



# PROJECTO FÍSICA

## UNIDADE 4

### LUZ E ELECTROMAGNETISMO

TEXTO E MANUAL DE EXPERIÊNCIAS E ACTIVIDADES



FUNDAÇÃO CALOUSTE GULBENKIAN

## Prefácio da Edição Portuguesa

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

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

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

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

Uma nova visão do ensino das ciências começa a esboçar-se na segunda metade da década de 60. Os jovens tornam-se cada vez mais sensíveis às interacções da ciência com a sociedade e exigem que a sua discussão seja feita nas classes de ciências. É neste contexto que um grupo de professores reunidos em torno da Graduate School of Education da Universidade de Harvard, atento à camada jovem que começava a desinteressar-se da ciência, assume com notável clareza as aspirações da

época e decide iniciar estudos para a organização de um curso de física em que os aspectos humanísticos fossem amplamente contemplados. Alguns destes professores, depois de vários ensaios e avaliações, produzem mais tarde o "Project Physics Course" cuja primeira edição aparece nos Estados Unidos em 1970.

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

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

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

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

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

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

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

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

Pelo Grupo de Coordenadores

MARIA ODETE VALENTE

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

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

I. I. RABI  
Prémio Nobel da Física

## PREFÁCIO

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

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

No auge do desenvolvimento do curso e das actividades de colheita de dados, entrou-se na fase final do projecto. Durante os últimos dois anos, o trabalho do projecto centrou-se no desenvolvimento e na realização de programas de preparação de professores, na dissemi-

nação de informações acerca do curso, na análise de grande quantidade de dados resultantes da avaliação e na redacção de um relatório completo sobre os resultados, numa tentativa de se descobrir como poderia o curso ser reformulado adaptando-se a audiências específicas.

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

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

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

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

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

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

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

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

Como respondeu o Harvard Project Physics a este desafio? Num certo sentido, cada aluno que entra neste curso deve responder a esta questão pessoalmente. Contudo, é um prazer indicar que o estudo

dos muitos resultados e opiniões de alunos, levado a cabo em universidades e escolas nos Estados Unidos e Canadá conduziu a resultados gratificantes, desde as excelentes classificações obtidas nos testes de conhecimento de física, até à satisfação pessoal de cada um dos alunos. É evidente que a composição diversificada dos alunos dos grupos experimentais correspondeu bem ao conteúdo da física, à ênfase humanística do curso e aos seus flexíveis e variados materiais de apoio.

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

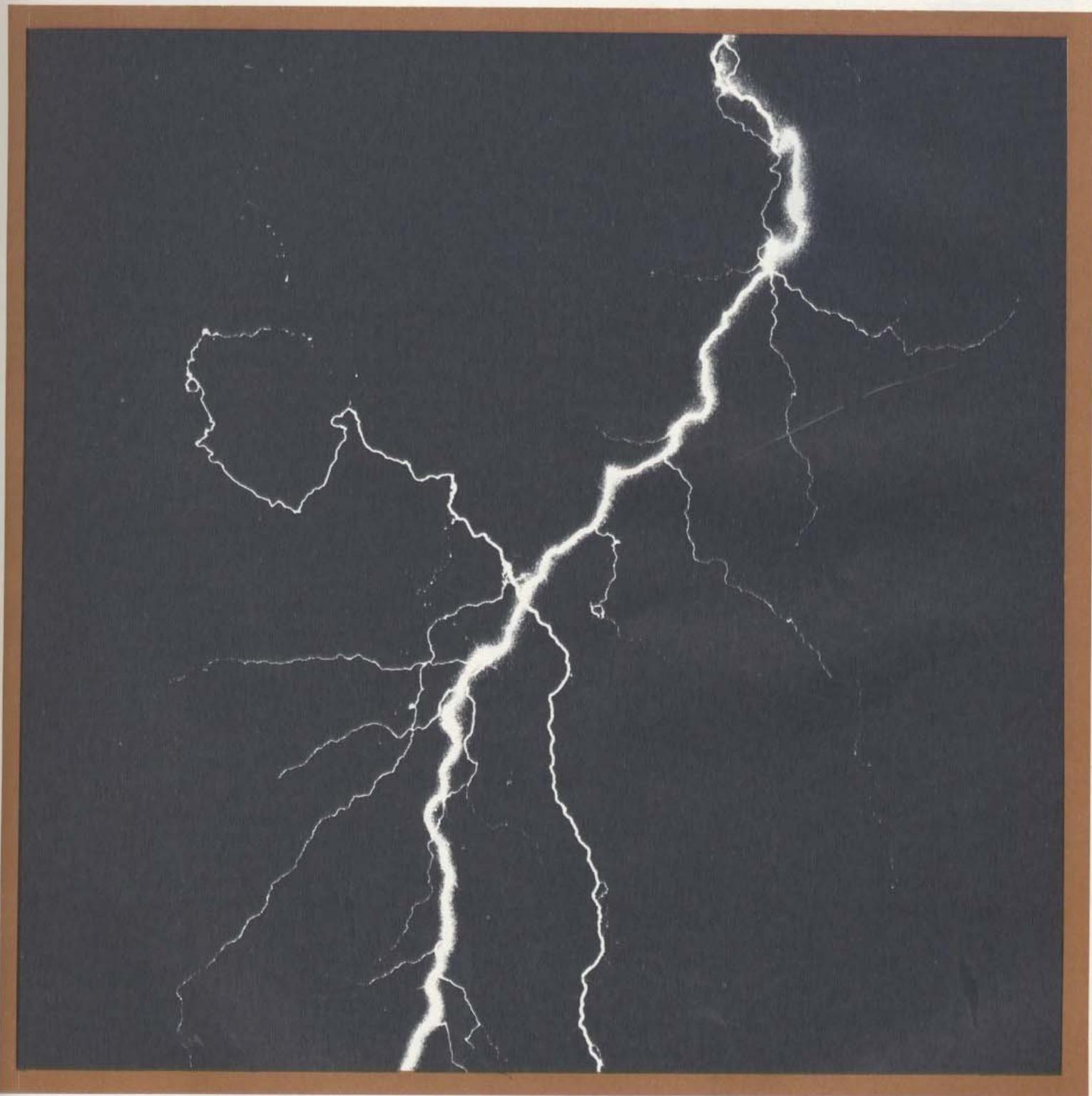
Gostaríamos também de especialmente agradecer à senhora Joan Laws cujas capacidades administrativas, confiança e reflexão tanto contribuíram para o nosso trabalho. O editor Holt, Rinehart and Winston, Inc., de New York forneceu a coordenação, o suporte editorial e o trabalho de base necessário ao grande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

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

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

F. James Rutherford  
Gerald Holton  
Fletcher G. Watson

TEXTO



# ÍNDICE DO TEXTO

## Prólogo 1

## Capítulo 13 Luz

- Introdução 5
- Propagação da luz 8
- Reflexão e Refracção 11
- Interferência e Difraccção 14
- Cor 16
- Porque é que o céu é azul? 20
- Polarização 22
- O éter 24

## Capítulo 14 Campos eléctricos e magnéticos

- Introdução 31
- As curiosas propriedades da magnetite e do ambar: O Livro *De Magnete* de Gilbert 31
- Cargas eléctricas e forças eléctricas 35
- Forças e campos 42
- A carga eléctrica de menor valor 48
- Lei da conservação da carga eléctrica 52
- Correntes eléctricas 54
- Diferença de potencial eléctrico 56
- Diferença de potencial eléctrico e intensidade de corrente eléctrica 59
- Diferença de potencial eléctrico e potência eléctrica 60
- Acção das correntes eléctricas sobre os ímanes 61
- Acção mútua entre correntes eléctricas 64
- Campos magnéticos e cargas em movimento 65

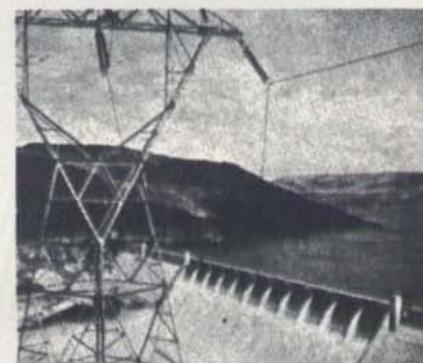
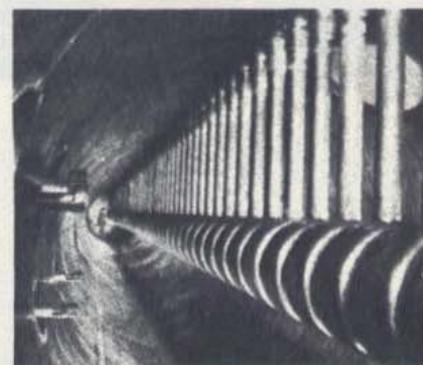
## Capítulo 15 Faraday e a era da electricidade

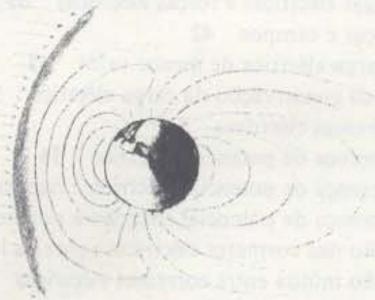
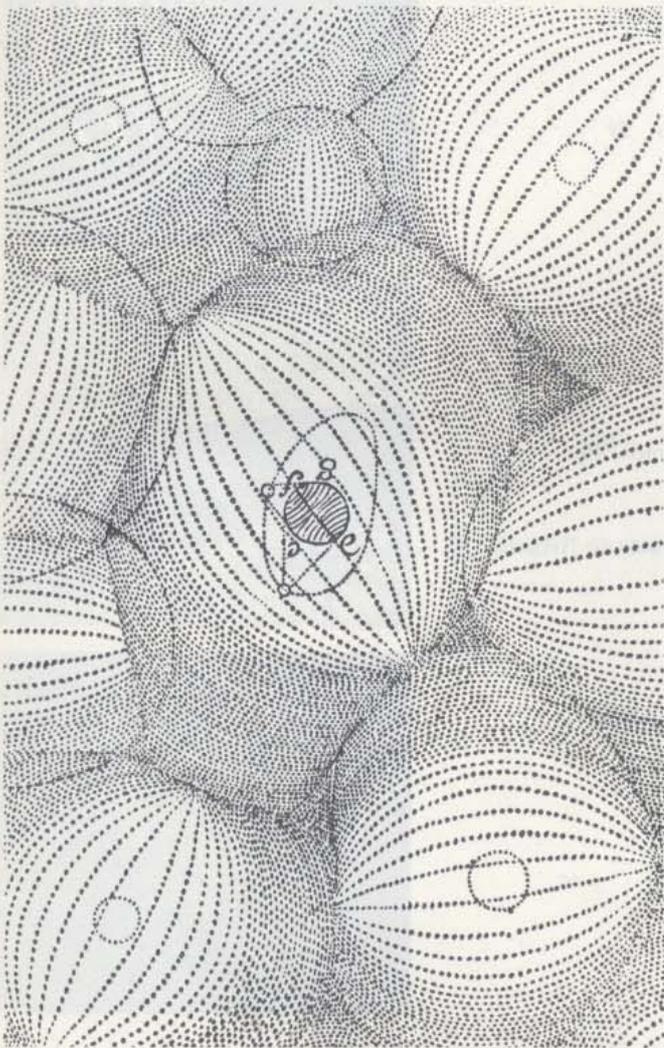
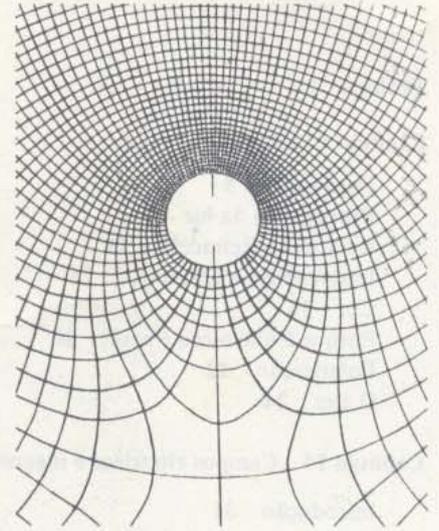
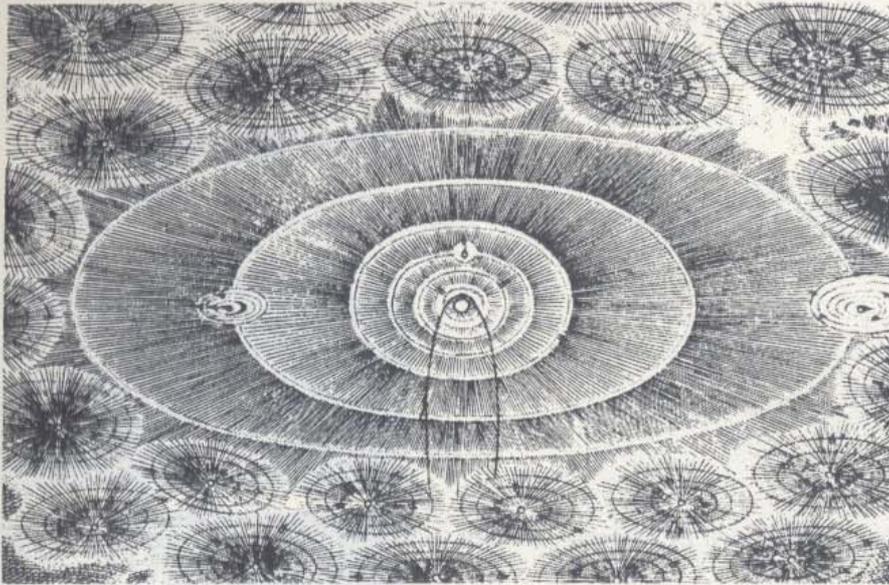
- Problema a resolver: levar energia de um local para outro 77
- O primeiro motor eléctrico de Faraday 78
- A descoberta da indução electromagnética 79
- Produção de electricidade utilizando campos magnéticos: o dínamo 84
- O motor eléctrico 86
- A lâmpada eléctrica 89
- Corrente alterna, corrente contínua e a central eléctrica das cataratas do Niagara 93
- A electricidade e a sociedade 97

## Capítulo 16 A radiação electromagnética

- Introdução 107
- A formulação de Maxwell dos princípios do electromagnetismo 108
- A propagação das ondas electromagnéticas 111
- As experiências de Hertz 115
- O espectro electromagnético 119
- E quanto ao éter? 126

## Epílogo 130





Para muitos cientistas era inconcebível que um corpo pudesse actuar directamente sobre outro através de um espaço vazio. Conceberam então uma série de esquemas para preencher esse espaço existente entre os corpos com alguma coisa que permitisse a transmissão dos efeitos que estes produziam. Primeiro, imaginaram um material que designaram por "éter"; mais tarde, consideraram a existência de "campos" matemáticos. Nesta página, mostram-se algumas ilustrações destes esquemas. O de Descartes, séc. XVII (em baixo, à esquerda); o de Euler, séc. XVIII (em cima, à esquerda); o de Maxwell, séc. XIX (em cima, à direita).

No centro, à direita, vemos uma reprodução de um desenho que apareceu em *The New York Times* e que representa o campo magnético que rodeia a terra. Este campo não é tão simétrico como o que existiria se apenas se tivesse considerado a acção da terra, dado que o campo que esta cria é perturbado por campos produzidos por feixes de partículas carregadas provenientes do sol.

# UNIDADE 4

## Luz e Electromagnetismo

### CAPÍTULOS

- 13 Luz
- 14 Campos eléctrico e magnético
- 15 Faraday e a era da electricidade
- 16 Radiação electromagnética

**PRÓLOGO** A convicção de que o mundo e tudo o que nele existe era constituído por matéria em movimento levou os cientistas a procurarem modelos mecânicos que se aplicassem à luz e ao electromagnetismo, ou seja, a tentarem imaginar que os efeitos da luz, electricidade e magnetismo podiam ser explicados em pormenor em termos de acções entre objectos materiais. (Consideremos, por exemplo, o modo como a luz se reflecte num espelho. Este efeito pode ser compreendido a partir de um modelo que visualiza a luz como sendo composta por partículas materiais que se comportam de um modo semelhante às bolas de pingue-pongue.) Estes modelos mecânicos foram úteis durante algum tempo mas, a longo prazo, provaram ser demasiado limitados. No entanto, a procura destes modelos conduziu a muitas descobertas importantes que, por sua vez, implicaram mudanças enormes na ciência, técnica e sociedade. São estas descobertas e os seus efeitos que constituem o tema desta Unidade. Neste Prólogo vamos delinear o desenvolvimento de vários modelos e indicar brevemente quais os efeitos que tiveram nas ideias que hoje temos sobre o mundo físico.

A partir do séc. XVII, existiram dois modelos concorrentes para a luz. Um destes modelos tentava explicar a luz em termos de partículas e o outro em termos de ondas. Na primeira metade do séc. XIX, o modelo ondulatório ganhou aceitação geral, uma vez que se mostrou como o mais adequado para explicar os efeitos ópticos recentemente descobertos. O capítulo 13 conta a história do triunfo da teoria ondulatória da luz. Esta teoria permaneceu como dominante até aos princípios do séc. XX, altura em que se descobriu (como veremos na unidade 5) que, por si só, nem as partículas nem as ondas permitem dar conta de todo o comportamento da luz.

À medida que as experiências mostravam que as forças eléctricas e magnéticas tinham algumas características comuns com as forças gravíticas, os cientistas foram desenvolvendo novas teorias para a electricidade e para o magnetismo. Tomando como modelo a formulação que

Newton dera para a gravitação, estas novas teorias pressupunham que existiam forças entre corpos electrizados e magnetizados que variavam inversamente com o quadrado da distância. Descobriu-se que esta hipótese permitia dar conta de muitas observações. É claro que os proponentes destas teorias pressupunham que os corpos podem exercer forças à distância sem terem que entrar em contacto.

As teorias de acção à distância mostraram ser particularmente bem sucedidas ao fornecerem uma expedição quantitativa de alguns aspectos do electromagnetismo. Não podiam, no entanto, nesse tempo, fornecer uma explicação realmente completa. Alternativamente, outros meios de descrição, baseados na noção de *campos*, tornaram-se largamente aceites no fim do séc. XIX. Hoje em dia acredita-se que esta é a melhor maneira de analisar *todas* as forças físicas. Aqui introduz-se a noção de campo no capítulo 14 e aprofundamo-la no último capítulo desta Unidade.

Muitos cientistas sentiam que as teorias de acção à distância, não obstante conduzirem a previsões correctas, não conseguiam fornecer uma explicação física satisfatória para o modo como um corpo exerce uma força sobre outro. O próprio Newton teve relutância em assumir que um corpo podia actuar sobre outro através de um espaço vazio. Numa carta que escreveu a Richard Bentley dizia:

Tradução do excerto de uma carta de Newton.

“É para mim inconcebível que a matéria bruta e inanimada possa (sem a mediação de outras coisas que não é material) agir sobre e afectar outra matéria sem que haja contacto mútuo; ... E esta é uma das razões porque desejo que não me seja atribuída a ideia de gravidade inata. Que a gravidade deva ser inata, inerente e essencial à matéria para que um corpo possa actuar à distância sobre outro através do vácuo, sem a mediação de qualquer coisa e através da qual a acção ou força possa ser transmitida de um ponto para outro é para mim um absurdo tão grande que acredito que nenhum homem com competência para lidar com assuntos filosóficos possa ser levado por essa ideia.”

Alguns cientistas do séc. XVII foram menos cautelosos que Newton e avançaram a ideia de que os objectos estariam rodeados por atmosferas que se estendem até às regiões mais distantes e que estas transmitiriam as forças gravíticas, eléctricas e magnéticas de um corpo para outro. As atmosferas que nesse tempo se consideravam não faziam parte de uma teoria quantitativa. Contudo, no séc. XIX, o conceito de atmosfera voltou a reviver e muitas tentativas se fizeram para desenvolver matematicamente as propriedades de um meio que transmitiria as ondas de luz. A esta hipotética substância que sustentaria a luz, foi dado o nome de “éter luminífero”.

A rápida descoberta de novos fenómenos eléctricos e magnéticos na primeira metade do séc. XIX, estimulou a imaginação científica. Michael Faraday (1791-1867), autor de muitas descobertas importantes, desenvolveu um modelo com linhas de força atribuídas ao espaço que rodeava corpos electrizados e magnetizados. Faraday mostrou como é que estas linhas de força permitiam explicar muitos efeitos electromagnéticos.

Num artigo que escreveu quando tinha 17 anos, William Thomson (1824-1907) mostrou como é que as equações utilizadas na formulação e

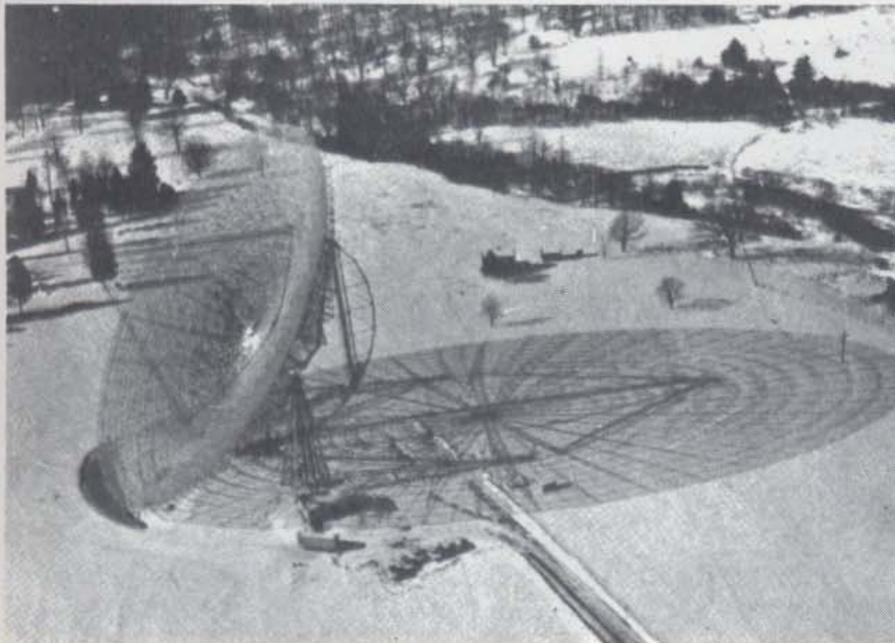
resolução de problemas da electrostática também se podiam usar para resolver problemas de transferência de calor. A *Electrostática* trata dos efeitos das forças entre cargas em repouso. Na altura, esse assunto era tratado de uma forma mais simples e eficiente, assumindo que as cargas eléctricas podiam actuar à distância. Por outro lado, considerava-se geralmente que a transferência de calor resultava da acção de partes em contacto. Thomson mostrou que a mesma formulação matemática se podia utilizar em teorias que assentavam em postulados físicos completamente diferentes. Talvez que, nessa altura, fosse mais importante encontrar meios matemáticos correctos que escolher um modelo matemático específico.

James Clerk Maxwell (1831-1879), inspirando-se nos modelos físicos de Faraday e na matemática de Thomson, tentou desenvolver uma teoria matemática do electromagnetismo. Maxwell considerou primeiro um éter imaginário cheio de roldanas e rodas com movimentos muito lentos. Depois, foi gradualmente chegando a um conjunto de equações que descreviam as propriedades dos campos eléctrico e magnético. Descobriu-se mais tarde que estas equações tinham um sucesso notável. Primeiro descreviam com bastante precisão os efeitos eléctricos e magnéticos já conhecidos. Para além disso, levaram Maxwell a prever novos efeitos que se baseavam na ideia de uma perturbação que se propagava ondulatoriamente nos campos eléctrico e magnético. A velocidade que ele previu para estas ondas electromagnéticas tinha aproximadamente o mesmo valor que o valor obtido para a velocidade da luz. Esta semelhança de valores sugeriu-lhe a possibilidade de que talvez a luz fosse uma onda electromagnética.

O conceito de campo, juntamente com o conceito de energia, fornece talvez um modo de estudar a acção que um corpo exerce sobre outro sem que haja a necessidade de falar em acção à distância ou de provado repetidamente a sua utilidade nos estudos que se têm feito durante o séc. XX.

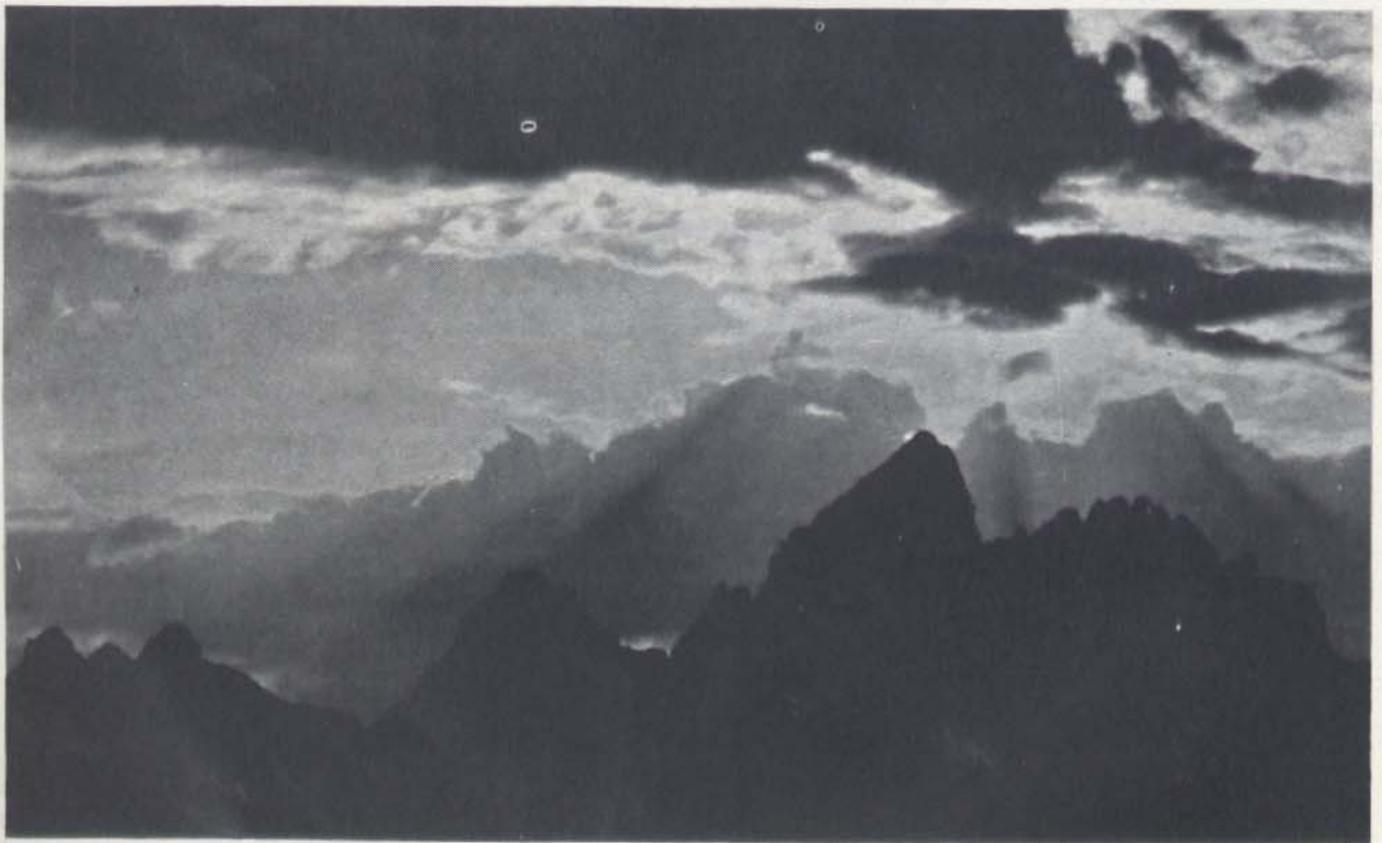
William Thomson (Lord Kelvin) foi um físico matemático escocês. As suas contribuições científicas estenderam-se não só aos campos da electricidade, mecânica e termodinâmica, como também incluem realizações práticas, nomeadamente o aperfeiçoamento de uma bússola de navegação e o primeiro cabo atlântico. Como homenagem, a escala absoluta de temperaturas chama-se escala de Kelvin.

Ver artigo de Maxwell "Acção à Distância" na *Colectânea 4*.



Rádio telescópio do *National Radio Astronomy Observatory*, situado em Greenbank, West Virginia, Estados Unidos da América.

13.1	Introdução	5
13.2	Propagação da luz	8
13.3	Reflexão e refração	11
13.4	Interferência e difração	14
13.5	Cor	16
13.6	Porque é que o céu é azul?	20
13.7	Polarização	22
13.8	O éter	24



## CAPÍTULO TREZE

# Luz

### 13.1 Introdução

O que é a luz? À primeira vista, esta pergunta pode parecer-nos trivial. De facto, não há nada que nos seja tão familiar. Vemos por intermédio da luz. Também vivemos devido à luz pois sem ela não haveria fotossíntese e a fotossíntese é a fonte básica de energia da maioria das formas vivas que existem na Terra. A luz fornece-nos a maior parte da informação que temos sobre o mundo que nos rodeia, sobre a Terra e sobre as regiões mais distantes do espaço. É justamente porque o nosso mundo é, em grande parte, definido pela luz que o seu comportamento sempre nos fascinou. A que velocidade se desloca? Como é que atravessa o espaço vazio? O que é a cor?

A luz é uma forma de energia. O físico pode descrever um feixe luminoso a partir de valores mensuráveis da sua velocidade, comprimento de onda ou frequência e intensidade. Mas, para ele, como para toda a gente, a luz é também brilho e sombra, a beleza das flores no Verão, das folhas no Outono, do pôr-do-sol vermelho e dos quadros pintados por grandes mestres. Estas são maneiras diferentes de apreciar a luz. Uma concentra-se nos aspectos mensuráveis da luz e corresponde a um processo que tem sido extremamente frutuoso em física e na tecnologia. A outra consiste na análise das nossas respostas estéticas quando observamos a luz quer na natureza quer nas artes. Há ainda um outro processo de encarar a luz e que foca os fenómenos biofísicos da visão.

Estes aspectos da luz não são facilmente separáveis. Assim, no começo da história da ciência, os problemas que se levantavam sobre a luz eram mais subtis e evasivos do que os que estavam associados à maior parte de outros aspectos da experiência física. As primeiras ideias sobre a natureza da luz confundiam frequentemente a luz com a visão. Esta confusão é ainda patente nas crianças. Quando brincam às escondidas, algumas crianças escondem-se tapando os olhos com as mãos. Aparentemente pensam que não podem ser vistas quando não podem ver. A associação da visão com a luz persiste também ao nível da linguagem corrente utilizada por adultos. Assim, utilizamos expressões como o Sol "espreita por entre as nuvens" ou as estrelas "olham cá para baixo".



Contemplai a Luz que vem do Sol,  
Que mais familiar, e que mais  
misterioso;

Enquanto no seu Resplendor  
irradiante revela

Toda a Face da Natureza, ela,  
porém, a si própria se oculta...

[Richard Blackmore, *Creation II*, 1715.]

(Traduzido por Francisco M. C. do Espírito Santo)

GE 13.1

Alguns filósofos gregos acreditavam que a luz se deslocava em linha recta, a grande velocidade e que continha partículas que estimulavam o sentido da visão ao encontrarem o globo ocular. Durante os séculos que se seguiram ao período da Civilização Grega, prestou-se pouca atenção à natureza da luz e este modelo corpuscular manteve-se praticamente intacto. No entanto, por volta de 1500, Leonardo da Vinci notou semelhanças entre os ecos sonoros e a reflexão da luz, tendo especulado sobre a possibilidade de a luz poder ter um carácter ondulatório.

No séc. XVIII, surgiu entre os cientistas uma divergência de opiniões quanto à natureza da luz. Alguns, incluindo Newton, defendiam um modelo que se baseava sobretudo na ideia de que a luz se comportava como um feixe de partículas. Outros, incluindo Huygens, apoiavam um modelo ondulatório. No fim do séc. XIX, as provas em favor do modelo ondulatório pareciam ser irrefutáveis. Neste capítulo vamos pôr a seguinte questão: *Até que ponto é que um modelo ondulatório é apropriado para explicar o comportamento observável da luz?* Para isso vamos considerar o modelo ondulatório como uma hipótese e examinar as provas que o apoiam. Devemos ter presente que qualquer modelo, hipótese ou teoria científica tem dois objectivos principais: explicar os factos que se conhecem e fazer previsões sobre outros que se possam verificar experimentalmente. Iremos analisar estes dois aspectos em ligação com o modelo ondulatório. O resultado será bastante surpreendente. O modelo ondulatório explica bastante bem todas as propriedades da luz conhecidas até ao séc. XX. Veremos, no entanto, no Capítulo 18, que, para determinados fins, devemos adoptar um modelo corpuscular. Em seguida, no Capítulo 20, combinaremos os dois modelos, fazendo a fusão de duas teorias aparentemente opostas.

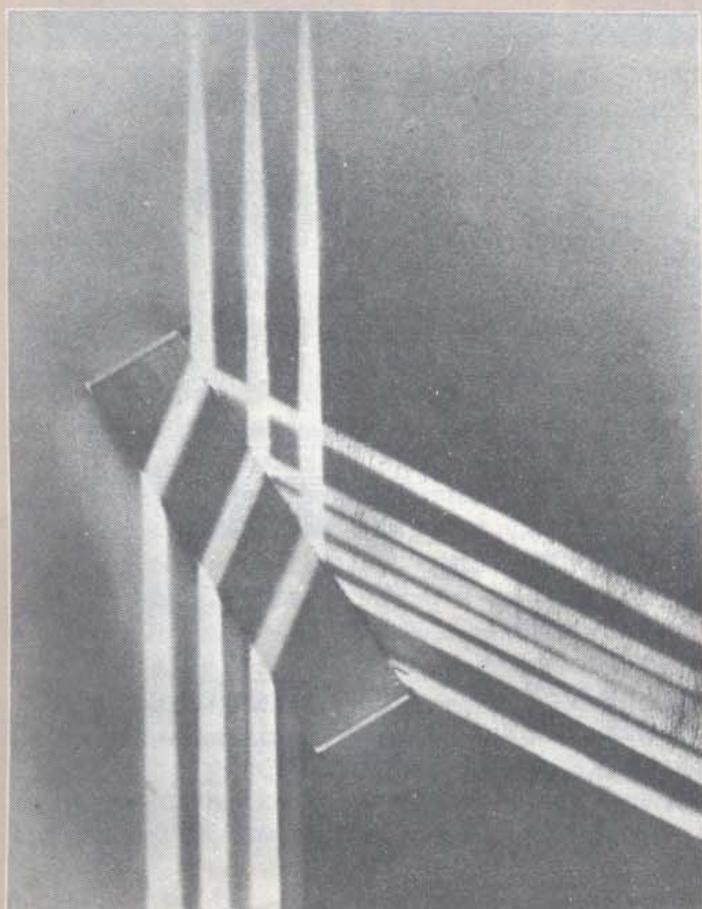
Já aqui mencionámos uma opinião antiga — mais tarde comprovada experimentalmente — de que a luz se desloca rectilaneamente e a alta velocidade. O uso diário do espelho convence-nos de que a luz também se pode reflectir. A luz pode também refractar-se e apresentar fenómenos de interferência e de difracção. Já estudámos todas estas propriedades no Capítulo 12, quando discutimos o comportamento das ondas. Se for necessário, devemos refrescar a memória revendo as ideias básicas desse capítulo, antes de prosseguirmos com o estudo da luz. Iremos também estudar outros fenómenos — dispersão, polarização e difusão — que até agora não foram considerados. Como veremos, também eles vão estar de acordo com o nosso modelo ondulatório e, na realidade, fornecem provas experimentais importantes a seu favor.

Antes de discutirmos os vários aspectos do comportamento da luz e de vermos como é que eles constituem provas apoiando o modelo ondulatório, vamos primeiro considerar a propagação da luz. Em seguida, vamos analisar duas características — a reflexão e a refracção — que tanto se podem explicar por um modelo corpuscular (de partículas) como por um modelo ondulatório. É evidente que a discussão que apresentamos no texto deve ser acompanhada, sempre que possível, com experiências laboratoriais e outras actividades, nomeadamente leituras de textos da *Colectânea*, projecção de filmes, transparências, etc.

Não existe uma distinção nítida e global entre modelo, hipótese e teoria. Podemos dizer de modo aproximado que um modelo (quer seja mecânico, quer seja matemático) é uma noção relativamente limitada que serve para explicar um fenómeno observável específico. Uma hipótese é uma proposição que geralmente pode ser testada directa ou indirectamente. Uma teoria é uma construção mais geral que relaciona um ou mais modelos e várias hipóteses e que visa explicar muitos efeitos ou fenómenos que até então pareciam não estar relacionados.

Preparou-se, também, uma Unidade Suplementar que trata apenas de Óptica.

Feixes luminosos propagam-se  
em linha recta

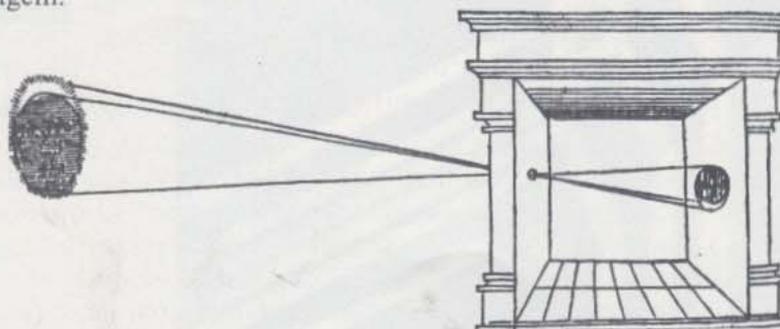


De facto, esta é uma boa altura para lembrarmos um ponto importante: este Curso insiste na utilização de muitos meios para a aprendizagem da física. Nisto difere de muitos outros cursos que nos são familiares e que assentam sobretudo num livro de texto. Neste Curso, o texto servirá, por vezes, apenas como motivação ou para enquadrar parte dos materiais que se aprendem muito melhor com experiências, discussões na aula, etc., do que por meio de leituras. Isto é particularmente verdade no caso da Óptica (ciência da luz), electricidade e magnetismo — os grandes temas da Unidade 4. Pretende-se que o texto forneça uma visão geral que se vá completando através de todo um processo que torne o estudo da física mais válido e que seja mais interessante do que aquele que se baseia apenas simplesmente em leituras.

### 13.2 A propagação da luz

Existem muitas provas de que a luz se propaga rectilaneamente. O facto de não podermos ver o que está “por detrás” de um obstáculo é disso um exemplo vivo. Uma sombra projectada pelo Sol tem os contornos muito bem definidos, como é característica das sombras produzidas por fontes luminosas de grandes dimensões, mas situadas a grandes distâncias. Analogamente, as sombras projectadas por fontes de menores dimensões, mas mais próximas, são também muito nítidas. O Sol e as fontes mais próximas de menores dimensões são aproximadamente fontes pontuais. Estas fontes pontuais produzem sombras de contornos bem definidos.

Imagens assim como sombras permitem demonstrar que a luz se desloca rectilaneamente. Antes da invenção da máquina fotográfica que hoje conhecemos com o seu sistema de lentes, utilizava-se muito um aparelho constituído por uma caixa fechada com apenas um orifício no centro de uma das faces. Tal como a *camera obscura*, este aparelho era muito popular na Idade Média. É provável que Leonardo da Vinci o tivesse utilizado como ajuda para os seus desenhos. Num dos seus manuscritos, da Vinci diz que “uma pequena abertura no batente de uma janela projecta na parede interior da sala uma imagem dos corpos que estão para lá dessa abertura”. Juntou um esquema para mostrar como é que a propagação rectilínea da luz explica a formação de uma imagem.

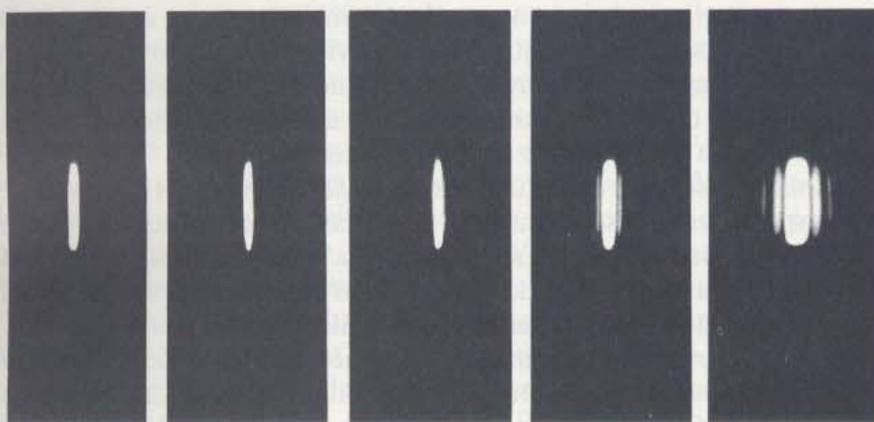


*Camera obscura* é uma expressão latina que significa “câmara escura”.

Primeira ilustração publicada de uma *camera obscura*, extraída de um livro do físico e matemático holandês Gemma Frisius. Mostra a observação de um eclipse solar em Janeiro de 1544.

É muitas vezes conveniente usar linhas rectas para representar a direcção segundo a qual a luz se desloca. A representação visual de um

raio de luz infinitamente estreito é útil quando pensamos sobre a luz, mas tais raios não têm existência real. Um feixe de luz que emerge de um orifício de dimensões razoáveis tem a largura desse orifício. Podíamos esperar que se diminuíssemos cada vez mais o orifício acabaríamos por obter um feixe de luz cada vez mais estreito — no limite, teríamos apenas um único raio de luz. No entanto, tal não acontece! Há efeitos de difracção (como os que observámos para as ondas na água e para as ondas sonoras no Capítulo 12) que aparecem quando o feixe luminoso passa através de um pequeno orifício (veja a figura). Vemos assim que um raio de luz infinitamente estreito, embora seja útil como representação visual, não se pode obter na prática. No entanto, podemos ainda continuar a utilizar esta ideia para *representar a direcção* segundo a qual se propagam as ondas paralelas de um feixe luminoso.



Tentativa para produzir um “raio luminoso”. As fotografias da esquerda conseguiram-se fazendo passar um feixe paralelo de luz vermelha através de fendas cada vez mais estreitas e apontando-o para uma chãpa fotográfica. (É claro que, quanto mais estreita era a fenda, menos luz passava através dela. Este facto foi compensado com exposições cada vez mais prolongadas para obtenção de cada fotografia.) As larguras das fendas são respectivamente, da esquerda para a direita, 1,5 mm, 0,7 mm, 0,4 mm, 0,2 mm e 0,1 mm.

Actualmente, um feixe luminoso produzido por um laser aproxima-se quanto possível do caso ideal de um feixe fino de raios paralelos. Como veremos mais tarde nesta Unidade (Capítulo 15), a luz é produzida pelas vibrações dos electrões dos átomos das fontes luminosas. Na maior parte destas fontes que vão desde as lâmpadas incandescentes e fluorescentes até ao Sol e às estrelas, os átomos vibram independentemente uns dos outros. Cada um destes átomos em vibração dá origem a uma onda individual e é a soma destas ondas provenientes dos diferentes átomos em vibração que constitui o feixe luminoso total emergente. Em consequência disto, a luz proveniente destas fontes espalha-se em todas as direcções. Pode produzir-se um feixe luminoso, mais ou menos paralelo, com o auxílio de um conjunto de pequenos orifícios ou com espelhos ou lentes como acontece, por exemplo, nas lanternas, nos faróis de automóveis e nos projectores. No entanto, como se pode verificar rapidamente, estes feixes luminosos divergem ainda de modo considerável.

Em contraste, os lasers são constituídos de modo a que os átomos vibrem e produzam luz em uníssono uns com os outros, em vez de o fazerem individualmente e ao acaso. Consequentemente, os átomos produzem ondas em simultâneo, o que dá origem a um feixe total com uma intensidade considerável e muito mais próximo da luz monocromática (isto é, de uma única cor) do que aquele que se obtém com qualquer fonte convencional. Para além disso, dado que as ondas lumi-

GE 13.3



nosas provenientes dos átomos de um laser são todas produzidas ao mesmo tempo, elas podem interferir umas com as outras de modo construtivo e produzir um feixe que é estreito e praticamente paralelo. De facto, a luz proveniente dos lasers dispersa-se tão pouco que, quando se orientaram feixes assim produzidos para a superfície lunar, que fica a 400 000 Km de distância, se obtiveram manchas luminosas com apenas um metro de diâmetro.

Veja também, o artigo "O Laser — o que é e o que faz" na *Colectânea 4*.

Dado que a luz parece propagar-se rectilaneamente, poderemos dizer a que velocidade se propaga? Galileu analisou este problema na sua obra *Dois Novas Ciências* (publicada em 1638) e notou que as experiências da vida corrente nos podem levar a concluir que a propagação da luz é instantânea. No entanto, estas experiências, quando analisadas em mais pormenor, mostram apenas que a luz se propaga muito mais rapidamente que o som. Por exemplo: "quando se dispara uma peça de artilharia, colocada a grande distância, o clarão atinge imediatamente os nossos olhos, enquanto que ouvimos o som só depois de um intervalo de tempo considerável". Mas como é que sabemos se, na realidade, a luz se desloca "instantaneamente" a não ser que tenhamos uma maneira precisa para medir o intervalo de tempo?

Galileu descreveu então uma experiência na qual dois observadores, munidos de lanternas e situados em duas colinas distantes podiam medir a velocidade da luz. (Esta experiência será analisada no GE 13-4.) Concluiu que a velocidade da luz era provavelmente finita e não infinita, embora não tivesse conseguido determinar qual o seu valor.

Foi o astrónomo dinamarquês Römer quem primeiro conseguiu obter uma prova experimental do valor finito da velocidade de propagação da luz. Observações detalhadas dos satélites de Júpiter mostravam que existia uma irregularidade inexplicável nos intervalos de tempo registados entre os eclipses sucessivos destes satélites provocados por aquele planeta. A 9 de Novembro de 1676 esperava-se a ocorrência de um desses eclipses 45 segundos depois das 5 horas e 25 minutos da manhã. Em Setembro desse mesmo ano, Römer comunicou à Academia das Ciências de Paris que o eclipse ocorreria dez minutos mais tarde. No dia 9 de Novembro, os astrónomos do Observatório Real de Paris observaram cuidadosamente o eclipse. Embora cépticos quanto às misteriosas previsões de Römer, comunicaram que, efectivamente, o eclipse ocorrera mais tarde tal como ele o previra.

#### GE 13.4

Mais tarde, na Academia de Ciências, Römer revelou a uma audiência de astrónomos totalmente perplexos a base teórica da sua previsão. Explicou que a hora do eclipse inicialmente prevista fora calculada com base em observações feitas quando Júpiter se encontrava perto da Terra. Ora Júpiter distanciara-se entretanto da Terra. O atraso no eclipse devia-se simplesmente ao facto de a luz proveniente de Júpiter demorar um certo tempo a chegar à Terra e de que esse intervalo de tempo devia ser obviamente tanto maior quanto maior fosse a distância entre as posições relativas que a Terra e Júpiter ocupavam nas suas respectivas órbitas. Römer calculou que a luz levava aproximadamente 22 minutos para atravessar a órbita da Terra em volta do Sol.

Pouco tempo depois deste acontecimento, o físico holandês Christian Huygens utilizou os valores de Römer para fazer o primeiro cálculo

da velocidade de propagação da luz. Combinou o valor de 22 minutos obtido por Römer para o tempo que a luz demora a atravessar a órbita da Terra com a sua própria estimativa do diâmetro da órbita da Terra. (Conseguiu-se calcular esta distância pela primeira vez no séc. XVII, como resultado do avanço da astronomia descrito na Unidade 2.) Huygens obteve um valor que, expresso em unidades actuais, era de aproximadamente  $2 \times 10^8$  metro por segundo. Este valor corresponde aproximadamente a 2/3 do valor hoje aceite (veja mais adiante). O erro no valor obtido por Huygens deveu-se sobretudo ao facto de Römer ter sobrestimado o intervalo de tempo. Sabemos hoje que a luz só leva cerca de 16 minutos a atravessar a órbita da Terra.

A velocidade da luz tem sido medida de muitas maneiras diferentes desde o séc. XVII (Veja o artigo "Velocidade da Luz" na Colectânea de Textos 4). Dado que esta velocidade é muito elevada, é necessário utilizar ou uma distância muito grande ou um intervalo de tempo muito pequeno ou ambas as coisas simultaneamente. Os primeiros métodos eram baseados em medidas de distâncias astronómicas. No séc. XIX, combinações de rodas dentadas rotativas com espelhos tornaram possível medir intervalos de tempo muito curtos, o que permitia utilizar distâncias de poucos quilómetros. O desenvolvimento da aparelhagem electrónica no séc. XX, permitiu a medição de intervalos de tempo ainda mais curtos. Hoje em dia, a velocidade da luz é uma das constantes da Física que se conhece com maior precisão, mas dada a importância que o valor da velocidade da luz tem nas teorias da Física moderna, os físicos continuam a melhorar os seus métodos de medida.

Actualmente, as medidas mais precisas indicam que a velocidade de propagação da luz no vácuo é de 299792456,2 metro/segundo. Admite-se que a incerteza neste valor é de menos de 1 metro/segundo, ou seja, 0,000001%. Representa-se habitualmente a velocidade da luz pelo símbolo  $c$  e, para a maior parte dos fins, é suficiente usar o valor aproximado de  $c = 3 \times 10^8$  m/s.

- Q1. Consegue-se tornar um feixe luminoso cada vez mais estreito, fazendo-o passar através de fendas cada vez mais estreitas?
- Q2. Que razões tinha Römer para pensar que o eclipse de determinado satélite de Júpiter se observaria mais tarde do que o previsto?
- Q3. Qual foi a consequência mais importante do trabalho de Römer?

### 13.3 Reflexão e Refracção

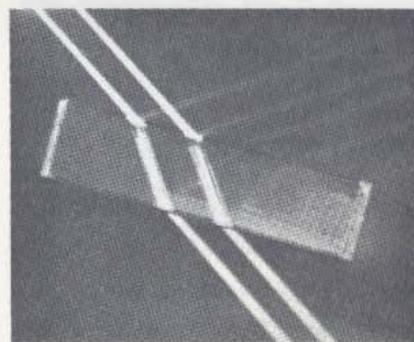
O que é que acontece quando a luz, ao propagar-se num certo meio (digamos o ar), encontra a fronteira com outro meio (o vidro, por exemplo)? As respostas a esta pergunta diferem consoante se adopta uma teoria corpuscular ou uma teoria ondulatória da luz. Por conseguinte, temos aqui uma possibilidade de verificar qual das teorias é a melhor.

Já discutimos a reflexão e a refracção do ponto de vista ondulatório no Capítulo 12. Precisamos apenas de recapitular os resultados que aí obtivemos e aplicá-los à luz.

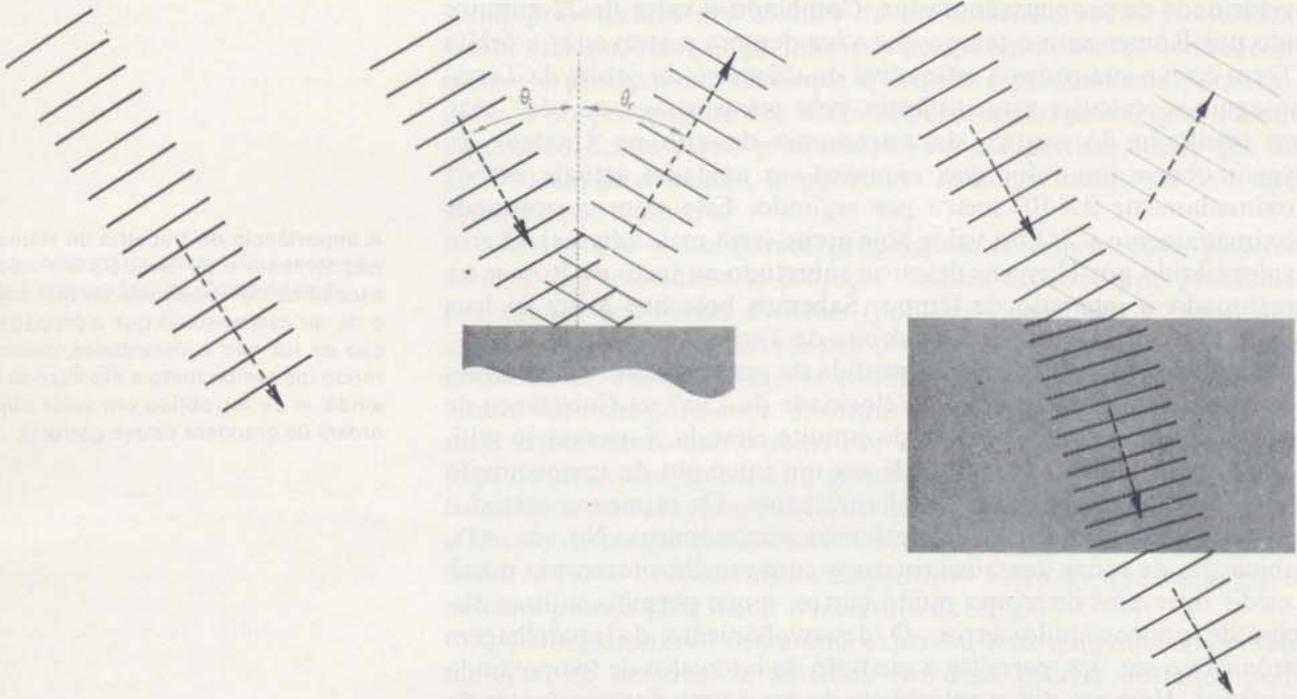
A importância do trabalho de Römer não foi tanto o ter levado a um valor específico da velocidade da luz, mas o de ter estabelecido que a propagação da luz não é instantânea, demorando um tempo finito a efectuar-se e ainda, o de ter obtido um valor cuja ordem de grandeza estava correcta.

GE 13.5

GE 13.6



Dois feixes luminosos estreitos, provenientes do lado superior esquerdo, incidem num bloco de vidro. Consegue explicar os outros efeitos?



1. Podemos considerar que um raio luminoso é a linha perpendicular à linha das cristas das ondas. Este raio representa a direcção segundo a qual um conjunto de ondas paralelas se propaga.

2. Na reflexão, o ângulo de incidência ( $\theta$ ) é igual ao ângulo de reflexão ( $\theta$ ).

3. A refração envolve uma mudança do comprimento de onda e da velocidade da onda, quando esta passa por outro meio. Quando a velocidade diminui, o comprimento de onda também diminui e o raio inclina-se aproximando-se da linha perpendicular à superfície de separação. Esta inclinação para a normal observa-se quando um raio luminoso passa do ar para o vidro.

GE 13.7 — 13.12

Os raios de incidência, reflexão e refração estão todos num mesmo plano que é perpendicular à superfície.



E se agora explicarmos as mesmas observações, partindo do modelo corpuscular? Para testar este modelo devemos considerar em primeiro lugar a natureza da superfície do vidro que, apesar de aparentemente lisa é, na realidade, muito rugosa. Com a ajuda de um microscópio potente podem observar-se inúmeros "montes" e "vales" nesta superfície. Se as partículas de luz fossem semelhantes a pequenas esferas de matéria, quando atingissem esta matéria tão rugosa deveriam dispersar-se em todas as direcções. Não se reflectiriam nem se refractariam como se mostra nas páginas 13 e 14. Por conseguinte, Newton argumentou que devia existir "alguma propriedade do corpo, distribuída uniformemente pela sua superfície e que actuaria sobre o raio sem contacto directo". Obviamente no caso da reflexão, esta força seria uma força que repelia as partículas de luz. Analogamente, uma força que atraísse as partículas de luz em vez de as repelir, poderia explicar a refração. À medida que uma partícula de luz se aproximasse de outro meio, teria em primeiro lugar que vencer a força repulsiva. Se o conseguisse, encontraria então uma força atractiva que a puxaria para dentro do

meio. Como a força atractiva seria um vector com uma componente na direcção do movimento original da partícula, a velocidade da partícula da luz aumentava. Assim, se o raio de partículas se deslocasse numa direcção oblíqua em relação à fronteira, a sua direcção mudaria ao entrar no meio, aproximando-se da linha perpendicular à fronteira.

De acordo com o modelo *corpúscular* podemos, portanto, fazer as seguintes afirmações sobre a reflexão e a refacção:

1. Um raio de luz representa a direcção segundo a qual as partículas se deslocam.

2. Na reflexão, os ângulos de incidência e de reflexão são iguais. Esta previsão pode ser deduzida aplicando a Lei de Conservação do Momento Linear às partículas que são repelidas por uma força, como se mostra no último desenho da página anterior (veja também o GE 13.7).

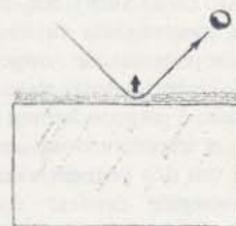
3. A refacção envolve uma mudança da velocidade das partículas quando passam de um meio para outro. Em particular, quando é uma força atractiva que está a actuar, o *módulo da velocidade aumenta* e a inclinação do raio também aumenta.

Podemos comparar estes aspectos do modelo corpúscular com os aspectos correspondentes do modelo ondulatorio (indicados acima). A única diferença está na velocidade prevista para o raio refractado. Nós observamos que um raio se aproxima da normal quando a luz passa do ar para a água. A teoria corpúscular *prevê* que a luz tem uma velocidade *maior* no segundo meio. A teoria ondulatoria *prevê* que a luz tem uma velocidade *menor*.

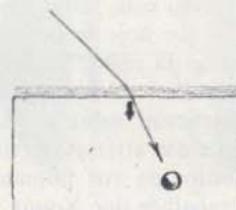
Poderá pensar-se que seria relativamente fácil conceber uma experiência para determinar qual das previsões era a correcta. Bastaria, por exemplo, medir a velocidade da luz depois de ela ter passado para a água e compará-la com a velocidade da luz no ar. No entanto, nos fins do séc. XVII e princípios do séc. XVIII, época em que Huygens defendia o modelo ondulatorio e Newton, o modelo corpúscular, tal experiência não era realizável. Nesse tempo, o único processo possível para medir a velocidade da luz era o que se usava em astronomia. Só nos meados do séc. XIX é que Armand H. K. Fizeau e Jean B. L. Foucault mediram a velocidade da luz na água. Os resultados obtidos concordavam com as previsões do modelo ondulatorio: a velocidade da luz é menor na água do que no ar.

Na realidade, quando estas experiências foram feitas, já a maior parte dos físicos tinha aceite o modelo ondulatorio, embora por outras razões que veremos mais adiante. As experiências de Foucault-Fizeau, realizadas em 1850, foram consideradas como a última pedra no túmulo da teoria corpúscular da luz formulada por Newton.

- Q4.** Qual a prova que mostrou definitivamente que o modelo corpúscular da luz formulado por Newton não podia explicar todos os aspectos da refacção?
- Q5.** Se a luz tem uma natureza ondulatoria, quais as modificações que se verificam na velocidade, comprimento de onda e frequência da luz quando esta passa do ar para a água?



GE 13.13



Superfície de um vidro vista através de um microscópio electrónico. A superfície é uma folha de alumínio com três micron de espessura. A amplificação aqui é de aproximadamente 26 000. ( $\mu$  é o símbolo que representa o micron e  $1 \mu = 10^{-6} \text{m}$ .)

Thomas Young (1773-1829) foi um linguista, físico e especialista em muitos campos da ciência de origem inglesa. Quando tinha quatorze anos já dominava o latim, o grego, o hebreu, o árabe, o persa, o francês e o italiano. Mais tarde, foi um dos primeiros acadêmicos a conseguir decifrar com sucesso os hieróglifos de inscrições egípcias. Estudou medicina em Inglaterra, na Escócia e na Alemanha. Enquanto estava na Faculdade de Medicina, fez trabalhos originais sobre o olho e desenvolveu mais tarde a primeira versão do que hoje se conhece pela teoria tricolor da visão. Também efectuou investigações no campo da fisiologia, em particular sobre as funções do coração e das artérias, e estudou os mecanismos da voz humana. Foi com estes trabalhos que Young se começou a interessar pela física do



som e pelas ondas sonoras. Young voltou-se então para a óptica e mostrou que muitas das experiências que Newton efectuara com a luz se podiam explicar em termos de uma teoria ondulatória simples. As suas conclusões foram fortemente atacadas por muitos cientistas em Inglaterra, a quem incomodava a ideia de que Newton pudesse estar errado.

Desenho efectuado por Thomas Young e que mostra os efeitos de interferência provocados pela sobreposição das ondas. As zonas alternadas de reforço e de cancelamento podem ver-se melhor se nos colocarmos de modo a que os nossos olhos fiquem perto da margem direita da figura e olharmos através de um ângulo praticamente rasando o diagrama.

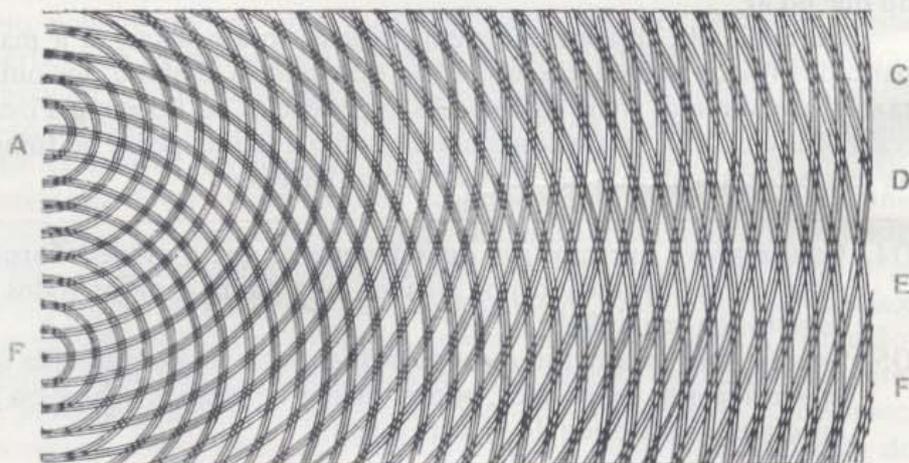
### 13.4 Interferência e Difracção

Desde o tempo de Newton até ao princípio do séc. XIX, a maioria dos físicos defendia a teoria corpuscular. O prestígio de Newton contribuiu fortemente para este apoio. No entanto, no princípio do séc. XIX, Thomas Young fez reviver a teoria ondulatória. Com base em experiências feitas entre 1802 e 1804, Young mostrou que a luz apresenta fenómenos de interferência. (As figuras de interferência foram discutidas na Secção 12.6, a propósito das ondas que se propagam à superfície da água.) A teoria corpuscular da luz não podia explicar facilmente estas figuras. A famosa experiência da “dupla fenda” de Young forneceu provas convincentes de que a luz tem propriedades que só podem ser explicadas em termos de ondas.

Embora a experiência de Young deva ser feita no laboratório e não apenas discutida verbalmente, vamos descrevê-la aqui sumariamente. Basicamente envolve a separação de um feixe luminoso em dois. Estes dois feixes podem depois sobrepor-se e os dois conjuntos de ondas vão interferir um com o outro — construtivamente nalguns sítios e destrutivamente noutros. Para simplificar a interpretação da experiência, vamos supor que esta é feita com luz com um único comprimento de onda  $\lambda$ .

Para a experiência, Young usou um écran preto, com um pequeno orifício, para produzir um feixe de luz solar estreito num quarto escuro. Na trajectória do feixe colocou um segundo écran preto com duas fendas estreitas e próximas uma da outra. Por detrás deste écran colocou outro écran branco. A luz, passando através de cada fenda, difractava-se e dispersava-se no espaço para lá do écran com a fenda dupla. A luz difractada por cada fenda interferia com a luz proveniente da outra fenda e podia observar-se uma figura de interferência no écran branco. Quando a interferência era construtiva, havia uma banda luminosa no écran. Quando a interferência era destrutiva o écran permanecia escuro.

É de facto notável que Young tenha conseguido determinar experimentalmente valores numéricos para os comprimentos de onda da luz que são extremamente pequenos.



Temos aqui o resultado que ele obteve:

Da comparação de várias experiências, parece dever considerar-se que a extensão das ondas que constituem a extremidade vermelha da luz é, no ar, cerca de  $7,056 \times 10^{-5}$  cm e que para a extremidade violeta da luz este valor é de aproximadamente  $4,233 \times 10^{-5}$  cm.

Ao anunciar os resultados, Young teve especial cuidado em antecipar-se às críticas dos discípulos de Newton, geralmente considerados como defensores da teoria corpuscular. Young mostrou que o próprio Newton fizera diversas afirmações apoiando uma teoria da luz que tinha alguns aspectos de uma teoria ondulatória. Não obstante tudo isto, Young não foi tomado a sério. Só em 1818, quando o físico francês Augustin Fresnel propôs uma teoria matemática para as ondas, é que os trabalhos de Young começaram a ter o crédito merecido. Fresnel também teve de submeter o seu trabalho à aprovação de um grupo de físicos simpatizantes da teoria corpuscular da luz. Um deles, o matemático Simon Poisson, tentou refutar as equações que Fresnel estabeleceu para as ondas. Segundo Poisson, se estas equações descrevessem realmente o comportamento da luz, deveria acontecer algo de muito estranho quando se colocasse um pequeno disco opaco na trajetória de um feixe luminoso. A difração das ondas luminosas produzida pelo bordo do disco circular deveria dar origem a uma interferência construtiva no centro do disco. Por sua vez, esta interferência construtiva deveria produzir um ponto luminoso no centro da sombra que o disco projectaria num écran branco colocado atrás do disco e a uma certa distância. Ora na teoria corpuscular não havia lugar para ideias como as de difração e de interferência construtiva. Além disso, nunca se tinha observado tal ponto luminoso e a própria ideia de um ponto luminoso no centro de uma sombra parecia absurda. Por todas estas razões, Poisson anunciou a Fresnel ter refutado a teoria ondulatória.

Contudo, Fresnel aceitou o desafio e imediatamente tratou de testar experimentalmente a previsão de Poisson. O resultado mostrou que havia, *de facto*, uma mancha luminosa no centro da sombra, tal como Poisson previra ao tomar como base a teoria ondulatória.

Gradualmente, os cientistas tomaram consciência da experiência da fenda dupla de Young e da mancha luminosa de Poisson. O apoio à teoria corpuscular da luz começou a desaparecer. Por volta de 1850, o modelo ondulatório da luz era largamente aceite. Os físicos tinham começado a trabalhar nas consequências matemáticas deste modelo e a aplicá-las às diferentes propriedades da luz.

- 
- Q6. Em que medida é que as experiências de Young apoiavam o modelo ondulatório da luz?
- Q7. Como é que a difração está relacionada com as experiências de Young?
- Q8. Qual foi o fenómeno previsto por Poisson com base na teoria ondulatória de Fresnel?
- 

Fotografia polaróide tirada através de uma lupa que pertence ao material do *Projecto Físico* e que foi colocada cerca de 30 cm atrás de um par de fendas próximas. As fendas eram iluminadas por uma fonte luminosa estreita mas brilhante.

GE 13.14



GE 13.15

Augustin Jean Fresnel (1788-1827) foi um engenheiro de pontes e estradas que trabalhou para o governo francês. Durante os tempos livres, Fresnel levou a cabo um extenso trabalho experimental e teórico no campo da óptica. Fresnel desenvolveu um modelo ondulatório bastante inclusivo que conseguia explicar de modo satisfatório a reflexão, refração, interferência e polarização. Concebeu também um sistema de lentes para faróis que ainda hoje se utiliza.

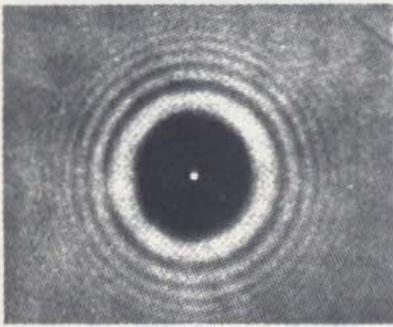


Figura de difracção produzida por um disco circular opaco em que se vê a mancha luminosa de Poisson no centro da sombra. Podem observar-se também as faixas luminosas e escuras correspondentes às interferências construtivas e destrutivas (pode também conseguir fotografias como esta — ver actividade “Mancha de Poisson” no *Manual*).

### 13.5 A Cor

Os agentes colorantes que se encontram na pintura e cerâmica pré-histórica mostram-nos que, desde os tempos mais remotos, os homens apreciavam a cor. Não se desenvolveu, no entanto, nenhuma teoria científica sobre a cor antes da época de Newton. Até então, a maior parte das ideias aceites sobre a cor foram apresentadas por artistas-cientistas, como da Vinci, que baseavam as suas ideias em experiências feitas com misturas de pigmentos.

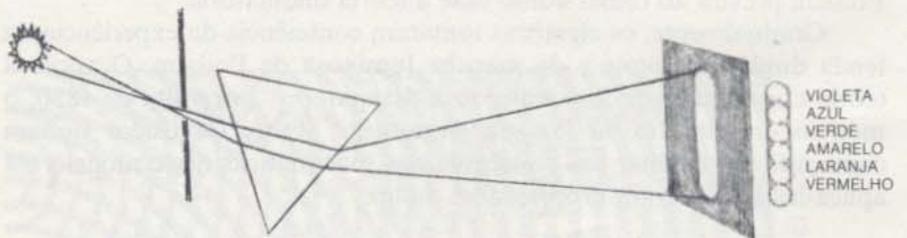
Infelizmente, as lições que aprenderam com a mistura de pigmentos raramente se aplicam à mistura de feixes luminosos de diferentes cores. Em tempos antigos, pensava-se que a luz solar era luz “pura”. A cor resultaria da adição de impurezas, como acontece no caso da refração da “luz pura” pelo vidro.

Newton começou a interessar-se pelas cores quando, ainda estudante na Universidade de Cambridge, começou a construir um telescópio astronómico. Um dos problemas aborrecidos que lhe surgiram consistia no aparecimento de uma auréola colorida que rodeava sempre a imagem dada pelas lentes do telescópio.

Foi talvez ao tentar compreender este efeito que Newton começou o seu estudo intensivo sobre a cor.

Em 1672, aos 29 anos, Newton publicou uma teoria sobre a cor na revista *Philosophical Transactions* publicada pela Royal Society de Londres. Este foi seu primeiro artigo científico a ser publicado. Escreveu Newton:

“...no começo de 1666 (nessa altura aplicava-se a polir lentes ópticas com formas diferentes da esférica) fabriquei um prisma triangular para tentar obter o célebre “fenómeno das cores”. E, tendo, para esse efeito, posto o meu quarto mais escuro e feito um pequeno orifício nas cortinas para deixar entrar uma quantidade conveniente da luz solar, coloquei o meu prisma junto à entrada da luz para que esta pudesse ser refractada em direcção à parede oposta. A princípio, foi um divertimento muito agradável observar as cores vivas e intensas assim produzidas...”



O desenho que se vê à direita baseia-se num diagrama de Newton para a refração da luz solar obtida com um prisma.

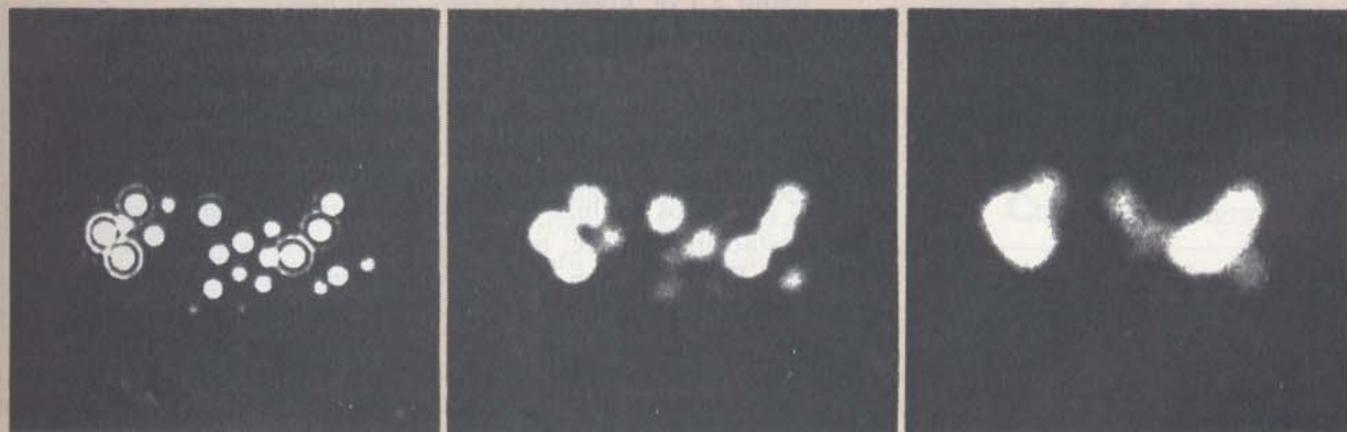
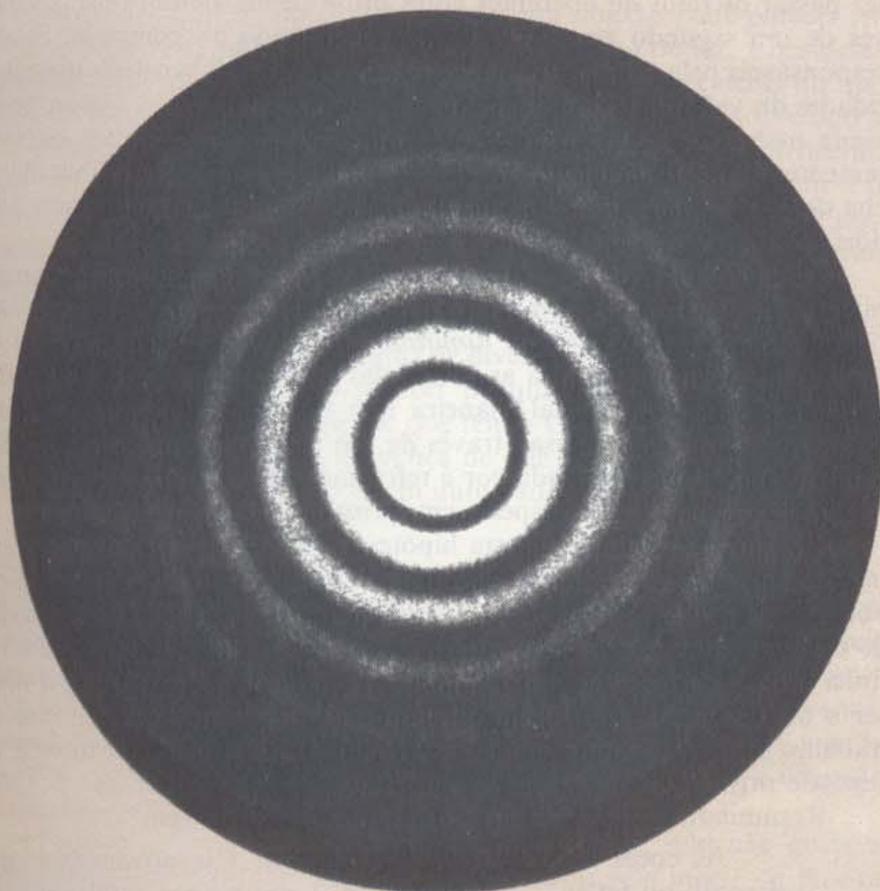
O feixe cilíndrico da luz solar “branca” proveniente da abertura circular passou através do prisma e produziu na parede oposta uma mancha alongada de luz colorida. Esta mancha era violeta num dos extremos, vermelha no outro e apresentava uma gradação contínua de cores entre esses extremos. Para este conjunto de cores Newton inventou o nome de *spectrum*.



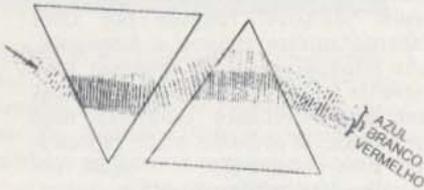
### Difracção e Detalhe

A fotografia à esquerda mostra-nos a imagem de difracção de uma fonte luminosa pontual. A difracção provocada pela abertura da máquina fotográfica difundiu a energia luminosa de modo a formar um disco central circular brilhante, rodeado por anéis alternadamente escuros e luminosos. As fotografias abaixo mostram uma série de fontes pontuais e foram tiradas interpondo orifícios cada vez mais pequenos. O conjunto podia representar uma constelação de estrelas, um detalhe da superfície de Marte, grânulos em células vivas ou simplesmente pontos de um dado objecto. A difracção das ondas a partir dos bordos do orifício limita o detalhe da informação que é possível receber. A medida que o orifício através do qual se observa o conjunto de fontes pontuais se torna mais pequeno, a figura de difracção de cada ponto dispersa-se e começa a sobrepor-se com as imagens de difracção dos outros pontos. Quando as figuras de difracção destes pontos se sobrepõem o suficiente torna-se impossível distingui-las.

O problema da difracção tem muitas consequências práticas. A maior parte da informação sobre o meio ambiente obtém-se através de ondas (luminosas, sonoras, radiofónicas, etc.) que recebemos através de um determinado tipo de orifício: a pupila do olho, o ouvido externo ou microfone, a abertura de um telescópio óptico ou de rádio, etc. Em todos estes casos, a difracção impõe um limite ao detalhe com que as fontes das ondas podem ser discriminadas.



Como se sugere no diagrama abaixo, a recombinação de cores feita por um segundo prisma não é completa. O próprio Newton notou que: "Os prismas também devem ser colocados muito perto um do outro; isto porque se a distância for demasiado grande, as cores começam a aparecer antes da incidência da luz no segundo prisma e estas cores não vão desaparecer pelas refrações contrárias desse prisma."



Newton ficou a pensar de onde viriam as cores e porque motivo a imagem se estendia como uma mancha alongada em vez de circular. Procurando uma explicação, fez passar a luz através de vidros com diferentes espessuras, alterou as dimensões do orifício na cortina e até colocou o prisma fora da janela. No entanto, nenhuma destas mudanças teve qualquer efeito no espectro. Newton pensou que talvez fosse alguma irregularidade ou defeito do vidro. Para testar esta possibilidade fez passar os raios de diferentes cores provenientes de um prisma através de um segundo prisma semelhante e voltado ao contrário. Se os responsáveis pela dispersão do feixe luminoso fossem possíveis irregularidades do vidro, o feixe ao passar pelo segundo prisma, dispersar-se-ia ainda mais. Em vez disso, o segundo prisma quando colocado correctamente, reunia de novo as cores bastante bem e formava-se uma mancha de luz branca, como se a luz não tivesse passado por nenhum dos dois prismas.

Por este processo de eliminação, Newton convenceu-se de uma hipótese que, muito provavelmente, considerava desde o princípio: *a luz branca é composta de feixes luminosos de diferentes cores*. Não é o prisma que cria ou adiciona as cores; elas já lá estavam desde o princípio mas misturadas de tal maneira que era impossível distingui-las. Quando a luz branca passa através de um prisma, cada uma das suas componentes com uma dada cor é refractada segundo um ângulo diferente, pelo que o feixe se dispersa em forma de espectro.

Como teste adicional a esta hipótese, Newton cortou um pequeno orifício num écran onde se projectava um espectro. Conseguia-se assim obter um feixe de luz monocromática que pudesse depois passar através de um segundo prisma. Newton verificou que este segundo prisma não tinha qualquer efeito adicional no feixe da luz monocromática, a não ser o de refractá-lo ainda mais. Depois do primeiro prisma ter feito o trabalho de separar as componentes de diferentes cores da luz branca, o segundo prisma não podia mudar as cores dessas componentes.

Resumindo as conclusões que tirou, Newton escreveu:

"As cores não são *Qualificativos da Luz* provenientes da refração ou reflexão dos Corpos Naturais (como geralmente se crê) mas sim Propriedades Originais e Inatas que são diferentes para os diferentes Raios. Alguns Raios estão preparados para exhibir a Cor Vermelha e não outra; outros, uma Cor Amarela e não outra, alguns a Verde e não outra, assim sucedendo para todos os outros. Também não existem só Raios próprios e específicos para as Cores mais eminentes, mas também para todas as suas gradações intermédias."

*Cores aparentes dos objectos.* Até aqui Newton tinha apenas discutido as cores dos raios da luz. Mas, mais à frente no seu artigo, levantou uma questão importante: porque é que os objectos parecem ter cores diferentes? Porque é que o céu é azul, a relva verde; um pigmento de pintura amarelo ou vermelho? Newton propôs uma resposta muito simples:

"Que as cores de todos os Corpos Naturais têm apenas como origem isto... Reflectem uma espécie de luz em maior quantidade do que outra..."

Por outras palavras, um pigmento vermelho parece-nos vermelho porque quando a luz branca proveniente do Sol incide sobre ele, o pigmento absorve a maior parte dos raios de outras cores do espectro e reflecte para a nossa vista sobretudo o vermelho.

De acordo com a teoria de Newton, a cor não é por si uma propriedade de um objecto. A cor depende do modo como o objecto reflecte e absorve os raios de diferentes cores que o atingem. Newton justificou esta hipótese, fazendo notar que um objecto pode parecer ter uma cor diferente quando iluminado por outro tipo de luz. Consideremos, por exemplo, um pigmento que reflecte mais luz vermelha do que azul ou verde. Quando iluminado pela luz branca, reflectirá sobretudo a componente vermelha da luz branca e, portanto, parecerá vermelho. Mas se for iluminado por luz azul, não há vermelho para reflectir e o objecto poderá apenas reflectir uma pequena parte da luz azul. O pigmento parecerá, por isso, escuro e ligeiramente azulado. Escreveu Newton:

“Fiz experiências num quarto escuro, iluminando os Objectos com luz composta (pura) de diversas cores. Por este processo qualquer Corpo pode parecer de qualquer cor. Não têm Cor própria, parecendo sempre que têm a Cor da Luz que sobre eles incide, apenas com a diferença de que têm uma coloração mais forte e viva no caso de serem iluminados pela luz da cor que eles têm à luz do dia.”

*Reacções à Teoria de Newton.* A teoria de Newton sobre a cor encontrou, a princípio, uma violenta oposição. Outros cientistas britânicos, especialmente Robert Hooke, objectaram que postular uma espécie diferente da luz para cada cor era desnecessário. Seria mais simples considerar que as diferentes cores eram produzidas pela luz branca, devido a algum tipo de modificação. Por exemplo, a frente de onda poderia ter sido torcida de modo a já não ficar perpendicular à direcção do movimento.

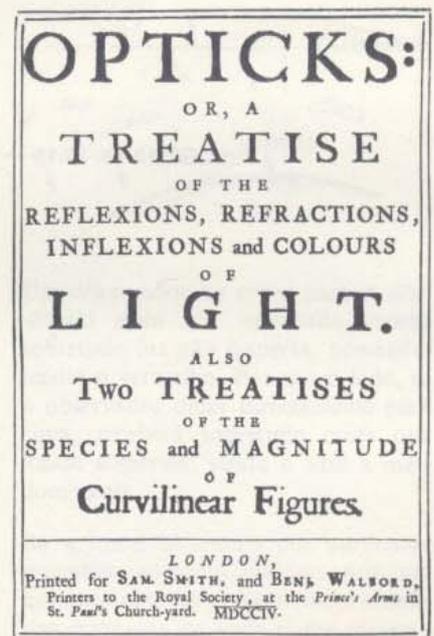
Newton conhecia as falhas da teoria de Hooke, mas não gostava de controvérsias públicas. Na realidade, esperou pela morte de Hooke em 1703 para publicar o seu próprio livro *Optiks* (1704), no qual revia as propriedades da luz. O livro *Principia* de Newton é um trabalho muito mais importante do ponto de vista puramente científico. No entanto, o seu livro *Opticks* teve também uma influência considerável no mundo literário.

Os poetas ingleses celebraram com alegria as descobertas do seu maior cientista. É evidente que a maioria dos poetas tinha apenas uma consciência muito vaga do significado da teoria da gravitação de Newton. Escapavam-lhes os detalhes técnicos das demonstrações e dos axiomas da geometria apresentados no *Principia*. Mas a teoria das cores e da luz forneceu imenso material para a imaginação poética, como a que aparece no poema de James Thomson “To the memory of Sir Isaac Newton” [À memória de Sir Isaac Newton] (1727).

... Primeiro o vermelho flamejante  
Avança vivo num salto; a seguir o laranja trigueiro;  
E depois o amarelo delicioso; a cujo lado

Muitas das cores dos materiais existentes são cores “em profundidade”, produzidas pela absorção selectiva da luz que penetra um pouco para além da superfície do corpo, antes de ser dispersa. Isto explica porque é que a luz que é transmitida por um vidro colorido tem a mesma cor que a luz que esse vidro reflecte. Em contraste com isso, folhas metálicas muito finas têm cor “à superfície”, cor essa que resulta de uma reflexão selectiva e regular. Neste caso, a luz transmitida será a complementar da luz reflectida. Por exemplo, a luz transmitida por uma lâmina de ouro é azul esverdeada, enquanto que a luz reflectida é amarela.

GE 13.16



Primeira página da primeira edição do livro *Opticks* de Newton (1704), onde ele descreve a sua teoria da luz.

Caíam os gentis feixes de verde refrescante.  
 Em seguida o azul puro, que enfuna céus de outono,  
 Num jogo etéreo; e então, de matiz mais triste,  
 Emergia o anil profundo, como quando  
 A noite, no seu manto pesado, se inclina com a geada;  
 Enquanto os últimos fulgores de luz refractada  
 Se diluíam num violeta em desmaio.\*

## GE 13.17

Goethe escreveu o seguinte poema para os físicos do séc. XIX que estavam a tentar usar a teoria de Newton para explicar os fenómenos relacionados com a cor e que tinham sido recentemente descobertos:

Vós podereis a luz fragmentar,  
 Dela cor atrás de cor retirar,  
 Ou farsar doutro modo qualquer,  
 Polarizar tudo o que vier,  
 Até que o ouvint' apavorado  
 No seu ser fica polarizado.  
 Não! Vós nunc' haveis de conseguir,  
 Vós nunca nos fareis divergir,  
 O ânimo inicial temos,  
 E com o mesmo ao fim chegaremos.

Traduzido de: J. W. von Goethe: *Schriften zur Farbenlehre*, Estugarda, Cotta, 1963, p. 820 (Gesamtausgabe der Werke und Schriften, Bd. 22 por Francisco M. C. do Espírito Santo)

## GE 13.18, 13.19

Os mentores do movimento literário romântico do séc. XIX e os "Filósofos da Natureza" alemães não tinham a teoria da cor de Newton em tão alta opinião. O procedimento científico de dissecação e análise dos fenómenos naturais por meio de experiências parecia-lhes detestável. Preferiam especular sobre os princípios unificadores de todas as forças naturais, na esperança de conseguirem perceber a natureza como um todo. O filósofo alemão Friedrich Schelling escreveu em 1802:

"O livro *Opticks* de Newton é a maior ilustração de toda uma estrutura de falácia que, em todas as suas partes, assenta em observações e experiências."

Goethe, poeta e Filósofo da Natureza alemão (mencionado no Capítulo 11), dispendeu anos a tentar derrubar a teoria das cores de Newton. Usando as suas próprias observações e argumentos apaixonados, Goethe insistiu na pureza da luz no seu estado natural. Rejeitou a hipótese de Newton de que a luz branca é uma mistura de cores e sugeriu que as cores são produzidas pela interacção da luz branca como seu oposto, o escuro. As observações de Goethe sobre a percepção da cor têm algum valor científico. Mas a sua teoria sobre a natureza física da cor não pôde sobreviver à confrontação com experiências pormenorizadas. A teoria da Cor de Newton permaneceu firmemente estabelecida.

- Q9. Como é que Newton mostrou que a luz não era "pura"?
- Q10. Como podia Newton saber se a luz verde, por exemplo, não era composta por luz de diferentes cores?
- Q11. Como explicaria Newton a cor de uma camisa azul?
- Q12. Porque é que a teoria de Cor de Newton foi atacada pelos filósofos da Filosofia da Natureza?

## 13.6 Porque é que o céu é azul?

Newton sugeriu que a cor dos objectos naturais dependia da cor que estes predominantemente reflectem ou dispersam em direcção ao observador. Em geral, não há uma maneira simples de prever, a partir da estrutura superficial, composição química, etc., quais as cores que um sólido ou líquido vão reflectir ou dispersar. No entanto, pode explicar-se a cor azul do céu com um argumento bastante simples.

Como Thomas Young (Secção 13.4) mostrou experimentalmente, a diferentes comprimentos de onda da luz correspondem cores diferen-

\* (Traduzido por Francisco M. C. do Espírito Santo)

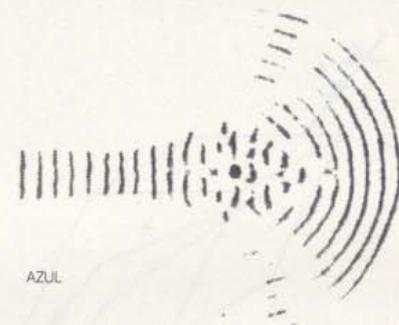
tes. O comprimento de onda da luz pode ser definido em unidades Ångstrom (Å), igual a  $10^{-10}$  metro. A gama do espectro visível para os seres humanos vai, aproximadamente, desde o valor 4000 Å para a luz violeta até ao valor 7000 Å para a luz vermelha. (7000 Å é da ordem de  $10^{-3}$  mm, número que convém lembrar.)

Pequenos obstáculos podem dispersar a energia de uma onda incidente em todas as direcções e a quantidade de energia dispersada depende do comprimento de onda. Pode demonstrar-se este facto por meio de experiências simples realizadas com ondas produzidas numa tina de água por meio de vibrações. Como regra geral, *quanto maior for o comprimento de onda, comparado com o tamanho do obstáculo, menor é a onda dispersada pelo obstáculo*. Para partículas de dimensões menores que um comprimento de onda, a dispersão de luz varia na razão inversa da 4.<sup>a</sup> potência do comprimento de onda. Por exemplo, o comprimento de onda da luz vermelha é aproximadamente o dobro do comprimento de onda da luz azul. Portanto, a dispersão da luz vermelha é cerca de 1/16 da dispersão da luz azul.

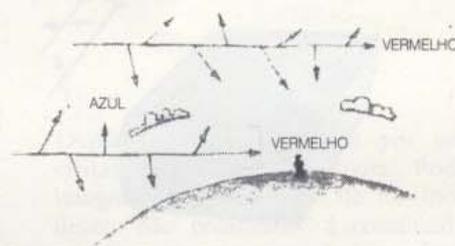


A unidade Ångstrom chama-se assim em memória do astrónomo sueco Anders Jonas Ångstrom que, em 1862, usou técnicas espectroscópicas para detectar a presença do hidrogénio no Sol.

Indica-se aqui qual a quantidade de luz dispersa provocada por um obstáculo muito pequeno, para ondas de três comprimentos de onda diferentes.



Podemos agora perceber porque é que o céu é azul. A luz solar é dispersada pelas moléculas de ar e partículas de pó existentes na atmosfera. Estas partículas são normalmente muito pequenas, quando comparadas com o comprimento de onda da luz visível, pelo que as partículas dispersam muito mais fortemente a luz de menor comprimento de onda — luz azul —, do que a luz com maior comprimento de onda. Quando se olha para um céu limpo, é sobretudo a luz dispersa que impressiona os nossos olhos. A gama de pequenos comprimentos de onda dispersos (e a sensibilidade à cor do aparelho visual humano) levam à sensação do azul. Por outro lado, vamos supor que estamos a olhar para o pôr-do-sol num dia enevoado. Neste caso, o feixe de luz que recebemos é uma luz que sofreu a completa dispersão da luz azul, não tendo sido dispersadas radiações de comprimento de onda maiores. Por isso, vemos o sol avermelhado.



Um observador ao olhar para o pôr-do-sol num dia enevoado recebe sobretudo luz não dispersa, nomeadamente o vermelho. Por outro lado, se o observador olhar directamente para cima, receberá sobretudo cores que foram dispersas, sendo o azul a mais dominante.

Se a terra não tivesse atmosfera, o céu aparecia preto e as estrelas seriam visíveis de dia. De facto, a partir de altitudes da ordem dos 15 Km, onde a atmosfera se começa a tornar rarefeita, o céu parece efectivamente negro e podem ver-se as estrelas durante o dia, como foi confirmado pelos astronautas.

Por vezes, o ar contém partículas de pó ou gotas de água de dimensões comparáveis com o comprimento de onda da luz visível ( $10^{-6}$  metro, aproximadamente). Neste caso, podem ser dispersadas outras cores, além do azul. Assim, verificamos, por exemplo, que o céu

Se a luz é difundida por partículas consideravelmente maiores que um comprimento de onda (como é o caso das gotículas da água numa nuvem), não há grande diferença na difusão de diferentes comprimentos. É por isso que a mistura que recebemos nos aparece como sendo branca.

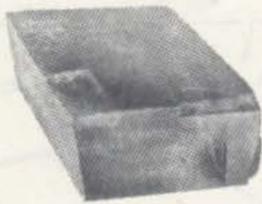
muda de cor em função da quantidade de vapor de água existente na atmosfera. Em dias claros e secos, o céu é de um azul mais escuro do que em dias claros e muito húmidos. O céu de cor azul intenso que se observa na Itália e na Grécia e que, durante muitos séculos, serviu de inspiração a poetas e pintores, é resultado de uma atmosfera intensamente seca.

A neblina azul acinzentada que frequentemente cobre as grandes cidades resulta principalmente de partículas emitidas pela combustão interna dos motores (de automóveis, camionetas) e pelas centrais industriais. Mesmo um automóvel normal que se desloque devagar tem um motor que emite mais de 100 bilhões de partículas por segundo. A maior parte destas partículas são invisíveis, com dimensões que variam entre 0,005 e 1 micron (1 micron é igual a  $10^{-6}$  metro). Estas partículas constituem núcleos a que vão aderir gases, líquidos e sólidos. As partículas maiores que assim se formam vão dispersar a luz e produzir a neblina.

O efeito da gravidade sobre as partículas é pequeno até elas se tornarem maiores por terem agregado a si uma quantidade apreciável de matéria. Estas partículas podem ficar na atmosfera durante meses se não forem limpas por chuvas sucessivas, neve ou ventos. A influência que estas nuvens de neblina ou nevoeiro têm sobre o clima e a saúde humana é substancial.

