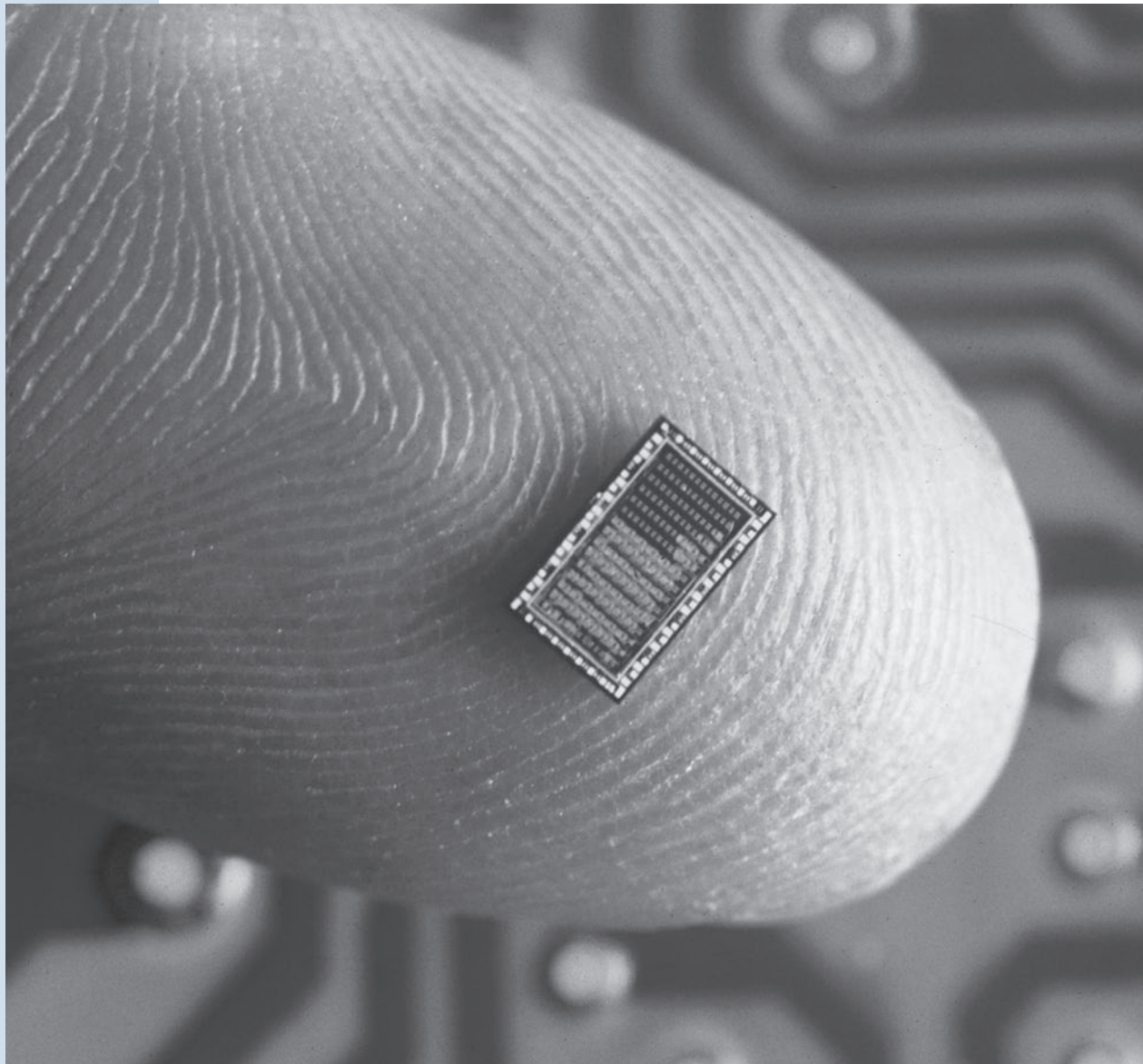


PARTE
VI

Eletricidade e Magnetismo

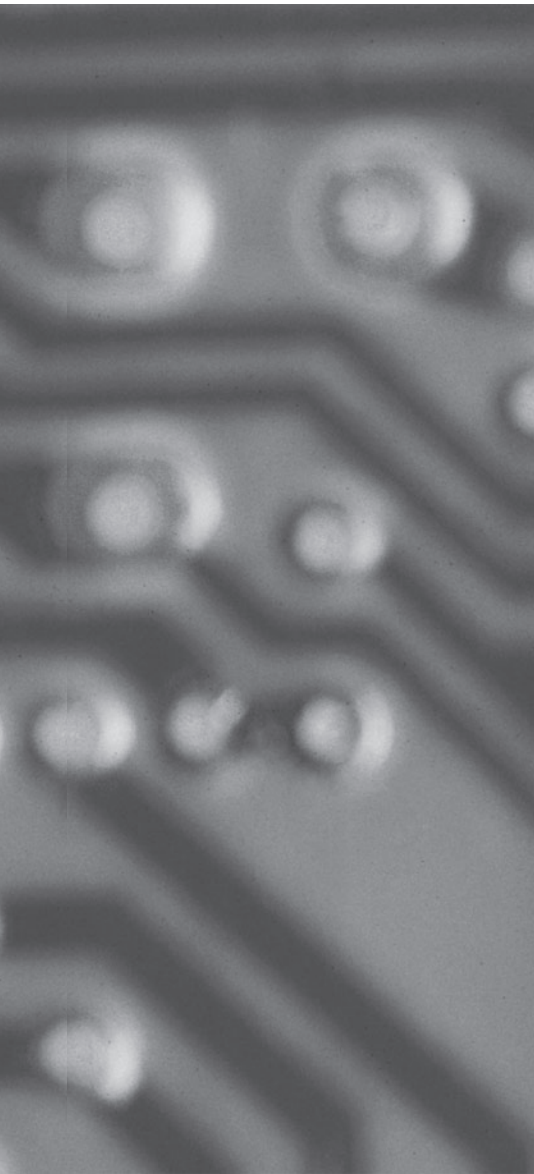
Este circuito integrado contém milhões de elementos de circuito. A densidade destes elementos nos circuitos integrados tem dobrado a cada 18 meses nos últimos 30 anos. A manutenção dessa tendência depende da compreensão, pelos cientistas e engenheiros, da física de circuitos elétricos em escala nanométrica.





Panorama

Fenômenos e Teorias



O âmbar, ou resina de árvore fossilizada, há muito tempo é apreciada por sua beleza. Hoje em dia o interesse científico no âmbar se deve ao fato de que os biólogos aprenderam a recuperar segmentos de DNA de insetos capturados nessa resina há milhões de anos. Mas o âmbar também tem uma conexão científica antiga. A palavra grega para âmbar é *elétron*.

Sabe-se desde a Antiguidade que friccionar um pedaço de âmbar com a pele pode torná-lo capaz de atrair penas ou palha – poderes aparentemente mágicos nas sociedades pré-científicas. Também era do conhecimento dos antigos gregos que certas pedras de uma região que eles chamavam de *Magnesia* podiam erguer pequenos pedaços de ferro. Foi a partir desse humilde começo que chegamos hoje aos computadores de alta performance, aos lasers e às imagens por ressonância magnética, assim como aos milagres comuns do mundo moderno, tais como a lâmpada elétrica.

Os fenômenos básicos da eletricidade e do magnetismo não nos são tão familiares quanto aqueles da mecânica. Passamos a vida inteira exercendo forças sobre objetos e observando-os se moverem, mas nossa experiência com a eletricidade e com o magnetismo, provavelmente, é muito mais limitada. Enfrentaremos essa limitação em experiência enfatizando os *fenômenos* da eletricidade e do magnetismo.

Começemos olhando em detalhe para a *carga elétrica* e para o processo de *eletrização* de um objeto. É fácil fazer observações sistemáticas sobre o comportamento das cargas, e iremos considerar as forças entre as cargas e o seu comportamento em diferentes materiais. Além disso, nosso estudo do magnetismo se concentrará na observação de como os ímãs atraem certos metais, e não, outros, e de como ímãs afetam as agulhas das bússolas. Mas nossa observação mais importante será a de que uma corrente elétrica afeta a agulha de uma bússola exatamente da mesma maneira como faz um ímã. Tal observação, sugerindo uma ligação entre a eletricidade e o magnetismo, nos levará à descoberta das ondas eletromagnéticas.

Na Parte VI, nosso objetivo é desenvolver uma teoria para explicar os fenômenos da eletricidade e do magnetismo. O cerne da teoria será o conceito inteiramente novo de *campo*. A eletricidade e o magnetismo tratam da interação de ação a distância entre cargas, sejam elas cargas estáticas ou cargas em movimento, e o conceito de campo nos ajudará a entender como ocorrem essas interações. Queremos saber como os campos são criados pelas cargas e como as cargas, em contrapartida, respondem a estes campos. Bit a bit, iremos construir uma teoria – baseada nos novos conceitos de campos elétrico e magnético – que nos permita compreender, explicar e prever o comportamento eletromagnético em uma larga escala.

A história da eletricidade e do magnetismo é vasta. A formulação da teoria eletromagnética no século XIX gerou uma grande revolução na ciência e na tecnologia, tendo sido chamada por ninguém menos que Einstein de “o evento mais importante da física desde a época de Newton”. Portanto, tudo o que podemos fazer neste livro é desenvolver algumas das idéias e dos conceitos mais básicos, deixando muitos detalhes e aplicações para cursos avançados. Ainda assim, nosso estudo da eletricidade e do magnetismo irá explorar um dos tópicos mais empolgantes e importantes da física.

26

Cargas Elétricas e Forças

O raio é uma manifestação viva das cargas e forças elétricas.

► Olhando adiante

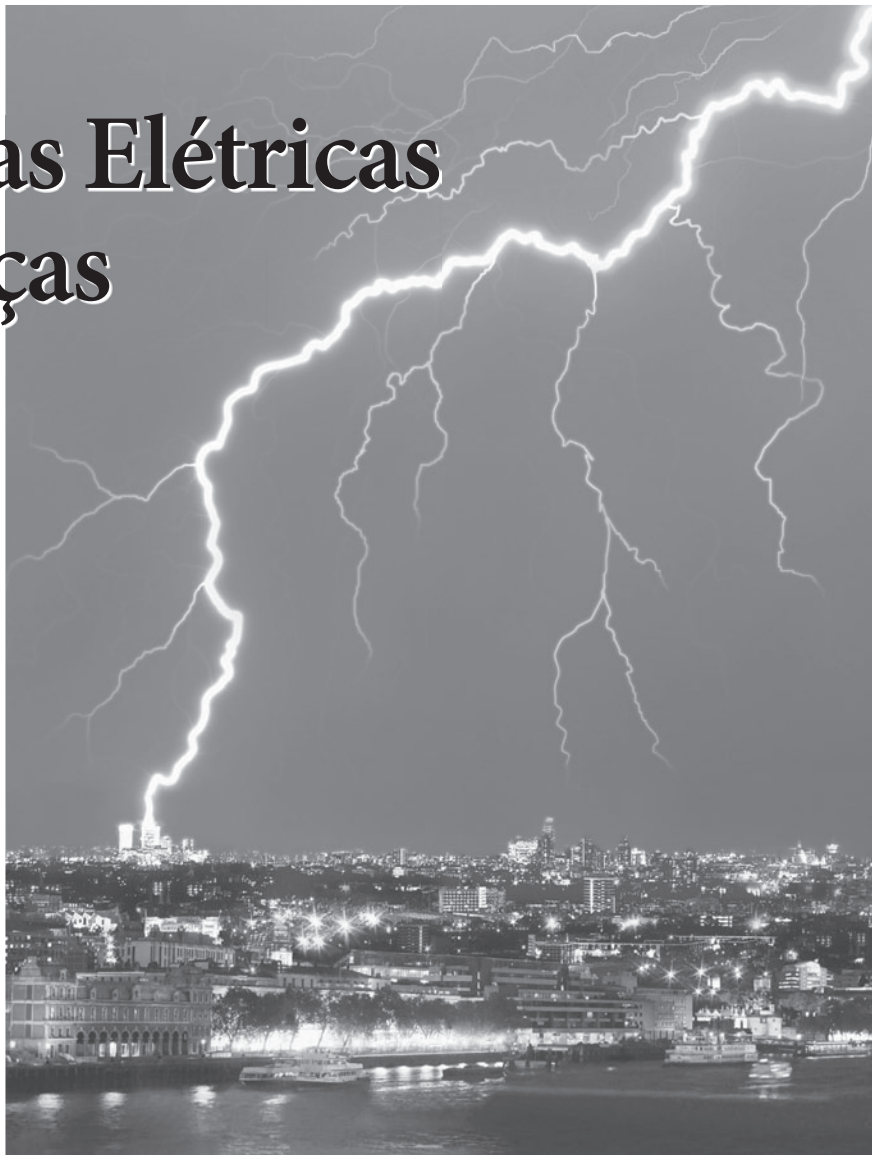
O objetivo do Capítulo 26 é desenvolver uma compreensão básica dos fenômenos elétricos em termos de cargas, forças e campos. Neste capítulo, você aprenderá a:

- Usar um modelo de carga para explicar fenômenos elétricos básicos.
- Compreender as propriedades elétricas de isolantes e condutores.
- Usar a lei de Coulomb para calcular a força elétrica entre duas cargas.
- Usar o modelo de campo para explicar a interação a distância entre duas cargas.
- Calcular e representar o campo elétrico de uma carga puntiforme.

◀ Em retrospectiva

A análise matemática das forças e dos campos elétricos faz uso extensivo da soma vetorial. Em muitos aspectos, a força elétrica é análoga à da gravidade. Revise:

- Seções 3.2 – 3.4 Propriedades dos vetores e soma vetorial
- Seções 13.3 e 13.4 Teoria de Newton da gravitação



A força elétrica é uma das forças fundamentais da natureza. Algumas vezes, como nesta descarga elétrica, as forças elétricas podem ser selvagens e incontroláveis. Por outro lado, a eletricidade sob controle é o fundamento da nossa sociedade moderna e tecnológica. Os dispositivos elétricos variam desde lâmpadas elétricas e motores a computadores e equipamento médico. Tente imaginar como seria viver sem a eletricidade!

Mas como controlamos e lidamos com essa força? Quais são as propriedades da eletricidade e das forças elétricas? Como geramos, transportamos e usamos a eletricidade? Essas são as questões que iremos explorar na Parte VI. A eletricidade é um assunto vasto, de modo que não poderemos responder a todas as questões de uma vez.

Começaremos pela investigação de alguns dos fenômenos mais básicos da eletricidade. É difícil perceber o que bastões de plástico e lã têm a ver com computadores e geradores elétricos, mas apenas se começarmos bem do início, com simples observações, é que poderemos desenvolver a compreensão necessária para usar a eletricidade de maneira controlada.

26.1 Desenvolvendo um modelo de carga

Você pode receber um choque fraco, mas desagradável, ou produzir uma pequena faísca ao tocar em uma maçaneta metálica após caminhar sobre um tapete. Friccionar vigorosamente seu cabelo recém-lavado e seco fará com que os fios fiquem eriçados. Um

penete de plástico que você passar pelos cabelos atrairá pequenos pedaços de papel e outros objetos, porém um pente metálico não fará o mesmo.

O aspecto comum a essas observações é que dois objetos foram *friccionados*. Por que a fricção de um objeto deveria causar forças ou faíscas? Que tipos de forças são essas? Por que os objetos de metal se comportam diferentemente dos não-metálicos? Essas são as questões com as quais começaremos nosso estudo da eletricidade.

Nossa primeira meta é desenvolver um modelo para a compreensão do fenômeno elétrico em termos de *cargas e forças*. Futuramente, usaremos nosso conhecimento atual dos átomos para compreender a eletricidade em nível microscópico, todavia os conceitos básicos da eletricidade *não* se referem especificamente a átomos ou elétrons. A teoria da eletricidade foi bem-estabelecida muito antes da descoberta do elétron.

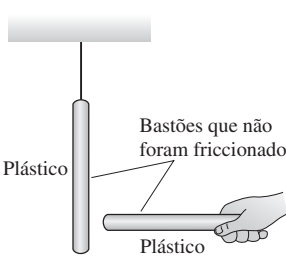
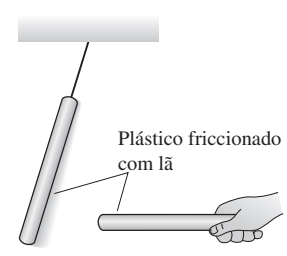
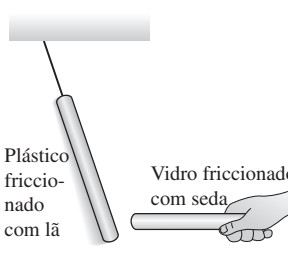
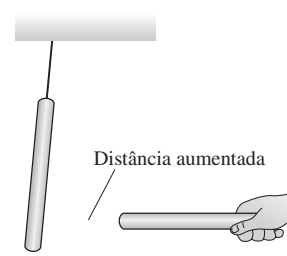
Experimentos com cargas

Entremos em um laboratório onde possamos fazer observações de fenômenos elétricos. Trata-se de um laboratório modesto, parecido com o que encontraríamos no ano de 1800. As principais ferramentas do laboratório são:

- Uma variedade de bastões de plástico e de vidro, com vários centímetros de comprimento. Eles podem ser manuseados ou suspensos por um fio em um suporte.
- Alguns bastões com punho de madeira.
- Pedacos de lã e de seda.
- Pequenas esferas de metal, com 2,5 a 5 cm de diâmetro, presas em suportes de madeira.

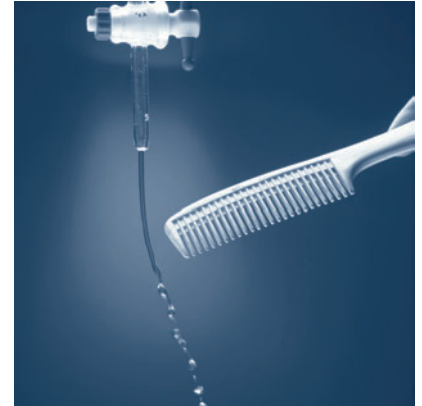
Vamos ver o que podemos aprender com essas ferramentas.

Descobrimo a eletricidade I

Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4
 <p>Bastões que não foram friccionados</p> <p>Plástico</p> <p>Plástico</p>	 <p>Plástico friccionado com lã</p>	 <p>Plástico friccionado com lã</p> <p>Vidro friccionado com seda</p>	 <p>Distância aumentada</p>
<p>Pegue um bastão de plástico que não foi perturbado por um longo período de tempo e pendure-o por um fio. Pegue outro bastão, também de plástico e não-perturbado por um longo período de tempo, e o aproxime do bastão pendurado. Nada acontece a qualquer um dos dois.</p>	<p>Friccione separadamente, com lã, o bastão de plástico pendurado e o que está na sua mão. Depois disso, quando você aproxima o bastão que está em sua mão do bastão pendurado, este tende a se afastar. Dois bastões de vidro friccionados com seda também passarão a se repelir.</p>	<p>Aproxime agora o bastão de vidro, que foi friccionado com seda, do bastão de plástico pendurado, que foi friccionado com lã. Os dois objetos passam, então, a <i>se atrair</i>.</p>	<p>Observações adicionais mostram que:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Essas forças são maiores para os bastões que foram friccionados mais vigorosamente. ■ A intensidade das forças diminui com o aumento da distância entre os bastões.

No Experimento 1, não são observadas forças. Dizemos que os objetos originais são **neutros**. Friccionar os bastões (Experimentos 2 e 3), de alguma maneira, faz com que eles passem a exercer força um sobre o outro. Chamamos de carregar ou eletrizar o processo de fricção descrito aqui, e **dizemos** que o bastão friccionado foi *carregado* ou *eletrizado*. Por hora, esses termos são, simplesmente, descritivos. Eles não nos dizem nada a respeito do processo em si.

