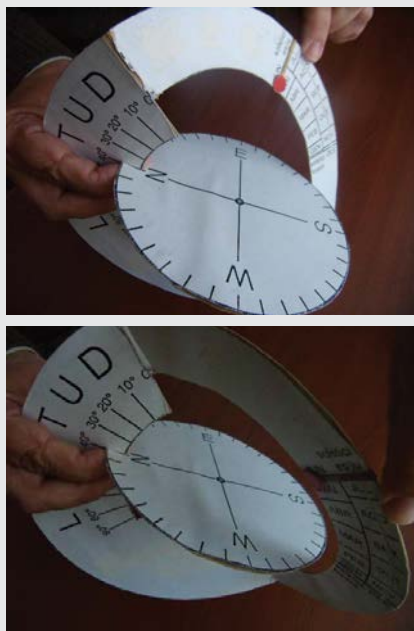


Fig. 12a e 12b: Preparação do simulador para o hemisfério norte com a latitude  $+40^\circ$ .

do Sol é  $+23,5^\circ$  e no primeiro dia do inverno (verão no hemisfério sul) é  $-23,5^\circ$  (figura 11). Devemos ter a possibilidade de alterar estes valores no modelo se desejarmos as trajetórias do Sol.

Para obter um bom simulador (figuras 12a e 12b), é uma ótima ideia colar os dois pedaços sobre uma cartolina antes de recortá-los. Também pode construir um simulador com o dobro do tamanho, para uso do professor.

### Instruções para a construção

#### Simulador para o hemisfério norte

- Faça uma fotocópia das figuras 13 e 14 (num papel mais grosso, ou cartolina, se puder).
- Corte as duas peças ao longo da linha contínua (figuras 13 e 14).
- Retire a área preta da peça principal (figura 13).
- Dobre a peça principal (figura 13) ao longo da linha pontilhada. É necessário dobrar bem a peça para facilitar o uso do simulador.
- Corte um encaixe pequeno no “N” do disco do horizonte (figura 14). Deve ser suficientemente grande

para que a cartolina possa passar.

- Cole o quadrante nordeste do disco do horizonte (figura 14) sobre o quadrante cinza da peça principal (figura 13). É muito importante ter a linha Norte-Sul conforme a linha da dobradura da peça principal, e o ponto cardinal “W” a coincidir com a latitude  $90^\circ$ .
- Quando introduzimos a marca “N” do disco do horizonte (figura 14) dentro da zona da latitude, o disco do horizonte deve permanecer perpendicular à peça principal.
- É muito importante colar as peças cuidadosamente para obter a precisão máxima.
- Para colocar o Sol no simulador, pinte um círculo vermelho num pedaço de papel. Corte-o e fixe-o entre dois pedaços de fita adesiva transparente. Coloque esta faixa transparente na área da declinação da figura 13. A proposta é que seja fácil movimentar a faixa para cima e para baixo de modo a colocar o ponto vermelho no mês desejado.

Para construir o simulador solar para uso no hemisfério sul é necessário seguir um esquema semelhante, mas substituindo a figura 13 pela figura 15.

#### Simulador para o hemisfério sul

- Faça uma fotocópia das figuras 14 e 15 (num papel mais grosso, ou cartolina, se puder).
- Corte as duas peças ao longo da linha contínua (figuras 14 e 15).
- Retire a área preta da peça principal (figura 15).
- Dobre a peça principal (figura 15) ao longo da linha pontilhada. É necessário dobrar bem a peça para facilitar o manuseio do simulador.
- Corte um encaixe pequeno no “S” do disco do horizonte (figura 14). Deve ser suficientemente grande para que a cartolina possa passar.
- Cole o quadrante sudoeste do disco do horizonte (figura 14) sobre o quadrante cinza da peça principal (figura 15). É muito importante ajustar a linha Norte-Sul conforme a linha da dobra da peça principal, e o ponto cardinal “E” a coincidir com a latitude  $90^\circ$ .
- Quando introduzimos a marca “S” do disco do horizonte (figura 14) dentro da zona da latitude, o disco deve permanecer perpendicular à peça principal.
- É muito importante colar as diversas peças cuidadosamente para obter a máxima precisão.
- Para colocar o Sol no simulador, pinte um círculo vermelho num pedaço de papel. Corte-o e fixe-o entre dois pedaços de fita adesiva transparente. Coloque esta faixa transparente na área da declinação da figura 15. A proposta é que seja fácil movimentar a faixa para cima e para baixo de modo a colocar o ponto vermelho no mês desejado.

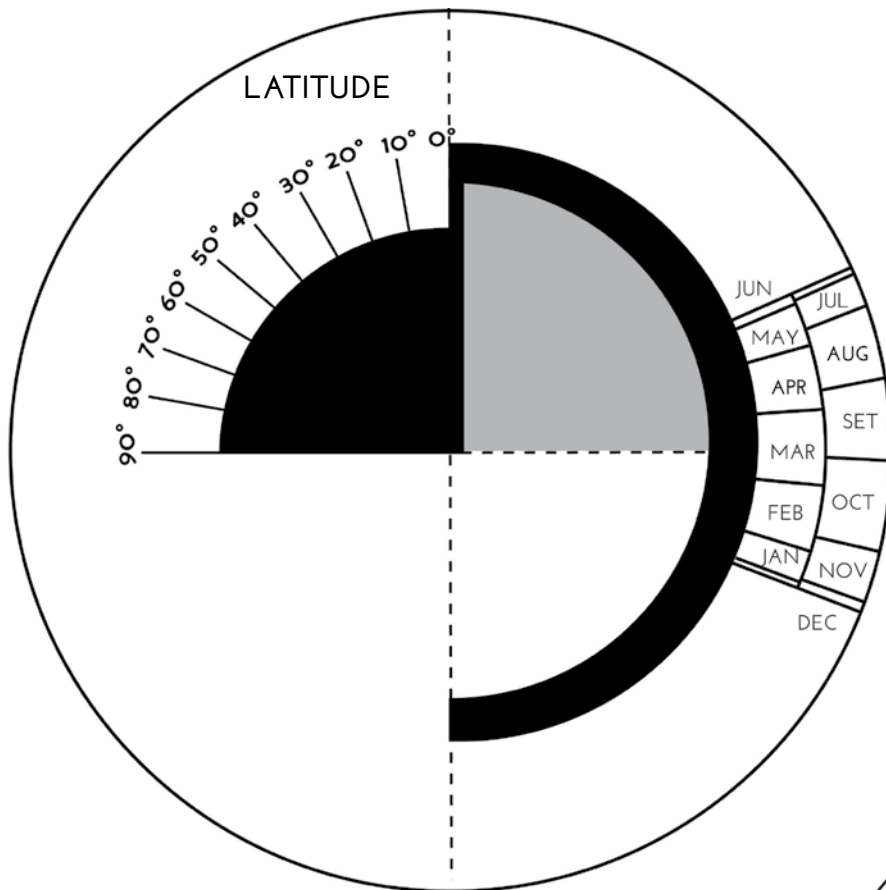


Fig. 13: Peça principal do simulador solar para o hemisfério norte.

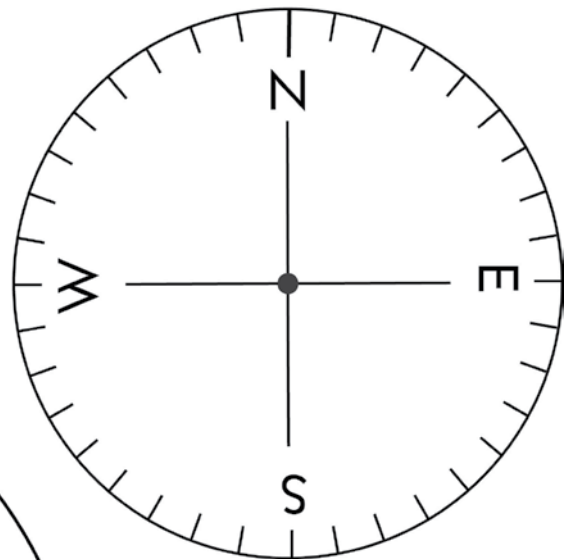


Fig. 14: Disco do horizonte.

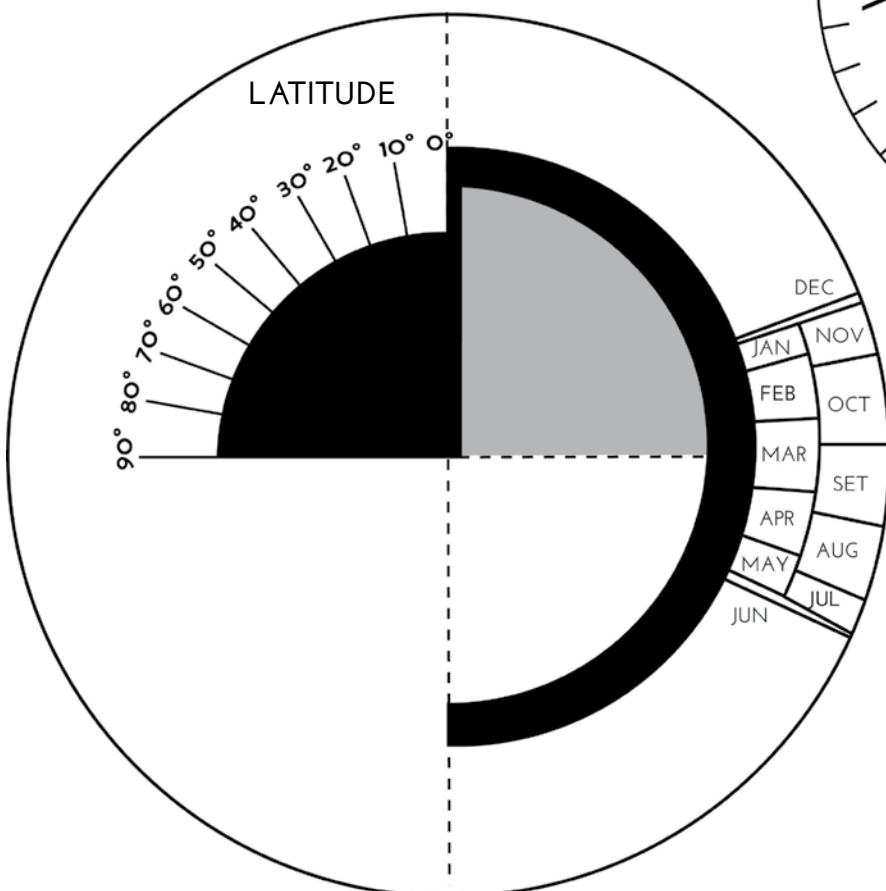


Fig. 15: Peça principal do simulador para o hemisfério sul.

## Usos do simulador

Para utilizar o simulador é preciso introduzir a latitude selecionada. Percorreremos a superfície da Terra numa viagem imaginária usando o simulador.

Consideraremos 3 áreas:

1. Lugares na área Intermediária do hemisfério norte ou sul.
2. Lugares nas áreas polares.
3. Lugares nas áreas equatoriais.

### 1.- Lugares na área intermediária do hemisfério norte ou sul: ESTAÇÕES DO ANO

#### *-Inclinação da trajetória do Sol sobre o horizonte*

Usando o simulador é fácil observar que o ângulo da trajetória do Sol sobre o horizonte depende da latitude. Se o observador vive no equador (latitude  $0^\circ$ ) este ângulo é  $90^\circ$ . Se o observador vive no polo norte ou polo sul (latitude  $90^\circ$  ou  $-90^\circ$ ) a trajetória do Sol é paralela ao horizonte. Geralmente se o observador vive numa cidade da latitude  $L$ , a inclinação da trajetória do Sol no horizonte é  $90-L$ . Nas figuras 16a e 16b podemos verificar esta situação. A figura 16a foi fotografada em Lapónia (Finlândia) e a figura 17a em Gandia (Espanha). A latitude na Lapónia é maior que em Gandia, mas a inclinação da trajetória do Sol é menor. A fotografia da figura 18a foi tirada em Ladrilleros (Colômbia) a uma latitude de  $4^\circ$  e consequentemente a inclinação da trajetória do Sol é quase perpendicular ao horizonte,  $86^\circ$ .

#### *-Altitude da trajetória do Sol dependendo das estações*

#### 1a) No hemisfério norte

Usando o simulador na sua cidade (introduza a latitude da sua cidade), é fácil verificar que a altitude do Sol acima do horizonte muda conforme a estação. Por exemplo, no primeiro dia de primavera, a declinação do Sol é  $0^\circ$ . Se situarmos o Sol em 21 de março e movermos o Sol sobre o equador, desde o Este ao Oeste, podemos ver que a trajetória do Sol possui uma determinada altura sobre o horizonte.

À mesma latitude repetimos a experiência para diferentes dias. Quando movemos o Sol ao longo do equador, no primeiro dia de verão, dia 21 de junho (declinação solar de  $+23^\circ,5$ ), podemos observar que a trajetória do Sol é superior no primeiro dia de primavera. Finalmente repetimos a experiência para o primeiro dia de inverno, 21 de dezembro (com declinação solar  $-23^\circ,5$ ). Podemos ver que neste caso a trajetória do Sol é mais baixa. No primeiro dia de outono a declinação é  $0^\circ$  e a trajetória do Sol seguirá o equador, de maneira semelhante à do primeiro dia de primavera.



Fig. 16a e 16b: Nascer do Sol em Enontekiö na Lapónia (Finlândia). O ângulo da trajetória do Sol relativamente ao horizonte é a colatitude ( $90^\circ - \text{latitude}$ ). (Foto: Sakari Ekko, Finlândia).



Fig. 17a e 17b: Nascer do Sol em Gandia (Espanha), de latitude  $+41^\circ$ . O ângulo da trajetória solar relativamente ao horizonte é  $90^\circ$  menos a latitude. (Foto: Rosa M. Ros, Espanha).

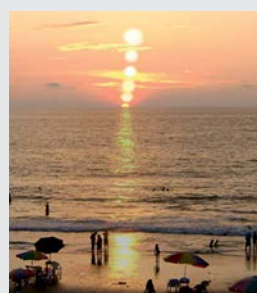


Fig. 18a e 18b: Nascer do Sol em Ladrilleros (Colômbia). O ângulo da trajetória solar relativamente ao horizonte é a colatitude ( $90^\circ - 4^\circ = 86^\circ$ ). (Foto: Mario Solarte, Colômbia).

Evidentemente que se mudarmos a latitude, a altitude das trajetórias do Sol muda, mas a mais alta corresponde sempre ao primeiro dia do verão e a mais baixa ao primeiro dia de inverno (figura 19a e 19b).



Fig. 19a e 19b: Trajetórias do Sol no verão e no inverno na Noruega. É evidente que o Sol movimentar-se mais acima no verão que no inverno. É por isso que há mais horas de luz do Sol durante o verão.

## 1a) No el hemisfério sul

Usando o simulador na sua localização (introduza a latitude da sua localização), é fácil verificar que a altitude do Sol sobre a altitude do horizonte muda de acordo com a estação. Por exemplo, no primeiro dia de primavera, a declinação do Sol é  $0^\circ$ . Podemos posicionar o Sol no dia 23 de setembro e mover o Sol, exatamente sobre o equador, do horizonte Este em direção a Oeste. Podemos ver que a trajetória do Sol possui uma determinada altitude sobre o horizonte.

À mesma latitude repetimos a experiência para diferentes dias. Quando movemos o Sol ao longo do equador, no primeiro dia de verão, dia 21 de dezembro (declinação solar de  $-23^\circ,5$ ), podemos observar que a trajetória do Sol é superior no primeiro dia de primavera. Finalmente repetimos a experiência, à mesma latitude, para o primeiro dia de inverno, 21 de junho (com declinação solar  $+23^\circ,5$ ). Podemos ver que neste caso a trajetória do Sol é mais baixa. No primeiro dia de outono a declinação é  $0^\circ$  e a trajetória do Sol seguirá o equador, de maneira semelhante à do primeiro dia de primavera.

Evidentemente que se mudarmos a latitude, a altitude das trajetórias do Sol muda, mas a mais alta corresponde sempre ao primeiro dia do verão e a mais baixa ao primeiro dia de inverno.

### Observações:

No verão, quando a altitude do Sol é máxima, a radiação solar “incide” mais perpendicular sobre o horizonte. Devido a isto, a radiação é concentrada numa área menor e o clima é mais quente. Também no período de verão, o número de horas de luz solar é maior que no inverno. Este efeito também aumenta a temperatura durante o verão.

*O Sol nasce e põe-se num lugar diferente todos os dias*

Se nas experiências anteriores prestássemos atenção aos locais do nascer do Sol e/ou aos lugares do pôr-do-sol, poderíamos observar que não é no mesmo lugar, todos os dias. Particularmente, a distância entre o nascer do Sol (ou o pôr) do primeiro dia de duas estações do ano consecutivas aumenta com o aumento da latitude (figuras 20a, 20b e 20c).

É muito simples simular esta observação com o simulador. Basta marcar a posição do Sol em cada estação do ano, para dois lugares a diferentes latitudes, por exemplo  $60^\circ$ ,  $40^\circ$  e  $0^\circ$  (figuras 21a, 21b e 21c).

As fotografias apresentadas nas figuras 20a, 20b e 20c correspondem ao hemisfério norte, mas a situação é semelhante no hemisfério sul (figuras 22a, 22b e 22c). Apenas muda a altura do ano das estações.

### Observações:

O Sol não nasce exatamente a Este e não se põe exatamente a Oeste. Apesar de ser uma ideia geralmente aceita, não é verdadeira. Tal fenómeno apenas acontece em 2 dias do ano: o primeiro dia de primavera e o primeiro dia de outono, em todas as latitudes.

Outra facto interessante é que o Sol atravessa o meridiano (a linha imaginária que parte do polo norte, passa no zénite, e acaba no polo sul) ao meio dia (tempo solar), a todas as latitudes. Isto pode ser usado para orientação.

## 2.- Regiões polares: SOL DA MEIA NOITE

### *Verão e inverno polares*

Se introduzirmos a latitude polar no simulador ( $+90^\circ$  ou  $-90^\circ$  dependendo do polo considerado) existem três possibilidades. Se a declinação do Sol é  $0^\circ$ , o Sol movimentar-se ao longo do horizonte, que também é o equador.

Se a declinação coincide com o primeiro dia de verão, o Sol movimentar-se paralelamente ao horizonte. De facto, o Sol move-se sempre paralelamente ao sobre o horizonte desde o segundo dia de primavera até ao último dia de verão. Isso significa meio ano de luz solar.

No primeiro dia de outono, o Sol move-se outra vez ao longo do horizonte. Mas a partir do segundo dia de outono até o último dia de inverno, o Sol move-se paralelamente ao horizonte, mas abaixo deste. Isso significa meio ano de noite.

Naturalmente, o exemplo anterior corresponde à situação extrema. Há outras latitudes nas quais as trajetórias do Sol não são paralelas ao horizonte. A essas latitudes não existem nasceres nem pores-do-sol porque

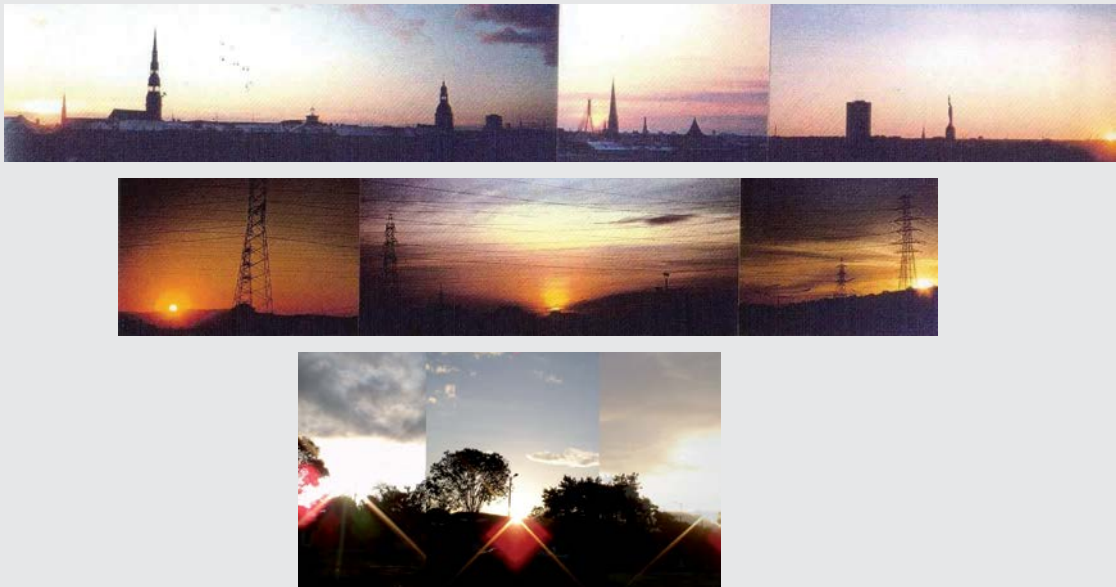


Fig. 20a, 20b e 20c: Pôr-do-sol em Riga, 57° (Letônia), Barcelona, 41° (Espanha) e Popayán, 2° (Colômbia) no primeiro dia de cada estação (esquerda/inverno, centro/primavera ou outono, direita/verão). Os pores-do-sol centrais das fotos estão na mesma linha. É fácil observar que os pores-do-sol de verão e de inverno em Riga (latitude maior) estão bem mais separados que em Barcelona e mais que em Popayán. (Fotos: Ilgonis Vilks, Letônia, Rosa M. Ros, Espanha, e Juan Carlos Martínez, Colômbia)



Fig. 21a: Nascer do Sol no primeiro dia de primavera ou de outono.



Fig. 21b: Nascer do Sol no primeiro dia de verão.



Fig. 21c: Nascer do Sol no primeiro dia de inverno.



Fig. 22a, 22b e 22c: Pores-do-sol em Popayán, 2° (Colômbia), La Paz, -19° (Bolívia) e Esquel, -43° (Argentina) no primeiro dia de cada estação (esquerda/verão, centro primavera e/ou outono, direita/inverno). Os pores-do-sol centrais das fotos estão na mesma linha. É fácil observar que os pores-do-sol do verão e do inverno em Esquel (maior latitude, mais negativa) estão bem mais afastados que em La Paz. (Fotos: Juan Carlos Martínez, Colômbia, Gonzalo Pereira, Bolívia, e Néstor Camino, Argentina).

a latitude local é demasiada alta. Neste caso podemos observar o Sol da meia-noite.

#### -Sol da meia-noite

Se introduzirmos a latitude  $+70^\circ$  no simulador (ou  $-70^\circ$  no hemisfério sul) podemos simular o Sol da meia-noite. Se colocarmos o Sol no primeiro dia de verão, 21 de junho no hemisfério norte (21 de dezembro no hemisfério sul), podemos ver que o Sol não nasce nem se põe neste dia. A trajetória do Sol é tangente ao horizonte, mas nunca está abaixo dele. Este fenómeno é denominado “Sol da meia-noite”, porque o Sol é observável à meia-noite (figuras 23a e 23b).

Nas latitudes polares ( $+90^\circ$  ou  $-90^\circ$ ) o Sol aparece acima do horizonte durante metade do ano e abaixo do horizonte na outra metade. Usando o simulador é muito fácil entender esta situação (figuras 24a e 24b).



Fig. 23a e 23b: Trajetória do Sol da meia-noite em Lapónia (Finlândia). O Sol vai descendo para o horizonte, mas não se põe até que o Sol começa a subir novamente. (Foto: Sakari Ekko).

### 3.- Lugares na área equatorial: PASSAGEM ZENITAL DO SOL

#### -Passagem do Sol pelo zénite

Na zona equatorial as quatro estações do ano não são muito distintas. A trajetória solar é praticamente perpendicular ao horizonte e a altitude solar é praticamente igual durante todo o ano. A duração dos dias é muito semelhante (figuras 25a, 25b e 25c).

Por outro lado, nos países tropicais há alguns dias especiais: os dias em que o Sol passa pelo zénite. Nesses dias a luz do Sol atinge a superfície da Terra perpendicularmente ao equador. Devido a isto, a temperatura é mais quente e a sombra das pessoas desaparece sob os seus sapatos (figura 26a). Em algumas culturas antigas esses dias eram considerados muito especiais porque o fenómeno era facilmente observável. Ainda é o que

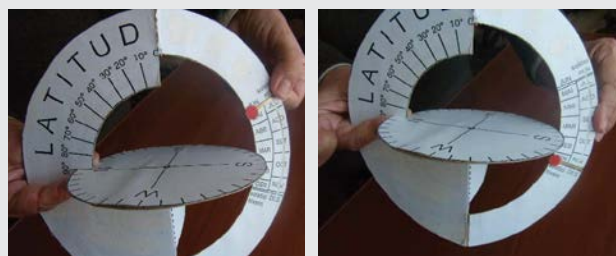


Fig. 24a e 24b: Simulador com o Sol por cima do horizonte durante meio ano e por baixo durante a outra metade.

acontece. Há dois dias por ano em que o Sol se encontra no zénite, para pessoal que vivam entre o Trópico de Câncer e o Trópico de Capricórnio. Podemos mostrar este fenómeno usando o simulador. Também é possível calcular aproximadamente a data em que isso ocorre, que depende da latitude (figura 26b).

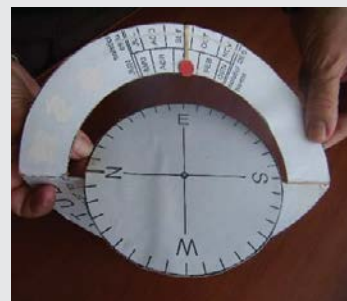


Fig. 25a, 25b e 25c: O Sol nasce no primeiro dia de cada estação do ano: esquerda - primeiro dia de verão; centro - primeiro dia de primavera e/ou outono; e, direita - primeiro dia de inverno. No equador a trajetória do Sol é perpendicular ao horizonte. O Sol nasce praticamente no mesmo ponto, ao longo do ano. A distância angular entre os nascer do Sol é de apenas  $23^\circ,5$ , a obliquidade da eclíptica. Para latitudes maiores as trajetórias solares inclinam-se e as distâncias entre os três pontos de nascer do Sol aumentam (figuras 20a, 20b, 20c, 22a, 22b e 22c).

Por exemplo, (figura 26b) se selecionarmos um lugar de latitude  $15^{\circ}\text{N}$ , usando o simulador podemos calcular aproximadamente em quais dias o Sol fará a passagem pelo zênite, ao meio dia. Apenas é necessário utilizar um palito perpendicular ao disco do horizonte da figura 26b e observar que esses dias são no final de abril e em meados de agosto.



Fig. 26a: Sombra reduzida (O Sol está praticamente no zênite num lugar perto do equador).



Fig. 26b: Simulando a passagem solar do Sol no zênite nas Honduras (latitude  $15^{\circ}$ ).



Fig. 27a: Simulador de grande tamanho feito em madeira. Fig. 27b: Simulador estelar em madeira. Fig. 27c: Com uma câmara fotográfica, e uma longa exposição, é possível simular a trajetória solar (Fotos: Sakari Ekko).

## Simulador XXL

Naturalmente, o modelo apresentado pode ser construído com outros materiais, por exemplo, em madeira (figura 27a). Nesse caso possível reproduzir a posição do Sol com uma luz. Com uma câmara fotográfica, usando um tempo de exposição longo, é possível visualizar as trajetórias do Sol (figura 27c).

## Simulador lunar: Porque é que às vezes a Lua sorri?

Quando ensinamos os estudantes acerca da Lua queremos que eles compreendam o porquê das fases da Lua. Os estudantes também devem compreender como, e porque, é que os eclipses acontecem. As fases da Lua são espetaculares e é fácil explicá-las com uma esfera e uma lanterna.

Modelos como os da figura 28 fornecem uma imagem da Lua crescente e das alterações sequenciais. Existe uma regra que diz que a Lua crescente é um “C” e a minguante um “D”. Esta técnica é verdade para os ha-

bitantes do hemisfério sul, mas não é possível utilizá-la no hemisfério norte onde se costuma dizer que a Lua é “mentirosa”.

O nosso modelo simulará as fases da Lua (figura 29) e mostrará porque é que a Lua se assemelha a um “C” ou um “D” dependendo da sua fase. Muitas vezes a Lua é observada no horizonte como mostrado na figura 29. Mas, conforme os países, é possível observar a Lua como um “C inclinado”, um “D” inclinado (figura 30a) ou, noutros casos, como um “U” (chamada “Lua sorridente”, figura 30b). Como podemos explicar isto? Usaremos o simulador lunar para compreender os diversos aspetos da Lua nas diversas latitudes.



Fig. 28: Fases da Lua.



Fig. 29: Fases da Lua no horizonte.

Se quisermos estudar os movimentos da Lua, devemos considerar também a sua posição relativamente ao Sol (que é o gerador de suas fases) e de sua declinação (já que a Lua também muda todos os dias, e mais depressa que o Sol). Por isso, devemos construir um simulador que proporcione aos estudantes a possibilidade de modificar facilmente a posição da Lua, se ela está mais ou menos próxima às sucessivas posições relativamente ao Sol, a uma declinação que varia consideravelmente ao longo de um mês. Efetivamente, vista da Terra, e no meio das estrelas, a Lua percorre num mês uma trajetória bastante próxima à do Sol num ano, seguindo a linha da “eclíptica” (com uma aproximação de mais ou menos  $5^{\circ}$ , por causa da inclinação de sua órbita).

A Lua encontra-se na direção do Sol quando é Lua nova. Quando é Lua cheia está numa posição oposta à eclíptica, e a sua declinação é oposta à do Sol (com um erro de  $5^{\circ}$ ). Por exemplo, no solstício de junho, a Lua cheia encontra-se na posição do Sol no solstício de dezembro e sua declinação é negativa (entre  $-18^{\circ}$  e  $-29^{\circ}$ ). O movimento diurno da Lua cheia em junho é semelhante à do Sol em dezembro.

Se considerarmos o quarto crescente, em forma de “D” no hemisfério norte (e “C” no hemisfério sul) sabemos que a Lua está a  $90^{\circ}$  relativamente ao Sol, embora muito “longe” do Sol na eclíptica (cerca de 3 meses de diferença). Em junho, a Lua em quarto crescente terá uma

declinação próxima à declinação do Sol em setembro ( $0^\circ$ ). Em setembro terá uma declinação próxima à do Sol em dezembro ( $-23,5^\circ$ ), etc.

### Construção do simulador

O simulador lunar é construído a partir do simulador solar. Como no anterior, é necessário um modelo para simular as observações a partir do hemisfério norte e outro para o hemisfério sul (figuras 13 e 14 para o hemisfério norte, e 13 e 15 para o hemisfério sul). É, novamente, uma boa ideia construir um simulador maior, com o dobro do tamanho, para uso do professor.

Por exemplo, instalaremos sobre o simulador solar uma Lua em quarto minguante (em forma de “C” para o hemisfério norte, ou em forma de “D” para o hemisfério sul) no lugar do Sol e obteremos um simulador lunar, de acordo com as instruções seguintes.

Para colocar a Lua no simulador, recorte a figura 31b (Lua em quarto decrescente) e cole dois pedaços de fita transparente de tal forma que a Lua fique no meio, bem posicionada (“C” ou “D” conforme a fase escolhida). Coloque esta fita transparente na área do mês da figura 12 ou 14. A proposta é que seja fácil movimentar a faixa para cima e para baixo nesta área e desta forma posicionar no mês desejado.

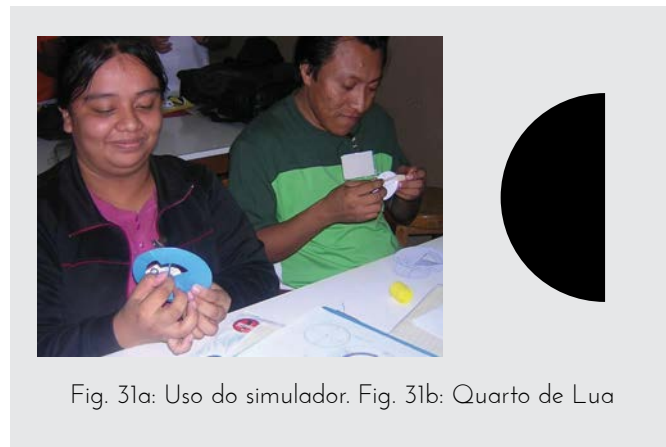


### Usos do simulador lunar

Para utilizar o simulador é necessário introduzir a latitude desejada. Usando o simulador, percorreremos a superfície da Terra numa viagem imaginária.

É necessário segurar com a mão esquerda a peça principal do simulador (figuras 32a e 32b) pela parte que está em branco (abaixo do quadrante da latitude). Seleccionada a latitude, mova o disco do horizonte até que atinja a latitude escolhida. Escolha o dia no qual desejamos simular o movimento da Lua decrescente. Acrescentar 3 meses a esse valor e colocar a Lua em

quarto decrescente (figura 31b). O mês obtido pela posição da Lua é onde se encontrará o Sol dentro de 3 meses! Com a mão direita, desloque o disco que segura a Lua do Este para o Oeste.



Com o simulador do “hemisfério norte”, é possível ver que a aparência da Lua em quarto decrescente altera conforme a latitude e o dia do ano. Da perspectiva do boneco, o quarto decrescente da Lua aparece como um “C” ou um “U” sobre o horizonte.

- Se introduzimos uma latitude de  $+70^\circ$  ou  $-70^\circ$  podemos ver a Lua em quarto decrescente como um “C” a mover-se de Este para Oeste. Não importa o período do ano. Em todas as estações do ano a Lua parece um “C” (figura 32a).
- Se a latitude é  $+20^\circ$  ou  $-20^\circ$ , o observador está próximo dos trópicos e podemos ver que a Lua sorri como um “U”. A Lua movimentar-se de forma mais perpendicular ao horizonte do que no exemplo anterior (figura 33b). A forma de “U” não muda com o mês. Tem o mesmo aspeto todo o ano.
- Se a latitude é  $+90^\circ$  ou  $-90^\circ$ , o observador está nos polos e, conforme seja o dia considerado:
  - É possível ver a Lua como um “C” a movimentar-se numa trajetória paralela ao horizonte.
  - Não é possível ver a Lua, pois sua trajetória está abaixo do horizonte.
- Se a latitude é  $0^\circ$ , o observador está no equador e podemos ver a Lua em quarto decrescente sorridente como um “U”. A Lua nasce e põe-se perpendicularmente ao horizonte. Ela ocultar-se-á (próximo do meio dia) em forma de “U” e regressará em “C”.

Para outros observadores que vivem nas latitudes intermediárias, as Luas em quarto decrescente nascem e põem-se numa posição intermédia entre “C” e “U”.

As explicações anteriores podem ser repetidas da mesma forma para a Lua em forma de “D”. Mais uma vez é necessário corrigir o dia (neste caso terá que subtrair 3 meses) ao situar a posição do Sol.

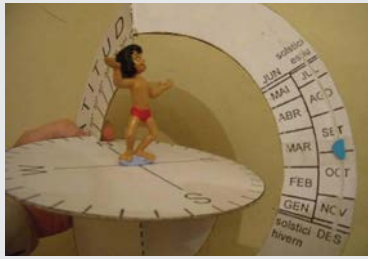


Fig. 30a: Simulador para 70° de la latitud Norte, Fig. 30b: 20° de la latitud Sur

- Se introduzimos um  $-70^\circ$  de latitude (ou  $70^\circ$  sul) podemos ver a Lua decrescente como um “D” que se desloca de Este para a Oeste. Isto não depende da época do ano. Em todas as estações do ano a Lua aparece como um “D” (figura 33a).
- Se a latitude é de  $-20^\circ$ , (figura 32b) o observador está nos trópicos e vê a Lua levantar-se sorrindo como um “U”, provavelmente ligeiramente inclinada. A Lua move-se numa trajetória perpendicular ao horizonte ao contrário do exemplo anterior (figura 32b). A forma de “U” não modifica em função mês.
  - Se é de latitude  $-90^\circ$ , o observador está no Polo Sul e poderá, de acordo com a data:
  - Ver a Lua como um “D” que se movimenta numa trajetória paralela ao horizonte.

Não observar a Lua, já que sua trajetória está abaixo do horizonte.

- Na latitude  $0^\circ$ , da mesma forma que no simulador do hemisfério norte, o observador está no equador, e podemos ver o sorriso da Lua como um “U”. A Lua eleva-se perpendicular ao horizonte em forma de “U” e esconder-se-á (por volta do meio dia) em forma de “ $\cap$ ”.

Para outros observadores que vivem em latitudes intermédias, a fase da Lua eleva-se e oculta-se em posições intermediária entre o “D” e o “U”, e é mais ou menos inclinada de acordo com a latitude do lugar de observação.

Estas explicações podem ser estabelecidas de maneira similar para quando a Lua aparece em forma de “C”, lembrando de subtrair 3 meses à posição do Sol.

*Agradecimiento: El autor desea agradecer a Joseph Snider su instrumento solar producido en 1992 que le inspiró para producir los otros simuladores.*

## Bibliografia

Ros, R.M., *De l'intérieur et de l'extérieur*, Les Cahiers Clairaut, 95, 1, 5, France, 2001.

Ros, R.M., *Sunrise and sunset positions change every day*, Proceedings of 6th EAAE International Summer School, 177, 188, Barcelona, 2002.

Ros, R.M., *“Two steps in the stars” movements: a demonstrator and a local model of the celestial sphere*, Proceedings of 5th EAAE International Summer School, 181, 198, Barcelona, 2001.

Snider, J.L., *The Universe at Your Fingertips*, Frankoi, A. Ed., Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, 1995.

Warland, W., *Solving Problems with Solar Motion Demonstrator*, Proceedings of 4th EAAE International Summer School, 117, 130, Barcelona, 2000.

# Sistema Terra-Lua-Sol: Fases e eclipses

Rosa M. Ros

União Astronómica Internacional, Universidade Politécnica da Catalunha (Barcelona, Espanha)

## Resumo

Neste trabalho são apresentados alguns modelos sobre as fases da Lua e os eclipses do Sol e da Lua. Estes eclipses também são usado para determinar as distâncias e diâmetros no sistema Terra-Lua-Sol.

Finalmente, também é explicada a origem das marés.

## Objetivos

- Compreender porque é que a Lua possui fases.
- Compreender a causa dos eclipses da Lua.
- Compreender o motivo dos eclipses do Sol.
- Determinar distâncias e diâmetros do sistema Terra-Lua-Sol.
- Compreender a origem das marés.

## Posições relativas

O termo “eclipse” é utilizado para fenómenos muito distintos, no entanto em todos os casos este fenómeno ocorre quando a posição relativa da Terra e da Lua (corpos opacos) obstrui a passagem da luz solar.

Um eclipse Solar ocorre quando a Lua se interpõe entre a Terra e o Sol, ocultando-o. Este tipo de eclipse acontece sempre na fase da Lua nova (figura 1).

Os eclipses da Lua ocorrem quando a Lua passa na sombra da Terra. Isto é, quando a Lua está no lugar oposto ao Sol, portanto, os eclipses lunares acontecem sempre na fase de Lua cheia (figura 1).

Los eclipses de Luna se producen cuando la Luna pasa a través de la sombra de la Tierra. Es decir, cuando la Luna esta en el lugar opuesto del Sol, por lo tanto, los eclipses lunares se dan siempre en la fase de Luna llena (figura 1).

A Terra e a Lua movimentam-se ao longo de órbitas elípticas que não se encontram no mesmo plano. A órbita da Lua está inclinada 5° relativamente ao plano da eclíptica (plano da órbita da Terra em torno do Sol). Os dois planos cruzam-se numa reta denominada Linha dos Nodos. Os eclipses acontecem quando



Fig.1: Os eclipses do Sol ocorrem quando a Lua está situada entre o Sol e a Terra (Lua nova). Os eclipses da Lua ocorrem quando a Lua cruza o cone de sombra da Terra (estando a Terra está situada entre o Sol e a Lua cheia).

a Lua está próxima da Linha dos Nodos. Se ambos os planos não formassem um ângulo, os eclipses seriam bem mais frequentes do que apenas entre zero e três vezes por ano.

## Modelos de máscaras

### Modelo da Face Oculta

A Lua tem dois movimentos: rotação e translação, com aproximadamente a mesma duração, que é de cerca de quatro semanas. Esta é a razão pela qual vemos sempre a mesma metade da superfície lunar, a partir da Terra.

Observaremos isto com um modelo simples. Começamos por colocar os voluntários que fazem o papel de Terra e apenas um o de Lua, com uma máscara branca. Colocamos o voluntário “Lua” em frente à “Terra”, olhando para esta, antes de iniciar o movimento. Ao mesmo tempo que a Lua rodar 90° na sua órbita em torno da Terra também terá que rodar 90° sobre si mesma e, portanto, continuará virada de frente para a Terra. Solicitaremos ao voluntário “Terra” se ele/ela consegue ver a mesma face da Lua ou se consegue ver uma parte diferente. Repetimos a mesma situação 4 vezes, movendo sempre 90°. É evidente que em cada 90°, que corresponde a cada semana, a Terra vê sempre a mesma face da Lua, e a parte de trás da cabeça do voluntário “Lua” nunca é visível.

### Modelo de Fases da Lua

Para explicar as fases da Lua é melhor é usar um modelo com uma lanterna ou com um retroprojetor (que representarão o Sol) e um mínimo 5 voluntários. Um deles estará colocado no centro, representando a

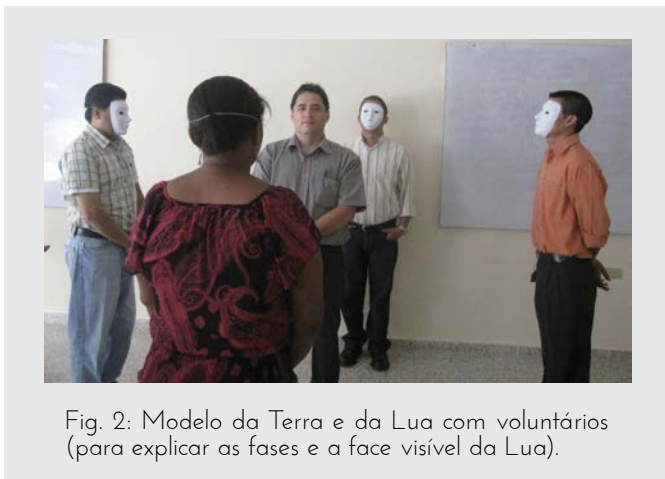


Fig. 2: Modelo da Terra e da Lua com voluntários (para explicar as fases e a face visível da Lua).

Terra, e os outros 4 posicionar-se-ão ao seu redor, de forma equidistante, para simular as diferentes fases da Lua. Para tornar a experiência mais atrativa, é boa ideia usar uma máscara branca que representará a Lua. Todos deverão ficar virados para a Terra porque sabemos que a Lua tem sempre a mesma face virada para a Terra (figura 2). Colocaremos a lanterna acesa atrás, e ligeiramente acima, de um dos voluntários que representa a Lua e começaremos a visualizar as 4 fases (vistas desde a Terra, que está no centro). É muito fácil descobrir que às vezes a máscara está completa iluminada, às vezes só um quarto e outras vezes não é possível ver nada (porque a luz da lanterna, a luz do Sol, está por trás dessa Lua). Quando maior for o número de voluntários mais fases da Lua podem ser observadas.

### Modelo Terra-Lua

Compreender de forma clara as fases da Lua e a geometria que contém o fenômeno dos eclipses do Sol e da Lua não é simples. Por essa razão é proposto um modelo simples que torna mais inteligíveis estes processos.

Basta inserir dois pregos (de 3 ou 4 cm) numa barra de madeira de 125 cm. Os pregos estarão separados 120 cm e em cada um fixaremos duas bolas de 4 e 1 cm (figura 3).

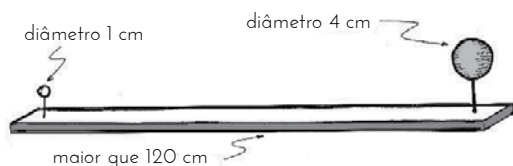


Fig. 3: Modelo Terra-Lua

É importante seguir estas medidas porque correspondem a um modelo à escala do sistema Terra-Lua, respeitando as proporções de distâncias e diâmetros.

Diâmetro Terra	12 800 Km	4 cm
Diâmetro Luna	3 500 Km	1 cm
Distancia Terra-Lua	384 000 Km	120 cm
Diâmetro Sol	1 400 000 Km	440 cm = 4,4 m
Distancia Terra-Sol	150 000 000 Km	4 700 cm = 0,47 km

Tabela 1: Distâncias e diâmetros do sistema Terra-Lua-Sol.

### Reprodução das fases da Lua

Num lugar ensolarado, quando a Lua for visível, direcione a barra com a bolinha para a Lua (figura 4). O observador deve estar posicionado atrás da bola que simula a Terra. A esfera da “Lua” é vista do mesmo tamanho aparente que a Lua e com a mesma fase. Alterando a orientação da barra é possível reproduzir as diferentes fases da Lua ao variar a iluminação que é recebida do Sol. É necessário mover a “Lua” para conseguir todas as fases.

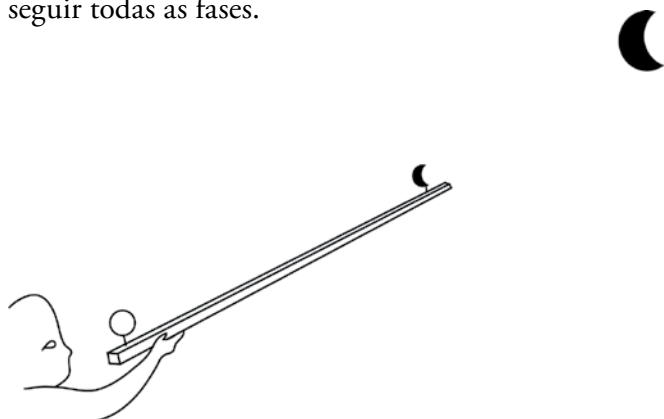


Fig. 4: Usando o modelo no pátio da escola.

A melhor forma de realizar esta atividade é no pátio, mas caso esteja nublado, também é possível realizar usando um retroprojor como fonte de luz.



Fig. 5a e 5b: Simulação de um eclipse de Lua

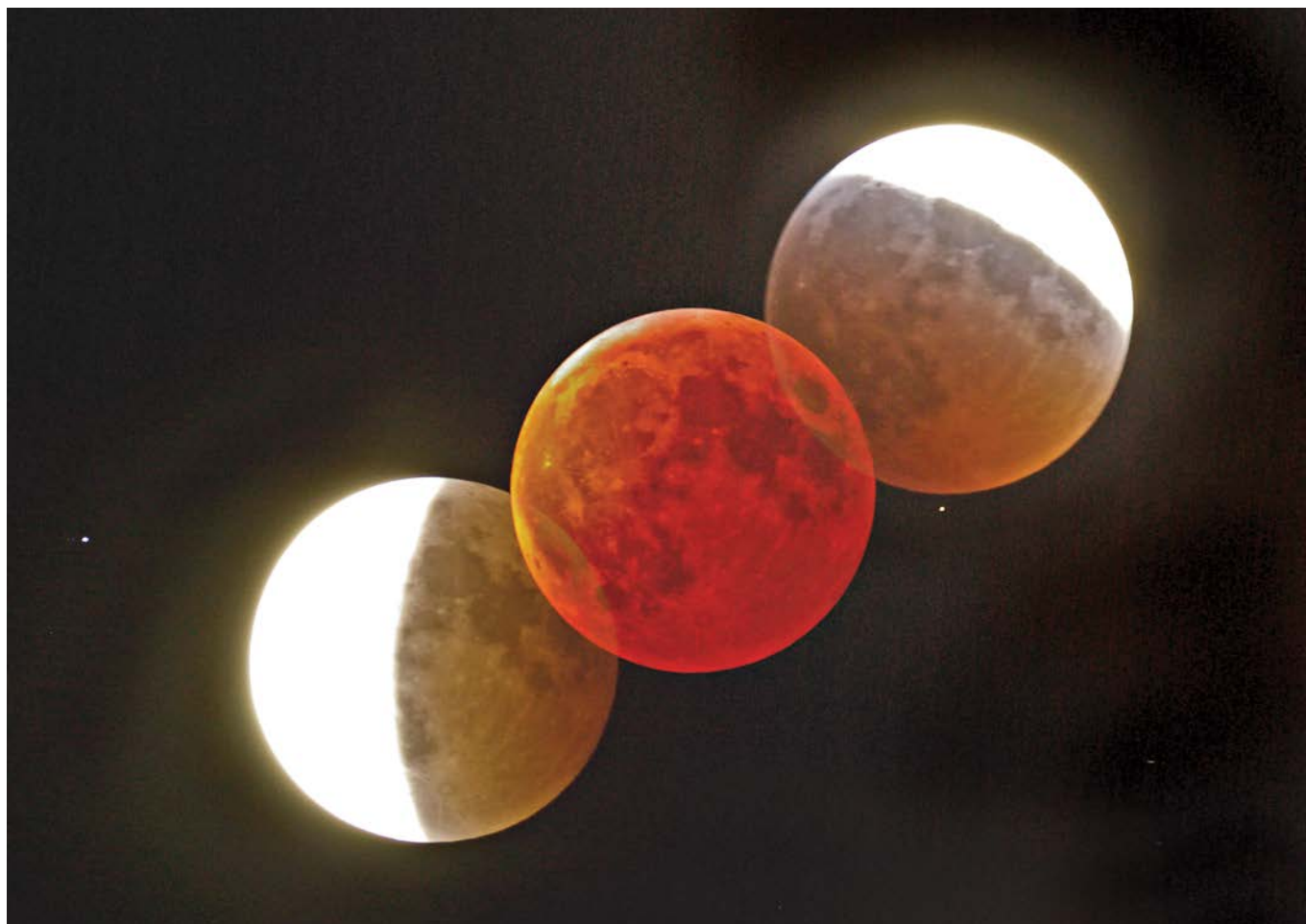


Fig. 6: Composição fotográfica de um eclipse de Lua. O nosso satélite cruzando o cone de sombra produzido pela Terra.

### Reprodução dos eclipses de Sol

Aponte a barra de modo que a Lua fique direcionada para o Sol (o ideal é usar um retroprojetor ou uma lanterna) e que a sombra da Lua seja projetada sobre a esfera terrestre. Desta forma é possível visualizar um eclipse do Sol, e uma pequena sombra da Lua causa uma pequena mancha sobre uma região da Terra (figura 7a, 7b e 8).

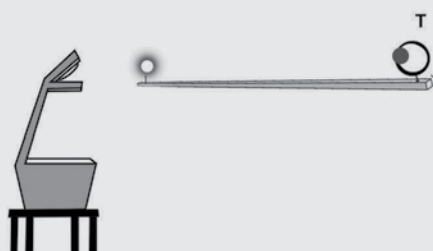


Fig. 7a e 7b: Simulação eclipse solar.

É difícil conseguir esta posição devido à inclinação que a barra deve ter ser muito precisa (esta é a razão pela qual ocorrem menos eclipses de Sol que eclipses Lunares).



Fig. 8: Detalhe da figura anterior 7a.



Fig. 9: Fotografia tirada a partir da ISS do eclipse do Sol de 1999 sobre uma região da superfície terrestre.

### Observações

- O eclipse Lunar somente ocorre quando há Lua cheia e o eclipse Solar quando há Lua nova.
- Um eclipse solar só é visto numa determinada parte, reduzida, da Terra.
- É raro a Terra e a Lua estarem suficientemente alinhadas para que produza um eclipse, e por isso não ocorrem sempre que há Lua nova ou Lua cheia.

### Modelo Sol-Lua

Com a finalidade de visualizar o sistema Sol-Terra-Lua, salientando a importância das distâncias, vamos usar um novo modelo, considerando o ponto de vista terrestre do Sol e da Lua. Para este modelo convidamos os estudantes a desenhar e pintar um grande Sol com diâmetro de 220 cm (mais de 2 metros de diâmetro) num lençol. Com esta experiência demonstramos que é possível cobrir este grande Sol apenas com uma pequena Lua de 0,6 cm de diâmetro (menos de 1 cm de diâmetro).

É possível substituir a bola que simula a Lua por um buraco numa tábua de madeira para que seja mais fácil de realizar a experiência.

Neste modelo, o Sol é colocado a 235 metros da Lua e o observador estará a 60 cm da Lua. Os estudantes ficarão surpreendidos ao cobrir o grande Sol com esta pequena Lua. Esta relação de um Sol 400 vezes maior que a Lua não é fácil de imaginar, pelo que é apropriado mostrar um exemplo para compreender a magnitude das distâncias e o tamanho real no Universo. Todas estas experiências e atividades ajudam a entender quais são as relações espaciais entre os corpos celestes durante um eclipse solar. Este método é muito melhor do que ler uma série de números num livro.

Diâmetro Terra	12 800 Km	2,1 cm
Diâmetro Lua	3 500 Km	0,6 cm
Distancia Terra-Lua	384 000 Km	60 cm
Diâmetro Sol	1 400 000 Km	220 cm
Distância Terra-Sol	150 000 000 Km	235 cm

Tabela 2: Distâncias e diâmetros do sistema Terra-Lua-Sol

### Medindo o diâmetro do Sol

É possível medir o diâmetro do Sol de diversas formas. Aqui, apresentamos um método simples usando uma câmara escura. É possível de realizar com uma caixa de sapatos ou com um cano de papelão que serve de eixo central para o papel alumínio ou filme transparente de cozinha.

