A energia potencial U do dipolo depende da orientação do dipolo em relação ao campo:

$$U = -\vec{p} \cdot \vec{E}. \tag{22-38}$$

A energia potencial é definida como nula ($U = 0$) quando $\vec{p}$ for perpendicular a $\vec{E}$; é mínima ($U = -pE$), quando $\vec{p}$ e $\vec{E}$ estão alinhados e apontam no mesmo sentido; é máxima ($U = pE$), quando $\vec{p}$ e $\vec{E}$ estão alinhados e apontam em sentidos opostos.

Perguntas

1 A Fig. 22-22 mostra três configurações de campo elétrico, representadas por linhas de campo. Nas três configurações, um próton é liberado no ponto A a partir do repouso e acelerado pelo campo elétrico até o ponto B. A distância entre A e B é a mesma nas três configurações. Coloque em ordem decrescente as configurações de acordo com o módulo do momento linear do próton no ponto B.

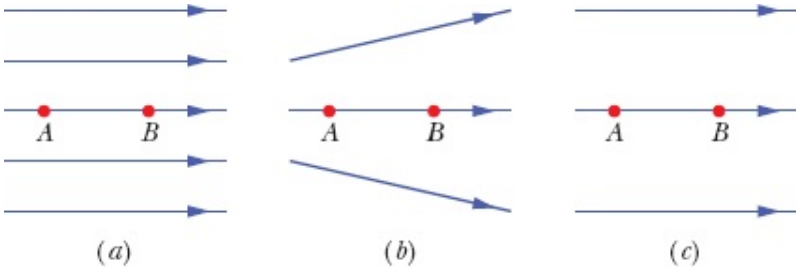


Figura 22-22 Pergunta 1.

2 A Fig. 22-23 mostra dois conjuntos de partículas carregadas em forma de quadrado. Os lados dos quadrados, cujo centro é o ponto P, não são paralelos. A distância entre as partículas situadas no mesmo quadrado é d ou $d/2$. Determine o módulo e a direção do campo elétrico total no ponto P.

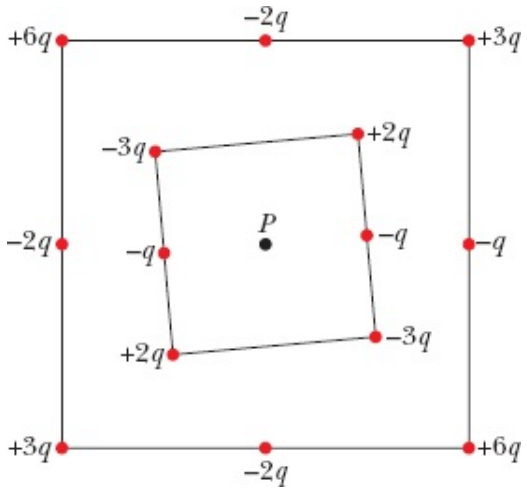


Figura 22-23 Pergunta 2.

3 Na Fig. 22-24, duas partículas de carga $-q$ estão dispostas simetricamente em relação ao eixo y e produzem campos elétricos em um ponto P situado no mesmo eixo. (a) Os módulos dos dois campos no

ponto P são iguais? (b) Os campos apontam na direção das cargas ou para longe das cargas? (c) O módulo do campo elétrico total no ponto P é igual à soma dos módulos E dos campos elétricos produzidos pelas duas cargas (ou seja, é igual a $2E$)? (d) As componentes x dos campos produzidos pelas duas cargas se somam ou se cancelam? (e) As componentes y se somam ou se cancelam? (f) A direção do campo total no ponto P é a das componentes que se somam ou a das componentes que se cancelam? (g) Qual é a direção do campo total?

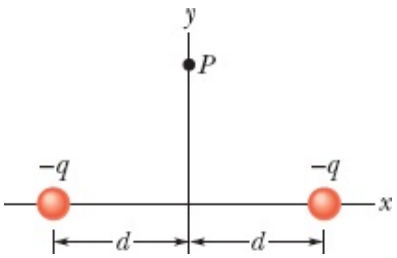


Figura 22-24 Pergunta 3.

4 A Fig. 22-25 mostra quatro sistemas nos quais quatro partículas carregadas estão uniformemente espaçadas à esquerda e à direita de um ponto central. Os valores das cargas estão indicados. Ordene os sistemas de acordo com o módulo do campo elétrico no ponto central, em ordem decrescente.

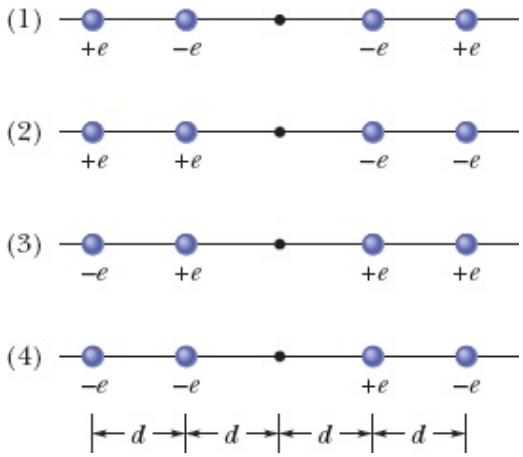


Figura 22-25 Pergunta 4.

5 A Fig. 22-26 mostra duas partículas carregadas mantidas fixas em um eixo. (a) Em que ponto do eixo (além do infinito) o campo elétrico é zero: à esquerda das cargas, entre as cargas, ou à direita das cargas? (b) Existe algum ponto *fora* do eixo (além do infinito) em que o campo elétrico seja zero?



Figura 22-26 Pergunta 5.

6 Na Fig. 22-27, dois anéis circulares iguais, isolantes, têm os centros na mesma reta perpendicular aos planos dos anéis. Em três sistemas, as cargas uniformes dos anéis A e B são, respectivamente, (1) q_0 e q_0; (2) $-q_0$ e $-q_0$; (3) $-q_0$ e q_0. Ordene os sistemas de acordo com o módulo do campo elétrico total (a) no

ponto P_1, a meio caminho entre os anéis; (b) no ponto P_2, no centro do anel B; (c) no ponto P_3, à direita do anel B, em ordem decrescente.

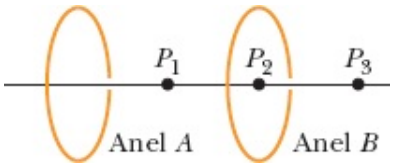


Figura 22-27 Pergunta 6.

7 As energias potenciais associadas a quatro orientações de um dipolo elétrico em relação a um campo elétrico são (1) $-5U_0$; (2) $-7U_0$; (3) $3U_0$; (4) $5U_0$, em que U_0 é uma constante positiva. Coloque em ordem decrescente as orientações de acordo (a) com o ângulo entre o momento dipolar $\vec{p}$ e o campo elétrico $\vec{E}$; (b) com o módulo do torque exercido pelo campo sobre o dipolo.

8 (a) No Teste 4, se o dipolo gira da orientação 1 para a orientação 2, o trabalho realizado pelo campo sobre o dipolo é positivo, negativo ou nulo? (b) Se o dipolo gira da orientação 1 para a orientação 4, o trabalho realizado pelo campo é maior, menor ou igual ao trabalho do item (a)?

9 A Fig. 22-28 mostra dois discos e um anel plano, todos com a mesma carga uniforme Q. Ordene os objetos de acordo com o módulo elétrico criado no ponto P (situado à mesma distância vertical nos três casos), em ordem decrescente.

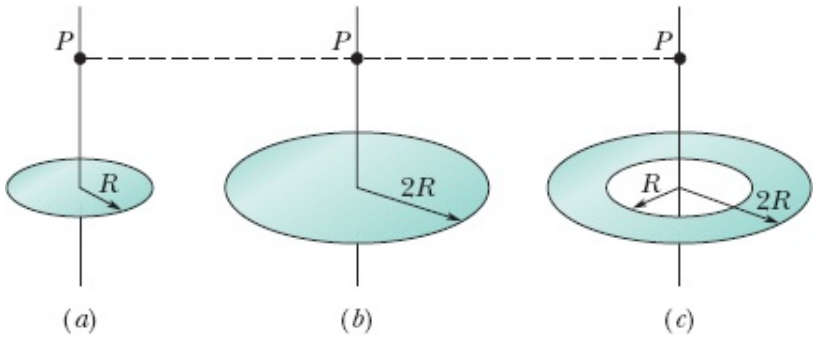


Figura 22-28 Pergunta 9.

