

Capítulo 19;

Raymond A. Serway /

John W. Jewett, Jr;

Vol.3 – Princípios da Física:

Eletromagnetismo

RESUMO

As **cargas elétricas** têm as seguintes propriedades importantes:

- Existem duas espécies de cargas na natureza, **positiva e negativa**, com a propriedade de que cargas de sinais opostos se atraem e cargas de mesmo sinal se repelem.
- A força entre partículas carregadas varia com o inverso do quadrado da distância que as separa.
- A carga é conservada.
- A carga é quantizada.

Condutores são materiais nos quais as cargas se movem com grande liberdade. **Isolantes** são materiais nos quais as cargas não se movem livremente.

A **lei de Coulomb** afirma que a força eletrostática entre duas partículas carregadas estacionárias, separadas por uma distância r , tem o módulo dado por

$$F_e = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad [19.1]$$

onde a constante de Coulomb tem valor $k_e = 8,99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$. A forma vetorial da lei de Coulomb é

$$\mathbf{F}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{12} \quad [19.2]$$

Um **campo elétrico** existe em um ponto no espaço se uma carga de prova positiva q_0 colocada nesse ponto experimentar uma força elétrica. O campo elétrico é definido como

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_e}{q_0} \quad [19.3]$$

A força em uma partícula com carga q colocada em um campo elétrico $\mathbf{E}$ é

$$\mathbf{F}_e = q\mathbf{E} \quad [19.4]$$

O campo elétrico devido à carga pontual q a uma distância de r da carga é

$$\mathbf{E} = k_e \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad [19.5]$$

onde $\hat{\mathbf{r}}$ é um vetor unitário orientado da carga para o ponto em questão. O campo elétrico é orientado radialmente para fora a partir de uma carga positiva e orientado em direção a uma carga negativa.

O campo elétrico decorrente de um grupo de cargas pode ser obtido usando-se o princípio de superposição. Isto é, o campo elétrico total é igual à soma vetorial dos campos elétricos de todas as cargas em um ponto qualquer:

$$\mathbf{E} = k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i \quad [19.6]$$

De maneira similar, o campo elétrico de uma distribuição contínua de carga em um ponto é

$$\mathbf{E} = k_e \int \frac{dq}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad [19.7]$$

onde dq é a carga sobre um elemento da distribuição de carga e r é a distância do elemento ao ponto em questão.

As **linhas do campo elétrico** são úteis para descrever o campo elétrico em qualquer região do espaço. O vetor $\mathbf{E}$ do campo elétrico é sempre tangente às linhas do campo elétrico em cada ponto. Além disso, o número de linhas por unidade de área através de uma superfície perpendicular às linhas é proporcional ao valor de $\mathbf{E}$ nessa região.

O **fluxo elétrico** é proporcional ao número de linhas do campo elétrico que penetram uma superfície. Se o campo elétrico for uniforme e fizer um ângulo θ com a normal à superfície, o fluxo elétrico através da superfície é

$$\Phi_E = EA \cos \theta \quad [19.18]$$

Em geral, o fluxo elétrico através de uma superfície é definido pela expressão

$$\Phi_E = \int_{\text{superfície}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} \quad [19.19]$$

A **lei de Gauss** diz que o fluxo elétrico resultante Φ_E através de qualquer superfície gaussiana fechada é igual à carga líquida no interior da superfície dividida por ϵ_0 :

$$\Phi_E = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q_{\text{in}}}{\epsilon_0} \quad [19.22]$$

Usando a lei de Gauss, pode-se calcular o campo elétrico devido a várias distribuições simétricas de carga.

Um **condutor em equilíbrio eletrostático** tem as seguintes propriedades:

1. O campo elétrico é nulo em toda parte dentro do condutor.
2. Se o condutor isolado tiver uma carga líquida, a carga em excesso residirá inteiramente em sua superfície.
3. O campo elétrico imediatamente fora do condutor carregado é perpendicular à superfície do condutor e tem uma magnitude de σ/ϵ_0 , onde σ é a carga por unidade de área nesse ponto.
4. Em um condutor de forma irregular, a carga por unidade de área é máxima nas posições onde o raio de curvatura da superfície é mínimo.

