PROJECTO FÍSICA

UNIDADE 2 MOVIMENTO NOS CÉUS

TEXTO E MANUAL
DE EXPERIÊNCIAS
E ACTIVIDADES

FUNDAÇÃO CALOUSTE GULBENKIAN

Prefácio da Edição Portuguesa

Na segunda metade da década de 50 iniciou-se nos Estados Unidos amplo movimento de renovação do ensino das ciências experimentais que cedo se alargou à Europa e a vários países da África, Ásia e América Latina e do qual se dá conta numa obra publicada em 1972 na Universidade de Maryland, intitulada "Eighth Report of the International Clearinghouse on Science and Mathematics Curricular Developments". Aqui se enumeram e descrevem sumariamente os novos projectos de ensino produzidos em mais de 50 países das mais diversas partes do mundo e nos mais diversos estados de desenvolvimento, mas onde é notável a ausência de Portugal.

O desencadeamento do movimento atribui-se frequentemente ao Physical Science Study Committee (PSSC), que produziu um dos mais conhecidos curricula de física e do qual quatro edições em língua inglesa, traduções inúmeras e adaptações diversas, constituem o balanço de 20 anos de influência.

Alguns anos mais tarde no Reino Unido a Fundação Nuffield decide também empreender um grande projecto para o ensino das ciências tendo neste caso sido considerado como prioritário o ensino da física, química e biologia do nível "O", isto é, o referente às idades entre os 11 e os 15 anos.

A revolução principal provocada pelos novos cursos resulta de estes assumirem novos objectivos e preconizarem novas metodologias de ensino, dos quais resultam também sequências temáticas diferentes das que nos habituámos a ver nos livros de física. Pretende-se que os jovens aprendam a ciência, participando activamente em todos os processos científicos, vivendo as dificuldades e alegrias próprias da descoberta científica. De uma maneira simples deseja-se que os alunos se comportem como "pequenos cientistas".

Uma nova visão do ensino das ciências começa a esboçar-se na segunda metade da década de 60. Os jovens tornam-se cada vez mais sensíveis às interacções da ciência com a sociedade e exigem que a sua discussão seja feita nas classes de ciências. É neste contexto que um grupo de professores reunidos em torno da Graduate School of Education da Universidade de Harvard, atento à camada jovem que começava a desinteressar-se da ciência, assume com notável clareza as aspirações da *época e decide iniciar estudos para a organização de um curso de física em que os aspectos humanísticos fossem amplamente contemplados. Alguns destes professores, depois de vários ensaios e avaliações, produzem mais tarde o "Project Physics Course" cuja primeira edição aparece nos Estados Unidos em 1970.*

A consciência que tínhamos do divórcio existente entre Portugal e os demais países em matéria de ensino da física, aliado ao facto de termos tido um conhecimento profundo do Project Physics Course, levou-nos a procurar o Serviço de Educação da Fundação Calouste Gulbenkian, instituição já então conhecida pelo acolhimento dado às iniciativas no campo da biologia, e a propor-lhe um plano cuja meta final consistia na adaptação ao sistema de ensino português de um projecto de física reconhecido como o mais adequado e actualizado.

A Fundação Calouste Gulbenkian acolheu do melhor modo a iniciativa, tendo-se estabelecido, depois de discussões e decisões várias, adaptar o Project Physics Course num plano dividido em três fases.

Com a presente tradução dá-se cumprimento à primeira fase a qual atinge já um duplo objectivo:

1 — torna o projecto acessível a todos os professores e alunos que desejem participar na adaptação, e

2 — proporciona um apreciável conjunto de recursos de aprendizagem utilizáveis em diversas situações de ensino do curso complementar, propedêutico ou mesmo universitário.

Na segunda fase pretende-se realizar uma série de «workshops» e seminários com o objectivo de permitir um contacto mais completo com os vários recursos de aprendizagem do projecto, nomeadamente filmes, transparências e equipamento de laboratório.

A terceira fase será dedicada à adaptação dos textos. Pretende-se que esta resulte do maior número possível de críticas e sugestões surgidas durante a segunda fase ou trazidas ao nosso conhecimento por outra qualquer via, nomeadamente por escrito e dirigidas ao Serviço de Educação — Ensino da Física, Fundação Calouste Gulbenkian, Avenida de Berna, Lisboa - 1.

Todos os que neste projecto têm trabalhado dedicadamente esperam deste modo ter contribuído para que em Portugal se abram novas perspectivas no domínio do ensino da física.

Pelo Grupo de Coordenadores

Maria Odete Valente

A ciência é uma aventura de toda a raça humana para aprender a viver e talvez a amar o universo onde se encontra. Ser uma parte dele é compreender, é conhecer-se a si próprio, é começar a sentir que existe dentro do homem uma capacidade muito superior à que ele pensava ter e uma quantidade infinita de possibilidades humanas.

Proponho que a ciência seja ensinada a qualquer nível, do mais baixo ao mais alto, de um modo humanístico. Deve ser ensinada com uma compreensão histórica, com um entendimento filosófico, com um entendimento social e humano, no sentido da biografia, da natureza das pessoas que fizeram a sua construção, dos triunfos, das tentativas e das tribulações.

I. I. RABI
Prémio Nobel da Física

PREFÁCIO

Generalidades O "Project Physics Course" baseia-se nas ideias e nos resultados experimentais de um projecto curricular nacional que se desenvolveu em três fases. Primeiro, os três autores colaboraram no estabelecimento dos objectivos principais e nos tópicos de um novo curso introdutório. Trabalharam juntos de 1962 a 1964 com o suporte financeiro da Carnegie Corporation de New York, sendo a primeira versão do texto ensaiada com resultados encorajadores.

Estes resultados preliminares conduziram à segunda fase do projecto, altura em que o U. S. Office of Education e a National Science Foundation concederam uma série de bolsas com início em 1964. Foi igualmente concedido um inestimável suporte financeiro pela Ford Foundation, Alfred P. Sloan Foundation, Carnegie Corporation e Universidade de Harvard. Um número elevado de colaboradores de todas as partes do país trabalhou com o grupo durante mais de quatro anos sob o título de "Harvard Project Physics". No centro do projecto, localizado na Universidade de Harvard, Cambridge, Massachusetts, o corpo principal do projecto e dos consultores incluía físicos, astrónomos, químicos, historiadores e filósofos da ciência, professores de universidades e de escolas secundárias, educadores de ciência, psicólogos, especialistas de avaliação, engenheiros, realizadores, artistas e projectistas. Os professores das classes experimentais assim como os alunos dessas classes foram de vital importância para o sucesso do Harvard Project Physic. À medida que se desenvolvia uma versão experimental do curso, ela era ensaiada nos Estados Unidos e Canadá. Os professores e alunos comunicavam as suas críticas e sugestões aos membros do projecto em Cambridge. Estes relatos constituíam a base para a revisão do ano seguinte. O número de professores que participaram na fase experimental elevou-se a 100. Cerca de 5 000 alunos participaram no último ano de ensaio num programa de pesquisa formal, em larga escala, levado a cabo para avaliação dos resultados obtidos através do projecto.

No auge do desenvolvimento do curso e das actividades de colheita de dados, entrou-se na fase final do projecto. Durante os últimos dois anos, o trabalho do projecto centrou-se no desenvolvimento e na realização de programas de preparação de professores, na disseminação de informações acerca do curso, na análise de grande quantidade de dados resultantes da avaliação e na redacção de um relatório completo sobre os resultados, numa tentativa de se descobrir como poderia o curso ser reformulado adaptando-se a audiências específicas.

Gostaríamos se fosse possível de enumerar todas as contribuições de cada uma das pessoas que participaram nalguma parte do Harvard Project Physics. Infelizmente isso não é possível, uma vez que a maioria dos colaboradores trabalharam em diversos materiais e tiveram responsabilidades múltiplas. Acresce ainda o facto de cada capítulo do texto, experiência, aparelho, filme ou outro elemento do programa experimental beneficiar das contribuições de muita gente. Havia de facto muitos colaboradores para ser possível mencioná-los todos. Estes, incluem administradores das escolas e universidades que participaram nas experiências, directores e professores das instituições de formação de professores, professores que utilizaram o curso a seguir ao ano de avaliação e em especial os milhares de alunos que não só concordaram em usar a versão experimental do curso como estavam também decididos a apreciá-lo criticamente e a contribuírem com as suas opiniões e sugestões.

Objectivos Desde o início o Harvard Project Physics teve três grandes objectivos: organizar um curso de física orientado humanisticamente, atrair um número maior de alunos para o estudo da física introdutória e descobrir algo mais sobre os factores que influenciam a aprendizagem da ciência. O último envolveu pesquisa educacional extensa cujos resultados foram já publicados em revistas.

Há cerca de dez anos tornava-se claro ser necessário um novo curso introdutório que atraísse maior número de candidatos. O problema que se punha ao Harvard Project Physics era o de projectar um curso humanístico que fosse útil e interessante para alunos com uma gama variada de capacidades, conhecimentos prévios e projectos futuros de carreira. Na prática, significava projectar um curso que deveria ter os seguintes efeitos:

1 — Ajudar os alunos a aumentarem o seu conhecimento do mundo físico concentrando-os nas ideias que melhor caracterizam a física enquanto ciência, em vez de os centrar em pedaços isolados de informação.

2 — Ajudar os alunos a verem a física como uma maravilhosa actividade com muitas facetas humanas. Isto significa apresentar o assunto numa perspectiva cultural e histórica, e mostrar que as ideias da física têm uma tradição ao mesmo tempo que modos de adaptação e mudança evolutivos.

3 — Aumentar a oportunidade de cada aluno na participação em experiências de ciência, imediatamente compensadoras, mesmo enquanto adquirindo o conhecimento e as capacidades úteis a longo prazo.

4 — Tornar possível aos professores a adaptação do curso aos interesses e capacidades variados dos seus alunos.

5 — Ter em conta a importância do professor no processo educativo no vasto espectro de situações de ensino.

Como respondeu o Harvard Project Physics a este desafio? Num certo sentido, cada aluno que entra neste curso deve responder a esta questão pessoalmente. Contudo, é um prazer indicar que o estudo dos muitos resultados e opiniões de alunos, levado a cabo em universidades e escolas nos Estados Unidos e Canadá conduziu a resultados gratificantes, desde as excelentes classificações obtidas nos testes de conhecimento de física, até à satisfação pessoal de cada um dos alunos. É evidente que a composição diversificada dos alunos dos grupos experimentais correspondeu bem ao conteúdo da física, à ênfase humanística do curso e aos seus flexíveis e variados materiais de apoio.

O "Project Physics Course" hoje Utilizando a última versão do curso desenvolvido pelo Harvard Project Physics como ponto de partida e tendo em consideração os resultados das experiências realizadas, os três colaboradores originais decidiram desenvolver uma versão adaptada a uma publicação em grande escala. É com especial prazer que agradecemos a assistência dada pelo Dr. Andrew Ahlgren da Universidade de Minnesota. O Dr. Ahlgren foi de inestimável valor pelas suas capacidades como professor de física, pelo seu talento editorial, a sua versatilidade e energia e sobretudo pelo cometimento aos objectivos do Harvard Project Physics.

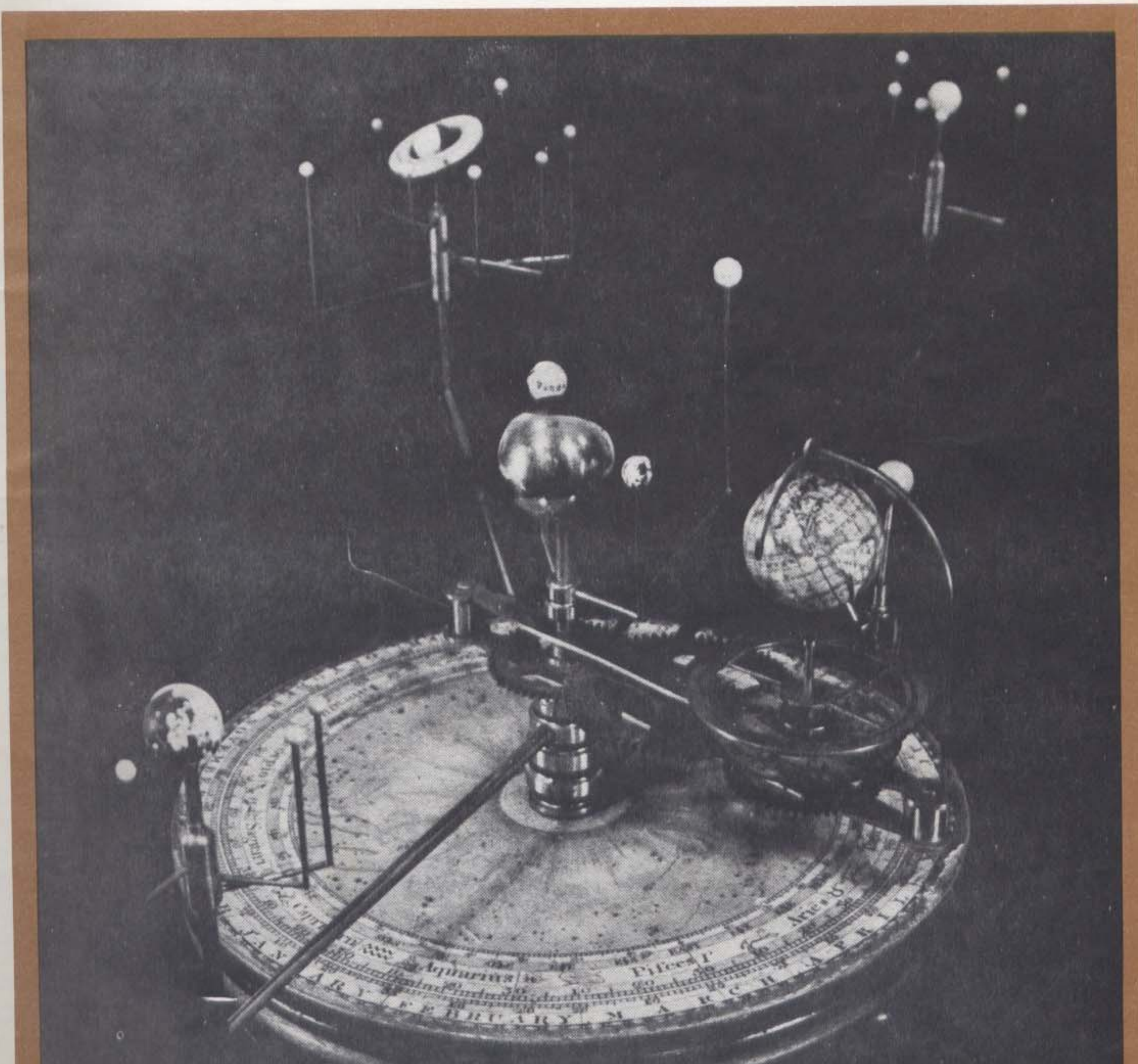
Gostaríamos também de especialmente agradecer à senhora Joan Laws cujas capacidades administrativas, confiança e reflexão tanto contribuíram para o nosso trabalho. O editor Holt, Rinehart and Winston, Inc., de New York forneceu a coordenação, o suporte editorial e o trabalho de base necessário ao grande empreendimento da versão final de todos os componentes do Project Physics Course, incluindo textos, aparelhos de laboratório, filmes, etc. A Damon-Educational Division localizada em Westwood, Massachusetts, trabalhou de perto connosco no melhoramento dos desenhos dos aparelhos e na verificação da sua integração adequada ao projecto.

Desde a sua última utilização na versão experimental, todos os materiais têm sido mais intimamente integrados e de novo escritos. O curso consiste hoje em uma grande variedade de materiais de aprendizagem entre os quais o livro de texto é apenas um; existem ainda as colectâneas de textos, manuais de actividades, guias para o professor, livros de instrução programada, filmes sem-fim "loop", filmes de 16 mm, transparências, aparelhos e livros de testes. Com a ajuda dos materiais de instrução e a orientação do professor, com o próprio interesse do aluno e esforço, cada aluno pode esperar ter com o curso uma experiência bem sucedida e válida.

Nos próximos anos, os materiais do Project Physics serão revistos tantas vezes quantas as necessárias para a remoção das ambiguidades ainda existentes e clarificação das instruções de modo a tornar os materiais mais interessantes e relevantes para os alunos. Deste modo pedimos a quantos usem este curso que nos enviem (ao cuidado de Holt, Rinehart and Winston, Inc, 383 Madison Avenue, New York, New York 10017) todas as sugestões e críticas. E agora — bem-vindos ao estudo da física.

F. James Rutherford
Gerald Holton
Fletcher G. Watson

TEXTO



ÍNDICE DO TEXTO

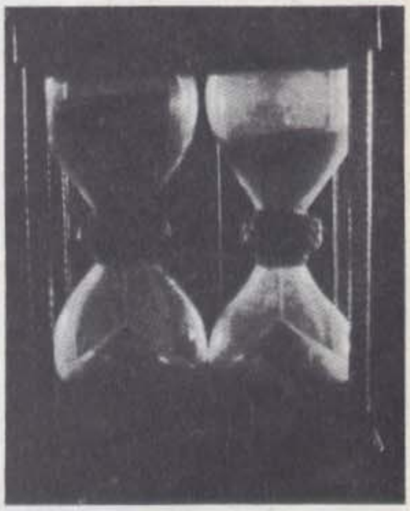
O calendário Azteca, esculpido mais de cem anos antes da adopção do nosso calendário, divide o ano em dezoito meses de vinte dias cada.

UNIDADE 2

Movimento nos céus

CAPÍTULOS

PRÓLOGO A Astronomia, a mais antiga das ciências, lida com objectos que hoje se sabe estarem situados a enormes distâncias de nós. Para os primeiros observadores, o Sol, a Lua, os planetas e as estrelas não pareciam estar assim tão longe. Contudo, desde sempre a majestosa exibição dos acontecimentos celestes estimulou fortemente a imaginação e curiosidade do Homem. Os povos antigos aperceberam-se da grande variedade de objectos visíveis no céu, da regularidade dos seus movimentos e das variações estranhamente lentas que se observavam nas suas posições e no seu brilho. Todo este misterioso esquema de movimentos exigia que se lhe procurasse a causa, a sua razão de ser, a sua explicação.



Felizmente, as estrelas e os planetas apresentam-se como minúsculos pontos luminosos. Torna-se assim fácil observá-los e segui-los com precisão, ao contrário do que acontece com a maioria dos outros fenómenos naturais. O céu forneceu assim o "laboratório" natural para iniciar uma ciência baseada nas capacidades de abstracção, medição e simplificação.

Os primeiros capítulos desta unidade descrevem a descoberta das causas e significados dos movimentos celestes observados. A unidade começa com as tentativas pré-históricas de interpretação das observações, pela sua incorporação em mitos e lendas. Termina na Revolução Científica do século XVII, que nos forneceu as explicações que ainda hoje são válidas. Estas explicações forneceram ainda todo um novo conjunto de métodos para a resolução de problemas de uma maneira científica.

Mesmo nos tempos modernos é frequente que as pessoas, ao ar livre, utilizem o Sol como relógio, durante o dia, e as estrelas, durante a noite. Ao nascer e ao pôr-se, o Sol indica direcções geográficas; ao meio-dia pode obter-se a direcção sul a partir da posição do Sol. A Estrela Polar permite a localização do verdadeiro norte, durante a noite. A posição do Sol pode ser utilizada, grosseiramente, como um calendário. A sua altitude ao meio-dia varia com as estações.

Os acontecimentos astronómicos não afectaram apenas a imaginação das pessoas; tiveram mesmo um efeito prático sobre a sua vida quotidiana. Na verdade, o dia de trabalho começava com o nascer do Sol e terminava com o seu ocaso. Antes da descoberta da iluminação eléctrica, a actividade humana era dominada pela presença ou pela ausência da luz do dia e pelo calor solar, variáveis de estação para estação.

O "dia" é provavelmente a mais fundamental e, seguramente, a mais antiga de todas as unidades de tempo usadas na prática. Para a medição de intervalos de tempo maiores, a "lua" ou mês constituía uma unidade óbvia. Ao longo dos séculos, os relógios foram sendo concebidos para subdividir o dia em unidades mais pequenas, e os calendários para registar a passagem dos dias e dos anos.

As primeiras tribos nómadas sentiram a necessidade de um calendário quando finalmente se fixaram em aldeias, há cerca de 10 000 anos,

Stonehenge, Inglaterra: aparentemente um observatório astronómico pré-histórico.

tornando-se dependentes da agricultura para a sua alimentação: o calendário era-lhes indispensável para o planeamento das suas actividades agrícolas. Ao longo da história, a maior parte dos povos foi-se envolvendo na agricultura, necessitando assim de um calendário. Se a sementeira fosse efectuada demasiado cedo, as sementes poderiam apodrecer no solo, ou os tenros pés recém-brotados poderiam ser mortos por uma vaga de frio. Se fosse efectuada demasiado tarde, a colheita não poderia ser feita antes do Inverno seguinte. Consequentemente, tornava-se fundamental para a sobrevivência humana o conhecimento tão exacto quanto possível das alturas em que se deviam efectuar a sementeira e a colheita. Como as festas religiosas dos tempos primitivos estavam muitas vezes relacionadas com as estações do ano, a tarefa de concepção e melhoramento dos calendários foi na maior parte dos casos desempenhada por sacerdotes. Tais melhoramentos requeriam a observação do Sol, dos planetas e das estrelas. Por isso, os primeiros astrónomos foram, provavelmente, sacerdotes.

Cromelech dos Almendres, Évora — Monumento megalítico do tipo frequentemente associado com observações do movimento aparente do Sol.

(Fotografia aérea reproduzida com permissão do Instituto Geográfico Cadastral).

As necessidades práticas e a imaginação actuaram em conjunto, de maneira a dar à astronomia, muito cedo, uma importância real. Muitos dos grandes monumentos dos tempos antigos foram construidos tendo em conta uma cuidadosa orientação astronómica. As grandes pirâmides do Egipto, túmulos dos faraós, foram construídas de modo a que as suas faces se orientassem nas direcções norte-sul e este-oeste. Os impressionantes círculos de pedras gigantes, em Stonehenge, na Inglaterra, parecem ter sido compostos por volta de 2000 anos antes de Cristo, de maneira a possibilitar observações astronómicas muito precisas das posições do Sol e da Lua. Os Maias e os Incas, na América, tal como os Chineses, desenvolveram esforços tremendos na construção de edifícios a partir dos quais se pudessem medir as variações da posição do Sol, da Lua e dos planetas. Os Babilónios e os Egípcios desenvolveram, mesmo antes de 1000 A.C., conhecimentos consideráveis a respeito da marcação do tempo. Os registos das suas observações ainda hoje estão a ser desenterrados em escavações.

Vemos assim que, ao longo de milhares de anos, o movimento dos corpos celestes foi cuidadosamente observado e registado. Nenhuma outra ciência teve uma acumulação de dados tão longa e profusa como a astronomia.

As posições de Júpiter, desde 132 A. C. a 60 A. C., estão registadas nesta placa de argila da Babilónia, presentemente no Museu Britânico.

Mas a nossa maior dívida é para com os Gregos, que começaram a tentar lidar de uma nova maneira com os dados que obtiveram. Eles descortinaram o contraste existente entre os movimentos aparentemente ocasionais e de curta duração dos corpos terrestres e os intermináveis movimentos cíclicos dos corpos celestes. Por volta do ano 600 A.C. começaram a pôr a si próprios uma nova pergunta: Como se poderão explicar estes acontecimentos celestes, cíclicos, de uma maneira simples? Que sentido de ordem, que significado poderemos extrair destes factos? As respostas que encontraram, que serão discutidas no capítulo 5, tiveram um efeito importante sobre a ciência. Por exemplo, os trabalhos de Aristóteles (cerca de 330 A.C.) foram largamente estudados e aceites na Europa ocidental, depois de 1200 D.C. e constituíram factores decisivos na revolução científica que se seguiu.

Depois das conquistas de Alexandre, o Grande, o centro do pensamento grego e da ciência deslocou-se para o Egipto, para a nova cidade de Alexandria, fundada em 332 A.C. Aí foi criado um grande museu, semelhante a um moderno centro de investigação, que floresceu durante muitos séculos. Mas, no declinar da civilização grega, os Romanos — povo eminentemente prático — capturaram o Egipto e o interesse pela ciência morreu. Em 640 D.C. Alexandria foi capturada pelos Muçulmanos, na sua expansão pela margem sul do Mediterrâneo e pela Espanha, até aos Pirenéus. Pelo caminho eles reuniram e preservaram muitas bibliotecas contendo documentos gregos, alguns dos quais foram mais tarde traduzidos para a língua árabe e cuidadosamente estudados. Durante os séculos seguintes, os cientistas muçulmanos fizeram novas e mais perfeitas observações celestes, embora sem alterar significativamente as explicações ou teorias gregas.

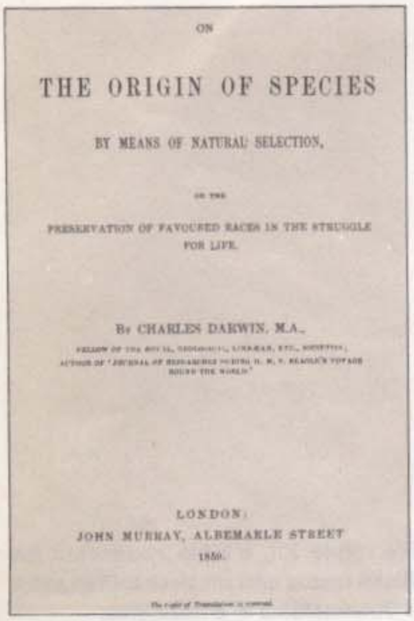
Durante este período, os trabalhos gregos foram quase completamente esquecidos na Europa ocidental. Só mais tarde foram redescobertos alguns deles, através de traduções árabes encontradas em Espanha, após a expulsão dos Muçulmanos. Por volta de 1130 D.C. existiam em Itália e em França manuscritos completos de pelo menos um dos livros de Aristóteles. Após a fundação da Universidade de Bolonha, nos fins do século XII, e da Universidade de Paris, cerca do ano 1200, foram encontrados muitos outros trabalhos de Aristóteles. Estes escritos receberam a atenção dedicada de estudiosos, tanto em Paris como nas novas Universidades inglesas, Oxford e Cambridge.

Durante o século seguinte, Tomás Aquino, um monge Dominicano, fundiu numa filosofia única alguns dos elementos principais do pensamento grego e da teologia Cristã. O seu trabalho foi largamente estudado e aceite na Europa ocidental, durante vários séculos. Na elaboração da sua síntese, Aquino aceitou a física e a astronomia de Aristóteles. E, porque a ciência estava fundida com a teologia, qualquer interrogação científica parecia constituir também uma interrogação teológica. Por isso e durante largo tempo, pouca ou nenhuma acção crítica efectiva se fez em relação à ciência aristotélica.

No século XII, o sábio Maometano Ibn Rashd tentou uma simbiose análoga entre o Aristotelismo e o Islamismo.

O movimento da Renascença, irradiado na Europa a partir da Itália, trouxe uma nova arte e uma nova música. Trouxe também novas ideias acerca do universo e do lugar nele ocupado pelo homem. Tornou-se aceitável, mesmo desejável e recompensada, uma atitude curiosa e interrogativa por parte das pessoas. Os homens adquiriram uma nova confiança na sua capacidade de estudar o mundo à sua volta. Entre aqueles cujo trabalho introduziu e iniciou a nova era contam-se Colombo e Vasco da Gama, Gutenberg e da Vinci, Miguel Ângelo e Rafael, Erasmo e Vessálio, Lutero, Calvino e Henrique VIII. (O esquema do Capítulo 6 mostra como se distribuíram as suas vidas e como se enquadraram no movimento renascentista). Nesta cultura renascentista florescente viveu Niklas Koppernigk, mais tarde chamado Copérnico, cuja reanálise das teorias astronómicas é discutida no Capítulo 6.

Outros desenvolvimentos importantes na astronomia foram efectuados no século XVII por Kepler, principalmente através do raciocínio matemático, e por Galileu, através das suas observações e escritos; estes são discutidos no Capítulo 7. No Capítulo 8 retomaremos o trabalho de Newton, na segunda metade do século XVII. O génio de Newton generalizou as ideias acerca dos movimentos dos objectos terrestres, de maneira a explicar os movimentos celestes — uma magnífica síntese da dinâmica terrestre e celeste. Estes homens — e outros como eles, em ciências como a anatomia e a fisiologia — literalmente alteraram o mundo. Os resultados por eles obtidos e os caminhos por eles trilhados durante o seu trabalho mostraram-se de tão grande alcance que as alterações consequentes ocorridas na sociedade humana recebem frequentemente o nome de *Revolução Científica*.


ON

THE ORIGIN OF SPECIES

BY MEANS OF NATURAL SELECTION,

PRESERVATION OF FAVOURED RACES IN THE STRUGGLE FOR LIFE.

By CHARLES DARWIN, M.A.,

LONDON:
JOHN MURRAY, ALBEMARLE STREET.
1859.

Os grandes progressos científicos podem afectar — e assim acontece muitas vezes — ideias exteriores à própria ciência. Por exemplo, a impressionante obra de Newton ajudou a formar um novo sentimento de autoconfiança. O Homem começou a sentir-se capaz de compreender todas as coisas, celestes como terrestres. Esta importantíssima alteração de atitude foi a principal característica do século XVIII, denominado a Idade da Razão. Até certo ponto, a nossa maneira actual de pensar e o modo como nos comportamos ainda assentam no efeito das descobertas científicas feitas séculos atrás.

Grandes alterações da atitude intelectual foram desenvolvidas a partir do início da Renascença e germinaram durante cerca de um século, desde o trabalho de Copérnico ao de Newton. De certa maneira, essa época de invenção pode ser comparada com o período de evolução rapidíssima que ocorreu durante os últimos cem anos. Este período pode considerar-se enquadrado pela publicação do trabalho de Darwin, *A Origem das Espécies* (*Origin of Species*, 1859) e pela primeira explosão nuclear, em 1945. Nele viveram cientistas como Mendel e Pasteur, Plank e Einstein, Rutherford e Fermi. As ideias introduzidas

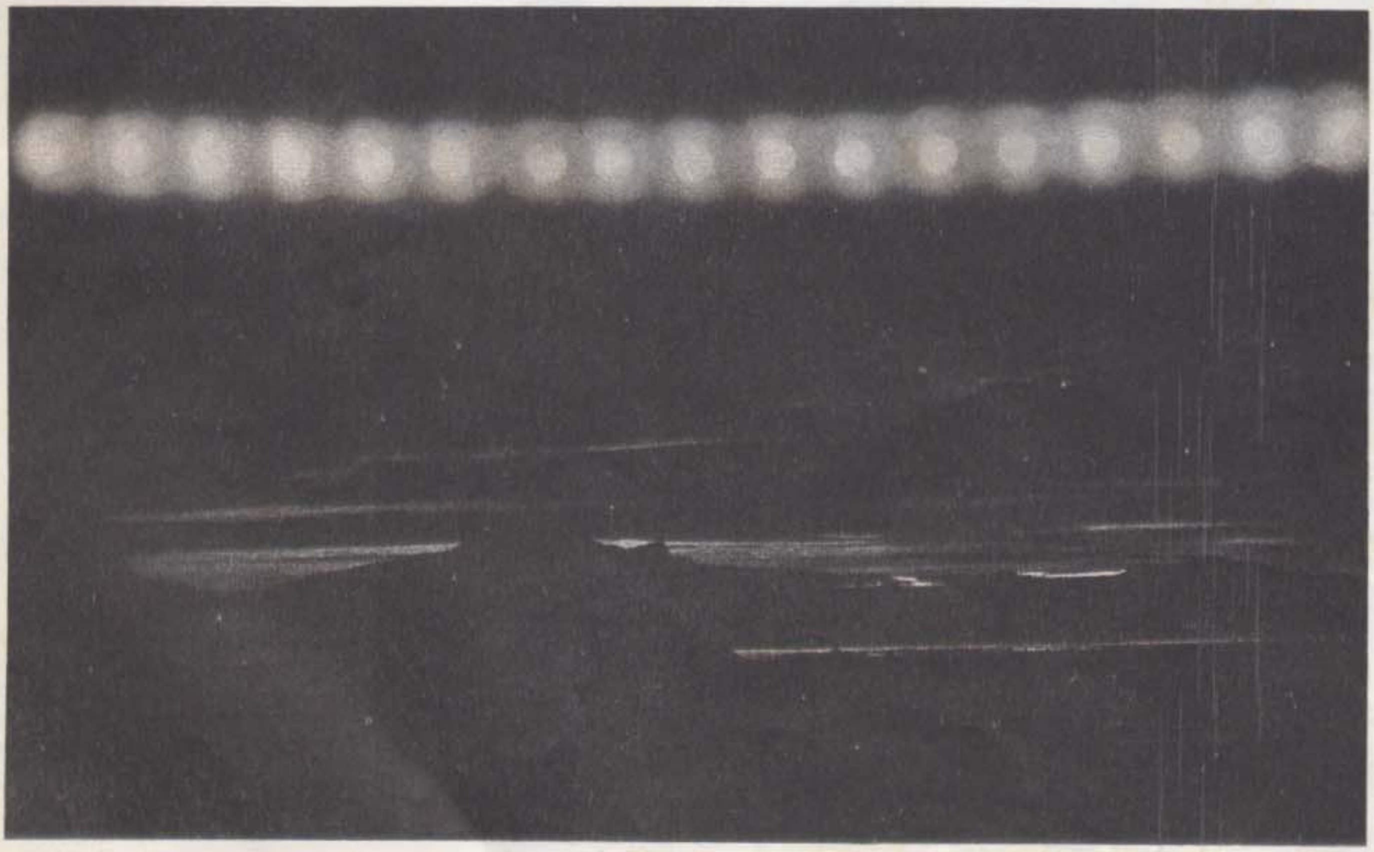
Luís XIV visitando a Academia das Ciências de França, fundada por ele em meados do século XVII. Através da janela da direita pode ver-se o Observatório de Paris, em construção na altura.

por eles e por outros na ciência têm-se vindo a tornar cada vez mais importantes. E estas ideias científicas têm um papel fundamental no nosso mundo actual, tal como as ideias e os trabalhos de pessoas como Martin Luther King e o Papa João XXIII, Marx e Lenin, Freud e Dewey, Picasso e Stravinsky, Shaw e Joyce. Se compreendermos como a ciência influenciou os homens do passado estaremos melhor preparados para compreender como a ciência influencia hoje o nosso pensamento e a nossa vida. Esta é uma das finalidades mais importantes deste curso.

Em suma, o assunto tratado nesta unidade, embora tenha uma natureza tanto histórica como científica, é ainda de primordial importância para quem quer que seja que esteja interessado na compreensão da ciência. Entre as razões para apresentação da ciência no seu contexto histórico pode ainda incluir-se o seguinte:

> Os resultados finalmente obtidos são ainda válidos e incluem-se entre as ideias mais antigas usadas quotidianamente no trabalho científico. As características de todo o trabalho científico são claramente visíveis. Pode-se observar o papel das hipóteses, da experiência e das observações, da teoria matemática. Podem-se notar os mecanismos sociais de colaboração, ensino e discussão. E pode-se apreciar a possibilidade de que as descobertas científicas venham a fazer parte do saber estabelecido da época.
>
> É interessante o conflito que existe entre as teorias rivais usadas para explicar as mesmas observações astronómicas. Ele ilustra o que essas disputas têm de comum com as que ocorrem hoje e ajudam a ver claramente que padrões devem ser utilizados para julgar uma teoria face a uma outra.
>
> Esta matéria inclui as razões principais do progresso da ciência, tal como o apreciamos hoje. A história da revolução científica do século XVII e dos seus múltiplos efeitos fora da própria ciência é crucial para a compreensão da ciência moderna, tal como o é a Revolução Francesa para a compreensão da Europa actual.

O Sol da meia-noite, fotografado a intervalos de 5 minutos, no Mar de Ross, na Antárctida.



CAPÍTULO 5

Onde Está a Terra? — As Respostas dos Gregos

5.1 Movimentos do Sol e das estrelas

Os factos comuns da astronomia, os próprios acontecimentos celestes, são os mesmos hoje que no tempo dos Gregos. Qualquer observador poderá facilmente verificar, a olho nu, a maior parte do que foi observado e registado por aqueles antigos cientistas. Poderá observar alguns dos há muito conhecidos ciclos e ritmos, tais como a variação da altura do Sol ao meio-dia com as estações do ano, as fases da Lua, e o glorioso espectáculo do lento carrocel celeste nocturno. Se pretendêssemos apenas obter previsões precisas acerca de eclipses, de posições planetárias e das estações do ano poderíamos, tal como fizeram os Egípcios e os Babilónios, focar a nossa atenção no registo dos pormenores daqueles ciclos e ritmos. Se, todavia, tal como os Gregos, pretendermos *explicar* aqueles ciclos, deveremos usar aqueles dados para construir algum tipo de modelo ou teoria simples, que permita prever as variações observadas. Mas antes de explorarmos as várias teorias propostas no passado vamos rever as *principais observações* que as teorias deverão explicar: os movimentos do Sol, da Lua, dos planetas e das estrelas.

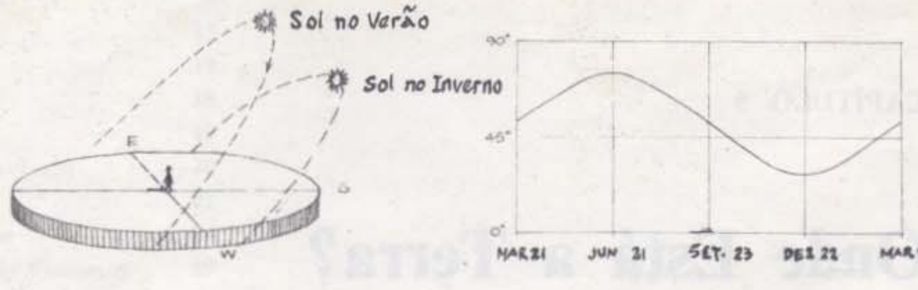
GE 5.1.

Os movimentos destes corpos, essencialmente os mesmos que ocorriam milhares de anos atrás, não são difíceis de observar — deverá insistir-se em observá-los. O *Manual* apresenta várias sugestões para a observação dos céus, tanto a olho nu como através de um pequeno telescópio.

O ciclo celeste fundamental observado da Terra é, naturalmente, o da sucessão dos dias e das noites. Em cada dia, o Sol levanta-se no horizonte local do lado leste e põe-se do lado oeste. O Sol descreve um arco através do céu, tal como está esboçado no diagrama (a), no cimo da página seguinte. Ao meio-dia, a meio caminho entre o nascer e o pôr do Sol, este está na sua posição mais alta relativamente ao horizonte. Em cada dia pode ser observado um movimento semelhante, de nascente para poente. Na verdade, todos os objectos celestes exibem um padrão de movimento diário deste tipo. Todos eles se levantam a leste, alcançam o ponto mais alto e põem-se a oeste (embora nem todas as estrelas cheguem realmente a descer abaixo do horizonte).

Esta descrição refere-se a observadores do Hemisfério Norte. Para os observadores a sul do equador bastará trocar «norte» por «sul» e vice-versa.

À medida que as estações vão passando vão-se alterando os pormenores da trajectória do Sol através do céu. Durante o Inverno, no hemisfério norte, o Sol nasce e põe-se mais a sul, a sua altura ao meio-dia é mais baixa e, portanto, a sua passagem no céu diurno leva menos tempo. No Verão o Sol nasce e põe-se mais a norte, a sua altura ao meio-dia é superior e a sua passagem no céu leva mais tempo. O ciclo total demora um pouco menos do que $365\frac{1}{4}$ dias.



(a) Trajectória do Sol no céu, num dia de Verão e num dia de Inverno.

(b) Altura do Sol ao meio-dia, ao longo do ano, tal como é visto de St. Louis, Missouri.

Este ciclo para norte e para sul, com a duração de um ano, é a base do ano solar e a origem das estações do ano. Aparentemente, os antigos Egípcios pensavam que o ano tivesse 360 dias; mais tarde, no entanto, acrescentaram cinco dias de festividades, de modo a ter um ano de 365 dias, que estava em melhor acordo com as suas observações

GE 5.2. das estações do ano. Sabemos hoje que o ano dura exactamente 365,24220 dias. O pequeno excesso em relação a um número inteiro

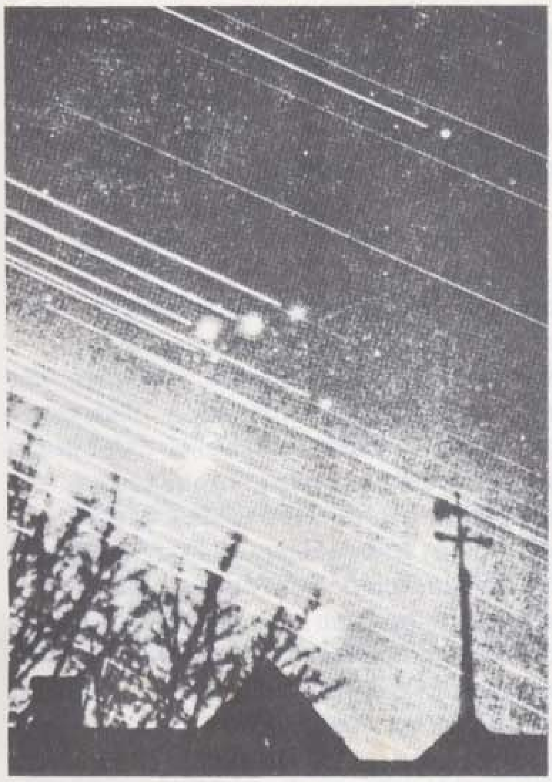
GE 5.3. de dias, de 0,24220 dias, levanta um problema a quem quer que queira fazer um calendário, que, naturalmente, trabalha apenas com dias inteiros. Se se trabalhar com um calendário de exactamente 365 dias, o dia de Ano Novo chegará um dia mais cedo, ao fim de quatro anos. Ao fim de um século ter-se-á um erro de quase um mês. Ao fim de alguns séculos, a data a que se convencionar chamar de "1 de Janeiro" chegará no Verão! Nos tempos antigos foram de vez em quando inseridos dias inteiros e mesmo meses inteiros, de modo a manter um acordo razoável entre as estações e um calendário de 365 dias.

Um tal expediente não é, todavia, satisfatório. Em 45 A.C., Júlio César decretou um novo calendário de 365 dias (o calendário Juliano), em que se previa a inserção de um dia inteiro (um "dia de transição") de quatro em quatro anos. Ao fim de muitos anos, portanto, a média seria de 365¼ dias. Este calendário foi usado durante vários séculos, durante os quais a pequena diferença entre ¼ e 0,24220 se foi acumulando, até atingir alguns dias. Finalmente, em 1582 D.C. foi anunciado um novo calendário, sob a égide do Papa Gregório (o calendário Gregoriano). Este previa apenas 97 dias de transição em cada 400 anos e esta nova aproximação mostrou-se satisfatória até aos nossos dias.

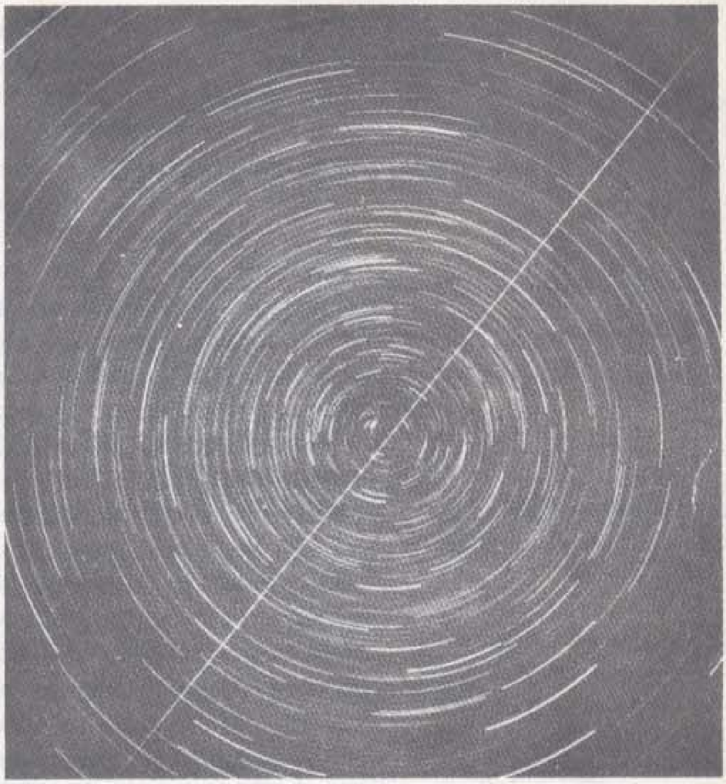
Para reduzir o número de dias de transição de 100 para 97 em 400 anos, os anos iniciais dos séculos não divisíveis por 400 não são considerados como bissextos. É por isso que o ano 1900 não foi um ano bissexto mas que o ano 2000 o será.

Toda a gente já notou, certamente, que algumas das estrelas são brilhantes e que muitas outras são dificilmente visíveis. As estrelas

GE 5.4. mais brilhantes podem parecer maiores, mas nem por isso deixam de constituir meros pontos de luz, quando observadas através de potentes binóculos. Algumas das estrelas mais brilhantes exibem colorações várias, mas a maior parte delas parecem brancas. Ao longo do tempo, a maior parte das estrelas mais brilhantes foram sendo agrupadas, constituindo aquilo a que se chama constelações. Por exemplo, a conhecidíssima Ursa Maior e o Oríon.



Uma combinação fotográfica (pose e fotografia "instantânea") da constelação Oríon. O diafragma da câmara fotográfica esteve aberto durante várias horas, enquanto as estrelas se moveram através do céu (deixando os rastos visíveis na fotografia). Depois, o diafragma esteve fechado durante alguns minutos, sendo em seguida reaberto, guiando-se a câmara de modo a seguir o movimento das estrelas.



Exposição fotográfica, mostrando os percursos aparentes das estrelas em torno do pólo norte celeste. A linha diagonal foi provocada pela rápida passagem de um satélite terrestre artificial.

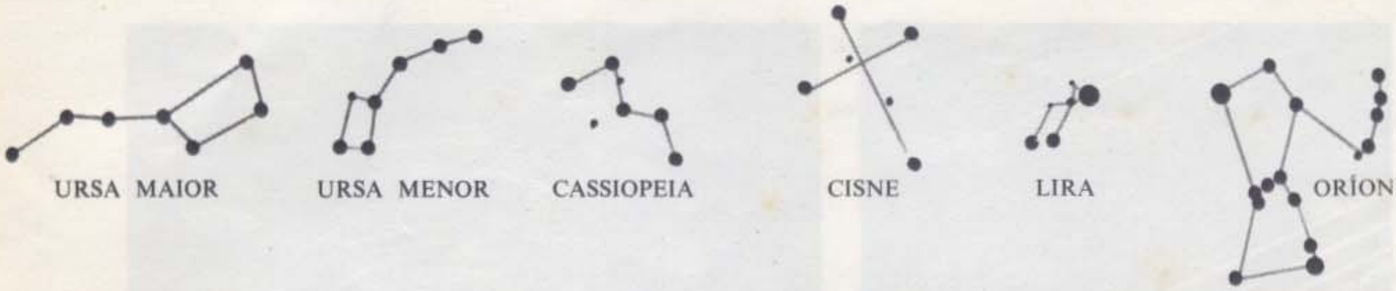
Poder-se-á utilizar um transferidor para determinar a duração da exposição; as estrelas movem-se cerca de 15° por hora.

Toda a gente já notou, com certeza, que um grupo qualquer de estrelas se vai deslocando, durante a noite, para oeste. Porquê? Uma observação mais pormenorizada, por exemplo recorrendo a uma fotografia com um tempo de exposição muito longo, mostraria que toda a esfera estelar se move de leste para oeste — aparecendo novas estrelas a leste e pondo-se algumas a oeste. Quando observadas de um ponto qualquer do hemisfério norte da Terra, as estrelas parecem mover-se, durante a noite, em torno de um ponto, denominado o pólo norte celeste, no sentido inverso ao dos ponteiros do relógio. Este ponto estacionário está bastante próximo da estrela chamada Estrela Polar, como se pode ver na fotografia à direita, ao cimo da página.

Algumas das constelações, tais como o Oríon (o Caçador) e o Cisne (também chamada a Cruz do Norte ou o Cruzeiro do Norte), foram observadas e receberam os seus nomes há milhares de anos. Uma vez que as formas descritas por esses remotos observadores ainda hoje se conservam, podemos afirmar que as posições das estrelas variam

GE 5.5.

Veja-se «The Garden of Epicurus» (*Colectânea de Textos*).



muito pouco, ou mesmo nada, ao longo dos séculos. Foi esta constância das posições que levou à designação de "estrelas fixas".

Assim, encontram-se nos céus relações imutáveis ao longo dos séculos, e movimentos suaves e perfeitamente ordenados, observáveis de dia para dia. Mas embora os ciclos diários do Sol e das estrelas — o seu nascer e pôr — sejam semelhantes, não são idênticos. Ao contrário do que acontece com o Sol, as trajectórias das estrelas não variam de altura com as estações do ano. Além disso, o ritmo do ciclo diário das estrelas não é igual ao do Sol, antes é um pouco mais rápido. Algumas constelações que possam hoje ser vistas bem alto nos céus, logo após o pôr do Sol, aparecerão mais baixas a oeste, algumas semanas depois, quando observadas à mesma hora. Em relação ao tempo solar, as estrelas põem-se quatro minutos mais cedo em cada dia.

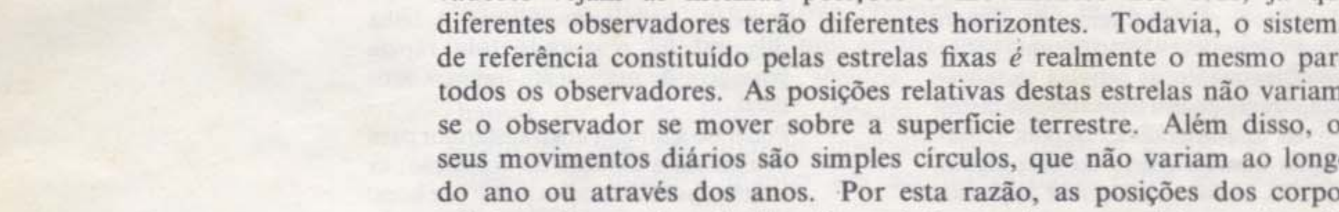
O *Manual* explica um meio muito fácil mas preciso de marcar o tempo nos movimentos das estrelas.

As diferenças entre os dois sistemas de referência — o horizonte e as estrelas fixas — constituem a base para a determinação das coordenadas de um lugar, tanto em terra firme como no mar.

Até agora, descrevemos as posições e os movimentos do Sol e das estrelas relativamente ao horizonte do observador. Mas este não é um sistema de referência imutável, em relação ao qual todos os observadores vejam as mesmas posições e movimentos nos céus, já que diferentes observadores terão diferentes horizontes. Todavia, o sistema de referência constituído pelas estrelas fixas *é* realmente o mesmo para todos os observadores. As posições relativas destas estrelas não variam, se o observador se mover sobre a superfície terrestre. Além disso, os seus movimentos diários são simples círculos, que não variam ao longo do ano ou através dos anos. Por esta razão, as posições dos corpos celestes são usualmente descritas relativamente a um sistema de referência constituído pelas próprias estrelas.

Uma descrição do movimento do Sol, utilizando as estrelas fixas como referência, deverá incluir o seu percurso diário através do céu, o intervalo de tempo diário entre o nascer e o pôr, e a variação da altura ao meio-dia com as estações do ano. Já vimos que, pelo tempo solar, as estrelas se põem quatro minutos mais cedo em cada dia. Podemos igualmente dizer que, pelo tempo estelar, o Sol se põe quatro minutos mais *tarde* em cada dia. Isto é, o Sol parece *atrasar-se* gradualmente em relação ao movimento diário das estrelas, de leste para oeste.

A variação da altura do Sol ao meio-dia ao longo do ano corresponde a uma oscilação para norte e para sul da trajectória solar,



relativamente ao fundo de estrelas. No primeiro dos diagramas apresentados mais abaixo, o aspecto da parte média do céu está representado por uma faixa à volta da Terra. A trajectória anual do Sol, projectada no fundo de estrelas, está representada nessa faixa por uma linha negra. Se cortarmos e planificarmos esta faixa, tal como se mostra no segundo e terceiro diagramas, obtemos um mapa da trajectória do Sol durante o ano. (A linha de 0° é o *equador celeste*, a linha celeste imaginária exactamente acima do equador terrestre). A projecção da trajectória do Sol no fundo de estrelas chama-se *eclíptica* — o seu desvio máximo para norte e para sul do equador celeste é de cerca de $23\frac{1}{2}$°. Além disto, precisamos de definir um ponto da eclíptica, de modo a podermos localizar o Sol, ou qualquer outro objecto, ao longo dela. Desde há séculos que este ponto tem sido aquele em que o Sol, deslocando-se para leste ao longo da eclíptica, cruza o equador de sul para norte — o que acontece por volta de 21 de Março. Este ponto é chamado "equinócio vernal (ou da primavera)". É o "zero", a partir do qual são medidas normalmente as posições das estrelas.

Há, portanto, três movimentos aparentes do Sol: (1) o seu movimento diário para oeste, através do céu, (2) o seu desvio anual para leste, em relação às estrelas, (3) o seu ciclo anual de oscilação para norte e para sul (altura ao meio-dia).

Estes fenómenos são tanto mais intrigantes quanto é verdade que se repetem de uma maneira absolutamente infalível e precisa. Torna-se imperativo explicar estes fenómenos a partir de um modelo simples que os represente.

Q1 — O pôr do Sol adiantar-se-á ou atrasar-se-á, de um dia para o seguinte, se o tempo for marcado relativamente às estrelas?

Q2 — Quais as razões práticas que exigiram a concepção de calendários?

Q3 — Quais os movimentos solares observados durante um ano?

Estas perguntas que se fazem no fim de cada secção destinam-se a ajudar o leitor a verificar o seu grau de compreensão da matéria exposta, antes de entrar na secção seguinte.

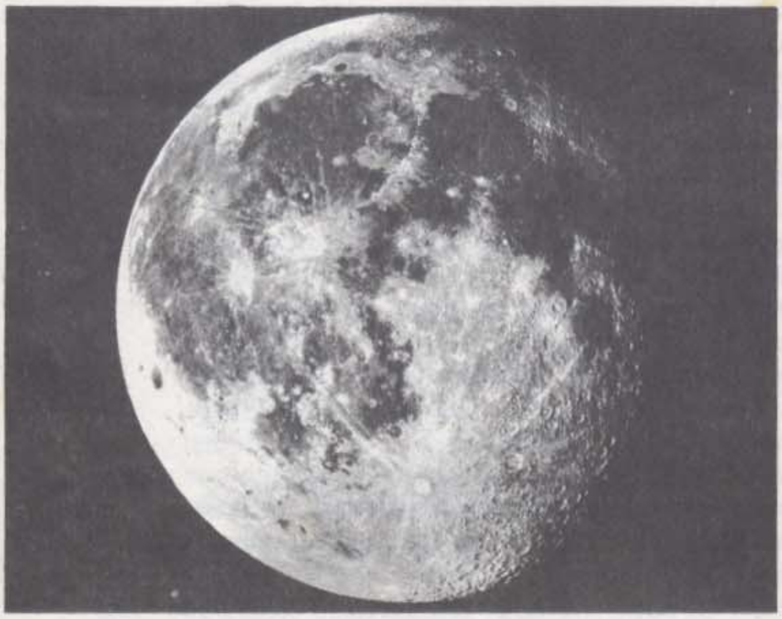
5.2 Movimentos da Lua

A Lua apresenta também o movimento diário de leste para oeste, comum ao Sol e às estrelas. Mas a Lua desliza para leste, relativamente ao fundo de estrelas, mais rapidamente do que o Sol. Na verdade, ela levanta-se uma hora mais tarde por cada dia que passa. Quando ela se levanta a leste por alturas do pôr do Sol (ou seja, numa posição oposta à do Sol), mostra-se brilhante e com a forma de um disco perfeito (Lua cheia). De aí em diante vai aparecendo cada vez mais tarde e menos redonda, acabando por surgir quase de manhãzinha, com a forma de um fino arco. Ao fim de cerca de catorze dias, quando a Lua passa pelo céu bem próximo do Sol, levantando-se com ele, nem sequer a conseguimos ver (Lua nova). Depois da Lua nova, a primeira vez que a conseguimos ver é quando ela aparece muito baixo, do lado oeste do céu, ao pôr do Sol, com a forma de

Uma «meia-lua» ocorre a um quarto do ciclo e é por isso chamada pelos astrónomos de «primeiro quarto» ou quarto-crescente. A Lua cheia ocorre a meio do ciclo e uma nova «meia Lua» ocorre no «terceiro quarto» (quarto minguante).

um fino arco. Depois, à medida que a Lua se afasta do Sol, em direcção a leste, a sua imagem vai engordando, primeiro até metade de um disco, e depois, ao fim de outra semana, novamente com a forma de um disco completo. E o ciclo repete-se a seguir a cada Lua cheia.

23 dias depois da Lua nova.



17 dias depois da Lua nova.

3 dias depois da Lua nova.

Já em 380 A.C. o filósofo grego Platão tinha observado que as fases da Lua podiam ser explicadas supondo que a Lua era um globo que reflectia a luz solar e que se movia em torno da Terra, com um período de cerca de 29 dias. Antigamente supunha-se que a Lua estivesse muito próxima da Terra, devido às grandes dimensões com que ela aparecia e ao facto de ela se mover muito mais rapidamente que as estrelas.

A trajectória lunar no céu é próxima da trajectória anualmente percorrida pelo Sol; isto é, a Lua está sempre próxima da eclíptica. Mas a trajectória lunar está ligeiramente inclinada em relação à do Sol; se assim não fosse, ela apareceria exactamente à frente do Sol em cada Lua nova (provocando um eclipse do Sol) e estaria exactamente em oposição ao Sol em cada Lua cheia, internando-se na sombra da Terra (e provocando um eclipse da Lua).

Os movimentos da Lua têm sido estudados desde há séculos, em parte devido ao interesse na previsão dos eclipses, e desde há muito que se sabe serem muito complicados. A previsão exacta da posição da Lua constitui um teste muito sensível para qualquer teoria que trate dos movimentos nos céus.

Q4 — Desenhe um esboço rápido que mostre as posições relativas do Sol, da Terra e da Lua em cada uma das quatro fases da Lua.

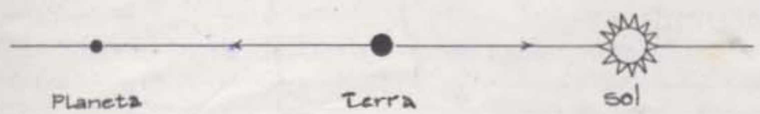
Q5 — Por que é que não há eclipses todos os meses?

GE 5.6.

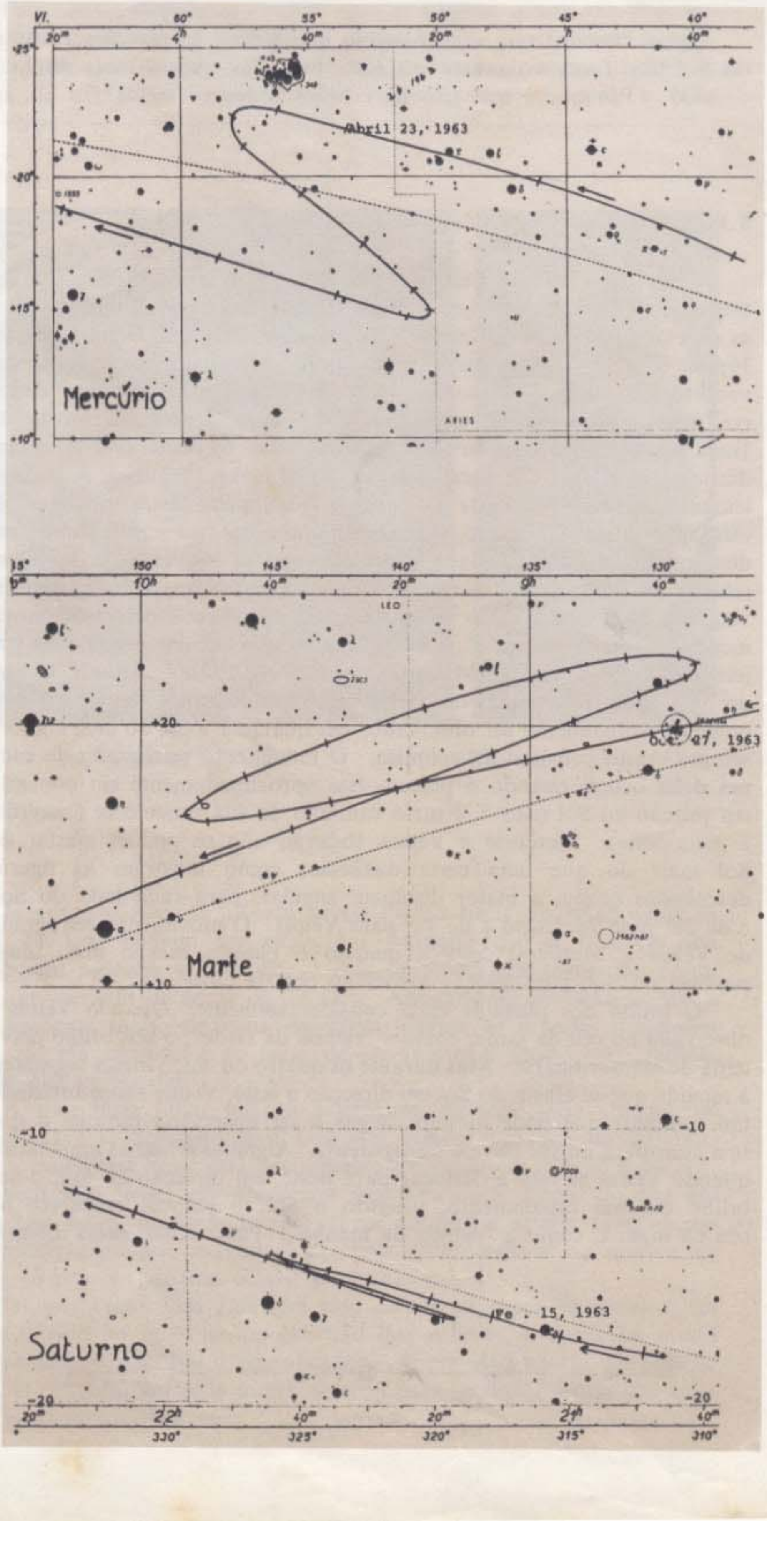
5.3 As "estrelas vagabundas"

Além do Sol e da Lua, podem-se ver, sem a ajuda de qualquer telescópio, cinco outros objectos bastante brilhantes que se movem entre as estrelas. São os "vagabundos", ou planetas: Mercúrio, Vénus, Marte, Júpiter e Saturno. Três outros planetas foram descobertos, com observações telescópicas: Urano, Neptuno e Plutão; mas qualquer destes era ainda desconhecido, cerca de um século depois da morte de Isaac Newton. Tal como o Sol ou a Lua, todos os planetas se levantam diariamente a leste e se põem a oeste. E, da mesma maneira, movem-se lentamente para leste entre as estrelas. Mas além destes movimentos, eles apresentam um outro, simultaneamente notável e intrigante: em determinadas alturas, cada planeta pára de se mover para leste em relação ao fundo de estrelas e, durante alguns meses, volta para trás, viajando para oeste. Este movimento em direcção a oeste, ou movimento no sentido "errado", é designado *movimento retrógrado*. As trajectórias retrógradas de Mercúrio, Marte e Saturno, durante o ano de 1963, estão desenhadas na página seguinte. Saturno, Júpiter e Marte podem eventualmente ser observados em qualquer local do céu, embora sempre muito próximo da eclíptica. O movimento retrógrado de cada um deles ocorre quando o planeta está aproximadamente em oposição em relação ao Sol (isto é, a meio caminho da sua trajectória nocturna, à meia-noite). Mercúrio e Vénus, todavia, não se podem afastar do Sol mais do que uma certa distância; como mostram as figuras desenhadas acima, a maior distância angular, para cada lado do Sol, é de 28° para Mercúrio e de 48° para Vénus. O movimento retrógrado de Vénus e Mercúrio começa quando o planeta está o mais longe possível do Sol, para leste, e visível no céu da tarde.

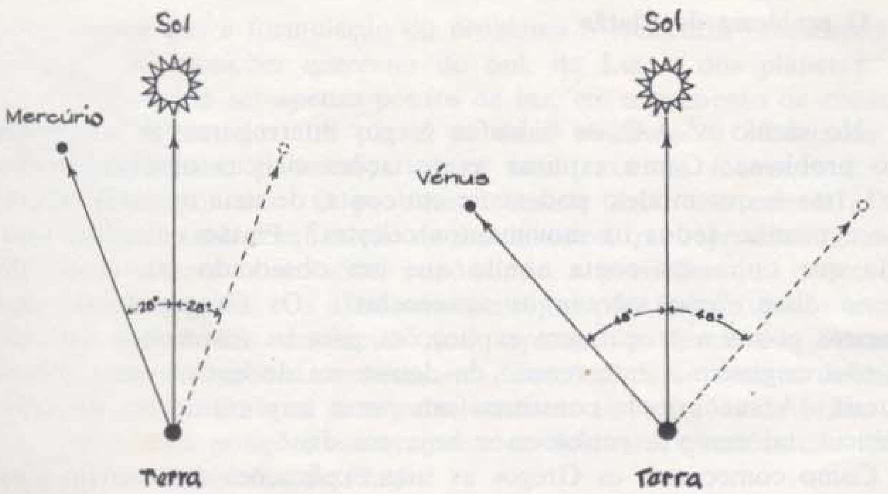
O brilho dos planetas varia consideravalmente. Quando Vénus é observada no céu da tarde, como a "estrela da tarde", o seu brilho não é nada de extraordinário. Mas durante os quatro ou cinco meses seguintes, à medida que se afasta do Sol em direcção a leste, Vénus vai-se tornando tão brilhante que pode mesmo chegar a ser observada durante o dia, se a atmosfera estiver clara e transparente. Algumas semanas mais tarde, quando Vénus se está a deslocar para oeste, em direcção ao Sol, o seu brilho diminui rapidamente; passado o Sol, o planeta reaparece no céu da manhã, como a "estrela da manhã". Passa então pelas mesmas



Diz-se que um planeta está *em oposição* quando ele é observado na direcção exactamente oposta à do Sol. Os movimentos retrógrados de Marte, Júpiter e Saturno são observados na altura em que estão em oposição.



Os movimentos retrógrados de Mercúrio (marcados a intervalos de 5 dias), de Marte (a intervalos de 10 dias) e de Saturno (a intervalos de 20 dias) em 1963, desenhados sobre uma carta celeste. A linha a pontuado representa a trajectória anual do Sol, a que se chama a eclíptica.



Os ângulos máximos, em relação ao Sol, a que se podem observar Mercúrio e Vénus. Em determinadas alturas, ambos os planetas podem ser observados ao nascer ou ao pôr do Sol. Mercúrio nunca é observado a mais de 28° do Sol, e Vénus a mais de 48°.

variações de brilho, agora por ordem oposta: grande brilho primeiro, esvaindo-se depois gradualmente. As variações de Mercúrio seguem aproximadamente o mesmo esquema. Mas estas são bastante mais difíceis de observar, já que o planeta está sempre muito próximo do Sol (sendo por isso visto apenas ao alvorecer e ao entardecer).

Marte, Júpiter e Saturno são mais brilhantes na altura em que estão no seu movimento retrógrado, em oposição ao Sol. Além disso, o seu brilho máximo varia ao fim de uma série de anos. A variação é mais facilmente perceptível em relação a Marte; o planeta apresenta o brilho máximo quando está em oposição ao Sol, por volta de Agosto ou Setembro.

O Sol, a Lua e os planetas movem-se em geral para leste em relação ao fundo de estrelas; mas, além disto, a Lua e os planetas (à excepção de Plutão) podem ser sempre encontrados numa faixa de apenas 8° de largura, para cada lado da trajectória do Sol.

Estes são, portanto, alguns dos principais fenómenos celestes observados. Todos eles são conhecidos desde há muito e, pela sua regularidade intrigante e pelas suas variações, parecem exigir, antes como hoje, alguma forma de explicação.

GE 5.7.

Movimentos retrógrados típicos dos planetas

Planeta	Dias	Deslocamento para oeste
Mercúrio	34	15°
Vénus	43	19°
Marte	83	22°
Júpiter	118	10°
Saturno	139	7°
Úrano	152	4°
Neptuno	160	3°
Plutão	156	2°

Q6 Qual a zona do céu a prescrutar, se se pretender observar os planetas Mercúrio e Vénus?

Q7 Para que parte do céu se deverá olhar, se se pretender ver um planeta que esteja em oposição?

Q8 Quando é que Mercúrio e Vénus estão em movimento retrógrado?

Q9 Quando é que Marte, Júpiter e Saturno estão em movimento retrógrado?

Q10 Poderão Marte, Júpiter e Saturno aparecer em qualquer local do céu?

5.4 O problema de Platão

No século IV A.C., os filósofos gregos interrogaram-se sobre um novo problema: Como explicar as variações cíclicas observadas nos céus? Isto é, que modelo poderá ter em conta, de uma maneira consistente e precisa, todos os movimentos celestes? Platão concebeu uma teoria que tinha em conta aquilo que era observado ou, como ele próprio disse, "que salvava as aparências". Os Gregos foram dos primeiros povos a procurarem explicações para os fenómenos naturais que não exigissem a intervenção de deuses ou de outros seres sobrenaturais. A sua atitude constituiu um passo importante em direcção à ciência, tal como a conhecemos hoje em dia.

Como começaram os Gregos as suas explicações dos movimentos observados nos céus? Quais foram as suas hipóteses?

Qualquer resposta a estas perguntas não pode deixar de conter uma certa dose de especulação. Embora, ao longo dos séculos, muitos escolásticos se tenham dedicado ao estudo do pensamento grego, os documentos nos quais se baseia o nosso conhecimento dos Gregos são, na maior parte dos casos, cópias de cópias e traduções de traduções, nas quais existem muitas vezes erros e omissões. Em certos casos conhecem-se unicamente relatórios ou comentários, feitos por autores muito mais recentes, a respeito do que certos filósofos gregos fizeram ou disseram; estas afirmações são frequentemente distorcidas ou incompletas. A tarefa dos historiadores é difícil. A maior parte dos escritos originais gregos foram feitos em rolos de papiro ou de pano, que se deterioraram com o tempo. Guerras, pilhagens e incêndios destruíram também muitos documentos importantes. Particularmente trágico foi o incêndio da célebre biblioteca de Alexandria, no Egipto, que continha várias centenas de milhar de documentos. (A biblioteca foi incendiada por três vezes: pelas tropas de César, em 47 A.C.; pelos cristãos, no século IV D.C.; e pelos muçulmanos, em 640 D.C. quando Alexandria estava sob o seu domínio). Assim, embora se tenha uma ideia geral bastante boa acerca da cultura grega, a verdade é que se desconhecem muitos pormenores interessantes.

Vários séculos mais tarde, a maturação da cultura islâmica levou a um estudo extensivo e a comentários eruditos sobre o que restava do pensamento grego. Vários séculos ainda mais tarde, uma cultura cristã mais amadurecida utilizou as ideias preservadas pelos maometanos para desenvolver os primeiros passos da ciência moderna.

A maneira como os Gregos (e os seus discípulos intelectuais, ao longo de muitos séculos) encararam o problema estava já implícita numa afirmação de Platão feita no século IV A.C. Este definiu o problema aos seus alunos da seguinte maneira: as estrelas — representando seres eternos, divinos e imutáveis — tal como as observamos, movem-se a velocidade uniforme em torno da Terra, na mais perfeita e regular de todas as trajectórias, o círculo interminável. Mas alguns outros corpos celestes, designadamente o Sol e os planetas, vagabundeiam nos céus, em trajectórias complicadas, chegando mesmo a apresentar movimentos retrógrados. Todavia, sendo corpos celestes, movem-se certamente da maneira mais adequada à sua elevada categoria. Os seus movimentos, não constituindo embora círculos perfeitos, são certamente combinações de círculos perfeitos. Quais as combinações de movimentos circulares a velocidade constante que poderão explicar as variações peculiares observadas nos movimentos acima de tudo regulares que são descritos nos céus?

Note-se que a formulação do problema o concentra unicamente na variação das posições *aparentes* do Sol, da Lua e dos planetas. Os planetas parecem ser apenas pontos de luz, em movimento de encontro ao fundo de estrelas. A partir de duas observações efectuadas em alturas diferentes, poderemos obter uma taxa de movimento: uns tantos graus por dia. O problema consiste então em encontrar um "mecanismo", uma combinação de movimentos, que reproduza os movimentos angulares observados, conduzindo a previsões que concordem com as observações. Os astrónomos antigos não tinham dados experimentais acerca das distâncias que separam a Terra dos restantes planetas, muito embora conhecessem direcções, datas e taxas de movimento angular. Embora já se relacionassem as variações de brilho dos planetas às suas posições relativamente ao Sol, estas questões não foram incluídas no problema de Platão.

Platão e muitos outros filósofos gregos admitiram a existência de alguns, poucos, "elementos" básicos, que misturaram da maneira mais conveniente, de modo a reproduzir a aparente variedade de materiais existente no universo. Embora nem todos concordassem com o que eram esses elementos, gradualmente acabaram por ser aceites quatro deles como fonte de explicação dos fenómenos observados na Terra. Esses elementos eram o Fogo, o Ar, a Água e a Terra. As substâncias compostas existentes na Terra (planeta), que se supunha serem constituídas por misturas variadas destes elementos, deveriam ter propriedades muito diferentes. (Veja-se a Unidade 1, capítulo 2). Nos céus, todavia, separados da Terra e residência dos deuses. só poderia existir a perfeição. Tal como os movimentos celestes deveriam ser eternos e perfeitos, da mesma maneira os corpos celestes imutáveis não poderiam ser compostos por elementos normalmente encontrados na Terra ou próximo dela. Portanto, supunha-se que eles eram compostos por um quinto elemento (*quinta-essência*) imutável — o éter.

Em latim chamava-se ao éter a «quinta essentia» (quinto elemento); daí o actual termo «quinta-essência».

O problema de Platão, posto para explicar o movimento dos planetas, foi o problema mais importante dos astrónomos teóricos durante cerca de dois mil anos. Para apreciar os esforços posteriores e as consequências das diferentes interpretações, desenvolvidas por Kepler, Galileu e Newton, examinaremos primeiro as soluções do problema de Platão, tal como foram apresentadas pelos Gregos. Teremos de confessar que, para o seu tempo, estas soluções eram úteis, engenhosas e verdadeiramente belas.

Q11 Qual foi o problema proposto por Platão em relação ao movimento planetário?

Q12 Porque não é completo o nosso conhecimento da ciência grega?

Q13 Porque pensaram os Gregos em utilizar unicamente o movimento circular uniforme para explicar os fenómenos celestes?

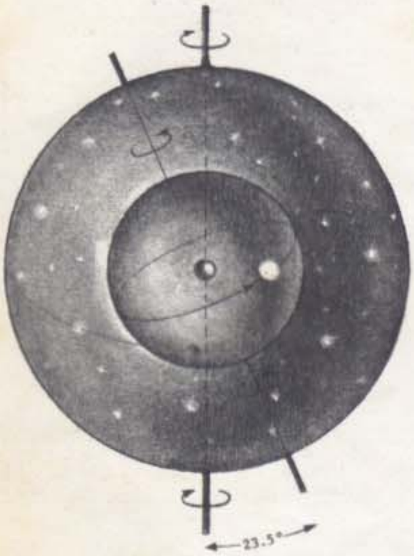
5.5 O conceito grego de "explicação"

A formulação de Platão do problema histórico do movimento planetário ilustra três contribuições dos filósofos gregos que, com certas modificações, são ainda básicas para a nossa compreensão da natureza das ciências físicas:

1. Uma teoria deve estar baseada em ideias simples. Platão foi mais além, reclamando que a ideia de que os corpos celestes se moviam uniformemente ao longo de trajectórias circulares era não só simples como também auto-evidente. Só há poucos séculos se compreendeu que tais crenças de senso comum poderiam ser enganadoras. Mais do que isso — compreendeu-se que embora se tornasse muitas vezes necessário partir de hipóteses não provadas, estas deveriam ser criticamente analisadas e nunca aceites sem reservas. Como veremos frequentemente ao longo deste curso, a identificação de hipóteses ocultas na ciência tem sido extremamente difícil. E, em muitos casos, o identificar e pôr em questão tais hipóteses foi o primeiro passo para a formulação de teorias inteiramente novas.

2. As teorias físicas devem concordar com os resultados de medições efectuadas na observação dos *fenómenos*, tal como o do movimento dos planetas. O nosso propósito, ao construir uma teoria, é o de descobrir a uniformidade de comportamento, a simplicidade subjacente às aparentes irregularidades. Para a organização das observações torna-se útil recorrer à linguagem dos números e da geometria. Esta utilização das matemáticas, largamente aceite hoje em dia, é em parte devida aos pitagóricos, um grupo de matemáticos que viveu no sul da Itália por volta de 500 A.C. e que acreditava que "todas as coisas são números". Na realidade, a utilização da matemática e da medição experimental só se tornou importante numa fase posterior do desenvolvimento da ciência. Na sua astronomia, Platão só realçou o papel fundamental dos dados numéricos, enquanto Aristóteles evitou mesmo, largamente, medições pormenorizadas. Este facto foi particularmente infeliz, já que, como se diz no Prólogo, os argumentos de Aristóteles influenciaram grandemente estudiosos posteriores. Os seus argumentos, que não incluíam a ideia da medição das variações como ferramenta de conhecimento, foram adoptados séculos depois por filósofos tão influentes como, por exemplo, Tomás Aquino.

3. "Explicar" fenómenos complexos significa desenvolver ou inventar um esquema (um modelo físico, ou matemático, ou outra construção matemática) que tenha as mesmas características que os fenómenos a explicar. Assim, por exemplo, se se construir um modelo de esferas interligadas, um ponto numa das esferas deve ter os mesmos movimentos que o planeta representado pelo ponto.



O movimento anual norte-sul do Sol (com as estações do ano) era explicado colocando-se o Sol numa esfera cujo eixo estava inclinado de 23½° em relação ao eixo da esfera eterna das estrelas.

5.6 A primeira solução com centro na Terra

Os Gregos constataram que a Terra era grande, sólida e permanente, enquanto que os céus pareciam ser povoados por pequenos e remotos objectos etéreos, continuamente em movimento. O que seria mais natural concluir senão que a nossa enorme e pesada Terra deveria ser o centro permanente e imutável do universo? Um tal ponto de vista — universo com centro na Terra — chama-se *geocêntrico*. A partir dele, o movimento diário das estrelas pode facilmente ser explicado: elas estão ligadas (ou constituem pequenos buracos) a uma camada esférica bem grande e negra que envolve a Terra, estando todas à mesma distância desta. Esta esfera celeste dá uma volta diária em torno de um eixo que atravessa a Terra. Como resultado disso, todas as estrelas nela fixas movem-se em trajectórias circulares em torno do pólo de rotação. Vemos assim que um modelo simples, à base de uma esfera celeste em rotação e de uma Terra estacionária, é capaz de explicar os movimentos diários das estrelas.

Os três movimentos observados do Sol já requerem um modelo um tanto ou quanto mais complicado. Para explicar o movimento do Sol em relação às estrelas imaginou-se uma outra camada invisível, separada, que transporta o Sol em torno da Terra. Além de estar fixa à esfera celeste e de compartilhar consequentemente do seu movimento diário, esta camada possui um movimento próprio, lento e em sentido contrário, descrevendo um ciclo completo de 360° por ano.

Para explicar o movimento solar anual do Sol, de oscilação para norte e para sul, imaginou-se que essa camada estava inclinada relativamente à esfera celeste e que, portanto, o próprio Sol estava inclinado em relação à cúpula de estrelas.

Os movimentos dos planetas visíveis — Mercúrio, Vénus, Marte, Júpiter e Saturno — eram mais difíceis de explicar. Eles compartilham o movimento diário das estrelas, mas possuem também movimentos peculiares próprios. A esfera de Saturno foi suposta ser a maior e mais próxima das estrelas, já que ele é o que se move mais lentamente (efectua uma revolução em cada 30 anos). Por dentro desta estariam as esferas que transportariam Júpiter e Marte, de movimentos mais rápidos (12 anos e 687 dias, respectivamente). Acreditava-se que estes três planetas estariam para lá da esfera correspondente ao Sol, já que qualquer deles levava mais de um ano para completar uma revolução. Vénus, Mercúrio e a Lua foram colocados entre o Sol e a Terra. Supôs-se que a Lua reflectia a luz solar e era o planeta mais próximo da Terra.

Um tal sistema imaginário de camadas ou esferas transparentes constituía uma espécie de "máquina", mais ou menos grosseira, capaz de reproduzir os movimentos gerais dos objectos celestes. Escolhendo convenientemente as dimensões das esferas e as respectivas velocidades e direcções de movimento podia-se obter um acordo aproximado entre o modelo e as observações. Novas esferas eram acrescentadas ao modelo, se observações adicionais revelavam outras variações cíclicas, de modo a efectuar os necessários ajustamentos.

Eudóxio, amigo de Platão, concluiu que um conjunto de 36 esferas era capaz de reproduzir todo o padrão geral de movimentos. Mais tarde foram acrescentadas 29 outras esferas por Aristóteles. (Dante dá uma descrição interessante deste sistema geral ou esquema cosmológico, na sua obra *Divina Comédia*, escrita por volta de 1300 D.C., pouco depois de serem conhecidos na Europa alguns dos escritos de Aristóteles). No entanto, mesmo Aristóteles sabia que o seu sistema não conseguia reproduzir as posições observadas dos corpos celestes. Ainda mais: não conseguia dar conta das variações observadas no brilho dos planetas.

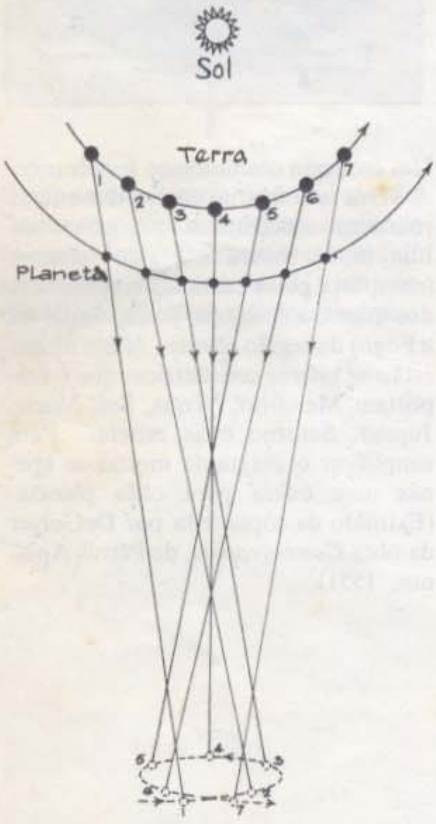
Poder-se-á ter a impressão de que a ciência grega era má, por ser diferente da actual, ou por ser menos precisa. Mas compreender-se-á,

Um esquema cosmológico geocêntrico. A Terra está fixa no centro das esferas rotativas concêntricas. A esfera da Lua (*lune*) separa a região terrestre (composta pelas camadas concêntricas dos quatro elementos, Terra, Água, Ar e Fogo) da região celeste. Nesta última estão as esferas concêntricas que transportam Mercúrio, Vénus, Sol, Marte, Júpiter, Saturno e as estrelas. Para simplificar o diagrama mostra-se apenas uma esfera para cada planeta. (Extraído da cópia feita por DeGolyer da obra *Cosmographia*, de Petrus Apianus, 1551).

do estudo deste capítulo, que tal conclusão não é correcta. Os Gregos estavam apenas a começar o desenvolvimento das teorias científicas e fizeram, inevitavelmente, hipóteses hoje consideradas erradas. A sua ciência não era "má", mas era diferente da ciência contemporânea, em muitos aspectos. Além de que não deverá esquecer-se que esta também não constitui a última palavra. Não será difícil imaginar que os esforços actuais pareçam estranhos e ineptos, aos olhos dos cientistas de daqui a 2000 anos.

Mesmo as teorias científicas mais modernas não são capazes de explicar todos os pormenores de cada situação particular. Os conceitos científicos são idealizações que tratam apenas de aspectos seleccionados das observações. Não cobrem a totalidade dos dados experimentais e da experiência que existe no universo. Além disso, cada período histórico apresenta as suas próprias limitações à capacidade de imaginação humana. Como se viu já na Unidade 1, conceitos gerais importantes, como por exemplo os de força e de aceleração, são especificamente imaginados para ajudar a organizar as observações. São invenções humanas.

Como seria de esperar, a história da ciência apresenta inúmeros exemplos de situações em que certos factores ignorados por um investigador se mostraram mais tarde muito importantes. Mas como desenvolver melhores sistemas, que forneçam melhores estimativas, sem se começar por uma primeira tentativa? As teorias são melhoradas através de verificações e revisões e, por vezes, são mesmo inteiramente substituídas por outras melhores.



À medida que a Terra ultrapassa um planeta na sua órbita em torno do Sol, o planeta parece mover-se para trás no céu. As setas mostram as direcções obtidas das sucessivas posições da Terra em direcção ao planeta. Os pequenos círculos numerados que estão representados na parte de baixo da figura indicam as posições aparentes resultantes para o planeta, projectadas no fundo das estrelas distantes.

Q14 O que é um sistema geocêntrico? Como poderá um sistema desse tipo explicar os movimentos do Sol?

Q15 Descreva a primeira solução dada ao problema de Platão.

5.7 Uma solução com centro no Sol

Durante cerca de dois mil anos após Platão e Aristóteles, o modelo geocêntrico foi geralmente aceite, se bem que certos pormenores fossem debatidos pelos estudiosos. Mas um modelo radicalmente diferente fora apresentado no séc. III A.C., baseado em hipóteses distintas. O astrónomo Aristarco (talvez influenciado pelos escritos de Heraclides, que viveu um século antes) sugeriu que uma interpretação mais simples dos movimentos celestes poderia resultar de se considerar o *Sol* no centro, com os planetas, a Terra e as estrelas movendo-se à sua volta. Um sistema destes, em que o centro é colocado no Sol, denomina-se *heliocêntrico*.

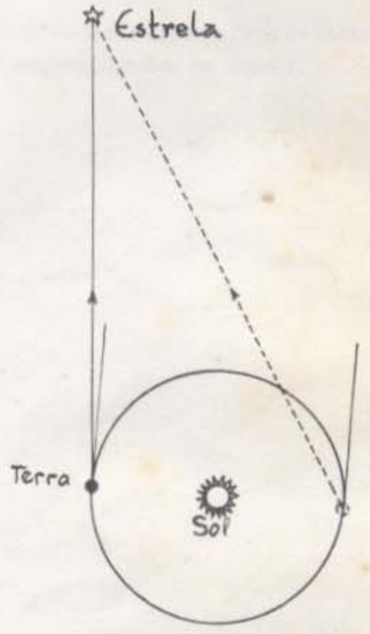
O que se sabe actualmente do trabalho de Aristarco resulta fundamentalmente de comentários feitos por outros autores, já que a maior parte dos seus escritos se perdeu. Segundo Arquimedes, Aristarco afirmaria que o Sol estaria pelo menos dezoito vezes mais distante que a Lua e que o corpo de maiores dimensões, que além disso era a fonte de luz, deveria estar no centro do universo.

Aristarco propôs-se explicar todos os movimentos observados nos céus supondo que a esfera celeste permanecia imóvel, enquanto a Terra rodava em torno do seu próprio eixo, uma vez por dia. A aparente inclinação das trajectórias do Sol, da Lua e de todos os planetas era explicada simplesmente pela inclinação do eixo terrestre. Além disto, as variações observadas anualmente nos céus, incluindo o movimento retrógrado dos planetas, poderiam ser explicadas supondo que a Terra e os cinco planetas visíveis efectuavam um movimento de revolução em torno do Sol. Neste modelo, o movimento previamente atribuído ao Sol em torno da Terra era substituído pelo da Terra em torno do Sol. Além disto, a Terra tornava-se apenas em mais um entre vários planetas.

Pode-se ver, no diagrama apresentado à margem, na página anterior, como este esquema permite explicar os movimentos retrógrados de Marte, Júpiter e Saturno; neste diagrama supõe-se que tanto a Terra como o planeta exterior se movem em órbitas circulares em torno do Sol. O planeta exterior move-se mais lentamente do que a Terra. Como consequência, quando a Terra está exactamente entre o Sol e o planeta, aquela ultrapassa este rapidamente. Relativamente à Terra, portanto, o planeta parece mover-se para trás durante algum tempo, ou seja em movimento retrógrado através do céu.

Desapareciam assim todas as esferas concêntricas interligadas. A hipótese heliocêntrica (de centro no Sol), que também usava apenas movimentos circulares uniformes, apresentava uma vantagem adicional: explicava o facto de os planetas serem mais brilhantes durante o seu movimento retrógrado, já que era precisamente nessa altura que eles estavam mais próximos da Terra. Mesmo assim, a proposta de Aristarco foi desprezada durante a antiguidade. Foi severamente criticada por três razões básicas. Uma delas era a de que uma Terra móvel era inaceitável. Contradizia as doutrinas filosóficas de que a composição da Terra era diferente da dos corpos celestes e de que o seu lugar natural, tanto física como teologicamente, era o centro do universo. De facto, os contemporâneos de Aristarco consideraram-no um ímpio, pelo simples facto de ter sugerido que a Terra se movia. Além disso, esta nova concepção do sistema solar contradizia o senso comum e as observações vulgares: era evidente que a Terra estava em repouso e não numa corrida desenfreada através do espaço.

Uma outra crítica assentava numa certa evidência experimental que parecia refutar a hipótese de Aristarco. Se a Terra se movesse numa órbita em torno do Sol, mover-se-ia também para trás e para diante, em relação às estrelas fixas. Como se mostra no esboço desenhado à margem, o ângulo de observação de qualquer estrela seria então diferente, de um ponto para outro da trajectória anual da Terra. Este desvio anual das estrelas fixas deveria ocorrer se a Terra se movesse em torno do Sol. Mas tal não tinha sido observado pelos astrónomos gregos. Este facto poderia ser explicado de duas maneiras: ou (1) a Terra *não* se movia em torno do Sol, não existindo por isso qualquer desvio, ou (2) a Terra movia-se em torno do Sol mas as estrelas estavam tão afastadas que o desvio era *demasiado pequeno para ser observado*. Mas para que fosse esta segunda hipótese a verdadeira, isto é, para que o desvio fosse tão pequeno que não pudesse



Se a Terra se move em torno do Sol, então a direcção segundo a qual se observa uma dada estrela deverá variar ao longo do ano. Chama-se *paralaxe* a um tal desvio nas posições relativas observadas para os objectos, provocado por um deslocamento do observador. A maior paralaxe estelar observada, devido ao movimento anual da Terra em torno do Sol, é de cerca de 1/2500°. Isto é devido ao facto de que a distância à estrela mais próxima não é apenas de centenas de milhões de quilómetros, mas de 40 *milhões* de milhões de quilómetros.

ser observado, as estrelas deveriam estar a distâncias enormes — talvez a centenas de milhões de quilómetros.

Usando telescópios, podemos hoje observar o desvio anual das estrelas e assim saber que o modelo de Aristarco é de facto útil. O desvio é tão pequeno que, mesmo com a ajuda de telescópios, só foi medido em 1838. O maior desvio anual é cerca de 100 vezes mais pequeno que o mínimo eventualmente observável à vista desarmada. O desvio existe na realidade, mas torna-se compreensível a atitude dos Gregos, que recusaram a teoria heliocêntrica em parte por não terem conseguido observar o desvio exigido por ela. Só Aristarco imaginou que as estrelas pudessem estar tão tremendamente distantes quanto hoje sabemos que estão.

Finalmente, Aristarco foi criticado por não ter desenvolvido pormenorizadamente o seu sistema e por não o ter utilizado para a previsão de posições planetárias. O seu trabalho parece ter sido essencialmente de natureza qualitativa, isto é, um esquema geral de como as coisas poderiam ser.

Os sistemas geocêntrico e heliocêntrico constituíram duas maneiras diferentes de tentar explicar as mesmas observações. Mas este último exigia uma tão drástica alteração da imagem do homem no universo que acabou por ter uma reduzida influência no pensamento grego. Felizmente, os seus argumentos foram registados e transmitidos. Dezoito séculos mais tarde, tomaram nova vida nas reflexões de Copérnico. As ideias não são limitadas pelo espaço ou pelo tempo.

Q16 Quais as duas hipóteses radicalmente novas feitas por Aristarco? Qual a simplificação resultante?

Q17 Como pode o movimento retrógrado ser explicado pelo modelo heliocêntrico proposto por Aristarco?

Q18 Qual a variação prevista pela teoria de Aristarco que não pôde ser observada pelos Gregos?

Q19 Por que é que Aristarco foi considerado ímpio? Porque foi desprezado o seu sistema?

5.8 O sistema geocêntrico de Ptolomeu

Desprezando o modelo heliocêntrico sugerido por Aristarco, os Gregos continuaram a desenvolver a sua teoria planetária na base do sistema geocêntrico. Como vimos, faltava rigor à primeira das soluções encontradas, aquela que assentava nas esferas concêntricas. Durante os 500 anos a seguir a Platão e Aristóteles, os astrónomos começaram a sentir a necessidade de uma teoria mais precisa que desse conta dos horários celestes. Tornava-se necessária uma complexa teoria matemática relativamente a cada planeta, para explicar as observações efectuadas.

Vários astrónomos gregos fizeram importantes contribuições, que culminaram na teoria geocêntrica de Cláudio Ptolomeu de Alexandria, por volta de 150 D.C. O livro de Ptolomeu acerca dos movimentos celestes constitui uma verdadeira obra-prima de análise.

Ptolomeu pretendia um sistema que previsse de uma maneira precisa as posições de cada um dos planetas. O tipo de sistema e os movimentos que ele aceitou baseavam-se nas hipóteses de Aristóteles. A definição do problema e a apresentação das hipóteses são feitas por Ptolomeu no prefácio do seu livro *Almagest:*

O título árabe dado ao livro de Ptolomeu, *Almagest*, significa «o maior».

> ...a partir das observações feitas pelos antigos e por nós próprios pretendemos descobrir aquilo que é evidente e aquilo que é aparente, e aplicar as consequências destes conceitos por meio de demonstrações geométricas.
>
> E assim, de uma maneira geral, temos de reconhecer que o céu é esférico e se move esfericamente; que o aspecto da Terra é sensivelmente esférico...; que a sua posição é exactamente no meio do universo, tal como um centro geométrico; que, no que diz respeito às dimensões e distâncias, [a Terra] se comporta como um ponto em relação à esfera das estrelas fixas, não tendo ela qualquer movimento local.

Ptolomeu argumenta a seguir acerca da necessidade destas hipóteses e da maneira como elas concordam com todas as observações. A força do seu convencimento está bem ilustrada na afirmação "...é evidente de todas as aparências, de uma vez por todas, que a Terra está no meio do universo e que todos os corpos pesados se movem em direcção a ela". Note-se que ele apoia a sua interpretação das observações astronómicas na física dos corpos em queda. Esta mistura de astronomia e de física, quando aplicada à Terra e ao seu lugar no sistema, torna-se altamente importante ao referir-se à proposta de Aristarco, de que a Terra poderia ter movimentos de rotação e de revolução:

> Ora certas pessoas, embora nada tendo a opor a estes argumentos, concordam com algo, na sua opinião, mais plausível. Parece-lhes a elas que não há nada que se oponha a que, por exemplo, os céus permaneçam imóveis e a Terra rode em torno do mesmo eixo [que as estrelas] de oeste para leste, muito aproximadamente ao ritmo de uma volta por dia...
>
> Mas escapou-lhes o facto de que, na verdade — embora talvez nada se oponha a que as coisas estejam de acordo com esta hipótese mais simples, no que diz respeito à aparência das estrelas — uma tal noção seria toda ela um absurdo relativamente ao que se passa no ar, à nossa volta.

Ptolomeu acreditava que, se a Terra rodasse, não arrastaria consigo a camada de ar à sua volta. Consequentemente, todas as nuvens, todas as aves e todos os objectos no ar voariam para oeste. Mesmo que a camada de ar fosse transportada pela Terra, isso continuaria a não impedir que os objectos que estivessem no ar tivessem tendência a ser deixados para trás, em direcção a oeste, no movimento constante do ar e da Terra.

Os parágrafos transcritos acima contêm um dos temas fundamentais desta Unidade 2. Ptolomeu reconheceu que os dois sistemas eram igualmente bem sucedidos na *descrição* do movimento — na cinemática;

mas um deles era preferível ao outro, porque se ajustava melhor às *causas* do movimento — a dinâmica — tal como elas eram conhecidas na altura. Muito mais tarde, ao ser desenvolvida por Newton uma dinâmica completamente diferente, a escolha recairia na outra hipótese.

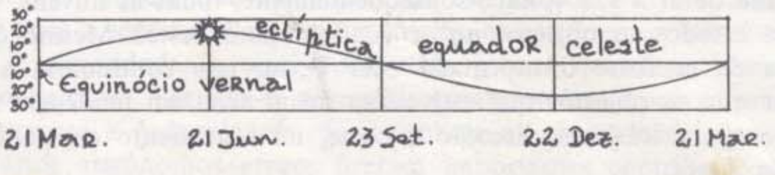
GE 5.8.

Ptolomeu desenvolveu processos engenhosos e bastante precisos pelos quais podiam ser obtidas as posições de cada um dos planetas, a partir de um modelo geocêntrico. Nas suas soluções, ele ultrapassou largamente o esquema de esferas concêntricas dos primeiros Gregos, construindo um modelo a partir de círculos e de três outros artifícios geométricos. Cada um destes artifícios reproduzia um determinado tipo de variações na taxa de movimento angular, tal como era vista da Terra. Para apreciar a solução de Ptolomeu vamos examinar uma das muitas pequenas variações que ele tentou explicar.

Podemos dividir os 360º da trajectória solar anual de encontro ao fundo de estrelas em quatro partes de 90º cada. Se o Sol estiver no ponto a 0º a 21 de Março, estará 90º mais para leste a 21 de Junho, outros 90º mais a 23 de Setembro, ainda outros 90º mais a 22 de Dezembro, e regressará ao ponto de partida a 21 de Março do ano seguinte. Se o Sol se mover uniformemente ao longo de uma circunferência em torno da Terra, os intervalos entre cada duas destas datas deverão ser iguais. Mas, como se poderá ver, consultando um calendário, assim não acontece. O Sol leva mais tempo para percorrer os 90º correspondentes à Primavera e ao Verão do que os correspondentes ao Outono e ao Inverno. Portanto, nenhum sistema circular simples, baseado em movimento a velocidade constante, explicará o comportamento do Sol.

Os três artifícios usados por Ptolomeu ao propor uma teoria geocêntrica melhorada foram o *excêntrico*, o *epiciclo* e o *equanto*.

De acordo com Platão, os astrónomos tinham até aí sustentado que o movimento de um objecto celeste deveria ser angularmente uniforme e a uma distância constante do centro da Terra. Embora Ptolomeu acreditasse que a Terra estivesse no centro do universo, não continuou a insistir em que ela fosse o centro geométrico de todos os círculos perfeitos. Propôs, pelo contrário, que o centro, C, estivesse afastado da Terra, numa posição *excêntrica*. Assim, o movimento — que seria realmente uniforme em torno do centro C — não parecia uniforme quando observado da Terra. Uma órbita deste tipo para o Sol, excêntrica, seria então capaz de explicar a irregularidade observada na taxa de movimento do Sol ao longo do ano.

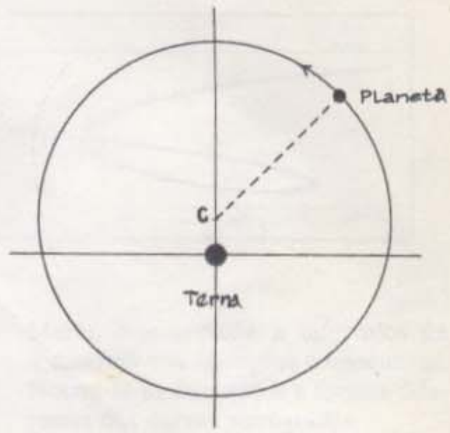


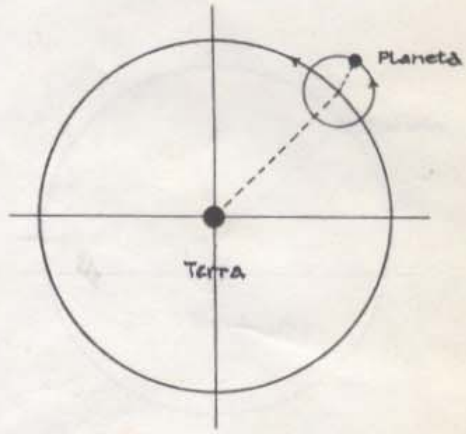
A trajectória anual do Sol projectada na esfera celeste.