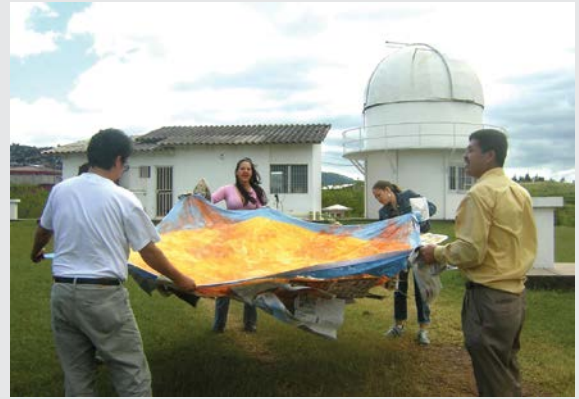


Fig. 10: Modelo de Sol



Fig. 11: Observando o Sol e a Lua no modelo.

1. Tampe uma das extremidades com papel semitransparente (se possível milimétrico) e a outra com papel de alumínio, ou papel grosso, onde faremos um buraco com um alfinete fino (figuras 12 e 13).
2. Direcione a extremidade com o pequeno buraco para o Sol e olhe pelo outro extremo onde está o papel semitransparente. Medimos o diâmetro,  $d$ , da imagem do Sol neste papel milimétrico.

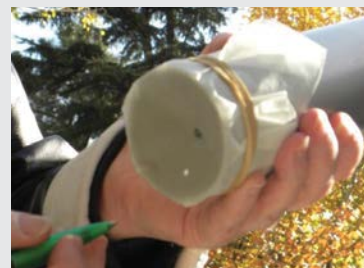


Fig. 12 e 13: Modelos de câmara escura.

Para calcular o diâmetro do Sol, basta considerar a figura 14, na qual aparecem dois triângulos semelhantes.

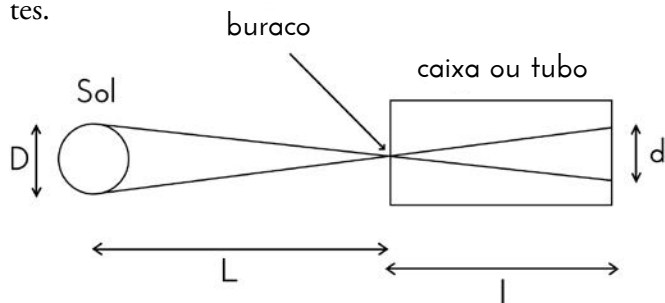


Fig. 14: Problema geométrico subjacente

Podemos estabelecer a relação:

$$\frac{D}{L} = \frac{d}{l}$$

Sendo possível calcular o diâmetro do Sol, D:

$$D = \frac{d \cdot L}{l}$$

Conhecendo a distância do Sol à Terra,  $L = 150\,000\,000$  km, podemos calcular o diâmetro,  $D$ , do Sol (lembrese que o diâmetro solar é de  $1\,392\,000$  km). Também é conhecido o comprimento do tubo,  $l$ , e o diâmetro,  $d$ , da imagem do Sol sobre o papel semitransparente.

É possível repetir o exercício com a Lua cheia sabendo que esta se encontra a aproximadamente  $400\,000$  km da Terra.

### Tamanhos e Distâncias no sistema Terra-Lua-Sol

Aristarco (310-230 a.C.) deduziu algumas proporções entre as distâncias e os raios do sistema Terra-Lua-Sol. Calculou o raio do Sol e da Lua, a distância da Terra ao Sol e a distância da Terra à Lua em relação ao raio da Terra. Alguns anos depois, Eratóstenes (280-192 a.C.) determinou o raio do nosso planeta e foi possível calcular todas as distâncias e raios do sistema Terra-Lua-Sol.

A proposta desta atividade consiste em repetir ambas as experiências com os estudantes. A ideia é reproduzir o processo matemático desenhado por Aristarco e Eratóstenes e, se possível, as observações por Aristarco e Eratóstenes.

#### Reproduzir a experiência de Aristarco

Aristarco determinou que o ângulo entre a linha Lua-Sol e a linha Terra-Sol, quando a Lua está em quarto, é  $\alpha = 87^\circ$  (figura 15).

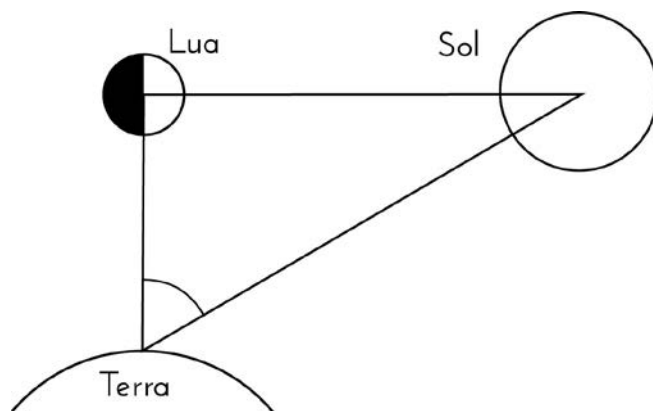


Fig.15: Posição relativa da Lua em quarto.

Hoje em dia sabemos que ele estava ligeiramente errado, possivelmente porque foi muito difícil determinar o preciso instante do quarto de fase da Lua. De fato este ângulo é  $\alpha = 89^\circ 51'$ , mas o processo usado por Aristarco é perfeitamente correto. Na figura 15, é usada a definição de cosseno, é possível deduzir que,

$$\cos \alpha = \frac{TL}{TS}$$

Em que TS é a distância da Terra ao Sol e TL é a distância da Terra à Lua. Então, aproximadamente,

$$TS = 400 TL$$

(apesar de Aristarco ter deduzido  $TS = 19 TL$ ).

#### Relação entre o raio da Lua e do Sol

A relação entre o diâmetro da Lua e do Sol deve ser semelhante à fórmula anteriormente obtida, porque da Terra observam-se ambos os diâmetros iguais a  $0,5^\circ$ . Portanto, os dois raios verificam

$$R_S = 400 R_L$$

#### Relação entre a distância da Terra à Lua e o raio lunar ou entre a distância da Terra ao Sol e o raio solar

Aristarco supôs que a órbita da Lua em torno da Terra seria circular. Como o diâmetro observado da Lua é de  $0,5^\circ$ , o ângulo da trajetória ( $360^\circ$ ) da Lua em torno da Terra será 720 vezes o diâmetro. O comprimento deste percurso é  $2\pi$  vezes a distância Terra-Lua, isto é:  $2R_L \cdot 720 = 2\pi TL$ , Resolvendo, encontramos

$$TL = \frac{720 R_L}{\pi}$$

e por um raciocínio similar,

$$TS = \frac{720 R_S}{\pi}$$

Esta relação é entre as distâncias à Terra, o raio lunar,

o raio solar e o raio terrestre.

*Relação entre as distâncias da Terra ao Sol e à Lua, o raio lunar, o raio solar e o raio terrestre*

Durante um eclipse da Lua, Aristarco observou que o tempo necessário para que a Lua cruze o cone de sombra terrestre era o dobro do tempo necessário para que a superfície da Lua fosse coberta (figura 16a e 16b). Portanto, deduziu que a sombra do diâmetro da Terra era o dobro do diâmetro da Lua, ou seja, a relação de ambos os diâmetros ou raios era de 2:1. Atualmente a informação é de que este valor é de 2,6:1.

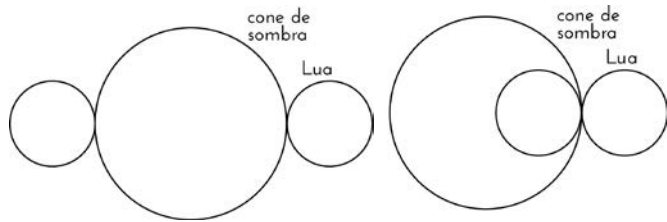


Fig. 16a: Medindo o cone de sombra.  
Fig. 16b: Medindo o diâmetro da Lua.

## Sumário final

Tendo em conta os resultados (figura 17)

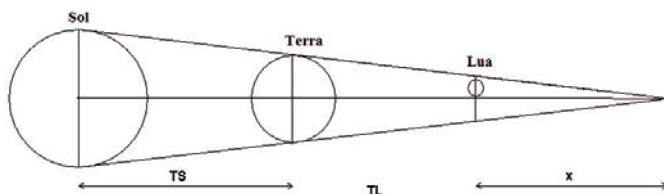


Fig. 17: Cone de sombra e posições relativas do sistema Terra-Lua-Sol.

deduzimos a seguinte relação:

$$\frac{x}{2.6 R_L} = \frac{x+TL}{R_T} = \frac{x+TL+TS}{R_S}$$

na qual  $x$  é uma variável auxiliar. Introduzindo nesta expressão as relações  $TS = 400 TL$  e  $R_S = 400 R_L$ , é possível eliminar  $x$  e, simplificando, obter,

$$R_L = \frac{401}{1440} \cdot R_T$$

que permite expressar todas as dimensões mencionadas anteriormente em função do raio da Terra, assim

$$R_S = \frac{2005}{18} R_T \quad TS = \frac{80200}{\pi} R_T \quad TL = \frac{401}{2\pi} R_T$$

Onde apenas é necessário substituir o raio do nosso planeta para obter todas as distâncias e raios do sistema Terra-Lua-Sol.

## Medições com os estudantes

Repetir as medidas realizadas por Aristarco com os es-

tudantes é uma boa ideia. Em primeiro lugar, é essencial calcular o ângulo entre o Sol e a Lua em quarto. Para realizar esta medida só é necessário dispor de um teodolito e saber o exato instante do quarto.

Assim, tentaremos verificar se este ângulo mede  $\alpha = 87^\circ$  ou  $\alpha = 89^\circ 51'$  (esta é uma medida realmente difícil de ser obtida).

Em segundo lugar, durante um eclipse da Lua, usando um cronómetro, é possível calcular a relação entre os tempos seguintes: “o primeiro e o último contato da Lua com o cone de sombra terrestre”, ou seja, medir o diâmetro do cone da sombra da Terra (figura 17a) e “o tempo necessário em cobrir a superfície lunar”, isto é, a medida do diâmetro da Lua (figura 17b). Finalmente, é possível verificar se a relação entre os tempos é 2:1 ou é de 2,6:1.

O objetivo mais importante desta atividade não é o resultado obtido para cada raio ou distância. O mais importante é que os estudantes descubram que, se utilizarem seus conhecimentos e inteligência, podem obter interessantes resultados apenas com poucos recursos. Neste caso, o talento de Aristarco foi muito importante para tentar obter uma ideia acerca do tamanho do sistema Terra-Lua-Sol.

Medir o raio da Terra seguindo o processo usado por Eratóstenes com os estudantes também é uma excelente proposta. Apesar da experiência de Eratóstenes ser bem conhecida, apresentamos aqui uma versão reduzida com o intuito de completar a experiência anterior.

## Reproduzir a experiência de Eratóstenes

Eratóstenes foi diretor da Biblioteca de Alexandria. Num dos textos da biblioteca ele leu que na cidade de Siena (atualmente Assuão) no dia de solstício de verão, ao meio dia, o Sol era refletivo no fundo de um poço, o que equivale a uma vara não produzir sombra. Ele notou que, no mesmo dia e à mesma hora, em Alexandria, uma vara produzia sombra. A partir destes factos ele deduziu que a superfície da Terra não podia ser plana, mas que seria esférica (figuras 18a e 18b).

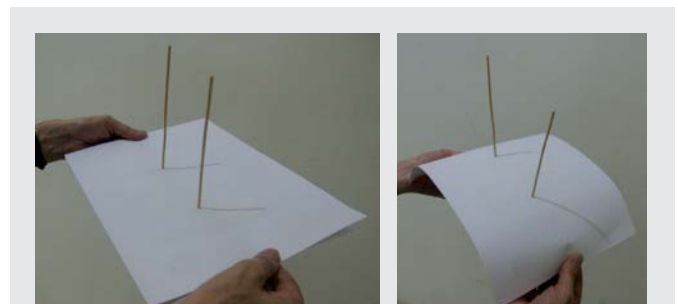


Fig. 18a e 18b: Numa superfície plana as duas estacas produzem sombras a mesma sombra, mas quando a superfície é curva as sombras são diferentes.

Considere duas estacas colocadas perpendicularmente ao solo, em duas localidades da superfície terrestre sobre o mesmo meridiano. As estacas devem apontar para o centro da Terra. Normalmente é melhor usar um fio-de-prumo no qual é marcado um ponto do fio para poder medir os comprimentos. É necessário medir a distância no fio-de-prumo, do solo até à marca, e o comprimento da sombra, da base do prumo até a sombra da marca no fio-de-prumo.

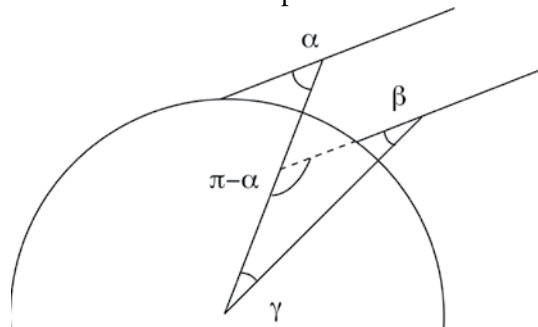


Fig. 19: Situação de prumos e ângulos na experiência de Eratóstenes.

Consideramos que os raios solares são paralelos. Estes raios solares produzem duas sombras, uma para cada estaca, ou fio-de-prumo. Medindo o comprimento do prumo e da sua sombra e usando a definição de tangente, obtêm-se os ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  (figura 19). O ângulo central  $\gamma$  pode ser calculado conferindo que a soma dos ângulos de um triângulo é igual a  $\pi$  radianos. Então deduzimos  $\pi = \pi - \alpha + \beta + \gamma$  e simplificando

$$\gamma = \alpha - \beta$$

no qual  $\alpha$  e  $\beta$  foram obtidos a partir da medição do prumo e da sua sombra.

Finalmente, estabelecendo uma proporcionalidade entre o ângulo  $\gamma$ , a longitude de seu arco,  $d$ , (determinado pela distância sobre o meridiano entre as duas localidades), e  $2\pi$  radianos do círculo meridiano e o seu comprimento  $2\pi R_T$ , obtemos,

$$\frac{2\pi R_T}{2\pi} = \frac{d}{\gamma}$$

Então conclui-se que:

$$R_T = \frac{d}{\gamma}$$

onde  $\gamma$  se obteve a partir da observação, em radianos, e  $d$  é a distância em km entre as duas localidades. É possível achar  $d$  a partir de um bom mapa.

Na situação de Eratóstenes, o ângulo  $\beta$  era zero e  $\gamma = \alpha$ , e com a distância entre Alexandria e Siena, é obtido um bom resultado do raio terrestre.

Também é necessário mencionar que o objetivo desta atividade não é a exatidão dos resultados. É esperado que os estudantes descubram que pensando e usando todas as possibilidades pode produzir resultados surpreendentes.

## Marés

As marés são a subida e descida do nível do mar causado pelos efeitos combinados da rotação da Terra e das forças gravitacionais exercidas pela Lua e o Sol. A forma do fundo do mar e da região costeira também têm influência nas marés, embora em menor escala. As marés são produzidas num período de aproximadamente 12 horas e meia.

As marés acontecem, principalmente, pela atração entre a Lua e a Terra. As marés altas ocorrem nas partes da Terra que estão de frente para a Lua e no lado oposto (figura 20). Nos pontos intermediários ocorrem as marés baixas.

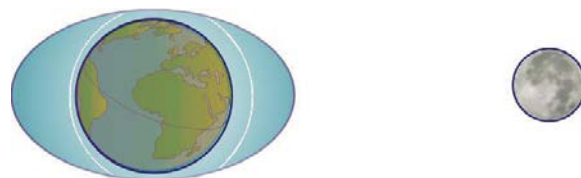


Fig. 20: Efeito das marés.



Fig. 21: Efeito, sobre a água, da aceleração diferenciada da Terra em diferentes áreas do oceano.

O fenómeno das marés já era conhecido na antiguidade, mas sua explicação apenas foi possível após a descoberta da Lei da Gravidade Universal de Newton (1687).

$$F_g = \frac{m_T \cdot m_L}{d^2}$$

A Lua exerce uma força gravitacional sobre a Terra. Quando há uma força gravitacional é possível considerar que existe uma aceleração gravitacional, de acordo com a segunda lei de Newton ( $F = m \cdot a$ ). Desta forma a aceleração da Lua sobre a Terra é dada por

$$a_g = G \frac{m_L}{d^2}$$

No qual  $m_L$  é a massa da Lua e  $d$  é a distância da Lua a um ponto da Terra.

A parte sólida da Terra é um corpo rígido e, por isso, é possível considerar toda a aceleração sobre esta parte sólida aplicada no centro da Terra. No entanto, a água é líquida e sofre uma aceleração diferencial que depende da distância à Lua. Assim, a aceleração do lado mais próximo da Lua é maior que do lado mais afastado. Em consequência, a superfície do oceano vai gerar um elipsoide (figura 20).

Esse elipsoide permanece sempre com a zona mais alongada para a Lua (figura 19) e a Terra vai girar por baixo. Assim cada ponto da Terra terá 2 vezes ao dia uma maré alta seguida de uma maré baixa. Na realidade o período entre marés é um pouco superior a 12 horas e a razão é que a Lua gira em relação à Terra com um período sinódico de aproximadamente 29,5 dias. Significa que percorre  $360^\circ$  em 29,5 dias, pelo que a Lua vai avançar no céu aproximadamente  $12,2^\circ$  em cada dia, ou seja,  $6,6^\circ$  a cada 12 horas. Como em cada hora a Terra gira sobre si mesma aproximadamente  $15^\circ$ ,  $6,6^\circ$  equivalem a 24 minutos, portanto cada ciclo de maré é de 12 horas e 24 minutos. Como o intervalo de tempo entre a maré alta e a maré baixa é a metade; o tempo compreendido da maré alta até a maré baixa, ou da maré baixa até a maré alta, será de 6h e 12min.

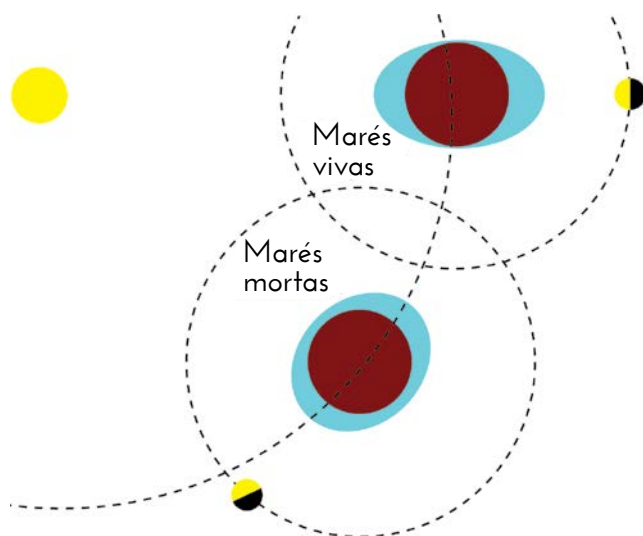


Fig 22: Marés vivas e marés mortas.

Devido a sua proximidade, a Lua é a que mais influencia as marés. Mas o Sol também tem influência nas marés. Quando a Lua e o Sol estão em conjunção (Lua nova) ou em oposição (Lua cheia) ocorrem as marés vivas. Quando a Lua e o Sol exercem atrações gravitacionais perpendiculares (Quarto crescente e Quarto minguante) ocorrem as marés mortas (figura 22).

## Bibliografia

Alonso, M., Finn, E. *Física – um curso universitário*. Volume I. Ed. Edgard Blucher, 1972.

Broman, L., Estalella, R., Ros, R.M., *Experimentos de Astronomía. 27 pasos hacia el Universo*, Editorial Alambra, Madrid, 1988.

Broman, L., Estalella, R., Ros, R.M., *Experimentos de Astronomía*, Editorial Alambra, México, 1997.

Fucili, L., García, B., Casali, G., “A scale model to study solar eclipses”, Proceedings of 3rd EAAE Summer School, 107, 109, Barcelona, 1999.

Lanciano, N., *Strumenti per i giardino del cielo*, Edizioni junior, Spaggiari Eds, Roma, 2016.

# Mala do jovem astrónomo

Rosa M. Ros

União Astronómica Internacional, Universidade Politécnica da Catalunha (Barcelona, Espanha)

---

## Resumo

Para promover a observação é necessário que os alunos tenham um conjunto de instrumentos simples. É proposto aos alunos a construção de alguns instrumentos para utilizar na observação do céu na própria escola.

Os alunos devem entender, de forma básica, como surgiram vários instrumentos ao longo dos séculos. Como se desenvolveram e como se tornaram imprescindíveis. São necessários conhecimentos astronómicos, grande habilidade para os construir e destreza para extrair medidas ou fazer leituras correspondentes às observações. Estes requisitos não são fáceis de serem desenvolvidos e por esse motivo propomos instrumentos simples.

## Objetivos

- Compreender a importância de realizar observações cuidadosas.
  - Compreender o uso de diversos instrumentos através da confecção feita pelos próprios alunos.
- 

## A Observação

É possível adquirir prática na medida do tempo e das posições dos corpos celestes com artefactos preparados “*ad hoc*”. Sugerimos algumas informações com o objetivo de preparar uma coleção de instrumentos que possam ser guardados numa mala. A mala e o conteúdo são feitos geralmente com cartolina usando cola, tesouras, etc. Este tema pode possibilitar pesquisas sobre outros instrumentos antigos e modernos.

A habilidade artística e criativa dos alunos permitirá obter algumas malas personalizadas. Esta atividade pode ser facilmente modificada e adaptada aos alunos conforme a idade, com instrumentos mais ou menos sofisticados.

Em especial esta mala contém:

- Uma régua para medir ângulos;
- Um quadrante simplificado;
- Um goniómetro horizontal;
- Um planisfério;
- Um mapa da Lua;
- Um relógio equatorial;

- Um espectroscópio

Propomos uma mala com instrumentos muito simples. Uma pequena mala pode ser facilmente transportada e utilizada, tanto na escola como nas horas livres. É muito importante que não seja muito grande nem frágil (especialmente se for utilizada por estudantes muito jovens). Salientamos que o esmero nas medidas não é a finalidade desta atividade.

## Conteúdos

Obviamente só podemos fazer as simulações num pátio durante o verão. A ideia é adquirir prática com os utensílios que vamos construir.

Em primeiro lugar precisamos de uma caixa de papelão semelhante às caixas de correio do tamanho de um livro grande (esta será a mala). Apenas é necessário colocar uma alça no lado estreito para que o lado largo possa ser aberto. Dentro da caixa, colocaremos os seguintes instrumentos:

- Uma **régua para medir ângulos** que pode ser usada para fornecer a distância angular entre duas estrelas de uma mesma constelação. É muito simples de utilizar caso não queiramos introduzir as coordenadas.
- Um **quadrante simplificado** que pode ser empregue para obter a altura das estrelas. Quando os alunos observam um objeto pelo visor, a corda indica a posição angular relativamente ao seu horizonte.
- Um **goniómetro horizontal** simples pode ser usado para determinar o azimute das estrelas. Obviamente é necessária uma bússola para orientar o instrumento na direção Norte-Sul.
- Um **planisfério** com as constelações do céu fotocopiadas com nitidez, num disco de papel branco, e uma bolsa de papelão com o “buraco” da latitude para colocar o disco do céu dentro. Girando o disco é localizada a data e a hora de observação para reconhecer as constelações mais importantes numa latitude do “buraco” escolhida.
- Um **espectroscópio** para decompor a luz solar nas sete cores que a compõem.

- Um **mapa da Lua** com os nomes dos mares e algumas crateras que sejam facilmente reconhecíveis através de binóculos.

- Uma **lanterna** (de luz vermelha) para iluminar os mapas antes de olhar o céu real. A luz atrapalha as observações. Se os alunos têm uma lanterna na mala, é necessário que fixem um “papel de celofane” sobre a lâmpada. Um grupo de alunos com lanternas diferentes da luz vermelha podem produzir muita poluição luminosa dificultando a observação

- Uma **bússola** para orientar os diferentes instrumentos.

E naturalmente, todos os acessórios que os alunos precisam: bloco de anotações, lápis, relógio e, se possível, uma câmara fotográfica.

Seguindo as instruções e os desenhos, podemos construir os instrumentos de forma muito simples e usá-los ao ar livre. Durante o dia mediremos, por exemplo, com o quadrante a posição (altura) do topo de uma árvore, de uma colina, etc. À noite, podemos medir a posição de duas estrelas diferentes, ou da Lua, com a finalidade de entender o ciclo periódico das suas fases. Convidamos os alunos a anotar as observações.

Para a primeira observação noturna é melhor utilizar mapas simples, preparados anteriormente, para se familiarizar com as constelações mais importantes. Naturalmente que os mapas astronômicos são precisos, mas a experiência dos professores indica que em algumas ocasiões estes ficam difíceis de serem utilizados pelos alunos, sem ajuda.

### Uma régua para medir ângulos

Considerando uma simples proporção podemos construir um instrumento básico para medir ângulos em qualquer situação. O principal objetivo é responder a seguinte pergunta: “Qual é a distância (raio R) que necessito para obter um artefacto que 1° seja equivalente a 1 cm?”.

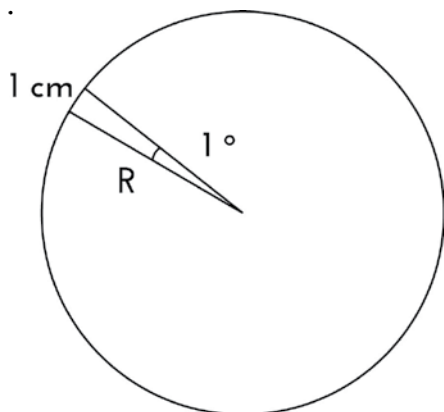


Fig. 1: O raio R com a finalidade de obter um instrumento em que 1° seja equivalente a 1 cm.

Na figura 1 consideramos a relação entre a circunferência de longitude  $2\pi R$  em centímetros, para 360°, com 1 cm para 1°:

$$\frac{2\pi R \text{ cm}}{360^\circ} = \frac{1 \text{ cm}}{1^\circ}$$

Portanto,

$$R = 180 / \pi = 57 \text{ cm}$$

### Para construir o instrumento

Usamos uma régua, onde fixamos uma corda de 57 cm de comprimento. É muito importante que a corda não se estique.

### Como usar:

- Olhamos, com o final da corda quase tocando nosso olho, “na bochecha, por baixo do olho”
- Podemos medir usando a régua e a equivalência é 1 cm = 1°, se a corda estiver esticada (figura 2).

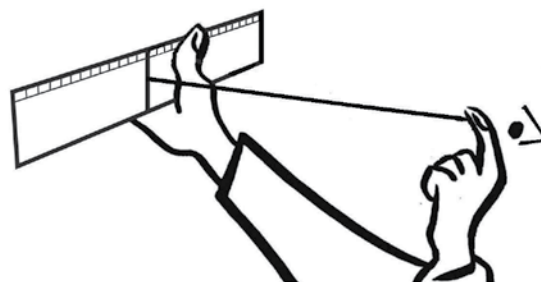


Fig. 2: Usando a ferramenta (uma régua e um pedaço de corda de 57 cm de comprimento). É possível medir ângulos com a equivalência “1 cm = 1°”.

### Ejercícios propostos:

*Qual é a distância angular entre duas estrelas da mesma constelação?*

Use o “medidor de ângulos” para calcular qual é a distância (em graus) entre Merak e Dubne, da Ursa Maior.

### Um quadrante simplificado: o quadrante “pistola”

Uma versão muito simplificada do quadrante pode ser muito útil para medir ângulos. Aqui apresentamos a versão “pistola” que é de fácil uso, pois favorece a utilização pelos alunos.

### Para construí-lo

É necessária uma peça retangular de cartão duro (cerca de 12 x 20 cm). Recorte uma área retangular como na figura 3, com a finalidade de colocar a mão nesse lugar. Coloque dois parafusos com argola no lado (figura 3).

Fixe um dos parafusos com argola sobre a posição 0° (figura 3) num quadrante de papel com os ângulos indicados. Amarre uma corda na parte de acima e, na outra ponta, fixe um pequeno peso.

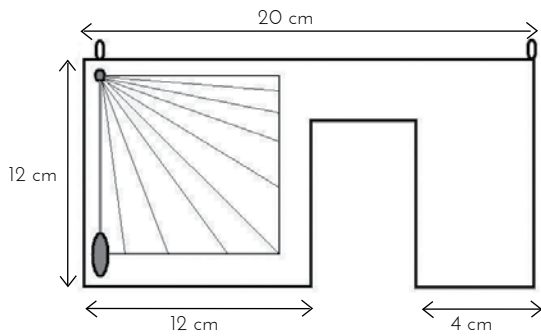


Fig. 3: Quadrante "Pistola".

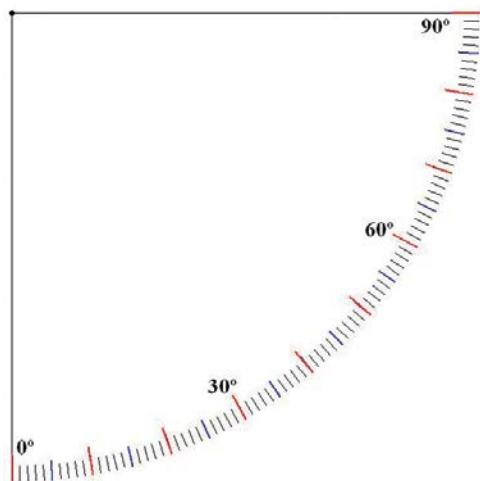


Fig. 4: Gradação de 90° para colar no quadrante.

#### Como usar

- Quando o objeto é observado através dos dois parafusos com argola, a corda indica a posição angular referida aos 0° do horizonte (figura 5b).
- Um canudo que passe através dos parafusos de olho fechado é um visor excelente que nos permitirá medir a altura do Sol projetando a imagem em um pedaço de papel branco. **ATENÇÃO: NUNCA OLHE O SOL DIRETAMENTE!**

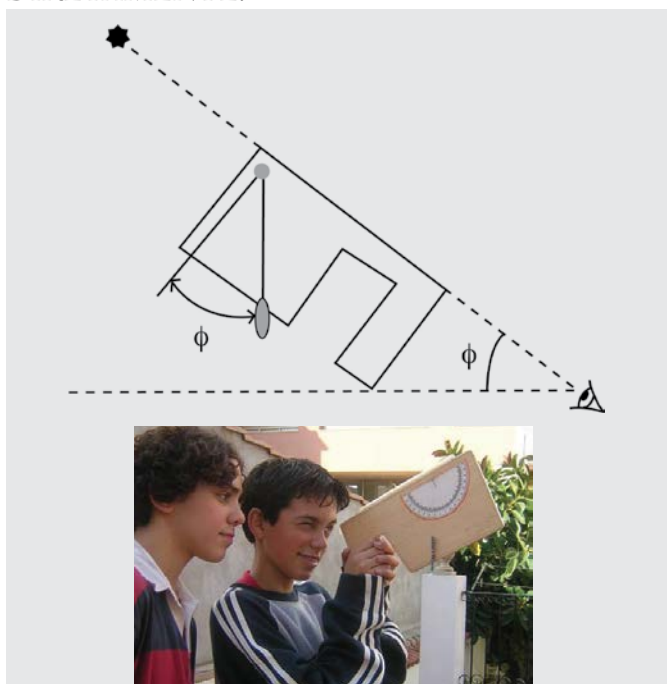


Fig. 5a e 5b: Usando o quadrante de "pistola".

#### Ejercícios propostos:

*Qual é a latitude da escola?*

Usaremos o quadrante para conhecer a altura da estrela Polar. A latitude de um lugar é igual à altura da Polar em dito lugar (figura 6). Também é possível usar o quadrante para calcular (na aula de matemática) a altura da escola ou de qualquer outro edifício próximo.

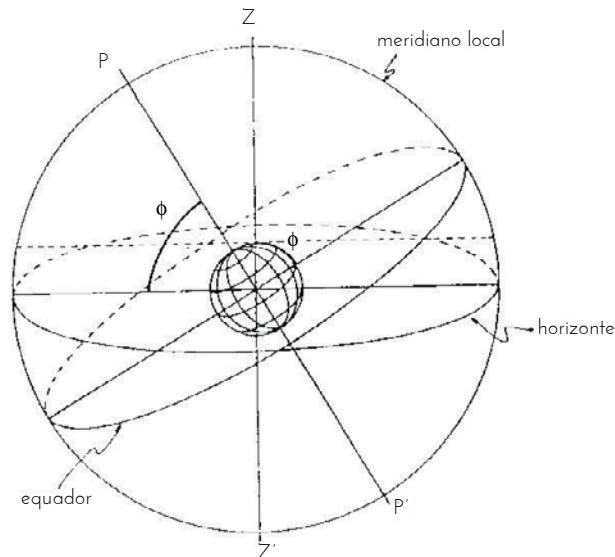


Fig. 6: A latitude do lugar  $\phi$  é igual à altura da Polar.

#### Goniómetro Horizontal

Uma versão simplificada do goniómetro horizontal pode ser utilizada para conhecer a segunda coordenada necessária para determinar a posição de um corpo celeste.

#### Para construir a ferramenta

Corte um retângulo de cartão de aproximadamente 12 x 20 cm (figura 7a). Cole um semicírculo de papel (figura 8) com os ângulos indicados de forma que o diâmetro do semicírculo esteja em paralelo com o lado maior do retângulo. Utilizando três "agulhas" podemos marcar duas direções no goniómetro (figura 7b).



Fig. 7a e 7b: Como é usado o goniómetro horizontal

#### Como usar

- Se quisermos medir o azimute de uma estrela temos que orientar a linha de partida do semicírculo na direção Norte-Sul.
- O azimute é o ângulo entre a linha Norte-Sul e a linha do centro do círculo e da direção do corpo.

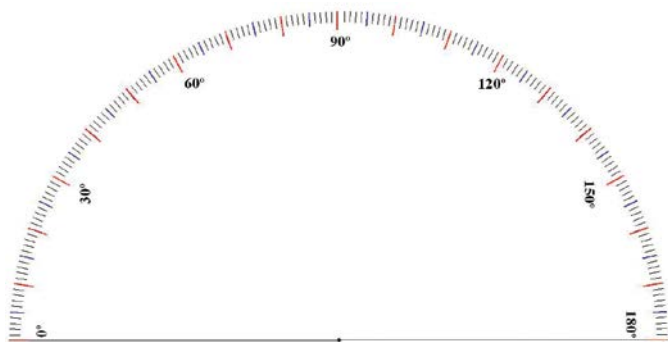


Fig. 8: Graduação de 180° para colar no goniómetro horizontal.

### Ejercícios propostos

*Qual é a posição da Lua esta noite?*

Use o quadrante e o goniómetro horizontal para calcular a altura e o azimute da Lua. Com o objetivo de estudar o movimento da Lua durante a noite, é possível determinar as duas coordenadas três vezes a cada hora. Desta maneira é possível comparar o movimento da Lua com o das estrelas no céu.

### O planisfério

Para reconhecer as constelações são utilizados mapas de estrelas que dependem da latitude do lugar. Construiremos um e recomendamos ampliá-lo através de fotocopiadora.

#### Para construir o planisfério:

Usaremos uma fotocópia das constelações do céu num disco de “fundo branco” e colocaremos dentro de uma bolsa conforme a sua latitude, próxima ao equador ou não, e segundo o hemisfério.

#### Hemisfério norte

Para lugares situados no hemisfério norte com latitudes compreendidas entre 0 e 20 graus, é conveniente preparar dois planisférios, um para cada horizonte. Para o horizonte norte recortaremos a janela da figura 9a pela linha de latitude contínua correspondente e dobraremos pela linha de pontos até conseguir uma bolsa. Nela introduziremos o planisfério da figura 10a. Com este processo teremos o planisfério do horizonte norte do lugar. Procedemos de forma semelhante para ter o planisfério do horizonte sul. Recortando e dobrando, como anteriormente, a janela da figura 9b e introduzindo no seu interior o mapa de estrelas da figura 10a. Quando terminados, usaremos os planisférios conforme o lugar em que estamos observando, para o horizonte norte ou sul.

Quando desejamos observar no hemisfério norte com latitudes compreendidas entre 30 e 70 graus, basta recortar a janela da figura 9e pela linha contínua e dobrar pela linha de pontos até obter uma bolsa onde

será introduzido o círculo de estrelas que recortámos anteriormente (figura 10a).

#### Hemisfério sul

Para lugares situados no hemisfério sul com latitudes compreendidas entre 0 e 20 graus é conveniente preparar dois planisférios, um para cada horizonte. Para o horizonte norte recortaremos a janela da figura 9c pela linha de latitude contínua correspondente e dobraremos pela linha pontilhada até conseguir uma bolsa. Nela introduziremos o planisfério da figura 10a. Com este procedimento teremos o planisfério do horizonte sul do lugar. Faremos de forma semelhante para ter o planisfério do horizonte sul. Recortando e dobrando, como antes, a janela da figura 9d e introduzindo no seu interior o mapa de estrelas da figura 10b. Quando terminados, usaremos os planisférios conforme o lugar que estamos observando, para o horizonte norte ou sul.

Quando queremos observar no hemisfério sul com latitudes compreendidas entre 30 e 70 graus, basta recortar a janela da figura 9f pela linha contínua e dobrar pela linha de pontos até obter uma bolsa onde será introduzido o círculo de estrelas que recortámos anteriormente (figura 10b).

#### Como usar:

Girando o círculo de estrelas coloca-se a data do dia em que vamos observar alinhada com a hora da observação, e utiliza-se o planisfério olhando o céu na direção indicada. A parte do céu que pode ser observada aparece descoberta pelo papel.

Atenção: Um planisfério é usado como um guarda-chuva. É um mapa do céu e devemos colocar acima de nossa cabeça para poder reconhecer as constelações.

#### Ejercícios propostos:

*Que céu podemos ver esta noite?*

Use o planisfério construído para a latitude de sua escola, apenas é necessário girar o disco estelar até que a data de hoje coincida com a hora que planeias sair para observar.

Observe que o planisfério é um “mapa de estrelas” e que é necessário levantá-lo sobre a sua cabeça como um guarda-chuva (não é um mapa da sua localidade!).

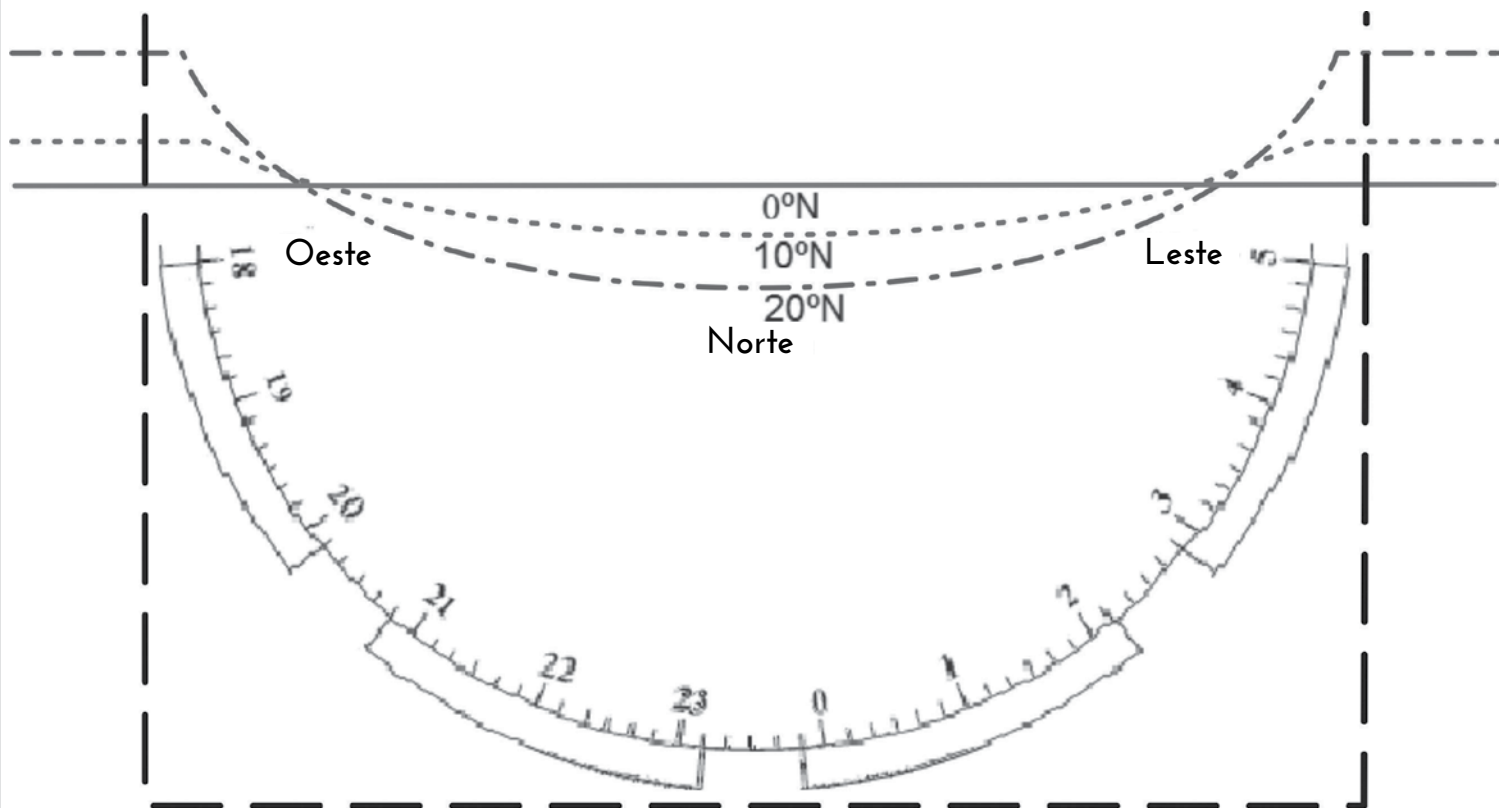


Fig. 9a: Bolsa para o horizonte norte (latitudes 0°, 10° e 20° Norte).

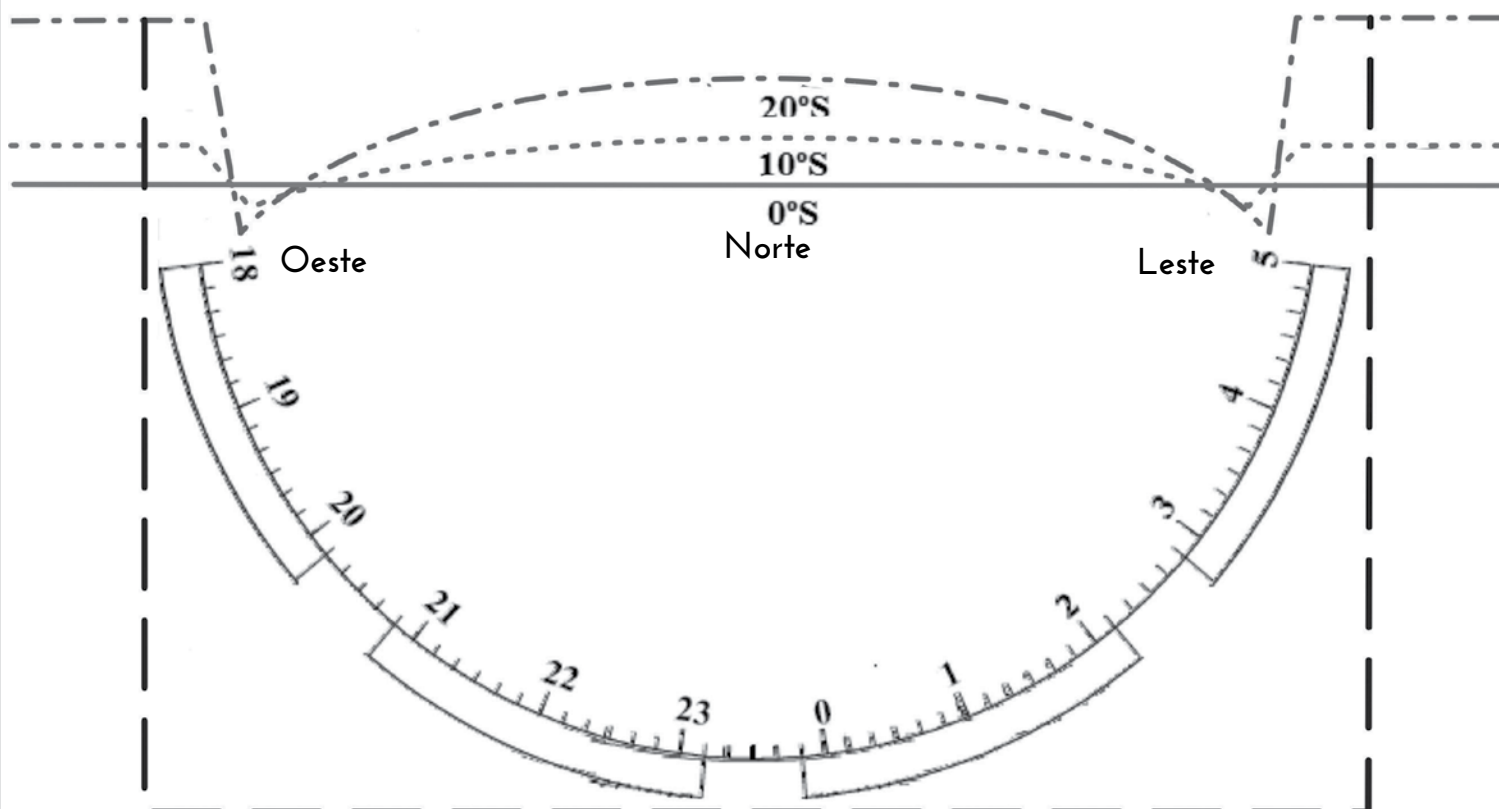


Fig. 9b: Bolsa para o horizonte sul (latitudes 0°, 10° e 20° Norte).

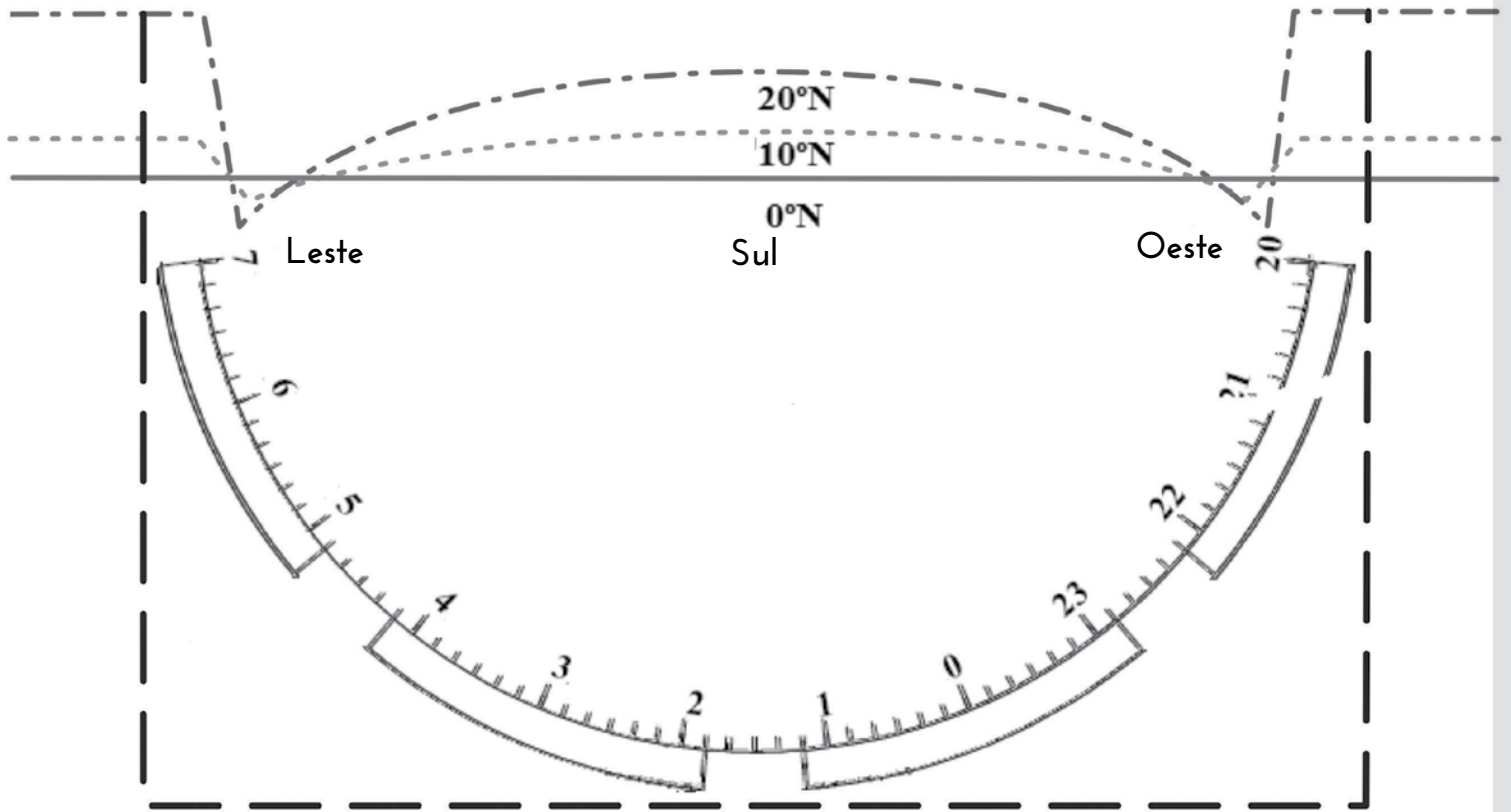


Fig. 9c: Bolsa para o horizonte norte (latitudes 0°, 10°, 20° Sul).

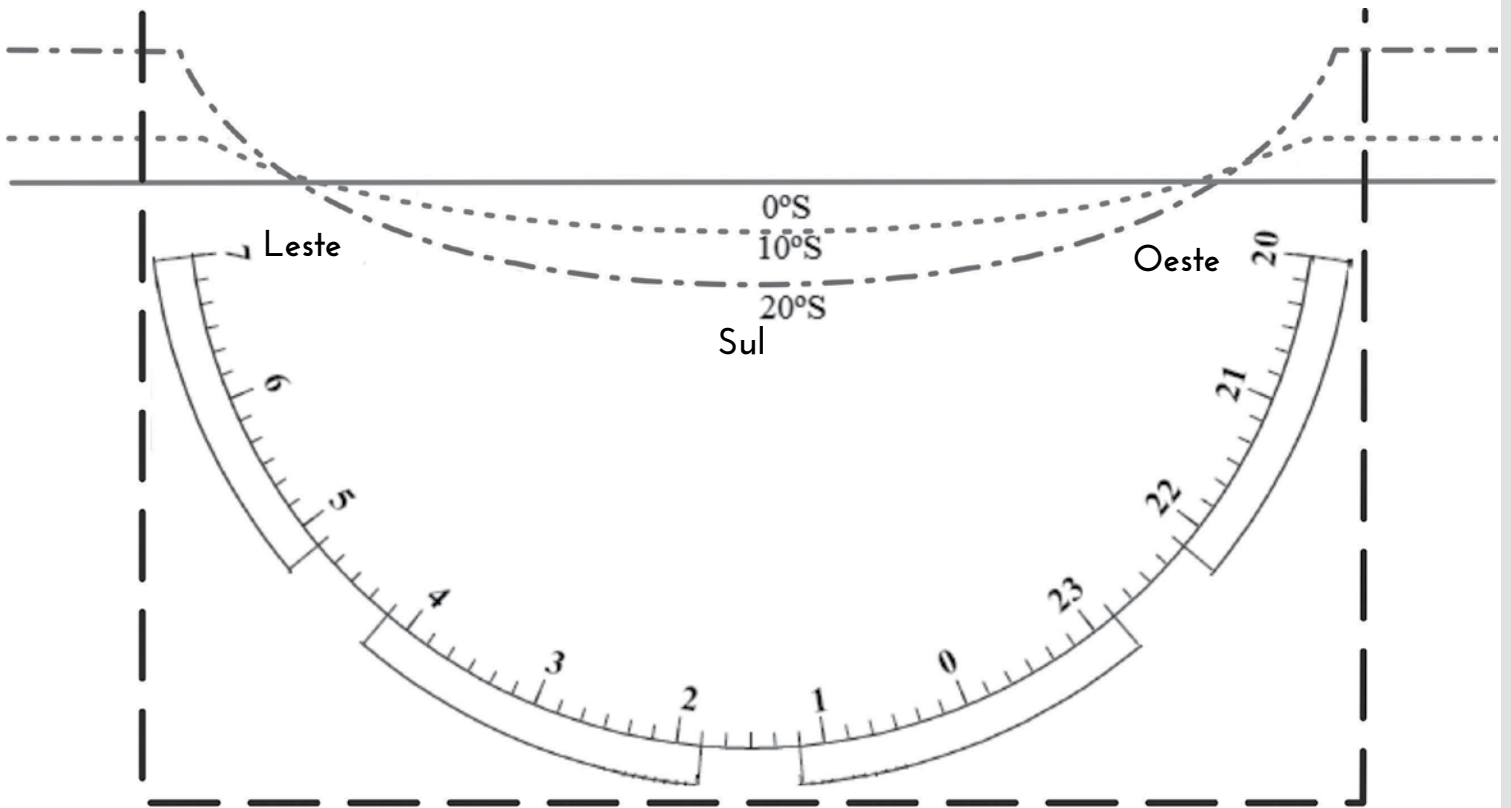


Fig. 9d: Bolsa para o horizonte sul (latitudes 0°, 10°, 20° Sul).

