varia (ou varia lentamente); o módulo da força que uma das partículas exerce sobre a outra é dado por

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|q_1|\,|q_2|}{r^2} \quad \text{(lei de Coulomb)}, \qquad (21\text{-}4)$$

em que $\varepsilon_0 = 8{,}85 \times 10^{-12}\ \mathrm{C^2/N \cdot m^2}$ é a **constante elétrica**. O fator $1/4\pi\varepsilon_0$ é frequentemente substituído pela **constante eletrostática** $k = 8{,}99 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2}$.

A força que uma partícula carregada exerce sobre outra partícula carregada tem a direção da reta que liga as duas partículas e aponta para a primeira partícula, se as partículas têm cargas de mesmo sinal, e aponta para longe da primeira partícula, se as partículas têm cargas de sinais opostos. Como acontece com outros tipos de forças, se uma partícula está sujeita a mais de uma força eletrostática, a força resultante é a soma vetorial de todas as forças que agem sobre a partícula.

Os dois teoremas das cascas da eletrostática são os seguintes:

Primeiro teorema das cascas: *Uma casca com uma distribuição uniforme de carga atrai ou repele uma partícula carregada situada do lado de fora da casca como se toda a carga estivesse no centro da casca.*

Segundo teorema das cascas: *Se uma partícula carregada está situada no interior de uma casca com uma distribuição uniforme de carga, a casca não exerce nenhuma força eletrostática sobre a partícula.*

Se um excesso de cargas é depositado em uma casca esférica feita de material condutor, a carga se distribui uniformemente na superfície (externa) da casca.

A Carga Elementar A carga elétrica é quantizada (só pode assumir determinados valores). A carga elétrica de qualquer partícula pode ser escrita na forma ne, em que n é um número inteiro positivo ou negativo e e é uma constante física conhecida como **carga elementar**, que é o valor absoluto da carga do elétron e do próton ($\approx 1{,}602 \times 10^{-19}$ C).

Conservação da Carga A carga elétrica total de um sistema isolado é constante.

Perguntas

1 A Fig. 21-11 mostra quatro sistemas nos quais cinco partículas carregadas estão dispostas ao longo de um eixo com espaçamento uniforme. O valor da carga está indicado para todas as partículas, a não ser para a partícula central, que possui a mesma carga nos quatro sistemas. Coloque os sistemas na ordem do módulo da força eletrostática total exercida sobre a partícula central, em ordem decrescente.

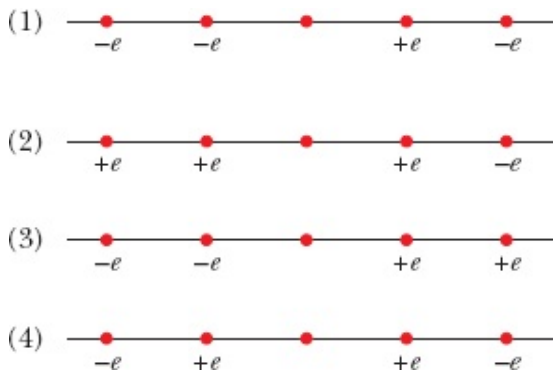


Figura 21-11 Pergunta 1.

2 A Fig. 21-12 mostra três pares de esferas iguais que são colocadas em contato e depois separadas. As cargas presentes inicialmente nas esferas estão indicadas. Coloque os pares, em ordem decrescente, de acordo (a) com o módulo da carga transferida quando as esferas são postas em contato e (b) com o módulo da carga presente na esfera positivamente carregada depois que as esferas são separadas.

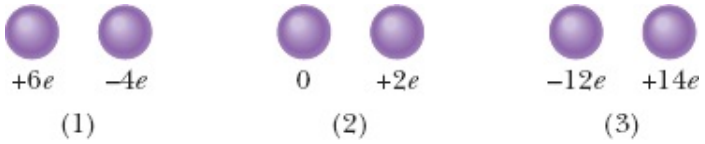


Figura 21-12 Pergunta 2.

3 A Fig. 21-13 mostra quatro sistemas nos quais partículas carregadas são mantidas fixas em um eixo. Em quais desses sistemas existe um ponto à esquerda das partículas no qual um elétron estaria em equilíbrio?

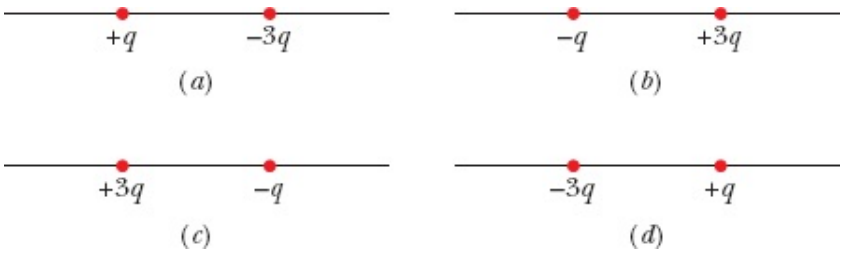


Figura 21-13 Pergunta 3.

4 A Fig. 21-14 mostra duas partículas carregadas em um eixo. As cargas têm liberdade para se mover; entretanto, é possível colocar uma terceira partícula em um ponto tal que as três partículas fiquem em equilíbrio. (a) Esse ponto está à esquerda das duas primeiras partículas, à direita delas ou entre elas? (b) A carga da terceira partícula deve ser positiva ou negativa? (c) O equilíbrio é estável ou instável?



Figura 21-14 Pergunta 4.

5 Na Fig. 21-15, uma partícula central de carga $-q$ está cercada por dois anéis circulares de partículas carregadas. Quais são o módulo e a orientação da força eletrostática total exercida sobre a partícula central pelas outras partículas? (*Sugestão*: Levando em conta a simetria do problema, é possível simplificar consideravelmente os cálculos.)

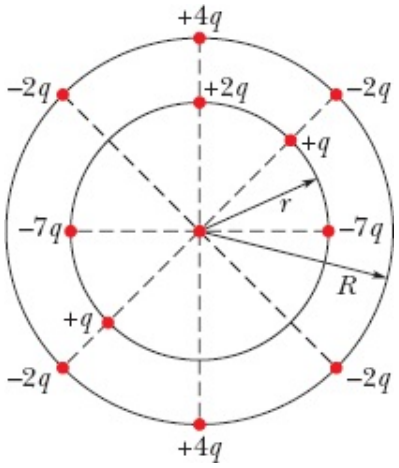


Figura 21-15 Pergunta 5.

6 Uma esfera positivamente carregada é colocada nas proximidades de um condutor neutro inicialmente isolado, e o condutor é colocado em contato com a terra. O condutor fica carregado positivamente, fica carregado negativamente, ou permanece neutro (a) se a esfera é afastada e, em seguida, a ligação com a terra é removida e (b) se a ligação com a terra é removida e, em seguida, a esfera é afastada?

7 A Fig. 21-16 mostra três sistemas constituídos por uma partícula carregada e uma casca esférica com uma distribuição de carga uniforme. As cargas são dadas e os raios das cascas estão indicados. Ordene os sistemas de acordo com o módulo da força exercida pela casca sobre a partícula, em ordem decrescente.

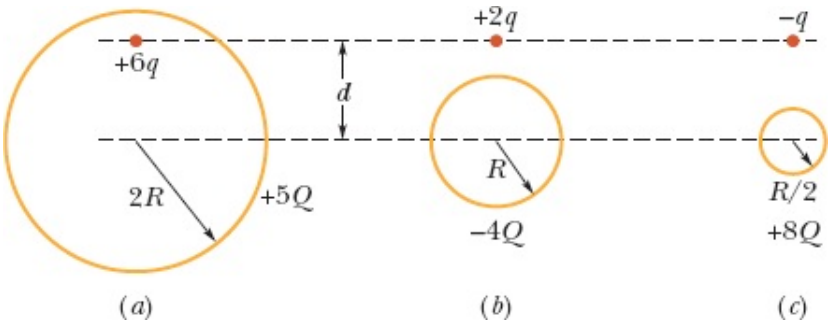


Figura 21-16 Pergunta 7.

8 A Fig. 21-17 mostra quatro sistemas de partículas carregadas. Ordene os sistemas de acordo com o módulo da força eletrostática total a que está submetida a partícula de carga $+Q$, em ordem decrescente.

