

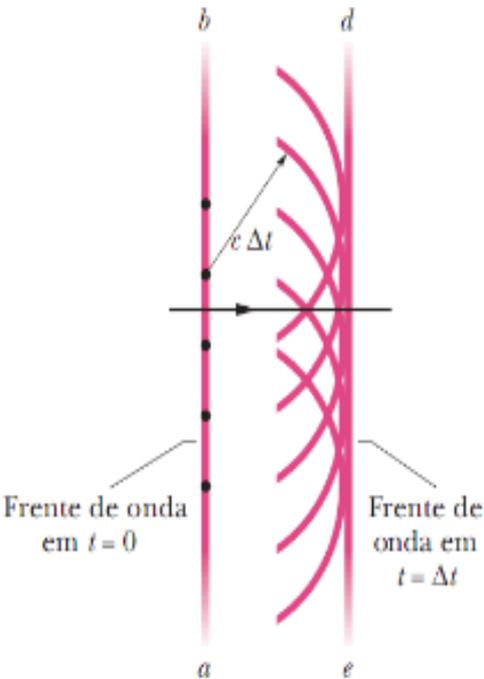
Ondas Luminosas - PRINCIPIO DE HUYGENS

A propagação tridimensional de ondas de todos os tipos, incluindo as ondas luminosas, pode ser modelada usando o princípio de Huygens, segundo o qual



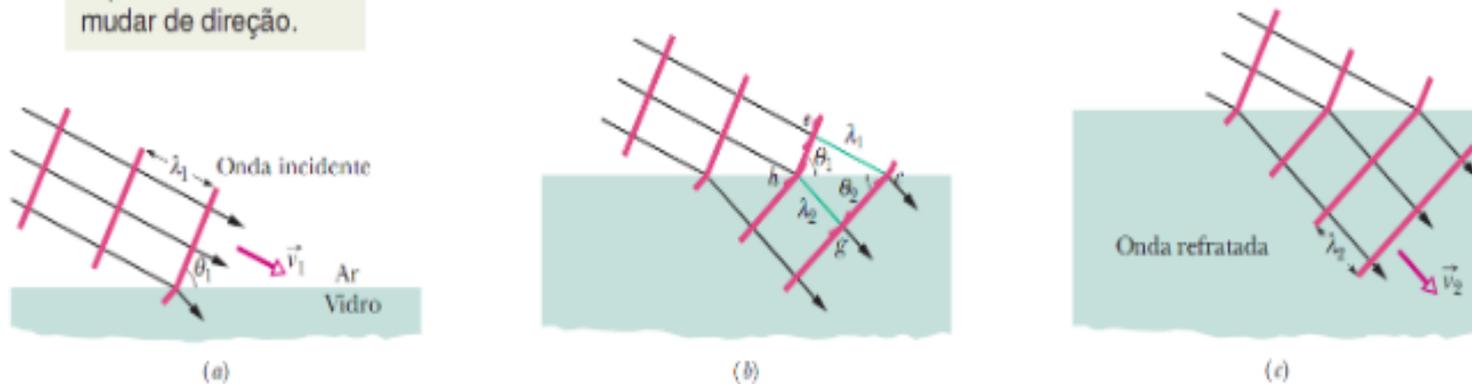
Todos os pontos de uma frente de onda se comportam como fontes pontuais de ondas secundárias. Depois de um intervalo de tempo t , a nova posição da frente de onda é dada por uma superfície tangente a essas ondas secundárias.

A Fig. 1 mostra a propagação de uma onda plana no vácuo, de acordo com o princípio de Huygens.



A refração ocorre na superfície e faz a onda mudar de direção.

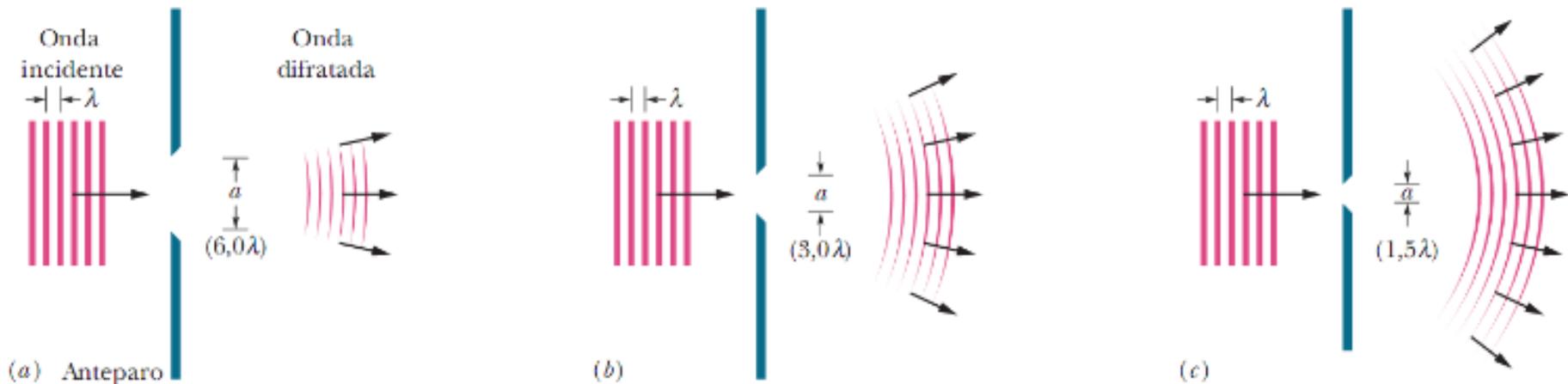
Figura 1



ONDA ELETROMAGNETICA

O alargamento de um feixe luminoso pode ser explicado pelo princípio de Huygens. A difração acontece com ondas de todos os tipos. A figura ilustra o processo.