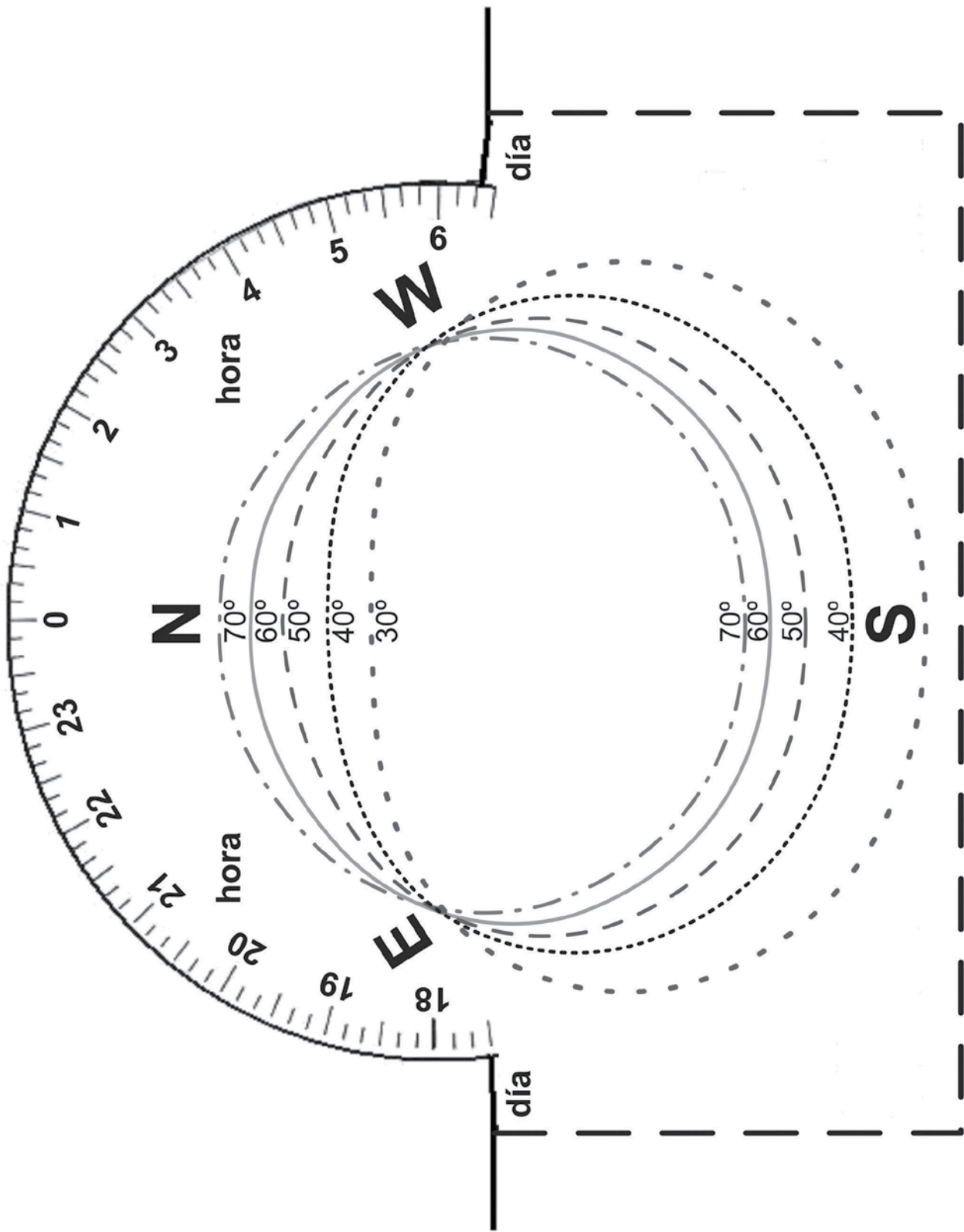


Fig. 9e: Bolsa para o hemisfério norte para ambos os horizontes. Latitudes de 30° a 70° Norte.

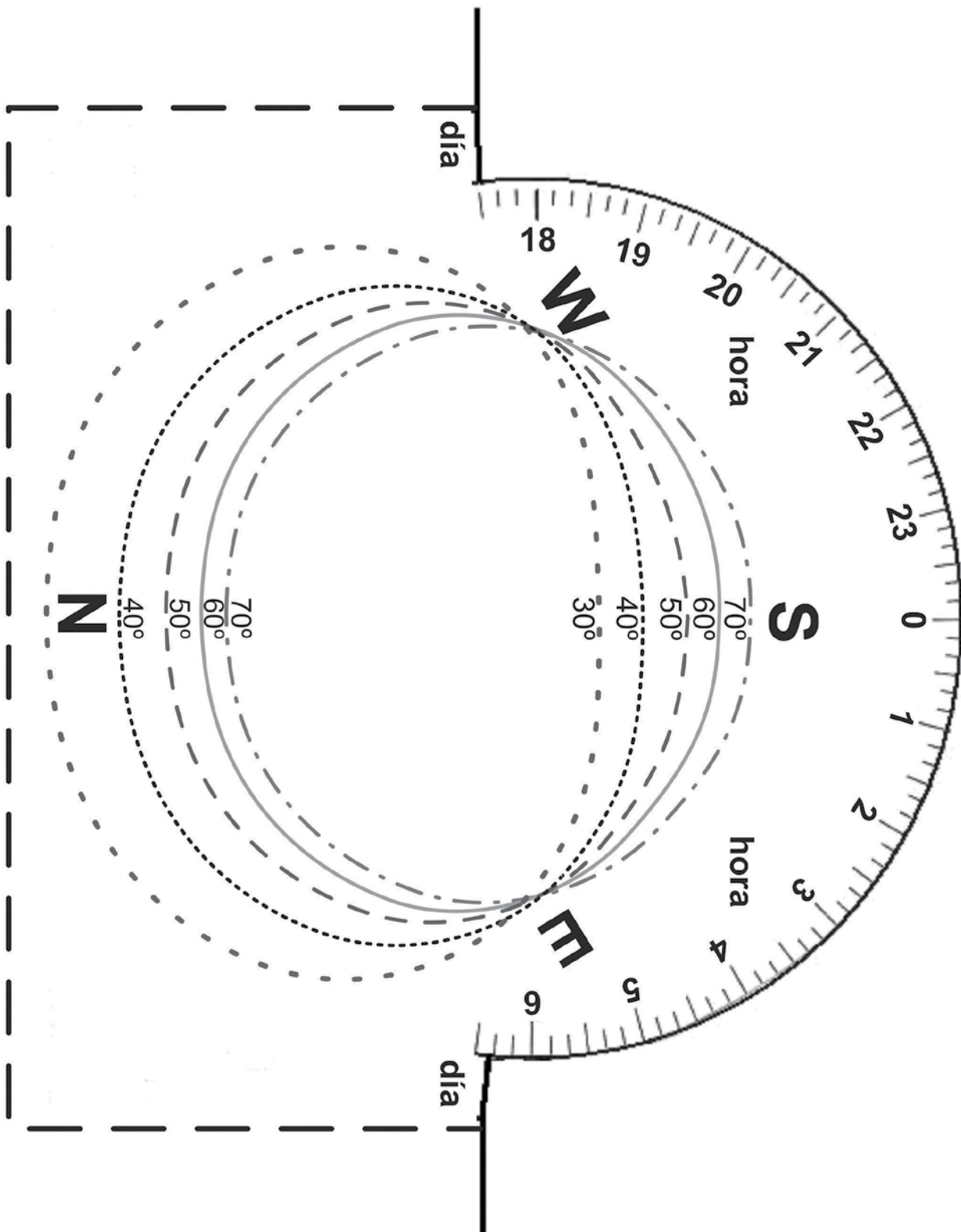


Fig. 9f: Bolsa para o hemisfério sul para ambos os horizontes. Latitudes de 30° a 70° Sul.

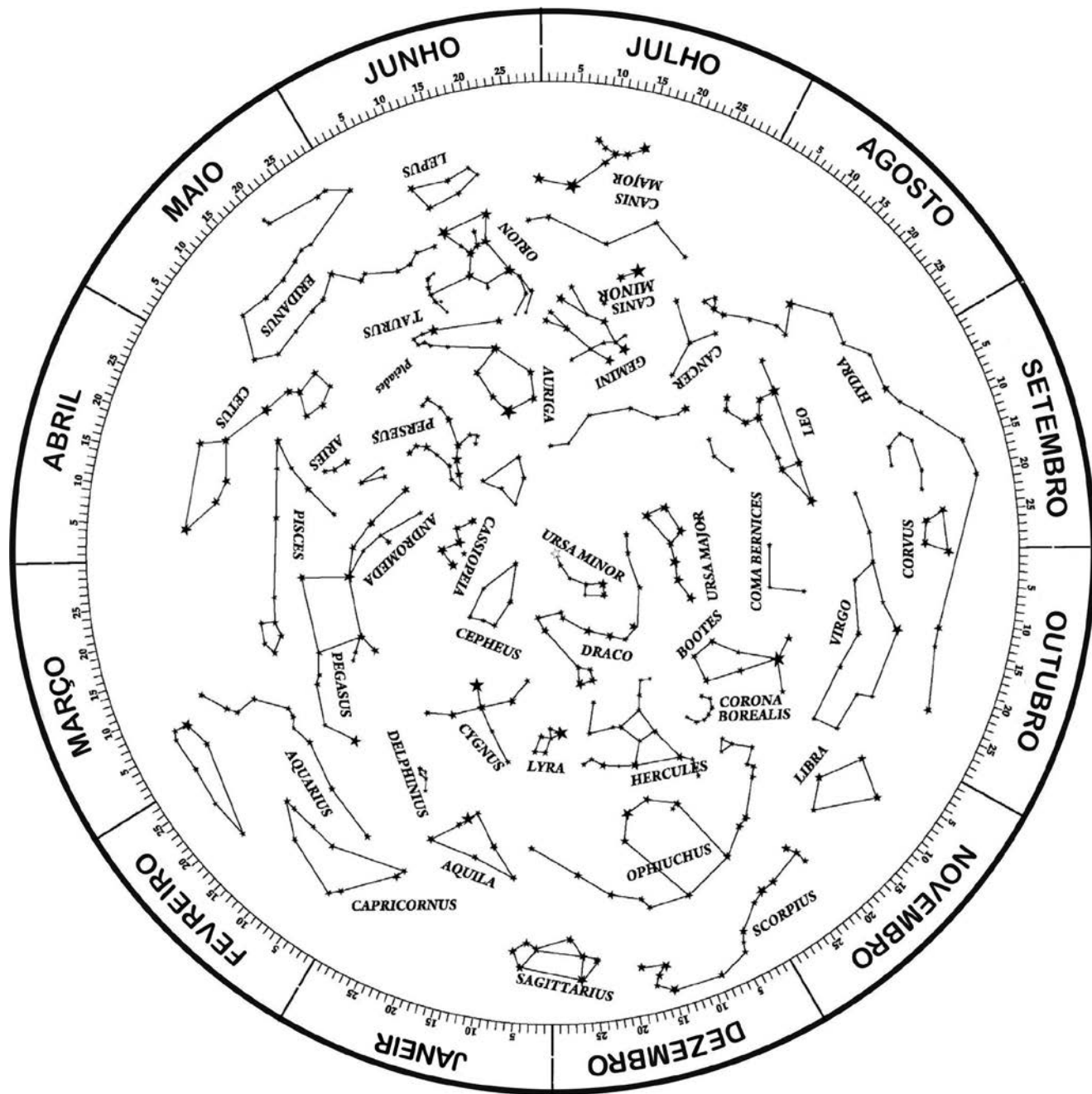


Fig. 10a: O disco ou mapa estelar que é posto dentro da bolsa. Hemisfério norte.



## Espectroscópio

Ao passar a luz do Sol por este simples instrumento, o aluno poderá visualizar a decomposição da luz. É uma forma simples de observar o espectro solar com um instrumento construído pelos próprios alunos.

### Construção do espectroscópio:

Pinte o interior de uma caixa grande de fósforos (tamanho dos fósforos de cozinha). Faça um corte longitudinal (figura 11b) pelo qual o observador possa observar o espectro no interior da caixa. Corte um CD inutilizado em oito partes iguais e cole uma das partes no fundo interior da caixa de fósforos, com o lado de gravação para acima. Feche a caixa deixando apenas uma fresta aberta na região oposta pela qual foi aberto o visor.

### Como usar

- Direcione a caixa de fósforos de forma que a luz do Sol entre pela fresta aberta e observe através do corte na caixa (figura 11a).
- Veja, no interior da caixa de fósforos, a decomposição da luz solar nas cores do espectro.



Fig. 11a y 11b: Como usar o espectroscópio.

### Ejercicio proposto:

Compare o espectro solar com o de uma lâmpada fluorescente ou outras lâmpadas que a escola possua. Poderão observar as variações que aparecem no espectro conforme o tipo de lâmpada.

### Mapa da Lua

É bom incluir uma versão simplificada de um mapa lunar que inclua o nome dos mares e de algumas crateras que possam ser observados com binóculos ou com um pequeno telescópio.

### Para construir:

Material: uma peça quadrada de papelão duro (aproximadamente 20 x 20 cm) onde é colada a figura 12 ou a figura 13.

### Como usar

O mapa da Lua pode ser usado da mesma forma como aparece aqui ou ao contrário, dependendo se for utilizado com binóculos ou com um telescópio (imagem invertida) e também depende se estão a observar do hemisfério norte ou sul. Em qualquer dos casos, o mais simples é começar por identificar os mares, comprovar que a posição é correta e depois identificar os demais acidentes lunares.

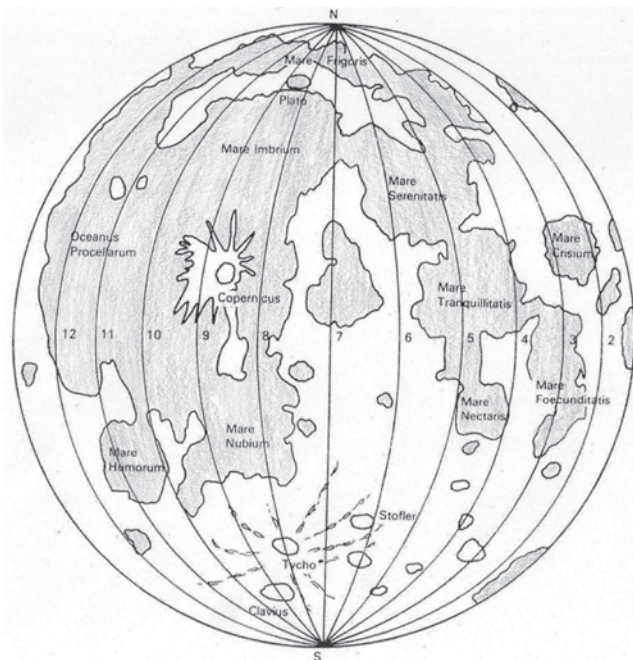


Fig. 12: Mapa esquemático da Lua.

### Ejercicio proposto:

*Qual é a cratera de Tycho?*

Observe a Lua num dia que está mais de metade iluminada e identifique na zona central uma cratera com um grande sistema de radiantes (linhas que saem da cratera e se direcionam em todas as direções, cruzando a superfície do satélite).

### Organização da mala

Preparar uma bolsa de papel com uma folha no lado superior da caixa aberta (figura 14) para guardar o planisfério, o mapa da Lua, o relógio solar, etc.

Na parte do fundo da caixa colocar os instrumentos de maneira que não se mexam, usando clips, alfinetes e pequenos passadores para fixar. O parafuso do quadrante deve fixar-se em torno do centro porque a mala contém instrumentos delicados e podem mexer-se ao manuseá-la. Um grupo de alunos propôs colocar uma lista no exterior da mala indicando o conteúdo, desta forma ajudaria a conferir os materiais e recolher tudo ao finalizar a atividade. Além da etiqueta com o nome do estudante, é sugerido enfeitar a mala com a intenção de a personalizar.

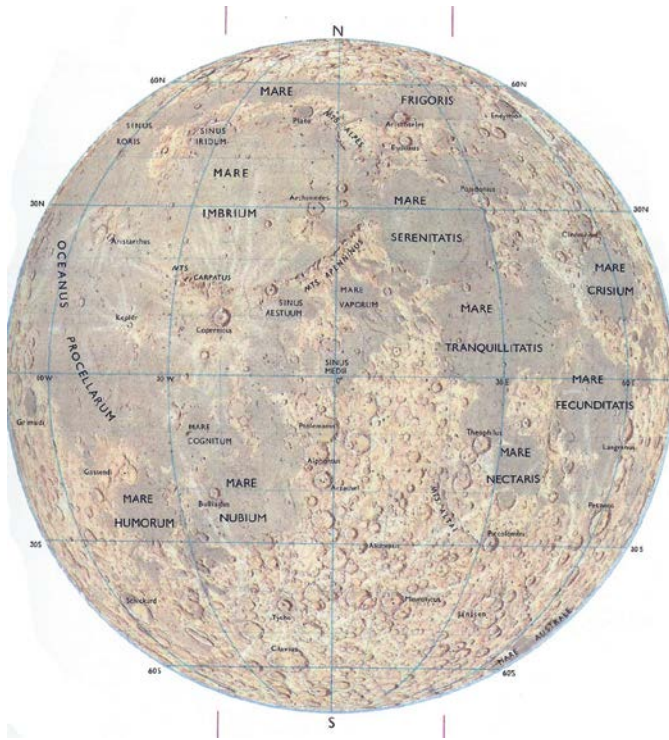


Fig. 13: Mapa simplificado da Lua.

## Bibliografia

Palici di Suni, C., “First Aid Kit, What is necessary for a good astronomer to do an Observation in any moment?”, *Proceedings of 9th EAAE International Summer School*, 99, 116, Barcelona, 2005.

Palici di Suni, C., Ros, R.M., Viñuales, E., Dahringer, F., “Equipo de Astronomía para jóvenes astrónomos”, *Proceedings of 10th EAAE International Summer School*, Vol. 2, 54, 68, Barcelona, 2006.

Ros, R.M., Capell, A., Colom, J., *El planisferio y 40 actividades más*, Antares, Barcelona, 2005.

## Conclusões

Observar como o céu se movimenta durante a noite, durante o dia e ao longo do ano é imprescindível para os jovens astrónomos. Com este tipo de projetos é possível que os alunos:

- Adquiram confiança com as medidas;
- Se responsabilizem pelos seus próprios instrumentos;
- Desenvolvam a sua criatividade e habilidade manual;
- Entendam a importância da recolha sistemática de dados;
- Entendam, de forma fácil, os instrumentos mais sofisticados;
- Reconheçam a importância da observação a olho nu.



Fig. 14: A mala.

# Espectro solar e manchas solares

Alexandre Costa, Beatriz García, Ricardo Moreno

União Astronómica Internacional, Escola Secundária de Loulé (Portugal), Universidade Tecnológica Nacional (Mendoza, Argentina), Colégio Retamar (Madrid, Espanha)

## Resumo

Esta oficina é uma aproximação teórica e prática acerca do espectro da luz do Sol, útil para o ensino secundário. As experiências são apropriadas para os ensinamentos básico e secundário.

O Sol é a principal fonte de quase todos os comprimentos de onda de radiação. No entanto, como a nossa atmosfera possui uma alta absorção em quase todos os comprimentos de onda não visíveis, apenas são considerados as experiências no espectro visível, parte do espectro que está presente na vida quotidiana dos estudantes. Para as experiências em regiões não visíveis, consulte a oficina correspondente.

Em primeiro lugar apresentamos a teoria, seguida por demonstrações experimentais de todos os conceitos desenvolvidos. Estas atividades são simples experiências que os professores podem reproduzir nas aulas introdutórias sobre temas como a polarização, a extinção, a radiação de corpo negro, o espectro contínuo, a linha do espectro, o espectro de absorção (por exemplo, a luz solar) e as linhas de Fraunhofer.

São discutidas as diferenças entre a superfície de emissão solar comum e as emissões das manchas solares. Também é mencionada a evidência da rotação solar e de que forma podem ser utilizados em projetos escolares.

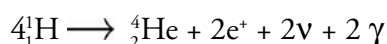
## Objetivos

- Compreender o que é o espectro solar.
- Compreender o espectro do Sol.
- Compreender o que são as manchas solares.
- Compreender a importância histórica das manchas solares nos trabalhos de Galileu acerca sobre do Sol.
- Estudar alguns aspetos da luz: polarização, dispersão, etc.

## A Radiação Solar

A energia solar é criada no interior do Sol, numa região denominada núcleo, onde a temperatura chega aos 15

milhões de graus e a pressão é altíssima. As condições de pressão e temperatura do núcleo costumam permitir reações nucleares. Na principal reação nuclear que ocorre no núcleo do Sol, quatro prótons (núcleos de hidrogénio) são transformados em partículas alfa (núcleos de hélio), gerando também dois positrões, dois neutrinos e dois fótons gama, de acordo com a equação:



A massa resultante é menor que a dos quatro prótons juntos. Esta perda de massa, segundo a equação de Einstein, implica uma geração de energia.

$$E=mc^2$$

A cada segundo 600 milhões de toneladas de hidrogénio são transformados em hélio, mas há uma perda entre 4 e 5 milhões de toneladas que são convertidas em energia. Ainda que possa parecer uma perda muito grande, a massa do Sol pode funcionar do mesmo modo durante bilhões de anos.

A energia produzida no interior seguirá um longo percurso até chegar à superfície do Sol.

Depois de emitida pelo Sol, essa energia propaga-se através do espaço a uma velocidade de 299 793 km/s sob a forma de radiação eletromagnética.

A radiação eletromagnética pode apresentar comprimentos de onda ou frequências que geralmente estão agrupadas em diferentes regiões como se mostra na figura 1.

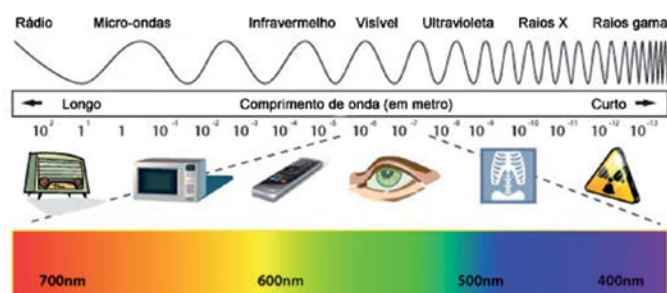


Fig. 1: O espectro electromagnético.

A frequência  $\nu$ , o comprimento de onda  $\lambda$  e a velocidade da luz  $c$  estão relacionadas entre si pela expressão:

$$c = \lambda \cdot \nu$$

Apesar do Sol ser uma fonte importante de muitos comprimentos de onda, iremos estudar a radiação solar usando o espectro visível. À exceção das frequências de rádio e pequenas bandas em infravermelho ou ultravioleta, os comprimentos de onda da luz visível são aquelas para as quais a nossa atmosfera é transparente e não precisamos de aparelhos sofisticados para as visualizar. Portanto, são as melhores para a experimentação em sala de aula.

## Polarização da Luz

Uma radiação eletromagnética perfeita e linearmente polarizada possui um perfil igual ao apresentado na figura 2.

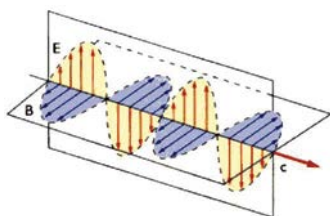


Fig. 2: Luz polarizada

A luz do Sol não possui nenhuma direção de vibração privilegiada, ainda que possa ser polarizada ao ser refletida sob um determinado ângulo ou quando passa por determinados filtros, denominados polarizadores.

A luz, ao passar por um desses filtros (figura 3), vibra apenas num plano. Se for inserido um segundo filtro, podem ocorrer duas coisas: quando os dois filtros têm orientações de polarização paralelas, a luz passa através deles (figura 4a); se estão perpendiculares, a luz que passa pelo primeiro filtro é bloqueada pelo segundo (figura 3) e os filtros escurecem (figura 4b).

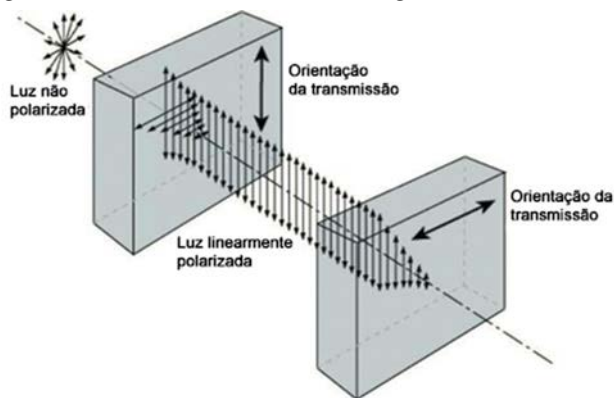


Fig. 3: Quando os dois filtros possuem uma orientação de transmissão perpendicular, a luz que passa no primeiro é bloqueada pelo segundo.



Fig. 4a: Se os filtros possuem a mesma orientação, a luz passa através deles.

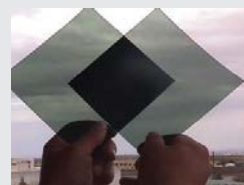


Fig. 4b: Se um dos filtros for girado 90°, a luz fica bloqueada.

Muitos óculos de sol possuem polarizadores para filtrar a luz refletida, abundante na neve ou no mar, e que costuma estar polarizada (figuras 5a e 5b). Os filtros polarizadores também são usados em fotografia para eliminar alguns reflexos e deixar o céu mais escuro.



Fig. 5a y 5b: Luz refletida, fotografada com e sem filtro polarizador.

## Atividade 1: Polarização da Luz

Para realizar esta atividade com filtros polarizadores, cortamos pela ponte do nariz as duas partes dos óculos 3D incolores (os óculos 3D verdes/vermelhos não servem para esta experiência). Podemos fazer a experiência das figuras 4a e 4b com ambos os filtros. Também é possível usar óculos de sol que sejam polarizados, ou óculos 3D, e orientá-los para verificar a polarização, sem ter que os quebrar em duas partes.

Muitos óculos de sol tem polarizadores para filtrar a luz e os ecrãs LCD de computadores e de televisão (não as de plasma) emitem luz polarizada. É possível comprovar estas factos olhando o ecrã de um computador portátil com óculos de sol polarizados e inclinar a cabeça: se possuírem polarizadores, num determinado ângulo observa-se o ecrã negro.

Quando a luz polarizada atravessa certos plásticos e vidros, a sua superfície gira um pouco no momento em que a luz vibra. Se forem observados com óculos de sol polarizados, irão ser observadas diferentes cores.

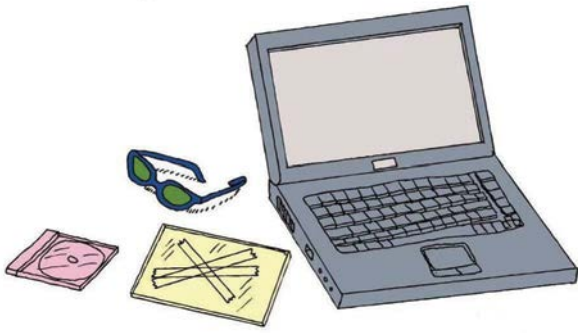


Fig. 6: A luz do ecrã TFT de um computador é polarizada, e a fita adesiva gira o ângulo de polarização. São observadas cores se for vista com óculos de sol polarizados.

Num vidro (pode ser de um moldura de fotos) colamos vários pedaços de fita adesiva, de tal forma que num dos locais tenha três camadas de fita uma em cima da outra, noutra parte duas e noutra apenas uma (figura 6). Numa televisão, ou computador com tela TFT, colocamos uma imagem que tenha a maior parte branca, por exemplo, um documento em branco de um processador de texto. Colocamos o vidro à frente do ecrã e olhamos através dos óculos de sol polarizados. Se giramos o vidro observaremos a fita adesiva de diferentes cores. No lugar do vidro podemos olhar o plástico transparente de uma caixa de CD. Observaremos os pontos onde há mais tensão concentrada. Se retorcermos levemente a caixa, veremos que as zonas de tensão mudam.

### A estrutura do Sol

O Sol possui uma estrutura que podemos dividir em cinco partes principais:

- 1) O núcleo e a zona de radiativa são os lugares onde se produzem as reações de fusão termonuclear. As temperaturas no interior do núcleo são de 15 milhões kelvin (K) e menor na zona radiativa, na ordem de 8 000 000 K. A transferência de energia acontece por radiação através da região perto do núcleo. Poderiam ser consideradas duas regiões diferentes (o núcleo e a zona radiativa), no entanto é muito difícil dizer onde termina um e onde começa a outra porque as suas funções estão misturadas.
- 2) A zona de convecção é onde a energia é transportada por convecção, com temperaturas inferiores a 500 000 K, entre os 0,3 raio do Sol e bem abaixo da fotosfera.
- 3) A fotosfera, que poderíamos considerar como a “superfície” do Sol, é a origem dos espectros de absorção e espectros contínuos. Possui temperaturas que vão desde 6 400 a 4 200 K. Está fragmentada em células

de aproximadamente 1 000 km de tamanho, que duram apenas algumas horas. Além disso, costuma ter algumas zonas mais frias (“somente” 4 200 K), vistas como manchas escuras.

4) A cromosfera é a parte exterior à fotosfera e possui uma temperatura de 4 200 a 1 milhão de K. Possui um aspeto de filamentos verticais que se assemelha a uma “planície ardente”. Há proeminências (protuberâncias) e erupções.

5) A coroa é a fonte do vento solar e possui temperaturas compreendidas entre um e dois milhões K.

### Actividade 2: Modelo simples das capas do Sol

Esta atividade pode ser realizada com crianças pequenas. O objetivo é recortar as diferentes figuras que aparecem a seguir (figuras 7 e 8). Podem ser recortadas de papéis de cores diferentes ou pintadas com as seguintes cores: coroa em branco, cromosfera em vermelho, fotosfera em amarelo, zona de convecção em laranja, zona radiativa em azul e o núcleo na cor grená.

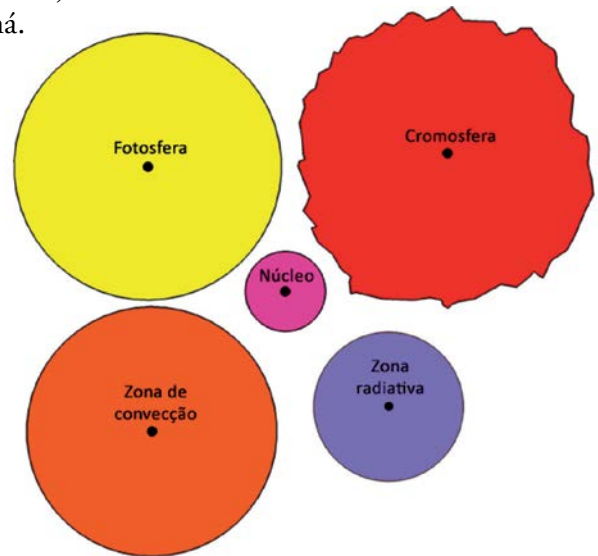


Fig 7: Partes do Sol, para recortar.

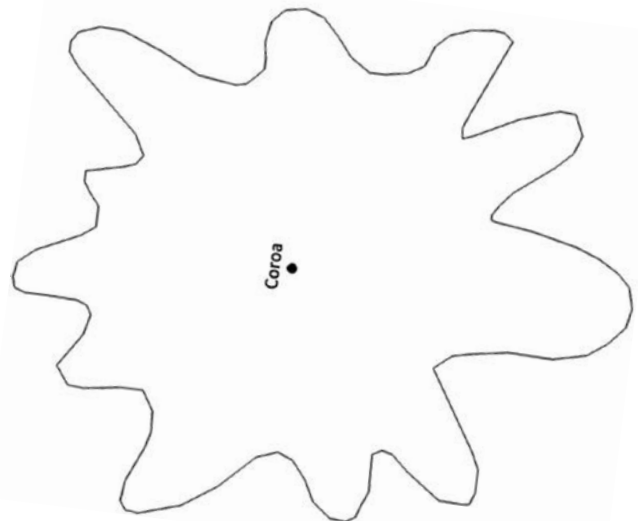


Fig 8: Coroa para recortar.

Finalmente é possível colar uma sobre outra, na ordem adequada (o tamanho de cada peça também indica essa ordem).

### Manchas solares

Na fotosfera observam-se com frequência manchas escuras, denominadas manchas solares. Tipicamente, uma mancha solar possui uma região central escura denominada umbra, rodeada por uma zona mais clara, ou penumbra, com filamentos claros e escuros que partem de forma aproximadamente radial da umbra.

Os filamentos da mancha solar estão rodeados por grânulos típicos da fotosfera (figura 9).



Com um pequeno telescópio as manchas parecem negras, no entanto isso é apenas um efeito de contraste. Se conseguisse observar uma mancha solar isolada ela seria mais brilhante que a Lua cheia. A diferença de intensidade das manchas acontece porque temperatura é 500 a 2 000 °C inferior à da fotosfera circundante. As manchas solares são o resultado da interação de fortes campos magnéticos verticais com a fotosfera.

Las manchas solares possuem uma importância histórica muito grande, pois permitiram a Galileu determinar o período de rotação do Sol e verificar que sua rotação era diferencial, isto é, que girava mais rápido no equador (período de rotação 25,05 dias) do que nos polos (período de rotação 34,3 dias).

### Actividade 3: Determinação do período de rotação do Sol

Outra experiência simples que pode ser realizado em sala de aula é medir o período de rotação solar utilizando as manchas solares. Nesta experiência é necessário realizar o acompanhamento das manchas solares durante vários dias com a finalidade de medir a sua rotação. As observações solares devem ser feitas sempre por projeção com um telescópio (figura 10a) ou binóculos (figura 10b). É necessário lembrar que nunca se deve olhar o Sol diretamente e muito menos com binóculos ou telescópios, já que podem produzir danos irreparáveis aos olhos.



Fig. 10a: Observação solar por projeção com um telescópio (nunca olhe diretamente o Sol).

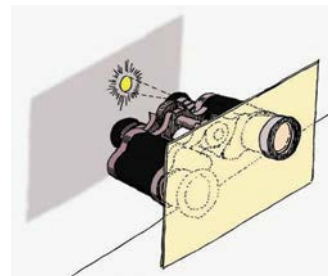


Fig. 10b: Observação por projeção com binóculos (nunca olhe diretamente o Sol).

Se fizermos a observação das manchas solares durante vários dias, o movimento de uma mancha será semelhante, por exemplo, ao descrito na figura 11.

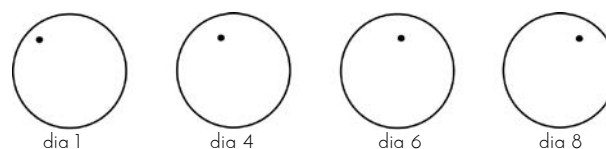


Fig. 11: Mudança de posição de uma mancha ao longo de vários dias.

Poderemos sobrepor as observações numa transparência, como é apresentado na figura 12. O período  $T$  pode então ser calculado simplesmente através de uma simples proporcionalidade

$$\frac{T}{t} = \frac{360^\circ}{\alpha}$$

Donde  $t$  indica o intervalo de tempo entre duas observações da mesma mancha,  $\alpha$  é o ângulo central entre a diferença das duas manchas consideradas (figura 12) e  $T$  es el período de rotación solar que se desea calcular. É o período de rotação solar que se quer calcular. Esta determinação oferece um bom nível de precisão.

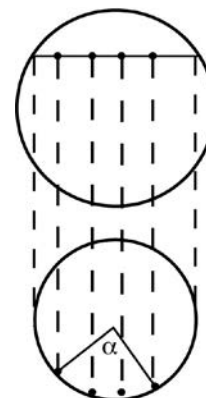


Fig. 12: Determinación de la rotación angular de las manchas solares.

Vejamos um exemplo real: a figura 13 é uma sobreposição de duas fotografias, tiradas no dia 12 de agosto de 1999 e no dia 19 desse mesmo mês. Desenhamos a circunferência que descreve a mancha, medimos o ângulo e resulta 92°. Portanto, a rotação solar será:

$$T = \frac{360^\circ \cdot 7 \text{ dias}}{92^\circ} = 27,3 \text{ dias}$$

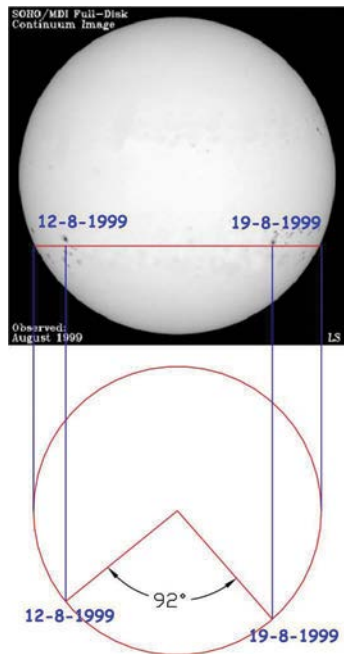


Fig. 13: Determinação do período de rotação solar.

## A Radiação emitida pelo Sol

O Sol é um grande reator nuclear, no qual uma enorme quantidade de energia é produzida de forma permanente e transportada até à superfície em forma de fótons. Os fótons são as partículas responsáveis pela radiação eletromagnética e o valor da energia por eles transportada pode ser calculado pela expressão:

$$E = h \cdot \nu$$

na qual  $E$  é a energia dos fótons,  $h$  é a constante de Planck ( $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ) e  $\nu$  é a frequência da radiação eletromagnética associada ao fóton. Os fótons gerados pelo Sol são os responsáveis pelo seu espectro.

A luminosidade total (ou potência) do Sol é enorme: a cada segundo emite mais de trilhões de bombas atômicas. Podemos imaginar a transmissão dessa energia através do espaço como a formação de uma bolha que aumenta cada vez mais com a distância. área dessa esfera é  $4\pi R^2$ . Se a potência do Sol é  $P$ , a energia que chega a um metro quadrado situado a uma distância é:

$$E = \frac{P}{4\pi R^2}$$

Por outras palavras: a energia é transmitida de forma inversamente proporcional ao quadrado da distância. E se soubermos a distância do objeto, podemos calcu-

lar sua potência total.

## Actividade 4: Determinação da luminosidade do Sol

A luminosidade, ou potência, do Sol é a energia emitida por segundo. E o Sol é, realmente, uma fonte luminosa muito potente. Vamos calcular a sua potência comparando-o com uma lâmpada de 100 W (figura 14)).

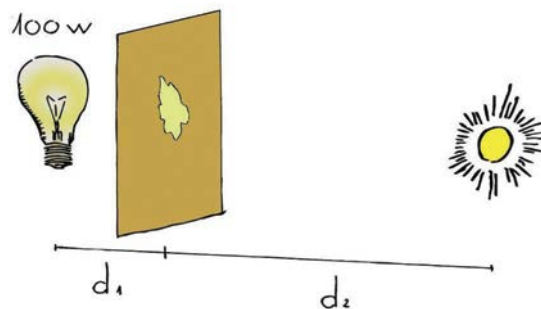


Fig. 14: Comparando a potência do Sol com uma lâmpada de 100 W.

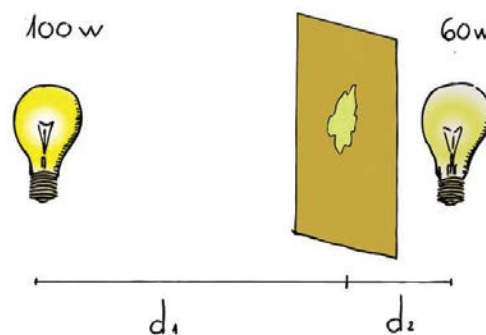


Fig. 15: Se a iluminação que chega a cada lado é a mesma, a mancha de azeite não é observável.

Vamos construir um fotómetro que permita comparar a luminosidade de duas fontes de luz. Para isso colocamos algumas gotas de azeite no meio de uma folha de papel de embrulho (também serve o papel branco normal). A mancha que é formada torna o papel um pouco transparente e isso será o nosso fotómetro. Ao colocá-lo entre duas fontes luminosas (figuras 14 a 16) é possível ajustar a distância para que a mancha não seja vista. Nessa situação foi igualada a iluminação nos dois lados do papel e a energia que chega a cada lado é a mesma.

Nesse caso:

$$\frac{100}{4 \cdot \pi \cdot d_1^2} = \frac{60}{4 \cdot \pi \cdot d_2^2}$$

Num dia ensolarado, colocamos o fotómetro ao ar livre com uma lâmpada de pelo menos 100 W (quanto mais, melhor). Colocamos o fotómetro entre o Sol e a lâmpada, a uma distância em que os dois lados do fotómetro apareçam igualmente brilhantes. Medimos

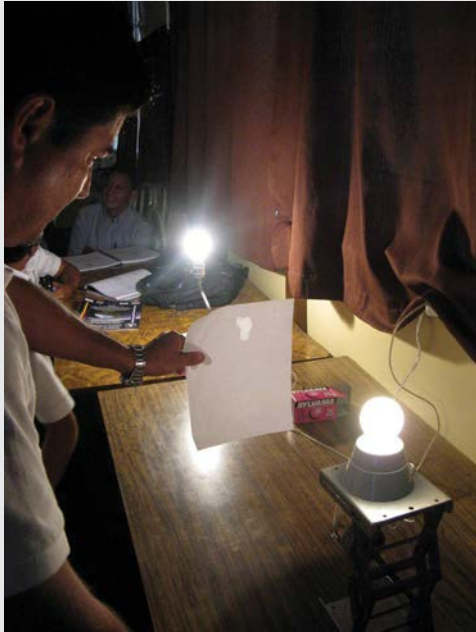


Fig. 16 Fotómetro de mancha de aceite, entre dos bombillas.

a distância  $d_1$ , em metros, do fotómetro ao filamento da lâmpada.

Sabendo que a distância do Sol à Terra é aproximadamente  $d_2 = 150\,000\,000\,000$  m, podemos calcular a potência do Sol  $P$  com a lei inversa de quadrados (no aparece el término de  $4\pi^2$  com a lei do inverso dos quadrados (não aparece o termo de porque estaria nos dois lados da igualdade):

$$\frac{100 \text{ W}}{d_1^2} = \frac{P_{\text{Sol}}}{d_2^2}$$

O resultado não deve diferir muito da luminosidade real do Sol, que é de  $3,83 \times 10^{26}$  W.

## Opacidade

A energia associada a um fóton de alta energia produzida no núcleo do Sol demora até 1 milhão de anos em chegar à fotosfera, já que nas partes mais interiores do Sol os fótons interagem com a matéria, extremamente densa nessas zonas. As interações entre os fótons e a matéria são produzidas num número no núcleo, diminuindo à medida que se aproxima da fotosfera. O resultado é um percurso em ziguezague (figura 17) que atrasa muito a saída desses fótons para o espaço.



Fig. 17: Os fótons demoram 1 milhão de anos a chegar à fotosfera.

Quando a radiação chega à fotosfera e, por consequência, à atmosfera do Sol, é irradiada para o exterior quase sem interações na maior parte dos comprimentos de onda, gerando o espectro contínuo que observamos da fotosfera. Isso ocorre porque o núcleo e o interior do Sol são opacos a todos os comprimentos de onda de radiação e sua atmosfera é transparente. Em astronomia os conceitos de opaco e transparente são um pouco diferentes do quotidiano.

Un gas puede ser transparente u opaco dependiendo solamente del hecho de si absorbe los fotones que lo cruzan o no. Por ejemplo, nuestra atmósfera es transparente a las longitudes de onda visibles. Sin embargo, en un día con niebla, no se verá mucho, por lo que será opaca.

Um gás pode ser transparente ou opaco dependendo de como absorve ou dispersa os fótons que o cruzam. Por exemplo, a nossa atmosfera é transparente aos comprimentos de onda visíveis. No entanto, num dia com nevoeiro, não conseguimos ver bem porque é opaca.

É necessário compreender que transparente não significa invisível. Uma chama de um isqueiro, ou vela, é transparente aos comprimentos de onda de um retro-projetor.

## Actividade 5: Transparência e opacidade

Os conceitos de transparência e opacidade podem ser demonstrados usando um isqueiro ou uma vela (o isqueiro é melhor que a vela, porque a vela produzirá fumo negro, pois a sua combustão é incompleta, e será visto a sair da chama da vela).

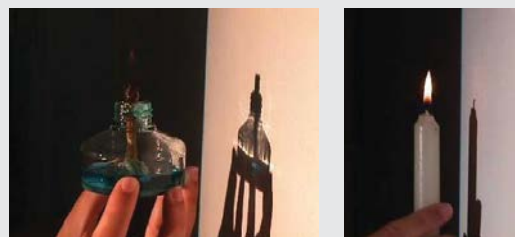


Fig. 18a e 18b: A chama de uma lâmpada de álcool ou de uma vela não produz sombra na parede. Observa-se que o vidro do isqueiro não é completamente transparente.

A demonstração é muito simples. Coloque objetos transparentes e opacos na luz de um retroprojektor projetado numa parede, ou tela, e pergunte se é transparente ou opaco. Nos objetos usuais a maioria das pessoas saberá responder em todos os casos.

A chama de uma vela, de um bico de Bunsen, ou um desses isqueiros que todos os fumadores usam também é transparente e é surpreendente para os alunos verificar que a chama não produz nenhuma sombra na parede (figuras 18a e 18b). É possível explicar que é semelhante à fotosfera do Sol, que é transparente a quase toda a radiação.

## Espectros

Em 1701, Newton usou um prisma e decompôs pela primeira vez a luz solar em cores. Pode-se decompor qualquer luz com um prisma ou com uma rede de difração, e o resultado obtido é o seu espectro. Os espectros podem ser explicados através das três leis que Gustav Kirchhoff e Robert Bunsen descobriram no século XIX. As três leis estão representadas na figura 19.

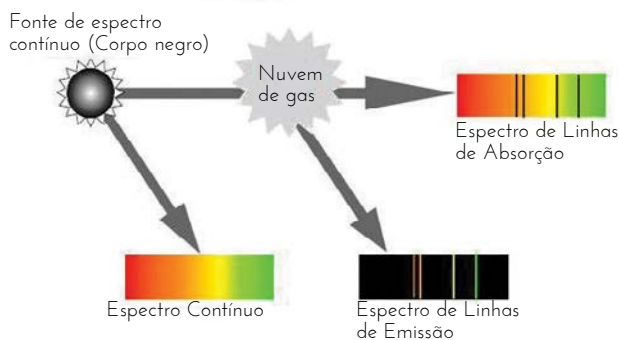


Fig. 19: Leis de Kirchhoff e Bunsen.

- 1ª Lei: Um objeto sólido incandescente produz luz com um espectro contínuo.
- 2ª Lei: Um gás tênue e quente produz luz com linhas espectrais em comprimentos de onda discretos que dependem da composição química do gás (espectro de emissão).
- 3ª Lei: Um objeto sólido incandescente rodeado por um gás a baixa pressão produz um espectro contínuo com intervalos em comprimentos de onda discretos cujas posições dependem da composição química do gás, e coincidem com a 2ª Lei (espectro de absorção).

As linhas de emissão do gás são produzidas pelas transições eletrônicas entre dois níveis de energia, que ocorrem quando os fótons interagem com a matéria. Como seria mais tarde explicado por Niels Bohr, a energia dos níveis nos átomos estão perfeitamente quantificados e as frequências emitidas são sempre as mesmas, pois a diferença de energia entre os níveis é constante (figura 20).

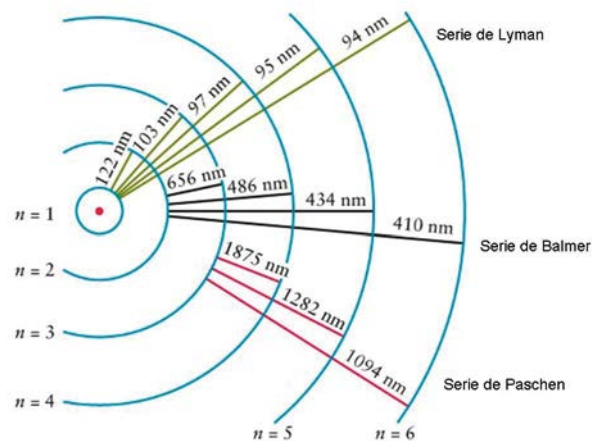


Fig. 20: Séries espectrais para a emissão do átomo de hidrogênio. As transições possíveis possuem sempre a mesma diferença de energia entre os níveis.

Um gás frio pode absorver a mesma energia que emite quando está quente. Por isso, se o gás for colocado entre uma fonte incandescente e um espectroscópio, o gás absorve as mesmas linhas do espectro contínuo da fonte de incandescência que o gás emite no momento em que está quente, gerando o seu espectro de absorção.

Este fenómeno acontece na atmosfera do Sol. Os elementos contidos no gás da atmosfera solar absorvem as frequências associadas às linhas espectrais desses elementos. Esse facto foi verificado por Joseph Fraunhofer em 1814, pelo que as linhas espectrais do Sol são denominadas linhas de Fraunhofer. As principais linhas de Fraunhofer são apresentadas na tabela seguinte, respeitando a designação original de Fraunhofer (1817) das letras para as linhas de absorção no espectro solar.

Letra	Comprimento de onda (nm)	Origem química	Faixa de Cor
A	759	O <sub>2</sub> atmosférico	vermelho escuro
B	687	O <sub>2</sub> atmosférico	vermelho
C	656	Hidrogénio <i>alpha</i>	vermelho
D1	590	Sódio neutro	vermelho alaranjado
D2	589	Sódio neutro	amarelo
E	527	Ferro neutro	verde
F	486	H <i>beta</i>	ciano
G	431	CH molecular	azul
H	397	Cálcio ionizado	violeta escuro
K	393	Cálcio ionizado	violeta escuro

Tabela 1: Linhas de Fraunhofer do Sol.

É importante perceber que analisando a luz que chega do Sol ou de uma estrela, podemos saber de que é constituída, sem necessidade de ir até lá. Hoje em dia os espectros são captados com instrumentos de alta re-

solução, detetando múltiplas linhas.

## Radiação de corpo negro

Quando um metal é suficientemente aquecido torna-se vermelho. Num lugar escuro, o corpo torna-se visível a uma temperatura de 400 °C. Se a temperatura continuar a aumentar, a cor do metal torna-se laranja, amarelo e inclusive chega a ser azulado após passar pela emissão de branco a uns 10 000 °C. Um corpo opaco, seja metálico ou não, irradia com essas características.

Quando um corpo negro (objeto ideal que não reflete o que vem de fora) é aquecido, emite uma radiação em muitos comprimentos de onda. Se medirmos a intensidade dessa radiação em cada comprimento de onda, pode ser construída uma curva denominada curva de Planck. Na figura 21 esta curva é apresentada para diferentes temperaturas do corpo negro. Possui um máximo numa determinada frequência, que nos dá a cor predominante. Esse está relacionado com a temperatura do corpo, segundo a Lei de Wien:

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T} \text{ (m)}$$

na qual  $T$  é a temperatura do corpo. Observe que devido a esta lei, através do estudo da radiação que nos chega de um objeto longínquo, podemos saber a que temperatura está sem a necessidade de ir lá e medir diretamente.

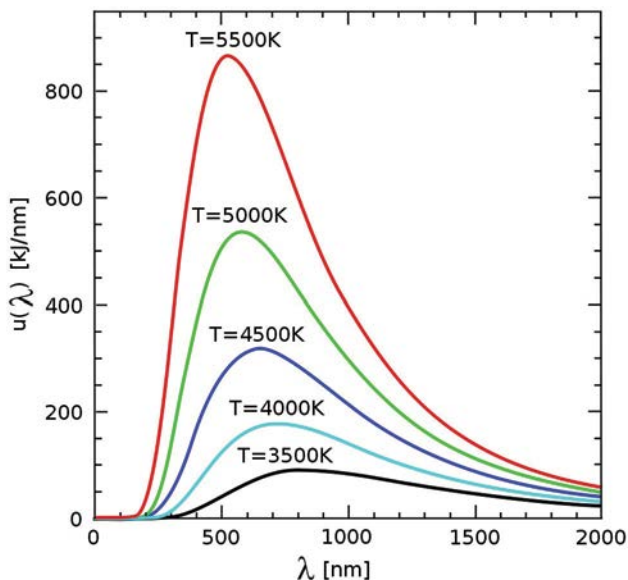


Fig. 21: Curvas de Planck de cuerpos negros a diferentes temperaturas.

Exemplos de objetos astronômicos opacos que podem ser denominados corpos negros são as estrelas (a exceção de sua atmosfera e coroa), os planetas, asteroides ou a radiação de fundo cósmico de micro-ondas.

A Lei de Wien é uma lei geral para a emissão térmica dos corpos opacos. Por exemplo, o ser humano irradia

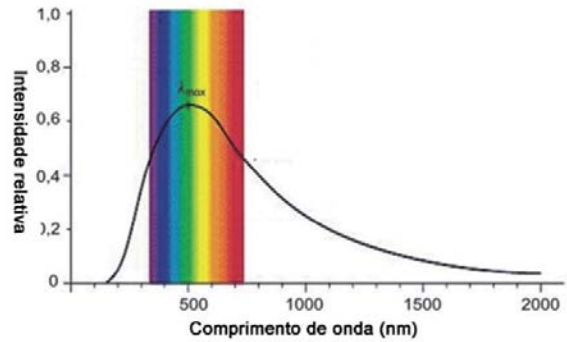


Fig. 22: Curva de emissão do "espectro contínuo" do Sol.

na região de infravermelhos com uma emissão máxima a um comprimento de onda de 9,4 μ, de acordo com a Lei de Wien (considerando uma temperatura de 37 °C (= 310 K)). Por isso os dispositivos de uso militar para observação noturna utilizam esses comprimentos de onda.