Embora o excêntrico possa também ter em conta pequenas variações na taxa de movimento dos planetas, é, no entanto, impossível explicar à sua custa algo de tão radical como o movimento retrógrado. Para isso, Ptolomeu concebeu um outro artifício, o *epiciclo* (figura à direita). O planeta é suposto mover-se a velocidade uniforme sobre uma circunferência de pequeno raio, denominada epiciclo. O centro do epiciclo, por sua vez, é suposto mover-se sobre uma circunferência de maior raio — o *deferente* — em torno da Terra.

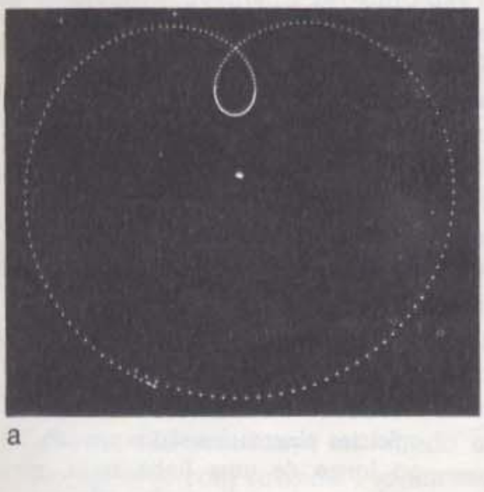
Se a velocidade do planeta no epiciclo for maior do que a velocidade no círculo grande, o planeta — observado de um ponto *acima* do sistema planetário — parecerá descrever caracóis ao longo da sua trajectória. Se o ponto de observação estiver na proximidade do centro, estes caracóis exibirão exactamente o aspecto do movimento retrógrado efectivamente observado para os planetas. As fotografias que se apresentam abaixo mostram dois aspectos dos movimentos produzidos por um modelo mecânico simples, a "máquina de epiciclo", na qual foi colocada uma lâmpada no lugar do planeta. A fotografia à esquerda foi tirada "de cima", isto é, corresponde ao diagrama desenhado à margem; a fotografia da direita foi tirada "de viés" quase tangencialmente ao plano da trajectória; nesta, portanto, o aspecto do movimento é semelhante ao que se poderia observar a partir do centro.

Os epiciclos podem ser usados para descrever muitos tipos de movimentos. Não seria difícil reproduzir um sistema que tivesse todos os aspectos principais do movimento planetário observado. Um ponto particularmente interessante do sistema de Ptolomeu reside no facto de os epiciclos para os planetas exteriores terem todos o mesmo período: exactamente um ano! Mais, como se indica nos esboços desenhados na página ao lado, as posições dos planetas exteriores, nos respectivos epiciclos, correspondem sempre exactamente à posição do Sol relativamente à Terra. Esta correspondência dos epiciclos em relação ao movimento do Sol em torno da Terra seria, catorze séculos mais tarde, um ponto de preocupação básica para Copérnico.

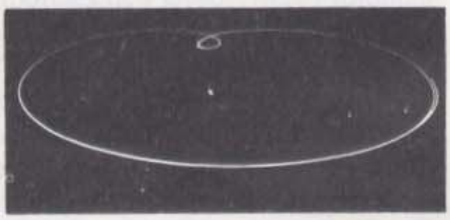




GE 5.9.



a

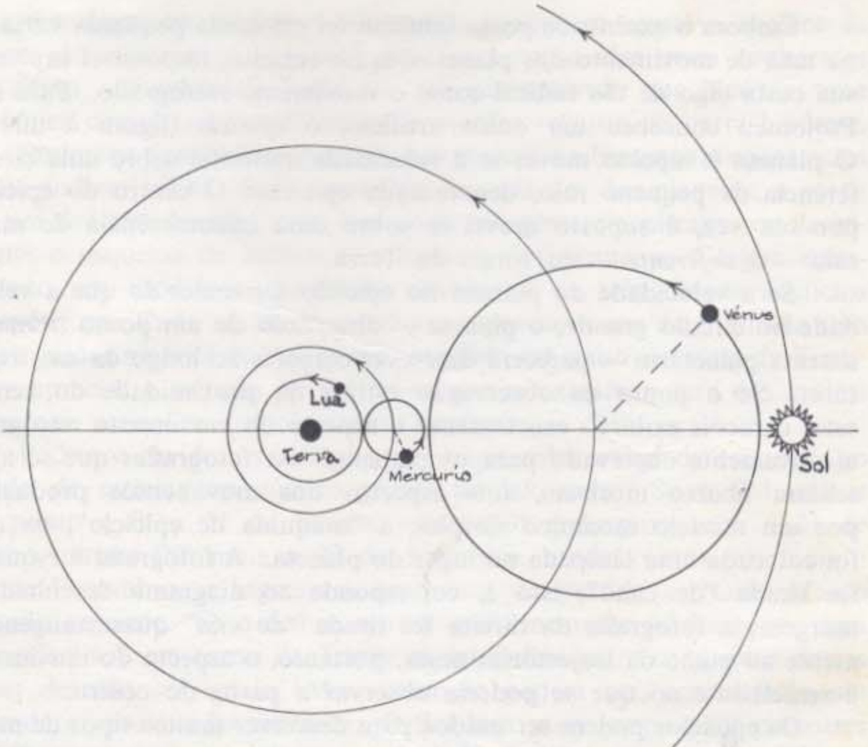


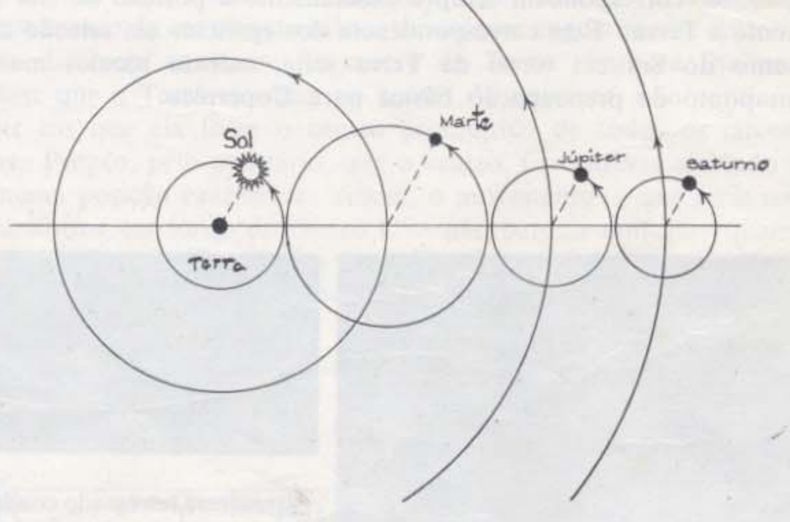
b

Movimento retrógrado criado por uma simples máquina de epiciclo.

(a) Fotografia estroboscópica do movimento epicíclico. Os disparos foram feitos a iguais intervalos de tempo. Note-se que o movimento é mais lento na pequena argola da trajectória.

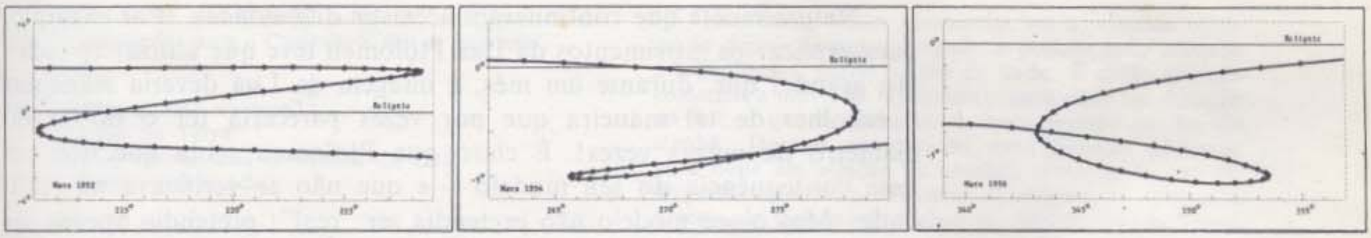
(b) O movimento visto segundo uma direcção quase tangente ao seu plano.





Ptolomeu não representou os movimentos planetários como os de uma máquina de interligação, em que cada planeta determina o movimento do seguinte. Por não possuir informação acerca dos afastamentos dos planetas, Ptolomeu colocou-os segundo a velha ordem de distâncias em relação à Terra: as estrelas como sendo os objectos mais distantes, depois Saturno, Júpiter, Marte, o Sol, Vénus, Mercúrio e a Lua. As órbitas foram normalmente apresentadas entrelaçadas umas nas outras de modo a não haver sobreposições dos epiciclos.

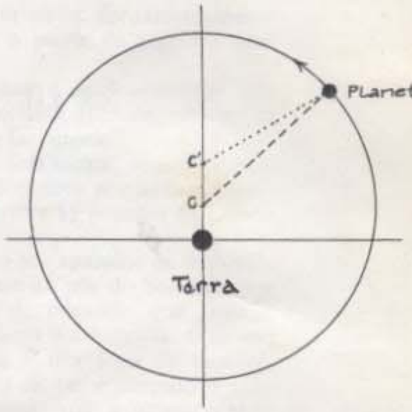
Representação simplificada do sistema ptolomaico. A escala do desenho de cima, que mostra os planetas que estão entre a Terra e o Sol, é oito vezes a do desenho de baixo, que mostra os planetas mais afastados do Sol. Os epiciclos planetários são representados ao longo de uma linha recta, para realçar as suas dimensões relativas.



Marte, representado a intervalos de 4 dias, em três oposições consecutivas. Notem-se as dimensões e formas diferentes das curvas retrógradas.

Até agora, o sistema de epiciclos e deferentes tem "funcionado" suficientemente bem. Explica não só o movimento retrógrado como também o maior brilho dos planetas durante esse movimento. Uma vez que o planeta está do lado de dentro do epiciclo durante o seu movimento retrógrado, ocupa uma posição mais próxima da Terra, parecendo consequentemente mais brilhante. Este facto constitui um bónus inesperado, já que o modelo não tinha sido concebido para explicar o fenómeno.

Mas Ptolomeu não foi capaz de reproduzir de uma maneira precisa os movimentos dos cinco planetas, mesmo à custa de combinações de excêntricos e epiciclos. Por exemplo, como se pode ver nas três figuras apresentadas acima, o movimento retrógrado de Marte não tem sempre a mesma dimensão angular, nem a mesma duração. Para ter em conta estas variações, Ptolomeu usou um terceiro artifício geométrico, a que chamou o *equanto*, resultante de uma modificação do excêntrico. Como se mostra ao lado, a Terra é mais uma vez deslocada do centro geométrico, C, do círculo, mas agora o movimento ao longo do perímetro desde já não é uniforme em torno de C; em vez disso, supõe-se que o movimento angular é uniforme relativamente a um outro ponto, C′, tão descentrado como a Terra, mas do lado oposto de C.



Um equanto. C é o centro do círculo. O planeta P move-se a uma taxa uniforme em torno do ponto descentrado C′.

5.9 Sucessos e limitações do modelo de Ptolomeu

O modelo de Ptolomeu recorreu sempre a taxas uniformes de movimento angular em torno de algum ponto, mantendo-se, desse ponto de vista, constantemente próximo das hipóteses de Platão. Mas Ptolomeu mostrou-se disposto a deslocar os centros do movimento do centro da Terra, tanto quanto fosse necessário para reproduzir as observações. Descreveu as posições de cada um dos planetas, separadamente, à custa de combinações de excêntricos, epiciclos e equantos. Para cada um deles Ptolomeu descobriu uma combinação de movimento capaz de prever as posições observadas durante largos períodos de tempo, com um erro inferior a cerca de dois graus (aproximadamente quatro diâmetros da Lua) — melhoria considerável em relação a sistemas anteriores.

O sucesso do modelo ptolomaico, em particular a inesperada explicação da variação de brilho, poderia ser tomada como prova de que os objectos celestes se movem realmente em epiciclos e deferentes, em torno de pontos descentrados. Parece, no entanto, que o próprio Ptolomeu não acreditava ter obtido um modelo físico real do universo. Contentava-se com considerá-lo um modelo matemático capaz de efectuar o cálculo das posições dos objectos celestes.

GE 5.10.

As observações astronómicas consistiam todas elas de medições de *ângulos* — um pequeno arco no céu poderia ser um pequeno arco relativamente próximo, ou um grande arco muito mais distante.

Naturalmente que continuaram a existir dificuldades. Por exemplo, para explicar os movimentos da Lua, Ptolomeu teve que utilizar epiciclos tão grandes que, durante um mês, a imagem da Lua deveria aumentar e encolher de tal maneira que por vezes pareceria ter o dobro do diâmetro de outras vezes! É claro que Ptolomeu sabia que isto era uma consequência do seu modelo — e que não se verificava na realidade. Mas o seu modelo não pretendia ser "real"; pretendia apenas ser uma base para o cálculo de posições dos corpos celestes.

A descrição ptolomaica constituía numa série de artifícios matemáticos, concebidos para reproduzir e prever o movimento de cada planeta, separadamente. A sua análise geométrica era equivalente ao processo de descoberta de uma complicada equação de movimento para cada planeta individual. Apesar disso e durante os séculos seguintes, muitos homens eruditos, incluindo o poeta Dante, acreditaram realmente que os planetas eram transportados por alguma espécie de esferas cristalinas, como foi sugerido por Eudóxio. Além disso, eles sentiram que os movimentos de todas estas esferas separadas deveriam estar relacionadas de alguma maneira. Mas no trabalho original de Ptolomeu

GE 5.11. não existia necessariamente uma ligação entre cada planeta e todos os restantes.

Embora desacreditada hoje em dia, a forma ptolomaica do modelo geométrico do sistema planetário, proposta em 150 D.C., foi utilizada durante cerca de 1500 anos. Havia boas razões para uma tão longa aceitação.

Previa, de uma maneira razoavelmente precisa, as posições do Sol, da Lua e dos planetas.

Explicava por que é que as estrelas fixas não mostram um desvio anual quando observadas a olho nu.

Concordava em muitos pormenores com as doutrinas filosóficas desenvolvidas pelos antigos Gregos, em particular com as ideias de "movimento natural" e de "lugar comum".

Continha uma boa dose de senso comum, atractiva para todos os que vissem o Sol, a Lua, os planetas e as estrelas em movimento à sua volta.

Concordava com a hipótese confortante de que a Terra era imóvel e estava no centro do universo.

E estava de acordo, mais tarde, com a síntese da fé cristã e da física aristotélica, efectuada por Tomás de Aquino e largamente aceite.

No entanto, o sistema de Ptolomeu acabou por ser substituído por

GE 5.12. uma teoria heliocêntrica. Porquê? Quais as vantagens desta nova teoria, em relação à antiga? Que podemos aprender hoje, a partir da discussão épica entre duas teorias em oposição, acerca do valor relativo de teorias rivais na ciência? Eis algumas das questões a considerar no

GE 5.13. capítulo seguinte.

5.1 Os materiais de estudo deste curso de física, particularmente adequados para o Capítulo 5, são os seguintes:

Experiências
Astronomia a olho nu (cont.)
A dimensão da Terra
A altura de Píton, uma montanha da Lua
O movimento retrógrado

Actividades
Medidas angulares
Epiciclos e movimento retrógrado
Modelos da esfera celeste
Quanto dura um dia sideral?
Modelo, à escala, do sistema solar
Construção de um relógio de Sol
Desenhe um analema
Stonehenge
Nomes das crateras lunares
Literatura

Textos da Colectânea
"The boy who redeemed his father's name"
"Four poetic fragments about astronomy"

Filme
O movimento retrógrado de Marte

Filmes sem-fim
O movimento retrógrado de Marte e de Mercúrio
Movimento retrógrado — modelo geocêntrico

Acetatos
O movimento estelar
A esfera celeste
O movimento retrógrado
Excêntricos e equantos

Além destes pontos, têm ainda um interesse geral para toda esta Unidade 2 os seguintes textos da Colectânea:

"The black cloud"
"Roll call"
"A night at the observatory"
"The garden of Epicurus"
"The stars within 22 light-years that could have habitable planets"
"Scientific study of UFO's"

5.2 Como se poderia usar a sombra projectada no solo horizontal por um pau colocado na posição vertical para determinar:
(a) o meio-dia local?
(b) quando ocorria o dia 21 de Junho?
(c) a duração de um ano solar?

5.3 Qual é a diferença entre 365,24220 dias e $365\frac{1}{4}$ dias: (a) em segundos? (b) em percentagem?

5.4 (a) Faça uma lista das observações de movimentos de corpos celestes que possa efectuar e que também possam ter sido feitas no tempo da Grécia antiga.
(b) Para cada uma das observações indique algumas razões que possam ter levado os Gregos a concluir da importância desses movimentos.

5.5 Quais os movimentos estelares aparentes que podem ser explicados à custa de uma Terra plana e de estrelas fixas a uma cúpula rodando à sua volta?

5.6 Descreva os movimentos da Lua durante um mês. (Use as suas próprias observações, se possível).

5.7 Mercúrio e Vénus apresentam um movimento retrógrado depois de terem ocupado a posição mais afastada a leste do Sol, visível no céu da tarde. É então que eles começam a mover-se rapidamente para oeste em direcção ao Sol, e que o ultrapassam, reaparecendo no céu da manhã. Durante este período, estes planetas movem-se para oeste em relação às estrelas, como se mostra no diagrama relativo a Mercúrio da página 16. Descreva o resto do movimento cíclico de Mercúrio e de Vénus.

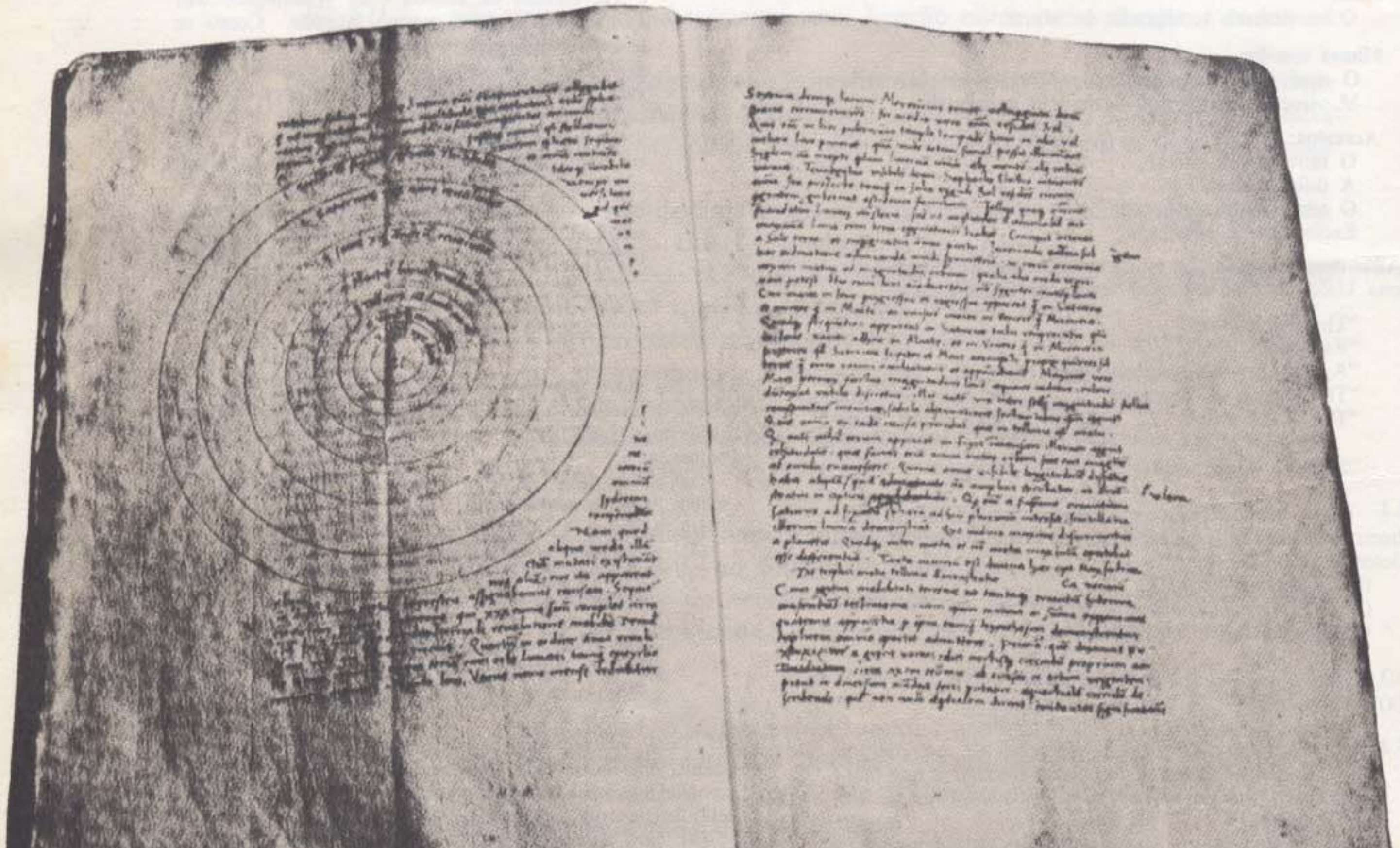
5.8 Coloque um transferidor centrado no ponto *C* do diagrama apresentado no topo da página 27 e meça o número de graus de cada um dos quatro quadrantes. Considere cada grau em torno de *C* como um dia. Construa uma tabela que registe o número de dias que o planeta leva a percorrer cada um dos quadrantes, tal como é visto da Terra.

5.9 (a) Quantos graus de longitude percorre o Sol numa hora?
(b) Diga como se poderia obter aproximadamente o diâmetro da Terra a partir do seguinte conjunto de dados:
i. As cidades de Lisboa e de Washington têm aproximadamente a mesma latitude. Como se poderia verificar isto facilmente?
ii. Um avião a jacto, sem escala, voando a uma velocidade de 800 quilómetros por hora em relação ao solo, leva 7 horas e 15 minutos de Lisboa a Washington.
iii. Um homem liga o seu aparelho de televisão, em Lisboa, exactamente ao pôr do Sol, para ver um longo programa de televisão que começa nesse preciso momento em Washington. O último número do programa é um jogo de basebol. 4 horas e meia depois de ter começado o programa, o locutor comenta que a última jogada se desenrolou exactamente ao pôr do Sol.

5.10 Na teoria dos movimentos planetários de Ptolomeu existia, como em todas as teorias, um certo número de hipóteses. Quais das seguintes foram consideradas por Ptolomeu?
(a) a cúpula de estrelas tem forma esférica;
(b) a Terra está imóvel;
(c) a Terra é esférica;
(d) a Terra está no centro da esfera estelar;
(e) a dimensão da Terra é extremamente pequena, comparada com a distância às estrelas;
(f) o movimento angular uniforme ao longo de círculos (mesmo quando medido a partir de um ponto descentrado) é o único comportamento adequado para os objectos celestes.

5.11 Tanto quanto tocava os Gregos e, na verdade, tanto quanto nos toca a nós, pode ser apresentada uma defesa razoável quer para a teoria geocêntrica quer para a teoria heliocêntrica do universo.
(a) Sob que pontos de vista foram bem sucedidas ambas as ideias?
(b) Indique algumas vantagens e algumas desvantagens de cada um dos sistemas, em termos da ciência grega.
(c) Quais as contribuições principais de Ptolomeu?

5.12 Por que foi a astronomia a primeira ciência a ter sucesso, em vez de, por exemplo, a meteorologia ou a zoologia?



O diagrama do sistema heliocêntrico de Copérnico (do seu manuscrito de *De Revolutionibus*, 1543). Esta representação simplificada omite os vários pequenos epiciclos realmente usados no sistema.

CAPÍTULO 6

Mover-se-á a Terra? — A Obra de Copérnico e de Tycho

6.1 O sistema de Copérnico

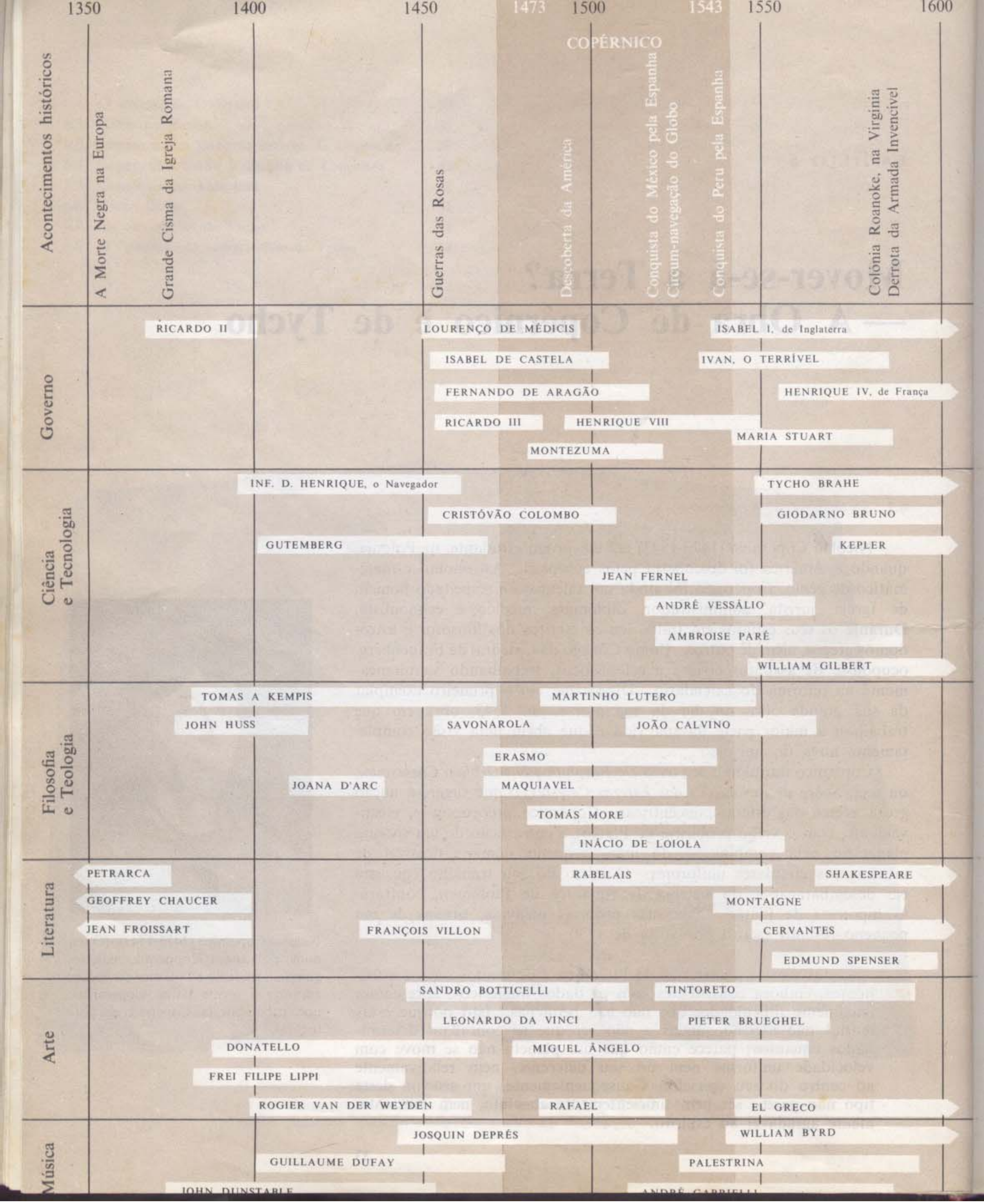
GE 6.1.

Nicolau Copérnico (1473-1543) era um jovem estudante, na Polónia, quando a América foi descoberta pelos europeus. Astrónomo e matemático de génio, Copérnico foi ainda um talentoso e respeitado homem de Igreja, jurista, administrador, diplomata, médico e economista. Durante os seus estudos em Itália, leu os escritos dos filósofos e astrónomos gregos, além de outros. Como Cónego da Catedral de Frauenberg, ocupou-se de assuntos cívicos e eclesiásticos, trabalhando simultaneamente na reforma do calendário. Diz-se que viu o primeiro exemplar da sua grande obra no dia da sua morte, em 1543, obra em que trabalhou a maior parte da sua vida e que abriu uma visão completamente nova do universo.

Nicolau Copérnico (1473-1543). (O seu nome polaco era Koppernik, mas, seguindo a tradição escolástica da época, adoptou a forma latina Copernicus, que acabou por dar Copérnico em português).

Copérnico intitulou o seu livro *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, ou seja, *Sobre as Revoluções das Esferas Celestes*, o que sugere a noção grega acerca das esferas concêntricas. Copérnico preocupou-se, efectivamente, com o velho problema de Platão: a construção de um sistema planetário pela combinação do mais pequeno número possível de movimentos circulares uniformes. O início do seu trabalho consistiu em desembaraçar-se do sistema de equantos de Ptolomeu, contrário às hipóteses de Platão. Nas suas próprias palavras, tiradas de um pequeno resumo escrito por volta de 1530:

> ...as teorias planetárias de Ptolomeu e de muitos outros astrónomos, embora consistentes com os dados numéricos, apresentam igualmente dificuldades que não são pequenas. Isto porque estas teorias não são adequadas a não ser que se concebam determinados equantos; parece então que um planeta não se move com velocidade uniforme nem no seu deferente, nem relativamente ao centro do seu epiciclo. Consequentemente, um sistema deste tipo não parece ser nem suficientemente absoluto, nem suficientemente agradável ao espírito.



1350
1400
1450
1473
1500
1543
1550
1600
COPÉRNICO
Acontecimentos históricos
A Morte Negra na Europa
Grande Cisma da Igreja Romana
Guerras das Rosas
Descoberta da América
Conquista do México pela Espanha
Circum-navegação do Globo
Conquista do Peru pela Espanha
Colônia Roanoke, na Virginia
Derrota da Armada Invencível
Governo
RICARDO II
LOURENÇO DE MÉDICIS
ISABEL I, de Inglaterra
ISABEL DE CASTELA
IVAN, O TERRÍVEL
FERNANDO DE ARAGÃO
HENRIQUE IV, de França
RICARDO III
HENRIQUE VIII
MARIA STUART
MONTEZUMA
Ciência e Tecnologia
INF. D. HENRIQUE, o Navegador
TYCHO BRAHE
CRISTÓVÃO COLOMBO
GIODARNO BRUNO
GUTEMBERG
KEPLER
JEAN FERNEL
ANDRÉ VESSÁLIO
AMBROISE PARÉ
WILLIAM GILBERT
Filosofia e Teologia
TOMAS A KEMPIS
MARTINHO LUTERO
JOHN HUSS
SAVONAROLA
JOÃO CALVINO
ERASMO
JOANA D'ARC
MAQUIAVEL
TOMÁS MORE
INÁCIO DE LOIOLA
Literatura
PETRARCA
RABELAIS
SHAKESPEARE
GEOFFREY CHAUCER
MONTAIGNE
JEAN FROISSART
FRANÇOIS VILLON
CERVANTES
EDMUND SPENSER
Arte
SANDRO BOTTICELLI
TINTORETO
LEONARDO DA VINCI
PIETER BRUEGHEL
DONATELLO
MIGUEL ÂNGELO
FREI FILIPE LIPPI
ROGIER VAN DER WEYDEN
RAFAEL
EL GRECO
Música
JOSQUIN DEPRÉS
WILLIAM BYRD
GUILLAUME DUFAY
PALESTRINA

> Consciente destes males, pensei muitas vezes se não seria talvez possível encontrar um arranjo mais razoável de círculos, a partir do qual pudessem ser obtidas todas as aparentes desigualdades e no qual tudo se movesse uniformemente em torno do centro adequado.

Em *De Revolutionibus* escreveu ainda:

> Devemos todavia confessar que estes movimentos [do Sol, da Lua e dos planetas] são circulares ou compostos de muitos movimentos circulares, de tal maneira que mantêm essas irregularidades de acordo com uma lei constante e com ciclos periódicos fixos, e que não poderiam ocorrer se não fossem circulares. Porque apenas o círculo pode trazer de volta o que já passou...
>
> Foi em Cícero que descobri primeiro que Nicetas pensava que a Terra se movia. E descobri mais tarde em Plutarco que havia outros da mesma opinião... Portanto eu próprio... comecei também a pensar acerca da mobilidade da Terra. E embora a ideia parecesse absurda, porque sabia que outros antes de mim tinham tido já a liberdade de imaginar quantos círculos quiseram, de maneira a demonstrar os fenómenos astrais, pensei que também poderia tentar encontrar demonstrações mais convincentes que as dos meus predecessores para as revoluções das esferas celestes, admitindo que a Terra tinha alguma forma de movimento... Descobri finalmente, com a ajuda de longas e numerosas observações, que, se os movimentos das outras estrelas vagabundas forem correlacionados com o movimento circular da Terra, e se os movimentos forem calculados de acordo com a revolução de cada planeta, não só todos os seus fenómenos se tornam consequência daquele, mas também essa correlação liga tão estreitamente a ordem e as dimensões de todos os planetas e das suas esferas ou círculos orbitais e dos próprios céus, que nada pode ser alterado seja em que parte for sem fazer desmoronar as partes restantes e o universo como um todo.

Ao fim de cerca de quarenta anos de estudo, Copérnico propôs um sistema de mais de trinta excêntricos e epiciclos que seriam no seu dizer "suficientes para explicar toda a estrutura do universo e o bailado dos planetas". Tal como o *Almagest* de Ptolomeu, *De Revolutionibus* recorre a extensas análises geométricas e é uma obra difícil de ler. Uma comparação entre os dois livros sugere fortemente que Copérnico pensava estar a produzir uma versão melhorada do *Almagest*. Utilizou muitas das observações de Ptolomeu, bem como algumas outras mais recentes. Contudo, o seu sistema diferia do de Ptolomeu em vários aspectos fundamentais. Acima de tudo, ele adoptou uma solução de centro no Sol, de uma maneira geral idêntica à de Aristarco.

Leia-se na *Colectânea de Textos* o prefácio ao *De Revolutionibus* de Copérnico.

Como todos os cientistas, Copérnico admitiu um certo número de hipóteses no seu sistema. Eis a lista das hipóteses por ele assumidas, nas suas próprias palavras (por vezes "traduzidas" em linguagem moderna):

1. Não existe um centro geométrico preciso de todas as esferas ou círculos celestes.
2. O centro da Terra não é o centro do universo, mas apenas o da gravitação e da esfera lunar.

3. Todas as esferas se movem em torno do Sol... pelo que o Sol tem uma posição central no universo.

4. A distância da Terra ao Sol é extremamente pequena, comparada com a distância às estrelas.

5. Qualquer movimento aparente nos céus não tem a sua origem no movimento do firmamento, mas no da Terra. A Terra, juntamente com a água e o ar que existem nela, realiza uma rotação completa em torno dos seus pólos fixos em cada dia, enquanto o céu permanece inalterável.

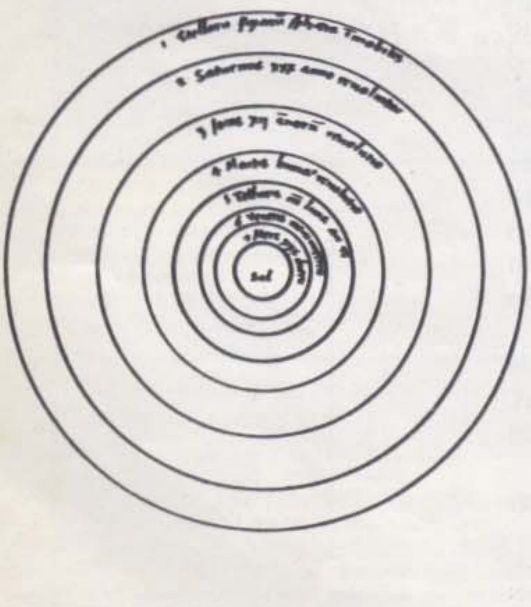
6. Aquilo que nos aparece como movimentos do Sol não nasce do seu movimento, mas do da Terra e... esta move-se em torno do Sol como qualquer outro planeta. A Terra tem, portanto, mais do que um movimento.

7. O movimento retrógrado aparente dos planetas não nasce dos seus movimentos, mas do da Terra. Os movimentos da Terra, por si sós, são, portanto, suficientes para explicar imensos movimentos aparentes observados nos céus.

Uma comparação desta lista com a das hipóteses de Ptolomeu, estudada no Capítulo 5, mostra claramente algumas semelhanças muito estreitas e diferenças importantes.

Note-se que Copérnico propôs que a Terra rodasse diariamente. Como já tinha sido imaginado por Aristarco e por outros, este movimento de rotação poderia explicar a sucessão diária dos nascer e pôr do Sol, bem como todos os outros fenómenos de nascer e pôr observados no céu. Copérnico propôs também, como tinha sido feito por Aristarco, que o Sol estivesse estacionário e ocupasse uma posição central no universo. A Terra e cada um dos outros planetas mover-se-iam em torno de pontos centrais distintos, próximos do Sol.

A figura à esquerda mostra as principais esferas concêntricas que transportariam os planetas em torno do Sol. O texto de Copérnico explica os aspectos fundamentais do seu sistema:



> As ideias aqui apresentadas são difíceis, se não quase impossíveis, de aceitar; são diametralmente opostas às noções populares. Todavia, e com a ajuda de Deus, faremos com que tudo o que é exposto a seguir se torne tão claro como o dia, pelo menos para aqueles que não sejam ignorantes da matemática...
>
> A primeira e a mais alta das esferas é a das estrelas fixas. Esta contém todas as outras esferas, além de se conter a si própria; está imóvel; é certamente a parte do universo em relação à qual devem ser considerados o movimento e as posições de todos os outros corpos celestes. Mesmo que alguém esteja ainda convencido de que esta esfera se move, nós temos uma opinião contrária; e mostraremos porquê, depois de deduzirmos o movimento da Terra. Saturno, o primeiro dos planetas, que efectua a sua revolução em trinta anos, é o que está mais próximo da primeira esfera. Júpiter, que efectua a sua revolução em doze anos, é o seguinte. Vem depois Marte, que faz a sua revolução em cada dois anos. O quarto lugar na série é ocupado pela esfera que contém a Terra e a esfera da Lua, que realiza uma revolução anual. O quinto lugar é o de Vénus, que faz uma revolução em nove meses. Finalmente, o sexto lugar é ocupado por Mercúrio, fazendo uma revolução em cada oitenta dias... No meio de tudo repousa o Sol, imóvel.

Reconhece-se imediatamente uma vantagem no sistema de Copérnico, que o torna "agradável ao espírito". As taxas de movimento das esferas celestes aumentam gradualmente, desde a esfera imóvel das estrelas até ao rápido Mercúrio. GE 6.3.

Q1 Quais as razões por que Copérnico rejeitou a utilização dos equantos?

Q2 Na lista de afirmações que se apresenta a seguir, marque com um *P* as que foram efectuadas por Ptolomeu e com um *C* as que foram feitas por Copérnico.

(a) A Terra é esférica.
(b) A Terra é apenas um ponto, comparada com a distância às estrelas.
(c) O firmamento roda diariamente em torno da Terra.
(d) A Terra tem um ou mais movimentos.
(e) Os movimentos celestes são circulares.
(f) O movimento retrógrado observado para os planetas resulta do movimento da Terra em torno do Sol.

6.2 Novas conclusões

Uma nova maneira de olhar para observações já conhecidas — uma nova teoria — pode sugerir novos tipos de observações a fazer, ou novas utilizações de dados conhecidos. Copérnico serviu-se do seu modelo, caracterizado pela Terra em movimento, para obter dois resultados importantes, impossíveis de concluir à custa da teoria ptolomaica. Foi capaz de calcular (a) o período do movimento de cada planeta em torno do Sol, e (b) as dimensões das órbitas de cada planeta, comparadas com a dimensão da órbita da Terra. Isto, pela primeira vez, podia dar uma escala das dimensões do universo.

Para calcular os períodos dos planetas em torno do Sol, Copérnico utilizou observações que tinham sido registadas ao longo de muitos séculos. O método de cálculo é semelhante ao do "problema da caça", em que se pretende determinar quantas vezes passam os ponteiros do relógio um pelo outro. Os pormenores do cálculo estão expostos na página 38. Na tabela 6.1, em baixo, são comparados os resultados de Copérnico com os valores vulgarmente aceites. GE 64, 6.5.

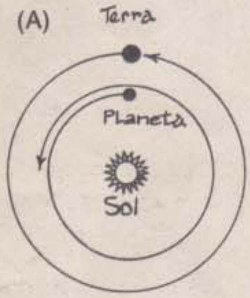
Tabela 6.1

PLANETA	VALOR DE COPÉRNICO	VALOR ACTUAL
Mercúrio	0,241 anos (88 dias)	87,97 dias
Vénus	0,614 anos (224 dias)	224,70 dias
Marte	1,88 anos (687 dias)	686,98 dias
Júpiter	11,8 anos	11,86 anos
Saturno	29,5 anos	29,46 anos

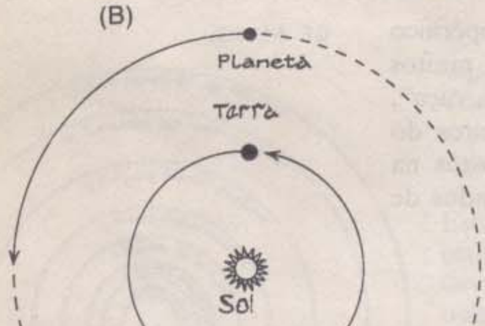
Copérnico pôde também, pela primeira vez na história, obter as distâncias relativas entre os planetas e o Sol. Recorde-se que o sistema ptolomaico não possuía qualquer escala de distâncias; fornecia apenas

Os Períodos de Revolução dos Planetas

O problema consiste em descobrir a taxa à qual se movem os planetas em torno do Sol utilizando observações feitas da Terra — que por sua vez se move também em torno do Sol. Suponha-se, por exemplo, que um planeta, mais próximo do Sol do que a Terra, se move em torno daquele com a frequência (taxa) de $1\frac{1}{4}$ ciclos por ano. A Terra move-se também em torno do Sol, na mesma direcção, à taxa de 1 ciclo por ano. Já que a Terra segue atrás do planeta, o movimento deste em torno do Sol, tal como é visto da Terra, parece ser a uma taxa inferior a $1\frac{1}{4}$ ciclos por ano. De facto, como sugerem os diagramas apresentados, a taxa *aparente* de movimento do planeta em torno do Sol é igual à diferença entre a taxa real de movimento do planeta e a taxa de movimento da Terra: $1\frac{1}{4}$ ciclos por ano menos 1 ciclo por ano, ou seja, $\frac{1}{4}$ de ciclo por ano. De uma maneira geral, se um planeta interior se move em torno do Sol à frequência f_p e se a Terra se move em torno do Sol à frequência f_t, a taxa aparente de movimento do planeta, f_{pt}, tal como é visto da Terra, é dada por $f_{pt}=f_p-f_t$.



Um planeta interior à órbita da Terra que efectue num ano 1 revolução e $\frac{1}{4}$ em torno do Sol parecerá, visto da Terra, ter efectuado apenas $\frac{1}{4}$ de revolução.



Um planeta exterior à órbita da Terra que efectue num ano apenas $\frac{1}{4}$ de revolução em torno do Sol parecerá, visto da Terra, ter efectuado cerca de 1 revolução e $\frac{3}{4}$.

Pode apresentar-se um argumento semelhante para os planetas mais afastados do Sol do que a Terra. (Veja-se o diagrama B). Uma vez que estes "planetas exteriores" se deslocam em torno do Sol mais lentamente do que a Terra, esta deixa-os repetidas vezes para trás. Consequentemente, deve usar-se o sinal oposto na equação para f_{pt} para os planetas exteriores: $f_{pt}=f_p+f_t$.

A frequência aparente f_{pt} representa aquilo que é realmente observado. Uma vez que f_t é, por definição, igual a 1 ciclo por ano, qualquer das equações é facilmente resolvida em relação à taxa de movimento real, f_p:

Para os planetas interiores:

$$f_p = 1 \text{ ciclo por ano} + f_{pt}.$$

Para os planetas exteriores:

$$f_p = 1 \text{ ciclo por ano} - f_{pt}.$$

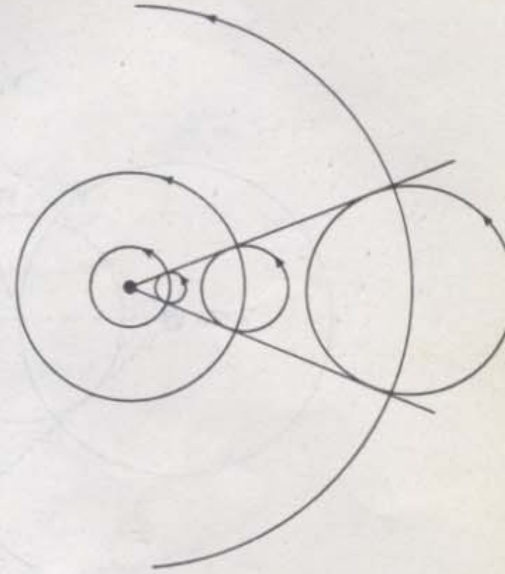
Copérnico usou algumas observações efectuadas por Ptolomeu e outras feitas por si mesmo. Eis um exemplo típico dos resultados apresentados em *De Revolutionibus:* "Júpiter é ultrapassado pela Terra 65 vezes em 71 anos solares menos 5 dias, 45 minutos e 27 segundos...". Os resultados de Copérnico são apresentados na Tabela 6.2, arredondados, na primeira coluna, para o ano mais próximo. (É de notar que os resultados exactos apresentados por Copérnico eram muito próximos de números inteiros de anos). Para os planetas interiores, os ciclos foram medidos entre duas ocasiões sucessivas em que o planeta se tinha apresentado a maior distância da Terra. Para os planetas exteriores, os ciclos foram medidos entre duas oposições consecutivas.

	NÚMERO DE ANOS DE OBSERVAÇÃO (t)	NÚMERO APARENTE DE CICLOS EM TORNO DO SOL DURANTE t (n)	FREQUÊNCIA APARENTE f_{pt} EM CICLOS POR ANO (n/t)	FREQUÊNCIA f_p EM TORNO DO SOL EM CICLOS POR ANO	PERÍODO EM TORNO DO SOL $(1/f_p)$ EM ANOS
Mercúrio	46	145	3.15	4.15	0.241
Vénus	8	5	0.625	1.625	0.614
Marte	79	37	0.468	0.532	1.88
Júpiter	71	65	0.915	0.085	11.8
Saturno	59	57	0.966	0.034	29.4

um processo de obter as direcções dos planetas, ou o ângulo segundo o qual eles se movem.

O sistema de Ptolomeu descrevia os movimentos do Sol e dos cinco planetas em termos de epiciclos anuais sobre círculos deferentes. Só eram conhecidas as dimensões *relativas* dos círculos correspondentes ao epiciclo e ao deferente, separadamente para cada planeta. No sistema de Copérnico, os movimentos do Sol e dos cinco planetas, anteriormente atribuídos a epiciclos ou a círculos deferentes de um ano, foram todos substituídos por um *único* movimento, o movimento anual de revolução da Terra *em torno do Sol*. Nas páginas 40 e 41 indica-se em pormenor como isto pode ser feito. Portanto, foi possível comparar os raios das órbitas planetárias com o da Terra. A distância do Sol à Terra é denominada 1 *unidade astronómica* (abreviadamente 1 UA) já que todas as distâncias são comparadas com aquela.

A tabela 6.3, abaixo, compara os valores obtidos para os raios das órbitas por Copérnico com os valores correntemente aceites.



No sistema ptolomaico só era especificada a dimensão relativa do epiciclo e do deferente. As dimensões reais podiam ser modificadas como fosse mais conveniente, desde que as proporções não fossem alteradas.

TABELA 6.3

RAIOS DAS ÓRBITAS PLANETÁRIAS

PLANETA	VALORES DE COPÉRNICO	VALORES ACTUAIS
Mercúrio	0,38 UA	0,39 UA
Vénus	0,72	0,72
Terra	1,00	1,00
Marte	1,52	1,52
Júpiter	5,2	5,20
Saturno	9,2	9,54

Note-se que Copérnico dispunha agora de um sistema em que se podia relacionar a dimensão da órbita de um dado planeta com as de todos os outros, em contraste com as soluções de Ptolomeu, completamente independentes para cada planeta. Não admira que Copérnico tenha afirmado, como se refere na secção 6.1, que: "nada pode ser alterado seja em que parte for sem fazer desmoronar as partes restantes e o universo como um todo".

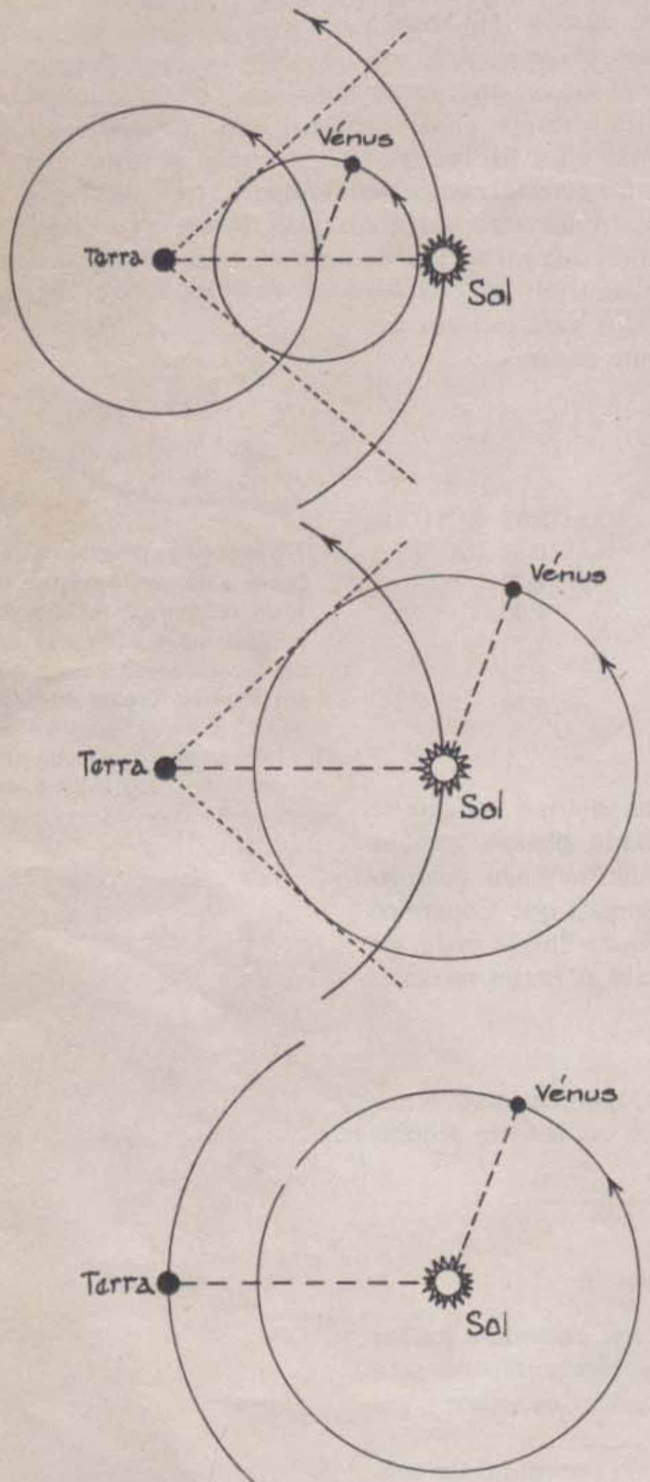
GE 6.6.

Q3 Que novos tipos de resultados obteve Copérnico com o seu modelo de Terra móvel, impossíveis de concluir com um modelo geocêntrico para o sistema planetário?

6.3 Argumentos a favor do sistema de Copérnico

Copérnico sabia que o seu trabalho pareceria absurdo a muitas pessoas — "mais do que isso, quase contrário à compreensão humana vulgar" — pelo que tentou, de várias maneiras, satisfazer os velhos argumentos contra uma Terra móvel.

1. Copérnico argumentou que as suas hipóteses concordavam com os dogmas teológicos, pelo menos tão bem como as de Ptolomeu. O seu livro contém muitas partes que tratam das limitações do sistema



A Mudança do Sistema de Referência da Terra para o Sol

A mudança de ponto de vista do sistema de Ptolomeu para o de Copérnico envolveu o que hoje se poderia chamar uma troca de sistemas de referência. O movimento aparente, atribuido antes aos círculos deferentes e aos epiciclos, foi atribuído por Copérnico aos movimentos orbitais da Terra e dos planetas em torno do Sol.

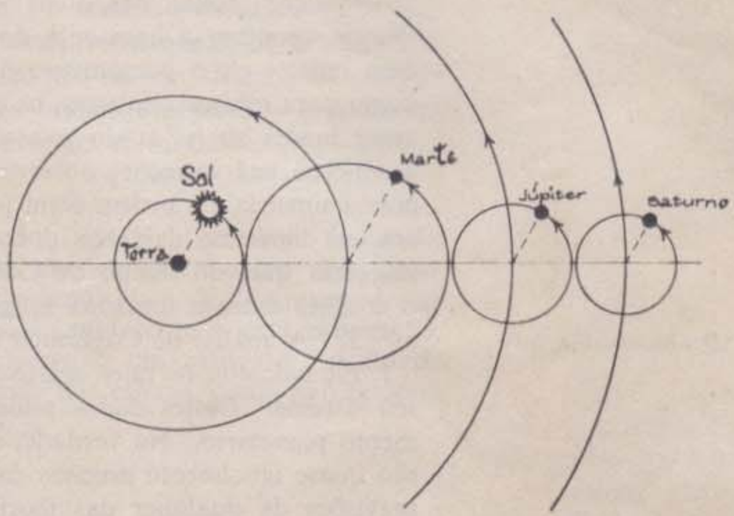
Consideremos, por exemplo, o movimento de Vénus. No sistema de centro na Terra de Ptolomeu, o centro do epiciclo de Vénus estava ligado ao movimento do Sol, como se mostra no diagrama à esquerda em cima. A dimensão do círculo deferente de Vénus era suposta ser mais pequena que a do Sol. Pensava-se que o epiciclo estivesse todo entre a Terra e o Sol. Mas a explicação dos movimentos observados *exigia* apenas uma certa *relação* entre as dimensões do epiciclo e do deferente. Podia-se atribuir uma dimensão qualquer ao deferente, desde que a dimensão do epiciclo fosse modificada proporcionalmente.

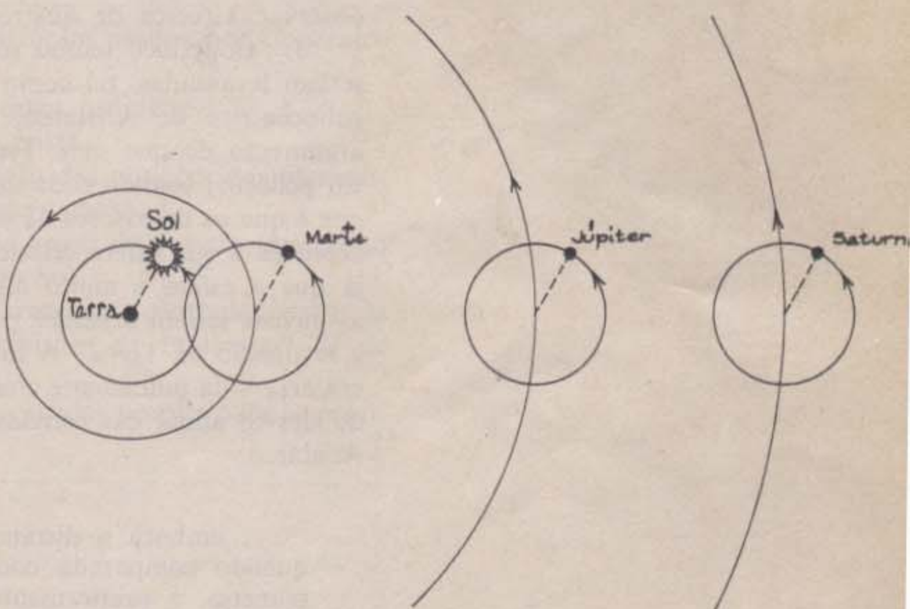
O primeiro passo em direcção a um sistema de centro no Sol consiste em deslocar o centro do deferente de 1 ano de Vénus para o Sol. O epiciclo de Vénus é aumentado proporcionalmente, como se mostra no diagrama à esquerda ao centro. O planeta move-se agora em torno do Sol, enquanto este se move em torno da Terra. Um sistema como este, em que todos os planetas visíveis se moviam em torno do Sol também em movimento, foi proposto mais tarde por Tycho Brahe.

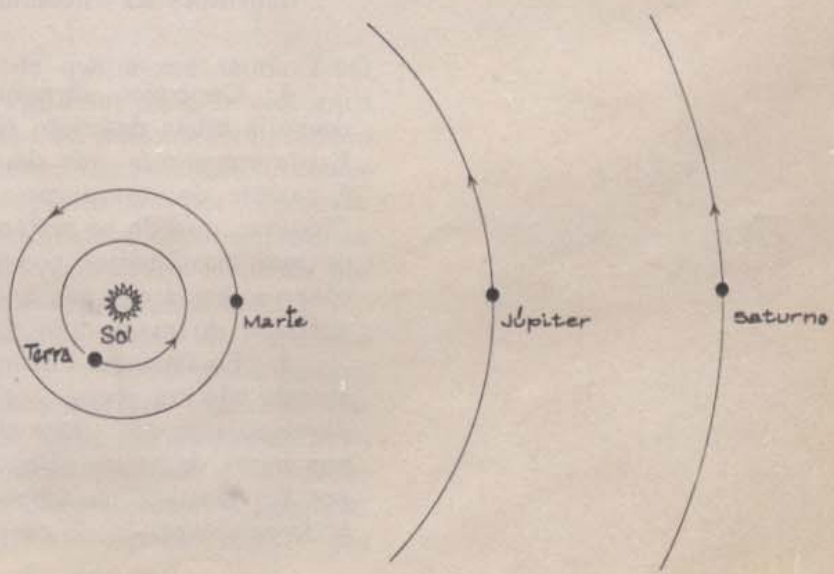
Copérnico foi mais longe. Explicou o movimento relativo da Terra e do Sol supondo que a Terra se movia em torno do Sol, em vez de ser este a mover-se em torno da Terra. No sistema de Copérnico, o epiciclo alargado de Vénus transforma-se na sua órbita em torno do Sol. Simultaneamente, o seu deferente é substituído pela órbita da Terra em torno do Sol. Veja-se o diagrama à esquerda, em baixo. Qualquer dos três sistemas, o de Copérnico, o de Ptolomeu e o de Tycho, explica as mesmas observações.

O argumento é semelhante para os planetas exteriores, embora estejam trocados os papéis do epiciclo e do deferente. No sistema de Ptolomeu, eram os epiciclos dos planetas exteriores e não os seus círculos deferentes que tinham períodos de 1 ano e se moviam paralelamente ao Sol na sua órbita. As dimensões dos deferentes eram escolhidas de modo a que o epiciclo de cada planeta fosse quase tangente aos epiciclos dos planetas imediatamente mais próximo e imediatamente mais afastado do Sol. (Era um belo exemplo de uma hipótese simplificativa — preenchia-se o espaço sem sobreposições nem espaçamentos). Este sistema está representado no diagrama à direita, em cima; mostram-se os planetas na situação improvável de terem os centros dos seus epiciclos todos sobre uma linha recta.

Relativamente a estes planetas, o primeiro passo em direcção a uma perspectiva de centro no Sol envolve o ajustamento das dimensões dos seus círculos deferentes, alterando-se proporcionalmente os seus epiciclos. Os epiciclos anuais acabam por ter a mesma dimensão que as órbitas anuais do Sol. Veja-se o diagrama à direita, ao meio. A seguir, o movimento anual aparente do Sol em torno da Terra é explicado igualmente bem supondo-se a Terra em revolução em torno do Sol. Além disso, o mesmo movimento orbital terrestre explica os movimentos retrógrados associados aos epiciclos anuais dos planetas exteriores. Assim, o conjunto dos epiciclos dos planetas exteriores e a órbita do Sol são substituídos por um *único* mecanismo, o do movimento orbital da Terra em torno do Sol. Apresenta-se esta troca no diagrama à direita, em baixo. Os círculos deferentes dos planetas exteriores transformam-se nas suas órbitas em torno do Sol.







ptolomaico (muitas das quais já eram conhecidas desde há séculos). Outras apontam a harmonia do seu própria sistema e mostram quão bem reflecte ele o pensamento do Divino Arquitecto. Para Copérnico, como para muitos cientistas, os complicados acontecimentos observados eram meros símbolos do pensamento de Deus. Procurar a ordem e a simetria nas variações observadas era, para ele, um acto de piedade, pois a simetria e a ordem eram prova da existência de Deus. Copérnico era um dignitário da Igreja e, como tal, sentir-se-ia chocado se pudesse imaginar que, no tempo de Galileu, a sua teoria iria contribuir para o conflito entre a doutrina religiosa e a ciência.

2. A análise de Copérnico foi tão cuidadosa como a de Ptolomeu. Ele calculou os raios relativos e as velocidades dos movimentos no seu sistema. Destes dados puderam ser construídas tabelas do movimento planetário. Na verdade, as teorias de Ptolomeu e de Copérnico são quase igualmente precisas na previsão das posições planetárias. As previsões de qualquer das teorias diferem por vezes 2° das posições observadas (cerca de quatro diâmetros lunares).

3. Copérnico tentou responder a várias objecções que certamente seriam levantadas, tal como tinha acontecido relativamente ao sistema heliocêntrico de Aristarco, dezanove séculos antes. Em resposta ao argumento de que uma Terra em rápida rotação certamente se faria em pedaços, voando cada um deles para seu lado, perguntou ele: "Por que é que os defensores da teoria geocêntrica não receiam que o mesmo aconteça à sua esfera celeste em rotação — rotação ainda mais rápida, já que a esfera é muito maior?" Argumentava-se que os pássaros e as nuvens seriam deixados para trás, devido aos movimentos de rotação e revolução da Terra. A esta objecção respondeu ele que a atmosfera era arrastada juntamente com a Terra. Relativamente à não observação do desvio anual das estrelas fixas só pôde dar a mesma resposta que Aristarco:

> ...embora a distância do Sol à Terra pareça muito grande, quando comparada com a dimensão das esferas de alguns dos planetas, é praticamente desprezável quando comparada com as dimensões da esfera das estrelas fixas.

4. Copérnico afirmou que a maior vantagem do seu esquema consistia numa descrição simples dos movimentos gerais dos planetas. Existe certamente uma simplicidade básica geral no seu sistema, como é patente do seu próprio diagrama, que se mostra na página 32. (Todavia, quando se pretendiam cálculos precisos, Copérnico precisava de *mais* movimentos pequenos do que Ptolomeu para reproduzir as observações, já que não utilizava equantos. Um diagrama mais pormenorizado do manuscrito de Copérnico é apresentado na página 46).

5. Finalmente, Copérnico apontava que a simplicidade do seu sistema não era apenas conveniente, mas também maravilhosa e "agradável ao espírito". Este tipo de pensamento nem sempre é realçado nos livros de texto. No entanto, esta espécie de prazer encontrado por um cientista na simplicidade dos seus modelos, é uma das mais poderosas experiências na prática real da ciência. Longe de constituir

meramente um exercício lógico, "frio", o trabalho científico está cheio de tais sentimentos de harmonia e, consequentemente, de beleza. Um outro aspecto da beleza que Copérnico viu no seu sistema foi o lugar central dado ao Sol, ao maior e mais brilhante objecto — o dador da luz, do calor e da vida. Como ele próprio afirmou:

> No meio de tudo repousa o Sol, imóvel. Quem, na realidade, poderia colocar o dador da luz em qualquer outro sítio deste templo maravilhoso, senão naquele donde ele pode iluminar todas as outras partes? Encontramos assim, subjacente a esta ordenação, uma admirável simetria no Universo e um evidente vínculo de harmonia no movimento e dimensão das esferas, como não poderia ser encontrado de outra maneira.

Veja-se novamente GE 6.2.

Q4 Quais dos seguintes argumentos foram usados por Copérnico a favor do seu sistema?

(a) Ele era óbvio para o senso comum ordinário.
(b) Era consistente com a teologia cristã.
(c) Era muito mais preciso na previsão das posições dos planetas.
(d) A sua simplicidade tornava-o maravilhoso.
(e) As estrelas mostravam um desvio anual de posição, devido ao movimento da Terra em torno do Sol.

Q5 Quanto valiam as maiores diferenças encontradas entre as posições planetárias observadas e as previsões de Ptolomeu? E de Copérnico?

Q6 Permitia o sistema de Copérnico cálculos simples para as previsões das posições dos planetas?

6.4 Argumentos contra o sistema de Copérnico

As esperanças que Copérnico tinha de que a sua teoria fosse aceite não foram rapidamente satisfeitas. Passaram mais de cem anos antes de o sistema heliocêntrico ser aceite de uma maneira geral, mesmo pelos astrónomos — e mesmo então, como veremos, a aceitação foi consequência de argumentos muito diferentes dos apresentados por Copérnico. Durante esse período, a teoria e os seus poucos defensores encontraram forte oposição. A maior parte dos argumentos foram idênticos aos usados por Ptolomeu contra o sistema heliocêntrico de Aristarco.

1. À parte a sua aparente simplicidade, o sistema de Copérnico não apresentava vantagens *científicas* claras em relação à teoria geocêntrica. Não existiam observações conhecidas que fossem explicadas por aquele sistema e não por este. Copérnico tinha um ponto de vista diferente, mas não apresentava novos tipos de observações, novos dados experimentais que não pudessem ser explicados pela teoria já existente. Além do mais, a precisão das suas previsões era pouco melhor que

a de Ptolomeu. Como disse Francis Bacon, nos princípios do séc. XVII: "É fácil de ver que quer os que pensam que a Terra se move, quer os que sustentam a concepção clássica, são igual e indiferentemente sustentados pelos fenómenos".

Basicamente, os sistemas rivais diferiam na escolha que faziam para os sistemas de referência utilizados para descrever os movimentos observados. O próprio Copérnico pôs o problema claramente:

> Posto que existem tantas autoridades a afirmar que a Terra repousa no centro do universo, essas pessoas consideram a hipótese contrária... ridícula; ...se, todavia, examinarmos o assunto atentamente, veremos que a questão não está ainda resolvida e que não há, portanto, nada a desdenhar. Porque todas as variações aparentes podem ocorrer devido ao movimento quer do objecto observado quer do observador, quer ainda devido ao movimento, necessariamente desigual, de ambos. Porque não pode ser apercebido qualquer movimento relativamente a objectos que se movam igualmente e na mesma direcção — refiro-me ao objecto observado e ao espectador. Ora é da Terra que o circuito celeste é contemplado, é aí que ele se nos apresenta à vista. Portanto, se algum movimento couber à Terra... ele aparecerá, nas partes do universo que lhe são exteriores, como o mesmo movimento mas na direcção oposta, como se as coisas exteriores a estivessem a ultrapassar. E a rotação diária... é um movimento deste tipo.

Também Ptolomeu tinha admitido a possibilidade de sistemas de referência de alternativa. (Releia-se a citação apresentada na página 25, no Capítulo 5). A maior parte dos seguidores de Ptolomeu não compartilhou deste ponto de vista.

Com esta afirmação, Copérnico convida o leitor a considerar o sistema de referência não do observador na Terra, mas o do observador numa posição remota, olhando para todo o sistema, com o Sol ao centro. Como se sabe a partir da experiência pessoal, uma tal mudança de atitude não é difícil, e por isso poderemos compreender aqueles que preferiram apegar-se à solução de centro na Terra para descrever as observações.

Hoje em dia, os físicos admitem, de uma maneira geral, que *todos* os sistemas de referência são em princípio igualmente válidos para a descrição dos fenómenos. Contudo, alguns permitem uma utilização ou uma reflexão mais fácil do que outros. Copérnico e aqueles que defenderam depois a sua linha de raciocínio sentiram que, num certo sentido absoluto, o sistema heliocêntrico estava correcto, isto é, que o Sol estava realmente fixo no espaço. Os seus adversários disseram o mesmo relativamente à Terra. Mas a atitude moderna na escolha do sistema de referência é a de utilizar aquele que permita a discussão mais simples possível do problema em estudo. Não diremos que um dado sistema de referência está certo ou errado, mas antes que é conveniente ou inconveniente. (Ainda hoje os navegadores usam um modelo geocêntrico para os seus cálculos; veja-se uma página de um livro de navegação, mostrada na página 45). Todavia, ainda que se reconheça que vários sistemas de referência sejam matematicamente possíveis, um dado sistema de referência que seja aceitável para uma pessoa poderá envolver considerações filosóficas inaceitáveis para outra.

2. A não observação de um desvio anual das estrelas fixas era um pesado óbice para o modelo de Copérnico. A sua única explicação possível para o facto tornava-se inaceitável, porque implicava que as estrelas estivessem a distâncias enormes da Terra. Os instrumentos de utilização a olho nu permitiam a medição de posições no céu com uma precisão de cerca de 1/10°; para que um desvio anual fosse inferior a 1/10°, as estrelas teriam que estar a uma distância da Terra mais de 1 000 vezes superior à distância do Sol! Isto não nos choca de maneira alguma, porque fomos criados numa sociedade que aceita a ideia de extensões enormes de espaço e de tempo. Mesmo assim, a nossa imaginação é posta à prova, com distâncias tão grandes. Para os adversários de Copérnico, isso constituía um absurdo. Na verdade, talvez possamos até ir mais longe: mesmo que naquela altura fosse observável um desvio anual na posição das estrelas, tal observação não teria sido tomada como evidência absoluta contra uma ou outra das teorias. Pode-se normalmente modificar uma teoria — mais ou menos satisfatoriamente — de modo a acomodá-la a alguma descoberta conflituosa.

GE 6.8.

GE 6.7.

O sistema de Copérnico conduzia a outras conclusões, que confundiam ou ameaçavam os seus críticos. Copérnico determinou as distâncias reais entre o Sol e as órbitas planetárias. Talvez então o seu sistema não fosse apenas um processo matemático para a previsão das posições observáveis dos planetas! Talvez ele descrevesse o sistema real de órbitas planetárias no espaço (como Copérnico pensava realmente acontecer). Mas isto seria difícil de aceitar, porque as órbitas estavam muito afastadas umas das outras. Mesmo os pequenos epiciclos que Copérnico ainda necessitava para ter em conta as variações dos movimentos não conseguiam preencher o espaço entre os planetas. Então o que é que existia aí? Acreditava-se que alguma coisa deveria existir em todo aquele espaço, porque Aristóteles afirmara: "a natureza tem horror ao vácuo". Como se poderia esperar, mesmo muitos dos que acreditavam no sistema de Copérnico sentiram que aquele espaço deveria ser preenchido com alguma coisa, inventando por isso toda a espécie de fluidos invisíveis e de éteres que pudessem encher o vazio. Mais recentemente, foram também utilizados fluidos semelhantes em teorias químicas, como em teorias a respeito do calor, da luz e da electricidade, como se estudará nos volumes seguintes deste curso.

3. Uma vez que não havia evidência astronómica que permitisse tomar uma decisão definitiva a respeito das teorias de Ptolomeu e de Copérnico, a atenção focou-se sobre o problema da Terra ocupar uma posição central e imóvel. A despeito dos seus esforços, Copérnico não foi capaz de convencer a maior parte dos seus leitores de que o seu sistema heliocêntrico reflectia o espírito de Deus, pelo menos tão bem como o sistema geocêntrico. Todas as fés religiosas da Europa, incluindo os recém-nascidos Protestantes, encontraram imensas citações bíblicas (por exemplo, *Josué* 10:12-13) confirmativas de que o Divino Arquitecto teria trabalhado de acordo com o esquema ptolomaico. Na verdade, Martinho Lutero chamou a Copérnico "o louco que viraria do avesso toda a ciência da astronomia".

Em 1616, mais nuvens tempestuosas se levantariam com o caso Galileu. A Inquisição acrescentou o *De Revolutionibus* ao *Index* dos livros

CELESTIAL OBSERVATIONS

By PHILIP KISSAM, C. E.
Professor of Civil Engineering, Princeton University

I. The Principles upon which Celestial Observations are Based.

A. CONCEPTS.

1. The Celestial Sphere. To simplify the computations necessary for the determinations of the direction of the meridian, of latitude, and of longitude or time, certain concepts of the heavens have been generally adopted. They are the following:

a. The earth is stationary.

b. The heavenly bodies have been projected outward, along lines which extend from the center of the earth, to a sphere of infinite radius called the ***celestial sphere***.

The celestial sphere has the following characteristics:

a. Its center is at the center of the earth.

b. Its equator is on the projection of the earth's equator.

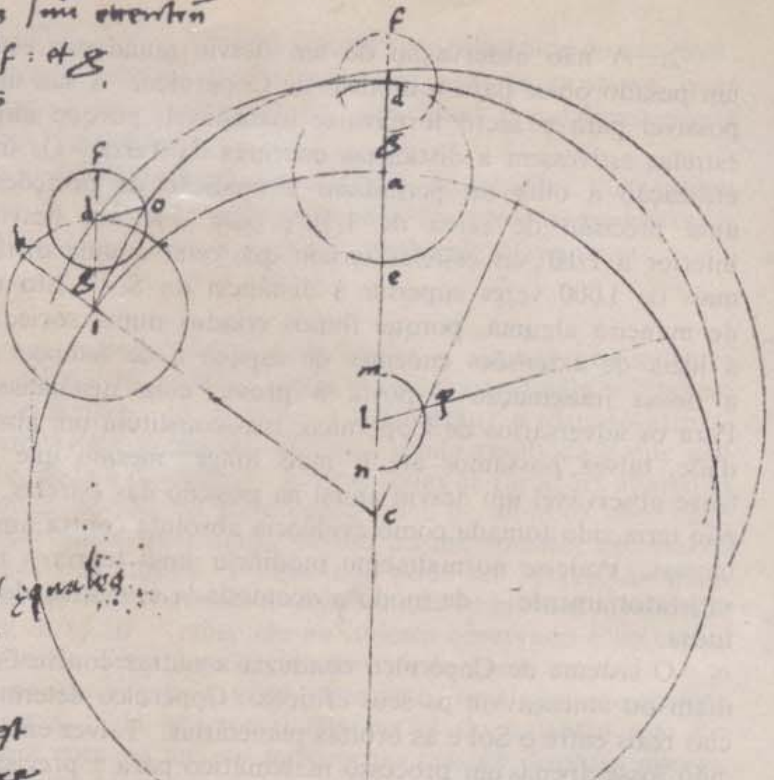
c. With respect to the earth, the celestial sphere rotates from east to west about a line which coincides with the earth's axis. Accordingly, the poles of the celestial sphere are at the prolongations of the earth's poles.

d. The speed of rotation of the celestial sphere is 360° 59.15' per 24 hours.

e. With the important exception of bodies in the solar system, which change position slowly, all heavenly bodies remain practically fixed in their positions on the celestial sphere, never changing more than negligible amounts in 24 hours, and accordingly are often called *fixed stars*.

A navegação pelos céus envolve a comparação entre a posição aparente do Sol (ou estrela) com a posição "real" dada numa tabela chamada de "efemérides". Mostra-se acima um excerto da introdução às tabelas do *Solar Ephemeris* de 1950. (Keufel e Esser Cia.).

quæ ipsi di fuerit æqualis . f quoque summi eccentri
secundum distantiam clm æqualem ipsi df : et g
similiter secundum ig et cn distantias
æquales . Interea si centrum terræ
iam emensum fuerit utrumque
f o circumferentiam secundum ac sui
epicycli, iam ipsum o non describet
eccentrum per cuius centrum in ac
linea contingat : sed in ea quæ
ipsi do parallelus fuerit qualis
est lp . Quod si etiam coniungantur
oi et cp erunt et ipsæ æquales
minores autem ipsis if et cm et
angulus dio angulo lcp per xxiii (æquales :
primi Euclidis : et pro tanto videbitur
Solis apogeum in cp linea prodere
ipsum a . Hinc etiam manifestum est
per eccentrepicyclum idem contingere
Quoniam in praeexistente eccentro quem descrip-
serit d epicyclum circa l centrum, centrum terræ
volvatur in fo circumferentia praedictis conditionibus : hoc est
plus modico quam fuerit annua revolutio . Superinducet enim et quoque aliam
alterum eccentrum priori circa p centrum accidentque prorsus
eadem . Cumque tot modi ad eundem numerum sese conferrent
quis locum habeat haud facile dixerim : nisi quod illa nu-
merorum ac apparentium perpetua consonantia credere cogit
eorum esse aliquem



Quanta sit secunda Solaris inæqualitatis differentia Cap xx

Cum igitur iam visum fuerit : quod ista secunda inæqualitas
prima ac simplici illam anomaliam obliquitatis signiferi vel
eius similitudini sequeretur : certas habebimus eius diffe-
rentias , si non obstiterit error aliquis observatorum priorum
Habemus enim ipsam simplicem anomaliam anno Christi MDxv
secundum numerationem grad clxv fere compertum fere : et eius fere xxxiv
lxiiii
principium facta retrorsum supputatione ~~supposita~~ fore
annis ante Christum natum / et colliguntur anni MDlxxix a quo ~~principio~~ tempore ad nos usque
~~anno~~ principium inventa eccentrotes maxima partium ~~que~~ 417
quarum ipsa ex centro orbis esset 10000 : nostra vero , ut
a nobis

proibidos, como "falso e de todo contrário às Santas Escrituras". Algumas comunidades judaicas proibiram também o ensino da teoria de Copérnico. Parecia que o homem, crendo ser ele próprio personagem central no plano de Deus, tinha que insistir em que a Terra fosse o centro do universo físico.

O supor-se que a Terra não fosse o centro do universo já era, por si só, suficientemente ofensivo. Mas, pior do que isso, o sistema de Copérnico sugeria que os outros planetas eram semelhantes à Terra. Aí era ameaçado o conceito de uma matéria celeste intrinsecamente diferente; quem sabe se não seria afirmado a seguir por algum idiota irreflectido que o Sol e as próprias estrelas eram feitas de materiais terrestres? Se os outros corpos celestes, no nosso sistema solar ou fora dele, fossem semelhantes à Terra, então eles poderiam eventualmente ser habitados. E os seus habitantes poderiam ser pagãos, ou seres tão amados de Deus como o homem, ou até talvez mesmo mais amados! Assim, todo o sistema de Copérnico provocava profundas questões filosóficas, evitadas pelo sistema ptolomaico.

4. A teoria de Copérnico estava em conflito com as afirmações básicas da física aristotélica. Este conflito está bem descrito por H. Butterfield, em *Origins of Modern Science:*

> ...pelo menos parte da economia aparentada pelo sistema de Copérnico é antes uma ilusão óptica de séculos mais recentes. Sabemos hoje que é preciso um esforço menor para mover a Terra em torno do seu eixo do que para deslocar todo o universo em volta da Terra, ao ritmo de uma revolução em cada vinte e quatro horas; mas para a física aristotélica tornava-se necessário um esforço colossal para deslocar a Terra, pesadona e indolente, enquanto que os céus eram compostos de uma substância subtil suposta sem peso, comparativamente muito mais fácil de ser posta a girar, já que o girar era concordante com a sua natureza. Acima de tudo, atribuir-se a Copérnico uma certa vantagem, no que diz respeito a simplicidade geométrica, exigia que se fizesse um sacrifício tremendo. Perdia-se toda a cosmologia associada ao aristotelismo — todo aquele sistema intrincadamente montado, no qual a nobreza e o arranjo hierárquico dos vários elementos tinha sido tão maravilhosamente encadeado. De facto, tinha que se deitar pela borda fora todo o quadro da ciência existente e foi aqui que Copérnico falhou realmente, ao não encontrar uma alternativa satisfatória. Forneceu uma geometria celeste mais limpa, mas que não fazia sentido relativamente às razões e explicações anteriormente invocadas para ter em conta os movimentos no céu.

Em suma, embora o esquema de centro no Sol, concebido por Copérnico fosse cientificamente equivalente ao de Ptolomeu para a explicação das observações astronómicas, o abandonar da hipótese geocêntrica parecia filosoficamente falso e absurdo, perigoso e fantástico. Muitos

Ao lado: Página do manuscrito do livro *De Revolutionibus* de Copérnico mostrando detalhes de alguns epiciclos no seu modelo.

europeus eruditos da altura reconheciam na Bíblia e nos escritos de Aristóteles as fontes supremas de autoridade. Ambas pareciam ser desafiadas pelo sistema de Copérnico. Embora estivesse já iniciada a liberdade de pensamento característica da Renascença, a velha imagem do universo dava ainda a muitos um sentimento de segurança e de estabilidade. Por isso, acreditar naquele tempo num universo com centro no Sol em vez de num universo com centro na Terra permitia um pequena ganho em simplicidade. Mas no tempo de Galileu isso parecia contradizer o senso comum e a observação. E, além disso, requeria uma revolução na filosofia, na religião e na ciência física da época. Não admira, pois, que tão poucas pessoas tenham acreditado em Copérnico!

Conflitos semelhantes entre as considerações subjacentes às teorias aceites e o conteúdo filosófico de novas teorias científicas ocorreram muitas vezes e continuarão a acontecer. Durante o século passado isso aconteceu pelo menos duas vezes. Nenhum desses dois conflitos está ainda resolvido. No campo da biologia, a teoria da evolução das espécies de Darwin provocou reacções filosóficas e religiosas importantes. Na física, como se verá nas Unidades 4, 5 e 6, o desenvolvimento de teorias do átomo, da relatividade e da mecânica quântica desafiaram hipóteses de há muito sustentadas acerca da natureza do universo e do nosso conhecimento da realidade. Como é ilustrado pela disputa entre os adeptos de Copérnico e de Ptolomeu, as hipóteses tão ardorosamente sustentadas pelo senso comum são muitas vezes os restos de alguma teoria científica anterior, menos completa.

GE 6.9.

Q7 Por que é que tantas pessoas, como Francis Bacon, por exemplo, hesitavam acerca da exactidão dos sistemas de Ptolomeu e de Copérnico?

Q8 Como é que a discussão astronómica se misturou com as fés religiosas?

Q9 Qual dos sistemas de referência, o de Ptolomeu ou o de Copérnico, era mais válido, de um ponto de vista moderno?

6.5 Consequências históricas

Ao fim e ao cabo, o modelo da Terra móvel de Copérnico acabou por ser aceite. A lentidão com que essa aceitação se processou é ilustrada por uma passagem do diário de John Adams (que seria mais tarde o segundo presidente dos Estados Unidos da América). Escreveu ele que assistiu a uma aula no Harvard College, na qual foi discutida a exactidão do ponto de vista de Copérnico — isto em 19 de Junho de 1753.

Seguiremos dentro em pouco o trabalho que levou gradualmente à aceitação geral do ponto de vista heliocêntrico. Veremos que o pormenorizado sistema de Copérnico, de movimentos circulares com excêntricos e epiciclos, acabou por vir a ser abandonado. No entanto, este facto em nada diminui a importância científica da obra de Copérnico. O ponto de vista heliocêntrico abriu todo um novo processo de compreensão do movimento planetário. Este novo caminho tornou-se dinâmico, muito mais do que cinemático. Envolveu as leis que relacionam a força e o movimento, desenvolvidas nos 150 anos a seguir a Copérnico, e a aplicação dessas leis aos movimentos celestes.

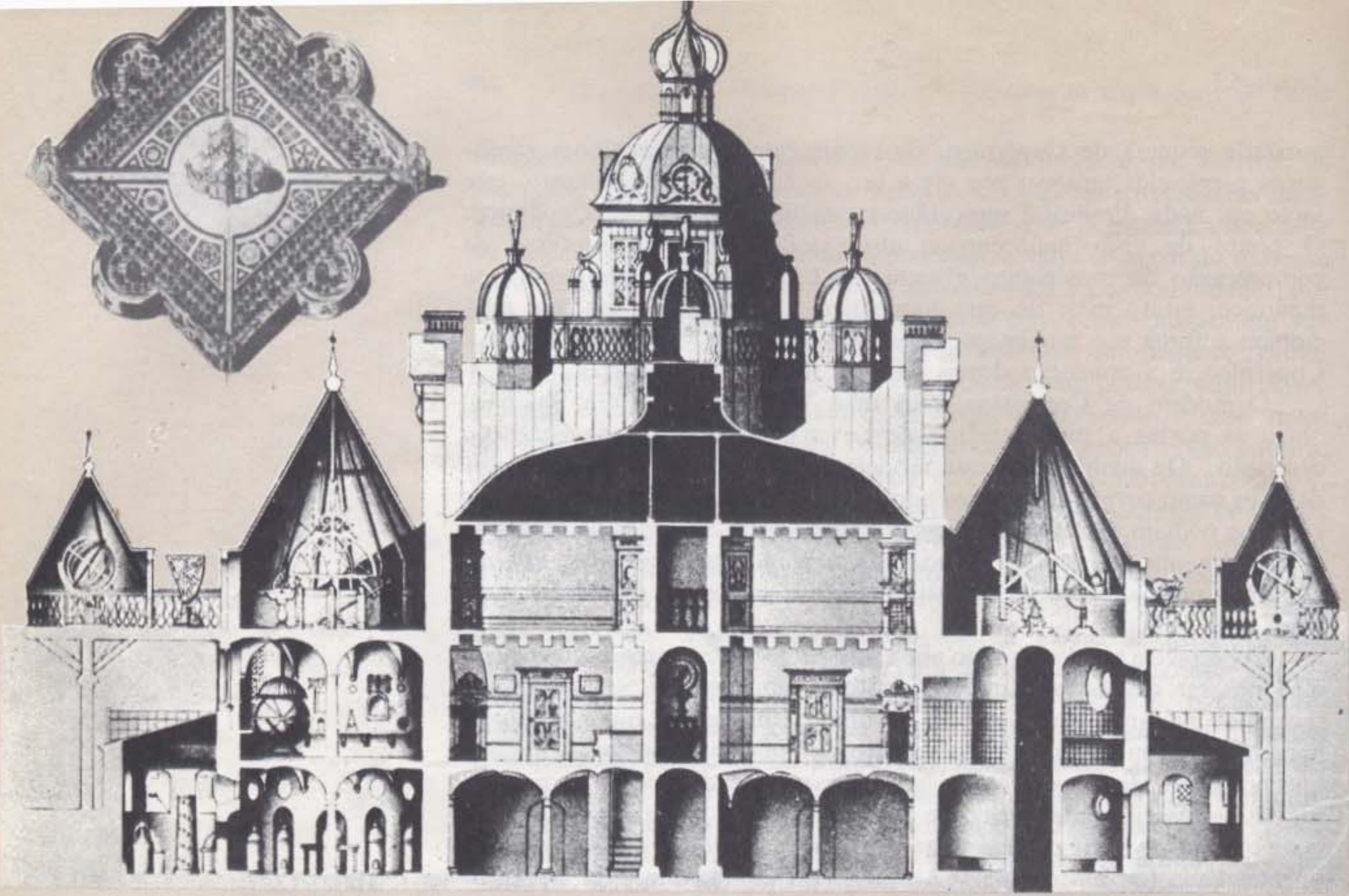
O modelo de Copérnico, com uma Terra móvel e um Sol fixo, abriu as portas a uma torrente de novas possibilidades de análise e descrição. De acordo com este modelo, os planetas podiam ser considerados como corpos reais, movendo-se ao longo de órbitas reais. Kepler e outros podiam agora encarar essas trajectórias planetárias de maneiras completamente novas. Na ciência, a gama das possibilidades abertas não pode normalmente ser prevista pelos iniciadores da revolução — ou pelos seus críticos.

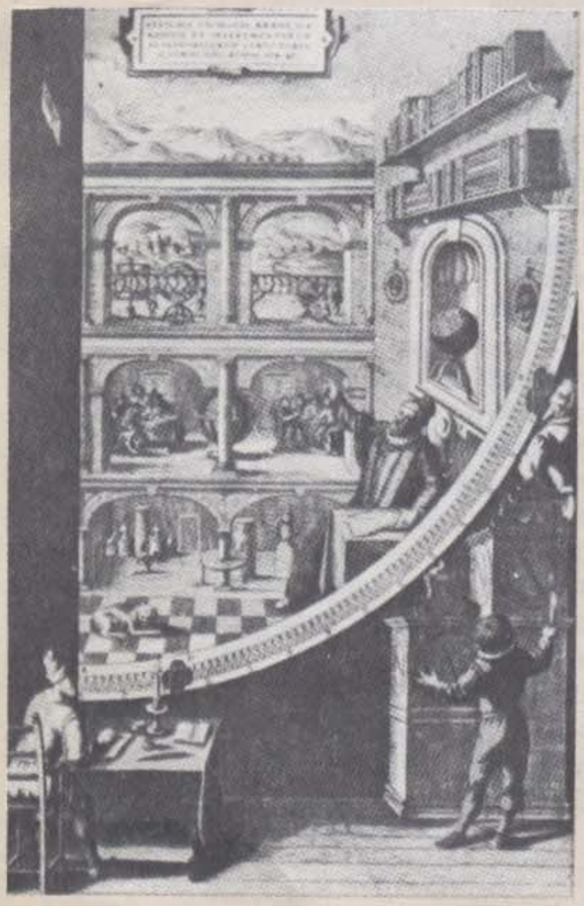
Copérnico é hoje recordado não tanto pelos pormenores da sua teoria, mas por ter desafiado o quadro existente do universo. A sua teoria tornou-se na arma principal da revolução intelectual que sacudiu o homem e o tirou da sua concepção autocentrada no universo. À medida que o sistema de Copérnico foi gradualmente sendo aceite, as pessoas foram necessariamente aceitando a ideia de que a Terra era apenas mais um entre vários planetas que circulavam em torno do Sol. Consequentemente, tornou-se cada vez mais difícil aceitar que toda a criação se tinha concentrado na humanidade. Simultaneamente, o novo sistema estimulou uma nova autoconfiança e curiosidade acerca do universo. GE 6.10.

A aceitação de uma ideia revolucionária baseada em pressupostos inteiramente novos é sempre lenta; assim aconteceu com Copérnico ao escolher um novo sistema de referência. São propostas por vezes teorias de compromisso, numa tentativa de unificar duas alternativas mutuamente exclusivas, de "ficar a meia distância". Como se verá, tais compromissos raramente são bem sucedidos. No entanto, muitas vezes as novas ideias estimulam novas observações e conceitos. Por sua vez estas podem conduzir a desenvolvimentos extremamente úteis ou a reformulações da teoria revolucionária original.

Uma tal reformulação da teoria heliocêntrica ocorreu nos 150 anos a seguir a Copérnico. Muitos cientistas contribuíram com observações e ideias. Nos capítulos 7 e 8 seguiremos as contribuições principais feitas por Kepler, Galileu e Isaac Newton. Mas analisaremos primeiro o trabalho de Tycho Brahe, que dedicou a sua vida à melhoria da precisão com a qual podiam ser observadas as posições planetárias, e à apresentação de uma teoria de compromisso para o movimento planetário.

Q10 Quais as maiores contribuições de Copérnico para a teoria planetária moderna, em termos da nossa perspectiva histórica?





Em cima, à esquerda, pode ver-se um plano do observatório e dos jardins construídos por Tycho Brahe em Uraniborg, na Dinamarca.

Um corte do observatório (em cima, ao meio) mostra onde era guardada a maior parte dos instrumentos importantes, incluindo enormes modelos de esferas celestes.

A figura ao lado mostra a sala que continha o grande quadrante de Tycho. Nas paredes podem ver-se imagens de alguns dos seus instrumentos. Mostra-se Tycho fazendo uma observação, ajudado pelos seus assistentes.

Imediatamente acima está um retrato de Tycho, pintado por volta de 1597.

6.6 Tycho Brahe

Tycho Brahe nasceu em 1546, de uma família dinamarquesa, nobre mas não particularmente rica. Tycho interessou-se intensamente pela astronomia com a idade de treze ou catorze anos. Embora estudando leis, foi gastando secretamente as suas mesadas em tabelas astronómicas e livros. Leu o *Almagest* e o *De Revolutionibus*. Descobriu rapidamente que tanto Ptolomeu como Copérnico se tinham baseado em tabelas de posições planetárias pouco precisas. Concluiu que seria necessário recolher, durante muitos anos, novas observações astronómicas com a máxima precisão possível, antes de poder ser criada uma teoria satisfatória do movimento planetário.

O interesse de Tycho pelo estudo dos céus foi incrementado por um excitante acontecimento celeste. Embora os antigos tivessem afirmado que as estrelas eram imutáveis, Tycho observou uma "nova estrela" na constelação da Cassiopeia, em 1572. Tornou-se rapidamente tão brilhante como Vénus, podendo mesmo ser vista durante o dia. Depois, ao longo de vários anos, foi diminuindo de brilho, até deixar completamente de ser visível. Para Tycho, estes acontecimentos foram espantosos — variações no firmamento de estrelas! Tornava-se evidente que pelo menos uma das hipóteses dos antigos estava errada. Talvez então outras hipóteses o estivessem também.

Depois de observar e de escrever acerca da nova estrela, Tycho viajou pelo norte da Europa, encontrando muitos outros astrónomos e recolhendo livros. Aparentemente, considerou mesmo a possibilidade de se mudar para a Alemanha ou para a Suíça, onde poderia encontrar mais facilmente outros astrónomos. Para conservar o jovem cientista na Dinamarca, o rei Frederico II ofereceu-lhe toda uma pequena ilha, bem como o rendimento de várias quintas. Este rendimento permitir-lhe-ia construir um observatório na ilha, equipá-lo e mantê-lo. A oferta foi aceite e, em poucos anos, ficou construído Uraniborg ("Castelo dos Céus"). Era uma estrutura enorme, com quatro observatórios, uma biblioteca, um laboratório, lojas e moradias para o pessoal, os alunos e os observadores. Tinha também uma oficina completa de impressão. Tycho calculou que o observatório tenha custado a Frederico II mais do que uma tonelada de ouro. Para a altura, aquele laboratório magnífico era pelo menos tão importante, complexo e caro como alguns dos maiores centros de investigação do nosso tempo. Uraniborg foi um lugar onde cientistas, técnicos e estudantes de muitas terras puderam juntar-se a estudar astronomia. Constituiu uma unidade de acção, um esforço de grupo sob a orientação de um cientista imaginativo, para o avanço das fronteiras do conhecimento numa ciência.

Embora existissem instrumentos de visão de precisão, todas as observações foram feitas a olho nu — o telescópio só seria inventado 50 anos depois.

Em 1577, Tycho observou um cometa brilhante, um objecto cujo movimento através do céu parecia ser errático, ao contrário dos movimentos ordenados dos planetas. Para determinar a distância ao cometa, Tycho comparou a sua posição, tal como observado da Dinamarca, com as suas posições, tal como observadas de outros pontos na Europa. Alguns destes locais distavam uns dos outros de centenas de quilómetros. Contudo, em cada momento todos os observadores indicavam para o cometa a mesma posição relativamente às estrelas. Em contraste, a posição da Lua era mensuravelmente diferente, quando

Há dois artigos sobre cometas na *Colectânea de Textos:* «The Great Comet of 1965» e «The Boy Who Redeemed His Father's Name».

O brilhante cometa de 1965.

observada de lugares assim tão distantes. Portanto, concluiu Tycho, o cometa deveria estar várias vezes mais distante que a Lua.

Era uma conclusão importante. Até essa altura tinha-se acreditado que os cometas eram de alguma maneira acontecimentos locais, como as nuvens ou os relâmpagos. Os cometas tinham agora que ser considerados como objectos astronómicos distantes, já do domínio das coisas eternas que existiam para lá da Lua. Mais espantoso ainda, pareciam atravessar as esferas cristalinas que, de uma maneira geral, se acreditava transportarem os planetas. O livro que Tycho escreveu a respeito deste cometa teve uma larga difusão e ajudou a minar a fé nas velhas considerações acerca da natureza dos céus.

GE 6.11.

Q11 Qual o acontecimento que estimulou o interesse de Tycho pela astronomia?

Q12 De que maneiras se parecia o observatório de Tycho com um moderno centro de investigação?

Q13 Por que eram importantes as conclusões de Tycho acerca do cometa de 1577?

6.7 As observações de Tycho

Leia-se alguma coisa sobre o projecto e a construção do telescópio de 200 polegadas de Hale, no Monte Palomar, para se apreciar um exemplo mais moderno relativo a este mesmo problema da instrumentação. Veja-se também o artigo da *Colectânea de Textos* intitulado «A Night at the Observatory».

A fama de Tycho resulta da devoção de toda uma vida à realização de observações invulgarmente precisas das posições das estrelas, do Sol, da Lua e dos planetas, trabalho efectuado antes da invenção do telescópio. Ao longo dos séculos, as posições dos objectos celestes foram registadas por muitos observadores talentosos, mas a precisão do trabalho de Tycho foi muito superior à dos melhores astrónomos que o precederam. Como foi Tycho Brahe capaz de fazer o que nenhum antes tinha conseguido?

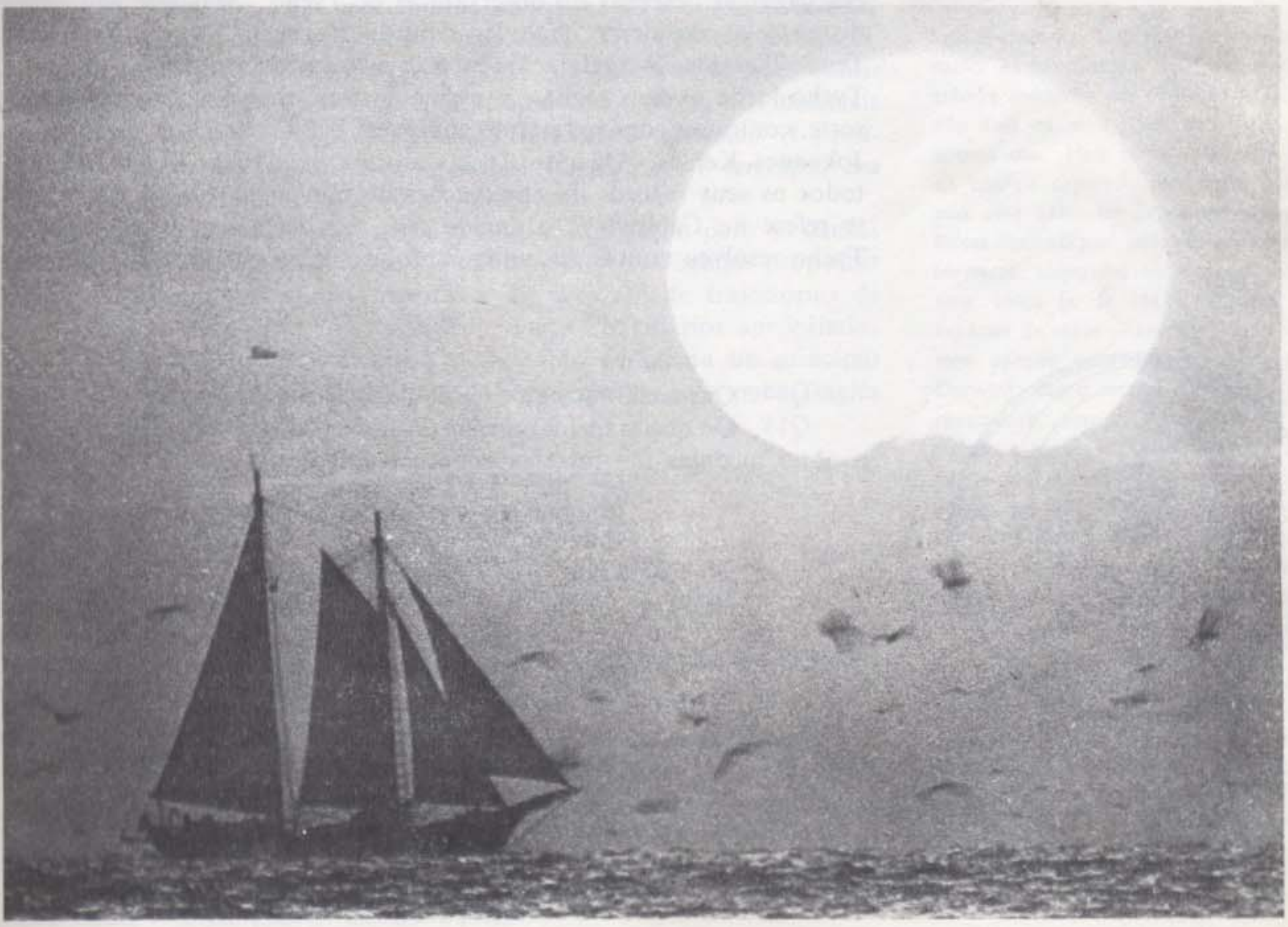
Uma das características de Tycho foi certamente a singeleza de propósitos. Sabia que seria necessário fazer durante muitos anos observações extremamente precisas. Para tal, desenvolveu instrumentos que fornecessem medidas consistentes. Felizmente, ele possuía quer o engenho mecânico indispensável para conceber tais instrumentos, quer os fundos para pagar a sua construção e utilização.

