

Versão <b>000</b>	Nome	Turma
----------------------	------	-------

- 1 (a) Escreva as equações de Maxwell na forma integral e explique resumidamente o significado físico de cada uma.  
 (b) À partir das equações de Maxwell na forma integral, escreva as equações de Maxwell na forma diferencial usando os teoremas da divergência e do rotacional.  
 (c) Discuta os argumentos teóricos utilizados por Maxwell para corrigir as equações do eletromagnetismo antes dele.
- 2 (a) Verifique a validade das seguintes igualdades trigonométricas:  $\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla^2 \vec{A} - \nabla(\nabla \cdot \vec{A})$   
 (b) A partir das equações de Maxwell demonstre que os campos elétrico e magnético obedecem às equações de onda tridimensional e que a velocidade de propagação é a velocidade da luz.
- 3 (a) Verifique que, de fato,  $\vec{E}(z, t) = E_0 \cos(kz - \omega t + \delta)\hat{i}$  é solução da equação da onda para o campo elétrico.  
 (b) Obtenha os campos elétrico e magnético como solução das equações de Maxwell e da equação de onda para uma onda plana monocromática senoidal. Discuta as grandezas envolvidas na propagação da onda: comprimento de onda, frequência angular, número de onda, velocidade de propagação.
- 4 Escreva a parte real dos campos elétrico e magnético para uma onda plana monocromática de amplitude  $E_0$ , frequência  $\omega$ , e constante de fase ( $\delta = 0$ ) nula que:
  - (a) viaja na direção negativa de  $x$  e está polarizada na direção  $\hat{n} = \hat{z}$ ;
  - (b) viaja na direção da origem para o ponto  $(1, 1, 1)$ , com polarização paralela ao plano  $xz$ . Como  $\hat{n}$  é paralelo ao plano  $xz$ , ele deve ter a forma  $\hat{n} = \alpha\hat{x} + \beta\hat{z}$ .  $\hat{n}$  é um vetor unitário.

Em cada caso dê as componentes cartesianas de  $\hat{k}$  e  $\hat{n}$ . Lembrem-se:

$$\hat{k} \cdot \hat{n} = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = E_0 \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \delta)\hat{n} \quad (2)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \frac{E_0}{c} \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \delta)(\hat{k} \times \hat{n}) \quad (3)$$

- 5 Lista de Exercícios do Livro SEARS E ZEMANSKY, Física III, 12ªed. São Paulo: Pearson, capítulo 32
  - (a) Ondas Eletromagnéticas e Velocidade da Luz: 32.1, 32.3, 32.4
  - (b) Ondas Eletromagnéticas senoidais: 32.5, 32.6, 32.7, 32.8, 32.9, 32.10, 32.11, 32.12, 32.13, 32.14
  - (c) Energia e Momento Linear em ondas eletromagnéticas: 32.15, 32.16, 32.18, 32.19, 32.22, 32.23, 32.25, 32.27, 32.28
  - (d) Problemas: 32.38, 32.39, 32.40, 32.46
- 6 (Problema 12.2 - Física Básica - Moysés Nussenzveig) - Um fio condutor retilíneo cilíndrico muito longo, de condutividade  $\sigma$  e raio  $a$ , transporta uma corrente constante, de densidade  $\mathbf{j} = \sigma\mathbf{E}$  uniformemente distribuída sobre a seção transversal. Tome o eixo do cilindro como eixo  $z$ .
  - (a) Calcule  $\mathbf{B}$  na superfície do fio.
  - (b) Calcule o vetor de Poynting  $\mathbf{S}$  na superfície do fio.
  - (c) Mostre que o fluxo de  $\mathbf{S}$  através da superfície de um trecho de comprimento  $l$  do fio é igual à energia dissipada em calor pelo efeito Joule nesse trecho, por unidade de tempo. Note que essa energia flui do espaço em torno do fio para dentro dele.

caso do recuo de um rifle quando dispara? Por que esse recuo não é efetivamente observado?

**Q32.12** Uma fonte de luz irradia uma onda eletromagnética senoidal de modo uniforme em todas as direções. Essa onda exerce uma pressão média  $p$  sobre uma superfície perfeitamente refletora a uma distância  $R$  dela. Qual pressão média (em termos de  $p$ ) essa onda exerceria sobre uma superfície perfeitamente absorvente que estivesse duas vezes mais distante da fonte?

**Q32.13** Uma onda eletromagnética *estacionária* transporta energia? Ela transporta momento linear? As respostas dessas questões seriam as mesmas se a pergunta fosse sobre uma onda eletromagnética *progressiva*? Por quê?