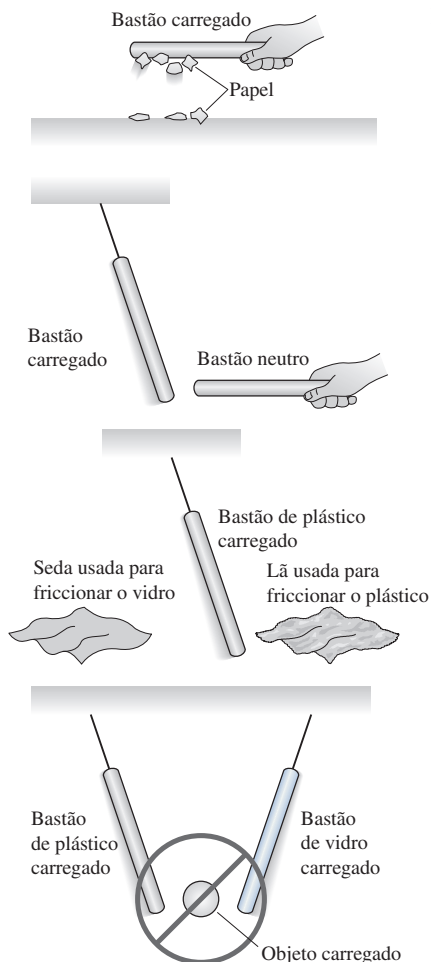
O Experimento 2 mostra que existe uma *força repulsiva de ação a distância* entre dois objetos idênticos que foram carregados da *mesma* maneira, tal como os dois bastões de plástico que foram friccionados com lã no experimento descrito. Além disso, o Experimento 4 mostra que a força entre dois objetos carregados depende da distância entre eles. Essa é a primeira força de ação a distância com que nos deparamos desde a introdução da gravidade, no Capítulo 5. É também a primeira vez que observamos uma força repulsiva, de modo que, veremos, serão necessárias novas idéias para a compreensão da eletricidade.



Um pente de plástico que foi carregado pelo atrito com seus cabelos atrai objetos neutros, tais como pedacinhos de papel ou, como visto aqui, pingos de água.

O Experimento 3 constitui um enigma. Os dois bastões *parecem* ter sido carregados da mesma maneira, ou seja, por fricção, mas os dois *se atraem* ao invés de se repelirem. Por que o resultado do Experimento 3 difere daquele do Experimento 2? De volta ao laboratório.

Descobrimos a eletricidade II



Experimento 5

Segure um bastão de plástico carregado (i.e., que foi friccionado) acima de pequenos pedaços de papel sobre uma mesa. Os pedaços de papel saltam e se grudam ao bastão. O mesmo ocorre com um bastão de vidro que tenha sido carregado. Entretanto, um bastão neutro não afeta os pedaços de papel.

Experimento 6

Friccione um bastão de plástico com lã, e um bastão de vidro, com seda. Erga ambos por meio de suportes separados por certa distância. Ambos são atraídos por um bastão de plástico *neutro* (i.e., não-friccionado) mantido próximo. Curiosamente ambos são atraídos também por um bastão *neutro* de vidro. Na verdade, os bastões carregados são atraídos por *qualquer* objeto neutro, tal como um dedo, um pedaço de papel ou um bastão de metal.

Experimento 7

Friccione com lã um bastão de plástico suspenso e, depois, segure a lã próxima ao bastão. O bastão é fracamente *atraído* pela lã, e o bastão de plástico é *repelido* pelo pedaço de seda que foi usado para friccionar o vidro.

Experimento 8

Experimentos adicionais revelam que:

- Outros objetos, após serem friccionados, atraem um dos bastões previamente carregados que estão suspensos (de plástico ou de vidro) e que se repelem. Os objetos carregados sempre atraem pequenos pedaços de papel.
- Aparentemente *não* há objetos que, após terem sido friccionados, passem a atrair pedaços de papel e, simultaneamente, o bastão de plástico e o de vidro.

Nosso primeiro conjunto de experimentos revelou que objetos carregados exercem forças uns sobre os outros. As forças às vezes são atrativas, e outras vezes, repulsivas. Os Experimentos 5 e 6 indicam que existe uma força atrativa entre um objeto carregado e qualquer objeto *neutro* (não-carregado). Tal descoberta nos apresenta um problema: como podemos descobrir se um objeto está carregado ou neutro? Pelo fato de existir força atrativa entre um objeto carregado e qualquer objeto neutro, a simples observação de uma força elétrica *não* indica qual é o objeto que está carregado.

Entretanto, a característica importante de qualquer objeto *carregado* parece ser a de que **todo objeto carregado atrai pequenos pedaços de papel**. Esse comportamento fornece um teste direto que nos possibilita responder à questão “Tal objeto está carregado?” Se ele passar no teste de atrair o papel, estará carregado; caso falhe no teste, o objeto estará neutro.

Estas observações nos levam a avançar numa tentativa de propor os primeiros passos para um **modelo de carga**.

MODELO DE CARGA, PARTE I Os postulados básicos do nosso modelo são:

1. Forças de atrito, como o da fricção, adicionam algo chamado de carga a um objeto ou a removem do mesmo. O processo é chamado de *carregamento* ou *eletrização*. Quanto maior for a intensidade da fricção, maior será a quantidade de carga produzida no processo.

- Há dois, e somente dois, tipos de carga. Por hora, chamaremos essas cargas de “carga do plástico” e “carga do vidro”. Outros objetos, às vezes, podem ser carregados por fricção, mas a carga que eles recebem é “carga do plástico” ou “carga do vidro”.
- Duas cargas de mesmo tipo (plástico/plástico ou vidro/vidro) exercem forças repulsivas uma sobre a outra. Duas cargas opostas (plástico/vidro) se atraem.
- A força entre duas cargas é de ação a distância. Ela aumenta à medida que aumentamos a quantidade de carga e diminui quando aumenta a distância entre as cargas.
- Os objetos *neutros* contêm uma *mistura igual* de ambos os tipos de carga, “carga do plástico” e “carga do vidro”. O processo de fricção, de alguma forma, separa os dois tipos.

O postulado 2 é baseado no Experimento 8. Se um objeto está carregado (i.e., se ele atrai papel), ele sempre irá atrair um dos bastões previamente carregados e repelir o outro. Ou seja, ele se comporta como se fosse uma “carga do plástico” ou uma “carga do vidro”. Se existisse um terceiro tipo de carga, diferente dos dois primeiros, um objeto que contivesse este tipo de carga iria atrair o papel e *ambos* os bastões. Objetos como esses nunca foram encontrados.

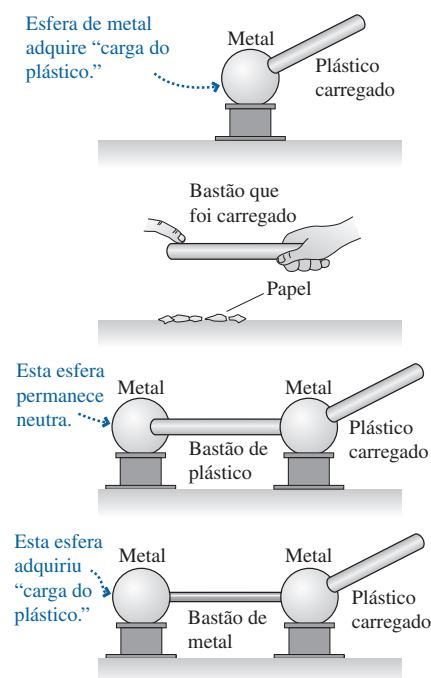
A base do postulado 5 é a observação do Experimento 7, em que um bastão plástico carregado é atraído pela lã que foi usada para esfregá-lo, todavia é repelido pela seda que foi friccionada com vidro. Parece que a fricção do vidro fez com que a seda adquirisse a “carga do plástico”. A maneira mais fácil de explicar isso é supor que a seda possua quantidades iguais de “carga do plástico” e “carga do vidro” no início, e que a fricção, de alguma maneira, transferiu “carga do vidro” da seda para o bastão. Isso ocasiona um excesso de “carga do vidro” no bastão e um excesso de “carga do plástico” na seda.

Embora o modelo de carga seja *consistente* com as observações, ele ainda não está provado. Podemos facilmente imaginar outras hipóteses que sejam tão consistentes com as observações limitadas que fizemos quanto as que foram feitas anteriormente. Ainda teremos alguns grandes enigmas por explicar, como o porquê de objetos carregados exercerem forças atrativas sobre objetos neutros.

Propriedades elétricas dos materiais

Ainda temos de esclarecer como diferentes tipos de materiais respondem às cargas.

Descobrimo a eletricidade III



Experimento 9

Eletrize um bastão de plástico friccionando-o com a lã. Encoste a área carregada do bastão a uma esfera de metal neutra. A esfera passará, agora, a atrair pequenos pedaços de papel, e a repelir o bastão de plástico suspenso que fora previamente carregado. A esfera de metal aparenta ter adquirido “carga do plástico”.

Experimento 10

Eletrize um bastão de plástico e, depois, passe seu dedo ao longo do mesmo. Após isso, o bastão não atrairá novamente os pequenos pedaços de papel ou não repelirá o bastão de plástico suspenso. Analogamente, a esfera de metal do Experimento 9 não repelirá mais o bastão de plástico após você tê-lo tocado com o dedo.

Experimento 11

Mantenha duas esferas de metal próximas uma da outra presas às extremidades de um bastão de plástico. Por fricção, eletrize um segundo bastão de plástico e o encoste a uma das esferas de metal. Após isso, a esfera de metal que foi tocada passará a atrair pequenos pedaços de papel e a repelir o bastão de plástico previamente carregado e suspenso. Com a outra esfera nada acontece.

Experimento 12

Repita o Experimento 11 com as duas esferas de metal agora presas às extremidades de um bastão metálico. Encoste um bastão de plástico carregado em uma das esferas de metal. Após isso, *ambas* as esferas de metal passarão a atrair pequenos pedaços de papel e a repelir o bastão de plástico previamente carregado e suspenso.

Nosso conjunto final de experimentos revelou que

- A carga pode ser *transferida* de um objeto para outro, mas apenas quando os objetos se *toçam*. É necessário haver contato. O ato de remover a carga de um objeto, o que se pode fazer simplesmente tocando nele, é chamado de **descarregamento**.
- Há dois tipos ou duas classes de materiais com propriedades elétricas muito distintas. Nós os chamamos de *condutores* e de *isolantes*.

O Experimento 12, no qual é usado um bastão de metal, está em franco contraste com o Experimento 11. De alguma forma, a carga *se move através* ou ao longo de um bastão de metal, indo de uma esfera para outra, mas permanece *fixa no seu lugar* em um bastão de plástico ou de vidro. Vamos definir os **condutores** como aqueles materiais nos quais a carga pode se mover livremente, e os **isolantes** como aqueles materiais nos quais a carga permanece imóvel. O plástico e o vidro são isolantes; o metal é um condutor.

Essa informação nos permite adicionar mais dois postulados ao nosso modelo de carga:

MODELO DE CARGA, PARTE II

6. Há dois tipos de materiais. Os condutores são materiais através dos ou nos quais a carga pode facilmente se mover. Os isolantes são materiais através dos ou nos quais as cargas permanecem em locais fixos.
7. A carga pode ser transferida de um objeto para outro por contato.

NOTA ► Isolantes e condutores podem ser eletrizados. Eles diferem quanto à *mobilidade* da carga. ◀

Não exaurimos o número de experimentos e de observações que ainda podemos tentar. As primeiras investigações científicas se depararam com estes e com muitos outros resultados. Além disso, muitos dos experimentos eram difíceis de reproduzir com boa precisão. Como podemos dar sentido a tudo isso? O modelo de carga parece promissor, todavia certamente não foi provado. Não explicamos ainda como os objetos carregados exercem forças atrativas sobre os objetos *neutros*, tampouco em que consiste a carga, como ela é transferida ou *por que* ela se move através de alguns objetos, e não, de outros. No entanto tiraremos vantagem da nossa visão retrospectiva histórica e continuaremos a nos dedicar a esse modelo. Nos exercícios propostos você irá praticar o emprego do modelo na explicação de outras observações.

EXEMPLO 26.1 Transferindo carga

No Experimento 12, tocar uma esfera de metal com um bastão de plástico carregado fez com que uma segunda esfera de metal adquirisse o mesmo tipo de carga do bastão. Use os postulados do modelo de carga para explicar este fato.

RESOLUÇÃO Precisamos das seguintes hipóteses do modelo de carga:

1. A carga é transferida por contato.
2. O metal é um condutor.
3. Cargas de mesmo tipo se repelem.

O bastão de plástico foi carregado pela fricção com a lã. A carga não se move pelo bastão, pois ele é um isolante, mas uma parte da “carga do plástico” é transferida ao metal no contato. Uma vez no metal, que é um condutor, as cargas estão livres para se moverem através do material. Além disso, devido ao fato de que cargas iguais se repelem, as “cargas do plástico” rapidamente se afastam umas das outras o máximo possível. Algumas se movem através do bastão de metal para a segunda esfera. Conseqüentemente, a segunda esfera adquire “carga do plástico”.

PARE E PENSE 26.1 Para determinar se um objeto tem “carga do vidro”, você necessita:

- a. Verificar se o objeto atrai um bastão de plástico carregado.
- b. Verificar se o objeto repele um bastão de vidro carregado.
- c. Fazer ambos, a e b.
- d. Fazer a ou b.

26.2 Carga

Como você provavelmente sabe, os nomes dados atualmente aos dois tipos de carga são *carga positiva* e *carga negativa*. Talvez você se surpreenda ao saber que esses nomes foram cunhados por Benjamin Franklin. Franklin descobriu que a carga se comporta como os números positivos e negativos. Se um bastão de plástico está carregado duplamente por fricção e transfere uma dupla carga para uma esfera de metal, as forças elétricas exercidas pela esfera serão dobradas. Ou seja, $2 + 2 = 4$. Mas a esfera se encontra neutra após receber iguais quantidades da “carga do plástico” e da “carga do vidro”. Isso se parece com a operação $2 + (-2) = 0$. Estes experimentos estabelecem uma importante propriedade da carga.

Então, o que é positivo e o que é negativo? Isso depende apenas de nós! Franklin estabeleceu a convenção de que **um bastão de vidro friccionado com seda torna-se carregado positivamente**. É isso. Qualquer outro objeto que repila um bastão de vidro carregado também estará carregado positivamente. E qualquer objeto que atraia um bastão de vidro carregado estará carregado negativamente. Portanto, **um bastão de plástico friccionado com lã torna-se carregado negativamente**. Somente muito tempo depois disso, com a descoberta dos elétrons e dos prótons, foi verificado que os elétrons são atraídos por um bastão de vidro carregado, enquanto os prótons são repelidos por ele. Portanto, *por convenção*, os elétrons têm carga negativa, e os prótons, carga positiva.

NOTA ► Teria sido melhor se Franklin tivesse feito uma escolha oposta. Os elétrons são os formadores das correntes elétricas em metais, e a convenção de assinalar uma carga negativa para os elétrons irá apresentar futuramente algumas dificuldades de sinal que poderiam ser evitadas se os elétrons fossem considerados como positivos. ◀

Átomos e eletricidade

Voltamos rapidamente ao século XXI. A teoria da eletricidade foi desenvolvida sem o conhecimento da existência dos átomos, mas não há razão para continuarmos a desprezar essa parte importante de nossa perspectiva atual. Por enquanto, prosseguiremos sem demonstrar algumas das características importantes dos átomos e da matéria. Oportunamente você aprenderá as evidências experimentais que embasam tais afirmações.

A **FIGURA 26.1** mostra que todo átomo consiste de um *núcleo* muito pequeno e denso (diâmetro $\sim 10^{-14}$) circundado por *elétrons*, de massa muito menor do que o núcleo, orbitando em torno do mesmo. As frequências orbitais dos elétrons são tão grandes ($\sim 10^{15}$ revoluções por segundo) que os elétrons parecem formar uma **nuvem eletrônica** com diâmetro $\sim 10^{-10}$ m, um fator 10^4 maior do que o núcleo. De fato, a dualidade onda-partícula da física quântica destrói qualquer noção de trajetória bem-definida para um elétron, e *tudo* o que nós sabemos sobre os elétrons é o tamanho e a forma da nuvem eletrônica.

Experimentos realizados no fim do século XIX – experimentos que estudaremos na Parte VI – revelaram que os elétrons são *partículas* de carga negativa e de massa. O núcleo é uma estrutura composta, que consiste de *prótons*, que são partículas carregadas positivamente, e de *nêutrons* neutros. O átomo é mantido coeso pela força elétrica atrativa entre o núcleo positivo e os elétrons negativos.

Uma das descobertas mais importantes é de que a **carga, como a massa, é uma propriedade inerente de prótons e elétrons**. É tão impossível haver um elétron desprovido de carga quanto o mesmo existir sem massa. Tanto quanto podemos saber atualmente, elétrons e prótons possuem cargas com sinais opostos e com *exatamente* o mesmo valor absoluto. (Experimentos realizados com muito cuidado nunca revelaram diferenças.) Essa unidade de carga em nível atômico, chamada de **unidade fundamental de carga**, é representada pelo símbolo e . A Tabela 26.1 mostra as massas e as cargas de prótons e de elétrons. Precisamos definir uma unidade de carga, o que faremos na Seção 26.5, antes de especificarmos quanto vale a carga e .

A conexão micro/macro

Os elétrons e os prótons são as cargas básicas da matéria elementar. Conseqüentemente, as várias observações feitas na Seção 26.1 precisam ser explicadas em termos de elétrons e de prótons.

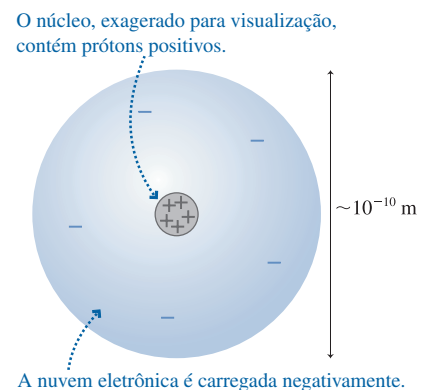


FIGURA 26.1 Um átomo.

TABELA 26.1 Prótons e elétrons

Partícula	Massa (kg)	Carga
Próton	$1,67 \times 10^{-27}$	$+e$
Elétron	$9,11 \times 10^{-31}$	$-e$

NOTA ► Elétrons e prótons são partículas da matéria. Seus movimentos são governados pelas leis de Newton. Elétrons podem se mover de um objeto para outro quando os objetos estão em contato, mas nem elétrons e nem prótons podem saltar de um objeto para outro através do ar. Um objeto não se torna carregado simplesmente por ter sido colocado próximo a um objeto carregado. ◀

A carga é representada pelo símbolo q (algumas vezes Q). Objetos macroscópicos como o bastão de plástico têm uma carga

$$q = N_p e - N_e e = (N_p - N_e) e \quad (26.1)$$

onde N_p e N_e são, respectivamente, o número de prótons e o número de elétrons contidos no objeto. A maioria dos objetos macroscópicos tem um *número igual* de prótons e elétrons e, portanto, tem $q = 0$. Um objeto sem carga *líquida* (i.e., $q = 0$) é considerado *eletricamente neutro*.

NOTA ► *Neutro* não significa “sem cargas”, e sim, que não possui uma carga *líquida*. Um volume de 1 cm^3 de um sólido comum contém $\sim 10^{24}$ elétrons e um número igual de prótons. Trata-se de um número enorme de cargas, mas a maioria dos sólidos é eletricamente neutra ou muito próxima disso. Um bastão de vidro perde apenas $\sim 10^{10}$ elétrons quando é carregado por fricção. Isso corresponde a apenas 1 elétron em 10^{14} . ◀

Um objeto carregado contém um número desigual de prótons e de elétrons. Qualquer objeto estará positivamente carregado se $N_p > N_e$. Ele é negativamente carregado se $N_p < N_e$. Note que um objeto carregado possui uma carga que é sempre igual a um múltiplo inteiro de e , ou seja, a quantidade de carga de um objeto sofre variações pequenas, mas discretas, e não-contínuas. A isto se denomina **quantização da carga**.

Na prática, os objetos adquirem carga positiva não por ganharem prótons, como se poderia esperar, mas por perderem elétrons. Os prótons estão *extremamente* firmes e ligados ao interior do núcleo e não podem ser adicionados ou removidos do átomo. Os elétrons, por outro lado, estão ligados mais frouxamente ao núcleo e podem ser removidos mais facilmente. O processo de remoção de um elétron da nuvem eletrônica é chamado de **ionização**. Um átomo que perdeu um elétron é chamado de *íon positivo*. Sua carga *líquida* é $q = +e$.

Constatamos que alguns átomos podem acomodar um elétron *extra* e, portanto, se tornarem um *íon negativo* com uma carga líquida $q = -e$. Uma solução de água salgada é um bom exemplo. Quando o sal de cozinha (cloreto de sódio, NaCl) se dissolve na água, ele é separado em íons positivos de sódio, Na^+ , e íons negativos de cloro, Cl^- . A **FIGURA 26.2** mostra íons positivos e negativos.

Todos os processos de eletrização que estudamos na Seção 26.1 envolveram atrito e fricção. As forças de atrito ocasionam quebras nas ligações moleculares da superfície enquanto os dois materiais passam um pelo outro. Moléculas são eletricamente neutras, mas a **FIGURA 26.3** mostra que pode-se criar um *íon molecular* quando uma das ligações de uma molécula grande for quebrada. Os íons moleculares positivos permanecem em um material, e os negativos, no outro, de modo que um dos objetos que sofre a fricção fica com uma carga líquida positiva, e o outro, com uma carga líquida negativa. Essa é a maneira pela qual o bastão de plástico é carregado pelo atrito com a lã ou um pente é carregado ao passar através do seu cabelo.

