

22 ELETROSTÁTICA



Jim Stith, antigo presidente da "American Association of Physics Teachers" (Associação Americana de Professores de Física), demonstra o funcionamento de um gerador de Whimhurst que produz relâmpagos em miniatura.

Eletricidade é o nome dado a um amplo conjunto de fenômenos que de uma forma ou outra estão subjacentes a quase tudo que nos cerca. Desde um relâmpago no céu até o acender de uma lâmpada, desde o que mantém os átomos juntos, formando moléculas aos impulsos que se propagam através dos nervos, a eletricidade está por toda parte. O controle da eletricidade é evidente nos diversos aparelhos elétricos, desde fornos de microondas a computadores. Nesta era tecnológica, é importante compreender o básico da eletricidade e como essas idéias básicas podem ser usadas para sustentar e melhorar nosso conforto, segurança e prosperidade.

Neste capítulo investigaremos a eletricidade em repouso, ou **eletrostática**, como é chamada. A eletrostática envolve cargas elétricas, as forças que existem entre elas, a "aura" que as rodeia e seus comportamentos nos materiais. No próximo capítulo investigaremos o movimento das cargas elétricas, ou **corrente elétrica**. Também estudaremos as voltagens que produzem as correntes e como elas podem ser controladas. No Capítulo 24 aprenderemos sobre a relação das correntes elétricas com o magnetismo, e no Capítulo 25 sobre como o magnetismo e a eletricidade podem ser controlados para operar motores e outros dispositivos elétricos.

A compreensão da eletricidade requer uma abordagem em estágios, onde cada conceito é o alicerce para o próximo. Assim, por favor, tenha um cuidado especial no estudo desse assunto. Ele pode ser difícil, confuso e frustrante se você for

impaciente. Mas com esforço e dedicação, ele pode tornar-se compreensível e recompensador. Avante!

Forças Elétricas

O que aconteceria se existisse uma força universal, como a gravidade, que varia inversamente com o quadrado da distância, mas fosse bilhões de bilhões de vezes mais forte do que esta? Se tal força existisse e se ela fosse atrativa como a gravidade, o universo seria comprimido em uma bola apertada, com toda a matéria existente estando agrupada tão juntas quanto possível. Mas suponha que essa força fosse repulsiva, com cada pedacinho de matéria repelindo qualquer outro pedacinho. Como seria, então? O universo seria como uma nuvem gasosa em perpétua expansão. Suponha, entanto, que o universo consistisse de dois tipos de partículas – positivas e negativas, digamos. Suponha que as positivas repelissem as positivas, mas atraíssem as negativas, e que as negativas repelissem as negativas, mas atraíssem as positivas. Em outras palavras, tipos iguais de partículas se repeliam, e tipos diferentes se atraíram (Figura 22.1). Suponha que existisse um mesmo número de partículas de cada tipo de modo que essa força intensa estivesse perfeitamente equilibrada! Como seria, então o universo? A resposta é muito simples: seria como este no qual vivemos. Pois esse

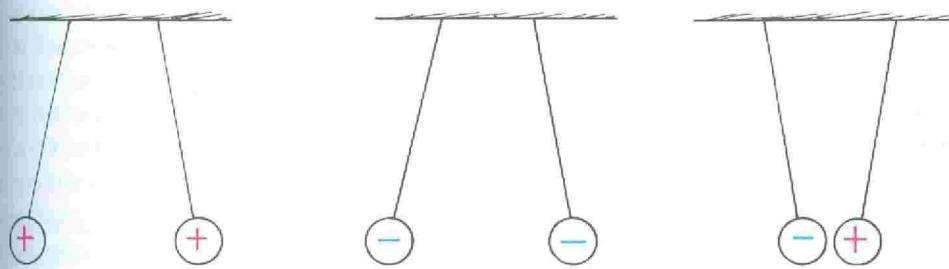


FIGURA 22.1 Cargas iguais se repelem. Cargas opostas se atraem.

partículas existem, e existe a tal força. Nós a chamamos de *força elétrica*.

Um grande número de partículas negativas e positivas se mantêm juntas pela enorme atração da força elétrica. Nesses “enxames” compactos de partículas positivas e negativas uniformemente misturadas, as enormes forças elétricas equilibram-se quase que perfeitamente. Esses enxames são os átomos que constituem a matéria. Quando dois ou mais átomos se juntam formando uma molécula, ela também contém partículas positivas e negativas equilibradas. E quando trilhões de moléculas se combinam para formar um pedacinho de matéria, as forças elétricas de novo se equilibram. Não existe praticamente qualquer atração ou repulsão elétrica entre dois pedaços de matéria ordinária, porque cada um deles contém um mesmo número de partículas negativas e positivas. Entre a Terra e a Lua, por exemplo, não existe qualquer força elétrica resultante. A força da gravidade, muito mais fraca e sempre atrativa, é que fica como a força predominante entre esses corpos.

Cargas Elétricas

As partículas positivas e negativas da matéria são os portadores de *carga elétrica*. Carga é a quantidade fundamental presente em todos os fenômenos elétricos. As partículas positivamente carregadas da matéria ordinária são os prótons, e as negativamente carregadas são os elétrons. As forças atrativas entre essas partículas fazem com que elas se aglomerem em unidades incrivelmente pequenas – os átomos. (Os átomos também contêm partículas neutras, chamadas *nêutrons*.) Quando dois átomos se unem, o equilíbrio das forças atrativas e repulsivas não é perfeito. Os elétrons voam dentro do volume de cada átomo, deixando, assim, áreas onde cargas estão expostas. Os átomos podem, então, se atraírem e formar uma molécula. De fato, todas as forças de ligação que mantêm juntos os átomos, formando moléculas, são de natureza elétrica. Qualquer um que planeje estudar química deve primeiro conhecer alguma coisa sobre atração e repulsão elétricas, e antes de estudar isso, deveria também conhecer algo sobre os átomos. Eis aqui alguns fatos importantes sobre os átomos:

1. Cada átomo é composto de um *núcleo* positivamente carregado, rodeado por elétrons negativamente carregados.

2. Os elétrons de todos os átomos são idênticos. Cada um deles possui a mesma quantidade de carga negativa e a mesma massa.
3. Prótons e nêutrons constituem o núcleo. (A forma mais comum de hidrogênio que não contém nêutron algum no núcleo é a única exceção.) Os prótons são cerca de 1.800 vezes mais massivos do que os elétrons, mas carregam consigo a mesma quantidade de carga positiva que os elétrons possuem de carga negativa. Os nêutrons possuem uma massa ligeiramente maior do que a dos prótons e não possuem carga elétrica.
4. Normalmente, os átomos possuem o mesmo número de prótons e elétrons, de modo que possuem carga elétrica líquida nula.

Por que os prótons não puxam para o núcleo os elétrons com carga oposta à sua, existentes no átomo? Você poderia pensar que a resposta é a mesma razão porquê os planetas não são puxados para dentro do Sol pela força da gravidade – ou seja, os elétrons estão orbitando os núcleos. Essa explicação planetária infelizmente não funciona para os elétrons. Quando o núcleo foi descoberto (1911), os cientistas sabiam que os elétrons não poderiam estar orbitando tranquilamente em torno do núcleo como a Terra orbita o Sol. Em apenas cerca de um centésimo de milionésimo de segundo, de acordo com a física clássica, o elétron deveria espiralar para dentro do núcleo, emitindo radiação eletromagnética enquanto isso. Portanto, uma nova teoria era necessária, e a teoria que nasceu é a *mecânica quântica*. Ao descrever o movimento eletrônico, nós ainda usamos a terminologia antiga, *órbita* e *orbital*. Uma palavra mais adequada é *cama da*, que sugere que os elétrons estão espalhados numa região esférica. Hoje, a mecânica quântica nos diz que a estabilidade do átomo tem a ver com o caráter ondulatório dos elétrons. Um elétron se comporta como se fosse uma onda e deve ocupar uma dada quantidade de espaço relacionada

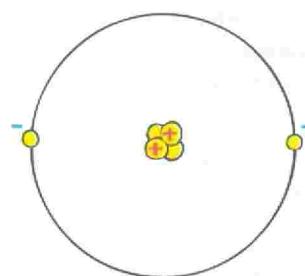


FIGURA 22.2 O modelo de um átomo de hélio. O núcleo atômico é formado por dois prótons e dois nêutrons. Os prótons positivamente carregados atraem os dois elétrons negativamente carregados. Qual a carga elétrica líquida deste átomo?

com seu comprimento de onda. Veremos no Capítulo 32, quando tratarmos da mecânica quântica, que o tamanho atômico é determinado pelo tamanho do “campo disponível para se movimentar” que um elétron requer.

Outro quebra-cabeças sobre os átomos é: por que os prótons do núcleo não se repelem e terminam se afastando? O que mantém íntegro o núcleo? A resposta é que, além das forças elétricas, dentro do núcleo existem as forças nucleares não-elétricas ainda mais intensas, que mantêm os prótons juntos apesar da repulsão elétrica. E também os neutrinos desempenham um papel, ao aumentar a distância entre os prótons. Abordaremos a força nuclear no Capítulo 33.

Teste a si mesmo

1. Sob a complexidade dos fenômenos elétricos, está a lei fundamental da qual praticamente todos os outros efeitos têm origem. Qual é essa lei fundamental?
2. Como a carga de um elétron difere da de um próton?

Verifique suas respostas

1. Cargas de mesmo sinal se repelem; cargas de sinais contrários se atraem.
2. A carga de um elétron tem mesmo módulo, mas sinal oposto ao de um próton.

Conservação da Carga

Em um átomo neutro, existe o mesmo número de elétrons e prótons, de modo que a carga líquida é nula. As positivas cancelam exatamente as negativas. Se um elétron for removido de um átomo, então ele não mais será neutro. O átomo terá, neste caso, uma carga positiva (um próton) a mais em relação às negativas (os elétrons), e se diz que ele está positivamente carregado ou eletrizado*. Um átomo carregado é chamado de *íon*. Um *íon positivo* possui uma carga líquida positiva. Um *íon negativo*, ou seja, um átomo com um ou mais elétrons extras, é negativamente carregado.

Os objetos materiais são formados por átomos, o que significa que eles são constituídos de elétrons e prótons (e neutrinos). Os objetos normalmente possuem um número igual de elétrons e prótons, sendo, portanto, eletricamente neutros. Mas se existir um ligeiro desequilíbrio nos números, o objeto será eletricamente carregado. O desequilíbrio é gerado quando elétrons são adicionados ou removidos de um objeto. Embora os elétrons mais próximos ao núcleo, os

mais internos, estejam ligados muito fortemente aos núcleos, os mais afastados, os mais externos portanto, são muito frouxamente ligados e podem facilmente ser desalijados. Quanto trabalho é necessário para remover um elétron do núcleo varia de uma substância para outra. Os elétrons estão mais fortemente ligados em materiais tais como borracha ou plástico do que no seu cabelo, por exemplo. Portanto, quando você passa um pente pelo seu cabelo, os elétrons se transferem deste para o pente. O pente, então, passa a ter um excesso de elétrons e se diz que está *negativamente carregado*. Seu cabelo, por sua vez, ficará com uma deficiência de elétrons e se diz que está positivamente carregado. Num outro exemplo, se você esfregar um bastão de vidro ou plástico com um pedaço de seda, o bastão se tornará positivamente carregado. A seda tem uma maior afinidade por elétrons maior do que o vidro ou o plástico. Os elétrons são, portanto, arrancados do bastão e transferidos para a seda.

Assim, vemos que um objeto que tenha um número desigual de elétrons e prótons está eletricamente carregado. Se ele possui mais elétrons do que prótons, ele está negativamente carregado. Se possui alguns elétrons a menos do que prótons, ele está positivamente carregado.

É importante notar que quando algo é eletricamente carregado, nenhum elétron é criado ou destruído. Eles são simplesmente transferidos de um material para outro. A carga é *conservada*. Em cada evento, seja ele em larga escala ou ao nível atômico ou molecular, sempre se verificou que o princípio da **conservação da carga** se aplica. Jamais se encontrou um caso sequer de criação ou destruição de carga elétrica. A conservação da carga é um dos fundamentos da física, ao mesmo nível de importância que a conservação da energia e a do momentum.

Qualquer objeto eletricamente carregado possui um excesso ou uma deficiência no número total de elétrons – os elétrons não podem ser divididos em frações de si mesmo. Isso significa que a carga de um objeto é um número inteiro múltiplo da carga de um elétron. Ele não pode ter uma carga igual a $1\frac{1}{2}$ ou $1.000\frac{1}{2}$ elétrons, por exemplo. A carga é “granulosa”, ou seja, formada por unidades elementares chamadas de quanta. Dizemos que a carga está quantizada.



FIGURA 22.3 Os elétrons são transferidos da pele para o bastão, que se torna negativamente carregado. A pele está eletricamente carregada? Quantos, em comparação com o bastão? Positivamente ou negativamente?