**Q13.** Como é que a dispersão das ondas luminosas por obstáculos extremamente pequenos depende do comprimento de onda?

**Q14.** Como explicaria a cor azul do céu? Como pensa que seja o céu da Lua? Porquê?



Iceland Spar Crystal  
Double Refraction

(Cristal de Refracção Dupla)



Iceland Spar Crystal  
Double Refraction

### 13.7 Polarização

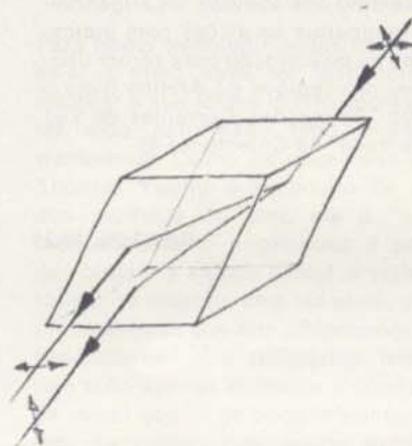
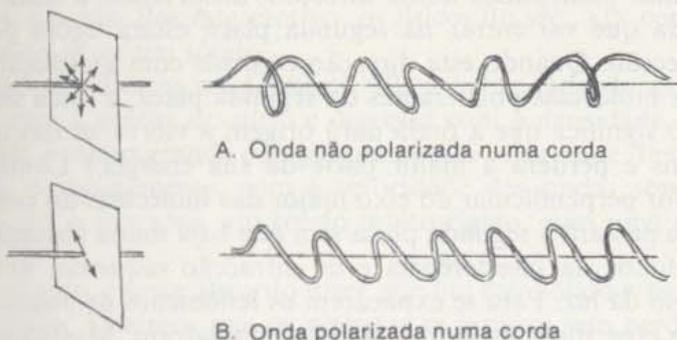
Hooke e Huygens consideraram que a luz se comporta, em muitos aspectos como o som, ou seja, que a luz é uma onda que se propaga através de um meio. Newton não podia aceitar esta teoria e argumentava que a luz deveria ter também algumas propriedades corpusculares. Notou duas propriedades da luz que, segundo pensou, não se poderiam explicar a não ser que se considerasse que a luz tem propriedades corpusculares. Em primeiro lugar, um feixe luminoso propaga-se em linha recta, enquanto as ondas sonoras se espalham em todas as direcções e contornam ângulos. Só se pôde responder a esta objecção nos princípios do séc. XIX, quando Young mediu o comprimento de luz e verificou que era extremamente pequeno. Mesmo o comprimento da luz vermelha, que é o maior comprimento de onda das radiações do espectro visível, é menor que um milésimo de milímetro. Enquanto um feixe luminoso incide sobre objectos ou passa por orifícios de tamanho normal (poucos milímetros ou mais de diâmetro), a luz parecerá propagar-se rectilaneamente. Os efeitos de difracção e dispersão só se tornam evidentes quando uma onda luminosa incide num objecto ou passa por orifícios de dimensões menores ou iguais à do seu comprimento de onda.

A segunda objecção de Newton baseava-se no fenómeno de “polarização” da luz. Em 1669, o cientista dinamarquês Erasmus Bartholinus descobriu que os cristais de espató da Islândia (calcite) podiam separar um raio luminoso em dois. Palavras escritas ou pequenos objectos observados através do cristal pareciam duplos.

Newton pensou que este comportamento se podia explicar admitindo que a luz era constituída por partículas com “lados” diferentes — por exemplo, com secções transversais rectangulares. Pensou que as imagens duplas representavam uma separação das partículas da luz que entravam no meio com orientações diferentes.

Por volta de 1820, Young e Fresnel apresentaram uma explicação muito mais satisfatória da polarização, usando uma teoria ondulatoria modificada para a luz. Antes disso, os cientistas admitiam geralmente que as ondas luminosas, tal como as ondas sonoras, deviam ser longitudinais. (E, como pensava Newton, não podiam ter nenhuma propriedade direccional.) Young e Fresnel mostraram que se as ondas de luz fossem *transversais*, se podia explicar o fenómeno da polarização.

Numa onda transversal, o próprio movimento do meio é sempre perpendicular à direcção de propagação da onda (veja o Capítulo 12).



Dupla refração produzida por um cristal de espató da Islândia. Pode imaginar-se que o feixe de luz incidente “não polarizado” é constituído por duas componentes de luz polarizada. O cristal separa essas duas componentes, transmitindo-as através do cristal com orientações e velocidades diferentes.

Isto não significa que o movimento do meio tenha sempre a mesma direcção. De facto, pode ter qualquer direcção desde que esteja num plano perpendicular à direcção de propagação. No entanto, se o movimento do meio se fizer predominantemente segundo uma dada direcção (a vertical, por exemplo), diz-se que a onda é *polarizada*. (Uma onda polarizada é, por consequência, e realmente, o tipo *mais simples* de onda transversal. Uma onda transversal não polarizada é algo de mais complicado, pois resulta da composição de vários movimentos transversais.) O modo como o espató da Islândia separa um feixe de luz não polarizada em dois feixes polarizados está esquematizado na margem.

Os estudos científicos sobre a polarização continuaram ao longo do século XIX. No entanto, não se desenvolveram aplicações práticas, sobretudo porque as substâncias polarizantes, como o espató da Islândia, eram raras e frágeis. Um dos melhores polarizadores conhecido era o sulfato de iodo — quinino (herapatite) que é um composto químico sintético: os cristais de herapatite, que se apresentam sob a forma de agulhas, absorvem a luz polarizada na direcção do eixo maior do cristal. Por outro lado, esses cristais absorvem muito pouco a luz polarizada segundo uma direcção perpendicular a esse eixo maior.

Mais tarde, Land aperfeiçoou o Polaroid, utilizando moléculas polímeras compostas sobretudo por iodo que substituíam os cristais de herapatite.

Os olhos das abelhas e das formigas são sensíveis à polarização da luz difundida num dia de céu aberto. Esta propriedade permite à abelha orientar-se com a ajuda do Sol, mesmo quando este está baixo no horizonte ou relativamente encoberto. Seguindo o exemplo das abelhas, os engenheiros equiparam os aviões com indicadores de polarização para serem utilizados nas regiões do Ártico (veja o artigo "Aplicações Correntes da Luz Polarizada" na *Colectânea 4*).

GE 13.20, 13.21

Os cristais de herapatite eram tão frágeis que parecia não haver maneira de se poderem utilizar. No entanto, em 1928, Edwin H. Land, na altura ainda estudante, inventou uma folha de plástico polarizante a que chamou "Polaroid". O seu primeiro polarizador era constituído por uma película de plástico com muitos cristais microscópicos de herapatite impregnados. Quando se esticava o plástico, os cristais em forma de agulha alinhavam-se segundo uma mesma direcção, de forma que todos actuavam do mesmo modo em relação à luz incidente.

Algumas das propriedades de um material polarizante demonstram-se facilmente. Coloquemos uma placa polarizante — por exemplo, as lentes de uns óculos de sol polarizante — em frente de uma fonte luminosa. Observemos depois esta primeira placa polarizante através de uma segunda. À medida que se faz rodar a primeira placa, podemos observar que a luz aumenta e diminui de intensidade alternadamente. Deve rodar-se a placa de um ângulo de  $90^\circ$  para se ir de um máximo de intensidade luminosa até ao mínimo.

Como é que se pode explicar este fenómeno? A luz que atinge a primeira placa é inicialmente não polarizada, isto é, é uma mistura de ondas polarizadas em várias direcções. A primeira placa transmite apenas as ondas polarizadas numa direcção, absorvendo o resto. A onda transmitida que vai entrar na segunda placa estará agora polarizada numa direcção. Quando esta direcção coincide com a direcção do eixo maior das moléculas polarizantes da segunda placa, a onda será absorvida. (Isto significa que a onda dará origem a vibrações das moléculas dos cristais e perderá a maior parte da sua energia.) Contudo, se a direcção for perpendicular ao eixo maior das moléculas do cristal, a luz polarizada passará a segunda placa sem que haja muita absorção.

Os efeitos da interferência e de difracção requerem um modelo ondulatório da luz. Para se explicarem os fenómenos de polarização, foi necessário especificar melhor o modelo ondulatório. Mostrou-se que se podia explicar a polarização se se considerasse que as ondas luminosas eram transversais. Este modelo da luz explica bastante bem todas as características da luz que vimos até agora. No entanto, como se verá na Unidade 5, verificou-se que era preciso generalizá-lo ainda mais.

- 
- Q15.** Quais as duas objecções que Newton levantou contra o modelo ondulatório?
- Q16.** Quais dos fenómenos que tratamos são consistentes com um modelo ondulatório da luz?
- Q17.** Teremos provado que a luz *não* pode ter propriedades corpusculares?
- 

### 13.8 O éter

No modelo ondulatório que descrevemos parece faltar nitidamente qualquer coisa. No Capítulo 12, considerámos as ondas como perturbações que se propagam numa dada substância ou "meio" e que pode ser, por exemplo, uma corda ou água. Qual é o meio de propagação das ondas luminosas?

Será o ar esse meio propagador das ondas luminosas? A resposta é negativa e isto porque a luz pode atravessar espaços rarefeitos ou sem atmosfera, como é o caso do espaço entre o Sol ou outras estrelas e a Terra. Mas antes de saber definitivamente que não existia ar entre o Sol e a Terra, já Robert Boyle tinha tentado a experiência de retirar com uma bomba quase todo o ar de uma campânula de vidro, tendo verificado que os objectos que lá estavam dentro permaneciam visíveis.

Era difícil pensar numa perturbação sem especificar o que estava a ser perturbado. Era por isso natural que se pusesse como hipótese a existência de um meio de propagação das ondas luminosas. A este meio chamou-se "éter".

Nos sécs. XVII e XVIII, imaginava-se que o éter era um fluido invisível de densidade muito baixa. Este fluido podia penetrar todos os corpos materiais e encher todo o espaço. Podia estar de algum modo associado com o "effluvium" (qualquer coisas que "circula para fora") que se inventara para explicar as forças magnéticas e eléctricas. Mas as ondas luminosas têm de ser transversais para poderem explicar a polarização e, normalmente, as ondas transversais só se propagam num meio *sólido*. Um líquido ou um gás não podem transmitir ondas transversais a distâncias significativas, pela mesma razão porque não se pode "torcer" um líquido ou um gás. Por este motivo, os físicos do séc. XIX consideravam que o éter devia ser um sólido.

Como se afirmou no Capítulo 12, a velocidade de propagação aumenta com a rigidez do meio e decresce com a densidade. A velocidade da luz é muito grande comparada com a velocidade de outro tipo de ondas, nomeadamente, com a velocidade das ondas sonoras. Daí pensar-se que o éter seria um sólido muito rígido, com uma densidade muito baixa.

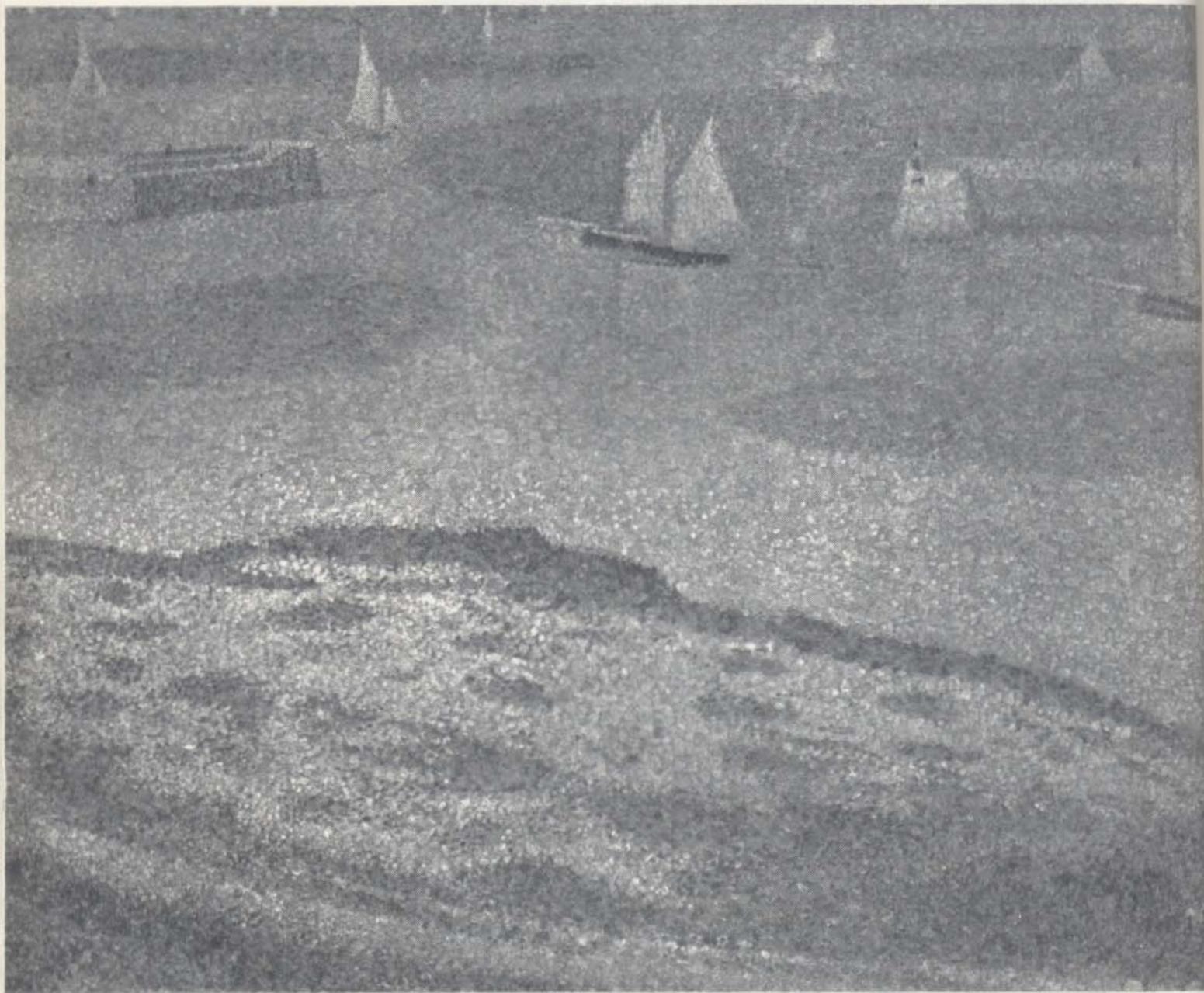
No entanto, parece absurdo dizer que um éter sólido e rígido enche todo o espaço. Sabemos que os planetas se movem sem perder velocidade pelo que, aparentemente, não encontram a resistência de um éter rígido. E é evidente que nós próprios não sentimos qualquer resistência quando nos movemos num espaço que transmite livremente a luz.

Sem o éter, a teoria ondulatória parecia improvável. Por seu lado, o éter tinha propriedades absurdas. Até ao princípio deste século, este problema ficou sem solução, tal como já ficara com Newton. Veremos como, partindo das modificações introduzidas por Einstein na teoria da luz, se veio a resolver o problema.

"Éter" foi o nome inicialmente escolhido por Aristóteles para designar o quinto elemento, fluido puro e transparente que enchia a esfera celeste. Mais tarde, chamou-se a este elemento precisamente "quinta-essência" (veja as secções 2.1 e 6.4).

Para poder transmitir ondas transversais, o meio deve ter tendência a retomar a sua forma inicial depois de ter sido deformado pelo impulso transversal. Como foi observado por Thomas Young a propósito de um dos modelos do éter, ele é "pelo menos bastante engenhoso e pode dar origem a alguns cálculos satisfatórios; no entanto, dele faz parte, uma circunstância que tem consequências desastrosas ... a resistência lateral tem sido apenas atribuída a sólidos: de modo que ... se pode inferir que o éter luminífero que enche todo o espaço e penetra quase todas as substâncias, é não só altamente elástico como também totalmente sólido!!!"

- 
- Q18.** Porque é que se considerou que existia um "éter" que transmitia as ondas de luz?
- Q19.** Que propriedade notável devia ter o éter para que pudesse ser o meio mecânico de propagação da luz?
-



"Entrada no Porto", pintura de Georges Seurat (1888). Os especialistas em História de Arte acreditam que as técnicas utilizadas por Seurat, ou seja, o uso de pequenos pontos de cores puras para conseguir todos os efeitos num quadro, reflectem a sua compreensão da natureza física da luz.

13.1 Os materiais de aprendizagem do Projecto de Física, especialmente apropriados ao Capítulo 13, incluem:

**Experiências**

Refracção de um feixe luminoso  
Experiência de Young — o comprimento de onda da luz

**Actividades**

Interferência criada por uma película muito fina  
Um lenço com rede de difracção  
Fotografando figuras de difracção  
Mancha de Poisson  
Actividades fotográficas  
Cor  
Luz polarizada  
Construção de uma lente de gelo

**Artigos de Colectânea**

Experiências e cálculos relativos à Óptica Física  
Velocidade da Luz  
Aplicações correntes da Luz Polarizada  
O olho e a câmara  
Lentes e instrumentos ópticos

Em complemento, pode também usar com a Unidade 4, os seguintes materiais:

**Artigos de Colectânea**

Acção à distância  
Cartas de Maxwell. Uma colectânea

**Filme**

"People and Particles"

13.2 Colocou-se um cartão quadrado, com 3 cm de lado, a 10 cm de um pequeno globo luminoso, projectando-se a sua sombra numa parede a 15 cm atrás do cartão. Qual o tamanho da sombra na parede? (Será útil esboçar um diagrama da situação.)

13.3 A sequência de fotografias da página 11 mostra o que sucede a um feixe luminoso que atravessa uma fenda estreita. A fila de fotografias da página 132 do Capítulo 12 mostra o que sucede a um conjunto de ondas criadas à superfície de água que atravessa uma abertura estreita. Ambos os conjuntos de fotografias ilustram a difracção por uma única fenda, mas as fotografias não são semelhantes. Explique a diferença verificada no aspecto das fotografias e as semelhanças que também se observam.

13.4 Galileu descreveu, do seguinte modo, uma experiência para determinar se a propagação da luz é ou não instantânea:

"Supunhamos que cada uma de duas pessoas leva uma lanterna ou outra fonte luminosa de modo que, interpondo a mão, um dos observadores pode impedir ou permitir que a luz seja vista pelo outro. Seguidamente, deixemo-los praticar em frente um do outro e à distância de alguns cúbitos (1 cúbito = 0,5 m), até adquirirem uma tal destreza no destapar e tapar das luzes que, no instante em que um deles vê a luz do companheiro, destapa a sua. Depois de algumas tentativas, a resposta será tão rápida que, sem erro sensível (svario), o destapar de uma luz é imediatamente seguido pelo descobrir da outra, conseguindo-se assim que logo que um expõe a sua luz veja, instantaneamente, a do outro.

Depois de terem treinado para esta pequena distância, vamos deixar que os dois experimentadores, equipados como anteriormente, ocupem posições, separadas por duas ou três milhas e realizem a mesma experiência de noite, verificando, cuidadosamente, se as operações de tapar e destapar das luzes ocorrem da mesma maneira que para distâncias pequenas; se isso acontecer, podemos concluir, com

segurança, que a propagação da luz é instantânea, mas se for preciso algum tempo para uma distância de 3 milhas, o que considerando a ida de uma das luzes e a volta da outra soma, na realidade, seis milhas, então a demora deve ser observável facilmente..."

Mas, posteriormente, afirma:

"Na verdade, tentei a experiência para uma distância pequena, inferior a uma milha, pelo que não fui capaz de confirmar se o aparecimento da luz oposta foi instantâneo ou não; mas se não foi instantâneo, é extraordinariamente rápido..."

- Porque foi Galileu mal sucedido na experiência acima descrita?
- Como deveria ser alterada a experiência para ter sucesso?
- Qual é o tempo máximo que a luz podia levar a ir de um observador ao outro sem os observadores detectarem a demora? Use esta estimativa para chegar a um limite mínimo para a velocidade da luz que seja consistente com o resultado descrito por Galileu.
- Porque pensa que a primeira prova de que a velocidade da luz é finita se baseou em observações astronómicas e não em observações terrestres?

13.5 Uma unidade conveniente para medir distâncias astronómicas é o *ano luz*, definido como sendo a distância que a luz percorre num ano. Calcule o ano luz em metros com dois algarismos significativos.

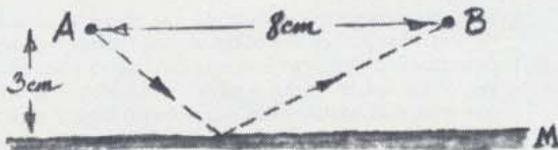
13.6 Quanto tempo seria preciso para uma nave espacial, com uma velocidade de 1/1000 da velocidade da luz, percorrer os 4,3 anos luz que separam a Terra da Próxima Centauri, a estrela mais próxima que se conhece além do Sol? Compare a velocidade dada para a nave espacial com a velocidade de, aproximadamente, 10 km/s, velocidade máxima (em relação à Terra) que uma cápsula espacial atinge na viagem da Terra à Lua.

13.7 Newton supôs que a reflexão da luz em superfícies brilhantes era devida a "alguma característica do corpo distribuída, uniformemente, pela sua superfície e pela qual o corpo actua, sem contacto, no raio luminoso". O modelo mais simples para esta característica seria uma força repulsiva que actuasse apenas numa direcção normal à superfície. Neste problema vamos mostrar como é que este modelo — juntamente com as leis da mecânica — prevê que os ângulos de incidência e reflexão devem ser iguais. Proceda da seguinte forma:

- Trace um diagrama indicando os raios incidente e reflectido. Mostre também os ângulos de incidência e reflexão ( $\theta_1$  e  $\theta_2$ ). Esboce no seu diagrama um sistema de coordenadas que tenha o eixo  $x$  paralelo à superfície e o eixo  $y$  perpendicular à superfície. Note que os ângulos de incidência e reflexão são definidos como sendo ângulos entre os raios incidente ou reflectido e o eixo  $y$ .
- Supondo que a luz incidente é formada por partículas de massa  $m$  e velocidade  $v$ , qual é a energia cinética de uma única partícula luminosa incidente?
- Se a força repulsiva devida à superfície reflectora não efectuar trabalho sobre a partícula e actuar perpendicularmente à superfície, qual das grandezas que descreveu em (b) se conserva?
- Mostre, algebricamente, que o módulo da velocidade  $u$  da partícula reflectida é igual ao módulo da velocidade  $v$  da partícula incidente.

- e) Escreva as expressões matemáticas das componentes do momento da partícula reflectida.
- f) Mostre, algebricamente, que  $\theta_1$  e  $\theta_2$  devem ser ângulos iguais.

13.8 Determine a trajectória mais curta entre os pontos  $A$  e  $B$  passando por um ponto da superfície  $M$ . Resolva isto pelo método das tentativas e erros, talvez experimentando com um bocado de fio, fixo na extremidade  $A$  por uma tacha. (Na figura mostra-se um dos caminhos possíveis que não é, necessariamente, o mais curto.) Repare que a mais curta distância entre  $A$ ,  $M$  e  $B$  é também a trajectória de tempo-mínimo para uma partícula que se desloque com uma velocidade constante de  $A$  a  $M$  e de  $M$  a  $B$ . Que trajectória seguirá a luz de  $A$  a  $M$  e de  $M$  a  $B$ ? Pode enunciar a lei da reflexão em termos deste princípio em vez de considerar os ângulos?



13.9 Qual a dimensão mínima de um espelho no qual um homem de 1,80 m de altura se possa ver completamente? (Suponha que tanto o homem como o espelho estão verticais e que o homem colocou o espelho na posição mais favorável.) Interessará a distância a que o homem está no espelho? As suas respostas a estas perguntas dependerão da distância entre os olhos e o cimo da cabeça do homem?

13.10 Suponha que as superfícies reflectoras de todos os objectos visíveis eram alterados de modo a absorverem qualquer luz que sobre elas incidisse; neste caso, como veria o mundo?

13.11 Os objectos vêem-se como um todo se as suas superfícies reflectirem a luz, de modo a permitir que os nossos olhos interceptem cones de raios reflectidos divergentes de cada parte da superfície. O diagrama anexo mostra um destes cones de luz (representado por dois raios divergentes) provenientes de um livro e entrando no olho.



Desenhe diagramas de linhas rectas para mostrar como é que se pode usar um par de raios divergentes para ajudar a explicar os seguintes fenómenos:

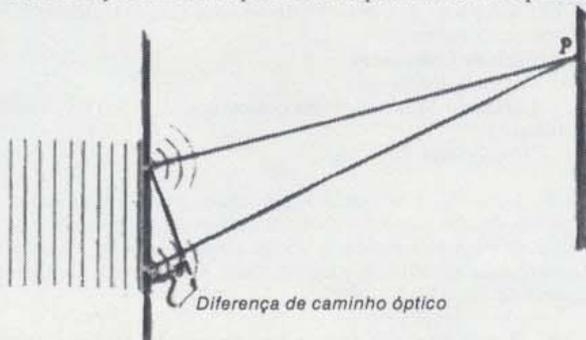
- a) A imagem de um objecto num espelho parece estar atrás do espelho e a uma distância que é igual à que existe entre o espelho e o objecto que está à sua frente.
- b) Um lago parece menos profundo do que na realidade é.
- c) Coloque-se uma moeda numa chávena de café vazia de tal modo que não possa ser totalmente vista. A moeda torna-se visível se enchermos a chávena com água.

13.12 Devido à refração atmosférica, vemos, ao fim da tarde, o Sol durante alguns minutos depois de ele se pôr e, de manhã, durante alguns minutos antes de ele nascer.

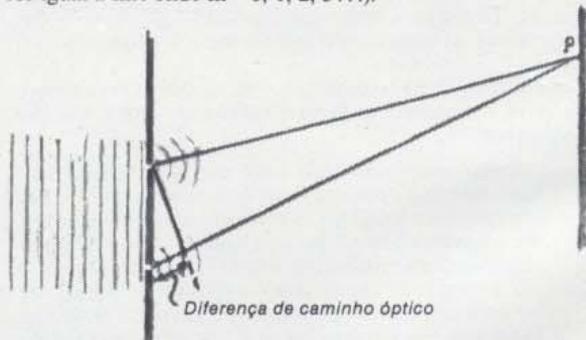
- a) Desenhe um diagrama simples para ilustrar a ocorrência deste fenómeno.
- b) Como seria o pôr-do-sol num planeta com uma atmosfera muito espessa e densa (ainda que transparente)?

13.13 Numa teoria corpuscular da luz, a refração pode explicar-se supondo que a partícula era acelerada por uma força atractiva quando passava do ar ou do vácuo para um meio como o vidro. Suponha que esta força aceleradora só podia actuar na partícula numa direcção perpendicular à superfície, e use diagramas vectoriais para mostrar que o módulo da velocidade da partícula no vidro deveria ser maior do que no ar.

13.14 Ondas luminosas paralelas e monocromáticas existentes num dado plano iluminam duas fendas estreitas, dando origem à formação de franjas de interferência alternadamente brilhantes e escuras que se obtêm no alvo. As franjas brilhantes representam zonas de interferência construtiva e, portanto, só aparecem em pontos, como o ponto

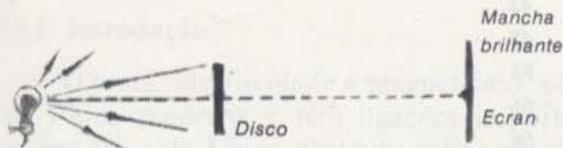


$P$  representado na figura, se as ondas difractadas provenientes das duas fendas chegarem a  $P$  em fase. As ondas difractadas só estarão em fase no ponto  $P$  se a diferença de caminho óptico for igual a um número inteiro de comprimento de onda (isto é, se a diferença de caminho óptico for igual a  $m\lambda$  onde  $m=0, 1, 2, 3 \dots$ ).



- a) Que diferença de caminho óptico resulta numa interferência destrutiva do alvo?
- b) A separação entre duas franjas brilhantes consecutivas depende do comprimento de onda da luz utilizada. A separação será maior para a luz vermelha ou para a luz azul?
- c) Para uma dada radiação luminosa, como variava a figura de interferência se se aumentasse a distância das fendas do alvo? (Sugestão: Faça dois diagramas.)
- d) Que alterações se verificam na figura de interferência, se aproximarmos as fendas? (Sugestão: faça dois diagramas.)
- e) Que acontece à figura de difracção se se tornarem as fendas mais estreitas?

13.15 Recordando os fenômenos de difracção e interferência do Capítulo 12, mostre que podemos usar a teoria ondulatória da luz para explicar a mancha brilhante que se pode encontrar no centro da sombra de um disco iluminado por uma fonte pontual.



13.16 É hoje uma observação familiar o facto de tecidos de certas cores parecerem diferentes à luz artificial e ao sol. Explique porquê.

13.17 Outro poema de James Thomson (1728):

"Meantime, refracted from yon eastern cloud,  
Beshiding earth, the grand ethereal bow  
Shoots up immense; and every hue unfold,  
In fair proportion running from the red  
To where the violet fades into the sky.

Here, awe-ful Newton, the dissolving clouds  
Form, fronting on the sun, thy showery prism;  
And to the sage-instructed eye unfold  
The various twine of light, by thee disclosed  
from the white wingling blaze."

Compare-o com o poema da página 21:

- a) do ponto de vista poético
- b) do ponto de vista da física.

13.18 A luz verde tem um comprimento de onda de, aproximadamente,  $5 \times 10^{-7}$  metro. Que frequência corresponde a este comprimento de onda? Compare esta frequência com a frequência das ondas de rádio difundidas por uma estação de rádio que oiça.

13.19 Muitas vezes a poesia reflecte as ideias contemporâneas da ciência; o poema seguinte é um excelente exemplo disto.

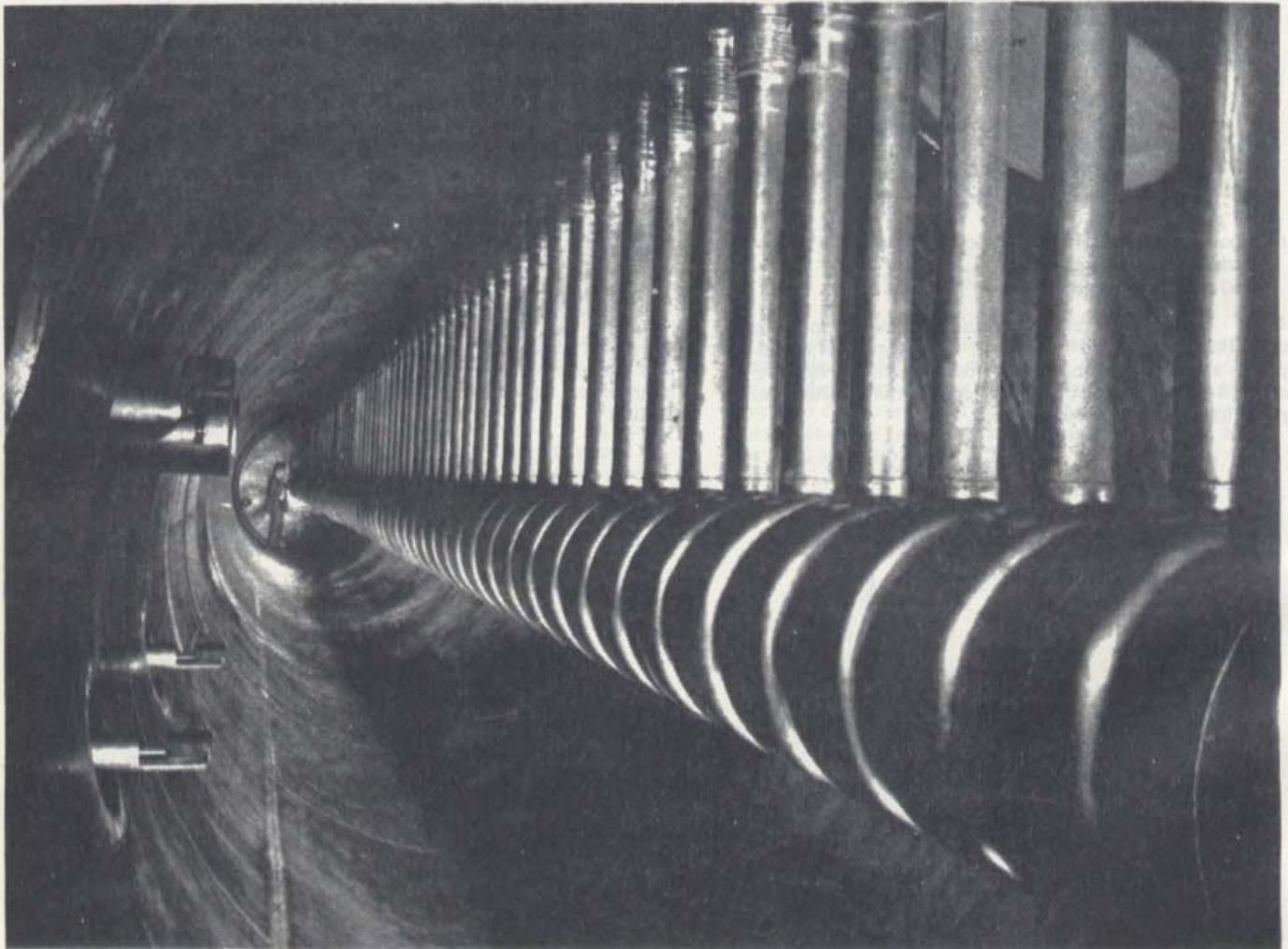
"Some range the colours as they parted fly.  
Clear-pointed to the philosophic eye;  
The flaming red, that pains the dwelling gaze,  
The stainless, lightsome yellow's gilding rays;  
The clouded orange, that betwixt them glows,  
And to kind mixture tawny lustre owers;  
All-cheering green, that gives the spring its dye;  
The bright transparent blue, that robes the sky;  
And indigo, which shaldded light displays;  
And violet, which in the view decays.  
Parental hues, whence others all proceed;  
An ever-minging, changeful, countless breed,  
Unravel'd, variegated, lines of light,  
When blended, dazzling in promiscuous white  
(Richard Savage — 1697/1743 — *The Wanderer*)

- a) Classificaria ou não o poeta Richard Savage como um "filósofo da natureza"? Porquê?
- b) Compare este poema com o que está no GE 13-17 de James Thomson; qual dos poetas mostra ter melhor conhecimento da Física? Que poema prefere?

13.20 Um modo de conseguir algum isolamento em apartamentos situados frente a frente e separados por um pátio estreito, ainda que permitindo aos moradores desfrutarem a vista do pátio e do sol sobre o pátio, é usar polaroides nas janelas. Explique como é que devem estar orientadas estas folhas para se obter um efeito máximo.

13-21 Para impedir os automobilistas de ficarem cegos pelas luzes dos carros que se aproximam, podem colocar-se polaroides sobre as luzes da frente e nos pára-brisas de todos os carros. Explique porque é que estas folhas teriam de estar orientadas do mesmo modo em todos os veículos e deveriam ter os seus eixos de polarização a  $45^\circ$  da vertical.

14.1	Introdução	31
14.2	Propriedades curiosas da magnetite e do âmbar:	
	O livro <i>De Magnete</i> de Gilbert	31
14.3	Cargas eléctricas e forças eléctricas	35
14.4	Forças e Campos	42
14.5	A carga eléctrica de menor valor	48
14.6	Lei de conservação da carga eléctrica	52
14.7	Correntes eléctricas	56
14.8	Diferença de potencial eléctrico	56
14.9	Diferença de potencial eléctrico e intensidade da corrente eléctrica	59
14.10	Diferença de potencial eléctrico e potência eléctrica	60
14.11	Acção das correntes eléctricas sobre os ímanes	61
14.12	Acção mútua entre correntes eléctricas	64
14.13	Campos magnéticos e cargas em movimento	65



Uma fotografia do interior do "Hilac" (heavy ion linear accelerator), existente em Berkeley, na Califórnia. Neste aparelho, os campos eléctricos aceleram átomos carregados até altas energias.

# Campos Eléctricos e Magnéticos

## 14.1 Introdução

O tema "electricidade e magnetismo" constitui um grande domínio da Física moderna e tem ligações importantes com quase todas as outras áreas da Física, Química e Engenharia. Seria impossível esgotar completamente este assunto no tempo destinado a um curso geral. Neste curso consideraremos apenas alguns dos tópicos principais que servirão de base aos capítulos posteriores. As principais aplicações dos conhecimentos introduzidos neste capítulo aparecerão mais tarde: o desenvolvimento da tecnologia eléctrica (Capítulo 15), o estudo da natureza da luz e das ondas electromagnéticas (Capítulo 16) e o estudo das propriedades das partículas atómicas e sub-atómicas (Unidade 5).

GE 14.1

Neste capítulo trataremos em primeiro lugar das cargas eléctricas e das forças que se estabelecem entre elas. Esta análise será breve porque a melhor maneira de aprender este assunto não é lendo mas fazendo experiências no laboratório (ver experiência 4-3 do *Manual*). Em seguida mostraremos como é que a ideia de um "campo" simplifica a descrição dos efeitos eléctricos e magnéticos. Depois, consideraremos as correntes eléctricas que são constituídas por cargas em movimento. Combinando o conceito de campo com a ideia de energia potencial, podemos estabelecer relações quantitativas entre a intensidade de corrente eléctrica, tensão e potência. Estas relações serão necessárias para as aplicações práticas que se analisarão no Capítulo 15.

Finalmente, no fim deste capítulo, chegaremos à relação entre electricidade e magnetismo. Esta relação tem consequências importantes quer no campo da tecnologia, quer no campo da Física teórica fundamental. Começaremos por estudar um fenómeno físico simples: a interacção entre cargas em movimento e campos magnéticos.

## 14.2 Propriedades curiosas da magnetite e do âmbar: O livro *De Magnete de Gilbert*

Duas substâncias naturais, o âmbar e a magnetite, têm vindo a suscitar grande interesse desde tempos antigos. O âmbar é uma substância que provém da seiva que há muito tempo escorreu de certas árvores de madeira macia, como o pinheiro. Durante vários séculos, esta seiva foi endurecendo e transformou-se num sólido semitransparente de cor entre o amarelo e o castanho. Quando polida, é uma bela pedra orna-

mental e contém, por vezes, restos de insectos que foram apanhados pela seiva pegajosa. Os gregos da antiguidade reconheceram esta estranha propriedade do âmbar: quando friccionado vigorosamente num tecido pode atrair objectos próximos, nomeadamente bocados de palha ou sementes.

A magnetite é um mineral que também tem propriedades invulgarres. Atrai o ferro. Além disso, um bocado de magnetite, quando suspenso ou a flutuar, orienta-se sempre segundo uma dada direcção — a direcção Norte-Sul. Nos países ocidentais, a primeira descrição escrita conhecida sobre a utilização da magnetite como bússola na navegação, data dos fins do séc. XII mas, na China, já se conheciam as suas propriedades.

As histórias sobre a magnetite e o âmbar são as primeiras histórias do magnetismo e da electricidade. O desenvolvimento moderno deste assunto começou em 1600 com a publicação, em Londres, do livro *De Magnete* de William Gilbert (1544-1603). Gilbert foi um médico influente, que serviu como médico-chefe da Rainha Isabel I. Durante os últimos anos de sua vida, estudou o que já se conhecia sobre a magnetite e o âmbar. Fez as suas próprias experiências para verificar as descrições de outros autores e resumiu a suas conclusões no livro *De Magnete*. O livro é um clássico da literatura científica, especialmente porque correspondeu a uma tentativa sistemática e bem sucedida de verificar uma especulação complexa por meio de um trabalho experimental detalhado.

A primeira tarefa de Gilbert foi a de rever e criticar o que previamente se escrevera sobre magnetite. Analisou várias teorias propostas para explicar a causa da atracção magnética. Uma das teorias mais populares fora sugerida pelo autor romano Lucrécio:

“Lucrécio . . . considera que a atracção é devida ao facto de que, assim como em todas as coisas há um fluxo para fora (“efluxo” ou “effluvium”) de corpos minúsculos, assim também há um efluxo de átomos do ferro para o espaço entre este e a magnetite — um espaço esvaziado de ar pelos átomos da magnetite (sementes); e quando estes átomos começam a voltar para a magnetite, o ferro segue-os, pois os corpúsculos estão emaranhados uns nos outros.”

Gilbert não aceitou a teoria do “effluvium” como explicação da atracção magnética, embora pensasse que se podia aplicar à atracção eléctrica.

Quando se descobriu que o âmbar e as agulhas magnéticas ou as barras de ferro tendiam a orientar-se segundo uma direcção Norte-Sul, muitos autores propuseram explicações. No entanto, segundo Gilbert,

“... todos eles perderam tempo e trabalho porque não tendo experiência na procura de objectos naturais e conhecendo apenas os livros, sendo induzidos em erro por certos sistemas físicos e não tendo realizado experiências sobre magnetismo, constituíram explicações com base em meras opiniões e, à maneira de senhoras idosas, sonharam com coisas que não existiam. Marcilius

Lucrécio foi um dos primeiros escritores a escrever sobre a teoria atómica; veja o prólogo da Unidade 5.

*Tractatus, sive Physiologia Nova*  
 DE  
**MAGNETE,**  
 Magneticisq; corporibus & magno  
 Magnete tellure, sex libris comprehensus,  
 a **GUILIELMO GILBERTO** Colce-  
 strensi, Medico Londinensi.

*In quibus ea, quae ad hanc materiam spectant, plurimie  
 & Argumentis & experimentis exactissime absolutissi-  
 moq; tractantur & explicantur.*

Omnia nunc diligenter recognita, & emendatius quam ante  
 in lucem edita, aucta & figuris illustrata, opera & studio D.  
**WOLFGANGI LOCHMANS**, I. U. D.  
 & Mathematici.

*Ad calcem libri adiunctus est Index capitum, Rerum & Verborum  
 locupletissimus, qui in prioribus editionibus desiderabatur.*

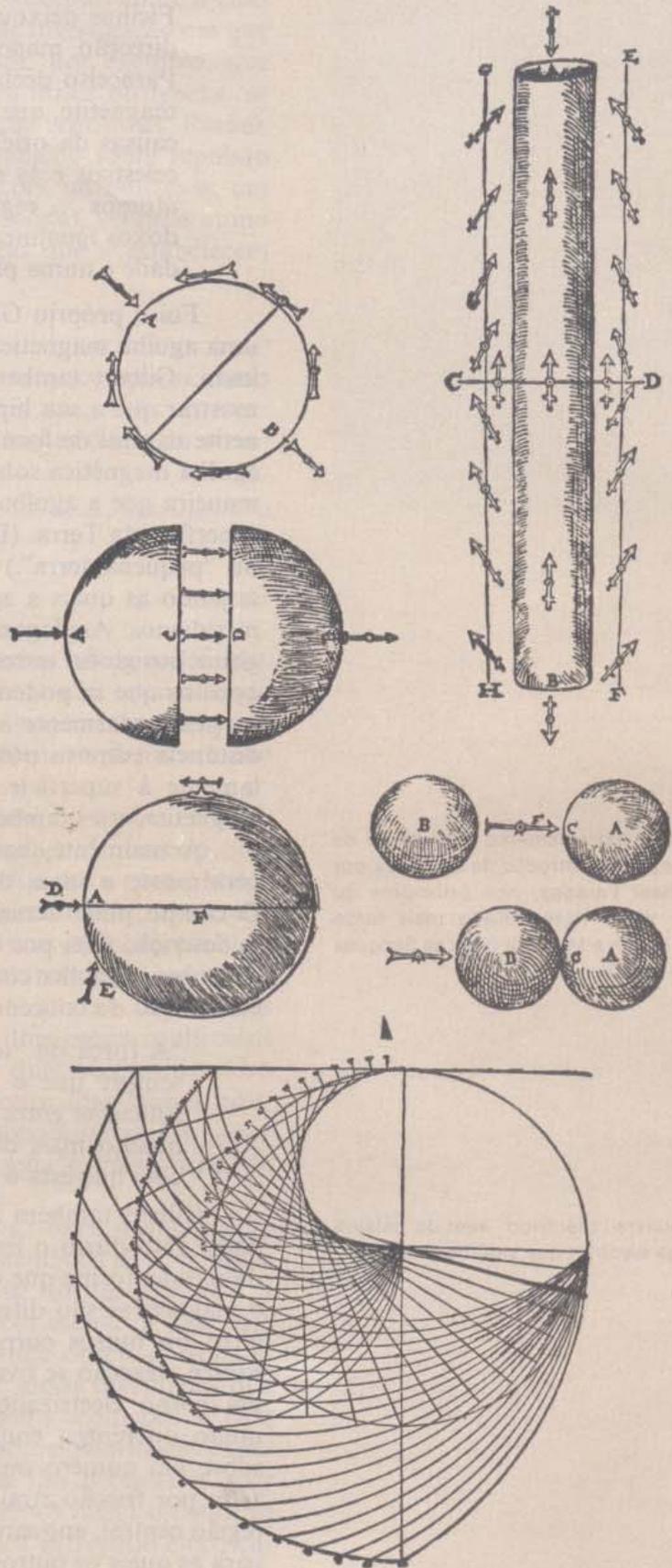


**SEDINI,**  
**Typis GOTZIANIS:**  
**ANNO M. DC. XXXIII.**

Reprodução da primeira página da terceira edição (1633) do livro de Gilbert. No princípio do livro, Gilbert faz a seguinte afirmação:

“Antes de expormos as causas dos movimentos magnéticos e de considerarmos as demonstrações e experiências relacionadas com assuntos que permaneceram escondidos por muito tempo ... devemos formular a nossa nova e, até agora, desconhecida, visão da Terra e submetê-la ao veredicto dos estudiosos.”

Gilbert propôs uma elaborada analogia entre a Terra e uma magnetite esférica. À direita, reproduzem-se alguns dos desenhos que Gilbert utilizou para ilustrar as suas experiências com agulhas magnetizadas e com esferas de ferro e de magnetite. Para o fim do livro, apresenta o diagrama que se vê aqui à direita, onde mostra os ângulos medidos a partir da superfície da Terra (representada pelo circuito central) segundo os quais a agulha magnetizada se “inclinaria” e isto para diferentes latitudes. O título da secção de *De Magnete* onde aparece este diagrama é: *Como determinar ... a latitude de qualquer lugar a partir do seguinte diagrama, transformado num instrumento magnético, em qualquer parte do mundo, sem a ajuda de corpos celestes, nomeadamente, do Sol, planetas ou estrelas fixas e que pode ser usado com o tempo enevoadado ou no escuro.*



Ficinus deixou-se levar por opiniões antigas e, para justificar a direcção magnética, procura a causa na constelação Ursa ... Paracelso declara que existem estrelas dotadas com o poder da magnetite, que atraem ... Todos estes filósofos ... atribuindo as causas da orientação do íman a uma região do céu, aos pólos celestiais e às estrelas ... montanhas, penhascos, espaços vazios, átomos ... regiões atractivas para além do céu e a outros paradoxos igualmente não comprovados, estão muito aquém da verdade e numa procura cega."

Foi o próprio Gilbert quem propôs a causa real da orientação de uma agulha magnética suspensa ou da magnetite: a própria Terra é um íman. Gilbert também fez uma experiência bastante engenhosa para mostrar que a sua hipótese era realista. Utilizando um bocado de magnetite natural de forma esférica, mostrou que, colocando uma pequena agulha magnética sobre a superfície da magnetite, esta actua da mesma maneira que a agulha de uma bússola colocada em diferentes locais da superfície da Terra. (De facto, Gilbert chamou à sua magnetite "terrela" ou "pequena terra".) Se marcarmos a giz na magnetite as direcções segundo as quais a agulha se alinha, vemos que elas formam círculos meridianos. Analogamente ao que acontece com as linhas de igual longitude no globo terrestre, estes círculos convergem para dois extremos opostos que se podem chamar "pólos". Nos pólos, a agulha orienta-se perpendicularmente à superfície da magnetite (ver página 35). A meia distância entre os pólos sobre o "equador", a agulha orienta-se paralelamente à superfície. Se se colocarem bocadinhos de ferro sobre a magnetite, estes também se alinham segundo as mesmas direcções.

Actualmente, nas discussões sobre as acções dos ímanes, usa-se geralmente a ideia de que os ímanes criam "campos" à sua volta. O campo pode actuar sobre outros objectos, próximos ou distantes. A descrição feita por Gilbert da força que a sua magnetite esférica exercia sobre a agulha correspondeu a um passo importante no sentido da elaboração do conceito de campo que actualmente se utiliza:

"A força da "terrela" estende-se em todas as direcções ... Mas sempre que o ferro ou outro corpo magnetizado de tamanho suficiente entra na sua esfera de influência é atraído; no entanto, quanto mais de perto estiver da magnetite, maior será a força com que esta o atrai."

Gilbert também incluiu no seu livro uma discussão sobre electricidade. Introduziu o termo *eléctricos* para designar "corpos que atraem da mesma forma que o âmbar". Gilbert mostrou que as forças eléctricas e magnéticas são diferentes. Por exemplo, a magnetite atrai sempre o ferro ou outros corpos magnetizados. Um corpo electrizado apenas exerce atracção se tiver sido recentemente friccionado. Por outro lado, um corpo electrizado pode atrair bocados pequenos de substâncias muito diferentes, enquanto que as forças magnéticas actuam apenas sobre um número muito reduzido de substâncias. Um objecto electrizado por fricção atrai os objectos segundo linhas orientadas para uma região central, enquanto que os ímanes têm sempre duas regiões (pólos) para as quais os outros ímanes são atraídos.

A ideia extremamente importante de "campo" foi introduzida na Física por Michael Faraday, nos princípios do séc. XIX, e desenvolvida mais tarde por Kelvin e Maxwell (veja as Secções 14.4 e 16.2).

A palavra "Eléctrico" vem da palavra grega *electron* que significa "âmbar".

Gilbert não se limitou a resumir os factos conhecidos sobre a electricidade e os ímanes. Sugeriu novos problemas de investigação em que outros trabalharam durante muitos anos. Propôs, por exemplo, que enquanto os pólos de duas magnetites se podiam atrair ou repelir, os corpos electrizados nunca poderiam exercer forças repulsivas. Porém, em 1646, Thomas Browe publicou o primeiro trabalho sobre repulsão eléctrica. Para sistematizar estas novas observações introduziu-se um novo conceito, o de *carga eléctrica*. Na próxima secção, veremos como se pode usar este conceito para descrever as forças que se estabelecem entre corpos carregados electricamente.

- Q1. Como é que Gilbert demonstrou que a Terra se comporta como magnetite esférica?
- Q2. Em que é que a atracção dos objectos pelo âmbar difere da atracção pela magnetite?



William Gilbert (1544-1603) foi um filósofo natural, físico e astrónomo inglês. Foi o primeiro a sugerir que a Terra é um ímã gigante. Em 1600, publicou o livro "De Magnete", onde descreve as propriedades magnéticas da Terra e a electricidade estática.

### 14.3 Cargas Eléctricas e Forças Eléctricas

Como Gilbert defendia vigorosamente, os factos relacionados com a electrostática devem aprender-se no laboratório e não apenas lendo sobre eles. Esta secção será, portanto, apenas um breve resumo que nos prepara para realizar pessoalmente trabalho experimental relacionado com estes fenómenos.

Já anteriormente se discutiu o comportamento do âmbar. Depois de friccionado, adquire misteriosamente a propriedade de atrair pequenos bocados de palha, cortiça, papel, cabelo, etc. Até certo ponto, todos os materiais apresentam este efeito depois de friccionados, nomeadamente as varetas de vidro ou de borracha rija e as tiras de plástico. Há ainda outras duas observações básicas importantes: (a) Quando se friccionam duas varetas do mesmo material no mesmo tecido, elas *repelem-se*. Como exemplo deste efeito temos dois casos conhecidos desde há muito e que funcionam bastante bem: duas varetas de vidro friccionadas em seda e duas de borracha friccionadas numa pele. (b) Quando se friccionam duas varetas de materiais *diferentes* — por exemplo, uma vareta de vidro num tecido de seda e uma vareta de borracha numa pele — elas podem *atrair-se*.

Estes e muitos outros factos semelhantes, experimentalmente observáveis, podem resumir-se de uma forma sistemática se se adoptar um modelo muito simples. Enquanto se descreve um *modelo* para a atracção e repulsão eléctricas é importante ter em mente de que este modelo não é um facto experimental que se pode observar isoladamente. O modelo corresponde a um conjunto de ideias inventadas que nos ajuda a descrever e a resumir aquilo que vemos acontecer. É fácil esquecer esta diferença muito importante entre factos observáveis experimentalmente e explicações inventadas. Ambos são necessários mas não são a mesma coisa! O modelo que adoptaremos inclui o conceito de "carga" e três regras. Diz-se que o objecto "fica carregado eléctrica-



Benjamim Franklin (1706-1790), estadista americano, inventor, cientista e escritor. Interessou-se muito pelos fenómenos da electricidade: a sua famosa experiência com um papagaio e a invenção do pára-raios tornaram-no muito conhecido. Na figura mostra-se Franklin observando o comportamento de uma campainha cujo badalo está ligado a um pára-raios.

mente” ou que “tem carga eléctrica” se, depois de friccionado, adquire a propriedade de atrair bocados pequenos de matéria. Além disso, imaginamos que há duas espécies de carga eléctrica. Admitimos que todos os objectos com um comportamento eléctrico têm uma das duas espécies de cargas eléctricas existentes. As três regras são:

- (1) existem apenas duas espécies de cargas eléctricas
- (2) dois objectos analogamente carregados (isto é, tendo o mesmo tipo de carga) repelem-se.
- (3) dois objectos carregados com cargas opostas atraem-se.

Quando se friccionam dois materiais diferentes e não carregados um no outro (por exemplo, uma vareta de vidro e um pano de seda), eles adquirem cargas de espécies opostas. Benjamim Franklin, que fez muitas experiências com cargas eléctricas, propôs um modelo mecânico para estes fenómenos. No seu modelo, carregar electricamente um objecto implicava a transferência de um “fluido eléctrico”, presente em toda a matéria. Quando se friccionavam dois objectos um no outro, parte do fluido eléctrico passava de um para o outro. Um dos objectos ficaria então com um excesso de fluido e o outro com falta de fluido. Um excesso de fluido produzia uma espécie de carga eléctrica — a que Franklin chamou “positiva”. A falta do mesmo fluido produzia a outra espécie de carga — a que chamou “negativa”.

Anteriormente alguns teóricos tinham proposto modelos “de dois fluidos” que envolviam um “fluido positivo” e um “fluido negativo”. De acordo com estes modelos, a matéria conteria iguais quantidades destes dois fluidos, de modo que os efeitos deles decorrentes se neutralizavam. Quando se friccionavam dois objectos diferentes um no outro, havia uma transferência de fluidos. Um dos objectos recebia um excesso de fluido positivo e o outro recebia um excesso de fluido negativo.

Houve algumas polémicas entre os defensores do modelo envolvendo um único fluido e os defensores do modelo de dois fluidos. No entanto, todos estavam de acordo em falar em termos de dois tipos de carga: a “+” e a “-”. Foi apenas em 1890 que apareceram factos experimentais que apoiavam convictamente qualquer dos dois modelos para a “carga eléctrica”. Acontece que, como se veio a descobrir, havia elementos verdadeiros quer no modelo de um fluido, quer no modelo de dois fluidos. A história será contada com algum pormenor na Unidade 5. Para já, podemos dizer que existem, de facto, dois “fluidos” materiais diferentes. No entanto, o “fluido negativo” move-se muito mais facilmente que o “fluido positivo”. Por isso, a maior parte dos fenómenos eléctricos que temos estado a considerar envolvem um excesso ou uma falta do “fluido móvel negativo” — ou, em termos actuais, um excesso ou uma falta de electrões.

Franklin pensou que o fluido era constituído por pequenas partículas e esse é também o ponto de vista actual. Consequentemente, usa-se muitas vezes a palavra grega “carga” no plural. Dizemos, por exemplo, geralmente que “as cargas eléctricas são transferidas de um corpo para o outro”.

O que é espantoso, não só em electricidade como também noutros domínios da física, é que sejam necessários tão poucos conceitos para

descrever uma infinidade de observações todas diferentes. Verificou-se, por exemplo, que não precisamos de introduzir uma terceira ou quarta espécie de cargas para juntar às cargas “+” e “-”. Isto significa que nenhuma observação feita com objectos electricamente carregados requer um tipo adicional de cargas, que se poderiam designar por “÷” ou “×”.

Até um comportamento de um corpo não carregado se pode compreender em termos de cargas + e -. Pode considerar-se que qualquer bocado de matéria, de dimensões suficientemente grandes para ser visível, contém uma grande quantidade de cargas eléctricas, tanto negativas como positivas. Se a quantidade de cargas positivas é igual à quantidade de cargas negativas, parecerá que esse bocado de matéria tem uma carga nula — ou seja, que não tem carga. Os efeitos das cargas positivas e negativas anulam-se simplesmente quando se adicionam ou actuam conjuntamente. (Esta é uma das vantagens de se designarem as duas espécies de cargas por positiva e negativa e não por  $x$  ou  $y$ , por exemplo.) Quando falamos de carga eléctrica de um objecto referimo-nos geralmente ao ligeiro excesso de cargas negativas ou positivas existente nesse objecto.

*A lei da força eléctrica.* Qual é a “lei da força” entre cargas eléctricas? Por outras palavras, de que modo é que a força depende da quantidade de carga e da distância entre os objectos electricamente carregados?

A primeira prova da natureza desta lei da força obteve-se de um modo indirecto.

Por volta de 1775, Benjamim Franklin reparou que um bocado pequeno de cortiça pendurado perto da abertura de um recipiente metálico electrizado era fortemente atraído. No entanto, verificou que quando fazia descer a cortiça pendurada por um fio de seda dentro do recipiente, esta não ficava submetida a nenhuma força, qualquer que fosse a sua posição dentro do recipiente.

Franklin não percebeu porque é que as paredes do recipiente não atraíam a cortiça quando esta estava dentro do recipiente e a atraíam quando estava fora dele. Pediu pois ao seu amigo Joseph Priestley que repetisse a experiência.

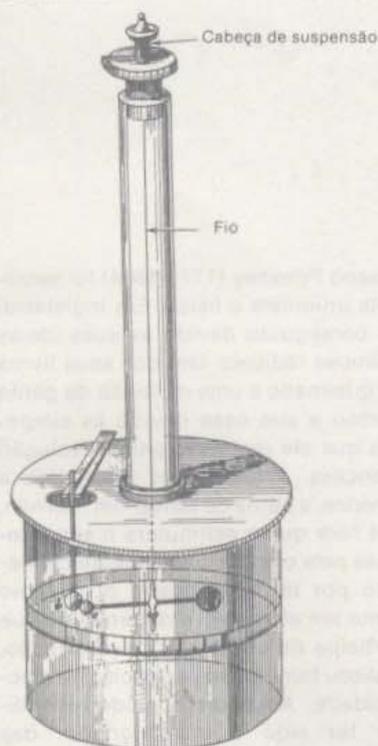
Priestley verificou os resultados de Franklin e, a partir deles, chegou a uma conclusão brilhante. Reportando-se aos *Principia* de Newton, lembrou-se de que as forças gravíticas se comportavam de um modo semelhante. No interior de um planeta oco, a força gravitacional resultante que actuará num objecto (ou seja, a soma de todas as forças que as diferentes partes do planeta exerceriam) seria nula. Este resultado deduz-se também matematicamente a partir da lei que diz que a força gravitacional existente entre dois bocados de matéria é inversamente proporcional ao quadrado das distâncias entre eles. Priestley pôs, portanto, a hipótese de que as forças que as cargas exercem variariam inversamente com o quadrado da distância, analogamente ao que acontece com as forças que os corpos maciços exercem. (Discutiremos a existência de uma força nula no interior de um condutor oco na página 41.) Chamamos força “eléctrica” à força que actua entre dois corpos pelo facto de estarem carregados, assim como chamamos força

O conhecimento que temos da lei da gravitação de Newton afecta esta questão. Estamos a assumir que as forças dependem apenas de uma única propriedade e da distância.

Joseph Priestley (1773-1804) foi sacerdote unionista e físico. Em Inglaterra, foi perseguido devido às suas ideias políticas radicais. Um dos seus livros foi queimado e uma multidão de gente cercou a sua casa devido às simpatias que ele mostrava pela Revolução Francesa. Priestley foi viver para a América, a pátria de Benjamim Franklin, que fora quem estimulara o seu interesse pela ciência. Inicialmente conhecido por ter identificado o oxigênio como um elemento independente que participa na combustão e respiração, realizou também experiências de electricidade. Além disso, pôde reivindicar ter sido o impulsor das bebidas gasosas.



Charles Augustin Coulomb (1738-1806) nasceu numa família com alta posição social e cresceu numa época de instabilidade política. Estudou ciências e matemática e começou a sua carreira como engenheiro militar. Com o seu livro *A Teoria das Máquinas Simples* conquistou o lugar de membro da Academia Francesa das Ciências. Enquanto estudava sobre máquinas, Coulomb inventou a sua balança de torção, com a qual prosseguiu investigações intensivas relacionadas com as forças mecânicas produzidas por cargas eléctricas.



Balança de Torção de Coulomb

gravitacional à força que se estabelece entre corpos não carregados. (Lembremo-nos, no entanto, que só conhecemos as forças através dos seus efeitos mecânicos — pelo impulso ou aceleração que provocam nos corpos materiais!)

A hipótese de Priestley baseava-se num raciocínio por analogia, ou seja, num raciocínio a partir de um caso paralelo e bem demonstrado. Este raciocínio não podia, por si só, *provar* que as forças eléctricas são inversamente proporcionais ao quadrado da distância entre as cargas, mas encorajou enormemente outros físicos a testar experimentalmente essa hipótese.

O físico francês Charles Coulomb forneceu a confirmação experimental directa da lei do inverso do quadrado da distância para as cargas eléctricas, sugerida por Priestley. Utilizou, para isso, uma balança de torção de sua invenção. À esquerda mostra-se um esquema desta balança. Consta de uma haste isoladora e em equilíbrio, suspensa por um fio de seda muito fino. Quando se exerce uma força na extremidade da haste, o fio torce-se e pode utilizar-se este efeito de torção como uma medida da força.

Coulomb prendeu um corpo electricamente carregado A a uma extremidade da haste e colocou outro corpo carregado B próximo dele. A força eléctrica que B exerce em A provocou a torção do fio. Medindo o efeito de torção para diferentes valores da distância entre os centros das esferas A e B, Coulomb descobriu que a força que actua entre as esferas varia proporcionalmente a  $1/R^2$ :

$$F_{el} \propto \frac{1}{R^2}$$

Confirmou assim a sugestão de Priestley. *A força repulsiva entre cargas semelhantes, ou atractiva para cargas de sinais contrários, varia inversamente com o quadrado da distância entre as cargas.*

Coulomb também demonstrou que o módulo da força eléctrica depende do valor absoluto das cargas. Na altura, não havia nenhum método para medir quantitativamente a quantidade de carga de um objecto. (De facto nada do que dissemos até aqui sugere um processo para medir o módulo da carga de um corpo.) No entanto, Coulomb usou uma técnica engenhosa, baseada no princípio da simetria, para comparar efeitos das diferentes quantidades de carga. Primeiro, mostrou que se uma esfera metálica electricamente carregada toca numa esfera descarregada do mesmo tamanho, a segunda esfera fica também carregada. Podíamos dizer que durante o momento de contacto entre os objectos há um "fluxo" de parte da carga do primeiro que "é conduzida" para o segundo. Verificou-se, além disso, que depois do contacto, as duas esferas partilham *igualmente* a carga original. (Isto demonstra-se tendo em conta o facto observável de as duas esferas exercerem forças iguais sobre um terceiro corpo carregado.) Usando este princípio, Coulomb começou com uma determinada carga numa esfera. Depois, por contacto, distribuiu esta carga por esferas idênticas mas descarregadas. Conseguiu assim produzir cargas iguais a  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/8$ , etc., da carga original.

Por este processo Coulomb fez variar as cargas de duas esferas idênticas, de modo independente e, depois, mediu a variação na força que se estabelecia entre elas. Descobriu, por exemplo, que quando se reduziam as cargas das duas esferas a metade, a força entre as esferas se reduzia a 1/4 do seu valor inicial. De um modo geral, mostrou que o módulo da força eléctrica é proporcional ao produto das cargas. Podemos usar símbolos  $q_A$  e  $q_B$  para representar o valor total das cargas nos corpos A e B. O módulo  $F_{el}$  da força eléctrica que cada um dos corpos exerce sobre o outro é proporcional a  $q_A \times q_B$ , e pode escrever-se  $F_{el} \propto q_A q_B$ .

Coulomb resumiu os seus resultados numa única equação que descreve as forças eléctricas que duas pequenas esferas electricamente carregadas A e B exercem uma sobre a outra:

$$F_{el} = k \frac{q_A q_B}{R^2}$$

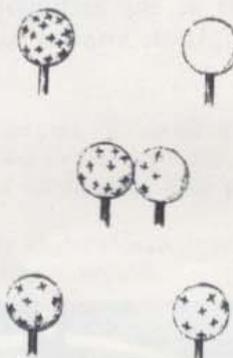
em que  $R$  é a distância entre os centros das esferas e  $k$  é uma constante cujo valor depende das unidades de carga e comprimento utilizadas. Actualmente, dá-se o nome de lei de Coulomb a esta forma da lei da força que actua entre duas cargas eléctricas. Discutiremos o valor de  $k$  mais adiante. De momento, notemos o seguinte facto notável sobre a lei de Coulomb: tem exactamente a mesma forma que a lei da Gravitação Universal de Newton! No entanto, estas duas leis tão importantes surgem de séries de observações completamente diferentes e aplicam-se a tipos de fenómenos totalmente distintos. A razão desta tão grande semelhança constitui, ainda hoje, um quebra-cabeças fascinante e outro dado da simplicidade básica da natureza.

*A unidade de carga.* Podemos usar a lei de Coulomb para definir uma unidade de carga. Por exemplo, podemos atribuir a  $k$  o valor de 1. Nestes caso, podemos definir uma unidade de carga de forma a que duas unidades de carga à distância de uma unidade de comprimento exerçam uma força unitária sobre a outra. Existe, de facto, um sistema baseado nesta escolha. No entanto, vamos encontrar outro sistema de unidades eléctricas — o sistema 'MKSA' — de utilização mais conveniente. Neste sistema não se deduz a unidade de carga da electrostática mas da unidade de intensidade de corrente, o *ampère*. (Discutiremos este assunto na secção 14.12.) Chama-se *coulomb* à unidade de carga e define-se como a quantidade de carga que passa num ponto de um fio condutor durante um segundo quando a intensidade de corrente é igual a 1 ampère. Na secção 14.6 veremos que 1 coulomb corresponde à carga de  $1/1,6 \times 10^{19}$  electrões.

O ampère, ou "A", é uma unidade familiar que se usa frequentemente para descrever a intensidade da corrente em aparelhos eléctricos. O valor efectivo da intensidade de corrente que passa numa lâmpada vulgar de 100 watt é de, aproximadamente, um ampère. Logo, a quantidade de carga que passa pela lâmpada durante um segundo é de, aproximadamente, um coulomb. Pode parecer que um coulomb é uma quantidade de carga bastante pequena. No entanto, uma carga resultante com o valor de um coulomb concentrada num ponto é algo de

O facto de duas esferas de iguais dimensões distribuírem igualmente entre si a carga disponível podia ter sido deduzido a partir daquilo a que se chama "argumento por simetria". Não há nenhuma razão evidente pela qual a carga não se deva distribuir simetricamente, ficando, portanto, igualmente repartida por esferas iguais. No entanto, esta dedução, baseada num raciocínio por simetria, deve ser sempre confirmada por experiências independentes, como aconteceu neste caso.

#### GE 14.2



O documentário filmado do Projecto de Física intitulado *People and Particles*, mostra uma experiência concebida para verificar se a lei de Coulomb também se aplica a cargas separadas por distâncias tão curtas como  $10^{-15}$  cm. (Aplica-se.)

#### Metro-Quilograma-Segundo-Ampère



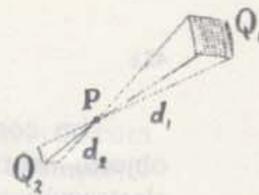
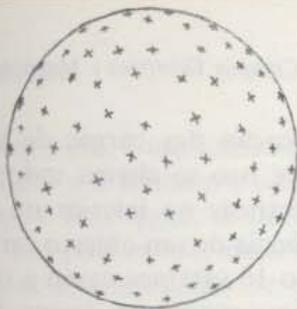
A intensidade de uma faísca tem, em média, o valor aproximado de 40000 A e implica a transferência de uma carga de cerca de 1 coulomb entre a nuvem e a terra.

### GE 14.3

incomensuravelmente grande! Na lâmpada, a quantidade de cargas negativas que se desloca no filamento é de um coulomb por segundo. No entanto, as cargas negativas passam através de uma distribuição mais ou menos estacionária de cargas positivas e, por isso, a carga resultante no filamento é nula em cada instante.

Adoptando o coulomb (1 C) como unidade da carga, podemos determinar a constante  $k$  da Lei de Coulomb experimentalmente, medindo simplesmente a força existente entre cargas conhecidas separadas por uma distância também conhecida. O valor que se obtém para  $k$  é igual a 9 mil milhões de newton vezes metro quadrado por coulomb quadrado ( $9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ ). Isto quer dizer que dois objectos, com uma carga total de 1 coulomb cada um e à distância de 1 metro, exerceriam um no outro forças com um valor de nove mil milhões de newton. Esta força é aproximadamente igual ao peso de um milhão de toneladas! Nunca observámos forças tão grandes porque, de facto, não conseguimos reunir uma carga tão elevada num dado local, nem podemos exercer uma força suficiente para aproximar duas cargas tão perto. A repulsão mútua de cargas semelhantes é tão forte que é difícil manter uma carga de mais de um milésimo de coulomb num objecto de tamanho normal. Se friccionarmos um pente na manga, o suficiente para produzir uma faísca quando se aproxima o pente de um condutor (da maçaneta de uma porta, por exemplo), a carga total do pente será muito menor que um milionésimo de coulomb. Os relâmpagos ocorrem normalmente quando uma nuvem acumulou uma carga total de poucas centenas de coulomb, distribuída pelo seu enorme volume.

*Indução electrostática.* Já aqui notámos e provavelmente, também já o teremos observado, que um corpo electricamente carregado pode muitas vezes atrair pequenos bocados de papel. No entanto, o papel em si não está carregado electricamente e, por si só não exerce nenhuma força sobre outros bocados de papel. À primeira vista pode, portanto, parecer que esta atracção contradiz a Lei de Coulomb. De facto, a força devia ser nula se  $q_A$  ou  $q_B$  fossem zero. Podemos, contudo, explicar esta atracção se nos lembrarmos que os objectos não carregados contêm quantidades iguais de cargas positivas e negativas. Quando se coloca um corpo eletrizado perto de um objecto neutro, pode haver uma redistribuição das posições de algumas das cargas neste objecto. É o que acontece quando se aproxima um pente carregado negativamente de um bocado de papel. Algumas das cargas positivas do papel deslocam-se para o lado mais próximo do pente e uma quantidade correspondente de cargas negativas deslocam-se para o lado oposto. O papel continua a ter uma carga total nula mas algumas das cargas positivas ficam ligeiramente mais perto do pente que as cargas negativas correspondentes. Por isso, a atracção que o pente exerce é maior que a repulsão. (Recordemos que a força diminui com o quadrado da distância, de acordo com a Lei de Coulomb. Se a distância duplicar, a força passará a ter 1/4 do valor inicial.) Em resumo, o corpo carregado exerce uma força atractiva sobre o objecto neutro. Isto explica a observação antiga do efeito que o âmbar depois de friccionado tinha sobre pequenas sementes, etc.



Consideramos uma carga pontual qualquer  $P$ , dentro de uma distribuição uniforme e esférica de cargas. A cada pequena superfície sobre a esfera com uma carga total  $Q_1$ , corresponde uma outra superfície do outro lado de  $P$ , com carga total  $Q_2$ . Como

as áreas destas superfícies são directamente proporcionais aos quadrados das distâncias medidas a partir de  $P$ , as cargas totais  $Q_1$  e  $Q_2$  são também directamente proporcionais ao quadrado das distâncias medidas a partir de  $P$ . O campo eléctrico devido às

cargas existentes em cada uma das superfícies é proporcional ao quadrado da distância medida a partir de  $P$ . Deste modo, os factores distância e área anulam-se — as forças que se exercem em  $P$ , devidas às duas superfícies são exactamente iguais em

módulo. No entanto, estas forças têm sentidos opostos e, por isso, a força resultante que se exerce em  $P$  devido a  $Q_1$  e  $Q_2$  é zero.

Como isto é verdade para todos os pares destas superfícies, o campo eléctrico resultante em  $P$  é zero.

### Protecção eléctrica

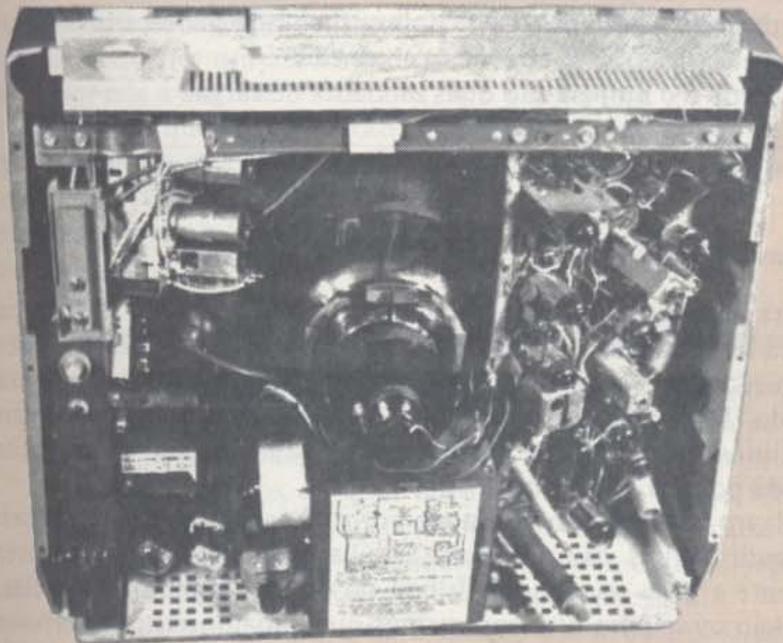
Em geral, as cargas numa superfície condutora fechada distribuem-se de modo a que a força eléctrica no seu interior seja zero, tal como acontece no caso da esfera que vimos no diagrama acima. Mesmo quando se coloca o condutor num campo eléctrico, as cargas à superfície redistribuem-se de modo a que a força resultante dentro do condutor permaneça nula. Assim, a região dentro de qualquer condutor fechado está "protegida" de qualquer campo

eléctrico exterior. Este é um princípio prático muito importante.

Sempre que um campo eléctrico qualquer possa perturbar o funcionamento de um equipamento eléctrico, podemos envolvê-lo com uma capa feita com um material condutor. Podemos ver algumas das aplicações da protecção eléctrica nas fotografias que se vêem em baixo e que mostram a parte de trás de um aparelho de televisão.

Fotografia ampliada de uma válvula da secção sintonizadora do aparelho de televisão que vemos à esquerda. A rodear a válvula está uma protecção metálica flexível.

Também se podem ver noutros locais desta fotografia, válvulas parcialmente protegidas.



Uma secção de um cabo protegido, análogo ao que é usado na fotografia de cima, e onde se mostra o modo como os dois fios estão rodeados por um cilindro condutor feito com fios finos entrelaçados.



Um corpo carregado *induz* uma deslocação das cargas de um objecto neutro colocado na proximidade. Por isso se chama indução electrostática à reorganização das cargas eléctricas no interior ou na superfície de um corpo neutro, devida à influência de um objecto carregado e que se encontra próximo. No Capítulo 16 veremos como a teoria da indução electrostática teve um papel importante no desenvolvimento da teoria da luz.



GE 14.4

GE 14.5

- Q3.** Nas afirmações seguintes, sublinhe as palavras ou as frases que não descrevem simplesmente factos observáveis, mas que foram especificamente “inventadas” para ajudar à compreensão dessas observações.
- Cargas semelhantes repelem-se. Um corpo carregado positivamente repele qualquer corpo que também esteja carregado positivamente. Por exemplo, se se friccionarem duas varetas de vidro, elas tendem a repelir-se uma à outra. Um corpo carregado negativamente repele qualquer outro que também tenha uma carga negativa.
  - Cargas de sinais contrários atraem-se mutuamente. Um corpo carregado positivamente atrai qualquer outro corpo, carregado negativamente e vice-versa.
- Q4.** Qual foi o facto experimental que levou Priestley a propor que a força eléctrica e a força gravítica variam de forma semelhante?
- Q5.** Quais os dois factos que Coulomb demonstrou sobre as forças que actuam entre cargas eléctricas?
- Q6.** Se se duplicar a distância entre dois corpos carregados, como varia a força eléctrica que se estabelece entre eles?
- Q7.** O coulomb e o ampère são duas unidades de carga?

#### 14.4 Forças e Campos

Gilbert descreveu a acção da magnetite dizendo que esta tinha “uma esfera de influência” que a envolvia. Com isto queria Gilbert dizer que qualquer outro corpo magnético que estivesse dentro dessa esfera seria atraído. Mais ainda, a intensidade da força seria maior nos locais mais próximos da magnetite. Hoje em dia, diríamos que a magnetite está rodeada por um *campo magnético*.

A palavra “campo” pode usar-se em muitos sentidos. Vamos primeiro discutir alguns campos mais familiares e, depois, desenvolver gradualmente a ideia de campos físicos, tal como é usada nas ciências. Este exercício serve para nos lembrarmos que a maior parte dos termos usados em Física são, na realidade—com algumas modificações importantes—palavras utilizadas na linguagem corrente. Os termos velocidade, aceleração, força, energia e trabalho são exemplos que já encontrámos neste Curso.

Podemos ilustrar uma utilização corrente do conceito de campo com o “campo de jogo” para diversos desportos. O campo de futebol,

por exemplo, é um local onde as equipas se confrontam de acordo com as regras que limitam a sua acção à área dos campos. Neste exemplo, o campo é uma *região de interacção*.

Em política internacional, falamos de “esferas” ou de “campos” de influência. Um campo de influência política é também uma região de interacção, mas, ao contrário do que acontece com o campo de jogos, não tem fronteiras bem definidas. Um país tem normalmente maior influência em certos países e menor influência noutros.

Assim, no sentido político, o termo “campo” refere-se também a uma quantidade de influência — maior em determinados locais e menor noutros. Além disso, o campo tem uma *fonte* — o país que exerce a influência.

Nestes exemplos existem semelhanças com o conceito de campo usado em Física. No entanto, há também uma diferença importante: para definir um campo em física tem de ser possível atribuir um valor numérico à intensidade do campo em cada ponto. Esta parte da ideia de campo tornar-se-á mais clara se considerarmos algumas situações mais directamente relacionadas com o estudo da Física. Vamos primeiro analisá-las utilizando a linguagem corrente e depois usando termos da Física.

#### A Situação

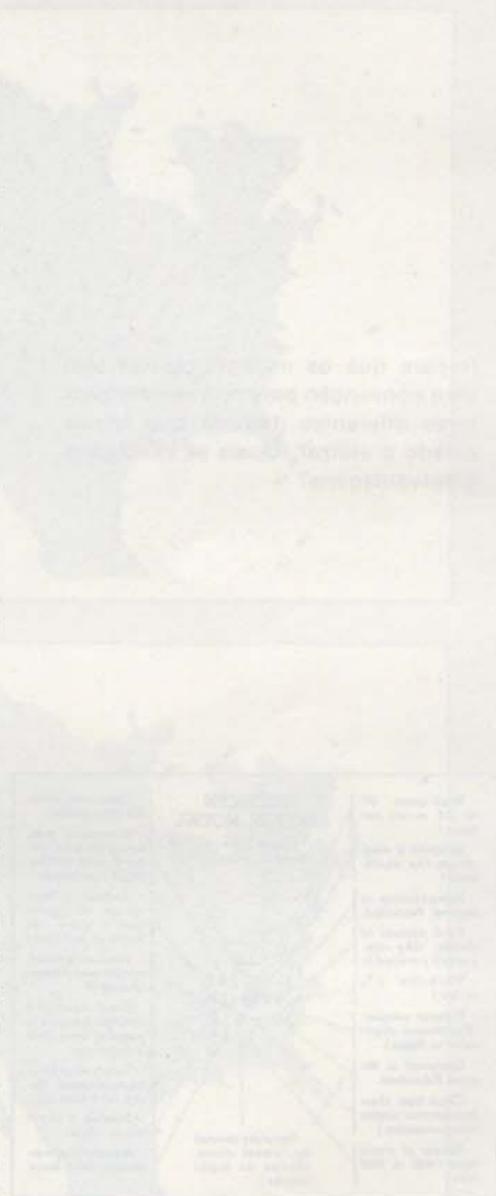
- a) Vamos a andar, de noite, pelo passeio em direcção a um candeeiro.
- b) Encontramo-nos parados num passeio, enquanto um automóvel passa por nós a buzinar.
- c) Num dia quente de verão, vamos a andar descalços e passamos do lado do passeio que está ao Sol para o lado onde há sombra.

#### Descrição da Experiência

- “A intensidade luminosa vai aumentando.”
- “O som aumenta e depois diminui de intensidade.”
- “O passeio está mais frio onde há sombra do que do lado onde bate o Sol.”

Podemos descrever estas experiências em termos de campos:

- (a) O candeeiro está rodeado por um campo luminoso. À medida que nos vamos aproximando do candeeiro, o campo luminoso vai ficando mais forte, como se pode registar com os nossos próprios olhos ou com o auxílio de uma célula fotoeléctrica que tenhamos connosco. Podemos associar a cada ponto do espaço que rodeia o candeeiro um número que representa a intensidade do campo de iluminação nesse local.
- (b) Existe um campo sonoro que rodeia a buzina. Neste caso, o observador está parado no sistema de referência (o passeio). O conjunto de valores do campo passa por ele com a mesma velocidade que o automóvel. Podemos imaginar que o campo sonoro é constante mas que se move com a buzina. Em cada instante poderíamos fazer corresponder a cada ponto do campo um número representando a intensidade do som. De



início, à medida que é a parte mais fraca do campo que atinge o observador, o som mal se ouve. Em seguida, atingem-no regiões mais intensas do campo e o som parece mais forte. Finalmente, a intensidade do som torna a diminuir, à medida que o campo sonoro e a sua fonte (a buzina) se afastam.

- (c) Neste caso, o observador está a andar num campo térmico. O campo é intenso nas zonas do passeio expostas ao Sol e mais fraco nas zonas de sombra. Também aqui podemos atribuir a cada ponto do campo um valor numérico que representa a temperatura nesse ponto.

É de notar que os dois primeiros campos são produzidos por uma única fonte. Em (a) a fonte é um candeeiro de rua imóvel; em (b) é uma buzina móvel. Em qualquer destes casos, a intensidade cresce gradualmente à medida que diminui a distância entre o observador e a fonte. Por outro lado, no terceiro caso, o campo é produzido por uma combinação complicada de influências: o Sol, as nuvens, as sombras que os edifícios próximos projectam e outros factores. Mesmo assim, a descrição do campo em si é tão simples como as que fizemos para os campos produzidos por única fonte: associamos um valor numérico a cada ponto do espaço.

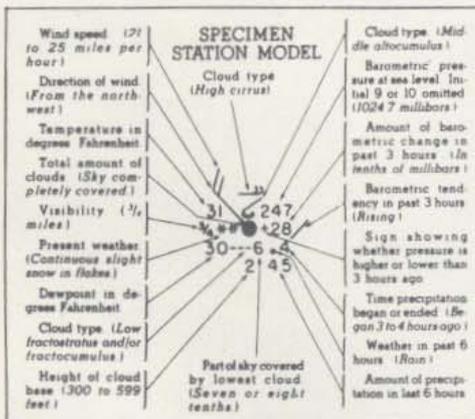
Até aqui, todos os exemplos correspondiam a campos escalares simples. Não havia qualquer direcção e sentido associados ao valor do campo em cada ponto. Na página seguinte mostram-se os mapas de dois campos referentes à camada atmosférica existente sobre os Estados Unidos e que se obtiveram em dois dias consecutivos. Existe, no entanto, uma diferença importante entre o campo representado à esquerda e o campo representado à direita. O campo das pressões atmosféricas (à esquerda) é um campo escalar; o campo da velocidade do vento (à direita) é um campo vectorial. Para cada ponto do campo das pressões há um único número — uma quantidade escalar — que dá o valor do campo nesse ponto. Por outro lado, no campo das velocidades do vento o valor do campo em cada ponto é dado por um valor numérico (módulo), por uma direcção e um sentido — isto é, por um vector.

Uma das aplicações destes mapas de campos é a de nos ajudarem a prever, com maior ou menor precisão, quais as condições que podem existir no campo no dia seguinte. Além disso, sobrepondo os mapas da pressão e da velocidade, podemos descobrir como é que estes dois campos se relacionam entre si.

Actualmente os físicos usam o termo "campo" em três sentidos diferentes: para significar (1) o valor do campo num ponto do espaço; (2) o conjunto de todos os valores correspondentes a todos os pontos do espaço onde o campo existe; (3) a região do espaço na qual o campo tem valores não nulos. Ao ler o resto do capítulo não terá dificuldade em decidir qual dos sentidos deve dar a este termo, sempre que ele é usado.

*Campo da Força Gravítica.* Antes de voltarmos ao estudo da electricidade e do magnetismo, vamos ilustrar um pouco melhor a ideia de campo. Um bom exemplo é o campo da força gravítica terrestre. Recordemos que a Força  $\vec{F}_{grav}$  que a Terra exerce sobre um objecto

Repare que os meteorologistas têm uma convenção para representar vectores diferentes daquela que temos estado a utilizar. Quais as vantagens e desvantagens?



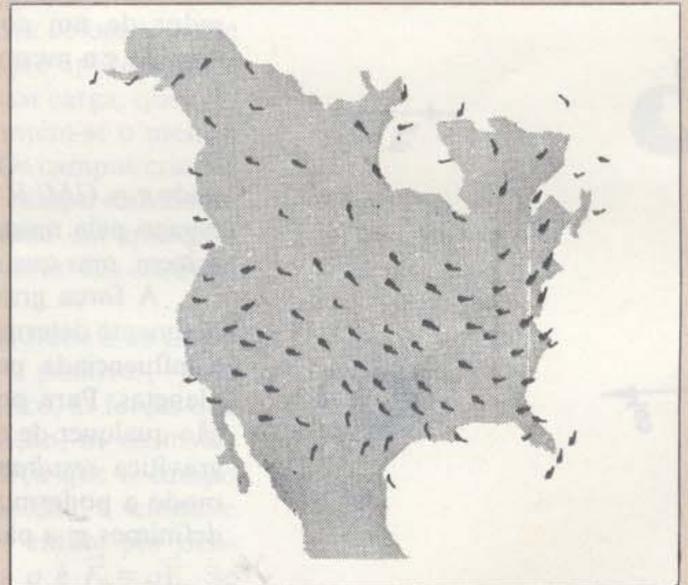
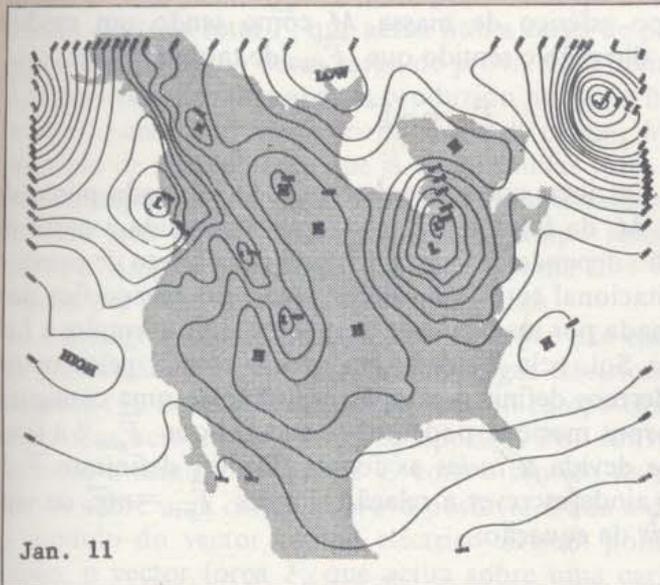
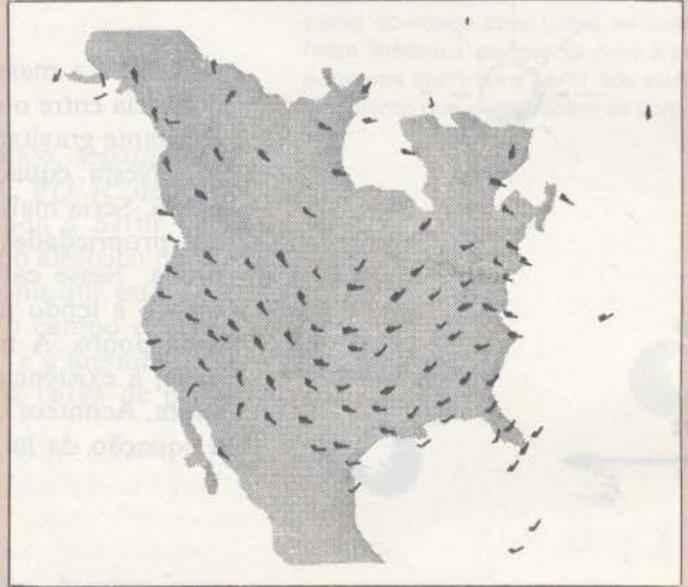
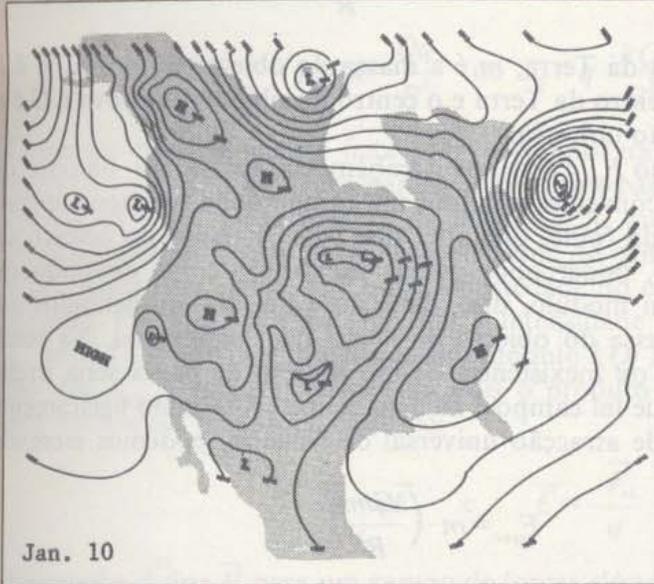
Chave para utilização de um mapa de uma Estação Meteorológica nos Estados Unidos.

## Campos de pressão e de velocidade

Estes mapas, adaptados de mapas da Estação Meteorológica Americana, mostram dois campos que correspondem, respectivamente, à pressão atmosférica à superfície da Terra e à velocidade do vento a grande altitude, em dois dias consecutivos. Os pontos em que a pressão é a mesma estão ligados por linhas fechadas. O conjunto dos "contornos" destas pressões representa a forma do campo total. A velocidade do vento num dado local é indicada por linhas em que se especifica o sentido — uma por cada 10 mph (o vento na extremidade da Florida, por exemplo, vem de nordeste e sopra com uma velocidade de cerca de 30 mph).

Pressão atmosférica à superfície da Terra

Velocidade do vento a alta altitude



qualquer situado na sua superfície actua segundo uma direcção orientada para o centro da Terra. Deste modo, o campo das forças de atracção gravítica é um campo vectorial, que se pode representar por setas orientadas para o centro da Terra. Na figura, representam-se algumas destas setas, umas perto e outras longe da Terra.

A intensidade, ou o módulo numérico, do campo da força gravítica terrestre num dado ponto depende da distância entre esse ponto e o centro da Terra. Esta dependência decorre da Lei de Newton, que nos diz que o módulo de atracção gravítica é inversamente proporcional ao quadrado da distância  $R$ :

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

onde  $M$  é a massa da Terra,  $m$  é a massa do objecto da prova,  $R$  é a distância entre o centro da Terra e o centro do objecto da prova e  $G$  é a constante gravitação universal.

Nesta equação  $F_{\text{grav}}$  depende também da massa do objecto de prova. Seria mais conveniente definir um campo que dependesse apenas das propriedades da fonte, qualquer que fosse a massa do objecto de prova. Nesse caso, poderíamos pensar no campo como existindo no espaço e tendo um módulo, uma direcção e um sentido definidos em cada ponto. A massa do objecto de prova não interessaria. Na realidade, a existência ou inexistência de um objecto de prova seria irrelevante. Acontece que tal campo é fácil de definir. Alterando ligeiramente a equação da lei de atracção universal de Newton, podemos escrever:

$$F_{\text{grav}} = m \left( \frac{Gm}{R^2} \right)$$

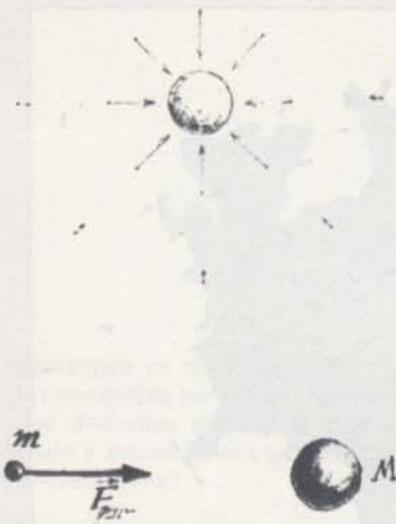
Podemos agora definir a intensidade do campo gravítico  $\vec{g}$  em redor de um corpo esférico de massa  $M$  como tendo um módulo  $Gm/R^2$  e a mesma direcção e sentido que  $\vec{F}_{\text{grav}}$ , de tal modo que:

$$\vec{F}_{\text{grav}} = m\vec{g}$$

onde  $g = GM/R^2$ . De notar que  $\vec{g}$  fica determinado em cada ponto do espaço pela massa  $M$  da fonte e pela distância  $R$ , medida a partir da origem, mas que não depende da massa de qualquer objecto de prova.

A força gravitacional total num dado ponto do espaço fica normalmente determinada por mais do que uma fonte. Por exemplo, a Lua é influenciada pelo Sol, pela Terra e, em menor escala, pelos outros planetas. Para podermos definir o campo resultante de uma configuração qualquer de corpos maciços, podemos considerar que  $\vec{F}_{\text{grav}}$  é a força gravítica *resultante* devida a *todas* as fontes. Depois definimos  $\vec{g}$  de modo a podermos ainda escrever a relação simples  $\vec{F}_{\text{grav}} = m\vec{g}$ , ou seja, definimos  $\vec{g}$  a partir da equação:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}_{\text{grav}}}{m}$$



GE 14.6

Com esta definição a intensidade do campo gravítico em qualquer ponto do espaço é dada pela *razão* entre a força gravitacional total  $\vec{F}_{\text{grav}}$  que actua num dado objecto de prova colocado num ponto e a massa  $m$  desse objecto de prova.