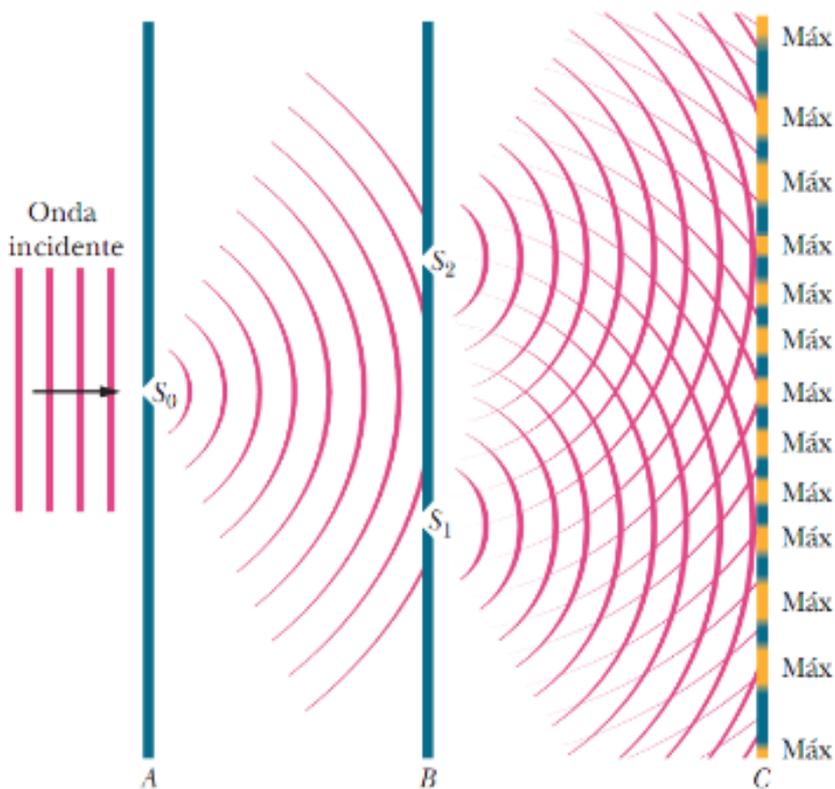
Um feixe luminoso que passa por uma fenda sofre um alargamento (é difratado).



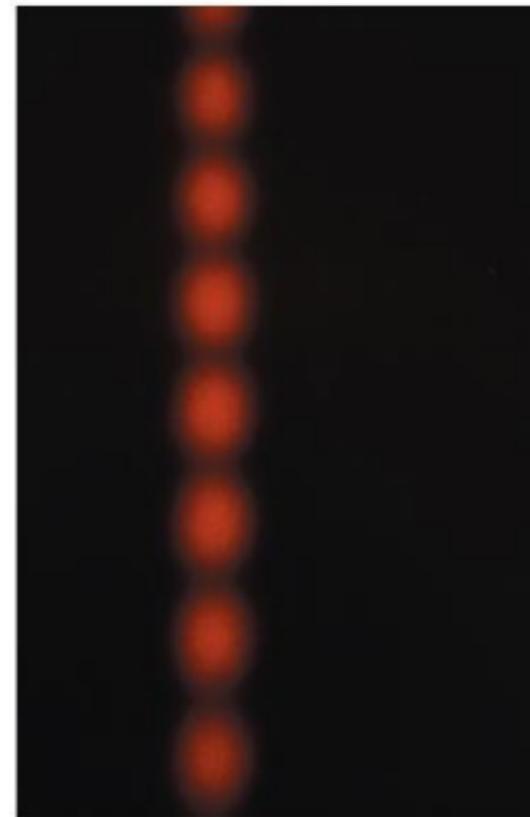
A figura (a) mostra o que acontece quando uma onda de comprimento de onda λ passa por uma fenda de largura $a = 6,0\lambda$. As figuras (b) (em que $a = 3,0\lambda$) e (c) ($a = 1,5\lambda$) ilustram uma propriedade importante da difração: quanto mais estreita é a fenda, mais difratado é o feixe.

EXPERIENCIA DE YOUNG - 1801

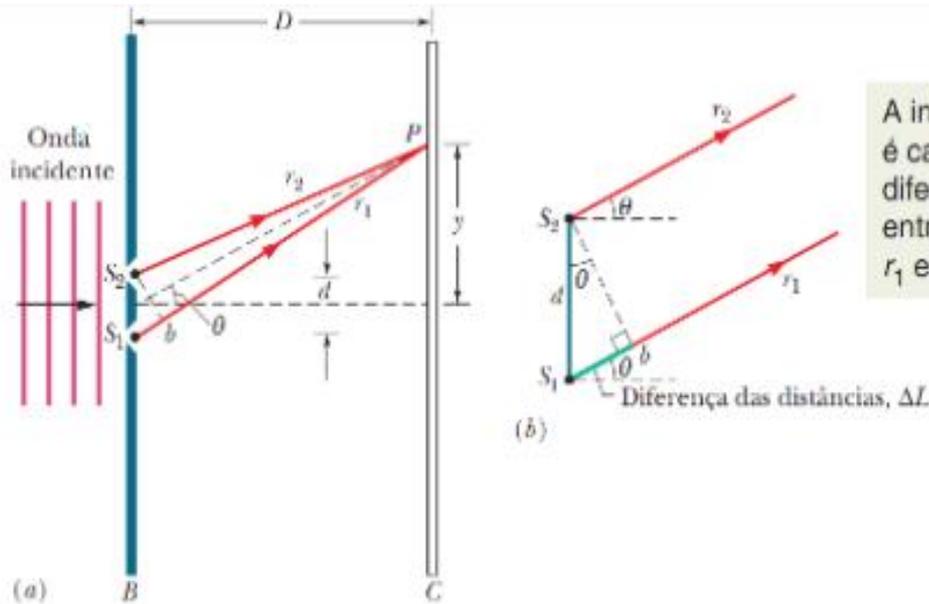
No experimento de Young, a luz monocromática incidente é difratada pela fenda S_0 , que se comporta como uma fonte luminosa pontual, emitindo frentes de onda semicirculares. Quando a luz chega ao anteparo B , é difratada pelas fendas S_1 e S_2 , que se comportam como duas fontes luminosas pontuais. As ondas luminosas que deixam as fendas S_1 e S_2 se combinam e sofrem interferência, formando um padrão de interferência, composto de máximos e mínimos, na tela de observação C .



Fotografia da figura de interferência produzida por um arranjo como o da Fig. 35-8, mas com fendas curtas. (A fotografia é uma vista frontal de parte da tela C .) Os máximos e mínimos de intensidade são chamados de *franjas de interferência* porque lembram as franjas decorativas usadas em colchas e tapetes.



EXPERIENCIA DE YOUNG - 1801



A interferência é causada pela diferença ΔL entre r_1 e r_2 .

(a) Os raios luminosos que partem das fendas S_1 e S_2 se combinam em P , um ponto arbitrário da tela C situado a uma distância y do eixo central. O ângulo θ pode ser usado para indicar a localização de P .
 (b) Para $D \gg d$, podemos supor que os raios r_1 e r_2 são aproximadamente paralelos e fazem um ângulo θ com o eixo central.