* Cada próton tem uma carga $+e$, igual a $+1,6 \times 10^{-19}$ coulomb. Cada elétron tem uma carga igual a $-e$, igual a $-1,6 \times 10^{-19}$ coulomb. Por que duas partículas tão diferentes possuem o mesmo valor absoluto de carga é uma questão ainda não respondida pela física. A igualdade entre os valores absolutos tem sido comprovada experimentalmente com alto grau de precisão.

com o quantum mínimo de carga sendo a carga do elétron (ou do próton). Jamais se observou unidades de carga menores do que esta*. Todos os objetos eletricamente carregados possuem uma carga que é um múltiplo inteiro da carga de um elétron.

Teste a si mesmo Se você esfrega elétrons sobre a pele dos pés, ao caminhar sobre o tapete, você está sendo eletrizado negativamente ou positivamente?

Lei de Coulomb

A força elétrica, como a gravitacional, diminui com o inverso do quadrado da distância entre os corpos interagentes. Essa relação foi descoberta por Charles Coulomb no século dezoito, e é denominada **lei de Coulomb**. Ela estabelece que, para dois objetos eletricamente carregados e que são muito menores do que a distância existente entre eles, a força entre os dois varia diretamente com o produto de suas cargas, e inversamente com o quadrado da separação mútua. (Reveja a lei do inverso do quadrado na Figura 9.4, página 157.) A força atua ao longo da linha reta que vai de um dos objetos carregados até o outro. A lei de Coulomb pode ser expressa como

$$F = k \frac{q_1 q_2}{d^2}$$

Onde d é a distância entre as partículas carregadas, q_1 representa a quantidade de carga de uma partícula, q_2 a da outra partícula, e k é uma constante de proporcionalidade.

A unidade de carga é o **coulomb**, abreviado pela letra maiúscula C. Resulta que 1 C é a carga correspondente a 6,25 bilhões de bilhões de elétrons. Isso poderia parecer que corresponde a um número muito grande de elétrons, mas de fato representa apenas a quantidade de carga que atravessa uma lâmpada comum de 100 watts durante pouco mais de um segundo.

A constante de proporcionalidade k na lei de Coulomb é análoga à constante G na lei de Newton da gravitação. Ao invés de ser um número muito pequeno como G ($6,67 \times 10^{-11}$), a constante de proporcionalidade elétrica k é um número muito grande. Ela vale aproximadamente

$$K = 9.000.000.000 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$$

ou, em notação científica, $k = 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$. A unidade $\text{N.m}^2/\text{C}^2$ não é o nosso principal interesse aqui; ela simplesmente converte o lado direito da equação para a unidade de

força (N). O que é importante é o grande valor de k . Se, por exemplo, um par de partículas iguais de 1 C estivessem a 1 m uma da outra, a força de repulsão que existiria entre elas seria igual a 9 bilhões de newtons**. Isso seria mais do que dez vezes o peso de um navio de guerra! Obviamente, quantidades líquidas de carga como essas não existem em nosso meio ambiente cotidiano.

Verifique sua resposta Você possuirá mais elétrons após ter esfregado a pele dos pés ao caminhar, de modo que acaba negativamente eletrizado (e o tapete está positivamente carregado).

Assim, a lei de Newton da gravitação para corpos massivos é semelhante à lei de Coulomb para corpos eletricamente carregados***. Enquanto a força de atração gravitacional entre partículas como um elétron e um próton é relativamente pequena, a força elétrica entre essas partículas é relativamente enorme. Além dessa enorme diferença em intensidades, a mais importante diferença entre as forças elétrica e gravitacional é que as elétricas podem ser atrativas ou repulsivas, enquanto as forças gravitacionais são apenas atrativas.

Teste a si mesmo

1. O próton que constitui o átomo de hidrogênio atrai o elétron que orbita em torno dele. O elétron atrai o próton com o mesmo valor de força, ou com mais força?
2. Se um próton é repelido com um certo valor de força por uma partícula carregada, como essa força diminuirá se o próton for deslocado para uma posição três vezes mais distante da partícula? E cinco vezes mais distante?
3. Qual é o sinal da carga da partícula, neste caso?

** Ao comparar os valores de G e k , devemos notar que eles dependem das unidades escolhidas para a massa e a carga elétrica, que poderiam ter sido escolhidas diferentemente. Assim, nossa comparação apenas nos lembra que as forças elétricas são normalmente enormes quando comparadas às gravitacionais. Compare os 9 bilhões de newtons entre as duas unidades de carga a 1 metro de distância mútua com a atração gravitacional entre duas unidades de massa (quilogramas) afastadas em 1 m: $6,67 \times 10^{-11} \text{ N}$ – uma força extremamente pequena. Para a força de 1 newton, as massas afastadas em 1 m teriam de ter cerca de 122.000 kg cada uma! As forças gravitacionais entre os objetos ordinários são pequenas demais para serem detectadas, a não ser por experimentos extremamente sensíveis. Mas as forças elétricas entre objetos ordinários podem ser relativamente gigantescas. Mesmo para objetos altamente carregados, entretanto, o desequilíbrio entre prótons e elétrons é normalmente menor do que uma parte por trilhão.

*** De acordo com a teoria quântica, uma força varia inversamente com o quadrado da distância se ela envolve a troca de partículas desprovidas de massa. A troca de fôtons desprovidos de massa é responsável pela força elétrica e a troca de grávitons, também sem massa, explica a força gravitacional. Alguns cientistas têm procurado uma relação ainda mais profunda entre a gravidade e a eletricidade. Albert Einstein gastou a parte final de sua vida pesquisando, com pouco sucesso, por uma “teoria do campo unificado”. Mais recentemente, a força elétrica foi unificada com uma das forças nucleares, a *força fraca*, que desempenha um papel no decaimento radioativo.

* No interior do núcleo atômico, no entanto, partículas elementares chamadas de *quarks* possuem cargas com valores absolutos iguais a 1/3 ou 2/3 da carga do elétron. Cada próton ou nêutron é formado por três quarks. Uma vez que os quarks sempre existem nessas combinações e jamais são encontrados separados, a regra do múltiplo inteiro da carga eletrônica vale também para os processos nucleares.

Condutores e Isolantes

É fácil estabelecer uma corrente elétrica em metais porque um ou mais dos elétrons das camadas mais externas desses átomos não estão firmemente presos aos núcleos. Ao contrário, eles são praticamente livres para vagar pelo material. Tais materiais são chamados de **condutores**. Os metais são bons condutores de corrente elétrica pela mesma razão pela qual são bons condutores de calor. Os elétrons de suas camadas mais externas estão “frouxos”.

Em outros materiais, borracha e vidro, por exemplo, os elétrons estão firmemente ligados e pertencem de fato a átomos individuais. Eles não são livres para vagar por entre os outros átomos do material. Conseqüentemente, não é fácil fazê-los fluir. Esses materiais são maus condutores de corrente elétrica pela mesma razão pela qual eles são normalmente maus condutores de calor. Esses materiais são chamados de bons **isolantes**.

Verifique suas respostas

- O mesmo valor de força, de acordo com a terceira lei de Newton – mecânica básica! Lembre que uma força é a interação entre duas coisas, neste caso entre o próton e o elétron. Eles se atraem mutuamente – e igualmente.
- Elas diminuirá para $1/9$ de seu valor original. Para uma distância cinco vezes maior, ela diminuirá para $1/25$ do valor original.
- Positivo.

Todas as substâncias podem ser ordenadas de acordo com sua facilidade de conduzir corrente elétrica. No topo dessa lista, situam-se os bons condutores, e no fim os bons isolantes. As extremidades da lista estão muito distantes. A

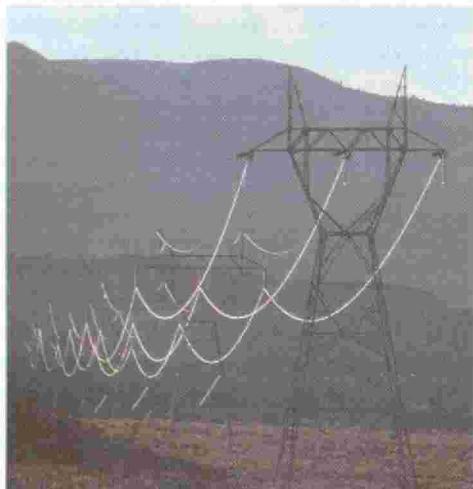


FIGURA 22.4 É mais fácil estabelecer uma corrente elétrica através de centenas de quilômetros de fios de metal do que através de alguns centímetros de material isolante.

condutividade de um metal, por exemplo, pode ser mais do que um milhão de trilhão de vezes maior do que a de um isolante como o vidro. Num fio elétrico duplo comum, os elétrons fluem por vários metros do fio em vez de fluírem diretamente de um fio para o seu vizinho através dos poucos centímetros do isolamento de borracha que os separa.

Semicondutores

Uma determinada substância pode ser classificada como condutora ou isolante, dependendo de quanto fortemente seus átomos seguram os elétrons. Um pedaço de cobre é um bom condutor, enquanto um de madeira é um bom isolante. Certos materiais, tais como o germânio e o silício, entretanto, não são bons condutores nem bons isolantes. Esses materiais caem no meio da faixa de resistividade elétrica, sendo condutores medianos em sua forma cristalina pura e tornando-se excelentes condutores quando apenas um átomo em 10 milhões é substituído por uma impureza, que adiciona ou retira elétrons da estrutura cristalina. Materiais que podem se comportar algumas vezes como isolantes e algumas vezes como condutores são chamados de **semicondutores**. Camadas finas de materiais semicondutores empilhadas juntas formam os transistores, usados para controlar o fluxo de corrente em circuitos, detectar e amplificar sinais de rádio e produzir oscilações elétricas em transmissores; atuam também como chaves digitais. Esses minúsculos sólidos foram os primeiros componentes elétricos em que materiais com características elétricas diferentes não foram conectados por fios, mas unidos fisicamente numa só estrutura. Eles requerem muito pouca potência e, usados normalmente, duram longo tempo.

Um semicondutor também conduzirá eletricidade quando luz de cor apropriada incidir nele. Uma placa de selênio puro normalmente é um bom isolante, e qualquer carga elé-

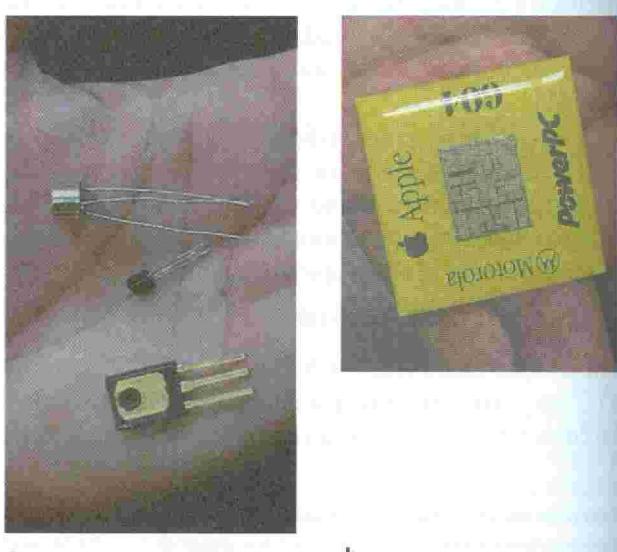


FIGURA 22.5 (a) Três transistores. (b) Muitos transistores em um circuito integrado.

trica colocada sobre sua superfície ali permanecerá por longos períodos, desde que esteja escuro. Se a placa for exposta à luz, entretanto, a carga escapará para fora da placa quase que imediatamente. Se uma placa de selênio carregada for exposta a um padrão luminoso, tal como o padrão de claro e escuro que constitui esta página, por exemplo, a carga escapará apenas das áreas expostas à luz. Se um pó plástico preto fosse espalhado sobre ela, ele grudaria apenas nas áreas que estão carregadas, onde a placa não foi exposta à luz. Agora, se um pedaço de papel, com uma carga elétrica localizada sobre seu verso, fosse colocado sobre a placa, o pó de plástico preto seria transferido para o papel, formando o mesmo padrão que, digamos, o desta página. Se o papel fosse, então, aquecido de modo a derreter o plástico e a fundi-lo com o papel, você poderia pagar alguns centavos por ele, e chamá-lo de cópia xerox.

Supercondutores

Um condutor ordinário oferece apenas uma pequena resistência ao fluxo de carga elétrica. Um isolante oferece uma resistência muito maior (abordaremos o tópico sobre resistência elétrica no próximo capítulo). Notavelmente, a temperaturas suficientemente baixas, determinados materiais adquirem resistência nula (ou condutividade infinita) ao fluxo de carga. Esses são os materiais *supercondutores*. Uma vez que a corrente elétrica tenha sido estabelecida num supercondutor, ela fluirá indefinidamente. Sem resistência elétrica alguma, a corrente passa pelo material sem sofrer perda de energia; nenhum aquecimento ocorre durante o fluxo da carga. A supercondutividade em metais próximos ao zero absoluto foi descoberta em 1911. Em 1987, foi descoberta a supercondutividade em “altas” temperaturas (acima de 100 K) num composto não-metálico. Presentemente, estão sendo objeto de intensas pesquisas materiais que são supercondutores tanto em baixas como em altas temperaturas. As potenciais aplicações incluem transmissão de energia a grandes distâncias sem perdas e veículos de alta velocidade magneticamente levitados, para substituir os trens.