9 A Fig. 21-18 mostra quatro sistemas nos quais partículas de carga $+q$ ou $-q$ são mantidas fixas. Em todos os sistemas, as partículas que estão no eixo x estão equidistantes do eixo y. Considere a partícula central do sistema 1; a partícula está sujeita às forças eletrostáticas F_1 e F_2 das outras duas partículas. (a)

Os módulos F_1 e F_2 dessas forças são iguais ou diferentes? (b) O módulo da força total a que a partícula central está submetida é maior, menor ou igual a $F_1 + F_2$? (c) As componentes x das duas forças se somam ou se subtraem? (d) As componentes y das duas forças se somam ou se subtraem? (e) A orientação da força total a que está submetida a partícula central está mais próxima das componentes que se somam ou das componentes que se subtraem? (f) Qual é a orientação da força total? Considere agora os outros sistemas. Qual é a orientação da força total exercida sobre a partícula central (g) no sistema 2, (h) no sistema 3, (i) no sistema 4? (Em cada sistema, considere a simetria da distribuição de cargas e determine as componentes que se somam e as componentes que se cancelam.)

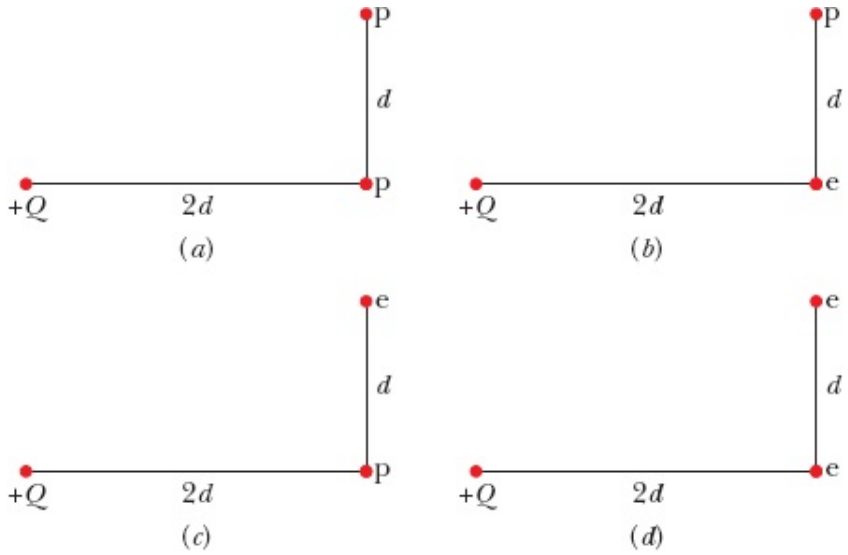


Figura 21-17 Pergunta 8.

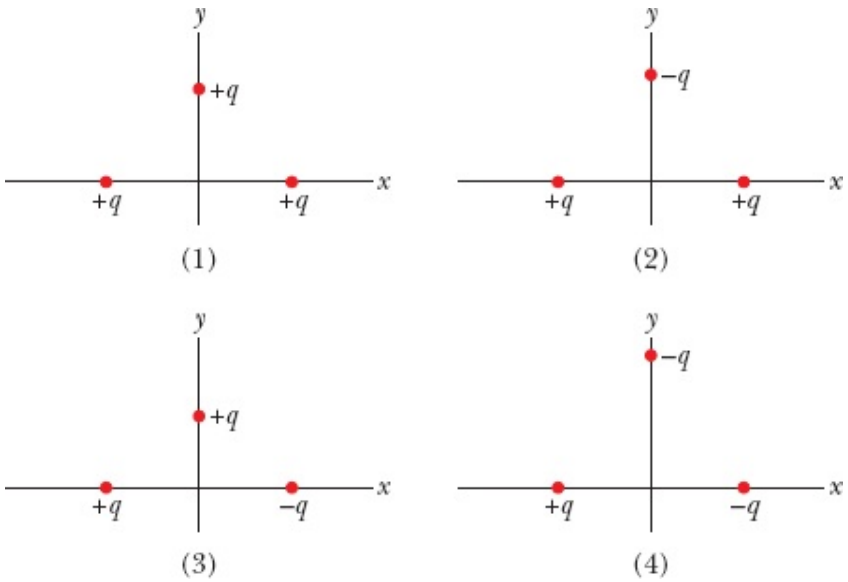


Figura 21-18 Pergunta 9.

10 Na Fig. 21-19, uma partícula central de carga $-2q$ está cercada por um quadrado de partículas carregadas, separadas por uma distância d ou $d/2$. Quais são o módulo e a orientação da força eletrostática total exercida sobre a partícula central pelas outras partículas? (*Sugestão*: Levando em

conta a simetria do problema, é possível simplificar consideravelmente os cálculos.)

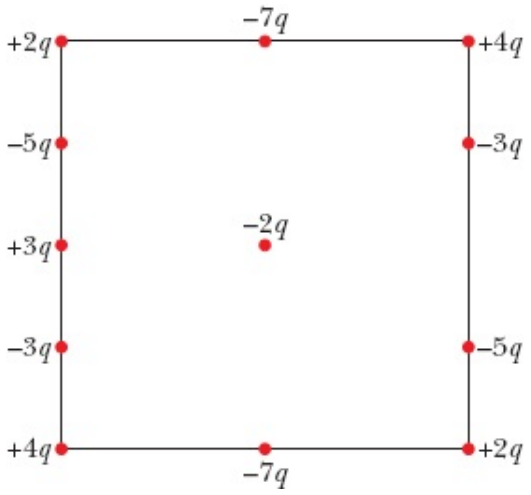


Figura 21-19 Pergunta 10.

11 A Fig. 21-20 mostra três bolhas condutoras iguais, *A*, *B* e *C*, que flutuam em um recipiente condutor que está ligado à terra por um fio. As bolhas têm inicialmente cargas iguais. A bolha *A* esbarra no teto do recipiente e depois na bolha *B*. Em seguida, a bolha *B* esbarra na bolha *C*, que desce até a base do recipiente. Quando a bolha *C* entra em contato com a base do recipiente, uma carga de –3*e* é transferida da terra para o recipiente, como indicado na figura. (a) Qual era a carga inicial de cada bolha? Quando (b) a bolha *A* e (c) a bolha *B* entram em contato com a base do recipiente, qual é a carga que atravessa o fio e em que sentido? (d) Durante todo o processo, qual é a carga total que atravessa o fio e em que sentido?

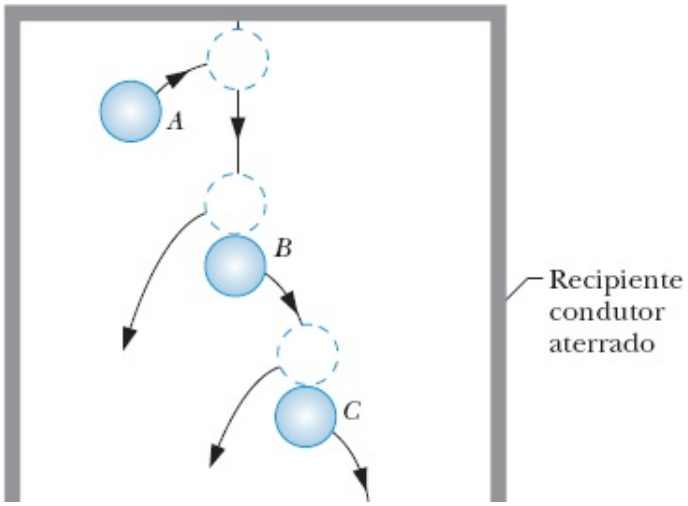


Figura 21-20 Pergunta 11.

12 A Fig. 21-21 mostra quatro sistemas nos quais um próton central está cercado por prótons e elétrons fixos no lugar ao longo de uma semicircunferência. Os ângulos θ são todos iguais; os ângulos ϕ também são todos iguais. (a) Qual é, em cada sistema, a direção da força resultante a que está submetido o próton central? (b) Ordene os quatro sistemas de acordo com o módulo da força resultante a que está submetido

o próton central, em ordem decrescente.

