

Aula 2: Interferência

Bárbara Amaral

Instituto de Física da USP

Moysén vol. 4 capítulos 3 e 4

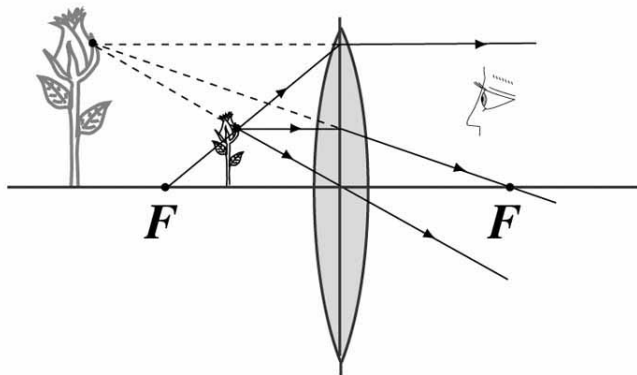
Feynman vol. 1 capítulos 28 e 29.

Young e Freedman vol. 4 capítulos 35 e
36

Ótica Geométrica

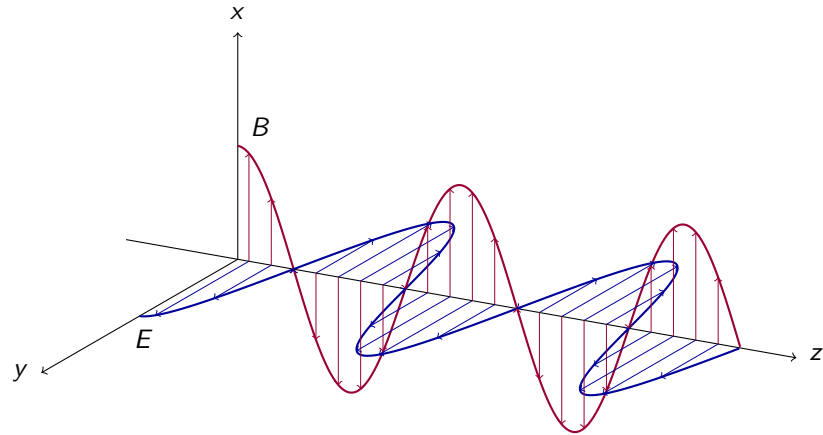
Representamos a luz por meio de **raios**:

Representamos a luz por meio de **raios**: linhas retas que mudam de direção quando sofrem reflexão ou refração em uma superfície.

