

HISTÓRIA DAS IDEIAS EM FÍSICA

João Andrade e Silva

Departamento de Física
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Apontamentos tirados por Paulo Ivo Teixeira
Licenciatura em Física
Ano lectivo de 1983–84

Novembro de 2001

Índice

1	A Pré-história	3
2	A Idade dos Metais	6
3	Ciência e civilização Gregas clássicas	9
3.1	A civilização Grega	9
3.2	Os filósofos naturalistas gregos	10
3.3	Platão e as Matemáticas Gregas	13
3.4	Aristóteles	15
3.5	A ciência Aristotélica	18
4	Ciência e civilização Helenísticas	20
4.1	O Período Helenístico	20
4.2	Matemática e Física no Período Helenístico	21
4.3	Astronomia e Matemática Helenísticas	23
5	A Idade Média	28
5.1	Declínio da civilização e ciência clássicas	28
5.2	Civilização e ciência Islâmicas	29
5.3	Cristandade latina	32
5.4	O Século XIII	34
5.5	Ciência Medieval	36
5.6	O Século XIV	38
5.7	Mecânica na Idade Média	40
5.8	O fim da Idade Média	41
6	Ciência Renascentista	46
6.1	O Renascimento	46
6.2	Física e Matemática no Renascimento	47
6.3	Astronomia Copernicana	49
6.4	Primeira metade do século XVI	51
6.5	Segunda metade do século XVI	53
6.6	A Astronomia no século XVI	55
7	Kepler	58

<i>ÍNDICE</i>	2
8 Galileu	62
8.1 Galileu e Kepler	62
8.2 Vida e obras de Galileu	64
8.3 Mecânica Galilaica	67
9 Descartes	71
10 Física experimental e Química no século XVII	74
10.1 Física experimental	74
10.2 Química	77
11 Huygens	79
12 A Óptica no século XVII	83
13 Newton	88
13.1 Vida de Newton	88
13.2 A Física de Newton	90
13.3 O pensamento no século XVII	92
14 A Ciência no século XVIII	94
14.1 Introdução	94
14.2 A Matemática e a Mecânica	94
14.3 A Electricidade	96
14.4 Termodinâmica e Revolução Industrial	99
14.5 A revolução da Química	102
14.6 Lavoisier	104
15 A Física no século XIX	107
15.1 O nascimento do átomo científico	107
15.2 A Óptica no século XIX	109
15.3 A Electricidade no século XIX – I	111
15.4 A Electricidade no século XIX – II	114
15.5 Os princípios da Termodinâmica	117
15.6 Uma outra versão da história da Termodinâmica	119
15.7 A Electricidade no século XIX – III	122
15.8 O éter na Física do século XIX	124
16 A Física no século XX	128
16.1 Nota introdutória	128
16.2 Os fracassos da teoria clássica	128
16.3 As antigas teorias quânticas	130
16.4 A via da Microfísica	134
16.5 A Teoria Geral da Relatividade	137

Capítulo 1

A Pré-história

A vida consiste numa forma muito elaborada de organização físico-química que surgiu por acaso e, aparentemente, contra as leis da Física, nomeadamente contra o segundo princípio da Termodinâmica, o qual implica uma tendência espontânea para a desordem. Ora os seres vivos, que resultaram de gigantescos radicais de proteínas e ácidos nucleicos, conservam-se e reproduzem-se, o que significa que absorvem energia e ordem (neguentropia) do Sol (ver quadro 1.1). Parafrazeando Demócrito, diríamos que “a trama do mundo provém do acaso e da necessidade”, o acaso produzindo grande número de variações, e a necessidade seleccionando os mutantes melhor adaptados à sobrevivência.

Desde 1945 que o nosso conhecimento dos antepassados do Homem tem aumentado consideravelmente, o que se deve, sobretudo, a dois factores:

- O grande número de achados arqueológicos;
- As pesquisas sobre a Psicologia e a Sociologia dos primatas.

Em tempos recuados, deu-se uma importante modificação climática, a qual, tendo conduzido ao recuo das florestas, levou os hominídeos a serem repelidos para campo aberto, onde se sentiam completamente desprotegidos (os “caçadores caçados”). Possuíam, no entanto, dois trunfos fundamentais: uma mão extremamente hábil, e um cérebro mais desenvolvido. A partir desta altura, e devido à reduzida dimensão dos grupos humanos, a evolução foi bastante rápida, favorecendo sobretudo o porte erecto, de modo a possibilitar a corrida; uma mão hábil, para o fabrico de instrumentos; e um maior cérebro. Supõe-se a este respeito que o “Homem 1470”, descoberto em África pelo Dr. Leakey, tivesse um volume cerebral de aproximadamente 800 cm^3 .

Há cerca de um milhão de anos, o Velho Mundo era habitado por hordas de Pitecantropídeos, os quais haviam já conquistado o fogo, possuíam uma indústria de pedra lascada e, talvez, uma linguagem. 150 000 anos antes do nosso século, foi a vez de surgir

Idade dos seres vivos	
Vertebrados	~300 milhões de anos
Mamíferos	~60 milhões de anos
Antropóides	~15 milhões de anos
Hominídeos	~5 milhões de anos

Quadro 1.1: As idades de diferentes grupos de seres vivos.

o Homem de Neanderthal, o primeiro a possuir sentimentos religiosos. Finalmente, o Homem moderno, *Homo Sapiens Sapiens*, surgiu há aproximadamente 30 000 anos, sendo as pinturas de Lascaux, Altamira e do Sahara testemunhos da sua capacidade artística.

A evolução humana constituiu, indubitavelmente, um processo muito complexo, que outrora foi considerado como meramente biológico. Hoje, sabe-se que os componentes socio-culturais não são de modo algum desprezáveis. É, além disso, de considerar a hipótese segundo a qual os Homens pré-históricos possuiriam já conhecimentos “científicos”, diferentes dos actuais, mas indubitavelmente ricos e objectivos, e mesmo uma noção intuitiva de lei natural.

Há que realçar:

A palavra: tornou possível a transmissão de experiências para criar uma tradição cultural;

A técnica (prática): com o cérebro comandando a mão, o que permite o desenvolvimento daquele, o Homem tornou-se um animal mais inteligente e mais hábil. De notar que todas as ciências surgiram como resposta a necessidades práticas.

Até à Revolução Neolítica de há 9 000–10 000 anos, os Homens pré-históricos foram nómadas, vivendo da caça, pesca e recollecção. Esta Revolução, cuja importância na história do Homem só é comparável à da revolução científica actual, levou cerca de 4 000 anos a propagar-se a todo o Velho Mundo (processo este que só terminou no século XV). Consistiu, fundamentalmente, na descoberta, provavelmente na Ásia Ocidental, da agricultura e da pecuária, com as quais se deu o advento da civilização urbana. Uma das consequências mais importantes foi que as comunidades passaram de recolectoras a produtoras, processando-se a divisão das tarefas: aos homens cabia a caça e o pastoreio; e às mulheres, a agricultura (até a descoberta do arado exigir maior força física). As famílias agrupavam-se em clãs totémicos, sendo a propriedade quer individual (vestuário, adornos, casas), quer colectiva (terras).

A agricultura deve também ser considerada como o primeiro exemplo de investimento a longo prazo, o que implica, para além de um conhecimento do calendário (Astronomia), a posse de novos instrumentos e a selecção das espécies cultiváveis, por aperfeiçoamento das espécies selvagens. Citem-se os exemplos do trigo, desenvolvido a partir do trigo de montanha (selvagem); do arroz, que os indianos descobriram medrar com maior rendimento em meio aquoso; e do milho (mais tardiamente). As culturas predominantes do Neolítico foram, contudo, principalmente o trigo e a cevada.

No que diz respeito a instrumentos, vale a pena referir o inventário de Gordon Childe, segundo o qual apenas quatro invenções se deram no período anterior ao Neolítico (entre elas a da máquina mais simples, a alavanca), e mais quatro entre o Neolítico e o fim da Idade dos Metais, enquanto que no decorrer do Neolítico se registaram onze. Citemos algumas: arco, irrigação, arado, tecelagem, tijolo e vidro, metalurgia rudimentar do cobre, roda e barco à vela. O arado, juntamente com a domesticação dos animais e a roda, vai permitir o aumento da área de cultivo e, portanto, da população, enquanto que a roda possibilitará a invenção do carro. É além disso crível que os Homens do Neolítico fossem já bons marinheiros (pelo menos na arte de bolinar), dado que a civilização Neolítica chegou à Península Ibérica por via marítima.

Quanto a animais domésticos, estes resultaram de uma cuidadosa selecção dos animais selvagens e respectivas descendências. Os primeiros foram cães, bois, cabras, ovelhas, porcos e, mais tarde, cavalos, camelos e galináceos.

No que diz respeito ao conhecimento matemático, é concebível que os Homens do Neolítico conhecessem já o conceito de número puro, bem como as quatro operações fundamentais, dado possuírem alguns números fraccionários e sistemas de numeração. Destes, a maioria é de base 10, ou 5, ou 20, existindo alguns exemplos de sistemas de base dupla, como o Mesopotâmico (10 e 60).

Convém no entanto salientar que os conhecimentos que temos desta época, anterior à escrita (que só surgiu com a civilização urbana), são fruto ou de especulação, ou de ilações tiradas a partir do estudo de alguns povos primitivos actuais.

Capítulo 2

A Idade dos Metais

A História, por convenção, iniciou-se cerca de 4 000 anos antes da nossa era, com o aparecimento, nas planícies do Tigre e do Eufrates (Sumer) e, mais tarde, do Nilo, das primeiras sociedades urbanas com classes sociais distintas, e possuidoras já da escrita, sistemas de numeração e uso dos metais. Idêntico desenvolvimento se deu na Índia cerca de 1 000 anos mais tarde e, por volta de 2000 a. C., o fenómeno voltou a repetir-se na China (vale do Yang-Tsé). A característica comum a todas estas zonas é a extrema fertilidade do solo, favorecida pelas cheias dos rios, a qual permitiu um rendimento agrícola da ordem dos 50 grãos/semente, fantástico se o compararmos com os 3–4,10 grãos/semente obtidos durante a Idade Média. Tal produtividade levou a um rápido aumento populacional, do qual resultaram novas classes sociais: mercadores, escribas e artesãos especializados.

Estas primeiras civilizações defrontavam-se, porém, com inúmeros problemas, ligados sobretudo à sua situação geográfica. Assim, a existência de pântanos constituía um perigo para a saúde das populações, além de dificultar o acesso aos rios. Por outro lado, a irregularidade das cheias levou a que fossem empreendidos esforços no sentido de aproveitar a maior quantidade de água possível, por meio de diques e barragens. Finalmente, as planícies aluviais onde se situavam as primeiras cidades eram bastante pobres em matérias primas (rochas, etc) para as indústrias líticas. Estes três factores, conjugados com a influência social da classe dos sacerdotes, levaram a que se estabelecessem contactos e associações entre as várias comunidades. Poder-se-iam citar, assim, o comércio de madeiras entre o Egipto e o Líbano (Fenícia); e entre as Minas de Taurus (Ásia Menor) e a Mesopotâmia.

Todo este desenvolvimento alastrou necessariamente às regiões vizinhas das primeiras comunidades urbanas, quer por estas o provocarem, quer pelo fascínio que despertavam, apesar de, a princípio, a civilização urbana não trazer vantagens visíveis. Deve, no entanto, salientar-se que, embora os contactos a curta distância fossem frequentes, os diferentes focos de desenvolvimento (Ásia Menor, Índia e China) permaneceram praticamente isolados, devido, provavelmente, às grandes dificuldades de transporte. Não cairemos então em total erro se nos restringirmos à nossa civilização ocidental, e isto por várias razões: primeiro, é aquela em que vivemos; segundo, foi aqui que surgiu a Ciência moderna; por último, muito pouco se sabe sobre as outras civilizações.

Por volta do ano 3000 a. C., o Mundo, da Grécia ao Mar Cáspio, encontra-se povoado de civilizações urbanas que sobreviverão até ao grande colapso da Idade do Bronze, no século XII a. C.. Há quem defenda que tal catástrofe resultou das contradições internas de tais sociedades, cujos grupos de poder (sacerdotes e militares) mostravam nítido pendor

para os gastos superfluos e improdutivos, e pouca abertura a inovações. Ora, datam desta época duas invenções fundamentais: a metalurgia do ferro, descoberta por uma tribo Hitita no planalto da Ásia Menor, e a do alfabeto fonético, em substituição do pictográfico (uma palavra = um símbolo). A não-aceitação pelas sociedades antigas destas novas invenções (que iriam destronar os escribas e alterar o estatuto da arma de bronze, rara, como símbolo de posição social) levou à sua queda, dado o ferro se prestar ao fabrico de armas de melhor qualidade, e mais facilmente, que o bronze.

No que respeita ao panorama das ciências da altura, existem registos escritos acerca da Medicina, Matemática e Astronomia, consideradas, respectivamente, a ciência útil a todos, a ciência administrativa e a ciência sacerdotal. É curioso notar a falta de referências à Física e à Química, as quais, consideradas meras técnicas, não mereciam a atenção dos escribas, cuja preocupação era guindarem-se às classes cimeiras. Isto apesar da importância já nessa altura assumida tanto pela Física (a Estática, através da alavanca e da roldana, na construção de monumentos; a Hidrostática, na construção de canais), como pela Química (vidro, esmaltes, corantes, tintas, metalurgia ...).

Reframos então os progressos da Matemática. Estes traduziram-se especialmente em fórmulas práticas para calcular volumes e áreas, resolver equações de vários graus e somar os termos de progressões. Notem-se a este propósito:

- A existência de uma fórmula para calcular a área da circunferência de diâmetro d : $A_c \simeq (d - d/9)^2$, o que equivale a usar $\pi \simeq 3.16$;
- A existência de uma aproximação para o valor da raiz quadrada de 2: $\sqrt{2} \simeq 1 + \frac{5}{12} \simeq 1.4142$.

A grande diferença, porém, entre estas e as Matemáticas Gregas que se vão seguir, é que as primeiras não traduzem qualquer esforço de demonstração ou justificação. Compreende-se assim que a Matemática tenha estado condicionada, quase até ao Renascimento, por técnicas de cálculo arcaicas. Dão-se a seguir exemplos de sistemas de numeração.

1. Numeração Egípcia.

$$|, ||, \dots, \cap, \dots, |\cap\cap, \dots, \text{C}, \dots, |\cap\cap\text{C}$$

$$1, 2, \dots, 10, \dots, 21, \dots, 100, \dots, 121$$

Exemplos:

- $121 + 204 = 325$

$$\begin{array}{r} |\cap\cap\text{C} \\ ||||\text{CC} \\ \hline |||||\cap\cap\text{CC} \end{array};$$

- $21 \times 13 = 273$

$$\begin{array}{l} 1 \equiv a \quad | \\ 2 \quad \quad || \\ 4 \equiv b \quad |||| \\ 8 \equiv c \quad ||||| \end{array} \quad , \quad \begin{array}{l} 21 = 21 \times a \quad \quad \quad |\cap\cap \\ 42 \quad \quad \quad \quad \quad \quad ||\cap\cap\cap\cap \\ 84 = 21 \times b \quad \quad \quad ||||\cap\cap\cap\cap\cap\cap\cap\cap \\ 168 = 21 \times c \quad \quad \quad ||||| \cap\cap\cap\cap\cap\cap\cap\cap \end{array}$$

Ora $13 = a + b + c$, logo $21 \times 13 = 21 \times a + 21 \times b + 21 \times c$.

2. Numeração Mesopotâmica.



$$60 \quad 10 \quad 1 = 71$$

$$60^2 \quad 60^1 \quad 60^0 = 3661$$

$$= 61$$

A numeração Mesopotâmica, embora posicional desde o século IX a. C. por influência árabe, era profundamente ambígua, dado servir-se de uma dupla base (10 e 60) e não possuir zero (o qual só surge na Idade do Ferro). Não obstante, as Matemáticas Mesopotâmicas conseguiram desenvolver-se mais do que as Egípcias, dado o seu menor isolamento.

Refiramos agora a Astronomia. Os Egípcios estabeleceram (provavelmente fazendo a média do período entre duas cheias consecutivas do Nilo) um ano de 365 dias com 12 meses de 30 dias e mais 5 dias de feriado. No entanto, e dadas as irregularidades do movimento da Terra, advinham daqui perturbações no calendário, que era necessário corrigir ao fim de 1456 anos – período Sótico (de Sótis, Sirius). Os Babilónios, por sua vez, tendo adoptado o calendário lunar (mês de 29 dias), viram-se obrigados a introduzir alguns anos de 13 meses. Foram, porém, excelentes observadores, tendo chegado a prever empiricamente os eclipses.

Data desta altura a Astrologia, uma vez que se pensava serem os astros deuses, ou habitados por deuses, cujas posições importava conhecer. A Astrologia tornou-se mais tarde profética, à medida que se ia democratizando.

Quanto à Cosmologia, a Terra era em geral considerada como plana e coberta por uma cúpula sólida (céu ou firmamento). Os Egípcios julgavam-na rectangular e os Chineses quadrada, diferindo as opiniões sobre a maneira segundo a qual era sustentada.

Capítulo 3

Ciência e civilização Gregas clássicas

3.1 A civilização Grega

Por volta do ano 3000 a. C., encontra-se estabelecida no Peloponeso uma importante civilização do bronze, fortemente influenciada pela cultura Minóica (Creta), e que iria acolher outros povos de língua grega, como Jónios, Aqueus e Eólicos. Por volta do século XII a. C., dá-se a invasão dos Dórios, os quais, já na posse de armas de ferro, vão destruir toda a civilização até aí existente. A Grécia fica, portanto, a ser constituída por pequenas comunidades de artesãos e camponeses, governadas por aristocracias teocráticas. Embora o solo grego, montanhoso e pobre, permitisse as colheitas da vinha e do azeite, não se prestava ao cultivo de cereais, o que levou a vagas periódicas de emigração. Assim é que, por volta de 2000 a. C., encontramos as costas da Ásia Menor e Itália (Grande Grécia) povoadas por colónias gregas, independentes da sua metrópole.

No século VII a. C., dá-se uma série de alterações socio-políticas que vão modificar profundamente o equilíbrio da sociedade. O comércio mediterrânico, até então dominado pelos Fenícios, passa a ser monopólio dos Gregos, graças aos seus bons conhecimentos de navegação, à qualidade e quantidade dos seus artesãos, ao número das suas colónias espalhadas pelo Mediterrâneo, e às dificuldades que a Fenícia então atravessava, face ao expansionismo Assírio. O aparecimento, nesse mesmo século, da moeda cunhada, leva ao desenvolvimento e prosperidade de novas classes sociais (mercadores, artesãos) e à ruína dos pequenos agricultores. As soluções várias encontradas para esta crise, embora de uma grande diversidade, vão geralmente favorecer as novas classes.

A característica comum das estruturas socio-políticas gregas depois do século VII a. C. é a invenção da *Polis* (cidade), virada para o comércio, dispendo de uma agricultura sólida e de um artesanato desenvolvido, liberta do peso das teocracias da Idade do Bronze e impulsionada por activas classes mercantis. O poder era nela exercido não por um monarca imbuído de direito divino, mas por representantes eleitos pelos cidadãos (minoria). Os deuses eram concebidos como seres antropomórficos, restritos a um âmbito geográfico e sem poderes reais sobre os Homens. O próprio plano das cidades evidencia a mudança de mentalidades: são construídas não já em torno de um palácio real, mas de uma praça, a *Ágora*, onde os cidadãos se reuniam. Dadas as dificuldades existentes no que dizia respeito aos transportes terrestres, as cidades situavam-se geralmente junto ao mar.

Pode perguntar-se por que razão não atingiu qualquer outra civilização da altura os píncaros alcançados pelos Gregos. Ora estes gozavam de uma preciosa independência política, encontrando-se ao mesmo tempo praticamente libertos de tradições tendentes a

travar o passo ao progresso, o que não se passava, por exemplo, com o Egipto ou a Fenícia.

Por volta do século V a. C., atinge-se o apogeu da civilização grega, com a hegemonia de Atenas (governada, de 442 a. C. a 429 a. C., por Péricles, discípulo de filósofo, amigo de Heródoto e Sófocles). Daqui em diante, a civilização grega vai declinar, devido principalmente às Guerras do Peloponeso, as quais, fazendo cair a Grécia sob o domínio macedónio, darão origem ao breve período do Renascimento Helenístico, muito menos importante, contudo.

3.2 Os filósofos naturalistas gregos

Designam-se usualmente os primeiros filósofos por Pré-Socráticos, ou seja, anteriores a Sócrates. Conviria talvez denominá-los antes Naturalistas ou Fisiólogos, dado que se ocuparam sobretudo da natureza, ao passo que Sócrates se debruçou sobre o Homem e a Política. Estes Naturalistas tiveram como denominador comum o serem pensadores laicos e racionalistas, embora ainda imbuídos de conceitos míticos e místicos, e extremamente ingénuos. Saliente-se, no entanto, a extrema importância de terem sido os inventores do Racionalismo Grego, defendendo que a aceitabilidade de uma teoria deveria basear-se na capacidade desta para explicar os factos. Até então, só tinham existido explicações dadas por sacerdotes, e ditas de inspiração divina.

Tales, geralmente considerado como o primeiro dos filósofos naturalistas gregos, nasceu na cidade de Mileto, na costa da Ásia Menor, no início do século VI a. C.. Mileto, além de ser uma grande cidade para a época, com várias dezenas de milhar de habitantes, era igualmente um importante entreposto comercial, tendo contactos com inúmeros estados vizinhos.

Tales tem sido descrito tanto como um sonhador e distraído, como como um grande geómetra e engenheiro. Era, provavelmente, da classe dos mercadores, e possuidor, portanto, de um espírito pragmático. Considerou a água o princípio material do Mundo (provavelmente devido a influência egípcia e mesopotâmica). Julgava ser a Terra um disco flutuando nas águas, e coberta por uma abóbada líquida onde navegavam os astros. Nos seus trabalhos encontram-se as primeiras referências ao íman e aos fenómenos electrostáticos. São-lhe igualmente atribuídas a medição da altura de uma montanha e a previsão de um eclipse.

Anaximandro, condiscípulo de Tales e pretense inventor do gnómon (vara que, uma vez espetada no chão, permite obter informações sobre o movimento do Sol), Foi o primeiro a realizar o esboço de um mapa das terras habitadas. Considerava que, dada a diversidade dos corpos visíveis não permitir a sua intertransformação, o princípio do mundo deveria ser aquilo a que chamou *indefinido* ou *indeterminado* (*apeiron*), invisível. O indeterminado teria originado os mundos pela acção de dois princípios opostos: o quente (chama) e o frio (ar bruma). Este último teria dado origem a Terra, ao condensar-se; da humidade daí resultante teriam provindo os mares. As chamas ter-se-iam agrupado em torno do ar exterior, sendo os astros as suas manifestações visíveis. Admitia ainda ser a Terra um cilindro, com diâmetro igual ao triplo da altura, e que se encontraria imóvel no centro do universo dado estarem em equilíbrio as forças nela aplicadas. Anaximandro parece ainda ter sido o primeiro a intuir algo semelhante à evolução das espécies, tendo considerado uma transição dos seres vivos de marítimos para terrestres.

Anaxímenes, que morreu por volta do fim do século VI a. C., tentou conciliar os seus

antecessores, admitindo como princípio o ar, cuja condensação daria a água e a terra, e cuja rarefacção daria o fogo. A Terra seria, segundo ele, plana, à volta da qual girariam todos os corpos celestes. A noite seria causada pela ocultação do Sol atrás das montanhas.

Pitágoras nasceu, provavelmente, na ilha grega de Samos, emigrando mais tarde, por motivos políticos, para a Sicília, onde fundou uma comunidade religiosa em Cróton. Os Pitagóricos acreditavam na transmigração das almas e seguiam curiosos preceitos éticos, possuindo no entanto os adeptos desta religião de mistério um grande interesse científico e matemático. Ao seu mestre se deve a descoberta de uma relação entre os quatro primeiros números inteiros e os intervalos musicais, o que levou os Pitagóricos a ter grande interesse pela música e a desenvolver uma mística numérica. O número sagrado, a *tetrakis* ou *década*, representada $\cdot\cdot\cdot\cdot$, seria o princípio de todas as coisas, constituindo os números subjacentes toda a realidade física. Os Pitagóricos privilegiaram em especial a geometria, concebendo números triangulares $\cdot\cdot$, quadrados $\cdot\cdot$, e rectangulares $\cdot\cdot\cdot$. Uma vez que lhes atribuíam extensão espacial, advieram dificuldades que vão dar origem aos famosos paradoxos eleatas.

A cosmologia Pitagórica considerava a Terra como esférica (não por razões físicas, mas por ser a esfera a forma perfeita), movendo-se os astros de forma a emitirem notas musicais que não ouvimos, dado estarmos a elas habituados desde que nascemos. É da autoria de um Pitagórico, **Filolau de Tarento**, o primeiro sistema “heliocêntrico”. Segundo ele, existiriam 10 planetas (número mágico): Anti-Terra, Terra, Lua, Mercúrio, Vénus, Sol, Marte, Júpiter e Saturno, girando nesta ordem em torno de um “Fogo Central”, fonte de calor. A Terra e a Anti-Terra encontrar-se-iam sempre diametralmente opostas, com o Fogo Central ente elas, de modo que a Anti-Terra nunca poderia ser vista da Terra. Por outro lado, a parte habitada da Terra seria sempre e só a metade oposta ao Fogo Central, pelo que este nunca poderia ser visto, resolvendo assim os problemas do calor e dos antípodas. A Anti-Terra teria sido introduzida para equilibrar a Terra, e fazer com que o sistema tivesse 10 corpos; o Fogo Central, para que tivesse um centro. Embora ingénuo, este sistema apresenta dois importantes aspectos: desalojar a Terra do centro do universo; e considerar este como tendo dimensões apreciáveis. Tais progressos serão, porém, subseqüentemente esquecidos.

O problema do movimento foi posto pela primeira vez, por volta do século V a. C., por um filósofo, **Heráclito de Efeso**, cognominado “o obscuro” ou “o tenebroso”. Este admitiu como substância primordial o fogo, o que se pensou a princípio estar ligado aos progressos da tecnologia da época, mas que se considerou mais tarde estar de acordo com a ideia segundo a qual a natureza se encontra em mudança constante. Foi Heráclito igualmente o primeiro a insistir na possibilidade de sermos enganados pelos nossos sentidos.

Pela mesma altura surgiu também, embora na outra extremidade do mundo grego (Magna Grécia), uma outra escola filosófica, liderada por **Parménides**, e a que se chamou eleata, por estar situada na cidade de Eleia. Parménides, que teve dois discípulos principais, **Zenão** e **Melissos** de Eleia, escreveu duas obras principais: a *Via da Aparência* e a *Via da Verdade*. A primeira consiste numa cosmogonia desprovida de interesse; a segunda, na investigação do que É (o Ser). Parménides concluiu que o Ser existe, e é eterno, pois se o não fosse, já teria não sido. É idêntico a si próprio, imutável (pois, se mudasse, não seria), indivisível e infinito (pois não carece de nada). Tudo o que for diferente destas verdades, é necessariamente falso.

Tão fortes são estas verdades proclamadas por Parménides (herdeiro da tradição Pitagórica) que ninguém se atreverá a negá-lo directamente. Os paradoxos de Zenão,

inventados com a finalidade de defender as doutrinas do mestre, acabaram por influenciar toda a Matemática. Para responder a algumas objeções, Melissos de Samos viu-se obrigado a modificar ligeiramente a doutrina do mestre, admitindo ser o Ser infinito, pois se fosse finito, teria extensão e seria divisível, além de deixar em aberto a possibilidade de existir algo mais para além dele.

Os principais opositores de Parménides vão ser **Empédocles** e **Anaxágoras**. **Empédocles de Agrigento** não negou Parménides, ao reconhecer na eternidade do Ser uma espécie de lei de conservação. Aceitou, no entanto, os dados dos sentidos, admitindo a existência do movimento. O ser é eterno e indestrutível, mas múltiplo e não uno. Segundo a tradição Jónica, considerou o ser como constituído por quatro elementos, governados por dois princípios, o Amor (atração) e o Ódio (repulsão). Dada a variedade de combinações possíveis, daqui adviriam todas as coisas e suas respectivas transformações. Esta doutrina será retomada por Aristóteles. Empédocles admitiu ainda uma cosmogonia cíclica, na qual predominariam alternadamente o Amor e o Ódio. Consta também ter sido da sua autoria a descoberta da materialidade do ar.

Anaxágoras, professor de Péricles, amigo de Eurípedes e Sócrates, foi o único dos filósofos naturalistas a viver em Atenas, de onde mais tarde teve de fugir. Considerou, como Empédocles, o ser como eterno, mas múltiplo, sendo a matéria infinitamente divisível, de modo que qualquer coisa conteria todas as outras coisas. Distinguiu ainda entre matéria com e sem espírito (viva e inerte), iniciando a doutrina do Vitalismo.

Sensivelmente pela mesma altura, surgiu na cidade de Abdera a doutrina do Atomismo, fundada por dois filósofos, **Leucipo** e **Demócrito**, dos quais pouco se sabe. Aceitavam, com Parménides, a eternidade do Ser, mas deram, de igual modo, um grande passo em frente ao atribuir uma realidade física ao não-Ser, o espaço vazio. Admitiram ser o Ser formado por inumeráveis partículas, os átomos, que pelos seus movimentos e associações seriam responsáveis pela transformação e variedade do mundo visível. Estes seriam todos da mesma substância, compactos e com a mesma densidade. Os corpos macroscópicos, pelo contrário, teriam grande diversidade de formas e densidades, por poderem ser constituídos por um número praticamente infinito de tipos de átomos, além de poderem conter vazio. Esses átomos deslocar-se-iam ao acaso no vazio, sendo a própria alma constituída por átomos disseminados pelo corpo. Surgiram daqui a primeira doutrina mecanicista, e a primeira metafísica materialista, que vão, no entanto, ser negadas por Platão e Aristóteles, só vindo a ser adoptadas pelos Epicuristas.

Por volta do século V a. C., a filosofia naturalista deixa de estar na moda, passando o panorama do saber a ser dominado pelos Sofistas, oriundos da Ásia Menor. Estes eram professores que ensinavam mediante remuneração, o que muito desagradava a Platão. Correspondiam, porém, a uma necessidade da época, dada a importância assumida pelas discussões públicas, que exigiam alguma cultura. Daí que muitas vezes os Sofistas se tenham preocupado demasiado com a argumentação, e pouco com a veracidade do conteúdo. Os mais célebres foram **Górgias**, céptico, e **Protágoras** (“o Homem é a medida de todas as coisas”), anteriormente considerado o fundador do relativismo ético, mas actualmente visto como precursor do Humanismo. Embora Platão apresente Sócrates como um inimigo dos Sofistas, ele próprio era um deles, sendo o Sócrates dos *Diálogos* uma pura criação literária. Sócrates passeava-se por Atenas conversando com todos, e de todos as ideias abalando. Constatou ser, como o Oráculo havia profetizado, o homem mais sábio da Grécia (por ser o único que, nada sabendo, admitia a sua ignorância). Acabou, no entanto, por ser condenado a morte.

3.3 Platão e as Matemáticas Gregas

Platão, nascido em Atenas por volta do ano 428 a. C. (portanto nos finais do domínio de Péricles e começo das guerras com Esparta), descendia de famílias nobres, tendo inicialmente apoiado o governo oligárquico dos Trinta Tiranos, imposto por Esparta a Atenas na sequência da derrota desta última cidade. A sua figura tem sido sempre foco de controvérsia, mais pelas suas ideias políticas e sociais, do que propriamente científicas. Julga-se que tenha encontrado Sócrates, com quem se deslumbrou, por volta dos vinte anos de idade, e é considerado um dos mais importantes pensadores e escritores da história.

Platão advogava uma forma de governo contrária à democracia, uma vez que as massas populares poderiam ser facilmente enganadas. Propôs em vez disso o governo por uma *élite*, esclarecida, de filósofos, isto é, homens que conheciam as Ideias. Estas, como a Beleza, o Bem, etc, seriam inatas, pelo que so poderíamos recordar as coisas com as quais já havíamos estado em contacto antes de nascermos, e que só são visíveis aos olhos da razão. Considerou que a verdade provém apenas da descoberta das verdades eternas, negando os testemunhos dos sentidos, atitude que alguns pensadores atribuíram ao seu conservadorismo político (por negar a mudança).

No ano 387 a. C., Platão fundou a sua escola, denominada *Academia*, por se situar no parque de Academos, e à porta da qual colocou o aviso “Quem não sabe Matemática não pode entrar”. Isto porque Platão via na Matemática uma via de acesso às Ideias (por exemplo, uma bola seria redonda porque participa da Ideia de esfericidade). Esta Academia vai ter uma influência positiva no desenvolvimento da Matemática grega.

Platão manifestou igualmente interesse pela Astronomia, dado pensar poder explicar todos os movimentos celestes considerando-os, segundo a tradição Pitagórica, como movimentos circulares uniformes, ou composições destes. Esta hipótese só viria a ser contrariada por Kepler, no século XVII. Em contrapartida, Platão não considerava a Física sequer uma ciência (só o será com Aristóteles), talvez porque as leis da Física exigissem um grau de abstracção inatingível na época. Platão tinha, no entanto, a sua teoria da estrutura da matéria, decalcada da de Empédocles, e fazendo corresponder, de modo puramente arbitrário, os quatro elementos deste último pensador a quatro dos cinco poliedros regulares:

Fogo Tetraedro

Ar Octaedro

Terra Cubo

Água Icosaedro

Isto constituía uma espécie de atomismo só com quatro tipos de átomos. Além disso, as faces deste poliedros podiam ser construídas a partir de apenas dois tipos de triângulos, um isósceles e um rectângulo (com um cateto de comprimento igual a metade da hipotenusa).

Por volta do século V a. C., os matemáticos Pitagóricos haviam avançado o suficiente para distinguir três tipos de proporções:

$$\frac{a - b}{a - c} = \begin{cases} \frac{a}{a}, & \text{proporção aritmética} \Rightarrow b = \frac{a+b}{2} \\ \frac{a}{b}, & \text{proporção geométrica} \Rightarrow b^2 = ac \\ \frac{a}{c}, & \text{proporção harmónica ou musical} \Rightarrow \frac{2}{b} = \frac{1}{a} + \frac{1}{c} \end{cases}$$

Na linguagem dos intervalos musicais Pitagóricos, $a = 2c$ correspondia a uma oitava, $\frac{a}{b} = \frac{2}{3}$ a uma quinta, e $\frac{b}{c} = \frac{3}{4}$ a uma quarta.

Os problemas que mais preocupavam os matemáticos gregos desta época eram três:

1. A quadratura do círculo;
2. A duplicação do cubo;
3. A trisecção do ângulo.

É por esta altura que surge **Hipócrates de Quios**, o maior matemático do século V a. C., e autor, ao que parece, de uns *Elementos*, onde faz o primeiro esforço de ordenação das suas descobertas. Foi, também, o primeiro capaz de determinar a área de superfícies delimitadas por duas curvas, das quais inventou varios exemplos (lúnulas, ver figura 3.1). Hipócrates demonstrou igualmente que o problema da duplicação do cubo consistia na,

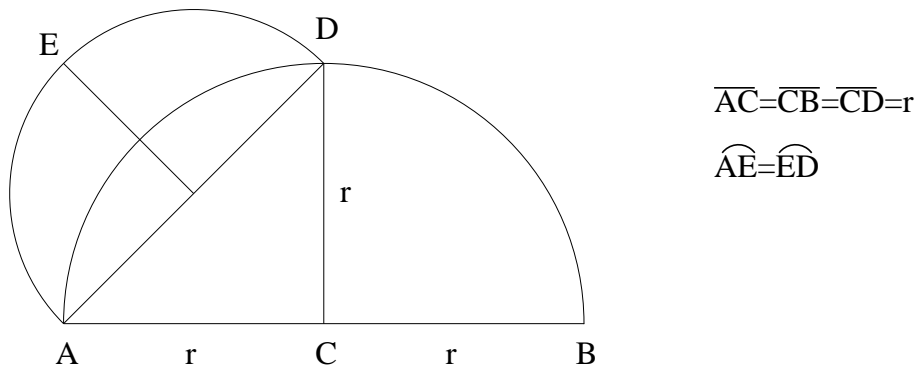


Figura 3.1: Determinação da área da lúnula por Hipócrates de Quios. Pelo teorema de Pitágoras, $\overline{AD} = \sqrt{2}r$, portanto a área do semi-círculo AED é $A_{\circ AED} = (\pi/2)(\sqrt{2}r/2)^2 = \pi r^2/4$. Por sua vez, a área do triângulo ACD é $A_{\Delta ACD} = r^2/2$, enquanto a do quadrante ACD é $A_{\circ ACD} = \pi r^2/4$. Se for A_l a área da lúnula AED (delimitada pelos arcos de circunferência AED e AD), tem-se $A_{\Delta ACD} + A_{\circ AED} = A_l + A_{\circ ACD}$, logo $A_l = A_{\Delta ACD} = r^2/2$.

ou melhor, correspondia à, solução da proporção $\frac{a}{x} = \frac{x}{y} = \frac{y}{2a}$.

O problema da trisecção, ou melhor, da n -secção do ângulo foi resolvido, de maneira mecânica (pelo que Platão a não apreciou), por um sofista chamado **Hípias** (ver figura 3.2). A solução consistia em fazer partir do ponto A dois pontos materiais, cuja velocidade seria constante: um seguindo o segmento $[AO]$ e o outro o arco \widehat{AB} . Dividir-se-ia em seguida o segmento $[AO]$ em tantas partes quantas aquelas em que se pretendia dividir o ângulo. Seguidamente, por estes pontos tiravam-se paralelas a $[OB]$, que iriam intersectar $[OR]$, onde R é a posição do ponto que segue a trajectória \widehat{AB} quando o ponto que segue a trajectória $[AO]$ se encontra em P . Estas intersecções definem a chamada *quadratriz*.

Convém salientar, a propósito dos números irracionais, que Platão afirmava já no seu diálogo *Teeteto* que todos os números inteiros menores que 17 excepto os quadrados perfeitos têm raízes quadradas irracionais. Teeteto identificou o icosaedro como sólido regular e demonstrou serem estes em número de cinco. A teoria dos números irracionais será mais

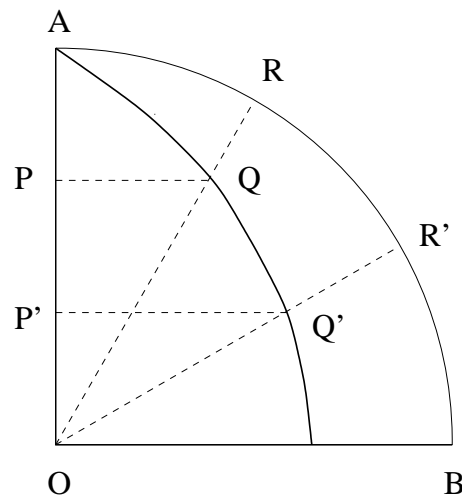


Figura 3.2: Construção da quadratriz (curva a traço mais grosso) para trisectar o ângulo, da autoria de Hípias.

tarde retomada por um matemático alemão do século XIX, o qual considerou que qualquer número divide \Re em duas classes. Exemplo: $\sqrt{2}$ divide \Re em $A = \{x \in \Re : x^2 < 2\}$ and $B = \{x \in \Re : x^2 > 2\}$.

3.4 Aristóteles

Antes de iniciarmos o estudo do pensador que foi Aristóteles, convém demorarmos-nos um pouco naquele que foi um dos maiores matemáticos da antiguidade: **Eudóximo**. De família muito pobre, teria frequentado a Academia, que se viu obrigado a deixar por razões monetárias. Foi o autor da teoria das proporções e o primeiro a utilizar o conceito de limite, além de ser igualmente o autor da demonstração Euclideana da proporcionalidade entre a área do círculo e o quadrado do seu raio.

Demonstração Sejam duas circunferências de raios a e b , sendo $a < b$. Ter-se-á então $\frac{a^2}{b^2} = \frac{A}{B} = \pi$? Sabia-se ser esta relação válida para os polígonos regulares. Suponha-se (redução ao absurdo) ser

$$\frac{a^2}{b^2} = \frac{A}{C}.$$

Se $C \neq B$, então $C < B$ ou $B < C$.

1. Se $C < B$, $B - C > 0$. Existe então um polígono de área $B' > C$ (inscrito na circunferência de área B) tal que $B - B' < B - C$. Seja A' a área de um polígono inscrito na circunferência de área A; tem-se

$$\left. \begin{array}{l} \frac{a^2}{b^2} = \frac{A'}{B'} \\ \frac{a^2}{b^2} = \frac{A}{C} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{A'}{B'}.$$

De $B' > C$, segue-se que $A' > A$, o que é absurdo, pois a área do polígono inscrito não pode ser maior que a da circunferência na qual está inscrito.

2. Se $C > B$, $C - B > 0$. Existe então um polígono de área $B' > B$ (circunscrito à circunferência de área B) tal que $B' - B < C - B$. Seja agora A' a área de um polígono circunscrito à circunferência de área A ; tem-se novamente

$$\left. \begin{aligned} \frac{a^2}{b^2} &= \frac{A'}{B'} \\ \frac{a^2}{b^2} &= \frac{A}{C} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{A'}{B'}$$

Então, como $C > B'$, $A > A'$, o que é absurdo, pois a área da circunferência não pode ser maior que a do polígono circunscrito. ||

Eudócio foi, de igual modo, o primeiro a tentar prever o movimento dos astros de modo quantitativo, por meio de um sistema de 27 esferas (posteriormente aumentado para 34 por Calipo), distribuídas como se segue: 4 esferas por cada um dos cinco planetas, 3 pelo Sol, 3 pela Lua e uma para as estrelas fixas. Este sistema, que se exemplifica a seguir (ver figura 3.3) com o caso da Lua, foi adoptado por Aristóteles, e permaneceu como alternativa ao de Hiparco e Ptolomeu.

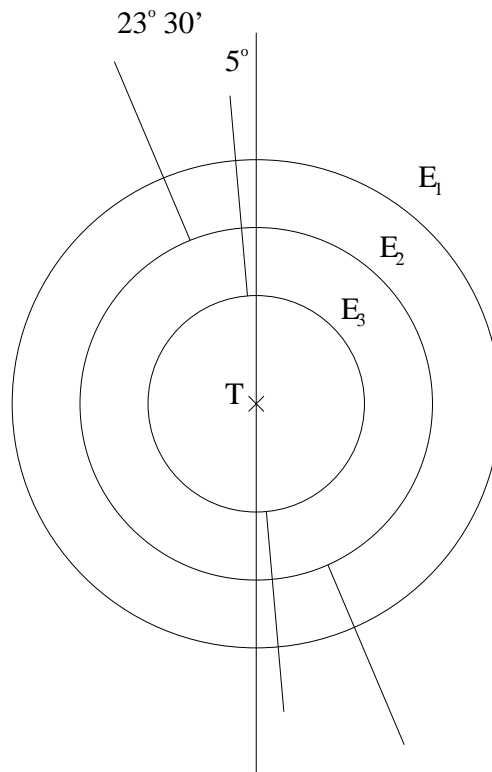


Figura 3.3: Sistema de Eudócio: o movimento da Lua resulta da composição das rotações de 3 esferas, em torno de eixos inclinados a diferentes ângulos. E_1 roda de este para oeste, com período $T_1 = 24$ horas; E_2 roda igualmente de este para oeste, mas com período $T_2 = 223$ meses; finalmente, E_3 roda de oeste para este com período $T_3 = 27$ dias.

Aristóteles de Estagira, nascido na Macedónia no ano 384 a. C., foi um dos pensadores de maior importância em toda a história da humanidade, ao ponto de não terem existido quaisquer alternativas às suas doutrinas durante mais de 2 000 anos. Entrou aos 18 anos na Academia, onde ficou 20 anos, até à morte de Platão. Saiu então e ensinou em

diversas cidades, tendo sido, inclusivamente, preceptor de Alexandre. Voltou a Atenas perto dos 50 anos, e fundou uma escola, o *Liceu*, na qual dava aulas aos alunos mais avançados passeando (donde o nome de Peripatéticos dado aos Aristotélicos).

Ao contrário de Platão, Aristóteles não escreveu obras destinadas a publicação, mas apenas textos de apoio para os seus discípulos. Uma vez que escreveu durante toda a sua vida, encontram-se nas suas obras opiniões contraditórias. Uma mais forte tendência Platónica corresponde normalmente a um escrito de juventude. Aristóteles debruçou-se fundamentalmente sobre quatro temas:

1. Política, Ética e Ciências Sociais;
2. Lógica e Metafísica;
3. Ciências Naturais;
4. Física.

Segundo alguns autores, bastaria a obra de Aristóteles nas Ciências Naturais, onde se revelou grande observador e experimentador, para lhe grangear admiração universal. A Metafísica deve o seu nome ao facto de os tratados que se debruçam sobre tais matérias ficarem dispostos, nas compilações das obras de Aristóteles, a seguir à Física (que com ele adquiriu o estatuto de ciência). Aristóteles deixou-nos ainda três tratados de Lógica: um tratando das demonstrações, outro dos silogismos, e um último das argumentações plausíveis.

Tem-se criticado Aristóteles por ter favorecido o raciocínio dedutivo em detrimento do indutivo. Note-se, porém, ser aquele a base dos *Elementos* de Arquimedes e de Euclides, bem como de obras mais modernas.

Com Aristóteles assiste-se a uma reviravolta radical contra Platão. Em vez de, por exemplo, uma esfera ser esfera por participar da Ideia de esfera, é a Ideia de esfera que é formada pela experiência de muitas esferas. Aristóteles nega que percebamos as sombras das Ideias pelos sentidos, pois assim as Ideias, tal como as suas imagens, seriam corruptíveis.

Aristóteles entende o movimento como sendo toda e qualquer transformação. Distingue dois tipos de acidentes:

Acidentes

1. Inerentes às coisas, por exemplo, a forma de um objecto:
 - (a) Qualidade – podem ter maior ou menor grau;
 - (b) Quantidade – são aditivos e matematizáveis.
2. Não inerentes, por exemplo, a posição de um objecto.

Atributos de uma substância

1. Em acto;
2. Em potência;
3. Misturados – movimento.

3.5 A ciência Aristotélica

Aristóteles conserva dos seus predecessores a ideia de um universo finito, ordenado e fechado (Cosmos); divide-o, porém, em duas partes:

Os céus ou mundo lunar Reino da ordem e da harmonia, do eterno e do perfeito.

O mundo terrestre ou sublunar Reino da desordem e da corrupção.

Aristóteles continua a considerar, para o mundo sublunar, os quatro elementos de Empédocles, não os associando já, no entanto, aos poliedros regulares, o que afirma fruto de mera especulação. Estes elementos não são o que nós conhecemos pelos mesmos nomes, mas sim princípios mais abstractos. Faz, além disso, a primeira identificação das propriedades dos corpos com a sua constituição elementar, o que irá influenciar as teorias alquímicas.

Sendo os céus tão radicalmente diferentes da Terra, são necessariamente constituídos por um quinto elemento, o *éter* ou *quinta essência*. Não é, portanto, possível qualquer interacção entre os céus e a Terra. Isto levantou grandes dificuldades, nomeadamente no tocante ao facto de o Sol ser quente (qualidade terrestre), bem como por certos fenómenos, como os cometas e os meteoros, não poderem ser devidamente explicados.

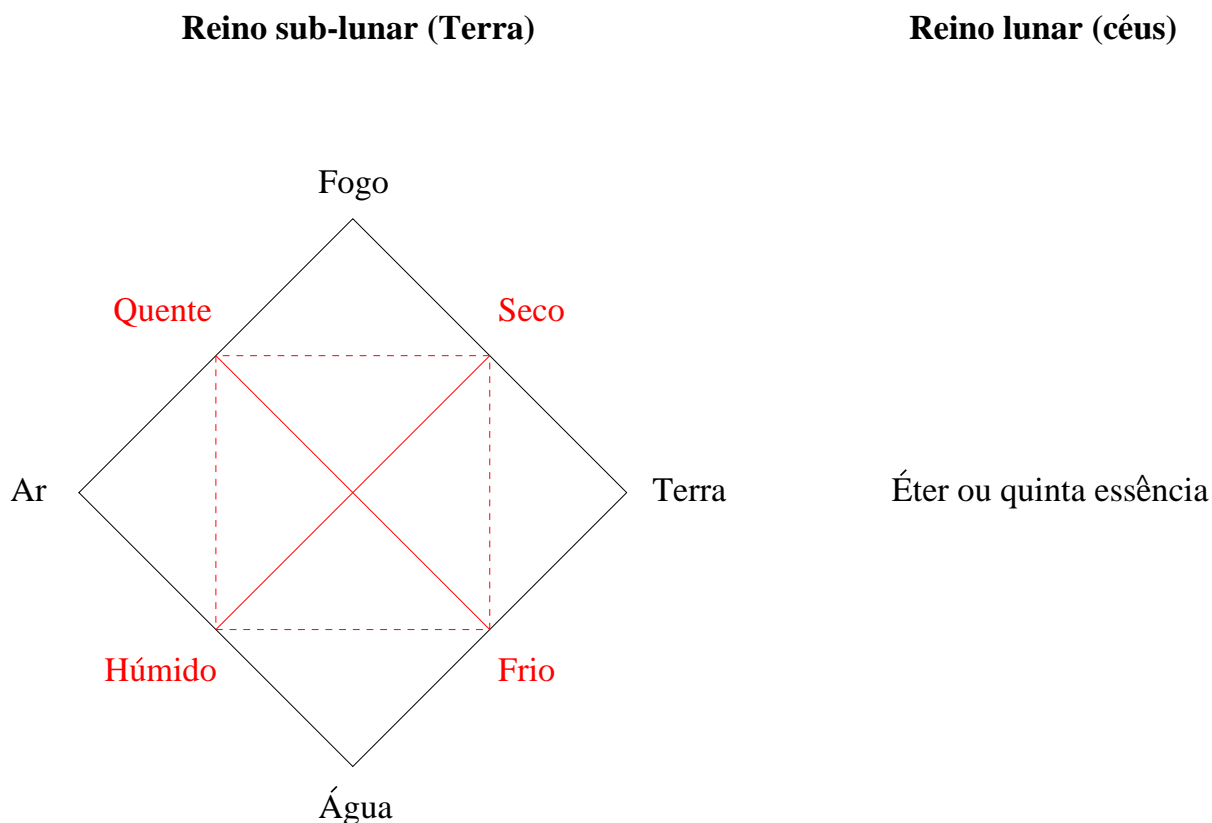


Figura 3.4: O universo segundo Aristóteles: os mundos sub-lunar e lunar não se influenciariam mutuamente.

Aristóteles elaborou uma cosmologia ainda mais complexa do que a de Eudócio e Calipo, uma vez que tinha em vista não somente a invenção de um modelo matemático, mas de uma teoria que explicasse os fenómenos físicos. (Saliente-se, novamente, que a

Física adquire, com Aristóteles, o estatuto de ciência.) O seu sistema do mundo incluía cerca de 50 esferas, todas ligadas entre si (as esferas de Eudóxio eram independentes). Isto obrigava a que, às esferas do sistema original, tivessem que ser adicionadas esferas de compensação, para anular a influência que umas tinham sobre as outras. Estas esferas seriam reais e translúcidas, nada existindo para além da esfera das estrelas fixas. Aristóteles poderia ter evitado a posterior complicação do seu sistema astronómico se tivesse conservado o movimento diurno de cada astro, em vez de criá-lo e destruí-lo vezes sucessivas.

A Dinâmica Aristotélica resulta da noção segundo a qual cada corpo tem um lugar natural: os corpos pesados, ou graves, descem, pois a Terra é o seu lugar natural; os corpos leves ou ligeiros sobem, pois é o ar o seu lugar natural. A situação natural seria, assim, cada corpo ocupar o seu lugar natural. No universo, porém, reina a desordem, estabelecida através de uma espécie de pecado original. Segue-se daqui que, dado o movimento ser mantido integralmente, a desordem do universo se mantenha. Distinguem-se dois tipos de movimentos:

Movimentos naturais Resultam da natureza dos corpos;

Movimentos violentos Exigem a acção de um motor. O corpo só se move se a potência a ele aplicada for superior à resistência.

Tal teoria, embora bastante de acordo com o que, de facto, se observa, apresentava um certo número de dificuldades, nomeadamente no caso de movimentos violentos aparentemente desprovidos de motor, como por exemplo o voo de uma flecha. Aristóteles admitiu, assim, como hipótese explicativa (embora frágil), a possibilidade de o ar deslocado pela flecha se precipitar no vazio criado atrás desta, impelindo-a constantemente. Em alternativa, surgiu a teoria do *ímpeto*, que era, no entanto, contrária ao corpo da doutrina.

Capítulo 4

Ciência e civilização Helenísticas

4.1 O Período Helenístico

Em meados do século IV a. C., Filipe da Macedónia impôs o seu domínio às cidades-estado gregas, enfraquecidas já pelas suas contínuas guerras. Este domínio, que começou por ser velado, foi mais tarde declarado abertamente por Alexandre, que acalentava o sonho de invadir o império Persa. Efectivamente, e apesar da desvantagem numérica em que o seu exército se encontrava, ao fim de quatro anos de campanhas Alexandre era o senhor de tudo até ao vale do Indo, tendo os seus soldados recusado então ir mais adiante. Tal foi possível devido, principalmente, ao facto de os Persas se encontrarem ainda numa situação típica da Idade do Bronze.

A morte de Alexandre vai originar guerras entre os seus sucessores, o que ocasiona a formação de três estados principais: Macedónia, Egipto, e o Reino dos Selêucidas. Todos estes estados serão governados ou por gregos, ou por aqueles que assimilaram a cultura grega.

Durante a sua vida e conquistas, Alexandre fundou imensas cidades, o que resolveu, pelo menos durante algum tempo, o crónico problema grego do excesso de população, ao mesmo tempo que abria novos mercados ao trânsito de produtos diversos. No entanto, estes novos estados acabaram por defrontar-se com os mesmos velhos problemas, pois as suas estruturas fundamentais não haviam mudado. Com efeito, e dada a tradição escravagista destas sociedades, existiam apenas uma classe elevada, de grande poder de compra (gregos ou helenizados), e a grande massa de trabalhadores escravos. As classes médias, cujo trabalho não era de forma alguma competitivo com a mão-de-obra escrava, foram assim condenadas ao desaparecimento. Isto embora a importância do escravagismo não pareça ter sido tão grande quanto certos autores marxistas comumente crêem. Pode assim dizer-se que tais sociedades se encontravam em crise económica praticamente desde o seu começo. Como pôde, então, surgir um florescimento do pensamento científico como o que se deu em Alexandria e outras cidades? As razões são de duas ordens:

Dinâmica interna da ciência Tanto na Astronomia como na Matemática, o número de problemas por resolver era bastante elevado; na Física, a doutrina qualitativa de Aristóteles clamava por matematização.