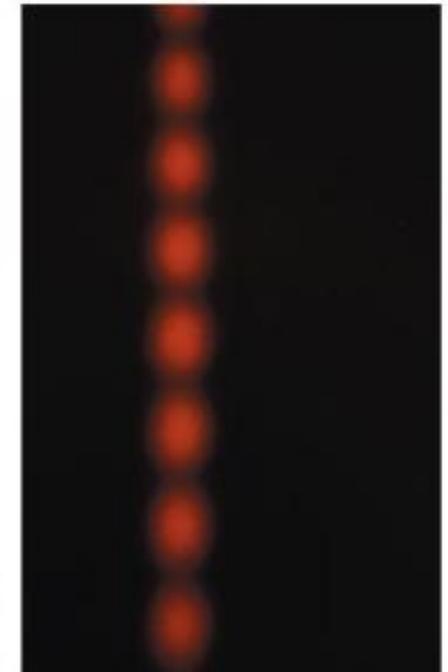


A diferença de fase entre duas ondas pode mudar se as ondas percorrerem distâncias diferentes.

As condições para que a intensidade da luz seja máxima e mínima são, respectivamente,

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad \text{para } m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{máximos; franjas claras})$$

$$d \sin \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda, \quad \text{para } m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{mínimos; franjas escuras})$$



INTENSIDADE DAS FRANJAS DE INTERFERÊNCIA.

Para que duas ondas luminosas interfiram, é preciso que a diferença de fase entre as ondas não varie com o tempo, ou seja, que as ondas sejam coerentes.

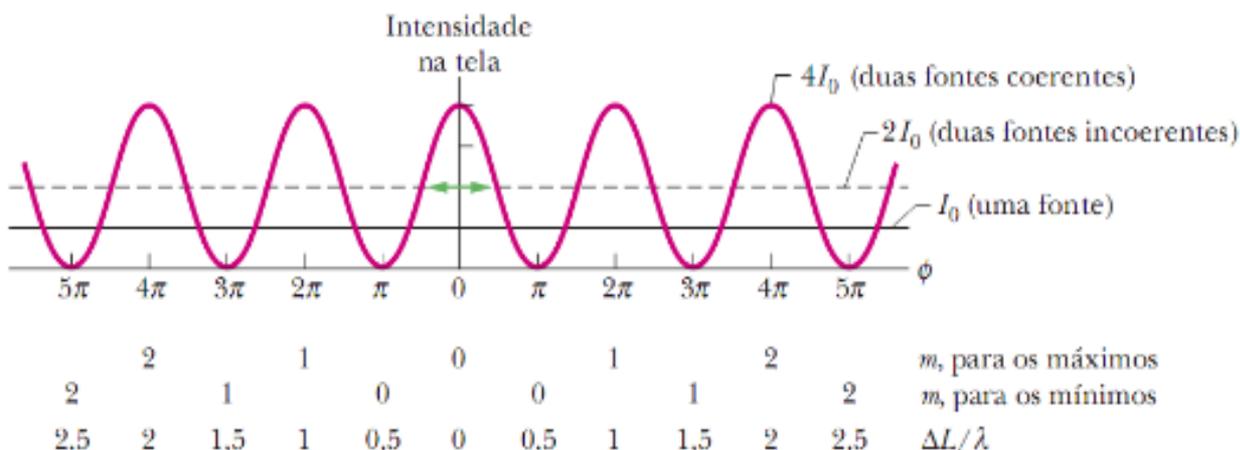


Gráfico da equação abaixo, mostrando a intensidade de uma figura de interferência de dupla fenda em função da diferença de fase entre as ondas provenientes das duas fendas. I_0 é a intensidade (uniforme) que seria observada na tela se uma das fendas fosse coberta. A intensidade média da figura de interferência é $2I_0$ e a intensidade máxima (para luz coerente) é $4I_0$.

Como mostra a figura, no experimento de Young, duas ondas de intensidade I_0 se combinam para produzir uma onda resultante de intensidade I na tela de observação, em que

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{1}{2} \phi$$

e

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta$$

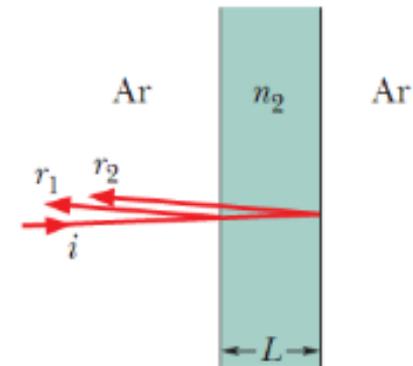
INTERFERENCIA EM FILMES FINOS.

Quando a luz incide em um filme transparente, as ondas luminosas refletidas pelas duas superfícies do filme interferem. No caso de uma incidência normal, as condições para que a intensidade da luz refletida por um filme *suspenso no ar* seja máxima e mínima são

$$2L = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{n_2}, \quad \text{para } m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{máximos; filme claro no ar}).$$

e

$$2L = m \frac{\lambda}{n_2}, \quad \text{para } m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{mínimos; filme escuro no ar}).$$



Reflexões em um filme fino suspenso no ar.

em que n_2 é o índice de refração do filme, L é a espessura do filme e λ é o comprimento de onda da luz no ar.

Quando um filme fino está cercado por meios diferentes do ar, as condições para reflexão máxima e mínima podem se inverter, dependendo dos índices de refração dos três meios.

Quando a luz que incide na interface de meios com índices de refração diferentes está se propagando inicialmente no meio com menor índice de refração, a reflexão produz um deslocamento de fase de π rad, ou meio comprimento de onda, da onda refletida. Se a onda está se propagando inicialmente no meio com maior índice de refração, a reflexão não produz um deslocamento de fase. A refração não produz deslocamentos de fase.

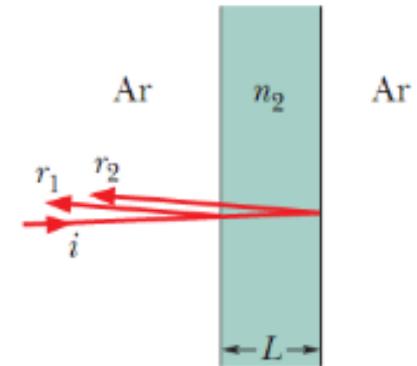
INTERFERENCIA EM FILMES FINOS.

