

(Continuação)

é a soma das energias dos fótons. O momento linear total inicial é zero. Da mesma forma, o momento linear total dos dois fótons tem de ser zero. Obtemos a energia do fóton E , usando o princípio da conservação da energia, a conservação do momento linear e a relação $E = pc$ (veja a Seção 38.1). Calculamos então os comprimentos de onda e as frequências a partir de $E = hc/\lambda = hf$.

EXECUTAR: se o momento linear total dos dois fótons precisa ser zero, seus momentos lineares precisam ter seus módulos iguais a p , a mesma direção e sentidos opostos. Como $E = pc = hc/\lambda = hf$, os dois fótons também precisam ter a mesma energia E , comprimento de onda λ e frequência f .

Antes da colisão, a energia de cada elétron é $K + mc^2$, onde K é a energia cinética e $mc^2 = 0,511 \text{ MeV}$. Usando a conservação da energia, temos

$$(K + mc^2) + (K + mc^2) = E + E$$

Dessa forma, a energia de cada fóton é $E = K + mc^2$.

(a) Neste caso, a energia cinética do elétron K é desprezível se comparada com sua energia de repouso mc^2 , então cada fóton possui energia $E = mc^2 = 0,511 \text{ MeV}$. O comprimento de onda e a frequência do fóton correspondentes são

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(4,136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s})(3,00 \times 10^8 \text{ m/s})}{0,511 \times 10^6 \text{ eV}}$$

$$= 2,43 \times 10^{-12} \text{ m} = 2,43 \text{ pm}$$

$$f = \frac{E}{h} = \frac{0,511 \times 10^6 \text{ eV}}{4,136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}} = 1,24 \times 10^{20} \text{ Hz}$$

(b) Neste caso, $K = 5,000 \text{ MeV}$, portanto cada fóton possui energia $E = 5,000 \text{ MeV} + 0,511 \text{ MeV} = 5,511 \text{ MeV}$. Se fizermos do mesmo jeito que na parte (a), podemos mostrar que o comprimento de onda do fóton é $0,2250 \text{ pm}$ e a frequência é $1,333 \times 10^{21} \text{ Hz}$.

AVALIAR: o Exemplo 38.1 nos faz lembrar que um fóton de luz visível de 650 nm possui energia de $1,91 \text{ eV}$ e frequência de $4,62 \times 10^{14} \text{ Hz}$. A energia do fóton é aproximadamente $2,5 \times 10^5$ vezes maior que a encontrada na parte (a). Conforme esperado, o comprimento de onda do fóton é menor e sua frequência é maior que um fóton de luz visível pelo mesmo fator. Você pode verificar os resultados da parte (b) da mesma maneira.

TESTE SUA COMPREENSÃO DA SEÇÃO 38.3 Se você utilizou fótons de luz visível na experiência mostrada na Figura 38.11, os fótons poderiam decair seu comprimento de onda em razão do espalhamento? Se a resposta for sim, é possível detectar a variação com o olho humano? |

38.4 DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA, PROBABILIDADE E INCERTEZA

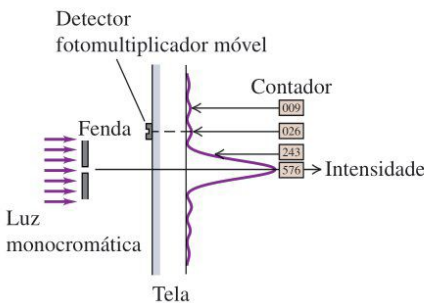
Vimos aqui muitos exemplos do comportamento da luz e de outras radiações eletromagnéticas. Alguns efeitos, inclusive a interferência e a difração estudadas nos capítulos 35 e 36, demonstraram irrefutavelmente a natureza *ondulatória* da luz. Outros, discutidos no presente capítulo, mostraram com igual clareza que a luz apresenta um comportamento semelhante ao de *partículas*. Essa *dualidade onda-partícula* significa que a luz possui dois aspectos que parecem ser diretamente conflitantes. Como pode a luz ser uma onda e uma partícula ao mesmo tempo?

Podemos encontrar a resposta para essa aparente contradição onda-partícula usando o **princípio da complementaridade**, enunciado pela primeira vez por Bohr em 1928. A descrição ondulatória é complementar à descrição corpuscular. Ou seja, precisamos das duas descrições para completar nosso modelo da natureza, mas nunca precisaremos usar ambas as descrições simultaneamente para descrever uma determinada ocorrência.

Difração e interferência na teoria do fóton

Vamos começar considerando novamente a figura de difração na experiência da fenda única, analisada nas seções 36.2 e 36.3. Em vez de registrar a imagem da figura de difração em uma placa fotográfica, podemos usar um tubo *fotomultiplicador* que serve, na verdade, para detectar até um único elétron. Usando o dispositivo mostrado na **Figura 38.15**, colocamos o detector fotomultiplicador em diversas posições em intervalos de tempo iguais, contamos os fótons que chegam a cada posição e fazemos um gráfico da distribuição das intensidades.