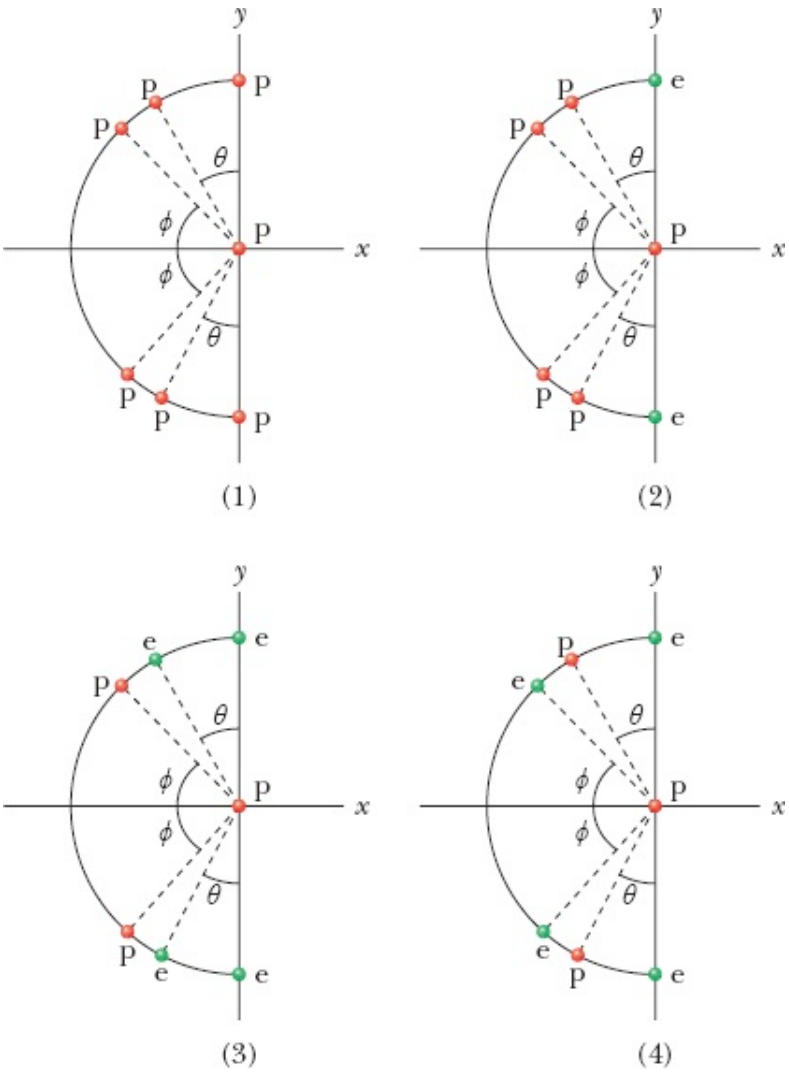


Figura 21-21 Pergunta 12.

Problemas

. - ... O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema.

Informações adicionais disponíveis em *O Circo Voador da Física* de Jearl Walker, LTC, Rio de Janeiro, 2008.

Módulo 21-1 A Lei de Coulomb

·1 Da carga Q que uma pequena esfera contém inicialmente, uma parte q é transferida para uma segunda esfera situada nas proximidades. As duas esferas podem ser consideradas cargas pontuais. Para que valor de q/Q a força eletrostática entre as duas esferas é a maior possível?

·2 Duas esferas condutoras, 1 e 2, de mesmo diâmetro, possuem cargas iguais e estão separadas por

uma distância muito maior que o diâmetro (Fig. 21-22*a*). A força eletrostática a que a esfera 2 está submetida devido à presença da esfera 1 é $\vec{F}$. Uma terceira esfera, 3, igual às duas primeiras, que dispõe de um cabo não condutor e está inicialmente neutra, é colocada em contato primeiro com a esfera 1 (Fig. 21-22*b*), depois com a esfera 2 (Fig. 21-22*c*) e, finalmente, removida (Fig. 21-22*d*). A força eletrostática a que a esfera 2 agora está submetida tem módulo F'. Qual é o valor da razão F'/F?

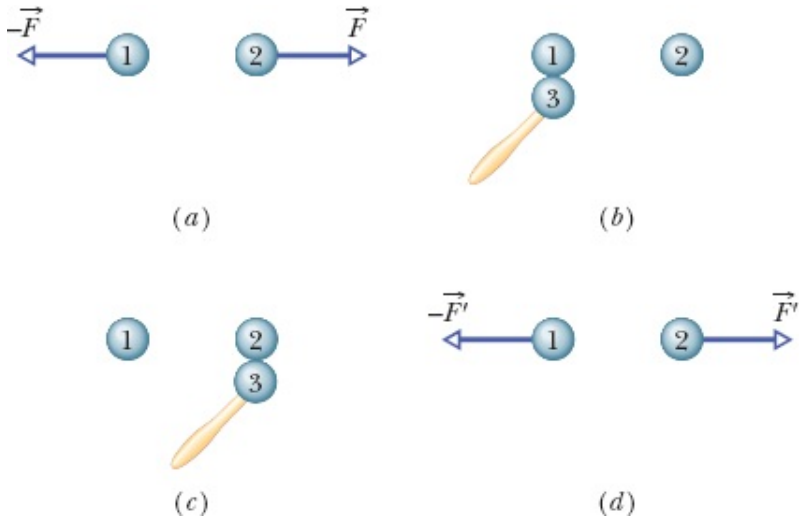


Figura 21-22 Problema 2.

·3 Qual deve ser a distância entre a carga pontual $q_1 = 26{,}0\ \mu C$ e a carga pontual $q_2 = -47{,}0\ \mu C$ para que a força eletrostática entre as duas cargas tenha um módulo de 5,70 N?

·4 Na descarga de retorno de um relâmpago típico, uma corrente de $2{,}5 \times 10^4$ A é mantida por 20 μs. Qual é o valor da carga transferida?

·5 Uma partícula com uma carga de $+3{,}00 \times 10^{-6}$ C está a 12,0 cm de distância de uma segunda partícula com uma carga de $-1{,}50 \times 10^{-6}$ C. Calcule o módulo da força eletrostática entre as partículas.

·6 Duas partículas de mesma carga são colocadas a $3{,}2 \times 10^{-3}$ m de distância uma da outra e liberadas a partir do repouso. A aceleração inicial da primeira partícula é 7,0 m/s^2 e a da segunda é 9,0 m/s^2. Se a massa da primeira partícula é $6{,}3 \times 10^{-7}$ kg, determine (a) a massa da segunda partícula e (b) o módulo da carga das partículas.

··7 Na Fig. 21-23, três partículas carregadas estão em um eixo x. As partículas 1 e 2 são mantidas fixas. A partícula 3 está livre para se mover, mas a força eletrostática exercida sobre ela pelas partículas 1 e 2 é zero. Se $L_{23} = L_{12}$, qual é o valor da razão q_1/q_2?

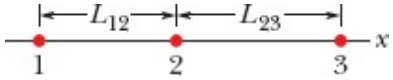


Figura 21-23 Problemas 7 e 40.

··8 Na Fig. 21-24, três esferas condutoras iguais possuem inicialmente as seguintes cargas: esfera *A*,

$4Q$; esfera B, $-6Q$; esfera C, 0. As esferas A e B são mantidas fixas, a uma distância entre os centros que é muito maior que o raio das esferas. Dois experimentos são executados. No experimento 1, a esfera C é colocada em contato com a esfera A, depois (separadamente) com a esfera B e, finalmente, é removida. No experimento 2, que começa com os mesmos estados iniciais, a ordem é invertida: a esfera C é colocada em contato com a esfera B, depois (separadamente) com a esfera A e, finalmente, é removida. Qual é a razão entre a força eletrostática entre A e B no fim do experimento 2 e a força eletrostática entre A e B no fim do experimento 1?

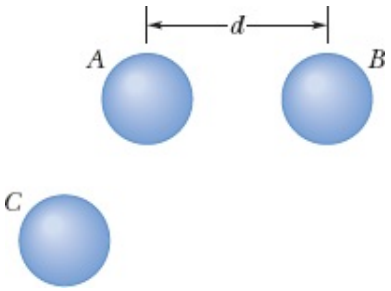


Figura 21-24 Problemas 8 e 65.