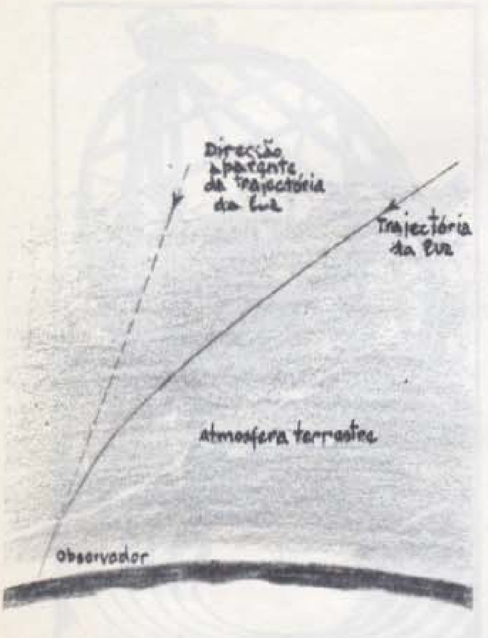
O primeiro desenvolvimento que Tycho efectuou nos instrumentos astronómicos conhecidos ao tempo foi torná-los maiores. A maior parte dos primeiros instrumentos utilizados era de dimensões relativamente pequenas, de maneira a poderem ser transportados por uma só pessoa. Em comparação com aqueles, os instrumentos de Tycho eram gigantescos. Por exemplo, um dos seus primeiros engenhos para a medição da altitude angular dos planetas (que se mostra na figura ao lado) tinha um raio de cerca de dois metros. Este instrumento, feito de madeira, era tão grande que foram necessários vários homens para o colocar na posição correcta. Além do mais, Tycho colocou os seus instrumentos sobre pesadas e sólidas fundações, ou então fixou-os a uma parede que corresse exactamente na direcção norte-sul. Aumentando a estabilidade dos instrumentos, Tycho aumentou a confiança que poderia depositar nas medidas, efectuadas durante longos intervalos de tempo. Ao longo da sua carreira, Tycho criou ainda melhores instrumentos de observação, réguas mais precisas e sistemas de suporte mais fortes, e fez dezenas de outras alterações no seu projecto, aumentando a precisão das observações.

Tycho não se limitou a conceber melhores instrumentos para a realização das suas observações; determinou e especificou também os

Um dos instrumentos de visão de Tycho. Infelizmente, os instrumentos de Tycho foram destruídos em 1619, durante a Guerra dos Trinta Anos.

Distorção aparente do Sol, no ocaso. A trajectória da luz é deflectida pela atmosfera terrestre, fazendo com que o Sol apareça achatado e de bordos mal definidos.





Refracção, ou deflexão, da luz de uma estrela pela atmosfera terrestre. A figura exagera largamente o efeito da refracção, relativamente ao que acontece na realidade.

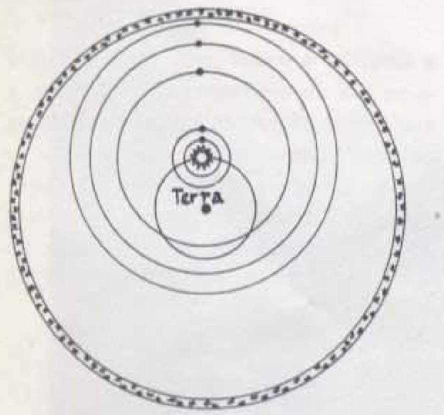
limites de precisão reais de cada um deles. Compreendeu que a construção de instrumentos cada vez maiores não acarretava necessariamente uma maior precisão; por fim seria a própria dimensão do aparelho a introduzir erros, já que o seu peso forçaria e torceria as suas partes. Tycho tentou portanto construir os seus aparelhos tão grandes e fortes quanto pôde, sem ao mesmo tempo introduzir erros devidos à torção. Além disso, num estilo bem moderno, Tycho calibrou cada um dos instrumentos e determinou a sua margem de erro. (Hoje em dia, muitos dos instrumentos científicos concebidos para trabalho de precisão, comercialmente disponíveis, são acompanhados de um relatório de medidas, normalmente na forma de uma tabela, ou de correcções a serem aplicadas às medições efectuadas).

Como Ptolomeu e como os observadores astronómicos muçulmanos, Tycho sabia que a luz que tinha de qualquer corpo celeste era inclinada para baixo pela atmosfera terrestre, tanto mais quanto mais próximo estava o objecto do horizonte. Para aumentar a precisão das suas observações, Tycho determinou cuidadosamente a refracção ocorrida, de modo a corrigir cada observação dos efeitos devidos à refracção. Um tal cuidado era essencial, já que se pretendiam registos tão precisos quanto possível.

Tycho trabalhou em Uraniborg de 1576 a 1597. Depois da morte de Frederico II, o governo dinamarquês mostrou-se menos interessado em pagar as despesas do observatório de Tycho. Mas este não estava disposto a considerar qualquer redução no custo da sua actividade. Tendo-lhe sido prometida ajuda pelo imperador Rudolfo da Boémia, Tycho levou os seus registos e vários instrumentos para Praga. Aí, por sorte, contratou como assistente um jovem hábil e imaginativo, chamado Johannes Kepler. Quando Tycho morreu, em 1601, Kepler recolheu todos os seus registos de observações do movimento de Marte. Como se refere no Capítulo 7, a análise feita por Kepler às observações de Tycho resolveu muitos dos antigos problemas do movimento planetário.

Q14 Que melhoramentos fez Tycho nos instrumentos astronómicos?

Q15 De que maneira corrigiu Tycho as suas observações, de modo a obter medidas tão precisas quanto possível?



As esferas principais do sistema universal de Tycho Brahe. A Terra estava fixa e constituía o centro do universo. Os planetas moviam-se em torno do Sol, enquanto este, por sua vez, se movia em torno da Terra fixa.

6.8 O sistema de compromisso de Tycho

As observações de Tycho destinavam-se a servir de base a uma nova teoria do movimento planetério, por ele esboçada num livro anterior. Apercebendo-se da simplicidade do sistema de Copérnico, no qual os planetas se moviam em torno do Sol. Tycho não pôde contudo aceitar a ideia de que a Terra tivesse algum movimento. No sistema de Tycho, todos os planetas, excepto a Terra, se moviam em torno do Sol, mas este movia-se em torno de uma Terra estacionária, como se mostra no esboço apresentado ao lado. Assim concebeu ele um modelo de compromisso que, no seu entender, reunia os melhores aspectos dos sistemas de Ptolomeu e de Copérnico. Todavia, Tycho não publicou quaisquer pormenores quantitativos da sua teoria.

A solução de compromisso de Tycho foi aceite apenas por algumas pessoas. Aqueles que aceitavam o modelo de Ptolomeu opuseram-se à proposta de Tycho porque os planetas se moviam em torno do Sol. Os que defendiam o modelo de Copérnico opuseram-se porque a Terra era mantida estacionária. Assim, continuou a discussão entre aqueles que sustentavam a posição aparentemente auto-evidente de que a Terra estava imóvel e aqueles que aceitavam, pelo menos como ensaio, as estranhas e excitantes propostas de Copérnico de que a Terra poderia rodar e revolucionar em torno do Sol. A escolha baseava-se em preferências filosóficas ou estéticas, já que qualquer dos três sistemas dava conta, igualmente bem, dos dados experimentais conhecidos.

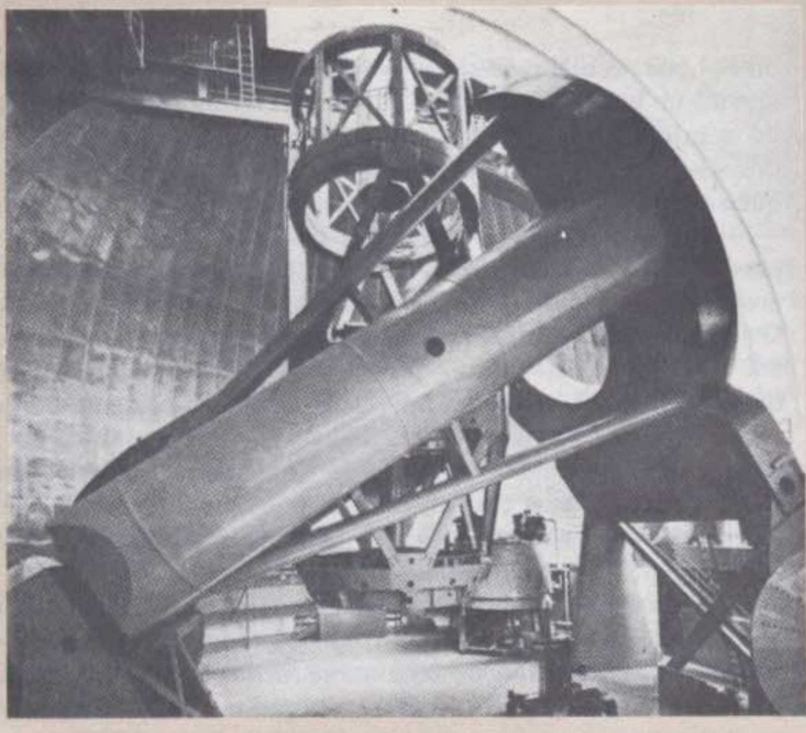
Todas as teorias planetárias desenvolvidas até aquela altura tinham tido como único objectivo a obtenção de um processo pelo qual pudessem ser previstas, de uma maneira razoavelmente precisa, as posições dos planetas. Nos termos utilizados na Unidade 1, poderiam ser designadas por descrições cinemáticas. As causas dos movimentos — aquilo a que chamamos hoje dinâmica — não tinham sido consideradas em pormenor. Os movimentos angulares dos objectos celestes eram "naturais", como tinha dito Aristóteles. E todos concordavam, incluindo Ptolomeu, Copérnico e Tycho. Os objectos celestes continuavam a ser considerados como completamente diferentes dos materiais terrestres e comportando-se de maneira totalmente distinta. *A possibilidade de uma teoria unificada dos movimentos celestes e terrestres era uma ideia revolucionária ainda a ser proposta.*

Isto anuncia o primeiro exemplo da orientação extremamente bem sucedida da ciência moderna em direcção à síntese: não dois ou mais tipos de ciência, mas apenas um. Mais tarde: não uma física da energia separada para cada assunto, mas uma única lei de conservação; não físicas distintas para os fenómenos ópticos, térmicos, eléctricos ou magnéticos, mas uma única (a de Maxwell); não duas espécies de seres — animais e homens — mas apenas uma (na perspectiva de Darwin); não o espaço e o tempo separadamente, mas o espaço-tempo; não massa e energia separadamente, mas massa-energia, etc. Pelo menos até certo ponto, os grandes avanços da ciência são resultado de audaciosas generalizações de um dado conjunto de ideias a novos campos. O perigo consiste na extrapolação falsa — que a ciência, por si própria, possa resolver todos os problemas, inclusive os de natureza política, de saúde ou de educação, e «explicar» todas as emoções humanas. A grande maioria dos cientistas, e os melhores entre eles, não pensam desta maneira, mas muitos não-cientistas acreditam falsamente que assim é.

Na medida em que não existia qualquer explicação para as causas do movimento, permanecia de pé a questão sobre se as órbitas propostas para os planetas nos vários sistemas eram na verdade trajectórias de objectos reais no espaço, ou apenas esquemas imaginários apropriados para a efectivação de cálculos. A posição do problema no princípio do século XVII foi, mais tarde, muito bem descrita pelo poeta inglês John Milton, em *Paradise Lost:*

> ...A fábrica dos céus ele abandona
> A fátuas conjecturas e argumentos,
> Talvez para sorrir quando insensatos,
> Com vastas opiniões, lidado estudo,
> Componham no porvir do Céu os moldes,
> As estrelas ao cálculo submetam,
> Dêem vibração à máquina do Mundo,
> Desmanchem-n'a, fabriquem-n'a de novo
> Para de inconvenientes ressalvá-la, —
> Quando cinjam com círculos a esfera
> Concêntricos, excêntricos, confusos,
> Com ciclos, epiciclos, uns sobre outros. (*)

* Extraído da tradução portuguesa de «*Paraíso Perdido*», de Jon Milton, por A. J. Lima Leitão, 1938, Ed. Empresa Literária Universal.



Edifícios e instrumentos de alguns observatórios modernos. Em cima: o telescópio de 200 polegadas de Monte Palomar e a respectiva cúpula. Em baixo: o conjunto de edifícios do Monte Wilson.

Veremos que o sucesso obtido pela dinâmica universal de Newton conduziu ao convencimento, que se manteve, cheio de confiança, durante cerca de dois séculos, de que os cientistas estavam a descrever o "mundo real". Os últimos capítulos deste texto, que tratam de descobertas e teorias recentes, mostrarão que os cientistas e filósofos actuais estão muito menos convencidos da utilidade para a ciência da noção de senso comum de "realidade". GE 6.12.

Q16 De que maneiras se assemalha o sistema de movimentos planetários de Tycho aos sistemas de Ptolomeu e de Copérnico?

6.1 Os materiais de estudo mais apropriados para o capítulo 6 são os seguintes:

Experiências
A forma da órbita terrestre
Usando lentes para construir um telescópio

Actividades
Duas actividades a respeito de sistemas de referência

Textos da Colectânea
"The boy who redeemed his father's name"
"The great comet of 1965"
"A night at the observatory"

Filme sem-fim
Movimento retrógrado — modelo heliocêntrico

6.2 O primeiro dos diagramas que se mostram na página seguinte mostra uma série de posições numeradas do Sol e de Marte (no seu epiciclo), marcadas a intervalos de tempo no seu movimento em torno da Terra, tal como é descrito pelo sistema de Ptolomeu. Poder-se-á refazer facilmente o desenho, de modo a considerar não o sistema de referência da Terra, mas o do Sol. Desenhe-se um círculo, representando a dimensão do Sol, no meio de uma fina folha de papel; isso constituirá um sistema de referência centrado no Sol. Coloque-se o círculo sobre cada uma das sucessivas posições do Sol, marcando-se a correspondente posição de Marte, bem como a da Terra. (Mantenha-se a folha de papel bem lisa). Ao fazer-se isto para todas as 15 posições possuir-se-á um diagrama dos movimentos de Marte e da Terra, tal como são vistos a partir de um sistema de referência centrado no Sol.

6.3 Que razões apresentou Copérnico para acreditar que o Sol estava fixo no centro do sistema planetário, ou lá próximo?

6.4 Pense-se nos ponteiros das horas e dos minutos de um relógio qualquer. Se se rodarem os ponteiros, a partir da posição das 12:00 horas, quantas vezes passará o ponteiro dos minutos pelo das horas, em 12 horas? Faça-se a experiência. Será possível, a partir do resultado obtido, *determinar uma relação pela qual se possa concluir que* o período do ponteiro dos minutos, no seu movimento em torno do centro, é de uma hora?

6.5 O diagrama no topo, à direita, na página seguinte, mostra os movimentos de Mercúrio e de Vénus, para leste e para oeste do Sol, tal como foram observados da Terra em 1966-1967. A escala de tempo está indicada a intervalos de 10 dias, ao longo da linha central, que representa a posição do Sol.

(a) Será capaz de explicar por que é que Mercúrio e Vénus parecem mover-se mais rapidamente de leste para oeste, do que de oeste para leste?
(b) Será capaz de determinar um período para o movimento aparente de Mercúrio no céu, relativamente ao Sol, a partir deste diagrama?
(c) Será capaz de determinar um período para o movimento orbital real de Mercúrio em torno do Sol?
(d) Quais as principais causas de erro nos resultados que obteve?
(e) Poderá estimar, da mesma maneira, o período orbital de Vénus?

6.6 Procure descobrir o raio orbital de um novo planeta que fosse descoberto, a partir da sequência de raios orbitais de Mercúrio a Saturno. Em que é que se baseou?

6.7 Se tiver os conhecimentos suficientes de trigonometria, tente resolver este problema: o maior desvio anual observado na posição das estrelas é de 1/2500 de grau. Qual é a distância que separa a Terra da estrela mais próxima (em UA)?

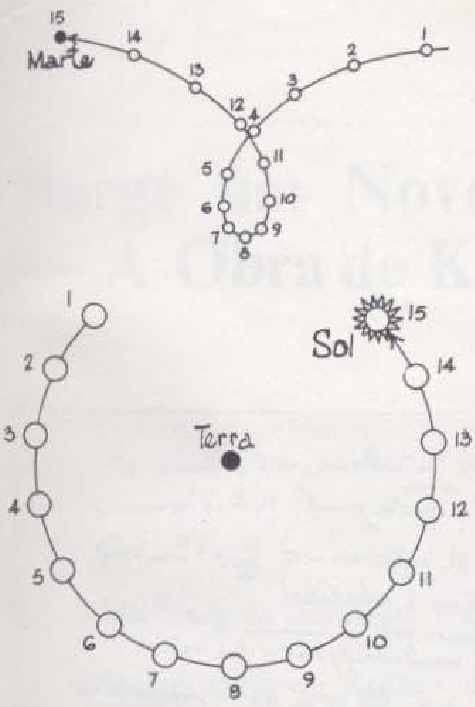
6.8 Como teria um astrónomo ptolomaico modificado o sistema geocêntrico, de maneira a explicar a paralaxe estelar observada?

6.9 Conhece algum conflito entre teorias científicas e o senso comum, hoje em dia?

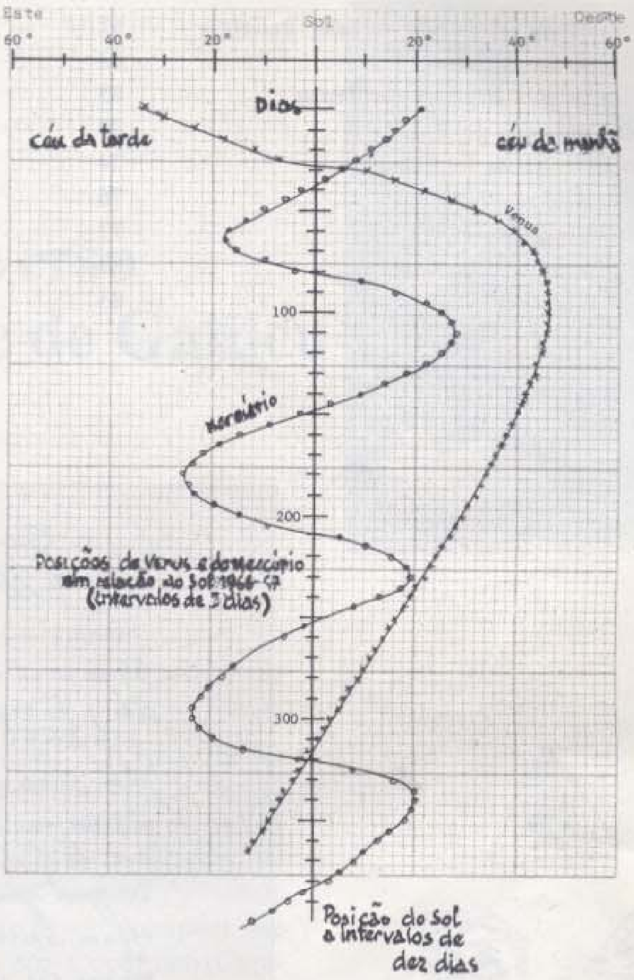
6.10 De que maneira encorajou o sistema de Copérnico a suspeita de que pudesse existir vida em outros locais que não a Terra? Considera-se hoje seriamente essa possibilidade? Que questões importantes são levantadas por essa hipótese?

6.11 Como poderia explicar o movimento observado para o cometa de Halley, em 1909-1910, e que se mostra na carta estelar reproduzida na página seguinte?

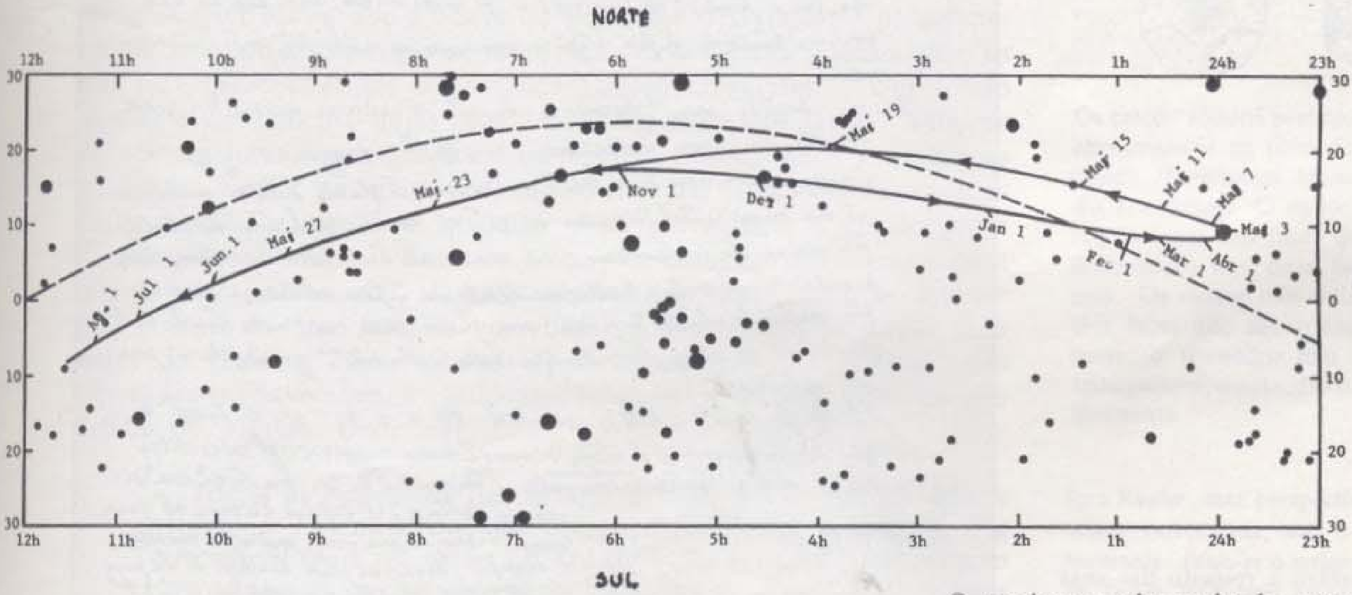
6.12 Em que medida sente que o sistema de Copérnico — com todos os seus muitos movimentos ao longo de excêntricos e epiciclos — descreve trajectórias reais no espaço, e não constitui apenas mais um processo de calcular as posições planetárias?



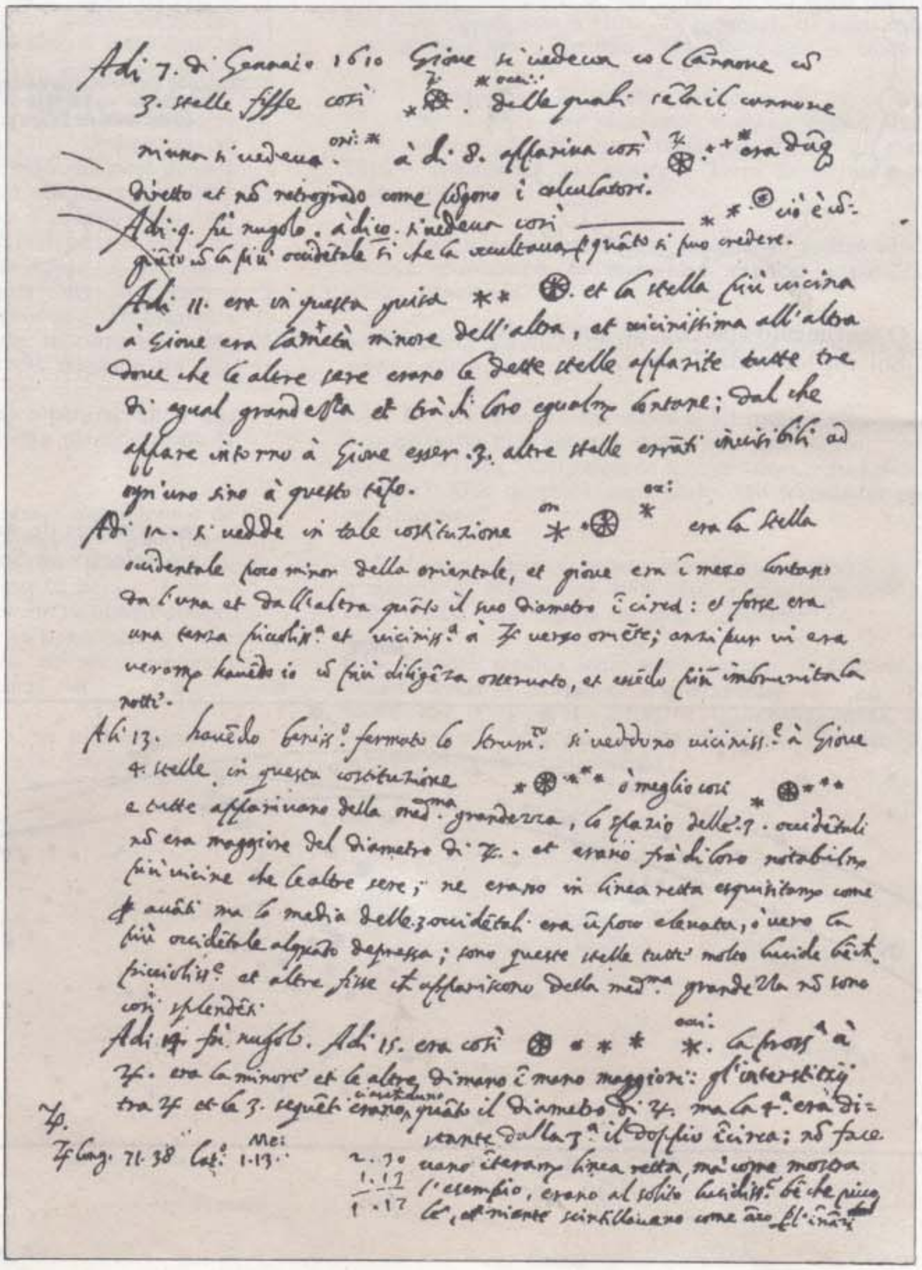
O movimento aparente de Marte e do Sol em torno da Terra.



As posições de Vénus e de Mercúrio em relação ao Sol.



O movimento observado do cometa de Halley, em 1909-1910.


Adi 7. di Gennaio 1610 Giove si vedeva col Cannone con
3. stelle fisse così * ⊛ . * delle quali senza il cannone
niuna si vedeva. à dì 8. appariva così ⊛ * * * era dunq
diretto et non retrogrado come pongono i calculatori.
Adi 9. si nuvolò. à dì 10. si vedeva così * * ⊛ ciò è con-
giunto con la più occidentale si che la occultava per quanto si può credere.
Adì 11. era in questa guisa * * ⊛. et la stella più vicina
à Giove era la metà minore dell'altra, et vicinissima all'altra
dove che le altre sere erano le dette stelle apparite tutte tre
di egual grandezza et tra di loro egualmente lontane; dal che
appare intorno à Giove esser 3. altre stelle erranti invisibili ad
ogn'uno sino à questo tempo.
Adì 12. si vedde in tale costituzione * ⊛ * era la stella
occidentale poco minor della orientale, et giove era in mezzo lontano
da l'una et dall'altra quanto il suo diametro in circa: et forse era
una terza piccolissima et vicinissima à ♃ verso oriente; anzi pur vi era
veramente havendo io con più diligenza osservato, et essendo più imbrunita la
notte.
Adì 13. havendo benissimo fermato lo Strumento si veddono vicinissime à Giove
4. stelle in questa costituzione * ⊛ * * * ò meglio così * ⊛ * * *
e tutte apparivano della medesima grandezza, lo spazio delle 3. occidentali
non era maggiore del diametro di ♃. et erano fra di loro notabilmente
più vicine che le altre sere; ne erano in linea retta esquisitamente come
per avanti ma la media delle 3 occidentali era un poco elevata, ò vero la
più occidentale alquanto depressa; sono queste stelle tutte molto lucide ben'
piccolissime et altre fisse et appariscono della medesima grandezza non sono
così splendenti.
Adì 14 si nuvolò. Adì 15. era così ⊛ * * * *. la prossima à
♃. era la minore et le altre di mano in mano maggiori: gl'interstitii
tra ♃ et le 3. seguenti erano quanto il diametro di ♃. ma la 4a era di-
stante dalla 3a il doppio in circa; non face-
vano esattamente linea retta, ma come mostra l'esempio, erano al solito lucidissime ben che picco-
le, et niente scintillavano come anco gl'inanzi
♃ long. 71.38 lat. 1.13
2.30
1.13
1.17

Notas de Galileu a respeito das suas observações começadas "no dia 7 de Janeiro de 1610".

CAPÍTULO 7

Surge um Novo Universo — A Obra de Kepler e de Galileu

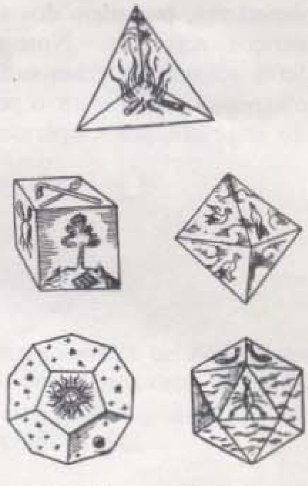
7.1 O abandono do movimento circular uniforme

GE 7.1.

O maior desejo de Kepler foi o de aperfeiçoar a teoria heliocêntrica. Contemplava a harmonia e a simplicidade daquela teoria com "incrível e arrebatador deleite". Para Kepler, tais padrões de ordem geométrica e de relação numérica constituíam as chaves do espírito de Deus. Para continuar a descoberta desses padrões através da teoria heliocêntrica, Kepler tentou explicar na sua primeira obra importante o espaçamento das órbitas planetárias, calculado por Copérnico (Capítulo 6, página 39).

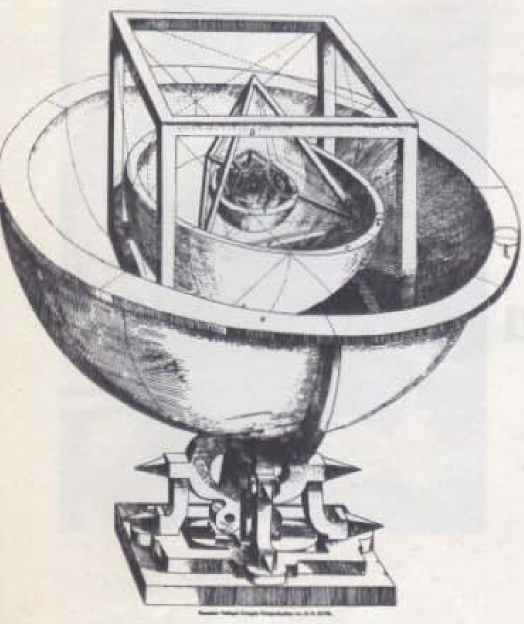
Kepler procurava as razões por que apenas eram visíveis seis planetas (incluindo a Terra) e por que estavam eles espaçados como estavam. Excelentes questões científicas, embora ainda hoje seja difícil responder-lhes. Kepler sentiu que a chave do problema deveria estar na geometria, e começou a interrogar-se sobre se haveria alguma relação entre os seis planetas conhecidos e os cinco "sólidos regulares". Um sólido regular é um poliedro cujas faces têm lados e ângulos iguais. Sabia-se do tempo dos Gregos que existiam apenas cinco sólidos geométricos regulares. Kepler imaginou um modelo no qual estivessem encadeados os cinco sólidos regulares, qualquer coisa parecida com um conjunto de esferas concêntricas. Entre os cinco sólidos existiriam espaços para quatro esferas planetárias. Uma quinta esfera poderia existir no interior do conjunto e uma sexta à sua volta. Kepler procurou então uma sequência para os cinco sólidos; se tocassem apenas as esferas, isso espaçá-las-ia das mesmas distâncias relativas do centro que as das órbitas planetárias. Disse ele:

> Tomei as dimensões das órbitas planetárias de acordo com a astronomia de Copérnico, que coloca o Sol imóvel no centro e a Terra móvel quer em torno do Sol quer em torno do seu próprio eixo; e mostrei que as diferenças das suas órbitas correspondiam às cinco figuras pitagóricas regulares...



Os cinco "sólidos perfeitos", como são apresentados na obra de Kepler intitulada *Harmonices Mundi* (Harmonia do Universo). O cubo é um sólido regular com seis faces quadradas. O dodecaedro tem doze faces pentagonais. Os outros três sólidos regulares têm faces que são triângulos equiláteros: o tetraedro tem quatro faces triangulares, o octaedro oito e o icosaedro vinte.

Para Kepler, esta perspectiva geométrica estava relacionada com o conceito de harmonia. (Veja-se o artigo da *Colectânea de Textos* intitulado «Kepler's Celestial Music»).



Um modelo da explicação dada por Kepler para o espaçamento das órbitas planetárias, por meio dos sólidos geométricos regulares. Note-se que as esferas planetárias eram suficientemente espessas para incluir o pequeno epiciclo utilizado por Copérnico.

À custa de várias tentativas, Kepler encontrou uma maneira de combinar os sólidos de modo a que as esferas reproduzissem as distâncias planetárias reais, com um erro inferior a cinco por cento. Para Kepler, este arranjo notável (mas, como sabemos hoje, inteiramente acidental) explicou simultaneamente os espaçamentos dos planetas e o facto de serem apenas seis. Além disso, confirmou-lhe a unidade que esperava existir entre a geometria e as observações científicas. Os resultados de Kepler, publicados em 1597, demonstraram a sua imaginação e a sua habilidade para o cálculo. E tornaram-no conhecido aos olhos de grandes cientistas, como Galileu e Tycho. Como consequência, Kepler foi convidado a ser um dos assistentes de Tycho no seu novo observatório em Praga, em 1600.

Aí foi dada a Kepler a tarefa de determinar em todo o pormenor a órbita de Marte. Este problema invulgarmente difícil não tinha sido resolvido por Tycho ou pelos seus outros assistentes. Como se torna aparente, a investigação do movimento de Marte era o ponto de partida a partir do qual Kepler poderia realinhar o estudo do movimento celeste, tal como Galileu usou o movimento de queda dos corpos para realinhar o estudo do movimento terrestre.

Kepler começou o seu estudo sobre Marte tentando ajustar as observações com movimentos sobre um excêntrico e um equanto. Tal como Copérnico, Kepler eliminou a necessidade de utilização do epiciclo grande, colocando o Sol imóvel ao centro e a Terra a rodar à sua volta (veja-se a página 35). Mas considerou uma hipótese diferente das de Copérnico. Relembre-se que este tinha rejeitado o equanto, com o argumento de se tratar de um tipo impróprio de movimento, mas que tinha utilizado pequenos epiciclos. Kepler usou um equanto, mas recusou-se a usar sequer um pequeno epiciclo. Para Kepler, o epiciclo parecia ser "contrário à física", porque o seu centro estava vazio, e o espaço vazio não podia exercer qualquer força sobre o planeta. Assim, logo desde o início do seu estudo sobre Marte, Kepler partia do princípio de que as órbitas eram reais e de que o movimento tinha causas físicas. Mesmo apesar de o seu professor o aconselhar a fazer apenas hipóteses "astronómicas" (de carácter observacional) e não físicas, Kepler apegou-se teimosamente à sua ideia de que os movimentos deveriam ser produzidos e explicados por forças. Ao publicar finalmente os seus resultados sobre Marte no livro *Astronomia Nova,* o subtítulo escolhido foi *Física Celeste.*

Mantendo-se dentro da física aristotélica, Kepler acreditava que era necessário uma força para arrastar os planetas ao longo dos seus círculos e não para os manter nesses mesmos círculos.

Kepler lutou durante um ano e meio para tentar reproduzir as observações de Tycho sobre Marte à custa de vários arranjos de um excêntrico e de um equanto. Quando, ao fim de 70 tentativas, o sucesso parecia finalmente próximo, fez uma descoberta desencorajante. Embora conseguisse reproduzir razoavelmente bem o movimento de Marte em longitude (para leste e para oeste, ao longo da eclíptica), os erros eram grosseiros relativamente à latitude (para norte e para sul da eclíptica). Todavia, o seu melhor ajuste, mesmo em longitude, apresentava diferenças de oito minutos de arco entre as posições observadas por Tycho e as previstas pelo modelo.

GE 7.2.

Oito minutos de arco, cerca de um quarto do diâmetro da Lua, poderá não parecer uma diferença por aí além. Outros poderiam ter sido tentados a desprezá-la, atribuindo-a talvez a erros de observação.

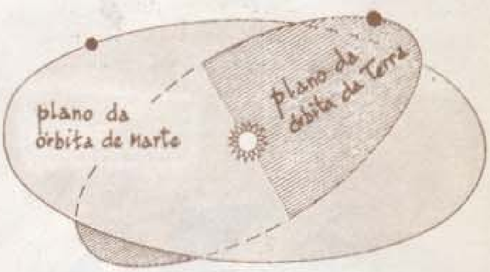
Mas Kepler sabia, pelo seu próprio estudo, que os instrumentos e as observações de Tycho raramente erravam sequer por dois minutos de arco. Aqueles oito minutos de arco significavam para Kepler que o seu melhor sistema, utilizando os velhos e aceites excêntrico e equanto, nunca seria adequado para reproduzir as observações.

Kepler escreveu na sua *Astronomia Nova:*

> Já que a bondade divina nos concedeu Tycho Brahe, o mais diligente observador, cujas observações trouxeram à luz um erro de oito minutos nos cálculos ptolomaicos, no caso de Marte, é obtendo um ajuste perfeito que podemos agradecer e honrar este favor de Deus, com mente agradecida. Obtê-lo-emos certamente, de modo a poder finalmente mostrar a verdadeira forma dos movimentos celestes (apoiando-nos nestas provas contra o sofisma das hipóteses então aceites). Eu próprio prepararei este caminho para outros, nos capítulos seguintes, tanto quanto mo permitirem as minhas escassas capacidades. Porque se pensasse que os oito minutos de longitude podiam ser ignorados, teria corrigido imediatamente a hipótese que ele fez antes e que funcionou razoavelmente. Mas tal como acontece na realidade, porque não podem ser ignorados, estes oito minutos, sozinhos, prepararam o caminho para uma reformulação total da astronomia e são o assunto que se tornou numa parte fundamental deste trabalho.

Felizmente, Kepler tinha efectuado anteriormente uma descoberta fundamental para o seu trabalho posterior. Descobrira que as órbitas da Terra e dos outros planetas se situavam em planos que passavam pelo Sol. Ptolomeu e Copérnico necessitavam de explicações especiais para o movimento dos planetas para norte e para sul da eclíptica, mas Kepler descobriu que estes movimentos eram simples consequência do facto de as suas órbitas estarem em planos inclinados relativamente ao plano da órbita da Terra.

Kepler concluiu que a órbita não era circular e que não havia ponto algum em torno do qual o movimento fosse uniforme. Deste modo, gorava-se o propósito de Platão de ajustar círculos perfeitos aos céus, propósito que, durante vinte séculos, tinha constituído a preocupação dos espíritos de muitos homens brilhantes. Kepler dispunha das mais perfeitas observações jamais feitas, mas não possuía qualquer teoria que as explicasse. Teria que começar tudo de novo, de modo a responder a duas novas perguntas. Primeira, qual *é* a forma da órbita seguida por Marte? Segunda, como varia a velocidade do planeta à medida que ele se desloca ao longo da sua órbita?



O diagrama mostra uma vista, quase de topo, dos planos orbitais da Terra e de outro planeta, qualquer deles intersectando o Sol.

Q1 Qual a tarefa atribuída a Kepler, ao tornar-se assistente de Tycho Brahe?

Q2 Em que se baseou Kepler para concluir que o problema de Platão, a descrição dos movimentos dos planetas pela combinação de movimentos circulares, não poderia ser resolvido?

7.2 A lei das áreas de Kepler

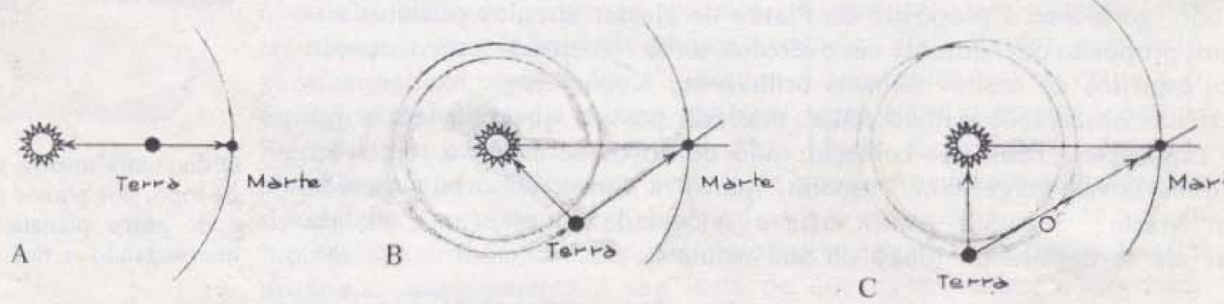
O problema abordado por Kepler era gigantesco. Para o resolver seriam necessárias toda a sua imaginação e habilidade de cálculo.

Como bases para o seu estudo, Kepler conhecia as direcções observadas por Tycho para Marte e para o Sol, em determinadas datas.

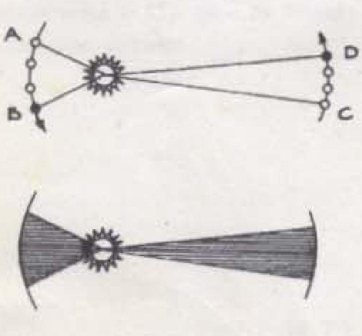
Mas estas observações tinham sido feitas de uma Terra em movimento, cuja órbita não era bem conhecida. Kepler apercebeu-se de que se tornava necessário determinar primeiro a forma da órbita da Terra de uma maneira mais precisa, de modo a poder saber a sua posição nas datas em que tinham sido feitas as várias observações de Marte. Seria então possível usar as observações para determinar a forma e as dimensões da órbita de Marte. Finalmente, seria preciso descobrir qualquer espécie de regularidade que descrevesse a rapidez com que Marte se movia ao longo de diversas partes da sua órbita, para poder prever as suas posições.

Seguindo aqui a sua brilhante análise e, especialmente, repetindo parte do seu trabalho no laboratório, veremos a série de problemas por ele resolvidos.

Para obter a órbita da Terra, começaremos por considerar os instantes em que o Sol, a Terra e Marte estão praticamente em linha recta (Fig. A). Ao fim de 687 dias, como descobriu Copérnico, Marte regressará ao mesmo lugar na sua órbita (Fig. B). Naturalmente, a Terra *não* estará, nessa altura, no mesmo local da sua órbita em que estava à data da primeira observação. Mas, como mostram as figuras B e C, serão conhecidas as direcções do Sol e de Marte, tal como vistas a partir da Terra em relação às estrelas fixas. O cruzamento das linhas de vista para o Sol e para Marte deverá ser um ponto sobre a órbita da Terra. Trabalhando com vários conjuntos de observações, feitos com intervalos de 687 dias (um "ano" marciano), Kepler foi capaz de determinar de maneira relativamente precisa a forma da órbita terrestre.



A órbita encontrada por Kepler para a Terra assemelhava-se a um círculo, com o Sol ligeiramente descentrado. A partir de um gráfico da sua forma e do registo da posição aparente do Sol em cada dia do ano, poderia determinar a posição da Terra na sua órbita e a sua velocidade ao longo dela. Kepler possuía agora uma órbira e um horário para o movimento da Terra. Na experiência intitulada "A Forma da Órbita da Terra" efectua-se o traçado de um gráfico semelhante.



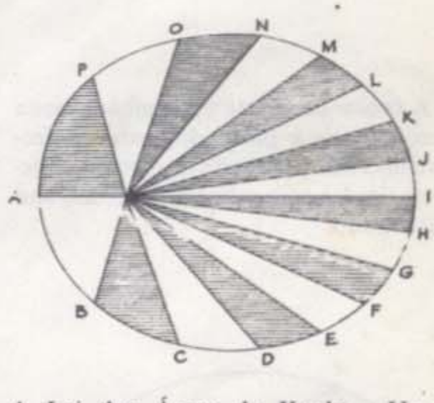
Tornava-se evidente do gráfico desenhado por Kepler que a Terra se movia tanto mais rapidamente quanto mais próxima estava do Sol. (Kepler interrogou-se sobre a razão deste facto e imaginou que o Sol poderia exercer alguma espécie de força que arrastasse os planetas ao longo das suas órbitas; a sua preocupação acerca da causa física do movimento planetário marcou uma alteração da atitude perante o movimento nos céus). Os desenhos à esquerda representam (com grande exagero) o movimento da Terra em duas partes da sua órbita. As diferentes posições orbitais estão separadas por iguais intervalos de tempo. Entre os pontos A e B, a distância é relativamente grande, pelo que o planeta deve-se ter movido rapidamente; entre os pontos C e D o movimento deve ter sido muito mais lento. Kepler reparou, no entanto, que as duas áreas (varridas por uma linha hipotética esticada entre o Sol e a Terra) são iguais. Supõe-se que Kepler tenha calculado estas áreas apenas para as posições em que os dois planetas, Terra e Marte, estão mais próximos e mais afastados do Sol. No entanto, a maravilhosa simplicidade da relação obtida tê-lo-á levado a concluir da sua validade geral, em relação a toda a órbita. Na sua forma geral, a Lei das Áreas diz: *A linha que une o Sol ao planeta em movimento varre áreas que são proporcionais aos intervalos de tempo*. Mais tarde, depois de Kepler ter descoberto a forma exacta das órbitas, a sua lei das áreas tornou-se uma ferramenta poderosa para a previsão das posições ao longo delas. Usaremos ambas as leis na próxima secção, observando pormenorizadamente a sua acção.

GE 7.4.

Uma outra maneira de exprimir esta relação para as posições mais próxima e mais afastada seria dizer que as velocidades eram inversamente proporcionais à distância; mas esta regra *não* é generalizável para qualquer outro ponto da órbita. (Explica-se nas páginas 72 e 73 uma modificação desta regra que é válida para qualquer ponto da órbita).

Poderá ser surpreendente que a primeira regra citada a respeito dos movimentos dos planetas se refira às áreas varridas pela linha entre o Sol e o planeta. Depois de se terem considerado círculos, círculos excêntricos, epiciclos e equantos, algo de inesperado se manifesta: a primeira propriedade constante do movimento orbital é a área varrida na unidade de tempo. (Como veremos no capítulo 8, esta lei fundamental da natureza aplica-se a todas as órbitas do sistema solar e também às estrelas duplas). Aqui estava algo que, além de novo e diferente, atraía ainda a atenção sobre o papel central desempenhado pelo Sol, apoiando assim a fé que Kepler sentia em relação à então ainda largamente desprezada ideia de Copérnico de um sistema heliocêntrico.

Como se verá, o restante trabalho de Kepler seria de pequena utilidade sem esta descoberta básica, embora a regra não dê qualquer sugestão acerca do porquê da existência desta regularidade. A lei das áreas descreve as taxas relativas com as quais a Terra e Marte (e, pensou Kepler, qualquer outro planeta) se movem em qualquer ponto das suas órbitas. A regra era inaplicável a Marte, supondo uma órbita circular, pelo que Kepler se atirou à tarefa de descobrir a forma exacta da sua órbita.



A Lei das Áreas de Kepler. Um planeta move-se ao longo da sua órbita a uma taxa tal que a linha que une o Sol ao planeta varre áreas proporcionais aos intervalos de tempo. O tempo necessário para percorrer AB é o mesmo que o necessário para percorrer BC, CD, etc.

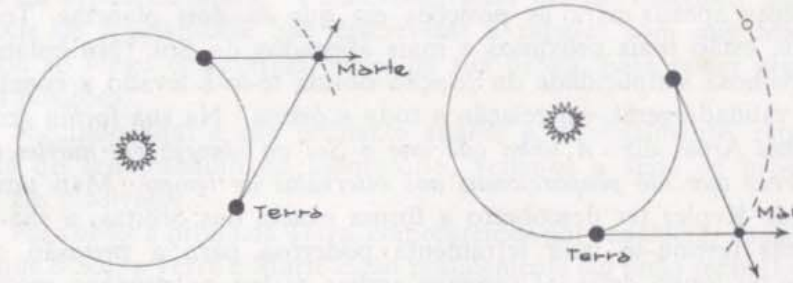
Q3 Quais as observações usadas por Kepler com o fim de obter um gráfico da órbita da Terra?

Q4 Enuncie a lei das áreas de Kepler.

Q5 Em que ponto da sua órbita se move um planeta mais rapidamente?

7.3 A lei das órbitas elípticas de Kepler

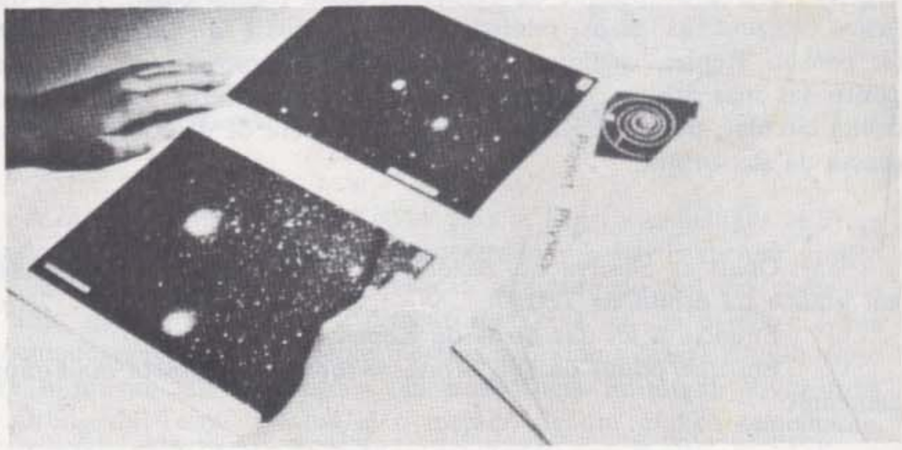
Conhecida a órbira e o horário da Terra, Kepler estava em condições de inverter a análise, a fim de determinar a forma da órbita de Marte. Para tal usou, mais uma vez, observações separadas de um ano marciano. Uma vez que este intervalo de tempo é um pouco menor que dois anos terrestres, a Terra está em pontos diferentes da sua órbita nos dois instantes. Assim, as duas direcções Terra-Marte são também diferentes. O seu ponto de cruzamento pertence à órbita de Marte. Utilizando pares de observações deste tipo, Kepler fixou muitos pontos da órbita de Marte. O diagrama apresentado em baixo mostra como podem ser obtidos dois destes pontos. Desenhando uma



curva que passasse por todos estes pontos, Kepler pôde determinar valores razoavelmente precisos para as dimensões e para a forma da órbita de Marte. Apercebeu-se imediatamente que esta não constituía um círculo em torno do Sol. Um resultado inteiramente análogo poderá ser obtido a partir da experiência intitulada "A Órbita de Marte". Mas que tipo de trajectória era aquela? Como descrevê-la mais simplesmente? Como Kepler disse: "A conclusão é, muito simplesmente, de que a trajectória do planeta não é circular — encurva-se para dentro de ambos os lados e novamente para fora nos extremos opostos. Uma curva deste tipo chama-se oval". Mas que tipo de oval?

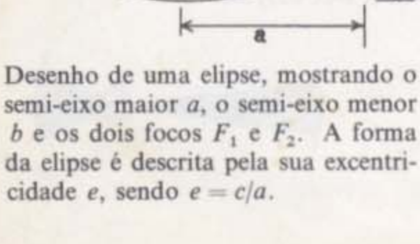
GE 7.5.

Existem muitas curvas diferentes a que se chama ovais. Durante algum tempo, Kepler pensou que a órbita tivesse a forma de um ovo. Mas acabou por rejeitar essa possibilidade, por não concordar com a



A órbita de Marte é desenhada nesta experiência a partir de medidas efectuadas sobre pares de fotografias celestes tiradas com o intervalo de um ano marciano.

sua ideia acerca da interacção física entre o Sol e o planeta. Kepler concluiu que deveria existir uma melhor maneira de descrever a órbita e que a poderia encontrar. Lutou com o problema durante muitos meses. E acabou por ser capaz de mostrar que a órbita tinha a forma de uma curva simples, estudada em pormenor pelos Gregos, dois mil anos antes: uma elipse. É a forma que se observa quando se olha obliquamente para um círculo.



Desenho de uma elipse, mostrando o semi-eixo maior a, o semi-eixo menor b e os dois focos F_1 e F_2. A forma da elipse é descrita pela sua excentricidade e, sendo $e = c/a$.

As elipses podem ter formas muito variadas. E têm muitas propriedades interessantes. Por exemplo, pode-se desenhar uma elipse com o auxílio de um pedaço de cordel com as duas pontas amarradas uma à outra, colocado de maneira a abraçar simultaneamente a ponta do lápis e duas pequenas taxas espetadas na folha de papel, nos pontos F_1 e F_2, como se mostra ao lado. Arrastando-se o lápis de modo a dar uma volta completa ao cordel, conseguir-se-á desenhar uma elipse. (Que tipo de curva se obteria se as duas taxas tivessem sido colocadas uma em cima da outra? Que resultados serão de esperar, se se afastarem ainda mais as duas taxas?)

Chama-se a cada um dos pontos F_1 e F_2 um *foco* da elipse. Quanto maior for a distância entre F_1 e F_2 mais achatada, ou "excêntrica", é a elipse; pelo contrário, esta vai-se tornando cada vez mais circular, à medida que diminui a distância entre F_1 e F_2. O quociente da distância F_1F_2 pelo eixo maior da elipse dá uma medida da excentricidade da elipse. Chamando c à distância entre os dois focos e a ao eixo maior da elipse, a excentricidade, e, é definida por $e = c/a$.

Mostra-se na página seguinte uma série de elipses, indicando-se para cada uma delas a respectiva excentricidade. É fácil de ver que a circunferência é um caso particular de uma elipse, em que $e = 0$, e que a maior excentricidade possível é de $e = 1,0$.

GE 7.6.

GE 7.7

Na experiência relativa à órbita de Mercúrio pode-se traçar a forma da órbita muito excêntrica deste planeta a partir de dados obtidos em observações. Veja-se também GE 7.8.

GE 7.9.

Tabela 7.1 As excentricidades das órbitas planetárias

PLANETA	EXCENTRICIDADE ORBITAL	NOTAS
Mercúrio	0,206	Número insuficiente de observações para o estudo de Kepler
Vénus	0,007	Órbita quase circular
Terra	0,017	Pequena excentricidade
Marte	0,093	Planeta com maior excentricidade, de entre aqueles que Kepler pôde estudar
Júpiter	0,048	Movimento celeste muito lento
Saturno	0,056	Movimento celeste muito lento
Úrano	0,047	Descoberto apenas em 1781
Neptuno	0,009	Descoberto apenas em 1846
Plutão	0,249	Descoberto apenas em 1930

A descoberta de Kepler de que a órbita de Marte tem a forma de uma elipse é, por si só, notável. Mas ele também mostrou que o Sol ocupava a posição de um dos seus focos. (O outro foco está desocupado). Kepler apresentou estes resultados na sua *Lei das Órbitas Elípticas: Os planetas movem-se em órbitas elípticas, ocupando o Sol um dos seus focos.*

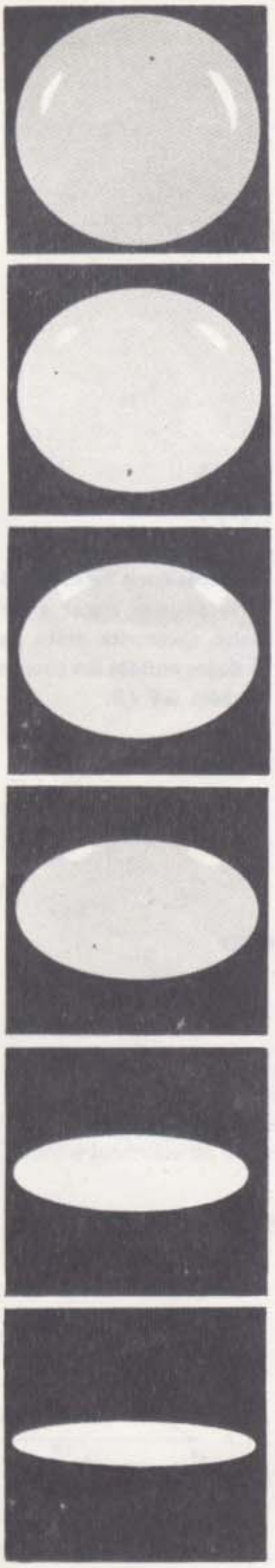
Como mostra a tabela 7.1, a órbita de Marte é a mais excêntrica de todas as estudadas por Kepler, nomeadamente as de Vénus, da Terra, de Marte, de Júpiter e de Saturno. Tivesse ele dedicado o seu estudo a qualquer outro planeta que não Marte e talvez nunca tivesse reparado que a forma da órbita era a de uma elipse! Mesmo para a órbita de Marte é muito pequena a diferença entre a órbita elíptica e uma circunferência descentrada. Não admira pois que Kepler tenha escrito, mais tarde: "Só Marte nos permite penetrar nos segredos da astronomia que, de outro modo, permaneceriam eternamente ocultos".

Tal como Kepler, acreditamos que as nossas observações representam aspectos de uma realidade mais estável que as emoções e desejos dos seres humanos, de natureza variável. Como Platão e todos os cientistas subsequentes, partimos do princípio que a natureza é, fundamentalmente, ordenada e consistente. Por isso, deve ser compreensível de uma maneira simples. Este axioma tem conduzido a significativos avanços teóricos e técnicos. O trabalho de Kepler é um exemplo de uma atitude tipicamente científica — partir do princípio de que uma grande variedade de fenómenos se pode considerar como mais bem compreendida se puder ser resumida por meio de uma lei simples, preferivelmente expressa de uma forma matemática.

Depois do regozijo inicial, resultante da descoberta da lei das trajectórias elípticas, Kepler deve ter posto a si próprio uma pergunta. Por que é que as órbitas planetárias serão elípticas, em vez terem outra forma qualquer? O desejo de Platão, de que os movimentos fossem circulares e uniformes, é compreensível, mas a insistência da natureza na elipse é surpreendente.

De facto, não foi dada resposta satisfatória àquela pergunta senão quando Newton mostrou, quase oitenta anos mais tarde, que as órbitas elípticas eram consequência necessária de uma lei mais geral da natureza. Aceitemos as leis de Kepler como regras que satisfaçam os factos observados sobre os movimentos dos planetas. Como *leis empíricas*, elas resumem os dados obtidos pela observação do movimento de qualquer planeta. A lei das órbitas, que afirma que as trajectórias dos planetas do Sol são elípticas, dá-nos todas as posições possíveis que cada planeta pode ocupar, conhecidos que sejam o seu tamanho e excentricidade. Esta lei, todavia, não nos diz *quando* é que o planeta está num determinado ponto da sua elipse, ou quão rapidamente ele se move num determinado instante. Por sua vez a lei das áreas não especifica a forma da órbita, mas descreve como varia a velocidade angular, à medida que vai variando a distância em relação ao Sol. É fácil de ver que as duas leis se completam uma à outra. Com a ajuda destas duas leis gerais, e conhecidas que sejam a dimensão e excentricidade da órbita (e um ponto de partida), poderemos determinar quer a posição quer a velocidade angular de um dado planeta em qualquer instante, passado ou futuro. Como também podemos determinar a posição da Terra nesse mesmo instante, poderemos calcular a posição do planeta, tal como foi ou será visto da Terra.

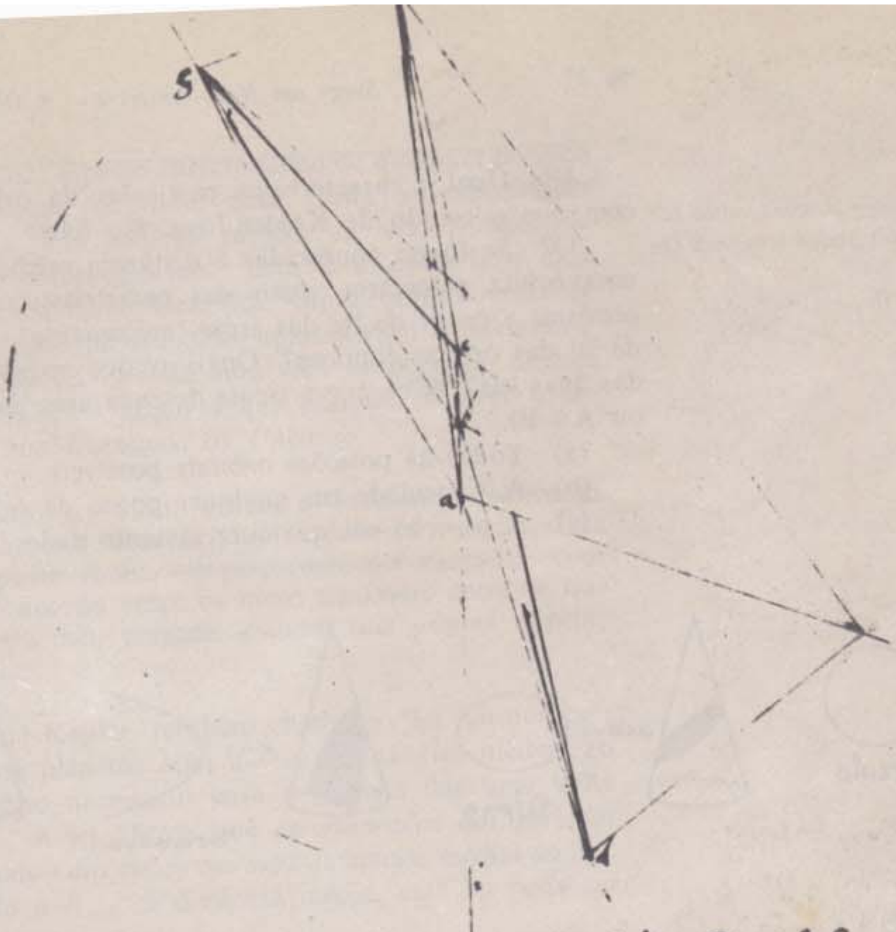
São impressionantes a elegância e simplicidade das duas leis de Kepler. Ptolomeu e Copérnico ficariam certamente surpreendidos por a solução do problema dos movimentos planetários poder ser dada em afirmações tão concisas. Mas não nos devemos esquecer de que estas leis foram elaboradas a partir da ideia de Copérnico de uma Terra móvel, do trabalho exaustivo que esteve na base das observações preciosas de Tycho e da imaginação e devoção de Kepler.



Eclipses de diferentes excentricidades. (As figuras foram feitas a partir de fotografias tiradas a um prato colocado em diferentes ângulos).

Métodos empíricos baseados na observação, mas não na teoria.

Ao lado: uma página dos livros de notas de Kepler.



B Centrum orbitae D. A corpus solis. C centrum aequalitatis Martis GHEDI orbita Martis HAL

Linea apogaei. F Situs Martis in 87. in ... 27

G Situs Martis in 91 ... 27

D Situs Martis in 93 ... 13

E Situs Martis in 95 ... 18

F. 147. 26. 0.	FAG. 91. 10. 24	FCG 94. 57. 4.
G. 238. 36. 24	G+D. 75 29. 51.	GCD 64. 8. 36
91 10 24	D+E. 65. 9. 42	DCE. 57. 16. 12
G 238. 36. 24	E4F. 128. 10. 3.	ECF 143. 26. 8
D 314. 6. 15	360. 0. 0.	
75. 29 51		
D 314 6. 15		
E. 360 19. 15. 57		
65 9. 42		

E. 19. 15 57	Summa CGA, ADC	11. 21. 15
G. ~~238 36 24~~	Summa CFA, AEC.	15. 26. 5.
147. 26. 0	Summa CGA, AEC.	19. 14. 45.
128 10 2	Summa CFA, ADC	7. 32. 35.

Excessus ... ADC: — 7. 53. 30.

Excessus ... AEC — 3. 48. 40.

... non est certa et data ... Nam oportet Apogaeum H hic ordinarium, ... lineae FB, GB, DB, EB, ... ut indicium ... Potius ... necessarius ...

GCD 64. 8. 36
DCE 57. 16. 12
ACE 121 24 48

GAD. 75. 29. 51
GAE ...
GAE. 140 39 33
39. 14. 45.

FCG 94. 57. 4
GCD 64. 8. 36
FCD 159. 5. 40

FAG. 91. 10. 24
GAD. 75. 29. 51
FAD 166 40 15
8 32 35.

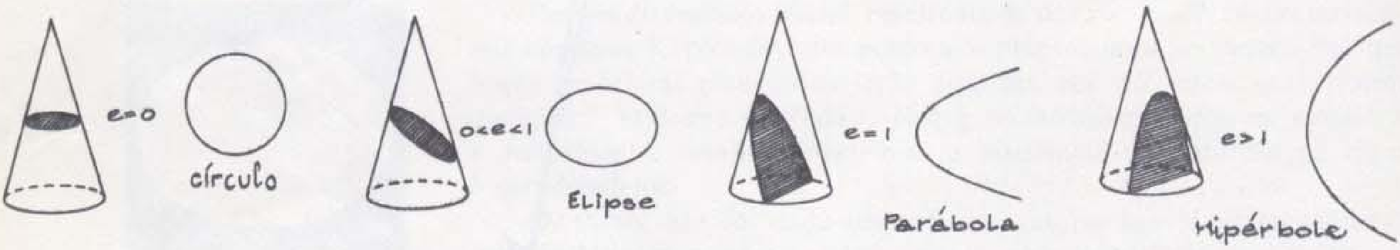
DAE 65. 9. 42
DCE. 57. 16. 12
7. 53 30.

GAF 91. 10. 24
GCF 94. 57. 4
3. 48. 40

Q6 Qual a característica particular da órbita de Marte que fez com que o estudo de Kepler fosse tão feliz?

Q7 Se forem conhecidas a distância média e a excentricidade de uma órbita planetária, quais das características seguintes podem ser previstas a partir da lei das áreas, unicamente? E unicamente a partir da lei das órbitas elípticas? Quais as que necessitam uma combinação das duas leis? (Coloque à frente de cada uma das alíneas um A, um E ou A + E).

(a) Todas as posições orbitais possíveis.
(b) A velocidade em qualquer ponto da órbita.
(c) A posição em qualquer instante dado.



As *secções cónicas* são figuras originadas no corte de um cone por um plano — a excentricidade da figura está relacionada com o ângulo a que se faz o corte. Além dos círculos e das elipses, as parábolas e as hipérboles são também secções cónicas, com excentricidades maiores que as das elipses. Newton mostrou que todas estas formas são trajectórias possíveis para um corpo que se mova sob a influência do Sol.

7.4 A Lei dos Períodos de Kepler

As primeiras duas leis de Kepler foram publicadas em 1609 no seu livro *Astronomia Nova*, mas a sua satisfação ainda não era completa, porque não tinha encontrado qualquer relação entre os movimentos dos diferentes planetas. Cada planeta parecia ter a sua própria órbita elíptica e a sua própria velocidade, mas não se encontrava um padrão geral que relacionasse todos os planetas uns com os outros. Kepler tinha começado a sua carreira a tentar explicar o número de planetas observados e os seus espaçamentos. Estava convencido que as órbitas e velocidades observadas não eram acidentais, que existia alguma espécie de regularidade a ligar todos os movimentos do sistema solar. A sua convicção era tão forte que passou anos a examinar imensas combinações diferentes de factores, numa busca, por tentativas, de uma terceira lei que relacionasse todas as órbitas planetárias. A sua longa e obstinada procura ilustra um aspecto característico de qualquer período da história da ciência: acima de tudo, mau grado as dificuldades aparentes na obtenção de uma solução rápida, as leis da natureza foram sempre tidas como compreensíveis. Esta fé é ainda hoje uma das fontes principais de inspiração científica, capaz muitas vezes de manter o ânimo em períodos de trabalho aparentemente infrutífero. Para Kepler, tornou-lhe suportável toda uma vida de pobreza, doença e outros infortúnios pessoais, de modo a que pudesse escrever triunfantemente, em 1619, na sua *Harmonia do Universo:*

Tal como Einstein escreveu mais tarde: «O Senhor é subtil, mas não malicioso».

> ...após prolongado trabalho, árduo e incessante, sobre as observações de Brahe, ao descobrir a verdadeira relação... as sombras do meu espírito foram tempestuosamente rasgadas, com uma tal perfeição de acordo entre os meus dezassete anos de trabalho de Brahe e este meu presente estudo, que julguei a princípio estar a sonhar...

A lei dos períodos de Kepler, também chamada "lei harmónica", relaciona os períodos dos planetas com as suas distâncias médias ao Sol. O período é o tempo necessário para o planeta dar uma volta completa na sua órbita. A lei afirma que *os quadrados dos períodos dos planetas são proporcionais aos cubos das suas distâncias médias ao Sol.* Chamando T ao período e $R_{\text{méd}}$ à distância média, esta lei pode ser expressa da seguinte maneira:

$$T^2 \propto R^3_{\text{méd}} \quad \text{ou} \quad T^2 = kR^3_{\text{méd}} \quad \text{ou} \quad \frac{T^2}{R^3_{\text{méd}}} = k$$

Para a Terra, T é um ano. A distância média, $R_{\text{méd}}$, da Terra ao Sol é de uma unidade astronómica, 1 UA. Assim, pode exprimir-se o valor da constante k por $k = 1$ ano²/UA³.

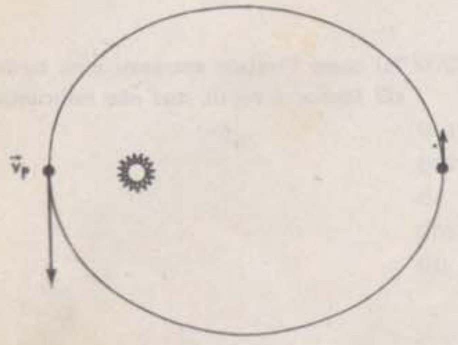
Verificação da Lei dos Períodos de Kepler

	Valores de Copérnico			Valores actuais		
Planeta	Período T (anos)	Distância média $R_{\text{méd}}$ (UA)	$\frac{T^2}{R^3_{\text{méd}}}$	Período T (anos)	Distância média $R_{\text{méd}}$ (UA)	$\frac{T^2}{R^3_{\text{méd}}}$
Mercúrio	0,241	0,38	1,06	0,241	0,387	1,00
Vénus	0,614	0,72	1,01	0,615	0,723	1,00
Marte	1,881	1,52	1,01	1,881	1,523	1,00
Júpiter	11,8	5,2	0,99	11,862	5,20	1,00
Saturno	29,5	9,2	1,12	29,458	9,54	1,00

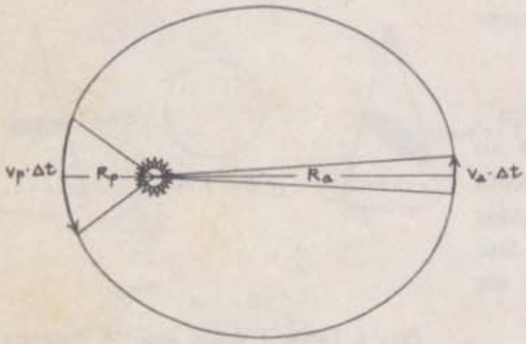
onde k é uma constante. Podemos usar esta relação para determinar o período de qualquer planeta, uma vez conhecida a sua distância média ao Sol, e vice-versa, porque ela se aplica a todos os planetas e mesmo a todos os cometas que giram em torno do Sol.

GE 7.11-7.14.

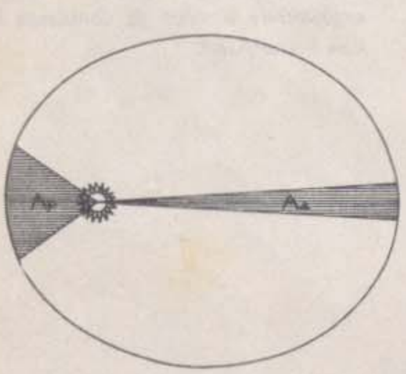
As três leis de Kepler são tão simples que a sua extraordinária importância pode passar despercebida. E combinadas com a descoberta de que cada planeta se move num plano, no qual está também o Sol, o seu valor é ainda maior. Elas permitem determinar toda a história passada e futura de cada planeta, a partir de apenas seis quantidades. Duas destas são a dimensão e excentricidade da sua órbita, três outras



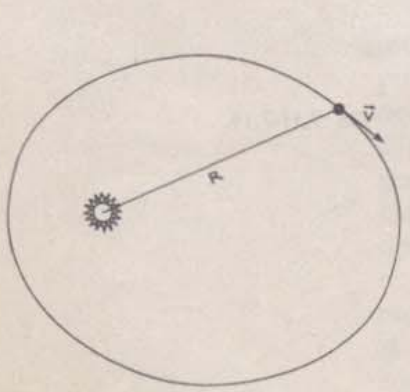
(A)



(B)



(C)



(D)

Uma Equação Geral para a Velocidade Orbital

A figura A representa a órbita elíptica de um planeta, com o Sol num dos seus focos. Poderemos obter, por meio de uma curta análise, o quociente das velocidades no ponto mais próximo do Sol (periélio) e no ponto mais afastado (afélio).

A figura B mostra uma pequena parte da trajectória do planeta junto do periélio, durante um intervalo de tempo Δt. Se Δt for muito pequeno, a velocidade média ao longo da trajectória durante Δt será muito aproximadamente igual à velocidade do planeta no periélio. Chama-se-lhe velocidade *instantânea* no periélio, v_p. O comprimento percorrido será $v_p . \Delta t$.

Além disso, se Δt for muito pequeno, aquela parte da trajectória será quase rectilínea. Poderá portanto ser considerada a base de um triângulo de altura R_p, representado a tracejado na figura C. A área de qualquer triângulo é dada por $\frac{1}{2}$ base $\times$ altura, pelo que a área A_p deste triângulo será $\frac{1}{2}(v_p \times \Delta t) R_p$.

De maneira semelhante, a área A_a de um triângulo varrido durante Δt no afélio é $\frac{1}{2}(v_a \times \Delta t) R_a$. Pela lei das áreas de Kepler, são varridas áreas iguais em tempos iguais, pelo que $A_a = A_p$. Então:

$$\tfrac{1}{2} v_a \times \Delta t \times R_a = \tfrac{1}{2} v_p \times \Delta t \times R_p$$

e, dividindo ambos os membros por $\frac{1}{2}\Delta t$:

$$v_a R_a = v_p R_p$$

Esta equação pode ser rearranjada de forma a dar:

$$\frac{v_a}{v_p} = \frac{R_p}{R_a}$$

Isto mostra que as velocidades no afélio e no periélio são inversamente proporcionais às distâncias ao Sol. Por outras palavras, quanto maior a distância, menor a velocidade.

Era fácil encontrar a relação entre as velocidades e as distâncias nestes dois pontos, já que a velocidade é neles perpendicular à linha que une o Sol ao planeta. Quando o planeta está numa outra posição qualquer que não a do afélio ou a do periélio, o vector velocidade já não é perpendicular àquela linha. Veja-se a figura D. Poderemos, no entanto, considerar que a área varrida (figura E) é aproximadamente igual à de um triângulo de altura R (figura F). Note-se que este procedimento inclui um pequeno canto de área a mais, não considerando em compensação um outro pequeno canto de área. Para um intervalo de tempo Δt muito curto, o triângulo será muito fino e a diferença entre os dois pequenos cantos será negligível. Como se mostra na figura G, a base do triângulo não é dada por $v \times \Delta t$. Em vez disso, é dada por $v_\perp \times \Delta t$, em que $v_\perp$ é a parte, ou *componente*, de v que aponta perpendicularmente à linha que une o Sol ao planeta.

Assim, a área varrida durante Δt pode ser expressa por:

$$\tfrac{1}{2} v_\perp \times \Delta t \times R$$

Esta mesma equação será válida para qualquer parte da trajectória, durante um intervalo de tempo Δt muito curto. Pela lei das áreas de Kepler, as áreas varridas durante intervalos de tempo iguais são também iguais, pelo que poderemos escrever:

$$\tfrac{1}{2} v_\perp \times \Delta t \times R = -\tfrac{1}{2} v_\perp' \times \Delta t \times R' = \tfrac{1}{2} v_\perp'' \times \Delta t \times R'', \text{ etc.}$$

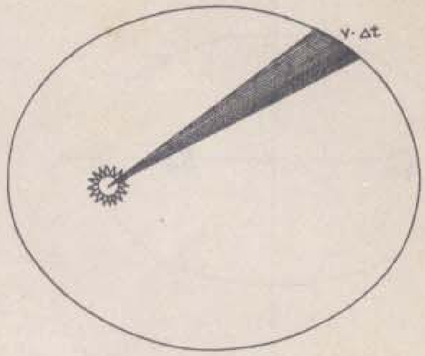
ou, dividindo tudo por $\frac{1}{2}\Delta t$:

$$v_\perp R = v_\perp' R' = v_\perp'' R'', \text{ etc.}$$

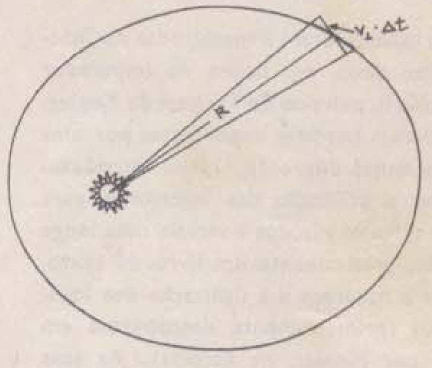
Podemos, portanto, exprimir a lei das áreas de Kepler pela equação:

$$v_\perp R = \text{constante.}$$

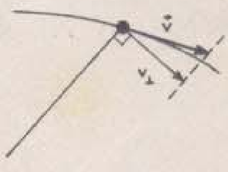
Se conhecermos a excentricidade da órbita e a velocidade e a distância num ponto qualquer dela, poderemos usar esta equação para calcular a velocidade num outro ponto qualquer da órbita. (Veja-se GE 7.10). Esta relação foi obtida a partir da lei das áreas. Veremos mais tarde que esta lei é válida para o movimento de qualquer corpo sob a acção de uma força dirigida para um dos focos da elipse — uma força chamada "central". Assim, a relação $v_\perp R =$ constante aplica-se tanto às estrelas duplas como aos átomos como ao sistema solar.



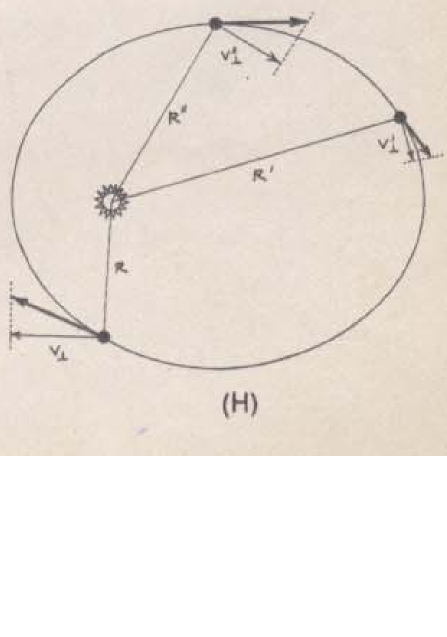
(E)



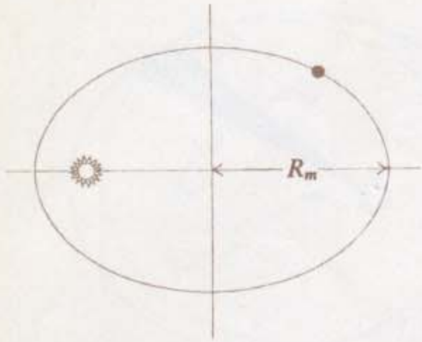
(F)



(G)



(H)



O valor de $R_{méd}$ para uma elipse é exactamente igual a metade do seu eixo maior.

Estas tabelas foram denominadas de *Tabelas Rudolfinas*, em honra do Imperador Rudolfo II, patrono de Tycho e de Kepler. Elas foram também importantes por uma razão muito diferente. Nelas introduziu Kepler a utilização dos logaritmos para fazer cálculos rápidos e incluiu uma longa secção, praticamente um livro de texto, sobre a natureza e a utilização dos logaritmos (primeiramente descobertos em 1614 por Napier, na Escócia). As suas tabelas divulgaram o uso deste processo de cálculo, largamente utilizado durante cerca de trezentos anos, até ao advento dos modernos computadores.

são ângulos que relacionam o plano da sua órbita com o da órbita terrestre e a sexta é a que diz em que ponto da órbita estava o planeta numa determinada data. Estas grandezas estão explicadas com mais pormenor na secção de actividades do *Manual 2* para os Capítulos 7 e 8.

Com estas leis podem ser determinadas todas as posições passadas e futuras de cada planeta e de cada cometa, de uma maneira mais simples e mais precisa do que com toda a multidão de artifícios geométricos em que assentavam as teorias planetárias de Ptolomeu, Copérnico ou Tycho. A partir de hipóteses diferentes e com processos distintos, Kepler tinha finalmente resolvido o problema astronómico no qual tinham trabalhado tantos grandes homens durante tantos séculos. Embora tivesse abandonado os *artifícios* geométrico do sistema de Copérnico, Kepler baseou-se no ponto de vista de um universo centrado no Sol, defendido por aquele. Nenhum dos modelos de centro na Terra poderia ter dado origem às três leis de Kepler.

Em 1627 Kepler publicou finalmente um conjunto de tabelas astronómicas, depois de muitos problemas com os editores e com os herdeiros de Tycho. Nestas tabelas Kepler combinou as observações de Tycho com as três leis, de modo a permitir cálculos precisos das posições planetárias em qualquer instante, passado ou futuro. Estas tabelas foram úteis durante cerca de um século, até que as observações telescópicas, de maior precisão, substituíram as de Tycho.

O interesse científico de Kepler não se confinou ao problema planetário. Como Tycho, que tinha ficado fortemente impressionado pela estrela nova de 1572, Kepler observou e escreveu acerca de estrelas novas que apareceram em 1600 e 1604. As suas observações e interpretações reforçaram o impacto das primeiras observações de Tycho, confirmando que ocorriam na verdade variações no firmamento de estrelas. Assim que Kepler soube do desenvolvimento do telescópio, passou uma grande parte de um ano em cuidadosos estudos do processo de formação das imagens. Estes estudos foram publicados num livro intitulado *Dioptrice* (1611), que constituiu um trabalho básico de óptica durante muitos anos. Além de vários livros sobre problemas matemáticos e astronómicos, Kepler escreveu uma descrição do sistema de Copérnico, modificado pelas suas próprias descobertas, que se popularizou e difundiu largamente. Isto incrementou o interesse crescente e a aceitação que se vinham fazendo em relação ao modelo de centro no Sol do sistema planetário.

Q8 Enuncie a lei dos períodos de Kepler.

7.5 O novo conceito de lei física

Um aspecto geral da obra de Kepler afectou grandemente o desenvolvimento de todas as ciências físicas. Quando Kepler começou os seus estudos, aceitava ainda as concepções de Platão acerca da importância dos modelos geométricos. Aceitava também a ênfase de Aristóteles sobre o "lugar natural" para a explicação do movimento. Mas mais tarde concentrou os seus esforços em leis algébricas que descrevessem os movimentos dos planetas. A sua bem sucedida formulação de leis empíricas em forma matemática ajudou a estabelecer a utilização da *equação* como forma normal da apresentação de leis na ciência física.

Mais do que qualquer dos que o precederam, Kepler esperava que uma teoria aceitável concordasse com observações quantitativas e precisas. Das observações de Tycho aprendeu a respeitar o poder de uma medição precisa. Os modelos e as teorias podem ser modificados pelo engenho humano, mas os valores correspondentes a boas observações são duradouros, independentes das variações que se façam nas hipóteses ou nos pontos de vista.

Indo além da observação e da descrição matemática, Kepler procurou explicar o movimento nos céus pela acção de forças físicas. No sistema de Kepler os planetas não se moviam por influência ou natureza divina, ou em movimento circular "natural" causado pelas suas formas esféricas. Em vez disso, Kepler procurou leis físicas baseadas em fenómenos observados e que descrevessem todo o universo de uma maneira quantitativa pormenorizada. Ele exprimiu a sua linha de pensamento numa carta escrita a Herwart (1605), no início da sua carreira:

> Estou muito preocupado com a investigação das causas físicas. O meu propósito é mostrar que a máquina celeste deve ser assemelhada não a um organismo divino mas antes a um relógio... pelo menos na medida em que todos os múltiplos movimentos são causados por uma única e muito simples força magnética, tal como no caso do relógio todos os movimentos são provocados por um simples peso. Além disto, mostro como é que este conceito físico pode ser apresentado através do cálculo e da geometria.

Mostrar que a máquina celeste é semelhante a um relógio accionado por uma única força — tratava-se, na verdade, de um objectivo profético. Estimulado pelo trabalho de William Gilbert no campo do magnetismo, publicado alguns anos antes, Kepler imaginava forças magnéticas originárias do Sol a conduzir os planetas ao longo das suas órbitas. Era uma hipótese razoável e prometedora. À medida que foi desenvolvida, a ideia básica de que um único tipo de força controla os movimentos de todos os planetas mostrou-se correcta; mas a força não é magnética, e é necessária não para impelir os planetas para a frente mas para lhes deflectir as trajectórias de modo a que percorram órbitas fechadas.

Embora Kepler não compreendesse correctamente a natureza das forças responsáveis pelo movimento celeste, o seu trabalho ilustra uma enorme mudança de atitude iniciada mais de dois séculos antes. Kepler ainda compartilhava a ideia antiga de que cada planeta tinha uma "alma". Mas recusava-se a basear a sua explicação do movimento planetário nesta ideia. Em vez disso procurou as causas físicas. Copérnico e Tycho tinham ficado satisfeitos com modelos geométricos com os quais as posições planetárias podiam ser previstas. Kepler foi um dos primeiros a procurar as *causas* dinâmicas para os movimentos. Este novo interesse em explicações físicas marca o início duma das principais características da ciência física moderna.

A formulação de leis empíricas por Kepler recorda a sugestão de Galileu, feita sensivelmente na mesma altura, para que se estudasse o "como" do movimento de queda livre e só depois o "porquê". Meio século mais tarde, Newton usou o conceito de *força gravitacional* para ligar as três leis planetárias de Kepler às leis da mecânica terrestre. Este será o assunto do capítulo 8.

Q9 De que maneiras é o trabalho de Kepler um exemplo de um "novo" conceito de lei física?

7.6 Galileu e Kepler

Galileu foi um dos cientistas com quem Kepler manteve correspondência a respeito dos progressos científicos. Enquanto que as contribuições de Kepler para a teoria planetária foram, essencialmente, as suas leis empíricas baseadas nas observações de Tycho, Galileu contribuiu tanto para a teoria como para a observação. Como se disse nos capítulos 2 e 3, a teoria do movimento de Galileu baseou-se em observações dos corpos que se moviam sobre a superfície terrestre. O seu desenvolvimento da nova ciência da mecânica contradisse as hipóteses de Aristóteles em que se baseavam a física e a interpretação dos céus. Através dos seus livros e dos seus discursos, Galileu acendeu viva discussão sobre as diferenças ou semelhanças entre a Terra e os céus. O interesse levantado estendeu-se bem fora dos círculos científicos. O poeta John Milton escreveu, alguns anos após a sua visita a Galileu, em 1638:

> ...É dos Céus uma sombra o orbe da Terra;
> Parecem-se entre si as coisas de ambos
> Muito mais do que tu julgá-lo podes.

Galileu desafiou as antigas interpretações da experiência. Como vimos antes, focou a sua atenção em novos conceitos: tempo e distância, velocidade e aceleração, forças e matéria. Em contraste, os aristotélicos falavam de essências, das causas finais, dos modelos geométricos fixos. No estudo que Galileu fez dos corpos em queda, insistiu em ajustar os conceitos aos factos observados. Procurando resultados que pudessem ser expressos na forma algébrica, Galileu seguiu um caminho paralelo ao do novo estilo de Kepler.

O maior antagonismo entre Galileu e a maior parte dos cientistas da sua época resultou do tipo de questões que levantou. Para os seus adversários, a maior parte dos problemas de Galileu parecia trivial. E os processos que ele usava para estudar o mundo pareciam peculiares. Que havia de importante em observar a oscilação dos pêndulos ou o rolar de esferas em planos inclinados, quando havia profundos problemas filosóficos que necessitavam de clarificação?

Embora Kepler e Galileu tivessem vivido na mesma altura, as suas vidas foram muito diferentes. Kepler teve uma existência precária e de pobreza, arrastado de uma cidade para outra pelas guerras religiosas da altura. Poucas pessoas, para lá de um pequeno grupo de amigos e correspondentes, conheceram ou se preocuparam com os seus estudos e resultados. Escreveu livros longos e complexos, que exigiam do leitor conhecimentos especializados no assunto.

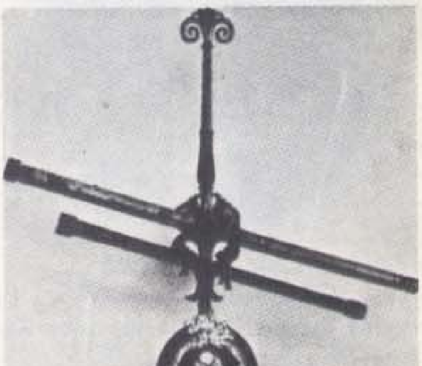
Galileu, por seu turno, escreveu numerosos ensaios e livros em italiano. A sua linguagem e estilo agradaram a muitos leitores que não sabiam o latim dos estudiosos. Galileu foi um mestre na arte de divulgar o seu trabalho. Ele quis que as suas obras fossem tão conhecidas quanto possível entre o público, para que os seus estudos fossem apreciados e para que a teoria de Copérnico tivesse aceitação. Escreveu não só para os pequenos grupos de escolásticos, mas também para os nobres, os líderes políticos e os dignitários religiosos. Os seus argumentos incluíam sátiras a individualidades ou a ideias. Em compensação, os seus esforços de informação e persuasão num assunto tão "perigoso" como a teoria cosmológica atraíram o ridículo e mesmo a violência. Todos aqueles que têm um ponto de vista realmente novo, têm muitas vezes de fazer face a tal reacção.

Nos tempos modernos, artistas como o pintor Picasso e o escultor Giacometti e os compositores Stravinsky e Schönberg tiveram inicialmente recepções semelhantes. O mesmo aconteceu em muitos outros campos, na literatura como na matemática, na economia ou na política. Mas embora as grandes novidades criativas sejam muitas vezes atacadas ao princípio, isso não significa que, inversamente, tudo o que é atacado deve ser criativo.

Q10 Quais das noções seguintes são de associar mais ao trabalho de Galileu que ao dos seus predecessores: qualidades e essências, linguagem popular, expressão matemática concisa, causas últimas ou finais?

7.7 A evidência telescópica

Como Kepler, Galileu estava rodeado de colegas convencidos de que os céus eram eternos e imutáveis. Por isso, Galileu interessou-se extremamente pelo aparecimento de uma estrela nova, em 1604, uma das observadas por Kepler. Onde nada havia antes de visível nos céus, estava agora uma brilhante estrela. Tal como Tycho e Kepler, Galileu compreendeu que tais variações no firmamento de estrelas estavam em conflito com a velha ideia de que as estrelas não podiam sofrer qualquer variação. Além do mais, esta estrela nova despertou em Galileu um interesse pela astronomia que se manteria por toda a sua vida.



Dois dos telescópios de Galileu, exibidos no Museu da Ciência de Florença.

Quatro ou cinco anos mais tarde soube que um Holandês "tinha construído um óculo por meio do qual objectos visíveis, embora muito distantes dos olhos do observador, eram observados distintamente, como se estivessem próximos". Galileu (como ele próprio o diz) estudou rapidamente alguns dos princípios ópticos envolvidos e lançou mãos ao trabalho de polir as lentes e construir ele próprio um tal aparelho. O seu primeiro telescópio fez com que os objectos aparecessem três vezes mais próximos do que quando observados a olho nu. Eis algumas afirmações de Galileu, relativas ao seu terceiro telescópio, contidas no seu livro *O Mensageiro das Estrelas:*

> Finalmente, não olhando a trabalho ou despesas, consegui eu próprio construir um tão excelente aparelho, que os objectos vistos

através dele pareciam cerca de mil vezes maiores e mais de trinta vezes mais próximos que quando observados com a nossa visão natural.

Que faria o leitor, se dispusesse de "um tão excelente aparelho"? Tal como os homens do tempo de Galileu, aplicá-lo-ia provavelmente a utilizações práticas. "Seria supérfluo", concorda Galileu,

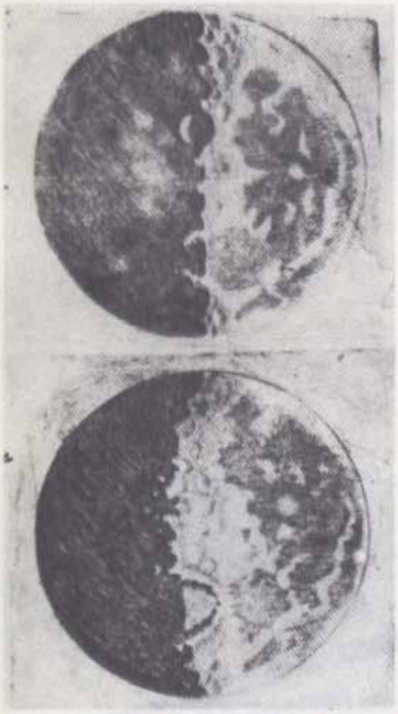
O que Galileu queria dizer era que a *área* do objecto era cerca de 1000 vezes maior. A área é proporcional ao *quadrado* da amplificação (ou «potência») tal como a definimos agora.

> enumerar o número e a importância das vantagens de tal aparelho, no mar como em terra. Mas, esquecendo as observações terrestres, virei-me para as observações celestes e observei primeiro a Lua de tão perto como se ela estivesse à distância de uns escassos dois raios terrestres. Depois disso observei muitas vezes com maravilhoso deleite tanto os planetas como as estrelas fixas...

No período de algumas curtas semanas, em 1609 e 1610, Galileu utilizou o seu telescópio para fazer várias descobertas, todas elas de primordial importância.

Primeiro, Galileu apontou o seu telescópio para a Lua. O que viu deu-lhe a convicção de que

> ...a superfície da Lua não é suave, uniforme e perfeitamente esférica, como crêem muitos filósofos (para a Lua como para outros corpos celestes), mas antes desigual, grosseira e cheia de cavidades e proeminências, não muito diferente da face da Terra, marcada por cadeias de montanhas e por profundos vales.



Dois dos primeiros desenhos da Lua feitos por Galileu (da sua obra *Siderius Nuncius*).

Galileu não se deteve com esta simples observação, tão contrária à ideia aristotélica de perfeição celeste. Suportou as suas conclusões com vários tipos de evidência, inclusive com medições cuidadosas. Por exemplo, desenvolveu um método para a determinação da altura de uma montanha na Lua, a partir da sombra por ela projectada. (O valor que obteve para a altura de algumas montanhas lunares — cerca de quatro milhas — não se afasta muito dos resultados modernos, como os que podem ser obtidos através da experiência "A Altura de Píton, uma Montanha da Lua".

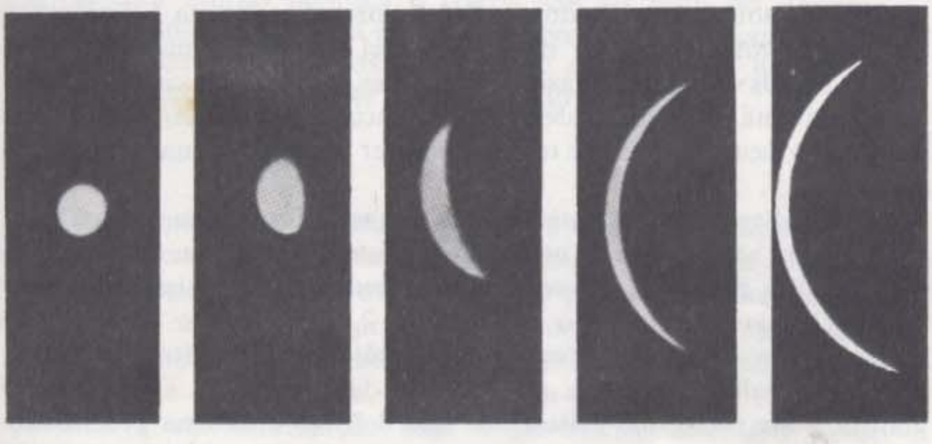
A seguir, olhou para as estrelas. A olho nu, a Via Láctea parecia ser uma faixa de luz mais ou menos contínua; através do telescópio via-se que ela consistia de milhares de estrelas muito ténues, Galileu observava muitas mais estrelas do que era possível ver à vista desarmada, qualquer que fosse o ponto do céu para onde apontasse o seu telescópio. Esta observação era contrária ao velho argumento de que as estrelas tinham sido criadas para que os homens pudessem ver à noite. Se tal explicação fosse correcta não deveriam existir estrelas invisíveis a olho nu — mas Galileu encontrou-as às centenas.

Rapidamente Galileu fez uma descoberta que, em sua opinião "...merece ser considerada como a mais importante de todas — a revelação de quatro *Planetas* nunca antes vistos, da criação do mundo até aos nossos dias". Refere-se ele aqui à sua descoberta de quatro dos satélites que orbitam em torno de Júpiter. Tinha ele ali, defronte dos seus olhos, um sistema solar em miniatura, com o seu próprio centro de revolução. Hoje, como naqueles longínquos dias, é com emoção que se observam pela primeira vez as luas de Júpiter por um telescópio. O que se vê contradiz frontalmente a noção aristotélica de que a Terra estava no centro do universo e constituía o seu centro principal de revolução.

A maneira como Galileu descobriu os "planetas" de Júpiter é um tributo à sua habilidade de observador. Em cada noite clara daquele período, ele estava a descobrir dezenas, se não centenas, de novas estrelas, nunca antes vistas pelo homem. Ao olhar para as vizinhanças de Júpiter na noite de 7 de Janeiro de 1610, reparou "...que ao lado do planeta estavam três pequenos pontos luminosos, pequenos certamente mas muito brilhantes. Embora tivesse acreditado que pertenciam à chusma de estrelas fixas, eles despertaram a minha curiosidade, talvez por parecerem estar exactamente ao longo de uma linha recta..." (A primeira página do seu livro de notas, no qual registou as suas observações, está reproduzida na página 60, no início deste capítulo). Ao observá-los novamente, na noite seguinte, verificou que a sua posição era diferente, relativamente a Júpiter. Em todas as noites claras, durante semanas, Galileu observou aquele planeta e as suas "estrelinhas" errantes e registou as suas posições em diagramas. Ao fim de alguns dias concluiu que as "estrelinhas" eram em número de quatro e que eram na realidade satélites de Júpiter. Continuou as suas observações até ser capaz de estimar os períodos das suas revoluções em torno de Júpiter.

De todas as descobertas de Galileu, a dos satélites de Júpiter foi a que provocou maior agitação. O seu livro *O Mensageiro das Estrelas* constituiu um sucesso imediato, sendo vendidos volumes tão rapidamente quanto podiam ser impressos. Para Galileu, o resultado foi uma tremenda procura de telescópios e uma enorme fama popular.