Eletrização

Podemos eletrizar objetos transferindo elétrons de um lugar para outro. Podemos fazer isso por *contato* físico, como ocorre quando as substâncias são friccionadas uma na outra,

ou simplesmente se tocam. Ou podemos redistribuir a carga de um objeto simplesmente colocando um objeto eletricamente carregado próximo a ele – isso é chamado de *indução*.

Eletrização por Atrito e por Contato

Todos estamos familiarizados com os efeitos elétricos produzidos pelo atrito. Você pode esfregar o pêlo de um gato e escutar depois os estalidos das faíscas produzidas, ou pentear seu cabelo em frente a um espelho num quarto escuro, para ouvir e ver as faíscas. Podemos esfregar nossos sapatos num capacho e sentir um formigamento quando pegamos a maçaneta da porta. converse com os mais idosos e eles lhe contarão sobre como era comum levar um surpreendente choque elétrico ao escorregar sobre a cobertura plástica dos assentos, enquanto se estava estacionado num carro (Figura 22.6). Em todos esses casos, os elétrons são transferidos pelo atrito quando um material é esfregado em outro.

Os elétrons podem ser transferidos de um material para outro por simples contato. Por exemplo, quando um bastão negativamente carregado é colocado em contato com um objeto neutro, alguns elétrons se transferirão para o objeto neutro. Esse método de eletrização é chamado simplesmente de *eletrização por contato*. Se o objeto eletrizado for um bom condutor, os elétrons se espalharão por toda a superfície do corpo, pois os elétrons transferidos se repelem mutuamente. Se ele for um mau condutor, pode ser necessário tocar o bastão em várias partes a fim de conseguir uma distribuição de carga mais ou menos uniforme.

Eletrização por Indução

Se você coloca um objeto negativamente carregado próximo a uma superfície condutora, você fará com que os elétrons se movam pela superfície do material mesmo não havendo contato físico algum. Considere duas esferas metálicas isoladas, A e B, como mostrado na Figura 22.7. (a) Elas estão se tocando, de modo que efetivamente elas formam um único condutor não-eletrizado. (b) Quando um bastão negativamente carregado é trazido para próximo de A, os elétrons do metal, sendo livres para se moverem, se repelem para tão longe quanto possível, até que a repulsão mútua seja suficientemente grande para equilibrar a influência do bastão. A carga foi redistribuída. (c) Se A e B forem separadas com o bastão ainda presente, (d) elas ficarão igualmente carregadas, mas com sinais opostos. Isso é a eletrização por indução.

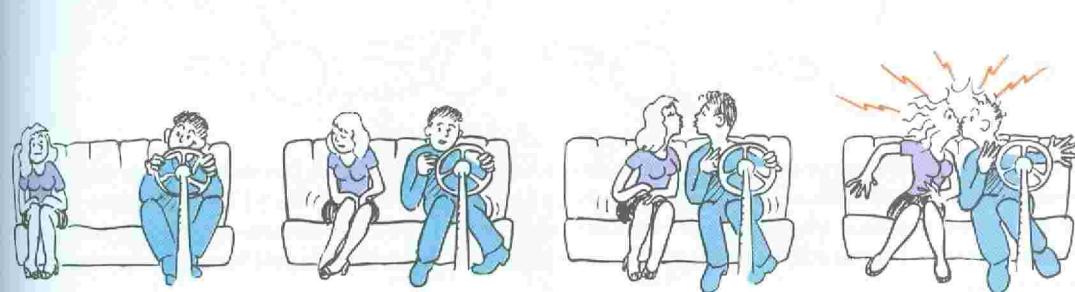


FIGURA 22.6 Eletrização por atrito e, depois, por contato.

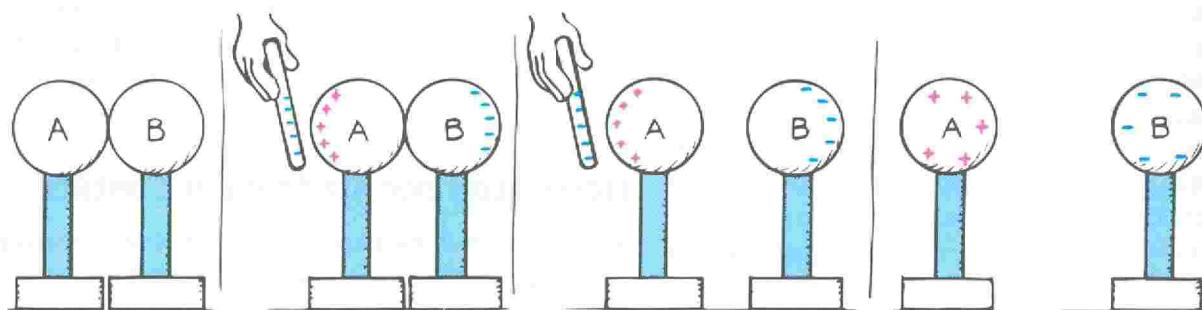


FIGURA 22.7 Eletrização por indução.

ção. O bastão eletrizado não tocou em momento algum as esferas, e possuiu a mesma carga original.

Analogamente, podemos eletrizar uma única esfera por indução se a tocarmos enquanto diferentes partes dela estão diferentemente carregadas. Considere uma esfera metálica pendurada por um barbante não-condutor, como mostrado na Figura 22.8. Quando tocamos a superfície do metal com um dedo, estamos providenciando um caminho por onde a carga pode fluir para ou de um grande reservatório de carga elétrica – o solo. Dizemos, então, que estamos *aterrando* a esfera, um processo que pode deixá-la com uma certa carga elétrica líquida. Voltaremos a essa idéia de aterramento no próximo capítulo, quando discutirmos correntes elétricas.

Teste a si mesmo

- As cargas induzidas nas esferas A e B da Figura 22.7 seriam necessariamente iguais e opostas?
- Por que o bastão negativamente carregado da Figura 22.7 tem a mesma carga antes e depois que as esferas são eletrizadas, mas não quando a eletrização acontece como na Figura 22.8?

A eletrização por indução ocorre também durante as tempestades com relâmpagos. As partes mais baixas das nuvens, negativamente carregadas, induzem uma carga positiva sobre a superfície da Terra. Benjamim Franklin foi o pri-

meiro a demonstrar isso com seu famoso experimento de empinar uma pipa durante uma tempestade, que provou que o relâmpago é um fenômeno elétrico*. O relâmpago é uma descarga elétrica entre uma nuvem e o solo eletrizado de maneira oposta, ou entre partes eletrizadas contrariamente das nuvens.

Franklin também descobriu que a carga flui facilmente para, ou de, uma ponta metálica afiada, e concebeu o primeiro pára-raios. Se o pára-raios estiver localizado acima de um edifício, e conectado ao solo, sua ponta metálica coloca os elétrons do ar, impedindo a indução de uma grande quantidade de carga positiva sobre o prédio. Esse “vazamento” constante de carga elétrica impede o acúmulo de carga que de outra maneira poderia levar a uma descarga repentina entre a nuvem e o edifício. O principal propósito do pára-raios,

* Benjamim Franklin teve o cuidado de isolar a si mesmo de seu aparelho e de manter-se fora da chuva enquanto realizava seu experimento, de modo que não fosse eletrocutado como outros que tentaram reproduzir o experimento. Além de ser um grande estadista, Franklin foi também um cientista de primeiro time. Ele introduziu os termos *positivo* e *negativo* relacionados com a eletricidade, mas apesar disso sustentou a teoria de um único fluido da carga elétrica, e contribuiu para nossa compreensão dos processos de aterramento e de isolamento. Também publicou um jornal, concebeu a primeira companhia de seguros contra incêndios e inventou uma estufa mais segura e eficiente – um homem realmente empreendedor! Apenas uma tarefa tão importante quanto ajudar a constituir o sistema de governo dos Estados Unidos da América o manteve despendendo mais tempo do que sua atividade favorita – a investigação científica da natureza.

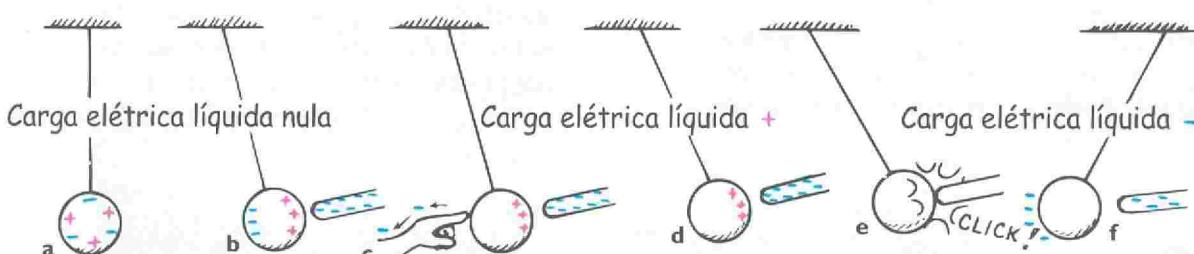


FIGURA 22.8 Estágios da indução de carga por aterramento. (a) A carga líquida na bola metálica é nula. (b) Devido à presença de um bastão carregado, a indução promove uma redistribuição das cargas da bola. Mas a carga líquida da bola ainda é nula. (c) Tocando o lado negativo da bola, remove-se elétrons por contato. (d) Isso deixa a bola positivamente eletrizada. (e) A bola é mais fortemente atraída pelo bastão negativo, e quando o toca ocorre a eletrização por contato. (f) A bola negativamente eletrizada é, agora, repelida pelo bastão, que permanece ainda um pouco eletrizado negativamente.



FIGURA 22.9 A carga negativa na parte inferior da nuvem induz uma carga positiva na superfície do solo abaixo dela.

portanto, é impedir a ocorrência de um grande raio. Se, por qualquer razão, ele não retirar carga em quantidade suficiente, e o raio acabar ocorrendo, ele pode ser atraído para o pára-raios e tomar o caminho direto para o solo, poupando desse modo o edifício. A finalidade geral do pára-raios é prevenir contra um incêndio que seria provocado pelo relâmpago.

Verifique suas respostas

- As cargas devem ser iguais e opostas em ambas as esferas, porque cada carga positiva individual da esfera A resulta de um único elétron que foi retirado de A e transferido para B. Isso é análogo a retirar os blocos que formam a superfície de uma rua de paralelepípedos e pô-los todos na calçada. O número de blocos na calçada será exatamente igual ao número de buracos deixados na rua. Analogamente, o número de elétrons extras de B será exatamente igual ao número de “buracos” (cargas positivas) deixados em A. Lembre-se de que uma carga positiva é o resultado da ausência de elétrons.
- No processo de eletrização da Figura 22.7, não foi feito nenhum contato entre o bastão negativamente carregado e as duas esferas. Na Figura 22.8, entretanto, o bastão tocou a esfera positivamente carregada. A transferência de carga por contato reduziu a carga negativa do bastão.

Polarização da Carga

A eletrização por indução não é um processo restrito aos condutores. Quando um bastão eletrizado é trazido para próximo de um isolante, não existem elétrons livres para migrar através do material isolante. Em vez disso, ocorre um rearranjo das cargas no interior dos próprios átomos e moléculas (Figura 22.11). Embora os átomos não se movam de suas posições relativamente fixas, seus “centros de carga” são deslocados. Um dos lados do átomo ou molécula, pela indução, torna-se mais negativo (positivo) do que o lado oposto. Dizemos que o átomo ou molécula está **eletricamente polarizado**. Se o bastão estiver negativamente eletrizado, digamos, então a parte positiva do átomo ou molécula é puxada em direção ao bastão, e sua parte negativa no sentido oposto. As partes positiva e negativa dos átomos ou moléculas tornam-se alinhadas. Eles estão eletricamente polarizados.

Podemos compreender por que razão pedacinhos eletricamente neutros de papel são atraídos por um objeto eletrizado – um pente que foi passado em seu cabelo, por exemplo. Quando o pente eletrizado é colocado próximo, as moléculas dos pedacinhos de papel são polarizadas. O sinal da carga que está mais próxima do pente é oposto à carga desse. As cargas de mesmo sinal situam-se a uma distância um pouco maior. As mais próximas vencem, e os pedacinhos de papel experimentam uma força resultante atrativa. Às vezes eles se grudam ao pente e, em seguida, são arremessados para longe dele. Essa repulsão ocorre porque, no contato, os pedacinhos de papel adquirem carga com mesmo sinal da que existe no pente.