10 Na Fig. 22-29, um elétron e atravessa um pequeno orifício da placa A e se dirige para a placa B. Um campo elétrico uniforme na região entre as placas desacelera o elétron sem mudar sua trajetória. (a) Qual é a direção do campo? (b) Quatro outras partículas também atravessam pequenos orifícios da placa A ou da placa B e se movem na região entre as placas. Três possuem cargas $+q_1$, $+q_2$ e $-q_3$. A quarta (n, na figura) é um nêutron, que é eletricamente neutro. A velocidade de cada uma das outras quatro partículas aumenta, diminui ou permanece a mesma na região entre as placas?

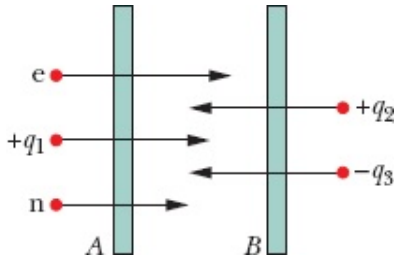


Figura 22-29 Pergunta 10.

11 Na Fig. 22-30*a*, uma barra de plástico circular, com uma carga elétrica uniforme +*Q*, produz um campo elétrico de módulo *E* no centro de curvatura da barra (situado na origem). Nas Figs. 22-30*b*, 22-30*c* e 22-30*d*, outras barras circulares, todas com a mesma forma e a mesma carga que a primeira, são acrescentadas até que a circunferência fique completa. Um quinto arranjo (que pode ser chamado de *e*) é semelhante ao arranjo *d*, exceto pelo fato de que a barra do quarto quadrante tem carga –*Q*. Coloque em ordem decrescente os cinco arranjos de acordo com o módulo do campo elétrico no centro de curvatura.

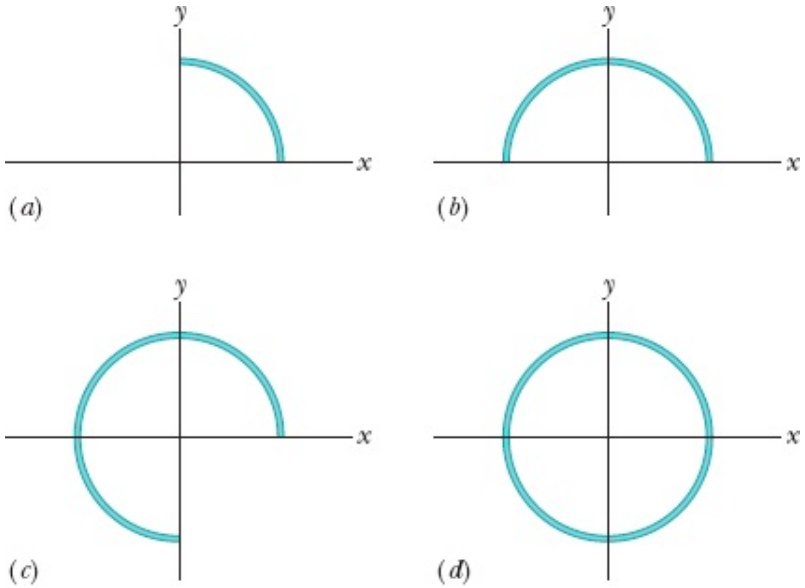


Figura 22-30 Pergunta 11.

12 Quando três dipolos elétricos iguais estão próximos, cada um está sujeito ao campo elétrico produzido pelos outros dois, e o sistema de três dipolos possui certa energia potencial. A Fig. 22-31 mostra dois arranjos nos quais três dipolos elétricos estão lado a lado. Os momentos dipolares elétricos dos três dipolos são iguais, e a distância entre dipolos vizinhos é a mesma. Em qual dos dois arranjos a energia potencial do arranjo de três dipolos é maior?

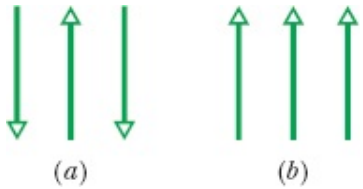


Figura 22-31 Pergunta 12.

13 A Fig. 22-32 mostra três barras, todos com a mesma carga Q distribuída uniformemente. As barras a (de comprimento L) e b (de comprimento $L/2$) são retas, e os pontos P estão em uma reta perpendicular que passa pelo centro das barras. A barra c (de comprimento $L/2$) tem forma de circunferência e o ponto P está no centro. Coloque em ordem decrescente as barras, de acordo com o módulo do campo elétrico nos pontos P.

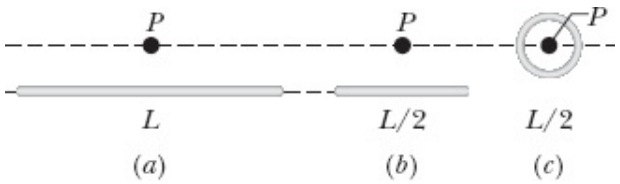


Figura 22-32 Pergunta 13.

14 A Fig. 22-33 mostra cinco prótons que são lançados em uma região onde existe um campo elétrico uniforme $\vec{E}$; o módulo e a orientação da velocidade dos prótons estão indicados. Coloque em ordem decrescente os prótons, de acordo com o módulo da aceleração produzida pelo campo elétrico.

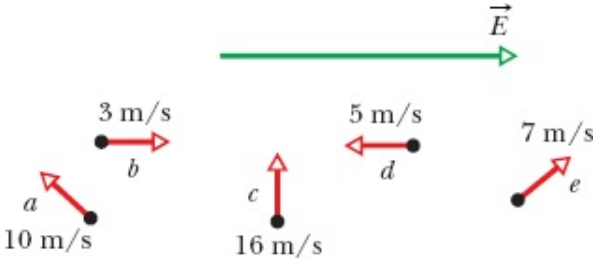


Figura 22-33 Pergunta 14.

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 22-1 O Campo Elétrico

·**1** Faça um esboço das linhas de campo elétrico entre duas cascas esféricas condutoras concêntricas e do lado de fora da casca de maior raio supondo que há uma carga positiva uniforme q_1 na casca de menor raio e uma carga negativa uniforme $-q_2$ na casca de maior raio. Considere os casos $q_1 > q_2$, $q_1 = q_2$ e $q_1 < q_2$.

·**2** Na Fig. 22-34, as linhas de campo elétrico do lado esquerdo têm uma separação duas vezes maior que as linhas do lado direito. (a) Se o módulo do campo elétrico no ponto A é 40 N/C, qual é o módulo

da força a que é submetido um próton no ponto *A*? (b) Qual é o módulo do campo elétrico no ponto *B*?

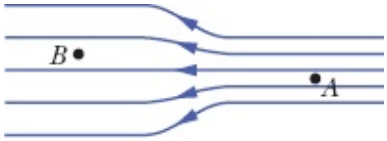


Figura 22-34 Problema 2.

Módulo 22-2 O Campo Elétrico Produzido por uma Partícula Carregada

·3 O núcleo de um átomo de plutônio 239 contém 94 prótons. Suponha que o núcleo é uma esfera com 6,64 fm de raio e que a carga dos prótons está distribuída uniformemente na esfera. Determine (a) o módulo e (b) o sentido (para dentro ou para fora) do campo elétrico produzido pelos prótons na superfície do núcleo.

·4 Duas partículas são mantidas fixas no eixo x: a partícula 1, de carga $-2{,}00 \times 10^{-7}$ C, no ponto x = 6,00 cm, e a partícula 2, de carga $+2{,}00 \times 10^{-7}$ C, no ponto x = 21,0 cm. Qual é o campo elétrico total a meio caminho entre as partículas, na notação dos vetores unitários?

·5 Qual é o valor absoluto de uma carga pontual cujo campo elétrico a 50 cm de distância tem um módulo de 2,0 N/C?

·6 Qual é o valor absoluto de uma carga pontual capaz de criar um campo elétrico de 1,00 N/C em um ponto a 1,00 m de distância?

··7 Na Fig. 22-35, as quatro partículas formam um quadrado de lado a = 5,00 cm e têm cargas q_1 = +10,0 nC, q_2 = –20,0 nC, q_3 = +20,0 nC e q_4 = –10,0 nC. Qual é o campo elétrico no centro do quadrado, na notação dos vetores unitários?

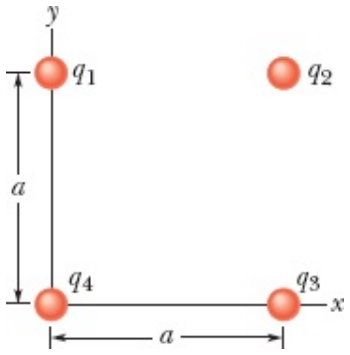


Figura 22-35 Problema 7.

