

? Os vírus (mostrados em azul) pararam sobre uma bactéria *E. coli* e injetaram seu DNA, convertendo a bactéria em uma fábrica de vírus. Esta imagem em falsa cor foi feita usando um feixe de elétrons em vez de um feixe de luz. Os elétrons são usados para gerar imagens com detalhes minuciosos porque, em comparação com os fótons de luz visível, (i) os elétrons podem ter comprimentos de onda muito mais curtos; (ii) os elétrons podem ter comprimentos de onda muito maiores; (iii) os elétrons podem ter muito menos momento linear; (iv) os elétrons possuem mais energia total para o mesmo momento linear; (v) há mais de uma resposta correta.

39 A NATUREZA ONDULATÓRIA DAS PARTÍCULAS

OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM

Ao estudar este capítulo, você aprenderá:

- 39.1** A hipótese de De Broglie de que elétrons, prótons e outras partículas podem se comportar como ondas e a evidência experimental das ideias de De Broglie.
- 39.2** Como os físicos descobriram o núcleo atômico.
- 39.3** Como o modelo das órbitas eletrônicas de Bohr explicou os espectros do hidrogênio e os átomos tipo hidrogênio.
- 39.4** Como um laser opera.
- 39.5** Como a ideia dos níveis de energia, com o modelo de fóton da luz, explica o espectro da luz emitida por um objeto quente e opaco.
- 39.6** O que o princípio da incerteza nos diz sobre a natureza do átomo.

Revedo conceitos de:

- 12.4** Satélites.
- 17.7** Lei de Stefan-Boltzmann.
- 18.4, 18.5** Princípio da equipartição; função de distribuição de Maxwell-Boltzmann.
- 32.1, 32.5** Radiação de uma carga em aceleração; ondas eletromagnéticas estacionárias.
- 36.5–36.7** Difração de luz, difração de raios X, resolução.
- 38.1, 38.4** Efeito fotoelétrico, fótons, interferência.

No Capítulo 38, descobrimos um aspecto da natureza da dualidade onda-partícula: a luz e outras ondas eletromagnéticas algumas vezes se comportam como ondas e outras vezes, como partículas. A interferência e a difração revelam o comportamento ondulatório, enquanto a emissão e a absorção de fótons demonstram o comportamento de partícula.

Se as ondas de luz podem se comportar como partículas, as partículas de matéria podem se comportar como ondas? A resposta é um retumbante sim. Os elétrons podem interferir e refratar, assim como outros tipos de onda. A natureza ondulatória dos elétrons não é simplesmente uma curiosidade de laboratório: é o motivo fundamental para que os átomos, que, de acordo com a física clássica deveriam ser instáveis, sejam capazes de existir. Neste capítulo, a natureza ondulatória da matéria nos ajudará a compreender a estrutura dos átomos, os princípios operacionais de um laser e as curiosas propriedades da luz emitida por um objeto aquecido e brilhante. Sem a imagem ondulatória da matéria, não haveria como explicar esses fenômenos.

No Capítulo 40, apresentaremos uma imagem ainda mais completa da natureza ondulatória da matéria, chamada *mecânica quântica*. No restante deste livro, usaremos as ideias da mecânica quântica para compreendermos a natureza das moléculas, dos sólidos, dos núcleos atômicos e das partículas fundamentais que são os blocos de montagem do nosso universo.

39.1 ONDAS DE ELÉTRONS

Em 1924, um físico francês, Louis De Broglie (pronuncia-se “de broy”); **Figura 39.1**, fez uma proposta marcante sobre a natureza da matéria. Seu pensamento, parafraseado livremente, foi mais ou menos o seguinte: a natureza ama a simetria. A luz possui uma natureza dual, comportando-se em algumas situações

Figura 39.1 Louis-Victor De Broglie, o sétimo duque De Broglie (1892–1987), rompeu a tradição familiar escolhendo a física em vez da diplomacia. Sua hipótese revolucionária de que as partículas apresentam comportamento ondulatório — pela qual recebeu o Prêmio Nobel de física de 1929 — foi publicada em sua tese de doutorado.



como onda e em outras, como partícula. Se a natureza é simétrica, essa dualidade também deveria ser válida para a matéria. Os elétrons, que geralmente são considerados *partículas*, em algumas situações podem se comportar como *ondas*.

Se uma partícula se comporta como onda, ela deve ter um comprimento de onda e uma frequência. De Broglie postulou que uma partícula livre com massa de repouso m , deslocando-se com velocidade não relativística v , deve ter um comprimento de onda λ associado a seu momento linear $p = mv$ do mesmo modo que um fóton, como expresso pela Equação 38.5, da Seção 38.1: $\lambda = h/p$. O **comprimento de onda de De Broglie** de uma partícula é, então,

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (39.1)$$

Diagrama da Equação 39.1: O comprimento de onda de De Broglie de uma partícula (λ) é igual à constante de Planck (h) dividida pelo momento linear da partícula (p). Alternativamente, é igual à constante de Planck (h) dividida pelo produto da massa da partícula (m) e sua velocidade (v).

