



? Este cirurgião plástico está usando duas fontes de luz: uma lâmpada de cabeça, que emite um feixe de luz visível, e um laser portátil, que emite luz infravermelha. A luz de ambas as fontes é emitida sob a forma de pacotes de energia conhecidos como fótons. Para qual fonte os fótons possuem maior energia? (i) A lâmpada de cabeça; (ii) o laser; (iii) ambos possuem a mesma energia; (iv) não foram fornecidas informações suficientes.

38 FÓTONS: ONDAS DE LUZ SE COMPORTANDO COMO PARTÍCULAS

OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM

Ao estudar este capítulo, você aprenderá:

- 38.1 De que forma a teoria de Einstein sobre o fóton explica o efeito fotoelétrico.
- 38.2 Como experiências envolvendo produção de raios X forneceram evidências de que a luz é emitida na forma de fótons.
- 38.3 Como o espalhamento dos raios gama ajudaram a confirmar a teoria dos fótons de luz.
- 38.4 Como o princípio da incerteza de Heisenberg impõe limites fundamentais no que é possível ser medido.

Revedo conceitos de:

- 8.5 Centro de massa.
- 16.7 Batimentos.
- 23.2 Elétrons-volt.
- 32.1, 32.4 Luz como uma onda eletromagnética.
- 33.6 Espalhamento da luz.
- 36.2, 36.3 e 36.6 Difração de fenda única, difração de raios X.
- 37.8 Energia e momento linear relativísticos.

No Capítulo 32, vimos como Maxwell, Hertz e outros estabeleceram que a luz é uma onda eletromagnética. Fenômenos como a interferência, a difração e a polarização, discutidos nos capítulos 35 e 36, forneceram novas comprovações da *natureza ondulatória* da luz.

No entanto, quando observamos de perto a emissão, a absorção e o espalhamento da radiação eletromagnética, descobrimos um aspecto completamente diferente da luz. Verificamos que a energia de uma onda eletromagnética é *quantizada*; ela é emitida e absorvida em pacotes semelhantes a partículas com energias definidas, chamados de *fótons* ou *quanta*. A energia de um único fóton é proporcional à frequência da radiação.

Veremos que a luz e outra radiação eletromagnética exibem uma *dualidade onda-partícula*: às vezes a luz age como onda e outras vezes, como partícula. Interferência e difração demonstram comportamento ondulatório, ao passo que emissão e absorção de fótons demonstram comportamento de partículas. Essa reinterpretação radical da luz nos conduzirá, no próximo capítulo, a alterações não menos radicais em nossa visão sobre a natureza da matéria.

38.1 LUZ ABSORVIDA COMO FÓTONS: O EFEITO FOTOELÉTRICO

Um fenômeno que nos ajuda a esclarecer a natureza da luz é o **efeito fotoelétrico**, no qual um material emite elétrons de sua superfície quando iluminado (**Figura 38.1**). Para se desprender da superfície, um elétron tem de absorver energia suficiente da luz para superar a atração dos íons positivos do material. Essas forças de atração constituem uma barreira de energia potencial; a luz fornece o “chute” que permite o desprendimento do elétron.

O efeito fotoelétrico possui um grande número de aplicações. Câmeras digitais e óculos de visão noturna o utilizam para converter energia luminosa em um sinal elétrico que é reconstituído em uma imagem (Figura 38.2). A luz do Sol incidindo sobre a Lua faz que a poeira de sua superfície libere elétrons, deixando as partículas de poeira com uma carga positiva. A repulsão elétrica mútua dessas partículas de poeira carregadas faz que elas se ergam acima da superfície da Lua, um fenômeno que foi observado a partir da órbita lunar pelos astronautas da *Apollo*.