··8 Na Fig. 22-36, as quatro partículas são mantidas fixas e têm cargas $q_1 = q_2 = +5e$, $q_3 = +3e$ e $q_4 = -12e$. A distância d = 5,0 μm. Qual é o módulo do campo elétrico no ponto *P*?

··9 A Fig. 22-37 mostra duas partículas carregadas mantidas fixas no eixo x: $-q = -3{,}20 \times 10^{-19}$ C, no ponto x = –3,00 m, e $q = 3{,}20 \times 10^{-19}$ C, no ponto x = +3,00 m. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semieixo x positivo) do campo elétrico no ponto *P*, para o qual y = 4,00 m.

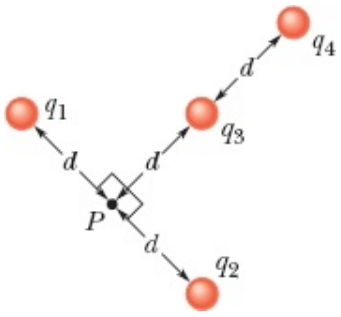


Figura 22-36 Problema 8.

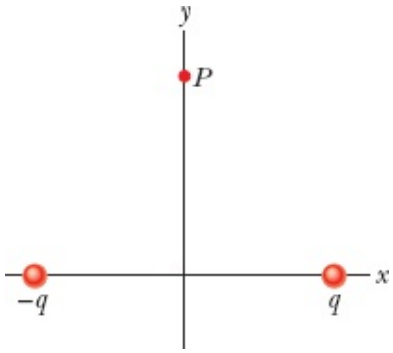


Figura 22-37 Problema 9.

··10 A Fig. 22-38*a* mostra duas partículas carregadas mantidas fixas no eixo x a uma distância L uma da outra. A razão q_1/q_2 entre os valores absolutos das cargas das duas partículas é 4,00. A Fig. 22-38*b* mostra $E_{tot,x}$, a componente x do campo elétrico total, em função de x, para a região à direita da partícula 2. A escala do eixo x é definida por x_s = 30,0 cm. (a) Para qual valor de $x > 0$ o valor de $E_{tot,x}$ é máximo? (b) Se a carga da partícula 2 é $-q_2 = -3e$, qual é o valor do campo máximo?

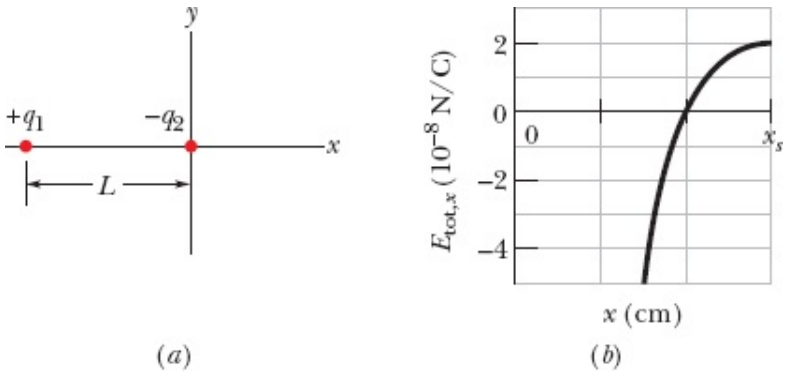


Figura 22-38 Problema 10.

··11 Duas partículas são mantidas fixas no eixo x: a partícula 1, de carga $q_1 = 2{,}1 \times 10^{-8}$ C, no ponto x = 20 cm, e a partícula 2, de carga $q_2 = -4{,}00q_1$, no ponto x = 70 cm. Em que ponto do eixo x o campo elétrico total é nulo?

··12 A Fig. 22-39 mostra um arranjo irregular de elétrons (e) e prótons (p) em um arco de circunferência de raio r = 2,00 cm, com ângulos $\theta_1 = 30{,}0^o$, $\theta_2 = 50{,}0^o$, $\theta_3 = 30{,}0^o$ e $\theta_4 = 20{,}0^o$. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semieixo x positivo) do campo elétrico no centro do arco.

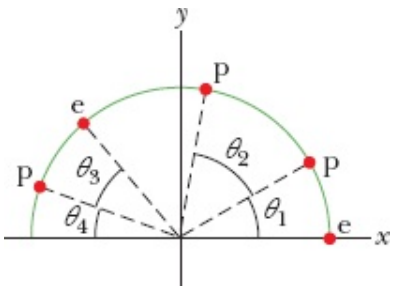


Figura 22-39 Problema 12.

··13 A Fig. 22-40 mostra um próton (p) no eixo central de um disco com uma densidade de carga uniforme devido a um excesso de elétrons. O disco é mostrado de perfil. Três dos elétrons aparecem na figura: o elétron e_c, no centro do disco, e os elétrons e_s, em extremidades opostas do disco, a uma distância R do centro. O próton está inicialmente a uma distância $z = R = 2{,}00$ cm do disco. Com o próton nessa posição, determine o módulo (a) do campo elétrico $\vec{E}_c$ produzido pelo elétron e_c e (b) do campo elétrico *total* $\vec{E}_{s,\text{tot}}$ produzido pelos elétrons e_s. O próton é transferido para o ponto $z = R/10{,}0$. Determine os novos valores (c) do módulo de $\vec{E}_c$ e (d) do módulo de $\vec{E}_{s,\text{tot}}$. (e) Os resultados dos itens (a) e (c) mostram que o módulo de $\vec{E}_c$ aumenta quando o próton se aproxima do disco. Por que, nas mesmas condições, o módulo de $\vec{E}_{s,\text{tot}}$ diminui, como mostram os resultados dos itens (b) e (d)?

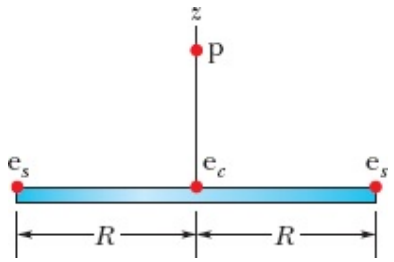


Figura 22-40 Problema 13.

··14 Na Fig. 22-41, a partícula 1, de carga $q_1 = -5{,}00q$, e a partícula 2, de carga $q_2 = +2{,}00q$, são mantidas fixas no eixo x. (a) Em que ponto do eixo, em termos da distância L, o campo elétrico total é nulo? (b) Faça um esboço das linhas de campo elétrico.

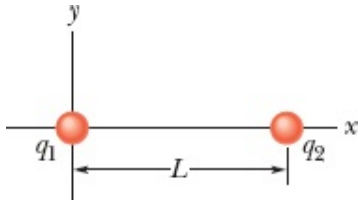


Figura 22-41 Problema 14.

··15 Na Fig. 22-42, as três partículas são mantidas fixas no lugar e têm cargas $q_1 = q_2 = +e$ e $q_3 = +2e$. A distância $a = 6{,}00\ \mu$m. Determine (a) o módulo e (b) a direção do campo elétrico no ponto P.

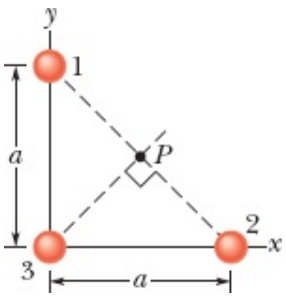


Figura 22-42 Problema 15.

···16 A Fig. 22-43 mostra um anel de plástico de raio R = 50,0 cm. Duas pequenas contas coloridas estão no anel: a conta 1, de carga +2,00 μC, que é mantida fixa na extremidade esquerda, e a conta 2, de carga +6,00 μC, que pode ser deslocada ao longo do anel. As duas contas produzem, juntas, um campo elétrico de módulo E no centro do anel. Determine (a) um valor positivo e (b) um valor negativo do ângulo θ para o qual $E = 2{,}00 \times 10^5$ N/C.

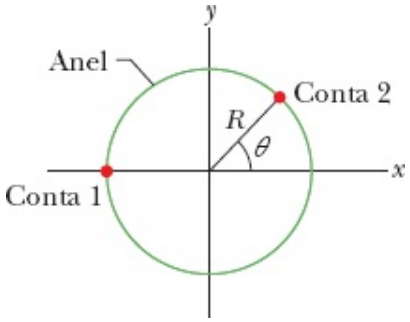


Figura 22-43 Problema 16.