**Campos eléctricos.** Pode definir-se a intensidade de qualquer campo de forças de forma semelhante. De acordo com a Lei de Coulomb, a força eléctrica que um corpo relativamente pequeno e electricamente carregado exerce noutro depende do produto das cargas dos dois corpos. Consideremos uma carga  $q$  colocada num ponto qualquer do campo eléctrico criado pela carga  $Q$ . Podemos escrever a Lei de Coulomb que nos dá a força  $F_{\text{el}}$  que se exerce sobre  $q$  da seguinte forma:

$$F_{\text{el}} = k \frac{Qq}{R^2} \quad \text{ou} \quad F_{\text{el}} = q \frac{kQ}{R^2}$$

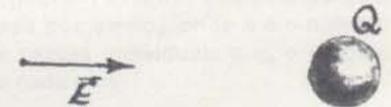
Como no caso da análise feita para o campo gravítico, separámos a expressão da força em duas partes. A primeira parte,  $kQ/R^2$  depende apenas da carga  $Q$  da fonte e da distância  $R$ , medida a partir dela. Podemos chamar a esta parte "a intensidade do campo eléctrico devida a  $Q$ ". A segunda parte,  $q$ , é uma propriedade do corpo que está a ser actuado. Podemos, portanto, definir a intensidade do campo eléctrico  $\vec{E}$ , devido à carga  $Q$ , como tendo um módulo  $kQ/R^2$  e a mesma direcção que  $\vec{F}_{\text{el}}$ . A força eléctrica será pois o produto da carga de prova pela intensidade do campo eléctrico:

$$\vec{F}_{\text{el}} = q\vec{E} \quad \text{e} \quad \vec{E} = \frac{\vec{F}_{\text{el}}}{q}$$

A equação define  $\vec{E}$  para um campo de forças eléctricas. Assim a intensidade do campo eléctrico  $\vec{E}$  num ponto do espaço é igual à razão entre a força eléctrica total  $\vec{F}_{\text{el}}$  que actua numa carga de prova colocada nesse ponto e o módulo  $q$  dessa carga de prova. Esta definição aplica-se quer o campo eléctrico seja apenas produzido por uma única carga, quer ele se deva a uma distribuição complicada de cargas. Mantém-se o mesmo princípio de sobreposição que já vimos muitas vezes. Os campos criados pela sobreposição de várias fontes formam um único campo resultante. O valor que especifica o módulo do campo resultante em qualquer ponto é simplesmente igual ao vector soma dos valores dos campos criados por cada uma das fontes individuais.

Até agora ignorámos um problema que não encontrámos ao tratar da gravitação. Há duas espécies de cargas eléctricas, a positiva (+) e a negativa (-). Se as colocarmos no mesmo campo eléctrico, as forças que sobre elas actuam têm sentidos opostos. Por convenção, os cientistas definem o sentido do vector  $\vec{E}$  com o sentido da força que o campo exerce sobre uma carga de prova positiva. Dada a direcção, o sentido e o módulo do vector campo eléctrico  $\vec{E}$  num ponto, então, por definição, o vector força  $\vec{F}_{\text{el}}$  que actua sobre uma carga  $q$  é  $\vec{F}_{\text{el}} = q\vec{E}$ . Se colocarmos, por exemplo, uma carga positiva de +0,00001 coulomb nesse ponto,  $\vec{F}_{\text{el}}$ , que vai actuar sobre ela tem a mesma direcção e

Recorde que se chama a  $F_{\text{el}}$  uma força 'eléctrica' porque se deve à presença de cargas. No entanto, tal como acontece com todas as outras força 'eléctrica' porque se deve à prepodemos medi-las a partir dos efeitos mecânicos que exerce sobre os corpos.



GE 14.7

GE 14.8

GE 14.9

sentido que  $\vec{E}$  nesse ponto. A força que actuará sobre uma carga de, por exemplo,  $-0,00001$  coulomb terá o mesmo módulo e direcção mas sentido oposto. Quando se muda o sinal  $q$  de  $+$  para  $-$ , o sentido de  $\vec{F}_{el}$  muda automaticamente para o sentido oposto.

**Q8.** Que diferença existe entre um campo escalar e um campo vectorial? Dê exemplos de ambos.

**Q9.** Descreva como se pode determinar experimentalmente o módulo, direcção e sentido de:

a) campo gravítico num dado ponto do espaço.

b) campo eléctrico num dado ponto do espaço.

**Q10.** Como se poderiam manter inalterados os valores dos campos  $\vec{g}$  e  $\vec{E}$  para os objectos de prova, se duplicássemos  $m$  e  $q$ ?

**Q11.** Coloca-se um objecto de prova carregado negativamente num campo eléctrico em que o vector  $\vec{E}$  tem uma direcção vertical e um sentido descendente. Qual o sentido da força que se exerce na carga de prova?

GE 14.10

#### 14.5 A carga eléctrica de menor valor

Na secção 14.3 mencionámos o facto de um pente electrizado poder levantar um pequeno bocado de papel. É óbvio que a força eléctrica que se exerce sobre o papel deve exceder a força gravítica que a Terra exerce sobre ele. Esta observação indica que geralmente as forças eléctricas são fortes comparadas com as forças gravitacionais. Usando o mesmo princípio, podemos equilibrar a força gravítica que se exerce sobre um objecto microscópico (mas que ainda contém vários biliões de átomos) com a força eléctrica que actua sobre o mesmo objecto quando este tem uma carga eléctrica total igual à de um único electrão! (O electrão é um dos componentes básicos do átomo. Discutir-se-ão outras propriedades dos átomos e dos electrões na Unidade 5.) Este ponto é a base de um método de medição da carga do electrão. Este método foi utilizado pela primeira vez pelo físico americano Robert A. Millikan em 1909.

Descreveremos pormenorizadamente a experiência de Millikan na secção 18.3. No entanto, vamos analisar aqui o seu princípio básico, dado que fornece uma ligação clara entre as ideias de força, campo e carga.

Consideremos um pequeno corpo de massa  $m$  — uma gota de óleo ou uma esfera de plástico pequena — com uma carga eléctrica total negativa de módulo  $q$ . Coloquemos este corpo carregado negativamente num campo eléctrico  $E$  com uma direcção vertical e um sentido descendente. Neste caso, vai exercer-se o corpo uma força  $\vec{F}_{el}$  de módulo  $qE$ , com a mesma direcção mas de sentido ascendente. É claro que, sobre o objecto, também actua uma força gravitacional  $\vec{F}_{grav} = mg$  com a mesma direcção e de sentido descendente. O corpo irá ser acelerado num sentido ascendente ou descendente, consoante a força eléctrica for maior ou menor do que a força gravítica. Ajustando o módulo

Millikan usou partículas que ficavam carregadas à medida que se pulverizavam. O óleo tinha vantagens, dado o baixo grau de evaporação de uma gotícula.

da intensidade do campo eléctrico  $\vec{E}$  (ou seja, regulando a fonte de alimentação que gera o  $\vec{E}$ ), podemos equilibrar as duas forças.

O que é que acontece quando as duas forças estão em equilíbrio? Lembremo-nos de que, quando uma força total nula actua sobre um corpo, este não pode ter aceleração. Deverá permanecer em repouso ou continuar o seu movimento com uma velocidade constante. Neste caso, a resistência do ar também actua sobre a gota durante o seu movimento e vai fazer com que a gota ou a esfera parem rapidamente. A gota ficará então em equilíbrio. Na realidade, ficará suspensa no ar. Quando tal acontece, registamos o módulo da intensidade do campo eléctrico  $\vec{E}$  que aplicámos para obter esta condição de equilíbrio.

Dado que agora a força eléctrica equilibra a força gravitacional deve verificar-se a seguinte condição:

$$qE = mg$$

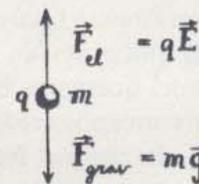
Podemos calcular a carga  $q$  a partir desta equação, se conhecermos os valores de  $E$ ,  $m$  e  $g$ , dado que

$$q = \frac{mg}{E}$$

Esta experiência permite-nos determinar no laboratório quais os valores da carga  $q$  que um pequeno objecto de prova pode ter.

Quando o fizermos descobriremos um facto notável: *todas as cargas possíveis existentes na natureza são formadas por múltiplos de uma dada carga mais pequena*. Chamamos a menor carga eléctrica possível o *módulo da carga de um electrão*. Repetindo a experiência muitas vezes com diferentes cargas pequenas, podemos determinar o valor da carga de um electrão ( $q_e$ ). Com efeito, foi isto que Millikan fez, tendo obtido o valor  $q_e = 1,6024 \times 10^{-19}$  coulomb para a carga do electrão. (Para a maior parte dos fins, podemos usar o valor  $1,6 \times 10^{-19}$  coulomb.)

Este valor está de acordo com o resultado de muitas outras experiências que se realizaram desde então. Até agora nenhuma experiência revelou a existência de uma unidade de carga mais pequena. (No entanto, alguns físicos têm especulado sobre a possibilidade de existência de uma carga  $1/3 q_e$ , que deveria estar associada a uma partícula sub-atómica, ainda por descobrir, e a que se dá o nome de "quark".)



Quando  $m\vec{g}$  e  $q\vec{E}$  se equilibram, as forças de fricção permanecem até que o corpo pare.

GE 14-11

Symboliza-se o módulo da carga de um electrão por  $q_e$ , e o seu sinal é negativo. Portanto, qualquer carga é dada por  $q = nq_e$ , onde  $n$  é o número de cargas individuais e  $q_e$  o módulo de cada uma.

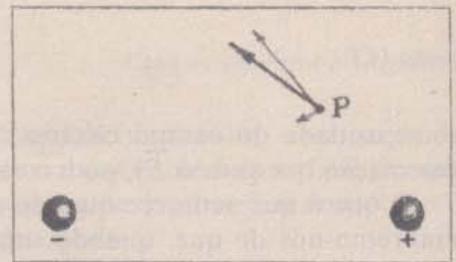
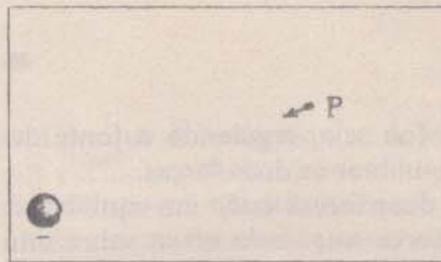
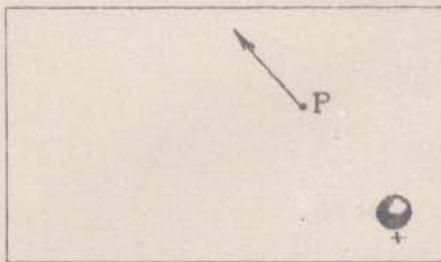
1 coulomb é, portanto, o valor absoluto da carga  $1/1,6 \times 10^{19}$  electrões.

GE 14.12-14.14

**Q12.** Como é que as gotas de óleo ou as pequenas esferas de plástico que se usam na experiência de Millikan podem ser actuadas por uma força eléctrica vertical de sentido *ascendente*, se o campo eléctrico tem um sentido *descendente*?

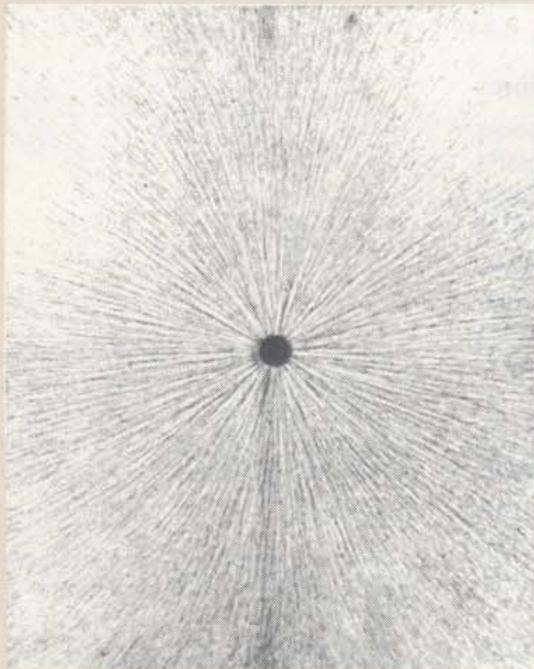
**Q13.** O que é que os resultados da experiência de Millikan nos permitem concluir sobre a natureza da carga eléctrica?

## Visualização de Campos Eléctricos



Só muito raramente estaremos interessados no campo magnético devido a uma única carga. Normalmente, queremos calcular os valores de um campo correspondente a uma distribuição complicada de cargas. Neste caso, a não ser que peguemos efectivamente numa carga teste e a desloquemos no campo para medir a força, precisamos de uma regra para adicionar os campos criados por cada uma das fontes, consideradas separadamente. Um grande número de experiências indicam que em qualquer ponto do campo eléctrico, a intensidade do campo produzido por várias fontes é simplesmente o *vector soma* das intensidades dos campos individualmente produzidos por cada fonte.

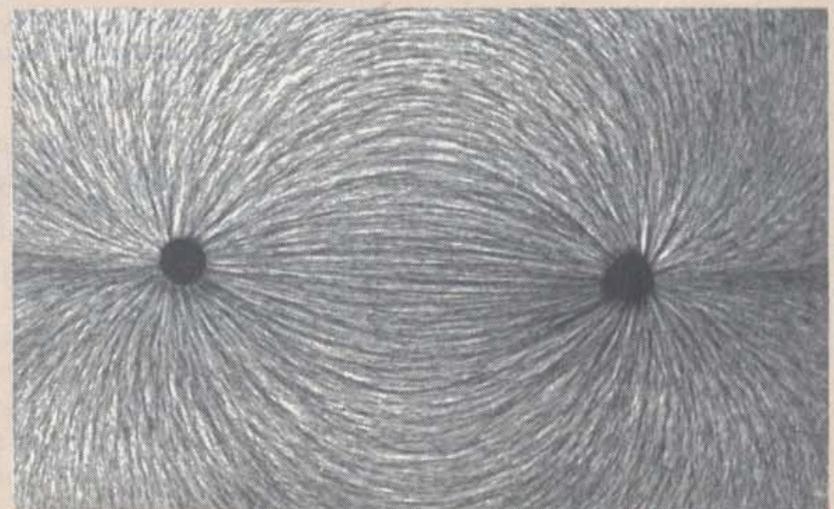
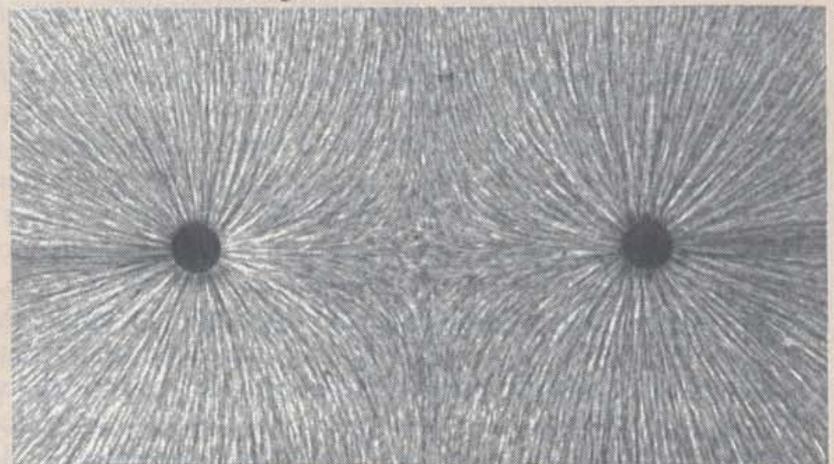
Um exemplo muito simples consiste em determinar a intensidade do campo eléctrico resultante produzido por duas esferas com cargas iguais e de sinais opostos. O vector no primeiro quadro indica a intensidade do campo num ponto  $P$  devido à presença de uma única carga (+). O segundo quadro mostra a intensidade do campo que aparece em  $P$  devido à presença de uma única carga (-). (A distância entre  $P$  e o centro da carga (-) é dupla da distância entre  $P$  e o centro da carga (+), de modo que a intensidade do campo na segunda figura é apenas  $1/4$  do valor da primeira). Quando se encontram presentes ambas as cargas (+) e (-), a intensidade do campo eléctrico resultante  $P$  é igual ao vector soma das intensidades eléctricas individuais. É este vector soma que se indica na terceira figura.

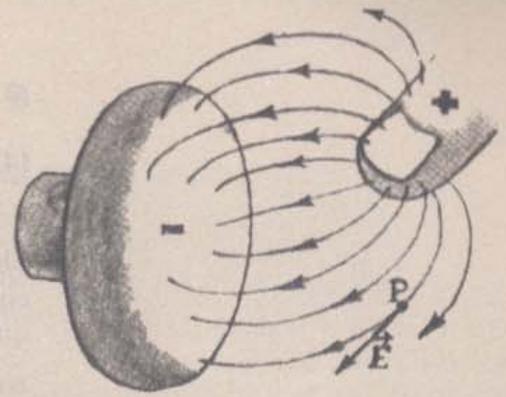
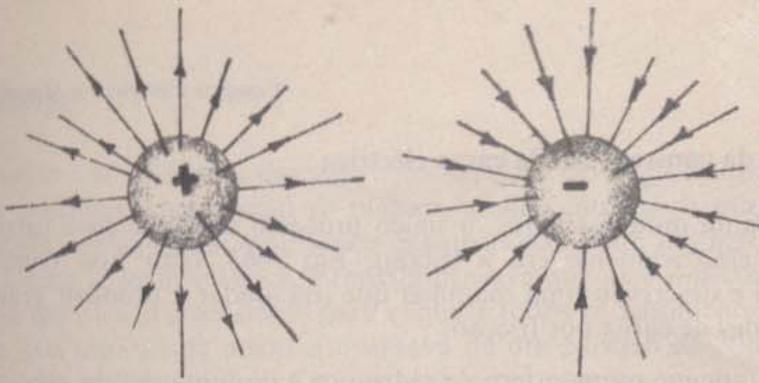


A fotografia acima mostra bocados de fios muito finos suspensos em óleo. No centro está um objecto electricamente carregado. O campo eléctrico que ele cria induz cargas opostas nas duas extremidades de cada bocado de fio e estas cargas tendem então a alinhar-se segundo a direcção do campo, havendo uma aproximação das extremidades carregadas com cargas de sinais opostos.

Na figura a cima, à direita, temos cargas iguais com o mesmo sinal.

Na figura de baixo, à direita, temos cargas iguais de sinais opostos.



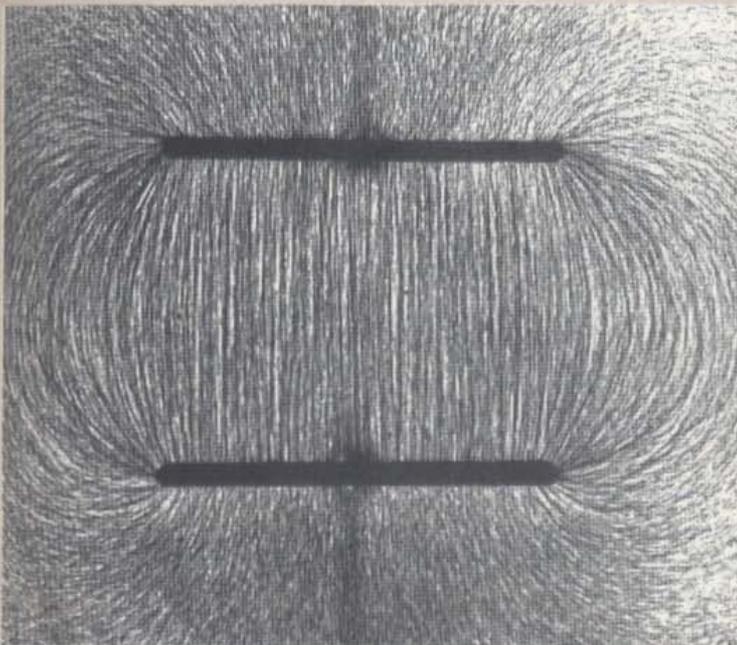


O "mapa" de um campo eléctrico a três dimensões não é fácil de desenhar. Pode atribuir-se um valor vectorial à intensidade de campo eléctrico  $\vec{E}$  em cada ponto do espaço. No entanto e, obviamente, não podemos mostrar isso — um mapa desses estaria completamente cheio de setas. Uma convenção que se usa em Física desde há alguns anos envolve o traçado de um pequeno número de linhas das inúmeras que são possíveis, de modo a indicar a direcção e sentido do campo.

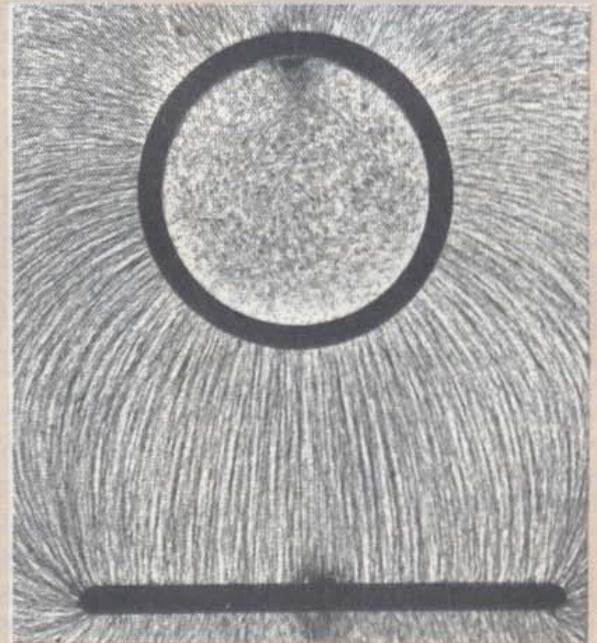
Por exemplo, pode representar-se o campo à volta de uma esfera carregada por quaisquer dos esquemas feitos acima. De notar que se traçam linhas simétricas em torno da esfera e que o campo é mais forte. Podem traçar-se estas linhas a três dimensões de modo que a densidade das linhas numa dada região represente a intensidade do campo nessa região. Estas linhas representam, portanto, e, simultaneamente, o sentido e a intensidade locais do campo. Chamam-se "linhas de força".

As linhas de força que rodeiam uma única esfera carregada são linhas rectas radiais que se orientam no sentido do centro ou no sentido oposto. Quando há uma distribuição de cargas mais complicadas, as linhas de força podem ser curvas. A direcção da intensidade do campo  $\vec{E}$  num ponto é tangente à linha de força que passa nesse ponto. Em cima, por exemplo, traçámos linhas de força que representam o campo eléctrico entre a ponta de um dedo carregada e a maçaneta de uma porta carregada com sinais opostos. Em  $P$ , o vector campo eléctrico  $\vec{E}$  tem uma direcção tangente à linha de força em  $P$  e está representado pela seta que começa em  $P$ .

Reparemos na seguinte diferença: cada linha de força tem uma única direcção e sentido, terminando no objecto carregado ou no infinito. No entanto o vector campo eléctrico  $\vec{E}$  é representado por uma seta com um comprimento que indica o módulo  $E$ .



Pratos carregados com cargas de sinais opostos. (Repare na uniformidade do campo entre os pratos comparada com a não uniformidade na extremidade dos mesmos.)



Um cilindro e um prato carregados com cargas de sinais opostos. (De notar a ausência de campo dentro do cilindro, indicada pela ausência de alinhamento dos filamentos.)

### 14.6 Lei da conservação da carga eléctrica

Durante muitos séculos, o único processo existente para carregar objectos electricamente era a fricção. Em 1663, Otto Von Guericke construiu e descreveu uma máquina que iria ajudar a produzir grandes quantidades de carga por fricção:

“... pegue numa esfera de vidro oca e do tamanho da cabeça de uma criança; encha-a com enxofre previamente moído num almofariz e aqueça-a até que o enxofre funda. Depois deste voltar a arrefecer, parta a esfera e retire o globo de enxofre, conservando-o num sítio fresco. Se preferir, faça um orifício no globo para que este possa girar em torno de um eixo de ferro...”

Quando Guericke colocou a mão sobre o globo que, entretanto, fazia girar rapidamente, o globo tinha adquirido uma carga suficientemente grande para atrair objectos pequenos.

Por volta de 1750, as máquinas eléctricas eram muito mais potentes e realizavam-se muitos trabalhos de investigação sobre a natureza da electricidade em vários sítios. Faziam-se girar esferas ou cilindros de vidro, em torno de eixos sustentados por pesadas armações de madeira. Por vezes, utilizavam-se correias de couro em vez das mãos para fazer rodar essas esferas. A carga acumulada na esfera era frequentemente transferida para um objecto metálico de maiores dimensões (nomeadamente, para o cano de um canhão) suspenso nas proximidades.

Estas máquinas eram suficientemente potentes para provocarem choques eléctricos consideráveis e produziam faíscas assustadoras. Em 1746, Pieter Van Musschenbroek, professor de Física em Leyden, comunicou uma descoberta acidental e quase fatal numa carta que começa assim: “Desejo comunicar-vos uma descoberta nova mas terrível que vos aconselho a nunca tentarem.” Musschenbroek tentava, aparentemente, armazenar electricidade numa garrafa pois tinha um fio de latão que ligava o cano de uma espingarda carregado electricamente a uma garrafa cheia de água. Havia um estudante que segurava a garrafa, enquanto Musschenbroek accionava a máquina. Quando o estudante tocou no fio com a mão que tinha livre, recebeu um choque tremendo. Repetiram a experiência, desta vez ficando o estudante à manivela, enquanto Musschenbroek segurava a garrafa. O estremeção foi ainda maior do que o anterior (provavelmente o aluno pôs o máximo do seu esforço ao dar à manivela). Musschenbroek escreveu mais tarde que pensava “... tudo acabou para mim...” e que nunca repetiria a experiência, nem que lhe oferecessem o reino de França. A notícia da experiência espalhou-se rapidamente e a garrafa veio a chamar-se a garrafa de Leyden. De facto, Musschenbroek tinha descoberto inadvertidamente que se podia armazenar carga eléctrica em objectos sólidos quando adequadamente construídos. Aparelhos, como a garrafa de Leyden, que têm a capacidade de armazenar carga eléctricas chamam-se actualmente *condensadores*.

A garrafa de Leyden chamou a atenção de Franklin que, com ela, realizou uma série de experiências, tendo publicado uma análise do seu comportamento em 1747. Com estas referências, Franklin mostrou



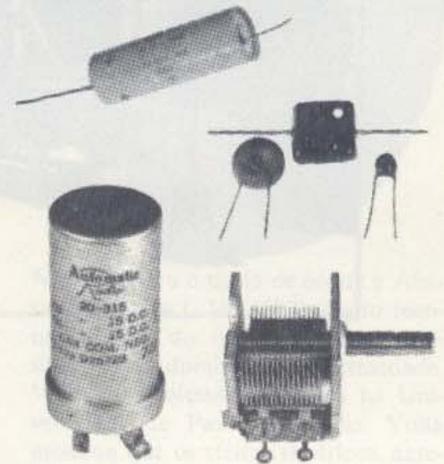
Desenho feito por Franklin de uma garrafa de Leyden colocada numa base isoladora feita de cera. A haste presa à rolha estava em contacto com um líquido condutor que enchia a garrafa. Uma carga fornecida à bola podia manter, através da parede de vidro não condutora, uma quantidade igual de cargas de sinal contrário numa folha metálica enrolada à volta da garrafa. Pode manter-se aí uma quantidade grande de cargas, porque cargas positivas conseguem atrair cargas negativas colocadas no outro lado de uma parede não condutora.

primeiro que os efeitos das diferentes espécies de carga (a que chamamos positivas e negativas) se podiam anular entre si, o que levou a concluir que as cargas positivas e negativas não eram de facto diferentes. Como já mencionámos, Franklin pensava que *uma única* espécie de carga eléctrica era suficiente para explicar todos os fenómenos. Acreditava que uma carga positiva resultava de um excesso de “fluido eléctrico” ou de “fogo eléctrico” e que uma carga negativa resultava da sua falta.

Esta interpretação conduziu Franklin à ideia correcta e cheia de potencialidades de que a carga eléctrica não se cria, nem se destrói. Os objectos ficam carregados positiva ou negativamente devido à reorganização das cargas eléctricas que já existiam nesse corpo. É uma questão de redistribuição e não de criação. Analogamente, as cargas positivas e negativas podem anular ou neutralizar os seus efeitos mútuos sem serem destruídas. Este é o princípio moderno da *conservação da carga*. Considera-se que este princípio é uma lei básica da natureza que figura ao lado dos princípios de conservação do momento e da energia. O princípio da Lei da Conservação da Carga Eléctrica pode enunciar-se do seguinte modo: *num sistema fechado, mantém-se constante a quantidade de carga eléctrica resultante, quaisquer que sejam as reacções que ocorram neste sistema*. Define-se a quantidade de carga resultante como a diferença entre as quantidades de carga positiva e negativa. (Por exemplo, uma carga de +1 coulomb, tanto pode significar o valor de uma única carga positiva igual a +1 coulomb, como a combinação de uma carga positiva de 11 coulomb com a carga negativa de 10 coulomb.) Se considerarmos os símbolos + e - como sinais numéricos e não apenas como designações das duas espécies de carga, podemos chamar à carga *resultante*, a carga total. A simples adição de cargas com sinais + e - dará então a diferença entre as quantidades de carga positiva e negativa.

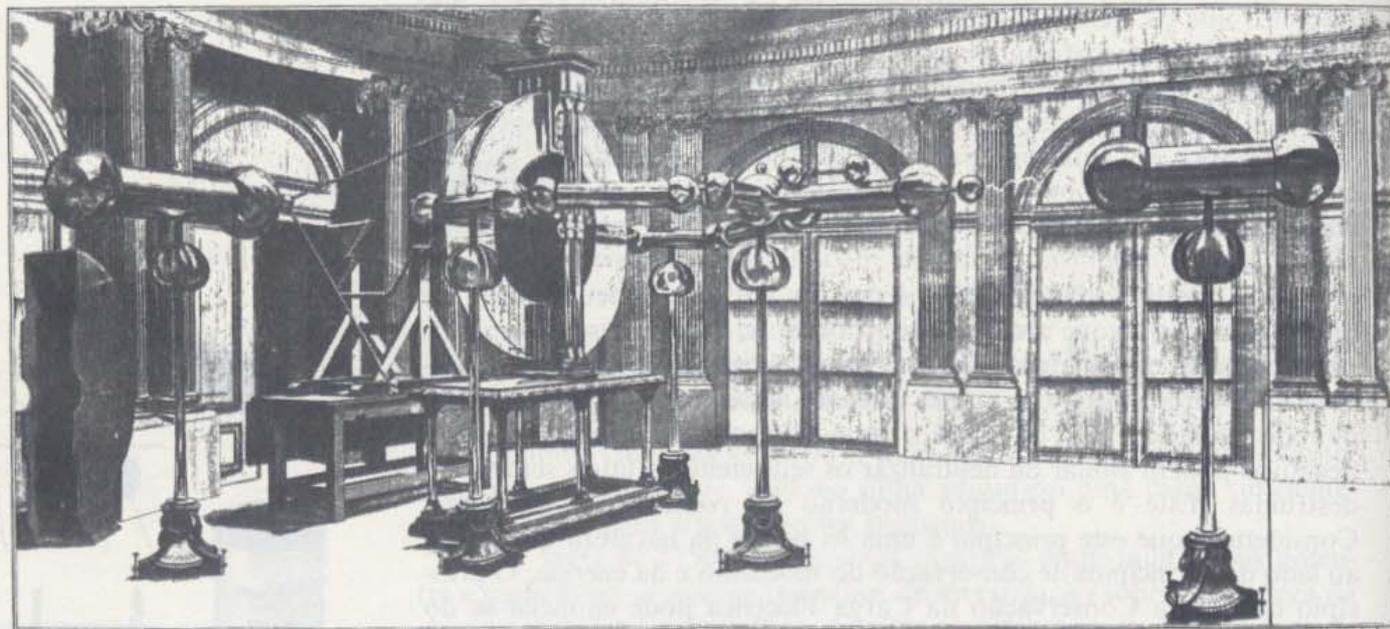
A lei ou o princípio da conservação de carga eléctrica é extremamente útil e tem uma vasta utilização. As suas aplicações vão desde o traçado de circuitos (veja o artigo, “A lei de Ohm”, na *Colectânea 4*) até à análise de reacções sub-atómicas (veja a Unidade Suplementar — *Partículas Elementares* — do Projecto de Física). Uma possibilidade muito interessante que a lei da conservação da carga eléctrica permite é o facto de as cargas eléctricas poderem aparecer e desaparecer bruscamente num sistema fechado — desde que esse aparecimento ou desaparecimento envolva iguais quantidades de cargas + e -. (Um exemplo deste aparecimento espontâneo de cargas + e -, sob a forma de um electrão negativo e de um positrão, constitui a parte central da experiência relatada no filme *People and Particles*).

**Q14.** Qual a exigência que a Lei da Conservação da Carga Eléctrica impõe quando, por exemplo, aparece uma carga + num sistema fechado?



Os condensadores, familiares a toda a gente que tenha olhado para o interior de um rádio, são descendentes da garrafa de Leyden. Têm aplicações muito diversas no campo da electrónica.





Equipamento electrostático dos anos de 1700.

#### 14.7 Correntes eléctricas

GE 14.15

Quando se toca com um objecto electricamente carregado na extremidade de uma corrente metálica ou no cano de uma espingarda, toda a corrente ou a arma vão ficar carregadas. A explicação óbvia para este fenómeno é que as cargas se deslocam e se distribuem pelo objecto. As cargas eléctricas deslocam-se facilmente através de determinados materiais que se designam por *condutores*. Os condutores metálicos constituíram os materiais normalmente usados pelos primeiros experimentadores, mas as soluções salinas e os gases muito quentes também conduzem as cargas eléctricas com facilidade. Existem outros materiais, nomeadamente o vidro e as fibras secas, que muito dificilmente conduzem as cargas eléctricas. Estes materiais designam-se por não-condutores ou *isoladores*. O ar seco é um bom isolador. (O ar húmido não o é — pelo que se pode ter dificuldade em manter os objectos electricamente carregados quando se fazem experiências de electrostática num dia húmido.) No entanto se a carga eléctrica for suficientemente grande, o próprio ar seco que a rodeia tornar-se-á subitamente um condutor, permitindo que uma grande quantidade de carga se escape através dele. O calor e a luz que esta deslocação de cargas origina, vão produzir uma “fáscia”. As fáscias constituíram a primeira prova óbvia das cargas em movimento. Até aos fins do séc. XVIII, só se conseguia produzir um movimento apreciável das cargas — uma corrente eléctrica — descarregando uma garrafa de Leyden. Estas correntes duravam apenas o breve intervalo de tempo que as garrafas levavam a descarregar.

Em 1880, Alessandro Volta descobriu um processo muito melhor para produzir correntes eléctricas. O método de Volta envolvia dois metais diferentes, cada um deles seguro por uma pega isolante. Quando

se punham os metais em contacto e depois se separavam, um deles ficava carregado positivamente e o outro ficava carregado negativamente. Volta pensou que se podia produzir uma carga mais elevada se se empilhassem várias peças metálicas em camadas alternadas. Esta ideia levou-o a empreender uma série de experiências que deram origem a uma descoberta espantosa, relatado por Volta numa carta redigida à "Royal Society" em Inglaterra e com a data de Março de 1880:

"Sim! o aparelho de que falo e que, sem dúvida, vos surpreenderá, consiste apenas na montagem de um certo número de bons condutores de diferentes tipos, dispostos de determinado modo. São precisas 30, 40, 60 ou mais peças de cobre, ou, melhor ainda, de prata, ficando cada uma delas em contacto com uma peça de latão ou, melhor ainda, com peças de zinco e um igual número de camadas de água ou outro líquido que seja melhor condutor que a água pura, nomeadamente a água salgada ou uma solução alcalina, ou então camadas de cartão ou couro, bem impregnadas de um destes líquidos . . .

Coloco horizontalmente sobre a mesa ou sobre uma base um dos pratos metálicos — um dos de prata, por exemplo. Por cima dele, coloco um segundo disco de zinco; sobre este disco, coloco um dos discos humedecidos; depois um novo disco de prata, seguido de outro de zinco, sobre o qual coloco um novo disco humedecido. Continuo sempre do mesmo modo a emparelhar um disco de prata com um de zinco, pela mesma ordem, ou seja, com o de prata sempre por baixo e do de zinco por cima, ou *vice-versa*, conforme o que fiz no princípio e inserindo entre estes pares um disco humedecido. Continuo, dizia, a formar, seguindo este processo, uma pilha tão alta quanto possível, desde que consiga aguentar-se sozinha sem cair."

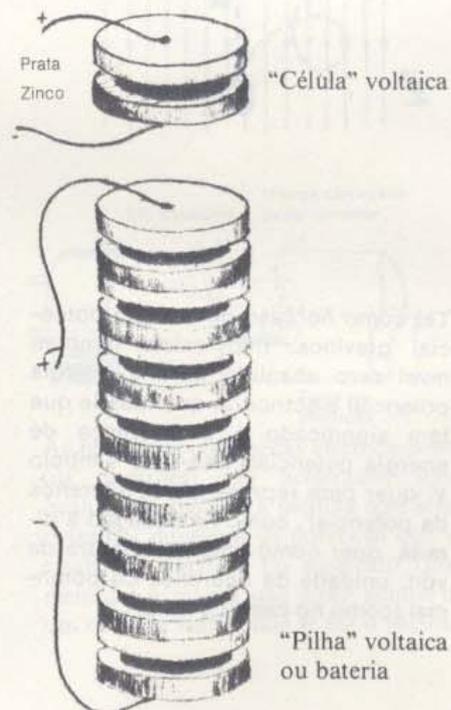
Volta mostrou que uma extremidade, ou um "terminal" da bateria estava carregada positivamente e que a outra estava carregada negativamente. Depois ligou dois fios, um ao primeiro e outro ao último dos discos do seu aparelho, a que chamou "bateria". Por meio destes fios, conseguiu obter electricidade com exactamente os mesmos efeitos que se obtinham com a electricidade produzida por fricção do âmbar, por fricção nas máquinas electrostáticas ou com a descarga das garrafas de Leyden.

No entanto, mais importante do que isso, a bateria de Volta podia produzir uma corrente eléctrica mais ou menos *constante* durante um período de tempo relativamente longo. Ao contrário do que acontecia com a garrafa de Leyden, não era necessário carregar a bateria após cada utilização. A partir desta altura, puderam então estudar-se as propriedades das correntes eléctricas e das cargas eléctricas estáticas de uma forma controlável. E este foi o instrumento necessário para que se pudesse iniciar uma série de invenções que tanto alteraram a civilização.

**Q15.** Em que é que a bateria de Volta era superior à garrafa de Leyden?



Napoleão deu o título de conde a Alessandro Volta (1745-1827), como reconhecimento do valor das suas experiências no domínio da electricidade. Volta foi professor de Física na Universidade de Pavia, na Itália. Volta mostrou que os efeitos eléctricos, anteriormente observados por Luigi Galvani quando efectuava experiências com pernas de rãs, eram devidos aos metais e não a qualquer espécie de "electricidade animal". Veja uma descrição desta controvérsia no artigo "Um Espelho para o Cérebro" na *Colectânea 4*.



### 14.8 Diferença de potencial eléctrico

Quando se ligam os terminais de uma bateria aparecem faíscas e há libertação de calor. Estes fenómenos mostram que a energia proveniente da bateria se transforma em luz, som e energia térmica. A própria bateria converte energia química em energia eléctrica. Por sua vez, esta transforma-se noutras formas de energia (nomeadamente em energia térmica) no circuito que liga os dois terminais. Para percebermos as correntes eléctricas e como é que elas se podem utilizar para transportar energia, precisamos de um novo conceito, a que normalmente se chama "tensão".

Aprendemos na mecânica (Unidade 3) que a variação de energia potencial é igual ao trabalho necessário para deslocar, sem atrito, um objecto de uma posição para outra (Secção 10.9). A energia gravítica de um livro, por exemplo, é maior quando ele está numa estante do que quando está no chão. O aumento de energia potencial é igual ao trabalho realizado para levantar o livro do chão até à estante. Esta diferença de energia potencial depende de três factores: da massa  $m$  do livro, do módulo da intensidade do campo gravítico  $g$  e da diferença de altura  $d$  entre o chão e a estante.

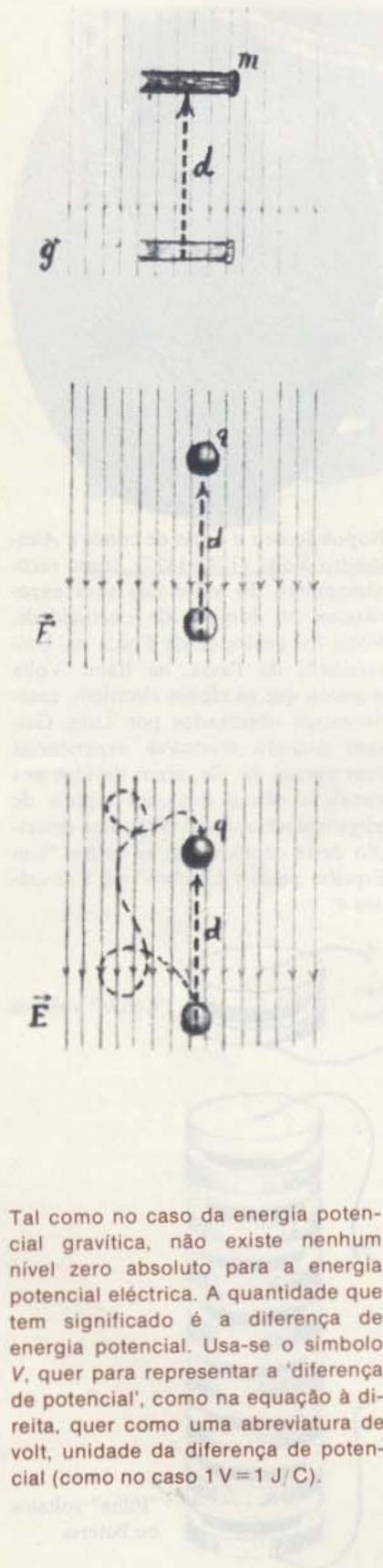
De modo análogo, a energia potencial eléctrica varia quando se realiza trabalho para deslocar uma carga eléctrica de um ponto para outro num campo eléctrico. Também neste caso, pode medir-se directamente esta variação da energia potencial,  $\Delta(E.P.)$ , a partir do trabalho realizado. O módulo desta variação de energia potencial depende evidentemente do módulo da carga de prova  $q$ . No entanto, se dividirmos a quantidade  $\Delta(E.P.)$  por  $q$ , vamos obter uma quantidade que não depende do valor absoluto de  $q$ , mas apenas da intensidade do campo eléctrico e da localização dos pontos inicial e final do deslocamento. Dá-se o nome de "diferença de potencial eléctrico" a esta nova grandeza. Define-se a diferença de potencial eléctrico como a razão entre a energia potencial eléctrica  $\Delta(E.P.)$  de uma carga  $q$  e o módulo dessa carga. Simbolicamente, escrevemos:

$$V = \frac{\Delta(E.P.)}{q}$$

As unidades de diferença de potencial eléctrico são as de energia por carga eléctrica, ou seja, joule por coulomb. Designa-se, abreviadamente, a unidade joule/coulomb por volt. A diferença de potencial eléctrico (ou "tensão") entre dois pontos é igual a 1 volt quando se realiza o trabalho de 1 joule para deslocar uma carga de 1 coulomb de um ponto para outro.

$$1 \text{ volt} = 1 \text{ joule/coulomb}$$

A diferença de potencial entre dois pontos de um campo eléctrico estacionário depende da localização dos pontos. Não depende, no entanto, do caminho que a carga de prova percorreu. O trabalho reali-



Tal como no caso da energia potencial gravítica, não existe nenhum nível zero absoluto para a energia potencial eléctrica. A quantidade que tem significado é a diferença de energia potencial. Usa-se o símbolo  $V$ , quer para representar a 'diferença de potencial', como na equação à direita, quer como uma abreviatura de volt, unidade da diferença de potencial (como no caso  $1V = 1J/C$ ).

zado por unidade de carga é sempre o mesmo, independentemente do facto da trajectória ser curta ou longa, rectilínea ou sinuosa. Analogamente, um alpinista realiza sempre o mesmo trabalho por unidade de massa da sua bagagem, para vencer o campo gravítico, quer suba na vertical ou vá em espiral ao longo das encostas. Podemos, portanto, falar da diferença de potencial eléctrico entre dois pontos, do mesmo modo que falámos da diferença de energia potencial gravítica entre dois pontos na secção 10.2.

Um exemplo muito simples vai ajudar-nos a ver a enorme importância desta definição de diferença de potencial. Calculemos a diferença de potencial entre dois pontos de um campo eléctrico uniforme de módulo  $E$  produzido por dois pratos paralelos carregados com cargas de sinais opostos. É necessário realizar um certo trabalho para deslocar uma carga positiva  $q$  de um ponto para outro, num sentido contrário ao das linhas da força eléctrica. A quantidade de trabalho requerida é igual ao produto da força  $F_{el}$  que se exerce sobre a carga (sendo  $F_{el} = qE$ ) pela distância  $d$  que a carga percorre. Assim

$$\Delta(E.P.) = qEd$$

Substituindo esta expressão de  $\Delta(E.P.)$  na definição de diferença de potencial eléctrico, vamos obter para o caso simples de um campo uniforme:

$$\begin{aligned} V &= \frac{\Delta(E.P.)}{q} \\ &= \frac{qEd}{q} \\ &= Ed \end{aligned}$$

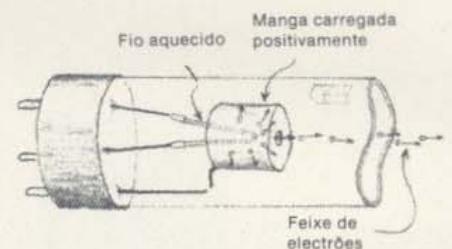
É mais fácil, na prática, medir a diferença de potencial eléctrico  $V$  (com um voltímetro) do que medir a intensidade de um campo eléctrico  $E$ . Por isso, a relação acima indicada é geralmente mais útil na sua forma  $E = V/d$ , que se pode utilizar para determinar a intensidade de um campo eléctrico uniforme.

Pode converter-se a energia eléctrica em energia cinética, como acontece com a energia potencial gravítica. Quando se coloca uma partícula carregada num campo eléctrico, não ficando submetida a outras forças, ela vai ser acelerada. Durante o movimento acelerado, a sua energia cinética vai aumentando à custa da energia potencial eléctrica. (Por outras palavras, a força eléctrica que se exerce sobre a carga actua de modo a empurrá-la para a região de menor energia potencial.) A energia de uma carga  $q$  que "caia" através de uma diferença de potencial  $V$  aumenta de  $qV$  se não houver perdas de energia por atrito (como acontece num tubo de vácuo). O aumento de energia cinética é igual ao decréscimo de energia potencial. Deste modo, a soma das duas permanece constante em qualquer instante. Este é um caso particular do princípio geral de conservação de energia, embora só actuem forças eléctricas.

GE 14.15-14.21



Uma célula de 1 1/2 volt é uma bateria que tem uma diferença de potencial de 1 1/2 volt entre os seus terminais. (Este tipo de célula designa-se frequentemente por "bateria", embora, tecnicamente, uma bateria seja o nome dado a um conjunto de células interligadas.)



As partículas carregadas electricamente (os electrões) são acelerados num canhão electrónico à medida que atravessam a diferença de potencial que se estabelece entre o fio aquecido (filamento) e a manga que estão dentro de um tubo de vidro onde se fez o vácuo.

Utiliza-se a conversão de energia potencial eléctrica em energia cinética nos *aceleradores de electrões* (um exemplo corrente é o aparelho de televisão). Um acelerador de electrões começa normalmente com um canhão electrónico. O “canhão” tem duas partes fundamentais: um filamento e uma manga metálica dentro de um tubo de vidro onde se faz o vácuo. Aquece-se o filamento ao rubro, o que provoca a emissão de electrões que se escapam da sua superfície. A manga metálica situada perto do filamento está carregada positivamente, o que vai dar origem ao aparecimento de um campo eléctrico entre esta e o filamento aquecido. O campo eléctrico vai acelerar os electrões através do vácuo na direcção da manga metálica. Muitos electrões vão ficar presos nessa manga mas alguns deles vão sair “disparados” por um orifício que existe numa das suas extremidades. O feixe de electrões que emerge desse orifício pode ser reacelerado ou focado por meio de mangas suplementares (lentes). (Pode construir este canhão electrónico no laboratório quando fizer a experiência — *Tubo de Feixes Electrónicos*.) Este feixe de partículas carregadas tem um vasto campo de aplicações quer na tecnologia, quer na investigação. Pode utilizar-se, por exemplo, para produzir pontos brilhantes num écran fluorescente, como na televisão ou no microscópio electrónico. Pode também ser usado para separar átomos, produzindo partículas que interessam estudar, ou Raios X para fins médicos ou para a investigação. Quando um electrão com uma carga de  $1,6 \times 10^{-19}$  coulomb se move numa diferença de potencial de 1 volt, a sua energia cinética aumenta de  $1,6 \times 10^{-19}$  joule. A esta quantidade dá-se o nome de “electrão-volt” ou, abreviadamente, eV.

Os múltiplos de eV são o KeV (1 KeV = 1000 eV), o MeV (1 MeV =  $10^6$  eV) e o BeV (1 BeV =  $10^9$  eV). As energias das partículas nos aceleradores são geralmente expressas nestes múltiplos. Num aparelho de televisão aceleram-se os electrões do feixe através de uma diferença de potencial eléctrico de aproximadamente 20 000 volt. Neste caso cada electrão tem uma energia de 20 KeV, aproximadamente. O maior acelerador que actualmente funciona (para fim da investigação) fornece partículas carregadas com energias cinéticas da ordem dos 200 BeV.

Existe uma grande variedade de aceleradores de partículas com diferentes formas e tamanhos. Podem ser tão correntes, como em tubo de 1000 volt de um osciloscópio ou como um ‘canhão’ de 2000 volt usado nas televisões, ou tão espectaculares como aqueles que se vê na figura que mostramos na página seguinte. (Veja também o Acelerador de Electrões de Cambridge que foi cenário de dois filmes do Projecto de Física — *People and Particles* e *Synchrotron*).

K: Kilo- ( $10^3$ )

M: Mega- ( $10^6$ )

B: Mil Milhões ( $10^9$ )

(B é muitas vezes substituído por G: Giga-)

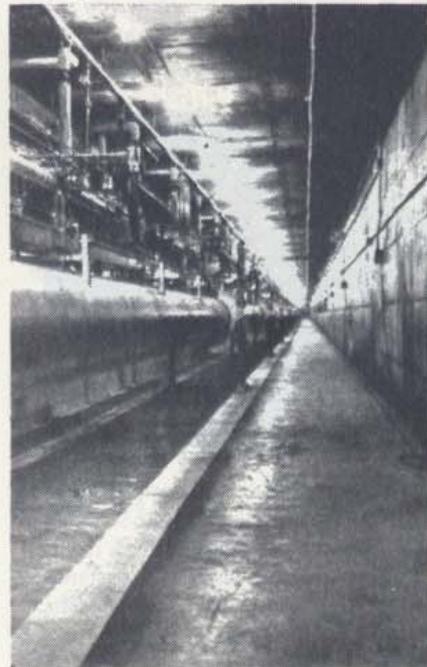
#### GE 14.22

- Q16.** Como é que se define diferença de potencial eléctrico ou “tensão”, entre dois pontos?
- Q17.** A diferença de potencial entre dois pontos depende do caminho percorrido pela carga de um ponto ao outro? Depende do valor absoluto da carga que se desloca?
- Q18.** O electrão-volt é uma unidade de carga, de diferença de potencial (tensão), ou de quê?

Em baixo à direita: local do acelerador de electrões da Universidade de Stanford, que tem uma extensão de duas milhas. Neste acelerador, os electrões adquirem energias cinéticas que vão até 20 BeV.



Em baixo à esquerda: secção de um tubo onde se faz o vácuo e onde se deslocam os electrões. Os electrões são acelerados gradualmente por meio de campos eléctricos que se estabelecem ao longo de uma série de cavidades aceleradoras, análogas às que se vêem na página 30.



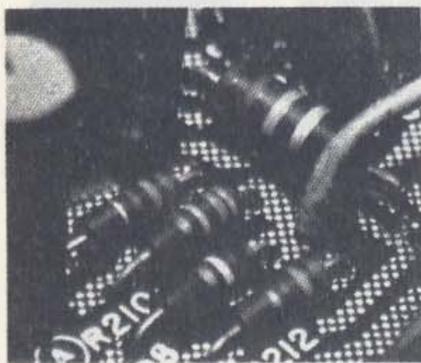
#### 14.9 Diferença de potencial eléctrico e intensidade de corrente eléctrica

A aceleração de um electrão no vácuo provocada pela acção de um campo eléctrico é o exemplo mais simples do efeito de uma diferença de potencial sobre uma partícula carregada. Um exemplo mais corrente é a passagem de corrente eléctrica num fio metálico. Neste tipo de montagem, as extremidades de fio estão ligadas aos terminais de uma bateria. As transformações químicas que ocorrem no interior de uma bateria vão produzir um campo eléctrico que conduz continuamente as cargas para os terminais, estando um deles carregado negativamente e o outro positivamente. A tensão aos terminais da bateria diz-nos qual o valor da energia disponível por unidade de carga, quando as cargas se deslocam num circuito *exterior* qualquer constituído, por exemplo, pelo fio que liga os terminais da bateria.

Os electrões não se deslocam tão livremente num metal como num tubo de vácuo, pois interactivam continuamente com os átomos do metal. Por este motivo, a relação entre a intensidade de corrente e a diferença de potencial pode parecer mais complicada no caso de fio do que para o tubo de vácuo. No entanto, verifica-se uma relação simples, descoberta por Georg Wilhelm Ohm e que é, pelo menos, aproximadamente, válida para a maioria dos condutores metálicos: *A intensidade total da corrente  $I$  que passa num condutor é proporcional à diferença*



Nos condutores metálicos, as cargas que se deslocam são os electrões (cargas negativas), ficando fixo o átomo "mãe" (positivo). No entanto os efeitos são os mesmos que se verificariam se fossem as cargas positivas a deslocarem-se no sentido oposto. Segundo uma convenção já antiga, é este o sentido que usualmente se escolhe para descrever o sentido da corrente.



Fotografia ampliada de parte do circuito eléctrico da televisão que se vê na página 41. Nestas circunstâncias, a razão entre a tensão e a corrente é bastante constante. (O valor desta razão é indicado pelas tiras coloridas.)

GE 14.23

de potencial  $V$  que se aplica entre as extremidades do condutor. Usando o símbolo  $I$  para a intensidade de corrente e o símbolo  $V$  para a diferença de potencial, podemos escrever

$$I \propto V$$

ou  $I = \text{constante} \times V$

A esta relação de proporcionalidade dá-se o nome de *Lei de Ohm*. Escreve-se geralmente na forma

$$I = \frac{V}{R}$$

onde  $R$  é uma constante que se designa por *resistência* do circuito condutor. A Lei de Ohm considera, portanto, que a resistência de um dado percurso condutor não depende da intensidade de corrente, nem da tensão. A resistência depende da natureza do material e das dimensões do circuito, nomeadamente, do comprimento e da espessura do fio. A resistência não é, no entanto, rigorosamente constante para todos os circuitos: varia, por exemplo, com as mudanças de temperatura.

A Lei de Ohm é uma boa aproximação no caso das aplicações técnicas. Não tem, porém, a validade geral da lei da Gravitação Universal ou da Lei de Coulomb. Neste caso, vamos usá-la fundamentalmente nos trabalhos de laboratório e nas discussões sobre lâmpadas eléctricas e sobre a transmissão de energia eléctrica, feitas no Capítulo 15.

- Q19.** Como variará a intensidade de corrente que passa num condutor metálico se a diferença de potencial entre os extremos do condutor duplicar?
- Q20.** O que significa dizer que uma resistência tem um valor de 5 mega-ohm ( $5 \times 10^6$  ohm)?
- Q21.** Como verificaria experimentalmente se a Lei de Ohm se aplica a um determinado troço de fio?

#### 14.10 Diferença de potencial eléctrico e potência eléctrica

Considere uma carga que se pode mover livremente de um terminal para outro de um tubo de vácuo. Neste caso, o trabalho realizado sobre a carga iria simplesmente aumentar a energia cinética da carga. No entanto, uma carga que se desloque através de um material qualquer (nomeadamente, através de um fio) transfere energia para esse material, devido às colisões com os átomos dessa substância, pelo que parte do trabalho se transforma em energia térmica. Uma lâmpada de "flash" fornece-nos um bom exemplo deste efeito. A bateria "força" as cargas a deslocarem-se através do filamento da lâmpada e a energia eléctrica que elas transportam transforma-se em energia térmica no filamento. Por sua vez, o filamento aquecido irradia energia, sendo parte desta, sob a forma de luz visível. Se nos lembrarmos que a "ten-



são" (diferença de potencial eléctrico) é igual à quantidade de trabalho realizado por unidade de tempo:

$$V \text{ (joule/coulomb)} \times I \text{ (coulomb/segundo)} = VI \text{ (joule/segundo)}$$

Ao trabalho realizado por unidade de tempo dá-se o nome de *potência* (como se definiu na Secção 10.6 da Unidade 3 do Texto). A unidade de potência, igual a 1 joule/segundo, designa-se por watt. Usando a definição de ampère (1 coulomb/seg.) e de volt (1 joule/coulomb), podemos escrever para a potência  $P$ :

$$P \text{ (watt)} = V \text{ (volt)} \times I \text{ (ampère)}$$

Quais as transformações de energia a que este trabalho dá origem? À medida que as cargas positivas se deslocam para um nível de menor potencial realizam trabalho contra o material, colidindo com os átomos deste. A energia eléctrica das cargas converte-se em energia térmica. Se for  $V$  a tensão entre as extremidades de um dado material onde passa uma corrente de intensidade  $I$ , a potência que se dissipa no material sob a forma de calor é dada por  $P=VI$ . Também se pode exprimir esta potência em função da resistência do material substituindo  $V$  por  $IR$ :

$$P = IR \times I$$

$$P = I^2 R$$

Logo, a quantidade de calor dissipada por uma corrente é proporcional ao quadrado da intensidade de corrente. Foi Joule quem primeiro provou experimentalmente esta relação. Esta descoberta faz parte da série de investigações que ele realizou sobre a conversão das diferentes formas de energia (Secção 10.8). O facto da taxa de dissipação de energia sob a forma de calor ser proporcional ao quadrado da intensidade de corrente é muito importante na utilização da energia eléctrica para fins práticos. Iremos aprender mais sobre este assunto no próximo capítulo.

- Q22.** O que acontece à energia eléctrica utilizada para deslocar as cargas através de um material condutor?
- Q23.** Como varia a potência dissipada num condutor sob a forma de calor quando se duplica a intensidade de corrente nesse condutor?

*Exemplo:* A intensidade da corrente que passa no filamento de uma lâmpada de "flash" ligada a uma pilha de 1,5 volt é de aproximadamente 0,1 ampère.

Qual o trabalho eléctrico que se realiza, por unidade de tempo, para aquecer o filamento da lâmpada?

$$\begin{aligned} P &= VI \\ &= 1,5 \text{ volt} \times 0,1 \text{ A} \\ &= 0,15 \text{ watt} \end{aligned}$$

(Apenas uma pequena fracção desta potência se transforma em energia luminosa visível, irradiada pelo filamento.)

GE 14.24 — 14.27

### 14.11 Acção das correntes eléctricas sobre os ímanes

No princípio do séc. XVIII, começaram a aparecer relatos sobre o facto de as faíscas modificarem a magnetização das agulhas das bússolas e transformarem facas e colheres em ímanes. Alguns investigadores acreditavam que tinham magnetizado agulhas de aço, descarregando uma garrafa de Leyden através delas. Estas comunicações sugeriam que a electricidade e o magnetismo estavam, de algum modo, intimamente

relacionados. Estas observações casuais não foram, no entanto, seguidas por experiências deliberadamente planeadas que podiam ter conduzido a conceitos e teorias úteis.

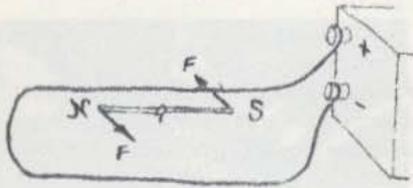
Nenhum destes primeiros relatos surpreendeu os filósofos naturalistas europeus do séc. XIX. Estes filósofos estavam convencidos de que todos os fenómenos observados na natureza eram apenas efeitos diferentes de uma única "força". A sua crença na unidade das forças físicas levava-os naturalmente a esperar que as forças eléctricas e magnéticas estivessem de algum modo associadas ou relacionadas.

A primeira prova concreta da existência de uma relação entre a electricidade e o magnetismo surgiu em 1820, quando Oersted realizou uma série de experiências extremamente importantes. (Veja as ilustrações da página seguinte.) Oersted colocou uma agulha magnética de uma bússola debaixo de um fio condutor comprido e colocado na horizontal. O fio estava alinhado com a direcção N-S magnética da Terra, de modo que a agulha magnética se orientava naturalmente paralelamente ao fio. Quando Oersted ligou o fio aos terminais de uma bateria, a agulha da bússola rodou para uma orientação Leste-Oeste — quase perpendicularmente ao fio! A cargas em repouso não afectam um íman, mas as cargas em movimento (uma corrente) exercem uma força estranha sobre um íman.

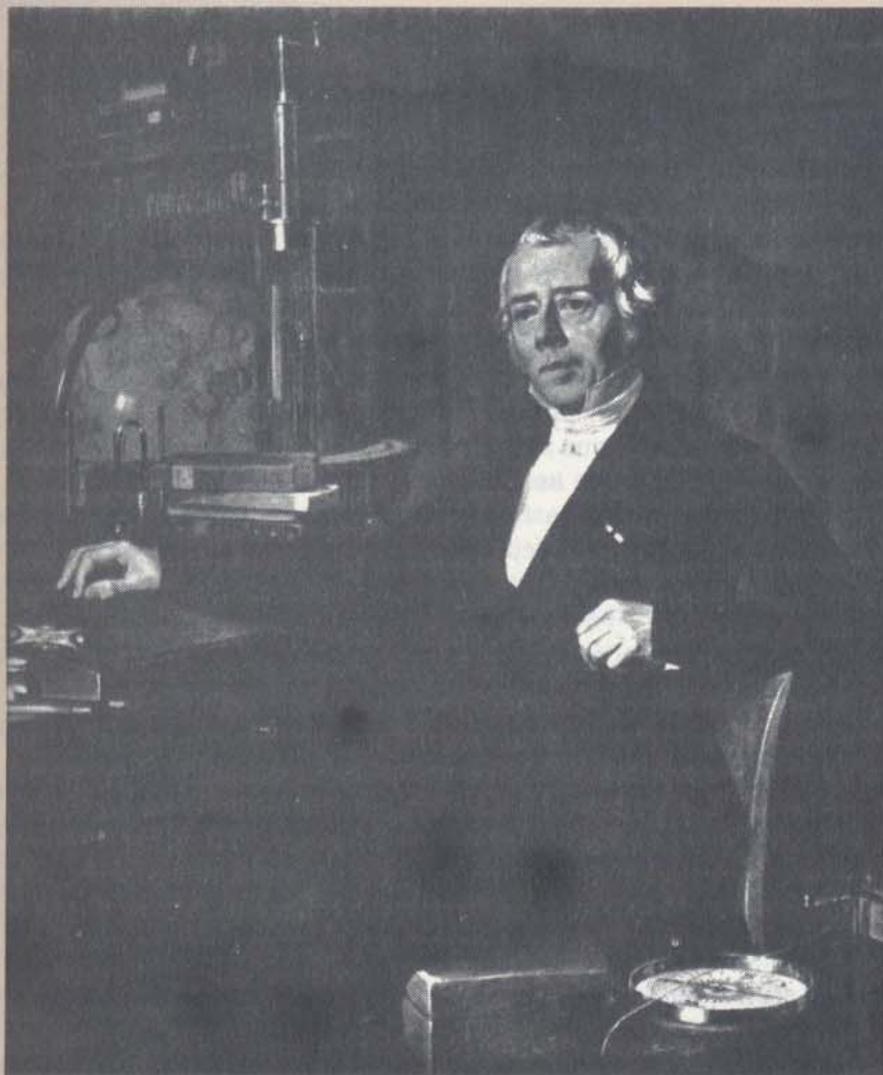
Os resultados de Oersted foram os primeiros que se obtiveram em que uma força não actuava paralelamente à linha que unia as origens das forças (como é o caso para as forças existentes entre os planetas ou para as forças que se estabelecem entre cargas eléctricas ou entre pólos magnéticos). A força que se exerce entre um fio onde passa corrente e cada um dos pólos magnéticos da agulha da bússola não actua segundo a linha que liga o fio ao pólo. De facto, para que a agulha se mova como o faz, a força tem que actuar perpendicularmente a esta linha. A agulha magnética não é atraída nem repelida pelo fio, roda sim no plano da horizontal, devido às forças que actuam sobre os seus pólos.

Este era um efeito completamente novo e não admira que tenha levado tanto tempo até que alguém descobrisse a relação entre a electricidade e o magnetismo. Uma análise mais aprofundada revelou mais claramente o que acontecia nesta experiência. O fio rectilíneo e comprido por onde passava a corrente cria um campo magnético. Este campo faz girar um íman pequeno de modo a que a direcção Norte-Sul do íman fique tangente a um círculo com centro no fio e situado num plano *perpendicular* a este. Deste modo, a corrente produz um campo magnético *circular* e não um campo orientado para o centro, como se esperava.

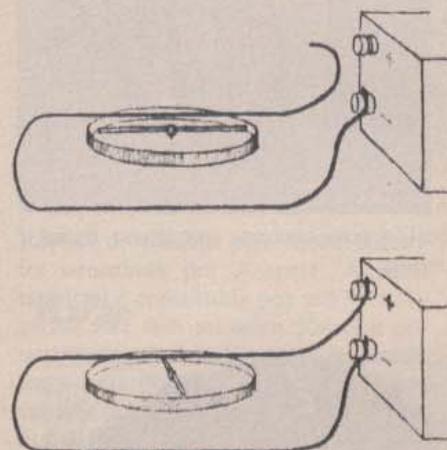
Definimos a direcção e sentido do vector campo magnético  $\vec{B}$  em cada ponto como sendo a *direcção e sentido da força que se exerce sobre o pólo de uma agulha magnética que aponta para o Norte quando colocado nesse ponto*. A força que se exerce sobre o pólo Sul da agulha terá um sentido oposto ao do campo. A agulha de uma bússola reagirá às forças opostas que actuam nos seus pólos rodando até apontar, tão exactamente quanto é possível, no sentido do campo. Podemos visualizar a "forma" do campo magnético à volta de uma corrente, espalhando limalha de ferro numa folha de papel que é atra-



Uma regra útil: se o polegar apontar no sentido do deslocamento da carga, os dedos dobram-se no sentido das linhas de força do campo magnético. Discutir-se-á o módulo de  $\vec{B}$  na Secção 14.13. Use a mão direita para o fluxo de cargas positivas, e a mão esquerda para o fluxo de cargas negativas.

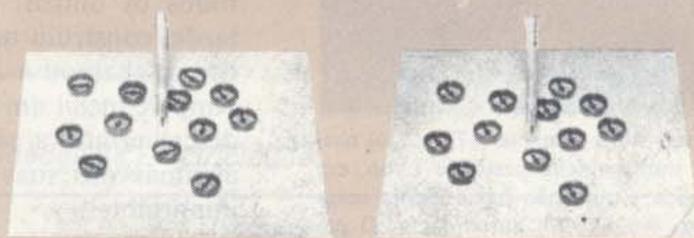
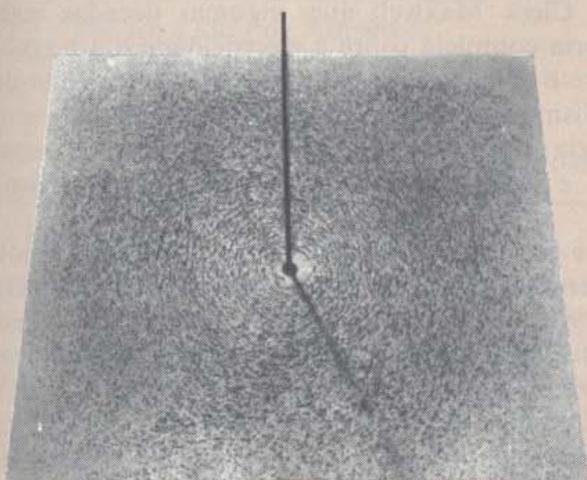


O físico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851) estudou os trabalhos de Schelling, filósofo defensor da filosofia da Natureza e, ele próprio escreveu muito sobre assuntos filosóficos. Num artigo publicado em 1813 previu que se haveria de encontrar uma ligação entre a electricidade e o magnetismo. Em 1820 descobriu que um campo magnético rodeava uma corrente eléctrica quando colocou uma bússola debaixo de um fio onde passava corrente. Anos mais tarde, negou veementemente a sugestão de outros cientistas de que a sua descoberta do electromagnetismo fora accidental.



A experiência de Oersted.

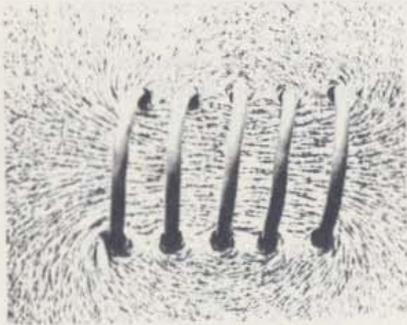
Para se conseguir a fotografia que vemos em baixo, inseriu-se um fio grosso na perpendicular a uma placa de cartão horizontal e espalhou-se limalha de ferro sobre ela. Fazendo passar uma corrente elevada no fio, este cria um campo magnético que faz com que bocadinhos de limalha fiquem magnetizados e se alinhem segundo a direcção do campo. Note que as linhas de força magnéticas rodeiam o fio.



À esquerda: Pequenas bússolas alinhadas sobre uma placa de cartão, perpendicular a uma haste de latão. À direita: Quando passa uma corrente forte nessa haste, as agulhas das bússolas são deflectidas da sua posição usual Norte-Sul pelo campo magnético criado pela corrente. Esta experiência também mostra que as linhas da força magnética criada pela corrente eléctrica são circulares, encontrando-se o centro na haste.



Cristais de óxido de ferro em forma de agulhas num campo magnético criado por uma barra magnética. O íman está colocado debaixo da folha de papel onde se espalhou o óxido de ferro.



Alinhamento da limalha de ferro produzido pela corrente que passa numa bobina.

GE 14.28



André-Marie Ampère (1775-1836) nasceu numa aldeia, perto de Lyon, em França. Como não havia escola nessa terra, Ampère foi autodidacta. O pai foi executado durante a revolução francesa e toda a sua vida pessoal foi profundamente afectada pela morte do pai. Ampère tornou-se professor de Matemática e teve contribuições muito importantes no campo da Física, da Matemática e da Filosofia das Ciências. Em cima reproduz-se o seu auto-retrato.

vessado pelo fio onde passa a corrente. A limalha fica magnetizada e comporta-se como um conjunto de pequenas agulhas magnéticas, indicando a direcção e sentido do campo. Os bocadinhos que constituem a limalha de ferro têm também tendência a unir-se pelas extremidades e, desse modo, a forma em que se dispõe a limalha de ferro indica as linhas de força que se criam à volta de qualquer fio onde passa corrente ou em redor de uma barra magnética. Estas linhas constituem uma “representação visual” do campo magnético.

Podemos usar um argumento semelhante para determinar a “forma” do campo magnético produzido pela corrente que passa numa bobina, em vez de passar por um fio rectilíneo. Para isso, enrola-se o fio em espiral, de modo a que as espiras atravessem o papel em dois sítios. Os efeitos magnéticos que as diferentes partes do fio provocam na limalha de ferro produzem uma figura semelhante àquela que é produzida por uma barra magnética. (Veja nas páginas 68 e 69.)

- Q24.** Em que condições é que as cargas eléctricas podem afectar os ímanes?
- Q25.** O que houve de inesperado no que se refere à força que uma corrente exerce sobre um íman?
- Q26.** Como é que se sabe que uma corrente produz um campo magnético à sua volta? Qual a “forma” que o campo apresenta num ponto qualquer perto de um condutor rectilíneo?

#### 14.12 Acção mútua entre correntes eléctricas

A experiência de Oersted constituiu uma das raras ocasiões em que uma descoberta abre de repente um novo e excitante domínio de investigação. Neste caso, não era necessário equipamento novo. Muitos cientistas, tanto na Europa como nos Estados Unidos, começaram simultaneamente estudos intensivos sobre os efeitos magnéticos das correntes eléctricas. O trabalho de André-Marie Ampère (1775-1836) sobressai de todos os outros. James Clerk Maxwell que, algumas décadas mais tarde, construiu uma teoria completa sobre a electricidade e o magnetismo, chamou a Ampère o “Newton da electricidade”. O trabalho de Ampère inclui um formalismo matemático muito elegante. Embora sem descrevermos a sua teoria em pormenor, podemos reproduzir aqui algumas das suas ideias e rever algumas das suas experiências mais importantes.

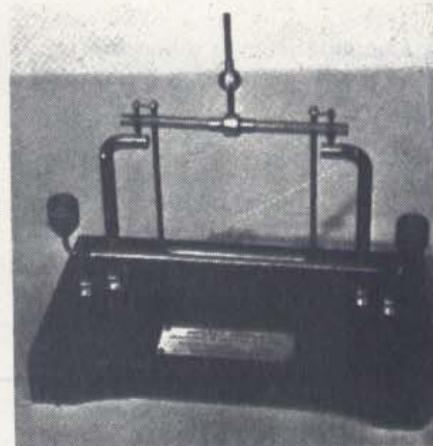
As ideias de Ampère começaram a aparecer logo que este tomou conhecimento das experiências de Oersted. O raciocínio de que Ampère partiu foi mais ou menos o seguinte: os ímanes exercem forças uns sobre os outros; por outro lado, também há forças que se estabelecem entre ímanes e correntes eléctricas. Será então possível que as correntes eléctricas exerçam forças sobre outras correntes eléctricas? A resposta não é necessariamente afirmativa. O raciocínio por simetria é convidativo e resulta muitas vezes, mas as conclusões a que leva não são nem

lógica nem fisicamente necessárias. Ampère reconheceu a necessidade de deixar que fosse a experiência a dar uma resposta à sua pergunta. Escreveu ele:

“Quando M. Oersted descobriu a acção que uma corrente exerce sobre um íman, foi certamente possível que alguém tivesse suscitado a existência de uma acção mútua entre dois circuitos eléctricos onde passava corrente; mas isto não era uma consequência necessária, pois uma barra de ferro macio também actua numa agulha magnetizada, apesar de não haver uma acção mútua entre duas barras de ferro macio.”

Ampère preferiu, portanto, testar o seu raciocínio. No dia 30 de Setembro de 1820, aproximadamente uma semana depois da notícia sobre o trabalho de Oersted ter chegado a França, Ampère fez uma comunicação para a Academia das Ciências francesa. Tinha realmente descoberto que dois circuitos paralelos por onde passavam correntes eléctricas exerciam forças um sobre o outro. Isto acontecia mesmo que não houvesse qualquer sinal que existisse uma carga resultante não nula nos fios.

Ampère fez um estudo sistemático das forças que se estabelecem entre correntes eléctricas. Investigou como é que dependem da distância entre os fios, das posições relativas desses mesmos fios e da intensidade da corrente. Podemos repetir no laboratório estas experiências e descobrir a “lei da força” entre duas correntes. Não precisamos entrar aqui em detalhes quantitativos, excepto para notar que a força que se estabelece entre as correntes pode ser usada para medir o valor da intensidade da corrente. De facto, a força magnética que se estabelece entre correntes é, actualmente, a quantidade preferida para *definir* a unidade de intensidade de corrente. Chama-se a esta unidade o *ampère*, como se mencionou na Secção 14.3. Define-se um ampère como a quantidade de corrente que passa em cada um de dois fios rectilíneos e paralelos, colocados à distância de um metro e que produz uma força com o valor de  $2 \times 10^{-7}$  newtons actuando sobre eles.



Réplica da balança para medir correntes concebida por Ampère. A parte essencial é constituída por um fio horizontal fixo (em primeiro plano) e por um outro fio mais curto, colocado logo atrás do primeiro e preso a um suporte que gira sobre gonzos. Produz-se corrente em ambos os fios e mede-se a força que se estabelece entre eles.

**Q27.** Qual foi a ideia de Ampère?

### Resumo das Unidades da Electricidade

QUANTIDADE	SÍMBOLO	UNIDADE
Intensidade de Corrente	$I$	O <i>Ampère</i> é a quarta unidade fundamental do sistema MKSA (metro, quilograma, segundo, ampère). Este é actualmente o sistema mais usado pelos físicos. Em relação à definição, veja o último parágrafo desta secção.
Carga	$Q$	O <i>Coulomb</i> define-se como sendo a quantidade de carga que se desloca durante um segundo, quando a intensidade da corrente é de 1 ampère.
Diferença de Potencial	$V$	O <i>Volt</i> define-se como sendo a diferença de potencial que se estabelece entre dois pontos, quando se realiza o trabalho de um joule para transportar a carga de 1 coulomb de um ponto para outro.

QUANTIDADE	SÍMBOLO	UNIDADE
Potência Eléctrica	$P$	O <i>Watt</i> define-se como sendo a taxa de fluxo de energia (trabalho realizado por segundo, ou "potência") que corresponde a 1 joule por segundo. A intensidade de corrente de 1 ampère devida a uma diferença de potencial de 1 volt corresponde, portanto, à potência de 1 watt. O kilowatt é igual a 1000 watt.
Trabalho	$W$	O <i>Kilowatt-hora</i> define-se como sendo a quantidade de energia dispendida (trabalho realizado) quando se utiliza a potência de 1 kilowatt durante 1 hora. É igual a 3600 000 joule (1000 joules/seg. $\times$ 3600 seg.)
Resistência	$R$	O <i>Ohm</i> define-se como sendo a resistência de um material que permite a passagem de uma intensidade de corrente de 1 ampère quando a diferença de potencial é de 1 volt.
Campo Eléctrico	$\vec{E}$	Pode exprimir-se o campo eléctrico quer em termos de força que se exerce sobre uma unidade de carga (newton/coulomb), quer em termos da taxa à qual a diferença de potencial eléctrico aumenta (volt/m).
Campo Magnético	$\vec{B}$	O módulo do campo magnético define-se em função da força que se exerce, por unidade de comprimento (expressa em metro) num condutor onde passa a corrente de 1 ampère. As unidades são, portanto, newton/ampère $\times$ metro. A unidade usual é o <i>Gauss</i> , que é igual a $10^{-4}$ newton/ampère $\times$ metro ou $10^{-4}$ Tesla.

### 14.13 Campos magnéticos e cargas em movimento

Nas duas últimas secções discutimos a interacção existente entre correntes eléctricas e ímanes e também a interacção entre correntes eléctricas. O conceito de *campo magnético* simplifica enormemente a descrição destes fenómenos.

Como vimos ao estudar a lei de Coulomb, os corpos electricamente carregados exercem forças uns sobre os outros. Quando estes corpos electricamente carregados se encontram em repouso, dizemos que as forças que se estabelecem são forças "eléctricas", ou forças de Coulomb. Neste caso, imaginamos "campos eléctricos" que actuam como fontes destas forças. Por outro lado, quando estes corpos estão em movimento (como no caso dos dois fios paralelos por onde passam correntes eléctricas), aparecem novas forças, para além das forças eléctricas já existentes. Chamamos a essas forças forças "magnéticas" e consideramos que elas são devidas aos "campos magnéticos" criados pelas cargas em movimento.

A interacção magnética entre corpos electricamente carregados não é tão simples como a interacção eléctrica. Lembremo-nos da descrição da experiência de Oersted. A direcção da força que uma corrente exerce sobre um íman é simultaneamente perpendicular à direcção da corrente e à linha que une o íman e a corrente. De momento, vamos, no entanto, ignorar as forças que se exercem sobre os condutores por onde passa uma corrente eléctrica. Isto porque, em última análise, acreditamos que a força que se exerce num fio é devida às forças que actuam nas cargas individuais que nele se movem. Vamos ver então como é que estas cargas individuais se comportam quando se movem livremente num campo magnético exterior. Depois de termos estabelecido algumas regras sim-

ples para o comportamento das partículas livres electricamente carregadas, podemos retomar o caso dos fios no capítulo seguinte. Aí irá ver-se como estas regras simples são suficientes para explicar o funcionamento dos geradores e dos motores eléctricos. (Também vamos ver como estas invenções transformaram a Civilização Ocidental.)

As regras que se sintetizam no resto desta secção aprendem-se melhor no laboratório. Para isso, precisamos apenas de um íman e de um aparelho que produza um feixe de partículas carregados — por exemplo, um “canhão electrónico” descrito na Secção 14.8. (As instruções sobre o funcionamento deste aparelho vêm descritas na experiência *Tubo de Feixes Electrónicos* no Manual.)

*Força que se exerce sobre um corpo carregado em movimento.* Consideremos que temos um campo magnético  $\vec{B}$ , suficientemente uniforme, produzido por um íman ou por uma corrente que percorre um solenóide. Como é que este campo exterior actua sobre um corpo carregado e em movimento? Determina-se experimentalmente que a carga fica submetida a uma força que depende de três quantidades: (1) a carga  $q$  do corpo; (2) da velocidade  $v$  do corpo; (3) da intensidade do campo magnético exterior  $\vec{B}$ , em que a carga se move.

A força não depende apenas do *módulo* da velocidade, mas também depende da sua *direcção* e *sentido*. Se o corpo se move numa direcção *perpendicular* à do campo  $\vec{B}$ , o módulo da força é proporcional a cada uma dessas quantidades, ou seja,

$$F \propto qvB$$

que também podemos escrever

$$F = KqvB$$

onde  $K$  é uma constante de proporcionalidade que depende das unidades escolhidas para  $F$ ,  $q$ ,  $v$  e  $B$ .

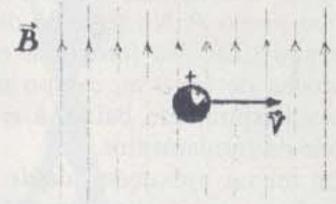
Por outro lado, se a carga se move numa direcção *paralela* à do campo  $\vec{B}$ , não há nenhuma força a actuar! Para todas as outras direcções do movimento, o módulo da força tem um valor compreendido entre o valor máximo e zero. De facto, a força é proporcional à componente de velocidade perpendicular à direcção do campo,  $v_{\perp}$ . Podemos então escrever uma expressão mais geral para a força

$$F \propto qv_{\perp}B$$

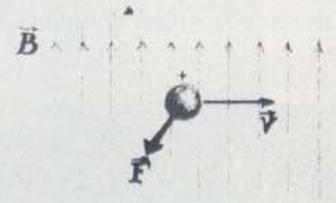
ou 
$$F = Kqv_{\perp}B$$

onde  $K$  é igual à constante anterior. *A direcção da força é sempre perpendicular à direcção do campo e à direcção do movimento do corpo electricamente carregado.*

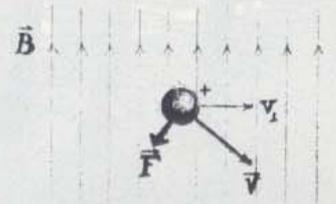
Pode utilizar-se a força que um campo magnético exterior exerce sobre uma partícula carregada em movimento para *definir* a unidade do campo magnético  $\vec{B}$ . Para isso fazemos a constante proporcionalidade  $K$  igual a 1. Esta diferença convém-nos aqui, dado que estamos sobretudo a tratar do modo como os campos magnéticos actuam sobre as cargas em movimento (e não das forças que se estabelecem entre ímanes).



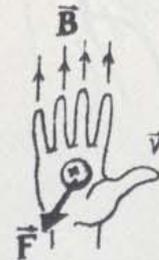
(a) Quando  $q$  se move com uma velocidade  $\vec{v}$  perpendicular  $\vec{B}$ , verificamos que



(b) Existe uma força  $\vec{F}$ , como a que se mostra, proporcional  $q$ ,  $v$  e  $B$ .



(c) Se  $\vec{v}$  não é  $\perp$  a  $\vec{B}$ , há uma força mais pequena, proporcional não a  $v$ , mas a  $v_{\perp}$ .



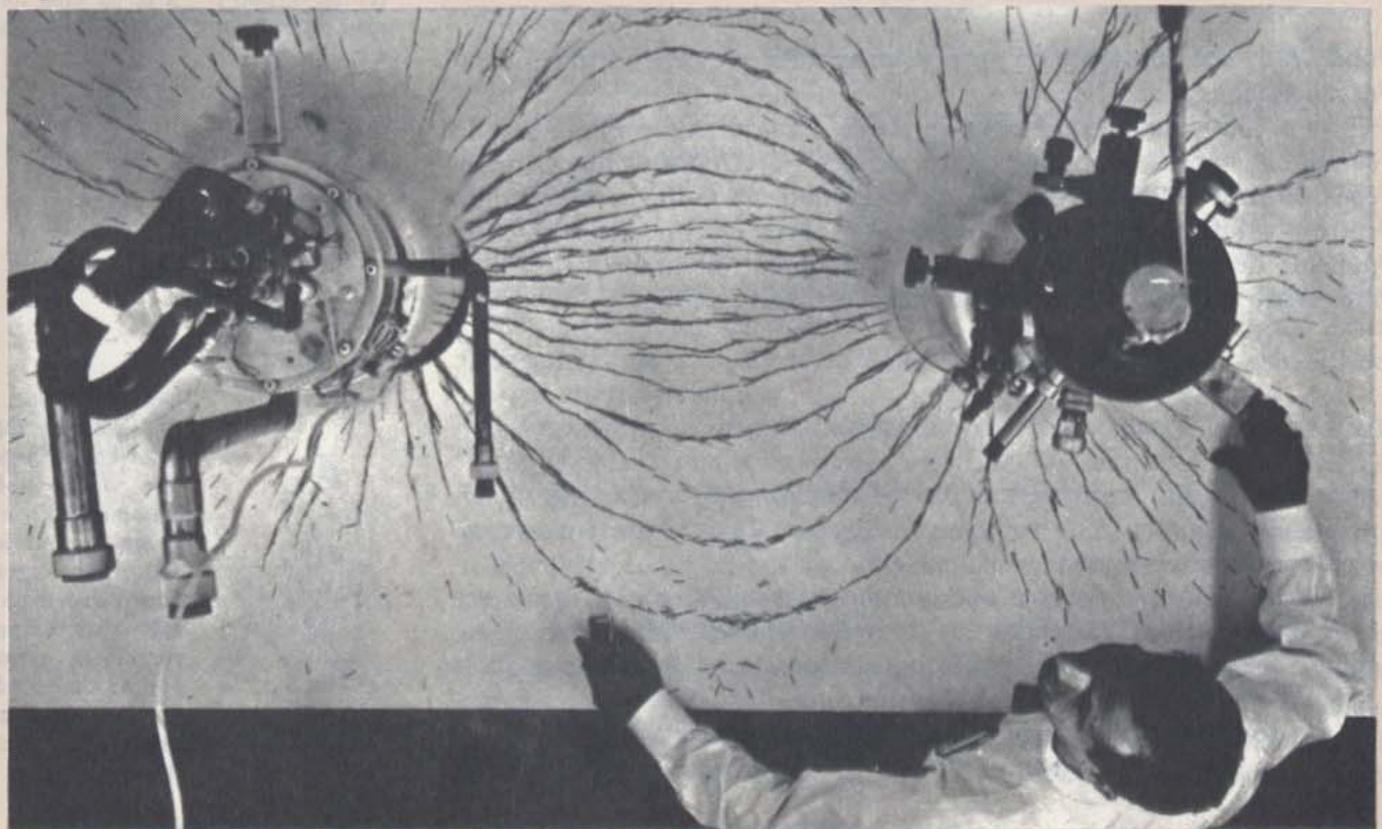
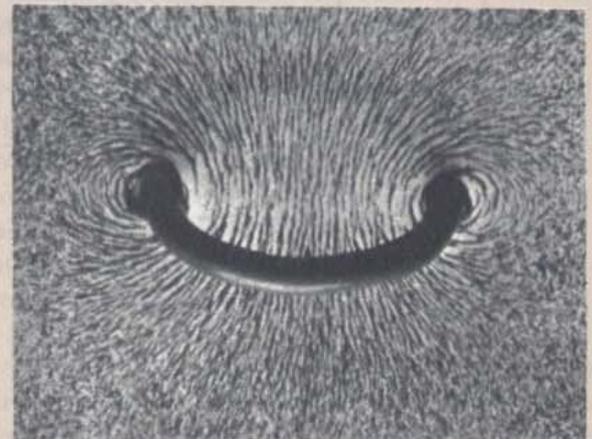
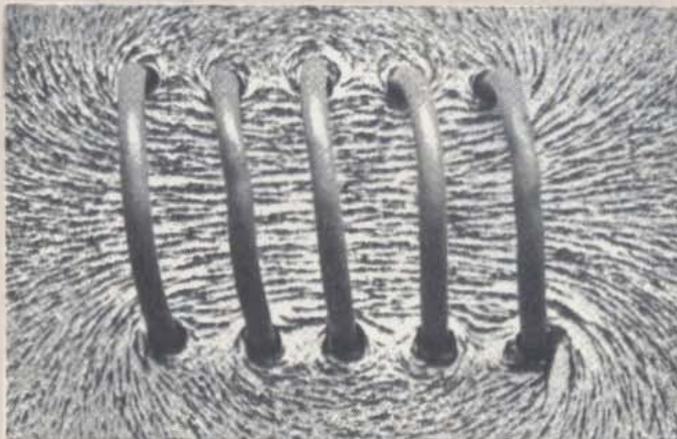
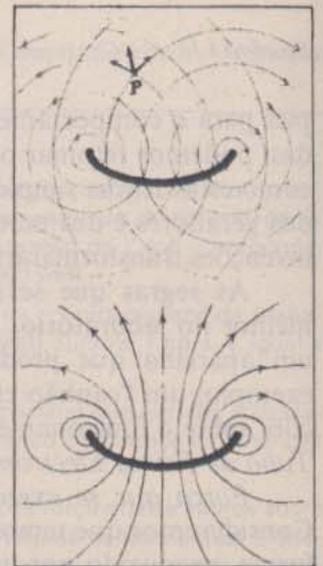
Uma regra útil: se os dedos da mão estiverem alinhados com  $\vec{B}$  e o polegar no sentido de  $\vec{v}$ ,  $\vec{F}$  terá um sentido dado pelo movimento que se dá à mão para empurrar. Para cargas positivas, use a mão direita e para cargas negativas, a mão esquerda.

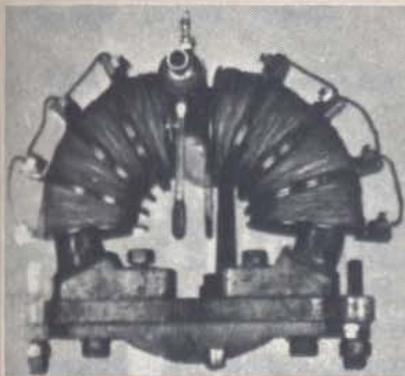
## Ímanes e Campos

Os diagramas à direita representam o campo magnético criado pela corrente que passa numa esfera metálica. No primeiro diagrama, estão desenhadas algumas linhas de força produzidas separadamente, pelos lados opostos da espira. Exemplifica-se também o modo como se adicionam dois campos num ponto *P*. No segundo diagrama aparecem algumas linhas de força do campo total. Na fotografia em baixo, à direita, temos o alinhamento da limalha de ferro no campo magnético produzido pela corrente que passa numa espira. Em baixo, à esquerda, temos o campo produzido por uma série de enrolamentos.

Em muitas aplicações, desde as campainhas das portas até aos ciclotrões, produzem-se campos magnéticos por meio de bobinas enroladas em volta de núcleos de ferro. Quando se faz passar uma corrente, o núcleo da bobina fica magnetizado e aumenta a intensidade do campo criado pela bobina de um factor  $10^2$  ou  $10^3$ .

Chamam-se a estes aparelhos *electroímans*.

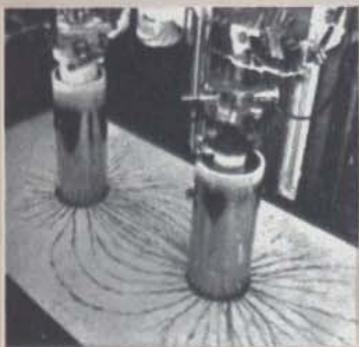




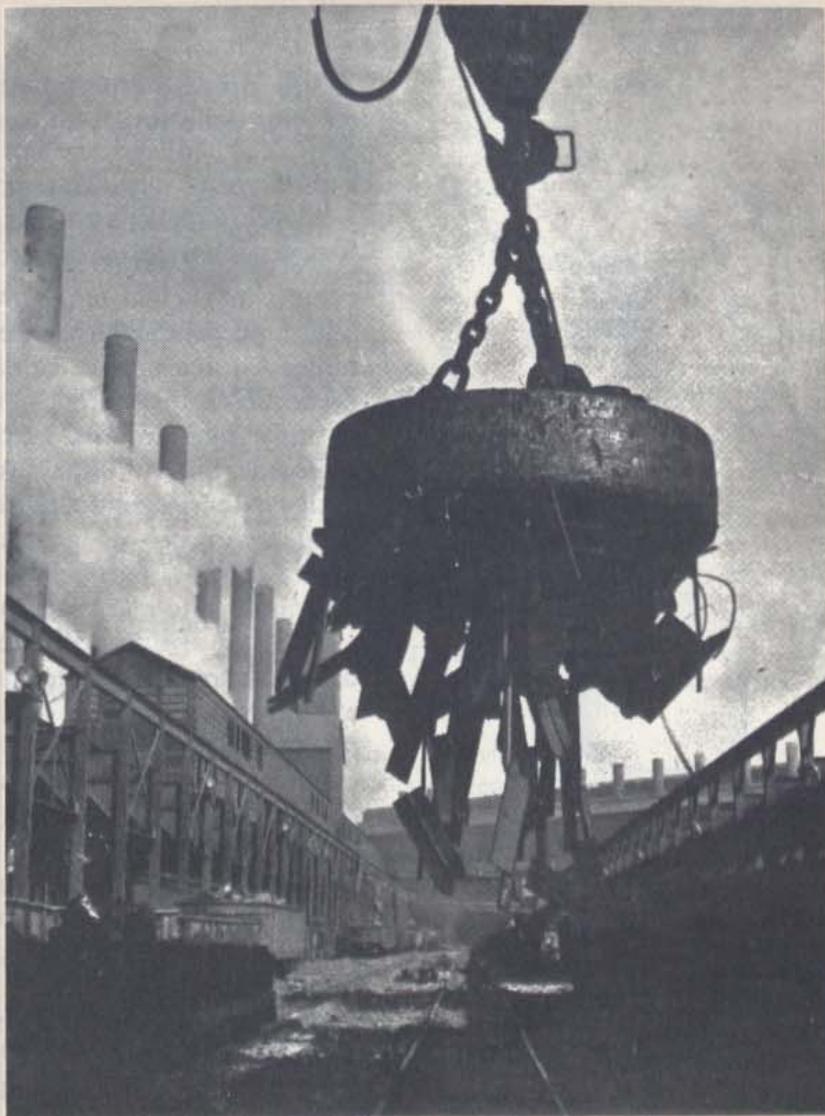
Utilizou-se este electroímã no princípio deste século para deflectir um feixe de átomos carregados que era enviado através do tubo que se vê em cima, colocado entre duas bobinas.



