

PERGUNTAS

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

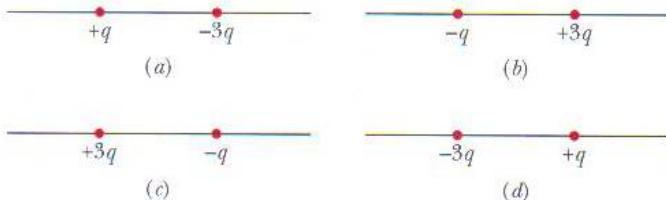


FIG. 21-13 Pergunta 1.

2 A Figura 21-14 mostra duas partículas carregadas sobre 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 ou entre elas? (b) A carga da terceira partícula deve ser positiva ou negativa? (c) O equilíbrio é estável ou instável?



FIG. 21-14 Pergunta 2.

3 A Figura 21-15 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 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.

- (1) $-e, -e, +e, -e$
- (2) $+e, +e, +e, -e$
- (3) $-e, -e, +e, +e$
- (4) $-e, +e, +e, -e$

FIG. 21-15 Pergunta 3.

4 A Figura 21-16 mostra três pares de esferas iguais que são colocadas em contato e novamente separadas. As cargas presentes inicialmente nas esferas estão indicadas. Ordene os pares 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, em ordem decrescente.

- (1) $+6e, -4e$
- (2) $0, +2e$
- (3) $-12e, +14e$

FIG. 21-16 Pergunta 4.

5 A Figura 21-17 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.

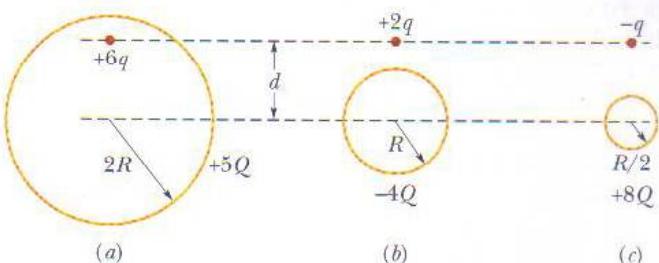


FIG. 21-17 Pergunta 5.

6 Na Fig. 21-18, 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.)

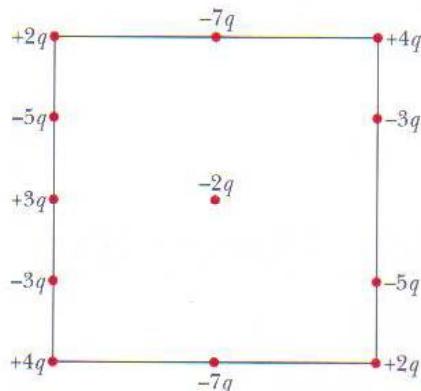


FIG. 21-18 Pergunta 6.

7 Na Fig. 21-19, 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.)

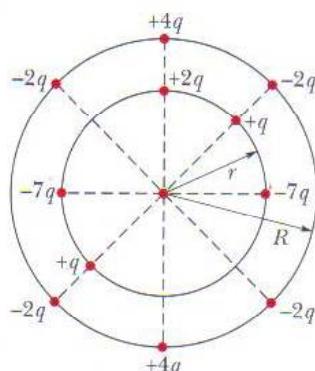


FIG. 21-19 Pergunta 7.

8 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, 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?

9 A Fig. 21-20 mostra quatro sistemas nos quais partículas de carga $+q$ ou $-q$ são mantidas fixas. Em todos os sistemas as partículas sobre o 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, me-

nor 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 do meio está mais próxima das componentes que somam ou das componentes que se subtraem? (f) Qual é a orientação dessa 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 se subtraem.)

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

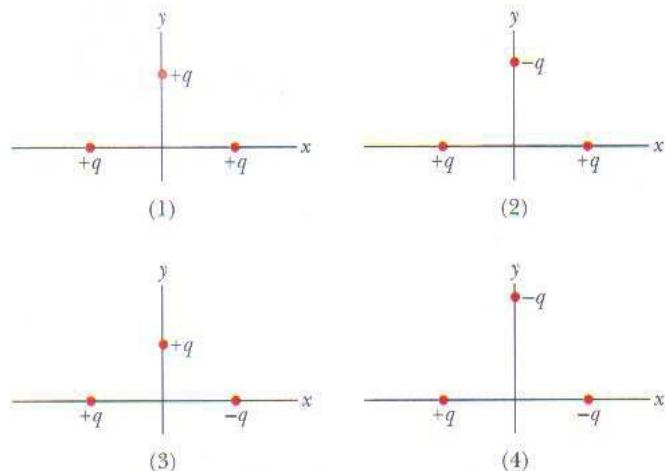


FIG. 21-20 Pergunta 9.

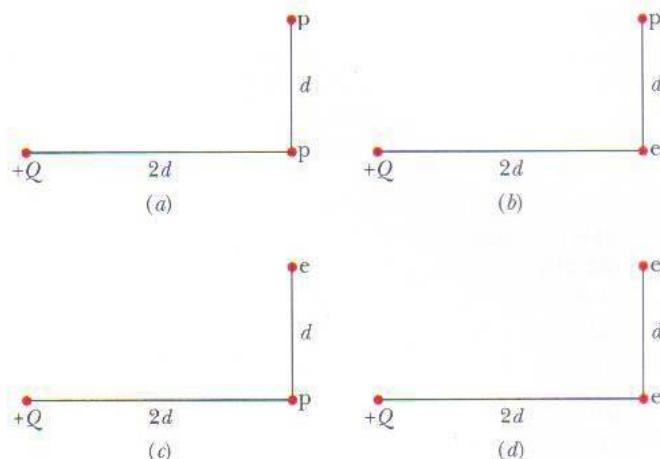


FIG. 21-21 Pergunta 10.

PROBLEMAS

• – ••• O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

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

seção 21-4 Lei de Coulomb

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

•2 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 $7,0 \text{ m/s}^2$ e a da segunda é $9,0 \text{ m/s}^2$. Se a massa da primeira partícula é $6,3 \times 10^{-7}$ kg, determine (a) a massa da segunda partícula; (b) o módulo da carga de cada partícula.

•3 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.

•4 Duas esferas condutoras iguais, 1 e 2, possuem cargas iguais e estão separadas por uma distância muito maior que o diâmetro (Fig. 21-22a). 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. 21-22b), depois com a esfera 2 (Fig. 21-22c) e, finalmente, re-

movida (Fig. 21-22d). A força eletrostática a qual a esfera 2 agora está submetida tem módulo F' . Qual é o valor da razão F'/F ?

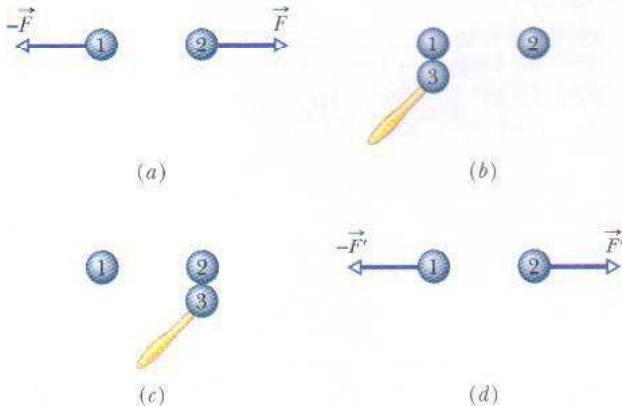


FIG. 21-22 Problema 4.

•5 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 como car-

gas pontuais. Para que valor de q/Q a força eletrostática entre as duas esferas é máxima?

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

••7 Duas esferas condutoras iguais, mantidas fixas, se atraem mutuamente com uma força eletrostática de $0,108 \text{ N}$ quando a distância entre os centros é $50,0 \text{ cm}$. As esferas são ligadas por um fio condutor de diâmetro desprezível. Quando o fio é removido, as esferas se repelem com uma força de $0,0360 \text{ N}$. Supondo que a carga total das esferas era inicialmente positiva, determine: (a) a carga negativa inicial de uma das esferas; (b) a carga positiva inicial da outra esfera.

••8 Na Fig. 21-23, 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 a força eletrostática total a que as partículas 1 e 3 estão submetidas seja nula? (b) Existe algum valor de q para o qual a força eletrostática a que todas as partículas estão submetidas seja nula? Justifique sua resposta.

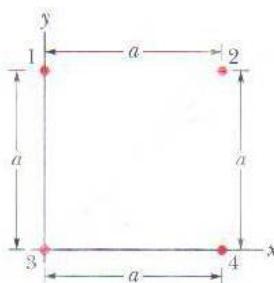


FIG. 21-23 Problemas 8, 9 e 62.

••9 Na Fig. 21-23, as cargas das partículas são $q_1 = -q_2 = 100 \text{ nC}$ e $q_3 = -q_4 = 200 \text{ nC}$. O lado do quadrado é $a = 5,0 \text{ cm}$. Determine (a) a componente x e (b) a componente y da força eletrostática a que está submetida a partícula 3.

••10 Três partículas são mantidas fixas sobre 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 a partícula 3 estiver no ponto $x = +1,50a$.

••11 Na Fig. 21-24, três partículas carregadas estão sobre 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 ?



FIG. 21-24 Problemas 11 e 56.

••12 A Fig. 21-25 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 novamente separadas. Finalmente, a esfera W é colocada em contato com a esfera C

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



FIG. 21-25 Problema 12.

••13 Na Fig. 21-26a, as partículas 1 e 2 têm uma carga de $20,0 \mu\text{C}$ cada uma e estão separadas por uma distância $d = 1,50 \text{ m}$. (a) Qual é o módulo da força eletrostática que a partícula 2 exerce sobre a partícula 1? Na Fig. 21-26b, a partícula 3, com uma carga de $20,0 \mu\text{C}$, 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?

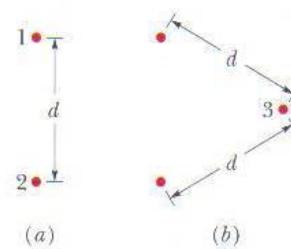


FIG. 21-26 Problema 13.

••14 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 $8,00 \text{ cm}$. A força que as partículas 1 e 2 exercem sobre uma partícula 3 (de carga $q_3 = +8,00 \times 10^{-19} \text{ C}$) 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 $x_s = 8,0 \text{ cm}$. Determine (a) o sinal da carga q_1 ; (b) o valor da razão q_2/q_1 .

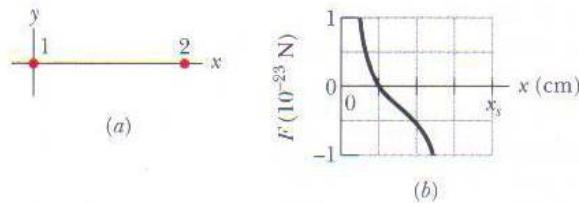


FIG. 21-27 Problema 14.

••15 Na Fig. 21-28, a partícula 1, de carga $+1,0 \mu\text{C}$, e a partícula 2, de carga $-3,0 \mu\text{C}$, são mantidas a uma distância $L = 10,0 \text{ cm}$ uma da outra sobre 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.

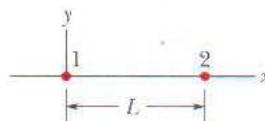


FIG. 21-28 Problemas 15, 19, 32, 64 e 69.

••16 Na Fig. 21-29a, 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. 21-27b, a partícula B foi transferida para o lado oposto de A , mas 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 ?

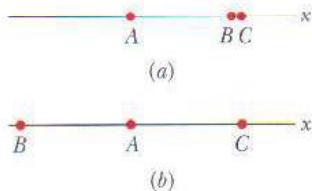


FIG. 21-29 Problema 16.

••17 As cargas e coordenadas de duas partículas mantidas fixas no plano xy são $q_1 = +3,0 \mu\text{C}$, $x_1 = 3,5 \text{ cm}$, $y_1 = 0,50 \text{ cm}$ e $q_2 = -4,0 \mu\text{C}$, $x_2 = -2,0 \text{ cm}$, $y_2 = 1,5 \text{ cm}$. Determine (a) o módulo e (b) a orientação 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 $q_3 = +4,0 \mu\text{C}$ para que a força exercida sobre ela pelas partículas 1 e 2 seja nula.

••18 Duas partículas são mantidas fixas em um eixo x . A partícula 1, de carga $40 \mu\text{C}$, está situada em $x = -2,0 \text{ cm}$; a partícula 2, de carga Q , está situada em $x = 3,0 \text{ cm}$. A partícula 3 está inicialmente no eixo y e é liberada, a partir do repouso, no ponto $y = 2,0 \text{ cm}$. O valor absoluto da carga da partícula 3 é $20 \mu\text{C}$. Determine o valor de Q para que a aceleração inicial da partícula 3 seja (a) no sentido positivo do eixo x ; (b) no sentido positivo do eixo y .

••19 Na Fig. 21-28, a partícula 1, de carga $+q$, e a partícula 2, de carga $+4,00q$, são mantidas a uma distância $L = 9,00 \text{ cm}$ sobre um eixo x . Se um partícula 3 de carga q_3 permanece imóvel ao ser colocada nas proximidades das partículas 1 e 2, determine (a) a razão q_3/q ; (b) a coordenada x da partícula 3; (c) a coordenada y da partícula 3.

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

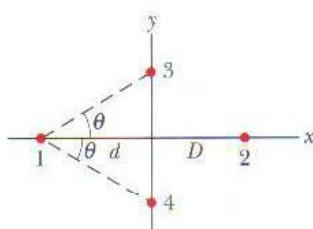


FIG. 21-30 Problema 20.

••21 Na Fig. 21-31, as partículas 1 e 2, de carga $q_1 = q_2 = +3,20 \times 10^{-19} \text{ C}$, estão sobre o eixo y , a uma distância $d = 17,0$

cm da origem. A partícula 3, de carga $q_3 = +6,40 \times 10^{-19} \text{ C}$, é deslocada ao longo do eixo x , de $x = 0$ até $x = +5,0 \text{ m}$. Para que valor de x o módulo da força eletrostática exercida pelas partículas 1 e 2 sobre a partícula 3 é (a) mínimo e (b) máximo? Quais são os valores (c) mínimo e (d) máximo do módulo?

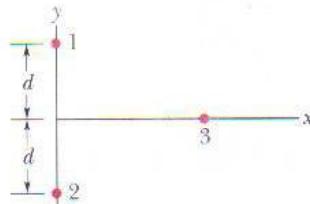


FIG. 21-31 Problema 21.

••22 A Fig. 21-32a mostra um sistema de três partículas carregadas separadas por uma distância d . As partículas A e C estão fixas no lugar sobre o 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 ligando os pontos A e B faz um ângulo θ com o eixo x (Fig. 21-32b). As curvas da Fig. 21-32c mostram, para duas situações, o módulo F_{tot} da força eletrostática total que as outras partículas exercem sobre a partícula A . Esta força total está plotada em função do ângulo θ e como múltiplo da uma força de referência F_0 . Assim, por exemplo, na curva 1, para $\theta = 180^\circ$, vemos que $F_{\text{tot}} = 2F_0$. (a) Para a situação correspondente à 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 mesma razão para a situação correspondente à curva 2?

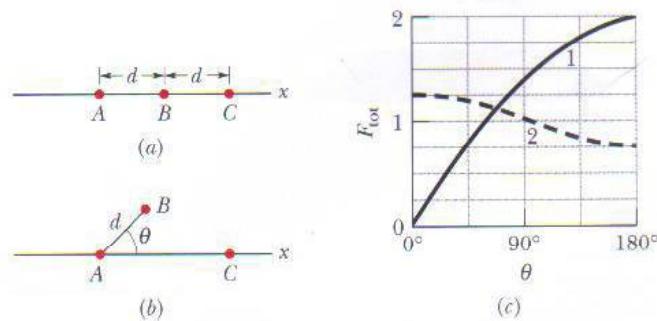


FIG. 21-32 Problema 22.

••23 Uma casca esférica não-condutora, com um raio interno de $4,0 \text{ cm}$ e um raio externo de $6,0 \text{ cm}$, possui uma distribuição de cargas não-homogênea. A *densidade volumétrica de carga* ρ é a carga por unidade de volume, medida em coulombs por metro cúbico. No caso dessa casca, $\rho = b/r$, onde r é a distância em metros a partir do centro da casca e $b = 3,0 \mu\text{C}/\text{m}^3$. Qual é a carga total da casca?

seção 21-5 A Carga É Quantizada

•24 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 $2,82 \times 10^{-10} \text{ m}$?

•25 O módulo da força eletrostática entre dois íons iguais separados por uma distância de $5,0 \times 10^{-10} \text{ m}$ é $3,7 \times 10^{-9} \text{ N}$. (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)?

•26 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 atraíram o peito da vítima?

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

•28 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?

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

••30 A Fig. 21-33a mostra duas partículas carregadas, 1 e 2, que são mantidas fixas sobre 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 sobre o eixo x , nas vizinhanças da partícula 2, é deslocada no sentido positivo do eixo x . Em consequência, a força eletrostática total $\vec{F}_{2,\text{tot}}$ a que está sujeita a partícula 2 varia. A Fig. 21-33b mostra a componente x dessa 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 $F_{2,\text{tot}} = 1,5 \times 10^{-25}$ N para $x \rightarrow \infty$. Determine o valor da carga q_2 da partícula 2, em unidades de e , incluindo o sinal.

