Respostas das Checagens Conceituais

23-1 A variação no potencial é zero se você mover em uma direção perpendicular à direção de $\vec{E}$.

23-2 O potencial aumenta a uma taxa máxima com relação à distância se você mover no sentido oposto ao de $\vec{E}$.

Respostas dos Problemas Práticos

23-1 Potencial aumentando

23-2 $V(x) = -(5\ \text{V/m}^2)x^2$

23-3 $-4{,}35 \times 10^{-18}\ \text{J}$

23-4 (*a*) o plano $x = 4{,}0$ m, (*b*) $V = -(25\ \text{V/m})x$

23-5 $3{,}7 \times 10^{-6}\ \text{J}$

23-6 $$V = \text{sign}\,(z) \cdot 2\pi k\sigma\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (R^2/z^2)}}\right)$$

23-7 $5{,}39 \times 10^5\ V = 539\ \text{kV}$

23-8 $V(r) = kQ/r - kQ/R$ para $r \geq R$;
$V(r) = \frac{1}{2}(kQ/R)(1 - r^2/R^2)$ para $r \leq R$

23-9 $1.5 \times 10^{-5}\ \text{C}, 5{,}5 \times 10^5\ \text{V}$

23-10 (*a*) $4\sqrt{2}kq^2/a$, (*b*) $(4 + 5\sqrt{2})kq^2/a$

Problemas

Em alguns problemas, você recebe mais dados do que necessita; em alguns outros, você deve acrescentar dados de seus conhecimentos gerais, fontes externas ou estimativas bem fundamentadas.

Interprete como significativos todos os algarismos de valores numéricos que possuem zeros em seqüência sem vírgulas decimais.

• Um só conceito, um só passo, relativamente simples
•• Nível intermediário, pode requerer síntese de conceitos
••• Desafiante, para estudantes avançados
Problemas consecutivos sombreados são problemas pareados.

PROBLEMAS CONCEITUAIS

1 • Um próton é deslocado para a esquerda em um campo elétrico uniforme que aponta para a direita. O próton está se movendo no sentido que o potencial aumenta ou diminui? A energia potencial eletrostática do próton está aumentando ou diminuindo?

2 • Um elétron é deslocado para a esquerda em um campo elétrico uniforme que aponta para a direita. O elétron está se movendo no sentido que o potencial aumenta ou diminui? A energia potencial eletrostática do elétron está aumentando ou diminuindo?

3 • Se o potencial elétrico é uniforme em uma região do espaço, o que pode ser dito sobre o campo elétrico nesta região?

4 • Se V é conhecido em um único ponto no espaço, $\vec{E}$ pode ser determinado naquele ponto? Explique sua resposta.

5 •• A Figura 23-29 mostra uma partícula puntiforme com carga positiva $+Q$ e uma esférica metálica com carga $-Q$. Represente as linhas de campo elétrico e as superfícies eqüipotenciais para este sistema de cargas.

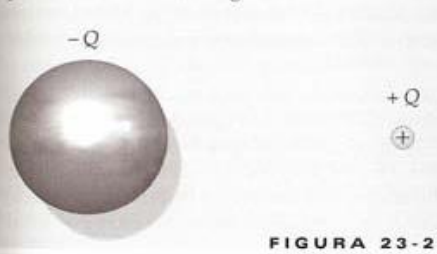

FIGURA 23-29 Problema 5

6 •• A Figura 23-30 mostra uma partícula puntiforme de carga negativa $-Q$ e uma esférica metálica com carga $+Q$. Represente as linhas de campo elétrico e as superfícies eqüipotenciais para este sistema de cargas.

FIGURA 23-30 Problema 6

7 •• Represente as linhas de campo elétrico e as superfícies eqüipotenciais para a região em torno do condutor carregado mostrado na Figura 23-31, considerando que ele tenha uma carga resultante positiva.

FIGURA 23-31 Problema 7

8 •• Duas cargas puntiformes positivas estão separadas por uma distância finita. Represente as linhas de campo elétrico e as superfícies eqüipotenciais para este sistema.

9 •• Duas cargas puntiformes estão fixas no eixo x. (*a*) Cada uma tem carga positiva q. Uma está em $x = -a$ e a outra em $x = +a$. Na origem, qual das seguintes opções é verdadeira?
(1) $\vec{E} = 0$ e $V = 0$
(2) $\vec{E} = 0$ e $V = 2kq/a$
(3) $\vec{E} = (2kq/a^2)\hat{i}$ e $V = 0$
(4) $\vec{E} = (2kq/a^2)\hat{i}$ e $V = 2kq/a$
(5) Nenhuma das alternativas anteriores

(*b*) Uma carga puntiforme tem carga positiva $+q$ e a outra tem carga negativa $-q$. A carga puntiforme positiva está em $x = -a$ e a carga puntiforme negativa está em $x = +a$. Na origem, qual das seguintes opções é verdadeira?
(1) $\vec{E} = 0$ e $V = 0$
(2) $\vec{E} = 0$ e $V = 2kq/a$
(3) $\vec{E} = (2kq/a^2)\hat{i}$ e $V = 0$
(4) $\vec{E} = (2kq/a^2)\hat{i}$ e $V = 2kq/a$
(5) Nenhuma das alternativas anteriores

10 •• O potencial eletrostático (em volts) é dado por $V(x, y, z) = 4{,}00|x| + V_0$, onde V_0 é uma constante e x está em metros. (*a*) Represente o campo elétrico para este potencial. (*b*) Qual das seguintes distribuições de carga tem maior probabilidade de ser responsável por este potencial: (1) Uma lâmina plana negativamente carregada no plano $x = 0$, (2) uma carga puntiforme na origem, (3) uma lâmina plana carregada positivamente no plano $x = 0$ ou (4) uma esfera carregada uniformemente centrada na origem? Explique sua resposta.

11 •• O potencial elétrico é o mesmo em todos os pontos na superfície de um condutor. Isto significa que a densidade superficial de carga é também a mesma em todos os pontos da superfície? Explique sua resposta.

12 •• Três cargas puntiformes positivas idênticas estão localizadas nos vértices de um triângulo eqüilátero. Se o comprimento de cada lado do triângulo é reduzido a um quarto do seu comprimento original, por que fator a energia potencial eletrostática deste sistema varia? (A energia potencial eletrostática tende a zero se o comprimento de cada lado do triângulo tende ao infinito.)

ESTIMATIVA E APROXIMAÇÃO

13 • Estime o valor da diferença de potencial máxima entre uma nuvem de tempestade e a Terra, sabendo que a ruptura dielétrica do ar ocorre para campos de aproximadamente $3{,}0 \times 10^6$ V/m.

14 • As especificações para a distância explosiva típica nas velas de ignição automotivas são aproximadamente iguais à espessura do papelão utilizado em uma caixa de fósforos. Devido à alta compressão da mistura de gás com ar no cilindro, a resistência dielétrica da mistura é de aproximadamente $2{,}0 \times 10^7$ V/m. Estime o valor da máxima diferença de potencial na vela de ignição durante as condições de operação.