Se a velocidade da partícula é uma fração considerável da velocidade da luz c , substituímos mv na Equação 39.1 por $\gamma mv = mv/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ (Equação 37.27, da Seção 37.7). A frequência f , de acordo com De Broglie, também é relacionada com a energia da partícula E da mesma forma que ocorre com um fóton, ou seja,

$$E = hf \quad (39.2)$$

Diagrama da Equação 39.2: A energia de uma partícula (E) é igual à constante de Planck (h) multiplicada pela frequência (f).

ATENÇÃO Nem todas as equações dos fótons se aplicam a partículas com massa. A relação $E = hf$ deve ser aplicada com cuidado a partículas que possuem massa de repouso diferente de zero, como os elétrons. Diferentemente dos fótons, essas partículas *não* se deslocam com a velocidade da luz c , de modo que nem a relação $f = c/\lambda$ nem a relação $E = pc$ podem ser aplicadas a elas!

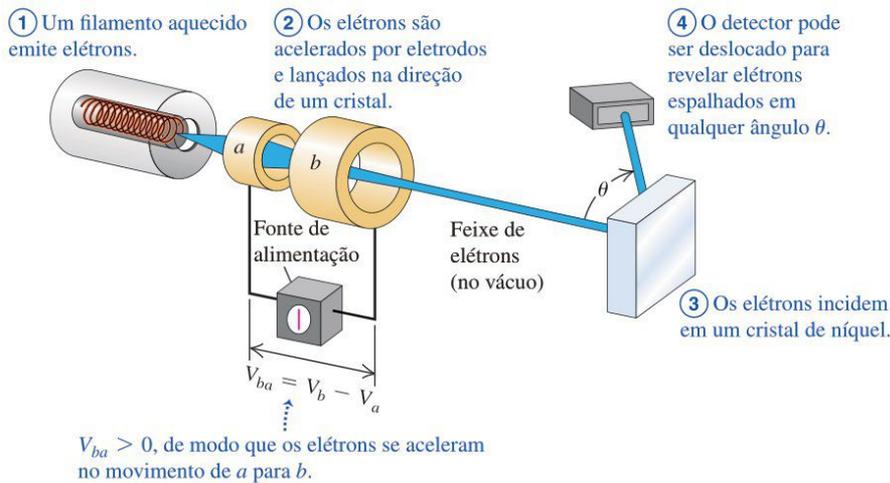
Observando a natureza ondulatória dos elétrons

A proposta de De Broglie foi muito audaciosa, feita em uma época em que ainda não existia nenhuma evidência experimental direta de que as partículas pudessem ter um caráter ondulatório. Porém, após alguns anos suas ideias foram retumbantemente verificadas por um experimento de difração com elétrons. Esse experimento foi semelhante aos descritos na Seção 36.6, nos quais os átomos de um cristal desempenhavam o papel de uma rede de difração tridimensional para os raios X. Um feixe de raios X é fortemente refletido quando incide formando um ângulo em que ocorre interferência construtiva entre as ondas espalhadas pelos diversos átomos no cristal. Esses efeitos de interferência demonstram a natureza *ondulatória* dos raios X.

Em 1927, os físicos americanos Clinton Davisson e Lester Germer, trabalhando nos laboratórios da Bell Telephone, estavam estudando a superfície de um bloco de níquel fazendo um feixe de *elétrons* incidir sobre ela e observando quantos elétrons emergiam em diferentes ângulos. A **Figura 39.2** mostra um dispositivo experimental semelhante ao que eles usaram. A amostra era *policristalina*; assim como vários metais comuns, a amostra continha muitos cristais microscópicos ligados e orientados aleatoriamente. Como resultado, o feixe de elétrons sofreria uma reflexão difusa, como a luz quicando em uma superfície áspera (veja a Figura 33.6b), com uma distribuição uniforme de intensidade em função do ângulo θ .

Durante a realização da experiência, ocorreu um acidente que possibilitou a entrada de ar na câmara a vácuo, ocasionando a formação de uma película de óxido sobre a superfície metálica. Para remover essa película, Davisson e Germer aqueceram a amostra em um forno com uma temperatura muito elevada. Sem que eles soubessem, esse processo teve o efeito de criar vastas regiões de monocristais cujos planos eram dispostos continuamente ao longo da largura do feixe de elétrons. Do ponto de vista dos elétrons, a amostra parecia ser um *único* cristal de níquel.