··9 Duas esferas condutoras iguais, mantidas fixas a uma distância, entre os centros, de 50,0 cm, se atraem mutuamente com uma força eletrostática de 0,108 N. Quando são ligadas por um fio condutor, de diâmetro desprezível, as esferas passam a se repelir com uma força de 0,0360 N. Supondo que a carga total das esferas era inicialmente positiva, determine: (a) a carga negativa inicial de uma das esferas e (b) a carga positiva inicial da outra esfera.

··10 Na Fig. 21-25, quatro partículas formam um quadrado. As cargas são $q_1 = q_4 = Q$ e $q_2 = q_3 = q$. (a) Qual deve ser o valor da razão Q/q para que seja nula a força eletrostática total a que as partículas 1 e 4 estão submetidas? (b) Existe algum valor de q para o qual a força eletrostática a que todas as partículas estão submetidas seja nula? Justifique sua resposta.

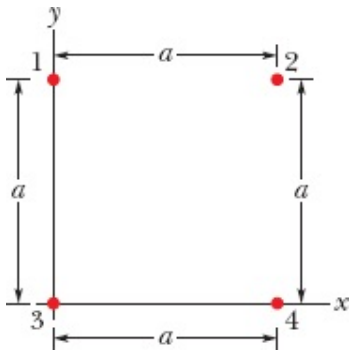


Figura 21-25 Problemas 10, 11 e 70.

··11 Na Fig. 21-25, as cargas das partículas são $q_1 = -q_2 = 100$ nC e $q_3 = -q_4 = 200$ nC. O lado do quadrado é $a = 5{,}0$ cm. Determine (a) a componente x e (b) a componente y da força eletrostática a que está submetida a partícula 3.

··12 Duas partículas são mantidas fixas em um eixo x. A partícula 1, de carga 40 μC, está situada em x = –2,0 cm; a partícula 2, de carga Q, está situada em x = 3,0 cm. A partícula 3 está inicialmente no eixo y e é liberada, a partir do repouso, no ponto y = 2,0 cm. O valor absoluto da carga da partícula 3 é 20 μC. Determine o valor de Q para que a aceleração inicial da partícula 3 seja (a) no sentido positivo do eixo x e (b) no sentido positivo do eixo y.

··13 Na Fig. 21-26, a partícula 1, de carga +1,0 μC, e a partícula 2, de carga –3,0 μC, são mantidas a uma distância L = 10,0 cm uma da outra, em um eixo x. Determine (a) a coordenada x e (b) a coordenada y de uma partícula 3 de carga desconhecida q_3 para que a força total exercida sobre ela pelas partículas 1 e 2 seja nula.

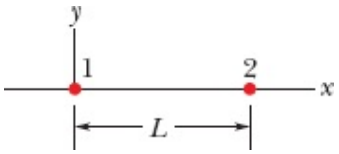


Figura 21-26 Problemas 13, 19, 30, 58 e 67.

··14 Três partículas são mantidas fixas em um eixo x. A partícula 1, de carga q_1, está em $x = -a$; a partícula 2, de carga q_2, está em $x = +a$. Determine a razão q_1/q_2 para que a força eletrostática a que está submetida a partícula 3 seja nula (a) se a partícula 3 estiver no ponto x = +0,500a; (b) se partícula 3 estiver no ponto x = +1,50a.

··15 As cargas e coordenadas de duas partículas mantidas fixas no plano xy são q_1 = +3,0 μC, x_1 = 3,5 cm, y_1 = 0,50 cm e q_2 = –4,0 μC, x_2 = –2,0 cm, y_2 = 1,5 cm. Determine (a) o módulo e (b) a direção da força eletrostática que a partícula 1 exerce sobre a partícula 2. Determine também (c) a coordenada x e (d) a coordenada y de uma terceira partícula de carga q_3 = +4,0 μC para que a força exercida sobre ela pelas partículas 1 e 2 seja nula.

··16 Na Fig. 21-27a, a partícula 1 (de carga q_1) e a partícula 2 (de carga q_2) são mantidas fixas no eixo x, separadas por uma distância de 8,00 cm. A força que as partículas 1 e 2 exercem sobre uma partícula 3 (de carga $q_3 = +8{,}00 \times 10^{-19}$ C) colocada entre elas é $\vec{F}_{3,\text{tot}}$. A Fig. 21-27b mostra o valor da componente x dessa força em função da coordenada x do ponto em que a partícula 3 é colocada. A escala do eixo x é definida por x_s = 8,0 cm. Determine (a) o sinal da carga q_1 e (b) o valor da razão q_2/q_1.

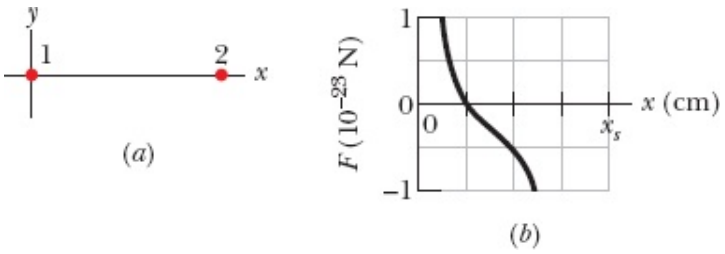


Figura 21-27 Problema 16.

··17 Na Fig. 21-28a, as partículas 1 e 2 têm carga de 20,0 μC cada uma e estão separadas por uma

distância d = 1,50 m. (a) Qual é o módulo da força eletrostática que a partícula 2 exerce sobre a partícula 1? Na Fig. 21-28*b*, a partícula 3, com carga de 20,0 μC, é posicionada de modo a completar um triângulo equilátero. (b) Qual é o módulo da força eletrostática a que a partícula 1 é submetida devido à presença das partículas 2 e 3?

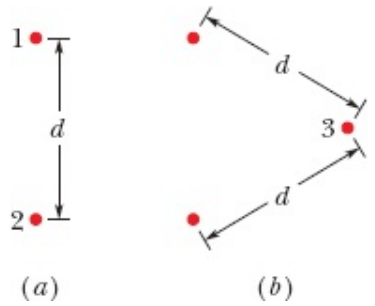


Figura 21-28 Problema 17.

··18 Na Fig. 21-29*a*, três partículas positivamente carregadas são mantidas fixas em um eixo x. As partículas B e C estão tão próximas que as distâncias entre elas e a partícula A podem ser consideradas iguais. A força total a que a partícula A está submetida devido à presença das partículas B e C é $2{,}014 \times 10^{-23}$ N no sentido negativo do eixo x. Na Fig. 21-29*b*, a partícula B foi transferida para o lado oposto de A, mas foi mantida à mesma distância. Nesse caso, a força total a que a partícula A está submetida passa a ser $2{,}877 \times 10^{-24}$ N no sentido negativo do eixo x. Qual é o valor da razão q_C/q_B?

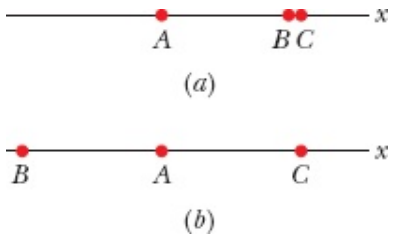


Figura 21-29 Problema 18.

··19 Na Fig. 21-26, a partícula 1, de carga $+q$, e a partícula 2, de carga $+4{,}00q$, são mantidas a uma distância L = 9,00 cm em um eixo x. Se, quando uma partícula 3 de carga q_3 é colocada nas proximidades das partículas 1 e 2, as três partículas permanecem imóveis ao serem liberadas, determine (a) a coordenada x da partícula 3, (b) a coordenada y da partícula 3 e (c) a razão q_3/q.

···20 A Fig. 21-30*a* mostra um sistema de três partículas carregadas, separadas por uma distância d. As partículas A e C estão fixas no lugar no eixo x, mas a partícula B pode se mover ao longo de uma circunferência com centro na partícula A. Durante o movimento, um segmento de reta que liga os pontos A e B faz um ângulo θ com o eixo x (Fig. 21-30*b*). As curvas da Fig. 21-30*c* mostram, para dois valores diferentes da razão entre a carga da partícula C e a carga da partícula B, o módulo F_{tot} da força eletrostática total que as outras partículas exercem sobre a partícula A. A força total foi plotada em função do ângulo θ e como múltiplo de uma força de referência F_0. Assim, por exemplo, na curva 1, para $\theta = 180^o$, vemos que $F_{tot} = 2F_0$. (a) Nas condições em que foi obtida a curva 1, qual é a razão entre a

carga da partícula *C* e a carga da partícula *B* (incluindo o sinal)? (b) Qual é a razão nas condições em que foi obtida a curva 2?