15 • O raio de um próton é de aproximadamente $1{,}0 \times 10^{-15}$ m. Considere dois prótons com momento de mesmo módulo, mas sentidos contrários, colidindo frontalmente. Estime o valor da energia cinética mínima (em MeV) necessária para cada próton para que eles vençam a repulsão eletrostática e colidam. *Dica: A energia de repouso de um próton é 938 MeV. Se as energias cinéticas dos prótons forem muito menores que esta energia de repouso, então é justificável utilizar as relações não-relativísticas.*

16 • Quando você toca em um amigo depois de ter caminhado sobre um tapete em um dia seco, você gera, tipicamente, uma faísca de aproximadamente 2,0 mm. Estime o valor da diferença de potencial entre você e seu amigo um instante antes da faísca.

17 • Estime a densidade superficial máxima de carga que pode existir na extremidade de um pára-raios para que não ocorra a ruptura dielétrica do ar.

18 •• A magnitude do campo elétrico na proximidade da superfície da Terra é de aproximadamente 300 V/m. (*a*) Estime o valor da densidade de carga na superfície da Terra. (*b*) Estime o valor da carga total na Terra. (*c*) Qual é o valor do potencial elétrico da superfície da Terra. (Considere que o potencial seja zero no infinito.) (*d*) Se a energia potencial eletrostática total na Terra pudesse ser aproveitada e convertida em energia elétrica com uma eficiência razoável, por quanto tempo ela seria usada para manter o consumo doméstico nos Estados Unidos? Considere que o consumo doméstico médio dos americanos seja de aproximadamente 500 kW · h de energia elétrica por mês.

DIFERENÇA DE POTENCIAL ELETROSTÁTICO, ENERGIA ELETROSTÁTICA E CAMPO ELÉTRICO

19 • Uma partícula puntiforme tem uma carga igual a +2,00 μC e está fixa na origem. (*a*) Qual é o potencial elétrico V em um ponto a 4,00 m da origem, considerando que $V = 0$ no infinito? (*b*) Quanto trabalho deve ser realizado para trazer uma segunda carga puntiforme que tem uma carga de +3,00 μC do infinito até uma distância de 4,00 m da carga de +2,00 μC?

20 •• As superfícies das faces de duas placas grandes, paralelas e condutoras, separadas por 10,0 cm, têm densidades superficiais uniformes de carga iguais em módulo, mas com sinais opostos. A diferença de potencial entre as placas é 500 V. (*a*) Qual das placas, a positiva ou a negativa, está em um potencial maior? (*b*) Qual é o módulo do campo elétrico entre as placas? (*c*) Um elétron é liberado a partir do repouso próximo à superfície carregada negativamente. Determine o trabalho realizado pelo campo elétrico sobre o elétron enquanto ele se move desde o ponto onde foi liberado até a placa positiva. Expresse sua resposta em elétron-volts e em joules. (*d*) Qual é a variação na energia potencial do elétron quando ele se move do ponto onde foi liberado até a placa positiva? (*e*) Qual é sua energia cinética quando ele atinge a placa positiva?

21 •• Um campo elétrico uniforme tem um módulo de 2,00 kV/m e aponta na direção $+x$. (*a*) Qual é a diferença de potencial elétrico entre o plano $x = 0{,}00$ m e o plano $x = 4{,}00$ m? Uma partícula puntiforme que tem carga de + 3,00 μC é liberada do repouso na origem. (*b*) Qual é a variação da energia potencial elétrica da partícula enquanto ela viaja do plano $x = 0{,}00$ m até o plano $x = 4{,}00$ m? (*c*) Qual é a energia cinética da partícula quando ela chega ao plano $x = 4{,}00$ m? (*d*) Determine a expressão para o potencial elétrico $V(x)$ se seu valor é escolhido como zero em $x = 0$.

22 •• Em uma unidade de cloreto de potássio, a distância entre o íon potássio (K^+) e o íon cloro (Cl^-) é $2{,}80 \times 10^{-10}$ m. (*a*) Calcule a energia (em eV) necessária para separar os dois íons até uma distância de separação infinita. (Modele os dois íons como duas partículas puntiformes inicialmente em repouso.) (*b*) Se fosse fornecido o dobro da energia determinada na Parte (*a*), qual seria a quantidade de energia cinética total que os dois íons teriam quando estivessem a uma distância infinita?

23 •• Prótons são liberados a partir do repouso em um sistema acelerador de Van de Graaff. Os prótons estão inicialmente localizados onde o potencial elétrico tem um valor de 5,00 MV e, então, eles viajam através do vácuo até uma região onde o potencial é zero. (*a*) Determine a rapidez final destes prótons. (*b*) Determine a magnitude do campo elétrico acelerador se o potencial mudar *uniformemente* sobre uma distância de 2,00 m.

24 •• O tubo de imagem de um aparelho de televisão era, até recentemente, invariavelmente um tubo de raios catódicos. Em um tubo típico de raios catódicos, uma configuração do tipo "canhão" de elétrons é usada para acelerar elétrons do repouso até a tela. Os elétrons são acelerados através de uma diferença de potencial de 30,0 kV. (*a*) Qual região está em um maior potencial

elétrico, a tela ou onde os elétrons estão inicialmente? Explique sua resposta. (*b*) Qual é a energia cinética (em eV e em J) de um elétron quando ele atinge a tela?

25 ••• (*a*) Uma partícula carregada positivamente está em uma trajetória para colidir frontalmente com um núcleo massivo carregado positivamente que está inicialmente em repouso. Inicialmente, a partícula tem energia cinética K_i e está bem distante do núcleo. Derive uma expressão para a distância de aproximação máxima. Sua expressão deve ser em termos da energia cinética inicial K_i da partícula, da carga ze da partícula e da carga Ze do núcleo, onde z e Z são inteiros. (*b*) Determine o valor numérico para a distância de aproximação máxima entre uma partícula α de 5,00 MeV e um núcleo estacionário de ouro, e entre uma partícula α de 9,00 MeV e um núcleo estacionário de ouro. (Os valores de 5,00 MeV e 9,00 MeV são as energias cinéticas iniciais das partículas alfa. Despreze o movimento dos núcleos de ouro depois das colisões.) (*c*) O raio do núcleo de ouro é aproximadamente 7×10^{-15} m. Se as partículas α se aproximam do núcleo por mais de 7×10^{-15} m, elas experimentam uma força nuclear forte, além da força de repulsão elétrica. No início do século XX, antes que a força nuclear forte fosse conhecida, Ernest Rutherford bombardeou núcleos de ouro com partículas α com energia cinética de aproximadamente 5 MeV. Você esperaria que este experimento revelasse a existência desta força nuclear forte? Explique sua resposta.