Voltando ao Sol, como a sua atmosfera é transparente, a radiação do corpo negro será determinada pela temperatura na fotosfera, onde o Sol passa a ser transparente (ao redor de 5 800 K) porque a sua radiação de corpo negro deve ter um máximo no comprimento de onda em torno dos 500 nm, como é apresentado na figura 22.

A nossa atmosfera absorve a radiação infravermelha e ultravioleta. Curiosamente, o olho humano evoluiu para ter uma visibilidade coerente com a parte visível da luz solar que chega à superfície da Terra.

## Dispersão da luz solar (*scattering*)

Quando um raio de luz branca atravessa um gás que contém partículas de tamanho maior que o comprimento de onda, a luz não se separa e todos os comprimentos de onda são dispersos. Isto acontece quando a luz do Sol atravessa uma nuvem que contém pequenas gotas de água: esta é vista como branca. O mesmo acontece quando a luz atravessa grãos de sal ou de açúcar.

Mas se a luz é dispersa por partículas de tamanho semelhante ao comprimento de onda (cores) de alguns fótons, estes são dispersos mas não o resto. É a chamada dispersão ou *scattering*.

Na atmosfera, a luz azul dispersa-se mais do que a luz vermelha, e os seus fótons chegam-nos de todas as direções. Isto faz com que vejamos o céu azul (figura 23) em vez de negro, como é visto no espaço. Ao entardecer, a luz atravessa mais atmosfera e contém menos luz



Fig. 23: A cor do céu depende da dispersão de Rayleigh.

azul pelo que se torna mais amarela. Nos pores-do-sol os fotões vermelhos também são dispersos.

Esta é a razão pela qual quando a luz passa através de grandes espessuras de gás (por exemplo, nebulosas) é vista vermelha (porque o azul vai se dispersar em todas as direções e somente o vermelho vai chegar com toda sua intensidade ao observador). Este fenómeno é conhecido como dispersão de Rayleigh.

### Actividade 6: Extinção e dispersão (scattering)

Esta experiência é feita com um retroprojektor, uma solução diluída de leite, um cartão preto e um copo alto. É necessário preparar uma solução de leite utilizando aproximadamente 1 gota de leite em 50 ml de água (esse é o ponto crucial, por isso recomendamos testar a concentração da solução antes da aula).



Fig. 24a: No início a luz que chega à parede é branca.



Fig. 24b: Com um pouco de solução, a luz que chega à parede passa a ser amarela.



Fig. 24c: Quando fica cheio, a luz na parede passa a ser vermelha.

Recorte um círculo no cartão preto com a forma e dimensão da base do copo. Coloque o copo vazio sobre a abertura e ligue o retroprojektor (figura 24a). A luz que chega à parede será branca.

Vamos enchendo o copo com a solução diluída de leite. A luz que chega à parede fica cada vez mais vermelha (figuras 24b e 24c). Pelos lados do copo sai uma luz branco-azulada.

.....

### Bibliografía:

Broman, L, Estalella, R, Ros, R.M. *Experimentos en Astronomía*. Editorial Alhambra Longman S.A., Madrid, 1993.

Costa, A, "Sunlight Spectra", *3rd EAAE Summer School Proceedings*, Ed. Rosa Ros, Briej, 1999.

Costa, A, "Simple Experiments with the Sun", *6th International Conference on Teaching Astronomy Proceedings*, Ed. Rosa Ros, Vilanova i la Geltrú, Barcelona, 1999.

Dale, A. O., Carrol, B. W, *Modern Stellar Astrophysics*, Addison-Wesley Publ. Comp., E.U.A, 1996.

Ferreira, M., Almeida, G, *Introdução à Astronomia e às Observações Astronómicas*, Plátano Ed. Téc., Lisboa, 1996.

Johnson,P.E., Canterna,R, *Laboratory Experiments For Astronomy*, Saunders College Publishing, Nova Iorque, 1987.

Lang,K.R, *Sun, Earth & Sky*, Springer-Verlag, Heidelberg, 1995.

Levy,D, *Skywatching-The Ultimate Guide to the Universe*, Harper Collins Publishers, London, 1995.

Moreno, R. *Experimentos para todas las edades*, Editorial Rialp, Madrid, 2008.

Rybicki,G.B., Lightman, A.P, *Radiative Processes in Astrophysics*,John Wiley & Sons, E.U.A, 1979.

Sousa, A.S, *Propriedades Físicas do Sol*, Ed. ASTRO, Porto, 2000.

Zeilik, M., Gregory, S.A., Smith, E.V.P, *Introductory Astronomy and Astrophysics*, 3rd Ed., Saunders College Publishing, Orlando, E.U.A, 1992.

### Fuentes Internet

NASA Polar Wind and Geotail Projects  
<http://www-istp.gsfc.nasa.gov>

Space & astronomy experiments  
<http://www.csiro.au/csiro/channel/pchdr.html>

The Sun  
<http://www.astromia.com/solar/sol.htm>

Nine planets  
<http://www.astrored.net/nueveplanetas/solarsystem/sol.html>



# Vida das estrelas

Alexandre Costa, Beatriz García, Ricardo Moreno,  
Rosa M Ros

União Astronómica Internacional, Escola Secundária de Loulé (Portugal), Universidade Tecnológica Nacional (Mendoza, Argentina), Colégio Retamar (Madrid, Espanha), Universidade Politécnica da Catalunha (Barcelona, Espanha).

## Resumo

Para compreender a vida das estrelas é necessário entender de que são constituídas, a que distância se encontram, como evoluem e quais as diferenças entre elas. Através de simples experiências é possível ensinar aos alunos os procedimentos que os cientistas realizaram para estudar a composição das estrelas e também construir alguns modelos simples.

## Objetivos

Esta oficina complementa a palestra geral da Evolução Estelar apresentando diferentes atividades e demonstrações centradas no conhecimento da evolução estelar. Os principais objetivos são:

- Entender a diferença entre a magnitude aparente e magnitude absoluta.
- Entender o diagrama de Hertzsprung-Russell fazendo um diagrama cor-magnitude.
- Compreender os conceitos de supernova, estrela de neutrões, pulsar e buraco negro.

## Actividade 1: Conceito de Paralaxe

A paralaxe é um conceito usado para calcular distâncias em astronomia. Vamos realizar uma atividade muito simples que nos permitirá entender o conceito. Colocamo-nos em frente a uma parede, a uma certa distância, em que hajam pontos de referência: armários, quadros, portas, etc. Esticamos o braço à nossa frente e estendemos o dedo polegar, verticalmente (figuras 1a e 1b).

Se fecharmos o olho direito veremos o dedo, por exemplo, sobre o centro de um quadro. Sem mover o dedo, abrimos o olho direito e fechamos o esquerdo. O dedo agora aparece deslocado sobre o fundo: já não coincide com o centro, mas sim com a borda do quadro.

Por esta razão, quando observamos o céu a partir de duas localizações afastadas, os corpos próximos, por

exemplo, a Lua, parece deslocada em relação às estrelas do fundo, que estão bem mais longe. O deslocamento é maior quanto mais separado estão os lugares de onde se recolhem as observações. Essa distância é denominada linha de base.



Fig. 1a: Com o braço estendido olhamos a posição do polegar em relação ao fundo, primeiro com o olho esquerdo (fechando o direito) e depois ao contrário. Fig. 1b: Observamos com o olho direito (com o esquerdo fechado).

## Cálculo de distâncias às estrelas por Paralaxe

Paralaxe é a mudança aparente na posição de um objeto quando é observado de diferentes posições. A posição de uma estrela próxima sobre o fundo bem mais longínquo parece mudar quando é vista de dois lugares diferentes. Desta forma podemos determinar a distância das estrelas próximas. Para que a paralaxe seja apreciável, é considerada como distância base a maior possível, que é o diâmetro da órbita terrestre em redor do Sol (figura 2).



Fig. 2: O ângulo de paralaxe é o ângulo verificado quando se observa uma estrela a partir de duas localizações à distância Terra-Sol uma da outra.

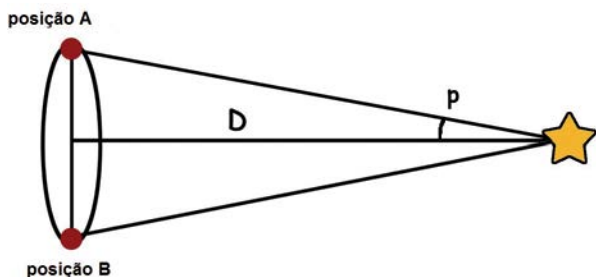


Fig. 3: Conhecido o ângulo  $p$ , é possível calcular a distância ao objeto.

Por exemplo, se observarmos uma estrela próxima relativamente ao fundo estrelado, de duas posições e da órbita terrestre (figura 3), separadas por seis meses, poderemos calcular a distância à que se encontra a estrela próxima, deduzindo:

$$\tan p = \frac{AB/2}{D}$$

Como  $p$  é um ângulo muito pequeno, a sua tangente pode ser aproximada ao ângulo medido em radianos:

$$D = \frac{AB/2}{p}$$

A base do triângulo  $AB/2$  é a distância Terra-Sol, ou seja, 150 milhões de km. Se soubermos o ângulo de paralaxe  $p$ , a distância até à estrela em quilómetros será  $D = 150\,000\,000/p$ , com o ângulo  $p$  expressado em radianos. Por exemplo, se o ângulo  $p$  é um segundo de arco, a distância da estrela será:

$$D = \frac{150000000}{2\pi/(360\,60\,60)} = 30939720937064 \text{ km} = 3,26 \text{ a.l.}$$

Esta é a unidade de distância usada em astronomia profissional. Se uma estrela for observada com uma paralaxe de um segundo de arco, dir-se-á que está a 1 parsec (pc), que equivale a  $1 \text{ pc} = 3,26$  anos-luz. Quanto menor for a paralaxe, maior é a distância da estrela. A relação entre distância (em pc) e paralaxe (em segundos de arco) é:

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

A simplicidade desta expressão é a razão pela qual se usa tanto. Por exemplo, a estrela mais próxima é Próxima Centauri, possui uma paralaxe de  $0,76''$  pois está a uma distância de 1,31 pc, o que equivale a 4,28 a.l. A primeira observação de paralaxe de uma estrela (61 Cygni) foi realizada por Bessel em 1838. Mesmo que se suspeitasse da distância longínqua das estrelas, até aquela ocasião não foi possível medir com precisão apropriada a distância das estrelas.

Atualmente, a paralaxe é usada para medir distâncias de estrelas que distam até uns 300 anos-luz. Além dessa distância, a paralaxe é desprezável, pelo que é necessário usar outros métodos que se baseiam, geralmente, na comparação de estrelas longínquas com outras, cuja distância é conhecida por paralaxe. A paralaxe fornece a base para outras medidas de distância em astronomia, uma escada de distância cósmica. Portanto, o conceito de paralaxe é a base desta escada.

## Actividade 2: Lei da inversa do quadrado

uma simples experiência pode ser útil para compreender a relação entre a luminosidade, o brilho e a distância a que se encontra uma fonte luminosa. Desta forma será possível compreender que a magnitude aparente é uma função da distância. Como demonstrado no diagrama da figura 4, utilizará uma lâmpada e uma cartolina (ou caixa) com uma abertura quadrada num dos lados da lâmpada. A luz da lâmpada é irradiada em todas as direções. Uma certa quantidade de luz passa através da abertura e incide numa tela móvel colocada paralelamente à cartolina. A tela deverá ter desenhados quadrados do mesmo tamanho que o buraco na cartolina. A quantidade total de luz que passa através da abertura na cartolina, e que chega à tela, não depende da distância entre a cartolina e a tela. Porém, quando colocamos a tela mais longe, esta quantidade fixa de luz irá cobrir uma área maior, e conseqüentemente o brilho sobre a tela diminui. Para simular uma fonte pontual, e diminuir as sombras nas margens do quadrado de luz, pode-se utilizar uma terceira cartolina com um buraco, bem próxima da lâmpada (não é possível usá-la por muito tempo, pois pode queimar).

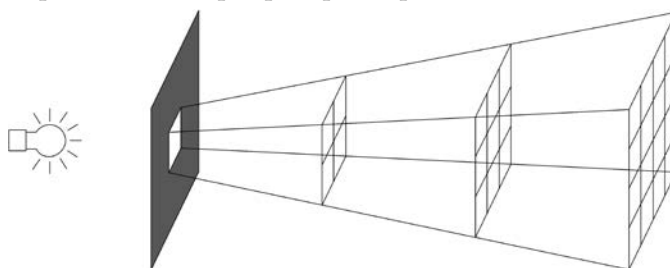


Fig. 4: Fundamento da experiência.

Observamos que, quando a distância passa a ser o dobro, a área sobre a qual incide luz passa a ser quatro vezes maior, logo a intensidade luminosa (a luz que chega por unidade de área) passará a ser um quarto. Se a distância triplicar, a área sobre a qual incide a luz passa a ser nove vezes maior, logo a intensidade luminosa passará a ser um nono. Desta forma, é fácil afirmar que a intensidade é inversamente proporcional ao quadrado da distância à fonte, ou seja, é inversamente proporcional à área total que a radiação atravessa, que é uma esfera de área  $4\pi D^2$ .

## O sistema de magnitudes

Imaginemos que uma estrela é como uma lâmpada acesa. O brilho que vemos depende da sua luminosidade e da distância de onde a vemos. Isto é possível de comprovar colocando uma folha de papel em frente à lâmpada: a quantidade de luz que chega dependerá da potência da lâmpada e da distância da folha até a lâmpada. A luz da lâmpada repartir-se-á pela superfície de uma esfera, cuja área é  $4\pi R^2$ , em que  $R$  a distância ente os dois objetos. Por isso, se duplicarmos a distância (figura 5), a intensidade com que chega não é a metade, mas a quarta parte (a área da esfera pela qual a luz é repartida é quatro vezes maior). E se a distância for triplicada, a intensidade com a que chega ao papel é a nona parte (a área da esfera pela qual a luz é repartida é nove vezes maior).

O brilho de uma estrela pode ser definido como a intensidade (ou fluxo) de energia que chega a uma área de um metro quadrado situado na Terra (figura 5). Se a luminosidade (ou potência) da estrela é  $L$ , então:

$$B = F = \frac{L}{4\pi D^2}$$

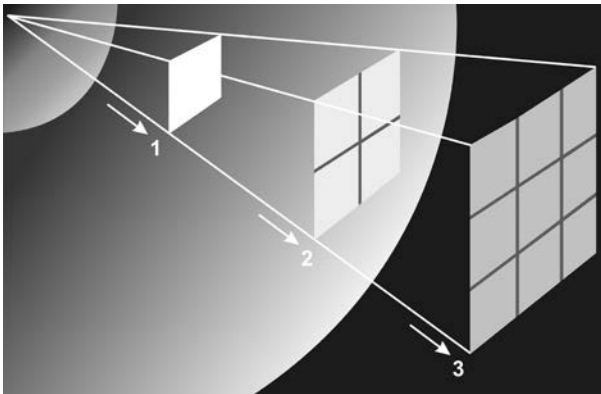


Fig. 5: A luz chega com menos intensidade quanto mais afastado estiver da fonte.

Como o brilho depende da luminosidade e da distância à estrela, podemos observar com o mesmo brilho uma estrela pequena e próxima e outra mais luminosa e longínqua.

Hiparco de Samos, no século II a.C., criou o primeiro catálogo de estrelas. Classificou as mais brilhantes como de 1ª magnitude e as mais fracas, de 6ª magnitude. Inventou um sistema de divisão de brilhos das estrelas que ainda está vigente, embora levemente aperfeiçoado com medidas mais precisas que as tidas a olho nu.

Uma estrela de magnitude 2 é mais brilhante que uma de magnitude 3. Há inclusive estrelas de magnitude 0 e de magnitude negativa, como Sírio, que possui

magnitude -1,5. Prolongando a escala, Vénus chega a adquirir magnitude -4, a Lua cheia -13, e o Sol -26,8.

Esses valores são denominados magnitudes aparentes  $m$ , já que medem o brilho que aparentam as estrelas vistas da Terra. Esta escala usa a regra de que uma estrela de magnitude 1 é 2,51 vezes mais brilhante que outra de magnitude 2, e esta 2,51 ( $\sqrt[5]{100}$ ) vezes mais brilhante que uma outra de magnitude 3, etc. sta significa que uma diferença de 5 magnitudes entre duas estrelas é equivalente a  $2,51^5 = 100$  vezes mais brilho. Esta relação matemática pode ser expressa como:

$$\frac{B_1}{B_2} = (2,51)^{m_2 - m_1} \text{ ou a equivalente } m_2 - m_1 = 2,5 \log \frac{B_1}{B_2}$$

A magnitude aparente  $m$  de uma estrela é uma medida relacionada com o fluxo  $F$  de luz (mensurável com um fotómetro e equivalente ao brilho  $B$ ) que chega aos telescópios de uma estrela e de uma constante (que depende das unidades de fluxo e da banda de observação  $C$ ):

$$m = -2,5 \log F + C$$

A expressão anterior permite verificar que quanto maior for o fluxo, mais negativa será a magnitude. A magnitude absoluta  $M$ : é a magnitude aparente  $m$  que teria um objeto teria se estivesse a uma distância de 10 parsecs.

Para converter a magnitude aparente em magnitude absoluta é necessário conhecer a distância exata à estrela. Muitas das vezes isto é um problema, pois determinar as distâncias em astronomia costuma ser difícil. Mas, se for conhecida a distância à estrela em parsecs ( $d$ ) é conhecida, a magnitude absoluta ( $M$ ) da estrela pode ser calculada através da equação:

$$M = m - 5 \log d + 5$$

## As cores das estrelas

É um facto que as estrelas apresentam diversas cores. A olho nu distinguem-se variações entre elas, mas as diferenças entre cores são mais evidentes quando as estrelas são observadas com binóculos ou fotografadas. As estrelas são classificadas de acordo com a sua cor, classificação da sua classe espectral, e são denominadas como: O, B, A, F, G, K, M. (figura 6).



Fig. 6: Tipos espectrais de estrelas conforme as cores.

De acordo com a Lei de Wien (figura 7), ao analisar a luz que chega de uma estrela, o máximo da intensidade da emissão é mais azul quanto maior for a temperatura, e mais vermelha quanto mais fria. Dito de outra forma, a cor da estrela indica-nos a temperatura da estrela à sua superfície.

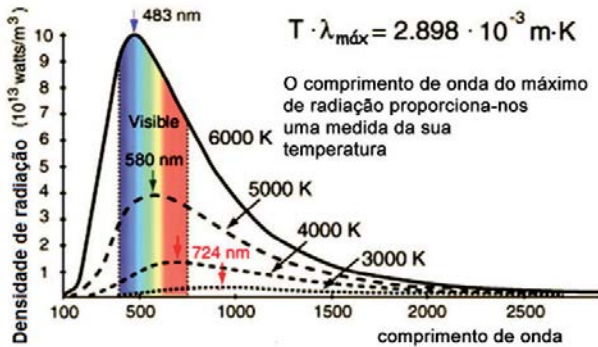


Fig. 7: Quando a temperatura da estrela aumenta, o máximo de intensidade desloca-se do vermelho para o azul.

### Actividade 3: Cores das estrelas

Primeiro, irá usar um simples lâmpada de incandescência com uma resistência variável para ilustrar a radiação de um corpo negro. Colocando filtros coloridos entre a lâmpada e o espectroscópio, os estudantes podem examinar o comprimento de onda da luz transmitida através do filtro. Por comparação com o espectro da lâmpada, os estudantes podem demonstrar que os filtros absorvem determinados comprimentos de onda.

Depois, os estudantes podem usar um aparelho semelhante ao apresentado na figura 8a, que contém uma lâmpada azul, uma vermelha e uma verde, equipadas com potenciômetros, para compreender a cor das estrelas. Este instrumento pode ser construído com lâmpadas, onde os tubos são feitos de cartão preto, e a abertura oposta da lâmpada coberta com folhas de celofane colorido. Usando este aparelho podemos analisar a figura 7 e tentar reproduzir o efeito da temperatura estelar. A baixa temperatura a estrela emite luz vermelha em quantidade significativa.

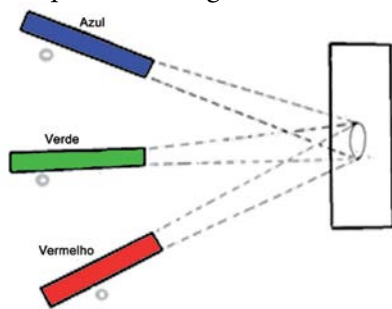


Fig. 8a: Esquema do aparelho para explicar a cor das estrelas.

Se a temperatura aumentar também haverá emissão de comprimentos de ondas que passam pelo filtro verde. À medida que esta contribuição se torna mais impor-

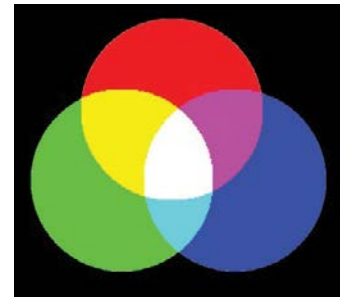


Fig. 8b: Aspecto da projeção para explicar a luz de cor branca.

tante a cor da estrela passará pelo laranja e o amarelo. À medida que a temperatura aumenta os comprimentos de onda que passam pelo filtro azul tornam-se importantes e, devido a isso, a cor da estrela torna-se branca. Se a intensidade dos comprimentos de onda azul continuar a crescer e ficar significativamente maior do que a intensidade dos comprimentos de onda que passam nos filtros vermelho e verde, a estrela torna-se azul. Para demonstrar esse último passo será necessário reduzir a intensidade das lâmpadas vermelha e verde se usou a intensidade máxima para produzir o branco.

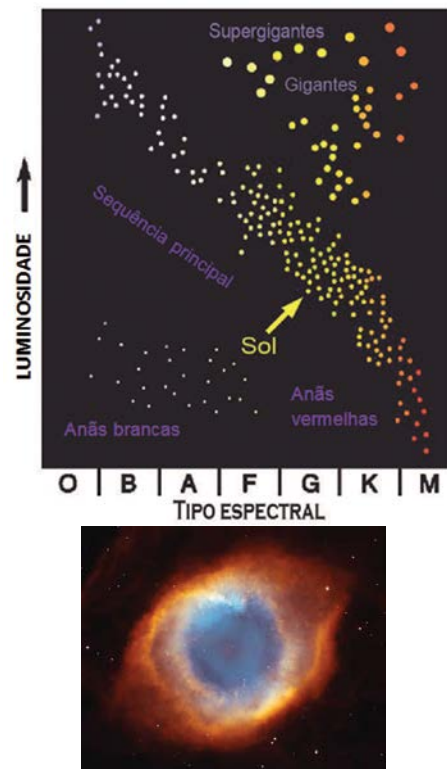


Fig. 9a: Diagrama H-R. Fig. 9b: O Sol expulsará a sua camada externa e converter-se-á numa anã branca, como a que está no centro desta nebulosa.

### Como sabemos que as estrelas evoluem?

As estrelas podem ser agrupadas num diagrama de Hertzsprung-Russell (figura 9a) que relaciona a intensidade das estrelas (luminosidade ou magnitude absoluta) em função da temperatura, ou cor, das estrelas. As estrelas frias terão pouca luminosidade (em baixo à direita, no diagrama) e as muito quentes terão alta luminosidade (em cima à esquerda, no diagrama). Esta

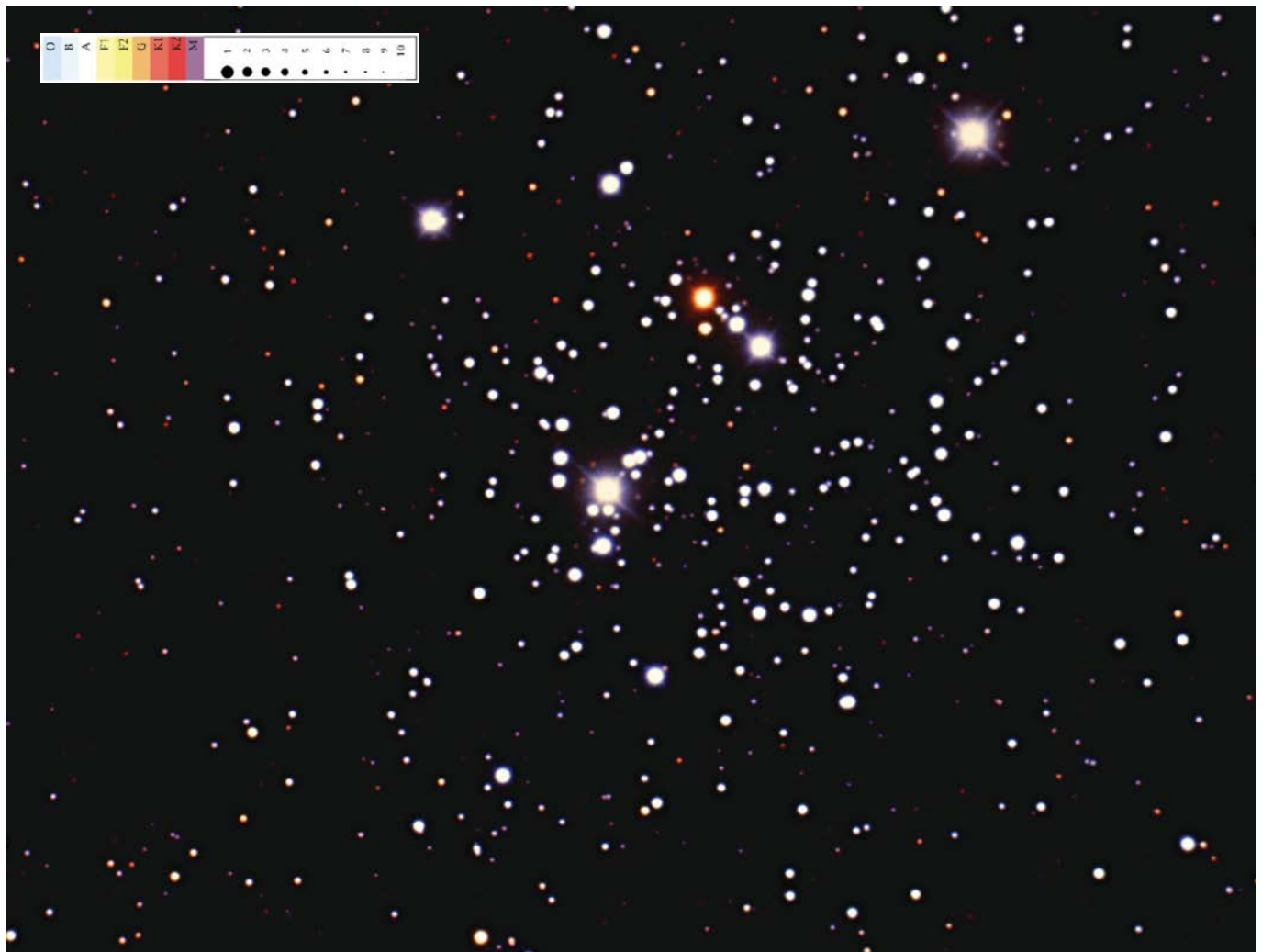


Fig. 10: Imagem da Caixa de Joias.

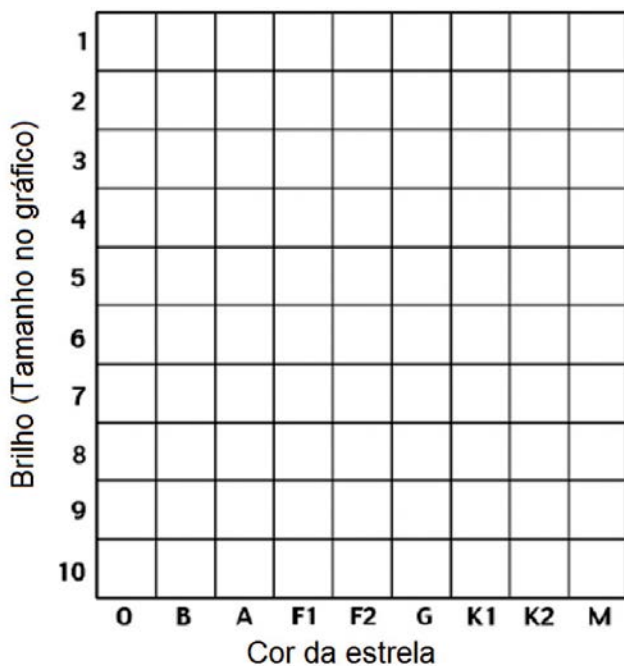


Fig. 11: Folha de Trabalho.

distribuição de estrelas forma uma sequência de estrelas desde as de baixa temperatura (baixa luminosidade) até às de alta temperatura (alta luminosidade), e é conhecida como Sequência Principal. Algumas estrelas afastam-se da Sequência Principal. Estrelas muito quentes mas com baixa luminosidade são anãs brancas. Estrelas de baixa temperatura e alta luminosidade são conhecidas por supergigantes.

Com o tempo, uma estrela pode evoluir e “movimentar-se” no diagrama H-R. Por exemplo, o Sol (no centro), no final da sua vida aumentará de tamanho e passará a ser uma gigante vermelha. Depois ejetará a camada externa e converter-se-á numa anã branca, como a da figura 9b.

#### Atividade 4: A idade dos cúmulos abertos

Examine a fotografia da figura 10, da Caixa de Joias, ou Kappa Crucis, na constelação Cruzeiro do Sul.

É evidente que as estrelas não são todas da mesma cor. Também é difícil decidir onde acaba o aglomerado de estrelas. Sobre a figura 10, marque o lugar onde acha que o aglomerado termina, ou onde está o seu limite.

Na mesma figura 10, indique com um “X” o lugar onde acha que se encontra o centro do aglomerado estelar e utilize uma régua para medir e desenhar um quadrado de 4 cm de lado em torno desse centro. Meça o brilho da estrela mais próxima do canto superior esquerdo do seu quadrado, a partir da comparação com a guia na margem da figura 10. Estime a cor da estrela com a ajuda da guia de cores de comparação localizada na margem da figura 10. Marque esta estrela, desenhando um ponto no quadriculado da figura 11.

Note que a cor é na abscissa e que o brilho (tamanho) é na ordenada. Após marca a primeira estrela, proceda de modo a medir e marcar, cor e brilho (tamanho) de todas as estrelas dentro do quadrado de 4 cm.

As estrelas da Caixa de Joias deverão aparentar um certo padrão no gráfico criado na figura 11. Na imagem da figura 10, aparecem estrelas que se encontram à frente e atrás do aglomerado aberto mas não fazem parte dele. Os astrónomos denominam essas estrelas como “estrelas de campo”. Caso tenha tempo estime quantas estrelas de campo foram incluídas no quadrado de 4 cm de lado e avalie a sua cor e o seu brilho. Para fazer isto, localize as estrelas de campo no diagrama cor-magnitude, indicando-as com um x minúsculo, em vez de um ponto. Observe que as estrelas de campo distribuem-se no gráfico de forma aleatória, não parecendo formar nenhum padrão.

A maioria das estrelas está distribuída num faixa do gráfico que vai do canto superior esquerdo atoe ao canto inferior direito. As estrelas menos massivas são mais frias e são vermelhas. As estrelas mais massivas são quentes, azuis, e brilhantes. Esta “banda” formada pelas estrelas denomina-se Sequência Principal. Estas estrelas são classificadas de O (as mais brilhantes, mais

massivas e de maior temperatura: aproximadamente 40 000 K) a M (as menos brilhantes, de pouca massa e baixíssima temperatura: aproximadamente 3 500 K).

Durante a maior parte da vida de uma estrela, as mesmas forças internas que produzem energia da estrela também a impedem de colapsar sobre si mesmo. Quando o combustível da estrela acaba, este equilíbrio acaba e as imensas forças de atração gravitacional da estrela causa o seu colapso e morte.

A transição de uma estrela entre a sequência principal e o colapso é uma parte de seu ciclo denominado “gigante vermelha”. As gigantes vermelhas são brilhantes porque possuem um diâmetro entre 10 e mais de 300 vezes maiores que o Sol. São vistas como vermelhas porque a sua temperatura à superfície é baixa. No diagrama são classificadas como estrelas K ou M mas são muito brilhantes. As estrelas mais massivas esgotam o seu combustível muito rapidamente e são as primeiras que abandonam a sequência principal para se transformar em gigantes vermelhas. Devido à sua enorme dimensão, que pode ser mais do que 1 000 vezes a dimensão do diâmetro do Sol, as gigantes vermelhas das estrelas com massas compreendidas entre 10 e 50 massas solares são conhecidas como “supergigantes vermelhas” (hipergigantes vermelhas no caso das que tiveram origem numa estrela de classe O). As gigantes vermelhas expandem-se e arrefecem, tornando-se brilhantes e vermelhas e, por isso, estão localizadas na região superior direita do diagrama. À medida que o aglomerado envelhece, uma maior quantidade de estrelas abandonará a sequência principal para se transformar em gigantes vermelhas. Os astrónomos afirmam que a idade do cúmulo pode ser determinada pela cor da estrela mais brilhante, a mais massiva, que ainda permanece na sequência principal.

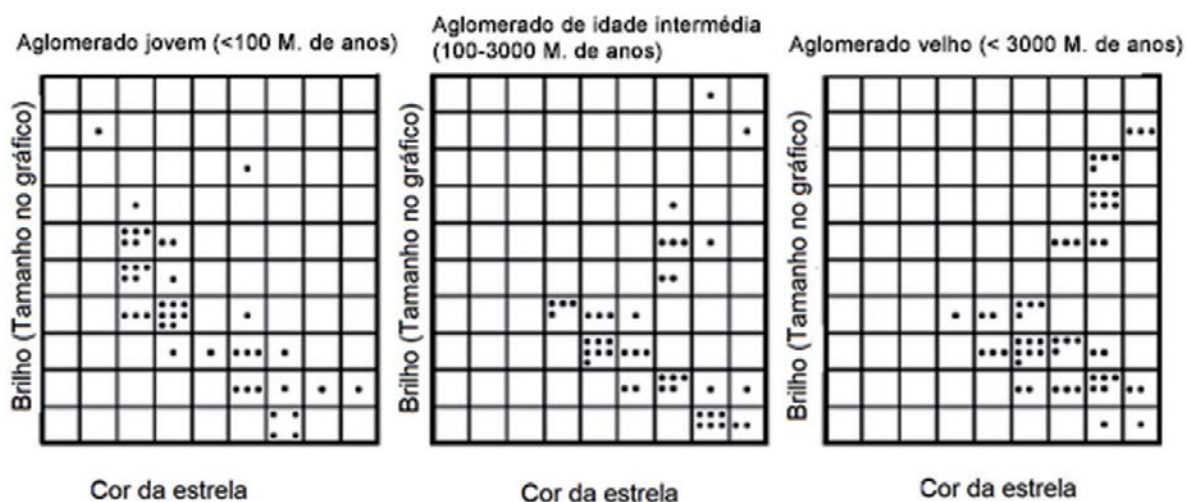


Fig. 12a, 12b y 12c: Diagramas H-R de aglomerados de referência.

Muitas estrelas de aglomerados velhos evoluíram do estado de gigantes vermelhas para outro, tornando-se anãs brancas. As anãs brancas são muito pequenas, aproximadamente do tamanho da Terra. Também são pouco brilhantes e por isso não é possível vê-las nesta imagem da Caixa de Joias.

Será possível estimar a idade do aglomerado aberto Caixa de Joias (figura 10) por comparação do gráfico 11 com gráficos de aglomerados de diferentes idades, representados nas figuras 12a, 12b e 12c?

Conhecendo o diagrama H-R e a relação entre a cor (temperatura superficial), o brilho (ou luminosidade) das estrelas e a idade das estrelas, é possível explicar a evolução dos aglomerados. Pode-se comparar as vidas relativas das estrelas O/B com as A/F/G e as K/M. Pode-se observar que estrelas com a mesma massa evoluem da mesma forma, mesmo em diferentes aglomerados. Desta forma é possível observar a idade de diferentes aglomerados usando o diagrama H-R. Por isso pode-se afirmar que a figura 12a é de um aglomerado jovem (há estrelas O e B na sequência principal e sabemos que estas estrelas evoluem rapidamente para supergigantes vermelhas), e que a figura 12c corresponde a um aglomerado velho (com estrelas K e M na sequência principal e muitas estrelas gigantes vermelhas).

Poderíamos perguntar: Qual seria o lugar que corresponderia ao Sol no diagrama Hertzsprung-Russell? O Sol é uma estrela com temperatura superficial de 5 870 K e, por isso, amarela. Corresponde à classe tipo

G2 (abscissas). Encontra-se na sequência principal, no qual o hidrogénio é fundido, no seu núcleo, para se transformar em hélio. Isto coloca-o na classe de luminosidade V, com muitas outras estrelas da sequência principal.

### Morte das estrelas

O final de uma estrela depende da massa da nebulosa inicial, como pode ser observado na figura 13:

Num determinado momento da evolução dos aglomerados estelares, as estrelas de maior massa desaparecem do diagrama de Hertzsprung-Russell. Enquanto as menos massivas vão evoluir para anãs brancas, as maiores vão dar origem a um dos mais violentos fenômenos do Universo: uma supernova. Os resíduos que sobram destes fenômenos não possuem emissão térmica (pulsares e buracos negros) e por isso não são visíveis no diagrama de Hertzsprung Russell.

### O que é uma supernova??

É a morte de uma estrela muito massiva. A sequência principal de uma estrela é caracterizada pela fusão do hidrogénio para produzir hélio, passando depois à produção de carbono e elementos cada vez mais pesados. O produto final é o ferro. A fusão do ferro não é possível porque esta reação requer energia, ao contrário de a produzir.

A fusão de diferentes elementos prossegue até que os reagentes se esgotem. Estas fusões ocorrem fora do núcleo pelo que, passado algum tempo, a estrela adquire uma estrutura em capas, chamada estrutura de cebola

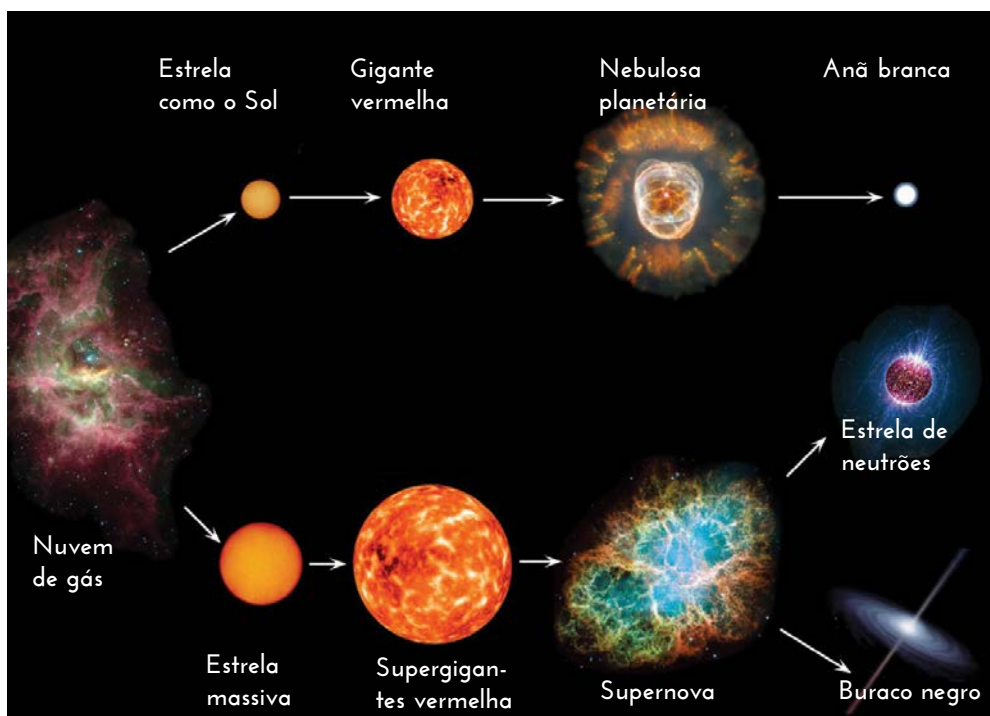


Fig 13: Evolução das estrelas conforme sua massa.



Fig. 14a: Restos de uma supernova.

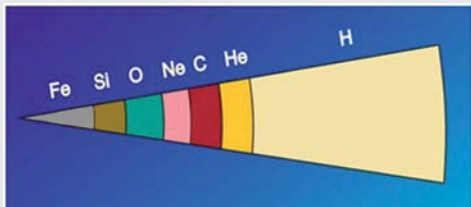


Fig. 14b: Estrutura em camadas do interior de uma estrela antes de explodir como uma supernova.

(figura 14b), com elementos mais pesados nas camadas mais próximas do núcleo.

Uma estrela de 20 massas solares apresenta as seguintes fases:

- 10 milhões de anos a queimar hidrogênio no seu núcleo (sequência principal);
- 1 milhão de anos a queimar hélio;
- 300 anos a queimar carbono;
- 200 dias a queimar oxigênio;
- 2 dias a consumir silício: a explosão da supernova é iminente

Quando, finalmente, a estrela tem um núcleo de ferro, não são possíveis mais reações nucleares. Sem a pressão de radiação da fusão para equilibrar a gravidade, o colapso da estrela é inevitável, sem a possibilidade mais ignições nucleares. Durante o colapso, os núcleos atômicos e os elétrons agrupam-se formando neutrões e a parte central do núcleo torna-se uma estrela de neutrões.

As estrelas de neutrões são tão densas que um colher de chá pesaria tanto como todos os edifícios de uma grande cidade. À medida que os neutrões são compactados mais nenhuma contração ocorre. A queda de partículas a partir das camadas mais exteriores da estrela, a velocidades da ordem da quarta parte da velocidade da luz, atingem o núcleo e são subitamente paradas. Isto causa um ressalto, produzindo uma onda de choque que é um dos processos mais energéticos que são conhecidos no Universo (figura 14a): uma só estrela em explosão pode brilhar mais que uma galáxia inteira, composta por bilhões de estrelas.

Durante este ressalto as energias são tão grandes que alguns elementos mais pesados que o ferro são criados (como o chumbo, o ouro, o urânio, etc.). Estes elemen-

tos emergem violentamente durante a explosão e são ejetados juntamente com todo o material da estrela. No centro do material ejetado permanece uma estrela de neutrões girando a grande velocidade ou, se a estrela era suficientemente massiva, um buraco negro.

### Actividade 5: Simulação da explosão de uma supernova

Quando uma estrela explode como supernova, os átomos leves das camadas exteriores caem em direção aos átomos mais pesados do interior e, finalmente, ressaltam no núcleo central maciço.

Um modelo simplificado para o ressalto dos átomos pesados contra o núcleo maciço, e o destes contra os mais leves que surgem por trás, caindo das camadas superficiais dessa gigantesca cebola (figura 14b), pode ser representado de forma fácil, e um tanto espetacular, com uma bola de basquete e uma bola de ténis, deixando-as cair juntos sobre um terreno duro (figura 15). Neste modelo, o solo representa o núcleo maciço da estrela de neutrões, a bola de basquete seria um átomo pesado que ressalta do núcleo e empurra o átomo leve que vem por trás, representado pela bola de ténis.



Fig. 15: Deixamos cair ao mesmo tempo uma bola de basquete e uma de ténis.

Para realizar o modelo, coloque a bola de basquete à altura dos olhos e sobre ela a bola de ténis, o mais vertical possível. Largue as duas ao mesmo tempo. Pode prever que a altura de ressalto seja igual à altura de partida, ou até menor, devido à fricção e à energia dissipada para o chão. No entanto, o resultado é bem diferente.

Ao largar as duas bolas, elas chegam quase ao mesmo tempo ao solo. A bola grande ressalta elasticamente e retrocede praticamente com a mesma velocidade com que chegou. Nesse momento choca com a pequena bola de ténis, que desce com a mesma velocidade com a que a bola de basquete sobe e a pequena sai disparada com grande velocidade para acima, atingindo uma altura muito mais alta do que a que foi largada. Se esta experiência for repetida usando um maior número de

bolas, ou bolas mais leves, as velocidades de ressalto serão fantásticas.

No modelo apresentado, a bola pequena chega a ultrapassar o dobro da altura inicial de queda das duas. De fato, é necessário ter cuidado para que não quebre nada, no caso de realizar a experiência dentro de um edifício.

Esta experiência pode ser realizada em sala ou em outro lugar fechado, ainda que seja preferível fazê-la ao ar livre. Pode ser realizado de uma janela alta, mas é difícil que as bolas caiam perfeitamente verticais e podem ressaltar com grande força em direções imprevisíveis.

Em algumas lojas de brinquedos, ou lojas de Museus de Ciência, são vendidos brinquedos conhecidos como “Astro Blaster”, baseados no mesmo princípio. Consiste em quatro pequenas bolas de borracha, de diferentes tamanhos, unidos por um eixo. A bola menor sai disparada depois do sistema atingir o solo.

### O que é uma estrela de neutrões?

Uma estrela de neutrões é o que resta de uma estrela muito massiva que colapsou e que lançou as suas camadas numa explosão de supernova. As estrelas de neutrões não são, normalmente, maiores que algumas dezenas de quilómetros. Como o próprio nome indica, consistem num aglomerado de neutrões empilhados com uma densidade incrível: um simples dedal desta matéria pesaria milhões de toneladas.

Uma estrela de neutrões é formada se a supernova tiver entre 1,44 e 8 massas solares.

### O que é um pulsar?

Um pulsar é uma estrela de neutrões que gira com extraordinária rapidez (figura 16). Quando uma estrela massiva colapsa, as camadas exteriores caem na direção do núcleo e começa a girar devido à conservação do momento angular. É semelhante ao acelerar da velocidade de rotação de um patinador quando este recolhe os braços.

O campo magnético da estrela cria fortes emissões eletromagnéticas na direção do seu eixo. Mas como o eixo do campo magnético não costuma coincidir com o eixo de rotação (tal como o que acontece na Terra), esta emissão gira como um gigantesco farol cósmico. Se o jato de emissão está direcionada para a Terra, detetamos pulsações a um ritmo muito regular.

Em 1967, Hewish e Bell descobriram o primeiro pulsar, Os pulsos provinham de ponto no espaço onde não se observava nada em luz visível. A rápida repetição de pulsos era impressionante – várias vezes por



Fig. 16: Um pulsar é uma estrela de neutrões em rotação.

segundo com uma precisão espantosa.

Primeiro acreditava-se que os pulsares poderiam ser sinais de extraterrestres inteligentes. Depois foram descobertas mais fontes rádio pulsantes, incluindo no centro da nebulosa do Caranguejo. Os cientistas sabiam que esta nebulosa foi produzida por uma supernova e puderam, finalmente, explicar a sua origem. O pulsar PSR B1937+21 é um dos pulsares mais rápidos conhecidos e gira mais de 600 vezes por segundo. Tem aproximadamente 5 km de diâmetro e se girasse apenas 10% mais rápido seria destruído pela força centrífuga. Hewish ganhou o Prémio Nobel da Física em 1974.

Outro pulsar muito interessante é o sistema binário, chamado PSR 1913+16, na constelação de Águia. O movimento orbital mútuo em campos gravitacionais tão intensos produz pequenos atrasos nas emissões que recebemos. Russel Hulse e Joseph Taylor estudaram este sistema e confirmam muitas previsões da teoria da relatividade, incluindo a emissão de ondas gravitacionais. Estes dois americanos receberam o Prémio Nobel da Física em 1993 por esses estudos.

### Actividade 6: Simulação de um pulsar

Um pulsar é uma estrela de neutrões, muito maciça, que gira rapidamente. Emite radiação, mas a fonte não está totalmente alinhada com o eixo de rotação, pelo que a emissão gira como um farol. Se o feixe estiver orientado para a Terra, o que vemos é uma radiação que pulsa várias vezes por segundo.

Podemos simular um pulsar com uma lanterna (figura 17a) amarrada a uma corda presa ao teto. Se ligarmos e a girarmos (figura 17b), veremos a luz de forma intermitente cada vez que a lanterna apontar na nossa direção (figura 17c).

Se inclinar um pouco a lanterna para que não fique horizontal, deixará de ver o feixe de luz, a partir da



Fig. 17a: Montagem.



Fig. 17b: Giramos a lanterna.



Fig. 17c: Vemos sua luz de forma intermitente.

mesma posição. Por isso, apenas observamos a emissão de um pulsar se estivermos bem alinhados com a sua rotação.

### O que é um buraco negro?

Se lançarmos uma pedra para cima, a força da gravidade irá desacelerá-la até que regresse novamente ao solo. Se a velocidade com que a lançarmos for maior, a pedra irá atingir alturas superiores antes de cair. Se a velocidade inicial for 11 km/s, a velocidade de escape da Terra, a pedra não voltaria a cair (desprezando o atrito do ar).

Se a Terra se contraísse mas mantivesse a sua massa, a velocidade de escape à sua superfície seria maior, já que estaríamos mais próximos do centro da Terra. Caso se concentrasse até um raio de 0,8cm, a velocidade de escape seria maior que a velocidade da luz. Como nada pode ultrapassar a velocidade da luz, nada escaparia da sua superfície, nem sequer a luz. A Terra ter-se-ia convertido num buraco negro do tamanho de um berlinde.

Teoricamente, pé possível que existam buracos negros de massas muito pequenas. No entanto só é conhecido um mecanismo que concentre tanta massa na densidade necessária: o colapso gravitacional. Para que isso aconteça são necessárias massas muito grandes. Já vimos a formação de estrelas de neutrões como restos de estrelas de 1,44 a 8 massas solares. Se estrela originária é ainda mais massiva, a gravidade é tão forte que o seu interior continua a colapsar sobre si mesma até se tornar num buraco negro. Por isso, este tipo de buraco negro terá uma massa várias vezes maior que o nosso Sol. A sua densidade de um buraco negro é impressionante. Um berlinde feito da sua matéria pesaria tanto como toda a Terra.

Apesar de não os conseguirmos observar diretamente, conhecemos diversos candidatos a buracos negros no Universo graças à emissão de material por outros objetos visíveis que giram na sua órbita, a grande velocidade. Por exemplo, mesmo no centro da nossa galáxia não vemos nada, mas detetamos um anel de gases que gira em redor do centro a velocidades incríveis. A única ex-

plicação possível é que lá exista uma enorme e invisível massa, várias vezes superior à do Sol. Isso apenas pode ser um buraco negro, com o raio de Schwarzschild ligeiramente superior ao do Sol. Este tipo de buracos negros, estão situados no centro de muitas galáxias, são denominados buracos negros supermassivos.

### Actividade 7: Simulação da curvatura do espaço e de um buraco negro

É muito simples simular a curvatura do espaço causada por um buraco negro usando um pedaço de tecido elástico: lycra (figura 18) ou com um grande pedaço de malha para fixar compressas.



Fig. 18: A trajetória da bola de ténis não é em linha reta, é uma curva.

Primeiro, estender o tecido ou a malha. Agora, lançar uma bola mais leve (ou um berlinde) ao longo do tecido. Isto representa um feixe de luz e a sua trajetória simula a trajetória retilínea de um raio de luz na ausência de curvatura. Mas, se colocamos uma bola pesada (ex: um balão cheio de água) e lançarmos a bola mais leve (ou o berlinde), a sua trajetória no tecido será uma curva, simulando a trajetória de um raio de luz num espaço curvo causado pela presença de uma massa gravítica. O grau do desvio da trajetória é proporcional à massa e inversamente proporcional à distância. Se afrouxarmos um pouco a tensão do tecido, é produzida um poço gravitacional maior, do qual é difícil a bola leve sair. Torna-se um modelo de buraco negro.

### Bibliografia

Broman, L., Estalella, R. Ros. R.M, *Experimentos en Astronomía*, Ed. Alhambra Longman, Madrid, 1993.  
Dale, A. O., Carrol, B.W, *Modern Stellar Astrophysics*, Addison-Wesley Publ. Comp., E.U.A, 1996.  
Moreno, R, *Experimentos para todas las edades*, Ed. Rialp. Madrid, 2008.  
Pasachoff, J. M, *Astronomy: From the Earth to the Universe*, 4th Edition, Saunders College Publishing, E.U.A, 1995.  
Rybicki, G. B., Lightman, A.P, *Radiative Processes in Astrophysics*, John Wiley & Sons, E.U.A, 1979  
Zeilik, M., Gregory, S.A., Smith, E.V.P, *Introductory Astronomy and Astrophysics*, 3rd Ed., Saunders College Publishing, EUA, 1992.

# Astronomia fora do visível

Beatriz García, Ricardo Moreno, Rosa M. Ros

União Astronômica Internacional, Universidade Tecnológica Nacional (Mendoza, Argentina), Colégio Retamar (Madrid, Espanha), Universidade Politécnica da Catalunha (Barcelona, Espanha).

## Resumo

Os objetos celestes irradiam em muitos comprimentos de onda do espectro eletromagnético, mas o olho humano apenas diferencia uma parte muito pequena dele: a região do visível.

Há maneiras de demonstrar a existência dessas formas de radiação eletromagnética que não vemos, através de simples experiências. Nesta apresentação será possível introduzir observações para além do que é observável com um telescópio usado numa escola de básico ou secundário.