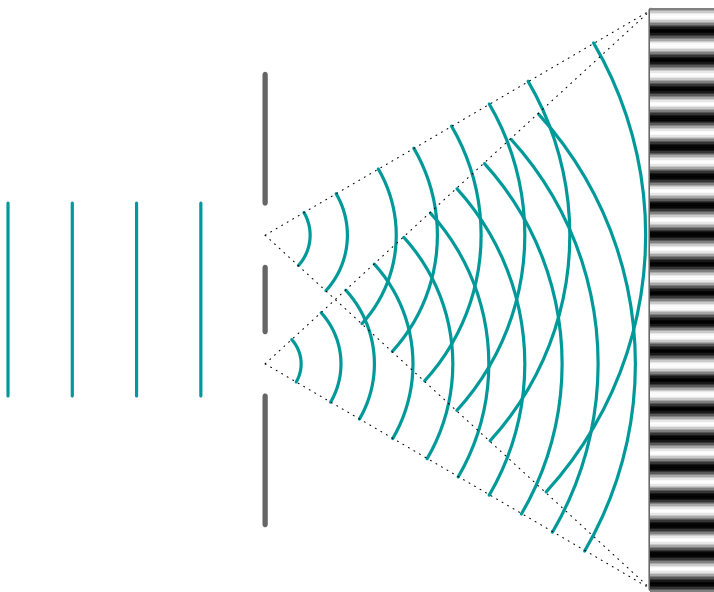


Ótica Física

A luz é uma onda eletromagnética

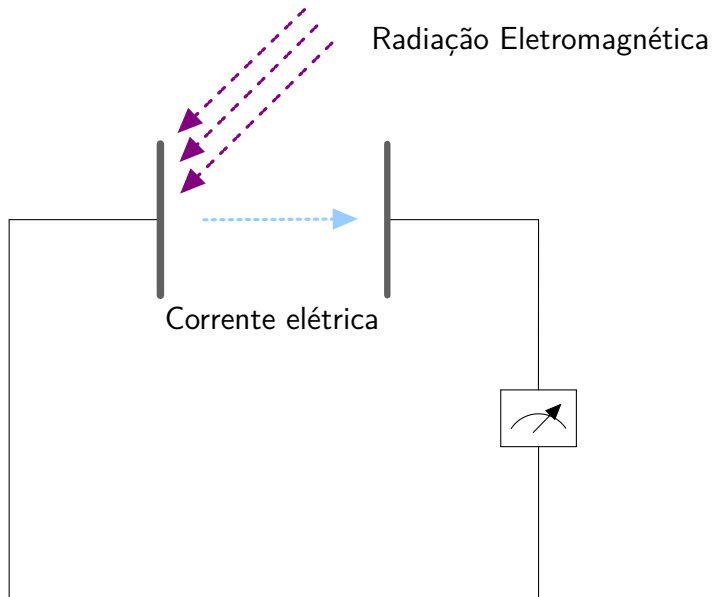


Interferência



Ótica Quântica

O efeito fotoelétrico



Efeito fotoelétrico:

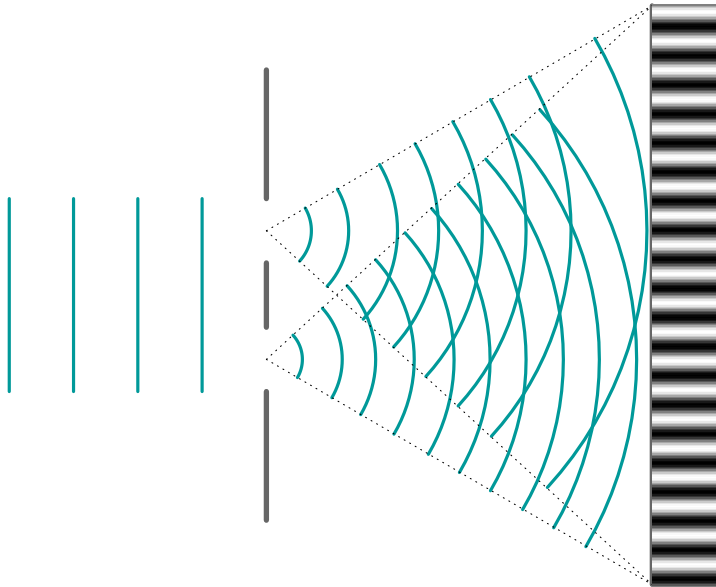
Efeito fotoelétrico: elétrons absorvem fótons da luz incidente e são ejetados do material, gerando uma corrente elétrica que pode ser experimentalmente registrada.

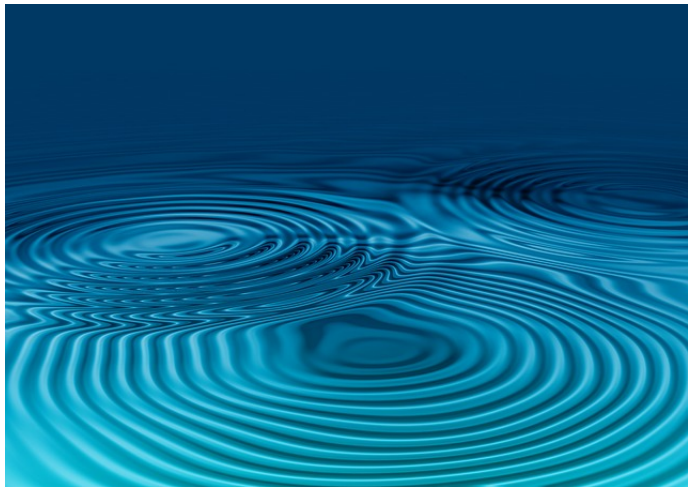
Interferência

Interferência

Acontece quando temos a superposição de duas ou mais ondas na mesma região do espaço.