Factores externos Concluiu-se que, até ao apogeu da civilização Helenística, só se dedicavam à ciência aqueles cujas profissões eram bem remuneradas (médicos, arquitectos, professores). Daí em diante, surgiram organizações de “Ensino Superior”,

pagas pelos monarcas helenísticos, e que forneciam excelentes condições de trabalho. Estes reis, ao contrário dos estados modernos, não esperavam quaisquer vantagens práticas, pretendendo unicamente aumentar o seu prestígio (se exceptuarmos os fins militares e de mistificação religiosa).

Os grandes centros de investigação desta altura foram Alexandria, Pérgamo, Siracusa e Rodes, sendo esta última cidade famosa pelo seu mercado de escravos. O Museu de Alexandria, como templo dedicado às musas, sofreu grande influência do Liceu de Aristóteles. Citemos, a propósito, entre os sucessores deste **Teofrasto**, autor de obras de Botânica e Mineralogia; e **Strato**, dedicado à Física e à Pneumática (estudo dos gases). Este último teria sido chamado a Alexandria pelo primeiro dos Ptolomeus, Ptolomeu Soter, para ser perceptor de seu filho.

O corpo dos professores do Museu rondava os 50, sendo as aulas dadas em Grego e as condições de trabalho ótimas. O Museu compreendia um importante observatório astronómico, um jardim botânico, um jardim zoológico e várias bibliotecas, a maior das quais contendo aproximadamente 700 000 pergaminhos, consequência do desejo constante dos reis de possuírem cópias de tudo o que era publicado no campo das ciências.

Note-se que em Atenas não voltou a florescer a ciência.

4.2 Matemática e Física no Período Helenístico

Não se pode, evidentemente, falar em Matemática sem referir a figura de **Euclides**, que viveu em Alexandria nos começos do século III a. C., e foi autor dos treze livros dos célebres *Elementos*, dos quais subsistem cerca de mil exemplares manuscritos e que são, ainda hoje, a base do ensino da Geometria. Os primeiros quatro livros tratam de Geometria Plana, e os três seguintes de Geometria do Espaço (por exemplo, da área e volume dos sólidos). Os livros 5 e 6 tratam da teoria das proporções; os sétimo, oitavo e nono, da Teoria dos Números (exemplo: de todos os rectângulos com igual perímetro, é o quadrado aquele que tem maior área). O livro 10 trata da teoria dos irracionais. Euclides, o primeiro a afirmar a propagação rectilínea da luz, ocupou-se ainda de Óptica (publicou os tratados *Óptica* e *Catóptrica*, contendo curiosas teorias), e da teoria da perspectiva.

Arquimedes de Siracusa nasceu na Sicília, filho de um astrónomo profissional (o que é relevante), o qual, aprecebendo-se das qualidades do jovem, o mandou estudar para Alexandria, onde foi colega de Eratóstenes. Embora dotado, segundo consta, de apurado espírito prático, Arquimedes nunca escreveu nada sobre a técnica, provavelmente devido ao facto de esta ser considerada inferior e indigna pelos gregos. Sabe-se, no entanto, que Arquimedes colheu nos problemas mecânicos a inspiração para os seus trabalhos matemáticos. Nomeadamente, inventou um processo de passagem ao limite denominado *método de exaustão*, que aplicou para calcular o número π (conhecido desde o século IV a. C.). Para tal, considerou polígonos com número crescente de lados, inscritos na, e circunscritos à, circunferência, de modo a obter um valor por excesso e outro por defeito. Veio assim $3 + \frac{10}{71} < \pi < 3 + \frac{10}{70}$. A média aritmética destes dois valores dá $\pi \simeq 3.1419$, resultado este obtido considerando um polígono com 96 lados. Mais tarde, os árabes conseguiram 17 algarismos significativos. Arquimedes obteve ainda alguns resultados ditos de “cálculo integral”, entre eles que a área de uma esfera é quadrupla da do seu círculo maior, e que o volume de uma esfera é $2/3$ do do cilindro a ela circunscrito.

No campo da Física experimental, Arquimedes procedeu à determinação do diâmetro aparente da Lua, mediante uso de um aparelho equipado com um disco destinado a ocultar a Lua cheia. Introduziu, além disso, a observação repetida, colhendo dados por excesso e por defeito e fazendo a média. Louve-se ainda a sua capacidade de introduzir novos conceitos em Física, como a massa específica.

Arquimedes dedicou-se sobretudo a problemas de Mecânica (Estática), entre os quais se salientam o equilíbrio da alavanca e a Hidrostática. Analisemos estes aspectos.

1. **Alavanca interfixa.** À maneira de Euclides, Arquimedes estabelece postulados (ver figura 4.1):

- (a) Dois pesos iguais, colocados a iguais distâncias do fulcro, estão em equilíbrio;
- (b) Se pesos diferentes estiverem a distâncias diferentes do fulcro, a alavanca não está em equilíbrio e cairá para o lado do corpo mais pesado;
- (c) A acção de um peso pode ser substituída por dois pesos, afastados iguais distâncias do primeiro para ambos os lados, e pesando cada um metade do peso inicial.

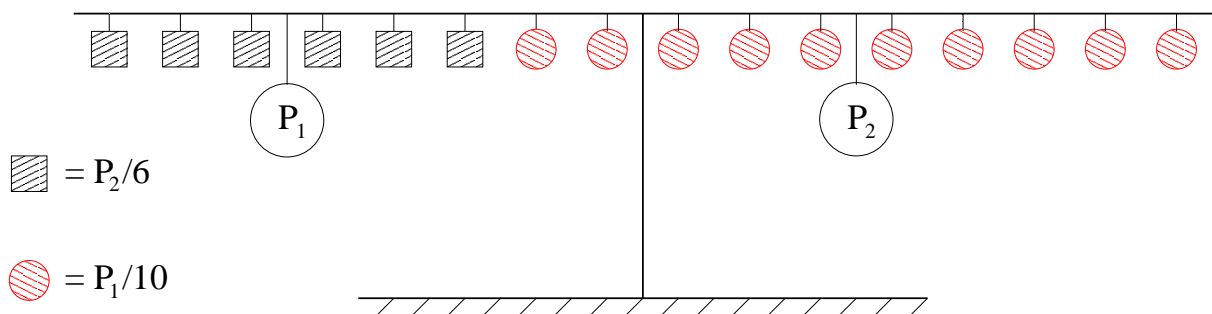


Figura 4.1: Alavanca interfixa. A condição de equilíbrio é $\frac{P_2}{6} = \frac{P_1}{10}$, ou, mais geralmente, $\frac{P_2}{2l_1} = \frac{P_1}{2l_2} \Leftrightarrow P_2 l_2 = P_1 l_1$.

2. **Hidrostática. Princípio de Arquimedes** (ver figura 4.2).

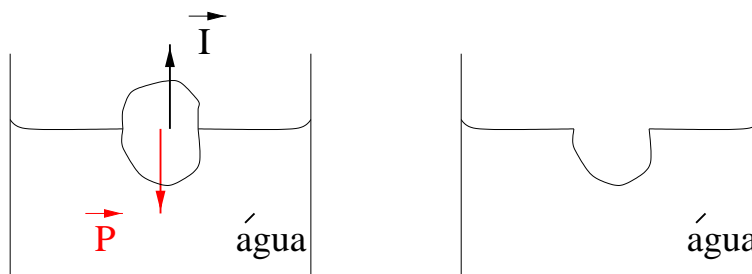


Figura 4.2: Princípio de Arquimedes. O pedaço de água que falta sofre da água restante uma força \vec{I} que é igual ao seu peso \vec{P} , para se manter em equilíbrio.

Arquimedes foi ainda o primeiro a deduzir ser a superfície livre das águas esférica e não plana.

Cite-se, por último, no campo da Matemática, **Apolónio de Pérgamo**, autor de interessantes estudos sobre as cónicas (*Tratado das Cónicas*, século II a. C.) que muito influenciaram pensadores posteriores, entre os quais Kepler.

4.3 Astronomia e Matemática Helenísticas

O primeiro grande nome da Astronomia Helenística que citaremos é **Heráclides** (ou **Heráclido**) de Ponto (388–315 a. C.), continuador de Eudócio que desprezou, porém, o sistema do mestre. De acordo com a teoria Pitagórica, supôs que a Terra rodava sobre si mesma em 24 horas (o que eliminava a necessidade de esferas para explicar os movimentos diurnos), e afirmou que Mercúrio e Vénus rodariam em torno do Sol, e todos os restantes planetas em torno da Terra.

As ideias de Heráclides influenciaram o primeiro grande astrónomo alexandrino, **Aristarco de Samos** (310–230 a. C.). Num rasgo de génio, e tendo a coragem de negar o antropocentrismo, Aristarco propôs o primeiro sistema heliocêntrico – no centro do mundo está o Sol, à volta do qual giram os planetas, à excepção da Lua, que gira à volta da Terra. Observe-se, porém, que a ideia de Aristarco não foi aceite na época, a maior objecção contra ela consistindo no facto de que, se a Terra se movesse, a paralaxe das estrelas fixas seria observável. Embora Aristarco tenha respondido a esta crítica afirmando estarem as estrelas muito distantes, o seu sistema nunca foi adoptado, dada a dificuldade que existia em aceitar que o Homem não se encontrasse no centro do Mundo, aliada a preconceitos religiosos. O único apoiante de Aristarco foi um astrónomo babilónio, **Seleuco**.

Aristarco foi ainda o primeiro a determinar as dimensões e a distância a que se encontram os corpos celestes. Através da medição do tempo que a Lua demora a entrar no cone

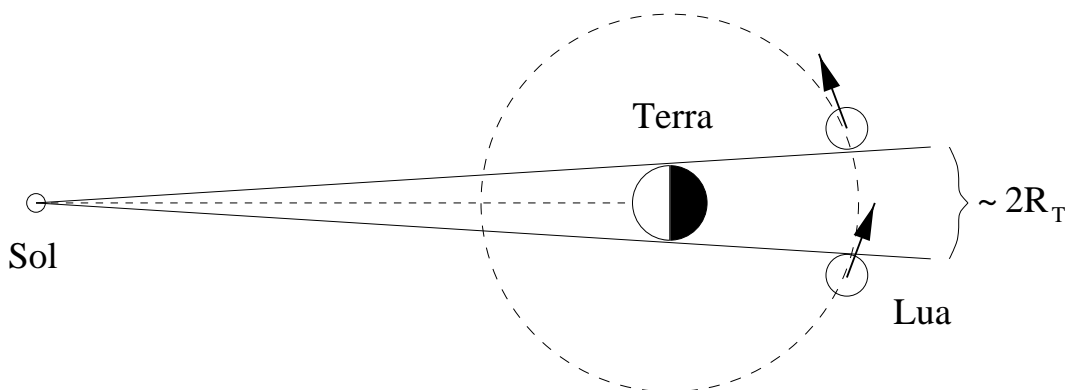


Figura 4.3: Determinação, por Aristarco de Samos, do diâmetro da Lua durante um eclipse: o cone, quase cilíndrico, de sombra da Terra tem diâmetro quase igual ao da Terra, $2R_T$.

de sombra da Terra, e do tempo que demora a atravessá-lo, obteve para o diâmetro lunar o valor $D_L = 0.36R_T$ (valor exacto: $D_L = 0.27R_T$). Observe-se além disso que, uma vez conhecidos os diâmetros aparente e absoluto, pode medir-se a distância a que se encontra

o objecto. Sendo o diâmetro aparente da Lua aproximadamente 0.5° de ângulo sólido, conhecendo-se $\alpha/2$ e l pode calcular-se d (ver figura 4.4). Os valores obtidos estão, no entanto, afectados de grande erro, devido principalmente a dois factores: (i) Um valor errado para o diâmetro da Lua; e (ii) um mau valor para o ângulo. Assim, Aristarco obteve $\overline{TL} = 9.5D_T$, quando o valor exacto é $\overline{TL} = 30.2D_T$. Fez ainda medições da distância Terra-Sol, para o que se serviu do facto de, no Quarto Crescente, Sol, Lua e Terra definirem um triângulo rectângulo (vê-se exactamente metade do disco lunar). Sendo conhecidos

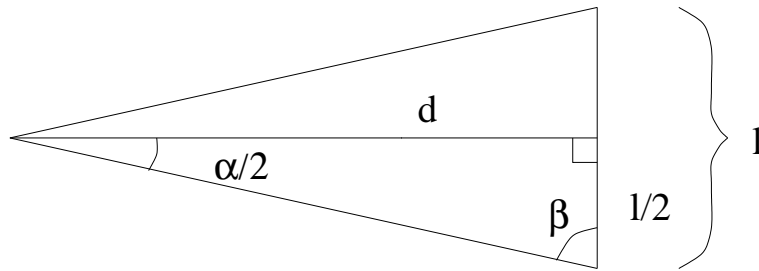


Figura 4.4: Cálculo da distância d a um corpo celeste, conhecidos os seu diâmetros linear l e angular α aparentes: $d/(l/2) = \tan \beta \Leftrightarrow d = (l/2) \tan(90^\circ - \alpha/2)$.

α e D_L (ver figura 4.5), é possível calcular \overline{TS} (ver figura). Aristarco tomou $\alpha = 87^\circ$

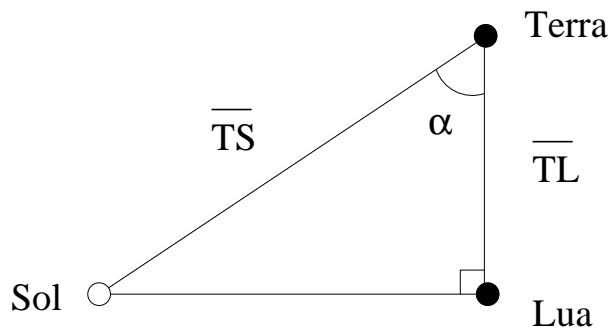


Figura 4.5: Determinação, por Aristarco de Samos, da distância da Terra ao Sol.

(valor exacto: $\alpha = 89^\circ$), o que deu origem a grandes discrepâncias: $\overline{TS} = 180D_T$, quando o valor exacto é $\overline{TS} = 12\,000D_T$, e $D_S \simeq 7D_t$ (valor exacto: $D_S \simeq 109D_T$). Note-se que, embora erradas, tais medidas atribuíam já ao universo dimensões muito apreciáveis e nunca imaginadas antes.

Outro grande astrónomo do período Helenístico foi **Eratóstenes de Cirene** (284–195 a. C.), polígrafo – poeta, gramático, matemático, historiador, filósofo e geógrafo, além de preceptor do Terceiro Ptolomeu e director da Grande Biblioteca de Alexandria. Celebrizou-se, sobretudo, pela sua medida das dimensões da Terra, a cujo perímetro atribuiu o valor de 39 600 km, pela célebre experiência do poço de Siena, que ao meio-dia de 21 de Junho tinha o seu fundo iluminado pelo Sol. No entanto, o valor obtido é muito próximo do actual apenas por acaso, uma vez que houve uma quantidade de erros que mutuamente se anularam. São eles: (i) Siena não está bem situada no trópico; (ii) A distância de Alexandria a Siena utilizada era incorrecta; e (iii) Siena e Alexandria não estão situadas no mesmo meridiano. Note-se que Eratóstenes fez uma segunda medição,

com outras duas cidades, cujo resultado coincidiu com este. As consequências destas medições são imediatas: a Terra passa a ser considerada “demasiado grande”, bem como o resto do universo. No século I a. C., um astrónomo de nome **Possidónio** repete as medidas de Eratóstenes e acha para o perímetro terrestre o valor 37 800 km (medição efectuada entre Alexandria e Rodes), bem como os seguintes resultados: $\overline{TS} = 6\,500D_T$; $D_S = 39D_T$; $\overline{TL} = 29\dots D_T$. Daqui se conclui facilmente que as medidas da Terra iam piorando, enquanto que as dos corpos celestes melhoravam. Ptolomeu admitiu $D_T = 28\,000$ km e $D_L = 0.29D_T$, o que será uma das razões que levarão Colombo a querer chegar à Índia pelo Ocidente, uma vez que não havia espaço para mais um continente.

Para terminar a Escola de Alexandria, importa referir alguns alexandrinos tardios, porém não menos importantes. Entre eles conta-se **Hiparco** (fl. 161–126 a. C.), considerado o maior astrónomo da Antiguidade, e que teria vivido em Alexandria e Rodes, mas do qual pouco ou nada se sabe. No campo experimental, foi o inventor do astrolábio, que lhe permitiu elaborar bons mapas do céu. Foi ainda o inventor das coordenadas para um ponto situado numa esfera e o descobridor da precessão dos equinócios. Esta última e fundamental descoberta veio-lhe da constatação da existência de desvios sistemáticos entre as posições das estrelas observadas pelos seus predecessores e as observadas no seu tempo. Tal facto levou-o a sugerir que o plano da eclíptica rodasse cerca de 36" por ano, conservando porém constante a sua inclinação. No campo da Astronomia teórica, a sua maior obra foi a teoria dos excêntricos e dos epiciclos. Com efeito, haviam surgido inúmeros factos astronómicos que careciam de explicação: a desigualdade na duração das estações do ano, ou a variação do brilho aparente dos planetas, não se harmonizavam com a hipótese de órbitas circulares. Assim, tinham sido avançadas duas teorias:

Teoria dos excêntricos Segundo esta teoria (esboçada por Apolónio de Perga), a Terra está no centro do universo, mas não coincide necessariamente com o centro das órbitas planetárias (ver figura 4.6). Além disso, a possibilidade de se acrescentarem novos círculos cujos centros se deslocavam sobre as órbitas circulares e que representariam, eles sim, as trajectórias planetárias, permitia explicar apreciavelmente um grande número de factos (por exemplo, a retrogradação), à custa, no entanto, de enormes dificuldades matemáticas.

Teoria dos epiciclos Esta teoria, muito semelhante à anterior, consistia fundamentalmente em admitir que os planetas não se deslocavam em órbitas circulares à volta da Terra, mas sim sobre círculos cujo centro, esse sim, orbitava em torno da Terra numa órbita circular (ver figura 4.7). Mediante a introdução de mais ou menos círculos (deferentes), e à custa de consideráveis complexidades matemáticas, conseguiu-se um êxito análogo ao do modelo anterior. Era assim salvo o programa platónico relativo aos movimentos circulares, pois todos os movimentos do céu eram explicáveis fazendo variar raios e períodos de epiciclos e deferentes.

Hiparco mais não fez, portanto, do que unificar estas duas teorias pré-existentes. O resultado obtido era de complexidade matemática considerável, sendo preciso esperar por Kepler para que se dê a sua simplificação. Hiparco formulou uma teoria específica apenas para o Sol e a Lua.

Cláudio Ptolomeu (fl. 127–151) foi um alexandrino tardio, vivendo numa época em que a ciência Helenística se encontrava já em franco declínio. Este génio extraordinário completou a obra de Hiparco, construindo teorias de excêntricos e epiciclos para todos

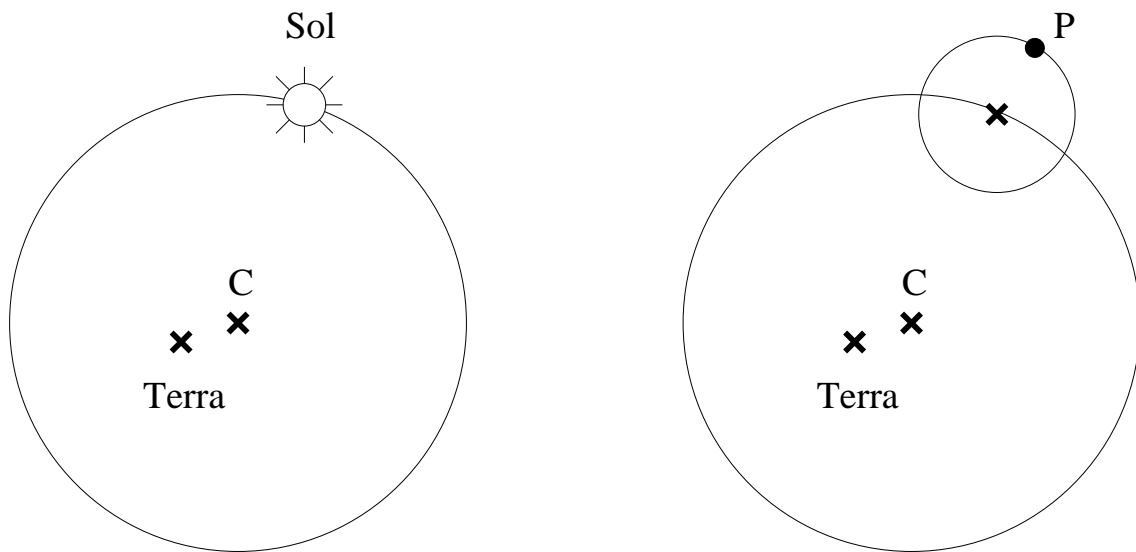


Figura 4.6: Teoria dos excêntricos: o centro do universo, ocupado pela Terra, não coincide como o centro, C, das orbitas planetárias (figura da esquerda). Acrescentando mais círculos pode explicar-se, por exemplo, o movimento retrógrado do planeta P (figura da direita).

os planetas, o que só foi possível graças aos desenvolvimentos da Matemática entretanto ocorridos. Note-se, no entanto, o desconhecimento, na época, das funções trigonométricas correntes, pelo que os ângulos eram referenciados pelo valor das suas cordas (ver figura 4.8). O próprio Ptolomeu foi autor de tabelas de cordas, para ângulos de 0° a 360° , intervalados de $30'$. A sua obra fundamental foi, porém, a *Sintaxe Matemática*, traduzida para árabe sob o nome de *Almagesto*, o *Grande Livro*, e que constituiu a bíblia dos astrónomos medievais. Ptolomeu escreveu ainda uma outra obra célebre, a *Sintaxe Tetrabíblica*, e que trata de Astrologia. Saliente-se, aliás, que, até ao século XVII, o interesse astronómico provinha do interesse astrológico, visando essencialmente a previsão do futuro e de ocasiões favoráveis à realização de determinadas empresas.

Ptolomeu interessou-se igualmente por Acústica, no seu livro *Harmónica*, no qual confunde, no entanto, os aspectos físico e psicológico do problema. Comparou ainda a luz ao fogo num seu célebre tratado de óptica (*Óptica*): trata aí sobretudo da teoria dos espelhos, planos, esféricos e cilíndricos, enunciando as leis da reflexão e abordando, pela primeira vez, a refacção. Tentou determinar o desvio dos raios refractados, não tendo podido estabelecer as leis da refacção por falta de Matemática.

Existiam nesta época, no que dizia respeito à percepção, duas teorias contraditórias:

- Uma, segundo a qual o raio luminoso é emitido do objecto para o olho;
- Outra, segundo a qual o raio luminoso é emitido pelo olho para o objecto (Euclides).

Existia, além disso, a curiosa *teoria dos simulacros*, da autoria dos filósofos epicuristas, e segundo a qual os objectos emitiam constantemente uma espécie de “cascas”, os seus contornos exteriores, os quais encolhiam ao entrar nos olhos, dando assim origem à riqueza das percepções visuais.

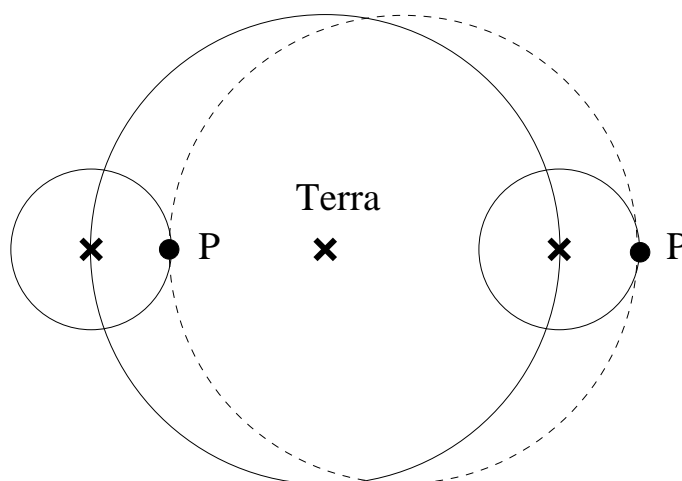


Figura 4.7: Teoria dos epiciclos: o planeta P descreve a órbita circular cujo centro, por sua vez, descreve uma órbita em torno da Terra.

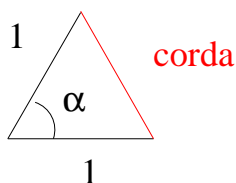


Figura 4.8: Ângulo α e respectiva corda.

Falando agora de dois outros alexandrinos tardios, importa referir primeiro **Diofanto** (meados do século III). Autor da *Aritmética* e de um *Tratado dos Números Polédricos*, inventou a primeira simbologia matemática e tratou a teoria das equações com mais do que uma incógnita. Egípcios e Mesopotâmios haviam tratado equações do primeiro grau com uma incógnita; os Gregos e Alexandrinos sabiam resolver equações do primeiro e segundo graus e seus sistemas, utilizando, no entanto, métodos geométricos que não vão ser adoptados por Diofanto. É ele o inventor da *Arithmos* (incógnita), a que corresponde o nosso x . Diofanto terá ainda, ao que parece, resolvido o caso mais simples da equação de Fermat: dado um quadrado perfeito, decompô-lo em dois outros quadrados perfeitos. Exemplo: $4^2 = \left(\frac{16}{5}\right)^2 + \left(\frac{12}{5}\right)^2$.

Quanto a **Papos**, autor da *Colectânea*, limitou-se a reunir, sem originalidade, os resultados de outros autores.

Capítulo 5

A Idade Média

5.1 Declínio da civilização e ciência clássicas

Por volta do século III, o Império Romano havia estendido a sua hegemonia à maior parte do mundo conhecido, possibilitando assim um longo período de paz, até então desconhecido. O Império Romano constituiu já, não obstante, uma época de declínio, visto que não procurou desenvolver-se, vivendo apenas dos saques e pilhagens dos territórios ocupados. Assistiu-se assim ao escavar de um fosso entre a oligarquia dominante, corrupta e extravagante, e a plebe, miserável e desocupada, que se distraía com jogos de circo enquanto se procedia à distribuição gratuita de alimentos. O Império enfermava de graves males: não se expandindo mais a seguir ao século I, sofreu de desvalorizações crónicas da moeda (que saía devido às importações de artigos de luxo), bem como de uma grave crise, económica, ideológica e demográfica. Os governantes tentaram minorar estes aspectos negativos através do emprego de mercenários bárbaros, do alargamento do direito de cidadania e da autorização de emigração bárbara. Tudo isto viria a ter graves efeitos, entre eles o de surgirem infiltrações bárbaras no exército, o que vai levar a que sejam bárbaros alguns imperadores.

O fim do Império do Ocidente está ligado às invasões bárbaras do século V. No entanto, os bárbaros entrados no Império nunca chegaram a exceder 5% da população deste, sendo portanto rapidamente submergidos pelos romanos, em cuja civilização procuravam, aliás, integrar-se, aceitando os títulos e a moeda do Basileu (imperador do oriente).

A todo este declínio económico e ao abandono das cidades está inevitavelmente ligado o declínio científico, com o aparecimento de um série de seitas religiosas estranhas, como os marcanitas, os maniqueianos, etc, o que fomenta o desenvolvimento das pseudo-ciências, em especial a Astrologia, proveniente do desejo de prever o futuro. Esta, oriunda da Mesopotâmia, começou por ser aplicada unicamente ao rei-deus, democratizando-se em seguida. A sua ideia principal consistia em identificar o destino dos Homens com o dos astros-deuses. Os romanos encontravam-se carregados de tradições astrológicas etruscas, chamando mesmo aos seus astrólogos caldeus. A Astrologia voltará a estar na moda no século XV. Outra pseudo-ciência em voga era a Auspicina, ou adivinhação do futuro por meio do exame das vísceras de animais.

Importa agora referir a Alquimia, que durante muito tempo foi a Química. Pensa-se que tenha tido origem no Egipto, no século III, estando ligada, sobretudo, ao nome de **Bolos de Mendes**. Tinha ligações profundas com as técnicas da época, uma vez que a teoria de Aristóteles tornava aceitável crer poderem transmutar-se os elementos. Busca-

se assim a “Pedra Filosofal”. A Alquimia constituiu um saber hermético (de Hermes Trimégito), tanto no sentido de ser fechado (componente empírico), como de ser difícil de compreender (componente teórico). A Alquimia médica foi desenvolvida por **Galeno** (século II), médico de Marco Aurélio, que considerava compreender o organismo quatro *humores*, de cujo equilíbrio dependeria a saúde: sangue, fleugma, bílis branca e bílis negra.

O Cristianismo originará mais tarde perseguições aos alquimistas (**Zózimo de Panóplias** foi um dos célebres), o que levará à criação de símbolos estranhos, presentes em quase todas as catedrais, e que irão desembocar na Cabala, Franco-Maçonaria e Rosa-Cruzes, sociedades que ainda hoje se mantêm. De facto, foi preciso esperar por Robert Boyle e o seu livro *The Skeptical Chemist* para que a Alquimia fosse desmentida.

5.2 Civilização e ciência Islâmicas

Desde a Idade do Bronze que a navegação de cabotagem ao longo das costas da Arábia e até à Índia havia permitido o desenvolvimento de algumas cidades, tais como Aden, Mascate e Ormuz. No interior da Península Arábica, o comércio de caravanas tinha, por sua vez, originado o desenvolvimento de Medina e Meca. Nesta última cidade nasceu, por volta do ano 570, no seio de uma família pobre, Maomé, ou Mohammed, que, após uma estada no deserto, já homem maduro, se apercebeu da sua vocação mística e fundou uma nova religião, o Islamismo. Acusado de subversão social, é forçado, em 622, a fugir para Medina. Esta fuga, a Hégira, marca o começo do calendário islâmico. Morre, finalmente, em 632 deixando o Corão, livro de ensinamentos religiosos e preceitos éticos.

Os sucessores de Maomé, os califas, eram membros da grande oligarquia, a quem interessava a expansão, favorecida pela fraqueza dos povos vizinhos, o Império Bizantino e o Irão dos Sassânidas. Assim, os árabes ocupam um território que se estende desde a Índia até além dos Pirinéus, sendo o Mediterrâneo, de então em diante, a fronteira entre o mundo cristão, a norte, e o mundo muçulmano. O quarto califa, Ali, genro de Maomé, foi originador da corrente Xiita do Islamismo, tendo mais tarde sido assassinado e substituído por uma dinastia hereditária, com capital primeiro em Damasco e depois em Bagdad. Por esta altura, o império dividiu-se em reinos e califados, nomeadamente os Abássidas em Bagdad e os Omíadas em Espanha, mantendo, no entanto, a língua e a religião comuns. (O Império Abássida será mais tarde dominado pelos Turcos Selúcidas muçulmanos.) Tinha-se assim que, enquanto na Europa cristã não havia cidades nem universidades, Córdova contava quase meio milhão de habitantes, e Bagdad quase dois milhões. A Espanha, antes um pobre território semi-feudal, transformou-se num activo centro de agricultura (linho, horticultura, amoreiras - seda) e de comércio activo com o califado de Bagdad. Saliente-se aqui ter sido através dos árabes que se deu a chegada da cultura clássica à Europa, nos séculos XII e XIII, acompanhada dos respectivos comentários dos sábios árabes, sem os quais a compreensão não teria sido possível. Não poderíamos passar sem referir a importante contribuição de indianos e chineses (bússola, pólvora, papel).

Passando agora ao campo da Matemática, a invenção fundamental foi a numeração decimal, que não se sabe ao certo se é oriunda do Oriente (Índia, Mesopotâmia) ou pura invenção árabe. O primeiro tratado empregando a nova notação foi escrito por volta do ano 850 por **Al-Khwarizmi** e intitulava-se *Aritmética*.. Do nome do autor vieram *algarismo* e *algoritmo*. *Álgebra* vem, por sua vez, de *Al Gebr*, que significava a mudança

de um termo de um membro para o outro de uma equação. Refira-se a propósito que a numeração árabe não foi adoptada na Europa cristã até ao século XIII. Exemplifica-se na figura 5.1 a resolução da equação canónica do segundo grau pelo processo árabe.

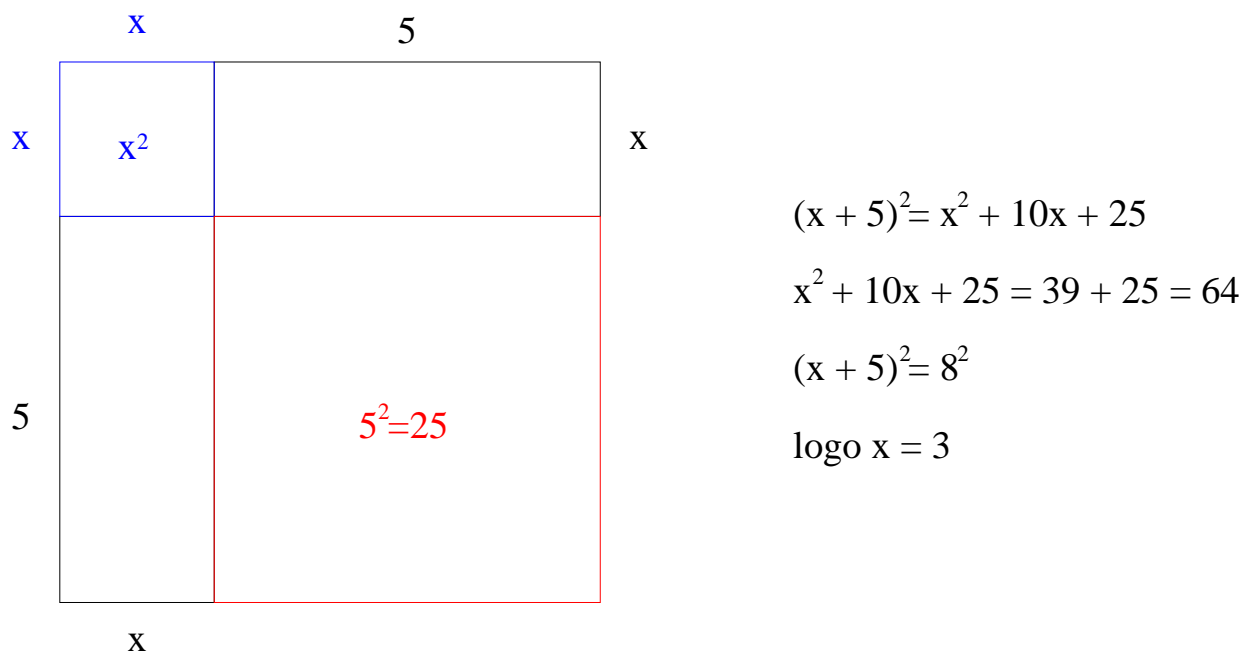


Figura 5.1: Resolução da equação $x^2 + 10x = 39$ pelo processo árabe. x é a *raiz* ou *coisa*.

Os árabes desenvolveram o cálculo de áreas e volumes pelo método da exaustão, tendo chegado a $\pi = 3.14159265358979326$ e a calcular integrais do tipo $\int_a^b x^{m/n} dx$. Em particular, **Omar Khayyam** procedeu ao estudo das equações do terceiro grau, decompondo-as em duas equações do segundo grau, cujas raízes se podiam achar pela intersecção de duas cónicas. Deve-se ao matemático indiano **Aryabhata** (século V) a invenção das funções trigonométricas, das quais coligiu tabelas e descobriu fórmulas. Tal resultado veio-lhe de considerar, não já a corda de um ângulo, mas metade da corda associada ao ângulo duplo do considerado (ver figura 5.2).



Figura 5.2: Funções trigonométricas do ângulo α : $\sin \alpha = d/2$, $\cos \alpha = \overline{OA}$. Pelo teorema de Pitágoras vem que $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$.

Não ficaram por aqui os progressos da matemática árabe. **Al-Abbas** calculou funções trigonométricas pelo método experimental, fazendo medições com o gnómon, e **Nasir al-Din** elaborou uma súpula de todos os conhecimentos de geometria plana.

Falando agora da Astronomia, é de salientar que o considerável interesse astronómico dos árabes se deveu, em parte, ao próprio Corão, que exige o conhecimento rigoroso de datas e horas (Ramadão, horas de oração). Ptolomeu foi o grande mestre da Astronomia árabe, tendo sido traduzido por cristãos nestorianos. **Al-Battani** melhorou alguns cálculos relativos à duração das estações e à inclinação da eclíptica. Os árabes não se coíbiram, porém, de criticar Ptolomeu por ter corrompido o ideal platónico, preferindo a teoria das esferas de Eudócio, cujas teorias complicaram e aperfeiçoaram. No domínio da observação, foram organizados catálogos de estrelas, inventou-se o astrolábio esférico e fundaram-se inúmeros observatórios, entre os quais se salientam os de Samarcanda e Azerbaijão, que muito beneficiaram dos contactos entre árabes e mongóis.

Na Física, os árabes dedicaram-se sobretudo ao estudo da balança (que usam, em combinação com a clepsidra, para medir o tempo), das alavancas e dos centros de gravidade, bem como à Óptica. E não se poderia deixar de referir, a este propósito, o nome de **Ibn-al-Haitham (Al-Hazen)**, autor de um célebre tratado de Óptica publicado por volta do ano 1000. Nesse livro, o autor:

- Demonstra experimentalmente que a luz vai do objecto para o olho. Provas: feixes de luz intensa causam dano à vista; os objectos mudam de aparência consoante a iluminação a que são sujeitos.
- Trata da formação das imagens: estas formam-se ponto por ponto, levando assim ao abandono da velha teoria dos simulacros.
- Afirma, erradamente, que é o cristalino que recebe as imagens (Averróis corrigi-lo-á, afirmando ser a retina).
- Propõe uma teoria de formação de imagens para toda a espécie de espelhos, bem como uma primeira explicação da lei da reflexão, baseando-se numa analogia mecânica (ver figura 5.3).

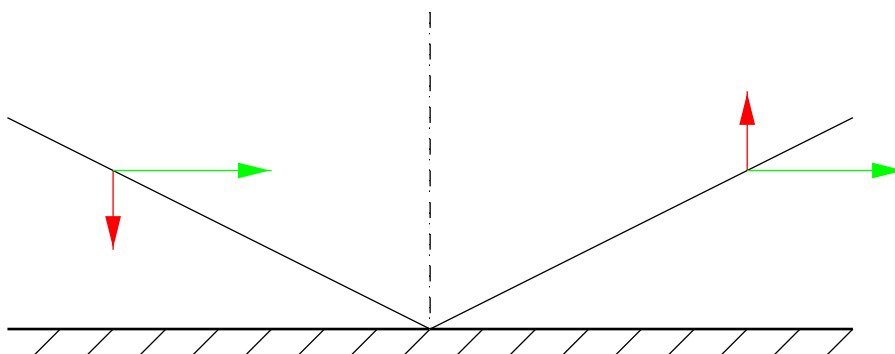


Figura 5.3: Explicação da lei da reflexão da luz por Ibn-al-Haitham: a componente tangencial da velocidade não se altera, enquanto que a normal é invertida.

- Tenta explicar a refração admitindo que a componente tangencial da velocidade da luz se mantém constante, enquanto que a normal varia, por ser diferente (e necessariamente finita!) a velocidade da luz nos diferentes meios.

Finalmente, no século XIII **Al-Faridzi** propõe o uso de lentes hiperbólicas para corrigir a aberração esférica, sugere uma teoria do arco-íris e o uso da primeira câmara escura na Astronomia.

5.3 Cristandade latina

No século VII, o Mediterrâneo está transformado num lago muçulmano, constituindo a fronteira entre os mundos cristão e árabe. Ao mesmo tempo, sucedem-se as invasões de vikings e magiares, o que vai provocar um declínio da civilização urbana e como que um retorno ao estado de barbárie da Pré-história. As cidades, habitadas apenas por alguns altos dignitários religiosos, vão desaparecendo e ficando em ruínas, enquanto que a forma de agregação mais comum é a de pequenos grupos de camponeses. Forma-se deste modo uma classe de senhores, que vivem à custa do trabalho alheio, e cujos únicos fins eram a guerra e a caça. Com a sociedade estruturada deste modo, desaparece o conceito de “estados”, uma vez que o “rei” não passa de uma entidade quase lendária (a quem se chega a atribuir poderes milagrosos) e deslocada, numa era em que o que conta é o contacto pessoal. É, portanto, de adivinhar a pobreza cultural da época, sendo os homens mais cultivados os clérigos, embora não muito (por vezes nem sabiam latim). Os autores mais conhecidos são:

Na Itália:

- **Plínio**, naturalista romano, autor de uma *História Natural*, com importância para a Zoologia, Botânica e Medicina;
- **Boécio**, autor de textos elementares de Aritmética, Geometria, Astronomia e Música (*Quadrivium*, ou ciências, nas escolas episcopais);
- **Cassiodoro**, que introduziu a tradição de copiar obras da cultura antiga.

Na Espanha:

- **Santo Isidoro de Sevilha** (séculos VI–VII), autor de *As Etimologias*, espécie de enciclopédia de todo o saber da época.

Na Inglaterra:

- **Beda** (séculos VII–VII), autor de célebres previsões sobre as marés e a data da Páscoa.

Nos séculos VIII–IX, surge o Império Carolíngio, e com ele uma tentativa de unificação cultural. É, portanto, por esta altura que aparecem alguns vultos importantes da cristandade medieval. Note-se que a primeira escola superior vai ser criada em Salerno, no sul de Itália, sendo por aí que a Alquimia e outros saberes do Islão entram na Europa. Voltando aos sábios, são eles:

- **Alcuíno**, sábio ao serviço de Carlos Magno. Nutrido de filosofias antigas mal aprendidas, dedicava-se a pouco mais do que jogos de sociedade na corte.
- **John Scott Erígen**o, uma das poucas pessoas na Europa capazes de ler grego. Fazia $\pi = 2$, representando um retrocesso em relação aos egípcios (para quem $\pi = 3$).
- **Gerbert/Silvestre II** (papa do ano 1000), introduziu na Europa o ábaco e o astrolábio. Estudou num mosteiro da Catalunha, tendo absorvido a sabedoria árabe, e mantinha uma rede de correspondentes através da Europa, com o propósito de obter livros.

A partir do ano 1000, dá-se uma melhoria geral da sociedade, devido aquilo a que se costuma chamar a revolução agrícola do século XI e que compreendeu as seguintes inovações:

- Ciclo trienal de culturas;
- Melhores utensílios: charruas de ferro, uso de parelhas de bois ou cavalos;
- Uso de ferraduras;
- Invenção do colar rígido para arreios de cavalo;
- Aproveitamento de novas fontes de energia: azenha romana (moagem, fabricação de panos), energia eólica (moínhos sírios e de invenção local).

Tudo isto se traduz numa melhoria do nível sanitário e alimentar, que traz consigo um aumento demográfico de 50% entre 1050 e 1250. As aldeias aumentam de dimensão e recomeçam a surgir as cidades, ao mesmo tempo que se recupera terreno por desbaste de florestas e drenagem de pântanos, o que também permite reduzir a incidência do paludismo.

Começa então a dar-se o renascimento do comércio, com a emergência de um desejo generalizado de viajar, que se traduz nas cruzadas e peregrinações a Santiago de Compostela. Os caminhos tornam-se assim gradualmente mais seguros, dando-se o aparecimento de uma classe de mercadores profissionais, cuja função é satisfazer as necessidades de artigos de luxo. Enquanto isso, o comércio por atacado (sal, vinho, etc) continua a ser feito por via marítima e/ou fluvial.

Com o ressuscitar do comércio surgem novas cidades, nos pontos de reunião dos mercadores, assistindo-se por conseguinte a um reinício da vida urbana, e com ele um retomar de preocupações antigas. Os primeiros pensadores, entre os quais se salienta **Bernard de Chartres**, tentam, infrutiferamente, conciliar Platão e Aristóteles. Surgem, por esta altura, as escolas de Chartres e Paris. A Escola de Paris era especializada em teologia, impregnada, no entanto, de mentalidade laica, oriunda dos textos da antiguidade. O seu maior professor foi **Pierre Abelard** (1074–1142), que utilizou a dialéctica contra os mestres da Igreja e descobriu as divergências destes. Afirmou que, se existe verdade anterior à Revelação, então esta não é total.

Debate-se, nessa época, a questão dos universais, isto é, o problema de saber se os conceitos e ideias têm realidade própria, ou se apenas designam objectos. Em favor da

primeira tese pendem os Realistas, chefiados por Santo Anselmo, enquanto que a segunda é defendida pelos Nominalistas, à frente dos quais se encontra Rosselin.

Entretanto, as tradições dos textos árabes vão-se aprimorando (primeira geração de tradutores, 1130–1180), sendo os principais centros de tradução a Itália do Norte (Veneza, Pisa e, mais tarde, Florença), Bizâncio, a Sicília e Toledo. No século XII encontram-se já traduzidos dois *Diálogos* platônicos, quase toda a *Lógica, Física e Metafísica* de Aristóteles, os *Elementos* de Euclides, o *Almagesto*, as obras médicas de Galeno e Hipócrates, a *Aritmética* de Al-Khwarizmi, e o Corão. Estes textos vão ser utilizados nas disputas teológicas que a Igreja atravessará no século XIII.

5.4 O Século XIII

Associa-se normalmente o século XIII à construção das catedrais, a qual traduz não só uma nova mentalidade, mas também o domínio de novas técnicas. Este foi igualmente, porém, o século do aparecimento das universidades, que se vão desenvolver quer como corporações de mestres, quer de mestres e estudantes, quer de estudantes, à imagem do que sucedia com artesãos e comerciantes.

Em 1170, o Concílio de Latrão decide que todos os bispados deveriam manter mestres para assegurar a formação adequada dos clérigos. O analfabetismo deixa por isso de estar em voga, e até os grandes senhores se sentem na obrigação de adquirir cultura. Por esta época, o desenvolvimento económico, centrado sobretudo na Flandres e no norte da Itália, é já considerável, estando em uso as letras de câmbio (cheques) e os livros de contabilidade. As sociedades por acções abundam, o que cria uma necessidade de médicos e juristas que as antigas escolas não podiam satisfazer. Assiste-se assim ao abandono do *trivium* e do *quadrivium*, enquanto se multiplicam as escolas nas cidades. Refira-se a propósito que as autoridades civis e religiosas fomentam a formação de universidades, embora não por razões desinteressadas: visava-se o lucro e o aumento do prestígio. Como exemplos, temos a Universidade de Montpellier, criada pela Igreja, e a de Bolonha, que resultou da luta entre o Papado e o Sacro Império. As universidades vão, no entanto, reagir contra esta tentativa de subordinação.

Nos finais do século XIII, existem na Europa 15 universidades, metade das quais na Itália e todas a oeste do Reno, sendo as maiores Oxford, Paris, Bolonha e Pádua. Tomemos o exemplo da universidade de Paris. Divide-se em quatro faculdades, como modernamente:

- Artes, curso preparatório que dá acesso a estudos mais avançados e confere o título de Mestre em Artes;
- Medicina;
- Direito (civil ou canónico);
- Teologia, o curso mais longo (15 anos), mas que oferece melhores oportunidades de emprego.

O ensino consistia essencialmente no comentário de textos pelo mestre e sua memorização pelos alunos, o que criava grandes problemas, dado os livros serem raros e caros. Lançou-se por isso mão de novas técnicas e truques, que permitiriam um mais fácil acesso ao saber e, assim, uma nova atitude intelectual:

- Novas técnicas de pergaminho;
- Invenção da pena de pato cortada em bisel;
- Escrita minúscula;
- Uso de abreviaturas e desaparecimento dos ornamentos (gravuras, etc);
- Diminuição das dimensões dos livros;
- Aparecimento dos livreiros.

Dá-se, por volta de 1220, o aparecimento da segunda geração de tradutores, na Sicília (Michael Scott), Toledo (Hermann o Alemão), Oxford (Robert Grosseteste), e Paris (S. Tomás de Aquino). Observe-se, no entanto, que, nesta segunda fase, só Aristóteles é traduzido (*Metafísica, Política, Ética, Ética a Nicómaco, Da Alma, Do Céu e da Terra*). Aristóteles parecia, porém, incompatível com a religião cristã: a Igreja começa, portanto, por proibir as suas obras, e mais tarde por as autorizar, desde que expurgadas. Ambos os expedientes fracassaram, pois os europeus começam a interessar-se cada vez mais por Aristóteles e pelos seus comentadores árabes, Aviceno e Averróis. Averróis defende teses absolutamente contrárias ao dogma cristão, nomeadamente:

- A eternidade do mundo;
- A imortalidade do intelecto agente;
- Das três formas de apreensão, Fé, Filosofia e Teologia, a mais completa e perfeita é a Filosofia, seguida pela Teologia e pela Fé (os averroístas latinos tentam remediar o caso colocando a Fé à frente da Teologia, mas ainda atrás da Filosofia – o que era o problema real).

Estabelecem-se assim três posições:

1. **Averroístas confessos:** chefiados por Siger, defendem a tese da dupla verdade (*dopia veritas*). A verdade é para eles de dois tipos, revelada (Fé) e racional (Filosofia). Esta posição vai ser mais tarde sustentada por Galileu.
2. **Teólogos mais ortodoxos:** aceitam Aristóteles sem Averróis. A razão tem limites, devendo ser recusada sempre que se opuser à Fé. Os expoentes máximos desta linha foram Alberto Magno e S. Tomás de Aquino. Este último, aluno do primeiro, sobrinho do imperador da Alemanha e chamado o *Doutor Angélico*, fundou o Tomismo, uma forma desvirtuada de Aristotelismo inserido no dogma cristão, no qual incluiu também doutrinas científicas que, mais tarde, se vão opor ao progresso da ciência moderna.
3. **Teólogos conservadores:** recusam Aristóteles inteiramente (pouco importantes).

Todo este desenvolvimento e propagação do saber vai dar origem a que, em 1277, os bispos de Paris e Canterbury condenem mais de 200 teses das universidades. Entre elas:

- A revelação cristã contem erros e fábulas;
- A religião cristã é contária à ciência;

- A felicidade encontra-se nesta vida;
- A continência não é um bem em si.

Apêndice: determinação por Al-Biruni do raio terrestre

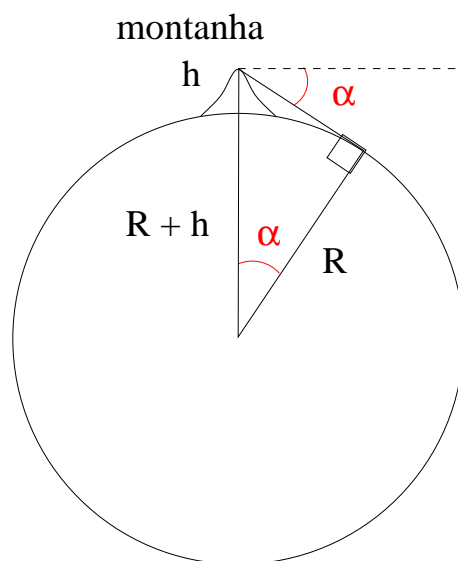


Figura 5.4: Subindo a uma montanha de altura conhecida, h , mede-se o ângulo α entre a horizontal (linha a tracejado) e o horizonte. O raio da Terra é então dado por $R = h \cos \alpha / (1 - \cos \alpha)$.

5.5 Ciência Medieval

O interesse pela ciência renasceu na Europa cristã por volta do século XII. Surgiram nessa altura alguns livros tratando de temas científicos, na sua maioria compilações enciclopédicas fantasistas e sem interesse, cujo melhor exemplo é um tratado de agrimensura que contém o esboço de uma teoria das equações do segundo grau. Só no século XII começam a surgir resultados científicos dignos de referência, especialmente em Oxford, universidade dominada pelos Franciscanos. A estes opunham-se os Dominicanos, sediados em Paris, e que se ocupavam sobretudo de Metafísica e Lógica. Os Franciscanos, seguindo a tradição do nominalismo, nunca aceitaram o tomismo nem Aristóteles, preferindo o platonismo. Citem-se os seguintes mestres da escola de Oxford (saliente-se a importância atribuída à *luz* pelos pensadores desta escola).

Robert Grosseteste (1175–1253). Teólogo, sofreu influências nítidas da ciência islâmica. Desenvolveu uma doutrina teológica segundo a qual o mundo teria começado por ser um ponto de luz, sendo as ações luminosas as responsáveis por todas as interações do

mundo físico. Interessou-se por Óptica, estudou as propriedades dos espelhos, do arco-íris e das lentes, e atribuiu o efeito da lente à refração.

Roger Bacon (1225–1294). Teólogo franciscano. Nos seus três livros, defendeu a importância da Matemática e da experiência no conhecimento. Afirmou ser o seu método indutivo, e não dedutivo/silogístico. Observou um eclipse do Sol, estudou al-Hazan, Grosseteste, as propriedades das lentes e dos espelhos esféricos.

Vito ou **Vitellius** (n. 1225, na Polónia ou Alemanha), plagiou Al-Hazan e escreveu um tratado de Óptica que será o padrão até ao século XVII.

Dietrich de Friburgo explicou o arco-íris como uma reflexão e duas refrações da luz. Explicou também o segundo arco-íris, cujas cores estão na ordem inversa das do primeiro (ver figura 5.5).

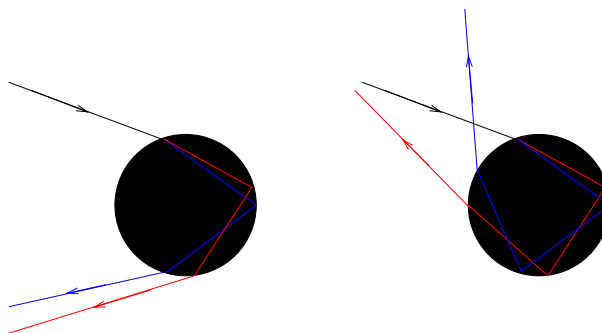


Figura 5.5: No segundo arco-íris (direita), a luz é reflectida duas vezes no interior de cada gota de água, ao passo que no primeiro arco-íris (esquerda) se dá apenas uma reflexão interna. Por esta razão, um observador olhando ao longo da direcção da luz incidente vê as cores do segundo arco-íris na ordem inversa das do primeiro.