QUESTÕES

- 1 Explique, de um ponto de vista atômico, por que a carga geralmente é transferida por elétrons.
- 2 Frequentemente são observadas (ou ouvidas) faíscas em um dia seco quando roupas são removidas de um secador em ambiente escuro. Explique.
- 3 Um balão é carregado negativamente por atrito e adere, então, a uma parede. Isso significa que a parede está carregada positivamente? Por que o balão cai depois de certo tempo?
- 4 Um pente carregado atrai frequentemente pequenos pedaços de papel seco que então voam para longe quando tocam no pente. Explique.
- 5 O pessoal da sala cirúrgica deve usar sapatos condutores especiais para trabalhar perto do oxigênio. Por quê? Descreva o que poderia acontecer se o pessoal usasse sapatos de borracha.
- 6 A vida seria diferente se o elétron fosse carregado positivamente e o próton fosse carregado negativamente? A escolha dos sinais tem algum significado sobre as interações físicas e químicas? Explique.
- 7 Explique as semelhanças e as diferenças entre a lei de Newton da gravitação universal e a lei de Coulomb.
- 8 Quando se define o campo elétrico, por que é necessário especificar que o módulo da carga de prova é muito pequeno?
- 9 Considere duas cargas pontuais iguais separadas por uma distância d . Em que ponto (além do ∞) uma terceira carga de prova não experimentaria nenhuma força resultante?
- 10 Uma carga pontual negativa $-q$ é colocada no ponto P perto do anel positivamente carregado mostrado na Figura 19.15 (Exemplo 19.5). Se $x \ll a$, descreva o movimento da carga pontual se ela for solta do repouso.
- 11 Uma carga $4q$ está a uma distância r de uma carga $-q$. Compare o número de linhas do campo elétrico que começa na carga $4q$ com o número que termina na carga $-q$. Onde terminam as linhas extras que começam em $4q$?
- 12 Uma placa muito grande, fina e plana de alumínio de área A tem uma carga total Q distribuída uniformemente sobre suas superfícies. A mesma carga é espalhada uniformemente apenas sobre a superfície superior de uma placa idêntica feita de vidro. Compare os campos elétricos imediatamente acima dos centros das superfícies superiores das placas.
- 13 Se mais linhas de campo elétrico estiverem saindo de uma superfície gaussiana do que entrando, o que você pode concluir sobre a carga líquida englobada por essa superfície?
- 14 Um campo elétrico uniforme existe em uma região do espaço sem cargas. O que você pode concluir sobre o fluxo elétrico *resultante* através de uma superfície gaussiana colocada nesta região do espaço?
- 15 Se a carga total dentro de uma superfície fechada for conhecida, mas a distribuição de carga não for especificada, você pode usar a lei de Gauss para encontrar o campo elétrico? Explique.
- 16 Explique por que o fluxo elétrico através de uma superfície fechada com uma carga interna dada é independente do tamanho ou da forma da superfície.
- 17 Uma demonstração comum envolve carregar um balão, que é um isolante, friccionando-o em sua cabeça e encostando o balão no teto ou em uma parede, que também é um isolante. A atração elétrica entre o balão carregado e a parede neutra faz o balão aderir à parede. Imagine agora que temos duas folhas planas infinitamente grandes de material isolante. Uma é carregada e a outra é neutra. Se essas folhas forem colocadas em contato, haverá uma força atrativa entre elas, como havia entre o balão e a parede?
- 18 Explique por que a carga em excesso sobre um condutor isolado deve residir na superfície deste, usando a natureza repulsiva da força entre cargas de mesmo sinal e a liberdade de movimento da carga dentro do condutor.
- 19 Quando é possível modelar uma distribuição de carga como uma carga pontual?
- 20 Uma pessoa é colocada no interior de uma esfera metálica oca grande que é isolada do solo. Se uma carga grande for colocada na esfera, a pessoa se machucará ao tocar o interior da esfera? Explique o que acontecerá se a pessoa tiver também uma carga inicial cujo sinal é oposto àquele da carga na esfera.
- 21 Imagine dois dipolos elétricos no vácuo. Cada dipolo tem carga líquida nula. Há uma força elétrica entre os dipolos – isto é, dois corpos com *carga líquida nula* podem exercer forças elétricas entre si? Se puderem, a força é de atração ou de repulsão?
- 22 Duas esferas sólidas, ambas de raio R , têm cargas totais idênticas Q . Uma esfera é um bom condutor e a outra um isolante. Como se comparam os campos elétricos fora dessas duas esferas se a carga na esfera isolante for distribuída uniformemente por todo o seu volume? Os campos são idênticos dentro das duas esferas?

PROBLEMAS

1, 2°, 3° = direto, intermediário, desafiador

 = computador útil para a solução do problema

 = par de problemas numérico/simbólico

 = aplicação à ciência da vida

Seção 19.2 Propriedades das Cargas Elétricas

Seção 19.3 Isolantes e Condutores

Seção 19.4 Lei de Coulomb

- (a) Calcule o número de elétrons em um pequeno alfinete de prata eletricamente neutro que tem massa de 10,0 g. A prata tem 47 elétrons por átomo e sua massa molar é 107,87 g/mol. (b) Elétrons são adicionados ao alfinete até que a carga negativa resultante seja 1,00 mC. Quantos elétrons são adicionados para cada $1,00 \times 10^9$ elétrons já presentes?
- Suponha que 1,00 g de hidrogênio seja separado em elétrons e em prótons. Suponha também que os prótons sejam colocados no Pólo Norte da Terra e que os elétrons sejam colocados no Pólo Sul. Qual é a força de compressão resultante sobre a Terra?
- O ganhador do Prêmio Nobel de física Richard Feynman disse uma vez que se duas pessoas ficassem de pé a um braço de distância uma da outra e se cada uma delas tivesse 1% mais elétrons do que prótons, a força de repulsão entre elas seria bastante para levantar um “peso” igual ao de toda a Terra. Faça um cálculo da ordem de grandeza para confirmar essa afirmação.
- Dois pequenas esferas condutoras idênticas são colocadas com seus centros separados por 0,300 m. A uma é dada uma carga de 12,0 nC, e à outra, uma carga de -18,0 nC. (a) Encontre a força elétrica exercida entre elas. (b) As esferas são conectadas por um fio condutor. Encontre a

força elétrica entre as duas depois que elas atingirem o equilíbrio.

- Dois prótons em um núcleo atômico são separados normalmente por uma distância de 2×10^{-15} m. A força elétrica de repulsão entre os prótons é enorme, mas a força nuclear de atração é ainda mais forte e evita que o núcleo se desintegre. Qual é o valor da força elétrica entre dois prótons separados por $2,00 \times 10^{-15}$ m?
- Problema de Revisão.** Na teoria de Bohr do átomo de hidrogênio, um elétron descreve uma órbita circular ao redor de um próton, sendo o raio da órbita de $5,29 \times 10^{-11}$ m. (a) Encontre a força elétrica entre os dois. (b) Se esta força causa a aceleração centrípeta do elétron, qual é a velocidade do elétron?
- Três cargas pontuais são colocadas nos vértices de um triângulo equilátero, como mostrado na Figura P19.7. Calcule a força elétrica resultante sobre a carga de $7,00 \mu\text{C}$.