Esfregue um balão de borracha em seu cabelo: ele se tornará carregado. Coloque o balão encostado numa parede e ele grudará nela. Isso, porque a carga no balão induz uma carga superficial oposta sobre a parede. De novo, as mais próximas vencem, pois a carga do balão está ligeiramente mais próxima das cargas induzidas com sinais opostos do

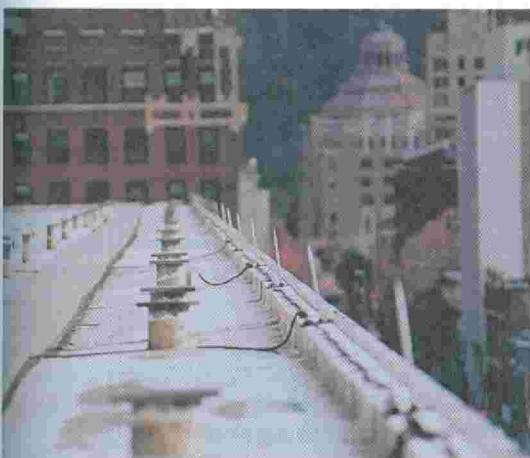


FIGURA 22.10 O pára-raios está conectado ao solo através de um fio condutor resistente, de modo que ele possa conduzir uma grande corrente para o solo, ao ser atingido por um raio. Na maior parte das vezes, a carga acaba escoando lentamente da ponta do pára-raios, impedindo a ocorrência de um raio.

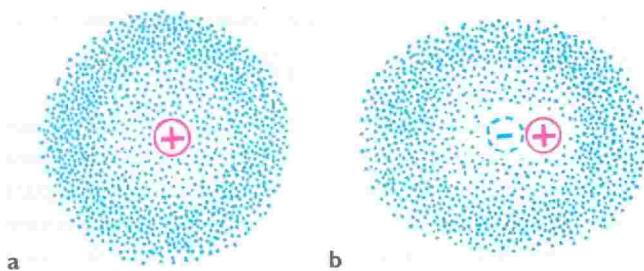


FIGURA 22.11 O enxame de elétrons circundando o núcleo atômico constitui uma nuvem eletrônica. (a) O centro da nuvem negativamente carregada coincide com o centro do núcleo positivo de um átomo. (b) Quando uma carga negativa externa for colocada próxima, à direita na figura, a nuvem eletrônica será distorcida de maneira que os centros das distribuições de carga positiva e negativa não mais coincidirão. O átomo, então, estará eletricamente polarizado.

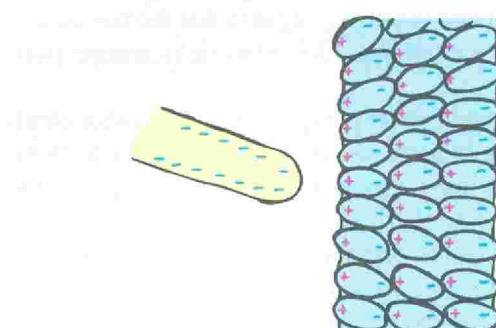


FIGURA 22.12 Todos os átomos ou moléculas próximos à superfície tornam-se eletricamente polarizados. Cargas superficiais de mesmo valor absoluto, mas com sinais opostos, são induzidas sobre superfícies opostas do material.

que das cargas induzidas com o mesmo sinal da do balão (Figura 22.14). Muitas moléculas, de água, por exemplo, são eletricamente polarizadas em estado normal. Sua distribuição de carga elétrica não é perfeitamente simétrica. Existe um pouco mais de carga negativa em um lado da molécula do que no outro (Figura 22.15). Essas moléculas constituem o que se chama de *dipolos elétricos*.

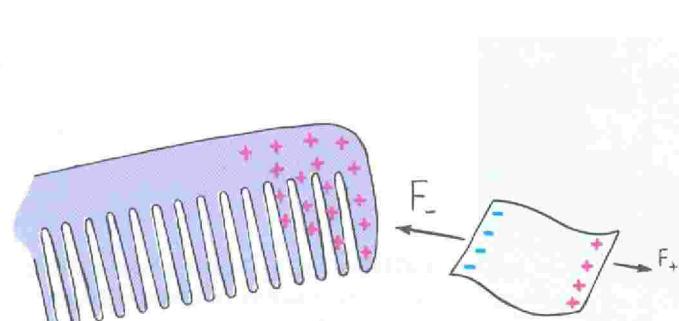


FIGURA 22.13 Um pente eletrizado atrai um pequeno pedaço de papel porque a força atrativa entre as cargas opostas mais próximas supera a força repulsiva entre as cargas de mesmo sinal mais afastadas.

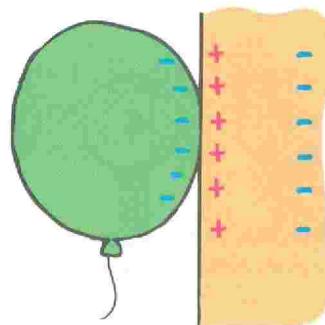


FIGURA 22.14 Um balão de borracha negativamente eletrizado polariza os átomos da madeira da parede, criando uma superfície positivamente eletrizada, de modo que o balão se gruda à parede.

Teste a si mesmo

- Um bastão negativamente eletrizado é trazido para perto de alguns pedacinhos de papel neutros. Os lados positivos das moléculas do papel são atraídos para o bastão, enquanto os lados negativos das moléculas são repelidos. Como as cargas positiva e negativa nos lados opostos são de mesmo valor, por que as forças atrativa e repulsiva não se cancelam?
- Com disposição para o humor, se você esfregar um balão de borracha sobre seu cabelo e depois encostar sua cabeça na parede, ela grudará na parede, como faria o balão?

Verifique suas respostas

- Os lados positivos simplesmente estão mais perto do bastão. De acordo com a lei de Coulomb, portanto, eles experimentam uma força elétrica maior do que os lados negativos mais afastados. Por isso dizemos que os mais próximos vencem. Essa força maior entre as partes positiva e negativa é atrativa, de modo que o pedacinho neutro de papel é atraído para o bastão eletrizado. Você consegue perceber que se o bastão fosse positivo também ocorreria atração?
- Ela grudaria se você tivesse uma cabeça de ar – ou seja, se a massa de sua cabeça fosse aproximadamente igual à do balão, de modo que a força gerada fosse evidente.

Campo Elétrico

As forças elétricas, como as gravitacionais, atuam entre corpos que não estão em contato mútuo. Tanto para a eletricidade como para a gravitação, existe um *campo de força* que influencia corpos eletrizados e massivos, respectivamente. Lembre-se do Capítulo 9: as propriedades do espaço ao re-

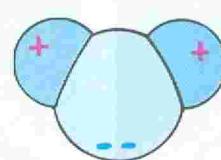


FIGURA 22.15 Uma molécula de água constitui um dipolo elétrico.

dor de qualquer corpo massivo são alteradas, de modo que outro corpo massivo trazido para essa região experimentará uma força. A força é gravitacional, e a alteração ocorrida no espaço ao seu redor é seu *campo gravitacional*. Podemos pensar em qualquer outro corpo massivo como estando em interação com o campo, e não diretamente com o corpo massivo que o produz. Por exemplo, quando uma maçã cai de uma árvore, dizemos que ela interagiu com a Terra, mas também podemos pensar que a maçã está interagindo com o campo gravitacional da Terra. O campo desempenha o papel de um intermediário na força entre os corpos. É comum pensar em foguetes distantes ou coisas semelhantes como estando em interação com campos gravitacionais, ao invés de interagirem diretamente com a Terra ou outros corpos responsáveis pelos campos. Da mesma forma como o espaço ao redor de um planeta ou de outros corpos massivos está preenchido por um campo gravitacional, o espaço ao redor de cada corpo eletricamente carregado está também preenchido por um **campo elétrico** – uma espécie de aura que se estende através do espaço.

Um campo elétrico possui tanto valor (intensidade) como direção e sentido. O valor do campo em qualquer ponto é simplesmente a força por unidade de carga. Se um corpo com carga q experimenta uma força F em um determinado ponto do espaço, então o valor do campo elétrico neste ponto é

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

O vetor campo elétrico vetorial é representado por meio de flechas na parte superior da Figura 22.17. A direção e o sentido do campo são indicados pelos vetores, e são definidos pela direção e pelo sentido em que uma pequena carga

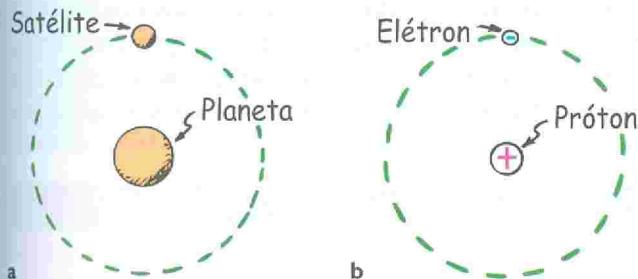


FIGURA 12.16 (a) Uma força gravitacional mantém o satélite em órbita ao redor do planeta, e (b) uma força elétrica mantém o elétron em órbita em torno do próton. Em ambos os casos, não existe contato entre os corpos. Dizemos, então, que os corpos orbitando interagem através dos campos de força do planeta e do próton, e que eles estão sempre em contato com esse campo em todos os pontos do espaço. Assim, a força que um corpo eletricamente carregado exerce sobre outro pode ser descrita em termos de uma interação entre um corpo e o campo gerado pelo outro.

¹ A carga de teste é tão pequena que, de fato, não influencia apreciavelmente o campo que está sendo medido. Lembre-se de que em nosso estudo do calor, para medir a temperatura dos corpos, havia a necessidade semelhante de que o termômetro utilizado fosse de massa muito pequena comparada com as daqueles corpos.

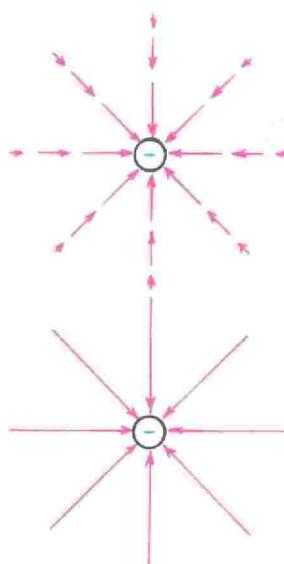


FIGURA 12.17 A representação de um campo elétrico ao redor de uma carga negativa. (acima) Uma representação vetorial. (abaixo) Uma representação em termos de linhas de força.

de teste positiva em repouso seria empurrada*. A direção da força e a do campo, em um ponto qualquer, são as mesmas. Na figura, portanto, vemos que todos os vetores apontam para o centro da bola negativamente carregada. Se ela fosse positiva, os vetores apontariam para fora de seu centro, pois neste caso uma carga de teste positiva localizada nas proximidades deveria ser repelida pela bola.

Uma maneira útil de descrever o campo elétrico é através de linhas de força elétrica (Figura 22.17). As linhas de força mostradas na figura representam um pequeno número das possíveis e infinitamente numerosas linhas que indicam a direção e o sentido do campo. A figura é uma representação bidimensional do que, na realidade, é tridimensional. Onde as linhas estão mais afastadas entre si, o campo é mais fraco. Para uma carga isolada, as linhas se estendem ao infinito; para duas ou mais cargas opostas, representamos as linhas como saindo de uma carga positiva e terminando em uma negativa. Algumas configurações de campos elétricos são mostradas na Figura 22.18, e fotografias dos padrões do campo são vistas na Figura 22.19. As fotografias mostram pedaços de linha de costura, em suspensão num banho de óleo, ao redor de condutores eletrizados. As extremidades dos fios de linha são eletrizadas por indução e tendem a se alinhar com as linhas de campo, como os pedacinhos de limalha de ferro na presença de um campo magnético.

O conceito de campo elétrico ajuda-nos a compreender não apenas as forças entre corpos isolados, estacionários e eletrizados, mas também o que acontece quando as cargas se movimentam. Quando isto ocorre, seus movimentos são transmitidos aos corpos eletrizados vizinhos, na forma de uma perturbação do campo. As perturbações emanam dos corpos eletrizados que estão sendo acelerados, e se propagam com a rapidez da luz. Aprenderemos que o campo elétrico é uma espécie de armazém de estocagem de energia, e que a energia pode ser transportada a grandes distâncias por um campo elétrico. A energia que se propaga com um campo elétrico pode ser direcionada e guiada através de fios me-

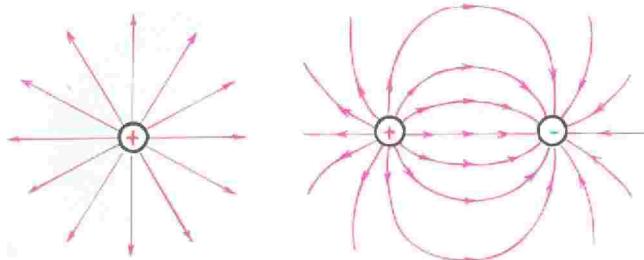


FIGURA 22.18 Algumas configurações de campo elétrico. (a) As linhas de força emanam de uma única partícula carregada positivamente. (b) As linhas de força de um par de partículas carregadas igualmente, mas com sinais opostos de carga. Observe que as linhas saem da partícula positiva e terminam na partícula negativa. (c) Linhas de força não-uniformes nas extremidades opostas de placas paralelas eletrizadas cargas de sinais opostos.

tálicos. Ou pode também estar atrelada a um campo magnético, sendo transportada através do vácuo. Retornaremos a esta idéia no próximo capítulo, e mais adiante quando abordarmos a radiação eletromagnética.