Pierre de Maricourt (Petrus Peregrinus). Escreveu em 1269 um tratado, *Epistola de Magnete*, que lhe valeu elogios de Bacon. Nele descreve cuidadosamente a pedra-ímã, identifica os pólos de uma agulha magnética, descobre as leis qualitativas da atracção e repulsão dos pólos e a inseparabilidade dos mesmos. Sugere que a razão pela qual a agulha da bússola aponta o norte é a presença, perto do pólo, de grandes massas de rocha magnetizada (pólo sul). Sobre o magnetismo, que adquiriu grande voga na época, com o aparecimento na Europa das primeiras bússolas (inicialmente, uma agulha magnética montada sobre um flutuador; mais tarde, móvel em torno de um eixo), só surgirão mais investigações com William Gilbert (*De Magnete*, 1600).

Entretanto, a Alquimia fizera a sua entrada no mundo cristão. A ela se dedicaram personagens como Alberto Magno, Raimundo Lúlio e Roger Bacon. Por essa época são descobertos os primeiros ácidos, sulfúrico e nítrico. A Astronomia, ligada profundamente à Astrologia, foi grandemente influenciada pela tradição judaico-árabe, e desenvolveu-se sobretudo na Península Ibérica, na corte de Afonso X o Sábio. No século XIII, surgem as *Tábuas Afonsinas* (1254), contendo uma descrição do céu. Surgem mais tarde, na mesma corte, os *Libros de Saber en Astronomia*. A divulgação da teoria de Ptolomeu estará a cargo, entre outros, de **John de Holywood (Sacrobosco)**, autor de um *Tratado da Esfera* datado de 1230.

A Matemática é inteiramente dominada por **Leonardo de Pisa** (1175–1240), chamado também **Fibonacci**. Filho do síndico dos mercadores de Pisa no norte de África, familiarizou-

se com as Matemáticas árabes, fomentando na Europa a difusão do ábaco e da numeração árabe (esta última de aceitação difícil). No seu livro mais importante, *Liber Abaci* (1202), inclui um pequeno tratado de Álgebra (equações do segundo grau, frações, proporções, progressões), além de uma referência à numeração posicional e do tratamento de uma série de assuntos comerciais, que vão ser o tema de vários livros publicados posteriormente e destinados à classe mercantil. No seu livro *Practica Geometrica* encontra-se a exposição das velhas Geometria e Trigonometria. De salientar que ambos os livros são divulgação da cultura árabe.

Fibonacci foi ainda o descobridor da série que tem o seu nome, a primeira da história da Matemática, a partir de um problema relativo a coelhos. É ela: 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89 ... Foi o vencedor de um torneio organizado por Frederico II da Sicília (cujo principal matemático era João de Palermo), resolvendo magistralmente problemas como os dois que se seguem (publicados no livro *Liber Quadratum*):

- Descobrir um número cujo quadrado fosse tal que juntando-lhe ou subtraindo-lhe 5 se obtivesse ainda um quadrado perfeito. Resposta: $\left(\frac{41}{12}\right)^2 - 5 = \left(\frac{49}{12}\right)^2$; $\left(\frac{41}{12}\right)^2 + 5 = \left(\frac{31}{12}\right)^2$.
- Dados três quadrados, há algum número que, somado e subtraído ao intermédio, dê os outros dois?

5.6 O Século XIV

A Idade Média pode ser, grosseiramente, dividida em três períodos:

1º **Período** Até ao ano 1000 (Idade das Trevas);

2º **Período** Do ano 1000 a 1300 (progresso técnico e científico);

3º **Período** De 1300 a 1450 (período de crises).

O século XIV foi, sobretudo, marcado pela peste de 1348, responsável pela morte, no prazo de um ano, de cerca de um quarto da população da Europa. A peste, no entanto, não surgiu sozinha, antes se integrou num contexto de crises, ocasionadas por sucessivos maus anos agrícolas, causando fome e carestias. Estas originavam, por sua vez, um enfraquecimento fisiológico, que levava à diminuição da força de trabalho e, portanto, novamente à fome, num processo tipo bola de neve. A figura 5.6 traduz a evolução da população europeia entre os anos 1000 e 1500. A crise foi essencialmente agrária, devida ao empobrecimento e esgotamento das terras, ao arrefecimento climático, ao constante aumento da população, acompanhado da escassez de matérias-primas (impossibilidade de novos desflorestamentos), e à já completa difusão das técnicas.

No século XIV houve pelo menos 40 anos de epidemias. Foi também nesta época, no entanto, que surgiu o moderno conceito de nacionalidade, com a Guerra dos Cem Anos (1337–1453), cujos melhores exemplos são Joana d'Arc em França e a Crise de 1383–1385 em Portugal. Aparece na mesma altura o mercenariado. Frequentemente, os mercenários eram marginais perigosos, especialmente quando desocupados.

Dá-se, porém, uma melhoria nas condições de vida dos mais desfavorecidos, dada a grande necessidade de trabalhadores. Data, assim, desta altura o fim da economia

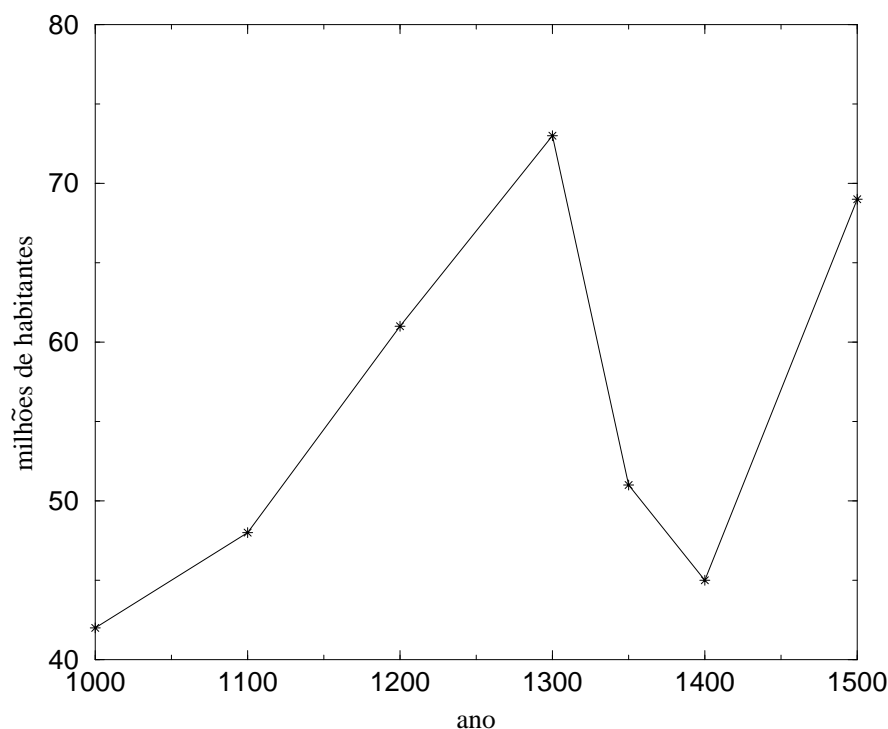


Figura 5.6: Crise da Baixa Idade Média: evolução da população europeia.

senhorial. Doravante, a classe senhorial fecha-se sobre si mesma, transformando-se numa casta fechada, de modo semelhante ao que se passa com as corporações de artesãos: cria-se a Aristocracia (governo dos bem-nascidos).

Estala então o conflito entre o Papado e os imperadores alemães, de que resulta a fuga do Papa para Avinhão em 1309, onde se coloca sob a protecção do rei de França, até 1378. No entanto, o Papa acaba por se tornar um peão do monarca. Chama-se a isto o Grande Cisma do Ocidente, com a existência de dois Papas: um em Roma (apoiado pela Alemanha e Portugal), e outro em Avinhão (apoiado pela França e Castela). Dá-se também o aparecimento de grande número de seitas heréticas (Franciscanos radicais, Hussitas, ...).

No campo das ideias, o tomismo admitia a crença na possibilidade de compreender racionalmente pelo menos parte do dogma. Contra este estado de coisas vai reagir um escocês, **Duns Scott**, afirmando não ser possível compreender racionalmente Deus. **William de Ockham** (professor em Oxford e Paris) foi o grande teórico das teses do imperador alemão, e influenciou toda a Física que se seguiu. Desenvolveu o nominalismo, negando radical e absolutamente a realidade dos universais. Pelo processo da navalha de Ockham (que não é dele), propôs-se eliminar as hipóteses desnecessárias. Negou a possibilidade de entender em termos racionais a religião, bem como a existência da Metafísica.

Assiste-se igualmente a uma multiplicação de centros universitários, especialmente a leste do Reno – Viena, Heidelberg, Cracóvia, Praga, ... No entanto, as universidades, atingidas pela crise, tendem a fechar-se em si mesmas, o que vai levar ao seu declínio.

5.7 Mecânica na Idade Média

No século XIII, surgem nas universidades textos que tratam os problemas da Estática independentemente de Aristóteles, isto é, fazendo uso de considerações matemáticas. Esses textos eram apocrifamente atribuídos a autores da Antiguidade - Euclides, Arquimedes, e a um personagem misterioso, dito Jordanus. Os três livros deste último foram escritos por pessoas diferentes, chamadas por isso (convencionalmente), Jordanus I, II e III. Jordanus I, cujo livro contém um estudo da Estática com base axiomática, apresenta a originalidade de considerar, para o estudo dos graves nas extremidades de uma alavanca, não o percurso que estes podem descrever, mas sim as projecções deste na vertical (ver figura 5.7). Dois

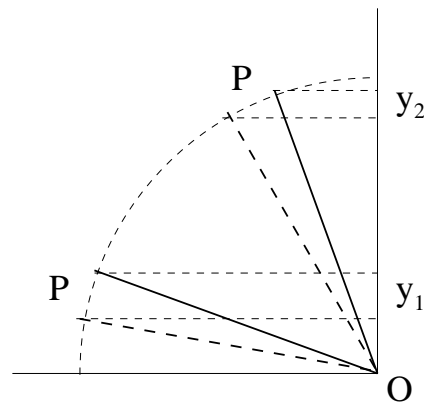


Figura 5.7: O efeito do peso P colocado na extremidade da alavanca depende do valor do próprio peso e da sua posição em relação à vertical: a distância vertical percorrida (e portanto o trabalho realizado) por P ao descrever arcos de circunferência iguais, é tanto menor quanto mais perto P estiver da vertical: $y_1 > y_2$.

corpos estão em equilíbrio numa alavanca interfixa se se compensam os pesos segundo a vertical (ver figura 5.8). Isto vai influenciar a Estática de Descartes e, mais tarde, o Princípio do Trabalho Mínimo de Jean Bernoulli (Pierre Duhem: a força que eleva p a h eleva np a h/n). Jordanus III teve grande influência nos renascentistas.

A dinâmica de Aristóteles era um sistema admiravelmente bem construído, sendo o problema do lançamento dos projecteis uma das suas poucas fraquezas. **João o Gramático (Filopão)** e, depois dele, os autores árabes, admitiram como explicação que o motor imprime uma *virtus* (virtude) ao móvel. Os próprios doutores da Igreja (por exemplo, S. Tomás e Roger Bacon) criticaram o aristotelismo: segundo S. Tomás, se fosse como Aristóteles afirmara, então o movimento violento não seria exterior ao móvel e não seria violento. Segundo Aristóteles, o movimento violento dependia de dois factores: potência, P (causa do movimento), e resistência, R (oposição ao movimento), dum modo que poderia ser expresso como $v \propto P/R$, onde v é a velocidade (embora a teoria de Aristóteles não seja matemática). Resulta daqui que existiria sempre uma velocidade não nula, qualquer que seja P ! Para evitar o absurdo, Aristóteles afirmou só ser a relação válida se $P > R$. **Ibn Patcha** admitiu em vez disso $v \propto P - R$, ideia que teve boa aceitação no século XIII. Assim, a característica mais importante desta época histórica é a disponibilidade para criticar Aristóteles, o que não acontecia antes.

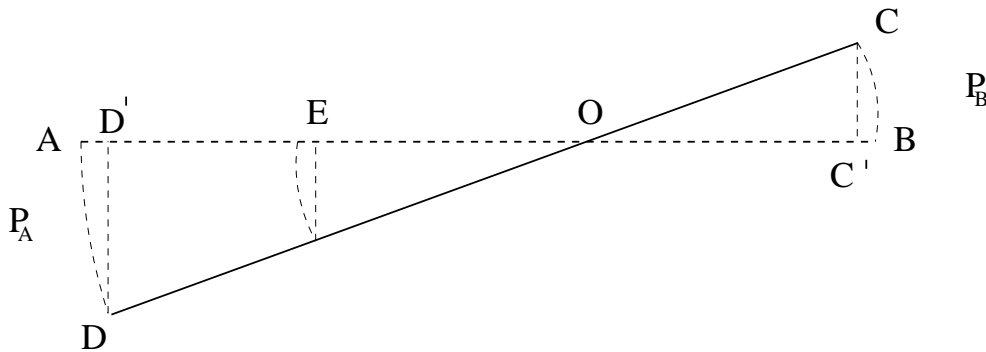


Figura 5.8: Demonstração de Jordanus I: se forem P_A e P_B os pesos colocados nas extremidades A e B , a condição de equilíbrio da alavanca é $\frac{P_A}{P_B} = \frac{AB}{OA}$. A gravita de $P'_B = P_B$ em E é igual à gravita de P_B em C .

No século XIV, dão-se os grandes progressos que vão influenciar todo o pensamento futuro. Aristóteles é duramente criticado. William de Ockham afirmou que o ar não pode ser motor do projectil, porque:

1. A destruição do motor não afecta o movimento;
2. Os movimentos não interferem mutuamente. Por exemplo, não há inteeferência entre os turbilhões de duas flechas cruzando-se em voo.

Bradwardine (1290–1349), dito o *Doutor Profundo*, e inspirado por uma demonstração de Euclides segundo a qual se tem

$$\frac{a}{b} = \frac{b}{c} = \frac{c}{d} = \dots \Rightarrow \frac{a}{c} = \left(\frac{a}{b}\right)^2, \quad \frac{a}{d} = \left(\frac{a}{b}\right)^3, \dots$$

propõe uma relação do tipo $v \propto \log(P - R)$.

Registaram-se, entretanto, progressos consideráveis em Oxford, onde os matemáticos de Merton College tentaram pela primeira vez descrever matematicamente o cosmos. Estes foram uma escola de teólogos, ditos *calculadores*, que tiveram, pela primeira vez, a ideia de substituir números por letras nas equações. Dedicaram-se ainda ao estudo do movimento uniforme e rectilíneo, movimentos diformes (movimentos variados) e uniformemente diformes (uniformemente variados), tendo calculado o espaço percorrido por um móvel animado de movimento uniformemente variado.

5.8 O fim da Idade Média

Neste período, há que conferir especial ênfase à Escola de Paris, cujos expoentes a seguir se apresentam.

Jean Buridan (1300–1358): teólogo francês, professor e reitor da Universidade de Paris, celebrou-se pela famosa “anedota do burro”. Foi autor de oito livros sobre questões de Física, onde apresenta argumentos contra a teoria aristotélica dos projecteis, nomeadamente quando esta afirma que os objectos mais leves deveriam ir mais longe do

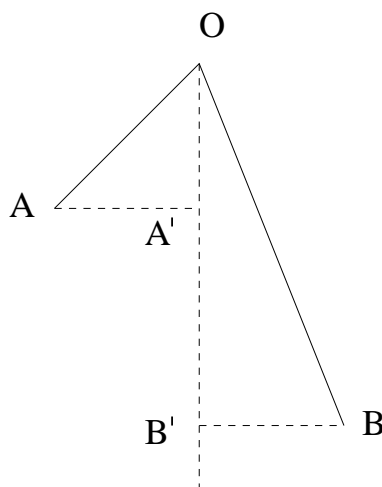


Figura 5.9: Alavanca dobrada com pesos iguais nas extremidades: $P_A = P_B$ (Jordanus III). Se A subisse, a sua *gravita* seria maior que a de B . Por outro lado, se B subisse, a sua *gravita* seria maior que a de A . Logo, a condição de equilíbrio é $\overline{AA'} = \overline{BB'}$ (para que sejam iguais as *gravitas*). Se os pesos forem diferentes, tem-se em vez disso $P_A \overline{BB'} = P_B \overline{AA'}$. (Em linguagem actual: os torques exercidos pelos pesos P_A e P_B têm de ser iguais e opostos para que haja equilíbrio estático.)

que os mais pesados, e que um objecto com a parte posterior aguçada deveria ter menor alcance quando lançado (o que está em contradição com a experiência). Reintroduziu as ideias de Filopão acerca da “virtude impressa”, que retoma da tradição árabe, chamando-lhe *impetus*. Assim, o movimento dos projecteis é explicado pelo facto de que o motor transmite ao móvel a propriedade de se mover, não durando o movimento indefinidamente, pois o *impetus* é gradualmente reduzido pela resistência do ar e tendência para cair. Se a resistência do meio for nula, porém, o movimento dura indefinidamente. Tal é o caso das esferas celestes, dotadas por Deus de *impetus* no início da criação e que, por isso, se movem sempre, dado não existir resistência no céu. Afirmou ainda ser o movimento uniformemente acelerado dos graves devido ao *impetus* que a gravidade imprime ao corpo em queda, em contraste com a explicação anterior, que fazia recurso às afinidades. Entendeu o *impetus* como proporcional à velocidade e ao peso, o que poderia levar-nos a tentar ver nele o precursor da descoberta do princípio da inércia. Pretensão ilegítima, dado ser o *impetus* responsável tanto pelo movimento uniforme e rectilíneo, como pelo movimento circular uniforme e movimentos uniformemente variados.

Alberto de Saxe (c. 1350–1360). Reitor da Universidade de Paris. Fez curiosas afirmações sobre a esfericidade da Terra, de que é exemplo a seguinte: uma vez que, ao deslocarmo-nos sobre uma esfera, primeiro descemos e depois subimos, ao dar-se um passeio, a nossa cabeça percorre uma distância superior à percorrida pelos nossos pés.

Nicolas Oresme (1323–1382). Grão-Mestre do Colégio de Navarra e conselheiro científico do rei de França, que o encarregou de traduzir as obras mais difíceis de Aristóteles (*Do Céu e Do Mundo*), simplificou as descobertas anteriores. Na Física, é essencialmente continuador de Buridan, aceitando a teoria do *impetus*. Propôs uma experiência imaginada, em que se abriria um poço de um lado ao outro da Terra, passando pelo centro.

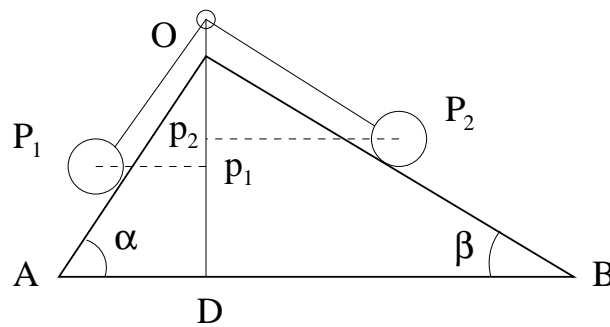


Figura 5.10: Plano inclinado. Sejam os pesos P_1 e P_2 , ligados por uma corda inextensível, e inicialmente às alturas p_1 e p_2 , respectivamente. As posições finais dos dois pesos são P_1' e P_2' , e as respectivas alturas finais p_1' e p_2' . Postulemos $P_1 \times \overline{p_1 p_1'} = P_2 \times \overline{p_2 p_2'}$, isto é, que o produto dos pesos pelos respectivos deslocamentos segundo a vertical têm de ser iguais para haver equilíbrio. Da semelhança dos triângulos segue-se que $\frac{P_1 P_1'}{OA} = \frac{p_1 p_1'}{OD}$ e $\frac{P_2 P_2'}{OB} = \frac{p_2 p_2'}{OD}$. Ora $\overline{P_1 P_1'} = \overline{P_2 P_2'}$ (por a corda ser inextensível), donde $\overline{OD} = \frac{\overline{p_2 p_2'} \overline{OB}}{\overline{P_2 P_2'}} \times \frac{1}{\overline{P_2 P_2'}} = \frac{p_1 p_1' \overline{OA}}{\overline{P_1 P_1'}} \times \frac{1}{\overline{P_1 P_1'}} \Rightarrow \overline{p_2 p_2'} \overline{OB} = \overline{p_1 p_1'} \overline{OA} \Rightarrow \frac{p_2 p_2'}{p_1 p_1'} = \frac{OA}{OB}$. Logo a condição de equilíbrio é $\frac{P_1}{P_2} = \frac{OA}{OB}$.

Um corpo lançado a esse passo ultrapassaria o centro da Terra e “subiria” nos antípodas, para depois recomeçar a “subir” entrando em movimento oscilatório até ficar em repouso no centro da Terra (ver figura 5.11). Daqui lhe veio o interesse pelos fenômenos pendulares, que vai influenciar toda a evolução futura da Física. Fez também a recuperação de um certo número de descobertas matemáticas, inventando, para representar fenômenos (movimentos), um sistema de dois eixos (de latitudes e longitudes) que pressagia a Geometria Analítica. Importa salientar a sua afirmação de que o que importa não é a forma da curva (que se pode alterar, por exemplo, mudando de sistema de coordenadas), mas o seu tipo. A ele se deve ainda a redução do movimento diformemente diforme (uniformemente acelerado) a um movimento uniforme (**Regra de Merton ou de Oresme**, ver figura 5.12). Foi autor de uma tese segundo a qual as esferas celestes se encontram imóveis, e é a Terra que roda sobre o seu eixo, pois pensava-se ser o repouso ontologicamente superior ao movimento, devendo corresponder ao repouso das almas(!). Nega a capacidade de intervenção da Bíblia em assuntos científicos, apresenta um contra-argumento ao paradoxo da pedra lançada para cima, afirmando que a esta é comunicado *impetus* (conservação do movimento – era concebível a composição de movimentos da mesma natureza), e nega o movimento das esferas celeste, pois, dadas as grandes dimensões do universo (pensava-se ter este um raio de 20 milhões de km), as estrelas seriam animadas de velocidades inconcebivelmente elevadas.

Nicolau de Cusa (1401–1461). Alemão, de cultura italiana, interessou-se por Metafísica, sendo na Mecânica discípulo de Buridan. No campo da Cosmologia, defende, no seu livro *Da Doutra Ignorância* (1440) que o universo é ilimitado, mas não infinito, sendo indeterminado. Só Deus é infinito, tal como defenderá mais tarde Descartes. Nicolau procede constantemente, portanto, a raciocínios de passagem ao limite, tentando colocar-se no ponto de vista de Deus. Sendo o universo a obra de Deus, conhecê-lo é conhecer Deus.

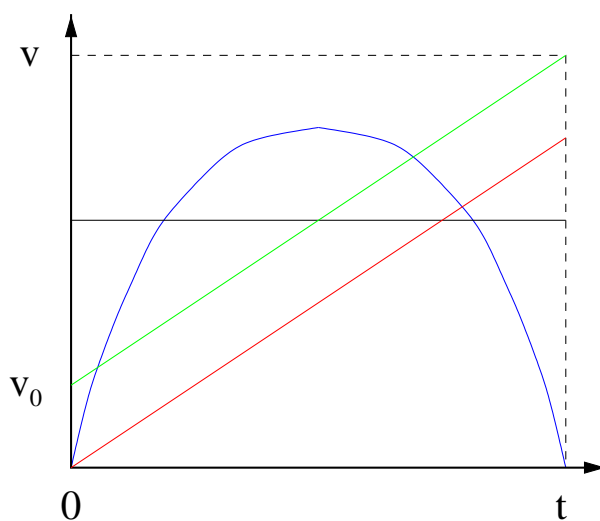


Figura 5.11: Variação da velocidade em função do tempo para diferentes tipos de movimentos: uniforme e retilíneo (curva negra); uniformemente acelerado sem velocidade inicial (curva vermelha); uniformemente acelerado com velocidade inicial (curva verde); e movimento de um grave lançado num poço que vai de um lado ao outro da Terra (curva azul).

Deus abarca a totalidade do universo; o Homem, só uma parte. Afirmou serem a curva e a recta de naturezas diferentes, coincidindo, porém, a circunferência com a tangente se o raio tender para infinito, e com o diâmetro se este tender para zero. O movimento, embora radicalmente diferente do repouso, por implicar mudança de lugar, identifica-se no entanto com este se a velocidade for infinita, pois então o móvel encontra-se simultaneamente em todos os pontos da trajectória. O universo é entendido por Nicolau como uma esfera cujo centro está em toda a parte, e cuja superfície não está em parte nenhuma. Note-se que Galileu e Kepler vão continuar agarrados ao modelo do universo finito, situação esta que só se alterará com Descartes, Newton e o princípio da inércia.

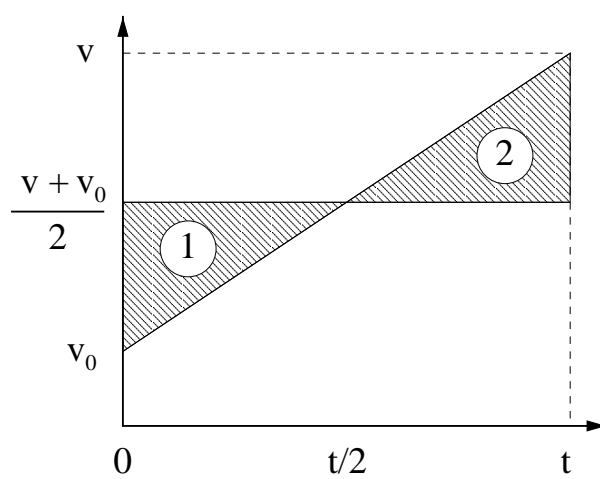


Figura 5.12: Sendo iguais as áreas dos triângulos, segue-se que o espaço percorrido pelo móvel em movimento uniforme e rectilíneo, com velocidade $\frac{v+v_0}{2}$, é igual ao percorrido em movimento uniformemente variado.

Capítulo 6

Ciência Renascentista

6.1 O Renascimento

A partir do século XVI, surgem na Itália novas ideias que representam uma viragem completa em relação ao pensamento medieval. Esta diferença entre os medievais e os renascentistas pode ser bem percebida se compararmos as obras de Dante (medieval, focando sobretudo temas sacros) com as de Petrarca e Boccaccio (que tratam já de outro tipo de temas).

Esta viragem, que começa na Itália, a partir de onde se espalha pelo resto da Europa, traduz-se, nomeadamente, por uma mudança de atitude em relação à morte (que na Idade Média era considerada como um bem, a libertação para a vida eterna, e que passa a ser vista como um mal), um movimento de revalorização da vida terrena que se afasta do cristianismo, e pelo humanismo, isto é, a assumpção do Homem como Homem.

A vanguarda desta mudança pertence às artes plásticas. A arte medieval interessara-se sobretudo pela iconografia e pela realidade sobrenatural. Na Renascença surge, primeiramente em Florença, um novo espaço plástico que realça o valor do Homem. Na pintura, dá-se a invenção da perspectiva linear, surgindo, na Flandres e em Florença, o sentido da terceira dimensão. Até na arte sacra se começam a representar figuras humanas.

Os grandes humanistas literários (Leonardo, Bruno, Lorenzo Valla) são fascinados pelos autores antigos, dado que, justamente nessa época, se dá a chegada de grande quantidade de manuscritos vindos de Constantinopla, recentemente ocupada pelos turcos. Recusa-se então Aristóteles e prefere-se, embora por vezes erradamente, Platão, chegando Ficino (um sábio de Florença, como Pico, que traduziu grande número de obras de Platão e seria mais tarde condenado como herege) a abrir, em Florença, sob a protecção de Lorenzo de Médicis, uma academia platónica. Assim, enquanto que os medievais não procuravam nos filósofos antigos o meio de compreender a realidade (pois esta havia sido revelada), mas apenas a confirmação da sua fé, os renascentistas vão-lhes buscar alternativas. A literatura própria do Renascimento só surgiu mais tarde, no século XVI, com obras como *O Príncipe*, de Machiavelli; *O Elogio da Loucura*, de Erasmus; *A Utopia*, de Thomas More; *Gargântua e Pantagruel*, de Rabelais.

O acontecimento mais significativo do século XVI é o aparecimento do burguês. Este tem uma importância decisiva, pois foi ele o principal responsável pela centralização do poder monárquico. Os burgueses favoreceram as viagens e as religiões reformadas, alargaram o mercado das artes plásticas, protegeram os humanistas e leram os seus livros. Forma-se uma aristocracia de negócios – os Függer, os Médicis, etc – que leva ao de-

envolvimento de várias cidades da Europa, especialmente Antuérpia. O aparecimento da burguesia, e a sua exigência contabilística, conduz ao aparecimento de um universo quantificado. Note-se que o burguês é, por isso, essencialmente diferente do humanista, pelo que seria um erro tentar reduzir o Renascimento ao Humanismo.

Leonardo da Vinci (1452–1519) foi o maior académico do século XVI, embora não fosse um humanista. Estudou artes em Florença, com Verrechio. Não sabia grego nem latim, nem era sequer detentor de formação académica. Tratou no entanto de toda a ciência conhecida, chegando a trabalhar em Milão como engenheiro.

Em Portugal, onde o humanismo chega vindo de Itália, fundou-se em Coimbra o Colégio das Artes, sendo os humanistas mais célebres André de Resende, Cleonardo e André Gouveia. A vanguarda não é, porém, constituída por estes homens, mas por outros, nomeadamente D. João de Castro, Duarte Pacheco Pereira e Pedro Nunes. Duarte Pacheco Pereira foi navegador e cartógrafo, difundindo o desprezo pelo saber não verificado dos antigos, após ter constatado a falsidade das suas afirmações (“A experiência é a mãe de todas as coisas”). Pedro Nunes, grande matemático, foi o primeiro titular da cátedra de Matemática em Coimbra.

Por esta altura, o progresso técnico origina a ascensão da Europa, enquanto se procede à destruição de outras civilizações em outros continentes. Cria-se assim uma civilização planetária, com a Europa “espalhando-se” por todo o mundo.

Os avanços técnicos são muitos e variados. Entre eles, a imprensa ocupa lugar de destaque. O papel tinha chegado à Europa, trazido pelos árabes, no século XIV, e a imprensa já existia na China. A invenção de Gutemberg resumiu-se assim ao uso de tipos metálicos móveis. O primeiro livro impresso foi a célebre Bíblia de 1455. Para dar uma ideia da difusão do livro, diga-se que, no século XV, foram editados 35 000 livros, correspondendo a um total de cerca de 15–20 milhões de exemplares. No século XVI, a cifra atingiu 200 000 livros e cerca de 200 milhões de exemplares. A difusão da arte vai ser, por sua vez, possibilitada pela invenção de técnicas de reprodução como a talha doce, ponta seca e água-forte.

No campo da metalurgia, constroem-se grandes fornos (com 5 m de diâmetro) com foles, por vezes accionados hidraulicamente, e produzindo 15–20 toneladas de ferro por ano, o que vai tornar possível a difusão deste metal e a baixa do seu preço, bem como o aparecimento de canhões (trons), primeiro de ferro fundido (barricat) e depois de bronze. Inventam-se ainda engrenagens, bielas e manivelas. Dão-se importantes mudanças na construção naval e fortificações: em lugar das grandes fortalezas, altas e vulneráveis, surgem castelos baixos e com casamatas para responder ao fogo, e os próprios navios começam a ser equipados com canhões. No campo da engenharia civil, é notável a construção da catedral de Florença (70 m de altura na cúpula, contruída sem andaimes), de um túnel alpino, e de uma barragem para irrigação de dimensões incomuns (20 m altura \times 90 m extensão), em Espanha.

6.2 Física e Matemática no Renascimento

Citem-se os nomes, ainda que pouco relevantes, de **Peurbach** (1423–61) e **Regiomontanus** (1436–76), responsáveis, respectivamente, pela divulgação da astronomia ptolemaica, e pelo desenvolvimento e utilização da geometria esférica, com a publicação da primeira tabela de senos.

A Matemática sofre nesta altura um desenvolvimento sociológico considerável, assistindo-se à publicação de tratados práticos destinados à classe mercantil. Saliente-se a importância de **Lucca Paccioli** (1445–1514), autor de um calhamaço para ensinar Matemática – tratado de contabilidade – destinado ao prosseguimento da difusão das Matemáticas no seio da classe mercantil. Surgem então também as primeiras cátedras de Matemática (em Bolonha e Cracóvia). Coimbra teve a sua em 1544, sendo Pedro Nunes o seu primeiro detentor.

A par da Matemática desenvolve-se a Astronomia, que estava ligada à Medicina pela Astrologia. **Viète** tem, pela primeira vez, a ideia de dotar a Matemática de uma simbologia eficaz. A Álgebra sofre desenvolvimentos consideráveis, especialmente a teoria das equações:

Scipione del Ferro (1465–1526) foi o primeiro titular da cátedra de Matemática em Bolonha. Descobriu a solução de um caso particular da equação do terceiro grau, $ax^3 + bx = c$.

Nicolo Fontana (Tartaglia) (1500–57) Sem estudos e autodidacta, descobriu a solução de outro caso particular da equação do terceiro grau, $ax^3 + bx^2 = c$. Vivia de explicações de Matemática, o que é bastante significativo. Antonio Fiori, discípulo de del Ferro e a quem este havia confiado a sua solução, não gostava de Tartaglia por este ser autodidacta, o que o levou a desafiá-lo para uma “disputa matemática” (que Tartaglia venceu, arrasando Fiori).

Gierolamo Cardano (1501–76) convenceu Tartaglia a revelar-lhe a sua descoberta, que publica mais tarde, juntamente com a de del Ferro, num tratado de Álgebra, no qual inclui a sua descoberta da solução geral da equação do terceiro grau. Surge igualmente por essa altura a resolução algébrica da equação do quarto grau, obtida por **Ludovico Ferrari** (1522–65), antigo criado de Cardano e que com ele aprendera.

Rafael Bombelli (1526–72) considerou como raízes possíveis de uma equação não só números positivos e negativos, mas também imaginários puros (por exemplo, $\sqrt{-6} = \sqrt{0-6}$, actualmente $\sqrt{6}i$).

Na Física, fazem-se esforços por entender a trajectória dos projecteis (inspirados pelo desenvolvimento da artilharia). Leonardo da Vinci desenvolve, em Estática, trabalhos inspirados na obra de Jordanus. Na Dinâmica, porém, as suas ideias foram originais, tendo considerado a trajectória de um projectil como composta por três fases (ver figura 6.1). Leonardo interessou-se ainda pelo choque, que tentou explicar em termos da conservação, ou transmissão, do *impetus*, estabelecendo um esboço da Terceira Lei de Newton.

Os grandes matemáticos quinhentistas dedicaram-se também à Física. Cardano limitou-se a plagiar Leonardo. Tartaglia desenhou a trajectória de um projectil quase como uma parábola (região de composição do movimento circular). Admitiu, além disso, que o movimento não admite nenhum segmento rectilíneo, pois em cada instante o projectil encontra-se sujeito ao *impetus* e à força da gravidade. Explicou o deslocamento quase rectilíneo de uma bala pela grande quantidade de *impetus* que lhe é comunicada, face ao seu pequeno peso.

No campo das ciências, aparecem três livros. Os dois primeiros, da autoria de **Vesálio** (1543) e **Foscori** (1546) tratam de Medicina, respectivamente de Anatomia (o primeiro livro do género) e de uma teoria das doenças infecciosas. O terceiro livro é de **Copérnico** (1473–1543). Nascido em Toruń, Polónia, Copérnico doutorou-se em Teologia em Bolonha, onde viveu em casa de Domenico Novara, tendo estudado também Astronomia. Após breve estada na Polónia, voltou à Itália, para estudar Medicina, só regressando definiti-

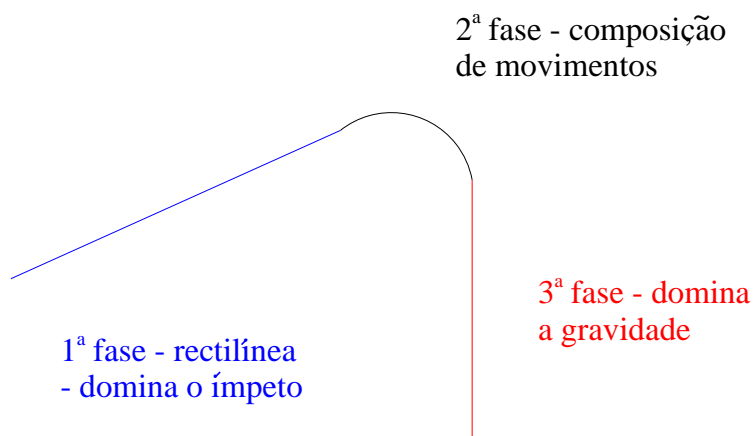


Figura 6.1: Trajectória de um projétil segundo Leonardo da Vinci.

vamente ao seu país em 1503. Nomeado cónego de Várnia pelo tio, eclesiástico de alta posição, tornou-se médico das personalidades mais importantes da Polónia. Publicou em 1509 um livro intitulado *Comentariolus*, a propósito de Astronomia, bem como um *Tratado sobre a Moeda* (1526). Georg Rheticus, astrónomo alemão, insistiu com Copérnico para que publicasse o seu sistema. Professor em Wittemberg, Rheticus publicou em 1540 a *Narratio Prima*, em que conta, em traços gerais, a teoria de Copérnico, sem, no entanto, se apoderar dela. Finalmente, em 1543, Copérnico publica a sua grande obra, *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, pretendendo a lenda que dela recebeu um exemplar no próprio dia da sua morte.

6.3 Astronomia Copernicana

Copérnico propôs a sua hipótese heliocêntrica como modo de eliminar alguns movimentos celestes, considerando fictício o movimento do Sol. A sua teoria era capaz de explicar certos fenómenos estranhos, como as retrogradações e a irregularidade dos períodos planetários, prevendo mesmo tais irregularidades com rigor apreciável. Tomemos o exemplo de um planeta cujo período seja de 16 meses (ver figura 6.2). A teoria de Copérnico explica ainda que os planetas interiores se mantenham sempre muito próximos do Sol, e vai mesmo permitir a medição de distâncias planetárias (ver figuras 6.3 e 6.4). Para Copérnico, o universo e a Terra, bem como todos os corpos celestes, são esféricos, pois respeitam a perfeição divina. Além disso, sendo esféricos, deveriam rolar sobre si mesmos, como resultado da sua natureza esférica (tese de Paris). Os planetas são, ainda, arrastados pelo movimento das esferas celestes, o que vai obrigar Copérnico a introduzir um terceiro movimento da Terra, com vista a explicar a constância da direcção do seu eixo.

Thomas Kuhn afirmou que o *Revolutionibus* teve menos importância pelo que disse do que pelo que fez dizer. De facto, Copérnico foi um astrónomo muito conservador, tendo evitado mexer com a Física aristotélica e invocando, a cada instante, a autoridade dos antigos (Heráclides, Aristarco). Foi, todavia, inevitavelmente alvo de inúmeros ataques. Tentou, nomeadamente, explicar o paradoxo do lançamento dos corpos fazendo uso da teoria do *impetus*. Para explicar que a Terra se não despedaçasse ao girar, argumentou

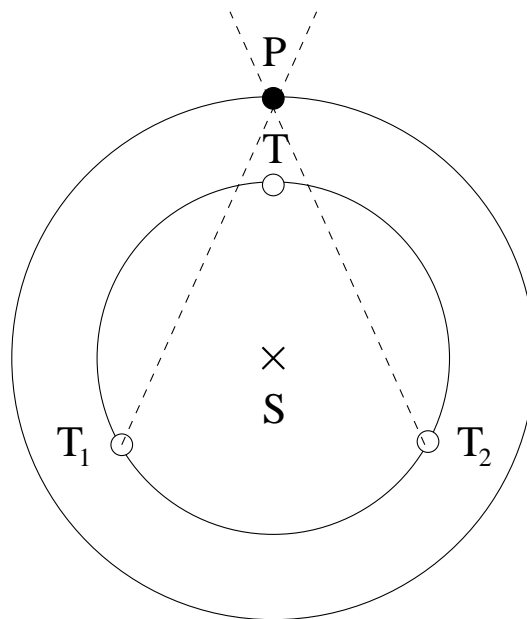


Figura 6.2: Irregularidades do movimento de um planeta exterior, segundo a teoria de Copérnico. Quando o planeta P acaba de completar uma volta em torno do Sol, S , já a Terra, inicialmente em T , completou $\frac{4}{3}$ de volta (Terra em T_1). O planeta é então visto numa posição diferente em relação ao fundo de estrelas fixas. Ao fim de uma segunda volta (Terra em T_2), o planeta é visto noutra posição diferente em relação ao fundo de estrelas fixas. Então, só ao fim de 3 anos se vê o planeta como de início.

que então a esfera das estrelas fixas, que, por hipótese, giraria, o faria a uma velocidade muito maior, se despedaçaria muito mais facilmente. (Esta explicação é muito frágil, pois a Física não era a mesma para os corpos celestes.) Se a Terra não fosse o centro do mundo, teria sido possível que acontecimentos religiosos se tivessem dado noutros locais também? Isto era inconcebível para a época, e Copérnico, que era teólogo, sabia-o. Evitou por isso qualquer referência a estes problemas.

Se a Terra não está no centro do mundo, por que razão caem os graves? Copérnico tentou explicar este facto dizendo que a gravidade é parte de uma inclinação natural dos corpos para que constituam uma esfera. Isto não explica, é claro, a existência de corpos leves e tal erro provém, obviamente, do facto de a Física de Aristóteles só ser compatível com o geocentrismo. Um outro argumento contra o heliocentrismo era a ausência de paralaxe estelar. Copérnico respondeu invocando o enorme valor do raio das estrelas fixas, calculado por Al-Farganus como sendo cerca de 20 000 raios terrestres. No entanto, para que não se observasse paralaxe, o valor real teria de ser 500 000 vezes superior a este, o que, para a época, era perfeitamente impensável.

A intenção de Copérnico tinha sido elaborar um novo *Almagesto*, isto é, uma descrição matemática dos movimentos celestes. Para tal, foi obrigado a conservar excêntricos e epíclis, em número de 30, bem como a deslocar o Sol do centro do deferente da Terra. A sua capacidade de previsão permanece, porém, superior à do sistema ptolomaico.

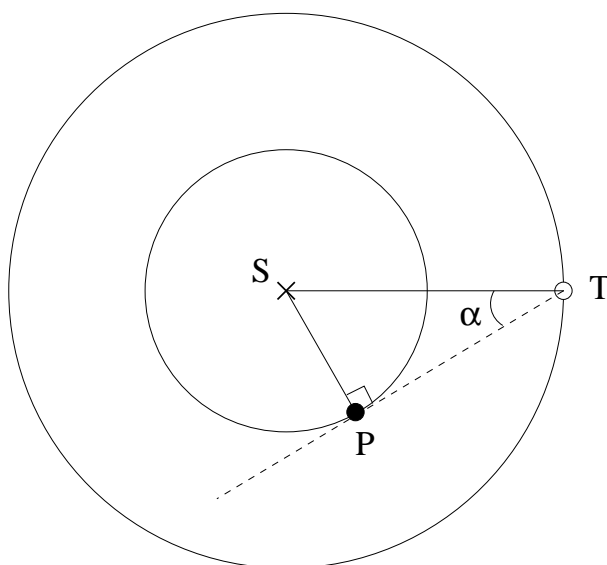


Figura 6.3: No caso dos planetas interiores, é conhecido o ângulo α (maior distância angular entre o planeta e o Sol). Como se conhece já \overline{TS} , pode conhecer-se \overline{PS} , a distância do planeta ao Sol: $\overline{PS} = \overline{TS} \sin \alpha$.

6.4 Primeira metade do século XVI

Copérnico desenvolveu o seu sistema por razões de natureza metafísica, ligadas à mística da luz da escola de Oxford. O Sol, como astro iluminante e principal, deveria ter uma posição privilegiada, no centro do mundo. Hermes Trimégisto, espiritualista esotérico, é frequentemente citado por Copérnico, que também sofreu a influência do neo-platónico Domenico Novara, seu professor em Bolonha.

O heliocentrismo era, no entanto, inevitável, dada a rejeição do aristotelismo que vinha a dar-se desde o século XV e que originara um vazio no saber. Resultou daqui uma abertura geral a todos os temas, sendo estes frequentemente tratados de um modo superficial. As teorias elaboradas eram, muitas vezes, contraditórias, dada a ausência de um sustentáculo lógico diferente do da teoria aristotélica.

Marsilio Ficino (fundador da Academia Platónica) trouxe à moda o platonismo e o neo-platonismo. Traduziu textos da antiguidade e introduziu na Europa textos herméticos. Pretendeu renovar o cristianismo através da interpretação de textos clássicos. Fez a apologia da liberdade e da responsabilidade do Homem, e creu na existência de uma filosofia prima e pia (piedosa), contendo verdades perdidas que urgia recuperar. A mistura de filosofia e ideologia dá origem a uma curiosa forma de saber.

Pico, já atrás referido, foi o tradutor da *Cabala Judaica*, célebre livro esotérico. Acrescenta-se a propósito que Cardano foi também um astrólogo, Paracelso um alquimista, e Kepler um neo-pitagórico.

Ao mesmo tempo, começa surgir a crença de uma relação entre Deus e a natureza, o mundo por Ele criado. O Sol, no centro do mundo, corresponde à imagem do próprio Deus. Ao mesmo tempo, desencadeia-se um espiritualismo desenfreado, que coloca a alma do Homem (microcosmos) a meio caminho entre o mundo celeste (macrocosmos) e o

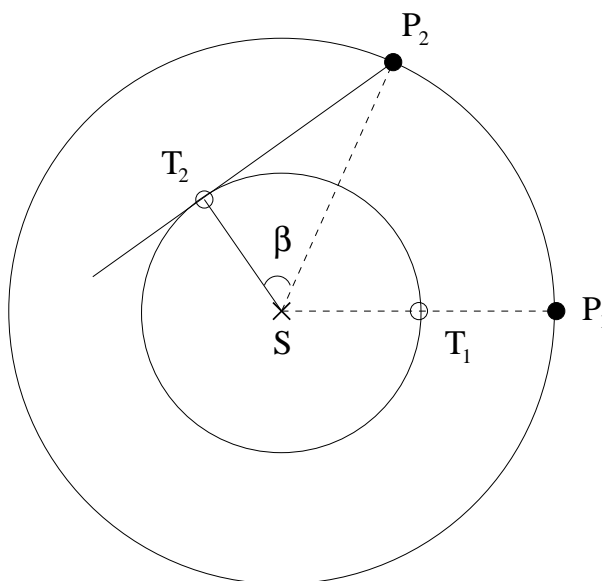


Figura 6.4: No caso dos planetas exteriores, conhece-se $\widehat{T_1T_2}$, pois sabe-se qual é o ano da Terra. Por outro lado, conhece-se o ano do planeta, logo sabe-se $\widehat{P_1P_2}$. A $\widehat{T_1T_2}$ e $\widehat{P_1P_2}$ correspondem ângulos ao centro; β é a diferença desses ângulos. conhecendo \overline{TS} , pode então calcular-se \overline{PS} : $\overline{PS} = \frac{\overline{TS}}{\cos \beta}$.

mundo material. Dá-se uma grande difusão da Astrologia, considerando-se que a alma é inseparável da matéria: assim, todo o objecto material possui uma alma. Isto está ligado à crença de que a natureza é mágica: tudo é milagre. Koyré disse ter sido o Renascimento o tempo em que as pessoas acreditavam em tudo. Sobrevém, de facto, grande confusão, com a crença em bruxas e feitiçaria.

O neo-pitagorismo revive nessa altura: o número surgia como entidade mágica. No entanto, as Matemáticas e a Geometria eram demasiado rígidas, além de serem suspeitas de colaborar com o Aristotelismo (por via da Lógica), o que era contra o espírito da época, que se pretendia livre de constrangimentos. Tentou-se, assim, dar uma explicação global ligada, não à Matemática, mas à Química, cujo patriarca era Paracelso (maior do que Celso, médico da antiguidade), e que só será derrotada pela concepção mecanicista.

Paracelso (Philippus Bombastus von Hohenheim) (1493–1541). Filho de um médico de aldeia suíço, foi iniciado em Alquimia e trabalhou nas minas dos Függer, o que o levou mais tarde a especular sobre o aparecimento dos metais e as doenças dos mineiros, escrevendo o primeiro livro de medicina do trabalho. Médico ambulante, pouco apreciador dos seus colegas, estudou em várias universidades (nas quais chegou mesmo a ocupar posições de destaque) e procurou aprender métodos da medicina tradicional. Na sequência da difusão das notícias das suas curas milagrosas, os seus manuscritos vão ser publicados em todas as línguas importantes da Europa. Contra Aristóteles e Galeno, Paracelso propõe uma nova doutrina médica, aliás com antecedentes (Ficino): enquanto Galeno pensava serem as doenças devidas ao desequilíbrio dos humores internos, Paracelso atribui-lhes causas exteriores e afirma deverem ser combatidas por meio da ingestão de medicamentos. Desenvolve-se, então, a farmacopeia, a partir da medicina aldeã.

Paracelso utilizou produtos químicos nos seus tratamentos, o que fez com que a Química assumisse uma importância inesperada. Dado o grande número de médicos, cirurgiões e barbeiros, o número de estudiosos empíricos da Química vai ser particularmente elevado. Os resultados são, porém, muito poucos, devido à falta de uma base científica para o trabalho. Surgiu, assim, a *Iatroquímica* (Química médica).

Paracelso recusava os quatro elementos da Alquimia, propondo, alternativamente, que, a nível muito profundo, existissem na matéria quatro elementos, dos quais originariam cinco princípios: mercúrio, enxofre, sal, fleugma e *caput mortem*. Destes, os três primeiros são activos, correspondendo às três pessoas da Santíssima Trindade. Trata-se de princípios espirituais, e não de substâncias em si. Deste modo, todos os metais da natureza tinham, como destino natural das suas transformações, o ouro.

John Dee (1527–1608). Humanista inglês, criou a mónada hieroglífica, semelhante ao símbolo do mercúrio. A mesma resulta de 24 teoremas matemáticos que, segundo ele, descreveriam a criação do mundo.

6.5 Segunda metade do século XVI

De 1550 até 1650, a expansão económica da Europa, sustentada sobretudo pelos metais preciosos do ultramar, é muito mais frágil do que anteriormente.

No domínio da Física, assiste-se a um despertar do interesse pela electricidade e magnetismo. as forças magnéticas foram o único campo de forças estudado (já existiam os tratados de Tales e Petrus Peregrinus), pois a gravidade era interpretada em termos de lugares naturais. Nesta época, observam-se pela primeira vez a declinação (por Colombo) e a inclinação magnéticas, que consistem, respectivamente, nas variações da direcção da agulha da bússola com a longitude e em relação ao plano horizontal. **Mercator** elabora a primeira carta da qual constam declinações e inclinações magnéticas. O magnetismo surge, assim, como uma força representativa da magia natural.

Giambattista della Porta, fundador da primeira academia científica, a Academia dos Segredos, acabou a sua vida como autor dramático. Interessou-se pela Óptica, tentando reintroduzir a teoria dos simulacros, estudou as lentes e descreveu, pela primeira vez, a luneta. Em 1589 publicou *Magia Naturalis*, em que se ocupa de magnetismo, acrescentando novidades aos estudos de Maricourt (por exemplo, a divisão da agulha magnética no sentido do comprimento). Concluiu que qualquer porção de um ímã é igual ao todo, e parece ter sido o primeiro a usar limalha de ferro para desenhar as linhas de força. Incluiu, porém, nos seus livros, estranhíssimas divagações.

William Gilbert (1540–1603). Humanista inglês, médico de Elizabeth I, publicou em 1600 o tratado *De Magnete*, em que anuncia uma nova Física. Afinal, e como se passara com Bacon, a sua Física pouco tem de novo. Fez a distinção entre factos e fantasias, descobriu a electrização por contacto, e distinguiu claramente, pela primeira vez, as forças eléctricas e magnéticas: a electricidade não é uma propriedade específica dos corpos.

Gilbert sustentou que o magnetismo é uma virtude da Terra, e a sua principal propriedade: trata-se de uma alma, ou virtude anímica. Todos os fragmentos da Terra devem, portanto, possuir propriedades magnéticas, pelo que magnetizar um corpo é despertar nele uma virtude adormecida. Esta virtude anima os corpos com vários tipos de movimento:

- Atracção e repulsão;

- Movimento de rotação da Terra (mas não de translação): a Terra giraria em torno de um eixo fixo devido à virtude magnética. Os fragmentos da Terra não girariam por estarem sujeitos à gravidade.

Este livro, que inclui poucas experiências novas e muita especulação, vai influenciar o pensamento de Kepler.

No campo das Matemáticas, renova-se o interesse pela Matemática Aplicada, especialmente pelo cálculo numérico, devido a necessidades comerciais. Surgem as primeiras traduções de Diofanto e os primeiros esforços para utilizar a Trigonometria.

Viète, jurista francês, foi um matemático amador que entrou numa competição pelo valor de π , o qual calculou com 10 casas decimais (Von Ceulen calculou-o, mais tarde, com 30). Ao resolver o problema de achar a relação entre a área de um quadrado e a do círculo nele circunscrito, foi levado a calcular o valor de $\frac{2}{\pi}$, fazendo

$$\frac{2}{\pi} = f_1 \times f_2 \times f_3 \times \dots \times f_n \times \dots = \prod_n f_n, \quad f_n = \cos \frac{1}{2^{n+1}}.$$

Viète foi, ainda, o primeiro a introduzir uma simbologia moderna, inventando os símbolos + e - e adoptando, nas equações, as consoantes para designar as constantes, e as vogais para designar as incógnitas.

Simon Stevin (1548–1620) foi inspector de diques na Holanda. No campo da Matemática, tentou inventar uma nova maneira de representar as dízimas (exemplo: $3.14 = 3(0)1(1)4(2)$, modernamente $3.14 = 3 \times \left(\frac{1}{10}\right)^0 + 1 \times \left(\frac{1}{10}\right)^1 + 4 \times \left(\frac{1}{10}\right)^2$). Publicou em 1585 o seu livro *Aritmética*, onde são tratados pela primeira vez, como números de direito, os irracionais e os negativos, e onde aparece também a primeira forma única da equação do terceiro grau, $ax^3 + bx^2 + cx + d = 0$. no domínio da Mecânica, tentou determinar a lei da velocidade dos graves durante a queda, o que não conseguiu, concluindo apenas estar Aristóteles errado. Na Estática, foi um continuador de Arquimedes e não atingiu grande originalidade, sendo o seu resultado principal a descoberta da condição de equilíbrio de dois corpos num plano inclinado (ver figura 6.5). Surge, paralelamente, a regra do paralelogramo de forças (Stevin só considerou a decomposição de uma força em duas forças paralelas entre si). Foi, ainda, o inventor do conceito de pressão de um líquido (ligado ao problema dos diques da Holanda), e “demonstrou” que a pressão de um líquido sobre o fundo de um recipiente depende apenas da altura do líquido, e não da sua forma (ver figura 6.6).