Figura 39.2 Dispositivo semelhante ao usado por Davisson e Germer para descobrir a difração de elétrons.



Quando eles repetiram as observações com essa amostra, os resultados foram bastante diferentes. Os máximos fortes na intensidade do feixe de elétrons refletido ocorriam em determinados ângulos (**Figura 39.3a**), em contraste com a variação uniforme da intensidade no ângulo que Davisson e Germer observaram antes do acidente. As posições angulares dos máximos dependiam da voltagem de aceleração V_{ba} usada para produzir o feixe de elétrons. Davisson e Germer conheciam a hipótese lançada por De Broglie e notaram a semelhança entre o comportamento da difração de raios X e o observado por eles. Embora esse não fosse o efeito que estavam procurando, eles imediatamente concluíram que o feixe de elétrons estava sendo *difratado*. Eles haviam descoberto uma confirmação experimental direta da hipótese ondulatória.

Davisson e Germer podiam determinar as velocidades dos elétrons a partir das voltagens de aceleração, de modo que era possível calcular os comprimentos de onda de De Broglie usando a Equação 39.1. Se um elétron for acelerado a partir do repouso no ponto a para o ponto b por um aumento de potencial $V_{ba} = V_b - V_a$, como mostra a Figura 39.2, o trabalho realizado sobre o elétron, eV_{ba} , é igual à energia cinética K . Usando $K = \left(\frac{1}{2}\right)mv^2 = p^2/2m$ para uma partícula não relativística, temos

$$eV_{ba} = \frac{p^2}{2m} \quad p = \sqrt{2meV_{ba}}$$

Substituindo isso na Equação 39.1 para o comprimento de onda de De Broglie do elétron, obtemos:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2meV_{ba}}} \quad (39.3)$$

Constante de Planck h

Comprimento de onda de De Broglie do elétron λ

Momento linear do elétron p

Voltagem de aceleração V_{ba}

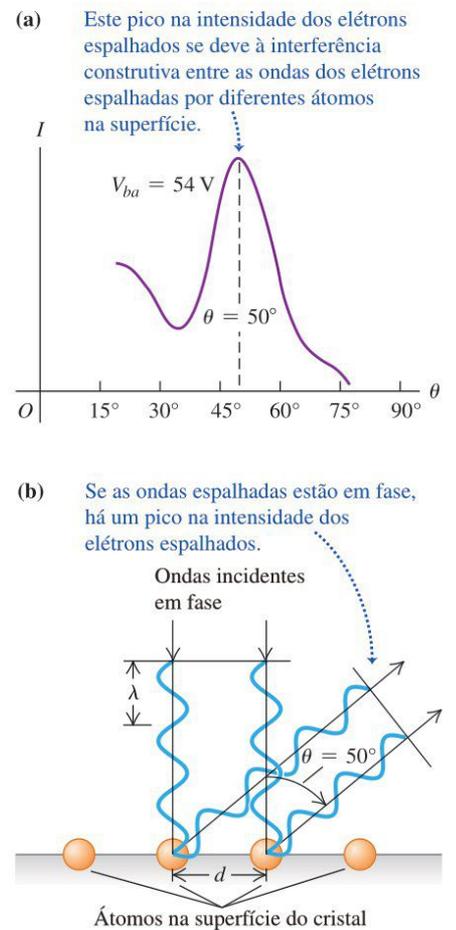
Módulo da carga do elétron e

Massa do elétron m

Quanto maior a voltagem de aceleração V_{ba} , mais curto o comprimento de onda do elétron.

Para prever os ângulos em que ocorre a reflexão forte, observe que os elétrons inicialmente eram espalhados principalmente pelos planos dos átomos perto da superfície do cristal. Os átomos em uma superfície plana são distribuídos ao longo de linhas, e a distância d do espaçamento entre os átomos pode ser medida pela técnica de difração de raios X. Essas linhas se comportam como uma rede de di-

Figura 39.3 (a) Gráfico da intensidade do feixe de elétrons espalhados mostrado na Figura 39.2 em função do ângulo de espalhamento θ . (b) A interferência construtiva entre as ondas dos elétrons espalhados por dois átomos adjacentes interfere construtivamente quando $d \sin \theta = m\lambda$. No caso mostrado aqui, $\theta = 50^\circ$ e $m = 1$.