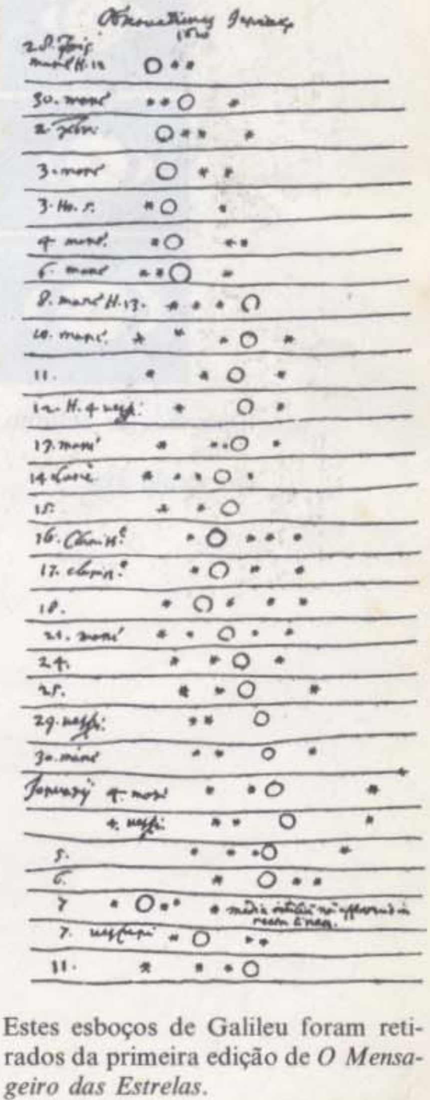
Galileu continuou a utilizar o seu telescópio com resultados notáveis. Conseguiu observar manchas solares, projectando a imagem do Sol num painel. Esta observação trouxe mais uma evidência de que o Sol, tal como a Lua, não era perfeito, no sentido aristotélico: era irregular, em vez de ter uma superfície lisa e suave. Notando que as manchas solares se moviam sobre a face do Sol de uma maneira regular, concluiu que o Sol rodava com um período de cerca de 27 dias.



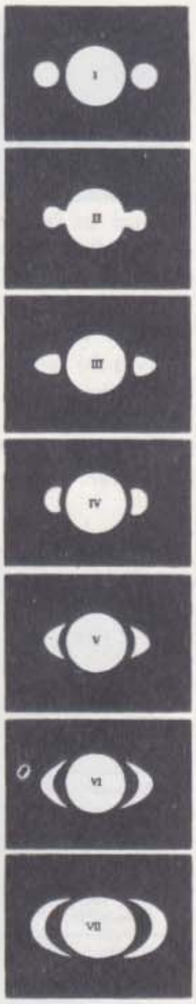
Fotografias de várias fases de Vénus, tiradas com a mesma amplificação.

Fotografia telescópica de Júpiter e dos seus quatro satélites mais brilhantes. Foi isto, aproximadamente, o que Galileu viu e o que se poderá ver através do telescópio simples descrito no *Manual*.

Até 1970 foram observados 12 satélites de Júpiter.



Estes esboços de Galileu foram retirados da primeira edição de *O Mensageiro das Estrelas*.



Desenhos de Saturno, feitos no século XVII.

Descobriu também que Vénus mostrava todas as fases, tal como o faz a Lua (vejam-se as fotografias apresentadas na página anterior). Portanto, Vénus deveria mover-se em torno do Sol, como acreditavam Copérnico e Tycho, em vez de permanecer sempre entre a Terra e o Sol, como supunham os astrónomos ptolomaicos. Saturno parecia ter saliências em torno do equador, como indicam os desenhos que se apresentam ao lado, mas os telescópios de Galileu não eram suficientemente potentes para permitirem ver que essas saliências eram anéis. Com a ajuda dos seus telescópios, Galileu recolheu um impressionante conjunto de novas informações sobre os céus — todas elas parecendo contradizer as hipóteses básicas do esquema universal ptolomaico.

Q11 As observações que Galileu fez das fases de Vénus podiam constituir um suporte da teoria heliocêntrica, do sistema de Tycho ou do sistema de Ptolomeu?

Q12 De que maneira é que as observações telescópicas da Lua e do Sol enfraqueceram a perspectiva do universo com centro na Terra?

Q13 Qual a importância que tiveram as observações de Júpiter no enfraquecimento do ponto de vista ptolomaico do universo?

7.8 Galileu concentra a controvérsia

As observações de Galileu suportaram a sua fé no sistema heliocêntrico de Copérnico, mas não foram a causa dessa fé. No seu grande trabalho, *Diálogo Sobre os Dois Grandes Sistemas Universais* (1632), os seus argumentos baseavam-se mais em hipóteses que lhe pareciam auto-evidentes do que nas observações. Galileu reconheceu, como Ptolomeu e Copérnico, que os movimentos observados dos planetas, por si só, não podiam decidir de uma maneira única entre as hipóteses heliocêntrica e geocêntrica. Com modificações apropriadas, diz Galileu, "O mesmo fenómeno poderia resultar de qualquer das hipóteses". Mas Galileu aceitou o movimento da Terra porque o sistema heliocêntrico lhe parecia mais simples e mais agradável. Poderão encontrar-se em outros pontos deste curso casos semelhantes, em que um cientista aceita ou recusa uma ideia com base num convencimento pessoal, num simples sentimento, sem que pudesse realmente haver lugar para uma confirmação experimental.

No *Diálogo Sobre os Dois Grandes Sistemas Universais*, Galileu apresenta os seus argumentos de uma maneira sistemática e viva. Tal como no seu trabalho posterior, *Proposições e Demonstrações Relativas a Duas Novas Ciências*, mencionado no Capítulo 2, a técnica de apresentação utilizada é a de uma discussão entre três homens cultos. Salviatti, a voz de Galileu, ganha a maior parte das discussões. O seu antagonista é Simplício, um aristotélico que defende o sistema ptolomaico. O terceiro elemento, Sagredo, representa o cidadão objectivo e inteligente, não comprometido com qualquer dos sistemas. Todavia, o papel de Sagredo é tal que ele acaba por aceitar, no fim, normalmente, a maior parte dos argumentos de Galileu.

Os argumentos de Galileu a favor do sistema de Copérnico, tal como são apresentados em *Os Dois Grandes Sistemas Universais*, são na sua maior parte os apresentados por Copérnico. Estranhamente, Galileu não fez uso das leis de Kepler. Todavia, as observações de Galileu forneciam nova evidência às leis de Kepler. Depois de determinar os períodos das quatro luas de Júpiter, Galileu verificou que o período de revolução era tanto maior quanto maior era a órbita do satélite. Copérnico tinha já descoberto que os períodos dos planetas aumentavam com a sua distância média em relação ao Sol. (A lei dos períodos de Kepler formulava a relação de uma maneira quantitativa). E agora o sistema de satélites de Júpiter apresentava um padrão semelhante, reforçando o desafio às velhas suposições de Platão, Aristóteles e Ptolomeu.

Os Dois Grandes Sistemas Universais baseia-se nos argumentos de Copérnico, nas observações de Galileu e em questões de plausibilidade para atacar as hipóteses básicas do modelo geocêntrico. Em resposta, Simplício, parecendo desesperado, tenta desfazer toda a argumentação de Galileu com um contra-argumento característico:

> ...quanto ao poder do Motor, que é infinito, é-lhe tão fácil fazer mover o universo como a Terra, ou uma palha.

Mas para isto apresenta Galileu uma resposta interessante; note-se como ele apresenta Aristóteles contra os aristotélicos:

> ...o que tenho estado a dizer refere-se não ao Motor mas aos móveis... Prestando então atenção aos corpos móveis, não pondo em questão se é mais rápido e mais fácil pôr em movimento a Terra que o universo, e prestando atenção às muitas outras simplificações que resultam meramente desta, torna-se muito mais provável que o movimento diurno pertença à Terra que ao resto do universo, exceptuando a Terra. Isto é suportado por uma certíssima máxima de Aristóteles que nos ensina que... "é desnecessário usar muita coisa para conseguir o que pode ser feito com pouca".

Galileu pensava que as suas descobertas com o telescópio demoliriam rapidamente as hipóteses que impediam uma larga aceitação da teoria de Copérnico. Mas os homens não podiam acreditar naquilo para que ainda não estavam prontos a acreditar. Na sua luta contra os novos defensores de Copérnico, os seguidores de Aristóteles estavam convencidos que tinham razão, que a teoria heliocêntrica era obviamente falsa e em contradição com a observação e com o senso comum. As observações telescópicas podiam ser afectadas por distorções; ao fim e ao cabo, as lentes de vidro mudam a trajectória dos raios luminosos. E mesmo que os telescópios parecessem funcionar correctamente no que dizia respeito às observações terrestres, ninguém podia ter a certeza que funcionassem igualmente bem quando apontados aos objectos celestes, muito mais distantes.

A maior parte dos aristotélicos não podiam sequer considerar o sistema de Copérnico como uma teoria possível sem violar muitas das suas afirmações básicas, como vimos no Capítulo 6. Isso ter-lhes-ia exigido algo humanamente quase impossível: desistir de muitas das suas ideias de senso comum e descobrir novas bases para as suas doutrinas teológicas e morais. Teriam que admitir que a Terra não estava ao centro de toda a criação. Talvez então o universo não tivesse sido criado especificamente para a humanidade. Não é de espantar que os argumentos de Galileu tenham levantado uma oposição tão tempestuosa!

As observações de Galileu intrigaram muita gente, mas eram inaceitáveis para os mestres aristotélicos. A maior parte deles tinha razões respeitáveis. Mas alguns colocaram-se em posições que devem ter parecido idiotas já naquele tempo. Por exemplo, o astrónomo florentino Francesco Sizzi argumentava assim sobre as razões por que não deveriam, por que não poderiam, na realidade, existir quaisquer satélites em volta de Júpiter.

> Existem sete janelas na cabeça, duas narinas, dois ouvidos, dois olhos e uma boca; assim, existem no céu duas estrelas favoráveis, duas adversas, duas luminárias e o solitário Mercúrio, indeciso e indiferente. A partir disto e de muitos outros fenómenos semelhantes da natureza, tal como os sete metais, etc., que seria fastidioso enumerar, concluímos que o número de planetas é necessariamente de sete (incluindo o Sol e a Lua)... Além disto, os Judeus e outros povos antigos, bem como os europeus modernos, adoptaram a divisão da semana em sete dias, designando estes com os nomes dos sete planetas; ora se aumentássemos o número de planetas, todo este sistema cairia por terra... Além disto, os satélites são invisíveis a olho nu e por isso não podem ter qualquer influência sobre a Terra, e por isso não têm qualquer utilidade, e por isso não existem.

Alguns dos argumentos apresentados contra as novas descobertas eram tão disparatados que se torna difícil para uma pessoa dos nossos tempos tomá-los a sério... Um dos adversários [de Galileu], que admitia que a superfície da Lua parecia irregular, sustentava que ela era na realidade perfeitamente suave e esférica, tal como tinha sido afirmado por Aristóteles, conciliando as duas ideias pela afirmação de que a Lua estava coberta por uma matéria lisa e transparente, através da qual se podiam descortinar as montanhas e as crateras existentes dentro dela. Sarcasticamente, Galileu prestou-se alegremente a aceitar esta contribuição, aplaudindo o seu engenho — desde que o seu adversário o retribuísse com igual cortesia, permitindo-lhe afirmar que a Lua era ainda mais irregular do que tinha pensado antes, e que a sua superfície estava coberta com montanhas e crateras desta substância invisível, dez vezes mais altas do que qualquer das que ele tinha visto. [Extraído de *Descobertas e Opiniões de Galileu*, traduzido por Stillman Drake].

GE 7.16.

Um ano despois das suas descobertas, Galileu escreveu a Kepler:

> Sois a primeira e talvez única pessoa que, depois de uma análise pouco mais que superficial, ...deu inteiro crédito às minhas afirmações. ...Que dizeis destes brilhantes filósofos a quem propus, mil vezes que me lembre, mostrar os meus estudos, mas que, com a obstinação preguiçosa de uma serpente de estômago cheio, nunca concrdaram em olhar para os planetas, ou para a Lua, ou para o telescópio?

Q14 Foram as observações telescópicas de Galileu que o levaram a acreditar no ponto de vista de Copérnico?

Q15 Quais as razões invocadas pelos adversários de Galileu para ignorarem as observações telescópicas?

7.9 Ciência e liberdade

A tragédia pessoal e política que atingiu Galileu é extensamente descrita em muitos livros. Mencionaremos aqui brevemente apenas alguns dos acontecimentos principais. Galileu foi intimado pela Inquisição, em 1616, a cessar o ensino da teoria de Copérnico como verdadeira (em vez de apenas como uma possibilidade para calcular os movimentos planetários), por essa teoria ser contrária às Sagradas Escrituras. Simultaneamente, o livro de Copérnico foi colocado no *Index* dos livros proibidos e suspenso, até "ser corrigido". Como vimos antes, Copérnico tinha usado sempre que possível a doutrina aristotélica para tornar plausível a sua teoria. Mas Galileu tinha um ponto de vista diferente: pretendia que o sistema heliocêntrico fosse aceite apenas pelos seus próprios méritos. Embora devotadamente religioso, excluiu deliberadamente as questões religiosas das discussões científicas. Era um rompimento fundamental com o passado.

Quando o Cardeal Barberini, antes amigo íntimo de Galileu, foi eleito em 1623 para ser o Papa Urbano VIII, Galileu falou-lhe do decreto contra as ideias de Copérnico. Como resultado da discussão, supôs-se suficientemente a salvo para escrever novamente sobre aquele tema controverso. Em 1632, depois de ter efectuado algumas alterações requeridas, Galileu obteve o necessário consentimento papal para a publicação de *Os Dois Grandes Sistemas Universais*. Este livro apresentava as perspectivas de Ptolomeu e de Copérnico e os seus méritos relativos de uma maneira muito persuasiva. Depois da publicação do livro, os seus adversários argumentaram que ele havia ignorado o aviso de 1616. Além disso, Galileu falava e actuava por vezes sem qualquer tacto. Isto e a necessidade de a Inquisição demonstrar o seu poder sobre os suspeitos de heresia contribuíram em conjunto para o assinalar decisivamente para o castigo.

Entre os muitos factores deste trama complexo, devemos lembrar-nos que Galileu, embora fosse suspeito para a Inquisição, considerava-se a si próprio como um religioso fiel. Em cartas datadas de 1613 e 1615, Galileu escreveu que a mente de Deus contém todas as leis naturais; consequentemente ele sustentou que os vislumbres dessas leis ocasionalmente apercebidos pelo investigador humano constituíam revelações directas de Deus, tão válidas como as que constavam da Bíblia: "Da Palavra Divina, provieram igualmente a Sagrada Escritura e a Natureza. ...Nem podia Deus mostrar-se-nos menos admiravelmente na acção da Natureza que nas lições sagradas da Escritura". Opiniões semelhantes são hoje sustentadas por muitas pessoas, cientistas, ou não, sem que sejam olhadas como conflituosas com as doutrinas teológicas. Mas no tempo de Galileu elas podiam ser olhadas como sintomas de panteísmo. Este foi um dos "crimes" religiosos ou heresias por que Giordano Bruno, contemporâneo de Galileu, foi queimado na fogueira. A Inquisição ficou alarmada pela controvérsia levantada por Galileu, parecendo negar a Bíblia como uma fonte correcta do conhecimento sobre a ciência natural. Em resposta, arrogante como era muitas vezes, Galileu citou o Cardeal Baronius: "O Espírito Santo pretendeu ensinar-nos como ir para o céu, e não como o céu anda".

O panteísmo refere-se à ideia de que Deus não é mais (nem menos) do que as forças e leis da natureza.

Segundo uma história bem conhecida mas provavelmente apócrifa, Galileu teria murmurado, no fim do processo: «*E pur se muove* — e no entanto ela move-se».

Embora idoso e doente, Galileu foi chamado a Roma e isolado durante alguns meses. Os registos do caso-Galileu, são ainda hoje em parte secretos. Sabemos que ele foi julgado, ameaçado com a tortura, forçado a fazer uma confissão formal de que defendia e ensinava ideias proibidas. Foi ainda forçado a negar a teoria de Copérnico. Como paga das suas confissões e do seu repúdio da teoria de Copérnico, foi condenado apenas a prisão domiciliária perpétua. Os amigos que Galileu tinha em Itália não ousaram defendê-lo publicamente. O seu livro foi colocado no *Index*, juntamente com o de Copérnico e com um dos de Kepler, até 1835. Assim, Galileu foi usado como um aviso para todos os homens de que a procura de conformidade espiritual requeria também a conformidade intelectual.

Mas sem a liberdade intelectual, a ciência não pode florescer por muito tempo. A Itália tinha sido até então mãe de imensos homens de génio. No entanto, durante dois séculos após Galileu não apareceu em Itália um único grande cientista, enquanto muitos apareciam por todo o resto da Europa. Os cientistas actuais estão agudamente conscientes desta parte famosa da história do desenvolvimento das teorias planetárias. Já no nosso tempo, os professores e cientistas tiveram que encarar os inimigos do espírito de livre indagação e do ensino sem restrições. Hoje, como no tempo de Galileu, os homens ou as mulheres que criam ou divulgam novas ideias devem estar prontos a permanecer de pé firme na sua defesa. Pois ainda há os que receiam e que desejam eliminar a discussão aberta das novas ideias e da nova evidência.

Duzentos anos passados sobre a sua retenção em Roma, as opiniões tinham mudado de tal modo que Galileu recebia a honra de figurar no fresco "Galileu apresentando o seu telescópio ao Senado Veneziano", de Luigi Sabatelli (1772-1850).

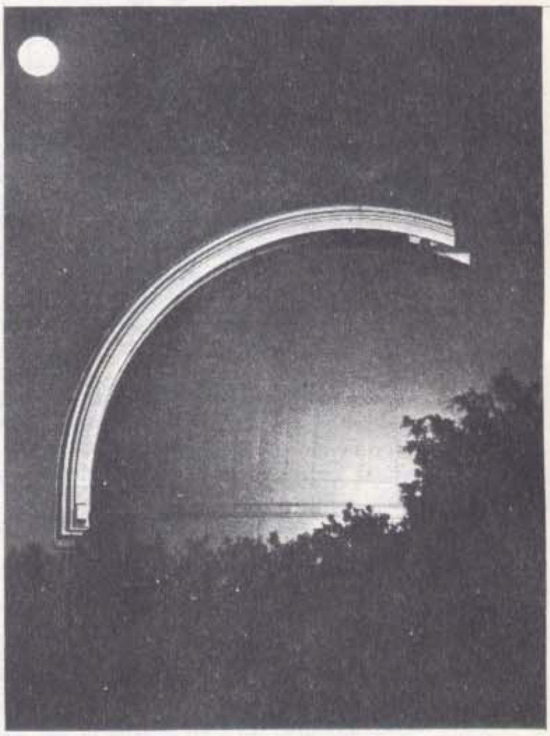
Platão sabia que um governo que pretende controlar totalmente o seu povo é ameaçado por ideias novas. Para evitar a expansão de tais ideias, Platão recomendava o tratamento agora bem conhecido: reeducação, prisão ou morte. Não há muito tempo, foi exigido a geneticistas soviéticos que renegassem teorias bem estabelecidas, não com base em nova evidência científica, mas porque "filósofos" do Partido as acusaram de conflitos com as doutrinas políticas. Analogamente a discussão da teoria da relatividade foi banida das escolas da Alemanha nazi, afirmando-se que a ascendência judaica de Einstein invalidava o seu trabalho. Um outro exemplo de intolerância foram as circunstâncias que conduziram ao "Julgamento do Macaco", em 1925 no Tenessee, onde o ensino da teoria da evolução biológica de Darwin foi atacado, por estar em conflito com certos tipos de interpretação bíblica.

Deveremos ser cuidadosos em não romantizar a lição deste episódio, em dois pontos. Embora um Galileu possa ainda ser desprezado ou ridicularizado, nem todos os que são desprezados ou ridicularizados são, por isso, Galileus. Poderá acontecer, realmente, que tal pessoa esteja errada. Por outro lado, mostra a experiência que a ciência pode continuar a viver de alguma maneira, pelo menos durante algum tempo, no mais hostil dos ambientes. Quando os políticos decidem o que pode ser pensado e o que não pode, a ciência sofre, como tudo o mais. Mas não se extingue necessariamente. Os cientistas podem reconfortar-se com o julgamento da história. Menos de 50 anos depois do caso-Galileu, o grande livro de Newton, os *Principia*, unificou brilhantemente o trabalho de Copérnico, de Kepler e de Galileu, com uma nova formulação dos princípios da mecânica. Sem Kepler e Galileu não teria, provavelmente, havido Newton. Tal como aconteceu, o trabalho destes três, juntamente com o de muitos contemporâneos, animados do mesmo espírito, marcou o começo triunfante da ciência moderna. Assim, as muito durantemente conquistadas novas leis da ciência e as novas perspectivas do lugar do homem no universo estavam estabelecidas. O que se seguiu foi denominado pelos historiadores "A Idade do Esclarecimento".

Q16 Quais das circunstâncias seguintes parecem ter contribuído para o facto de Galileu ter sido julgado pela Inquisição?

(a) Ele não acreditava em Deus.
(b) Era arrogante.
(c) Ele separou as questões religiosas das científicas.
(d) Escreveu em italiano.

GE 7.17.



É no Observatório de Palomar que está instalado o telescópio de reflexão de 200 polegadas, de Hale. Este Observatório foi construído no Monte Palomar, na parte sul da Califórnia.

7.1 Os materiais de estudo deste curso de física particularmente adequados para o capítulo 7 são os seguintes:

Experiências
A órbita de Marte
A órbita de Mercúrio

Actividades
Modelo tridimensional de duas órbitas
Inclinação da órbita de Marte
Demonstração sobre órbitas de satélites
Galileu
Modelos de secções cónicas
Problemas tentadores: determinação da distância da Terra ao Sol
Medição de áreas irregulares

Textos da Colectânea
"Kepler"
"Kepler on Mars"
"Kepler's Celestial Music"
"The Starry Messenger"
"Galileo"

Filme sem-fim
Órbita de um satélite de Júpiter

Acetato
Parâmetros orbitais

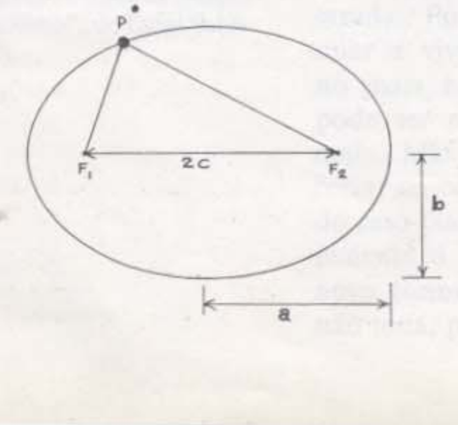
7.2 Quanto vale um erro de 8 minutos de arco, em graus? Quanto acha que seria necessário deslocar o pequeno ponto sobre um "i", impresso nesta página, para que se percebesse que estava descentrado? Qual o ângulo correspondente a esse deslocamento, observado da distância normal de leitura, ou seja, de cerca de 25 cm?

7.3 Resuma os passos dados por Kepler na determinação da órbita da Terra.

7.4 As velocidades de um planeta, nas posições orbitais mais próximas e mais afastadas do Sol, são inversamente proporcionais às distâncias ao Sol. Qual a diferença percentual entre a mais baixa velocidade da Terra, em Julho, quando está a 1,02 UA do Sol, e a sua maior velocidade, em Janeiro, quando está a 0,98 UA do Sol?

7.5 Resuma os passos dados por Kepler na determinação da órbita de Marte.

7.6 Em qualquer elipse, a soma das distâncias entre um ponto da curva e os dois focos é igual ao comprimento do eixo maior, isto é, $(F_1P + F_2P) = a$. Esta propriedade das elipses permite desenhá-las utilizando uma volta de cordel colocado de maneira a abraçar simultaneamente a ponta do lápis e dois alfinetes colocados nos focos. Qual deverá ser o comprimento do cordel?



7.7 Ao descrever órbitas em torno do Sol, o ponto mais próximo deste é denominado *periélio* e o ponto mais afastado *afélio*. As distâncias destes dois pontos ao Sol são chamadas, respectivamente, *distância de periélio* e *distância de afélio*. Os termos periélio e afélio vêm do grego, língua em que *helios* é o sol, *peri* significa próximo e *apo* significa distante de.

(a) Indique algumas outras palavras nas quais os prefixos *peri* e *apo* ou *ap* tenham significados semelhantes.
(b) Ao descrever órbitas de satélites terrestres, são muitas vezes referidos os termos *apogeu* e *perigeu*. Qual o seu significado?
(c) Como se deverão chamar os pontos das órbitas de satélites lunares correspondentes àqueles de que temos vindo a falar?

7.8 A distância de periélio (maior aproximação do Sol) do planeta Mercúrio foi medida em cerca de $45{,}8 \times 10^6$ km e a sua distância de afélio (maior afastamento do Sol) em cerca de $70{,}0 \times 10^6$ km. Qual é a excentricidade da órbita de Mercúrio?

7.9 A excentricidade da órbita de Plutão é de 0,254. Qual é o quociente entre a velocidade orbital mínima e a velocidade orbital máxima de Plutão?

7.10 A regra $v_1 R =$ const. faz com que seja fácil determinar v_1 para um ponto qualquer de uma órbita, conhecidas que sejam a velocidade e a distância a um outro ponto qualquer. Faça um esboço que mostre como determinar v, se se conhecer v_1.

7.11 O cometa de Halley tem um período de 76 anos, e a sua órbita tem uma excentricidade de 0,97.

(a) Qual a sua distância média em relação ao Sol?
(b) Qual a sua maior distância em relação ao Sol?
(c) Qual a sua menor distância em relação ao Sol?
(d) Qual a relação entre as suas velocidades máxima e mínima?

7.12 A distância média do planeta Plutão ao Sol é de 39,6 UA. Qual o seu período orbital?

7.13 Descobriram-se três novos planetas principais, desde os tempos de Kepler. Os seus períodos orbitais e as suas distâncias médias em relação ao Sol estão indicados na tabela apresentada abaixo. Determine se a lei dos períodos de Kepler é também verificada para estes planetas.

	Data da descoberta	**Período orbital**	**Distância média ao Sol**	**Excentricidade da órbita**
Úrano	1781	84,013 anos	19,19 UA	0,047
Neptuno	1846	164,783	30,07	0,009
Plutão	1930	248,420	39,52	0,249

7.14 Tendo em conta os dados de que dispunha, acha que a conclusão de Kepler, que o quociente $T^2/R^3_{\text{méd}}$ era constante, estava suficientemente justificada?

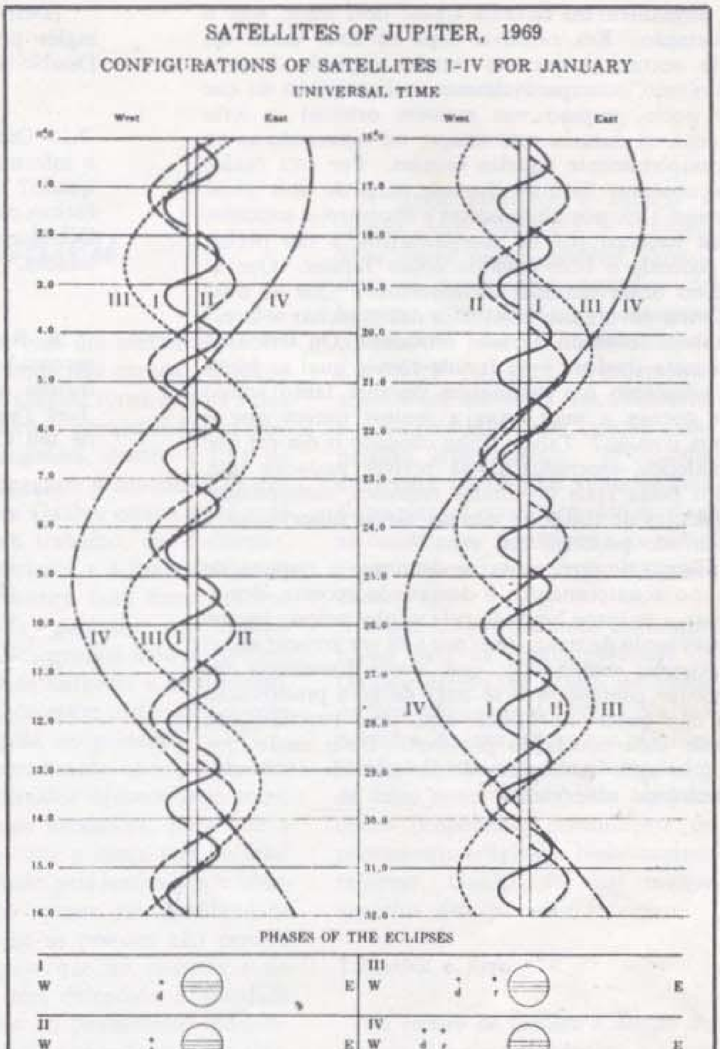
7.15 A carta que se apresenta na página seguinte é uma reprodução do exemplar de Janeiro de 1969 da revista "Sky and Telescope".

(a) Faça um esquema que mostre como apareceram Júpiter e os seus satélites a intervalos de uma semana, começando a partir do dia "0".

OS SATÉLITES DE JÚPITER

As quatro linhas curvas representam os quatro satélites brilhantes de Júpiter (os de de Galileu): I, Io; II, Europa; III, Ganimedes; IV, Calisto. A localização do disco planetário está indicada pelos pares de linhas verticais. A curva é interrompida quando uma lua está invisível, por estar por detrás do disco (isto é, oculta por Júpiter).

As linhas horizontais marcam a passagem do tempo, correspondendo a de cima de todas, à esquerda, às 0 horas (tempo Universal). Na escala vertical, 1 milímetro corresponde a quase 4 horas e meia. Nesta carta, «oeste» corresponde ao lado esquerdo, tal como num telescópio inversor para um observador situado no Hemisfério Norte. Em baixo, «d» é o ponto de desaparecimento de um satélite na sombra de Júpiter; «r» é o ponto de reaparecimento. Extraído de *American Ephemeris and Nautical Almanac.*



(b) Determine os valores de $R_{\text{méd}}$ e de T a partir de medidas efectuadas sobre a própria carta. (Considere uma escala conveniente qualquer para $R_{\text{méd}}$, como por exemplo "cm medidos sobre o diagrama").

(c) A lei dos períodos de Kepler, $T^2/R^3_{\text{méd}}$ = constante, é verificada para os satélites de Júpiter?

Transcrevem-se a seguir duas passagens de "Cartas sobre Manchas Solares", de Galileu. Comente as características de Galileu como observador e como cientista, na base destas referências.

(4 de Maio de 1612)

"Resolvi não pôr nada à volta de Saturno, excepto aquilo que já observei e descrevi — isto é, duas pequenas estrelas que lhe tocam, uma a leste e a outra a oeste, nas quais não foi ainda observada qualquer alteração nem se espera qualquer alteração no futuro, salvo algum muito estranho acontecimento completamente diferente de qualquer outro movimento conhecido ou sequer imaginado por nós. Mas quanto à suposição de Apeles, de que Saturno é por vezes oblongo e por vezes acompanhado por duas estrelas nos flancos. Vossa Excelência poderá estar seguro de que isto resulta ou da imperfeição do telescópio ou dos olhos do observador, porque a forma de Saturno é: oOo, quando mostrada por uma visão perfeita e por instrumentos perfeitos, mas aparece como: , onde falta a perfeição, a forma e a separação das três estrelas não sendo perfeitamente observada. Eu, que o observei mil vezes, em diferentes alturas, com um excelente instrumento, posso assegurar-lhe que nenhuma alteração é nele alguma vez observada. E o raciocínio, baseado na nossa experiência de todos os outros movimentos estelares, faz-nos ter a certeza de que nenhuma será alguma vez observada, porque se essas estrelas tivessem algum movimento semelhante ao das outras estrelas, há muito teriam sido separadas ou fundidas com o corpo de Saturno, mesmo se esse movimento fosse mil vezes mais lento do que o de qualquer outra estrela que vagueia pelos céus".

(1 de Dezembro de 1612)

"Escrevi há cerca de três anos que, para minha grande surpresa, tinha descoberto que Saturno era composto por três corpos; isto é, que era um agregado de três estrelas, dispostas numa linha recta paralela à eclíptica, das quais a central era muito maior que as outras. Acreditei que não tivessem qualquer movimento relativo, porque quando as observei pela primeira vez elas pareciam quase tocar-se e assim permaneceram durante quase dois anos, sem a menor variação. Era razoável supô-las fixas umas em relação às outras, já que um simples segundo de arco (um movimento incomparavelmente mais pequeno do que qualquer outro, mesmo nas maiores órbitas) se teria tornado sensível durante esse tempo, ou separando-as ou unindo completamente aquelas estrelas. Por esta razão, deixei de observar Saturno durante mais de dois anos. Mas regressei a ele nos últimos dias e encontrei-o solitário, sem o seu habitual par de companheiros, e tão perfeitamente redondo e bem definido como Júpiter. Que se poderá dizer desta estranha metamorfose? Que as duas estrelas foram devoradas, à maneira das manchas solares? Terá Saturno devorado as suas crianças? Ou terá sido realmente uma ilusão e uma fraude com a qual as lentes do meu telescópio me enganaram durante tanto tempo — e não apenas a mim, mas a muitos outros que o observaram comigo? Talvez tenha chegado o dia em que uma desfalecida esperança possa reviver naqueles que, conduzidos pelas mais profundas reflexões, compreenderam as falácias de todas as minhas novas observações e concluíram não poderem elas existir!

Não preciso de dizer nada de definitivo a respeito de tão estranho acontecimento; é demasiado recente, demasiado ímpar, e eu estou limitado pela minha própria imperfeição e pelo medo de errar. Mas por esta vez arriscar-me-ei a uma pequena temeridade; que Vossa Excelência me perdoe porque confesso que se trata de uma precipitação e afirmo não querer apresentar aqui uma previsão mas tão-somente uma conclusão provável. Direi então que acredito que, após o solstício do Inverno de 1614, elas serão novamente observadas".

(*Descobertas e Opiniões de Galileu*, traduzido para o inglês por Stillman Drake, publicado (em inglês) por Doubleday, 1957, pp. 101-102, 143-144).

7.17 Qual é o procedimento vulgar pelo qual o público é informado das novas teorias científicas? Acha-o adequado? Até que ponto são ampliados pelos meios jornalísticos os aspectos mais soantes das opiniões apresentadas? Dê alguns exemplos, tirados de jornais ou revistas de actualidades.

7.18 Recentemente, a Igreja Católica Romana decidiu reconsiderar a sua condenação de Galileu. O artigo reproduzido na página ao lado, que apareceu no "*The New York Times*" em Julho de 1968, refere passagens da opinião de um Cardeal austríaco sobre o assunto.

(a) Nos comentários referidos, o Cardeal Konig sugere três formas de conhecimento: "revelações divinas", "construções filosóficas" e "visões espontaneamente ingénuas da realidade". Em qual delas acha que ele classificaria as afirmações de Galileu? Galileu concordaria?

(b) Qual parece ser a base da reconsideração da Igreja? Dúvida sobre as *conclusões* do julgamento, ou sobre a *capacidade* ou *possibilidade* de julgar as ideias científicas? Terá sido por alguma alteração na filosofia da Igreja, ou por se ter verificado que Galileu estava certo?

Para Reabilitar Galileu

O que se segue são excertos de um discurso intitulado "Religião e Ciências Naturais" feito pelo Cardeal Franz Konig de Viena, num encontro de laureados com o Prémio Nobel, na Alemanha, na semana passada.

Nem as igrejas cristãs nem a ciência moderna conseguiram até agora controlar aquela componente da natureza humana que reflecte visivelmente um fenómeno semelhante do reino animal: a agressividade. Sustento que a neutralização deste instinto, que cria agora mais perigos que nunca, tem que ser uma meta primordial na cooperação objectiva entre teólogos e cientistas. Este trabalho deverá tentar cobrir a incongruência entre o poder de destruição do homem, completo e aperfeiçoado, e a sua condição psíquica, que permanece desenfreada e presa do atavismo.

A remoção de barreiras

Para que tal cooperação se torne possível, é preciso primeiro remover as barreiras do passado. Talvez que o maior obstáculo, bloqueando desde há séculos a cooperação entre a religião e a ciência, seja o julgamento de Galileu.

Para a igreja depois do Concílio Vaticano II, virando-se como se está a virar para o mundo como advogada dos direitos legítimos e da liberdade do espírito humano, parece ter chegado a altura de determinar tão completamente quanto possível a era de desagrado e desconfiança que começou com a censura a Galileu, em 1633. Durante mais de 300 anos, o mundo científico olhou, com razão, para o injusto veredicto da igreja sobre um daqueles homens que prepararam o caminho para a ciência moderna, com um sentimento doloroso de ferida não curada. O julgamento de Galileu torna-se hoje ainda mais doloroso porque todas as pessoas inteligentes, dentro e fora da igreja, chegaram à conclusão de que o cientista Galileu estava certo e de que o seu trabalho, em particular, deu à mecânica e à física modernas a sua primeira base firme. A sua perspicácia permitiu ao espírito humano desenvolver uma nova compreensão da natureza e do universo, substituindo assim conceitos e noções herdados da antiguidade.

Uma clarificação aberta e honesta do caso-Galileu aparece hoje como ainda mais necessária, para que a pretensão que a igreja tem de falar pela verdade, pela justiça e pela liberdade não sofram em credibilidade e para que as pessoas não percam fé na igreja que no passado e no presente tem defendido a liberdade e o direito ao pensamento independente contra várias formas de totalitarismo e contra a chamada "raison d'état".

Estou em posição de anunciar perante esta assembleia que as autoridades competentes decidiram dar os primeiros passos para trazer ao caso-Galileu uma solução clara e aberta.

A Igreja Católica está hoje indubitavelmente pronta a fazer uma revisão ao juízo formulado no julgamento de Galileu. A clarificação das questões que estavam ainda enevoadas no tempo de Galileu permite hoje retomar o caso com plena confiança em si própria e sem preconceitos. Os espíritos fiéis lutaram dolorosamente pela verdade e encontraram gradualmente o caminho certo através da experiência e de discussões conduzidas com paixão.

A igreja aprendeu a encarar a ciência com franqueza e respeito. Sabe agora que é possível harmonizar o pensamento científico do homem e a religião. A aparente contradição entre o sistema de Copérnico ou, mais precisamente, a mecânica inicial da física moderna e a história bíblica da criação desapareceu gradualmente. A teologia diferencia agora mais vincadamente as revelações essencialmente divinas, as construções filosóficas e as visões espontaneamente ingénuas da realidade.

O que eram obstáculos intransponíveis para os contemporâneos de Galileu deixou há muito de irritar os fiéis educados de hoje. Na sua maneira de ver as coisas, Galileu já não aparece como mero fundador de uma nova ciência mas também como proponente proeminente de pensamento religioso. Neste campo, também, Galileu foi em muitos aspectos um pioneiro modelar.

Tentativa e Erro

Na esteira de Galileu e dentro do espírito das suas diligências, a igreja Católica tem vindo a reconhecer, em sucessivas tentativas, a possibilidade de uma cooperação harmoniosa entre a investigação livre e um pensamento livre por um lado e uma absoluta lealdade à palavra de Deus por outro. A tarefa actual é a de esboçar as consequências deste reconhecimento. Sem fixar fronteiras, Deus abriu a sua criação — o universo — à mente inquiridora do homem.

A igreja não tem qualquer razão para evitar uma revisão do discutido veredicto de Galileu. Pelo contrário, o caso dá à igreja uma oportunidade de explicar o seu lema de infalibilidade no seu domínio, e de lhe definir os limites. Todavia, será também uma oportunidade para provar que a igreja considera mais a justiça que o prestígio.

(Excerto do "The New York Times", Julho de 1968)

Isaac Newton (1642-1727)

CAPÍTULO 8

A Unidade da Terra e do Céu — A Obra de Newton

8.1 Newton e a ciência do século XVII

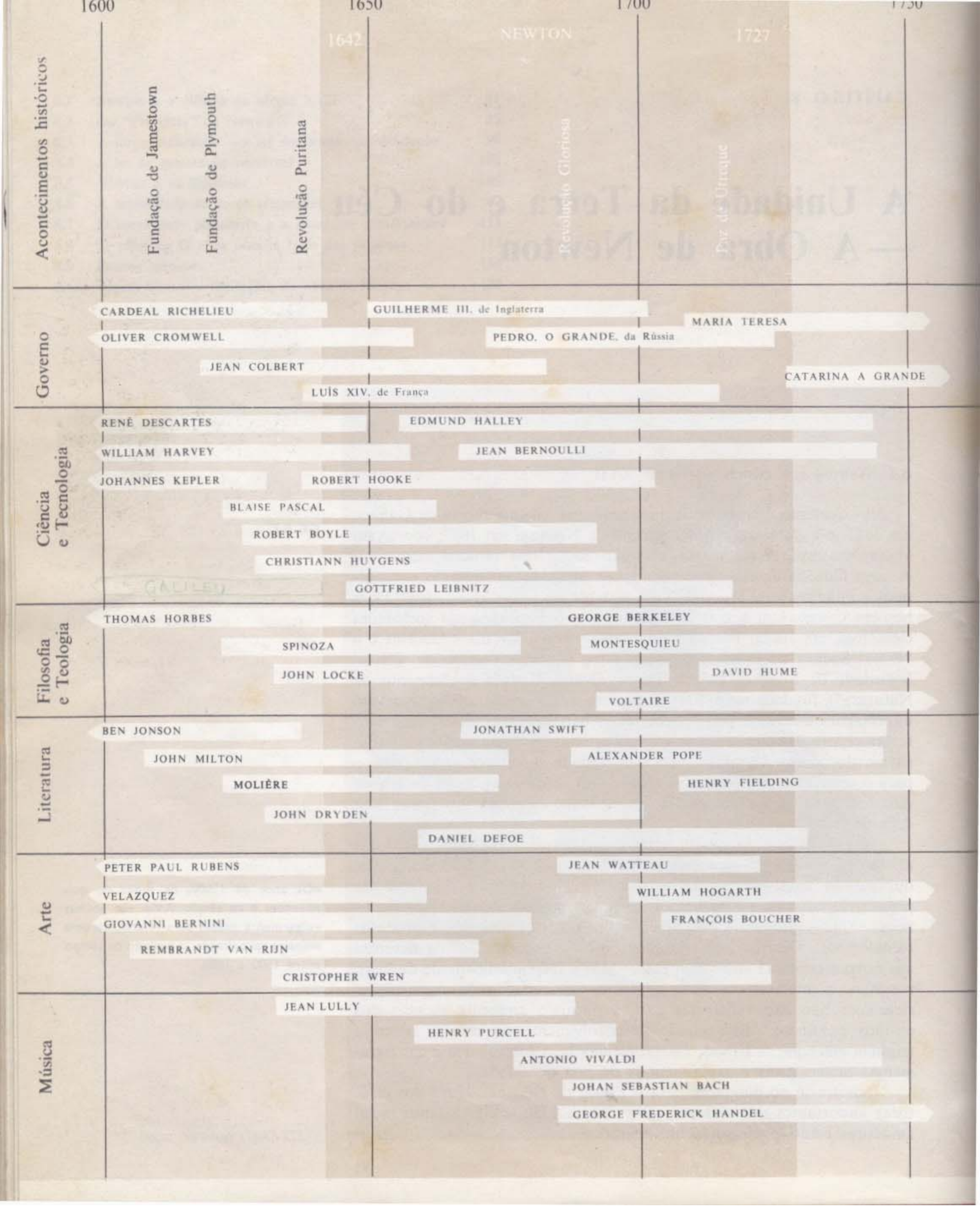
Nos quarenta e cinco anos que medearam entre a morte de Galileu, em 1642, e a publicação dos *Principia* de Newton, em 1687, ocorreram alterações importantes na organização social dos estudos científicos. A nova filosofia da ciência experimental, aplicada por homens entusiásticos e imaginativos, produzia uma torrente de novos resultados. Estes homens começavam a trabalhar juntos e a organizar-se em sociedades científicas, em Itália, França e Inglaterra. Uma das mais famosas é a "Royal Society of London for Improving Natural Knowledge" ("Real Sociedade de Londres para o Desenvolvimento do Conhecimento da Natureza"), fundada em 1662. Os experimentadores científicos trocavam informações através dessas sociedades, debatiam novas ideias, argumentavam contra os adversários das novas actividades experimentais e publicavam documentos técnicos. Cada sociedade procurava apoio público para o seu trabalho e publicava estudos em jornais científicos de grande difusão. Através das sociedades, a actividade científica tornava-se bem definida, forte, internacional.

GE 8.1.

Este desenvolvimento da actividade científica era uma parte das alterações gerais que ocorriam na cultura, na política e na economia, durante os anos quinhentos e seiscentos. (Veja-se o diagrama da página 92). Artífices e homens ricos envolveram-se nos estudos científicos. Alguns procuraram o desenvolvimento dos métodos e produtos tecnológicos. Outros encontraram no estudo experimental da natureza um novo e excitante entretenimento. Mas a disponibilidade de dinheiro e tempo, o interesse crescente na ciência e a criação de organizações científicas não são suficientes para explicar o crescente sucesso dos estudos científicos. Este rápido desenvolvimento da ciência assentou também em homens hábeis, em problemas bem formulados e em ferramentas matemáticas e experimentais de boa qualidade.

«Os anos de 1500», os «anos de quinhentos» e «o século XVI» são formas vulgarmente usadas para referir, de uma maneira aproximada, o período de tempo entre 1500 e 1600.

Indicam-se no diagrama para a Época de Newton alguns dos cientistas importantes que viveram entre 1600 e 1750. A lista tanto inclui amadores como professores universitários.



1600
1650
1700
1750
1642
NEWTON
1727
Acontecimentos históricos
Fundação de Jamestown
Fundação de Plymouth
Revolução Puritana
Revolução Gloriosa
Paz de Utreque
Governo
CARDEAL RICHELIEU
GUILHERME III, de Inglaterra
MARIA TERESA
OLIVER CROMWELL
PEDRO, O GRANDE, da Rússia
JEAN COLBERT
CATARINA A GRANDE
LUÍS XIV, de França
Ciência e Tecnologia
RENÉ DESCARTES
EDMUND HALLEY
WILLIAM HARVEY
JEAN BERNOULLI
JOHANNES KEPLER
ROBERT HOOKE
BLAISE PASCAL
ROBERT BOYLE
CHRISTIANN HUYGENS
GALILEU
GOTTFRIED LEIBNITZ
Filosofia e Teologia
THOMAS HORBES
GEORGE BERKELEY
SPINOZA
MONTESQUIEU
JOHN LOCKE
DAVID HUME
VOLTAIRE
Literatura
BEN JONSON
JONATHAN SWIFT
JOHN MILTON
ALEXANDER POPE
MOLIÈRE
HENRY FIELDING
JOHN DRYDEN
DANIEL DEFOE
Arte
PETER PAUL RUBENS
JEAN WATTEAU
VELAZQUEZ
WILLIAM HOGARTH
GIOVANNI BERNINI
FRANÇOIS BOUCHER
REMBRANDT VAN RIJN
CRISTOPHER WREN
Música
JEAN LULLY
HENRY PURCELL
ANTONIO VIVALDI
JOHAN SEBASTIAN BACH
GEORGE FREDERICK HANDEL

Nos trabalhos de Galileu e de Kepler aparecem numerosos problemas bem formulados. Os seus estudos mostraram como podem ser úteis as matemáticas quando usadas em conjunto com a observação experimental. Para além do mais, os seus trabalhos levantaram novas questões excitantes. Por exemplo, que forças deverão actuar nos planetas para que se expliquem as trajectórias realmente observadas? E por que é que os objectos caem como caem, junto à superfície terrestre?

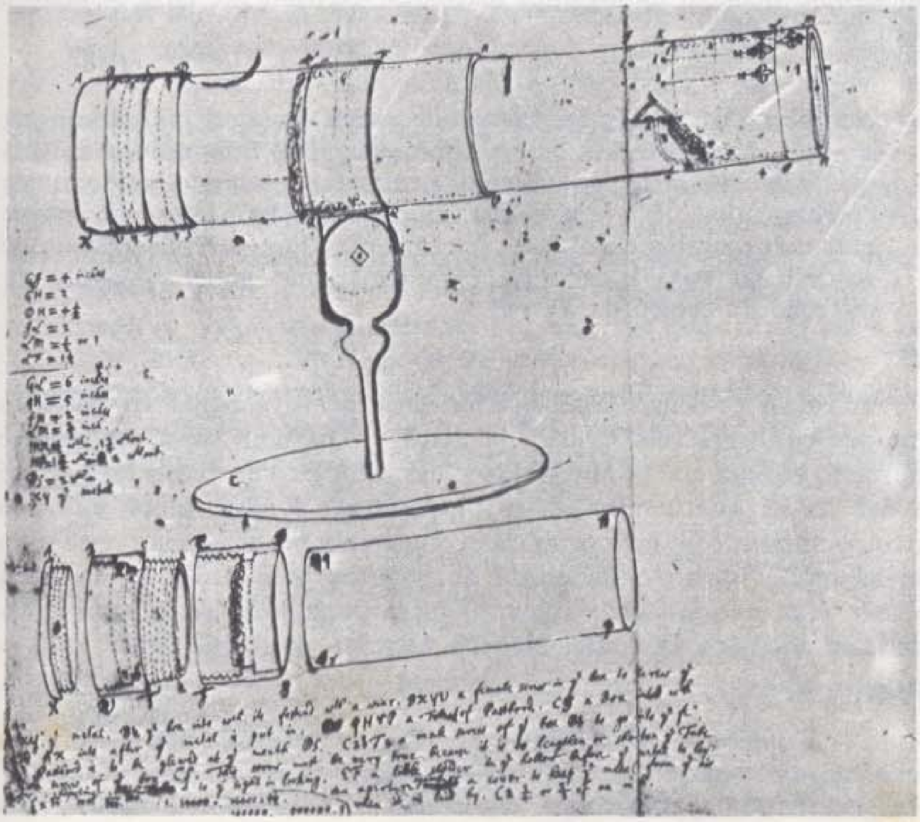
Estavam a ser criadas belas ferramentas experimentais e matemáticas. Com a aplicação da matemática à física, cada uma das ciências estimulava novos desenvolvimentos na outra. Analogamente, o construtor de instrumentos e o cientista ajudavam-se um ao outro.

Um outro factor de grande importância foi a rápida acumulação do próprio conhecimento científico. Desde os tempos de Galileu que eram apresentadas em livros e publicações periódicas experiências susceptíveis de serem repetidas. As teorias podiam agora ser testadas, modificadas. Cada estudo assentava noutros feitos previamente.

Newton, que viveu nesta nova era científica, é o personagem central deste capítulo. Todavia, antes de seguir o seu trabalho, deveremos relembrar que na ciência, como em qualquer outro campo, as contribuições úteis vêm de muitos homens. Toda a estrutura da ciência assenta não apenas naqueles que são considerados génios, mas também em muitos outros, menos conhecidos. Como disse Lord Rutherford, um dos fundadores da moderna teoria atómica:

> Não é da natureza das coisas que um único homem faça uma súbita e violenta descoberta; a ciência avança passo a passo e cada homem assenta no trabalho dos seus predecessores... Os

Newton entrou em 1661, com a idade de dezoito anos, para o Trinity College, na Universidade de Cambridge. Ainda estudante, já fazia experiências e ensinava. Esta gravura mostra o calmo estudante, trajando uma cabeleira postiça e as pesadas vestes académicas.



Este desenho do telescópio de reflexão, inventado por ele próprio, foi feito por Newton quando era ainda um estudante.

cientistas não estão dependentes das ideias de um único homem, mas antes da combinação da sabedoria de milhares de homens.

Para contar a história apropriadamente, deveríamos seguir completamente a dependência de cada homem naqueles que trabalharam antes dele. Deveríamos estudar a influência dos seus contemporâneos e a sua própria influência sobre os seus sucessores. No entanto, dentro do espaço disponível, será apenas possível fazer breves referências a estas relações.

Isaac Newton nasceu no dia de Natal de 1642, na pequena vila inglesa de Woolsthorpe, no Lincolnshire. Foi um pequeno camponês sossegado. Tal como o jovem Galileu, gostava de construir pequenos dispositivos mecânicos e parecia ter um certo gosto pela matemática. Entrou em 1661 para o Trinity College da Universidade de Cambridge, com a ajuda material de um tio. Ali se envolveu no estudo das matemáticas e foi um estudante bem sucedido. Em 1665, a Peste Negra varreu toda a Inglaterra. O colégio fechou e Newton regressou a casa, em Woolsthorpe. Aí, com a idade de vinte e quatro anos, fez descobertas espectaculares. Na matemática descobriu o teorema do binómio e o cálculo diferencial. Na óptica desenvolveu uma teoria das cores. Na mecânica já tinha formulado um conceito claro das duas primeiras leis do movimento e da lei da gravitação universal. Tinha também descoberto a equação da aceleração centrípeta. Todavia, não anunciou esta equação senão muitos anos depois da afirmação equivalente de Huygens.

Deve ter sido desta altura a famosa e discutida queda da maçã. Um dos sítios em que é referida a história da maçã é a biografia de Newton, escrita em 1752 pelo seu amigo William Stukeley. Nela se lê que numa ocasião em que Stukeley tomava chá com Newton, sentados no jardim, debaixo de algumas macieiras, Newton lhe teria contado o seguinte episódio:

> ele [Newton] estava na mesma posição em que, anteriormente, a noção de gravitação lhe viera à mente. Isto fora provocado pela queda de uma maçã, quando ele se encontrava sentado numa atitude contemplativa. Por que é que aquela maçã teria que cair sempre perpendicularmente ao chão, pensara ele. Por que não haveria de se deslocar para o lado ou para cima, mas antes e sempre em direcção ao centro da Terra?

A ênfase principal desta história deve provavelmente ser posta na "atitude contemplativa" e não na maçã. Mais uma vez a situação se ajusta ao padrão que já observámos: um complexo quebra-cabeças (aqui o das forças que actuam sobre os planetas) começa a ser resolvido quando alguém com raciocínio claro contempla um fenómeno conhecido de há muito (como o da queda de objectos para a Terra). Newton obteve uma relação onde antes ninguém tinha visto nenhuma. Referindo-se aos anos da Peste, Newton escreveu em certa altura:

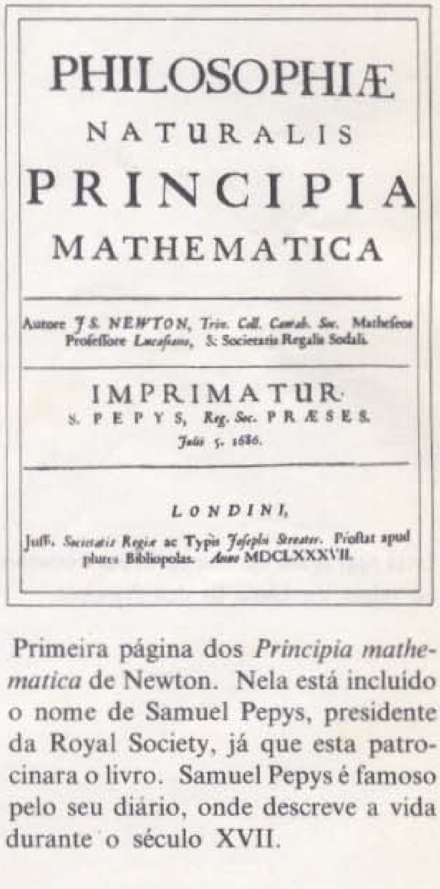
> Comecei a pensar que a gravidade se estendia até à órbita da Lua, e... a partir da regra de Kepler [terceira lei, leis dos períodos]... deduzi que as forças que conservam os Planetas nas suas órbitas

devem ser inversamente proporcionais aos quadrados das suas distâncias aos centros em torno dos quais revolucionam: e assim comparei a força necessária para conservar a Lua na sua órbita com a força da gravidade à superfície da Terra e encontrei valores agradavelmente semelhantes. Tudo isto aconteceu durante os dois anos de peste, em 1665 e 1666, porque naqueles dias eu estava na aurora da minha idade da invenção e a filosofia e a matemática eram-me mais importantes que nunca.

Pouco depois do regresso de Newton a Cambridge, ele foi escolhido para suceder ao seu antigo mestre, como professor de matemática. Ensinou na universidade e contribuiu com documentos na Royal Society. No inicio, as suas contribuições eram principalmente no campo da óptica. A sua *Teoria da Luz e das Cores*, finalmente publicada em 1762, foi objecto de tão longa e amarga controvérsia com alguns outros cientistas que aquele homem introspectivo e complexo decidiu não mais publicar fosse o que fosse.

Halley, um devotado amigo de Newton e notável astrónomo, pediu-lhe em 1684 conselho a respeito de uma controvérsia com Cristopher Wren e Robert Hooke sobre a força necessária para levar um corpo a mover-se ao longo de uma elipse de acordo com as leis de Kepler. Este era um dos problemas científicos mais debatidos e interessantes da época. Halley ficou agradavelmente surpreendido ao ver que Newton tinha já calculado a solução exacta do problema ("e muitos outros problemas"). Halley persuadiu então o amigo a publicar aqueles estudos. Para encorajar Newton, Halley responsabilizou-se por todos os custos da publicação. Menos de dois anos mais tarde os *Principia* estavam prontos para publicação. Essa publicação, em 1687, colocou rapidamente Newton no lugar de um dos maiores pensadores da história.

Vários anos mais tarde, Newton sofreu aparentemente um esgotamento. Recuperou, mas daí até à sua morte, trinta e cinco anos mais tarde, não produziu qualquer outra descoberta científica importante. Completou estudos anteriores sobre o calor e a óptica e passou a escrever cada vez mais sobre teologia. Durante esses anos recebeu imensas honrarias. Foi designado Curador da Casa da Moeda em 1699 e, mais tarde, seu Presidente, em parte devido ao seu grande interesse e conhecimento sobre a química dos metais. Naquele cargo ajudou a restabelecer o valor das moedas britânicas, nas quais estavam a ser incluídos chumbo e cobre em vez de prata e ouro. Em 1689 e 1701 representou a Universidade de Cambridge no Parlamento e foi feito Cavaleiro em 1705, pela Rainha Ana. Foi presidente da Royal Society desde 1703 até à sua morte, em 1727. Está sepultado na Abadia de Westminster.



PHILOSOPHIÆ

NATURALIS

PRINCIPIA

MATHEMATICA.

Autore J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.

S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.

Julii 5. 1686.

LONDINI,

Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Primeira página dos *Principia mathematica* de Newton. Nela está incluído o nome de Samuel Pepys, presidente da Royal Society, já que esta patrocinara o livro. Samuel Pepys é famoso pelo seu diário, onde descreve a vida durante o século XVII.

8.2 Os "Principia" de Newton

Encontramos um esboço bem claro do livro no prefácio original dos *Principia* (escrito em latim):

> Uma vez que os antigos (como nos diz Pappus) consideraram a ciência da mecânica como da maior importância para a investigação

das coisas naturais, e que os modernos, rejeitando formas substanciais e qualidades ocultas, se empenharam em sujeitar os fenómenos naturais às leis da matemática, cultivei neste tratado a matemática tanto quanto ela se relaciona com a filosofia [diríamos hoje "ciência física"]... porque toda a tarefa da filosofia parece consistir nisto — dos fenómenos do movimento investigar [induzir] as forças da natureza e a partir destas forças demonstrar [deduzir] os outros fenómenos, e com este objectivo estão orientadas as proposições gerais dos primeiro e segundo Livros. No terceiro Livro dou um exemplo disto na explicação do sistema do Universo; porque, pelas proposições matematicamente demonstradas nos Livros anteriores, no terceiro derivo, a partir dos fenómenos celestes, as forças de gravidade pelas quais os corpos se ligam ao Sol e aos vários planetas. E então, a partir destas forças, por outras proposições também matemáticas, deduzo os movimentos dos planetas, dos cometas, da Lua e do mar [marés]...

O trabalho começa com definições — massa, momento, inércia, força. Vêm em seguida as três leis do movimento e os princípios de adição de forças e velocidades (discutidos na Unidade 1). Newton incluiu também uma passagem igualmente notável e importante a propósito de "Regras de Raciocínio em Filosofia". As quatro regras, ou postulados, reflectem a sua profunda fé na uniformidade de toda a natureza. Elas foram concebidas com o intuito de guiar os cientistas na formulação de hipóteses. Newton pretendeu ainda tornar claras para o leitor as suas próprias hipóteses filosóficas. Estas regras, cujas raízes remontam à Grécia antiga, são ainda úteis. A primeira chama-se Princípio da Parcimónia, a segunda e a terceira Princípios da Unidade. A quarta exprime a fé necessária para a utilização do processo lógico.

Eis as regras de Newton, numa forma concisa e usando linguagem moderna:

Estas regras são apresentadas por Newton no início do Livro III dos *Principia*.

1. "A natureza não faz nada... em vão, e nada é mais vão do que aquilo que para nada serve". A natureza é essencialmente simples; por isso, não se deverão introduzir mais hipóteses do que as necessárias e suficientes para explicar os factos observados. Esta fé fundamental para todos os cientistas assemelha-se a uma paráfrase de Galileu: "A natureza não usa muitas coisas para fazer aquilo que pode ser feito com poucas". Galileu, por sua vez, estava a recordar uma opinião de Aristóteles. Assim, a fé na simplicidade tem uma longa história.
2. "Consequentemente, para os mesmos efeitos naturais devemos, tanto quanto possível, atribuir as mesmas causas. Como a respiração para o homem e para um animal; a queda de pedras na Europa e na América;... a reflexão da luz na Terra e nos planetas".
3. As propriedades comuns a todos aqueles corpos que podem ser objecto das nossas experiências devem ser atribuídas (até prova em contrário) a todos os corpos em geral. Por exemplo, uma vez que todos os objectos conhecidos dos experimentadores têm massa,

esta regra guiaria Newton na proposição de que *todos* os corpos têm massa (mesmo aqueles que estão fora do nosso alcance, na região celeste).

4. Na "filosofia experimental", hipóteses ou generalizações baseadas na experiência devem ser aceites como "correctamente ou muito aproximadamente verdadeiras, não obstante quaisquer outras hipóteses contrárias que possam ser imaginadas". Devemos aceitar tais hipóteses até que surja evidência adicional pela qual possam ser tornadas ainda mais precisas ou revistas.

Note-se que a hipótese de Newton nega a distinção entre a matéria terrestre e a matéria celeste.

Reformule estas regras por palavras suas antes de passar à secção seguinte. (A possibilidade de as regras de raciocínio de Newton serem aplicáveis fora da ciência poderá constituir um bom tema para um trabalho escrito).

Os *Principia* constituem um documento extraordinário. As suas três secções principais contêm um autêntico manancial de descobertas matemáticas e físicas. Mas, ofuscando tudo o mais, está a teoria da gravitação universal, com as provas e os argumentos que conduzem a ela. Newton utiliza um tipo de argumentação baseado no de Euclides — o tipo de demonstrações que se encontra ao estudar geometria. A maior parte dos pontos apresentados aqui foi "traduzida" para termos modernos, porque o estilo característico dos *Principia*, com passos matemáticos muito pormenorizados, não se mostra familiar.

A ideia central da gravitação universal pode ser formulada muito simplesmente: *no universo qualquer objecto atrai qualquer outro*. Além disso, a "quantidade" de atracção depende de uma maneira simples das massas dos objectos e da distância entre eles.

Esta foi a grande síntese de Newton, juntando ousadamente as leis terrestres da força e do movimento com as leis astronómicas do movimento. A gravitação é uma força *universal* que se aplica à Terra e às maçãs, ao Sol e aos planetas, e a todos os outros corpos (tais como os cometas, que se movem no sistema solar). Os Céus e a Terra foram unidos num único grande sistema, dominado pela Lei da Gravitação Universal. O respeito e admiração gerais estão bem reflectidos nas palavras do poeta inglês Alexander Pope:

> Na noite se escondiam a Natureza e suas leis:
> Deus disse, Que surja Newton! e tudo foi luz.

Os *Principia*, escritos em latim, estavam cheios de longas argumentações geométricas e eram difíceis de ler. Felizmente, vulgarizadores dotados escreveram sumários que permitiram a um vasto círculo de leitores a aprendizagem dos argumentos e conclusões de Newton. Um dos mais lidos destes livros populares foi publicado em 1736 por Voltaire, filósofo e reformador francês.

Os leitores destes livros devem ter-se sentido excitados e talvez intrigados pela nova perspectiva e pelas hipóteses apresentadas. Durante dois mil anos, desde a Grécia antiga até bem depois de Copérnico, tinham sido usados os conceitos de lugar e movimento naturais para explicar a posição geral e os movimentos dos planetas. Desde o tempo dos Gregos que se acreditava que os planetas se moviam nas suas órbitas por ser esse o seu "movimento natural". No entanto, o movimento natural de um corpo, para Newton, era o movimento uniforme em linha recta. O movimento ao longo de uma curva era evidência de que uma força resultante estava continuamente aplicada aos planetas, acelerando-os e desviando-os do seu movimento natural ao longo de linhas rectas. Mas a força actuante nos planetas era inteiramente natural e actuava em todos os corpos, celestes ou terrestres. Além disso, era também a mesma força que provocava a queda dos corpos na Terra. Que reviravolta na interpretação do que era "natural"!

8.3 A força planetária — a lei do inverso do quadrado

Newton acreditava que a trajectória natural para um planeta era a linha recta, e que ele era forçado a percorrer uma trajectória curvilínea pela influência do Sol. Conseguiu mostrar que a lei das áreas de Kepler era verdadeira se, e só se, as forças exercidas sobre os planetas estivessem dirigidas sempre para um único ponto. (Nas páginas coloridas sob o título "O movimento sob uma força central" são dados pormenores sobre a demonstração de Newton relativamente a esta "força central"). Demonstrou também que esse ponto único coincidia com a posição do Sol. A lei das áreas seria satisfeita qualquer que fosse a *intensidade* da força, desde que estivesse sempre dirigida para o mesmo ponto. Contudo, Newton tinha ainda que mostrar que uma força gravitacional central produzia a relação exacta observada entre o raio orbital e o período. Mas quanto deveria valer a força gravitacional e de quanto deveria diferir para os vários planetas?

A combinação das leis de Kepler com as de Newton fornece um exemplo excelente do poder do raciocínio lógico. Lembremos estas leis:

Leis de Newton

1. Um corpo continua num estado de repouso ou de movimento rectilíneo uniforme, a não ser que seja actuado por uma força resultante não nula (Lei da Inércia).
2. A força resultante que actua num objecto é directamente proporcional e tem a mesma direcção da aceleração'
3. Para cada acção existe uma reacção igual e oposta.

Leis de Kepler

1. Os planetas movem-se em órbitas que são elipses e em que o Sol ocupa um dos focos.
2. A linha que une o Sol a um planeta varre áreas que são proporcionais aos intervalos de tempo gastos.
3. Os quadrados dos períodos dos planetas são proporcionais aos cubos das suas distâncias médias ao Sol.

$$T^2 = k\ R^3_{\text{méd}}$$

De acordo com a primeira lei de Newton, uma mudança de movimento, em direcção ou intensidade (velocidade), requer a acção de uma força resultante não nula. Mas, de acordo com Kepler, os planetas movem-se em órbitas que são elipses, isto é, órbitas curvas. Então, deve existir uma força resultante não nula que actue para alterar o seu movimento. Note-se que esta conclusão não especifica nem o tipo nem a direcção da força resultante.

A combinação da segunda lei de Newton com as duas primeiras leis de Kepler clarifica a direcção da força. De acordo com a segunda lei de Newton, a força resultante é exercida na direcção da aceleração observada. Mas qual é a direcção da força que actua sobre os planetas? Newton utilizou a análise geométrica para responder a esta pergunta, tal como se descreve nas páginas 102 e 103 ("O movimento sob uma força central").

A sua análise indicou que um corpo que se mova sob a acção duma força central mover-se-á, quando observado do centro da força, de acordo com a lei das áreas de Kepler. Mas esta lei diz respeito à distância dos planetas ao Sol. Consequentemente, pôde concluir que o Sol, colocado num dos focos da elipse, era a fonte da força central que actuava nos planetas.

Newton descobriu então que o movimento numa trajectória elíptica só podia ocorrer quando a força central era do tipo "inverso do quadrado", $F \propto 1/R^2$. Assim, só uma força com esta lei de variação, exercida pelo Sol, poderia produzir as órbitas elípticas descritas por Kepler. Newton reforçou então a sua argumentação, mostrando que a terceira lei de Kepler, a lei dos períodos, $T^2 = kR^3_{\text{méd}}$, resultava também desta lei de força.

Desta análise Newton concluiu da existência de uma Lei da Gravitação Universal, aplicável a todos os corpos do sistema solar. Este é o ponto principal da grande síntese de Newton.

Consideremos os movimentos dos seis planetas conhecidos na época e as suas acelerações centrípetas para o Sol. Pelo raciocínio de Newton, apresentado acima, estas acelerações diminuíam inversamente com os quadrados das distâncias médias em relação ao Sol. A prova desta afirmação, para órbitas circulares, é muito curta. A expressão da aceleração centrípeta, a_c, de um corpo em movimento uniforme ao longo de uma trajectória circular, em função do raio R e do período T, é:

$$a_c = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$$

(derivámos esta expressão no Capítulo 4). Como Kepler afirmou na sua lei dos períodos, existe uma relação definida entre os períodos orbitais dos planetas e as suas distâncias médias em relação ao Sol:

$$T^2/R^3_{\text{méd}} = \text{constante}$$

Usando o símbolo k para representar a constante pode escrever-se:

$$T^2 = kR^3_{\text{méd}}$$

Para órbitas circulares, $R_{\text{méd}}$ é muito simplesmente R. Substituindo T^2 por kR^3, na equação da força centrípeta, obtém-se:

$$a_c = \frac{4\pi^2 R}{kR^3} = \frac{4\pi^2}{kR^2}$$

Atendendo a que $4\pi^2/k$ é constante, podemos escrever simplesmente:

$$a_c \propto \frac{1}{R^2}$$

Esta conclusão segue-se necessariamente da lei dos períodos de Kepler e da definição de aceleração. Se a segunda lei de Newton, $F \propto a$, for válida para os planetas, tal como o é para os corpos na Terra, então deverá existir uma força centrípeta, F_c, actuando sobre o planeta. Além disso, essa força deverá decrescer proporcionalmente ao quadrado da distância do planeta ao Sol:

$$F_c \propto \frac{1}{R^2}$$

Newton mostrou que o mesmo resultado se aplica para o caso das trajectórias elípticas — mostrou na realidade que qualquer objecto em movimento numa órbita, que é afinal uma secção cónica (cricunferência, elipse, parábola ou hipérbole), em torno de um centro de força, é actuado por uma força centrípeta que varia inversamente com o quadrado da distância ao centro de força.

No tempo de Newton tinham já sido observados quatro dos satélites de Júpiter e quatro dos de Saturno.

Newton dispunha ainda de mais evidência experimental, a partir das observações telescópicas dos satélites de Júpiter e de Saturno. Os satélites de cada um dos planetas obedeciam à lei das áreas de Kepler em torno do planeta tomado como centro. Para os satélites de Júpiter mostrava-se válida a lei dos períodos de Kepler, $T^2/R^3 = constante$, mas o *valor* da constante era diferente daquele que se obtinha para os planetas em movimento em torno do Sol. A mesma lei era também válida para os satélites de Saturno, mas com uma constante uma vez mais diferente. Consequentemente, os satélites de Júpiter eram actuados por uma força central apontada para Júpiter e decrescendo com o quadrado da distância. O mesmo ocorria em relação a Saturno e aos seus satélites. Estas interacções, observadas entre os corpos astronómicos, serviram de suporte à lei do tipo "$1/R^2$", proposta por Newton para força atractiva central.

GE 8.2.

Q1 O que é que pode ser provado a partir do facto de, relativamente ao Sol, os planetas varrerem áreas iguais em tempos iguais?

Q2 Com que relação pode ser combinada a expressão $T^2/R^3_{\text{méd}} =$ = constante, para provar que a atracção gravitacional varia com $1/R^2$?

Q3 Qual a hipótese simplificativa que foi feita na demonstração apresentada neste capítulo?

Q4 Restringiu-se Newton a essa simplificação?

8.4 A lei da gravitação universal

Embora sujeita a posteriores verificações, aceitaremos por agora a ideia de que os planetas são mantidos nas suas órbitas por uma força central. Mais ainda, que a intensidade dessa força central varia inversamente com o quadrado da distância ao Sol. Isto sugere fortemente que é o Sol a origem dessa força — mas não exige necessariamente essa conclusão. Os resultados de Newton descrevem a força em termos matemáticos mas não incluem, até este ponto, qualquer mecanismo físico para a sua transmissão.

O filósofo francês Descartes (1596-1650) propôs uma teoria segundo a qual o espaço estava cheio de um fluido subtil e invisível, que transportaria os planetas num gigantesco remoinho em torno do Sol. Tratava-se de uma ideia interessante, largamente aceite ao tempo. Newton, todavia, foi capaz de provar, por uma argumentação elaborada e precisa, que um tal mecanismo não era capaz de explicar os pormenores do movimento planetário sumarizados pelas leis de Kepler.

GE 8.3.

Kepler tinha feito uma sugestão diferente, alguns anos antes. Propôs ele que se considerasse algum tipo de força magnética emanando do Sol, que conservaria os planetas em movimento. O seu modelo era inadequado, é certo, mas foi ele o primeiro, pelo menos, a encarar o Sol como o agente mecânico controlador do movimento planetário. E o problema continuou a existir, portanto: seria o Sol realmente a fonte da força? Se assim era, de que características do Sol ou dos planetas dependia a intensidade da força?

Como se viu na Secção 8.1, Newton começou a pensar na força planetária durante os anos em que esteve recolhido em casa, por ocasião da Peste Negra. Ocorreu-lhe a ideia — talvez ao observar a queda de uma maçã, ou talvez não — de que a força planetária era exactamente o mesmo tipo de força que atraía os objectos para o solo, na vizinhança da superfície da Terra. Experimentou esta ideia primeiramente em relação à atracção da Lua pela Terra. Dos dados de que dispunha, Newton sabia que a distância entre os centros da Terra e da Lua era de cerca de sessenta raios terrestres. Se a força atractiva variasse com $1/R^2$, a aceleração gravitacional exercida pela Terra sobre a matéria, à distância a que estava a Lua, deveria ser apenas $1/60^2$ (ou seja, $1/3600$) da exercida à superfície terrestre (por exemplo sobre uma maçã). Sabia-se desde há muito, da observação da queda dos corpos, que a aceleração gravitacional à superfície terrestre era de cerca de 9,80 metros por segundo por segundo. Portanto, a Lua *deveria* cair com uma aceleração igual a $1/3600$ daquele valor: $(9{,}80/3600)$ metros por segundo por segundo, ou seja, $2{,}72 \times 10^{-3}$ m/s². Será assim?

Para nós, que ouvimos falar da gravidade desde os primeiros tempos de escola, isto poderá não parecer ter sido algo de extremamente inteligente. Mas nos tempos de Newton, depois de se ter acreditado durante séculos que os fenómenos celestes eram completamente diferentes dos fenómenos terrestres, constituía uma transição mental de génio. Newton tinha já admitido que os planetas estavam sujeitos às leis de movimento da Terra, quando deduziu uma lei da força do tipo $1/R^2$, utilizando a fórmula para a. Mas supor que a força planetária não era algum tipo especial de força celeste, mas nada mais do que o velho e familiar peso dos objectos vulgares, constituía ainda um passo gigantesco.

Newton partiu do conhecimento de que o período orbital da Lua era, muito aproximadamente, de $27\frac{1}{3}$ dias. A aceleração centrípeta, a_c, de um corpo em movimento uniforme num círculo de raio R, com um período T, (estudo efectuado na secção 4.6 da Unidade 1) é $a_c = 4\pi^2 R/T^2$. Ao substituirmos os valores conhecidos de R e de T (em metros e segundos) para a Lua e efectuarmos os cálculos necessários, obtemos a aceleração *observada:*

$$a_c = 2{,}74 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$$

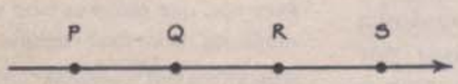
Este resultado concorda muito bem com o valor de $2{,}72 \times 10^{-3}$ m/s² previsto acima. A partir dos valores de que dispunha, semelhantes aos que usámos, Newton concluiu que tinha

> ...comparado a força necessária para conservar a Lua na sua órbita com a força da gravidade à superfície da Terra, encontrando valores agradavelmente semelhantes.
>
> Consequentemente, a força que mantém a Lua na sua órbita torna-se, junto à superfície terrestre, igual à força da gravidade que pode ser observada aqui, nos corpos pesados. E, portanto,

O Movimento sob uma Força Central

Com reagirá um corpo em movimento a uma força central? Para poder seguir a análise de Newton teremos que recordar que a área de um triângulo é igual a $\frac{1}{2}$ base × altura. Qualquer dos três lados pode ser escolhido para base e a altura é a distância, medida na perpendicular, entre o vértice oposto e a base.

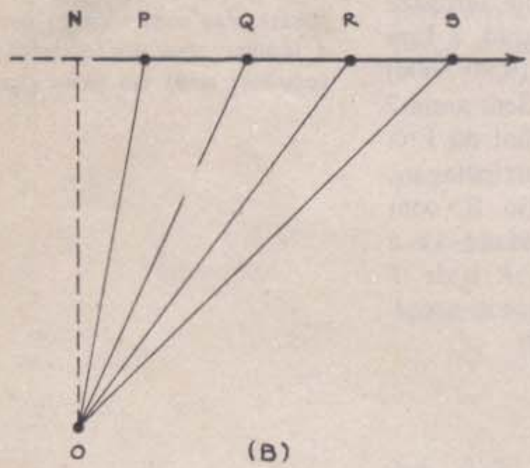
Suponha-se que um corpo estava inicialmente a passar por um ponto P, movendo-se já a velocidade uniforme v segundo a linha recta que passa por P e Q. (Veja-se a figura A). Se nenhuma força actuar sobre ele,



(A)

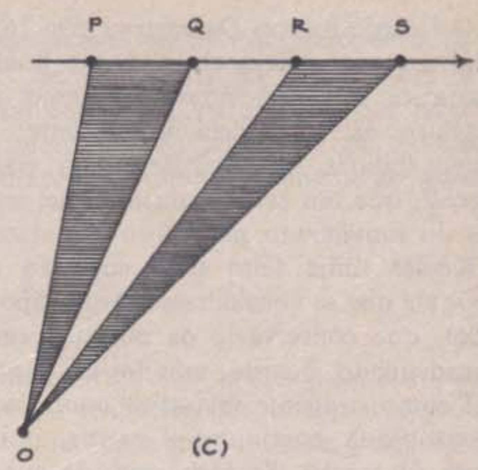
prosseguirá o seu movimento de tal modo que, em iguais intervalos de tempo Δt transporá distâncias iguais, PQ, QR, RS, etc.

Como é que um observador, colocado num ponto qualquer O, verá este movimento? Considerem-se os triângulos OPQ, OQR e ORS, na figura B. Os três triângulos têm



(B)

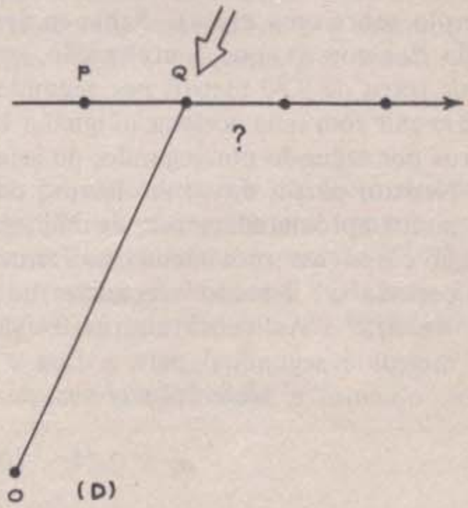
bases iguais, PQ = QR = RS, e alturas iguais, ON. Portanto, os triângulos OPQ, OQR e ORS têm áreas iguais. E portanto a linha desenhada do observador no ponto O ao corpo em movimento, a velocidade constante, ao longo da linha recta PQR varrerá áreas iguais em intervalos de tempo iguais.



(C)

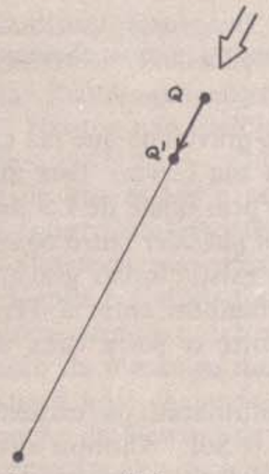
Assim, por estranho que pareça à primeira vista, a lei das áreas de Kepler aplica-se também a um corpo relativamente ao qual a força resultante tem o valor *zero* e que, portanto, se move uniformemente segundo uma linha recta.

Suponha-se agora que o objecto apresentado na figura A é sujeito a uma força ao passar pelo ponto Q, durante um intervalo de tempo muito curto, como que num impulso. Como se alterará o movimento do objecto, se esta força estiver dirigida para o ponto O? (Tome-se como referência a figura D).



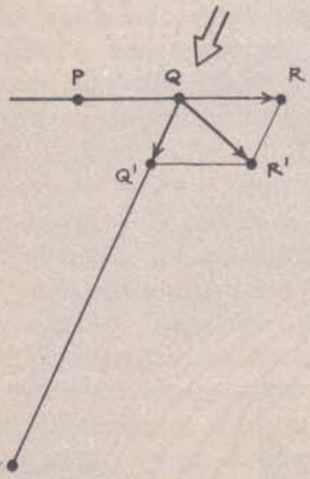
(D)

Veja-se primeiro o que aconteceria se um corpo inicialmente em repouso no ponto Q fosse exposto ao mesmo impulso. Durante a duração do impulso o corpo seria acelerado em direcção a O. Continuaria depois a mover-se em direcção a O a velocidade constante e, no fim de um determinado intervalo de tempo Δt, teria percorrido uma determinada distância até um novo ponto Q′. (Veja-se a figura E).



O (E)

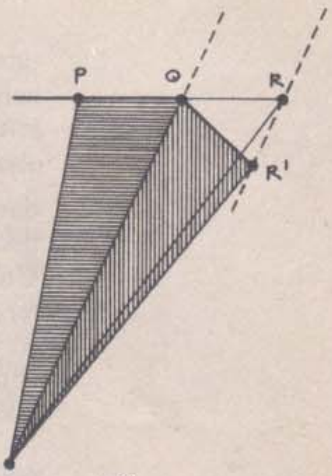
Considere-se agora o efeito do impulso no objecto que estava inicialmente em movimento em direcção ao ponto R. O movimento resultante é a combinação destas duas componentes e o objecto move-se para o ponto R′. (Veja-se a figura F).



O (F)

Vimos antes que as áreas dos triângulos OPQ e OQR eram iguais. Será a área do triângulo OQR′ igual à daqueles? Os dois triângulos OQR e OQR′ têm uma base comum, OQ. Além disso, a altura de ambos os triângulos é a distância, medida na perpendicular, entre as linhas OQ e RR′. (Veja-se a figura G). Portanto, as áreas dos triângulos OQR e OQR′ são iguais.

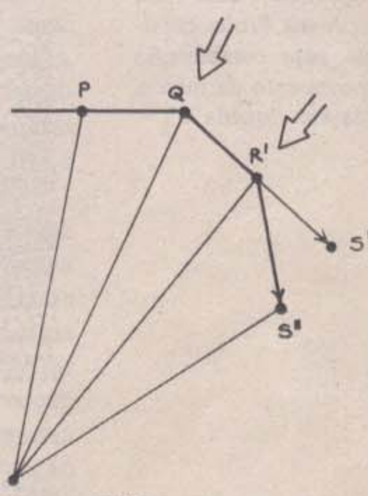
Se for dado um outro impulso dirigido para O, agora no ponto R′, o corpo mover-se-á para um determinado ponto S″, como se indica na figura H. Poder-se-á verificar que as áreas



O (G)

dos triângulos OR′S″ e OR′S′ são iguais, utilizando uma análise em tudo semelhante à que usámos atrás. As suas áreas são também iguais à do triângulo OPQ.

Nesta argumentação geométrica a força aplicada foi sempre dirigida para o mesmo



O (H)

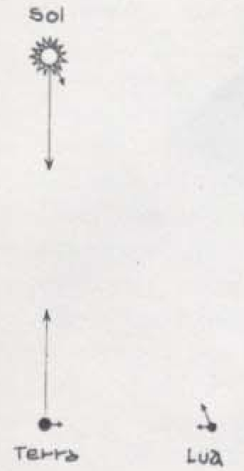
ponto O. Uma força sempre dirigida para o mesmo ponto é denominada força *central*. (Note-se que a prova apresenta nada tem a ver com a *amplitude* da força, ou com a maneira como ela varia com a distância a O). Além disso, aplicámos a força em instantes separados de iguais intervalos de tempo, Δt. Se cada um destes intervalos de tempo Δt for tornado negligivelmente pequeno, a força parecerá estar aplicada continuamente. E a argumentação continuará a ser válida. Chegamos assim a uma conclusão importante: *Se um corpo for actuado por uma força central qualquer, ele mover-se-á de acordo com a lei das áreas de Kepler.*

(pelas Regras de Raciocínio 1 e 2) a força que mantém a Lua na sua órbita é exactamente a mesma a que chamamos normalmente gravidade...

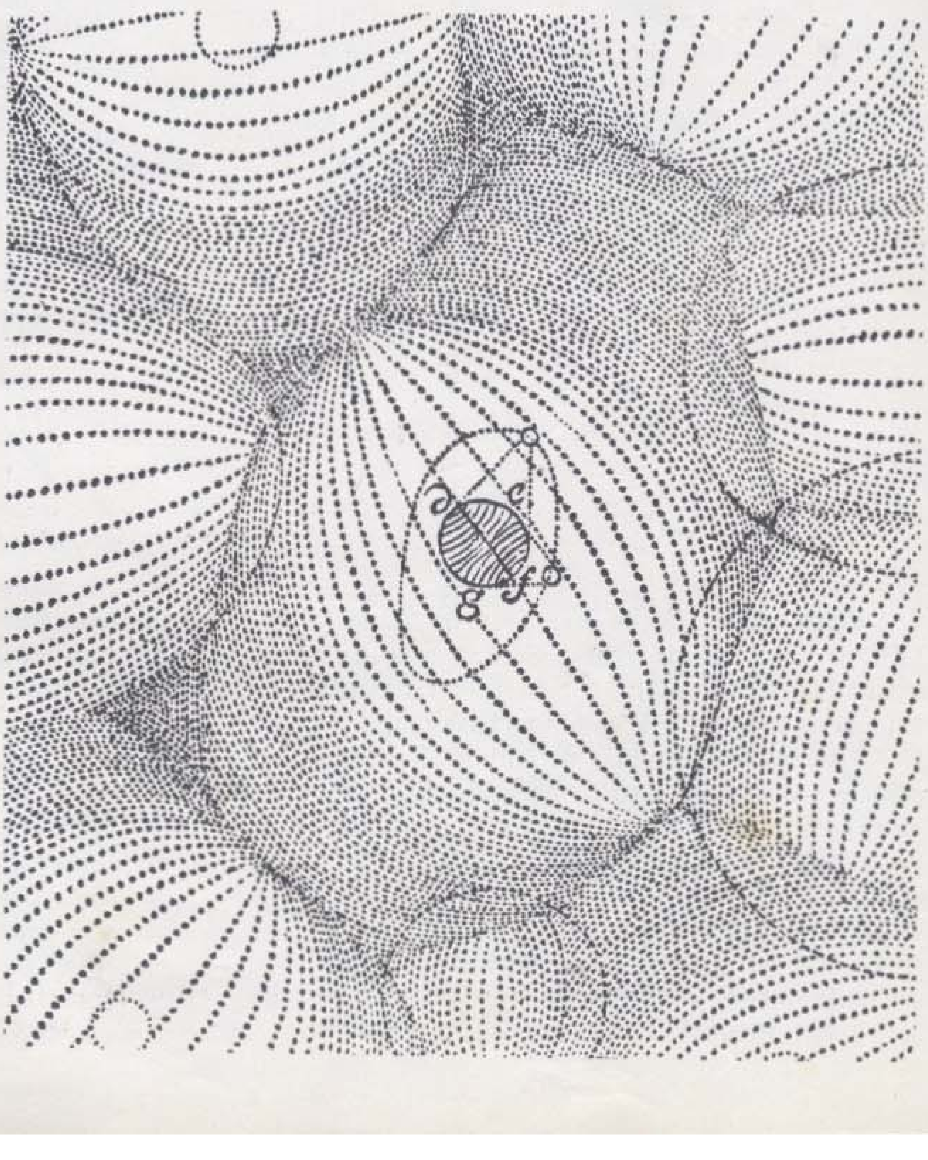
Era um autêntico triunfo: a mesma gravidade que faz cair as maçãs das árvores mantém também a Lua na sua órbita. Esta afirmação é a primeira parte daquilo que é conhecido pelo nome de Lei da Gravitação Universal: *cada objecto do universo atrai qualquer outro objecto com uma força gravitacional.* Se assim é, devem existir forças gravitacionais não só entre um rochedo e a Terra, mas também entre a Terra e a Lua, entre Júpiter e os seus satélites — e entre o Sol e cada um dos seus planetas.

Mas Newton não se ficou pela afirmação da existência de uma força gravitacional entre os planetas e o Sol. Afirmou além disso que essa força tinha exactamente a intensidade necessária para explicar *completamente* o movimento de todos os planetas. Nenhum outro mecanismo era necessário — nenhum remoinho em fluidos invisíveis, nenhumas forças magnéticas. A gravitação, e apenas a gravitação, está na base da dinâmica dos céus.

Este conceito é tão vulgar para nós que há o perigo de passar por cima deste assunto sem se compreender realmente aquilo que



O Sol, a Lua e a Terra actuam uns sobre os outros. As forças estão associadas em pares, de acordo com a terceira lei do movimento de Newton. Enquanto a Lua se move através do espaço, a atracção gravitacional da Terra faz com que ela "caia" em direcção à Terra. A sua órbita curvilínea é produzida pela combinação contínua do seu movimento de inércia em linha recta e da sua "queda".



Um desenho no qual Descartes (1596-1650) ilustrava a sua teoria do espaço cheio dos remoinhos de matéria que conduziram os planetas nas suas órbitas.

Newton defendia. Em primeiro lugar, ele propôs uma lei física verdadeiramente universal. Guiado pelas suas Regras de Raciocínio, estendeu a todo o universo o que encontrou de verdade para as suas partes observáveis. Newton não excluiu nenhum objecto do universo do efeito da gravidade.

A ideia de que as leis e as forças terrestres eram as mesmas que governavam todo o universo teve um impacto estrondoso. Menos de um século antes teria sido uma loucura e mesmo perigoso sugerir tal coisa. Mas Kepler e Galileu tinham lançado as fundações para a unificação da física celeste e terrestre. Newton concluiu esse trabalho. A sua extensão da mecânica dos objectos terrestres ao movimento dos corpos celestes é hoje chamada a *síntese newtoniana*.

A afirmação de Newton de que a órbita de um planeta é determinada pela atracção gravitacional entre ele e o Sol teve outra consequência. Afastou a ciência das explicações geométricas, em direcção às interpretações exclusivamente físicas. A maior parte dos filósofos e cientistas anteriores a Newton ocuparam-se fundamentalmente da pergunta: "O que são os movimentos?" Newton alterou a pergunta: "Que força explica o movimento?" Tanto no sistema de Ptolomeu como no de Copérnico, os planetas moviam-se em torno de *pontos* no espaço e não em torno de *objectos*. Moviam-se assim devido à sua "natureza" ou à sua forma geométrica e não porque fossem actuados por forças. Newton, por outro lado, falou não de pontos mas de coisas, de objectos, de corpos físicos. Sem a atracção gravitacional solar a deflecti-los continuamente nas suas trajectórias, de outro modo rectilíneas, os planetas mergulhariam na escuridão do espaço imenso. Assim, era o Sol físico que se tornava importante, não o ponto onde acontecia ele estar.

A síntese de Newton centrou-se na ideia da força gravitacional. Chamando-lhe força da gravidade, todavia, Newton sabia que não estava a explicar *porque* é que ela existia. Ao segurar-se uma pedra acima do solo e ao largá-la, ela acelerará em direcção ao chão. As nossas leis do movimento dizem-nos que deverá existir uma força a actuar na pedra em aceleração em direcção à Terra. Conhecemos a direcção da força e podemos determinar a sua intensidade multiplicando a massa da pedra pela aceleração. Podemos dar-lhe um nome: peso, ou atracção gravitacional para a Terra. Mas o porquê da existência de tal interacção entre corpos continua a ser um quebra-cabeças. É ainda hoje um problema importante da física.

Q5 Qual a ideia que ocorreu a Newton, quando pensava sobre objectos em queda e sobre a aceleração da Lua?

Q6 Kepler também tinha suposto que o Sol exercia forças sobre os planetas. Em que diferia a sua opinião da de Newton?

Q7 A ideia central do capítulo 8 é a "síntese newtoniana". Em que consiste ela?

8.5 Newton e as hipóteses

A afirmação de Newton da existência de uma força mútua (interacção gravitacional) entre um planeta e o Sol, levantou uma nova questão.

Como poderão um planeta e o Sol actuar um sobre o outro, separados de distâncias tão grandes, sem quaisquer ligações visíveis entre eles? Na Terra pode-se exercer uma força sobre um objecto, puxando-o ou empurrando-o. Não nos espantamos ao ver uma nuvem ou um balão a deslizar pelo céu, embora nada pareça tocar-lhes; embora o ar seja invisível, sabemos que ele é realmente uma substância material, que podemos sentir quando, por exemplo, o vento sopra à nossa volta. A queda de objectos no solo e a atracção de pedaços de ferro por um ímã são já exemplos mais preocupantes, mas as distâncias de separação são ainda pequenas. No entanto, a Terra está a mais de 140 milhões de quilómetros do Sol, e Saturno a mais de 1,4 biliões de quilómetros. Como poderá existir algum contacto físico entre objectos tão distantes? Como poderemos explicar uma tal "acção à distância"?

No tempo de Newton, e mesmo muito depois, foram apresentadas sugestões para explicar como podiam ser exercidas forças mecânicas àquelas distâncias. Na maior parte dessas sugestões imaginava-se o espaço cheio de alguma substância invisível (um "éter"), capaz de transmitir a força. O próprio Newton admitia em privado que existia um tal "éter". Mas não encontrava qualquer experiência capaz de verificar a sua convicção. Assim, pelo menos em público, Newton recusou-se a especular sobre mecanismos possíveis. Como ele próprio escreveu, numa passagem famosa das notas que acrescentou à segunda edição dos *Principia* (1713):

> ...Até agora não fui capaz de extrair dos fenómenos a causa destas propriedades da gravidade, e não esboço quaisquer hipóteses; porque tudo o que não for deduzido dos fenómenos deve ser chamado hipótese; e as hipóteses, sejam elas metafísicas ou físicas, refiram-se elas a qualidades ocultas ou mecânicas, não têm lugar na filosofia experimental... E é para nós bastante que a gravidade exista na realidade, e que se comporte de acordo com as leis que explicámos, e que sirva perfeitamente para explicar todos os movimentos dos corpos celestes, e do nosso mar.

Fizemos uma citação bastante longa porque há uma frase de Newton que é frequentemente mal referida e mal interpretada. Pode ler-se no original em latim: *hypotheses non fingo*. Isto significa "não esboço quaisquer hipóteses" ou "não invento quaisquer hipóteses". O sentido é "não fabrico hipóteses falsas". Sabemos que Newton fez de facto numerosas hipóteses nos seus muitos trabalhos publicados . Além disso, as suas cartas escritas a amigos continham muitas outras especulações que ele não publicou. Por isso, a sua áspera rejeição das hipóteses deve ser correctamente interpretada. A lição a extrair (que tem hoje a mesma utilidade que naquele tempo) é a de que existem duas espécies básicas de hipóteses ou suposições:

(1) O tipo mais frequentemente encontrado consiste numa proposta de algum mecanismo oculto para explicação das observações. Por exemplo, ao observar o movimento dos ponteiros de um relógio, poderemos inventar facilmente uma combinação de engrenagens e de molas que provoque o movimento. Isto constituirá uma *hipótese directa ou indirectamente verificável, pelo menos em princípio, relativamente aos fenómenos*. A nossa hipótese poderá ser verificada, por exemplo, abrindo

o relógio, ou radiografando-o. Considere-se neste contexto a hipótese de um fluido invisível, o chamado "éter", capaz de transmitir a força gravitacional. Newton e outros pensaram que a presença desta substância deveria poder ser estabelecida por meio de certos testes directos. Por isso, muitos experimentadores tentaram "apanhar" o éter. Um processo vulgarmente utilizado consistia em extrair o ar de uma garrafa, tentando-se então detectar alguma espécie de vento, ou de pressão, ou de fricção, devida ao éter, que permanecesse e que afectasse objectos colocados lá dentro. Nenhuma daquelas experiências resultou (nem tem resultado desde então) e por isso, prudentemente, Newton recusou-se a fazer publicamente uma hipótese para a qual não era capaz de também propor um teste.

(2) Em trabalhos científicos faz-se frequentemente uma espécie muito diferente de suposição. É o caso de uma hipótese que se sabe não ser directamente verificável mas que, no entanto, é necessária *exactamente para começar o próprio trabalho*. Como exemplo veja-se a afirmação de que a "natureza é simples", ou qualquer outra das quatro Regras de Raciocínio de Newton. A aceitação do sistema heliocêntrico ou do sistema geocêntrico é um outro exemplo. Ao escolher o sistema heliocêntrico, Copérnico, Kepler e Galileu fizeram a hipótese de que o Sol estava no centro do universo. Eles sabiam que não estavam a propor uma hipótese directamente verificável e que qualquer dos sistemas parecia explicar igualmente bem "os fenómenos". Contudo, adoptaram o ponto de vista que lhes parecia mais simples, mais convincente e, como disse Copérnico, mais "agradável ao espírito". Foi este o tipo de hipóteses usado sem reservas por Newton nos seus trabalhos publicados.

O trabalho de qualquer cientista envolve os dois tipos de hipóteses. A imagem popular de um cientista é a de uma pessoa que usa apenas pensamentos deliberados, lógicos e objectivos e imediatamente os testa com experiências apropriadas. Mas, de facto, o cientista sente-se livre para se permitir adivinhar, usar especulação imaginativa, ou simplesmente ter em consideração um pressentimento — capaz ou não de ser verificado — desde que isso lhe possa ser útil no seu trabalho. (Algumas vezes, estes pressentimentos são referidos, solenemente, como "hipóteses de trabalho". Pouco progresso haveria sem eles!) Tal como Newton, contudo, a maior parte dos cientistas de hoje não gosta de *publicar* algo que seja apenas um pressentimento não comprovado.

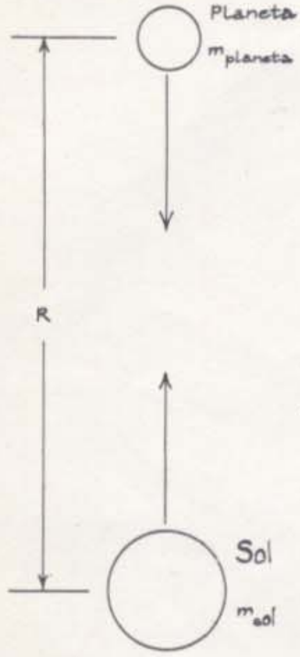
Q8 Newton explicou a atracção gravitacional existente entre todos os corpos?

Q9 Qual era o tipo vulgar de explicação para as "acções à distância"? Porque recusou Newton esse tipo de explicação?

Q10 Quais são os dois tipos básicos de hipóteses usados na ciência?

8.6 A intensidade da força planetária

A afirmação geral de que as forças gravitacionais existem por toda a parte deve agora ser transformada numa lei quantitativa, que forneça



A força gravitacional exercida pelo Sol sobre um planeta é igual e oposta à força gravitacional exercida pelo planeta sobre o Sol.

uma expressão quer para a *intensidade* quer para a *direcção* e *sentido* das forças que dois objectos quaisquer exercem um sobre o outro. Não basta dizer que existe uma força gravitacional mútua entre o Sol e, por exemplo, Júpiter. Para se mostrar convincente, Newton teve que especificar quais os factores quantitativos que determinam as intensidades dessas forças mútuas. Teve que mostrar como elas poderiam ser medidas, directa ou indirectamente.

O primeiro exemplo consistia na definição precisa da distância R. Deveria ela, por exemplo, ser tomada como a distância entre as superfícies da Terra e da Lua? Para muitos problemas astronómicos, as dimensões dos corpos interactuantes são extremamente pequenas em comparação com as distâncias entre eles. Nesses casos, as distâncias entre as suas superfícies são praticamente iguais às distâncias entre os seus centros. No caso da Terra e da Lua, a distância entre os centros é cerca de 2% maior que a distância entre as superfícies. Alguns historiadores crêem que a incerteza de Newton relativamente a uma resposta rigorosa para o problema o levou a abandonar o estudo por muito anos.

A seu tempo, Newton resolveu o problema. A força gravitacional exercida *por* um corpo esférico era a mesma que ocorreria se toda a sua massa estivesse concentrada no seu centro. Reciprocamente, a força gravitacional exercida *sobre* um corpo esférico por um outro corpo é a mesma que ocorreria se toda a sua massa estivesse concentrada no seu centro. Consequentemente, a distância R referida na Lei da Gravitação é a distância entre os centros.