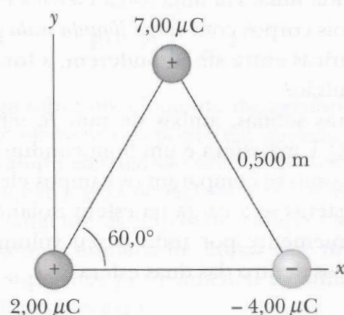


Figura P19.7

Seção 19.5 Campos Elétricos

- Quais são a magnitude e a direção do campo elétrico que equilibra o peso (a) de um elétron e (b) de um próton? (Use os dados da Tabela 19.1.)
- Na Figura P19.9, determine o ponto (diferente do infinito) em que o campo elétrico é zero.

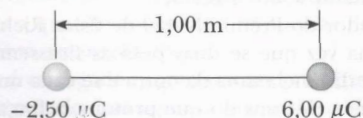


Figura P19.9

- Três cargas pontuais são arranjadas como mostrado na Figura P19.10. (a) Encontre o campo elétrico vetorial que as cargas de 6,00 nC e -3,00 nC criam juntas na origem. (b) Encontre a força vetorial na carga de 5,00 nC.

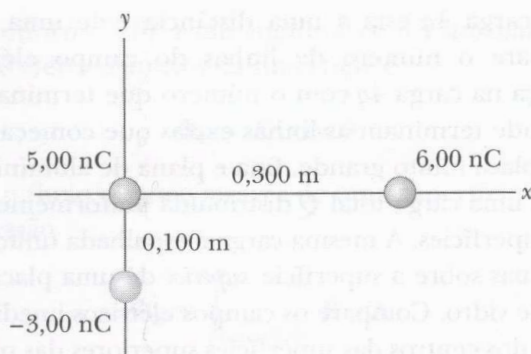


Figura P19.10

- Três cargas positivas iguais q estão nos vértices de um triângulo equilátero de lado a como na Figura P19.11. (a) Suponha que todas as três cargas criam um campo elétrico. Encontre a posição de um ponto (diferente de ∞) onde o campo elétrico é zero. (Dica: Esboce as linhas do campo no plano das cargas.) (b) Quais são a magnitude e a direção do campo elétrico em P devidas às duas cargas na base?

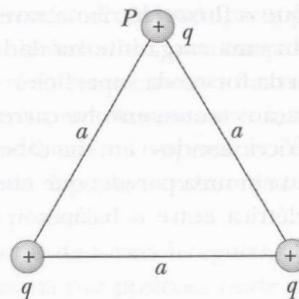


Figura P19.11

- 12* Duas cargas pontuais de $2,00 \mu\text{C}$ estão situadas no eixo x . Uma está situada em $x = 1,00 \text{ m}$ e a outra está em $x = -1,00 \text{ m}$. (a) Determine o campo elétrico no eixo y em $y = 0,500 \text{ m}$. (b) Calcule a força elétrica sobre uma carga de $-3,00 \mu\text{C}$ colocada sobre o eixo y em $y = 0,500 \text{ m}$.
- 13* Quatro cargas pontuais estão nos vértices de um quadrado de lado a , como mostrado na Figura P19.13. (a) Determine a magnitude e a direção do campo elétrico na posição da carga q . (b) Qual é a força resultante sobre q ?

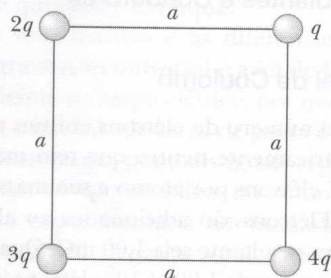


Figura P19.13

- 14 Uma haste de $14,0 \text{ cm}$ de comprimento uniformemente carregada tem uma carga total de $-22,0 \mu\text{C}$. Determine a magnitude e a direção do campo elétrico ao longo do eixo da haste em um ponto a $36,0 \text{ cm}$ de seu centro.
- 15* Considere o dipolo elétrico mostrado na Figura P19.15. Mostre que o campo elétrico em um ponto distante ao longo do eixo x é $E_x \approx 4k_e q a / x^3$.

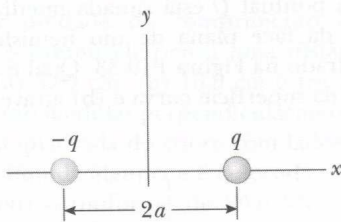


Figura P19.15

- 16 Um anel uniformemente carregado de raio de $10,0 \text{ cm}$ tem uma carga total de $75,0 \mu\text{C}$. Encontre o campo elétrico no eixo do anel afastado do seu centro a uma distância de (a) $1,00 \text{ cm}$, (b) $5,00 \text{ cm}$, (c) $30,0 \text{ cm}$ e (d) 100 cm .
- 17* Uma haste isolante uniformemente carregada de comprimento de $14,0 \text{ cm}$ tem a forma de um semicírculo, como mostrado na Figura P19.17. A haste tem uma carga total de $-7,50 \mu\text{C}$. Encontre a magnitude e a direção do campo elétrico em O , o centro do semicírculo.