POTENCIAL DEVIDO A UM SISTEMA DE CARGAS PUNTIFORMES

Nota: **Em todos os problemas nesta seção, considere que o potencial elétrico seja zero a grandes distâncias de todas as cargas, a menos que seja dito o contrário.**

26 • Quatro cargas positivas, cada uma com magnitude igual a 2,00 μC, estão fixas nos vértices de um quadrado cujos lados têm 4,00 m de comprimento. Determine o potencial elétrico no centro do quadrado se (*a*) todas as cargas forem positivas, (*b*) três das cargas forem positivas e uma das cargas, negativa, e (*c*) duas das cargas forem positivas e duas negativas. (Considere que o potencial seja zero bem distante de todas as cargas.)

27 • Três cargas puntiformes estão fixas em posições no eixo x: q_1 está em $x = 0{,}00$ m, q_2 está em $x = 3{,}00$ m e q_3 está em $x = 6{,}00$ m. Determine o potencial elétrico no ponto no eixo y em $y = 3{,}00$ m se (*a*) $q_1 = q_2 = q_3 = +2{,}00\ \mu$C, (*b*) $q_1 = q_2 = +2{,}00\ \mu$C e $q_3 = -2{,}00\ \mu$C, e (*c*) $q_1 = q_3 = +2{,}00\ \mu$C e $q_2 = -2{,}00\ \mu$C. (Considere que o potencial seja zero muito distante de todas as cargas.)

28 • Os pontos A, B e C estão fixos nos vértices de um triângulo eqüilátero cujos lados têm 3,00 m de comprimento. Duas partículas puntiformes com cargas de +2,00 μC estão fixas nos vértices A e B. (*a*) Qual é o potencial elétrico no ponto C? (Considere que o potencial seja zero bem distante das cargas.) (*b*) Quanto trabalho é necessário para mover uma partícula puntiforme com carga +5,00 μC de uma distância infinita até o ponto C? (*c*) Quanto trabalho adicional é necessário para mover a partícula puntiforme de +5,00 μC do ponto C até o ponto médio do lado AB?

29 •• Três partículas puntiformes idênticas de carga q estão nos vértices de um triângulo eqüilátero que está circunscrito em um círculo de raio a contido no plano $z = 0$ e centrado na origem. Os valores de q e a são +3,00 μC e 60,0 cm, respectivamente. (Considere que o potencial seja zero bem distante de todas as cargas.) (*a*) Qual é o potencial elétrico na origem? (*b*) Qual é o potencial elétrico no ponto do eixo z que está em $z = a$? (*c*) Como mudariam suas respostas para as Partes (*a*) e (*b*) se as cargas ainda estivessem no círculo, mas uma delas não estivesse mais em um dos vértices do triângulo? Explique sua resposta.

30 •• Duas cargas puntiformes q e q' estão separadas por uma distância a. Em um ponto a uma distância $a/3$ de q e ao longo da linha que une as duas cargas, o potencial é zero. (Considere que o potencial seja zero bem distante de todas as cargas.) (*a*) Qual das afirmativas a seguir é verdadeira?

(1) As cargas têm o mesmo sinal.
(2) As cargas têm sinais opostos.
(3) Os sinais relativos das cargas não podem ser determinados usando as informações dadas.

(*b*) Qual das seguintes afirmações é verdadeira?

(1) $|q| > |q'|$
(2) $|q| < |q'|$
(3) $|q| = |q'|$
(4) As magnitudes relativas das cargas não podem ser determinadas usando as informações dadas.

(*c*) Determine a razão q/q'.

31 •• Duas partículas puntiformes idênticas, carregadas positivamente, estão fixas no eixo x em $x = +a$ e $x = -a$. (*a*) Escreva uma expressão para o potencial elétrico $V(x)$ como uma função de x para todos os pontos no eixo x. (*b*) Represente $V(x)$ *versus* x para todos os pontos no eixo x.

32 •• Uma carga puntiforme $+3e$ está na origem e uma segunda carga puntiforme $-2e$ está no eixo x em $x = a$. (*a*) Represente a função potencial $V(x)$ *versus* x para todos os pontos no eixo x. (*b*) Em que ponto ou pontos, se existir algum, $V = 0$ no eixo x?(*c*) Em que ponto ou pontos, se existir algum no eixo x, o campo elétrico é zero? Estas posições são as mesmas encontradas na Parte (*b*)? Explique sua resposta. (*d*) Quanto trabalho é necessário para trazer uma terceira carga $+e$ até o ponto $x = \frac{1}{2}a$ no eixo x?

33 ••• Um dipolo consiste em duas cargas iguais com sinais opostos, $+q$ e $-q$. Ele está localizado de forma tal que seu centro está na origem e seu eixo está alinhado com o eixo z (Figura 23-32). A distância entre as cargas é L. Seja $\vec{r}$ o vetor desde a origem até um ponto arbitrário de campo e θ, o ângulo que $\vec{r}$ faz com a direção $+z$. (*a*) Mostre que a grandes distâncias do dipolo (ou seja, para $r \gg L$) o potencial elétrico do dipolo é dado por $V(r, \theta) \approx k\vec{p} \cdot \hat{r}/r^2 = kp \cos \theta / r^2$, onde $\vec{p}$ é o momento de dipolo e θ é o ângulo entre $\vec{r}$ e $\vec{p}$. (*b*) Em que pontos na região $r \gg L$, além do infinito, o potencial elétrico é zero?

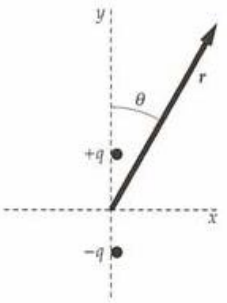

FIGURA 23-32 Problema 33

34 ••• Uma configuração de cargas consiste em três cargas puntiformes localizadas no eixo z (Figura 23-33). Uma tem carga igual a $-2q$, e está localizada na origem. As outras duas têm cargas iguais a $+q$, uma está localizada em $z = +L$ e a outra em $z = -L$. Esta configuração pode ser considerada como dois dipolos: um centrado em $z = +L/2$ e com um momento de dipolo na direção $+z$, o outro centrado em $z = -L/2$ e com um momento de dipolo na direção $-z$. Cada um destes dipolos tem um momento de dipolo com magnitude igual a qL. Dois dipolos arranjados desta maneira formam um *quadrupolo elétrico linear*. (Há outros arranjos geométricos de dipolos que criam quadrupolos, mas eles não são lineares.) (*a*) Usando o resultado do

Problema 33, mostre que a grandes distâncias do quadrupolo (ou seja, para $r \gg L$), o potencial elétrico é dado por $V_{quad}(r, \theta) = 2kB \cos^2 \theta / r^3$, onde $B = qL^2$. (B é a magnitude do momento de quadrupolo da configuração de cargas.) (*b*) Mostre que, no eixo positivo z, este potencial dá um campo elétrico (para $z \gg L$) de $\vec{E} = (6kB/z^4)\hat{k}$. (*c*) Mostre que você obtém o resultado da Parte (*b*) somando os campos elétricos das três cargas puntiformes.