Giambattista Benedetti (1530–1590). discípulo de Tartaglia, matemático do duque de Sabóia e anti-aristotélico convicto, serviu-se da obra de Arquimedes, nomeadamente da força de impulsão, para explicar as forças de resistência do meio. Sustentou que a velocidade de queda de um grave é proporcional à diferença entre o peso e a impulsão. O peso depende do volume e da densidade do corpo, a impulsão do volume e da densidade do meio. Segue-se que $v \propto d_c - d_{meio}$. Benedetti foi o autor do célebre “argumento de Galileu”, segundo o qual a velocidade de queda dos corpos não é proporcional ao seu peso; negou a distinção entre corpos “leves” e “pesados”, e disse que os graves caem devido à sua potência superar a resistência do meio. O movimento no vazio (resistência nula) é, então, o mais simples. Afirmou ainda que o *impetus* se exerce sempre em linha recta, explicando o movimento circular pela acção conjunta do *impetus* e das ligações, sendo que estas desviam aquele da trajectória rectilínea.

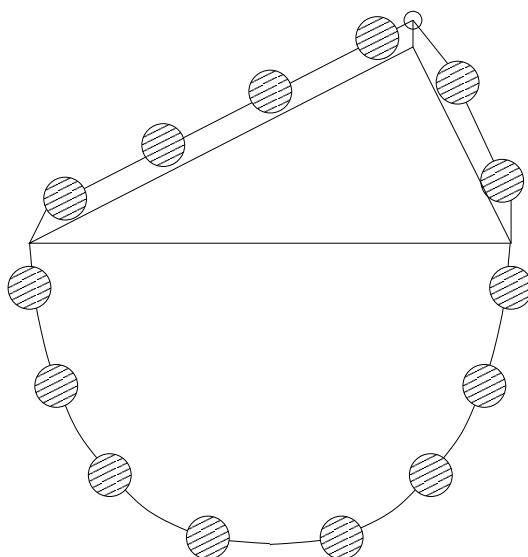


Figura 6.5: Se a corrente não estivesse em equilíbrio rodaria e gerar-se-ia um movimento perpétuo, o que é impossível.

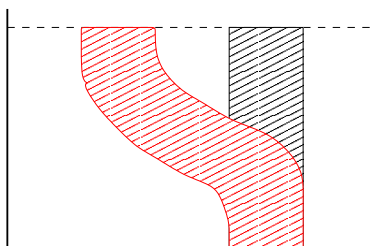


Figura 6.6: Paradoxo hidrostático explicado pelas ações das forças de pressão do líquido nas paredes do recipiente.

6.6 A Astronomia no século XVI

No século XVI, a doutrina heliocêntrica começou por ser rejeitada por Lutero e pelos luteranos. Melanchton, sucessor de Lutero, condenou o copernicianismo, o que criou uma ameaça aos adeptos alemães desta doutrina. Com efeito, Rheticus pediu a Osiander uma carta-prefácio em que, para evitar problemas, o livro de Copérnico é apresentado só como uma hipótese para simplificar cálculos. Este prefácio, que durante longo tempo se atribuiu a Copérnico, visto não ser assinado, inspirou a princípio uma certa tolerância em relação ao livro. No entanto, Rheticus não chegou a escrever a prometida *Narratio Secunda*, e Reinhold, que usou o modelo de Copérnico, embora sem lhe referir o nome, para calcular tábuas celestes, foi duramente criticado.

Copérnico foi rejeitado pelos astrónomos da época, pois a sua doutrina não era melhor que a de Ptolomeu. Entrou, no entanto, em voga nos círculos cultos, sendo o copernicianismo considerado uma história de ficção científica capaz apenas de inspirar indivíduos

pouco ortodoxos, como Tycho Brahe. Os poucos copernicianos eram:

Na Alemanha Rheticus e Maestlin (mestre de Kepler). Nicolau de Cusa foi um pré-coperniciano confesso.

Na Itália Benedetti (por ser uma doutrina contrária a Aristóteles).

Na Inglaterra Digges e, em certa medida, Gilbert.

A concepção do mundo de Copérnico não difere essencialmente da de Ptolomeu. Na realidade, trata ainda de um mundo finito e hierarquizado, permitindo, porém, certas hipóteses estranhas a Ptolomeu. De facto, se o universo fosse infinito e limitado pelas fixas, estas teriam velocidades infinitas, logo o espaço teria de ser finito. Mas, se fosse, como Copérnico afirmava, a Terra a girar e as estrelas a permanecer fixas, então o universo já poderia ser infinito.

Thomas Digges (1545–94) escreveu um livro em que defende Copérnico, afirmando não estarem as estrelas sobre uma esfera, mas a distâncias variáveis, sendo este facto responsável pela diferença dos seus brilhos aparentes. Sustentou que devem existir, até, estrelas invisíveis. As suas ideias criam o problema de saber onde colocar o céu teológico. Para o solucionar, Digges povoou o espaço físico de santos e almas.

Giordano Bruno (1548–1600) nasceu em Nápoles, onde estudou Lógica e Filosofia e se doutorou em Teologia. Fugiu mais tarde para Genebra, onde se converteu ao Calvinismo para poder frequentar a universidade. Ensinou Filosofia em Toulouse, de onde fugiu para Paris, devido ao ambiente anti-protestante. Em Paris, ensinou no Collège de France, antes de fugir para Inglaterra, onde viveu de 1584 a 1586 e escreveu alguns livros. De Inglaterra, tornou a fugir para Paris e a seguir para Praga, vadiando depois pela Alemanha. Volta então a Veneza, onde o denunciam à Inquisição em 1592. Fica preso de 1593 a 1600, altura em que é executado.

Bruno foi um filósofo confuso, que defendeu a tese da existência de um universo infinito por ser o único digno da onipotência de Deus. Num prenúncio de novidade, levantou-se contra as autoridades católicas e protestantes, e afirmou nada ter o dogma que ver com a ciência. Deus, sendo bom, não pode ter criado o universo diferentemente em vários lugares. O Sol é uma estrela vulgar, de onde se segue que os sistemas solares e os planetas habitados devem existir em enorme quantidade. O Sol não pode ser, então, o centro de um universo infinito.

Bruno afirmou que os planetas se moviam devido a forças anímicas, e identificou a Santíssima Trindade com o mundo: Pai – matéria; Verbo – razão; Espírito Santo – alma. Intuiu ainda algumas descobertas da Física, como a relatividade e a composição dos movimentos.

Tycho Brahe (1548–1601), nobre dinamarquês, é atacado pelo fascínio dos céus devido à Astrologia. Estudou em Copenhaga e em universidades alemãs, verificando que as tabelas astronómicas existentes eram insuficientes para as observações que queria fazer. Sendo rico, mandou construir vários observatórios astronómicos equipados com instrumentos de grandes dimensões (sextante, quadrante, esfera ...). Em 1572 apareceu no firmamento uma nova, que a Astronomia tradicional identificou com um cometa. Mas Tycho observou que esta não tinha paralaxe, e que parecia encontrar-se mais longe que Saturno. Como prémio, o rei da Dinamarca ofereceu-lhe uma ilha, Uraniborg, onde ele construiu um gigantesco palácio-observatório, rodeado de uma multidão de colaboradores.

Devido ao atraso na construção, Tycho quase perdeu a oportunidade de ver um cometa, sobre o qual viria a publicar as suas observações, tardia, mas detalhadamente:

1. O cometa passara através das esferas celestes – estas não devem existir;
2. O cometa entrara no mundo supralunar.

Até Tycho Brahe, a precisão das observações não ultrapassara $10'$ arco (Lua cheia: $30'$ arco). Com Tycho, o erro era de $1'$ arco para as estrelas e não mais que $4'$ arco para os planetas, o que é o melhor que é possível fazer a olho nu.

Tycho propôs uma nova teoria astronómica, na época mais vantajosa que a de Copérnico, segundo a qual a Terra, a volta da qual giram o Sol e a Lua, está imóvel no centro do mundo, enquanto que os restantes planetas giram à volta do Sol.

Quando se lhe acaba o dinheiro, Tycho tem de deixar Uraniborg. Parte então para a Alemanha e publica um livro para ganhar os favores do imperador. Instala-se seguidamente na Boémia e chama para seu assistente o jovem Kepler, que após a morte do mestre herdará o cargo deste (como Primeiro Matemático e Astrólogo da Corte) e as suas observações.

Capítulo 7

Kepler

Johannes Kepler nasceu no sul da Alemanha em 1571. Frequentou a universidade luterana de Tübingen, onde teve como professor Maestlin, que o converteu ao heliocentrismo. Sendo de família modesta, o seu destino natural seria a igreja, o que, no entanto, se não concretizou, dada a desconfiança teológica de que era alvo. Conseguiu um lugar, mal pago, de professor em Graz, que todavia lhe proporcionou o tempo livre necessário para escrever um livro, *Mysterium Cosmographicum* (1596), publicado com apoio de Maestlin. Nele, Kepler faz uma apologia do copernicianismo como realidade física, e não como mero artifício matemático. Introduziu-lhe também melhoramentos, afirmando, nomeadamente, ser o Sol, e não a Terra, o ponto de intersecção das órbitas dos planetas. Levanta ainda uma problemática epistemológica, ao indagar qual a razão da existência de 6 planetas, e não de outro número qualquer. Este número deveria, então, traduzir um mistério divino, cuja solução Kepler julga encontrar nos cinco poliedros regulares. Com efeito, alternando estes com esferas inscritas e circunscritas em cada um deles, vemos que os raios das órbitas planetárias correspondem, grosso modo, aos raios das esferas. Isto na seguinte ordem:

Mercúrio / octaedro / Vénus / icosaedro / Terra / dodecaedro / Marte /
tetraedro / Júpiter / cubo / Saturno

Faz, além disso, uma analogia entre os elementos imóveis da sua concepção do mundo e as três pessoas da Santíssima Trindade: Sol – Pai; estrelas fixas – filho; Espaço – Espírito Santo. tal procedimento leva-o a concluir que os objectos que não participavam desta comparação deveriam ser todos da mesma natureza (por exemplo, os planetas e as suas partes), levantando assim a hipótese de as leis da natureza serem as mesmas para todos os corpos.

O livro não tem qualquer êxito. Kepler remete, porém, um exemplar a Tycho, o qual, entusiasmado com as especulações do autor, o chama para seu assistente. Quando Tycho morre, Kepler herda as observações do mestre e o seu lugar de Astrónomo do Imperador da Alemanha, cujo trabalho, astrológico, era de fácil execução (Kepler, ele próprio, acreditava na Astrologia).

Antes de morrer, Tycho encarregara Kepler de calcular a órbita de Marte segundo a teoria pessoal do primeiro. Kepler vai mais longe e calcula-a pelos sistemas de Ptolomeu, Copérnico, Tycho, e o seu próprio, sendo o último o que dá melhores resultados. Mesmo assim, sobrevivia um erro de 8' relativamente às observações, o que destruía a validade do modelo. Kepler acabou por concluir que este erro sistemático resultava de não se conhecer com exactidão a posição da Terra, resolvendo-se então a determinar esta (ver

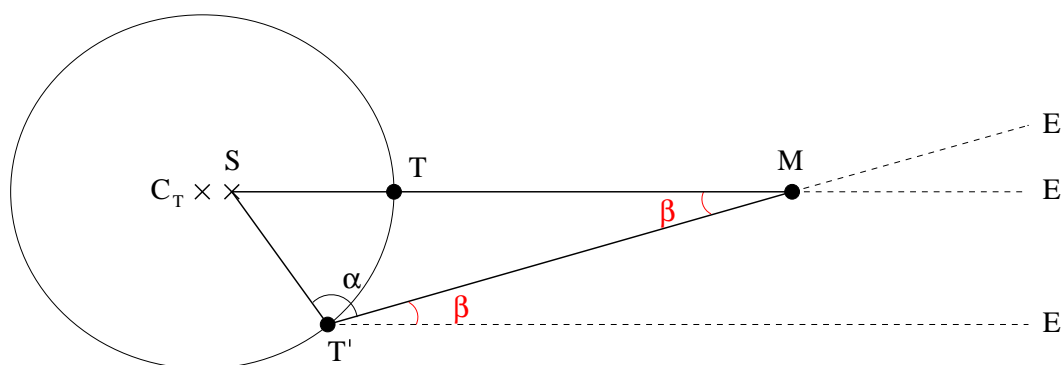


Figura 7.1: Determinação da posição da Terra. Estando Marte, M , em conjunção com a Terra, T , mede-se a posição de Marte em relação ao fundo de estrelas fixas, E . Ao fim de um ano de Marte, a Terra está em T' , e a posição de Marte em relação ao fundo de estrelas fixas é agora E' . Sabem-se assim os ângulos α e β . Tomando a distância do Sol a Marte, \overline{SM} , como unidade, sabem-se os comprimentos dos lados do triângulo. Este processo pode repetir-se indefinidamente, permitindo determinar a distância do centro da órbita da Terra ao Sol: $\overline{C_T S} = 0.18R_T$, em contraste com o valor normalmente aceite de $\overline{C_T S} = 0.36R_T$.

figura 7.1). Ao contrário do que seria de esperar, Kepler não retomou imediatamente a seguir o cálculo da trajectória de Marte, talvez por se encontrar muito cansado e ter lido *De Magnete*, que muito o impressionou.

Nos seus livros, aliás altamente autobiográficos, Kepler trata do problema de saber se os corpos estão ou não aparentados. Corpos aparentados atrair-se-iam com forças iguais e opostas (pressagiando o princípio da acção e reacção). Logo, os planetas não devem ser aparentados nem com o sol, nem entre si. Os responsáveis pelo movimento dos planetas seriam, então, as acções magnéticas (ver figura 7.2). O Sol emitiria algo, uma *species*, ou virtude magnética, que faria girar os planetas. Kepler, como bom neo-pitagórico, tentou dar forma quantitativa a essa lei e, como a dita força era suposta aparentada com a luz, interessou-se pela Óptica. Publicou em 1604 um livro de Óptica que trata fundamentalmente de fotometria, contendo a descoberta de que a intensidade luminosa varia na razão inversa dos quadrados das distâncias. Isto implica que os planetas se movem devido a uma força vinda do Sol e proporcional ao inverso do quadrado do raio orbital. Kepler não poderia, no entanto, ter chegado à lei de Newton, pois faltava-lhe a nova Mecânica: permanecia agarrado aos conceitos aristotélicos, admitindo, por exemplo, a força como causa da velocidade e tangente às trajectórias planetárias. Sabia-se já, porém, que a distância da Terra ao Sol varia, e que a força de atracção varia com a distância. Segue-se então que, quando a Terra está mais próxima do Sol, a força é mais intensa e, portanto, maior a velocidade, e inversamente quando a Terra se encontra mais afastada. Fica assim destruída a tese do movimento circular uniforme.

Kepler tentou, em seguida, calcular a órbita da Terra para uma lei $F \propto 1/r^2$, tentativa que falhou. Pensou, no entanto, que, dado que Deus deveria concentrar a *species* só onde ela era precisa, esta deveria concentrar-se no plano das órbitas dos planetas, e enfraquecer mais rapidamente, dando uma lei $F \propto 1/r$. Kepler testou esta hipótese e concluiu que os

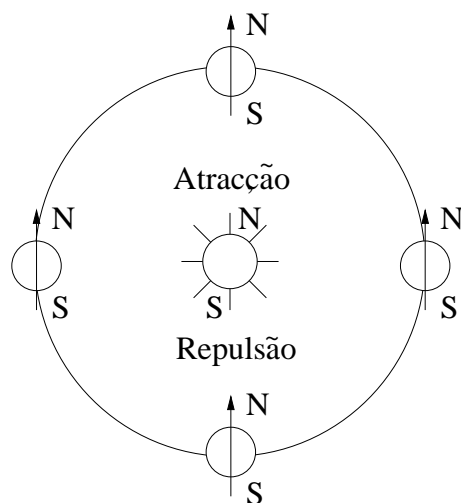


Figura 7.2: O “Sistema Solar magnético” de Kepler. Cada planeta seria um íman com pólos N e S.

dados se ajustam perfeitamente às previsões se se admitir que o raio vector varre áreas iguais em intervalos de tempo iguais. Esta é a descoberta da Lei das Áreas, ou Segunda Lei de Kepler (cronologicamente a primeira). Tendo isto em conta, Kepler voltou ao problema de calcular a órbita de Marte (ver figura 7.3). Kepler constatou que a órbita de Marte não era uma circunferência. Decidiu, em seguida, que era uma oval. Fracasso: a Lei das Áreas não funciona para ovais. Resolveu então inventar uma curva que satisfizesse a Lei das Áreas – elipse auxiliar – e esta serve! A órbita é uma elipse, e o Sol está num dos seus focos (Primeira Lei de Kepler). Mas surge um problema: porque é a órbita elíptica? Kepler supõe então que o Sol é um íman, com o pólo sul no interior, e o norte no exterior: as forças magnéticas deformariam a circunferência, aproximando-a da elipse.

Kepler publica os seus resultados em 1609, no livro *Astronomia Nova*, que ninguém entende.

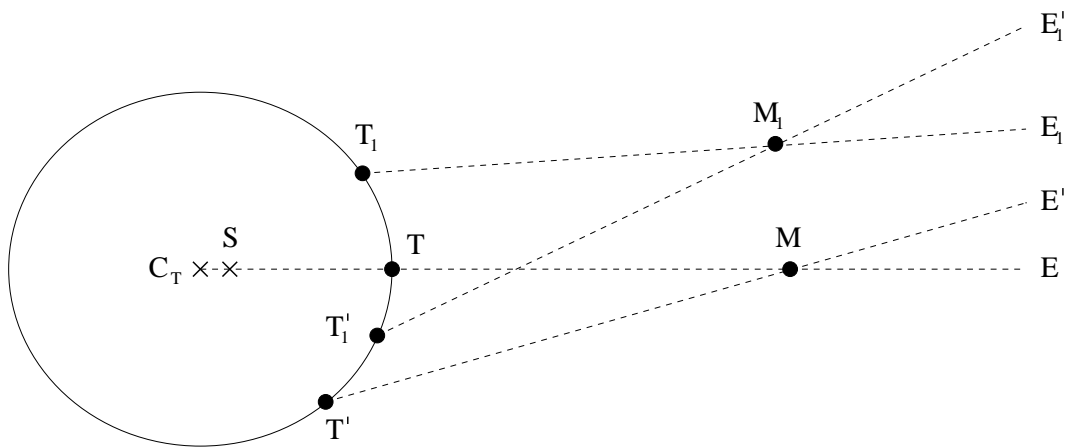


Figura 7.3: Cálculo da órbita de Marte. Repetindo o processo (as posições da Terra são obtidas pela Lei das Áreas), obtém-se a órbita de Marte. O procedimento normal a seguir seria tentar construir uma órbita montando epiciclos e deferentes. Mas a força magnética actua corpos magnéticos como Marte; não actuará o centro do epiciclo, dado ser este um ponto geométrico.

Capítulo 8

Galileu

8.1 Galileu e Kepler

Galileu Galilei nasceu em 1564, em Pisa, filho de burgueses florentinos com prestígio, mas sem muito dinheiro, e que regressaram a Florença quando Galileu tinha 10 ou 11 anos.

Galileu estudou num colégio jesuíta, onde concluiu o ensino secundário e manifestou grande interesse por questões de Matemática e Engenharia. No entanto, o pai manda-o para Pisa estudar Medicina, com vista a aumentar os magros rendimentos da família. Galileu vai para Pisa e aí fica 4 anos, tempo durante o qual se familiariza com Platão e Aristóteles. A propósito desta estada de Galileu em Pisa conta Viviani, seu discípulo e primeiro biógrafo, uma série de histórias fantasistas, de que é exemplo a da descoberta da lei do isocronismo, a qual se verificou mais tarde ser falsa (não havia candelabros na catedral de Pisa).

Galileu volta a Florença com 21 anos, sem ter estudado Medicina alguma. Decide então trabalhar em Mecânica, no que é apoiado por Ricci, matemático de Florença que o ajuda a aprofundar os seus conhecimentos de Platão, Aristóteles, Euclides e Arquimedes, bem, como dos modernos, Tartaglia, Cardano e Benedetti. Galileu realiza, por essa altura, os seus primeiros trabalhos sobre a balança hidrostática e a determinação de centros de gravidade.

Guidobaldo del Monte, matemático influente na época, reconheceu o génio de Galileu e fê-lo nomear, aos 25 anos, professor de Matemática em Pisa. É também da autoria de Viviani o relato da célebre experiência que Galileu teria efectuado na torre de Pisa. Esta história é, evidentemente, falsa, uma vez que o próprio Galileu atribuía pouca impotência a essa experiência, sendo, além disso, incapaz de reunir muita gente e muito cauteloso a respeito das suas opiniões.

Galileu não gostava de Pisa – o meio era pequeno e a paga insuficiente. Guidobaldo consegue então faze-lo transferir para Pádua, onde ele permanece 18 anos (1592–1610), e onde faz numerosos amigos e realiza a maior parte das suas experiências (embora não publique os resultados). Pádua era a universidade de Veneza, tal como Pisa o era de Florença. Entre os amigos de Galileu contam-se Salviati e Sagredo.

Em 1610, um antigo aluno francês de Galileu, de passagem por Pádua, conta-lhe da existência da luneta, fabricada na Holanda. Galileu deita-se, ele próprio, ao trabalho de construir uma luneta pelo processo de tentativa e erro. Não será o primeiro a observar o céu com a luneta, mas será, sim, o primeiro que sabe para onde a há-de apontar. As

suas observações foram publicadas em 1610 no livro *Sidereus Nuncius*, que constituiu um êxito imediato.

Segundo Galileu, a Lua não seria uma esfera perfeita, mas antes altamente imperfeita, com montanhas, vales, planícies e mares. Galileu chegou mesmo a estimar a altura de uma montanha lunar, interpretando os pontos luminosos como elevações (ver figura 8.1). Verificou, ainda, que a zona obscura não era completamente obscura, mas acinzentada -

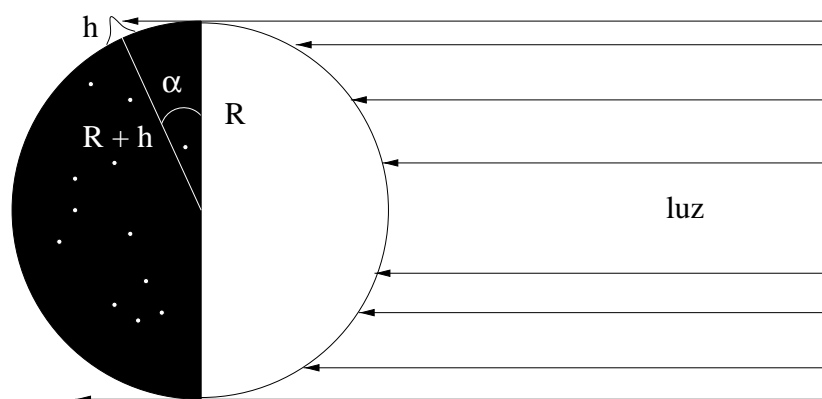


Figura 8.1: Cálculo da altura de uma montanha lunar. Um ponto luminoso na parte escura da Lua corresponde ao cume iluminado de uma montanha: medindo a sua distância angular α à orla da zona iluminada, e sabendo o raio da Lua, R , pode determinar-se a altura da montanha, h .

indicando que a Terra reflectia para a Lua alguma luz, o que se não passava durante um eclipse. Isto implicava que a Terra brilha, como qualquer outro planeta.

Galileu observou que a Via Láctea é constituída por um número incontável de estrelas. Distinguiu, entre outros casos, 30 estrelas na constelação de Orion, onde anteriormente só se contavam 9. Descobriu os quatro maiores satélites de Júpiter, destruindo o argumento da singularidade da Terra enquanto único astro provido de um satélite. Além disso, uma vez que os satélites não eram deixados para trás pelo planeta, devido ao movimento deste, abria-se a possibilidade de a Terra ter, também, movimento. Aos quatro satélites, chamou Galileu *Estrelas de Médicis*.

Galileu disputou com o jesuíta Scheiner a prioridade da descoberta das manchas solares. Enquanto este último admitia serem as mesmas corpos opacos, Galileu atribuiu-as ao Sol, tendo-se servido delas para estimar o período de rotação deste astro (~ 24 dias). Mas a sua mais importante descoberta foram as fases de Vénus: nunca há Vénus nova, pois os planos das órbitas de Vénus e da Terra não coincidem exactamente (ver figura 8.2); e, além disso, as dimensões do planeta parecem aumentar à medida que diminui a iluminação do seu disco, o que é inexplicável pela teoria geocêntrica. Segundo esta, a pequena distância angular entre Vénus e o Sol era explicada admitindo que o Sol, a Terra e o centro do epíciclo de Vénus se encontram alinhados. Ora, segundo esta hipótese, nunca deveria haver Vénus cheia, mas deveria haver Vénus nova (ver figura 8.3). Por outro lado, a teoria heliocêntrica está de acordo com o que se observa (ver figura 8.4), o que motiva a adesão de Galileu à causa copernicana. Ambas as igrejas vão, porém, reagir condenando Copérnico, ainda que de balde, em 1616.

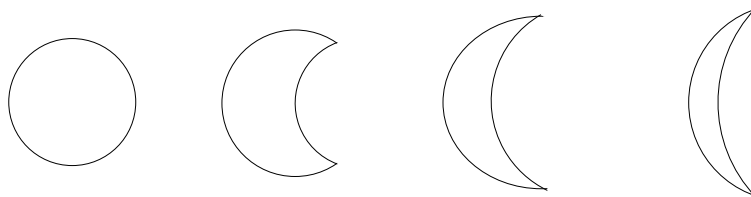


Figura 8.2: Fases de Vénus.

Galileu enviara, entretanto, um exemplar do *Sidereus Nuncius* a Kepler, que muito encantou o astrónomo, ao ponto de este ter pedido ao imperador da Alemanha que lhe obtivesse uma luneta. De posse desta, Kepler verifica e confirma as observações de Galileu, mas não faz quaisquer pesquisas originais; em vez disso, dedica-se a investigar a razão pela qual a luneta aumenta os objectos. Em 1611 publica a *Dióptrica*, onde esboça a explicação do funcionamento da luneta, o que é notável, dado que Kepler não conhecia as leis da refacção. Admitiu a hipótese de ser o ângulo de incidência proporcional ao ângulo de refacção, o que é aproximadamente verdadeiro, para pequenos ângulos. Por este processo, calculou os índices de refacção de alguns materiais, a distância focal de algumas lentes, e concebeu uma ocular melhorada para a luneta. Deve-se-lhe, além disso, a descoberta da reflexão total e o estudo das causas e maneiras de corrigir deficiências visuais.

Em 1612 morre o imperador Rodolfo, ficando Kepler desempregado. Este vê-se então forçado a aceitar um lugar de professor de Matemática em Linz. Morrem-lhe, em seguida, a mulher e um dos filhos. Sobrevem-lhe grande transtorno, o que o leva a procurar a harmonia musical do mundo. Em 1617 publica um tratado sobre astronomia copernicana que constitui um retorno à *Astronomia Nova*, mais completa. Ocupa-se, igualmente, de ilibar a mãe da acusação de feitiçaria que a levaria a fogueira. Em 1619, publica *Harmonices Mundi*, livro onde surge a sua Terceira Lei, obtida, ao que parece, por tentativas. A partir dela, Kepler elaborou tabelas de posições planetárias a que chamou *Tábuas Rodolfinas*. Seguidamente, foi para Praga seguir Wallenstein, morrendo, só e ignorado, pouco depois. Nem Galileu nem Descartes se interessaram por Kepler.

8.2 Vida e obras de Galileu

A publicação, em 1610, do livro *Sidereus Nuncius* tornou Galileu, até então um obscuro professor, conhecido, famoso e respeitado em toda a Europa. A universidade de Pádua tenta então retê-lo oferecendo-lhe um lugar de professor vitalício, que ele recusa, pois pretendia regressar a Florença, onde poderia prosseguir as suas pesquisas sem encargos professorais. Em Florença é recebido triunfalmente, tendo a sua luneta feito grande sucesso, embora os aristotélicos afirmassem, retomando a tradição medieval, que as lentes deformavam as imagens.

Dá-se, por esta altura, o primeiro conflito de Galileu com a Igreja, dado que esta tinha de afirmar o geocentrismo e a separação dos mundos lunar e sublunar. Galileu, que defendia o copernicianismo, não se apercebeu do perigo, pois considerou que as suas ideias estavam suficientemente apoiadas pelas observações. Dada a fama de Galileu, a Igreja

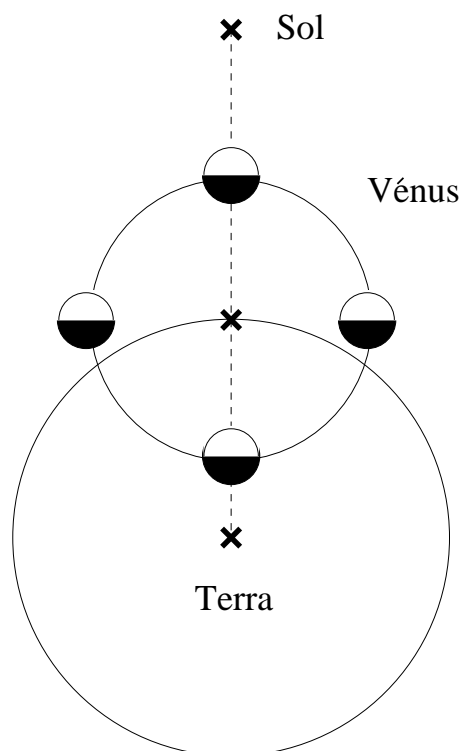


Figura 8.3: Órbita de Vénus segundo a teoria geocêntrica.

decidiu adiar o ataque. Para se defender dos rumores que corriam a seu respeito, Galileu escreve várias cartas, a Castelli e às princesas de Florença, em que reivindica liberdade para o pensamento científico, e recusa a autoridade e a interpretação literal das escrituras.

Em 1615, o padre Lorini denuncia Galileu à Santa Inquisição, servindo-se precisamente da carta a Castelli. Galileu vai a Roma tentar deter o processo que corre contra ele, mas é obrigado, sob pena de prisão, a abandonar e abjurar as suas teses sobre o movimento da Terra. Para evitar um confronto directo com a nova mentalidade, as actas do processo não são tornadas públicas, embora por essa época se condenem as doutrinas ditas “pitagóricas”, entre elas o copernicianismo, sem que Galileu seja, no entanto, citado.

Galileu obtém uma audiência com o Papa, que o recebe bem, e igualmente uma carta de um inquisidor, o cardeal Bellarmino, severo e ortodoxo, em que, misteriosamente, se diz que Galileu só tinha sido advertido da falsidade das suas ideias.

Por essa altura, Galileu retoma os seus trabalhos de Astronomia, obtendo um método para determinar a longitude de um barco que se desloca no oceano, a partir da observação das estrelas de Médicis. Tenta vender este método à Corte espanhola, sem sucesso: o processo não parecia nem prático, nem digno de confiança e, além disso, baseava-se numa descoberta herética.

Em 1621 é eleito o Papa Gregório XV, que sofre grande influência de Maffeo Barberini, antigo amigo de Galileu. O papado de Gregório XV é curto, sendo que em 1623 é Papa Urbano VIII, que é nem mais nem menos que o próprio Barberini. Sentindo-se protegido, Galileu publica *Il Saggiatore*, que dedica ao Papa, e onde ataca as opiniões do jesuíta Grassi a propósito do cometa de 1619. Seguidamente, Galileu desloca-se a Roma, sendo

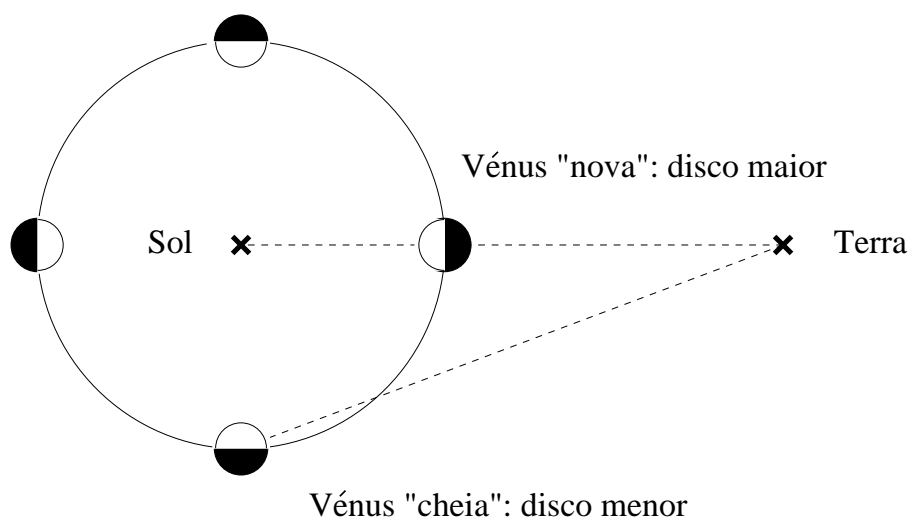


Figura 8.4: Órbita de Vênus segundo a teoria heliocêntrica.

recebido pelo Papa no próprio dia da sua chegada. Como o Papa o trata muito bem, Galileu pede-lhe, ingenuamente, que levante a proibição do copernicianismo. O Papa tenta aconselhá-lo, autorizando-o, no entanto (grande favor), a publicar a *Carta a Ingoli* (1624), em que prova que os argumentos contra o heliocentrismo eram desprovidos de razão.

Em 1632, Galileu acha chegada a altura de publicar uma obra a sério, o que foi muito difícil, pois queria dar-lhe uma forma interessante. Esta acabou por desenvolver-se sob a forma de diálogo socrático entre três personagens: Salviati, o indivíduo imbuído das novas ideias; Sagredo, o despoletador do diálogo; e Simplicio, o aristotélico simplista. Os dois primeiros portam os nomes de antigos amigos de Galileu, entretanto desaparecidos; são os dois personagens simpáticos.

Galileu partiu para Roma em 1631 com o manuscrito, para pedir autorização de publicação. Vinda esta (*Imprimatur*), ainda que insuficiente, Galileu publica o seu *Dialogo Intorno ai Due Massimi Sistemi del Mondo* (1632). O livro consiste numa hábil apologia de Copérnico, e constituiu um sucesso imediato.

O Papa fica furioso com a atitude de Galileu, sentindo-se traído. Galileu é chamado a Roma, conseguindo no entanto adiar a sua partida de Fevereiro de 1632 a Abril de 1633, sob pretexto de doença. Em Roma, é colocado num convento, e dá-se início ao processo. O caso tinha sido agravado pelas pressões da Corte Espanhola, e por intrigas visando convencer o Papa de que Simplicio era ele. Sendo o Inquisidor Geral um ex-aluno de Galileu, o Papa nomeou para a comissão de inquérito o seu próprio irmão, Antonio Barberini, para assegurar a idoneidade do processo.

A defesa de Galileu foi frouxa: argumentou que o *Dialogo* não era uma apologia do heliocentrismo e exibiu a carta de Bellarmino, parecendo esquecer-se da existência de arquivos. Os cardeais acharam-no suspeito de heresia a 22 de Junho de 1633, mas propuseram perdoar-lhe se ele abjurasse todos os seus crimes e se comprometesse a denunciar os heréticos que conhecesse. Desta vez o processo não foi mantido em segredo, e Galileu abjurou em público, na igreja de S. Maria, diante do colégio de cardeais e numerosa assistência. As actas do processo passaram por todas as universidades da Europa.

Em Julho de 1633, Galileu foi enviado sob prisão para o palácio do arcebispo de Siena,

Piccolomini. Este tenta recuperar Galileu, tratando-o muito bem e incitando-o a retomar os seus estudos e investigações em Física e Astronomia. Em Dezembro de 1633, Galileu é colocado em semi-reclusão na sua casa de Arcetri. Em 1634 morre-lhe a filha, Maria Celeste, o que muito o abala. A partir daí volta a trabalhar, recomeçando a corresponder-se com personagens importantes, como Pierre Gassendi e Mersenne.

É durante os seus últimos anos em Arcetri que Galileu redige a sua obra mais importante, e que é a expressão mais acabada das suas ideias: os *Discorsi e Dimonstrazioni Matematiche intorno a Due Nuove Scienze* (1638), saído em segredo de Arcetri e publicado na Holanda por Elsevier. No estilo dos *Dialogo*, a obra consiste num diálogo entre os mesmos três personagens.

Galileu cegara em 1637. Em 1638 a Inquisição autoriza Viviani, então com apenas 16 anos, a ir viver com Galileu para o acompanhar. Em 1641 juntam-se-lhes Torricelli e Castelli. Durante os seus últimos anos, Galileu ocupou-se a trocar correspondência e a formar os seus discípulos. Morreu a 8 de Janeiro de 1642, na companhia de Viviani. Os Médicis pretenderam erigir-lhe um mausoléu, cuja construção só foi autorizada pela Igreja em 1734.

8.3 Mecânica Galilaica

A obra mecânica de Galileu, exposta na sua completude nos *Discorsi*, apresenta notórias influências arquimédicas que o seu autor recebeu, essencialmente, de Ricci. Este não foi, porém, o único arquimédico da época. Galileu continua e ultrapassa Arquimedes, pois enquanto este considerara apenas a matematização do equilíbrio, Galileu tenta matematizar o movimento.

O anti-aristotelismo de Galileu assume características profundas: um tal programa de matematização da Física seria inconcebível para Aristóteles, que dividia as propriedades dos corpos em quantidades e qualidades, sendo que só as primeiras eram matematizáveis. Galileu rejeita a Física e a Metafísica aristotélicas e diz-se platónico (no sentido renascentista), isto é, contra Aristóteles. É importante fazer notar que as duas obras mais importantes de Galileu foram escritas sob a forma de diálogo. Koyré disse ser Galileu um platónico.

Os filósofos positivistas do início do século XX, entre os quais Mach, na sua *The Science of Mechanics*, tentaram fazer de Galileu um empirista. A tentativa saiu falhada: de facto, Galileu encontrava-se mais próximo de um platónico que de um empirista. O empirismo do século XVII só surgirá mais tarde, pois é necessário dispor primeiramente de uma teoria bem formulada, que permita pôr as questões a que a experiência possa responder.

Nesta empresa, Galileu teve ilustres predecessores, entre os quais Benedetti (que falhou no seu intento), o qual destruiu a distinção entre corpos leves e pesados: todos os corpos são pesados, sendo o facto de subirem ou descerem resultado da impulsão devida ao meio em que se encontram (princípio de Arquimedes).

Galileu começa por tentar matematizar a teoria do *impetus* – e, tal como Benedetti, falha. Discute, então, se o *impetus* é uma qualidade natural (gastando-se por acção do exterior) ou imposta (gastando-se por si mesma). Conclui que o *impetus* é imposto, e que um corpo que o possui tem a tendência natural para se libertar dele, tal como um corpo quente tende a arrefecer, ou um sino tende a ter extinto o seu ruído. Antes de

Galileu, Cardano afirmara que o *impetus* tende a permanecer no corpo, prefigurando, de certa forma, a lei da inércia.

Disse-se que a revolução científica do século XVII subiu aos céus com Copérnico, desceu à Terra com Galileu, e voltou a subir com Newton. O sistema aristotélico estabelecia um espaço ordenado, finito e limitado, centrado na Terra. Na nova Mecânica, e para pequenos intervalos de tempo, pode considerar-se que a Terra tem movimento uniforme e rectilíneo em relação ao Sol. Havia, no entanto, as objecções dos aristotélicos: se a Terra se move, por que razão não é possível detectar esse movimento (de que é exemplo o célebre problema do corpo lançado ao ar); e de Tycho, segundo o qual um tiro de canhão deveria ter diferentes alcances consoante fosse disparado para oriente ou ocidente, o que não se verifica. A resposta a estas objecções foi entrevista por Bruno, e consiste na *relatividade do movimento*.

É particularmente importante, e bastantes vezes referido no *Dialogo*, o estudo de referenciais que se deslocam com movimento uniforme e rectilíneo um em relação ao outro, como no célebre exemplo do barco e do cais (ver figura 8.5). Galileu argumenta

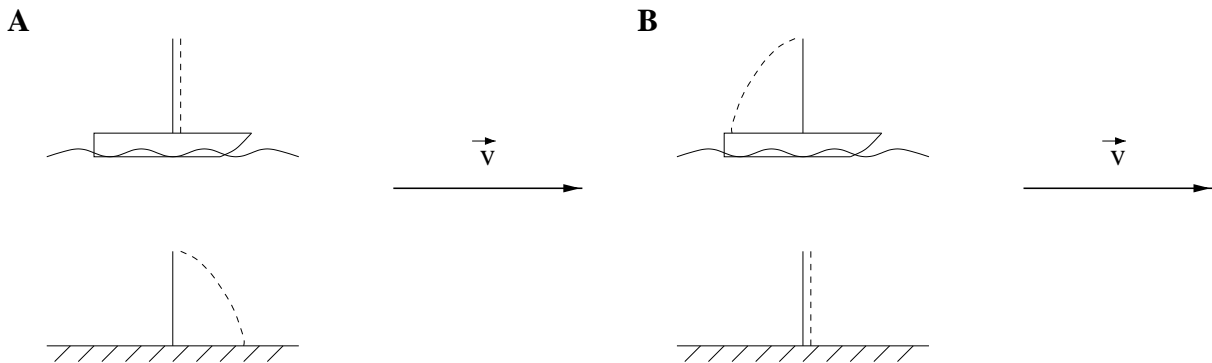


Figura 8.5: Movimento do barco em relação ao cais: os referenciais são galileanos. Em **A**, enquanto que um observador no barco vê a pedra cair ao longo do mastro, um observador em terra vê-a cair segundo uma parábola. Em **B**, se a pedra cair do topo do mastro em terra, um observador em terra vê-a cair na vertical, enquanto que um observador no barco a vê descrever uma trajetória parabólica.

que não há razão para privilegiar o barco ou a terra. O movimento não é intrínseco, mas uma propriedade de relação. Ao contrário da Física aristotélica, em que só o repouso era admitido como estado (aquele que permanece), Galileu admite também o movimento como estado, pelo menos em certos casos.

O movimento de queda de um corpo em relação à Terra é, então, a composição de um movimento vertical, natural (queda), com um movimento horizontal violento (deslocamento horizontal). Como podem sobrepor-se movimentos de natureza diferente? Como pode existir *impetus* só num dos referenciais? Tudo se inclina para o abandono do *impetus* e da distinção entre movimentos. Galileu conserva, no entanto, a palavra *impetus* com o sentido moderno de *momento*, a quantidade que não se gasta. A objecção de Tycho é, assim, desprovida de sentido, pois, sendo a Terra um referencial de inércia, não interessa o movimento desta (só interessa o movimento em relação ao Sol).

Segundo Galileu, o movimento de um corpo resulta sempre de algo que lhe é transmi-

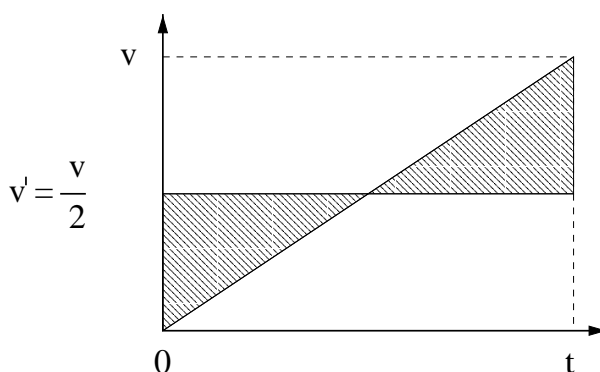


Figura 8.6: Demonstração de Galileu de que o espaço percorrido por um corpo em queda livre é proporcional ao quadrado do tempo decorrido desde o início do movimento. Pela regra de Merton, o espaço percorrido por um corpo em movimento uniformemente acelerado é igual ao espaço percorrido por esse mesmo corpo em movimento uniforme, com velocidade igual à velocidade média do movimento uniformemente acelerado. No caso de um corpo em queda livre que parte do repouso, a velocidade inicial é zero; se for v a velocidade ao fim do tempo t , a velocidade média é $v' = \frac{v}{2}$, e o espaço percorrido $\ell = v't = \frac{v}{2}t$. Como o movimento é uniformemente acelerado com aceleração a , tem-se $v = at$ e $\ell = \frac{1}{2}at^2$ (ver quadro 8.1).

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ℓ	1	4	9	16	25	36	49	64	81
$\Delta\ell$		3	5	7	9	11	13	15	17

Quadro 8.1: Em queda livre, os espaços percorridos em cada intervalo de tempo estão na proporção dos números ímpares, se os tempos estiverem na razão dos inteiros.

tido por outro corpo, com uma única exceção: o movimento de queda, que cria momento. Galileu não sabe qual é a causa disto, acha apenas que tal acontece porque todos os corpos são graves, e que o movimento de queda é fundamental, sendo a sua compreensão a base da compreensão do movimento, por sua vez chave da Física Nova. Ele propusera-se inicialmente tentar explicar o movimento; verificando ser incapaz de o fazer, contenta-se em descrevê-lo.

Galileu adopta, nesta altura, o *critério da simplicidade*, que tão frutuoso se vai mostrar: o movimento de queda faz-se da maneira mais simples, com a velocidade variando linearmente. Mas variando linearmente com o quê? A distância, o tempo? Galileu começou por admitir a primeira hipótese, tal como Descartes, por ser esta a mais natural. Mais tarde, viu que esta suposição conduzia a grandes dificuldades (o corpo nunca se poria em movimento). Admite em seguida que a velocidade seria proporcional ao tempo, e passa à lei dos espaços, descrevendo uma experiência de confirmação. A demonstração resulta da regra de Merton (ver figura 8.6). Mas a queda na vertical torna-se extremamente rápida. Na impossibilidade de uma verificação experimental directa, Galileu vai mostrar que a queda no plano inclinado obedece às mesmas leis que a queda livre, demonstrando ser $a = g \sin \alpha$. Observa que um corpo que desce um plano inclinado, tendo partido de uma dada altura inicial, alcança sempre a mesma altura noutra plano inclinado colocado

à frente do primeiro. Para fazer tal afirmação, baseia-se nos seus estudos sobre o pêndulo, que considera como uma sucessão de subidas e descidas ao longo de planos inclinados. De facto, o pêndulo atinge “sempre” a mesma altura, independentemente de quaisquer obstáculos que lhe sejam colocados no percurso (ver figura 8.7).

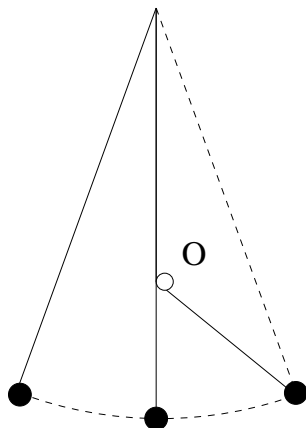


Figura 8.7: Um corpo animado de movimento pendular sobe “sempre” até à mesma altura, apesar do obstáculo O .

Galileu fez, ainda, o cálculo do movimento parabólico dos projecteis. Admitiu, contra o senso comum, a existência de inércia circular: se, no caso dos dois planos inclinados, o ângulo de inclinação do segundo plano for nulo, o corpo continuará para sempre em movimento no plano. Mas o plano é uma aproximação local de uma trajetória circular! Como resultado disto, Galileu considerou ser o universo finito, o que seria incompatível com a inércia rectilínea.

Diz-se, geralmente, que Galileu praticou um corte epistemológico, ao admitir coisas que sabia nunca se darem. Ele descreve, não as coisas, mas as “formas” platónicas, o mundo que ele geometrizou e simplificou, e que pretende descrever por intermédio de modelos. Modelos estes que tentarão, seguidamente, aproximar-se da descrição dos objectos reais.

Capítulo 9

Descartes

René Descartes (1596–1650) nasceu na Touraine e foi educado no colégio jesuíta de La Flèche, encontrando-se, com a idade de 20 anos, licenciado em direito civil e canônico. Já nessa altura olhava a Matemática como via para a verdade, pois constatara que a educação livresca que tinha recebido não lhe oferecia qualquer certeza.

Passou, seguidamente, algum tempo em Paris, onde levou uma vida frívola. Depois, achou que era altura de ganhar experiência da vida, para o que se alistou no exército de Maurits de Nassau. Na Holanda, encontra Beekman, com quem faz as primeiras pesquisas sobre a queda dos graves, desconhecendo os trabalhos de Galileu. Em 1619 alista-se no exército do duque da Baviera, e tem os seus três famosos sonhos. A seguir, viaja pela Europa, procurando adquirir conhecimentos das pessoas simples e da natureza. Seguidamente, volta a Paris, mas logo se transfere para os Países-Baixos, dado o clima de maior liberdade que aí então se respirava. Vive na Holanda de 1628 a 1649, uma vida pacata, dedicada ao estudo, às investigações experimentais, e ao auxílio das pessoas humildes, a quem ensinava o que sabia.

Apesar de todas as suas tentativas para não dar nas vistas, torna-se notado por trocar correspondência com Mersenne, que nessa altura desempenhava o papel de revista científica, correspondendo-se com todos os estudiosos da época (era, além disso, um dos partidários de Galileu). Para citar um exemplo, Pascal foi influenciado pela obra de Torricelli, cuja notícia lhe foi dada por Mersenne.

Descartes acabou por se tornar famoso e atrair as atenções. Os protestantes mais radicais acusaram-no de blasfémia e ateísmo. Acabou por aceitar, a contragosto, um convite da rainha da Suécia para ir residir em Estocolmo. A sua saúde frágil não resistiu ao rigoroso clima sueco: morre em 1650.

Nos começos da década de 1630, Descartes preparava o seu tratado *Le Monde*, onde expunha as suas conclusões científicas e fazia a apologia do copernicianismo. A condenação de Galileu em 1633 assustou-o de tal modo que este tratado só foi publicado postumamente, em 1667. Para compensar, Descartes escreveu o *Discours de la Méthode pour bien conduire la Raison et chercher la Verité dans les Sciences* (1637). Este servia de prefácio a três textos científicos, e começa com a célebre e irónica frase, “O bom senso é a coisa do mundo mais bem partilhada”. O *Discours* é uma manifestação do mecanicismo, da burguesia e da sua nova mentalidade. Nele são apresentadas as famosas regras, entre as quais “nada admitir como verdadeiro sem o ter compreendido como tal”, o que constitui uma quebra com a tradição de autoridade. As outras regras são inspiradas pelo matemático. Descartes oferece uma resposta ao cepticismo do século XVII (Montaigne),

apresentando a dúvida metódica como base da procura da verdade.

Os três ensaios que acompanham o *Discours*, e que, na altura, suscitaram mais interesse do que este, são a *Dióptrica*, os *Meteoros*, e a *Geometria*. A *Dióptrica* é um ensaio sobre instrumentos de óptica onde aparece, pela primeira vez, a lei da refacção. Não se sabe se Descartes a terá descoberto independentemente de Snell. Os *Meteoros* são uma tentativa de explicação dos fenómenos meteorológicos. A *Geometria* trata da Geometria Analítica, que não é exclusivamente obra de Descartes (pense-se no Merton College, em Fermat . . .). Os dois *Discursos* (de Descartes e Galileu) são escritos em língua vulgar, procurando um público mais vasto, e publicados quase ao mesmo tempo (1637 e 1638, respectivamente). Descartes leu os *Diálogos*, mas, devido ao seu orgulho intelectual, manteve-se sempre desconfiado da obra de Galileu, cujos resultados integrou, no entanto, na sua metafísica do conhecimento. Mais tarde, Huygens e Newton irão negar ter recebido ensinamentos de Descartes.

A Física Cartesiana encontra-se exposta no livro *Principia Philosophiae* (1641), escrito em latim. A ideia fundamental de Descartes é a identificação de matéria e espaço, e a desconfiança do testemunho sensorial. Tenta, além disso, fazer uma geometrização do universo, ensaiando a sua matematização. Nega a existência do vazio (a que chama a encarnação do nada) e o atomismo (pois uma figura geométrica é infinitamente divisível). O atomismo havia ressurgido no século XVII com Pierre Gassendi, o pai do atomismo moderno, que realizara estudos sobre Epicuro. Descartes, à maneira de Einstein, descreve o universo em termos de figuras e movimento.

Antes de Descartes, só Bruno se tinha apercebido da relatividade do movimento, ao vislumbrar a inexistência de referenciais privilegiados: o movimento é sempre de um corpo em relação a outros. Sendo relativo, o movimento não se pode distinguir do repouso. Um movimento, o movimento uniforme e rectilíneo, é privilegiado – o que leva ao *Princípio da Inércia*. O espaço Cartesiano, fundado sobre a estrutura da recta, não é limitado. É indefinido e não infinito, pois só Deus é infinito (o que é comparável à distinção que hoje se faz entre infinito actual e potencial). Surge, por esta altura, o sério problema da acção de Deus no mundo. Para explicar o movimento dos astros, Descartes recorre ao arrastamento por turbilhão.

A Física de Descartes é uma física do choque. A este respeito, Descartes enuncia sete regras, das quais só a primeira não é falsa, dado o seu prematuro tratamento do problema. Essa regra afirma que dois corpos de igual massa, chocando frontalmente com iguais velocidades, trocam as suas velocidades aquando do choque. Mais tarde, a Royal Society pôs o problema a concurso, ao qual responderam Wren, Wallis e Huygens, sendo o tratamento do último o melhor. É, no entanto, notável que Descartes se tenha apercebido da falsidade das suas regras – estas, dizendo respeito a corpos ideais, não podiam, evidentemente, ser verificadas por corpos reais. Isto mostra ter Descartes assimilado bem os ensinamentos de Galileu, segundo o qual a ciência pretende descrever não os objectos, mas os seus modelos matemáticos.

A teoria do choque de Descartes deriva da noção de quantidade de movimento, a respeito da qual comete dois erros: não considerar a velocidade como um vector, e não saber o que é a massa. A este respeito é suscitada a querela das forças vivas, entre os partidários de Descartes, que pretendiam que se conservava mv , e os de Leibniz, que preferiam a conservação de mv^2 (a *força viva*). Newton, por seu lado, mostrou-se hostil aos princípios de conservação.

Começa por essa altura a decrescer a confiança na magia natural e a aparecer a nova

mentalidade, aumentando o número de autores de tratados de Física. Destes, o mais célebre foi Rouhault (1675). Na Inglaterra, ensinou-se primeiro Descartes, e só depois Newton. Quanto à Europa Continental, só na década de 1730 se impôs o Newtonianismo.