## Objetivos

Esta atividade pretende mostrar certos fenômenos para além do que pode ser observável com um telescópio amador, como a existência de:

- Corpos celestes que emitem energia eletromagnética que os nossos olhos não podem detetar. Os astrónomos estão interessados nesses comprimentos de onda porque a região do visível, por si só, não oferece uma imagem completa do Universo.
- Emissões nas regiões das ondas de rádio, infravermelho, ultravioleta, micro-ondas e raios X.

## Espectro eletromagnético

As ondas eletromagnéticas cobrem uma ampla faixa de frequências, ou comprimentos de onda, e podem ser classificadas conforme sua principal fonte de produção. A classificação não possui limites precisos. O conjunto de todos os comprimentos de onda é denominado espectro eletromagnético.

Na figura 1 são identificadas as diferentes regiões do espectro, com os seus diferentes comprimentos de onda. É indicado o tamanho entre as cristas da onda (comprimento de onda,  $\lambda$ ) e alguns objetos desses tamanhos: átomos, moscas, montanhas... para termos uma ideia das dimensões das ondas. Na mesma figura é possível apreciar como se “observam” o Sol e Saturno se os observarmos em comprimentos de onda que nossos olhos não podem detetar. Essas fotografias foram

tiradas com detetores especiais sensíveis a esses comprimentos de onda.

No Universo, há material que se encontra a temperaturas mais baixas que a das estrelas, por exemplo, nuvens de material interestelar. Essas nuvens não emitem radiação visível, no entanto podem ser detetadas em comprimentos de onda longos, como o infravermelho, as micro-ondas e as ondas de rádio. Observar o Universo em todas as regiões do espectro eletromagnético, o que os astrónomos denominam “observação multionda”, permite-nos ter uma imagem bem mais precisa de sua estrutura, temperatura e energia, e criar modelos bem mais realistas relacionados com a sua evolução.

Na figura 2 é observado o centro de nossa galáxia, a Via Láctea fotografada pelos telescópios espaciais Spitzer (em infravermelho), Hubble (em visível) e Chandra (em raios X). Em cada um, são observados objetos e detalhes que em outros comprimentos de onda não se observam.

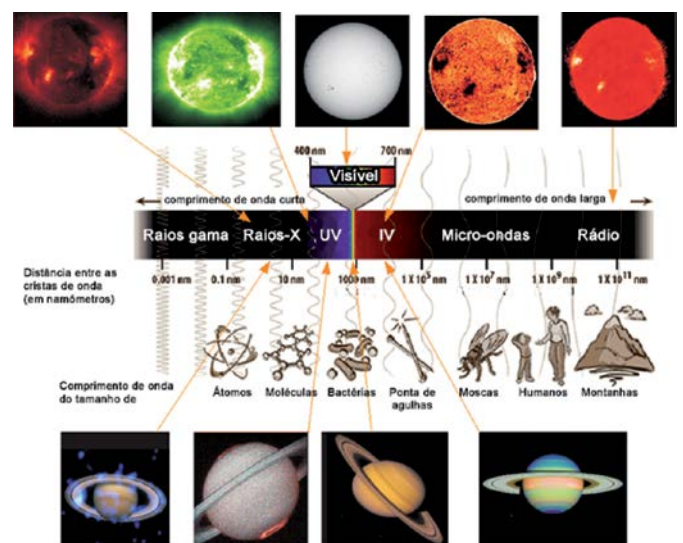


Fig. 1: Espectro eletromagnético, com objetos do tamanho dessas ondas. O Sol (acima) e Saturno (abaixo) observados em diferentes comprimentos de onda (as cores são simuladas).

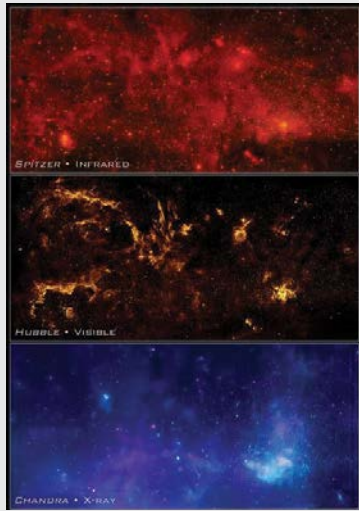


Fig. 2: O centro de nossa galáxia, a Via Láctea, fotografado em diferentes comprimentos de onda.

### Atividade 1: Construção de um espectroscópio

A luz branca de uma lâmpada de filamento é composta por todas as cores. Em lâmpadas que contêm gás (fluorescentes, lâmpadas de baixo consumo e candeeiros de rua) a luz apenas contém determinadas cores. Se separarmos as cores da luz, obtemos o seu espectro, que no caso dos gases é formado por um conjunto de linhas de cores. Cada tipo de gás possui um espectro próprio, que é como a impressão digital do gás. Se observarmos com um espectroscópio a luz de uma galáxia longínqua, as próprias linhas do hidrogénio, e do resto dos gases, serão observada com um desvio para o vermelho (redshift), que é tanto maior quanto mais longe estiver a galáxia.

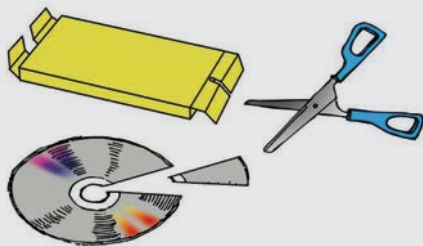


Fig. 3a: Material necessário: DVD, tesoura e caixa de papelão.



Fig. 3b: Retirando a capa metálica do CD, com fita adesiva.

Com tesouras fortes, corte, de forma radial, pedaços de um CD ou de um DVD (figura 3a). Se usar um CD deve ser prateado pela parte que não é gravado, isto é, não deve estar impresso, nem ser branco nem de outra cor. Para desprender a capa metálica do CD, pode usar fitas adesivas, riscando previamente a superfície (figura 3b). Se usar um DVD, o procedimento anterior não é necessário: basta separar, no pedaço cortado, a capa de plástico superior da inferior, dobrando-o levemente ou com a ajuda de uma chave de fendas, e terá a rede de difração preparada.

Faça uma fotocópia em papel do modelo da figura 5, de preferência em tamanho A3, pois será mais exato. Recorte o modelo, incluindo a parte branca em forma de setor circular (está impresso “CD” e “DVD”, para recortar um ou outro setor circular e fresta, conforme possuam um ou outro tipo de disco), e faça uma fresta fina na lista próxima da escala graduada. Esta escala NÃO se deve recortar. Monte a caixa deixando a parte preta no interior e cole-a sobrepondo os rebordos. No buraco deixado no setor circular, cole o pedaço de CD ou DVD que preparamos.



Fig. 4: Observação de uma lâmpada fluorescente.

Se olhar através do pedaço de disco, direcionando a fresta da caixa (não a escala) para uma lâmpada de baixo consumo ou uma fluorescente (figura 4), serão nitidamente observadas, sobre a escala, as riscas de emissão dos gases que dessas lâmpadas. Se não forem observadas, olhe à direita da lâmpada e mova o espectroscópio lentamente para a esquerda até que apareçam as riscas. A escala está graduada em centenas de nanômetros, isto é, a marca 5 indica 500 nm ( $500 \times 10^{-9}$  m). Quanto mais fina for a fresta, com maior precisão será medido o comprimento de onda das riscas.

É possível fazer a caixa com cartolina. Nesse caso, é necessário recortar o retângulo da escala e colar uma cópia da escala feita em papel normal sobre esse buraco, para que possa tornar a escala transparente.

Também é possível olhar os candeeiros das ruas, tanto os laranjas (de sódio) como os brancos (de vapor de

mercúrio). As lâmpadas incandescentes tradicionais têm um espectro contínuo.

Os alunos mais novos podem decompor a luz e fazer um arco-íris. Precisam uma mangueira com difusor, e posicionar-se com o Sol atrás (figura 6).

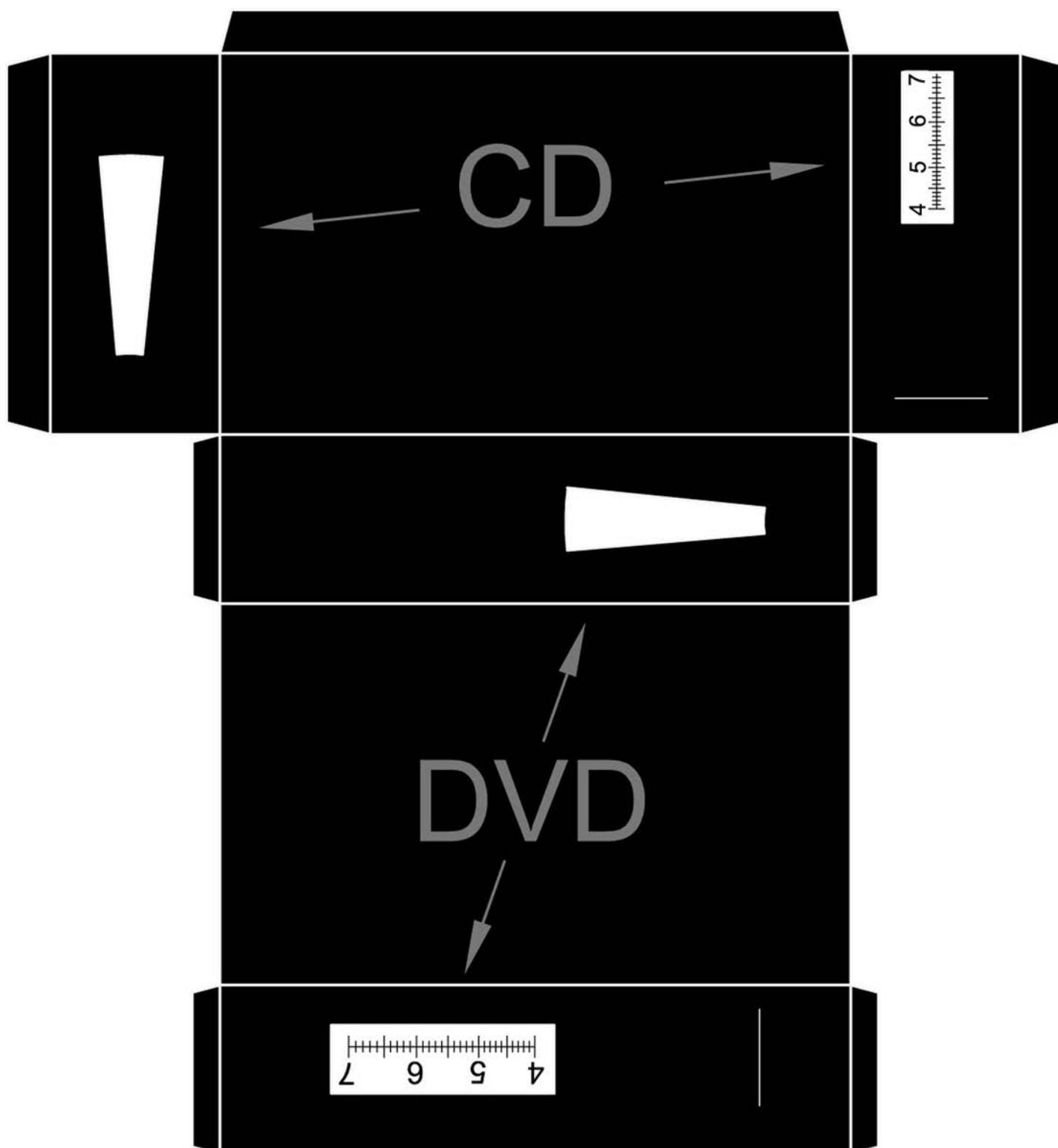


Fig. 5: Modelo para o espectroscópio.



Fig. 6: Os alunos pequenos podem decompor a luz em um arco-íris.

## O infravermelho

A região infravermelha do espectro eletromagnético foi descoberta por William Herschel (descobridor do planeta Urano). Em 1800, com um prisma e alguns termômetros, obteve o espectro visível, passando a luz branca do Sol através de um prisma. Colocou vários termômetros, um na região do azul, outro no vermelho (ambas as cores detetáveis pelo olho) e pôs um terceiro termômetro para além do vermelho, imediatamente depois. Com um quarto termômetro, mediu a temperatura ambiente e descobriu que a temperatura marcada no termômetro na região “abaixo” do vermelho (por derivação foi denominado “infra” vermelho) era maior que a do ambiente.

Herschel fez outras experiências com os “raios caloríficos” (como os chamava) que existiam para além da região vermelha do espectro: eram refletidos, refratados, absorvidos e transmitidos tal como a luz visível. Estes “raios caloríficos” foram posteriormente denominados raios infravermelhos, ou radiação infravermelha. Estas descobertas foram seguidas por outras que resultaram em várias aplicações tecnológicas.

Os corpos que se encontram a baixa temperatura não emitem na região visível do espectro, mas em com-

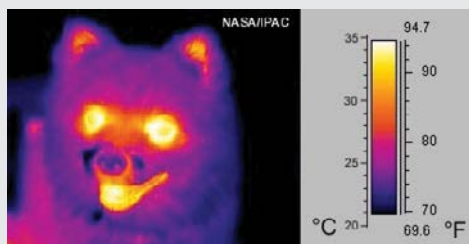


Fig. 7: Fotografia com infravermelhos. Distinguem-se zonas mais ou menos quentes

primentos de onda mais longas, pois a energia que libertam é menor. Por exemplo, o nosso corpo, e o dos animais, emitem radiação infravermelha não detetada com os olhos, no entanto podemos percebê-la como a forma de calor que o organismo emite. Todos os objetos que estejam a uma certa temperatura emitem em infravermelho (figura 7). Para vê-los à noite foram inventados óculos noturnos, que permitem detetar esta radiação que a visão não percebe.

## Atividade 2: Experiência de Herschel na banda IV

O objetivo é repetir a experiência de 1800, mediante a qual o famoso astrónomo William Herschel descobriu uma forma de radiação diferente da luz visível. Precisaremos de um prisma de vidro, quatro termômetros, caneta permanente de tinta preta, tesouras, fita adesiva, uma caixa de papelão e uma folha branca. Colocamos fita adesiva nos bulbos dos termômetros e pintamo-los com caneta preta permanente para que absorvam melhor o calor.

A experiência deve ser realizada ao ar livre, num dia MUITO ensolarado. Se houver muito vento, a experiência pode ser realizada num lugar fechado, se houver uma janela por onde o Sol entre de forma direta. Coloque uma folha branca no fundo da caixa de papelão. O prisma é colocado cuidadosamente no rebordo superior da caixa, de maneira a que fique do lado do Sol. O interior da caixa deve ficar todo, ou quase todo, à sombra (figuras 15 a 16c). Gire o prisma cuidadosamente até que apareça um espectro, o mais amplo possível, sobre a folha situada no fundo da caixa.

Após segurar o prisma nessa posição, com fita adesiva, colocamos três termômetros na luz do espectro de maneira que cada bulbo esteja numa das cores: um na

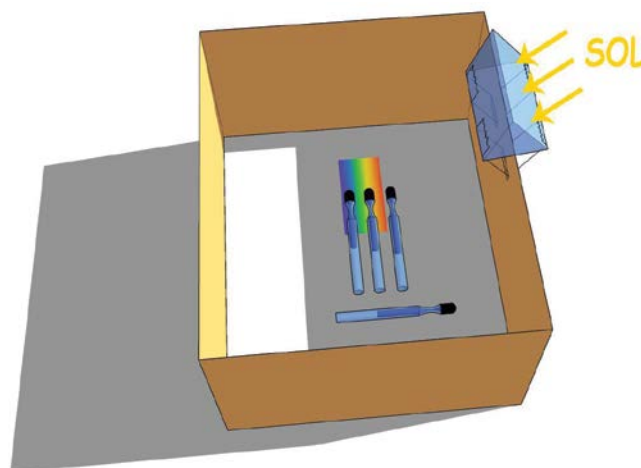


Fig. 8: Dispositivo de Herschel. Os termômetros colocados no espectro marcam temperaturas mais altas do que a temperatura ambiente.

região azul, outro na amarela e o terceiro um pouco além da região vermelha visível. É necessário poder observar bem a escala graduada do termómetro, para não mover o termómetro quando anotarmos as medidas. O quarto termómetro é colocado na sombra, não alinhado com os anteriores (figuras 9a a 9c).

As temperaturas demoram aproximadamente cinco minutos para alcançarem os seus valores finais. Registamos a cada minuto, na tabela 1, os valores das temperaturas em cada uma das três regiões do espectro e do ambiente. Não mova os termómetros da sua posição no espectro nem bloqueie a sua luz.

O termómetro no amarelo (figura 9c) deveria marcar uma temperatura um pouco maior que no azul e no ambiente, e o que estiver próximo do vermelho deveria marcar uma temperatura ainda um pouco superior, pelo que é lógico deduzir que o termómetro junto ao

vermelho recebe algum tipo de radiação do Sol, invisível à nossa vista.

### Atividade 3: Detecção do IV com um instrumento tecnológico moderno

Se quisermos detetar IV com instrumentos tecnológicos modernos, provavelmente o primeiro que vem à mente são os visores noturnos, preparados para ver o infravermelho que o nosso corpo emite. Mas esse não é um recurso ao alcance de todos. Segue-se um procedimento mais económico e fácil.

Os comandos à distância, que utilizamos para ligar a televisão ou aparelhos de som, utilizam radiação infravermelha (os que possuem luz vermelha não servem para esta atividade). Existe alguma maneira simples de ver essa radiação não visível e que de repente se transforme em detetável?

Para isso devemos procurar um detetor sensível ao IV. Existe um produto tecnológico de envergadura, resultante do desenvolvimento nos estudos da luz em Astronomia, chamado CCD (das iniciais da sua denominação em inglês: Charged Coupled Device). Este dispositivo permite capturar e acumular fótons durante um determinado período de tempo, de maneira a que possamos “ver objetos que emitem ou refletem pouca luz”. O CCD é mais sensível na região do vermelho e, nalguns casos, a sua faixa de eficiência cobre o IV próximo. Qualquer câmara moderna possui um CCD para a aquisição de imagens, o que permite tirar fotos em condições de baixo nível de iluminação. O telemóvel é o dispositivo mais simples de uso quotidiano que possui uma câmara moderna e, portanto, um detetor CCD.

Observando o comando à distância com os nossos olhos, de maneira direta, não identificaremos nenhuma diferença entre estar aceso e apagado, como na figura 10a. Porém, se tirarmos uma fotografia com o telemóvel e com o comando à distância ativado (figura 10b)... Surpresa! A luz que o comando utiliza para enviar o sinal que liga a televisão, ou qualquer outro



Fig. 9a: Colocando os três termómetros, com os bulbos pretos, e o espectro na sombra. Fig. 9b: Os termómetros no azul, no amarelo e para além do vermelho. Fig. 9c: Exemplo das medições realizadas após 3 minutos

	Termómetro nº1 en el azul	Termómetro nº2 en el amarillo	Termómetro nº3 más allá del rojo	Termómetro nº4 a la sombra
1 minuto				
2 minutos				
3 minutos				
4 minutos				
5 minutos				

Tabela 1: Tabela de dados.



Fig. 10a: Comando à distância ligado e observado a olho nu. Fig. 10b: Comando à distância ligado e observado através do telemóvel.

equipamento eletrônico, é uma luz infravermelha que os nossos olhos não veem, mas que a câmara do telemóvel deteta.

#### Atividade 4: Detecção da luz infravermelha de uma lâmpada

A maioria dos corpos do céu emite em muitos comprimentos de onda. Se entre eles e nós houver pó ou gás, alguns comprimentos de onda podem ficar bloqueados, e outros não. Por exemplo, o pó que existe no centro de nossa galáxia impede-nos de ver a intensa luz visível produzida pela concentração de milhões de estrelas que ali existem. No entanto, esse pó é transparente à luz infravermelha que consegue atravessá-la e chegar até nós. Ocorre o mesmo com outras nuvens de pó escuro na nossa galáxia (figuras 11a e 11b).



Fig. 11a: Nuvem de pó na região do visível.  
Fig. 11b: Sobrepondo a visão infravermelha.

Nas emissões de uma lâmpada de filamento incandescente, a maior parte da energia que emite é na região visível, mas também emite em infravermelho, que pode atravessar o que o visível não consegue.

Utilizaremos uma lanterna e um pedaço de tecido de feltro (figuras 12a e 12b). Este tecido não é particularmente entrelaçado mas bloqueia bem a luz visível. Num quarto escuro, acendemos a lanterna. A seguir, tampamo-la com o feltro e comprovamos que não vemos a luz. Se isso não ocorrer, colocamos outra capa de feltro (podemos dobrar) ou, inclusive, uma terceira. Não convém pôr mais do que o necessário, pois é pos-

sível bloquear também toda a radiação infravermelha. Nesse quarto, o mais escuro possível, se a observarmos a lanterna com a câmara de nosso telemóvel (que capta a radiação infravermelha) vemos que se distingue a lâmpada (figuras 12a e 12b).



Fig. 12a e 12b: O feltro bloqueia totalmente a luz visível, mas não a infravermelha.

#### Atividade 5: Constelação com infravermelhos

Nas lojas de componentes eletrônicos, ou na Internet, são vendidos LEDs infravermelhos, semelhantes aos usados nos comandos à distância de TV, aparelhos de som, etc. São baratos, funcionam com uma pilha de 3 ou 9 V, ou com um alimentador de corrente contínua. São ligados em paralelo entre si, com uma resistência entre 100 e 500  $\Omega$ .

É possível fazer um pequeno circuito com vários LEDs, formando uma constelação conhecida, por exemplo Cassiopeia (figuras 13a e 13b), Oriente, Cruzeiro do

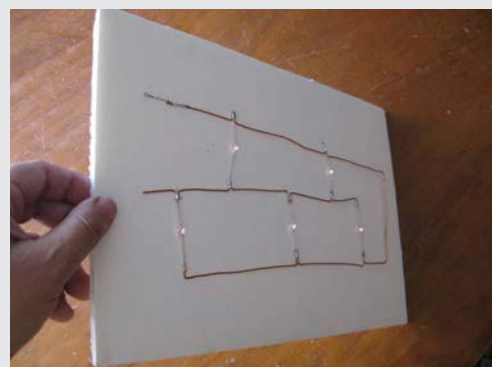
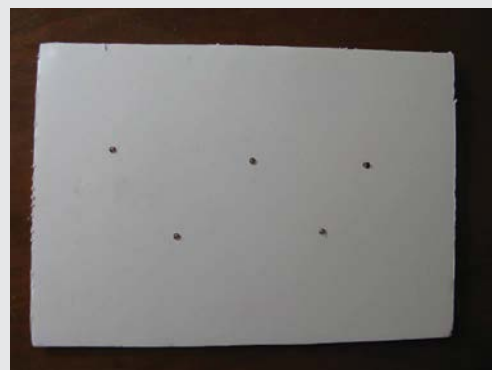


Fig. 13a e 13b: Cassiopeia feita com LEDs infravermelhos ligados em paralelo.

Sul ou a Ursa Maior (conforme o céu observado do seu hemisfério). É possível observá-la no infravermelho com a câmara fotográfica do telemóvel.

### Atividade 6: Constelação com comandos a distância

Mais fácil que a experiência anterior é formar uma constelação conhecida usando vários comandos à distância de infravermelhos. Se for observada no escuro com uma câmara digital, a constelação é vista (figuras 14a e 14b).

### Energia eletromagnética na região rádio

As ondas eletromagnéticas com comprimento de onda de metros a quilómetros são denominadas ondas de rádio. São as usadas nas emissões comerciais, mas também chegam do espaço. Estas radiações mostram morfologias que noutros comprimentos de onda não podem ser vistas (figuras 15, 16a e 16b).



Fig. 14a e 14b: Formação da constelação Cruzeiro do Sul com comandos infravermelhos.

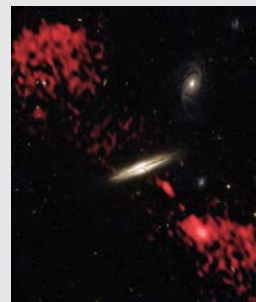


Fig. 15: Esta galáxia emite jatos apenas detetáveis em rádio (coloridos artificialmente de vermelho).

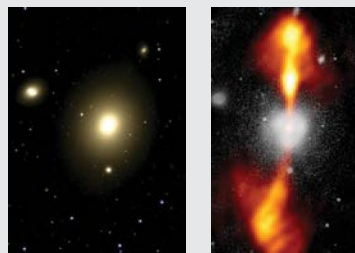


Fig. 16a: Fotografia da galáxia NGC 4261 no visível. Fig. 16b: A mesma galáxia com a imagem de rádio sobreposta. Observam-se uns jatos de matéria coloridos artificialmente de vermelho.

No Universo há fontes de rádio intensas: o centro de nossa galáxia, estrelas de neutrões em rápida rotação ou inclusive alguns planetas como Júpiter.

### Atividade 7: Produzindo ondas de rádio

Ao abrir e fechar um circuito elétrico são produzidas ondas de rádio semelhantes às emissões comerciais. É possível capturá-las num aparelho de rádio em AM e transformá-las em som, que é outro tipo de onda. A potência dessas emissões de rádio diminui quando o recetor se afasta. As ondas de rádio podem atravessar obstáculos e inclusive paredes.

Para realizar esta atividade, usamos dois pedaços de fio elétrico de 20 cm cada. Removemos o plástico nos dois extremos de um dos pedaços. No outro cabo, removemos também o plástico de um extremo, deixamos uns 10 cm com plástico e tiramos também o plástico no resto. No extremo onde há muito cabo descascado, faça uma bola. O outro extremo é ligado a um terminal de uma pilha de 9 V. Afiamos um lápis nas duas extremidades. A grafite servirá como fonte de radiação rádio. Num extremo ligamos o primeiro pedaço de fio, segurando-o com fita adesiva. O outro extremo do fio é ligado ao segundo terminal da pilha (figura 17).

Ligamos o rádio e colocamo-lo em AM (não FM). Batemos com a ponta livre do lápis na bola de fio. Sintonizamos o rádio até que se possa ouvir pelo rádio as batidas que damos na bola. Podemos tentar afastar o rádio ou colocar obstáculos de cartão, madeira, etc.

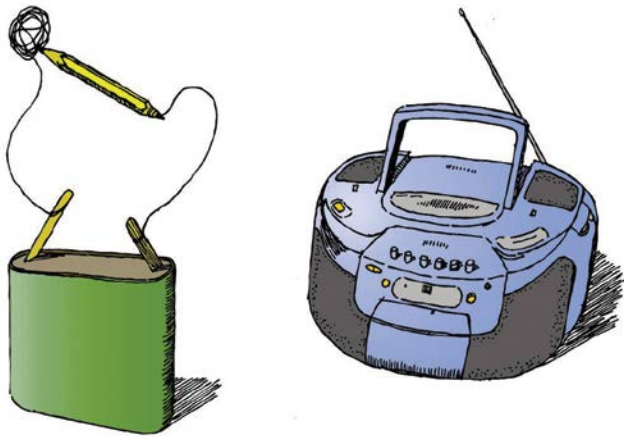


Fig. 17: Produção de ondas de rádio.

Também podemos levar o rádio para outro compartimento e comprovar se é possível ouvir ou não. Tenha em conta que a energia eletromagnética é primeiro transformada em energia elétrica e só depois em som.

### Atividade 8: Escutando a voz de Júpiter

Júpiter emite ondas de rádio em várias frequências. Não está clara a sua procedência, mas parece que está relacionada com o seu campo magnético e interações com sua lua Io. A emissão é na banda de frequências de 18 a 22 MHz, com um máximo nos 21 MHz. Esses valores podem ser captados por muitos receptores caseiros. Devem ter Onda Curta (SW) e alcançar esses valores.

As emissões de Júpiter não são contínuas. Júpiter possui três jatos, mais ou menos equidistantes, que giram com o planeta a cada dez horas. Além disso, esses jatos às vezes estão ativos e outras não, por isso é importante ter bastante uma boa dose de paciência.

Para as ouvir precisaremos um rádio que tenha onda curta (SW). É necessário sintonizá-lo entre 18 e 22 MHz onde não haja muito ruído de fundo e esperamos. As emissões soam como ondas de mar numa praia (ou rajadas de vento), que chegam com uma frequência de três por segundo, aproximadamente. A sua intensidade cresce até um máximo, que dura alguns minutos ou segundos, às vezes, e depois decai. A experiência indica que se ouvir durante 20 minutos, há 1 probabilidade em 6 de a ouvir. Como é lógico, Júpiter deve estar no céu, mas as nuvens não interferem.

A própria antena do rádio é adequada, embora seja omnidirecional e capte ondas provenientes de todas as direções. Se quisermos melhorar a escuta e, além disso, ter a certeza que provem de Júpiter, devemos construir uma antena direcional que substitua a normal. É necessário proceder da seguinte maneira: usamos 165 cm de fio de cobre e fazemos uma circunferência com ele, sem a fechar. Apoiamos a circunferência sobre quatro



Fig. 18: Antena para ouvir Júpiter

paus de 30 cm de comprimento. Forramos um dos lados de uma placa de madeira de 60 x 60 cm com papel de alumínio. Cravamos na placa de madeira a circunferência de cobre com os quatro paus.

Usamos um cabo coaxial de antena e ligamos o cabo interior à circunferência de cobre, e a malha exterior ao alumínio. O outro extremo é ligado à antena do rádio. Por último, direcionamos a antena para Júpiter.

### Luz Ultravioleta

Os fótons de luz ultravioleta possuem mais energia que os de luz visível. Isso permite que esta luz, em doses altas, destrua as ligações químicas das moléculas orgânicas, pelo que é letal para a vida. De fato, é usado para esterilizar material cirúrgico.

O Sol emite este tipo de radiação mas, felizmente, a atmosfera (em especial a camada de ozono) filtra a maior parte, e alguma desta radiação é benéfica. É esta luz que deixa a nossa pele morena (embora em excesso possa causar cancro da pele) e é absorvida pelas plantas para a fotossíntese, etc. Se a espessura da camada de ozono diminuísse chegaria à superfície terrestre uma dose demasiado alta o que aumentaria muito as doenças cancerígenas.

### Atividade 9: Luz negra (UV)

Há lâmpadas chamadas de luz negra que emitem sobretudo em UV e são usadas com frequência para favorecer o crescimento das plantas em estufa ou em zonas com pouca iluminação solar. O vidro dessas lâmpadas costuma ser quase negro e emite apenas um pouco de luz visível azul escuro. Alguns tecidos sintéticos brancos de camisas e t-shirts são fluorescentes com essa luz e refletem-na como uma cor roxa brilhante. Por essa razão esta iluminação é usada em algumas discotecas, pois os tecidos brancos são vistos reluzentes.

Esta propriedade é também usada no fabrico do papel de muitas notas: são introduzidas pequenas tiras de material fluorescente que são visíveis ao ser iluminadas por luz UV (figura 19). Desta forma observa-se que



Fig. 19: Uma nota de 50 € iluminada com luz UV mostra pequenas tiras fluorescentes marcadas com setas.



Fig. 27: Detetor de notas falsas que usa luz ultravioleta.

não é uma simples fotocópia da nota. Esta luz vem incorporada nos aparelhos detetores de notas falsas (figura 20). Muitos crachás oficiais possuem marcas ou sinais que apenas são visíveis com luz UV.

### Raios X

Mais energética que a UV é a radiação X. É usada em medicina, nas radiografias e noutras formas de diagnóstico radiológico (figura 21).

No cosmos, as fontes de raios X são característicos de acontecimentos e objetos muito energéticos: buracos negros, quasares, supernovas, etc. O telescópio espacial Chandra tem como missão a deteção e monitorização destes objetos (figura 22).



Fig. 21: Placa de raios X usada em medicina.



Fig. 22: Galáxia M81 com o núcleo fotografado em Raios X, que sugere a presença de um buraco negro muito massivo.

### Raios Gama

No extremo do espectro, com comprimentos de onda ainda mais curtos que os anteriores, está a radiação gama. É a radiação mais energética e é produzida quando matéria (um elétron) encontra antimatéria (um positrão). No cosmos há diversas fontes (figura 23), e não é raro detetar violentas erupções pontuais que emitem um potente jato de raios gama durante alguns minutos ou horas.

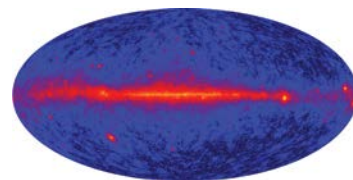


Fig. 23: Mapa do Universo exposto pelo "Fermi Gamma-Ray Space Telescope". A linha central é a nossa galáxia.

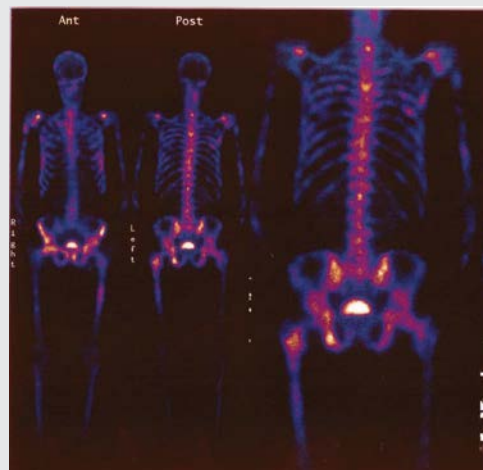


Fig. 24: Gamagrafia óssea do corpo humano.

Como duram tão pouco, o problema é detetá-los e determinar a sua localização exata para saber que tipo de objeto produziu essa radiação. Objetos como núcleos ativos de galáxias, pulsares e supernovas foram identificados como fontes de raios X.

Na Terra esta radiação é emitida pela maioria de elementos radioativos. Tal como os raios X, esta radiação é usada em medicina tanto para obtenção de imagens (figura 24) como para curar doenças como o cancro.

.....

## Bibliografia

Mignone, C., Barnes, R., *More than meets the eye: how space telescopes see beyond the rainbow*, Science in the School, Eiro Forum, 2014

Moreno, R., *Experimentos para todas las edades*, Ed. Rialp. Madrid, 2008.

## Fuentes da Internet

Spitzer Telescope, Educacion, California Intitute of Technology.

<http://www.spitzer.caltech.edu/espanol/edu/index.shtml>

[http://www.scienceinschool.org/2014/issue29/EM\\_Astronomy](http://www.scienceinschool.org/2014/issue29/EM_Astronomy)

<https://www.khanacademy.org/science/cosmology-and-astronomy/universe-scale-topic/light-fundamental-forces/v/introduction-to-light>

Chandra X-ray Observatory:

<http://chandra.harvard.edu/about>

The Fermi Gamma-ray Space Telescope:

<http://fermi.gsfc.nasa.gov>

# Expansão do Universo

Ricardo Moreno, Susana Deustua

União Astronómica Internacional, Colégio Retamar (Madrid, Espanha), Space Telescope Science Institute (Baltimore, USA)

## Resumo

Esta oficina contém atividades simples, nas quais trabalharemos o conceito de expansão do Universo. Na primeira atividade estudaremos o efeito Doppler. Na segunda, terceira e quarta experimentaremos qualitativamente, através da expansão de um arame, uma borracha, de um balão e de uma superfície de pontos respetivamente. Na quinta e na sexta calcularemos a constante de Hubble e veremos, de forma quantitativa, a expansão de uma superfície. Na sétima atividade detetaremos a radiação de fundo de micro-ondas. Na oitava simularemos lentes gravitacionais.

## Objetivos

- Compreender o que é a expansão do Universo.
- Compreender que não há um centro do Universo.
- Compreender a Lei de Hubble.
- Compreender o significado e simular lentes gravitacionais.

## A Origem do Universo

A teoria sobre a origem do Universo mais aceita hoje em dia é conhecida com o nome de *Big Bang*: um evento singular, original, que iniciou uma expansão do próprio espaço. Mas não são as galáxias que se movem “através do espaço”, é o espaço entre elas que se expande, arrastando as galáxias. Por essa razão não é possível discutir acerca do centro do Universo, como também não é possível afirmar que um país está no centro da superfície terrestre.

A velocidade de recessão de uma galáxia e a distância que estão de nós é proporcional. A constante que as relaciona é chamada constante de Hubble. A lei de Hubble relaciona de forma linear a distância de uma galáxia com a velocidade com que esta se afasta de nós.

A primeira prova do *Big Bang* veio com a observação do desvio para o vermelho (*redshift*) nos espectros das galáxias, e a prova que proporcionou o reconhecimento definitivo da teoria do *Big Bang* foi a deteção da radiação de fundo de micro-ondas.

## Desvio para o vermelho (redshift)

Se no laboratório observarmos, com um espectroscópio, a luz que chega de um gás quente, por exemplo, o hidrogénio, veremos linhas de cores que são típicas desse gás, a comprimentos de onda fixos. Se fizermos o mesmo com a luz que chega de uma galáxia remota, veremos essas linhas, mas ligeiramente deslocadas (figura 1). É o fenómeno denominado desvio para o vermelho, pois na maioria das galáxias o deslocamento é para essa cor.

Este desvio para o vermelho da luz é devido ao afastamento da galáxia em relação a nós, de forma semelhante a mudança de tom de um apito de uma locomotiva, e quanto maior for essa mudança maior será a velocidade.

Estudando o espectro das galáxias do nosso grupo local, verificámos que a Grande Nuvem de Magalhães se afasta de nós a 13 km/s, e a Pequena Nuvem de Magalhães se aproxima a 30 km/s. Andrómeda aproxima-se a 60 km/s, enquanto a M 32 (uma satélite sua) se afasta a 21 km/s. Por outras palavras, as galáxias próximas possuem movimentos relativos pequenos e de forma irregular.

Mas se observarmos o enxame de Virgem, a uma distância média de 50 milhões de a.l., veremos que todas se afastam a velocidades entre 1 000 e 2 000 km/s. E no superenxame de Coma, ou Berenice, a 300 milhões

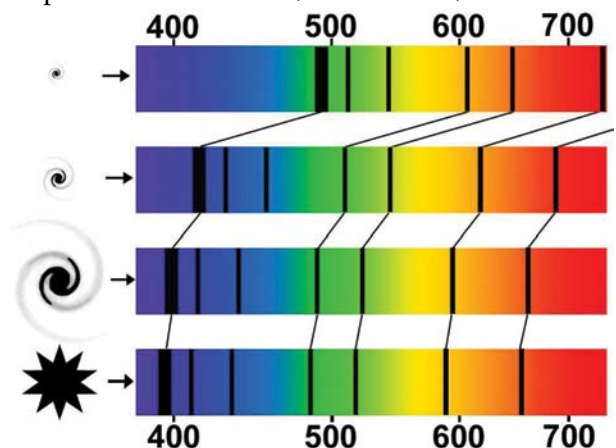


Fig.1: Quanto mais afastada está a galáxia, mais o seu espectro se desvia para o vermelho, demonstrando que se afasta de nós a maior velocidade.

de a.l., as velocidades de afastamento oscilam entre 7 000 e 8 500 km/s. Se olharmos na direção oposta, obtemos que a M 74 se afasta de nós a 800 km/s e M 77 a 1 130 km/s. E se o alvo forem galáxias mais longínquas, e fracas, a velocidade de recessão é ainda maior: NGC 375 afasta-se a 6 200 km/s, NGC 562 a 10 500 e NGC 326 a 14 500 km/s. Todas as galáxias mais próximas se afastam de nós. Estarão chateadas conosco?

### Atividade 1: O efeito Doppler

O efeito Doppler é o fenômeno que permite variar o comprimento de onda de um som quando a fonte está em movimento. Verificamos isso no som de motos ou carros numa corrida: o som é diferente ao aproximar-se e ao afastar-se. Outro exemplo familiar é um carro de bombeiros que passa junto a nós, no apito de um comboio em movimento, etc.

É possível reproduzir este efeito girando, num plano horizontal uma fonte de som, por exemplo um despertador. Introduzimos o despertador numa bolsa de tecido (figura 2a) e amarramo-lo com uma corda. Ao girá-lo sobre as nossas cabeças (figura 2b), é possível escutá-lo quando se aproxima do observador; diminui e o som é mais agudo. Quando se afasta, aumenta e o som é mais grave. A pessoa que está no centro de giro não verifica o fenômeno.



Fig. 2a: Relógio despertador, bolsa e corda.



Fig. 2b: Girando sobre as nossas cabeças os espectadores ouvem a diferença de tom.

Este é o efeito Doppler devido à deslocação. Porém, não é o que as galáxias possuem, com a expansão. As galáxias não se movem através do espaço, é o espaço entre elas que se expande.

### Atividade 2: O “alongamento” dos fotões

O Universo, ao expandir-se, “estica” os fotões. Quanto mais tempo durar a viagem do fotão, maior é “alongamento” que este sofre.

É possível fazer um modelo deste “alongamento” com um cabo semirrígido, usado nas instalações elétricas das casas. Corte aproximadamente um metro de cabo, depois dobre-o com as mãos fazendo vários ciclos de uma senoide, representando várias ondas (figura 3a).



Fig. 3a: Ondas feitas com cabo semirrígido.

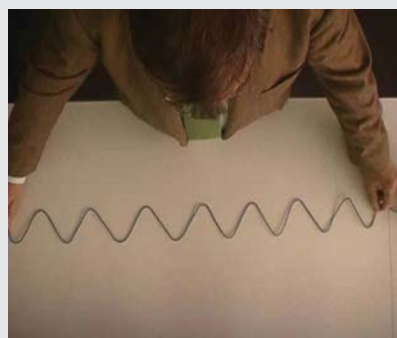


Fig. 3b: As mesmas ondas, esticadas, com um comprimento de onda maior.

Pegue o cabo com as duas mãos, estique-o (figura 3b), e observe que o comprimento de onda aumenta, tal como ocorre na radiação que chega de uma galáxia. Quanto mais longe estiver de nós, mais tempo teve para se esticar e se desviar mais para o vermelho (maiores comprimentos de onda).

### Lei de Hubble

Foi Edwin Hubble (figura 4) quem, a partir destes dados, estabeleceu em 1930 a lei que tem o seu nome: quanto mais distante está uma galáxia mais depressa se afasta de nós. Isto indica que o Universo se expande em todas as direções, pois todos os corpos que estão no Universo vão-se afastando uns dos outros. Se observarmos o afastamento de todas as galáxias em relação a nós não significa que estejamos no centro: o mesmo seria observado por um extraterrestre em qualquer lugar do Universo, como acontece numa explosão de fogos-de-artifício: todas as partículas luminosas vão-se

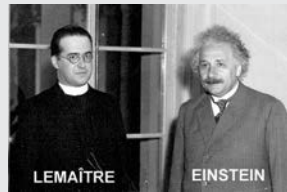
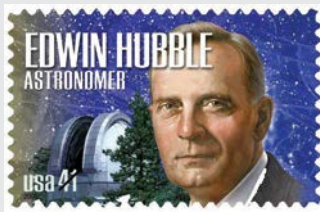


Fig. 4: Edwin Hubble. Fig. 5: George Lemaître e Albert Einstein

afastando entre si movidas pela explosão da pólvora.

No entanto, o modelo real não é o modelo de galáxias a movimentar-se através do espaço, mas é o espaço entre elas o que se expande, arrastando às galáxias.

Se o espaço se expande em todas as direções, significa que voltando atrás no tempo, a matéria esteve concentrada, em algum momento inicial, onde tudo começou.

Foi assim que o padre belga George Lemaître (figura 5) estabeleceu o mais aceite modelo do Universo: houve uma grande explosão original e ainda estamos envolvidos nela. Nessa expansão é o próprio espaço que se vai dilatando. Para entender este fenómeno, imaginemos um bolão de borracha com uma série de pontos desenhados na sua superfície, representando as galáxias (figura 6). À medida que vai crescendo, o espaço elástico entre os pontos desenhados vai aumentando. Da mesma forma, à medida que o tempo passa, o espaço vai-se expandindo e a matéria contida nele vai-se separando entre si.

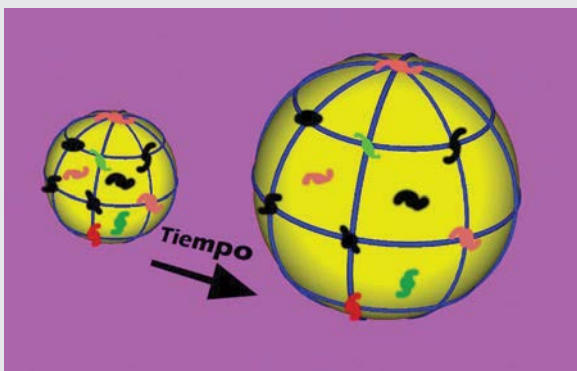


Fig. 6: Com o passar do tempo, o espaço vai-se expandindo e a matéria contida nele vai-se afastando.

Portanto, a velocidade aparente de recessão de uma galáxia e a distância a que está de nós é proporcional. A constante que as relaciona é chamada de constante de Hubble.

A Lei de Hubble relaciona a distância de uma galáxia

com a velocidade aparente com que se afasta:

$$v=H \cdot d$$

Para determinar seu valor bastaria saber a velocidade e a distância de algumas galáxias. A velocidade com que uma galáxia parece afastar-se é facilmente medida com precisão através do desvio para o vermelho, mas a distância a que está, especialmente no caso das mais longínquas, é mais difícil. Os cientistas não estão de acordo com o valor da constante de Hubble. Conforme usem um ou outro método, resultam valores diferentes, que geralmente oscilam entre 50 e 100 km/s por Megaparsec. O valor mais aceite atualmente é aproximadamente 70, o que indica uma idade para o Universo de 13 700 milhões de anos.

### Atividade 3: O Universo numa borracha elástica

Edwin Hubble descobriu que todas as galáxias parecem estar a afastar-se de nós. Quanto mais longe estão, mais rapidamente se afastam. A chamada Lei de Hubble estabelece que a velocidade aparente de afastamento de uma galáxia relativamente a nós é proporcional à sua distância. É uma consequência lógica da expansão do Universo. E ainda que todas as galáxias pareçam estar a afastar-se de nós, não significa que estejamos no centro do Universo.

Com uma régua faça marcas, de 1 cm em 1 cm, sobre uma borracha. Cada marca uma representará uma galáxia (A, B, C, etc.). A nossa galáxia será a primeira. Coloque a borracha próxima da régua (figura 7a) de modo a que a nossa galáxia coincida com a marca 0 cm. As outras galáxias A, B, C... coincidirão com as marcas 1, 2, 3, 4... cm.



Fig. 7a: Borracha sem estar esticada.



Fig. 7b: Borracha esticada.

Estique a borracha (figura 7b) de tal forma que nossa galáxia se mantenha na marca de 0 cm, e que a seguinte (A) se situe sobre a de 2 cm. A distância desta galáxia em relação à nossa duplicou. O que aconteceu à distância entre as restantes galáxias, B, C, D, e a nossa? Também duplicou?

Suponha que o tempo que durou o esticar da borracha foi de 1 segundo. As velocidades com que as outras galáxias se distanciaram relativamente à nossa são todas iguais, ou umas afastam-se mais depressa que outras? Como é que um habitante da próxima “galáxia” vizinha vê a nossa galáxia e as restantes? Também lhe parecerá que todas se afastam da sua?

#### Atividade 4: O Universo num balão

Na expansão do Universo, é o espaço entre as galáxias que se expande. As próprias galáxias não se expandem, nem a nossa casa se expande. O que está fortemente unido pela gravidade, não aumenta de tamanho. Lo que está unido fuertemente por la gravedad, no aumenta su tamaño.

Há uma experiência simples que permite mostrar este facto. Basta usar um balão, apenas parcialmente cheio. Depois colamos com adesivo sobre sua superfície alguns pedacinhos de esferovite (também podem ser moedas). A seguir enchemos o balão até chegar ao máximo. Os pedacinhos de esferovite vão separar-se uns de outros (figuras 8a e 8b). Alguns parecerão afastar-se mais do que outros, mas nenhuns se aproximarão. É um modelo muito simples da expansão do Universo.



Fig. 8a: Pedacos de esferovite colados no balão parcialmente enchido.



Fig. 8b: Os pedacos de esferovite afastam-se quando o balão está mais cheio.

#### Atividade 5: Cálculo da constante de Hubble

A Lei de Hubble afirma que a velocidade  $v$  de uma galáxia é proporcional à distancia  $d$  que se encontra de nós:

$$v = H \cdot d$$

A constante  $H$  é denominada constante de Hubble, e pode ser calculada a partir das distâncias e das velocidades das galáxias. Aplicando a fórmula anterior:

$$H = v/d$$

No diagrama da figura 9 é mostrado o espaço, representado por uma quadrícula azul a tracejado, connosco no centro e várias galáxias, a azul, a uma certa distância de nós. Depois de algum tempo, cerca de 10 segundos, o espaço expandiu-se e ficou representada a vermelho, tanto a grelha (em linhas contínuas) como as galáxias.

Preencha a tabela 2 e em cada fila coloque os dados relativos a cada galáxia. Por exemplo, as coordenadas são obtidas com as quadrículas azul (a tracejado) ou vermelha (linhas contínuas), conforme seja a galáxia A ou a A', respetivamente, e a distância obtém-se medindo com uma régua o comprimento, em cm, entre nós (no centro) e o centro dessa galáxia. Os dados da coluna obtém-se subtraindo as distâncias obtidas para A' e A. Na última coluna é necessário usar, no denominador, a distância antes da expansão (por exemplo, a de A, não a de A').

Comprovarás que:

- As coordenadas de cada galáxia não variam com a expansão (as galáxias não se movem através do espaço).
- O valor de  $H$  é bastante constante, independentemente das galáxias.

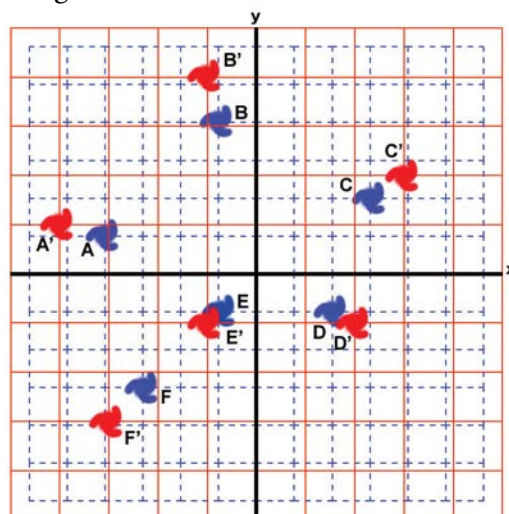


Fig. 9: O quadrículado de traço contínuo (vermelho) é a mesma que a do traço descontinuo (azul), mas expandida. As galáxias estão fixas nas quadrículas.

Galaxia	Coordenadas $x,y$	$d$ =distancia al origen	$\Delta d$	$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$	$H = \frac{v}{d}$
A	(-4, 1)				
A'	(-4, 1)				
B	(-1, 4)				
B'	(-1, 4)				
C	(3, 2)				
C'	(3, 2)				
D	(2, -1)				
D'	(2, -1)				
E	(-1, -1)				
E'	(-1, -1)				
F	(-3, -3)				
F'	(-3, -3)				

Tabela 1: Com as coordenadas escritas como exemplo.

Galaxia	Coordenadas $x,y$	$d$ =distancia al origen	$\Delta d$	$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$	$H = \frac{v}{d}$
A					
A'					
B					
B'					
C					
C'					
D					
D'					
E					
E'					
F					
F'					

Tabela 2: Para preencher com os dados da figura 9.

## ○ Big Bang

Atualmente, a teoria da origem do Universo como uma grande explosão é a mais aceita na comunidade científica, embora ainda seja questionada porque há detalhes que ainda não foram explicados. Em 1994 a revista americana *Sky & Telescope* fez um concurso para rebatizá-la. Receberam 12 000 propostas, mas nenhuma conseguiu suplantar a que já existia: teoria do *Big Bang*. O nome foi colocado depreciativamente pelo astrónomo Fred Hoyle que, com determinados preconceitos antirreligiosos, tinha a impressão que esta era demasiado consistente com a ideia de um Criador.

Com a observação de um Universo em expansão, deduz-se que, voltando atrás no tempo, houve um princípio no qual a explosão ocorreu, dando origem ao espaço e ao tempo tal como agora os conhecemos. Podemos perguntar como aconteceu e porque é que aconteceu. A ciência não dá resposta isto porque apenas trabalha em função do que existe. A ciência pode tentar explicar como é que as coisas funcionam, desde o Big Bang, mas não porque é que a matéria existe. Esses tipos de questões é para os filósofos, que estudam a metafísica (para além da física).

Algumas tentativas de explicar a causa recorrem a conceitos físicos como flutuações quânticas do vácuo, confundem o vazio com o nada: o vazio quântico exist-

te, pois possui espaço e alguma energia. O conceito de nada, como significado de ausência de tudo, incluindo o espaço, não é científico, é metafísico. No nada, nada pode nem existir nem flutuar. Outras teorias falam de multiuniversos mas, por definição, são impossíveis de comprovar (se pudessemos observar de alguma forma outro universo, esse faria parte do nosso, já que o nosso Universo é toda a matéria que está, de alguma maneira, ao nosso alcance). Por essa razão, essas teorias também não são realmente científicas.

Voltemos à ciência. No instante inicial, toda a matéria e energia encontravam-se numa singularidade, infinitamente pequena e densa. O Big Bang foi a explosão do espaço no começo do tempo, e a partir desse momento a matéria começou a funcionar com leis que estavam inscritas no seu interior, e que conduziram o Universo ao estado atual.

## Atividade 6: Não há um centro de expansão

Na figura 10 aparece um desenho com muitos pontos, que simulam galáxias num determinado momento. Faça uma primeira fotocópia, em papel transparente, e depois outra, noutra papel transparente, mas levemente ampliada (por exemplo, 105%).