**Q32.14** Quando um motorista dirige através do nível superior da ponte Bay Bridge, no sentido de Oakland para San Francisco, ele consegue sintonizar facilmente diversas estações emissoras no rádio do seu carro. Quando ele volta de San Francisco para Oakland pelo nível inferior da ponte, que possui nos dois lados uma estrutura de aço para suportar o nível superior, a recepção do rádio é muito fraca. Qual é o motivo dessa diferença?

## Exercícios

### Seção 32.2 Ondas eletromagnéticas planas e velocidade da luz

**32.1** (a) Sabendo que a distância entre a Terra e a Lua é de 384000 km, quanto tempo leva a luz para viajar da Lua até a Terra? (b) A luz emitida pela estrela Sirius leva 8,61 anos para chegar até a Terra. Qual é a distância entre a Terra e Sirius em quilômetros?

**32.2 Fantasma da TV.** O chamado fantasma da TV é uma imagem que se forma sobre a tela em virtude da superposição das ondas eletromagnéticas que chegam diretamente sobre a antena e das ondas que chegam indiretamente depois de refletidas em um edifício ou em uma superfície metálica de grandes dimensões. Para uma tela de 25 polegadas (aproximadamente 0,63 m), a imagem fantasma está deslocada cerca de 1,0 cm para a direita da imagem principal quando o sinal refletido chega 0,60  $\mu$ s depois do sinal principal. Nesse caso, qual é a diferença entre os comprimentos dos percursos dos dois sinais?

**32.3** Para uma onda eletromagnética que se propaga no ar, determine a frequência de uma onda com um comprimento de onda de (a) 5,0 km; (b) 5,0 m; (c) 5,0  $\mu$ m; (d) 5,0 nm.

**32.4 Radiação ultravioleta.** Há duas categorias de raio ultravioleta. O ultravioleta A (UVA) possui um comprimento de onda que varia de 320 nm a 400 nm. Ele não é tão prejudicial à pele e é necessário para a produção de vitamina D. O UVB, com comprimento de onda entre 280 nm e 320 nm, é muito mais perigoso porque causa câncer de pele. (a) Determine as faixas de frequência de UVA e UVB. (b) Quais são as faixas dos números de onda para UVA e UVB?

### Seção 32.3 Ondas eletromagnéticas senoidais

**32.5** Uma onda eletromagnética senoidal com um campo magnético de amplitude 1,25  $\mu$ T e um comprimento de onda de 432 nm se desloca no sentido  $+x$  através do vácuo. (a) Qual é a frequência dessa onda? (b) Qual é a amplitude do campo elétrico associado? (c) Escreva as equações para os campos elétrico e magnético em função de  $x$  e de  $t$  na forma das equações (32.17).

**32.6** Uma onda eletromagnética com comprimento de onda igual a 435 nm se desloca no vácuo no sentido  $-z$ . O campo

elétrico é paralelo ao eixo  $Ox$  e possui amplitude de  $2,70 \times 10^{-3}$  V/m. Qual é o valor (a) da frequência? (b) da amplitude do campo magnético? (c) Escreva equações vetoriais para  $\vec{E}(z, t)$  e para  $\vec{B}(z, t)$ .

**32.7** Uma onda eletromagnética senoidal com frequência igual a  $6,10 \times 10^{14}$  Hz se desloca no vácuo no sentido  $+z$ . O campo magnético  $\vec{B}$  é paralelo ao eixo  $Oy$  e possui amplitude de  $5,80 \times 10^{-4}$  T. Escreva equações vetoriais para  $\vec{E}(z, t)$  e para  $\vec{B}(z, t)$ .

**32.8** O campo elétrico de uma onda eletromagnética senoidal obedece à equação  $E = -(375 \text{ V/m}) \sin [(5,97 \times 10^{15} \text{ rad/s})t + (1,99 \times 10^7 \text{ rad/m})x]$ . (a) Quais são a frequência, o comprimento de onda e o período da onda? Essa luz é visível aos seres humanos? (c) Qual é a velocidade da onda?

**32.9** Uma onda eletromagnética possui um campo elétrico dado por  $\vec{E}(y, t) = -(3,10 \times 10^5 \text{ V/m}) \hat{k} \sin [ky - (12,65 \times 10^{12} \text{ rad/s})t]$ . (a) Em que direção e sentido a onda eletromagnética está se propagando? (b) Qual é o comprimento de onda? (c) Escreva a equação vetorial para  $\vec{B}(y, t)$ .

**32.10** Uma onda eletromagnética possui um campo magnético dado por  $\vec{B}(x, t) = (8,25 \times 10^{-9} \text{ T}) \hat{j} \sin [(1,38 \times 10^4 \text{ rad/m})x + \omega t]$ . (a) Em que direção e sentido a onda eletromagnética está se propagando? (b) Qual é a frequência  $f$  da onda? (c) Escreva a equação vetorial para  $\vec{E}(x, t)$ .