A eletrização por atrito, através de quebra de ligações, funciona melhor para grandes moléculas orgânicas. Isto explica não somente por que o plástico é eletrizado pela fricção com a lã, mas também as nossas experiências cotidianas, como a produção de “eletricidade estática” em uma secadora de roupas. Os metais geralmente *não* podem ser carregados por atrito.

Conservação da carga e diagramas de carga

Uma das importantes descobertas sobre a carga é a **lei de conservação da carga**: a carga não é criada nem destruída. Uma carga pode ser transferida de um objeto para outro, à medida que elétrons e íons se movem, mas a quantidade total de carga se mantém constante. Por exemplo, carregar um bastão de plástico por fricção com a lã transfere elétrons da lã para o plástico durante a quebra das ligações moleculares. A lã fica com uma carga positiva de mesmo valor absoluto, porém de sinal contrário à carga do bastão: $q_{\text{lã}} = -q_{\text{plástico}}$. A carga *líquida* permanece nula.

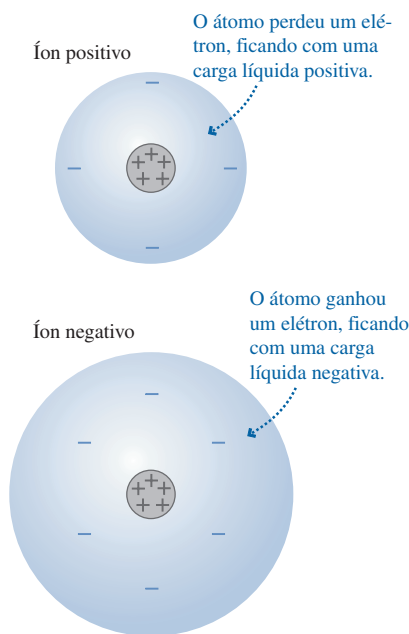


FIGURA 26.2 Íons positivos e negativos.

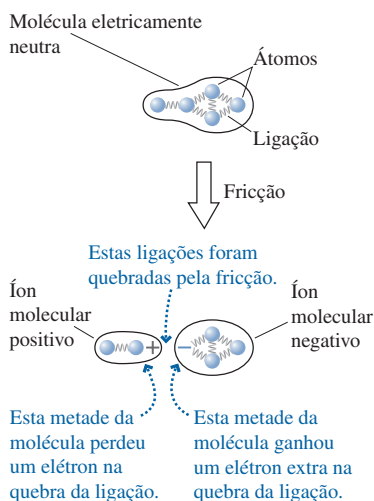


FIGURA 26.3 A eletrização por fricção geralmente cria íons moleculares através da quebra das ligações.

Os diagramas serão uma importante ferramenta para entender e explicar cargas e forças sobre objetos carregados. Conforme você for usando os diagramas, será importante fazer uso explícito da conservação de carga. A quantidade líquida de sinais positivos e de sinais negativos desenhados no seu diagrama *não* deverá mudar conforme você os move.

BOX TÁTICO
26.1

Desenhando diagramas de carga



- 1 Faça um desenho da seção transversal bidimensional simplificada do objeto.
- 2 Desenhe as cargas *superficiais bem próximas* da superfície do objeto.
- 3 Desenhe as cargas *internas* distribuídas uniformemente no interior do objeto.
- 4 Represente apenas a carga *líquida*. Para objetos neutros, *não* se deve indicar cargas nem uma porção de sinais positivos ou negativos.
- 5 Se você usar uma série de diagramas para explicar um processo, conserve a carga de um diagrama para o próximo.

Exercícios 10–13

Estas referências são do *Student Workbook*, disponível, em inglês, apenas no mercado norte-americano.

A **FIGURA 26.4** mostra dois exemplos de diagramas de carga. O passo 5 se tornará mais claro à medida que o usarmos nos exemplos. O passo 4 é de especial importância. Por exemplo, um objeto positivamente carregado perdeu elétrons. Independentemente de como o objeto se torna eletrizado, o diagrama de carga deve trazer o sinal positivo.

PARE E PENSE 26.2

Ordene em seqüência decrescente os valores das cargas de q_a a q_e destes cinco sistemas.

Próton •	Elétron •	17 prótons 19 elétrons	1.000.000 prótons 1.000.000 elétrons	Bola de vidro que perdeu 3 elétrons ○
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)

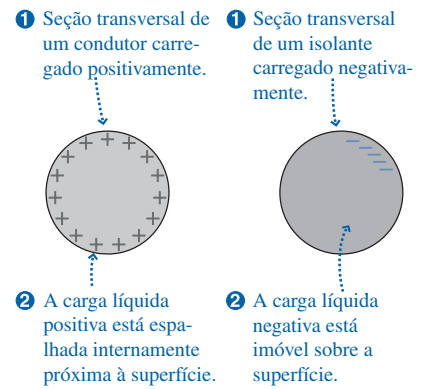


FIGURA 26.4 Diagramas de carga.

26.3 Isolantes e condutores

Você aprendeu que existem duas classes de materiais quanto às suas propriedades elétricas: a dos isolantes e a dos condutores. É hora de examinar melhor esses materiais.

A **FIGURA 26.5** representa os interiores de um isolante e de um condutor metálico. Os elétrons do isolante estão todos fortemente ligados aos núcleos positivos e não são livres para se movimentar. Carregar um isolante por fricção deixa trechos da superfície com íons moleculares, mas tais íons são imóveis.

Em metais, os elétrons atômicos externos (chamados de *elétrons de valência* em química) estão ligados apenas fracamente ao núcleo. Quando os átomos se aproximam para formar um sólido, estes elétrons se desprendem de seus núcleos de origem e tornam-se livres para se mover através do sólido inteiro. O sólido, *como um todo*, permanece eletricamente neutro porque nenhum elétron foi adicionado ou removido durante o processo; todavia, agora os elétrons se parecem com um gás ou um líquido negativamente carregado – o que os físicos gostam de denominar **mar de elétrons** – que permeia uma rede de **carços iônicos** positivamente carregados.

A consequência imediata dessa estrutura é que os elétrons são altamente móveis em um metal. Eles podem, rápida e facilmente, se mover através do metal em resposta a forças elétricas exercidas. O movimento de cargas através de um material é o que chamamos de **corrente**, e as partículas com carga que realmente se movem são chamadas de **portadores de carga**. Em um metal, os portadores de carga são os elétrons.

Os metais não são os únicos condutores que existem. As soluções iônicas, como a água salgada, também são bons condutores. Mas os portadores de carga em uma solução iônica são íons, e não, elétrons. Manteremos nossa atenção sobre os condutores metálicos devido à sua importância nas aplicações elétricas.

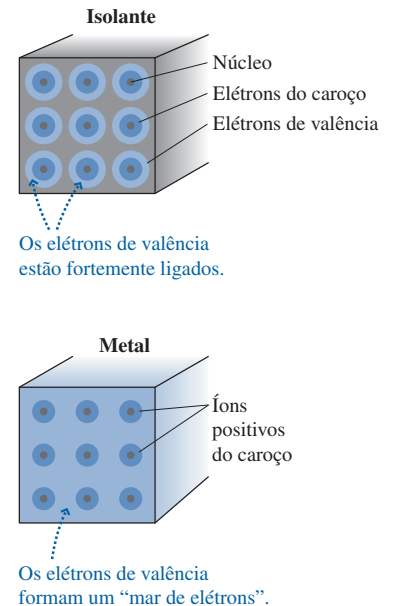


FIGURA 26.5 Uma visão microscópica dos isolantes e condutores.

Eletrização

Os isolantes, em geral, podem ser eletricamente carregados por atrito. Os diagramas de carga da FIGURA 26.6 mostram que a carga do bastão está na superfície do mesmo e que a carga é conservada. A carga sobre o bastão é imóvel. Ela pode ser transferida para outro objeto por contato, mas não se move através do bastão.

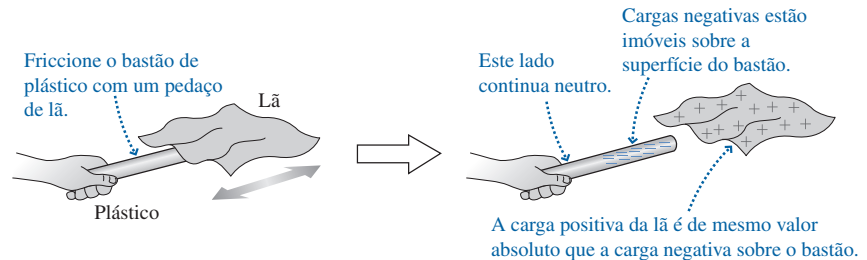


FIGURA 26.6 Um bastão isolante é carregado por atrito.

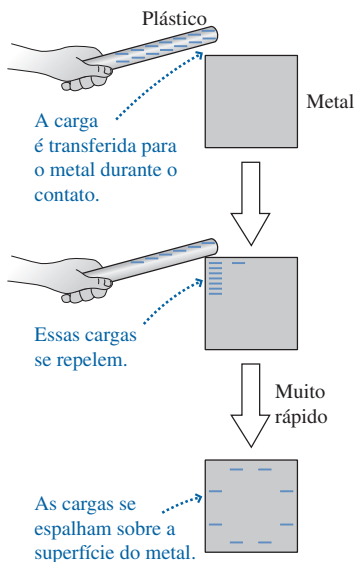


FIGURA 26.7 Um condutor é carregado por contato com um bastão de plástico eletrizado.

Os metais geralmente não podem ser eletrizados por atrito, mas o Experimento 9 mostra que uma esfera de metal pode ser eletricamente carregada por contato com um bastão de plástico. A FIGURA 26.7 mostra um desenho explicativo do processo. A idéia essencial é que, **em um condutor, os elétrons são livres para se mover** pelo material. Uma vez que a carga tenha sido transferida para o metal, as forças repulsivas entre as cargas negativas farão com que os elétrons se afastem uns dos outros.

Note que os novos elétrons adicionados não precisam se mover para os cantos distantes do objeto metálico. Devido às forças repulsivas, os novatos simplesmente “empurram” o mar inteiro de elétrons para o lado. Em um tempo extremamente curto, geralmente menor do que 10^{-9} s, o mar de elétrons se ajusta à presença da carga adicionada. Para fins práticos, um condutor responde *instantaneamente* à adição ou à subtração de carga.

A não ser pelo breve intervalo de tempo durante o qual o mar de elétrons está se ajustando, as cargas em um condutor *isolado* encontram-se em equilíbrio estático, ou seja, as cargas estão em repouso e não há força resultante exercida sobre qualquer carga. Essa condição é chamada de **equilíbrio eletrostático**. Se *houvesse* uma força resultante sobre qualquer uma das cargas, ela iria rapidamente se mover para um ponto de equilíbrio no qual a força voltasse a ser nula.

O equilíbrio eletrostático tem uma consequência importante:

Em um condutor isolado, qualquer excesso de carga está localizado sobre a superfície do condutor.

Para ilustrar isso, suponha que *exista* um elétron em excesso no interior de um condutor isolado. O elétron extra irá desequilibrar a neutralidade elétrica do interior, exercendo forças sobre os elétrons próximos e fazendo com que se movam. Mas tal movimento violaria a hipótese de equilíbrio estático; logo, somos forçados a concluir que não pode haver elétrons em excesso no interior de um condutor isolado. Qualquer excesso de elétrons causará repulsões que os empurrarão para longe uns dos outros até que todos estejam na superfície.

EXEMPLO 26.2 Carregando um eletroscópio

Muitas demonstrações em eletricidade são feitas com o auxílio de um *eletroscópio* como o mostrado na FIGURA 26.8. Tocar a esfera do topo de um eletroscópio com um bastão de plástico carregado faz com que as folhas se afastem, mantendo um ângulo entre elas. Use os diagramas de carga para explicar por quê.

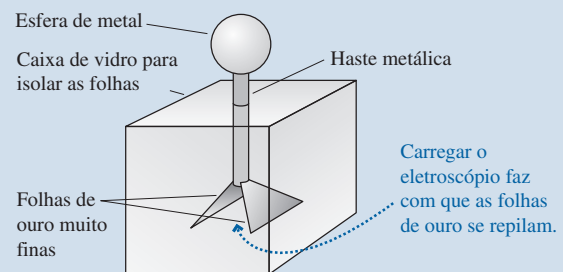


FIGURA 26.8 Um eletroscópio carregado.

MODELO Usaremos o modelo de carga e o modelo de um condutor como um material através do qual os elétrons podem se mover.

VISUALIZE A FIGURA 26.9 usa uma série de diagramas de carga para mostrar o processo de eletrização de um eletroscópio.

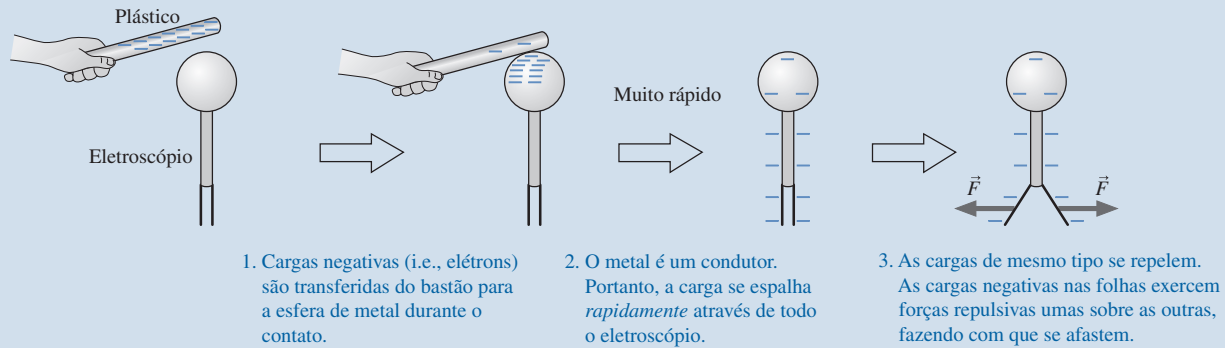


FIGURA 26.9 Processo pelo qual um eletroscópio é carregado.

Descarregamento

A água pura está longe de ser um bom condutor, mas quase toda água contém uma variedade de minerais dissolvidos que flutuam entre os íons. O sal de cozinha, conforme citamos anteriormente, se separa em íons Na^+ e Cl^- . Eles são os portadores de carga, permitindo que a água salgada seja um bom condutor.

Uma grande parte do corpo humano consiste de água salgada. Conseqüentemente, e ocasionalmente de forma trágica, os humanos são condutores razoavelmente bons. Este fato nos permite entender por que, ao *tocar* em um objeto carregado, nós o descarregamos como descrito no Experimento 10. A FIGURA 26.10 mostra uma pessoa que toca um metal positivamente carregado que perdeu elétrons. Ao contato, alguns dos íons negativos Cl^- sobre a superfície da pele transferem seu elétron extra para o metal, tornando ambos neutros, o metal e o átomo de cloro. Isso deixa o corpo com um excesso de íons positivos Na^+ e, portanto, uma carga líquida positiva. Como em qualquer condutor, as cargas positivas em excesso se afastam o máximo possível umas das outras, espalhando-se rapidamente sobre a superfície do condutor.

Tocar em um metal carregado resulta em que, juntos, ele e o corpo humano condutor se tornam um único condutor maior do que o metal sozinho. Qualquer excesso de carga que estiver inicialmente confinado no metal poderá, agora, se espalhar sobre o grande condutor metal + corpo humano. Isso pode não descarregar totalmente o metal, mas, em circunstâncias típicas, onde o corpo humano é muito maior do que a amostra de metal, a carga residual que permanece no metal é muito menor do que a quantidade de carga original. Para a maioria das aplicações práticas, o metal está descarregado. Em essência, dois condutores em contato “repartem” a carga que originalmente pertencia a apenas um deles.

O ar úmido é um condutor, mas um mau condutor. Objetos carregados expostos ao ar perdem lentamente sua carga à medida que o objeto a divide com o ar. A própria Terra é um gigantesco condutor devido à água, à umidade do ar e a uma variedade de íons – claro, não um condutor tão bom quanto um pedaço de cobre, mas sem dúvida um condutor. Qualquer objeto que esteja fisicamente conectado à Terra através de um condutor é considerado como **aterrado**. O efeito do aterramento é que o objeto reparte qualquer excesso de carga que possua com a Terra inteira! Mas a Terra é tão grande que qualquer condutor conectado a ela estará completamente descarregado.

A finalidade de *aterrar* objetos, tais como circuitos e eletrodomésticos, é impedir acúmulos de carga sobre os mesmos. Como você verá adiante, o aterramento tem o efeito de impedir o surgimento de uma *diferença de voltagem* entre o objeto e o solo. O terceiro pino existente nos plugues de eletrodomésticos e aparelhos eletrônicos tem a finalidade de conectar o dispositivo à Terra. A fiação de uma construção conecta fisicamente o terceiro pino do plugue para dentro do solo, em algum lugar externo à construção, geralmente ligado a um cano de metal enterrado profundamente no solo.

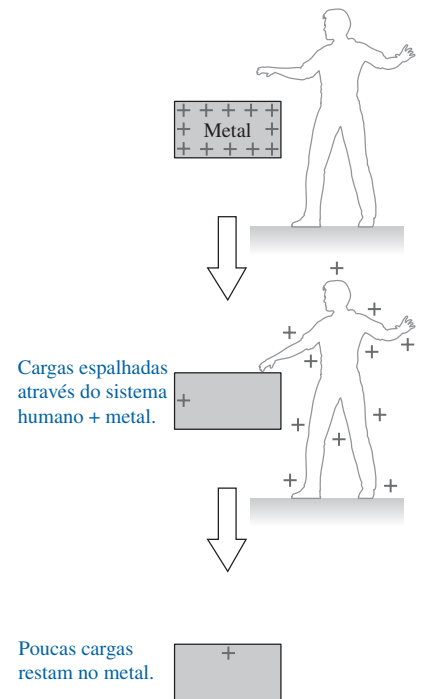


FIGURA 26.10 Encostar em um metal carregado o descarrega.

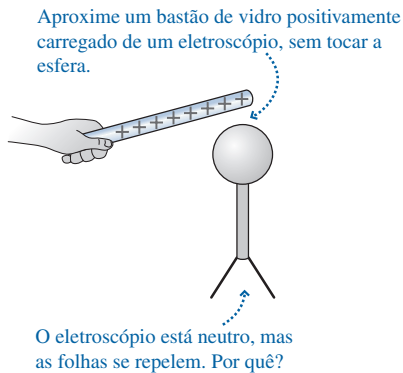


FIGURA 26.11 Um bastão carregado mantido perto de um eletroscópio faz as folhas do mesmo se repelirem mutuamente.

Polarização da carga

Fizemos grandes avanços ao aprender como a estrutura atômica da matéria pode explicar os processos de carga e as propriedades dos isolantes e dos condutores. Entretanto, uma observação da Seção 26.1 ainda necessita de explicação. Como objetos com cargas de sinais quaisquer exercem forças atrativas sobre um objeto *neutro*?

Para começar a responder à questão, consideremos um condutor neutro. A **FIGURA 26.11** mostra um bastão positivamente carregado mantido próximo – mas sem o tocar – a um eletroscópio *neutro*. As folhas se afastam e se mantêm afastadas enquanto o bastão for mantido próximo, mas rapidamente descem para suas posições normais quando o bastão é removido. Podemos compreender esse comportamento?

Podemos, sim, e a **FIGURA 26.12a** mostra como. Embora o metal como um todo ainda esteja eletricamente neutro, dizemos que o objeto foi *polarizado*. A **polarização da carga** consiste em uma leve separação das cargas positivas e negativas em um objeto neutro. A polarização da carga produz um excesso de cargas positivas nas folhas do eletroscópio mostrado na **FIGURA 26.12b**, de modo que elas se repelem. Mas, devido ao fato de o eletroscópio não possuir uma carga *líquida*, o mar de elétrons rapidamente se reajustará uma vez que o bastão seja removido.

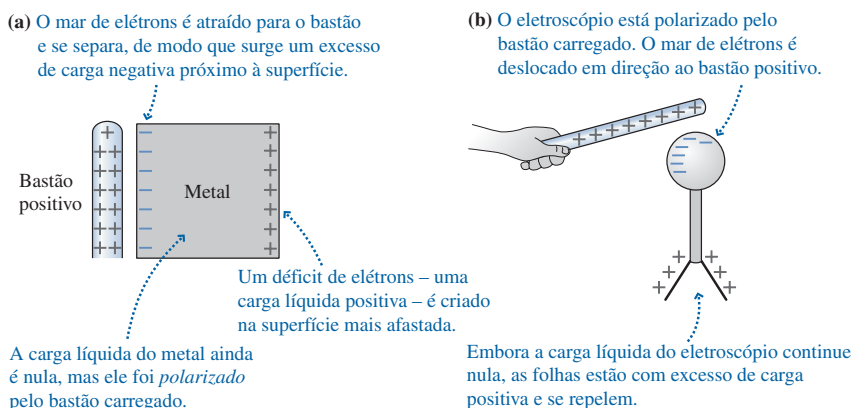


FIGURA 26.12 Um bastão carregado polariza um metal.