Isto foi uma descoberta crítica. Permite-nos considerar a atracção gravitacional entre corpos esféricos como se as suas massas estivessem concentradas em pontos. Assim, conceptualmente, podemos substituir os objectos por *pontos-de-massa*.

A terceira lei de Newton afirma que a acção é igual à reacção. Se isto for aplicável universalmente, poderemos concluir que a quantidade de força exercida pelo Sol num planeta é exactamente igual à quantidade de força exercida pelo planeta sobre o Sol. Esta afirmação pode parecer contrária ao senso comum, quando aplicada ao caso de uma massa muito grande e outra muito pequena. Mas a igualdade é fácil de provar. Primeiro suponhamos apenas que a terceira lei de Newton é válida entre pequenos bocados de matéria: por exemplo, que um bocado de Júpiter com 1 kg actua *sobre* um bocado do Sol com 1 kg tanto como é actuado *por* ele. Agora, consideremos a atracção total entre Júpiter e o Sol, cuja massa é cerca de 1 000 vezes maior que a daquele. Como indica a figura ao lado, podemos considerar o Sol como um globo contendo 1 000 Jupiteres. Vamos tomar como unidade de força que é exercida entre duas massas das dimensões da de Júpiter, quando separadas por uma distância igual ao raio da órbita de Júpiter. Então, Júpiter actua sobre o *Sol* (um globo com 1 000 Jupiteres) com uma força total de 1 000 unidades. E como cada uma das 1 000 partes do Sol actua sobre o planeta Júpiter com uma força igual à unidade, a força total exercida pelo Sol sobre *Júpiter* será também de 1 000 unidades. Cada parte do Sol enorme não só actua *sobre* o planeta como é actuada também *pelo* planeta. Quanto mais massa há para *atrair*, tanto mais massa há para *ser atraida*. (Mas embora as forças atractivas mútuas sejam iguais em intensidade, não o são as *acelerações* resultantes. Júpiter actua sobre o Sol tão fortemente como o Sol actua sobre Júpiter, mas o Sol *responde* à acção com apenas 1/1000 da aceleração, porque a sua inércia é 1000 vezes maior que a de Júpiter).

Apresentou-se na Secção 3.8 da Unidade 1 uma explicação para o facto de corpos de diferentes massas caírem com a mesma aceleração junto à superfície terrestre. Viu-se que quanto maior é a inércia de um corpo tanto mais intensamente é ele actuado pela gravidade. Ou, mais precisamente: junto à superfície terrestre, a força gravitacional que se exerce sobre um corpo é directamente proporcional à sua massa. Tal como Newton, vamos generalizar este efeito terrestre a toda a gravitação. Podemos então supor que a força gravitacional exercida pelo *Sol* sobre um planeta é proporcional à massa do planeta. Analogamente, a força gravitacional exercida pelo *planeta* sobre o Sol é proporcional à massa deste. Uma vez que as forças exercidas pelo Sol e pelo planeta um sobre o outro são iguais em valor absoluto, segue-se que o valor absoluto da força gravitacional é proporcional à massa do Sol *e* à massa do planeta. Isto é, a atracção gravitacional entre dois corpos é proporcional ao *produto* das suas massas. Se a massa de qualquer dos corpos for triplicada, a força será triplicada. Se as massas de ambos os corpos triplicarem, a força será aumentada por um factor 9. Utilizando o símbolo F_{grav} para o valor absoluto das forças, poderemos escrever: $F_{grav} \propto m_{planeta} \cdot m_{Sol}$. GE 8.4.

Já concluímos que a quantidade de atracção entre o Sol e um planeta é proporcional ao produto das suas massas. Tínhamos primeiro concluído que a atracção varia com o quadrado da distância entre os corpos. Combinando ambas as proporcionalidades, encontramos *uma* lei de força que faz intervir tanto as massas como a distância: GE 8.5.

$$F_{grav} \propto \frac{m_{planeta} m_{Sol}}{R^2}$$

Uma tal expressão de proporcionalidade pode ser escrita como uma equação, introduzindo uma constante. (A constante dá conta das unidades de medida utilizadas). Chamando G a essa constate de proporcionalidade, podemos escrever a lei das forças planetárias da seguinte maneira:

$$F = G\frac{m_{planeta} m_{Sol}}{R^2}$$

Esta equação é uma afirmação ousada, de que as forças entre o Sol e qualquer planeta dependem *unicamente* de três factores. Estes são as massas do Sol e do planeta e a distância entre eles. Esta equação parece inacreditavelmente simples, ao lembrarmo-nos da complexidade observada nos movimentos planetários. Todavia, todas as Leis do Movimento Planetário de Kepler, retiradas directamente da experiência, são consistentes com esta relação. Mais do que isso, as leis empíricas de GE 8.6.

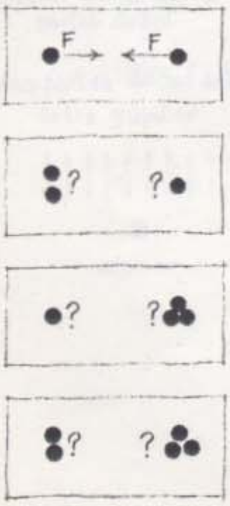
Kepler podem ser *derivadas* desta lei de força, juntamente com a segunda lei do movimento de Newton. Mas, o que é ainda mais importante, a lei de força permite o cálculo de todos os pormenores do movimento planetário, o que era impossível por recurso apenas às leis de Kepler.

Esta proposição de Newton, de que uma equação tão simples descreve completamente as forças que se exercem entre o Sol e os planetas, não foi o último passo. Ele acreditava que nada havia de único ou de particular na força mútua entre o Sol e os planetas, ou entre a Terra e as maçãs. Em vez disso, insistiu em que uma relação idêntica se deveria aplicar universalmente. Esta relação deveria ser válida entre *quaisquer dois corpos* (que normalmente estivessem separados por uma distância grande em comparação com as suas dimensões). Deveria ser aplicável igualmente a dois átomos ou a duas estrelas. Isto é, ele propôs que se pudesse escrever uma *Lei da Atracção Gravitacional geral:*

$$F_{grav} = G\frac{m_1 . m_2}{R^2},$$

onde m_1 e m_2 são as massas dos corpos e R é a distância entre os
GE 8.7. seus centros. A constante numérica G é chamada *constante de gravitação universal*. Newton supôs que esta constante era a mesma para todas as interacções gravitacionais, fossem elas entre dois grãos de areia, dois elementos do sistema solar ou duas estrelas quaisquer do firmamento.
GE 8.8. Como veremos, o sucesso desta relação tão simples foi tão grande que se acabou por considerar que ela se aplica em toda a parte e em todos os tempos, no passado, no presente e no futuro.

Mesmo antes de apresentarmos mais dados comprovativos, já a arrebatadora majestade da teoria da atracção gravitacional de Newton nos maravilha e espanta. Levanta-nos também a pergunta de como provar uma teoria universal tão ousada. Não existe qualquer prova completa, naturalmente, porque isso significaria examinar todas as interacções entre todos os corpos do universo! Mas quanto maior for a variedade das verificações simples que fizermos, maior será a nossa fé na exactidão da teoria.

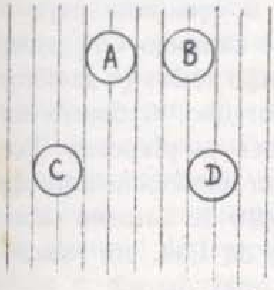


Q11 De acordo com a lei da acção e da reacção de Newton, a Terra deverá sofrer a acção de uma força e acelerar em direcção a uma pedra em queda.

(a) Qual a relação existente entre a força actuante na Terra e a força actuante na pedra?

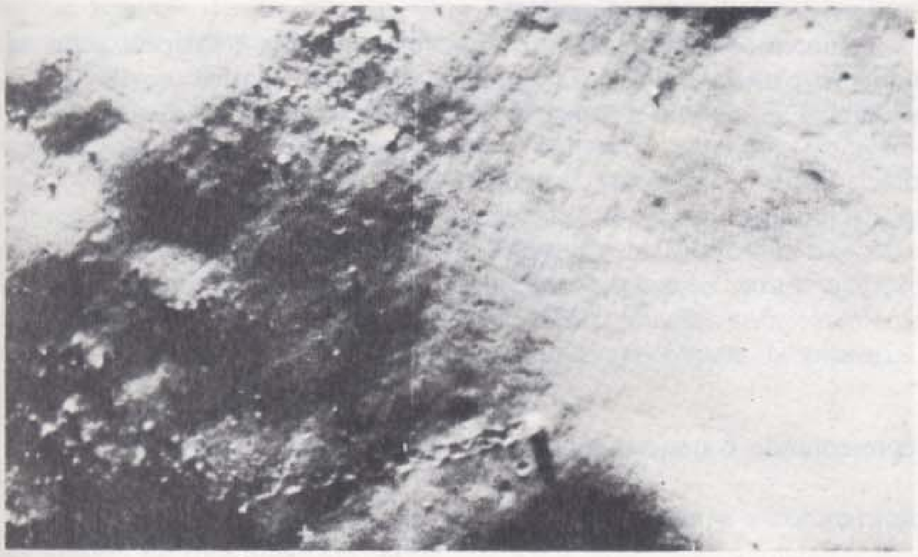
(b) Qual a relação existente entre a aceleração experimentada pela Terra e a aceleração da pedra?

Q12 O diagrama em cima, ao lado, representa dois corpos de igual massa exercendo um sobre o outro forças gravitacionais com o mesmo valor absoluto, *F*. Qual será o valor absoluto das atracções gravitacionais, em cada caso?



Q13 A, B, C e D são corpos com massas iguais. Qual a relação entre as forças exercidas por A e B um sobre o outro, e por C e D, também um sobre o outro?

(a) $F_{AB} = 3 \times F_{CD}$
(c) $F_{AB} = 4 \times F_{CD}$
(b) $F_{AB} = 9 \times F_{CD}$
(d) $F_{AB} = 16 \times F_{CD}$



Esta fotografia da superfície lunar apresenta evidência recente de que as leis da mecânica dos corpos celestes são pelo menos semelhantes às que se aplicam na Terra: os rastos de duas enormes rochas que rolaram cerca de 300 metros por uma encosta lunar.

8.7 O movimento planetário e a constante gravitacional

Suponhamos que um planeta de massa m_p se move ao longo de uma órbita de raio R com um período T. De acordo com a mecânica de Newton, existirá continuamente uma aceleração centrípeta igual a $a_c = 4\pi^2 R/T^2$. Portanto, deverá existir continuamente uma força central igual a $F_c = m_p \cdot a_c = 4\pi^2 R m_p/T^2$. Identificando a gravidade com esta força central, resulta:

$$F_{grav} = F_c$$

$$\text{ou } G\frac{m_p m_{Sol}}{R^2} = \frac{4\pi^2 R m_p}{T^2}$$

Simplificando esta equação e rearranjando os seus termos, poderemos obter uma expressão para G:

$$G = \frac{4\pi^2}{m_{Sol}}\left(\frac{R^3}{T^2}\right)$$

Sabemos já, de Kepler, que o quociente R^3/T^2 é constante para o movimento dos planetas em torno do Sol; $4\pi^2$ é também constante. Se admitirmos que a massa do Sol é constante, então todos os factores à direita, na equação anterior, são constantes. Por isso, G deverá ser uma constante do efeito gravitacional do Sol sobre os planetas. Por um raciocínio semelhante, o valor de G deverá ser uma constante da acção de Júpiter sobre as suas luas — e para a acção de Saturno sobre as suas luas — e para o problema da maçã, como da Lua, em relação à Terra. Mas terá G o mesmo valor em todos estes casos?

É impossível *provar* que G é igual para a interacção gravitacional de *todos* os corpos. Se, todavia, *admitirmos* que G é uma constante universal, poderemos obter uma informação nova e notável — as massas relativas do Sol e dos planetas!

Comecemos novamente por equacionar a força centrípeta actuante sobre os planetas e a atracção gravitacional relativa ao Sol, mas resolvamos desta vez a equação em ordem a m_{Sol}:

$$F_{\text{grav}} = F_c$$

$$G\frac{m_p m_{\text{Sol}}}{R^2} = \frac{4\pi^2 R m_p}{T^2}$$

$$m_{\text{Sol}} = \frac{4\pi^2 R^3}{GT^2}$$

Representando o quociente constante T^2/R^3 por k_{Sol}, teremos:

$$m_{\text{Sol}} = \frac{4\pi^2}{Gk_{\text{Sol}}}$$

Analogamente:

$$m_{\text{Júpiter}} = \frac{4\pi^2}{Gk_{\text{Júpiter}}} \qquad m_{\text{Saturno}} = \frac{4\pi^2}{Gk_{\text{Saturno}}} \qquad m_{\text{Terra}} = \frac{4\pi^2}{Gk_{\text{Terra}}}$$

onde $k_{\text{Júpiter}}$, k_{Saturno} e k_{Terra} são os valores, conhecidos, dos quocientes T^2/T^3 para os satélites de Júpiter, Saturno e Terra.

Para comparar a massa de Júpiter com a do Sol basta dividir a fórmula para $m_{\text{Júpiter}}$ pela fórmula para m_{Sol}:

$$\frac{m_{\text{Júpiter}}}{m_{\text{Sol}}} = \frac{\dfrac{4\pi^2}{Gk_{\text{Júpiter}}}}{\dfrac{4\pi^2}{Gk_{\text{Sol}}}}$$

ou seja:

$$\frac{m_{\text{Júpiter}}}{m_{\text{Sol}}} = \frac{k_{\text{Sol}}}{k_{\text{Júpiter}}}$$

Analogamente podem ser comparadas as massas de dois planetas quaisquer, desde que sejam conhecidos os valores de T^2/R^3 para ambos — isto é, se ambos possuírem satélites cujos movimentos tenham sido cuidadosamente observados.

Estas comparações são baseadas na *suposição* de que G seja uma constante universal. Os cálculos baseados nesta hipótese conduziram a resultados *consistentes* numa grande variedade de dados astronómicos. Um exemplo diz respeito ao comportamento de uma nave espacial em órbita e em aterragem na Lua. Esta hipótese conduziu também a resultados consistentes nos cálculos mais difíceis relativos às pequenas perturbações que os planetas exercem nas órbitas uns dos outros. Não existe ainda uma maneira de provar que G é o mesmo em toda a parte e sempre. É, no entanto, uma hipótese de trabalho razoável até que apareçam provas em contrário.

Se fosse conhecido o valor numérico de G, poderiam ser calculadas as massas reais da Terra, de Júpiter, de Saturno e do Sol. G é definido pela equação $F_{grav} = Gm_1m_2/R^2$. Para conhecer o valor de G é necessário conhecer os valores de todas as outras variáveis — isto é, medir a força F_{grav} entre duas massas conhecidas m_1 e m_2 separadas por uma distância também conhecida R. Newton sabia isso, mas não existiam no seu tempo instrumentos suficientemente sensíveis para a medição da pequeníssima força que se prevê existir entre massas suficientemente pequenas para poderem ser utilizadas numa experiência laboratorial.

GE 8.9.

As massas comparadas à da Terra

Terra	1
Saturno	95
Júpiter	318
Sol	333000

Q14 Qual a informação que poderá ser usada para a comparação das massas de dois planetas?

Q15 Qual é a informação adicional necessária para o cálculo das suas massas reais?

8.8 O valor de G e as massas reais dos planetas

As massas de pequenos objectos sólidos podem ser facilmente obtidas a partir dos seus pesos. A medição da distância entre objectos sólidos de forma esférica também não constitui problema. Mas como medir a pequena força de atracção gravitacional mútua entre objectos relativamente pequenos, num laboratório? (Particularmente quando qualquer deles está, separadamente, sob a acção de uma tremenda força gravitacional que os puxa em direcção à Terra, gigantescamente maciça).

Este problema técnico de medida, muito sério, acabou por ser resolvido pelo cientista inglês Henry Cavendish (1731-1810). Para medir as forças gravitacionais, ele usou uma balança de torção, na qual a força de atracção gravitacional existente entre dois pares de esferas de chumbo fazia torcer o fio que suspendia um dos pares. A torção do fio podia ser calibrada, por meio de uma série de experiências nas

O cálculo de G, a partir de valores experimentais aproximados:

$$F_{grav} = G\frac{Mm}{R^2}$$

pelo que: $$G = \frac{F_{grav}R^2}{Mm}$$

$$= \frac{(10^{-6}\,\text{N})(0{,}1\,\text{m})^2}{(100\,\text{kg})(1\,\text{kg})}$$

$$= \frac{10^{-6}\times10^{-2}}{10^2}\ \text{N.m}^2/\text{kg}^2$$

$$= 10^{-10}\ \text{N.m}^2/\text{kg}^2$$

quais se aplicavam pequenas forças conhecidas. Uma experiência típica poderia envolver uma esfera de 100 kg e uma outra de 1 kg, separadas por uma distância de 0,1 metros, entre os centros. A força resultante seria cerca de um milionésimo de newton! Como mostram os cálculos que se apresentam ao lado, estes dados conduzem a um valor para G da ordem de 10^{-10} $(N.m^2/kg^2)$. As condições de realização desta experiência foram sendo progressivamente melhoradas e o valor hoje aceite para G é de:

$$G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ N.m^2/kg^2$$

Também se pode exprimir $N.m^2/kg^2$ na forma $m^3/kg.s^2$.

É evidente que a gravitação é uma força fraca, que se torna importante apenas quando pelo menos uma das massas é muito grande. A força gravitacional que se exerce sobre uma massa de 1 kg, à superfície terrestre, é de 9,8 newtons. (Este valor é imediatamente determinável: se deixarmos cair aquela massa, ela deslocar-se-á em direcção à superfície da Terra com uma aceleração de 9,8 m/s^2). Substituindo F_{grav} por 9,8 newtons e R pelo raio da Terra, poderemos calcular a massa da Terra! (Veja-se GE 8.11).

GE 8.10-8.13.

Suponhamos que é aplicável o mesmo valor de G a todas as interacções gravitacionais. Poderemos então calcular os valores das massas dos planetas, a partir dos valores conhecidos de T^2/R^3 relativos aos seus satélites. Desde o tempo de Newton, foram descobertos satélites em todos os planetas exteriores, à excepção de Plutão. Apresentam-se na tabela da página seguinte, ao lado, os valores das suas massas, calculadas a partir da relação $m = 4\pi^2/G \times R^3/T^2$. Vénus e Mercúrio não têm satélites, mas os valores das suas massas foram obtidos pela análise dos pequenos efeitos perturbadores que ocasionam nas órbitas dos outros planetas. Os valores indicados à margem para as massas são actuais. Note-se que a soma das massas de todos os planetas pouco excede a milésima parte da massa do sistema solar. A maior parte da massa reside, de longe, no Sol. Por esta razão, o Sol domina o movimento dos planetas, comportando-se como um objecto praticamente fixo, de massa quase infinita.

As massas reais (em unidades de 10^{24} kg)

Sol	1 980 000
Mercúrio	0,328
Vénus	4,83
Terra	5,98
Marte	0,637
Júpiter	1 900
Saturno	567
Úrano	88,0
Neptuno	103
Plutão	1,1

À luz da terceira lei de Newton, deveremos modificar um pouco o quadro que construímos. À acção exercida pelo Sol sobre cada um dos planetas, corresponde uma reacção igual e oposta de cada um destes sobre o Sol. É evidente que, pelo facto de o Sol possuir uma massa muitíssimo maior, a sua aceleração terá, correspondentemente, um valor muitíssimo menor. Mas esta aceleração não é, ao fim e ao cabo, exactamente nula. Assim, se aceitarmos a dinâmica newtoniana, o Sol não poderá estar realmente fixo no espaço, mesmo num sistema heliocêntrico, mas antes mover-se-á ligeiramente em torno do ponto que constitui o centro de massa comum do Sol e dos planetas em movimento que exercem forças sobre ele. Isto é verdade para cada um dos nove planetas; e uma vez que estes não se movem ao longo da mesma linha, o movimento do Sol é, na realidade, uma complicada sobreposição

GE 8.14-8.17

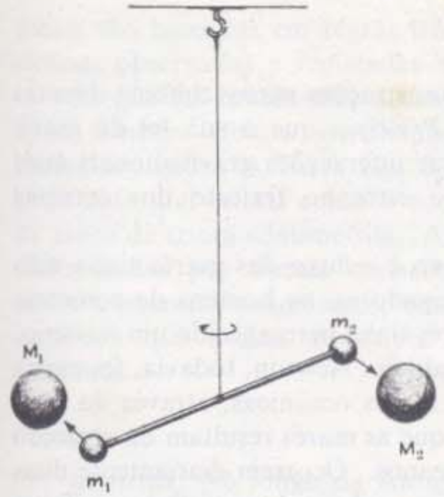
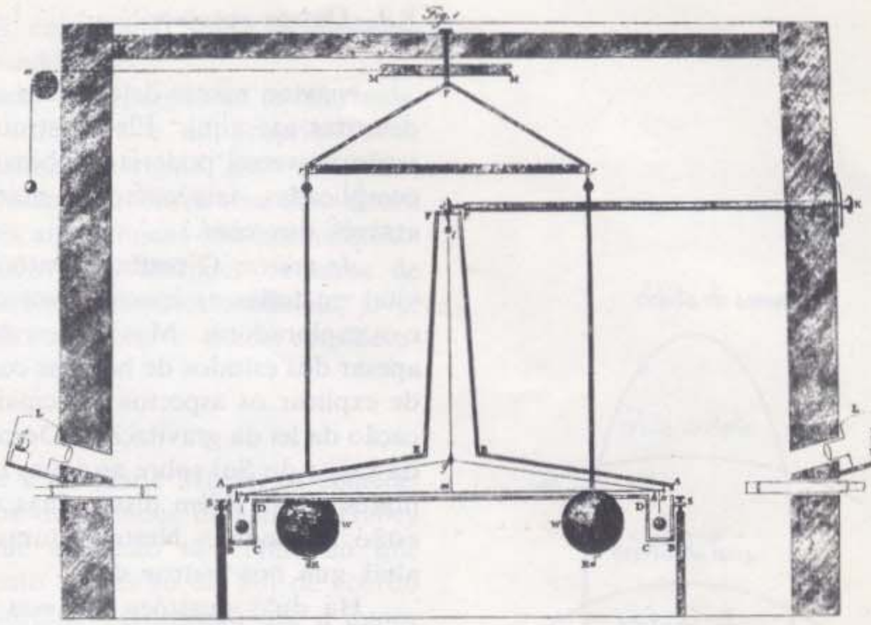


Diagrama esquemático do dispositivo utilizado por Cavendish para a determinação do valor da constante gravitacional *G*. Colocam-se grandes bolas de chumbo, de massas M_1 e M_2, próximo de pequenas bolas também de chumbo, de massas m_1 e m_2. A atracção gravitacional mútua entre M_1 e m_1, e entre M_2 e m_2 provoca uma torção mensurável no fio vertical.



O desenho original do aparelho de Cavendish para a determinação do valor de *G*. O dispositivo estava fechado numa caixa estanque, para evitar perturbações devidas a correntes de ar. Cavendish observou a deflexão do ponteiro da balança do exterior, com a ajuda de telescópios.

de 9 pequenas elipses. No entanto, a não ser no caso de um hipotético sistema solar no qual os planetas sejam muito pesados em comparação com o seu sol, tal movimento não é suficientemente amplo para se tornar de interesse em relação à maior parte das questões.

Q16 Qual das grandezas que entram na equação $F_{grav} = Gm_1m_2/R^2$ foi *medida* por Cavendish?

Q17 Supondo conhecido o valor de *G*, que outra informação pode ser usada para se determinar a massa da Terra?

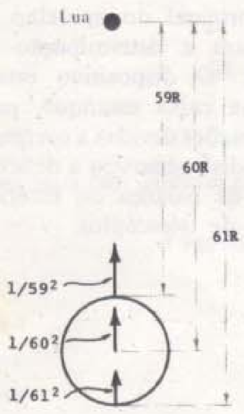
Q18 Conhecido o valor de *G*, que outra informação pode ser utilizada para se determinar a massa de Saturno?

Q19 A massa do Sol é cerca de 1000 vezes maior que a de Júpiter. Qual a relação entre a aceleração do Sol, devida à atracção de Júpiter, e a aceleração de Júpiter, devida à atracção do Sol?

8.9 Outros sucessos

Newton não se deteve com as demonstrações razoavelmente directas descritas até aqui. Ele mostrou nos *Principia* que a sua lei de gravitação universal poderia também explicar interacções gravitacionais mais complicadas, tais como as marés e o estranho trajecto dos cometas através dos céus.

As marés: O conhecimento do fluxo e refluxo das marés tinha sido vital em todas as épocas, para os navegadores, os homens de comércio e os exploradores. Mas a *causa* das marés tinha permanecido um mistério, apesar dos estudos de homens como Galileu. Newton, todavia, foi capaz de explicar os aspectos principais das marés oceânicas, através da aplicação da lei da gravitação. Descobriu que as marés resultam da atracção da Lua e do Sol sobre as águas dos oceanos. Ocorrem diariamente duas marés altas. Além disso, duas vezes por mês, a Lua, o Sol e a Terra estão alinhados. Nestas alturas as marés são significativamente mais altas que nos outros dias.



Forças das marés.
Na figura, a distância da Terra à Lua foi fortemente reduzida devido às limitações de espaço.

Há duas questões relativas ao fenómeno das marés que merecem especial atenção. Em primeiro lugar, por que é que ocorrem marés altas de ambos os lados da Terra, do lado mais próximo e do lado mais afastado da Lua? Em segundo lugar, por que é que a maré alta, num dado local, ocorre algumas horas depois de a Lua ter passado na vertical desse local?

Newton sabia que as atracções gravitacionais da Lua e do Sol aceleram todo o globo sólido terrestre. Estas forças também aceleram a água existente à superfície da Terra. Newton compreendeu que as marés resultam da *diferença* entre a aceleração da parte sólida da Terra e a aceleração das águas à sua superfície. A distância da Lua ao centro da Terra é de 60 raios terrestres. Do lado da Terra mais próximo da Lua, a distância da água à Lua é de apenas 59 raios. Do outro lado da Terra, mais afastado, a água está a 61 raios terrestres da Lua. Na figura ao lado mostram-se as acelerações correspondentes. No lado da Terra mais próximo da Lua, a aceleração da água em direcção à Lua é maior que a aceleração da Terra como um todo. O efeito resultante é o da água se afastar da Terra, isto é, o seu nível sobe. Do outro lado, a aceleração da água em direcção à Lua é menor que a da Terra como um todo. Neste caso, é a Terra que se afasta da água e, igualmente, o nível desta sobe.

Talvez o leitor tenha alguma vez consultado uma tabela de marés, ou observado o seu fluxo e refluxo numa praia. Poderá então ter verificado que a maré alta não ocorre quando a Lua ocupa a sua posição mais alta no céu, mas algumas horas *mais tarde*. Para explicar este facto, mesmo qualitativamente, é preciso lembrarmo-nos de que os oceanos não são muito profundos, de uma maneira geral. Como resultado, as águas em movimento sobre os fundos oceânicos, em resposta à atracção lunar, são retardadas pelo atrito nesses mesmos fundos, particularmente em locais de menor profundidade, pelo que, consequentemente, a hora da maré alta aparece atrasada. Num determinado local, o atraso e a altura das marés dependem muito da facilidade com que as águas se podem deslocar. Não é razoável esperar que alguma teoria possa explicar todos os pormenores das marés. A maior parte das previsões locais são baseadas em regras empíricas, construídas sobre as variações cíclicas observadas e registadas no passado.

Já que há marés nos oceanos, poder-se-á perguntar se não existirão também efeitos semelhantes na atmosfera e na própria Terra. Assim acontece. A Terra não é completamente rígida; pelo contrário, pode deformar-se, tal como o aço. As marés terrestres têm uma altura de cerca de trinta centímetros. As marés atmosféricas são normalmente dissimuladas por outras variações. Todavia, a altitudes de cerca de mil e seiscentos quilómetros, em que orbitam satélites artificiais, já se observou que a fina atmosfera aí existente sobe e desce consideravelmente.

Cometas: Ao longo da Antiguidade e da Idade Média, os cometas foram sempre tomados como presságios de grandes desastres. Halley e Newton, no entanto, mostraram que eles não são mais do que uma massa nebulosa ténue em movimento em torno do Sol de acordo com as leis de Kepler, tal como os planetas. Verificaram que a maior parte dos cometas só são visíveis quando se aproximam do Sol a uma distância inferior à de Júpiter. Sabe-se que vários dos cometas mais brilhantes têm órbitas que os levam bem dentro da órbita de Mercúrio, apenas a alguns milhões de quilómetros do Sol, como se representa na figura ao lado. Muitas das suas órbitas têm excentricidades próximas de 1,0, constituindo quase parábolas; estes cometas têm períodos de milhares e mesmo de milhões de anos. Alguns outros cometas menos brilhantes têm períodos de apenas cinco a dez anos.

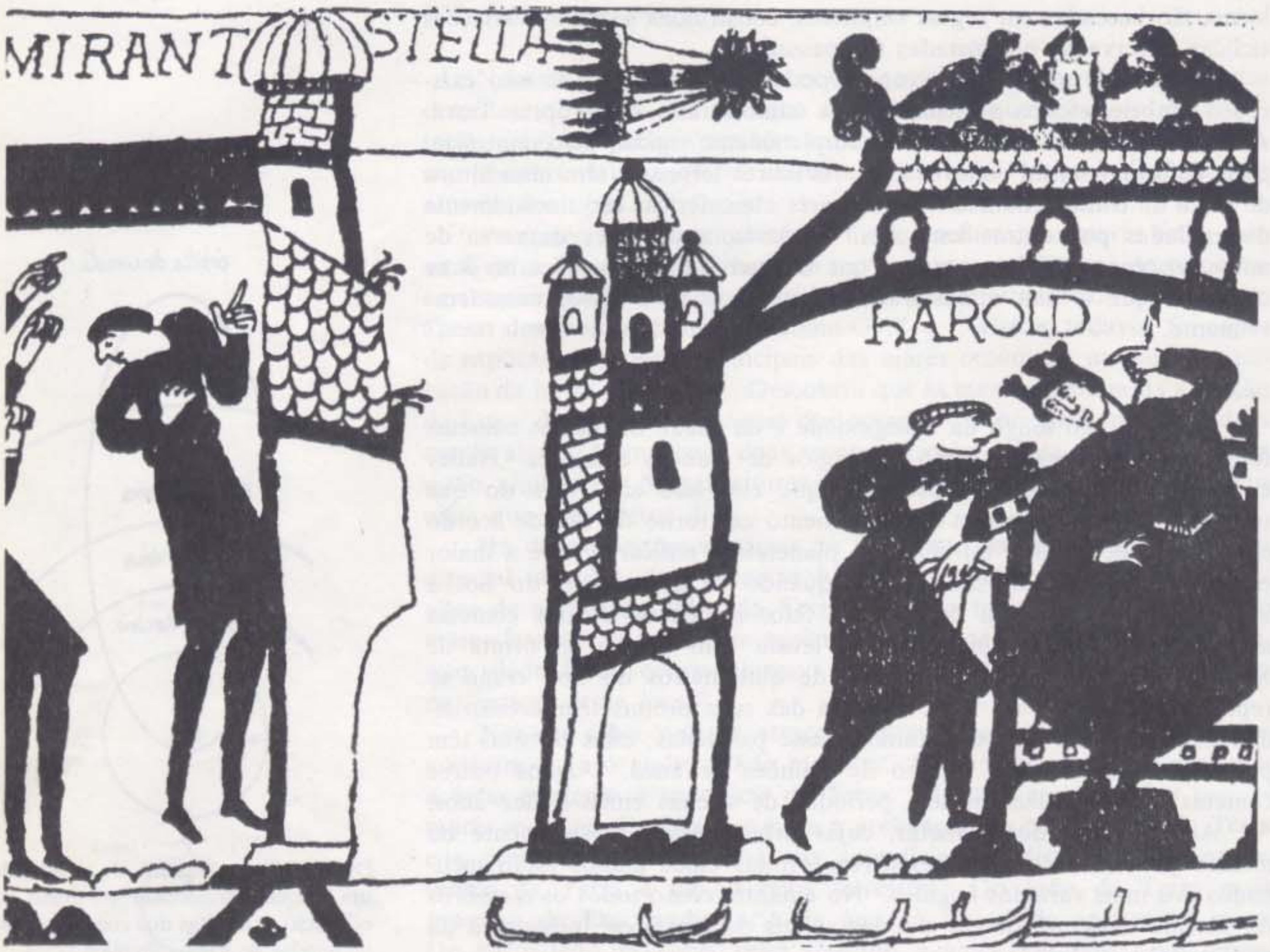
Ao contrário dos planetas, cujas órbitas estão sensivelmente no mesmo plano, os cometas percorrem órbitas cujos planos estão inclinados dos mais variados ângulos. No entanto, como todos os membros do sistema solar, obedecem a todas as leis da dinâmica, inclusive à da gravitação universal.

Edmund Halley aplicou os conceitos de Newton sobre os movimentos celestes ao movimento dos cometas brilhantes. Entre aqueles que estudou contam-se os que foram observados em 1531, 1607 e 1682, cujas órbitas verificou serem muito aproximadamente iguais. Halley suspeitou que se trataria do mesmo cometa, visto a intervalos de cerca de setenta e cinco anos e movendo-se numa órbita fechada. Previu então o seu regresso para cerca de 1757 — o que realmente aconteceu, embora Halley já não fosse vivo. O cometa de Halley reapareceu em 1833 e em 1909 e deverá estar na vizinhança do Sol, novamente brilhante, em 1985.

Conhecido o período deste cometa brilhante, estavam aproximadamente conhecidas as datas dos seus aparecimentos passados. Todos estes foram identificados, a partir de antigos registos e documentos indianos, chineses e japoneses, excepto o que deveria ter ocorrido por volta de 240 A.C. Não existem praticamente registos deste cometa na Europa. Este facto constitui uma nota triste sobre o nível de cultura da Europa, durante a chamada Idade Negra. Um dos poucos registos europeus sobre este cometa existe na famosa tapeçaria de Bayeux, bordada com setenta e duas cenas da conquista da Inglaterra pelos Normandos, em 1066. Uma das cenas mostra o cometa ao alto, enquanto o rei

Diagrama esquemático da órbita de um cometa, projectada no plano da eclíptica; as órbitas dos cometas estão inclinadas de vários ângulos.

GE 8.18.



Uma cena da tapeçaria de Bayeux, tecida por volta de 1070. Pode ver-se o cometa brilhante de 1066 no topo da figura. Mais tarde, este cometa foi identificado como sendo o de Halley. À direita, Harold, pretendente ao trono de Inglaterra, é avisado de que o cometa constitui um mau presságio. Nesse mesmo ano, Harold seria derrotado por Guilherme, o Conquistador, na batalha de Hastings.

Harold de Inglaterra e a sua corte se encolhem de medo. Um dos triunfos principais da ciência newtoniana foi o seu sucesso na explicação dos cometas. Assim, passaram a ser encarados como membros regulares do sistema solar, em vez de acontecimentos imprevisíveis e assustadores.

GE 8.19.

O âmbito do princípio da gravitação universal: Newton aplicou a sua lei da gravitação universal a muitos outros problemas, que não podemos considerar aqui em pormenor. Por exemplo, investigou as causas do movimento um tanto irregular da Lua e mostrou que estas irregularidades eram explicáveis pelas forças gravitacionais actuantes sobre a Lua. À medida que a Lua se move em torno da Terra, a sua distância ao Sol varia continuamente. Este facto faz variar a força resultante das acções combinadas da Terra e do Sol sobre a Lua em órbita. Mostrou ainda que outras variações no movimento da Lua ocorrem por a Terra não ser uma esfera perfeita, mas antes achatada nos pólos. (O diâmetro equatorial da Terra é cerca de quarenta e três quilómetros maior que o seu diâmetro polar). A propósito do movimento da Lua, Newton fez o seguinte comentário: "O cálculo deste movimento é difícil". Mesmo assim, conseguiu obter previsões com um acordo razoável relativamente aos valores observados disponíveis naquele tempo. Conseguiu mesmo prever pormenores ainda então não observados.

Investigou as variações da gravidade com a latitude, devidas à rotação e à não-esfericidade da Terra. Notou diferenças nos períodos de oscilação dos pêndulos a diversas latitudes. A partir destes dados deduziu a forma aproximada da Terra.

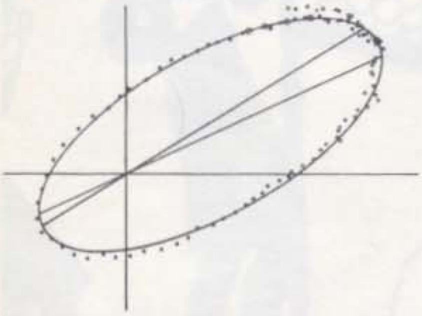
Em resumo, Newton criou toda uma nova perspectiva quantitativa para o estudo do movimento na astromonia. Provocou, indirectamente, a construção de instrumentos melhores do que os existentes, já que algumas das variações por ele previstas não tinham ainda sido observadas. Estes instrumentos melhoraram, por sua vez, as anteriores observações, explicadas antes, no seu conjunto, pela grande teoria. Lançou a atenção sobre numerosos novos problemas teóricos. Por exemplo, quais serão as influências previsíveis e observáveis que os planetas exercem uns sobre os outros nos seus movimentos? Muito embora os planetas sejam pequenos em comparação com o Sol e estejam muito afastados uns dos outros, as suas interacções são observáveis. À medida que foram sendo recolhidos e reunidos dados mais precisos, a teoria newtoniana foi permitindo o cálculo do passado e do futuro do sistema planetário. Para intervalos de tempo, passados ou futuros, superiores a algumas centenas de milhões de anos, as extrapolações tornam-se demasido imprecisas. Para intervalos mais curtos, a teoria newtoniana diz-nos que o sistema planetário tem sido e continuará a ser aquilo que é hoje.

O que espantou os contemporâneos de Newton e ainda hoje provoca a nossa admiração por ele não foi só o alcance e o génio do seu trabalho na mecânica, nem apenas a extrema originalidade e elegância das suas demonstrações, mas o pormenor a que levou as implicações de cada uma das suas ideias. Tendo-se satisfeito a si próprio acerca da exactidão do seu princípio da gravitação universal, aplicou-o a uma imensa gama de problemas terrestres e celestes, o que fez com que a teoria se tornasse cada vez mais vastamente aceite. A teoria de Newton tem sido o principal instrumento na resolução dos novos problemas de movimento no sistema solar. Por exemplo, o movimento dos satélites artificiais e das sondas espaciais pôde ser exactamente calculado na base da suposição de que, em cada instante, actua sobre eles uma força gravitacional que obedece à lei da gravitação universal de Newton. É assim que podemos concordar com a resposta dada pelos tripulantes ao controle terrestre, no regresso da cápsula Apolo 8 do primeiro voo tripulado à Lua — controle terrestre: "Quem está a conduzir agora?"; Apolo 8: "Penso que é Isaac Newton que está a fazer a maior parte do trabalho, neste momento".

A partir de pequenas variações em relação à lei «$1/R^2$», detectadas na aceleração centrípeta de satélites em órbita em torno da Lua, foi possível localizar concentrações invulgarmente densas de massa sob a superfície lunar.

Para lá do sistema solar: Vimos já como se podem aplicar as leis de Newton na explicação dos movimentos e de outros fenómenos físicos, na Terra como em todo o sistema solar. Encaremos agora uma questão nova e ainda mais grandiosa. Serão as leis de Newton também aplicáveis para distâncias maiores, por exemplo entre as estrelas?

Durante os anos que se seguiram à publicação dos *Principia*, vários conjuntos de observações foram recolhidos que forneceram resposta a esta importante pergunta. Nos fins do século XVIII, William Herschel, um músico britânico transformado em astrónomo amador, fez, com a ajuda de sua irmã Caroline, uma notável série de observações telescópicas do céu. Servindo-se de telescópios caseiros mas de alta qualidade, pretendia medir a paralaxe das estrelas devida ao movimento da Terra em torno do Sol. Ocasionalmente, notou que uma estrela se apresentava muito próxima de uma outra. Herschel suspeitou então que alguns desses pares poderiam ser, na realidade, estrelas duplas, emparelhadas pelas suas atracções gravitacionais mútuas. Continuou a observar as direcções e distâncias relativas das duas estrelas em tais pares. No intervalo de alguns anos, uma das estrelas percorria um pequeno arco de trajectória curva em torno da outra, como observou em alguns casos. (A figura ao lado mostra o movimento de uma das duas estrelas constituintes de um sistema). Outros astrónomos reuniram mais informações acerca destas estrelas duplas imensamente distantes do Sol e dos seus planetas. Por fim, tornou-se claro que se moviam uma em relação à outra de acordo com as leis de Kepler e, consequentemente, em obediência à lei da gravitação universal de Newton. Utilizando exactamente a mesma equação que usámos para os planetas (veja-se a página 111), os astrónomos calcularam que as massas destas estrelas variam entre um décimo e 50 vezes a massa do Sol.



O movimento de um dos dois componentes de um sistema estelar binário, correspondente a muitos anos. Cada círculo indica o valor médio de observações feitas durante um ano inteiro.

Uma teoria nunca poderá ser completamente provada; mas ela torna-se mais e mais aceitável à medida que se for descobrindo a sua utilidade sobre uma gama cada vez mais vasta de problemas. Nenhuma outra teoria suportou melhor este teste que a teoria da gravitação universal de Newton, aplicada ao sistema planetário. Depois de Newton, foi necessário quase um século para que os físicos e astrónomos compreendessem, verificassem e estendessem o seu trabalho, na aplicação aos problemas do movimento planetário. Ao fim de dois séculos (pelos fins do século XIX), era ainda razoável dizer que a maior parte do que se tinha feito na ciência da mecânica, desde os tempos de Newton, não era mais do que um desenvolvimento ou aplicação do seu trabalho.

Q20 Por que é que a Lua faz com que o nível das águas do mar suba de *ambos* os lados da Terra?

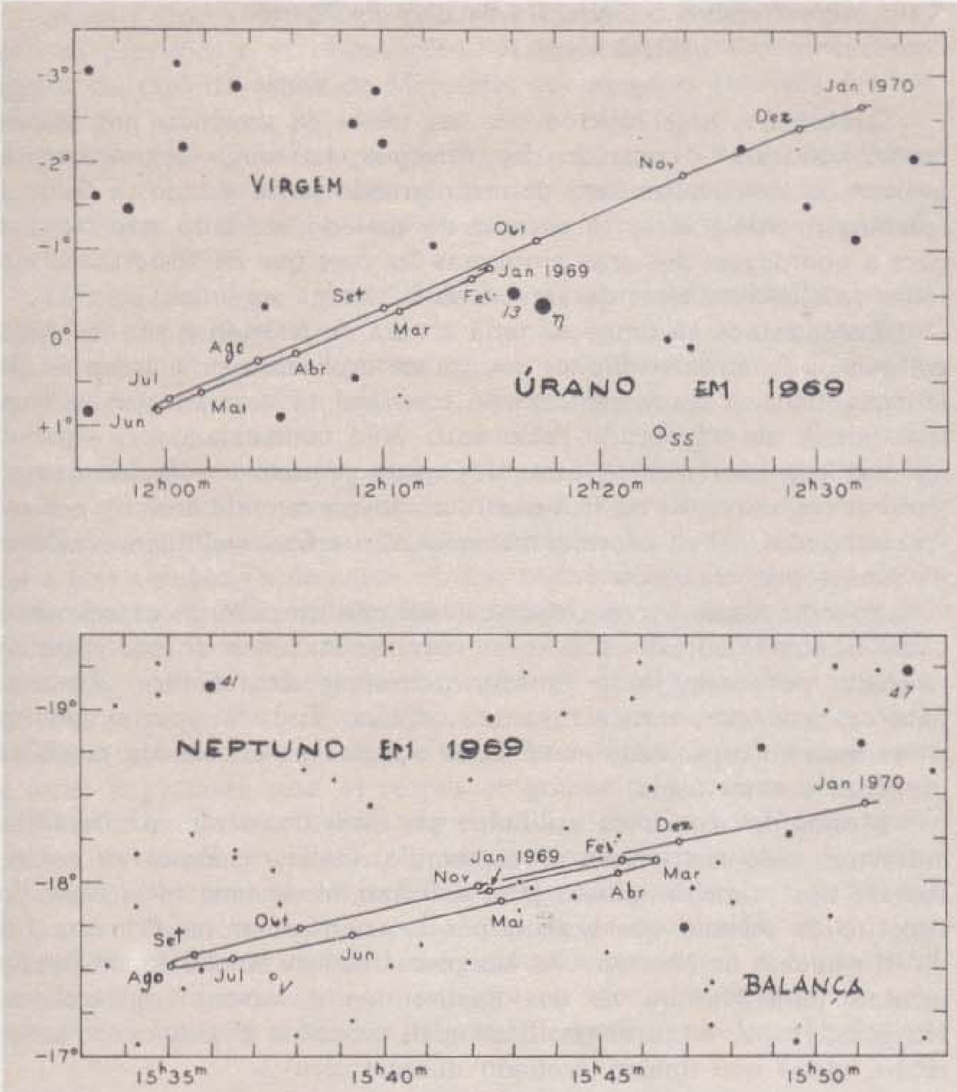
Q21 Em quais dos meios materiais indicados a seguir há marés provocadas pela Lua?

(a) Os mares. (b) A atmosfera. (c) A Terra sólida.

Q22 Por que é que o cálculo preciso dos movimentos da Lua é tão complicado?

Q23 Em que diferem as órbitas dos cometas das dos planetas?

Q24 Essas diferenças afectam a validade da lei da gravitação universal de Newton relativamente aos cometas?



As trajectórias dos três planetas mais afastados do Sol durante o ano de 1969. (Diagramas reproduzidos da revista *Sky and Telescope*).

O planeta Úrano foi descoberto com um telescópio de reflexão, em 1781. As perturbações observadas durante muitos anos na órbita de Úrano levaram os astrónomos a procurar outro planeta para além dele. Neptuno foi observado em 1846, exactamente na posição prevista através de análises das perturbações da órbita de Úrano (utilizando a mecânica newtoniana). Pode encontrar-se um relato pormenorizado da história de Neptuno na Unidade Suplementar do Projecto Física denominada *Discoveries in Physics*. As perturbações observadas durante muitos anos na órbita de Neptuno levaram os astrónomos a procurar ainda um outro planeta. Mais uma vez foram bem sucedidas as previsões da mecânica newtoniana, e Plutão (demasiado ténue para ser observado visualmente, mesmo com os melhores telescópios) foi descoberto em 1930, numa fotografia de longo tempo de exposição.

8.10 Alguns efeitos e limitações da obra de Newton

Apreciamos hoje Newton e a sua teoria da mecânica por muitas razões válidas. O conteúdo dos *Principia* constituiu, historicamente, a base do desenvolvimento de uma grande parte da nossa física e tecnologia. Além disso, o sucesso do método utilizado por Newton para a abordagem dos seus problemas fez com que ele fosse usado em todas as ciências físicas durante os dois séculos seguintes.

Encontramos ao longo de toda a obra de Newton a sua fé básica em que os fenómenos celestes podem ser explicados pela aplicação de leis quantitativas fundamentalmente terrestres. Ele sentiu que as suas leis tinham um significado físico real. Não constituíam meros meios matemáticos convenientes, atrás dos quais se escondessem leis impossíveis de conhecer. As leis físicas naturais governantes do universo *podiam* ser conhecidas. As suas formas matemáticas simples constituíam evidência da sua própria realidade.

Newton reuniu a capacidade e o método do cientista experimental e do cientista teórico. Construiu engenhosas peças de equipamento — como, por exemplo, o primeiro telescópio de reflexão. Realizou hábeis experiências, particularmente na óptica. Todavia, aplicou também a sua enorme capacidade matemática e lógica na criação de previsões explícitas e observáveis.

Muitos dos conceitos utilizados por Newton vieram de cientistas anteriores e do seu tempo. Por exemplo, Galileu e Descartes contribuíram nos primeiros passos para a formação de uma ideia clara do conceito de inércia, que acabou por se transformar na Primeira Lei do Movimento de Newton. As leis planetárias de Kepler foram fundamentais para Newton na sua análise dos movimentos planetários. Huygens, Hooke e outros clarificaram os conceitos de força e de aceleração, ideias que tinham evoluído durante séculos.

Além das suas próprias experiências, Newton seleccionou e utilizou dados de muitas outras fontes. Tycho Brahe foi apenas um dos vários astrónomos de cujas observações do movimento da Lua ele se serviu. Quando não conseguia completar as suas próprias medidas, Newton sabia a quem se dirigir.

Por fim, deveremos recordar quão exaustiva e frutífera foi a sua utilização e expansão das suas próprias contribuições específicas. Por exemplo, ao desenvolver a sua teoria da gravitação universal utilizou, intensivamente, as suas leis do movimento e as suas muitas invenções matemáticas. No entanto, Newton era modesto acerca dos seus sucessos. Chegou mesmo a dizer que, se tinha ido mais longe que outros, "era por estar assente nos ombros de Gigantes".

Sabemos hoje que a mecânica newtoniana é válida apenas dentro de um campo bem definido da nossa ciência. Por exemplo, embora as forças interiores a uma dada galáxia pareçam ser newtonianas, isso poderá já não ser verdade para as forças actuantes entre uma galáxia e outra. No outro extremo da escala, situa-se o mundo dos átomos e das partículas subatómicas. Veremos que foi necessário desenvolver todo um conjunto de conceitos não-newtonianos para explicar os movimentos observados destas partículas.

Mesmo dentro do sistema solar, há várias pequenas discrepâncias entre as previsões e as observações. A mais famosa é o movimento angular do eixo da órbita de Mercúrio, que excede a previsão das leis de Newton em cerca de 1/80° por século. Qual será a causa deste erro? Durante algum tempo pensou-se que o erro seria devido ao facto de a força gravitacional não variar *exactamente* com o inverso do quadrado da distância — talvez a lei da força fosse, por exemplo, $F_{grav} \propto 1/R^{2,000001}$

Dificuldades deste tipo não devem ser apressadamente atribuídas a pequenas imperfeições. A Lei da Gravitação aplica-se com um rigor fora de questão a todos os outros movimentos planetários. No entanto, poderá acontecer que as hipóteses básicas da teoria a tornem muito limitada, como aconteceu com o sistema de epiciclos de Ptolomeu. Como resultado de muitos estudos, chegou-se à conclusão que não há maneira de modificar pormenores da mecânica newtoniana, de modo a explicar certas observações. Essas observações só podem ser tidas em conta pela construção de *novas* teorias, baseadas em algumas hipóteses muito diferentes. As previsões destas teorias são quase idênticas às das leis de Newton nos fenómenos que nos são familiares. Mas a verdade é que elas também se mostram mais precisas em alguns casos extremos, em que as previsões newtonianas começam a apresentar imprecisões. A ciência newtoniana liga-se por um lado à *teoria da relatividade*, que se torna importante para os corpos de grande massa ou animados de velocidades muito altas. Pelo outro lado, a ciência newtoniana aproxima-se da *mecânica quântica*, importante para as partículas de massa e dimensões extremamente pequenas — moléculas, átomos e partículas nucleares. Para uma gama muito extensa de problemas, entre estes extremos, a teoria newtoniana dá resultados precisos e é muito mais simples de ser usada. Mais ainda, foi na mecânica newtoniana que tiveram raiz quer a teoria da relatividade quer a mecânica quântica.

A mecânica newtoniana refere-se à ciência do movimento dos corpos, na base da obra de Newton. Inclui as suas leis do movimento e da gravitação aplicadas a todos os tipos de corpos, desde os de dimensões microscópicas às estrelas, e incorpora desenvolvimentos da mecânica levados a cabo durante os duzentos anos seguintes à própria obra de Newton.

GE 8.20-8.22.

Como se determina a massa de uma estrela dupla

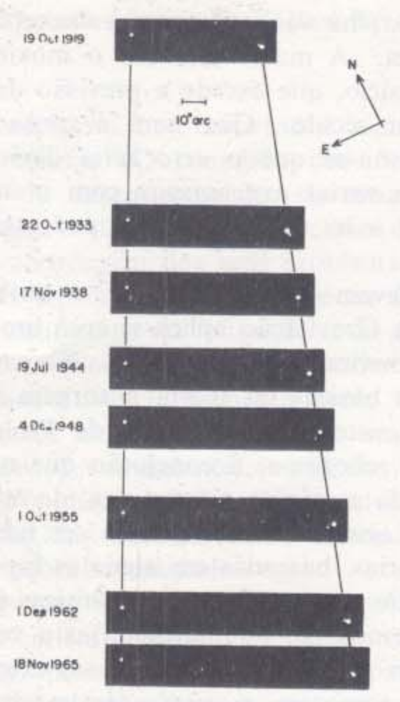
Vamos estudar um sistema estelar duplo, para demonstrar o poder das leis de Newton e para exemplificar o tipo de problemas que interessa a alguns dos astrónomos de hoje. Mesmo o leitor poderá determinar a massa do sistema, a partir das suas próprias observações.

O sistema denominado Kruger 60 constitui uma interessante estrela dupla de período curto. Está localizada menos de um grau a sul da estrela variável Delta de Cefeu, no céu do hemisfério norte.

Pode ver-se a estrela dupla na série de fotografias (figura A), do lado direito; as várias imagens estão espaçadas de acordo com as datas em que fora obtidas. Do lado esquerdo aparece uma outra estrela, que aconteceu estar no campo de visão. As fotografias mostram a revolução do sistema estelar duplo, cujo período é de cerca de 45 anos. Como se pode ver, as duas estrelas apresentavam o máximo de afastamento uma da outra em meados da década de 1940; nessa altura a distância entre elas era de cerca de 3,4 segundos de arco. A carta das suas posições relativas (figura B) mostra que a situação de aproximação máxima ocorreu por volta de 1971; a distância era então de 1,4 segundos de arco. O duplo círculo marca o centro de massas do sistema constituído pelas duas estrelas. Poder-se-á desenhar o movimento de uma das estrelas relativamente à outra, medindo-se a direcção e a distância que as separam, a intervalos de cinco anos. Esperaria que a figura fosse uma elipse? Serão aplicáveis as leis de Kepler? São? Partiu do princípio de que o plano orbital é perpendicular à direcção de observação?

A sequência de imagens mostra ainda um outro movimento. O centro de massa de Kruger 60 afasta-se da estrela à esquerda. Prolongando as linhas para datas anteriores a mais antiga assinalada, poderá verificar-se que, em 1860, Kruger 60 passou a apenas 4 segundos de arco da estrela de referência.

O afastamento do sistema Kruger 60 relativamente à estrela de referência mostra que as estrelas se movem realmente umas em relação às outras. A maior parte das estrelas estão demasiado distantes da Terra para que este movimento, denominado *movimento próprio*, possa ser detectado.



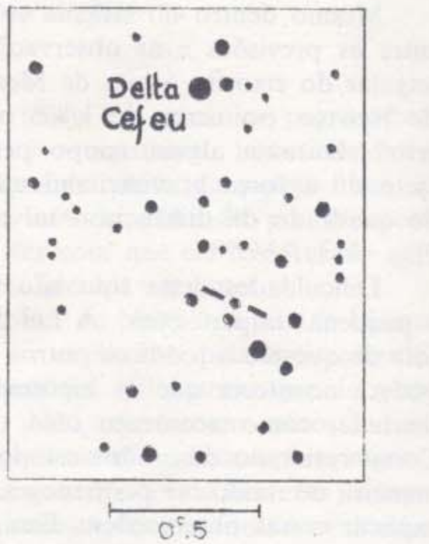


Figura A Os movimentos orbital e linear do sistema binário visual Kruger 60 são mostrados simultaneamente nesta carta, obtida a partir de fotografias tiradas no Observatória Leander McCormick (1919 e 1933) e no Observatório Sproul (1938 a 1965).

Kruger 60, todavia, está relativamente próxima, apenas a cerca de 13 anos-luz de distância. (Um ano-luz é a distância que a luz viaja num ano, à velocidade de $3{,}0 \times 10^8$ metros por seg.). A distância a que está Kruger 60 é, portanto: 13 anos $\times 3{,}0 \times 10^8$ m/s $\times 3{,}2 \times 10^7$ s/ano $= 13 \times 10^{16}$ m, ou seja, $8{,}7 \times 10^5$ UA. (Um ano tem cerca de $3{,}2 \times 10^7$ segundos. Uma UA — unidade astronómica — é igual a $1{,}5 \times 10^{11}$ metros).

Conhecida a escala da imagem, podemos determinar, a partir das fotografias, a variação da distância de Kruger 60 à estrela de referência, entre 1919 e 1965. As medidas efectuadas sobre as fotografias dão as distâncias de 55 segundos de arco em 1919 e de 99 segundos de arco em 1965 (*). Consequentemente, o movimento próprio foi de 44 segundos em 46 anos, ou seja, muito aproximadamente de 1,0 segundos de arco por ano. Este ângulo é cerca de $1/2{,}1 \times 10^5$ da distância à estrela. Num

(*) Adaptado de um artigo de James F. Wanner, do Observatório Sproul, Swarthmore College, publicado na revista *Sky and Telescope*, em Janeiro de 1967.

ano, portanto, a estrela move-se 13×10^{16} m/$2,1 \times 10^5$, ou seja, $6,7 \times 10^{11}$ metros/ano. Num segundo, a componente do movimento da estrela, projectado no firmamento, é de $1,9 \times 10^4$ m. Isto é, a sua velocidade, perpendicularmente à direcção de observação, é de 1,9 km/s. É provável que a estrela tenha também uma componente do movimento *segundo* a direcção de observação, correspondente à *velocidade radial*. Mas esta só pode ser determinada a partir de outro tipo de observações.

Podem ser determinadas as massas das duas estrelas de Kruger 60, a partir da fotografia apresentada na fig. B e da aplicação de uma equação semelhante à indicada na página 112 para o quociente das massas de Júpiter e do Sol. Ao obter esta equação, supusemos que a massa de um dos corpos de cada par (Sol-planeta, ou planeta-satélite) era muito mais pequena que a do outro. Na verdade, a massa que aparece na equação é a soma das duas. Assim, para a estrela dupla devemos escrever $(m_1 + m_2)$. Temos então:

$$\frac{(m_1 + m_2)\ \text{par}}{m_{\text{Sol}}} = \left[\frac{T_{\text{terra}}}{T_{\text{par}}}\right]^2 \left[\frac{R_{\text{par}}}{R_{\text{terra}}}\right]^3$$

As contas tornam-se muito mais simples se tomarmos os períodos em anos e as distâncias em unidades astronómicas (UA), já que qualquer destas grandezas é igual a um, para a Terra. O período de Kruger 60 é de cerca de 45 anos. A distância média entre as duas estrelas pode ser determinada, em segundos de arco, a partir do diagrama (figura B). A separação média é de:

$$\frac{\max + \min}{2} = \frac{3{,}4\ \text{s} + 1{,}4\ \text{s}}{2} = 2{,}4\ \text{s}$$

Vimos atrás que a distância do par ao Sol é de cerca de $8,7 \times 10^5$ UA. A separação angular média de 2,4 s corresponde então a:

$$\frac{2{,}4 \times 8{,}7 \times 10^5\ \text{U.A.}}{2{,}1 \times 10^5} = 10\ \text{UA}$$

As duas estrelas estão separadas, portanto, sensivelmente da mesma distância a que Saturno está do Sol.

Introduzindo agora os valores conhecidos na equação indicada acima, obtemos:

$$\frac{(m_1 + m_2)_{\text{par}}}{m_{\text{Sol}}} = \left[\frac{1}{45}\right]^2 \left[\frac{10}{1}\right]^3 = \frac{1000}{2020} = 0{,}50$$

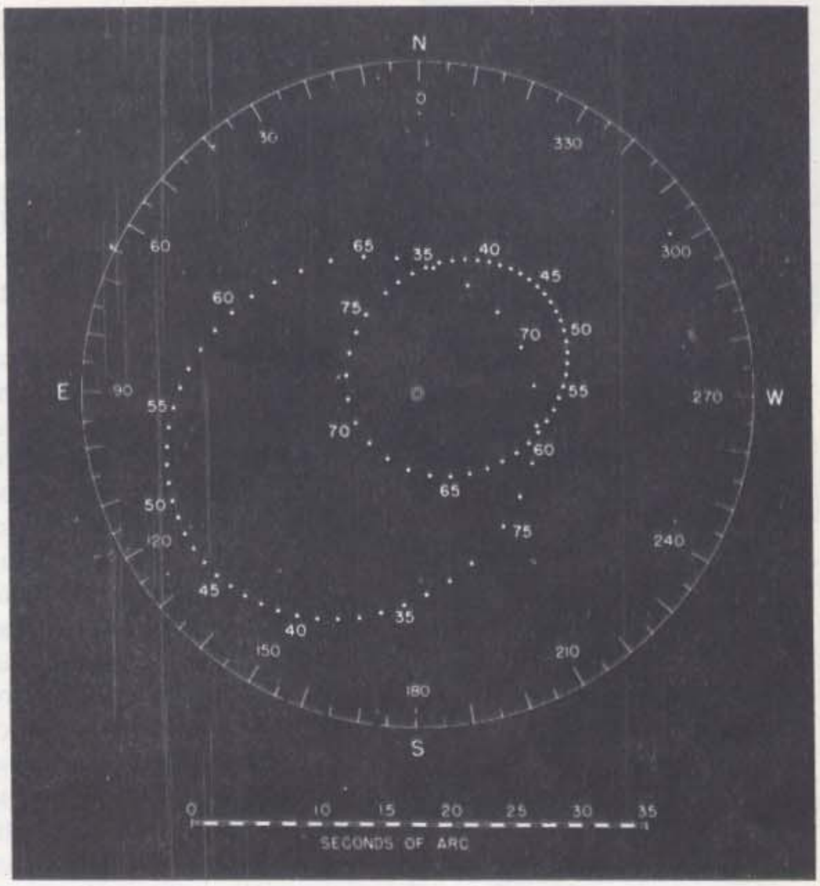


Figura B Os componentes de Kruger 60 percorrem órbitas elípticas, indicadas por pontos, em torno do seu centro de massa, representado por um círculo duplo. Os pontos correspondem às posições ocupadas no dia 1 de Setembro dos anos de 1932 a 1975. O círculo exterior está graduado em graus, pelo que as posições angulares da companheira, durante a próxima década, podem ser lidas directamente.

Portanto, a soma das massas das duas estrelas é cerca de metade da massa do Sol.

Podemos mesmo determinar a massa de cada uma das estrelas, separadamente. Podemos ver no diagrama dos movimentos em torno do centro de massas que uma das estrelas tem um movimento de menor amplitude que a outra. Ela é, portanto, a de maior massa. Nas posições correspondentes a 1970 (ou nas que foram observadas no ciclo anterior, em 1925), a estrela menos massiva está 1,7 vezes mais afastada do centro de massas do que a outra. As massas das duas estrelas estão, portanto, na razão 1,7:1. Das duas, a estrela de menor massa, tem:

$$\frac{1}{1 + 1{,}7} \times 0{,}5 = 0{,}18 \text{ vezes a massa do Sol}$$

E, consequentemente, a outra estrela tem 0,32 vezes a massa do Sol. A estrela de maior massa é mais de quatro vezes mais brilhante do que a de menor massa. Ambas são "anãs vermelhas", menos massivas e consideravelmente mais frias do que o Sol.

EPÍLOGO Começou-se nesta Unidade a partir dos primeiros registos históricos, seguindo-se as tentativas feitas pelo Homem para explicar os movimentos celestes. Viu-se a longa e gradual transição de uma perspectiva celeste de centro na Terra para a perspectiva moderna, na qual a Terra é apenas mais um planeta em movimento em torno do Sol. Examinaram-se as dificuldades encontradas na realização desta mudança de perspectiva. Pretendeu-se ainda pôr em evidência a síntese de Newton dos movimentos terrestres e celestes. De vez em quando, sugeriu-se a existência de uma interacção entre esta nova visão do universo e a cultura geral. Acentuou-se o facto de que os cientistas são produto do seu próprio tempo. São naturalmente limitados nas suas possibilidades de abandonar os princípios em que foram ensinados. Gradualmente, através do trabalho de muitos, foi nascendo toda uma nova maneira de encarar os movimentos celestes, o que, por sua vez, abriu novas possibilidades para novas ideias ainda futuras. E o fim deste processo não se pode vislumbrar.

Além disso, apreciou-se a construção e verificação de teorias. Discutiu-se o lugar das hipóteses e da experiência, dos modelos mecânicos e da descrição matemática. Voltar-se-á a esta questão, dentro de um contexto mais moderno, na parte final do curso. Verificar-se-á que as atitudes desenvolvidas em relação à construção de teorias durante a revolução científica do século XVII são, ainda hoje, imensamente proveitosas.

Durante o estudo, referiram-se cientistas da Grécia, do Egipto, da Polónia, da Dinamarca, da Áustria, da Itália, da Inglaterra e de outros países. Cada um deles, como disse Newton de si próprio, ergueu-se sobre os ombros dos antecessores. E por cada vitória retumbante acumularam-se muitos outros avanços mais pequenos, ou mesmo fracassos. A ciência é encarada como uma actividade intelectual cumulativa, não limitada por fronteiras nacionais ou pelo tempo. Não é inevitável ou inexoravelmente bem sucedida, mas cresce como uma floresta. O "novo" substitui e alimenta-se do "velho", por vezes com variações inesperadas nas suas várias partes. A ciência não é um processo frio e calculista. Pode envolver controvérsia apaixonada, convicções religiosas, julgamentos estéticos e mesmo, por vezes, desenfreada especulação pessoal.

É também evidente que a síntese newtoniana não pôs fim ao estudo da ciência, nem lhe resolveu todos os problemas. Em muitos aspectos abriu-lhe linhas de investigação completamente novas, tanto no campo teórico como no campo observacional. De facto, grande parte da ciência e da tecnologia actual iniciaram-se com o trabalho de Newton. Novos modelos, novas ferramentas matemáticas e nova autoconfiança encorajaram os que se seguiram a atacar novos problemas. Encetou-se uma série interminável de perguntas, de respostas e de novas perguntas. A perspectiva moderna da ciência situa-a como uma investigação contínua em campos cada vez mais interessantes.

Um dos problemas que ficaram por resolver após o trabalho de Newton foi o do estudo de objectos que interactuam não por forças gravitacionais mas pela fricção e pela colisão. Como mostrará a próxima Unidade, isto conduziu aos conceitos de momento e de energia e a uma visão muito mais vasta das ligações entre diferentes partes da ciência — física, química e biologia. Esta linha de estudo acabou por produzir outras afirmações, tão grandiosas como a lei da gravitação universal de Newton. Entre elas estão as leis de conservação, em que tanto se baseiam a ciência e a tecnologia modernas. Uma parte importante destas leis descreve como funcionam sistemas constituídos por muitas partículas interactuantes. Este tema será o assunto principal da Unidade 3.

A influência de Newton não se limitou, todavia, apenas à ciência. O século que se seguiu à morte de Newton, em 1727, foi um período de acréscimo na compreensão e aplicação das suas descobertas e métodos. A sua influência sentiu-se especialmente na filosofia e na literatura, mas também em muitos outros campos exteriores à ciência. Completemos o nosso estudo de Newton pela análise de alguns destes efeitos.

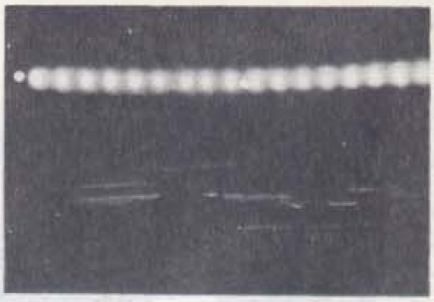
O século XVIII é muitas vezes chamado a Idade da Razão ou Século do Esclarecimento. Durante estes anos, a cosmologia newtoniana entroncou-se firmemente na ciência e na filosofia europeias. Será difícil exagerar o impacto dos resultados alcançados por Newton. Ele mostrou que a observação, o raciocínio e o uso de modelos mecânicos e de leis matemáticas podiam descortinar os segredos do funcionamento do universo físico. Consequentemente, como foi argumentado, o mesmo método podia ser usado para compreender não só a natureza mas também a sociedade e o espírito humano. Como o exprimiu o escritor francês Fontenelle (1657-1757):

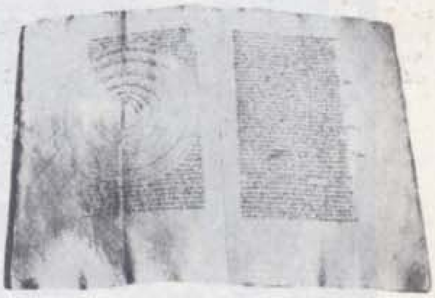
> O espírito geométrico não está tão ligado à geometria que não possa ser dele desenredado e transportado para outros campos. Um trabalho de moral, ou de política, ou de crítica, talvez mesmo de eloquência, será mais perfeito, em igualdade com outros, se for escrito pela mão de um geómetra.

O filósofo inglês John Locke (1632-1704) foi fortemente influenciado pela obra de Newton, reforçando por sua vez a influência deste sobre outros. Dizia Locke que o objectivo da filosofia devia ser a resolução de problemas, incluindo aqueles que afectam a nossa vida diária. E que a melhor maneira de o fazer era através da observação e do raciocínio. "A razão deve ser o nosso melhor guia e conselheiro em todas as coisas", afirmava ele. Locke pensava que o conceito de "lei natural" podia ser aplicado na religião como na física; e, na verdade, a noção de uma religião "baseada na razão" encantou muitos europeus, que se lembravam ainda das amargas guerras religiosas do século XVII.

Locke introduziu a teoria de que o espírito de um recém-nascido não contém "ideias inatas". É antes como uma folha de papel em branco, na qual tudo pode vir a ser escrito. Assim, será fútil procurar dentro de cada uma alguma dádiva divina para apreciar o que é verdadeiro e o que é moralmente correcto. Em vez disso, dever-se-á procurar na natureza ou na sociedade quaisquer "leis naturais" que possam existir. Reciprocamente, se se pretender melhorar a qualidade do espírito humano, dever-se-á procurar melhorar a sociedade em que se vive.

O ponto de vista de Locke implicava uma estrutura "atomística" da sociedade: cada pessoa estaria separada dos outros indivíduos, no sentido de não existir qualquer relação "orgânica" entre eles. Ante-





A gravura de Sebastian LeClerc representando a Academia Francesa (1698) reflecte a actividade das sociedades cultas da época. A figura não mostra, naturalmente, uma cena real, mas mostra alegoricamente a excitação de comunicação que crescia numa atmosfera informal. As vestes representam simbolicamente a herança grega das ciências. Embora representando todas as ciências, o artista colocou nos flancos a anatomia, a botânica e a zoologia, representadas por esqueletos e folhas secas, juntamente com a alquimia e a teologia. São as matemáticas e as ciências físicas, incluindo a astronomia, que ocupam a zona central.

riormente, as teorias políticas tinham-se baseado na ideia de que a sociedade era como que um organismo, no qual cada pessoa tinha um lugar, uma função e uma obrigação pré-estabelecidos. As teorias posteriormente desenvolvidas, baseadas nas ideias de Locke, defenderam o ponto de vista de que o governo deveria limitar-se a uma função de protecção da liberdade e da propriedade de cada indivíduo.

A "razão" era a palavra-chave dos filósofos do século XVIII. Contudo, as suas teorias de como melhorar a religião e a sociedade não tinham que ser perfeitamente razoáveis. Por exemplo, eles acreditavam fortemente na doutrina da igualdade de direitos de todos os homens. No entanto, não existia nenhuma prova matemática ou científica para demonstrar esta crença. A física newtoniana, a tolerância religiosa e o governo republicano foram introduzidos pelo mesmo movimento. Mas isto não significa necessariamente uma ligação lógica entre eles. Muitos dos pensadores do século XVIII, noutros assuntos ou países, nem sequer se preocuparam muito com outras falhas, na lógica ou no sentimento. Por exemplo, embora acreditando que "todos os homens são criados igualmente", pouco fizeram para remover as grilhetas dos escravos negros, os muros dos "ghettos" que aprisionavam os judeus, ou as leis que negavam o voto às mulheres.

Todavia, em comparação com o século anterior, o tema dominante dos anos de 1700 foi a *moderação* — o "feliz meio-termo". A ênfase foi dada à tolerância das opiniões diferentes, à restrição dos excessos em qualquer direcção, ao equilíbrio das forças em oposição. À própria razão não era permitido pôr fortemente em causa as fés religiosas. O ateísmo, que alguns filósofos pensaram ser a consequência lógica da racionalidade ilimitada, era ainda olhado com horror pela maior parte dos europeus.

Entre as Constituições Liberais encontram-se alguns dos mais duradouros feitos deste período. O seu engenhoso sistema de "verificações e equilíbrios" foi especialmente projectado para impedir que qualquer grupos obtivesse demasiado poder. Pela Constituição, tentou-se introduzir na política um equilíbrio estável de tendências opostas, semelhante ao que ocorre entre a atracção gravitacional solar e a tendência que um planeta tem de voar em linha recta. Se aumentar a atracção gravitacional sem que aumente em correspondência a velocidade planetária, o planeta cairá no Sol; se for a velocidade a aumentar sem um correspondente aumento da atracção gravitacional, o planeta escapar-se-á do sistema solar.

Os filósofos políticos, alguns dos quais utilizaram a física newtoniana como modelo de pensamento, procuraram conceber um sistema de governo que evitasse os extremos da ditadura e da anarquia. Conforme disse James Wilson (1742-1798), que desempenhou um papel fundamental na elaboração da Constituição dos Estados Unidos da América:

> No governo, a perfeição do todo depende do equilíbrio das partes, e o equilíbrio das partes consiste no exercício independente dos seus poderes separados e, quando os seus poderes são utilizados separadamente, na sua influência mútua e na acção que têm uns sobre os outros. Cada parte actua e é actuada, suporta e é suportada, regula e é regulada pelo resto. Poder-se-á supor que estes poderes, assim mutuamente verificados e controlados, permanecerão num estado de inacção. Mas há uma necessidade de movimento nos assuntos humanos; e estes poderes são forçados a mover-se, ainda que a mover-se em conjunto. Eles movem-se, na verdade, segundo uma direcção diferente daquela que cada acção teria imprimido por si só; mas, simultaneamente, segundo uma linha em que comparticipam as direcções naturais do conjunto — a verdadeira linha da liberdade pública e da felicidade.

Tanto a vida de Newton como os seus escritos pareciam apoiar a ideia da democracia política. Um antigo provinciano tinha penetrado até aos extremos da imaginação humana e o que aí encontrou significava, primeiro que tudo, que Deus tinha feito um único conjunto de leis para os céus e para a Terra. Isto esmagou as crenças antigas sobre o "lugar natural" e estendeu uma nova democracia através de todo o universo. Newton mostrou que toda a matéria, fosse ela constituinte do Sol ou de uma simples pedra, tinha sido criada igual. Isto é, toda a matéria era igual perante "as Leis e o Deus da Natureza". (Esta frase, "The Laws of Nature and Nature's God", foi utilizada no início da Declaração da Independência dos Estados Unidos da América para justificar o desejo do povo das colónias de eliminar o seu mau sistema política e tornar-se independente). Toda a ideologia política da época foi fortemente influenciada pelas ideias newtonianas. Os *Principia* pareciam oferecer um termo de comparação às teorias acerca da democracia. Parecia lógico que todos os homens, como todos os objectos naturais, fossem criados igualmente perante o criador da Natureza. Algumas destas importantes tendências são discutidas em artigos contidos na *Colectânea de Textos*.

Também na literatura foi bem recebida a nova perspectiva científica. Forneceu muitas ideias como fonte de metáforas, alusões e conceitos usados em poemas e ensaios. A descoberta feita por Newton de que a luz branca resulta da composição de todas as cores foi referida em imensos poemas do século XVIII (veja-se a Unidade 4). Samuel Johnson defendeu a ideia de que as palavras nascidas nas ciências naturais fossem utilizadas nos trabalhos literários, definindo-as no seu *Dicionário* e ilustrando as suas aplicações no livro de ensaios intitulado *Rambler*.

Outros escritores rejeitaram a nova cosmologia. No seu poema épico *The Rape of the Lock* ("O Rapto da Fechadura"), Alexander Pope exagerou deliberadamente o novo vocabulário científico, de modo a obter um efeito cómico. Jonathan Swift, enviando Gulliver para as suas viagens a Laputa, descreveu uma academia de cientistas e matemáticos, cujas experiências e teorias eram tão absurdas como a dos "Fellows" da Royal Society devem ter parecido aos leigos do século XVIII.

A primeira reacção verdadeiramente poderosa contra a cosmologia newtoniana foi o movimento do Romantismo, iniciado na Alemanha por volta de 1780 por jovens escritores inspirados em Johann Wolfgang von Goethe. Os exemplos mais familiares do Romantismo na literatura inglesa são os poemas e novelas de Blake, Coleridge, Wordsworth, Shelley, Byron e Scott.

Os Românticos zombaram da visão matemática da natureza, realçando a importância da qualidade em substituição da quantidade. Preferiam estudar o elemento único de uma pessoa ou de uma experiência individual, em vez de entrar em abstracções. Exaltaram a emoção e o sentimento, trocando por eles a razão e o cálculo. Em particular, opuseram-se frontalmente à teoria que assemelhava o universo a uma espécie de relógio, feito de matéria inerte e posto em movimento por um Deus que nunca mais, a partir daí, mostrara a Sua presença. Reflectindo esta atitude, E. A. Burtt, historiador e filósofo da ciência, escreveu que:

Isto é, naturalmente, uma distorção daquilo em que os cientistas realmente acreditam — uma das imagens falsas da ciência discutidas no artigo «The Seven Images of Science», incluído na *Colectânea de Textos*.

> ...a grande autoridade de Newton estava exactamente por detrás daquela perspectiva do cosmos que via no homem um espectador desprezável, irrelevante (tanto quanto assim pode ser chamado alguém que esteja totalmente aprisionado num quarto escuro) do vasto sistema matemático cujos movimentos regulares, obedecendo a princípios mecânicos, constituíam o universo da natureza. O universo gloriosamente romântico de Dante e de Milton, sem fronteiras espaciais ou temporais para a imaginação humana, tinha agora sido completamente varrido. O espaço estava identificado com o reino da geometria, o tempo com a continuidade dos números. O mundo em que as pessoas pensavam viver — um mundo rico de cor e de som, aromatizado de fragrâncias, cheio de alegria, de amor e de beleza, falando por todo o lado da harmonia intencional e de ideais criativos — estava agora arrumado em minúsculos cantos dos cérebros de seres orgânicos dispersos por todos os lados. O mundo exterior realmente importante era

áspero, frio, incolor, silencioso e morto; um mundo de quantidade, um mundo de movimentos matematicamente calculáveis, em perpétua regularidade mecânica. O universo das qualidades, tal como elas são directamente apercebidas pelo homem, transformava-se num efeito insignificante e apenas curioso daquela máquina infinita que existia para lá dele.

Os Românticos acreditavam que o todo, seja ele um simples ser humano ou o universo inteiro, está provido de um espírito único. Este espírito não pode ser explicado parcialmente; só pode ser sentido. Os Românticos insistiram em que os fenómenos não podiam ser analisados significativamente e reduzidos às suas partes separadas, por explicações mecanicistas.

Muitos líderes do Romantismo na Europa Continental concordaram com o filósofo alemão Friedrich Schelling (1775-1854). Schelling propusera um novo processo para a investigação científica, um novo tipo de ciência a que chamara "Naturphilosophie", ou "Filosofia da Natureza". (Este termo não deve ser confundido com o clássico "filosofia natural", que significa, fundamentalmente, física). Os Filósofos da Natureza não analisam os fenómenos, como por exemplo um feixe de luz branca, em partes ou factores separados, mensuráveis quantitativamente no laboratório. Ou, pelo menos, não é esse o seu propósito principal. Em vez disso, procuram compreender o fenómeno como um todo e procuram os princípios básicos subjacentes que governam todos os fenómenos. Os filósofos românticos alemães consideravam Goethe como o seu maior cientista e, simultaneamente, como o seu maior poeta. Apontaram em particular a sua teoria da cor, diametralmente oposta à teoria da luz de Newton. Goethe sustentava que a luz branca não consistia de uma mistura de cores e que era inútil "reduzir" um feixe de luz branca, fazendo-o passar através de um prisma. Em vez disso, contrapunha que as cores eram produzidas artificialmente pelo prisma, actuando sobre a luz originalmente pura.

Na opinião de todos os físicos modernos, Newton estava certo e Goethe errado. Mas isto não significa que a Filosofia da Natureza foi desprovida de qualquer valor. Encorajou a especulação em torno de ideias tão gerais que nunca poderiam ser facilmente verificadas pela experiência. Na época, a Filosofia da Natureza foi condenada pela maior parte dos cientistas, apenas por esta razão. Mas os historiadores da ciência concordam hoje, de uma maneira geral, em que a Filosofia da Natureza desempenhou um papel importante nas origens históricas de algumas descobertas científicas. Entre estas conta-se o princípio geral da conservação da energia, descrito no Capítulo 10. Este princípio defendia que todas as "forças da natureza" — os fenómenos do calor, da gravidade, da electricidade, do magnetismo, etc. — são manifestações de uma única "força" íntima (aquela a que hoje chamamos energia). Esta ideia concordava bem com o ponto de vista da "Filosofia da Natureza". Contudo, também poderia ter sido posta numa forma aceitável cientificamente.

Alguns artistas modernos, alguns intelectuais e a maior parte dos membros dos movimentos da "contracultura" exprimem desdém pela ciência. O seu raciocínio é semelhante ao dos Românticos. Baseia-se na noção errada de que os cientistas pretendem ser capazes de descobrir uma explicação mecanicista para *tudo*, inclusive para a mente humana. Se tudo fosse explicado pela ciência newtoniana, então tudo seria também *determinado*, tal como os movimentos das diferentes partes de uma máquina são determinados pela sua construção. A maior parte dos cientistas modernos não acredita que tal explicação seja possível. No passado, no entanto, alguns cientistas argumentaram fortemente que *era* possível. Por exemplo, disse o matemático francês Laplace (1749-1827):

> Temos que olhar então para o estado actual do universo como efeito do estado anterior e como a causa do que se lhe seguirá. Supondo-se por um instante um espírito que pudesse compreender todas as forças que animam a natureza e a situação concomitante dos seres que a constituem — uma mente suficientemente vasta para fazer a análise de todos estes dados — ele reuniria numa única fórmula os movimentos dos maiores corpos do universo e os dos mais pequenos átomos; para ele, nada seria impreciso e o futuro, como o passado, seria presente para os seus olhos.

Mesmo o filósofo romano Lucrécio (100-55 A.C.), que defendeu a teoria atómica no seu poema *Sobre a Natureza das Coisas*, não foi tão longe. Para preservar alguns vestígios de "liberdade" no universo, Lucrécio sugeriu que os átomos deveriam ter movimentos ao acaso. Até isto se mostrava insatisfatório para os Românticos e mesmo para alguns cientistas, como Erasmo Darwin (avô de Charles Darwin, autor da teoria da evolução das espécies), que perguntou:

> Néscio ateu, podia o baile estouvado
> De átomos à toa rodando
> Construir um tão belo, tão ordenado,
> Tão maravilhoso mundo?

Os Filósofos da Natureza pensavam poder desacreditar os cientistas newtonianos, forçando-os a responder a esta pergunta. Dizer "sim", argumentavam eles, seria absurdo, dizer "não" seria desleal para as crenças newtonianas. Veremos quão bem sucedidos foram os newtonianos na explicação do universo físico, sem se comprometerem com qualquer resposta definitiva à pergunta de Erasmo Darwin. Em vez disso, foram conduzidos à descoberta de leis da natureza imensamente poderosas e proveitosas, que discutiremos nas próximas Unidades.

GE 8.23-8.24.

8.1 Os materiais de estudo deste curso de física especialmente adequados para o Capítulo 8 são:

Experiência
Aproximação iterativa de uma órbita

Actividades
Modelo da órbita do cometa de Halley
Órbitas de outros cometas
Forças num pêndulo
Haiku
Julgamento de Copérnico
Descoberta de Neptuno e de Plutão

Textos da Colectânea
"Newton and the *Principia*"
"The Laws of Motion and Proposition I"
"Universal Gravitation"
"An Appreciation of the Earth"
"The Great Comet of 1965"
"Gravity Experiments"
"Space the Unconquerable"
"The Life Story of a Galaxy"
"Expansion of the Universe"
"Negative Mass"
"The Dyson Sphere"

Filmes sem-fim
"Jupiter Satellite Orbit"
"Program Orbit I"
"Program Orbit II"
"Central forces — iterated blows"
"Kepler's Laws"
"Unusual Orbits"

Acetato
Movimento sob uma força central

8.2 Na tabela apresentada abaixo estão indicados os períodos e as distâncias a Júpiter dos seus quatro maiores satélites, obtidos a partir de observações telescópicas. Aplicar-se-á a lei dos períodos de Kepler ao sistema constituído por Júpiter e pelos satélites?

Satélite	Período	Distância ao centro de Júpiter (em termos do raio de Júpiter, r)
I	1,77 dias	6,04 r
II	3,55	9,62
III	7,15	15,3
IV	16,7	27,0

8.3 Dê algumas razões por que a teoria do movimento planetário de Descartes poderia ter sido "uma ideia útil".

8.4 Afirmou-se na página 109 que a dependência da força gravitacional em relação às massas de ambos os corpos interactuantes poderia ser expressa na forma $m_{Sol} \cdot m_{planeta}$

(a) Mostre que isto é correcto, servindo-se de um diagrama semelhante ao utilizado na questão Q13 (página 111).

(b) Para verificar algumas alternativas à utilização do produto, considerem-se as seguintes duas possibilidades de dependência da força em relação às massas:
(1) a força total depende de $(m_{Sol} + m_{planeta})$
ou (2) a força total depende de $(m_{Sol} / m_{planeta})$.

O que implicam estas relações para a força, se qualquer das massas for reduzida a zero? Existiria ainda alguma força, se apenas fosse deixada uma massa? Poder-se-ia falar de uma força gravitacional, se não existisse qualquer corpo a acelerar?

8.5 Use os valores da massa e das dimensões da Lua (consulte a tabela da página 138) para mostrar que a "gravidade superficial" (aceleração devida à gravidade na vizinhança da superfície lunar) é apenas cerca de 1/6 da que existe junto da Terra.

8.6 É necessário cálculo diferencial e integral para determinar a força exacta exercida por um corpo esférico mas não é difícil provar que a *direcção* da força resultante aponta para o seu centro. A argumentação apresentada por Newton envolvia a noção de simetria e a consideração de pequenas partes do corpo. Desenvolva essa argumentação.

8.7 Use a equação da força centrípeta e a equação da força gravitacional para obter uma expressão para o período de um satélite em órbita em torno de um planeta, em função do raio da órbita e da massa do planeta.

8.8 A massa do Sol é cerca de 27 000 000 vezes superior à da Lua; o Sol está cerca de 400 vezes mais distante da Terra que a Lua. Compare as forças gravitacionais exercidas pelo Sol e pela Lua sobre a Terra.

8.9 Até à altura em que viveu Newton, as observações telescópicas tinham já fornecido os valores dos períodos e raios orbitais dos quatro maiores satélites de Júpiter. Por exemplo, tinha-se verificado que Calisto tinha um período de 16,7 dias e um raio orbital de 1/80 UA.

(a) Calcule, a partir destes dados, o valor de $k_{Júpiter}$ (converta primeiro dias em anos).

(b) Mostre que a massa de Júpiter é cerca de 1/1000 da do Sol.

(c) Como terá sido possível determinar o valor do raio orbital de um satélite de Júpiter?

8.10 Qual o raio orbital que deverá ter um satélite terrestre para permanecer sempre sobre o mesmo ponto da superfície terrestre — isto é, para que tenha um período de 24 horas? (Sugestão: veja GE 8.7).

8.11 Calcule a massa da Terra, a partir do conhecimento de que um objecto de 1 kg, à superfície terrestre, é atraído para a Terra com uma força de 9,8 newtons. A distância da superfície ao centro da Terra é de $6{,}4 \times 10^6$ metros. Quantas vezes é esta massa maior do que as maiores massas que alguma vez tenha tentado acelerar (automóveis, por exemplo)?

8.12 A massa da Terra pode ser calculada também a partir da massa e da distância da Lua. Mostre que o valor calculado por este meio concorda com as medidas efectuadas à superfície terrestre. (Consulte a tabela da página 138.).

8.13 O valor que Cavendish obteve para G tornou possível calcular a massa da Terra e, consequentemente, a sua densidade média. A "densidade" da água é de 1000 kg por metro cúbico. Isto é, dividindo a massa de qualquer amostra de água pelo seu volume obtém-se 1000 kg/m³.

(a) Qual é a densidade média da Terra?

(b) O mais denso tipo de rocha conhecido tem uma densidade de cerca de 5000 kg/m³. A maior parte das rochas que se podem encontrar vulgarmente têm uma densidade de cerca de 3 000 kg/m³. Que se pode concluir a partir disto, relativamente à estrutura da Terra?

8.14 A cápsula tripulada Apollo 8 (1968) foi colocada numa órbita quase circular, 112 km acima da superfície lunar. O período da órbita era de 120,5 minutos. Calcule a massa da Lua a partir destes dados. (O raio da Lua é de 1740 km. Não se esqueça de utilizar um conjunto consistente de unidades).

8.15 Como explica o facto de não existir um valor de confiança para a massa de Plutão?

8.16 Marte tem dois satélites, Phobos e Deimos. Escreveu-se uma história de ficção científica na qual os nativos de Marte mostravam um grande respeito por uma ranhura existente no solo. A ranhura era afinal a trajectória da lua mais próxima de Marte, "Bottomos".

(a) Se tal órbita fosse possível, qual deveria ser o seu período?

(b) Qual a velocidade necessária para ser percorrida uma tal órbita?

(c) Que dificuldades encontra para a possibilidade de uma órbita?

8.17 Usando os valores dados na tabela da página 114, construa uma tabela das massas dos planetas, relativamente à massa da Terra.

8.18 O período do cometa de Halley é de cerca de 75 anos. Qual é a sua distância média ao Sol? A excentricidade da sua órbita é de 0,967. Qual é o seu afastamento máximo do Sol? E a sua maior aproximação?

8.19 Aceitando a validade de $F_{grav} = Gm_1m_2/R^2$ e reconhecendo que G é uma constante universal, podem-se explicar—e portanto compreender melhor—muitos factos particulares que pareciam antes completamente distintos. Por exemplo, poder-se-á concluir:

(a) Que a_g (aceleração da gravidade), para um corpo de massa m_0 qualquer, será constante num determinado lugar da Terra.

(b) Que a_g deverá ser diferente em lugares da Terra que estejam a diferentes distâncias do seu centro.

(c) Que, à superfície da Terra, o peso de um corpo estará relacionado com a sua massa.

(d) Que o quociente R^3/T^2 será constante para todos os satélites de um corpo.

(e) Que as marés altas ocorrerão a intervalos de cerca de seis horas. Descreva resumidamente como pode cada uma destas conclusões ser obtida a partir da equação.

8.20 A elaboração de teorias que expliquem as observações é um dos propósitos fundamentais do estudo científico. Consequentemente, será útil fazer uma certa reflexão sobre as teorias já encontradas ao longo deste curso. Comente resumidamente algumas das proposições apresentadas abaixo, ilustrando-as com exemplos extraídos das Unidades 1 e 2. Faça uma primeira leitura a todas as proposições e escolha pelo menos seis, pela ordem que quiser.

(1) Uma boa teoria deverá resumir um conjunto de observações confirmadas e não estar em conflito com ele. (Por exemplo, a repugnância de Kepler em desprezar a diferença de oito minutos de arco verificada entre as suas previsões e as observações de Tycho).

(2) Não há nada de mais prático que uma boa teoria.

(3) Uma boa teoria deverá permitir previsões de novas observações, que virão a ser efectuadas, mais cedo ou mais tarde.

(4) Uma boa nova teoria deverá fornecer previsões quase idênticas às de teorias anteriores, para o conjunto de fenómenos em que ambas se aplicam bem.

(5) Qualquer teoria envolve hipóteses. Algumas envolvem também preferências estéticas do cientista.

(6) Uma nova teoria relaciona algumas observações previamente não relacionadas.

(7) As teorias envolvem muitas vezes conceitos abstractos derivados da observação.

(8) As leis empíricas, ou "regras", permitem a organização de uma grande quantidade de observações e mostram como é que os valores de uma dada grandeza variam relativamente a uma outra; mas estas leis não fornecem explicação para as causas ou mecanismos do fenómeno.

(9) Uma teoria nunca se ajusta exactamente a todos os dados conhecidos.

(10) Previsões efectuadas a partir de teorias podem conduzir à observação de novos efeitos.

(11) Teorias que em dada altura sejam rejeitadas podem ter sido úteis por terem encorajado novas observações.

(12) As teorias que permitem previsões quantitativas são preferíveis às teorias qualitativas.

(13) Há sempre algo de importante nas entrelinhas de qualquer proposição que diga respeito a uma lei da natureza.

(14) Um aspecto essencial para o progresso científico é o da comunicação entre cientistas.

(15) Algumas teorias parecem inicialmente tão estranhas que são completamente rejeitadas, ou então aceites apenas muito lenta e gradualmente.

(16) São muitas vezes utilizados modelos para a elaboração de uma teoria ou para a sua descrição às pessoas.

(17) A potência das teorias vem-lhes da sua generalidade.

8.21 Que aconteceu ao problema de Platão? Chegou a ser resolvido?

8.22 Por que se acredita hoje num sistema heliocêntrico? É este idêntico ao idealizado por Copérnico ou por Kepler? Qual é a evidência experimental? Está provado que o sistema geocêntrico esteja errado?

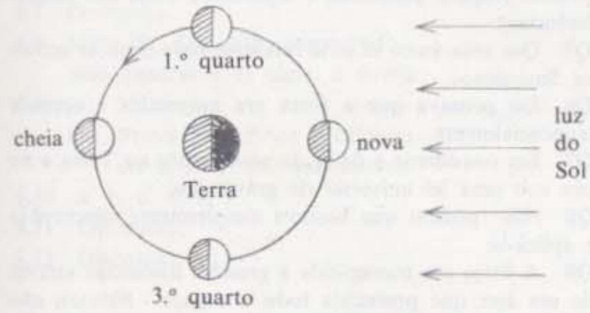
8.23 Terá a obra de Newton apenas importância histórica, ou será ainda útil hoje? Explique.

8.24 Quais foram algumas das consequências principais da obra de Newton para a perspectiva que os cientistas têm do universo?

Respostas às Perguntas de Fim-de-Secção

Capítulo 5

Q1 O Sol pôr-se-á 4 minutos mais tarde por cada dia.
Q2 Os calendários tornaram-se necessários para planear as actividades agrícolas e os ritos religiosos.
Q3 O Sol tem um movimento diário em direcção a oeste, um movimento para leste em relação às estrelas fixas e uma oscilação para norte e para sul.
Q4



Q5 Não há eclipses todos os meses porque a Lua e a Terra não têm o mesmo plano orbital.
Q6 Mercúrio e Vénus estão sempre na vizinhança do Sol, um pouco à frente ou um pouco atrás dele.
Q7 Diz-se que um planeta está em oposição quando está do lado oposto ao do Sol; portanto, o planeta aparecerá ao sol-pôr e estará na linha norte-sul à meia-noite.
Q8 Depois de ultrapassarem a sua posição mais afastada do Sol, para leste, quando são visíveis no céu da tarde.
Q9 Quando estão próximo da oposição.
Q10 Não, estão sempre próximo da eclíptica.
Q11 Como se poderão explicar os movimentos irregulares dos planetas à custa de combinações de velocidades constantes segundo circunferências?
Q12 Porque muitos dos registos escritos foram destruídos pelo fogo, pela acção das intempéries ou pela idade.
Q13 Porque apenas os círculos perfeitos e as velocidades uniformes eram apropriados para os corpos celestes, perfeitos e imutáveis.
Q14 Um sistema geocêntrico é um sistema de centro na Terra. O movimento anual do Sol é explicado supondo que ele está ligado a uma esfera própria, que se move em sentido contrário ao do movimento das estrelas.
Q15 A primeira solução, tal como foi proposta por Eudóxio, consistia num sistema de esferas cristalinas transparentes, que giravam a velocidades variadas em torno de vários eixos.
Q16 Aristarco supôs que a Terra rodava, num movimento diário — o que explicava todos os movimentos diários observados no céu. Supôs ainda que a Terra tinha um movimento de revolução em torno do Sol — o que explicava as muitas variações anuais observadas no céu.
Q17 Quando a Terra se movia entre um destes planetas e o Sol (estando o planeta a ser observado em oposição), a Terra dever-se-ia mover mais rapidamente do que o planeta. Assim, o planeta parecer-nos-ia mover-se para oeste.
Q18 As direcções das estrelas deveriam exibir um desvio anual — a paralaxe anual. (Este fenómeno diz respeito a um ângulo muito pequeno e, consequentemente, não poderia ter sido observado pelos Gregos, com os instrumentos de que dispunham. Foi observado pela primeira vez em 1836 D.C.).
Q19 Aristarco foi considerado ímpio por ter sugerido que a Terra, lar da humanidade, pudesse não estar no centro do universo. O seu sistema foi desprezado por várias razões:
(1) "Religiosas" — ele deslocava o homem do centro do universo.
(2) Científicas — a paralaxe estelar não tinha sido observada.
(3) Práticas — os fenómenos celestes não eram previstos melhor por ele do que por outras teorias menos ofensivas.

Capítulo 6

Q1 A necessidade de velocidade constante, associada aos equantos (1) não era suficientemente absoluta, (2) não era suficientemente agradável ao espírito.
Q2 (a) P, C
(b) P, C
(c) P
(d) C
(e) P, C
(f) C

Q3 As dimensões relativas das órbitas planetárias, em comparação com a distância entre a Terra e o Sol. Estas foram relacionadas com os períodos, calculados, de revolução em torno do Sol.
Q4 (b) e (d).
Q5 2º em qualquer dos casos.
Q6 Não; para cálculos precisos tornavam-se necessários mais pequenos movimentos do que no sistema de Ptolomeu.
Q7 Ambos os sistemas eram mais ou menos igualmente bem sucedidos na explicação dos fenómenos observados.
Q8 A posição do homem e do seu lar, a Terra, eram importantes na interpretação do plano divino para o universo.
Q9 São igualmente válidos; por razões práticas, seria preferível o de Copérnico pela sua simplicidade.
Q10 Desafiou a imagem do universo de centro na Terra, aceite no seu tempo, e abriu o caminho para posteriores alterações e melhoramentos, efectuados por Kepler, Galileu e Newton.
Q11 O aparecimento, em 1572, de uma "nova estrela", de brilho variável.
Q12 Incluía equipamento e disponibilidade dispendiosas e era o centro do trabalho coordenado de um conjunto de pessoas.

Q13 Mostraram que os cometas eram objectos astronómicos distantes e não fenómenos locais, como se acreditava.

Q14 Tornou-os maiores e mais resistentes e concebeu graduações com as quais as medições angulares puderam ser efectuadas de uma maneira mais precisa.

Q15 Analisou os erros provavelmente inerentes a cada peça do seu equipamento; efectuou ainda correcções devidas aos efeitos de refracção atmosférica.

Q16 Manteve a Terra fixa, tal como Ptolomeu, e supôs que os planetas revolucionavam em torno do Sol, tal como Copérnico.

Capítulo 7

Q1 Determinar o exacto movimento de Marte através do céu.

Q2 Kepler não pôde fazer concordar as observações de Tycho Brahe com as posições de Marte, calculadas por meio de movimentos circulares. (Havia uma discrepância de 8 minutos de arco, em latitude).

Q3 Kepler obteve o gráfico da órbita da Terra através de triangulações, baseadas em observações das direcções de Marte e do Sol, espaçadas de 687 dias.

Q4 Uma linha que una o Sol a um planeta varre áreas iguais em intervalos de tempo iguais.

Q5 Quando está mais próximo do Sol.

Q6 Marte era o que tinha a maior excentricidade, de entre os planetas que Kepler poderia estudar.

Q7 (a) Lei das Órbitas Elípticas.
(b) Lei das Áreas.
(c) Ambas (mais a data da passagem no periélio, por exemplo).

Q8 O quadrado do período de qualquer planeta é proporcional ao cubo da sua distância média ao Sol.

Q9 Kepler baseou as suas leis em observações e exprimiu-as na forma matemática.

Q10 Linguagem popular, expressão matemática concisa.

Q11 Quer da teoria heliocêntrica, quer do sistema de Tycho.

Q12 As manchas solares e as montanhas lunares refutaram a asserção ptolomaica de que todos os corpos celestes eram esferas perfeitas.

Q13 As observações dos satélites de Júpiter, feitas por Galileu, mostraram que podiam existir movimentos em torno de outros centros, além da Terra. Isto contradisse as hipóteses básicas da física de Aristóteles e da astronomia de Ptolomeu. Galileu sentiu-se encorajado para continuar e para endurecer os seus ataques àquelas teorias anteriores.