Capítulo 10

Física experimental e Química no século XVII

10.1 Física experimental

O desenvolvimento da Física experimental no século XVII só foi possível após os grandes progressos epistemológicos e técnicos realizados, pois pressupõe a possibilidade de fazer perguntas teóricas à natureza, às quais a ciência vai responder. É fundamental salientar, neste período, o aparecimento de novos instrumentos científicos. De entre estes, refira-se em especial a luneta, inventada empiricamente por ópticos holandeses por volta de 1604, e que sofrerá grandes progressos com Newton e Huygens, o primeiro dos quais a transformará em telescópio. Outra grande invenção da altura foi o microscópio (Holanda, *circa* 1615), se bem que os primeiros não fossem operacionais, e isto até à segunda metade do século XVII. O microscópio exerceu uma influência negativa na Biologia, pois contribuiu para atrasar a rejeição da hipótese da geração espontânea. Outros instrumentos foram o termómetro, o barómetro, a máquina pneumática, a máquina electrostática (que tanta influência vai ter na Física do século XVIII), o pêndulo (com o qual surge, com Huygens, o relógio moderno), e o prisma óptico.

Consideremos, em primeiro lugar, o termómetro. Já os Helenistas sabiam construir instrumentos grosseiros para medir a temperatura. Na *Pneumatica* de Hierão é descrito um “termómetro”, consistindo numa gota de água colocada no gargalo estreito de uma garrafa, e que se moveria para baixo ou para cima com a contracção ou dilatação do ar. No entanto, tal instrumento constituía apenas um termoscópio, pois ninguém nunca se lembrara de o graduar, visto que, segundo Aristóteles, o calor e o frio são qualidades, logo não matematizáveis. Sabe-se hoje que Galileu conheceu o termoscópio de Hierão.

Os Galilaicos, discípulos de Galileu (Borelli, Viviani, Cavalieri...), fundaram em Florença, após a morte do mestre, a Academia del Cimento (Academia das Experiências), com a protecção do duque da Toscana e do irmão deste, o Grão-Duque Leopoldo. Esta academia, cuja existência foi curta (1657–1665), renunciou instituições similares, como a Royal Society (1660/62) ou a Académie Royale des Sciences (1667 por Louis XIV), que sobrevivem até hoje.

O termómetro foi, portanto, uma invenção dos Galilaicos. Consistia num recipiente esférico, de vidro, com um tubo fino, semi-cheio de líquido, liso ou enrolado, para medir as variações de temperatura. Para que a pressão atmosférica não interferisse com os resultados da medição, o gargalo era obturado. O termómetro era graduado pela definição

de dois pontos fixos, aos quais se atribuíam temperaturas arbitrárias.

O termómetro difundiu-se lentamente, devido a não haver acordo quanto à substância termométrica, nem quanto aos pontos fixos, nem à escala, de modos que, em meados do século XVIII, existiam na Europa ainda cerca de 60 escalas termométricas. Duas delas vão, no entanto, impor-se: Celsius e Fahrenheit. Celsius, astrónomo sueco, tomou (1742) como pontos fixos as temperaturas de fusão do gelo e de ebulição da água, dividindo o intervalo entre elas em 100 partes (provavelmente a conselho de Lineu). Fahrenheit, um operário siderúrgico alemão natural de Danzig, tomou como ponto zero a temperatura de uma mistura frigorífica (água, amónia, gelo), e como ponto 96° a temperatura do corpo humano. Só no século XIX será introduzida a escala de Kelvin, com bases científicas.

Entretanto, os Galilaicos haviam-se entregado a variadas experiências com o termómetro: duas quantidades iguais de líquidos diferentes não fundiam iguais quantidades de gelo (calores específicos); e um termómetro colocado num recipiente com gelo colocado em água a ferver continuava a marcar zero. Isto era, à época, incompreensível.

Passemos, seguidamente, ao barómetro. Já nos *Dialogo* de Galileu se encontra a afirmação de que as bombas não puxam a água acima de uma dada altura, problema que Galileu não soube resolver. Ele terá sido o primeiro, no entanto, a provar que o ar tem peso, pesando um balão cheio e vazio, o que influenciou imenso os galilaicos.

Evangelista Torricelli (1608–1647), um Galilaico afastado da Academia, teve a ideia de que a subida da água numa bomba aspirante é consequência do peso do ar que se exerce sobre a superfície do líquido no poço: a bomba não aspira, apenas cria condições para que o ar empurre a água. Com a água tem-se uma coluna de 10 m de altura, pouco manejável; se a densidade do líquido fosse maior, este subiria menos, pois o princípio deveria ser válido para todos os líquidos. Torricelli usou então o mercúrio, argumentando que o peso da coluna de mercúrio é igual ao exercido pelo ar sobre a superfície do mercúrio na tina. Esta ideia foi mal acolhida, uma vez que não se aceitava então que o ar exercesse peso que não era sentido. Além disso, surge com esta experiência o problema do vazio barométrico de Torricelli, que este provou ser atravessado pela luz e fazer rebentar um balão aí colocado.

Otto von Guericke (1602–1686), foi conselheiro de Friedrich-Wilhelm e burgomestre de Magdeburgo. Hábil como diplomata e engenheiro, inventou as máquinas pneumática e electrostática. Segundo ele, Deus, na sua infinita potência, não proibiria o vazio; então, enchendo um barril com água, e retirando-a em seguida, obter-se-ia o vazio. Isto não resultou, pois entrava sempre ar ou água (se se colocasse o barril dentro de água). Experimentou a seguir com uma esfera de cobre, que rebentou; com uma outra mais resistente, teve êxito. O rebentamento da esfera, porém, parecia confirmar a tese de Descartes segundo a qual dois corpos separados por nada tendem a juntar-se.

Guericke concebeu mais tarde uma bomba com a qual retirava directamente o ar e não a água. Assim, introduziu na esfera ratos e balões, verificando que os ratos morriam e os balões estoiravam. Utilizou também a sua esfera, munida de uma torneira, como barómetro qualitativo.

Em 1654 a Dieta reuniu-se em Regensburg. Guericke aproveitou a oportunidade para apresentar três experiências:

1. Fazer o vazio numa esfera e ligá-la a um garrafão: a pressão no garrafão cai e este estoira.
2. Hemisférios de Magdeburgo.

3. Granadeiros do Imperador.

Informado, por um frade, das experiências de Torricelli, Guericke construiu uma grande coluna de mercúrio, na superfície da qual flutuava um boneco, e inaugurou assim o primeiro serviço meteorológico. Contudo, acabou por se desentender com o seu administrador, vindo a morrer, só, em Hamburgo.

Blaise Pascal (1623–1662) foi um nome célebre das letras e das ciências francesas. Ocupou-se de ciência até aos 30 anos, após o que se dedicou a questões religiosas (querela dos Jesuítas e Jansenistas). Foi um dos fundadores do cálculo das probabilidades, cuja ideia lhe surgiu do problema do jogo de cartas de M. de Méré. Construiu, além disso, a primeira máquina de calcular, mecânica e capaz de realizar as quatro operações. Foi considerado um menino prodígio.

Em 1644, Pascal tomou conhecimento, através de Padre Mersenne, da experiência de Torricelli, que repetiu. Em 1648 fez verificar, pelo seu cunhado, a variação da pressão entre a base e o cume de uma montanha de cerca de 1 000 m, o Puy-de-Dôme, registando-se uma diferença de cerca de 8 cm. Pascal repetiu mais tarde esta experiência, na torre St.-Jacques, em Paris, tendo medido uma diferença de cerca de 1 mm. Tais resultados permitiram-lhe argumentar que o horror ao vazio não era o mesmo ao nível do mar que a uma altitude elevada, e propor o uso do barómetro como altímetro.

Pascal reclamou ainda ter realizado uma experiência em que teria colocado um tubo de Torricelli no vazio barométrico de outro tubo, o que é falso, pois uma tal experiência é de difícil realização, mesmo com a técnica actual. No domínio da hidrodinâmica, publicou o *Traité de l'Equilibre des Liqueurs*, onde expõe o seu Princípio, que apresenta como paradoxo (ver figura 10.1).

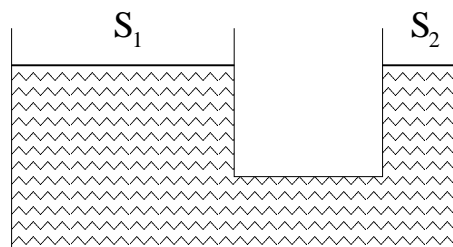


Figura 10.1: Princípio de Pascal: sejam dois vasos comunicantes cheios de fluido; as áreas das superfícies fluidas expostas são S_1 e S_2 , nas quais estão aplicadas as forças F_1 e F_2 , respectivamente. A condição de equilíbrio corresponde a aplicar forças diferentes em cada superfície, dadas por $\frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1}{S_2}$.

$$\left. \begin{array}{l} F_1 = pS_1 \\ F_2 = pS_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1}{S_2}.$$

Robert Boyle (1627–1691), irlandês, filho do conde de Cork; tímido, discreto e metódico, teve uma vida regrada e dedicada ao estudo. Utilizou a sua fortuna para financiar as suas pesquisas, e colocou a sua biblioteca particular à disposição da comunidade. Foi um continuador de Guericke, que teve como empregados Denis Papin e Robert Hooke. Durante algum tempo presidente da Royal Society, demitiu-se devido às imposições mundanas do cargo.

10.2 Química

Regressando à História da Química, importa dizer que Paracelso mais não tinha feito que inventar uma nova Alquimia. Contudo, a sua insistência na Iatroquímica fez aumentar espectacularmente o número de investigadores em Química, donde resultou uma larga abundância de conhecimentos empíricos. Até ao Renascimento, as substâncias eram divididas em ácidos e sais; o primeiro ácido a ser conhecido foi o ácido acético, seguido, na Idade Média, pelos ácidos nítrico e sulfúrico, este último conhecido por óleo de vitríolo. O ácido clorídrico, sendo volátil e obtido pela acção do ácido sulfúrico sobre o sal das cozinhas, foi denominado espírito do sal. Entre os espíritos contavam-se ainda o álcool e a amónia, de forma que, no final do Renascimento, já havia metais, vitríolos, espíritos e boráx.

Jean-Baptiste van Helmont (1577–1644), médico holandês possuído da magia natural, afirmou que o elemento subjacente a tudo era a água, tendo realizado, para o comprovar, a sua famosa experiência: plantou um choupo pequeno num vaso com terra; ao fim de cinco anos, este tinha crescido formidavelmente; como Van Helmont só o tinha regado, concluiu que a água se transformara em madeira. Segundo ele, tudo seria feito de água, mas, para que esta se transformasse em metal, seria necessário algo a que chamou “espírito seminal dos metais”. Inventou ainda o alkaest, uma substância hipotética capaz de dissolver tudo, e a palavra “gás”, que utilizou a propósito do espírito silvestre (o metano dos pântanos). Para ele, o gás era um princípio, e não uma substância; os gases reais eram chamados “ares”.

Voltemos a Boyle. Este publicou uma obra crítica, *The Skeptical Chemist*, onde apresenta a Química como uma ciência autónoma, sujeita ao método experimental, e chama a atenção para a falta de rigor das definições. Mostra que as doutrinas alquímicas estão erradas, que o fogo é corporal, e que não há razão para que terra, água ou ar sejam substâncias simples. Define corpo simples como aquele que não pode decompor-se, embora observe que aquilo que extraímos de um corpo composto possam não ser corpos simples: atomista que era, reparara que os resultados da decomposição de um corpo complexo variam consoante o método utilizado.

Boyle realizou a sua famosa experiência visando provar a elasticidade do ar, que ele descreveu como um conjunto de pequenos corpos elásticos duros (ver figura 10.2). Realizou ainda uma outra experiência, que considerou fundamental: encerrar um barómetro de Torricelli num recipiente do qual se extrai o ar com uma máquina pneumática, tendo observado que o mercúrio descia a cada bombada da máquina. Taunley, um outro figalgo, interessou-se pelo barómetro e sugeriu a Boyle a lei $pV = \text{const.}$, a que Boyle não atribuiu grande importância, e que seria reencontrada mais tarde por Mariotte.

Observe-se que grande parte do sucesso de Boyle se deveu ao extraordinário talento como experimentador do seu assistente, Hooke.

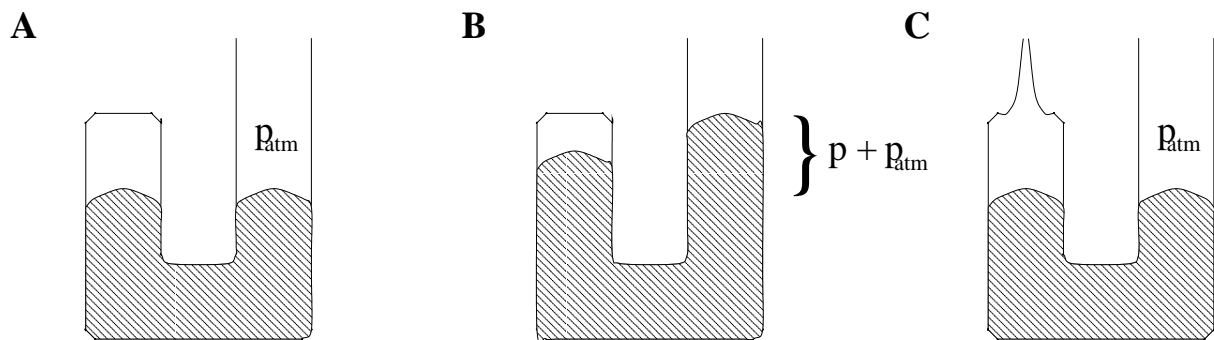


Figura 10.2: Experiência de Boyle para demonstrar a elasticidade do ar. Inicialmente (A) o ar dentro da extremidade fechada do tubo encontra-se à pressão atmosférica p_{atm} . Em B, aumenta-se a pressão para $p + p_{atm}$ adicionando mais mercúrio. A elasticidade do ar aumenta quando a pressão aumenta – o ar resiste mais. Finalmente (C), restabelece-se a pressão atmosférica ligando a extremidade fechada do tubo a uma máquina pneumática.

Capítulo 11

Huygens

Christiaan Huygens (1629–1695), holandês, de família abastada, interessada cultural e artisticamente, recebeu uma educação esmerada e teve grandes oportunidades. Descartes ia a sua casa com frequência, embora a posição de Huygens se aproxime mais da de Galileu do que do Cartesianismo. Teve a ciência como paixão desde tenra idade.

No campo da Matemática, publicou o primeiro tratado sobre o cálculo das probabilidades, intitulado *Os Cálculos dos Jogos de Azar*. Como astrónomo, revelou-se grande polidor de lentes (juntamente com o irmão) e identificou os anéis de Saturno. As suas investigações nos domínios da Óptica e da Mecânica tiveram importantes implicações técnicas, a ponto de Koyré ter afirmado tal evidência como óbvia.

Começou nesta altura a dar-se importância à medida rigorosa do tempo, com a finalidade de determinar as efemérides astronómicas e a longitude dos barcos no mar. De facto, a navegação tornara-se uma actividade vital à economia. Sabia-se medir a latitude, a partir da altura de algumas estrelas, mas a longitude necessitava de ser determinada com um relógio e um almanaque: o almanaque dava a hora do nascer do Sol na cidade de partida e, consoante o atraso, medido com o relógio, com que o Sol nascesse no mar (15° correspondem a uma hora), podia calcular-se a longitude. Ora os relógios da época, embora existindo desde a Idade Média, eram muito maus. Huygens tentou construir um bom relógio de pêndulo, a partir de considerações teóricas, e com a ajuda de um relojoeiro. Em 1667 surge o primeiro relógio moderno, cuja patente Huygens concede ao relojoeiro. Este relógio, porém, não servia para determinar a longitude, pois só era isócrono para pequenas oscilações, sendo portanto afectado pelo balanço dos barcos. Huygens procurou então construir o verdadeiro pêndulo: uma vez que o período do pêndulo é $T = 2\pi\sqrt{l/g}$, este permite medir variações de g , e depende também do comprimento, l . Huygens teve a ideia de fazer variar T mudando l , colocando uma esfera para o impedir de ter oscilações demasiado amplas (ver figura 11.1a). assim, quando o ângulo de abertura ultrapassasse o valor θ , o movimento passaria a ser em torno do ponto B , com o comprimento do pêndulo correspondentemente diminuído. Huygens concluiu ainda que, para melhor compensar a variação da amplitude e permitir uma melhor dedução do tempo, a esfera deveria ter a forma de uma cicloide (ver figura 11.1b). No decurso dos seus estudos sobre o pêndulo, Huygens inventou aquilo a que Euler vai chamar o centro de massa, bem como a *força viva* (*vis vitalis*), mv^2 .

A Huygens devem-se os primeiros estudos sobre o movimento circular e a força centrífuga, tendo ele demonstrado que a aceleração $j_c = \omega^2 r$, onde ω é a velocidade angular e r o raio da trajectória. Considerem-se primeiramente dois corpos que descrevem uma cir-

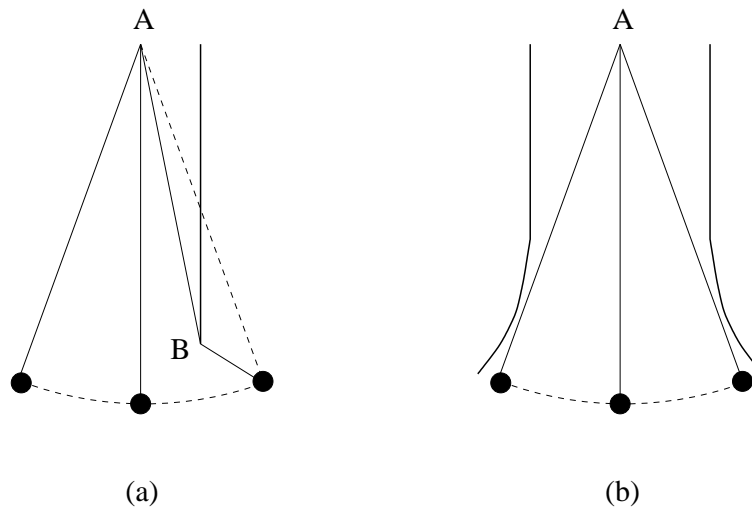


Figura 11.1: Pêndulo de Huygens.

cunferência de raio r_1 , com velocidades v_1 e v_2 (ver figura 11.2). Para um deslocamento

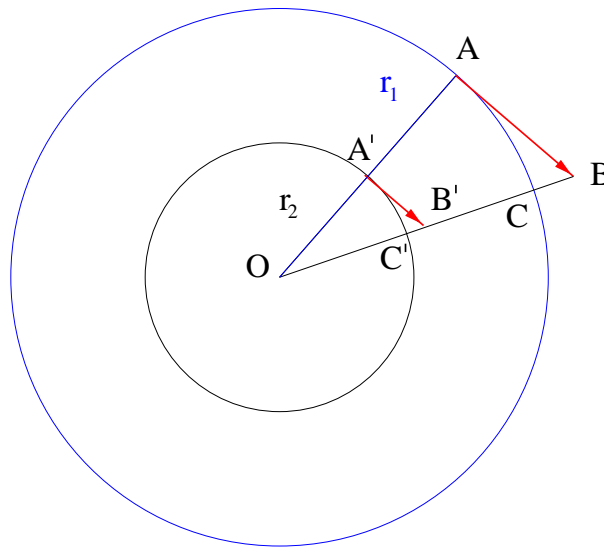


Figura 11.2: Demonstração de Huygens relativa à aceleração centrípeta do movimento circular uniforme.

infinitesimal, pode considerar-se o seu movimento como composto de dois movimentos: um, uniforme e retilíneo, tangente à circunferência; e outro, uniformemente acelerado, dirigido segundo o raio. Então, a distância \overline{AB} vai ser percorrida por cada um dos móveis ao longo da tangente à circunferência (em movimento uniforme), nos intervalos de tempo Δt_1 e Δt_2 , respectivamente:

$$\overline{AB} = v_1 \Delta t_1 = v_2 \Delta t_2 \Rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}.$$

De igual modo, distância \overline{BC} percorrida ao longo do raio (em movimento acelerado) é:

$$\overline{BC} = \frac{1}{2}j_1(\Delta t_1)^2 = \frac{1}{2}j_2(\Delta t_2)^2 \Rightarrow \frac{j_1}{j_2} = \left(\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}\right)^2.$$

Das duas equações anteriores tem-se que

$$\frac{v_1^2}{v_2^2} = \left(\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}\right)^2 = \frac{j_1}{j_2} \Rightarrow j \propto v^2 \quad \text{ou} \quad j \propto \omega^2.$$

Suponhamos agora que um dos corpos descreve a circunferência de menor raio, r_2 . Então:

$$\frac{\overline{AB}}{\overline{A'B'}} = \frac{r_1}{r_2}.$$

Uma vez que $\overline{A'B'} = v'\Delta t'$, tem-se que

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t'} = \frac{v'r_1}{v_1r_2} \Leftrightarrow \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t'}\right)^2 = \frac{(v')^2r_1^2}{v_1^2r_2^2}.$$

Por outro lado, $\overline{B'C'} = \frac{1}{2}j'(\Delta t')^2$ acarreta

$$\frac{\overline{BC}}{\overline{B'C'}} = \frac{r_1}{r_2} \Leftrightarrow \frac{j'(\Delta t_1)^2}{j'(\Delta t')^2} = \frac{r_1}{r_2}.$$

Das duas equações anteriores tomadas em conjunto tem-se finalmente

$$\frac{j_1}{j'} = \frac{v_1^2/r_1}{(v')^2/r_2} \Rightarrow j = \frac{v^2}{r}.$$

Por essa altura é posto a concurso, pela Royal Society, o problema do choque. A este respondem Wallis, Wren e Huygens, sendo o tratamento deste último o mais interessante, embora só considere o choque elástico. Huygens formulou uma teoria axiomática do choque, tendo como bases os princípios da inércia e da relatividade clássica, e a primeira regra de Descartes para o choque. Com efeito, desta regra segue-se que dois corpos A e B colidindo frontalmente trocam de velocidades (ver figura 11.3). Seja agora $A = B$

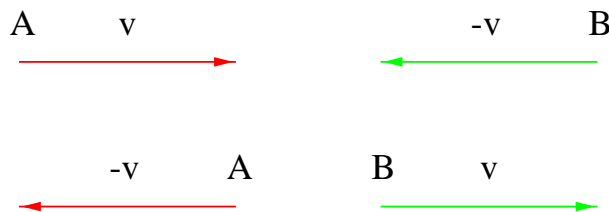


Figura 11.3: Primeira regra de Descartes: dois corpos colidindo frontalmente trocam de velocidades.

e B parado (ver figura 11.4). Considerando um referencial S' com velocidade $v/2$, vem que, para um observador nele situado, ambos os corpos se movem em sentidos opostos

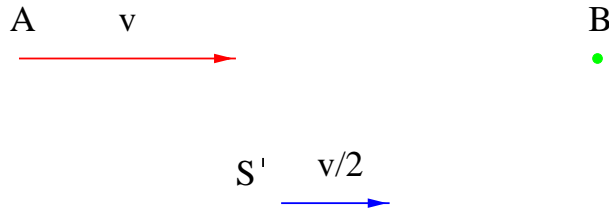


Figura 11.4: Corpos A (movendo-se com velocidade v) e B (parado) vistos por um observador em repouso. O referencial S' move-se com velocidade $v/2$.



Figura 11.5: Corpos A (movendo-se com velocidade v) e B (parado) vistos por um observador situado no referencial S' .

com velocidades $v/2$ e $-v/2$ (ver figura 11.5), Sendo $A = B$, este caso reduz-se ao anterior. Escolhendo devidamente o referencial S' , podem reduzir-se problemas deste tipo ao primeiro caso.

Huygens retomou as pesquisas de Galileu sobre o plano inclinado, o que ilustra a sua assimilação da nova Mecânica. Em 1673 publica *Horologium Oscillatorium*, onde inclui a ideia de que a força é proporcional à aceleração, embora fale apenas de acelerações. A massa, com a qual se pode escrever a relação $F = mv^2/r$, só vai ser definida por Newton, em termos aliás contraditórios.

A respeito de Newton, convém salientar que a lei do inverso do quadrado da distância era evidente, para Hooke e Huygens, após o estudo do movimento circular, e é quase certo que estes dois cientistas sabiam da lei da atracção universal. O mérito de Newton consistiu essencialmente em demonstrar a validade da lei para órbitas elípticas:

$$\left. \begin{aligned} F &= m\omega^2 R \\ \omega &= \frac{2\pi}{T} \end{aligned} \right\} \Rightarrow F = \frac{4\pi^2 m R}{T^2}.$$

Mas, segundo Kepler, $T^2/R^3 = \text{const.}$, logo

$$F = \frac{4\pi m}{R^2} \times \text{const.}$$

Pelo princípio da acção e reacção, tem-se

$$F = k \frac{mm'}{R^2}.$$

Surgem nesta época os primeiros observatórios astronómicos (Paris em 1672, Greenwich em 1675).

Capítulo 12

A Óptica no século XVII

O aspecto mais importante da história da Óptica no século XVII foi a descoberta da lei da refração, uma vez que a da reflexão já se encontrava em Euclides. A lei parece ter sido descoberta por um holandês, de nome **Snell van Reuen**, mas manteve-se desconhecida até Descartes a mencioná-la na *Dióptrica* em 1637. Descartes não só a apresenta, como tenta deduzi-la de uma hipótese *a priori*: a luz propaga-se com velocidades diferentes nos diferentes meios. Ao passar de um meio para outro (por exemplo, do ar para a água), exerce-se sobre a luz uma força que só tem componente normal ao plano de separação – logo só altera a velocidade vertical da luz – o que vai fazê-la aproximar-se da normal. Da figura 12.1 tem-se

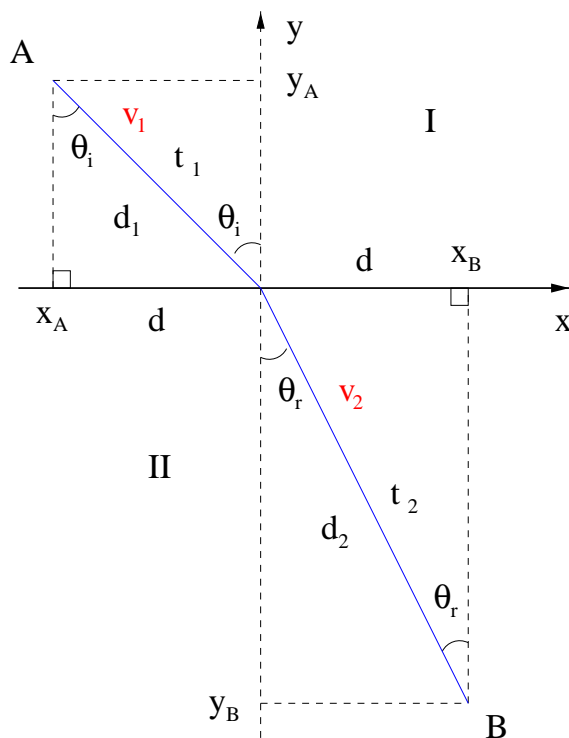


Figura 12.1: Refracção da luz na superfície separadora dos meios I e II.

$$d \propto v_1 \sin \theta_i,$$

$$d \propto v_2 \sin \theta_r.$$

Dividindo membro a membro, vem

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{v_2}{v_1},$$

donde se segue que a velocidade da luz seria tanto maior quanto mais denso fosse o meio. Para justificar esta afirmação, Descartes apresentou um argumento tirado da vida quotidiana: uma bala de pistola disparada contra um bloco de madeira penetra mais profundamente nele do que num barril com alcatrão. Afirmou-se ainda partidário de uma teoria corpuscular da luz, segundo a qual esta seria constituída por corpúsculos de matéria luminosa movendo-se entre os corpúsculos do éter. Estas ideias vão ser mais tarde retomadas por Newton.

Pierre de Fermat (1601–1665), magistrado no sul da França, ocupa os seus ócios, aliás numerosos, a fazer ciência. Foi um dos fundadores do cálculo das probabilidades (com Huygens e Pascal), disputou com Descartes a descoberta da Geometria Analítica; e foi precursor da teoria dos números e do cálculo diferencial, sendo o primeiro a calcular máximos e mínimos de funções. No campo da Física, propõe o primeiro princípio variacional da História – o Princípio de Fermat: Deus criou o mundo de modo que a luz vai gastar o menor tempo possível para ir de A a B. Neste caso, a linha recta não é o caminho mais curto! Senão, consideremos novamente a figura 12.1:

$$d_1 = v_1 t_1 \Rightarrow t_1 = \frac{d_1}{v_1} = \frac{\sqrt{x_A^2 + y_A^2}}{v_1},$$

$$d_2 = v_2 t_2 \Rightarrow t_2 = \frac{d_2}{v_2} = \frac{\sqrt{x_B^2 + y_B^2}}{v_2}.$$

Para que o tempo total gasto no percurso, $t = t_1 + t_2$, seja mínimo, tem de ter-se $t' = 0$, donde se segue, pelas equações anteriores e notando que $x_A = x_B = d$, que

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{v_1}{v_2},$$

Fermat prevê então, ao contrário de Descartes, que a luz viaja mais lentamente nos meios mais densos. E é ele que tem razão, como se descobrirá mais tarde. Ora o único meio de apaziguar esta disputa era medindo a velocidade da luz, empreendimento já tentado, sem êxito, por Galileu. Descartes sugeriu o recuso à Astronomia: se a velocidade da luz, c , é finita, isso deve poder detectar-se, por exemplo, pelas fases da Lua. Nada conseguiu provar, pois a distância da Terra à Lua é demasiado pequena, afirmando portanto que a velocidade da luz parecia infinita (o que era incoerente com a sua lei da refacção).

Olaf Römer, um dinamarquês, aprendiz no observatório de Paris, ocupava-se dos satélites de Júpiter quando se apercebeu (1675) de que o período destes variava se as observações fossem suficientemente espaçadas. Por sugestão de Cassini, Römer considerou a variação máxima do período ΔT (996 s) como correspondendo à situação em que Júpiter e a Terra se encontravam em oposição (isto é, com o Sol entre eles, todos os três astros sobre uma linha recta), de modo que ΔT cresceria à medida que a Terra se afastasse de

Júpiter, e diminuiria no caso contrário. Tomando o máximo de ΔT como o tempo que a luz demoraria a percorrer duas vezes o raio da órbita terrestre, Römer achou $c = 327\,000$ km/s. Observe-se que só em 1849, com Fizeau, vai ser possível medir c no laboratório.

No campo da Óptica experimental, **Francesco Maria Grimaldi** (1618–1663), frade e professor de Física, recebeu num quarto um feixe de luz do Sol através de um orifício pequeno, com o que obteve uma grande mancha, o que contradizia a propagação rectilínea da luz. Colocando no feixe um objecto pequeno, não se obtinha uma sombra pequena, mas sim grande, rodeada de franjas claras e escuras, raiadas de côr. A sobreposição de vários feixes provoca estranhos fenómenos (difracção), cuja descrição Grimaldi publica sem saber interpretar.

Observam-se então também fenómenos de interferência, ligados aos célebres “anéis de Newton”. Estes já tinham sido observados por Boyle e Hooke, tendo este último reclamado a sua descoberta. Data daí a primeira querela entre Newton e Hooke, tendo o primeiro jurado nada mais publicar sobre Óptica até à morte do segundo (de facto, o livro *Opticks*) só sai em 1704, tendo Hooke morrido em 1703). A interpretação correcta da interferência só será feita por Young.

Erasmus Bartholinus (1625–1698) observou a dupla refacção num cristal de espató de Islândia (calcite): um raio de luz que entra no cristal refracta-se de acordo com as leis de Snell, mas surge um segundo raio que não obedece às leis da refacção. Descobriu-se em seguida que a maior parte das substâncias cristalinas são bi-refringentes (com a excepção das que cristalizam no sistema cúbico).

Por esta altura (fim do século XVII) as ideias sobre a natureza da luz eram fundamentalmente de dois tipos: corpusculares e ondulatórias. Huygens mostrou-se adepto da teoria ondulatória; Newton, após hesitação, virou-se para os corpúsculos.

A teoria de Huygens era brilhante e baseada no Princípio de Huygens: qualquer ponto de uma fonte luminosa é a origem de uma pequena onda de luz. Todas as ondículas formam a frente de onda, propagando-se como se mais nenhuma onda existisse. Huygens avança como argumento as suas pesquisas sobre o choque elástico, baseadas numa curiosa concepção de “éter às bolas” (ver figura 12.2): a esfera A, batendo em B, põe B em

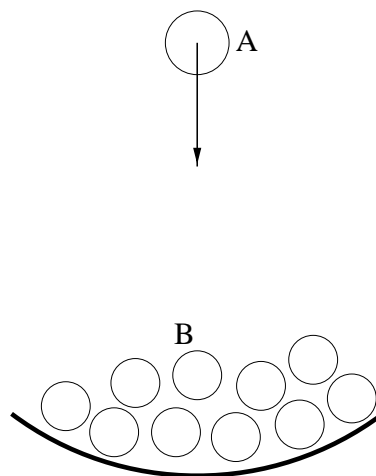


Figura 12.2: Princípio de Huygens explicado em termos do “éter às bolas”: o éter seria constituído por corpúsculos obedecendo às leis do choque.

movimento. Mas, como B está rodeada de esferas de éter, estas vão ser por sua vez postas em movimento, originando uma frente de onda esférica. Huygens explica parcialmente a dupla refração, admitindo que um cristal é um meio anisótropo, de modo que se criam ondas de formas diferentes nas diferentes direcções. Finalmente, fornece mesmo construções geométricas para a refração e reflexão (ver figura 12.3).

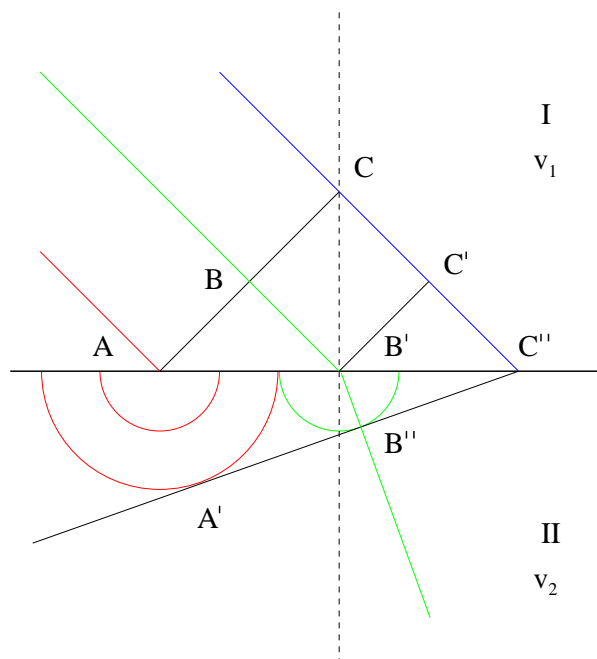


Figura 12.3: Explicação da refração por meio do Princípio de Huygens. No meio I, onde a velocidade da luz é v_1 , a frente de onda é o segmento $[AB]$. A luz atinge primeiro a superfície no ponto A, que se torna origem de uma ondícula propagando-se no meio II, com velocidade v_2 . Quando o ponto A é atingido, o raio de luz verde ainda vai em B, e só atinge a superfície um pouco mais tarde, em B' , que se torna igualmente origem de uma ondícula. Como a luz se propaga mais lentamente no meio II, esta segunda ondícula estará sempre atrasada relativamente à que tem origem em A, logo a frente de onda no meio II, $[A'C'']$, não é paralela a $[AB]$.

Newton adoptou a teoria corpuscular. Provou, através das suas experiências com o prisma, que a luz branca é constituída por várias cores, que não são criadas pelo vidro. Então, a cor é uma propriedade da luz, logo a luz não pode ser uma propriedade (como pretendiam os adeptos da teoria ondulatória), pois nesse caso a cor seria uma propriedade de uma propriedade. Newton foi, assim, inspirado por esta razão metafísica, além de pela sua concepção da matéria como um agregado de pontos materiais.

Newton viu-se, no entanto, obrigado a introduzir o éter para explicar a acção à distância dos corpúsculos de luz, e atribuiu-lhes uma periodicidade (inconcebível numa teoria corpuscular) para explicar a existência dos anéis de Newton: os corpúsculos teriam um relógio interno que os colocaria num estado ou noutra – acesso ou *fit* – que os levaria a reflectir-se ou a refractar-se.

Apesar das suas contradições, e devido à grande autoridade de Newton, a teoria corpus-

cular teve enorme sucesso e foi aceite durante todo o século XVII, até que em 1815–1830 Fresnel retomou a teoria ondulatória.

Capítulo 13

Newton

13.1 Vida de Newton

Isaac Newton (1642/3–1727) nasceu, segundo o calendário Juliano, no Dia de Natal de 1642, correspondendo esta data a 5 de Janeiro de 1643 pelo calendário Gregoriano, que vigorava no resto da Europa, mas ainda não na Inglaterra. Nasceu numa família de pequenos proprietários agrícolas, pertencente ao mais baixo escalão da nobreza rural inglesa. Nasceu após a morte do pai, tendo estabelecido com a mãe uma relação privilegiada. Mais tarde, a mãe voltou a casar e, embora lhe deva bastante do ponto de vista cultural, Newton nunca gostou do seu padrasto. Depois de estudos secundários não muito bons, Newton ingressou na Universidade de Cambridge, aos 18 anos, sendo a maior parte dos seus condiscípulos dois ou três anos mais novos do que ele. Sabia algum Latim e Geometria, e aprendeu Gramática, Retórica, Ética, Francês e Matemática. Nos dois primeiros anos não deu muito nas vistas, mas, por volta do terceiro ano, as suas grandes capacidades como matemático manifestaram-se, levando Isaac Barrow, seu professor, a interessar-se por ele. Diz-se que, no fim do curso, Newton sabia mais Matemática do que Barrow, que mais tarde deixou a cátedra, a qual viria a ser ocupada por Newton.

Newton concluiu os seus estudos em 1664, precisamente na altura em que uma epidemia de peste levou ao encerramento da universidade durante dois anos. Newton voltou à sua terra natal, Woolsthorpe, onde passaria dois anos fundamentais para a sua carreira. Graças à sua necessidade quase obsessiva de escrever, podemos saber que se ocupou da fórmula do binómio, da teoria das fluxões e dos integrais, e da lei da gravidade, entendida esta como força em $1/r^2$, inspirada pela força centrífuga.

Newton regressou a Cambridge na primavera de 1667, tendo sido nomeado Fellow do Trinity College, onde permaneceria até 1694. Em 1667 é eleito *Lucasian Professor of Mathematicks*, com o encargo de dar oito aulas por ano, o que lhe permitia concentrar-se nas suas pesquisas. As suas aulas incidiam apenas sobre Óptica e Matemática: ensinando pouco e mal, quase não tinha alunos. Por essa altura, abandonara completamente as questões de que se tinha ocupado em Woolsthorpe, pois havia-se dado conta da fragilidade dos resultados obtidos. Com efeito, havia falhas na concordância do cálculo com as observações, devido à existência de dados astronómicos imperfeitos. Além disso, tinha considerado a Terra e a Lua como pontos materiais (o que não é admissível para o estudo de um objecto à superfície da Terra) e obtido para a Lua uma trajectória circular, embora a verdadeira trajectória seja extremamente complexa. Julgara-se, ainda por cima, incapaz de resolver as suas dificuldades matemáticas.

Newton conhecia as três leis de Kepler, cujas obras completas se encontravam na biblioteca de Cambridge, e é possível que a sua leitura lhe tenha sido recomendada por Barrow. Nessa época, só as duas primeiras leis eram conhecidas na Europa. Borelli, discípulo de Galileu, chamara a atenção para Kepler, pois, tendo as orbes celestes perdido a sua materialidade, importava explicar o movimento dos céus, que Kepler não entendera. Borelli, continuador do conceito de animal-máquina e cartesiano, introduziu uma força atractiva em $1/r$. Note-se que Galileu ultrapassara o problema, com a sua inércia circular. Descartes inventara, para tal fim, os seus famosos turbilhões, que constituíam uma teoria não matematizada, ainda que mecanicista. Ele próprio se apercebeu que esses mesmos turbilhões fariam os planetas sair das órbitas, e idealizou por isso que o éter funcionaria como uma mola para os reter. Newton, tal como Borelli, introduziu uma força atractiva.

Só muito mais tarde voltaria Newton à Mecânica e à Astronomia. Isto está ligado à sua primeira desavença com Hooke, que, com Wren e Halley, se interessava pelos astros. Newton firmara-se na Royal Society pelos seus trabalhos de Matemática e Óptica; Hooke levantou o problema da prioridade das descobertas e discutiu algumas das teorias de Newton. Este último, pouco propenso à discussão, chegou a querer deixar a Royal Society, sendo disso dissuadido pelo então secretário, que o isentou do pagamento das quotas.

Hooke, entretanto, retomara as ideias de Descartes acerca do éter, e adoptara uma ideia de Borelli: o movimento dos planetas é elíptico pois estes teriam uma espécie de movimento pendular que transformaria as órbitas circulares em elipses. Com vista a comprovar isto, Hooke fez várias experiências com o pêndulo, mas, devido a não saber matemática, nada pode concluir. Uma sua proposta interessante foi a de que o movimento planetário se poderia explicar por meio da lei da inércia e de uma lei de atracção em $1/r^2$.

Newton descobre em 1666 a lei da atracção universal, no que foi precedido por Huygens. No entanto, Huygens não chegou onde Newton chegou devido aos seus escrúpulos, tentando explicações mecânicas em vez de estabelecer leis matemáticas simples.

Em 1676 Hooke reconcilia-se com Newton. O facto de Hooke ser, nessa altura, secretário da Royal Society, facilita a sua correspondência com Newton, a quem escreve dizendo que o movimento planetário se pode explicar pela lei da inércia e a atracção para um corpo central. Newton receia que Hooke lhe passe à frente e responde-lhe que a questão não tem importância, tentando dissuadi-lo de a tratar. Newton afirmava que um corpo largado na vizinhança de uma massa descreve uma elipse até cair. Hooke dizia o contrário: que descrevia apenas uma elipse. Este último aproveita para ler a carta de Newton em público, para ridicularizá-lo. Newton envia em seguida um trabalho em que mostra que Hooke não tinha razão: este trabalho é criticado por Hooke, que diz ter Newton utilizado uma força constante e não proporcional ao inverso do quadrado da distância, como ele, Hooke, propusera. Hooke escreve em seguida a Newton pedindo-lhe que faça a demonstração de que o movimento obtido é elíptico; Newton faz (ou refaz) o cálculo, e conclui que a trajectória pode ser uma elipse, circunferência, ou parábola.

Newton apercebeu-se em seguida de que precisava de integrar estes resultados numa nova mecânica. Em 1684 deu um curso de Mecânica Celeste, cujas notas enviou a Halley. Este convenceu-o a publicá-las. Nesse mesmo ano, é iniciada a redacção dos *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, publicados pela primeira vez em 1687, e que constituem uma réplica aos *Principia* de Descartes. Este livro granjeou a Newton grande popularidade, tendo ele abandonado a carreira científica. Em 1699 Lord Halifax adquire grande importância política e faz nomear Newton Inspector da Casa da Moeda em Londres, com um bom ordenado. Mais tarde, Lord Montague, primeiro-ministro, fez Newton *Master*

of the Mint, Sir, e presidente da Royal Society, tendo passado a ser o ditador da ciência inglesa.

Newton passou mais tempo a reflectir sobre a Bíblia do que sobre a Física, dedicou-se à Alquimia, e viveu obcecado pelo facto de ser Anti-trinitário. Morreu com 85 anos, em 1727, e foi sepultado em Westminster. Encomendou-se para ele um epitáfio (depois considerado insuficiente) a Pope, poeta britânico:

A Natureza e as suas leis escondiam-se na noite;
Deus ordenou que Newton viesse;
E tudo foi luz.

Note-se que Newton nunca esteve convencido de que a sua Física pudesse explicar a estabilidade do sistema solar, requerendo esta a intervenção de Deus, o que só viria a ser desmentido por Laplace.

13.2 A Física de Newton

Na segunda metade do século XVII surgiu um grupo de indivíduos, sem grande envergadura intelectual, que se denominaram os Neo-platónicos de Cambridge, e entre os quais se destacam Isaac Barrow e Henry More. Estes pensadores eram atomistas: em Inglaterra, ao contrário do que se passava em França, as ideias atomistas tiveram grande difusão devido a Robert Boyle (que no entanto era cartesiano) lhes ter aderido.

Em 1648 More escreve a Descartes pedindo-lhe explicações sobre algumas partes da sua filosofia, sugerindo mesmo as respostas (estas perguntas são idênticas às que Gassendi já havia formulado). More não entendia a diferença entre matéria (extensão) e espírito (sem extensão), ou como salvaguardar a presença de Deus no mundo: segundo Descartes, o momento linear conserva-se como resultado da acção de Deus no mundo. More, porém, não aceitava qualquer tipo de acção à distância, pois Deus, para agir, teria de estar presente no espaço. Logo, Descartes deveria abandonar a oposição ao espaço vazio, uma vez que este continha Deus! Além disso, More não compreendia a diferença entre indefinido e infinito: só concebia o espaço como finito ou infinito, procurando convencer Descartes a adoptar esta última hipótese.

Descartes responde dizendo que Deus não era extenso porque isso implicaria que fosse divisível, o que não faria sentido. Então, se o espaço fosse infinito, estaríamos a divinizar-lo.

More não está convencido. Argumenta que o nada, ao contrário do que afirmara Descartes, tem pelo menos uma propriedade, a duração, pois se Deus, na sua infinita potência, decidisse aniquilar o universo e tornar a criá-lo em seguida, decorreria algum tempo em que tinha existido nada. Descartes argumenta que isto implica um Deus temporal.

More publicou livros sobre a sua doutrina, o primeiro dos quais se intitula *Antídoto contra o Ateísmo*. Defende uma concepção de espaço e de tempo diferente da da Física cartesiana, inventando um espaço infinito e imaterial: quem o não aceitasse era ímpio e ateu, pois expulsava Deus do mundo. Recusa o movimento relativo: existe um referencial privilegiado, o próprio espaço. O espaço incriado e o tempo são atributos de Deus, conceitos estes que irão reaparecer em Newton, de forma mais refinada.

Os *Principia* (claramente inspirados nos *Elementos* de Euclides) tiveram a sua primeira edição em 1687. A obra encontra-se dividida em introdução + três livros + scholium

geral. A introdução contém considerações matemáticas e oito definições. A primeira é de “quantidade de matéria” (massa), o que constitui clara oposição à Física cartesiana (extensão \times massa). A definição é no entanto contraditória, pois m é definida como o produto da densidade pelo volume, e a densidade só se define a partir da massa... A segunda definição é de “quantidade de movimento”. A terceira prenuncia a Lei da Inércia, atribuindo-a a uma “força inata” misteriosa. A quarta definição é a de “forças aplicadas” – qualquer causa exterior que afecta o estado de movimento de um corpo – constituindo um prenúncio da Segunda Lei. A quinta definição é a de “força central”, e as sexta, sétima e oitava respectivamente sobre as quantidades absoluta, acelerativa, e motora.

A seguir, vêm as célebres Três Leis de Newton. Note-se que a Primeira Lei, tal como Newton a enuncia, é um caso particular da Segunda, além de que a Segunda Lei é definida como $\mathbf{F} dt = m d\mathbf{v}$. Ernst Mach disse da Terceira Lei que ela é “uma pura maravilha”. Esta não é, porém, uma ideia de Newton, mas algo que vinha já de Leonardo da Vinci. Os corolários destas Leis dizem respeito à composição de forças, ao Teorema do Centro de Massa, e ao Princípio da Relatividade Clássica.

O scholium contém as definições de tempo e espaço absolutos. O espaço e o tempo absolutos são independentes da matéria. No entanto, Newton faz concessões aos cartesianos, ao admitir simultaneamente um espaço e um tempo relativos. O movimento absoluto pode em certos casos ser detectado pelas suas causas ou efeitos – existem forças inerciais, que são a consequência do movimento acelerado dos corpos em relação ao espaço absoluto. O Princípio da Relatividade mostra que o espaço absoluto é equivalente a qualquer referencial de inércia: nos outros, o espaço absoluto actua sobre os corpos sob a forma de forças de inércia. Mas dá-se aqui uma assimetria, visto que a matéria não actua sobre o espaço absoluto. Esta situação poderia parecer insatisfatória, mas não o é, dado que matéria e espaço não têm o mesmo estatuto: o espaço e o tempo absoluto são atributos de Deus. Isto explica que sejam eternos, e a matéria criada.

O Livro I trata os movimentos planetários de forma abstracta: analisa sistemas físicos por vezes muito semelhantes ao Sistema Solar, e refere que um corpo sob a acção de uma força central obedece à lei das áreas. Discute os possíveis tipos de forças que, actuando no móvel segundo um raio vector, produzam movimento elíptico, e conclui que esta força deve ser $\propto 1/r^2$. Neste caso, qualquer que seja a elipse, tem-se $T^2/R^3 = \text{const.}$ (isto é, verifica-se a terceira lei de Kepler). Discute ainda o problema de um corpo actuado por dois centros de forças (que se assemelha ao da Lua).

O Livro II contém o estudo de problemas de movimento de corpos com atrito, hidrostática, movimento oscilatório e oscilações em meios elásticos.

O Livro III é o *Sistema do Mundo*, onde são retomados e aplicados ao mundo real os resultados obtidos no Livro I. “Todos e quaisquer corpos são dotados de um princípio de atracção mútua”. Newton consegue obter as leis de Kepler, explica o movimento dos cometas e elabora a primeira teoria coerente das marés. Finalmente, distingue massa e peso.

No Scholium Geral, Newton demonstra que a teoria cartesiana dos vórtices é inaceitável. Para ele, a existência do Sistema Solar provava a existência e bondade de Deus, pois só Ele podia explicar a quase coincidência dos planos das órbitas planetárias (não se tinha o sentido do tempo, que só vai surgir no século XIX). Além disso, Deus teria colocado as estrelas suficientemente afastadas para que estas, atraindo-se, não destruíssem o universo. Isto significava que, por meio da Física, se podiam obter informações sobre Deus.

Saliente-se, por fim, que Newton abominava a ideia da gravitação como força instantânea, tendo tentado sem sucesso explicar a propagação desta por meio de um éter. Refugiou-se posteriormente na ideia de que a gravitação não era uma força física, mas algo de espiritual.

13.3 O pensamento no século XVII

Os célebres *Principia* tiveram três edições durante a vida de Newton. Inicialmente, não tiveram grande aceitação fora dos círculos ligados ao próprio Newton, demorando cerca de 50 anos a ser aceites na Europa. Os seus principais adversários foram os aristotélicos peripatéticos. Poderia ter parecido que, após Descartes, o aristotelismo estaria morto: tal não corresponde, no entanto, à verdade. Após o choque da Reforma e Contra-Reforma (concílio de Trento), a Igreja Católica consolida-se nos países latinos, ocupando a Europa católica sensivelmente as mesmas fronteiras que o velho Império Romano. Por esta altura, Inácio de Loyola, soldado basco, funda os Jesuítas, que vão ser poderosos aliados da Igreja. Dedicam-se ao ensino, cobrindo a Europa latina de estabelecimentos de ensino secundário e superior de boa qualidade. Uma vez que a Física que transmitiam era a de Aristóteles, os indivíduos de cultura média ficavam nela embebidos. Mas esta posição não era válida para entrar no grande debate de ideias, de onde Aristóteles fora há muito banido, de modo que os Jesuítas vão tentar corrigi-la. **Malebranche** (1638–1715) recorre a Platão e a Sto. Agostinho para compatibilizar Descartes com o Cristianismo. Os Jesuítas acabaram assim por adoptar um cartesianismo falsificado, para poderem intervir nos debates de alto nível e travar as tendências mecanicistas inspiradas por Newton.

Newton encontrou grande oposição em França, dada a grande difusão da cultura deste país e a sua importância demográfica, com uma população de cerca de 20 milhões de habitantes. Fontenelle, secretário da Académie des Sciences, escreve mesmo um livro especulativo, intitulado *Entretiens sur la Pluralité des Mondes*, em que defende o cartesianismo.

A segunda edição dos *Principia* tem um prefácio escrito por um dos “pistoleiros” de Newton, Roger Cotes, embora seja Newton quem, da sombra, governa tudo. (Newton encontrava-se rodeado de indivíduos insignificantes, na sua maior parte teólogos.) Nesse prefácio, Newton acusa o cartesianismo de introduzir ideias ocultas, e o seu autor de ser ímpio e ateu por negar a intervenção de Deus no mundo. (Segundo Newton, Deus era o garante da estabilidade do Sistema Solar e da conservação do movimento.) No entanto, Newton não foi capaz de criar um modelo mecânico do éter para explicar a acção à distância, embora o tenha tentado por três vezes.

Leibniz, que já se envolvera em polémicas com Newton acerca da descoberta do cálculo infinitesimal, publica um panfleto, *Contra os Físicos Bárbaros*, em que ataca a acção à distância. Saliente-se entretanto que a prioridade da descoberta acima referida cabe a Newton, sendo no entanto a formulação de Leibniz muito superior, razão pela qual os matemáticos ingleses, agarrados a Newton, vão estagnar durante todo o século XVIII, s’øprogredindo após a introdução do processo de Leibniz no século XIX.

Dá-se então o confronto entre Leibniz e Clarke (“pistoleiro” de Newton) através da Princesa de Gales, uma alemã interessada em filosofia. Esta escreve a Leibniz pedindo-lhe explicações. Sendo amiga de Newton, a princesa envia-lhe a resposta de Leibniz. Newton manda o Dr. Samuel Clarke responder às críticas de Leibniz: este critica a noção de espaço

como sendo o sensorio de Deus, cuja acção deve ser sobre a Graça e não sobre a natureza. Clarke recusa-se a fazer a distinção entre Graça e natureza e Leibniz acusa-o de panteísmo.

Entretanto, dava-se o desenvolvimento dos Países Baixos, que apresentavam afinidade religiosa com a Inglaterra. Era especialmente célebre a Universidade de Leiden, onde trabalhavam, entre outros, Musschenbroek e 's-Gravesænde. A Holanda, com o seu clima tolerante, tornou-se a testa-de-ponte dos ingleses. Os franceses protestantes, que prosseguiram os seus estudos nos Países Baixos, contribuíram assim para espalhar a Física newtoniana, fazendo circular edições “corrigidas” dos tratados cartesianos.