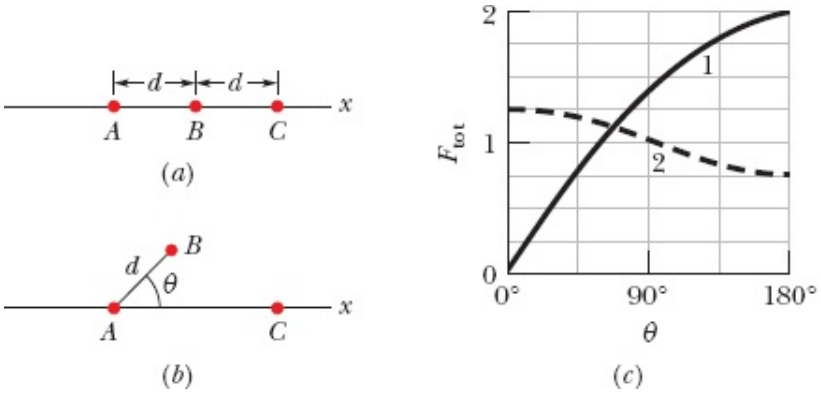


Figura 21-30 Problema 20.

···21 Uma casca esférica isolante, com um raio interno de 4,0 cm e um raio externo de 6,0 cm, possui uma distribuição de carga não uniforme. A *densidade volumétrica de carga* ρ, cuja unidade no SI é o coulomb por metro cúbico, é a carga por unidade de volume. No caso dessa casca, $\rho = b/r$, em que r é a distância em metros a partir do centro da casca e $b = 3{,}0\ \mu C/m^2$. Qual é a carga total da casca?

···22 A Fig. 21-31 mostra um sistema de quatro partículas carregadas, com $\theta = 30{,}0^o$ e $d = 2{,}00$ cm. A carga da partícula 2 é $q_2 = +8{,}00 \times 10^{-19}$ C; a carga das partículas 3 e 4 é $q_3 = q_4 = -1{,}60 \times 10^{-19}$ C. (a) Qual deve ser a distância D entre a origem e a partícula 2 para que seja nula a força que age sobre a partícula 1? (b) Se as partículas 3 e 4 são aproximadas do eixo x mantendo-se simétricas em relação a esse eixo, o valor da distância D é maior, menor ou igual ao valor do item (a)?

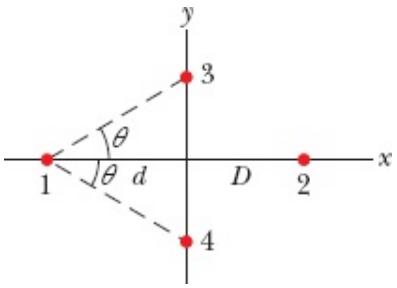


Figura 21-31 Problema 22.

···23 Na Fig. 21-32, as partículas 1 e 2, de carga $q_1 = q_2 = +3{,}20 \times 10^{-19}$ C, estão no eixo y, a uma distância $d = 17{,}0$ cm da origem. A partícula 3, de carga $q_3 = +6{,}40 \times 10^{-19}$ C, é deslocada ao longo do eixo x, de $x = 0$ até $x = +5{,}0$ m. Para qual valor de x o módulo da força eletrostática exercida pelas partículas 1 e 2 sobre a partícula 3 é (a) mínimo e (b) máximo? Qual é o valor (c) mínimo e (d) máximo do módulo?

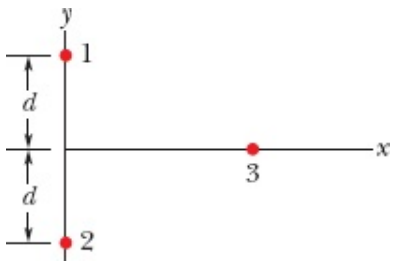


Figura 21-32 Problema 23.

Módulo 21-2 A Carga É Quantizada

·24 Duas pequenas gotas d'água esféricas, com cargas iguais de $-1{,}00 \times 10^{-16}$ C, estão separadas por uma distância, entre os centros, de 1,00 cm. (a) Qual é o valor do módulo da força eletrostática a que cada uma está submetida? (b) Quantos elétrons em excesso possui cada gota?

·25 Quantos elétrons é preciso remover de uma moeda para deixá-la com uma carga de $+1{,}0 \times 10^{-7}$ C?

·26 Qual é o módulo da força eletrostática entre um íon de sódio monoionizado (Na^+, de carga $+e$) e um íon de cloro monoionizado (Cl^-, de carga $-e$) em um cristal de sal de cozinha, se a distância entre os íons é $2{,}82 \times 10^{-10}$ m?

·27 O módulo da força eletrostática entre dois íons iguais separados por uma distância de $5{,}0 \times 10^{-10}$ m é $3{,}7 \times 10^{-9}$ N. (a) Qual é a carga de cada íon? (b) Quantos elétrons estão "faltando" em cada íon (fazendo, assim, com que o íon possua uma carga elétrica diferente de zero)?

·28 Uma corrente de 0,300 A que atravesse o peito pode produzir fibrilação no coração de um ser humano, perturbando o ritmo dos batimentos cardíacos com efeitos possivelmente fatais. Se a corrente dura 2,00 min, quantos elétrons de condução atravessam o peito da vítima?

··29 Na Fig. 21-33, as partículas 2 e 4, de carga $-e$, são mantidas fixas no eixo y, nas posições $y_2 = -10{,}0$ cm e $y_4 = 5{,}00$ cm. As partículas 1 e 3, de carga $-e$, podem ser deslocadas ao longo do eixo x. A partícula 5, de carga $+e$, é mantida fixa na origem. Inicialmente, a partícula 1 está no ponto $x_1 = -10{,}0$ cm e a partícula 3 está no ponto $x_3 = 10{,}0$ cm. (a) Para qual ponto do eixo x a partícula 1 deve ser deslocada para que a força eletrostática total $\vec{F}_{tot}$, a que a partícula está submetida sofra uma rotação de 30° no sentido anti-horário? (b) Com a partícula 1 mantida fixa na nova posição, para qual ponto do eixo x a partícula 3 deve ser deslocada para que $\vec{F}_{tot}$ volte à direção original?

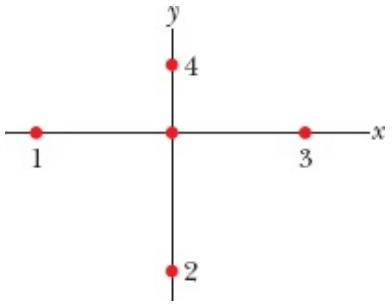


Figura 21-33 Problema 29.

··30 Na Fig. 21-26, as partículas 1 e 2 são mantidas fixas no eixo x, separadas por uma distância L = 8,00 cm. As cargas das partículas são $q_1 = +e$ e $q_2 = -27e$. A partícula 3, de carga $q_3 = +4e$, colocada no eixo x, entre as partículas 1 e 2, é submetida a uma força eletrostática total $\vec{F}_{3,tot}$. (a) Em que posição deve ser colocada a partícula 3 para que o módulo de $\vec{F}_{3,tot}$ seja mínimo? (b) Qual é o valor do módulo de $\vec{F}_{3,tot}$ nessa situação?

··31 A atmosfera da Terra é constantemente bombardeada por *raios cósmicos* provenientes do espaço sideral, constituídos principalmente por *prótons*. Se a Terra não tivesse atmosfera, cada metro quadrado da superfície terrestre receberia, em média, 1500 prótons por segundo. Qual seria a corrente elétrica recebida pela superfície do planeta?