Q14 Não, suportaram apenas o convencimento que já tinha.

Q15 Alguns acreditavam que as distorções do telescópio (que eram acentuadas) poderiam ter provocado aquelas peculiares observações. Outros acreditavam que a física, a religião e a filosofia já estabelecidas eram muito mais importantes que algumas observações inexplicáveis.

Q16 (b) e (c). ((d) não é uma resposta desrazoável, já que foi por escrever em italiano que ele incitou muita gente).

Capítulo 8

Q1 As forças exercidas nos planetas estão sempre dirigidas para um único ponto, aquele em que está o Sol.

Q2 Com a fórmula da aceleração centrípeta.

Q3 Que a órbita era circular.

Q4 Não, incluiu o caso mais geral de todas as secções cónicas (elipses, parábolas e hipérboles, além das circunferências).

Q5 Que uma única lei seria suficiente para explicar ambos os fenómenos.

Q6 Ele pensava que a força era magnética e actuava tangencialmente.

Q7 Em considerar a física do movimento na Terra e no céu sob uma lei universal de gravitação.

Q8 Não, pensou que bastava simplesmente descrevê-la e aplicá-la.

Q9 A força era transmitida a grandes distâncias através de um éter que preenchia todo o espaço. Newton não quis utilizar uma hipótese que não pudesse ser testada.

Q10 Fenomenológicas e temáticas.

Q11 (a) As forças são iguais.
(b) As acelerações são inversamente proporcionais às massas.

Q12 (a) 2F.
(b) 3F.
(c) 6F.

Q13 (b) $F_{AB} = 4F_{CD}$.

Q14 Os valores da constante que aparece na terceira lei de Kepler, $T^2/R^3 = k$, aplicadas aos satélites de cada um dos planetas a comparar.

Q15 O valor numérico de G.

Q16 F_{grav}, m_1, m_2, R.

Q17 O período da Lua e a distância entre os centros da Terra e da Lua, ou o quociente T^2/R^3.

Q18 Informação semelhante sobre Saturno e pelo menos um dos seus satélites.

Q19 1/1000; isto é, inversamente proporcional às massas.

Q20 No lado mais próximo, a água é puxada para longe da terra sólida; no lado mais afastado, a terra sólida é puxada para longe da água. Uma vez que $F \propto 1/R^2$, quanto maior for R mais pequeno será o F correspondente.

Q21 Em todos eles.

Q22 Ao longo da sua órbita, a distância da Lua ao Sol varia continuamente, o que afecta, consequentemente, a força resultante na Lua, devida ao Sol e à Terra. Além disso, a Terra não é uma esfera perfeita.

Q23 Os cometas viajam segundo elipses muito alongadas.

Q24 Não.

Breves Respostas às Perguntas do Guia de Estudo

Capítulo 5

5.1 Informação.
5.2 Discussão.
5.3 (a) 674 segundos.
(b) 0,0021%.
5.4 Tabela.
5.5 Discussão.
5.6 Discussão.
5.7 Discussão.
5.8 102°, 78°, 78°, 102°, começando pelo quadrante de cima, à direita.
5.9 (a) 15°.
(b) Prova geométrica e cálculo; cerca de 12800 quilómetros.
5.10 a, b, c, d, e, f.
5.11 Discussão.
5.12 Discussão.

Capítulo 6

6.1 Informação.
6.2 Construção de um diagrama.
6.3 Discussão.
6.4 11 vezes; dedução.
6.5 Discussão.
6.6 Discussão.
6.7 $2{,}8 \times 10^5$ UA.
6.8 Discussão.
6.9 Discussão.
6.10 Discussão.
6.11 Discussão.
6.12 Discussão.

Capítulo 7

7.1 Informação.
7.2 Cerca de 1/8 de grau; cerca de 1/4 de milímetro; aproximadamente 1/20 de grau.
7.3 Discussão.
7.4 4%.
7.5 Discussão.
7.6 a + c.
7.7 Discussão.
7.8 0,209.
7.9 0,594/1.
7.10 Análise.
7.11 (a) 17,9 UA.
(b) 35,3 UA.
(c) 0,54 UA.
(d) 66/1.
7.12 $T = 249$ anos.
7.13 $k = 1{,}0$ para os três planetas.
7.14 Discussão.
7.15 (a) Esboço.
(b) $R_{méd}$: 3.4 mm. 5.2 mm. 8.2 mm. 4,6 mm.
T: 44 h. 84 h. 168 h. 384 h.
(c) k: 485, 495, 501, 470 h^2/mm^3.
7.16 Discussão.
7.17 Discussão.
7.18 Discussão.

Capítulo 8

8.1 Informação.
8.2 Sim, com um acordo dentro de cerca de 1%.
8.3 Discussão.
8.4 Discussão.
8.5 Dedução.
8.6 Discussão.
8.7 $T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{G}\right)\frac{R^3}{m}$
8.8 Cerca de 170 vezes maior.
8.9 (a) $1{,}05 \times 10^3$ dias²/UA³.
(b) Discussão.
(c) Discussão.
8.10 42600 km.
8.11 $5{,}98 \times 10^{24}$ kg.
8.12 $6{,}04 \times 10^{24}$ kg.
8.13 (a) $5{,}52 \times 10^3$ kg/m³.
(b) Discussão.
8.14 $7{,}30 \times 10^{22}$ kg.
8.15 Plutão não tem satélites.
8.16 (a) $5{,}99 \times 10^3$ s, ou 1,66 horas.
(b) 3,55 km/s.
(c) colisões.
8.17 Tabela.
8.18 17,7 UA, 0,60 UA, 34,8 UA.
8.19 Deduções
8.20 Discussão.
8.21 Discussão. Não.
8.22 Discussão.
8.23 É ainda hoje útil.
8.24 Discussão.

SATÉLITES DOS PLANETAS

		DESCOBERTA	RAIO MÉDIO DA ÓRBITA	PERÍODO DE REVOLUÇÃO			DIÂMETRO
TERRA:	Lua		384 400 kilómetros	27d	7h	43m	2160 kilómetros
MARTE:	Phobos	1877, Hall	9 300	0	7	39	16?
	Deimos	1877, Hall	23 500	1	6	18	8?
JUPITER:	V	1892, Barnard	182 000	0	11	53	241?
	I (Io)	1610, Galileo	422 000	1	18	28	3219
	II (Europa)	1610, Galileo	671 000	3	13	14	2 897
	III (Ganymede)	1610, Galileo	1 072 000	7	3	43	4 989
	IV (Callisto)	1610, Gallielo	1 883 000	16	16	32	4 506
	VI	1904, Perrine	11 458 000	250	14		161?
	VII	1905, Perrine	11 732 000	259	14		56?
	X	1938, Nicholson	11 748 000	260	12		24?
	XII	1951, Nicholson	21 000 000	625			23?
	XI	1938, Nicholson	22 500 000	700			31?
	VIII	1908, Melotte	23 500 000	739			56?
	IX	1914, Nicholson	23 700 000	758			27?
SATURNO:	Mimas	1789, Herschel	185 000	0	22	37	483?
	Enceladus	1789, Herschel	238 000	1	8	53	563
	Tethys	1684, Cassini	295 000	1	21	18	805
	Dione	1684, Cassini	377 000	2	17	41	805
	Rhea	1672, Cassini	526 000	4	12	25	1 609
	Titan	1655, Huygens	1 221 000	15	22	41	4 587
	Hyperion	1848, Bond	1 481 000	21	6	38	483?
	Phoebe	1898, Pickering	12 929 000	550			322?
	Iapetus	1671, Cassini	3 557 000	79	7	56	1287
ÚRANO:	Miranda	1948, Kuiper	130 000	1	9	56	
	Ariel	1851, Lassell	192 000	2	12	29	967?
	Umbriel	1851, Lassell	267 000	4	3	28	644?
	Titania	1787, Herschel	433 000	8	16	56	1 609?
	Oberon	1787, Herschel	586 000	13	11	7	1 448?
NEPTUNO:	Triton	1846, Lassell	354 000	5	21	3	3 782
	Nereid	1949, Kuiper	5 510 000	359	10		323?

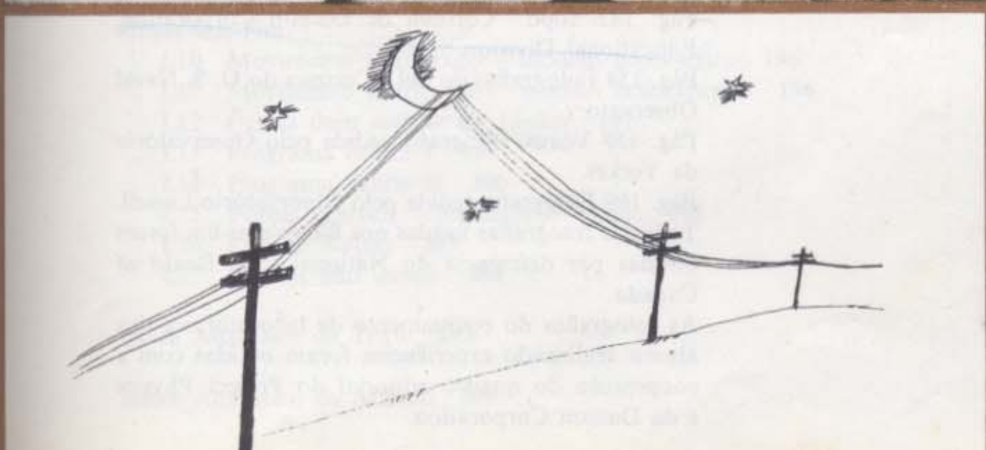
O SISTEMA SOLAR

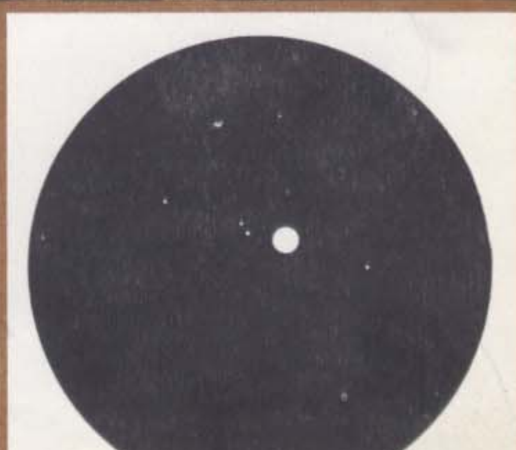
	RAIO	MASSA	RAIO MÉDIO DA ÓRBITA	PERÍODO DE REVOLUÇÃO
Sol	$6,95 \times 10^{8}$ metros	$1,98 \times 10^{30}$ kilogramas	—	—
Lua	$1,74 \times 10^{6}$	$7,34 \times 10^{22}$	$3,8 \times 10^{8}$ metros	$2,36 \times 10^{6}$ segundos
Mercúrio	$2,57 \times 10^{6}$	$3,28 \times 10^{23}$	$5,79 \times 10^{10}$	$7,60 \times 10^{6}$
Vênus	$6,31 \times 10^{6}$	$4,83 \times 10^{24}$	$1,08 \times 10^{11}$	$1,94 \times 10^{7}$
Terra	$6,38 \times 10^{6}$	$5,98 \times 10^{24}$	$1,49 \times 10^{11}$	$3,16 \times 10^{7}$
Marte	$3,43 \times 10^{6}$	$6,37 \times 10^{23}$	$2,28 \times 10^{11}$	$5,94 \times 10^{7}$
Jupiter	$7,18 \times 10^{7}$	$1,90 \times 10^{27}$	$7,78 \times 10^{11}$	$3,74 \times 10^{8}$
Saturno	$6,03 \times 10^{7}$	$5,67 \times 10^{26}$	$1,43 \times 10^{12}$	$9,30 \times 10^{8}$
Úrano	$2,67 \times 10^{7}$	$8,80 \times 10^{25}$	$2,87 \times 10^{12}$	$2,66 \times 10^{9}$
Neptuno	$2,48 \times 10^{7}$	$1,03 \times 10^{26}$	$4,50 \times 10^{12}$	$5,20 \times 10^{9}$
Plutão	?	?	$5,9 \times 10^{12}$	$7,28 \times 10^{9}$

PROJECTO FÍSICA

UNIDADE 2

MANUAL DE EXPERIÊNCIAS E ACTIVIDADES





ÍNDICE DO MANUAL

EXPERIÊNCIAS

EXPERIÊNCIA 2-1 ASTROMONIA A OLHO NU

Sempre que o tempo permita, é possível observar acontecimentos celestes durante o dia ou durante a noite. Talvez o leitor já tenha seguido a trajectória do Sol ou olhado para a Lua, para os planetas ou para as estrelas.

A partir de semelhantes observações, os cientistas desenvolveram no passado uma notável sequência de teorias. Quanto mais consciente se está dos movimentos no céu e quanto mais se procura a sua interpretação, tanto mais facilmente se pode seguir o desenvolvimento destas teorias. Se o leitor não possui dados de observação próprios, poderá usar os resultados fornecidos nas secções seguintes.

A. Observação do Sol durante um Dia

Um observador fez as seguintes determinações da posição do Sol no dia 23 de Setembro

Hora local	Altura do Sol	Azimute do Sol
7.00	------	------
8.00	08°	097°
9.00	19	107
10.00	29	119
11.00	38	133
12.00	45	150
13.00	49	172
14.00	48	197
15.00	42	217
16.00	35	232
17.00	25	246
18.00	14	257
19.00	03	267

Se o leitor fizer um gráfico da altura (ordenada) em função do azimute (abcissa) e marcar as horas para cada ponto, poderá responder mais facilmente às perguntas seguintes:

1. Qual foi a maior altura do Sol durante o dia?
2. Qual era a latitude do observador?
3. A que horas atingiu o Sol a sua maior altura?
4. Em que horas do dia a direcção do Sol (azimute) varia mais rapidamente?
5. Em que horas do dia a altura do Sol varia mais rapidamente?
6. A que hora do dia atingiu o Sol a sua maior altitude? Como se explica o facto de que não é exactamente às 12,00 horas? (lembre-se que a hora local está adiantada uma hora).

B. Observação do Sol durante um Ano

Um observador fez as seguintes observações mensais do Sol durante um ano completo

Datas	Altura do Sol ao meio-dia	Azimute do pôr do Sol	Intervalo de Tempo entre o meio-dia e o pôr do Sol
Jan. 1	20°	238°	4^h25^m*
Fev.	26	245	4 50
Mar. 1	35	259	5 27
Abr. 1	47	276	6 15
Mai. 1	58	291	6 55
Jun. 1	65	300	7 30
Jul. 1	66	303	7 40
Agos. 1	61	295	7 13
Set. 1	52	282	6 35
Out. 1	40	267	5 50
Nov. 1	31	250	5 00
Dez. 1	21	239	4 30

* h = horas, m = minutos.

Use estes valores para fazer três gráficos (em cores diferentes ou com marcas diferentes na mesma folha de papel). Um da altura do Sol ao meio-dia, outro da direcção do Sol no ocaso e outro do intervalo entre o ocaso e o meio-dia. Marque os valores no eixo vertical e as datas no eixo horizontal.

7. Qual foi a altura do Sol ao meio-dia nos equinócios (21 de Março e 23 de Setembro)?
8. Qual era a latitude do observador?
9. Se a latitude do observador era 71° N, de que cidade se encontrava mais próximo?
10. Qual foi a variação (em graus) do pôr do Sol durante o ano?
11. De quanto variou durante o ano a hora do pôr do Sol?
12. Se o intervalo do nascer do Sol

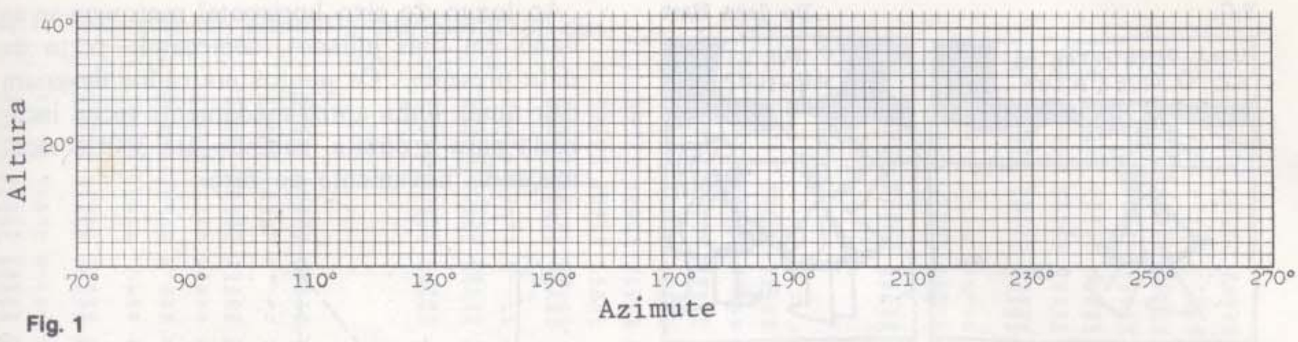


Fig. 1

até ao meio-dia fosse sempre igual ao intervalo do meio-dia ao pôr do Sol, qual era a duração total do dia mais curto do ano? e do mais longo?

C. Observação da Lua

Durante o mês de Outubro um observador (situado em Faro) fez ao pôr do Sol as seguintes observações: (o azimute do Sol era cerca de 255°)

Data	Ângulo entre o Sol e a Lua	Altura da Lua	Azimute da Lua
Out.			
16	032°	17°	230°
18	057°	25	205
20	081	28	180
22	104	30	157
24	126	25	130
26	147	16	106
28	169	05	083

13. Faça o traçado das posições da Lua num gráfico como o da fig. 1.
14. Dos valores acima e do gráfico obtido faça uma estimativa das datas de Lua nova, quarto crescente e Lua cheia.
15. Por cada um dos pontos marcados acrescente um esboço da forma da área iluminada da Lua.

D. Localizar os Planetas

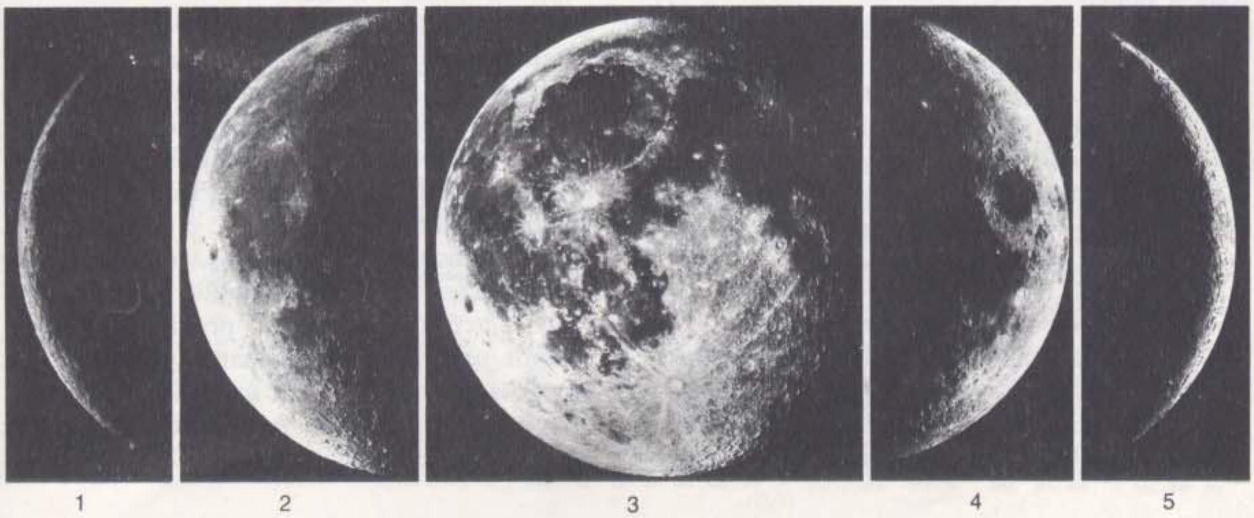
A tabela 1, Longitudes Planetárias, lista a posição de cada planeta maior ao longo da eclíptica. As posições são fornecidas de dez em dez dias, arredondados para o valor inteiro em graus mais próximo.

Por interpolação pode determinar-se a posição dum planeta em qualquer dia.

A coluna designada T. J. (tempo juliano) mostra a data correspondente no calendário juliano para cada entrada. Este calendário é simplesmente uma numeração consecutiva dos dias que passaram desde um dia arbitrário (o dia juliano n.º 1) em 4713 A.C.; o dia 24 de Setembro de 1975, por exemplo, é o mesmo que o D.J. 2442620.

As datas julianas são usadas pelos astrónomos por conveniência de trabalho. Por

Fases da Lua: (1) 26 dias, (2) 23 dias, (3) 17 dias, (4) 5 dias (5) 3 dias depois da Lua nova



B.C. By John Hart

By permission of John Hart and Field Enterprises, Inc.

exemplo, o número de dias entre 8 de Março e 26 de Setembro é trabalhoso de calcular directamente, mas é fácil de determinar por simples subtracção das correspondentes datas julianas.

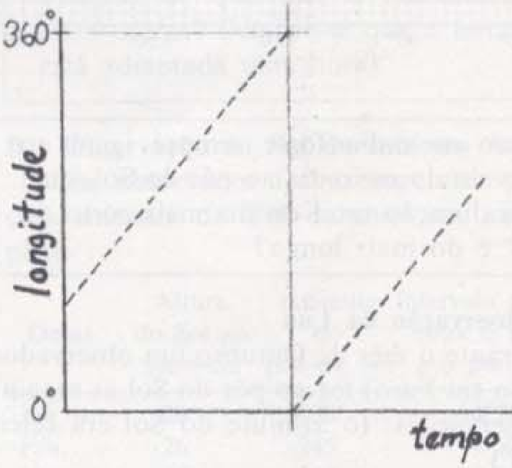
Escolha uma data e veja a correspondente longitude do Sol na tabela. Localize o Sol na carta (celeste) de constelações (SC-1): o percurso do Sol, a eclíptica, é a linha curva marcada em longitude de grau em grau.

Um planeta que esteja a oeste da posição do Sol (para a direita, na carta), está "à frente do Sol", isto é, nasce e põe-se antes do Sol. Um planeta que esteja a 180° do Sol, nasce ao pôr do Sol e permanece no céu durante toda a noite.

Logo que o leitor tenha decidido quais os planetas visíveis, procure localizá-los ao longo da eclíptica no mapa SC-1. Ao contrário do Sol, os planetas não estão exactamente sobre a eclíptica, mas nunca se afastam desta por mais de 8°. Uma vez localizado um planeta na carta das constelações torna-se fácil encontrá-lo no céu entre as estrelas.

E. Gráficos das Posições dos Planetas

Vejamos um modo útil de utilizar a informação contida na Tabela 1 de Longitudes Planetárias. Em papel de gráfico normal marque-se a longitude do Sol em função do tempo. Ao longo do eixo horizontal marquem-se as datas em dias julianos, começando perto da data presente. Os pontos marcados deveriam cair numa linha aproximadamente recta, inclinada para a direita, subindo até 360° e recomeçando novamente de zero.



Quanto tempo decorrerá até ao Sol tornar a ter a mesma longitude que tem hoje? A resposta será a mesma se esta pergunta for feita daqui a três meses? Qual é a velocidade angular média do Sol (em graus por dia) ao longo dum ano? Quando atinge a sua velocidade angular máxima?

Marque as longitudes de Mercúrio no mesmo gráfico (usando cor diferente ou marcas de forma diferente). De acordo com o seu gráfico, a que distância (em longitude) se afasta Mercúrio do Sol? (este valor é a chamada "maior elongação de Mercúrio").

Em que intervalo de tempo passa Mercúrio entre a Terra e o Sol?

Faça os gráficos das posições dos outros planetas usando cores diferentes para cada. A informação que figura no gráfico resultante é semelhante à que intrigou os antigos. De facto, a tabela de longitudes é apenas uma versão actual das tabelas que Ptolomeu, Copérnico e Tycho elaboraram.

O gráfico contém uma boa quantidade de informação útil. Por exemplo, quando estarão Mercúrio e Vénus tão próximos que possamos usar o Vénus brilhante para ajudar a localizar Mercúrio? Em que posição, relativa ao Sol, se encontram os planetas quando se observa o seu movimento retrógrado?

Tabela 1 Longitudes dos planetas a intervalos de 10 dias

Ano	Data		D.J.	Sol	Mer.	Vên.	Marte	Júp.	Sat.
			2440000						
1974	DEC	18	2400	266	266	276	245	341	108
1974	DEC	28	2410	276	281	289	253	342	107
1975	JAN	7	2420	287	298	301	260	344	105
1975	JAN	17	2430	297	314	314	267	346	104
1975	JAN	27	2440	307	325	326	274	348	103
1975	FEB	6	2450	317	322	339	281	350	103
1975	FEB	16	2460	327	312	351	289	353	102
1975	FEB	26	2470	337	312	4	296	355	102
1975	MAR	8	2480	347	320	16	304	357	102
1975	MAR	18	2490	357	332	28	312	0	102
1975	MAR	28	2500	7	347	41	319	2	102
1975	APR	7	2510	17	5	53	327	5	103
1975	APR	17	2520	27	25	65	334	7	103
1975	APR	27	2530	36	46	76	342	9	104
1975	MAY	7	2540	46	65	88	349	12	105
1975	MAY	17	2550	56	78	99	357	14	106
1975	MAY	27	2560	65	83	110	4	17	107
1975	JUN	6	2570	75	81	120	12	18	108
1975	JUN	16	2580	84	75	131	19	20	110
1975	JUN	26	2590	94	74	140	27	21	111
1975	JUL	6	2600	103	82	148	33	22	112
1975	JUL	16	2610	113	96	155	40	24	114
1975	JUL	26	2620	123	115	160	47	24	115
1975	AUG	5	2630	132	137	162	54	24	116
1975	AUG	15	2640	142	156	160	60	25	117
1975	AUG	25	2650	151	172	154	66	25	118
1975	SEP	4	2660	161	187	149	72	24	119
1975	SEP	14	2670	171	198	145	77	23	120
1975	SEP	24	2680	181	205	146	82	22	121
1975	OCT	4	2690	190	202	150	86	21	122
1975	OCT	14	2700	200	190	156	90	19	122
1975	OCT	24	2710	210	192	164	92	18	123
1975	NOV	3	2720	220	205	174	93	16	123
1975	NOV	13	2730	230	221	184	92	15	123
1975	NOV	23	2740	240	237	194	89	14	123
1975	DEC	3	2750	251	253	206	87	14	123
1975	DEC	13	2760	261	269	217	83	14	123
1975	DEC	23	2770	271	285	229	79	14	122
1976	JAN	2	2780	281	300	241	76	15	122
1976	JAN	12	2790	291	310	253	74	16	121
1976	JAN	22	2800	302	304	265	73	18	120
1976	FEB	1	2810	312	294	277	74	19	119
1976	FEB	11	2820	322	296	289	77	21	118
1976	FEB	21	2830	332	306	302	80	22	117
1976	MAR	2	2840	342	319	314	83	24	117
1976	MAR	12	2850	352	334	326	87	27	116
1976	MAR	22	2860	2	352	339	92	29	116
1976	APR	1	2870	12	11	351	97	31	116
1976	APR	11	2880	22	32	4	102	33	116
1976	APR	21	2890	31	51	16	107	36	117
1976	MAY	1	2900	41	61	28	112	39	118
1976	MAY	11	2910	51	63	41	117	41	118
1976	MAY	21	2920	60	58	53	123	44	119
1976	MAY	31	2930	70	54	65	128	46	120
1976	JUN	10	2940	79	56	78	134	48	121
1976	JUN	20	2950	89	66	90	140	50	122
1976	JUN	30	2960	99	82	102	146	52	123
1976	JUL	10	2970	108	101	114	152	54	124
1976	JUL	20	2980	118	123	127	158	56	126
1976	JUL	30	2990	127	143	139	164	58	127
1976	AUG	9	3000	137	159	152	171	59	129
1976	AUG	19	3010	146	173	164	177	60	130
1976	AUG	29	3020	156	183	176	183	61	131
1976	SEP	8	3030	166	188	189	190	61	132
1976	SEP	18	3040	175	183	201	196	61	133
1976	SEP	28	3050	185	174	213	203	61	134
1976	OCT	8	3060	195	177	225	210	60	135
1976	OCT	18	3070	205	191	237	216	60	136
1976	OCT	28	3080	215	206	249	223	58	137
1976	NOV	7	3090	225	225	262	230	58	137
1976	NOV	17	3100	235	241	274	237	56	137
1976	NOV	27	3110	245	257	286	244	54	138
1976	DEC	7	3120	256	272	298	252	53	137
1976	DEC	17	3130	266	286	309	259	52	137
1976	DEC	27	3140	276	294	321	267	51	137
1977	JAN	6	3150	286	287	332	274	50	136
1977	JAN	16	3160	296	277	343	281	50	135
1977	JAN	26	3170	306	282	354	289	51	134
1977	FEB	5	3180	317	292	3	297	51	134
1977	FEB	15	3190	327	306	12	305	53	133
1977	FEB	25	3200	337	321	19	312	54	132
1977	MAR	7	3210	347	339	23	320	55	131
1977	MAR	17	3220	357	358	25	328	57	131
1977	MAR	27	3230	7	18	22	335	59	130
1977	APR	6	3240	16	36	16	343	60	130
1977	APR	16	3250	26	45	10	351	63	130
1977	APR	26	3260	36	43	7	359	65	131
1977	MAY	6	3270	46	36	9	7	67	131
1977	MAY	16	3280	55	34	13	15	69	132
1977	MAY	26	3290	65	40	20	22	72	133
1977	JUN	5	3300	74	52	28	30	74	133
1977	JUN	15	3310	84	68	38	37	77	134
1977	JUN	25	3320	94	87	48	44	79	135
1977	JUL	5	3330	103	110	58	51	81	136
1977	JUL	15	3340	113	129	69	58	83	137
1977	JUL	25	3350	122	146	80	65	85	138
1977	AUG	4	3360	132	159	91	72	87	140
1977	AUG	14	3370	141	168	103	79	89	141
1977	AUG	24	3380	151	171	114	85	91	143
1977	SEP	3	3390	161	164	126	92	93	144
1977	SEP	13	3400	170	157	138	97	94	145
1977	SEP	23	3410	180	162	150	103	95	146
1977	OCT	3	3420	190	178	162	108	95	147
1977	OCT	13	3430	200	196	175	113	96	148
1977	OCT	23	3440	210	212	187	118	96	149
1977	NOV	2	3450	220	229	200	122	96	150
1977	NOV	12	3460	230	244	213	126	95	150
1977	NOV	22	3470	240	259	223	129	95	151
1977	DEC	2	3480	250	272	238	131	93	151
1977	DEC	12	3490	260	278	251	132	92	151
1977	DEC	22	3500	271	269	263	131	91	151
1978	JAN	1	3510	281	261	276	128	89	151
1978	JAN	11	3520	291	267	288	125	88	151
1978	JAN	21	3530	301	279	301	121	87	150
1978	JAN	31	3540	311	293	313	117	86	149
1978	FEB	10	3550	321	309	326	114	86	148
1978	FEB	20	3560	331	326	338	112	86	147
1978	MAR	2	3570	341	344	351	111	86	146
1978	MAR	12	3580	351	4	3	112	86	146
1978	MAR	22	3590	1	20	16	114	87	145
1978	APR	1	3600	11	27	28	117	88	144
1978	APR	11	3610	21	22	41	120	90	144
1978	APR	21	3620	31	15	53	124	91	144
1978	MAY	1	3630	41	16	66	128	93	144
1978	MAY	11	3640	50	24	78	133	95	144
1978	MAY	21	3650	60	36	90	138	97	145
1978	MAY	31	3660	69	53	102	143	99	146
1978	JUN	10	3670	79	74	114	148	101	146
1978	JUN	20	3680	89	96	126	153	103	147
1978	JUN	30	3690	98	116	137	159	106	148
1978	JUL	10	3700	108	132	149	165	108	149
1978	JUL	20	3710	117	144	160	171	110	150
1978	JUL	30	3720	127	152	171	177	112	151
1978	AUG	9	3730	136	152	182	183	115	152
1978	AUG	19	3740	146	144	192	189	117	153
1978	AUG	29	3750	156	140	202	196	119	155
1978	SEP	8	3760	165	147	211	202	121	156
1978	SEP	18	3770	175	164	219	209	122	157
1978	SEP	28	3780	185	183	227	216	124	159
1978	OCT	8	3790	195	200	231	222	125	160
1978	OCT	18	3800	205	217	234	229	127	161
1978	OCT	28	3810	215	232	232	237	128	162
1978	NOV	7	3820	225	246	227	244	128	162
1978	NOV	17	3830	235	258	221	251	129	163
1978	NOV	27	3840	245	262	218	258	129	163
1978	DEC	7	3850	255	252	220	266	129	164
1978	DEC	17	3860	265	245	224	273	129	164
1978	DEC	27	3870	275	253	231	281	128	164
1979	JAN	6	3880	286	266	240	289	126	164
1979	JAN	16	3890	296	281	249	297	125	164
1979	JAN	26	3900	306	297	259	304	123	163
1979	FEB	5	3910	316	313	270	312	122	163
1979	FEB	15	3920	326	331	281	320	121	162
1979	FEB	25	3930	336	349	293	328	120	162
1979	MAR	7	3940	345	5	304	336	119	161
1979	MAR	17	3950	356	9	316	344	119	159
1979	MAR	27	3960	6	1	328	352	119	159
1979	APR	6	3970	16	355	340	359	119	158
1979	APR	16	3980	26	359	352	7	120	158
1979	APR	26	3990	36	9	3	13	121	158
1979	MAY	6	4000	45	22	15	23	121	158
1979	MAY	16	4010	55	39	27	30	123	158
1979	MAY	26	4020	64	60	40	38	124	158
1979	JUN	5	4030	74	82	52	45	126	159
1979	JUN	15	4040	84	102	64	52	128	159
1979	JUN	25	4050	93	117	76	59	130	160
1979	JUL	5	4060	103	129	89	66	132	161
1979	JUL	15	4070	112	134	101	74	134	162
1979	JUL	25	4080	122	132	113	81	136	163
1979	AUG	4	4090	131	125	126	87	138	164
1979	AUG	14	4100	141	123	138	94	140	165
1979	AUG	24	4110	151	133	150	100	143	166
1979	SEP	3	4120	160	150	163	107	145	167
1979	SEP	13	4130	170	170	175	113	147	168
1979	SEP	23	4140	180	188	188	119	149	170
1979	OCT	3	4150	190	205	200	125	151	171
1979	OCT	13	4160	199	220	212	131	153	172
1979	OCT	23	4170	209	233	225	136	154	173
1979	NOV	2	4180	219	243	237	141	156	174
1979	NOV	12	4190	229	246	250	146	157	175
1979	NOV	22	4200	240	234	262	151	158	175
1979	DEC	2	4210	250	230	275	155	159	176
1979	DEC	12	4220	260	239	288	158	159	176
1979	DEC	22	4230	270	253	300	161	160	177
1980	JAN	1	4240	280	269	312	164	160	177
1980	JAN	11	4250	290	284	324	165	160	178
1980	JAN	21	4260	301	301	336	165	159	177
1980	JAN	31	4270	311	318	349	163	158	177
1980	FEB	10	4280	321	335	1	161	157	177
1980	FEB	20	4290	331	349	12	157	155	176
1980	MAR	1	4300	341	351	24	153	154	176
1980	MAR	11	4310	351	341	36	150	153	175
1980	MAR	21	4320	1	337	46	147	152	174
1980	MAR	31	4330	11	343	57	146	151	173
1980	APR	10	4340	21	354	67	145	150	172
1980	APR	20	4350	30	8	76	147	150	172
1980	APR	30	4360	40	26	84	149	150	171
1980	MAY	10	4370	50	46	89	152	151	171
1980	MAY	20	4380	59	68	92	156	151	171
1980	MAY	30	4390	69	88	92	160	152	172
1980	JUN	9	4400	79	102	87	164	153	172
1980	JUN	19	4410	88	112	80	169	154	173
1980	JUN	29	4420	98	115	75	174	156	173
1980	JUL	9	4430	107	111	74	179	157	174
1980	JUL	19	4440	117	105	77	185	159	175
1980	JUL	29	4450	126	107	83	191	161	175
1980	AUG	8	4460	136	118	91	197	163	176
1980	AUG	18	4470	145	136	99	203	165	177
1980	AUG	28	4480	155	157	109	210	167	178
1980	SEP	7	4490	165	175	119	216	169	179
1980	SEP	17	4500	175	192	130	223	171	180
1980	SEP	27	4510	184	207	141	229	174	182
1980	OCT	7	4520	194	220	152	236	176	183
1980	OCT	17	4530	204	228	164	244	178	184
1980	OCT	27	4540	214	229	176	251	180	185
1980	NOV	6	4550	224	217	188	258	182	186
1980	NOV	16	4560	234	215	200	266	184	187
1980	NOV	26	4570	244	226	212	273	185	187
1980	DEC	6	4580	255	241	225	281	187	188
1980	DEC	16	4590	265	256	237	288	187	189
1980	DEC	26	4600	275	272	250	296	188	189
1981	JAN	5	4610	286	288	262	304	189	190
1981	JAN	15	4620	295	305	275	313	190	190
1981	JAN	25	4630	306	321	288	320	190	190
1981	FEB	4	4640	316	334	300	328	190	190
1981	FEB	14	4650	326	333	313	336	190	190
1981	FEB	24	4660	336	323	325	344	189	190
1981	MAR	6	4670	346	321	338	352	188	189
1981	MAR	16	4680	356	328	350	0	187	188
1981	MAR	26	4690	6	340	3	7	185	187
1981	APR	5	4700	16	355	15	15	184	187
1981	APR	15	4710	25	12	27	23	183	186
1981	APR	25	4720	35	32	40	30	182	185
1981	MAY	5	4730	45	54	52	38	181	185
1981	MAY	15	4740	54	73	64	45	181	184
1981	MAY	25	4750	64	87	77	52	181	184
1981	JUN	4	4760	74	94	89	59	181	184
1981	JUN	14	4770	83	94	102	66	181	185
1981	JUN	24	4780	93	88	114	73	182	185
1981	JUL	4	4790	102	85	126	81	182	185
1981	JUL	14	4800	112	91	139	88	183	186
1981	JUL	24	4810	121	104	151	94	185	187
1981	AUG	3	4820	131	123	162	101	186	187
1981	AUG	13	4830	140	144	174	107	188	188
1981	AUG	23	4840	150	163	186	114	190	189
1981	SEP	2	4850	160	179	198	120	192	190
1981	SEP	12	4860	169	194	210	127	194	191
1981	SEP	22	4870	179	206	221	133	196	192
1981	OCT	2	4880	189	213	233	139	198	193
1981	OCT	12	4890	199	212	244	145	200	194
1981	OCT	22	4900	209	200	255	151	202	196
1981	NOV	1	4910	219	200	266	156	204	197
1981	NOV	11	4920	229	212	276	162	207	197
1981	NOV	21	4930	239	228	286	168	209	198
1981	DEC	1	4940	249	244	295	172	211	199
1981	DEC	11	4950	259	260	302	177	212	200
1981	DEC	21	4960	270	275	307	182	214	201
1981	DEC	31	4970	280	292	310	187	216	201
1982	JAN	10	4980	290	307	308	190	217	202
1982	JAN	20	4990	300	318	303	193	218	202
1982	JAN	30	5000	310	315	297	196	219	203
1982	FEB	9	5010	320	304	293	199	219	203
1982	FEB	19	5020	330	305	295	200	220	203
1982	MAR	1	5030	341	314	299	198	220	203
1982	MAR	11	5040	351	326	306	197	220	202
1982	MAR	21	5050	0	341	314	194	220	201
1982	MAR	31	5060	10	359	323	190	219	200
1982	APR	10	5070	20	18	334	186	218	199
1982	APR	20	5080	30	40	344	184	217	199
1982	APR	30	5090	40	59	355	182	214	198
1982	MAY	10	5100	49	71	6	180	213	197
1982	MAY	20	5110	59	75	17	180	212	197
1982	MAY	30	5120	69	72	29	182	211	197
1982	JUN	9	5130	78	66	40	185	211	197
1982	JUN	19	5140	88	67	52	189	210	197
1982	JUN	29	5150	97	75	64	193	211	197
1982	JUL	9	5160	107	89	76	197	211	197
1982	JUL	19	5170	116	109	88	202	211	198
1982	JUL	29	5180	126	131	100	208	212	198
1982	AUG	8	5190	135	150	112	214	212	199
1982	AUG	18	5200	145	166	124	219	214	199
1982	AUG	28	5210	155	181	137	225	215	200
1982	SEP	7	5220	164	191	149	232	217	201
1982	SEP	17	5230	174	198	162	239	218	202
1982	SEP	27	5240	184	194	174	245	220	203
1982	OCT	7	5250	19	184	187	252	222	204
1982	OCT	17	5260	204	185	199	259	224	205
1982	OCT	27	5270	214	199	212	267	227	207
1982	NOV	6	5280	224	215	224	274	229	208
1982	NOV	16	5290	234	232	237	282	231	209
1982	NOV	26	5300	244	243	249	289	233	210
1982	DEC	6	5310	254	263	262	297	235	211
1982	DEC	16	5320	264	279	274	305	238	212
1982	DEC	26	5330	274	294	287	313	240	213
1983	JAN	5	5340	285	303	299	321	242	213
1983	JAN	15	5350	295	297	312	329	243	214
1983	JAN	25	5360	305	287	325	336	245	214
1983	FEB	4	5370	315	290	337	344	247	215
1983	FEB	14	5380	325	300	350	352	248	215
1983	FEB	24	5390	335	313	2	359	249	215

EXPERIÊNCIA 2.2 A DIMENSÃO DA TERRA

Durante muitos anos ouvimos dizer que a Terra tem um diâmetro de cerca de 13 000 Km e um perímetro de cerca de 40000 km. Sempre acreditámos nestes valores que nos têm sido ditos. Mas suponhamos que alguém nos desafia para os demonstrar? Como faríamos?

O primeiro registo dum valor calculado do tamanho da Terra foi feito por Eratóstenes no século 3 A.C. Calculou esse valor comparando as sombras produzidas pelo Sol em dois locais diferentes do Egipto. Os locais referidos eram bastante afastados mas estavam aproximadamente numa linha Norte-Sul traçada à superfície da Terra. A experiência a realizar utiliza um método semelhante. Em vez de se medir o comprimento duma sombra, mede-se o ângulo entre a vertical e a direcção de observação do Sol ou duma estrela.

Torna-se necessário alguém pelo menos 300 Km a sul ou a norte para fazer medidas simultâneas. Os dois observadores terão que combinar previamente qual a estrela a utilizar e o dia e a hora das observações. Verifique com que aproximação consegue determinar por este processo o tamanho real da Terra.

Hipóteses e Teoria

A experiência baseia-se nas hipóteses seguintes

1. A Terra é uma esfera perfeita.
2. A linha dum fio de prumo aponta sempre na direcção do centro da Terra.
3. A distância da Terra às estrelas e ao Sol é muito grande comparada com o diâmetro da Terra.

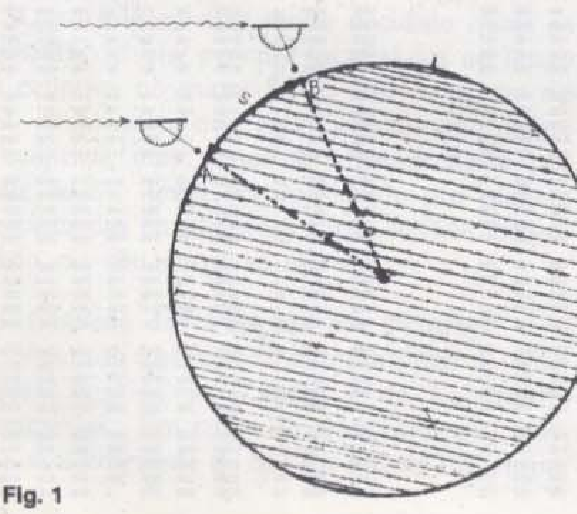


Fig. 1

Os dois observadores devem estar colocados em pontos aproximadamente Norte Sul um do outro. Suponhamos que estão nos pontos A e B, separados por uma distância s, como se mostra na figura 1. Ambos apontam para a mesma estrela no instante pré-combinado, quando a estrela está sobre ou perto do meridiano comum, e medem o ângulo entre a vertical definida pela linha do prumo e a direcção de observação da estrela.

Os raios luminosos provenientes da estrela e que chegam aos pontos A e B são paralelos como consequência da hipótese 3.

Podem-se então relacionar o ângulo θ_A em A, o ângulo θ_B em B e o ângulo ϕ entre os dois raios, tal como se mostra na fig. 2.

No triângulo ABO tem-se

$$\phi = (\theta_A - \theta_B) \qquad (1)$$

Se C é o perímetro da Terra e s é o arco de meridiano pode fazer-se a proporção

$$\frac{s}{C} = \frac{\phi}{360°} \qquad (2)$$

Combinando as equações (1) e (2), obtém-se

$$C = \frac{360°}{\theta_A - \theta_B}\, s,$$

onde θ_A e θ_B são os ângulos medidos (em graus).

Realização da Experiência

Para se obterem melhores resultados, as duas posições A e B deveriam estar directamente a Norte e a Sul uma da outra e as observações deveriam ser feitas quando a estrela está perto do ponto mais alto que atinge no céu.

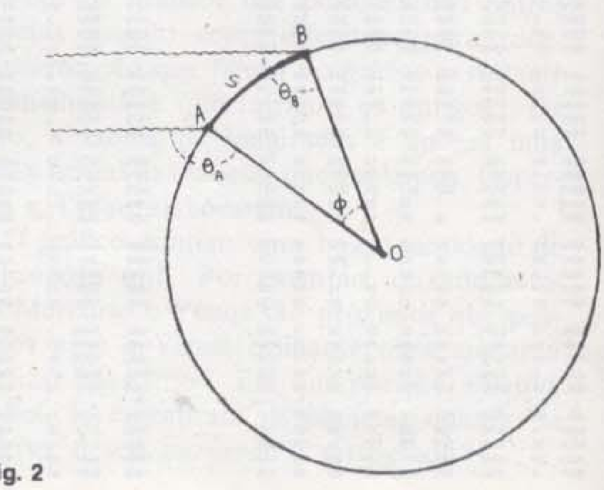


Fig. 2

Será necessário um instrumento para medir o ângulo θ. Tal instrumento chama-se Astrolábio.

Se não possuir um astrolábio, pode facilmente improvisar um, com um transferidor, um tubo fino e um fio com um peso na ponta tal como se pode ver na fig. 3.

Alinhe então o seu astrolábio ao longo da linha Norte-Sul e meça o ângulo que faz com a vertical, a direcção da observação da estrela, na altura em que atravessa a linha Norte-Sul (meridiano).

Se o astrolábio não está alinhado com o meridiano, a estrela será observada antes ou depois de atingir a maior altura no céu. Um erro de alguns minutos relativo à passagem da estrela no meridiano fará pouca diferença no ângulo a medir.

Como alternativa poderíamos determinar a altura do Sol ao "meio-dia". Isto significa o instante em que o Sol se encontra mais alto no céu e não necessariamente às 12 h de tempo local de relógio (note-se que o Sol apresenta uma largura de meio grau quando observado da Terra).

É importante ter-se uma estimativa da imprecisão na medida de θ. Faça várias determinações com a mesma estrela e tome o valor médio das medidas. A dispersão dos valores medidos pode ser usada para fazer uma estimativa da imprecisão das observações e do resultado obtido.

O valor que se obtém para o perímetro da Terra depende também do conhecimento da distância entre os dois pontos de observação. Esta distância pode ser obtida dum mapa usando a correspondente escala quilométrica.

No artigo "The Shape of the Earth" (*Scientific American*, Outubro, 1967, pág. 67) encontra-se uma descrição da informação que nos tem sido fornecida acerca da forma da Terra pelas diversas medidas efectuadas ao longo dos anos.

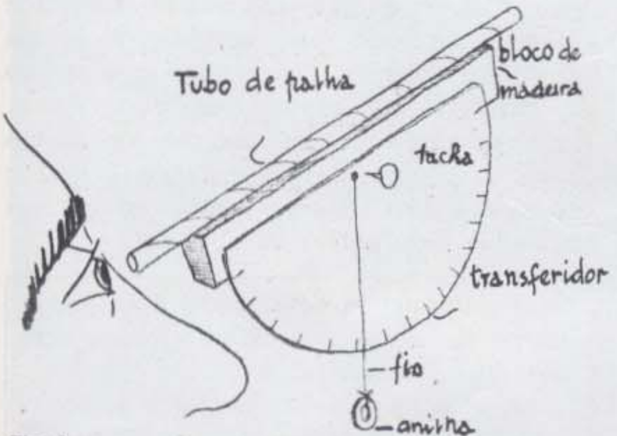


Fig. 3

Não observe o Sol directamente. Esta observação pode danificar-lhe os olhos. Em vez disso arranje um cartão e faça-lhe um pequeno furo no qual insere o tubo fino do astrolábio. Oriente o astrolábio de tal modo que a luz do Sol ao atravessar o tubo apareça como uma mancha brilhante sobre um outro cartão colocado junto da extremidade oposta ao Sol.

1. Compare a imprecisão existente na distância entre os dois pontos com a imprecisão do valor de θ. Que conclui?
2. Qual é o valor que resulta para o perímetro da Terra e qual é a imprecisão desse valor?
3. Os astrónomos determinaram que o perímetro médio da Terra é cerca de 40 000 km. Qual é o erro do resultado obtido expresso em percentagem?
4. Este erro será aceitável em face da imprecisão das medidas?

B.C. **By John Hart**

A Dimensão da Terra — Versão Simplificada

Na falta dum segundo observador para a realização da experiência tal como foi descrita poderá recorrer-se ao método seguinte que consiste na determinação da maior altura de um qualquer dos objectos da lista abaixo indicada, utilizando em seguida os dados anexos.

Um observador em Marraquesh (31°39′N, 8°1′0) Marrocos, fez as seguintes determinações da altura máxima de algumas estrelas e do Sol, marcadas S ou N conforme feitas a Sul ou a Norte do Zénite:

Antares	(α — Scorpii)	32,0	(S)
Vega	(α — Lirae)	82,9	(N)
Deneb	(α — Cygni)	76,5	(N)
Altair	(α — Aquilae)	67,2	(S)
Fomalhaut	(α — Piscis Austrini)	28,6	(S)
Sol			
Outubro	1	55,2	(S)
	15	49,9	(S)
Novembro	1	44,0	(S)
	15	39,9	(S)
Dezembro	1	36,6	(S)
	15	35,1	(S)

Como as observações indicadas foram feitas quando os objectos referidos se encontravam na sua maior altura, os valores obtidos dependem apenas da latitude do observador e não da sua longitude ou da hora em que as observações foram feitas.

Num mapa determine a sua posição relativamente ao observador. Em seguida meça a maior altitude de um ou mais destes objectos. A partir dos valores obtidos e disponíveis calcule o valor do perímetro da Terra.

EXPERIÊNCIA 2.3 DISTÂNCIA DA TERRA À LUA

A Lua está tão perto da Terra que dois observadores distantes vêem a Lua projectada em posições diferentes contra um fundo de estrelas fixas. (Se estender o braço e olhar o polegar primeiro com um olho e depois com o outro, a posição aparente do polegar mudará em relação ao ponto de referência distante).

Esta mudança da posição aparente, quando vista dos dois extremos da linha de base define um ângulo, chamado ângulo de paralaxe.

1. Se o objecto for movido para mais longe, o ângulo de paralaxe virá maior ou menor?
2. Como varia o ângulo de paralaxe se a linha da base aumentar? E se diminuir?

A 27 de Dezembro de 1973, a Lua, Vénus e Júpiter estavam muito próximos no céu. Dois astrónomos amadores, um no Dacota do Norte e outro no Mississipi (E. U.) tiraram simultaneamente fotografias destes planetas.

Efeito semelhante poderia ter sido obtido por dois amadores na Europa um em Zurique e outro em Creta. Porque tinham as fotografias de ser retiradas ao mesmo tempo? A Lua encontrava-se no início da fase de quarto crescente. A restante parte do disco da Lua era iluminada por luz reflectida pela Terra. Vénus apresenta um aspecto cintilante assemelhando-se a uma estrela devido a reflexões internas na câmara fotográfica.

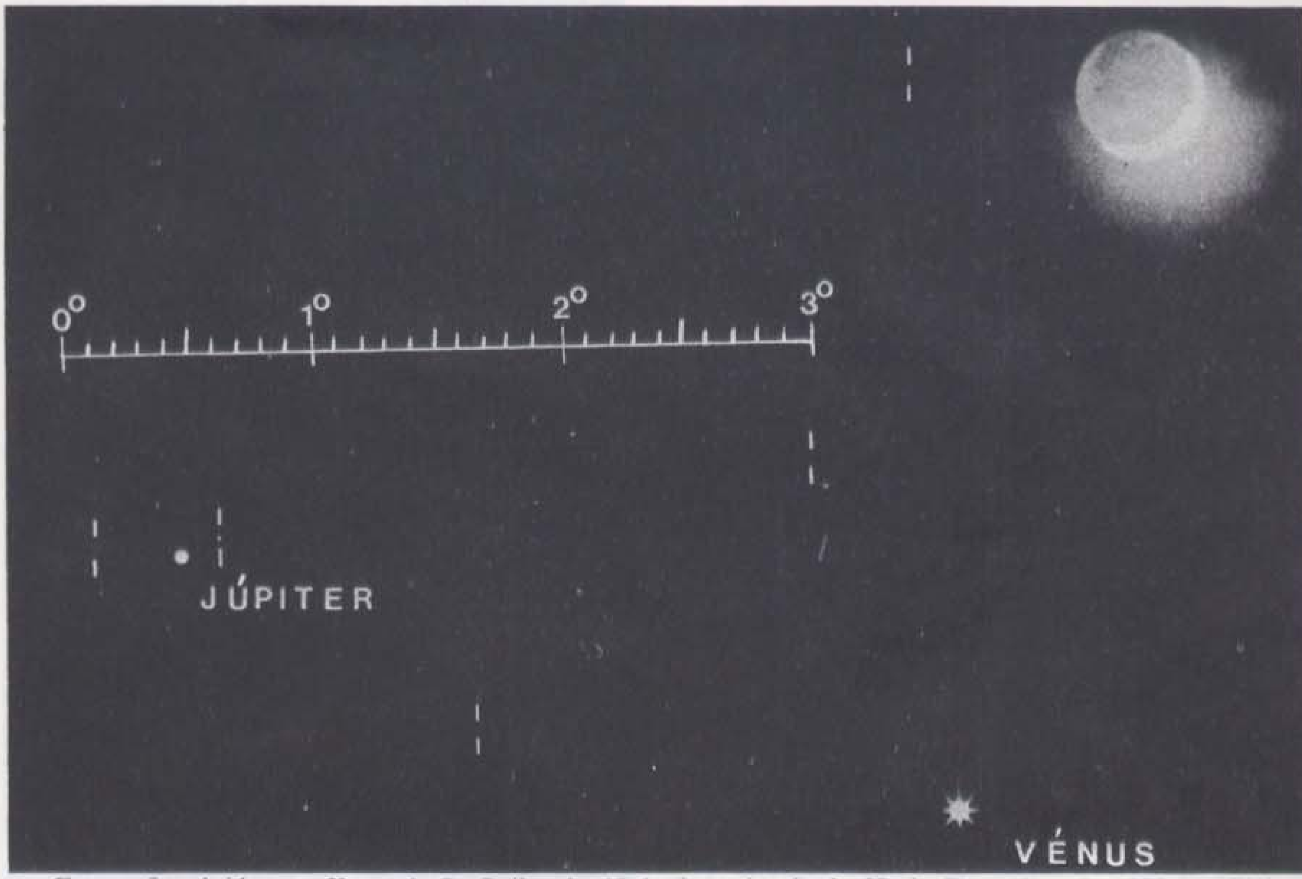
À primeira vista as duas fotografias parecem idênticas, mas o leitor pode notar a diferença da posição relativa da Lua para com a estrela mais próxima, localizada entre dois traços verticais.

A mudança aparente de posição lunar para estes dois observadores pode ser determinada decalcando em papel vegetal ou em plástico a imagem da Lua, os centros das imagens de Vénus e Júpiter e uma estrela ou duas. Coloca-se então o decalque sobre a outra fotografia fazendo-os coincidir e determina-se o ângulo de paralaxe em graus usando a escala. Podem-se então usar as medições do ângulo de paralaxe para obter a distância a que se encontra a Lua. Como comparam os seus resultados com outros já obtidos?

3. Porque se deve medir o deslocamento de vários pontos correspondentes nas duas fotografias?
4. Como se sabe que foi a posição aparente da Lua que mudou e não as de Vénus e Júpiter?

O diâmetro linear da Lua pode, também, ser calculado a partir de medidas do seu diâmetro angular nas fotografias.

Nesta relação geométrica o diâmetro da Lua é agora a linha de base.



Fotografia obtida por Kenneth R. Polley às 18 h (hora local) de 27 de Dezembro de 1973 em Finley no Dakota do Norte (Lat. 47,5°N, Long. 97,9°O). (Tempo de exposição 4 s, abertura f 5.6, distância focal 135 mm).

Fotografia obtida por David Farley às 18 h (tempo local) de 27 de Dezembro de 1973, em Starkville, Mississipi (Lat. 33,5°N, Long. 88,7°O). (Tempo de exposição 4 s, abertura f 5.6, distância focal 105 mm).

TABELA PARA CONVERTER ÂNGULOS PEQUENOS EM COMPRIMENTOS

θ	sen θ
0,00	0,00000
0,05	0,00087
0,10	0,00175
0,15	0,00262
0,20	0,00349
0,25	0,00436
0,30	0,00524
0,35	0,00611
0,40	0,00698
0,45	0,00785
0,50	0,00873
Δ0,01° =	0,000175

5. Que valor obtém para o diâmetro da Lua?

6. Quantos algarismos significativos se devem tomar em conta?

7. Se outro objecto tal como o Sol, um cometa ou uma estrela tiver uma paralaxe pequena ou mesmo nula, que se pode concluir acerca da sua distância?

8. Nesta análise foram feitas várias aproximações. Como afectará cada um dos seguintes factos a estimativa feita da distância da Lua?

a) A linha da base não é inteiramente perpendicular à direcção da Lua.

b) A distância sobre a Terra entre os observadores não é a distância mais curta entre estes.

c) A Lua na fase de quarto crescente estava muito iluminada.

d) O observador no Mississípi viu a Lua bastante mais alta no céu do que o observador no Dacota do Norte.

EXPERIÊNCIA 2.4 A ALTURA DE PÍTON, UMA MONTANHA DA LUA

Fotografias tiradas próximo da superfície lunar foram transmitidas para a Terra de veículos espaciais em órbita lunar (Orbiter) ou pousados na Lua (Surveyor) ou ainda trazidas pelos astronautas das missões Apolo.

Muito se tem descoberto acerca da Lua a partir de tais fotografias, bem como das alunagens feitas pelos astronautas nos módulos Apolo.

Mas muito tempo antes da idade do espaço, mais precisamente desde o tempo de Galileu, os astrónomos têm adquirido conhecimentos acerca da superfície lunar, mesmo sem terem saído da Terra. Nesta experiência, o leitor usará uma fotografia (fig. 2) tirada com um telescópio de 90 cm na Califórnia (E. U.) para fazer uma estimativa da altura duma montanha lunar. O método que vai usar é semelhante no seu princípio ao que Galileu usou, embora seja possível obter um valor mais preciso do que ele conseguiu com o seu pequeno telescópio (e sem fotografias!).

A fotografia da Lua na fig. 1 foi tirada no observatório de Lick (E. U.) muito próximo do quarto minguante. Esta não mostra a Lua como a vê no céu na fase de quarto minguante, porque um telescópio astronómico dá uma imagem invertida — troca o topo com a base e a direita com a esquerda. (Portanto o Norte está em baixo).

A fig. 2 representa uma ampliação de 10 × da área contida no rectângulo da fig. 1.

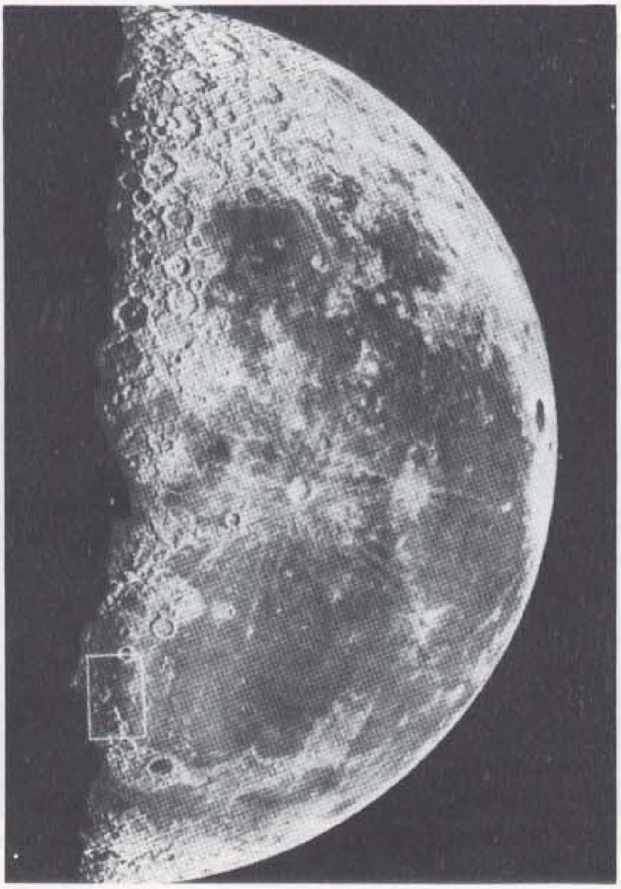


Fig. 1

Fig. 2

Porquê Escolher Píton?

Píton, uma montanha situada no hemisfério norte da Lua, é fácil de medir, porque se trata dum pináculo que se ergue abruptamente numa área muito plana.

Quando a fotografia foi tirada, a Lua estava quase no quarto minguante. Píton bastante perto da linha que separa a parte iluminada da não iluminada. (Esta linha é chamada *terminador*) [1].

Encontrará Píton para sudoeste da grande cratera de chão escuro Plato (n.° 230 no seu mapa da Lua, a qual está localizada a uma longitude de 10° e uma latitude de 50°).

Hipóteses e Relações

A fig. 3 apresenta a Lua em quarto minguante; *r* é o raio, *P* Píton, *l* o comprimento da sua sombra, *d* a distância de Píton ao terminador. Os raios solares podem ser considerados paralelos, porque a Lua se encontra

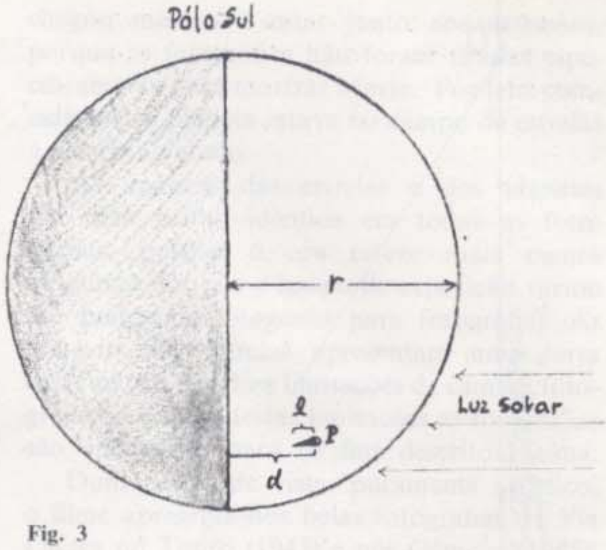


Fig. 3

a uma grande distância do Sol. Então o ângulo segundo o qual os raios solares incidem em Píton não mudará, se imaginarmos que rodamos a Lua segundo um eixo na direcção do Sol.

Na fig. 4, a Lua foi rodada o suficiente para levar Píton até à margem da figura.

Nesta posição é mais fácil determinar a geometria da sombra.

A fig. 5 mostra como a altura de Píton pode ser determinada a partir da semelhança de triângulos. Nesta figura *h* representa a altura da montanha, *l* o comprimento aparente da sombra, *d* é a distância do terminador à montanha, *r* é o raio da Lua (desenhado de Píton em *P* para o centro da circunferência).

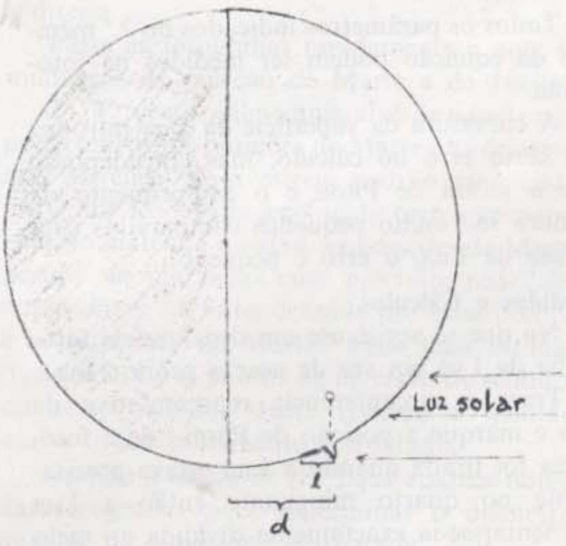


Fig. 4

[1] Linha divisória entre a parte iluminada e a não iluminada de um astro.

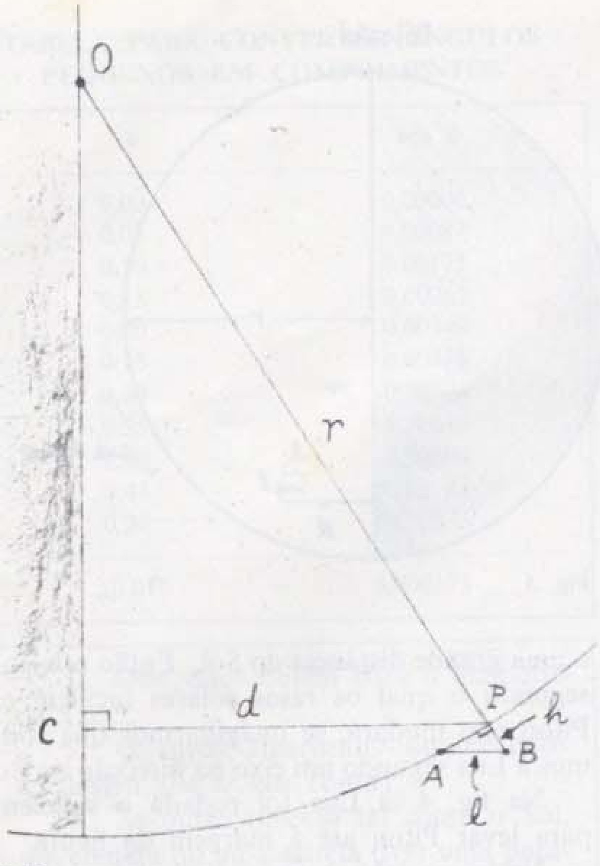


Fig. 5

Pode provar-se geometricamente (e pode ver no desenho) que o pequeno triângulo BPA é semelhante ao triângulo PCO. Os lados correspondentes destes triângulos são proporcionais, portanto podemos escrever

$$\frac{h}{l} = \frac{d}{r} \quad \text{donde} \quad h = \frac{l \times d}{r}$$

Todos os parâmetros indicados no 2.° membro da equação podem ser medidos na fotografia.

A curvatura da superfície da Lua introduz um certo erro no cálculo, mas considerando que a altura de Píton e o comprimento da sombra são muito pequenos comparados com o raio da Lua, o erro é pequeno.

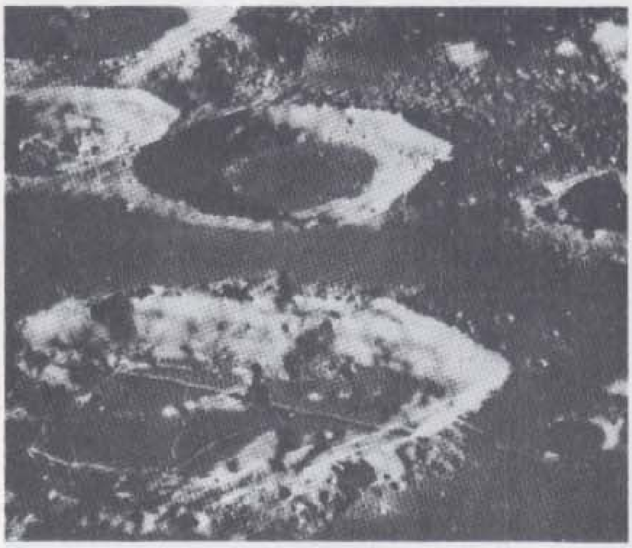
Medidas e Cálculos

No que se segue use um decalque da fotografia da Lua em vez de usar o próprio livro.

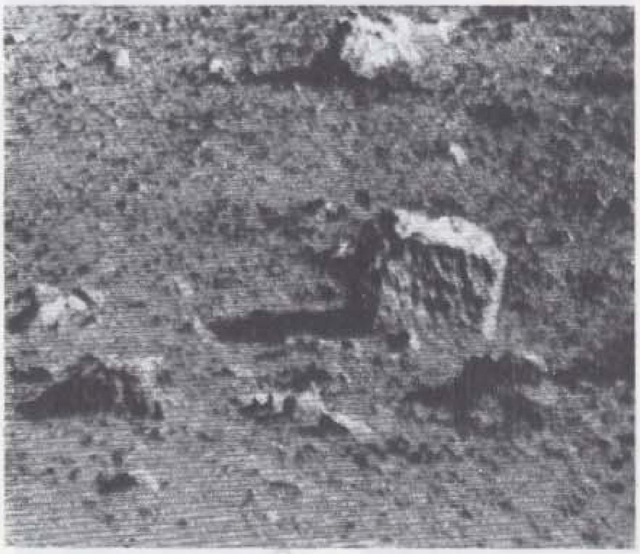
Trace a circunferência representativa da Lua e marque a posição de Píton. Se a fotografia foi tirada quando a Lua estava precisamente no quarto minguante então a Lua apresentar-se-ia exactamente dividida ao meio pelo terminador. A linha de separação aparece irregular porque as sombras dos picos altos projectam-se na parte iluminada e há picos que sobressaem no lado não iluminado. Faça uma estimativa da melhor linha recta para a linha de separação e esboce-a no seu decalque.

Use uma escala em milímetros para medir o comprimento da sombra de Píton e a distância da linha de separação até ao cume da montanha.

Provavelmente será mais fácil fazer os cálculos à escala da fotografia; determine a altura de Píton em centímetros, e depois finalmente mude para a escala real da Lua.



Uma área de 80 000 m² da superfície lunar perto da grande cratera, Goclenius. Um pormenor fora do vulgar desta cratera é o vale estreito que atravessa a sua orla.



Uma pedra de 10 cm fotografada na superfície lunar pelo Surveyor VII, em 1968.

1. Qual é o valor da altura de Píton expresso em cm à escala da fotografia?
2. O diâmetro da Lua é 3476 km. Qual é a escala da fotografia?
3. Que valor encontra para a altura real de Píton?
4. Qual das suas medidas é a mais incerta? Qual a estimativa de incerteza para a sua altura de Píton?
5. Os astrónomos usando métodos mais complicados que os seus determinaram para a altura de Píton o valor 2,3 km (e cerca de 22 km de diâmetro de base). O seu valor difere do valor aceite num valor superior à incerteza experimental? Se tal acontecer poderá sugerir razões que justifiquem tal facto?

EXPERIÊNCIA 2.5 MOVIMENTO RETRÓGRADO

O filme utilizado nesta experiência provém dos arquivos do Observatório do Harvard College e apresenta-nos fotografias de Marte, obtidas em 1941, 1943 e 1946, quando o planeta se encontrava em oposição.

A primeira série de doze fotografias mostra-nos as posições de Marte antes e depois do planeta estar em oposição, a qual ocorreu a 10 de Outubro de 1941.

A primeira fotografia desta série foi obtida a 3 de Agosto de 1941 e a última a 6 de Dezembro do mesmo ano.

A segunda série apresenta-nos, também, diferentes posições de Marte antes e depois do planeta estar em oposição a 5 de Dezembro de 1943. Esta segunda série contém 7 fotografias datando a primeira de 28 de Outubro de 1943 e a última de 19 de Fevereiro de 1944.

A terceira série reúne 11 fotografias ainda respeitantes a uma oposição de Marte, esta agora a 14 de Janeiro de 1946. Na segunda e terceira série pode-se mesmo ver Júpiter. As fotografias foram tiradas pelo Harvard Sky Patrol com uma câmara fotográfica de 15 cm de distância focal e uma abertura angular de 55°.

Durante cada exposição, a câmara era guiada por um sistema de relógio para seguir o movimento diário das estrelas para oeste, fixando assim as suas imagens na película.

Marte nunca esteve no centro do campo e chegou mesmo a estar junto aos extremos, porque as fotografias não foram tiradas especificamente para mostrar Marte. Por feliz coincidência, o planeta estava no campo de estrelas a ser fotografado.

As imagens das estrelas e dos planetas não têm brilho idêntico em todas as fotografias, porque o céu esteve mais escuro nalgumas noites e o tempo de exposição variou um pouco de fotografia para fotografia. As imagens das estrelas apresentam uma certa deformação devido a limitações da câmara fotográfica. Apesar destas limitações as fotografias são adequadas para os fins descritos acima.

Dum ponto de vista, puramente artístico, o filme apresenta-nos belas fotografias da Via Láctea no Touro (1943) e nos Gémeos (1945).

Usando a Fita de Diapositivos

1. Os campos de estrelas foram cuidadosamente localizados para cada série de fotografias de tal maneira que as posições das estrelas fossem quase idênticas.

Se as fotografias de cada série puderem ser passadas em rápida sucessão, verá as estrelas estacionárias enquanto que o movimento de Marte entre as estrelas é bastante nítido. Tudo se passa como se desenhar um ponto na margem esquerda dum bloco e for desenhando pontos em folhas diferentes, em que cada ponto se encontra à direita do anterior. Se passar rapidamente as folhas do bloco verá o ponto a deslocar-se da esquerda para a direita.

Passe as fotografias rapidamente e note as mudanças de posição de Marte e de Júpiter.

2. Projecte o filme num alvo de papel onde possa marcar as posições de Marte e as de algumas estrelas. Se a estrela padrão para cada fotografia for levada a coincidir com a primeira posição marcada no alvo, as posições de Marte podem ser marcadas com precisão, nas diferentes datas. A linha definida por estes pontos é a trajectória de Marte. Faça uma estimativa da data dos pontos de inversão de sentido, ou seja, quando Marte começa e quando acaba o seu movimento retrógrado.

Usando a escala de (10°) que aparece numa das fotografias pode determinar o diâmetro angular da trajectória retrógrada.

Compare os seus resultados com os valores médios que se encontram no *Texto*, página 16 de Unidade 2.

Durante 1943-44 e de novo em 1945-46, Júpiter e Marte estiveram em oposição quase na mesma altura.

Deste modo as fotografias mostram-nos, também, Júpiter no seu movimento retrógrado. Júpiter esteve em oposição em 11 de Janeiro de 1943, 11 de Fevereiro de 1944, 13 de Março de 1945, e 13 de Abril de 1946.

Marque as posições de Júpiter e determine a duração e o diâmetro angular da sua trajectória retrógrada. Compare os resultados com os valores médios do texto. Foi este tipo de informação que Ptolomeu, Copérnico e Kepler tentaram explicar fundamentados nas suas teorias.

EXPERIÊNCIA 2-6 A FORMA DA ÓRBITA DA TERRA

Ptolomeu e a maioria dos Gregos pensavam que o Sol se movia à volta da Terra. Mas, depois de Copérnico, foi gradualmente aceite a ideia de que é a Terra e os outros planetas que se movem à volta do Sol.

Embora o leitor provavelmente aceite o modelo de Copérnico, a observação directa não lhe dá motivos para preferir um ao outro. A olho nu vê-se o Sol mover no céu dia a dia numa trajectória que parece circular. Este movimento aparente do Sol é facilmente explicado se imaginarmos que a *Terra* executa uma rotação diária sobre si própria.

Mas o Sol também tem um movimento *anual* em relação às outras estrelas. Mesmo se argumentarmos que o movimento diário dos objectos no céu é devido ao movimento de rotação da Terra, ainda será possível imaginarmos a Terra como sendo o centro do Universo e o Sol a mover-se numa órbita anual à volta da Terra.

Medições simples mostram-nos que o diâmetro angular do Sol aumenta e diminui ligeiramente durante o ano, como se a sua distância à Terra variasse alternadamente.

No entanto, se considerarmos que o Sol se move à volta da Terra num círculo um pouco descentrado temos uma interpretação que se coaduna com estas observações. O objectivo deste trabalho prático será o de traçar a órbita do Sol tão correctamente quanto possível.

Traçado da Órbita do Sol

Em cada dia que se observa o Sol conhece-se a sua direcção. A partir do diâmetro observado, pode-se também determinar a sua distância relativamente à Terra. Assim, em cada observação podem-se marcar a direcção do Sol e a sua distância relativa à Terra. Unindo os pontos marcados obtém-se uma curva que representa a órbita aparente do Sol.

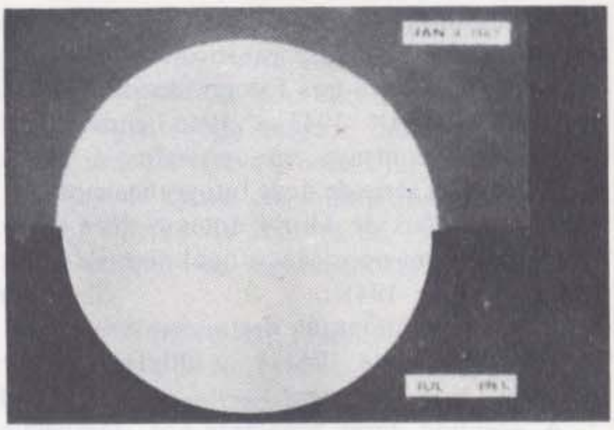
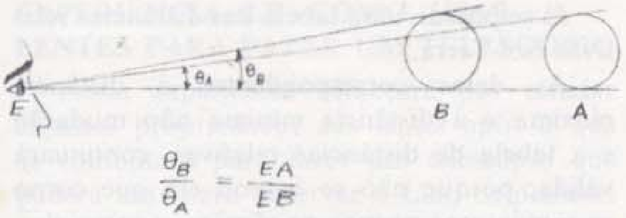


Fig. 1 Fotografia 4 do filme de diapositivos do Sol

Para observação ser-lhe-á fornecida uma série de fotografias obtidas pelo U. S. Observatory. Estas fotografias foram tiradas com cerca de um mês de intervalo e montadas

B.C. By John Hart



Quanto mais próximo o objecto se encontra do observador maior é o seu diâmetro angular. De facto, os ângulos θ_A e θ_B são inversamente proporcionais aos ângulos EA e EB:

$$\frac{\theta_B}{\theta_A} = \frac{EA}{EB}$$

Neste desenho EB $= \frac{3}{4}$ EA; portanto ângulo $\theta_B = \frac{3}{4}$ ângulo θ_A.

numa fita de diapositivos. Na fot. 4 as imagens do Sol em Janeiro e em Julho foram justapostas, tal como se reproduz na fig. 1. Pode assim ver-se qual a variação do diâmetro aparente do Sol durante o ano. Constate, também, como o diâmetro aparente dum objecto é função da distância a que este se encontra do observador.

Modo de Proceder

Utilize uma folha de papel milimétrico com cerca de 40 cm por 50 cm. Marque um ponto no centro da folha para representar a Terra. Torna-se necessário respeitar as dimensões indicadas para o papel, se for traçar a órbita de Marte (Experiências 2-8 e 2-9) que usa os resultados deste trabalho.

Desenhe a direcção 0° (correspondente a um ponto de referência situado entre as estrelas) de modo a ficar para o lado direito do papel.

Esta a direcção segundo o qual o Sol é visto da Terra a 21 de Março (fig. 2). As datas destas fotografias e as direcções do Sol, medidas no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio, a partir dos 0°, estão indicadas na tabela abaixo. Sirva-se de um transferidor para marcar correctamente cada um dos segmentos que emerge da Terra nas diferentes direcções.

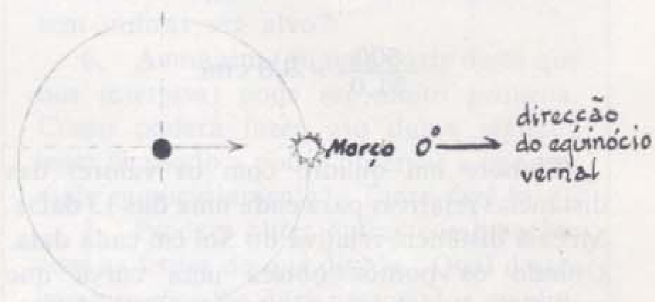
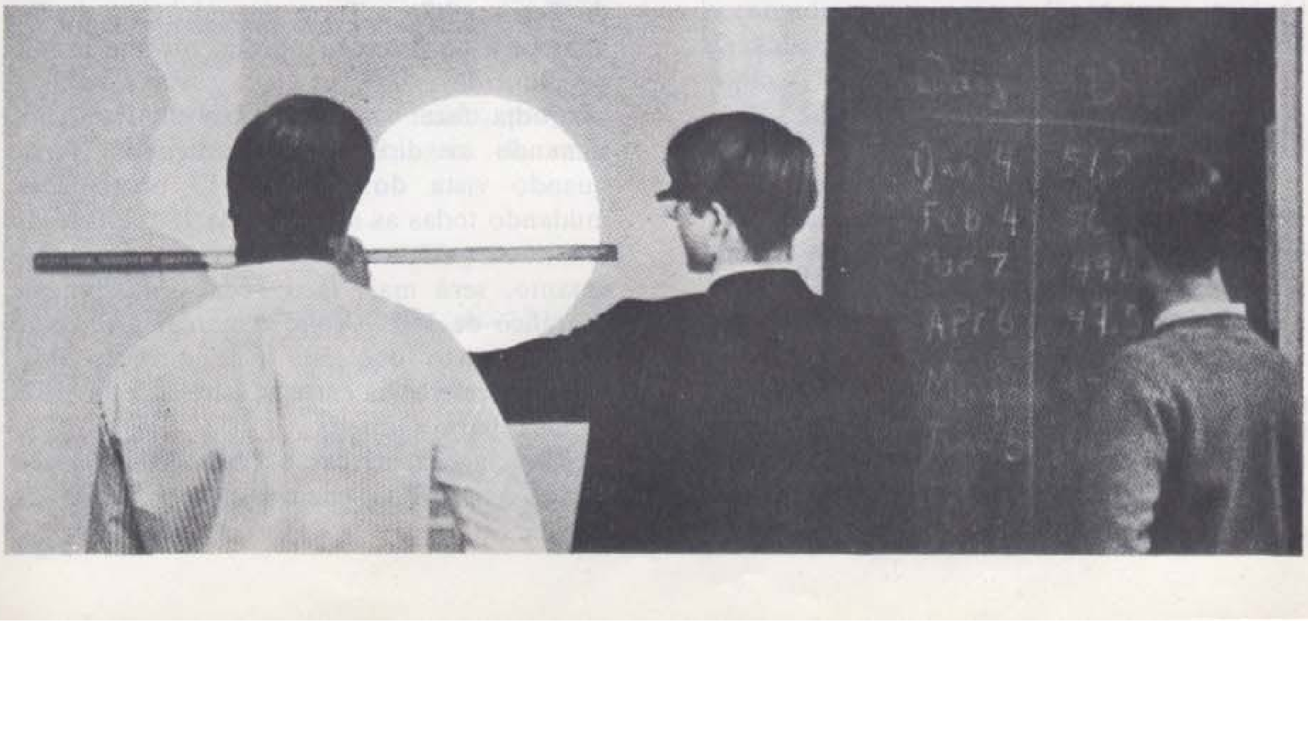


Fig. 2

Data	Direcção do Sol	Data	Direcção do Sol
21 Março	000°	4 Out.	191°
6 Abril	015	3 Nov.	220
6 Maio	045	4 Dez.	250
5 Junho	074	4 Jan.	283
5 Julho	102	4 Fev.	315
5 Agosto	132	7 Março	346
4 Set.	162		

Meça cuidadosamente o diâmetro da imagem projectada em cada uma das fotos da fita de diapositivos. O diâmetro aparente do Sol é inversamente proporcional à sua distância.



Pode obter um conjunto de valores da distância relativa do Sol, escolhendo uma constante e fazendo a razão entre esta e os diâmetros aparentes. Uma órbita com um raio de 10 cm será uma medida conveniente para utilização posterior. Se a medida do diâmetro do Sol for 50 cm, uma constante adequada será 500; visto que $\frac{500}{50} = 10$. Se o valor obtido para o diâmetro do Sol for maior que 50, a distância da Terra ao Sol virá menor que 10. Por exemplo, com um diâmetro de 51 cm

$$\frac{500}{51,0} = 9,8 \text{ cm.}$$

Elabore um quadro com os valores das distâncias relativas para cada uma das 13 datas. Meça a distância relativa do Sol em cada data. Unindo os pontos obterá uma curva que representa a órbita aparente do Sol relativamente à Terra.

Como as distâncias são apenas relativas, não se pode determinar a distância real da Terra ao Sol a partir destes dados.

1. A órbita obtida é um círculo? Se é, onde está colocado o centro? Se não é um círculo, que forma tem a curva?
2. Localize o eixo maior da órbita com base nos pontos onde o Sol passa mais perto e mais distante da Terra. Faça uma estimativa da data em que se deram, respectivamente, o afélio e o periélio. Qual a razão entre a distância maior e a distância menor?

Sistema Heliocêntrico

Copérnico e os seus sucessores adoptaram um modelo centrado no Sol, porque acreditavam que deste modo a descrição do sistema solar seria mais fácil. Não tinham, no entanto, nenhuns dados novos que não pudessem ser interpretados pelo modelo anterior.

O leitor deve ser então capaz de usar os mesmos dados para inverter a situação e traçar a órbita da Terra à volta do Sol. Evidentemente que vai encontrar algumas semelhanças entre as duas órbitas.

Já se possui uma tabela das distâncias relativas Sol-Terra.

As datas correspondentes à distância máxima e à distância mínima não mudarão e a tabela de distâncias relativas continuará válida, porque não se baseou em que corpo se movia mas apenas na distância entre eles. Apenas se alteram, portanto, as direcções usadas no gráfico anterior.

Para determinar como variam os ângulos lembre-se que, quando a Terra estava no centro do modelo o Sol estava na direcção 0° (para a direita) em 21 de Março.

3. Sendo assim, qual seria a direcção da Terra vista do Sol naquela data? Tente responder à pergunta antes de observar a fig. 3. Certifique-se que compreendeu o problema posto, antes de continuar.

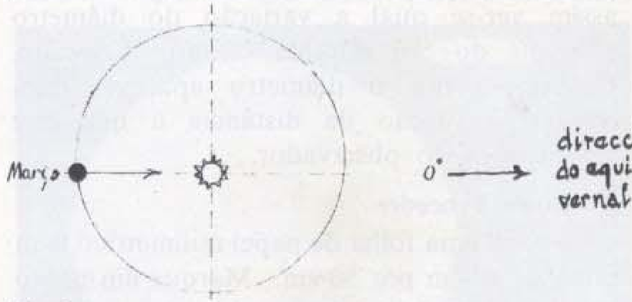


Fig. 3

Chegado a este ponto já estará provavelmente em condições de prever as conclusões a que vamos chegar. Talvez o possa fazer sem continuar o desenho. Se não o conseguir, eis como proceder:

Se o Sol está na direcção 0°, quando visto da Terra, então a Terra quando vista do Sol aparecerá na direcção oposta, ou seja a 180° do ponto 0°.

Podia fazer uma nova tabela de dados tomando as direcções aparentes da Terra, quando vista do Sol nas 13 observações, mudando todas as direcções de 180° e fazendo um novo gráfico com o Sol no centro. No entanto, será mais fácil rodar simplesmente o gráfico de 180°. Volte a marcar a direcção de 0° — visto que esta é a direcção dum ponto de referência entre as estrelas, está ainda voltada para a direita.

Pode agora marcar o centro como sendo o Sol, e a órbita como sendo a órbita da Terra.

EXPERIÊNCIA 2.7 COMO USAR LENTES PARA FAZER UM TELESCÓPIO

Nesta experiência começará por estudar algumas propriedades das lentes após o que as combinará para fazer um telescópio que poderá usar para observar a Lua, os planetas e outros corpos celestes (satélites da Terra).

A Lupa

Certamente tem já alguns conhecimentos sobre lentes, — por exemplo, a melhor maneira de utilizar uma lupa é segurá-la junto à vista e então mover o objecto que pretende examinar até que a imagem deste apareça bem focada.

Examine alguns objectos com a ajuda de diversas lentes. Use lentes de diferentes tamanhos e formas. Separe as lentes que aumentam das que não o fazem. Descreva as diferenças que encontra entre as lentes que aumentam e as outras.

> 1. Disponha as lentes de acordo com o seu poder amplificador. Para qual delas tem esta grandeza valor maior?
>
> 2. Qual das características f.sicas duma lente parece determinar o seu poder de amplificação — será o seu diâmetro, a sua espessura, a sua forma, a curvatura da sua superfície? Para variar o diâmetro das lentes, coloque sobre elas pedaços de papel ou de cartão com orifícios de diferentes dimensões.

Desenhe a secção principal de uma lente de grande poder de aumento, de uma lente de reduzido poder e de lentes com o máximo e o mínimo poder que possa imaginar.

Imagens Reais

Com uma das lentes que usou, projecte numa folha de papel a imagem de uma lâmpada acesa, ou a duma cena exterior. Descreva as propriedades da imagem que pode observar. Uma imagem que pode ser projectada num alvo denomina-se *imagem real.*

> 3. Será que todas as lentes de que dispõe dão imagens reais?
>
> 2. Qual a relação entre o tamanho da imagem e as características da lente utilizada?
>
> 5. Qual a posição em que se deve colocar, se quiser ver uma imagem real sem utilizar um alvo?
>
> 6. A imagem (ou uma parte desta que nos interessa) pode ser muito pequena. Como poderá fazer uso duma segunda lente de modo a poder observar a imagem mais minuciosamente? Tente fazê-lo.
>
> 7. Procure obter outras combinações com as lentes de que dispõe. Qual destas combinações lhe dará uma maior amplificação?

Como Fazer um Telescópio

Pode-se servir de duas lentes dispostas convenientemente para observar objectos distantes. A fig. 1 mostra uma associação simples de duas lentes para fazer um telescópio: uma lente grande (chamada a *objectiva*) através da qual a luz passa e uma de duas lentes permutáveis que são utilizadas como oculares.

As notas seguintes ajudá-lo-ão a montar o seu telescópio.

1. Se colocar a objectiva sobre uma superfície plana e polida verá que uma das faces da referida lente apresenta uma curvatura mais acentuada que a outra. Deve ter o cuidado de voltar esta face para o interior do telescópio.

2. Limpe bem as lentes (quer com um lenço bem limpo, quer com papel apropriado)

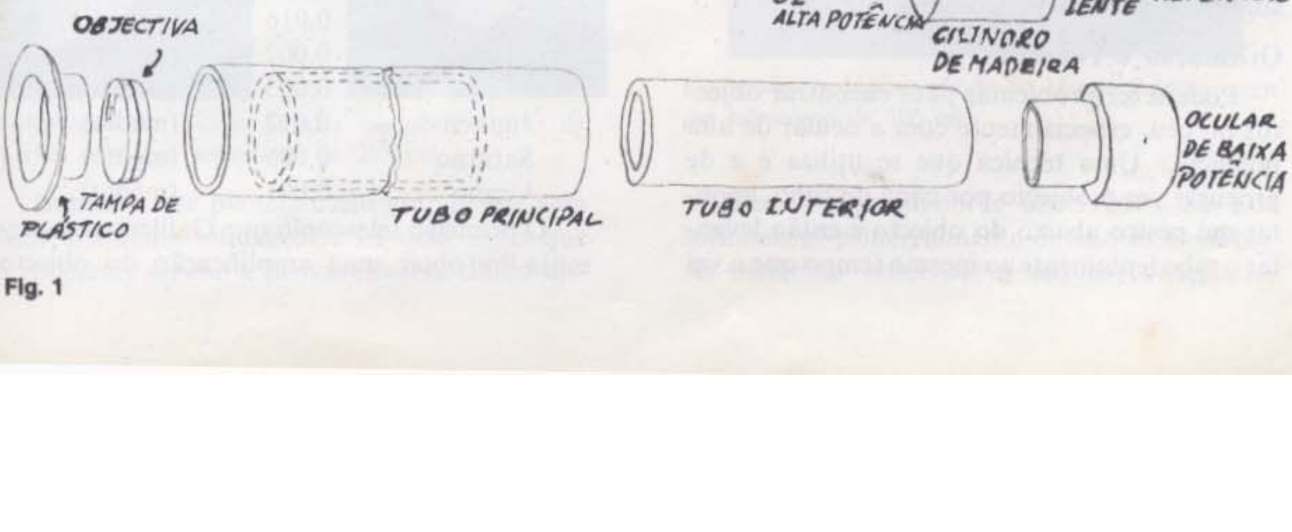


Fig. 1

antes de as montar e evite deixar impressões digitais sobre estas.

3. Coloque braçadeiras de borracha à volta da extremidade do tubo principal, na qual teve o cuidado prévio de fazer algumas ranhuras.

Assim obterá uma boa adaptação entre o tubo principal e o tubo interior. Aperte o suficiente para que haja um ajustamento perfeito, mas de modo a que o tubo interior se possa deslocar. Foque rodando o tubo interior como se se tratasse dum parafuso, mas não mova a ocular.

4. Quando usar a lente de alta potência é essencial o uso dum suporte rigido (tripé).

5. Certifique-se que a lente de ocular de alta potência está na posição devida.

Use o seu telescópio para observar objectos no interior e no exterior do laboratório. Com a lente de baixa potência consegue uma ampliação de cerca de 12× e com a lente de alta potência uma ampliação de cerca de 30×.

Montando o Telescópio

Para observações com a ocular de baixa potência, se não dispuser dum tripé, pode mesmo segurar o telescópio com as mãos. Segure o telescópio firmemente e afaste-o e aproxime-o de si, tanto quanto possível, apoiando os braços contra um suporte rígido, que poderá ser o tejadilho dum automóvel, um posto telefónico, etc.

Quando estiver a trabalhar com a ocular de alta potência terá que usar uma montagem própria. Se dispuser dum tripé de cabeça giratória, dos usualmente utilizados para as máquinas de filmar, poderá adaptar um pedaço de madeira ao parafuso que se encontra na cabeça do tripé e segurar o telescópio ao pedaço de madeira por meio de braçadeiras de borracha. Uma vez que os tripés da máquina de filmar são usualmente muito baixos para fazer as observações confortavelmente, sugere-se que esteja sentado.

Orientação e Focagem

Poderá ter problemas para encontrar objectos no céu, especialmente com a ocular de alta potência. Uma técnica que se utiliza é a de procurar ver o objecto por cima do tubo, apontar um pouco abaixo do objecto e então levantar o tubo lentamente ao mesmo tempo que o vai derivando um pouco para a direita e para a esquerda.

Ao focar, movendo o tubo interior segundo o eixo dos dois tubos, pode deslocar as peças do telescópio da posição conveniente. Para evitar que isto aconteça rode o tubo interior enquanto o está a mover, como se estivesse a aparafusá-lo.

Se usa óculos estes manterão a sua vista a uma distância da ocular maior do que a distância conveniente. As pessoas que têm problemas de miopia ou de presbitia conseguem normalmente melhores observações se trabalharem sem óculos. Observadores com astigmatismo têm que decidir entre uma imagem distorcida (sem óculos) ou um pequeno campo de visão (com óculos).

Muitos observadores consideram que conseguem fazer observações (procurar e focar o objecto) estando sempre a olhar através do telescópio desde que apoiem a face sobre o indicador e o polegar.

Quando trabalhar com um tripé, tire as mãos do telescópio enquanto estiver a fazer as observações para não fazer vibrar o instrumento.

Limitações do seu Telescópio

Poderá ter uma ideia da minúcia de pormenor que pode obter quando observar um planeta, se comparar o diâmetro angular deste com o poder resolvente do telescópio. Um telescópio com uma lente de diâmetro 2,5 cm, só distingue os pormenores se estes estiverem afastados pelo menos 0,001°, considerando esta distância medida do ponto de observação. A ocular de baixa potência do "Projecto Física" poderá não ser suficiente para mostrar esse detalhe, mas a ocular de alta potência será mais do que suficiente.

O diâmetro angular de alguns planetas quando vistos da Terra é:

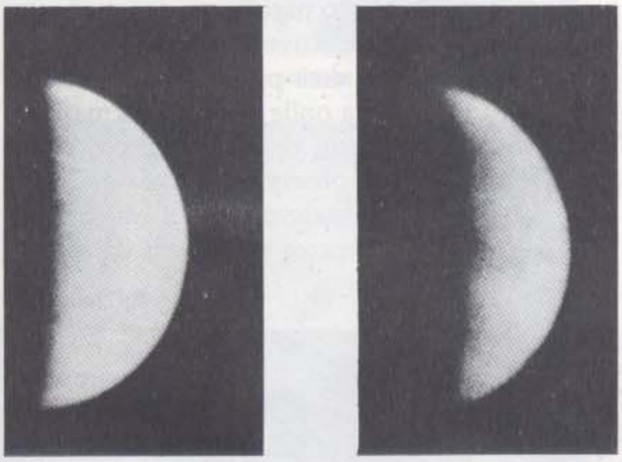
Vénus	0,003	(mínimo)
	0,016	(máximo)
Marte	0,002	(mínimo)
	0,005	(máximo)
Júpiter	0,012	(médio)
Saturno	0,005	(médio)
Úrano	0,001	(médio)

O primeiro telescópio que Galileu usou permitia-lhe obter uma amplificação do objecto de cerca de 3× e a melhor amplificação que ele conseguiu foi de cerca de 30× (para isso utilizou uma ocular com um campo de visão muito mais pequeno). Deve tomar este facto como um desafio no sentido de conseguir fazer todas as observações que ele fez às quais se faz referência na Sec. 7.7 do *Texto*.

Algumas Observações que Pode Realizar

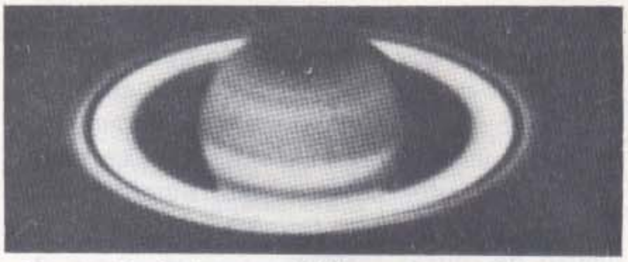
O conjunto de objectos que se sugere foi escolhido, porque são (1) fáceis de encontrar, (2) representativos do que pode observar no céu, e (3) muito interessantes. Deve observar estes objectos primeiro com a ocular de baixa potência e depois com a ocular de alta potência. Para obter algumas informações adicionais dos objectos de observação corrente consulte o livro *New Handbook of Heavens* ou as últimas páginas das revistas mensais *Sky and Telescope*, *Natural History*, ou *Science News*.

Vénus: Não verá pormenores importantes neste planeta, mas pode observar as suas fases, como se mostra nas fotografias abaixo e na pág. 79 do *Texto*. Quando Vénus está muito brilhante poderá precisar de reduzir a intensidade da luz que entra no telescópio para obter uma imagem mais nítida. Poderá utilizar um papel com o tamanho da lente com um furo no centro a fim de reduzir a intensidade luminosa (reduzindo no entanto o poder resolvente do telescópio). Poderá também usar óculos de sol como filtro.



Fotografias de Vénus obtidas no observatório de Yerkes com um telescópio de 205 cm.

Saturno: este planeta é tão grande que será fácil distinguir nitidamente os dois anéis que o rodeiam; ser-lhe-á provavelmente difícil dis-

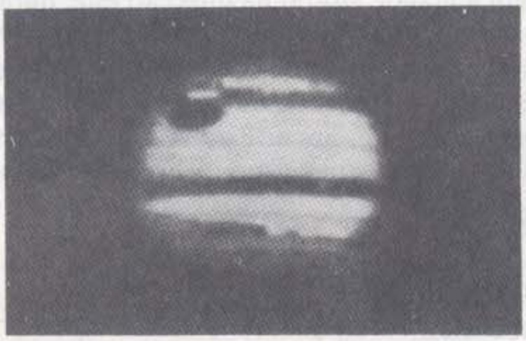


Fotografia de Saturno obtida no Monte Wilson com um telescópio de 250 cm.

tinguir, com a amplificação de 30× que lhe é dada pelo seu telescópio, a área que separa o anel mais próximo do próprio planeta. Compare as suas observações com o esquema da pág. 80 do *Texto*.