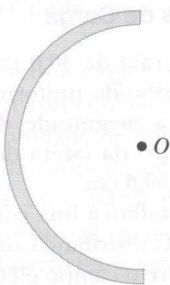


Figura P19.17

- 18* Uma linha contínua de carga encontra-se ao longo do eixo x , estendendo-se de $x = +x_0$ até o infinito positivo. A linha é carregada com densidade linear uniforme λ_0 . Quais são a magnitude e a direção do campo elétrico na origem?
- 19* Uma haste fina de comprimento ℓ e carga uniforme por unidade de comprimento λ encontra-se ao longo do eixo x , como mostrado na Figura P19.19. (a) Mostre que o campo elétrico em P , a uma distância y da haste, sobre a mediatriz, não tem nenhuma componente x e é dado por $E = 2k_e \lambda \sin \theta_0 / y$. (b) Use seu resultado do item (a) para mostrar que o campo de uma haste de comprimento infinito é $E = 2k_e \lambda / y$. (Dica: Calcule primeiramente o campo em P devido a um elemento de comprimento dx , que tem uma carga λdx . Mude então as variáveis de x para θ , usando as relações $x = y \tan \theta$ e $dx = y \sec^2 \theta d\theta$, e integre em θ .)

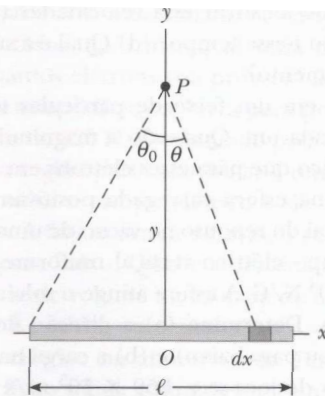


Figura P19.19

- 20 Três cilindros plásticos sólidos idênticos têm raio de $2,50 \text{ cm}$ e comprimento de $6,00 \text{ cm}$. Um (a) tem carga por unidade de área de $15,0 \text{ nC/m}^2$ espalhada uniformemente sobre sua superfície. Um outro (b) tem a mesma carga por unidade de área apenas sobre sua superfície lateral. O terceiro (c) tem carga uniforme por unidade de volume de 500 nC/m^3 por todo o plástico. Encontre a carga de cada cilindro.

Seção 19.6 Linhas do Campo Elétrico

- 21 Uma haste negativamente carregada de comprimento finito tem uma carga uniforme por unidade de comprimento. Esboce as linhas do campo elétrico em um plano que contém a haste.
- 22 A Figura P19.22 mostra as linhas do campo elétrico para duas cargas pontuais separadas por uma distância pequena. (a) Determine a razão q_1/q_2 . (b) Quais são os sinais de q_1 e de q_2 ?

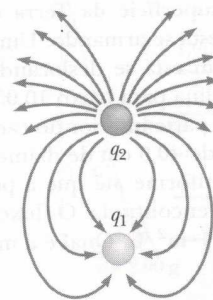


Figura P19.22

Seção 19.7 Movimento de Partículas Carregadas em um Campo Elétrico Uniforme

- 23 Um próton acelera a partir do repouso em um campo elétrico uniforme de 640 N/C . Algum tempo depois, sua velocidade alcança $1,20 \times 10^6 \text{ m/s}$ (não relativístico, porque v é muito menor do que a velocidade da luz). (a) Encontre a aceleração do próton. (b) Quanto tempo leva para o próton alcançar essa velocidade? (c) Que distância ele percorreu nesse tempo? (d) Qual é a sua energia cinética nesse momento?
- 24 Os elétrons em um feixe de partículas têm uma energia cinética K cada um. Quais são a magnitude e a direção do campo elétrico que pára esses elétrons em uma distância d ?
- 25 Uma pequena esfera carregada positivamente tem massa de $1,00 \text{ g}$ e cai do repouso no vácuo de uma altura de $5,00 \text{ m}$ em um campo elétrico vertical uniforme com magnitude de $1,00 \times 10^4 \text{ N/C}$. A esfera atinge o solo a uma velocidade de $21,0 \text{ m/s}$. Determine (a) a direção do campo elétrico (para cima ou para baixo) e (b) a carga na esfera.
- 26 Um próton desloca-se a $4,50 \times 10^5 \text{ m/s}$ no sentido horizontal. Ele entra em um campo elétrico vertical uniforme com magnitude de $9,60 \times 10^3 \text{ N/C}$. Desprezando quaisquer efeitos gravitacionais, encontre (a) o tempo que leva para o próton se deslocar $5,00 \text{ cm}$ horizontalmente, (b) seu deslocamento vertical depois que percorreu $5,00 \text{ cm}$ horizontalmente e (c) as componentes horizontal e vertical de sua velocidade após se deslocar $5,00 \text{ cm}$ horizontalmente.
- 27 Duas placas horizontais metálicas, cada uma com 100 mm quadrados, são alinhadas a $10,0 \text{ mm}$ de distância, uma acima da outra. Elas recebem cargas iguais e opostas de modo que um campo elétrico uniforme de 2000 N/C , apontando para baixo, existe na região entre elas. Uma partícula de massa de $2,00 \times 10^{-16} \text{ kg}$ e com carga positiva de $1,00 \times 10^{-6} \text{ C}$ deixa o centro da placa negativa inferior com velocidade inicial de $1,00 \times 10^5 \text{ m/s}$ fazendo um ângulo de $37,0^\circ$ acima da horizontal. Descreva a trajetória da partícula. Que placa ela atinge? Onde alcança a placa em relação ao seu ponto inicial?