···17 Duas contas carregadas estão no anel da Fig. 22-44*a*, que possui um raio R = 60,0 cm. A conta 2, que não aparece na figura, é mantida fixa. A conta 1 está inicialmente no eixo x, na posição $\theta = 0^o$, mas é deslocada para a extremidade oposta do anel, ou seja, para a posição $\theta = 180^o$, passando pelo primeiro e segundo quadrantes do sistema de coordenadas xy. A Fig. 22-44*b* mostra a componente x do campo elétrico produzido na origem pelas duas contas em função de θ, e a Fig. 22-44*c* mostra a componente y do campo. As escalas dos eixos verticais são definidas por $E_{xs} = 5{,}0 \times 10^4$ N/C e $E_{ys} = -9{,}0 \times 10^4$ N/C. (a) Qual é o ângulo θ da conta 2? Determine a carga (b) da conta 1 e (c) da conta 2.

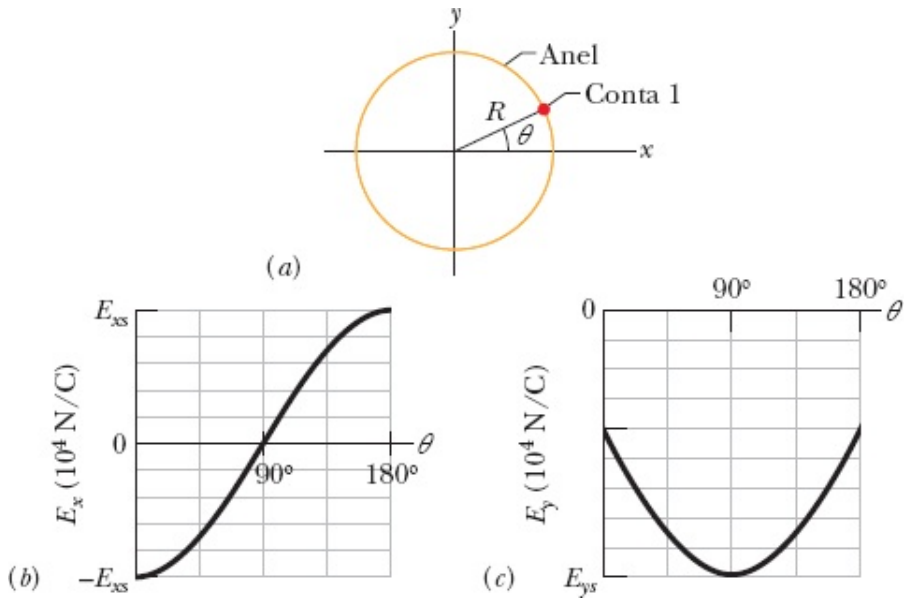


Figura 22-44 Problema 17.

Módulo 22-3 O Campo Elétrico Produzido por um Dipolo Elétrico

··18 O campo elétrico de um dipolo elétrico em pontos do eixo do dipolo é dado, aproximadamente, pelas Eqs. 22-8 e 22-9. Se é feita uma expansão binomial da Eq. 22-7, qual é o termo seguinte da expressão do campo elétrico do dipolo em pontos do eixo do dipolo? Em outras palavras, qual é o valor de E_1 na expressão

$$E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{qd}{z^3} + E_1?$$

··19 A Fig. 22-45 mostra um dipolo elétrico. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semieixo x positivo) do campo elétrico produzido pelo dipolo em um ponto P situado a uma distância $r >> d$.

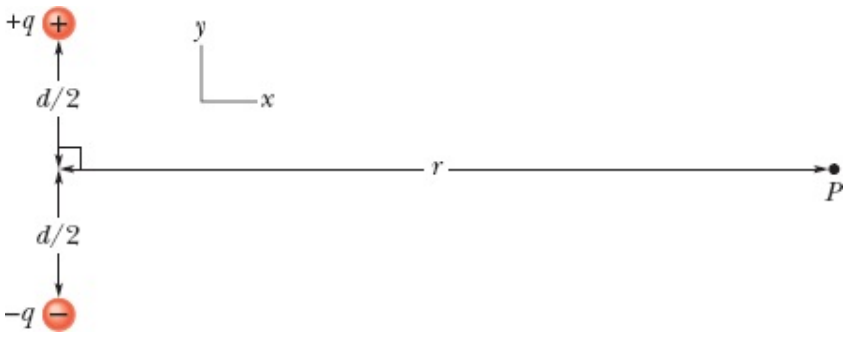


Figura 22-45 Problema 19.

··20 As Eqs. 22-8 e 22-9 fornecem o valor aproximado do módulo do campo elétrico de um dipolo elétrico em pontos do eixo do dipolo. Considere um ponto P do eixo situado a uma distância $z = 5{,}00d$ do centro do dipolo, em que d é a distância entre as partículas que formam o dipolo. Seja E_{apr} o valor aproximado do módulo do campo no ponto P, dado pelas Eqs. 22-8 e 22-9, e seja E_{ver} o valor verdadeiro

do campo. Determine a razão E_{apr}/E_{ver}.

···21 *Quadrupolo elétrico*. A Fig. 22-46 mostra um quadrupolo elétrico, formado por dois dipolos de mesmo módulo e sentidos opostos. Mostre que o valor de E em um ponto P do eixo do quadrupolo situado a uma distância z do centro (supondo $z \gg d$) é dado por

$$E = \frac{3Q}{4\pi\varepsilon_0 z^4},$$

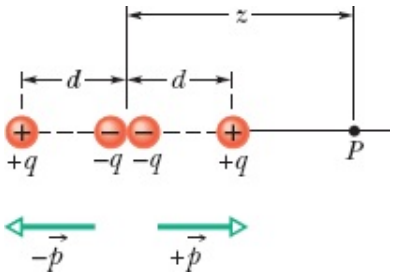


Figura 22-46 Problema 21.

em que Q ($= 2qd^2$) é chamado de *momento quadrupolar* da distribuição de carga.

Módulo 22-4 O Campo Elétrico Produzido por uma Linha de Carga

·22 *Densidade, densidade, densidade*. (a) Uma carga de –300e está distribuída uniformemente em um arco de circunferência de 4,00 cm de raio, que subtende um ângulo de 40°. Qual é a densidade linear de carga do arco? (b) Uma carga de –300e está distribuída uniformemente em uma das superfícies de um disco circular de 2,00 cm de raio. Qual é a densidade superficial de carga da superfície? (c) Uma carga de –300e está distribuída uniformemente na superfície de uma esfera de 2,00 cm de raio. Qual é a densidade superficial de carga da superfície? (d) Uma carga de –300e está distribuída uniformemente no volume de uma esfera de 2,00 cm de raio. Qual é a densidade volumétrica de carga da esfera?

·23 A Fig. 22-47 mostra dois anéis isolantes paralelos, com o centro na mesma reta perpendicular aos planos dos anéis. O anel 1, de raio R, possui uma carga uniforme q_1; o anel 2, também de raio R, possui uma carga uniforme q_2. Os anéis estão separados por uma distância $d = 3{,}00R$. O campo elétrico no ponto P da reta que passa pelos centros dos anéis, que está a uma distância R do anel 1, é zero. Calcule a razão q_1/q_2.

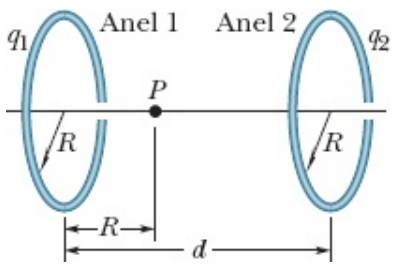


Figura 22-47 Problema 23.

··24 Uma barra fina isolante, com uma distribuição uniforme de carga positiva Q, tem a forma de uma circunferência de raio R (Fig. 22-48). O eixo central do anel é o eixo z, com a origem no centro do anel. Determine o módulo do campo elétrico (a) no ponto $z = 0$ e (b) no ponto $z = \infty$. (c) Em termos de R, para qual valor positivo de z o módulo do campo é máximo? (d) Se $R = 2{,}00$ cm e $Q = 4{,}00\ \mu$C, qual é o valor máximo do campo?

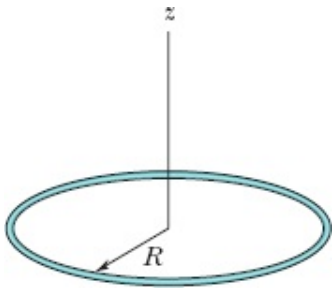


Figura 22-48 Problema 24.