Interferência



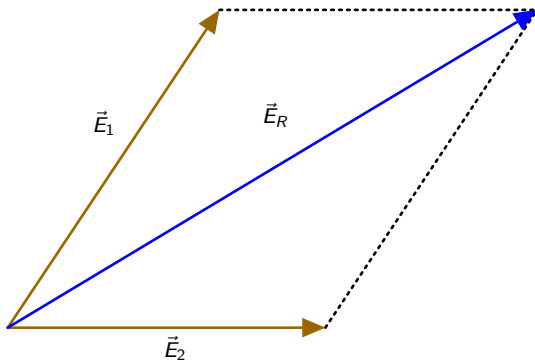


Princípio de Superposição

Quando duas ou mais ondas luminosas se superpõem em uma região do espaço, o campo elétrico da onda resultante é a **soma** dos campos elétricos das ondas individuais.

Princípio de Superposição

Quando duas ou mais ondas luminosas se superpõem em uma região do espaço, o campo elétrico da onda resultante é a **soma** dos campos elétricos das ondas individuais.



Restrições

Vamos considerar fontes luminosas senoidais, monocromáticas e com mesma polarização.

Restrições

$$\vec{E}(t) = E \cos(\omega t + \phi) \hat{k}$$

Restrições

$$E_1(t) = E \cos(\omega t + \phi_1)$$

$$E_2(t) = E \cos(\omega t + \phi_2)$$

Fontes Coerentes

$\phi_1 - \phi_2$ é constante.