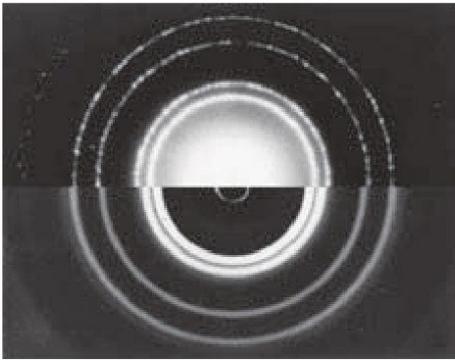


fração; os ângulos em que ocorre forte reflexão são os mesmos que os obtidos no caso de uma rede de difração com uma distância d entre duas fendas consecutivas (Figura 39.3b). De acordo com a Equação 36.13, os ângulos em que ocorre reflexão máxima são dados por

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (39.4)$$

Figura 39.4 Difração de elétrons e difração de raios X. A metade superior da foto mostra a figura de difração para raios X de 71 pm passando através de uma folha de alumínio. A metade inferior da foto mostra, em uma escala diferente, a figura de difração para elétrons de 600 eV passando através de uma folha de alumínio. A semelhança mostra que os elétrons sofrem o mesmo tipo de difração que os raios X.

Em cima: difração de raios X



Embaixo: difração de elétrons

onde θ é o ângulo indicado na Figura 39.2. (Observe que a geometria na Figura 39.3b é diferente daquela para a Figura 36.22, de modo que a Equação 39.4 é diferente da Equação 36.16.) Davisson e Germer descobriram que os ângulos previstos por essa equação, usando o comprimento de onda de De Broglie indicado pela Equação 39.3, concordavam com os valores observados (Figura 39.3a). Assim, a descoberta acidental da **difração de elétrons** foi a primeira evidência experimental direta a confirmar a hipótese feita por De Broglie.

Em 1928, apenas um ano após a descoberta de Davisson e Germer, o físico inglês G. P. Thomson fez experiências de difração de elétrons usando como alvo uma fina folha metálica policristalina. Debye e Sherrer empregaram uma técnica semelhante para estudar a difração de raios X de amostras policristalinas. Nesses experimentos, o feixe passa *através* do alvo, em vez de ser refletido por ele. Por causa das orientações aleatórias dos cristais microscópicos no interior da folha, a figura de difração era constituída por máximos distribuídos ao longo de um anel em torno da direção do feixe incidente. Os resultados de Thomson confirmaram novamente a relação proposta por De Broglie. A **Figura 39.4** mostra duas figuras de difração, uma para elétrons e outra para raios X, passando através de uma folha de alumínio policristalina. (É interessante notar que G. P. Thomson era filho de J. J. Thomson, que, 31 anos antes, havia descoberto o elétron. Davisson e o Thomson mais novo compartilharam o Prêmio Nobel de física em 1937 por suas descobertas.)

Experiências adicionais com difração foram realizadas posteriormente em muitos laboratórios, usando não apenas elétrons, mas também diversos íons e nêutrons de baixas energias. Todas essas experiências estavam de acordo com as previsões audaciosas de De Broglie. Assim, a natureza ondulatória das partículas, tão estranha em 1924, se tornou firmemente estabelecida nos anos posteriores.

ESTRATÉGIA PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS 39.1 PROPRIEDADES ONDULATÓRIAS DAS PARTÍCULAS

IDENTIFICAR *os conceitos relevantes:* as partículas têm propriedades ondulatórias. O comprimento de onda de uma partícula (De Broglie) é inversamente proporcional ao seu momento linear, e a frequência é proporcional à sua energia.

PREPARAR *o problema:* identifique as variáveis-alvo e decida que equações usará para calculá-las.

EXECUTAR *a solução* da seguinte forma:

1. Use a Equação 39.1 para relacionar o momento linear p da partícula com seu comprimento de onda λ ; use a Equação 39.2 para relacionar sua energia E com sua frequência f .
2. A energia cinética não relativística pode ser expressa na forma $K = \frac{1}{2}mv^2$ ou (como $p = mv$) pela relação $K = p^2/2m$. A última forma geralmente é útil para cálculos que envolvem o comprimento de onda de De Broglie.
3. Você pode expressar as energias em joules ou em elétrons-volt, usando $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ou $h = 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$, conforme o caso.

AVALIAR *sua resposta:* para verificar seus resultados numéricos, é útil memorizar algumas ordens de grandeza aproximadas. Veja uma lista parcial:

Raio de um átomo: $10^{-10} \text{ m} = 0,1 \text{ nm}$

Massa de um átomo: 10^{-26} kg

Massa de um elétron: $m = 10^{-30} \text{ kg}$; $mc^2 = 0,511 \text{ MeV}$

Ordem de grandeza da carga de um elétron: 10^{-19} C

kT na temperatura ambiente: $\frac{1}{40} \text{ eV}$

Diferença entre níveis de energia de um átomo (a ser discutida na Seção 39.3): 1 a 10 eV

Velocidade de um elétron no modelo de Bohr para um átomo de hidrogênio (a ser discutida na Seção 39.3): 10^6 m/s .