**32.11** Uma certa estação de rádio emite ondas com frequência de 830 kHz. Para uma dada distância do transmissor, a amplitude do campo magnético da onda eletromagnética é igual a  $4,82 \times 10^{-11}$  T. Calcule (a) o comprimento de onda; (b) o número de onda; (c) a frequência angular; (d) a amplitude do campo elétrico.

**32.12** A amplitude do campo elétrico nas vizinhanças de uma certa estação de rádio é igual a  $3,85 \times 10^{-3}$  V/m. Qual é a amplitude de  $\vec{B}$ ? Como o valor obtido se compara ao módulo do campo magnético da Terra?

**32.13** Uma onda eletromagnética com frequência  $5,70 \times 10^{14}$  Hz se propaga com uma velocidade de  $2,17 \times 10^8$  m/s em um dado pedaço de vidro. Determine (a) o comprimento de onda da onda no vidro; (b) o comprimento de onda de uma onda com a mesma frequência que se propaga no ar; (c) o índice de refração  $n$  do vidro para uma onda eletromagnética com essa frequência; (d) a constante dielétrica do vidro nessa frequência, supondo que a permeabilidade relativa seja igual a 1.

**32.14** Uma onda eletromagnética com frequência de 6,50 Hz se desloca em um material magnético isolante que possui constante dielétrica de 3,64 e permeabilidade relativa de 5,18 nessa frequência. O campo elétrico possui amplitude  $7,20 \times 10^{-3}$  V/m. (a) Qual é a velocidade de propagação da onda? (b) Qual é o comprimento de onda? (c) Qual é a amplitude do campo magnético? (d) Qual é a intensidade da onda?

### Seção 32.4 Energia e momento linear em ondas eletromagnéticas

**32.15 Campos de uma lâmpada.** Podemos modelar de forma razoável uma lâmpada incandescente de 75 W como uma esfera com 6,0 cm de diâmetro. Tipicamente, somente cerca de 5% da energia vai para a luz visível; o restante vai, em grande parte, para a radiação infravermelha não visível. (a) Qual é a intensidade da luz visível (em  $\text{W/m}^2$ ) na superfície da lâmpada? (b) Quais são as amplitudes dos campos elétrico e magnético nessa superfície, para uma onda senoidal com essa intensidade?

**32.16** Considere a direção e o sentido do campo magnético e do campo elétrico indicados a seguir. Para cada caso, qual é a direção

e o sentido da propagação da onda? (a)  $\vec{E} = E\hat{i}$ ,  $\vec{B} = -B\hat{j}$ ; (b)  $\vec{E} = E\hat{j}$ ,  $\vec{B} = B\hat{i}$ ; (c)  $\vec{E} = -E\hat{k}$ ,  $\vec{B} = -B\hat{i}$ ; (d)  $\vec{E} = E\hat{i}$ ,  $\vec{B} = -B\hat{k}$ .

**32.17** Uma onda eletromagnética senoidal está se propagando no vácuo no sentido  $+z$ . Se em um dado instante e em um dado ponto do espaço o campo elétrico estiver no sentido  $+x$  e possuir módulo de 4,0 V/m, quais serão o módulo, a direção e o sentido do campo magnético da onda nesse mesmo ponto no espaço e mesmo instante no tempo?

**32.18** Uma onda eletromagnética senoidal emitida por uma estação de rádio passa perpendicularmente através de uma janela aberta com área de 0,500 m<sup>2</sup>. Na janela, o campo elétrico da onda possui valor eficaz de 0,0200 V/m. Quanta energia essa onda transporta através da janela durante um comercial de 30,0 s?

**32.19 Teste de um transmissor de rádio no espaço.** Você é um especialista em missões da Nasa e realiza sua primeira viagem a bordo do ônibus espacial. Graças ao seu treinamento intensivo em física, você foi designado para avaliar o desempenho de um novo transmissor de rádio a bordo, o International Space Station (ISS). Empoleirado no braço móvel do ônibus espacial, você mira um detector sensível no ISS, que está a 2,5 km de distância. Você calcula que a amplitude do campo elétrico das ondas do rádio emitidas pelo transmissor ISS é 0,090 V/m e que a frequência das ondas é 244 MHz. Determine o seguinte: (a) a intensidade do rádio na sua localização; (b) a amplitude do campo magnético da onda na sua localização; (c) a potência total do transmissor de rádio ISS. (d) Quais suposições, se alguma, você fez nos seus cálculos?

**32.20** A intensidade de um feixe de laser cilíndrico é de 0,800 W/m<sup>2</sup>. A área de seção reta do feixe é  $3,0 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup> e a intensidade é uniforme através da seção reta do feixe. (a) Qual é a potência média do laser? (b) Qual é o valor eficaz do campo elétrico no feixe?