Blindagem Eletrostática

Uma importante diferença entre os campos elétricos e gravitacionais é que os campos elétricos podem ser blindados por diversos materiais, ao passo que os gravitacionais não jamais podem ser blindados. A intensidade da blindagem depende do material usado para isso. Por exemplo, o ar enfraquece um pouco o campo elétrico entre dois objetos eletrizados em relação ao valor que ele teria no vácuo, enquanto que o óleo colocado entre os objetos pode diminuir o valor do campo em aproximadamente um centésimo. Um metal pode blindar completamente um campo elétrico. Quando nenhuma corrente elétrica está fluindo, o campo elétrico no interior do metal é nulo, não importando quanto intenso é o campo elétrico em seu exterior.

Considere, por exemplo, os elétrons sobre uma esfera metálica. Devido à repulsão mútua, os elétrons se espalharão uniformemente sobre a superfície externa da esfera. É fácil perceber que é nula a força total que a esfera exerce sobre uma carga de prova localizada em seu centro, pois as forças opostas se equilibram em todas as direções. Curiosamente, o cancelamento completo das forças ocorre em qualquer lugar

no interior de uma esfera condutora. Compreender isso exige um pouco mais de raciocínio, e envolve a lei do inverso do quadrado da distância e um pouco de geometria. Considere uma carga de prova no ponto P da Figura 22.20. A carga de prova se encontra duas vezes mais distante do lado esquerdo da esfera do que do lado direito. Se as forças elétricas entre a carga de prova e as cargas sobre a esfera dependerem apenas da distância, então a carga de prova seria atraída pelo lado esquerdo com apenas 1/4 do valor da força com a qual ela é atraída pelo lado oposto. (lembre-se da lei do inverso do quadrado da distância: duas vezes mais distante significa apenas 1/4 do efeito, três vezes mais distante significa apenas 1/9, e assim por diante.) Mas a força também depende da quantidade de carga. Na figura, os cones que se estendem do ponto P até as áreas A e B têm o mesmo ângulo do vértice, mas um tem o dobro da altura do outro. Isso significa que a área A da base do cone mais alto é quatro vezes maior do que a área B da base do cone mais curto, o que é verdadeiro para qualquer valor do ângulo do vértice. Desde que 1/4 de 4 é igual a 1, a carga de prova em P é atraída identicamente por cada lado e ocorre o cancelamento perfeito. O mesmo argumento se aplica a qualquer par de cones opostos com vértice em P orientados em qualquer direção. Então o cancelamento completo ocorre em todos os pontos no interior da esfera. (Invoque este argumento novamente no Capítulo 8, para demonstrar o cancelamento da gravidade no interior de um planeta oco. A esfera metálica comporta-se da mesma maneira,

Fornos de Microondas

Imagine um cercado com bolas de ping-pong e alguns bastões, todos em repouso. Agora imagine que os bastões subitamente começem a girar para um lado e para o outro, como hélices semigiratórias, golpeando com isso as bolas de ping-pong adjacentes. Um forno de microondas funciona de maneira semelhante. Os bastões são as moléculas de água ou outras moléculas polares, obrigadas a girar de um lado para o outro, em ritmo com as microondas enclausuradas no interior do forno. As bolas de ping-pong são as moléculas não-polares que constituem a maior parte da massa dos alimentos em cozimento.

Cada molécula de água é um dipolo elétrico que tende a se alinhar com o campo elétrico, da mesma forma que a agulha de uma bússola tende a se alinhar com um campo magnético. Quando o campo elétrico começa a oscilar, as moléculas de água tam-

bém fazem o mesmo. E quando a freqüência de oscilação do campo se iguala a sua própria freqüência natural, as moléculas de água passam a se movimentar muito energicamente – em ressonância. A comida é cozida por uma espécie de “atrito cinético”, quando o movimento semigiratório das moléculas de água (ou de outras moléculas polares) comunicam a agitação térmica às moléculas circundantes. As paredes metálicas do forno refletem as microondas para cá e para lá, cozinhando rapidamente os alimentos.

Papel seco, pedaços de placas de isopor ou outros materiais recomendados para uso em fornos de microondas não contêm água ou outras moléculas polares, de modo que as microondas os atravessam sem efeito algum. O mesmo acontece com o gelo, onde as moléculas de água estão em posições fixas e não podem oscilar de um lado para o outro.

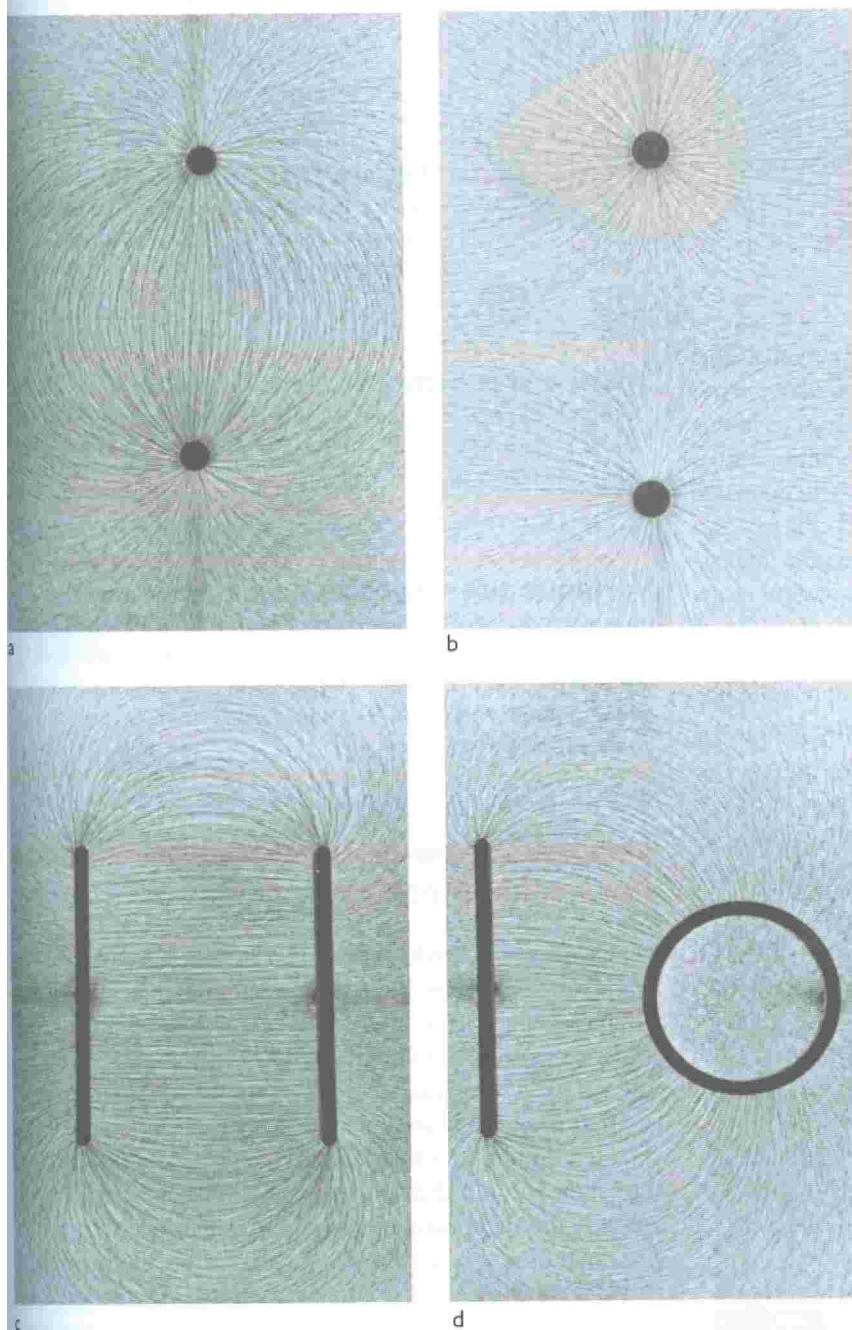


FIGURA 22.19 O campo elétrico gerado por um par de condutores eletrizados é mostrado através de pedacinhos de linha de costura, em suspensão no óleo que circunda os condutores. Observe que os fios de linha se alinham com a direção do campo. (a) Condutores eletrizados com cargas iguais e de sinais opostos (como na Figura 22.18b). (b) Condutores eletrizados identicamente. (c) Placas eletrizadas com cargas opostas. (d) Um cilindro e uma placa eletrizados com cargas opostas.

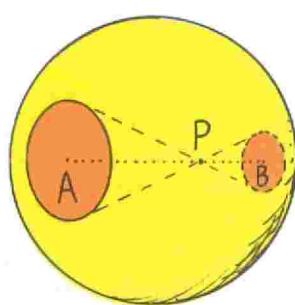


FIGURA 22.20 A carga de teste em P é igualmente atraída pela carga maior na região mais afastada A e pela carga menor na área mais próxima B. A força resultante sobre a carga de prova é nula — ali ou em qualquer lugar no interior do condutor. O mesmo acontece com o campo elétrico em qualquer ponto interior.

seja ela oca ou não, porque toda sua carga acumula-se em sua superfície externa.)

Se o condutor não for esférico, então a distribuição de carga não será uniforme. As distribuições de carga sobre condutores com diferentes formas são mostradas na Figura 22.21. A maior parte da carga superficial do cubo, por exemplo, é mutuamente repelida para os vértices. A coisa mais notável é: a exata distribuição de carga sobre a superfície de qualquer condutor é tal que o campo elétrico é nulo em qualquer ponto no interior do condutor. Veja isso de outra maneira: se existisse um campo elétrico dentro do condutor, então os elétrons livres no interior dele estariam em movimento. Quão longe eles conseguiram se mover? Até que o equilíbrio se estabelecesse — o que significa dizer: quando as posições ocupadas pelos elétrons livres produzissem um campo elétrico nulo dentro do condutor.

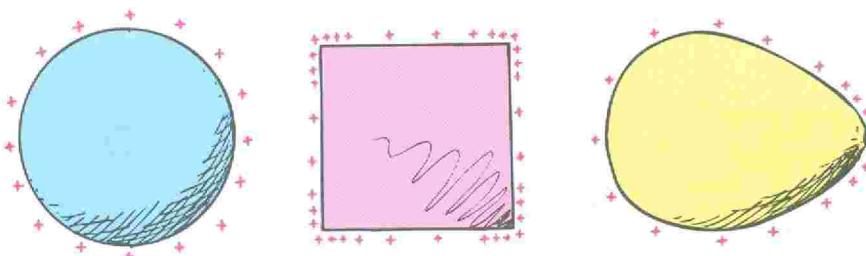


FIGURA 22.21 A carga elétrica se distribui por si mesma sobre a superfície de todos os objetos condutores, de tal maneira que o campo elétrico seja nulo dentro do objeto.

Não podemos blindar a nós mesmos da gravidade, porque a gravidade é sempre atrativa. Não existem partes repelindo-se gravitacionalmente de modo a compensar as partes que se atraem. Para blindar campos elétricos, entretanto, é muito simples. Envolva a si mesmo, ou o que seja que você deseja blindar, por uma superfície condutora. Ponha essa superfície na presença de um campo elétrico com uma intensidade qualquer. As cargas livres existentes no condutor se arranjarão na superfície do mesmo de maneira tal que todas as contribuições para o campo elétrico no interior do condutor se anulem quando combinadas. Eis porque determinados componentes eletrônicos possuem uma cobertura metálica – para blindá-los da atividade elétrica externa.

Teste a si mesmo Pedacinhos de linha mostram claramente os campos elétricos nas quatro fotos da Figura 22.19. Mas os pedacinhos de linha não estão alinhados no interior do cilindro da Figura 22.19d. Por quê?

Verifique sua resposta O campo elétrico está blindado no interior do cilindro, mostrado como um círculo na fotografia bidimensional. Portanto, os pedaços de linha estão sem um alinhamento comum. O campo elétrico é nulo no interior de qualquer condutor – desde que nenhuma carga elétrica esteja fluindo nele.