Quando a luz incide em um filme transparente, as ondas luminosas refletidas pelas duas superfícies do filme interferem. No caso de uma incidência normal, as condições para que a intensidade da luz refletida por um filme *suspenso no ar* seja máxima e mínima são

$$2L = (m + \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{n_2}, \quad \text{para } m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{máximos; filme claro no ar}).$$

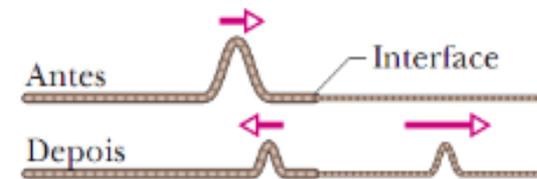
e

$$2L = m \frac{\lambda}{n_2}, \quad \text{para } m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{mínimos; filme escuro no ar}).$$



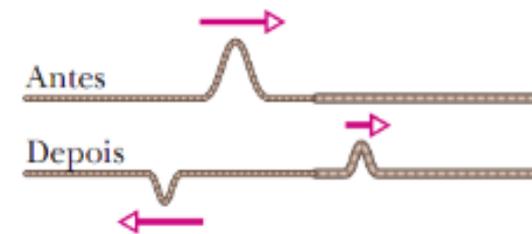
Reflexões em um filme fino suspenso no ar.

em que n_2 é o índice de refração do filme, L é a espessura do filme e λ é o comprimento de onda da luz no ar.



O pulso incidente está na corda mais densa.

Reflexão	Mudança de fase
Em um meio com n menor	0
Em um meio com n maior	$0,5\lambda$



O pulso incidente está na corda menos densa. Apenas neste caso a onda incidente e a onda refletida têm fases opostas.

INTERFERÔMETRO DE MICHELSON

O interferômetro é um instrumento que pode ser usado para medir comprimentos de onda com grande precisão por meio de franjas de interferência.

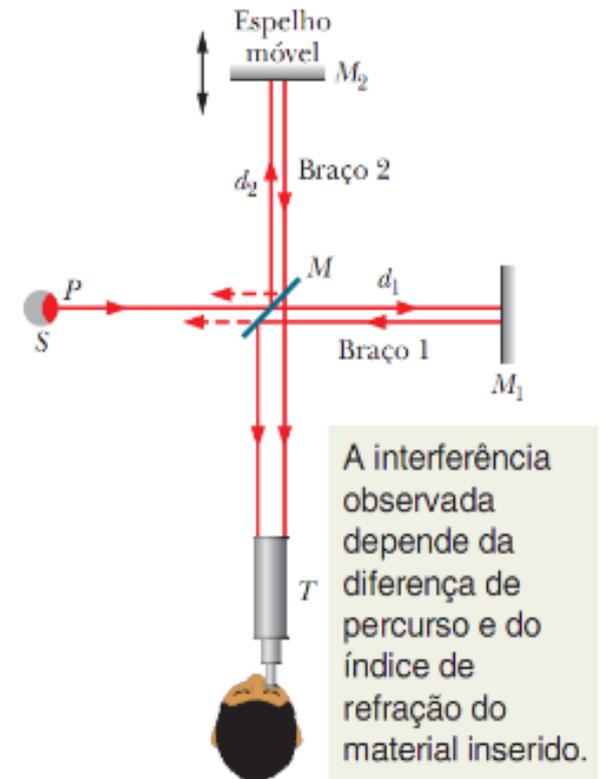
No interferômetro de Michelson, uma onda luminosa é dividida em dois feixes que se recombinaem depois de percorrerem caminhos diferentes.

A figura de interferência produzida por um interferômetro depende da diferença de percurso dos dois feixes e dos índices de refração dos meios encontrados pelos dois feixes.

Se um dos feixes atravessa um material transparente de índice de refração n e espessura L , a diferença de fase (em comprimentos de onda) introduzida pelo material transparente é dada por

$$\frac{2L}{\lambda} (n - 1)$$

em que λ é o comprimento de onda da luz.



Interferômetro de Michelson, mostrando o caminho seguido pela luz que parte de um ponto P de uma fonte S . O espelho M divide a luz em dois feixes, que são refletidos pelos espelhos M_1 e M_2 de volta para M e daí para o telescópio T . No telescópio, o observador vê uma figura de interferência.

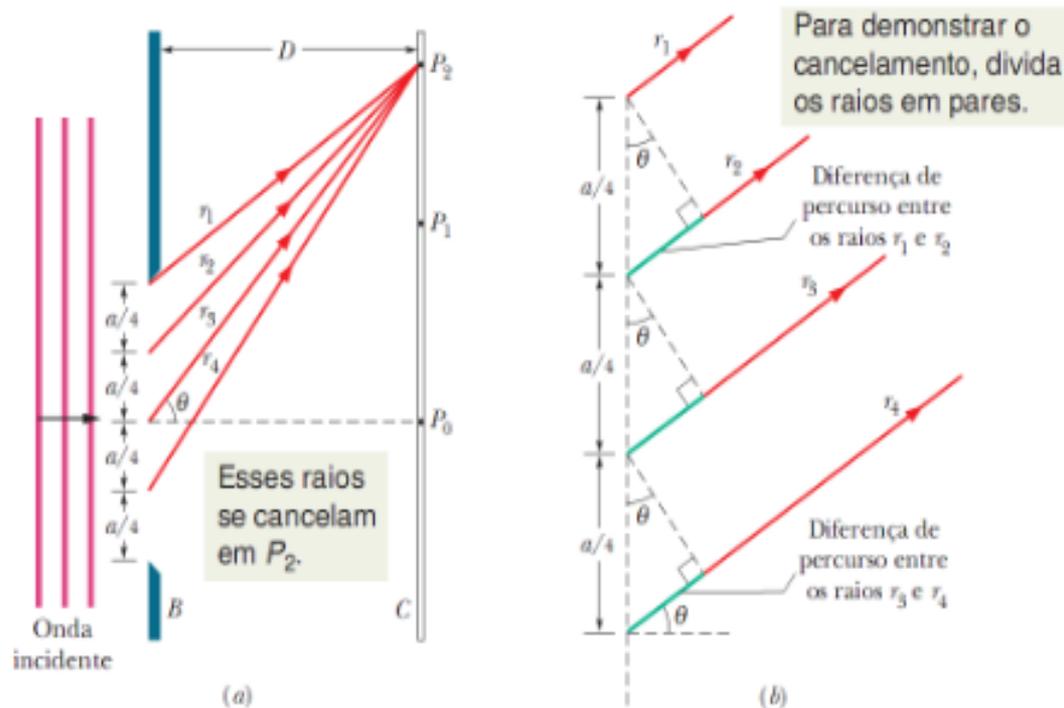
DIFRAÇÃO EM FENDA ÚNICA.

Quando as ondas encontram um obstáculo ou uma fenda de dimensões comparáveis com o comprimento de onda, as ondas se espalham e sofrem interferência. Esse tipo de interferência é chamado de difração.