Seção 19.8 Fluxo Elétrico

- 28 Um campo elétrico vertical de magnitude $2,00 \times 10^4 \text{ N/C}$ existe acima da superfície da Terra em um dia em que uma tempestade está se armando. Um carro retangular de $6,00 \text{ m}$ por $3,00 \text{ m}$ está se deslocando ao longo de uma estrada que se inclina para baixo $10,0^\circ$. Determine o fluxo elétrico através da parte inferior do carro.
- 29 Um anel circular de $40,0 \text{ cm}$ de diâmetro é girado em um campo elétrico uniforme até que a posição do fluxo elétrico máximo seja encontrada. O fluxo medido nessa posição é $5,20 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$. Qual é a magnitude do campo elétrico?

Seção 19.9 Lei de Gauss

- 30 O campo elétrico medido em toda parte sobre a superfície de uma casca esférica fina de raio de $0,750 \text{ m}$ é de 890 N/C e aponta radialmente para o centro da esfera. (a) Qual é a carga líquida dentro da superfície da esfera? (b) O que você pode concluir sobre a natureza e a distribuição de carga dentro da casca esférica?
- 31 As seguintes cargas estão situadas dentro de um submarino: $5,00 \mu\text{C}$, $-9,00 \mu\text{C}$, $27,0 \mu\text{C}$ e $-84,0 \mu\text{C}$. (a) Calcule o fluxo

elétrico resultante através do casco do submarino. (b) O número de linhas do campo elétrico que deixam o submarino é superior, igual ou inferior ao número que entra?

- 32 Uma carga de $170 \mu\text{C}$ está no centro de um cubo cujo lado tem $80,0 \text{ cm}$. (a) Encontre o fluxo total através de cada face do cubo. (b) Encontre o fluxo através de toda a superfície do cubo. (c) Suas respostas aos itens (a) ou (b) mudariam se a carga não estivesse no centro? Explique.
- 33 Uma carga pontual Q está situada imediatamente acima do centro da face plana de um hemisfério de raio R , como mostrado na Figura P19.33. Qual é o fluxo elétrico (a) através da superfície curva e (b) através da face plana?

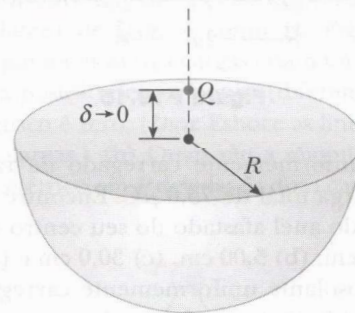


Figura P19.33

Seção 19.10 Aplicação da Lei de Gauss a Distribuições Simétricas de Carga

- 34 Uma esfera sólida de raio de $40,0 \text{ cm}$ tem carga positiva total de $26,0 \mu\text{C}$ distribuída uniformemente por todo o seu volume. Calcule a magnitude do campo elétrico a uma distância do centro da esfera de (a) 0 cm , (b) $10,0 \text{ cm}$, (c) $40,0 \text{ cm}$ e (d) $60,0 \text{ cm}$.
- 35 Considere uma casca esférica fina com raio de $14,0 \text{ cm}$ e carga total de $32,0 \mu\text{C}$ distribuída uniformemente sobre sua superfície. Encontre o campo elétrico a uma distância do centro da distribuição de carga de (a) $10,0 \text{ cm}$ e (b) $20,0 \text{ cm}$.
- 36 Uma casca cilíndrica de raio de $7,00 \text{ cm}$ e comprimento de 240 cm tem sua carga distribuída uniformemente sobre sua superfície curva. A magnitude do campo elétrico em um ponto radialmente distante $19,0 \text{ cm}$ do seu eixo (medido a partir do centro da casca) é de $36,0 \text{ kN/C}$. Encontre (a) a carga líquida sobre a casca e (b) o campo elétrico em um ponto a $4,00 \text{ cm}$ do eixo, medido radialmente para fora a partir do centro da casca.
- 37 Considere uma distribuição de carga em um longo cilindro de raio R , com densidade de carga ρ uniforme. Encontre o campo elétrico a uma distância r do eixo, onde $r < R$.
- 38 Um pedaço de isopor de $10,0 \text{ g}$ tem uma carga líquida de $-0,700 \mu\text{C}$ e flutua acima do centro de uma folha horizontal grande de plástico que tem densidade de carga uniforme sobre sua superfície. Qual é a carga por área sobre a folha plástica?

- 39 Em uma reação de fissão nuclear, um núcleo de urânio 235, que contém 92 prótons, divide-se em duas esferas menores, cada uma com 46 prótons e com raio de $5,90 \times 10^{-15}$ m. Qual é o valor da força elétrica de repulsão que afasta as duas esferas?

Seção 19.11 Condutores em Equilíbrio Eletrostático

- 40 Uma haste longa e reta de metal tem raio de 5,00 cm e carga por unidade de comprimento de 30,0 nC/m. Encontre o campo elétrico a uma distância do eixo da haste de (a) 3,00 cm, (b) 10,0 cm e (c) 100 cm, onde as distâncias são medidas perpendicularmente à haste.
- 41 Uma placa quadrada do cobre com lados de 50,0 cm não tem carga líquida alguma e é colocada em uma região de campo elétrico uniforme de 80,0 kN/C orientado perpendicularmente à placa. Encontre (a) a densidade de carga de cada face da placa e (b) a carga total em cada face.
- 42 O campo elétrico sobre a superfície de um condutor de formato irregular varia de 56,0 kN/C a 28,0 kN/C. Calcule a densidade local de carga por unidade de área no ponto sobre a superfície onde o seu raio de curvatura é (a) máximo e (b) mínimo.
- 43 Uma placa condutora quadrada fina cujo lado mede 50,0 cm encontra-se no plano xy . Se uma carga total de $4,00 \times 10^{-8}$ C for colocada na placa, encontre (a) a densidade de carga na placa, (b) o campo elétrico imediatamente acima da placa e (c) o campo elétrico imediatamente abaixo da placa. Você pode supor que a densidade de carga é uniforme.
- 44 Um fio longo e reto é englobado por um cilindro metálico cujo eixo coincide com o eixo do fio. O fio tem uma carga por unidade de comprimento dada por λ e o cilindro tem uma carga líquida por unidade de comprimento dada por 2λ . A partir dessa informação, use a lei de Gauss para encontrar (a) a carga por unidade de comprimento nas superfícies interna e externa do cilindro e (b) o campo elétrico fora do cilindro, a uma distância r do eixo.
- 45 Uma esfera condutora sólida com raio de 2,00 cm tem carga de $8,00 \mu\text{C}$. Uma casca esférica condutora com raio interno de 4,00 cm e raio externo de 5,00 cm é concêntrica com a esfera sólida e tem uma carga total $-4,00 \mu\text{C}$. Encontre o campo elétrico a uma distância do centro dessa configuração de carga de (a) $r = 1,00$ cm, (b) $r = 3,00$ cm, (c) $r = 4,50$ cm e (d) $r = 7,00$ cm.