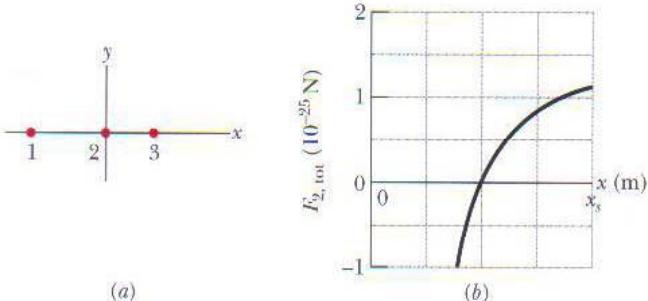


FIG. 21-33 Problema 30.

••31 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.)

••32 Na Fig. 21-28, as partículas 1 e 2 são mantidas fixas sobre o 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 sobre o eixo dos x , entre as partículas 1 e 2, é submetida a uma força eletrostática total $\vec{F}_{3,\text{tot}}$. (a) Em que posição deve ser colocada a partícula 3 para que o módulo de $\vec{F}_{3,\text{tot}}$ seja mínimo? (b) Qual é o valor do módulo de $\vec{F}_{3,\text{tot}}$ nessa situação?

••33 Na Fig. 21-34, as partículas 2 e 4, de carga $-e$, são mantidas fixas sobre o 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 se encontra no ponto $x_1 =$

$-10,0$ cm e a partícula 3 no ponto $x_3 = 10,0$ cm. (a) Para que ponto sobre o eixo x a partícula 1 deve ser deslocada para que a força eletrostática total \vec{F}_{tot} a que a partícula 5 está submetida sofra uma rotação de 30° no sentido anti-horário? (b) Com a partícula 1 mantida fixa na nova posição, para que ponto sobre o eixo x a partícula 3 deve ser deslocada para que \vec{F}_{tot} volte à direção original?

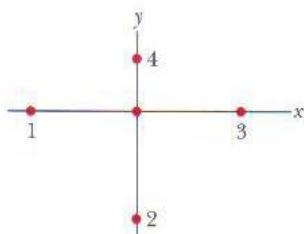


FIG. 21-34 Problema 33.

••34 A Fig. 21-35 mostra dois elétrons, 1 e 2, sobre o eixo x , e dois íons, 3 e 4, de carga $-q$, sobre o 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 físicamente 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 .

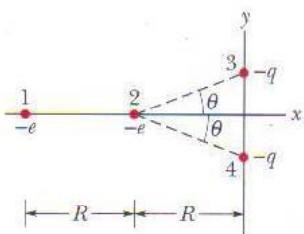


FIG. 21-35 Problema 34.

••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 total 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 total exercida sobre o íon Cl^- pelos íons Cs^+ restantes?

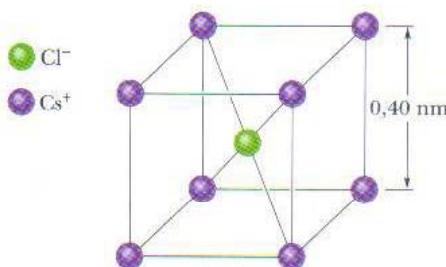


FIG. 21-36 Problema 35.

seção 21-6 A Carga É Conservada

•36 Elétrons e pósitrons são produzidos em reações nucleares envolvendo prótons e nêutrons 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) ${}^1\text{H} + {}^9\text{Be} \rightarrow \text{X} + \text{n}$; (b) ${}^{12}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow \text{X}$; (c) ${}^{15}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{X}$. (Sugestão: Consulte o Apêndice F.)

Problemas Adicionais

38 Na Fig. 21-37, quatro partículas são mantidas fixas sobre o eixo x, separadas por uma distância $d = 2,00 \text{ cm}$. As cargas das partículas são $q_1 = +2e$, $q_2 = -e$, $q_3 = +e$ e $q_4 = +4e$, onde $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$. Em termos dos vetores unitários, determine a força eletrostática a que está submetida (a) a partícula 1; (b) a partícula 2.

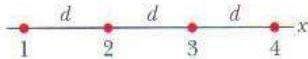


FIG. 21-37 Problema 38.

39 Na Fig. 21-38, a partícula 1, de carga $+4e$, está a uma distância $d_1 = 2,00 \text{ mm}$ do solo, e a partícula 2, de carga $+6e$, está sobre o solo, a uma distância horizontal $d_2 = 6,00 \text{ mm}$ da partícula 1. Qual é a componente x da força eletrostática exercida pela partícula 1 sobre a partícula 2?

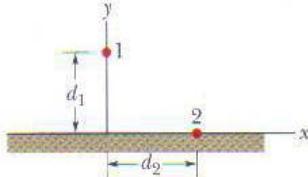


FIG. 21-38 Problema 39.

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

41 Uma barra não-condutora carregada, com um comprimento de $2,00 \text{ m}$ e uma seção reta de $4,00 \text{ cm}^2$, está sobre o semi-eixo x positivo com uma das extremidades na origem. A *densidade volumétrica de carga* ρ é a carga por unidade de volume em coulombs por metro cúbico. Determine quantos elétrons em excesso existem na barra se (a) ρ é uniforme, com um valor de $-4,00 \mu\text{C/m}^3$; (b) o valor de ρ é dado pela equação $\rho = bx^2$, onde $b = -2,00 \mu\text{C/m}^5$.

42 Uma carga de $6,0 \mu\text{C}$ é dividida em duas partes, que são mantidas a uma distância de $3,00 \text{ mm}$. Qual é o maior valor possível da força eletrostática entre as duas partes?

43 Quantos megacoulombs de carga elétrica positiva existem em $1,00 \text{ mol}$ de hidrogênio (H_2) neutro?

44 A Fig. 21-39 mostra uma barra longa, não-condutora, de massa desprezível, de comprimento L , articulada no centro e equilibrada por um bloco de peso W a uma distância x da extremidade esquerda. Nas extremidades direita e esquerda da barra existem pequenas esferas condutoras de carga positiva q e $2q$, 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 nenhuma força vertical sobre o apoio quando está equilibrada na horizontal?

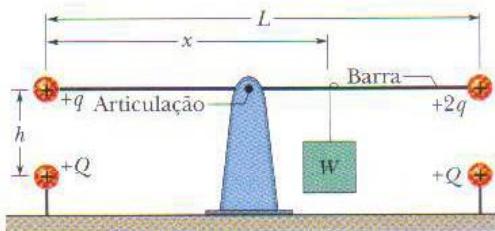


FIG. 21-39 Problema 44.

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

46 Na Fig. 21-40, três esferas condutoras iguais são dispostas de modo a formar um triângulo equilátero de lado $d = 20,0 \text{ cm}$. Os raios das esferas são muito menores que d , e as cargas das esferas são $q_A = -2,00 \text{ nC}$, $q_B = -4,00 \text{ nC}$ e $q_C = +8,00 \text{ nC}$. (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 (a) do módulo da força eletrostática entre as esferas A e C ; (b) do módulo da força eletrostática entre as esferas B e C .

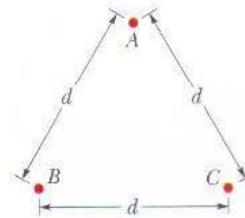


FIG. 21-40 Problema 46.

47 Qual seria o módulo da força eletrostática entre duas cargas pontuais de $1,00 \text{ C}$ separadas por uma distância de (a) $1,00 \text{ m}$ e (b) $1,00 \text{ km}$ se essas cargas pontuais pudessem existir (o que não é verdade) e fosse possível montar um sistema desse tipo?

48 Na Fig. 21-41, 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 co-

REVISÃO E RESUMO

Campo Elétrico Uma forma de explicar a força eletrostática entre duas cargas é supor que toda carga produz um campo elétrico no espaço que a cerca. A força eletrostática que age sobre uma das cargas é atribuída ao campo elétrico produzido pela outra carga na posição da primeira.

Definição de Campo Elétrico O campo elétrico \vec{E} em qualquer ponto do espaço é definido em termos da força eletrostática \vec{F} que seria exercida em uma carga de prova positiva q_0 colocada nesse ponto:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}. \quad (22-1)$$

Linhas de Campo Elétrico As linhas de campo elétrico são usadas para visualizar a orientação e a intensidade dos campos elétricos. O vetor campo elétrico em qualquer ponto do espaço é tangente à linha de campo elétrico que passa por esse ponto. A densidade de linhas de campo elétrico em uma região do espaço é proporcional ao módulo do campo elétrico nessa região. As linhas de campo elétrico começam em cargas positivas e terminam em cargas negativas.

Campo Produzido por uma Carga Pontual O módulo do campo elétrico \vec{E} produzido por uma carga pontual q a uma distância r da carga é dado por

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad (22-3)$$

O sentido de \vec{E} é para longe da carga pontual se a carga é positiva e na direção da carga se esta é negativa.

Campo Produzido por um Dipolo Elétrico Um dipolo elétrico é formado por duas partículas com cargas de mesmo valor absoluto q e sinais opostos, separadas por uma pequena distância d . O momento dipolar elétrico \vec{p} de um dipolo tem módulo qd e aponta da carga negativa para a carga positiva. O mó-

dulo do campo elétrico produzido por um dipolo em um ponto distante sobre o eixo do dipolo (reta que passa pelas duas cargas) é dado por

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{p}{z^3}, \quad (22-9)$$

onde z é a distância entre o ponto e o centro do dipolo.

Campo Produzido por uma Distribuição Contínua de Cargas O campo elétrico produzido por uma *distribuição contínua de cargas* pode ser calculado tratando elementos de carga como cargas pontuais e somando, por integração, os campos elétricos produzidos por todos os elementos de carga.

Força Exercida por um Campo Elétrico sobre uma Carga Pontual Quando uma carga pontual q é submetida a um campo elétrico externo \vec{E} produzido por outras cargas, a força eletrostática \vec{F} que age sobre a carga pontual é dada por

$$\vec{F} = q\vec{E}. \quad (22-28)$$

A força \vec{F} tem o mesmo sentido que \vec{E} se a carga q for positiva e o sentido oposto se a carga for negativa.

Força Exercida por um Campo Elétrico sobre um Dipolo Quando um dipolo elétrico de momento dipolar \vec{p} é submetido a um campo elétrico \vec{E} , o campo exerce sobre o dipolo um torque $\vec{\tau}$ dado por

$$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}. \quad (22-34)$$

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

$$U = -\vec{p} \cdot \vec{E}. \quad (22-38)$$

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

PERGUNTAS

1 A Fig. 22-21 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. Ordene as configurações de acordo com o módulo do momento linear do próton no ponto B , em ordem decrescente.

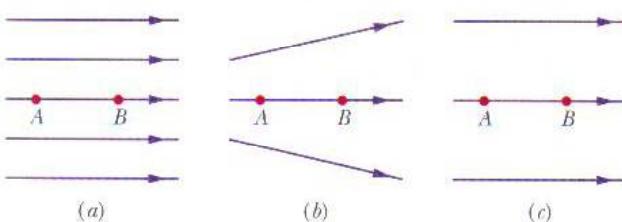


FIG. 22-21 Pergunta 1.

2 A Fig. 22-22 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.

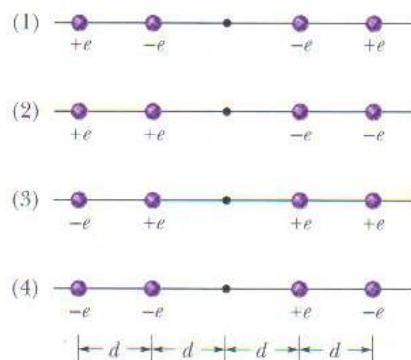


FIG. 22-22 Pergunta 2.

- 3** A Fig. 22-23 mostra duas partículas carregadas mantidas fixas sobre 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 (além do infinito) *fora* do eixo em que o campo elétrico seja zero?



FIG. 22-23 Pergunta 3.

- 4** A Fig. 22-24 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 .

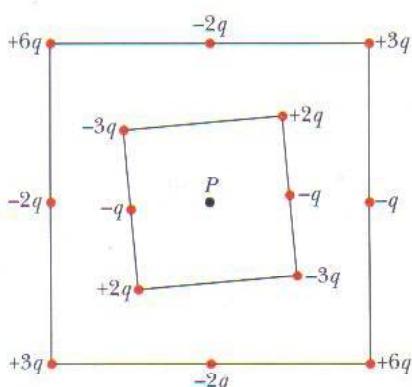


FIG. 22-24 Pergunta 4.

- 5** Na Fig. 22-25 duas partículas de carga $-q$ estão dispostas simetricamente em relação ao eixo y e produzem campos elétricos em um ponto P situado sobre o 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?

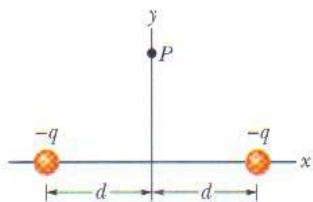


FIG. 22-25 Pergunta 5.

- 6** Na Fig. 22-26 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 neutrônio, que é eletricamente neutro. A velocidade de cada uma das outras quatro partículas aumenta, diminui ou permanece a mesma na região entre as placas?

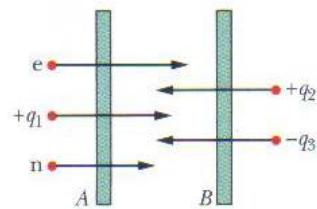


FIG. 22-26 Pergunta 6.

- 7** Na Fig. 22-27a 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. 22-27b, c e 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 $-Q$. Ordene os cinco arranjos de acordo com o módulo do campo elétrico no centro de curvatura, em ordem decrescente.

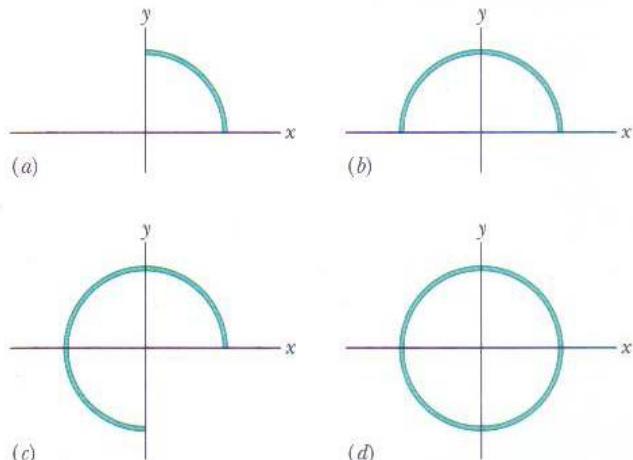


FIG. 22-27 Pergunta 7.

- 8** Na Fig. 22-28 dois anéis circulares iguais, não-condutores, têm os centros sobre a 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.

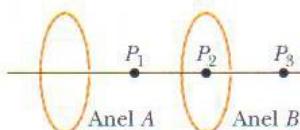


FIG. 22-28 Pergunta 8.

9 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) $5U_0$, onde U_0 é uma constante positiva. Ordene 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, em ordem decrescente.

10 (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)?

11 A Fig. 22-29 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), em ordem decrescente.

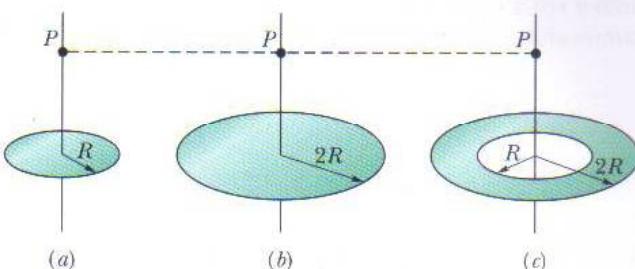


FIG. 22-29 Pergunta 11.

PROBLEMAS

• • • O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

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

seção 22-3 Linhas de Campo Elétrico

•1 Na Fig. 22-30 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 ?

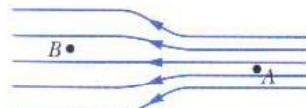


FIG. 22-30 Problema 1.

•2 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 existe 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 $q_1 < q_2$.

seção 22-4 Campo Elétrico Produzido por uma Carga Pontual

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

•4 Qual é o módulo de uma carga pontual capaz de criar um campo elétrico de 1,00 N/C em um ponto a 1,00 m de distância?

•5 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 nessa esfera. Determine (a) o módulo e (b) o sentido (para dentro ou para fora) do campo elétrico produzido pelos prótons na superfície do núcleo.

•6 Duas partículas são mantidas fixas sobre o 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, em termos dos vetores unitários?

••7 Duas partículas são mantidas fixas sobre o 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?

••8 Na Fig. 22-31 a partícula 1, de carga $q_1 = -5,00q$, e a partícula 2, de carga $q_2 = +2,00q$, são mantidas fixas sobre o 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.

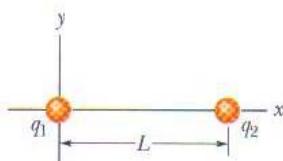


FIG. 22-31 Problema 8.

••9 Na Fig. 22-32 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, em termos dos vetores unitários?

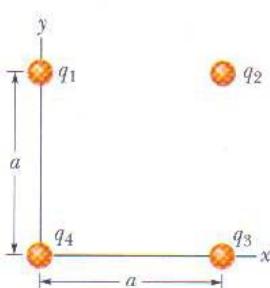


FIG. 22-32 Problema 9.

••10 Na Fig. 22-33 as quatro partículas são mantidas fixas e têm cargas $q_1 = q_2 = +5e$, $q_3 = +5e$ e $q_4 = -12e$. A distância $d = 5,0$ μm. Qual é o módulo do campo elétrico no ponto P ?

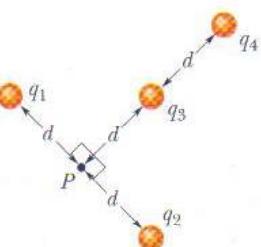


FIG. 22-33 Problema 10.