Quando a luz passa por uma fenda estreita, de largura a , produz, em uma tela de observação, uma figura de difração de uma fenda que consiste em um máximo central (franja clara) e uma série de franjas claras laterais separadas por mínimos cujas posições angulares são dadas pela equação

$$a \sin \theta = m\lambda, \quad \text{para } m = 1, 2, 3, \dots$$

Os máximos estão situados aproximadamente a meio caminho entre os mínimos.



- (a) Os raios provenientes da extremidade superior de quatro regiões de largura $a/4$ sofrem interferência destrutiva no ponto P_2 .
- (b) Para $D \gg a$, podemos supor que os raios r_1, r_2, r_3 e r_4 são aproximadamente paralelos e fazem um ângulo θ com o eixo central.

INTENSIDADE DA LUZ DIFRATADA POR FENDA ÚNICA.

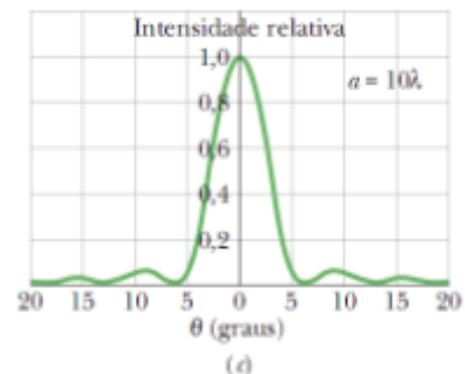
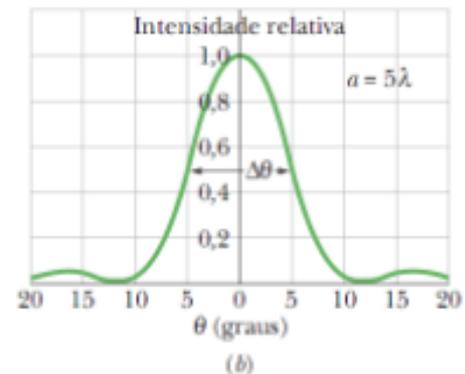
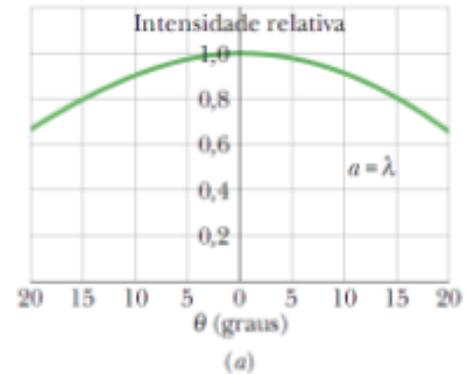
A intensidade do ponto da figura de difração associado ao ângulo θ é dada por

$$I(\theta) = I_m \left(\frac{\text{sen } \alpha}{\alpha} \right)^2$$

em que I_m é a intensidade no centro da figura de difração e

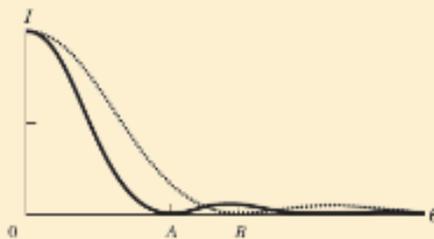
$$\alpha = \frac{1}{2} \phi = \frac{\pi a}{\lambda} \text{sen } \theta$$

Os gráficos mostram a intensidade relativa da luz difratada para três valores da razão a/λ . Quanto mais larga é a fenda, mais estreito é o mínimo central.



✓ Teste 3

Dois comprimentos de onda, 650 e 430 nm, são usados separadamente em um experimento de difração por uma fenda. A figura mostra os resultados na forma de gráficos da intensidade I em função do ângulo θ para as duas figuras de difração. Se os dois comprimentos de onda forem usados simultaneamente, que cor será vista na figura de difração resultante (a) na posição correspondente ao ângulo A e (b) na posição correspondente ao ângulo B ?



Respostas:
 (a) 650 nm
 (b) 430 nm

DIFRAÇÃO EM ORIFÍCIO CIRCULAR

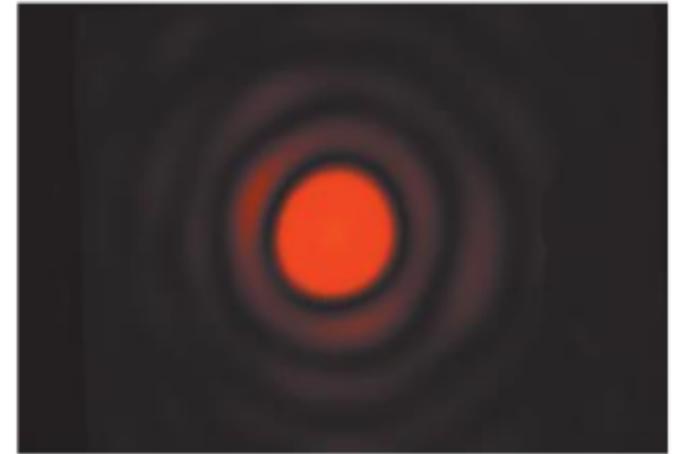
A difração por uma abertura circular ou por uma lente produz um máximo central e mínimos concêntricos dados por

$$\sin \theta = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (\text{primeiro mínimo; abertura circular})$$

em que θ é o ângulo entre o eixo central e a reta que liga o centro do anel à posição do mínimo. A equação é semelhante a

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{a} \quad (\text{primeiro mínimo; fenda única}),$$

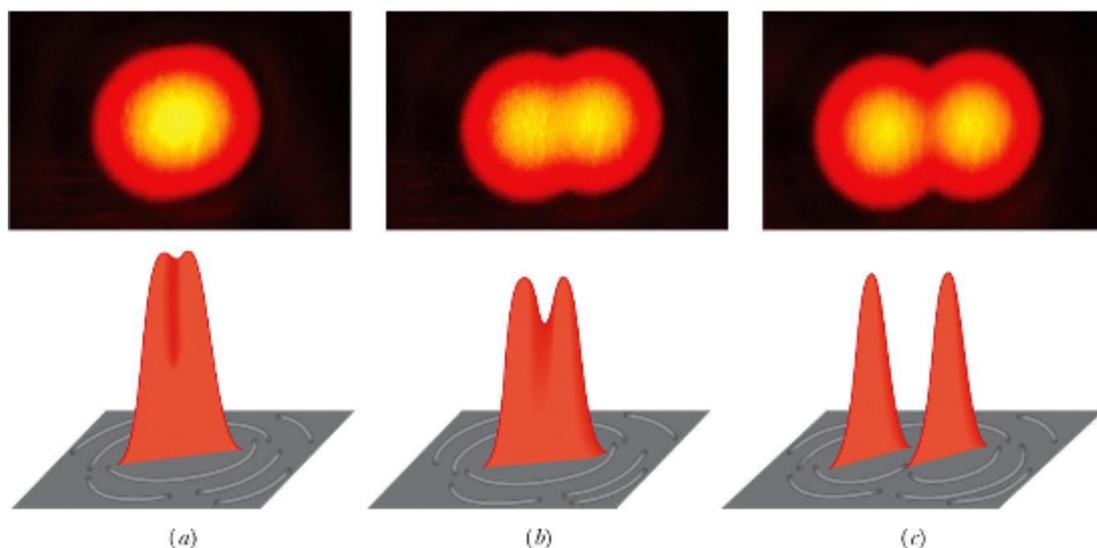
usada para calcular o primeiro mínimo de difração de uma fenda. A única diferença é o fator 1,22, que se deve à forma circular da abertura.