Na França, começam a surgir os Iluministas ou “Philosophes”, que são essencialmente empiristas. Estes vão agarrar-se às equações de Newton e esquecer a filosofia subjacente, o que vai contribuir para a sua difusão. Desta forma, os Iluministas ajudarão a propagar a imagem de um Newton empirista. **John Locke** (1632–1704), amigo de Newton, foi o primeiro grande empirista moderno. **Voltaire (François-Marie Arouet)** (1694–1778) descobriu Newton durante um dos seus exílios em Inglaterra. Assistiu ao funeral de Newton e trouxe os *Principia* para França. Sabendo pouca Física, era obrigado a pedir frequentemente explicações a Maupertuis. Escreveu, entre outros, as *Cartas sobre os Ingleses*, e os *Elementos da Filosofia de Newton*. Maupertuis foi o primeiro cientista francês a defender Newton; Huygens não aceitava a gravitação universal.

Surgiu por esta altura o problema da esfericidade da Terra: segundo Newton, a Terra deveria ser uma esfera achatada nos pólos, sendo o achatamento $1/273$ do raio. Huygens, por seu lado, previra um alongamento polar de $1/570$ do raio (“Terra melão”). Para aplacar a polémica, havia que medir o comprimento do grau de meridiano perto dos pólos e perto do Equador, ou então o valor da aceleração da gravidade, g . Em 1667 Richter afirmou oscilar o pêndulo mais lentamente na Guiana do que em Paris. Os cartesianos, porém, conseguiram adaptar a teoria dos turbilhões à explicação desse fenómeno, tanto mais que as medidas de Cassini pareciam confirmar Huygens. Maupertuis envia então duas expedições, uma à Lapónia (que ele integra), e outra ao Peru. Regressando mais cedo, Maupertuis é aclamado como “le grand aplatisseur”. É ainda de Maupertuis o “Princípio da Menor Acção”, que levou Voltaire a ridicularizá-lo: Deus criou o mundo de modo a que se gastasse a menor acção possível.

O newtonianismo só se impôs na Europa a partir de 1750, sendo Descartes desconsiderado depois da *Encyclopédie*.

Capítulo 14

A Ciência no século XVIII

14.1 Introdução

Importa assinalar antes de mais que as descobertas fundamentais efectuadas no século XVIII se deram no âmbito das academias científicas e não das universidades, instituições que só trocarão a sua esterilidade com as academias no século XIX. As principais academias são as de Paris, Berlim e S. Petersburgo, estas últimas fundadas por monarcas que desejavam ornamentar com sábios as suas cortes. Estes, ditos “déspotas esclarecidos”, são, respectivamente, Frederico II e Catarina II. Note-se não estar incluída a Royal Society, à qual se deveu a esterilização da ciência inglesa, motivada por excessiva fidelidade a Newton.

No domínio científico o século XVIII é, contudo, muito menos brilhante que qualquer dos séculos XVII ou XIX, uma vez que se trata de um século não de descoberta original, mas de balanço, desenvolvimento e amadurecimento das descobertas anteriores, preparando o terreno para o século XIX e a nova revolução que este vai trazer.

14.2 A Matemática e a Mecânica

Há que salientar que o progresso das Matemáticas se faz a par e passo com o da Mecânica, sendo mecânicos todos os grandes matemáticos, e vice-versa. Começamos pela família Bernoulli: provenientes da Holanda, instalaram-se na Suíça, na cidade de Basileia, governada por uma aristocracia mercantil de que esta família fazia parte.

Jakob/Jacques/James Bernoulli (1654–1705) e seu irmão **Johann I/Jean I/John I Bernoulli** (1667–1748) começaram por estudar, inicial e respectivamente, Teologia e Medicina, mas, deslumbrados pelos trabalhos que Leibniz publicara nas *Acta Eruditorum*, dedicaram-se à Matemática. Até à morte de Leibniz trabalharam em conjunto com ele; após o seu falecimento, tentaram sem sucesso trabalhar em grupo os dois. Devemos-lhes a invenção das coordenadas polares, os fundamentos do cálculo das variações, as primeiras integrações de equações diferenciais ordinárias e, da parte de Jakob, uma importante contribuição para a teoria das probabilidades (com o livro *Ars Conjecturandum*). Saliente-se ainda a resolução de uma série de problemas meio analíticos, meio numéricos, como por exemplo: dados dois pontos no mesmo plano vertical, qual é a trajectória que um corpo deve seguir para ir de um ao outro no menor tempo possível; ou, em geral, a determinação da forma da curva que um corpo deve seguir para percorrer uma dada distância no tempo

mínimo. Jakob Bernoulli ocupou a cátedra de Matemática em Basileia em 1687–1705. Sucedeu-lhe o irmão, que a ocupou durante 43 anos.

Da segunda geração de Bernoulli fazem parte os filhos de Johann I. **Niklaus/Nicolas/Nicholas Bernoulli** (1695–1726) morreu muito novo, não tendo oportunidade de fazer sobressair os seus méritos. É, não obstante, da sua autoria o “Paradoxo de S. Petersburgo”. **Daniel Bernoulli** (1700–1782) deixou obra extensa em Matemática, Ciências Naturais, Astronomia e Física (Mecânica e Hidrodinâmica). Publicou em 1738 o primeiro tratado de Hidrodinâmica, no qual se esboça pela primeira vez uma teoria cinética dos gases. Trata, a propósito dos problemas com a corda vibrante, as primeiras equações às derivadas parciais. Ganhou 10 vezes o prémio da Académie des Sciences, *record* só igualado por Euler.

Leonhard Euler (1707–1783) estudou com Johann I Bernoulli, tendo o seu pai estudado com Jakob Bernoulli. Viveu na casa dos Bernoulli, e foi em 1725 com Niklaus Bernoulli para S. Petersburgo, onde ficou vários anos. Mudou-se depois para Berlim, onde viveu 25 anos, até à morte de Frederico II. Em seguida regressou a S. Petersburgo, onde morreu. Publicou em vida 530 trabalhos, sendo hoje conhecidos mais de 900. Interveio em todos os campos da Matemática, Astronomia, Mecânica, Filosofia, Música, Hidráulica, Construção Naval e Artilharia, influenciando todos os matemáticos que lhe sucederam. Foi o verdadeiro criador da moderna notação matemática, especialmente na trigonometria, onde introduz o círculo trigonométrico. Redige o primeiro tratado de cálculo diferencial (1748), onde trata de séries e do estudo analítico das curvas; e também o primeiro tratado de cálculo integral (1764), onde trata de equações integrais e de funções por estas determinadas. Escreveu o primeiro tratado moderno de mecânica racional, no qual, a propósito de corpos sólidos, introduz os famosos ângulos de Euler; e, ainda, o primeiro tratado moderno de álgebra, onde são estudadas as equações cúbicas e biquadráticas. Continuou também o estudo do cálculo das variações. No campo da geometria, deve-se-lhe o teorema segundo o qual, em qualquer sólido geométrico, a soma do número de arestas com o número de faces excede em 2 o número de vértices. Na Astronomia, elaborou uma teoria do movimento da Lua, e calculou as forças atractivas de um elipsóide achatado. Publicou uma teoria analítica da óptica geométrica e das equações às derivadas parciais.

Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698–1759) enunciou o Princípio da Menor Acção, o qual permitiu resolver o paradoxo criado pelo Princípio de Fermat face à teoria corpuscular de Newton, que afirmavam respectivamente, que a luz se movia mais devagar ou mais depressa quanto mais denso fosse o meio. Assim, o que era minimizado era a acção, grandeza não conservativa que vai desempenhar um papel importante na Termodinâmica e na Mecânica Quântica.

Jean Le Rond d’Alembert (1717–1783) foi abandonado pelos seus abastados, mas faltosos, progenitores na igreja de S. Jean Le Rond. Eleito aos 23 anos para a Académie, publica aos 26 o seu *Traité de Dynamique*, onde enuncia o princípio que tem o seu nome, isto é, que a Segunda Lei de Newton implica que

$$\sum_i \left(F_i - \frac{dp_i}{dt} \right) dr_i = 0,$$

o que permite reduzir qualquer problema de dinâmica a um problema de estática. Dedicou-se ainda ao estudo das equações às derivadas parciais, e das cordas vibrantes, que envolvem equações do tipo

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \kappa \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}.$$

d' Alembert colaborou com Diderot na *Encyclopédie*, redigindo quase todos os artigos de Matemática e de Mecânica (mais tarde retirou-se). Pôs-se nesta altura o problema de saber se a Mecânica, tal como se pensava ser a Geometria, seria uma ciência necessária, isto é, só podendo existir na forma em que estava formulada. d'Alembert pensava que sim.

Joseph-Louis Lagrange (1736–1813) era, aos 19 anos, professor na Escola Superior de Artilharia de Turim. Viveu mais tarde em Berlim e passou a sua maturidade em França. Fez parte da Comissão de Pesos e Medidas, e das Écoles Polytechnique e Normale Supérieure. O seu *Tratado das Funções Analíticas* (1799) contém o tratamento completo do cálculo das variações e um tratamento de análise quase moderno. Na sua *Mécanique Analytique* (1788) apresenta um tratamento totalmente analítico da Mecânica, por oposição a Newton. O livro não contém qualquer figura. Nele, considera as coordenadas e velocidades generalizadas, q_k e \dot{q}_k . Chamando T à energia cinética e U à energia potencial, tem-se:

$$\frac{\partial T}{\partial q_k} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) = F_k.$$

Se as forças F_k derivam de um potencial, $F_k = \partial U / \partial q_k$, definindo o operador Lagrangeano $\mathcal{L} = T - U$, vem que

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_k} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_k} \right) = 0.$$

Pierre Simon, Marquis de Laplace (1749–1827) prestou uma contribuição notável ao cálculo das probabilidades com a sua *Teoria Analítica das Probabilidades* (1812), e mais tarde com um livro de divulgação, *Essai Philosophique sur les Probabilités*. O “Newton francês” foi ainda autor dos 5 volumes da *Mecânica Celeste*, publicados de 1799 a 1825 e traduzidos para inglês por um americano. Dá a definição clássica de probabilidade, demonstra a estabilidade do Sistema Solar, contribui para o problema dos três corpos, populariza o conceito de potencial, afirma o determinismo laplaciano e a noção de probabilidade como traduzindo um conhecimento incompleto. Deduz ainda a equação de Laplace,

$$\Delta V = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0.$$

14.3 A Electricidade

Os fenómenos eléctricos eram conhecidos na Europa deste Tales de Mileto, tendo Pierre de Maricourt contribuído largamente para a difusão desse conhecimento, nomeadamente através da introdução da bússola chinesa. William Gilbert descobriu por sua vez que não só o âmbar, mas também as resinas, o vidro e as pedras preciosas eram passíveis de serem electrizadas. Otto von Guericke interessara-se igualmente por electricidade, construindo a primeira máquina electrostática. Esta consistia numa esfera de enxofre gigante que se friccionava com um pano de lã ou com a mão. Conseguiu assim obter razoáveis quantidades de carga eléctrica: descobriu a descarga por faíscas, e que um corpo é primeiramente atraído por uma esfera carregada e, após contacto, repellido.

No século XVIII dá-se um surto de interesse pela electricidade por motivos recreativos. Há muitos amadores que se dedicam à ciência por curiosidade.

Stephen Gray (1670–1736) divertia-se, em 1727, a electrizar um tubo de vidro. Tem então a ideia de o electrizar e tapar com uma rolha, para que o fluido eléctrico se não escapasse. Verificou imediatamente que a rolha se electrizava. Espetando um pau na rolha, este electrizava-se também. Decide depois ligar-lhe uma corda de cânhamo com 10 m de comprimento, suspensa do tecto do corredor por fios de seda muito finos, para o fluido se não escapar. A ponta da corda ainda atrai pedaços de papel. Experimenta então com uma corda mais comprida (90 m), e estende-a através da aldeia onde morava, suspendendo-a com fios de seda – funciona! Substituindo o fio de seda por um de latão, já não dá. Gray percebeu que o latão deixa escapar o fluido eléctrico. Distingue assim duas espécies de comportamento possível, face ao fluido eléctrico: “condutores” e “isoladores”.

Du Fay, botânico e intendente do Jardim Botânico de Paris, descobriu em 1733 que os corpos que se electrizam não o fazem todos da mesma maneira: consoante a sua natureza, atraem-se ou repelem-se, uma vez electrizados. Elabora então listas dos objectos que se repelem e dos que se atraem, classificando-os segundo se electrizam como o vidro ou como a resina – electricidade vítrea ou resinosa. Corpos com electricidades diferentes atrair-se-iam, enquanto corpos com idênticas electricidades se repeliriam. Afirma-se assim a ideia de existirem duas espécies de fluido eléctrico.

Desperta por essa altura um grande interesse pela electricidade. Publicam-se belos livros com gravuras, e o Abbé Nollet, que tinha um “gabinete de Física”, dedicava-se a experiências de salão. Havia bichas à sua porta para receber choques eléctricos. Certa vez, fez saltar, em Versailles, diante de Louis XV, 240 guardas reais, e, noutra ocasião, fez o mesmo a 3 000 frades. Embora aparentemente gratuitas, estas experiências destinavam-se a provar se o fluido eléctrico se propagava com velocidade finita ou infinita. Ora, uma vez que todos saltavam aparentemente ao mesmo tempo, a velocidade de propagação parecia infinita. Tais experiências eram possíveis devido à invenção, em 1745, por Von Kleist e Van Musschenbroek, do primeiro condensador, a garrafa de Leiden. Consistia numa garrafa tapada com uma rolha atravessada por um prego e contendo um líquido condutor. Recoberta com uma folha de metal, permitia armazenar uma quantidade apreciável de carga eléctrica.

Benjamin Franklin (1706–1790) inventa a doutrina de um só fluido eléctrico: a electricidade é um fluxo de partículas muito pequenas, que atravessam a matéria por ela ser porosa como uma esponja. Isso dá-se com grande velocidade: a matéria atrai a electricidade, e as partículas eléctricas repelem-se entre si. Em condições normais, a matéria contém uma dada quantidade de electricidade, reponsável pelos fenómenos dos corpos electrizados. Se dermos a um corpo um excesso de electricidade, esse excesso origina uma nuvem em torno do corpo electrizado. Mas a teoria não explica por que razão dois corpos electrizados da mesma maneira se repelem. Um sucessor de Franklin sugeriu que a carência de electricidade criaria efeitos repulsivos. O século XVIII vai ser o palco desta luta de ideias.

Franklin foi o primeiro chefe da diplomacia americana em Paris. Autodidacta, causou sucesso em França, pois os Estados Unidos eram a república democrática dos filósofos, pretendida pelos Iluministas (oposição); e, além disso, por ser um aliado contra a Inglaterra. Foi recebido por d’Alembert, que na ocasião proferiu o seu famoso discurso em que afirma ter Franklin “tirado o raio ao céu e o ceptro aos tiranos”.

Franklin tem a seu crédito a invenção do pára-raios, que está relacionado com o poder das pontas. Associara-se já o raio a uma descarga eléctrica, tendo algo que ver com a electrização das nuvens. A primeira experiência foi feita em França por Buffon, um

newtoniano, e por Dalibord, os quais tentaram captar o fluido eléctrico dos céus com uma vara metálica de 12 m de comprimento e 2 cm de diâmetro. A 10 de Maio de 1752, obtiveram-se resultados: o cura e o jardineiro de Dalibord, aproximando da haste, durante uma tempestade, uma garrafa com a rolha perfurada, observaram o aparecimento de faíscas. Entretanto, Richmann, querendo repetir as experiências, aproximou-se demais da haste e morreu electrocutado.

Franklin tem a ideia de recolher directamente a electricidade das nuvens com um papagaio. Este entraria na nuvem, para que a electricidade descesse pelo fio. O papagaio estaria munido de uma ponta de ferro ligada a uma corda de cânhamo. (Franklin teve sorte: o cânhamo é mau condutor. O êxito da experiência foi em parte devido à chuva.) Contudo, esta ideia não foi de Franklin, mas de De Ramas (1753): este fê-la ligando o papagaio a uma corda de seda, ligada a um fio de metal que acabava num cilindro metálico isolado. Obteve primeiramente faíscas de 0.5 m que se transmitiam a 100 m, e mais tarde faíscas de 3 m. O pára-raios, fim de tudo isto, tornou-se muito útil para os navios, cujos mastros atraíam os raios.

A electrostática começa então a matematizar-se. Conseguem medir-se carga e força eléctrica por meio de processos mecânicos, por exemplo envolvendo um corpo carregado flutuando na água: uma carga próxima alterar-lhe-ia a posição, tendo-se de colocar-lhe pesos para que voltasse à posição anterior. Surge ainda o electroscópio (Volta).

Charles Coulomb (1736–1806) quantificou a electricidade. Estudou igualmente as leis do atrito e a teoria da resistência dos materiais, tendo inventado a balança de torção para medir forças eléctricas. Tinha-se (ver figura 14.1) que a força era proporcional ao

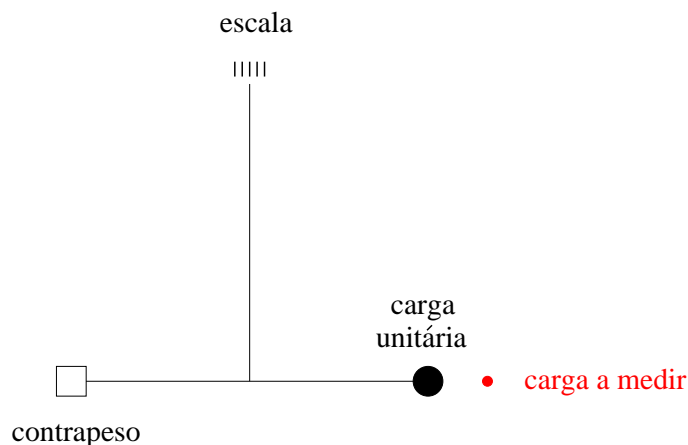


Figura 14.1: Balança de torção de Coulomb.

ângulo de torção, com uma precisão de 10^{-6} gf. Coulomb conclui, por volta de 1780, que

$$F = C \frac{qq'}{r^2} \quad (\text{cargas eléctricas}),$$

e

$$F = C' \frac{mm'}{r^2} \quad (\text{"massas" magnéticas}),$$

o que se assemelha muito à lei de Newton, embora a carga não seja uma propriedade de

um corpo, F possa ser atractiva ou repulsiva, e C (C') não seja uma constante universal. Tudo se enquadra no paradigma mecanicista da Física de Newton.

A invenção da pilha de Volta (1800) vai alterar tudo radicalmente.

14.4 Termodinâmica e Revolução Industrial

Como se sabe, o termómetro havia sido inventado no século XVII, pelos membros da Academia del Cimento. No entanto, perpetuaram-se certos problemas, como o das escalas termométricas (ainda existiam 19 no fim do século XVIII) e a incapacidade de distinguir calor e temperatura. Pensava-se, por exemplo, que o grau servia para medir calor.

Os primeiros trabalhos de calorimetria foram devidos a Richmann. Dadas duas massas, m_1 e m_2 , da mesma substância, às temperaturas t_1 e t_2 , tem-se que a temperatura de equilíbrio é

$$t = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2}.$$

Joseph Black (1728–1789), médico e químico britânico, foi professor em Glasgow e Edinburgh. Interessou-se pela calorimetria no decurso dos seus estudos visando teorizar a Química. Generalizou a fórmula de Richmann a massas de substâncias diferentes:

$$t = \frac{m_1 c_1 t_1 + m_2 c_2 t_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2}.$$

descobrimo o conceito de calor específico c_i (quantidade de calor necessária para elevar de 1° a massa unitária de uma dada substância). Ocupou-se ainda do problema das mudanças de fase ligadas a certos aspectos paradoxais das suas experiências. Por exemplo: pondo em contracto uma libra de gelo e uma libra de água a 50° C, não se obtém água a 25° C, mas sim a fusão de parte do gelo. Interpretou estes resultados admitindo que se necessita de uma muito grande quantidade de calor para fundir o gelo (79 vezes o calor específico). Hoje, diz-se que o calor de fusão da água é 79.9 cal. O calor de vaporização é cerca de 400 cal. Black chamou-lhes “calores latentes”, visto serem recuperados pelas mudanças de fase inversas.

Surtem então duas teses: uma, que defendia ser o calor uma forma de movimento; outra, presidida por Boerhave, considera-o uma substância. A primeira hipótese foi defendida por Daniel Bernoulli e ????. O livro *Hidrodinâmica*, da autoria de Bernoulli, contém, pela primeira vez, a ideia de que a pressão é devida aos choques moleculares, e que a temperatura é proporcional ao quadrado das velocidades das moléculas. Esta teoria não foi aceite, pois não permitia explicar o calor radiante, indicando além disso os primeiros ensaios no sentido da conservação do calor, o que sugeria para este a natureza de um fluido indestrutível: no século XVIII os fluidos estavam na moda. Em 1782 Lavoisier e Laplace efectuam experiências, com sólidos e gases, mais rigorosas do que as de Black, que havia usado líquidos. Estudam calores de reacção e dissolução, bem como os libertados pelos organismos vivos. Confirmam com rigor a ideia da conservação do calor, o que reforça a teoria do calor como fluido calórico. Esta hipótese, extremamente fecunda, atrasou assim o progresso da Termodinâmica, cujo Primeiro Princípio só surgiu cerca de 1850. E tal foi a sua importância que, em 1755, a Académie des Sciences deliberou não aceitar mais trabalhos que tratassem da quadratura do círculo, da duplicação do cubo, ou da possibilidade do motor perpétuo.

A Revolução Industrial resultou fundamentalmente, mas não unicamente, da utilização de uma nova fonte de energia. No entanto, desde o século XVII que se havia tentado construir uma máquina a vapor. No começo do século XVIII, Papin inventara uma máquina para mover os batelões do Reno, cujo esboço foi destruído pelos bateleiros, que temiam o desemprego. Em 1705, Newcomen e Cowley, ingleses, inventam o primeiro motor térmico capaz de funcionar decentemente, com a finalidade de extrair a água que inundava as minas de carvão, de grande importância económica (ver figura 14.2). Em 1764 havia em

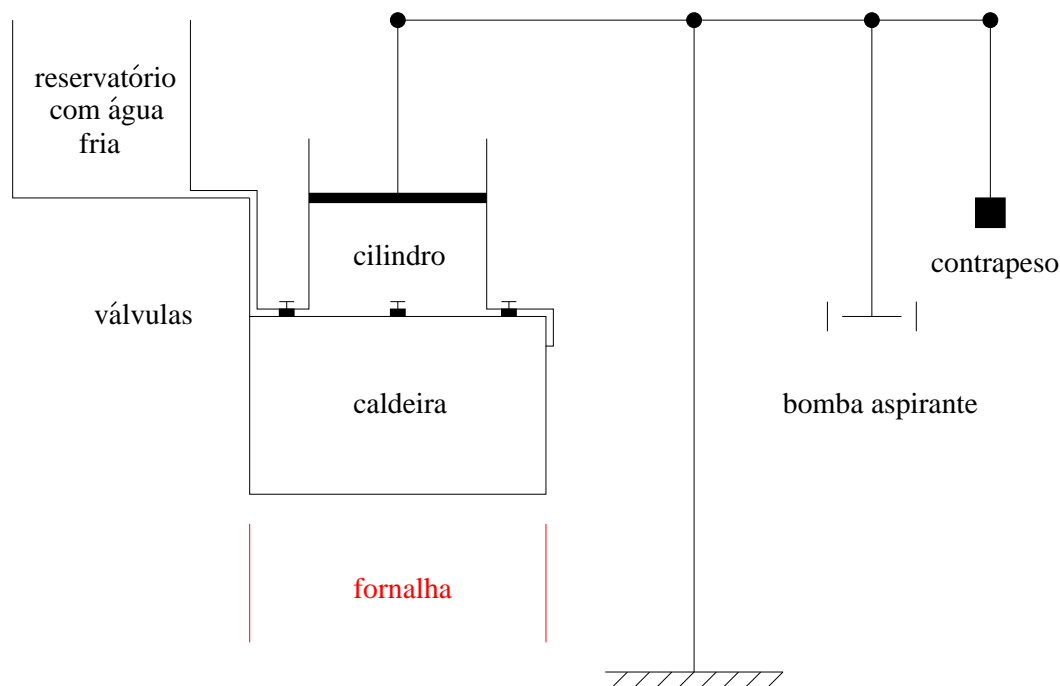


Figura 14.2: Máquina de Newcomen e Cowley (1705).

Inglaterra 100 grandes máquinas (isto é, com um cilindro de diâmetro superior a 1 m) a funcionar, efectuando 15 a 20 movimentos de vai-vem por minuto.

James Watt (1736–1819), “engenheiro” escocês, era construtor e reparador de instrumentos de precisão. Sendo chefe das oficinas da universidade de Glasgow, onde estava Black, apercebe-se da validade dos resultados deste. Ao reparar o modelo de Newcomen, Watt interessa-se por máquinas térmicas. Mas, já tendo sido surpreendido pelas enormes quantidades de energia necessárias para vaporizar a água, apercebe-se de que a máquina de Newcomen é altamente ineficaz: a água fria que usa para arrefecer o sistema gasta-se, e além disso perde-se muito calor, pois está-se sempre a aquecer e arrefecer o sistema. Em colaboração com Black, Watt constroi então a primeira máquina moderna (ver figura 14.3). Como novidade, temos o cilindro isolado com madeira grossa, para mantê-lo quente, e um condensador mergulhado em água corrente.

O século XVIII inglês foi um período de grande criatividade técnica que frequentemente acabava mal, sendo os inventores roubados ou explorados. Watt, porém, encontrou Boulton, e juntos ganham bastante. Como truque comercial, propõem a todos os donos de máquinas de Newcomen a substituição gratuita das suas máquinas por máquinas de Watt, em troca de 1/3 da poupança obtida. Vendem 500 (!) grandes máquinas até a

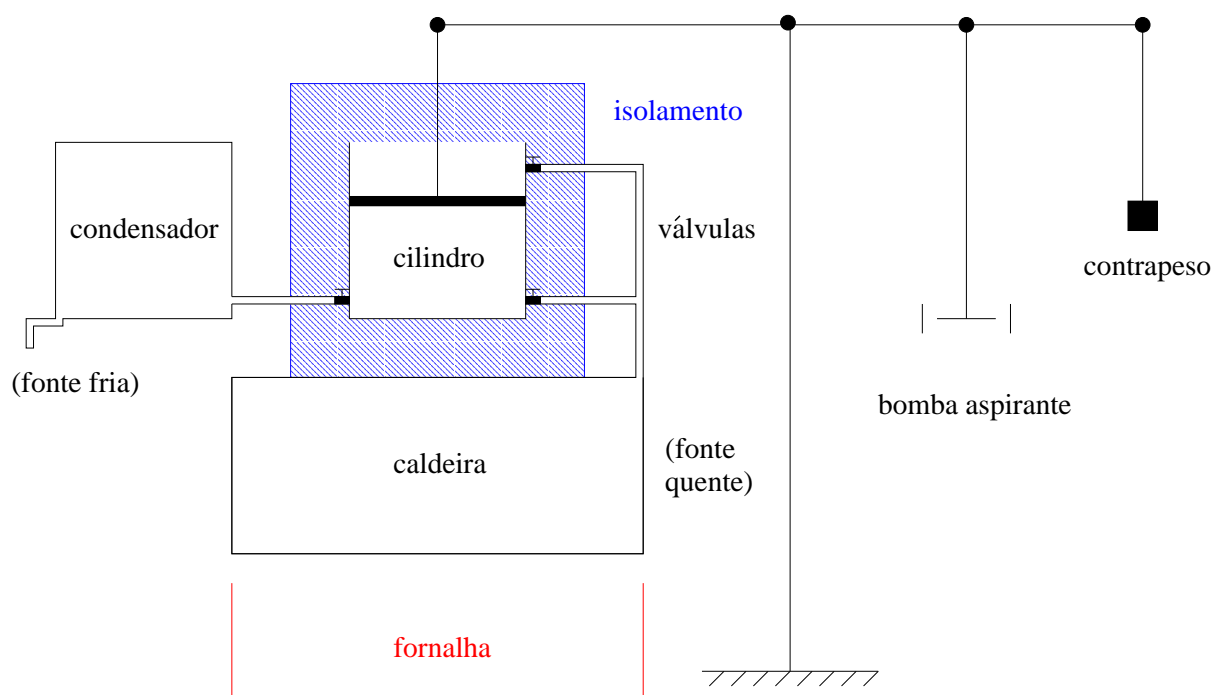


Figura 14.3: Primeira máquina de Watt.

patente expirar em 1800.

A segunda máquina de Watt (ver figura 14.4) apresenta a vantagem de ser de duplo efeito, isto é, o pistão realiza trabalho tanto a subir como a descer. Mediante o uso de um sistema de biela e manivela (conhecido desde o Renascimento) e de um volante, transforma-se o movimento de vai-vem num movimento circular. Watt inventa mais tarde o regulador de bolas, que regulava automaticamente a entrada do vapor. É o primeiro exemplo de uma máquina de *feed-back*, ou retroacção. A primeira teoria do assunto é exposta por Maxwell no seu livro *Sobre a Teoria dos Governadores*.

A Revolução Industrial, cujo início os historiadores fixam em 1770, não é unicamente consequência da máquina a vapor: esta foi condição necessária, mas não suficiente, desse “solavanco” histórico. Eram também necessários capitais e um espírito de criatividade. O processo chega atrasado aos Estados Unidos e ao resto da Europa, criando grandes assimetrias económicas que estarão na base da Primeira Guerra Mundial.

Entretanto, desenvolvera-se a indústria dos têxteis com a invenção, em 1730, da lançadeira móvel, permitindo fazer peças de tecido mais baratas e com as dimensões exigidas. Com a introdução da máquina de fiar (*Spinning Jenny*), a produção multiplicou por 100. Desenvolvem-se particularmente as indústrias da metalurgia, da fabricação de máquinas, e química.

Fala-se por vezes na revolução do petróleo (século XIX) e na revolução informática dos nossos dias. No entanto, a maior parte dos historiadores concordam em que só houve dois grandes acontecimentos na história do Homem: a Revolução Neolítica e a Revolução Industrial. Entre estas, prefere-se imaginar um processo contínuo. Segue-se um gráfico da população mundial desde 1650 (ver figura 14.5).

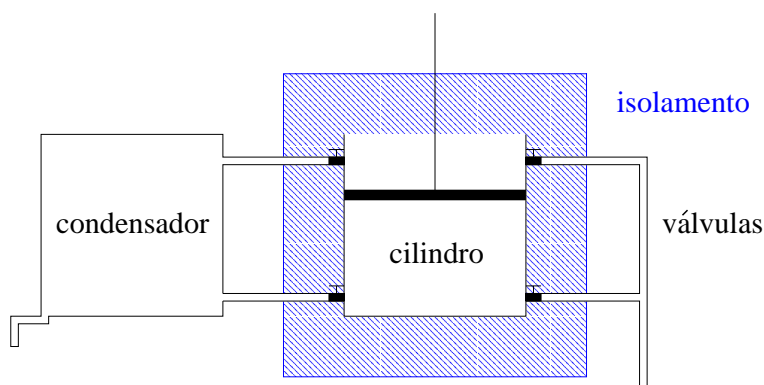


Figura 14.4: Segunda máquina de Watt.

14.5 A revolução da Química

Recordemos, antes de prosseguir propriamente com a evolução da Química no século XVIII, os progressos até aí verificados nessa ciência. Sofrera ela no Renascimento um avanço considerável, pois, com a invenção da imprensa, puderam ser difundidos inúmeros textos de alquimia. Por outro lado, a Química apareceu aliada a interesses práticos, como a tinturaria, a metalurgia, e o fabrico de explosivos. Dá-se precisamente nessa altura um surto de explorações mineiras. O livro *De Re Metallica* (Banner/Agricola) torna-se a bíblia dos metalurgistas. Entretanto, Paracelso chamara importância para a Química Médica; e Van Helmont, um paracelsiano, defende a ideia de que a única substância fundamental é a água. Distingue gases diferentes do ar – metano ou “gás silvestre”. Até então, tinha havido um gás e não gases. Quanto a Boyle, foi, não o pai da Química moderna, mas o coveiro da Química antiga, cujas fragilidades mostrou, tendo ao mesmo tempo tentado definir elemento químico. Note-se, porém, que a revolução da Química chegou cerca de 150 anos atrasada em relação à da Física: enquanto esta se pode datar, grosso modo, de 1630, aquela só se deu por volta de 1780.

O primeiro esboço de uma teoria química surgiu nos fins do século XVII, com **Joachim Becker** (1635–82) e foi desenvolvido por **Georg Ernest Stahl** (1660–1734). Esta teoria, chamada teoria do flogisto, postulava a existência de um fluido universal, um fluido imponderável, princípio do fogo, presente em todos os corpos combustíveis – o flogisto. Uma combustão levaria a separação do flogisto, sendo o corpo “desflogisticado” diferente do original. Como exemplo, o carvão, que arde quase completamente, seria quase só flogisto, sendo este, no entanto, impossível de isolar.

O mérito desta teoria provinha-lhe do facto de ser capaz de explicar os fenómenos de oxi-redução. todos os metais conteriam flogisto em quantidades variáveis (ouro – pouco; prata – muito), sendo a transformação de um metal em óxido (“terra” ou “cal”) consequência da perda do seu flogisto. Boyle constatou que este fenómeno só se dava em presença do ar, o que Stahl explicou admitindo que as partículas de ar eram necessárias para expulsar o flogisto do corpo. A calcinação dava origem à partida do flogisto. Por outro lado, se se aquecesse um óxido com carvão obtinha-se novamente o metal, pois este recebia flogisto do carvão. O flogisto desempenhava assim o papel de um anti-oxigénio.

A maior dificuldade que se punha à teoria do flogisto era explicar que um metal

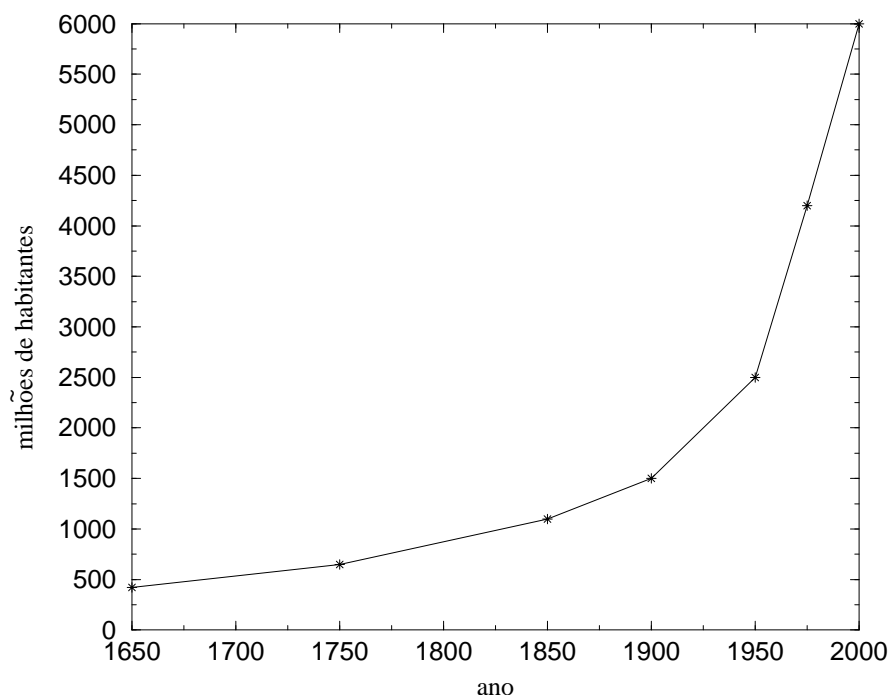


Figura 14.5: Evolução da população mundial desde 1650.

desflogisticado pesasse mais do que um metal normal. Inventaram-se várias respostas, algumas fazendo referência à capacidade levitativa do flogisto, embora a mais prometedora afirmasse que o flogisto, ao partir, deixava na matéria espaços que eram depois ocupados pelo ar.

A partir deste ponto, existe já uma teoria para guiar a pesquisa. Fazem-se inúmeras experiências, não já ao acaso, mas segundo um esquema organizado. Estudam-se os sais de potássio (tártaros) e identifica-se o potássio (alcali fixo vegetal), bem como o sódio (alcali fixo mineral) e o magnésio, cujos carbonatos eram utilizados no tratamento de doenças de estômago. O zinco era já conhecido de Paracelso, que lhe chamara “falsa prata”. Descobrem-se o cobalto, níquel e fósforo, o último dos quais se verifica estar ligado ao fenómeno da fosforecência.

Registam-se igualmente significativos avanços no estudo das substâncias gasosas. Reconhece-se a existência de vários gases e não de um único gás com “impurezas”. Boyle inventa um dispositivo para recolher as misturas gasosas (ver figura 14.6). Este apresentava no entanto o defeito de não permitir a recolha de gases solúveis na água; mais tarde solucionar-se-á este problema substituindo a água por mercúrio.

Em 1755, Black foi o primeiro a reconhecer um gás diferente do ar, o dióxido de carbono, a que chama o “ar fixo”, e que produz a partir de carbonato de magnésio e carbonatos alcalinos. A sua ideia era de difícil aceitação, por abria a porta à existência de outros gases.

Henry Cavendish (1731–1810) descobriu o “ar inflamável” (hidrogénio) em 1765, obtendo-o pela acção do ácido sulfúrico sobre o ferro. Esta reacção era previamente conhecida, tal como o eram outros gases inflamáveis. Usou-se então o ácido clorídrico e o

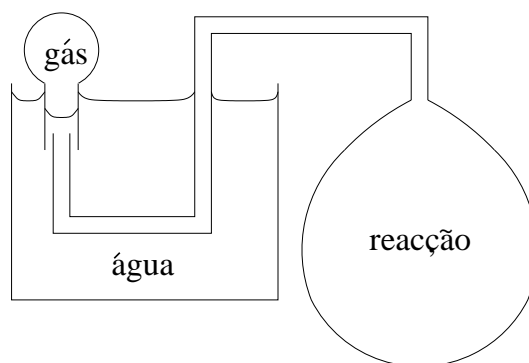


Figura 14.6: Dispositivo de Boyle para recolha de gases.

zinco, verificando-se que também se obtém hidrogénio.

Três pessoas reclamam a descoberta do oxigénio: Scheele, Priestley e Lavoisier. **Willem Scheele** (1742–1786) nasceu na Suécia. Não tinha estudos: interessou-se por Química por trabalhar numa farmácia. Grande experimentador, foi para Upsala, cidade universitária, em 1770, relacionando-se com Bergmann. Preparou o cloro, descobriu a barite, preparou os ácidos tungsténico e molibdénico. Foi um precursor da Química Orgânica, isolando os ácidos cítrico, úrico, tartárico e láctico. Sintetizou ainda a glicerina. Em 1773 preparou oxigénio (a que chamou “ar de fogo”), sendo o primeiro a falar da atmosfera como composta de oxigénio e azoto. O fogo seria uma mistura de oxigénio e flogisto. A sua obra principal foi o *Tratado Químico do Ar e do Fogo* (1777).

Joseph Priestley (1733–1804), inglês, foi educado por um pastor que lhe ensinou Hebraico e Teologia, tendo ele ficado toda a vida obcecado por esta última. Mudou quatro ou cinco vezes de seita religiosa, dedicando-se à Química como hobby. Eleito membro da Royal Society, desinteressou-se mais tarde da Química. Em 1792 a sua casa foi queimada, em consequência do que emigrou para os Estados Unidos, vindo a morrer no Massachusetts. Priestley efectuou experiências sobre o “ar viciado”, isto é, aquele que é incapaz de assegurar combustões ou respiração. Descobriu o “ar ácido” (ácido clorídrico gasoso) e o “ar nitroso” (dióxido de azoto). Em 1774 decompôs o óxido de mercúrio e obteve um gás que animava as combustões. A princípio pensou que se tratasse de dióxido de azoto, “ar nitroso desflogisticado”. Mais tarde chamou ao oxigénio “ar desflogisticado”. Antes, deslocou-se a Paris e contou a Lavoisier as suas experiências. Lavoisier, que podemos considerar o Galileu e o Newton da Química, foi o primeiro a saber que o oxigénio era um elemento – e nesse sentido ele descobriu o oxigénio. Foi ainda o primeiro a saber que o ar era uma mistura de oxigénio e azoto.

14.6 Lavoisier

Antoine Laurent de Lavoisier (1733–1794) nasceu numa família de posição social elevada; o seu pai era conselheiro do parlamento de Paris. Frequentou o Colégio Mazarin, o melhor de Paris. Em 1754 licenciou-se em Direito, para continuar a tradição da família. Despertava nele já, porém, o interesse pelas ciências. Seguiu outros cursos: Química (Ronelle), Botânica (Jussieu) e Geologia (Guétard), ajudando mesmo este último professor

a traçar a primeira carta geológica de França. Este trabalho envolvia recolha de amostras e análises, o que lhe aumentou a capacidade de manuseamento químico.

Em 1766 Lavoisier ganhou um concurso da Académie para a melhor maneira de iluminar uma grande cidade. Por essa altura é admitido, pela mesma Académie, como académico pensionário (o grau mais baixo). A Académie dedicava-se então à resolução de problemas propostos por particulares, ou pelo estado, funcionando como uma espécie de instituto científico e tecnológico. Em 1768 Lavoisier passa a académico adjunto, em competição com um velho e famoso químico. Torna-se também Fermier Général: a Ferme Générale era uma associação de financeiros que comprava ao estado o direito de cobrar certos impostos (quase todos indirectos, na época). O estado libertava-se assim de trabalhos e os Fermiers auferiam grandes lucros. Eram inicialmente 60 e mais tarde 40, tendo Lavoisier começado por ser dono de meia quota. Mesmo assim, tinha um rendimento cerca de 30 vezes superior ao do mais bem pago funcionário real. O preço a pagar por tais lucros era uma extrema impopularidade. Reza a história que a intensidade do contrabando à volta de Paris levou Lavoisier a construir uma muralha à volta da cidade, decisão muito contestada pelos parisienses, que se queixavam de que ela lhes tirava o ar (“Le mur murant Paris rend Paris murmurant”).

Em 1775 Lavoisier aceita a direcção do Instituto das Pólvoras, instalando-se no Arsenal. Inicia a produção científica, e não empírica, da pólvora, o que mais tarde vai permitir a obtenção de importantes victórias do exército francês. Em 1771 casara-se com uma menina de 14 anos, Anne-Marie Paulze. Esta ajudá-lo-ia imenso, funcionando como sua secretária e traduzindo-lhe textos de Química de inglês. O casamento durou até à morte de Lavoisier. Ela tornou a casar, com Benjamin Thompson, Conde de Rumford, mas o casamento não resultou.

O sucesso de Lavoisier deveu-se, por um lado, às suas facilidades materiais, que lhe permitiam adquirir os equipamentos mais avançados; e, por outro, à sua fantástica capacidade de trabalho.

Lavoisier acolhe calorosamente a revolução de 1789, desempenhando papéis no novo regime, como por exemplo membro da “Comissão dos Pesos e Medidas”. Após a radicalização do regime que se seguiu ao juramento da sala do Jeu de Paume (1792), todos os Fermiers Généraux foram acusados e julgados, sendo Lavoisier guilhotinado em Maio de 1794.

A obra de Lavoisier em Química foi tardia. O seu primeiro trabalho data de 1768 e aborda o problema da transformação da água em terra. Scheele havia procedido à análise do resíduo no fundo de um vaso de destilação. Lavoisier fez antes a destilação num vaso selado, concluindo que o peso do resíduo é igual à diminuição do peso do recipiente, sendo aquele portanto partículas deste.

Lavoisier compreendeu a necessidade de criar uma Química, e com esse propósito estabeleceu um programa para 1772/3 (a que Gillespie chama “premonição”): devia estudar a calcinação dos metais e a libertação do dióxido de carbono, os carbonatos e a redução dos óxidos (por temperaturas elevadas ou carvão), e a oxidação. Suspeitou da importância do carvão como redutor e do ar como oxidante.

Priestley constatara que, quando um metal se oxida, o volume de ar presente diminui. Lavoisier, que desconfiava do flogisto, concluiu que o ar se fixa no metal. Usa lentes como fonte de calor, para obter grandes quantidades de calor sem intervenção do fogo. Em 1773 comprova que o acréscimo de peso ocorrido quando um metal se oxida é exactamente compensado pelo decréscimo de peso do ar presente. Boyle já fizera esta experiência, mas,

devido a ter usado um recipiente aberto, concluiu que o peso vinha do fogo. Pesagens precisas levaram Lavoisier a concluir que na oxidação se dá fixação do ar; nunca fala do flogisto. Em 1775 encontrou-se com Priestley. Mais tarde, apercebeu-se de que o ar é uma mistura de dois gases, um comburente e o outro não, os quais são substâncias simples: o ar passa a ser uma mistura! Demonstrou ainda que as transformações metais→óxidos e metalóides→ácidos implicam a fixação de oxigénio.

Lavoisier interessou-se por fenómenos calorimétricos, dado que, no seu círculo do Arsenal, convivia mais com físicos do que com químicos. Introduziu o calórico como elemento químico, com o que foi capaz de explicar desde as máquinas térmicas ao Segundo Princípio da Termodinâmica. Os gases seriam então misturas de elementos com calórico: Por exemplo: oxigénio = oxigene + calórico.

Em 1783 Lavoisier debruçou-se sobre o problema da composição da água, que Cavendish (adepto do flogisto) já havia sintetizado fazendo passar faíscas através de uma mistura de oxigénio e hidrogénio. Lavoisier, juntamente com Laplace, decompõe e sintetiza a água, estabelecendo-a como um composto.

As suas ideias começam a ter crédito em 1785. Publica então dois trabalhos, um dos quais sobre nomenclatura química (até aí: óxido de zinco – lâ filosófica; acetato de cálcio – ???; cloreto de estanho – licor fumante de Sibarius; sulfato de cálcio – cristais de Vénus). **Guyton de Morveau** (1737–1816), advogado de Dijon, teve em 1782 a ideia de inventar uma nova nomenclatura. Falhou porque era adepto do flogisto. Foi para Paris e juntou-se a Lavoisier. Os primeiros discípulos deste, Fourcroy e Berthollet, inventaram a nova nomenclatura, semelhante à actual: o nome deveria dar uma ideia da composição da substância. Este sistema saiu na obra *Ensaio de Nomenclatura Química* (1787).

A partir daí, multiplicam-se as adesões. Em 1789, Lavoisier expõe no seu *Tratado Elementar de Química* a sua teoria e as suas experiências. Divide os elementos em quatro categorias: fundamentais (calórico, luz, oxigénio, hidrogénio, azoto); simples, não metálicos (enxofre, fósforo, carbono, radicais muriáticos, fluóricos e borácicos); metais (17); e substâncias salificáveis terrosas (óxido de bário, óxido de alumínio, dióxido de silício). Salienta que só afirma o que se pode concluir do estado actual dos conhecimentos.

Joseph Black foi um dos primeiros a juntar-se a Lavoisier. Quando este morreu, o seu reconhecimento era quase universal.

Capítulo 15

A Física no século XIX

15.1 O nascimento do átomo científico

A linha que levou ao atomismo científico foi, por estranho que pareça, a questão das afinidades (duas substâncias têm grande afinidade quando têm grande tendência a unir-se quimicamente). Já no século XVII Newton afirmara que os ácidos atraem metais, o que se enquadrava no seu paradigma mecanicista.

Os físicos tornam-se os grandes propagandistas do atomismo. Em 1720 Jouffroy publica uma tabela de afinidades, baseada em experiências muito frágeis, uma vez que não se sabia ainda titular as substâncias. Resultavam daí muitas tabelas de afinidades diferentes: como obter uma solução titulada? Só em 1770 os químicos se aperceberam de que eram necessárias medidas rigorosas. Em 1775 Bergmann tenta obter uma tabela de actividades em termos ponderáveis, e um inglês, Kirkland, tem a ideia de usar como padrão uma solução saturada de cloreto de hidrogénio, a partir da qual calibra soluções ácidas e básicas. Wenzel determina a força dos ácidos mergulhando neles um cilindro de metal e medindo o seu grau de corrosão ao fim de uma hora. Em 1792 Richter enuncia a lei das proporções equivalentes: se tivermos duas substâncias que actuam sobre uma terceira, segundo uma relação de pesos entre as duas substâncias iniciais, então essa relação mantém-se se essas duas actuarem sobre uma quarta substância. Em 1799, o irlandês Higgins publica um livro em que se afirma que as substâncias são constituídas por átomos ou moléculas – todas com o mesmo peso, razão pela qual não teve êxito.

John Dalton (1766–1834), professor de ciências num colégio de Manchester, foi toda a sua vida um apaixonado da meteorologia. Newtoniano fanático, acreditava que o comportamento dos gases podia ser explicado pelas leis da mecânica. (Newton tentara nos *Principia* explicar a lei de Boyle admitindo a existência de uma força repulsiva em $1/r$ actuando entre as moléculas dos gases.) Não há muitos dados sobre Dalton, visto os seus cadernos de notas terem sido destruídos durante a 2ª Guerra Mundial, e os testemunhos de outros cientistas serem contraditórios ou inverosímeis.

Entretanto, um físico americano chamado Henry descobrira que a pressão de um gás e a sua solubilidade na água estão relacionadas. Dalton relacionou então a densidade de um gás com a distância entre os seus átomos, o que implica ser o peso proporcional à densidade. Em 1805 apercebeu-se de que convinha atribuir aos átomos pesos diferentes, e que deveria existir uma relação entre a razão dos pesos e a razão de combinação. É obrigado a postular hipóteses *a priori*: um composto formado por dois elementos seria necessariamente binário; dois compostos de dois elementos seriam um binário e um ternário; três

compostos dos mesmos dois elementos seriam um binário e dois ternários; etc.

Dalton elaborou a primeira tabela de pesos atômicos (ver figura 15.1). Apresentou a

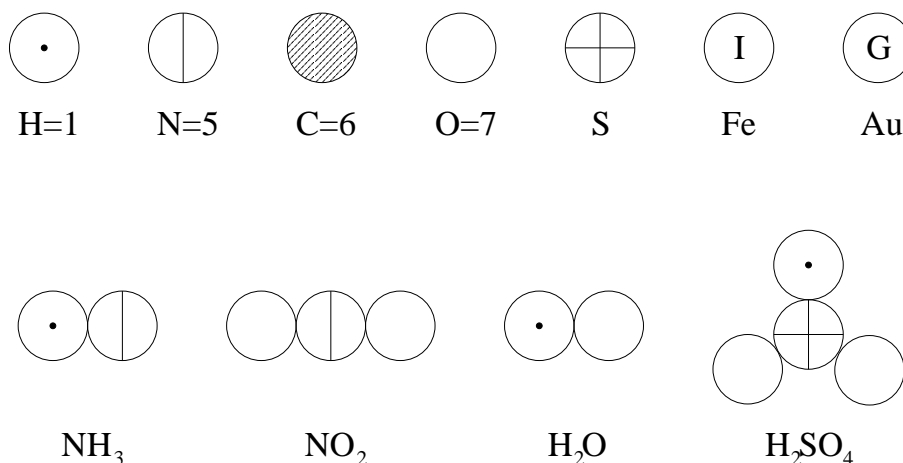


Figura 15.1: Tabela atômica de Dalton.

sua teoria no livro *New System of Chemical Philosophy*, publicado de 1808 a 1826. Foi, no entanto, incapaz de entender as novidades introduzidas nesta teoria.

Joseph Louis Proust (1759–1826) participou em ascensões em balão, tendo como finalidade determinar a composição da atmosfera. Dedicou-se à análise de sais e compostos, afirmando (1801) que os elementos que intervêm num composto o fazem sempre em proporções definidas. Isto não é óbvio, e foi negado por Berthollet, que não fazia a distinção entre mistura e composto. Após uma polémica cortês, Proust ganhou, com o reconhecimento de Berthollet.

Louis Joseph Gay-Lussac (1778–1850) descobriu, aos 24 anos, a lei que tem o seu nome: o volume de um gás, a pressão constante, é directamente proporcional à sua temperatura. Indivíduo versátil, detentor do *record* de subida em balão, descobriu que, quando dois gases se combinam para dar um composto, a pressão e temperatura constantes, a combinação dá-se segundo uma relação volumétrica simples (lei das combinações volumétricas, 1808): por exemplo, dois volumes de hidrogénio com um de oxigénio para dar água.

Amedeo Avogadro (1776–1856) e **André-Marie Ampère** (1755–1836) aperceberam-se de que as leis de Gay-Lussac forneciam um instrumento para determinar as proporções em que os átomos se combinavam: a lei de Avogadro. Dalton, entretanto, nunca aceitou esta lei, por não admitir que dois volumes de um gás dessem um só volume.

Jöns Jakob Berzelius (1779–1848) foi, com Faraday, pai da Electroquímica, e papa da Química durante 12 anos, numa época em que surgia a ideia de que corpos simples teriam uma estrutura molecular. Em 1818 publicou o *Ensaio Sobre a Teoria das Proporções Químicas*, onde apresenta uma explicação coerente da temperatura atmosférica, uma excelente tabela de pesos atômicos, e a notação actual da Química. Utilizou as leis de Gay-Lussac. Em 1819, porém, outras descobertas se vão chocar com as suas. **Dulong** (1785–1838) e **Petit** (1791–1829) descobrem que os calores molares têm em geral o mesmo valor (6 cal/° C). **Mitscherlich** descobre que sais correspondentes às reacções de ácidos diferentes com o mesmo metal cristalizam de forma semelhante – lei do isomorfismo cristalino, o que implica estruturas moleculares, levando a uma revisão da tabela

de massas que contradiz a de Berzelius. Este, atrapalhado por resultados contraditórios, apresenta em 1826 uma resposta pouco satisfatória em que admitia que todas as moléculas gasosas eram binárias: por exemplo, $H_2O = O\bar{H}$, onde \bar{H} é um átomo “duplo”. Além de tudo isto, alastrava nesta altura o positivismo antiatomista de **Comte**: no seu **Curso de Filosofia Positiva**, publicado em 1826, nega a existência do que não for observável.

Em 1832 Berzelius abandona a sua cátedra e dedica-se à literatura. O papa passa a ser **Jean Baptiste Dumas** (1800–1884), um adversário da teoria atômica. Esta morre, dela ficando apenas a vaga noção de *equivalente*. Em 1860 a teoria atômica renasce, pela mão de **Stanislao Cannizzaro** (1826–1910). Este redescobre e compreende Avogadro, e apresenta um sistema de pesos atômicos coerente. Dá-se um retomar da teoria atômica, embora grandes químicos como Berthelot a não aceitem. Os físicos Joule, Clausius e Maxwell serão os primeiros a fazer uma interpretação mecânica do calor.