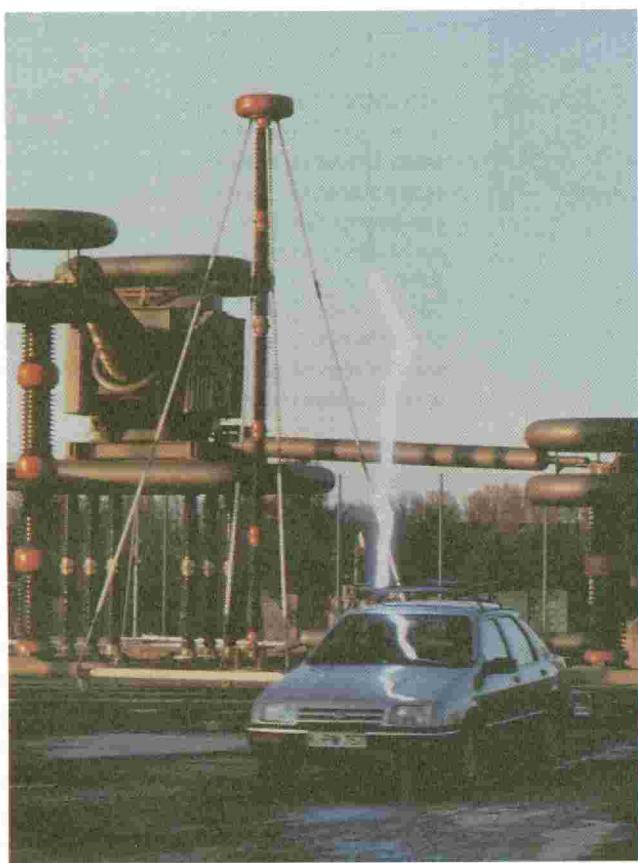


FIGURA 22.22 Os elétrons trazidos pela descarga elétrica, repelindo-se mutuamente, se dirigem para a superfície externa do metal. Embora o campo elétrico estabelecido possa ser muito intenso *fora* do carro, no *interior* do mesmo o campo é nulo.

Potencial Elétrico

No Capítulo 7, quando estudamos energia, aprendemos que um objeto possui energia potencial gravitacional em virtude de sua localização no interior do campo gravitacional. Analogamente, um objeto eletrizado possui uma energia potencial em virtude de sua localização no interior de um campo elétrico. Da mesma forma como é necessário realizar trabalho para erguer um objeto massivo contra o campo gravitacional da Terra, trabalho também é necessário para empurrar uma partícula carregada contra o campo elétrico gerado por um outro corpo eletrizado. Esse trabalho altera a energia potencial elétrica da partícula carregada*. Considere uma partícula com carga elétrica positiva localizada a uma certa distância de uma esfera positivamente eletrizada, como na Figura 22.24. Se você empurrar a partícula para mais próximo da esfera, você gastará energia para vencer a repulsão elétrica existente; ou seja, você realizará trabalho ao empurrar a partícula eletrizada contra o campo elétrico gerado pela esfera. Esse trabalho aumenta a energia da partícula. Chamamos de **energia potencial elétrica** a energia que a partícula possui em virtude de sua localização. Se a partícula for solta, ela acelera, se afastando da esfera, enquanto sua energia potencial elétrica vai sendo convertida em energia cinética.

Se, por outro lado, nós empurrarmos uma partícula com duas vezes mais carga elétrica, realizaremos duas vezes

* Esse trabalho é considerado positivo se ele aumenta a energia potencial elétrica da partícula, e negativo se a diminui.

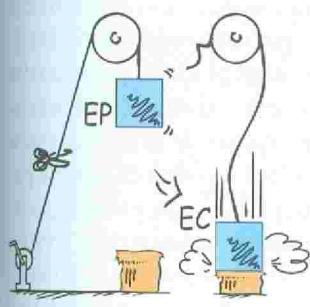


FIGURA 22.23 (a) A EP (energia potencial gravitacional) de uma massa segura em um campo gravitacional, quando a massa é solta, converte-se em EC (energia cinética). (b) A EP de uma partícula eletrizada suspensa em um campo elétrico, quando a carga é solta, converte-se em EC. Como a EC adquirida se compara com a diminuição em EP?

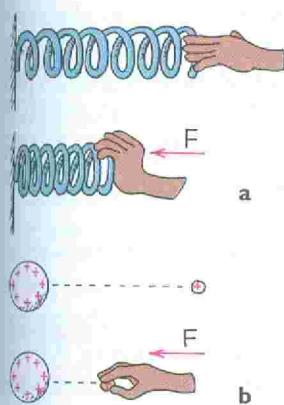


FIGURA 22.24 (a) Uma mola tem mais EP mecânica quando se encontra comprimida. (b) Analogamente, uma partícula carregada tem mais EP elétrica quando localizada mais próxima de uma esfera eletrizada. Em ambos os casos, o aumento de EP é o resultado do trabalho realizado sobre a partícula.

mais trabalho sobre ela, de modo que uma partícula cuja carga foi dobrada, estando na mesma posição espacial, terá duas vezes mais energia potencial elétrica do que originalmente. Uma partícula com carga triplicada terá energia potencial elétrica triplicada; dez vezes mais carga, dez vezes mais energia potencial; e assim por diante. Em vez de tratar com a energia potencial de um corpo eletrizado, ao tratar-se de partículas carregadas em um campo elétrico é mais conveniente considerar a energia potencial elétrica por *unidade de carga*. Simplesmente dividimos o valor da energia potencial, em qualquer caso, pela quantidade de carga. Por exemplo, uma partícula com dez vezes mais carga do que outra terá dez vezes mais energia potencial – mas ter dez vezes mais carga significa ter a mesma energia potencial por unidade de carga. O conceito de energia potencial por unidade de carga é denominado **potencial elétrico**; ou seja,

$$\text{Potencial elétrico} = \frac{\text{Energia potencial elétrica}}{\text{carga}}$$

A unidade empregada para medir o potencial elétrico é o volt, de modo que o potencial elétrico freqüentemente é chamado de *voltagem*. Um potencial de 1 volt (V) é igual a 1 joule (J) de energia por 1 coulomb (C) de carga.

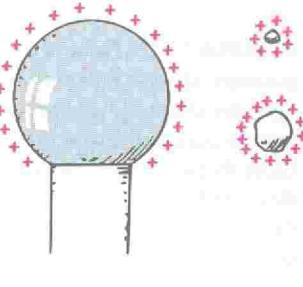


FIGURA 22.25 Dos dois corpos carregados próximos à cúpula eletrizada, o que possui mais carga tem maior EP na presença do campo gerado pela cúpula. Mas o potencial elétrico de ambos é o mesmo – da mesma forma que para qualquer quantidade de carga localizada na mesma posição. Por quê?

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

Portanto, uma bateria de 1,5 volts fornece 1,5 joules de energia a cada 1 coulomb de carga que a atravessa. Os dois termos, *potencial elétrico* e *voltagem*, são populares, de modo que ambos podem ser empregados. Neste livro, ambos serão usados indistintamente.

O significado do potencial elétrico (voltagem) é que um valor bem definido dele pode ser assinalado a cada localização espacial. Podemos falar no potencial elétrico em diversos pontos no interior de um campo elétrico, estejam cargas presentes ou não ocupando tais posições (desde que um ponto de voltagem nula seja especificado). Analogamente com as voltagens em várias localizações de um circuito elétrico. No próximo capítulo você verá que um ponto do terminal positivo de uma bateria de 12 volts é mantido a uma voltagem 12 volts mais elevada do que um ponto do terminal negativo dessa bateria. Quando um meio condutor conectar esses terminais mantidos a voltagens diferentes, as cargas existentes no meio se movimentarão entre eles.

Teste a si mesmo

- Se possuisse duas vezes mais carga, a carga de prova próxima à esfera carregada da Figura 22.24 teria uma mesma energia potencial elétrica, com respeito à esfera carregada, ou uma energia duas vezes maior? O potencial elétrico da carga de prova seria o mesmo ou seria o dobro?
- O que significa dizer que seu carro tem uma bateria de 12 volts?

Esfregue um balão de borracha em seu cabelo e ele se tornará negativamente carregado – talvez a milhares de volts! Isto corresponderia a vários milhares de joules de energia se a carga fosse 1 coulomb. Entretanto, 1 coulomb é uma quantidade muito grande de carga. A carga adquirida por um balão de borracha é tipicamente muito menor do que um milionésimo de coulomb. Portanto, a quantidade de energia associada com o balão carregado é muito, muito pequena. Uma alta voltagem significa um monte de energia apenas se um monte de carga está envolvida. Há uma diferença importante entre energia potencial elétrica e potencial elétrico.



FIGURA 22.26 Embora o potencial elétrico (voltagem) do balão eletrizado seja alto, a energia potencial é baixa por causa da pequena quantidade de carga. Portanto muito pouca energia é transferida quando o balão é descarregado.

Verifique suas respostas

1. Duas vezes mais carga significaria duas vezes mais energia potencial elétrica. (Isso porque seria necessário realizar o dobro de trabalho para por a carga naquela posição.) Mas o potencial elétrico seria o mesmo, pois ele é igual à energia potencial total dividida pela carga total. Por exemplo, dez vezes mais energia dividida por dez vezes mais carga resultará no mesmo valor que duas vezes mais energia dividida por duas vezes mais carga. O potencial elétrico não é a mesma coisa que a energia potencial elétrica. Esteja certo de ter compreendido isso, antes de seguir adiante em seu estudo.
2. Significa que o potencial em um dos terminais da bateria está 12 V acima do potencial no outro. No próximo capítulo você verá que isso também significa que, quando um circuito é conectado entre esses dois terminais, será fornecido 12 J a cada coulomb de carga da corrente que atravessar a bateria.

Energia Elétrica Armazenada

A energia elétrica pode ser armazenada em um dispositivo comum chamado de **capacitor**, encontrado em circuitos eletrônicos. Os capacitores são usados como um depósito de energia. São eles que armazenam a energia para disparar os *flashes* fotográficos. A rápida liberação de energia é evidente na curta duração de um *flash* desse tipo. Analogamente, mas em uma escala maior, enormes quantidades de energia são armazenadas nos bancos de capacitores que alimentam os *lasers* gigantescos nos laboratórios nacionais.

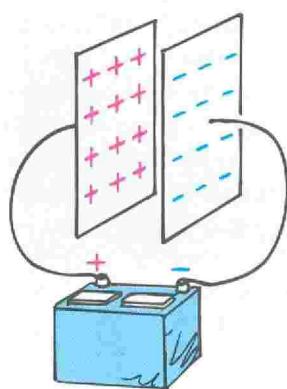


FIGURA 22.27 Um capacitor consiste em duas placas metálicas paralelas, com uma pequena separação entre elas. Quando conectado a uma bateria, as placas adquirem cargas opostas de mesmo valor. A voltagem entre as placas, então, se iguala à diferença de potencial elétrico entre os terminais da bateria.

O mais simples dos capacitores consiste em duas placas condutoras paralelas, separadas por uma pequena distância, de modo a não se tocarem. Quando as placas são conectadas a um aparelho carregador, tal como a bateria mostrada na Figura 22.29, elétrons são transferidos de uma placa para outra. Isso ocorre quando o terminal positivo da bateria puxa elétrons da placa conectada a ele. Esses elétrons, com efeito, estão sendo bombeados através da bateria e levados para o terminal negativo através da outra placa. As placas do capacitor acabam adquirindo cargas de mesmo valor, mas de sinais opostos – a placa positiva conectada ao terminal positivo, e a negativa ao terminal negativo. O processo de carregamento está completo quando a diferença de potencial entre as placas se iguala à diferença de potencial entre os terminais da bateria – a voltagem da bateria. Quanto maior for a voltagem da bateria, e quanto maior forem as proximidades entre as placas, maior a quantidade de carga que pode ser armazenada. Na prática, essas placas podem ser folhas metálicas finas separadas por uma folha fina de papel. Este “sanduíche de papel” é, então, enrolado para economizar espaço, e inserido em um cilindro. Esse capacitor real é mostrado, junto com outros, na Figura 22.28. (No próximo capítulo, abordaremos o papel desempenhado pelos capacitores nos circuitos.)

Um capacitor carregado pode ser descarregado se for estabelecido um caminho condutor ligando as duas placas. Uma descarga dessas pode ser uma experiência chocante se acontecer de você fazer parte do caminho condutor. A transferência de energia que ocorre pode ser fatal quando altas voltagens estão envolvidas, tais como nas fontes de alimentação de uma TV – mesmo após o aparelho ser desligado. Essa é a principal razão para os avisos de perigo colocados nesses aparelhos.

Teste a si mesmo Qual é a carga líquida de um capacitor carregado?

A energia armazenada em um capacitor provém do trabalho realizado para carregá-lo. A energia está armazenada no campo elétrico que se cria entre suas placas. Entre placas paralelas, o campo elétrico é uniforme, como indicado nas Figuras 22.18c e 22.19c. Portanto, a energia armazenada em um capacitor é a energia de seu campo elétrico. No Capítulo 25 veremos como a energia solar é irradiada na forma de campos elétricos e magnéticos. O fato de que a energia está contida em campos elétricos é realmente algo de grande alcance.



FIGURA 22.28 Capacitores reais.