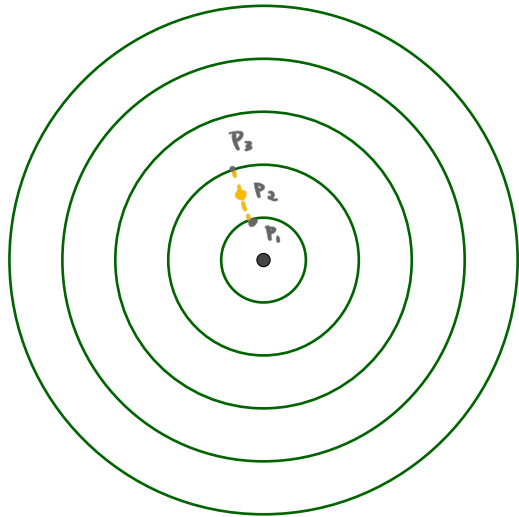
Analizando padrões de interferência

S_1



S_2





$\mathcal{E}_m$ P_1 & P_3

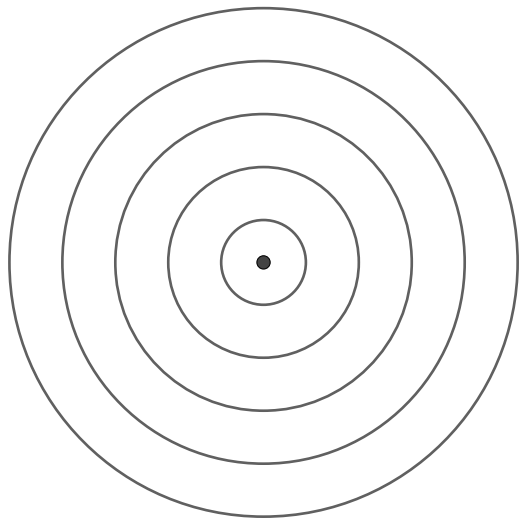
E

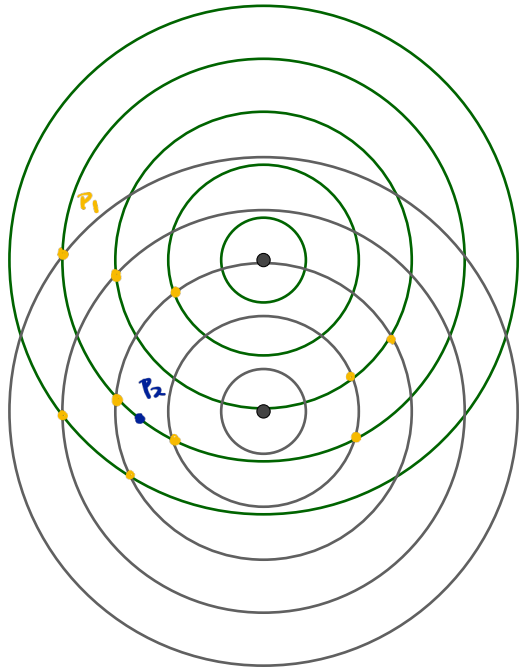


$\mathcal{E}_m$ P_2

$-E$







E_m P_1

$\uparrow \uparrow$

E_1 E_2

$$E_R = 2E$$

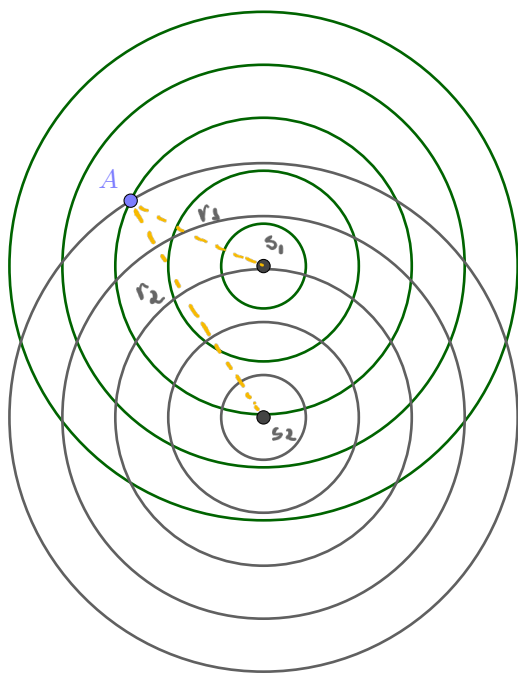