Electroímã moderno usado na investigação quando são necessários campos uniformes e de intensidades elevadas.



Nas duas figuras à esquerda, vemos pregos de ferro alinhados num campo magnético forte, produzido por correntes elevadas que passam em bobinas supercondutoras mantidas, por meio de hélio líquido, a  $4^{\circ}$  acima do zero absoluto.



O primeiro electroímã, inventado por William Sturgeon em Inglaterra no ano de 1824, podia levantar um peso de quatro quilogramas. Em 1832, Joseph Henry construiu um electroímã em Princeton que podia aguentar um peso de 1,6 toneladas. Os actuais electroímãs (ver acima) podem levantar normalmente 23 toneladas de ferro e são muito utilizados na indústria, nomeadamente, para seleccionar ou carregar bocados de sucata e metal.

Assim, no caso especial em que  $\vec{B}$  e  $\vec{v}$  são *perpendiculares*, o módulo da força deflectora é simplesmente

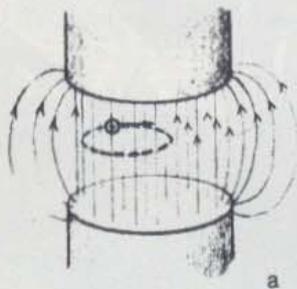
$$F = qvB$$

*Trajectória de um corpo carregado num campo magnético.*

A força que actua sobre um corpo carregado que se desloca num campo magnético tem sempre um sentido para “o lado de fora”, ou seja, é perpendicular à direcção do movimento do corpo em cada instante. A força magnética não altera, portanto, o módulo da velocidade do corpo carregado, mas muda a sua *direcção*. Se um corpo carregado se move segundo uma direcção perpendicular à de um campo magnético uniforme, haverá uma atracção constante para os lados. O corpo deslocar-se-á segundo numa trajectória circular, num plano perpendicular à direcção do campo magnético. Se o campo  $B$  for suficientemente forte, a partícula fica “presa” numa órbita circular (como no desenho *a* feito na margem).

GE 14.29

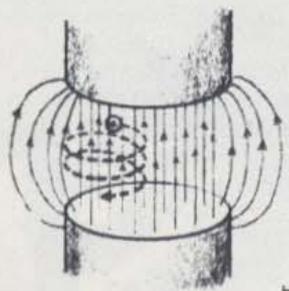
GE 14.30



a

O que é que acontece se a velocidade do corpo carregado tiver uma componente paralela à direcção do campo, não sendo, no entanto, exactamente paralela a este? O corpo será ainda deflectido segundo uma trajectória curvilínea, mas a componente do seu movimento paralela ao campo não será perturbada. A partícula descreverá então uma trajectória em espiral (helicoidal) (como no desenho *b* feito à margem). Se o corpo se mover inicialmente numa direcção paralela à do campo, não há qualquer força deflectora, visto que  $v_{\perp}$  é zero.

14.31



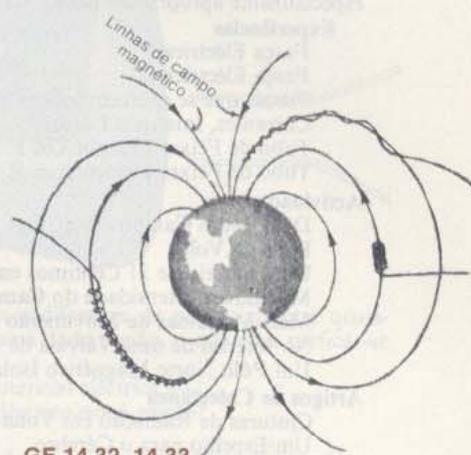
b

Discutiremos alguns exemplos importantes da deflecção das partículas carregadas por um campo magnético na Unidade 5 e na Unidade Suplementar — *O Núcleo*. Estes exemplos incluem os aceleradores de partículas e as câmaras de bolhas. Aqui, vamos mencionar um exemplo do movimento “em espiral”: as cinturas de radiação de Van Allen. Um feixe de partículas carregadas provenientes sobretudo do Sol, mas vindas também de todo o espaço exterior, passa continuamente pela Terra. Muitas destas partículas são deflectidas pelo campo magnético terrestre, passando a ter trajectórias em espiral e ficando “apanhadas” pelo campo de Terra. Dá-se o nome de cintura de Van Allen a estas zonas extensas onde estas partículas que ficam presas pelo campo magnético terrestre se deslocam rapidamente. Por vezes, partículas destas zonas conseguem aproximar-se dos pólos magnéticos da Terra. Quando atingem a atmosfera, excitam os átomos dos gases aí existentes que produzem radiação luminosa. Esta é a causa das auroras boreais (dos hemisférios Norte e Sul).

Neste capítulo, discutimos a interacção entre as correntes eléctricas e os ímanes e entre campos magnéticos e partículas carregadas. Numa primeira leitura, muitos alunos consideram este tópico uma parte muito abstracta da Física pura. No entanto, o estudo destas interacções tem tido efeitos sociais e práticos em todo o mundo civilizado. Veremos alguns destes efeitos nos dois capítulos seguintes.

- Q28.** Qual das seguintes grandezas afecta o *módulo* da força deflectora que se exerce sobre uma partícula carregada em movimento?  
(a) a componente da velocidade paralela ao campo magnético

- (b) a componente da velocidade normal ao  $\vec{B}$ .
  - (d) o módulo da carga
  - (e) o sinal da carga
- Q29.** Qual dos itens da pergunta anterior afecta a direcção e sentido da força deflectora que actua sobre a partícula carregada?
- Q30.** Porque é que a força deflectora que actua numa partícula carregada em movimento não altera o módulo da velocidade dessa partícula? Esta força realiza trabalho sobre a partícula em qualquer circunstância?
- Q31.** Quais as diferenças existentes entre as forças deflectoras que actuam sobre um objecto carregado devida a acção (a) da gravidade, (b) de um campo eléctrico, (c) de um campo magnético?



GE 14.32, 14.33

Esquema simplificado das diferentes trajetórias que as partículas carregadas têm no campo magnético da Terra. As cinturas de radiação de Van Allen são regiões onde estas partículas são apanhadas.

O físico americano James A. Van Allen dirigiu o projecto dos instrumentos que foram no primeiro satélite americano, Explorer I. Veja o artigo de sua autoria 'Radiation Bells Around the Earth' na *Colectânea 4*.



Fotografia da Aurora Boreal no Alasca. A luminosidade é produzida quando a atmosfera de regiões mais elevadas é excitada por partículas carregadas apanhadas pelo campo magnético terrestre.

14.1 Os materiais de aprendizagem do Projecto de Física, especialmente apropriados para o Capítulo 14, incluem:

**Experiências**

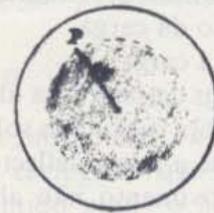
- Força Eléctrica I
- Força Eléctrica II
- Forças que se exercem sobre Correntes Eléctricas
- Correntes, Ímanes e Forças
- Tubo de Feixes Electrónicos I
- Tubo de Feixes Electrónicos II

**Actividades**

- Detectando Campos Eléctricos
- Pilha de Volta
- Uma Bateria de 11 Cêntimos em moeda americana
- Medindo a Intensidade do Campo Magnético
- Mais Máquinas de Movimento Perpétuo
- No Interior de uma Válvula de Rádio
- Um Pólo Norte Magnético Isolado

**Artigos de Colectânea**

- Cinturas de Radiação em Volta da Terra
- Um Espelho para o Cérebro



14.2 De quanto é preciso alterar a distância entre dois objectos carregados para manter constante a força exercida sobre eles, se também

- a) triplicar a carga de cada um?
- b) reduzir a metade a carga de cada um?
- c) duplicar a carga de um e reduzir a metade da carga do outro?

14.3 A que distância devem colocar-se, no ar, duas esferas carregadas, tendo cada uma a carga de 1 coulomb, para que a força exercida sobre elas seja de 1 newton?

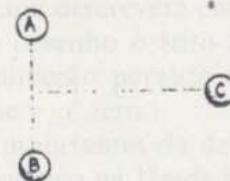
14.4 Se a indução electrostática não implica a adição ou subtracção de partículas carregadas, mas, em vez disso, corresponde apenas à redistribuição de partículas carregadas, como é que a atracção pode resultar da indução?

14.5 Toca-se com um dedo numa bola de pingue-pongue revestida de carvão (e, portanto, condutora), que está suspensa de um suporte, em forma de anel, por um fio de nylon (não condutor), para remover qualquer carga que ela possa ter. Depois disso, aproxima-se uma haste carregada negativamente mas *sem tocar* a bola. Enquanto se segura a haste nesta posição, toca-se, momentaneamente, na bola com um dedo; em seguida, remove-se a haste. A bola estará agora carregada? Como poderia testar se estava ou não? Se pensa que a bola está carregada, faça esboços simples para mostrar como se tornou carregada, indicando, claramente, com que espécie de carga ficou.

- 14.6
- a) Calcule a intensidade do campo gravítico da Lua num ponto da sua superfície. Considere que a massa da Lua é  $7,3 \times 10^{22}$  Kg e que o raio é  $1,74 \times 10^6$  m.
  - b) Calcule o campo gravítico num ponto perto da superfície de uma estrela pequena mas extremamente densa, cujo raio é  $1,5 \times 10^6$  m e cuja densidade é cerca de  $10^{22}$  Kg/m<sup>3</sup>.
  - c) O campo gravítico de qualquer camada esférica uniforme é nulo no interior da camada. Use este princípio juntamente com a lei de atracção universal de Newton e com a expressão que dá o volume de uma esfera ( $\frac{4}{3} \pi r^3$ ), para saber de que modo o campo gravítico, num ponto *P* no interior de um planeta esférico sólido, depende da distância *r* medida a partir do centro. (Considere que a densidade do planeta é uniforme.)

14.7 Diz-se que um campo eléctrico exerce uma força sobre uma partícula carregada colocada no campo. Que mais se pode dizer sobre esta situação, considerando o facto de a terceira lei de Newton ser também válida neste caso?

14.8 As três esferas *A*, *B* e *C* encontram-se fixas nas posições indicadas. Determine a direcção e sentido da força eléctrica resultante que se exerce sobre *C*, que está carregada positivamente, se

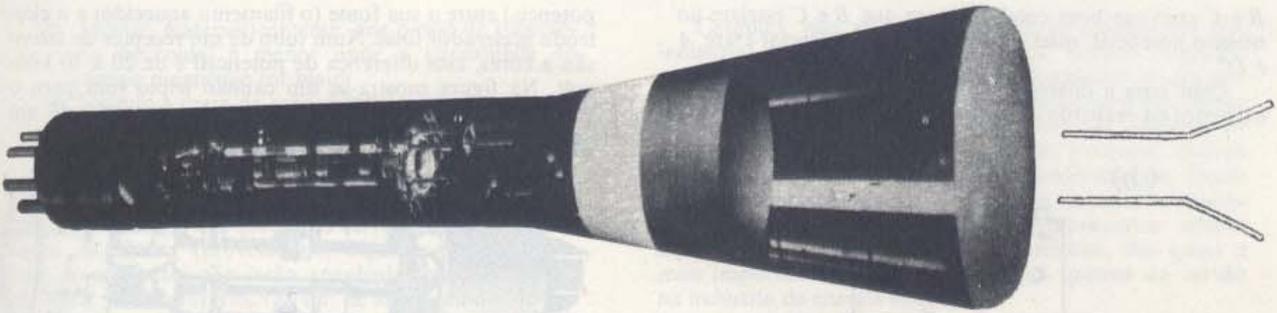


- a) *A* e *B* tiverem cargas positivas iguais.
- b) *A* e *B* tiverem cargas de módulo igual, sendo a carga em *B* negativa e em *A* positiva.

14.9 À superfície da Terra existe um campo eléctrico com a intensidade aproximada de 100 N/coulomb dirigido para o centro.

- a) Qual é a carga resultante na Terra? (Como Newton mostrou para as forças gravíticas, o campo de uma esfera, uniformemente carregada, pode ser calculado supondo que toda a carga está concentrada no seu centro.)
- b) Dado que a Terra é um condutor, a maior parte da carga resultante encontra-se na superfície. Qual é, aproximadamente, a carga média, por metro quadrado de superfície? Comparada com as cargas usuais como, por exemplo, aquelas que se produzem nos pentes, esta é grande ou pequena?

14.10 Nos osciloscópios, o feixe de electrões, à medida que passa através de dois pratos com cargas de sinais contrários, vai sendo deflectido. Como se vê na fotografia, cada par de placas tem uma forma algo semelhante à do desenho que está à direita da fotografia. Faça um esboço aproximado de como seriam as linhas de força que existem no campo eléctrico que se estabelece entre um par destes pratos carregados com cargas de sinal contrário.



- 14.11 a) Diga como é que o facto de a bola ter uma carga não nula se ajusta com a Lei de Conservação da Carga Eléctrica.  
 b) Na experiência descrita para medir a carga do electrão, o atrito do ar que actua sobre a gota de óleo em movimento é uma ajuda ou um obstáculo? Justifique, resumidamente, a sua resposta.

14.12 O valor da carga do electrão é  $1,6 \times 10^{-19}$  coulomb. Quantos electrões são precisos para se obter um coulomb de carga?

14.13 Calcule a razão entre a força electrostática e a força gravítica para dois electrões separados por uma distância de  $10^{-10}$  metro. (A massa do electrão é, aproximadamente,  $10^{-30}$  kg; lembre-se que:  
 $G = 6,7 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 / \text{Kg}^2$ )

14.14 Dado que as forças eléctricas são, nalguns aspectos, semelhantes às forças gravíticas, é razoável imaginar que partículas carregadas como, por exemplo, o electrão, podem mover-se em órbitas estáveis, em torno de outras partículas carregadas. Logo, assim como a Terra é um "satélite gravítico" do Sol, o electrão seria um "satélite eléctrico" de uma partícula carregada positivamente.

Se esta partícula tem um massa muito maior que a do electrão, podemos considerar que ela está fixa no centro da órbita do electrão. Suponha que a partícula tem uma carga de módulo igual à carga do electrão, e que o electrão se move em torno dela numa órbita circular.

- a) A força centrípeta que actua no electrão em movimento é criada pela força eléctrica (coulomb) entre o electrão e a partícula carregada positivamente. Escreva uma equação que represente esta afirmação. A partir desta equação, deduza uma outra que mostre como a energia cinética do electrão está relacionada com a distância entre este e a partícula carregada positivamente.  
 b) Calcule a energia cinética do electrão se o raio da sua órbita fosse  $10^{-10}$  metro.  
 c) Qual seria o módulo da velocidade do electrão se este tivesse a energia cinética que calculou na alínea b)? (A massa do electrão é, aproximadamente,  $10^{-30}$  Kg).

14.15 Pode mostrar-se que um pente de ebonite ou de plástico friccionado com um pano de lã fica, muitas vezes, carregado. Porque é que um pente metálico não mostra, tão prontamente, uma carga produzida por fricção, a não ser que seja agarrado com uma pega isoladora?

14.16 Qual a diferença de potencial entre dois pontos num campo eléctrico, se o trabalho realizado contra a força eléctrica, para mover uma carga de  $2 \times 10^{-5}$  coulomb de um ponto para o outro, for  $6 \times 10^{-4}$  joule?

14.17 Se não houver diferença de potencial entre quaisquer dois pontos numa dada região, o que deve verificar-se quanto  
 a) à energia potencial eléctrica e  
 b) ao campo eléctrico nessa região?

14.18 A intensidade do campo eléctrico  $\vec{E}$ , pode ser medida em qualquer destas duas unidades equivalentes: newton por coulomb e volt por metro. Usando as definições de volt e joule, mostre que, efectivamente, newton/coulomb é o mesmo que volt/metro. Pode justificar, por palavras, esta equivalência?

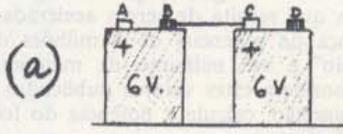
14.19 Sabe-se, experimentalmente, que se a distância entre as superfícies de duas esferas condutoras for de, aproximadamente, 1 cm, é necessária uma diferença de potencial eléctrico de cerca de 30 000 volt entre elas para produzir uma faísca no ar. (Quanto mais elevada for a tensão acima dos 30 000 volt, mais forte será a faísca para esta distância intercalar.) Qual é a intensidade mínima do campo eléctrico (no intervalo entre as superfícies) necessária para produzir faísca?

14.20 O intervalo entre os eléctrodos de uma vela de um automóvel mede cerca de 1 mm. Se a tensão produzida entre eles pela bobina de ignição for de, aproximadamente, 10 000 volt, qual é a intensidade aproximada do campo eléctrico nesse intervalo?



14.21 Podemos pensar que uma bateria eléctrica "bombeia" cargas através dos seus terminais até que a diferença de potencial eléctrico que se estabelece entre eles, atinja um valor tal que as que já aí estão concentradas repõem as recém-chegadas do interior da bateria. Normalmente, este valor é muito próximo do valor da tensão indicado na bateria.

Que aconteceria se ligássemos duas ou mais baterias em série? Por exemplo, a bateria da direita mantém o terminal C a um potencial eléctrico 6 volt superior ao do terminal D.

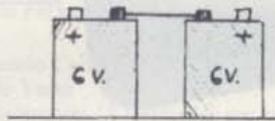


É isto o que o sinal + colocado por baixo de C indica; o seu potencial eléctrico é maior que o outro terminal da mesma bateria. A bateria à esquerda mantém o terminal A a um potencial 6 volt superior ao terminal B. Se ligarmos

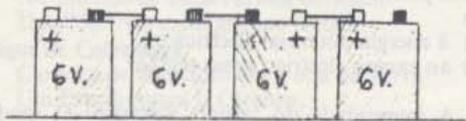
*B* e *C* com um bom condutor para que *B* e *C* estejam ao mesmo potencial, qual é a diferença de potencial entre *A* e *D*?

Qual seria a diferença de potencial entre os terminais extremos da esquerda e da direita nos esquemas seguintes?

(b)



(c)



- 14.22 a) Qual a energia cinética que um electrão adquirirá, dentro de um tubo onde se faz vácuo, se for acelerado por meio de uma diferença de potencial de 100 volt? Dê a sua resposta em electrão volt e em joule. (O valor da carga do electrão é  $1,6 \times 10^{-19}$  coulomb.)  
 b) Qual o módulo da velocidade que o electrão adquire devido à aceleração? (A massa do electrão é  $10^{-30}$  Kg.)

14.23 Suponha que se ligam três resistências a uma bateria e a um amperímetro. Na tabela abaixo dão-se duas das três quantidades relacionadas pela lei de Ohm para três casos distintos. Complete a tabela.

	Tensão	Corrente	Resistência
a)	2 volt		0,5 ohm
b)	10 volt	2 amp	
c)		3 amp	5 ohm

14.24 O campo eléctrico à superfície da Terra pode aumentar até cerca de  $10^4$  volt/metro, quando há nuvens de trovoadas.

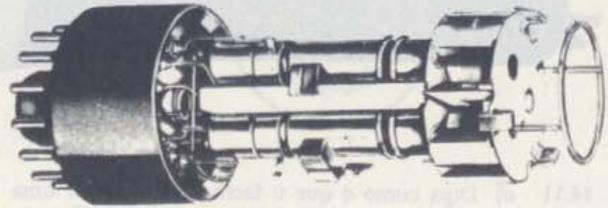
- a) aproximadamente, qual será a diferença de potencial entre a Terra e a nuvem que este facto implica?  
 b) Um conjunto de relâmpagos pode transferir o equivalente a 50 coulomb de carga. Que quantidade de energia pode ser libertada, aproximadamente, numa tal descarga?

14.25 A "International Physics Co.'s Pulsed Radiation Facility" está, actualmente, a produzir feixes electrónicos extremamente intensos (40000 amp/4 Mev) como uma operação de rotina. Este feixe pode depositar para cima de 5000 joule de energia em 30 nanosegundo. (Anúncio recente que apareceu na revista "Phisics Today".)

O termo "4 Mev" significa que as cargas no feixe têm uma energia que resulta de serem aceleradas através de uma diferença de potencial de 4 milhões de volt. Um "nanosegundo" é um milésimo de milionésimo de um segundo. Considera estes valores publicados consistentes entre si? (Sugestão: calcule a potência do feixe por dois processos diferentes.)

14.26 Um "canhão" electrónico contém vários eléctrodos mantidos a tensões diferentes para acelerar e focar o feixe electrónico. No entanto, a energia dos electrões do feixe que emergem do canhão só depende da diferença de

potencial entre a sua fonte (o filamento aquecido) e o eléctrodo acelerador final. Num tubo de um receptor de televisão a cores, esta diferença de potencial é de 20 a 30 kilovolt. Na figura mostra-se um canhão triplo (um para o vermelho, um para o azul e outro para o verde) de um aparelho de televisão a cores.

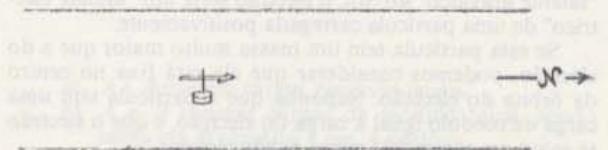


Suponha o feixe num tubo de TV acelerado através de 20000 volt e que tem uma corrente média da ordem de  $10^{-3}$  A. Qual é, aproximadamente, a potência que é dissipada no écran do tubo?

14.27 Calcule a potência dissipada em cada um dos três elementos do circuito da pergunta 14.23.

14.28 Um aluno, tentando mostrar o efeito magnético de uma corrente sobre uma bússola de bolso, fez deslizar, lentamente, a bússola ao longo da cabeceira da mesa na direcção de um fio estendido sobre a mesa e percorrido por uma corrente constante. Ficou surpreendido pela ausência de qualquer efeito de rotação observável na agulha da bússola. Como explicaria estas observações?

14.29 O desenho mostra dois fios paralelos e longos, situados num plano vertical com a direcção Norte-Sul (aqui a visão é orientada para Oeste). Coloca-se uma bússola horizontalmente a meia distância entre dois fios. Quando o fio superior é percorrido por uma corrente de intensidade 1 amp, a agulha aponta NW.



- a) Qual a direcção desta corrente de um ampère?  
 b) Que corrente (valor em módulo e direcção) deveria haver no fio inferior para que a bússola voltasse à sua posição original?

14.30 A força deflectora que se exerce sobre um partícula carregada, movendo-se perpendicularmente a um campo magnético, é sempre perpendicular ao vector velocidade da partícula. Logo, em qualquer momento, é dirigido para um único ponto — o centro da trajectória circular da partícula.

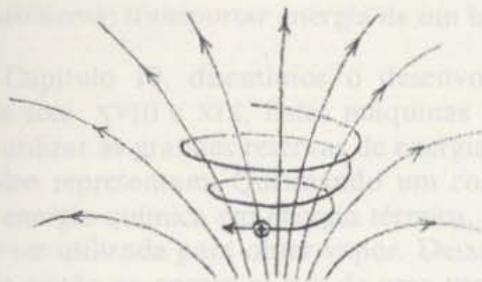
- a) Consequentemente, a força magnética (dada pela expressão  $qvB$ ) cria uma força centrípeta (que é sempre dada por  $mv^2/R$ ). Mostre que o raio do círculo  $R$  é directamente proporcional ao momento da partícula  $mv$ .  
 b) De que informação necessaria para determinar a razão entre a carga e a massa da partícula?

14.31 Reportando-se à informação dada no último problema:

- a) Descubra uma equação para o período do momento circular de uma partícula carregada num campo magnético uniforme.

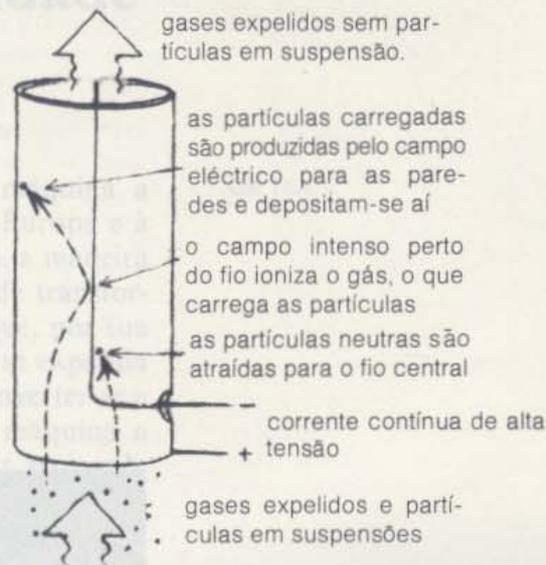
- b) Mostre, matematicamente, que o raio da trajectória helicoidal é menor onde a intensidade do campo magnético for maior.
- c) Usando a regra da mão direita, mostre que o sentido da força deflectora exercida sobre a partícula se opõe ao movimento da partícula na região onde o campo é mais intenso.

**14.32** Se a energia das partículas carregadas que se aproximam da Terra (provenientes, digamos, do Sol) for muito grande, estas não serão apanhadas nas cinturas de Van Allen. Pelo contrário, vão ser, de algum modo, deflectidas continuando para além ou através da Terra. As linhas de força do campo magnético terrestre encontram-se orientadas no sentido do Pólo Norte terrestre. Se colocar, na terra, um detector de partículas carregadas positivamente, espera detectar mais partículas orientando-o, ligeiramente, para Leste ou, ligeiramente, para Oeste?



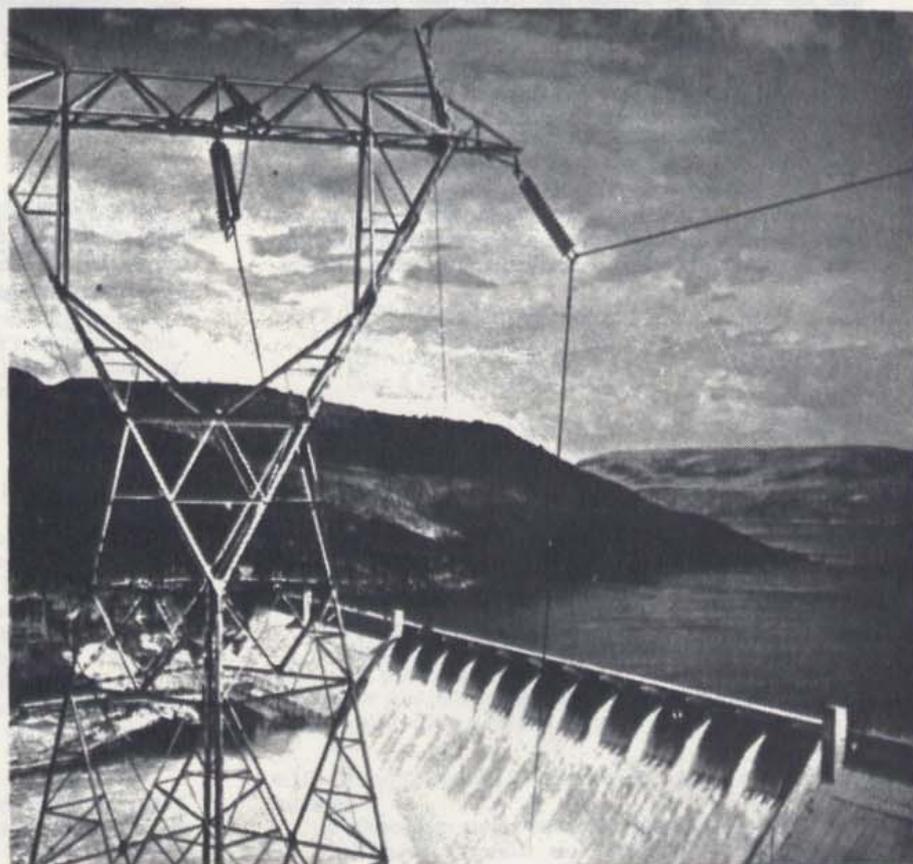
**14.33** Na obra "De Magnete", William Gilbert referiu que um bocado de âmbar, que tivesse sido friccionado, atraía o fumo que se elevava de uma vela recentemente apagada. As partículas do fumo ficavam carregadas por passarem através dos gases ionizados da chama. Depois do desenvolvimento das máquinas electrostáticas, realizaram-se experiências sobre descargas (designadas por descarga de coroa) obtidas com eléctrodos afiados ou ponteados como agulhas. Em 1824, descobriu-se que fazendo passar uma descarga através de um jarro cheio de névoa, se dissipava essa névoa. Nestas experiências, a descarga de coroa ionizava o gás que, por sua vez, carregava e precipitava as gotas de água do nevoeiro ou as partículas do fumo.

Contudo, não apareceu nenhum precipitado de tipo industrial até que Frederick Cottrell, usando conjuntamente um gerador eléctrico, um transformador de alta tensão e um rectificador mecânico, desenvolvidos no fim do séc. XIX, conseguiu não só uma fonte de descarga de coroa, mas também uma diferença de potencial elevada entre o eléctrodo de descarga e o eléctrodo colector. Desde então, engenheiros electrotécnicos têm construído muitos "precipitadores electrostáticos" para concentrar muitas espécies de matéria dividida em partículas, das quais a mais importante é a cinza que voa da queima do carvão na indústria de energia eléctrica.



Quais são as implicações deste desenvolvimento tecnológico em termos de controlo da população? Estes precipitadores são largamente usados pela indústria na sua comunidade? Se não, porquê?

15.1 O problema: transportar energia de um local para outro	77
15.2 O primeiro motor eléctrico de Faraday	78
15.3 A descoberta da indução electromagnética	79
15.4 Produção de electricidade utilizando campos magnéticos: o dínamo	84
15.5 O motor eléctrico	86
15.6 A lâmpada eléctrica	89
15.7 Corrente alterna, corrente contínua e a Central Eléctrica das Cataratas do Niagara	93
15.8 A electricidade e a sociedade	97



## CAPÍTULO QUINZE

# Faraday e a Era da Electricidade

### 15.1 O problema: transportar energia de um local para outro

No Capítulo 10, discutimos o desenvolvimento da máquina a vapor nos sécs. XVIII e XIX. Estas máquinas permitiram à Europa e à América utilizar as grandes reservas de energia que o carvão, a madeira e o petróleo representam. Queimando um combustível, pode transformar-se a energia química em energia térmica, energia essa que, por sua vez, pode ser utilizada para obter vapor. Deixando que este se expanda contra um pistão ou contra as pás de uma turbina, pode converter-se a energia térmica em energia mecânica. Deste modo, uma máquina a vapor, utilizando o carvão como combustível, pode servir para pôr maquinaria industrial em funcionamento.

Mas as máquinas a vapor tinham dois grandes defeitos. Primeiro, só se podia dispor da energia mecânica em zonas onde as máquinas a vapor estavam localizadas. Segundo, as máquinas a vapor utilizadas eram grandes, quentes e sujas. À medida que aumentava a utilização das máquinas activadas por vapor, os trabalhadores iam sendo amontoados em fábricas e as suas casas iam ficando na sombra de colunas de fumo. Mesmo as locomotivas movidas a vapor, embora úteis como meios de transporte, eram limitadas pelo seu tamanho e peso. Para além disso, contribuíam também para a poluição do ar.

Estes defeitos podiam ser parcialmente ultrapassados com a utilização de uma central de energia de onde se enviaria energia a ser utilizada a uma certa distância. Esta energia podia fazer funcionar máquinas com o tamanho e potência desejados, nos locais mais convenientes. Depois do desenvolvimento da bateria de Volta, muitos cientistas e inventores especulavam sobre a possibilidade de a electricidade poder fornecer meios de distribuição de energia e poder pôr máquinas em funcionamento. Porém, a energia das baterias esgota-se rapidamente, a menos que seja fornecida a um débito pequeno. Era preciso encontrar um processo melhor de gerar correntes eléctricas. Quando se descobriu este processo, todo o estilo de vida nas casas, fábricas, campos, escritórios se modificou completamente. A própria fisionomia das cidades e dos campos ficou alterada.

Neste capítulo, veremos um outro exemplo de como as descobertas no domínio da Física pura deram origem a novas tecnologias. Estas tecnologias revolucionaram e beneficiaram a civilização moderna, embora trouxessem, por outro lado, alguns problemas novos.

GE 15.1



GE 15.2



GE 15.3



Ampère também pressentiu que a electricidade seria capaz de transmitir à distância não só energia como ainda informação.

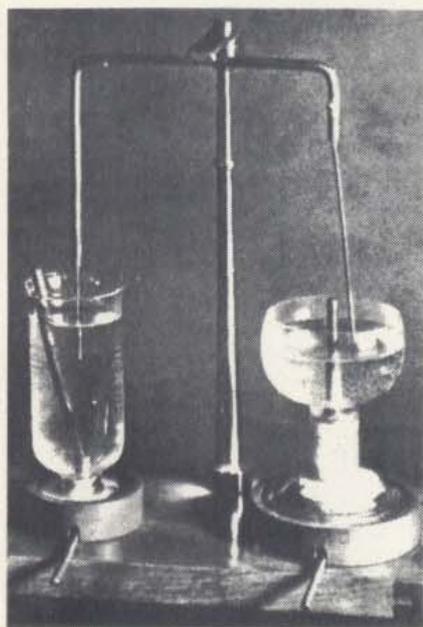
A primeira ideia para a utilização mais vasta da electricidade partiu da descoberta de Oersted de que uma agulha magnética é deflectida pela corrente eléctrica gerada por uma bateria. Dado que uma corrente eléctrica pode exercer força sobre um íman, muitos físicos puseram naturalmente a hipótese de que um íman poderia de algum modo produzir uma corrente num fio. (Este tipo de raciocínio por simetria é usual em Física e provou, muitas vezes, ser útil.) Logo após a notícia da descoberta de Oersted ter chegado a Paris, os físicos franceses Biot, Savard e Ampère começaram a realizar investigações sobre as interacções entre a electricidade e o magnetismo. (Mencionaram-se alguns dos seus resultados no Capítulo 14.) Uma enorme quantidade de experiências e especulações levadas a cabo em toda a parte encheram as revistas científicas. No entanto, a descoberta-chave — como gerar uma corrente eléctrica contínua em grandes quantidades — continuava a escapar a todos.

## 15.2 O primeiro Motor Eléctrico de Faraday

As revistas científicas trazem regularmente notícias breves sobre os pormenores técnicos de novas descobertas. De tempos a tempos fornecem também valiosas sínteses com informação em profundidade sobre os grandes avanços recentes da Ciência. A necessidade de artigos de síntese como estes faz-se sentir particularmente, sobretudo, depois de um grande surto de actividade do tipo que se seguiu à descoberta do electromagnetismo por Oersted em 1820.

Em 1821, o editor da revista *Annals of Philosophy* pediu a Michael Faraday que escrevesse um resumo sobre as experiências e teorias sobre electromagnetismo que tinham aparecido no ano anterior. Faraday que já tinha sido aprendiz de encadernador, era nessa altura assistente de um químico conhecido, Humphry Davy. Faraday provinha de uma família pobre e não tivera a oportunidade de receber uma formação académica em ciência ou matemática. Estava, no entanto, desejoso de aprender tudo o que pudesse e aceitou rapidamente a tarefa. Porém, depressa verificou que não se podia limitar a relatar o que os outros diziam ter feito. Sentiu que tinha a necessidade de repetir as experiências no seu próprio laboratório. Além disso, não estando satisfeito com as explicações teóricas propostas por outros físicos, começou a trabalhar nas suas próprias teorias e em planos para futuras experiências. Passado pouco tempo, Faraday começava uma série de trabalhos de investigação em electricidade que fariam dele um dos mais famosos físicos do seu tempo.

A primeira descoberta de Faraday relacionada com o electromagnetismo ocorreu no dia 3 de Setembro de 1821. Ao repetir a experiência de Oersted (descrita na Secção 14.11), pôs a agulha magnética em diferentes posições à volta do fio onde passava corrente. Faraday ficou particularmente impressionado com o seguinte facto: a força que a corrente eléctrica exercia em cada pólo do íman tendia a deslocá-lo segundo uma linha circular à volta do fio. Como viria a dizer mais tarde, o fio ficava rodeado por *linhas de força circulares* — um campo magnético circular.



Duas versões do rotor electromagnético de Faraday. Em ambos, o recipiente estava cheio de mercúrio para que se pudesse estabelecer uma corrente elevada entre a base e a parte superior do suporte.

Baseando-se nesta ideia, Faraday construiu então um “rotor electromagnético”. O aparelho funcionou. Apesar de muito primitivo foi o primeiro aparelho capaz de produzir um movimento contínuo devido à acção de uma corrente eléctrica — o primeiro motor eléctrico.

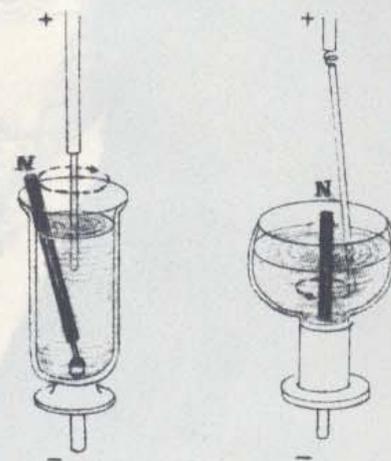
Faraday também concebeu um dispositivo no qual o íman estava fixo, sendo o fio por onde passava a corrente que rodava à volta dele. (Se uma corrente exerce uma força sobre o íman, o íman deve exercer uma força igual sobre a corrente, de acordo com a 3.<sup>a</sup> lei de Newton.) Como em muitos outros casos, Faraday guiou-se pela ideia de que para cada efeito da electricidade sobre o magnetismo devia existir um efeito correspondente do magnetismo sobre a electricidade. É claro que nem sempre foi tão óbvia a forma que este efeito correspondente devia ter.

**Q1.** Porque é que o pólo magnético do “rotor electromagnético” de Faraday se desloca segundo um círculo à volta de um fio fixo?

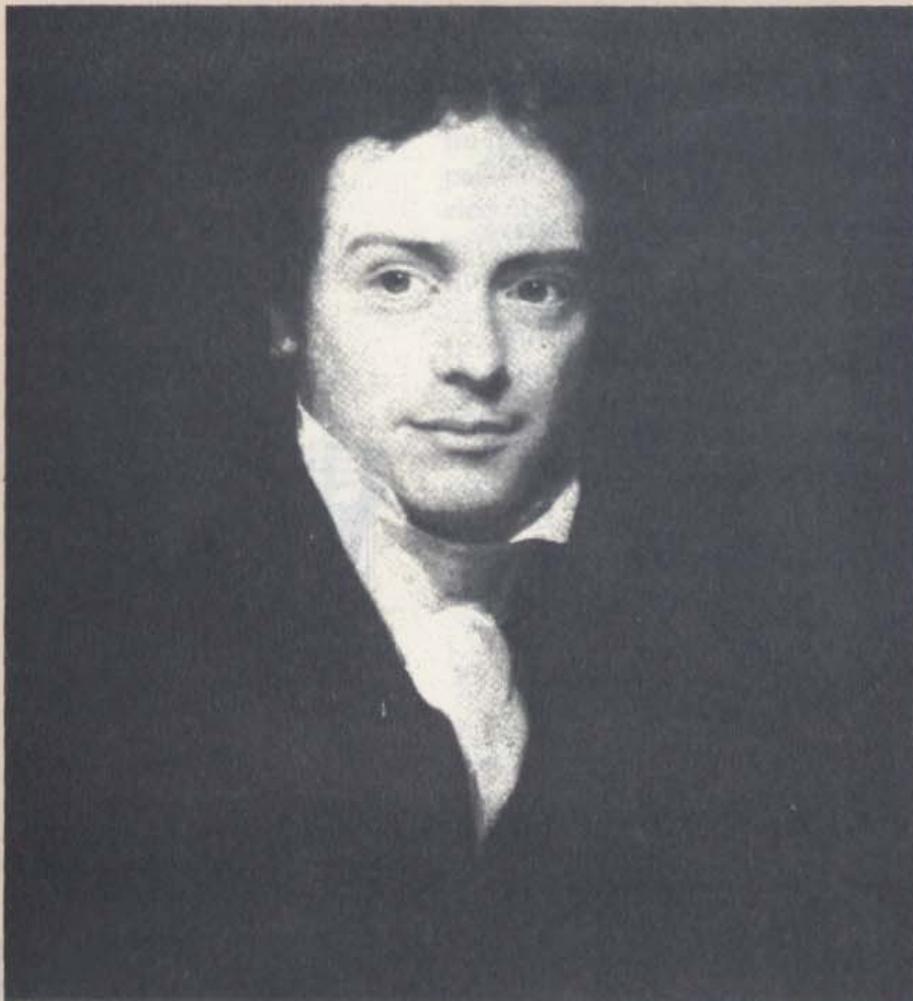
### 15.3 A descoberta da indução electromagnética

Munido com a sua ideia de “linhas de força” dos campos eléctricos e magnéticos, Faraday dedicou-se à pesquisa de uma forma de produzir correntes a partir do magnetismo. Espalhadas pelo seu diário dos anos posteriores a 1824 encontram-se muitas descrições de tais experiências. Cada relato acabava com uma nota: “não manifestou a acção” ou “sem efeito”.

Finalmente, em 1831, conseguiram ultrapassar-se as dificuldades. Como muitas outras descobertas que se seguem a um período de muita investigação e discussão entre cientistas, esta foi feita quase simultaneamente por dois cientistas trabalhando independentemente e em países diferentes. Faraday não foi propriamente o primeiro a produzir electricidade a partir do magnetismo. A *indução electromagnética* (produção de uma corrente eléctrica a partir do magnetismo) foi, de facto, descoberta primeiro pelo cientista americano Joseph Henry. Henry ensinava nessa altura Matemática e Filosofia numa Academia em Albany, no Estado de Nova Iorque. Infelizmente para a reputação da ciência americana, exigia-se que os professores da Academia de Albany dispendessem todo o tempo em trabalhos relacionados com as aulas a dar. Ficava muito pouco tempo para a investigação. Henry não teve praticamente nenhuma oportunidade para prosseguir o trabalho de aperfeiçoamento e aprofundamento da descoberta que fizera durante o seu mês de férias. Só conseguiu publicar o seu trabalho um ano depois. Entretanto, Faraday fizera uma descoberta semelhante e publicou os seus resultados. Mais importante do que isso, efectuou investigações exaustivas sobre todos os aspectos do assunto. As suas primeiras experiências e ideias sobre as linhas de força tinham sugerido que uma corrente que passava num fio devia de algum modo a induzir uma corrente noutra fio colocado nas proximidades. Oersted e Ampère tinham mostrado que uma corrente eléctrica *estacionária* produzia um



Numa das versões (à esquerda), o pólo norte de uma barra magnética roda no sentido das linhas de força eléctrica circulares que rodeiam a corrente fixa. Na outra (à direita), a haste onde passa a corrente roda em volta de uma barra magnética — movendo-se sempre perpendicularmente às linhas de força provenientes do pólo do íman.



Michael Faraday (1791-1867) era filho de um ferreiro inglês. Segundo ele conta:

“A minha educação foi das mais vulgares, consistindo em pouco mais que os rudimentos de leitura, escrita e aritmética, dados numa escola pública. Fora da escola passava as horas em casa ou na rua.”

Aos doze anos foi trabalhar como moço de recados numa livraria. Mais tarde tornou-se ajudante de encadernador. Quando tinha cerca de dezanove anos ofereceram a Faraday um bilhete para assistir a uma série de conferências feitas por Sir Humphry Davy na *Royal Institution* em Londres. A *Royal Institution* era um importante centro de investigação e educação em ciência e Davy era o director dessa Instituição. Faraday mostrou-se desde logo interessado pela ciência e começou a estudar Química sozinho. Em 1813, pediu um emprego a Davy e este contratou-o para assistente de investigação. Em breve Faraday mostrava o seu génio como experimentalista. Teve contribuições importantes nos domínios da química, magnetismo, electricidade e luz e acabou por suceder a Davy no cargo de director da *Royal Institution*.

Devido às suas múltiplas descobertas, Faraday é normalmente considerado como o maior dos cientistas experimentais. Faraday foi também um bom conferencista e tinha o dom de explicar os resultados da investigação científica a pessoas sem preparação científica. As suas conferências para audiências jovens ainda hoje se lêem com prazer. Duas delas, “On the Various Forces of Nature” e “The Chemical History of a Candle” foram reeditadas em edições de bolso.

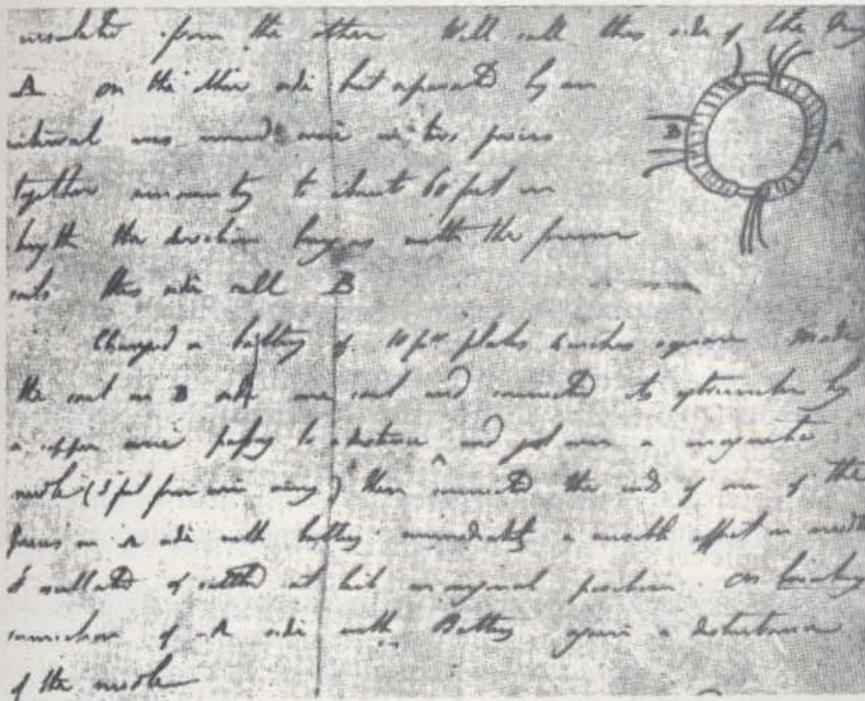
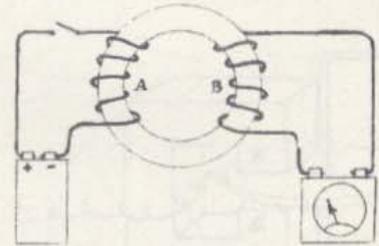
Faraday era uma pessoa modesta, amável e muito religioso. Embora tivesse recebido muitos títulos científicos de âmbito internacional, não desejou ser armado cavaleiro, preferindo ficar sem título.



O laboratório de Faraday na *Royal Institution*.

campo magnético *estacionário* à volta do circuito eléctrico onde passa a corrente. Nesse caso, talvez se pudesse gerar uma corrente estacionária se se colocasse um fio perto ou à volta de um íman muito forte. Ou talvez se pudesse produzir uma corrente estacionária num fio se existisse uma corrente estacionária noutro fio próximo. Faraday tentou todas estas possibilidades sem sucesso.

A solução que Faraday encontrou em 1831 apareceu, em parte, acidentalmente. Faraday estava a fazer uma experiência com dois fios enrolados em espiral à volta de um anel de ferro (ver ilustração na margem) e notou que aparecia uma corrente numa das bobinas sempre que ligava ou desligava a corrente que passava na outra bobina. Quando ligava a corrente que passava na bobina A, induzia uma corrente na bobina B, corrente essa que durava, no entanto, apenas um



Parte de uma página do diário de Faraday onde registou a sua primeira experiência sobre a indução electro-magnética que teve sucesso (reprodução com 1/2 do tamanho real).

instante. Logo que se estabelecia uma corrente estacionária na bobina A, a corrente na bobina B desaparecia. No entanto, quando desligava a corrente que passava na bobina A, aparecia de novo uma corrente momentânea em B.

Para resumir os resultados de Faraday: uma corrente num fio móvel só pode induzir uma corrente noutro fio imóvel *quando essa corrente é variável*. Por outro lado, uma corrente estacionária que passe num fio não pode induzir corrente noutro fio.

Faraday não ficou satisfeito com a mera observação e relato de sua montagem e do importante resultado que obtivera. Servindo-se do seu conceito de "linhas de força", tentou descobrir quais os princípios básicos que a indução electromagnética envolvia.

De acordo com a teoria de Faraday, a corrente variável na bobina A modificava as linhas de força magnética em todo o anel de ferro. A variação nas linhas de força magnética na parte do anel de ferro da

bobina B ia induzir uma corrente em B. Mas, perguntou-se Faraday, se esta era realmente a explicação correcta, não seria possível produzir o mesmo efeito de outra maneira? Em particular:

1. O anel de ferro era mesmo necessário para produzir o efeito de indução? Ou a presença do ferro apenas intensificava um efeito que também ocorria sem ele?

2. A bobina A era mesmo necessária? Ou poder-se-ia induzir uma corrente fazendo simplesmente variar as linhas de força magnética através da bobina B por outro qualquer como, por exemplo, fazendo mover um íman em relação ao fio?

Faraday respondeu a estas perguntas quase logo a seguir com novas experiências. Primeiro, mostrou que o anel de ferro não era necessário. O ligar e desligar de uma corrente que passava numa bobina induzia uma corrente momentaneamente numa outra bobina próxima, mesmo que só houvesse ar (ou vácuo) entre as bobinas. (Ver a figura acima à esquerda. De notar que não há nenhuma bateria no circuito da direita mas apenas um aparelho para medir a corrente induzida.)

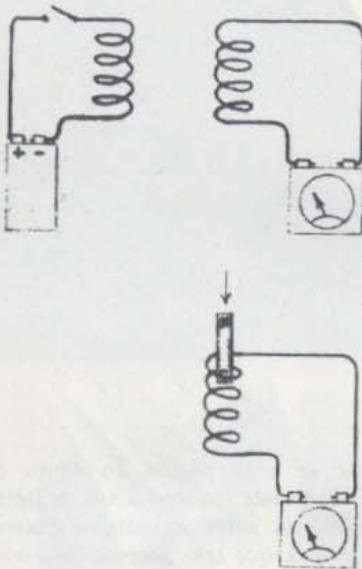
Em segundo lugar, estudou o que acontecia quando inseria ou removia uma barra magnética na bobina. Descobriu que, no momento em que o fazia, induzia uma corrente. Segundo o seu próprio relato:

“Uma barra magnética cilíndrica ... tinha apenas uma das extremidades ligeiramente dentro de uma hélice cilíndrica; depois, empurrou-se rapidamente o íman para dentro do cilindro e a agulha do galvanómetro moveu-se; em seguida, puxou-se a barra novamente para fora e a agulha tornou-se a mexer, mas no sentido oposto. O efeito repetia-se sempre que se introduzia ou se removia o íman...”

De notar que este é um *gerador eléctrico* primitivo: fornece corrente eléctrica quando existe um agente mecânico qualquer que move um íman.

Tendo efectuado estas e muitas outras experiências, Faraday anunciou o seu princípio geral da indução electromagnética. Basicamente este princípio diz que *a variação das linhas de força magnética pode induzir uma corrente num fio*. A “variação” necessária nas linhas de força pode ser produzida quer movendo um íman relativamente ao fio, quer utilizando uma corrente variável. No caso da corrente variável, são as linhas de força que “atravessam” o fio. Mais tarde, Faraday utilizou a palavra *campo* para se referir à disposição e à intensidade das linhas de força no espaço. Podemos então dizer que se pode induzir uma corrente num circuito fazendo variar um campo magnético à volta do circuito. Estas variações podem resultar do movimento do fio em relação ao campo ou simplesmente da variação da intensidade do campo.

Até esse momento Faraday tinha apenas produzido aparições momentâneas de corrente por indução. É evidente que tal facto não constituía uma melhoria substancial em relação às baterias como fontes de corrente. Seria possível produzir uma corrente durável por indução electromagnética? Para o conseguir, teria que se arranjar uma situação em que as linhas de força magnéticas tivessem uma *variação contínua* em relação ao condutor. Usando um simples íman, podia produzir-se



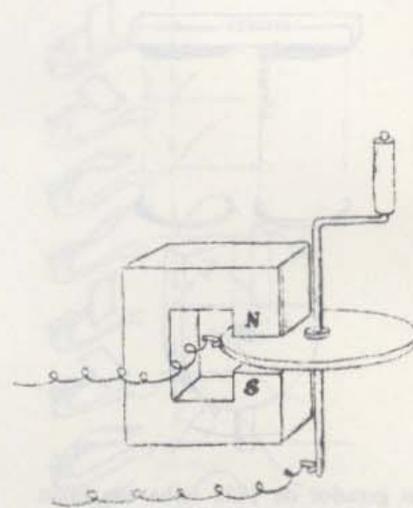
GE 15.4

GE 15.5

essa variação relativa quer movendo o íman, quer movendo o condutor. Foi precisamente isto que Faraday fez: rodou um disco de cobre sobre os pólos de um íman (ver ilustração na margem) e gerou uma corrente estacionária num circuito ligado ao disco através de “escovas”. Este aparelho, que se designa por “dínamo de disco de Faraday”, foi o primeiro gerador de corrente eléctrica constante. Este tipo de montagem não se revelou muito prático mas mostrou que era possível gerar electricidade de modo contínuo.

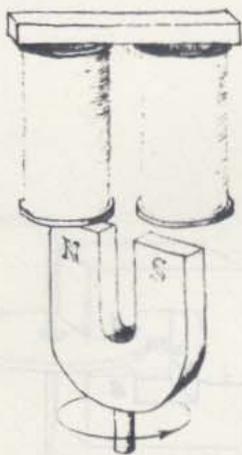
Estes primeiros processos experimentais para produzir uma corrente durável foram meios importantes para ajudar a compreender qual a ligação entre a electricidade e o magnetismo. Para além disso, sugeriram a possibilidade de eventualmente se gerar electricidade em larga escala. A produção de corrente eléctrica envolve a transformação de energia de uma forma para outra. A energia eléctrica obtém-se à custa de outra forma de energia. Numa bateria eléctrica, converte-se energia química — energia de formação dos compostos químicos — em energia eléctrica. As baterias são úteis em muitos aparelhos pequenos (automóveis e lanternas, por exemplo) mas não são práticas para produzir grandes quantidades de energia eléctrica. Existem, no entanto, grandes reservas de energia mecânica disponíveis. Poder-se-ia produzir energia eléctrica em larga escala se existissem meios razoavelmente eficientes para converter energia mecânica em energia eléctrica. Esta energia mecânica pode encontrar-se sob a forma de vento, quedas de água com grande desnível ou sob a forma de movimento mecânico contínuo produzido por uma máquina a vapor. A descoberta da indução electromagnética mostrou que, pelo menos em princípio, era possível gerar electricidade através de meios mecânicos. Neste sentido, pode considerar-se Faraday como sendo, de facto, o fundador da era moderna da electricidade.

Faraday apercebeu-se da importância prática das suas descobertas. No entanto, o seu principal interesse era a ciência pura, a procura das leis da natureza que permitem uma compreensão mais aprofundada da relação entre descobertas experimentais e teóricas feitas separadamente. Faraday reconhecia a necessidade da ciência aplicada e, nomeadamente, do aperfeiçoamento de determinados aparelhos, mas deixou o desenvolvimento do gerador e do motor a outros. De certo modo, isto foi uma infelicidade. No tempo de Faraday, os inventores e engenheiros que se interessavam pelas aplicações práticas e rentáveis da electricidade, não percebiam muito de Física. Daqui resultou que a maior parte do progresso conseguido durante os cinquenta anos seguintes foi obtido por tentativas. Ao seguirmos o desenvolvimento da tecnologia eléctrica moderna, encontraremos vários problemas que podiam ter sido resolvidos mais cedo, se um físico com os conhecimentos de Faraday tivesse trabalhado neles.



**Q2.** Porque é que se considera Faraday como o descobridor da indução electromagnética?

**Q3.** Qual é a definição geral da indução electromagnética?

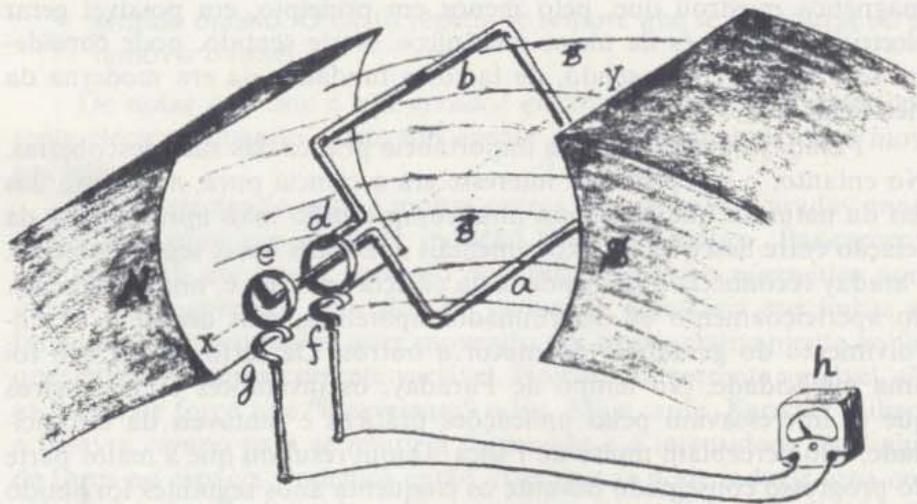


Um gerador de 1832 tinha um íman permanente em forma de ferradura colocado por baixo de duas bobinas estacionárias. Fazia-se rodar o íman manualmente e induzia-se uma corrente nas bobinas.

#### 15.4 Produção de electricidade utilizando campos magnéticos

Faraday mostrou que quando um fio condutor de corrente se move num campo magnético se produz uma corrente eléctrica. Não importa se é o fio ou se é o campo que se move. O que conta é o movimento de um em relação ao outro. Uma vez descoberto o princípio de indução magnética, os experimentalistas tentaram toda a espécie de combinações com fios condutores e ímanes em movimento relativo. Descreveremos um tipo básico de gerador (designado frequentemente por "dínamo") que foi muito usado no séc. XIX e que, efectivamente, permanece como o modelo básico para muitos geradores actuais.

Este tipo básico de gerador é fundamentalmente constituído por um enrolamento que pode rodar num campo magnético. O enrolamento está ligado a um circuito exterior por contactos móveis. No diagrama que se apresenta na página seguinte, em cima, à esquerda, o "enrolamento" está representado por uma única espira rectangular metálica, para simplificar o esquema. Esta espira roda em torno de um eixo  $XY$ , que passa por entre os pólos norte e sul do íman. Existem também dois anéis condutores  $d$  e  $e$  solidários com a espira e que, conseqüentemente, também rodam em torno do eixo. As duas escovas condutoras  $f$  e  $g$ , que estão ligadas a um aparelho de medida  $h$  que indica a corrente produzida, completam o circuito. O circuito completo é  $a b c d f h g e a$ . (De notar que uma parte do fio passa através do anel  $d$  sem o tocar e está ligado a  $e$ .)



Gerador de corrente alterna.

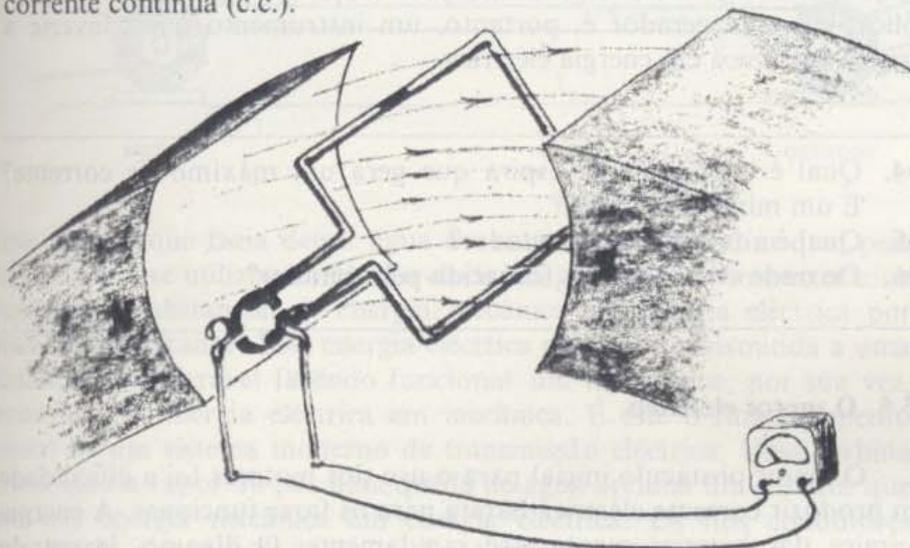
Inicialmente a espira está em repouso entre os pólos magnéticos, passando qualquer carga através dela. Suponhamos agora que se agarra na espira e a fazemos rodar no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio. Os lados maiores  $a$  e  $b$  da espira rectangular terão uma componente do movimento perpendicular à direcção das linhas de força magnética, isto é, o condutor "corta" as linhas de força. Esta é a condição para que uma corrente eléctrica seja induzida na espira. Quanto maior for o número de vezes que se cortam as linhas de força, maior será a corrente induzida.

Para se compreender melhor o que se passa no fio, vamos descrever o seu funcionamento em termos das forças que se exercem nas cargas presentes no fio. É o movimento destas cargas que dá origem à corrente eléctrica.

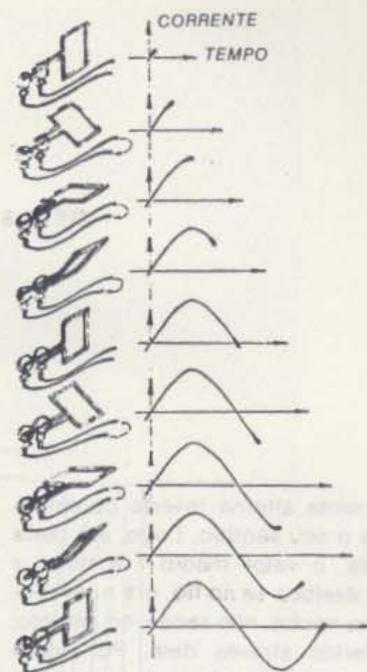
As cargas que estão na parte da espira que se designou por  $b$  têm um movimento real solidário com o movimento da espira no campo magnético. São, portanto, actuadas por uma força magnética dada por  $qvB$  (como foi descrito na Secção 14.13). Esta força empurra as cargas "para o lado de fora". Nesta situação "para o lado de fora" significa *ao longo do fio*.

O que se passará no lado  $a$ ? Este lado também se move no campo magnético e "corta" as linhas de força, mas no sentido oposto. Assim, as cargas em  $a$  sofrem um deslocamento ao longo do fio mas no sentido oposto às que se encontram em  $b$ . É justamente isso que é necessário; os dois efeitos reforçam-se e vão produzir uma corrente eléctrica através do circuito.

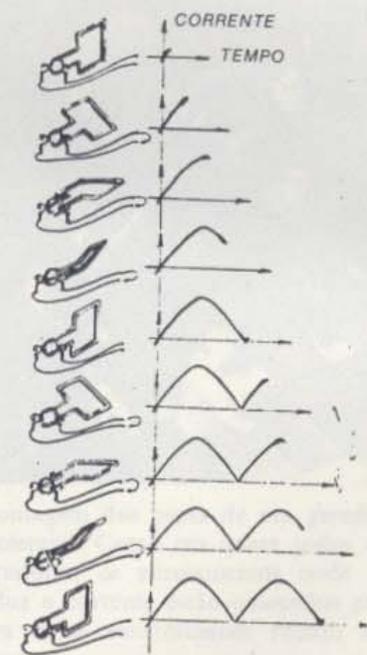
O gerador que acabámos de descrever produz corrente alterna (ou, abreviadamente, c.a.). Designa-se esta corrente por corrente "alterna" por que inverte (alterna) periodicamente o seu sentido. É este fenómeno que se mostra na página 84. Na altura em que este tipo de gerador foi desenvolvido, por volta de 1830, a corrente alterna não se podia utilizar para fazer funcionar máquinas. Pretendia obter-se, em contrapartida, corrente contínua (c.c.).



Em 1832, Ampère anunciou que o seu fabricante de instrumentos, Hippolyte Pixii, resolvera o problema da geração da corrente contínua. Pixii modificou o gerador de corrente alterna por meio de um aparelho chamado comutador. O nome deriva da palavra *comutar*, trocar ou andar para a frente e para trás. O comutador é um cilindro fendido inserido no circuito (ver na figura acima). No gerador da corrente alterna as escovas  $f$  e  $g$  estão ligadas sempre à mesma parte da espira. Por outro lado, com o comutador, as escovas invertem as ligações de cada vez que a espira passa pela posição vertical. No momento em que se inverte o sentido da corrente induzida, os contactos também se invertem. Como resultado, a corrente no circuito exterior tem sempre o mesmo sentido.



Gerador de corrente contínua.



GE 15.6

A corrente alterna inverte continuamente o seu sentido. Logo, em certa medida, o valor médio  $I$  é nulo; a carga desloca-se no fio, ora num sentido ora noutro, não sendo, no entanto, transferida através dele. Por outro lado, os módulos dos valores médios das intensidades de corrente nas duas metades do ciclo são iguais. Consequentemente os valores  $\langle I^2 \rangle$  nas duas metades do ciclo são iguais e positivos.

GE 15.7-15.9

Embora a corrente no circuito exterior tenha sempre o mesmo sentido, não é constante. Aumenta e diminui rapidamente, variando entre zero e o seu valor máximo, como se mostra no desenho da página 85. Num gerador eléctrico existem diferentes conjuntos de espiras e comutadores ligados, formando um único circuito. Deste modo, as correntes induzidas atingem os seus valores máximo e nulo em momentos diferentes, pelo que a corrente total produzida pelo conjunto será mais uniforme.

Que o gerador produza corrente alterna ou contínua, a potência eléctrica (energia por unidade de tempo) produzida em cada instante é dada pela equação que desenvolvemos na Secção 14.10. Suponhamos, por exemplo, que um fio (o filamento de uma lâmpada, por exemplo) com uma resistência  $R$  substitui o aparelho de medida  $h$ . Se a intensidade da corrente produzida no circuito num dado instante for  $I$ , a energia eléctrica por unidade de tempo cedida ao fio será dada por  $I^2 R$ . No caso da corrente alterna, a potência de saída varia de instante para instante, mas a potência média de saída será simplesmente  $\langle I^2 \rangle R$ . É evidente que esta energia eléctrica não aparece por si só, sem uma fonte de energia. Isto violaria as leis da conservação de energia. No nosso gerador, a "fonte" de energia é a energia mecânica que mantém as espiras em rotação. Esta energia mecânica pode ser fornecida por máquinas a vapor ou a gasolina, pela força da água ou pela força eólica, etc.... O gerador é, portanto, um instrumento que converte a energia mecânica em energia eléctrica.

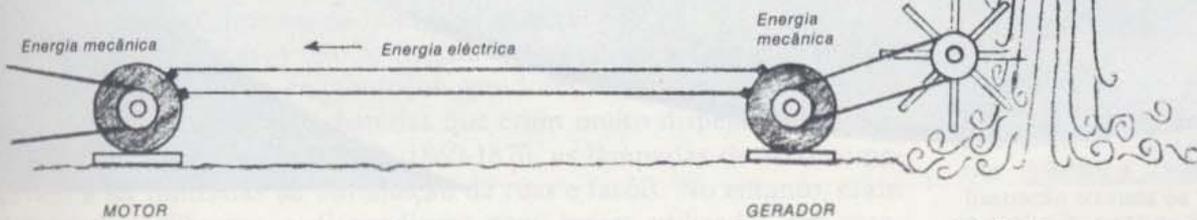
- Q4.** Qual é a posição da espira que gera um máximo de corrente? E um mínimo? Porquê?
- Q5.** Qual é a função do comutador?
- Q6.** De onde vem a energia fornecida pelo gerador?

### 15.5 O motor eléctrico

O maior obstáculo inicial para o uso dos motores foi a dificuldade em produzir corrente eléctrica barata para os fazer funcionar. A energia química das baterias esgotava-se rapidamente. O dínamo, inventado quase simultaneamente por Faraday e Henry em 1832, não era, inicialmente, mais económico do que a bateria. Eram necessários geradores que utilizassem eficientemente energia mecânica para produzir energia eléctrica. Porém, a concepção destes geradores implicava a compreensão dos pormenores do seu funcionamento, o que levou quase cinquenta anos a efectivar-se. Durante esse período, houve numerosas invenções que suscitavam um grande entusiasmo momentâneo e o aparecimento de planos ambiciosos, seguidos de desencorajamento quando se levantavam dificuldades práticas inesperadas. A esperança de fazer fortuna com o fornecimento de energia barata espicçou, no entanto, sucessivas gerações de inventores. Gradualmente, foram-se acumulando os conhecimentos sobre a física e tecnologia dos sistemas electromagnéticos.

Na realidade, foi um conhecimento ocasional que marcou o início efectivo da era da energia eléctrica. Este acontecimento foi uma descoberta accidental na Exposição de Viena em 1837. Em ciência nunca é muito correcto atribuir um princípio de uma era a uma pessoa, realizando um único acto, num determinado momento. Na verdade, muitos cientistas contribuem com as suas ideias e experiências para um dado campo científico. Eventualmente, a situação torna-se favorável para que se ultrapassem dificuldades e, por vezes, um acontecimento ocasional é suficiente para fazer avançar as coisas. Neste caso, segundo reza a História, um trabalhador desconhecido da Exposição ligou acidentalmente dois dínamos. A corrente gerada pelo primeiro dínamo, que era accionado mecanicamente, atravessou as espiras do segundo dínamo. Surpreendentemente, o segundo íman funcionou como um motor eléctrico alimentado pela electricidade gerada pelo primeiro!

Esta descoberta accidental, de que um gerador podia funcionar com um motor, foi imediatamente utilizada na Exposição. Utilizaram uma pequena queda de água artificial para accionar o gerador. A corrente que este produzia fazia mover o motor que, por sua vez, fazia funcionar



uma bomba que fazia deitar água de uma fonte. Foi assim que, pela primeira vez, se utilizou a indução electromagnética para converter uma quantidade substancial de energia mecânica em energia eléctrica por meio de um gerador. Esta energia eléctrica podia ser transmitida a uma distância considerável fazendo funcionar um motor que, por sua vez, reconvertia a energia eléctrica em mecânica. É este o funcionamento básico de um sistema moderno de transmissão eléctrica. Uma turbina alimentada a vapor ou por uma queda de água acciona um gerador que converte energia mecânica em energia eléctrica. Os fios condutores transmitem a electricidade a grandes distâncias até aos motores, torradeiras, luzes eléctricas, etc. Por sua vez, estes aparelhos convertem a energia eléctrica em energia mecânica, térmica ou luminosa.

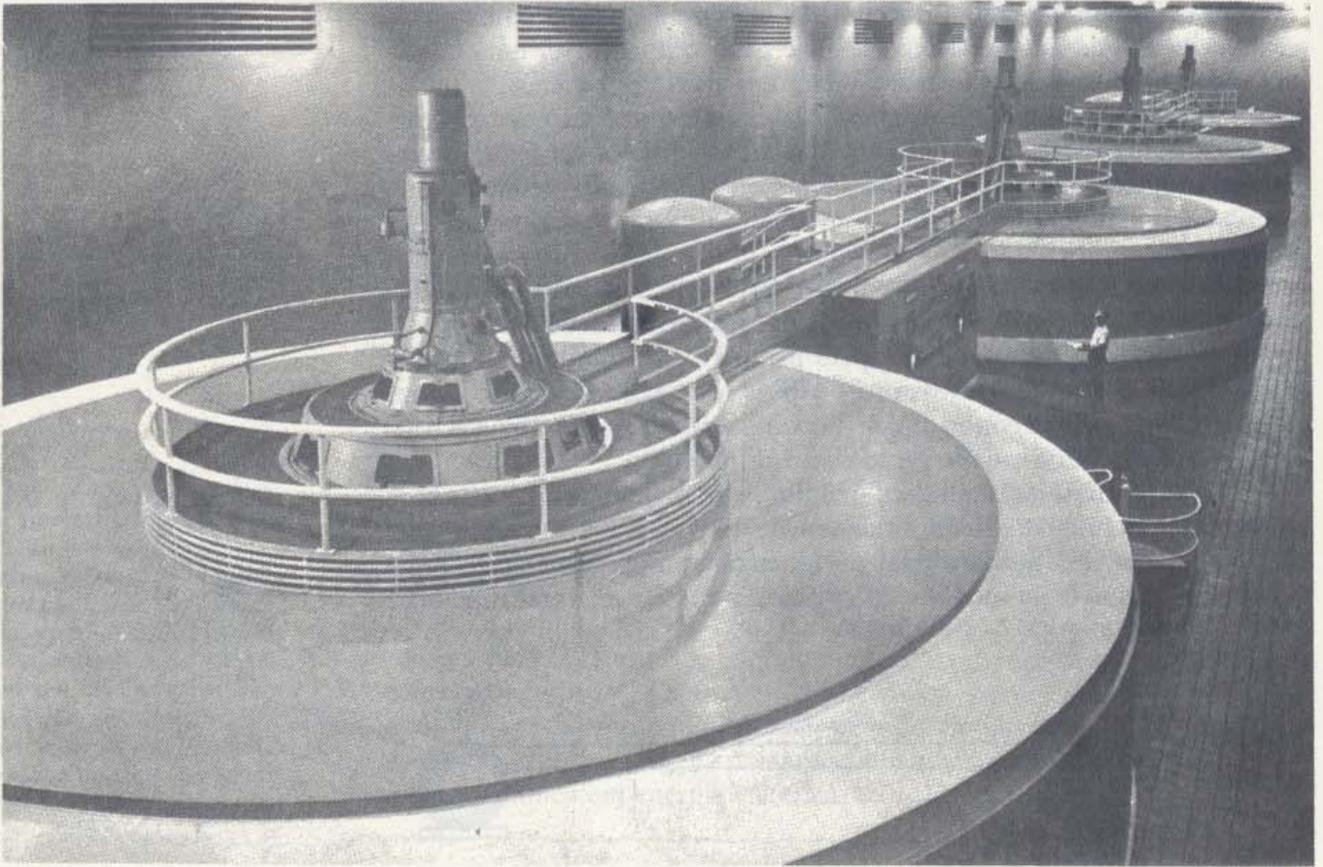
O desenvolvimento dos geradores térmicos mostra um tipo de interacção entre a ciência e a tecnologia diferente daquela que se observa com o desenvolvimento das máquinas a vapor. Como assinalámos no Capítulo 10, as primitivas máquinas a vapor foram desenvolvidas por inventores que não tinham qualquer conhecimento sobre aquilo que hoje consideramos ser a correcta teoria do calor (termodinâmica). No entanto, o desenvolvimento da máquina a vapor e as tentativas de Sadi Carnot e outros para melhorar a eficiência dessas máquinas através de análises teóricas contribuíram enormemente para o estabelecimento da termodinâmica. No caso do electromagnetismo passou-se o contrário.

GE 15.10

GE 15.11



Montagem das peças de um gerador comercial. Como em quase todos os geradores, os enrolamentos onde se induz a corrente estão colocados por fora e os electroimanes rodam no interior.



Geradores hidro-eléctricos produzindo energia na Central "Tennessee Valey Authority". Esta Central pode produzir energia eléctrica a uma taxa superior a 100 000 000 watt.

Uma enorme quantidade de conhecimentos científicos foi estabelecido por Ampère, Faraday, Kelvin e Maxwell antes de alguma aplicação prática importante ter sucesso. Os cientistas que compreendiam a electricidade melhor do que ninguém não estavam especialmente interessados nas aplicações comerciais. Os inventores, que esperavam tirar lucros enormes com a electricidade sabiam muito pouco de teoria. Depois de Faraday ter anunciado a sua descoberta da indução electromagnética, as pessoas começaram imediatamente a construir geradores para produzir electricidade. No entanto, só 40 anos mais tarde é que os inventores e engenheiros perceberam o suficiente para trabalhar com conceitos tão necessários como o de linhas de força e o de vectores de campo. Com a introdução do telégrafo, telefone, rádio e sistemas geradores de corrente alterna, a quantidade de conhecimentos matemáticos necessários para trabalhar em electricidade aumentou. As Universidades e os Institutos Técnicos começaram a fazer cursos de engenharia eléctrica. Gradualmente foram-se formando grupos de especialistas que estavam familiarizados com a física da electricidade e que também sabiam aplicá-la.

- Q7. Como construiria um motor eléctrico a partir de um gerador?
- Q8. O que é que impediu que o motor eléctrico constituísse um sucesso económico imediato?
- Q9. Qual foi o acontecimento que conduziu ao começo da era da energia eléctrica?

## 15.6 A lâmpada eléctrica

O crescimento da indústria eléctrica resultou, em grande parte, da procura de produtos eléctricos por parte do grande público. Um dos primeiros produtos eléctricos a ser comercializado com sucesso nos Estados Unidos foi a lâmpada eléctrica. O seu sucesso constitui um caso interessante da interligação entre a Física, a indústria e a sociedade.

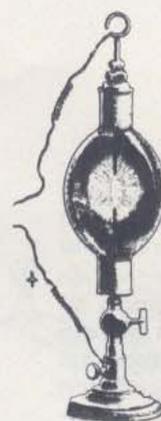
No princípio do séc. XIX, a iluminação dos prédios e das casas era feita com velas e lâmpadas a óleo. A iluminação das ruas das cidades era praticamente inexistente, com excepção de algumas luzes que, à noite, se penduravam fora das casas. A indústria do gás natural começava apenas a modificar esta situação. Londres teve o seu primeiro sistema de iluminação das ruas em 1813, altura em que foram instalados candeeiros a gás na ponte de Westminster. No entanto, nem todos os efeitos sociais da iluminação a gás foram benéficos. Por exemplo, a introdução da iluminação a gás nas fábricas permitiu que os patrões prolongassem o dia de trabalho, que já era longo e difícil.

Em 1801, o químico inglês Humphry Davy notou o aparecimento de uma faísca ou arco brilhante quando afastou duas hastes de carvão que estavam ligadas aos terminais de uma bateria. Esta descoberta levou ao desenvolvimento da "lâmpada de arco".

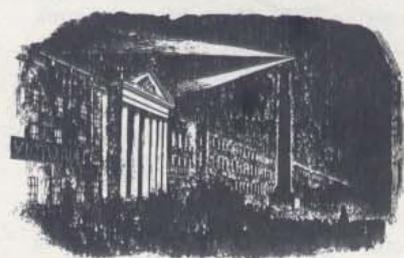
A lâmpada de arco não conseguiu encontrar uma aplicação prática para uso generalizado enquanto os geradores eléctricos alimentados a vapor não substituíram as baterias que eram muito dispendiosas como fontes de corrente. Nos anos de 1860-1870, as lâmpadas de arco começavam a ser utilizadas na iluminação de ruas e faróis. No entanto, eram demasiado brilhantes e dispendiosas para serem utilizadas em casa. Além disso, as hastes de carvão gastavam-se em poucas horas devido às altas temperaturas produzidas pelo arco. A necessidade de serviços e substituições frequentes tornavam este sistema inconveniente. (As lâmpadas de arco ainda se usam para a obtenção de luzes muito intensas como é o caso das luzes de foco dos teatros.)

Como Davy e outros cientistas mostraram, pode produzir-se luz fazendo simplesmente passar uma corrente eléctrica por um fio e aquecendo-o a uma temperatura elevada. Este método é conhecido por "iluminação incandescente". O maior impedimento técnico era o facto de o filamento arder e se gastar gradualmente. A solução óbvia era fechar o filamento num recipiente de vidro do qual se tivesse retirado o ar. Mas isto era mais fácil de dizer que de fazer. As bombas de vácuo existentes nos princípios do séc. XIX não podiam fornecer um vácuo suficientemente bom para este fim. Não foi senão em 1865, quando Hermann Sprengel inventou, na Alemanha, uma bomba de vácuo suficientemente sofisticada, que a lâmpada eléctrica na sua forma actual pôde ser desenvolvida. (A bomba de Sprengel também ajudou enormemente Crookes e outros em experiências científicas que conduziram a importantes descobertas no domínio da física atómica. Discutiremos estas descobertas no Capítulo 18.)

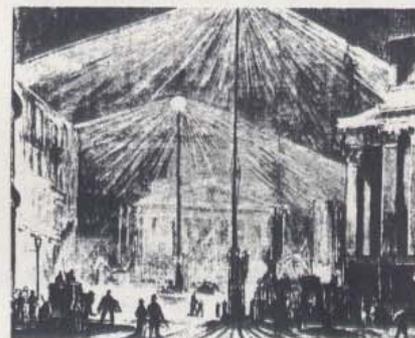
Thomas Edison não foi o primeiro a inventar uma luz incandescente, nem descobriu nenhum princípio científico essencialmente novo. O que ele fez foi desenvolver uma lâmpada eléctrica que podia ser utili-



Lâmpada de arco de Davy.



Demonstrações do novo sistema de iluminação eléctrica efectuadas durante a visita da Rainha Victória e do Príncipe Alberto a Dublin, na Irlanda. Ilustração retirada da "Illustrated London News", de 11 de Agosto de 1849.

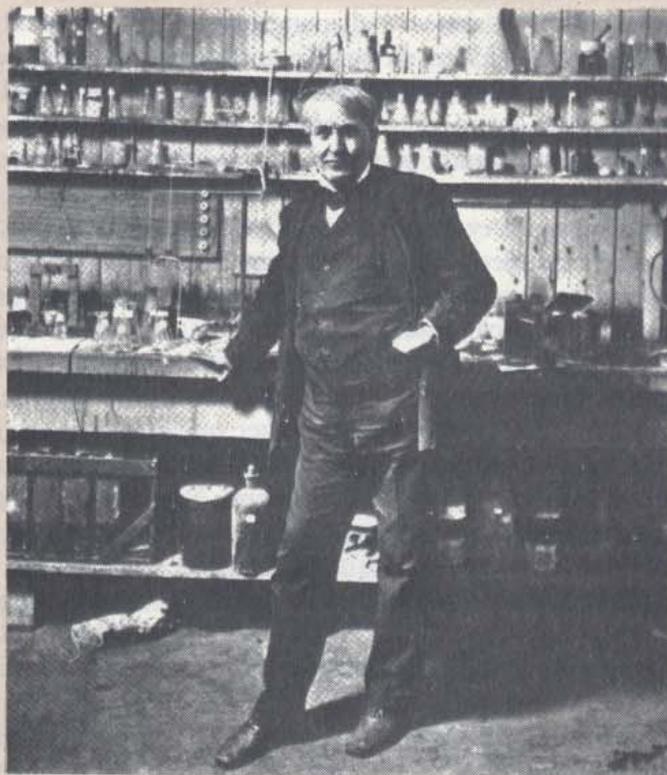


Nos finais da década de 1800 usavam-se lâmpadas de arco alimentadas por dínamo nalgumas cidades da Europa.

Thomas Alva Edison (1847-1931) nasceu em Milan, Ohio, e passou a maior parte da sua juventude em Port Huron, Michigan. A química foi a sua primeira paixão e, para ganhar dinheiro para as suas experiências de química, estabeleceu as suas próprias empresas de negócios. Antes dos quinze anos, dirigia duas lojas em Port Huron, uma de jornais, outra de vegetais; contratou um ardina para vender jornais na linha férrea "Grand Trunk Railway", entre Port Huron e Detroit; publicou um jornal semanal e estabeleceu um laboratório de química numa carruagem de mercadorias do comboio. O seu império financeiro crescia rapidamente quando, em 1862, se incendiou uma barra de fósforo no seu laboratório, ficando destruída parte da carruagem. Devido a este incidente, desalojaram o seu laboratório e material jornalístico do comboio e Edison viu-se obrigado a procurar uma outra base de funcionamento.

Em breve, o acontecimento infeliz com o fósforo foi compensado por um episódio feliz: Edison conseguiu salvar a vida ao filho de um funcionário da estação, empurrando-o para fora da linha onde ia passar um comboio. Como sinal de gratidão, o agente ensinou Edison a telegrafar e foi assim que começou a carreira de Edison na electricidade.

À direita, mostram-se dois retratos de Edison. Na página 92 está uma reprodução do desenho que acompanhava a sua patente da lâmpada incandescente. As partes indicadas por letras são o filamento de carvão (a), as extremidades mais grossas do filamento (c), os fios de platina (d), os fios condutores (x), os fios de cobre (e), o tubo para a bomba de vácuo (m).



zada em casa. Mais importante ainda, inventou um sistema de distribuição de electricidade. O seu sistema não só tornou a lâmpada eléctrica comerciável com abriu o caminho para o consumo generalizado de energia eléctrica nos Estados Unidos.

Edison começou por formular uma hipótese importante sobre o modo como as pessoas desejariam utilizar as lâmpadas eléctricas. Decidiu que cada um dos consumidores devia acender ou apagar uma lâmpada qualquer sem que isso afectasse as outras lâmpadas ligadas ao circuito. Isto significava que as lâmpadas deviam estar ligadas “em paralelo” — como os degraus de uma escada — em vez de estarem ligadas “em série”.

A escolha de circuito em paralelo em vez de circuitos em série teve consequências técnicas importantes. Num circuito em série a intensidade de corrente que passa por cada lâmpada é a mesma. Num circuito paralelo, só uma parte da intensidade total da corrente proveniente da fonte passa por cada uma das lâmpadas. Para impedir que a intensidade total da corrente necessária fosse demasiado elevada, a intensidade de corrente passando em cada lâmpada teria que ser pequena.

Como se viu no Capítulo 14, o efeito de aquecimento de uma corrente depende da resistência do fio e da intensidade da corrente. A taxa segundo a qual a energia térmica é produzida é igual a  $I^2R$ , ou seja, a taxa é directamente proporcional à resistência, mas aumenta com o quadrado da intensidade de corrente. Por conseguinte, a maior parte dos inventores usavam lâmpadas de baixa resistência e por onde podia passar uma corrente de grande intensidade e pressupunham que os circuitos em paralelo não seriam práticos. Edison, no entanto, descobriu que uma corrente de baixa intensidade podia ter um efeito calorífico grande se a resistência fosse suficientemente elevada.

Nesse sentido, Edison começou a procurar uma substância não-metálica apropriada para os filamentos e com uma grande resistência. Para obter esse filamento, teve primeiro que cozer ou “carbonizar” um bocado delgado de uma substância. Depois selava-o dentro de uma lâmpada de vidro onde se fizera o vácuo, deixando as extremidades do fio no exterior.

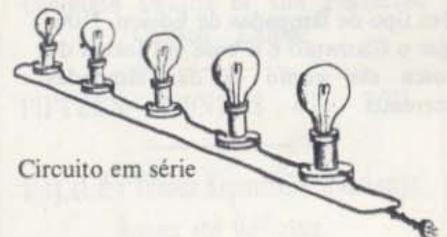
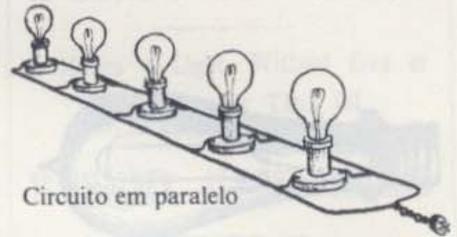
Os seus assistentes experimentaram mais de 1600 tipos de material: “papel e tecido, fio, fio de pesca, fibra, celulóide, madeira de buxo, casca de coco, couro prussiano, madeira pesada, feno, canas, pau-rosa, fungos, cortiça, juta e o pêlo de barba de um escocês ruivo”. A sua primeira lâmpada com alta resistência que teve sucesso era feita com um fio de algodão carbonizado, fechado num globo de vidro onde se fizera um vácuo elevado. Essa lâmpada esteve acesa continuamente durante dois dias antes de se fundir. Isto passou-se em Outubro de 1879. No ano seguinte, Edison produziu lâmpadas com filamentos feitos de bambu e de papel.

A Companhia *Edison Electric Light* começou a instalar um sistema de iluminação em 1882. Passados apenas três anos de funcionamento, a companhia de Edison vendera já 200 000 lâmpadas. Tinha o monopólio virtual do seu campo e pagou enormes dividendos aos seus accionistas.

## EDISON'S LIGHT.

The Great Inventor's Triumph in  
Electric Illumination.

SCRAP OF PAPER.



SCIENCE IS A UTTERLY THROAT.

The world is full of people who  
are not interested in science  
and who are not interested in  
the progress of the world.

EDISON'S LIGHT.

The world is full of people who  
are not interested in science  
and who are not interested in  
the progress of the world.

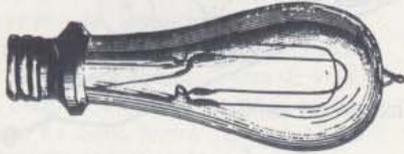
GE 15.12, 15.13

Veja o artigo “A invenção da luz eléctrica” na *Colectânea 14*.

The world is full of people who  
are not interested in science  
and who are not interested in  
the progress of the world.

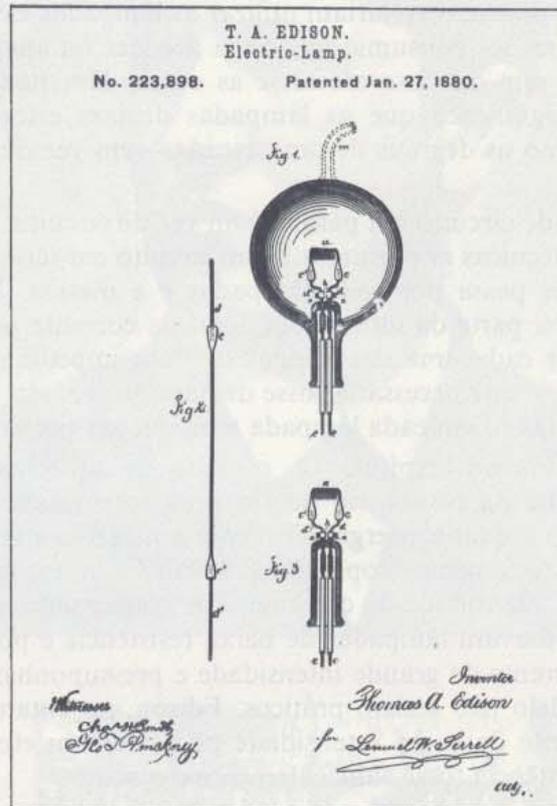
The world is full of people who  
are not interested in science  
and who are not interested in  
the progress of the world.

A lâmpada eléctrica sofrera, entretanto, algumas modificações desde a invenção original de Edison. Por exemplo, os fios carbonizados das antigas lâmpadas foram substituídos por fios muito finos de tungsténio nas lâmpadas mais modernas. O tungsténio tem a vantagem de ser mais eficiente e de ter uma vida mais longa.



Um tipo de lâmpadas de Edison. Note que o filamento e a base em forma de rosca são como os das lâmpadas correntes.

Desenho (reduzido a cerca de metade) que acompanhou o pedido de patente de Edison.



A grande difusão das lâmpadas eléctricas confirmou a validade da teoria de Edison sobre o que é que as pessoas comprariam. Esta grande difusão conduziu também ao rápido desenvolvimento de sistemas geradores e de distribuição de energia eléctrica. A necessidade de obter maior potência para a iluminação incentivou a invenção de melhores geradores, a utilização de energia hidro-eléctrica e a invenção da turbina a vapor. O sucesso da produção de maiores quantidades de energia a preço mais baixo tornou também práticas outras utilizações da electricidade. A partir da altura em que as casas foram equipadas com fios para as lâmpadas eléctricas, passou a poder utilizar-se a corrente eléctrica para fazer funcionar máquinas de coser, aspiradores, máquinas de lavar, torradeiras e (mais tarde) frigoríficos, congeladores, rádios e televisores. A partir da altura em que a energia eléctrica pôde ser usada para transportes públicos relativamente limpos, as cidades puderam crescer rapidamente em todas as dimensões. Os elevadores tornaram os arranha-céus práticos e os carros eléctricos e metropolitanos passaram a transportar rapidamente as pessoas desde suas casas até aos empregos e lojas.

Actualmente estamos tão acostumados a utilizações sofisticadas da electricidade que é difícil imaginar o impacto de coisas tão simples

como a lâmpada eléctrica. No entanto, a maior parte das pessoas que viveu durante o período da electrificação — que apenas se deu nos anos trinta e quarenta em muitas zonas rurais dos Estados Unidos — concorda que o utensílio eléctrico que maior modificação causou na vida de todos os dias foi a lâmpada eléctrica.

- Q10. Porque é que as lâmpadas de arco não foram utilizadas na iluminação das casas?
- Q11. Qual foi o instrumento essencial ao desenvolvimento da lâmpada incandescente?
- Q12. Porque é que Edison queria uma substância com grande resistência para os filamentos da sua lâmpada?
- Q13. Quais foram alguns dos maiores efeitos provocados pela introdução da energia eléctrica na vida quotidiana?

**15.7 Corrente alterna, corrente contínua e a central eléctrica das cataratas do Niagara**

Na Secção 15.4 afirmámos que os primeiros geradores produziam corrente alterna que depois se podia transformar em corrente contínua por meio de um comutador. Durante praticamente todo o séc. XIX, os engenheiros acreditavam que só a corrente contínua (c.c.) era útil para as aplicações práticas da electricidade. No entanto, à medida que aumentava a procura da energia eléctrica, algumas das desvantagens da corrente contínua tornaram-se evidentes. Um dos problemas era que o comutador complicava a construção mecânica dos geradores — especialmente se o anel tinha que girar a alta velocidade. Esta dificuldade tornou-se ainda mais séria depois da introdução das turbinas a vapor nos anos de 1890, dado que as turbinas trabalhavam mais eficazmente a altas velocidades. Outra desvantagem consistia em não haver uma maneira conveniente de modificar a tensão da corrente contínua que era fornecida.

Porque é que seria necessário modificar a tensão com que a corrente era distribuída por um sistema de transmissão? Uma das razões envolvia a quantidade de potência eléctrica perdida por aquecimento dos fios de transmissão. A potência de saída de um gerador depende (como se indicou na Secção 14.10) da tensão de saída do gerador e da *intensidade de corrente*:

$$P_{\text{total}} = VI$$

A potência produzida pelo gerador é transmitida para a linha de transmissão e para o consumidor. Pode transmitir-se a *mesma* quantidade de potência com um valor de *I* menor desde que se aumente o valor de *V*. Quando existe uma intensidade de corrente *I* num fio de transmissão de resistência *R*, a quantidade de potência sob a forma de calor na transmissão é proporcional à resistência e ao quadrado da intensidade de corrente:

$$P_{\text{potência perdida por aquecimento}} = I^2 R$$

# EDISON'S LIGHT.

The Great Inventor's Triumph in Electric Illumination.

## A SCRAP OF PAPER.

It Makes a Light, Without Gas or Flame, Cheaper Than Oil.