Figura 38.2 (a) Um tubo fotomultiplicador para visão noturna usa o efeito fotoelétrico. Os fótons que entram no tubo colidem com a placa, ejetando elétrons que passam através de um disco fino, no qual existem milhões de minúsculos canais. A corrente através de cada canal é ampliada eletronicamente e, a seguir, direcionada para uma tela que cintila quando atingida por elétrons. (b) A imagem sobre a tela, formada por milhões de cintilações, é milhares de vezes mais nítida que a imagem formada a olho nu.

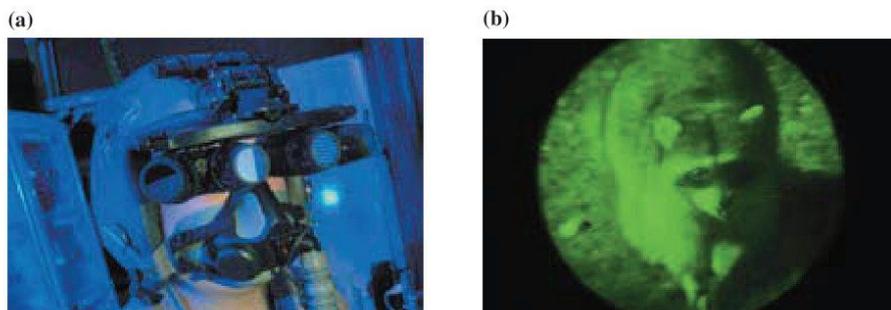
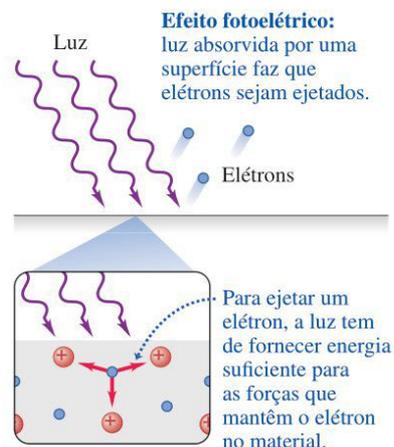


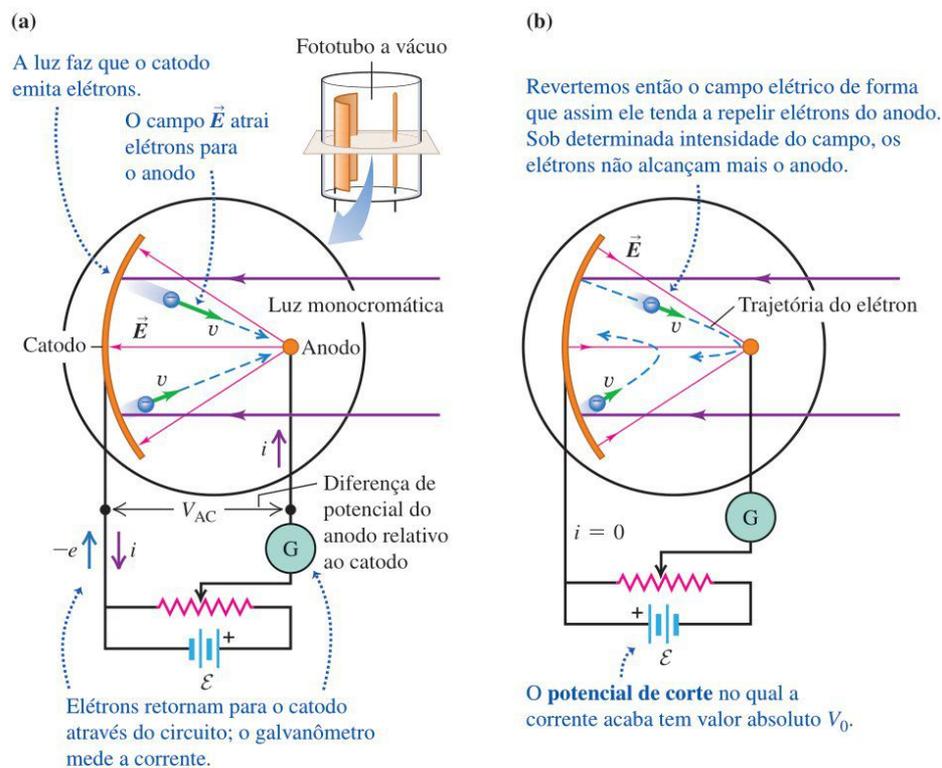
Figura 38.1 O efeito fotoelétrico.