Figura 38.15 Figura de difração na experiência da fenda única observada com um fotomultiplicador móvel. A curva obtida mostra a distribuição das intensidades prevista pela descrição ondulatória, e a distribuição dos fótons é indicada pelo número de fótons contados em cada posição.



Verificamos que, na média, a distribuição dos fótons concorda com nossas previsões da Seção 36.3. Em pontos correspondentes aos máximos da figura de difração contamos muitos fótons, nos mínimos não contamos quase nenhum fóton, e assim por diante. O gráfico das contagens nos diversos pontos fornece a mesma figura de difração prevista na Equação 36.7.

Suponha agora que a intensidade seja reduzida a tal ponto que somente alguns fótons por segundo passem através da fenda. Assim, registramos uma série discreta de colisões, cada uma representando um único fóton. Como não há uma maneira de prever o local exato em que um único fóton vai colidir, ao longo do tempo as colisões acumuladas formam uma figura de difração familiar, o que é esperado para uma onda. Para reconciliar a descrição ondulatória com a descrição corpuscular da figura de difração, devemos encarar essa figura como uma distribuição *estatística* que nos informa quantos fótons, na média, atingem cada local. De modo equivalente, a figura nos diz a *probabilidade* de que um fóton individual atinja um determinado ponto. Se fizermos nosso feixe de luz brilhar em um dispositivo de fenda dupla, obtemos um resultado similar (**Figura 38.16**). Novamente não é possível prever o local exato onde podemos encontrar um determinado fóton; a figura de interferência é uma distribuição estatística.

Como o princípio da complementaridade se aplica a essas experiências de interferência e difração? A descrição ondulatória, e não a descrição corpuscular, explica as experiências da fenda única e da fenda dupla. Porém a descrição corpuscular, e não a descrição ondulatória, explica como um detector fotomultiplicador pode ser usado para construir a figura de interferência mediante a adição de pacotes discretos de energia. As duas descrições completam nossa compreensão dos resultados. Por exemplo, suponha que estejamos considerando um fóton individual e perguntamos como ele sabe “qual caminho deve seguir” quando passa pela fenda. Essa pergunta se parece com um enigma, isso porque é formulada admitindo-se que a luz seja uma *partícula*. É a natureza ondulatória da luz, e não sua natureza corpuscular, que determina a distribuição dos fótons. Reciprocamente, o fato de que o fotomultiplicador detecta luz fraca como uma sequência de “pontos” individuais não pode ser explicado em termos ondulatórios.

Probabilidade e incerteza

Embora os fótons possuam energia e momento linear, são muito diferentes do modelo corpuscular que usamos para a mecânica newtoniana nos capítulos de 4 a 8. O modelo de partícula newtoniano trata um objeto como um ponto que possui massa. Podemos descrever a localização e o estado do movimento como uma partícula em qualquer instante usando três coordenadas espaciais e três componentes do momento linear e, assim, podemos prever o movimento da partícula no futuro. No entanto, esse modelo não funciona de forma alguma para fótons: simplesmente não podemos tratar um fóton como um objeto pontual. Isso porque existem limitações fundamentais quanto à precisão com que podemos determinar a posição e o momento linear de um fóton simultaneamente. (No Capítulo 39 descobriremos que as ideias não newtonianas que desenvolvemos para os fótons nesta seção também se aplicam a partículas como os elétrons.)

Para obter mais esclarecimentos a respeito do problema de medirmos a posição e o momento linear de um fóton simultaneamente, vamos olhar novamente na difração da luz em uma fenda única.

Suponha que o comprimento de onda λ seja muito menor que a largura a da fenda (**Figura 38.17**). Em seguida, a maioria (85%) dos fótons entra na parte mais ao centro da figura de difração e o restante vai para as outras partes da figura. Usamos θ_1 para designar o ângulo entre o ponto mais ao centro e o primeiro ponto mínimo da figura. Usando a Equação 36.2 com $m = 1$, descobrimos que θ_1 é dado por $\sin \theta_1 = \lambda/a$. Uma vez que assumimos $\lambda \ll a$, segue-se que θ_1 é muito pequeno, e $\sin \theta_1$ é quase igual a θ_1 (em radianos), e

Figura 38.16 Estas imagens registram as posições em que fótons individuais incidem na tela em uma experiência de interferência de fenda dupla. À medida que mais fótons atingem a tela, começamos a reconhecer uma figura de interferência.

Após 21 fótons atingirem a tela



Após 1.000 fótons atingirem a tela



Após 10.000 fótons atingirem a tela