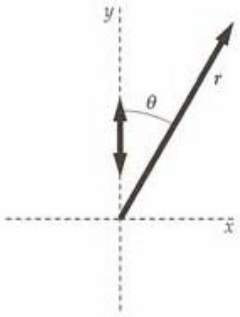

FIGURA 23-33 Problema 34

CALCULANDO O CAMPO ELÉTRICO A PARTIR DO POTENCIAL

35 • Um campo elétrico uniforme está na direção $-x$. Os pontos a e b estão no eixo x, com a em $x = 2{,}00$ m e b em $x = 6{,}00$ m. (*a*) A diferença de potencial $V_b - V_a$ é positiva ou negativa? (*b*) Se $|V_b - V_a|$ é 100 kV, qual é a magnitude do campo elétrico?

36 • Um campo elétrico é dado pela expressão $\vec{E} = bx^3\hat{i}$, onde $b = 2{,}00$ kV/m^4. Determine a diferença de potencial entre o ponto em $x = 1{,}00$ m e o ponto $x = 2{,}00$ m. Qual destes pontos está em um potencial maior?

37 •• O campo elétrico no eixo x devido a uma carga puntiforme fixa na origem é dado por $\vec{E} = (b/x^2)\hat{i}$, onde $b = 6{,}00$ kV · m e $x \neq 0$. (*a*) Determine a magnitude e o sinal da carga puntiforme. (*b*) Determine a diferença de potencial entre os pontos no eixo x em $x = 1{,}00$ m e $x = 2{,}00$ m. Qual destes pontos está em um potencial maior?

38 •• O potencial elétrico devido a uma distribuição particular de cargas é medido em muitos pontos ao longo do eixo x. Um gráfico dos dados está mostrado na Figura 23-34. Em que posição (ou posições) a componente x do campo elétrico é igual a zero? Nesta posição (ou posições), o potencial também é igual a zero? Explique sua resposta.

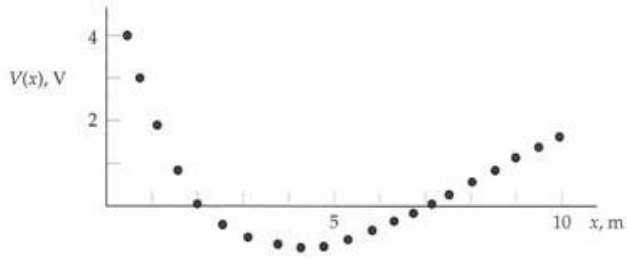

FIGURA 23-34 Problema 38

39 •• Três cargas puntiformes idênticas, cada uma com uma carga igual a q, estão no plano xy. Duas das cargas estão no eixo y em $y = -a$ e $y = +a$, e a terceira carga está no eixo x em $x = a$. (*a*) Determine o potencial como uma função da posição ao longo do eixo x. (*b*) Use o resultado da Parte (*a*) para obter uma expressão para $E_x(x)$, a componente x do campo elétrico como uma função de x. Confira suas respostas para as Partes (*a*) e (*b*) na origem e quando x tende a ∞ para ver se elas fornecem os resultados esperados.

CÁLCULOS DE *V* PARA DISTRIBUIÇÕES CONTÍNUAS DE CARGA

40 • Uma carga de $+10{,}0\ \mu$C está uniformemente distribuída em uma fina casca esférica de raio 12,0 cm. (Considere que o potencial seja zero bem distante das cargas.) (*a*) Qual é a magnitude do campo elétrico próximo ao lado de fora e ao lado de dentro da casca? (*b*) Qual é a magnitude do potencial elétrico próximo ao lado de fora e ao lado de dentro da casca? (*c*) Qual é o potencial elétrico no centro da casca? (*d*) Qual é o módulo do campo elétrico no centro da casca?

41 • Uma linha infinita de cargas com densidade linear $+1{,}50\ \mu$C/m está no eixo z. Determine o potencial elétrico nas seguintes distâncias da linha de carga: (*a*) 2,00 m, (*b*) 4,00 m e (*c*) 12,0 m. Considere que escolhemos $V = 0$ a uma distância de 2,50 m da linha de carga.

42 • (*a*) Determine a carga líquida máxima que pode ser colocada em um condutor esférico de raio 16 cm antes que a ruptura dielétrica do ar ocorra. (*b*) Qual é o potencial elétrico da esfera quando ela tem esta carga máxima? (Considere que o potencial seja zero bem distante de todas as cargas.)

43 • Determine a densidade superficial máxima de carga $\sigma_{máx}$ que pode existir na superfície de qualquer condutor antes que ocorra a ruptura dielétrica do ar.

44 •• Uma casca esférica condutora de raio interno b e raio externo c é concêntrica a uma pequena esfera metálica de raio $a < b$. A esfera metálica tem uma carga positiva Q. A carga total na casca esférica condutora é $-Q$. (Considere que o potencial seja zero bem distante de todas as cargas.) (*a*) Qual é o potencial elétrico da casca esférica? (*b*) Qual é o potencial elétrico da esfera metálica?

45 •• Duas cascas cilíndricas coaxiais condutoras têm cargas iguais com sinais opostos. A casca interna tem carga $+q$ e um raio externo a, e a casca externa tem carga $-q$ e um raio interno b. O comprimento de cada casca cilíndrica é L, e L é muito longo comparado a b. Determine a diferença de potencial $V_a - V_b$ entre as cascas.

46 •• Uma carga positiva é colocada em duas esferas condutoras que estão bem afastadas e conectadas por um fio condutor muito longo e fino. O raio da esfera menor é 5,00 cm e o da esfera maior é 12,0 cm. A magnitude do campo elétrico na superfície da esfera maior é 200 kV/m. Estime o valor da densidade superficial de carga em cada esfera.

47 •• Duas cascas esféricas condutoras concêntricas têm cargas iguais com sinais opostos. A casca interna tem raio externo a e carga $+q$; a casca externa tem raio interno b e carga $-q$. Determine a diferença de potencial $V_a - V_b$ entre as cascas.

48 •• O potencial elétrico na superfície de uma esfera uniformemente carregada é 450 V. Em um ponto do lado de fora da esfera a uma distância (radial) de 20,0 cm da sua superfície, o potencial elétrico é 150 V. (O potencial é zero bem distante da esfera.) Qual é o raio da esfera, e qual é a carga da esfera?

49 •• Considere duas finas lâminas carregadas, infinitas e paralelas, uma no plano $x = 0$ e a outra no plano $x = a$. O potencial é zero na origem. (*a*) Determine o potencial elétrico em todos os pontos no espaço se os planos têm densidades de carga positiva iguais, $+\sigma$. (*b*) Determine o potencial elétrico em todos os pontos do espaço se a lâmina no plano $x = 0$ tem densidade de carga $+\sigma$ e a lâmina no plano $x = a$ tem densidade $-\sigma$.