··25 A Fig. 22-49 mostra três arcos de circunferência cujo centro está na origem de um sistema de coordenadas. Em cada arco, a carga uniformemente distribuída é dada em termos de $Q = 2{,}00\ \mu$C. Os raios são dados em termos de $R = 10{,}0$ cm. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semieixo x positivo) do campo elétrico na origem.

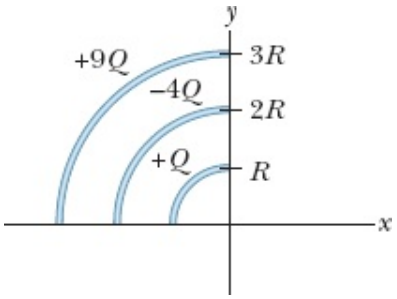


Figura 22-49 Problema 25.

··26 Na Fig. 22-50, uma barra fina de vidro forma uma semicircunferência de raio $r = 5{,}00$ cm. Uma carga $+q = 4{,}50$ pC está distribuída uniformemente na parte superior da barra, e uma carga $-q = -4{,}50$ pC está distribuída uniformemente na parte inferior da barra. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semieixo x positivo) do campo elétrico $\vec{E}$ no ponto P, situado no centro do semicírculo.

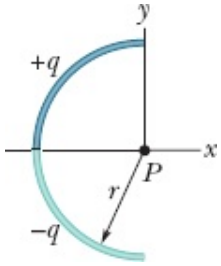


Figura 22-50 Problema 26.

··27 Na Fig. 22-51, duas barras curvas de plástico, uma de carga $+q$ e outra de carga $-q$, formam uma circunferência de raio $R = 8{,}50$ cm no plano xy. O eixo x passa pelos dois pontos de ligação entre os arcos, e a carga está distribuída uniformemente nos dois arcos. Se $q = 15{,}0$ pC, determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semieixo x positivo) do campo elétrico $\vec{E}$ no ponto P, situado no centro da circunferência.

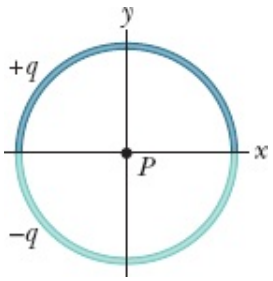


Figura 22-51 Problema 27.

··28 Um anel de raio $R = 2{,}40$ cm contém uma distribuição uniforme de carga, e o módulo do campo elétrico E resultante é medido ao longo do eixo central do anel (perpendicular ao plano do anel). A que distância do centro do anel o campo E é máximo?

··29 A Fig. 22-52*a* mostra uma barra isolante com uma carga $+Q$ distribuída uniformemente. A barra forma uma semicircunferência de raio R e produz um campo elétrico de módulo E no centro de curvatura P. Se a barra é substituída por uma carga pontual situada a uma distância R do ponto P (Fig. 22-52*b*), qual é a razão entre o novo valor de E e o antigo valor?

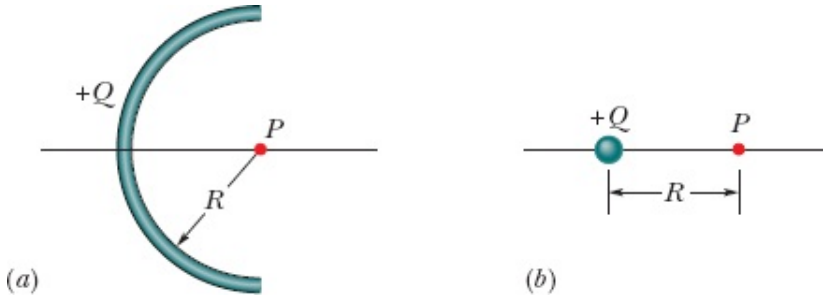


Figura 22-52 Problema 29.

··30 A Fig. 22-53 mostra dois anéis concêntricos, de raios R e $R' = 3{,}00R$, que estão no mesmo plano. O ponto P está no eixo central z, a uma distância $D = 2{,}00R$ do centro dos anéis. O anel menor possui uma carga uniformemente distribuída $+Q$. Em termos de Q, qual deve ser a carga uniformemente distribuída no anel maior para que o campo elétrico no ponto P seja nulo?

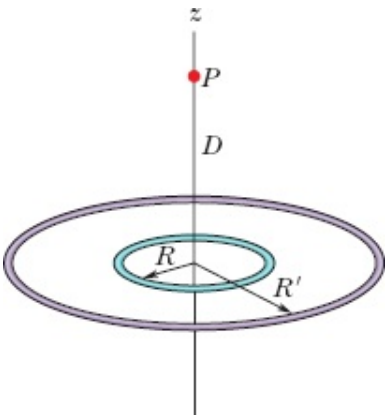


Figura 22-53 Problema 30.

··31 Na Fig. 22-54, uma barra isolante, de comprimento L = 8,15 cm, tem uma carga $-q$ = –4,23 fC uniformemente distribuída. (a) Qual é a densidade linear de carga da barra? Determine (b) o módulo e (c) a direção (em relação ao semieixo x positivo) do campo elétrico produzido no ponto P, situado no eixo x, a uma distância a = 12,0 cm da extremidade da barra. Determine o módulo do campo elétrico produzido em um ponto situado no eixo x, a uma distância a = 50 m do centro da barra, (d) pela barra e (e) por uma partícula de carga $-q$ = –4,23 fC colocada no lugar anteriormente ocupado pelo centro da barra.

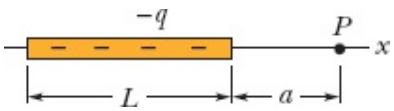


Figura 22-54 Problema 31.

···32 Na Fig. 22-55, uma carga positiva q = 7,81 pC está distribuída uniformemente em uma barra fina, isolante, de comprimento L = 14,5 cm. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semieixo x positivo) do campo elétrico produzido no ponto P, situado na mediatriz da barra, a uma distância R = 6,00 cm da barra.

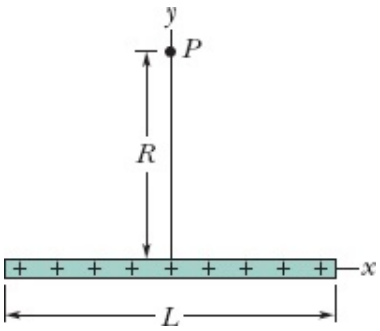


Figura 22-55 Problema 32.

···33 Na Fig. 22-56, uma barra isolante "semi-infinita" (ou seja, infinita apenas em um sentido) possui uma densidade linear de carga uniforme λ. Mostre que o campo elétrico $\vec{E}_p$ no ponto P faz um ângulo de 45° com a barra e que o resultado não depende da distância R. (*Sugestão*: Calcule separadamente as componentes de $\vec{E}_p$ na direção paralela à barra e na direção perpendicular à barra.)

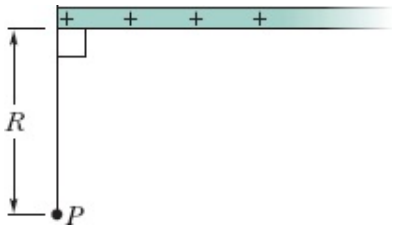


Figura 22-56 Problema 33.

Módulo 22-5 O Campo Elétrico Produzido por um Disco Carregado

·34 Um disco de 2,5 cm de raio possui uma densidade superficial de carga de 5,3 μC/m^2 na superfície superior. Qual é o módulo do campo elétrico produzido pelo disco em um ponto do eixo central situado a uma distância z = 12 cm do centro do disco?

·35 A que distância ao longo do eixo de um disco de plástico uniformemente carregado com 0,600 m de raio o módulo do campo elétrico é igual a metade do módulo do campo no centro do disco?

··36 Um disco circular de plástico de raio R = 2,00 cm tem uma carga uniformemente distribuída $Q = +(2{,}00 \times 10^6)e$ na superfície. Qual é a carga, em coulombs, de um anel circular de 30 μm de largura e raio médio r = 0,50 cm extraído do disco?

··37 Um engenheiro foi encarregado de projetar um dispositivo no qual um disco uniformemente carregado, de raio R, produz um campo elétrico. O módulo do campo é mais importante em um ponto P do eixo do disco, a uma distância 2,00R do plano do disco (Fig. 22-57*a*). Para economizar material, decidiu-se substituir o disco por um anel com o mesmo raio externo R e um raio interno R/2,00 (Fig. 22-57*b*). O anel tem a mesma densidade superficial de carga que o disco original. Qual é a redução percentual do módulo do campo elétrico no ponto P?