Se sobrepostas num retroprojektor de transparências,

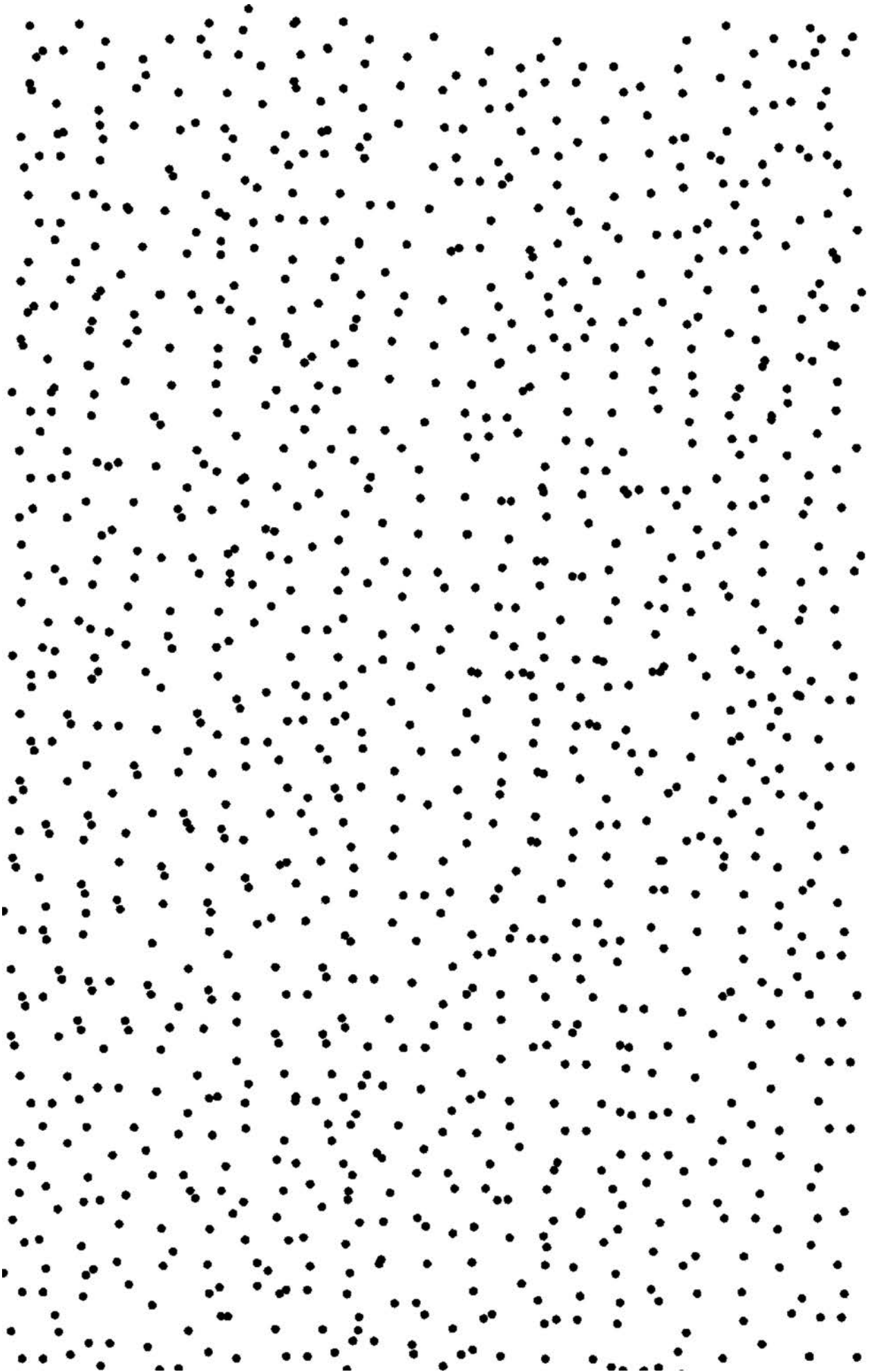


Fig. 10: Fotocopiar esta página numa transparência, e depois noutra, ampliada (por exemplo 105%).

obter-se-á uma imagem (figura 11a) que representa a expansão o espaço no tempo: fazendo coincidir um dos pontos, nas duas transparências, observa-se muito bem que o deslocamento de todos os outros pontos é radial, e é tanto maior quanto mais afastado estiver do ponto coincidente. Parece que os pontos se afastam mais depressa quanto mais longe estiverem do ponto coincidente.

Mas se o ponto coincidente for outro (figura 11b), ocorre o mesmo. É o que acontece no espaço: a partir da nossa galáxia vemos que todas se afastam de nós, mais rapidamente quanto mais longe estiver do observador. Parece que estamos no centro do Universo, mas não é assim, já que um observador situado noutra galáxia veria o mesmo e ele pareceria estar no centro. Realmente, não há nenhum centro.

## Evolução do Universo

Para termos uma ideia da história tardia do Universo, podemos supor que todo o tempo desde o *Big Bang* até agora é condensado num ano, de 1 de janeiro a 31 de dezembro.

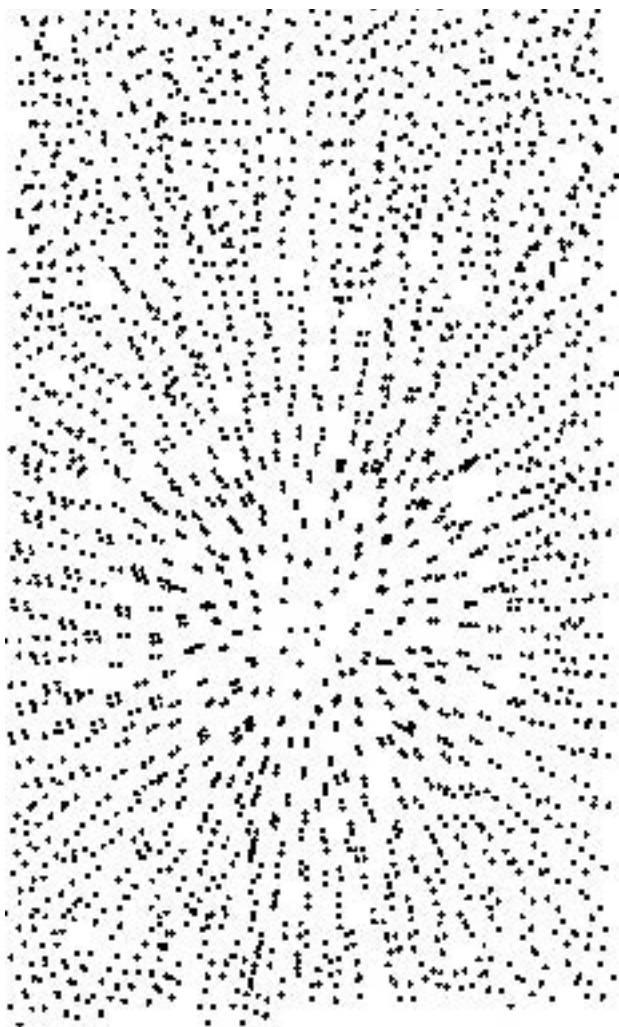


Fig. 11a: Sobreposição de duas transparências, uma delas ampliada.



Fig. 11b: Se fazemos coincidir outro ponto, também parece que tudo se afasta dele: não há um centro de expansão.

A nossa Via Láctea seria formada em maio. No início de setembro o Sol seria formado e a Terra teria forma esférica no final do mês. Mesmo que algumas células vivas muito simples tenham aparecido na Terra logo de seguida, as células com núcleo, como as atuais, apareceriam apenas em 2 de dezembro. Seria também no início de dezembro que o oxigénio apareceria na nossa atmosfera. No dia 12 apareceriam os primeiros organismos pluricelulares. No dia 19 surgiriam as plantas e peixes, e no dia 23 as árvores, insetos e répteis. No dia 25 surgiriam os dinossauros, que durariam até o dia 30. No dia 30 os mamíferos já habitariam sobre a Terra, e a partir do dia 31, às 11 da noite, surgiria o homem. É no último minuto que se pintariam as grutas de Altamira. Cinco segundos antes da meia-noite seria o momento do nascimento de Jesus Cristo. O último século seriam as últimas duas décimas de segundo.

## Radiação de fundo de micro-ondas

No começo, a temperaturas elevadíssimas, as quatro forças que conhecemos estavam unificadas. A gravidade, a força eletromagnética, a força nuclear forte e a fraca – estas duas últimas apenas atuam no interior dos átomos, e portanto são menos conhecidas das pessoas – estavam unidas. De seguida separaram-se e formaram-se os fótons, os eletrões, os prótons e as demais partículas elementares. Ao mesmo tempo que se ex-

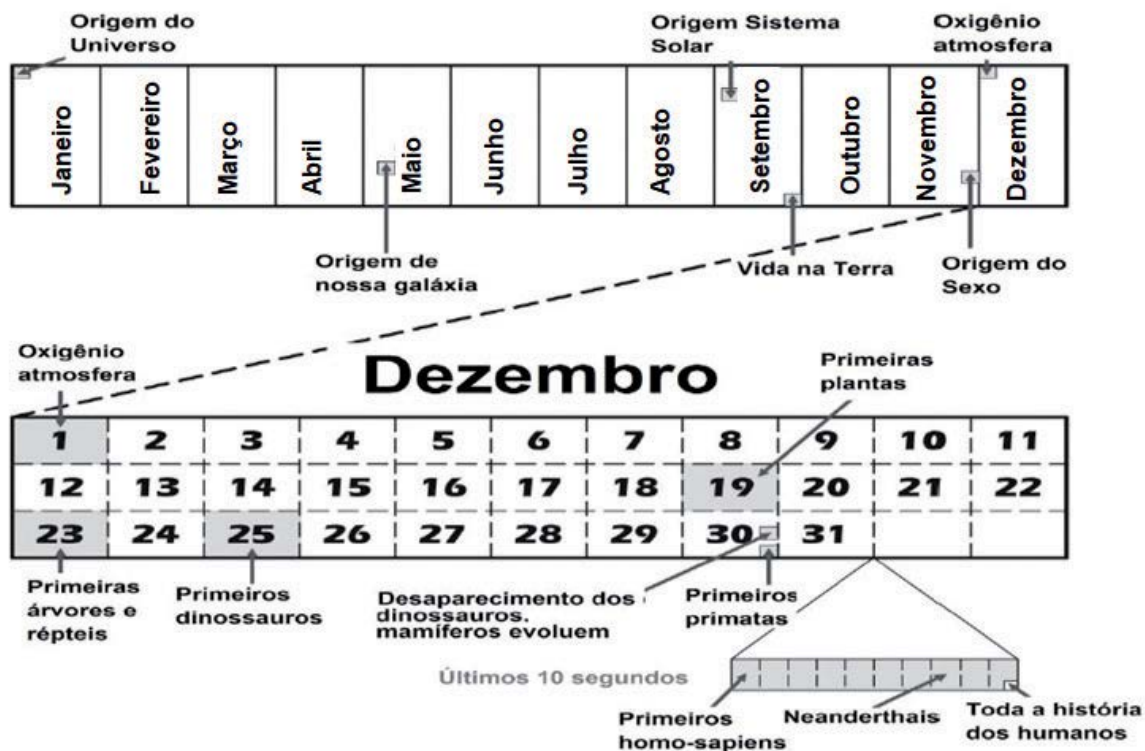


Fig.12: A história do Universo num ano. Toda a história humana (civilização) ocorre nos últimos 21 segundos.

pandia o Universo ia arrefecendo. Após 300 000 anos a temperatura baixou o suficiente para se poderem formar os átomos, principalmente hidrogénio e hélio. A densidade baixou e os fotões ficaram livres para se poderem mover em todas as direcções: fez-se a luz. Os cientistas afirmam que o Universo tornou-se transparente. Esses fotões ainda viajam pelo espaço atualmente, apesar de este ter arrefecido e dilatado, pelo que o comprimento de onda aumentou muitíssimo (figura 13) e converteram-se em fotões mais frios, transmitindo uma energia de apenas 2,7 kelvin. É a chamada radiação de fundo de micro-ondas (*Cosmic Microwave Background* ou CMB).

Esta radiação de fundo foi detetada pela primeira vez em 1964 por Penzias e Wilson, nos Estados Unidos. Eles estavam a tentar eliminar todos os ruídos parasitas do seu radiotelescópio quando captaram uma emissão de 7,35 cm de comprimento de onda que estava sempre presente, independentemente da zona para a qual apontassem a gigantesca antena. Reviu-se toda a instalação e inclusive pensou-se que a causa fosse o ninho construído na antena por alguns pássaros, mas não conseguiram eliminar esse ruído de fundo. Chegou-se à conclusão que era proveniente de um corpo emissor que com uma temperatura de 2,7 kelvin – a temperatura atual do Universo – e que não se encontrava em nenhum lugar particular. Era o próprio Universo que

emitia aquela radiação de fundo, uma relíquia do *Big Bang*. Qualquer pessoa pode detetá-la com uma televisão analógica sintonizada num canal livre: um em cada dez pontos vistos no ecrã são devido à radiação de fundo de micro-ondas. São emissões no campo das micro-ondas, semelhante às dos fornos caseiros, mas com tão pouca energia que apenas poderia aquecer os alimentos a 2,7 K.



Fig. 13: Com o passar do tempo, à medida que o espaço se expande, os fotões dilatam o seu comprimento de onda. É a radiação de fundo de micro-ondas.

Ainda que parecesse uma radiação extraordinariamente uniforme, G. Smoot e outros colegas conseguiram detetar pequenas variações nas medidas realizadas pelo satélite COBE (figura 14a), na ordem de milionésimas de grau. Simultaneamente detetaram-se essas flutuações a partir da superfície terrestre, nas instalações

de Tenerife, do Instituto de Astrofísica de Canárias. E no ano 2001 a NASA lançou o telescópio WMAP para estudar essa radiação de fundo com muito maior resolução (figura 14b).

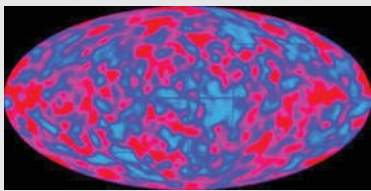


Fig. 14a: Imagem do COBE.

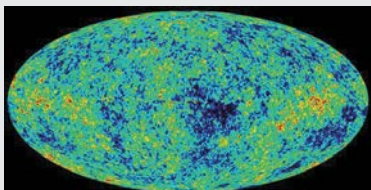


Fig. 14b: Imagem do WMAP.

Mesmo que pequenas, estas pequenas variações são as impressões dos grumos de matéria a partir dos quais se começaram a formar as galáxias. Ainda não sabemos o que originou estas flutuações de densidade. O que podemos afirmar é que estas rugas na matéria ocorreram e começaram a produzir-se as condensações das protogaláxias, apenas umas centenas de milhões de anos após o Big Bang. Quase ao mesmo tempo formar-se-iam as primeiras estrelas nessas galáxias primitivas.

### Atividade 7: Detecção da radiação de fundo de micro-ondas

300 000 anos após o *Big Bang*, os fótons separaram-se da matéria e começaram a viajar livremente pelo Universo. Quando o espaço se expandiu, esses fótons foram dilatando o seu comprimento de onda. Os cálculos preveem que teriam agora um comprimento de onda de cerca de 2 mm, que corresponde à região das micro-ondas e equivale ao que emitiria um corpo negro que esteja a 2,7 graus Kelvin.

Como mencionado anteriormente, Penzias e Wilson detetaram pela primeira vez, em 1964, a radiação de fundo de micro-ondas, uma radiação relíquia que é proveniente de todas as direções. O satélite COBE (figura 14a) e mais tarde o WMAP (figura 14b) realizaram medidas muito precisas desta radiação em todas as direções, detetando pequenas variações de uma área para outra, correspondendo ao que eram, então, aglomerados de galáxias.

Podemos detetar esta radiação com uma simples televisão (figura 15). Para fazer isto, sintonize a televisão para um canal livre. A imagem é composta de múlti-



Fig 15: Alguns dos pontos de um ecrã de uma televisão analógica não sintonizada são provenientes da radiação de fundo de micro-ondas.

plos pontos que mudam constantemente. Aproximadamente 10%, isto é, um em cada dez, dos pontos são provenientes da radiação do Universo.

### Porque é que a noite é escura?

Este era o título de um artigo interessante que o alemão Heinrich Olbers publicou em 1823. Anteriormente, em 1610, Kepler já tinha considerado que era uma evidência que o Universo não podia ser infinito. Edmund Halley, um século depois, encontrou no céu algumas zonas especialmente brilhantes e propôs que o céu não é uniformemente brilhante, durante a noite, porque apesar de o Universo ser infinito as estrelas estão uniformemente distribuídas. Até o escritor Edgar Allan Poe (1809-1849) escreveu acerca deste fenómeno<sup>1</sup>. Este tema entrou para a história como o Paradoxo de Olbers.



Fig. 16a: Johannes Kepler. Fig. 16b: Edmund Halley.



Fig. 16c: Heinrich Olbers. Fig. 16d: Edgar Allan Poe.

<sup>1</sup> Em “Eureka”, um ensaio científico publicado em fevereiro de 1848, ele deu a seguinte explicação para o escuro “vazio” entre as estrelas observadas: “Podemos compreender o vazio que os nossos telescópios encontram, em inúmeras direções, assumindo que a distância entre a distância ente o fundo invisível é tão imenso que ainda nenhum raio de luz proveniente de lá conseguiu chegar até nós”.

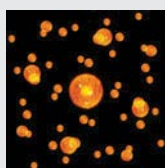
A resposta parece trivial, mas não o é após ler o artigo de Olbers. O raciocínio apontado por Olbers levava ao paradoxo de que o céu noturno devia ser tão brilhante como o mais esplendoroso dia. Vejamos o seu argumento.

Olbers partia dos seguintes pressupostos:

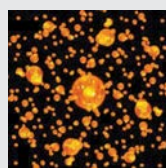
- 1.- O Universo tem uma extensão infinita.
- 2.- As estrelas distribuem-se mais ou menos uniformemente por todo o Universo.
- 3.- As estrelas possuem uma luminosidade média semelhante em todo o Universo.

Observemos o Universo a partir da Terra. Suponhamos uma primeira camada esférica de estrelas na abóbada celeste, a uma distância  $R_1$ . O número de estrelas que contém será  $N_1$ . Suponhamos uma segunda camada esférica, a uma distância maior,  $R_2$ . Cada uma das suas estrelas ilumina-nos menos por estar mais longe, mas ao mesmo tempo essa camada é maior e contém mais estrelas, segundo o princípio nº 2, e contraria a menor iluminação (a intensidade da luz diminui proporcionalmente a  $1/R^2$ , e à área da camada e, portanto, o número de estrelas aumenta proporcionalmente a  $R^2$ ). A conclusão é que a segunda camada ilumina a Terra da mesma forma que a primeira. De acordo com o princípio nº 1, há infinitas camadas, pelo que a conclusão é que o céu deveria aparecer brilhante durante a noite.

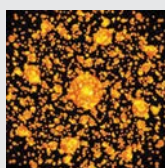
Outra forma de colocar esta questão: se observamos o céu à noite, com uma infinidade de estrelas, em qualquer direção que olhemos os nossos olhos deverão observar uma estrela brilhante e, portanto deveríamos ver ali um ponto brilhante. E se isso ocorre em todo o céu, ele deveria ser totalmente brilhante.



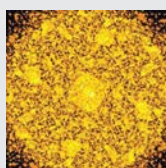
A Luz que chega de estrelas próximas.



Porém, mais longe também há estrelas que nos enviam a sua luz.



Quanto mais longe, mais estrelas há.



De qualquer ponto do céu deveria chegar a luz de uma estrela.

Fig. 17: Extraídas de *Wikimedia Commons*.

Evidentemente que isto não é verdade. Este paradoxo de Olbers despoletou muitas controvérsias e não foi possível resolvê-lo corretamente até o início do século XX, com a teoria do *Big Bang*. O raciocínio em si é correto, mas falham os princípios dos quais parte. Efetivamente que, com a expansão do Universo, a luz das estrelas longínquas sofre um desvio para o vermelho, que é maior quanto mais longe estão essas estrelas. Isto implica um enfraquecimento na intensidade de sua radiação, pelo que o princípio nº 3 de Olbers não está correto. Também sabemos que quanto mais longe estiver uma estrela, há mais tempo partiu de lá a luz, isto é, vemo-la como era há muito tempo. As estrelas mais longínquas formaram-se pouco depois do *Big Bang*, mas não podemos observar mais porque não há infinitas camadas de estrelas, ou seja, o princípio nº 1 de Olbers também é falso.

En el siglo XX, la solución a la paradoja de Olbers quedó resuelta con la expansión y sobre todo con la edad no infinita del Universo. ¡Afortunadamente, la noche podía seguir siendo oscura!

### Lentes gravitacionais

A luz segue sempre o caminho mais curto possível entre dois pontos. Porém, houver massa presente, o espaço curva, e então o caminho mais curto possível é uma curva como a observada na figura 18a. Esta ideia não é difícil para os estudantes. Realmente, podemos demonstrá-la sobre um globo terrestre (figura 18c). Evidentemente que podem entender que sobre a superfície da Terra as distâncias entre dois pontos são sempre uma curva.

Geralmente, podemos imaginar as lentes gravitacionais como uma lente qualquer, mas na qual o desvio da luz é produzido por uma grande massa, chamada defletora, que existe no caminho da luz (figura 19a).



Fig. 18a e 18b: Se o espaço for curvo, o caminho mais curto entre dois pontos é uma curva.



Fig. 18c: O caminho mais curto sobre a superfície terrestre não é uma reta.

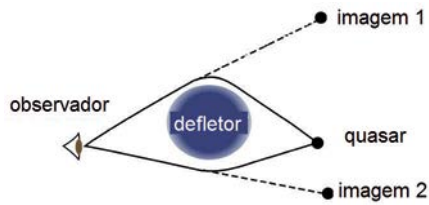


Fig. 19a: O observador tem a sensação que chegam raios luminosos de dois lugares diferentes, e vê duas imagens.



Fig. 19b: Fotografia da imagem dupla do Quasar Q0957+561. O defletor é a galáxia próxima ao componente B.

As lentes gravitacionais produzem uma curvatura nos raios de luz fazendo com que os objetos, se forem pontuais (estrelas ou quasares), pareçam estar num lugar diferente do qual realmente estão ou, inclusive, podem produzir imagens múltiplas do objeto (figura 19b). Se os objetos forem extensos (como as galáxias) as imagens aparecem deformadas como arcos brilhantes (figuras 20a, 20b e 20c).

### Atividade 8: Simulação de lente gravitacional com uma taça de vinho

Podemos simular uma lente gravitacional utilizando um copo de vinho. Esta experiência permite “mostrar” como é que a matéria pode introduzir deformações nas imagens observadas.

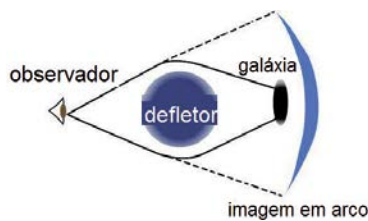


Fig. 20a: Se o corpo desviado for um objeto extenso, as imagens obtidas são um conjunto de arcos brilhantes ou um anel completo.



Fig. 3b: Arcos luminosos gigantes formados pelo enxame de galáxias Abell 2218.



Fig. 3c: Anel completo de uma galáxia que está por trás de um defletor brilhante.

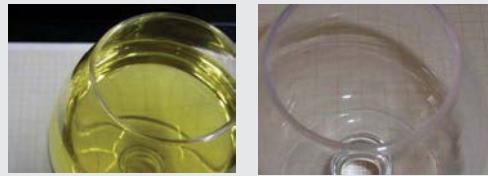


Fig. 21a e 21b: Apenas podemos ver a deformação das quadriculas se o copo estiver cheio.

É fácil comprovar que esta simulação provoca a “deformação do espaço” que é observado. Basta colocar o copo sobre um papel quadriculado e observar através do vinho branco (ou sumo de maçã). Poderemos ver esta deformação (figuras 21a e 22b).

Vejamos agora como simular o anel de Einstein ou a multiplicidade de imagens. Basta usar uma lanterna, posicionando-a do outro lado do copo de vinho tinto e observar o raio de luz que passa através dele.

Se observarmos a luz, podemos vê-la e movê-la da direita para a esquerda e de cima para baixo. Observamos

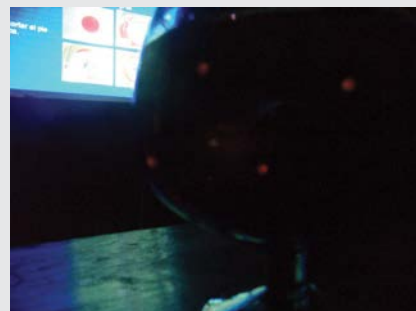
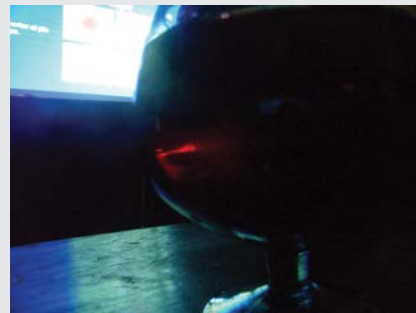


Fig. 22a: A luz da lanterna é vista como um arco entre dois pontos brilhantes vermelhos, Fig. 22b: Como uma figura amorfa, y Fig. 22c: A cruz de Einstein.

que a luz produz imagens repetidas e nalguns casos alguns arcos. Isto é a consequência de o copo atuar como uma lente que deforma a trajetória da luz. Às vezes podemos observar uma figura amorfa, ou um ponto vermelho brilhante, quatro pontos vermelhos ou um arco entre os pontos vermelhos (figuras 22a, 22b e 22c).



Fig. 23: Deformação das quadriculas.

Também podemos simular a lente gravitacional olhando através da base de uma taça. Se colocarmos a base da taça sobre um papel quadriculado e observarmos através dele, podemos ver a deformação das quadriculas (figura 23).

Movendo lentamente a base da taça da direita para a esquerda sobre um objeto, por exemplo, um círculo vermelho de uns 3 cm, reproduziremos os diferentes objetos reais observados nas lentes gravitacionais (figuras 24a, 24b e 24c).



Fig. 24a, 24b e 24c: A base da taça é um simulador de diversos objetos: segmentos de arco, imagens da cruz e anel de Einstein.

## Bibliografia

Moreno, R. *Experimentos para todas las edades*, Ed. Rialp, Madrid, 2008.

Moreno, R. *Taller de Astrofísica*, Cuadernos ApEA, Antares, Barcelona, 2007.

Moreno, R. *Historia Breve del Universo*, Ed. Rialp, Madrid, 1998.

Moreno, A, Moreno, R. *Taller de Astronomía*, Ediciones AKAL, Madrid, 1996.

Riaza, E, Moreno, R. *Historia del comienzo: George Lemaitre, padre del Big Bang*, Ediciones Encuentro, Madrid, 2010.

Ros, R.M, “Experiments and exercises involving gravitational lenses”, *Proceedings 1st ESO-EAAE Astronomy Summer School*, Barcelona, 2007.

Ros, R.M, *Gravitational lenses in th classroom*, Physics Education, 43, 5, 506, 514, Oxford, 2008

## Fuentes Internet

<http://www.spitzer.caltech.edu/espanol/edu/index.shtml>

<http://www.dsi.uni-stuttgart.de>

<http://georgeslemaitre.blogspot.com/>

# Planetas e exoplanetas

Rosa M. Ros

União Astronómica Internacional, Universidade Politécnica da Catalunha (Barcelona, Espanha).

## Resumo

Esta oficina fornece uma série de atividade para comparar as muitas propriedades observadas (como o tamanho, distâncias, velocidades orbitais e velocidade de escape) dos planetas no nosso Sistema Solar. Cada secção fornece contexto para diversas tabelas de dados planetários através de demonstrações ou cálculos para comparação das propriedades dos planetas, dando aos estudantes uma ideia concreta dos que os dados representam.

Como atividade final, são exploradas algumas propriedades de sistemas planetários extrassolares. Atualmente, são utilizados vários métodos para encontrar exoplanetas, mais ou menos indiretamente. Já foi possível detetar quase 2 000 planetas, e cerca de 500 sistemas planetários múltiplos. Um exemplo de um dos primeiros planetas observado diretamente é mostrado na figura 1.



Fig. 1: O primeiro planeta, 2M1207b, observado diretamente, em 16 de março de 2003. Tem 3,3 vezes a massa de Júpiter e orbita a 46 ua da anã castanha. Em 2006, um disco de pó foi encontrado em redor da estrela mãe, fornecendo evidências de que a formação de planetas pode ocorrer de maneira semelhante à observada em redor de estrela mais massivas do que o Sol (Foto: ESO).

## Objetivos

- Compreender o significado dos valores numéricos das tabelas de dados dos planetas do Sistema Solar.
- Deduzir o raio e o período de rotação dos satélites galileanos de Júpiter mediante o uso de um conjunto de observações fotográficas.
- Calcular a massa de Júpiter usando a terceira lei de Kepler.
- Compreender as principais características dos sistemas planetários extrassolares por paralelismo com o sistema orbital de Júpiter e os seus satélites galileanos.

## O Sistema Solar

Ao criar modelos à escala do Sistema Solar, os alunos são incentivados a realizar comparações entre os diferentes parâmetros planetários. Para poder realizar esta atividade é necessário usar os dados da tabela 1.

Planeta	Diâmetro (km)	Distância ao Sol (km)
Sol	1 392 000	
Mercúrio	4 878	$57,9 \times 10^6$
Vénus	12 180	$108,3 \times 10^6$
Terra	12 756	$149,7 \times 10^6$
Marte	6 760	$228,1 \times 10^6$
Júpiter	142 800	$778,7 \times 10^6$
Saturno	120 000	$1.430,1 \times 10^6$
Urano	50 000	$2.876,5 \times 10^6$
Neptuno	45 000	$4.506,6 \times 10^6$

Tabela 1: Dados dos corpos do Sistema Solar.

O principal objetivo do modelo é tornar os dados compreensíveis. Os milhões de km não são distâncias facilmente imagináveis, porém, se traduzidas para escalas da distância e tamanho os alunos acham-nas mais fáceis de compreender.

## Modelos do Sistema Solar

### Modelos de diâmetros

Num grande papel (ou múltiplos papéis, se necessário) de cor amarela, recortar um círculo que representará o Sol. O sol terá 139 cm de diâmetro já que cada 1 cm representa 10 000 km. Recortar os diferentes planetas em cartolina e desenhar as suas características morfológicas. Colocando os planetas junto do disco solar os alunos poderão perceber as diferentes escalas planetárias.

Com uma escala de 1 cm por cada 10 000 km, usar os seguintes diâmetros: Sol 139 cm, Mercúrio 0,5 cm, Vénus 1,2 cm, a Terra 1,3 cm, Marte 0,7 cm, Júpiter 14,3 cm, Saturno 12,0 cm, Urano 5,0 cm e Neptuno 4,9 cm.

Sugestão: a maquete anterior pode ser realizada pintando os planetas numa t-shirt, cumprindo a escala dos planetas e pintando apenas uma fração do Sol.



Fig. 2a e 2b: Exemplos de camisetas.

### Modelo de distâncias

Por comparação das distâncias entre os planetas e o Sol é possível elaborar outra maquete para colocar num qualquer corredor da escola. Primeiro, basta cortar uma cartolina em tiras de 10 cm de comprimento, que uniremos para formar uma longa fita de vários metros (figura 3). A seguir, são colados, nas distâncias correspondentes, os nomes dos diferentes planetas. Lembrar os estudantes que a distância entre os planetas não corresponde a uma escala de diâmetros.



Fig. 3: Maquete de distâncias

À escala sugerida utilizado os planetas seriam mil vezes mais pequenos já que a escala é de 1 cm para cada 10 000 000 de km, enquanto na atividade anterior era de 1 cm para 10 000 km. Na escala de 1 cm para cada 10 000 000 de km as distâncias obtidas são: Mercúrio 6 cm, Vénus 11 cm, Terra 15 cm, Marte 23 cm, Júpiter 78 cm, Saturno 143 cm, Urano 288 cm e Neptuno 450 cm.

Sugestão: Uma variação interessante para este modelo consiste em usar um rolo de papel higiênico utilizando a escala de uma porção de papel para cada 20 milhões de km.

### Modelo de diâmetros e distâncias

O desafio seguinte consiste em combinar as duas anteriores atividades e produzir um modelo que represente

os corpos à escala assim como às correspondentes distâncias entre eles. Não é tão simples como parece encontrar uma escala que permita representar os planetas com objetos não sejam demasiado pequenos e em que as distâncias entre eles que não sejam exageradamente grandes, já que nesse caso não seriam representáveis e o modelo seria pouco útil para os alunos. Como sugestão, é uma boa ideia usar o pátio da escola para fazer o modelo e usar bolas para os planetas já que existem bolas de diversos diâmetros.

Oferecemos uma possível solução como exemplo. Num extremo do pátio colocamos uma bola de basquete de aproximadamente 25 cm de diâmetro que representa o Sol. Mercúrio será a cabeça de uma agulha (1 mm de diâmetro) situada a 10 m do Sol. A cabeça de outra agulha, um pouco maior (2 mm de diâmetro) será Vénus a 19 m do Sol, enquanto a Terra será a cabeça de outra agulha como a anterior (2 mm) a 27 m do Sol. Marte é outra cabeça de agulha, um pouco menor (1 mm) situada a 41 m do Sol.



Fig. 4: O Sol e os planetas do modelo de diâmetros e distâncias.

Normalmente o pátio da escola termina aqui, se é que não acabou antes. Os seguintes planetas terão que estar postos noutros lugares fora do pátio, mas próximos da escola, para que os alunos conheçam as distâncias. Uma bola de ping-pong (2,5 cm de diâmetro) corresponde a Júpiter, a 140 m do Sol. Outra bola de ping-pong (2 cm de diâmetro) será Saturno, a 250 m do Sol. Um berlinde (1 cm de diâmetro) representará Urano, a 500 m do Sol, e outro berlinde (1 cm), situado a 800 m, será Neptuno.

É necessário ressaltar que este sistema planetário não cabe em nenhuma escola. Mas deve-se considerar que se reduzirmos as distâncias, os planetas seriam menores que a cabeça de uma agulha e praticamente seriam impossíveis de visualizar. Como tarefa final, os alunos podem calcular qual é a escala utilizada para elaborar este modelo.

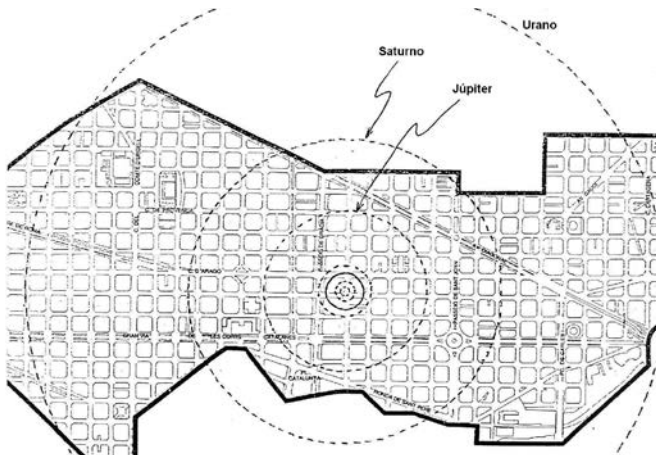


Fig. 5: Mapa ampliado de Barcelona com alguns planetas.

### Modelo na cidade

A ideia é simples: usar a escala de um mapa da localidade para imaginar a posição dos diferentes planetas, assumindo que o Sol está situado na porta da escola. Como exemplo, é apresentado o plano de Barcelona com diferentes objetos (frutas e legumes) que estariam postos nas diferentes ruas para, desta forma, podermos imaginar melhor as dimensões. Como exercício, sugere-se a realização do mesmo trabalho na própria localidade.



Fig. 6a e 6b: Fotos da cidade de Metz.

No mapa da figura, Mercúrio seria um grão de caviar, Vénus e a Terra ervilhas, Marte um grão de pimenta, Júpiter uma laranja, Saturno uma tangerina e Urano e Neptuno um par de nozes. Para o Sol, como não há nenhuma esfera vegetal suficientemente grande, os próprios alunos terão que imaginar uma esfera do tamanho de uma máquina de lavar louças. Qualquer leitor pode fazer o mesmo na sua própria localidade.

Na cidade de Metz (França) há um Sistema Solar disposto através das suas ruas e praças, com os correspondentes planetas acompanhados de painéis informativos para o transeunte.

### Modelo de distâncias-luz

Em astronomia, é comum usar o ano-luz como unida-

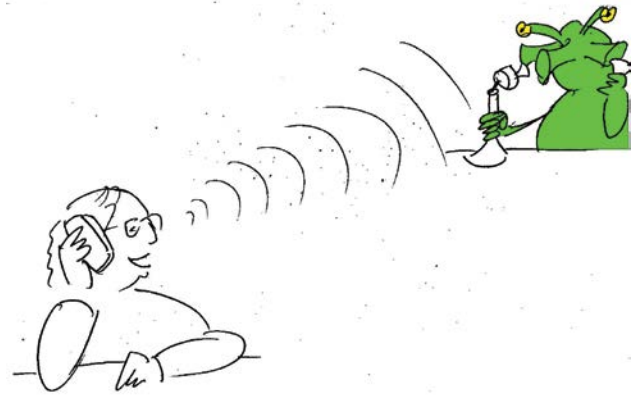


Fig. 7: Outro exemplo de modelo.

de de medida, que facilmente é confundida com uma medida de tempo. Este conceito pode ser ilustrado usando um modelo do Sistema Solar. Como a velocidade da luz é  $= 300\,000\text{ km/s}$ , a distância correspondente a 1 segundo-luz é de  $300\,000\text{ km}$ . Por exemplo, para a Lua, que está posicionada a  $384\,000\text{ km}$ , o tempo que a luz demora em chegar da Lua à Terra é de

$$\frac{384.000}{300.000} = 1,3 \text{ segundos.}$$

Usando estas unidades será solicitado aos alunos que calculem o tempo necessário para que a luz do Sol chegue a cada um dos planetas do Sistema Solar (como solução: aqui ficam os tempos solicitados: o tempo que a luz do Sol demora a chegar a Mercúrio que é de 3,3 minutos; a Vénus 6,0 min.; à Terra 8,3 min.; a Marte 12,7 min.; a Júpiter 43,2 min.; a Saturno 1,32 horas; a Urano 2,66 horas; e a Neptuno 4,16 horas). Poderá propor aos alunos que imaginem como seria uma videoconferência entre o Sol e um planeta à escolha.

### Modelo de tamanhos aparentes do disco solar de cada planeta

De um planeta, por exemplo, a Terra, o Sol observa-se sob um ângulo  $\alpha$  (figura 8). Para valores de  $\alpha$  muito pequenos, toma-se  $\tan \alpha = \alpha$  (em radianos).

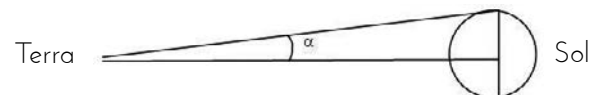


Fig. 8: O Sol é visto da Terra sob um ângulo  $\alpha$ .

Sabendo que o diâmetro solar é de  $1,4 \times 10^6\text{ km}$ , ou seja, um raio de  $0,7 \times 10^6\text{ km}$ , e que a distância Terra-Sol é  $150 \times 10^6\text{ km}$ , deduz-se:

$$\alpha = \text{tg}\alpha = \frac{0,7 \times 10^6}{150 \times 10^6} = 0,0045 \text{ radianos}$$

e em graus:

$$\frac{0,0045 \times 180}{\pi} = 0,255^\circ$$

Ou seja, da Terra, o Sol é visto do tamanho  $2 \times 0,255^\circ = 0,51^\circ$ , isto é, aproximadamente meio grau. Repetindo o mesmo processo para cada um dos planetas, obtêm-se os resultados da tabela 2 e pode-se representar seu tamanho relativo (figura 9).

Planetas	$2 \tan \alpha$	$2\alpha$ (°)	$2\alpha$ (°)aprox
Mercúrio	0,024	1,383	1,4
Vénus	0,0129	0,743	0,7
Marte	0,006	0,352	0,4
Júpiter	0,0018	0,1031	0,1
Saturno	0,000979	0,057	0,06
Urano	0,00048	0,02786	0,03
Neptuno	0,0003	0,0178	0,02

Tabela 2: Tamanho do Sol a partir dos diferentes planetas.

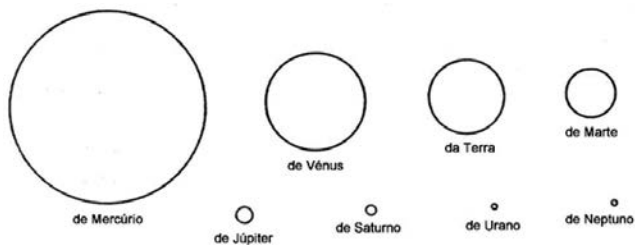


Fig. 9: O Sol visto de cada planeta: Mercúrio, Vénus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano e Neptuno.

### Modelo de densidades

O objetivo deste modelo consiste em procurar amostras de materiais que sejam facilmente manipuláveis e que tenham uma densidade semelhante a cada um dos corpos do Sistema Solar, de modo a poder “sentir nas mãos”.

A partir da tabela 3, das densidades dos planetas, é simples comparar com as densidades de diversos minerais (em todas as escolas costuma haver uma coleção de materiais) ou nalguns casos usar amostras de outros

Planetas	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Sol	1,41
Mercúrio	5,41
Vénus	5,25
Terra	5,52
Lua	3,33
Marte	3,9
Júpiter	1,33
Saturno	0,71
Urano	1,3
Neptuno	1,7

Tabela 3: Densidades dos corpos do Sistema Solar.



Fig. 10: Modelo de densidades.

Minerais	Densidade	Outros materiais	Densidade
Gesso	2,3	Glicerina	1,3
Ortosa	2,6	Rolha	0,24
Enxofre	1,1-2,2	Alumínio	2,7
Halite	2	Ferro	7,86
Quartzo	2,65	Cimento	2,7 - 3,1
Bórax	1,7	Vidro	2,4 - 2,8
Blenda	4	Estanho	7,3
Pirita	5,2	Argila	1,8 - 2,5
Hematites	5,4	Baquelite	1,25
Calcite	2,7	Madeira de roble	0,90
Galena	7,5	Madeira de pino	0,55

Tabela 4: Exemplos de densidades de alguns materiais.

materiais fáceis de encontrar, como o vidro, cerâmica, madeira, plásticos, etc. A seguir apresentamos a tabela 4 com alguns exemplos de densidades que sirvam para a orientação de alguns materiais.

Em caso de utilizar outro tipo de material que não figure nesta tabela 4, é muito fácil calcular a sua densidade. Basta pegar uma porção deste material, pesá-lo para conhecer  $m$  e introduzi-lo num recipiente de água e medir seu volume,  $V$ . A densidade,  $d$ , do material será,

$$d = \frac{m}{V}$$

Os alunos devem verificar que Saturno “flutuará” na água, porque a sua densidade é menor que 1.

### Modelo de achatamento dos planetas

Para visualizar a deformação (achatamento) dos planetas gasosos devido à força centrífuga gerada pela sua rotação, construiremos um modelo simples.

Tal como pode ser visto na figura 11, com um pau de madeira e umas tiras de cartolina é possível construir

este modelo simples que reproduz o achatamento dos planetas do Sistema Solar devido à rotação.

1. Recorte tiras de cartolina de 35 x 1 cm.
2. Amarre as duas extremidades das tiras de cartolina a um pedaço de pau cilíndrico, de 50 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro, fazendo com que não subam ou baixem pela parte superior, enquanto na parte inferior possam ser deslocados com liberdade ao longo do pedaço de pau.
3. Gire o pau de madeira, movendo-o entre as duas mãos e fazendo um rápido movimento de rotação num sentido e depois no outro. Observe como a força centrífuga deforma as bandas de cartolina (figura 11) da mesma forma que atua sobre os planetas.



Fig. 11: Modelo para simular o achatamento.

### Modelo das velocidades de rotação.

Todos os planetas orbitam o Sol com diferentes velocidades e períodos orbitais (tabela 5). Sabendo o período e a distância média ao Sol pode ser deduzida a velocidade orbital média do planeta. Veja o exemplo do caso da Terra, mas que pode ser repetido para qualquer outro planeta.

O comprimento de uma revolução orbital é  $L = 2\pi R$ , pelo que a velocidade orbital média é

$$v = \frac{L}{T} = \frac{2\pi R}{T}$$

Para a Terra o período é 365 dias, então  $v = 2\,582\,750$  km/dia = 107 740 km/h = 29,9 km/s, onde a distância



Fig. 12a, 12b e 12c: Simulando o movimento circular dos planetas.

Planeta	Período orbital (dias)	Distancia al Sol (km)	Velocidade orbital média (km/s)	Velocidade orbital média (km/h)
Mercúrio	87,97	$57,9 \times 10^6$	47,87	172 440
Vénus	224,70	$108,3 \times 10^6$	35,02	126 072
Terra	365,26	$149,7 \times 10^6$	29,50	107 208
Marte	686,97	$228,1 \times 10^6$	24,13	86 688
Júpiter	4 331,57	$778,7 \times 10^6$	13,07	47 052
Saturno	10 759,22	$1.430,1 \times 10^6$	9,67	34 884
Urano	30 799,10	$2.876,5 \times 10^6$	6,84	24 876
Neptuno	60 190,00	$4.506,6 \times 10^6$	5,48	19 558

Tabela 5: Dados orbitais dos corpos do Sistema Solar.

da Terra ao Sol =  $150 \times 10^6$  km. De notar que o Sol também orbita o centro da galáxia com uma velocidade de 220 km/s, que é o mesmo que 800 000 km/h.

O mais rápido é Mercúrio, o mais próximo do Sol, e o mais lento é Neptuno, o mais afastado. Os romanos já tinham observado que Mercúrio era o mais rápido de todos os planetas e por isso representaram-no como o mensageiro dos deuses, com asas nos pés. O período orbital, ou um “ano” em mercúrio dura apenas 88 dias. Mesmo através de observação a olho nu, durante algumas semanas é fácil comprovar que Júpiter e Saturno se movimentam mais lentamente sobre as constelações zodiacais do que Vénus ou Marte.

Existe uma forma simples de verificar a relação ente distância e período orbital.

Começamos por amarrar um objeto um pouco pesado a um pedaço de corda. Se segurarmos a corda pela outra extremidade, giraremos o objeto num movimento circular acima da nossa cabeça. Veremos que se soltarmos um pouco de corda (fazendo com que a corda que gire fique maior) o objeto demora mais tempo a completar um período orbital. Ao contrário, se puxarmos a corda (reduzindo o tamanho livre para girar) demora menos tempo.

Podemos preparar um modelo de Sistema Solar com objetos e pedaços de corda de comprimentos semelhantes aos raios das órbitas planetárias (supondo que todos viajem em movimento circular). Em vez de cortar um fio separado para cada planeta, use uma escala apropriada e meça as distâncias corretas, a partir do objeto pesado, e faça um nó em cada um desses pontos. Desta forma a corda pode ser agarrada pela localização de um nó enquanto se gira o objeto pesado.

Para usar o modelo é necessário segurar uma das cordas pela zona do nó e girá-la acima da nossa cabeça,

Planeta	raio equatorial (km)	densidade (g/cm <sup>3</sup> )	gravidade superficial (m s <sup>-2</sup> )
Lua	1 738	3,3	1,62
Mercúrio	2.439	5,4	3,70
Vénus	6.052	5,3	8,87
Terra	6.378	5,5	9,81
Marte	3.397	3,9	3,71
Júpiter	71.492	1,3	24,8
Saturno	60.268	0,7	8,96
Urano	25.559	1,2	8,69
Neptuno	25.269	1,7	11,00

Tabela 6: Tamanho, densidade e gravidade superficial dos corpos do Sistema Solar.

num plano paralelo ao solo com a mínima velocidade possível para manter a órbita. Verificamos que o objeto necessita de menos tempo para uma rotação completa quando raio é menor.

### Modelo de gravidades superficiais

A fórmula da força gravitacional

$$F = G \cdot \frac{M m}{d^2}$$

permite calcular a gravidade superficial,  $g$ , que atua sobre a superfície de um planeta com massa  $M$ . Considerando a massa unidade ( $m = 1$ ) na superfície do planeta ( $d = R$  o raio do planeta), obtemos

$$g = \frac{G M}{R^2}$$

onde  $g$ , a constante de gravitação universal, tem o valor de  $6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ . Substituindo a massa do planeta por ,

$$M = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho$$

onde  $\rho$  é a densidade do planeta e  $R$  o seu raio, então:

$$g = \frac{4}{3} \pi G \rho R$$

Substituindo estas duas últimas variáveis pelos valores listados tabela 6 (após conversão do raio para metro e a densidade para kg/m<sup>3</sup>, com 1000 kg/m<sup>3</sup> = 1 g/cm<sup>3</sup>), é possível calcular o valor da gravidade superficial,  $g$ , de todos os planetas.

Veamos alguns exemplos,

$$g_{\text{mercúrio}} = \frac{4}{3} \pi \times G \times 2439 \times 10^3 \text{ m} \times 5400 \text{ kg m}^{-3} = 3.7 \text{ m s}^{-2}$$

$$g_{\text{vénus}} = \frac{4}{3} \pi \times G \times 6052 \times 10^3 \text{ m} \times 5300 \text{ kg m}^{-3} = 8.9 \text{ m s}^{-2}$$

De forma semelhante é possível calcular  $g$  para os restantes planetas. Tal como na tabela 7, a gravidade à superfície é muitas vezes expressa relativamente à da Terra, indicada pela letra  $g$ .

Planeta	Gravidade (m·s <sup>-2</sup> )	Gravidade (relativamente à Terra)
Lua	1,62	0,16
Mercúrio	3,70	0,37
Vénus	8,87	0,86
Terra	9,80	1,00
Marte	3,71	0,38
Júpiter	23,12	2,36
Saturno	8,96	0,91
Urano	8,69	0,88
Neptuno	11,00	1,12

Tabla 7: Gravidades superficiais, absolutas e relativas, para cada corpo do Sistema Solar.



Fig.13a e 13b: Balança de casa de banho com o disco substituído.



Fig. 14: Modelo do Sistema Solar com balanças de casa de banho.

### Modelo das balanças de casa de banho

Neste caso o objetivo do modelo consiste em preparar um conjunto de 9 balanças de casa de banho (8 planetas e a Lua) para que os estudantes possam simular a sua pesagem em cada um dos planetas e na Lua.

Como o procedimento é semelhante para cada planeta, apenas será explicado para um deles. Essencialmente, a ideia é abrir uma balança de casa de banho e substituir o disco com as marcações por outro com os novos pesos, que serão marcados sobre o círculo, calibrados para um determinado planeta.

1. Primeiro abra a balança. Na maioria dos modelos há duas molas que fixam a base. Lembre que é necessário montar tudo novamente (figuras 13a e 13b).
2. Após aberta a balança, é necessário substituir, ou colocar em cima, o disco de pesos apropriados para o outro planeta.
3. Na tabela seguinte estão as gravidades superficiais da Lua e dos diferentes planetas do Sistema Solar. Numa coluna figuram em valores absolutos ( $m\ s^{-2}$ ) e na outra em valores relativos à gravidade terrestre. Estes valores são os que devem aplicar-se às unidades de peso “terrestres” da balança para converter nos valores correspondentes a outro planeta (apenas é necessário fazer uma proporção, ou regra de três).
4. Finalmente, é necessário fechar a balança para poder comprovar o que pesa nesse planeta.



Fig. 15a: Simulando crateras. Fig. 15b: Crateras resultantes.

### Modelos de crateras

A maioria das crateras do Sistema Solar não tem origem vulcânica, mas são o resultado da queda de meteoroides do espaço sobre a superfície dos planetas e satélites.

1. Primeiro cubra o chão com jornais velhos para não o sujar.
2. Coloque, dentro de uma bandeja, uma camada de 2 a 3 cm de farinha, distribuindo-a com uma peneira para que a superfície fique bem lisa.
3. Coloque uma camada de alguns milímetros de cacau em pó, sobre a farinha, com a ajuda de uma peneira (figura 15a).
4. De uma altura de cerca de 2 metros, deixar cair o

Planeta	R Radio ecuatorial. (km)	g Gravedad superficial reducida
Mercurio	2.439	0,378
Venus	6.052	0,894
Tierra	6.378	1,000
Marte	3.397	0,379
Júpiter	71.492	2,540
Saturno	60.268	1,070
Urano	25.559	0,800
Neptuno	25.269	1,200

Tabla 8: Radios y gravidades superficiales de los cuerpos del Sistema Solar.

projétil: uma colher de sopa de cacau em pó. Ao cair deixará marcas semelhantes às crateras de impacto (figura 15b).

5. É possível fazer a experiência variando a altura, o tipo, a forma ou a massa dos projéteis, etc. É possível conseguir, inclusive, o pico central de uma cratera.

### Modelos de velocidades de escape

Se a velocidade de lançamento de um foguetão não for muito grande, a força gravitacional do próprio planeta fá-lo cair novamente sobre sua superfície. Se a velocidade de lançamento é suficientemente grande o foguetão escapa do campo gravitacional do planeta. Vejamos qual é a velocidade limite acima da qual o foguetão poderá escapar, isto é, a velocidade mínima de lançamento ou velocidade de escape.