50 ••• A expressão para o potencial ao longo do eixo de um fino disco uniformemente carregado é dada por $V = 2\pi k\sigma|z|\left(\sqrt{1 + \frac{R^2}{z^2}} - 1\right)$ (Equação 23-20), onde R e σ são o raio e a carga por unidade de área do disco, respectivamente. Mostre que esta expressão se reduz a $V =$

$kQ/|z|$ para $|z| \gg R$, onde $Q = \sigma\pi R^2$ é a carga total no disco. Explique por que este resultado é esperado. *Dica: Use o teorema binomial para expandir o radical.*

51 •• Um bastão de comprimento L tem carga total Q distribuída uniformemente ao longo de seu comprimento. O bastão está ao longo do eixo y com seu centro na origem. (*a*) Determine uma expressão para o potencial elétrico como uma função da posição ao longo do eixo x. (*b*) Mostre que o resultado obtido na Parte (*a*) se reduz a $V = kQ/|x|$ para $|x| \gg L$. Explique por que este resultado é esperado.

52 •• Um bastão de comprimento L tem carga total Q distribuída uniformemente ao longo de seu comprimento. O bastão está ao longo do eixo y com uma extremidade na origem. (*a*) Determine uma expressão para o potencial elétrico como uma função da posição ao longo do eixo x. (*b*) Mostre que o resultado obtido na Parte (*a*) se reduz a $V = kQ/|x|$ para $|x| \gg L$. Explique por que este resultado é esperado.

53 •• Um disco de raio R tem uma distribuição superficial de carga dada por $\sigma = \sigma_0 r^2/R^2$, onde σ_0 é uma constante e r é a distância ao centro do disco. (*a*) Determine a carga total no disco. (*b*) Determine a expressão para o potencial elétrico a uma distância z do centro do disco no eixo que passa através do centro do disco e é perpendicular ao seu plano.

54 ••• Um disco de raio R tem uma distribuição superficial de cargas dada por $\sigma = \sigma_0 R/r$, onde σ_0 é uma constante e r é a distância ao centro do disco. (*a*) Determine a carga total no disco. (*b*) Determine uma expressão para o potencial elétrico a uma distância x do centro do disco no eixo que passa pelo centro do disco e é perpendicular ao seu plano.

55 •• Um bastão de comprimento L tem uma carga total Q uniformemente distribuída ao longo de seu comprimento. O bastão está ao longo do eixo x com seu centro na origem. (*a*) Qual é o potencial elétrico como função da posição ao longo do eixo x para $x > L/2$? (*b*) Mostre que, para $x \gg L/2$, seu resultado se reduz ao devido a uma carga puntiforme Q.

56 ••• Um círculo de raio a é removido do centro de um fino disco circular uniformemente carregado de raio b e carga por unidade de área σ. (*a*) Determine uma expressão para o potencial no eixo x a uma distância x do centro do disco. (*b*) Mostre que, para $x \gg b$ o potencial elétrico no eixo do disco uniformemente carregado com o corte tende a kQ/x, onde $Q = \sigma\pi(b^2 - a^2)$ é a carga total no disco.

57 ••• A expressão para o potencial elétrico dentro de uma esfera sólida uniformemente carregada é dado por $V(r) = \frac{kQ}{2R}\left(3 - \frac{r^2}{R^2}\right)$, onde R é o raio da esfera e r é a distância ao centro. Esta expressão foi obtida no Exemplo 23-12 descobrindo, primeiramente, o campo elétrico. Neste problema, você deriva a mesma expressão modelando a esfera como uma coleção de finas cascas esféricas e, então, somando os potenciais destas cascas em um ponto-campo dentro da esfera. O potencial dV que está a uma distância r do centro de uma fina casca esférica uniformemente carregada, com raio r' e uma carga dQ, é dado por $dV = kdQ/r$ para $r \geq r'$ e $dV = kd\,Q/r'$ para $r \leq r'$ (Equação 23-22). Considere uma esfera de raio R contendo uma carga Q que está uniformemente distribuída e você deseja determinar V em algum ponto dentro da esfera (ou seja, para $r < R$). (*a*) Determine uma expressão para a carga dQ na casca esférica de raio r' e espessura dr'. (*b*) Determine uma expressão para o potencial dV em r devido à carga em uma casca de raio r' e espessura dr', onde $r \leq r' \leq R$. (*c*) Integre sua expressão da Parte (*b*) desde $r' = r$ até $r' = R$ para determinar o potencial em r devido a todas as cargas na região mais afastada que r do centro da esfera. (*d*) Determine uma expressão para o potencial dV em r devido à carga em uma casca de raio r' e espessura dr', onde $r' \leq r$. (*e*) Integre sua expressão na Parte (*d*) desde $r' = 0$ até $r' = r$ para determinar o potencial em r devido a todas as cargas na região mais próxima que r ao centro da esfera. (*f*) Determine o potencial total V em r somando seus resultados para a Parte (*c*) e para a Parte (*e*).

58 •• Calcule o potencial elétrico no ponto a uma distância $R/2$ do centro de uma fina casca esférica uniformemente carregada de raio R e carga Q. (Considere que o potencial é zero distante da casca.)

59 •• Um círculo de raio a é removido do centro de um fino disco circular carregado uniformemente de raio b. Mostre que o potencial em um ponto no eixo central do disco a uma distância z de seu centro geométrico é dado por $V(z) = 2\pi k\sigma(\sqrt{z^2 + b^2} + \sqrt{z^2 + a^2})$, onde σ é a densidade de carga do disco.

SUPERFÍCIES EQÜIPOTENCIAIS

60 • Uma lâmina plana infinita e carregada tem densidade superficial uniforme igual a 3,50 $\mu C/m^2$. Qual a distância entre as superfícies eqüipotenciais cujos potenciais difiram de 100 V?

61 •• Considere dois planos infinitos paralelos, uniformemente carregados com cargas iguais, mas com sinais opostos. (*a*) Qual(is) é(são) a(s) forma(s) das superfícies eqüipotenciais entre eles? Explique sua resposta. (*b*) Qual(is) é(são) a(s) forma(s) das superfícies eqüipotenciais nas regiões que não estão entre eles? Explique sua resposta.

62 •• Um tubo Geiger consiste em dois elementos, uma casca cilíndrica metálica e longa e um fio metálico esticado e longo com o mesmo eixo central. Considere o tubo como se o fio e o cilindro fossem infinitamente longos. O fio central está carregado positivamente e o cilindro externo está carregado negativamente. A diferença de potencial entre o fio e o cilindro é 1,00 kV. (*a*) Quais são a direção e o sentido do campo elétrico dentro do tubo? (*b*) Qual elemento está no maior potencial? (*c*) Qual(is) é(são) a(s) forma(s) das superfícies eqüipotenciais no interior do tubo? (*d*) Considere as duas superfícies eqüipotenciais descritas na Parte (*c*). Suponha que a diferença de potencial entre elas é de 10 V. Estas superfícies eqüipotenciais próximas ao fio central teriam o mesmo espaçamento se elas estivessem próximas ao cilindro externo? Se a resposta for não, onde, no tubo, estão as superfícies eqüipotenciais que estão mais espaçadas? Explique sua resposta.