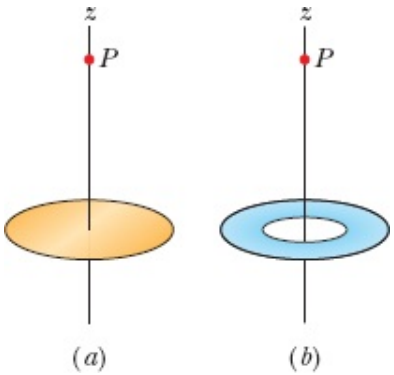


Figura 22-57 Problema 37.

··38 A Fig. 22-58*a* mostra um disco circular uniformemente carregado. O eixo central z é perpendicular ao plano do disco e a origem está no centro do disco. A Fig. 22-58*b* mostra o módulo do campo elétrico no eixo z em função do valor de z, em termos do valor máximo E_m do módulo do campo elétrico. A escala do eixo z é definida por z_s = 8,0 cm. Qual é o raio do disco?

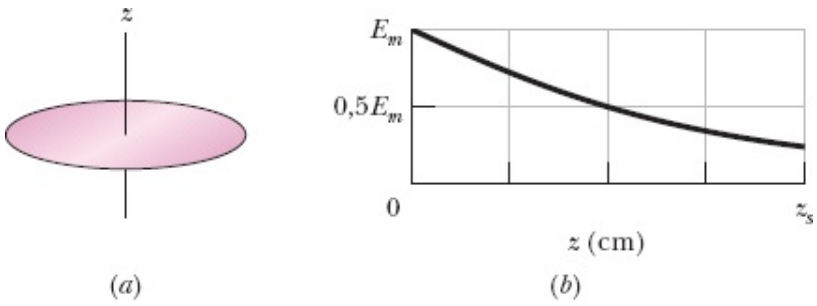


Figura 22-58 Problema 38.

Módulo 22-6 Uma Carga Pontual em um Campo Elétrico

·39 No experimento de Millikan, uma gota de óleo, com raio de 1,64 μm e massa específica de 0,851 g/cm^3, permanece imóvel na câmara C (veja a Fig. 22-16) quando um campo vertical de $1{,}92 \times 10^5$ N/C é aplicado. Determine a carga da gota em termos de e.

·40 Um elétron com uma velocidade de $5{,}00 \times 10^8$ cm/s entra em uma região em que existe um campo elétrico uniforme de $1{,}00 \times 10^3$ N/C e se move paralelamente ao campo, sendo desacelerado por ele. Determine (a) a distância percorrida pelo elétron até inverter o movimento e (b) o tempo necessário para que o elétron inverta o movimento. (c) Se a região em que existe o campo tem 8,00 mm de largura (uma distância insuficiente para que o elétron inverta o movimento), que fração da energia cinética inicial do elétron é perdida na região?

·41 Um grupo de nuvens carregadas produz um campo elétrico no ar perto da superfície da Terra. Na presença desse campo, uma partícula com uma carga de $-2{,}0 \times 10^{-9}$ C é submetida a uma força eletrostática para baixo de $3{,}0 \times 10^{-6}$ N. (a) Qual é o módulo do campo elétrico? Determine (b) o módulo e (c) a orientação da força eletrostática $\vec{F}_{el}$ exercida pelo campo sobre um próton. (d) Determine o módulo da força gravitacional $\vec{F}_g$ a que está sujeito o próton. (e) Calcule a razão F_{el}/F_g.

·42 O ar úmido se torna um bom condutor de eletricidade (as moléculas se ionizam) quando é submetido a um campo elétrico maior que $3{,}0 \times 10^6$ N/C. Determine, para esse valor de campo elétrico, o módulo da força eletrostática a que é submetido (a) um elétron e (b) um átomo monoionizado.

·43 Um elétron é liberado a partir do repouso em um campo elétrico uniforme, de módulo $2{,}00 \times 10^4$ N/C. Determine a aceleração do elétron. (Ignore os efeitos da gravitação.)

·44 Uma partícula alfa (núcleo de um átomo de hélio) tem uma massa de $6{,}64 \times 10^{-27}$ kg e uma carga de $+2e$. Determine (a) o módulo e (b) a direção de um campo elétrico capaz de equilibrar o peso da partícula.

·45 Um elétron está no eixo de um dipolo elétrico, a 25 nm de distância do centro do dipolo. Qual é o módulo da força eletrostática a que está submetido o elétron se o momento do dipolo é $3{,}6 \times 10^{-29}$ C · m? Suponha que a distância entre as cargas do dipolo é muito menor que 25 nm.

·46 Um elétron adquire uma aceleração para leste de $1{,}80 \times 10^9$ m/s^2 ao ser submetido a um campo elétrico uniforme. Determine (a) o módulo e (b) a orientação do campo elétrico.

·47 Feixes de prótons de alta energia podem ser produzidos por “canhões” que usam campos elétricos para acelerar os prótons. (a) Qual é a aceleração experimentada por um próton em um campo elétrico de $2{,}00 \times 10^4$ N/C? (b) Qual é a velocidade adquirida pelo próton depois de percorrer uma distância de 1,00 cm na presença desse campo?

··48 Na Fig. 22-59, um elétron (e) é liberado a partir do repouso no eixo central de um disco uniformemente carregado, de raio R. A densidade superficial de carga do disco é +4,00 μC/m^2. Determine o módulo da aceleração inicial do elétron se for liberado a uma distância (a) R, (b) $R/100$, (c) $R/1000$ do centro do disco. (d) Por que o módulo da aceleração quase não varia quando o elétron está próximo do disco?

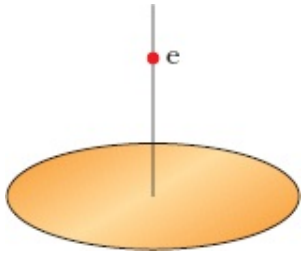


Figura 22-59 Problema 48.

··49 Um bloco de 10,0 g com uma carga de $+8{,}00 \times 10^{-5}$ C é submetido a um campo elétrico $\vec{E} = (3000\hat{i} - 600\hat{j})$ N/C. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semieixo x positivo) da força eletrostática que age sobre o bloco. Se o bloco for liberado na origem, a partir do repouso, no instante $t = 0$, determine (c) a coordenada x e (d) a coordenada y do bloco no instante $t = 3{,}00$ s.

··50 Em determinado instante, as componentes da velocidade de um elétron que se move entre duas placas paralelas carregadas são $v_x = 1{,}5 \times 10^5$ m/s e $v_y = 3{,}0 \times 10^3$ m/s. O campo elétrico entre as placas é $\vec{E} = (120 \text{ N/C})\,\hat{j}$. Determine, na notação dos vetores unitários, (a) a aceleração do elétron e (b) a velocidade do elétron no instante em que sua coordenada x variou de 2,0 cm.

··51 Suponha que uma abelha possa ser aproximada por uma esfera de 1,000 cm de diâmetro com uma carga de +45,0 pC distribuída uniformemente na superfície. Suponha ainda que um grão de pólen com 40,0 μm de diâmetro seja mantido eletricamente na superfície da esfera porque a carga da abelha induz uma carga de –1,00 pC no lado mais próximo da esfera e uma carga de +1,00 pC no lado mais distante. (a) Qual é o módulo da força eletrostática que a abelha exerce sobre o grão de pólen? Suponha que a abelha transporte o grão de pólen até uma distância de 1,000 mm da ponta do estigma de uma flor e que a ponta do estigma possa ser aproximada por uma partícula com uma carga de –45 pC. (b) Qual é o módulo da força eletrostática que o estigma exerce sobre o grão? (c) O grão permanece no corpo da abelha ou salta para o estigma?

··52 Um elétron penetra, com uma velocidade inicial de 40 km/s, em uma região na qual existe um campo elétrico uniforme de módulo $E = 50$ N/C, e se move na mesma direção e no mesmo sentido que o campo. (a) Qual é a velocidade do elétron 1,5 ns depois de entrar na região? (b) Qual é a distância que o

elétron percorre nesse intervalo de 1,5 ns?

··53 Duas grandes placas de cobre, mantidas a 5,0 cm de distância uma da outra, são usadas para criar um campo elétrico uniforme, como mostra a Fig. 22-60. Um elétron é liberado da placa negativa ao mesmo tempo que um próton é liberado da placa positiva. Desprezando a interação entre as partículas, determine a que distância da placa positiva as partículas passam uma pela outra. (Por que não é necessário conhecer o valor do campo elétrico para resolver o problema?)