As partículas de tinta de uma máquina fotocopadora grudam-se a *gotas portadoras* eletrizadas devido a uma força de polarização. Em seguida, as partículas de tinta são transferidas para áreas previamente eletrizadas de uma folha de papel, produzindo, assim, uma fotocópia da imagem.

Por que nem *todos* os elétrons na Figura 26.12a vão para o lado carregado positivamente? Uma vez que o mar de elétrons se desvia ligeiramente, os íons positivos estacionários começam a exercer uma força restauradora, que puxa os elétrons de volta para a direita. A posição de equilíbrio para o mar de elétrons está suficientemente deslocada para a esquerda para que as forças exercidas pelas cargas externas e pelos íons positivos estejam equilibradas. Na prática, o deslocamento do mar de elétrons é geralmente *menor do que* 10^{-15} m!

A polarização da carga explica não somente por que as folhas do eletroscópio se defletem, mas também como um objeto carregado exerce uma força atrativa sobre um objeto neutro. A **FIGURA 26.13** mostra um bastão carregado positivamente próximo a um pedaço de metal neutro. Uma vez que a força elétrica diminui com a distância, a força atrativa sobre os elétrons no topo da superfície é *levemente maior* do que a força repulsiva dos íons no fundo. A força resultante orientada para o bastão carregado é chamada de **força de polarização**. As forças de polarização surgem por causa da separação de cargas no metal, e *não*, porque o bastão e o metal estão carregados com cargas de sinais opostos.

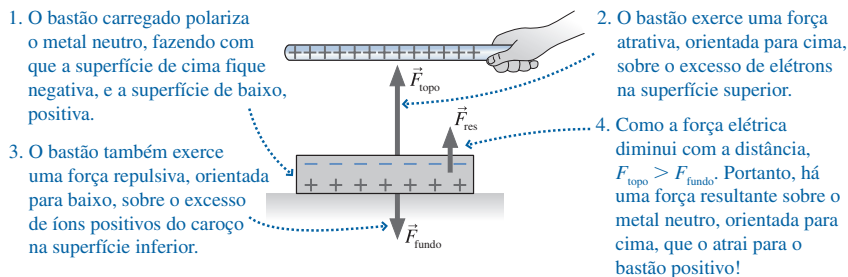


FIGURA 26.13 A força de polarização em um pedaço de metal neutro deve-se à pequena separação de cargas.

Um bastão negativamente carregado irá empurrar o mar de elétrons para longe de si, polarizando o metal com cargas positivas na superfície superior, e cargas negativas, na inferior. Mais uma vez, essas são as condições para que a carga exerça uma *força resultante atrativa* sobre o metal. Assim, nosso modelo de carga explica como um objeto carregado de sinal *qualquer* atrai pequenos pedaços metálicos neutros.

O dipolo elétrico

Agora vamos considerar uma situação um pouco mais complicada. Por que um bastão carregado atrai papel, que é um isolante, e não, um metal? Primeiro considere o que ocorre quando um átomo é aproximado de uma carga positiva. Como mostra a **FIGURA 26.14a**, a carga polariza o átomo. A nuvem eletrônica não se afasta muito, pois a força do núcleo positivo a puxa de volta, entretanto o centro de carga positiva e o centro de carga negativa estão levemente separados.

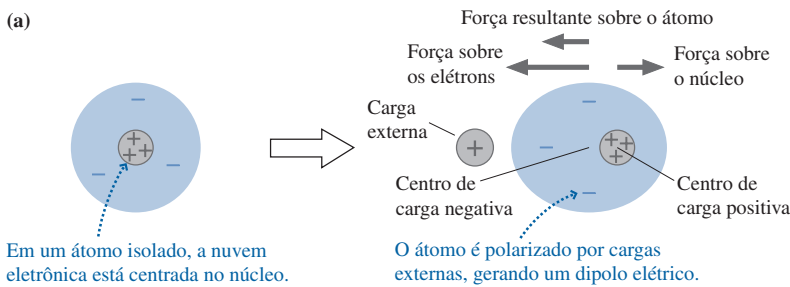


FIGURA 26.14 Um átomo neutro é polarizado por uma carga externa, dando origem a um dipolo elétrico.

Dois cargas opostas com uma pequena separação entre si formam, então, o que chamamos de **dipolo elétrico**. A **FIGURA 26.14b** mostra que uma carga externa de sinal qualquer polariza o átomo, dando origem a um dipolo elétrico com o lado adjacente de sinal oposto ao da carga. (A distorção real em relação a uma esfera perfeita é minúscula, nada comparada à distorção ilustrada na figura.) A força atrativa no lado do dipolo próximo à carga é *ligeiramente maior* do que a força repulsiva no lado oposto, pois aquele lado está mais próximo à carga externa. A força resultante, uma força *atrativa* entre a carga e o átomo, constitui outro exemplo de força de polarização.

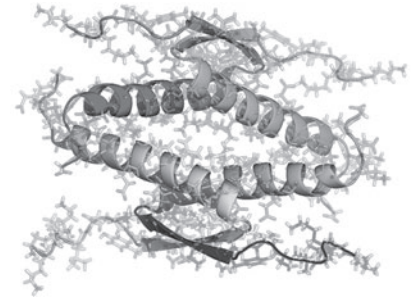
Um isolante não contém o mar de elétrons que se desloca se uma carga externa for aproximada dele. Em vez disso, conforme mostra a **FIGURA 26.15**, todos os átomos individuais do isolante tornam-se polarizados. A força de polarização exercida *sobre cada átomo* dá origem a uma força de polarização resultante orientada para a carga externa. Isto resolve o quebra-cabeça. Um bastão carregado atrai pedaços de papel porque ele

- Polariza os átomos do papel,
- E, deste modo, exerce uma força de polarização atrativa sobre cada átomo.

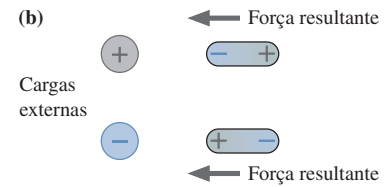
Isto é importante. Tenha certeza de ter entendido todos os passos do raciocínio.

PARE E PENSE 26.3 Um eletroscópio é positivamente carregado por *contato* com um bastão de vidro positivamente carregado. As folhas do eletroscópio se separam, e, depois, o bastão de vidro é removido. Em seguida, um bastão de plástico negativamente carregado é aproximado da parte superior do eletroscópio, mas sem fazer contato. O que acontece com as folhas?

- a. As folhas se aproximam.
- b. As folhas se afastam ainda mais.
- c. Uma das folhas se move para cima, e outra, para baixo.
- d. As folhas não se movem.



As forças intramoleculares que dão forma as moléculas biológicas, como esta proteína, estão relacionadas às forças de polarização.



Dipolos elétricos podem ser criados por cargas positivas ou negativas. Em ambos os casos, há uma força resultante atrativa que aponta para a carga externa.

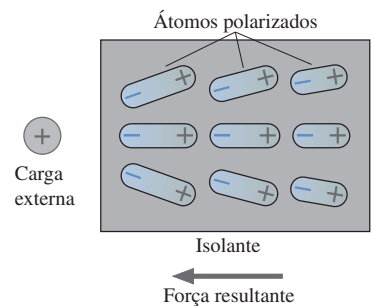


FIGURA 26.15 Os átomos de um isolante são polarizados por uma carga externa.

Eletrização por indução

A polarização da carga é responsável por uma maneira interessante e contra-intuitiva de carregar um eletroscópio. A FIGURA 26.16 mostra um bastão de vidro positivamente carregado que é mantido próximo a um eletroscópio, sem tocá-lo, enquanto uma pessoa encosta um dedo no aparelho. Ao contrário do que acontece na Figura 26.11, as folhas do eletroscópio não se movem.

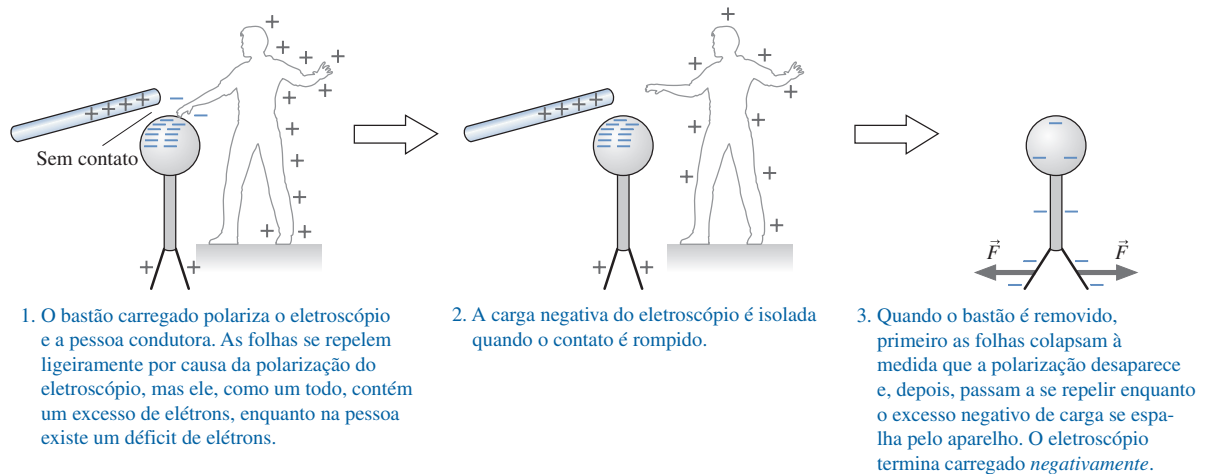


FIGURA 26.16 Eletrização por indução.

A polarização da carga ocorre como descrito na Figura 26.11, mas, desta vez, no grande sistema eletroscópio + pessoa condutora. Se a pessoa remover o dedo enquanto o sistema estiver polarizado, o eletroscópio ficará com uma carga *resultante* negativa, e a pessoa, com uma carga *resultante* positiva. Por um processo chamado de **eletrização por indução**, o eletroscópio tornou-se carregado com uma carga *oposta à do bastão*.

26.4 A lei de Coulomb



Uma reprodução do século XIX da balança de torção de Coulomb.

As últimas seções estabeleceram *um modelo* de cargas e de forças elétricas. O modelo é muito bom para explicar fenômenos elétricos e fornece uma visão geral da eletricidade. Agora precisamos torná-lo quantitativo. O Experimento 4 da Seção 26.1 mostrou que a força elétrica aumenta para objetos que possuem maiores cargas e diminui quando os objetos carregados são afastados. A lei de força que descreve este comportamento é conhecida como *lei de Coulomb*.

Charles Coulomb foi um dos muitos cientistas que investigaram a eletricidade no século XVIII. Coulomb teve a idéia de estudar as forças elétricas utilizando um arranjo experimental com uma balança de torção com o qual Cavendish havia medido o valor da constante gravitacional G (ver Seção 13.4). Foi muito difícil realizar o experimento. As massas que Cavendish usara podiam ser colocadas nas suas posições sem sofrerem alterações posteriores, ao passo que Coulomb, de vez em quando, tinha de recarregar as extremidades de sua balança. Como ele conseguiu tornar isso reproduzível? Como Coulomb podia saber que os dois objetos haviam sido “igualmente carregados”? Como ele podia ter certeza do lugar onde a carga estava localizada?

A despeito desses obstáculos, em 1785 Coulomb comunicou que a força elétrica obedece a uma *lei do inverso do quadrado*, análoga à lei de Newton da gravitação. Historiadores da ciência ainda debatem se Coulomb realmente descobriu essa lei a partir dos seus dados obtidos ou se, talvez, tirou conclusões não-justificadas porque desejava que a sua descoberta rivalizasse com a do grande Newton. Entretanto, a descoberta de Coulomb ou sua feliz intuição, seja qual for, foi confirmada subsequentemente, e a lei básica da eletricidade leva hoje o seu nome.

LEI DE COULOMB:

1. Se duas partículas eletrizadas com cargas q_1 e q_2 estão afastadas uma da outra por uma distância r , as partículas exercem entre si forças de módulo dado por

$$F_{1 \text{ sobre } 2} = F_{2 \text{ sobre } 1} = \frac{K|q_1||q_2|}{r^2} \quad (26.2)$$

onde a constante K é chamada de **constante eletrostática**. Essas forças constituem um par ação/reação, tendo mesmo módulo e orientações opostas.

2. As forças estão orientadas ao longo de uma reta que passa pelas duas partículas. Elas são forças *repulsivas* para cargas de mesmo sinal e *atrativas* para cargas de sinais opostos.

Às vezes falamos em “a força entre a carga q_1 e a carga q_2 ”; todavia, devemos ter sempre em mente que, de fato, estamos lidando com *objetos* carregados que também possuem massa, tamanho e outras propriedades. A carga não é uma entidade imaterial que existe independentemente da matéria. A lei de Coulomb descreve as forças entre *partículas* carregadas, que também chamamos de **cargas puntiformes**. Uma partícula carregada, o que constitui uma extensão do modelo de partícula usado na Parte I, possui uma massa e uma carga, mas não, um tamanho.

A lei de Coulomb se parece muito com a lei de Newton da gravitação, mas há uma importante diferença: a carga q pode ser tanto negativa quanto positiva. Conseqüentemente, os valores absolutos dos sinais na Equação 26.2 são de especial importância. A primeira parte da lei de Coulomb fornece tão somente a *intensidade* (módulo) da força, uma grandeza que é sempre positiva. A orientação da força deve ser determinada a partir da segunda parte da lei. A **FIGURA 26.17** representa as forças entre diferentes combinações de cargas positivas e negativas.

Unidades de carga

Coulomb não dispunha de uma *unidade* de carga, portanto não foi capaz de determinar o valor da constante K , que depende tanto da unidade usada para a distância quanto da unidade de carga. A unidade SI para a carga, o **coulomb** (C), é derivada da unidade SI de *corrente*, de modo que teremos de esperar até o estudo da corrente, no Capítulo 31, antes de definir o coulomb precisamente. Por ora, faremos apenas a observação de que a unidade fundamental de carga e foi medida como tendo o valor

$$e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Trata-se de uma quantidade muito pequena de carga. Dito de outra forma, 1 C é a carga total de aproximadamente $6,25 \times 10^{18}$ prótons.

NOTA ► As quantidades de carga produzidas por atrito em bastões de plástico ou de vidro têm valores tipicamente na faixa de 1 nC (10^{-9} C) a 100 nC (10^{-7} C). Isto corresponde a excessos ou a déficits de aproximadamente 10^{10} a 10^{12} elétrons nos objetos. ◀

Uma vez que a unidade de carga esteja estabelecida, experimentos como os de Coulomb, com a balança de torção, podem ser usados para medir o valor da constante eletrostática K . Em unidades do SI,

$$K = 8,99 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$$

Costuma-se arredondar K por $9,0 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$ em tudo, exceto para cálculos extremamente precisos, e assim o faremos.

Surpreendentemente, veremos que a lei de Coulomb não é usada explicitamente na maior parte da teoria da eletricidade. Embora ela *seja* a lei de força básica, a maioria de nossas discussões e cálculos futuros serão baseados em entidades físicas chamadas de *campos* e *potenciais*. Tornar-se-á evidente que cálculos futuros serão mais fáceis de efetuar se expressarmos a lei de Coulomb em uma forma um pouco mais complicada. Vamos definir uma nova constante, chamada de **constante de permissividade** ϵ_0 (pronunciada “épsilon zero”), como

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi K} = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N m}^2$$

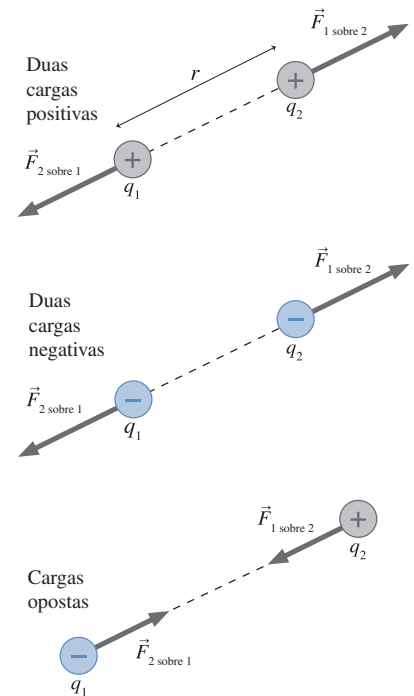


FIGURA 26.17 Forças atrativas e repulsivas entre cargas.

Reescrevendo a lei de Coulomb em termos de ϵ_0 , temos

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad (26.3)$$

Será mais fácil utilizar a lei de Coulomb diretamente com a constante eletrostática K . Entretanto, nos capítulos posteriores iremos trocar para a segunda versão com ϵ_0 .

Usando a lei de Coulomb



11.1-11.3

A lei de Coulomb é uma lei de força, e forças são grandezas vetoriais. Já se passaram muitos capítulos desde que fizemos uso de vetores e de soma vetorial, mas essas técnicas matemáticas serão essenciais para o nosso estudo da eletricidade e do magnetismo. Talvez você deva revisar a soma de vetores no Capítulo 3.

Há três observações importantes a fazer com relação à lei de Coulomb:

1. A lei de Coulomb se aplica somente a cargas puntiformes. Uma carga puntiforme é um objeto idealizado dotado de carga e massa, mas sem extensão ou tamanho. Para fins práticos, objetos carregados podem ser considerados como cargas puntiformes se forem muito menores do que a separação entre eles.
2. Estritamente falando, a lei de Coulomb se aplica somente à eletrostática, a força elétrica entre *cargas em repouso*. Na prática, a lei de Coulomb é uma boa aproximação para a força elétrica entre cargas em movimento se a velocidade relativa entre ambas for muito menor do que a velocidade da luz.
3. Forças elétricas, como outras forças, podem ser superpostas. Se estiverem presentes múltiplas cargas 1, 2, 3..., a força elétrica *resultante* sobre a carga j , devida a todas outras cargas, é

$$\vec{F}_{\text{res}} = \vec{F}_{1 \text{ sobre } j} + \vec{F}_{2 \text{ sobre } j} + \vec{F}_{3 \text{ sobre } j} + \dots \quad (26.4)$$

onde cada uma das $\vec{F}_{i \text{ sobre } j}$ é dada pela Equação 26.2 ou 26.3.

Essas condições formam a base da estratégia para o emprego da lei de Coulomb na resolução de problemas sobre forças eletrostáticas.

ESTRATÉGIA PARA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS 26.1

Forças eletrostáticas e a lei de Coulomb



MODELO Identifique as cargas puntiformes ou os objetos que possam ser considerados como cargas puntiformes.

VISUALIZAÇÃO Faça uma *representação pictórica* para estabelecer o sistema de coordenadas, indique as posições das cargas, represente os vetores força sobre as cargas, defina as distâncias e os ângulos relevantes e identifique o que o problema pede para determinar. Este é o processo de transformação de palavras em símbolos.

RESOLUÇÃO A representação matemática é baseada na lei de Coulomb:

$$F_{1 \text{ sobre } 2} = F_{2 \text{ sobre } 1} = \frac{K|q_1||q_2|}{r^2}$$

- Indique as orientações das forças – repulsivas para cargas de mesmo sinal, atrativas para cargas de sinais opostos – na representação pictórica.
- Quando possível, mostre graficamente a soma vetorial na representação ilustrada. Mesmo não sendo exato, o desenho lhe indicará que tipo de resposta se deve esperar.
- Escreva cada vetor força em termos de seus componentes x e y e, depois, some os componentes a fim de obter a força resultante. Use a representação pictórica para determinar qual componente é positivo e qual é negativo.

AValiação Verifique se seu resultado está expresso nas unidades corretas, se é coerente e se responde à questão.

EXEMPLO 26.3 A soma de duas forças

Duas partículas carregadas com +10 nC estão separadas por 2 cm sobre o eixo x. Qual é a força resultante sobre uma partícula de +1,0 nC posicionada no ponto médio da distância entre elas? Qual será a força resultante se a partícula da direita for substituída por outra, com -10 nC de carga?

MODELO Considere as partículas carregadas como cargas puntiformes.

VISUALIZAÇÃO A FIGURA 26.18 define o sistema de coordenadas a ser usado e representa as forças $\vec{F}_{1 \text{ sobre } 3}$ e $\vec{F}_{2 \text{ sobre } 3}$.