Frequência e potencial de corte

Na Seção 32.1, exploramos o modelo ondulatório da luz, que Maxwell formulou duas décadas antes de o efeito fotoelétrico ser observado. O efeito fotoelétrico seria consistente com esse modelo? A Figura 38.3a mostra uma versão moderna

Figura 38.3 Uma experiência testando se o efeito fotoelétrico é consistente com o modelo ondulatório da luz.



de uma das experiências que exploraram essa questão. Dois eletrodos condutores encontram-se no interior de um tubo de vidro a vácuo, são conectados por uma bateria e o catodo é iluminado. Dependendo da diferença de potencial V_{AC} entre os dois catodos, os elétrons emitidos pelo catodo iluminado (chamados de *fotoelétrons*) podem atravessar o anodo, produzindo uma *corrente fotoelétrica* no circuito externo (o tubo é submetido a uma pressão residual de 0,01 Pa ou menor para minimizar as colisões dos elétrons com as moléculas gasosas).

O catodo iluminado emite fotoelétrons com várias energias cinéticas. Se o campo elétrico aponta para o catodo, como na Figura 38.3a, todos os elétrons são acelerados em direção ao anodo e contribuem para a corrente fotoelétrica. No entanto, ao reverter o campo e ajustar sua intensidade, como vemos na Figura 38.3b, podemos evitar que elétrons com energia menor alcancem o anodo. De fato, podemos determinar a energia cinética *máxima* $K_{m\acute{a}x}$ dos elétrons emitidos fazendo o potencial do anodo relativo ao catodo, V_{AC} , negativo o suficiente para que a corrente pare. Isso ocorrerá quando $V_{AC} = -V_0$, onde V_0 é chamada de **potencial de corte**. Na medida que um elétron se move do catodo para o anodo, o potencial diminui por V_0 e o trabalho negativo $-eV_0$ é exercido sobre o elétron (carregado negativamente). O elétron com mais energia deixa o catodo com energia cinética $K_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2}mv_{m\acute{a}x}^2$ e possui energia cinética zero no anodo. Usando o teorema trabalho-energia, obtemos:

$$W_{tot} = -eV_0 = \Delta K = 0 - K_{m\acute{a}x} \quad (\text{energia cinética máxima de fotoelétrons})$$

$$K_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2}mv_{m\acute{a}x}^2 = eV_0 \quad (38.1)$$

Portanto, medindo o potencial de corte V_0 , podemos determinar a energia cinética máxima com a qual os elétrons deixam o catodo. (Estamos desprezando qualquer efeito provocado pela eventual diferença nos materiais do catodo e do anodo.)

Nessa experiência, como é que a corrente fotoelétrica depende da tensão através dos eletrodos e da frequência e intensidade da luz? Com base na visão de Maxwell a respeito da luz como uma onda eletromagnética, podemos prever o seguinte:

Modelo ondulatório – previsão 1: vimos na Seção 32.4 que a intensidade de uma onda eletromagnética depende de sua amplitude, mas não de sua frequência. Assim, o efeito fotoelétrico deve ocorrer para luz de qualquer frequência e a *magnitude da corrente fotoelétrica não deve depender da frequência da luz*.

Modelo ondulatório – previsão 2: é preciso uma certa quantidade de energia mínima, chamada de **função trabalho**, para que um único elétron salte de uma superfície em particular (veja a Figura 38.1). Se a luz que incide sobre a superfície é muito fraca, algum tempo pode decorrer antes de a energia total absorvida pela superfície ser igual à função trabalho. Dessa forma, para uma iluminação fraca, *esperamos um atraso de tempo* entre o momento em que a luz é ligada e quando os fotoelétrons aparecem.