**32.21** Uma sonda espacial que está a  $2,0 \times 10^{10}$  m de uma estrela mede que a intensidade total da radiação eletromagnética da estrela é de  $5,0 \times 10^3$  V/m<sup>2</sup>. Se a estrela irradia uniformemente em todas as direções, qual é a potência média total?

**32.22** Uma onda eletromagnética senoidal emitida por um telefone celular possui comprimento de onda igual a 35,4 cm e a amplitude do campo elétrico é de  $5,40 \times 10^{-2}$  V/m a uma distância de 250 m da antena. Calcule (a) a frequência da onda; (b) a amplitude do campo magnético; (c) a intensidade da onda.

**32.23** Uma fonte de luz monocromática possui potência total igual a 60,0 W e irradia uniformemente em todas as direções uma luz de comprimento de onda igual a 700 nm. Calcule  $E_{\text{máx}}$  e  $B_{\text{máx}}$  para a luz de 700 nm a uma distância de 5,0 m da fonte.

**32.24** Para a onda eletromagnética representada pela Equação (32.19), mostre que o vetor de Poynting (a) possui a mesma direção e o mesmo sentido da propagação da onda; (b) possui módulo médio dado pela Equação (32.29).

**32.25** Uma fonte de luz intensa irradia uniformemente em todas as direções. A uma distância de 5,0 m da fonte, a pressão de radiação sobre uma superfície perfeitamente absorvedora é  $9,0 \times 10^{-6}$  Pa. Qual é a potência média total da fonte?

**32.26 Transmissão de Televisão.** O canal público de televisão KQED em São Francisco, nos Estados Unidos, transmite um sinal de rádio senoidal a uma potência de 316 kW. Suponha que a onda se propague uniformemente para um hemisfério acima do solo. Em uma casa a 5,0 km de distância da antena, (a) qual é a pressão média exercida pela onda sobre uma superfície totalmente refletora; (b) quais são as amplitudes dos campos elétrico e magnético da onda e (c) qual é a densidade média da energia que essa onda trans-

porta? (d) Para a densidade de energia obtida no item (c), qual porcentagem advém do campo elétrico e qual porcentagem do campo magnético?

**32.27** Supondo que a intensidade da luz solar incidindo diretamente sobre um dado ponto da superfície terrestre seja igual a 0,78 kW/m<sup>2</sup>, calcule: (a) a densidade do momento linear médio (momento linear por unidade de volume) da luz solar; (b) o momento linear médio por unidade de área e por unidade de tempo da luz solar.

**32.28** Nos laboratórios de simulação espacial da Nasa, existe uma sala de 25 pés de comprimento (aproximadamente igual a 7,6 m), na qual um conjunto de lâmpadas produz no piso do laboratório uma intensidade de 2500 W/m<sup>2</sup> (uma simulação equivalente à intensidade da luz solar nas vizinhanças do planeta Vênus). Calcule a pressão da radiação média (em pascals e em atmosferas) sobre (a) uma seção totalmente absorvedora do piso do laboratório; (b) uma seção totalmente refletora do piso do laboratório. (c) Calcule a densidade do momento linear médio (momento linear por unidade de volume) da luz que atinge o piso do laboratório.

**32.29** Verifique se a Equação (32.27) pode ser escrita a partir das expressões equivalentes indicadas na Equação (32.26).

### Seção 32.5 Ondas eletromagnéticas estacionárias

**32.30** Uma onda eletromagnética estacionária no ar possui frequência igual a 750 MHz e se propaga entre dois planos condutores paralelos separados por uma distância de 80,0 cm. Em que pontos entre esses dois planos deve uma carga puntiforme ser colocada em repouso de modo que ela *permaneça* em repouso? Explique.

**32.31** Uma onda eletromagnética estacionária em certo material possui frequência igual a  $2,20 \times 10^{10}$  Hz. A distância entre dois planos nodais consecutivos do campo  $\vec{B}$  é igual a 3,55 mm. Calcule: (a) o comprimento de onda da onda nesse material; (b) a distância entre dois planos nodais adjacentes do campo  $\vec{E}$ ; (c) a velocidade de propagação da onda.

**32.32** Uma onda eletromagnética estacionária no ar possui frequência igual a 75,0 MHz. (a) Qual é a distância entre dois planos nodais consecutivos do campo  $\vec{E}$ ? (b) Qual é a distância entre um plano nodal do campo  $\vec{E}$  e o plano nodal mais próximo do campo  $\vec{B}$ ?