Seção 19.12 Conexão com o Contexto – O Campo Elétrico Atmosférico

- 46 No tempo bom, o campo elétrico no ar em uma determinada posição imediatamente acima da superfície da Terra é de 120 N/C orientado para baixo. (a) Qual é a densidade de carga por unidade de superfície sobre a superfície da Terra? É positiva ou negativa? (b) Se o clima fosse bom

em toda parte e se a densidade de carga por unidade de superfície fosse uniforme, qual seria a carga de toda a Terra? Quantos elétrons (ou prótons) adicionais estariam sobre toda a superfície da Terra para produzir um campo atmosférico de 120 N/C orientado para baixo?

- 47 Sobre uma região particular no ar a uma altura de 500 m acima do solo, o campo elétrico é de 120 N/C dirigido para baixo. A 600 m acima do solo, o campo elétrico é de 100 N/C para baixo. Qual é a densidade média de carga por unidade de volume na camada de ar entre essas duas elevações? É positiva ou negativa?
- 48 O campo elétrico na atmosfera da Terra sugere que as suas superfícies sólida e líquida têm uma carga de aproximadamente -5×10^5 C. Imagine que o planeta como um todo tivesse uma carga de $-5,00 \times 10^5$ C e que a Lua, com 27,3% do raio da Terra, tivesse uma carga de $-1,37 \times 10^5$ C. (a) Encontre a força elétrica que a Terra exerceria sobre a Lua. (b) Compare-a com a força gravitacional que a Terra exerce sobre a Lua. Como o seu cálculo sugere, para explicar os movimentos astronômicos, podemos tratar as forças reais como puramente gravitacionais. Podemos dizer que os corpos astronômicos têm cargas totais insignificantes.

Problemas Adicionais

- 49 Uma pequena bola de plástico de 2,00 g é suspensa por um fio de 20,0 cm de comprimento em um campo elétrico uniforme, como mostrado na Figura P19.49. Se a bola estiver em equilíbrio quando o fio fizer um ângulo de $15,0^\circ$ com a vertical, qual será a carga líquida na bola?

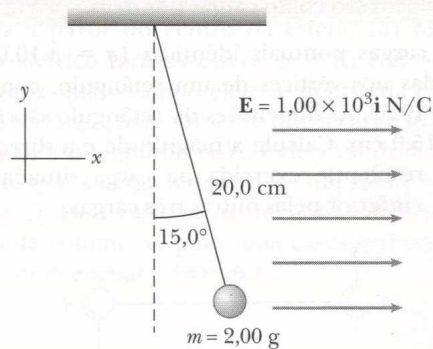


Figura P19.49

- 50 Três pequenas bolas idênticas de isopor ($m = 2,00$ g) são suspensas de um ponto fixo por três linhas não condutoras, cada uma com um comprimento de 50,0 cm e com massa insignificante. No equilíbrio, as três bolas formam um triângulo equilátero com lados de 30,0 cm. Qual é a carga comum q em cada bola?

- 51* Dois blocos metálicos idênticos que repousam sobre uma superfície horizontal sem atrito são conectados por uma mola metálica leve que tem constante elástica de 100 N/m e um comprimento quando não esticada de 0,300 m, como mostra a Figura P19.51a. Uma carga total Q é colocada lentamente no sistema, fazendo a mola esticar até um comprimento de equilíbrio de 0,400 m, como é mostrado na Figura P19.51b. Determine o valor de Q , supondo que toda a carga reside nos blocos e que os blocos são como cargas pontuais.

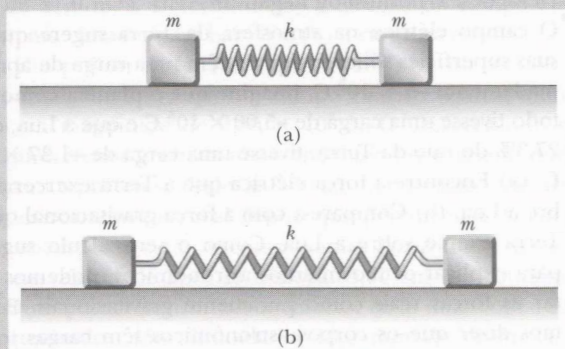


Figura P19.51 Problemas 51 e 52.