## TRANSFORMED IN THE FURNACE.

Complete Details of the Perfected Carbon Lamp.

## FIFTEEN MONTHS OF TOIL.

Story of His Tireless Experiments with Lamps, Burners and Generators.

## SUCCESS IN A COTTON THREAD.

The Wizard's Byplay, with Eodily Pain and Gold "Tailings."

## HISTORY OF ELECTRIC LIGHTING.

The near approach of the first public exhibition of Edison's long looked for electric light, announced to take place on New Year's Eve at Menlo Park, on which occasion that place will be illuminated with the new light, has revived public interest in the great inventor's work, and throughout the civilized world scientists and people generally are anxiously awaiting the result. From the beginning of his experiments in electric lighting to the present time Mr. Edison has kept his laboratory guardedly closed, and no authoritative account (except that published in the *HERALD* some months ago relating to his first patent) of any of the important steps of his progress has been made public—a course of procedure the inventor found absolutely necessary for his own protection. The *HERALD* is now, however, enabled to present to its readers a full and accurate account of his work from its inception to its completion.

### A LIGHTED PAPER.

Edison's electric light, incredible as it may appear, is produced from a little piece of paper—a tiny strip of paper that a breath would blow away. Through

Primeiro artigo jornalístico sobre a invenção de Edison ("New York Herald", de 21 de Dezembro de 1879).

GE 15.14

A potência que é finalmente cedida aos consumidores é  $P_{\text{total}} - P_{\text{perdida}}$  por aquecimento. Para as linhas de transmissão com uma dada resistência  $R$ , a intensidade  $I$  devia ser tão pequena quanto possível para minimizar as perdas de potência. Para esse efeito, a electricidade devia obviamente ser transmitida com uma intensidade baixa e a alta tensão.

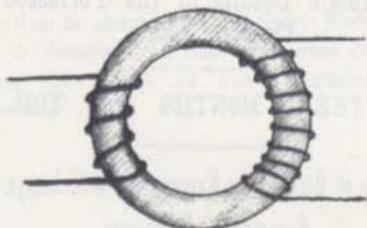
No entanto, a maior parte dos geradores não pode produzir electricidade com tensões muito altas, pois isso requeria que as partes móveis se movessem a velocidades excessivamente grandes. Precisamos, portanto, de uma maneira de “elevar” a electricidade até uma alta tensão de transmissão. Por outro lado, precisamos de arranjar uma maneira de “descer” novamente a tensão na extremidade onde o consumidor utiliza a energia. Na maior parte dos utensílios eléctricos, especialmente em casa, não é conveniente, nem seguro, usar altas tensões. Resumindo, precisamos de *transformadores* nas duas extremidades da linha transmissora.

Pode construir-se facilmente um transformador com uma simples modificação na bobina de indução de Faraday (Secção 15.4). Lembremos que Faraday enrolou um fio (a que chamou enrolamento *secundário*) à volta de um dos lados de um anel de ferro. Depois induziu uma corrente neste enrolamento secundário fazendo *variar* a corrente noutra bobina (o enrolamento *primário*) enrolada à volta do outro lado do anel. Induz-se uma corrente no enrolamento secundário sempre que se varia a corrente no enrolamento primário. Se a corrente no primário variar sempre, existirá uma corrente induzida permanente no secundário. Fornecendo uma corrente alterna ao enrolamento primário (a partir de um gerador sem comutador, por exemplo), induz-se uma corrente alterna no enrolamento secundário.

Há ainda mais um conceito que é importante para perceber um transformador eléctrico simples. Se o enrolamento secundário tiver *mais* voltas que o primário, a tensão produzida no secundário será maior que a tensão no primário; se o enrolamento secundário tiver *menos* voltas que o primário, a tensão alterna produzida no secundário será menor que a tensão no primário. Este facto foi descoberto por Joseph Henry que construiu o primeiro transformador em 1838.

O primeiro sistema de corrente alterna foi exibido em Paris em 1883. Em 1884 foi instalado um sistema experimental numa linha de caminho de ferro em Londres para alimentar lâmpadas de arco e incandescentes, através de transformadores. Pouco depois houve uma nova exibição na Itália. Um engenheiro americano, George Westinghouse, viu o sistema italiano e comprou os direitos de patente desse sistema para os Estados Unidos. Westinghouse já tinha ganho reputação devido à sua invenção de travões de ar comprimido para os comboios e já tinha também montado uma pequena companhia de engenharia eléctrica em Pittsburg. Depois de melhorar o projecto e a construção de transformadores, a *Westinghouse Electric Company* pôs de pé a sua primeira instalação comercial em 1886. A sua finalidade era distribuir corrente alterna para a iluminação a luz incandescente de Búfalo, Nova Iorque.

Quando Westinghouse introduziu o seu sistema de corrente alterna nos Estados Unidos a Companhia *Edison Electric Light* tinha o mono-



Uma corrente contínua (c.c.) no primário não induz qualquer corrente no secundário; os transformadores actuam com corrente alterna (c.a.).

Pela lei da conservação de energia, a potência de saída de um transformador não pode exceder a potência de entrada. Assim, se se aumenta a tensão de saída (aumentando o número de espiras no enrolamento secundário em relação ao número de espiras no primário), a intensidade de corrente de saída decrescerá proporcionalmente.

GE 15.15-15.17

pólio quase completo da indústria relacionada com a iluminação a luz incandescente. A Companhia Edison tinha investido grandes somas de dinheiro nas centrais geradoras de corrente contínua e nos sistemas de distribuição para a maioria das grandes cidades. Naturalmente, Edison ficou alarmado com a nova companhia que afirmava produzir energia eléctrica para a iluminação com um sistema mais barato. Seguiu-se uma controvérsia pública bastante violenta. Edison tentou demonstrar que a corrente alterna era perigosa porque usava alta tensão na transmissão. No meio desta controvérsia, o tribunal legislativo do Estado de Nova Iorque aprovou uma lei estabelecendo a electrocução como um meio de execução da pena capital. Este acontecimento parece ter ajudado a aumentar o receio popular da alta tensão.

Não obstante, o sistema de Westinghouse continuou a desenvolver-se. Não houve qualquer acidente espectacular e a população começou a aceitar a corrente alterna como sendo razoavelmente sem perigo. A invenção do “conversor rotativo” (constituído por um motor de corrente alterna que alimenta um gerador de corrente contínua) também ajudou a acabar com esta disputa. Este aparelho podia converter a corrente alterna em corrente contínua para ser utilizada nos sistemas locais já apetrechados com equipamento para corrente contínua ou alimentar motores individuais de corrente contínua. Consequentemente, a Companhia Edison (que mais tarde se fundiu com a *General Electric*) não teve que abandonar o negócio quando a corrente alterna foi adoptada em larga escala.

A vitória final do sistema de corrente alterna ficou assegurada em 1893, quando foi escolhido para a nova central hidroeléctrica situada nas Cataratas do Niagara. Em 1887, os homens de negócios de Búfalo tinham proposto um prémio de 100 000 dólares para os “Inventores do Mundo”. O prémio iria para o inventor que projectasse um sistema de utilização da energia do rio Niagara, “em, ou perto de Búfalo, de modo a que essa energia pudesse ser utilizada para vários fins em toda a cidade”. O concurso atraiu a atenção mundial. Até então nunca se transmitiria uma tão grande quantidade de energia eléctrica para distâncias tão grandes — a distância entre as Cataratas do Niagara e Búfalo é de 20 milhas. O sucesso ou fracasso desta aventura iria influenciar o futuro desenvolvimento dos sistemas de distribuição de electricidade para outras grandes cidades.

Foi uma decisão difícil a de escolher entre a utilização da corrente alterna ou corrente contínua para os sistemas das Cataratas do Niagara. A corrente alterna podia ser gerada e transmitida mais eficientemente. Contudo, em 1890, a procura da electricidade estava sobretudo ligada à iluminação, o que significava que haveria uma procura máxima no fim da tarde. O sistema teria que funcionar abaixo da sua capacidade máxima durante o dia e a altas horas da noite. Devido a esta variação na procura da electricidade, alguns engenheiros acreditavam que um sistema de corrente contínua teria um funcionamento mais barato, uma vez que se podiam utilizar baterias para reforçar os geradores nos períodos de procura máxima. Thomas Edison foi consultado e, sem hesitação, recomendou a corrente contínua. No entanto a *Catarat Cons-*



GE 15.18



GE 15.18

struction Company, que fora formada para administrar o projecto, adiou a tomada de decisão.

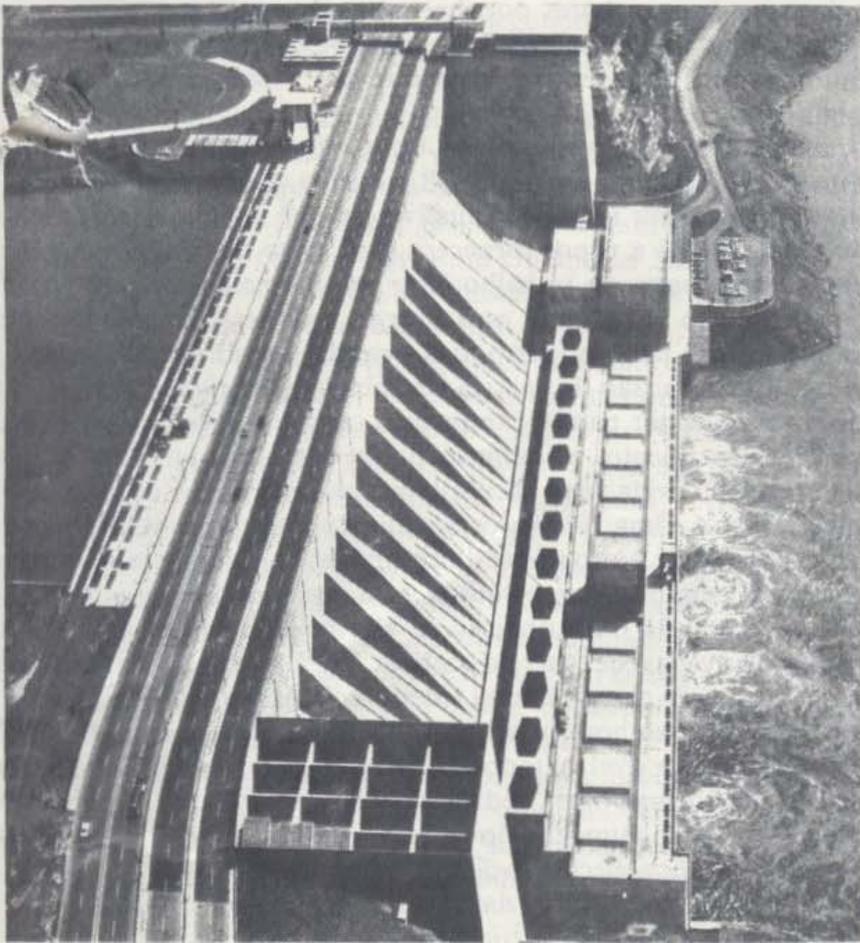
Em 1891, quando abriu a Exposição Eléctrica Internacional em Francforte, na Alemanha, a solução estava ainda em dúvida. Nessa exposição, foi apresentado um sistema de corrente alterna de alta tensão para transmissão de quantidades consideráveis de energia desde Francforte até Lauffen que ficava a 110 milhas de distância. Os testes efectuados com esta linha de transmissão mostravam que a sua eficiência era de 77%, ou seja, por cada 100 watt que alimentavam uma das extremidades, apenas se perdiam 23 watt por efeitos de aquecimento na linha. Os outros 77 watt eram fornecidos como potência útil. O sucesso desta demonstração reforçou a mudança gradual da opinião dos especialistas em favor da corrente alterna e em detrimento da corrente contínua. Finalmente a *Catarat Company* decidiu construir um sistema de corrente alterna.

Depois de se ter estabelecido o sistema de corrente alterna, verificou-se que os críticos se tinham enganado quanto às previsões sobre a variação da procura de electricidade durante o dia. A electricidade já tinha muitas outras aplicações para além da iluminação. Nos anos de 1890, já se utilizavam motores eléctricos nos carros eléctricos, máquinas de coser e elevadores. Devido a estas utilizações diversas, a procura de electricidade distribuía-se mais ou menos uniformemente durante o período das 24 horas do dia. No caso particular da Central Hidroeléctrica nas Cataratas do Niagara, a fonte de energia era a corrente de água do rio Niagara que tem um débito mais ou menos constante. Este facto tornou possível a produção de energia sem um custo adicional grande. (A caldeira de turbina a vapor teria que ser alimentada com fuel durante a madrugada ou então desligada durante a noite e tornada a ser ligada de manhã.) Como havia energia hidroeléctrica disponível durante a noite a baixo custo, novas aplicações para esta energia se tornaram possíveis. A Central das Cataratas do Niagara atraiu indústrias de fundição que produziam, em regime contínuo, alumínio, abrasivos, sílica e grafite. Anteriormente, os processos electroquímicos utilizados nestas indústrias eram demasiado caros para serem usados em larga escala. Agora a energia barata tornava-os industrializáveis. Por sua vez, estas novas indústrias eram fontes de procura de energia, o que tornava o projecto de Niagara ainda mais lucrativo do que se esperava.

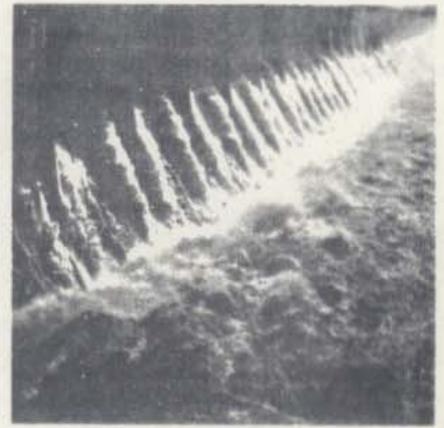
GE 15.19

A primeira transmissão de energia para Búfalo realizou-se em Novembro de 1896. Em 1899 havia em funcionamento em Niagara oito unidades com uma potência de 5000 cavalos vapor de potência. Os accionistas da *Cataract Construction Company*, já tinham tido um lucro de mais de 50% sobre o investimento. As indústrias electroquímicas, que não figuravam nos planos iniciais, estavam a utilizar mais energia do que a iluminação e os motores em conjunto.

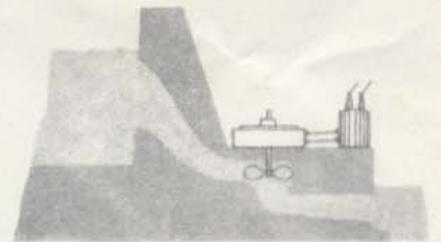
Como pós-escrito à história da corrente alterna contra a corrente contínua, devemos mencionar que actualmente se está de novo a preferir a corrente contínua para a transmissão de energia eléctrica a longa distância e com tensões muito elevadas. As razões desta reviravolta estão explicadas num artigo "O futuro da transmissão por corrente contínua", reeditado na *Colectânea de Textos 4*.



Central hidro-eléctrica das Cataratas do Niágara.



Wilson Dam (Tennessee Valley Authority) em Alabama.



Neste desenho, mostra-se o princípio geral da produção de energia hidro-eléctrica: a água cai de um nível mais alto para outro mais baixo e faz rodar as pás de uma turbina que está ligada ao eixo de um gerador. Os pormenores da construção podem variar muito.

- Q14.** Dê uma razão para o facto de ser mais económico transmitir energia eléctrica a alta tensão e com uma intensidade de corrente baixa do que a baixa tensão e com uma intensidade de corrente elevada.
- Q15.** Porque é que os transformadores não funcionam se se fornece uma corrente contínua ao enrolamento primário?

### 15.8 A electricidade e a sociedade

*Um ponto de vista optimista.* Muitas vezes, durante os últimos cem anos, promotores entusiásticos têm previsto um futuro maravilhoso para todos nós, baseado nas aplicações da electricidade em todas as fases da vida. Em primeiro lugar, as máquinas que trabalham a electricidade farão todo o trabalho físico estafante que fora o destino de 99% das pessoas através dos tempos e que ainda o é para a grande parte da humanidade de hoje. O cidadão médio terá apenas que vigiar a maqui-

naria durante algumas horas por dia e depois ir para casa gozar uma vida de lazer. As máquinas eléctricas também farão todos os trabalhos domésticos como, por exemplo, lavar a roupa, passar a ferro, cozinhar e lavar a loiça.

Um segundo objectivo social da tecnologia eléctrica foi concebido pelo presidente Franklin D. Roosevelt e outros que acreditavam que a vida do campo é mais natural e saudável do que a vida da cidade. No séc. XIX, a máquina a vapor fornecera uma fonte de energia capaz de realizar a maior parte do trabalho feito pelo homem e pelos animais. No entanto, para utilizarem essa energia, as pessoas tiveram que concentrar-se nas cidades perto das centrais geradoras de energia. Agora que a transmissão da energia eléctrica à distância era possível, as pessoas podiam voltar para o campo sem sacrificar o conforto da vida urbana. O aquecimento, a iluminação e refrigeração por meios eléctricos tornariam a vida mais fácil e higiénica em regiões de condições climáticas difíceis. Uma das maiores realizações do governo de Roosevelt, nos anos 30, foi o programa da electrificação rural. Este programa concedia empréstimos às cooperativas para instalarem os seus próprios sistemas de produção e distribuição de electricidade em áreas onde as companhias privadas de energia tinham verificado não ser rentável investir. Projectos de energia a nível federal, como o do vale de Tennessee (Tennessee Valley Authority) também ajudaram na campanha a favor da electricidade acessível a todos. A electricidade tornou a vida no campo um pouco mais fácil, reduzindo o trabalho físico inerente aos trabalhos agrícolas e aumentando o tempo destinado ao lazer e à educação. Deste modo, a electrificação devia ter ajudado a inverter o sentido migratório das populações das áreas rurais para as urbanas.

Um terceiro efeito da electricidade é a sua tendência para unificar uma vasta região numa única unidade social, fornecendo meios de transporte rápidos e meios de comunicação ainda mais rápidos entre as suas diferentes partes. No que diz respeito aos transportes, os aparelhos que funcionam a electricidade têm um papel essencial quer na manufatura em série, quer no funcionamento de camionetas. Em relação à comunicação, devemos lembrar-nos que a sociedade humana evolui como os organismos biológicos: todas as partes se desenvolvem em conjunção à medida que a sua mútua interferência aumenta. Isto implica que as telecomunicações e a sociedade humana se têm que desenvolver conjuntamente. O telefone é extremamente valioso em sociedades complexas e cosmopolitas. De facto, muitas das instituições básicas da nossa sociedade — por exemplo, uma imprensa livre — não poderiam funcionar sem um sistema electrónico de comunicações com dois sentidos.

As pessoas optimistas encaram a electricidade como fazendo cada vez mais coisas para camadas cada vez mais vastas da população. Aparelhos eléctricos como os frigoríficos e aparelhos de ar condicionado contribuirão para uma vida mais saudável e confortável em todo o mundo. As comunicações electrónicas vão continuar a difundir-se, o que permitirá uma troca sempre crescente de factos, opiniões e culturas. As máquinas eléctricas farão cada vez mais o trabalho que nos é difícil. Graças ao avanço da ciência e da tecnologia com ela relacionado, muitas pessoas não têm que gastar quase todo o tempo a trabalhar para

GE 15.20

Veja o artigo "A revolução electrónica" na *Colectânea 4*.

suportar as necessidades da vida. Segundo os optimistas, o que quer que seja que queiramos fazer, a electricidade pode ajudar-nos a fazê-lo melhor.

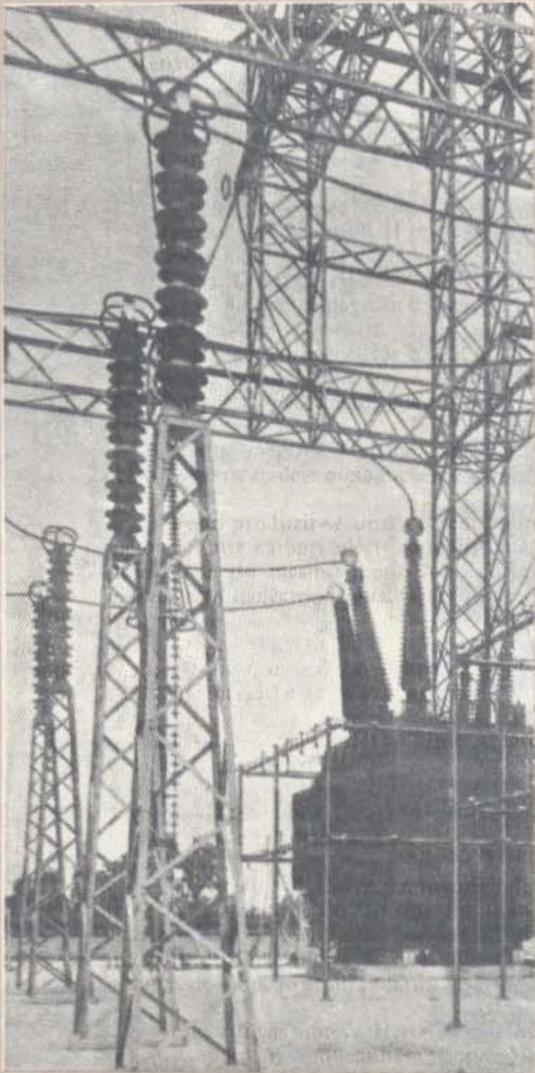
*Uma opinião menos optimista.* Embora tudo pareça maravilhoso, há muita gente que tem uma visão mais sombria deste "progresso". Apontam, por exemplo, para a diminuição das reservas de combustível fossilizado (carvão, petróleo e gás). Argumentam que as indústrias nos países mais desenvolvidos esgotaram em apenas 200 anos a quase totalidade das reservas de energia química acumulada durante os últimos duzentos milhões de anos. Além disso, estas indústrias têm geralmente poluído o ar e a água, excepto quando são confrontadas com a indignação da opinião pública. Há pessoas cépticas que proclamam que se criou um sistema social em que as virtudes do "trabalho honesto e o orgulho do trabalhador" estão em perigo. Em contrapartida, a maioria das pessoas trabalha em empregos monótonos e triviais, enquanto outros sofrem com o desemprego crónico. E embora seja verdade que muitas pessoas, nos países ricos e industrializados, gozam de altos padrões de vida e podem adquirir "gadgets" e artigos de luxo, estas coisas não preenchem as verdadeiras necessidades humanas e sociais. E a sua "procura" nem sequer é real, mas sim criada artificialmente por campanhas publicitárias e pelo facto, também planeado, de caírem rapidamente em desuso. Assim, estes artigos não trouxeram felicidade e tranquilidade de espírito, mas apenas uma procura alienada de um número cada vez maior de bens materiais. Entretanto, as pessoas materialmente menos afortunadas estão separadas por um fosso cada vez mais profundo das pessoas ricas e olham-nas com uma inveja e raiva crescentes.

E o que se passa com as invenções para "poupar trabalho" nas actividades domésticas? Tornam realmente a vida mais fácil às famílias de rendimentos altos e médios que as possuem? Nem por isso, dizem os críticos, dado que, de qualquer modo, o trabalho feito pelas máquinas era anteriormente feito pelas criadas. É claro que a industrialização e a electrificação criaram postos de trabalho para pessoas com poucas habilitações e que estes trabalhos são mais atraentes que o trabalho de criado. Não são, no entanto, ainda bem pagos. Como resultado, as famílias com rendimentos baixos só se podem permitir o luxo de terem um *aparelho eléctrico importante e, geralmente, estas famílias adquirem uma televisão*, o que, segundo cépticos, contribui pouco para melhorar a qualidade de vida.

A descentralização das populações que se considerava que a electricidade ajudaria a realizar deu-se de um modo bastante inesperado. Os cidadãos, com rendimentos altos e médios conseguiram escapar para os arredores onde podem gozar de todas as conveniências e prazeres da era da electricidade. Deixaram, no entanto, para trás os "ghettos" urbanos onde se concentram os grupos minoritários. É evidente que este grupos protestam violentamente contra o facto de serem privados dos benefícios da sociedade de consumo e da vida dos arredores das cidades que lhes é apresentada na televisão.

Quanto aos agricultores, a tecnologia moderna transformou a agricultura numa indústria gigantesca onde não há lugar para o pequeno agricultor.

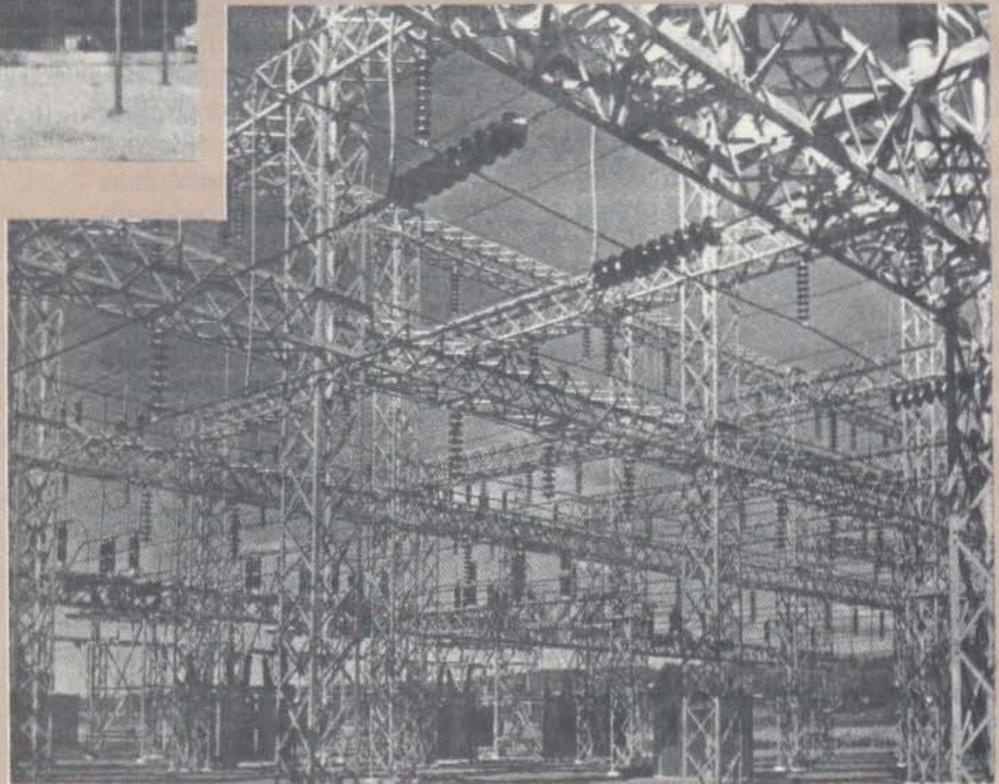
Veja o artigo "Alta Fidelidade" na *Colectânea 4*.

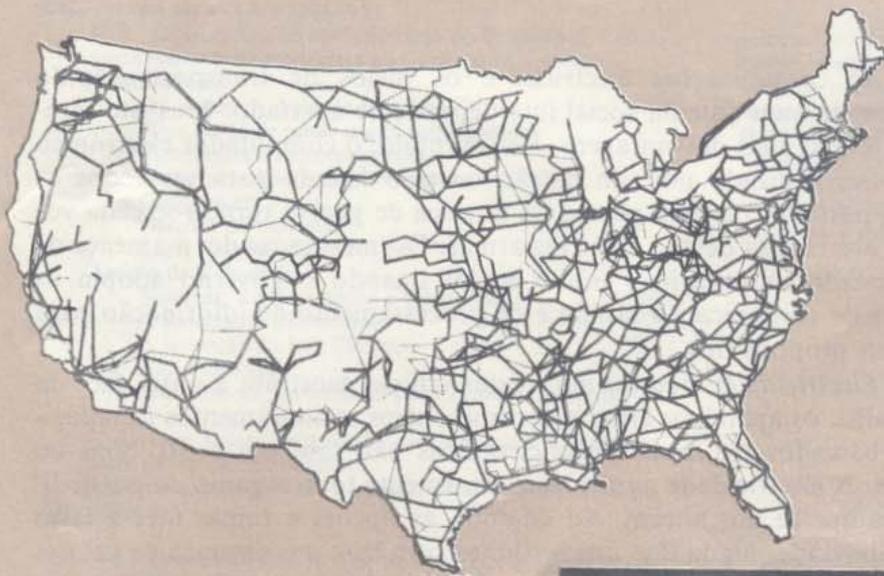


### Distribuição comercial da energia eléctrica

A distribuição comercial da energia eléctrica na forma de corrente alterna implica um equipamento de transmissão complexo. Para serem transmitidas, elevam-se as tensões de saída dos geradores de  $10^4$  volt aproximadamente até cerca de  $10^5$  volt.

Para a distribuição local, faz-se de novo descer a tensão até cerca de  $10^4$  volt e, depois, ainda para  $10^2$  volt por meio de transformadores de potência, colocados em cabos vizinhos. Em casa, esta tensão pode descer mais (muitas vezes até 6 volt, para ser usada nas campainhas das portas e nos comboios eléctricos) ou subir por meio de transformadores montados nos rádios e aparelhos de televisão para fazer funcionar tubos de alta tensão.

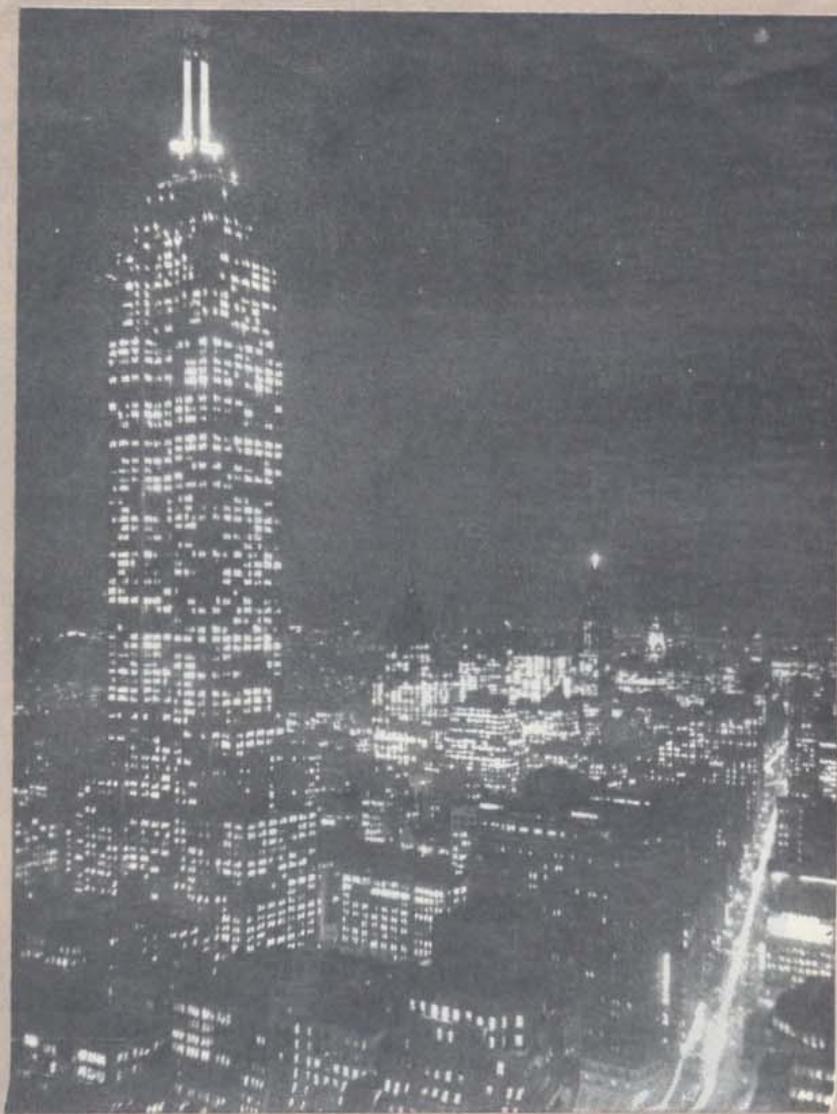
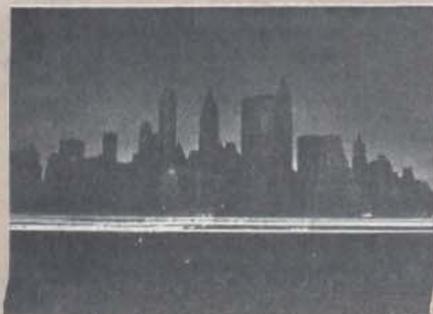




Principais linhas de transmissão eléctrica nos Estados Unidos. Em muitos casos, uma única linha representa no mapa várias linhas de transmissão. Não estão representadas as linhas de pequena capacidade que servem populações dispersas nas áreas montanhosas e desérticas. Nas áreas densamente povoadas só se mostram os cabos de alta tensão.



A interdependência do actual sistema de distribuição de energia eléctrica ficou dramaticamente demonstrada no dia 9 de Novembro de 1965, pelas 5 h da tarde, quando uma falha num cabo de retransmissão eléctrica no Canadá provocou uma falha de energia e a mais completa escuridão em grande parte do nordeste dos Estados Unidos.

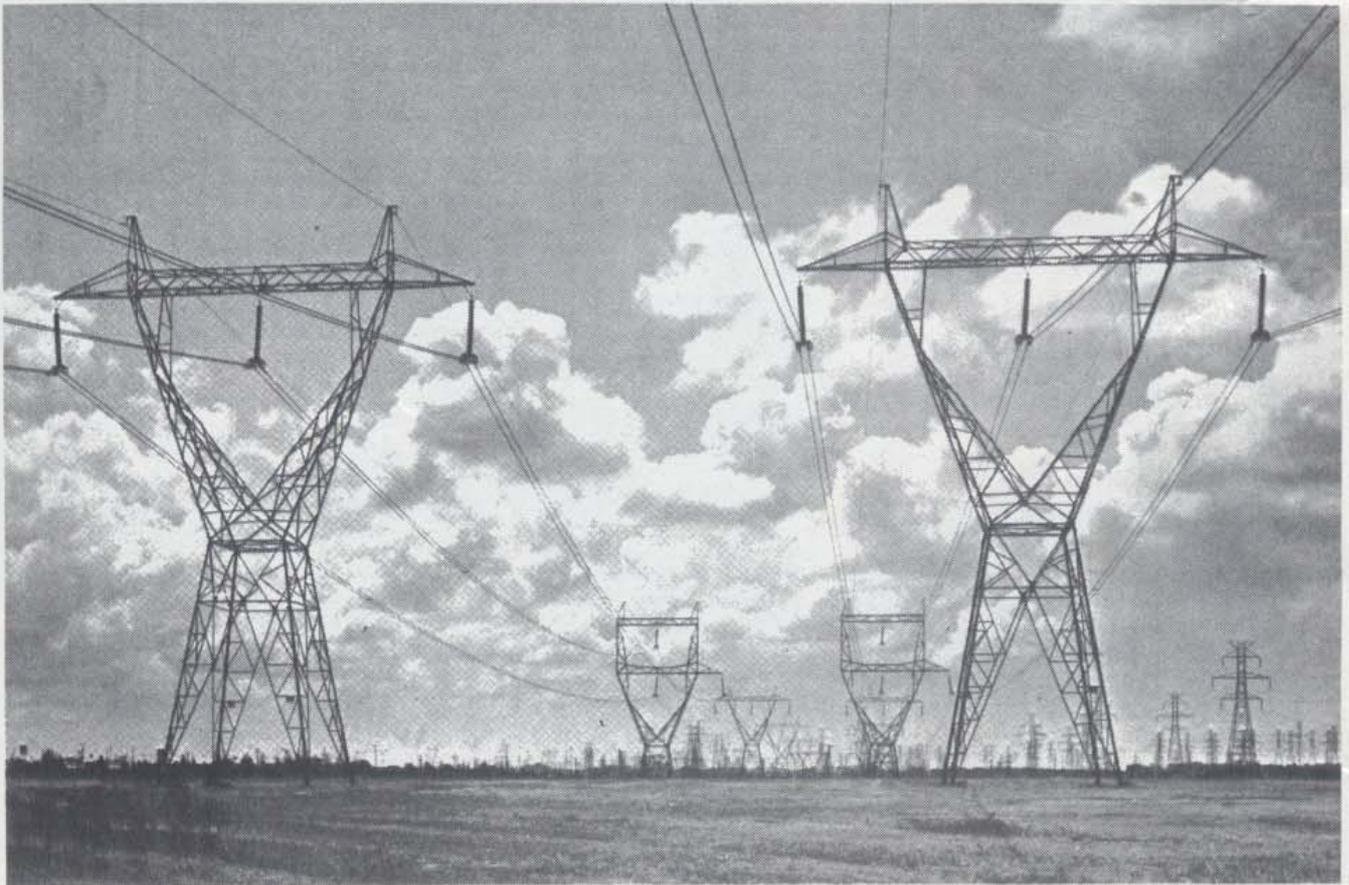


As comunicações eléctricas e os meios de transporte rápido uniram-se num sistema social interdependente apertado. Mas isto também tem as suas desvantagens. Por exemplo, o computador electrónico pode ser utilizado por um patrão ou pelo Estado para ver todos os erros passados de uma pessoa. A ameaça de guerra tornou-se cada vez mais aterradora devido às novas armas. Do mesmo modo, a ameaça de um estado autoritário é muito maior quando o governo adopta os meios de comunicação rápida e de processamento de informação para os seus próprios fins.

*Electricidade: boa ou má?* Estas críticas mostram a outra face da medalha: os aparelhos eléctricos como outros melhoramentos tecnológicos, baseados em descobertas científicas não são, por si só, bons ou maus. A electricidade aumenta enormemente toda a gama de possibilidades que se nos abrem. No entanto, as opções a tomar face a essas possibilidades ainda têm que ser feitas com base em sistemas de valores exteriores à ciência e à tecnologia. É necessário tomar decisões importantes no que diz respeito à electrificação, à utilização da energia nuclear, à automatização e outras aplicações dos computadores e muitas outras aplicações da electricidade. Não podem deixar-se estas decisões aos especialistas em Física e Engenharia, às empresas públicas ou privadas ou às agências governamentais. Devem ser tomadas por cidadãos que se tenham preocupado em aprender alguma coisa sobre as forças físicas que têm um papel importante na civilização moderna.

GE 15.21

Cabos de energia eléctrica no Estado de Nova Iorque.



15.1 Os materiais de aprendizagem do Projecto de Física, particularmente apropriados ao Capítulo 15, incluem:

**Actividades**

- O dínamo de disco de Faraday
- Uma corda de saltar usada como gerador
- Voltímetros e motores simples
- Demonstração de um motor-gerador simples
- Colagens em Física
- Gerador de bicicleta
- Lápis Polaris, Magnes

**Artigos da Colectânea**

- Sistemas, Realimentação e Cibernética
- A Revolução Electrónica
- A Invenção da Luz Eléctrica
- Alta Fidelidade
- O Futuro da Transmissão por Corrente Contínua

15.2 Que fontes de energia existiam para a indústria antes da era da electricidade?

Como se transportava a energia para os locais onde era precisa?

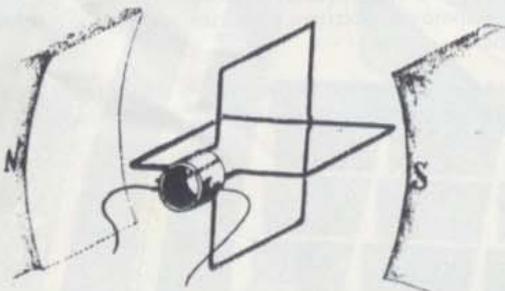
15.3 Oersted descobriu que uma agulha magnética era afectada por uma corrente eléctrica. Imaginava que uma agulha magnética exercesse uma força sobre a corrente? Porquê? Como detectaria esta força?

15.4 Em quais destes casos ocorrerá a indução electro-magnética?

- (a) Liga-se uma bateria a um enrolamento em espiral, colocado nas proximidades de outro enrolamento.
- (b) Desliga-se a ligação entre uma bateria e um rolamento que está colocado perto de outro enrolamento.
- (c) Faz-se mover um íman através de um enrolamento.
- (d) Coloca-se uma espira dentro de um campo magnético estacionário.
- (e) Desloca-se um enrolamento ou uma espira metálica num campo magnético.

15.5 Descreva uma montagem que produza correntes induzidas por meio de um campo magnético e explique em que é que esta montagem difere de uma que produza um campo por meio de uma corrente.

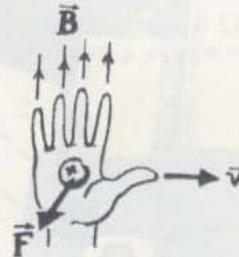
15.6 Disse-se na página 86 que se pode tornar a saída de um gerador de corrente continua mais uniforme usando espiras múltiplas. Como seria a corrente à saída do gerador se se ligasse cada uma das duas espiras a comutadores, como se mostra na figura?



Segmentos de um comutador múltiplo de um gerador eléctrico utilizado num automóvel.

15.7 Reporte-se ao gerador simples de corrente alterna que se mostra na página 84. Suponha que existe uma espira que roda no sentido contrário ao dos ponteiros do

relógio devido a uma força mecânica aplicada exteriormente. Considere o segmento  $b$ , tal como está representado no terceiro desenho, movendo-se através do campo magnético, no sentido descendente. (Lembre-se desta regra, que é muito útil: se os seus quatro dedos apontam no sentido do campo  $\vec{B}$  e o polegar segundo  $\vec{v}$ ,  $\vec{F}$  terá um sentido tal que com a palma da mão a poderia empurrar. Para as cargas positivas, use a mão direita e, para as negativas, a mão esquerda.)

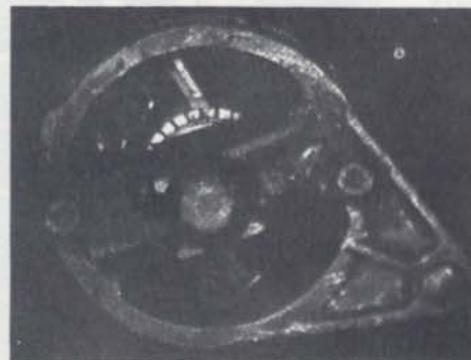


- (a) Use a regra da mão para determinar a direcção e sentido da corrente induzida em  $b$ .
- (b) A corrente induzida corresponde a um movimento das cargas que também se movem no campo magnético externo. Portanto, existe uma força magnética adicional que actua sobre o segmento  $b$ . Use a regra da mão para determinar o sentido da força adicional — mas *antes* de o fazer, tente adivinhar qual a direcção e sentido da força.
- (c) Determine a direcção e sentido da força adicional que se exerce sobre as cargas no segmento designado por  $a$ , que se move no campo magnético, no sentido ascendente.

15.8 Porque é mais difícil fazer rodar um gerador de bobina quando este está ligado a um aparelho a que fornece corrente (uma lâmpada, por exemplo) do que quando não está ligado a qualquer receptor?

15.9 Considere que se deixam cair ao mesmo tempo duas barras magnéticas ambas suspensas ao mesmo nível por uma das extremidades e afastadas de alguns centímetros. Uma delas passa através da espira metálica. Qual dos ímanes chega primeiro ao chão? Porquê?

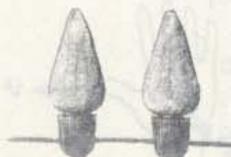
15.10 Esquematize uma situação em que exista um fio perpendicular a um campo magnético e use a regra da mão para determinar a direcção e sentido da força que actua sobre a corrente. Imagine que o fio se move lateralmente em resposta a essa força. Este movimento lateral corresponde a um movimento adicional e, por isso, cada



carga existente no fio é actuada por uma força adicional. Qual é a direcção e sentido desta força adicional que se exerce sobre as cargas?

**15.11** Ligue um pequeno motor de corrente contínua a uma bateria por meio de um amperímetro. Apertando o veio do motor, faça variar o módulo da velocidade a que este se desloca. Com base na sua resposta à pergunta 15.10, pode explicar o efeito que a velocidade tem sobre a corrente?

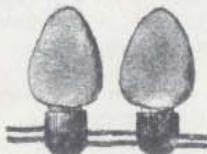
**15.12** Ligam-se 12 lâmpadas próprias para a árvore de natal em série e, em seguida, a uma tomada de 120 volt.



- (a) Se cada lâmpada dissipar 10 watt de energia calorífica e luminosa, qual é a intensidade da corrente no circuito?
- (b) Qual é a resistência de cada lâmpada?
- (c) O que sucederia a estas lâmpadas se estivessem ligadas em paralelo a um cabo de tensão de 120 volt? Porquê?

**15.13** Suponha que queríamos ligar doze lâmpadas em paralelo a um cabo de 120 volt. Neste caso, determine a resistência que deve ter cada lâmpada. Para determinar a resistência, comece por responder à seguintes questões:

- (a) Que intensidade de corrente passará em cada lâmpada?
- (b) Qual é a resistência de cada lâmpada?



Compare a intensidade de corrente total para esta fila de lâmpadas de 10 watt com a intensidade de corrente na fila de lâmpadas da pergunta anterior.

**15.14** Um homem que construiu o seu próprio barco quer equipá-lo com luzes de viagem e com uma luz interior, usando um fio de ligação com uma resistência de  $1/5$  ohm. No entanto, ficou indeciso sem saber se devia usar um sistema de 5 volt ou de 12 volt para ter menos

perdas de calor nos fios de ligação. Suponha que a lâmpada interior vai ser de 6 watt. (Uma lâmpada de 6 watt concebida para uso num sistema de 6 volt tem uma resistência de 6 ohm.)

- (a) Se o sistema fosse funcionar utilizando os 6 volt, com uma perda energética por unidade de tempo de 6 watt, que intensidade de corrente era precisa na lâmpada?
- (b) Se a intensidade de corrente determinada em (a) fosse a intensidade de corrente real, que perda de potência haveria nos fios de ligação?
- (c) Devido à resistência dos fios de ligação, as lâmpadas descritas não podem funcionar na prática a plena capacidade. Refaça os cálculos das alíneas (a) e (b) para determinar quais seriam as correntes reais, perdas de potência e consumo energéticos por unidade de tempo das lâmpadas.

**15.15** Usou-se um transformador num comboio eléctrico de brincar para fazer "descer" a tensão de 120 volt para 6 volt. Como acontece na maioria dos transformadores, a potência de saída da bobina do secundário é apenas um pouco menor que a potência da bobina do primário. Se a intensidade de corrente na bobina do sistema primário fosse de  $1/4$  A, qual seria a intensidade de corrente na bobina do secundário?

**15.16** Para um transformador, a razão entre as tensões aos terminais do secundário e do primário é igual à razão entre o número de voltas do fio da bobina do secundário e o número de voltas do fio da bobina do primário. Se um transformador tivesse um rendimento de 100%, a potência de saída era igual à potência de entrada. Considere que é este o caso e deduza uma expressão para a razão entre o número de voltas do fio nas duas bobinas.

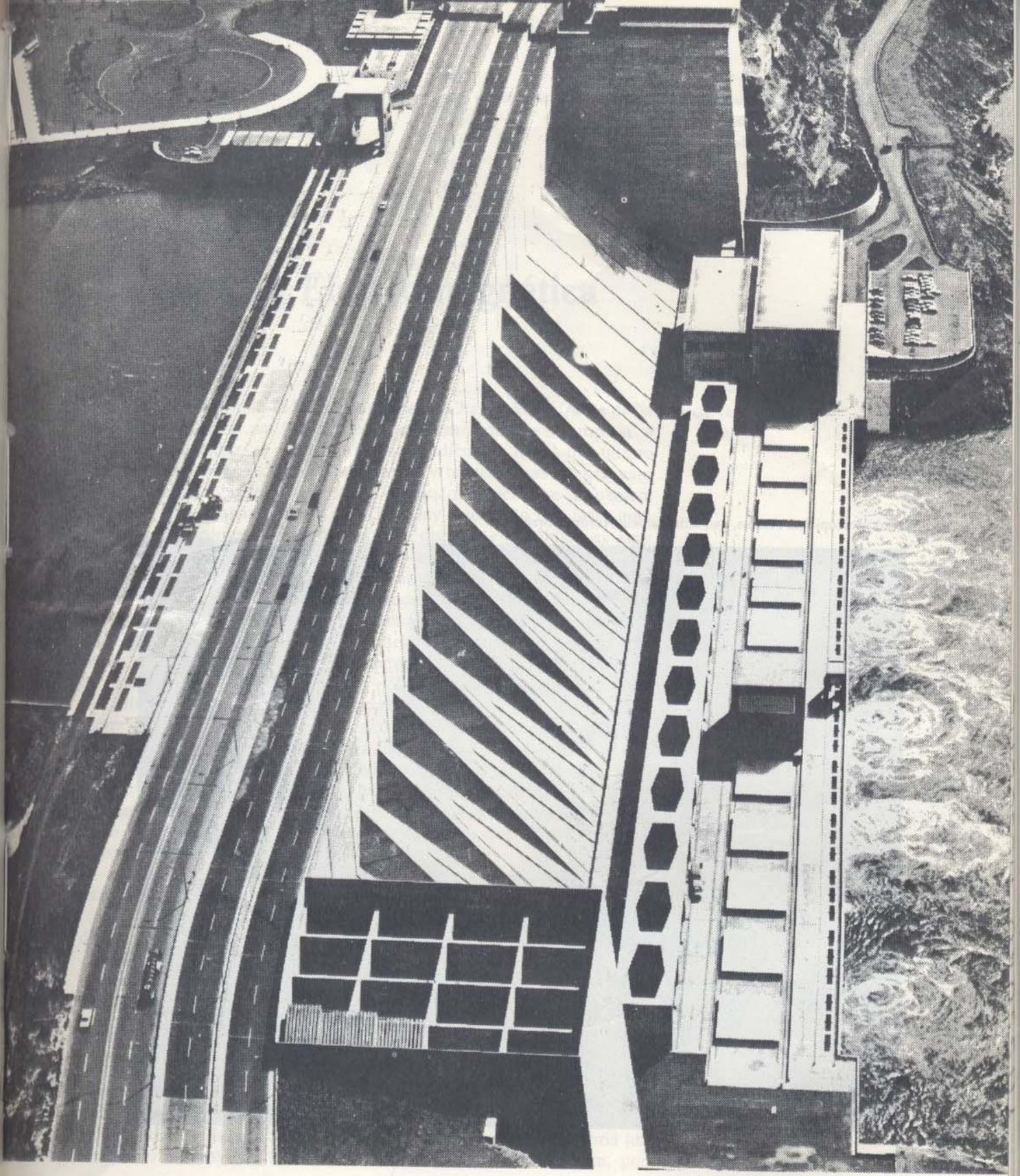
**15.17** Em muitos transformadores, usa-se um fio mais grosso (com menor resistência) para uma das bobinas. Qual das bobinas deverá ter o fio mais grosso, a de maior ou de menor tensão?

**15.18** Comente se é recomendável e quais os métodos possíveis para se sair de um carro sobre o qual caiu um cabo de alta tensão.

**15.19** Que factores fizeram com que a recomendação de Edison para se usar corrente eléctrica na central das Cataratas do Niagara estivesse errada?

**15.20** Escreva um pequeno ensaio comparando os primeiros automóveis eléctricos e aqueles que se estão a testar actualmente.

**15.21** Mencione alguns dos principais efeitos (quer benéficos, quer prejudiciais) da electricidade na sociedade.



16.1	Introdução	107
16.2	Formulação de Maxwell dos princípios do electromagnetismo	108
16.3	A propagação de ondas electromagnéticas	111
16.4	As experiências de Hertz	115
16.5	O espectro electromagnético	119
16.6	E quanto ao éter?	126

Rádio telescópio no Alaska, enquadrada pela Aurora Boreal.



## CAPÍTULO DEZASSEIS

# A Radiação Electromagnética

### 16.1 Introdução

Em 11 de Abril de 1846, o distinto físico Charles Wheatstone devia fazer uma palestra na Royal Institution em Londres. Competia a Faraday apresentar o conferencista à audiência. Mas, no último minuto, exactamente quando Faraday e Wheatstone se preparavam para entrar na sala de conferências, Wheatstone encheu-se de pânico, deu meia volta e abandonou a sala. Faraday teve então que fazer uma palestra. Normalmente, Faraday apenas discutia em público as suas experiências mais recentes mas, naquela ocasião, revelou determinadas especulações que, como mais tarde admitiu, nunca teria tornado públicas se não tivesse sido subitamente obrigado a falar durante uma hora.

As especulações de Faraday relacionavam-se com a natureza da luz. Faraday, tal como Oersted antes dele, acreditava que todas as forças da natureza estavam de algum modo ligadas. Assim, a electricidade e o magnetismo, por exemplo, não podiam ser coisas separadas que, por coincidência, existiam no mesmo universo. Deviam ser formas diferentes de um mesmo fenómeno básico. Esta convicção era semelhante à crença de Schelling e de outros filósofos naturalistas alemães do séc. XIX. Esta filosofia inspirara Oersted a procurar no laboratório uma relação entre a electricidade e o magnetismo, relação que, eventualmente, veio a encontrar ao descobrir que uma corrente eléctrica que passa num condutor pode fazer rodar um íman que se encontre nas proximidades.

Faraday também não tinha sido guiado por uma crença na unidade das forças naturais. Poderia a luz ser também outra forma desta "força" básica? Se isso assim fosse, os cientistas deveriam ser capazes de demonstrar experimentalmente a sua ligação com outras formas de energia, nomeadamente com a electricidade e o magnetismo. Faraday conseguiu demonstrar exactamente a existência de tal ligação. Em 1845, mostrou que o plano de polarização da luz que se propagava através de um vidro espesso rodava quando se aplicava um campo magnético ao vidro.

Esta experiência convenceu Faraday de que havia uma ligação concreta entre a luz e o magnetismo. No entanto, Faraday não conseguiu resistir a avançar mais um passo no decurso da palestra improvisada que teve de fazer no ano seguinte. Sugeriu que talvez a própria luz fosse uma vibração de linhas de forças magnéticas. Considerem, por

GE 16.1

A Filosofia Naturalista foi discutida no Epílogo do Texto da Unidade 2 e na Secção 10.9; a influência que exerceu em Oersted foi analisada na Secção 14.11.

GE 16.2

exemplo, duas cargas ou dois objectos magnetizados ligados por uma linha de força eléctrica ou magnética. Neste caso, raciocinou Faraday, se uma das cargas ou um dos objectos se move, haverá uma perturbação que se transmite ao longo da linha de força. Para além disso, se as ondas luminosas fossem vibrações de linhas de força, não precisaríamos de imaginar uma substância elástica como o éter para explicar a transmissão da luz. Poderíamos substituir o conceito de éter se pudessemos provar que as linhas de força têm as propriedades elásticas necessárias à transmissão das ondas.

Faraday não conseguiu formular a sua ideia com maior precisão. Faltava-lhe a competência matemática necessária para provar que as ondas se podiam propagar ao longo de linhas de forças eléctricas ou magnéticas. Outros físicos na Inglaterra ou no continente europeu poderiam ter sido capazes de desenvolver uma teoria matemática das ondas electromagnéticas. No entanto, nessa altura, esses físicos ou não perceberam o conceito de linhas de força concebido por Faraday ou não o consideravam uma boa base para uma teoria matemática. Passaram-se dez anos até ao aparecimento de James Clerk Maxwell, físico matemático escocês que viu o valor da ideia de linhas de força e que começou a usar a matemática para exprimir os conceitos de Faraday.

## 16.2 Formulação de Maxwell dos princípios do electromagnetismo

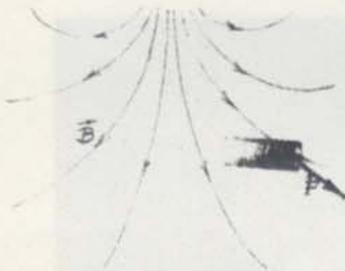
Os trabalhos de Oersted, Ampère, Henry e Faraday tinham estabelecido dois princípios do electromagnetismo.

1. *Uma corrente eléctrica num condutor produz linhas de força magnéticas que envolvem o condutor.*
2. *Quando um condutor se move através de linhas de força magnéticas que se criaram por meios exteriores ao condutor, induz-se uma corrente no condutor.*

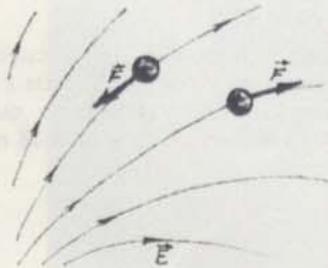
Na década de 1860, James Clerk Maxwell desenvolveu uma teoria magnética do electromagnetismo. Com essa teoria, acrescentou e generalizou estes princípios de modo que eles se aplicassem aos campos eléctricos e magnético existentes nos condutores, isoladores e mesmo no espaço sem matéria.

Maxwell começou por dar uma formulação matemática à teoria que Faraday desenvolvera para a electricidade. Em 1855, menos de dois anos depois de ter completado o seu curso universitário na Universidade de Cambridge, Maxwell apresentou na Cambridge Philosophical Society um longo trabalho intitulado "Sobre as linhas de força de Faraday" e no qual descrevia como se construíam estas linhas:

"... Se começarmos num ponto qualquer e traçarmos uma linha de modo a que, quando a seguimos, a direcção e sentido dos seus diferentes pontos coincida sempre com os da força resultante existente em cada um desses pontos, esta curva indicará a direcção e sentido dessa força em cada ponto que ela atravessa e, por isso, pode chamar-se uma *linha de força*. Podemos, da mesma forma, traçar outras linhas de força até termos preenchido todo o espaço com curvas que indiquem, pela sua direcção e sentido, a direcção da força em qualquer ponto."



As linhas de força magnéticas indicam a direcção e sentido da força magnética que se exerce num pólo Norte magnético. (A força que se exerce sobre o pólo Sul tem um sentido contrário.)



As linhas de força eléctricas indicam a direcção e sentido da força eléctrica que se exerce sobre uma carga de teste positiva. (A força que se exerce sobre a carga negativa tem o sentido contrário.)

Maxwell afirmou que o seu artigo se propunha "mostrar como é que, a partir da aplicação estrita das ideias e métodos de Faraday, a relação entre os diferentes tipos de fenómenos por ele descoberto se podia exprimir claramente em linguagem matemática". Durante os dez anos seguintes, Maxwell criou os seus próprios modelos para a indução eléctrica e magnética. Ao desenvolver a sua teoria, propõe primeiro um modelo mecânico para as quantidades eléctricas e magnéticas que Faraday e outros cientistas tinham observado experimentalmente. Depois Maxwell exprimiu o funcionamento do modelo com um sistema de equações que dava as relações entre os campos eléctrico e magnético. Depressa descobriu que estas equações correspondiam à melhor maneira de prosseguir a teoria. As potencialidades deste sistema de equações eram tais que lhe permitiram abandonar completamente o modelo mecânico. A formulação matemática de Maxwell é ainda hoje considerada pelos físicos como a maneira mais correcta de apresentar a teoria dos fenómenos electromagnéticos. Se seguirem outro curso de Física, depois deste curso introdutório, verão que o desenvolvimento do modelo matemático de Maxwell (as equações de Maxwell) constitui um dos pontos mais importantes do curso. Ele exigirá, por outro lado, conhecimentos de cálculo vectorial.

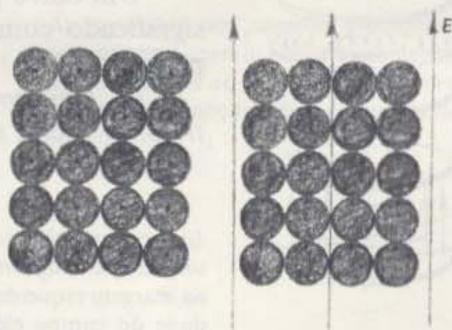
O trabalho de Maxwell continha uma ideia inteiramente nova que implicava consequências de grande alcance: *um campo eléctrico que sofra variações no tempo gera um campo magnético*. Não só as *correntes nos condutores* produzem campos à sua volta mas também *campos eléctricos variáveis em isoladores*, como o vidro, o ar ou vácuo produzem campos magnéticos.

Uma coisa é aceitar esta nova ligação entre os campos eléctrico e magnético, outra coisa mais difícil, mas também interessante, é *compreender* a necessidade física de uma tal ligação. Os parágrafos seguintes destinam-se a clarificar esta relação e a sua necessidade.

Um isolador não carregado (o vidro, a madeira, o papel, a borraça, etc.) contém quantidades iguais de cargas positivas e negativas. No estado normal, estas cargas distribuem-se uniformemente e, portanto, a carga total resultante é zero, em qualquer ponto do material. No entanto, quando se coloca o isolador num campo eléctrico, estas cargas ficam sujeitas a forças eléctricas. As cargas positivas são empurradas num sentido e as cargas negativas no sentido oposto.

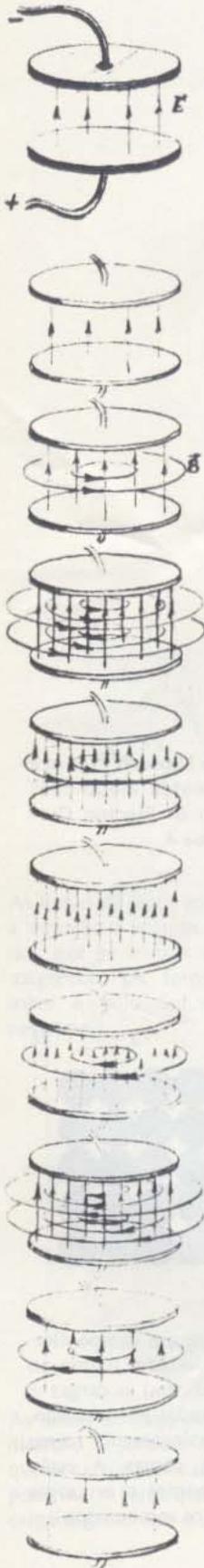
Contrariamente ao que se passa num condutor, as cargas num material isolador *não* podem deslocar-se livremente através desse material. As cargas só se podem deslocar a distâncias curtas até que as forças de reacção do isolador equilibrem a força do campo eléctrico. Se a intensidade do campo aumenta, as cargas deslocar-se-ão a distâncias maiores. Este deslocamento variável das cargas associado a um campo eléctrico variável num isolador produz uma corrente. Maxwell chamou a esta corrente uma *corrente de deslocamento* e considerou que esta corrente de deslocamento momentânea que se estabelece num isolador vai rodear-se de um campo magnético, tal como acontece com uma corrente de condução com o mesmo valor, em módulo.

Num isolador, a corrente de deslocamento define-se como sendo a *taxa de variação de deslocamento das cargas*. Esta taxa é directamente



Veja a discussão de Maxwell "Sobre a indução das correntes eléctricas" ("On the Induction of Electric Currents") na *Colectânea 4*.

Quando se estabelece um campo eléctrico num material isolador (como no diagrama acima, à direita) as cargas + e -, que estavam ligadas por atracção, deslocam-se. Este deslocamento forma uma corrente. (As cargas + estão representadas por pontos e as cargas negativas por circuitos sombreados.)



proporcional à taxa segundo a qual o campo eléctrico varia com o tempo. Assim, o campo magnético que rodeia a corrente de deslocamento pode considerar-se como uma consequência da variação no tempo do campo eléctrico. Maxwell considerou que este modelo, que desenvolvera para a matéria, também se podia aplicar ao *espaço sem matéria* (embora isto pareça absurdo, à primeira vista). Por conseguinte, em quaisquer circunstâncias *um campo eléctrico variável no tempo rodeia-se de um campo magnético*. Anteriormente pensava-se que a única corrente que produzia um campo magnético era a corrente num condutor. Agora Maxwell previa que um campo magnético também podia ser gerado por um campo eléctrico variável, mesmo no vácuo. Infelizmente esse campo era muito pequeno comparado com o campo magnético produzido por uma corrente nos condutores dos aparelhos e não foi possível, nesse tempo, medi-lo directamente. No entanto, como veremos, Maxwell previu consequências que em breve puderam ser testadas.

De acordo com a teoria de Maxwell devia, portanto, acrescentar-se um terceiro princípio aos dois princípios básicos do electromagnetismo já mencionados:

3. *Um campo eléctrico variável no espaço produz um campo magnético*. O vector campo magnético induzido  $\vec{B}$  está num plano perpendicular ao vector campo eléctrico variável  $\vec{E}$ . O módulo do vector  $\vec{B}$  depende da taxa de variação de  $\vec{E}$ , ou seja, de  $\Delta\vec{E}/\Delta t$ , e não de  $\vec{E}$ . Daí que, quanto maior for a frequência e variação de  $\vec{E}$ , maior será o campo  $\vec{B}$  induzido.

Consideremos um par de pratos condutores ligados a uma fonte de corrente, como se mostra à esquerda. As cargas movem-se em direcção ao prato ou deslocam-se a partir deles através dos condutores que os ligam à fonte. Assim, o valor do campo eléctrico  $\vec{E}$  no espaço entre os pratos varia no tempo. Este campo eléctrico variável produz um campo magnético  $\vec{B}$  como aquele que se mostra. (Claro que só mostram algumas das muitas linhas de força que representam  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$ .)

Um outro princípio, conhecido antes de Maxwell, tomou um novo significado com o trabalho de Maxwell, uma vez que é simétrico da proposição 3:

4. *Um campo magnético variável no espaço produz um campo eléctrico*. O vector campo eléctrico induzido  $\vec{E}$  situa-se num plano perpen-

*Um campo eléctrico variável produz um campo magnético* (veja o desenho na margem esquerda): quando a intensidade do campo eléctrico  $\vec{E}$ , existente entre um par de pratos carregado começa a aumentar, é induzido um campo magnético. Quanto mais rápida é a variação de  $\vec{E}$ , maior é a intensidade de  $\vec{B}$ . Quando  $\vec{E}$  atinge momentaneamente o seu valor máximo,  $\vec{B}$  decresce momentaneamente para zero. Quando  $\vec{E}$  diminui, um  $\vec{B}$  é de novo induzido, no sentido oposto e decai até zero à medida que  $\vec{E}$  volta ao seu valor inicial.

*Um campo magnético variável produz um campo eléctrico* (veja o desenho na margem direita): Quando o campo magnético  $\vec{B}$  existente entre os pólos de um electroíman começa a aumentar, é induzido um campo eléctrico  $\vec{E}$ . Quanto mais rápida for a variação  $\vec{B}$ , maior é a intensidade de  $\vec{E}$ . Quando  $\vec{B}$  atinge momentaneamente o seu valor máximo,  $\vec{E}$  decresce momentaneamente para zero. Quando  $\vec{B}$  diminui, um campo  $\vec{E}$  é de novo induzido, no sentido contrário e decai até zero à medida que  $\vec{B}$  volta ao seu valor inicial.



GE 16.3

dicular ao vector campo magnético variável  $\vec{B}$ . O módulo de  $\vec{E}$  depende da taxa de variação de  $\vec{B}$ , ou seja, depende de  $\Delta B/\Delta t$  e não de  $\vec{B}$ . Consideremos um campo magnético variável produzido por um aumento temporário da corrente num electroíman. (Veja a figura na margem direita da página anterior.) Este campo magnético variável induz um campo eléctrico na região em volta do íman. Se acontece que um condutor esteja alinhado com o sentido do campo eléctrico induzido, as cargas livres do condutor mover-se-ão sob a influência do campo, produzindo então no condutor uma corrente no sentido do campo induzido. Esta indução electromagnética tinha sido descoberta por Faraday (Secção 15.3).

As ideias de Maxwell sobre o sistema total de relações entre os campos eléctricos e magnético não foram todas testadas directa e simultaneamente. Quando o teste finalmente apareceu, dizia respeito à previsão que Maxwell fizera sobre a existência de ondas propagando-se como campos eléctrico e magnético interligados — ondas electromagnéticas.

- 
- Q1.** O que é que Maxwell considerou que se gerava quando existe um campo eléctrico variável?
- Q2.** O que é uma corrente de deslocamento?
- Q3.** Quais são os quatro princípios do electromagnetismo?
- 

### 16.3 A propagação de ondas electromagnéticas

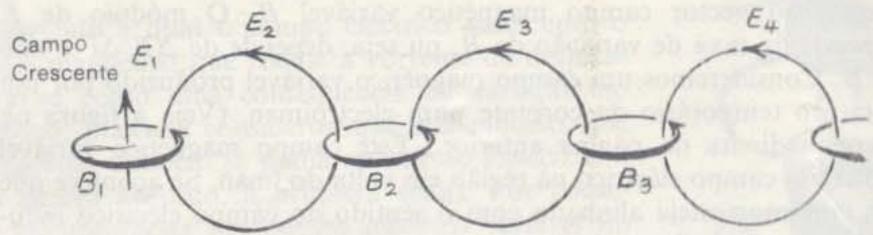
Vamos supor que se criou, numa dada região, um campo eléctrico variável no tempo. De acordo com a teoria de Maxwell, um campo eléctrico  $\vec{E}$  variável no tempo induz simultaneamente um campo magnético  $\vec{B}$  que também varia no tempo. (O campo magnético também varia com a distância até à região onde se criou o campo eléctrico variável.) Analogamente, um campo magnético variável no tempo induz simultaneamente um campo eléctrico variável no tempo. (Neste caso, o campo eléctrico também varia com a distância até à região onde se criou o campo magnético variável.)

Tal como Maxwell percebera e correctamente previra, a indução mútua dos campos eléctrico e magnético variáveis no tempo e no espaço devia estabelecer uma sequência infinita de acontecimentos. Primeiro, um campo eléctrico variável no tempo numa dada região produz um campo magnético variável no tempo e no espaço em pontos próximos desta região. Por sua vez, este campo *magnético* produz um campo *eléctrico* variável no tempo e no espaço, na região que o rodeia. E *este* campo eléctrico produz na *sua* vizinhança campos magnéticos variáveis no tempo e no espaço e assim por diante. Assim, supondo que se começava uma perturbação electromagnética num determinado local fazendo, por exemplo, vibrar as cargas de um gás aquecido ou com o auxílio de um fio transmissor de uma estação de rádio ou de televisão, esta perturbação podia propagar-se até pontos distantes através da geração mútua de campos eléctricos e magnéticos. Os campos eléctrico e magnético flutuantes e interligados propagam-se através do espaço

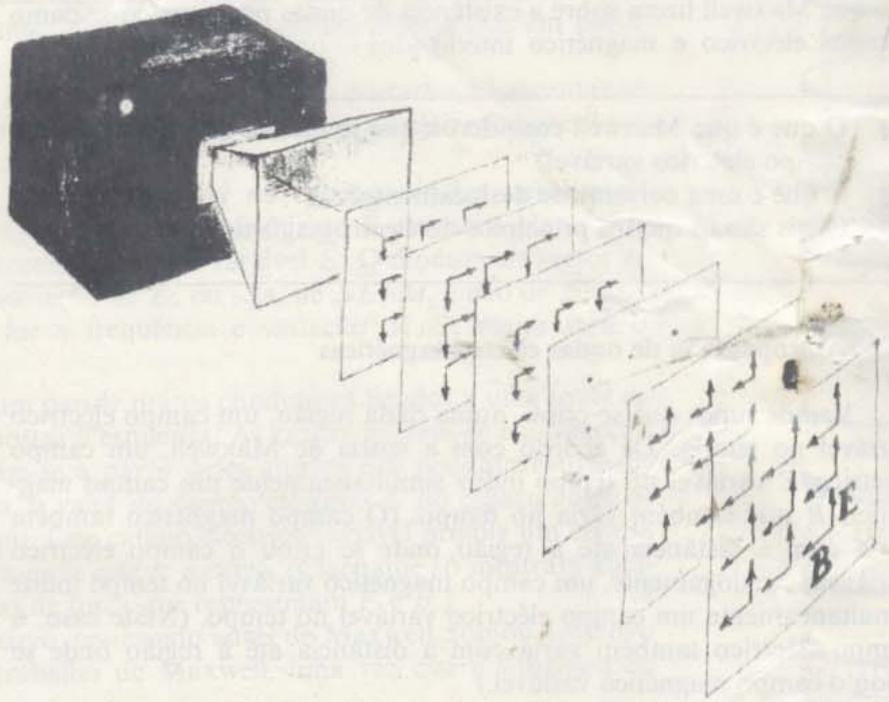
Veja o artigo "A relação entre a Electricidade e o Magnetismo" na *Colectânea 4*.

As variações dos campos eléctrico e magnético ocorrem simultaneamente, analogamente ao que acontece com a "acção" e "reação" da terceira Lei de Newton.

O campo eléctrico  $E_1$  da esquerda, que aumenta de intensidade (ou uma corrente) rodeia-se de um campo magnético  $B_1$ . À medida que  $B_1$  varia, induz um campo eléctrico  $E_2$  encadeado com o primeiro e assim sucessivamente. Este processo em cadeia continua com uma velocidade contínua. Esta é apenas uma descrição aproximada do processo, que se propaga em todas as direcções.



Campos eléctricos e magnéticos encadeados ligados por indução, extraído de *Teoria da Relatividade especial de Einstein*, de Max Born (1924).



Oscilações eléctricas numa válvula são transmitidas para uma haste existente numa campânula metálica. Nessa campânula as oscilações dão origem à variação de campos eléctricos e magnéticos que irradiam para o espaço. Este desenho corresponde a uma "fotografia" em instantâneo de frentes de onda praticamente planas situadas na frente de tal caixa.

#### GE 16.4, 16.5

sob a forma de uma "onda electromagnética" — uma perturbação nas intensidades dos campos eléctrico e magnético no espaço.

No Capítulo 12 mostrámos que aparecem ondas quando uma perturbação criada numa região produz num instante posterior uma perturbação em regiões adjacentes. Quando se sacode a extremidade de uma corda produz-se, através da acção de uma parte da corda sobre outra, um deslocamento em pontos mais afastados da corda, passado um certo intervalo de tempo. Quando se atira uma pedra num lago provoca-se uma perturbação que se vai afastando da origem, à medida que uma parte da água actua sobre as regiões vizinhas. Os campos eléctrico e magnético variáveis no tempo produzem uma perturbação que se afasta da origem à medida que os campos variáveis numa região criam campos variáveis nas regiões vizinhas.



Como se disse no Capítulo 12, página 115, o módulo da velocidade de propagação depende da rigidez e da densidade do meio:

$$\text{velocidade} = \sqrt{\frac{\text{rigidez}}{\text{densidade}}}$$

Com métodos de medição melhores sabemos hoje que quer o valor que Maxwell previu para a velocidade, quer o valor obtido por Fizeau deviam ser ligeiramente menores que  $3 \times 10^8$  m/s, i.e.  $2.99793 \times 10^8$  m/s.

Maxwell mostrou que numa perturbação electromagnética, os vectores  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  deviam ficar perpendiculares um ao outro e perpendiculares ainda à direcção de propagação da onda. Logo, na linguagem utilizada no Capítulo 12, as ondas electromagnéticas são transversais. Como indicámos no Capítulo 13, desde há muito que se sabia que as ondas luminosas eram transversais.

O que é que determina a velocidade com que as ondas electromagnéticas se propagam? Lembremo-nos primeiro de que para as ondas mecânicas a velocidade de propagação é determinada pela rigidez e densidade do meio. A velocidade aumenta com a rigidez mas diminui com o aumento da densidade. Esta relação entre a velocidade da onda, a rigidez e a densidade verifica-se para os movimentos ondulatórios mecânicos. Aqui apenas podemos delinear esquematicamente como é que Maxwell continuou para lá deste ponto. Primeiro, considerou que uma relação semelhante entre “rigidez e densidade” se aplicaria às ondas electromagnéticas. Depois calculou aquilo que pensava serem a “rigidez” e a “densidade” dos campos eléctrico e magnético propagando-se através de um éter hipotético. Para encontrar os valores destas duas propriedades dos campos eléctricos e magnéticos, considerou o seu modelo mecânico que representava o éter. Neste modelo, a rigidez relacionava-se com o campo eléctrico e a densidade com o campo magnético. Em seguida provou matematicamente que a *razão* entre estes dois factores, que deveria determinar a velocidade da onda, é a mesma para todas as intensidades dos campos. Finalmente, Maxwell demonstrou que as velocidades das ondas — se elas existissem! — é uma quantidade precisa que se pode deduzir de medições feitas em laboratório.

As medidas necessárias dos factores envolvidos já tinham efectivamente sido feitas cinco anos antes pelos cientistas alemães Weber e Kohlraush. Utilizando os valores que estes tinham publicado, Maxwell calculou que a velocidade das hipotéticas ondas electromagnéticas deveria ser cerca de 311 000 000 metro por segundo. Maxwell ficou imediatamente impressionado pelo facto deste número tão grande ser muito próximo do valor da velocidade da luz, valor esse que já era bem conhecido dos cientistas. Em 1849, Armand Fizeau tinha medido a velocidade da luz e obtivera um valor de, aproximadamente, 315 000 000 m/s. Esta semelhança tão grande podia ser mera coincidência. Mas Maxwell acreditava que devia existir uma razão adjacente mais profunda para que estes números fossem praticamente iguais. O significado para a Física pareceu-lhe óbvio. Dando um grande salto de imaginação, escreveu:

“A velocidade das ondulações transversais no nosso meio hipotético, calculada a partir das experiências de electromagnetismo efectuadas pelos Srs. Kohlraush e Weber, tem um valor tão próximo do valor da velocidade da luz calculado a partir de experiências de óptica realizadas pelo Sr. Fizeau, que é difícil evitar a inferência de que a luz consistirá em ondulações transversais do mesmo meio que é a causa dos fenómenos eléctricos e magnéticos.”

Aqui estava então uma explicação para as ondas luminosas e ao mesmo tempo um modo de ligar domínios da Ciência até aí separados — a electricidade, o magnetismo e a óptica. Maxwell apercebeu-se da importância da sua descoberta e, a partir daí, começou a trabalhar de modo a apresentar uma teoria matemática sólida e fundamentada, libertando-a do seu modelo, que admitia ser artificial.

A síntese do electromagnetismo e da óptica conseguida por Maxwell, depois de ter sido confirmada experimentalmente (veja a Secção 16.4), foi considerado como um grande acontecimento da Física.

De facto, desde 1680, altura em que Newton escrevera o seu trabalho monumental sobre Mecânica, que a Física não conhecia um período tão alto. É claro que a teoria electromagnética de Maxwell apareceu a Maxwell enquanto newtoniano, dentro de um esquema mecânico. Mas tinha ultrapassado este esquema e tornou-se outra grande teoria geral da Física teórica, independente das suas origens mecanicistas. Tal como aconteceu à mecânica de Newton, a teoria do campo electromagnético de Maxwell conheceu um sucesso espectacular. Veremos algo sobre este sucesso nas Secções seguintes. O sucesso ocorreu em dois planos distintos: o prático e o teórico. Do ponto de vista prático, conduziu a uma imensidade de realizações modernas, tais como a Rádio e a Televisão. Num nível teórico, conduziu a toda uma nova maneira de encarar os fenómenos. O Universo não era apenas uma máquina newtoniana com partes que rodam rapidamente ou que colidem entre si; incluía também campos e energias que nenhuma máquina podia reproduzir. Como indicaremos mais tarde, o trabalho de Maxwell constituiu uma base da teoria especial da relatividade. Outras teorias físicas também foram influenciadas por este trabalho. Eventualmente e, apesar disso, começaram a acumular-se os resultados que não se enquadravam na teoria de Maxwell e alguma coisa mais começou a tornar-se necessária. A partir de 1925, aproximadamente um quarto de século depois da sua descoberta, o desenvolvimento da mecânica quântica conduziu a uma síntese mais ampla, que incluía o electromagnetismo de Maxwell.

- Q4.** Qual foi a descoberta que Maxwell fez depois de calcular a velocidade com que as perturbações electromagnéticas se podiam deslocar?
- Q5.** A que é que se chama a síntese de Maxwell?

#### 16.4 As experiências de Hertz

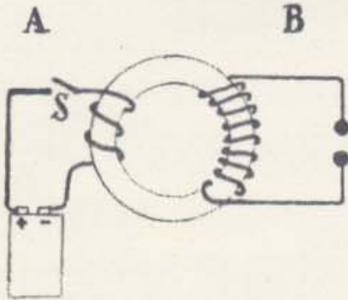
Será que Maxwell estabeleceu, sem sombra de dúvida, que a luz era efectivamente constituída por ondas electromagnéticas, ou mesmo que estas ondas existem realmente? Não. A maioria dos físicos permaneceu céptica durante vários anos. O facto de se ter verificado, a partir de experiências efectuadas no domínio da electricidade, de que a razão entre duas quantidades determinadas é igual à velocidade da luz sugeria certamente que havia *uma* relação entre a electricidade e a luz. Ninguém podia defender seriamente que este facto era apenas uma coincidência. Era, no entanto, necessária uma prova mais forte, antes que o resto da teoria de Maxwell, com a sua corrente de deslocamento, fosse aceite.

Que outras provas foram necessárias para persuadir os físicos de que a teoria de Maxwell era correcta? Maxwell mostrou que a sua teoria podia explicar todos os factos conhecidos sobre a electricidade, magnetismo e luz. Mas existiam também outras teorias que o podiam fazer, embora apresentando uma relação menos forte entre estas diferentes partes. Para um físico actual, as outras teorias propostas no séc. XIX parecem todas muito mais complicadas e artificiais que a de

Para uma visão geral do desenvolvimento das ideias em Física que conduziram até às equações de Maxwell veja o artigo de Einstein e Infeld "O campo electromagnético" na *Colecção 4*.

Veja também "James Clerk Maxwell, II Parte", na *Colecção 4*.

Recorde-se do que foi dito na página 110. O módulo de  $B$  depende da taxa de variação de  $E$  (de  $\Delta E/\Delta t$ ). Logo, um campo eléctrico que oscile com uma frequência elevada induz campos magnéticos fortes comparados com o campo magnético normal que envolve o condutor da corrente. No entanto, circuitos que produzissem oscilações de frequências tão elevadas não existiam no tempo de Maxwell.



Funcionamento de uma bobina de indução: quando se liga ou se desliga a corrente do enrolamento *A* por meio de um interruptor *S*, produz-se um campo magnético que varia rapidamente no núcleo de ferro. Este campo variável induz picos de alta tensão na bobina *B*, constituída por um maior número de espiras do que *A* e pode originar o aparecimento de uma faísca no espaço existente entre as extremidades indicadas. As bobinas de ignição que se usam nos motores dos automóveis funcionam assim.

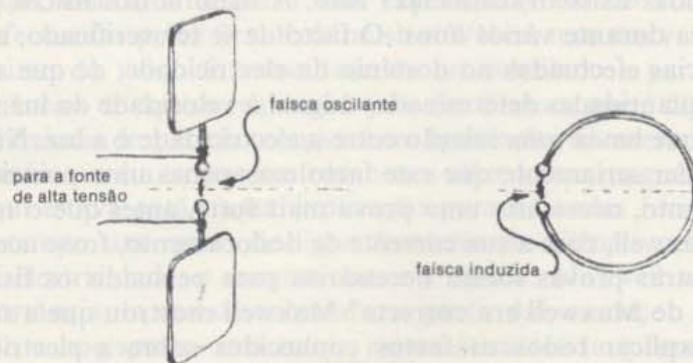
Acontece muitas vezes termos interferências na rádio e televisão devidas à electricidade "estática" produzida por curto-circuitos em aparelhos electrodomésticos ou pela ignição de carros que passem perto. Este facto mostra que quando há uma faísca se produzem oscilações de alta frequência.

GE 16.6

Maxwell. Na altura, no entanto, a teoria de Maxwell parecia estranha aos físicos que não estavam habituados a pensar em termos de campos. Só poderia ser preferida a outras teorias se pudesse ser usada para prever uma nova propriedade do electromagnetismo ou da luz.

O próprio Maxwell fez duas dessas previsões, partindo da sua teoria. Não viveu, no entanto, o suficiente para ver essas previsões provadas experimentalmente em 1888, pois morreu em 1879, com 48 anos. A previsão mais importante que Maxwell fez dizia que podiam existir ondas electromagnéticas com diferentes frequências. Todas estas ondas se propagariam no espaço com a velocidade da luz. A própria luz corresponderia a ondas com altas frequências dentro de uma pequena gama (desde  $4 \times 10^{14}$  ciclo/s até  $7 \times 10^{14}$  ciclo/s). Estas são as frequências detectáveis pelo olho humano.

O teste desta previsão implicava a invenção de aparelhos que pudessem simultaneamente produzir e detectar ondas electromagnéticas — de preferência com frequências diferentes da luz. Isto foi feito pela primeira vez pelo físico alemão Heinrich Hertz, cujo trabalho foi impulsionado por uma observação ocasional. Hertz notou um efeito algo estranho que se produziu durante a descarga de uma bobina de indução. Como era conhecido, por vezes saltavam faíscas entre os terminais de uma bobina de indução (veja o desenho). Recordemos (Capítulo 15) que se pode usar uma bobina de indução para produzir altas tensões se existir um maior número de voltas num enrolamento do que no outro. Normalmente, o ar não conduz a electricidade. No entanto, quando se estabelece uma grande diferença de potencial entre dois fios próximos, pode firmar-se um trajecto condutor momentâneo, devido à ionização das moléculas do ar. Pode haver então uma pequena descarga eléctrica acompanhada por uma faísca. Cada faísca visível que se produz é, na realidade, constituída por uma série de faíscas muito pequenas, que saltam rapidamente para trás e para a frente (oscilando) entre os terminais. Hertz descobriu que podia controlar a frequência de oscilação da faísca variando o tamanho e a forma dos pratos metálicos que limitam o espaço entre os terminais da bobina de indução.

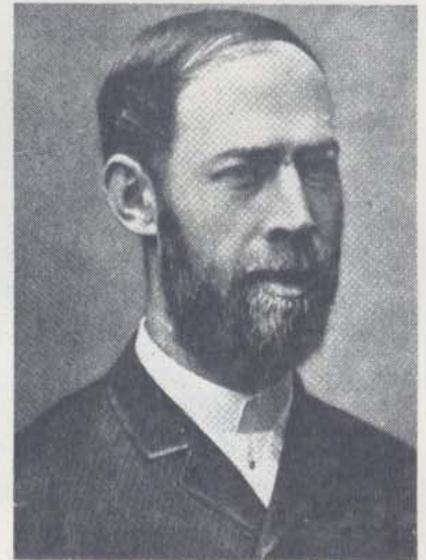


Depois, Hertz dobrou um fio de modo a que houvesse apenas um intervalo estreito entre as suas extremidades. Quando o colocou perto de uma bobina de indução, verificou que *saltava uma faísca no espaço entre as extremidades do fio ao mesmo tempo que saltava uma faísca entre os terminais da bobina de indução*. Este era um novo fenómeno muito surpreendente. Hertz raciocinou que à medida que a faísca salta para trás e para a frente no espaço entre os terminais da bobina de indução ela deve estabelecer campos eléctricos e magnéticos que variam rapidamente. De acordo com a teoria de Maxwell, estas variações propagam-se no espaço como ondas electromagnéticas. (A frequência das ondas é igual à frequência das oscilações das faíscas.) Quando as ondas electromagnéticas passam através do fio dobrado, também aí elas estabelecem campos eléctricos e magnéticos rapidamente variáveis. Um campo eléctrico forte produz uma faísca no ar entre as extremidades do fio, tal como o campo transmissor o fizera entre os terminais da bobina de indução. Dado que o campo varia rapidamente, as faíscas podem saltar para trás e para a frente no espaço entre as duas extremidades do fio. Este fio serve, portanto, como um detector das ondas electromagnéticas geradas pela bobina de indução. A observação de Hertz sobre a faísca induzida foi a primeira indicação sólida da existência das ondas electromagnéticas.

Vamos considerar esta interpretação como correcta e admitir que as ondas se propagam desde a bobina de indução através do espaço. Neste caso, deve haver um certo intervalo de tempo entre a primeira (esquerda) e a segunda faísca (direita). A faísca no detector não pode aparecer exactamente no mesmo instante que a faísca produzida pela bobina de indução. Mesmo que as ondas se desloquem à velocidade da luz, devem demorar um tempo finito para irem de um lado para o outro. Em 1888, Hertz mediu a velocidade destas ondas electromagnéticas e descobriu que, tal como Maxwell previra, essa velocidade era igual à velocidade da luz.

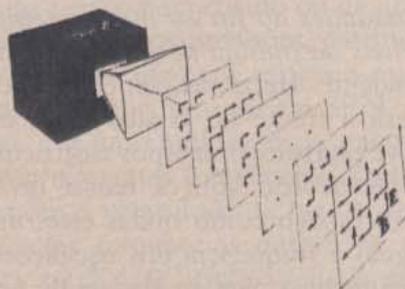
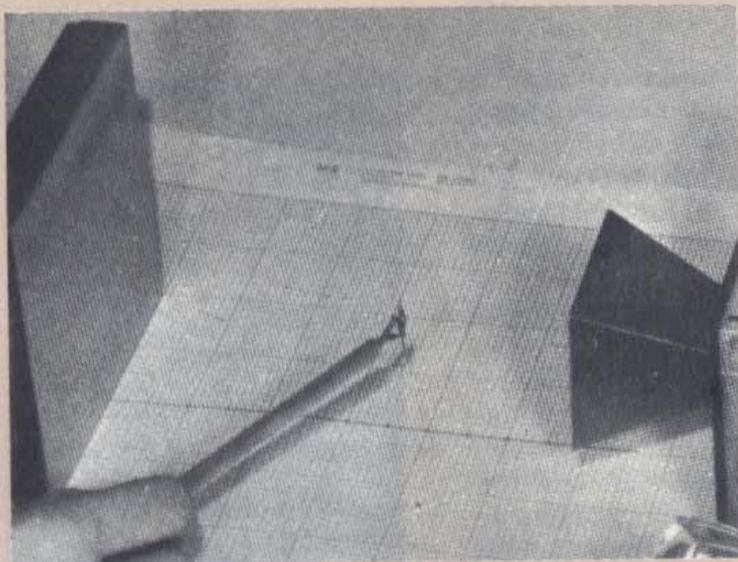
Em experiências posteriores, Hertz mostrou que a radiação electromagnética produzida pela sua bobina de indução tinha todas as propriedades habituais das ondas luminosas. Podia ser reflectida pela superfície dos corpos sólidos, incluindo os condutores metálicos. Além disso, o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência. Pode focar-se a radiação electromagnética com espelhos côncavos metálicos. Apresenta efeitos de difracção quando passa através de uma abertura feita num alvo. As ondas electromagnéticas também se refractam quando passam por prismas de vidro, de madeira, de plástico ou de outro material não condutor. Todas estas experiências se podem realizar no laboratório, com aparelhos mais modernos.

As experiências de Hertz forneceram uma confirmação categórica da teoria electromagnética de Maxwell. Mostraram que as ondas electromagnéticas existem de facto, que se propagam com a velocidade da luz e que têm as características familiares da luz. Depois disso, os físicos matemáticos aceitaram rapidamente a teoria de Maxwell e aplicaram-se com grande sucesso à análise detalhada de toda uma vasta gama de fenómenos.

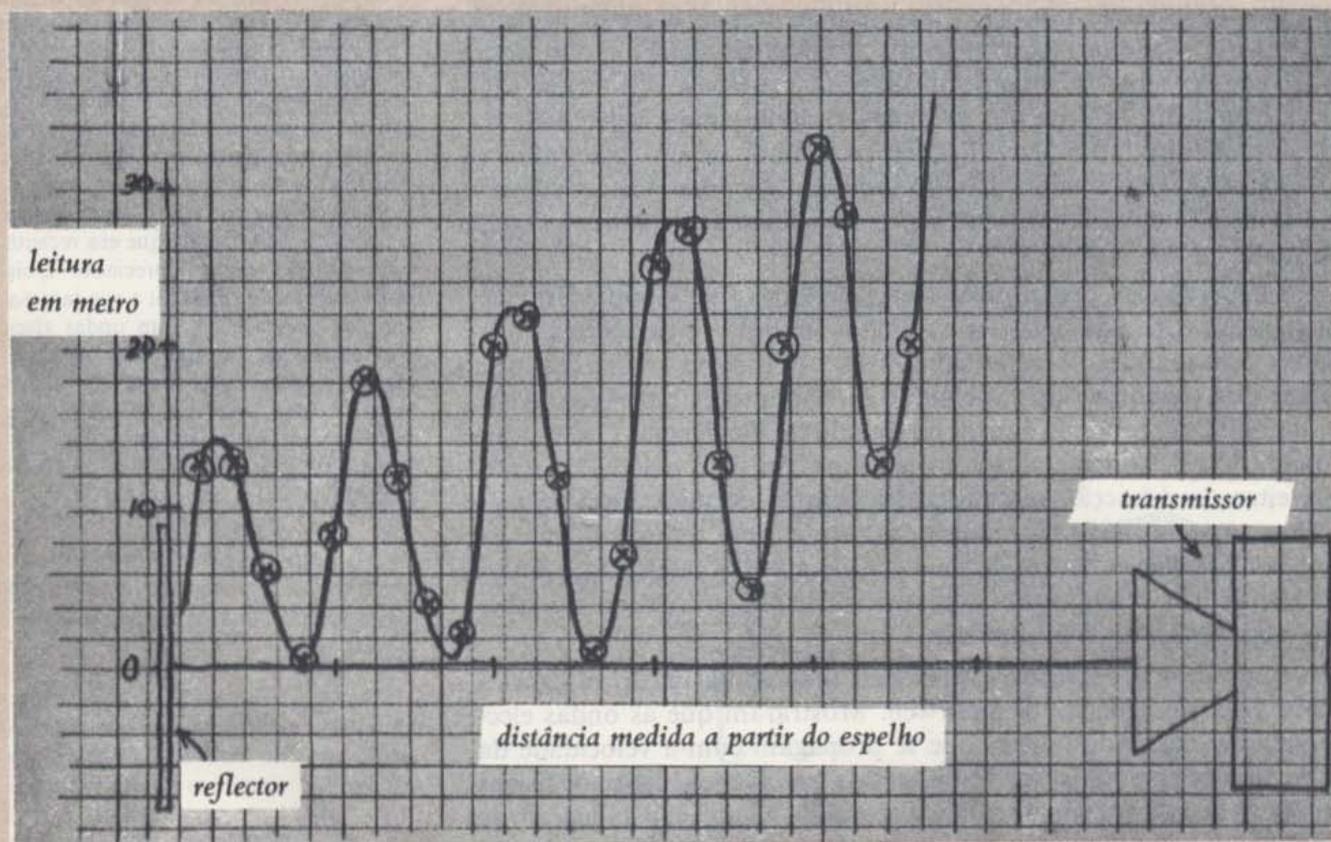


Heinrich Hertz (1857-1894) nasceu em Hamburgo, na Alemanha. Durante a sua juventude interessou-se sobretudo por línguas e humanidades mas logo depois de o seu avô lhe ter dado alguns aparelhos começou a sentir-se atraído pela Ciência. Hertz fez experiências simples num pequeno laboratório que acomodara na sua casa. Depois de ter terminado o ensino secundário (e um ano de serviço militar) começou a estudar seriamente Matemática e Física na Universidade de Berlim em 1878. Em 1882 dedicou-se ao estudo do electromagnetismo, incluindo nesse estudo o trabalho de Maxwell que era recente e ainda não muito apreciado. Dois anos mais tarde começou a sua famosa série de experiências com ondas electromagnéticas. Durante este trabalho, Hertz fez outra descoberta — o efeito fotoeléctrico — que tem tido profunda influência na Física moderna. Estudaremos este efeito no Capítulo 18 (Unidade 5).