- 11** A Fig. 22-34 mostra duas partículas carregadas mantidas fixas sobre o eixo x : $-q = -3,20 \times 10^{-19} \text{ C}$, no ponto $x = -3,00 \text{ m}$, e $q = 3,20 \times 10^{-19} \text{ C}$, no ponto $x = +3,00 \text{ m}$. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semi-eixo x positivo) do campo elétrico no ponto P , para o qual $y = 4,00 \text{ m}$.

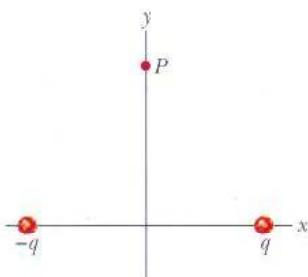


FIG. 22-34 Problema 11.

- 12** A Fig. 22-35a mostra duas partículas carregadas mantidas fixas sobre o 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. 22-35b mostra a componente x , $E_{\text{tot},x}$ do campo elétrico no eixo x , à direita da partícula 2, em função de x . A escala do eixo x é definida por $x_s = 30,0 \text{ cm}$. (a) Para que valor de $x > 0$ o valor de $E_{\text{tot},x}$ é máximo? (b) Se a carga da partícula 2 é $-q_2 = -3e$, qual é o valor desse campo máximo?

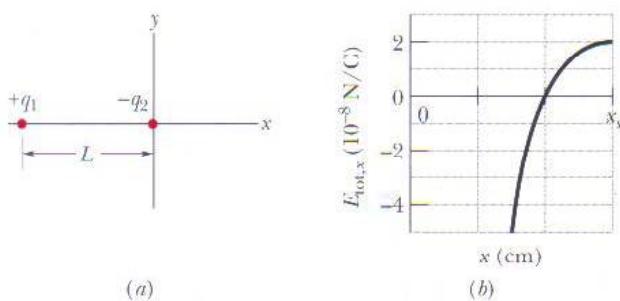


FIG. 22-35 Problema 12.

- 13** Na Fig. 22-36 as três partículas são mantidas fixas no lugar e têm cargas $q_1 = q_2 = +e$ e $q_3 = +2e$. A distância $a = 6,00 \mu\text{m}$. Determine (a) o módulo e (b) a direção do campo elétrico no ponto P .

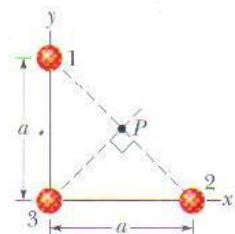


FIG. 22-36 Problema 13.

- 14** A Fig. 22-37 mostra um arranjo irregular de elétrons (e) e prótons (p) sobre um arco de circunferência de raio $r = 2,00 \text{ cm}$, com ângulos $\theta_1 = 30,0^\circ$, $\theta_2 = 50,0^\circ$, $\theta_3 = 30,0^\circ$ e $\theta_4 = 20,0^\circ$. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semi-eixo x positivo) do campo elétrico no centro do arco.

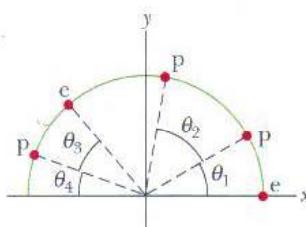


FIG. 22-37 Problema 14.

- 15** A Fig. 22-38 mostra um próton (p) sobre o eixo central de um disco com uma densidade uniforme de cargas devido a um excesso de elétrons. Três desses elétrons são mostrados 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 se encontra inicialmente a uma distância $z = R = 2,00 \text{ cm}$ 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)?

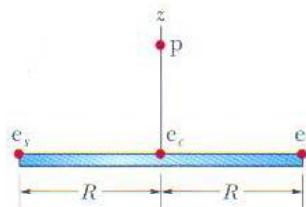


FIG. 22-38 Problema 15.

- 16** A Fig. 22-39 mostra um anel de plástico de raio $R = 50,0 \text{ cm}$. Duas pequenas contas coloridas estão sobre o anel: a conta 1, de carga $+2,00 \mu\text{C}$, que é mantida fixa na extremidade esquerda, e a conta 2, de carga $+6,00 \mu\text{C}$, 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 que $E = 2,00 \times 10^5 \text{ N/C}$.

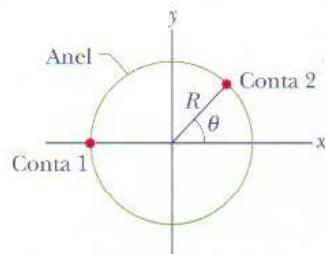


FIG. 22-39 Problema 16.

- 17** Duas contas carregadas estão sobre o anel da Fig. 22-40a, que possui um raio $R = 60,0 \text{ cm}$. A conta 2, que não aparece na figura, é mantida fixa. A conta 1 está inicialmente sobre o eixo x , na posição $\theta = 0^\circ$, mas é deslocada para a extremidade oposta do anel, ou seja, para a posição $\theta = 180^\circ$, passando pelo primeiro e segundo quadrantes do sistema de coordenadas xy . A Fig. 22-40b mostra a componente x do campo elétrico produzido na origem pelas duas contas em função de θ , e a Fig. 22-40c mostra a componente y do campo. As escalas dos eixos verticais são definidas por $E_{xs} = 5,0 \times 10^4 \text{ N/C}$ e $E_{ys} = -9,0 \times 10^4 \text{ N/C}$. (a) Qual é o ângulo θ da conta 2? Determine as cargas (b) da conta 1 e (c) da conta 2.

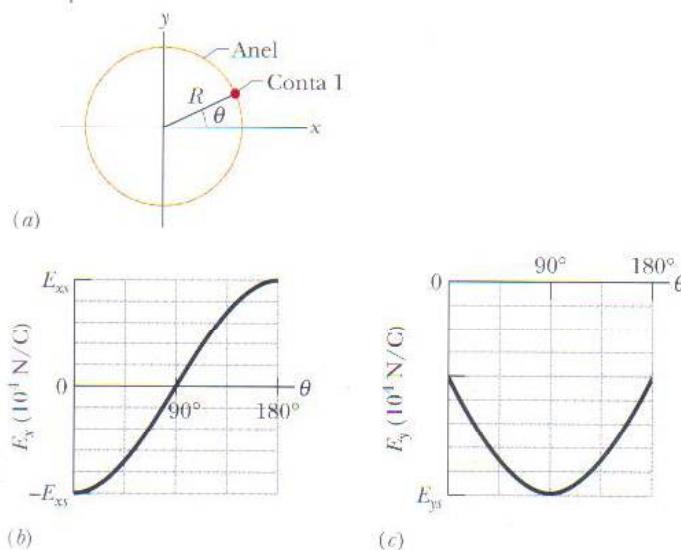


FIG. 22-40 Problema 17.

seção 22-5 Campo Elétrico Produzido por um Dipolo Elétrico

••18 As Eqs. 22-8 e 22-9 fornecem o valor aproximado do módulo do campo elétrico de um dipolo elétrico em pontos sobre o eixo do dipolo. Considere um ponto P sobre este eixo a uma distância $z = 5,00d$ do centro do dipolo, onde 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 E_{ver} o valor verdadeiro do campo. Determine a razão $E_{\text{apr}}/E_{\text{ver}}$.

••19 A Fig. 22-41 mostra um dipolo elétrico. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semi-eixo x positivo) do campo elétrico produzido pelo dipolo em um ponto P situado a uma distância $r \gg d$.

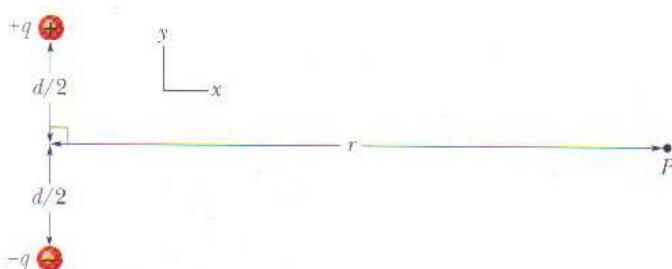


FIG. 22-41 Problema 19.

••20 O campo elétrico de um dipolo elétrico em pontos sobre o 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 sobre o eixo do dipolo? Em outras palavras, qual é o valor de E_1 na expressão

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{qd}{z^3} + E_1?$$

••21 *Quadrupolo elétrico.* A Fig. 22-42 mostra um quadrupolo elétrico, formado por dois dipolos de mesmo módulo e sentidos opostos. Mostre que o valor de E em um ponto P sobre o eixo do quadrupolo situado a uma distância z do centro (supondo $z \gg d$) é dado por

$$E = \frac{3Q}{4\pi\epsilon_0 z^4},$$

onde $Q (= 2qd^2)$ é chamado de *momento quadrupolar* da distribuição de cargas.

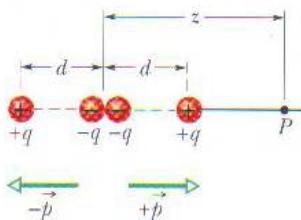


FIG. 22-42 Problema 21.

seção 22-6 Campo Elétrico Produzido por uma Linha de Cargas

•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 cargas 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 cargas 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 cargas da superfície? (d) Uma carga de $-300e$ está distribuída uniformemente em uma esfera de 2,00 cm de raio. Qual é a densidade volumétrica de cargas da esfera?

•23 A Fig. 22-43 mostra dois anéis não-condutores paralelos, com os centros sobre a 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 situado na reta que passa pelos centros dos anéis, a uma distância R do anel 1, é zero. Determine a razão q_1/q_2 .

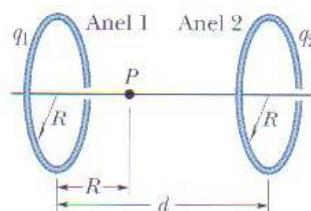


FIG. 22-43 Problema 23.

••24 Na Fig. 22-44 uma barra fina de vidro forma uma semicircunferência de raio $r = 5,00$ cm. Uma carga $+q = 4,50$ pC está distribuída uniformemente na metade superior da barra, e uma carga $-q = -4,50$ pC está distribuída uniformemente na metade inferior. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semi-eixo x positivo) do campo elétrico \vec{E} no ponto P , situado no centro do semicírculo.

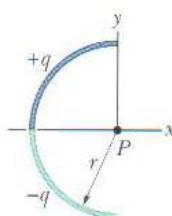


FIG. 22-44 Problema 24.

••25 Na Fig. 22-45 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 semi-eixo x positivo) do campo elétrico \vec{E} no ponto P , situado no centro da circunferência.

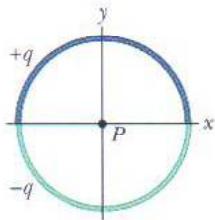


FIG. 22-45 Problema 25.

••26 Um anel de raio $R = 2,40$ cm de raio contém uma distribuição uniforme de cargas, 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?

••27 Na Fig. 22-46, uma barra não-condutora de comprimento $L = 8,15$ cm tem uma carga $-q = -4,23 \text{ fC}$ uniformemente distribuída. (a) Qual é a densidade linear de cargas da barra? Determine (b) o módulo e (c) a direção (em relação ao semi-eixo 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 $-q = -4,23 \text{ fC}$ colocada no lugar anteriormente ocupado pelo centro da barra.

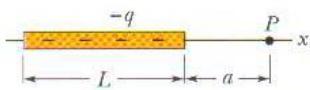


FIG. 22-46 Problema 27.

••28 A Fig. 22-47 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?

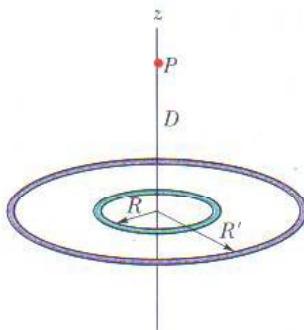


FIG. 22-47 Problema 28.

••29 A Fig. 22-48 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 $Q = 2,00 \mu\text{C}$. Os raios são dados em termos de $R = 10,0$ cm. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semi-eixo x positivo) do campo elétrico na origem.

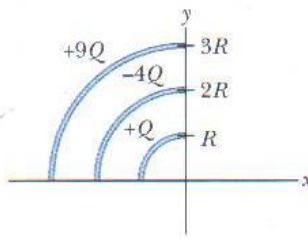


FIG. 22-48 Problema 29.

••30 Uma barra fina não-condutora, com uma distribuição uniforme de carga positiva Q , tem a forma de um círculo de raio R (Fig. 22-49). 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 que valor positivo de z o módulo do campo é máximo? (d) Se $R = 2,00$ cm e $Q = 4,00 \mu\text{C}$, qual é o valor máximo do campo?

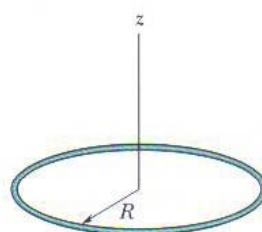


FIG. 22-49 Problema 30.

••31 A Fig. 22-50a mostra uma barra não-condutora com uma carga $+Q$ distribuída uniformemente. A barra forma um semicírculo 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. 22-50b), qual é a razão entre o novo valor de E e o antigo valor?

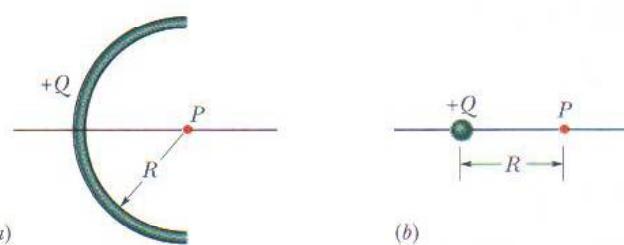


FIG. 22-50 Problema 31.

••32 Na Fig. 22-51, uma carga positiva $q = 7,81 \text{ pC}$ está distribuída uniformemente em uma barra fina, não-condutora, de comprimento $L = 14,5$ cm. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semi-eixo x positivo) do campo elétrico produzido no ponto P , situado sobre a mediatrix da barra, a uma distância $R = 6,00$ cm da barra.

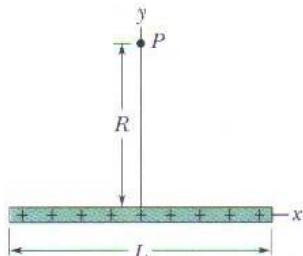


FIG. 22-51 Problema 32.

- 33** Na Fig. 22-52, uma barra não-condutora “semi-infinita” (ou seja, infinita apenas em um sentido) possui uma densidade linear de cargas uniforme λ . Mostre que o campo elétrico \vec{E}_p no ponto P faz um ângulo de 45° com a barra e que esse resultado não depende da distância R . (Sugestão: Calcule separadamente as componentes de \vec{E}_p nas direções paralela e perpendicular à barra.)

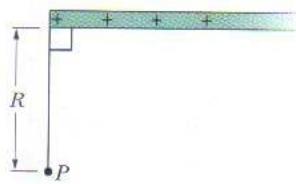


FIG. 22-52 Problema 33.

seção 22-7 Campo Elétrico Produzido por um Disco Carregado

- 34** Um disco de 2,5 cm de raio possui uma densidade superficial de cargas de $5,3 \mu\text{C}/\text{m}^2$ na superfície superior. Qual é o módulo do campo elétrico produzido pelo disco em um ponto sobre o eixo central 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 de 0,600 m de raio o módulo do campo elétrico é igual à metade do módulo do campo no centro do disco?

- 36** A Fig. 22-53a mostra um disco circular uniformemente carregado. O eixo central z é perpendicular ao plano do disco, e sua origem está no plano do disco. A Fig. 22-53b mostra o módulo do campo elétrico sobre o 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?

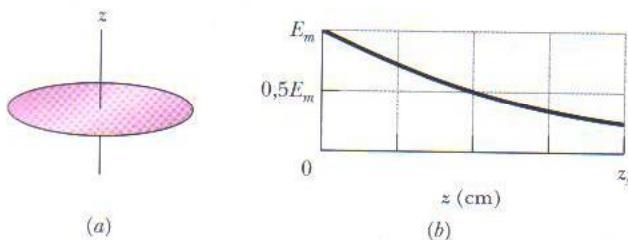


FIG. 22-53 Problema 36.

- 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 sobre o eixo do disco, a uma distância $2,00R$ do plano do disco (Fig. 22-54a). 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. 22-54b). O anel tem a mesma densidade superficial de cargas que o disco original. Qual é a razão entre o novo campo no ponto P e o campo antigo?

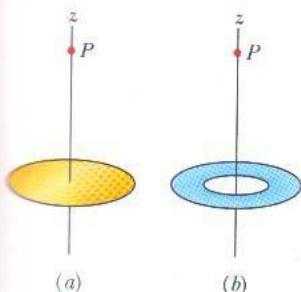


FIG. 22-54 Problema 37.

- 38** 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?

seção 22-8 Uma Carga Pontual em um Campo Elétrico

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

- 40** Um elétron adquire uma aceleração para leste de $1,80 \times 10^9 \text{ m/s}^2$ na presença de um campo elétrico. Determine (a) o módulo e (b) a orientação do campo elétrico.

- 41** Um elétron está sobre o 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 $3,6 \times 10^{-29} \text{ C}\cdot\text{m}$? Suponha que a distância entre as cargas do dipolo é muito menor que 25 nm.

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

- 43** 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 $-2,0 \times 10^{-9} \text{ C}$ é submetida a uma força eletrostática para baixo de $3,0 \times 10^{-6} \text{ N}$. (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) Qual é o módulo da força gravitacional \vec{F}_g a que está sujeito o próton? (e) Qual é a razão \vec{F}_{el}/\vec{F}_g neste caso?