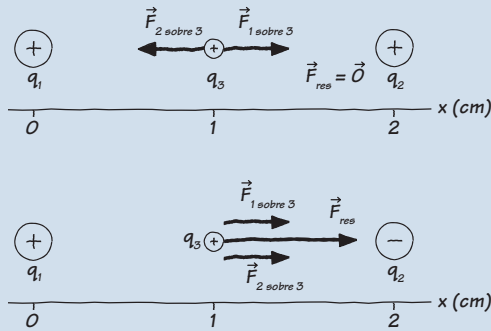


FIGURA 26.18 Uma representação pictórica das cargas e forças.

RESOLUÇÃO Forças elétricas são vetores, e a força resultante sobre q_3 é a soma vetorial $\vec{F}_{\text{res}} = \vec{F}_{1 \text{ sobre } 3} + \vec{F}_{2 \text{ sobre } 3}$. Cada uma das cargas q_1 e q_2 exerce uma força repulsiva sobre q_3 , mas elas são de mesmo módulo e de sentidos opostos. Conseqüentemente, $\vec{F}_{\text{res}} = \vec{0}$. A situação mudará se q_2 for negativa. Neste caso, as duas forças terão mesmo módulo e mesma orientação, apontando ambas no mesmo sentido, de modo que $\vec{F}_{\text{res}} = 2\vec{F}_{1 \text{ sobre } 3}$. O módulo da força é dado pela lei de Coulomb:

$$F_{1 \text{ sobre } 3} = \frac{K|q_1||q_3|}{r_{13}^2} = \frac{(9,0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(10 \times 10^{-9} \text{ C})(1,0 \times 10^{-9} \text{ C})}{(0,010 \text{ m})^2} = 9,0 \times 10^{-4} \text{ N}$$

Portanto, a força resultante sobre a carga de 1,0 nC é $\vec{F}_{\text{res}} = 1,8 \times 10^{-3} \hat{i} \text{ N}$.

AVALIAÇÃO Este exemplo ilustra a idéia importante de que as forças elétricas são *vetores*.

EXEMPLO 26.4 O ponto de força nula

Duas partículas positivamente carregadas com q_1 e $q_2 = 3q_1$ estão afastadas uma da outra por 10 cm. Onde (excetuando-se o infinito) pode ser colocada uma terceira carga q_3 de forma que ela experimente uma força resultante nula?

MODELO Considere as partículas carregadas como cargas puntiformes.

VISUALIZAÇÃO A FIGURA 26.19 define o sistema de coordenadas usado, em que q_1 está na origem. Primeiro, precisamos identificar a região do espaço na qual q_3 deve ser posicionada. Não temos informação acerca do sinal de q_3 , portanto aparentemente a posição pela qual procuramos funcionará para qualquer sinal. Você pode ver pela figura que, no ponto A, acima do eixo, e no ponto B, além das cargas, as forças não podem se cancelar. Entretanto, no ponto C sobre o eixo x, na região entre as cargas, as duas forças possuem sentidos opostos.

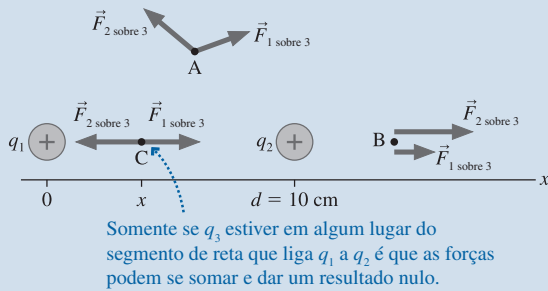


FIGURA 26.19 Representação pictórica das cargas e das forças

RESOLUÇÃO O problema matemático é determinar a posição para a qual as forças $\vec{F}_{1 \text{ sobre } 3}$ e $\vec{F}_{2 \text{ sobre } 3}$ possuem módulos iguais. Se x for a distância dessa posição em relação a q_1 , sua posição em relação a q_2 será, então, $d - x$. As intensidades (módulos) das forças são

$$F_{1 \text{ sobre } 3} = \frac{Kq_1|q_3|}{r_{13}^2} = \frac{Kq_1|q_3|}{x^2}$$

$$F_{2 \text{ sobre } 3} = \frac{Kq_2|q_3|}{r_{23}^2} = \frac{K(3q_1)|q_3|}{(d - x)^2}$$

As cargas q_1 e q_2 são positivas e não é preciso tomar seus módulos. Igualando as duas forças, obtemos

$$\frac{Kq_1|q_3|}{x^2} = \frac{3Kq_1|q_3|}{(d - x)^2}$$

O termo $Kq_1|q_3|$ é cancelado. Multiplicando por $x^2(d - x)^2$, encontramos

$$(d - x)^2 = 3x^2$$

o que pode ser rearranjado na forma da equação quadrática

$$2x^2 + 2dx - d^2 = 2x^2 + 20x - 100 = 0$$

onde usamos $d = 10 \text{ cm}$ e x está em cm. As soluções para a equação são

$$x = +3,66 \text{ cm} \quad \text{e} \quad -13,66 \text{ cm}$$

Ambos correspondem a pontos onde as intensidades (módulos) das duas forças são iguais, todavia $x = -13,66 \text{ cm}$ corresponde a um ponto onde os módulos são iguais e apontam no mesmo sentido. A solução pela qual procuramos, correspondente a uma carga puntiforme posicionada entre as cargas, é $x = 3,66 \text{ cm}$. Portanto, o ponto onde colocar q_3 situa-se a 3,66 cm de distância de q_1 , ao longo da linha que une q_1 e q_2 .

AVALIAÇÃO A carga q_1 é menor do que q_2 , portanto esperamos que o ponto no qual as forças se equilibram esteja mais próximo de q_1 do que de q_2 . A solução parece plausível. Note que o enunciado do problema não define o sistema de coordenadas; assim, “ $x = 3,66 \text{ cm}$ ” não é uma resposta aceitável. Você precisa descrever a posição em relação a q_1 e q_2 .

EXEMPLO 26.5 Três cargas

Três partículas carregadas com $q_1 = -50 \text{ nC}$, $q_2 = +50 \text{ nC}$ e $q_3 = +30 \text{ nC}$ são colocadas nos cantos do retângulo de $5,0 \text{ cm} \times 10,0 \text{ cm}$ mostrado na FIGURA 26.20. Qual é a força resultante sobre a carga q_3 devida às duas outras cargas? Expresse sua resposta em módulo e orientação.

MODELO Considere as partículas carregadas como cargas puntiformes.

VISUALIZAÇÃO A representação pictórica da FIGURA 26.21 define o sistema de coordenadas a ser usado. As cargas q_1 e q_2 são de sinais opostos, portanto o vetor força $\vec{F}_{1 \text{ sobre } 3}$ corresponde a uma força atrativa orientada para q_1 . As cargas q_2 e q_3 são de mesmo sinal, portanto o vetor $\vec{F}_{2 \text{ sobre } 3}$ corresponde a uma força repulsiva que tende a afastar q_3 de q_2 . As cargas q_1 e q_2 têm módulos iguais, mas $\vec{F}_{2 \text{ sobre } 3}$ foi desenhado com um comprimento menor do que o de $\vec{F}_{1 \text{ sobre } 3}$ porque q_2 está mais distante de q_3 . A soma vetorial foi usada para desenhar o vetor força resultante \vec{F}_3 e para definir o ângulo.

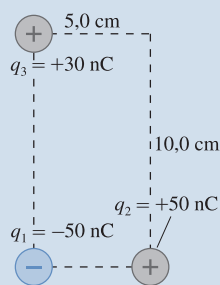


FIGURA 26.20 As três cargas do Exemplo 26.5.

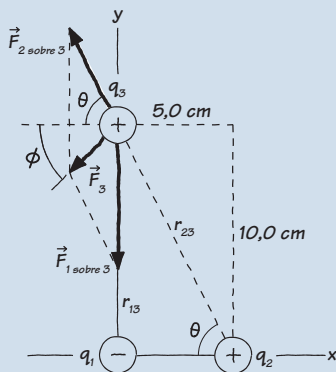


FIGURA 26.21 Uma representação pictórica para as cargas e forças.

RESOLUÇÃO A questão pede por uma *força*, então nossa resposta será o *vetor* soma $\vec{F}_3 = \vec{F}_{1 \text{ sobre } 3} + \vec{F}_{2 \text{ sobre } 3}$. Precisamos escrever $\vec{F}_{1 \text{ sobre } 3}$ e $\vec{F}_{2 \text{ sobre } 3}$ em função dos componentes correspondentes. O módulo da força $F_{1 \text{ sobre } 3}$ pode ser determinado através da lei de Coulomb:

$$F_{1 \text{ sobre } 3} = \frac{K|q_1||q_3|}{r_{13}^2} = \frac{(9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2)(50 \times 10^{-9} \text{ C})(30 \times 10^{-9} \text{ C})}{(0,100 \text{ m})^2} = 1,35 \times 10^{-3} \text{ N}$$

onde usamos $r_{13} = 10,0 \text{ cm}$. A representação pictórica mostra que $\vec{F}_{1 \text{ sobre } 3}$ aponta para baixo, no sentido negativo de y; logo,

$$F_{1 \text{ sobre } 3} = -1,35 \times 10^{-3} \hat{j} \text{ N}$$

Para calcular $\vec{F}_{2 \text{ sobre } 3}$ primeiro precisamos da distância r_{23} entre as cargas

$$r_{23} = \sqrt{(5,0 \text{ cm})^2 + (10,0 \text{ cm})^2} = 11,2 \text{ cm}$$

Portanto, o módulo de $\vec{F}_{2 \text{ sobre } 3}$ é

$$F_{2 \text{ sobre } 3} = \frac{K|q_2||q_3|}{r_{23}^2} = \frac{(9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2)(50 \times 10^{-9} \text{ C})(30 \times 10^{-9} \text{ C})}{(0,112 \text{ m})^2} = 1,08 \times 10^{-3} \text{ N}$$

Isto é apenas a intensidade. O *vetor* $\vec{F}_{2 \text{ sobre } 3}$ é

$$\vec{F}_{2 \text{ sobre } 3} = -F_{2 \text{ sobre } 3} \cos \theta \hat{i} + F_{2 \text{ sobre } 3} \sin \theta \hat{j}$$

onde o ângulo θ é definido na figura e o sinal (componente x negativo e componente y positivo) foi determinado a partir da representação pictórica. Da geometria do retângulo,

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{10,0 \text{ cm}}{5,0 \text{ cm}} \right) = \text{tg}^{-1}(2,0) = 63,4^\circ$$

Portanto, $\vec{F}_{2 \text{ sobre } 3} = (-4,83 \hat{i} + 9,66 \hat{j}) \times 10^{-4} \text{ N}$. Agora podemos adicionar $\vec{F}_{1 \text{ sobre } 3}$ e $\vec{F}_{2 \text{ sobre } 3}$ para obter

$$\vec{F}_3 = \vec{F}_{1 \text{ sobre } 3} + \vec{F}_{2 \text{ sobre } 3} = (-4,83 \hat{i} - 3,84 \hat{j}) \times 10^{-4} \text{ N}$$

Esta poderia ser uma resposta aceitável para muitos problemas, mas às vezes precisamos da força resultante dada em intensidade (módulo) e orientação. Com o ângulo θ definido conforme a figura, temos

$$F_3 = \sqrt{F_{3x}^2 + F_{3y}^2} = 6,2 \times 10^{-4} \text{ N}$$

$$\phi = \text{tg}^{-1} \left(\frac{F_{3y}}{F_{3x}} \right) = 38^\circ$$

Portanto $\vec{F}_3 = (6,2 \times 10^{-4} \text{ N}, 38^\circ \text{ abaixo do eixo } x \text{ negativo})$.

AVALIAÇÃO As forças não são grandes, mas são forças típicas da eletrostática. Mesmo assim, veremos logo adiante que tais forças podem produzir grandes acelerações porque as massas dos objetos carregados sobre os quais elas são exercidas são geralmente muito pequenas.

EXEMPLO 26.6 Erguendo uma conta de vidro

Uma pequena esfera de plástico carregada com -10 nC está suspensa 1 cm acima de uma pequena conta de vidro que se encontra em repouso sobre uma mesa. A conta tem massa de 15 mg e carga de $+10 \text{ nC}$. A conta de vidro saltará para cima, em direção à esfera de plástico?

MODELO Considere a esfera de plástico e a conta de vidro como cargas puntiformes.

VISUALIZAÇÃO A FIGURA 26.22 define o eixo y, identifica a esfera plástica por q_1 e a conta de vidro por q_2 e mostra o diagrama de corpo livre correspondente.

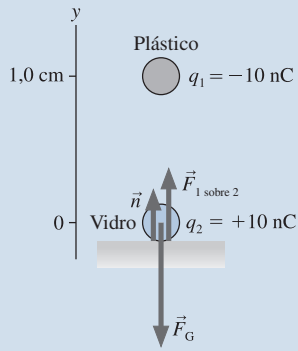


FIGURA 26.22 Uma representação pictórica para as cargas e as forças.

RESOLUÇÃO Se $F_{1 \text{ sobre } 2}$ for menor do que o módulo da força gravitacional $F_G = m_{\text{conta}} g$, então a conta permanecerá em repouso sobre a mesa com $F_{1 \text{ sobre } 2} + F_G + \vec{n} = \vec{0}$. Mas se $F_{1 \text{ sobre } 2}$ for maior do que $m_{\text{conta}} g$, a conta de vidro será acelerada para cima em relação à mesa. Usando os valores fornecidos, temos

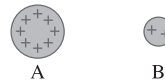
$$F_{1 \text{ sobre } 2} = \frac{K|q_1||q_2|}{r^2} = 9,0 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_G = m_{\text{conta}} g = 1,5 \times 10^{-4} \text{ N}$$

Como $F_{1 \text{ sobre } 2}$ é maior do que $m_{\text{conta}} g$ por um fator igual a 60, a conta de vidro saltará.

AVALIAÇÃO Os valores usados no exemplo são realistas para esferas com diâmetro ≈ 2 mm. Em geral, como no exemplo, as forças elétricas são *significativamente* maiores do que as gravitacionais. Conseqüentemente podemos desprezar a gravidade quando trabalharmos em problemas sobre força elétrica, a menos que as partículas tenham massas grandes.

PARE E PENSE 26.4 As esferas carregadas A e B exercem entre si forças repulsivas. Sabemos que $q_A = 4 q_B$. Qual das afirmações abaixo é verdadeira?



- a. $F_{A \text{ sobre } B} > F_{B \text{ sobre } A}$ b. $F_{A \text{ sobre } B} = F_{B \text{ sobre } A}$ c. $F_{A \text{ sobre } B} < F_{B \text{ sobre } A}$

26.5 O modelo de campo

Como a gravidade, as forças elétricas e as forças magnéticas são forças de *ação a distância*. Não é necessário haver contato para que uma partícula carregada exerça uma força sobre outra partícula carregada. De alguma maneira, a força se transmite através do espaço. O conceito de *ação a distância* causou grande preocupação a muitos dos principais pensadores da época de Newton após a publicação da sua teoria da gravitação. Eles acreditavam que a força deveria ter algum *mecanismo* por meio do qual ela fosse exercida a distância, e a idéia de ação a distância sem um mecanismo aparente estava além do que muitos cientistas da época poderiam aceitar. Todavia, eles não podiam questionar o sucesso da teoria de Newton.

O grande prestígio e sucesso de Newton mantiveram as dúvidas e as reservas dos cientistas até o final do século XVIII, quando as pesquisas sobre os fenômenos elétricos e magnéticos reabriram a questão da ação a distância. Por exemplo, considere as partículas carregadas A e B da **FIGURA 26.23**. Se as partículas forem deixadas em repouso por um longo período de tempo, poderemos com certeza usar a lei de Coulomb para determinar a força que A exerce sobre B. Mas suponha que, subitamente, A começasse a se mover como indicado pela seta. Em resposta, o vetor força sobre B deveria girar para seguir A. Isso ocorre *instantaneamente*? Ou existe algum *atraso* entre o instante em que A se move e o instante em que a força $\vec{F}_{A \text{ sobre } B}$ varia correspondentemente?

Nem a lei de Coulomb nem a lei de Newton da gravitação dependem do tempo, de modo que a resposta, segundo a perspectiva da física newtoniana, teria de ser “instantaneamente”. Muitos cientistas ainda consideravam isso preocupante. O que acontece se A estiver a 100.000 anos-luz de B? A partícula B irá responder *instantaneamente* a um evento que ocorre a 100.000 anos-luz de distância? No começo do século XIX, a idéia de transmissão instantânea de forças através do espaço começava a perder crédito junto a muitos cientistas. Mas se existe de fato um atraso, de quanto é seu valor? Como a informação “variação da força” se transmite de A para B? Eram estas as questões quando um jovem, Michael Faraday, entrou em cena.

Michael Faraday é uma das figuras mais interessantes da história da ciência. Nascido em 1791, filho de um pobre ferreiro vivendo nos arredores de Londres, Faraday foi enviado muito jovem para trabalhar, com quase nenhuma educação formal. Na adolescência, Faraday trabalhou com um tipógrafo e restaurador de livros, e lá começou a ler obras

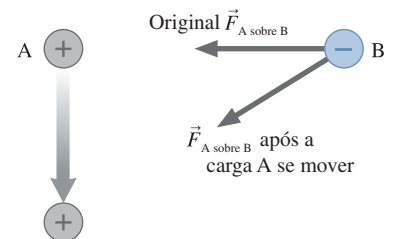


FIGURA 26.23 Se a carga A se move, quanto tempo leva para o vetor força sobre B variar?

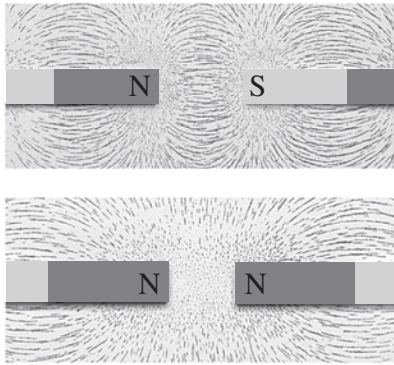


FIGURA 26.24 A limalha de ferro aspergida sobre as extremidades de um ímã sugere que a influência do mesmo se estende através do espaço à sua volta.

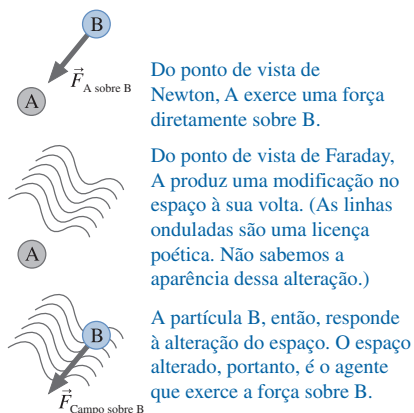


FIGURA 26.25 Idéias de Newton e de Faraday sobre as forças de ação a distância.

Eu prefiro procurar por uma explicação (dos fenômenos elétricos e magnéticos) que os considere produzidos por ações que se propagam através do meio circundante, bem como dos corpos excitados, e me empenho em explicar a ação entre corpos distantes sem presumir a existência de forças capazes de atuar diretamente... A teoria que proponho, portanto, pode ser chamada de uma teoria do Campo Eletromagnético por estar relacionada ao espaço nas vizinhanças de corpos elétricos e magnéticos.

James Clerk Maxwell, 1865.

que chegavam à loja. Por acaso, um dia um cliente trouxe uma cópia da *Encyclopedia Britannica* para ser reparada, e Faraday descobriu lá um extenso artigo sobre a eletricidade. Aquilo foi a centelha necessária para lançá-lo em uma carreira que, após sua morte, iria torná-lo um dos cientistas mais prestigiosos da Europa.

Você aprenderá mais sobre Faraday nos capítulos seguintes. Por ora basta mencionar que Faraday nunca foi capaz de se tornar fluente em matemática. Aparentemente a idade tardia com que começou seus estudos era muito elevada, o que prejudicou sua aprendizagem da matemática. Em lugar da matemática, a mente brilhante e perspicaz de Faraday desenvolveu engenhosos métodos *pictóricos* de pensar e descrever fenômenos físicos. Sem dúvida, o mais importante desses métodos é o relacionado ao conceito de campo.

O conceito de campo

Faraday estava particularmente impressionado com o padrão que a limalha de ferro formava quando aspergida em torno de um ímã, como mostra a **FIGURA 26.24**. O padrão regular e as linhas curvas sugeriram a Faraday que o *próprio espaço* em torno do ímã estaria preenchido com algum tipo de influência magnética. Esta alteração do espaço, seja qual for, é o *mecanismo* através do qual uma força de ação a distância é exercida.