Em vez de dependerem de faíscas oscilantes, os circuitos electrónicos modernos usam fios de uma antena transmissora. As correntes oscilantes que se deslocam através dos fios irradiam ondas electromagnéticas.



Uma radiação electromagnética de alguns centímetros de comprimento de onda é gerada por campos eléctricos oscilantes dentro de uma campânula metálica. Experiências feitas com esta radiação apresentam fenómenos semelhantes aos observados com ondas à superfície da água e com ondas sonoras. Em baixo vemos o registo de medidas de intensidade da luz de uma figura de interferência estacionária de ondas electromagnéticas. A intensidade foi medida com o auxílio da corrente induzida num pequeno detector colocado na extremidade de uma sonda, como se mostra na fotografia.



Maxwell também previu que as ondas electromagnéticas exercem uma dada pressão sobre as superfícies que as reflectem ou absorvem. Esta pressão é muito pequena. Experimentalmente, é extremamente difícil de a distinguir da pressão das correntes de ar provocadas pelo aquecimento da superfície que absorve as ondas. As dificuldades técnicas inerentes à verificação desta previsão só foram resolvidas em 1899, por Lebedev na Rússia. Dois anos mais tarde, nos Estados Unidos, Nichols e Hull confirmaram também a existência da pressão da radiação. O valor calculado coincidia com o valor previsto pela teoria de Maxwell.

GE 16.7

GE 16.8

- Q6. Quais das previsões de Maxwell foram verificadas por Hertz?  
 Q7. O que é que Hertz utilizou como detector das ondas electromagnéticas?

### 16.5 O espectro electromagnético

A bobina de indução de Hertz produziu uma radiação electromagnética com um comprimento de onda de um metro, aproximadamente. Este comprimento de onda é cerca de um milhão de vezes maior que o comprimento de onda da luz invisível. Experiências posteriores mostraram que existe uma faixa muito larga e contínua de comprimentos de onda (e frequências) possíveis para as ondas electromagnéticas. Chama-se *espectro electromagnético* a esta gama possível. Estudou-se um intervalo de frequências compreendido entre 1 ciclo/s, aproximadamente, até  $10^{23}$  ciclos/s, intervalo este que corresponde ao intervalo de comprimento de onda entre  $10^8$  m e  $10^{-17}$  m. Muitas destas zonas de frequência já foram utilizadas para fins práticos.

Luz, calor, ondas de rádio, raios X são nomes que se dão às radiações correspondentes a determinadas regiões do espectro electromagnético. Em cada uma destas regiões, a radiação produz-se ou é observada de uma forma característica. Por exemplo, a luz pode ver-se directamente através dos efeitos que tem na retina do olho. No entanto, para detectarmos as ondas de rádio, precisamos de equipamento electrónico. As regiões que citámos sobrepõem-se. Por exemplo há uma radiação que se chama "ultravioleta" ou "Raios X" consoante o modo como é produzida.

Todas as ondas do espectro electromagnético, embora se produzam e se detectem de modos diversos, comportam-se como o prevê a teoria de Maxwell. Todas as ondas electromagnéticas se propagam no vácuo à mesma velocidade, a velocidade da luz. Todas elas transportam energia e, quando são absorvidas, o material absorvente aquece. Uma radiação electromagnética, qualquer que seja a sua frequência, só pode ser emitida se se fornecer energia à fonte de radiação. Actualmente, há provas mais do que suficientes de que a radiação electromagnética tem origem em cargas aceleradas, tal como Faraday tinha especulado. Esta aceleração das cargas pode ser produzida de muitas maneiras. Por exemplo, o aquecimento de um material pode aumentar a energia de vibração de partículas carregadas. Podemos ainda variar o movimento das cargas de um condutor eléctrico (uma antena), ou provocar uma

Deu-se recentemente o nome de "hertz" à unidade de frequência "ciclos/s". Encontraremos, por vezes, as expressões  $10^6$  hertz,  $10^6$  ciclos/s,  $10^3$  kilociclos/s, 1 megaciclos/s ou 1 megahertz. Todas elas significam a mesma frequência. Actualmente muitas estações de rádio anunciam regularmente a sua frequência em megahertz (MHz).

GE 16.9

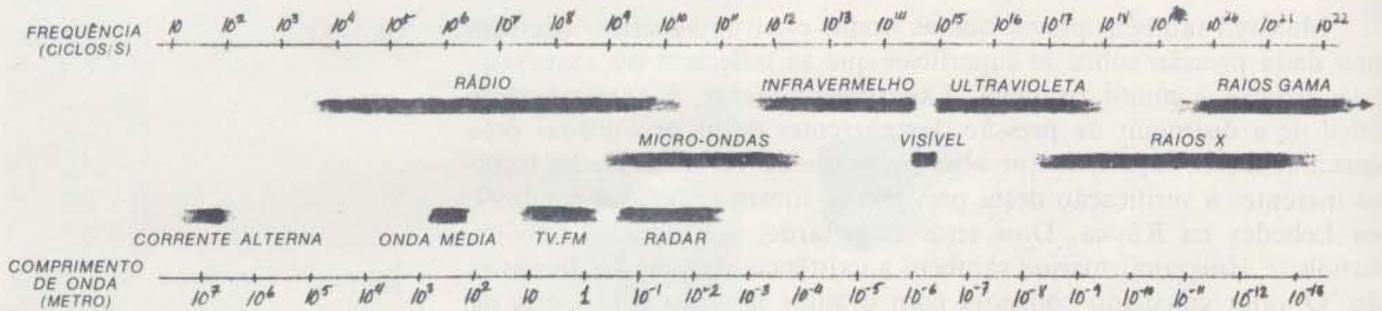


Diagrama do espectro electromagnético.

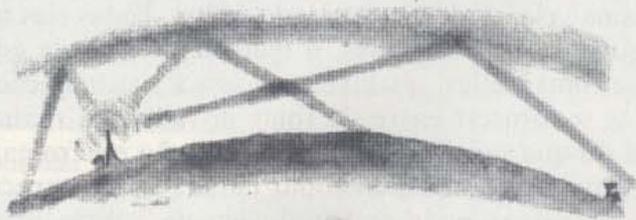
Veja o artigo "A Revolução Electrónica" na *Colectânea 2*.

mudança de direcção do movimento de uma partícula carregada. Nestes e noutros processos, há trabalho realizado pela força que se aplica para acelerar a carga eléctrica. Parte da energia fornecida à antena para efectuar este trabalho é "emitida", ou seja, propaga-se a partir da fonte como uma onda electromagnética.

Os trabalhos de Maxwell e Hertz abriram uma nova visão científica sobre a Natureza. Prepararam também um caminho para o desenvolvimento de novas tecnologias, tais como a rádio, a televisão, o radar, etc. Como já fizemos antes — no capítulo dedicado aos motores e geradores eléctricos, por exemplo — vamos ver rapidamente algumas destas consequências directas de um avanço científico.

**Rádio.** As ondas electromagnéticas com frequências de  $10^4$  a  $10^7$  ciclos/s são bastante bem reflectidas pelas camadas electricamente carregadas que existem na alta atmosfera. Esta reflexão torna possível que se detectem ondas de rádio a grandes distâncias da sua origem. Os sinais de rádio têm comprimentos de onda que vão desde dezenas até milhares de metros. Este tipo de ondas podem facilmente difractar-se em volta de obstáculos relativamente pequenos, como árvores ou prédios. No entanto, montes altos ou montanhas podem originar sombras "escuras"

As ondas de rádio que podem atravessar grandes distâncias quer directamente, quer por retransmissão são muito úteis para a difusão da informação. A comunicação consegue-se mudando o sinal de acordo com um código previamente estabelecido que pode ser decifrado no pólo receptor. A primeira comunicação feita por rádio foi efectuada ligando e desligando o sinal de acordo com uma dada sequência já conhecida, como, por exemplo, o código de Morse. Mais tarde, os sons foram codificados por meio de variações contínuas na *amplitude* (isto é, na intensidade) da onda transmitida (AM).



Mais tarde ainda, a informação foi codificada com o auxílio de variações na frequência da onda transmitida (FM). Na transmissão à distância usada pela rádio e pela televisão, a "descodificação" é feita

Em Dezembro de 1901, Guglielmo Marconi conseguiu detectar com sucesso as ondas de rádio emitidas de Newfoundland para a Irlanda. O trabalho de Marconi mostrou que a comunicação radiofónica para grandes distâncias era possível e revelou a existência de camadas de cargas eléctricas na alta atmosfera, facto de que não se suspeitava até à data.

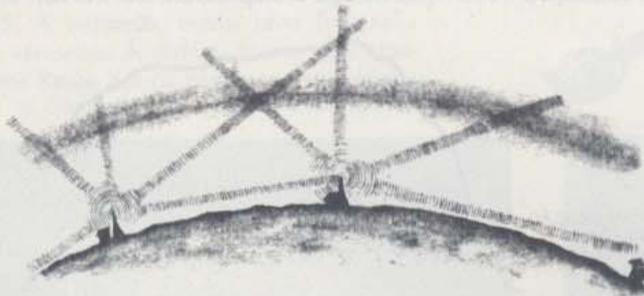
GE 16.10

GE 16.11

num receptor, que está ligado ao amplificador ou ao aparelho receptor de televisão. A mensagem difundida pelo receptor tem a mesma forma que tinha no transmissor.

Dado que os sinais provenientes de diferentes estações não devem ser recebidos com os aparelhos sintonizados no mesmo local, é necessário restringir as transmissões que efectuam. A União Internacional de Telecomunicações (UIT) controla as transmissões radiofónicas e outros meios de comunicação internacionais. Nos Estados Unidos, existe a Comissão Federal de Comunicações que regulamenta as transmissões de rádio. Para reduzir a interferência de um sinal de uma estação com o de outra, a Comissão atribui a cada estação de rádio as frequências convenientes. Limita, também, a potência com que elas emitem em determinadas direcções e pode ainda restringir as horas de transmissão.

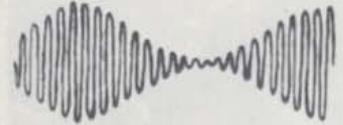
*Televisão e Radar.* A televisão e as estações emissoras em FM funcionam com frequências de cerca de  $10^8$  ciclos/s. Ondas com estas frequências não são reflectidas por camadas de cargas eléctricas existentes na alta atmosfera. Em vez disso, os sinais propagam-se praticamente em linha recta e vão para o espaço em vez de seguirem a curvatura da Terra. É por isso que podem ser usadas nas comunicações entre a Terra e a Lua, por exemplo. No entanto, na Terra, precisamos de cabos coaxiais ou estações de retransmissão para transmitir sinais entre pontos a mais de 80 Km de distância, mesmo se não existirem montanhas no caminho. Os sinais podem ser transmitidos de um local distante para outro, inclusive de um continente para outro, por meio de satélites de retransmissão.



Dado que estes sinais têm comprimento de onda de apenas um metro aproximadamente, eles não se difractam muito em volta de objectos que tenham vários metros de comprimento, como é o caso de carros, navios ou aviões. Assim, usa-se a parte reflectida dos sinais de comprimento de onda que vão desde um metro até um milímetro para detectar estes objectos. A interferência entre as ondas directas e a reflexão dessas mesmas ondas causada por aviões que passam pode perturbar consideravelmente a imagem que se recebe na televisão. O sinal também pode ser emitido sob a forma de impulsos. Neste caso, o tempo entre a emissão de um impulso e a recepção do seu eco dá uma medida da distância do objecto reflector. Esta técnica tem o nome de Radar (Radio Detection And Ranging). Com o auxílio da reflexão de um feixe correspondente a um impulso, pode medir-se a direcção e a distância de um objecto.



Um "transmissor" de ondas de rádio.



AM (Amplitude modelada): a informação é codificada em termos das variações na amplitude (ou intensidade) da onda transmissora.



FM (Frequência modelada): a informação é codificada em termos das variações na frequência de onda transmissora.



Os satélites são usados para retransmitir micro-ondas por todo o mundo. As micro-ondas podem levar informação radiofónica ou televisiva.

Um princípio importante na transmissão e detecção radiofónica é o circuito ressonante ou "sintonizador". Pode encontrar referências a este princípio no *Manual de Rádio Amador* (Radio Amateur's Handbook) ou em qualquer texto básico referido pela maioria dos catálogos dos fornecedores de rádio como, por exemplo, Allied Radio.

GE 16.12-16.18

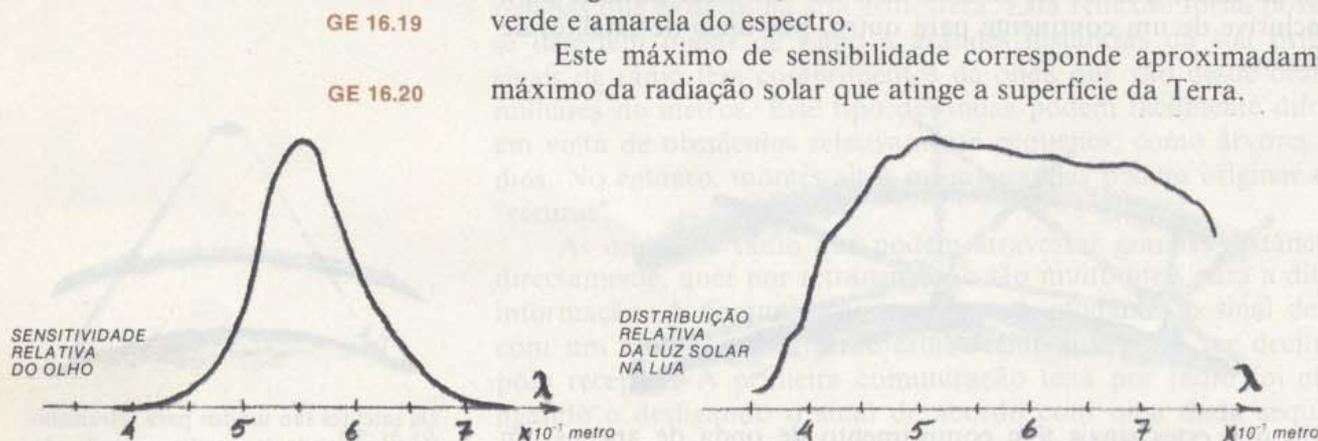


Uma fotografia feita com uma película sensível apenas à radiação infravermelha.

**Radiação infravermelha.** Às ondas electromagnéticas com comprimentos de  $10^{-1}$  a  $10^{-4}$  metro, dá-se frequentemente o nome de micro-ondas. Quanto menor é o comprimento de onda, mais difícil se torna construir circuitos que oscilem e gerem energia de radiação significativa. No entanto, em corpos aquecidos, são os próprios átomos que emitem ondas electromagnéticas mais curtas que  $10^{-4}$  metros, aproximadamente. A ester "calor de radiação" dá-se geralmente o nome de raios *infravermelhos*, isto porque a maior parte da energia tem comprimento de onda ligeiramente maiores que a extremidade vermelha do espectro visível. Embora associados sobretudo com a radiação de calor, os raios infravermelhos têm algumas propriedades que são as mesmas das da luz visível. As ondas infravermelhas com comprimentos de onda mais curtos afectam películas fotográficas que tiveram um tratamento especial e as fotografias tiradas com radiação infravermelha mostram alguns efeitos interessantes. Além disso, a dispersão por partículas pequenas existentes na atmosfera é muito menor para grandes comprimentos de onda (Secção 1.6) e, por isso, os raios infravermelhos podem penetrar zonas de fumo ou com nevoeiro bastante denso, regiões onde a luz visível não pode entrar.

**Luz visível.** Os receptores visuais do olho humano são sensíveis a radiações electromagnéticas cujos comprimentos de onda estão entre  $7 \times 10^{-7}$  e  $4 \times 10^{-7}$  metro. É a radiação com estes comprimentos de onda que se chama geralmente luz, ou luz visível. O olho é mais sensível às partes verde e amarela do espectro.

Este máximo de sensibilidade corresponde aproximadamente ao máximo da radiação solar que atinge a superfície da Terra.

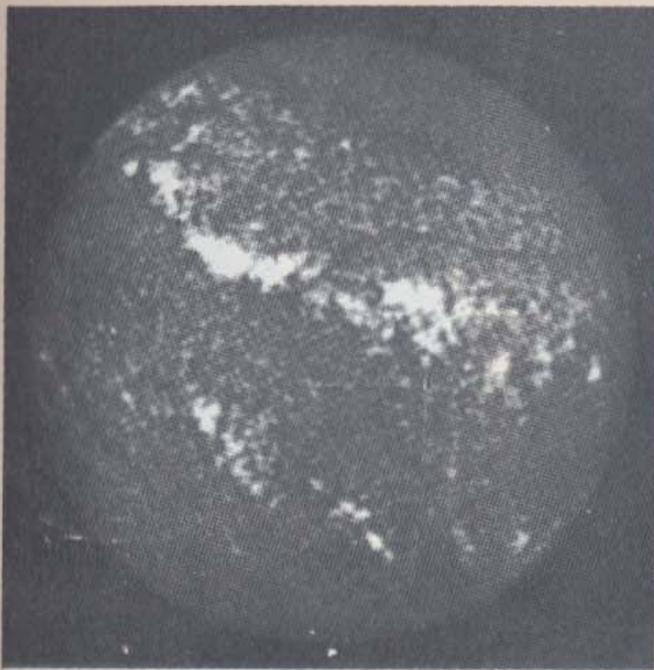


GE 16.19

GE 16.20

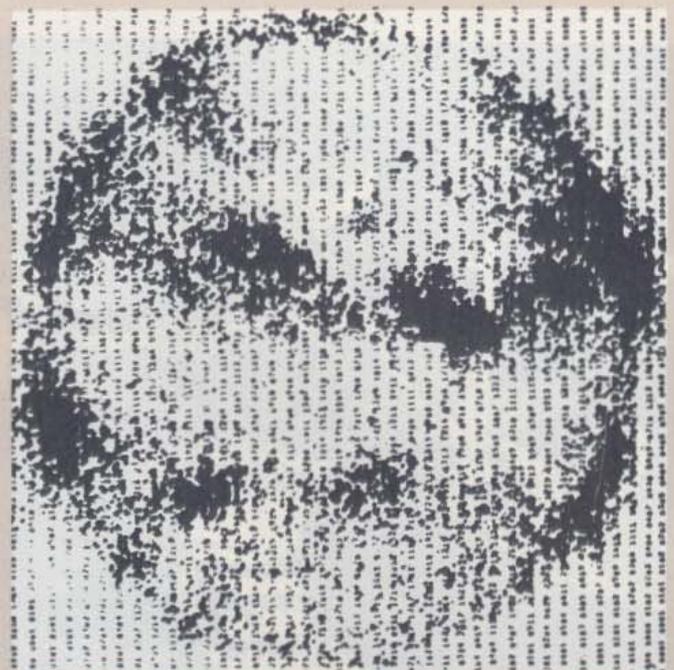
GE 16.21

**Luz ultravioleta.** As ondas electromagnéticas mais curtas que a radiação violeta visível têm o nome de *ondas ultravioletas*. O estudo desta região ultravioleta do espectro tem tanto interesse como os das regiões visível e infravermelha. Os átomos de muitos elementos emitem radiações ultravioletas que são características destes elementos. A luz ultravioleta, assim como a luz visível, pode causar reacções fotoquímicas nas quais a energia de radiação se converte directamente em energia química. São exemplos típicos destas reacções as que ocorrem com o brometo de prata durante o processo fotográfico, na produção do ozono na alta atmosfera e na produção de um pigmento escuro conhecido por melanina que aparece na pele.

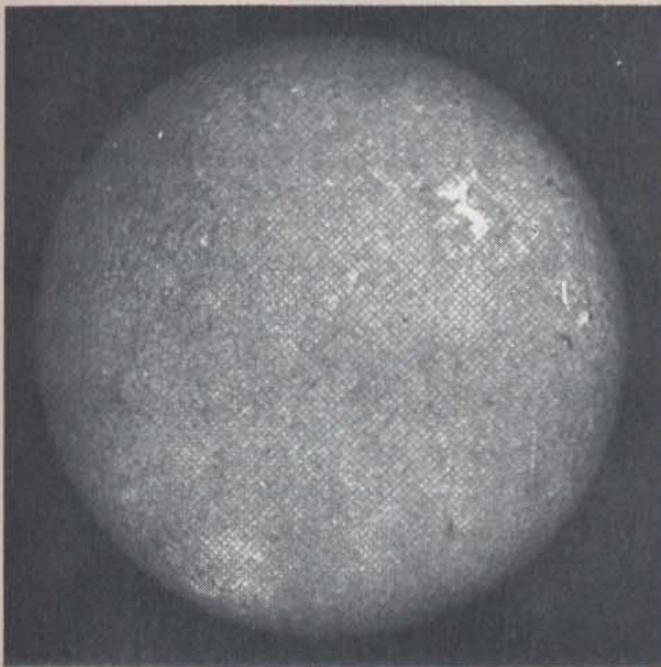
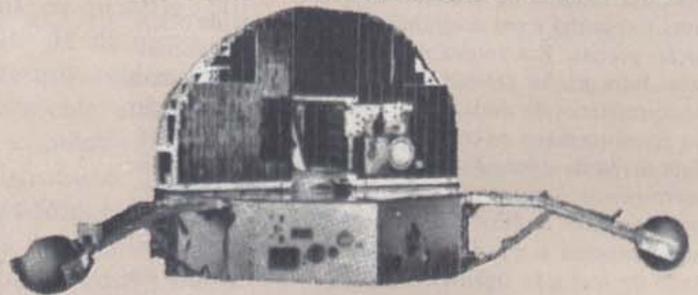


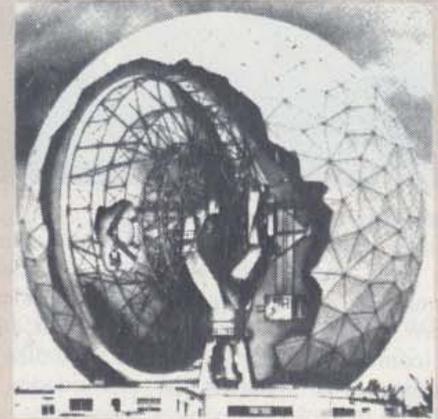
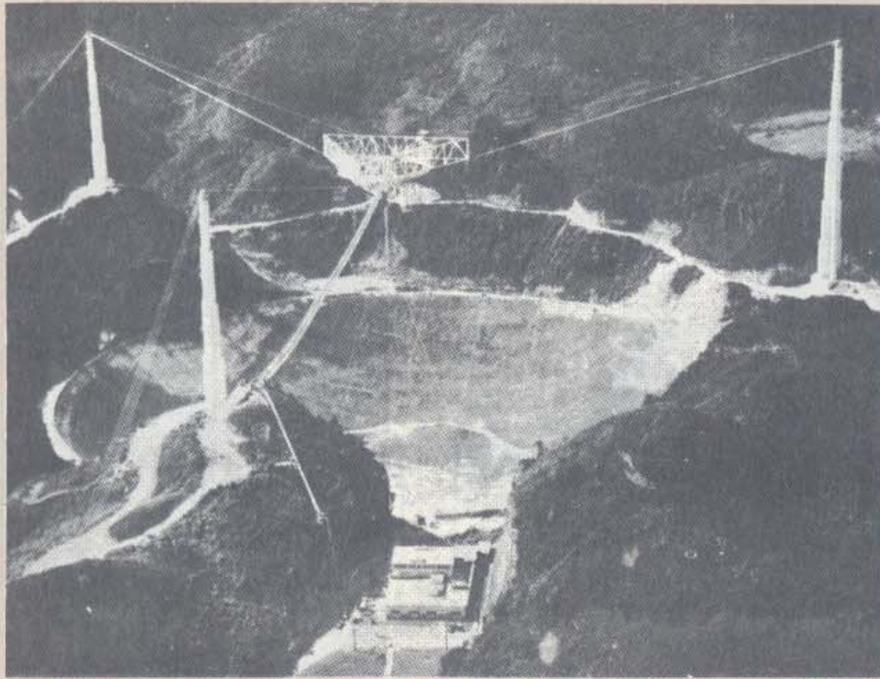
### Astronomia através do espectro

A radiação electromagnética de diferentes comprimentos de onda traz-nos diferentes tipos de informação. Em cima, temos duas vistas do Sol, obtidas em 25 de Outubro de 1967. À esquerda temos uma fotografia tirada com luz *violeta*. À direita temos um traçado feito com um computador das intensidades de uma emissão de radiação ultravioleta muito curta. A radiação UV não penetra na atmosfera terrestre, a informação que se mostra foi obtida a partir do satélite do *Orbiting Solar Observatory*, que se mostra à direita. Em baixo temos três vistas do Sol, obtidas em 17 de Março de 1965. À esquerda, temos uma fotografia tirada com luz vermelha. À direita, vemos uma imagem formada por Raios X e na página seguinte temos um mapa com os contornos das intensidades feito a

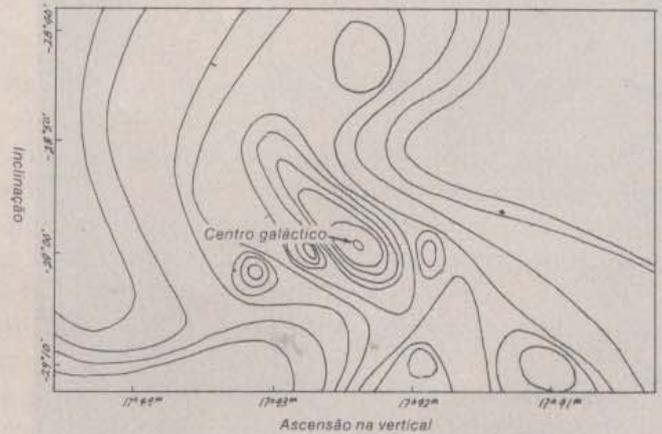
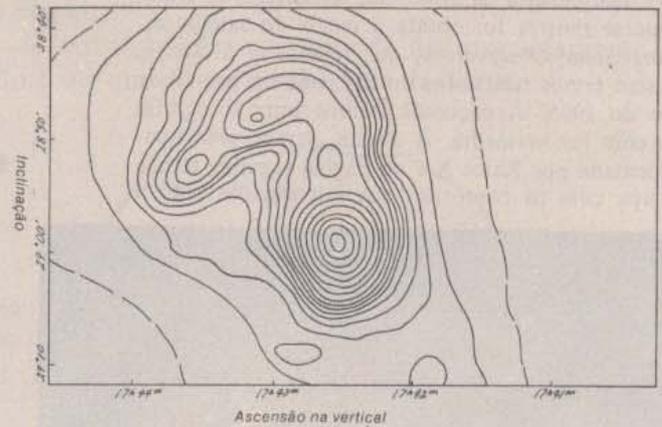
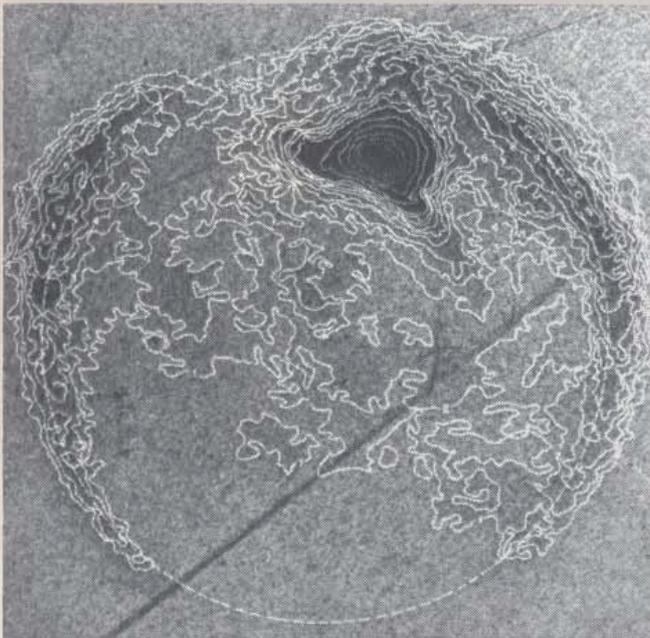


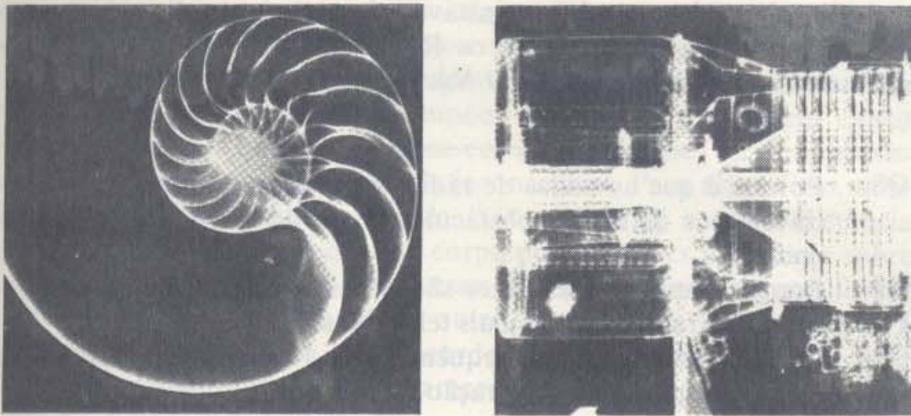
partir desta imagem. O telescópio de Raios X foi colocado acima da atmosfera terrestre com o auxílio do foguetão *Aerobec*. As radiações com comprimentos de onda maiores, como as de rádio ou infravermelhas, são capazes de penetrar no pó interaestrelar. Existem rádio-





-telescópios com uma grande variedade de formas e tamanhos. Em cima, vemos o enorme telescópio *Arecibo*, existente em Porto Rico; tem um reflector fixo mas um módulo de detecção móvel. À direita, vemos uma fotografia e um diagrama de uma antena de orientação precisa. É a antena de Haystack em Massachusetts. Informação recebida com este instrumento para comprimentos de onda de 3,7 cm permitiu a obtenção do primeiro mapa de contornos que se mostra à direita. Este mapa da intensidade luminosa das ondas de rádio corresponde à parte do céu que rodeia o centro da nossa galáxia. A dimensão da área considerada é aproximadamente a mesma que a da lua cheia. A intensidade de *radiação infravermelha* da mesma porção do céu é a que se mostra no mapa de contornos em baixo.





Mão de Carvão, na Dinamarca, e Catalães, Ilhéus, com que se tornou o maior produtor de carvão em Flóres durante vários séculos e séculos.

Foi um dos castelos que mais contribuiu para o desenvolvimento da indústria têxtil nos séculos XVIII e XIX, e para a introdução da

Fotografias de Raios X de uma concha de Nautilus (à esquerda) e de uma máquina a jacto (à direita).

As ondas electromagnéticas são geralmente produzidas pela aceleração de partículas carregadas.

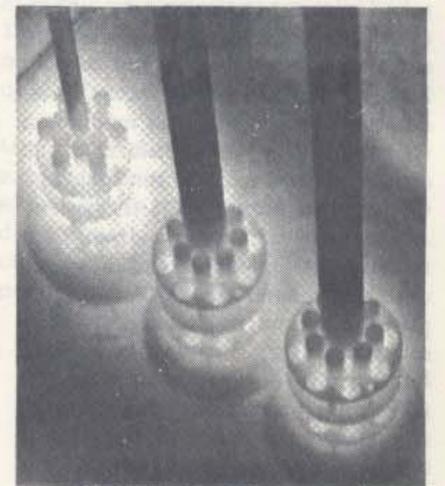


James Clerk Maxwell (1817-1879) nasceu em Edimburgo, na Escócia, no mesmo ano em que Faraday descobriu a indução electromagnética. Ao contrário de Faraday, a família de Maxwell era abastada e Maxwell foi educado na academia e depois na Universidade de Cambridge. Ainda nos seus anos de juventude, produziu trabalhos sobre

**Raios X.** Esta radiação inclui comprimentos de onda que vão desde os  $10^{-8}$  m, aproximadamente, até aos  $10^{-17}$  m. Geralmente, é produzida por uma deflexão rápida ou por uma paragem de electrões que atingem um alvo de metal. A frequência máxima da radiação gerada determina-se a partir da energia com que os electrões atingem o alvo. Por seu lado, esta energia determina-se a partir da diferença de potencial através da qual os electrões são acelerados (Secção 14.8). A frequência máxima aumenta com a voltagem de aceleração. Quanto maior é a frequência dos Raios X, maior é o seu poder de penetração na matéria. No entanto, a distância de penetração também depende da natureza do material a ser penetrado. Os Raios X são facilmente absorvidos pelos ossos que contêm cálcio e passam muito mais facilmente através de matéria orgânica menos densa (como a carne) que contém sobretudo átomos leves de hidrogénio, carbono e oxigénio. Este facto, aliado à capacidade que os Raios X têm de afectar uma chapa fotográfica, conduziu a algumas das utilizações médicas das chapas dos Raios X. Os Raios X podem destruir células vivas e deviam ser usados com a maior das precauções e apenas por técnicos com a preparação devida. No entanto, alguns tipos de células doentes são mais afectadas pelos Raios X que as células saudáveis. Assim, usam-se por vezes feixes de Raios X cuidadosamente controlados para destruir formações cancerosas e outras células prejudiciais.

Os Raios X produzem efeitos de interferência quando incidem em cristais onde os átomos e moléculas se distribuem em estruturas regulares. Diferentes porções de um feixe incidente de Raios X são reflectidas por diferentes planos de átomos existentes na estrutura do cristal. Estes raios reflectidos podem interferir construtivamente e este facto pode ser usado de duas maneiras diferentes. Se a distância entre os átomos do cristal é conhecida, podemos calcular o comprimento de onda dos Raios X. Se o comprimento de onda dos Raios X é conhecido, podemos determinar a distância entre os planos do cristal e, conseqüentemente, conhecer a estrutura do cristal. Os Raios X são actualmente muito utilizados por químicos, mineralogistas e biólogos no estudo das estruturas dos cristais e de moléculas complexas.

**Raios Gama.** A região dos Raios Gama no espectro electromagnético sobrepõe-se à região dos Raios X (veja página 120). A radiação gama é



A luminosidade que aparece nesta fotografia é causada pela interacção dos raios gama emitidos por cilindros de cobalto radioactivo com a água da piscina circundante.

emitida sobretudo por núcleos instáveis de materiais radioactivos naturais ou artificiais. Estudaremos os Raios Gama com maior profundidade na Unidade Suplementar *O Núcleo*.

GE 16.22



James Clerk Maxwell (1831-1879) nasceu em Edimburgo, na Escócia, no mesmo ano em que Faraday descobriu a indução electromagnética. Ao contrário de Faraday, a família de Maxwell era abastada e Maxwell foi educado na Academia e depois na Universidade de Edimburgo. Ainda mal tinha três anos e já mostrava grande interesse em saber como aconteciam as coisas. Quando criança perguntava constantemente "Como é que isto anda?" Estudou todo o tipo de mecanismos, desde brinquedos até uma máquina a vapor comercial, até satisfazer a sua curiosidade de ver como funcionavam. Começou os seus estudos formais na Academia de Edimburgo e depois continuou o seu trabalho como estudante universitário em Cambridge, o que lhe permitiu adquirir a experiência necessária para usar a matemática no estabelecimento de paralelismos muito úteis entre ocorrências aparentemente não relacionadas entre si. A sua primeira publicação apareceu nos *Proceedings* da Royal Society de Edimburgo, quando tinha apenas catorze anos. Aos dezassete anos já tinha publicado três artigos com resultados de investigações suas originais. Durante a década de 1870, organizou o Labora-

- Q8. Porque é que as ondas de rádio não projectam "sombras" apreciáveis por detrás de obstáculos como as árvores ou pequenos prédios?
- Q9. Porque é que muitas vezes são necessárias estações de retransmissão para transmitir sinais televisivos?
- Q10. De que modo é que a frequência dos Raios X está relacionada com o seu poder de penetração na matéria?
- Q11. Onde se situam os comprimentos de onda da luz visível?
- Q12. Em que é que a produção de Raios X difere da produção de Raios Gama?

### 16.6 E quanto ao éter?

O "éter luminífero" fora proposto especificamente como um meio de transmissão das ondas luminosas. Maxwell descobriu que também se podia pensar no éter como meio transmissor das ondas eléctricas e magnéticas. Mais tarde, veio a verificar que podia abandonar completamente este conceito se se concentrasse apenas na forma matemática da teoria. Mesmo assim, e pouco antes da sua morte em 1873, Maxwell escreveu um artigo em que apoiava ainda o conceito do éter:

"Sejam quais forem as dificuldades que possamos ter para formar uma ideia consistente sobre a constituição do éter não pode haver qualquer dúvida de que os espaços interplanetários e interestelares não são vazios, mas sim ocupados por uma substância material ou corpo que é certamente maior e provavelmente mais uniforme que qualquer outro corpo de que tenhamos algum conhecimento..."

Maxwell conhecia os fracassos das teorias que até então existiam sobre o éter. Quase no princípio do mesmo artigo dizia:

"Os éteres foram inventados para que os planetas neles se movessem, para constituir atmosferas eléctricas e fluidos magnéticos, para transmitir sensações de partes do nosso corpo para outras e assim sucessivamente, até que todo o espaço começava a ficar cheio com três ou quatro éteres ao mesmo tempo. Só quando nos lembramos da extensa e nefasta influência que tais hipóteses sobre os éteres costumavam exercer sobre a ciência, é que podemos apreciar o horror que esta ideia dos éteres provocava nas mentalidades sóbrias dos homens do séc. XVIII..."

Maxwell formulara assim uma teoria matemática para o electromagnetismo que não dependia de nenhum modelo detalhado para o

éter. Sendo assim, porque é que ele continuou a falar no “grande oceano do éter” que ocupava todo o espaço? Tal como acontece a todos nós, Maxwell não conseguiu ultrapassar um certo limite na mudança que operara na sua visão do mundo. A ideia que pudessem existir vibrações sem que houvesse alguma coisa que vibrasse, ou de que existissem ondas sem um meio parecia inconcebível. Para além disso, também para muitos cientistas do séc. XIX a ideia de acção à distância parecia absurda. Como é que um corpo podia exercer uma força sobre outro corpo distante se não houvesse algo para transmitir essa força? Diz-se que um corpo age *sobre* outro, e a palavra *sobre* implica a ideia de contacto. Assim, e de acordo com as maneiras aceites para descrever o mundo e que transparecem na linguagem comum, o éter parecia de certo modo necessário.

No entanto, vinte cinco anos depois da morte de Maxwell, o conceito de éter tinha perdido muito do apoio que tivera e, na década seguinte, desaparecera do conjunto de conceitos úteis. Em parte, foi o sucesso da própria teoria de Maxwell que contribuiu para que a crença generalizada na existência do éter comesse a decrescer bastante. As equações de Maxwell não dependiam de pormenores relacionados com a estrutura do éter. De facto, elas podiam exprimir as variações dos campos eléctricos e magnéticos do espaço sem fazer qualquer referência ao éter.

Outra dificuldade relacionada com a existência do éter prendia-se com o fracasso de todas as tentativas para detectar o movimento da Terra com respeito ao éter. Se a luz é uma espécie de vibração de um éter que se espalha por todo o espaço, então a Terra deveria deslocar-se com uma velocidade determinada em relação a este. Por outro lado, a Terra deveria também mover-se através do éter enquanto descreve a sua órbita anual em volta do Sol. Se assim fosse, a Terra deveria deslocar-se como um barco, por vezes contra um “vento de éter”, por vezes tendo este a seu favor. Nestas condições deveria observar-se uma variação na velocidade aparente da luz. A velocidade que a luz tem quando a Terra e um feixe de luz se movem no mesmo sentido não devia ser a mesma que aquela que se observa quando a Terra e a luz se movem em sentidos opostos.

Os teóricos calcularam o tempo necessário para que a luz percorresse o caminho de ida e volta a favor e contra o vento de éter. Depois compararam este intervalo de tempo com o tempo calculado para o mesmo percurso mas na ausência desse mesmo vento de éter. Descobriram que a diferença de tempo esperada era muito pequena: apenas  $10^{-15}$  segundos para uma viagem de ida e volta de 30 metros. Esta diferença é demasiado pequena para ser medida directamente, mas como é da mesma ordem de grandeza de um período da luz visível, pensou-se que poderia ser detectada a partir de observações feitas com figuras de interferência produzidas de modo apropriado. Em 1887, os cientistas americanos Albert Michelson e Edward Morley usaram uma aparelhagem suficientemente sensível para poder detectar efeitos com apenas um por cento do valor previsto pela teoria do éter. Nem esta experiência nem outras experiências semelhantes realizadas desde então revelaram qualquer vento de éter.

tório de Cavendish, na Universidade de Cambridge, laboratório esse que se tornou o centro mundial da investigação em Física durante várias décadas a seguir.

Foi um dos cientistas que mais contribuiu para o desenvolvimento da teoria cinética dos gases, da mecânica estatística e da termodinâmica e também para a teoria da visão a cores. O seu trabalho mais importante foi a teoria electromagnética. Maxwell é geralmente considerado como o físico mais profundo e produtivo que existiu entre a época de Newton e a de Einstein.

#### GE 16.23

Observa-se um efeito semelhante com as ondas de rádio: em relação à Terra, elas deslocam-se mais depressa quando têm vento a seu favor do que quando se movem contra o vento.

Michelson tentou a sua primeira experiência em 1881, motivado pelas especulações de como medir o efeito do éter na propagação da luz, fornecidas por Maxwell numa carta que foi publicada logo após a sua morte.

Os defensores do conceito de éter deram várias explicações para este resultado. Sugeriram, por exemplo, que os objectos que se deslocam a grandes velocidades relativamente ao éter poderiam mudar de tamanho de tal forma que esta velocidade relativa se tornasse impossível de detectar. Mas mesmo os que fizeram tais tentativas para recuperar o conceito de éter sentiam que as suas propostas eram forçadas e artificiais. Finalmente, um desenvolvimento decisivo levou os cientistas a desistir do conceito de éter. Este acontecimento não se ficou a dever a uma experiência específica mas sim a uma proposta brilhante feita por um jovem de 26 anos. Este homem era Albert Einstein e em 1905 sugeriu que se podia conseguir formular uma nova e profunda união da mecânica e do electromagnetismo sem o auxílio de nenhum modelo relacionado com o éter. Vamos fornecer aqui umas notas que poderão servir como base para um estudo mais aprofundado da relatividade e que será feito mais tarde.

Einstein mostrou que as equações do electromagnetismo se podiam escrever de modo a ficarem de acordo com o mesmo princípio da relatividade que se aplica à mecânica. O princípio da relatividade de Galileu já foi discutido na Secção 4.4. Este princípio diz que se aplicam as mesmas leis da mecânica em cada um dos sistemas de referência que se desloquem com uma velocidade constante um relativamente ao outro. Assim é impossível dizer com base em qualquer espécie de experiência mecânica se um laboratório (sistema de referência) está parado ou se se move com uma velocidade constante. Este princípio pode ser exemplificado por meio de experiências correntes realizadas dentro de um barco, automóvel, avião ou comboio que se movam rectilaneamente a uma velocidade constante. O observador descobre que os objectos se movem ou permanecem parados ou caem ou respondem a forças que a eles sejam aplicados exactamente da mesma forma que quando estes meios de transporte estão parados. Galileu, um convicto adepto de Copérnico, aplicou este princípio ao movimento de objectos em relação à Terra. Recordemos o exemplo de uma pedra que caía com um movimento rectilíneo paralelamente a uma torre. Galileu argumentou que este acontecimento não dava qualquer informação que nos permitisse decidir se era a Terra que estava fixa e o Sol em movimento ou se era o Sol que estava fixo e era a Terra que se movia.

Einstein generalizou este princípio da relatividade para além do domínio da mecânica e propôs que ele se applicava a *toda* a Física, incluindo o electromagnetismo. Uma das principais razões que o levou a pôr esta hipótese parece estar ligada ao seu sentimento que a Natureza não podia ser tão desequilibrada que um princípio da relatividade se applicasse apenas a *uma parte* da Física. Einstein adicionou então uma segunda conjectura básica e afirmou que a *velocidade de qualquer feixe de luz movendo-se num espaço livre é a mesma para todos os observadores*, mesmo quando estes se movem uns em relação aos outros ou em relação à fonte luminosa! Esta afirmação tão radical resolveu o problema de saber porque é que o movimento de observadores em relação ao éter não era detectado nas experiências efectuadas sobre a velocidade da luz. De facto Einstein rejeitou a ideia do éter e todas as outras tentativas feitas para fornecer um "sistema de referência preferencial" para

Encontramos mais material sobre a teoria da relatividade no Capítulo 20 e na *Colectânea 5*.



Einstein em 1912.

Veja o artigo de Einstein "Sobre o Método da Física Teórica" na *Colectânea 4*.

propagação da luz. Einstein mostrou que o preço a pagar pela introdução das suas hipótese era a necessidade de rever algumas das noções sobre o espaço e o tempo que existiam a nível de senso comum. Einstein provou ainda que as equações de Maxwell eram absolutamente consistentes com esta generalização do princípio da relatividade a toda a Física. O trabalho de Einstein constituiu mais um dos grandes trabalhos de síntese reunindo ideias anteriormente separadas, a par dos que tinham sido realizados por Copérnico, Newton e Maxwell.

Qual foi então o papel desempenhado pelas complicadas teorias do éter que estiveram na base da maior parte da Física do séc. XIX? Seria injusto dizer que o conceito do éter fora inútil, dado que foi ele que finalmente orientou o trabalho de Maxwell e outros e que contribuiu também para o desenvolvimento de uma maior compreensão das propriedades elásticas da matéria. A melhor maneira de olharmos para os primeiros modelos mecânicos usados para a luz e a electricidade será talvez a de os considerar como andaimes necessários para a construção de um edifício. Uma vez o edifício completo, e se a construção tiver sido sólida, os andaimes podem ser retirados e destruídos.

De facto, a própria ideia de explicação a partir de mecanismos tem sido abandonada em larga escala pela Física moderna. Na Unidade 5 e na Unidade Suplementar *O Núcleo* retomaremos os desenvolvimentos que ocorreram na Física no séc. XX e que têm vindo a mostrar as deficiências das explicações mecanicistas.

- 
- Q13.** Porque é que Maxwell (e outros) se agarravam ao conceito de um éter?
- Q14.** Qual foi o argumento que finalmente demonstrou que a hipótese do éter era desnecessária?
- 

Discutiremos outras importantes consequências da teoria da relatividade de Einstein na Unidade 5.

GE 16.24-16.28



**EPÍLOGO.** Nesta Unidade seguimos a história de como a luz e o electromagnetismo se tornaram compreensíveis primeiro separadamente e depois considerados em conjunto. O modelo corpuscular da luz explicava o seu comportamento em termos de partículas em movimento. De acordo com este modelo, pensava-se que estas partículas ao serem submetidas a forças elevadas numa dada fronteira, ressaltavam ou deflectiam o seu percurso segundo direcções que eram exactamente as mesmas que se observavam quando a luz era reflectida ou refractada. O modelo ondulatório também explicava estes e outros efeitos considerando que a luz era constituída por ondas transversais num meio contínuo. Estes modelos rivais forneceram analogias mecânicas úteis para a luz, quer esta fosse encarada como sendo constituída por partículas ou por ondas.

Os modelos mecânicos também funcionaram, até certo ponto, para explicar a electricidade e o magnetismo. Tanto Faraday como Maxwell utilizaram os modelos mecânicos para as linhas de força eléctricas e magnéticas. Maxwell utilizou estes modelos como guias para o desenvolvimento de uma teoria matemática. Esta teoria também explicava a luz como um fenómeno de ondas electromagnéticas.

Os campos eléctricos e magnéticos da teoria de Maxwell não se podem fazer corresponder a partes de nenhum modelo mecânico. Haverá, então, alguma maneira de visualizar a que é que um campo “se assemelha”? Temos aqui a resposta a esta pergunta dada pelo físico americano Richard Feynman, prémio Nobel da Física:

“Pedi-lhes que imaginassem estes campos eléctricos e magnéticos. O que é que vocês fazem? E sabem como? Como é que eu próprio imagino um campo eléctrico e um campo magnético? Quais serão as exigências da imaginação científica? Será diferente daquela que exercemos quando tentamos imaginar que a sala está cheia de anjos invisíveis? Não, não é a mesma coisa que tentar imaginar anjos invisíveis. O grau de imaginação que se exige para perceber um campo eléctrico é maior do que o que é necessário para compreender anjos invisíveis. Porquê? Porque para tornar compreensíveis os anjos invisíveis basta-me alterar *um pouco* as suas propriedades — torno-os ligeiramente visíveis e então já posso ver a forma das suas asas e dos seus corpos, assim como as suas auréolas. Uma vez que consegui imaginar um anjo visível, a abstracção requerida — que é a de considerar anjos quase invisíveis — é relativamente fácil. Assim dizem-me: “Professor, dê-me, por favor, uma descrição aproximada das ondas electromagnéticas, mesmo que seja ligeiramente inadequada, para que eu também as possa ver tal como posso ver anjos invisíveis. Depois eu transformarei a imagem na abstracção necessária.”

Tenho pena de não vos poder fazer isso. Não sei como se faz. Não tenho nenhuma imagem deste campo electromagnético que se possa dizer adequada em qualquer sentido. Conheço o campo electromagnético desde há muito — há 25 anos estava na mesma posição em que vocês se encontram até agora e tive 25 anos de experiência a pensar sobre essas ondas que se movem

de um lado para o outro. Quando começo a descrever o campo magnético movendo-se através do espaço, falo dos campos  $E$  e  $B$ , movimento os meus braços e é possível que imaginem que os posso ver. Vou dizer-vos o que *posso* ver. Vejo umas linhas vagas, de contornos indefinido, que se movem de um lado para o outro — aqui e além há um  $E$  e  $B$  que de algum modo estão escritos sobre elas e talvez que algumas destas linhas tenham setas — uma seta aqui ou ali que desaparece logo que a olho com um pouco mais de atenção.

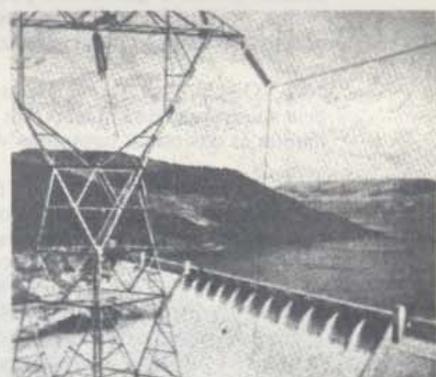
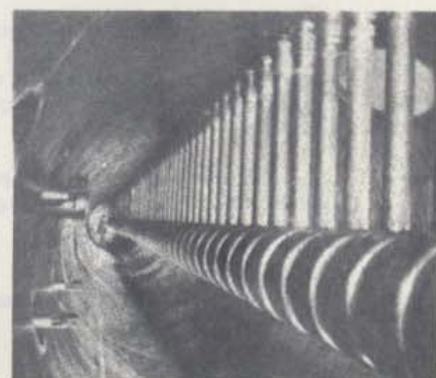
Quando falo de campos deslizando através do espaço faço uma confusão terrível entre os símbolos que uso para descrever os objectos e os próprios objectos. Não posso, de facto, construir uma imagem que seja aproximadamente parecida com as ondas verdadeiras. Portanto, se tiverem dificuldades em imaginar tal imagem não devem ficar preocupados, porque a vossa dificuldade é usual.”

(Existe um excerto desta discussão na *Colectânea 4*.)

Podemos resumir a tendência geral que se verifica na Física moderna e no electromagnetismo dizendo que as teorias físicas se vão tornando cada vez mais abstractas e matemáticas. Newton substituiu a maquinaria celestial das primeiras teorias por uma teoria matemática usando as leis do movimento e a lei do inverso do quadrado da distância. Maxwell desenvolveu uma teoria matemática do electromagnetismo que, como Einstein o demonstrou, não requeria que se considerasse nenhum meio material, nomeadamente o éter. O que estamos a observar aqui é uma crescente, embora normal, disparidade entre as ideias de senso comum que se desenvolvem a partir das experiências humanas directas e as subtis abstracções matemáticas que descrevem efeitos que nós não experimentamos directamente.

No entanto, estas teorias altamente abstractas têm finalmente que fazer sentido quando expressas em linguagem corrente e elas falam-nos, *de facto*, de coisas que nós vemos, tocamos, sentimos. Utilizam uma linguagem abstracta, mas têm testes e produtos derivados concretos. Foram estas teorias que tornaram possível a invenção do equipamento que guia os módulos espaciais para outros planetas, assim como a planificação e os modos de funcionamento dos instrumentos que nos permitem comunicar com esses módulos. Estas teorias não só estão na base de todos os desenvolvimentos práticos nos campos da electrónica e da óptica, como também agora contribuem para a nossa compreensão da visão e do sistema nervoso.

A teoria electromagnética de Maxwell e a interpretação dada por Einstein para o electromagnetismo e a mecânica na sua teoria especial da relatividade restrita provocaram uma mudança radical no ponto de vista filosófico da cosmologia de Newton. (Neste sentido a Unidade 4 marca uma espécie de fronteira entre a “antiga” e a “nova” maneira de trabalhar em Física.) Embora seja ainda demasiado cedo para o aparecimento de uma exposição global destas modificações, já se podem detectar alguns aspectos de uma nova cosmologia. Para este efeito, teremos agora que dar mais atenção ao comportamento da matéria e às teorias atómicas desenvolvidas para explicar esse comportamento.



**16.1** Os materiais de aprendizagem do Projecto de Física especialmente apropriados ao Capítulo 16 incluem:

**Actividades**

- Sistema de transmissão por micro-ondas.
- A Ciência e o Artista — a história por detrás de um selo científico
- Estojos científicos da Bell Company (Kits da Bell Telephone Science)

**Artigos da Colectânea**

- James Clerk Maxwell, II Parte
- Sobre a indução da corrente eléctrica
- A relação entre a electricidade e o magnetismo
- O campo electromagnético

**Filme sem-fim**

- Ondas electromagnéticas estacionárias

**Transparência**

- O espectro electromagnético

**16.2** O que inspirou Oersted a procurar uma conexão entre a electricidade e o magnetismo?

**16.3** Pode produzir-se uma corrente num condutor por meio de um campo eléctrico constante. Será possível produzir-se do mesmo modo uma corrente de *deslocamento* num dieléctrico? Justifique a sua resposta resumidamente.

**16.4** O que é que causa o aparecimento de uma onda electromagnética? e a sua propagação?

**16.5** Qual é a “perturbação” que se propaga em cada uma das seguintes ondas:

- (a) ondas à superfície da água
- (b) ondas sonoras
- (c) ondas electromagnéticas

**16.6** No detector de Hertz, é a intensidade do campo eléctrico na vizinhança do fio que faz com que as faíscas saltem. Como é que Hertz poderia ter mostrado que as ondas produzidas pelas faíscas que aparecem entre as bobinas de indução eram polarizadas?

**16.7** Que provas obteve Hertz de que as ondas geradas pela sua bobina de indução têm propriedades muito semelhantes às das ondas luminosas visíveis?

**16.8** Dê exemplos de vários factores que contribuíram para o atraso de vinte cinco anos que se verificou na aceitação generalizada por parte dos cientistas da teoria ondulatória electromagnética de Maxwell.

**16.9** Que prova existe para supor que as ondas electromagnéticas transportam energia? Uma vez que a energia se desloca na direcção da propagação da onda, como é que isto sugere o facto que a antiga teoria corpuscular tinha algum sucesso?

**16.10** Qual é o comprimento de onda de uma onda electromagnética gerada nas linhas de transmissão de corrente por uma corrente alterna de 60 ciclos/s? E pelos postos de rádio nas frequências de onda média padrão (entre 500 e  $1500 \times 10^3$  ciclo/s)? E pelos postos de onda média com uma frequência de  $26225 \times 10^6$  ciclos/s?

**16.11** Qual é comprimento de onda das “ondas curtas” de rádio? (Veja as frequências indicadas no mostrador de um rádio de ondas curtas.)

**16.12** As descargas eléctricas em faíscas, sinais de neon, relâmpagos e algumas perturbações atmosféricas produ-

zem ondas de rádio. O resultado é a “estática” ou ruído nos receptores de rádio de ondas médias. Indique outras fontes possíveis de tais interferências.

**16.13** Porque é que existe um controlo central em relação à potência de difusão e à direcção das estações de rádio e televisão e não se verifica o mesmo controlo na distribuição de jornais e revistas?

**16.14** Se existirem seres extraterrestres, com civilizações mais avançadas, que métodos poderiam usar para obter informações sobre a população terrestre?

**16.15** Porque é que as ondas de rádio se podem detectar a distâncias maiores do que as usadas na televisão e nas estações de FM?

**16.16** Alguns satélites de retransmissão têm órbitas com um período de 24 horas, ficando, portanto, sempre por cima do mesmo ponto enquanto a Terra gira. Qual seria o raio e a localização da órbita de uma órbita “síncrona”? (Recorra à Unidade 2 para quaisquer princípios ou constantes de que necessite.)

**16.17** Explique porque é que os aviões que passam por cima de nós provocam “perturbações” na imagem da televisão.

**16.18** Quanto tempo decorreria entre a emissão de um sinal de radar para a Lua e o regresso do eco?

**16.19** Reporte-se à fotografia a preto e branco da página 122, tirada usando uma película sensível apenas para infravermelhos. Como explica o aspecto das árvores, das nuvens e do céu?

**16.20** Porque razões pensa que a vista é apenas sensível ao intervalo de comprimentos de onda a que efectivamente é?

**16.21** Quando se coloca um termómetro sensível em diferentes partes de um espectro visível que se obtém por meio de um prisma de quartzo, verifica-se uma subida de temperatura. Este facto mostra que todas as radiações luminosas produzem calor quando absorvidas. Por outro lado, o termómetro indica também uma subida de temperatura quando se coloca o reservatório em qualquer das duas regiões escuras que ficam nas duas extremidades do espectro visível. Porque é que isto acontece?

**16.22** Considere as diferentes partes do espectro electromagnético discutidas na Secção 16.5. Faça uma lista das maneiras de como cada uma nos afecta. Dê exemplos de coisas que tenha feito com radiações com frequências dentro dessas bandas ou de efeitos que elas tenham tido sobre si.

**16.23** Qual foi a razão principal que explica que o conceito de éter perdesse o apoio que tinha?

**16.24** Em muitos pontos da história da Ciência o modo tido como “natural” ou que faz parte do senso comum de olhar para as coisas tem variado enormemente. As atitudes que tivemos em relação à distância são exemplo disso. Pode fornecer outros exemplos?

**16.25** Pode educar-se a intuição? Por outras palavras, podemos alterar o modo como intuimos os aspectos básicos da realidade? Use como exemplos as atitudes verificadas em relação à acção a distância do éter e dê outros.

PROJECTO FÍSICA

**16.26** Explique o sorriso de Gato de Cheshire que se mostra em baixo.

**16.27** Escreva um pequeno comentário sobre duas das cinco ilustrações que estão nas páginas 130 e 131 explicando, com algum pormenor, quais os principais princípios da Física que elas exemplificam. (Selecione primeiro o princípio fundamental que é operativo em cada uma das situações aí apresentadas. Depois, não é necessário que se limite aos princípios analisados nesta Unidade.)

**16.28** Faça um resumo com cerca de duas páginas de como nesta Unidade se foi contando a história (e os pormenores físicos) da teoria da luz que a explica em termos de uma onda material num éter material. Prossiga até à união das disciplinas que estudam a electricidade e o magnetismo e que numa primeira fase surgiram separadas, analisando primeiro o modo como se ligaram entre si e depois como se juntaram com a teoria da luz na teoria electromagnética generalizada de Maxwell.

Neste capítulo teve oportunidade de perceber como os modelos mecânicos da luz e do electromagnetismo foram desaparecendo, dando lugar a um não-modelo, ou seja, uma teoria matemática (e, portanto, abstracta) do campo. Pode comparar-se esta situação com a do Gato de Cheshire, personagem que aparece numa história escrita pelo Reverendo Charles Dodgson, professor de matemática em Oxford, em 1862. Reproduzimos aqui uma passagem.



“Gostaria que não aparecesses e desaparecesses tão de repente”, respondeu Alice, “pões-me tonta de todo!” “Está bem!”, disse o gato; e desta vez desapareceu muito devagarinho, a começar pela ponta do rabo e a acabar pelo riso que ficou ainda um bocado, depois de tudo o resto se ter sumido.

“Bonito! Já vi muitos gatos sem sorriso” — pensou Alice — “mas um sorriso sem gato, é a coisa mais curiosa que já vi em toda a minha vida.”

[Alice no País das Maravilhas, Capítulo VI]





# PROJECTO FÍSICA

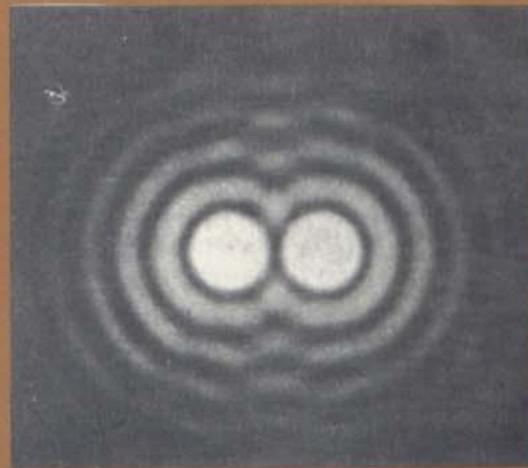
## UNIDADE 4

### MANUAL DE EXPERIÊNCIAS E ACTIVIDADES

4.1 Forças Eléctricas I - 141  
4.4 Forças Eléctricas II - Lei de Coulomb - 142  
4.5 Forças que actuam nas correntes eléctricas - 143  
4.6 Circuitos, Tensões e Forças - 153  
4.7 Tubo de Röntgen Catiódico I - 157  
4.8 Tubo de Röntgen Catiódico II - 160  
4.9 Ondas Comunicadas - 163

Atividades

Um círculo numa película de ar - 169  
Um fio como eixo de difracção - 169  
Polarização ligada ao difracção - 169  
Módulo de Poisson - 178



# ÍNDICE DO MANUAL

## Experiências

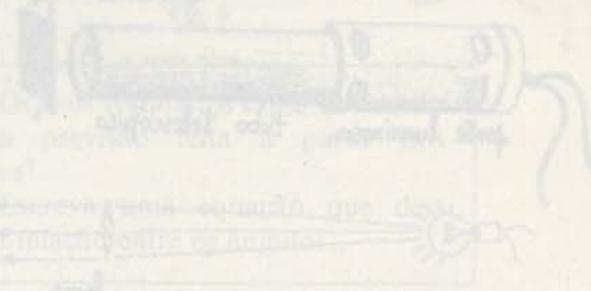
- 4.1 Refracção de um Feixe Luminoso 138
- 4.2 Experiência de Young — O comprimento de onda da luz 140
- 4.3 Forças Eléctricas I 143
- 4.4 Forças Eléctricas II — Lei de Coulomb 145
- 4.5 Forças que actuam nas correntes eléctricas 148
- 4.6 Correntes, Ímanes e Forças 153
- 4.7 Tubo de Raios Catódicos I 157
- 4.8 Tubo de Raios Catódicos II 160
- 4.9 Ondas e Comunicação 163

## Actividades

- Interferência numa película de ar 169
- Um lenço como rede de difracção 169
- Fotografando figuras de difracção 169
- Mancha de Poisson 170
- Actividades fotográficas 170
- Cor 171
- Luz Polarizada 171
- Como fazer uma lente de gelo 173
- Detectando campos eléctricos 173
- Pilha de Volta 174
- Uma bateria de 11 cêntimos (moeda americana) 174
- Medindo a intensidade de um campo magnético 174
- Mais máquinas de movimento perpétuo 175
- Transistor amplificador 176
- No interior de uma válvula de rádio 176
- Um pólo norte magnético isolado? 178
- Dinamo de disco de Faraday 178
- Uma corda de saltar como gerador 179
- Aparelhos de medida e motores simples 179
- Demonstração simples com um motor-gerador 181
- Colagens em Física 182
- Um gerador de bicicleta 182
- Lápis Polaris, Magnes 182
- Sistemas de transmissão por micro-ondas 182
- A Ciência e o Artista — A história de um selo científico 183
- Estojos científicos da Bell Company 184

## Notas sobre o Filme-sem-fim L44

- Ondas electromagnéticas estacionárias 187



# Experiências

## Experiência 4.1

### REFRAÇÃO DE UM FEIXE LUMINOSO

Pode facilmente demonstrar qual o comportamento de um feixe luminoso que passa de um meio material transparente para outro. Precisa apenas de um recipiente de plástico semicircular, de uma lente, de uma pequena fonte luminosa e de um tubo de cartão. A fonte luminosa que se utiliza no aparelho de Milikan (Unidade 5) e o tubo telescópico com uma lente objectiva (Unidades 1 e 2) servirão perfeitamente.

#### Construção de um Projector de Feixes Luminosos

Para começar, ajuste a fonte luminosa do aparelho de Millikan à extremidade do tubo telescópico (Fig. 1). Depois de ter regulado a posição da lente convergente de modo a obter um feixe de raios luminosos paralelos, este vai produzir sobre uma folha de papel uma mancha luminosa de tamanho constante, quer aproxime, quer afaste o papel da lente até uma distância de 60 cm.

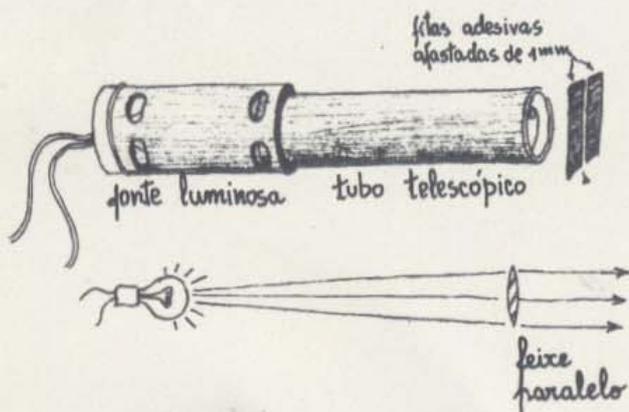


Fig. 1

Para obter um feixe luminoso fino, cole duas tiras de fita adesiva preta na extremidade do tubo onde está a lente, afastando-as uma da outra, aproximadamente, de 1 mm, de modo a formarem uma fenda. Rode o filamento da lâmpada até ficar paralelo à fenda.

Quando se inclina ligeiramente o projector para baixo, apontando para uma superfície plana, vai haver um feixe luminoso fino que atravessa essa superfície. Fazendo incidir o feixe num recipiente de plástico cheio de água, pode observar a trajectória do feixe emergente no ar. A direcção do feixe pode medir-se com precisão, colocando transferidores dentro e fora da tina, ou colocando a tina sobre uma folha de papel polar (Fig. 2).

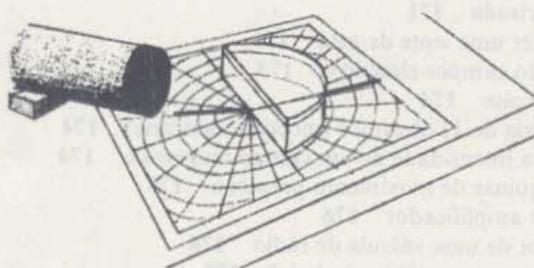


Fig. 2

#### Comportamento de um feixe luminoso na fronteira entre dois meios

Oriente o feixe para o centro do lado plano do recipiente, mantendo a fenda vertical. Incline o projector até ver o caminho do feixe luminoso quer antes de atingir a tina, quer depois de emergir pelo outro lado.

Para descrever o comportamento do feixe, precisa de ter um processo conveniente para medir o ângulo que o feixe faz com a superfície de separação. Em Física, o sistema de medição de ângulos em relação a uma dada superfície atribui o valor de  $0^\circ$  à direcção perpendicular à superfície. Dá-se o nome de *ângulo de incidência* ao ângulo segundo o

qual um feixe incide numa superfície. Este ângulo é igual ao número de graus medidos a partir da direcção normal. Analogamente dá-se o nome de *ângulo de refacção* ao ângulo segundo o qual um feixe refractado emerge da superfície de separação. Este ângulo mede o desvio em relação à direcção perpendicular à superfície (Fig. 3).

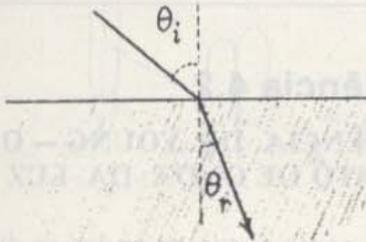


Fig. 3

Registe a direcção do feixe refractado para um dado ângulo de incidência. Depois, oriente o feixe perpendicularmente à parte circular do recipiente, por onde, anteriormente emergira o feixe (Fig. 4).

Qual é agora o ângulo segundo o qual o feixe emerge pelo lado plano? Este tipo de inversão dos caminhos ópticos tem sempre o mesmo efeito para todos os ângulos?

1. Pode estabelecer uma regra geral para a passagem dos feixes luminosos através de um meio?

2. O que acontece ao feixe luminoso quando atinge a fronteira do recipiente segundo um dado raio?

Varie o ângulo de incidência e observe como variam os ângulos dos feixes reflectido e refractado. (O mais fácil será deixar o projector fixo numa dada posição e rodar a folha de papel onde assenta o recipiente). Verá que o ângulo reflectido é sempre igual ao ângulo do feixe incidente, mas que o ângulo do feixe *refractado* não varia de modo tão simples.

#### Ângulo de refacção e variação da velocidade

Começando em  $0^\circ$  varie o ângulo de incidência de 5 em  $5^\circ$  até  $85^\circ$ , registando para cada um deles, o ângulo do feixe refractado

correspondente. À medida que os valores dos ângulos medidos no ar aumentam, o feixe na água começa a espalhar-se, sendo cada vez mais difícil medir com precisão a sua direcção. Pode evitar esta dificuldade orientando o feixe para a parte circular do recipiente em vez de o orientar para a parte plana. Esta modificação conduzirá aos mesmos resultados já que, como  $v_{\text{ar}} > v_{\text{água}}$ , o caminho do feixe é reversível.

3. Com base na sua tabela de valores, parece-lhe que os ângulos medidos no ar aumentam proporcionalmente com os ângulos medidos na água?

4. Faça um gráfico marcando os ângulos medidos no ar em função dos ângulos medidos na água. Como descreveria a relação entre os ângulos?

De acordo quer com o modelo ondulatório simples, quer com o modelo corpuscular para a luz, não é a razão entre os ângulos nos dois meios que se mantém constante mas a razão entre os *senos* desses ângulos.

Adicione mais duas colunas à sua tabela de valores e, recorrendo a uma tabela da função seno, registe os senos dos ângulos que observou. Depois, faça um gráfico com os valores dos senos dos ângulos medidos na água em função dos senos dos ângulos medidos no ar.

Fig. 4

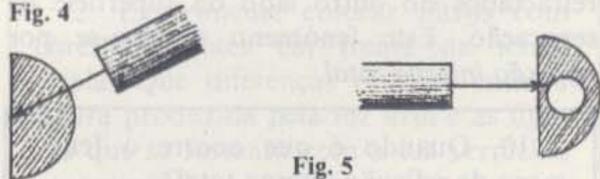


Fig. 5

5. Os seus resultados estão de acordo com a previsão feita a partir dos modelos?

6. Escreva uma equação que descreva a relação entre os ângulos.

De acordo com o modelo ondulatório, a razão entre os senos dos ângulos medidos nos dois meios é igual à razão entre as velocidades da luz nesses dois meios.

7. De acordo com o modelo ondulatório, o que os seus resultados indicam é a velocidade da luz na água?

### Diferenças de Cor

Observou provavelmente nesta experiência que as diferentes radiações da luz não se refractam da mesma quantidade. (Este efeito chama-se *dispersão*.) Este fenómeno torna-se mais evidente quando faz incidir o feixe na parte circular do recipiente, segundo um ângulo tal que o feixe refractado emergente pelo lado plano se situa muito próximo deste. As diferentes radiações que formam a luz branca separam-se de um modo bastante distinto.

8. Qual a radiação que se refracta mais?

9. Usando a relação entre os senos e as velocidades, calcule a diferença entre as velocidades das diferentes radiações luminosas na água.

### Outros Fenómenos

Durante as observações que fez verificou provavelmente que, para determinados ângulos de incidência, não apareceram raios refractados do outro lado da superfície de separação. Este fenómeno designa-se por *reflexão interna total*.

10. Quando é que ocorre o fenómeno de reflexão interna total?

Mergulhando blocos de vidro ou plástico na água, pode observar o que acontece ao feixe quando passa de um destes meios para a água. (Pode usar outros líquidos sem ser água, com o cuidado de não utilizar um que dissolva o recipiente de plástico!) Se mergulhar na água um recipiente transparente com a boca voltada para baixo, de modo a que fique ar lá dentro, pode observar o que acontece na fronteira que separa a água do ar

(Fig. 5). Se colocar um recipiente redondo verá qual o efeito que uma bolha de ar na água tem na luz.

11. Antes de tentar esta última sugestão, faça um esquema daquilo que pensa que vai acontecer. Se a sua previsão estiver errada, explique o que aconteceu.

## Experiência 4.2

### EXPERIÊNCIA DE YOUNG — O COMPRIMENTO DE ONDA DA LUZ

Já viu como é que as ondas se difractam numa superfície de água, espalhando-se depois de terem passado por uma abertura. Também já observou o fenómeno de interferência na água quando as ondas, provenientes de duas fontes, se reforçam mutuamente em determinados sítios e se anulam noutros.

As ondas de som e de ultrassom comportam-se como as ondas na água. Os efeitos de difracção e de interferência são característicos de todos os movimentos ondulatórios. Neste caso, se a luz tem uma natureza ondulatória, não deverá apresentar efeitos de difracção e de interferência?

É provável que abane a cabeça num gesto negativo ao pensar nisto. Se a luz se difracta isso deve implicar que a luz se espalha, contornando objectos. Mas, por outro lado, aprendeu na Unidade 2 que 'a luz se propaga rectilaneamente'. Como é que a luz pode simultaneamente contornar objectos e propagar-se rectilaneamente?

### Experiências simples com ondas luminosas

Já alguma vez reparou que a luz se difunde depois de passar por uma abertura ou através de um obstáculo? Tente esta experiência muito simples: olhe para uma fonte luminosa estreita afastada de si de alguns metros. (O melhor é usar uma lâmpada com um filamento vertical, mas uma lâmpada fluorescente bastante afastada também serve.) Coloque dois dedos em frente de um dos olhos, de modo a ficarem paralelos em rela-

ção à fonte luminosa. Olhe para a luz através do intervalo entre os seus dedos (Fig. 1). Aproxime lentamente os dedos um do outro para diminuir a abertura entre eles. O que é que vê? O que acontece ao filamento à medida que vai reduzindo a abertura entre os dedos até ter uma fenda muito estreita?

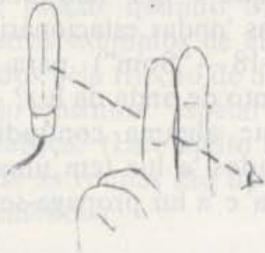


Fig. 1

É evidente que a luz se pode difundir ao passar pela abertura muito estreita entre os dedos. Para que o efeito seja visível, a abertura tem que ser pequena comparada com o comprimento de onda. No caso da luz, a abertura deve ser muito mais pequena do que a que se usou na tina de ondas ou com as ondas sonoras. Isto sugere que a luz é uma onda mas que tem um comprimento de onda muito mais pequeno que as ondas que se observam à superfície da água ou do que o som ou ultrassom no ar.

Também se observam fenómenos de interferência com as ondas luminosas? A sua primeira resposta pode ser 'não'. Já alguma vez viu formarem-se regiões escuras devido ao facto de ondas luminosas provenientes de duas fontes se anularem?

Tal como a difracção, para se observarem interferências deve arranjar fontes luminosas pequenas e próximas uma da outra. Um negativo de fotografia escuro com duas linhas ou duas fendas funciona muito bem. Segure este negativo em frente de um dos olhos com as fendas paralelas a uma fonte luminosa estreita. Que prova tem de interferência da luz proveniente das duas fontes?

### Figura de interferência por uma fenda dupla

Para examinar esta figura de interferência da luz com mais pormenor, adapte o negativo à fenda dupla na extremidade de um

tubo de cartão. Pode servir-se, por exemplo, do tubo telescópico sem a lente. Tome providências para que a luz passe apenas pela extremidade do tubo através das duas fendas. (Ajuda, se tapar a maior parte da película com fita adesiva preta.) Cole um bocado de fita adesiva translúcida à extremidade do tubo mais estreito que deve ficar perfeitamente ajustado dentro do primeiro. Insira esta extremidade no tubo mais largo, como se mostra na Fig. 2.

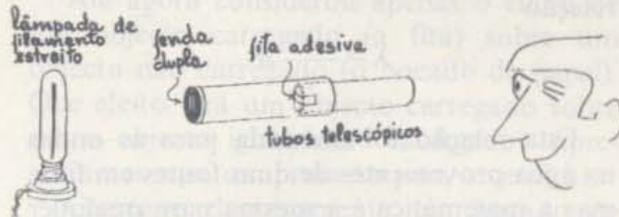


Fig. 2

Instale o tubo duplo afastado de pelo menos 1,5 m de uma fonte luminosa estreita, com as fendas paralelas à fonte luminosa. Mantendo-se afastado da extremidade aberta do tubo cerca de 30 cm, foque um dos seus olhos para o alvo. No alvo pode observar a figura de interferência formada pela luz proveniente das duas fendas.

1. Descreva como se modifica a figura da difracção à medida que afasta o alvo das fendas.

2. Experimente colocar filtros com cores diferentes em frente da fenda dupla. Que diferenças observa entre a figura produzida pela luz azul e as figuras que se formam com a luz vermelha ou amarela?

### Medição do comprimento de onda

Retire a fita adesiva translúcida da extremidade do tubo mais estreito. Coloque uma lupa e uma escala na extremidade do tubo mais perto do seu olho e olhe para a luz através da lupa (veja a Fig. 3). O que vê é uma imagem ampliada da figura de interferência no plano da escala. Experimente variar a distância entre a lupa e a fenda dupla.

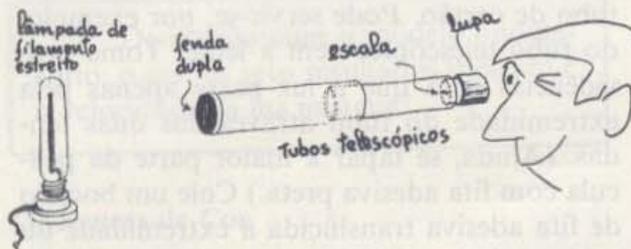


Fig. 3

Numa experiência anterior, calculou o comprimento de onda do som a partir da relação

$$\lambda = \frac{x}{l} d$$

Esta relação foi deduzida para as ondas na água provenientes de duas fontes em fase, mas a matemática é a mesma para qualquer tipo de ondas. (A utilização de duas fendas próximas uma da outra constitui uma boa aproximação de duas fontes em fase.)



Fig. 4

Utilize a fórmula para calcular o comprimento de onda da luz transmitida pelos filtros de diferentes cores. Para isso, meça  $x$ , a distância entre duas franjas escuras consecutivas com o auxílio da lupa acoplada a uma escala (Fig. 5). (Lembre-se de que as divisões mais pequenas da escala valem 0.1 mm.)

Também pode usar a lupa para medir a distância  $d$  entre as duas fendas. Coloque a película sobre a escala e depois volte-a para a luz. Na figura,  $l$  é a distância entre o plano das duas fontes e o plano da figura de interferência que mediu.

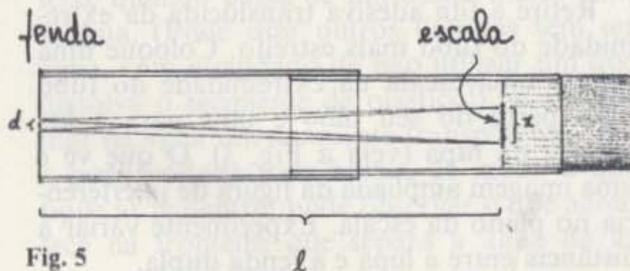


Fig. 5

A velocidade da luz no ar é aproximadamente  $3 \times 10^8$  m/s. Use os valores que determinou para o comprimento da onda para calcular os valores aproximados das frequências da luz para cada cor que usou.

3. Porque é que não pode usar o método das 'ondas estacionárias' (Experiência 3-18 — "Som") para medir o comprimento de onda da luz?

4. Existe alguma contradição entre os enunciados 'a luz tem uma natureza ondulatória' e 'a luz propaga-se rectilinearmente'?

5. É capaz de pensar nalguma experiência simples que evidencie a natureza ondulatória da luz?

#### Sugestões para mais algumas experiências

1. Examine a direcção da luz utilizando um orifício circular em vez de usar uma fenda estreita. Neste caso, a fonte luminosa deve ser quase pontual, servindo, por exemplo, uma lanterna de bolso colocada bastante longe. Observe também o fenómeno de interferência quando a luz passa através de duas fontes circulares muito pequenas — orifícios num cartão — em vez de passar por duas fendas estreitas (Thomas Young usou orifícios circulares e não fendas na sua primeira experiência realizada em 1802.)

2. Observe o fenómeno de difracção da luz provocado por um obstáculo. Utilize, por exemplo, fios de diferentes diâmetros, paralelos em relação a uma fonte luminosa estreita. Pode também usar objectos circulares como por exemplo esferas muito pequenas, a cabeça de um alfinete, etc., e uma fonte luminosa pontual. Pode usar qualquer dos métodos de observação — o écran constituído pela fita adesiva translúcida ou a lupa. Pode ter que colocar a lupa bastante perto do objecto que origina a difracção.

Tem instruções de como fotografar alguns destes efeitos nas actividades que se seguem às experiências.

## Experiência 4.3

### FORÇAS ELÉCTRICAS I

Se andar por cima de uma carpete num dia seco e depois tocar num puxador metálico, pode acontecer que salte uma faísca entre os seus dedos e o puxador. O seu cabelo pode estalar quando o penteia. Já reparou noutros exemplos de efeitos eléctricos provocados pela fricção de dois objectos. O seu cabelo costuma 'espetar' quando se despe pela cabeça? (Este efeito é particularmente forte se as roupas são de nylon ou de outra fibra sintética.)



Um pente ou uma régua de plástico depois de friccionados num bocado de pano atraem pequenos bocados de papel. Experimente. Muitas vezes, a força atractiva é suficientemente forte para levantar bocados de papel de uma mesa, o que mostra que é maior que a força gravítica que se exerce entre o papel e a terra!

A força que se estabeleceu entre o plástico que foi friccionado e o papel é uma força eléctrica, uma das quatro forças básicas da natureza.

Nesta experiência fará várias observações sobre a natureza da força eléctrica. Se fizer a próxima experiência 'Forças Eléctricas II', poderá fazer medições desta força.

#### Forças entre objectos electrificados

Fixe uma tira adesiva transparente com cerca de 20 cm de comprimento ao tampo de uma mesa. Com os dedos pressione bem a

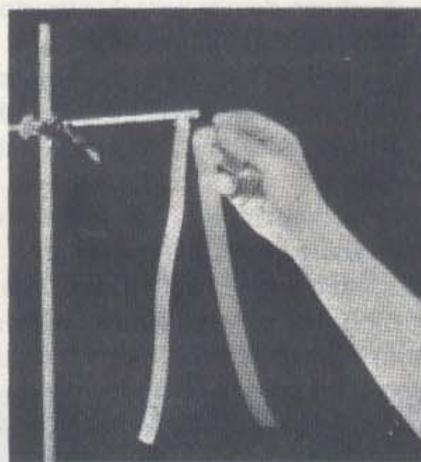
fita, deixando soltos uns 2,5 cm que servem como pega. Retire a fita adesiva da mesa, com cuidado, puxando pela extremidade solta, de modo a evitar que a fita se encaracole nos seus dedos.

Para verificar se a fita ficou carregada electricamente ou não quando a arrancou da mesa, veja se o lado não adesivo levanta um bocado de papel. Melhor ainda, o papel é capaz de saltar da mesa para a fita? A fita está carregada? O papel está carregado?

Até agora considerou apenas o efeito de um objecto carregado (a fita) sobre um objecto não carregado (o bocado de papel). Que efeito terá um objecto carregado sobre outro objecto igualmente carregado? Apresentamos aqui um processo para o verificar.

Carregue electricamente um bocado de fita adesiva colando-a à mesa e puxando-a depois, como fez anteriormente. Suspenda a fita numa haste de madeira horizontal ou no bordo da mesa. (Não deixe que a extremidade inferior se encaracole nas pernas da mesa.)

Depois carregue electricamente uma segunda fita pelo mesmo processo e aproxime-a da primeira. É uma boa ideia voltar os dois lados não adesivos um para o outro.



As duas afectam-se mutuamente? Que tipo de força é — atractiva ou repulsiva?

Pendure a segunda fita, afastada de alguns centímetros da primeira. Proceda como anteriormente e carregue electricamente uma terceira fita. Observe a reacção entre esta fita e

as duas primeiras. Registe todas as observações que fez. Deixe apenas a primeira fita pendurada no suporte — vai precisar dela dentro em breve. Retire as outras duas.

Cole uma nova fita adesiva (A) à mesa de depois outra (B) sobre a primeira. Aperte bem uma contra a outra. Retire as duas fitas da mesa simultaneamente. Para retirar a carga total com que ficou o par, passe o lado não adesivo deste par por cima de um tubo de canalização de água ou pelos seus lábios. Verifique se o par está electricamente neutro, com o auxílio da primeira fita de teste. Depois, separe cuidadosamente as duas fitas.

1. À medida que separava as fitas notou alguma interacção entre elas (diferente da que é devida à cola?)

2. Segure as fitas, uma em cada mão, e aproxime-as lentamente (as partes não adesivas devem estar viradas uma para a outra). O que é que observa?

3. Aproxime uma das fitas da primeira fita deste teste; aproxime depois a outra. O que acontece?

Coloque A e B no suporte horizontal ou na borda da mesa para servirem como fitas de teste. Se tiver disponíveis hastes de plástico, vidro ou borracha, ou um pente, régua de plástico, etc., carregue electricamente cada um deles, friccionando-os num tecido ou numa pele, e aproxime-os primeiro de A e depois de B.

Embora a partir do resultado de um número limitado de experiências não possa prová-lo, parece que existem apenas duas classes de objectos electrificados. Até agora nunca ninguém produziu um corpo carregado electricamente que fosse capaz de atrair ou repelir simultaneamente A e B (em que A e B são objectos electrificados). As duas classes designam-se por positiva (+) e negativa (-) respectivamente. Escreva um princípio geral que sintetize a forma como os membros de uma mesma classe se comportam uns em relação aos outros (atraem-se, repelem-se ou não são afectados por) e relativamente aos membros da outra classe.

## Um quebra-cabeças

O seu sistema de duas classes de objectos electrificados baseou-se em observações sobre o modo como objectos carregados interatuam. Mas como é que pode explicar o facto de um objecto carregado (um pente que foi friccionado, por exemplo) atrair um objecto não carregado (nomeadamente, um bocado de papel)?

4. A força entre um corpo carregado (positiva ou negativamente) e um corpo não carregado é sempre atractiva, sempre repulsiva, ou uma coisa umas vezes e outras vezes outra?

5. Pode explicar como é que aparece uma força entre corpos carregados e corpos não carregados e por que é que se comportam sempre da mesma maneira? A chave está no facto de as cargas negativas se poderem deslocar ligeiramente nos materiais que se designam por não condutores, como é o caso do plástico e do papel.



## Experiência 4.4

### FORÇAS ELÉTRICAS II — LEI DE COULOMB

Verificou que objectos carregados electricamente exercem forças uns sobre os outros mas, até aqui, as observações que fez foram apenas qualitativas; viu mas não mediu. Nesta experiência vai determinar como é que a força eléctrica entre dois corpos carregados depende do valor das cargas e da distância entre os corpos. Complementarmente, vai tomar contacto com algumas das dificuldades que surgem com a utilização de equipamento sensível.

As forças eléctricas entre cargas que pode produzir convenientemente num laboratório são pequenas. A sua medição requer uma balança sensível.

#### Construção de uma balança

(Se uma balança já está montada, não precisa de ler esta secção — vá para a secção 'Utilização da balança'). Na Fig. 1 tem o esquema de uma balança bastante satisfatória.

Aplice uma camada de tinta condutora a uma pequena bola de plástico esponjoso e fixe-a na extremidade de uma haste de plástico fina ou num palito, espetando a ponta afiada na bola. Como é muito importante que o plástico esteja limpo e seco (para reduzir a fuga de cargas através da superfície), segure na haste de plástico o menor número de vezes possível e apenas com os dedos limpos e secos. Enfie essa haste dentro de uma palha de fresco, deixando pelo menos

2,5 cm do plástico de fora como se mostra na Fig. 2.

Em seguida, encha o suporte de plástico da balança com glicerina, óleo ou outro líquido. Faça um pequeno corte no topo da palha, a uma distância de cerca de 2 cm do eixo, no lado oposto à esfera — veja a Fig. 2.

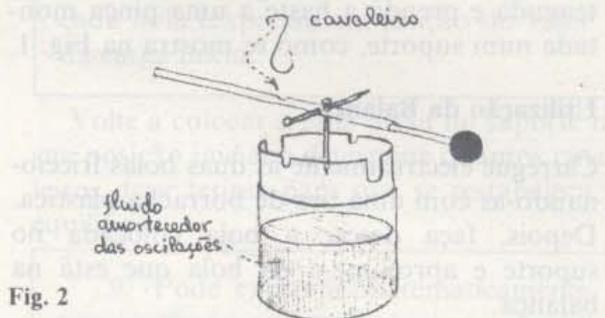


Fig. 2

Determine o ponto de equilíbrio do sistema constituído pela palha, bola e haste. Espete um alfinete nesse ponto de modo a formar um eixo. Espete um segundo alfinete directamente na palha, à frente do eixo e perpendicularmente a este. (Quando a palha oscila de um lado para o outro, este alfinete move-se no fluido que está no recipiente de suporte. O fluido reduz as oscilações da balança.) Coloque a palha no suporte, com o alfinete suspenso dentro do líquido. Ajuste depois a balança, fazendo deslizar a haste de plástico para dentro ou para fora da palha, até que esta fique horizontalmente em equilíbrio. Se for necessário, cole bocadinhos de fita adesiva na palha para conseguir o equilíbrio. Certifique-se de que a balança pode oscilar livremente enquanto faz este ajustamento.

Por fim, corte cinco ou seis bocados pequenos e iguais de fio liso e fino (de cobre, por exemplo). Cada bocado deve ter cerca de 2 cm de comprimento e, tanto quanto possi-

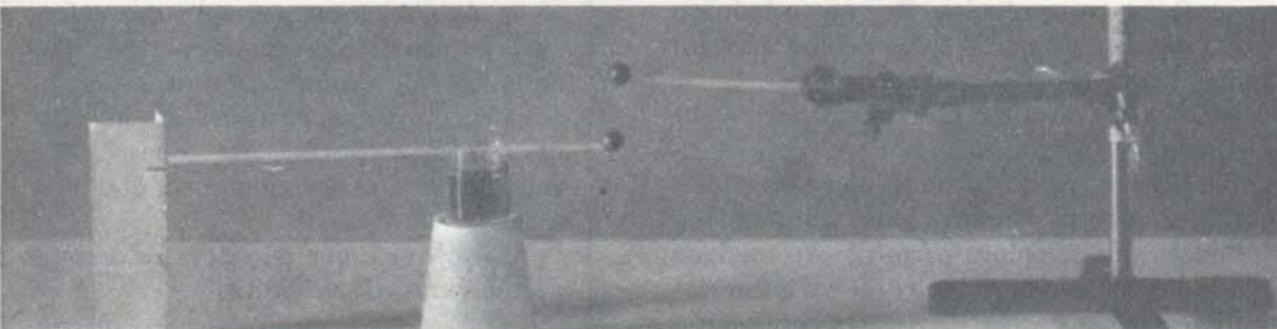


Fig. 1

vel, todos devem ter o mesmo tamanho. Dobre-os para formarem pequenos ganchos (Fig. 2) que se possam pendurar na concavidade que cortou na folha e uns nos outros. Estes são os seus 'pesos'.

Coloque outra bola em que aplicou tinta condutora numa haste de plástico pontiaguda e prenda a haste a uma pinça montada num suporte, como se mostra na Fig. 1.

### Utilização da Balança

Carregue electricamente as duas bolas friccionando-as com uma tira de borracha plástica. Depois, faça descer a bola colocada no suporte e aproxime-a da bola que está na balança.

1. Que prova é que tem de que existe uma força entre as duas bolas?
2. Pode dizer que esta força é devida às cargas?
3. Pode comparar o valor da força eléctrica entre as duas bolas com o valor da força gravitacional que existe entre elas?

A sua balança está pronta, mas para fazer a experiência tem que resolver dois problemas técnicos. Durante a experiência vai ter que ajustar a posição da esfera que está no suporte de modo a equilibrar a força entre as esferas carregadas com os cavaleiros. Neste caso a palha estará horizontal. Primeiro deve, portanto, verificar rapidamente se a palha está horizontalmente em equilíbrio de cada vez que repete a experiência. Segundo, meça a distância entre os centros das duas bolas não podendo, no entanto, colocar a régua perto das bolas carregadas pois isso iria afectar os resultados. Por outro lado, se a régua não estiver perto das esferas, é muito difícil fazer medições com precisão.

Indicamos aqui um processo para efectuar a medição. Com a balança na posição horizontal, pode registar a sua posição de equilíbrio com uma marca feita num cartão dobrado que se coloca perto da extremidade da palha (afastado de pelo menos 5 cm das cargas) (veja a Fig. 1).

Como é que pode evitar o efeito de paralaxe? Experimente inventar um método para medir a distância entre os centros das esferas. Se não conseguir inventar nenhum, pergunte ao professor.

Agora está pronto para fazer as medições que lhe permitem saber como é que a força entre as bolas depende da distância entre elas e do valor das cargas.

### Realização da Experiência

A partir de agora, procure trabalhar tão depressa quanto possível mas mova-se com cuidado para evitar perturbar o equilíbrio ou criar correntes de ar. Não é necessário esperar que a palha páre para registar a sua posição. Se as oscilações da palha são pequenas e iguais relativamente à sua posição de equilíbrio, pode considerar-se que se atingiu o equilíbrio.

Carregue as duas bolas, ponha-as brevemente em contacto e desloque a bola colocada no suporte até que a palha volte à sua posição de equilíbrio. O peso de um dos cavaleiros equilibra agora a força eléctrica entre as esferas carregadas para esta posição. Registe a distância entre as bolas.