Considerando as fórmulas do movimento uniformemente acelerado, onde  $e$  é o espaço percorrido e  $a$  a aceleração,

$$e = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t$$

$$v = a t + v_0$$

Se substituirmos a aceleração por  $g$  e for considerada a velocidade inicial  $v_0$  nula, verificamos que na superfície do planeta  $R = \frac{1}{2} g t^2$ , e também,  $v = gt$ . Eliminando a variável tempo,

$$v = \sqrt{2 g R}$$

onde podemos substituir os valores de  $g$  e  $R$  pelos que figuram na tabela 6, para calcular a velocidade de escape para cada planeta. Como exemplo, calculamos a velocidade de escape de alguns planetas. Para Terra,

$$v_{Terra} = \sqrt{2 g R} = \sqrt{2 \times 9,81 \text{ m s}^{-2} \times 6\,378 \times 10^3 \text{ m}} =$$

$$= 11\,186 \text{ m/s} \approx 11,2 \text{ km/s}$$

De forma semelhante, para o planeta mais pequeno,

Mercúrio,

$$v_{Mercúrio} = \sqrt{2 \times 3,78 \text{ m s}^{-2} \times 2\,439 \times 10^3 \text{ m}} = 4\,294 \text{ m/s} \approx$$

$$\approx 4,3 \text{ km/s}$$

E para o maior planeta, Júpiter,

$$v_{Júpiter} = \sqrt{2 \times 23,1 \text{ m s}^{-2} \times 71\,492 \times 10^3 \text{ m}} = 57\,471 \text{ m/s} \approx$$

$$\approx 57,5 \text{ km/s}$$

É evidente que é mais fácil lançar um foguetão a partir de Mercúrio do que da Terra, mas é mais difícil lançar um foguetão a partir de Júpiter, onde a velocidade de escape é de cerca de 60 km/s.

(Para poder comparar os resultados acrescentamos que os valores das velocidades de escape aceites para cada corpo do Sistema Solar são os seguintes: Mercúrio 4,3 km/s, Vénus 10,3 km/s, Terra 11,2 km/s, Marte 5,0 km/s, Júpiter 59,5 km/s, Saturno 35,6 km/s, Urano 21,2 km/s e Neptuno 23,6 km/s. Como se pode observar, os nossos cálculos, simples, fornecem resultados aceitáveis).

### Modelo de foguete com uma pastilha efervescente

Como exemplo de foguete, que pode ser lançado em sala de aula sem qualquer perigo, propomos o seguinte:



Fig. 17: Vários foguetes.

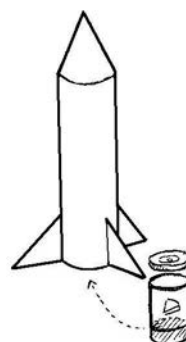


Fig. 18: Esquema simplificado.



Fig. 16a, 16b, 16c e 16d: O processo, em quatro fotos.

te foguetão, que usa como propulsor uma aspirina ou uma pastilha efervescente. Começamos por recortar o modelo pelas linhas contínuas e colar nas linhas tracejadas, de acordo com a fotografia.

Usaremos uma cápsula de plástico, como as de guardar comprimidos ou comida para peixes, confirmando que cabe dentro do cilindro do foguetão. Depois colamos os três triângulos como suportes do corpo do foguetão e, finalmente, acrescentamos cone na parte superior do cilindro (figuras 16a, 16b, 16c, 16d, 17, 18, 19a, 19b e 19c).

Após finalizar o corpo do foguetão, é necessário realizar o lançamento. Para isso colocaremos água dentro da cápsula de plástico, até cerca de  $1/3$  da sua altura (aproximadamente 1 cm). Acrescentamos  $1/4$  da aspirina efervescente (ou outra pastilha efervescente). Colocamos a tampa e o foguete em cima. Após aproximadamente 1 minuto o foguete descola. Evidentemente que podemos repetir tantas vezes quanto se desejar o processo (ainda sobram  $3/4$  de aspirina, então aproveitem lançando foguetes...). Também é possível lançar foguetões usando bicarbonato de sódio e vinagre.

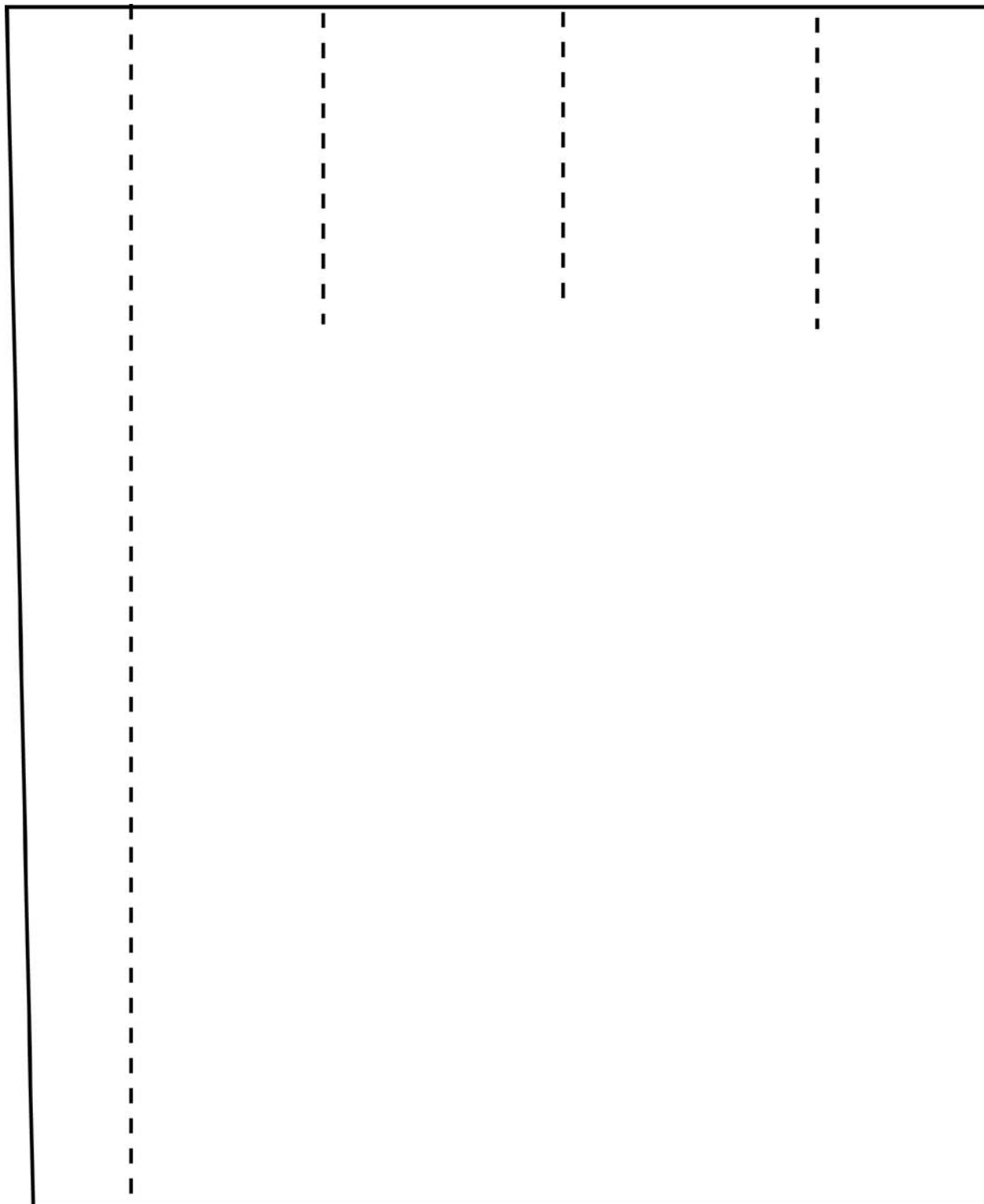


Fig. 19a: Corpo do foguete. É necessário colar as asas na zona pontilhada.

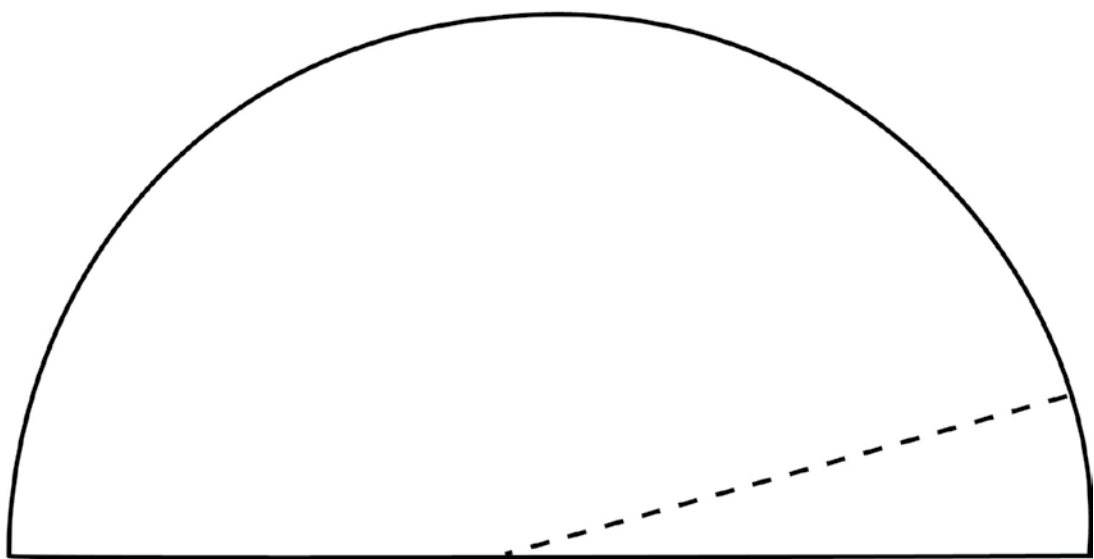
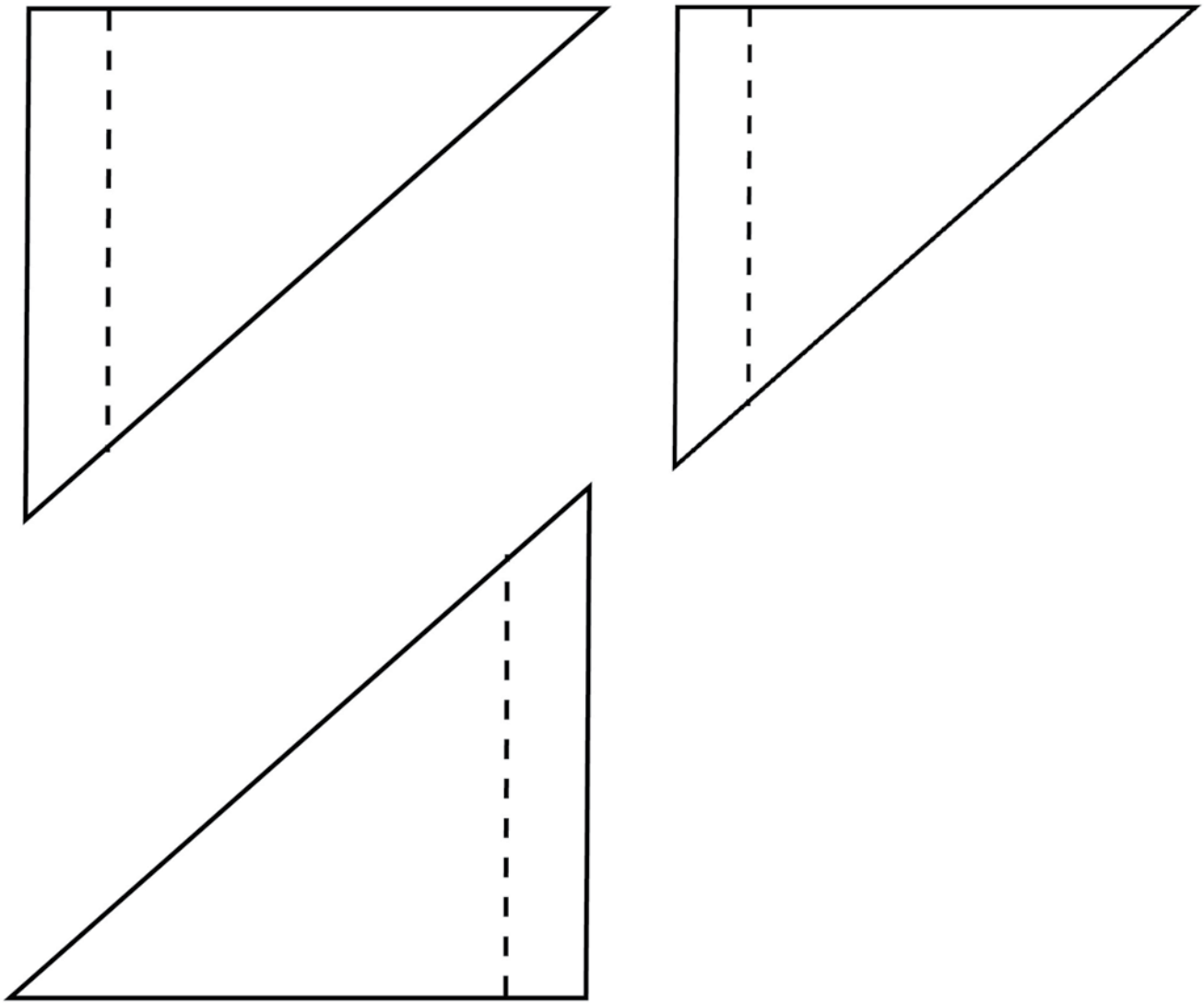


Fig. 19b: Modelo para as três asas. Fig.19c: Parte cuneiforme na zona superior do foguete.

## Modelos de sistemas exoplanetários

Como vimos anteriormente, a distância para Alpha Centeuri, a estrela mais perto de nós, é enorme comparada com a distância aos planetas dos Sistema Solar. De facto, Alpha Centeuri é cerca de 10 000 vezes mais afastada que Neptuno, o planeta mais distante. Estas enormes distâncias fizeram com que a deteção de planetas em torno de outras estrelas impossível até que técnicas de observação sofisticadas fossem desenvolvidas, perto do final do século passado.

### Introdução aos exoplanetas

Atualmente existem dois métodos dominantes para a descoberta de exoplanetas. São ambos indiretos, onde a presença de um sistema planetário é inferida da observação da estrela central.

O método das velocidades radiais (VR) foi o primeiro que descobriu um exoplaneta em volta de uma estrela normal, com a descoberta do 51 Pegasus b, em 1995. Neste método, é medida a oscilação da estrela central devido ao seu movimento em torno do centro de massa do sistema estrela-planeta. Este movimento da estrela

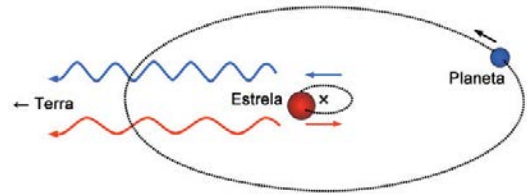


Fig. 20a: Deteção de planetas pelo método da velocidade radial (VR).

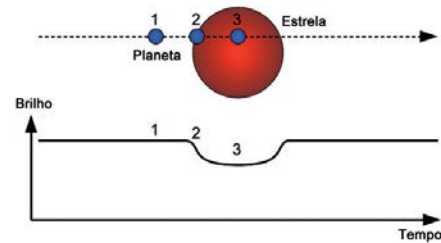


Fig. 20b: Deteção de planetas pelo método de trânsito.

central induz pequeníssimas alterações na luz da estrela, no sentido do vermelho ou do azul (figura 20a), devido ao efeito Doppler. Com este método, podemos determinar a massa do planeta relativamente à da estrela central. Na entanto, na prática, não sabemos a orientação da maioria dos sistema detetados com o mé-

Nome do planeta	Distância média (ua)	Período orbital, dias	Massa* (massas de Júpiter)	Descoberta (ano)	Raio
Ups And b	0,059	4,617	0,69	1996	0,9 $R_{Jup}$ , 62 000 km*
Ups And c	0,83	241,52	1,98	1999	1,2 $R_{Jup}$ , 88 000 km*
Ups And d	2,51	1274,6	3,95	1999	1,5 $R_{Jup}$ , 110 000 km*
Gl 581 e	0,03	3,149	0,006	2009	1,2 $R_T$ , 8 000 km*
Gl 581 b	0,04	5,368	0,049	2005	2,5 $R_T$ , 16 000 km*
Gl 581 c	0,07	12,929	0,016	2007	1,7 $R_T$ , 11 000 km*
Kepler-62 b	0,0553	5,714932	<0,03	2013	1,3 $R_T$ , 8 400 km*
Kepler-62 c	0,0929	12,4417	<0,013	2013	0,5 $R_T$ , 3 400 km*
Kepler-62 d	0,12	18,16406	<0,044	2013	1,9 $R_T$ , 12 000 km*
Kepler-62 e	0,427	122,3874	<0,113	2013	1,6 $R_T$ , 10 000 km*
Kepler-62 f	0,718	267,291	<0,11	2013	1,4 $R_T$ , 9 000 km*

Tabela 8: Três sistemas extrassolares com múltiplos planetas. Dados retirados do *Extrasolar Planets Catalog*<sup>2</sup> (exceto a última coluna). \*Estes planetas não transitam e os seus diâmetros foram calculados assumindo que a densidade do planeta é igual à densidade de Júpiter ( $1\,330\text{ kg/m}^3$ ) para o caso de planetas gasosos. Para planetas considerados semelhantes à Terra, o diâmetro foi calculado usando a densidade da Terra ( $5\,520\text{ kg/m}^3$ ).

Nome do Planeta	Distância média, (ua)	Período orbital, (anos)	Massa, Massas de Júpiter	Raio, (km)
Mercúrio	0,3871	0,2409	0,0002	2 439
Vénus	0,7233	0,6152	0,0026	6 052
Terra	1,0000	1,0000	0,0032	6 378
Marte	1,5237	1,8809	0,0003	3 397
Júpiter	5,2026	11,8631	1	71 492
Saturno	9,5549	29,4714	0,2994	60 268
Urano	19,2185	84,04	0,0456	25 559
Neptuno	30,1104	164,80	0,0541	25 269

Tabela 9: Planetas do Sistema Solar.

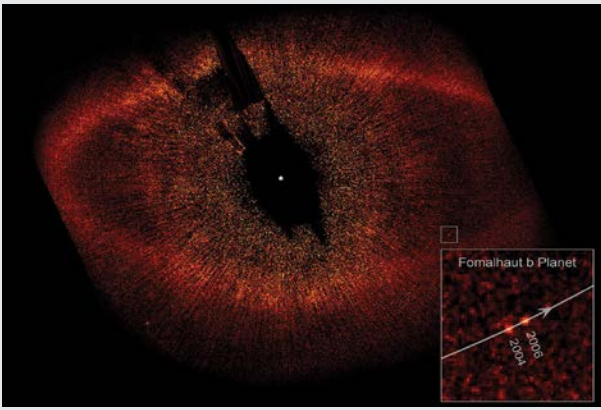


Fig. 20: Planeta Fomalhaut b dentro da nuvem de pó interplanetário de Fomalhaut numa imagem do Hubble Space Telescope (Foto: NASA).

todo VR, e a massa do planeta que podemos calcular é a massa mínima (o que significa que a massa real pode ser bem maior). O outro método importante, denominado método de trânsito, é baseado na observação da variação do brilho de uma estrela quando um dos seus planetas passa (transita) na sua frente, ocultando uma pequena parte do seu disco estelar (figura 20b). Com o método do trânsito, o tamanho do planeta,  $R_p$ , relativamente ao da estrela central,  $R_*$ , pode ser medido e é dado, aproximadamente, por.

$$R_p / R_* = \sqrt{dF / F}$$

onde  $dF / F$  é a alteração relativa observada no brilho durante o trânsito do planeta (por exemplo,  $dF / F = 0,01$  se uma estrela diminui o brilho em 1% durante o trânsito).

A NASA (<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>) mantém um catálogo atualizado de objetos descobertos fora de nosso Sistema Solar. Em 2016 havia mais de 3 000 planetas confirmados. São os chamados exoplanetas. A nomenclatura dos exoplanetas é simples. É colocada uma letra depois do nome da estrela, começando com “b” para o primeiro planeta encontrado no sistema (por exemplo, 51 Pegasi b). O próximo planeta detetado no sistema é denominado com a letra seguinte do alfabeto, c, d, e, f, etc (51 Pegasic, 51 Pegasi d, 51 Pegasi e...).

A maioria dos planetas conhecidos têm massas comparáveis à de Júpiter, que é o maior planeta de nosso Sistema Solar. É por esta razão pela que, com frequência, se comparam as massas e tamanhos dos planetas extrassolares com a massa, ( $1,9 \times 10^{27}$  kg), e raio, (71 492 km), de Júpiter. Apenas alguns deles (cerca de 20) têm massa semelhante à Terra. Há, no entanto, mais planetas (cerca de 600, 20% dos conhecidos) com tamanho semelhante à Terra, até 1,5 (raio da Terra).

É esperado que estes planetas sejam os mais comuns, mas as atuais técnicas de deteção têm mais sucesso na deteção de objetos mais massivos ou maiores.

Nesta secção são considerados exemplos de sistemas planetários com mais de três planetas conhecidos. A tabela 8 mostra planetas em redor das estrelas Ups Andromeda, Gliese 581 e o sistema Kepler-62., concretamente se considerarão alguns sistemas com mais de três planetas conhecidos. Os sistemas planetários de Ups Andromeda e Gliese 581 foram descobertos com o método VR e para esses planetas conhecemos a sua massa mínima, mas não os seus tamanhos. No caso da Gliese 581, o planeta “d” está desaparecido, tendo sido a sua descoberta removida, muito provavelmente devido a interferência nos sinais detetados. Os planetas da Kepler-62 foram descobertos pelo método dos trânsitos. Devido a isso, os seus tamanhos são conhecidos. Da sua massa conhecemos apenas os seus limites superiores (massas máximas), já que são demasiado pequenos (e leves) para serem detetados pelo método das VR. Há, no entanto, muitos planetas que foram detetados pelos dois métodos, trânsitos e VR, pelo que sabemos as suas massas e os seus tamanhos.

Muitos dos exoplanetas estão muito perto da estrela central, como muitos dos da tabela acima, com órbitas mais próximas da estrela do que Mercúrio está do Sol. Outros possuem planetas mais longínquos (HD 8799 tem um sistema planetário com três planetas mais ou menos tão distantes como Neptuno está do Sol). Uma das possibilidades de visualizar estes dados consiste em construir modelos à escala do sistema planetário escolhido. Isto permitirá comparar facilmente uns com os outros e com nosso Sistema Solar. Atualmente, sabemos que existem exoplanetas em redor de diferentes tipos de estrelas. Em 1992, os radioastrónomos anunciaram a descoberta de planetas em redor do pulsar PSR 1257 +12. Em 1995 foi anunciada a primeira deteção de exoplanetas em redor de uma estrela do tipo do Sol, 51 Pegasi, e desde essa data foram detetados exoplanetas em órbita em torno de: uma estrela anã vermelha (Gliese 876, em 1998), uma estrela gigante (Iota Draconis, em 2001), uma estrela anã castanha (2M1207, em 2004), uma estrela de classe A (Fomalhaut, em 2008), e um planeta desintegrado em redor de uma estrela anã (WD1145-1017), entre outras.

#### Determinação do diâmetro de exoplanetas

Para planetas como os que orbitam Ups And, encontrados pelo método das velocidades radiais, não são conhecidos os tamanhos. Aqui estimaremos o seu diâmetro de uns quantos exoplanetas incluídos na tabela 8.

Podemos atingir este objetivo assumindo que conhecemos a densidade do exoplaneta. Para o nosso estudo consideramos que os planetas gasosos têm a mesma densidade que Júpiter e que os exoplanetas terrestres têm a mesma densidade que o planeta Terra. Por definição, a densidade de um corpo de massa  $m$  é dada pela expressão

$$\rho = m/V$$

A massa  $m$  do exoplaneta que aparece na tabela 8, e o volume  $V$  são obtidos considerando o planeta como uma esfera

$$V = \frac{4 \cdot \pi \cdot R^3}{3}$$

Se substituirmos esta fórmula na anterior, é possível obter o raio do exoplaneta,

$$R = \sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi\rho}}$$

Propomos ao leitor calcular o diâmetro de Gliese 581d (exoplaneta terrestre) supondo  $\rho = 5\,520 \text{ kg/m}^3$  (a densidade da Terra). Depois repetir os cálculos para um exoplaneta não terrestre como o primeiro sistema planetário múltiplo que foi descoberto em redor de uma estrela da sequência principal, Upsilon Andromedae. Este sistema consiste em três planetas, todos eles semelhantes a Júpiter: planetas Upsilon b, c e d. Calcular os seus diâmetros assumindo  $\rho = 1\,330 \text{ kg/m}^3$  (a densidade de Júpiter) e comparar os resultados com os da tabela 8.

Usando estes resultados e a distância média que aparece na tabela 8, é possível produzir um modelo na secção seguinte.

### Determinação da massa da estrela central

Fazendo uso dos valores da tabela 8 e da terceira lei de Kepler, é possível estimar a massa da estrela central  $M$ . A 3ª Lei de Kepler afirma que para um planeta com o período  $P$  e uma órbita de raio  $a$ ,  $a^3/P^2 = \text{constante}$ . Podemos demonstrar que esta constante é a massa da estrela central, expressada em massas solares. Assumindo que o movimento dos exoplanetas em redor da estrela é uma órbita circular de raio  $a$ , é possível escrever:

$$m \cdot \frac{v^2}{a} = \frac{G M m}{a^2}$$

Para este movimento circular, a velocidade  $v$  verifica,

$$v^2 = \frac{G \cdot M}{a}$$

O período,  $P$ , para um movimento circular é

$$P = \frac{2 \pi a}{v}$$

Introduzir o valor da velocidade  $v$ , deduzimos:

$$P^2 = \frac{4 \pi^2 a^3}{G M}$$

E, para cada exoplaneta, usando a terceira lei de Kepler,

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G M}{4 \pi^2}$$

Escrevendo a expressão anterior para a Terra, que gira em torno do Sol, usando  $P = 1$  ano e  $a = 1$  ua, deduzimos a seguinte relação

$$1 = \frac{G M}{4 \pi^2}$$

Se dividirmos as duas últimas igualdades, e usando a massa do Sol como unidade, obtemos

$$\frac{a^3}{P^2} = M$$

na qual  $a$  é o raio da órbita (em ua),  $P$  o período de revolução (em anos) e  $M$  a massa da estrela central (em unidades de massa solar).

Esta relação permite determinar a massa da estrela central em unidades de massas solares. Por exemplo, calcular a massa da estrela de Upsilon Andromedae e Gliese 581 em massas solares (o resultado deve ser 1,03 e 0,03 massas solares, respetivamente).

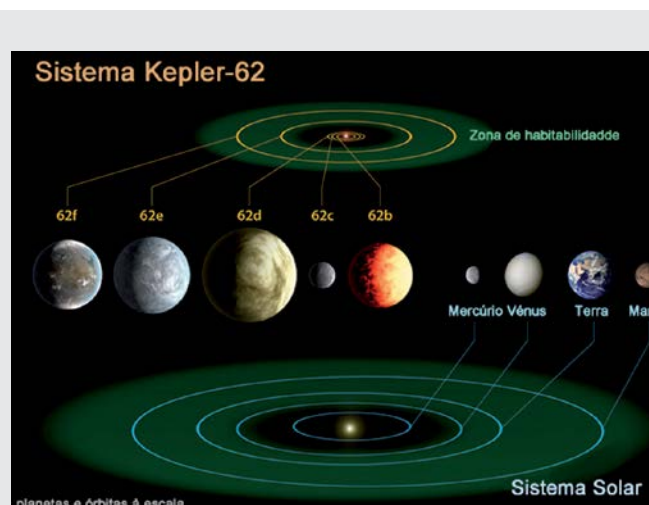


Fig. 21: Comparação entre o sistema Kepler-62 e o Sistema Solar. A região verde indica a zona habitável - a zona onde a vida tal como a conhecemos poderá existir. Fonte: NASA Ames/JPL-Caltech.

## Modelo de escala de um sistema exoplanetário

Em primeiro lugar, vamos escolher a escala do modelo. Para as distâncias, a escala apropriada é: 1 ua = 1 m. Neste caso, todos os exoplanetas podem ser colocados numa sala de aula de tamanho normal, bem como os cinco primeiros planetas de nosso Sistema Solar. Se a atividade for realizada ao ar livre (por exemplo, no pátio da escola) pode ser construído um modelo completo. Para o tamanho dos planetas deve ser utilizada uma escala diferente, por exemplo: 10 000 km = 0,5 cm. Neste caso, o maior planeta do nosso sistema, Júpiter, terá 7 cm de diâmetro e o menor, Mercúrio, terá 0,2 cm de diâmetro. Agora podemos construir o Sistema Solar, ou qualquer dos sistemas da tabela 8, usando os valores de distância média incluídos nas tabelas 8 e 9, e os diâmetros calculados anteriormente. Para as estrelas centrais, podemos calcular os seus tamanhos a partir da relação raio-massa de uma estrela, em que  $R$  e  $M$  estão em unidades de massa solar,

$$R \sim 1,06 M^{0,945}$$

e usar a massa calculada no exercício anterior.

Nos últimos anos percebemos que as configurações dos sistemas planetários são muito diferentes. A parte interna do Sistema Solar está ocupada pelos pequenos planetas rochosos e o primeiro dos planetas gasosos e gigantes, Júpiter, dista 5,2 ua do Sol. Muitos dos exoplanetas giram em redor das suas estrelas muito mais perto que qualquer outro planeta do nosso próprio Sistema Solar orbita em torno do Sol. Isto significa que são muito quentes. Outra diferença é que muitos destes planetas em órbitas muito perto das estrelas são planetas gasosos.

Estas diferenças deverão ser consequências do tipo de observação e dos métodos empregues. O método da velocidade radial é mais sensível quando os planetas estão em órbitas menores e são mais massivos. O método dos trânsitos deteta mais facilmente planetas em órbitas curtas que se encontram mais perto da estrela central. Parece plausível considerar que na maioria dos sistemas de exoplanetas há um ou dois planetas gigantes, com órbitas de dimensões comparáveis às de Júpiter e Saturno. É também expectável que a maioria das estrelas tenha planetas do tipo da Terra em órbitas semelhante à da Terra. A sua deteção é, no entanto, muito difícil e como consequência, muito poucos são conhecidos.

## Habitabilidade de exoplanetas

Consideremos agora a habitabilidade dos exoplanetas. A zona habitável de uma estrela é a região em redor da estrela onde um planeta, com pressão atmosférica sufi-

ciente, consegue manter água em estado líquido à sua superfície. Esta é uma definição conservadora e restrita à vida tal como a conhecemos na Terra. Alguns cientistas planetários sugeriram a inclusão de zonas equivalentes em torno das estrelas, nas quais outros solventes, como o amoníaco e o metano, podem existir na sua forma líquida estável.

Cálculos aproximados indicam que na zona habitável do Sistema Solar, onde a água líquida pode existir (a faixa de temperatura de 0 a 100 °C) estende-se desde 0,8 a 2 ua. A margem interior desta zona situa-se perto da órbita de Vénus e a margem exterior é perto da órbita de Marte (zona verde na figura 21). Existe, no entanto, muitas estimativas para a zona habitável do Sistema Solar (consultar “Zona habitável” na Wikipedia) com uma recente, de Kopparapu, de 013, que coloca a margem interior à distância de 0,99 ua, um pouco menor que a órbita da Terra. Que se saiba, apenas a Terra está habitada, já que Vénus é demasiado quente, com um forte efeito estufa no planeta, enquanto Marte não tem água à superfície e, na melhor das hipóteses, poderá ter vida microbológica. Conhecendo a energia libertada pelas estrelas, as estimativas da zona habitável para o nosso Sistema Solar podem ser facilmente adaptadas a outros sistemas planetários. Uma lista de potenciais planetas habitáveis é fornecida em <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>. Também é fornecida uma tabela onde esses planetas estão ordenados pela semelhança com a Terra (“Earth similarity index =ESI”).

O exemplo mais interessante de um sistema potencialmente habitável é o Kepler-62, onde trânsitos foram descobertos pela missão espacial Kepler, em 2013. Este sistema contém, pelo menos, 5 planetas dentro do raio entre 0,54 e 1,95 raios da Terra.

São de particular interesse os planetas e e f, já que são os melhores candidatos a serem planetas sólidos dentro da zona habitável da sua estrela. O seu raio, 1,61 e 1,41 raios da Terra, respetivamente, coloca-os dentro de um raio onde poderão existir planetas rochosos. Por outro lado, as suas posições, dentro do sistema Kepler-62, indicam que estarão dentro da zona habitável da estrela: a margem de distância onde, pelo menos para algumas condições atmosféricas, estes planetas poderão ter água líquida nas suas superfícies, talvez até cobrindo-os completamente. Para o Kepler-62e, que se encontra perto da margem interior da zona habitável, isto requererá uma camada de nuvens refletoras que reduzirá a radiação que aquece a superfície. O Kepler-62f, por outro lado, encontra-se na margem exterior da zona habitável, tal como Marte no nosso Sistema

Solar. Isto significa que será necessário muito dióxido de carbono para manter a superfície do planeta suficientemente quente para manter a água líquida à sua superfície. Considerando os tamanhos de Marte e de Kepler-62f: Qual dos planetas terá melhores condições para albergar vida, e porquê?

Ainda há muitas perguntas sem respostas a respeito das propriedades dos exoplanetas. Encontrar mais planetas e estudar as suas propriedades e características tem sido a motivação de várias missões espaciais atuais e futuras, tais como as missões Kepler e TESS, da NASA, e as CHEOPS e PLATO, europeias, a última das quais com lançamento previsto para 2024.

.....

## Bibliografia

Berthomieu, F., Ros, R.M., Viñuales, E., “Satellites of Jupiter observed by Galileo and Roemer in the 17th century”, *Proceedings of 10th EAAE International Summer School*, Barcelona, 2006.

Gaitsch, R., “Searching for Extrasolar Planets”, *Proceedings of 10th EAAE International Summer School*, Barcelona 2006.

Ros, R.M., “A simple rocket model”, *Proceedings of 8th EAAE International Summer School*, 249, 250, Barcelona, 2004.

Ros, R.M., “Measuring the Moon’s Mountains”, *Proceedings of 7th EAAE International Summer School*, 137, 156, Barcelona, 2003.

Vilks I., “Models of extra-solar planetary systems”, *Proceedings of 10th EAAE International Summer School*, Barcelona 2006.





**Lanterna de luz vermelha.** Mesmo que, na escuridão, as nossas pupilas se abram lentamente para deixar passar mais luz, o que garante podermos “ver” de noite é a capacidade da “visão noturna” ocular. A visão noturna está relacionada com um dos dois tipos de células fotossensíveis na retina: os bastonetes. Na retina existem dois tipos de células, os cones, sensíveis à cor e que se ativam quando há muita luz, e os bastonetes, que só estão ativos com baixos níveis de iluminação. Se a zona para onde estamos a olhar se ilumina de repente, a pupila fecha-se os bastonetes desativam-se. Mesmo quando a escuridão volta, a pupila demorará um breve intervalo de tempo a abrir-se totalmente de novo, mas os bastonetes demorarão uns 10 minutos a recuperar a visão noturna. Isso não ocorre com a luz vermelha, com a qual podemos iluminar sem problemas o mapa estelar, o chão, etc. Basta uma lanterna normal com um simples filtro de papel vermelho transparente.

**Comida.** É necessário prever o que serão várias horas de atividade, contando com a viagem, a preparação do material, a observação, a recolha e a viagem de volta. A atividade será mais agradável se compartilhamos algo para comer e beber (frio ou quente, em função do tempo).

**Ponteiro laser verde,** É útil para apontar constelações, estrelas, etc. É necessário ser muito cuidadoso com estes tipos de ponteiros. Nunca aponte para os olhos dos participantes na observação, pois pode danificá-los. Esta ferramenta só deve ser manipulada por adultos.

**Roupa.** Mesmo no verão, ao anoitecer a temperatura baixa sempre, com frequência há vento e deve-se considerar que vamos permanecer parados durante muitas horas. A temperatura do dia não serve como referência.

**inóculos, telescópios, câmara fotográfica** (ver mais abaixo). Este material dependo do tipo de observação que pretendemos fazer.

**Se houver nuvens.** Um céu nublado pode atrapalhar todo o plano. Porém, podemos preparar um plano alternativo: contar histórias sobre as personagens das constelações ou falar sobre algum tema de astronomia. Se dispuser de Internet podemos desfrutar do popular Google Earth, mas para observar o céu (Google Sky) ou Marte, ou qualquer outro programa de simulação do céu, ou ver um vídeo sobre astronomia no YouTube.

## Observação a olho nu

É fundamental conhecer o céu a olho nu. Isso significa conhecer os nomes das principais constelações e das estrelas mais brilhantes, para o que apenas é necessário um mapa do céu e, se possível, um ponteiro laser

verde. Também há aplicações muito úteis para iPhone/iPad ou Android que mostram no ecrã as constelações e planetas ao apontar para qualquer parte do céu, usando o GPS do telefone. Como as nuvens não afetam estas aplicações, podem servir como alternativa se o céu estiver encoberto.

As estrelas que podem ser vistas dependem do lugar de onde estivermos: próximo do Polo Norte apenas veremos 50% das estrelas de todo o céu, as que estão no hemisfério norte celeste. Nas proximidades do equador poderemos ver toda a esfera celeste, só dependerá da época do ano. Próximo do Polo Sul veríamos só metade, neste caso as que estão no hemisfério sul.

As constelações e estrelas para conhecer são:

### HEMISFÉRIO NORTE

**Constelações:** Ursa Menor, Ursa Maior e Cassiopeia observam-se sempre. No verão observam-se também Cisne, Lira, Hércules, Boieiro, Coroa Boreal, Leão, Sagitário e Escorpião. As que são observadas no inverno são: Oriente, Cão Maior, Touro, Cocheiro, Andrómeda, Pégaso, Gêmeos, Plêiades.....

**Estrelas:** Polar, Sírio, Aldebará, Betelgeuse, Rigel, Arturo, Antares, etc.

### HEMISFÉRIO SUL

**Constelações:** Cruzeiro do Sul, Sagitário, Escorpião, Leão, Carina, Popa e Vela (estas três constelações formavam a antiga constelação de Argos, o navio dos Argonautas). Também é possível ver Oriente e o Cão Maior do sul.

**Estrelas:** Antares, Aldebará, Sírio, Betelgeuse. No hemisfério sul não existe uma estrela que marque a localização do Polo Sul celeste.

As constelações que se encontram na região denominada “do zodíaco” são observadas dos hemisférios norte e sul, mesmo que mude a sua orientação na esfera celeste.

É interessante seguir a mudança das fases da Lua dia a dia, e a mudança da sua posição relativamente às estrelas. Também se pode observar as mudanças da Lua relativamente aos planetas, notando o seu lento movimento sobre os outros planetas próximos ou em relação às estrelas. Isto é especialmente observável com Vénus ou Mercúrio que se movem mais depressa, quando são observados, ao entardecer. Estes planetas também podem ser vistos ao amanhecer e durante uma noite de observação.

Durante algumas horas após o entardecer, é possível

observar estrelas fugazes (meteoros) em qualquer data, com uma frequência aproximada de 5 a 10 por hora. Em determinadas épocas do ano há “chuvas de estrelas”, em que se observam muitíssimos meteoros. Por exemplo, próximo do dia 3 de janeiro estão as Quadrântidas, com umas 120 por hora, por volta do dia 12 de agosto as Perseidas, com 100/h, em 18 de novembro é o máximo das Leónidas, com 20/h, e entre o dia 12 e 14 de dezembro observam-se as Geminidas, com 120/h. As Perseidas não são visíveis do hemisfério sul.

Há muitos satélites que orbitam na Terra e que ao serem iluminados pelo Sol podem ser vistos da Terra, cruzando lentamente o céu. Como a altitude não costuma ser muita, apenas são observados se o Sol se pôs recentemente. Por exemplo, a ISS é bastante brilhante e demora 2-3 minutos para percorrer a parte visível do céu. Destes satélites e de muitos outros é possível prever a sua passagem sobre um determinado lugar geográfico com uma semana de antecipação (ver [www.heavens-above.com](http://www.heavens-above.com)).



Fig. 3: Trajetória da ISS.



Fig. 4: Ampliação e diâmetro da objetiva.

## Observação com binóculos

Um instrumento astronômico muito útil e acessível são os binóculos. Embora a sua capacidade de ampliação seja normalmente pequena, eles recolhem mais luz do que a nossa pupila, pois servem para ver objetos que a olho nu são pouco luminosos, como aglomerados de estrelas, nebulosas e estrelas duplas. Além disso, têm a vantagem de aumentar as diferenças de cores das estrelas, especialmente quando estão levemente desfocadas.

Costumam ter inscrições como 8x30 ou 10x50. O primeiro número indica a ampliação e o segundo a abertura da lente dianteira, a objetiva, em mm. O mais recomendado para esta atividade é o 7x50. Com maior ampliação, a imagem movimentar-se-á muito, já que é difícil manter o pulso estável, e maiores aberturas aumentam bastante o preço.

Objetos interessantes para serem vistos com binóculos são a galáxia de Andrómeda (M31), o aglomerado de Hércules (M13), o aglomerado de Perseu, o Presépio (M44), a nebulosa de Oriente (M42), toda a zona de Sagitário (nebulosa da Laguna M8, Trífida M20,

Ómega M17, vários aglomerados globulares M22, M55, etc.) e em geral a Via Láctea, que são vistos com muito mais estrelas que a olho nu. No hemisfério sul, Ómega Centauro e 47 Tucano são aglomerados globulares espetaculares.

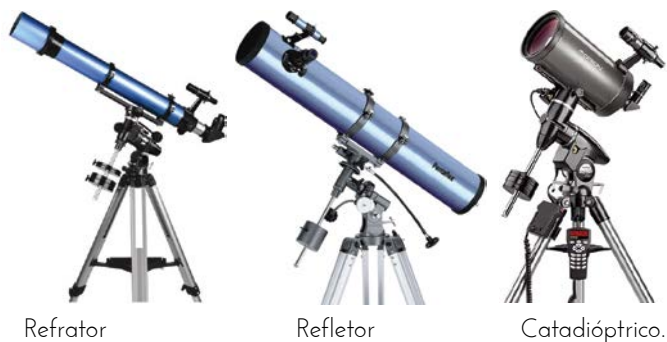
## Observação com telescópio

maioria das pessoas sabe que a missão de um telescópio é ampliar os objetos longínquos, contudo poucas pessoas sabem que tem, além disso, outra missão tão importante como esta: captar mais luz que o olho humano. Desta forma conseguimos ver objetos pouco intensos, que permaneceriam assim, mesmo que aumentássemos a ampliação.

Um telescópio possui duas partes essenciais: a objetivo e a ocular. A primeira é uma lente de grande diâmetro e pouca curvatura (telescópios refratores) ou um espelho parabólico (telescópios refletores). O segundo é uma lente pequena e de grande curvatura, junto à qual, como seu próprio nome indica, colocamos o olho para observar. Costuma ser removível, e dará mais ou menos ampliação.

Quanto maior for a objetiva, mais luz consegue concentrar e poderemos ver objetos mais tênues. Lentes grandes de qualidade são mais caras que espelhos do mesmo diâmetro, por isso os telescópios refletores são mais frequentes. O tipo mais frequente é o newtoniano, que conta com um espelho côncavo no fundo do tubo, que devolve os raios à boca deste, onde há um pequeno espelho secundário formando um ângulo de 45° com o eixo do telescópio, que desvia os raios para o exterior do tubo, onde está a ocular. O espelho secundário bloqueia alguma luz que entra, mas não é significativo. Outro desenho é o tipo Cassegrain, no qual o espelho secundário envia a luz para um orifício central do espelho primário. A ocular é colocada por trás do buraco central do espelho primário. Por último estão os catadióptricos, que costumam ser como estes últimos, mas acrescentando uma lente fina na entrada do tubo, com o qual reduzem muito o comprimento do tubo e o tornam mais leve e transportável.

**A capacidade de ampliação de um telescópio** é proporcionada através do quociente entre o comprimento focal da objetiva e a da ocular. Por exemplo, se tivermos um telescópio com um comprimento focal da objetiva de 1 000 mm e colocarmos uma ocular com comprimento focal de 10 mm, obtemos uma ampliação de 100 vezes (ou x100). Se quisermos duplicar as ampliações, precisaremos de uma objetiva de maior comprimento focal ou colocar uma ocular menor. Isto apresenta um limite prático, já que oculares com com-



Refrator

Refletor

Catadióptrico.

Fig. 5: Diferentes tipos de óticas.

primentos focais pequenos são difíceis de fabricar e dão imagens desfocadas.

Os fabricantes muitas vezes descrevem os telescópios em termos da **razão focal**, como por exemplo,  $f/6$  ou  $f/8$ . A razão focal é o comprimento focal da lente, ou espelho primário, dividido pela abertura e serve para conhecer uma destas duas magnitudes, se a outra for conhecida. Se por exemplo, tivermos um telescópio refrator de  $f/8$  e a objetiva for uma lente de 60 mm de diâmetro, o comprimento focal real do telescópio será a razão focal multiplicada pela abertura, isto é,  $8 \times 60 = 480$  mm. Igualmente para abertura da objetiva, quanto maior a relação focal, menor campo de visão e maior ampliação.

Quanto maior for a abertura de um telescópio, mais luz captará – será mais luminoso – e poderão ver objetos menos intensos. Também será maior sua **capacidade de resolução**, que é a capacidade de ver detalhes: quando é baixa, a imagem fica desfocada, e quando é alta fica muito nítida, com muitos detalhes. A escuridão da noite também influencia: em dias de Lua cheia ou com luminosidade nos arredores, não se observam as estrelas menos intensas.

Outra limitação importante é a **estabilidade atmosférica**. Todos veem como a atmosfera quente de um deserto faz tremer a visão em cenas de filmes com teleobjetivas. Quando olhamos através de um telescópio, pequenas perturbações do ar fazem com que a imagem se mova. Os astrónomos referem-se a isto com o conceito de *seeing*. A atmosfera é a que faz as estrelas piscar.

A imagem vista com um telescópio está invertida, por isso não importa muito: no Cosmos as posições acima e abaixo são muito relativas. Há acessórios que invertem a imagem e colocam-na corretamente, mas com o custo de diminuir um pouco a luminosidade.

A **montagem** é uma peça importante de um telescópio. As de má qualidade fazem que o tubo do telescópio oscile cada vez que é tocado. O resultado é uma

dança na imagem que, além de enjoar o mais entusiasmado, impede de ver os detalhes. É importante que sejam rígidas e estáveis.

Há dois tipos de montagem: a azimutal e a equatorial. A primeira é a mais simples, mas a menos útil. Pode girar à esquerda e direita sobre o eixo vertical, acima e abaixo em redor de um eixo horizontal. A montagem Dobson é um tipo de montagem azimutal muito simples de transportar e usar. Nas montagens equatoriais há dois eixos inclinados formando 90 graus. Um, o polar, deve estar direcionado para o polo norte, se estivermos no hemisfério norte, ou para o polo sul se estivermos no hemisfério sul. Este eixo gira em função das ascensões retas. O outro eixo, o equatorial, dá as declinações. É o usado pelos astrónomos profissionais e pela maioria dos admiradores. Podem levar um motor no eixo equatorial que vai compensando a rotação da Terra. Caso contrário, especialmente com grandes ampliações, a imagem desaparece do campo de visão num tempo surpreendentemente curto.



Montagem azimutal

Montagem ecuatorial

Montagem Dobson

Fig. 6: Diferentes montagens de telescópios.

Caso disponha de uma montagem equatorial, é conveniente orientá-lo de tal forma que o eixo polar esteja alinhado com o Polo Norte (ou Sul) do céu. Isso leva tempo, mas é necessário para que o motor de acompanhamento equatorial sirva para que o objeto que observamos não se mova com o passar do tempo, imprescindível em fotografia. Se não dispõe de motor, o alinhamento exato é menos importante, mas servirá para manter o objeto no campo de vista movendo uma única roda.

Por último, há telescópios computadorizados, com um banco de dados de posições dos objetos celestes e dois motores. Depois de o instalar corretamente, são muito mais fáceis de utilizar. No entanto é necessário um alinhamento inicial com três estrelas conhecidas, um passo que por vezes confunde os iniciados.

## Movimento do céu

Basicamente, os movimentos que observamos no céu são devido a movimento relativos da rotação e trans-

lação da Terra. Isto faz com que percebamos o céu como um conjunto de dois movimentos básicos: diário e anual.

O movimento diário é muito importante, é muito rápido e dificilmente nos deixar apercebermo-nos do movimento anual que é muito mais lento. A Terra gira  $360^\circ$  em 24 horas, ou seja,  $15^\circ$  por hora. Este movimento é bastante perceptível, embora o não seja se não realizarmos observações cuidadosas. O movimento de translação é de  $360^\circ$  em 365 dias, o que significa um grau por dia (um pouco menos que um grau por dia). Se imaginarmos que não houvesse rotação, poderíamos ver à noite, de um dia para o seguinte, a mesma estrela, à mesma hora, no mesmo local apenas desfasada um grau (isto é, a largura do dedo indicador com o braço estendido). Esta observação só pode ser realizada se tivermos como referência uma antena ou um poste que nos permita relacionar a observação, em dias consecutivos. Este movimento é quase imperceptível se não houver uma referência e por isso não será visível a olho nu, mas o que podemos observar é que o céu noturno de um dia é completamente diferentes após três ou seis meses. Após três meses a translação corresponde a  $90^\circ$ , ou cerca de  $\frac{1}{4}$  do céu e em meio ano é  $\frac{1}{2}$  do céu, isto é, a outra metade do céu, diametralmente oposta. Este movimento é mascarado noite após noite devido à rotação, mas mesmo assim todos percebemos, a olho nu, que passados três meses as constelações no céu são bem diferentes

### Atividade 1: Guarda-chuva celestial

Um simples guarda-chuva permite-nos visualizar os movimentos do céu anteriormente explicados. O guarda-chuva coloca uma abóbada acima da nossa cabeça onde podemos desenhar as constelações desejadas. Usaremos um guarda-chuva preto e desenharemos nele com tinta branca (ou um corretor).

Neste modelo não desenharemos todas as constelações, mas apenas as mais importantes, com as estrelas mais importantes de cada uma. Não procuraremos um resultado bonito, mas sim um modelo com o qual possamos pensar.

Cada guarda-chuva servirá para mostrar um dos dois hemisférios. O ponto de interseção entre a haste do guarda-chuva e o tecido é o polo do hemisfério considerado. A margem do tecido do guarda-chuva corresponde, aproximadamente ao equador celeste.

O melhor é preparar dois guarda-chuvas, um para cada hemisfério.

### No hemisfério norte desenharemos:

- Perto do polo norte (perto da haste do guarda-chuva) a Ursa Maior, a Cassiopeia e a estrela polar, que será precisamente na interseção entre a haste e o tecido;
- Na área perto da margem do guarda-chuva, serão desenhadas quatro constelações, uma para cada estação do ano, as mais comuns e facilmente reconhecíveis:
  - Primavera: Leão;
  - Verão: Cisne;
  - Outono: Pégaso;
  - Inverno: Oriente.

Podem ser escolhidas outras constelações, mas devem estar equidistantes, cada uma localizada cerca de  $90^\circ$  afastada da anterior.

### No hemisfério sul representaremos:

- Na zona do polo sul (perto da haste do guarda-chuva) o Cruzeiro do Sul, o polo sul celeste estará na interseção entre a haste e o tecido;
- Na área perto da margem do guarda-chuva, serão desenhadas quatro constelações, uma para cada estação do ano, as mais comuns e facilmente reconhecíveis:
  - Primavera: Aquário;
  - Verão: Oriente;
  - Outono: Leão;
  - Inverno: Escorpião.

A ideia é escolher constelações grandes e que se encontrem normalmente acima do horizonte. Isto depende

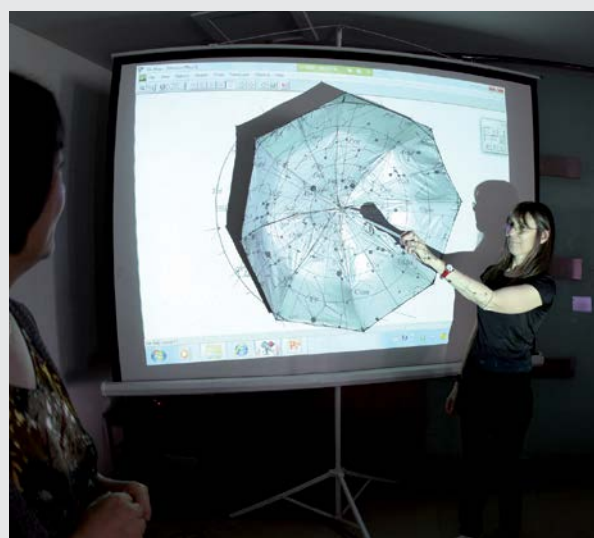


Fig. 7: Projeção das estrelas no hemisfério norte num ecrã para desenhar as constelações desejadas. Recomendamos a implementação do modelo sobre um guarda-chuva preto, embora para a fotografia tenha sido usado um de outra cor, apenas para explicar o processo.



Fig. 8: Usando o guarda-chuva do hemisfério norte com estudantes.

um pouco do local de observação, mas é suposto poder ser adaptado a cada caso.

Se o local onde nos localizamos ficar situado na zona equatorial, entre as latitudes  $20^\circ$  norte e  $20^\circ$  sul, é necessário desenhar os dois guarda-chuvas. Se estivermos localizados no hemisfério norte, a latitudes entre  $30^\circ$  e  $90^\circ$ , desenharemos apenas o guarda-chuva para este hemisfério, e o mesmo acontecerá no hemisfério sul.