A **FIGURA 26.25** ilustra a idéia de Faraday. A visão newtoniana era a de que A e B interagem diretamente um com o outro. Na visão de Faraday, primeiro A altera ou modifica o espaço à sua volta, e, depois, a partícula B chega e interage com esse espaço alterado. A alteração do espaço torna-se o *agente* através do qual A e B interagem mutuamente. Além disso, essa alteração pode facilmente ser imaginada como tendo um tempo de propagação finito para longe de A, talvez sob a forma de algum tipo de onda. Se A sofrer uma alteração, B responderá a ela somente quando a alteração do espaço produzida por A o alcançar. A interação entre B e a alteração do espaço é uma interação *local*, mais do que uma força de contato.

A idéia de Faraday viria a ser chamada de **campo**. O termo “campo”, que provém da matemática, se refere a uma função $f(x, y, z)$ que assinala um valor a cada ponto do espaço. Quando utilizado na física, o termo campo expressa a idéia de que uma dada entidade física existe em todos os pontos do espaço. É isso o que Faraday realmente sugeriu acerca de como operam as forças de ação a distância. A carga produz uma alteração em *todos os lugares* do espaço. Outras cargas, então, respondem à alteração do espaço nos lugares em que elas estão. A alteração do espaço em torno de uma massa é chamada de **campo gravitacional**. De forma análoga, uma carga altera o espaço em torno de si gerando um **campo elétrico**.

NOTA ▶ O conceito de campo está em franco contraste com o conceito de partícula. Uma partícula existe em um ponto do espaço. A finalidade das leis de Newton do movimento é determinar como uma partícula se move de um ponto para outro ao longo de uma trajetória. Já um campo é algo que existe simultaneamente em todos os pontos do espaço. Uma onda constitui um exemplo de campo, embora o termo não tenha sido usado durante o nosso estudo das ondas. ◀

Faraday propôs uma maneira original de pensar sobre como um objeto exerce força sobre outro. No início, sua idéia não foi levada a sério; ela parecia vaga demais e não-matemática para os cientistas impregnados pela tradição newtoniana de partículas e forças. Mas a importância do conceito de campo foi crescendo à medida que a teoria eletromagnética se desenvolveu durante a primeira metade do século XIX. O que parecia, à primeira vista, um “truque”, começou a ser visto cada vez mais como essencial para a compreensão das forças elétricas e magnéticas.

Em 1865, as idéias de campo de Faraday foram finalmente embasadas em fundamentos matemáticos por James Clerk Maxwell, um físico escocês que possuía grande percepção física e habilidade matemática. Maxwell foi capaz de descrever completamente todos os comportamentos conhecidos dos campos elétricos e magnéticos com quatro equações, hoje conhecidas como as equações de Maxwell. Exploraremos aspectos da teoria de Maxwell à medida que avançarmos no curso, até que, no Capítulo 35, vejamos todas as implicações das equações de Maxwell.

O campo elétrico

Iniciaremos nossa investigação dos campos elétricos postulando um **modelo de campo** que descreve como as cargas interagem:

1. Algumas cargas, que denominaremos **cargas-fonte**, alteram o espaço ao redor de si pela criação de um *campo elétrico* \vec{E} .
2. Toda carga isolada, *dentro* de um campo elétrico, experimenta uma força \vec{F} exercida *pelo campo*.

Devemos resolver duas tarefas para fazer deste um modelo útil para as interações elétricas. Primeiro, devemos aprender como calcular o campo elétrico para uma configuração de cargas-fonte. Segundo, devemos determinar as forças exercidas sobre uma carga e o movimento da mesma dentro do campo elétrico.

Suponha que a carga q experimente uma força elétrica $\vec{F}_{\text{sobre } q}$ devido a outras cargas. A orientação dessa força varia de ponto a ponto através do espaço, de modo que $\vec{F}_{\text{sobre } q}$ é uma função contínua das coordenadas (x, y, z) da carga. Isto sugere que “alguma coisa” presente em cada ponto no espaço é o agente da força que a carga q experimenta. Vamos definir o campo elétrico \vec{E} no ponto (x, y, z) como

$$\vec{E}(x, y, z) \equiv \frac{\vec{F}_{\text{sobre } q} \text{ em } (x, y, z)}{q} \tag{26.5}$$

Estamos *definindo* o campo elétrico como uma razão entre força e carga, de modo que a unidade de campo elétrico é o newton por coulomb, ou N/C. O módulo E do campo elétrico é chamado de **intensidade de campo elétrico**.

Você pode pensar em usar uma carga de *prova* q para determinar se existe um campo elétrico em um determinado ponto do espaço. Se a carga q experimentar uma força elétrica naquele ponto do espaço, como ilustra a **FIGURA 26.26a**, dizemos que existe um campo elétrico naquele ponto causando a força. Adiante, *definiremos* o campo elétrico em um ponto como o vetor dado pela Equação 26.5. A **FIGURA 26.26b** representa o campo elétrico em dois pontos apenas, entretanto você pode imaginar “um mapa” do campo elétrico obtido posicionando a carga de prova q em todos os pontos do espaço.

NOTA ► A carga de prova q também produz um campo elétrico. Mas cargas não exercem forças sobre si mesmas, de maneira que com a carga q se mede apenas o campo elétrico gerado por outras cargas. ◀

A idéia básica do modelo de campo é a de que **o campo é o agente que exerce uma força elétrica sobre a carga q** . Note três idéias importantes sobre o campo:

1. A Equação 26.5 associa um *vetor* a *cada ponto* no espaço, isto é, o campo elétrico é um *campo vetorial*. Diagramas de campo elétrico mostrarão uma amostra de vetores, mas haverá um vetor campo elétrico em qualquer ponto, seja ele mostrado ou não ali.
2. Se q for positiva, o vetor campo elétrico apontará no mesmo sentido da força elétrica exercida sobre aquela carga.
3. Devido ao fato de q aparecer na Equação 26.5, pode parecer que o campo elétrico dependa do valor da carga de prova utilizada para sondar o campo. Todavia ele, de fato, não depende! A partir da lei de Coulomb, sabemos que a força $\vec{F}_{\text{sobre } q}$ é proporcional à q . Assim, o campo elétrico definido pela Equação 26.5 é *independente* da carga de prova q utilizada para sondá-lo. O campo elétrico depende apenas das cargas-fonte que o geram.

Na prática, geralmente invertemos a Equação 26.5 e encontramos a força exercida sobre uma carga por um campo elétrico conhecido. Isto é, uma carga q , em um ponto do espaço onde o campo elétrico é \vec{E} , experimenta uma força elétrica dada por

$$\vec{F}_{\text{sobre } q} = q\vec{E} \tag{26.6}$$

Se q for positiva, a força sobre ela terá a mesma orientação de \vec{E} . Sobre uma carga negativa, a força estará na mesma direção, porém em sentido *oposto* de \vec{E} .

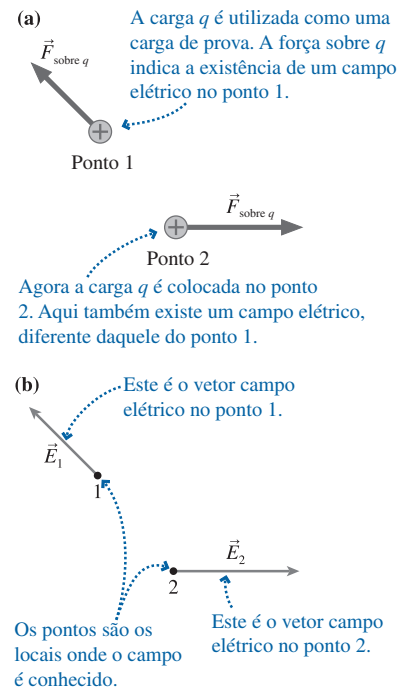
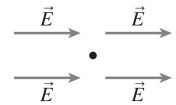


FIGURA 26.26 A carga q serve para sondar o campo elétrico.

PARE E PENSE 26.5 Um elétron é colocado na posição indicada pelo ponto da figura ao lado. A força exercida sobre o elétron é



- a. Nula
- b. Orientada para a direita
- c. Orientada para a esquerda
- d. Não há informação suficiente para responder

O campo elétrico de uma carga puntiforme

Usaremos a definição de campo elétrico em sua totalidade no próximo capítulo. Por ora, para desenvolver um pouco mais as idéias, determinaremos o campo elétrico gerado por uma única carga puntiforme q . A **FIGURA 26.27a** mostra a carga q e um ponto do espaço no qual desejamos conhecer o campo elétrico. Necessitamos de uma segunda carga, mostrada como q' na **FIGURA 26.27b**, que desempenhe o papel de uma sonda do campo elétrico.

Por enquanto, assumiremos que ambas as cargas sejam positivas. A força sobre q' , repulsiva e orientada radialmente para fora de q , é dada pela lei de Coulomb:

$$\vec{F}_{\text{sobre } q'} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2}, \text{ para fora de } q \right) \quad (26.7)$$

É usual empregar $1/4\pi\epsilon_0$ em vez de K em cálculos de campo. A Equação 26.5 definiu o campo elétrico em função da força exercida sobre uma carga de prova; logo, o campo elétrico neste ponto é

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{\text{sobre } q'}}{q'} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}, \text{ para fora de } q \right) \quad (26.8)$$

O campo elétrico é representado na **FIGURA 26.27c**.

NOTA ▶ A expressão para o campo elétrico é similar à lei de Coulomb. Para distinguir uma da outra, lembre-se de que a lei de Coulomb é dada pelo produto de duas cargas no numerador. Isso descreve a força entre duas cargas. A expressão para o campo elétrico contém uma única carga no numerador. Trata-se do campo criado por uma carga. ◀

A *intensidade* do campo à distância r da carga puntiforme que o criou é inversamente proporcional ao quadrado dessa distância: $E = q/4\pi\epsilon_0 r^2$. Na **FIGURA 26.28a**, a intensidade do campo E_1 é maior do que a intensidade do campo E_2 porque $r_1 < r_2$. Se calcularmos o campo em um número suficiente de pontos, poderemos desenhar um **diagrama de campo** tal como o mostrado na **FIGURA 26.28b**. Note que os vetores do campo apontam todos para fora da carga q . Note também quão rapidamente as setas diminuem em comprimento devido à dependência com o inverso do quadrado de r .

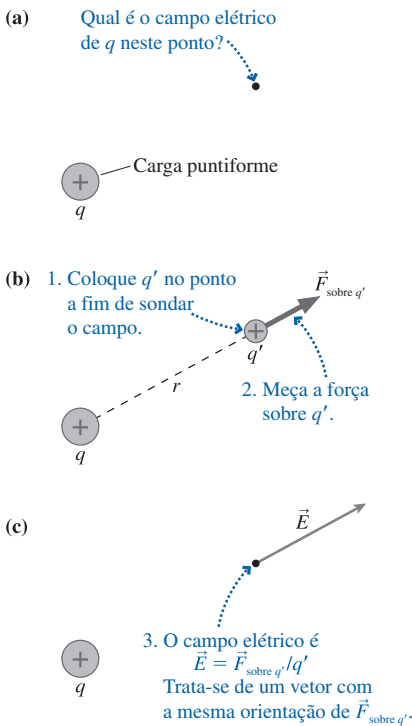


FIGURA 26.27 A carga q' é usada para sondar o campo elétrico criado por uma carga puntiforme q .

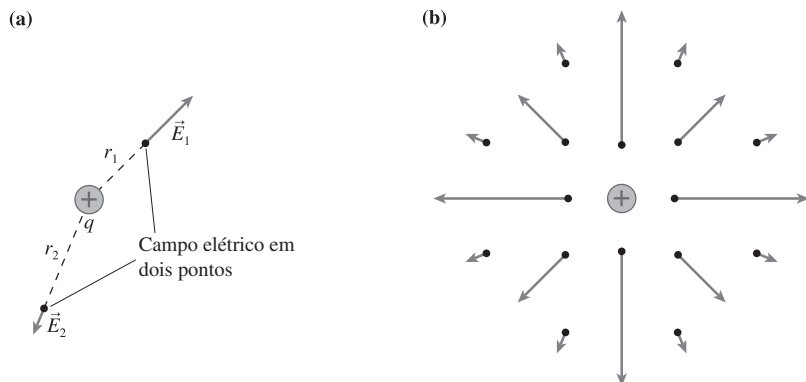


FIGURA 26.28 Campo elétrico de uma carga positiva.

Tenha em mente estes três pontos importantes quando for usar diagramas de campo:

1. O diagrama é apenas uma amostra representativa de vetores de um campo elétrico. O campo existe em todos os outros lugares. Um diagrama bem-desenhado pode informar com boa precisão o comportamento do campo nas vizinhanças do ponto.
2. A seta indica a orientação e a intensidade do campo elétrico *no ponto a partir do qual ela foi desenhada* – ou seja, no ponto onde se localiza a *origem* do vetor. Neste capítulo, indicaremos o local no qual o campo elétrico é medido por um ponto. O comprimento de qualquer vetor é relevante somente em relação aos comprimentos dos outros vetores envolvidos.
3. Embora tenhamos de desenhar vetores ao longo da página, de ponto em ponto, um vetor campo elétrico *não* é uma quantidade espacial. Ele não se “estica” de um ponto a outro. Cada vetor representa o campo elétrico apenas em *um ponto* do espaço.



Notação em vetores unitários

A Equação 26.8 é exata, mas não inteiramente conveniente. Além disso, o que acontecerá se a carga-fonte q for negativa? Precisamos de uma notação mais concisa para escrever o campo elétrico, uma notação que incorpore o fato de q poder ser tanto positiva quanto negativa.

A necessidade básica é expressar em notação matemática o que queremos dizer com “para fora de q ”. Tal expressão significa *uma orientação* no espaço. Para nos guiar, recorde-se de que já dispomos de uma notação para expressar certas orientações – a saber, os vetores unitários \hat{i} , \hat{j} e \hat{k} . Por exemplo, o vetor unitário \hat{i} significa “no sentido positivo do eixo x ”. Com sinal negativo, $-\hat{i}$ significa “no sentido negativo do eixo x ”. Vetores unitários, com módulos iguais a 1 adimensionais, fornecem informação apenas sobre a orientação.

Com isso em mente, vamos definir o vetor unitário \hat{r} como um vetor de comprimento 1 orientado da origem para o ponto de interesse. O vetor unitário \hat{r} não provê informação acerca da distância ao ponto. Ele apenas especifica a orientação (direção e sentido).

A FIGURA 26.29a representa os vetores unitários \hat{r}_1 , \hat{r}_2 e \hat{r}_3 apontando em direção aos pontos 1, 2 e 3. Diferentemente de \hat{i} e \hat{j} , o vetor unitário \hat{r} não tem uma orientação fixa. Em vez disso, o vetor unitário \hat{r} especifica a orientação “diretamente para fora de um dado ponto”. Porém isso é exatamente o que precisamos para descrever o vetor campo elétrico. A FIGURA 26.29b mostra o campo elétrico criado nos pontos 1, 2 e 3 por uma carga positiva localizada na origem. Independentemente do ponto que você escolha, o campo elétrico no mesmo aponta “diretamente para fora” da carga-fonte. Em outras palavras, o campo elétrico \vec{E} tem a mesma direção e sentido do vetor unitário \hat{r} .

Com essa notação, o campo elétrico à distância r de uma carga puntiforme q é dado por

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad (\text{campo elétrico de uma carga puntiforme}) \quad (26.9)$$

onde \hat{r} é um vetor unitário orientado da carga para o ponto no qual queremos determinar o campo. A Equação 26.9 é idêntica à Equação 26.8, todavia está escrita em uma notação na qual o vetor unitário \hat{r} expressa a idéia “para fora de q ”.

A Equação 26.9 funciona igualmente bem se q for negativa. Pôr um sinal negativo na frente de um vetor simplesmente inverte seu sentido, então o vetor unitário \hat{r} aponta *em direção* à carga q . A FIGURA 26.30 representa o campo elétrico criado por uma carga puntiforme negativa. Ele se parece com o campo elétrico de uma carga puntiforme positiva, exceto pelo fato de que os vetores apontam para dentro, em direção à carga, ao invés de para fora da mesma.

Encerraremos o capítulo com dois exemplos de campo elétrico criados por uma carga puntiforme. O Capítulo 27 expandirá essas idéias para o caso de campos elétricos criados por múltiplas cargas e por objetos extensos.

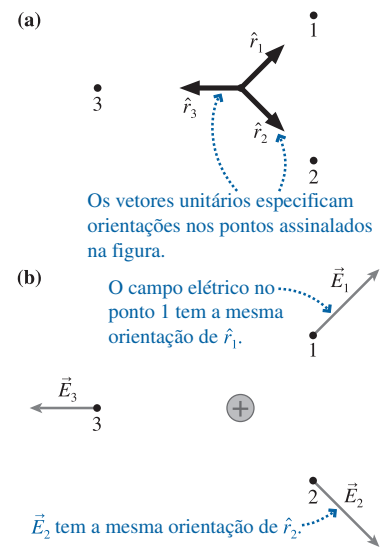


FIGURA 26.29 Usando o vetor unitário \hat{r} .

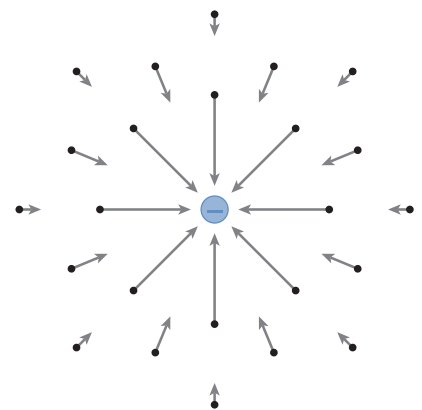


FIGURA 26.30 O campo elétrico criado por uma carga puntiforme negativa.

EXEMPLO 26.7 Calculando o campo elétrico

Uma partícula carregada com $-1,0 \text{ nC}$ está localizada na origem de um sistema de coordenadas. Os pontos 1, 2 e 3 têm coordenadas (x, y) dadas por $(1 \text{ cm}, 0 \text{ cm})$, $(0 \text{ cm}, 1 \text{ cm})$ e $(1 \text{ cm}, 1 \text{ cm})$, respectivamente. Determine o campo elétrico \vec{E} nestes pontos e, depois, represente os vetores em um diagrama de campo elétrico.

MODELO O campo elétrico é criado por uma carga puntiforme negativa.

VISUALIZAÇÃO O campo elétrico aponta *diretamente* para a origem. Ele será mais fraco no ponto $(1 \text{ cm}, 1 \text{ cm})$, que é mais distante da carga.

RESOLUÇÃO O campo elétrico é

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$$

onde $q = -1,0 \text{ nC} = -1,0 \times 10^{-9} \text{ C}$. A distância r dos pontos 1 e 2 é de $1,0 \text{ cm} = 0,010 \text{ m}$ e de $(\sqrt{2} \times 1,0 \text{ cm}) = 0,0141 \text{ m}$ no caso do ponto 3. O módulo de \vec{E} nos três pontos é igual a

$$E_1 = E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q|}{r_1^2} = \frac{(9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2)(1,0 \times 10^{-9} \text{ C})}{(0,010 \text{ m})^2} = 90.000 \text{ N/C}$$

$$E_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q|}{r_3^2} = \frac{(9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2)(1,0 \times 10^{-9} \text{ C})}{(0,0141 \text{ m})^2} = 45.000 \text{ N/C}$$

Devido ao fato de q ser negativa, o campo em cada uma dessas posições aponta diretamente para ela. Os vetores campo elétrico, em função dos componentes, são dados por

$$\vec{E}_1 = -90.000 \hat{i} \text{ N/C}$$

$$\vec{E}_2 = -90.000 \hat{j} \text{ N/C}$$

$$\begin{aligned} \vec{E}_3 &= -E_3 \cos 45^\circ \hat{i} - E_3 \sin 45^\circ \hat{j} \\ &= (-31.800 \hat{i} - 31.800 \hat{j}) \text{ N/C} \end{aligned}$$

Esses vetores estão representados no diagrama de campo elétrico da FIGURA 26.31.

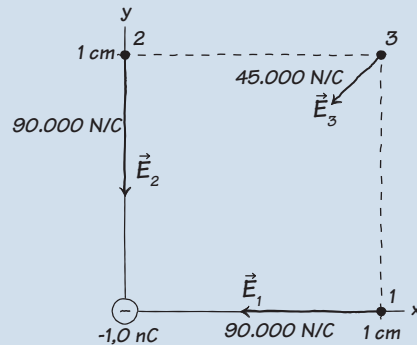


FIGURA 26.31 Diagrama de campo elétrico de uma partícula carregada com $-1,0 \text{ nC}$.

EXEMPLO 26.8 O campo elétrico de um próton

Em um átomo de hidrogênio, o elétron descreve uma órbita com raio de $0,053 \text{ nm}$ em torno do próton.

- Qual é a intensidade do campo elétrico criado pelo próton na posição do elétron?
- Qual é o módulo da força elétrica exercida sobre o elétron?