Modelo ondulatório – previsão 3: como a energia que incidiu sobre a superfície do catodo depende da intensidade da iluminação, *esperamos que o potencial de corte aumente com o aumento da intensidade da luz*. Uma vez que a intensidade não depende da frequência, esperamos que *o potencial de corte não dependa da frequência da luz*.

O resultado experimental mostra-se *muito* diferente dessas previsões. A seguir, são apresentados os resultados obtidos entre os anos de 1877 e 1905:

Resultado experimental 1: *a corrente fotoelétrica depende da frequência da luz*. Para um determinado material, a luz monocromática com uma frequência abaixo da **frequência de corte** mínima não produz *nenhuma* corrente fotoelétrica, independentemente de sua intensidade. Para a maioria dos metais, a frequência de corte é a ultravioleta (que corresponde a um comprimento de onda λ entre 200 e 300 nm),

mas para outros materiais, como óxido de potássio e óxido de césio, ela está no espectro visível (λ entre 380 e 750 nm).

Resultado experimental 2: não existe um intervalo de tempo mensurável entre o instante em que a luz é ligada e aquele em que o catodo emite fotoelétrons (supondo que a frequência da luz supere a frequência de corte). Essa é uma verdade, independentemente do quanto a luz é fraca.

Resultado experimental 3: o potencial de corte não depende da intensidade, mas da frequência. A **Figura 38.4** mostra um gráfico da corrente fotoelétrica em função da diferença de potencial V_{AC} para a luz com uma determinada frequência e em duas intensidades diferentes. A diferença de potencial $-V_0$ invertida, necessária para reduzir a corrente a zero, é a mesma para ambas as intensidades. O único efeito do aumento da intensidade é o aumento do número de elétrons por segundo e, conseqüentemente, a corrente fotoelétrica i . (As curvas se estabilizam quando V_{AC} é suficientemente grande e positiva, pois nesse ponto *todos* os elétrons emitidos são coletados pelo anodo.) Se a intensidade da luz permanece constante, mas a frequência aumenta, o potencial de corte também aumenta. Em outras palavras, quanto maior a frequência da luz, maior é a energia dos fotoelétrons liberados.

Esses resultados contradizem diretamente a descrição da luz feita por Maxwell, como uma onda eletromagnética. Uma solução para esse dilema foi fornecida por Albert Einstein em 1905. Sua proposta consistia em nada menos que uma nova teoria para a natureza da luz.

Teoria do fóton proposta por Einstein

Einstein fez um postulado radical de que um feixe de luz era constituído por pequenos pacotes de energia, chamados **fótons** ou *quanta*. Esse postulado foi uma extensão de uma ideia desenvolvida cinco anos antes por Max Planck para explicar as propriedades da radiação de corpo negro, conforme discutimos na Seção 17.7. (Exploraremos as ideias de Planck na Seção 39.5). Na teoria de Einstein, a energia E de um fóton é igual a uma constante vezes a frequência f . De acordo com a relação $f = c/\lambda$ para ondas eletromagnéticas no vácuo, temos

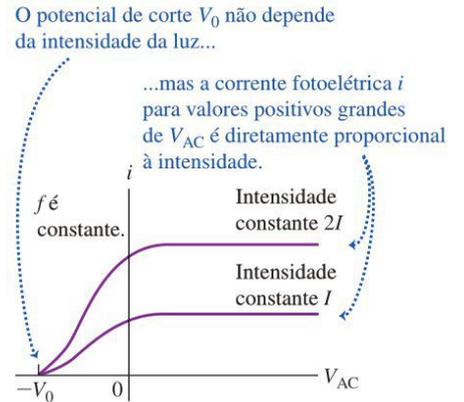
$$\begin{array}{c}
 \text{Energia de um fóton} \rightarrow E = hf = \frac{hc}{\lambda} \\
 \begin{array}{l}
 \text{Constante de Planck} \rightarrow h \\
 \text{Frequência} \rightarrow f \\
 \text{Velocidade da luz no vácuo} \rightarrow c \\
 \text{Comprimento de onda} \rightarrow \lambda
 \end{array}
 \end{array}
 \quad (38.2)$$