- 52* Dois blocos metálicos idênticos que repousam sobre uma superfície horizontal sem atrito são conectados por uma mola metálica leve que tem uma constante elástica k e comprimento L_0 quando não esticada, como mostra a Figura P19.51a. Uma carga total Q é colocada lentamente no sistema, fazendo a mola esticar até um comprimento de equilíbrio L , como é mostrado na Figura P19.51b. Determine o valor de Q , supondo que toda a carga reside nos blocos e que os blocos são como cargas pontuais.

- 53* Quatro cargas pontuais idênticas ($q = +10,0 \mu\text{C}$) estão localizadas nos vértices de um retângulo, como mostra a Figura P19.53. As dimensões do retângulo são $L = 60,0 \text{ cm}$ e $W = 15,0 \text{ cm}$. Calcule a magnitude e a direção da força elétrica resultante exercida na carga situada no vértice esquerdo inferior pelas outras três cargas.

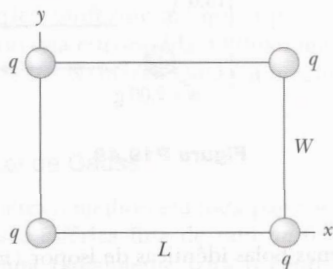


Figura P19.53

- 54* Três cargas de igual magnitude q estão presas nos vértices de um triângulo equilátero (Figura P19.54). Uma quarta carga Q está livre para mover-se ao longo do eixo x positivo

sob a influência das forças exercidas pelas três cargas fixas. Encontre um valor para s para o qual Q está em equilíbrio. Você precisará resolver uma equação transcendental.

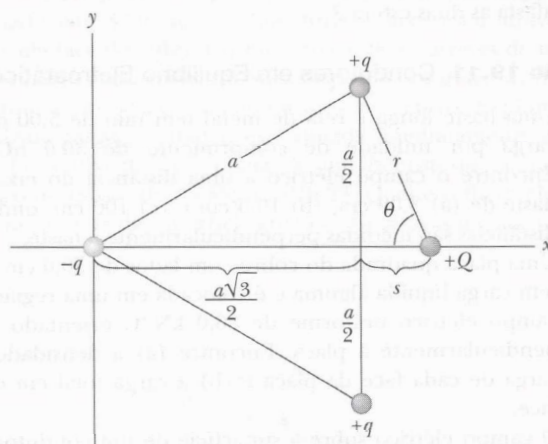


Figura P19.54

- 55* Duas esferas pequenas de massa m estão suspensas por fios de comprimento ℓ , que são conectados em um ponto comum. Uma esfera tem carga Q e a outra tem carga $2Q$. Suponha que são pequenos os ângulos θ_1 e θ_2 que os fios fazem com a vertical. (a) Como se relacionam θ_1 e θ_2 ? (b) Mostre que a distância r entre as esferas é dada por

$$r \approx \left(\frac{4k_e Q^2 \ell}{mg} \right)^{1/3}$$

- 56* Uma linha de carga com uma densidade uniforme de $35,0 \text{ nC/m}$ encontra-se ao longo da linha $y = -15,0 \text{ cm}$, entre os pontos com coordenadas $x = 0$ e $x = 40,0 \text{ cm}$. Encontre o campo elétrico que ela cria na origem.

- 57* Considere a distribuição de carga mostrada na Figura P19.57. (a) Mostre que a magnitude do campo elétrico no centro de qualquer face do cubo tem um valor de $2,18k_e q/s^2$.

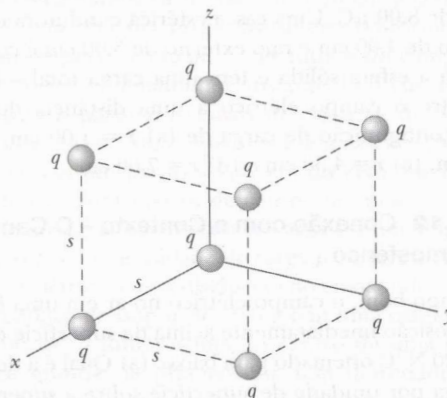


Figura P19.57

(b) Qual é a direção do campo elétrico no centro da face superior do cubo?

58. **Problema de Revisão.** Uma partícula negativamente carregada $-q$ é colocada no centro de um anel uniformemente carregado, onde o anel tem uma carga positiva total Q como no Exemplo 19.5. A partícula, confinada a deslocar-se ao longo do eixo x , é deslocada uma pequena distância x ao longo do eixo (onde $x \ll a$) e liberada. Mostre que a partícula oscila com movimento harmônico simples e que sua frequência é dada por

$$f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{k_e q Q}{ma^3} \right)^{1/2}$$

59. Uma esfera isolante sólida de raio a tem densidade de carga uniforme ρ e carga total Q . Uma esfera oca não carregada condutora, cujos raios interno e externo são b e c , como mostra a Figura P19.59, é concêntrica a essa esfera. (a) Encontre a magnitude do campo elétrico nas regiões $r < a$, $a < r < b$, $b < r < c$ e $r > c$. (b) Determine a carga induzida por unidade de área nas superfícies interna e externa da esfera oca.

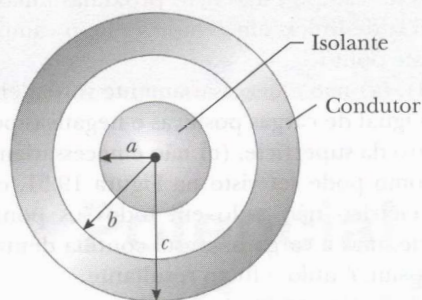


Figura P19.59

60. Duas folhas de carga infinitas, não condutoras, são paralelas entre si, como mostra a Figura P19.60. A folha na

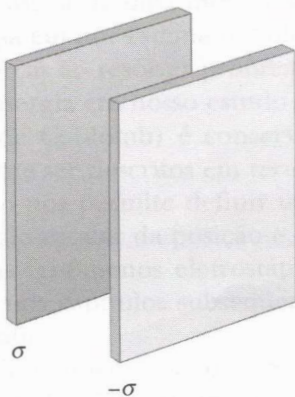


Figura P19.60

esquerda tem uma carga por unidade de área σ uniforme, e a da direita tem uma densidade de carga uniforme $-\sigma$. Calcule o campo elétrico nos pontos (a) à esquerda, (b) no meio e (c) à direita das duas folhas. (Dica: Veja o Exemplo 19.12.)