RESOLUÇÃO a. A carga do próton é $q = e$. A intensidade de seu campo elétrico à distância onde se encontra o elétron é

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}}{(5,3 \times 10^{-11} \text{ m})^2} \\ &= 5,1 \times 10^{11} \text{ N/C} \end{aligned}$$

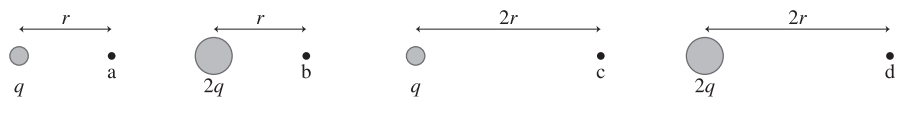
Note que o campo é muito grande em comparação com o campo do Exemplo 26.7.

- Poderíamos usar a lei de Coulomb para determinar a força sobre o elétron, mas o ponto-chave é que, conhecendo o campo elétrico, podemos utilizá-lo diretamente para obter a força exercida sobre uma carga no campo. O módulo da força sobre o elétron é

$$\begin{aligned} F_{\text{sobre o elétron}} &= |q_e| E_{\text{do próton}} \\ &= (1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(5,1 \times 10^{11} \text{ N/C}) \\ &= 8,2 \times 10^{-8} \text{ N} \end{aligned}$$

PARE E PENSE 26.6

Ordene em seqüência decrescente as intensidades dos campos elétricos de E_a a E_d nos pontos de a até d.



RESUMO

O objetivo do Capítulo 26 foi desenvolver uma compreensão básica dos fenômenos elétricos em termos de cargas, forças e campos.

Princípios gerais

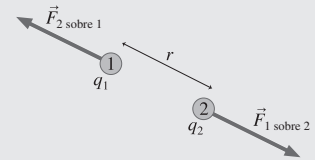
Lei de Coulomb

As forças entre duas partículas carregadas q_1 e q_2 , separadas entre si por uma distância r , possuem módulos iguais dados por

$$F_{1 \text{ sobre } 2} = F_{2 \text{ sobre } 1} = \frac{K|q_1||q_2|}{r^2}$$

Estas forças constituem um par ação/reação com a direção da reta que passa pelas duas partículas.

- As forças são repulsivas para duas cargas de mesmo sinal e atrativas para duas cargas de sinais opostos.
- A força resultante sobre a carga é a soma das forças exercidas individualmente por todas as outras cargas.
- A unidade de carga é o coulomb (C).
- A constante eletrostática é $K = 9,0 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$.



Conceitos importantes

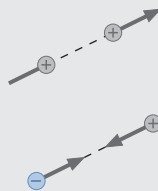
O modelo de carga

Existem dois tipos de carga, as positivas e as negativas.

- As cargas fundamentais são as dos prótons e as dos elétrons, com cargas $\pm e$, onde $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$.
- Os objetos são carregados por meio da adição ou da remoção de elétrons.
- Qualquer quantidade q de carga satisfaz à relação $q = (N_p - N_e) e$.
- Todo objeto que contenha um número igual de prótons e de elétrons é **neutro**, o que significa a inexistência de uma carga **resultante**.

Objetos carregados exercem força elétrica entre si.

- Cargas de mesmo sinal se repelem, cargas de sinais opostos se atraem.
- A força aumenta com o aumento da carga.
- A força diminui com o aumento da distância.

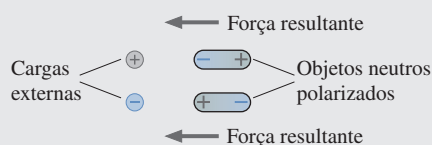


Há dois tipos de materiais, os isolantes e os condutores.

- A carga permanece fixa dentro ou sobre um isolante.
- A carga pode facilmente se mover através ou ao longo dos condutores.
- A carga é transferida de um objeto a outro por contato entre eles.

Objetos carregados atraem objetos neutros.

- A carga polariza o metal, deslocando o mar de elétrons.
- A carga polariza os átomos, criando dipolos elétricos.
- A força de polarização é sempre atrativa.



O modelo de campo

As cargas interagem umas com as outras através do **campo elétrico** \vec{E} .

- A carga A altera o espaço em torno de si pela criação de um campo elétrico.

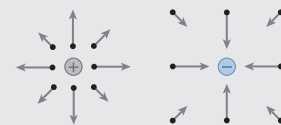


- O campo é o agente que exerce a força. A força sobre a carga q_B é $\vec{F}_{\text{sobre } B} = q_B \vec{E}$.

Todo campo elétrico é identificado e medido em termos da força que ele exerce sobre uma **carga de prova** q :

$$\vec{E} = \vec{F}_{\text{sobre } q} / q$$

- O campo elétrico existe em todos os pontos do espaço.
- Um vetor campo elétrico representa o campo apenas em um ponto, aquele da origem do vetor.



O campo elétrico criado por uma **carga puntiforme** é

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$$

Termos e notação

neutro	nuvem eletrônica	portadores de carga	carga puntiforme
eletrização	unidade fundamental de carga,	equilíbrio eletrostático	coulomb, C
modelo de carga	e	aterramento	constante de permissividade, ϵ_0
carga, q ou Q	quantização da carga	polarização da carga	campo
cargas iguais	ionização	força de polarização	campo elétrico, \vec{E}
cargas opostas	lei de conservação da carga	dipolo elétrico	modelo de campo
descarregamento	mar de elétrons	eletrização por indução	carga-fonte
condutor	caroço iônico	lei de Coulomb	intensidade de campo elétrico, E
isolante	corrente	constante eletrostática, K	diagrama de campo



Para a tarefa de casa indicada no *MasteringPhysics*, acessar www.masteringphysics.com

A dificuldade de um problema é indicada por símbolos que vão de I (fácil) a III (desafiador).

Problemas indicados pelo ícone integram o material relevante de capítulos anteriores.

QUESTÕES CONCEITUAIS

- Um isolante pode ser eletrizado? Em caso afirmativo, como você eletrizaria um isolante? Em caso negativo, por que não?
- Um condutor pode ser eletrizado? Em caso afirmativo, como você eletrizaria um condutor? Em caso negativo, por que não?
- Quatro bolas leves A, B, C e D estão suspensas por fios. A bola A foi tocada por um bastão de plástico previamente friccionado em lã. Quando as bolas são aproximadas, sem se tocarem, observa-se o seguinte:
 - As bolas B, C e D são atraídas pela bola A.
 - As bolas B e D não têm efeito uma sobre a outra.
 - A bola C é atraída pela B.
 Qual é o estado de eletrização (carga do vidro, do plástico ou neutro) das bolas A, B, C e D? Explique.
- Bastões de plástico e de vidro previamente carregados estão suspensos por fios.
 - Um objeto repele o bastão de plástico. Você pode prever o que ele irá fazer com o bastão de vidro? Em caso afirmativo, descreva o que irá acontecer. Em caso negativo, por que não?
 - Um objeto diferente atrai o bastão de plástico. Você pode prever o que ele irá fazer com o bastão de vidro? Em caso afirmativo, descreva o que irá acontecer. Em caso negativo, por que não?
- Quando você retira roupas da secadora logo após a lavagem, as roupas geralmente grudam em suas mãos e seus braços. Seu corpo está carregado? Em caso afirmativo, como ele poderia ter adquirido a carga? Em caso negativo, por que isso ocorre?
- Uma bola leve de metal está suspensa por um fio. Quando um bastão carregado é mantido próximo, a bola se move em direção a ele, tocando-o, e, então, rapidamente “se afasta para longe” dele. Explique esse comportamento.
- É dada a você uma amostra de um material. Proponha um experimento ou uma série de experimentos para determinar se o material é um condutor ou um isolante. Descreva claramente quais serão os resultados de cada experimento se o material for um condutor ou um isolante.
- Suponha que exista um terceiro tipo de carga além daquelas que chamamos de “carga do plástico” e “carga do vidro”. Chame este terceiro tipo de carga X. Que experimentos ou série de experimentos você deveria realizar para testar se um objeto possui uma carga do tipo X? Descreva claramente como os possíveis resultados do experimento deveriam ser interpretados.
- Um eletroscópio carregado negativamente está com as folhas separadas.
 - Suponha que você aproxime um bastão carregado negativamente da parte superior do eletroscópio, porém sem tocá-lo. Como as folhas irão se comportar? Desenhe um diagrama de carga e dê uma explicação teórica em sua resposta.
 - Como as folhas irão se comportar se você aproximar um bastão carregado positivamente da parte superior do eletroscópio, sem tocá-lo? Desenhe um diagrama de carga e dê uma explicação teórica em sua resposta.
- As duas esferas de metal da **FIGURA Q26.10** estão carregadas com cargas opostas de mesmo valor absoluto. Elas são colocadas em contato com um bastão de metal neutro. Qual é o estado final de carga de cada esfera e do bastão?

FIGURA Q26.10

FIGURA Q26.11
- A esfera metálica A da **FIGURA Q26.11** possui 4 unidades de carga negativa, e a esfera B, também metálica, duas unidades de carga positiva. As esferas são colocadas em contato. Qual é o estado final de carga de cada esfera? Explique.
- As esferas metálicas A e B da **FIGURA Q26.12** estão inicialmente neutras e encostadas uma na outra. Um bastão carregado positivamente é aproximado de A, mas não a toca. A esfera A ficará carregada positivamente, carregada negativamente ou permanecerá neutra? Desenhe um diagrama de carga e dê uma explicação teórica em sua resposta.

FIGURA Q26.12

FIGURA Q26.13

13. Se você aproximar seu dedo de uma bolinha pendurada por um fio e negativamente carregada, ela se moverá em direção ao dedo, como ilustrado na FIGURA Q26.13. Use um diagrama de carga e palavras para explicar esta observação.
14. Reproduza a FIGURA Q26.14 em uma folha de papel. Depois, desenhe um ponto (ou vários pontos) sobre a figura para indicar a posição (ou posições) onde um elétron não experimentaria uma força resultante.



FIGURA Q26.14

15. As cargas A e B da FIGURA Q26.15 são iguais. Considere que cada carga exerça uma força sobre a outra com módulo igual a F . Suponha agora que o valor da

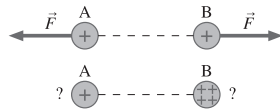


FIGURA Q26.15

- carga B aumente por um fator 4 e que todo o restante permaneça igual. Em função de F , (a) qual é o módulo (intensidade) da força exercida sobre A, e (b) qual é o módulo (intensidade) da força exercida sobre B?
16. A intensidade do campo elétrico em um ponto próximo a uma carga puntiforme é de 900 N/C . Qual é a intensidade do campo em um ponto 50% mais afastado da mesma carga?
17. A intensidade do campo elétrico em um ponto próximo a uma carga puntiforme é de 1000 N/C . Qual é a intensidade do campo se (a) a distância à carga puntiforme for dobrada e se (b) a distância à carga puntiforme diminuir pela metade?
18. Em um determinado campo elétrico, a força elétrica exercida sobre uma partícula carregada é F . Qual seria a força se a carga da partícula fosse triplicada e se o campo elétrico fosse diminuído pela metade?

EXERCÍCIOS E PROBLEMAS

Exercícios

Seção 26.1 Desenvolvendo um modelo de carga

Seção 26.2 Carga

- Um bastão de vidro é carregado com $+8,0 \text{ nC}$ por meio de atrito.
 - Elétrons foram removidos do bastão ou prótons foram adicionados ao mesmo? Explique.
 - Quantos elétrons foram removidos ou quantos prótons foram adicionados?
- Um bastão de plástico é carregado com -12 nC por meio de atrito.
 - Elétrons foram removidos do bastão ou prótons foram adicionados ao mesmo? Explique.
 - Quantos elétrons foram removidos ou quantos prótons foram adicionados?
- Um bastão de plástico, previamente carregado com uma carga de -15 nC , toca uma esfera de metal. Logo a seguir, a carga do bastão é de -10 nC .
 - Que tipo de partícula carregada foi transferida entre o bastão e a esfera, e em que direção se deu a transferência? Ou seja, as partículas se moveram do bastão para a esfera ou em sentido contrário?
 - Quantas partículas carregadas foram transferidas?
- Um bastão de vidro, previamente carregado com uma carga de $+12 \text{ nC}$, toca uma esfera de metal. Logo a seguir, a carga do bastão é de $+8 \text{ nC}$.
 - Que tipo de partícula carregada foi transferida entre o bastão e a esfera, e em que direção se deu a transferência? Ou seja, as partículas se moveram do bastão para a esfera ou em sentido contrário?
 - Quantas partículas carregadas foram transferidas?
- Qual é a carga total de todos os prótons contidos em $1,0 \text{ mol}$ de gás O_2 ?
- Qual é a carga total de todos os elétrons contidos em $1,0 \text{ L}$ de água na fase líquida?

Seção 26.3 Isolantes e condutores

- A Figura 26.9 mostrou como um eletroscópio torna-se negativamente carregado. As folhas também se repeliriam se você tocasse o eletroscópio com um bastão de vidro carregado positivamente. Use uma série de diagramas de carga para explicar o que acontece neste caso e por que as folhas passam a se repelir.

- Um balão de plástico que foi friccionado com lã adere a uma parede.
 - Você pode concluir daí que a parede está carregada? Se ela não estiver, por que não? Se ela estiver, de onde veio a carga?
 - Desenhe uma série de diagramas de carga que mostre como o balão adere à parede.
- Dois esferas metálicas neutras, fixas em suportes de madeira, são encostadas uma na outra. Um bastão carregado negativamente é posicionado diretamente acima do topo da esfera da esquerda, sem tocá-la. Enquanto o bastão é mantido ali, a esfera da direita é movida de forma que as esferas não mais se toquem. A seguir, o bastão é afastado. Após tudo isso, qual é o estado de carga de cada uma das esferas? Use diagramas de cargas para ilustrar sua resposta.
- Você dispõe de duas esferas metálicas neutras e fixas em suportes de madeira. Descreva um procedimento para eletrizar as esferas de forma que elas fiquem com cargas opostas e de valores absolutos *exatamente* iguais. Use diagramas de carga para ilustrar o procedimento.
- Você dispõe de duas esferas metálicas neutras e fixas em suportes de madeira. Descreva um procedimento para eletrizar as esferas de forma que elas fiquem com cargas iguais e de valores absolutos *exatamente* iguais. Use diagramas de carga para ilustrar o procedimento.
- Um objeto passará no teste “Ele está carregado?” se atrair pequenos pedaços de papel.
 - Use uma série de diagramas de carga para explicar como um objeto carregado pode atrair pequenos pedaços de papel.
 - Este teste funciona para ambos os tipos de objetos eletrizados, os positivamente carregados e os negativamente carregados. Explique por que isso é verdadeiro.

Seção 26.4 Lei de Coulomb

- Dois massas de $1,0 \text{ kg}$ estão separadas por $1,0 \text{ m}$ (de centro a centro) sobre uma mesa sem atrito. Cada massa tem uma carga de $+10 \mu\text{C}$.
 - Qual é o módulo da força elétrica exercida sobre cada uma das massas?
 - Qual será a aceleração inicial das massas se elas forem soltas e puderem se mover?
- Dois pequenas esferas plásticas possuem massas de $2,0 \text{ g}$ e cargas de -50 nC cada uma. Elas são colocadas a $2,0 \text{ cm}$ uma da outra (de centro a centro).

- a. Qual é o módulo da força elétrica exercida sobre cada esfera?
 b. Por qual fator a força elétrica é maior do que o peso de cada esfera?
- 15 || Uma pequena conta de vidro foi carregada com +20 nC. Uma esfera de metal, suspensa 1,0 cm acima da conta, experimenta uma força elétrica de 0,018 N orientada para baixo. Qual é a carga da esfera suspensa?
16. | Qual é a força elétrica resultante sobre a carga A da FIGURA EX26.16?

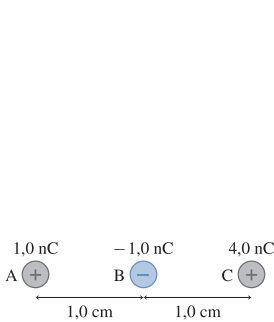


FIGURA EX26.16

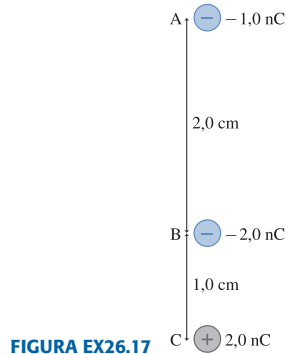


FIGURA EX26.17

17. | Qual é a força elétrica resultante sobre a carga A da FIGURA EX 26.17?
18. | Um objeto A, previamente carregado com +10,0 nC, encontra-se na origem de um sistema de coordenadas. Um objeto B, previamente carregado com -20,0 nC, encontra-se em $(x, y) = (0,0 \text{ cm}, 2,0 \text{ cm})$. Determine a força elétrica exercida sobre cada objeto. Expresse cada vetor força em função de seus componentes.
19. | Uma pequena conta de vidro foi carregada com +20 nC de carga. A 1,0 cm de distância do centro da conta de vidro, qual será o módulo e qual será a orientação da aceleração (a) de um próton e (b) de um elétron ali soltos?

Seção 26.5 O modelo de campo

20. | Qual é a intensidade e a orientação do campo elétrico a 1,0 mm de distância (a) de um próton e (b) de um elétron?
21. | O campo elétrico em certo ponto do espaço é $\vec{E} = (200\hat{i} + 400\hat{j}) \text{ N/C}$.
- a. Qual é a força elétrica sobre um próton posicionado neste ponto? Expresse sua resposta em função dos componentes.
 b. Qual é a força elétrica sobre um elétron posicionado neste ponto? Expresse sua resposta em função dos componentes.
 c. Qual é o módulo da aceleração do próton?
 d. Qual é o módulo da aceleração do elétron?
22. || Que valor absoluto de carga cria um campo elétrico de 1,0 N/C a 1,0 m de distância?
23. || Quais são a intensidade e a orientação de um campo elétrico a 2,0 cm de uma pequena conta de vidro eletrizada com +8,0 nC?
24. || O campo elétrico a 2,0 cm de um pequeno objeto aponta para o mesmo com uma intensidade de 180.000 N/C. Qual é a carga do objeto?
25. || Quais são a intensidade e a orientação do campo elétrico que equilibra uma esfera de plástico com massa de 1,0 g e eletrizada com -3,0 nC?
26. || Quais são a intensidade e a orientação do campo elétrico que equilibra o peso de (a) um próton e (b) de um elétron?
27. || Uma carga de +12 nC está localizada na origem de um sistema de coordenadas.
- a. Quais são os vetores de campo elétrico nas posições (x, y) dadas por $(5,0 \text{ cm}, 0 \text{ cm})$, $(-5,0 \text{ cm}, 5,0 \text{ cm})$, e $(-5,0 \text{ cm}, -5,0 \text{ cm})$? Expresse cada vetor campo elétrico em função dos componentes.

- b. Desenhe um diagrama de campo que represente os vetores do campo elétrico nestes pontos.
28. || Uma carga de -12 nC está localizada na origem de um sistema de coordenadas.
- a. Quais são os vetores de campo elétrico nas posições (x, y) dadas por $(0 \text{ cm}, 5,0 \text{ cm})$, $(-5,0 \text{ cm}, -5,0 \text{ cm})$, e $(-5,0 \text{ cm}, 5,0 \text{ cm})$? Expresse cada vetor campo elétrico em função dos componentes.
 b. Desenhe um diagrama de campo que represente os vetores de campo elétrico nestes pontos.

Problemas

29. || Duas esferas metálicas idênticas estão conectadas por um bastão de metal. Ambas estão neutras inicialmente. Então, $1,0 \times 10^{12}$ elétrons são adicionados à esfera A, e a seguir o bastão que conecta as esferas é removido. Logo após, quais serão as cargas de A e de B?
30. || Duas esferas metálicas idênticas estão conectadas por um bastão de plástico. Ambas estão neutras inicialmente. Então, $1,0 \times 10^{12}$ elétrons são adicionados à esfera A, e a seguir o bastão que conecta as esferas é removido. Logo após, quais serão as cargas de A e de B?
31. || Hoje em dia, nos EUA, as moedas de um centavo são feitas de zinco recoberto com cobre, todavia antigamente elas eram feitas de cobre, com 3,1 g de massa. Quais são a carga total positiva e a carga total negativa existentes numa antiga moeda de centavo feita de cobre e eletricamente neutra?
32. || Uma conta de plástico de 2,0 g, carregada com -4 nC, e uma conta de vidro de 4,0 g, carregada com uma carga de +8,0 nC, estão separadas por 2,0 cm (centro a centro). Quais serão as acelerações (a) da conta de plástico e (b) da conta de vidro quando forem soltas?
33. || Dois prótons estão a 2,0 fm de distância um do outro.
- a. Qual é o módulo da força elétrica que cada próton exerce sobre o outro?
 b. Qual é o módulo da força gravitacional de um próton sobre o outro?
 c. Qual é a razão entre os módulos da força elétrica e da força gravitacional sobre cada próton?
34. || O núcleo de um átomo de ^{125}X (um isótopo do elemento xenônio com massa de 125 u) tem 6,0 fm de diâmetro. Ele contém 54 prótons e uma carga total $q = +54 e$.
- a. Qual é a força elétrica sobre um próton a 2,0 fm da superfície do núcleo?
 b. Qual é a aceleração do próton?
- Dica:** Considere o núcleo esférico como uma carga puntiforme.
35. || Duas esferas de 1,0 g são carregadas igualmente e mantidas separadas por 2,0 cm. Quando soltas, elas aceleram a 150 m/s^2 . Qual é o valor absoluto da carga de cada esfera?
36. | Dois objetos A e B são carregados positivamente. Ambos têm uma massa de 100 g, porém A possui uma carga duas vezes maior que a de B. Quando A e B são mantidos afastados por 10 cm, B experimenta uma força elétrica de 0,45 N.
- a. Qual é o módulo da força sobre A?
 b. Quanto valem as cargas q_A e q_B ?
 c. Se os objetos forem soltos, qual será a aceleração inicial de A?
- 37 || Qual é a força \vec{F} exercida sobre a carga de 1,0 nC da FIGURA P26.37? Expresse sua resposta em módulo e orientação.