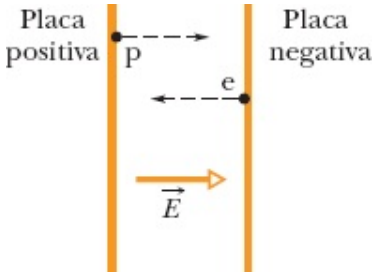


Figura 22-60 Problema 53.

··54 Na Fig. 22-61, um elétron é lançado com uma velocidade inicial $v_0 = 2{,}00 \times 10^6$ m/s e um ângulo $\theta_0 = 40{,}0^o$ com o eixo x em uma região na qual existe um campo elétrico uniforme $\vec{E} = (5{,}00\ \text{N/C})\hat{j}$. Uma tela para detectar elétrons foi instalada paralelamente ao eixo y, a uma distância $x = 3{,}00$ m do ponto de lançamento do elétron. Na notação dos vetores unitários, qual é a velocidade do elétron ao atingir a tela?

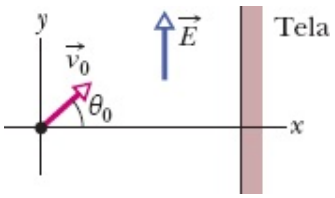


Figura 22-61 Problema 54.

··55 Um campo elétrico uniforme existe em uma região entre duas placas com cargas elétricas opostas. Um elétron é liberado, a partir do repouso, da superfície da placa negativamente carregada e atinge a superfície da outra placa, a 2,0 cm de distância, em $1{,}5 \times 10^{-8}$ s. (a) Qual é a velocidade do elétron ao atingir a segunda placa? (b) Qual é o módulo do campo elétrico $\vec{E}$?

Módulo 22-7 Um Dipolo em um Campo Elétrico

·56 Um dipolo elétrico formado por cargas de $+2e$ e $-2e$ separadas por uma distância de 0,78 nm é submetido a um campo elétrico de $3{,}4 \times 10^6$ N/C. Calcule o módulo do torque exercido pelo campo elétrico sobre o dipolo se o momento do dipolo estiver (a) paralelo, (b) perpendicular e (c) antiparalelo ao campo elétrico.

·57 Um dipolo elétrico formado por cargas de +1,50 nC e –1,50 nC separadas por uma distância de 6,20 μm é submetido a um campo elétrico de 1100 N/C. Determine (a) o módulo do momento dipolar elétrico e (b) a diferença entre as energias potenciais quando o dipolo está orientado paralelamente e

antiparalelamente a $\vec{E}$.

··58 Um dipolo elétrico é submetido a um campo elétrico uniforme $\vec{E}$ cujo módulo é 20 N/C. A Fig. 22-62 mostra a energia potencial U do dipolo em função do ângulo θ entre $\vec{E}$ e o momento do dipolo $\vec{p}$. A escala do eixo vertical é definida por $U_s = 100 \times 10^{-28}$ J. Qual é o módulo de $\vec{p}$?

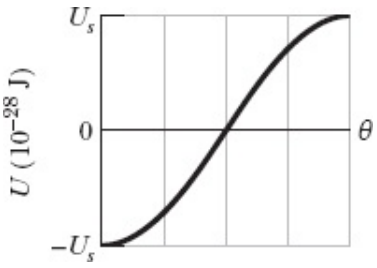


Figura 22-62 Problema 58.

··59 Qual é o trabalho necessário para fazer girar de 180° um dipolo elétrico em um campo elétrico uniforme de módulo $E = 46{,}0$ N/C se $p = 3{,}02 \times 10^{-25}$ C · m e o ângulo inicial é 64°?

··60 Um dipolo elétrico é submetido a um campo elétrico uniforme $\vec{E}$ de módulo 40 N/C. A Fig. 22-63 mostra o módulo τ do torque exercido sobre o dipolo em função do ângulo θ entre o campo $\vec{E}$ e o momento dipolar $\vec{p}$. A escala do eixo vertical é definida por $\tau_s = 100 \times 10^{-28}$ N · m. Qual é o módulo de $\vec{p}$?

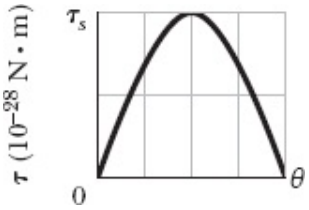


Figura 22-63 Problema 60.

··61 Escreva uma expressão para a frequência de oscilação de um dipolo elétrico de momento dipolar $\vec{p}$ e momento de inércia I, para pequenas amplitudes de oscilação em torno da posição de equilíbrio, na presença de um campo elétrico uniforme de módulo E.

Problemas Adicionais

62 (a) Qual é o módulo da aceleração de um elétron submetido a um campo elétrico uniforme de $1{,}40 \times 10^6$ N/C? (b) Quanto tempo o elétron leva, partindo do repouso, para atingir um décimo da velocidade da luz? (c) Que distância o elétron percorre nesse período de tempo?

63 Uma gota d'água esférica com 1,20 μm de diâmetro está suspensa no ar devido a um campo elétrico atmosférico vertical cujo módulo é $E = 462$ N/C. (a) Qual é o peso da gota? (b) Quantos elétrons em excesso a gota possui?

64 Três partículas com a mesma carga positiva Q formam um triângulo equilátero de lado d. Qual é o

módulo do campo elétrico produzido pelas partículas no ponto médio de um dos lados?

65 Na Fig. 22-64*a*, uma partícula de carga $+Q$ produz um campo elétrico de módulo E_{part} no ponto P, a uma distância R da partícula. Na Fig. 22-64*b*, a mesma carga está distribuída uniformemente em um arco de circunferência de raio R, que subtende um ângulo θ. A carga do arco produz um campo elétrico de módulo E_{arco} no centro de curvatura P. Para qual valor de θ temos $E_{arco} = 0{,}500E_{part}$? (*Sugestão*: Use uma solução gráfica.)

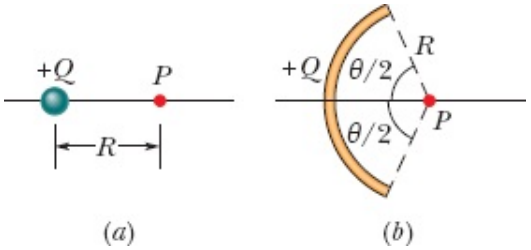


Figura 22-64 Problema 65.

66 Um próton e um elétron ocupam dois vértices de um triângulo equilátero de lado $2{,}0 \times 10^{-6}$ m. Qual é o módulo do campo elétrico no terceiro vértice do triângulo?

67 Uma corda com uma densidade linear uniforme de carga de 9,0 nC/m é estendida ao longo do eixo x de $x = 0$ até $x = 3{,}0$ m. Determine o módulo do campo elétrico no ponto $x = 4{,}0$ m do eixo x.

68 Na Fig. 22-65, oito partículas estão no perímetro de um quadrado de lado $d = 2{,}0$ cm. As cargas das partículas são $q_1 = +3e$, $q_2 = +e$, $q_3 = -5e$, $q_4 = -2e$, $q_5 = +3e$, $q_6 = +e$, $q_7 = -5e$ e $q_8 = +e$. Na notação dos vetores unitários, qual é o campo elétrico produzido pelas partículas no centro do quadrado?

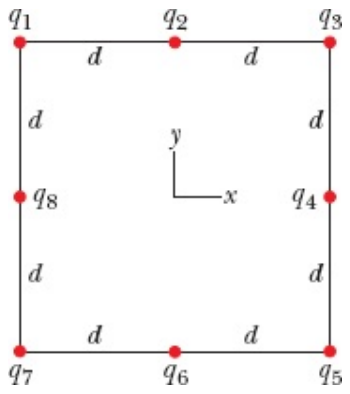


Figura 22-65 Problema 68.

69 Duas partículas, ambas com uma carga de valor absoluto 12 nC, ocupam dois vértices de um triângulo equilátero com 2,0 m de lado. Determine o módulo do campo elétrico no terceiro vértice (a) se as duas cargas forem positivas e (b) se uma das cargas for positiva e a outra for negativa.

70 Em um de seus experimentos, Millikan reparou que as cargas a seguir eram observadas na mesma gota em diferentes ocasiões:

$6{,}563 \times 10^{-19}$ C	$13{,}13 \times 10^{-19}$ C	$19{,}71 \times 10^{-19}$ C
$8{,}204 \times 10^{-19}$ C	$16{,}48 \times 10^{-19}$ C	$22{,}89 \times 10^{-19}$ C
$11{,}50 \times 10^{-19}$ C	$18{,}08 \times 10^{-19}$ C	$26{,}13 \times 10^{-19}$ C

Que valor da carga elementar e pode ser calculado a partir desses dados?