··32 A Fig. 21-34*a* mostra duas partículas carregadas, 1 e 2, que são mantidas fixas em um eixo x. O valor absoluto da carga da partícula 1 é $|q_1| = 8{,}00e$. A partícula 3, de carga $q_3 = +8{,}0e$, que estava inicialmente no eixo x, nas vizinhanças da partícula 2, é deslocada no sentido positivo do eixo x. Em consequência, a força eletrostática total $\vec{F}_{2,tot}$, a que está sujeita a partícula 2, varia. A Fig. 21-34*b* mostra a componente x da força em função da coordenada x da partícula 3. A escala do eixo x é definida por x_s = 0,80 m. A curva possui uma assíntota $F_{2,tot} = 1{,}5 \times 10^{-25}$ N para $x \rightarrow \infty$. Determine o valor da carga q_2 da partícula 2, em unidades de e, incluindo o sinal.

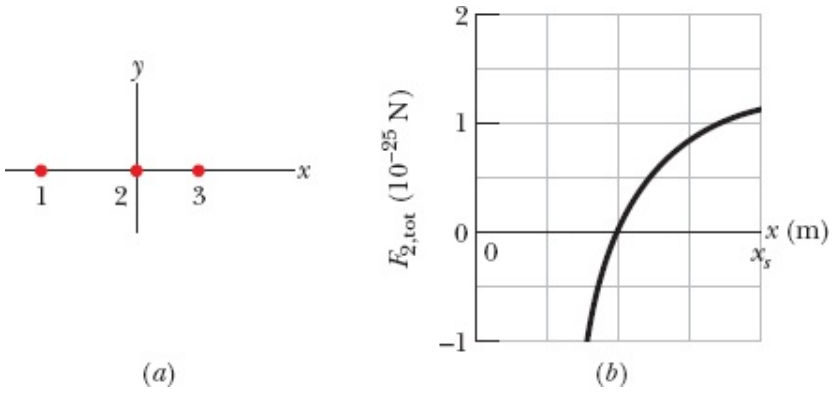


Figura 21-34 Problema 32.

··33 Calcule o número de coulombs de carga positiva que estão presentes em 250 cm^3 de água (neutra). (*Sugestão*: Um átomo de hidrogênio contém um próton; um átomo de oxigênio contém oito prótons.)

···34 A Fig. 21-35 mostra dois elétrons, 1 e 2, no eixo x e dois íons, 3 e 4, de carga $-q$, no eixo y. O ângulo θ é o mesmo para os dois íons. O elétron 2 está livre para se mover; as outras três partículas são mantidas fixas a uma distância horizontal R do elétron 2, e seu objetivo é impedir que o elétron 2 se mova. Para valores fisicamente possíveis de $q \leq 5e$, determine (a) o menor valor possível de θ; (b) o segundo menor valor possível de θ; (c) o terceiro menor valor possível de θ.

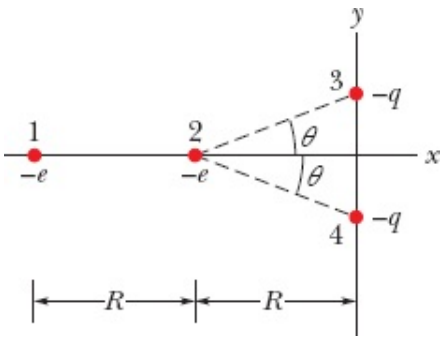


Figura 21-35 Problema 34.

···35 Nos cristais de cloreto de césio, os íons de césio, Cs^+, estão nos oito vértices de um cubo, com um íon de cloro, Cl^-, no centro (Fig. 21-36). A aresta do cubo tem 0,40 nm. Os íons Cs^+ possuem um elétron a menos (e, portanto, uma carga $+e$) e os íons Cl^- possuem um elétron a mais (e, portanto, uma carga $-e$). (a) Qual é o módulo da força eletrostática exercida sobre o íon Cl^- pelos íons Cs^+ situados nos vértices do cubo? (b) Se um dos íons Cs^- está faltando, dizemos que o cristal possui um *defeito*; qual é o módulo da força eletrostática exercida sobre o íon Cl^- pelos íons Cs^+ restantes?

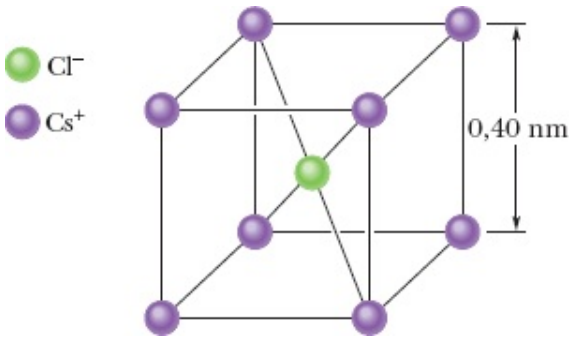


Figura 21-36 Problema 35.

Módulo 21-3 A Carga É Conservada

·36 Elétrons e pósitrons são produzidos em reações nucleares envolvendo prótons e nêutrons. Essas reações são conhecidas pelo nome genérico de *decaimento beta*. (a) Se um próton se transforma em um nêutron, é produzido um elétron ou um pósitron? (b) Se um nêutron se transforma em um próton, é produzido um elétron ou um pósitron?

·37 Determine X nas seguintes reações nucleares: (a) $^1H + {}^9Be \rightarrow X + n$; (b) $^{12}C + {}^1H \rightarrow X$; (c) $^{15}N + {}^1H \rightarrow {}^4He + X$. (*Sugestão*: Consulte o Apêndice F.)

Problemas Adicionais

38 A Fig. 21-37 mostra quatro esferas condutoras iguais, que estão separadas por grandes distâncias. A esfera *W* (que estava inicialmente neutra) é colocada em contato com a esfera *A* e depois as esferas são novamente separadas. Em seguida, a esfera *W* é colocada em contato com a esfera *B* (que possuía inicialmente uma carga de $-32e$) e depois as esferas são separadas. Finalmente, a esfera *A* é colocada em

contato com a esfera C (que possuía inicialmente uma carga de $+48e$) e depois as esferas são separadas. A carga final da esfera W é $+18e$. Qual era a carga inicial da esfera A?

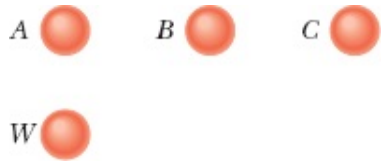


Figura 21-37 Problema 38.

39 Na Fig. 21-38, a partícula 1, de carga $+4e$, está a uma distância $d_1 = 2{,}00$ mm do solo e a partícula 2, de carga $+6e$, está no solo, a uma distância horizontal $d_2 = 6{,}00$ mm da partícula 1. Qual é a componente x da força eletrostática exercida pela partícula 1 sobre a partícula 2?

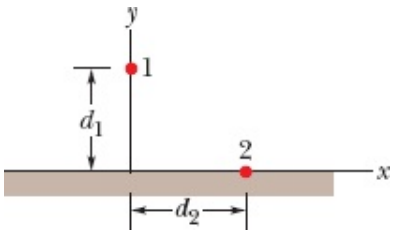


Figura 21-38 Problema 39.

40 Na Fig. 21-23, as partículas 1 e 2 são mantidas fixas. Se a força eletrostática total exercida sobre a partícula 3 é zero e $L_{23} = 2{,}00L_{12}$, qual é o valor da razão q_1/q_2?

41 (a) Que cargas iguais e positivas teriam que ser colocadas na Terra e na Lua para neutralizar a atração gravitacional entre os dois astros? (b) Por que não é necessário conhecer a distância entre a Terra e a Lua para resolver o problema? (c) Quantos quilogramas de íons de hidrogênio (ou seja, prótons) seriam necessários para acumular a carga positiva calculada no item (a)?

42 Na Fig. 21-39, duas pequenas esferas condutoras de mesma massa m e mesma carga q estão penduradas em fios isolantes de comprimento L. Suponha que o ângulo θ é tão pequeno que a aproximação $\tan\theta \leq \text{sen}\,\theta$ pode ser usada. (a) Mostre que a distância de equilíbrio entre as esferas é dada por

$$x = \left(\frac{q^2 L}{2\pi\varepsilon_0 mg}\right)^{1/3}$$

(b) Se $L = 120$ cm, $m = 10$ g e $x = 5{,}0$ cm, qual é o valor de $|q|$?