Cortesia de Jearl Walker

Figura de difração de uma abertura circular. Observe o máximo central e os máximos secundários circulares. A fotografia foi superexposta para tornar mais visíveis os máximos secundários, que são muito menos intensos que o máximo central.

Resolução



Em cima, imagens de duas fontes pontuais (estrelas) formadas por uma lente convergente. Embaixo, representações da intensidade das imagens. Em (a), a separação angular das fontes é pequena demais para que as fontes possam ser distinguidas; em (b), as fontes mal podem ser distinguidas; em (c), as fontes podem ser perfeitamente distinguidas. O critério de Rayleigh é satisfeito em (b), com o máximo de uma das figuras de difração coincidindo com o mínimo da outra.

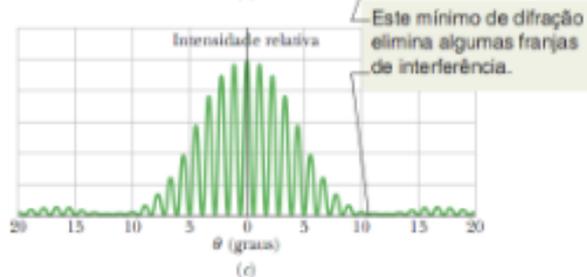
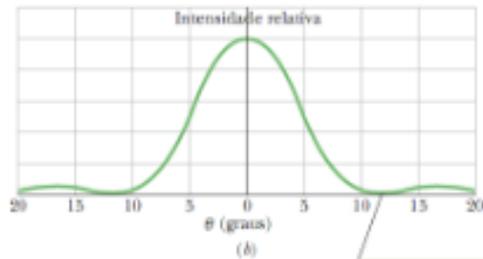
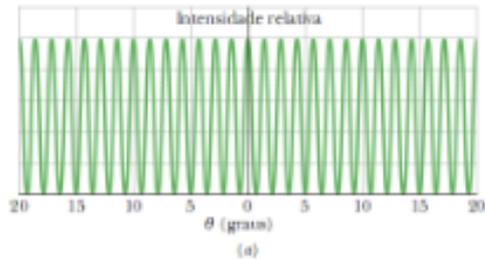
De acordo com o **critério de Rayleigh**, dois objetos mal podem ser distinguidos se o máximo central de difração de um dos objetos coincide com o primeiro mínimo de difração do outro objeto. Isso acontece quando a separação angular dos objetos é dada por

$$\theta_R = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (\text{critério de Rayleigh})$$

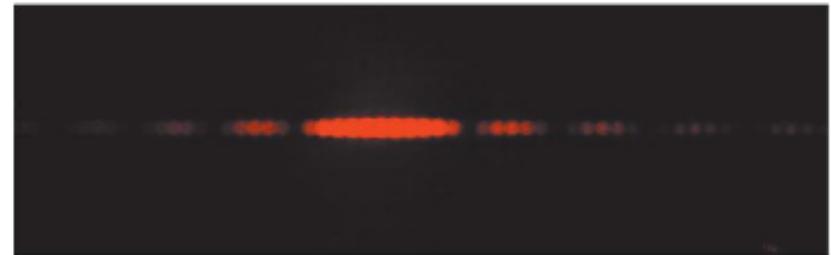
em que d é o diâmetro da abertura.

DIFRAÇÃO POR FENDAS DUPLA

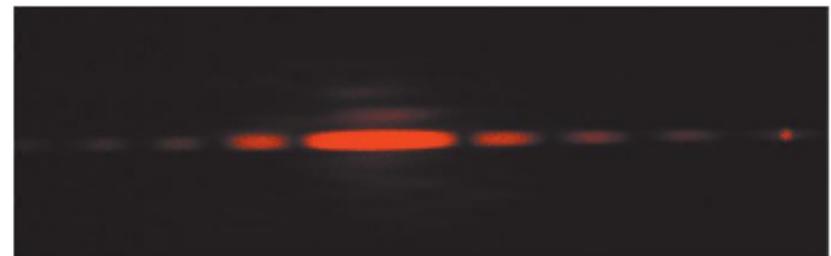
As ondas que passam por duas fendas produzem uma combinação de interferência de dupla fenda com difração por uma fenda.



(d)



(e)



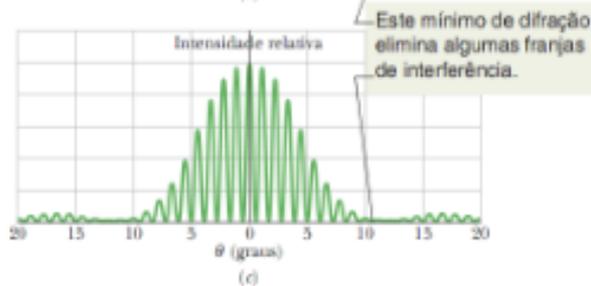
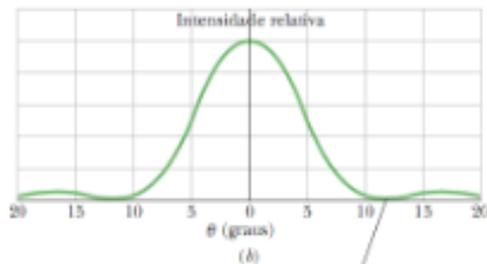
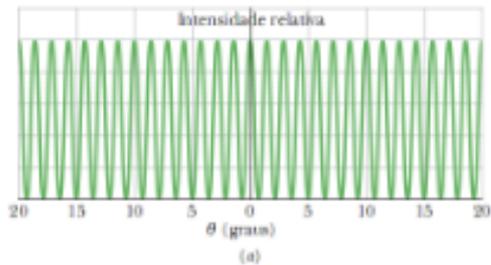
Cortesia de Jearyl Walker

(d) Franjas de interferência em um sistema real de duas fendas; compare com a figura (b). (e) Figura de difração de uma única fenda; compare com a figura (e).