61. Repita os cálculos do Problema 60 quando as duas folhas têm cargas por unidade de área σ uniformes *positivas*.
62. Uma esfera de raio $2a$ é feita de material não condutor que tem carga por unidade de volume ρ uniforme. (Suponha que o material não afeta o campo elétrico.) Remove-se agora uma cavidade esférica de raio a da esfera, como mostra a Figura P19.62. Mostre que o campo elétrico dentro da cavidade é uniforme e é dado por $E_x = 0$ e por $E_y = \rho a / 3\epsilon_0$. (Dica: O campo dentro da cavidade é a superposição do campo devido à esfera original mais o campo devido a uma esfera do tamanho da cavidade com uma densidade uniforme de carga negativa $-\rho$.)

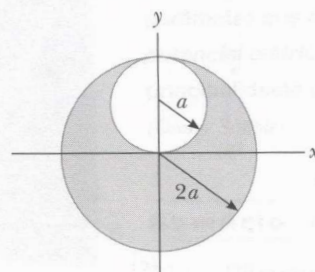
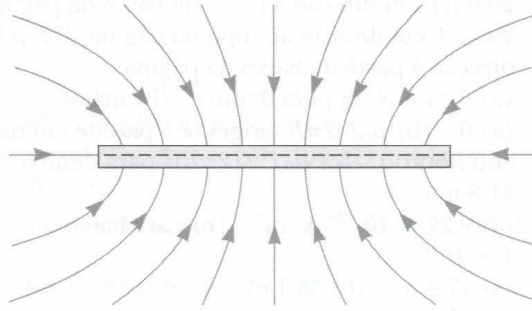


Figura P19.62

63. Uma esfera isolante sólida de raio R tem uma densidade de carga não uniforme que varia com r de acordo com a expressão $\rho = Ar^2$, onde A é uma constante e $r < R$ é medida a partir do centro da esfera. (a) Mostre que o campo elétrico fora da esfera ($r > R$) é $E = AR^5 / 5\epsilon_0 r^2$. (b) Mostre que o campo elétrico dentro da esfera ($r < R$) é $E = Ar^3 / 5\epsilon_0$. (Dica: Observe que a carga total Q na esfera é igual à integral de ρdV , onde r vai de 0 a R ; observe também que a carga q dentro de um raio $r < R$ é menor do que Q . Para calcular as integrais, observe que o elemento de volume dV para uma casca esférica de raio r e espessura dr é igual a $4\pi r^2 dr$.)

Respostas dos problemas ímpares

1. (a) $2,62 \times 10^{24}$ elétrons (b) 2,38 elétrons
3. A força é $\sim 10^{26}$ N
5. 57,5 N
7. 0,872 N a 330°
9. 1,82 m para a esquerda da carga negativa
11. (a) O campo é nulo no centro do triângulo.
(b) $1,73k_e q\mathbf{j}/a^2$
13. (a) $5,91k_e q/a^2$ a $58,8^\circ$ (b) $5,91k_e q^2/a^2$ a $58,8^\circ$
17. $-21,6\mathbf{i}$ MN/C
- 21.



23. (a) 61,4 Gm/s² (b) 19,5 μ s (c) 11,7 m (d) 1,20 fJ
25. (a) Para baixo (b) 3,43 μ C
27. A partícula colide com a placa negativa após deslocar-se em uma parábola com uma altura de 0,181 mm e uma largura de 0,961 mm.
29. 4,14 MN/C
31. (a) $-6,89 \text{ MN} \cdot \text{m}^2/\text{C}$
(b) O número de linhas que entra excede o número que sai 2,91 vezes ou mais.
33. (a) $+Q/2\epsilon_0$ (b) $-Q/2\epsilon_0$
35. (a) 0 (b) 7,19 MN/C para fora do centro
37. $\mathbf{E} = \rho r/2\epsilon_0$ para fora do eixo
39. 3,50 kN
41. (a) $+708 \text{ nC/m}^2$ e -708 nC/m^2
(b) $+177 \text{ nC}$ e -177 nC
43. (a) $80,0 \text{ nC/m}^2$ em cada face (b) $9,04\mathbf{k}$ kN/C
(c) $-9,04\mathbf{k}$ kN/C
45. (a) 0 (b) 79,9 MN/C radialmente para fora (c) 0
(d) 7,34 MN/C radialmente para fora
47. positiva, $1,77 \times 10^{-12} \text{ C/m}^3$
49. 5,25 μ C
51. 26,7 μ C
53. 40,9 N a 263°
55. (a) $\theta_1 = \theta_2$
57. (b) na direção $+z$
59. (a) $\rho r/3\epsilon_0$; $Q/4\pi\epsilon_0 r^2$; 0; $Q/4\pi\epsilon_0 r^2$; todos radialmente para fora (b) $-Q/4\pi b^2$ e $+Q/4\pi c^2$
61. (a) σ/ϵ_0 afastando-se de ambas as placas (b) 0
(c) σ/ϵ_0 afastando-se de ambas as placas