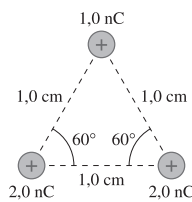


FIGURA P26.37

38. || Qual é a força \vec{F} exercida sobre a carga de 1,0 nC da FIGURA P26.38? Expresse sua resposta em módulo e orientação.

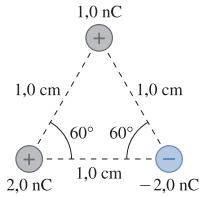


FIGURA P26.38

39. || Qual é a força \vec{F} sobre a carga de -10 nC da FIGURA P26.39? Expresse sua resposta em função do módulo e de um ângulo medido em sentido horário ou anti-horário (especifique qual) a partir do semi-eixo x positivo.

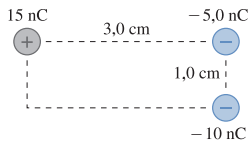


FIGURA P26.39

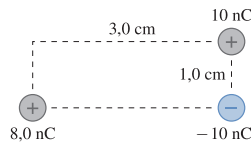


FIGURA P26.40

40. || Qual é a força \vec{F} exercida sobre a carga de -10 nC da FIGURA P26.40? Expresse sua resposta em função do módulo e de um ângulo medido em sentido horário ou anti-horário (especifique qual) a partir do semi-eixo positivo de x .
41. || Qual é a força \vec{F} exercida sobre a carga de 5,0 nC da FIGURA P26.41? Expresse sua resposta em função do módulo e de um ângulo medido em sentido horário ou anti-horário (especifique qual) a partir do semi-eixo positivo de x .

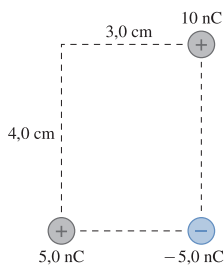


FIGURA P26.41

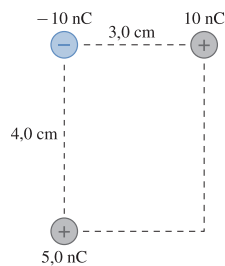


FIGURA P26.42

42. || Qual é a força \vec{F} exercida sobre a carga de 5,0 nC da FIGURA P26.42? Expresse sua resposta em função do módulo e de um ângulo medido em sentido horário ou anti-horário (especifique qual) a partir do semi-eixo positivo de x .
43. || Qual é a força \vec{F} exercida sobre a carga de 1,0 nC no centro da FIGURA P26.43 devido às outras quatro cargas? Expresse sua resposta em função dos componentes.

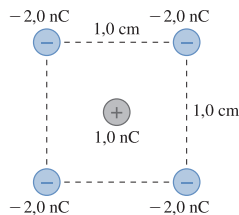


FIGURA P26.43

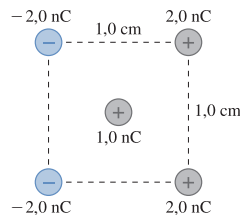


FIGURA P26.44

44. || Qual é a força \vec{F} exercida sobre a carga de 1,0 nC no centro da FIGURA P26.44 devido às outras quatro cargas? Expresse sua resposta em função dos componentes.

45. || Qual é a força \vec{F} exercida sobre a carga de 1,0 nC na parte inferior da FIGURA P26.45? Expresse sua resposta em função dos componentes.

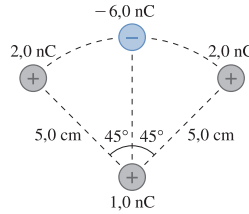


FIGURA P26.45

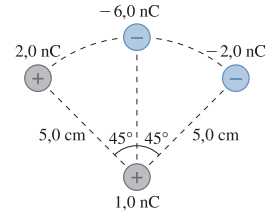


FIGURA P26.46

46. || Qual é a força \vec{F} exercida sobre a carga de 1,0 nC na parte inferior da FIGURA P26.46? Expresse sua resposta em função dos componentes.
47. || Uma carga de +2,0 nC está na origem de um sistema de coordenadas, e outra carga de -4,0 nC encontra-se em $x = 1,0$ cm.
- Em qual coordenada x você colocaria um próton a fim de que a força resultante sobre ele fosse nula?
 - A força resultante sobre um elétron colocado na mesma posição também seria nula? Explique.
48. || A força resultante sobre a carga de 1 nC da FIGURA P26.48 é nula. Qual é o valor de q ?

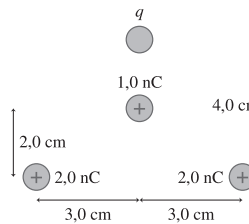


FIGURA P26.48

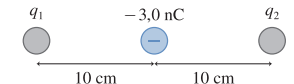


FIGURA P26.49

49. || A carga q_2 da FIGURA P26.49 encontra-se em equilíbrio eletrostático. Qual é o valor de q_1 ?
50. || Uma carga puntiforme positiva Q está localizada em $x = a$, e outra carga puntiforme negativa $-Q$ encontra-se em $x = -a$. Uma terceira carga positiva q pode ser posicionada em qualquer lugar sobre o eixo y . Obtenha uma expressão para $(F_{\text{res}})_x$, o componente x da força resultante exercida sobre q .
51. || Uma carga puntiforme positiva Q está localizada em $x = a$, e outra carga puntiforme negativa $-Q$ encontra-se em $x = -a$. Uma terceira carga positiva q pode ser posicionada em qualquer lugar sobre o eixo x . Obtenha uma expressão para $(F_{\text{res}})_x$, o componente x da força resultante sobre q , quando (a) $|x| > a$ e (b) $|x| < a$.
52. || A FIGURA P26.52 mostra quatro cargas nos vértices de um quadrado de lado L . Considere Q e q como positivas. Qual é o módulo da força resultante sobre q ?

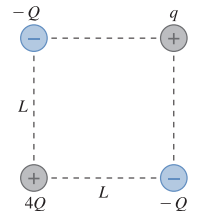


FIGURA P26.52

53. || Duas cargas puntiformes q e $4q$ estão em $x = 0$ e $x = L$, respectivamente, e são livres para se mover. Uma terceira carga é posicionada de forma que o sistema formado pelas três cargas fique em equilíbrio eletrostático. Quais são o módulo, o sinal algébrico e o valor da coordenada x da terceira carga?
54. || Suponha que o valor absoluto da carga do próton seja diferente do valor absoluto da carga do elétron por apenas uma parte em 10^9 .

- a. Qual seria a força entre duas esferas de cobre de 2,0 mm de diâmetro separadas por 1,0 cm? Considere que cada átomo de cobre tenha igual número de prótons e de elétrons.
- b. Este valor de força pode ser detectável? O que você pode concluir do fato de que tais forças não são observadas?

55. || Em um modelo simplificado do átomo de hidrogênio, o elétron descreve uma órbita circular de raio 0,053 nm ao redor do próton estacionário. Quantas revoluções por segundo o elétron efetua?

56. || Em um projeto de ciências, você inventou uma “bomba de elétrons” que transfere elétrons de um objeto para outro. Para demonstrar sua invenção, você aparafusa uma pequena placa de metal no teto da escola, conecta a bomba entre a placa metálica e você mesmo e começa a “bombear” elétrons da placa de metal para você. Quantos elétrons devem ser movidos da placa de metal para seu corpo de modo que você permaneça suspenso no ar a 2,0 m do teto? Considere que sua massa seja de 60 kg.

Dica: Considere que você e a placa possam ser modelados como cargas puntiformes.

57. || Você dispõe de uma mola com 4,0 cm de comprimento e não-tensionada e está curioso para ver se pode usar a mola para medir o valor de uma carga. Primeiro você prende uma das extremidades da mola ao teto, e na outra extremidade, uma massa de 1,0 g. A mola, então, distende-se até atingir 5,0 cm de comprimento. A seguir, você prende duas pequenas contas de plástico nas extremidades da mola, a coloca sobre uma mesa livre de atrito e eletriza cada uma das contas com uma mesma carga. A mola, então, distende-se até atingir um comprimento de 4,5 cm. Qual é o valor absoluto da carga (em nC) de cada conta?

58. || Às vezes você gera uma centelha ao tocar uma maçaneta após ter caminhado sobre um tapete. Por quê? O ar sempre contém alguns elétrons livres que foram ejetados de átomos por raios cósmicos. Se um campo elétrico está presente, um elétron livre é acelerado até colidir com uma molécula do ar. Ele, então, transferirá sua energia cinética para a molécula, que acelera, colide, acelera, colide e assim sucessivamente. Se a energia cinética do elétron imediatamente antes da colisão for de $2,0 \times 10^{-18}$ J ou maior, ele terá energia suficiente para ejetar um elétron da molécula com a qual colida elasticamente. Onde havia um elétron livre, haverá agora dois! Cada um destes poderá, a seguir, acelerar, atingir outra molécula e ejetar um novo elétron. Portanto, haverá agora quatro elétrons livres. Em outras palavras, como mostra a FIGURA P26.58, um campo elétrico muito intenso causa uma “reação em cadeia” de produção de novos elétrons. Isto é chamado “ruptura elétrica” do ar. A corrente de elétrons em movimento é que produz o choque que você sente, e uma centelha é, então gerada quando os elétrons se recombina com os íons positivos, emitindo o excesso de energia como uma centelha de luz.

- a. A distância média que um elétron percorre entre duas colisões sucessivas é de 2,0 μm . Que aceleração deve ter um elétron para ganhar $2,0 \times 10^{-18}$ J de energia cinética ao longo dessa distância?
- b. Que força deve ser exercida sobre um elétron para lhe imprimir a aceleração do item a)?
- c. Que intensidade de campo elétrico irá exercer essa força sobre o elétron? Esta é a *intensidade do campo de ruptura*.
- d. Suponha que um elétron livre no ar esteja a 1,0 cm de distância de uma carga puntiforme. Qual é o valor mínimo q_{min} desta carga puntiforme que causa a ruptura elétrica do ar e gera uma centelha?

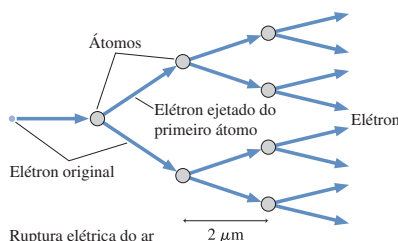


FIGURA P26.58 Ruptura elétrica do ar

59. || Duas cargas puntiformes de 5,0 g, penduradas por fios de 1,0 m de comprimento, se repelem após terem sido carregadas com 100 nC cada uma, como mostrado na FIGURA P26.59. Quanto vale o ângulo θ ? Considere que o ângulo θ seja pequeno.

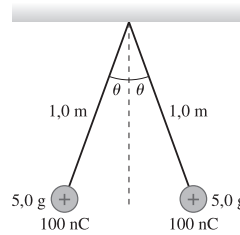


FIGURA P26.59

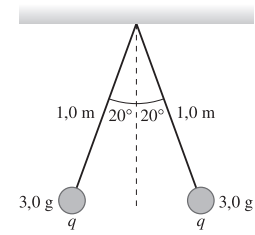


FIGURA P26.60

60. || Duas cargas puntiformes de 3,0 g, penduradas por fios de 1,0 m de comprimento, se repelem após terem sido carregadas como mostrado na FIGURA P26.60. Quanto vale a carga q ?

61. || Quais são os campos elétricos nos pontos 1, 2 e 3 da FIGURA P26.61? Expresse sua resposta em função dos componentes.

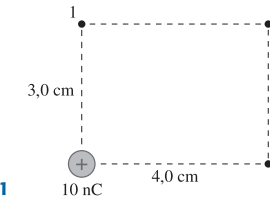


FIGURA P26.61

62. || Quais são os campos elétricos nos pontos 1 e 2 da FIGURA P26.62? Expresse sua resposta em módulo e orientação.

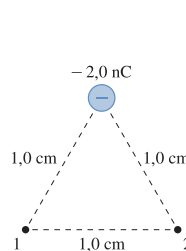


FIGURA P26.62

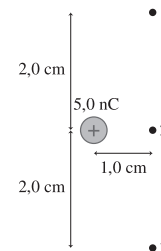


FIGURA P26.63

63. || Quais são os campos elétricos nos pontos 1, 2 e 3 da FIGURA P26.63? Expresse sua resposta em função dos componentes.

- 64. || Uma carga de $-10,0$ nC está localizada na posição $(x, y) = (2,0 \text{ cm}, 1,0 \text{ cm})$. Em que posições (x, y) o campo elétrico é expresso por
 - a. $-225.000 \hat{i}$ N/C?
 - b. $(161.000 \hat{i} - 80.500 \hat{j})$ N/C?
 - c. $(28.800 \hat{i} + 21.600 \hat{j})$ N/C?

- 65. || Uma carga de 10,0 nC está localizada na posição $(x, y) = (1,0 \text{ cm}, 2,0 \text{ cm})$. Em que posições (x, y) o campo elétrico é expresso por
 - a. $-225.000 \hat{i}$ N/C?
 - b. $(161.000 \hat{i} + 80.500 \hat{j})$ N/C?
 - c. $(21.600 \hat{i} - 28.800 \hat{j})$ N/C?

66. || Três cargas de 1,0 nC estão dispostas como mostra a FIGURA P26.66. Cada uma das cargas cria um campo elétrico \vec{E} em um ponto diretamente à frente da carga central e a 3,0 cm da mesma.

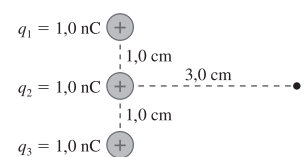


FIGURA P26.66

- a. Quais são os três campos \vec{E}_1 , \vec{E}_2 e \vec{E}_3 criados, respectivamente, pelas três cargas? Escreva sua resposta para cada um dos campos como um vetor em função dos componentes correspondentes.

b. Você acredita que o campo elétrico satisfaça ao princípio da superposição? Ou seja, existe um “campo resultante” neste ponto dado por $\vec{E}_{\text{res}} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$? Use o que você aprendeu neste capítulo e em capítulos anteriores no nosso estudo das forças para argumentar se isso é verdadeiro ou não.

c. Se isso for verdadeiro, quanto é \vec{E}_{res} ?

67. II Um campo elétrico $\vec{E} = 100.000\hat{i}$ N/C faz com que uma carga puntiforme de massa 5,0 g da FIGURA P26.67 fique suspensa em um ângulo de 20°. Qual é a carga da bola?

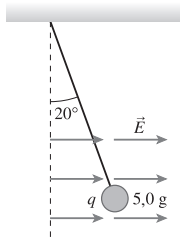


FIGURA P26.67

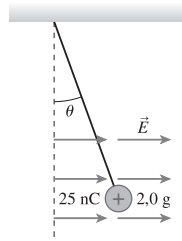


FIGURA P26.68

68. II Um campo elétrico $\vec{E} = 200.000\hat{i}$ N/C faz com que uma carga puntiforme da FIGURA P26.68 fique suspensa em um certo ângulo. Qual é o valor do θ (*net = res)?

Em cada um dos problemas de 69 a 72 lhe é fornecida uma equação (ou mais) para ser utilizada na resolução de um problema ainda não formulado. Em cada um deles,

- Redija um problema realista para o qual esta(s) equação(ões) seja(m) apropriada(s).
- Resolva o problema proposto.

69.
$$\frac{(9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2) \times N \times (1,60 \times 10^{-19} \text{ C})}{(1,0 \times 10^{-6} \text{ m})^2}$$

$= 1,5 \times 10^6 \text{ N/C}$

70.
$$\frac{(9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2)q^2}{(0,0150 \text{ m})^2} = 0,020 \text{ N}$$

71.
$$\frac{(9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2)(15 \times 10^{-9} \text{ C})}{r^2} = 54.000 \text{ N/C}$$

72.
$$\sum F_x = 2 \times \frac{(9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2)(1,0 \times 10^{-9} \text{ C})q}{((0,020 \text{ m})/\text{sen}30^\circ)^2} \times \cos30^\circ$$

$= 5,0 \times 10^{-5} \text{ N}$

$\sum F_y = 0 \text{ N}$

Problemas desafiadores

73. Uma bola de cobre com 2,0 mm de diâmetro está carregada com +50 nC. Que fração de seus elétrons foi removida?

74. Três bolas de 3,0 g estão suspensas por fios de 80 cm de comprimento presos a um mesmo ponto fixo. Cada uma das bolas é eletrizada com uma mesma carga q. No equilíbrio, as três bolas formam um triângulo equilátero no plano horizontal com 20 cm de lado. Qual é o valor da carga q?

75. As pequenas esferas idênticas mostradas na FIGURA PD26.75 estão carregadas com +100 nC e -100 nC. Elas estão suspensas, como mostrado, em um campo elétrico de módulo igual a 100.000 N/C. Qual é a massa de cada esfera?

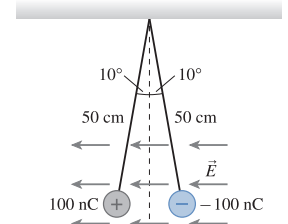


FIGURA PD26.75

76. Na FIGURA PD26.76 é representada uma força exercida sobre a carga de -1,0 nC. Qual é o módulo dessa força?

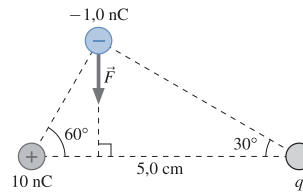


FIGURA PD26.76

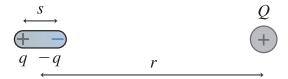


FIGURA PD26.77

77. Na Seção 26.3 afirmamos que objetos carregados exercem uma força resultante atrativa sobre dipolos elétricos. Vamos investigar isso. A FIGURA PD26.77 mostra um dipolo elétrico permanente que consiste das cargas +q e -q separadas pela distância fixa s. A carga +Q está à distância r do centro do dipolo. Consideraremos, como geralmente é o caso, na prática, que $s \ll r$.

- Escreva uma expressão para a força resultante que a carga +Q exerce sobre o dipolo.
- Esta força aponta para +Q ou para fora de +Q? Explique.
- Use a aproximação binomial $(1 + x)^{-n} \approx 1 - nx$, válida para $x \ll 1$, e mostre que a expressão que você obteve no item a pode ser escrita como $F_{\text{res}} = 2KqQs/r^3$.
- Como uma força elétrica pode depender do inverso do cubo da distância? A lei de Coulomb não nos diz que a força elétrica depende do inverso do quadrado da distância? Explique.

RESPOSTAS DAS QUESTÕES DO TIPO PARE E PENSE

Pare e Pense 26.1: b. Objetos eletrizados sempre são atraídos por objetos neutros, de modo que uma força atrativa é inconclusiva. A repulsão é o único teste seguro.

Pare e Pense 26.2: $q_c(+3e) > q_a(+1e) > q_d(0) > q_b(-1e) > q_e(-2e)$.

Pare e Pense 26.3: a. O bastão de plástico negativamente carregado polarizará o eletroscópio empurrando os elétrons para baixo, na direção das folhas. Isso neutralizará parcialmente a carga positiva que as folhas adquiriram do bastão de vidro.

Pare e Pense 26.4: b. As duas forças constituem um par ação/reação, com sentidos opostos, mas módulos iguais.

Pare e Pense 26.5: c. Existe um campo elétrico em todos os pontos, seja o vetor \vec{E} mostrado ou não. O campo elétrico no ponto aponta para a direita. Todavia todo elétron possui uma carga negativa, portanto a força devida ao campo elétrico, sobre o elétron, aponta para a esquerda.

Pare e Pense 26.6: $E_b > E_a > E_d > E_c$.