63 •• Considere que o cilindro no tubo Geiger no Problema 62 tem um diâmetro interno de 4,00 cm e o fio tem um diâmetro de 0,500 mm. O cilindro está aterrado, portanto, seu potencial é igual a zero. (*a*) Qual é o raio da superfície eqüipotencial que tem um potencial igual a 500 V? Esta superfície está mais próxima do fio ou do cilindro? (*b*) Qual a distância entre as superfícies eqüipotenciais que têm potenciais de 200 e 225 V? (*c*) Compare seu resultado na Parte (*b*) com a distância entre as duas superfícies que têm potenciais de 700 e 725 V, respectivamente. O que esta comparação lhe diz sobre a magnitude do campo elétrico como função da distância ao fio central?

64 •• Uma partícula puntiforme que tem uma carga de +11,1 nC está na origem. (*a*) Qual(is) é(são) a(s) forma(s) das superfícies eqüipotenciais na região em volta desta carga? (*b*) Considerando o potencial como sendo zero em $r = \infty$, calcule os raios de cinco superfícies que têm potenciais iguais a 20,0 V, 40,0 V, 60,0 V, 80,0 V e 100,0 V e represente-as em escala, centradas na carga. (*c*) Estas superfícies estão igualmente espaçadas? Explique sua resposta. (*d*) Estime o valor da magnitude do campo elétrico entre as superfícies eqüipotenciais de 40,0 V e 60,0 V dividindo a diferença entre estes dois potenciais pela diferença entre os dois raios. Compare esta estimativa com o valor exato na posição intermediária entre estas duas superfícies.

ENERGIA POTENCIAL ELETROSTÁTICA

65 • Três cargas puntiformes estão no eixo x: q_1 está na origem, q_2 está em $x = +3{,}00$ m e q_3 está em $x = +6{,}00$ m. Determine a energia potencial eletrostática deste sistema de cargas para os seguintes valores de carga: (*a*) $q_1 = q_2 = q_3 = +2{,}00\ \mu C$; (*b*) $q_1 = q_2 = +2{,}00\ \mu C$

e $q_3 = -2{,}00\ \mu C$; (*c*) $q_1 = q_3 = +2{,}00\ \mu C$ e $q_2 = -2{,}00\ \mu C$. (Considere que a energia potencial seja zero quando as cargas estiverem muito afastadas.)

66 • Cargas puntiformes q_1, q_2 e q_3 estão fixas nos vértices de um triângulo eqüilátero cujos lados tem comprimento de 2,50 m. Determine a energia potencial eletrostática deste sistema de cargas para os seguintes valores de carga: (*a*) $q_1 = q_2 = q_3 = +4{,}20\ \mu C$, (*b*) $q_1 = q_2 = +4{,}20\ \mu C$ e $q_3 = -4{,}20\ \mu C$; e (*c*) $q_1 = q_2 = -4{,}20\ \mu C$ e $q_3 = +4{,}20\ \mu C$. (Considere que a energia potencial seja zero quando as cargas estão muito afastadas.)

67 •• (*a*) Quanta carga está na superfície de um condutor esférico isolado que tem raio de 10,0 cm e está carregado com 2,00 kV? (*b*) Qual é a energia potencial eletrostática deste condutor? (Considere que o potencial é zero distante da esfera.)

68 ••• Quatro cargas puntiformes, cada uma com magnitude 2,00 μC, estão nos vértices de um quadrado com lados de 4,00 m de comprimento. Determine a energia potencial eletrostática deste sistema nas seguintes condições: (*a*) todas as cargas são negativas; (*b*) três das cargas são positivas e uma é negativa, (*c*) as cargas em dois vértices adjacentes são positivas e as outras duas são negativas e (*d*) as cargas em dois vértices opostos são positivas e as outras duas são negativas. (Considere que a energia potencial é zero quando as cargas puntiformes estão muito distantes.)

69 •• Quatro cargas puntiformes estão fixas nos vértices de um quadrado centrado na origem. O comprimento de cada lado do quadrado é $2a$. As cargas estão localizadas em: $+q$ está em $(-a, +a)$, $+2q$ está em $(+a, +a)$, $-3q$ está em $(+a, -a)$ e $+6q$ está em $(-a, -a)$. Uma quinta partícula com massa m e carga $+q$ é colocada na origem e liberada a partir do repouso. Determine sua rapidez quando ela estiver bem distante da origem.

70 •• Considere que duas partículas puntiformes, com carga $+e$, estão em repouso e separadas por $1{,}50 \times 10^{-15}$ m. (*a*) Quanto trabalho foi necessário para colocá-las juntas a partir de uma separação muito grande? (*b*) Se elas forem liberadas, quanta energia cinética elas terão quando estiverem separadas pelo dobro de sua separação inicial? (*c*) A massa de cada partícula é 1,00 u (1,00 uma). Que rapidez cada uma terá quando estiverem bem afastadas?

71 ••• Considere um elétron e um próton que estão inicialmente em repouso e separados por 2,00 nm. Desprezando qualquer movimento do próton, que é muito mais massivo, qual é a mínima (*a*) energia cinética e (*b*) rapidez com as quais o elétron deve ser projetado para que atinja um ponto a uma distância de 12,0 nm do próton? Considere que a velocidade do elétron esteja dirigida radialmente, se afastando do próton. (*c*) A que distância o elétron viajará do próton se ele tiver o dobro desta energia cinética inicial?

PROBLEMAS GERAIS

72 • Uma carga puntiforme positiva igual a $4{,}80 \times 10^{-19}$ C está separada de uma carga puntiforme negativa de mesma magnitude por $6{,}40 \times 10^{-10}$ m. Qual é o potencial elétrico em um ponto a $9{,}20 \times 10^{-10}$ m de cada uma das duas cargas?

73 • Duas cargas puntiformes positivas com carga $+q$ estão fixas no eixo y em $y = +a$ e $y = -a$. (*a*) Determine o potencial elétrico em qualquer ponto no eixo x. (*b*) Use seu resultado na Parte (*a*) para determinar o campo elétrico em qualquer ponto no eixo x.

74 • Se uma esfera condutora deve ser carregada com um potencial de 10,0 kV, qual é o menor raio possível da esfera para que o campo elétrico próximo à superfície da esfera não exceda a resistência do ar?

75 •• **PLANILHA ELETRÔNICA** Dois fios paralelos infinitamente longos têm carga uniforme por unidade de comprimento λ e $-\lambda$, respectivamente. Os fios são paralelos ao eixo z. O fio carregado positivamente intercepta o eixo x em $x = -a$, e o fio carregado negativamente intercepta o eixo x em $x = +a$. (*a*) Escolha a origem como o ponto de referência onde o potencial é zero, e expresse o potencial em um ponto arbitrário (x, y) no plano xy em termos de x, y, λ e a. Use esta expressão para encontrar o potencial em todos os pontos do eixo y. (*b*) Usando $a = 5{,}00$ cm e $\lambda = 5{,}00$ nC/m, obtenha a equação para a superfície eqüipotencial no plano xy que passa através do ponto $x = \frac{1}{4}a$, $y = 0$. (*c*) Use um programa de planilha eletrônica para fazer um gráfico da superfície eqüipotencial encontrada na Parte (*b*).