Júpiter: Observe os quatro satélites que Galileu descobriu. Faça observações com a diferença de algumas horas ou mesmo de um dia, para ver as mudanças de posição. Se colher informações durante vários meses pode determinar o período de cada num dos satélites, o raio das suas órbitas e a massa de Júpiter. (Veja as notas para o filme sem-fim, "A Órbita do Satélite de Júpiter", neste *Guia de Experiências*, as quais o poderão ajudar na análise das informações obtidas).

Júpiter é tão grande que alguns dos pormenores deste planeta — como, por exemplo, uma larga cintura formada por nuvens escuras que se encontra na zona equatorial do planeta, — podem ser detectados (especialmente se sabe de antemão que o vai observar naquela posição).



Fotografia de Júpiter obtida no Monte Palomar com um telescópio de 500 cm.

Lua: Os pormenores observados na Lua sobressaem principalmente devido às sombras. As melhores observações são as conseguidas na fase de quarto crescente e na fase de quarto minguante. Faça um esboço do que observou e compare-o ao de Galileu que se encontra na pág. 78 do *Texto*. Procure, cuidadosamente, escarpas, montanhas no centro das crateras, picos iluminados na parte não iluminada do planeta próximo do terminador e crateras dentro de outras crateras.

As Plêiades: Um pequeno agregado de estrelas, muito belo, que pode localizar sobre a pata direita do Touro na constelação do mesmo nome. Nas noites de Dezembro pode encontrar estas estrelas quase por cima da cabeça. As Plêiades foram um dos objectos que Galileu estudou com o seu primeiro telescópio. Ele contou 36 estrelas as quais o poeta Tennyson descreve como "um enxame de pirilampos emaranhado em fios de prata".

As Híadas: Esta constelação também é parte integrante da constelação do Touro e encontra-se perto da estrela Aldebarã que forma o olho do Touro. As Híadas têm o aspecto dum "V". A lente de alta potência poderá mostrar que várias estrelas que observa não são uma, mas sim duas estrelas.

A Nebulosa de Oríon: Observe a área situada, sensivelmente, a meio da espada formada por algumas das estrelas desta constelação. Pode encontrá-la no céu, na direcção sudeste durante os meses de Dezembro e Janeiro. Use a ocular de baixa potência.

Algol: Esta famosa estrela de brilho variável faz parte da constelação Perseu, a qual está a sul da Cassiopeia. Pode encontrar Algol a grande altura, na direcção este, durante o mês de Dezembro e aproximadamente na vertical do lugar durante Janeiro. Geralmente comporta-se como uma estrela de segunda grandeza tal como a Estrela Polar. Depois de nos mostrar um aspecto brilhante durante dois dias e meio, Algol vai reduzindo a intensidade luminosa durante cinco horas e torna-se uma estrela de quarta grandeza tal como as estrelas mais fracas da Ursa Menor. Então, a estrela de brilho variável vai aumentando o seu brilho durante cinco horas e retoma o brilho normal. O período que decorre entre dois mínimos é de dois dias, vinte horas e quarenta e nove minutos.

A Grande Nebulosa em Andrómeda: Procure esta nebulosa no céu, a grande altura, na direcção oeste, no começo da noite, durante o mês de Dezembro. Durante o mês de Janeiro ela estará mais baixa no horizonte. Aparecer-lhe-á como uma mancha luminosa de contorno mal definido e conseguirá uma melhor observação com a ocular de baixa potência. A luz que vê irradiar desta galáxia percorreu o trajecto que a separa da Terra desde há aproximadamente dois milhões de anos.

A Via Láctea: É particularmente brilhante nas regiões da Cassiopeia e do Cisne.

Vê-la-á facilmente se a poluição do ar na área em que se encontra o permitir.

Observando as Manchas Solares: NÃO OLHE PARA O SOL ATRAVÉS DO TELESCÓPIO. A LUZ SOLAR FERIR-LHE-Á A VISTA. A fig. 2 mostra a montagem dum tripé, do telescópio com a ocular de baixa potência e duma folha de papel para projectar as manchas solares. Faça um orifício num pedaço de cartão para que o possa adaptar convenientemente à extremidade do telescópio. Este actuará como uma protecção a fim de ter uma área de sombra onde pode ver as manchas solares. Use a ocular de alta potência, foque o telescópio e tente observar objectos distantes. Então, projecte a imagem do Sol numa folha de papel branco a cerca de 70 cm da ocular.

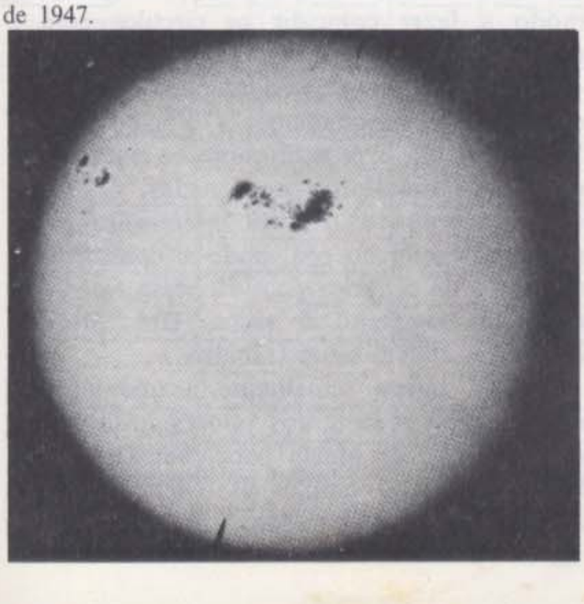
B.C. By John Hart

Foque a imagem movendo o tubo interior suavemente, puxando-o para fora. Quando a imagem estiver no foco pode ver algumas manchas escuras no papel. Para distinguir as manchas solares no papel mova-o ligeiramente para a frente e para trás. Como pode dizer que as manchas não são provocadas pelas lentes?

Fig. 2

Obtendo a imagem mais longe do telescópio, pode conseguir uma imagem maior e com menos brilho. Pode ser que movendo o papel consiga uma melhor imagem do que se mover o tubo que contém a ocular.

Fotografia das manchas solares obtida a 7 de Abril de 1947.



EXPERIÊNCIA 2.8 A ÓRBITA DE MARTE

Nesta experiência obter-se-á a órbita de Marte à volta do Sol pelo mesmo método que Kepler usou na descoberta de que as órbitas dos planetas eram elípticas. Como as observações são feitas da Terra, necessitar-se-á da órbita desta que foi obtida na Experiência 2.6, "A Forma da Órbita da Terra". Certifique-se que o gráfico a utilizar nesta experiência representa a órbita da Terra à volta do Sol e não a do Sol à volta da Terra.

Se não se realizou a experiência para obter a forma da órbita da Terra, pode-se usar, para órbita aproximada, uma circunferência de 10 cm de raio a qual se desenhará no centro duma folha de papel de gráfico (40 × 50 cm). Como a excentricidade da órbita da Terra é muito pequena (0,017) pode-se colocar o Sol no centro da órbita sem o risco de introduzir um erro apreciável nos resultados da experiência.

Desenhe-se uma semi-recta a partir do Sol e para a direita, segundo a direcção horizontal do quadriculado do papel (fig. 1). Marque-se a semi-recta como a direcção 0°. Esta semi-recta vai encontrar a esfera celeste num ponto chamado o equinócio vernal e é a origem a partir da qual se marcam os ângulos no plano da órbita da Terra (plano da eclíptica). A Terra atravessa esta direcção a 23 de Setembro. A 21 de Março, quando a Terra está no lado oposto da sua órbita, o Sol está entre a Terra e o equinócio vernal.

Observações Fotográficas de Marte

Usar-se-á uma colecção contendo 16 ampliações de partes de fotografias que mostram Marte entre as estrelas. Estas fotografias foram obtidas em várias ocasiões entre 1931 e 1950, pelo Harvard Observatory Sky Patrol. Em

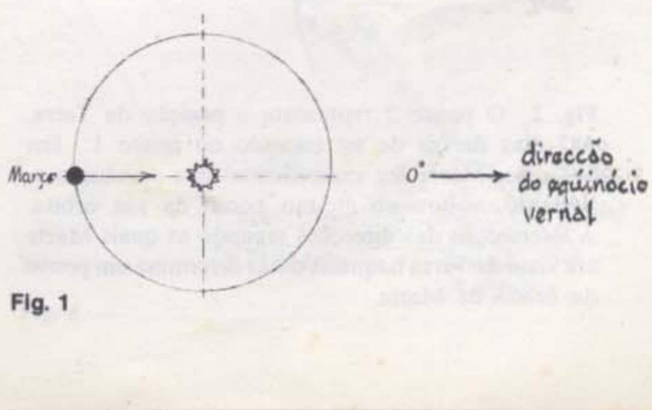


Fig. 1

algumas destas fotografias Marte estava muito perto do centro; no entanto em muitas outras Marte estava próximo da margem onde as imagens das estrelas estão deformadas. Apesar de estas deformações, as fotografias podem ser utilizadas satisfatoriamente para obter posições de Marte. A fotografia P é uma dupla exposição mas é ainda bastante aceitável.

A variação da posição relativa das estrelas é muito lenta. Somente algumas estrelas que se encontram muito próximo do Sol têm um movimento suficientemente grande para poder ser detectado com os telescópios mais potentes. Por conseguinte, pode-se considerar que as estrelas estão fixas.

Tentando Encontrar a Posição de Marte

Marte move-se continuamente entre as estrelas mas mantém-se sempre perto da eclíptica. A partir de algumas centenas de milhares de fotografias tiradas no Observatório de Harvard, foram seleccionadas dezasseis com a ajuda dum computador, para fornecer pares de fotografias, tiradas com um intervalo de 687 dias, que é aproximadamente o valor determinado por Copérnico para o período de revolução de Marte em torno do Sol. Por conseguinte, cada par de fotografias mostra Marte num ponto da sua órbita.

Durante estes 687 dias a Terra completa quase dois ciclos da sua órbita, visto que necessitaria de mais 43 dias para o fazer. Por conseguinte, a posição da Terra não será a mesma para cada par de observações. Se se conseguir determinar a direcção segundo a qual Marte é visto da Terra para cada uma das fotografias do par, as duas direcções devem intersectar-se num ponto da órbita de Marte (veja a fig. 2).

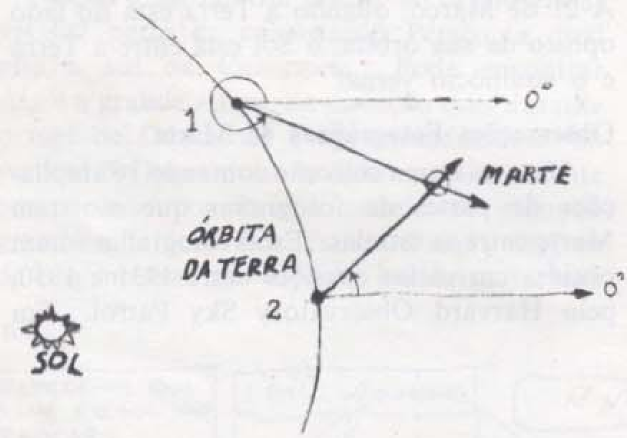


Fig. 2 O ponto 2 representa a posição da Terra, 687 dias depois de ter passado no ponto 1. Em 687 dias, Marte fez exactamente uma revolução e, portanto, voltou ao mesmo ponto da sua órbita. A intersecção das direcções segundo as quais Marte era visto da Terra naquelas datas determina um ponto da órbita de Marte.

Sistema de Coordenadas Usado

Quando se olha para o céu não se vê nenhum sistema de coordenadas. Os sistemas de coordenadas foram criados para as mais diversas aplicações. O sistema usado aqui toma como base a eclíptica. Lembre-se que a eclíptica é a linha imaginária na esfera celeste ao longo da qual o Sol parece mover-se.

As *longitudes* ao longo da eclíptica são sempre medidas para Este do ponto 0° (o equinócio vernal); isto é, para a esquerda nas cartas celestes. As *latitudes* são medidas perpendicularmente à eclíptica e tomam valores compreendidos entre 0 e 90° a sul ou a norte. O ligeiro movimento de Marte acima e abaixo da eclíptica é considerado na Experiência 2.9 "A Inclinação da Órbita de Marte".

Para determinar as coordenadas duma estrela ou as de Marte deve-se projectar o sistema de coordenadas no céu. Para o conseguir são fornecidos desenhos em transparente que mostram o sistema de coordenadas da eclíptica para cada fotografia de A a P. A posição de várias estrelas está assinalada com um círculo. Sobreponha e ajuste de modo a fazer coincidir os círculos com a posição das respectivas estrelas. Então, poder-se-á ler os valores das coordenadas (longitude e latitude) correspondentes a esta posição de Marte. A fig. 3 mostra como se pode interpolar entre duas linhas coordenadas. Como em cada fotografia só se está interessado numa pequena secção do céu, pode-se considerar o segmento da eclíptica contido nessa fotografia como um segmento de recta. Uma precisão de $\frac{1}{2}$° é aceitável neste trabalho.

Numa tabela semelhante à que aqui se mostra, tome-se nota dos valores da longitude e da latitude de Marte para cada fotografia. Para um gráfico simples da órbita de Marte à volta do Sol, só se usará a primeira coluna

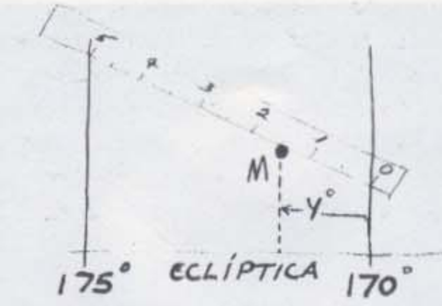


Fig. 3 Interpolação entre linhas coordenadas. No esboço, Marte (M) está a uma distância y° da direcção 170°. Faça uma escala, num cartão de pelo menos 10 cm de comprimento, dividindo o papel em 10 partes. Tome cada duas partes como unidade e marque as correspondentes divisões de 0 a 5. Isto lhe dará uma escala de 0,5°. Note que nesta escala os números vão da direita para a esquerda. Coloque a escala de modo a que a margem graduada passe pela posição de Marte. Rode-a de modo a que o 0 e o 5 se situem sobre uma das rectas marcadas. Leia o valor de y na escala. No esboço y = 1,5°, portanto, a longitude de M é 171,5°.

— a longitude de Marte. As colunas correspondentes à latitude, distância do Sol a Marte e das coordenadas do centro do Sol, serão usadas se também se estudar a inclinação da órbita de Marte.

Posições de Marte Observadas

Fotografia	Data	Long. Geoc.	Lat. Geoc.	Distância de Marte à Terra	Distância de Marte ao Sol	Long. Helioc.	Lat. Helioc.
A	21 de Mar. de 1931						
B	5 de Fev. de 1933						
C	20 de Ab. de 1933						
D	8 de Mar. de 1935						
E	26 de Mai. de 1935						
F	12 de Ab. de 1937						
G	16 de Set. de 1939						
H	4 de Ag. de 1941						
I	22 de Nov. de 1941						
J	11 de Out. de 1943						
K	21 de Jan. de 1944						
L	9 de Dez. de 1945						
M	19 de Mar. de 1946						
N	3 de Fev. de 1948						
O	4 de Ab. de 1948						
P	21 de Fev. de 1950						

Determinação da Órbita de Marte

Quando a tabela estiver completa para os 8 pares de observações, estará pronto a localizar pontos da órbita de Marte.

1. No esquema da órbita da Terra localize a posição desta na data em que cada uma das 16 fotografias foram tiradas. Pode fazê-lo por interpolação a partir das datas que conhece para a experiência "A Órbita da Terra". Sabendo que a Terra percorre 360° em cerca de 365 dias, conclui-se que cada dia corresponde aproximadamente a 1°. Por exemplo, a fotografia A foi tirada a 21 de Março. A Terra estava na posição 166° a 7 de Março: 14 dias mais tarde, ou seja, a 21 de Março, a Terra deve ter-se movido cerca de 14° pelo que se deve encontrar na posição 180°. Efectue os seus cálculos tomando sempre a posição da Terra numa data o mais próximo possível da data em que Marte foi fotografado.

2. Por cada ponto da órbita da Terra faça uma recta "0°" paralela à recta que passa pelo Sol e pelo equinócio vernal (os próprios traços do papel milimétrico podem ajudá-lo). Use um transferidor e um lápis afiado para marcar o ângulo entre a direcção 0° e a direcção de Marte naquela data, como se fosse visto da Terra (longitude de Marte). As direcções desenhadas a partir das posições da Terra por cada par de fotografias intersectam-se num ponto da órbita de Marte. A fig. 4 mostra um ponto da órbita de Marte obtido a partir dos dados do primeiro par de fotografias. Como se dispõe de 8 pares de fotografias, podem-se obter 8 pontos da órbita de Marte.

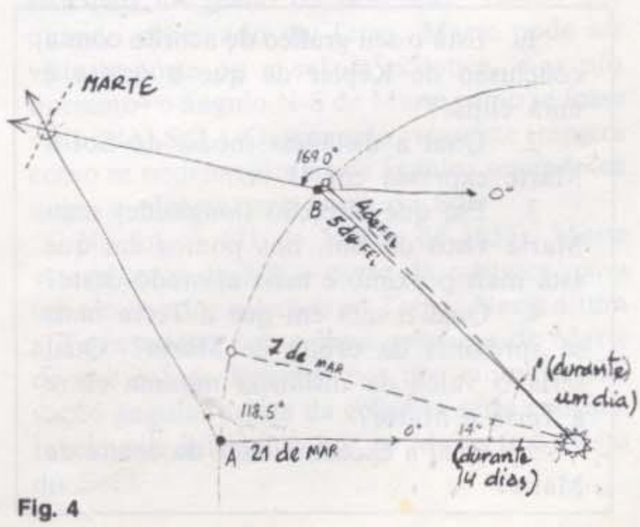
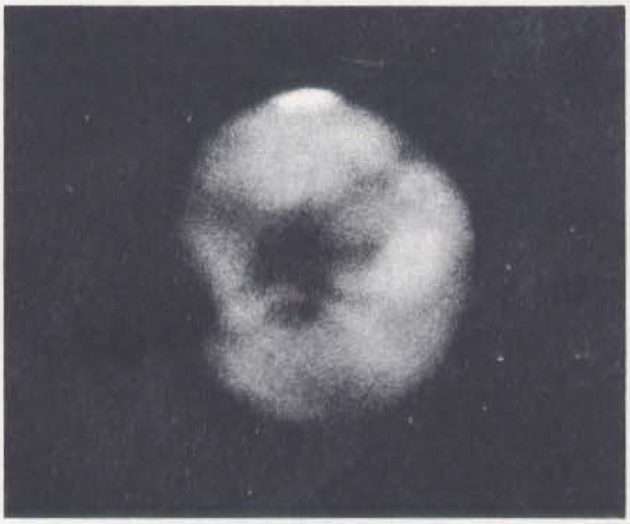


Fig. 4



Fotografias de Marte obtidas com um telescópio de reflexão de 150 cm (Observatórios do Monte Wilson e do Monte Palomar) quando Marte esteve mais próximo da Terra em 1956. À esquerda: a 10 de Agosto; à direita: a 11 de Setembro. Note a diminuição de tamanho da calote polar.

3. Poderá notar que não há nenhum ponto numa certa secção da órbita. No entanto pode traçar a parte restante, porque a órbita é simétrica em relação ao eixo maior. Use um compasso e tente encontrar a circunferência que melhor se ajuste aos pontos marcados. Talvez consiga obter um escantilhão no gabinete de desenho ou no de matemática.

Agora, que já traçou a órbita, conseguiu aquilo que se propunha fazer, ou seja, determinar a trajectória de Marte em torno do Sol.

Leis de Kepler

Se tiver tempo para continuar, valerá a pena ver até que ponto o seu gráfico está de acordo com a generalização feita por Kepler a respeito das órbitas planetárias.

1. Está o seu gráfico de acordo com a conclusão de Kepler de que a órbita é uma elipse?
2. Qual a distância média do Sol a Marte expressa em U. A.?
3. Em que direcção (longitude) seria Marte visto do Sol, nos pontos em que está mais próximo e mais afastado deste?
4. Qual o mês em que a Terra mais se aproxima da órbita de Marte? Qual seria o valor da distância mínima entre a Terra e Marte?
5. Qual a excentricidade da órbita de Marte?

6. Está o seu gráfico da órbita de Marte de acordo com a lei das áreas de Kepler, a qual estabelece que uma recta traçada do Sol para o planeta varre áreas proporcionais aos intervalos de tempo?

Pode ver na sua órbita que Marte estava no ponto B′ a 5 de Fevereiro de 1933 e no ponto C′ a 20 de Abril do mesmo ano, como se mostra na fig. 5. Na tabela que obteve, há oito meses de datas como a acabada de referir, em que os intervalos de tempo são diferentes para cada par.

Una por meio de um segmento de recta o *Sol* a cada um dos pontos dum par, fig. 5. Determine a área delimitada pelos dois segmentos de recta e pela órbita de Marte, para o que será suficiente contar o número de quadrados do papel milimétrico inscrito na fig. (conte um quadrado desde que mais de metade dele esteja contido na área determinada por estas três linhas). Divida a área obtida pelo número de dias no intervalo de modo a determinar um valor para a "área varrida por dia". Repita o processo para cada par e verifique se os valores obtidos são muito próximos.

7. Veja qual a variação em percentagem dos valores obtidos.
8. Qual é o valor da incerteza nas suas medições das áreas?

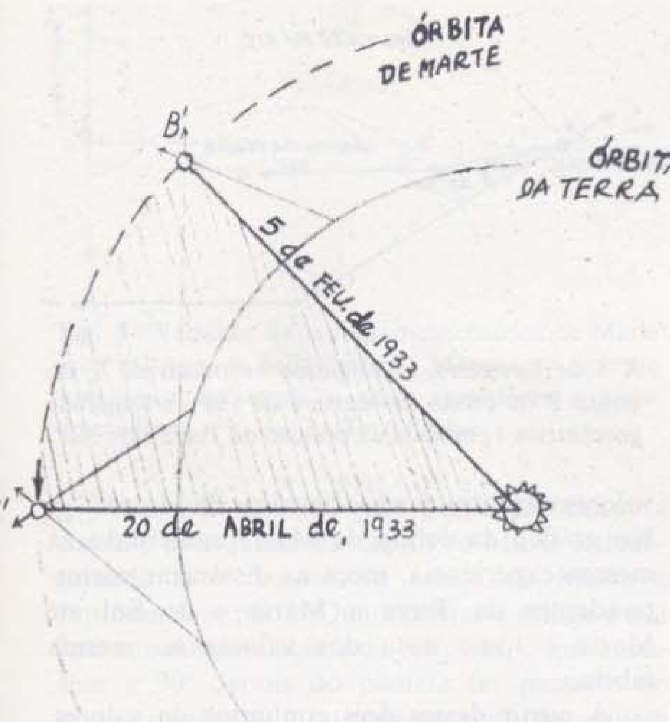


Fig. 5 Neste exemplo o intervalo de tempo é de 74 dias

> 9. Será que o valor da incerteza é o mesmo, tanto para a medição de áreas grandes, como para a medição de áreas pequenas?
>
> 10. Os seus resultados evidenciam a lei das áreas de Kepler?

EXPERIÊNCIA 2.9 INCLINAÇÃO DA ÓRBITA DE MARTE

Quando traçou a órbita de Marte na experiência 2.8, não tomou em conta o ligeiro movimento do planeta acima e abaixo da eclíptica. Este movimento de Marte a norte e a sul de eclíptica mostra que o plano da sua órbita é ligeiramente inclinado em relação ao plano da órbita da Terra. Agora, pode-se utilizar a coluna da tabela de valores correspondentes à latitude de Marte (construída na exp. 2.8), para determinar a inclinação da órbita do planeta.

Comece por fazer um modelo tridimensional das suas órbitas para ter a noção do significado da expressão "a inclinação das duas órbitas". Pode fazê-lo rapidamente com dois pedaços de cartão (7,5 × 12,5 cm). Em cada um dos cartões desenhe uma circunferência ou uma elipse, tendo o cuidado de desenhar uma maior que a outra. Marque a posição do foco (Sol) em cada cartão. Num dos cartões faça uma pequena ranhura do bordo esquerdo deste *até ao Sol.* No outro faça o mesmo mas agora do bordo direito do cartão até ao Sol. Interpenetre os cartões de modo a que as posições do Sol sejam coincidentes. Experimente inclinar os cartões (planos das órbitas) a ângulos diferentes (fig. 1).

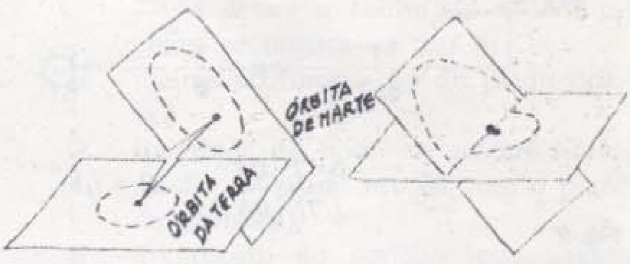


Fig. 1

Teoria

A partir de cada uma das 16 fotografias usadas na experiência anterior, pode-se determinar a latitude (ângulo com a eclíptica) de Marte em cada ponto do seu plano orbital. Cada um destes ângulos é medido numa fotografia *tirada da Terra.* Contudo, como se pode ver a partir da fig. 1, é o Sol e não a Terra que está no centro da órbita de Marte. Portanto, a inclinação da órbita de Marte é um ângulo que deve ser medido como se ele fosse visto *do Sol.* É este ângulo (a latitude heliocêntrica) que se pretende calcular.

A fig. 2 mostra que Marte pode ser representado pela cabeça de um alfinete cujo bico está fixo no plano da eclíptica. Vemos que quando observado da Terra, Marte pode ser visto a norte ou a sul da eclíptica, mas nós queremos o ângulo N-S de Marte como se fosse visto do Sol. O exemplo seguinte mostra como se podem calcular os ângulos segundo os quais o planeta seria visto do Sol.

Na fot. A (21 de Março de 1933), Marte estava cerca de 3,2° a norte da eclíptica, para um observador *colocado na Terra.* Nessa altura a Terra estava muito mais próxima de Marte do que o Sol. Percebe, por que motivo a elevação angular acima da eclíptica seria consideravelmente inferior a 3,2° se Marte fosse visto do Sol?

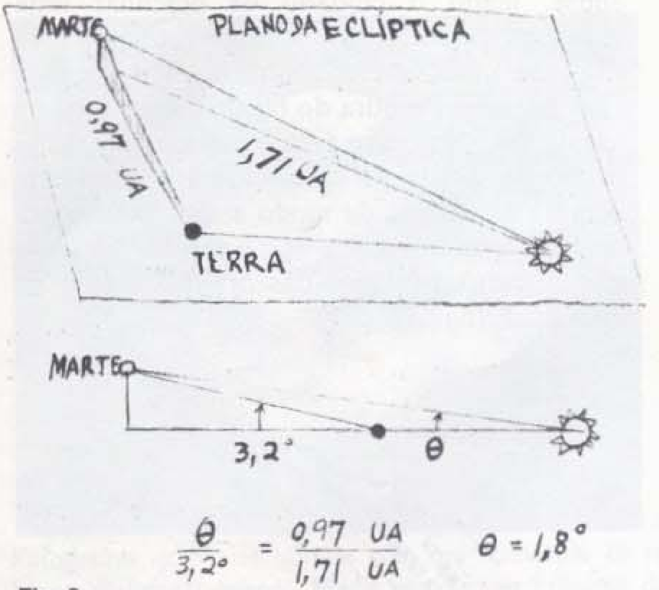


Fig. 2

As dimensões angulares aparentes são, para ângulos pequenos, aproximadamente proporcionais aos inversos das distâncias. Por exemplo, se a distância de Marte ao Sol fosse o dobro da distância de este planeta até à Terra, o ângulo segundo o qual um objecto em Marte seria visto do Sol seria aproximadamente metade do ângulo segundo o qual seria visto da Terra.

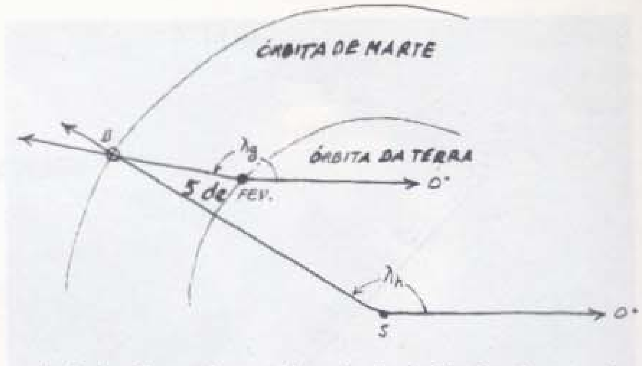
Medições efectuadas no gráfico da órbita de Marte (Experiência 2.8) indicam como valor da medida da distância de Terra a Marte 9,7 cm (0,97 UA) e para a medida da distância do Sol até Marte 17,1 cm (1,71 UA) na data em que a fotografia foi tirada. A latitude heliocêntrica de Marte é então:

$$\frac{9{,}7}{17{,}1} \times 3{,}2°N = 1{,}8°N$$

Pode-se confirmar este valor determinando a latitude heliocêntrica deste mesmo ponto da órbita de Marte na fot. B (5 de Fev. de 1933). Nesta data a Terra estava num ponto diferente da sua órbita e portanto a latitude geocêntrica e a distância Terra–Marte serão diferentes, mas a latitude heliocêntrica deverá ser a mesma, dentro do erro previsto para a sua incerteza experimental.

Efectuando as Medições

Use a tabela de dados que foi construída na Experiência 2.8, na qual se tomou nota dos



A 5 de Fevereiro, a longitude heliocêntrica λ_h do ponto B da órbita de Marte é de 150°; a longitude geocêntrica λ_g medida da posição da Terra é de 169°.

valores das latitudes geocêntricas de Marte (λ_g). No gráfico da órbita de Marte construído na mesma experiência, meça as distâncias correspondentes da Terra a Marte e do Sol até Marte e tome nota dos valores na mesma tabela.

A partir destes dois conjuntos de valores, calcule as latitudes heliocêntricas como já foi explicado. Os valores da latitude heliocêntrica calculados a partir das duas fotografias de cada par (A e B, C e D, etc.) devem concordar dentro dos limites de precisão do seu método experimental.

No esquema da órbita de Marte meça a *longitude heliocêntrica* λ_h, para cada uma das 8 posições de Marte. A longitude heliocêntrica é medida a partir do Sol, mais precisamente a partir da direcção 0° (direcção que contém o equinócio vernal) e no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio.

Complete a tabela da Experiência 2.8 com os valores das distâncias da Terra a Marte e do Sol a Marte, os valores das latitudes geocêntricas e heliocêntricas e os das longitudes geocêntrica e heliocêntrica para cada uma das 16 fotografias.

Faça um gráfico, como o da fig. 3, que mostra a variação da latitude heliocêntrica de Marte com a variação da longitude heliocêntrica do planeta.

A partir do gráfico podem-se determinar dois parâmetros da órbita de Marte em relação à eclíptica. O ponto em que Marte atravessa a eclíptica de sul para norte chama-se o *nodo ascendente* (o *nodo descendente*, no outro lado da órbita é o ponto em que Marte atravessa a eclíptica de norte para sul).

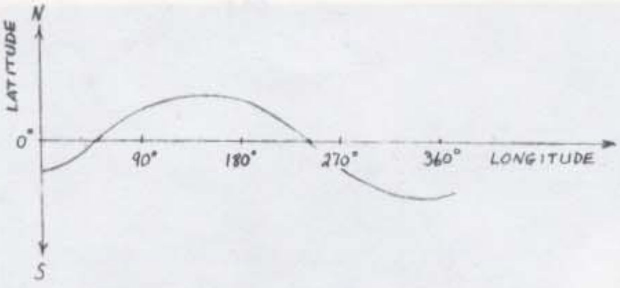


Fig. 3 Variação da latitude heliocêntrica de Marte com a longitude heliocêntrica. Marque no desenho a eclíptica, a latitude, o nodo ascendente, o nodo descendente e a inclinação da órbita.

O ângulo definido pelo plano da órbita da Terra e pelo plano da órbita de Marte é denominado a *inclinação* da órbita de Marte e representa-se por *i*. Quando Marte atinge a sua latitude máxima acima da eclíptica, o que acontece a 90º depois do planeta ter passado no *nodo ascendente*, a latitude máxima do planeta e a *inclinação i* da órbita, são iguais.

Parâmetros duma Órbita

Para definir a posição do plano da órbita de Marte em relação ao do plano da eclíptica são necessários dois ângulos, a *longitude do nodo ascendente*, Ω, e a *inclinação i*. É necessário mais um ângulo para orientar a órbita de Marte no seu plano orbital. Este ângulo chamado o *argumento de periélio* ω, na fig. 4, é o ângulo no *plano da órbita* formado pela direcção do nodo ascendente com a direcção do periélio (ambas as direcções são consideradas a partir do Sol). No seu gráfico da órbita de Marte meça o ângulo Ω formado pela direcção do nodo ascendente com a direcção do periélio para obter o argumento do periélio ω.

Se chegou até este ponto, já determinou cinco dos seis parâmetros que definem qualquer órbita:

- *a* — Semi-eixo maior ou distância média (parâmetro que determina o período)
- *e* — excentricidade (é dada pelo quociente c/a e define a forma da órbita, tal como se mostra na fig. 4)
- *i* — inclinação (inclinação do plano orbital)
- Ω — longitude do nodo ascendente (intersecção do plano orbital com o plano da eclíptica).
- ω — argumento do periélio (este ângulo define a orientação da órbita no seu plano).

Estes cinco parâmetros (os quais se mostram na fig. 4) dão-nos a dimensão e forma da órbita, definem a posição no espaço do plano orbital de qualquer planeta ou cometa e ainda a orientação da órbita no plano orbital. Para poder calcular um horário completo ou efeméride do astro que está a estudar, basta-lhe conhecer uma data origem para início de contagem dos tempos. Geralmente, define-se *T* como o instante que o planeta passa pelo periélio. A fotografia *G* foi tirada a 16 de Setembro de 1933. A partir dela pode fazer uma estimativa da data em que Marte passou no periélio.

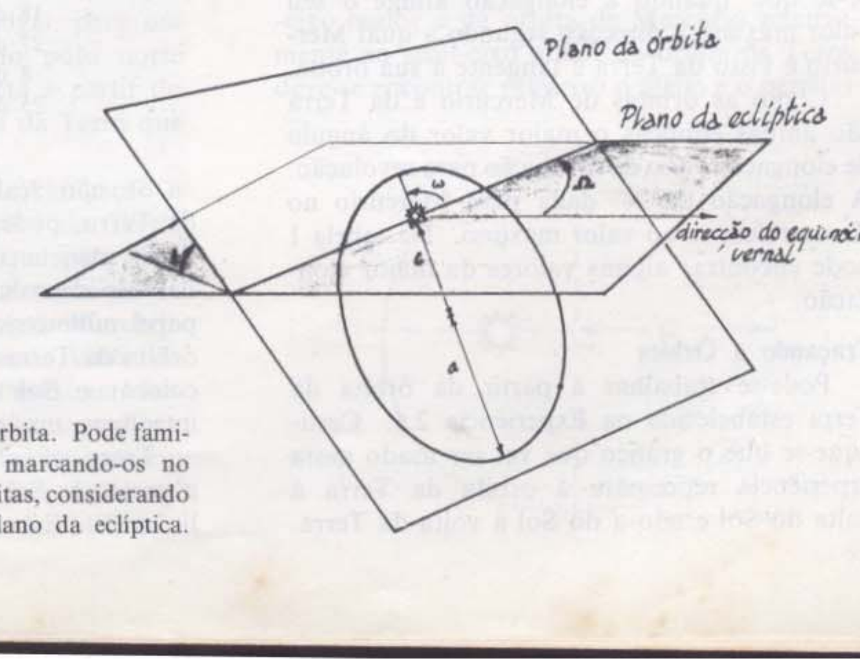


Fig. 4 Os seis parâmetros duma órbita. Pode familiarizar-se com estes parâmetros marcando-os no modelo tridimensional das duas órbitas, considerando que a órbita da Terra está no plano da eclíptica.

EXPERIÊNCIA 2.10 A ÓRBITA DE MERCÚRIO

Mercúrio, o planeta mais interior do sistema solar, nunca se encontra no céu muito afastado do Sol. Só pode ser observado perto do horizonte, antes do nascer do Sol ou um pouco após o pôr do Sol e mesmo assim a sua observação torna-se difícil devido ao clarão do Sol.

Mercúrio tem a órbita com a segunda maior excentricidade ($e = 0{,}206$) do nosso sistema solar. A maior é a de Plutão o qual difere em vários aspectos dos outros planetas. A grande excentricidade da órbita de Mercúrio teve particular importância, pois que serviu aos cientistas para uma das verificações da Teoria da Relatividade Generalizada de Einstein. Para um planeta cuja órbita se encontra no interior da órbita da Terra há um método mais simples para traçar a sua órbita do que o utilizado para a órbita de Marte. Nesta experiência esse método será usado para determinar a forma aproximada da órbita de Mercúrio.

Elongações de Mercúrio

Vamos utilizar uma concepção heliocêntrica para o sistema solar. A órbita de Mercúrio pode ser obtida a partir dos ângulos de elongação máxima de Mercúrio a este e a oeste do Sol como se fosse visto da Terra em diferentes datas.

O ângulo (fig. 1) segundo o qual um observador colocado na Terra veria o Sol e Mercúrio é denominado "elongação". Repare-se que quando a elongação atinge o seu valor máximo, a direcção segundo a qual Mercúrio é visto da Terra é tangente à sua órbita.

Como as órbitas de Mercúrio e da Terra são ambas elípticas, o maior valor do ângulo de elongação varia de revolução para revolução. A elongação de 28° dada para Mercúrio no *Texto* refere-se ao valor máximo. Na tabela 1 pode encontrar alguns valores da maior elongação.

Traçando a Órbita

Pode-se trabalhar a partir da órbita da Terra estabelecida na Experiência 2.6. Certifique-se que o gráfico que vai ser usado nesta experiência representa a órbita da Terra à volta do Sol e não a do Sol à volta da Terra.

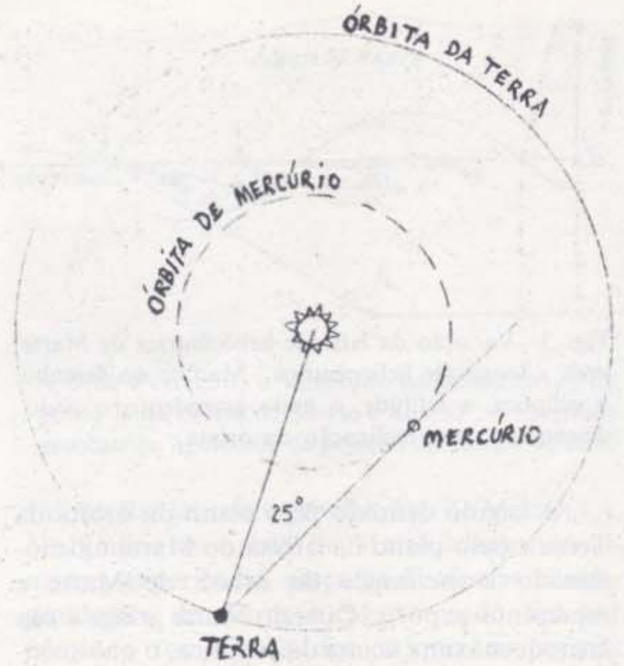


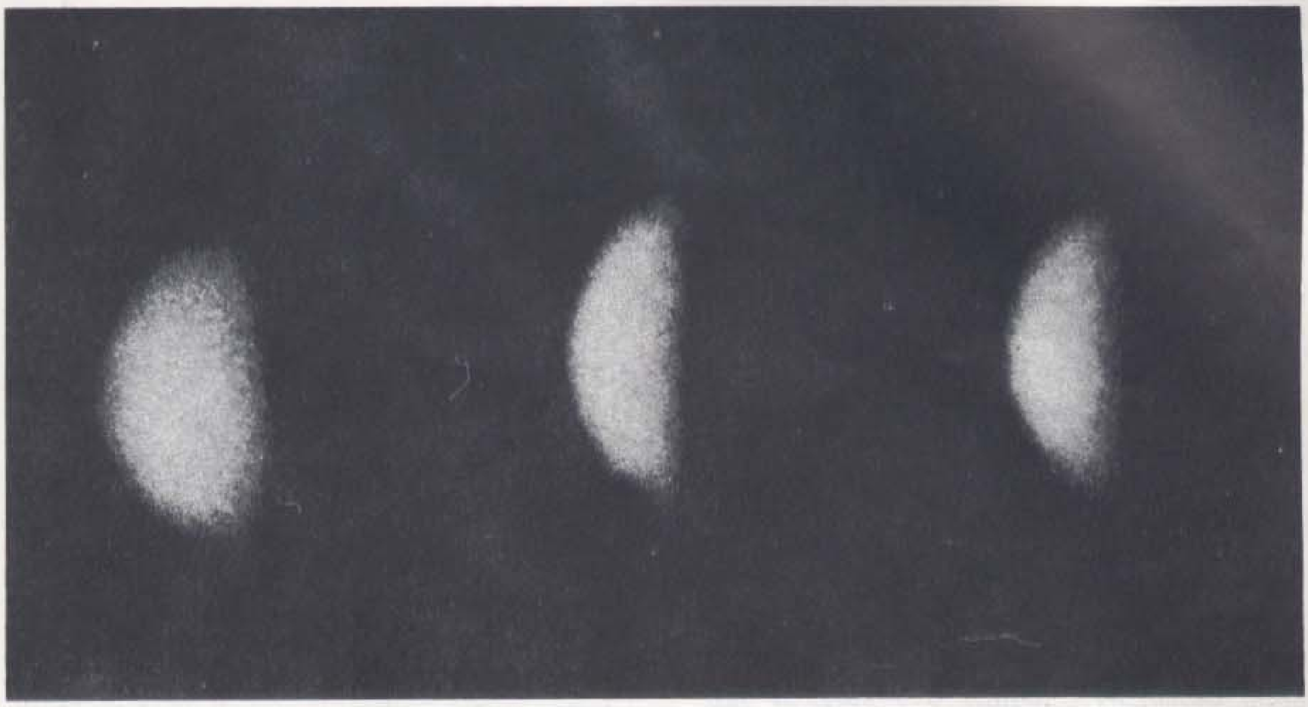
Fig. 1 A maior elongação oeste de Mercúrio, 25 de Maio de 1964. A elongação teve o valor 25° oeste.

TABELA 1 ALGUMAS DATAS E VALORES DA MAIOR ELONGAÇÃO DE MERCÚRIO (do "American Ephemeris e do Nautical Almanac")

Data	Elongação
4 Jan. de 1963	19° E
14 de Fev.	26 O
26 de Abril	20 E
13 de Junho	23 O
24 de Agosto	27 E
6 de Out.	18 O
18 de Dez.	20 E
27 de Jan. de 1964	25 O
8 de Abril	19 E
25 de Maio	25 O

Se não realizou a experiência da órbita da Terra, pode usar para órbita aproximada deste planeta uma circunferência de 10 cm de raio desenhada no centro duma folha de papel milimétrico. Como a excentricidade da órbita da Terra é muito pequena (0,017), pode colocar o Sol no centro da órbita sem que introduza um erro significativo no trabalho.

Trace uma semi-recta, horizontalmente, a partir do Sol e para a direita. Denomine-a linha 0°. Esta linha apontando o equinócio



Fotografias de Mercúrio, na fase de quarto crescente, tirada a 7 de Junho de 1934 no Observatório de Lowell, Flagstaff, Arizona.

vernal é a linha de referência a partir da qual podemos determinar a posição da Terra na sua órbita em diferentes datas. O ponto onde a linha 0° traçada a partir do Sol atravessa a órbita da Terra é a posição onde a Terra se encontra a 23 de Setembro.

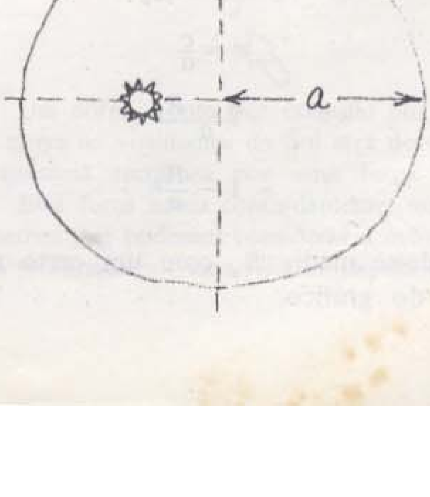
A Terra demora cerca de 365 dias a completar uma revolução (360°). Para determinar a posição da Terra em cada uma das datas na tabela 1, considere que o planeta percorre aproximadamente 1° em cada dia. Lembre-se que a Terra percorre a sua órbita na direcção *contrária à dos ponteiros do relógio*, para um observador que se encontra no polo norte celeste. Trace segmentos de recta a partir do Sol para cada uma das posições da Terra que obteve.

Desenhe, agora, o ângulo de elongação a partir de cada uma das posições da Terra. Certifique-se a partir da fig. 1 que para uma elongação *este*, Mercúrio está à *esquerda* do Sol e para uma elongação *oeste*, Mercúrio se encontra à direita deste, quando vistos da Terra. Numa data de elongação máxima Mercúrio encontra-se algures na linha segundo a qual é visto, mas não sabe precisamente em que ponto da linha se deve colocar o planeta. Uma hipótese razoável será colocar Mercúrio no ponto da linha de visão mais próximo possível do Sol.

Pode-se agora determinar a órbita de Mercúrio traçando a curva que melhor se adapte aos pontos obtidos. Lembre-se que a órbita deve *tocar* cada uma das linhas de vista sem as atravessar.

Determinação de $R_{méd}$

A distância média dum planeta numa órbita elíptica é igual a metade do eixo maior da elipse. Para determinar o tamanho do semi-eixo maior *a* da órbita de Mercúrio relativamente ao semi-eixo maior da órbita da Terra, deve-se encontrar primeiro o áfélio e o periélio.



Para determinar esses pontos da órbita, pode-se utilizar um compasso. Eles são respectivamente o ponto da órbita mais afastado e o mais próximo do Sol.

Meça o maior diâmetro da órbita ao longo da recta que passa pelo periélio-sol-afélio. Considerando que 10 cm correspondem a uma UA (a medida do semi-eixo maior da órbita da Terra) pode-se agora obter a medida do semi-eixo maior da órbita de Mercúrio expressa em UA.

Cálculo da Excentricidade da Órbita

A excentricidade é definida pelo quociente c/a, ou seja, $e = c/a$. No entanto, como a distância c, do centro da órbita elíptica de Mercúrio ao Sol, é pequena no gráfico, cometer-se-á um erro grande se for medida directamente.

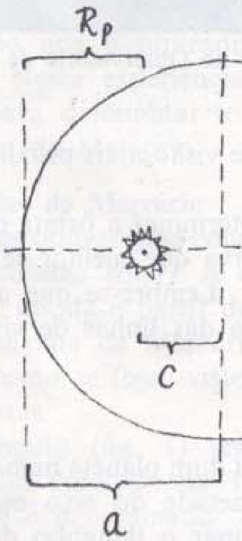


Fig. 2

A partir da fig. 2, pode-se notar que c é a diferença entre a distância do periélio de Mercúrio R_p e o semi-eixo maior a.

Isto é:

$$c = a - R_p$$

assim

$$e = \frac{c}{a}$$

$$= \frac{a - R_p}{a}$$

$$= 1 - \frac{R_p}{a}$$

Pode-se medir R_p com um certo rigor a partir do gráfico.

Calcule e, e compare o valor obtido com o valor aceite.

Segunda Lei de Kepler

A lei das áreas de Kepler pode ser verificada no gráfico da órbita de Mercúrio tal como se descreve na Experiência 2.8, «A Órbita de Marte». Contando os quadrados pode-se determinar a área varrida pelos segmentos de recta traçados a partir do Sol para Mercúrio entre datas sucessivas de observação, tais como 4 de Janeiro a 14 de Fevereiro, e de 13 de Junho a 24 de Agosto. Divida a área pelo número de dias do intervalo para obter a "área por dia". Se a lei de Kepler se verificar no seu gráfico esta grandeza é constante. O valor obtido é constante?

EXPERIÊNCIA 2.11 DETERMINAÇÃO DA ÓRBITA POR APROXIMAÇÕES SUCESSIVAS *

Viu-se no *Texto* como Newton analisou o movimento dos corpos na sua órbita com base no conceito de força central. Com base na discussão do *Texto*, Secção 8.4, estaremos agora em condições de aplicar o método de Newton para determinar uma órbita aproximada para um satélite ou um cometa em torno do Sol. Pode-se também, a partir da órbita obtida, verificar a lei das áreas de Kepler e outras relações discutidas no *Texto*.

Fotografia do cometa Cunningham tirada nos Observatórios do Monte Wilson e do Monte Palomar a 21 de Dezembro de 1940. Porque é que as estrelas deixam rasto e o cometa não deixa?

* Esta experiência é baseada numa experiência semelhante elaborada pelo Dr. Leo Lavatelli na Universidade do Illinois, *American Journal of Physics*, vol. 33, pg. 605.

Imagine uma bola rolando sobre uma superfície plana e polida como, por exemplo, uma placa de vidro.

1. Como prevê que seja a trajectória da bola baseando-se nas leis do movimento de Newton?
2. Suponha que dava uma pancada lateral na bola. A direcção da trajectória mudaria?
3. E a velocidade mudaria? Suponha que aplicava lateralmente à bola uma série de golpes laterais (impulsos), sempre com a mesma força, à medida que ela se movia. Qual deveria ser a trajectória da bola?

Se encontrar dificuldade na resposta a estas perguntas, torne a ler a Secção 8.4 do *Texto*.

Hipóteses

Um planeta ou um satélite estão sujeitos a uma força contínua enquanto descrevem a sua órbita. Mas à medida que o corpo se move, a intensidade, a direcção e o sentido da força vão variando. Para prever exactamente a órbita do planeta sujeito a forças que variam continuamente, são necessários cálculos de matemáticas avançadas. Contudo, pode-se conseguir uma aproximação razoável da órbita, considerando que a atracção em vez de se aplicar duma forma contínua, se aplica numa sucessão de pequenos impulsos em cada um dos quais a força actua como um golpe instantâneo na direcção do Sol, por exemplo de 60 em 60 dias (ver fig. 1).

A aplicação de passos sucessivos e repetidos designa-se por "iteração". É uma técnica poderosa na resolução de problemas. Os modernos computadores digitais de alta velocidade usam métodos iterativos para resolver problemas complexos, tais como a determinação da melhor trajectória (ou trajectórias) para uma sonda Mariner ir da Terra a Marte.

Pode-se agora iniciar o traçado aproximado da órbita dum cometa se se considerarem as seguintes hipóteses adicionais:

1. A força que actua o cometa está dirigida para o Sol.
2. A intensidade do impulso varia na razão inversa do quadrado da distância do cometa ao Sol.
3. Os impulsos ocorrem regularmente em intervalos de tempo iguais, neste caso de 60 em 60 dias. Suponha que a intensidade de cada impulso instantâneo é igual ao efeito total da atracção contínua do Sol sobre o cometa durante um intervalo de 60 dias.

Efeito da Força Central

A partir da segunda lei de Newton sabe-se que a força gravítica provocará uma aceleração no cometa dirigida para o Sol. Se a força $\vec{F}$ actua num corpo de massa m durante um intervalo de tempo Δt sabe-se que:

$$F = m\vec{a} = m\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$$

$$\text{e, portanto:}\quad \Delta\vec{v} = \frac{\vec{F}}{m}\Delta t$$

Esta equação relaciona a variação de velocidade do corpo, com a massa deste, a força que o actua e o tempo de actuação dessa força. A massa m é constante para cada corpo e de acordo com a hipótese 3, o intervalo Δt,

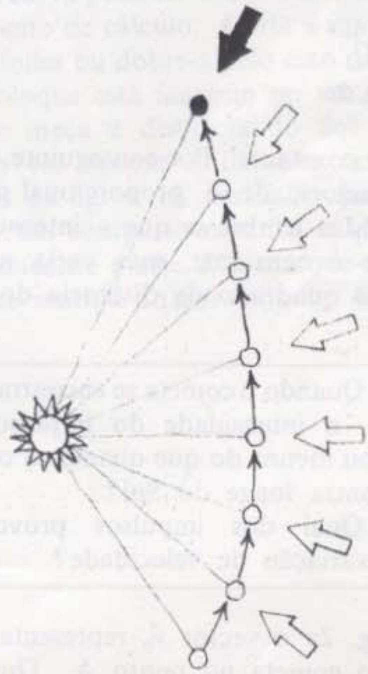


Fig. 1 Um corpo, como por exemplo um cometa, que se mova na vizinhança do Sol será desviado da sua trajectória rectilínea por uma força gravitacional. Esta força actua continuamente, mas Newton mostrou que podemos considerar a órbita como se fosse produzida por uma série de impulsos instantâneos.

Fig. 2a

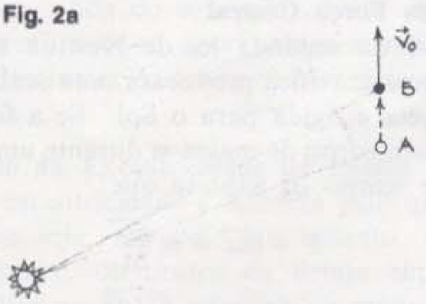


Fig. 2b

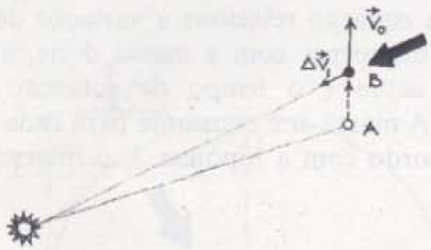


Fig. 2c

também é constante. Por conseguinte, a variação de velocidade é proporcional à força $\Delta\vec{v} \propto \vec{F}$. Mas lembre-se que a intensidade da força *não* é constante, mas varia na razão inversa do quadrado da distância do cometa ao Sol.

> 4. Quando o cometa se encontra perto do Sol, a intensidade do impulso será maior ou menor do que quando o cometa se encontra longe do Sol?
> 5. Qual dos impulsos provoca a maior variação de velocidade?

Na fig. 2a o vector $\vec{v}_0$ representa a velocidade do cometa no ponto A. Durante os primeiros 60 dias, o cometa move-se de A até B (fig. 2b). Em B um impulso provoca uma variação da velocidade $\Delta\vec{v}_1$ (fig. 2c). A velocidade depois do impulso será $\vec{v}_1 = \vec{v}_0 + \Delta\vec{v}_1$ e poderá ser determinada pela regra do paralelogramo (fig. 2d). Por conseguinte, o cometa deixa o ponto B com a velocidade $\vec{v}_1$ e continua a mover-se com esta velocidade durante 60

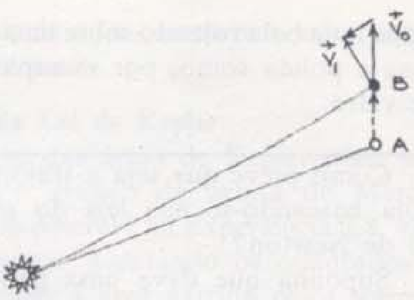


Fig. 2d

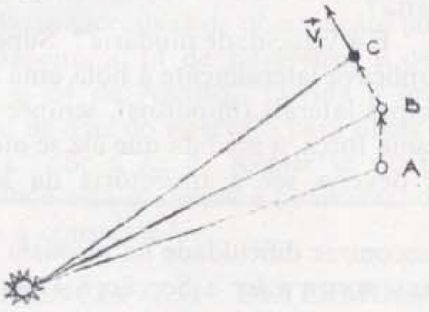


Fig. 2e

dias. Como os intervalos de tempo entre cada impulso são constantes (60 dias), o valor do deslocamento ao longo da trajectória é proporcional ao valor da velocidade $\vec{v}$. Assim usar-se-á um comprimento proporcional à velocidade do cometa para representar o valor do deslocamento durante cada intervalo (fig. 2e).

Cada novo valor da velocidade é determinado como se fez acima para o ponto B, ou seja, adicionando à velocidade anterior o $\Delta\vec{v}$ correspondente ao impulso. Desta maneira, de intervalo em intervalo, se vai traçando a órbita do cometa.

Escala do Gráfico

A forma da órbita depende da posição inicial, da velocidade inicial e da força actuante. Suponha-se que o cometa na posição inicial se encontra a uma distância de 4 UA do Sol e que o valor da sua velocidade neste ponto é $v = 2$ UA por ano (cerca de 34 mil km/h) e dirigida perpendicularmente à direcção cometa-Sol. Os seguintes factores de escala reduzirão a órbita de modo a caber, perfeitamente, numa folha de papel milimétrico de 40×50 cm.

1. Faça 1 UA igual a 6,3 cm, e portanto, 4 UA virão iguais a cerca de 25 cm.

2. Visto que o cometa sofre um impulso de 60 em 60 dias, é conveniente a velocidade em UA por 60 dias. Suponha que adopta um

factor de escala no qual o vector velocidade de 1 UA/60 dias é representado por um vector de 5 cm de comprimento.

A velocidade inicial do cometa é de 2 UA por ano e pode ser expressa em 2/365 UA por dia, ou ainda, $2/365 \times 60 = 0{,}33$ UA por 60 dias. Isto fica representado à escala por um vector de 2,14 cm de comprimento. Este é o valor do deslocamento do cometa nos primeiros 60 dias.

Cálculo de Δv

Na escala indicada e com o intervalo de iteração de 60 dias que foi escolhido o campo de forças do Sol é tal que o Δv provocado por um impulso, quando o cometa está a uma distância do Sol de 1 UA é de 1 UA/60 dias.

Para evitar o cálculo de Δv para cada valor da distância planeta-Sol R, pode-se traçar um gráfico da variação de Δv em função de R. Então para qualquer valor de R, poder-se-á imediatamente encontrar o correspondente valor de Δv.

A Tabela 1 dá valores de R expressos em UA e em centímetros de modo a que caibam na escala do gráfico. A Tabela dá ainda para cada valor de R o correspondente valor de Δv expresso em UA/60 dias e em centímetros.

Construa um gráfico com estes valores numa folha de papel milimétrico de pelo menos 25 cm de comprimento, como se mostra na fig. 3 e ligue cuidadosamente os pontos obtidos com uma curva regular.

Esta curva pode ser usada como um simples instrumento de cálculo. Corte a margem inferior da folha ou dobre-a pelo eixo das abcissas (R). Coloque esta margem no seu gráfico da órbita e meça a distância do Sol ao ponto onde se vai aplicar a iteração tal como o ponto B da fig. 4. A partir do quadriculado ou com um compasso obtenha o valor de Δv correspondente a este R e marque-o na linha radial no sentido do Sol (veja fig. 4).

TABELA 1 ESCALAS DE R e Δv

DISTÂNCIA AO SOL, R		VARIAÇÃO DA VELOCIDADE, Δv	
UA	cm	UA/60 dias	cm
0,75	*4,75*	1,76	*11,3*
0,8	*5,08*	1,57	*9,97*
0,9	*5,72*	1,23	*7,80*
1,0	*6,35*	1,00	*6,35*
1,2	*7,62*	0,69	*4,42*
1,5	*9,52*	0,44	*2,82*
2,0	*12,7*	0,25	*1,57*
2,5	*15,9*	0,16	*1,02*
3,0	*19,1*	0,11	*0,71*
3,5	*22,2*	0,08	*0,51*
4,0	*25,4*	0,06	*0,41*
4,5	*28,6*	0,05	*0,38*

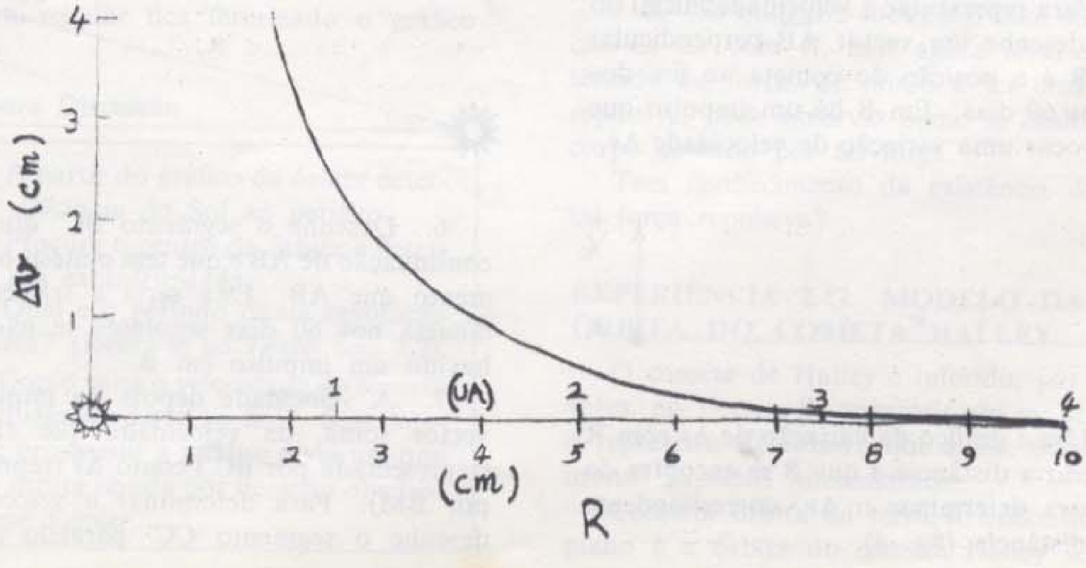


Fig. 3

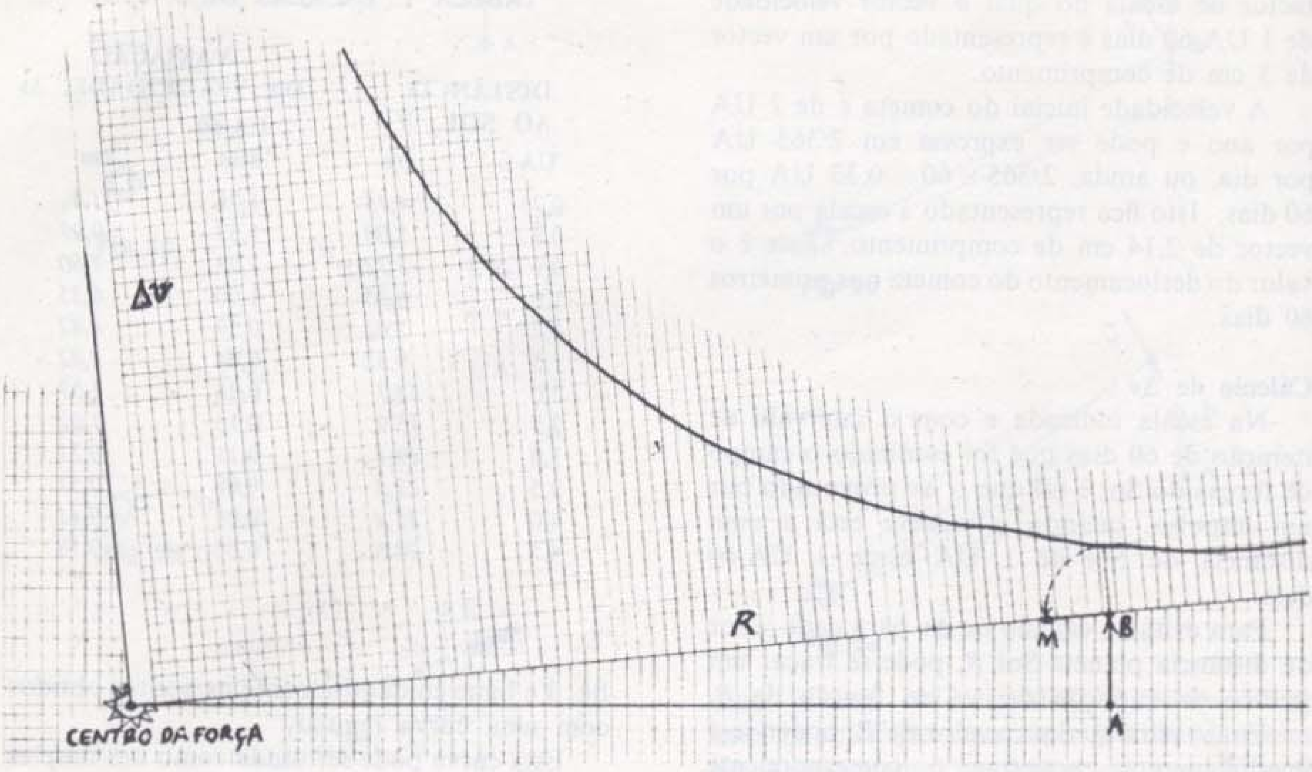


Fig. 4

Traçado do Gráfico

1. Marque a posição S do Sol a cerca de metade da altura da folha de papel milimétrico e a cerca de 30 cm da margem direita de esta.

2. Marque um ponto a 25 cm, 4 UA para a direita do Sol *S*. Este ponto é o ponto A a que vai fazer corresponder a posição inicial do cometa.

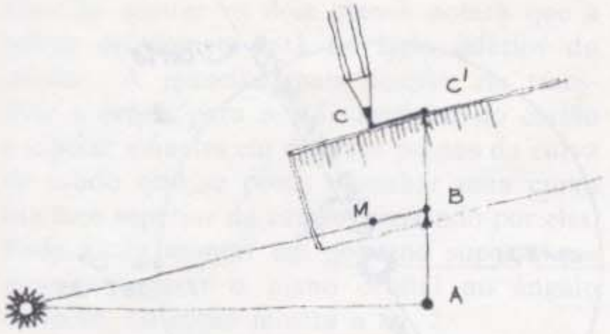
3. Para representar a velocidade inicial do cometa desenhe um vector $\overrightarrow{AB}$ perpendicular a SA. B é a posição do cometa ao fim dos primeiros 60 dias. Em B há um impulso que vai provocar uma variação de velocidade Δv_1.

4. Use o gráfico da variação de Δv com R para medir a distância a que B se encontra do Sol e para determinar o Δv_1 correspondente a esta distância (fig. 4).

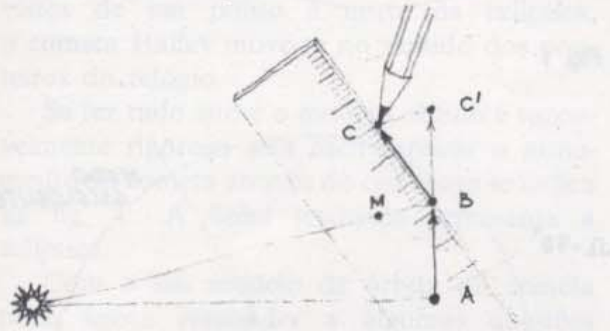
5. A força, e por conseguinte a variação de velocidade, é sempre dirigida no sentido do Sol. A partir de B marque $\Delta\vec{v}_1$ na direcção de S. Chame M à extremidade deste vector.

6. Desenhe o segmento BC′ que é uma continuação de AB e que tem o mesmo comprimento que AB. Esta seria a trajectória do cometa nos 60 dias seguintes se não tivesse havido um impulso em B.

7. A velocidade depois do impulso é o vector soma, da velocidade que ele trazia (representada por BC′) como $\Delta\vec{v}$ (representado por BM). Para determinar a velocidade $\vec{v}_1$ desenhe o segmento CC′ paralelo a BM e



com o mesmo comprimento. O segmento BC representa o valor do novo vector velocidade $\vec{v}_1$, ou seja, a velocidade com que o cometa deixa o ponto B.



8. O cometa move-se de novo com velocidade constante por mais 60 dias até que atinge o ponto C. O seu deslocamento durante esse tempo é $\Delta\vec{d}_1 = \vec{v}_1 \times 60$ dias e devido ao factor de escala escolhido o valor do deslocamento é representado pelo segmento BC.

9. Repita os passos 1 a 8 para obter o ponto D e faça o mesmo pelo menos para 14 ou 15 intervalos (25 intervalos dão a órbita completa).

10. Ligando os pontos A, B, C, ... por uma curva regular fica terminado o gráfico da órbita.

Prepare para Discussão

6. A partir do gráfico da órbita determine a distância do Sol ao periélio.

7. Procure o centro da órbita e determine a sua excentricidade.

8. Qual é o período duma revolução do cometa? (Refira-se ao *Texto*, Sec. 7.3).

9. Como varia a velocidade do cometa com a distância deste ao Sol? Será interessante prosseguir a análise e ver até que ponto a órbita obtida por iteração obedece às leis de Kepler.

10. Confirma-se a lei de Kepler das elipses? (Procure um método para determinar em que medida a curva obtida é uma elipse).

11. Verifica-se a lei das áreas de Kepler?

Para responder a esta questão lembre-se que o intervalo de tempo entre dois impulsos consecutivos é de 60 dias, portanto o cometa atinge as posições B, C, D ..., etc., ao fim de intervalos de tempo iguais. Desenhe um segmento de recta a partir do Sol para cada um destes pontos (incluindo A) e terá um conjunto de triângulos.

Determine a área de cada triângulo. A área de um triângulo é dada por $A = \frac{1}{2}ab$ onde a e b, são respectivamente a altura e a base. Ou poderá ainda contar os quadrados do papel para determinar as áreas.

Mais Coisas para Fazer

1. A técnica de construção de gráficos que usou pode ser utilizada para muitos problemas. Pode utilizá-la para descobrir o que acontece se forem usadas diferentes velocidades iniciais e/ou diferentes direcções e sentidos. Pode querer usar o gráfico de $1/R^2$, ou pode construir um novo gráfico. Para o fazer use uma função diferente (por exemplo, considere a força proporcional a $1/R^3$, ou a $1/R$, ou ainda a R) para obter trajectórias diferentes; as forças gravíticas reais *não* são descritas por tais leis de forças.

2. Se utilizar o mesmo gráfico da variação de Δv com R, mas agora invertendo o sentido da força, de modo a ter uma força repulsiva, pode observar como se desloca um corpo actuado por tal força.

Tem conhecimento da existência de uma tal força repulsiva?

EXPERIÊNCIA 2.12 MODELO DA ÓRBITA DO COMETA HALLEY

O cometa de Halley é referido, por várias vezes, no *Texto*. Se construir um modelo que o represente descobrirá que a sua órbita tem muitos aspectos interessantes.

Como a órbita da terra se encontra num plano e a órbita do cometa Halley se situa num segundo plano que intersecta o primeiro, serão necessárias duas folhas de cartão rígido que vão funcionar como planos sobre os quais se vão traçar aquelas órbitas.

A Órbita da Terra

No centro de uma das folhas de cartão, desenhe uma circunferência com raio 5 *cm* (1 UA) representando a órbita da Terra. Na mesma folha de cartão desenhe ainda as órbitas aproximadas (circulares) de Mercúrio (raio 0,4 UA) e de Vénus (raio 0,7 UA). Assim, estará a considerar que todas estas órbitas estão no mesmo plano. Desenhe um segmento de recta a partir do Sol (colocado no centro das órbitas) e considere a direcção do segmento como sendo a de 0° de longitude.

A tabela da página 142 deste *Manual* dá-nos as posições aparentes do Sol nos dias 1 de cada mês ao longo de um ano. Adicionando 180° a cada um desses valores podem-se obter as posições da terra em relação ao Sol. Marque estas posições no seu gráfico representativo da órbita da Terra (se quiser marcar no seu gráfico mais que as doze posições pode fazê-lo usando a técnica descrita na página 142).

A Órbita do Cometa

A figura 5 mostra as posições do cometa Halley na sua órbita à volta do Sol, a qual é, aproximadamente, uma órbita parabólica. Decalque a figura 5 e monte o decalque sobre a folha de cartão ainda não utilizada.

Combinação das Duas Órbitas

Dispõe-se assim das duas órbitas, a do cometa e a da Terra nos respectivos planos, cada um contendo o Sol. Basta então ajustá-las de acordo com os elementos de órbitas que porventura foram usados na experiência sobre a "Inclinação da órbita de Marte".

A linha ao longo da qual o plano da órbita do cometa intersecta o plano da eclíptica, é denominada a "linha dos nodos". Com o eixo maior desenhado, pode-se agora localizar, no plano orbital, o nodo ascendente, medindo o ângulo ω no sentido *oposto* ao do movimento do cometa e a partir da direcção do periélio (fig. 5).

Para associar as duas órbitas, faça um corte no plano da eclíptica (órbita da Terra) ao

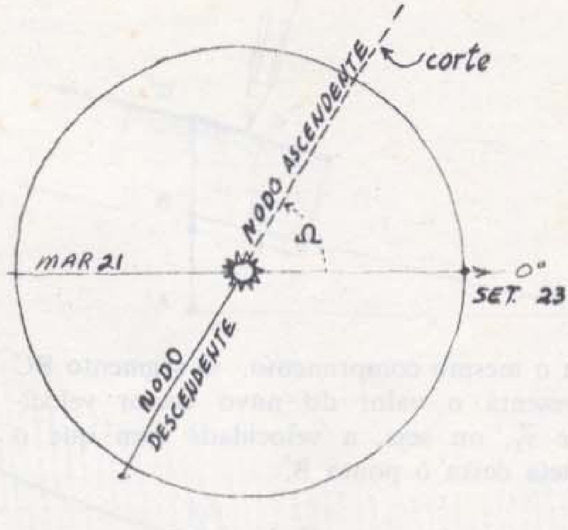


Fig. 1

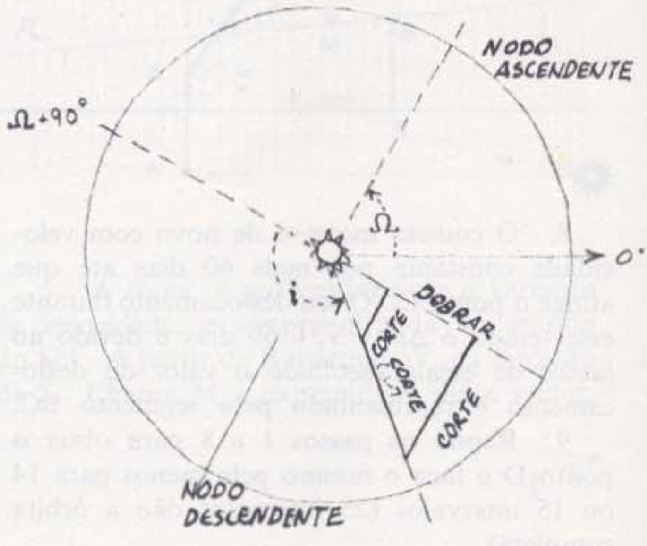
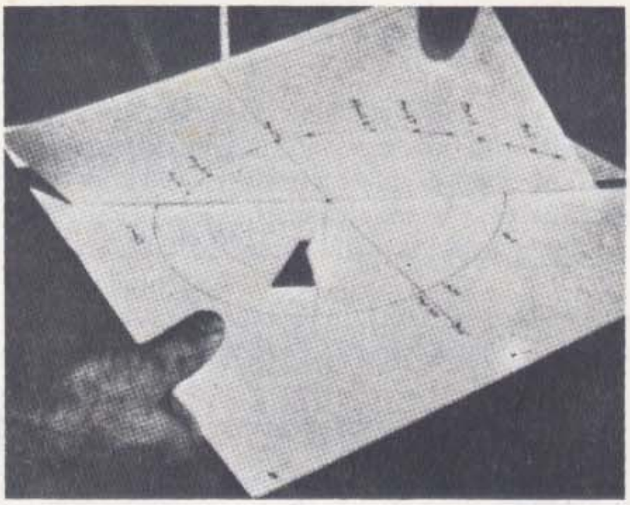


Fig. 2

longo da direcção do nodo *ascendente* e desde o bordo da folha até ao ponto representativo do Sol. A longitude Ω do nodo ascendente do cometa era 57° como mostra a figura 1. Faça agora um corte no plano orbital do cometa seguindo a direcção do nodo *descendente* até ao Sol (ver fig. 5). Encaixe os planos um no outro ao longo dos cortes de modo que os dois pontos representativos do Sol nos dois planos se encontrem.

Para ter o modelo a três dimensões deve-se agora ligar os dois planos segundo o ângulo correcto. Lembre-se que a inclinação *i*, 162°, é medida a partir da eclíptica e para cima (norte) na direcção Ω + 90° (ver fig. 2).

Quando ajustar os dois planos notará que a órbita do cometa está no lado inferior do cartão. A maneira mais simples de transferir a órbita para o lado superior do cartão é espetar alfinetes em diversos pontos da curva de modo que se possa desenhar uma curva (na face superior do cartão) passando por eles. Pode ainda montar um pequeno suporte que permita segurar o plano orbital no ângulo correcto, tal como mostra a fig. 2.



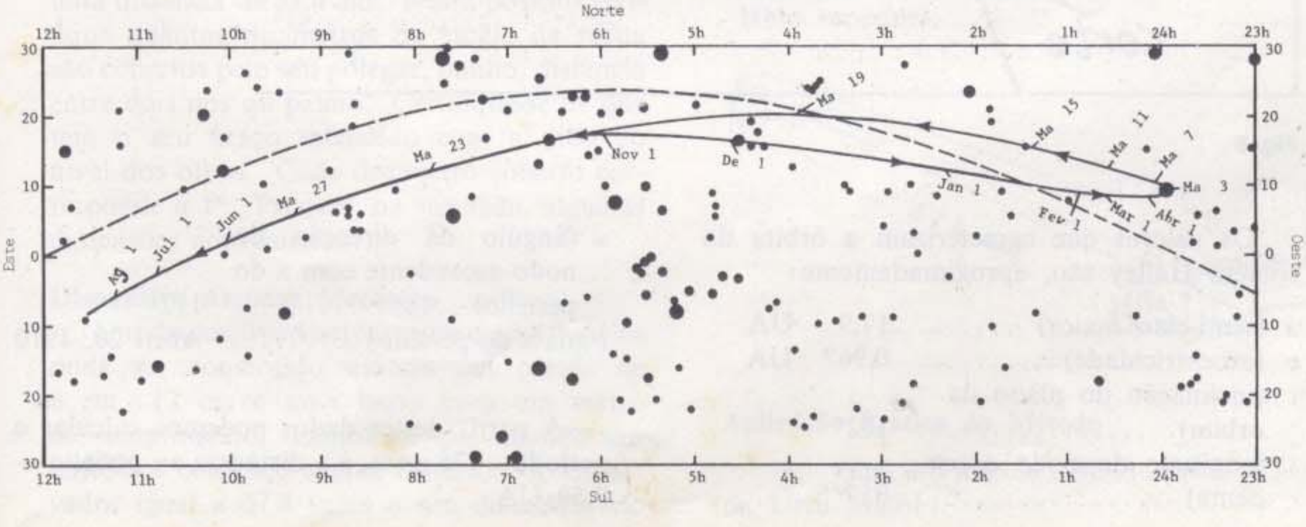
O cometa Halley move-se no sentido oposto ao da Terra e de outros planetas. Enquanto a Terra e os planetas se movem no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio quando vistos de um ponto a norte da eclíptica, o cometa Halley move-se no sentido dos ponteiros do relógio.

Se fez tudo isto e o modelo obtido é razoavelmente rigoroso será fácil explicar o movimento do cometa através do céu como se indica na fig. 4. A linha tracejada representa a eclíptica.

Com o seu modelo da órbita do cometa pode agora responder a algumas questões interessantes acerca do comportamento do cometa Halley em 1910.

1. Durante vários meses o cometa pareceu mover-se para oeste. Porquê?
2. Por que razão ficou o cometa praticamente imóvel no céu durante o mês de Abril de 1910?
3. Depois desse período, em que esteve praticamente estacionário, terá o cometa percorrido, durante o mês de Maio de 1910, aproximadamente metade do seu percurso no céu?
4. Qual a posição do cometa no dia 19 de Março, considerada em relação à Terra?
5. Se nesse dia a cauda do cometa tivesse muitos milhões de quilómetros de comprimento, teria sido provável que a Terra atravessasse parte da sua cauda?
6. Estavam as pessoas preocupadas com o efeito que a cauda do cometa podia ter tido na vida sobre a Terra? (consulte jornais e revistas de 1910).
7. Aconteceu algo de estranho? Qual a densidade da matéria constituinte da cauda de um cometa? Teria sido de esperar que algo tivesse acontecido?

Fig. 4 Movimento do Cometa Halley em 1909-10



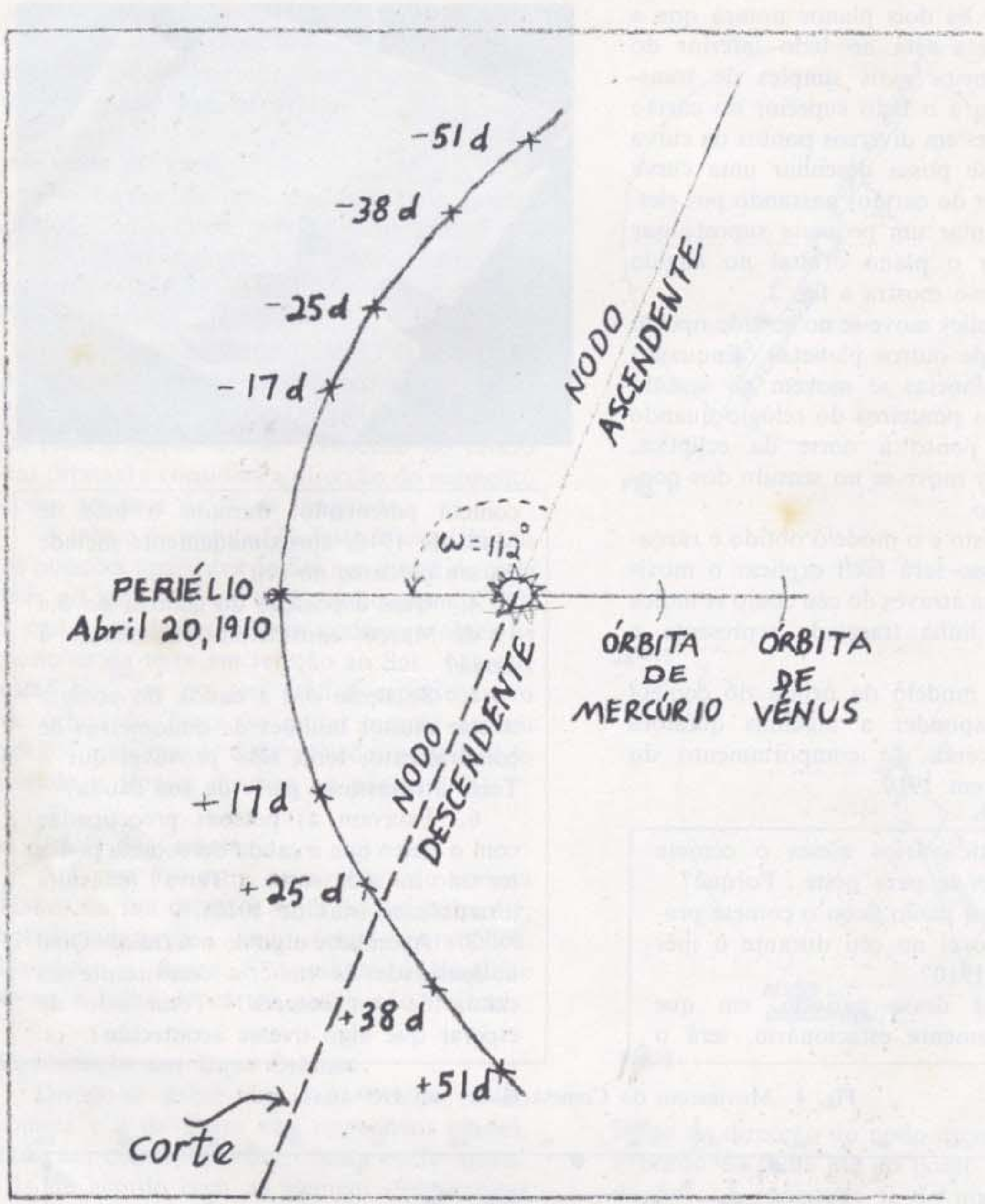


Fig. 5

Os valores que caracterizam a órbita do cometa Halley são, aproximadamente:

a (semi-eixo maior) .... 17,9 UA
e (excentricidade)........... 0,967 UA
i (inclinação do plano da órbita).................. 162°
Ω longitude do nodo ascendente) .... 057°
ω (ângulo da direcção do nodo ascendente com a do periélio) .... 112°
T (data do periélio) .... Abril 20, 1910

A partir destes dados podemos calcular o período — 76 anos, e a distância ao periélio — 0,59 UA.

ACTIVIDADES

COMO FAZER MEDIÇÕES ANGULARES

Em observações astronómicas, e muitas vezes com outros propósitos, torna-se necessário fazer uma estimativa do ângulo entre dois pontos. Pode improvisar uma série de dispositivos que, depois de calibrados, constituem instrumentos de medida. Estenda o seu braço direito à sua frente. Terá como possíveis instrumentos de medida os seguintes:

1. O polegar,
2. O punho, não incluindo o polegar,
3. Dois nós de um dedo, e
4. A palma da mão aberta, da ponta do polegar à ponta do dedo mínimo (é o palmo).

Numa primeira aproximação, o punho é visto segundo um ângulo de cerca de 8° e o palmo segundo um ângulo de 15° a 20°.

Contudo, como tanto o comprimento dos braços como as dimensões das mãos variam de pessoa para pessoa, é conveniente fazer uma calibração. Pode-se para isso, usar um método como o que a seguir se descreve.

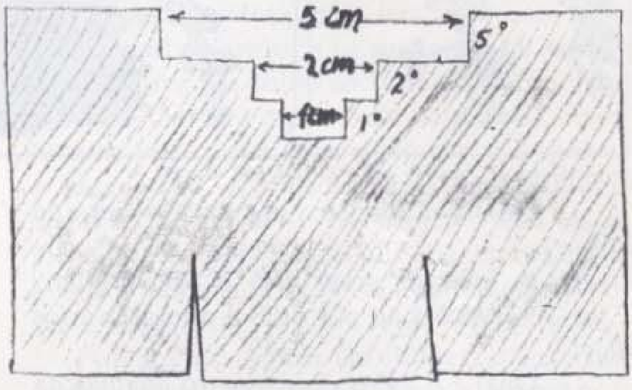
Para encontrar as dimensões angulares do polegar, punho ou palma da mão, nas condições referidas anteriormente, faça uso de uma relação simples. Um objecto à distância de 57,4 vezes o seu diâmetro é visto segundo um ângulo de 1°. (Por exemplo, uma moeda de vinte e cinco tostões, vista a cerca de 1 metro e quinze centímetros).

Fixe uma régua graduada em decímetros no quadro da sua sala de aula e observe-a a uma distância de 57,4 dm. Nessa posição verifique quantos decímetros da escala da régua são cobertos pelo seu polegar, punho, distância entre dois nós ou palmo. Certifique-se de que tem o seu braço estendido com a mão ao nível dos olhos. Cada decímetro coberto corresponde a 1°. Procure, na sua mão, algumas dimensões convenientes.

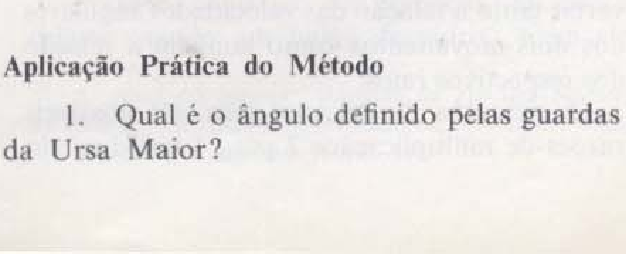
Dispositivo Auxiliar Mecânico

Um dispositivo simples para medir ângulos pode ser construído usando um cartão de 8 cm × 12 cm e uma barra com um metro de comprimento. Lembre-se que quando um objecto é colocado a uma distância do observador igual a 57,4 vezes o seu diâmetro, ele é visto segundo um ângulo de 1°. Isto significa que um objecto de 2 cm, colocado à distância de 114,8 cm, seria visto segundo um ângulo de 1°. Um objecto de 1 cm colocado à distância de 57,4 cm seria visto também segundo um ângulo de 1°.

Agora já pode construir um pequeno dispositivo que pode usar para determinar ângulos pequenos.



Recorte o cartão como indica a figura: corte tiras de 1 cm, 2 cm e 5 cm de comprimento e faça corresponder os espaços deixados a 1°, 2° e 5° respectivamente. Monte o cartão verticalmente sobre a barra colocando-o na posição 57,4 cm. Faça um aba na margem inferior do cartão com dimensões tais que se possa adaptá-la à barra. Prenda-a com fita-cola. Coloque a posição zero da barra sobre o lábio superior — e observe (mantenha tenso o lábio superior).



Aplicação Prática do Método

1. Qual é o ângulo definido pelas guardas da Ursa Maior?

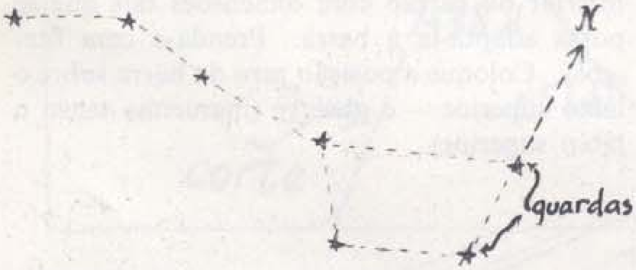
B.C. By John Hart

By permission of John Hart and Field Enterprises, Inc.

2. Qual é o diâmetro angular do cinto da Oríon?

3. A quantos graus está o Sol da Lua? Faça observações ao pôr do Sol durante vários dias.

4. Qual é o valor do diâmetro angular da Lua? Durante o mesmo dia esse valor variará desde que a Lua nasce até que atinge o seu ponto mais alto? Para a maioria das pessoas a Lua parece maior quando está perto do horizonte. Será mesmo maior? Consulte "The Moon Illusion", um artigo da revista *Scientific American* de Julho 1962, página 120.



EPICICLOS E MOVIMENTO RETRÓGRADO

A máquina manual de epiciclos permite estudar o movimento resultante de dois movimentos circulares. Para encontrar as formas das diferentes trajectórias resultantes, pode-se variar tanto a relação das velocidades angulares dos dois movimentos como também a relação dos respectivos raios.

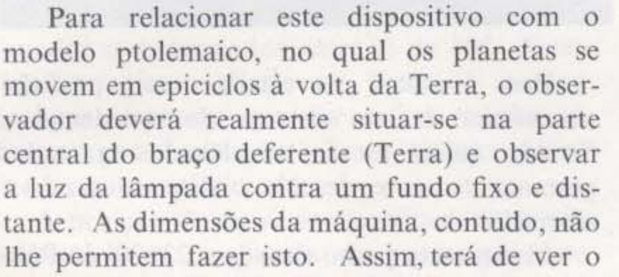
A máquina de epiciclos tem três possíveis razões de multiplicação: 2 para 1 (produzindo duas voltas num dos movimentos por cada revolução no outro movimento), 1 para 1 (uma volta por revolução) e 1 para 2 (uma volta para cada duas revoluções). Para modificar a relação, mude a correia accionadora para outro conjunto de polias. A correia deverá ser dobrada em 8 de tal maneira que o braço deferente (braço comprido) e o braço epiciclo (braço curto) rodem no mesmo sentido.

Adapte uma fonte luminosa (pilha, lâmpada e suporte) a um extremo do braço epiciclo e contrabalance o outro extremo do braço, por exemplo, com outra fonte igual mas apagada. Se usar uma velocidade de rotação relativamente elevada numa sala às escuras, poderá juntamente com outros observadores ver a fonte de luz mover-se num epiciclo.

A forma da curva desenhada não depende somente da razão de ajustamento mas também do comprimento relativo dos braços. À medida que se aproxima a luz da parte média do braço epiciclo, o laço deste diminui até que se torna num bico. Quando a luz está muito perto do centro do braço epiciclo, tal como no movi-

mento da Lua à volta da Terra, a curva será uma circunferência levemente distorcida, como mostra a figura.

Para relacionar este dispositivo com o modelo ptolemaico, no qual os planetas se movem em epiciclos à volta da Terra, o observador deverá realmente situar-se na parte central do braço deferente (Terra) e observar a luz da lâmpada contra um fundo fixo e distante. As dimensões da máquina, contudo, não lhe permitem fazer isto. Assim, terá de ver o movimento de lado (ou pode colar uma bola de vidro — como as que se usam para enfeitar a árvore de Natal — no centro da máquina; a reflexão que verá na bola é justamente o que veria se estivesse colocado no centro). A lâmpada tem, então, movimento retrógrado para um observador colocado em frente da máquina quando ele vê um laço. O movimento retrógrado é mais pronunciado quando a fonte de luz está afastada da parte média do eixo epiciclo.



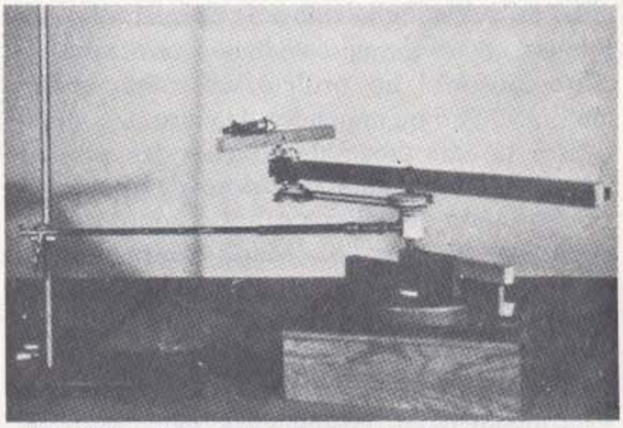
Fotografando os Epiciclos

O movimento da fonte luminosa da experiência anterior pode ser fotografado montando a máquina de epiciclos sobre uma plataforma rotativa e prendendo com um grampo a polia central de modo a mantê-la fixa. Outro modo de obter o mesmo efeito será fixar a máquina a um suporte por meio de um grampo e rodá-la à mão.

Rodando a plataforma rotativa durante várias revoluções, observa-se que os trajectos luminosos não se sobrepõem exactamente.

(Isto verifica-se, provavelmente, porque a correia accionadora não tem espessura uniforme, particularmente na sua junta, ou porque os diâmetros das polias não estão em proporção exacta). Quando o ponto de junção da correia accionadora passa por qualquer das polias, a razão das velocidades varia momentaneamente e há um leve deslocamento dos eixos. Deixando a mesa rodar durante mais tempo, a figura desenhada acabará eventualmente por ser a mesma.

Fotografias tiradas em diferentes instantes podem revelar interessantes figuras geométricas do movimento. Pode-se, como actividade complementar, tirar tais fotografias. As figuras da página seguinte mostram quatro exemplos dos muitos desenhos diferentes que podem ser obtidos.

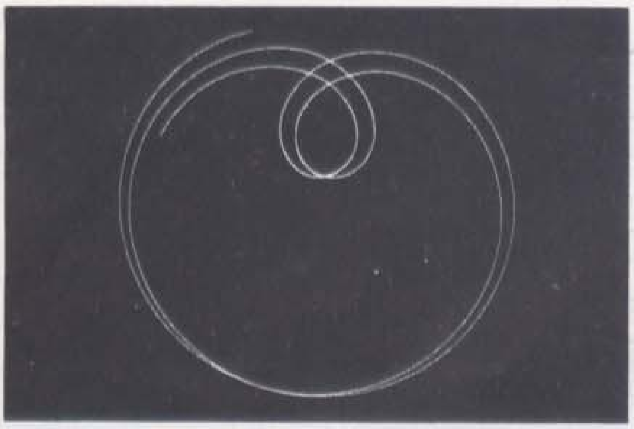


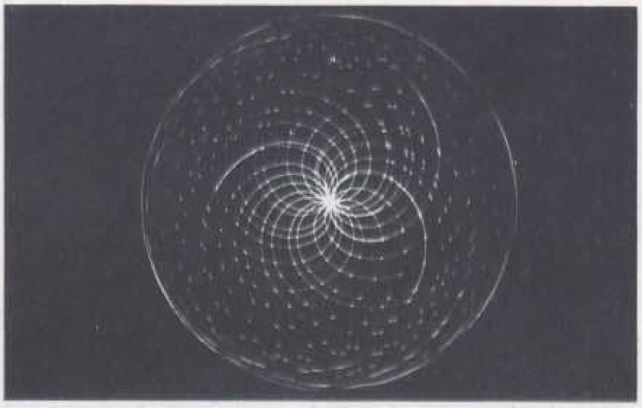
Um demonstrador de epiciclos ligado a uma plataforma rotativa.

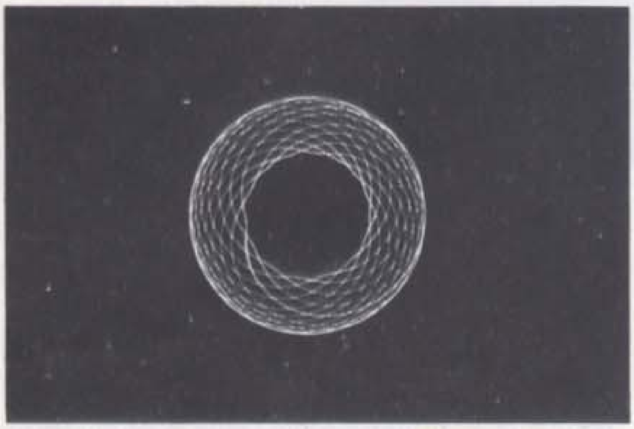
MODELO DA ESFERA CELESTE *

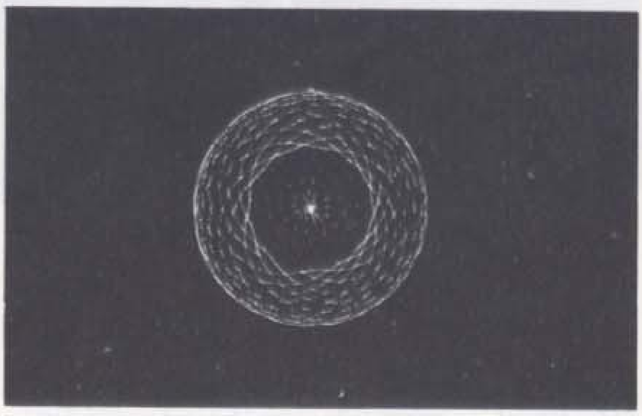
Pode-se construir um modelo da esfera celeste usando um balão de vidro. Com ele

* *Nota dos autores:* adaptado de *You and Science*, de Paul F. Brandwein e colaboradores, editado em 1960, por Harcourt, Brace and World, Inc.









poderá ver como o aspecto do céu muda à medida que o observador se desloca para norte ou para sul e também poderá ver como as estrelas parecem nascer e ter o seu ocaso.

Para construir este modelo é preciso ter, além do balão, uma rolha de borracha furada e ajustável ao gargalo do balão, um tubo de vidro ajustável ao orifício da rolha, tintas, um pincel fino ou marcador de vidro, um mapa celeste ou uma tabela de posições das estrelas, e, naturalmente, uma boa dose de paciência.

No fundo do balão localize o ponto oposto ao centro do gargalo. Marque essa posição e denomine-a "N" (pólo norte celeste). Com um fio ou fita, determine o perímetro da maior circunferência sobre a esfera que constitui o balão — a maior distância à volta deste. Esta distância corresponderá a 360°. Marque, então, vários pontos que estejam à distância do Pólo Norte de 1/4 do total do perímetro ou seja pontos correspondentes a um ângulo de 90° com a direcção do Pólo Norte. Estes pontos situam-se sobre uma linha que é o equador celeste. Pode marcar o equador usando o marcador de vidro (ou tinta-da-china ou ainda o pincel e tinta).

Para localizar as estrelas com precisão necessitará de um sistema de coordenadas. Se não quiser ter as coordenadas marcadas permanentemente, desenhe o sistema usando o marcador de vidro.

Marque um ponto situado a 23° 30′ do Pólo Norte (cerca de 1/4 de 90°). Este ponto será o *pólo da eclíptica* indicado por P. E. na fig- 1.