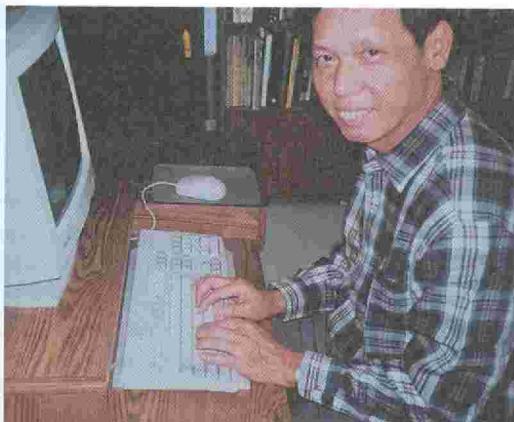


FIGURA 22.29 Cada tecla do teclado é parte de um capacitor. Quando pressionada, as placas desse capacitor são aproximadas, aumentando a capacidade e enviando um sinal para o computador.

Verifique sua resposta A carga líquida de um capacitor carregado é zero, porque as cargas nas duas placas são de mesmo valor, mas de sinais opostos. Mesmo quando o capacitor está descarregado, depois de se providenciar um caminho condutor entre as duas placas carregadas, a carga líquida dele permanece nula — pois cada placa tem carga nula.

Gerador Van de Graaff

Um aparelho comum de laboratório para obter altas voltagens é o *gerador Van de Graaff*. Essa é uma das máquinas de produzir raios usadas pelos cientistas malucos nos antigos filmes de ficção científica. Um modelo básico do gera-

dor Van de Graaff é mostrado na Figura 22.30. Uma grande esfera metálica oca é sustentada por um cilindro isolante. Uma esteira de borracha movimentada por um motor, localizada no interior de um suporte cilíndrico, passa friccionando-se num conjunto de farpas de metal, como se formassem um pente, que é mantido a um grande potencial negativo com respeito ao solo. Através das descargas que ocorrem nessas pontas metálicas, um suprimento contínuo de elétrons se deposita sobre a esteira, que circula pelo interior da cúpula oca condutora. Uma vez que o campo elétrico no interior de um condutor é nulo, as cargas sobre a esteira acabam escapando por outro conjunto de farpas metálicas (minúsculos pára-raios) e depositam-se no interior da cúpula. Os elétrons, então, se repelem mutuamente, dirigindo-se para a superfície exterior da cúpula condutora. A carga estática sempre fica por fora da superfície externa de qualquer condutor. Isso mantém o interior descarregado e capaz de receber mais elétrons trazidos pela esteira. O processo é contínuo e a carga na cúpula aumenta até que o potencial negativo da cúpula seja muito maior do que na fonte de voltagem na parte inferior do aparelho — da ordem de milhões de volts.

Uma esfera com um raio de 1 metro pode ser levada a um potencial de 3 milhões de volts antes que ocorra uma descarga elétrica através do ar. A voltagem pode ser elevada ainda mais, aumentando-se o raio da cúpula ou colocando o aparelho todo dentro de um recinto preenchido com gás a uma alta pressão. Geradores Van de Graaff podem produzir voltagens tão altas quanto 20 milhões de volts. Essas voltagens aceleram partículas carregadas que são usadas como projéteis para penetrar nos núcleos atômicos. Tocar um desses geradores pode ser uma experiência de arrepiar os cabelos.

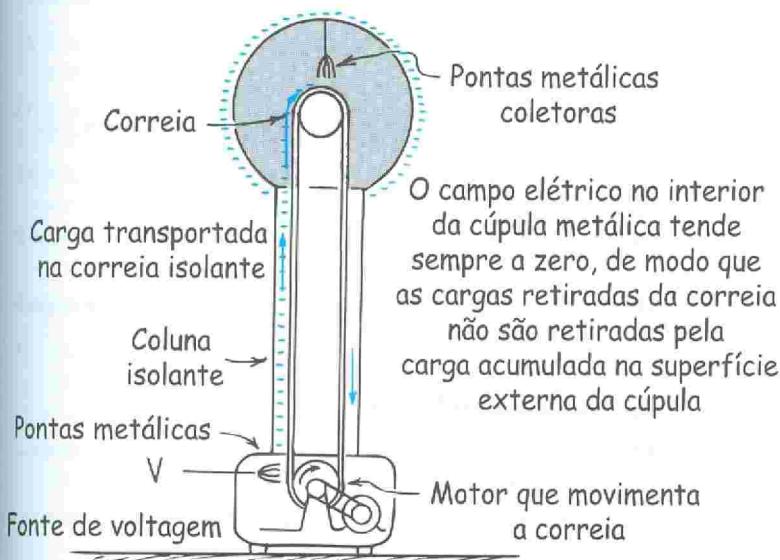


FIGURA 22.30 Um modelo básico de um gerador Van de Graaff.

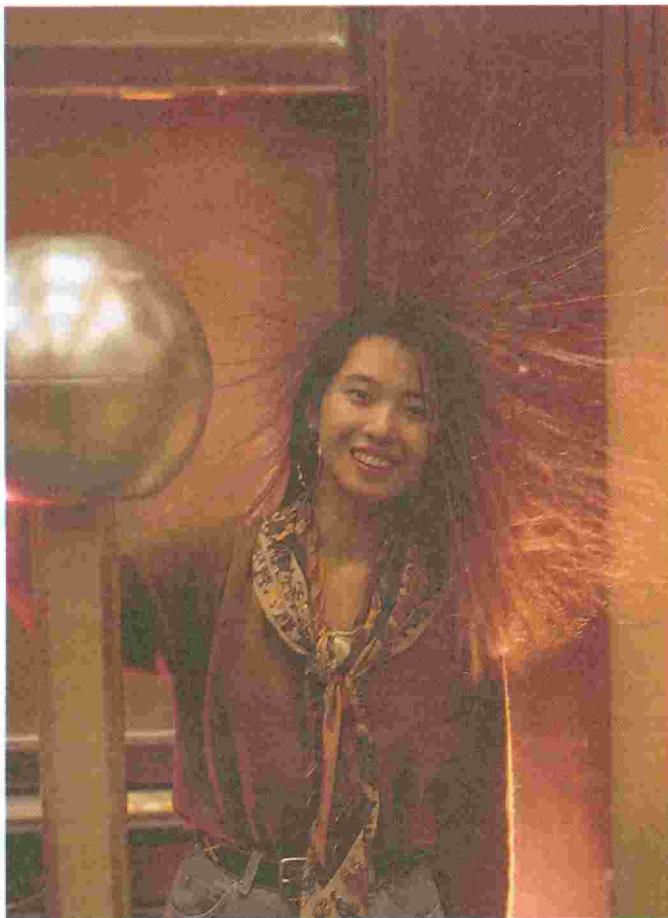


FIGURA 22.31 Tanto a entusiasta da física como a cúpula esférica do gerador Van de Graaff estão eletrizados a uma voltagem muito alta. Por que o cabelo da moça fica arrepiado?

Sumário de Termos

Eletricidade Termo genérico para os fenômenos elétricos, tal como gravidade para os fenômenos gravitacionais, ou sociologia para os fenômenos sociais.

Eletrostática O estudo das cargas elétricas em repouso (não *em movimento*, como em correntes elétricas).

Conservação da carga A carga elétrica não é criada nem destruída. A carga total anterior a uma interação é igual à carga total posterior a ela.

Lei de Coulomb A relação entre a força elétrica, a carga e a distância:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{d^2}$$

Se as cargas são de mesmo sinal, a força é repulsiva; se de sinais opostos, a força é atrativa.

Coulomb A unidade do SI para carga elétrica. Um coulomb (símbolo C) é igual à carga total de $6,25 \times 10^{18}$ elétrons.

Condutor Qualquer material que disponha de partículas carregadas que possam fluir facilmente através do material, quando uma força elétrica estiver atuando sobre elas.

Isolante Um material que não dispõe de partículas carregadas livres, através do qual uma corrente elétrica não pode fluir facilmente.

Eleticamente polarizado Termo aplicado a um átomo ou molécula em que as cargas estão alinhadas, de modo que um dos lados tem um pequeno excesso de carga positiva, enquanto o oposto tem um pequeno excesso de carga negativa.

Campo elétrico Definido como força por unidade de carga, pode ser considerado como uma espécie de “aura” circundando objetos eletrizados, e um “armazém” de energia elétrica. O campo elétrico diminui de acordo com a lei do inverso do quadrado da distância, como o campo gravitacional. Entre placas paralelas carregadas contrariamente, o campo elétrico é uniforme.

Energia potencial elétrica A energia que um objeto eletrizado possui em virtude de sua localização em um campo elétrico.

Potencial elétrico A energia potencial elétrica por unidade de carga medida em volts, e freqüentemente chamada de *voltagem*:

$$\text{Voltagem} = \text{energia potencial elétrica} / \text{quantidade de carga na placa}$$

Capacitor Um dispositivo elétrico, em sua forma mais simples: um par de placas paralelas separadas por uma pequena distância, capaz de armazenar carga e energia elétricas.

Questões de Revisão

Forças Elétricas

- Em termos de atração e repulsão, como as partículas negativas afetam outras partículas negativas? Como as negativas afetam as positivas?
- Por que a força gravitacional entre a Terra e a Lua predomina sobre as forças elétricas?

Cargas Elétricas

- Que parte do átomo é *positivamente* carregada, e que parte é *negativamente* carregada?
- Como a carga de um elétron se compara à de outro elétron?
- Como o número de prótons em um núcleo atômico normalmente se compara com o número de elétrons que orbitam o núcleo?

Conservação da Carga

- O que é um íon positivo? E um íon negativo?
- O que significa dizer que a carga é *conservada*?
- O que significa dizer que a carga é *quantizada*?
- Que partícula tem exatamente uma unidade quântica de carga?

Lei de Coulomb

- Como um coulomb de carga se compara com a carga de um elétron?
- Em quê a lei de Coulomb é semelhante à lei de Newton da gravitação? Em quê elas são diferentes?

Condutores e Isolantes

- Por que os metais são bons condutores tanto de calor como de electricidade?
- Por que materiais tais como o vidro e a borracha são bons isolantes?

Semicondutores

14. Em que um semicondutor difere de um condutor ou de um isolante?
15. De que é composto um transistor, e quais são suas funções?

Supercondutores

16. Qual é a resistência elétrica de um supercondutor ao fluxo de carga elétrica?

Eletrização

17. O que acontece aos elétrons em qualquer processo de eletrização?

Eletrização por Atrito e por Contato

18. Dê um exemplo de algo que seja eletrizado por atrito.
19. Dê um exemplo de algo eletrizado por um simples contato.

Eletrização por Indução

20. Dê um exemplo de algo eletrizado por indução.
21. O que acontece quando “aterramos” um objeto?
22. Qual é o propósito do pára-raios?

Polarização da Carga

23. Em que um objeto eletricamente polarizado difere de um objeto eletricamente carregado?
24. Um pedaço de papel torna-se eletricamente polarizado na presença, digamos, de uma carga positiva. O lado negativo do papel é atraído pela carga negativa, enquanto o lado positivo é repelido pela mesma carga. Então por que essas forças não se cancelam?

Campo Elétrico

25. Dê dois exemplos de campos de força comuns.
26. Como é definido o módulo de um campo elétrico?
27. Como são definidos a direção e o sentido de um campo elétrico?

Bindagem Eletrostática

28. Por que não existe campo elétrico no meio de um condutor esférico eletrizado?
29. Existe um campo elétrico no interior de um condutor esférico carregado em outros pontos que não seu centro?
30. Quando as cargas se repelem e se distribuem sobre a superfície de um condutor qualquer, qual é o efeito causado no interior do condutor?

Potencial Elétrico

31. Quanta energia é dada a cada coulomb de carga que flui através de uma bateria de 1,5 volts?
32. Um balão pode ser facilmente eletrizado a milhares de volts. Isso significa que ele dispõe de vários milhares de joules de energia? Explique.

Energia Elétrica Armazenada

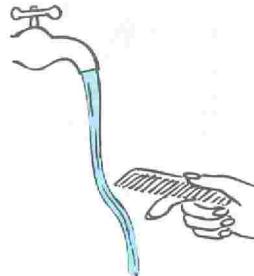
33. Como a carga em uma das placas de um capacitor se compara com a que existe na outra placa?
34. Onde está a energia armazenada em um capacitor?

Gerador Van de Graaff

35. Qual é o módulo do campo elétrico no interior da cúpula de um gerador Van der Graaff?
36. Por que os cabelos da entusiasta por eletricidade estão arrepiados na Figura 22.31?

Projetos

1. Demonstre a eletrização por atrito e a descarga através de pontas com um colega que está de pé na extremidade, oposta à sua, de uma sala cujo piso é recoberto por um tapete. Vá arrastando os pés no tapete enquanto caminha em direção ao seu colega, até que seus narizes estejam bem próximos. Isso pode ser uma experiência divertida, dependendo de quanto seco está o ar e de quanto pontudos são seus narizes.