- 44** O ar úmido se torna um condutor (as moléculas se ionizam) quando é submetido a um campo elétrico maior que $3,0 \times 10^6 \text{ N/C}$. Para esse valor de campo, determine o módulo da força eletrostática a que é submetido (a) um elétron e (b) uma molécula da qual foi removido um elétron.

- 45** 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 $2,00 \times 10^4 \text{ N/C}$? (b) Na presença desse campo, qual é a velocidade adquirida pelo próton depois de percorrer uma distância de 1,00 cm?

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

- 47** No experimento de Millikan, uma gota de óleo com um raio de $1,64 \mu\text{m}$ e uma massa específica de $0,851 \text{ g/cm}^3$ permanece imóvel na câmara C (Fig. 22-14) quando um campo vertical de $1,92 \times 10^5 \text{ N/C}$ é aplicado. Determine a carga da gota em termos de e .

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

••49 Há um campo elétrico uniforme em uma região entre duas placas com cargas elétricas opositas. 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} ?

••50 Na Fig. 22-55 um elétron é lançado com uma velocidade inicial $v_0 = 2,00 \times 10^6$ m/s a um ângulo $\theta_0 = 40,0^\circ$ 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 é instalada paralelamente ao eixo y , a uma distância $x = 3,00$ m do ponto de lançamento do elétron. Em termos dos vetores unitários, qual é a velocidade do elétron ao atingir a tela?

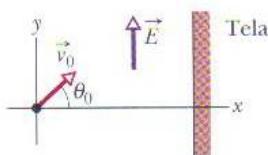


FIG. 22-55 Problema 50.

••51 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. 22-56. Um elétron é liberado da placa negativa ao mesmo tempo em 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?)

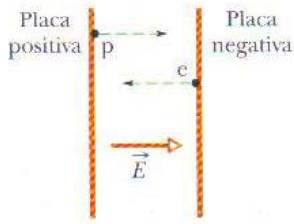


FIG. 22-56 Problema 51.

••52 Na Fig. 22-57 um elétron (e) é liberado a partir do repouso no eixo central de um disco uniformemente carregado de raio R . A densidade superficial de cargas do disco é $+4,00 \mu\text{C/m}^2$. Determine o módulo da aceleração inicial do elétron se ele 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 com a distância entre a carga e o disco?

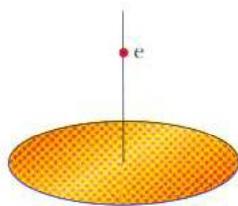


FIG. 22-57 Problema 52.

••53 Um bloco de $10,0 \text{ g}$ com uma carga de $+8,00 \times 10^{-5} \text{ C}$ é submetido a um campo elétrico $\vec{E} = (3000\hat{i} - 600\hat{j}) \text{ N/C}$. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semi-

eixo x positivo) da força eletrostática que age sobre o bloco. Se o bloco é 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 $t = 3,00 \text{ s}$.

••54 Um elétron penetra em uma região em que existe um campo elétrico uniforme com uma velocidade inicial de 40 km/s e se move paralelamente ao campo elétrico, cujo módulo é $E = 50 \text{ N/C}$. (a) Qual é a velocidade do elétron $1,5 \text{ ns}$ depois de entrar na região? (b) Que distância o elétron percorre nesse intervalo de $1,5 \text{ ns}$?

••55 Suponha que uma abelha pode ser aproximada por uma esfera de $1,000 \text{ cm}$ de diâmetro com uma carga de $+45,0 \text{ pC}$ distribuída uniformemente na superfície. Suponha também que um grão de pólen com $40,0 \mu\text{m}$ de diâmetro é mantido eletricamente na superfície da esfera porque a carga da abelha induz uma carga de $-1,00 \text{ pC}$ no lado mais próximo da esfera e uma carga de $+1,00 \text{ pC}$ no lado mais distante. (a) Qual é o módulo da força eletrostática resultante que a abelha exerce sobre o grão de pólen? Suponha que a abelha transporte o grão de pólen até uma distância de $1,000 \text{ mm}$ da ponta do estigma de uma flor e que a ponta é uma partícula de carga -45 pC . (b) Qual é o módulo da força eletrostática resultante que o estigma exerce sobre o grão? (c) O grão permanece no corpo da abelha ou salta para o estigma?

seção 22-9 Um Dipolo em um Campo Elétrico

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

••57 Um dipolo elétrico formado por cargas de $+1,50 \text{ nC}$ e $-1,50 \text{ nC}$ separadas por uma distância de $6,20 \mu\text{m}$ 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 certo dipolo elétrico é submetido a um campo elétrico uniforme \vec{E} de módulo 40 N/C . A Fig. 22-58 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 $\tau_s = 100 \times 10^{-28} \text{ N.m}$. Qual é o módulo de \vec{p} ?

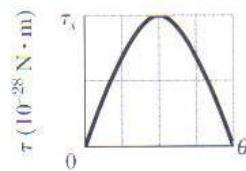


FIG. 22-58 Problema 58.

••59 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 .

••60 Um certo dipolo elétrico é submetido a um campo elétrico uniforme \vec{E} cujo módulo é 20 N/C . A Fig. 22-59 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 $U_s = 100 \times 10^{-28} \text{ J}$. Qual é o módulo de \vec{p} ?

REVISÃO E RESUMO

Lei de Gauss A lei de Gauss e a lei de Coulomb são formas diferentes de descrever a relação entre carga e campo elétrico em situações estáticas. A lei de Gauss é expressa pela equação

$$\epsilon_0 \Phi = q_{\text{env}} \quad (\text{lei de Gauss}), \quad (23-6)$$

onde q_{env} é a carga total no interior de uma superfície imaginária fechada (conhecida como *superfície gaussiana*) e Φ é o *fluxo* total do campo elétrico através da superfície:

$$\Phi = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} \quad (\text{fluxo elétrico através de uma superfície gaussiana}). \quad (23-4)$$

A lei de Coulomb pode ser demonstrada a partir da lei de Gauss.

Aplicações da lei de Gauss Usando a lei de Gauss e, em alguns casos, princípios de simetria é possível demonstrar várias propriedades importantes de sistemas eletrostáticos, entre as quais as seguintes:

- As cargas em excesso de um *condutor* estão concentradas na superfície externa do condutor.
- O campo elétrico externo nas vizinhanças da *superfície de um condutor carregado* é perpendicular à superfície e tem um módulo dado por

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (\text{superfície condutora}). \quad (23-11)$$

onde σ é a densidade superficial de cargas.

No interior do condutor, $E = 0$.

- O campo elétrico em qualquer ponto de uma *linha de cargas* infinita com uma densidade linear de cargas uniforme λ é per-

pendicular à linha de cargas e tem um módulo dado por

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (\text{linha de cargas}), \quad (23-12)$$

onde r é a distância perpendicular entre a linha de cargas e o ponto.

- O campo elétrico produzido por uma *placa não-condutora infinita* com uma densidade superficial de cargas uniforme σ é perpendicular ao plano da placa e tem um módulo dado por

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad (\text{placa de cargas}). \quad (23-13)$$

- O campo elétrico *do lado de fora de uma casca esférica uniformemente carregada* de raio R e carga total q aponta na direção radial e tem um módulo dado por

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (\text{casca esférica, para } r \geq R). \quad (23-15)$$

Onde r é a distância entre o centro da casca e o ponto no qual o campo E é medido. (A carga se comporta, para pontos externos, como se estivesse concentrada no centro da esfera.) O campo *do lado de dentro* de uma casca esférica uniformemente carregada é zero:

$$E = 0 \quad (\text{casca esférica, para } r < R). \quad (23-16)$$

- O campo elétrico *no interior de uma esfera uniformemente carregada* aponta na direção radial e tem um módulo dado por

$$E = \left(\frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^3} \right) r. \quad (23-20)$$

PERGUNTAS

- 1 A Fig. 23-20 mostra, em seção reta, uma esfera central metálica, duas cascas metálicas e três superfícies gaussianas esféricas concêntricas de raio R , $2R$ e $3R$. As cargas dos três corpos, distribuídas uniformemente, são as seguintes: esfera, Q ; casca menor, $3Q$; casca maior, $5Q$. Coloque as três superfícies gaussianas na ordem do módulo do campo elétrico em qualquer ponto da superfície, começando pelo maior.

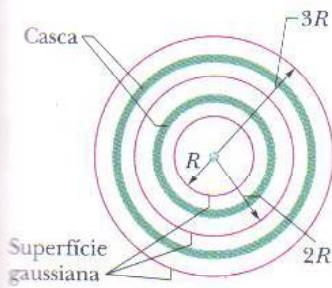


FIG. 23-20 Pergunta 1.

- 2 A Fig. 23-21 mostra, em seção reta, duas esferas gaussianas e dois cubos gaussianos no centro dos quais existe uma partícula de carga positiva. (a) Coloque as quatro superfícies gaussianas na ordem do fluxo elétrico que as atravessa, começando pelo maior. (b) Coloque as quatro superfícies gaussianas na ordem do

módulo do campo elétrico em qualquer ponto da superfície, começando pelo maior, e informe se os módulos são uniformes ou variam de ponto para ponto da superfície.

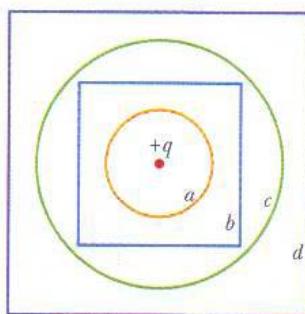


FIG. 23-21 Pergunta 2.

- 3 O vetor área de uma superfície é $\vec{A} = (2\hat{i} + 3\hat{j})\text{m}^2$. Qual é o fluxo de um campo elétrico através dessa superfície se o campo é (a) $\vec{E} = 4\hat{e}_x \text{ N/C}$; (b) $\vec{E} = 4\hat{k} \text{ N/C}$?

- 4 A Fig. 23-22 mostra, em seção reta, três cilindros maciços de comprimento L e carga uniforme Q . Concêntrica com cada cilindro existe uma superfície gaussiana cilíndrica; as três superfícies gaussianas têm o mesmo raio. Coloque as superfícies gaussianas

na ordem do módulo do campo elétrico em qualquer ponto da superfície, começando pelo maior.

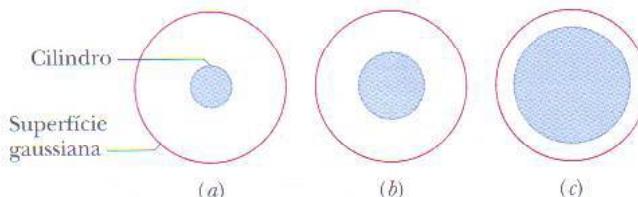


FIG. 23-22 Pergunta 4.

5 A Fig. 23-23 mostra as seções retas de quatro conjuntos de barras finas e muito compridas perpendiculares ao plano da figura. O valor abaixo de cada barra indica a densidade linear uniforme de cargas da barra em microcoulombs por metro. As barras estão separadas por distâncias d ou $2d$, e um ponto central é mostrado a meio caminho entre as barras internas. Coloque os conjuntos na ordem do módulo do campo elétrico no ponto central, começando pelo maior.

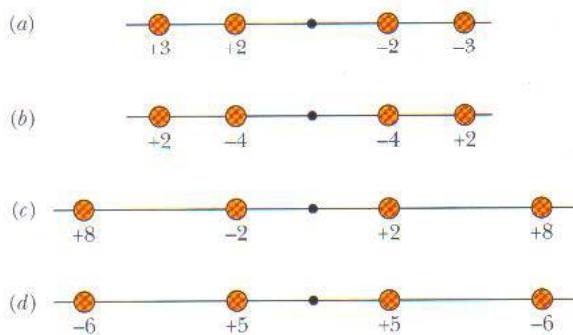


FIG. 23-23 Pergunta 5.

6 Uma pequena esfera carregada está no interior de uma casca esférica metálica de raio R . Para três situações, as cargas da esfera e da casca, respectivamente, são (1) $+4q$, 0; (2) $-6q$, $+10q$; (3) $+16q$, $-12q$. Coloque as situações em ordem de acordo com a carga (a) da superfície interna da casca; (b) da superfície externa da casca, começando pela mais positiva.

7 Coloque as situações da Pergunta 6 em ordem de acordo com o módulo do campo elétrico (a) no centro da casca; (b) em um ponto a uma distância $2R$ do centro da casca, começando pelo maior.

8 Três placas infinitas não-condutoras, com densidades superficiais de cargas positivas σ , 2σ e 3σ , foram alinhadas paralela-

mente, como as duas barras da Fig. 23-17a. Qual é a ordem das placas, da esquerda para a direita, se o campo elétrico \vec{E} produzido pelas barras tem módulo $E = 0$ em uma região e $E = 2\sigma/\epsilon_0$ em outra região?

9 Na Fig. 23-24 um elétron é liberado entre duas placas infinitas não-condutoras horizontais, com densidades superficiais de cargas $\sigma_{(+)}$ e $\sigma_{(-)}$, como mostra a figura. O elétron é submetido às três situações mostradas na tabela a seguir, que envolvem as densidades superficiais de cargas e a distância entre as placas. Coloque as situações na ordem do módulo da aceleração do elétron, começando pelo maior.

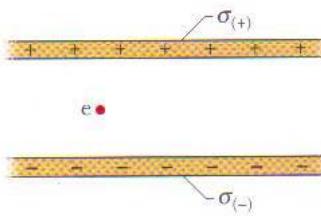


FIG. 23-24 Pergunta 9.

Situação	$\sigma_{(+)}$	$\sigma_{(-)}$	Distância
1	$+4\sigma$	-4σ	d
2	$+7\sigma$	$-\sigma$	$4d$
3	$+3\sigma$	-5σ	$9d$

10 A Fig. 23-25 mostra quatro esferas maciças, todas com uma carga Q distribuída uniformemente. (a) Coloque as esferas em ordem de acordo com a densidade volumétrica de cargas, começando pela maior. A figura mostra também um ponto P para cada esfera, todos à mesma distância do centro da esfera. (b) Coloque as esferas em ordem de acordo com o módulo do campo elétrico no ponto P , começando pelo maior.

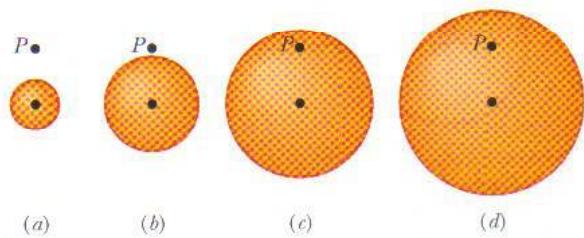


FIG. 23-25 Pergunta 10.

PROBLEMAS

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

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

seção 23-3 Fluxo de um Campo Elétrico

•1 A superfície quadrada da Fig. 23-26 tem 3,2 mm de lado e está imersa em um campo elétrico uniforme de módulo $E = 1800 \text{ N/C}$ e com linhas de campo fazendo um ângulo de 35° com a nor-

mal, como mostra a figura. Tome essa normal como apontando “para fora”, como se a superfície fosse a tampa de uma caixa. Calcule o fluxo elétrico através da superfície.

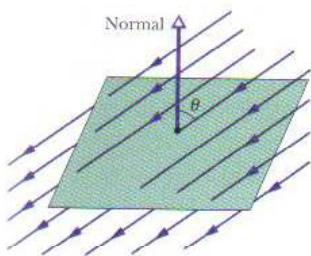


FIG. 23-26 Problema 1.

••2 Um campo elétrico dado por $\vec{E} = 4,0\hat{i} - 3,0(y^2 + 2,0)\hat{j}$ atravessa um cubo gaussiano com 2,0 m de aresta, posicionado da forma mostrada na Fig. 23-5. (E é dado em newtons por coulomb e x em metros.) Determine o fluxo elétrico (a) através da face superior; (b) através da face inferior; (c) através da face da esquerda; (d) através da face traseira. (e) Qual é o fluxo elétrico total através do cubo?

••3 O cubo da Fig. 23-27 tem 1,40 m de aresta e está orientado da forma mostrada na figura em uma região onde existe um campo elétrico uniforme. Determine o fluxo elétrico através da face direita do cubo se o campo elétrico, em newtons por coulomb, é dado por (a) $6,00\hat{i}$; (b) $-2,00\hat{j}$; (c) $-3,00\hat{i} + 4,00\hat{k}$. (d) Qual é o fluxo total através do cubo nos três casos?

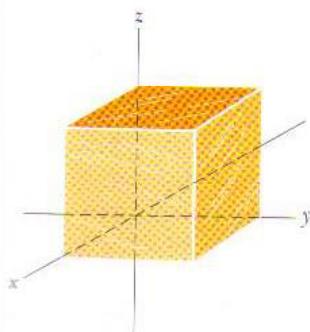


FIG. 23-27 Problemas 3, 4 e 11.

seção 23-4 Lei de Gauss

•4 Em todos os pontos da superfície do cubo da Fig. 23-27 o campo elétrico é paralelo ao eixo z . O cubo tem 3,0 m de aresta. Na face superior do cubo $\vec{E} = -34\hat{k}$ N/C; na face inferior, $\vec{E} = +20\hat{k}$ N/C. Determine a carga que existe no interior do cubo.

•5 Uma carga pontual de $1.8 \mu\text{C}$ está no centro de uma superfície gaussiana cúbica de 55 cm de aresta. Qual é o fluxo elétrico através da superfície?

•6 Na Fig. 23-28, uma rede para pegar borboletas está imersa em um campo elétrico uniforme de módulo $E = 3,0 \text{ mN/C}$. O plano do aro da rede, uma circunferência de raio $a = 11 \text{ cm}$, é mantido perpendicular à direção do campo. A rede é eletricamente neutra. Determine o fluxo elétrico através da rede.