Para desenhar as constelações com tinta branca é muito conveniente usar o *Stellarium*, ou um *software* semelhante, e projetar as imagens com um projetor multimídia no tecido do guarda-chuva, colocando o polo no ponto de interseção da haste com o tecido. Projetaremos o hemisfério correspondente (figura 7). Uma vez acabados, usaremos cada guarda-chuva com os alunos, colocando-os acima das cabeças deles (figura 8).

Colocaremos o guarda-chuva com a haste inclinada na direção do polo do correspondente hemisfério (tal como o eixo de rotação da Terra). Imagine o chão à altura do seu pescoço, representando o horizonte, pelo que parte do tecido do guarda-chuva estará abaixo do horizonte. Agora distinguimos duas partes neste horizonte imaginário. A parte perto do polo, onde o céu é observável durante o ano é sempre o mesmo (quando olhamos para a área de interseção da haste com o tecido). A área do equador que permanece acima do horizonte é a mais interessante porque as constelações mudam ao longo do ano (figura 9).

Devemos insistir que este modelo explica o movimento de translação. Imaginamos que não há rotação, semelhante a realizar observações todos os dias à mesma hora. Lembramos também que é um modelo simplificado, que visualizamos o movimento do céu de  $90^\circ$  em  $90^\circ$  a cada três meses. Como o movimento do céu



Fig. 9: Guarda-chuva com a haste inclinada na direção do polo, de acordo com a latitude. Imaginamos que o horizonte cobre parte do guarda-chuva.

é contínuo, diariamente, quando é mencionado que uma determinada constelação é visível durante uma estação do ano, deveremos compreender que acerca da constelação que observamos no centro do horizonte, nos meses centrais das estações do ano.

#### Como usar

Gostaríamos de usar o guarda-chuva para compreender o movimento de translação.

#### Hemisfério Norte

Iremos supor que nos encontramos numa localização a  $40^\circ$  norte. Colocamos o guarda-chuva do hemisfério norte com o polo norte ( $40^\circ$  inclinado acima do horizonte) acima da nossa cabeça.

No hemisfério norte a estela polar está localizada praticamente na direção do polo norte. É muito fácil reconhecer a constelação Ursa Maior ou a Cassiopeia. A partir da Ursa Maior, prolongando 4 vezes a distância entre as duas estrelas mais afastadas da cauda da constelação, localiza-se a Estrela Polar. Usando a Cassiopeia, a Polar está na interseção das duas bissetrizes de cada V do W que a Cassiopeia representa.

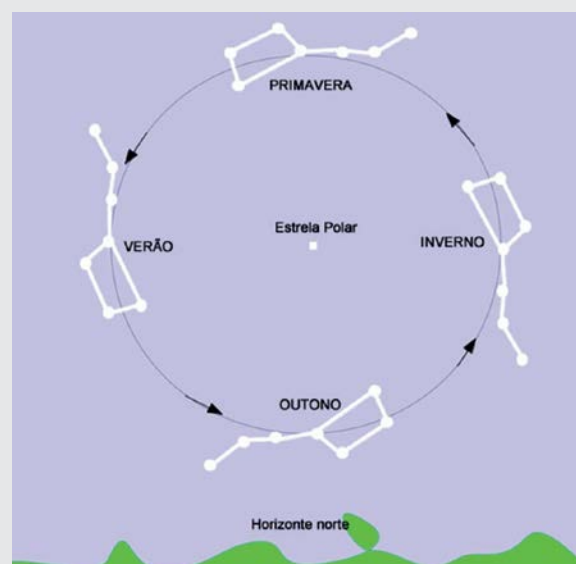


Fig. 10: Posições relativas da Ursa Maior em torno do polo norte, ao longo do ano (à mesma hora).

## Horizonte Norte

Olhemos para a zona da Estrela Polar. Se introduzirmos uma pequena rotação, observamos as constelações Ursa Maior e Cassiopeia a rodar em torno do polo norte ao longo do ano (figura 10).

Começamos por colocar a Ursa Maior no topo e a Cassiopeia em baixo (o que acontece na primavera) e rodamos a pega do guarda-chuva para que a Ursa Maior fique à esquerda e a Cassiopeia à direita (teremos a situação de verão). De novo rodamos 90° na mesma direção, então a Ursa Maior fica em baixo e a Cassiopeia em cima (esta é a posição correspondente ao outono) e finalmente rodamos 90° levando a Ursa Maior para a direita e a Cassiopeia para a esquerda (é o inverno). Se rodarmos de novo 90° reproduziremos a situação inicial e o início das quatro estações de um novo ano (figura 10).

Tal como descrito no processo, esta área do céu, chamada horizonte norte, é a área do horizonte correspondente ao norte em que as constelações que observamos ao longo do ano são sempre as mesmas.

## Horizonte Sul

Consideremos agora a área equatorial, a área mais perto da margem do guarda-chuva. As constelações nesta área do horizonte sul variam de acordo com as estações do ano.

A constelação central da primavera é Leão, então colocamos o guarda-chuva com Leão na parte mais alta do horizonte. Depois rodamos o guarda-chuva  $\frac{1}{4}$  de volta, ou 90°, e teremos sobre o horizonte sul a constelação central de verão: o Cisne com Lira e Águia, o triângulo de verão. Com mais  $\frac{1}{4}$  de volta estamos no outono e a constelação central será o grande quadrilátero de Pégaso. Rodamos mais 90° e estaremos no

inverno, e a constelação de Oriente, com os seus cães, domina o céu do horizonte.

## Hemisfério Sul

Considere, por exemplo, latitude de 40° sul. Colocamos o guarda-chuva do hemisfério sul com a haste em direção ao polo sul (inclinado a cerca de 40° do chão) acima das nossas cabeças.

No hemisfério sul não há uma estrela que permita visualizar a posição do polo sul. A constelação Cruzeiro do Sul é usada para marcar a posição do polo sul celeste; isso deve ser feito estendendo 4,5 vezes o eixo principal da cruz em direção ao pé da cruz. Esta constelação faz uma revolução em torno do polo em 24 horas. A posição muda ao longo do ano, para a mesma hora, como mostra a figura 10. Assumimos que é à mesma hora para retirar o efeito da rotação da Terra e observar apenas a rotação do céu devida à translação.

## Horizonte Sul

Olhe para a área de intersecção entre a haste do guarda-chuva e o tecido, que é onde fica o polo sul. Rodamos lentamente o cabo e notamos que a constelação do Cruzeiro do Sul gira em torno do polo sul ao longo do ano. Começamos por colocar o Cruzeiro do Sul em cima (o que acontece no inverno), giramos o cabo do guarda-chuva 90° até ter o Cruzeiro do Sul à direita (posição na primavera). Giramos novamente 90°, na mesma direção, e o Cruzeiro do Sul está em baixo (que é a posição correspondente ao verão) e, finalmente, rodamos 90° deixando o Cruzeiro do Sul à esquerda do polo Sul (como no outono). Se girarmos novamente 90°, reproduzimos a situação inicial e começamos as quatro estações do ano (figura 11).

Após o processo descrito, percebe-se que nesta área do céu, chamada de horizonte norte (a área do horizonte correspondente ao ponto cardinal norte), as constelações que vemos ao longo do ano são sempre as mesmas.

## Horizonte Norte

Olhamos agora para o tecido do guarda-chuva na zona equatorial, isto é, o horizonte norte. Esta área é onde as constelações variam mais. As que são visíveis no verão não o são no inverno. Zeus, o rei dos deuses da mitologia grega, colocou o gigante Oriente no céu após a sua morte causada pela picada de um escorpião. E também, Zeus colocou esta constelação no céu, mas diametralmente oposta, para que ele não pudesse atacar Oriente de novo.

A constelação central durante a primavera é Aquário. Giramos o guarda-chuva 90°, ou seja, depois de três meses e teremos Oriente, com os seus cães, no hori-

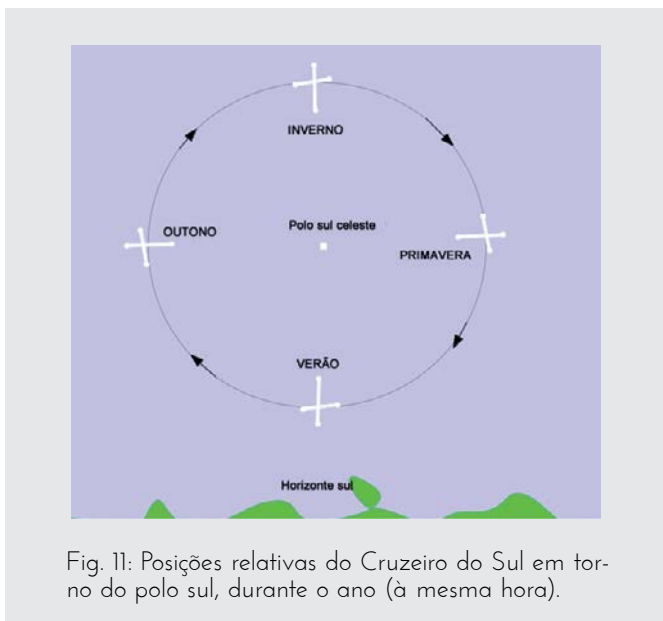


Fig. 11: Posições relativas do Cruzeiro do Sul em torno do polo sul, durante o ano (à mesma hora).

zonte norte, que é a constelação central do verão. Com mais  $\frac{1}{4}$  de volta estaremos no outono e a constelação central é Leão. Se girarmos o guarda-chuva  $90^\circ$  é inverno, e temos a bela constelação de Escorpião no horizonte.

### Conclusões para ambos os hemisférios

Seguindo o esquema anteriormente apresentado em ambos os hemisférios, para dois horizontes, podemos entender o céu noturno devido ao movimento translacional.

Se quisermos incluir o movimento de rotação na atividade, teremos que considerar que, além do movimento anual, é realizado um movimento diário devido à rotação da Terra. Num dia, tanto a Ursa Maior como o Cruzeiro do Sul dão uma volta completa aos respectivos polos. Para deixar de lado o efeito da rotação no movimento de translação, simplificámos a atividade imaginando que a observação é sempre realizada à mesma hora.

### Céus escuros e contaminação luminosa

Para poder observar as estrelas devemos ter um céu escuro. No entanto, isto só é possível se nos afastarmos das cidades. Os seres humanos esquecem-se como o céu é estrelado porque não podem vê-lo. Este problema ocorre porque a maior parte da iluminação pública desperdiça enormes quantidades de energia iluminando para cima, onde é desnecessária. A poluição luminosa é uma das formas de contaminação ambiental menos conhecidas. Afeta a visibilidade do céu noturno, impedindo de ver as estrelas, para além de alterar o equilíbrio do ecossistema e afetar a saúde humana, pois atenta contra os relógios biológicos que estão coordenados com os períodos de luz e de escuridão. Ter consciência deste tema permite reconhecer o problema, alertar sobre as consequências e procurar soluções.

Existem três tipos de contaminação luminosa:

a) O resplendor é um fenómeno produzido, geralmente, pela iluminação pública exterior. Evidencia-se quando temos a oportunidade de viajar à noite e de nos aproximar-nos de uma cidade. Vemos uma envolveria de luz a rodeá-la. A luz que produz o resplendor é luz desaproveitada, pois é gasta para iluminar para cima, onde não é necessária, e, portanto, não só nos impede de ver as estrelas mas também um gasto de energia desnecessário. Este tipo de contaminação é reduzida escolhendo bem as lâmpadas.

b) A intrusão: a luz exterior projeta-se em todas as direções e em algumas delas entra, sem querer, nas nossas

moradias. Se a luz é projetada nos quartos, vemo-nos obrigados a bloquear as janelas com cortinas durante a noite.

c) O ofuscamento: este tipo de poluição é projetada pelas luzes dos automóveis e iluminação exterior nas cidades e moradias. Torna-se evidente em lugares com desnivelamento, pois o ofuscamento é produzido quando nos encontramos de maneira inesperada com um foco ou refletor.

Embora seja possível, a partir de diversos programas na Internet, reunir uma série de atividades práticas que permitam trabalhar este tema, proporemos somente uma que seja interativa e fácil de realizar em qualquer situação.

### Atividade 2: Contaminação luminosa

Os objetivos desta oficina consistem em mostrar o efeito contaminante da iluminação sem proteção, reconhecer o efeito benéfico, do ponto de vista astronómico, da escolha de um candeeiro desenhado para o controle da contaminação luminosa e realçar a possibilidade de melhorar a visão das estrelas, sem deixar de iluminar aqueles lugares onde não podemos ter escuridão total.



Fig. 12a e 12b: Caixa de cartão com o desenho da constelação de Oriente numa das faces.



Fig. 13: Visão de Oriente de dentro da caixa. Cada buraco representa uma estrela.

Para realizar esta experiência é necessário obter uma caixa de cartão de certa dimensão, que permita que o aluno olhe o seu interior. Será desenhada uma constelação escolhida (neste exemplo, a de Oriente) onde serão marcadas as estrelas como pontos. Depois serão feitos buracos, tendo em conta que o diâmetro de cada um deve estar de acordo com a magnitude estelar (figura 12a e 12b). A constelação desenhada na parte exterior da caixa deve ser a imagem especular da mesma, pois esta deve ser tal como aparece no céu quando é vista no interior da caixa.

A caixa deve ter o interior pintado de preto, de ma-



Fig. 14a: Bola de ping-pong sem proteção. Fig. 14b: Bola de ping-pong com hemisfério pintado.

neira a que quando observado o seu interior se veja a constelação com a aparência da figura 13. As “estrelas”, ou pontos que as representam, serão iluminadas pela entrada da luz exterior dentro da caixa.

Preparam-se duas bolas de ping-pong, fazendo um buraco que permita introduzir uma lanterna no seu interior, de diâmetro exato para que possam ser fixadas à lanterna. Uma das bolas permanece intacta e a outra é pintada com esmalte sintético, de qualquer cor, no hemisfério superior, representando desta maneira o que se denomina “proteção”, que impede que a luz seja



Fig. 15a: Tiramos o protetor da lanterna. Fig. 15b: Lanterna com a bola de ping-pong simulando o candeeiro.



Fig. 16a: Lanterna sem proteção. Fig. 11b: Lanterna com proteção.



Fig. 17a: Aspecto do céu com candeeiros sem proteção. Fig. 17b: Aspecto do céu com candeeiros com proteção.

projetada para cima (figuras 14a e 14b).

Para realizar a experiência, é necessário selecionar lanternas nas quais seja possível remover a parte superior protetora e deixar a lâmpada à vista (figuras 15a e 15b). A bola de ping-pong insere-se na lanterna e simula um candeeiro tipo balão.

A experiência realiza-se em duas etapas: Primeiro, fora da caixa. Nesta ocasião, devem apagar-se as luzes do lugar onde é realizada a experiência. Experimentam-se ambos os modelos, com a mesma lanterna para evitar variações no fluxo. Sem proteção (figura 16a) e com proteção (figura 16b), projetando a luz que produzem sobre uma superfície lisa e próxima, por exemplo, a parede ou um cartão.

Em segundo lugar, vejamos o que acontece dentro da caixa. A situação pode ser observada nas figuras 17a e 17b, para os casos da lanterna sem e com proteção, respetivamente. É possível utilizar uma câmara digital

para fotografar o que acontece dentro da caixa, caso contrário os participantes olham para o interior. As luzes externas, na habitação onde é realizada a experiência, devem estar acesas.

É possível indicar o que ocorre de maneira muito clara. Na primeira situação, no caso da iluminação exterior, o corte que produz um candeeiro com desenho para o controle da poluição luminosa: a emissão para o céu é observada notavelmente reduzida.

Na segunda situação, ao utilizar os dois tipos de lanterna no interior da caixa, estamos a simular a situação de um ambiente noturno. A luz sem proteção produz uma iluminação extra sobre o céu, o denominado resplendor, que dificulta a visão das estrelas. No caso da câmara digital, ao usar exposição automática, não é possível nem sequer focar de maneira adequada as estrelas. Pelo contrário, com a lanterna adaptada para controle de contaminação luminosa, é evidente que para baixo este artefacto não deixa de ter efeito, enquanto o céu se vê bem mais escuro, e a câmara consegue registar de maneira clara a constelação de Oriente.

## Bibliografia

Berthier, D., *Descubrir el cielo*, Ed. Larousse, Barcelona, 2007.

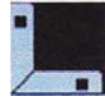
Bourte, P. y Lacroux, J., *Observar el cielo a simple vista o con prismáticos*, Larousse, Barcelona, 2010.

García, B., *Ladrones de Estrellas*, Ed. Kaicron, Colección Astronomía, BsAs, 2010.

Reynolds, M., *Observación astronómica con prismáticos*, Ed. Tutor, Madrid 2006.

Roth, G.D. *Guía de las estrellas y de los Planetas*. Omega. Barcelona 1989.

## ANEXO: Instruções o para *Stellarium* 0.16.0



Para visualizar ou não as barras de ferramentas (traga o cursor para o canto inferior esquerdo).



Localização. É possível introduzir por cidades, por coordenadas ou clicando num mapa.



Data e hora em que é mostrado o céu.



Configuração da visão do céu. Por sua vez, possui quatro menus, que são explicados a seguir.



Nº de estrelas, planetas... para exibir ou não a atmosfera.



Mostrar as linhas de coordenadas no céu, das constelações... Tipo de projeção do céu. É recomendado a Estereográfica ou Ortográfica.



Mostrar a paisagem, o solo, o nevoeiro.



Nomes e figuras das constelações e de estrelas em diferentes culturas. Os mais conhecidos são os ocidentais.



Pesquisar um objeto (por exemplo, Saturno, M13, NGC 4123, Altair).



Definir o idioma e as informações exibidas dos objetos no ecrã.













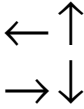








Ajuda (teclas de atalho, etc.).



Ritmo normal do tempo.



Aumentar velocidade do tempo. É possível alterar várias vezes.

	Diminuir velocidade do tempo.		Centrar no objeto selecionado.
	Voltar para a hora atual.		Modo noturno.
	Linhas das constelações.		Ecrã completo / janela.
	Nomes das constelações.		Ocular (como olhar para o objeto selecionado através de um telescópio).
	Figuras das constelações.		Satélites artificiais em órbita.
	Quadrícula equatorial.		Movimentar-se através da visualização.
	Quadrícula azimutal + horizonte.	Page Up	Aumentar a ampliação.
	Solo / Horizonte.	Page Down	Diminuir a ampliação.
	Mostrar pontos cardeais.	Ctrl+G	Definir o planeta selecionado a partir do próprio planeta. Para voltar à Terra, pesquisar “Terra” e depois Ctrl+G para selecionar a Terra como ponto de referência.
	Atmosfera.	Alt+T	Identificação dos planetas.
	Nebulosas e nomes.	Ctrl+S ou Prt Scr	Capturar ecrã.
	Nomes dos planetas.		Sair (encerrar o <i>Stellarium</i> )
	Montagem equatorial / azimutal.	ou Ctrl+Q	

# Arqueoastronomia e o seu potencial educacional

Juan Antonio Belmonte Avilés

Instituto de Astrofísica das Canárias (Espanha)

---

## Introdução

Arqueoastronomia, astroarqueologia, astronomia cultural, etnoastronomia, história da astronomia... Nos últimos anos, o mundo científico e, por arrasto, o público académico em geral, começou a reconhecer uma série de subdisciplinas que, de uma forma ou de outra, se esforçam por relacionar ciência da astronomia às tradicionais humanidades (arqueologia, história, etnografia, antropologia, história da arte ou filosofia, etc.) ou, mais propriamente, às ciências sociais.

O suplemento de Arqueoastronomia do *Journal for the History of Astronomy*, criado por Michael Hoskin – que infelizmente já não continua a ser publicado, popularizou o termo "arqueoastronomia" em meados da década de 1980. (Para tornar as coisas confusas, no entanto, um termo igualmente válido "astroarqueologia", relacionando a orientação astronómica de vestígios arqueológicos, acabou sendo aplicado a tentativas de relacionar sítios arqueológicos a visitas de supostos seres extraterrestres. A confusão da terminologia científica com a pseudociência é, infelizmente, uma longa tradição: é por isso que os astrónomos denominam-se a si mesmos com um termo prosaico que significa "quem dá nomes às de estrelas" na vez de "astrólogos", o termo mais apropriado, como biólogos, ecologistas, antropólogos ou uma longa lista de outros "tratadores" de ciências.

O que é, então, a arqueoastronomia? Em *History of Astronomy: an Encyclopedia*, o "arqueoastrónomo" Edwin Krupp, Diretor do Observatório de Griffith de Los Angeles, propõe a seguinte definição do termo: arqueoastronomia é o estudo interdisciplinar da astronomia pré-histórica, antiga e tradicional em todo o mundo, no quadro do seu contexto cultural. Neste estudo estão incluídas fontes escritas e arqueológicas, abrangendo os seguintes tópicos: calendários; observação prática; cultos e mitos celestes; representação simbólica de eventos, conceitos e objetos astronómicos; orientação astronómica de sepulturas, templos, santuários e centros urbanos; cosmologia tradicional

e a aplicação cerimonial das tradições astronómicas. É verdade que essa definição é suficiente ampla para abranger uma ampla variedade de tópicos. No entanto, a "arqueoastronomia" definida desta forma ignora duas áreas muito importantes em que a astronomia se relaciona totalmente com as ciências sociais, a história da astronomia e da etnoastronomia. A primeira área de estudo, que já tem uma longa tradição, narra corretamente o avanço da astronomia como disciplina científica e a evolução do pensamento e da prática astronómica desde a Grécia clássica. A etnoastronomia complementa isso ao investigar a astronomia nas tradições orais das culturas que existem atualmente e, segundo alguns pesquisadores, as fontes escritas (crónicas de conquistas, antigos estudos antropológicos) de culturas extintas, abrangendo uma gama de tópicos que coincidem em grande parte com os da própria arqueoastronomia. Na verdade, os limites entre essas três disciplinas são extremamente mal definidos e os estudos que se enquadram em duas, ou em todas, dessas categorias são mais a regra do que a exceção.

Por essa razão, o termo geral "astronomia cultural" parece mais apropriado para qualquer estudo em que a astronomia esteja relacionada com as ciências sociais. É por isso que os especialistas neste campo hoje se chamam de "European Society for Astronomy in Culture" (Sociedade Europeia de Astronomia na Cultura) (SEAC): [www.archeoastronomy.org](http://www.archeoastronomy.org).

## Onde se enquadra a arqueoastronomia?

Uma das distinções mais importantes entre a arqueoastronomia e as ciências físicas "duras" é a substituição da língua "astronómica" pela linguagem, mais compatível com o ponto de vista epistemológico das ciências sociais, não se devendo ter em conta a arqueoastronomia. A arqueoastronomia, devemos lembrar, não é um ramo da astrofísica moderna, nem é seu propósito fundamental o avanço do conhecimento físico do Universo. A arqueoastronomia é uma especialidade mais intimamente aliada aos estudos antropológicos, servindo disciplinas como a arqueologia da paisagem

(no sentido abrangente do termo paisagem), a história de religiões ou a arqueologia do poder. Portanto, um astrónomo treinado principalmente nas ciências quantitativas pode ter dificuldade em saber como responder às questões que interessam os arqueólogos – ou mesmo em colocar questões. Mas é importante para pessoas interessadas em astronomia que se pretendam familiarizar com as suas raízes e entender como diferentes culturas têm usado a observação do céu para moldar a sua visão do universo, em torno deles, numa visão do mundo coerente e significativa.

Tem sido argumentado que é necessária uma estreita colaboração entre arqueólogos e astrónomos para realizar pesquisas substanciais em arqueoastronomia. Esta simbiose interdisciplinar é uma consequência natural da necessidade de arqueólogos, antropólogos e historiadores da astronomia dominarem técnicas astronómicas, como a astronomia posicional ou a mecânica celeste, e ferramentas matemáticas como a trigonometria esférica, que vão muito além da sua formação normal.

No entanto, a minha opinião atual, depois de mais de duas décadas de experiência no campo, é que tanto o astrónomo como o antropólogo precisam transformar-se num tipo substancialmente diferente de erudito, um arqueoastrónomo, esquecendo muitos dos hábitos epistemológicos dos longos anos de disciplina, e treinar e estabelecer novos padrões de pensamento. Nem tudo o que é estudado na arqueoastronomia pode necessariamente ser considerado interdisciplinar, embora uma certa abordagem multidisciplinar possa ser necessária. É, em suma, um campo legítimo em si mesmo.

A arqueoastronomia tem outro problema importante: é uma espécie de terra de ninguém, na qual astrónomos e astrofísicos se sentem fora do lugar (embora isso, felizmente, esteja a começar a mudar), e arqueólogos e historiadores muitas vezes não conseguem ver nada nele que seja útil para a sua compreensão do passado. Isso contrasta com outras intersecções das ciências humanas com as ciências experimentais, por exemplo, o uso de  $C^{14}$  na datação, que é amplamente aceite por cientistas, historiadores e arqueólogos. O problema é agravado quando o título "arqueoastrónomo" é aplicado a cientistas interessados em aplicar os seus conhecimentos a temas históricos e que usam (e abusam) as consideráveis ferramentas físicas e matemáticas ao seu dispor para propor teorias históricas absolutamente absurdas, para horror de ambos, arqueólogos e antropólogos. Esforços de cientistas conscientes para obter o grau de reconhecimento de abordagens astronómicas da arqueologia podem ser frustrados por alguns

membros proeminentes, que os cientistas britânicos chamam de margem lunática.

A fronteira entre o que é ciência e o que não é deve ser baseada na aplicação de regras básicas como a Navalha de Ockham, a formulação mais simples do Princípio da Economia (diante de duas possíveis respostas a um problema científico, o mais simples é normalmente o verdadeiro). No entanto, devemos reconhecer que essas regras não são universalmente aplicáveis.

### A arqueoastronomia e a NASE

O potencial da arqueoastronomia no ensino da astronomia é que ela pode inspirar os corações e a consciência dos jovens aprendizes a verem sua própria cultura refletida no modo de compreender o cosmo dos seus ancestrais. Nesse sentido, a arqueoastronomia pode fornecer uma ligação direta com o ambiente imediato, em oposição ao aparente distanciamento do céu e do universo em geral. Se isso for verdade, seria interessante conduzir pesquisas sobre os efeitos pedagógicos da arqueoastronomia ou da etnoastronomia, ou mesmo uma combinação de ambas.

Estas abordagens abrem oportunidades para que os alunos estimulem o diálogo com os idosos para aprender o conhecimento tradicional do céu, especialmente se estiverem localizados próximos de sociedades agrícolas ou de caçadores-coletores. Nas sociedades urbanas modernas, o conhecimento é transmitido mais formalmente pelas escolas e pelos meios de comunicação. Para os alunos interessados nesta abordagem, um esboço típico de entrevista que poderia servir como guia está anexado (consulte o Apêndice 1).

Por outro lado, é quase certo que no ambiente imediato do jovem aprendiz de astronomia, onde quer que ele esteja localizado, haverá uma série de edifícios que poderiam ter um caráter simbólico marcado e que já têm uma função religiosa ou secular. Esses edifícios, ou planeamento espacial urbano, são potenciais objetos de experimentação arqueoastronómica. Citamos alguns exemplos:

- Igrejas num ambiente cristão;
- Mesquitas num ambiente muçulmano;
- Templos num ambiente hindu, budista ou xintoísta (pagodes ou gopuras incluídos);
- Planos urbanos, especialmente aqueles com um quadro ortogonal claro e organizado (muito comum em todo o mundo);
- Santuários de sociedades indígenas (Polinésia ou América);
- Outros lugares de culto em sociedades tribais;
- Monumentos antigos, se houver algum.

A iconografia astronómica existente nesses lugares também pode ser estudada, por exemplo, a análise de estações de esculturas rupestres que frequentemente mostram elaboradas representações astrais. Portanto, a astronomia cultural pode tornar-se uma abordagem eficaz e valiosa que pode trazer astronomia para o público em geral e, especialmente, para os jovens.

## Apêndice I

### (Adaptado de "El Cielo de los Magos")

#### TIPO DE ENTREVISTA PARA ETNOASTRONOMIA DE CAMPO

O conjunto de questões propostas é do tipo generalista e pode ser aplicado na maioria dos casos. No entanto, a experiência mostra que, neste tipo de pesquisa, depois uma vez que uma conversa se inicia, surgirão inúmeras questões mais específicas relacionadas mais diretamente com o assunto a ser tratado. Consequentemente, embora este esboço possa servir como guia, espera-se que a maioria das entrevistas assuma, naturalmente, um caráter mais aberto.

1. Primeiro, peça ao entrevistado que explique o que sabemos e por quê, começando com questões gerais como:

- Aqui, olhou recentemente para o céu à procura de algo?
- Usa-o como guia, sinal, símbolo para alguma coisa?

2. De seguida, pergunte especificamente sobre cada objeto que pode ser usado para fins preditivos:

a) Perguntas focadas nas estrelas

- À noite, guia-se pelas estrelas?
- Quais as estrelas que conhece no céu?
- Você conhece "esta ou aquela" estrela (\*)?

Faça perguntas sobre o local e a época do ano em que sai para observar e quais as estrelas que observa, a fim de esclarecer qual a estrela, ou estrelas, a que o entrevistado se está referindo.

- Você lembra-se dos nomes de outros grupos de estrelas?
- Isso indica alguma coisa sobre as estrelas?
- A chuva está associada a alguma estrela?
- As observações são mais normalmente feitas à noite ou ao início da manhã?
- Usa observações de estrelas para decidir quando e onde fazer o trabalho agrícola?
- Com base em que é que toma essas decisões ... se uma estrela é vista ou não é vista num determinado momento? Se uma estrela está numa posição particular? etc?
- Como é que o entrevistado vê as horas à noite?

- Existe alguma importância para o surgimento de uma estrela em particular?
- O gado faz alguma coisa ou acontece algo associado às estrelas?
- O gado fica inquieto ou nervoso por causa da posição ou comportamento das estrelas?

(\*) Nota: Será feita referência específica a qualquer estrela, conhecida das entrevistas anteriores ou referida na bibliografia sobre o assunto.

b) Questões relacionadas com a Lua:

- Já olhou para a lua?
- Usa a Lua como guia para alguma coisa?
- Já viu, ou percebeu, onde a Lua se põe?
- Notou a posição, forma ou fase da Lua, recentemente?
- A posição da Lua indica alguma coisa?
- Já olhou para a Lua para ajudá-lo com o trabalho agrícola?
- Há alguma coisa especial que tenha notado sobre a Lua?
- Há alguma fase, ou lua sazonal, mais importante que as outras?
- A Lua tem alguma influência na chuva?
- A Lua afeta os animais?

c) Questões relacionadas com o Sol:

- Já olhou para o Sol?
- Usa o Sol como um guia para qualquer coisa?
- Observou, ou percebeu, onde é que o Sol se põe?
- Usa o Sol para contar as horas?... Como?
- Já olhou para a Lua para ajudá-lo com o trabalho agrícola?
- Ouviu algo sobre ver o Sol dançar?

d) Questões relacionadas com fenómenos meteorológicos:

- Como sabe se vai chover ou não?
- Sabe de algum sinal, de algo, em algum lugar, que indique que vai chover?
- Que outros sinais conhecidos se relacionam com os ventos, nuvens ou eventos celestes?
- Havia algum sinal para esta ou aquela montanha?
- Tem alguma maneira de saber que clima fará no mar (pesca)?
- Se for chover, consegue dizer, apenas observando o céu, a que horas isso vai acontecer... (\*)?
- A que horas é que observar o céu (\*)?

(\*) Nota: A intenção destas duas últimas perguntas é descobrir se conhecem os Cabañuelas (métodos tradicionais de previsões meteorológicas existentes em partes de Espanha e América Central) sem mencionar expressamente o seu nome. De outra forma...

e) Questões relacionadas com as Cabañuelas e os Aberruntos (métodos tradicionais de previsões meteorológicas):

- Há alguma hora especial para procurar sinais do tempo durante o resto do ano?
- Conhece os Cabañuelas?
- O que sabe sobre as Cabañuelas?
- Em que data?
- Em que consiste o método?
- Conhece algum Aberrunto?
- O que é que isso significa?
- Esses métodos funcionam ou não?
- Existe alguma Cabañuela que seja mais precisa do que outros métodos?
- Existe alguma Cabañuela associada ao Sol ou à Lua?

f) Questões relacionadas com feriados e dias santos:

- Que festas existem aqui?
- Quando são?
- Quais são os mais importantes?
- Qual é o seu santo padroeiro?
- O que faz o seu santo?
- O que é que faz no dia especial?
- Nessa data, faz alguma coisa relacionada com o céu?

3. Questões de natureza geral para fazer ao longo da entrevista:

- Lembra-se de uma música, cantando ou apenas falando-a, relacionada com as coisas do céu?
- Conhece alguém que sabe prever o tempo?
- Qual é o nome dele(a)?
- As previsões são muito precisas?
- Que outros sinais conhece?
- Confia em todos esses sinais?
- Atualmente, ainda segue esses sinais?
- Atualmente, as pessoas ainda procuram por essas coisas?
- Acha que os sinais são confiáveis?
- Quem lhe ensinou essa história?
- Onde é que ele(a) nasceu? Onde é que ele(a) cresceu? Onde estava o seu pai (pai, avô...)?

## Apêndice II

(Adaptado da "La Orientación como seña de identidad cultural: Las Iglesias Históricas de Lanzarote")

### Sumário

A orientação das igrejas cristãs é um elemento distintivo da sua arquitetura que repete padrões dos tempos cristãos. Há uma tendência geral para orientar as suas absides para a faixa solar, com uma predileção pelo

este geográfico (proximidade do equinócio astronómico). Apesar disso, não são incomuns alinhamentos em direção oposta, com a abside para oeste, que são excepcionais por não seguirem o padrão canónico.

O caso das igrejas construídas no noroeste da África, antes da chegada do Islão, é paradigmático a esse respeito e pode refletir tradições anteriores. As Ilhas Canárias representam o extremo ocidental do koiné cultural do Norte da África, portanto, foi considerado relevante abordar um estudo de um conjunto compacto de igrejas antigas numa das ilhas, escolhendo Lanzarote. A orientação de um total de 30 igrejas construídas antes de 1810, bem como mais alguns exemplos de períodos posteriores, são medidas. A amostra indica que a ilha seguiu um padrão de orientação decisiva mas, ao contrário do padrão encontrado até agora no resto do mundo cristão, este protótipo é duplo. Por um lado, aparece a direção este (ou oeste) padrão, mas a amostra também contém uma orientação de marcação para o norte-nordeste, por enquanto, exclusiva de Lanzarote. O anexo discute o porquê dessa estranha regra, considerando várias possibilidades, descartadas na sua maioria. Descobrimos que a explicação pode ser muito prosaica, de tal forma que, às vezes, as necessidades terrenas são mais relevantes do que as necessidades decisórias do culto.

### Introdução: Prolegómeno

O estudo do arranjo e orientação de igrejas cristãs tem sido alvo de interesse desde os tempos antigos e recentemente ganhou um novo boom na literatura especializada. Este é um fator importante da sua arquitetura. De acordo com os textos de escritores e primeiros apologistas cristãos, as igrejas deveriam seguir uma certa orientação, ou seja, o padre tinha que ficar de frente para o Oriente durante o culto. Reconhecido por Orígenes, Clemente de Alexandria e Tertuliano, o Concílio de Nicéia (325) determinou isso como um fator prioritário. Atanasius de Alexandria, também no quarto século, expressou que o sacerdote e os participantes devem estar dirigidos para Oriente, onde Cristo, o Sol da Justiça, brilhará no fim dos tempos (*ecclesiarum situs plerumque talis etat, ut fideles altare facie versa orientem solem, symbolum Christi qui [...] sun iustitia et lux mundi interentur [...]*); para uma análise aprofundada das primeiras fontes e métodos de orientação você pode seguir Vogel (1962).

No entanto, esses mandamentos não são totalmente claros, tornando possível escolher entre diferentes interpretações: é orientada para o Sol nascente no dia em que começa a construção da igreja? Ou em direção ao Sol noutra dia considerado importante, como no dia

do santo padroeiro da igreja? Ou a orientação para o Oriente seria considerada no sentido estrito? As igrejas foram orientadas para o nascer do Sol no Equinócio? Nesse caso, em direção a qual equinócio? Inicialmente, as primeiras basílicas cristãs não foram construídas com a abside, ou a cabeça da Igreja, orientadas para Oriente. A este respeito, Delgado-Gomez (2006) indica que das 20 primeiras basílicas cristãs construídas durante o tempo de Constantino e seus sucessores, em Roma, Jerusalém, Constantinopla e no Norte da África, 18 estão aproximadamente orientadas na linha este-oeste, mas as absides de 11 delas estão direcionadas para Ocidente. No entanto, é interessante notar que nestes casos a cadeira e os sacerdotes estão virados a este, daí o altar está localizado entre ele e os fiéis.

Entre os séculos III e VII, as recomendações foram impostas e, desta forma, as constituições apostólicas indicam que as igrejas devem ser construídas de frente para o Oriente (Const. Apost., II, 7). No século 5, Sidonius Apolinar e Paulinus de Nola indicaram que a abside deveria olhar para o Oriente, isto é, para o Equinócio, algo mais tarde confirmado tanto pelo papa Virgilius como por Isidoro de Sevilla no seu *Etymologiae* (XV, 4) (McCluskey, 1998). Isto seria confirmado durante a Idade Média por Honório Augusto [...] Augustodunensis (séculos XI-XII: *ecclesiae ad orientem vertitur ubi sol oritur* [...]) e por outros autores como William Durando (séculos XII-XIII: [...] *versus orientem, hoc est, versus solis ortum aequinoctialem, nec vero contra aestivale solstitium* [...]), que indica claramente a direção a ser seguida: o equinócio, impedindo o uso dos solstícios. A orientação para Oriente tem uma simbologia clara, como referimos anteriormente. É nessa direção que o Sol nasce, e assim Cristo, como o Sol da Justiça, emergirá dali no Juízo Final (McCluskey 2004, 2010). Por outro lado, a não preferência dos solstícios poderia estar ligada à importância dessas datas nos períodos anteriores e aos numerosos templos pagãos apontados nessas direções (ver, por exemplo, Belmonte, 2012).

Todavia, nessas indicações, a ambiguidade ainda persiste. Qual equinócio deve ser considerado? Como é mencionado por McCluskey (2004), existem várias possibilidades: o equinócio vernal romano ocorre em 25 de março, enquanto o grego acontece em 21 de março – como foi refletido no Concílio de Nicéia – mas podem usar-se outras definições como a entrada do Sol no signo de Aquário ou o equinócio outonal. Cada uma dessas definições ofereceria várias datas e, portanto, orientações ligeiramente diferentes (Ruggles 1999, González-García & Belmonte 2006).

Outro ponto importante a considerar é o uso do ca-

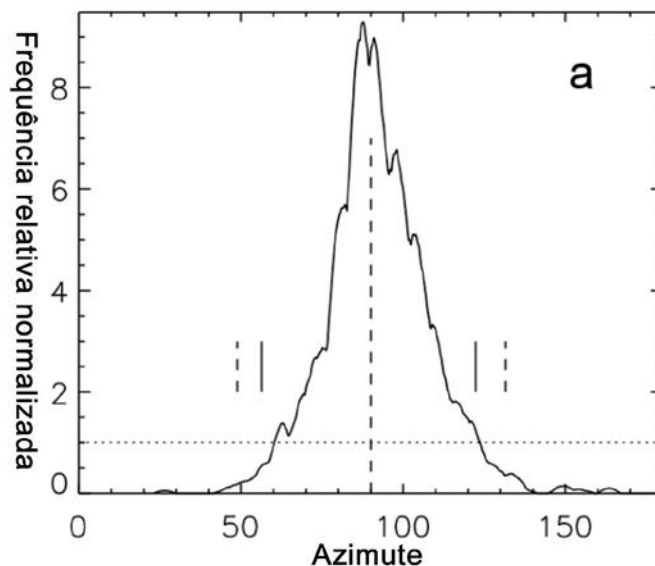


Fig. 1: Histograma azimutal de uma amostra de 1274 igrejas medievais europeias..

lendário Juliano, durante a Idade Média e parte do calendário moderno. A natureza disso levaria ao facto de que, se olharmos para um calendário do equinócio – ou seja, numa data específica – esse tempo seria deslocado no tempo, algo que seria refletido numa mudança sistemática de orientação, se isso fosse feito por observação do nascer do Sol naquele dia.

Juntamente com as pirâmides do Egito e os megalitos europeus, o estudo da orientação das igrejas medievais europeias é uma das mais antigas provas enfrentadas pela arqueoastronomia. González-García (2013) realizou recentemente uma coletânea de trabalhos nesse campo. Isso mostra que as indicações para a orientação para Oriente seguiram um padrão bastante sistemático em toda a Europa durante a Idade Média, como pode ser visto na Figura 1. Todas as áreas estudadas por González-García (2013) seguem esse padrão de orientação com um máximo claro predominantemente centrado no Oriente, salientando que em numerosas ocasiões, especialmente na Europa Ocidental, esse máximo é levemente deslocado para o norte do este astronômico, talvez indicando um uso de datas específicas para o equinócio (25 de março) que, com o passar do tempo, foram movendo-se como descrito acima, embora em cada região existam características particulares.

É interessante notar que uma constante na literatura sobre a orientação das igrejas é que elas são orientadas para o surgimento do Sol nas efemérides do santo padroeiro (o que não parece ser o caso das igrejas de Lanzarote, como iremos ver). No entanto, nos primeiros textos, e até à Idade Média, não existe um endosso epigráfico para tal afirmação. As obras revisadas por González-García (2013) indicam que para áreas da

Alemanha, e talvez da Inglaterra e da França, pode haver interesse relativamente a alguns santos em certos monumentos, embora esses edifícios sejam geralmente igrejas monásticas românicas ou catedrais góticas e, portanto, tardios. Um caso interessante e bem documentado é dado na Eslovênia, onde Čaval (2009) encontrou evidências de uma especial predileção pela chamada festa da Cátedra de São Pedro, que se reflete na orientação de um número significativo de igrejas na região na direção do nascer do Sol naquele dia. McCluskey (2004) indica que algo semelhante acontece nas igrejas românicas da Inglaterra onde, talvez as igrejas com dedicatórias marianas e alguns outros santos possam seguir esse padrão, complementando a orientação para o Oriente.

Neste contexto, e dado o objeto do presente estudo, é interessante notar que, à exceção de um pequeno número de trabalhos dedicados a igrejas particulares, especialmente na Inglaterra e na Europa Central, não há estudos sistemáticos sobre a orientação de templos em períodos pós Idade Média, como o presente. Como veremos, a grande maioria das igrejas e capelas de Lanzarote começou a ser erguida décadas após a conquista e colonização da ilha, pelos normandos a serviço da Coroa de Castela, no século XV.

Curiosamente, uma exceção à regra de orientação é o Norte de África, onde as igrejas são construídas em direções opostas. Os dados apresentados na figura 2 foram obtidos por Esteban et al. (2001) e Belmonte et al. (2007), assim como outros não publicados anteriormente (González-García 2013) e inclui um total de 23 igrejas, em particular na África Proconsular e Tripolitana, possíveis locais de origem da população aborígine das Ilhas Canárias (Belmonte et al. 2010). É interessante observar que estas igrejas mostram um bom número com orientação para o Ocidente, usual nos primeiros tempos do cristianismo, como mencionado acima. Também destaca que a maioria das igrejas está localizada dentro da faixa solar, com concentrações nos equinócios e solstícios, o que poderia dar pistas sobre o processo de cristianização nesta região.

Em Espanha, tanto na Península Ibérica como nos dois arquipélagos, apesar de haver relatos de eventos particulares de luz e sombra dentro dos templos românicos em épocas especiais como o equinócio (como em Santa Marta de Tera ou em San Juan de Ortega, nas respectivas províncias de Zamora e Burgos), a questão da orientação das igrejas tem sido pouco investigada em geral do ponto de vista estatístico, o que levou a alegações de explicações peregrinas sobre a possível causa de desvios de algumas igrejas em relação à orien-

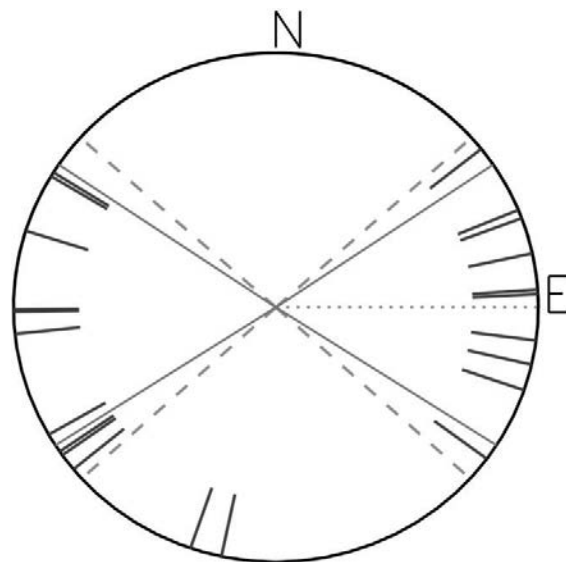


Fig. 2: Diagrama de orientação das primeiras igrejas católicas no Norte de África.

tação canónica (ver por exemplo Godoy-Fernández, 2004). Perez-Valcárcel (1998) investigou a orientação de 187 igrejas românicas do Caminho de Santiago. Embora os seus dados não incluam a medição da altura angular do horizonte, algo que infelizmente é muito comum noutros estudos europeus, o que parece claro é que ele não estabelece uma relação geral entre a orientação dessas igrejas e o nascer do Sol na data do santo padroeiro de adoração da Igreja.

A nossa equipa decidiu iniciar um projeto em grande escala, tanto na Península Ibérica como nas Canárias. No final, o que é mostrado aqui é o primeiro estudo sistemático desenvolvido até agora. No entanto, dentro de um programa mais amplo para medir as orientações das igrejas pré-românicas do território peninsular de forma sistemática, González-García et al. (2013) dedicaram atenção especial às igrejas do período asturiano e sua interação com o poder muçulmano dominante no Sul da península. Em particular, existem 13 igrejas do período ainda existentes nas Astúrias que possuem uma orientação canónica, com a abside a Este, embora geralmente desviada vários graus ao norte do este. Além disso, os autores descobriram que as mesquitas de Al Andalus, embora pudessem ter sido orientadas para Meca, com qibla que poderiam ter sido consistentes com os alinhamentos canónicos das igrejas. No entanto, parece que as mesquitas "evitam" possíveis orientações que podem confundir os seus templos com igrejas, enquanto as igrejas asturianas, e talvez as moçárabes imediatamente subsequentes, também tendem a evitar aquelas posições que confundem esses templos com mesquitas, num exemplo de interação de religião, poder e astronomia. Portanto, vemos que, em circunstâncias excepcionais, os padrões canónicos podem ser alterados.

Por fim, García-Quintela et al. (2013) investigaram a introdução do cristianismo no noroeste da Península e a possível substituição de elementos indo-europeus (célticos) por fatores cristãos, através da introdução do que chamou de "paisagem mártir": através da orientação das igrejas e a cristianização dos seus ambientes, assim como a criação de mitos e histórias que canalizaram, modificaram ou substituíram os possíveis cultos pagãos. Assim, seria interessante analisar essa mesma fenomenologia nas Ilhas Canárias e, em particular, na ilha de Lanzarote, um caso particularmente notável, uma vez que foi o primeiro a ser colonizado pela Europa e seu tamanho e número de núcleos populacionais permitiria um levantamento de uma amostra estatisticamente significativa num espaço muito compacto e pequeno.

Exemplo: as igrejas e capelas de Lanzarote. Conclusões Após a conquista e colonização das Ilhas Canárias de Lanzarote pelas populações europeias no início do século XV, a colonização em larga escala começou nos séculos imediatamente seguintes com o estabelecimento de pequenas fazendas e aldeias, ao lado de alguns sítios mais antigos, como Femés ou Teguisse, onde foi construído de um número significativo de templos cristãos que ilustraram a nova situação social e religiosa.

Em alguns poucos lugares, é possível que os edifícios fossem orientados imitando padrões de adoração aborígenes. Noutros, o alinhamento canônico tradicional dos templos para o Oriente (com algumas exceções para o Ocidente) foi respeitado, mas com um grau de liberdade maior do que o habitual. A este respeito, deve ser mencionado que apenas a igreja de Mala parece apresentar uma orientação que é compatível com o nascer do Sol no dia da invocação (Mariana) do templo (figura 3).

Finalmente, em Lanzarote, há um número estatística-



Fig. 3: Igreja da Nossa Senhora das Mercês em Mala..

mente significativo de igrejas orientadas para o nortenordeste, o que é uma notável exceção à regra. Várias possibilidades foram analisadas para explicar essa anomalia, chegando à conclusão de que a resposta mais plausível é, também, a mais prosaica. Este padrão de orientação parece obedecer ao desejo de evitar os fortes ventos predominantes na ilha, precisamente a partir dessa direção, e, em particular, para evitar o inconveniente causado pela areia deslocada pelo vento nas construções próximas ou vizinhas de El Jable, região arenosa no Norte da ilha.

Este é apenas a primeira experiência de um projeto que esperamos poder realizar nos próximos anos, medindo a orientação dos mais antigos templos cristãos noutras ilhas do arquipélago das Canárias. A este respeito, partimos do pressuposto de que o estudo da ilha de Fuerteventura, submetido ao mesmo fluxo de vento, mais intenso ainda, será um estudo de caso muito interessante para comparar com a vizinha ilha de Lanzarote. As igrejas de Fuerteventura também terão um padrão duplo? Os seus construtores ousaram romper o preceito canônico para impor as necessidades humanas do culto? O tempo dirá!

## Bibliografia

Belmonte J.A., *Pirâmides, templos y estrellas: astronomía y arqueología en el Egipto antiguo*, Crítica, Barcelona, 2012.

Belmonte, J.A. y Sanz de Lara M., *El Cielo de los Magos*, La Marea, La Laguna, 2001.

Belmonte J.A., Tejera A., Perera M.A. y Marrero R., "On the orientation of pre-Islamic temples of Northwest Africa: a reappraisal. New data in Africa Proconsularis", *Mediterranean Archaeology and Archaeometry* 6, 3: 77-85. 13, 2007.

Belmonte J.A., Perera Betancort M.A. y González García A.C., "Análisis estadístico y estudio genético de la escritura líbico-bereber de Canarias y el Norte de África", en *VII Congreso de patrimonio histórico: inscripciones rupestres y poblamiento del Archipiélago Canario*, Cabildo de Lanzarote, Arrecife, (2010).

Čaval, S. (2009). "Astronomical orientations of Sacred Architecture during the Medieval period in Slovenia", en J.A. Rubiño-Martín, J.A. Belmonte, F. Prada and A. Alberdi (eds.), *Cosmology Across Cultures*, 209-19. San Francisco. Astronomical Society of the Pacific.

Estéban, C., Belmonte, J.A., Perera Betancort, M.A.,

- Marrero, R. y Jiménez González, J.J., "Orientations of pre-Islamic temples in North-West Africa", *Archaeoastronomy* 26, S65-84, (2001).
- Gangui A.; González García A.C.; Perera Betancort M.A. y Belmonte, J.A., *La orientación como una seña de identidad cultural: las iglesias históricas de Lanzarote*, Tabona en prensa, 2015.
- García Quintela, M.V., González-García, A.C. y Seoane-Veiga, Y., "De los solsticios en los castros a los santos cristianos: la creación de un paisaje mártir en Galicia", *Madridler Mittelungen*, 2013.
- González-García, A.C., "A voyage of christian medieval astronomy: symbolic, ritual and political orientation of churches", en F. Pimenta, N. Ribeiro, F. Silva, N. Champion, A. Joaquinito, L. Tirapicos (eds.): *Stars and stones*. British Archaeology reports, 2013.
- González-García, A.C. y Belmonte, J.A., "Which Equinox?" *Archaeo-astronomy, The Journal of Astronomy in Culture* 20. 97-107, 2006.
- González-García, A.C., Belmonte J.A. y Costa-Ferrer, L., "The orientation of pre-Romanesque churches in Spain: Asturias, a case of power re-affirmation", en M.A. Rappenglueck, B. Rappenglueck and N. Champion (eds.), *Astronomy and Power*. British Archaeology Reports, 2013.
- Godoy Fernández, C., "A los pies del templo. Espacios litúrgicos en contraposición al altar: una revisión", *Antigüedad Cristiana* 21, 473-89, 2004.
- Krupp E.C., *Echoes of the Ancient Skies*, Harper & Row, Nueva York, 1983.
- Krupp E.C., *En busca de las antiguas astronomías*, Pirámide, Barcelona, 1989.
- Krupp E.C., *Beyond the Blue Horizon*, Oxford University Press, Oxford, 1991.
- McCluskey, S.C., *Astronomies and cultures in early Medieval Europe*. Cambridge University Press. Cambridge, 1998.
- McCluskey, S.C., "Astronomy, Time, and Churches in the Early Middle Ages", in M.-T. Zenner, Villard's legacy: *Studies in Medieval Technology, Science and Art in Memory of Jean Gimpel*. Ashgate, Aldeshot: 197-210, 2004.
- McCluskey, S.C., "Calendric cycles, the eighth day of the World and the orientation of English Churches", en C. Ruggles and G. Urton (eds.), *Skywatching in the Ancient World*, New Perspectives in Cultural Astronomy, 331-353. University Press of Colorado. Bolder, 2010