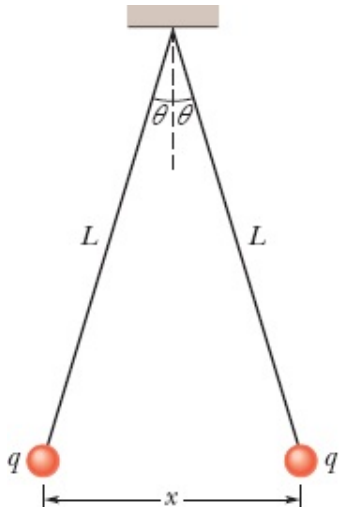


Figura 21-39 Problemas 42 e 43.

43 (a) Explique o que acontece com as esferas do Problema 42 se uma delas é descarregada (ligando, por exemplo, momentaneamente a esfera à terra). (b) Determine a nova distância de equilíbrio x, usando os valores dados de L e m e o valor calculado de $|q|$.

44 A que distância devem ser colocados dois prótons para que o módulo da força eletrostática que um exerce sobre o outro seja igual à força gravitacional a que um dos prótons está submetido na superfície terrestre?

45 Quantos megacoulombs de carga elétrica positiva existem em 1,00 mol de hidrogênio molecular (H_2) neutro?

46 Na Fig. 21-40, quatro partículas são mantidas fixas no eixo x, porém separadas por uma distância d = 2,00 cm. As cargas das partículas são $q_1 = +2e$, $q_2 = -e$, $q_3 = +e$ e $q_4 = +4e$, em que $e = 1{,}60 \times 10^{-19}$ C. Usando a notação dos vetores unitários, determine a força eletrostática a que está submetida (a) a partícula 1 e (b) a partícula 2.

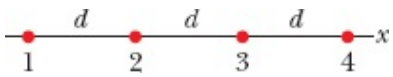


Figura 21-40 Problema 46.

47 Cargas pontuais de +6,0 μC e –4,0 μC são mantidas fixas no eixo x nos pontos x = 8,0 m e x = 16 m, respectivamente. Que carga deve ser colocada no ponto x = 24 m para que seja nula a força eletrostática total sobre uma carga colocada na origem?

48 Na Fig. 21-41, três esferas condutoras iguais são dispostas de modo a formarem um triângulo equilátero de lado d = 20,0 cm. Os raios das esferas são muito menores que d. As cargas das esferas são $q_A = -2{,}00$ nC, $q_B = -4{,}00$ nC e $q_C = +8{,}00$ nC. (a) Qual é o módulo da força eletrostática entre as esferas A e C? Em seguida, é executado o seguinte procedimento: A e B são ligadas por um fio fino, que depois é removido; B é ligada à terra pelo fio, que depois é removido; B e C são ligadas pelo fio, que depois é removido. Determine o novo valor (b) do módulo da força eletrostática entre as esferas A e C; (c) do

módulo da força eletrostática entre as esferas *B* e *C*.

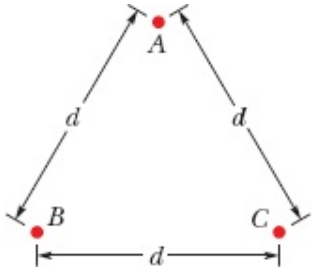


Figura 21-41 Problema 48.

49 Um nêutron é composto por um quark "up", com carga de $+2e/3$, e dois quarks "down", cada um com carga de $-e/3$. Se os dois quarks "down" estão separados por uma distância de $2{,}6 \times 10^{-15}$ m no interior do nêutron, qual é o módulo da força eletrostática entre eles?

50 A Fig. 21-42 mostra uma barra longa, isolante, de massa desprezível e comprimento *L*, articulada no centro e equilibrada por um bloco de peso *P* situado a uma distância *x* da extremidade esquerda. Nas extremidades direita e esquerda da barra existem pequenas esferas condutoras, de carga positiva *q* e 2*q*, respectivamente. A uma distância vertical *h* abaixo das esferas existem esferas fixas de carga positiva *Q*. (a) Determine a distância *x* para que a barra fique equilibrada na horizontal. (b) Qual deve ser o valor de *h* para que a barra não exerça força vertical sobre o apoio quando está equilibrada na horizontal?

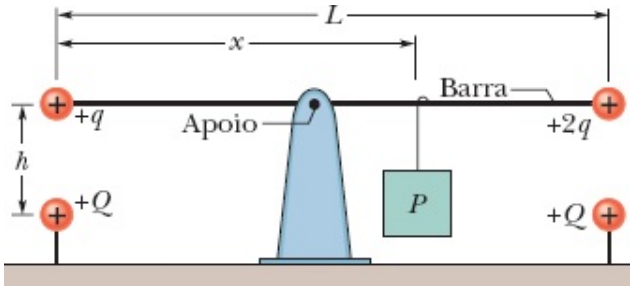


Figura 21-42 Problema 50.

51 Uma barra isolante eletricamente carregada, com um comprimento de 2,00 m e uma seção reta de 4,00 cm^2, está no semieixo *x* positivo com uma das extremidades na origem. A *densidade volumétrica de carga* ρ, cuja unidade no SI é o coulomb por metro cúbico, é a carga por unidade de volume. Determine quantos elétrons em excesso existem na barra (a) se ρ é uniforme, com um valor de $-4{,}00\ \mu C/m^3$; (b) se o valor de ρ é dado pela equação $\rho = bx^2$, em que $b = -2{,}00\ \mu C/m^5$.

52 Uma partícula de carga *Q* é mantida fixa na origem de um sistema de coordenadas *xy*. No instante $t = 0$, uma partícula ($m = 0{,}800$ g, $q = +4{,}00\ \mu C$) está situada no eixo *x*, no ponto $x = 20{,}0$ cm, e se move com uma velocidade de 50,0 m/s no sentido positivo do eixo *y*. Para qual valor de *Q* a partícula executa um movimento circular uniforme? (Despreze o efeito da força gravitacional sobre a partícula.)

53 Qual seria o módulo da força eletrostática entre duas cargas pontuais de 1,00 C separadas por uma distância de (a) 1,00 m e (b) 1,00 km, se essas cargas pontuais pudessem existir (o que não é verdade) e

se fosse possível montar um sistema desse tipo?

54 Uma carga de 6,0 μC é dividida em duas partes, que são mantidas a uma distância de 3,00 mm. Qual é o maior valor possível da força eletrostática entre as duas partes?

55 Da carga Q que está presente em uma pequena esfera, uma fração α é transferida para uma segunda esfera. As esferas podem ser tratadas como partículas. (a) Para qual valor de α o módulo da força eletrostática F entre as duas esferas é o maior possível? Determine (b) o menor e (c) o maior valor de α para o qual F é igual à metade do valor máximo.

56 Se um gato se esfrega repetidamente nas calças de algodão do dono em um dia seco, a transferência de carga do pelo do gato para o tecido de algodão pode deixar o dono com um excesso de carga de –2,00 μC. (a) Quantos elétrons são transferidos para o dono? O dono decide lavar as mãos, mas, quando aproxima os dedos da torneira, acontece uma descarga elétrica. (b) Nessa descarga, elétrons são transferidos da torneira para o dono do gato, ou vice-versa? (c) Pouco antes de acontecer a descarga, são induzidas cargas positivas ou negativas na torneira? (d) Se o gato tivesse se aproximado da torneira, a transferência de elétrons seria em que sentido? (e) Se você for acariciar um gato em um dia seco, deve tomar cuidado para não aproximar os dedos do focinho do animal; caso contrário, poderá ocorrer uma descarga elétrica suficiente para assustar você. Levando em conta o fato de que o pelo de gato é um material isolante, explique como isso pode acontecer.

57 Sabemos que a carga negativa do elétron e a carga positiva do próton têm o mesmo valor absoluto. Suponha, porém, que houvesse uma diferença de 0,00010% entre as duas cargas. Nesse caso, qual seria a força de atração ou repulsão entre duas moedas de cobre situadas a 1,0 m de distância? Suponha que cada moeda contém 3×10^{22} átomos de cobre. (*Sugestão*: Um átomo de cobre contém 29 prótons e 29 elétrons.) O que é possível concluir a partir desse resultado?