76 •• A curva eqüipotencial cujo gráfico foi feito no Problema 75 deveria ser um círculo. (*a*) Mostre matematicamente que ela é um círculo. (*b*) O círculo eqüipotencial no plano xy é a interseção de uma superfície eqüipotencial tridimensional e o plano xy. Descreva a superfície tridimensional usando uma ou duas sentenças.

77 ••• O átomo de hidrogênio no seu estado fundamental pode ser modelado como uma carga puntiforme positiva de magnitude $+e$ (o próton) circundada por uma distribuição de carga negativa com densidade de carga (o elétron) que varia com a distância ao centro do próton r como $\rho(r) = -\rho_0 e^{-2r/a}$ (um resultado obtido da mecânica quântica), onde $a = 0{,}523$ nm é a distância mais provável do elétron ao próton. (*a*) Calcule o valor de ρ_0 necessário para que o átomo de hidrogênio seja neutro. (*b*) Calcule o potencial eletrostático (relativo ao infinito) deste sistema como função da distância r ao próton.

78 •• Carga é fornecida à cúpula metálica de um gerador de Van de Graaff pela correia a uma taxa de 200 μC/s quando a diferença de potencial entre a correia e a cúpula é 1,25 MV. A cúpula transfere carga para a atmosfera à mesma taxa, mantendo a diferença de potencial de 1,25 MV. Qual a potência mínima necessária para mover a correia e manter a diferença de potencial de 1,25 MV?

79 •• Uma carga puntiforme positiva $+Q$ está localizada no eixo x em $x = -a$. (*a*) Quanto trabalho é necessário para trazer uma carga puntiforme idêntica do infinito ao ponto no eixo x em $x = +a$? (*b*) Com as duas cargas puntiformes idênticas nos lugares, em $x = -a$ e em $x = +a$, quanto trabalho é necessário para trazer uma terceira carga puntiforme $-Q$ do infinito até a origem? (*c*) Quanto trabalho é necessário para mover a carga $-Q$ da origem até o ponto no eixo x em $x = 2a$ ao longo do caminho semicircular mostrado (Figura 23-25)?

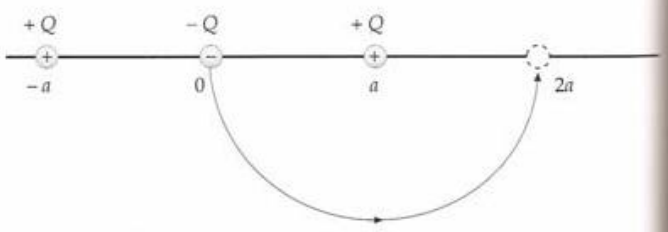

FIGURA 23-35 Problema 79

80 •• Uma carga de +2,00 nC está uniformemente distribuída em um anel de raio 10,0 cm que está no plano $x = 0$ e está centrada na origem. Um carga puntiforme de +1,00 nC está inicialmente localizada no eixo x em $x = 50{,}0$ cm. Determine o trabalho necessário para mover a carga puntiforme até a origem.

81 •• Duas esferas metálicas têm raio de 10,0 cm cada uma. Os centros das duas esferas estão separados por 50,0 cm. As esferas estão inicialmente neutras, mas uma carga Q é transferida de uma esfera para a outra, criando uma diferença de potencial entre elas de 100 V. Um próton é liberado do repouso na superfície da esfera carregada positivamente e viaja para a esfera carregada negativamente. (*a*) Qual é a energia cinética assim que ele chega na esfera carregada negativamente? (*b*) Com que rapidez ele colide na esfera?

82 • **PLANILHA ELETRÔNICA** (*a*) Usando um programa com planilha eletrônica faça um gráfico de $V(z)$ *versus* z para um anel uniformemente carregado no plano $z = 0$ e centrado na origem. O potencial no eixo z é dado por $V(z) = kQ/\sqrt{a^2 + z^2}$ (Equação 23-19). (*b*) Use seu gráfico para estimar os pontos no eixo z onde a magnitude do campo elétrico é máxima.

83 •• Um condutor esférico de raio R_1 está carregado com 20 kV. Quando ele é conectado através de um fio condutor muito fino e longo, a um segundo condutor esférico bem distante, seu potencial cai para 12 kV. Qual é o raio da segunda esfera?

84 •• Uma esfera metálica centrada na origem tem uma densidade superficial de carga que tem magnitude de 24,6 nC/m² e um raio menor que 2,00 m. A uma distância de 2,00 m da origem, o potencial elétrico é 500 V e a magnitude do campo elétrico é 250 V/m. (Considere o potencial como zero muito longe da esfera.) (*a*) Qual é o raio da esfera metálica? (*b*) Qual é o sinal da carga na esfera? Explique sua resposta.

85 •• Ao longo do eixo central de um disco carregado uniformemente, em um ponto a 0,60 m do centro do disco, o potencial é 80 V e a intensidade do campo elétrico é 80 V/m. A uma distância de 1,5 m, o potencial é 40 V e a intensidade do campo elétrico é 23,5 V/m. (Considere que o potencial seja zero muito distante do disco). Determine a carga total do disco.

86 •• Um núcleo de ^{210}Po radioativo emite uma partícula α de carga $+2e$. Quando a partícula α está a uma grande distância do núcleo, ela tem uma energia cinética de 5,30 MeV. Considere que a partícula α tenha uma energia cinética desprezível quando ela deixa a superfície do núcleo. O núcleo "filho" (ou residual) ^{206}Pb tem uma carga de $+82e$. Determine o raio do núcleo de ^{206}Pb. (Despreze o raio da partícula α e considere que o núcleo de ^{206}Pb permanece em repouso.)

87 ••• (*a*) A configuração *A* consiste em duas partículas puntiformes, uma tem carga $+q$ e está no eixo x em $x = +d$ e a outra partícula tem carga $-q$ e está em $x = -d$ (Figura 23-26*a*). Considerando que o potencial seja zero a grandes distâncias das partículas carregadas, mostre que o potencial também é zero em todos os pontos do plano $x = 0$. (*b*) A configuração *B* consiste em uma placa plana metálica de extensão infinita e uma partícula puntiforme localizada a uma distância d da placa (Figura 23-36*b*). A partícula puntiforme tem uma carga igual a $+q$ e a placa está aterrada. (O aterramento da placa obriga o seu potencial a ser igual a zero.) Escolha a linha perpendicular à placa e que passa através da carga puntiforme como o eixo x, e escolha a origem na superfície da placa, o mais próximo da partícula. (Estas escolhas colocam a partícula no eixo x em $x = +d$). Para a configuração *B*, o potencial é zero em todos os pontos no semi-espaço $x \geq 0$ que estão muito afastados da partícula e em todos os pontos no plano $x = 0$ — assim como no caso da configuração *A*. Um teorema, denominado *teorema da unicidade*, implica que através do semi-espaço $x \geq 0$ a função potencial V — e, portanto, o campo elétrico $\vec{E}$ — para as duas configurações são idênticos. Usando este resultado, obtenha o campo elétrico $\vec{E}$ em cada ponto no plano $x = 0$ na configuração *B*. (O teorema da unicidade diz que na configuração *B* o campo elétrico em cada ponto no plano $x = 0$ é o mesmo que na configuração *A*.) Use este resultado para encontrar a densidade superficial de carga σ em cada ponto no plano condutor (na configuração *B*).