**32.33** Uma onda eletromagnética estacionária em certo material possui frequência de  $1,20 \times 10^{10}$  Hz e velocidade de propagação de  $2,10 \times 10^8$  m/s. (a) Qual é a distância entre um plano nodal do campo  $\vec{B}$  e o plano antinodal mais próximo do campo  $\vec{B}$ ? (b) Qual é a distância entre um plano antinodal do campo  $\vec{E}$  e o plano antinodal mais próximo do campo  $\vec{B}$ ? (c) Qual é a distância entre um plano nodal do campo  $\vec{E}$  e o plano nodal mais próximo do campo  $\vec{B}$ ?

**32.34** Mostre que as ondas estacionárias do campo magnético e do campo elétrico para ondas eletromagnéticas estacionárias indicadas pelas equações (32.34) e (32.35) (a) satisfazem a Equação de onda (32.15); (b) satisfazem as equações (32.12) e (32.14).

**32.35 Forno de microondas.** As microondas de um forno de microondas possuem um comprimento de onda de 12,2 cm. (a) Qual deve ser a largura desse forno para que possa conter cinco planos antinodais do campo elétrico ao longo da sua largura no padrão de onda estacionária? (b) Qual é a frequência dessas microondas? (c) Suponha que, por um erro de fabricação, o forno tenha ficado 5,0 cm mais comprido do que o especificado no item (a). Nesse caso, qual teria de ser a frequência das microondas para ainda haver cinco planos antinodais do campo elétrico ao longo da largura do forno?

## Problemas

**32.36** Considere uma onda eletromagnética senoidal tal que os campos sejam dados pelas equações  $\vec{E} = E_{\text{máx}} \hat{j} \sin(kx - \omega t)$  e  $\vec{B} = B_{\text{máx}} \hat{k} \sin(kx - \omega t + \phi)$ , com  $-\pi \leq \phi \leq \pi$ . Mostre que, se  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  satisfazem às equações (32.12) e (32.14), então concluímos que  $E_{\text{máx}} = cB_{\text{máx}}$  e  $\phi = 0$ . (O resultado  $\phi = 0$  indica que os campos  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  oscilam em fase.)

**32.37** Mostre que o campo magnético  $B_z(x, t)$  de uma onda eletromagnética plana se propagando no sentido  $+x$  deve satisfazer a Equação (32.15). (Sugestão: faça a derivada parcial da Equação (32.12) em relação a  $t$  e a derivada parcial da Equação (32.14) em relação a  $x$ . A seguir, combine os resultados.)

**32.38** Para uma onda eletromagnética senoidal se propagando no vácuo, tal como a onda descrita na Equação (32.16), mostre que a densidade de energia média armazenada no campo elétrico é a mesma que aquela armazenada no campo magnético.

**32.39** Um satélite a 575 km acima da superfície terrestre transmite ondas eletromagnéticas senoidais com frequência de 92,4 MHz uniformemente em todas as direções, com uma potência de 25,0 kW. (a) Qual é a intensidade dessas ondas, quando elas atingem um receptor na superfície terrestre diretamente abaixo do satélite? (b) Quais são as amplitudes dos campos elétrico e magnético no receptor? (c) Se o receptor possui um painel totalmente absorvedor que mede 15,0 cm por 40,0 cm orientado com seu plano perpendicular ao sentido que as ondas percorrem, qual é a força média que essas ondas exercem sobre o painel? Essa força é grande o suficiente para causar efeitos significativos?

**32.40** Uma onda eletromagnética senoidal plana se propagando no ar possui comprimento de onda de 3,84 cm e a amplitude do campo  $\vec{E}$  é igual a 1,35 V/m. (a) Qual é a frequência? (b) Qual é a amplitude do campo  $\vec{B}$ ? (c) Qual é a intensidade? (d) Qual é a força média que essa radiação exerce sobre uma superfície totalmente absorvedora perpendicular à direção de propagação com área igual a 0,240 m<sup>2</sup>?

**32.41** Um pequeno laser de hélio-neônio emite luz vermelha com potência igual a 3,20 mW concentrada em um feixe com diâmetro de 2,50 mm. (a) Calcule as amplitudes do campo elétrico e do campo magnético da luz emitida. (b) Calcule as densidades de energia médias associadas com o campo elétrico e com o campo magnético. (c) Qual é a energia contida em um comprimento do feixe igual a 1,0 m?

**32.42** Considere uma onda eletromagnética plana tal como a indicada na Figura 32.5, porém na qual os campos  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  também possuam componentes na direção do eixo  $Ox$  (ao longo da direção de propagação da onda). Use a lei de Gauss para o campo magnético e para o campo elétrico para mostrar que os componentes  $E_x$  e  $B_x$  devem ser ambos iguais a zero e que, portanto,  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  são ambos transversais. (Sugestão: use uma superfície gaussiana como indicada na Figura 32.6. Das duas faces paralelas ao plano  $yz$ , escolha uma à esquerda da frente de onda e a outra à direita da frente de onda.)