(a) Gráfico teórico da intensidade em um experimento de interferência com duas fendas infinitamente estreitas. (b) Gráfico teórico da difração produzida por uma única fenda de largura a finita. (c) Gráfico teórico da intensidade em um experimento com duas fendas de largura a finita. A curva de (b) se comporta como uma envoltória, modulando a intensidade das franjas de (a). Observe que os primeiros mínimos da curva de difração de (b) eliminam as franjas de (a) que estariam presentes nas vizinhanças de 12° em (c).

INTENSIDADE DA DIFRAÇÃO POR FENDAS DUPLA

As ondas que passam por duas fendas produzem uma combinação de interferência de dupla fenda com difração por uma fenda.



No caso de fendas iguais, de largura a , separadas por uma distância d , a variação da intensidade da luz com o ângulo θ é dada pela equação

$$I(\theta) = I_m (\cos^2 \beta) \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \quad (\text{duas fendas})$$

em que

$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta$$

e

$$\alpha = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta$$

Note que o lado direito da primeira equação é o produto de I_m e dois fatores: (1) o fator de interferência $\cos^2 \beta$, que depende de d , a distância entre as fendas; (2) o fator de difração $[(\sin \alpha)/\alpha]^2$, que depende de a , a distância entre as fendas.

REDE DE DIFRAÇÃO

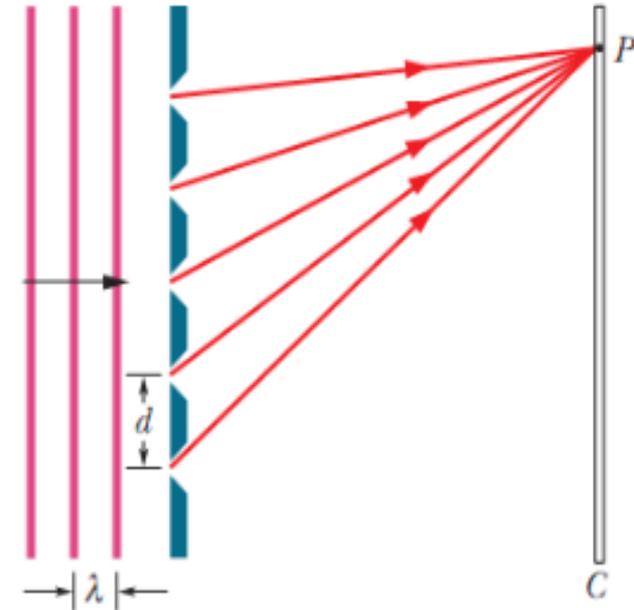
Uma rede de difração é uma série de fendas usadas para separar uma onda incidente nos comprimentos de onda que a compõem. A posição angular dos máximos produzidos por uma rede de difração, conhecidos como linhas, é dada por

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad \text{para } m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{linhas})$$

A meia largura de uma linha é o ângulo entre o centro da linha e o primeiro mínimo de intensidade e é dada por

$$\Delta\theta_{\text{ml}} = \frac{\lambda}{Nd \cos \theta} \quad (\text{meia largura})$$

Note que, para uma luz de um dado comprimento de onda λ e uma rede de difração com um dado espaçamento d entre as ranhuras, a largura das linhas é inversamente proporcional ao número N de ranhuras. Assim, no caso de duas redes de difração com a mesma distância entre as ranhuras, a que possui maior número de ranhuras permite separar melhor os diferentes comprimentos de onda da radiação incidente, já que as linhas de difração são mais estreitas e, portanto, existe menos superposição.



Rede de difração simplificada, com apenas cinco fendas, que produz uma figura de interferência em uma tela de observação distante.

Dispersão

A dispersão D de uma rede de difração é uma medida da separação angular $\Delta\theta$ que a rede de dispersão produz no caso de dois comprimentos de onda cuja diferença é $\Delta\lambda$. A dispersão é dada pela expressão

$$D = \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda}$$

em que m é o número de ordem e θ é o ângulo correspondente.

Para conseguir uma grande dispersão, devemos usar uma rede de difração com um pequeno espaçamento d entre as ranhuras e trabalhar com grandes valores de m . Observe que a dispersão não depende do número N de ranhuras da rede. A unidade de D do SI é o grau por metro ou o radiano por metro.



Kristen Brochmann/Fundamental Photographs

As ranhuras de um CD, com $0,5 \mu\text{m}$ de largura, se comportam como uma rede de difração. Quando o CD é iluminado com luz branca, a luz difratada forma faixas coloridas que representam as figuras de difração associadas aos diferentes comprimentos de onda da luz incidente.

Resolução

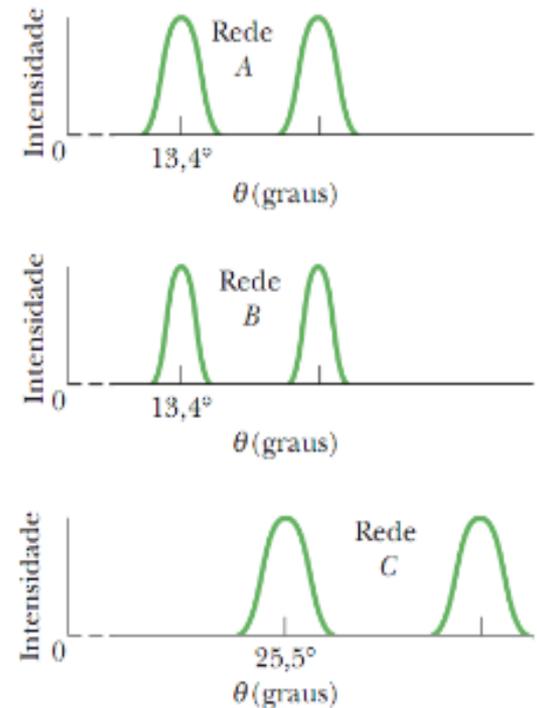
A resolução R de uma rede de difração é uma medida da capacidade da rede de difração de permitir que comprimentos de onda próximos sejam observados separadamente. No caso de dois comprimentos de onda cuja diferença é $\Delta\lambda$ e cujo comprimento de onda médio é $\lambda_{\text{méd}}$, a resolução é dada por

$$R = \frac{\lambda_{\text{méd}}}{\Delta\lambda} = Nm$$

Parâmetros de Três Redes de Difração^a

Rede	N	d (nm)	θ	D ($^{\circ}/\mu\text{m}$)	R
A	10 000	2540	13,4 $^{\circ}$	23,2	10 000
B	20 000	2540	13,4 $^{\circ}$	23,2	20 000
C	10 000	1360	25,5 $^{\circ}$	46,3	10 000