Interferência
construtiva

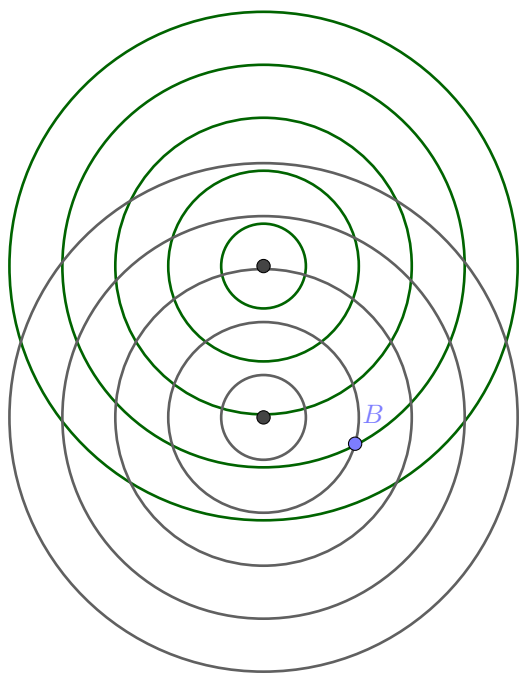
E_m P_2

$\uparrow \downarrow$

$$E_R = 0$$

Interferência
destrutiva

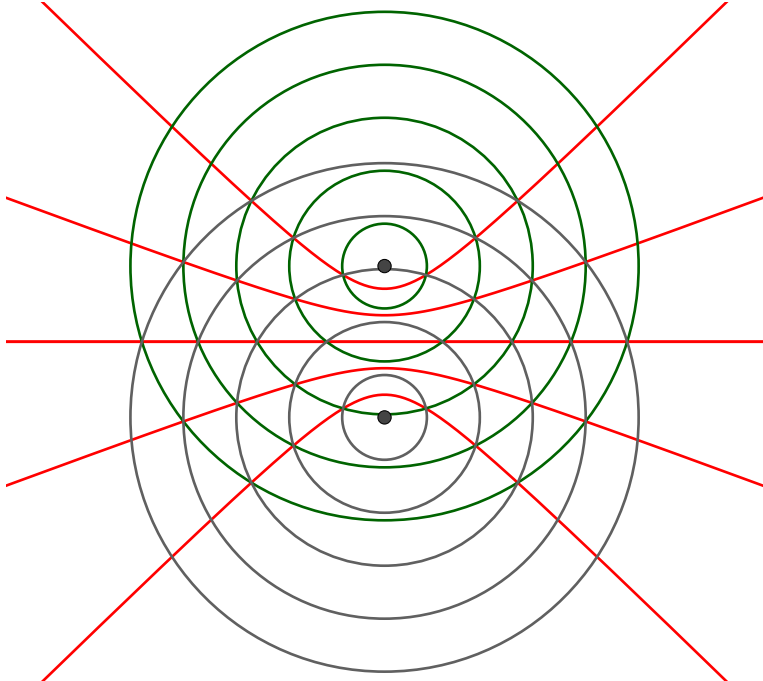


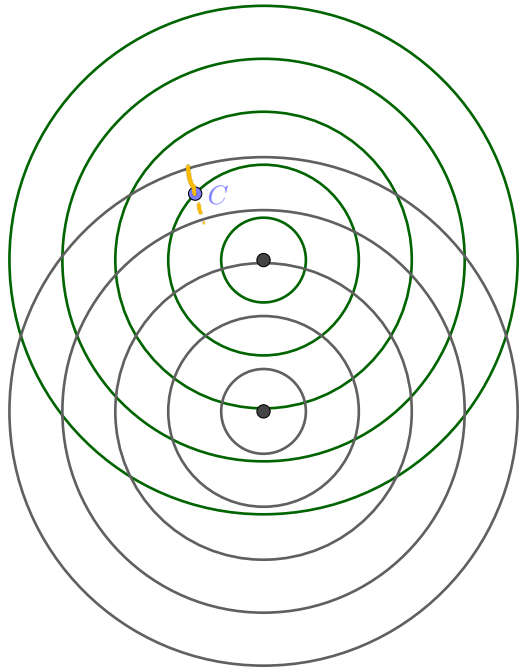


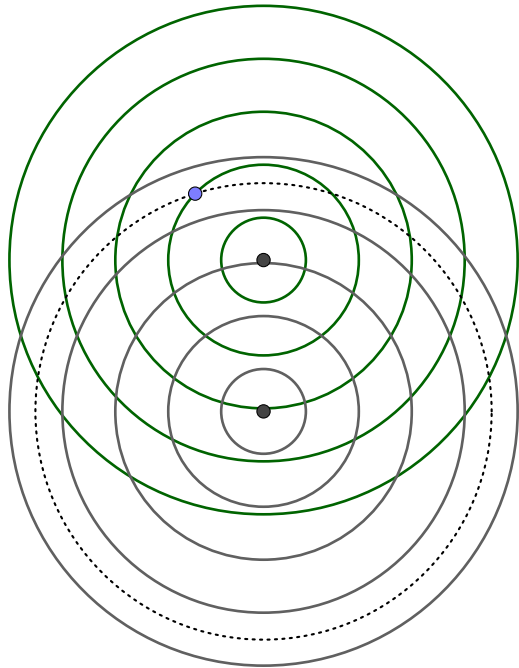
Condições para interferência construtiva