15.2 A Óptica no século XIX

O século XVIII não trouxe progressos consideráveis à ciência da Óptica. A maior parte dos fenómenos estava já descoberta, e a teoria de Newton actuava como estabilizadora dos conhecimentos. Os progressos mais significativos registaram-se no domínio da instrumentação, incentivados por imperativos práticos e pelas necessidades da Astronomia. A descoberta fundamental foi a das lentes acromáticas: em regra, os meios ópticos são dispersivos, isto é, o índice de refração varia com o comprimento de onda da luz. Segue-se daqui que uma lente provoca uma distorção — aberração cromática. Segundo Newton, este fenómeno seria inevitável (razão pela qual ele se interessou pela construção de telescópios reflectores). Mas, no século XVIII, Chester Hall descobriu que, mediante o uso de várias substâncias ópticas com diferentes índices de refração (por exemplo, quartzo e cristal de vidro) se poderia eliminar a aberração cromática e obter muito melhores telescópios.

Isto despoletou consideráveis progressos em Astronomia. **William Herschell** (1738–1822) descobriu Urano e foi o primeiro a explorar a Via Láctea, cujas dimensões calculou (com má precisão), bem como a sua forma (com maior precisão). com ele, a Astronomia ultrapassou os limites do Sistema Solar.

Havia já há algum tempo a ideia de que as estrelas mais brilhantes eram as mais próximas, e pretendia-se usar esse facto na medição das suas distâncias à Terra. Esse processo utilizava as estrelas mais longínquas como plano de fundo: observando uma estrela próxima em relação às distantes com 6 meses de intervalo, teríamos um triângulo para calcular as distâncias, sabidos um lado (diâmetro da órbita da Terra) e um ângulo (das duas direcções de observação).

James Bradley (1693–1762) acreditou em 1725/8 ter observado a paralaxe de uma estrela. Esta parecia descrever no céu uma pequena elipse, que no entanto era demasiado irregular para ser explicada a partir do movimento da Terra. Bradley compreendeu que estava a observar a aberração da luz. contudo, só daí a um século se fizeram as primeiras medições rigorosas (Bessel, Anderson; 1830–40).

Thomas Young (1773–1829), médico inglês, convenceu-se em 1801 de que havia encontrado argumentos em favor da teoria ondulatória da luz. Retomou as experiências de Grimaldi (luz + luz = escuridão), observando a princípio uma fonte luminosa através de um furo de alfinete num cartão. Mas a luz obtida é quase sempre incoerente (pois é

emitida independentemente por cada átomo, como hoje se sabe). Havia então que utilizar duas ranhuras para produzir fenômenos de interferência, de modo que as flutuações de fase se dessem de forma idêntica: o interferómetro de Young (ver figura 15.2). Mas Young sabia

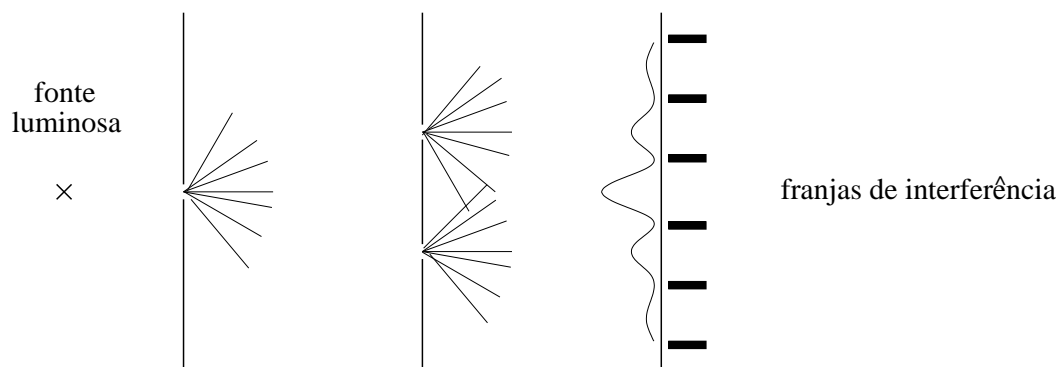


Figura 15.2: Interferómetro de Young: observam-se as interferências produzidas pela luz colimada por duas aberturas.

pouca Física e pouca Matemática: os corpusculistas – Laplace, Poisson, Biot, Brewster – logo o confundiram com os seus argumentos, de tal maneira que, durante o resto da sua vida, Young apenas se dedicou à Óptica Médica.

Etienne Malus (1775–1812), reformado do exército de Napoleão após a campanha do Egipto, possuía uma boa formação em Física. Por essa altura, a Académie propôs um concurso para a explicação da dupla refração. Malus, observando através de um cristal de calcite a luz reflectida por uma janela, via ora dois Sóis, ora um, à medida que rodava o cristal. Pensou então que a luz adquiriria por reflexão novas propriedades. Corpusculista como era, introduziu a hipótese de que os corpúsculos teriam um carácter direccional, algo como pólos: luz polarizada. A luz poderia ser polarizada por refração (totalmente) ou por reflexão (parcialmente). **Brewster** (1781–1868) descobriu que, por reflexão, a polarização da luz era máxima quando os raios incidente e reflectido faziam entre si um ângulo de 90° . Este e outros fenómenos estranhos, tais como o de duas reflexões em dois cristais de calcite eliminarem a refração, foram enviados pelos corpusculistas a Young.

Augustin Fresnel (1788–1827) começou por ser engenheiro civil. Monárquico convicto, foi exilado na sua aldeia natal aquando dos Cem Dias. Resolveu então dedicar-se aos problemas da luz. Possuía uma boa formação matemática, uma enorme capacidade de trabalho e espírito lógico, bem como alguns conhecimentos de Física. Ignorante dos trabalhos de Huygens, escreveu a **François Arago** (1786–1853), enviando-lhe os seus trabalhos, e progredindo através dos conselhos deste. Retoma a argumentação da teoria ondulatória, alicerçando-a em sólidas bases matemáticas. A partir daqui, foi capaz de explicar a difracção e a interferência, de corrigir Young e de redescobrir o Princípio de Huygens. Fresnel propôs mesmo uma experiência como o seu interferómetro (ver figura 15.3): neste caso, a interferência é a de fontes virtuais. Fresnel propunha-se ganhar um prémio da Académie, o que prometia ser difícil, uma vez que o júri (Laplace, Biot, Poisson, etc) era inteiramente corpusculista. Poisson decidiu então levar a teoria de Fresnel às suas últimas consequências, prevendo a existência de um ponto luminoso no centro da sombra de um objecto circular iluminado por uma fonte pontual (o que era absurdo).

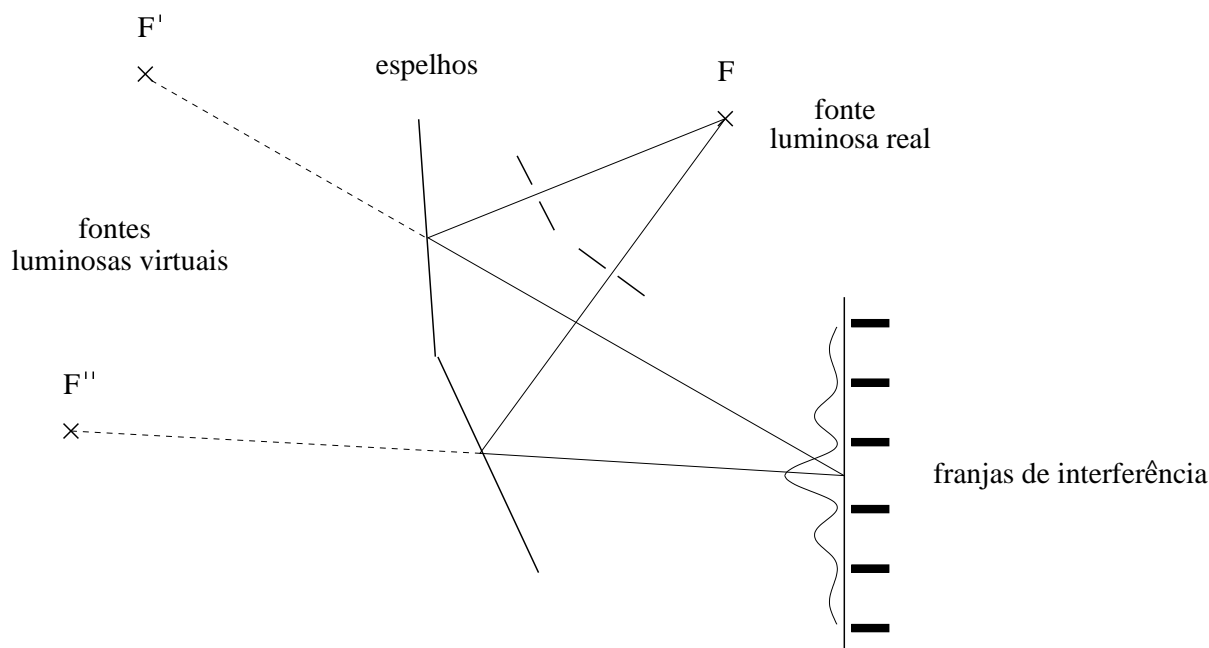


Figura 15.3: Interferômetro de espelhos de Fresnel. A interferência dá-se entre as ondas reflectidas pelos espelhos, correspondentes às fontes virtuais F' e F'' .

Mas, em 1819, a experiência confirmou a previsão, e Fresnel ganhou o seu prémio.

Fresnel, tendo constatado que dois raios luminosos polarizados perpendicularmente não interferem, tentou entender a polarização. Uma vez que eram necessários dois graus de liberdade para descrever a luz, esta deveria, ao contrário do som, consistir numa onda transversal. Em condições normais (luz não polarizada) não haveria direcções privilegiadas. De facto, se a intensidade da luz for $I = (\vec{A} + \vec{B})^2 = A^2 + B^2 + 2\vec{A} \cdot \vec{B}$ e $\vec{A} \perp \vec{B}$, o termo de interferência $\vec{A} \cdot \vec{B}$ é nulo e $I = A^2 + B^2$, não há interferência.

Fresnel explicou ainda os fenómenos dos meios cristalinos, a polarização circular, a tríplice refacção num meio cristalino, e a polarização elíptica (ligada à reflexão da luz em superfícies metálicas). A sua teoria dava, porém, azo a previsões desconcertantes: **Hamilton** (1805–1865) mostrou que, se a luz incidisse num cristal birrefringente segundo um determinado ângulo, o feixe refractado sairia segundo uma superfície cónica (oca)! Em 1832, Lloyd verificou experimentalmente esta bizarra previsão.

15.3 A Electricidade no século XIX – I

Nos finais do século XVIII, dispunha-se de uma teoria da electrostática bastante razoável. Os pesquisadores já se haviam apercebido da corrente eléctrica, mas, dada a baixa intensidade das correntes envolvidas em fenómenos observáveis (descargas de corpos carregados, etc), esta era considerada um fenómeno transitório sem interesse. Foi então que se deu a descoberta dos geradores.

Luigi Galvani (1737–98), fisiologista e professor de Medicina em Bolonha, interessava-se pelo estudo dos batráquios, procedendo à vivisecção de rãs para estudar os seus

músculos. Ora, quando alguém tocava os músculos da pata de uma rã com um bisturi, produzia-se uma contracção intensa destes. O mesmo fenómeno repetia-se quando alguém fazia saltar uma faísca de uma máquina electrostática (hoje diríamos que o bisturi funciona como antena). Estava nessa altura na moda a electricidade animal, provocada por curiosidade acerca das enguias eléctricas e outros animais do género. Fizeram-se então experiências consistindo em colocar a rã na base de um pára-raios, para observar a sua contracção à passagem de nuvens carregadas. Galvani pendurava as rãs na varanda do seu palácio, suspensas de um balcão de ferro por um gancho de cobre. Num dia sem nuvens, a rã tocara acidentalmente no ferro (fechando o circuito) e imediatamente se contraía. No seu livro *Comentários sobre as Forças Eléctricas dos Organismos Animais*, Galvani defendeu ser a electricidade produzida pelo cérebro e transportada pelos nervos, funcionando o animal como uma garrafa de Leiden, com o interior positivo e o exterior negativo.

Alessandro Volta (1745–1827) era um físico interessado em fenómenos eléctricos, que já se celebrizara pela invenção do electróforo. Retomou as experiências de Galvani e constatou que obtinha uma contracção sempre que ligava as patas da rã com um fio de ferro e cobre. Mas, segundo Galvani, isto não deveria dar-se, uma vez que a carga das duas pernas deveria ser de igual sinal. Todavia, com um fio de um só metal nada acontecia: o fenómeno tinha que ver com os dois metais. Volta fez então uma série de experiências consistindo em colocar uma moeda da prata sob a língua e tocar com esta uma moeda de estanho: sentia um sabor ácido. Ao trocar a posição das moedas, os sabor tornava-se alcalino. Fazendo a experiência numa sala escura, julgou mesmo ver um relâmpago.

Em 1792 Volta concluiu que a presença dos dois metais era essencial, funcionando a rã apenas como electroscópio. Associou então a transmissão de carga a diferenças de potencial entre metais. Em 1795 publicou uma lista em que os metais são ordenados por ordem crescente da sua tendência a carregarem-se positivamente: Zn, Sn, Fe, . . . , C. Enunciou ainda uma lei segundo a qual, se entre dois metais A e B existe uma diferença de potencial AB e entre B e C existe a diferença de potencial BC , então entre A e C existe a diferença de potencial $AC = AB + BC$. Volta distinguiu dois tipos de condutores: metais e húmidos (electrólitos). compreendeu que, ao ter um metal em solução, obtinha uma corrente eléctrica, fraca mas permanente. Visando aumentar a intensidade da corrente, aumentou o número de condutores presentes.

Em 1800 Volta escreveu uma carta à Royal Society sobre o órgão eléctrico artificial, onde descreve o primeiro gerador de corrente. Em virtude da constituição e aspecto deste, chama-lhe *pilha*. A pilha suscitou de imediato o interesse dos estudiosos. Davy, entre outros, lançou-se a experiências de electrólise, provando que a decomposição da água liberta sempre dois volumes de hidrogénio por cada volume de oxigénio. A electrólise permitiu ainda isolar metais como o bário, o cálcio ou o magnésio. Deu-se uma corrida para pilhas cada vez maiores; Napoleão encarregou a Ecole Polytechnique da construção de uma pilha com 600 pares, que fornecia uma tensão de 500 V e uma corrente de 10 A: consistia em discos de dois metais diferentes sobrepostos, intercalados com discos de papel embebidos em electrólito.

Entretanto, em Inglaterra fazia-se uma subscrição para construir uma pilha maior. Surgiam no entanto problemas, pois a pressão fazia escorrer o líquido das camadas inferiores. Havia, porém, outro processo: mergulhar dois condutores num voltâmetro. Os ingleses utilizaram assim 1000 recipientes e outros tantos pares, tendo este dispositivo sido entregue à Royal Society para ser utilizado por Davy. Este estudou a elevação de tem-

peratura nas barras, introduziu o conceito de condutividade eléctrica, e descobriu o arco eléctrico (passagem da corrente através do ar tornada curva pela subida de ar aquecido). Volatiliza o quartzo e o diamante, e funde quase tudo.

Surgiu nesta altura uma curiosa crença nos efeitos terapêuticos do choque eléctrico. **Hans-Christian Oersted** (1777–1851) descobriu em 1820 que uma corrente eléctrica actua sobre uma agulha magnética. Ao contrário do que habitualmente se diz, a descoberta não foi ocasional: ele já a procurava, mas não tinha geradores suficientemente potentes e, além disso, era travado por razões filosóficas. Seguindo o paradigma newtoniano, Oersted procurava uma força dirigida segundo a linha corrente – íman (quando a verdadeira força é perpendicular a esta linha – o que era estranho para a época). Oersted não era, ao contrário do que se costuma dizer, um puro experimentalista: estava ligado à escola de Kant e Leibniz, e cria na conservação de algo na natureza (ao contrário dos newtonianos). Arago teve conhecimento dos trabalhos de Oersted, e verificou que a acção se exercia mesmo sobre uma agulha não magnetizada; além disso, este efeito era multiplicado se o condutor fosse enrolado à volta de uma vareta de metal.

Jean-Baptiste Biot (1774–1862) e **Félix Savart** (1791–1841) tentaram determinar a lei que governa o fenómeno descoberto por Oersted. Descobriram a regra da mão direita (ver figura 15.4). A intensidade do campo magnético B a uma distância d de um

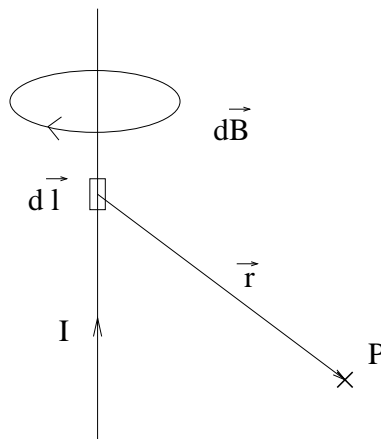


Figura 15.4: Lei de Biot-Savart: indução magnética $d\vec{B}$ devida ao elemento de corrente $I d\vec{\ell}$. O sentido de $d\vec{B}$ é dado pela regra da mão direita.

condutor longo e rectilíneo é dada por $B = CI/d$, onde C é uma constante. Generalizando a qualquer corrente, tem-se a Lei de Biot-Savart (descoberta por Ampère): se for $d\vec{\ell}$ o elemento de comprimento (apontando no sentido da corrente) de um condutor delgado transportando uma corrente de intensidade I , e se for \vec{r} o vector com origem em $d\vec{\ell}$ e terminando no ponto P onde se faz a observação (ver figura 15.4), então a amplitude $d\vec{B}$ do fluxo magnético em P é dada por

$$d\vec{B} = \frac{1}{c} \frac{I d\vec{\ell} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3}.$$

Mas então também um íman deveria actuar sobre uma corrente eléctrica. Davy observou a acção de um magnete sobre o arco eléctrico, e tinha-se uma relação quantitativa para

a força actuante sobre um elemento de corrente $I d\vec{\ell}$ na presença do campo \vec{B} – a Lei de Laplace (descoberta por Ampère):

$$d\vec{F} = I d\vec{\ell} \times \vec{B}.$$

André-Marie Ampère (1775–1836) era dotado de extraordinário talento poético, mas psiquicamente muito sensível. O seu pai fora guilhotinado durante a Revolução Francesa. Ampère foi mesmo um precursor do Romantismo, vítima de infelicidade conjugal. Grande matemático, trabalhou em probabilidades, integrais, e no problema da cadeia suspensa. Redescobriu a hipótese de Avogadro. Dedicou-se ainda à Astronomia, e em 1813 foi eleito para a Académie, indo ocupar o lugar de Lagrange. Em 1826 publicou o livro em que expõe uma teoria geral dos fenómenos electromagnéticos: a *Teoria Matemática dos Fenómenos Electrodinâmicos Unicamente Deduzida da Experiência*. Dele disse Maxwell que tinha sido o “Newton da electricidade”.

Será então que as correntes interactuam? Sim, mas para estudar isto era preciso investigar os efeitos de comprimentos infinitesimais de condutores em qualquer posição. Obtém, para a força entre dois elementos de corrente $I d\vec{\ell}$ e $I' d\vec{\ell}'$ afastados de \vec{r} ,

$$d\vec{F} = \frac{1}{c^2} \frac{I d\vec{\ell} \times (I' d\vec{\ell}' \times \vec{r})}{|\vec{r}|^3}.$$

E por que razão actuam o magnetismo e a electricidade um sobre o outro? Ampère tratou de reduzir o magnetismo à electricidade, associando-o à presença de correntes macroscópicas fechadas em torno do eixo N–S. Mais tarde, Fresnel sugeriu que as correntes poderiam ser microscópicas, o que permitiu explicar a magnetização: o campo do íman ordena as correntes, sendo esta ordenação lentamente destruída pela agitação interna. Estas ideias não estão longe das actuais.

15.4 A Electricidade no século XIX – II

Em 1821, **Thomas Seebeck** (1770–1831), preocupado com as junções bimetálicas, tentava observar uma corrente eléctrica usando uma junção de cobre e bismuto. Mas observava a passagem da corrente apenas quando segurava a junção com a mão. Depressa descobriu que o que importava não era a mão, mas o calor da mão. Utilizando uma chama, verificou que, aquecendo a junção do termopar, obtinha electricidade – efeito Seebeck. Esta fonte – termopar – era melhor do que uma pilha, uma vez que uma pilha polarizava-se e um termopar não. Assim, a corrente obtida a partir de um termopar era de intensidade constante.

Georg Ohm (1787–1854) estudou em 1826 a relação entre a intensidade da corrente e a “força electroscópica”. Constatou que, quando fechava um circuito de n termogeradores em série produzindo uma força electroscópica nE , se tinha uma corrente I tal que $nE = I(nR_0 + R)$, onde R_0 é a resistência de cada gerador e R a do condutor – lei de Ohm. Mais tarde, Kirchhoff identificou a “força electroscópica” com uma diferença de potencial à maneira de Laplace e Green.

Por volta de 1832, **Peltier** (1785–1845), relojoeiro francês, descobriu o efeito inverso do efeito Seebeck: a passagem de corrente arrefece as junções bimetálicas – efeito Peltier. A partir daqui podia congelar-se água por meio da electricidade.

A primeira tentativa de interpretação dos fenómenos eléctricos devera-se ao newtoniano Coulomb, e fora matematizada por Poisson. Mas a electricidade não se enquadrava bem no mecanicismo newtoniano, devido à existência de dois sinais, e de cargas que apareciam e desapareciam. A electrodinâmica foi razoavelmente explicada por Ampère, tendo Oersted proposto uma interpretação mais heterodoxa (na linha kantiana). Mas, como este último não era tão bom matemático e não se baseava em concepções tão sólidas, foi menosprezado.

Michael Faraday (1791–1867) nasceu numa família pobre e só fez estudos elementares. Aos 14 anos trabalhava numa oficina de encadernação e sonhava com ascensão social, ao mesmo tempo que acalentava o desejo de ser cientista. Frequentava cursos para aprender a falar e escrever bem. Ora o conde de Rumford fundara a Royal Institution, para desenvolver as ciências e facultar o acesso à ciência daqueles que pertenciam às classes mais baixas. Faraday foi a essas palestras, financiado pelo seu patrão, que lhe facultava a leitura de livros.

Em 1812 Faraday pediu emprego na Royal Institution, pedido este que foi indeferido. Em 1813 arranjou emprego junto de Davy, como contínuo. Ascendeu rapidamente a preparador, assistente, colaborador e, por fim, cientista mais famoso do que Davy. Este a princípio não gostou, mas mais tarde reconheceu o valor de Faraday, considerando-o “a sua melhor descoberta”.

No campo da Química, Faraday descobriu o benzeno. Como secretário de Davy, viajou por toda a Europa, e conheceu os principais físicos da época. Trabalhou ainda no domínio das baixas temperaturas, liquefazendo gases (por exemplo o cloro) e compreendendo porque certos gases (ditos “permanentes”) são difíceis de liquefazer.

No campo da Electroquímica, verificou que, na hidrólise de diferentes substâncias, a carga utilizada é proporcional ao número de moléculas decompostas, o que era um argumento em favor da teoria atómica.

Não se poderia produzir uma corrente com outra corrente? Sim, e outros, como Ampère, já o haviam feito, embora sem disso se aperceberem. Faraday realizou experiências enrolando condutores à volta de toros de madeira, mais tarde substituídos por metal. Construiu uma espécie de motor eléctrico, constituído por um disco que se fazia girar, por meio de uma manivela, entre os pólos de um íman, disco este munido de duas escovas, uma na periferia e outra no eixo – o primeiro gerador electromagnético. Alguns anos depois surgiu o primeiro motor eléctrico, e só 30 anos depois o dínamo, por Siemens e Gramme, despoletando a chamada “segunda revolução industrial”.

Faraday foi um grande experimentador: procedia sempre por variação sistemática de todos os factores passíveis de influir no resultado de uma experiência. Interessava-se imenso por crianças, inaugurando na Royal Institution uma série de palestras para elas, bem como as célebres palestras de 6^a-feira à noite, dedicadas a um público geral. Em 1858 retirou-se, devido a esgotamento.

Mas Faraday foi, fundamentalmente, o inventor do conceito de campo. Incomodava-o o positivismo, segundo o qual a verdade resulta directamente da experiência e a teoria é apenas uma forma de resumir observações. Faraday rejeita esta doutrina, não por ignorância, mas devido à sua preocupação filosófica: queria descobrir, tal como Einstein, “como Deus fizera o mundo”.

Seria o paradigma newtoniano adequado? Faraday duvidava conscientemente, e conhecia as alternativas de Descartes e Leibniz. Adere a Leibniz, estabelecendo uma linha que passará por Maxwell, até Einstein. Faraday lera Boscovitch, Oersted e Kant. O kan-

tismo sofreu profundas influências de Descartes e Leibniz: a ideia da unidade das forças da natureza, o uno por trás do múltiplo, sendo o uno conservativo. Faraday busca então a união da electricidade com o magnetismo.

Sabia-se que os meios dieléctricos influenciavam os condutores. Que sucederia se se introduzisse dois eléctrodos numa substância não condutora? A carga dos eléctrodos era afectada pela presença de diferentes líquidos (estudo das correntes abertas). Isto leva a uma versão generalizada da lei de Coulomb:

$$F = \frac{1}{\epsilon} \frac{qq'}{r^2} \quad \text{em vez de} \quad F = \frac{qq'}{r^2} \quad (\text{v\u00e1cuo}),$$

sendo ϵ a permitividade eléctrica do meio. Vejamos agora o que se passa no caso de duas placas e um dieléctrico (ver figura 15.5): as moléculas do dieléctrico são polarizadas pela

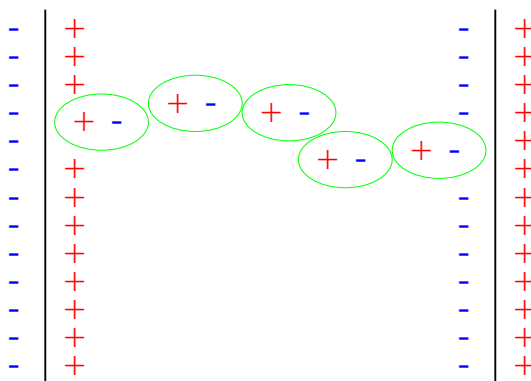


Figura 15.5: Polarização de um dieléctrico colocado entre duas placas carregadas.

influência das cargas, transformando-se em dipolos. Formam-se então cadeias entre as placas, que levam a que decresça a diferença de potencial entre estas, visto acumularem-se cargas positivas junto à placa negativa, e cargas negativas junto à placa positiva – condensação parcial. Logo, o condutor pode armazenar mais carga do que na ausência do dieléctrico.

Mas e se não houver dieléctrico? Então as cargas das placas actuariam à distância? Não: segundo Faraday, os corpos só podem actuar uma vez em contacto. Então, mesmo na ausência de dieléctrico, o próprio espaço transmite a acção eléctrica. O dieléctrico apenas reforça esse efeito. Daqui vem um espaço com propriedades físicas, muito diferente do de Newton. Um corpo magnetizado ou electrizado cria no espaço um estado de tensão, uma distribuição de energia no espaço – isso é que é real.

As linhas de força são uma ideia antiga. Como linhas perpendiculares às superfícies equipotenciais, já haviam sido observadas por Green e Gilbert, mas eram tomadas por simples instrumentos matemáticos (analogamente, podemos perguntar-nos se o potencial terá uma realidade física). Para Faraday, porém, elas traduziam o estado de tensão do espaço. Ele tinha poucos conhecimentos matemáticos, mas muita imaginação, e analisou o que se passava enquanto o fenómeno da condensação se não estabilizava (por exemplo, durante a ligação à terra): as cargas positivas vão num sentido e as negativas no sentido oposto, o que é equivalente a um deslocamento só de cargas positivas – corrente de

deslocamento. Esta existe mesmo sem dieléctrico, e é tão real como as que estão nos fios. Logo, deve criar um campo magnético.

As concepções segundo as quais o espaço é sede de fenómenos permitem a interpretação dos fenómenos electromagnéticos (as linhas de força eram quase como elásticos). Disse Helmholtz que Faraday descobriu com a intuição algo de muito avançado. James Clerk Maxwell vai contar matematicamente a história de Faraday.

15.5 Os princípios da Termodinâmica

Já antes da famosa descoberta quase simultânea, por quatro pessoas, do Primeiro Princípio da Termodinâmica, **Sadi Carnot** (1798–1832), um jovem engenheiro francês, tinha-o intuído, ainda no âmbito do calórico. Carnot inventara já uma versão do Segundo Princípio, e só a morte o impediu de chegar ao Primeiro.

Diz-se que a tese do calórico teria sido combatida por Davy e Rumford. Davy teria esfregado um contra o outro dois pedaços de gelo, que se teriam liquefeito. Recentemente, tentou-se reproduzir esta experiência, e concluiu-se que ela não é possível, devido ao reduzido atrito do gelo. O resultado pretendido só seria obtido se se aplicasse pressão sobre o gelo, o que, no entanto, o desfaria. É, portanto, pouco crível que Davy tenha realizado tal experiência pois, acomodado como era, dificilmente a levantaria contra o calórico.

Rumford, agente secreto britânico durante a guerra da independência americana, conseguiu tornar-se ministro da guerra do rei da Baviera, tendo a seu cargo a fiscalização do fabrico de canhões. Para fabricar um canhão era preciso perfurar, com uma broca, um cilindro de metal, o que, por ser uma operação lenta e demorada, era realizado dentro de água, sendo esta constantemente substituída para manter a temperatura. Rumford tentou descobrir de onde viria todo esse calor, que bastava para fazer ferver a água. A teoria do calórico não chegava, pois este “calórico” parecia não se esgotar. Contudo, as observações de Rumford foram desprezadas.

Deu-se então a célebre descoberta simultânea.

Julius Robert Mayer (1814–78) era um médico alemão interessado em Física fisiológica, sendo o seu maior interesse o modo como os organismos vivos libertavam calor. Em 1840 fez uma longa viagem como médico num veleiro que partia para Java, completamente desocupado devido à boa saúde da tripulação. Ao chegarem a Java, segundo se conta, Mayer teve de fazer uma sangria, constatando que o sangue venoso era mais escuro do que o que ele conhecia. Concluiu que a combinação do sangue com o oxigénio se fazia de forma mais completa em Java, devido à elevada temperatura. Daqui lhe veio a ideia da transformação do trabalho em calor, com a conservação de alguma coisa.

Quando Mayer chegou à Europa, redigiu um artigo vergonhoso em que dizia que “algo” se conserva. Esse “algo” podia ser de posição, cinético, químico ou eléctrico. O artigo foi recusado quando Mayer o enviou a Pogendorff (que nem o leu). Mayer, sentindo-se perseguido, mostra o seu artigo a um amigo, que lhe corrige os erros. Este novo artigo foi publicado em 1845. Nele, Mayer determina o equivalente mecânico da caloria a partir de leis conhecidas. Exemplo: para elevar a temperatura de uma mole de gás, fornece-se o calor molar a volume constante, C_V (ver figura 15.6). Se o pistão puder mover-se, tem de se fornecer C_P – calor molar a pressão constante. $C_P > C_V$, pois se o volume for constante não se realiza trabalho a mover o pistão. Se a pressão P for constante (pistão móvel),

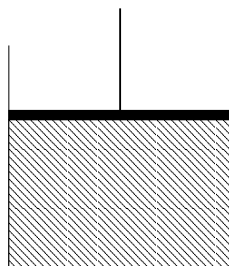


Figura 15.6: Dispositivo para determinar o calor molar de um gás.

há realização de trabalho. Mas, segundo Gay-Lussac, a dilatação de um gás inicialmente ocupando o volume V_0 segue $V = V_0(1 + \alpha\Delta t)$, onde Δt é a variação de temperatura e $\alpha \approx 1/273$. Se $\Delta t = 1^\circ \text{C}$, vem $\Delta V = V - V_0 = \alpha V_0$, logo o trabalho realizado para efectuar a dilatação ΔV é $W = P\Delta V = \alpha P V_0$. Daqui vem que $C_V - C_P = \alpha P \Delta V_0$ (nas unidades habituais (???), $J(C_V - C_P) = \alpha P \Delta V_0$), e deve poder determinar-se o equivalente mecânico do calor.

Mas este segundo trabalho também não teve êxito. Mayer, transtornado por ver as suas descobertas atribuídas a outros, enlouqueceu e esteve internado. Depois, levou uma vida difícil. Finalmente, em 1860, a Royal Society atribuiu a medalha de ouro a Joule e a Mayer, pela descoberta do Primeiro Princípio, pelo que Mayer pôde morrer tranquilo.

James Prescott Joule (1819–91) era filho do dono de uma cervejaria em Manchester, a qual herdou. Aluno de Dalton, interessou-se pela electricidade e pela produção de calor por esta (1840). Joule tentou determinar de que dependia esse calor libertado, Q , chegando a $Q = \text{const.}RI^2$, onde R é a resistência e I a intensidade da corrente – lei de Joule. Mas de onde vinha o calor? O calórico só poderia vir da pilha, que então arrefeceria. Mas ela aquecia!

Joule interessara-se também por motores eléctricos, e constatara que, quando introduzia um motor eléctrico num circuito, I e Q diminuían, dependendo da potência do motor. Estabeleceu então uma relação entre as características do motor e do circuito, suspeitando da possibilidade de conversão de uma forma de energia em outra. Realizou imensas experiências (por exemplo: a do peso que, ao descer, faz rodar uma haste munida de palhetas, aquecendo o líquido em que esta esta imersa, demonstrando a transformação de energia potencial em energia térmica; ou o aquecimento de um líquido ao passar num tubo estreito) para determinar o equivalente mecânico do calor, as quais deram a princípio resultados contraditórios. Joule analisou as causas de erro e chegou ao valor coerente $1 \text{ cal} = 4.24 \text{ J}$.

Ludwig Colding (1815–89), dinamarquês, cria, por razões metafísicas, que só havia uma força, devendo todas as energias ser equivalentes.

Hermann Helmholtz (1821–94) foi um médico alemão que se transformou em físico. Na sua juventude fez trabalhos teóricos. Em 1848 tentou interpretar o calor em termos de energia mecânica e deduziu, a partir das forças centrais, a relação entre trabalho e calor.

A respeito do Segundo Princípio, temos não já uma descoberta simultânea, mas uma descoberta convergente. Em 1824, o livro de Carnot, *Reflexões sobre a Força Motriz do Fogo*, anuncia-o. Nele se introduz o motor térmico ideal, como aquele cujo rendimento só depende da diferença de temperatura entre as fontes quente e fria. Mas Carnot era

adepto do calórico e ninguém lhe leu o livro.

Na década de 1820, Clapeyron redescobriu Carnot e ficou fascinado. Carnot explicara, por meio de um fluido conservativo, o funcionamento dos motores térmicos: como a água numa azenha, o calórico passava do quente para o frio, fazendo “girar” a máquina. A diferença de alturas correspondia aqui à diferença de temperaturas. Clapeyron, por seu turno, inventa os diagramas da Termodinâmica, entre os quais o famoso diagrama de Carnot. A partir daí, a obra deste último é difundida.

William Thomson, Lord Kelvin (1824–1907) foi um menino prodígio, tendo dirigido a instalação do primeiro cabo submarino. Conheceu os trabalhos de Clapeyron durante um estágio em Paris e, juntamente com um alemão, **Rudolf Clausius** (1822–1888), desenvolveu as ideias de Carnot.

São estes os três grandes do Segundo Princípio. Mas tudo isto é uma história muito esquisita! Então aparece o Primeiro Princípio, descoberto por quatro pessoas, depois do Segundo, em cuja descoberta três pessoas se completam?

15.6 Uma outra versão da história da Termodinâmica

Durante os seus primórdios, a Revolução Industrial cingiu-se à Grã-Bretanha, só se estendendo à Europa continental e América algum tempo depois. Em 1850, existiam na Europa continental máquinas a vapor fixas cuja potência conjunta igualava um milhão de kW, bem como 40 000 km de caminhos de ferro. Assim, na primeira metade do século XIX, a máquina a vapor, concebida expressamente como aparelho que transforma calor em trabalho mecânico, era comum na Europa. Media-se mesmo o seu rendimento, pela razão entre o trabalho produzido e o combustível gasto na obtenção de calor.

Em 1775 a Académie des Sciences decidiu não aceitar mais trabalhos sobre a construção do motor perpétuo, o que implica o conhecimento da irrealizabilidade deste. Então porque demorou tanto tempo a aparecer a Termodinâmica? Segundo a escola de Bernal, “a Termodinâmica deve mais à máquina a vapor do que a máquina a vapor deve à Termodinâmica”. Isto é discutível e parcial. A máquina de Watt tinha como base um certo desenvolvimento científico, tendo Black feito experiências de propósito para Watt.

O estudo do calor sofrera um desenvolvimento considerável da parte de Lavoisier e Laplace (1784). Eles consideravam o calor como uma substância imponderável e o primeiro elemento químico. Como consequência, o calórico dominou a cena científica durante cerca de 60 anos. Com efeito, a teoria do calórico era bastante flexível e fecunda, podendo ser matematizada. O calórico era um fluido corpuscular, cujas partículas exerciam entre si forças de repulsão em $1/r^n$, com $n > 2$. Isto ajudava a explicar por que razão os átomos de um corpo não tombavam uns sobre os outros devido à atracção gravítica, fazendo desabar o corpo. Todos os corpos teriam calórico, que se espalharia em nuvens dentro dos materiais, compensando a atracção da gravidade. Se se desse muito mais calórico, aumentariam as forças repulsivas, e as partículas materiais tenderiam a afastar-se, explicando assim as dilatações e mudanças de estado.

Esta teoria era fácil de matematizar, a partir da conservação do calórico. Obtinha bons resultados quantitativos, como a explicação da lei de Dulong e Petit e os trabalhos de Fourier sobre a condutividade térmica, além de ter exercido grande influência nas leis de Ohm.

O mais brilhante resultado da teoria do calórico foi a obra de Carnot. No seu célebre

livro, ele afirma que a potência motriz da máquina a vapor não resulta de um consumo de calórico, mas da sua tendência a estabelecer um estado de equilíbrio em que não haja diferenças de temperatura. Para ter um motor térmico não basta uma fonte quente, é precisa uma fonte fria para recolher o calor. O trabalho é consequência do trânsito do calórico. Será que o rendimento depende das substâncias utilizadas? (Problema prático.) Carnot estuda um processo particular, que pode exprimir em termos simples: tem uma fonte quente e uma fonte fria; um gás contido num cilindro com um pistão que se desloca sem atrito. O gás sofre uma série de transformações em ciclo fechado (ver figura 15.7). Como disse Clausius, após o ciclo não houve qualquer realização de trabalho interno, não

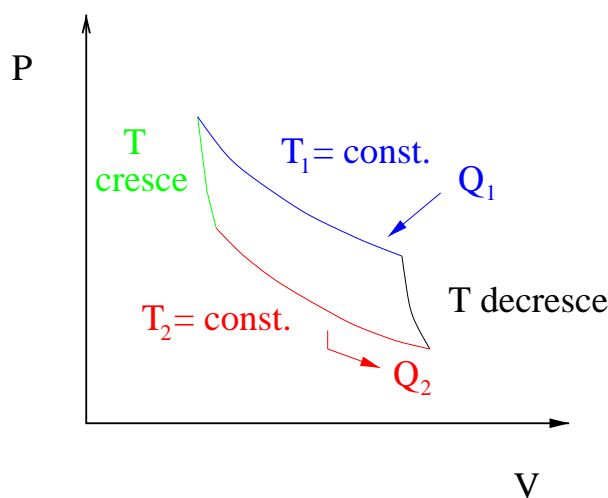


Figura 15.7: Diagrama de Clapeyron do ciclo de Carnot.

sendo por isso necessário determiná-lo.

Na primeira fase, põe-se o gás em contacto com a fonte quente. Ele expande-se, mas permanece à temperatura da fonte quente, T_1 (transformação isotérmica). A seguir, isola-se o gás da fonte quente, e ele expande-se sem receber calor, logo arrefece (transformação adiabática). Esta expansão prossegue até o gás estar à temperatura da fonte fria, T_2 . Quando isto acontece, o gás começa a contrair-se, cedendo calor à fonte fria (transformação isotérmica). Finalmente, isola-se e comprime-se o gás até este regressar as condições iniciais (transformação adiabática).

Carnot não se limitou ao seu ciclo. Introduziu a ideia de ciclo reversível (que não existe), e que ele concebeu à semelhança dos corpos sem atrito de Galileu. Carnot forneceu assim uma explicação de como a máquina térmica produz trabalho. (Atenção: há um erro – o calor cedido à fonte fria não é igual ao recebido da fonte quente.) Assim, o rendimento só depende das temperaturas da fonte quente e da fonte fria. A máquina térmica funciona como um frigorífico, transportando o calor do frio para o quente. Deste modo, se nem todas as máquinas térmicas tivessem o mesmo rendimento, seria possível usar a de maior rendimento para produzir trabalho e a de menor rendimento para transportar calor, e poderíamos assim obter o movimento perpétuo. Como isto é impossível, segue-se que todas as máquinas térmicas têm o mesmo rendimento, para as mesmas temperaturas das fontes.

Esta doutrina foi defendida por Clapeyron na década de 1830. Kelvin encontrou

Clapeyron em Paris e ficou fascinado com o trabalho de Carnot. Em 1847, Kelvin encontrou-se com Joule; este nada sabia de Carnot, mas tinha grande habilidade experimental. Entre 1847 e 1850, Kelvin publicou as suas perplexidades relativamente à teoria do calórico e às experiências que a contradiziam. Levando ao fim o raciocínio de Carnot, resolveu um estranho problema: a definição de uma escala de temperatura. (Este problema assemelha-se ao que Newton teve em definir a massa inercial.) Uma vez que as indicações dos termómetros dependem da substância termométrica, Kelvin definiu temperatura a partir do ciclo de Carnot, que usa para definir uma razão entre duas temperaturas. Basta então um ponto fixo: o zero absoluto é o zero desta escala, de modo que a temperatura de fusão do gelo é aproximadamente 273 K. Passou *à coté*.

Em 1850 Rudolf Clausius (à data professor em Berlim) reconheceu a importância de Kelvin e Carnot. Mostrou que, quando se descreve o ciclo de Carnot, há realização do trabalho W , que é dado por um integral: $Q_1 = Q_2 + W$ (ver figura 15.7). Com isto, e tendo percebido o Segundo Princípio, Clausius salvava Carnot, deixando Kelvin e Rankine perplexos.

Quinze anos volvidos sobre a publicação da sua primeira memória (após uma polémica sobre a maneira de enunciar o Segundo Princípio), Clausius definiu a função de estado, a entropia, que está para o Segundo Princípio como a energia está para o Primeiro. Explicou assim por que razão os processos não são reversíveis – a entropia tem de aumentar. Seja S a entropia e Q a quantidade de calor cedida ou recebida por um sistema à temperatura T . Tem-se

$$dS = \frac{dQ}{T} \Rightarrow \frac{dS}{dQ} = \frac{1}{T}.$$

Sejam agora dois sistemas em contacto, 1 e 2, às temperaturas T_1 e T_2 , respectivamente. O sistema 1 recebe a quantidade de calor ΔQ_1 do sistema 2; o sistema 2, por sua vez, cede a quantidade de calor ΔQ_2 ao sistema 1. Pelo Primeiro Princípio, $\Delta Q_1 = -\Delta Q_2$. Pelo Segundo Princípio,

$$\frac{\Delta Q_1}{T_1} - \frac{\Delta Q_2}{T_2} \geq 0 \Rightarrow \frac{\Delta Q_1}{T_1} \geq -\frac{\Delta Q_2}{T_2} = \frac{\Delta Q_1}{T_2} \Rightarrow T_2 \geq T_1.$$

Criaram-se desta forma condições para a descoberta do Primeiro Princípio: Grandes cientistas como Liebig e Faraday diziam coisas semelhantes, embora disso se não apercebessem. Havia três factores principais:

- 1. A máquina a vapor.** (Carnot era engenheiro.) A Carnot e a outros (Séguin) escaparam as outras formas de energia; eles só falam em calor e energia mecânica, pois as máquinas a vapor eram predominantes.
- 2. Descoberta da cadeia entre as diferentes formas de energia.** A corrente eléctrica produz calor e luz. As experiências de Química revelaram a energia química. Em 1820 descobriu-se a relação entre electricidade e magnetismo. Os efeitos Seebeck e Peltier evidenciaram a transformação de energia térmica em energia eléctrica e vice-versa. Com a invenção da fotografia (Niepce) veio a possibilidade de transformar a luz em energia química. Data também dessa época a identificação do calor radiante com a luz, bem como a interpretação de velhos fenómenos: a produção de trabalho por atrito e pelo calor, as acções electrostáticas, a produção de calor e luz por reacções químicas. Em 1834 surgiu o primeiro livro de divulgação científica, escrito por Mary Somnerfeld, e no qual se fala de uma única “energia”. Mas o

grande problema é que cada um pegava por um só lado de todos estes factos: não havia ainda unificação, e por isso não houvera evolução.

3. Ideais filosóficos. Todos os alemães foram influenciados por Kant ou Schelling. Os ingleses, com Faraday, pela tradição de Leibniz.

15.7 A Electricidade no século XIX – III

Faraday apresentara as suas ideias sobre o espaço de forma intuitiva. Havia que fazê-las entrar no formalismo da Física. Importa, porém, referir, nesta altura, os esforços desenvolvidos, a partir de 1840, no sentido de obter um sistema coerente de unidades. Em Mecânica, este problema era muito fácil, pois qualquer grandeza podia exprimir-se em termos de espaço, tempo e massa. Mas, no Electromagnetismo, temos grandezas definidas a partir de fenómenos de natureza eléctrica e magnética inter-relacionados. Isto constitui uma meada cujo desenredar ainda hoje é controverso, mas que foi feito pelos físicos do século XIX, que para tal efeito procederam a rigorosas medições. **Weber** (1804–91) foi um experimentador cuidadoso que desempenhou um importante papel neste processo. Verificou que, para unificar um sistema de unidades eléctricas e magnéticas, era obrigado a introduzir uma constante que não era um número puro, tendo antes as dimensões de uma velocidade, e que era da ordem de grandeza da velocidade da luz. Seria isto por acaso?

James Clerk Maxwell (1831–79), escocês, foi um menino prodígio. Personagem simpático, teve uma carreira académica brilhante, tendo sido professor em Aberdeen, Londres e Cambridge. Simples, modesto, bom cristão, irreverente e bem humorado, deixou obras importantíssimas em Electromagnetismo e Física Estatística.

Em 1873 publicou o seu *Tratado de Electricidade e Magnetismo*, no qual apresenta, sob uma forma matematicamente adequada, as ideias de Faraday, seu pai espiritual. Descreve os fenómenos electromagnéticos em termos de um campo eléctrico e outro magnético, que existem em todos os pontos do espaço e governam esses mesmos fenómenos. As fontes desses campos são cargas e ímanes, os quais não são, no entanto, grandezas fundamentais. Maxwell excluiu do próprio formalismo matemático qualquer acção à distância: as modificações de um corpo só dependem do que se passa na vizinhança dele. As acções propagam-se de ponto a ponto, em conformidade com as ideias de Leibniz. A acção à distância é excluída.

As equações de Maxwell descrevem o campoelectromagnético. No vazio, são:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{E} &= 4\pi\rho && \text{(lei de Coulomb),} \\ \operatorname{div} \vec{H} &= 0 && \text{(inexistência de monopólos magnéticos),} \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} && \text{(lei de Faraday: } \vec{H} \text{ variável produz } \vec{E}\text{),} \\ \operatorname{rot} \vec{H} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{J} && \text{(corrente de deslocamento e lei de Biot-Savart),} \end{aligned}$$

onde

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta V}$$

é a densidade de carga. A primeira lei traduz que os fluxos de corrente que atravessam as duas esferas (ver figura 15.8) são iguais, de onde se segue que $E \propto 1/r^2$. Na matéria,

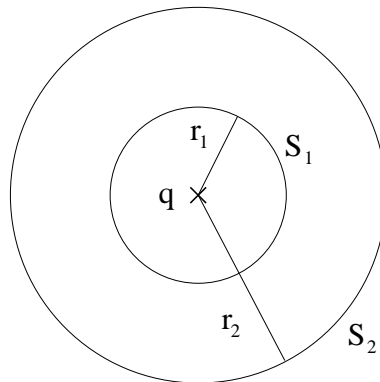


Figura 15.8: Significado físico da lei de Coulomb: duas esferas concêntricas, de raios r_1 e r_2 , áreas S_1 e S_2 , com a carga q ao centro.

aparecem a permissividade eléctrica, ϵ , e a permeabilidade magnética, μ , e vem $\vec{J} = \sigma \vec{E}$, onde σ é a condutividade eléctrica. Na ausência de cargas e correntes, teremos:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{E} &= 0, \\ \operatorname{div} \vec{H} &= 0, \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} \vec{H} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \end{aligned}$$

No espaço livre, tanto \vec{E} como \vec{H} obedecem a equações de onda. Tais ondas electromagnéticas propagam-se no espaço de acordo com uma generalização da equação das cordas vibrantes, o que implica tratar-se de ondas transversais: \vec{E} e \vec{H} vibram em planos perpendiculares à direcção de propagação e perpendiculares entre si. Maxwell verificou que estas ondas tinham todas as características das ondas luminosas de Fresnel. As ondas luminosas eram ondas electromagnéticas (lá estava c) e, assim, a Óptica reduzia-se ao Electromagnetismo. Então, as propriedades das ondas viriam das equações de Maxwell, o qual mostrou que a velocidade da luz num meio material é $v = c/\sqrt{\epsilon\mu}$. Isto permitiu relacionar o índice de refração com grandezas de natureza electromagnética (μ é aproximadamente constante). As equações de Maxwell foram verificadas para uma ampla gama de espectros.

O tratado de Maxwell foi muito mal recebido, visto conter ideias contrárias aos paradigmas vigentes. Só alguns físicos alemães (Helmholtz, Boltzmann...) as aceitaram. No entanto, os preconceitos depressa foram vencidos. Em 1876 Rowland mostrou que um disco de vidro polarizado, com movimento de rotação, desviava uma agulha magnética, comprovando a existência da corrente de deslocamento.

Heinrich Hertz (1857–1894), discípulo de Helmholtz, criou o ressoador e o oscilador (ver figura 15.9). O ressoador, ligado a uma fonte de corrente alterna, permitia observar as ondas electromagnéticas produzidas: as ondas hertzianas (1887). A partir daí deu-se o desenvolvimento tecnológico da telegrafia sem fios (TSF), por Bramley, Marconi, Popov, etc. A primeira ligação TSF França–Grã-Bretanha data de 1899.

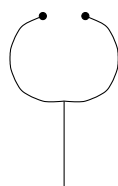


Figura 15.9: O ressonador de Hertz.

Hendrik Lorentz (1853–1927) utilizou as equações de Maxwell para descrever os fenômenos ao nível microscópico, estabelecendo a primeira teoria do electrão.

Mas como enquadrar todas estas novas ideias no esquema do mecanicismo? Ressurgia o velho problema: qual é o veículo material que permite a transmissão de ondas electro-magnéticas? Inventou-se então o *éter luminoso*. Mas as teorias de Faraday e Maxwell exigiam um suporte para os campos – daqui vieram mais dois éteres, um eléctrico e outro magnético, que mais tarde deram um único, o éter electromagnético. Como descrever este éter em termos mecânicos? Como descobri-lo, se ele é inacessível à experiência? Ah, mas temos as equações de Maxwell: há que inventar um éter que as confirme. Ele deve ocupar todo o espaço, pois é o suporte do campo e este pode existir em toda a parte. Nesse meio propagam-se ondas electromagnéticas, logo deve ser elástico. Então o éter é um meio elástico que ocupa todo o espaço. Mas as ondas são transversais, e nos fluidos só se propagam ondas longitudinais. Logo, o éter é sólido, pois só nos sólidos se propagam ondas dos dois tipos. Mas, nos sólidos, toda a onda tem uma componente longitudinal, desprezável no caso de sólidos muito rígidos.

Chegou-se assim a um éter muito esquisito: sólido, perfeitamente elástico, extremamente rígido e preenchendo todo o espaço. Devido à grande velocidade da luz, o meio tinha de ser muito elástico, pois a velocidade de uma onda é dada por $v = \sqrt{P/\rho}$, onde P é o módulo de elasticidade e ρ a massa específica. Então, como é que os corpos se deslocam sem serem actuados pelo éter? Afinal, os planetas rodam como se não houvesse atrito... Este problema, que preocupou Lord Kelvin, foi estudado por muitos outros físicos, que tentaram sem sucesso construir modelos de éter sucessivamente mais complicados (pseudo-sólido e outras hipóteses *ad hoc*).

15.8 O éter na Física do século XIX

Ao éter deveriam poder aplicar-se as leis dos meios materiais, como as leis de Newton e a gravitação, uma vez que este era um meio material que preenchia o vazio e todos os corpos. Então o éter deveria estar imóvel em relação aos sistemas inerciais, pois se assim não fosse (isto é, se o éter tivesse aceleração), teria de haver uma força actuante em todo o espaço, responsável por essa aceleração. Seria portanto mais natural que o éter estivesse completamente imóvel, pois se assim não fosse haveria variações de elasticidade e densidade, que afectariam a propagação da luz, distorcendo as imagens dos objectos celestes. Então, o éter estaria imóvel num sistema inercial, que assim adquiriria um estatuto privilegiado. Em princípio todos os sistemas inerciais são equivalentes: só o espaço absoluto é que seria privilegiado, pois nas equações da Mecânica só há segundas

derivadas. Mas nas equações do Electrodinâmica há primeiras derivadas, logo nem todos os referenciais de inércia são equivalentes (as leis dependem da velocidade). Pela teoria clássica, a velocidade da luz mudaria com o referencial, o que alteraria as equações de Maxwell. Então, o espaço absoluto seria indetectável pela Mecânica, mas detectável pelo Electromagnetismo – seria aquele em que o éter estaria em repouso. Poder-se-ia desta forma medir a velocidade da Terra em relação ao espaço absoluto, medindo a velocidade da luz na Terra (uma vez que se conhecia a velocidade da luz em relação ao éter). Mas a Terra contém éter! Quem garante que o não arrasta? Se a luz emitida por uma estrela pode ser afectada pelo movimento da estrela, não poderá sê-lo também pelo movimento da Terra?

Os físicos estudaram estes problemas, e a primeira conclusão a que chegaram foi que a velocidade da fonte emissora não influencia a velocidade da luz. Esta descoberta veio da análise do comportamento das estrelas duplas (ver figura 15.10): se a velocidade da luz variasse, observar-se-iam imagens distorcidas e até estrelas fantasmas, o que estava em desacordo com a experiência.