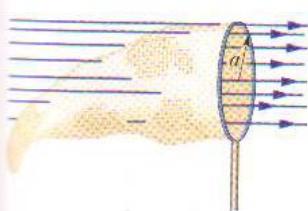


FIG. 23-28 Problema 6.

•7 Na Fig. 23-29 um próton se encontra a uma distância vertical $d/2$ do centro de um quadrado de aresta d . Qual é o módulo

do fluxo elétrico através do quadrado? (Sugestão: Pense no quadrado como uma das faces de um cubo de aresta d .)

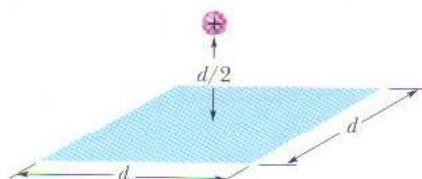


FIG. 23-29 Problema 7.

••8 A Fig. 23-30 mostra duas cascas esféricas não-condutoras mantidas fixas no lugar. A casca 1 possui uma densidade superficial de cargas uniforme de $+6,0 \mu\text{C/m}^2$ na superfície externa e um raio de 3,0 cm; a casca 2 possui uma densidade superficial de cargas uniforme de $+4,0 \mu\text{C/m}^2$ na superfície externa e raio de 2,0 cm; os centros das cascas estão separados por uma distância $L = 10 \text{ cm}$. Em termos dos vetores unitários, qual é o campo elétrico no ponto $x = 2,0 \text{ cm}$?

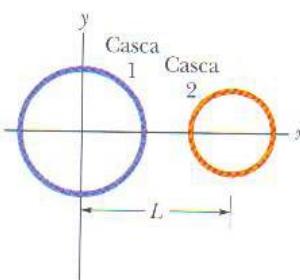


FIG. 23-30 Problema 8.

••9 Observa-se experimentalmente que o campo elétrico em uma certa região da atmosfera terrestre aponta verticalmente para baixo. A uma altitude de 300 m o campo tem um módulo de $60,0 \text{ N/C}$; a uma altitude de 200 m o módulo é de 100 N/C . Determine a carga em excesso contida em um cubo com 100 m de aresta e faces horizontais a 200 e 300 m de altitude.

••10 Quando um chuveiro é aberto em um banheiro fechado os respingos de água no piso do boxe podem encher o ar de íons negativos e produzir um campo elétrico no ar de até 1000 N/C . Considere um banheiro de dimensões $2,5 \text{ m} \times 3,0 \text{ m} \times 2,0 \text{ m}$. Suponha que no teto, no piso e nas quatro paredes o campo elétrico no ar é perpendicular à superfície e possui um módulo uniforme de 600 N/C . Suponha também que essas superfícies formam uma superfície gaussiana que envolve o ar do banheiro. Determine (a) a densidade volumétrica de cargas ρ e (b) o número de cargas elementares e em excesso por metro cúbico de ar.

••11 A Fig. 23-27 mostra uma superfície gaussiana com a forma de um cubo com 1,40 m de aresta. Determine (a) o fluxo Φ através da superfície; (b) a carga q_{env} envolvida pela superfície se $\vec{E} = 3,00\hat{y} \text{ N/C}$, com y em metros; os valores de (c) Φ e (d) q_{env} se $\vec{E} = [-4,00\hat{i} + (6,00 + 3,00y)\hat{j}] \text{ N/C}$.

••12 *Fluxo e cascas não-condutoras.* Uma partícula carregada está suspensa no centro de duas cascas esféricas concêntricas que são muito finas e feitas de um material não-condutor. A Fig. 23-31a mostra uma seção reta do sistema, e a Fig. 23-31b o fluxo Φ através de uma esfera gaussiana com centro na partícula em função do raio r da esfera. A escala do eixo vertical é definida por $\Phi_s = 5,0 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$. (a) Determine a carga da partícula central. (b) Determine a carga da casca A. (c) Determine a carga da casca B.

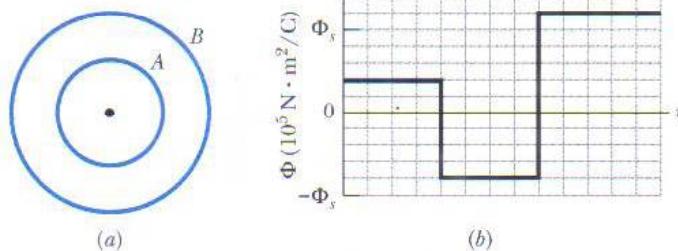


FIG. 23-31 Problema 12.

••13 Uma partícula de carga $+q$ é colocada em um dos vértices de um cubo gaussiano. Determine o múltiplo de q/ϵ_0 que corresponde ao fluxo através de (a) uma das faces do cubo que contêm o vértice; (b) uma das outras faces do cubo.

••14 A Fig. 23-32 mostra uma superfície gaussiana com a forma de um cubo de 2,00 m de aresta, imersa em um campo elétrico dado por $\vec{E} = (3,00x + 4,00)\hat{i} + 6,00\hat{j} + 7,00\hat{k}$ N/C, com x em metros. Qual é a carga total contida no cubo?

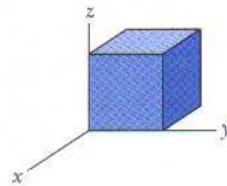


FIG. 23-32 Problema 14.

••15 A Fig. 23-33 mostra uma superfície gaussiana com a forma de um cubo de 2,00 m de aresta, com um vértice no ponto $x_1 = 5,00 \text{ m}$, $y_1 = 4,00 \text{ m}$. O cubo está imerso em um campo elétrico dado por $\vec{E} = -3,00\hat{i} - 4,00y^2\hat{j} + 3,00\hat{k}$ N/C, com y em metros. Qual é a carga total contida no cubo?

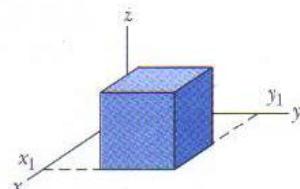


FIG. 23-33 Problema 15.

••16 A superfície gaussiana em forma de paralelepípedo da Fig. 23-34 envolve uma carga de $+24,0\epsilon_0 \text{ C}$ e está imersa em um campo elétrico dado por $\vec{E} = [(10,0 + 2,00x)\hat{i} - 3,00\hat{j} + bz\hat{k}]$ N/C, com x e z em metros e b constante. A face inferior está no plano xz ; a face superior está no plano horizontal que passa pelo ponto $y_2 = 1,00 \text{ m}$. Para $x_1 = 1,00 \text{ m}$, $x_2 = 4,00 \text{ m}$, $z_1 = 1,00 \text{ m}$ e $z_2 = 3,00$, qual é o valor de b ?

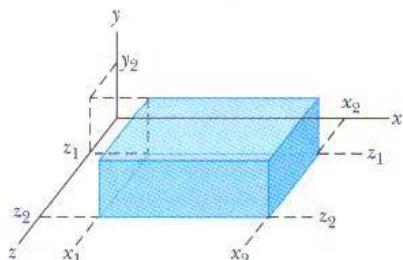


FIG. 23-34 Problema 16.

seção 23-6 Um Condutor Carregado

•17 Os veículos espaciais que atravessam os cinturões de radiação da Terra podem interceptar um número significativo de elétrons. O acúmulo de cargas resultante pode danificar componentes eletrônicos e prejudicar o funcionamento de alguns circuitos. Suponha que um satélite esférico feito de metal, com 1,3 m de diâmetro, acumule $2,4 \mu\text{C}$ de carga. (a) Determine a densidade superficial de cargas do satélite. (b) Calcule o módulo do campo elétrico nas vizinhanças do satélite devido à carga superficial.

•18 *Fluxo e cascas condutoras.* Uma partícula carregada é mantida no centro de duas cascas esféricas condutoras concêntricas, cuja seção reta aparece na Fig. 23-35a. A Fig. 23-35b mostra o fluxo Φ através de uma esfera gaussiana com centro na partícula em função do raio r da esfera. A escala do eixo vertical é definida por $\Phi_s = 5,0 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$. Determine (a) a carga da partícula central; (b) a carga da casca A ; (c) a carga da casca B .

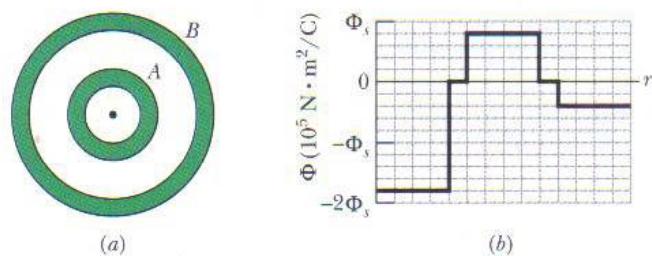


FIG. 23-35 Problema 18.

•19 Uma esfera condutora uniformemente carregada com 1,2 m de diâmetro possui uma densidade superficial de cargas de $8,1 \mu\text{C}/\text{m}^2$. (a) Determine a carga da esfera. (b) Determine o fluxo elétrico através da superfície da esfera.

•20 O campo elétrico nas vizinhanças do tambor carregado de uma fotocopiadora tem um módulo E de $2,3 \times 10^5 \text{ N/C}$. Qual é a densidade superficial de cargas, supondo que o tambor é feito de material condutor?

•21 Um condutor isolado de forma arbitrária possui uma carga de $+10 \times 10^{-6} \text{ C}$. No interior do condutor existe uma cavidade; no interior da cavidade está uma carga pontual $q = +3,0 \times 10^{-6} \text{ C}$. Determine a carga (a) da superfície da cavidade; (b) da superfície externa do condutor.

seção 23-7 Aplicando a Lei de Gauss: Simetria Cilíndrica

•22 A Fig. 23-36 mostra uma seção de um tubo longo de metal, de paredes finas, com um raio $R = 3,00 \text{ cm}$ e uma carga por unidade de comprimento $\lambda = 2,00 \times 10^{-8} \text{ C/m}$. Determine o módulo E do campo elétrico a uma distância radial (a) $r = R/2,00$; (b) $r = 2,00R$. (c) Faça um gráfico de E em função de r para $0 \leq r \leq 2,00R$.

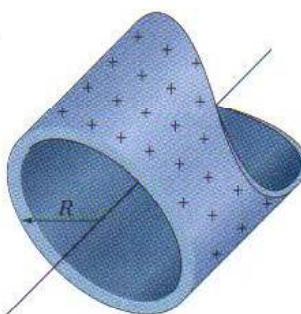


FIG. 23-36 Problema 22.

•23 Uma linha infinita de cargas produz um campo de módulo $4,5 \times 10^4 \text{ N/C}$ a uma distância de 2,0 m. Calcule a densidade linear de cargas.

•24 Um elétron é liberado a partir do repouso a uma distância perpendicular de 9,0 cm de uma barra não-condutora retilínea muito longa com uma densidade de cargas uniforme de $6,0 \mu\text{C/m}$. Qual é o módulo da aceleração inicial do elétron?

•25 (a) O tambor de uma fotocopiadora tem um comprimento de 42 cm e um diâmetro de 12 cm. O campo elétrico nas proximidades da superfície do tambor é de $2,3 \times 10^5 \text{ N/C}$. Qual é a carga total do tambor? (b) O fabricante deseja produzir uma versão compacta da máquina. Para isso é necessário reduzir o comprimento do tambor para 28 cm e o diâmetro para 8,0 cm. O campo elétrico na superfície do tambor deve permanecer o mesmo. Qual deve ser a carga do novo tambor?

•26 Na Fig. 23-37 pequenas partes de duas linhas paralelas de cargas muito compridas são mostradas, fixas no lugar, separadas por uma distância $L = 8,0 \text{ cm}$. A densidade uniforme de cargas das linhas é $+6,0 \mu\text{C/m}$ para a linha 1 e $-2,0 \mu\text{C/m}$ para a linha 2. Em que ponto do eixo x o campo elétrico é zero?

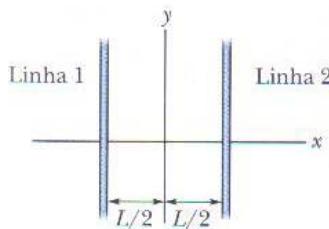


FIG. 23-37 Problema 26.

•27 A Fig. 23-38 é uma seção de uma barra condutora de raio $R_1 = 1,30 \text{ mm}$ e comprimento $L = 11,00 \text{ m}$ no interior de uma casca coaxial, de paredes finas, de raio $R_2 = 10,0R_1$ e mesmo comprimento L . A carga da barra é $Q_1 = +3,40 \times 10^{-12} \text{ C}$; a carga da casca é $Q_2 = -2,00Q_1$. Determine (a) o módulo E e (b) a direção (para dentro ou para fora) do campo elétrico a uma distância radial $r = 2,00R_2$. Determine (c) E e (d) a direção do campo elétrico para $r = 5,00R_1$. Determine a carga (e) na superfície interna e (f) na superfície interna da casca.

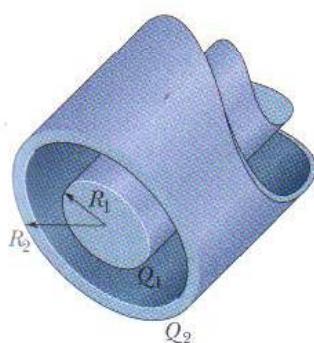
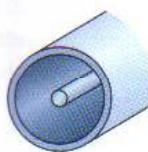
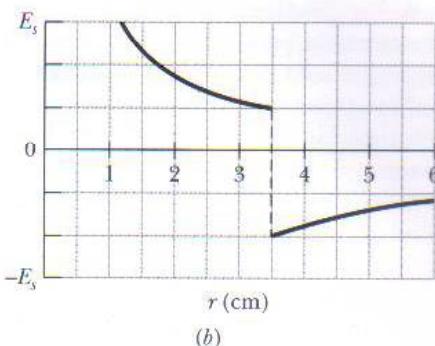


FIG. 23-38 Problema 27.

•28 A Fig. 23-39a mostra um cilindro fino, maciço, carregado e uma casca cilíndrica coaxial, também carregada. Os dois objetos são feitos de material não-condutor e possuem uma densidade superficial de cargas uniforme na superfície externa. A Fig. 23-39b mostra a componente radial E do campo elétrico em função da distância radial r a partir do eixo comum. A escala do eixo vertical é definida por $E_s = 3,0 \times 10^3 \text{ N/C}$. Qual é a densidade linear de cargas da casca?



(a)



(b)

FIG. 23-39 Problema 28.

•29 Duas cascas cilíndricas longas, carregadas, coaxiais, de paredes finas, têm 3,0 e 6,0 m de raio. A carga por unidade de comprimento é $5,0 \times 10^{-6} \text{ C/m}$ para a casca interna e $-7,0 \times 10^{-6} \text{ C/m}$ na casca externa. Determine (a) o módulo E e (b) o sentido (para dentro ou para fora) do campo elétrico a uma distância radial $r = 4,0 \text{ cm}$. Determine (c) E e (d) o sentido para $r = 8,0 \text{ cm}$.

•30 Uma carga de densidade linear uniforme $2,0 \text{ nC/m}$ está distribuída ao longo de uma barra longa, fina, não-condutora. A barra está envolvida por uma casca longa, cilíndrica, coaxial, condutora (raio interno: 5,0 cm; raio externo, 10 cm). A carga da casca é zero. (a) Determine o módulo do campo elétrico a 15 cm de distância do eixo da casca. Determine a densidade superficial de cargas (b) na superfície interna e (c) na superfície externa da casca.

•31 Um fio reto longo possui cargas negativas fixas com uma densidade linear de $3,6 \text{ nC/m}$. O fio é envolvido por uma casca coaxial cilíndrica, não-condutora, de paredes finas, com 1,5 cm de raio. A casca possui uma carga positiva na superfície externa com uma densidade superficial σ , que anula o campo elétrico do lado de fora da casca. Determine o valor de σ .

•32 Um cilindro maciço, longo, não-condutor, com 4,0 cm de raio, possui uma densidade volumétrica de cargas não-uniforme ρ que é função da distância radial r a partir do eixo do cilindro: $\rho = Ar^2$. Para $A = 2,5 \mu\text{C/m}^5$, determine o módulo do campo elétrico (a) para $r = 3,0 \text{ cm}$; (b) para $r = 5,0 \text{ cm}$.

seção 23-8 Aplicando a Lei de Gauss: Simetria Planar

•33 A Fig. 23-40a mostra três placas de plástico de grande extensão, paralelas e uniformemente carregadas. A Fig. 23-40b mostra a componente x do campo elétrico em função de x . A escala do eixo vertical é definida por $E_s = 6,0 \times 10^5 \text{ N/C}$. Determine a razão entre a densidade de cargas na placa 3 e a densidade de cargas na placa 2.

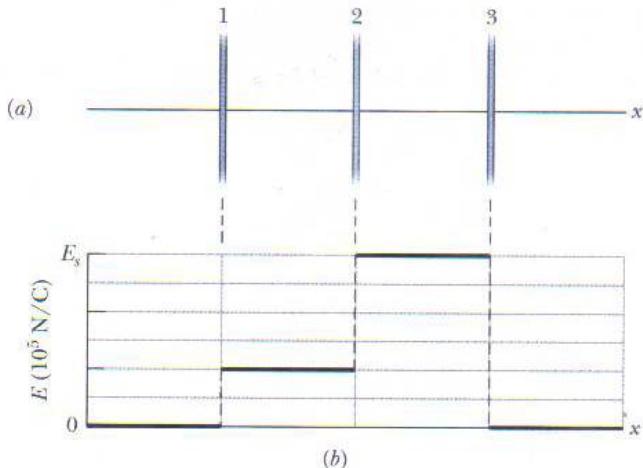


FIG. 23-40 Problema 33.