58 Na Fig. 21-26, a partícula 1, com carga de –80,0 μC, e a partícula 2, com carga de +40 μC, são mantidas fixas no eixo x, separadas por uma distância L = 20,0 cm. Determine, na notação dos vetores unitários, a força eletrostática total a que é submetida uma partícula 3, de carga q_3 = 20,0 μC, se a partícula 3 for colocada (a) no ponto x = 40,0 cm; (b) no ponto x = 80,0 cm. Determine também (c) a coordenada x; (d) a coordenada y da partícula 3 para que seja nula a força eletrostática total a que a partícula é submetida.

59 Qual é a carga total, em coulombs, de 75,0 kg de elétrons?

60 Na Fig. 21-43, seis partículas carregadas cercam a partícula 7 a uma distância de 1,0 cm ou 2,0 cm, como mostra a figura. As cargas são $q_1 = +2e$, $q_2 = +4e$, $q_3 = +e$, $q_4 = +4e$, $q_5 = +2e$, $q_6 = +8e$ e $q_7 = +6e$, com $e = 1{,}60 \times 10^{-19}$ C. Qual é o módulo da força eletrostática a que está submetida a partícula 7?

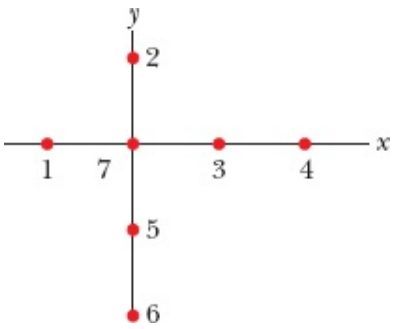


Figura 21-43 Problema 60.

61 Três partículas carregadas formam um triângulo: a partícula 1, com uma carga $Q_1 = 80{,}0$ nC, está no ponto (0; 3,00 mm); a partícula 2, com uma carga Q_2, está no ponto (0; –3,00 mm), e a partícula 3, com uma carga $q = 18{,}0$ nC, está no ponto (4,00 mm; 0). Na notação dos vetores unitários, qual é a força eletrostática exercida sobre a partícula 3 pelas outras duas partículas (a) se $Q_2 = 80{,}0$ nC e (b) se $Q_2 = -80{,}0$ nC?

62 Na Fig. 21-44, determine (a) o módulo e (b) a direção da força eletrostática total a que está submetida a partícula 4. Todas as partículas são mantidas fixas no plano xy; $q_1 = -3{,}20 \times 10^{-19}$ C; $q_2 = +3{,}20 \times 10^{-19}$ C; $q_3 = +6{,}40 \times 10^{-19}$ C; $q_4 = +3{,}20 \times 10^{-19}$ C; $\theta_1 = 35{,}0^{\circ}$; $d_1 = 3{,}00$ cm; $d_2 = d_3 = 2{,}00$ cm.

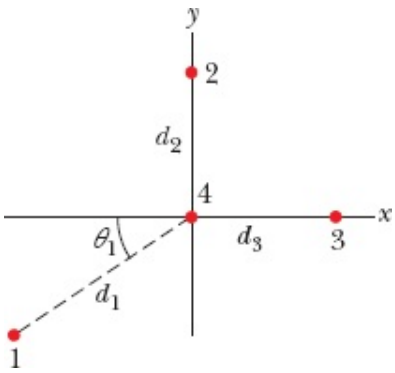


Figura 21-44 Problema 62.

63 Duas cargas pontuais de 30 nC e –40 nC são mantidas fixas no eixo x, na origem e no ponto $x = 72$ cm, respectivamente. Uma partícula com uma carga de 42 μC é liberada a partir do repouso no ponto $x = 28$ cm. Se a aceleração inicial da partícula é 100 km/s^2, qual é a massa da partícula?

64 A soma das cargas de duas pequenas esferas positivamente carregadas é $5{,}0 \times 10^{-5}$ C. Se cada esfera é repelida pela outra com uma força eletrostática de 1,0 N e as esferas estão separadas por uma distância de 2,0 m, qual é a carga da esfera com a menor carga?

65 As cargas iniciais das três esferas condutoras iguais da Fig. 21-24 são as seguintes: esfera A, Q; esfera B, $-Q/4$; esfera C, $Q/2$, em que $Q = 2{,}00 \times 10^{-14}$ C. As esferas A e B são mantidas fixas, com uma distância entre os centros $d = 1{,}20$ m, que é muito maior que o raio das esferas. A esfera C é colocada em contato, primeiro com a esfera A e depois com a esfera B antes de ser removida. Qual é o módulo da força eletrostática entre as esferas A e B?

66 Um elétron se encontra no vácuo, perto da superfície da Terra, no ponto $y = 0$ de um eixo vertical. Qual deve ser a coordenada y de um segundo elétron situado no eixo y para que a força eletrostática exercida sobre o primeiro elétron compense o peso do primeiro elétron?

67 Na Fig. 21-26, a partícula 1, de carga $-5{,}00q$, e a partícula 2, de carga $+2{,}00q$, são mantidas a uma distância L no eixo x. Se uma partícula 3, de carga desconhecida q_3, é colocada em um ponto tal que a força eletrostática total exercida sobre a partícula seja zero, determine (a) a coordenada x e (b) a coordenada y da partícula 3.

68 Dois estudantes de engenharia, João, com uma massa de 90 kg, e Maria, com uma massa de 45 kg, estão a 30 m de distância um do outro. Suponha que existam desequilíbrios de carga de 0,01% nos corpos dos dois estudantes, com um deles positivo e o outro negativo. Determine a ordem de grandeza da força de atração eletrostática entre os dois estudantes substituindo-os por esferas de água com a mesma massa.

69 No decaimento radioativo da Eq. 21-13, um núcleo de ^{238}U se transforma em ^{234}Th e ^{4}He, que é ejetado. (Trata-se de núcleos e não de átomos; isso significa que não há elétrons envolvidos.) Para uma distância entre os núcleos de ^{234}Th e ^{4}He de $9{,}0 \times 10^{-15}$ m, determine (a) a força eletrostática entre os núcleos e (b) a aceleração do núcleo de ^{4}He.

70 Na Fig. 21-25, quatro partículas formam um quadrado. As cargas são $q_1 = +Q$, $q_2 = q_3 = q$ e $q_4 = -2{,}00Q$. Qual é o valor de q/Q se a força eletrostática total a que está submetida a partícula 1 é zero?

71 Em uma casca metálica de raio R, um elétron é lançado do centro em direção a um pequeno furo da casca, passa pelo furo e se afasta da casca. A casca está carregada negativamente com uma *densidade superficial de carga* (carga por unidade de área) de $6{,}90 \times 10^{-13}$ C/m^2. Determine o módulo da aceleração do elétron no instante em que a distância entre o elétron e o centro da casca é (a) $0{,}500R$ e (b) $2{,}00R$.

72 Um elétron é lançado, com uma velocidade inicial $v_i = 3{,}2 \times 10^5$ m/s, em direção a um próton muito distante que está em repouso. Como a massa do próton é muito maior que a massa do elétron, suponha que o próton permanece em repouso. Calculando o trabalho realizado pela força eletrostática sobre o elétron, determine a distância entre as duas partículas no instante em que a velocidade do elétron é igual a $2v_i$.

73 Em um modelo antigo do átomo de hidrogênio (o *modelo de Bohr*), o elétron descrevia uma órbita circular em torno do próton e o raio da órbita era restrito aos valores dados por

$$r = n^2 a_0, \quad \text{para } n = 1, 2, 3, \ldots,$$

em que $a_0 = 52{,}92$ pm. Qual seria a velocidade do elétron (a) na órbita de menor raio e (b) na órbita com o segundo menor raio? (c) Se o elétron passasse para uma órbita de raio maior, a velocidade do elétron aumentaria, diminuiria ou permaneceria a mesma?

74 A corrente que atravessa o filamento de uma lâmpada de 100 W é 0,83 A. Quanto tempo é necessário

para que 1 mol de elétrons passe pela lâmpada?

75 As cargas do elétron e do pósitron são $-e$ e $+e$, respectivamente. As duas partículas têm a mesma massa, $9{,}11 \times 10^{-31}$ kg. Qual é a razão entre a força de atração elétrica e a força de atração gravitacional entre um elétron e um pósitron?

[1]Essas pastilhas, muito populares nos Estados Unidos; são conhecidas como LifeSavers. (N.T.)