**32.43** O Sol emite energia sob forma de ondas eletromagnéticas com uma taxa de  $3,9 \times 10^{26}$  W. Essa energia é produzida por reações nucleares que ocorrem próximas ao centro do Sol. (a) Calcule a intensidade da radiação eletromagnética e a pressão da radiação sobre um objeto absorvedor na superfície do Sol (raio  $r = R = 6,96 \times 10^5$  km) e a uma distância  $r = R/2$  no interior do Sol. Despreze os efeitos de espalhamento das ondas quando elas se propagam radialmente a partir do centro do Sol. Compare o resultado aos

valores fornecidos na Seção 32.4 para a luz solar imediatamente antes de ela penetrar na atmosfera terrestre. (b) A pressão do gás na superfície do Sol é aproximadamente igual a  $1,0 \times 10^4$  Pa; para  $r = R/2$ , de acordo com modelos do interior do Sol, a pressão do gás é de cerca de  $4,7 \times 10^{13}$  Pa. Comparando esses dados aos resultados que você obteve no item (a), a pressão da radiação é um fator importante para determinar a estrutura do Sol? Por quê?

**32.44** Existem projetos para o uso de coletores solares em satélites que orbitam em torno da Terra. A potência coletada pelo satélite seria enviada para a Terra sob forma de radiação de microondas. Para um feixe de microondas cuja seção reta possui área igual a 36,0 m<sup>2</sup> incidindo sobre a superfície da Terra com uma potência total de 2,80 kW, qual seria a amplitude do campo elétrico do feixe sobre a superfície da Terra?

**32.45** Dois refletores quadrados, cada qual com 1,50 cm de lado e 4,0 g de massa, estão localizados em extremidades opostas de uma haste delgada, extremamente leve, de 1,0 m e que pode girar sem atrito e no vácuo em torno de um eixo perpendicular a ele no seu centro (Figura 32.24). Esses refletores são suficientemente pequenos para serem tratados como massas puntiformes em cálculos de momento de inércia. Ambos os refletores são iluminados em uma face por uma onda de luz senoidal com um campo elétrico de amplitude 1,25 N/C, que recai uniformemente sobre ambas as superfícies e sempre os atinge perpendicularmente ao plano das suas superfícies. Um refletor é coberto com um revestimento perfeitamente absorvedor e o outro com um revestimento perfeitamente refletor. Qual é a aceleração angular desse dispositivo?

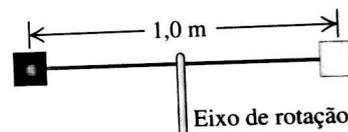


Figura 32.24 Problema 32.45.

**32.46** O plano de uma superfície é perpendicular à direção de propagação de um feixe de ondas eletromagnéticas com intensidade  $I$ . A superfície absorve uma fração  $w$  da intensidade incidente, sendo  $0 \leq w \leq 1$ , e reflete a parte restante. (a) Mostre que a pressão da radiação sobre a superfície é dada por  $(2 - w)I/c$ . (b) Mostre que o resultado precedente fornece a expressão correta para uma superfície (i) totalmente absorvedora; (ii) totalmente refletora. (c) Para uma intensidade incidente de  $1,40 \text{ kW/m}^2$ , qual é a pressão da radiação quando ocorre uma absorção de 90%? E quando ocorre uma reflexão de 90%?

**32.47** Um condutor cilíndrico com seção reta circular de raio  $a$  e resistividade  $\rho$  conduz uma corrente constante  $I$ . (a) Determine o módulo, a direção e o sentido do vetor  $\vec{E}$  em um ponto imediatamente abaixo da superfície do fio situado a uma distância  $a$  do eixo central. (b) Determine o módulo, a direção e o sentido do vetor  $\vec{B}$  nesse mesmo ponto. (c) Calcule o módulo, a direção e o sentido do vetor de Poynting  $\vec{S}$  nesse mesmo ponto. (O sentido de  $\vec{S}$  indica o sentido em que a energia eletromagnética flui para o interior ou para o exterior do condutor.) (d) Use o resultado do item (c) para calcular a taxa de escoamento de energia para o interior do volume ocupado por um comprimento  $l$  do condutor. (Sugestão: integre  $\vec{S}$  sobre a superfície do volume considerado.) Compare o resultado à taxa da geração de energia térmica no mesmo volume. Explique por que a energia dissipada na resistência de um condutor que conduz

uma corrente pode ser interpretada em termos de uma energia que penetra no solenóide através de suas paredes cilíndricas.

**32.48** Uma fonte de ondas eletromagnéticas senoidais irradia uniformemente em todas as direções. A 10,0 m dessa fonte, a amplitude do campo elétrico é medido como 1,50 N/C. Qual é a amplitude do campo elétrico a uma distância de 20,0 cm da fonte?