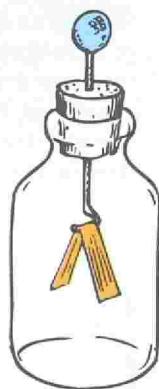


2. Esfregue vigorosamente um pente em seu cabelo ou numa peça de roupa de lã, e depois o coloque próximo à corrente de água que sai constantemente de uma torneira. A corrente de água será desviada?

Exercícios

1. Nós realmente não sentimos as forças gravitacionais entre nós mesmos e os objetos que nos rodeiam porque essas forças são extremamente pequenas. As forças elétricas, em comparação, são enormes. Uma vez que nós e os objetos que nos cercam são compostos por partículas carregadas, por que normalmente não sentimos as forças elétricas?
2. Com respeito a forças, em que a carga e a massa se parecem? Em que elas diferem?
3. Por que as roupas freqüentemente se grudam após terem sido reviradas no interior de uma secadora de roupas?
4. Quando você retira um casaco de lã do compartimento de roupas de uma secadora de roupas, o compartimento torna-se positivamente carregado. Explique como isso ocorre.
5. Enquanto está penteando o cabelo, você está arrancando elétrons dele e transferindo-os para o pente. Seu cabelo, então, ficará positivamente ou negativamente carregado? E quanto ao pente?

6. Em alguns pedágios rodoviários existe um fino arame metálico fixado verticalmente no piso da rodovia, que entra em contato com os carros antes que eles alcancem a guarita do funcionário do pedágio. Qual é a finalidade do arame?
7. Por que os pneus dos caminhões que transportam gasolina e outros fluidos inflamáveis são fabricados de modo que sejam bons condutores elétricos?
8. Um eletroscópio é um dispositivo básico, uma esfera metálica ligada por um condutor a duas folhas metálicas delgadas, protegidas das perturbações causadas pelo ar por um recipiente de vidro fechado, como mostra a figura. Quando a esfera é tocada por um corpo eletrizado, as folhas, que normalmente pendem juntas na vertical, se afastam uma da outra. Por quê? (Os eletroscópios são úteis não apenas como detetores de carga, mas também para medir a quantidade de carga: quanto mais carga é transferida para a esfera, mais as folhas se afastam.)



9. As folhas metálicas de um eletroscópio acabam se fechando com o decorrer do tempo. Em grandes altitudes, elas se fecham mais rápido. Por que isso acontece? (Dica: a existência de raios cósmicos foi revelada pela primeira vez por esse tipo de observação.)
10. É necessário que um corpo eletrizado realmente toque na esfera de um eletroscópio para que suas folhas metálicas se afastem? Justifique sua resposta.
11. Estritamente falando, quando um objeto adquire uma carga positiva por transferência de elétrons, o que acontece a sua massa? E quando ele adquire uma carga negativa? Pense microscopicamente!
12. Estritamente falando, uma pequena moeda ficará com mais massa ao adquirir uma carga negativa ou uma positiva? Explique.
13. Em um cristal de sal de cozinha existem elétrons e íons positivos. Como a carga total dos elétrons se compara à carga total dos íons? Explique.
14. Como você pode eletrizar negativamente um determinado objeto com ajuda apenas de um objeto carregado positivamente?
15. É relativamente fácil retirar elétrons mais externos de átomos pesados, como os do urânio (com o quê eles se tornam, então, íons de urânio), mas não seus elétrons mais internos. Por que você supõe que isso seja assim?
16. Quando um material é friccionado em outro, os elétrons passam facilmente de um material para o outro, mas os prótons não. Por quê? (Pense em termos atômicos.)
17. Se os elétrons fossem positivos e os prótons negativos, a lei de Coulomb seria escrita da mesma maneira ou diferentemente?
18. Os cinco milhares de bilhões de bilhões de elétrons livres que se movem em uma pequena moeda se repelem mutuamente. Por que, então, eles não saem voando para longe da moeda?

19. Como a intensidade da força elétrica entre um par de objetos eletrizados se altera quando os objetos são deslocados de modo a ficarem duas vezes mais afastados? E três vezes mais afastados?
20. Como a intensidade da força elétrica entre um par de partículas carregadas varia quando a distância entre elas diminuir para a metade de seu valor original? E para um quarto de seu valor inicial? E se a distância aumentar para quatro vezes o valor original? (Que lei orienta suas respostas?)
21. Duas bolinhas eletrizadas são afastadas de modo que a distância original entre si dobre de valor. (a) Qual provavelmente será mais intensa, a força gravitacional ou a força elétrica entre elas? (b) O que variará por um fator maior quando elas forem afastadas, a força gravitacional ou a força elétrica entre elas?
22. Duas cargas iguais exercem forças mútuas iguais. Agora considere que uma delas tenha o dobro do valor da carga da outra. Como se comparam as forças que uma exerce na outra?
23. A constante de proporcionalidade k na lei de Coulomb tem um valor enorme quando usamos unidades comuns, enquanto que a constante de proporcionalidade G na lei de Newton da gravitação é muito pequena, nessas mesmas unidades. O que isso indica acerca das intensidades relativas dessas duas forças?
24. Suponha que a intensidade do campo elétrico em torno de uma carga pontual isolada tem um determinado valor a uma distância de 1 m. Como a intensidade do campo elétrico a uma distância de 2 m dessa carga se compara com o valor anterior? Que lei orienta sua resposta?
25. Medições mostram que existe um campo elétrico circundando a Terra. Sua intensidade é de cerca de 100 N/C na superfície da Terra e ele aponta para dentro, em direção ao centro do planeta. A partir dessa informação, você pode estabelecer se a Terra está carregada positivamente ou negativamente?
26. Por que não é uma boa idéia usar sapatos de jogar golfe, dotados de cravos de metal no solado, em um dia tempestuoso?
27. Se você é apanhado a céu aberto por uma tempestade com relâmpagos, por que não deve se abrigar debaixo de uma árvore? Você consegue pensar numa razão para que não deva se ficar em pé com as pernas abertas? Ou, por que é perigoso deitar-se no solo? (Dica: considere a diferença de potencial elétrico.)
28. Se um campo elétrico bastante intenso for aplicado, mesmo um isolante acabará deixando passar corrente, como é evidente nos raios ou descargas elétricas através do ar. Explique como isso acontece, levando em conta as cargas opostas de um átomo e como ocorre a ionização.
29. Por que um bom condutor de eletricidade é também um bom condutor de calor?
30. Se você esfregar em seu cabelo um balão de borracha inflado e encostá-lo depois numa porta, por qual mecanismo ele se grudará a ela? Explique.
31. Como pode um átomo carregado (um íon) atrair um átomo neutro?
32. Enquanto um chassi de carro é conduzido através de uma câmara de pintura, uma névoa de tinta é borrifada ao redor do mesmo. Quando uma rápida descarga elétrica é dada no chassi, a névoa é atraída para ele e pronto, o carro fica rapidamente pintado de maneira uniforme. O que o fenômeno da polarização tem a ver com isso?
33. Se você colocar um elétron livre e um próton livre no mesmo campo elétrico, como se compararão as forças que agem sobre eles? Como se compararão as suas acelerações? E as direções e sentidos de seus movimentos?

34. Imagine um próton em repouso a uma determinada distância de uma placa negativamente carregada. Ele é solto e colide com a placa. Agora imagine o caso análogo de um elétron em repouso, à mesma distância de uma placa com carga de mesmo valor, mas com sinal contrário. Em qual dos casos a partícula estará se movendo mais rapidamente no momento da colisão? Por quê?
35. Um vetor campo gravitacional aponta para o interior da Terra e um vetor campo elétrico aponta para um elétron. Por que um vetor campo elétrico aponta para fora de um próton?
36. De que maneira específica os pedacinhos de linha de costura alinharam-se com os campos elétricos mostrados na Figura 22.19?
37. Suponha que um fichário metálico de escritório esteja eletrizado. Como a concentração de carga nos vértices do fichário se compara com as concentrações correspondentes nas partes planas do mesmo?
38. Se você realiza 10 joules de trabalho para empurrar 1 coulomb de carga contra um campo elétrico, qual será a voltagem da carga com respeito a seu ponto de partida? Quando for solta, qual será sua energia cinética ao passar voando pelo ponto de partida?
39. Você não é machucado pelo contato com uma bola metálica eletrizada, mesmo que a voltagem dela seja muito alta. A razão para isso é análoga à razão de você não ser machucado pelo contato com as faíscas, a mais de 1.000°C , lançadas por um fogo de artifício? Justifique sua resposta em termos das energias envolvidas.
40. Qual é a voltagem na posição em que se encontra uma carga de 0,0001 C que possui uma energia potencial elétrica de 0,5 J (ambos medidos em relação ao mesmo ponto de referência)?
41. Qual a proteção oferecida em permanecer dentro de um automóvel durante uma tempestade com relâmpagos? Justifique sua resposta.
42. Por que as cargas em lados opostos de um capacitor são sempre de mesmo valor absoluto?
43. A fim de poder armazenar mais energia em um capacitor de placas paralelas submetido a uma voltagem fixa, que alteração você poderia fazer nas placas?
44. Você sentiria quaisquer efeitos elétricos se estivesse no interior da cúpula eletrizada de um gerador Van de Graaff? Justifique sua resposta em caso positivo ou negativo.
45. Um colega afirma que a razão para os cabelos de uma pessoa arriparem enquanto ela toca num gerador Van de Graaff eletrizado é, simplesmente, que os fios de cabelo tornam-se eletrizados e que são suficientemente leves para que a repulsão entre eles seja visível. Você concorda com isso ou discorda?
2. Se as cargas que se atraem no problema anterior forem de mesmo valor, qual será esse valor?
3. Duas bolinhas, cada qual com 1 microcoulomb (10^{-6} C), estão afastadas por 3 cm (0,03 m). Qual é a força elétrica entre elas? Que objeto massivo experimentaria esse mesmo valor de força no campo gravitacional da Terra?
4. Pessoas versadas em eletrônica desprezam a força da gravidade sobre os elétrons. Para ver por que, calcule a força da gravidade da Terra sobre um elétron e compare-a com a força exercida sobre o elétron por um campo elétrico de intensidade igual a 10.000 V/m (um campo relativamente fraco). A massa e a carga de um elétron são fornecidas na contracapa posterior deste livro.
5. Os físicos atômicos ignoram os efeitos da gravidade no interior do átomo. Para perceber por que, calcule e compare as forças gravitacional e elétrica entre um elétron e um próton separados por uma distância de 10^{-10} m . As cargas e massas necessárias são fornecidas na contracapa posterior deste livro.
6. Uma gotícula de tinta dentro de uma impressora a jato-de-tinta industrial possui uma carga de $1,6 \times 10^{-10}\text{ C}$ e é desviada para o papel por uma força de $3,2 \times 10^{-4}\text{ N}$. Encontre a intensidade do campo elétrico que produz tal força.
7. A diferença de potencial entre uma determinada nuvem de tempestade e o solo é de 100 milhões de volts. Se 2 C de carga, na forma de um relâmpago, forem transferidos da nuvem para o solo, qual será a variação de energia potencial sofrida pela carga?
8. Uma energia de 0,1 J é armazenada na cúpula metálica de um gerador Van de Graaff. Uma faísca de um microcoulomb (10^{-6} C) descarrega completamente a cúpula. Qual era o potencial da cúpula com respeito ao solo?
9. Em 1909, Robert Millikan foi o primeiro a encontrar o valor da carga do elétron, com seu famoso experimento com gotas de óleo (veja a Figura 11.11). Nele, minúsculas gotas de óleo são borrifadas no interior de um campo elétrico uniforme entre um par de placas horizontais eletrizadas com cargas opostas. As gotas são observadas com uma lente de aumento, e o campo elétrico é ajustado de modo que a força ascendente sobre algumas gotas de óleo que foram eletrizadas seja suficiente para equilibrar a força da gravidade para baixo. Isto é, quando suspensa, a força ascendente qE equilibra exatamente o peso mg da gota. Millikan mediou com precisão as cargas de muitas gotas de óleo e descobriu que seus valores de carga eram sempre iguais a um múltiplo inteiro de $1,6 \times 10^{-19}\text{ C}$ – a carga do elétron. Por esse trabalho, ele recebeu o prêmio Nobel. Questões: (a) Se uma gota com massa de $1,1 \times 10^{-14}\text{ kg}$ permanece estacionária num campo elétrico de $1,68 \times 10^5\text{ N/C}$, qual é a sua carga? (b) Quantos elétrons extras existem nesta particular gota de óleo (dada a carga do elétron presentemente conhecida)?
10. Encontre a variação de voltagem (a) quando um campo elétrico realiza 12 J de trabalho sobre uma carga de 0,0001 C, e (b) quando o mesmo campo elétrico realiza 24 J de trabalho sobre 0,0002 C de carga?

Problemas

1. Duas cargas pontuais estão separadas por 6 cm. A força atrativa entre elas é de 20 N. Encontre a força entre elas quando estiverem separadas por 12 cm. (Por que você pode resolver esse problema sem conhecer os valores absolutos das cargas?)