- 34** A Fig. 23-41 mostra as seções retas de duas placas de grande extensão, paralelas, não-condutoras, positivamente carregadas, ambas com distribuição superficial de cargas $\sigma = 1,77 \times 10^{-22} \text{ C/m}^2$. Determine o campo elétrico \vec{E} , em termos dos vetores unitários, (a) acima das placas; (b) entre as placas; (c) abaixo das placas.

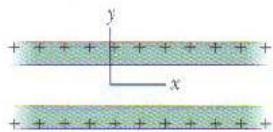


FIG. 23-41 Problema 34.

- 35** Uma placa metálica quadrada de 8,0 cm de lado e espessura insignificante possui uma carga total de $6,0 \times 10^{-6} \text{ C}$. (a) Estime o módulo E do campo elétrico perto do centro da placa (a 0,50 mm do centro, por exemplo) supondo que a carga está distribuída uniformemente pelas duas faces da placa. (b) Estime E a 30 m de distância (uma distância grande, em comparação com as dimensões da placa) supondo que a placa é uma carga pontual.

- 36** Na Fig. 23-42 um pequeno furo circular de raio $R = 1,80 \text{ cm}$ foi aberto no meio de uma placa fina, infinita, não-condutora, com uma densidade superficial de cargas $\sigma = 4,50 \text{ pC/m}^2$. O eixo z , cuja origem está no centro do furo, é perpendicular à placa. Determine, em termos dos vetores unitários, o campo elétrico no ponto P , situado em $z = 2,56 \text{ cm}$. (Sugestão: Use a Eq. 22-26 e o princípio de superposição.)

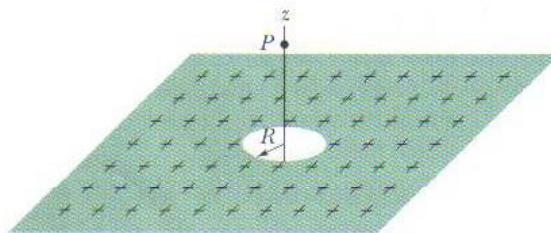


FIG. 23-42 Problema 36.

- 37** Na Fig. 23-43 duas placas finas, de grande extensão, são mantidas paralelas e a uma pequena distância uma da outra. Nas faces internas as placas possuem densidades superficiais de cargas de sinais opostos e valor absoluto $7,00 \times 10^{-22} \text{ C/m}^2$. Em termos dos vetores unitários, determine o campo elétrico (a) à esquerda das placas; (b) à direita das placas; (c) entre as placas.

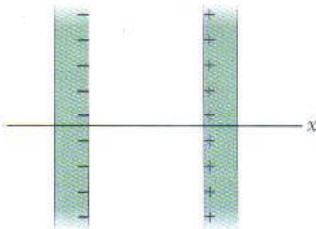


FIG. 23-43 Problema 37.

- 38** Duas grandes placas de metal com $1,0 \text{ m}^2$ de área são mantidas paralelas a 5,0 cm de distância e possuem cargas de mesmo valor absoluto e sinais opostos nas superfícies internas. Se o módulo E do campo elétrico entre as placas é 55 N/C , qual é o módulo da carga em cada placa? Despreze o efeito de borda.

- 39** Um elétron é arremessado na direção do centro de uma placa metálica que possui uma densidade superficial de cargas de $-2,0 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$. Se a energia cinética inicial do elétron é $1,60 \times 10^{-17} \text{ J}$ e o movimento do elétron muda de sentido (devido à repulsão eletrostática da placa) a uma distância insignificante da placa, de que distância da placa o elétron foi arremessado?

- 40** Na Fig. 23-44a um elétron é arremessado verticalmente para cima, com uma velocidade $v_s = 2,0 \times 10^5 \text{ m/s}$, a partir das vizinhanças de placa de plástico uniformemente carregada. A placa é não-condutora e muito extensa. A Fig. 23-44b mostra a velocidade escalar v em função do tempo t até o elétron voltar ao ponto de partida. Qual é a densidade superficial de cargas da placa?

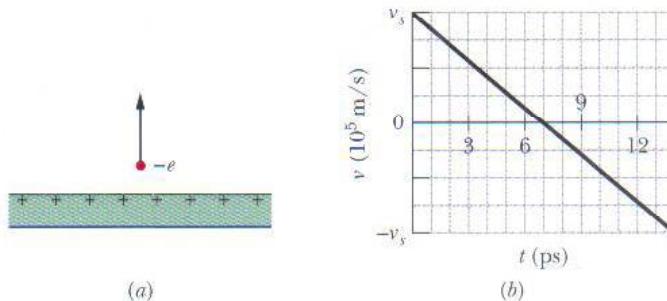


FIG. 23-44 Problema 40.

- 41** Na Fig. 23-45 uma pequena esfera não-condutora de massa $m = 1,0 \text{ mg}$ e carga $q = 2,0 \times 10^{-8} \text{ C}$ (distribuída uniformemente em todo o volume) está pendurada em um fio não-condutor que faz um ângulo $\theta = 30^\circ$ com uma placa vertical, não-condutora, uniformemente carregada (vista de perfil). Considerando a força gravitacional a que a esfera está sujeita e supondo que a placa possui uma grande extensão, calcule a densidade superficial de cargas σ da placa.

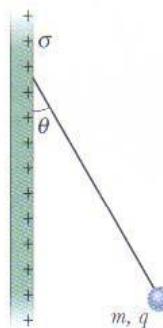


FIG. 23-45 Problema 41.

- 42** A Fig. 23-46 mostra uma placa não-condutora muito extensa que possui uma densidade superficial de cargas uniforme $\sigma = -2,00 \mu\text{C/m}^2$; a figura mostra também uma partícula de carga $Q = 6,00 \mu\text{C}$, a uma distância d da placa. Ambas estão fixas no lugar. Se $d = 0,200 \text{ m}$, para que coordenada (a) positiva e (b) negativa sobre o eixo x (além do infinito) o campo elétrico total \vec{E}_{tot}

é zero? (c) Se $d = 0,800\text{ m}$, para que coordenada sobre o eixo x o campo \vec{E}_{tot} é 0?

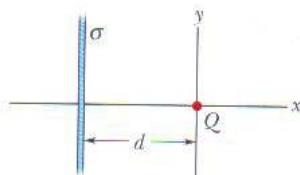


FIG. 23-46 Problema 42.

- 43 A Fig. 23-47 mostra uma seção reta de uma placa não-condutora muito extensa com uma espessura $d = 9,40\text{ mm}$ e uma densidade volumétrica de cargas uniforme $\rho = 5,80\text{ fC/m}^3$. A origem do eixo x está no centro da placa. Determine o módulo do campo elétrico (a) em $x = 0$; (b) em $x = 2,00\text{ mm}$; (c) em $x = 4,70\text{ mm}$; (d) em $x = 26,0\text{ mm}$.

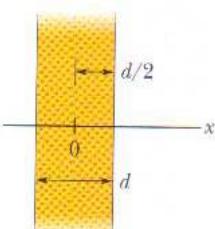


FIG. 23-47 Problema 43.

seção 23-9 Aplicando a Lei de Gauss: Simetria Esférica

- 44 Uma carga pontual produz um fluxo elétrico de $-750\text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}$ através de uma superfície esférica gaussiana de $10,0\text{ cm}$ de raio com centro na carga. (a) Se o raio da superfície gaussiana é multiplicado por dois, qual é o novo valor do fluxo? (b) Qual é o valor da carga pontual?

- 45 Uma esfera condutora com 10 cm de raio possui uma carga desconhecida. Se o campo elétrico a 15 cm do centro da esfera tem um módulo de $3,0 \times 10^3\text{ N/C}$ e aponta para o centro da esfera, qual é a carga da esfera?

- 46 A Fig. 23-48 mostra o módulo do campo elétrico do lado de dentro e do lado de fora de uma esfera com uma distribuição uniforme de cargas positivas em função da distância do centro da esfera. A escala do eixo vertical é definida por $E_s = 5,0 \times 10^7\text{ N/C}$. Qual é a carga da esfera?

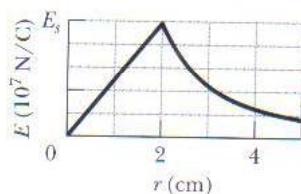


FIG. 23-48 Problema 46.

- 47 Duas cascas esféricas concêntricas carregadas têm raios de $10,0\text{ cm}$ e $15,0\text{ cm}$. A carga da casca menor é $4,00 \times 10^{-8}\text{ C}$, e a da casca maior é $2,00 \times 10^{-8}\text{ C}$. Determine o campo elétrico (a) em $r = 12,0\text{ cm}$; (b) em $r = 20,0\text{ cm}$.

- 48 A Fig. 23-49 mostra duas cascas esféricas não-condutoras mantidas fixas no lugar sobre o eixo x . A casca 1 possui uma densidade uniforme de cargas superficiais $+4,0\text{ }\mu\text{C/m}^2$ na superfície externa e um raio de $0,50\text{ cm}$, enquanto a casca 2 possui uma densidade uniforme de cargas superficiais $-2,0\text{ }\mu\text{C/m}^2$ na superfície externa e um raio de $2,00\text{ cm}$; a distância entre os centros é $L = 6,0\text{ cm}$. Determine o(s) ponto(s) sobre o eixo x (além do infinito) onde o campo elétrico é zero.

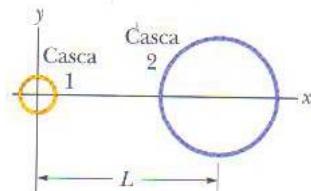


FIG. 23-49 Problema 48.

- 49 Na Fig. 23-50 uma casca esférica não-condutora com um raio interno $a = 2,00\text{ cm}$ e um raio externo $b = 2,40\text{ cm}$ possui uma densidade volumétrica uniforme de cargas positivas $\rho = A/r$, onde A é uma constante e r é a distância em relação ao centro da casca. Além disso, uma pequena esfera de carga $q = 45,0\text{ fC}$ está situada no centro da casca. Qual deve ser o valor de A para que o campo elétrico no interior da casca ($a \leq r \leq b$) seja uniforme?

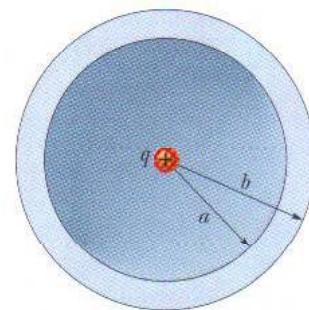


FIG. 23-50 Problema 49.

- 50 A Fig. 23-51 mostra uma casca esférica com uma densidade volumétrica de cargas uniforme $\rho = 1,84\text{ nC/m}^3$, raio interno $a = 10,0\text{ cm}$ e raio externo $b = 2,00a$. Determine o módulo do campo elétrico (a) em $r = 0$; (b) em $r = a/2,00$; (c) em $r = a$; (d) em $r = 1,50a$; (e) em $r = b$; (f) em $r = 3,00b$.

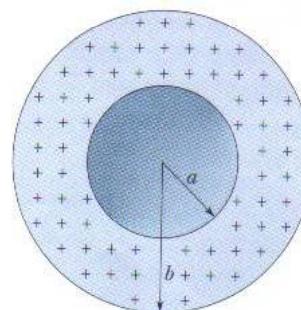


FIG. 23-51 Problema 50.

- 51 Na Fig. 23-52 uma esfera macia de raio $a = 2,00\text{ cm}$ é concêntrica com uma casca esférica condutora de raio interno

co. O trabalho realizado sobre uma carga de prova para deslocá-la de uma superfície equipotencial para outra não depende da localização dos pontos inicial e final nem da trajetória entre os pontos. O campo elétrico \vec{E} é sempre perpendicular à superfície equipotencial correspondente.

Cálculo de V a Partir de \vec{E} A diferença de potencial elétrico entre dois pontos i e f é

$$V_f - V_i = \int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{s}, \quad (24-18)$$

onde a integral é calculada ao longo de qualquer trajetória que comence no ponto i e termine no ponto f . Se tomamos como referência o potencial $V_i = 0$, o potencial em um ponto qualquer é dado por

$$V = - \int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{s}. \quad (24-19)$$

Potencial Produzido por Cargas Pontuais O potencial elétrico produzido por uma carga pontual a uma distância r da carga é dado por

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}, \quad (24-26)$$

onde V tem o sinal de q . O potencial produzido por um conjunto de cargas pontuais é dado por

$$V = \sum_{i=1}^n V_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i}. \quad (24-27)$$

Potencial Produzido por um Dipolo Elétrico A uma distância r de um dipolo elétrico com um momento dipolar elétrico $p = qd$, o potencial elétrico do dipolo é dado por

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p \cos \theta}{r^2} \quad (24-30)$$

para $r \gg d$; o ângulo θ é definido na Fig. 24-10.

Potencial Produzido por uma Distribuição Contínua de Cargas No caso de uma distribuição contínua de cargas, a Eq. 24-27 se torna

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r}, \quad (24-32)$$

onde a integral é calculada para toda a distribuição.

Cálculo de \vec{E} a Partir de V A componente de \vec{E} em qualquer direção é o negativo da taxa de variação do potencial com a distância na direção considerada:

$$E_s = - \frac{\partial V}{\partial s}. \quad (24-40)$$

As componentes x , y e z de \vec{E} são dadas por

$$E_x = - \frac{\partial V}{\partial x}; \quad E_y = - \frac{\partial V}{\partial y}; \quad E_z = - \frac{\partial V}{\partial z}. \quad (24-41)$$

Se \vec{E} é uniforme, a Eq. 24-40 se reduz a

$$E = - \frac{\Delta V}{\Delta s}, \quad (24-42)$$

onde s é a direção perpendicular às superfícies equipotenciais. O campo elétrico é zero na direção paralela às superfícies equipotenciais.

Energia Potencial Elétrica de um Sistema de Cargas Pontuais A energia potencial elétrica de um sistema de cargas pontuais é igual ao trabalho necessário para montar o sistema com as cargas inicialmente em repouso e a uma distância infinitaumas das outras. Para duas cargas separadas por uma distância r ,

$$U = W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r}. \quad (24-43)$$

Potencial de um Condutor Carregado Em equilíbrio, toda a carga em excesso de um condutor está concentrada na superfície externa do condutor. A carga se distribui de tal forma que o potencial é o mesmo em todos os pontos do condutor.

PERGUNTAS

- 1 A Fig. 24-21 mostra quatro pares de partículas carregadas. Para cada par, faça $V = 0$ no infinito e considere V_{tot} em pontos sobre o eixo x . Para que pares existe um ponto no qual $V_{\text{tot}} = 0$? (a) entre as partículas e (b) à direita das partículas? (c) Nos pontos dos itens (a) e (b) \vec{E}_{tot} também é zero? (d) Para cada par, existem pontos fora do eixo x (além de pontos no infinito) para os quais $V_{\text{tot}} = 0$?

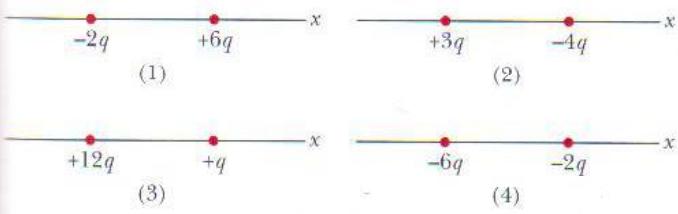


FIG. 24-21 Perguntas 1 e 7.

- 2 A Fig. 24-22 mostra quatro arranjos de partículas carregadas, todas à mesma distância da origem. Ordene os arranjos de acordo com o potencial na origem, começando pelo mais positivo. Tome o potencial como sendo zero no infinito.

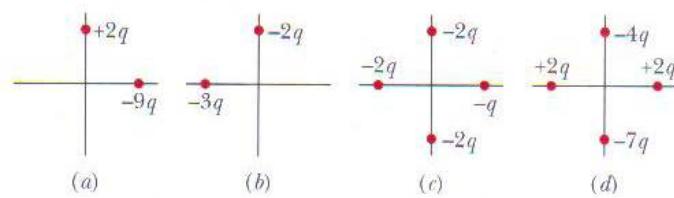


FIG. 24-22 Pergunta 2.

- 3 Na Fig. 24-23, oito partículas formam um quadrado, com uma distância d entre as partículas vizinhas. Qual é o potencial P no centro do quadrado se o potencial é zero no infinito?

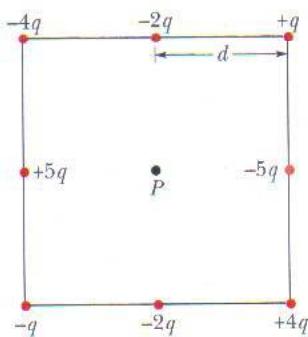


FIG. 24-23 Pergunta 3.

- 4 A Fig. 24-24 mostra três conjuntos de superfícies eqüipotenciais vistas de perfil; os três conjuntos cobrem a mesma região do espaço. (a) Ordene os conjuntos de acordo com o módulo do campo elétrico existente na região, começando pelo maior. (b) Em que conjunto o campo elétrico aponta para baixo?

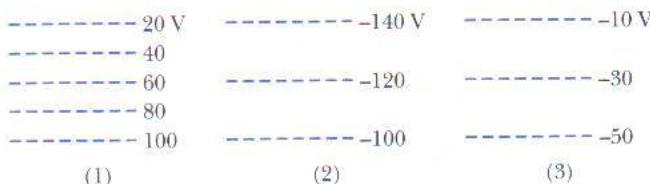


FIG. 24-24 Pergunta 4.