**32.49** Uma espira circular pode ser usada como uma antena de rádio. Sabendo que uma antena com diâmetro igual a 18,0 cm está localizada a 2,50 km de uma fonte de 95,0 MHz com potência total de 55,0 kW, qual é a fem máxima induzida na antena? (Suponha que o plano que contém a antena circular seja ortogonal à direção do campo magnético da radiação e que a fonte irradie uniformemente em todas as direções.)

**32.50** Em uma dada experiência, um transmissor de rádio emite ondas eletromagnéticas senoidais com frequência de 110,0 MHz em sentidos opostos dentro de uma cavidade estreita com refletores em ambas as extremidades, gerando um padrão de onda estacionária. (a) Qual é a distância que separa os planos nodais do campo magnético? (b) Se o padrão de onda estacionária é determinado como na sua oitava harmônica, qual é o comprimento da cavidade?

**32.51 Lanterna para resgate.** Você é o único tripulante da nave interplanetária *T:1339 Vorgia*, que realiza transporte regular de carga entre a Terra e as colônias de mineração no cinturão de asteróides. Certo dia, você está trabalhando fora da nave, a uma distância de 2,0 AU do Sol. [1 AU (unidade astronômica) é a distância média entre a Terra e o Sol, 149.600.000 km.] Infelizmente, você perde contato com o casco da nave e começa a flutuar no espaço. Você usa os foguetes do seu uniforme espacial para tentar se impulsionar de volta à nave, mas o combustível acaba antes que você consiga retornar à nave. Você está em apuros, flutuando a 16,0 m da nave com velocidade zero em relação a ela. Felizmente, você está carregando uma lanterna de 200 W. Você acende a lanterna e usa seu feixe como um 'fogueto de luz' para se impulsionar de volta à nave. (a) Considerando que você, o seu uniforme espacial e a lanterna possuem uma massa combinada de 150 kg, quanto tempo você levará para retornar à nave? (b) Há algum outro modo de usar a lanterna para realizar o mesmo objetivo de retornar à nave?

**32.52** Nikola Tesla, um inventor do século XIX, propôs a transmissão de potência elétrica através de ondas eletromagnéticas senoidais. Considere a potência elétrica transmitida por um feixe com seção reta de área igual a 100 m<sup>2</sup>. Qual deveria ser a amplitude do campo magnético e a amplitude do campo elétrico para que esse feixe pudesse transmitir uma potência elétrica comparável à potência transmitida por uma linha de transmissão moderna (que opera com tensões da ordem de 500 kV e correntes da ordem de 1000 A)?

**32.53 Sistema de Posicionamento Global (GPS).** A rede GPS consiste de 24 satélites, e cada qual realiza duas órbitas em torno da Terra por dia. Cada satélite transmite um sinal eletromagnético senoidal de 50,0 W (ou até menos) em duas frequências, uma das quais é de 1575,42 MHz. Suponha que um satélite transmita metade da sua potência em cada frequência e que as ondas se propaguem uniformemente em um hemisfério de cima para baixo. (a) Qual é a intensidade média que um receptor de GPS no solo, diretamente abaixo do satélite, recebe? (*Sugestão:* primeiro use as leis de Newton para determinar a altitude do satélite.) (b) Quais são as amplitudes dos campos elétrico e magnético do receptor de GPS no item (a), e quanto tempo leva para o sinal atingir o receptor? (c) Se o receptor for um painel quadrado de 1,50 cm de lado que absorve todo o feixe de luz, qual é a pressão

média exercida pelo sinal sobre ele? (d) Qual é o comprimento de onda com o qual o receptor deve estar sintonizado?

**32.54** A Nasa está considerando seriamente a possibilidade de uma propulsão de naves espaciais usar o conceito das *velas solares*. Uma nave espacial solar teria uma grande vela feita com material leve e usaria a propulsão aproveitando a energia e o momento linear da radiação solar. (a) A vela deve absorver ou refletir a luz solar? Por quê? (b) A potência total emitida pelo Sol é igual a  $3,9 \times 10^{26}$  W. Qual deve ser a área de uma vela para impulsionar uma nave espacial de massa igual a 10000 kg no sentido contrário ao da força de atração gravitacional do Sol? Expresse sua resposta em quilômetros quadrados. (c) Explique por que sua resposta do item (b) não depende da distância entre a nave e o Sol.