71 Uma carga de 20 nC está uniformemente distribuída ao longo de uma barra retilínea de 4,0 m de comprimento que é encurvada para formar um arco de circunferência com 2,0 m de raio. Qual é o módulo do campo elétrico no centro de curvatura do arco?

72 O movimento de um elétron se limita ao eixo central do anel, de raio R, da Fig. 22-10, com $z << R$. Mostre que a força eletrostática a que o elétron é submetido faz com que a partícula oscile em torno do centro do anel com uma frequência angular dada por

$$\omega = \sqrt{\frac{eq}{4\pi\varepsilon_0 mR^3}},$$

em que q é a carga do anel e m é a massa do elétron.

73 O campo elétrico, no plano xy produzido por uma partícula positivamente carregada, é $7{,}2(4{,}0\hat{i} + 3{,}0\hat{j})$ N/C no ponto (3,0; 3,0) cm, e $100\hat{i}$ N/C no ponto (2,0; 0) cm. Determine (a) a coordenada x e (b) a coordenada y da partícula. (c) Determine a carga da partícula.

74 (a) Qual deve ser a carga total q (em excesso) do disco da Fig. 22-15 para que o campo elétrico no centro da superfície do disco seja $3{,}0 \times 10^6$ N/C, o valor de E para o qual o ar se torna um condutor e emite centelhas? Tome o raio do disco como 2,5 cm. (b) Suponha que os átomos da superfície têm uma seção reta efetiva de 0,015 nm^2. Quantos átomos são necessários para preencher a superfície do disco? (c) A carga calculada em (a) é a soma das cargas dos átomos da superfície que possuem um elétron em excesso. Qual deve ser a fração desses elétrons?

75 Na Fig. 22-66, a partícula 1 (de carga +1,00 μC), a partícula 2 (de carga +1,00 μC) e a partícula 3 (de carga Q) formam um triângulo equilátero de lado a. Para qual valor de Q (sinal e valor) o campo elétrico no centro do triângulo é nulo?

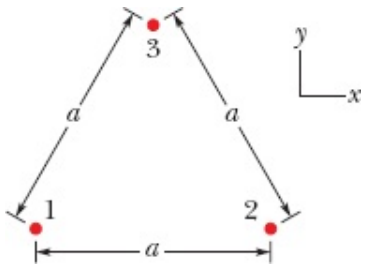


Figura 22-66 Problemas 75 e 86.

76 Na Fig. 22-67, um dipolo elétrico gira de uma orientação inicial *i* (θ_i = 20,0°) para uma orientação final *f* (θ_f = 20,0°) na presença de um campo elétrico externo uniforme $\vec{E}$. O momento do dipolo é 1,60 × 10^{-27} C · m; o módulo do campo é 3,00 × 10^6 N/C. Qual é a variação da energia potencial do dipolo?

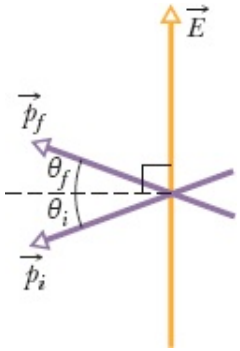


Figura 22-67 Problema 76.

77 Uma partícula de carga $-q_1$ é mantida fixa na origem do eixo *x*. (a) Em que ponto do eixo *x* deve ser colocada uma partícula de carga $-4q_1$ para que o campo elétrico seja zero no ponto *x* = 2,0 mm? (b) Se uma partícula de carga $+4q_1$ é colocada no ponto determinado no item (a), qual é a orientação (em relação ao semieixo *x* positivo) do campo elétrico no ponto *x* = 2,00 mm?

78 Duas partículas com a mesma carga positiva *q* são mantidas fixas no eixo *y*, uma em *y* = *d* e a outra em *y* = –*d*. (a) Escreva uma expressão para o módulo *E* do campo elétrico em pontos do eixo *x* dados por *x* = *αd*. (b) Plote *E* em função de *α* no intervalo 0 < *α* < 4. Determine, a partir do gráfico, os valores de *α* para os quais (c) o valor de *E* é máximo e (d) o valor de *E* é metade do valor máximo.

79 O mostrador de um relógio possui cargas negativas pontuais –*q*, –2*q*, –3*q*, ..., –12*q* mantidas fixas nas posições dos números correspondentes. Os ponteiros do relógio não afetam o campo produzido pelas cargas pontuais. A que horas o ponteiro das horas aponta na mesma direção que o vetor campo elétrico no centro do mostrador? (*Sugestão*: Leve em conta a simetria das cargas.)

80 Calcule o momento dipolar elétrico de um elétron e um próton separados por uma distância de 4,30 nm.

81 Existe na atmosfera um campo elétrico $\vec{E}$, dirigido verticalmente para baixo, cujo módulo é da ordem de 150 N/C. Estamos interessados em fazer "flutuar" nesse campo uma esfera de enxofre com 4,4 N de peso carregando-a eletricamente. (a) Qual deve ser a carga da esfera (sinal e valor absoluto)? (b) Por que o experimento não pode ser realizado na prática?

82 Uma barra circular tem um raio de curvatura *R* = 9,00 cm, uma carga uniformemente distribuída *Q* = 6,25 pC e subtende um ângulo *θ* = 2,40 rad. Qual é o módulo do campo elétrico no centro de curvatura?

83 Um dipolo elétrico de momento dipolar

$$\vec{p} = (3{,}00\hat{i} + 4{,}00\hat{j})(1{,}24 \times 10^{-30}\ \text{C} \cdot \text{m})$$

é submetido a um campo elétrico $\vec{E}$ = (4000 N/C)î. (a) Qual é a energia potencial do dipolo elétrico? (b) Qual é o torque que age sobre o dipolo? (c) Se um agente externo faz girar o dipolo até que o momento dipolar seja

$$\vec{p} = (-4{,}00\hat{i} + 3{,}00\hat{j})(1{,}24 \times 10^{-30}\ \text{C} \cdot \text{m}),$$

qual é o trabalho realizado pelo agente externo?

84 Na Fig. 22-68, um campo elétrico uniforme vertical $\vec{E}$ de módulo $2{,}00 \times 10^3$ N/C foi estabelecido entre duas placas horizontais carregando positivamente a placa de baixo e negativamente a placa de cima. As placas têm comprimento L = 10,0 cm e estão separadas por uma distância d = 2,00 cm. Um elétron é lançado no espaço entre as placas a partir da extremidade esquerda da placa de baixo. A velocidade inicial $\vec{v}_0$ faz um ângulo θ = 45,0° com a placa de baixo e tem um módulo de $6{,}00 \times 10^6$ m/s. (a) O elétron irá se chocar com uma das placas? (b) Se a resposta for afirmativa, com qual das placas o elétron irá se chocar e a que distância horizontal da extremidade esquerda das placas?

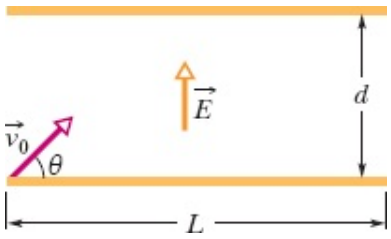


Figura 22-68 Problema 84.

85 Para os dados do Problema 70, suponha que a carga q da gota é dada por $q = ne$, em que n é um número inteiro e e é a carga elementar. (a) Determine o valor de n para cada valor experimental de q. (b) Faça uma regressão linear dos valores de q em função de n e use o resultado para determinar o valor de e.

86 Na Fig. 22-66, a partícula 1 (de carga +2,00 pC), a partícula 2 (de carga –2,00 pC) e a partícula 3 (de carga +5,00 pC) formam um triângulo equilátero de lado a = 9,50 cm. (a) Determine a orientação (em relação ao semieixo x positivo) da força $\vec{F}_3$ a que a partícula 3 é submetida pelas outras partículas fazendo um esboço das linhas de força associadas às outras partículas. (b) Calcule o módulo da força $\vec{F}_3$.

87 Na Fig. 22-69, a partícula 1, de carga q_1 = 1,00 pC, e a partícula 2, de carga q_2 = –2,00 pC, são mantidas fixas, separadas por uma distância d = 5,00 cm. Determine, na notação dos vetores unitários, o campo elétrico (a) no ponto A, (b) no ponto B e (c) no ponto C. (d) Faça um esboço das linhas de campo elétrico.

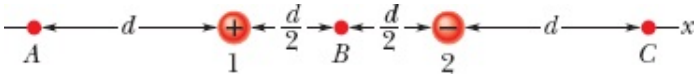


Figura 22-69 Problema 87.