onde h é uma constante universal, chamada de **constante de Planck**. O valor numérico dessa constante, com a precisão conhecida hoje, é

$$h = 6,62606957(29) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

ATENÇÃO Fótons não são “partículas” no sentido usual. É comum, porém impreciso, visualizar fótons como se fossem bolas de bilhar em miniatura. Bolas de bilhar possuem uma massa de repouso e viajam em uma velocidade mais lenta que a velocidade da luz c , enquanto fótons viajam na velocidade da luz e possuem *zero* massa de repouso. Além do mais, os fótons possuem características de onda (frequência e comprimento) que são facilmente observáveis. O conceito de fóton é muito estranho, e a verdadeira natureza dos fótons é difícil de visualizar de um jeito simples. Discutiremos esse assunto com mais detalhes na Seção 38.4.

Figura 38.4 Corrente fotoelétrica i em função do potencial V_{AC} do anodo em relação ao catodo para uma frequência da luz f constante.



Na teoria de Einstein, um único fóton chegando em uma superfície na Figura 38.1a ou 38.2 é absorvido por um único elétron. Essa transferência de energia é um processo de tudo ou nada, contrastando com a transferência contínua de energia que existe na teoria de onda da luz; o elétron absorve toda a energia do próton

DADOS MOSTRAM

Fótons

Quando os alunos recebiam um problema sobre fótons e suas propriedades, mais de 20% davam uma resposta incorreta. Erros comuns:

- Confusão a respeito de energia do fóton, frequência e comprimento de onda. Quanto maior for a frequência de um fóton, maior será a energia dele, e menor será seu comprimento de onda; quanto maior for o comprimento de onda de um fóton, menor será a energia do fóton e mais baixa será sua frequência (veja a Equação 38.2).
- Confusão sobre o efeito fotoelétrico. Quanto *maior* for a força de trabalho do material, *menor* será a energia cinética dos elétrons emitidos quando os fótons de uma determinada frequência brilharem sobre o material (veja a Equação 38.3).

ou absolutamente nenhuma. O elétron pode se desprender da superfície somente se a energia que ele adquirir for maior que a função trabalho ϕ . Dessa forma, os fotoelétrons serão emitidos somente se $hf > \phi$ ou $f > \phi/h$. Portanto, o postulado de Einstein explica por que o efeito fotoelétrico ocorre apenas para frequências superiores a um limite mínimo de frequência. Esse postulado também é consistente com a observação de que maior intensidade provoca maior corrente fotoelétrica (Figura 38.4). Maior intensidade em uma frequência específica significa maior número de fótons absorvidos por segundo e, portanto, maior número de elétrons emitidos por segundo e uma maior corrente fotoelétrica.

O postulado de Einstein também explica por que não existe intervalo algum entre a iluminação e a emissão de fotoelétrons. Assim que fótons com energia suficiente atingem a superfície, elétrons podem absorvê-los e ser liberados.