**32.55** O espaço sideral contém muitas partículas que constituem a chamada *poeira cósmica*. A pressão oriunda da radiação emitida pelo Sol estabelece um limite inferior para o diâmetro dessas partículas. Para verificar a origem desse limite, considere uma partícula esférica de poeira de raio  $R$  e massa específica  $\rho$ . (a) Escreva uma expressão para a força gravitacional exercida pelo Sol sobre a partícula quando ela está a uma distância  $r$  do Sol (que possui massa  $M$ ). (b) Seja  $L$  a luminosidade do Sol, ou seja, a taxa com a qual ele emite ondas eletromagnéticas. Calcule a força exercida sobre a partícula (totalmente absorvedora) oriunda da pressão da radiação solar. A grandeza relevante para esse cálculo é a área da seção reta da partícula, e não a área de sua superfície. Como parte da resposta, diga por que você deve considerar essa área. (c) A massa específica de uma partícula típica de poeira cósmica é da ordem de 3000 kg/m<sup>3</sup>. Calcule qual deve ser o raio  $R$  da partícula para que a força gravitacional exercida pelo Sol seja igual ao valor da força oriunda da pressão da radiação. A luminosidade do Sol é de  $3,9 \times 10^{26}$  W. Sua resposta depende da distância  $r$  entre a partícula e o Sol? Por quê? (d) Explique por que existe uma probabilidade muito pequena de que uma partícula com raio menor do que aquele que você encontrou no item (c) possa existir no espaço interplanetário do sistema solar. (*Sugestão:* obtenha a razão entre a expressão encontrada no item (a) e a encontrada no item (b).)

## Problemas desafiadores

**32.56 Modelo clássico do átomo de hidrogênio.** Podemos considerar que o elétron de um átomo de hidrogênio está em uma órbita circular com raio igual a 0,0529 nm e energia cinética de 13,6 eV. Caso o elétron se comportasse de maneira tradicional, qual seria a quantidade de energia que ele deveria irradiar por segundo? (Veja o problema desafiador 32.57.) O que esse resultado informa a respeito do modelo da física clássica para descrever o átomo?

**32.57** Ondas eletromagnéticas são produzidas por cargas aceleradas. A taxa da emissão de energia de uma partícula com carga  $q$  e aceleração  $a$  é dada por

$$\frac{dE}{dt} = \frac{q^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3}$$

em que  $c$  é a velocidade da luz. (a) Verifique se essa equação está dimensionalmente correta. (b) Sabendo que um próton se desloca em um acelerador de partícula com energia cinética de 6,0 MeV, percorrendo uma órbita circular de raio igual a 0,750 m, qual é a fração de sua energia que ele irradia por segundo? (c) Considere agora um elétron se deslocando nessa órbita com o mesmo raio e

com a mesma velocidade. Qual é a fração de sua energia que ele irradia por segundo?

**32.58** As ondas eletromagnéticas se propagam em *condutores* de modo muito diferente da propagação em dielétricos e no vácuo. Quando a resistividade do condutor for suficientemente pequena (ou seja, quando ele for um bom condutor), o campo elétrico oscilante da onda produzirá uma corrente de condução oscilante que é muito maior do que a corrente de deslocamento. Nesse caso, a equação de onda para o campo elétrico  $\vec{E}(x, t) = E_y(x, t)\hat{j}$  se propagando no sentido  $+x$  no interior do condutor é dada por

$$\frac{\partial^2 E_y(x, t)}{\partial x^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial E_y(x, t)}{\partial t}$$

em que  $\mu$  é a permeabilidade do condutor e  $\rho$  é sua resistividade.

(a) Uma solução para essa equação de onda é dada por

$$E_y(x, t) = E_{\text{máx}} e^{-k_C x} \sin(k_C x - \omega t)$$

em que  $k_C = \sqrt{\omega\mu/2\rho}$ . Verifique essa solução substituindo  $E_y(x, t)$  na equação de onda precedente. (b) O termo exponencial mostra que a amplitude do campo elétrico diminui à medida que a onda se propaga. Explique a razão desse efeito. (*Sugestão:* o campo realiza trabalho para mover a carga no interior do condutor. A corrente resultante desse movimento produz uma dissipação de calor  $i^2 R$  no interior do condutor, fazendo sua temperatura aumentar. De onde provém a energia para isso?) (c) Mostre que a amplitude do campo elétrico diminui de um fator  $1/e$  para uma distância determinada por  $1/k_C = \sqrt{2\rho/\omega\mu}$  e calcule essa distância para uma onda de rádio com frequência  $f = 1,0$  MHz no cobre (resistividade  $1,72 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$  e permeabilidade  $\mu = \mu_0$ ). Como essa distância é muito pequena, as ondas eletromagnéticas praticamente não se propagam no interior do cobre. Ao contrário, elas são refletidas na superfície do metal. A partir disso se conclui que as ondas de rádio não penetram no cobre nem em outros metais, explicando-se por que a recepção das ondas de rádio é extremamente fraca no interior de um ambiente cercado por uma estrutura metálica.