Sem recarregar as bolas, adicione um segundo cavaleiro e reajuste o sistema até restabelecer o equilíbrio. Registe esta nova posição. Repita a operação até ter usado todos os cavaleiros — mas não reduza o espaço entre as bolas a menos de 1/2 cm. Depois inverta rapidamente os passos que efectuou, retirando um (ou mais) cavaleiros de cada vez e suba também a bola colocada no suporte para restabelecer o equilíbrio.

4. As distâncias que registou ao efectuar o processo 'inverso' podem não estar de acordo com as primeiras medições, correspondentes ao mesmo número de cavaleiros. Se for esse o caso pode sugerir uma razão que justifique este facto?

5. Porque é que não deve recarregar as bolas entre duas leituras?

### Interpretação dos resultados

Faça um gráfico com os valores das medições que obteve para a força  $F$  em função da distância  $d$  entre os centros das esferas. É nítido que  $F$  e  $d$  estão inversamente relacionados, isto é,  $F$  cresce quando  $d$  decresce. Pode ir mais longe e determinar a relação entre  $F$  e  $d$ . Pode ser, por exemplo,  $F \propto 1/d$ ,  $F \propto 1/d^2$ , ou  $F \propto 1/d^3$ , etc.

6. Como verificaria qual destas relações melhor representa os seus resultados?
7. Que relação encontrou entre  $F$  e  $d$ ?

### Investigação Adicional

Nesta experiência pode determinar como é que a força varia entre o valor da carga das esferas, quando mantém  $d$  constante.

Carregue as duas bolas e, depois, toque rapidamente com uma bola na outra. Dado que as esferas são aproximadamente idênticas, considera-se que, quando se tocam, a carga total fica distribuída de modo praticamente igual pelas duas.

Pendure quatro cavaleiros na balança e afaste a bola colocada no suporte até que a palha fique na posição de equilíbrio. Tome nota desta posição.

Toque na bola situada mais acima com o dedo para a descarregar. Se puser as duas bolas de novo em contacto, a carga que ficou na bola colocada na balança vai ser igualmente redistribuída pelas duas bolas.

8. Qual é agora o valor da carga em cada bola (expresso em função do valor da carga inicial)?

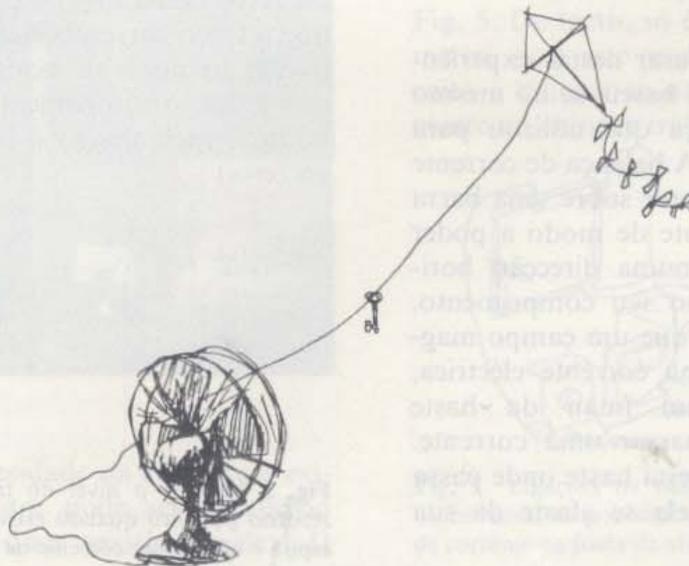
Volte a colocar a bola presa no suporte na sua posição inicial e determine quantos cavaleiros deve retirar para que se restabeleça o equilíbrio.

9. Pode exprimir matematicamente este resultado por meio de uma relação entre a quantidade de carga e o módulo da força?

10. Considere por que é que teve que tomar duas precauções ao realizar a experiência:

- (a) Por que é que uma régua colocada muito perto da carga pode afectar os resultados?
- (b) Porque é que se sugeriu que a distância entre as bolas não devia ser inferior a  $1/2$  cm?

11. Como poderia modificar esta experiência para ver se a terceira lei de Newton se aplica às forças eléctricas?



## Experiência 4.5

### FORÇAS QUE SE EXERCEM SOBRE CORRENTES ELÉCTRICAS

Se fez a experiência 4-4, usou a balança simples mas sensível para investigar como é que a força eléctrica entre dois corpos carregados depende da distância entre eles e da quantidade de carga. Nesta e na experiência seguinte vai examinar um efeito relacionado com este: a força que se estabelece entre cargas em movimento, ou seja, correntes eléctricas. Vai investigar o efeito dos módulos e dos sentidos das correntes. Antes de começar a experiência já deve ter lido a descrição dos trabalhos de Oersted e de Ampère (*Texto*, Secções 14.11 e 14.12).

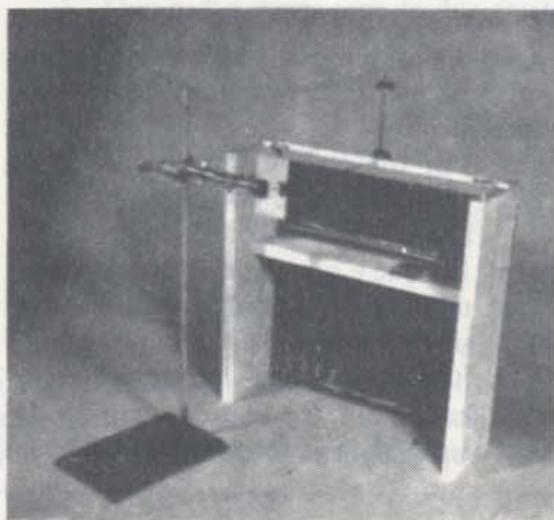


Fig. 1

O aparelho que vai usar nestas experiências (como o da Fig. 1) baseia-se no mesmo princípio que a balança que utilizou para medir forças eléctricas. A balança de corrente mede a força que se exerce sobre uma barra suspensa horizontalmente de modo a poder deslocar-se livremente numa direcção horizontal, perpendicular ao seu comprimento. Pode estudar as forças que um campo magnético exerce sobre uma corrente eléctrica, fazendo aproximar um íman da haste quando nesta se faz passar uma corrente. A força que se exerce nesta haste onde passa corrente faz com que ela se afaste da sua posição inicial.

Pode também fazer passar uma corrente num fio fixo, paralelo à haste. Uma força que se exerça sobre a haste devido à existência de uma corrente no fio fixo, vai também provocar um movimento da haste. Pode determinar estas forças, medindo simplesmente a força de restituição necessária para fazer voltar a haste à sua posição inicial.

#### Ajustamento da balança de corrente

Este instrumento é mais complicado que a maioria dos aparelhos com que trabalhou até agora. Por esse motivo, talvez valha a pena dispender algum tempo para ver como é que o instrumento funciona antes de começar a fazer as suas leituras.

1. Temos três ou quatro hastes de metal leve, dobradas com as formas  $\perp$  ou  $\text{L}$ . São as "espiras móveis". Monte a balança com a espira mais longa presa à barra horizontal. Ajuste a espira de modo a que a parte horizontal fique ao mesmo nível que os fios que estão enrolados na placa de cartão prensado (bobina fixa). Ajuste a balança nessa placa de modo a que a espira e a bobina fiquem paralelas quando vistas de cima. A distância entre elas deve ser de pelo menos 5 cm. Certifique-se de que a espira pode oscilar livremente.

2. Ajuste o "contra-peso" cilíndrico para equilibrar o sistema e de modo a que o ponteiro fique aproximadamente na horizontal. Prenda o prato em forma de  $\equiv$  (indicador do zero) numa mola e coloque-o de modo a que o traço correspondente ao zero fique em frente do ponteiro horizontal (Fig. 2). (Se está a usar o equipamento pela primeira vez, marque você mesmo o traço correspondente ao zero.)

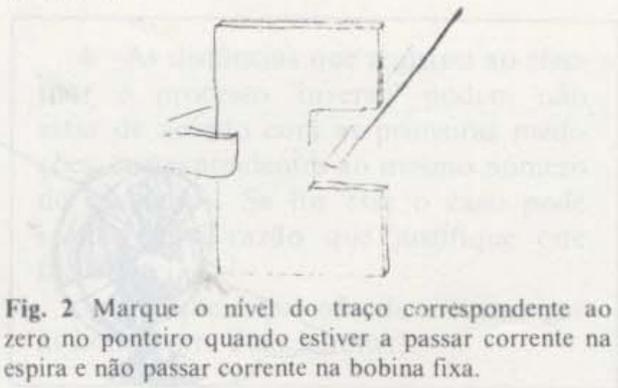


Fig. 2 Marque o nível do traço correspondente ao zero no ponteiro quando estiver a passar corrente na espira e não passar corrente na bobina fixa.

3. Agora estabeleça o equilíbrio para um máximo de sensibilidade da balança. Para isso, suba a mola de ajuste da sensibilidade na haste (Fig. 3) até que a espira oscile lentamente de um lado para o outro. O período destas oscilações pode ser de 4 a 5 s. Se a mola estiver muito alta, o equilíbrio pode tornar-se instável e haver um deslocamento para um dos lados sem que o equilíbrio se restabeleça.

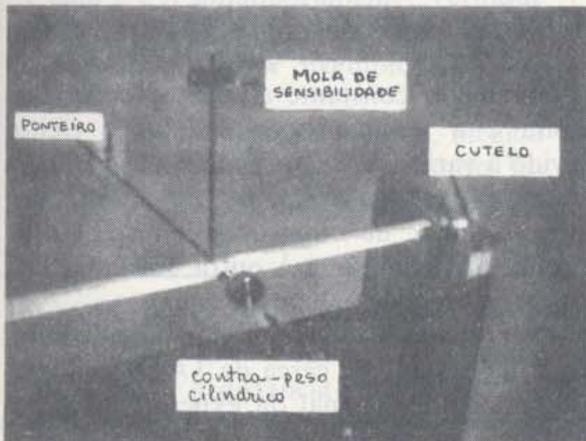


Fig. 3

4. Ligue uma fonte de alimentação de 6 V e 5 A, que possa fornecer uma corrente de intensidade até 5 A, através de um amperímetro, a um dos pratos horizontais onde está assente o pivot. Ligue o outro prato ao outro terminal da fonte de alimentação (Fig. 4).

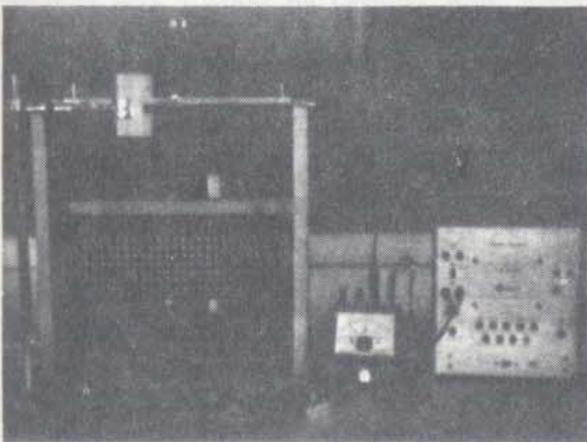


Fig. 4

Para limitar a intensidade da corrente e evitar um curto-circuito, pode ser necessário introduzir uma ou duas resistências de  $1 \Omega$

no circuito. (Se a fonte de alimentação não tiver um botão de ajustamento da corrente, deve introduzir um reóstato no circuito.)

5. Ponha o botão de ajustamento num mínimo de intensidade e ligue a fonte de alimentação. Se a agulha do amperímetro deflectir para o lado errado, troque as ligações. Aumente lentamente a corrente até um valor de, aproximadamente, 4,5 A.

6. Aproxime agora um íman pequeno do condutor.

1. Como deve colocar o íman para que se observe o maior efeito possível na haste? Como determina o sentido segundo o qual a haste oscila?

Na próxima experiência “Correntes, ímanes e forças”, vai fazer medições quantitativas das forças que se estabelecem entre ímanes e correntes. O resto desta experiência diz respeito à interação entre duas correntes.

7. Ligue um circuito análogo — fonte de alimentação, amperímetro e reóstato (no caso de não haver um botão de ajustamento da corrente na fonte de alimentação) — à bobina fixa que está colocada no painel de cartão vertical — ao conjunto dos dez fios e não a um único fio. Os dois circuitos (a bobina fixa e o gancho móvel) devem ser independentes. A montagem deve ter o mesmo aspecto daquela que se mostra na Fig. 5. De facto, só é necessário um amperímetro, pois este pode retirar-se de um circuito e colocar-se no outro. É mais conveniente no entanto trabalhar com dois.

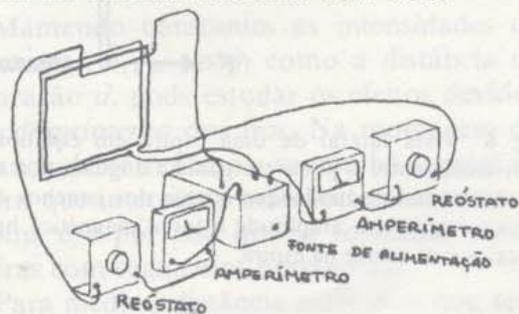


Fig. 5 Ligações na balança de corrente quando se usam reóstatos por não haver botão de reajustamento de corrente na fonte de alimentação.

8. Ligue os dois circuitos e verifique para que lado se desloca o ponteiro da balança. O ponteiro deve mover-se para cima. Se isso não acontecer, veja se consegue que ele se desloque para cima, mudando qualquer coisa na sua montagem.

2. As correntes que se deslocam no mesmo sentido atraem-se ou repelem-se? O que é que acontece no caso das correntes terem sentidos opostos?

9. Com o fio fino que lhe foi dado, construa alguns "pesos". Vai precisar de um conjunto de fios com comprimento de 1 cm, 2 cm, 5 cm e 10 cm. Pode precisar de mais fios com estes comprimentos, mas pode arranjá-los à medida que for precisando deles durante a experiência. Dobre-os em forma de ganchos em S, para que os possa pendurar no encaixe existente no ponteiro ou uns nos outros. A distância entre este encaixe e o eixo da balança é a mesma que entre o encaixe e a extremidade inferior da espira, isto para que, quando se exerce uma força na parte horizontal da espira, o peso total  $F$  que se prende nesse encaixe seja igual à força magnética que actua horizontalmente na espira. (Veja a Fig. 6.)

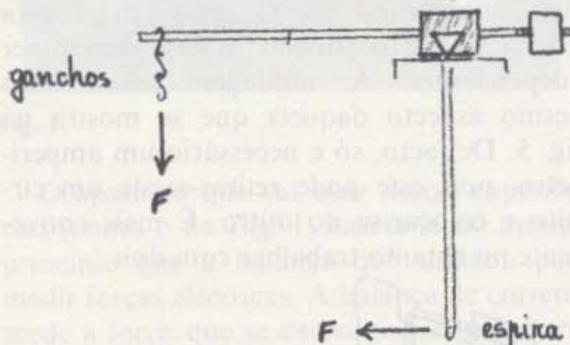


Fig. 6 Vista lateral de uma espira em equilíbrio. A distância entre o pivot e o gancho é igual até à secção horizontal de modo que o peso dos ganchos adicionais é igual em amplitude à força magnética horizontal que se exerce na espira.

Estes ajustamentos preliminares são comuns a todas as experiências. Agora, a partir daqui, vamos ter instruções separadas de três

experiências diferentes. Diferentes grupos de alunos vão investigar como é que a força depende:

- (a) da *intensidade de corrente* que passa nos fios
- (b) da *distância* entre os fios, ou
- (c) do *comprimento* de um dos fios.

Quando tiver acabado a sua experiência (a), ou (b), ou (c) — leia a secção "Para discussão na aula".

- (a) *Como é que a força depende da intensidade da corrente que passa nos fios*

Mantendo constante a separação entre a espira e a bobina, pode estudar o efeito devido à variação da intensidade da corrente. Monte a balança no painel de modo que, quando olhar de cima, veja a espira e a bobina paralelas uma à outra e a uma distância de cerca de 1,0 cm.

Faça passar na espira uma corrente com uma intensidade de cerca de 3 A. Não altere este valor até ao final da experiência. Com esta corrente na espira e sem qualquer corrente na bobina fixa, alinhe o indicador de zero com o ponteiro.

Começando com uma corrente relativamente pequena na bobina fixa (cerca de 1 A) determine quantos centímetros de fio deve pendurar no encaixe feito no ponteiro para que este volte ao zero.

Registe o valor da intensidade da corrente  $I_f$  na bobina fixa e o comprimento do fio que teve que adicionar ao braço do ponteiro. O peso do fio é a força de equilíbrio  $F$ . Aumente gradualmente  $I_f$ , verificando sempre qual o valor da intensidade de corrente que passa na espira e isto até atingir um valor de cerca de 5 A para a intensidade de corrente na bobina fixa.

- 3. Qual é a relação entre a intensidade de corrente na bobina fixa e a força que actua na espira? Um processo para a descobrir consiste em fazer o gráfico da força  $F$  em função da intensidade de corrente  $I_f$ . Um outro processo é ver o que acontece à força de equilíbrio quando se duplica e depois triplica, a intensidade da corrente  $I_f$ .

4. Suponha que mantinha a intensidade de corrente  $I_1$  constante e media  $F$  à medida que fazia variar a intensidade da corrente  $I_b$  que passa na espira. Que relação pensa que encontraria entre  $F$  e  $I_b$ ? Verifique a sua resposta experimentalmente (duplicando  $I_b$ , por exemplo), se tiver tempo.

5. Pode escrever uma expressão simbólica que represente a dependência de  $F$  com  $I_1$  e  $I_b$  simultaneamente? Verifique a sua resposta experimentalmente (duplicando  $I_1$  e  $I_b$ , por exemplo) se tiver tempo.

6. Como convertiria a força, medida em centímetros de fio pendurado no braço do ponteiro, em Newton, unidade convencional de força?

(b) *Como é que a força varia com a distância entre os fios*

Para medir a distância entre os dois fios, tem que olhar para baixo. Coloque uma escala na prateleira que está debaixo da espira. Dado que há um intervalo entre os fios e a escala, o número que aí lê varia à medida que desloca a cabeça de um lado para outro. Este efeito chama-se efeito de paralaxe e deve ser reduzido se quer efectuar boas medições. Quando olha de cima para um espelho colocado na prateleira, pode dizer se está a olhar na vertical. pois, neste caso, o fio e sua imagem estão alinhados. Experimente (Fig. 7.)

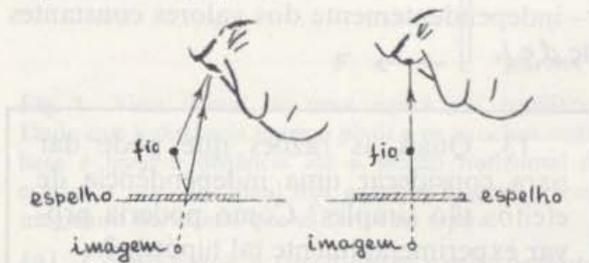


Fig. 7 Só quando se está a olhar perpendicularmente para o fio, é que este e a sua imagem no espelho estão alinhados.

Cole um bocado de fita-cola graduada em centímetros num dos lados do espelho de modo a poder olhar para baixo e ler a distância entre um dos lados do fio e o lado correspondente da espira. Ajuste o zero para

uma intensidade de corrente  $I_b$  na espira de cerca de 4,5 A e para uma corrente nula  $I_1$  na bobina fixa. Ajuste depois a distância para cerca de 0,5 cm.

Comece a experiência ajustando a intensidade da corrente que passa na bobina fixa em 4,5 A. Pendure pesos no encaixe do braço que serve de ponteiro até que este volte à posição zero. Registe cuidadosamente os valores do peso e da distância.

Repita as medições para quatro ou cinco distâncias maiores. Entre cada conjunto de medições, assegure-se de que a espira e a bobina se mantêm paralelas e verifique também que os valores das intensidades de corrente ainda são de 4,5 A.

7. Qual é a relação entre a força  $F$  que se exerce na espira e a distância  $d$  entre a espira e a bobina fixa? Um processo para descobrir esta relação consiste em encontrar uma função de  $d$  ( $1/d^2$ ,  $1/d$ ,  $d^3$ , etc.) que nos permita obter uma linha recta quando se traça o gráfico dessa função em função de  $F$ . Outro processo é encontrar o que acontece à força de equilíbrio quando duplica e depois triplica a distância  $d$ .

8. Se a força que se exerce na espira é  $F$ , qual é a força que actua na bobina fixa?

9. Pode converter a força, medida em centímetros de fio pendurados no braço do ponteiro, em newton?

(c) *Como é que a força varia em função do comprimento de um dos fios*

Mantendo constantes as intensidades de corrente  $I_1$  e  $I_b$ , assim como a distância de separação  $d$ , pode estudar os efeitos devidos ao comprimento dos fios. Na montagem da balança de corrente, é a secção horizontal de espira que interactiva mais fortemente com a bobina e é por isso que se fornecem várias espiras com segmentos horizontais.

Para medir a distância entre dois fios, tem que olhar para eles de cima. Coloque uma régua na prateleira situada debaixo da espira. Dado que há um intervalo entre os fios e a

régua, o número que aí lê varia, à medida que move a cabeça de um lado para outro. Este efeito chama-se efeito de paralaxe e deve ser reduzido se quer efectuar boas medições. Se olhar de cima para um espelho colocado na prateleira, pode dizer quando está a olhar na vertical pois, neste caso, o fio e a sua imagem estão alinhados. Experimente (Fig. 7).

Cole um bocado de fita-cola, graduada em centímetros, num dos lados do espelho. Depois olhe de cima e leia a distância entre um lado do fio e o lado correspondente da espira. Ajuste esta distância para cerca de 0,5 cm. Com um valor da intensidade da corrente  $I_b$  de cerca de 4,5 A na espira e com uma corrente  $I_f$  na bobina fixa, ajuste o zero.

Comece a experiência fazendo passar uma intensidade de corrente de 4,5 A na espira e na bobina fixa. Pendure pesos no encaixe do braço do ponteiro até que este volte a zero.

Registe o valor das intensidades da corrente, da distância entre os dois fios e os pesos adicionados.

Desligue as correntes e retire cuidadosamente a espira fazendo-a deslizar para fora das molas que a prendem (Fig. 8). Meça o comprimento do segmento horizontal da espira.

Insira uma outra espira. Ajuste-a de modo a que ela fique ao mesmo nível que a bobina  $d$  de modo a que a distância entre a espira e a bobina seja a mesma que tinha antes. Isto é importante. A espira e a bobina também devem ficar paralelas, quer quando vistas de cima, quer quando as olha de lado. Reajuste a mola na balança para conseguir um máximo de sensibilidade. Verifique a posição do zero e veja se as intensidades da corrente ainda são de 4,5 A.

Repita as medições para cada uma das espiras.

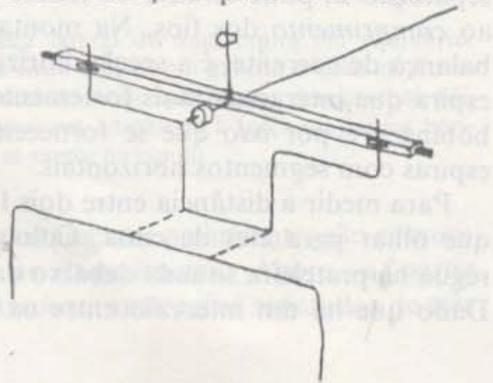


Fig. 8

10. Qual é a relação entre o comprimento  $l$  da espira e a força  $F$  que se exerce sobre ela? Um dos processos para a descobrir consiste em encontrar uma função de  $l$  ( $l$ ,  $l^2$ ,  $1/l$ , etc.) de tal modo que haja uma relação linear entre essa função e  $F$ . Outro processo é ver o que acontece a  $F$  quando duplica  $l$ .

11. Pode converter a força, medida em centímetros de fio pendurado no braço do ponteiro, em newton?

12. Se a força que se exerce na espira é  $F$ , qual é a força que se exerce na bobina fixa?

#### Para discussão na aula

Prepare-se para fazer um relatório da sua experiência que apresentará ao resto da turma. Na aula, vai ser capaz de combinar as experiências individuais numa única relação que exprima a dependência da força com a intensidade da corrente, com a distância e com o comprimento. Em cada uma das partes desta experiência, fez-se variar um factor, mantendo os outros dois constantes. Ao combinar os três resultados numa única expressão para a força, está a pôr-se como hipótese que os efeitos destes três factores são *independentes*. Está, por exemplo, a pressupor que, quando duplica uma intensidade de corrente, a força duplicará *sempre* — independentemente dos valores constantes de  $d$  e  $l$ .

13. Quais as razões que pode dar para considerar uma independência de efeitos tão simples? Como poderia provar experimentalmente tal hipótese?

14. Para pôr esta afirmação em equação, de que outros factores precisa para poder prever a força (em newton) que se estabelece entre as correntes que passam em dois fios com comprimentos determinados e separados por uma dada distância?

## Experiência 4.6

### CORRENTES, ÍMANES E FORÇAS

Se fez a última experiência "Forças que se exercem sobre correntes eléctricas", determinou a relação que exprime como é que a força entre dois fios depende da intensidade de corrente que neles passa, dos seus comprimentos e da distância que os separa. Também já sabe como é que um íman exerce uma força num fio colocado perto dele e por onde passa corrente. Nesta experiência vai usar a balança de corrente para estudar mais aprofundadamente a interacção entre um íman e um fio por onde passa corrente. Se necessário, pode reportar-se às notas da Experiência 4-5 para pormenores sobre o equipamento.

Nesta experiência *não* vai usar a bobina fixa. O painel onde a bobina estava enrolada vai servir apenas como um bom suporte para a balança e os ímanes.

Prenda a espira da balança mais longa à barra horizontal com um pivot e ligue-a através de um amperímetro a uma fonte de alimentação. Pendure pesos no encaixe do ponteiro até que este volte à posição zero.

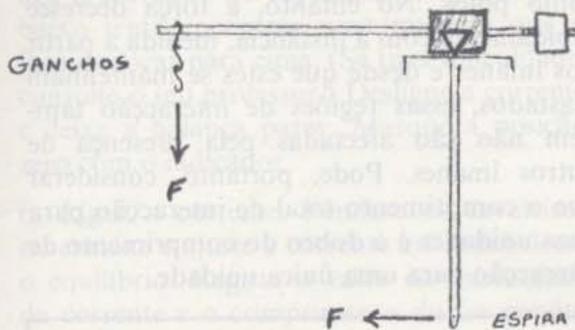


Fig. 1 Vista lateral de uma espira em equilíbrio. Dado que a distância entre o pivot e os ganchos metálicos é igual à distância até à secção horizontal da espira, o peso adicional dos ganchos é igual à força magnética horizontal que se exerce na espira.

(a) *Como é que a força entre uma corrente e um íman depende dessa corrente*

1. Coloque dois ímanes pequenos de cerâmica dentro de uma peça de ferro em forma de U. O modo como estes ímanes estão orientados é importante; devem estar colocados de modo a que as duas faces mais próximas se atraiam quando os aproxima.

(Cuidado: os ímanes de cerâmica são frágeis e partem-se se os deixar cair.) Coloque o núcleo de ferro e o íman na plataforma, com a espira da balança a passar pelo meio da região entre os dois ímanes de cerâmica (Fig. 2).

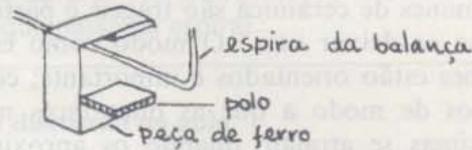


Fig. 2 Cada íman é constituído por uma peça em forma de U e um par de peças removíveis: os ímanes de cerâmica que servem de pólos.

2. Verifique se o ponteiro horizontal se move para cima quando liga a corrente. Se ele se mover para baixo, mude qualquer coisa (a corrente? os ímanes?) para que o ponteiro se desloque efectivamente para cima.

3. Com a corrente desligada, ajuste a posição do zero do ponteiro com o indicador. Ajuste a intensidade da corrente na bobina para cerca de 1 A. Pendure pesos no encaixe do braço da balança até que o ponteiro volte a zero.

Registe o valor da corrente e o valor total do peso de equilíbrio. Repita as medições para, pelo menos, quatro correntes maiores. Entre cada par de leituras verifique a posição do zero do braço do ponteiro.

1. Qual é a relação entre a intensidade de corrente  $I_b$  e a força resultante  $F$  que o íman exerce sobre o fio? (Tente traçar um gráfico.)

2. Se o íman exerce uma força sobre uma corrente, pensa que a corrente exercerá uma força sobre o íman? Como pode verificar isto?

3. Como é que um íman mais forte ou mais fraco, iria afectar a força que se exerce sobre a corrente? Se tiver tempo, tente a experiência com ímanes diferentes ou duplicando o número de peças nos pólos. No mesmo gráfico que serviu para a pergunta 1., trace as curvas de  $F$  em função de  $I_b$ . Qual a relação entre as curvas obtidas?

(b) *Como é que a força entre um íman e a uma corrente depende do comprimento da região da interacção*

1. Coloque um dos ímanes de cerâmica dentro da peça de ferro em forma de U para funcionarem como pólos (Fig. 2). (Cuidado: os ímanes de cerâmica são frágeis e partem-se se os deixar cair.) O modo como estes ímanes estão orientados é importante; coloque-os de modo a que as duas faces mais próximas se atraiam quando os aproxima. Coloque a peça em U e a unidade magnética na plataforma, com a espira da balança a passar pelo meio da região entre os ímanes de cerâmica (Fig. 2).

Coloque a peça em U de modo a que a espira da balança passe através do íman e que o ponteiro se desloque para cima quando se liga a corrente. Se o ponteiro se mover para baixo, varie qualquer coisa (a corrente? os ímanes) para que o ponteiro se desloque efectivamente para cima.

Com a corrente desligada, alinha o ponteiro com o zero do indicador.

2. Pendure um fio com dez centímetros de comprimento no encaixe da haste da balança e ajuste a corrente até que o ponteiro volte ao zero. Registe o valor da intensidade da corrente e o comprimento total do fio. Ponha de lado o íman para ser usado mais tarde.

3. Coloque uma segunda peça de ferro em forma de U e um par de ímanes que funcionam como pólos magnéticos e veja se se restabeleceu o equilíbrio. Não tem que variar a intensidade da corrente, nem o comprimento do fio pendurado no ponteiro. Assim, se o equilíbrio se restabelecer, este íman deve ter a mesma intensidade que o primeiro. Se não se restabelecer, tente outras combinações dos pólos até ter dois ímanes com a mesma intensidade. Se possível, tente arranjar três ímanes semelhantes.

4. Agora tem tudo preparado para um teste importante. Coloque dois ímanes na plataforma ao mesmo tempo (Fig. 3). Para evitar que os ímanes se afectem um ao outro, mantenha-os afastados de, pelo menos, 10 cm.

É claro que cada íman deve estar colocado de modo que o ponteiro sofra uma deflexão para cima. Com uma intensidade de corrente igual à anterior, pendure cavaleiros no encaixe da haste até que se restabeleça o equilíbrio.

Se tem três pares de ímanes, repita a experiência com os três, tendo o cuidado de os manter afastados uns dos outros.

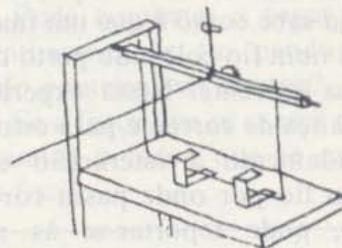


Fig. 3

### Interpretação dos resultados

O seu problema é determinar a relação entre o comprimento  $l$  da região de interacção e a força  $F$  que se exerce no fio.

Pode não saber qual é o comprimento exacto da região de interacção entre o íman e o fio para um único sistema magnético. A interacção estende-se certamente para lá da região entre as peças que funcionam como pólos. No entanto, a força decresce rapidamente com a distância, medida a partir dos ímanes e desde que estes se mantenham afastados, essas regiões de interacção também não são afectadas pela presença de outros ímanes. Pode, portanto, considerar que o comprimento total de interacção para duas unidades é o dobro do comprimento de interacção para uma única unidade.

4. Como é que  $F$  depende de  $l$ ?

(c) *Um estudo da interacção entre a Terra e uma corrente eléctrica*

O campo magnético da Terra é muito mais fraco que o campo perto dos ímanes de cerâmica e a balança deve estar ajustada para o seu máximo de sensibilidade. A sequência que apresentamos a seguir com os diferentes passos descritos em pormenor, ajudá-lo-á a detectar e a medir as forças de fraca intensidade que se exercem na espira.

1. Coloque na balança a espira mais longa e ajuste a balança para o máximo de sensibilidade, movendo a mola até ao topo da haste vertical. Pode aumentar a sensibilidade se adicionar uma segunda mola — é preciso, no entanto, ter cuidado para que a parte de cima da balança não fique muito pesada e caia, não conseguindo balançar.

2. Com a corrente que passa na espira desligada, alinhe o zero com a extremidade do braço do ponteiro.

3. Ligue a corrente e ajuste a sua intensidade para um valor aproximado de 5 A. Desligue a corrente e deixe que a balança pare.

4. Ligue a corrente e observe com cuidado: a balança move-se quando liga a corrente? Dado que não há corrente na bobina fixa e não há ímanes perto, a força que actua sobre a corrente que passa na espira deve ser devida à interacção entre esta e o campo magnético terrestre.

5. Para medir a força que se exerce na espira deve montar a experiência de modo a que o ponteiro se desvie para cima quando se liga a corrente. Se o ponteiro se move para baixo tente encontrar uma maneira que o faça deslocar para cima. (Se tiver dificuldade, consulte o seu professor.) Desligue a corrente e deixe a balança parar. Marque a posição zero com o indicador.

6. Ligue a corrente. Pendure os cavaleiros no encaixe e ajuste a corrente até restabelecer o equilíbrio. Registe o valor da intensidade da corrente e o comprimento do fio pendurado no encaixe. Repita a medição da força que é necessária para restabelecer o equilíbrio para diferentes valores da intensidade da corrente.

Se tiver tempo, repita as medições da força e da intensidade da corrente para uma espira mais curta.

### Interpretação dos resultados

Tente determinar a relação entre a intensidade da corrente  $I_b$  que passa na espira da balança e a força  $F$  que nela se exerce. Faça um gráfico de  $F$  em função de  $I_b$ .

5. Como pode converter as unidades de peso (expressa em cm de fio, por exemplo) em newton?

6. Qual é a força (em newton) que o campo magnético terrestre existente no seu laboratório exerce sobre a corrente  $I_b$  que passa na espira?

### Para discussão na aula

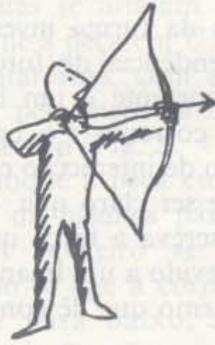
Os diferentes grupos da turma investigaram a relação de dependência de força  $F$ , que existe entre uma corrente e um íman, com a intensidade de corrente  $I$  e com o comprimento  $l$  da região de interacção com a corrente. Também deve ser claro que, qualquer expressão que descreva a força que se exerce numa corrente devido a um íman, tem que incluir um outro termo que dê conta da “intensidade” do íman.

Prepare um relatório para apresentar à turma com os resultados que obteve nas suas investigações e ajude a formular uma expressão que inclua todos os factores relevantes que foram estudados pelos diferentes grupos.

7. A intensidade de um campo magnético pode ser expressa em função da força que se exerce num fio por onde passa uma corrente de intensidade de 1 A, quando o comprimento do fio que interacciona com o campo é de 1 m. Tente exprimir a intensidade do campo magnético criado pelo sistema que utilizou ou a do campo magnético terrestre, expressa na unidade  $\text{Newton/A} \times \text{m}$ . (Por outras palavras, qual a força que os campos exerceriam num fio horizontal com 1 m de comprimento por onde passasse uma corrente de 1 A?)

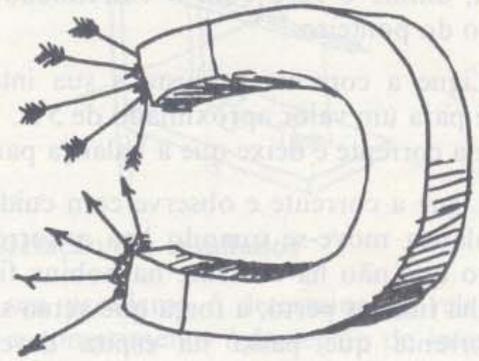
Ao usar a balança de corrente nesta experiência, todas as medições foram feitas na posição zero, ou seja, quando a espira estava no ponto inferior da sua oscilação. Nesta posição, a força vertical não afecta o equilíbrio. Por esse motivo, o que mediu foram apenas as forças *horizontais* que se exercem na parte inferior da espira.

No entanto, dado que a força que se exerce numa corrente devido à existência de um campo magnético é sempre perpendicular ao-campo, o que mediu foi apenas a componente *vertical* dos campos magnéticos. A partir da simetria do seu sistema magnético, é possível que tenha adivinhado que o campo é um campo totalmente na vertical na região entre as peças que funcionam como pólos.



Por outro lado, o campo magnético terrestre é vertical apenas nos pólos magnéticos. (Veja a figura da página 71 do *Texto*).

8. Como é que teria que modificar a experiência para medir a componente horizontal do campo magnético terrestre?



1. A. quando o comprimento do fio da corrente é maior, a força exercida sobre o fio é maior. B. quando o comprimento do fio da corrente é menor, a força exercida sobre o fio é menor. C. quando o comprimento do fio da corrente é igual, a força exercida sobre o fio é igual. D. quando o comprimento do fio da corrente é diferente, a força exercida sobre o fio é diferente.

de corrente e a componente da força  
lado no eixo  $\hat{y}$  e a medida da força  
que é necessária para deslocar o eixo  
para posições diferentes de modo a  
corrente  $I$  e o comprimento do fio  $l$   
Se tiver tempo, experimente com  
força e a intensidade da corrente  
e a intensidade da corrente  $I$   
para a mesma força e o mesmo  
intensidade da corrente  $I$  e o mesmo  
força da corrente  $I$  e o mesmo  
força e a força  $F$  que não se exercem  
um gráfico de  $F$  em função de  $I$

## Experiência 4.7

### TUBO DE FEIXES ELECTRÓNICOS

Se fez a experiência “Forças Eléctricas II” — lei de Coulomb”, verificou que a força que se exerce numa carga de teste, nas proximidades de um segundo objecto carregado, decresce rapidamente com o aumento da distância entre os dois objectos carregados. Por outras palavras, a intensidade do *campo eléctrico* devido a um pequeno objecto carregado decresce com a distância, medida a partir desta carga. Em muitas experiências, é útil ter uma região onde o campo seja uniforme, ou seja, uma região em que a força que se exerce sobre uma carga de teste seja a mesma em todos os pontos dessa região. O campo que se estabelece entre dois pratos próximos e paralelos, carregados com cargas de sinais opostos é aproximadamente uniforme (como foi sugerido pelo comportamento das fibras alinhadas num campo eléctrico entre dois pratos e que se mostra na Fig. 1).

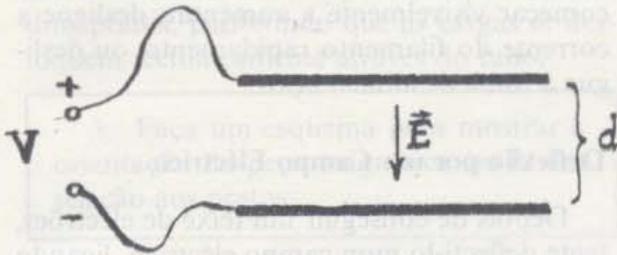


Fig. 1 O campo entre dois pratos paralelos é uniforme e dado por  $E=v/d$  onde  $v$  é a diferença do potencial (volts) entre dois pratos.

O módulo deste campo  $E$ , aproximadamente uniforme, depende da diferença de potencial entre os pratos e da distância  $d$  entre eles:

$$E = \frac{v}{d}$$

Se fez pelo menos uma das duas experiências anteriores com a balança de corrente, além de ter verificado a existência de forças eléctricas em corpos carregados, verificou também que há uma força que se exerce num fio por onde passa corrente, devido à existência de um campo magnético.

### Cargas Livres

Nesta experiência, as cargas não vão ficar confinadas à bola de plástico ou ao condutor metálico. Em vez disso, vai haver cargas livres — livres de se moverem no campo por elas criado no ar a uma baixa pressão.

Vai construir um tubo especial para esta experiência. O tubo conterá um filamento metálico e um recipiente com um pequeno orifício nas extremidades. Os electrões emitidos pelo filamento aquecido vão ser acelerados em direcção ao recipiente carregado positivamente, passando alguns deles através do orifício, formando um feixe de electrões. É muito fácil observar como é que o feixe é afectado pelos campos eléctrico e magnético.

Quando uma das moléculas do ar que ficou no tubo, onde se fez parcialmente o vácuo, choca com um electrão, a molécula emite luz. Moléculas de diferentes gases emitem luzes de diferentes cores. (O gás neon, por exemplo, emite luz vermelha.) A luz azulada que o ar no tubo emite mostra a trajetória do feixe de electrões.



### Construção do Tubo de Raios Catódicos

As instruções completas para a montagem do tubo estão incluídas com o material. Note que um dos pratos está ligado ao recipiente, enquanto o outro prato não pode tocar o recipiente.

Depois de ter montado o filamento e os pratos nos contactos eléctricos que estão na base do tubo de vidro, pode verificar se o alinhamento está correcto, olhando através do tubo de vidro mais estreito. Deverá ser capaz de ver o filamento a passar pelo centro do orifício no recipiente. Não sele o tubo sem verificar primeiro este alinhamento. Depois disso, deixe o tubo em repouso durante uma noite para que a cola endureça.

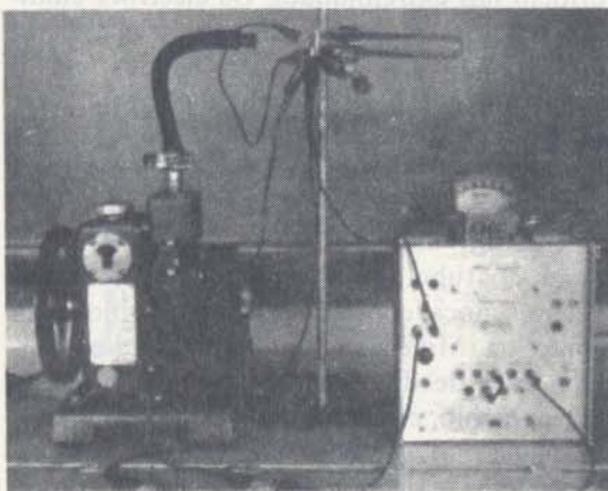


Fig. 2

### Funcionamento do Tubo

Com a fonte de alimentação no *OFF*, ligue o tubo como se mostra nas Figs. 2 e 3. A ligação à baixa tensão fornece uma corrente que vai provocar o aquecimento do filamento que vai emitir electrões. O amperímetro colocado neste circuito vai permitir um controlo da intensidade da corrente, para se evitar que o filamento funda. Assegure-se de que o botão de controlo 0-6 V está no zero.

A ligação a alta tensão vai fornecer o campo que acelera estes electrões na direcção

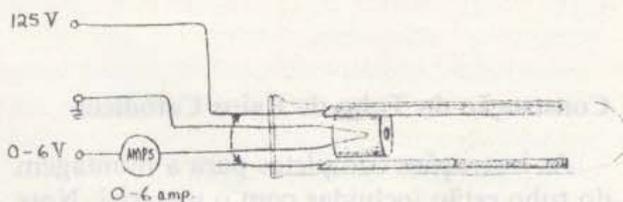


Fig. 3 Os contactos metálicos dos dois pratos estão de modo a ficarem ao mesmo potencial e de modo a não existir qualquer campo eléctrico entre eles.

do recipiente metálico. Peça ao seu professor que verifique os circuitos antes de continuar.

Ligue a bomba de vácuo e deixe-a funcionar durante alguns minutos. Se a montagem do tubo estiver bem feita e se a bomba de vácuo está em boas condições, não deverá ter dificuldades em obter uma luz na região onde passa o feixe electrónico que atravessou o orifício do recipiente.

Deve trabalhar com a luz mais fraca possível que consegue ver claramente. Mesmo assim, é importante ter em atenção a intensidade da luz. A corrente existente entre o filamento metálico e o recipiente é considerável. À medida que o gás residual fica mais quente, torna-se um melhor condutor e faz aumentar a intensidade da corrente. Esse aumento da corrente vai provocar um maior aquecimento, podendo este processo continuar — a extremidade do tubo ficará intensamente iluminada com uma luz azulada e o recipiente pode ficar incandescente. Neste caso, deve imediatamente reduzir a corrente para evitar que o canhão fique destruído. Se a intensidade da luz na extremidade do tubo começar visivelmente a aumentar, desligue a corrente do filamento rapidamente, ou desligue a fonte de alimentação.

### Deflexão por um Campo Eléctrico

Depois de conseguir um feixe de electrões, tente deflecti-lo num campo eléctrico, ligando o prato deflector ao terminal terra (veja a Fig. 4). Com isso vai fazer com que as diferenças de potencial entre os dois pratos seja igual à tensão de aceleração. Pode fazer outras ligações para obter tensões diferentes, mas deve verificar os seus planos com o seu professor antes de os experimentar.

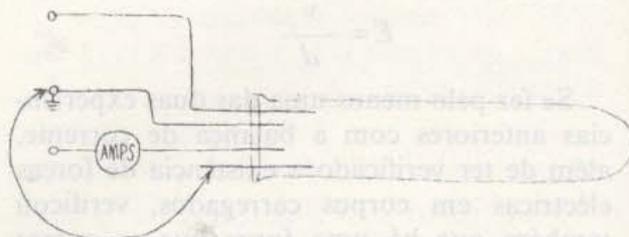


Fig. 4 Ligando um prato deflector à terra a diferença de potencial entre os pratos vai ser de 125 V.

1. Faça um esquema para mostrar a direcção e sentido do campo eléctrico e da força que actua o feixe carregado. A deflexão no campo magnético confirma o facto de o feixe ser constituído por cargas carregadas negativamente?

### Deflexão por um Campo Magnético

Experimente deflectir o feixe num campo magnético, utilizando a peça em U e os ímanes utilizados nas experiências com a balança de corrente.

2. Faça um gráfico vectorial para mostrar a direcção e o sentido do campo magnético, a velocidade dos electrões e a força que actua sobre eles.

### Equilíbrio entre os Efeitos Eléctricos e Magnéticos

Tente orientar os ímanes de modo a anular o efeito de um campo eléctrico entre os dois pratos, permitindo que as cargas se desloquem rectilíneamente através do tubo.

3. Faça um esquema para mostrar a orientação da peça magnética em U em relação aos pratos.

### A Velocidade das Cargas

Como se explicou no Capítulo 14 do *Texto*, o módulo da força magnética é  $qvB$ , onde  $q$  é carga do electrão,  $v$  a sua velocidade e  $B$  a intensidade do campo magnético. O módulo da força eléctrica é  $qE$ , onde  $E$  é a intensidade do campo eléctrico.

Se for ajustando a tensão nos pratos até que a força eléctrica equilibre a força magnética, então  $qvB = qE$  e, portanto,  $v = E/B$ .

4. Mostre que a razão  $B/E$  será expressa em unidades de velocidade se se exprimir  $B$  em newton/A × metro e  $E$  em newton/coulomb. Sugestão: Lembre-se que  $1 \text{ A} = 1 \text{ coulomb/s}$ .

Se conhecesse os valores de  $B$  e  $E$ , poderia calcular a velocidade dos electrões. O valor de  $E$  é fácil de determinar, dado que num campo uniforme entre pratos paralelos,  $E = v/d$ , onde  $v$  é a diferença de potencial entre o prato (expressa em volt) e  $d$  a distância entre os pratos (expresso em metro). (A unidade volt/metro é equivalente a newton/coulomb.)

Na experiência "Correntes, Ímanes e Forças" descreveu-se um processo para obter um valor aproximado da intensidade do campo magnético entre os pólos de uma armadura magnética.

5. Que valor obteve para  $E$  (em volt por metro)?

6. Que valor obteve para  $B$  (em newton por ampère × metro)?

7. Qual o valor que calculou para a velocidade dos electrões no feixe?

### Uma pergunta importante

Uma das questões com que os físicos do fim do séc. XIX se confrontaram foi a de decidir qual seria a natureza destes "raios catódicos" (têm este nome porque são emitidos pelo eléctrodo negativo ou cátodo). Um grupo de cientistas (na sua maioria Alemães) pensava que os raios catódicos eram uma forma de radiação, análoga à luz, enquanto outro grupo (na sua maioria Ingleses) pensava que seriam feixes de partículas. J. J. Thompson realizou várias experiências no laboratório de Cavendish em Cambridge, Inglaterra, muito semelhantes àquela que descrevemos aqui, e mostrou que os raios catódicos se comportavam como partículas: estas partículas chamam-se actualmente electrões.

Estas experiências tiveram enorme importância nos primeiros avanços da Física Atómica. Na Unidade 5 irá realizar uma experiência para determinar a razão entre a carga de um electrão e a sua massa.

## Experiência 4.8

### TUBOS DE FEIXES ELECTRÓNICOS — II

#### 1. Focagem do feixe de electrões

Uma corrente que percorra uma bobina enrolada à volta do tubo de raios catódicos vai produzir dentro da bobina um campo magnético paralelo ao eixo do tubo. (Se enfiar ímanes em forma de anel no tubo, vai produzir o mesmo tipo de campo.) Um electrão que se mova paralelamente ao eixo não ficará sujeito a nenhuma força — a sua velocidade é paralela ao campo magnético. Por outro lado, para um electrão que se mova numa direcção perpendicular ao eixo do tubo, o campo ficará perpendicular à sua velocidade e o electrão vai ficar sujeito à acção de uma força ( $F = qvB$ ) perpendicular à velocidade e ao campo. Se o electrão permanece num campo uniforme, a sua trajectória será um círculo. A força centrípeta  $F = mv^2/R$  que o obriga a percorrer o círculo é precisamente a força magnética  $qvB$ , de modo que:

$$qvB = \frac{mv^2}{R}$$

onde  $R$  é o raio da órbita. Neste caso simples, temos:

$$R = \frac{mv}{qB}$$

Suponha que o electrão se move em sentido descendente, ligeiramente afastado do eixo, na presença de um campo paralelo ao eixo (Fig. 1a). Pode considerar-se que a velocidade tem duas componentes: uma componente axial  $v_a$ , paralela ao eixo, e uma transversal  $v_t$  (perpendicular ao eixo) (Fig. 1b). Considere estas duas componentes

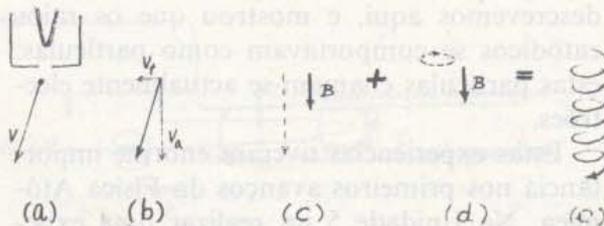


Fig. 1

da velocidade do electrão, independentemente uma da outra. Sabemos que a componente axial não será afectada — o electrão continuará a deslocar-se em sentido descendente com a velocidade  $v$  (Fig. 1c). A componente transversal, no entanto, é perpendicular ao campo, o que implica que o electrão tenha um movimento circular (Fig. 1d). Neste caso,

$$R = \frac{mv_t}{qB}$$

O movimento resultante — a composição de um movimento uniforme, paralelo ao eixo e no sentido descendente, com um movimento circular perpendicular ao eixo — terá uma forma helicoidal, análoga à da rosca de um parafuso (Fig. 1e).

Na ausência de qualquer campo, os electrões, que se deslocam ligeiramente afastados do eixo, continuarão a deslocar-se em direcção à extremidade do tubo. No entanto, na presença de um campo magnético axial, os electrões vão ter um movimento helicoidal descendente — os electrões ficaram focados num eixo. O raio deste depende da intensidade do campo  $B$  e da velocidade transversal  $v_t$ .

Enrole o tubo de raios catódicos com um calibrador de arame de cobre forte (cerca de duas voltas por centímetro) e ligue o tubo a uma fonte de baixa tensão (3-6 volt) e com uma intensidade elevada, para que se obtenha um efeito de focagem visível. Observe a forma do raio luminoso, usando diferentes bobinas e correntes. (Em alternativa, pode variar o número e a distância entre os ímanes em forma de anel onde enfiou o tubo, para produzir um campo axial.)

#### 2. Reflexão do Feixe de Electrões

Se aproximar do tubo o pólo de um íman forte (com muito cuidado para que o íman não atraia as partes de ferro do tubo), verá que a trajectória luminosa do feixe será uma espiral cada vez mais estreita à medida que as regiões do campo são mais fortes. Se as linhas do campo divergem o suficiente, a trajectória do feixe pode começar a ser uma

espiral de sentido contrário. A razão deste fenómeno está sugerido no GE 14.32 do *Texto*.

É este tipo de reflexão que se exerce nas partículas das cinturas de radiação existentes à volta da Terra, quando eles se aproximam dos pólos magnéticos terrestres. (Veja o desenho no fim do Capítulo 14 do *Texto*.) É esta reflexão que torna possível manter partículas carregadas com energias altíssimas em "canais" magnéticos. Um dos tipos de bobina que se usa para produzir um campo com características aparece na Unidade 5.

### 3. Características do Díodo e do Tríodo

A construção e funcionamento de algumas válvulas de vácuo electrónicas são descritos na actividade "No interior de uma válvula de rádio", página 40. Nesta experiência encontra algumas sugestões para poder explorar algumas das características destas válvulas com os materiais do tubo de feixes electrónicos.

Estas experiências realizam-se com tensões de aceleração abaixo das que provocam ionização (luz visível) no tubo de feixes electrónicos.

#### (a) Rectificação

Ligue um amperímetro entre o recipiente metálico e a fonte de alta tensão para ver o sentido da corrente e para ver que apenas existe corrente quando o recipiente metálico está a uma tensão superior à do filamento (Fig. 2).

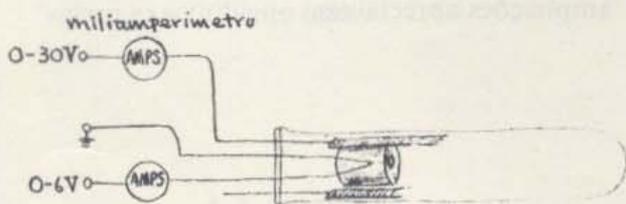


Fig. 2

Note que há uma intensidade de corrente mensurável para valores de tensão menores que os necessários para produzir uma iluminação visível no tubo. Depois, aplique uma

diferença de potencial alterna entre o recipiente e o filamento (proveniente de um Variac, por exemplo). Use o osciloscópio para mostrar que o recipiente tem um potencial, alternadamente, acima e abaixo do potencial do filamento. Depois, ligue o osciloscópio através de uma resistência ao circuito da placa para mostrar que a corrente só passa num sentido. (Veja a Fig. 3.)

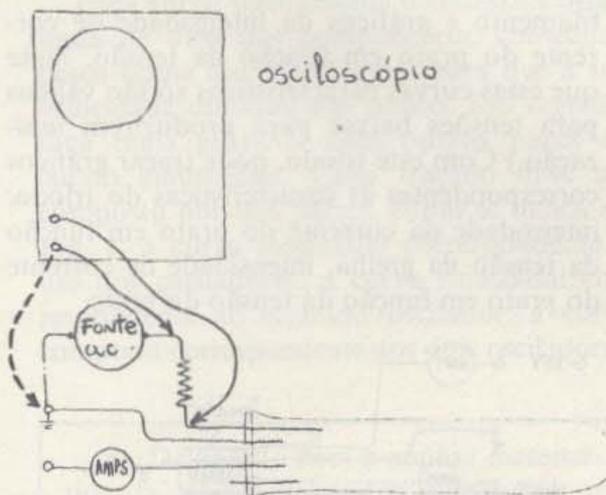


Fig. 3 Pode verificar a acção de rectificação de um diodo se substituir a fonte de tensão de aceleração contínua e se lhe ligar um reóstato em série (com cerca de 100  $\Omega$ ). Quando se liga um osciloscópio, como se mostra na figura com os traços a cheio, ele vai indicar a intensidade de corrente no círculo do recipiente. Quando se troca a ligação de um fio, passando esta a ser a que se indica pela seta a tracejado, o osciloscópio indicará a tensão no recipiente metálico.

#### (b) Tríodo

O tríodo da Fig. 4 foi construído com uma folha fina de alumínio para a placa e um fio de uma liga de cromo-níquel para a grelha. O filamento é o que vem com os materiais para a construção do tubo de feixes electrónicos e usaram-se tubos de alumínio fino comprados numa loja para fazer as ligações entre o prato e a grelha. (Por razões que se perdem na história das válvulas de vácuo, chama-se normalmente ao recipiente metálico, o "prato". É interessante traçar os gráficos das intensidade do prato em função da intensidade da corrente de aquecimento do

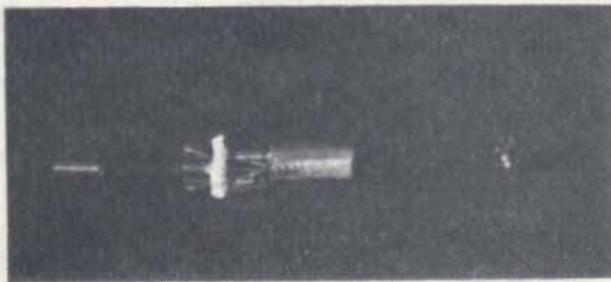


Fig. 4

filamento e gráficos da intensidade de corrente do prato em função da tensão. Note que estas curvas características só são válidas para tensões baixas para produzirem ionização.) Com este triodo, pode traçar gráficos correspondentes às características do triodo: intensidade da corrente do prato em função da tensão da grelha, intensidade de corrente do prato em função da tensão do prato.

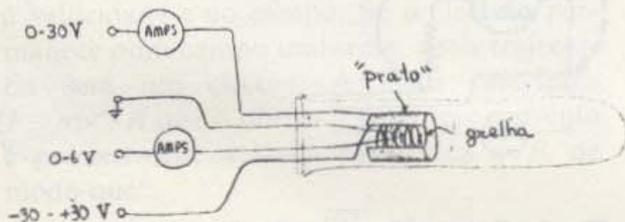


Fig. 5

Também pode medir o factor de amplificação da tensão, que nos indica a amplitude da variação da tensão da placa produzida por uma variação de tensão da grelha. Mais precisamente, o factor de amplificação é,

$$\mu = \frac{-\Delta V_{\text{prato}}}{\Delta V_{\text{grelha}}}$$

quando se mantém constante a intensidade de corrente do prato.

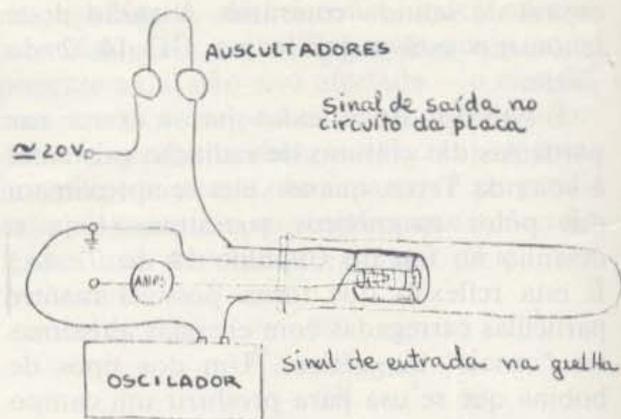


Fig. 6 Circuito de amplificação.

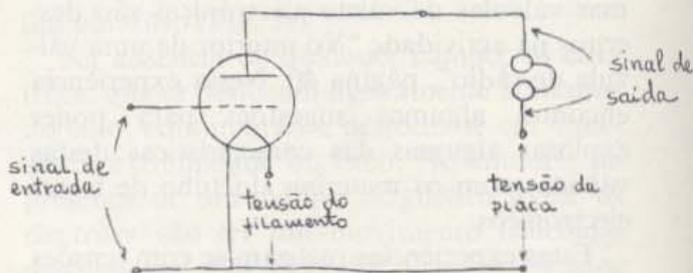


Fig. 7 Esquema de um circuito amplificador.

Faça variar um pouco a tensão da grelha e ajuste a tensão da placa de modo a obter novamente a intensidade de corrente da placa inicial. O módulo da razão entre estas duas variações de tensão é o factor de amplificação. (As válvulas de vácuo comerciais têm normalmente factores de amplificação da ordem dos 500.) No circuito que se mostra nas Figs. 6 e 7, as válvulas produzem ampliações apreciáveis.

## Experiência 4.9

### ONDAS E COMUNICAÇÃO

Tendo estudado muitos tipos e características das ondas no *Texto* das Unidades 3 e 4, está agora em posição para ver como são usadas nas comunicações. Temos aqui algumas sugestões para possíveis investigações com equipamento que provavelmente já viu em demonstrações. Nas notas seguintes partiu-se do princípio que já sabe utilizar o equipamento. Se não sabe, não prossiga antes de pedir instruções. Embora diferentes grupos de alunos possam usar equipamentos diferentes, todas as experiências estão relacionadas com os mesmos fenômenos — como é que podemos comunicar por meio de ondas.

#### A. Osciladores

Ligue o oscilador que tem uma caneta acoplada. (Veja a Unidade 5, Capítulo 17.) Ligue o registador gráfico, mas não ligue o oscilador onde ele está montado. A caneta vai traçar uma curva sinusoidal, à medida que se desloca no papel em movimento. Depois de ter feito um registo com alguns centímetros, desligue o oscilador e coloque a caneta parada no meio do papel. Agora ligue o segundo oscilador à mesma velocidade com que o primeiro estava a andar. A caneta vai traçar uma curva sinusoidal semelhante à primeira, à medida que o papel se desloca de um lado para o outro por debaixo da caneta. Os comprimentos de onda das duas curvas são provavelmente semelhantes, embora não sejam exactamente iguais.

1. O que prevê que acontecerá se ligar os dois osciladores? Experimente. Olhe cuidadosamente para a curva que fica traçada quando os osciladores estão ligados e compare-a com as figuras traçadas previamente quando apenas um dos osciladores estava ligado.

Faça variar ligeiramente o comprimento de onda de uma das componentes, colocando pesos numa das plataformas para que a sua velocidade diminua um pouco. Em seguida, faça mais gráficos com outros pares de curvas sinusoidais. Cada traçado deve ser composto por três partes, como se indica na Fig. 1: a curva sinusoidal correspondente a um dos osciladores; a curva sinusoidal correspondente ao segundo oscilador; a curva composta correspondente aos dois osciladores.

2. De acordo com a análise matemática da adição de ondas sinusoidais, o comprimento de onda da onda resultante ( $\lambda_r$ , na Fig. 1) aumentará à medida que os comprimentos de onda das duas componentes ( $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ) se vão tornando praticamente iguais. Os seus resultados confirmam esta afirmação?

3. Se os dois comprimentos de onda  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  fossem exactamente iguais, qual a figura que iria obter, quando ligasse os dois pratos giratórios, ou seja, quando as duas curvas se sobrepussem? Para além de depender de  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , de que outras variáveis depende a forma das figuras que se obtêm?

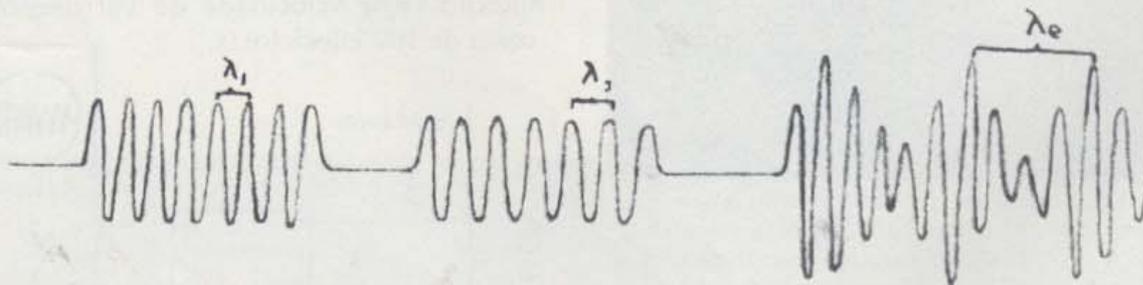


Fig. 16-1

À medida que a diferença entre  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  diminui,  $\lambda_c$  fica maior. Deste modo, pode detectar uma diferença muito pequena nos comprimentos de onda, examinando as variações na amplitude da onda resultante, que ocorrem durante uma distância relativamente grande. Este método, conhecido por método dos batimentos, fornece um processo sensível para comparar dois osciladores e para ajustar um deles até que ele fique com a mesma frequência que o outro.

Este método dos batimentos utiliza-se também na afinação de instrumentos musicais. Se tocar a mesma nota em dois instrumentos que não estão totalmente em consonância, pode ouvir batimentos. Quanto mais consonantes estiverem as notas, menor será a frequência dos batimentos. Pode tentar esta mesma experiência com duas guitarras ou com outros instrumentos musicais (ou com duas cordas do mesmo instrumento).

Na comunicação por rádio, pode transmitir-se um sinal, usando-o para modular uma onda "transmissora" com uma frequência mais elevada. (Veja na parte E, uma explicação mais aprofundada da modulação.) Um instantâneo de onda modulada tem um aspecto semelhante ao dos batimentos que tem estado a produzir, mas resulta de uma onda utilizada para controlar a amplitude de uma outra e não da simples adição das ondas.

### B. Circuitos Ressonantes

Já previu uma demonstração sobre o modo como se pode transmitir um sinal de um circuito sincronizado para outro. (Se não viu a demonstração, deve montá-la, usando para isso a montagem que se mostra na Fig. 2.)

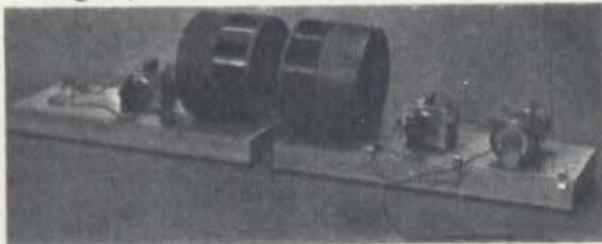


Fig. 2 Duas unidades de um circuito ressonante. Cada uma delas tem uma bobina e uma capacidade variável. A parte da direita tem uma bateria eléctrica e uma barra dentada para produzir oscilações de curta duração nesse circuito.

Podemos representar esta montagem pelo esquema da Fig. 3.

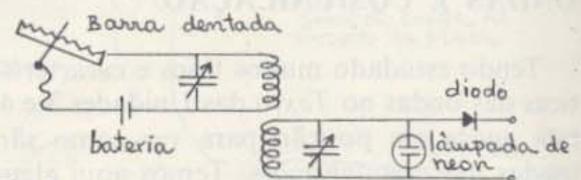


Fig. 3

As duas bobinas têm que estar muito próximas uma da outra para que o circuito receptor apanhe o sinal proveniente do transmissor.

Investigue o efeito que tem a mudança de posição de uma das bobinas. Experimente rodar uma delas, afastá-la, etc.

4. O que acontece quando coloca entre as bobinas uma folha de metal, plástico, madeira, cartão, papel molhado, ou vidro?

5. Por que é que um automóvel tem sempre uma antena exterior e um rádio dentro de casa não?

6. Por que é que é impossível comunicar por rádio com um submarino que está submerso?

Já aprendeu provavelmente que para transmitir um sinal de um circuito para outro, é necessário que os dois circuitos estejam sintonizados para a mesma frequência.

Para verificar qual a gama de frequências que pode obter com o seu circuito de ressonância, ligue uma antena (um fio com um comprimento grande) ao circuito receptor ressonante, para aumentar a sua sensibilidade e substitua o microfone por um osciloscópio (Fig. 4).

Ponha o osciloscópio em "sincronismo interno" e a velocidade de varrimento em cerca de 100 kilociclos/s.

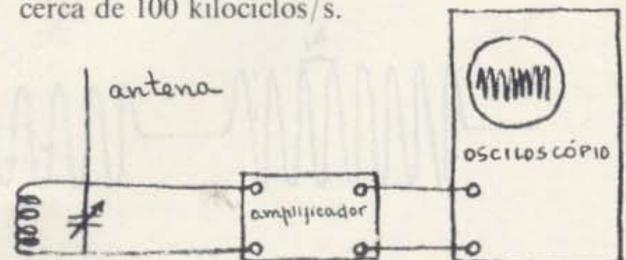


Fig. 4

7. Varie a posição do condensador variável (  $\neq$  ) e veja como varia a figura no oscilador. Que posição da capacidade dá origem a uma velocidade mais elevada? E mais baixa? De quanto pode variar a frequência, ajustando a posição do condensador?

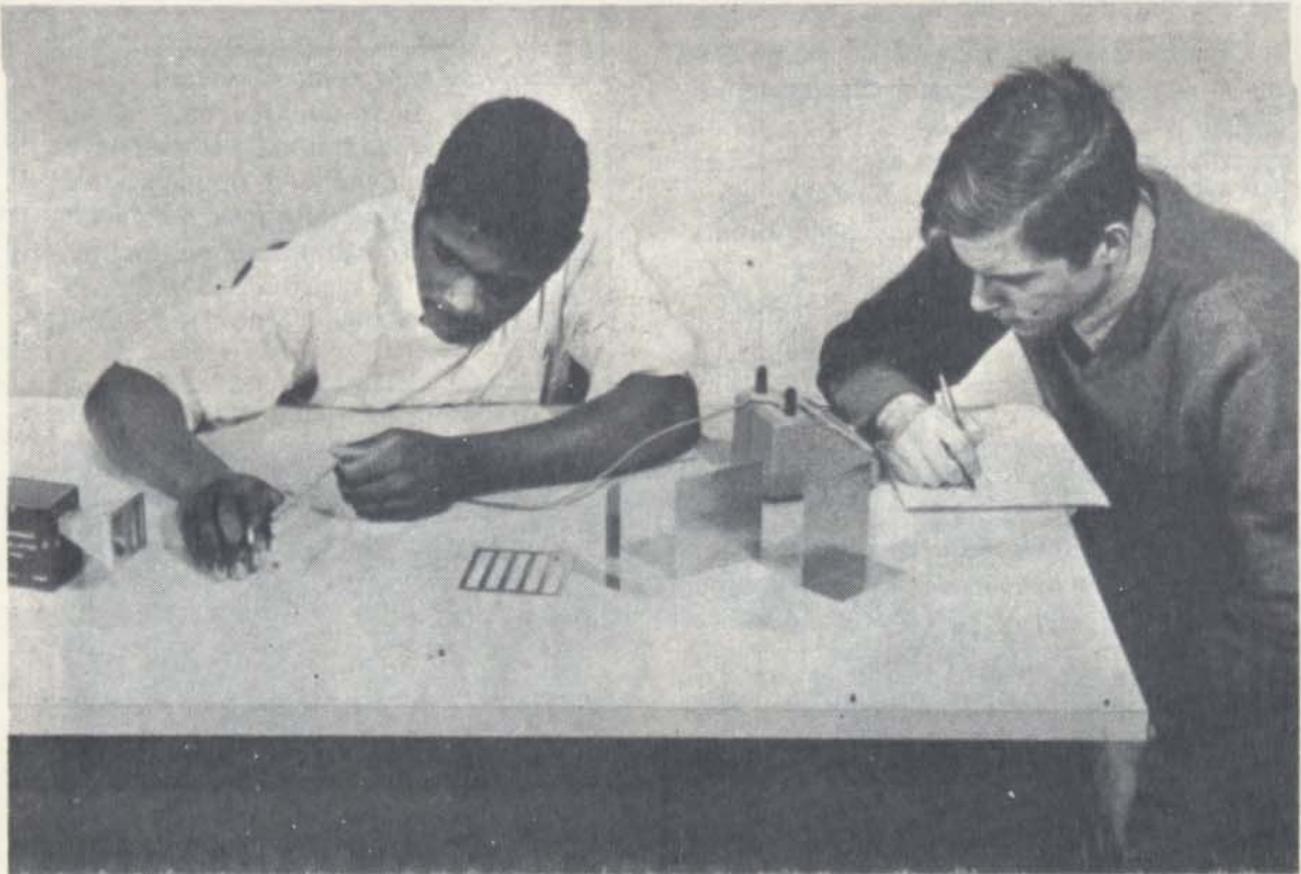
Quando sintoniza um rádio o que faz normalmente é o que faz aqui, ou seja, variar a posição de um condensador variável de modo a sincronizar o circuito para uma frequência diferente.

A bobina também tem um papel importante na determinação da frequência de ressonância do circuito. Se a bobina tiver um número de espiras diferente, será necessário regular de novo o condensador para obter a mesma frequência.

### C. Propriedades Elementares das Micro-ondas

Com um gerador de micro-ondas pode investigar algumas das características das ondas curtas na parte das ondas de rádio do espectro electromagnético. Na experiência 3-17 "Medição do comprimento da onda" e na experiência 3-18 "Som" explorou o comportamento de diferentes tipos de ondas. Estas experiências contêm um certo número de ideias que o ajudarão a mostrar que a energia emitida pelo seu gerador de micro-ondas tem uma forma ondulatória.

Reporte-se às notas relativas a essas experiências. Depois, utilizando a montagem aí sugerida, ou outras ideias que tenha, estude a transmissão de micro-ondas através de vários metais assim como a reflexão e a refração dessas ondas. Experimente detectar o fenómeno de difracção provocado por obstáculos ou devido à passagem das micro-ondas por



orifícios pequenos em materiais opacos a estas ondas. Finalmente, se tem disponíveis dois transmissores ou uma campânula metálica com duas aberturas, veja se consegue medir o comprimento da onda usando o método das interferências da Experiência 3.18. Discuta os seus resultados com os alunos que estão a fazer a experiência (D) sobre a interferência de micro-ondas reflectidas.

#### D. *Interferência de Micro-ondas reflectidas*

Com micro-ondas é fácil demonstrar a existência de interferência entre a radiação directa emitida por uma fonte e a radiação reflectida por uma superfície plana, servindo, por exemplo, uma placa metálica. Nos pontos onde as ondas directa e reflectida chegam em fase, haverá máximos e nos pontos onde elas chegam desfasadas de  $1/2$  ciclo, haverá mínimos. Consequentemente, podemos encontrar facilmente os máximos e os mínimos, movendo o detector numa direcção perpendicular ao reflector (Fig. 5).

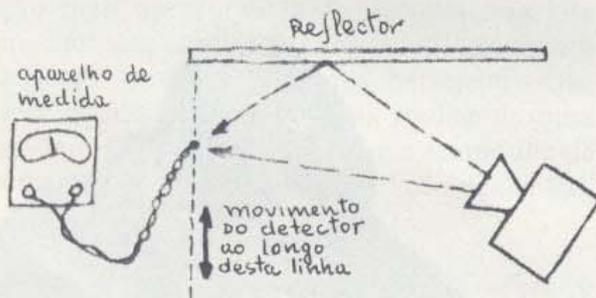


Fig. 5

8. Pode estabelecer uma regra com que seja possível prever as posições dos máximos e dos mínimos?

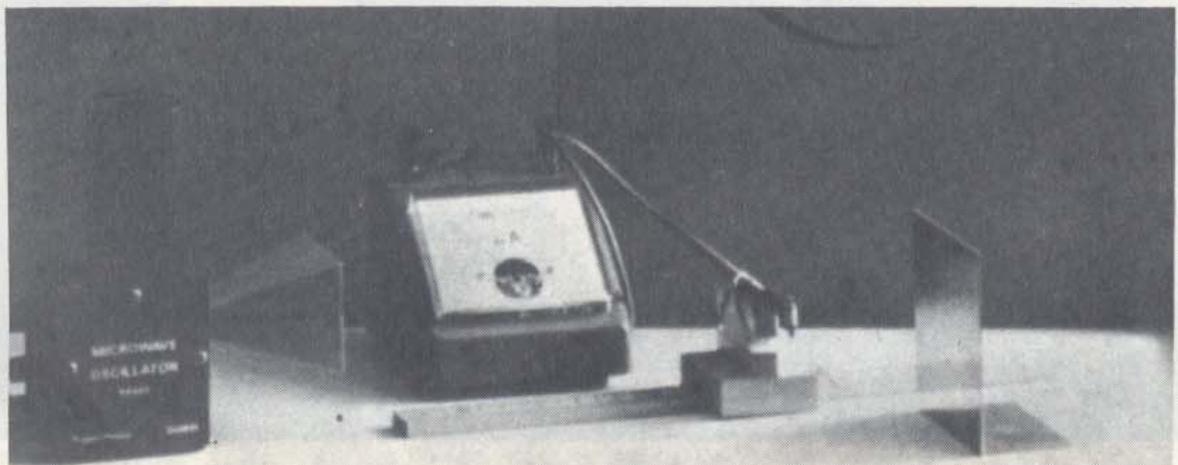
Movendo o detector para trás, e tornando a examinar de novo cuidadosamente pode traçar as linhas de máximos e de mínimos.

9. Até que ponto é que esta figura de interferência é semelhante à que observou com radiações provenientes de duas fontes?

Conseguirá obter micro-ondas estacionárias se colocar o reflector exactamente na perpendicular à fonte. (Analogamente ao que acontece com as outras ondas estacionárias, os nodos estão separados de  $1/2$  do comprimento de onda.) Localize diversos nodos, movendo o detector segundo a direcção entre a fonte e o reflector, e a partir da distância entre eles, calcule o comprimento de onda das micro-ondas.

10. Qual foi o comprimento de onda que obteve para as micro-ondas?

11. As micro-ondas, como a luz, propagam-se com uma velocidade de  $3 \times 10^8$  m/s. Qual é a frequência das suas micro-ondas? Verifique o resultado que obteve, comparando-o com os valores indicados no registo do espectro visível dado na página 118 do *Texto*, Capítulo 16.



A interferência entre ondas de rádio directas e reflectidas têm consequências práticas importantes. Existem camadas de ar parcialmente ionizadas (e, portanto, electricamente condutoras), que têm a designação global de ionosfera e que rodeiam a Terra, situando-se a uma distância que vai desde os 30 Km até 300 Km. Uma camada a cerca de 300 Km de distância funciona como um bom reflector de ondas de rádio, podendo, portanto, ser usado para fazer chegar mensagens de rádio a pontos que, devido à curvatura da Terra, estão a distâncias demasiado longas para serem atingidas por linhas rectas.

Se uma torre de transmissão tem uma altura de 100 m, então, como se mostra esquematicamente na Fig. 6, o ponto A — o ponto mais afastado que o sinal pode atingir directamente numa região — fica a cerca de 35 Km. No entanto, a partir da reflexão na ionosfera, o sinal pode atingir o ponto B, localizado para lá da zona atingida pelos sinais directos, assim como outros mais afastados.

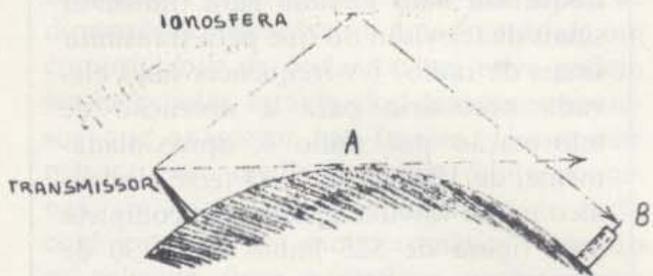


Fig. 6

Por vezes, um sinal directo e um sinal reflectido atingem o mesmo local, o que vai dar origem ao fenómeno de interferência. Se os dois sinais estão desfasados e têm a mesma amplitude, o receptor não captará nada. Esta interferência destrutiva é responsável pelo desaparecimento gradual do som do rádio. Este fenómeno pode tornar-se mais complicado pelo facto de a altura da ionosfera e a intensidade da reflexão variarem com a quantidade de luz solar.

A montagem representada na Fig. 7 é um modelo desta situação. Desloque o reflector (a "ionosfera") para trás e para a frente. O que acontece à intensidade do sinal?

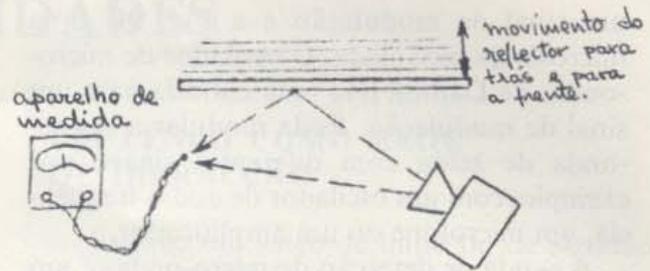


Fig. 7

Podem também existir reflexões múltiplas — a radiação pode deslocar-se para trás e para a frente entre a Terra e a ionosfera várias vezes durante o seu percurso, percurso esse que pode ser, por exemplo, Nova Iorque e Calcutá, na Índia. Talvez consiga também simular esta situação com o seu equipamento de micro-ondas.

### E. Sinais e Micro-ondas

Até agora aprendeu alguma coisa sobre o comportamento das micro-ondas com uma única frequência e amplitude constante. Pode adicionar-se um *sinal* a estas ondas, fazendo variar a sua amplitude no transmissor. O processo mais óbvio para conseguir isto, seria simplesmente o de ligar e desligar estas ondas, como se mostra na Fig. 8. As mensagens em código podem ser transmitidas por este processo um pouco primitivo. No entanto, podemos variar a amplitude da

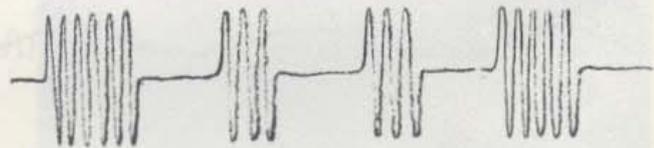


Fig. 8

onda de maneiras mais elaboradas, quando queremos transmitir sinais musicais ou vocálicos. Por exemplo, se alimentarmos parte da micro-onda transmissora com uma onda sinusoidal de 1000 ciclos/s, isto vai provocar uma variação gradual da micro-onda até 1000 ciclos/s.

Este processo de controlar a amplitude da onda transmitida chama-se *modulação da amplitude*. A Fig. 9A representa uma micro-onda não modulada, a Fig. 9B representa

um sinal de modulação e a Fig. 9C uma micro-onda modulada. O oscilador de micro-ondas de Damon tem uma entrada para um sinal de modulação. Pode modular a micro-onda de saída com diferentes sinais, por exemplo, com um oscilador de áudio-frequência, um microfone ou um amplificador.

A sonda de detecção de micro-ondas é um

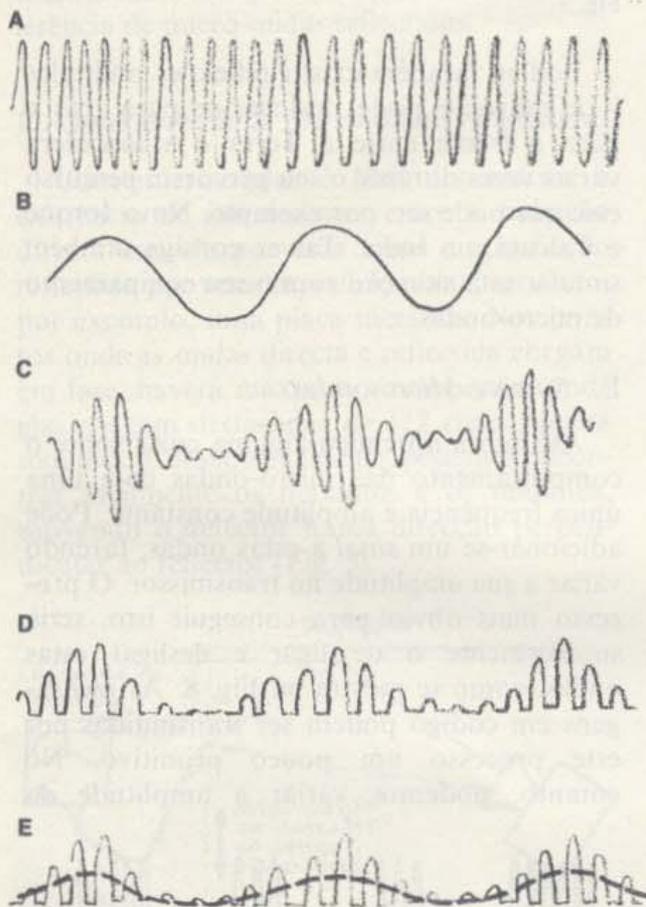


Fig. 9

aparelho rectificado — só passa corrente com um sentido. Se a micro-onda que atinge o detector é representado por C, o sinal eléctrico que se obtém proveniente do detector é análogo ao que se apresenta em D.

Pode visualizar este fenómeno, no oscilador, ligando-o à sonda de micro-ondas (através de um amplificador, se necessário).

O sinal modulado que se detecta com a sonda detectora pode transformar-se em som, ligando um amplificador ou um altifalante à sonda. O altifalante não será capaz de responder às  $10^9$  oscilações individuais de curta duração produzidas por segundo pela onda "transmissora", mas apenas ao seu efeito médio representado pela linha a tracejado em E. Consequentemente, o sinal sonoro da saída no altifalante corresponderá aproximadamente a um sinal de modulação.

12. Por que é que a frequência das ondas transmissoras deve ser muito maior do que a frequência do sinal?

13. Por que é que é necessário uma frequência mais elevada para transmitir sinais de televisão do que para transmitir sinais de rádio? (A frequência mais elevada necessária para a obtenção de informação por rádio é, aproximadamente, de 1200 ciclos/s. O feixe electrónico numa válvula de televisão completa uma figura de 525 linhas em 1/30 de segundo, e a intensidade do feixe deve poder variar várias centenas de vezes durante o traçado de uma única linha.)

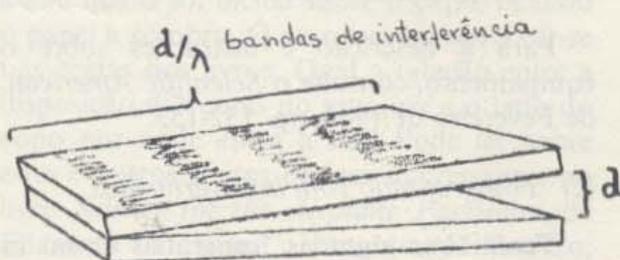
# ACTIVIDADES

## INTERFERÊNCIA CRIADA POR UMA PELÍCULA MUITO FINA

Agarre em duas lamelas de microscópio, bem limpas, e aperte-as uma contra a outra. Observe a luz por elas reflectida, proveniente de uma fonte que emite luz composta apenas por poucas radiações de comprimentos de onda bem definidos (uma lâmpada de mercúrio ou em chama de sódio, por exemplo). O que vê é o resultado da interferência das ondas luminosas reflectidas pelas duas superfícies interiores das lamelas que quase se tocam, embora não totalmente. (A película fina é formada pela camada de ar entre as duas lamelas.)

Também se pode usar este fenómeno para determinar o nivelamento de superfícies. Se as duas superfícies interiores são totalmente planas, as franjas de interferência são bandas paralelas. No entanto, se há altos ou depressões nessas superfícies, mesmo que sejam de dimensões comparáveis a uma fracção de um comprimento de onda da luz, estes podem ser detectados através dos contornos sinuosos que aparecem nas franjas. Usa-se este método para medir distâncias muito pequenas, em termos de comprimentos de onda conhecidas de luz monocromática. Quando se colocam duas superfícies perfeitamente planas de modo a que façam entre si um ângulo pequeno, vão aparecer bandas de interferência, correspondentes aos diferentes comprimentos de onda de separação. (Ver figura abaixo.)

Como poderia usar este fenómeno para medir a espessura de um cabelo muito fino ou de um plástico muito fino?



## UM LENÇO COMO REDE DE DIFRAÇÃO

Estique um lenço de linho ou de algodão de boa qualidade e olhe através dele para uma fonte luminosa distante, como sendo, por exemplo, um candeeiro de rua situado no quarteirão que está à sua frente. Observará uma figura de difracção interessante. (Também se pode utilizar a rede de uma janela ou um chapéu de chuva de pano.)

## FOTOGRAFANDO FIGURAS DE DIFRAÇÃO

Figuras de difracção como as que se apresentam consegue-se no laboratório ou em casa. As fotografias nas Figs. 1 e 2 foram produzidas com a montagem que aqui se esquemmatiza.

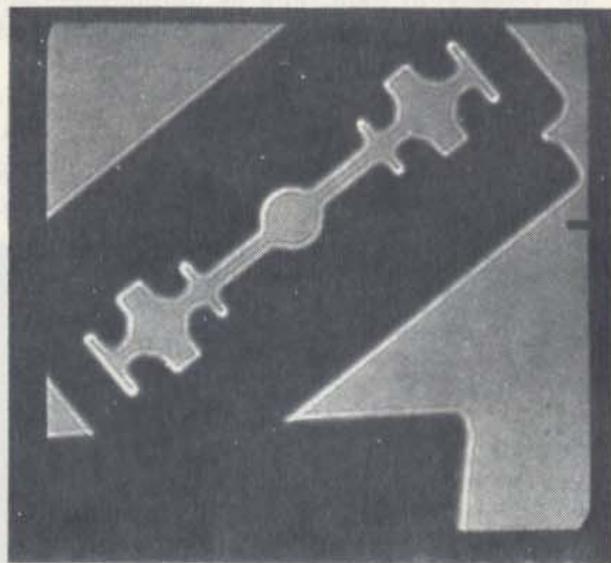
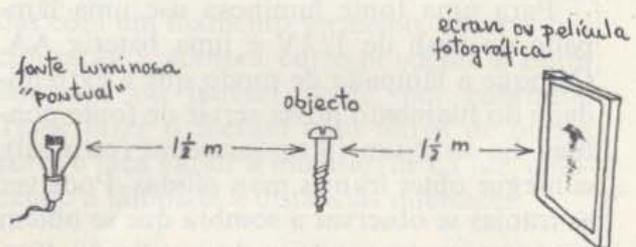


Fig. 1

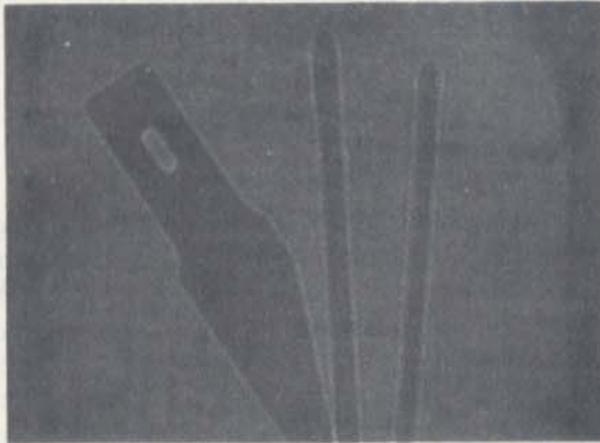


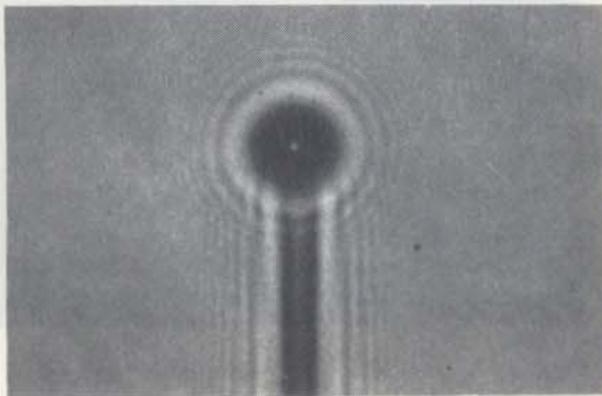
Fig. 2

Para fotografar estas figuras, deve ter uma câmara escura ou uma grande caixa onde não entre luz. A Fig. 1 foi tirada com uma máquina Polaroid 4×5 de revelação instantânea. As lentes foram removidas e uma película fotográfica Polaroid de 3000-ASA foi exposta durante 10s; como obturador usou-se um bocado de cartão que se colocou em frente da câmara.

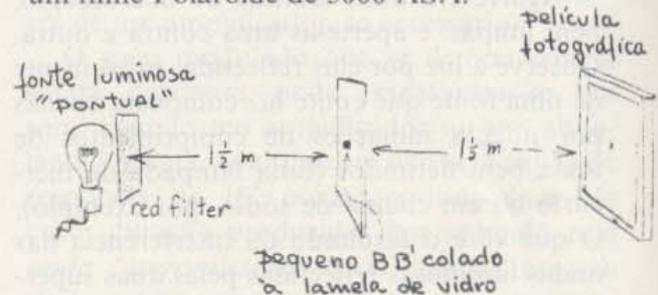
Para uma fonte luminosa use uma lâmpada de flash de 1/2 V e uma bateria AA. Coloque a lâmpada de modo que a extremidade do filamento possa servir de fonte pontual. Se usar um filtro vermelho (ou azul), consegue obter franjas mais nítidas. Pode ver as franjas se observar a sombra que se obtém no écran com uma lupa de ampliação 10×. Lâminas, agulhas ou fios de redes são bons objectos para este estudo.

### MANCHA DE POISSON

Numa fotografia, pode observar-se uma mancha luminosa no meio de várias som-



bras, como se vê na fotografia abaixo. Para o conseguir, monte uma fonte luminosa, um obstáculo e um écran, como se mostra no esquema. Para obter resultados satisfatórios, é preciso que trabalhe no escuro. Experimente fazer uma exposição de 2s, utilizando um filme Polaroid de 3000 ASA.



### ACTIVIDADES FOTOGRÁFICAS

O número de actividades fotográficas é ilimitado, de modo que não vamos tentar descrever muitas em detalhe. Em vez disso, vamos fornecer uma lista de sugestões que servirão de pontos de partida para exposições a montar na sala de aula, para demonstrações, ou ainda, para trabalho criativo.

#### (a) *História da fotografia*

Em 23 de Dezembro de 1966, a revista *Life* publicou uma excelente edição especial sobre fotografia. No livro *Latent Image* de Beaumont Newhall, publicado nas edições de bolso das Science Study Series, há uma descrição de como é que Maxwell fez a primeira fotografia tricromática em 1861. Muito do que foi a história mais antiga da fotografia nos Estados Unidos é examinado no livro *Mathew Brady*, de James D. Horan, Crown Publishers.

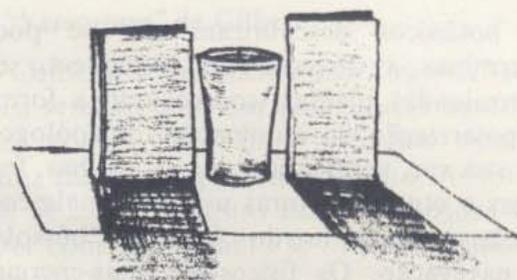
#### (b) *Fotografia de Schlieren*

Para a descrição e instruções sobre o equipamento, consulte o *Scientific American*, de Fevereiro de 1964, pp. 132-133.

#### (c) *Fotografando com infravermelhos*

Tente tirar algumas fotografias como as que se mostram na página 15 do *Texto*.

A película de infravermelhos da Kodak não é mais cara que um rolo normal a preto e branco e pode ser revelada com reveladores normais. Se tem uma máquina Polaróide 4×5 de revelação instantânea, pode usar película Polaróide de infravermelhos 4×5. O livro da 'Kodak' *Infrared and Ultraviolet Photography* poderá ser-lhe muito útil.