Finalmente, o postulado de Einstein explica por que o potencial de corte para uma determinada superfície depende apenas da frequência da luz. Lembre-se de que ϕ é a energia *mínima* necessária para remover um elétron de uma superfície. Einstein aplicou a conservação da energia para descobrir que a energia cinética *máxima* $K_{\text{máx}} = \frac{1}{2}mv_{\text{máx}}^2$ para um elétron emitido é a energia hf obtida de um fóton menos a função trabalho ϕ :

$$K_{\text{máx}} = \frac{1}{2}mv_{\text{máx}}^2 = hf - \phi \tag{38.3}$$

Substituindo $K_{\text{máx}} = eV_0$ da Equação 38.1, encontramos:

Efeito fotoelétrico:

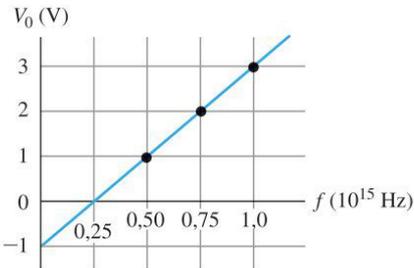
$$eV_0 = hf - \phi$$

Energia cinética máxima do fotoelétron
Energia do fóton absorvido

Módulo da carga do elétron
Potencial de corte
Função trabalho
Constante de Planck
Frequência da luz

(38.4)

Figura 38.5 Potencial de corte como uma função da frequência para determinado material do catodo.



A Equação 38.4 mostra que o potencial de corte V_0 aumenta com o aumento da frequência f . A intensidade não aparece na Equação 38.4, então V_0 é independente da intensidade. Para uma confirmação da Equação 38.4, podemos medir o potencial de corte V_0 para cada um dos muitos valores da frequência f , para um dado material do catodo (**Figura 38.5**). Com um gráfico de V_0 como uma função de f , observamos que o resultado é uma linha reta, e podemos determinar tanto a função trabalho ϕ quanto o valor da grandeza h/e . Depois que a carga do elétron $-e$ foi medida por Robert Millikan em 1909, a constante de Planck h também foi determinada a partir dessas medidas.

As funções trabalho e as energias dos elétrons geralmente são expressas em elétrons-volt (eV), unidade definida na Seção 23.2. Com quatro algarismos significativos, temos

$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Para esse nível de precisão, a constante de Planck é

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

A **Tabela 38.1** lista as funções trabalho para muitos elementos. Esses valores são aproximados porque são muito sensíveis às impurezas da superfície. Quanto maior for a força de trabalho, maior será a frequência mínima necessária para a emissão de fotoelétrons (**Figura 38.6**).

A teoria do fóton também explica outros fenômenos nos quais a luz é absorvida. Um *bronzamento solar* é causado quando a energia da luz solar dispara uma reação química nas células da pele que leva ao aumento da produção do pigmento

TABELA 38.1 Função trabalho de diversos elementos.

Elemento	Função trabalho (eV)
Alumínio	4,3
Carbono	5,0
Cobre	4,7
Ouro	5,1
Níquel	5,1
Silício	4,8
Prata	4,3
Sódio	2,7

melanina. Essa reação pode ocorrer somente se uma molécula específica na célula absorve uma certa quantidade mínima de energia. Um fóton com comprimento de onda curto ultravioleta possui energia suficiente para disparar essa reação, mas uma luz visível com comprimento de onda maior não consegue. Sendo assim, a luz ultravioleta causa o bronzeado, mas a luz visível, não.

Momento linear do fóton

O conceito de fóton se aplica a *todas* as regiões do espectro eletromagnético, inclusive as ondas de rádio, os raios X e assim por diante. Um fóton de qualquer frequência f e comprimento de onda λ possui uma energia E dada pela Equação 38.2. Além disso, de acordo com a teoria especial da relatividade, toda partícula que possui energia também deve possuir momento linear. Os fótons têm massa de repouso igual a zero e um fóton com energia E possui momento linear com módulo p obtido da relação $E = pc$, como vimos na Equação 37.40 da Seção 37.8. Logo, o módulo p do momento linear do fóton é

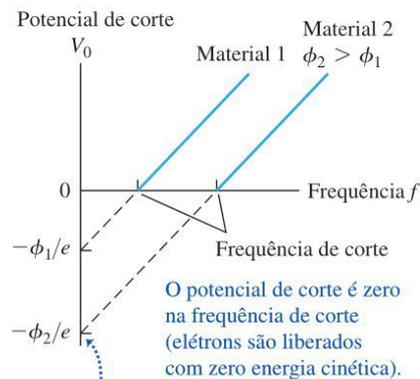
$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (38.5)$$

Energia do fóton
Constante de Planck
Comprimento de onda

Momento linear de um fóton
Velocidade da luz no vácuo
Frequência

A direção e o sentido do momento linear do fóton são simplesmente a direção e o sentido da propagação da onda eletromagnética.