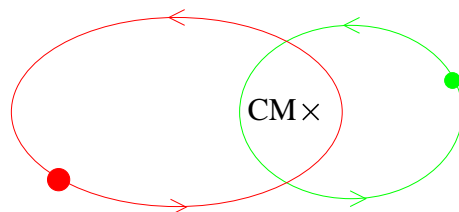


Figura 15.10: Estrela dupla: as duas estrelas do par orbitam em torno do centro de massa comum, CM.

Mas, por essa altura, sabia-se que a luz era uma onda com uma frequência associada, e que o movimento da fonte deveria influenciar essa frequência. **Christian Doppler** descobriu este efeito – efeito Doppler – para o som (1842). Em 1851 **Hippolyte Fizeau** (1819–1896) descobriu-o para a luz. A fórmula que dá a frequência associada é:

$$\nu' = \nu \left(1 \pm \frac{v}{c} \right),$$

onde v é a velocidade da fonte. Este fenómeno foi particularmente útil para medir a velocidade radial das estrelas. Mas o éter não aparece nesta fórmula! Fez-se então uma nova teoria, mais física, que já incluía o éter, mas em que aparecia nas equações um termo de ordem v^2/c^2 , isto é, de segunda ordem. Qual o valor de v/c ? Podemos estimar um valor mínimo: a velocidade da Terra em relação ao Sol. Como $v \simeq 3 \times 10^4$ m/s e $c = 3 \times 10^8$ m/s, tem-se $v/c \simeq 10^{-4}$ e $v^2/c^2 \simeq 10^{-8}$. O primeiro valor é razoável, mas o segundo é inobservável.

Levantou-se então novamente o problema de haver ou não arrastamento do éter. O arrastamento total levantava muitas dificuldades, pois, ao verificar-se, por exemplo, o deslocamento brusco de um bloco de vidro, este daria origem a uma variação brusca da velocidade da luz, o que implicaria a existência de uma força de intensidade infinita. Além disso, considerando que, na Terra, a atmosfera se rarefaz com a altitude, passando ao vazio de uma forma contínua, onde é que o arrastamento termina? Finalmente, as

elipses de Bradley deveriam ter o seu eixo maior inclinado $20'' (= \arctan \frac{v}{c})$, quando o valor observado era cerca de $40''$.

Em 1851, Fizeau determinou pela primeira vez a velocidade da luz na Terra, colocando uma fonte luminosa diante de uma roda dentada. A luz passava entre os dentes, percorria 9 km, e era reflectida nm espelho. A roda estava animada de rápido movimento de rotação, de modo que a luz ao regressar passasse por um intervalo entre dois dentes. Conhecendo a velocidade de rotação da roda e a distância, podia calcular-se c . Esta experiência foi aperfeiçoada por **Léon Foucault** (1819–1868).

Fizeau fez, em seguida, uma experiência para determinar o arrastamento do éter pela água (ver figura 15.11): a luz vinda da fonte era dividida em dois feixes, que fazem o mesmo percurso em sentidos contrários – um no sentido da água corrente, e o outro no sentido oposto. Os dois raios deveriam propagar-se com velocidades diferentes e chegar portanto desfasados, o que produziria franjas de interferência susceptíveis de indicar se havia arrastamento e como se processava este. Concluiu-se que havia arrastamento, sendo

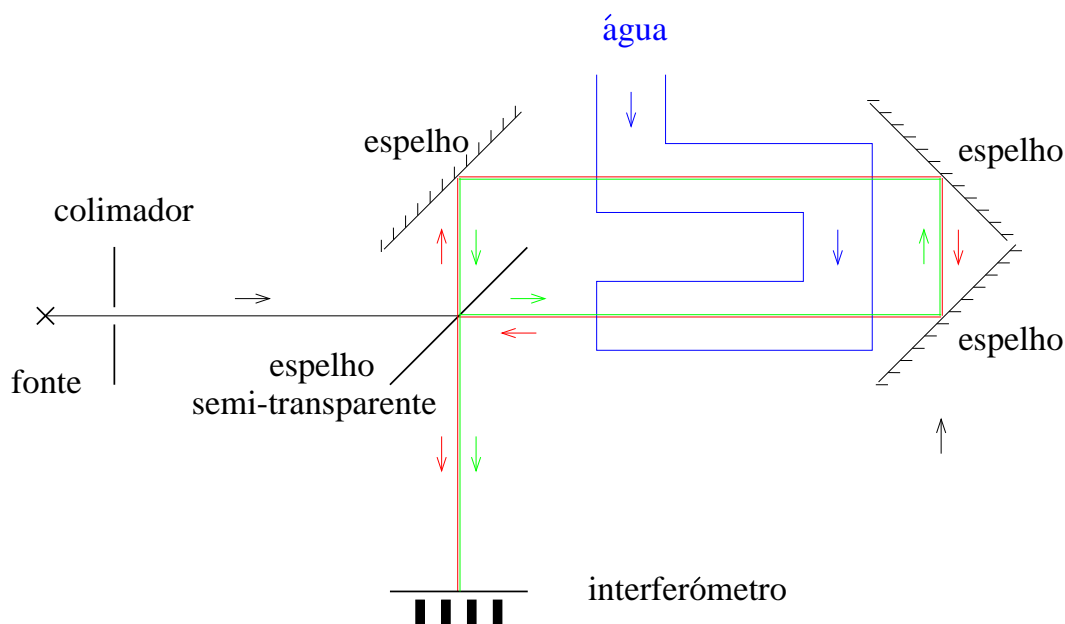


Figura 15.11: Experiência de Fizeau.

a fórmula que o descrevia a mesma que havia sido introduzida por Fresnel:

$$v = \frac{c}{n} \pm v \left(1 - \frac{1}{n^2} \right),$$

onde n e v são, respectivamente, o índice de refração e a velocidade do meio em movimento.

Com esta fórmula de Fresnel do arrastamento parcial explicaram-se todos os fenómenos de primeira ordem. Mas nenhum destes permitia determinar uma velocidade em relação ao éter: a teoria implicava que esta só podia ser medida a partir de um efeito de segunda ordem. A primeira experiência a detectar um tal efeito foi a de Michelson em 1881, mais tarde de Michelson-Morley (1887). O tempo de percurso da luz seria afectado pelo

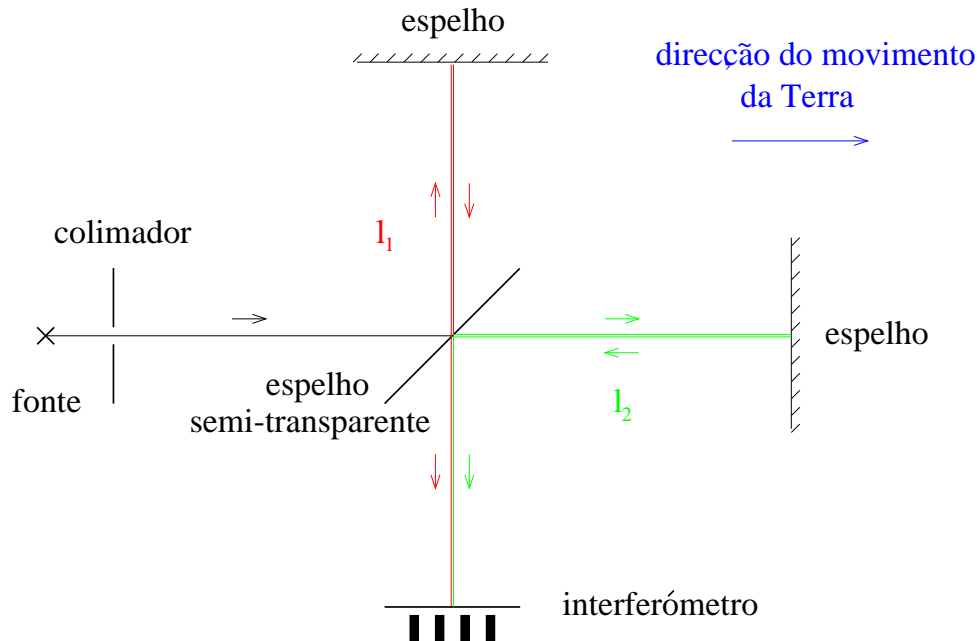


Figura 15.12: Experiência de Michelson-Morley: interferômetro de Michelson.

movimento da Terra em relação ao éter. Todo o aparelho estava a flutuar numa bacia de mercúrio, podendo ser colocado primeiro na direção do movimento da Terra, e depois rodado 90° . A diferença de tempos deveria ser (ver figura 15.12):

$$\Delta t = \frac{l_1 + l_2}{c} \frac{v^2}{c^2},$$

detectável a partir das franjas de interferência e medida com precisão 10^{-8} . Mas as franjas não se moviam! Não havia vento de éter!!! Algo estava errado, mas onde? Na Mecânica? No Electromagnetismo? Em qual destas doutrinas tão bem fundamentadas?

Para salvar as coisas, Fitzgerald introduziu uma hipótese *ad hoc*: os corpos contrair-se-iam sempre que tinham uma velocidade em relação ao éter. Esta contracção seria de $\sqrt{1 - \beta^2}$ ($\beta = v/c$), a distância necessária para explicar o resultado da experiência de Michelson e Morley. Esta hipótese foi explorada por Lorentz, o qual mostrou que, para que ela fosse coerente, era necessário admitir que a massa de um corpo aumentava de $(1 - \beta^2)^{-1/2}$ quando ele se movia em relação ao éter. Além disso, os relógios atrasar-se-iam de $\sqrt{1 - \beta^2}$. Mas Lorentz não acreditou no que fez.

Albert Einstein (1879–1955) era um espírito independente. Doutorou pela Escola Politécnica de Zurique, vivia com dificuldades e trabalhava no departamento de patentes em Berna. Em 1905 publicou as célebres memórias em que introduzia a relatividade restrita, a teoria fotónica, e a explicação do movimento browniano.

Capítulo 16

A Física no século XX

16.1 Nota introdutória

Importa salientar que, enquanto a mecânica relativista surgiu numa data bem definida, como resposta a um problema bem definido, o mesmo não se passou com a teoria quântica, que surgiu gradualmente e como resposta a vários problemas.

16.2 Os fracassos da teoria clássica

Joseph von Fraunhofer (1787–1826) não foi o inventor da espectroscopia, pois antes dele já se tinham observado espectros; ele foi, simplesmente, o primeiro a ligar-lhes importância. Protegido pelo Eleitor da Baviera após a perda da sua família, foi um grande artesão vidreiro que construiu o melhor material óptico do princípio do século XIX. Observou que a luz solar podia ser decomposta por um prisma, sendo o espectro atravessado por linhas escuras – as riscas de Fraunhofer. Estas tinham uma posição bem definida (ele mediu-lhes o comprimento de onda) e esta era independente do facto de a luz ser a vinda do Sol, ou reflectida pelos planetas. Fraunhofer classificou as riscas com as letras do alfabeto, o que ainda hoje se usa (por exemplo, a risca D do sódio, que aparece na luz – espectro de emissão – de uma lâmpada de sódio).

Após os trabalhos de Fraunhofer, muita gente acumulou informações que não compreendia. A espectroscopia científica só apareceu na segunda metade do século XIX graças a duas personagens célebres, irmãos intelectuais, como Castor e Pollux: **Robert Bunsen** (1811–99), professor em Heidelberg, foi sobretudo um grande experimentador, ligado à Química; e **Gustav Kirchhoff** (1824–87), um teórico muito imaginativo, meio físico, meio matemático.

Tudo começou quando Bunsen resolveu utilizar as riscas de Fraunhofer para identificar as substâncias, inventando o bico que tem o seu nome com a finalidade de obter chamas puras para produzir espectros de emissão. Bunsen constatou que tinha descoberto um poderoso método de análise química, uma vez que as riscas eram independentes da temperatura e do estado de agregação química, dependendo só da substância em causa. Além disso, bastava uma quantidade minúscula de material (cerca de um micrograma) para que as riscas fossem detectáveis. Este processo simples e preciso levou a que uma pleiade de cientistas elaborasse catálogos das riscas dos elementos, fundando-se assim a espectroscopia de emissão.

Quanto à espectroscopia de absorção, verificara-se que as riscas que um vapor emitia apareciam como riscas negras quando a luz atravessava o mesmo material. Logo, uma dada substância teria tendência a emitir e absorver os mesmos comprimentos de onda. A partir das riscas de Fraunhofer, Kirchhoff afirmou que o sódio existe no Sol. Isto foi um escândalo, pois o positivismo começava a estar em voga e Comte afirmara que nos estariam vedadas certas descobertas, como a constituição das estrelas. Importa, porém, salientar que Kirchhoff teve uma intuição correcta da unidade do universo, ao ver no céu os elementos da Terra. Mais escândalos se seguiram, com a identificação de novos elementos: o rubídio e o cézio. O mais escandaloso foi a descoberta no Sol de um elemento inexistente na Terra: Kirchhoff chamou-lhe hélio, e ele foi mais tarde igualmente detectado na Terra.

Mas não se percebia qual a origem dos espectros, que eram cada vez mais complicados sem que qualquer fórmula os descrevesse. Em 1885 um suíço, Balmer, descobriu uma fórmula empírica que exprimia as frequências do espectro visível do hidrogénio como proporcionais a $1/2^2 - 1/n^2$, com $n > 2$. Esta fórmula foi generalizada por Ritz:

$$\nu_{m,n} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad m > n.$$

Ou seja, $\nu_{m,n} = T_m - T_n$: cada frequência é a diferença de dois termos espectrais. Mas porque surgiam frequências privilegiadas? Pela teoria clássica, todas deveriam ser equivalentes.

Faziam-se por essa altura pesquisas sobre descargas eléctricas em gases rarefeitos. Geissler construía tubos de vidro em que fizera pressões baixíssimas (da ordem de 10^{-3} torr) mediante uma bomba de mercúrio; notava-se uma luminosidade na região anódica. Plücker, Crookes e Hittorf constataram que se tratava de raios que iam do cátodo ao ânodo. Hittorf colocou mesmo uma cruz no trajecto destes raios, vendo a imagem da cruz projectada na parede do tubo. Havia duas hipóteses para explicar o fenómeno: ou se tratava de moléculas arrancadas ao cátodo (Crookes), ou de radiações electromagnéticas. A primeira hipótese foi abandonada quando se descobriu que os raios eram capazes de atravessar uma placa de metal. **J. J. Thomson** (1856–1940) mediu a velocidade de propagação dos raios catódicos e chegou ao valor 1.6×10^8 km/s, o que excluía a possibilidade de serem radiações electromagnéticas. Seriam cargas eléctricas? **Jean Perrin** (1870–1942) colocou um condutor dentro do tubo e constatou que ele se carregava. Finalmente, Thomson determinou a razão q/m (carga/massa) das partículas e, estimando q a partir de fenómenos de electrólise, mostrou que m é cerca de $1/2000$ da massa do átomo de hidrogénio. Foi a derrota de Crookes, e a primeira determinação da massa do electrão (1897).

Entretanto, em 1901, **Wilhelm Röntgen** (1845–1923) observara que os choques dos raios catódicos com as paredes do tubo produziam uma radiação com estranhas propriedades, a que chamou raios X (a incógnita da Matemática). Röntgen interessou-se pela capacidade que esta radiação apresentava de atravessar corpos opacos, e obteve as primeiras radiografias. Suspeitou tratar-se de uma radiação electromagnética de pequeno comprimento de onda, hipótese só demonstrada em 1912 por **Max von Laue** (1879–1960), genro de Planck, que utilizou redes cristalinas para produzir difracção de raios X. Estes ficaram assim reconhecidos pelo seu poder de análise, e como sendo radiações electromagnéticas.

Já no século XVIII se discutira se o calor seria ou não uma forma de movimento (Bernoulli e Euler). Mas a teoria do calórico acabara por triunfar, deixando inclusiva-

mente mal visto o modelo de um gás como um conjunto de moléculas em movimento. Nos começos do século XIX, o atomismo fez uma breve reaparição em Química, a qual no entanto só durou até 1830, tendo sido derrotada pelas ideias positivistas. Teve, porém, a sua renascença em 1850, quando um número de cientistas, de posse das leis da Termodinâmica, soube retomá-lo. O campeão deste grupo, James Joule, tentou interpretar um gás como sendo um aglomerado de partículas em agitação caótica. Ora o fenómeno mais fácil de interpretar era a pressão; Joule supôs que ela era devida aos choques da moléculas com as paredes do recipiente em que se encontram encerradas, e determinou a partir daí a velocidade média dessas moléculas: seja N o número de moléculas contidas num volume V , e com velocidade v . Se a pressão p se deve à transferência de momento linear das moléculas para a parede do recipiente, tem-se:

$$pV = \frac{2}{3}N\frac{m\overline{v^2}}{2} \Rightarrow p = \frac{1}{3}\frac{N}{V}m\overline{v^2} \Rightarrow p = \frac{1}{3}\rho\overline{v^2},$$

onde ρ é a densidade do gás. Mas, sendo p mensurável, pode determinar-se $\overline{v^2}$. Como $\overline{v} \propto \sqrt{\overline{v^2}}$, pode achar-se \overline{v} . Joule obteve, para as moléculas da atmosfera, $\overline{v} \simeq 1500$ km/h (!), o que foi confirmado por Clausius. Os teóricos mostraram em seguida que a velocidade do hidrogénio era ainda quatro vezes maior!

Mas, se as moléculas eram tão rápidas, como se explicava que os fenómenos de convecção se propagassem tão lentamente? É aqui que Maxwell entra em campo. Ele introduz a descrição do comportamento dos gases não em termos de velocidade, mas da probabilidade dessa velocidade, e inventa o conceito de livre percurso médio, o que explica a lentidão dos processos termodinâmicos: cada molécula chocava incessantemente com as outras. Maxwell calculou mesmo que, em condições normais, uma molécula sofreria 5×10^9 choques/segundo, ou seja, 100 000 antes de percorrer 1 cm. **Loschmidt** (1821–1895) calculou as dimensões de uma molécula como sendo da ordem de 10^{-8} cm (o que é uma muito boa estimativa), e foi igualmente o primeiro a calcular o número de moléculas existentes numa molécula-grama de gás – 6.022×10^{23} – o número de Avogadro-Loschmidt.

Surgiram todavia objecções, como os paradoxos de Loschmidt e Zermelo (as leis da Mecânica são reversíveis e as da Termodinâmica não?) a queurgia dar uma resposta. **Ludwig Boltzmann** (1844–1906) deu à Mecânica Estatística a sua forma quase definitiva. Utilizando o aparelho matemático da Mecânica e o cálculo de probabilidades, respondeu às objecções e fez duas afirmações importantes: interpretou o Segundo Princípio em termos da teoria cinética, e deu a definição de entropia como $S = N \log P$, onde P é a probabilidade do estado. Os estados tendem assim a evoluir dos menos para os mais prováveis (sendo os mais prováveis os de maior desordem).

Josiah Willard Gibbs (1839–1903) fez uma obra paralela à de Boltzmann, em que estendeu os resultados aos casos em que a matéria não é um gás (o que foi muito difícil, porém coroado de sucesso). Ele utilizou os mesmos resultados, mas, considerando um gás como um enorme conjunto de moléculas iguais, imaginou por sua vez um sólido ou um líquido como consistindo em milhões de elementos de volume.

16.3 As antigas teorias quânticas

O coeficiente de absorção de uma substância mede a percentagem de luz incidente que é absorvida. O poder de absorção só depende da temperatura e da natureza química da

substância em questão. Por meados do século XIX, Kirchhoff constatou que, considerando uma cavidade a uma determinada temperatura, as suas paredes emitiriam e absorveriam radiações, dando origem a um campo electromagnético em equilíbrio com as paredes. Este era um equilíbrio dinâmico, mantendo a radiação uma determinada composição. Em 1859, Kirchhoff demonstrou que isto implicava que houvesse uma relação universal entre o poder absorvente e o poder emissor – as taxas de absorção e de emissão eram proporcionais. Esta radiação em equilíbrio, caracterizada por uma dada densidade de energia para cada frequência, dependeria apenas da temperatura. Então, quando duas substâncias tivessem o mesmo poder absorvente, teriam também o mesmo poder emissor. As substâncias para as quais os processos de absorção e emissão dependem só da temperatura são assim privilegiadas, e chamou-se-lhes *corpos negros* (conceito imaginário). Kirchhoff inventou um corpo negro semi-teórico: uma cavidade. A radiação que nesta incide não volta a sair, devido às inúmeras reflexões que sofre no interior. Então, a superfície que limita esta cavidade comporta-se como um corpo negro. À radiação dentro da cavidade chama-se radiação negra, e ρ_ν , a densidade de energia para a frequência ν , é função de ν e da temperatura. Este é o corpo negro em “forno de padeiro”, tal que $\rho_\nu = F(\nu, T)$ aumenta com a temperatura (ver figura 16.1).

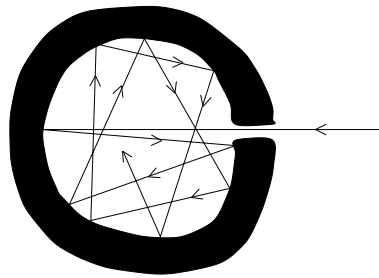


Figura 16.1: Cavidade cheia de radiação de corpo negro.

Em 1879 **Stefan** (1835–1893) demonstrou, a partir da Termodinâmica, que a energia total irradiada é proporcional à quarta potência da temperatura: $E = \text{const.} T^4$ (lei de Stefan) Mais tarde, em 1893, **Wilhelm Wien** (1864–1928) mostrou que a densidade de energia é da forma $\rho_\nu = \nu^3 F(\nu/T)$, o que é uma generalização da lei de Stefan. Com efeito, tem-se:

$$E = \int_0^\infty \rho_\nu d\nu = \int_0^\infty \nu^3 F\left(\frac{\nu}{T}\right) d\nu.$$

Fazendo a mudança de variáveis $x = \nu/T$, vem

$$E = T^4 \int_0^\infty x^3 F(x) dx \Rightarrow E = C T^4.$$

Mostrou além disso que ρ_ν tinha um máximo, como função da temperatura, para cada frequência. Se for λ_m o comprimento de onda correspondente a esse máximo, tem-se $\lambda_m T = \text{const.}$ – lei do deslocamento de Wien –, fórmula esta utilizada, por exemplo, na determinação da temperatura das estrelas (para as quais se conhece o valor da constante). Pode demonstrar-se ainda que esta lei se deduz da lei de Wien para ρ_ν .

Mas a situação era dramática: nada mais se podia fazer a partir da Termodinâmica – a lei de Wien esgotara tudo. Havia, porém, uma função desconhecida. Surgiu então

uma ideia: se a lei é universal, deveria poder inventar-se uma substância teórica capaz de receber e emitir energia electromagnética, a qual deveria ser suficientemente simples para se poderem fazer cálculos. Tal substância foi concebida como uma colecção de dipolos oscilantes, de todas as frequências possíveis. A partir daí foi possível determinar a forma de $F(\nu/T)$, obtendo-se a Lei de Rayleigh-Jeans:

$$\rho_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{C^3} kT,$$

o que corresponde a ter $F(\nu/T) = C(T/\nu)$. Mas isto é uma lei horrível! as suas previsões só coincidem com os dados experimentais para grandes comprimentos de onda, ou, o que é o mesmo, a frequências baixas (ver figura 16.2). Além disso, a energia total viria dada

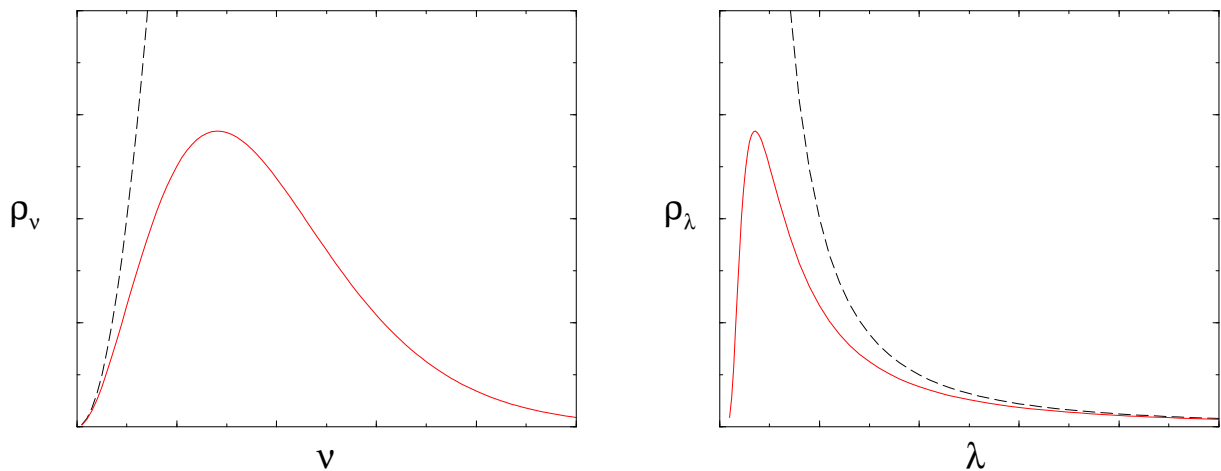


Figura 16.2: Densidade de energia em função (a) da frequência e (b) do comprimento de onda. A previsão teórica da lei de Rayleigh-Jeans (linhas a tracejado) só concorda com os resultados experimentais (linhas a cheio) na região de baixas frequências ou grandes comprimentos de onda.

por

$$E = \frac{8\pi kT}{C^3} \int_0^\infty \nu^2 d\nu,$$

ou seja, a energia total seria infinita! Tinha-se assim que as previsões falhavam redondamente para pequenos comprimentos de onda. a este fenómeno chamou-se, algo imaginosamente, a catástrofe do ultra-violeta.

Como se explicava que a lei de Rayleigh-Jeans fosse errada e absurda, derivando ela da Termodinâmica? O que estaria errado? O Electromagnetismo? A Mecânica Estatística? Qualquer das hipóteses era pouco plausível.

Max Planck (1858–1947), professor em Berlin, publicara já treze memórias sobre o corpo negro. Em 1900, teve a ideia de introduzir uma hipótese *ad hoc*: a energia só poderia ser trocada em quantidades finitas. Refez os cálculos com esta hipótese, o que levava à substituição de um integral por uma série. Veio

$$\rho_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{C^3} \frac{1}{e^{h\nu/kt} - 1} \quad \text{Lei da radiação de Planck.}$$

h era uma constante que Planck teve de introduzir. Para haver acordo com a lei de Jeans, a unidade elementar de energia tinha de ser $E_0 = h\nu$. Com efeito, para λ grande (ν pequeno), tem-se $h\nu/kT \ll 1$ e

$$e^{h\nu/kT} - 1 \approx \frac{h\nu}{kT} \Rightarrow \rho_\nu \approx \frac{8\pi\nu^2}{C^3} kT.$$

Esta lei era boa, mas esquisita, uma vez que admitia, ao contrário da Mecânica Clássica, que a energia variava de forma descontínua. Isso também contradizia a teoria de Maxwell. Além disso, h tinha dimensões de acção, o que era estranho.

Planck apresentou a sua teoria como um expediente, que ninguém levou a sério excepto Einstein. Este propôs, em 1905, que se aceitasse ser a energia transmitida e absorvida em quantidades finitas – teoria do efeito fotoeléctrico. Neste, descoberto por Hertz *circa* 1887, uma liga metálica emite electrões quando irradiada com radiação electromagnética de comprimento de onda adequado. O efeito fotoeléctrico fora estudado por dois físicos alemães, que haviam descoberto que ele só se dava quando a radiação incidente atingia uma dada frequência, característica da substância. Uma vez alcançada essa frequência limite, o fenómeno dava-se, sendo o número de fotoelectrões emitido proporcional à intensidade da radiação. Ora, segundo a teoria electromagnética clássica, ao irradiar-se um metal dá-se energia aos electrões. Mas esta energia é proporcional ao quadrado do campo magnético e independe da frequência. Logo, deveria dar-se emissão com qualquer frequência, dependendo apenas da intensidade. Isto não se observava.

Einstein sugeriu então que se voltasse a uma concepção corpuscular da luz. A luz seria constituída por corpúsculos (hoje chamados fotões), sendo a energia de cada corpúsculo dada pela fórmula de Planck. Então o efeito fotoeléctrico é explicado pela transferência de energia de um fotão para um electrão: se essa energia fosse suficiente, o electrão saltaria do metal com energia cinética T :

$$T = \frac{1}{2}mv^2 = h\nu - h\nu_0 = h(\nu - \nu_0),$$

onde ν_0 é a frequência limite, característica do metal, e $A = h\nu_0$ é, portanto, a energia de que um electrão necessita para vencer a barreira de potencial e deixar o metal. Isto permitia entender por que razão o número de electrões emitidos dependia da intensidade da radiação incidente: a uma elevada intensidade corresponderiam muitos fotões, aumentando por conseguinte a probabilidade de estes chocarem com electrões.

Mas a hipótese corpuscular levantava dificuldades. Para começar, era uma teoria híbrida, pois falava de partículas e de frequências. Além disso, como desalojar a teoria electromagnética, que tanto êxito tinha tido? Einstein foi, assim, o primeiro a abordar o problema da dualidade onda-corpúsculo, que tentou explicar mediante a sua teoria das “ondas fantasmas”, ou seja, ondas electromagnéticas que quase não transportavam energia. A luz seria então constituída por estas ondas, obedecendo às equações de Maxwell, e por grãos de energia transportados pela onda. A uma onda muito intensa corresponderiam muitos fotões, sendo a intensidade proporcional à probabilidade de presença do fotão.

E no caso das interferências? A formação de franjas podia explicar-se admitindo ser a onda fantasma dividida em duas, com passagem de fotões por ambas as fendas. Formar-se-iam desta forma riscas claras e escuras, consoante chegassem ao alvo muitos ou poucos fotões. Em 1907, Taylor obteve franjas de interferência com baixas intensidades e grandes

intervalos de tempo: as figuras pareciam formar-se um ponto de cada vez¹ (ver figura 16.3). Mas ninguém quis ouvir Einstein. Ele foi o único físico quântico durante cerca de

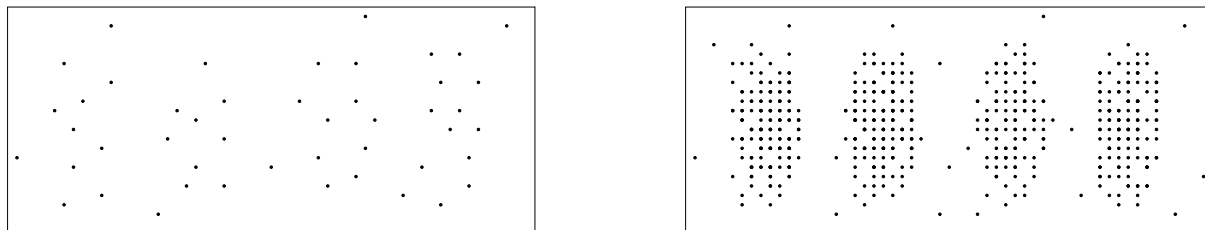


Figura 16.3: Experiência de Taylor: formação gradual das franjas de interferência.

vinte anos. Recebeu o Prémio Nobel da Física em 1921, pela teoria do efeito fotoelétrico.

16.4 A via da Microfísica

Embora a ideia de átomo datasse já do tempo dos gregos, só no século XIX surgiu, com Dalton, uma teoria atómica quantitativa. Esta foi, porém, abandonada *circa* 1830, pra ser retomada pelos químicos por volta de 1860. Saliente-se que, entretanto, surgira a Mecânica Estatística.

Mas o ponto de vista da existência do átomo como inescável oferecia enormes problemas. Descobriam-se o electrão e a tabela periódica, e os átomos podiam ceder e trocar entre si electrões. O fenómeno decisivo foi, no entanto, a descoberta da radioactividade, por **Becquerel** (1852–1908). Este constatou que um mineral de urânio tinha a capacidade de impressionar uma chapa fotográfica. As pesquisas de Becquerel e de **Pierre** (1859–1906) e **Marie Curie** (1867–1934) levaram seguidamente à descoberta de um número cada vez maior de átomos capazes de emitir diferentes tipos de radioactividade: raios gama (radiações electromagnéticas), partículas beta (electrões) e alfa (núcleos de hélio).

A estrutura do átomo permitia explicar por que razão os elementos se organizavam por famílias, tendo propriedades semelhantes dentro de cada uma. Mas porque eram os átomos estáveis? No princípio do século foram formuladas duas hipóteses: uma delas era da autoria de J. J. Thomson, e dita do *Plum Pudding* – o átomo seria uma pequena região ocupada por uma carga eléctrica positiva, onde estariam incrustados os electrões. Mas um tal modelo deveria ser instável. A segunda hipótese, avançada por Perrin, propunha o átomo como sendo um sistema solar em miniatura. Mas esta tampouco era estável.

Em 1911, **Rutherford** (1871–1937) e **Geiger** (1882–1945) realizaram a sua célebre experiência, em que bombardearam com partículas alfa uma fina folha de ouro, com a finalidade de observar o desvio dos “projectéis”: este era, em geral, da ordem de 1° – 2° . Mas Marsden, um estagiário, descobriu que havia alguns desvios enormes, por vezes segundo ângulos maiores que 90° . Isto era extraordinário, e só compreensível se se admitisse que a massa do átomo se encontrava concentrada numa região de muito pequenas dimensões. Nesse caso, e por um golpe de sorte (pois só por acaso é que a Mecânica Clássica consegue dar conta destes resultados), os cálculos permitiam explicar os desvios. Isto constituiu

¹Numa experiência do mesmo tipo, realizada recentemente, não foram observadas interferências.

um bom argumento a favor do modelo “planetário”, segundo o qual a matéria consistia principalmente em espaço vazio. Mas tudo isto era incompatível com a Mecânica Clássica e com a Teoria Electromagnética: estando acelerados, os electrões deveriam radiar energia de modo contínuo (levando a espectros de emissão contínuos) e acabar por cair sobre o núcleo, destruindo o átomo, que assim seria instável – ao contrário do que a experiência mostra.

É então (1913) que surge uma teoria híbrida, a primeira capaz de explicar as coisas. **Niels Bohr** (1885–1962), um jovem físico dinamarquês, inventou um monstrozinho em que ora aceitava, ora rejeitava, conforme lhe convinha, as leis da Física Clássica, de modo a ser capaz de explicar a estabilidade do átomo. De todos os estados dinâmicos que o electrão podia descrever, actuado pelo potencial coulombiano do núcleo, e ao contrário das trajectórias no campo gravítico, só alguns poderiam realizar-se. Essas órbitas quantificadas gozavam da propriedade de o electrão não emitir qualquer energia enquanto as descrevia. A irradiação ou absorção só se davam quando houvesse transições entre órbitas, o que explicava a ocorrência de espectros de riscas. Além disso, o átomo de Bohr introduzia h (a constante de Planck), para definir as órbitas possíveis, e as frequências emitidas e absorvidas – condições mecânica e óptica do quantum.

Este modelo, embora logicamente insustentável, previa alguns fenómenos importantes, como por exemplo os valores das riscas do espectro do hidrogénio e de alguns metais alcalinos. **Arnold Sommerfeld** (1868–1951) e **Wilson** (????–????) estenderam a teoria de Bohr de um só grau de liberdade (órbitas circulares) a vários (órbitas elípticas como para os planetas). Eles esperavam com isto encontrar mais níveis de energia, pois a espectroscopia começava a revelar as estruturas fina, hiperfina, superhiperfina, etc, mas não deu resultado: os níveis tinham a mesma energia. No entanto, Sommerfeld constatou que obtinha melhores resultados se o cálculo fosse feito em Mecânica Relativista. Isto explicava-se pelo princípio da correspondência.

Até 1920 conseguira-se uma boa previsão dos espectros atómicos e até moleculares. Mas os modelos existentes não explicavam, por exemplo, as intensidades das riscas, uma vez que faltava um grau de liberdade: o *spin*, introduzido em 1923 por **Uhlenbeck** (1900–1988) e **Goudsmit** (1902–1978). A partir de 1920, o modelo revela fraquezas estruturais da teoria e falhanços de previsão, entre eles a inexactidão da condição mecânica do quantum (apareciam números semi-inteiros). Além disso, e ao contrário do que se passava na Mecânica Analítica, os resultados dos problemas diferiam consoante o tipo de coordenadas utilizado. Face a esta situação, os cientistas tentaram reconstruir a Mecânica Analítica, sem sucesso. Havia que construir uma teoria que integrasse a quantificação, o que só vai fazer-se em 1924.

Para desenvolver a Mecânica Ondulatória, **Louis de Broglie** (1892–1987) constatou que havia dois factos fundamentais: a necessidade de introduzir o dualismo onda-corpúsculo, e a ocorrência de números inteiros. A partir da ideia da unidade e simplicidade da natureza, De Broglie afirmou que o dualismo de Einstein deveria existir também para a matéria. Poder-se-ia então explicar a ocorrência de números inteiros, visto que a Mecânica Clássica é continuista – salvo para as ondas. Era uma hipótese muito ousada, e sem qualquer apoio experimental. Havia que definir essas ondas de matéria. Como Einstein afirmara que $E = h\nu$, De Broglie atribuiu à massa uma dada frequência, primeiro considerando o referencial próprio da partícula (aquele onde ela está em repouso) e mudando depois de referencial. Através das fórmulas de transformação relativistas, chegou

a

$$\lambda = \frac{h}{p} \Leftrightarrow E = h\nu,$$

onde p é o momento linear da partícula. De Broglie demonstrou ainda que esta hipótese implicava ter o electrão propriedades de onda, o que explicava a condição mecânica do quantum.

Erwin Schrödinger (1887–1961) abandonou os aspectos relativistas e construiu (1926), introduzindo um potencial coulombiano, uma equação que, tal como as equações de Maxwell descrevem as ondas electromagnéticas, descreve as ondas de matéria. O papel desempenhado pelo índice de refração é aqui desempenhado pelos potenciais. Através desta equação, que já prestou serviços inestimáveis, foi possível calcular o espectro do hidrogénio com precisão 10^{-5} , sem necessidade de introduzir hipóteses adicionais.

As consequências destas ideias foram verificadas quase em seguida, por difracção de electrões (**Davisson** (1881–1958) e **Germer** (1896–1971)). Puderam então reproduzir-se, com ondas materiais, as experiências que atribuíam à luz propriedades ondulatórias, embora tal seja muito difícil, visto ser o comprimento de onda das ondas de matéria da ordem dos raios X (10^{-8} cm). Tudo isto, todavia, abriu o caminho para microscópios electrónicos capazes de aumentar 200 000 ou mesmo um milhão de vezes, contra as 3 000–5 000 vezes dos microscópios ópticos, usando campos electromagnéticos em vez de lentes como elementos de focagem. O que tornou possível o extraordinário progresso da Biologia nos últimos anos.

Quase ao mesmo tempo, **Werner Heisenberg** (1901–1976) apresentou uma outra forma da nova mecânica, dita Mecânica Quântica, em que substituiu as grandezas habituais por quadros de números para os quais definiu regras que coincidiam (como fez notar Born), estranhamente, com as da álgebra das matrizes. Heisenberg postulou então que as suas equações eram formalmente idênticas às da Mecânica Clássica, introduzindo uma hipótese adicional:

$$p_x q_x - q_x p_x = \frac{h}{2\pi m i},$$

em que p_x e q_x são, respectivamente, as componentes x do momento linear e da posição de uma partícula de massa m , e $i = \sqrt{-1}$.

Surge nesta altura o problema de se ter passado de nenhuma mecânica para mecânicas a mais. Schrödinger (e mais tarde Dirac) demonstrou que a Mecânica Matricial é deduzível da Mecânica Ondulatória. Posteriormente, verificou-se que as duas se podiam unificar.

Wolfgang Pauli (1900–1958) generalizou a equação de Schrödinger introduzindo o *spin*, o que levou a admitir que existam várias funções de estado associadas a uma partícula. Schrödinger, De Broglie, Klein, Gordon, e outros, tentaram obter uma equação para o caso relativista, que no entanto nunca funcionou satisfatoriamente, dado conter uma segunda derivada em ordem ao tempo.

Paul Dirac (1902–1984) constatou que a equação de Klein-Gordon não era boa, e tratou de obter uma que contivesse primeiras derivadas em ordem ao espaço e ao tempo. Esta equação deveria ser linear. Dirac imaginou uma família delas, usou a mais simples para calcular o espectro do hidrogénio, e obteve uma precisão de 10^{-6} , melhor que a permitida pelas experiências. A equação de Dirac era perfeita, prevendo inclusivamente a existência de anti-electrões e servindo para partículas de *spin* 1/2. E para o fóton, que tem *spin* 1? De Broglie construiu uma equação para o fóton, considerando-o como a reunião de duas partículas de *spin* 1/2. Obteve 16 equações, ou seja, 16 funções, a partir

de cuja manipulação encontrou um sistema formidável de onde pôde deduzir as equações de Maxwell!

A partir de 1930, tentou-se quantificar as equações do campo electromagnético, e quantificar uma segunda vez a Mecânica Quântica. Daqui veio a Teoria Quântica dos Campos, que explica o comportamento dos sistemas em que há criação e aniquilação de matéria.

Têm, desde o início, havido grandes discussões sobre se a Mecânica Quântica será completa. Einstein, De Broglie, Schrödinger e outros não aceitaram a interpretação da Escola de Copenhaga, seguida por Bohr, Born, Heisenberg, Pauli e Dirac (embora este último tenha mudado recentemente de ideias). De Broglie chegou a propor uma alternativa, a “teoria da dupla solução”, que se assemelha muito às ideias de Einstein sobre a onda fantasma.

16.5 A Teoria Geral da Relatividade

A Física Clássica pressupõe o espaço absoluto, intangível, indetectável pela Mecânica e pelo Electromagnetismo. Este pode ser substituído por referenciais de inércia. Os referenciais de inércia são privilegiados, uma vez que um corpo colocado num deles não se encontra sujeito a forças de inércia.

Seja um corpo num campo gravítico. Ele é actuado por uma força $\vec{F} = M\vec{G}$, sendo M a massa gravítica do corpo. Num campo eléctrico \vec{E} , a situação é semelhante: $\vec{F} = Q\vec{E}$, onde Q é a carga do corpo. Em ambos os casos, \vec{F} provoca uma aceleração \vec{a} tal que $\vec{F} = m\vec{a}$, onde m é a massa inercial do corpo. Igualando as expressões de \vec{F} , vem:

$$\vec{a} = \frac{M}{m}\vec{G} \quad \text{e} \quad \vec{a} = \frac{Q}{m}\vec{E}.$$

A simetria que aqui se constata é puramente formal: de facto, M/m é o mesmo para todos os corpos (podendo fazer-se $M/m = 1 \Rightarrow M = m$) enquanto Q/m varia. A igualdade das duas massas pode verificar-se com precisão de 10^{-9} , embora não directamente através da queda de um grave. No entanto, todas as expressões levam a concluir a igualdade das duas massas, o que constitui um mistério da Física Clássica.

Postulemos então $m = M$ e retomemos a experiência do elevador de Einstein. Temos dois conjuntos observador + aparelhos: um num elevador e outro fora, num referencial ligado à Terra e suposto inercial. Se o elevador estiver em movimento uniforme e rectilíneo, a queda faz-se naturalmente. Suponhamos agora que o elevador tem uma aceleração. Neste caso, o grave cai com aceleração diferente, podendo até ficar parado, no caso de o elevador se encontrar em queda livre. Se assim for, o observador no elevador pode dizer que o campo desapareceu. Como $m = M$, ambos os observadores têm razão: tanto faz queda livre como $\vec{G} = 0$, e nenhuma experiência permite decidir entre as duas possibilidades.

Encontramo-nos então numa situação esquisita, uma vez que se põe em causa a definição de referencial de inércia. Até aqui, dizia-se que um referencial é de inércia quando qualquer corpo não actuado por forças tivesse nele movimento uniforme. Mas como saber se um corpo é ou não actuado por forças, como no caso do elevador? O elevador não é um referencial de inércia, e no entanto ambos os pontos de vista são válidos. Então, há que construir uma Física que lhes dê o mesmo estatuto ontológico, isto é, que faça todos os referenciais serem equivalentes (pois não se sabe bem o que são referenciais inerciais) – Princípio da Relatividade Generalizada.

Esta nova Física, que estabelece uma relação entre as velhas forças de inércia e as velhas forças gravíticas, deve levar a repensar os problemas do campo gravítico. Ora, sucede que a teoria de Newton se mostra inoperante, visto implicar uma acção à distância. Mas, segundo a Teoria da Relatividade Restrita, a distância depende do observador, logo a força gravítica também dependerá do observador!!! Logo, a lei da gravidade perde-se com a Teoria da Relatividade Restrita. Mas a lei da gravidade é demasiado importante para ser perdida: há que torná-la covariante, generalizando as equações do campo. Mas esta tentativa falhou.

A primeira conclusão a tirar da equivalência de todos os referenciais é a não aplicabilidade da geometria euclideana. Seja uma roda que gira, (ver figura 16.4) com uma régua fixa sobre um dos seus raios. A régua não encolhe, pois está colocada perpendicularmente

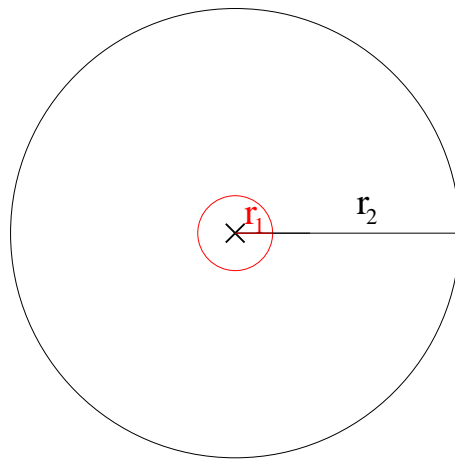


Figura 16.4: Dois corpos em movimento circular uniforme sobre circunferências de raios muito diferentes. Do ponto de vista do corpo que descreve a circunferência de raio r_2 , o perímetro da circunferência calculado a partir do raio não coincide com o espaço percorrido durante uma volta, devido à contracção no sentido do movimento, a qual não afecta a medida do raio. (No caso da circunferência de raio $r_1 \ll r_2$, o efeito é quantitativamente muito menor.)

ao movimento. Um corpo colocado sobre a roda sofrerá tanto mais contracção na direcção do movimento quanto mais longe estiver do centro (correspondendo a uma maior velocidade). Sejam dois pontos, 1 e 2, situados a distâncias r_1 e r_2 , respectivamente, do centro da roda. As suas velocidades serão $v_1 = \omega r_1$ e $v_2 = \omega r_2$, onde ω é a velocidade angular da roda. Se for $r_1 \ll r_2$, ter-se-á igualmente $v_1 \ll v_2$. r_1 e r_2 são constantes, uma vez que são perpendiculares às suas trajectórias, cujos perímetros, calculados a partir dos raios, são $p_1 = 2\pi r_1$ e $p_2 = 2\pi r_2$. Mas, se medirmos p_2 com uma (ou muitas) régua(s) colocada(s) sobre a circunferência exterior, virá $p_2 \neq 2\pi r_2$, uma vez que estas régua(s) se contraem. Como todos os referenciais são igualmente bons, há que explicar esta discrepância. Visto que o teorema euclideano falha, há que abandonar a geometria de Euclides. Esta geometria é a codificação de factos experimentais – é a mais antiga e a mais relacionada com a experiência do quotidiano. Mas nada garante a sua aplicabilidade universal. É, além disso, relativamente fácil conceber geometrias não-euclidianas, várias das quais haviam sido descobertas durante o século XIX. (Como exemplo de geometria não-euclideana num

espaço a duas dimensões, temos a geometria esférica, onde é possível definir um triângulo tal que a soma dos seus ângulos internos é superior a 180° , ver figura 16.5.) À relatividade

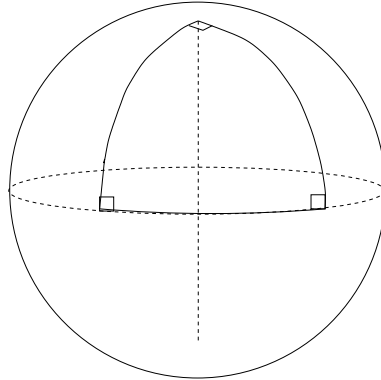


Figura 16.5: Triângulo sobre a superfície de uma esfera. A soma dos seus ângulos internos é superior a 180° .

interessavam quatro dimensões de espaço-tempo, sendo o único invariante o intervalo de espaço-tempo.

Mas o problema é mais complicado, uma vez que, para definir uma geometria, temos de ser capazes de definir uma distância, uma métrica: ds^2 . Se a matriz da métrica for

$$\underline{g} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{21} \end{bmatrix},$$

num espaço bidimensional descrito pelas coordenadas q_1 e q_2 , vem que o quadrado da distância entre dois pontos infinitesimalmente próximos é:

$$ds^2 = g_{11}dq_1dq_1 + g_{12}dq_1dq_2 + g_{21}dq_2dq_1 + g_{22}dq_2dq_2.$$

No espaço euclideano, em coordenadas cartesianas, $g_{11} = g_{22} = 1$ e $g_{12} = g_{21} = 0$, logo $ds^2 = dq_1^2 + dq_2^2$. Mas o espaço pode não ser euclideano, e as coordenadas podem não ser cartesianas. Então, tudo se torna muito complicado ao exigir que as equações sejam covariantes. Einstein conseguiu, quase sem fazer hipóteses, determinar quais são as equações que descrevem a estrutura do espaço-tempo. Estas só contêm duas grandezas independentes: o tensor métrico e um outro tensor, dito de Riemann-Christoffel, $R_{\mu\nu}$, tal que se tem

$$R_{\mu\nu} - Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \chi T_{\mu\nu},$$

equação que descreve a curvatura do espaço. Λ é uma estranha constante, a constante cosmológica, desprovida de significado físico, e que Einstein acabou por expulsar. Então, um corpo curva o espaço à sua volta e modifica o comportamento dos outros corpos. Cada corpo segue, num espaço curvo, o caminho mais curto – uma geodésica.

Esta teoria era extravagante, mas bela. Nos finais da década de 1920, Einstein demonstrou que o postulado segundo o qual os corpos deviam seguir as geodésicas saía directamente das equações do campo, não existindo assim dicotomia entre as equações do campo e o movimento. Para campos fracos, as equações coincidiam com as de Newton.

A Teoria da Relatividade permitiu fazer três previsões cruciais, confirmadas pela experiência:

1. O avanço do periélio de Mercúrio, de aproximadamente $43.5''/\text{século}$, inexplicável pela Mecânica Clássica.
2. A deflexão da luz nos campos gravíticos, observada por Eddington durante um eclipse em 1919.
3. A acção dos campos gravíticos sobre o comprimento de onda das radiações (fraco; para o Sol, $\Delta\lambda/\lambda \sim 10^{-6}$).

A partir da Relatividade foi possível, pela primeira vez, construir modelos cosmológicos. Os primeiros foram do tipo *steady state*, sendo possíveis três alternativas:

1. Universo descrito pela Teoria da Relatividade Restrita.
2. Universo finito e fechado, com raio da ordem de 10^{10} anos-luz (Einstein). Não explica o desvio para o vermelho da luz das galáxias.
3. Universo de De Sitter, vazio de matéria.

Mais tarde, **Friedmann** (1888–1925) demonstrou que os modelos estáticos se tornariam gradualmente não-estáticos, donde surgiu a nova ideia de procurar modelos não-estáticos desde à partida.

A Teoria da Relatividade, com a sua geometrização da Física, constitui uma desforra de Descartes sobre Newton: a matéria é apenas uma singularidade do campo. No entanto, esta teoria só compreende a gravidade. A partir de 1919, tentou-se unificar os campos gravítico e electromagnético, tendo Einstein empregue nisso os últimos 25 anos da sua vida. Kaluza sugeriu posteriormente a hipótese de definir uma geometria não a quatro, mas a cinco dimensões, trazendo mais componentes para o tensor métrico (que é 4×4 na Teoria da Relatividade). Einstein resistiu inicialmente a esta hipótese, dado que uma tal quinta dimensão não seria observável.

Bibliografia Geral

Obras cuja leitura é recomendada

Podem ser substituídas por outras de teor análogo.

1. C. Singer, *A Short History of Scientific Ideas to 1900*. Oxford University Press, Oxford, 1959.
2. A. Einstein e L. Infeld, *A Evolução da Física*. Livros do Brasil, Lisboa, s/d.
3. M. Born, *La Théorie de la Relativité d'Einstein et ses Bases Physiques*. Gauthier-Villars, Paris, 1923. (Também existe tradução em inglês: *Einstein's Theory of Relativity*. Dover Publications, New York, 1962.)
4. J. Andrade e Silva e G. Lochak, *Quanta*. Instituto das Novas Profissões, Lisboa, 1988.

Obras de consulta de índoles diversas

Uma selecção forçosamente um tanto arbitrária.

1. UNESCO, *Histoire du Développement Culturel et Scientifique de l'Humanité*. Lafont, Paris, 1963–1969. (Existem também versões em inglês, espanhol, etc).
2. R. Taton (ed.), *Histoire Générale des Sciences* (4 vols.). Presses Universitaires de France, Paris, 1957, 1969, 1995.
3. R. J. Forbes e E. J. Dijksterhuis, *História da Ciência e da Técnica*. Livros Pelicano, Lisboa, 19??. (Tradução de: *A History of Science and Technology*. Penguin Books, ????, 19??.)
4. J. D. Bernal, *Ciência na História* (5 vols.). Lisboa, Livros Horizonte, 1975–1978. (Tradução de: *Science in History*. Watts, London, 1961.)
5. C. Singer *et al.* (ed.), *A History of Technology* (5 vols.). Clarendon Press, Oxford, 1955–1958.)
6. A. P. Usher, *História das Invenções Mecânicas* (2 vols.). Cosmos, Lisboa, 1973. (Tradução de: *A History of Mechanical Inventions*. Harvard University Press, Cambridge (Mass.), 1954; Dover Publications, New York, 1988.)

7. D. J. Struik, *História Concisa das Matemáticas*. Gradiva, Lisboa, 1989. (Tradução de: *A Concise History of Mathematics*, 3rd ed. Dover Publications, New York, 1987.)
8. P. Doig, *A Concise History of Astronomy*. Philosophical Library, New York, 1950.
9. D. Papp, *História de la Física*. Espasa-Calpe, Buenos Aires y Madrid, 1961.
10. R. Dugas, *Histoire de la Mécanique*. Le Griffon, Neuchâtel, 1950.
11. E. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity* (2 vols.). Nelson, London, 1951–1953.
12. V. Ronchi, *Storia della Luce*. Zanichelli, Bologna, 19??. (Existem traduções em francês, inglês, etc.)
13. J. R. Partington, *História de la Química*. Espasa-Calpe, Buenos Aires y Madrid, 19??.