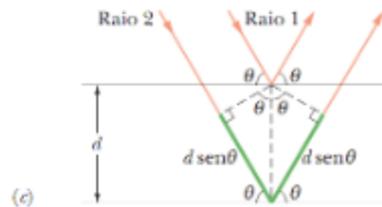
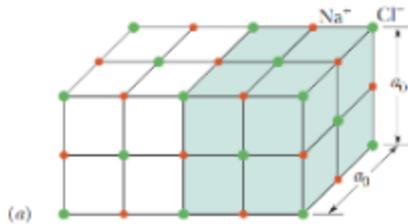
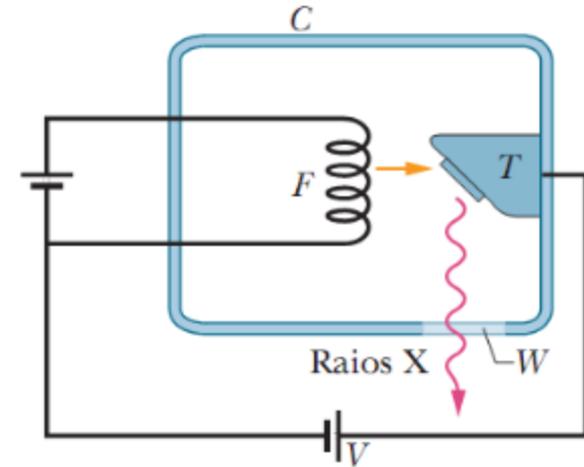
^aOs dados são para $\lambda = 589$ nm e $m = 1$.



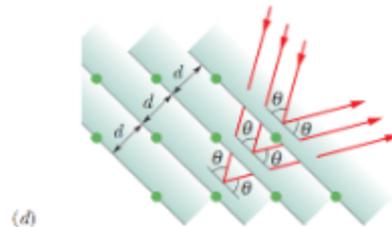
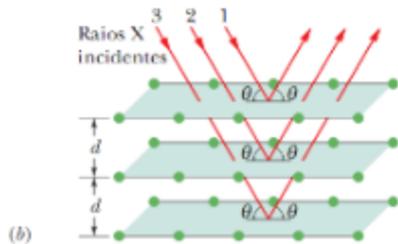
Gráficos de intensidade observados quando uma luz com dois comprimentos de onda é usada para iluminar as redes de difração, cujas propriedades podem ser vistas na Tabela 36-1. A rede de maior resolução é a rede B e a de maior dispersão é a rede C.

DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Os raios X são ondas eletromagnéticas com um comprimento de onda da ordem de $1 \text{ \AA} (= 10^{-10} \text{ m})$. A figura à direita mostra que raios X são produzidos quando elétrons que escapam de um filamento aquecido F são acelerados por uma diferença de potencial V e se chocam com um alvo de metal T .



A interferência se deve à distância adicional do raio 2.



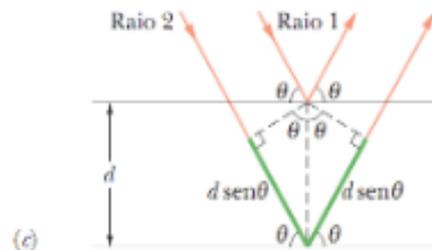
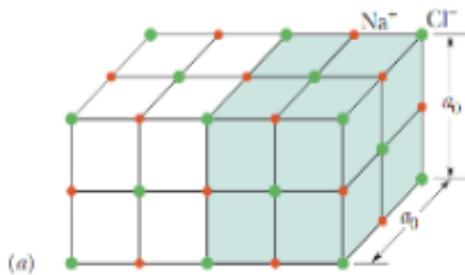
(a) A estrutura cúbica do NaCl, mostrando os íons de sódio e cloro e uma célula unitária (sombreada). (b) Os raios X incidentes são difratados pelo cristal representado em (a) como se fossem refletidos por uma família de planos paralelos, com o ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência, ambos medidos em relação aos planos (e não em relação à normal, como na ótica). (c) A diferença de percurso dos raios refletidos por planos vizinhos é $2d \sin \theta$. (d) Quando o ângulo de incidência muda, os raios X se comportam como se fossem refletidos por outra família de planos.

DIFRAÇÃO DE RAIOS X

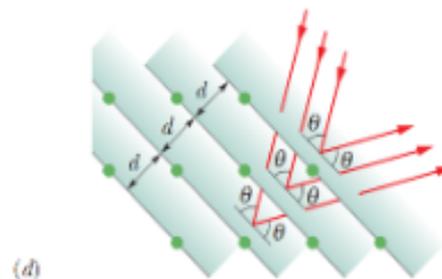
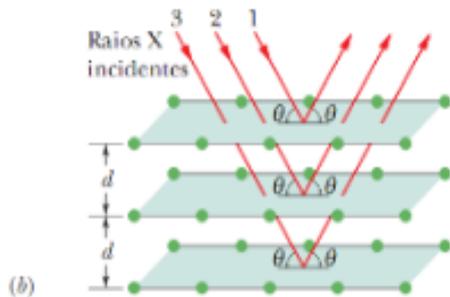
Como mostra a figura, quando raios X incidem em um cristal, sofrem o espalhamento de Bragg, que é mais fácil de visualizar se os átomos do cristal forem imaginados em planos paralelos.

No caso de raios X de comprimento de onda λ sendo espalhados por planos cristalinos com espaçamento d , os ângulos θ para os quais a intensidade do espalhamento é máxima são dados por

$$2d \sin \theta = m\lambda, \quad \text{para } m = 1, 2, 3, \dots$$



A interferência se deve à distância adicional do raio 2.



(a) A estrutura cúbica do NaCl, mostrando os íons de sódio e cloro e uma célula unitária (sombreada). (b) Os raios X incidentes são difratados pelo cristal representado em (a) como se fossem refletidos por uma família de planos paralelos, com o ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência, ambos medidos em relação aos planos (e não em relação à normal, como na ótica). (c) A diferença de percurso dos raios refletidos por planos vizinhos é $2d \sin \theta$. (d) Quando o ângulo de incidência muda, os raios X se comportam como se fossem refletidos por outra família de planos.