Figura 38.6 Potencial de corte em função da frequência para dois materiais do catodo que possuam uma função trabalho ϕ diferente.



Para cada material,

$$eV_0 = hf - \phi \quad \text{ou} \quad V_0 = \frac{hf}{e} - \frac{\phi}{e}$$
 e, sendo assim, as linhas têm a mesma inclinação dada por h/e , mas diferentes pontos de interseção $-\phi/e$ com o eixo vertical.

ESTRATÉGIA PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS 38.1 FÓTONS

IDENTIFICAR *os conceitos relevantes:* a energia e o momento linear de um fóton individual são proporcionais à frequência e inversamente proporcionais ao comprimento de onda. A interpretação de Einstein para o efeito fotoelétrico é que a energia é conservada quando um fóton libera um elétron da superfície de um material.

PREPARAR *o problema:* identifique a variável-alvo. Pode ser o comprimento de onda λ , a frequência f , a energia E ou o momento linear p . Se o problema envolve o efeito fotoelétrico, a variável-alvo pode ser a energia cinética máxima dos fotoelétrons $K_{\text{máx}}$, o potencial de corte V_0 ou a função trabalho ϕ .

EXECUTAR *a solução* conforme segue:

- Use as equações 38.2 e 38.5 para relacionar a energia e o momento linear de um fóton a seu comprimento de onda e frequência. Se o problema envolve o efeito fotoelétrico, use as equações 38.1, 38.3 e 38.4 para relacionar a frequência,

o potencial de corte, a função trabalho e a energia cinética máxima dos fotoelétrons.

- O elétron-volt (eV), que abordamos inicialmente na Seção 23.2, é uma unidade importante e conveniente. É a quantidade de energia cinética ganha por um elétron ao se deslocar livremente através de um aumento de potencial igual a um volt: $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$. Se a energia do fóton E for dada em elétrons-volt, use $h = 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$; se E estiver em joules, use $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

AVALIAR *sua resposta:* em problemas envolvendo fótons, as grandezas algumas vezes são expressas com intervalos não familiares, por isso os erros não serão óbvios. É útil lembrar que um fóton de luz com $\lambda = 600 \text{ nm}$ e $f = 5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ possui uma energia E aproximadamente igual a 2 eV, ou cerca de $3 \times 10^{-19} \text{ J}$.

EXEMPLO 38.1 FÓTONS DE UM LASER POINTER

Um laser pointer com uma potência de saída de 5,00 mW emite luz vermelha ($\lambda = 650 \text{ nm}$). (a) Qual é o módulo do momento linear de cada fóton? (b) Quantos fótons o laser pointer emite em cada segundo?

SOLUÇÃO

IDENTIFICAR E PREPARAR: este problema envolve as ideias de (a) momento linear do fóton e (b) energia do fóton. Na parte (a),

usaremos a Equação 38.5 e o comprimento de onda fornecido para encontrar o módulo do momento linear de cada fóton. Na parte (b), a Equação 38.5 nos fornece a energia por fóton e a potência nos permite saber qual a energia emitida por segundo. Podemos combinar essas grandezas para calcular o número de fótons emitidos por segundo.

EXECUTAR: (a) sabemos que $\lambda = 650 \text{ nm} = 6,50 \times 10^{-7} \text{ m}$, então, a partir da Equação 38.5, o momento linear do fóton é:

(Continua)