- 5 A Fig. 24-25 mostra três trajetórias ao longo das quais podemos deslocar a esfera A, positivamente carregada, aproximando-a da esfera B, também positivamente carregada, que é mantida fixa no lugar. (a) O potencial da esfera A é maior ou menor após o deslocamento? O trabalho realizado (b) pela força usada para deslocar a esfera A e (c) pelo campo elétrico produzido pela esfera B é positivo, negativo ou nulo? (d) Ordene as trajetórias de acordo com o trabalho realizado pela força do item (b), começando pelo maior.

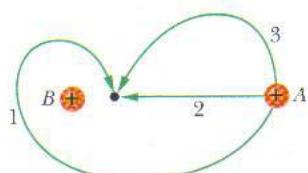


FIG. 24-25 Pergunta 5.

- 6 A Fig. 24-26 mostra o potencial elétrico V em função de x . (a) Ordene as cinco regiões de acordo com o valor absoluto da componente x do campo elétrico, começando pelo maior. Qual o sentido do campo elétrico (b) na região 2? (c) na região 4?

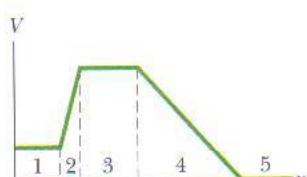


FIG. 24-26 Pergunta 6.

- 7 A Fig. 24-21 mostra quatro pares de partículas carregadas com a mesma separação. (a) Ordene os pares de acordo com a energia potencial elétrica, começando pela maior (mais positiva). (b) Para cada par, se a distância entre as partículas aumenta, a energia potencial do par aumenta ou diminui?

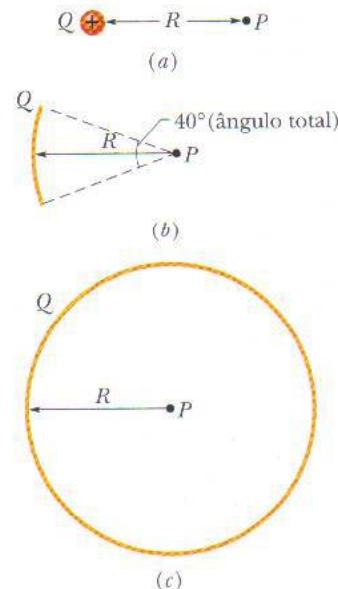


FIG. 24-27 Pergunta 8.

- 8 (a) Na Fig. 24-27a, qual é o potencial no ponto P devido à carga Q situada a uma distância R de P ? Tome $V = 0$ no infinito. (b) Na Fig. 24-27b, a mesma carga Q foi distribuída uniformemente em um arco de circunferência de raio R e ângulo central 40° . Qual é o potencial no ponto P , o centro de curvatura do arco? (c) Na Fig. 24-27c, a mesma carga Q foi distribuída uniformemente em uma circunferência de raio R . Qual é o potencial no ponto P , o centro da circunferência? (d) Ordene as três situações de acordo com o módulo do campo elétrico no ponto P , começando pelo maior.

- 9 A Fig. 24-28 mostra um conjunto de três partículas carregadas. Se a partícula de carga $+q$ é deslocada por uma força externa do ponto A para o ponto D , determine se as grandezas a seguir são positivas, negativas ou nulas: (a) a variação da energia potencial elétrica; (b) o trabalho realizado pela força eletrostática sobre a partícula que foi deslocada; (c) o trabalho realizado pela força externa. (d) Quais são as respostas dos itens (a), (b) e (c) se a partícula é deslocada do ponto B para o ponto C ?

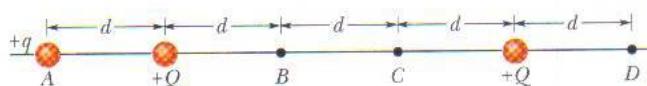


FIG. 24-28 Perguntas 9 e 10.

- 10 Na situação da Pergunta 9, determine se o trabalho realizado pela força externa é positivo, negativo ou nulo se a partícula é deslocada (a) de A para B ; (b) de B para C ; (c) de B para D . (d) Ordene esses deslocamentos de acordo com o trabalho realizado pela força externa, começando pelo maior.

PROBLEMAS

• • • O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

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

seção 24-3 Potencial Elétrico

•1 Boa parte do material dos anéis de Saturno está na forma de pequenos grãos de poeira com raios da ordem de 10^{-6} m. Esses grãos se encontram em uma região onde existe um gás ionizado rarefeito e podem acumular elétrons em excesso. Suponha que os grãos são esféricos, com um raio $R = 1,0 \times 10^{-6}$ m. Quantos elétrons um grão teria que recolher para adquirir um potencial de -400 V na superfície? (Tome $V = 0$ no infinito.)

•2 A diferença de potencial elétrico entre a terra e uma nuvem de tempestade é $1,2 \times 10^9$ V. Qual é o módulo da variação da energia potencial elétrica de um elétron que se desloca da nuvem para a terra? Expressse a resposta em elétrons-volts.

•3 Uma certa bateria de automóvel de 12 V pode fazer passar uma carga de $84 \text{ A} \cdot \text{h}$ (ampéres-horas) por um circuito, de um terminal para o outro da bateria. (a) A quantos coulombs corresponde essa quantidade de carga? (Sugestão: Veja a Eq. 21-3.) (b) Se toda essa carga sofre uma variação de potencial elétrico de 12 V, qual é a energia envolvida?

seção 24-5 Cálculo do Potencial a Partir do Campo

•4 Na Fig. 24-29, quando um elétron se desloca de A a B ao longo de uma linha de campo elétrico esse campo realiza um trabalho de $3,94 \times 10^{-19}$ J. Quais são as diferenças de potencial elétrico (a) $V_B - V_A$; (b) $V_C - V_A$; (c) $V_C - V_B$?

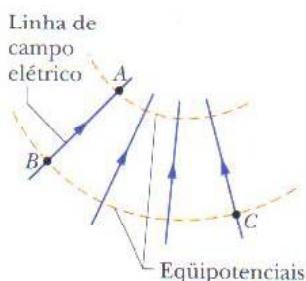


FIG. 24-29 Problema 4.

•5 Uma placa infinita não-condutora possui uma densidade superficial de cargas $\sigma = 0,10 \mu\text{C}/\text{m}^2$ em uma das faces. Qual é a distância entre duas superfícies eqüipotenciais cujos potenciais diferem de 50 V?

•6 Duas placas paralelas condutoras de grande extensão estão separadas por uma distância de 12 cm e possuem densidades superficiais de cargas de mesmo valor absoluto e sinais opostos nas faces internas. Uma força eletrostática de $3,9 \times 10^{-15}$ N age sobre um elétron colocado na região entre as duas placas. (Despreze o efeito de borda.) (a) Determine o campo elétrico na posição do elétron. (b) Determine a diferença de potencial entre as placas.

•7 Uma placa não-condutora infinita possui uma densidade superficial de cargas $\sigma = +5,80 \text{ pC}/\text{m}^2$. (a) Qual é o trabalho realizado pelo campo elétrico produzido pela placa se uma partícula de carga $q = +1,60 \times 10^{-19}$ C é deslocada da superfície da placa para um ponto P situado a uma distância $d = 3,56$ cm da superfície?

cie da placa? (b) Se o potencial elétrico V é definido como sendo zero na superfície da placa, qual é o valor de V no ponto P ?

•8 A Fig. 24-30 mostra um gráfico da componente x do campo elétrico em função de x em uma certa região do espaço. A escala do eixo vertical é definida por $E_{xs} = 20,0 \text{ N/C}$. As componentes y e z do campo elétrico são nulas nessa região. Se o potencial elétrico na origem é 10 V, (a) qual é o potencial elétrico em $x = 2,0$ m? (b) Qual é o maior valor positivo do potencial elétrico em pontos do eixo x para os quais $0 \leq x \leq 6,0$ m? (c) Para que valor de x o potencial elétrico é zero?

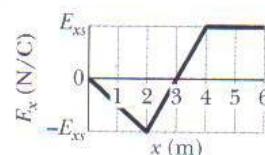


FIG. 24-30 Problema 8.

•9 O campo elétrico em uma certa região do espaço tem componentes $E_y = E_z = 0$ e $E_x = (4,00 \text{ N/C})x$. O ponto A está sobre o eixo y e em $y = 3,00$ m e o ponto B está sobre o eixo x em $x = 4,00$ m. Qual é a diferença de potencial $V_B - V_A$?

•10 Dois planos infinitos, não-condutores, uniformemente carregados, são paralelos ao plano yz e posicionados em $x = -50$ cm e $x = +50$ cm. As densidades de cargas dos planos são -50 nC/m^2 e $+25 \text{ nC/m}^2$, respectivamente. Qual é o valor absoluto da diferença de potencial entre a origem e o ponto sobre o eixo x em $x = +80$ cm? (Sugestão: Use a lei de Gauss.)

•11 Uma esfera não-condutora tem raio $R = 2,31$ cm e uma carga uniformemente distribuída $q = +3,50 \text{ fC}$. Tome o potencial elétrico no centro da esfera como sendo $V_0 = 0$. Determine o valor de V (a) para uma distância radial $r = 1,45$ cm; (b) para $r = R$. (Sugestão: Veja a Séção 23-9.)

seção 24-7 Potencial Produzido por um Grupo de Cargas Pontuais

•12 Considere uma carga pontual $q = 1,0 \mu\text{C}$, o ponto A a uma distância $d_1 = 2,0$ m de q e o ponto B a uma distância $d_2 = 1,0$ m de q . (a) Se A e B estão diametralmente opostos, como na Fig. 24-31a, qual é a diferença de potencial elétrico $V_A - V_B$? (b) Qual é a diferença de potencial elétrico se A e B estão localizados como na Fig. 24-31b?

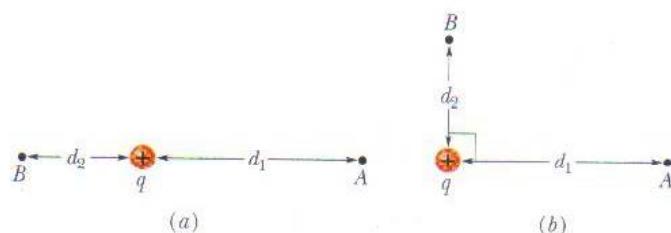


FIG. 24-31 Problema 12.

•13 Determine (a) a carga e (b) a densidade superficial de cargas de uma esfera condutora de 0,15 m de raio cujo potencial é 200 V (tomando $V = 0$ no infinito).

•14 Quando o ônibus espacial atravessa a ionosfera da Terra, formada por gases rarefeitos e ionizados, o potencial da nave varia de aproximadamente $-1,0$ V a cada revolução. Supondo que o ônibus espacial é uma esfera com 10 m de raio, estime a carga elétrica recolhida a cada revolução.

•15 Na Fig. 24-32, qual é o potencial elétrico no ponto P devido às quatro partículas se $V = 0$ no infinito, $q = 5,00 \text{ fC}$ e $d = 4,00 \text{ cm}$?

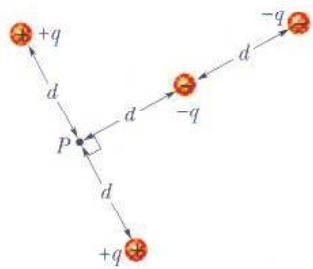


FIG. 24-32 Problema 15.

•16 Na Fig. 24-33, duas partículas, de cargas q_1 e q_2 , estão separadas por uma distância d . O campo elétrico produzido em conjunto pelas duas partículas é zero em $x = d/4$. Com $V = 0$ no infinito, determine (em termos de d) o(s) ponto(s) sobre o eixo x (além do infinito) em que o potencial elétrico é zero.

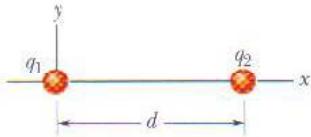


FIG. 24-33 Problemas 16, 17 e 91.

•17 Na Fig. 24-33, partículas de cargas $q_1 = +5e$ e $q_2 = -15e$ são mantidas fixas no lugar, separadas por uma distância $d = 24,0 \text{ cm}$. Tomando $V = 0$ no infinito, determine o valor de x (a) positivo e (b) negativo para o qual o potencial elétrico sobre o eixo x é zero.

•18 A Fig. 24-34 mostra um arranjo retangular de partículas carregadas mantidas fixas no lugar, com $a = 39,0 \text{ cm}$ e as cargas indicadas como múltiplos inteiros de $q_1 = 3,40 \text{ pC}$ e $q_2 = 6,00 \text{ pC}$. Com $V = 0$ no infinito, qual é o potencial elétrico no centro do retângulo? (Sugestão: Examinando o problema com atenção é possível reduzir consideravelmente os cálculos.)

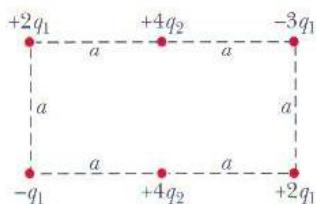


FIG. 24-34 Problema 18.

•19 Uma gota d'água esférica com uma carga de 30 pC tem um potencial de 500 V na superfície (com $V = 0$ no infinito). (a)

Qual é o raio da gota? (b) Se duas gotas de mesma carga e raio se combinam para formar uma gota esférica, qual é o potencial na superfície da nova gota?

•20 A Fig. 24-35a mostra duas partículas carregadas. A partícula 1, de carga q_1 , é mantida fixa no lugar a uma distância d da origem. A partícula 2, de carga q_2 , pode ser deslocada ao longo do eixo x . A Fig. 24-35b mostra o potencial elétrico V na origem em função da coordenada x da partícula 2. A escala do eixo x é definida por $x_s = 16,0 \text{ cm}$. O gráfico tende assintoticamente para $V = 5,76 \times 10^{-7} \text{ V}$ quando $x \rightarrow \infty$. Qual é o valor de q_2 em termos de e ?

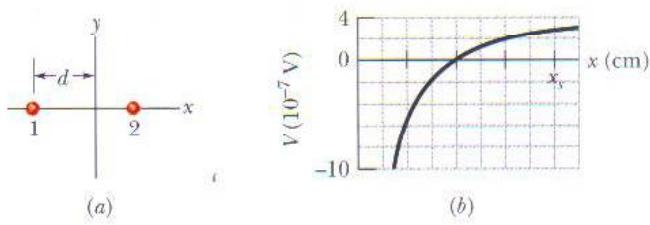


FIG. 24-35 Problema 20.

seção 24-8 Potencial Produzido por um Dipolo Elétrico

•21 A molécula de amoníaco (NH_3) possui um dipolo elétrico permanente de $1,47 \text{ D}$, onde $1 \text{ D} = 1 \text{ debye} = 3,34 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}$. Calcule o potencial elétrico produzido por uma molécula de amoníaco em um ponto sobre o eixo do dipolo a uma distância de $52,0 \text{ nm}$. (Tome $V = 0$ no infinito.)

•22 Na Fig. 24-36a, uma partícula de carga $+e$ está inicialmente no ponto $z = 20 \text{ nm}$, sobre o eixo de um dipolo elétrico, do lado positivo do dipolo. (A origem do eixo z é o centro do dipolo.) A partícula é deslocada em uma trajetória circular em torno do centro do dipolo até a coordenada $z = -20 \text{ nm}$. A Fig. 24-36b mostra o trabalho W_a realizado pela força responsável pelo deslocamento da partícula em função do ângulo θ que define a localização da partícula. A escala do eixo vertical é definida por $W_{as} = 4,0 \times 10^{-30} \text{ J}$. Qual é o módulo do momento do dipolo?

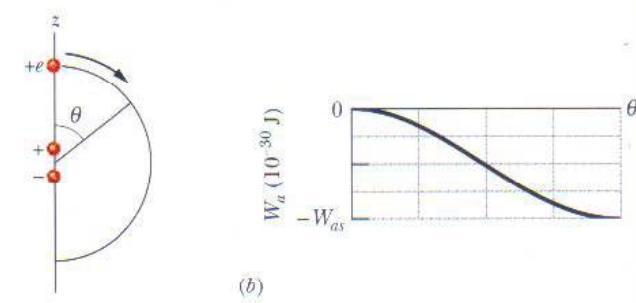


FIG. 24-36 Problema 22.

seção 24-9 Potencial Produzido por uma Distribuição Contínua de Cargas

•23 Uma barra de plástico tem a forma de um círculo de raio $R = 8,20 \text{ cm}$. A barra possui uma carga $Q_1 = +4,20 \text{ pC}$ uniformemente distribuída ao longo de um quarto de círculo e uma carga $Q_2 = -6Q_1$ distribuída uniformemente ao longo do resto da circunferência (Fig. 24-37). Com $V = 0$ no infinito, determine o potencial elétrico (a) no centro C da circunferência; (b) no ponto P , que está sobre o eixo central da circunferência a uma distância $D = 6,71 \text{ cm}$ do centro.

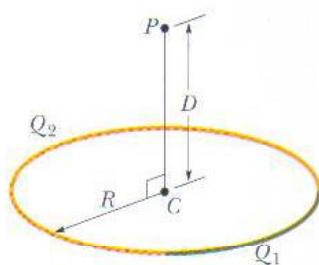


FIG. 24-37 Problema 23.

- 24** Na Fig. 24-38, uma barra de plástico com uma carga uniformemente distribuída $Q = -25,6 \text{ pC}$ tem a forma de um arco de circunferência de raio $R = 3,71 \text{ cm}$ e ângulo central $\phi = 120^\circ$. Com $V = 0$ no infinito, qual é o potencial elétrico no ponto P , o centro de curvatura da barra?