(c) *Visão de cores por contraste (efeito de de Land)*

**COR**

Podem fazer-se muitas experiências e actividades curiosas relacionadas com os aspectos físicos, fisiológicos e psicológicos da visão. Apresentamos aqui algumas sugestões.

(a) *Dispersão da luz*

Adicione cerca de 1/4 de uma colher de chá de leite a um copo cheio de água. Coloque uma lanterna a cerca de 60 cm do copo, de modo que este fique iluminado. Quando olha através da água esbranquiçada para a luz, vê uma cor laranja-pálido. Se se mover à volta do corpo, parecer-lhe-á que a água esbranquiçada vai mudando de cor. Descreva esta mudança e explique a sua razão de ser.

(b) *O efeito de arco-íris*

Pode demonstrar como é que são produzidos os arco-íris, usando um copo de água, para servir de gota de chuva, grande e cilíndrica. De manhã cedo ou ao pôr-do-sol, coloque o copo sobre uma folha de papel branco. Para que o arco-íris fique mais visível, ponha dois livros ao alto, um de cada lado do copo, e distanciados de um pouco mais que a largura do copo. Conseguir-se assim que o sol incida sobre o copo, ficando o papel à sombra. O arco-íris vai observar-se nas costas dos livros. Qual a relação entre a disposição das cores no arco-íris e o lado do copo por onde entra a luz? Pode ler sobre estes e outros efeitos ópticos interessantes no livro *Science for the Airplane Passenger*, de Elizabeth A. Word, Houghton-Mifflin Co, 1968.

Ligue duas pequenas lâmpadas, colocadas como se mostra na figura. Coloque um obstáculo em frente do écran para que neste



se formem sombras adjacentes. Vê alguma nestas sombras? Tape agora uma das lâmpadas com um filamento vermelho, observe que coloração a sombra correspondente à outra lâmpada vai parecer verde, por contraste. Tente fazer o mesmo com filtros de outras cores e faça variar a intensidade da luz, colocando a lâmpada a distâncias diferentes.

(d) *Demonstração de Land com duas cores*

Uma outra actividade interessante consiste na demonstração de que se pode criar uma imagem a cores, projectando simultaneamente duas transparências a preto e branco, fotografadas através de um filtro vermelho e verde. Para mais informação consulte o *Scientific American*, de Maio de 1959, Setembro de 1959 e Janeiro de 1960.

**LUZ POLARIZADA**

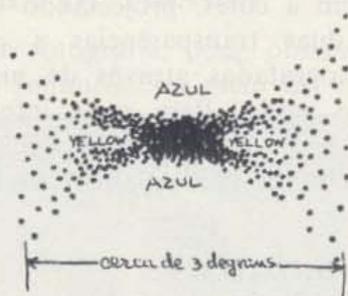
O uso da luz polarizada na investigação fundamental tem-se estendido rapidamente a muitos domínios da Ciência. O Laser, que é a fonte mais intensa de luz polarizada que nós temos no laboratório, foi inventado por investigadores de electrónica e micro-ondas.

Os botânicos descobriram que se pode determinar a direcção do crescimento de determinadas plantas, controlando a forma de polarização da iluminação; os zoólogos, por sua vez, verificaram que as abelhas, formigas e outras criaturas usam normalmente a polarização da luz do céu como "bússola" de navegação. Os físicos de altas-energias verificaram que o acelerador de partículas mais moderno, o sincrotrão, é uma óptima fonte de raios-X polarizados. Os astrónomos descobriram que a polarização das ondas de rádio provenientes dos planetas e das estrelas oferece pistas importantes para conhecermos a dinâmica destes mesmos corpos. Os químicos e os engenheiros mecânicos encontraram utilizações novas para a luz polarizada enquanto instrumento analítico. Os teóricos descobriram métodos mais sucintos para tratar algebricamente a luz polarizada. De todos os lados nos vem um grande número de ideias novas que imprimem um vigor novo a este assunto já clássico.

Encontramos uma discussão de muitos destes aspectos da natureza e aplicação de luz polarizada, incluindo algumas actividades análogas às que aqui se descrevem no livro *Polarized Light*, de W. A. Shureliff e S. S. Ballard, Van Nostrand Momentum Book, 1964.

#### (a) *Detecção*

A luz polarizada pode ser detectada, usando apenas os nossos olhos, isto quando se sabe o que se está à procura. Para desenvolver esta capacidade, comece por olhar



com atenção para o Sol através de uma película Polaróide, durante cerca de dez segundos. Depois rode rapidamente o polarizador de  $90^\circ$  e procure uma figura de cor amarelo-pálido e com a forma de uma escova, semelhante à que se mostra no desenho.

A cor desaparecerá dentro de poucos segundos, mas quando se roda de novo o Polaróide de  $90^\circ$  vai aparecer uma nova figura.

Como é que o eixo dessa figura está relacionado com a direcção de polarização da luz transmitida pelo Polaróide? (Para determinar a direcção da polarização do filtro, olhe para a luz reflectida por uma superfície plana não metálica, como o tampa de uma mesa. Rode o Polaróide até obter a luz reflectida mais intensa que é possível. Ponha um bocado de fita-cola num dos bordos da Polaróide, paralelo ao chão para determinar a direcção de polarização.) O ângulo entre o eixo da figura amarelada e o eixo de polarização será sempre o mesmo?

Algumas pessoas vêem melhor a figura quando utilizam luz polarizada circularmente. Para fazer um polarizador circular, coloque um filme Polaróide em contacto com um papel celofane, de modo que o seu eixo de polarização faça um ângulo de  $45^\circ$  com as linhas mais esticadas do celofane.

#### (b) *Analogia com uma vedação*

É possível que já lhe tenham explicado a polarização da luz em termos de uma corda com uma das extremidades presa a um objecto fixo e que se abana, segurando na outra ponta. A corda passa por entre duas vedações (como se vê na Fig. 1) ou por entre duas placas de cartão com fendas. Esta analogia sugere que quando as fendas são para-

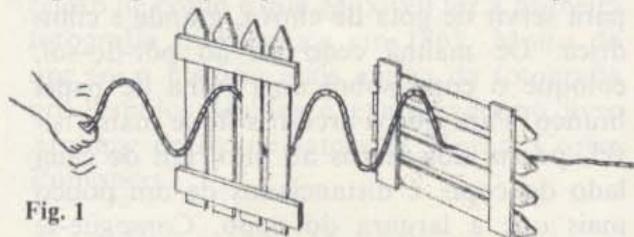


Fig. 1

lelas, a onda passa através dela, mas quando as fendas ficam perpendiculares uma à outra, as ondas param. (É possível que queira usar a corda e as peças de cartão com fendas para verificar que isto se passa efectivamente assim.)

Coloque dois filtros Polaróide paralelamente um ao outro e rode um deles de modo a bloquear completamente a passagem da

luz. Coloque depois um terceiro filtro entre os dois primeiros e faça-o rodar sobre o eixo dos três filtros. O que é que acontece? A analogia com a vedação ainda é válida?

Pode fazer-se uma experiência semelhante com micro-ondas, usando tiras paralelas de folha de alumínio, que se colocam sobre o cartão em vez dos filtros Polaroid.



Com a autorização de John Hart e Field Enterprises Inc.

### COMO FAZER UMALENTE DE GELO

No livro *Aventuras do Capitão Hatteras*, de Júlio Verne, o Dr. Clawbonny conseguiu fazer fogo quando a temperatura atmosférica era de  $-44,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  (consequindo assim salvar os passageiros que tinham dado à costa), a partir de um bocado de gelo que talhou em forma de lente e que focou sobre um rastilho. Se o gelo é puro, os raios solares que passam através do gelo dispersam-se pouco. Pode construir uma lente de gelo com água gelada, dentro de uma tijela com o fundo redondo. Use água destilada fervida, se possível para minimizar os problemas devidos às bolhas de gás que se formam dentro do gelo. Meça a distância focal da lente e relacione esta distância com o raio do fundo da tijela. (Adaptação do livro *Physics for Entertainment*, de Y. Perelman, Foreign Languages Publishing House, Moscovo, 1936.)

### DETECTANDO CAMPOS ELÉCTRICOS

Podem usar-se muitos métodos para estudar a forma dos campos eléctricos. Aqui descrevem-se dois métodos muito simples.

### O "Versorium" de Gilbert

Constrói-se facilmente uma "bússola" eléctrica sensível com um palito, uma agulha e uma rolha. Um campo eléctrico exterior induz cargas à superfície do palito. As forças que se exercem nestas cargas induzidas vão fazer com que o palito se oriente segundo a direcção do campo.

Para construir o "Versorium", dobre primeiro um palito achatado para que este fique ligeiramente arqueado. Depois de ter montado o palito horizontalmente, as curvas descendentes nas extremidades vão-lhe dar estabilidade, fazendo com que o seu centro de gravidade fique abaixo do ponto em torno do qual o palito oscila. Com um prego pequeno, faça um furo no ponto de equilíbrio do palito, de modo a quase furá-lo de um lado ao outro. Suspenda o palito horizontalmente numa agulha, certificando-se que ele pode oscilar livremente, como a agulha de uma bússola. Agora, tente aproximar vários objectos carregados electricamente.

Para pormenores sobre a experiência de Gilbert e outras experiências consulte o Capítulo 26 do livro *Foundation of Modern Physical Science*, de Holton e Roller.

### Bola Carregada

Pode usar-se uma bola de "baseball" carregada (ou uma bola de esponja plástica, coberta com um material condutor) e suspenção de uma haste por meio de um fio isolador, como um indicador aproximado dos

campos que se estabelecem à volta de esferas carregadas, pratos ou fios eléctricos.

Use uma fonte luminosa pontual para projectar uma sombra no fio e na bola. O ângulo entre o fio e a normal dá uma medida aproximada das forças. Use a bola carregada para estudar o comportamento de um campo uniforme perto de um grande prato carregado, suspenso por meio de tiras de fita-cola, e o modo como o campo decresce com  $1/r$  quando colocado perto de um fio longo e carregado.

Tiras de plástico friccionadas num pano podem servir para carregar esferas, pratos ou fios bem isolados. (Para eviar a fuga de cargas pelas extremidades de um fio carregado, coloque duas bolas metálicas pequenas nestas extremidades. Mesmo um pingo de solda em cada uma das pontas já ajuda.)

### PILHA DE VOLTA

Corte vinte ou mais discos de dois metais diferentes. O zinco e o cobre formam uma boa combinação. (As partes metálicas redondas de saída de uma instalação eléctrica podem ser usadas como discos de zinco, pois têm uma grande cobertura de zinco.) As moedas de 1 e de 10 cêntimos da moeda americana também servem, embora não tão bem. Corte folhas de papel de filtro ou lenços de papel e ajuste-as entre cada par de discos dos dois metais em contacto. Construa uma pilha com os discos metálicos e com o papel molhado com água salgada, tal como o fez Volta. Mantenha sempre a mesma ordem de empilhamento: por exemplo, cobre-papel-zinco, cobre-papel-zinco, etc. Ligue dois fios de cobre à parte superior e inferior de pilha. Toque com dois dedos da mesma mão nas extremidades do fio. Qual é o efeito? Este efeito aumenta quando humedece os dedos? De que outras maneiras pode aumentar o efeito? De quantos discos precisaria para poder acender uma lâmpada de uma lanterna?

Se tem dentes chumbados, experimente morder um bocado de uma folha de alumínio. Como pode explicar a sensação que

sente? (Adaptação feita a partir do livro *History of Science for High Schools*, de Leo E. Klopfer, Science Research Associates, 1966.)

### UMA BATERIA DE 11 CÊNTIMOS (MOEDA AMERICANA)

Usando 1 cêntimo (95% de cobre) e uma moeda de 10 cêntimos de prata (90% de prata), pode construir uma bateria de 11 cêntimos. Corte num papel de filtro ou numa lenço de papel, um quadrado com cerca de 2,5 cm de lado, mergulhe-o numa solução salgada e introduza-o entre as duas medidas. O galvanómetro acusa a passagem de corrente? A bateria também produziria corrente se pusesse as duas moedas em contacto directo, estando elas secas?

### MEDINDO A INTENSIDADE DE UM CAMPO MAGNÉTICO

Muitos dos aparelhos mais importantes que se usam em Física experimental utilizam um campo magnético uniforme de intensidade conhecida. São disso exemplo os ciclotrões, as câmaras de bolhas, os espectrómetros de massa. Use a balança de corrente, descrita nas Experiências 4-4 e 4-6 e meça a intensidade do campo magnético existente na região entre duas superfícies polares magnéticas, constituídas por dois ímanes de cerâmica colocados perto um do outro. Depois, quando tiver aprendido sobre radioactividade, pode observar a deflecção da partículas  $\beta$  quando elas passam por esta região e determinar a energia média das partículas.

Dobre duas tiras de folha de alumínio ou cobre (mas não de ferro) e cole-as aos dois ímanes de disco como se mostra na figura da página seguinte.

Assegure-se de que as superfícies polares dos ímanes estão paralelas uma à outra e que se atraem (pólos opostos em frente um do outro). Suspenda a espira móvel da balança de corrente de modo a que ela passe por entre as superfícies polares magnéticas. Determine a força necessária para restabelecer o equilíbrio inicial da balança, quando

## MAIS MÁQUINAS DE MOVIMENTO PERPÉTUO

Os diagramas das Figs. 1 e 2 mostram mais duas máquinas de movimento perpétuo, descritas no livro *Perpetual Motion of Modern Research for Power*, de R. Raymond Smedile. (Consulte também a página 62 do *Manual da Unidade 3*.) Qual é o ponto fraco de argumentação apresentado a favor destas máquinas? (Veja também o artigo "Perpetual Motion Machines", de Stanley W. Angrist, no *Scientific American* de Janeiro de 1968.)

Na Fig. 1, *A* representa uma roda estacionária que tem à sua volta uma roda mais larga e móvel *E*. Na roda estacionária *A* existem três ímanes, assinalados por *B* na

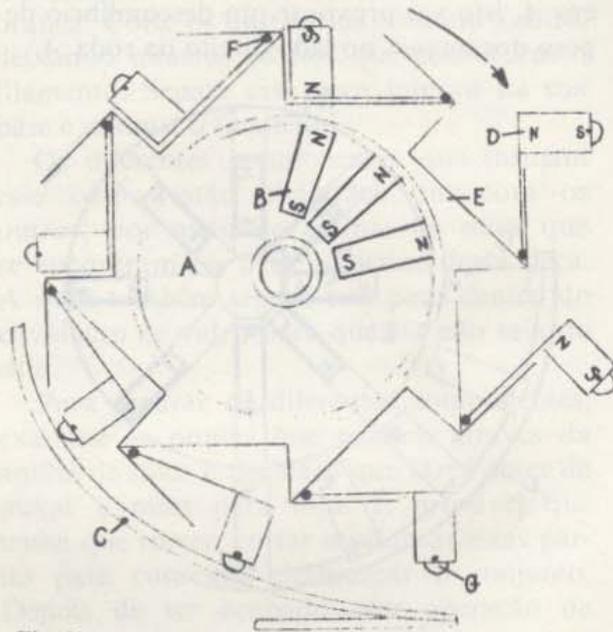
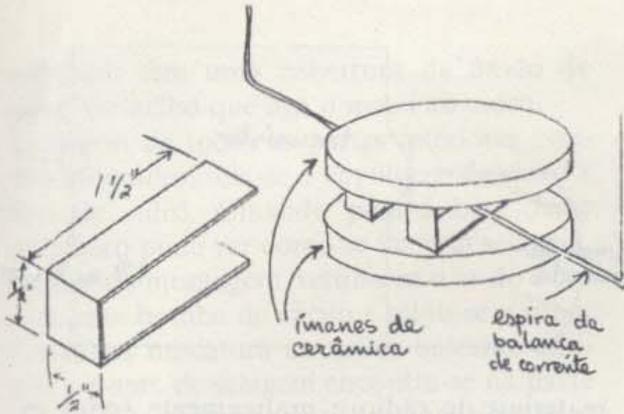


Fig. 1

posição que se mostra no desenho. Na roda giratória *E* há oito ímanes, indicados por *D*. Estes ímanes estão ligados a oito alavancas e seguras à roda *E* por gonzos, indicados por *F*. Cada íman tem também um rolamento *G*, para evitar a fricção quando rolam sobre a peça *C*.

Pretende-se que esta peça *C* empurre cada um dos ímanes para o centro deste mecanismo, à medida que eles sobem pelo seu lado esquerdo. À medida que cada íman rola, passando pelo topo, os ímanes fixos



faz passar uma corrente de intensidade conhecida pela espira. Já aprendeu na Experiência 4-5 que há uma relação simples entre a intensidade do campo magnético, o comprimento da parte da espira que está nesse campo e a intensidade de corrente que passa na espira. Esta relação é expressa pela equação  $F = BIl$ , onde  $F$  é a força que se exerce na espira (expressa em newton),  $B$  a intensidade do campo magnético (expressa em newtons/ $A \times m$ ),  $I$  a intensidade de corrente (em ampères) e  $l$  o comprimento (expresso em metro) da parte da espira onde passa a corrente e que se encontra efectivamente dentro do campo. É possível medir com a balança de corrente  $F$ ,  $I$  e  $l$ , o que nos permite calcular  $B$ .

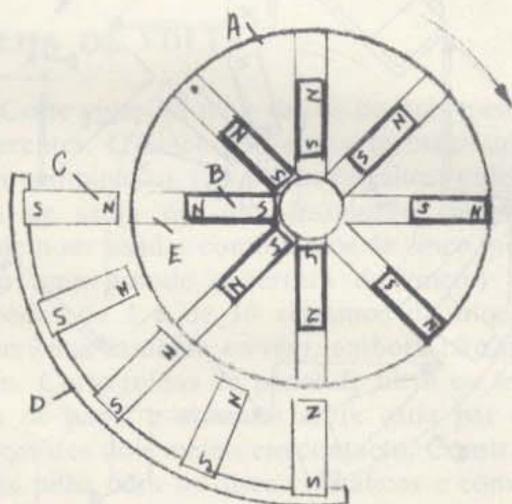
Para realizar esta actividade, fizeram-se duas hipóteses simplificadoras que, embora não sejam rigorosamente válidas, permitem que se obtenham resultados razoavelmente correctos para os valores de  $B$ : (a) o campo é praticamente uniforme em toda a região entre os pólos e (b) o campo é nulo fora desse espaço. Com estas aproximações, pode usar-se o diâmetro dos ímanes para o valor de  $l$  que aparece na expressão dada.

Tente realizar a mesma experiência, colocando dois ímanes em cima e dois ímanes abaixo da espira. Como varia  $B$ ? Dobre as tiras de metal de maneiras diferentes de modo a variar a distância entre as superfícies polares magnéticas. Como é que esta variação afecta  $B$ ?

Uma unidade mais antiga para a intensidade do campo magnético e que ainda hoje se usa bastante é o Gauss. Para converter uma unidade na outra use o factor de conversão,  $1N/A \times m = 10^4$  Gauss.

que estão na frente deles, vão obrigar a que os ímanes na roda *E* caiam. Isto vai provocar um desequilíbrio de peso no lado direito desta roda e consegue-se assim que ele tenha um movimento de rotação perpétuo no sentido dos ponteiros do relógio.

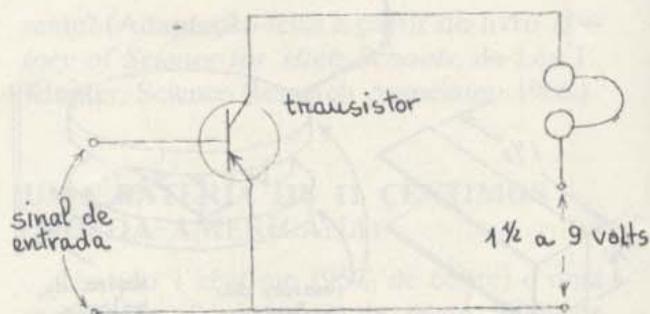
Na Fig. 2, *A* representa a roda na qual estão colocados oito tubos ocos assinalados por *E*. Mete-se dentro de cada um desses tubos um íman, *B*, de modo que eles possam deslizar de um lado para o outro. *D* representa uma cremalheira estacionária à qual estão presos cinco ímanes, como se mostra na figura. Cada um destes ímanes está colocado de modo a repelir aqueles que estão na roda *A*, quando esta roda no sentido dos ponteiros do relógio. Dado que os ímanes presos a *D* vão repelir os ímanes que estão em *A*, isto vai provocar um desequilíbrio de peso dos ímanes no lado direito da roda *A*.



### TRANSISTOR AMPLIFICADOR

A função de um transistor PNP ou NPN é muito semelhante à do tríodo (embora não se possa descrever o seu funcionamento em termos simples). O diagrama seguinte mostra o esquema de um circuito no transistor e que é análogo ao circuito da válvula de vácuo que se mostrou na Experiência 4-8. Em ambos os casos, um pequeno sinal de entrada vai originar correntes de saída elevadas.

Podem comprar-se transistores baratos em quase todas as lojas onde se vendem



materiais de rádio e praticamente todos os transistores PNP e NPN servem. Nestas lojas também se encontram frequentemente livros que fornecem explicações simplificadas sobre o funcionamento dos transistores e mostram como é que se podem usar componentes baratos para construir equipamento electrónico simples.

### NO INTERIOR DE UMA VÁLVULA DE RÁDIO

Válvulas de aparelhos receptores, como as que se encontram nos rádios e nas televisores, contêm partes interessantes que exemplificam princípios físicos e químicos importantes.

Escolha algumas válvulas de vidro que já não são utilizadas, com pelo menos 5 cm de altura. O técnico que arranja o seu televisor ou aparelho de rádio tem provavelmente algumas que lhe pode dispensar. Olhe para os números das válvulas num manual de um aparelho receptor qualquer e, se possível, encontre um tríodo (o Manual de válvulas RCA vende-se em muitas lojas de peças para aparelhos de rádio e televisão, a preços acessíveis.) *Cuidado:* não tente abrir uma válvula de televisão!!! Mesmo as válvulas mais pequenas são muito perigosas quando rebentam.

Examine a válvula e observe como é que as partes interiores estão ligadas aos contactos metálicos por meio de fios que se encontram na parte inferior da válvula. À medida que o tubo aquece e arrefece, os contactos metálicos e o vidro devem ter uma dilatação igual. Os contactos são feitos de uma liga de ferro e níquel cujo coeficiente de expansão é muito próximo do do vidro. Os contactos

metálicos têm uma cobertura de óxido de cobre vermelho que liga o metal ao vidro.

Depois de todas as partes interiores estarem montadas, sela-se o envólucro de vidro à base de vidro. Olhando para a base desse envólucro pode ver como se faz esta selagem. Depois da montagem, retirou-se o ar do tubo com uma bomba de vácuo e selou-se o tubo. Em tubos miniatura ou tubos bastante antigos, a ponta de selagem encontra-se na parte superior dos tubos; nos tubos com uma base octogonal o elemento de selagem está coberto pelo contacto de alinhamento que se encontra na base desses tubos.

O material prateado espalhado em parte do interior da válvula chama-se "getter". Esta protecção (geralmente de bário ou alumínio) foi vaporizada dentro da válvula depois desta ter sido selada e serve para absorver alguns dos gases que ficaram dentro da válvula depois de se ter retirado o ar.

Para abrir a válvula, estenda várias folhas de jornal numa superfície plana. Use óculos de protecção e luvas para evitar ferimentos.

Com uma lima triangular, risque ligeiramente a válvula perto da base. Embrulhe a válvula num pano velho, ponha-a na mesa com a parte riscada voltada para cima e bata-lhe com um alicate ou com uma lima até que ela se parta. Desembrulhe cuidadosamente a válvula partida e examine as diferentes peças. A película do material absorvente das impurezas ("getter") vai modificar-se assim que é exposta ao ar e, em poucos segundos, vai transformar-se numa camada pulverizada branca de óxido de bário ou alumínio.

Da parte inferior do corpo interior da válvula saem os fios que ligam aos contactos metálicos. Identifique os fios que constituem o filamento (há dois ou três)— são fios muito finos com uma cobertura de cerâmica branca. Corte os outros fios com um xisado, deixando intactos os fios que constituem o filamento. Separe essa peça interior da sua base e remova o filamento.

Os diferentes componentes que formam esse corpo estão alinhados uns com os outros, por meio de anilhas de mica que se encontram na parte superior dessa peça. A mica também segura esta peça dentro do envólucro de vidro para que ela não saia do sítio.

Para separar os diferentes componentes, examine as pontas que passam através da anilha de mica e decida o que fazer antes de puxar a mica para fora. É provável que tenha que torcer, cortar ou dobrar estas partes para conseguir desmontar o conjunto. Depois de ter acabado esta operação de desmontagem, coloque os diferentes componentes em cima de uma folha de papel limpa e examine uma de cada vez.

A mica foi o material escolhido para os separadores, pois é uma substância durável, com elevada resistência eléctrica e que suporta altas temperaturas. A mica branca é um composto complexo de potássio, alumínio, sílica e oxigénio com uma forma cristalina. Os cristais de mica têm ligações fracas entre os diferentes planos, pelo que se separam em camadas finas. Experimente!

O pequeno cilindro metálico com uma cobertura branca é o cátodo. É aquecido

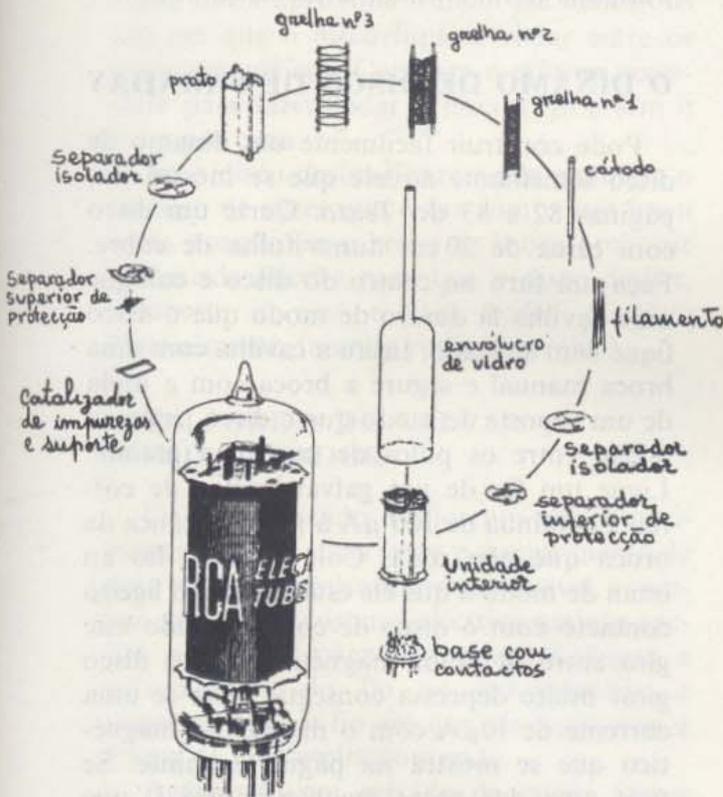


Diagrama de uma válvula de vácuo com três grelhas ("pentodo").

pelo filamento. À temperatura de funcionamento da válvula, os electrões começam a ser emitidos.

A cobertura aumenta enormemente o número de electrões que são emitidos da superfície. Quando está à espera que o seu rádio e o seu televisor aqueçam, o que está, de facto, é à espera que os cátodos aqueçam até uma temperatura de emissão eficaz.

A peça de fio muito fino em forma de escada é a *grelha*, os electrões que foram emitidos pelo cátodo, devido ao seu aquecimento, passam através desta *grelha* e, portanto, a corrente na válvula é muito sensível ao campo eléctrico existente à volta da *grelha*.

Pequenas variações na tensão da *grelha* podem ter grande efeito no fluxo de electrões dentro do tubo. Esta acção de controlo é a base da amplificação e de outras aplicações das válvulas.

O cilindro escuro que forma a parte exterior desta unidade interior da válvula é o *prato*. Num circuito que esteja a funcionar, o prato tem uma tensão positiva em relação ao cátodo para poder atrair os electrões que este emite. Os electrões atingem o prato e aí perdem a maior parte da sua energia cinética que é transferida para o prato, que aquece bastante. É por isso que o prato é escuro, pois isso ajuda a dissipar a energia calorífica. Muitas vezes, a cobertura é formada por uma camada de carvão que consegue remover com o seus dedos.

É interessante abrir diferentes tipos de válvulas e ver em que é que diferem. Algumas têm mais que uma unidade interior, múltiplas *grelhas* ou pratos.

O manual sobre válvulas RCA é uma boa fonte de informação para o estudo de diferentes tipos de válvulas e seu funcionamento.

### UM PÓLO NORTE ISOLADO?

Ímanes feitos de um material macio, como é o caso da borracha, encontram-se em muitas lojas de ferramentas. Os ímanes típicos são constituídos por peças achatadas com uma área de 20 mm × 25 mm e uma espes-

sura de 5 mm, aproximadamente. O pólo Norte magnético está numa das superfícies de 20 × 25 mm e o pólo Sul na superfície oposta. Consegue-se cortar estes ímanes com facas bem afiadas.

Suponha que cortou seis ímanes, tendo ficado, portanto, com seis peças quadradas de 20 mm de lado. Depois, alinhe os lados correspondentes ao pólo S, de modo a que as peças fiquem ajustadas umas às outras, formando um cubo oco com todos os pólos N voltados para cima. As diferentes peças repelem-se bastante umas às outras, pelo que talvez seja necessário colá-las (com cola para borracha) ou atá-las umas às outras com um fio, para que fiquem juntas.

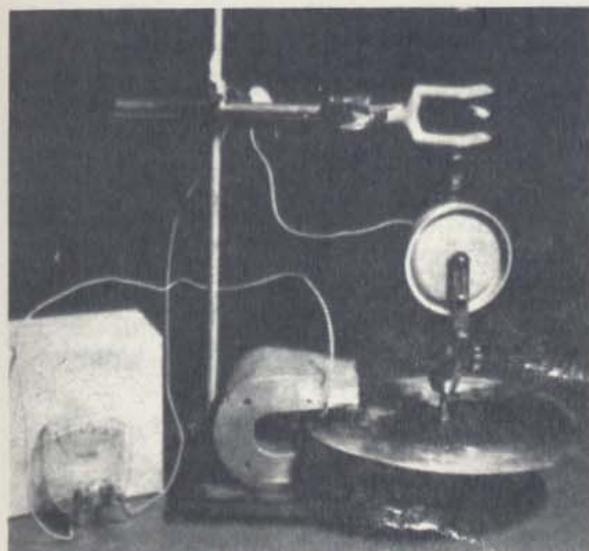
Terá ficado com um pólo Norte isolado, ou seja, com um pólo Norte que se estende por toda a região exterior (e com um pólo Sul no interior)?

Há um campo magnético com um sentido para fora relativamente às superfícies do cubo?

(Adaptado do *The Physics Teacher*, Março 1966.)

### O DÍNAMO DE DISCO DE FARADAY

Pode construir facilmente um dínamo de disco semelhante àquele que se mostra nas páginas 82 e 83 do *Texto*. Corte um disco com cerca de 20 cm numa folha de cobre. Faça um furo no centro do disco e coloque uma cavilha lá dentro de modo que o disco fique bem ajustado. Insira a cavilha com uma broca manual e segure a broca com a mola de um suporte de modo que o disco passe na região entre os pólos de um íman grande. Ligue um fio de um galvanómetro de corrente contínua de 100  $\mu\text{A}$  à parte metálica da broca que não roda. Cole o outro fio ao íman de modo a que ele estabeleça um ligeiro contacto com o disco de cobre quando este gira entre os pólos magnéticos. Se o disco girar muito depressa consegue gerar-se uma corrente de 10  $\mu\text{A}$  com o magnetão magnético que se mostra na página seguinte. Se usar uma das peças magnéticas em U que utilizou na balança de corrente, com três ímanes de cerâmica de cada lado, conseguirá



que a agulha do aparelho de medida se desloque ligeiramente do zero para outra posição.

Também pode observar-se o efeito de travagem das correntes induzidas do disco. Retire o aparelho de medida, os fios e o íman. Enquanto uma pessoa faz girar o disco, outra aproxima o íman até uma posição em que o disco fique a rodar entre os pólos magnéticos. Compare o esforço necessário para fazer rodar o disco com e sem o íman por cima.

Se o disco deslizar livremente compare o número de vezes que o faz com e sem íman nesta posição (se o braço de broca provocar demasiada fricção para que o disco deslize, desaperte a noz e faça rodar o disco manualmente, fazendo rodar a cavilha.)

### UMA CORDA DE SALTAR COMO GERADOR

Com um boçado de fio com um comprimento que seja duas vezes o comprimento de uma sala e um galvanómetro sensível, consegue gerar uma corrente eléctrica usando apenas o campo magnético terrestre. Ligue a extremidades do fio ao galvanómetro e depois estique o fio até que ele fique com a forma de uma espira comprida.

Agarrando em metade da corda faça-a girar como se fosse uma corda de saltar. Se não tem disponível um aparelho de medida

sensível, ligue a entrada de um dos amplificadores e depois ligue o amplificador a um aparelho de medida menos sensível.

Como é que é a corrente gerada quando o eixo de rotação é paralelo à direcção Norte-Sul, quando comparada com a corrente gerada quando o movimento se faz na direcção Leste-Oeste? O que é que isto nos diz sobre o campo magnético terrestre? Notar-se-á algum efeito se as duas pessoas que estão a dar à corda estiverem em duas plataformas e a descer umas escadas?



### APARELHOS DE MEDIDA E MOTORES SIMPLES

Pode construir aparelhos de medição de intensidade de corrente e motores que funcionam a partir de elementos bastante simples:

- 2 Ímanes de cerâmica (do estojo com material para a balança de corrente)
- 1 Peça em U de aço
- 1 Rolha
- 1 Haste metálica com cerca de 2 mm de diâmetro e 12 cm de comprimento. (Um dos raios de uma roda de bicicleta, um cabide de metal ou um prego muito comprido servem)
- 1 Bloco de madeira com as dimensões aproximadas de 10 cm × 5 cm × 1 cm
- Cerca de 3 m de fio de cobre isolador magnético n.º 30
- 2 Pionés
- 2 Alfinetes de dama
- 2 Tachas ou pregos pequenos (só para o aparelho de medida)
- 1 Cartão branco 10 × 12 cm
- Papel duro preto para o ponteiro
- Fita eléctrica isoladora (apenas para o motor)

### Aparelho de Medida

Para construir o aparelho, siga as instruções que se apresentam a seguir, prestando atenção ao diagrama. Espete a haste na rolha. Construa a bobina giratória ou *armadura* enrolando um fio à volta da rolha cerca de 20 vezes e mantendo-se sempre paralelo à haste. Deixe cerca de 30 cm de fio solto em cada uma das extremidades (Fig. 1).

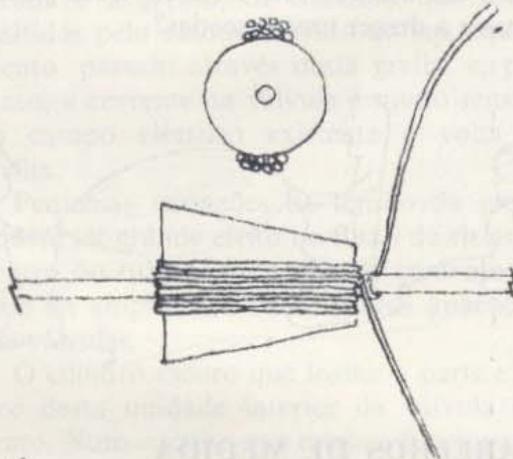


Fig. 1

Use pregos ou tachas para prender os alfinetes de dama nas extremidades do bloco de madeira (Fig. 2).

Faça um ponteiro com o papel preto e espete-o na haste metálica. Depois, suspenda a armadura entre os alfinetes de dama, enro-

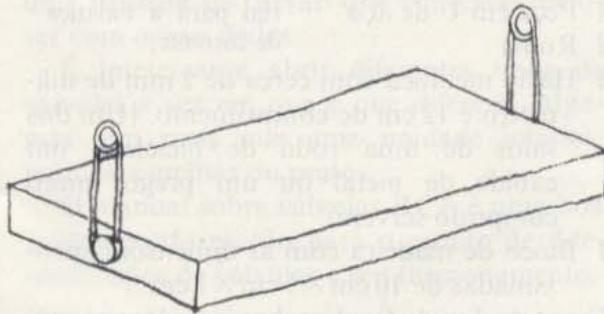


Fig. 2

lando as pontas soltas do fio em volta dela e prendendo-as depois à base de madeira com dois piones. Coloque dois ímãs de cerâmica numa peça de ferro em U (com os pólos contrários, um em frente do outro) e ponha essa peça à volta da armadura (Fig. 3).

Retire a parte isoladora das extremidades do fio e está pronto para ligar o seu aparelho a uma fonte de corrente contínua com baixa tensão.

Calibre uma escala em volt no cartão branco, usando, para isso, vários valores conhecidos de tensão. Pode usar baterias ou uma fonte de alimentação de baixa tensão. O seu aparelho de medida está pronto. Minimize o efeito de paralaxe, colocando o ponteiro tão perto da escala, quanto possível.

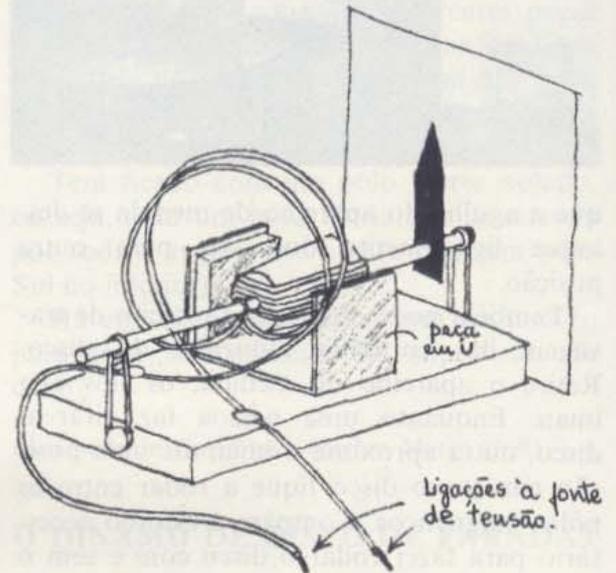


Fig. 3

### Motor

Para montar um motor, enrole uma armadura como o fez para o aparelho de medida. Deixe ficar soltas as duas partes do fio, com um comprimento de 6 cm e retire a parte de plástico isolante destas pontas. Torça bem os fios de cada uma destas pontas, para que eles fiquem bem enrolados e prenda-os aos lados da haste metálica com fita-cola.

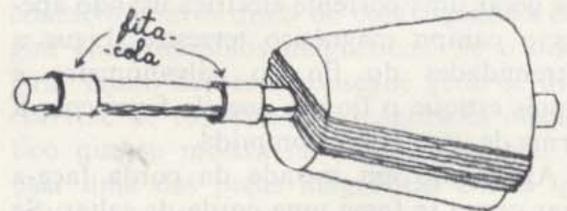


Fig. 4

Fixe dois alfinetes de dama à base, como o fez para o aparelho de medida, e monte a bobina entre os alfinetes.

As ligações para o motor são feitas com dois fios ligados à base por dois pionés nos pontos X (Fig. 5).

Coloque a peça magnética em U à volta da bobina. A bobina deve poder girar livremente (Fig. 6).

Ligue os fios a uma bateria de 1,5 V. Comece a fazer girar o motor com o seu dedo. Se ele não girar, verifique as ligações à bateria e os fios de contacto seguros à haste.

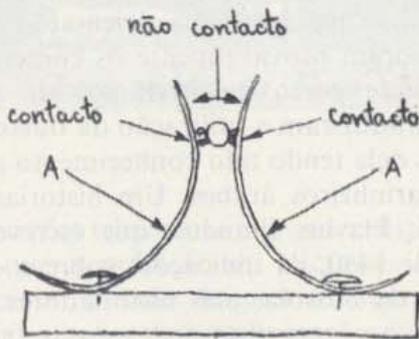
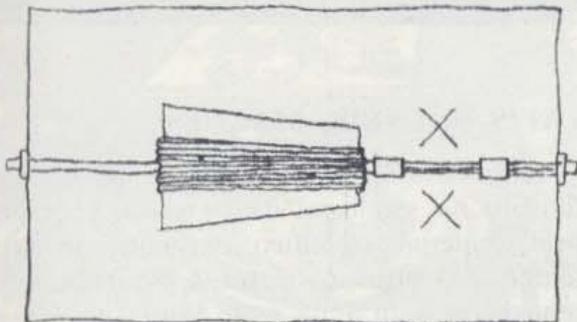


Fig. 5

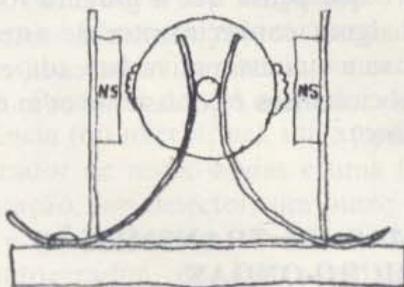


Fig. 6

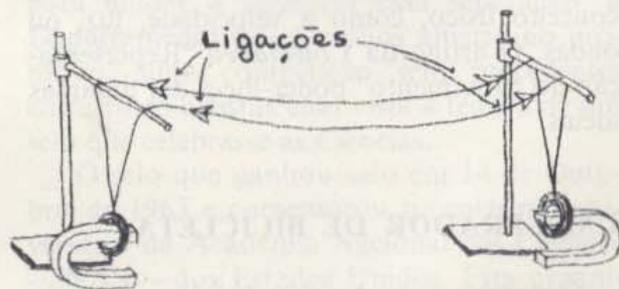
É possível que não tenha tirado toda a parte isolante dos fios. Experimente fazer uma ligeira pressão nos pontos A (Fig. 5) para melhorar o contacto. Verifique também os dois contactos, tocam os fios da armadura ao mesmo tempo (Fig. 6).

(Adaptação de *A Sourcebook for the Physical Sciences*, A. Joseph e al.; Harcourt, Brace and World, 1961, p. 529).

### DEMONSTRAÇÃO SIMPLES COM UM MOTOR-GERADOR

Com dois ímãs em U bastante fortes e duas bobinas que você mesmo pode enrolar, consegue preparar uma demonstração simples para mostrar os princípios de um motor e de um gerador. Enrole duas bobinas de arame magnético, com 100 voltas cada uma. Pode usar como forma um rolo de cartão onde estão enroladas as toalhas de papel. Deixe soltas duas pontas com cerca de 1/2 m de comprimento. Prenda a bobina para que ela não se desenrole e depois tire o tubo de cartão.

Pendure as bobinas em dois suportes como se mostra na figura, de modo a que fiquem enfiadas nos pólos de dois ímãs em U, colocados sobre uma mesa e à distância de 1 m. Ligue as bobinas uma à outra. Puxe uma das bobinas para o lado e depois largue-a. O que é que acontece à outra bobina? Acontece a mesma coisa se as duas bobinas não estiverem ligadas uma à outra? E o que é que acontece se se invertem os ímãs?



Tente outras variações como, por exemplo, voltar um dos ímãs de lado, à medida



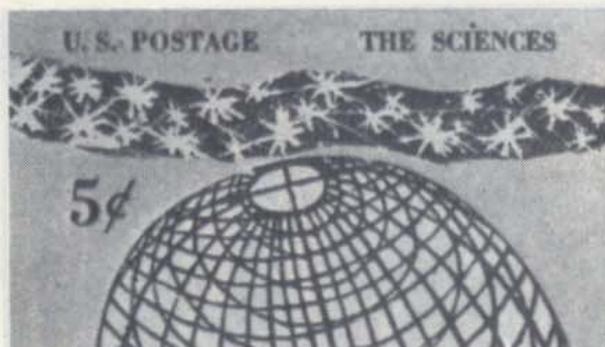


conversações telefônicas a grandes distâncias. Dado que a radiação de micro-ondas tem um alcance limitado, foi preciso montar uma série de estações de retransmissão distanciadas de cerca de 48 Km umas das outras. Em cada uma das estações o sinal é detectado e amplificado antes de ser retransmitido para a próxima. Se tiver vários geradores de micro-ondas que podem ter amplitudes moduladas, veja se consegue montar uma demonstração que mostre o funcionamento deste sistema. Precisar-se-á de um oscilador de audio-frequência (ou microfone), um amplificador, um gerador de micro-ondas e uma fonte de alimentação, um detector, um outro amplificador e um altifalante. Precisa também de um autogerador de micro-ondas, outro detector, um terceiro amplificador e outro altifalante.

### A CIÊNCIA E O ARTISTA — A HISTÓRIA POR DETRÁS DE UM SELO CIENTÍFICO

Considera-se muitas vezes que as ciências e as artes são duas culturas distintas, existindo um enorme fosso entre elas. Talvez para ajudar a colmatar essa separação, o Departamento dos Correios americano promoveu uma competição sem precedentes entre cinco artistas com vista à feitura de um selo que celebrasse as Ciências.

O selo que ganhou saiu em 14 de Outubro de 1963 e comemorou o centésimo aniversário da Academia Nacional das Ciências — NAS — dos Estados Unidos. Esta organização foi fundada durante a Guerra Civil com o objectivo de "investigar, experimentar e relatar sobre qualquer assunto quer das



Desenho vencedor de Antonio Frasconi. O selo foi impresso em azul claro e preto.

ciências quer das artes, sempre que isso lhe fosse pedido por qualquer departamento do Governo”.

Para celebrar o seu aniversário, o Presidente John F. Kennedy falou aos membros da academia e seus convidados, provenientes de sociedades científicas estrangeiras. Depois de ter realçado o reconhecimento público de que goza a Ciência fundamental hoje em dia, o Presidente mostrou como é que as descobertas científicas forçam as nações a cooperar.

“Cada vez que vós, cientistas, fazeis uma grande descoberta, nós, os políticos temos que inventar uma nova instituição para poder lidar com ela. E agora esta instituição tem quase sempre que ser uma instituição internacional.”

Como exemplo destas instituições internacionais, citou a Organização Internacional para a Energia Atómica, o tratado que abriu o Antártico para investigações científicas a nível internacional e a Comissão Oceanográfica Intergovernamental.

Nas sessões científicas que comemoraram o aniversário da NAS, discutiram-se as mais recentes teorias sobre o homem, a matéria e as suas evoluções, assim como os problemas relativos ao financiamento de investigações futuras para a investigação espacial, medicina, biologia, e ciências físicas.

A competição para o selo começou na *National Gallery of Art*, em Washington, D.C. Um júri de três conhecidos especialistas de arte convidou cinco artistas americanos a submeterem os seus desenhos. Os artistas foram escolhidos pela sua reconhecida capacidade para trabalhar com tópicos científicos.

Foram eles Josef Albers, Herbert Bayer, Antonio Frasconi, Buckminster Fuller e Bradburg Thompson.

Albers e Bayer ensinaram na Bauhaus (Alemanha), um centro pioneiro de desenho e arquitectura que combinava o saber prático da indústria moderna com a inspiração vinda da arte moderna. (O Centro Bauhaus é provavelmente mais conhecido pelas suas criações de móveis de aço tubular.) Albers publicou recentemente um trabalho que promete ser o trabalho definitivo sobre a cor — *Interaction of Color* (Yale University Press). Bayer é não só um artista mas também um arquitecto; fez o modelo de vários dos edifícios que compõem o Instituto para os Estudos Humanísticos em Aspen, Colorado. Buckminster Fuller, engenheiro, desenhador, escritor e inventor, é o criador da cúpula geodésica, do carro de três rodas Dymaxion, e do mapa de projecções Dymaxion. Frasconi nasceu no Uruguai e é especialmente conhecido pelos seus trabalhos com madeira; em 1960, ganhou o Grande Prémio do Festival de Cinema com o seu filme *The Neighboring Shore*. Bradbury Thompson faz desenhos para várias publicações, incluindo o *Art News*.

Na página seguinte mostram-se nove dos desenhos que os artistas submeteram. A comissão intitulada “Citizen’s Stamp Advisory Committee” escolheu quatro deles e de entre estes quatro, o director dos Correios, J. Edward Day seleccionou o vencedor. O vencedor foi o selo concebido por Frasconi que mostra uma representação estilizada do Mundo, sobre o qual se estende um céu luminoso com estrelas.

Qual dos desenhos pensa que representa com maior acuidade o espírito e a natureza da Ciência e porquê? Se não gosta particularmente de nenhum, faça um desenho seu.

## ESTOJOS CIENTÍFICOS DA BELL COMPANY

Os laboratórios da Companhia de Telefones Bell produziram vários estojos científicos relacionados com os tópicos da Unidade 4.

THE SCIENCES

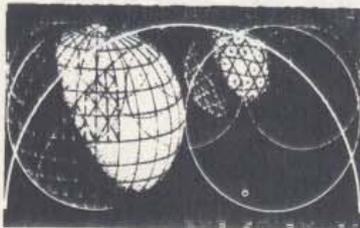


5c  
UNITED STATES POSTAGE

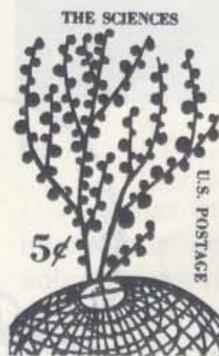
Albers



Bayer



Fuller



Frasconi



Thompson

Talvez consiga que alguma casa representante dessa companhia lhe ofereça alguns grátis. Segue-se uma breve descrição.

“Cristais e Luz” inclui os materiais necessários para montar um microscópio simples, filtros polarizantes, amostras de cristais, um livro de experiências e livros com maior informação sobre cristais.

“Energia Solar” contém materiais básicos, instruções para a construção de uma célula solar, para a efectuação de experiências que determinem as características da célula solar e detalhes para construir um pêndulo accionado por luz, um motor com um comutador que funciona com a luz e um receptor de rádio.

O “Sintetizador da Fala” permite-lhe montar um circuito simples com uma bateria para produzir artificialmente o som das vogais. Contém um manual que descreve as semelhanças entre o circuito e a produção de voz humana e discute as primeiras tentativas para criar máquinas com vozes artificiais.

“Do Sol ao Som” contém uma célula solar já feita, um manual e material necessários para a construção de um rádio que funciona a energia solar.

### BOAS LEITURAS

Há vários livros de bolso sobre ciência, na colecção Science Study Series, das publicações Anchor Books, Doubleday and Co. Alguns deles são apropriados para a *Unidade 4*, nomeadamente, *The Physics of Television*, por Donald G. Fink e David M. Lutyens; *Waves and Messages*, de John R. Pierce; *Quantum Electronics*, de John Pierce; *Electrons and Waves*, de John R. Pierce; *Computers and the Human Mind*, de Donald G. Fink. Pode ler também o artigo “Telephone Switching”, no *Scientific American* de Julho, 1962, e a *Colectânea 4* do *Projecto de Física*.



# NOTAS SOBRE OS FILMES SEM-FIM

## Filmes Sem-Fim 44

### ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS ESTACIONÁRIAS

As ondas estacionárias não se confinam às ondas mecânicas em molas ou num gás. Basta fazer reflectir uma onda proveniente de uma fonte a uma distância adequada para que as ondas que se movem em sentidos contrários se sobreponham de forma apropriada. Neste filme, as ondas electromagnéticas estacionárias são geradas por um transmissor rádio.

O transmissor produz radiação electromagnética a uma frequência de  $435 \times 10^6$  ciclos/s. Dado que todas as ondas electromagnéticas se propagam com a velocidade da luz, o comprimento de onda é  $\lambda = c/f = 0,69$  m. A saída do oscilador transmissor (Fig. 1) passa através de um aparelho que indica a potência, seguindo depois para uma antena constituída por duas hastes de comprimento igual a  $1/4 \lambda$ .

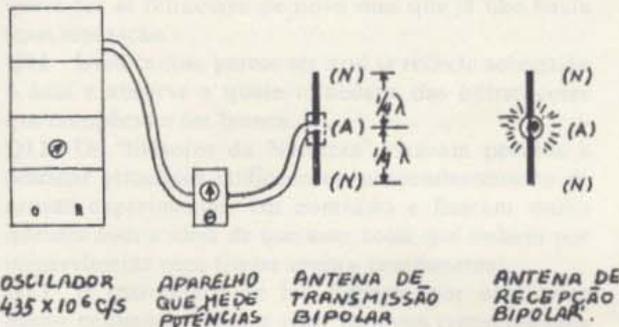


Fig. 1

A antena receptora (Fig. 2) tem também um comprimento igual a  $1/2 \lambda$ . O receptor é uma lâmpada de flash ligada por dois fios rijos, com um comprimento de  $1/4 \lambda$  cada. Se o campo eléctrico da onda incidente é paralelo à antena receptora, a força que se

exerce nos electrões do fio obriga-os a deslocar-se para trás e para a frente dentro da lâmpada. A intensidade da luz da lâmpada indica a intensidade da radiação electromagnética na antena. Uma cavidade rectangular de alumínio, com a abertura voltada para a câmara, mantém a onda dentro de certos limites para que ela forneça a intensidade suficiente.

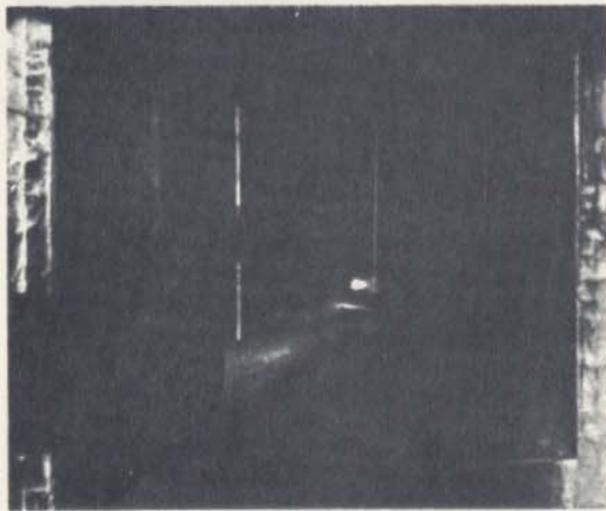


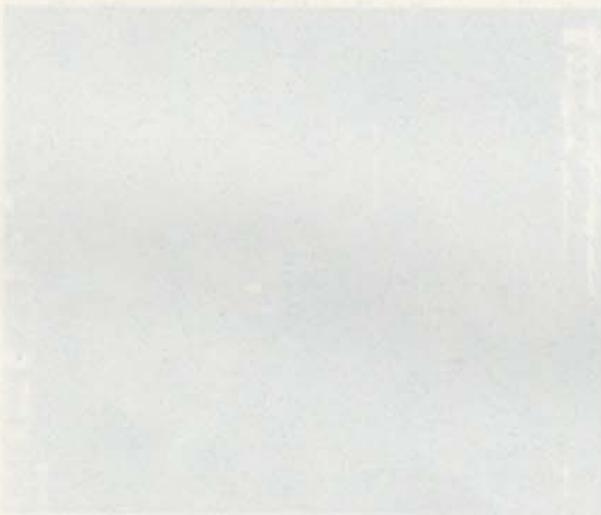
Fig. 2

As cenas iniciais mostram como é que a intensidade depende da distância entre a antena transmissora e a antena receptora. A potência de radiação é de aproximadamente 20 watt. A intensidade recebida decrescerá à medida que a distância aumenta? A radiação tem uma polarização vertical, de modo que a resposta decresce para zero quando se roda a antena receptora para uma posição horizontal.

Conseguem-se ondas estacionárias quando se coloca um reflector metálico na extremidade da cavidade. Não se pode colocar o reflector num sítio qualquer; ele tem que ficar num nó. A distância entre a fonte e o reflector tem que ser um múltiplo de metade de um comprimento de onda mais  $1/4$  de um

comprimento de onda. O comprimento da cavidade tem que estar "ajustado" com o comprimento da onda. Podem identificar-se os nodos e os ventres, movendo a antena receptora para trás e para a frente. Depois, uma fila de antenas receptoras verticais é colocado na cavidade e conseguem-se ver os nodos e os ventres com o auxílio da figura produzida pelo brilho das lâmpadas. Em cada experiência, quantos nodos e ventres se conseguem ver?

As ondas estacionárias de diferentes tipos podem ter o mesmo comprimento de onda.



As ondas estacionárias produzidas em uma cavidade dependem do comprimento da cavidade e da frequência da onda. Quando o comprimento da cavidade é igual a um múltiplo ímpar da metade do comprimento de onda, ocorre uma onda estacionária. A distância entre dois ventres consecutivos é igual a  $\lambda/2$ . A distância entre dois nodos consecutivos é igual a  $\lambda/2$ . A distância entre um nó e um ventre consecutivo é igual a  $\lambda/4$ . Quando o comprimento da cavidade é igual a um múltiplo par da metade do comprimento de onda, ocorre uma onda estacionária. A distância entre dois ventres consecutivos é igual a  $\lambda/2$ . A distância entre dois nodos consecutivos é igual a  $\lambda/2$ . A distância entre um nó e um ventre consecutivo é igual a  $\lambda/4$ .

Para cada caso, é preciso uma fonte (um diapásão, um altifalante ou uma antena bipolar). Também é preciso um refletor (o suporte de uma corda, um pistão de madeira, ou um espelho de folha de alumínio). Se as frequências forem de 72 vib/s para a corda, 505 vib/s para o gás e  $435 \times 10^6$  vib/s para as ondas electromagnéticas, o que é que pode concluir sobre as velocidades destes três tipos de ondas? Analise as semelhanças e diferenças nos três casos. O que é que pode dizer sobre o "meio" no qual se propagam as ondas electromagnéticas?

Quando se produz uma onda estacionária em uma cavidade, a energia não se transmite através da cavidade. A energia é armazenada na cavidade e é convertida em calor. A energia é convertida em calor porque a onda estacionária produz um campo electromagnético que aquece o meio. A energia é convertida em calor porque a onda estacionária produz um campo electromagnético que aquece o meio. A energia é convertida em calor porque a onda estacionária produz um campo electromagnético que aquece o meio.

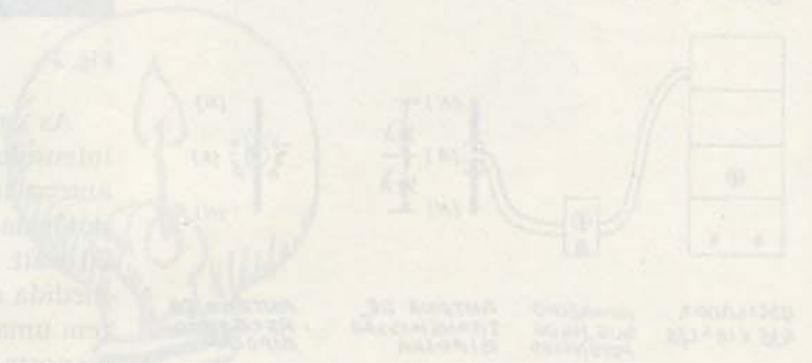


Fig. 1. Antena receptora (Fig. 2) tem comprimento igual a  $\lambda/2$ . O receptor é uma lâmpada de flash ligada por dois fios com um comprimento de  $\lambda/4$  cada. Se o campo eléctrico da onda incidente é paralelo à antena receptora, a força que se

## Respostas às questões de fim de secção

### Capítulo 13

**Q1** Não. Eventualmente a difracção começa a alargar o feixe.

**Q2** Römer baseou a sua previsão no tempo extra que calculara ser preciso para que a luz atravessasse a órbita terrestre.

**Q3** Römer mostrou que a luz tem uma velocidade limitada.

**Q4** As experiências feitas por Foucault e Fizeau mostraram que a luz tem uma velocidade *menor* na água do que no ar, enquanto que o modelo corpuscular implicava que a luz tivesse uma velocidade *superior* na água.

**Q5** Quando a luz entra num meio mais denso, o seu comprimento de onda e velocidade diminuem, mas a frequência mantém-se.

**Q6** As experiências de Young mostraram que se podia formar uma figura de interferência com a luz, e que só se podia explicar essa figura se se considerasse um modelo ondulatório para a luz.

**Q7** Foi a difracção que difundiu a luz para além dos dois orifícios de modo a haver sobreposição e a verificar-se interferência entre os dois feixes.

**Q8** Poisson aplicou a equação das ondas de Fresnel à sombra de um obstáculo circular e descobriu que devia haver uma mancha brilhante no centro da sombra.

**Q9** Newton fez passar um feixe de luz branca através de um prisma e verificou que essa luz era substituída por um feixe divergente de luz colorida. Experiências adicionais mostraram que as cores se podiam recombinar para formar luz branca.

**Q10** Newton fez um buraco no écran onde se projectava o espectro e deixou que uma única cor passasse pelo buraco e através de um segundo prisma; verificou que a luz se refractava de novo mas que já não havia mais separação.

**Q11** Uma camisa parece ser azul se reflecte sobretudo o azul e absorve a quase totalidade das outras cores que compõem a luz branca.

**Q12** Os "filósofos da Natureza" estavam prontos a postular princípios unificadores independentemente de provas experimentais em contrário e ficaram muito infelizes com a ideia de que uma coisa que tinham por inegavelmente pura tivesse muitos componentes.

**Q13** A quantidade de luz dispersa por obstáculos muito pequenos é maior para menores comprimentos de onda do que para maiores comprimentos de onda.

**Q14** O "céu" é luz solar que a atmosfera dispersa. A luz que se dispersa mais é a de menor comprimento de onda, o azul da extremidade do espectro. Na lua o céu parece preto porque não há atmosfera que difunda a luz até ao observador.

**Q15** Hooke e Huygens propuseram que as ondas luminosas eram semelhantes às ondas sonoras: Newton pôs objecções a esta ideia pois a propagação rectilínea

da luz tinha um comportamento muito diferente do som. Para além disso, Newton verificou que os fenómenos de polarização não podiam ser explicados em termos de ondas esféricas de pressão.

**Q16** Reflexão, refacção, difracção, interferência, polarização, cor, velocidade finita e propagação rectilínea (esta última estaria associada com o plano de ondas).

**Q17** Não; apenas que a luz tem muitas propriedades ondulatórias e que a sua velocidade noutras substâncias diferentes do ar não está de acordo com as previsões de um modelo corpuscular *simples*.

**Q18** Mostrou-se que a luz tinha propriedades ondulatórias e como todos os outros movimentos ondulatórios conhecidos precisavam de um meio físico para os transmitir, também se supôs que devia existir um "éter" para transmitir as ondas luminosas.

**Q19** Porque a luz é uma onda transversal que se propaga a uma velocidade de tal modo elevada que o éter tem que ser um sólido duro.

### Capítulo 14

**Q1** Mostrou que a terra e a magnetite afectam a agulha magnetizada de modos semelhantes.

**Q2** O ambar atrai muitas substâncias; a magnetite apenas algumas. Para poder atrair, o ambar precisa de ser friccionado; a magnetite atrai sempre. O ambar atrai para o seu centro; a magnetite para qualquer dos seus pólos.

**Q3** 1. Cargas iguais repelem-se. Um corpo que tem uma carga resultante positiva repele qualquer corpo com uma carga resultante positiva, isto é, duas varetas de vidro depois de friccionadas tendem a repelir-se. Um corpo com uma carga resultante negativa repele um outro corpo com uma carga resultante negativa.

2. Cargas de sinais contrários atraem-se. Um corpo com uma carga resultante positiva atrai qualquer corpo com uma carga resultante negativa e vice-versa.

**Q4** Uma rolha suspensa dentro de um recipiente de prata carregado não era atraído pelas partes laterais do recipiente. (Isto implicava que não havia força eléctrica resultante a exercer-se sobre a rolha — resultado semelhante àquele que Newton provou para a força gravítica dentro de uma esfera oca.

**Q5**  $E_{el} \propto 1/R^2$  e  $E_{el} \propto q_A q_B$ .

**Q6**  $E_{el}$  terá um quarto do valor.

**Q7** Não, o ampère é a unidade de intensidade de corrente.

**Q8** Um ponto qualquer num campo escalar é dado apenas por um número, enquanto que um ponto num campo vectorial é representado por um número, direcção e sentido. Exemplos de campos escalares: campo sonoro perto de um bocal vibrante, intensidade da luz perto de uma lâmpada; temperatura perto de um aquecimento. Exemplos de campos vectoriais: campo gravi-

tico da terra, campos eléctricos perto de corpos carregados, campos magnéticos perto de ímanes.

**Q9** Para determinar o campo gravítico num ponto, coloca-se um corpo de massa conhecida nesse ponto e mede-se o módulo e sentido da força que se exerce sobre ele. A direcção e sentido da força é a direcção e sentido do campo; a razão entre o módulo da força e da massa é a amplitude do campo.

Para determinar o campo eléctrico, coloca-se uma carga positiva conhecida no ponto e mede-se o módulo e sentido da força que se exerce sobre a carga. O sentido da força é o sentido do campo eléctrico. A razão entre o módulo de carga e a carga é o módulo do campo.

Nota: para calcular a força em qualquer dos casos observe a aceleração de uma massa conhecida ou determine qual a carga adicional que deve colocar para equilibrar a força original.

**Q10** As forças correspondentes também seriam duplas e, portanto, as razões entre a força e a massa e a força e a carga permaneceriam inalteradas.

**Q11** A carga teste negativa sofrerá uma força orientada para cima.

**Q12** Se as gotículas ou esferas estão carregadas negativamente, elas sofrem uma força eléctrica no sentido oposto ao sentido do campo.

**Q13** A carga exprime-se em unidades básicas: a carga do electrão.

**Q14** A carga negativa, (-), também deve aparecer dentro do mesmo sistema fechado. (Por exemplo, um (-) electrão separa-se do átomo, deixando-o positivamente carregado).

**Q15** Produz uma corrente constante durante um longo período de tempo.

**Q16** A voltagem entre dois pontos é o trabalho que exerce para mover uma carga de um ponto para outro, a dividir pelo módulo da carga.

**Q17** Não; a diferença de potencial é independente quer da trajectória quer do módulo da carga que se move.

**Q18** Um electrão-volt é uma unidade de energia.

**Q19** Se a tensão duplicasse, a intensidade de corrente também duplicaria.

**Q20** Significa que quando se aplica uma tensão às extremidades de uma resistência e passa por ela uma corrente, a razão entre a tensão e a corrente será de  $5 \times 10^6$ .

**Q21** Aplique diferentes tensões às suas extremidades e meça a intensidade de corrente produzida em cada caso. Depois calcule as razões  $V/I$  para cada caso. Se as razões são as mesmas, a lei de Ohm aplica-se.

**Q22** A energia eléctrica transforma-se em energia calorífica e possivelmente em energia luminosa. (Se a intensidade da corrente é variável, ocorrem transformações adicionais de energia; este tópico será discutido no Capítulo 16.)

**Q23** Duplicar a intensidade da corrente aumenta a produção de calor quatro vezes (considerando-se que a resistência é constante).

**Q24** As cargas devem estar a mover-se em relação ao íman. (De facto, devem estar a mover-se através do campo criado pelo íman.)

**Q25** Mostrou-se que era uma força "lateral"!

**Q26** Forças actuam sobre uma agulha magnetizada (mas sem carga) de uma bússola colocada perto de uma corrente. O campo magnético em qualquer ponto perto de um condutor rectilíneo fica num plano perpendicular ao fio e é tangente a um círculo desse plano que tem o centro no fio. A forma geral do campo magnético é circular.

**Q27** Ampère suspeitava que as correntes deviam exercer forças uma sobre a outra.

**Q28** (b), (c), (e).

**Q29** (b), (c), (e).

**Q30** A força magnética não tem a direcção e sentido do movimento da partícula — está orientada para o lado, perpendicularmente à direcção do movimento. *NÃO* efectua trabalho sobre a partícula, uma vez que é sempre perpendicular à direcção do movimento.

**Q31** A gravidade actua sempre em direcção ao centro da terra e é proporcional à massa (é independente da velocidade).

O campo eléctrico actua no sentido do campo (ou no sentido oposto ao das cargas negativas), é proporcional à carga que se exerce sobre o objecto e é independente da velocidade do objecto.

O campo magnético actua perpendicularmente à direcção do campo e à direcção do movimento, é proporcional à carga e à velocidade e depende do sentido em que o objecto se está a mover.

## Capítulo 15

**Q1** Um único pólo magnético pode mover-se livremente e segue a trajectória circular de força magnética à volta do fio onde passa corrente.

**Q2** Considera-se que foi Faraday que descobriu a indução electromagnética porque foi ele o primeiro a publicar a descoberta, tendo também feito uma série de experiências exaustivas sobre o assunto.

**Q3** A produção de uma corrente pelo magnetismo.

**Q4** A espira está na horizontal para uma corrente máxima e na vertical para uma corrente mínima. A razão deste facto é que a bobina atravessa as linhas de força mais rapidamente quando está na horizontal, e menos rapidamente quando está na vertical.

**Q5** Inverte a ligação do gerador com o circuito exterior em cada meia-volta da espira.

**Q6** Provém do aparelho mecânico que está a fazer girar a bobina no campo magnético.

**Q7** Use uma bateria para levar corrente através da bobina.

**Q8** Baterias são fracas e caras.

**Q9** Um trabalhador desconhecido mostrou que o dínamo de Gramme podia funcionar como um motor.

**Q10** Muito brilhante, muito caro, com muitos inconvenientes.

**Q11** Uma bomba de vácuo melhor.

**Q12** Uma corrente fraca terá maior efeito calorífico se a resistência for suficientemente grande.

**Q13** As cidades tornaram-se maiores, desde que passaram a existir transportes fáceis de uma parte para outra; os prédios tornaram-se mais altos pois os elevadores podiam levar as pessoas para os andares mais altos; as horas possíveis de trabalho nas fábricas, lojas e escritórios aumentaram muito.

**Q14** Há menos perda de calor nos fios de transmissão.

**Q15** Só há corrente induzida na bobina secundária se houver uma corrente variável na bobina primária.

## Capítulo 16

**Q1** Um campo magnético.

**Q2** O pequeno deslocamento de cargas que acompanha um campo eléctrico variável.

**Q3** Os quatro princípios são:

(1) Uma corrente eléctrica num condutor produzem linhas de força magnética que formam um círculo à volta do condutor.

(2) Quando um condutor se move através de linhas de força magnética criadas externamente, induz-se uma corrente no condutor.

(3) Um campo eléctrico variável no espaço produz um campo magnético.

(4) Um campo magnético variável no espaço produz um campo eléctrico.

**Q4** Era praticamente a mesma que a velocidade da luz determinada por Fizeau —diferiam um pouco mais de 1%!

**Q5** "Síntese de Maxwell" é a sua teoria electromagnética em que mostra a relação entre electricidade, magnetismo e luz.

**Q6** A existência de ondas electromagnéticas, que se propagam à velocidade da luz, que têm todas as propriedades normais da luz, como a reflexão, a refração, a capacidade de formar ondas estacionárias, etc.

**Q7** Uma espira de arame.

**Q8** Têm comprimentos de onda muito grandes (das dezenas a milhares de metros).

**Q9** Os sinais propagam-se em linhas rectilíneas e, de outro modo, iriam para o espaço em vez de seguirem a curvatura da terra.

**Q10** Quanto maior é a frequência, maior é a penetração de matéria.

**Q11** O comprimento de onda de um RADAR de 1 m é cerca de  $2 \times 10^6$  vezes o comprimento de onda da luz verde que é de  $5 \times 10^{-7}$  m.

**Q12** Os raios-x são produzidos pela deflecção ou paragem brusca de electrões; a radiação gama é emitida por núcleos instáveis de materiais radioactivos.

**Q13** Era quase impensável que pudessem existir ondas sem um meio que as transmitisse.

**Q14** De Albert Einstein (na sua teoria da relatividade).

## Breves respostas às questões do guia de estudo

### Capítulo 13

- 13.1 Informação  
13.2 7,5 cm  
13.3 Discussão  
13.4 Discussão  
13.5 (a)  $4,4 \times 10^9$  m  
(b)  $3,0 \times 10^8$  m/s  
(c) Desvio positivo; ciclo conjuntivo  
13.6 (a)  $9,5 \times 10^{15}$  m  
(b) 4300 anos  
(c) 30 vezes maior  
13.7 Derivação  
13.8 Discussão  
13.9 90 cm; não; não  
13.10 Discussão  
13.11 Diagramas  
13.12 (a) Diagrama  
(b) Discussão  
13.13 Demonstração  
13.14 (a)  $(m + 1/2)$  quando  $m = 0, 1, 2$   
(b) Maior  
(c) A separação das franjas aumenta  
(d) A separação das franjas aumenta  
(e) Mais esbatida mas mais extensa  
13.15 Discussão  
13.16 Discussão  
13.17 Discussão  
13.18  $6 \times 10^{14}$  ciclo/s  
 $10^9$  vezes as frequências de AM  
 $10^7$  vezes as frequências de FM  
13.19 Discussão  
13.20 Discussão  
13.21 Vertical  
13.22 Discussão

### Capítulo 14

- 14.1 Informação  
14.2 (a) Triplicar  
(b) Reduzir a metade  
(c) Não muda  
14.3 95 km  
14.4 Discussão  
14.5 Sim; discussão; esboços  
14.6 (a) 1,6 N/kg  
(b)  $4,2 \times 10^{18}$  N/kg  
(c) Directamente proporcional a  $\sqrt{\quad}$   
14.7 Discussão  
14.8 Diagramas vectoriais  
14.9 (a)  $10^6$  Coulomb  
(b)  $10^{-9}$  Coulomb/m<sup>2</sup>  
14.10 Esboço (normal às superfícies)  
14.11 (a) Discussão  
(b) Ajuda  
14.12  $6,25 \times 10^{18}$  electrões  
14.13  $3,4 \times 10^{42}$

- 14.14 (a)  $1/2 mv^2 = 1/2 kg^2/R$   
(b)  $1,2 \times 10^{-18}$  joule  
(c)  $1,5 \times 10^6$  m/s  
14.15 Os metais são condutores  
14.16 30 volt  
14.17 Sempre igual ou nulo  
14.18 Derivação  
14.19  $3 \times 10^6$  volt/metro  
14.20  $10^7$  volt/metro  
14.21 (a) 12 volt  
(b) Zero volt  
(c) 12 volt  
14.22 (a)  $1,6 \times 10^{-17}$  joule  
(b)  $5,7 \times 10^6$  m/s  
14.23 (a) 4 Ampère  
(b) 5 ohm  
(c) 15 volt  
14.24 (a)  $10^7$  volt  
(b)  $5 \times 10^8$  joule  
14.25 Discussão  
14.26 20 watt  
14.27 (a) 8 watt  
(b) 20 watt  
(c) 45 watt  
14.28 Na superfície o campo magnético é vertical  
14.29 (a) Norte  
(b) 1 ampère, Norte  
14.30 (a) Derivação  
(b)  $v, B$  e  $R$   
14.31 Derivação  
14.32 Oeste  
14.33 Discussão

### Capítulo 15

- 15.1 Informação  
15.2 Discussão  
15.3 Sim  
15.4 Todos com excepção de (d)  
15.5 Discussão  
15.6 Esboço  
15.7 (a) Exercício  
(b) Ascendente  
(c) Descendente  
15.8 Lei de Lenz  
15.9 O íman que passa por fora  
15.10 Oposto  
15.11 Discussão  
15.12 (a) 1 ampère  
(b) 10 ohm  
(c) fundiam  
15.13 (a) 1/12 ampère  
(b) 1440 ohm, o mesmo  
15.14 (a) 1 ampère  
(b) 1/5 watt  
(c) 1/2 ampère, 1/20 watt

(d) 0,97 ampère; 0,19 W; 5,6 W; 0,50 ampère, 0,50 W, 6 W

- 15.15 5 ampère
- 15.16 Derivação
- 15.17 A bobina de baixa tensão
- 15.18 Discussão
- 15.19 Discussão
- 15.20 Relatório
- 15.21 Discussão

**Capítulo 16**

- 16.1 Informação
- 16.2 Simetria
- 16.3 Não
- 16.4 Carga com aceleração; indução mútua
- 16.5 (a) Altura  
(b) Pressão  
(c) Intensidade do campo
- 16.6 Orientação do deflector
- 16.7 Propriedades da luz
- 16.8 Discussão

- 16.9 Discussão
- 16.10  $5 \times 10^9$ ; 600 m e 193 m; 11 m
- 16.11 10 m até 100 m
- 16.12 Discussão
- 16.13 Discussão
- 16.14 Discussão
- 16.15 Reflexão ionosférica da radiação de menor comprimento de onda
- 16.16 42 500 km
- 16.17 Diferença de fase entre as ondas directas e as reflectidas
- 16.18 2,6 s
- 16.19 Absorção
- 16.20 Evolução
- 16.21 Ultravioleta e infravermelho
- 16.22 Discussão
- 16.23 Desnecessário
- 16.24 Discussão
- 16.25 Discussão
- 16.26 Discussão
- 16.27 Ensaio
- 16.28 Ensaio

# ÍNDICE ALFABÉTICO DO TEXTO

- Acceleradores, electrão, 57-58  
Acceleradores de electrões, 57-58  
Âmbar, propriedades de, 31-32  
Ampère, 39, 65  
definição, 65  
Ampère, André-Marie, e forças entre correntes, 64-65  
Ångstrom, Anders Jonas, 21  
Atracção electrostática, 35-42  
Aurora, 70
- Balança de torsão, de Coulomb, 38  
Barragem hidroeléctrica das Cataratas do Niágara, 95-96  
Bateria eléctrica, 83  
(*ver também* Bateria)  
Bateria de Volta, 55  
(*ver também* Célula eléctrica)  
Browne, Sir Thomas, e repulsão eléctrica, 35  
Câmara obscura, 8  
Campo(s) eléctrico(s), 34-35, 46-47  
visualização de, 50-51  
Campo magnético, 34-35  
circular, 78  
electroímãs e, 68-69  
partículas carregadas e, 66-70  
(*ver também* Linhas de força)  
Campo magnético circular, 78  
Campos de velocidade, 45  
Campos escalares, 44  
Canhão electrónico, 57-58  
Carga, unidade de, 39, 42  
Carga eléctrica, 35-42  
conservação de, 52-53  
Cinturas de Van Allen, 70-71  
Circuitos eléctricos, em paralelo, 89-91  
em série, 91  
Circuito em paralelo, 89-91  
Circuito em série, 91  
Comprimento de onda, da luz, 20-21  
Comutador, 85  
Condensadores, 52  
Condutores, 54  
metálico, 59-60  
Conservação da carga eléctrica, 52-54  
Cor, 16, 18-20  
comprimento de onda da luz e da, 20-21  
espectro de, 18  
teoria de Newton da, 16, 18-19  
Corrente (*ver* Corrente eléctrica)  
Corrente alterna, 85-86  
transformadores e, 94  
uso comercial de, 95-96  
Corrente contínua, 85-86  
transformadores e, 94, 97  
Corrente(s) eléctrica(s), acções sobre ímãs, 61-64  
alterna(s), 85-86, 94-96  
contínua, 85-86, 93-94, 97
- diferença de potencial e, 60-61  
força magnética entre, 61-64  
produção de, 54-55  
Coulomb, Charles, e força eléctrica, 38-39  
balança de torsão, 38-39  
lei de, 39-40  
Coulomb, definição, 40  
Cristal de espató da Islândia, dupla refração por, 22-23  
Cristais de herapatite, e luz polarizada, 23-24
- Davy, Humphry, lâmpada de arco e, 89  
*De Magnete* (William Gilbert), 32-34  
Diferença de potencial eléctrico, 56-58  
corrente e, 60  
definição, 56  
potência e, 60  
Difracção da luz, 15, 17  
Dinamo, 84-86  
Dinamo de disco de Faraday, 83  
Dispersão da luz, 20-21  
Dupla refração da luz, 22-23
- Edison, Thomas Alva, e lâmpada eléctrica, 89-93  
Einstein, Albert, teoria da relatividade e, 128  
Electrão, medindo a carga de, 48-49  
órbitas de, 79-82  
Electricidade, vantagens de, 97-98  
criticismos de, 98, 99, 102  
Electroímãs, 68-69  
Electromagnetismo, princípios de, 108-111  
teoria da relatividade e, 128  
(*ver também* Magnetismo)  
Electrostática, definição, P4, 3  
Energia, potencial eléctrico, 56-58  
Energia cinética, energia potencial eléctrica e, 57-58  
Energia mecânica, e conversão em energia eléctrica, 83  
Energia potencial, eléctrica, 56-58  
Energia potencial eléctrica, mudança para energia cinética, 57-58  
Espectro, cor, 18  
electromagnético, 119-126  
Espectro electromagnético, 119-126  
definição, 119  
Espelho, superfície do, 13  
Éter, refutação do conceito de, 126-127  
propagação das ondas de luz e, 24-25  
Experiência da dupla fenda, 14-15  
Experiência da gota de óleo de Millikan, 48-49
- Faraday, Michael, 78, 80  
indução electromagnética e, 79-83  
linhas de força e, P4, 2  
radiação electromagnética e, 107-108
- Feixes luminosos, comportamento de, 7-11  
Força do campo gravítico, 44, 46  
Força(s) eléctrica(s), em equilíbrio, 49  
carga de menor valor de, 48, 49  
Força magnética, entre correntes eléctricas, 61-64  
(*ver também* Electromagnetismo, Magnetismo)  
Forças eléctricas, 37-39  
Franklin, Benjamin, e carga eléctrica, 36-37  
garrafa de Leyden e, 52  
Fresnel, Augustin Jean, e polarização, 23  
teoria ondulatória da luz, 15
- Galileu, velocidade da luz e, 10  
Garrafa de Leyden, 52  
Gerador de corrente alterna, 84-85  
Gerador de corrente contínua, 85  
Gerador(es), eléctrico(s), 82  
bateria como, 83  
como no motor, 87  
dínamo, 84  
hidroeléctrico, 88  
Geradores, como motores, 87  
Goethe, Johann Wolfgang von, e teoria da cor, 20
- Henry, Joseph, e indução electromagnética, 79  
Hertz, Heinrich, e experiências com ondas electromagnéticas, 115-117  
Hertz (ciclos por segundo), 119  
Hilac, 30  
Huygens, Christian, velocidade da luz e, 10-11
- Ímãs, acção da corrente eléctrica sobre, 61-64  
electroímãs, 68-69  
Indução electromagnética, descoberta de, 79, 81-83  
princípio de, 82  
Indução electrostática, 40-42  
definição, 42  
Interferência, onda luminosa, 14-15  
Isoladores, 54
- Lâmpada de arco, 89  
Lâmpada eléctrica, 89-93  
Land, Edwin H., e polaróide, 24  
Laser(s), produção de luz por, 10  
Lei da força eléctrica, 37-38  
Lei de Ohm, 59-60  
Linha(s) de força, e indução electromagnética, 78-79, 81-82  
(*ver também* Electromagnetismo, Campo magnético)  
Linhas do tempo, Maxwell, James Clerk, 113

- Luz, arco, 89  
 como força electromagnética, 107-108  
 como onda electromagnética, P4, 3  
 comprimento de onda da, 20-21  
 conceito atmosférico de P4, 2  
 cor e, 16, 18-20  
 difracção da, 15,17  
 dispersão da, 20-21  
 incandescente, 89, 91-93  
 interferência da, 14-15  
 modelo corpuscular da P4, 1  
 modelo ondulatorio da P4, 1  
 natureza da, 5-8  
 polarização de, 22-24  
 propagação da, 8-11, 24-25  
 reflexão da, 11-13  
 refração da, 11-13  
 refração dupla da, 22-23  
 ultravioleta, 122  
 velocidade da, 10-11, 114, 116  
 visível, 122
- Luz eléctrica, 89, 91-93  
 Luz incandescente, 89, 91-93  
 Luz visível, 122
- Magnetismo, relação com electricidade, 61-64  
 magnetite e, 32-35  
 (*ver também* Electromagnetismo e Força magnética)
- Magnetite, e magnetismo, 32-35  
 Mancha brilhante de Poisson, 15.  
 Mapas do Instituto Meteorológico, 44-45  
 Máquina(s) a vapor, defeitos de, 77  
 Maxwell, James Clerk, 126  
 conceito de éter e, 126-127  
 electromagnetismo e, 108-111  
 linha do tempo, 113  
 Micro-ondas, 121-122  
 Millikan, Robert A., e carga do electrão, 48-49  
 experiência da gota de óleo de, 48-49  
 Modelo, definição, 6
- Modelo corpuscular da luz P4, 1  
 reflexão e refração, 12
- Módulo ondulatorio da luz, e interferência, 14-15  
 polarização e 22-24  
 reflexão e refração e, 12-13
- Motor, eléctrico, 78-79, 86-88  
 Motor eléctrico, 86-88  
 de Faraday, 78-79
- Newton, Isaac  
 polarização da luz e, 22  
 teoria da cor, 16, 18-20
- Oersted, Hans Christian, a relação entre electricidade e magnetismo, 61-64
- Olho, percepção da luz pelo, 122
- Onda de reflexão, 11-13
- Onda(s) electromagnética(s), 111-112, 114  
 infravermelhas, 122  
 micro-ondas, 121-122  
 polarizada, 22-23  
 rádio, 121-122  
 raio-x, 125  
 transversais, 22-23  
 ultravioleta, 122  
 (*veja também* Luz)
- Onda polarizada, 22-23  
 definição, 23
- Ondas de rádio, transmissão de, 120-121
- Ondas electromagnéticas, propagação de, 111-112, 114  
 velocidade da, 114, 116
- Ondas luminosas, e éter, 24-25
- Ondas transversais, polarização e, 22-23
- Ondas ultravioletas, 122
- Óptica, e electromagnetismo, 114-115
- Optiks (Newton), 19
- Partículas carregadas, e radiação electromagnética, 119-120  
 interacção magnética de, 66-70
- Película polarizadora, 24
- Pilha voltaica, 55
- Polarização da luz, 21-24
- Pólos magnéticos, 34-35
- Potência eléctrica e diferença de potencial, 60-61  
 transmissão de, 95-96, 100-101  
 (*ver também* Electricidade)
- Priestley, Joseph, e força eléctrica, 37
- Prisma, refração da luz por, 16, 18
- Propagação da luz, 8-11
- Protecção eléctrica, 41
- Radiação electromagnética, a partir de partículas carregadas, 119-120  
 propriedades ondulatorias da luz, 116, 119  
 uso em astronomia, 123-124
- Radiação infravermelha, 122
- Raio(s) Gama, 125
- Raios-x, uso de, 125  
 ondas de, 125
- Refração dupla, 22-23  
 onda, 11-13
- Repulsão electrostática, 35-42
- Römer, Ole, e velocidade da luz, 10
- Rotor de conversão, 95
- Sistema de transmissão eléctrica, 87
- Sistema MKSA, 39
- Televisão, 121
- Teoria, definição, 6
- Teoria da relatividade, Einstein e, 128  
 electromagnetismo e, 128
- Teorias do fluido eléctrico, 48-49
- Terra, como magnetite, 34
- Transformador(es), 94
- Unidade Ångstrom, definição, 21
- Volt, definição, 56
- Volta, Alessandro, e corrente eléctrica, 55
- Voltagem, conceito de, 56
- Westinghouse, George, e corrente alterna, 94-95
- Young, Thomas, e polarização, 22  
 teoria ondulatoria da luz e, 14-15

# ÍNDICE ALFABÉTICO DO MANUAL

## Actividades

actividades fotográficas, 170  
aparelhos de medida e motores simples, 179-181  
Ciência e o Artista — A história por detrás de um selo científico, 183-184  
colagens em física, 182  
cor, 171  
corda de saltar como gerador, 179  
demonstração com um motor-gerador, 181-182  
dentro de uma válvula de rádio, 176-178  
detectando campos eléctricos, 173-174  
dínamo de disco de Faraday, 178-179  
estojos científicos da Bell Company, 184, 186  
fazer uma lente de gelo, 173  
fotografando figuras de difracção, 169-170  
gerador de bicicleta, 182  
interferência criada por uma película muito fina, 169  
Lapis Polaris, Magnes, 182  
lenço com rede de difracção, 169  
luz polarizada, 171-172  
mais máquinas de movimento perpétuo, 175-176  
mancha de Poisson, 170  
medindo a intensidade do campo magnético, 174-175  
pilha de Volta, 174  
Polo Norte isolado, 178  
sistema de transmissão por micro-ondas, 182-183  
transistor amplificador, 176  
uma bateria de 11 cêntimos (moeda americana), 174  
Actividades fotográficas (actividade), 170  
Água, e refracção da luz, 139  
Analogia com uma vedação de madeira, e luz polarizada, 172-173  
Ângulo(s) de incidência e refracção, 138-139  
Aparelho de medida, construção de, 180  
Armadura, construção de, 180  
Balança, construção e uso de, 145-146  
Balança de corrente, ajustamento de ligação, 148  
Bateria de 11 cêntimos (actividade), 174  
Batimentos, método de comparação de frequência, 163  
Bell Company, estojos científicos (actividade), 184, 186  
Bicicleta, gerador de (actividade), 182  
Bola carregada (actividade), 173-174  
Bússola, flutuante, 182  
Bússola flutuante, 182

Campo eléctrico, e deflexão de um feixe de electrões, 157-159  
deteccção de (actividade), 173-174  
Campo magnético, e deflexão do feixe de electrões, 158-159  
e efeito sobre fio onde passa corrente eléctrica, 154  
e geração de corrente eléctrica, 148-152  
intensidade do, 155  
medição de intensidade (actividade), 174-175  
Carga(s), eléctrica  
livre, 157  
velocidade de, 159  
(ver também Eléctrica, carga)  
Cargas livres, eléctricas, 157  
Catalizador de impurezas, tubo de raios catódicos, 177  
Catódicos, tubo de raios, 177  
Circuito amplificador, 162  
Circuitos ressonantes e banda de frequência, 164  
Colagens em física (actividade), 182  
Comprimento de onda da luz, 140-142  
Computadores e o cérebro humano, 186  
Comunicação, e ondas (experiência), 163-168  
Corda de saltar como gerador (actividade), 179  
Cores, refracção de, 140  
aspectos fisiológicos e psicológicos, 171  
Corpos carregados, força eléctrica entre, 143-144  
Corrente(s), eléctrica, interacção com a terra, 154-155  
e íman, força entre, 154  
forças sobre (experiência), 148-152  
ímanes e forças (experiência), 153-156  
Correntes eléctricas, força entre, 148-152  
"Cristais e luz", estojo científico, 186  
Dínamo, disco, construção de, 178-179  
Dínamo de disco, construção de (actividade), 178-179  
Dispersão de cores na refracção, 140  
Efeito arco-íris (actividade), 171  
Efeito de Land (actividade), 171  
Electrões e ondas (John R. Pierce), 186  
"Energia solar" estojo científico, 186  
Estojos científicos, Bell Company, 184, 186  
Experiência de Young — o comprimento de onda da luz, 140-142  
Experiências  
correntes, ímanes e forças, 153-156  
dínamo de disco de Faraday, construção de (actividade), 178-179

experiência de Young — o comprimento de onda da luz, 140-142  
forças eléctricas II — Lei de Coulomb, 145-147  
forças sobre correntes, 148-152  
ondas electromagnéticas estacionárias, 187-188  
refracção de um feixe luminoso, 138-140  
tubo de feixes electrónicos, 157-160

Feixe de electrões, focagem de, 160  
reflexão, 160-161  
Feixe luminoso, refracção de (experiência), 138-140  
projector de, 138  
Figura de interferência da luz, 141  
Figura de interferência por uma fenda dupla, 141  
Força eléctrica, medição de, 145-147  
Forças, sobre correntes (experiência), 148-152  
e distância entre fios, 151  
e variação no fio, 151-152  
eléctrica, entre corrente e íman, 153-156  
Forças eléctricas I (experiência), 143-144  
Forças eléctricas II — Lei de Coulomb (experiência), 145-147  
Fotografando figuras de difracção (actividade), 169-170  
Fotografia, história de (actividade), 170  
infravermelho, 170-171  
Schlieren, 170  
*Foundations of Modern Physical Science* (Holton e Roller), 173  
Frequências de rádio, 164  
Gauss, 175  
Gerador de micro-ondas, 165-166  
Grelha, tubo de raios catódicos, 178  
Íman, interacção com fio onde passa corrente eléctrica, 178  
Incidência, ângulo de incidência, 138-139  
Infravermelho, fotografia (actividade), 170-171  
Interaction of Color (Joseph Albers), 184  
Interferência, película fina (actividade), 169  
Interferência criada por uma película muito fina (actividade), 169  
Lapis Polaris Magnes (actividade), 182  
Lei de Coulomb, 145-147  
Lenço como rede de difracção (actividade), 169  
Luz, figura de interferência, 141  
comprimento de onda da, 140-142  
frequência de, 141

- polarizada, 171-172  
 velocidade no ar, 141  
 (ver também Cor)
- Luz dispersa (actividade), 171
- Luz polarizada (actividade), 171-173  
 analogia com uma vedação, 172-173  
 detecção de (actividade), 172  
 uso de, 172
- Luz polarizada (W. A. Schurcliff e S. S. Ballard), 172
- Mancha de Poisson (actividade), 170
- Manual de válvulas da RCA, 176
- "Máquinas de movimento perpétuo" (Stanley W. Angrist), 175
- Micro-onda(s), modulação, 167-168  
 e sinais, 167-168  
 propriedades de, 165-166  
 reflectida, interferência, 166-167
- Micro-onda modulada, 167-168
- Modulação de amplitude, 167
- Motor, construção de (actividade), 179-181
- Motor-gerador, demonstração (actividade), 181-182
- National Academy of Sciences (NAS), centésimo aniversário, 184
- Onda(s) e comunicação, 163-168  
 electromagnéticas, 176  
 modulada, 167
- Ondas electromagnéticas estacionárias, 187
- Ondas electromagnéticas estacionárias (filme sem-fim), 187-188
- Onda modulada, 167-168
- Onze centímetros, bateria, construção de (actividade), 174
- Physics for Entertainment (Y. Perchman), 173
- Physics of Television (Donald G. Fink e David M. Lutyens), 186
- Pilha de Volta, construção de (actividade), 174
- Polo Norte isolado (actividade), 178-179
- Prato, tubo de raios catódicos, 178
- Quantum Electronics* (John R. Pierce), 186
- Radiação electromagnética, e micro-onda, 165-168  
 e ondas estacionárias, 187-188
- Reflexão interna total, 139
- Refracção, feixe luminoso (experiência), 138-140
- Schlieren, fotografia de, 170
- Selos científicos, 183-184
- Sinais e micro-ondas, 167-168
- "Sintetizador da fala", estojo científico, 186
- Sistemas de transmissão de micro-ondas, 182-183
- Sonda de detecção de micro-ondas, 168
- "Telephone Switching" Scientific American, 186
- Terra, interacção com a corrente eléctrica, 154-155
- Transistor amplificador (actividade), 176
- Tubo de feixes electrónicos (experiência), 157-162  
 construção e funcionamento de, 157-162  
 e características do tubo de vácuo, 161-162
- Válvula de rádio, componentes da (actividade), 176-178
- Válvulas de vácuo, diodo e triodo, características de, 161-162
- Velocidade da luz no ar, 142
- Versorium de Gilbert (actividade), 173
- Waves and Messages (John R. Pierce), 186