88 ••• Uma partícula de massa m e uma carga positiva q está restrita ao movimento ao longo do eixo x. Em $x = -L$ e em $x = L$, estão dois anéis carregados de raio L (Figura 23-37). Cada anel está centrado no eixo x e está em um plano perpendicular a ele. Cada anel tem uma carga total positiva Q uniformemente distribuída. (*a*) Obtenha uma expressão para o potencial $V(x)$ no eixo x devido à carga nos anéis. (*b*) Mostre que $V(x)$ tem um mínimo em $x = 0$. (*c*) Mostre que, para $|x| \ll L$, o potencial tende à forma $V(x) = V(0) + \alpha x^2$. (*d*) Use o resultado da Parte (*c*) para deduzir uma expressão para a freqüência angular de oscilação da massa m se ela for levemente deslocada da origem e liberada. (Considere que o potencial seja zero nos pontos distantes dos anéis.)

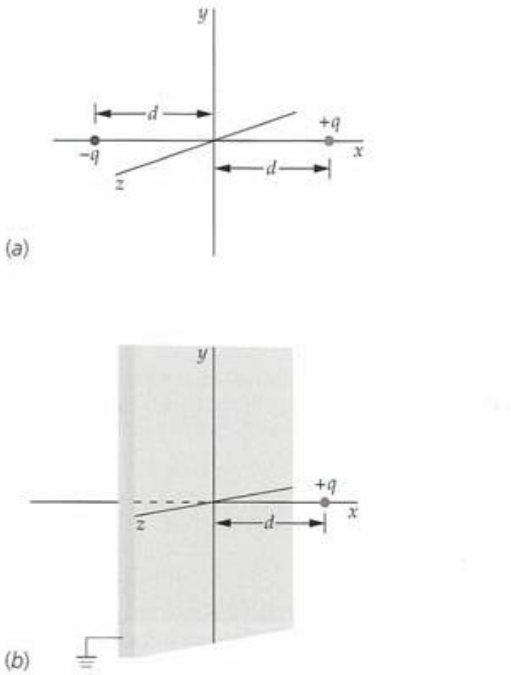

FIGURA 23-36 Problema 87

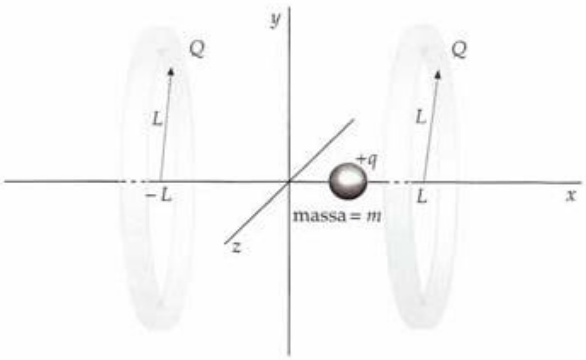

FIGURA 23-37 Problema 88

89 ••• Três finas cascas esféricas condutoras e concêntricas têm raio a, b e c e $a < b < c$. Inicialmente, a casca interna está descarregada, a casca intermediária tem uma carga positiva $+Q$ e a casca externa tem uma carga $-Q$. (Considere que o potencial seja zero em pontos bem distantes das cascas.) (*a*) Determine o potencial elétrico de cada uma das três cascas. (*b*) Se as cascas interna e externa forem, agora, conectadas por um fio condutor que está isolado e que passa através de um pequeno orifício pela esfera intermediária, qual é o potencial elétrico de cada uma das três cascas e qual é a carga final em cada uma?

90 ••• Considere duas finas cascas esféricas metálicas e concêntricas, de raio a e b, onde $b \geq a$. A casca externa tem uma carga Q, mas a interna está aterrada. Isso significa que o potencial na casca interna é o mesmo que o potencial nos pontos afastados das cascas. Determine a carga na casca interna.

91 ••• Mostre que o trabalho total necessário para agregar uma esfera carregada uniformemente que tem uma carga total Q e um

raio R é dado por $3Q^2/(20\pi\epsilon_0 R)$. A conservação de energia nos diz que este resultado é o mesmo que a energia potencial eletrostática da esfera. *Dica: Seja ρ a densidade de carga da esfera que tem carga Q e raio R. Calcule o trabalho dW para trazer uma carga dq do infinito até a superfície de uma esfera uniformemente carregada de raio r ($r < R$) e densidade de carga ρ. (Nenhum trabalho adicional é necessário para arrastar dq através da casca esférica de raio r, espessura dr e densidade de carga ρ. Por quê?)*

92 ••• (*a*) Use o resultado do Problema 91 para calcular o *raio clássico do elétron*, o raio de uma esfera uniforme que tem carga $-e$ e uma energia potencial eletrostática igual à energia de repouso do elétron ($5{,}11 \times 10^5$ eV). Comente sobre os defeitos deste modelo para o elétron. (*b*) Repita o cálculo na Parte (*a*) para um próton usando sua energia de repouso de 938 MeV. Experimentos indicam que o próton tem um raio aproximado de cerca de $1{,}2 \times 10^{-15}$ m. Seu resultado está próximo deste valor?

93 ••• (*a*) Considere uma esfera uniformemente carregada com raio R e carga Q e constituída por um fluido incompressível, tal como a água. Se a esfera fissiona (se parte) em duas metades de mesmo volume e mesma carga, e se estas metades se estabilizam em esferas carregadas uniformemente, qual é o raio R' de cada uma? (*b*) Usando a expressão para a energia potencial mostrada no Problema 91, calcule a variação na energia potencial eletrostática total do fluido carregado. Considere que as esferas estejam separadas por uma grande distância.

94 ••• O Problema 93 pode ser modificado para ser usado como um modelo muito simples para fissão nuclear. Quando um núcleo de ^{235}U absorve um nêutron, ele pode fissionar nos fragmentos ^{140}Xe, ^{94}Sr e 2 nêutrons. O ^{235}U tem 92 prótons, enquanto o ^{140}Xe tem 54 prótons e o ^{94}Sr tem 38 prótons. Estime o valor da energia liberada durante este processo de fissão (em MeV), considerando que a densidade de massa do núcleo é constante e tem um valor de 4×10^{17} kg/m^3.