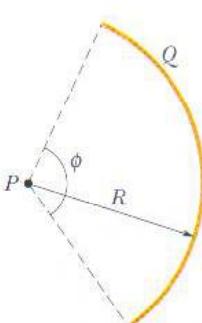


FIG. 24-38 Problema 24.

- 25** (a) A Fig. 24-39a mostra uma barra não-condutora de comprimento $L = 6,00 \text{ cm}$ e densidade linear de cargas positivas uniforme $\lambda = +3,68 \text{ pC/m}$. Tome $V = 0$ no infinito. Qual é o valor de V no ponto P situado a uma distância $d = 8,00 \text{ cm}$ acima do ponto médio da barra? (b) A Fig. 24-39b mostra uma barra idêntica à do item (a), exceto pelo fato de que a metade da direita agora está carregada negativamente; o valor absoluto da densidade linear de cargas continua a ser $3,68 \text{ pC/m}$ em toda a barra. Com $V = 0$ no infinito, qual é o valor de V no ponto P ?



FIG. 24-39 Problema 25.

- 26** Uma esfera gaussiana de $4,00 \text{ cm}$ de raio envolve uma esfera de $1,00 \text{ cm}$ de raio que contém uma distribuição uniforme de cargas. As duas esferas são concêntricas e o fluxo elétrico através da superfície da esfera gaussiana é $+5,60 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$. Qual é o potencial elétrico a $12,0 \text{ cm}$ do centro das esferas?

- 27** Na Fig. 24-40, determine o potencial elétrico produzido na origem por um arco de circunferência de carga $Q_1 = +7,21 \text{ pC}$ e duas partículas de cargas $Q_2 = 4,00Q_1$ e $Q_3 = -2,00Q_1$. O centro de curvatura do arco está na origem, o raio do arco é $R = 2,00 \text{ m}$ e o ângulo indicado é $\theta = 20,0^\circ$.

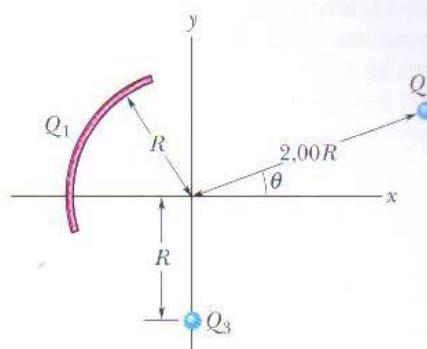


FIG. 24-40 Problema 27.

- 28** O rosto soridente da Fig. 24-41 é formado por três elementos:

1. uma barra fina com uma carga de $-3,0 \mu\text{C}$ e a forma de uma circunferência completa com $6,0 \text{ cm}$ de raio;
2. uma segunda barra fina com uma carga de $2,0 \mu\text{C}$ e a forma de um arco de circunferência com $4,0 \text{ cm}$ de raio, concêntrico com o primeiro elemento, que subtende um ângulo de 90° ;
3. um dipolo elétrico com um momento dipolar na direção perpendicular ao diâmetro do primeiro elemento que passa pelo centro do segundo elemento, cujo módulo é $1,28 \times 10^{-21} \text{ C} \cdot \text{m}$.

Determine o potencial elétrico no centro da circunferência.

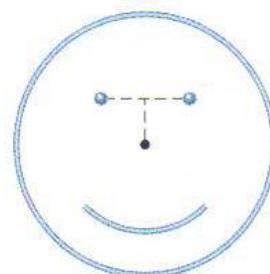


FIG. 24-41 Problema 28.

- 29** Um disco de plástico de raio $R = 64,0 \text{ cm}$ é carregado na face superior com uma densidade superficial de cargas uniforme $\sigma = 7,73 \text{ fC/m}^2$ e, em seguida, três quadrantes do disco são removidos. A Fig. 24-42 mostra o quadrante remanescente. Com $V = 0$ no infinito, qual é o potencial produzido pelo quadrante remanescente no ponto P , que está sobre o eixo central do disco original?

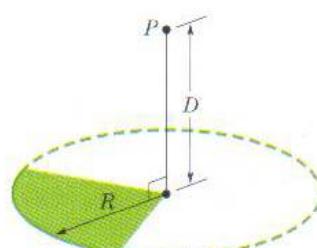


FIG. 24-42 Problema 29.

- 30** A Fig. 24-43 mostra uma barra fina de plástico sobre o eixo x . A barra tem um comprimento $L = 12,0$ cm e uma carga positiva uniforme $Q = 56,1$ fC uniformemente distribuída. Com $V = 0$ no infinito, determine o potencial elétrico no ponto P_1 sobre o eixo x , a uma distância $d = 2,50$ cm de uma das extremidades da barra.

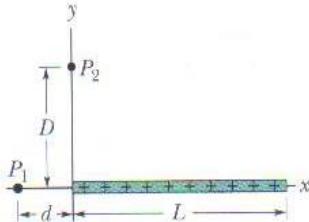


FIG. 24-43 Problemas 30, 33, 38 e 40.

- 31** Na Fig. 24-44, três barras finas de plástico têm a forma de quadrantes de circunferência com o mesmo centro de curvatura, situado na origem. As cargas uniformes das barras são $Q_1 = +30$ nC, $Q_2 = +3,0Q_1$ e $Q_3 = -8,0Q_1$. Determine o potencial elétrico na origem.

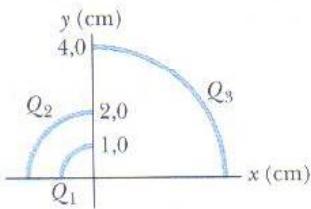


FIG. 24-44 Problema 31.

- 32** Uma distribuição linear de cargas não-uniforme dada por $\lambda = bx$, onde b é uma constante, está situada sobre o eixo x , entre $x = 0$ e $x = 0,20$ m. Se $b = 20$ nC/m² e $V = 0$ no infinito, determine o potencial elétrico (a) na origem; (b) no ponto $y = 0,15$ m, sobre o eixo y .

- 33** A barra fina de plástico que aparece na Fig. 24-43 tem um comprimento $L = 12,0$ cm e uma densidade linear de cargas não-uniforme $\lambda = cx$, onde $c = 28,9$ pC/m². Com $V = 0$ no infinito, determine o potencial elétrico no ponto P_1 sobre o eixo x , a uma distância $d = 3,00$ cm de uma das extremidades.

seção 24-10 Cálculo do Campo Elétrico a Partir do Potencial

- 34** O potencial elétrico V no espaço entre duas placas paralelas, 1 e 2, é dado (em volts) por $V = 1500x^2$, onde x (em metros) é a distância perpendicular em relação à placa 1. Para $x = 1,3$ cm, (a) determine o módulo do campo elétrico; (b) o campo elétrico aponta para a placa 1 ou na direção oposta?

- 35** O potencial elétrico no plano xy é dado por $V = (2,0 \text{ V/m}^2)x^2 - (3,0 \text{ V/m}^2)y^2$. Em termos dos vetores unitários, qual é o campo elétrico no ponto $(3,0 \text{ m}; 2,0 \text{ m})$?

- 36** Duas placas metálicas paralelas, de grande extensão, são mantidas a uma distância de 1,5 cm e possuem cargas de mesmo valor absoluto e sinais opostos nas superfícies internas. Tome o potencial da placa negativa como sendo zero. Se o potencial a meio caminho entre as placas é +5,0 V, qual é o campo elétrico na região entre as placas?

- 37** Um elétron é colocado no plano xy , onde o potencial elétrico varia com x e y de acordo com os gráficos da Fig. 24-45 (o potencial não depende de z). Em termos dos vetores unitários, qual é a força a que é submetido o elétron?

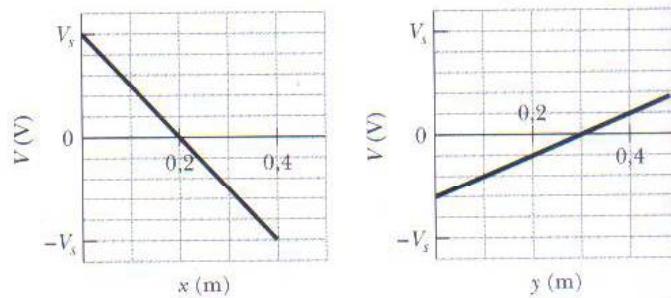


FIG. 24-45 Problema 37.

- 38** A Fig. 24-43 mostra uma barra fina de plástico de comprimento $L = 13,5$ cm e uma carga de $43,6$ fC uniformemente distribuída. (a) Determine uma expressão para o potencial elétrico no ponto P_1 em função da distância d . (b) Substitua d pela variável x e determine uma expressão para o módulo da componente E_x do campo elétrico no ponto P_1 . (c) Qual é o sentido de E_x em relação ao sentido positivo do eixo x ? (d) Qual é o valor de E_x no ponto P_1 para $x = d = 6,20$ cm? (e) Determine o valor de E_y no ponto P_1 a partir da simetria da Fig. 24-43.

- 39** Qual é o módulo do campo elétrico no ponto $(3,00\hat{i} - 2,00\hat{j} + 4,00\hat{k})$ m se o potencial elétrico é dado por $V = 2,00xyz^2$, onde V está em volts e x , y e z em metros?

- 40** A barra fina de plástico da Fig. 24-43 tem um comprimento $L = 10,0$ cm e uma densidade linear de cargas não-uniforme $\lambda = cx$, onde $c = 49,9$ pC/m. (a) Com $V = 0$ no infinito, determine o potencial elétrico no ponto P_2 , situado sobre o eixo y , em $y = D = 3,56$ cm. (b) Determine a componente do campo elétrico E_y no ponto P_2 . (c) Por que a componente E_x do campo em P_2 não pode ser calculada usando o resultado do item (a)?

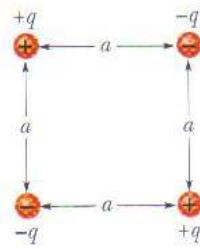


FIG. 24-46 Problema 41.

seção 24-11 Energia Potencial Elétrica de um Sistema de Cargas Pontuais

- 41** Qual é o trabalho necessário para montar o arranjo da Fig. 24-46 se $q = 2,30$ pC, $a = 64,0$ cm e as partículas estão inicialmente em repouso e infinitamente afastadasumas das outras?

- 42** Na Fig. 24-47, sete partículas carregadas são mantidas fixas no lugar para formar um quadrado com 4,0 cm de lado. Qual é o trabalho necessário para deslocar para o centro do quadrado uma partícula de carga $+6e$ inicialmente em repouso a uma distância infinita?

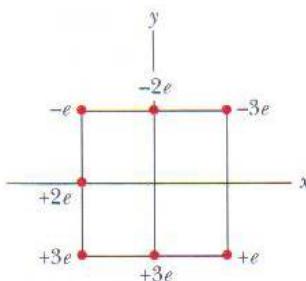


FIG. 24-47 Problema 42.

••43 Uma partícula de carga $+7,5 \mu\text{C}$ é liberada a partir do repouso sobre o eixo x , no ponto $x = 60 \text{ cm}$. A partícula começa a se mover devido à presença de uma carga Q que é mantida fixa na origem. Qual é a energia cinética da partícula após se deslocar 40 cm (a) se $Q = +20 \mu\text{C}$; (b) se $Q = -20 \mu\text{C}$?

••44 (a) Qual é a energia potencial elétrica de dois elétrons separados por uma distância de $2,00 \text{ nm}$? (b) Se a distância diminui, a energia potencial aumenta ou diminui?

••45 No retângulo da Fig. 24-48, os comprimentos dos lados são $5,0 \text{ cm}$ e 15 cm , $q_1 = -5,0 \mu\text{C}$ e $q_2 = +2,0 \mu\text{C}$. Com $V = 0$ no infinito, determine o potencial elétrico (a) no vértice A ; (b) no vértice B . (c) Determine o trabalho necessário para deslocar uma carga $q_3 = +3,0 \mu\text{C}$ de B para A ao longo da diagonal do retângulo. (d) Este trabalho faz a energia potencial elétrica do sistema de três partículas aumentar ou diminuir? O trabalho é maior, menor ou igual se a carga q_3 é deslocada ao longo de uma trajetória (e) no interior do retângulo, mas que não coincide com a diagonal; (f) fora do retângulo?



FIG. 24-48 Problema 45.

••46 Na Fig. 24-49, determine o trabalho necessário para deslocar uma partícula de carga $Q = +16e$, inicialmente em repouso, ao longo da reta tracejada, do infinito até o ponto indicado, nas proximidades de duas partículas fixas de cargas $q_1 = +4e$ e $q_2 = -q_1/2$. Suponha que $d = 1,40 \text{ cm}$, $\theta_1 = 43^\circ$ e $\theta_2 = 60^\circ$.

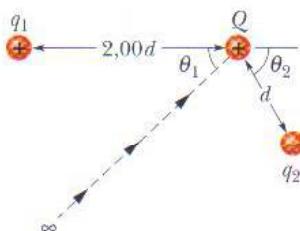


FIG. 24-49 Problema 46.

••47 Uma partícula de carga q é mantida fixa no ponto P e uma segunda partícula de massa m , com a mesma carga q , é mantida inicialmente a uma distância r_1 de P . A segunda partícula é liberada. Determine a velocidade da segunda partícula quando se encontra a uma distância r_2 do ponto P . Suponha que $q = 3,1 \mu\text{C}$, $m = 20 \text{ mg}$, $r_1 = 0,90 \text{ mm}$ e $r_2 = 2,5 \text{ mm}$.

••48 Uma carga de $-9,0 \text{ nC}$ está distribuída uniformemente em um anel fino de plástico situado no plano yz , com o centro do anel na origem. Uma carga pontual de $-6,0 \text{ pC}$ está situada sobre o eixo x , no ponto $x = 3,0 \text{ m}$. Se o raio do anel é $1,5 \text{ m}$, qual deve ser o trabalho executado por uma força externa sobre a carga pontual para deslocá-la até a origem?

••49 Qual é a *velocidade de escape* de um elétron inicialmente em repouso na superfície de uma esfera com $1,0 \text{ cm}$ de raio e uma carga uniformemente distribuída de $1,6 \times 10^{-15} \text{ C}$? Em outras palavras, qual deve ser a velocidade inicial de um elétron para chegar a uma distância infinita da esfera com energia cinética zero?

••50 Uma casca fina, esférica, condutora de raio R é montada em um suporte isolado e carregada até atingir um potencial de -125 V . Em seguida, um elétron é disparado na direção do centro da casca a partir do ponto P , situado a uma distância r do centro da casca ($r \gg R$). Qual deve ser a velocidade inicial v_0 do elétron para que chegue a uma distância insignificante da casca antes de parar e inverter o movimento?

••51 Duas pequenas esferas metálicas A e B , de massas $m_A = 5,00 \text{ g}$ e $m_B = 10,0 \text{ g}$, possuem a mesma carga positiva $q = 5,00 \mu\text{C}$. As esferas estão ligadas por um fio não-condutor de massa insignificante e comprimento $d = 1,99 \text{ m}$ que é muito maior que os raios das esferas. (a) Qual é a energia potencial elétrica do sistema? (b) Suponha que o fio seja cortado. Qual é a aceleração de cada esfera nesse instante? (c) Qual é a aceleração de cada esfera muito tempo depois de o fio ter sido cortado?

••52 A Fig. 24-50a mostra três partículas sobre o eixo x . A partícula 1 (com uma carga de $+5,0 \mu\text{C}$) e a partícula 2 (com uma carga de $+3,0 \mu\text{C}$) são mantidas fixas no lugar, separadas por uma distância $d = 4,0 \text{ cm}$. A partícula 3 pode ser deslocada ao longo do eixo x , à direita da partícula 2. A Fig. 24-50b mostra a energia potencial elétrica U do sistema de três partículas em função da coordenada x da partícula 3. A escala do eixo vertical é definida por $U_s = 5,0 \text{ J}$. Qual é a carga da partícula 3?

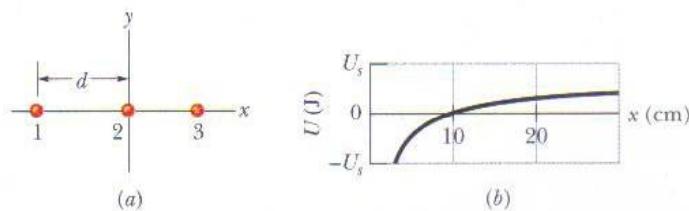


FIG. 24-50 Problema 52.

••53 Dois elétrons são mantidos fixos, separados por uma distância de $2,0 \text{ cm}$. Outro elétron é arremessado a partir do infinito e pára no ponto médio entre os dois elétrons. Qual é a velocidade inicial do terceiro elétron?

••54 Um próton em um poço de potencial. A Fig. 24-51 mostra o potencial elétrico V ao longo de um eixo x . A escala do eixo vertical é definida por $V_s = 10,0 \text{ V}$. Um próton é liberado no ponto $x = 3,5 \text{ cm}$ com uma energia cinética inicial de $4,00 \text{ eV}$. (a) Se o próton está se movendo inicialmente no sentido negativo do eixo x , ele chega a um ponto de retorno (se a resposta for afirmativa, determine a coordenada x do ponto) ou escapa da região mostrada no gráfico (se a resposta for afirmativa, determine a velocidade no ponto $x = 0$)? (b) Se o próton está se movendo inicialmente no sentido positivo do eixo x , ele chega a um ponto de retorno (se a resposta for afirmativa, determine a coordenada x do ponto) ou escapa da região mostrada no gráfico (se a resposta for afirmativa,