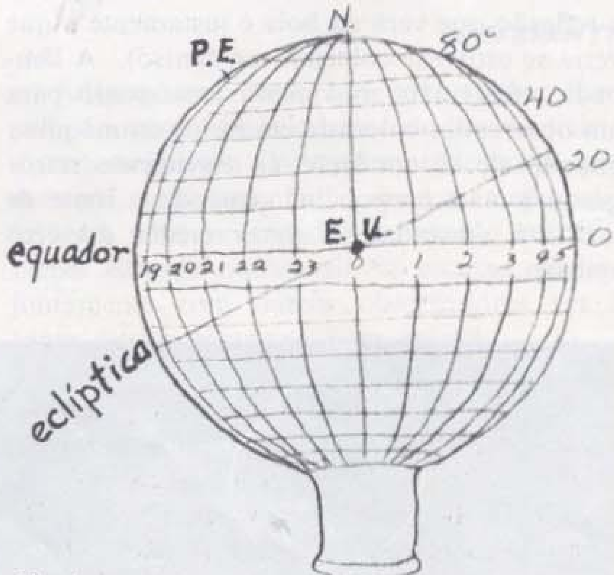
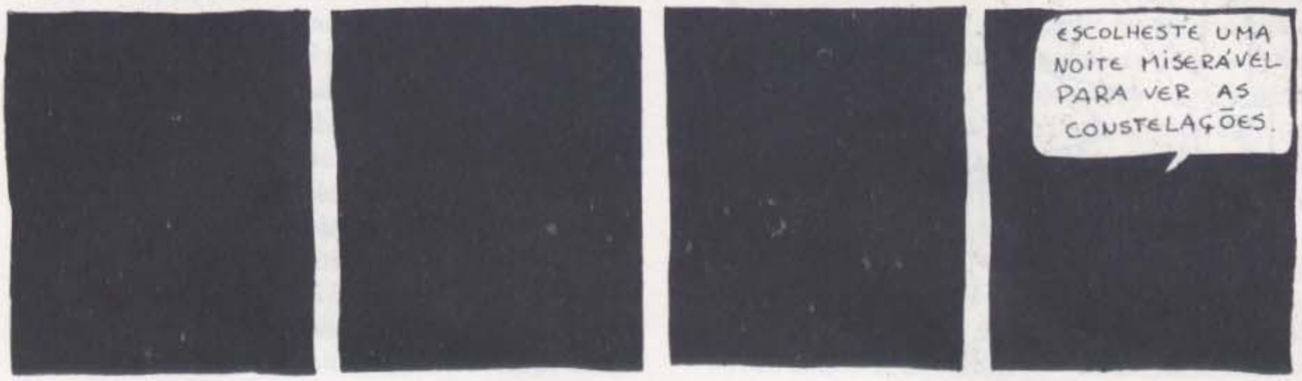


Fig. 1

B.C. **By John Hart**



A eclíptica (trajectória do Sol) é um círculo máximo a 90° do seu pólo. O ponto onde a eclíptica cruza o equador de sul para norte é chamado o *equinócio vernal*, posição do Sol em 21 de Março. Todas as posições no céu são consideradas para este deste ponto e a norte ou sul do equador.

Para marcar a escala norte-sul considere, no hemisfério norte, oito círculos paralelos ao equador e distanciados entre si de 10°. Estes círculos correspondem, na Terra, a pontos de igual latitude que na esfera celeste se designa por *declinação*. Trace círculos idênticos no hemisfério sul.

A posição de uma estrela, chamada a sua *ascensão recta*, é registada, em horas, para este do equinócio vernal. Para marcar a escala este-oeste, marque intervalos de 1/24 do perímetro total da esfera celeste, começando no equinócio vernal. Estas marcações distam 15° entre si — o firmamento roda de 15° durante uma hora.

A partir duma tabela de posições das estrelas ou de um mapa celeste, pode determinar as coordenadas de uma estrela. Marque então, no seu globo, a posição da estrela. Todas as posições este-oeste são expressas para este, ou seja, para a direita do equinócio vernal (considerando que o observador está virado de frente para o globo).

Para completar o modelo, adapte agora ao gargalo do balão a rolha atravessada pelo tubo de vidro de tal modo que o tubo quase toque o fundo do balão (mais precisamente o pólo norte do modelo da sua esfera celeste). Deite água corada dentro do balão de modo que, quando ele estiver com o gargalo virado para baixo, o nível do líquido coincida com o equador. Por segurança, ate bem a rolha ao gargalo, para que não caia. Use fio de arame (fig. 2).

Tem, assim, ao seu dispor um modelo do céu tal como o veria de vários pontos do Hemisfério Norte. Se estivesse no Pólo Norte da Terra o norte celeste estaria precisamente na vertical, por cima da sua cabeça (zénite) e veria somente as estrelas da metade norte do firmamento. Se estivesse à latitude 45° N, o pólo norte celeste estaria a meia distância entre o horizonte e o zénite. Pode simular o aspecto do céu na latitude de 45° N inclinando o eixo do seu globo a 45° e rodando-o. Se segurar o globo mantendo o eixo horizontal, verá qual o aspecto do céu para um observador situado no equador.

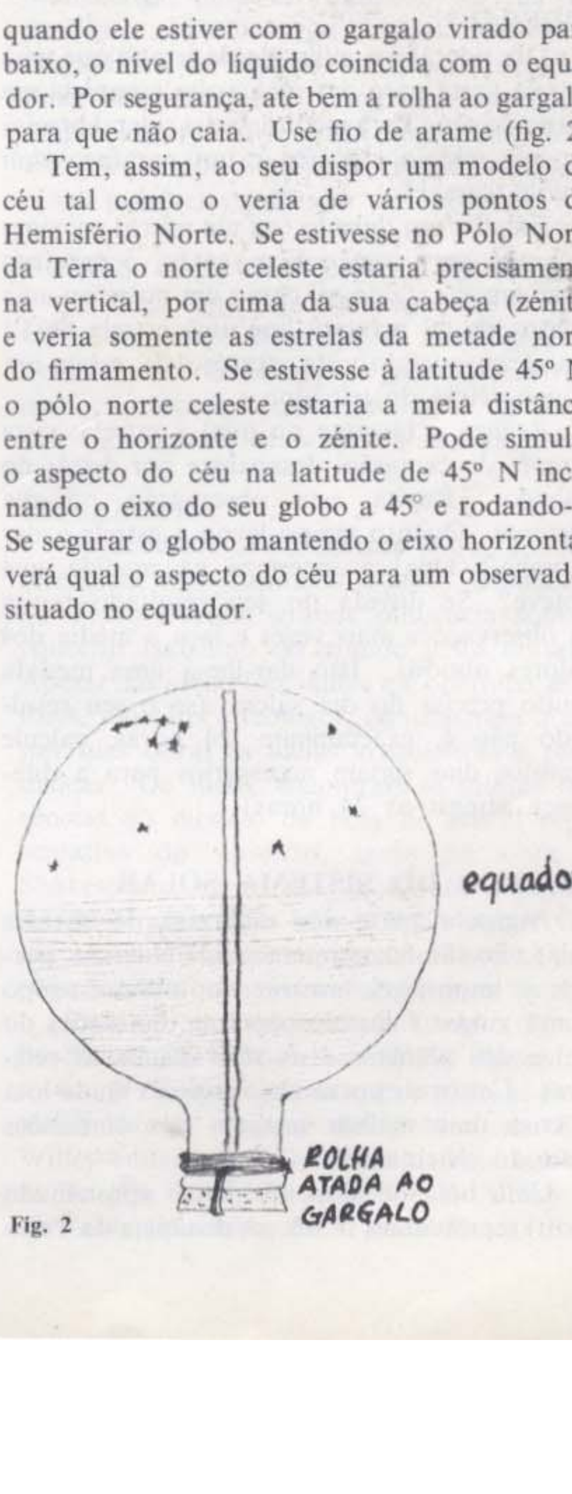
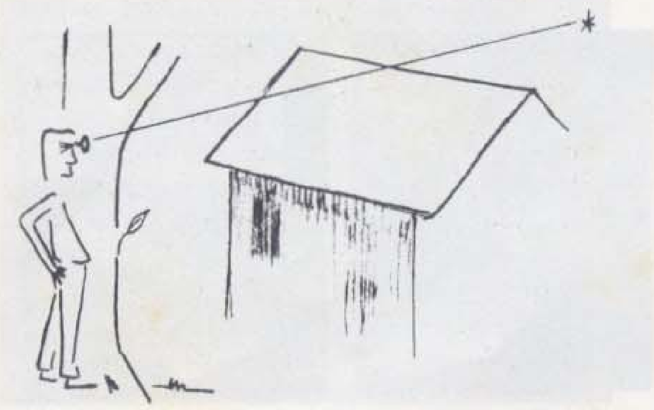


Fig. 2



QUAL A DURAÇÃO DE UM DIA SIDERAL?

Dia sideral é o intervalo de tempo que uma estrela gasta para dar uma volta completa em torno do céu. Para medir um dia sideral precisa ter um relógio eléctrico e um parafuso com argola (camarão).

Escolha um telhado (ou um muro) próximo e virado para oeste. Fixe, então, o parafuso num suporte rígido tal como um poste ou uma árvore, de tal maneira que uma estrela de 1.ª grandeza, quando vista através dele, esteja um pouco acima do telhado.

Registe o instante no qual a estrela, vista através do camarão, desaparece por detrás do telhado. Repita esta observação no dia seguinte. Quanto tempo levou a estrela a dar a volta? Qual a incerteza na medida que obteve? Se duvida do seu resultado repita as observações mais vezes e faça a média dos valores obtidos. Isto dar-lhe-á uma medida muito precisa do dia sideral (se o seu resultado não é, exactamente, 24 horas, calcule quantos dias seriam necessários para a diferença atingir as 24 horas).

MODELO DO SISTEMA SOLAR

A maior parte dos esquemas do sistema solar não são feitos numa escala correcta, porque é impossível mostrar ao mesmo tempo numa vulgar folha de papel as dimensões do Sol e dos planetas e as suas distâncias relativas. Construir um modelo à escala ajudá-lo-á a criar uma melhor imagem das dimensões reais do sistema solar.

Uma bola de ténis (diâmetro aproximado 7 cm) representará o Sol. A distância da Terra ao Sol é 107 vezes o diâmetro deste astro; no modelo, aproximadamente, 823 cm. (Pode confirmar isto facilmente. O Sol tem um diâmetro de meio grau — cerca de metade da largura do seu polegar quando visto à distância do comprimento do seu braço estendido. Verifique isto , se desejar, comparando o seu polegar ao diâmetro angular da Lua, o qual é aproximadamente igual ao do Sol; ambos têm diâmetro de meio grau. Mantenha o seu polegar na posição referida anteriormente e afaste-se até que o diâmetro angular da bola seja aproximadamente metade da largura do seu polegar. Estará então a uma distância compreendida entre 7,5 e 9 metros da bola!). Como o diâmetro do Sol é, aproximadamente, 1 400 000 km, no modelo, 1 cm representará cerca de 183 000 km. As distâncias e dimensões de todos os outros planetas podem ser obtidos a partir desta escala.

A Lua está a uma distância média da Terra de 384 000 km e tem um diâmetro de 3 476 km. Onde se encontra a Lua no modelo que estamos considerando? Qual o seu diâmetro? Complete a tabela indicada abaixo, preenchendo a coluna das distâncias. Isso levá-lo-á a resultados surpreendentes.

A distância média entre a Terra e o Sol é chamada a "unidade astronómica" (UA). Esta unidade é usada sempre que as distâncias que se estão a considerar digam respeito ao sistema solar.

Modelo, à escala, do sistema solar

Astro	Distância ao Sol		Diâmetro		Objecto modelo
	UA	Modelo (cm.) (aprox.)	Km (aprox.)	Modelo (cm) (aprox.)	
Sol	----	----	1 400 000	7	–bola de
Mercúrio	0,39		4 600		ténis
Vénus	0,72		12 000		
Terra	1,00	823	13 000		–cabeça
Marte	1,52		6 600		de
Júpiter	5,20		140 000		alfinete
Saturno	9,45		120 000		
Úrano	19,2		48 000		
Neptuno	30,0		45 000		
Plutão	39,5		6 000		
Estrela mais próxima					

CONSTRUÇÃO DE UM RELÓGIO DE SOL

Se está interessado em construir um relógio de sol, encontrará na secção Cientista Amador da revista *Scientific American* um grande número de artigos que lhe serão úteis. Consulte, em particular, o número de Agosto de 1959. Consulte também os números de Setembro de 1953, Outubro de 1954, Outubro de 1959, ou Março de 1964. O livro *Sundials* de Mayall and Mayall (editado por Charles T. Branford, Co. Publishers, Boston) contém teoria e instruções práticas para a construção de uma grande variedade de relógios de sol. Pode, ainda, recorrer a Enciclopédias que o irão, sem dúvida, ajudar também.

DESENHO DUM ANALEMA

Já alguma vez viu um analema? Examine um globo terrestre e verá nele representada uma escala tendo a forma de um 8, na qual se encontram marcadas datas. É esta escala em forma de oito que se denomina por analema. Um analema é usado para representar as diferentes posições do Sol durante o ano.

Poderá dispor de um analema feito por si. Para isso proceda como a seguir se indica. Coloque um pequeno espelho quadrado sobre uma superfície horizontal de tal maneira que ao meio-dia a luz do Sol reflectida pelo espelho incida sobre uma parede virada a sul. Faça observações diárias, sempre à mesma hora (por exemplo, ao meio-dia) e marque, numa folha de papel colada à parede, o ponto de incidência da luz reflectida, correspondente a cada observação. (A folha de papel deve estar sempre na mesma posição). Registe a data ao lado do ponto de incidência. O movimento norte-sul é mais evidente durante os meses de Setembro e Outubro e de Março e Abril. Poderá, se estiver interessado, encontrar, em livros de astronomia e em Enciclopédias, informação suplementar sobre o deslocamento este-oeste do Sol (procure no tema Equação de Tempo).

STONEHENGE

Durante séculos, Stonehenge (pág. 2 da Unidade 2 do *Texto*) tem-se revelado um mistério. Alguns cientistas têm admitido tratar-se de um templo pagão, outros pensaram ser um monumento dedicado a chefes barbaramente assassinados. A lenda invocou o poder de Merlin para explicar como as pedras foram transportadas para o local em que hoje se encontram. Estudos recentes indicam que Stonehenge pode ter sido um observatório astronómico onde, por exemplo, se teria feito previsão de eclipses.

Leia o artigo "Stonehenge Physics", no número de Abril de 1966 da revista *Physics Today; Stonehenge Decoded*, da autoria G. S. Hawkins e J. B. White; ou consulte o número de Junho 1953 da revista *Scientific American*. Faça uma descrição e/ou um modelo de Stonehenge, para ser utilizado na sua aula de Física. Leia o artigo "Novos monumentos megalíticos do distrito de Évora" de H. L. Pina, nas actas do II Congresso Nacional de Arqueologia (1971). Faça uma descrição do cromeleque dos Almendres (Évora) e comente o seu possível significado astronómico.

NOMES DAS CRATERAS LUNARES

Faça uma lista de nomes das crateras. Consulte o livro *Biographical Encyclopedia of Science and Technology* de Isaac Asimov, no qual encontrará informação acerca de cientistas cujos nomes foram dados às crateras.

LITERATURA

Os modelos astronómicos a que foi feita referência nos Capítulos 5 e 6, Unidade 2, do *Texto* tiveram grande influência sobre o conceito Isabelino do mundo e do universo. Apesar das ideias de Galileu e Copérnico, escritores, filósofos e teólogos, continuaram a usar nas suas obras as ideias aristotélicas e ptolemaicas. De facto, encontram-se muitas referências ao modelo da bola de cristal representativa do universo, tanto na obra de Shakespeare, como nas de Donne e Milton. As referências eram muitas vezes subtis visto que essas ideias eram comummente aceites pelas pessoas para quem os trabalhos eram escritos.

Para ter uma ideia deste assunto, leia as brochuras *The Elizabethan World Picture*, de E. M. W. Tillyard, editado por Vintage Press, e *Seventeenth Century Background*, de Basil Willey editado por Doubleday. Veja também os artigos de H. Butterfield e B. Willey no *Texto da Colectânea* do Projecto Física. Referências adicionais podem ser encontradas nas Fontes Adicionais sobre "Ciência e Literatura", na parte final desta secção de Actividades (página 192).

Um exemplo interessante das ideias acima referidas e expressas na literatura, é o que se encontra em *O "Fausto"* de Christopher Marlowe, quando Fausto vende a sua alma em troca dos segredos do universo. Falando ao diabo, diz Fausto:

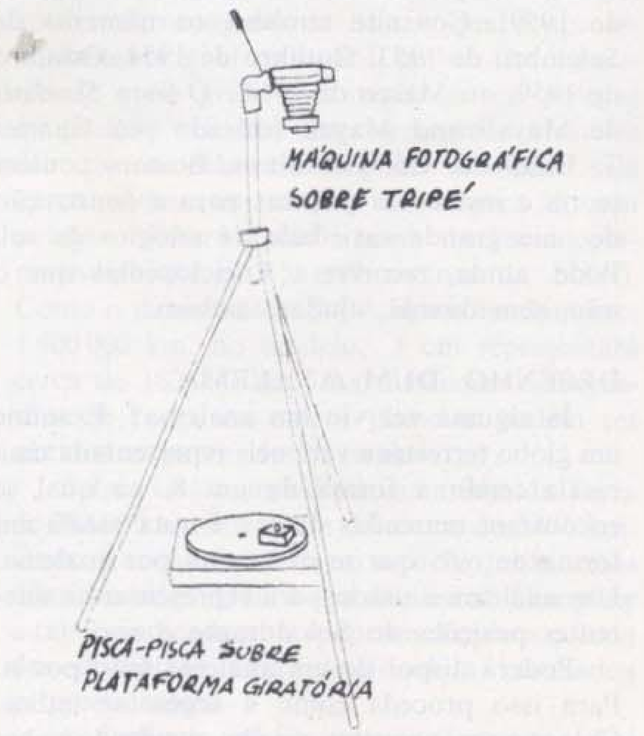
"...Vem, Mefistófles, vamos discutir,
De novo argumentar de Astrologia.
Diz cá: Há muitos céus por sobre a lua?
São os corpos celestes um só globo
Como a substância da terrena esfera?..."[1]

SISTEMAS DE REFERÊNCIA

1. Segure a extremidade de uma barra ou corda de cerca de um metro de comprimento. Peça a um colega que segure a outra extremidade da mesma. Se rodar sobre si mesmo de tal maneira que esteja sempre virado para o seu companheiro enquanto ele caminha à sua volta descrevendo uma circunferência, vê-lo-á movendo-se à sua volta (em relação às paredes e mobília). Mas como o vê a si o seu companheiro? Peça-lhe que descreva o que ele vê quando o observa relativamente às paredes e mobília. Em que diferem e se assemelham as vossas descrições? Em que sentido viu (você) o seu companheiro mover-se — para a sua esquerda ou para a sua direita? Em que sentido o seu companheiro o viu a si mover-se — para a esquerda ou para a direita dele?

2. Para esta segunda demonstração necessita de uma máquina fotográfica, tripé, pisca-pisca e plataforma rotatória. Monte a máquina no tripé (usando o suporte do motor do estroboscópio se a máquina não tiver ligação para tripé) e coloque o pisca-pisca sobre a plataforma rotatória. Volte a objectiva da máquina para baixo.

Tire uma fotografia-pose com a máquina parada enquanto o pisca-pisca descreve uma circunferência. Se não usar a plataforma rotatória, desloque manualmente o pisca-pisca descrevendo uma circunferência previamente traçada no plano de fundo. Tire depois uma segunda fotografia com o pisca-pisca parado e a máquina em pose. Mova a máquina manualmente dando-lhe um movimento regular em



torno do eixo do tripé. Tente rodar a máquina com a mesma velocidade angular com que o pisca-pisca se movia na primeira fotografia.

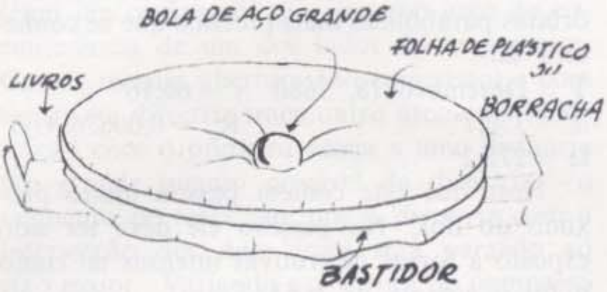
Poderá concluir, só a partir da observação das fotografias, qual dos dois objectos, a máquina ou o pisca-pisca, se estava a mover?

DEMONSTRAÇÃO DAS ÓRBITAS DE SATÉLITES

Prenda, num bastidaor de cerca de 55 cm de diâmetro, uma folha de plástico ou borracha de pequena espessura. Coloque o bastidor sobre alguns livros e no seu centro uma bola

[1] Do livro O "Fausto". Trad. por A. Oliveira Cabral. Colecção Bilingue. Ed. Pap. Fernandes, Lisboa, 1943 (pp. 66 e 68).

pesada, por exemplo, uma bola de aço, de uns 5 cm de diâmetro. O plástico (ou borracha) sofrerá uma deformação tal que haverá maior força solicitando o corpo para o centro quando ele está perto deste ponto do que quando o referido corpo está junto à periferia.



Pode usar um bastidor mais pequeno (35 cm de diâmetro) colocado sobre a plataforma de um retroprojector. Como satélites poderá usar berlindes ou pequenas esferas. Terá então uma sombra projectada da massa central, com os pequenos satélites em torno dela. Tome cuidado: não deixe cair a bola sobre o vidro do projector.

Se tirar fotografias estroboscópicas do movimento, poderá verificar as três leis de Kepler; poderá ver quais os pontos das órbitas onde os satélites atingem maior velocidade; poderá também ver como as próprias órbitas se movem no espaço. ·Para tirar a fotografia, coloque o bastidor no chão com papel preto por baixo.

Para tirar as fotografias pode usar quer o flash electrónico estroboscópico, quer o disco estroboscópico. Em qualquer dos casos coloque a máquina directamente por cima do bastidor e a fonte luminosa ao lado, levemente acima do plano do mesmo, de tal modo que o chão por baixo dele não fique muito iluminado. Uma bola pequena (ou berlinde) dará óptimas fotografias.

Pense nas seguintes questões:

1. Dará o seu modelo uma representação exacta do campo gravítico terrestre? Em que aspectos falha o modelo (além dos possíveis buracos que podem ser feitos, se não houver cuidado, com as unhas)?
2. Será mais difícil pôr um satélite em órbita circular do que numa órbita elíptica? Que condições devem ser satisfeitas para que a órbita seja circular?
3. São as três leis de Kepler realmente verificadas? Deveriam sê-lo?

Para ter mais pormenores e ideias, consulte o artigo "Satellite Orbit Simulator", na revista *Scientific American* de Outubro de 1958.

GALILEU

Ponha à discussão da classe alguns extractos da peça *Galileu*, da autoria de Bertoldt Brecht, que considere de interesse. Há uma certa controvérsia sobre se a referida peça reflecte realmente o que os historiadores julgam ter sido o pensamento de Galileu. Como termo de comparação pode ler: *O Crime de Galileu*, de Giorgio de Santillana; *Galileu e a Revolução Científica* de Laura Fermi; The Galileo Quadricentennial Supllement, na revista *Sky and Telescope* de Fevereiro de 1964; ou os artigos "Galileo: Antagonist" e "Galileo Galilei: An Outline of His Life", ambos no número de Abril de 1966 da revista *The Physics Teacher*, e "Valor Social e Moral da Obra de Galileo Galilei", de Bento de Jesus Caraça.

MODELOS DE SECÇÕES CÓNICAS

Arranje um cone (daqueles que se utilizam em demonstrações de matemática) que tenha sido cortado segundo planos originando as quatro possíveis secções cónicas.

Se não puder dispor de um cone como esse, coloque um cone de papel em frente de uma pequena lâmpada. Acenda a lâmpada e vire-a para a parede. Rode o cone várias vezes, alterando de cada vez o seu ângulo com a parede. Poderá assim obter todas as secções cónicas apresentadas na Secção 7.3 do *Texto*.

Um candeeiro eléctrico de "abat-jour" cilíndrico forma, na parede, acima e abaixo dele, sombras geralmente com a forma de hipérboles. Pode verificar isto traçando a curva obtida numa grande folha de papel e vendo se os pontos satisfazem à definição de uma hipérbole.

PROBLEMA: DETERMINE A DISTÂNCIA TERRA-SOL A PARTIR DE FOTOGRAFIAS DE VÉNUS

Suponha que Vénus tem o mesmo diâmetro que a Terra e que a escala das figuras da página 79 da Unidade 2 do *Texto* é 1,5 segundos de arco por milímetro.

Determine a distância da Terra ao Sol, em quilómetros.

COMO MEDIR ÁREAS IRREGULARES

Não acha cansativo e pouco prático medir a área de figuras irregulares contando todos os pequenos quadrados contidos nessas figuras? Muito mais cómodo será usar um dispositivo chamado planímetro. Há vários tipos de planímetros, desde o simples canivete de bolso até ao complexo dispositivo formado pela combinação de engrenagens sem-fim e braços articulados. Consulte a secção Cientista Amador da revista *Scientific American*, de Agosto de 1958 e Fevereiro de 1959.

OUTRAS ÓRBITAS DE COMETAS

Se lhe agradou fazer o modelo da órbita do cometa Halley, talvez queira fazer modelos de órbitas de outros cometas. Damos, a seguir, informação relativa a alguns cometas com interesse.

O cometa Encke tem interesse visto que possui o mais curto dos períodos conhecidos para os cometas, somente 3,3 anos. Ele é representativo por várias razões, de todos os cometas de período curto, que tenham órbitas de baixa inclinação e que passem perto da órbita de Júpiter. Junto desta eles são, muitas vezes, fortemente desviados. A elipse completa pode ser desenhada numa escala de 10 cm para 1 UA. Os parâmetros orbitais para o cometa Encke são:

$a = 2{,}22$ UA $\quad \Omega = 335°$
$e = 0{,}85$ UA $\quad \omega = 185°$
$i = 15°$

A partir destes dados podemos calcular a distância do periélio R_p (0,33 UA) e a distância do afélio R_a (4,11 UA).

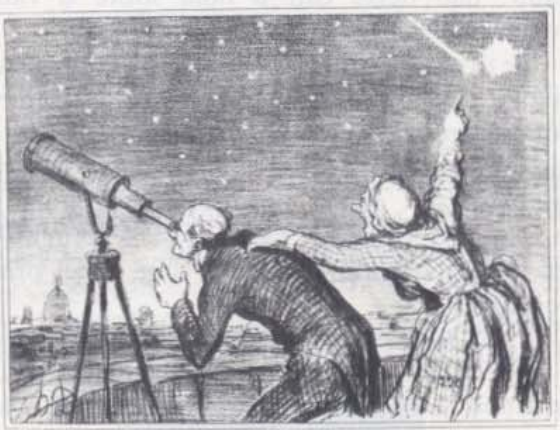
O cometa de 1680 é exaustivamente discutido na obra de Newton *Principia*, na qual são dados os valores aproximados dos parâmetros orbitais. Os valores de parâmetros de órbitas parabólicas mais precisos que se conhecem são:

T = Dezembro 18, 1680 $\quad i = 60{,}16°$
$\omega = 350{,}7°$ $\quad R_p = 0{,}00626$ UA
$\Omega = 272{,}2°$

Note que este cometa passou muito próximo do Sol. No periélio ele deve ter sido exposto a forças destrutivas intensas tal como o foi o cometa de 1965.

A órbita parabólica do cometa Candy (1960 N) tinha os seguintes parâmetros:

T = Fevereiro 8, 1961 $\quad i = 150{,}9°$
$\omega = 136{,}3°$ $\quad R_p = 1{,}06$ UA
$\Omega = 176{,}6°$



M. Babinet prévenu par sa portière de la visite de la comète. Uma litografia do artista francês Honoré Daumier (1808-1879). Museu das Belas Artes, Bóston.

COMO DESENHAR UMA ÓRBITA PARABÓLICA

A parábola é uma secção cónica cuja excentricidade é exactamente 1. Geometricamente, ela tem a seguinte propriedade interessante: todos os seus pontos estão a uma distância do foco que é igual à distância à recta perpendicular ao eixo maior e que passa pelo ponto situado a 2 vezes a distância periélio-foco. Esta recta é chamada a "directriz". A referida propriedade permite um traçado rápido da parábola.

Assim: sobre o eixo maior marque um ponto a uma distância do periélio igual à distância periélio-foco. Por esse ponto trace uma recta perpendicular ao eixo maior. Com centro no foco e abertura qualquer, trace (com um compasso) um pequeno arco de circunferência de um dos lados do eixo maior. Com a mesma abertura (do compasso) e com centro na directriz trace outro arco cuja intersecção com o primeiro esteja a uma distância tão grande quanto possível da directriz — o segmento de recta que une a directriz com a intersecção dos dois arcos será paralelo ao eixo maior. Variando a abertura do compasso poderá traçar vários pontos da parábola. Desenhe, depois, uma curva passando por eles.

O número de dias que um corpo, que se move em torno do Sol numa órbita parabólica, leva para ir de um ponto da sua órbita até ao periélio é-nos dado na tabela seguinte. Usando a tabela e conhecendo a data do periélio pode-se determinar a data em que um dado cometa se encontrava, em qualquer ponto da sua órbita.

Parábola para uma órbita com distância periélica $q = 0{,}20$ UA.

Distância do Sol	**Distância periélica q = (UA)**						
X UA	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
2,0	77,8	88,1	97,1	105,8	108,0	109,6	107,8
1,8	66,1	78,2	84,3	98,0	93,2	93,0	88,6
1,6	56,1	64,8	72,0	76,7	78,2	76,0	69,4
1,4	45,4	56,0	60,3	63,8	63,4	59,0	46,8
1,2	38,2	43,9	48,9	50,7	49,5	50,0	0,0
1,0	29,4	36,3	38,0	56,2	31,9	0,0	
0,8	19,6	23,4	27,8	24,5	0,0		
0,7	16,7	21,3	22,5	14,5			
0,6	18,8	17,5	17,2	0,0			
0,5	9,7	15,5	11,3				
0,4	6,9	9,8	0,0				
0,3	4,5	6,1					
0,2	2,6	0,0					
0,1	0,9						

FORÇAS EXERCIDAS SOBRE UM PÊNDULO

Se afastar um pêndulo da sua posição de equilíbrio e o largar dando-lhe ao mesmo tempo um pequeno impulso lateral, ele mover-se-á numa trajectória aproximadamente elíptica. De certo modo, o movimento obtido é semelhante ao de um planeta em torno do Sol, mas há algumas diferenças.

Para determinar a forma da órbita do pêndulo e verificar se o movimento segue a lei das áreas pode fazer uma fotografia estroboscópica utilizando o dispositivo representado na fig. 1. Monte um flash electrónico estroboscópico lateralmente em relação ao pêndulo ou coloque sobre este um conjunto formado por uma pequena lâmpada, uma pilha e, em frente da objectiva, um disco estroboscópico, accionado por um motor. Se cobrir metade de uma das 12 ranhuras do disco, com fita adesiva, obterá na fotografia, de 12 em 12 pontos, um ponto mais fraco, o que lhe fornecerá uma marca de medida do tempo — ver fig. 2. Pode, também, apoiar a máquina fotográfica de costas no chão. Coloque o disco estroboscópico entre a máquina e o pêndulo.

Serão semelhantes entre si os movimentos e forças no caso do pêndulo e no caso dos planetas? Para os planetas, o ponto de aplicação da força está situado num dos focos da elipse. E no caso do pêndulo? Faça medições a partir das fotografias que obteve para verificar se o pêndulo segue a lei das áreas do movimento provocado por uma força central.

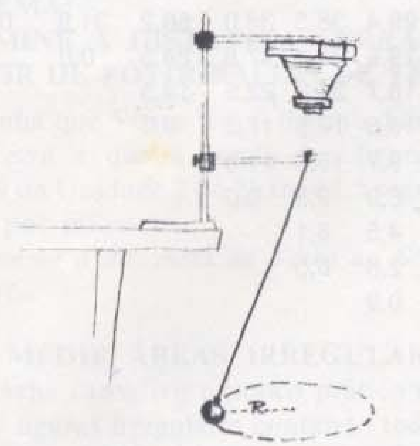
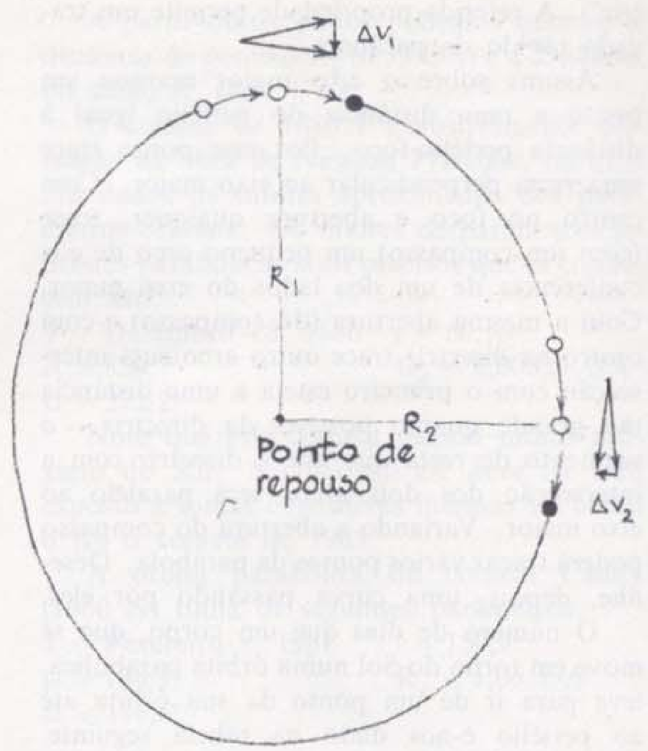


Fig. 1



No caso dos planetas, a força varia inversamente com o quadrado da distância entre o Sol e o planeta. A partir das fotografias que obteve pode determinar como varia a força central exercida sobre o pêndulo com a distância R ao ponto de repouso. Determine a variação de velocidade Δv para 2 secções da órbita, uma próxima e outra afastada do ponto de repouso (Δv_1 e Δv_2, como se mostra na figura). Como pode relacionar as acelerações nos dois pontos da órbita (note que as acelerações se obtêm a partir de Δv_1 e Δv_2) com as distâncias R? Será que a relação entre R e a força central é a mesma para o pêndulo e para os planetas? Se conseguir um exemplar da obra de Newton, *Principia*, leia a Proposição X.

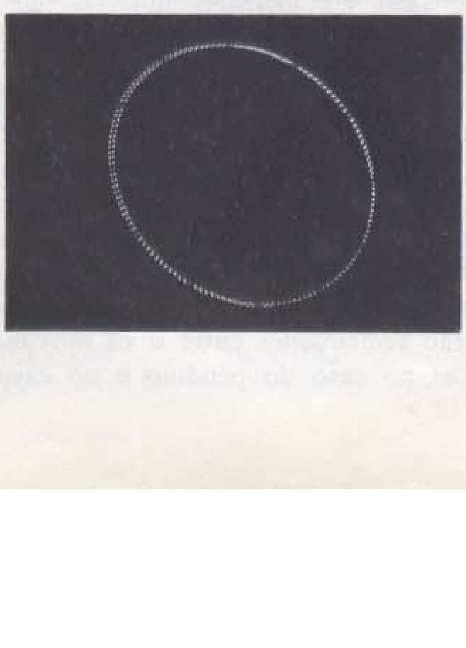


Fig. 2

O JULGAMENTO DE COPÉRNICO

Faça uma simulação do julgamento de Copérnico. Um grupo de estudantes representa a acusação e outro a defesa. Constitua o seu júri, se possível, por professores de Português, línguas estrangeiras e estudos sociais.

DESCOBERTA DE NEPTUNO E PLUTÃO

A unidade suplementar do Projecto Física, *Descobertas em Física*, descreve como a lei da gravitação universal de Newton foi usada para prever a existência de Neptuno e de Plutão, antes destes planetas terem sido observados. Leia a referida unidade e conclua se será ainda possível a descoberta de outro planeta para além de Plutão. Damos-lhe a seguir outras referências de que pode servir-se no seu estudo: o artigo "John Couch Adams and the Discovery of Neptune", na revista *The World of Mathe-*

matics e o artigo de Owen Gingerich "Solar System beyond Neptune" na revista *Scientific American* de Abril 1959.

HAIKU

Se tem jeito para literatura tente escrever um poema na forma haiku (originária do Japão) para sumarizar o que aprendeu até agora em física. As regras de estilo são simples: um haiku tem de ter três linhas, a primeira e a terceira tendo cinco sílabas e a segunda sete. Não é necessário rima. Apresentamos a seguir poemas haiku escritos por alguns estudantes:

Um epiciclo
As coisas complicadas
Kepler acabou

Órbita Marte
Com grande trabalho da
Terra obtida

Datar estrelas
Serviu Kepler nascendo
nova Física

Fontes adicionais SL-1 sobre Ciência e Literatura

MARJORIE NICOLSON

Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey

As referências seguintes foram seleccionadas da lista original publicada no *American Journal of Physics*, vol. 33, N.º 3, de Março 1965 (páginas 175-183). As fontes adicionais SL-1 foram preparadas a pedido do "Comittee on Resource Letters" da Associação Americana de Professores de Fisica, subsidiada pela "National Science Foundation" (E. U. A.).

III. HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA

Para uma introdução às leituras em ciência e literatura, apresentamos uma lista de seis volumes que apenas tratam o assunto indirectamente mas que são de grande importância pois nos mostram o pensamento dos nossos antecessores e o modo como ao longo dos tempos foi vista a Natureza.

*1. "The Making of the Modern Mind", de J. H. RANDALL. (Editado por Houghton Miffln Company, Boston, 1926; teve uma 2.ª edição em 1940). Um dos primeiro livros livros que tentaram fazer uma tal descrição; tem sido largamente aconselhado aos alunos (nos E. U. A.) em disciplinas como Inglês, Filosofia e Ciências Sociais. Embora esteja ultrapassado em certos aspectos, continua a ser uma valiosa intròdução ao pensamento moderno.

2. "The Idea of Progress", de J. B. BURY. (Editado por The Macmillan Company, New York, 1932; como brochura, editado por Dover Publishers, New York). Embora a ideia de progresso tenha sido analisada até épocas mais remotas na história da humanidade, desde o aparecimento deste livro, e outras matérias tenham sido adicionadas por estudiosos, o livro ainda permanece uma obra de referência que mostra a razão por que a ideia de progresso foi tão retardada, o modo como essa ideia se desenvolveu e o impacto que teve no pensamento humano durante quase três séculos.

3. "The Idea of Nature", de R. G. COLLINGWOOD. (Editado pela Oxford University Press, 1945, 1960; em brochura, pela Galaxy Books). Uma descrição breve mas elucidativa das atitudes em relação à Natureza, desde os Gregos até ao nosso século. A velha ideia da Natureza como vida, deu lugar, no século XVII, à teoria mecanicista da Natureza, que por sua vez levou, no século XIX, ao conceito de desenvolvimento.

4. "The Great Chain of Being: a Study in the History of an Idea", de A. O. LOVEJOY. (Editado por Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1936; em brochura, pela Harper Torchbooks). Um estudo monumental de uma das mais duradouras de todas as ideias: progressão gradual, sequência, graduação, ou escala da Natureza. Esta ideia originária de Platão, continuou a ser ao longo do século XVIII, uma das mais importantes ideias do pensamento humano.

5. "Science and the Modern World", de A. N. WHITEHEAD. (Editado por The Macmillan Company, New York, 1925; décima primeira edição em 1962; em brochura editado por Mentor Books). Um trabalho de grande importância para os estudantes. O Capítulo 3, "A Century of Genius", dá-nos uma retrospectiva admirável do que foi a literatura do século XVII.

6. "Metaphysical Foundations of Modern Physical Science". A Historical and Critical Essay, de E. A. BURTT. (Editado por Brace and Company, New York, 1925; brochura, editado pela Anchor Books). Um estudo importante das filosofias em que Newton se baseou para escrever o livro "Principia".

IV. OBRAS GERAIS SOBRE CIÊNCIA E LITERATURA

(relativas a mais de um século)

*7. "Science and English Poetry: an Historical Sketch, 1590-1950", de DOUGLAS BUSH. (Editado por Oxford University Press, New York, 1950). Este conjunto de lições (Patten Lectures) realizadas na Universidade de Indiana proporcionam a melhor introdução possível ao assunto, indicando atitudes de poetas para com a Ciência desde o período Isabelino até ao presente.

*8. "Literature and Science", de B. IFOR EVANS. (Editado por George Allen and Unwin, London, 1954). Cobre sensivelmente o mesmo campo que Bush, do ponto de vista da seguinte tese: "O meu objectivo é explicar a posição do artista, e mais particularmente do escritor, na nossa sociedade científica moderna".

9. "Scientific Thought in Poetry", de R. B. CRUM (Editado por Columbia University Press, New York, 1931) um dos primeiros trabalhos neste campo.

10. "Science and the Creative Spirit". Editado por HARCOURT BROWN (University of Toronto Press, Toronto, Ontário, 1958). "Este volume é o fruto de cinco anos de encontros do "Committee on the Humanistic Aspects of Science", com o apoio do "American Council of Learned Societies". Contêm ensaios de Harcourt Brown, Karl Deutsh, F. E. L. Priesley, David Hawkins.

*11. "The Common Sense of Science", de JACOB BRONOWSKI. (Editado por Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1953; em brochura editado por Vintage Books). Uma interessante discussão das atitudes científicas nos séculos XVII, XVIII, XIX e XX.

12. "Pilgrims Through Space and Time: Trends and Patterns in Scientific and Utopian Fiction", de J. O. BAILEY. (Editado por Argus Books, Inc., New York, 1947). Ficção científica referente aos séculos XVII-XX. O apêndice indica muitos romances científicos de vários períodos.

13. "Mountain Gloom and Mountain Glory: the Development of the Aesthetics of the Infinite", de M. H. NICOLSON. (Editado por Cornell University Press, Ithaca, New York, 1959; em brochura editado por Norton Library, 1963). A transferência de um novo sentido da imensidão para os objectos terrestres grandes, particularmente montanhas. Profundas mudanças devidas à astronomia e geologia provocando a glorificação moderna da imensa paisagem.

14. "The Orphic Voice: Poetry and Natural History", de ELIZABETH SEWELL. (Editado por Yale University Press, New Haven, Connecticut, 1960). Uma distinta crítica

e novelista inglesa discute "a função biológica da poesia na história natural dos homens simbolizada pelo mito de Orfeu nos trabalhos dos maiores escritores ingleses desde Bacon e Shakespeare, Erasmo, Darwin e Goethe, a Wordsworth e Rilke".

*15. "Literature and Science: an Antology from English and American Literatura, 1600-1900". Editado por Grant McColley (Packard and Company, Chicago, 1940). Originalmente elaborada como livro de texto para estudantes dum Instituto de Tecnologia, esta antologia inclui passagens de 53 autores. Cerca de metade referem trabalhos de Ciência, os outros são da autoria de poetas e prosadores comentando a ciência. Embora o livro não tenha voltando a ser editado (o editor faleceu), pode encontrá-lo facilmente em bibliotecas universitárias.

*16. "A Book of Science Verse: the Poetic Relations of Science and Technology". Editado por E. EASTWOOD (MacMillan Company Ltd., London, 1961). Uma agradável antologia, contendo poemas ou partes de poemas desde Lucrécio até ao presente, todos relacionados directamente com ciência ou tecnologia.

*17. "Watchers of the Skies" e "The Torchbearers", de ALFRED NOYES. (Editado por Sneed, London, 1937). Nestes poemas, um poeta moderno, retrata, frequentemente de forma dramática, momentos importantes da história da ciência.

V. A RENASCENÇA E O SÉCULO XVII

*18. "The Seventeenth Century Background: Studies in the Thought of the Age in Relation to Poetry and Religion", de BASIL WILLEY. (Editado por Chatto Windus, London, 1934, 1953; em brochura, por Anchor Books). O professor Willey da Universidade de Cambridge faz o confronto entre a literatura e o conhecimento filosófico e científico daquele período.

19. "Science and Religion in Elizabethan England", de P. H. KOCHER. (Editado por Huntington Library, San Marino, California, 1953). Ciência, religião e literatura estão intimamente interligadas neste período, de tal forma que o efeito da ciência sobre a religião é importante para a compreensão da literatura.

20. "The Scientific Renaissance, 1450-1630", de MARIE BOAS. (Editado por Harper and Row, New York, 1962). Uma vasta descrição, de importância para os estudantes que desejem compreender os antecedentes da Nova Filosofia do século XVII.

21. "The Platonic Renaissance in England", de ERNST CASSIRER, traduzido para o inglês por J. P. Pettegrove. (Editado por University of Texas Press, Austin, 1953). Uma indispensável base de conhecimentos para o estudo da literatura, filosofia ou ciência da Renascença. É escrito por um dos mais importantes e originais filósofos dos nossos tempos, Não é de fácil leitura, mas vale bem o esforço.

*24. "Francis Bacon, Philosopher of Industrial Science", de BENJAMIN FARRINGTON. (Editado por Henry Schuman, New York, 1949; em brochura, editado por Collier Books, 1961). "Francis Bacon: the First Statesman of Science", de J. C. Crowther. (Editado por Cresset Press, London, 1960). "Francis Bacon: His Career and Thought", de F. H. Anderson (Editado por University Publishers, New York, 1962). "Francis Bacon and the Modern Dilemma", de L. C. Eiseley (Editado por Nebraska Press, Lincoln, 1962).

VI. A NOVA FILOSOFIA

*26. "From the Closed world to the Infinite Universe", de ALEXANDRE KORÉ. (Editado por Johns Hopkins Press, Baltimore, 1952). Um tratamento exaustivo e bem feito da mudança do velho para o novo cosmos. O seu autor é um distinto historiador de ciência, matemático e filósofo, cujo livro "Études galiléennes" (editado por Hermann et Cie., Paris, 1939) é um estudo definitivo do lugar de Galileu como pensador.

27. "Galileo as a Critic of the Arts", de ERWIN PANOFSKY. (Editado por Martinus Nijhoff, The Hague, 1954). Galileu, filho de um distinto músico, cresceu mais num ambiente humanístico e artístico do que num científico. Este volume (ilustrado) não discute somente a atitude de Galileu perante a pintura e escultura mas oferece também um contraste interessante entre Galileu e Kepler, particularmente nas suas atitudes em relação ao sistema planetário e seu movimento. É um clássico, em certa medida, no estudo da intercorrelação ciência--artes.

*28. "Science and Literature", de DOUGLAS BUSH, em *Seventeenth Century Science and the Arts*, editado por H. H. Rhys (Princeton University Press, Princeton, 1961). Contém ensaios sobre "Seventeenth Century Science and the Arts", de STEPHEN TOULMIN; "Science and Visual Art", de J. S. ACKERMAN; "Scientific Empiricism in Musical Thought", de C. V. PALISCA.

*29. "The Breaking of the Circle: Studies in the Effect of the New Science on Seventeenth Century Poetry", de M. H. NICOLSON. (Editado por Northwestern University Press, Evanston, Illinois, 1950; 2.ª edição editada por Columbia University Press, 1960; em brochura, editado por Columbia, 1962). O quebrar de velhas concepções da Natureza e o nascer da filosofia mecanicista reflectidos na poesia do período.

*30. "Voyages to the Moon", de M. H. NICOLSON. (Editado por The Macmillan Company, New York, 1948; em brochura editado por Macmillan en 1960). Observações de Galileu a respeito da topografia da Lua serviram de estímulo para importantes experiências em aerostática e levaram também muitos autores a escrever sobre imaginárias viagens à Lua, fantasistas, satíricas e realistas.

31. "Milton and the Telescope", em *Science and Imagination*, de M. H. NICOLSON. (Editado por Cornell University Press, Ithaca, New York, 1956), páginas 80-109. O efeito da astronomia sobre a imaginação de Milton, em "Paradise Lost. Milton and Science", de KESTER SVENDSEN. (Editado por Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1956). Um estudo completo do conhecimento de Milton, que se reveste de interesse em vários aspectos do campo científico.

VII. A RESTAURAÇÃO E O SÉCULO XVIII

*33. "The Eighteenth Century Background", de BASIL WILLEY. (Editado por Chatto Windus, London, 1940). Realça atitudes para com a "Natureza", como importante característica do pensamento do século.

*34. "The Heavenly City of the Eighteenth Century Philosophers", de C. L. BECKER. (Editado por Yale University Press, New Haven, Connecticut, 1932; 11.ª edição, 1957; em brochura, por Yale U. P., 1959). Este pequeno volume de quatro leituras admiravelmente escritas analisa as atitudes dos Filósofos do século XVIII e *filosofia* de maneira a indicar que, apesar da sua revolta contra a religião revelada, eles estavam realmente mais próximos do universo de Dante e Aquino que do de Einstein.

35. "The Philosophy of the Enlightenment", de ERNST CASSIRER. (Editado por Princeton University Press, Princeton, 1951; em brochura, por Beacon, 1955). Importante para este período como o n.º 21 para a Renascença.

*37. "Newton Demands the Muse: Newton's Opticks and the Eighteenth Century Poets", de M. H. NICOLSON. (Editado por University Press, Princeton, 1946; reeditado por Archon Books, Hamden, Connecticut, 1963). Este livro foi largamente lido por leigos no assunto visto que para eles era mais compreensível que os "Principia", uma vez que estava escrito em inglês e tratava de assuntos como luz e cor, sempre tema de poesia. A recepção popular à obra, atitudes para com Newton, muda, em tratamento de luz e cor, a estética e a metafísica encontradas neste livro de Nicolson.

*38. "Scientists and Amateurs. A History of the Royal Society", de DOROTHY STIMSON. (Editado por Henry Schuman, New York, 1948). Realça a diferença entre a Royal Society original e a actual. Muitos membros eram amadores, aristocratas, membros do clero, autores. Como Sprat sugere, um grupo quis transformar a Society numa Academia Britânica. Uma maneira interessante de conhecer a mudança de atitudes em relação à Royal Society é ler obras, com base no índice (sob os títulos "Gresham College" e "Royal Society"). "The Diary of Samual Pepys", que foi escrito praticamente durante a primeira década da Society. Pepys começou com ironia. Depois da sua eleição, ele participou em encontros e experiências. O apogeu da sua carreira foi a sua nomeação como Presidente da Royal Society.

39. "Swift's Satire on Learning in A Tale of a Tub", de M. K. STARKMAN. (Editado por Princeton University Press, Princeton, 1950). Um estudo completo das atitudes satíricas de Swift em relação a vários tipos de aprendizagem, incluindo a Nova Ciência.

*40. "The Scientific Background of Swift's Voyage to Laputa", de N. H. MOHLER e M. H. NICOLSON. Em *Science and Imagination*, de M. H. NICOLSON. (Editado por Cornell University Press, Ithaca, New York, 1956), páginas 110-154. A terceira viagem de "Gulliver's Travels", é uma sátira à ciência, desde a matemática à astronomia, e particularmente à experimentação, na Royal Society. As experiências absurdas na Grand Academy são sátiras a experiências realizadas por membros da Royal Society.

41. "Swift's Flying Island in the Voyage to Laputa", de N. M. MOHLER e M. H. NICOLSON. Ann. Sci. n.º 2, 405-430 (1937). Os conhecimentos científicos sobre a estrutura da "Ilha Voadora" e o seu princípio de voo por magnetismo terrestre.

44. "Scientific Verse". Em *English Literature in the Early Eighteenth Century*, de BONAMY DOBRÉE. (Editado por Clarendon Press, Oxford, 1959). Discussão entre escritores que se intitulam a si próprios "poetas científicos".

45. "Doctor Johnson on Ballooning and Flight", de J. E. HODGSON. (Editado por Oxford University Press, London, 1925). Originalmente publicado em London Mercury 10, 63 ff., (1924). Samuel Johnson discutiu em Rasselas, de forma pessimista, o futuro do voo. Tal como os seus contemporâneos, contudo, ele esteve grandemente interessado em experiências da época com balões.

47. "William Blake: A Man Without a Mask", de JACOB BRONOWSKI. (Editado por Secker-Warburg, London, 1948). "Tracks in the Snow: Studies in English Science and Art", de RUTHVEN TODD. (Editado por Charles Scribner's Sons, New York, 1947). Ensaios sobre William Blake, mais como artista que como poeta.

48. "The New England Mind", de PERRY MILLER. (Editado por Macmillan Company, New York, 1 vol. 1939; por Beacon, Boston, 2 vols., 1961; em brochura por Beacon). Reconhecido como um trabalho representativo versando o tipo de cultura dos colonos. Várias secções sobre atitudes perante a ciência na Nova Inglaterra durante os séculos XVII e XVIII.

49. "The Pursuit of Science in Revolutionary America, 1735-1789". (Editado por University of North Caroline Press, Chapel Hill, North Caroline, 1956). Mostra ligações significativas entre as Colónias e a Europa, particularmente a Inglaterra. "Franklin and Newton: An Inquiry into Speculative Newtonian Experimental Science and Franklin's Work in Electricity", de I. B. COHEN. (Editado por American Philosophical Society, Philadelphia, 1956).

VIII. O SÉCULO XIX

*51. "Ideas and Beliefs of the Victorians", editado por Harman Grisewood (Sylvan Press, London, 1950). Uma série interessante de palestras da B. B. C. escritas por distintos cientistas, membros do clero, escritores, incluindo "Unbelief in science", de J. BRONOWSKI, 164-169, num grupo de ensaios sobre "Man and Nature", 164-243.

*53. "Science and Literary Criticism", de HERBERT DINGLE. (Editado por Nelson and Sons, New York, 1949). Ensaios sobre vários escritores do século XIX. Dingle editou também "A Century of Science, 1851-1951". (Editado por Hutchinson, London, 1951).

55. "A Newton among Poets: Shelley's Use of Science in Prometheus Unbound", de CARLO GRABO. (Editado por University of North Caroline Press, Chapel Hill, North Caroline, 1930). Whitehead tinha escrito em "Science and the Modern World" que, se Shelley não tivesse sido um poeta, ele podia ter sido um grande químico. Neste estudo é discutido o livro, "Prometheus Unbound"

como sendo "um drama dos elementos químicos". Grabo escreveu a seguir "The Magic Plant: The Growth of Shelley's Thought". (Editado por University of North Caroline Press, Chapel Hill, North Caroline, 1936).

IX. O SÉCULO XX

*71. "Forces in Modern British Literature", de W. Y. TINDALL. (Editado por Alfred A. Knopf, Inc., New York, 1947). Entre as forças refere-se a ciência, em relação ao naturalismo, e o impacto de Freud e outros psicólogos.

72. "A Key to Modern British Poetry", de LAWRENCE DURRELL. (Editado pela University of Oklahoma Press, Norman, Oklahoma, 1952). O novelista britânico desenvolve a tese que o impacto da relatividade e psicologia mudou o ponto de vista de todos os escritores importantes a respeito do mundo. Discute as obras de Eliot, Joyce, V. Woolf, Proust e outros, e aponta uma mudança radical no estilo literário da época, como consequência do princípio do indeterminismo, a nível do conhecimento do mundo exterior e das novas descobertas da psicologia a nível do mundo interior. As quatro novelas recentes de Durrell, que constituem o "Alexandria Quartet", envolvem vários aspectos da sua tese. Consulte o artigo "Durrell and Relativity", da autoria de A. M. BORK, na revista The Centennial Review, número 7, páginas 191-203 (Spring, 1963) para apreciar uma crítica muito interessante ao tratamento da relatividade, por Durrell, tanto no livro "A Key to Modern British Poetry" como em "Alexandria Quartet".

73. "Science and Poetry", de I. A. RICHARDS. (Editado por W. W. Norton ad Company, Inc., New York, 1926); "Principles of Literary Criticism". (Editado por Harcourt, Brace and Company, Inc., 5.ª edição, 1934); em brochura, editado por Harvest Book); "Pratical Criticism: A Study of Literary Judgment", (Editado por Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1950). Três trabalhos devidos a um dos criticos modernos de maior influência. Estes trabalhos tratam do problema da psicologia do comportamento em relação com a literatura.

82. "Space, Time and Architecture", de S. GIEDION. (Editado pela Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1938; 4.ª edição ampliada, 1962). Refere a tese segundo a qual o desenvolvimento da fisica moderna e da arte moderna procedem dum desacordo com velhas teorias de espaço e tempo.

83. "Time and Literature", de HANS MEYERHOFF. (Editado pela University of California Press, Berkeley, 1955; em brochura, em 1960). Uma comparação entre o conceito cientifico de tempo em fisica e o tratamento literário de tempo pelos cientistas e autores seguintes: Proust, Scott Fitzgerald, Thomas Wolfe, e outros.

X. ÉPOCA CONTEMPORÂNEA: CONTROVÉRSIA E SÍNTESE

88. "The History of Science and the New Humanism", de GEORGE SARTON. (Editado por Indiana University Press, Bloomington, Indiana, 1963). Uma nova forma das palestras de Colver na Universidade Brown, em 1930, feita por um distinto historiador de ciência.

*89. "Science and the Modern Mind. A Symposium". Editado por Gerald Holton. (Beacon Press, Boston, 1958). (Originalmente publicado em Daedalus 87 (Winter, 1958) como um resultado de uma conferência da American Academy of Arts and Sciences). "Os nove colaboradores desta obra apresentam uma vasta gama de pontos de vista acerca do universo dentro e fora de nós". Nos três primeiros ensaios, Henry Guerlac, Harcourt Brown e Giorgio de Santillana fazem uma visão retrospectiva acerca de como o nascer da ciência afectou a cultura posterior. Philipp Frank, Robert Oppenheimer, e Jerome S. Bruner discutem os efeitos dos conceitos-chave da ciência sobre as atitudes contemporâneas. Os últimos três, P. W. Bridgman, Charles Morris e Howard Mumford Jones, têm em vista o futuro.

93. "The Sciences and the Arts: A New Alliance", de H. G. CASSIDY. (Editado por Harper & Row, New York, 1962). "The Muse and the Axiom", de H. G. CASSIDY, em American Science, n.º 51, páginas 315-326 (1963). O último começa citando Henry Adams como "um epítome do não cientista perante a ciência que ele não compreende realmente".

96. "Physics and Culture", de GERALD HOLTON, Bull. Inst. Phys. & Phys. Soc., páginas 321-329 (Dezembro 1963). Reeditado em "Why Teach Physics?", de S. C. BROWN e N. CLARKE. (Editado por M. I. T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1964). Contém o discurso da sessão inaugural à Segunda Conferência Internacional sobre Educação em Fisica, realizada no Rio de Janeiro em Julho de 1963. Fornece-nos uma razão para a elaboração de cursos de ciências que introduzem ligações explícitas com o humanismo e outros campos de estudo.

FILMES-SEM-FIM

FILME-SEM-FIM L10 MOVIMENTO RETRÓGRADO — MODELO GEOCÊNTRICO

O filme ilustra o movimento de um planeta — Marte — tal como é visto da Terra. O filme foi feito usando a "máquina de epiciclos" como modelo do sistema ptolemaico.

A primeira parte do filme mostra o movimento retrógrado característico durante o laço efectuado quando o planeta está mais próximo da Terra. Em seguida a cena ilumina-se e vê-se que o movimento é devido à combinação de dois movimentos circulares. Um braço do modelo roda na extremidade do outro.

A Terra, no centro do modelo, é então substituída por uma máquina fotográfica que está dirigida segundo uma direcção fixa do espaço. A máquina regista o movimento do planeta relativamente às estrelas fixas (assim é ignorada a rotação da Terra em torno do seu eixo). Tudo se passa como se o observador colocado na Terra estivesse observando as estrelas e planetas na direcção de uma constelação do zodíaco, por exemplo Sagitário.

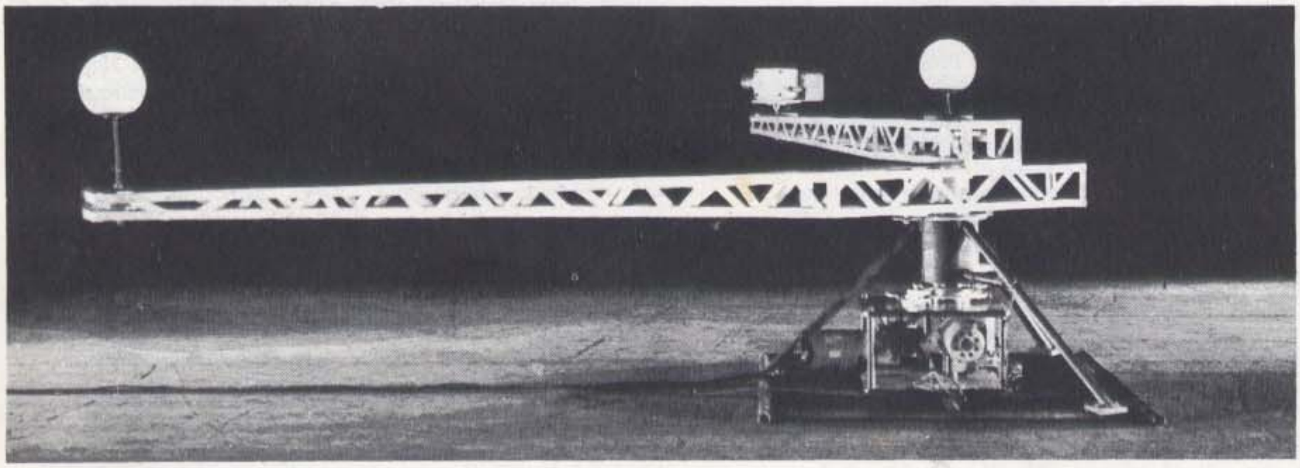
O planeta é representado por um globo branco. O movimento directo do planeta, relativo às estrelas fixas, é um movimento no sentido este e para a esquerda (como seria se o observador estivesse virado para sul). O movimento retrógrado de um planeta não ocorre sempre na mesma região do céu; assim, alguns movimentos retrógrados não são visíveis na direcção escolhida para observação. Para melhor simular observações de planetas, foram fotografados mais três laços retrógrados, usando lâmpadas mais pequenas e velocidades menores.

Observe a variação no brilho aparente e no diâmetro angular do globo enquanto ele passa rapidamente perto da máquina. Os planetas têm o aspecto de pontos luminosos, mas mesmo em relação a eles se pode observar uma alteração no brilho. Isto não foi considerado no sistema ptolemaico, que apenas teve em vista as posições dos planetas no céu. O filme-sem-fim L11 mostra um modelo semelhante mas baseado na teoria heliocêntrica.

FILME-SEM-FIM L11 MOVIMENTO RETRÓGRADO — MODELO HELIOCÊNTRICO

Este filme é baseado em modelos mecânicos heliocêntricos de grandes dimensões. Os 2 globos, um cor de laranja e um azul, representam respectivamente o planeta Marte e a Terra. Os planetas movem-se em circunferências concêntricas à volta do Sol, representado por um globo amarelo. A Terra move-se com uma velocidade superior à do planeta e numa circunferência de raio inferior ao daquele.

Então a Terra é substituída por uma máquina fotográfica com 25° de campo de visão. A máquina está voltada segundo uma direcção fixa no espaço, indicada por uma seta. Portanto estamos a ignorar a rotação diária da Terra e concentramo-nos apenas no movimento da Terra à volta do Sol.



O filme mostra-nos também como um observador colocado na Terra vê os movimentos durante um período superior a um ano. Primeiro o Sol é visto em movimento directo, depois Marte entra em oposição e realiza um movimento retrógrado em laço, e finalmente verá de novo o Sol em movimento directo.

As cenas são vistas de cima e no plano do movimento. O movimento retrógrado ocorre sempre que Marte entra em oposição, isto é, sempre que Marte se opõe ao Sol quando ambos são vistos da Terra. Mas nem todas estas oposições têm lugar enquanto Marte se encontra no campo de visão da máquina. O intervalo de tempo entre duas oposições é aproximadamente 2,1 anos. O filme mostra que a Terra executa aproximadamente 2,1 revoluções durante o intervalo de tempo compreendido entre duas oposições de Marte.

Pode calcular este valor. A Terra perfaz uma revolução à volta do Sol por ano e Marte fá-lo em 1,88 anos. Assim as frequências do movimento orbital são:

$$f_{\text{Terra}} = 1 \text{ ciclo/ano e } f_{\text{Marte}} = 1 \text{ ciclo}/1{,}88 \text{ anos} = 0{,}532 \text{ ciclos/ano}$$

A frequência da Terra em relação a Marte é $f_{\text{Terra}} - f_{\text{Marte}}$:

$$f_{\text{Terra}} - f_{\text{Marte}} = 1{,}00 \text{ ciclos/ano} - 0{,}532 \text{ ciclos/ano} = 0{,}468 \text{ ciclos/ano}$$

Portanto a Terra, na sua órbita, encontra Marte uma vez em cada

$$\frac{1}{0{,}468} = 2{,}14 \text{ anos}$$

Observe o aumento aparente de dimensões e de brilho no globo que representa Marte, enquanto ele está na posição mais próxima da Terra. Visto a olho nu, Marte apresenta uma grande variação de brilho (proporção aproximada 50:1) mas tem sempre o aspecto de um ponto luminoso. Com telescópio pode-se ver que o diâmetro angular também varia, tal como seria de prever a partir do modelo.

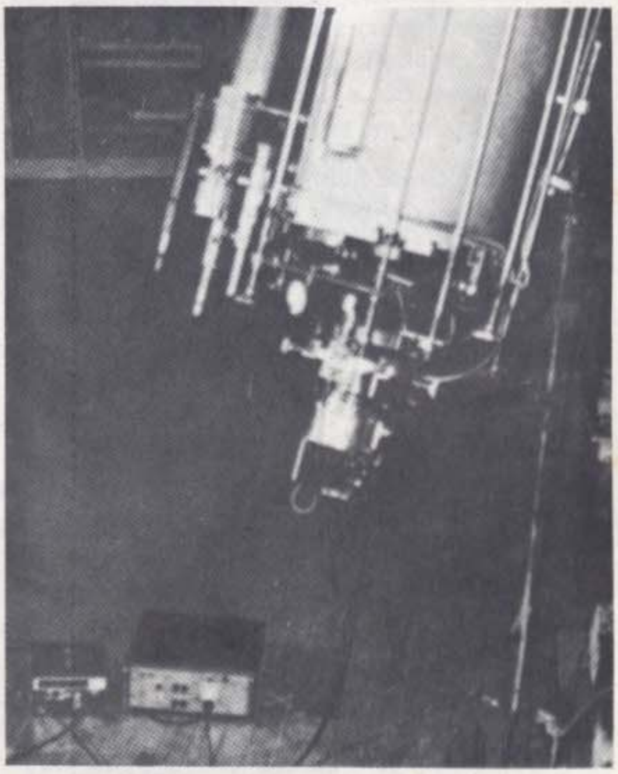
O modelo heliocêntrico é, de algum modo, mais simples que o modelo geocêntrico de Ptolomeu e mostra as características gerais observadas nos planetas: posição angular, movimento retrógrado, e variação no brilho. Contudo, usando órbitas circulares, não se pode obter um acordo perfeito entre valores numéricos teóricos e valores numéricos obtidos por observação.

FILME-SEM-FIM L12 ÓRBITA DUM SATÉLITE DE JÚPITER

Este breve estudo da órbita do satélite de Júpiter, Io, foi filmado no Lowell Observatory, em Flagstaff, Arizona, E. U. A., usando um telescópio refractor de 60 cm de diâmetro.

As exposições foram feitas em 1967, durante 7 noites, com um minuto de intervalo. Uma órbita quase completa de Io pode ser reconstruida usando todas as fotografias que foram tiradas.

O filme mostra primeiro uma parte da órbita fotografada com telescópio; um relógio mostra-nos o tempo decorrido nas diversas partes do estudo. Devido a pequenos erros na manipulação do telescópio e devido também às desfavoráveis condições atmosféricas, as imagens grandemente ampliadas de Júpiter e seus satélites apresentam movimentos irregulares. Para remover estas irregularidades, cada



Extremidade ocular do refractor de 60 cm, no Observatório Lowell.

imagem — e havia mais de 2100 — foi centrada opticamente na fotografia. As imagens já estabilizadas foram montadas a fim de se obter um registo completo do movimento de Io. Devido à falta de luminosidade ou devido à presença de nuvens observa-se uma certa variação no brilho.

Na Tabela 1 enumeram-se e referem-se algumas características dos quatro satélites de Galileu. Em 3 de Fevereiro de 1967, eles tinham a configuração que se mostra na fig. 1. Os

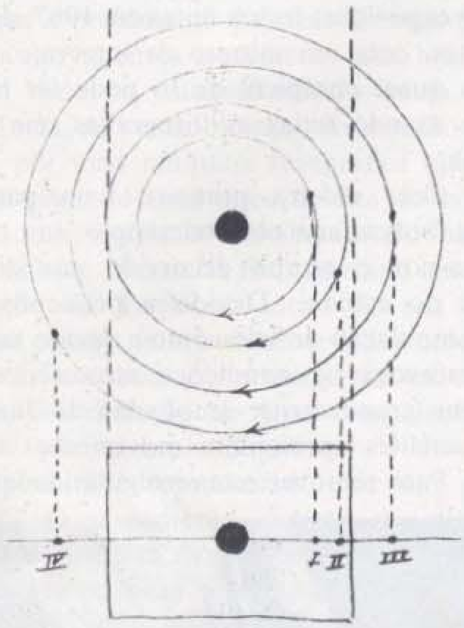


Fig. 1

satélites movem-se num mesmo plano, que nós vemos quase de perfil; assim eles parecem mover-se para diante e para trás ao longo de uma linha. O campo de visão é suficientemente grande para incluir as órbitas completas de I e II, mas III e IV estão fora do campo de visão da máquina, quando estiverem o mais afastados possível de Júpiter.

A posição de Io na última fotografia de 29 de Janeiro coincide com a posição do mesmo planeta na primeira fotografia de 7 de Fevereiro. Contudo, como a essas fotografias corresponde um intervalo de tempo de 9 dias, os outros três satélites moveram-se entretanto, variando as suas distâncias. Assim vê-los-á nalgumas fotografias e não os verá noutras, enquanto que a imagem de Io é contínua. Há linhas que identificam Io em cada secção. Fixe a sua atenção no movimento regular de Io e ignore os aparecimentos e desaparecimentos dos outros planetas.

Características Interessantes do Filme

1. A princípio Io aparece do lado direito e praticamente estacionário na sua elongação máxima. Outro satélite está a mover-se para a esquerda e ultrapassa-o na sua posição.

2. Como Io se move para a esquerda (fig. 2), ele passa em frente de Júpiter; dá-se aquilo a que se chama um *trânsito*. Outro satélite, *Ganimedes*, tem um trânsito aproximadamente ao mesmo tempo. Um terceiro sátelite move-se para a direita e desaparece por trás de Júpiter, dá-se aquilo a que, em astronomia, se chama *ocultação*. É um conjunto de cenas muito movimentadas. Se olhar com atenção durante o trânsito, pode ser que veja a sombra de Ganimedes e talvez também a de Io, na parte esquerda da superfície de Júpiter.

3. Próximo do fim do filme, Io (movendo-se para a direita) desaparece; uma ocultação começa. Procure ver o reaparecimento de Io — ele surge após um eclipse e no lado direito

TABELA 1
SATÉLITES DE JÚPITER

	Nome	Período	Raio da órbita (Km)(aprox.)	Excentricidade da órbita	Diâmetro (Km) (aprox.)
I	Io	$1^d\ 18^h\ 28^m$	422 000	0,0000	3 219
II	Europa	$3^d\ 13^h\ 14^m$	671 000	0,0003	2 897
III	Ganimedes	$7^d\ 3^h\ 43^m$	1 072 000	0,0015	4 989
IV	Calisto	$16^d\ 16^h\ 32^m$	1 883 000	0,0075	4 506

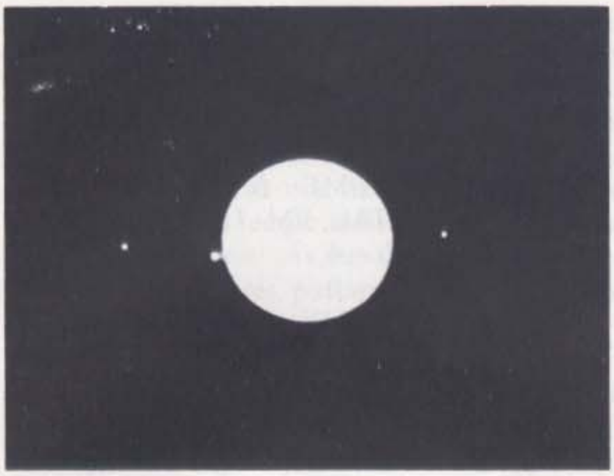


Fig. 2

Uma imagem do Filme-Sem-Fim L12, que mostra as posições de três satélites de Júpiter no começo da sequência trânsito e ocultação. O satélite IV não aparece na imagem, por se encontrar muito distante (e para a direita) de Júpiter.

de Júpiter. Note que Io não é visível durante um certo intervalo de tempo, porque está por trás de Júpiter ou porque está na sombra de Júpiter. Ele não pode ser observado enquanto se move de D para E (fig. 3).

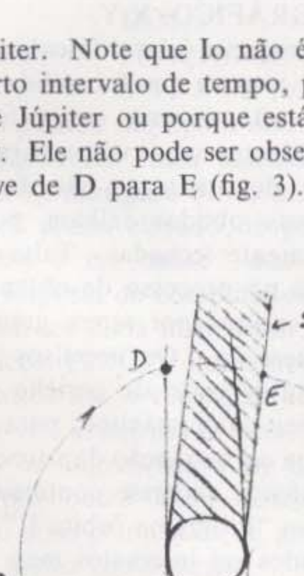


Fig. 3

4. Júpiter aparece como uma esfera achatada nos pólos devido ao seu rápido movimento (período de rotação 9 h 55 m). O efeito é bastante notável: o diâmetro equatorial é 142745 km e o diâmetro polar é 133236 km.

Medidas

1. *Período da órbita.* Tome nota do intervalo de tempo que decorre entre um trânsito e uma ocultação (de B a D, na fig. 3), ou seja o tempo correspondente a uma semi-revolução. A partir desse intervalo de tempo é imediato o cálculo do período. O filme é projectado a uma velocidade de cerca de 18 fotografias por segundo, assim o factor de multiplicação é 18×60, ou seja 1080. Como pode calibrar o seu projector de forma mais precisa? (Há 3969 fotografias numa volta completa do filme). Qual a diferença entre o valor que obteve para o período e o que é dado na tabela?

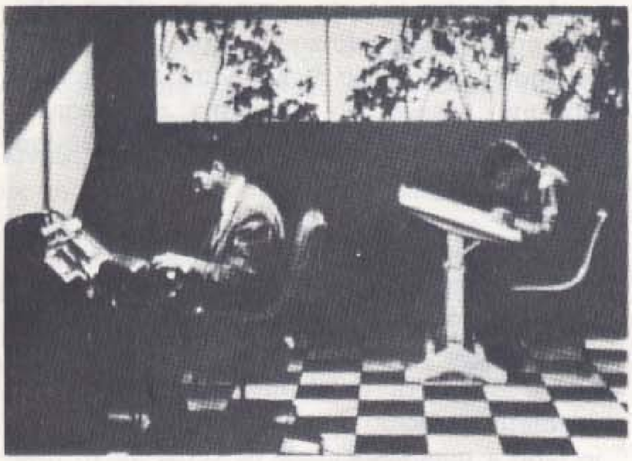
2. *Raios da órbita.* Projecte sobre uma folha de papel e marque as duas posições extremas do satélite, a mais afastada para a direita (em A) e a mais afastada para a esquerda (em C). Para obter o valor do raio da órbita em quilómetros, use o diâmetro equatorial de Júpiter como termo de comparação.

3. *Massa de Júpiter.* Pode usar os seus valores do raio orbital e do período para calcular a massa de Júpiter em relação à massa do Sol (no *Texto* é feito um cálculo semelhante para o satélite Calisto). Qual a diferença entre o valor experimental que obteve e o valor que se adopta ou seja $m_J/m_s = 1/1048$?

FILME-SEM-FIM L13
PROGRAMA ÓRBITA I

Na figura 1 pode ver-se um estudante (à direita na figura) que está traçando a órbita de um planeta, por um processo de passos sucessivos. O seu professor (à esquerda) prepara o programa do computador para resolver o mesmo problema. Computador e estudante usam um processo análogo.

A "linguagem" de computador usada foi FORTRAN. O programa FORTRAN (escrito num conjunto de cartões perfurados) constitui as "regras de jogo": as leis do movimento e da gravitação. Estas dão ao computador os dados necessários para que ele efectue os



cálculos. O programa é traduzido e guardado na memória do computador antes de ser executado.

O cálculo começa com a escolha da posição e velocidade iniciais do planeta. Seleccionam-se as coordenadas X e Y da posição inicial e também as componentes da velocidade inicial XVEL e YVEL (XVEL é o nome de uma variável simples e não o produto de quatro variáveis).

Depois o programa dá instruções ao computador para calcular a força que o Sol exerce sobre o planeta. Estas instruções são tiradas da lei da gravitação, a qual refere a proporcionalidade inversa entre a força e o quadrado da distância. Usam-se as leis de Newton do movimento para calcular a que distância e em que direcção e sentido se move o planeta depois de cada impulso.

O computador pode apresentar os seus cálculos de diversas formas. Pode por exemplo apresentá-los numa tabela de valores de X e Y. Pode também fornecer um gráfico construído a partir destes valores num traçador de gráficos X-Y. Esse gráfico será semelhante ao gráfico que o estudante traçou à mão. Os resultados do computador podem ainda ser fornecidos através de um tubo de raios catódicos (TRC), semelhante ao que se encontra nos aparelhos de televisão. Assim, os resultados aparecerão no écran do tubo de raios catódicos sob a forma de gráficos luminosos. Neste filme, os resultados aparecem exactamente sob a segunda forma citada acima, isto é, a obtida no traçador de gráficos X-Y.

Apresentamos a seguir o diálogo entre o computador e o operador na experiência 1. Os valores numéricos dão entrada no computador depois de terem sido escritos na linguagem deste pelo operador, após o que o computador imprime uma mensagem pedindo esses valores:

Computador:	DÁ-ME A POSIÇÃO INICIAL EM UA...
Operador:	X = 4 Y = 0
Computador:	DÁ-ME A VELOCIDADE INICIAL EM UA/ANO...
Operador:	XVEL = 0 YVEL = 2
Computador:	DÁ-ME OS INTERVALOS DE ITERAÇÃO, EM DIAS...
Operador:	60
Computador:	DÁ-ME O NÚMERO DE INTERVALOS PARA CADA PONTO MARCADO...
Operador:	1
Computador:	DÁ-ME O MODO DE EXPOR OS RESULTADOS...
Operador:	GRÁFICO X-Y.

Pode verificar que a órbita desenhada pelo computador, tal como a que foi obtida à mão pelo estudante, não é uma curva fechada. Isto é surpreendente, uma vez que se sabe que as órbitas dos planetas são fechadas. Ambas as curvas obtidas falham por não serem completamente fechadas. Talvez tenha sido introduzido no processo de obtenção da curva um erro enorme por serem grandes os intervalos de iteração. Os impulsos podem ser demasiado raros perto do periélio onde a força atinge o seu valor máximo, para que se obtenha uma boa aproximação da situação que ocorreria se a força actuasse continuamente. No filme-sem-fim "Programa órbita II" os cálculos são baseados em intervalos mais pequenos. Assim terá oportunidade de verificar se a justificação dada acima, é ou não razoável.

FILME-SEM-FIM L14
PROGRAMA ÓRBITA II

Este filme é a continuação do anterior "Programa órbita I" e nele se usa de novo um computador para desenhar uma órbita planetária. O programa do computador faz uso das leis do movimento de Newton. Os impulsos actuam sobre o móvel a intervalos de tempo iguais. Nós supusemos que a órbita obtida no filme anterior não era fechada porque os impulsos eram demasiado espaçados. Podia-se obter a órbita usando muitos mais impulsos, mas fazer isto à mão requeria muito mais tempo e esforço. Por meio do computador precisamos somente especificar nos dados, que queremos um intervalo de tempo mais pequeno entre os pontos calculados. As leis do movimento são as mesmas que antes, portanto usamos o mesmo programa.

A parte do "diálogo" entre o computador e o operador, que nesta experiência difere da primeira, é a seguinte:

Computador: DÁ-ME OS INTERVALOS DE ITERAÇÃO EM DIAS...
Operador: 3.
Computador: DÁ-ME O NÚMERO DE INTERVALOS PARA CADA PONTO MARCADO...
Operador: 7.
Computador: DÁ-ME O MODO DE EXPOSIÇÃO DOS RESULTADOS...
Operador: TRAÇADOR DE GRÁFICOS X-Y.

Os pontos são agora calculados de 3 em 3 dias (20 vezes mais cálculos que na experiência 1), mas para evitar um gráfico com um número muito elevado de pontos, somente é marcado 1 em cada 7 dos calculados.

A resposta do computador neste filme pode também ser dada num écran de tubo de raios catódicos (TRC). Este modo de obter os resultados tem a vantagem de ser mais rápido e flexível e assim usá-lo-emos em outros filmes como os Filmes-Sem-Fim L15, L16 e L17. Mas por outro lado, o registo permanente obtido com o traçador de gráficos X-Y é por vezes muito conveniente.

Programa da Órbita

O programa de computador para órbitas é escrito em FORTRAN II e inclui instruções "ACCEPT" análogas às usadas no IBM 1620 (Ver exemplo a seguir).

Com uma ligeira alteração o programa FORTRAN pode ser usado em CDC 3100 e CDC 3200, como se mostra nos filmes-sem-fim L13 e L14, "Programa órbita I" e "Programa órbita II". Pode igualmente ser modificado para outro computador. Com mais algumas

```
      PROGRAM ORBIT
C
C        HARVARD PROJECT PHYSICS ORBIT PROGRAM.
C        EMPIRICAL VERIFICATION OF KEPLERS LAWS
C        FROM NEWTONS LAW OF UNIVERSAL GRAVITATION.
C
      G=40.
    4 CALL MARKF(0.,0.)
    6 PRINT 7
    7 FORMAT(9HGIVE ME Y )
      X=0.
      ACCEPT 5,Y
      PRINT 8
    8 FORMAT(12HGIVE ME XVEL)
    5 FORMAT(F10.6)
      ACCEPT 5,XVEL
      YVEL=0.
      PRINT 9
    9 FORMAT(49HGIVE ME DELTA IN DAYS,  AND NUMBER BETWEEN PRINTS)
      ACCEPT 5,DELTA
      DELTA=DELTA/365.25
      ACCEPT 5,PRINT
      IPRINT = PRINT
      INDEX = 0
      NFALLS = 0
   13 CALL MARKF(X,Y)
      PRINT 10,X,Y
   15 IF(SENSE SWITCH 3) 20,16
   20 PRINT 21
   10 FORMAT(2F7.3)
      NFALLS = NFALLS + IPRINT
   21 FORMAT(23HTURN OFF SENSE SWITCH 3 )
   22 CONTINUE
      IF(SENSE SWITCH 3) 22,4
   16 RADIUS = SQRTF(X*X + Y*Y)
      ACCEL = -G/(RADIUS*RADIUS)
      XACCEL = (X/RADIUS)*ACCEL
      YACCEL = (Y/RADIUS)*ACCEL
C  FIRST TIME THROUGH WE WANT TO GO ONLY 1/2 DELTA
      IF(INDEX) 17,17,18
   17 XVEL = XVEL + 0.5 * XACCEL * DELTA
      YVEL = YVEL + 0.5 * YACCEL * DELTA
      GO TO 19
C  DELTA V = ACCELERATION TIMES DELTA T
   18 XVEL = XVEL + XACCEL * DELTA
      YVEL = YVEL + YACCEL * DELTA
C  DELTA X = XVELOCITY TIMES DELTA T
   19 X = X + XVEL * DELTA
      Y = Y + YVEL * DELTA
      INDEX = INDEX + 1
      IF(INDEX - NFALLS) 15,15,13
      END
```

N. T. — Note que não se traduziu o programa no que se refere às mensagens que o computador escreve. No entanto, nos exemplos de diálogo essas mensagens aparecem traduzidas. Seria fácil obter os diálogos em português por simples alteração das instruções convenientes.

modificações (na instrução 16 e nas três seguintes) pode também ser usado para outras leis de força. O método de cálculo usado pelo computador é o que se representa em esquema nas *Leituras adicionais* do Projecto Física "Leis da Dinâmica de Newton". Um programa semelhante é apresentado e explicado no livro *FORTRAN para físicos* (de Alfred M. Bork, editado por Addison-Wesley, em 1967).

Note que é necessário ter uma subrotina MARK. No nosso caso foi usada esta subrotina para se marcarem os pontos num traçador de gráficos X-Y, mas podíamos tê-la substituído por uma subrotina PRINT.

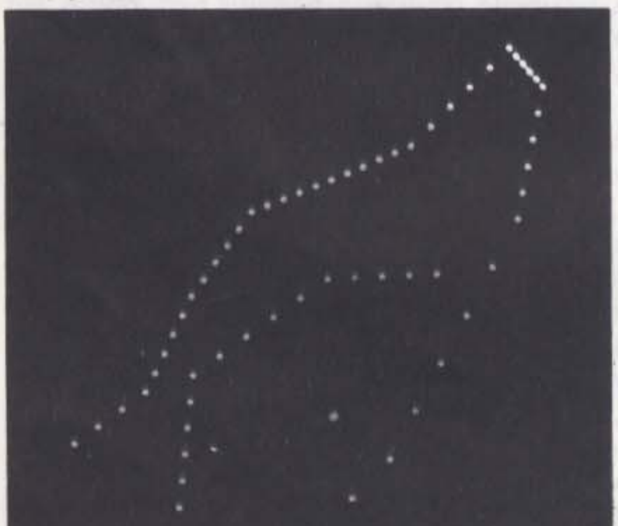
FILME-SEM-FIM L15 FORÇAS CENTRAIS — IMPULSOS REPETIDOS

No capítulo 8, Experiência 2-11 e no Filme-Sem-Fim L13 sobre o traçado de órbitas por métodos iterativos, verificámos que a lei das áreas de Kepler se aplicava a corpos sujeitos a uma força central. A força era atractiva e ou era constante ou variava regularmente segundo uma determinada função. Mas suponha agora que a força central é repulsiva; significa isto que ela está dirigida do centro para fora? E se for umas vezes atractiva e outras repulsiva? E o que acontecerá se a intensidade da força variar de forma irregular? Nestas circuntâncias ainda seria verificada a lei das áreas? Pode usar este filme para o saber;

O filme foi feito fotografando o écran de um tubo de raios catódicos (TRC), no qual se representava a saída de dados de um computador. É importante compreender o papel do programa do computador neste filme: ele controlou a mudança de direcção, sentido e valor da velocidade do "móvel", para cada impulso. Este é o modo como o programa de computador usa as leis do movimento de Newton para prever o resultado da aplicação de uma força instantânea ou impulso. O programa manteve-se o mesmo para todas as partes do filme, da mesma maneira que as leis de Newton se mantêm válidas para todas as experiências laboratoriais. Contudo, em certo ponto do programa, o operador teve de especificar como queria que a força variasse.

Impulsos ao Acaso

A fotografia abaixo mostra parte do movimento do corpo quando se aplicam impulsos



repetidamente em intervalos de tempo iguais. As características de cada impulso não foram planeadas com antecedência. O computador estava programado para seleccionar "ao acaso" a intensidade de cada impulso. Os sentidos da força (atractiva ou repulsiva) foram também seleccionados "ao acaso", embora tivesse sido dada uma ligeira preferência por forças atractivas para que a curva representativa da órbita não tivesse grande probabilidade de sair dos limites do écran do TRC. Os pontos aparecem em intervalos de tempo iguais. A intensidade e direcção de cada impulso são representados pelo segmento de recta no ponto em que se deu o impulso.

Estude as fotografias. Quantos impulsos eram atractivos? E quantos eram repulsivos? Havia alguns impulsos tão pequenos que pudessem ser desprezados?

Pode ver se a lei das áreas se aplica a este movimento "ao acaso". Projecte o filme sobre uma folha de papel, marque o centro e os pontos em que os impulsos foram aplicados. Agora meça as áreas dos triângulos. Será que o corpo que se está a mover varre áreas iguais em intervalos de tempo iguais?

Força Proporcional à Distância

Se um peso suspenso na extremidade de uma corda for puxado para trás e largado com um impulso lateral, o peso mover-se-á descrevendo uma órbita elíptica. O ponto de aplicação da força que origina o movimento elíptico situa-se no centro da elipse. Uma curva semelhante é obtida nesta parte do filme, no écran do TRC. Repare como a força varia nos diferentes pontos da órbita. Obtém-se uma curva regular no computador quando os impulsos forem mais frequentes. Em 2(a), são usados 4 impulsos para completar a órbita; em 2(b) 9 impulsos, e em 2(c) 20 impulsos, os quais permitem uma boa aproximação para a elipse que é originada por aquela força. Geometricamente, como difere esta órbita das órbitas planetárias? E como diferem do ponto de vista físico?

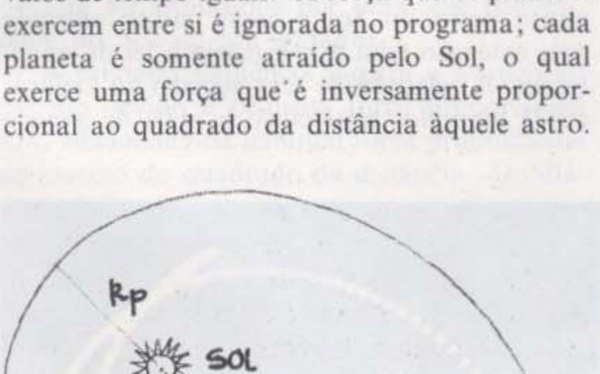
Força Inversamente Proporcional ao Quadrado da Distância

Usa-se um programa semelhante para o caso em que se estudam dois planetas simultaneamente. Mas agora a força que actua cada um deles é *inversa do quadrado da distância* ao centro que cria o campo. Ao contrário da situação real, o programa pressupõe que os planetas não exercem forças um sobre o outro. Nas elipses resultantes o ponto de aplicação da força situa-se num dos *focos* (1.ª lei de Kepler), e não no centro da elipse, como no caso anterior.

Neste filme, o computador realizou milhares de vezes mais rapidamente o que o leitor podia ter feito se tivesse enorme paciência e tempo. Com o computador, pode mudar as condições facilmente, e assim estudar muitos casos diferentes. E, uma vez que se lhe tenha dito o que fazer, o computador comete muito menos erros de cálculo do que uma pessoa!

FILME-SEM-FIM L16
LEIS DE KEPLER

Um programa análogo ao usado no filme "Forças centrais — impulsos repetidos" leva o computador a descrever o movimento de dois planetas. Os impulsos dirigidos para o centro (Sol), actuam sobre cada planeta em intervalos de tempo iguais. A força que os planetas exercem entre si é ignorada no programa; cada planeta é somente atraído pelo Sol, o qual exerce uma força que é inversamente proporcional ao quadrado da distância àquele astro.



A distância média $R_{méd}$, de um planeta P ao Sol, é $(R_p + R_a)/2$.

Foram escolhidos valores para as posições e as velocidades iniciais. As posições dos planetas são representadas no écran TRC por pontos, a intervalos regulares. (Muitos mais pontos foram calculados além dos representados).

Pode verificar as três leis de Kepler projectando o filme sobre uma folha de papel e marcando as posições sucessivas dos planetas. A lei das áreas pode ser verificada desenhando triângulos e medindo áreas. Determine as áreas varridas em, pelo menos, três sítios: perto do periélio, perto do afélio, e num ponto aproximadamente a meio caminho entre o periélio e o afélio.

A terceira lei de Kepler diz que em qualquer sistema planetário os quadrados dos períodos dos planetas são proporcionais aos cubos das distâncias médias entre eles e o corpo à volta do qual se movem. Ou seja,

$$T^2 \propto R_{méd}^3$$

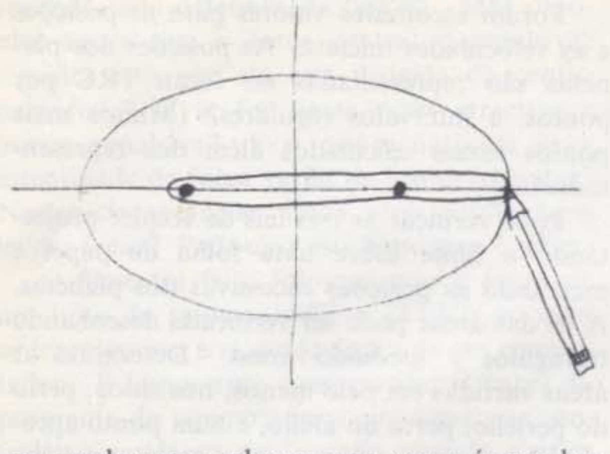
onde T é o período e $R_{méd}$ a distância média. Assim em qualquer sistema o valor de $T^2/R_{méd}^3$ devia ser o mesmo para todos os planetas.

Podemos usar este filme para verificar a lei dos períodos de Kepler medindo T e $R_{méd}$ para cada uma das órbitas, calculando depois $T^2/R_{méd}^3$ para cada uma delas. Para medir os períodos de revolução, utilize um relógio com segundos. Outra maneira de o fazer é contar o número de pontos marcados em cada órbita. Para encontrar $R_{méd}$ para cada órbita, meça as distâncias ao periélio e ao afélio (R_p e R_a) e faça a sua média.

Qual a diferença que obteve entre os 2 valores de $T^2/R_{méd}^3$? Qual é a maior causa de erro, a medição de T ou de $R_{méd}$?

Para verificar a primeira lei de Kepler, verifique se a órbita é uma elipse com o Sol num dos focos. Para desenhar a elipse pode usar corda e pioneses. Localize o outro foco, simétrico do primeiro em relação ao Sol. Coloque pioneses nestes dois pontos. Faça uma argola com a corda tal como se mostra na figura a seguir.

Com a ponta de um lápis junto à argola da corda desenhe a elipse mantendo a corda esticada. É a elipse que obteve análoga à da órbita do planeta? Que outros métodos podem



ser usados para saber se uma curva é uma boa aproximação de uma elipse?

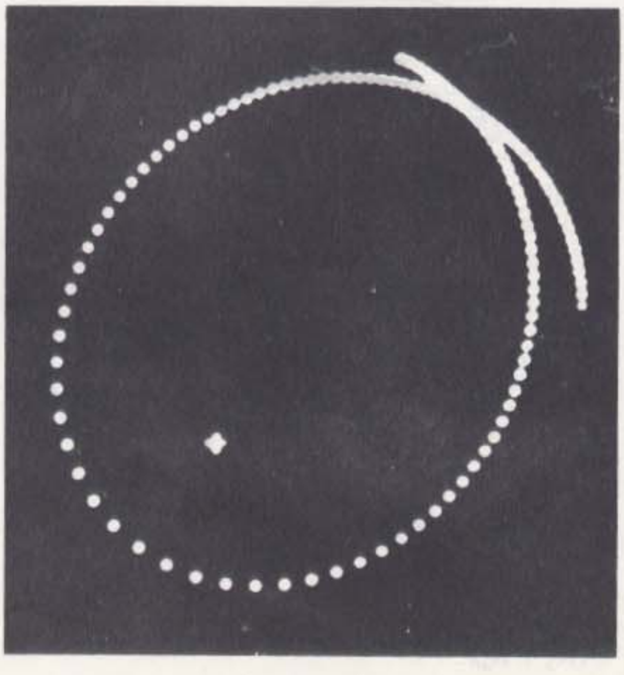
Talvez gostasse de perguntar se a verificação das leis de Kepler para estas órbitas é somente pelo gosto de trabalhar, uma vez que o computador já "reconheceu" as leis de Kepler e as usou no cálculo das órbitas. Mas ao computador *não* foram dadas instruções para as leis de Kepler. O que está a analisar é se as leis de Newton conduzem a movimentos que se ajustam às leis descritivas de Kepler. O computador somente "reconheceu" (através do programa que nós lhe demos) as leis do movimento de Newton e a lei da gravitação do inverso do quadrado da distância. Este cálculo é exactamente o que Newton fez, mas sem a ajuda de um computador.

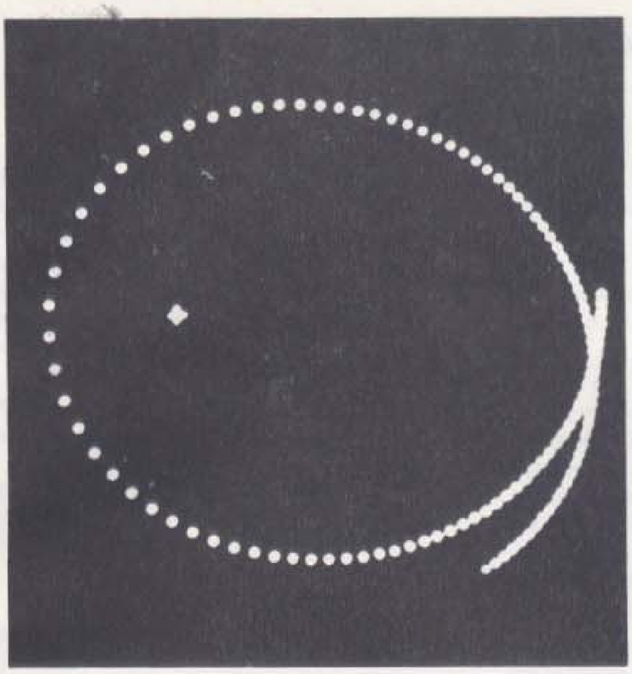
FILME-SEM-FIM L17
ÓRBITAS NÃO USUAIS

Neste filme é usada uma modificação no programa do computador já descrita atrás em "Forças centrais — impulsos repetidos". Há duas sequências: a primeira mostra o efeito de uma força perturbadora sobre uma órbita produzida por uma força central, proporcional ao inverso do quadrado da distância; a segunda mostra uma órbita produzida por uma força proporcional ao inverso do cubo.

A palavra "perturbação" refere-se a uma pequena variação no movimento de um corpo celeste causada pela atracção gravítica devida a outro corpo. Por exemplo, o planeta Neptuno foi descoberto devido à perturbação que ele causou na órbita de Úrano. A força principal exercida sobre Úrano é a atracção newtoniana do Sol. A força exercida sobre ele por Neptuno causa uma perturbação que modifica um pouco a órbita de Úrano. Os astrónomos foram capazes de prever a posição e a massa de um planeta desconhecido a partir do seu pequeno efeito sobre a órbita de Úrano. Esta espectacular "astronomia do invisível" foi, com razão, vista como um triunfo da lei da gravitação universal de Newton.

A órbita de um planeta roda, em regra, lentamente, devido a pequenas atracções de outros planetas e devido também à força retardadora de fricção proveniente da poeira existente no espaço. Este efeito é chamado o "avanço do periélio". O periélio de Mercúrio avança cerca de 500 segundos de arco (1/7°) por século. Isto foi explicado, em grande parte, pelas perturbações devidas a outros planetas. Contudo, um avanço de cerca de 43 segundos por século ficou por explicar. Quando Einstein reexaminou a natureza do espaço e tempo, no seu desenvolvimento da teoria da relatividade, ele desenvolveu uma nova teoria gravítica que modificou a teoria de Newton em pontos cruciais. A teoria da relatividade é importante para corpos que se movem a altas velocidades ou perto de corpos de grande massa. A órbita de Mercúrio está muito perto do Sol e assim muito afectada pela extensão feita por Einstein à lei da gravitação. A relatividade teve sucesso ao explicar os 43 segundos por século a mais de avanço





do periélio de Mercúrio. Mas recentemente este "sucesso" foi de novo posto em causa, com a sugestão de que os 43 segundos extra podiam ser explicados por uma leve convexidade do Sol no seu equador.

A primeira sequência mostra o avanço do periélio devido à pequena força proporcional a *R*, adicionada da habitual força proporcional ao inverso do quadrado da distância. O "diálogo" entre o operador e o computador começa como segue:

O PROGRAMA DE PRECESSÃO USARÁ
  ACCEL = G/(R*R) + P*R
DÁ-ME A PERTURBAÇÃO *P*
  P = 0,66666
DÁ-ME A POSIÇÃO INICIAL EM UA
  X = 2
  Y = 0
DÁ-ME A VELOCIDADE INICIAL EM UA/ANO
  XVEL = 0
  YVEL = 3

O símbolo * significa multiplicação na linguagem FORTRAN usada no programa. Então $G/(R*R)$ é a força do inverso do quadrado, e $P*R$ é a força perturbadora, proporcional a *R*.

Na segunda parte do filme, a força é proporcional ao inverso do cubo da distância. A órbita resultante de uma tal força atractiva, tal como de outras leis de força, não é fechada. O planeta descreve espirais aproximando-se do Sol numa órbita "catastrófica". À medida que o planeta se aproxima do Sol, a sua velocidade aumenta, e assim os pontos obtidos ficam separados por uma distância maior. Posições e velocidades iniciais diferentes conduziram a órbitas bastante diferentes.

ÍNDICE ALFABÉTICO DO TEXTO

ÍNDICE ALFABÉTICO DO MANUAL