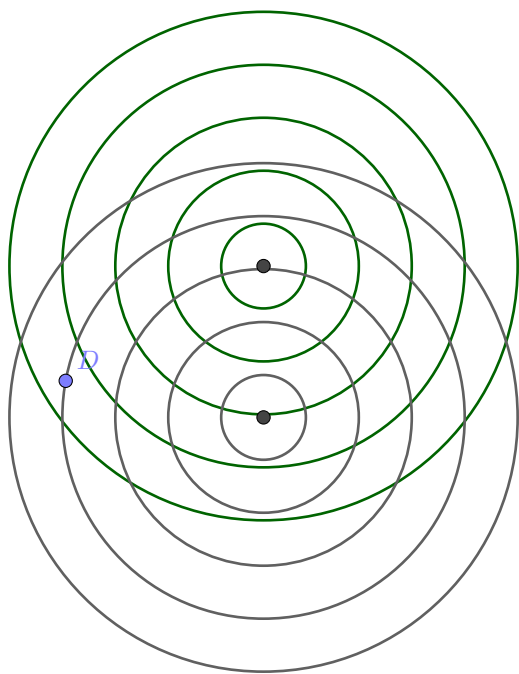
Fontes em fase

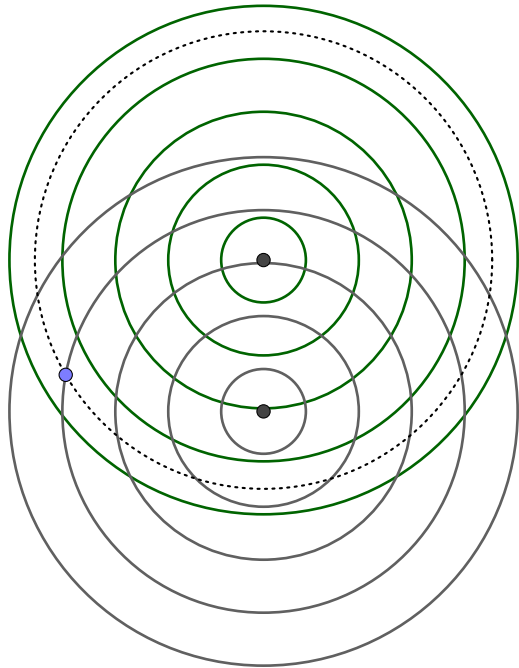
$$r_1 - r_2 = m\lambda, \quad m \in \mathbb{Z}$$





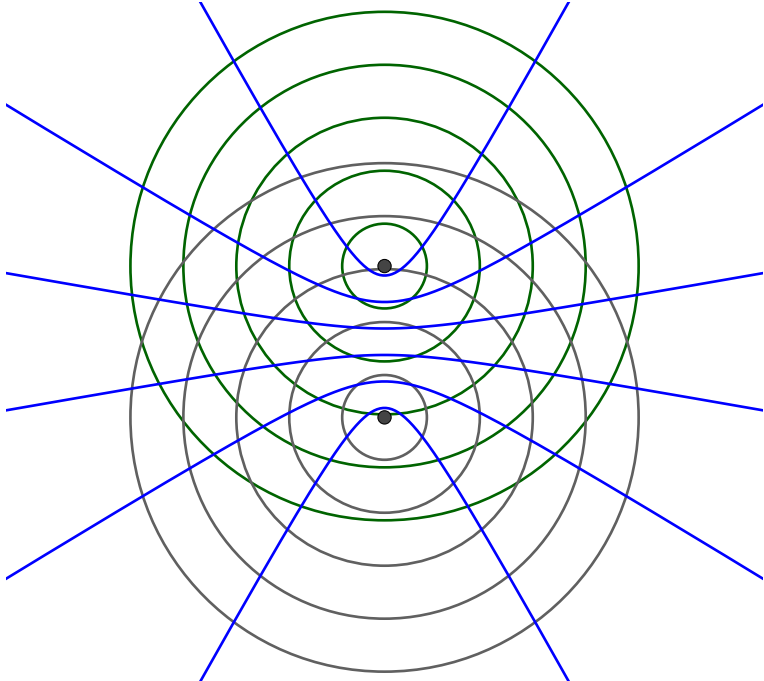






Condições para interferência destrutiva
Fontes em fase

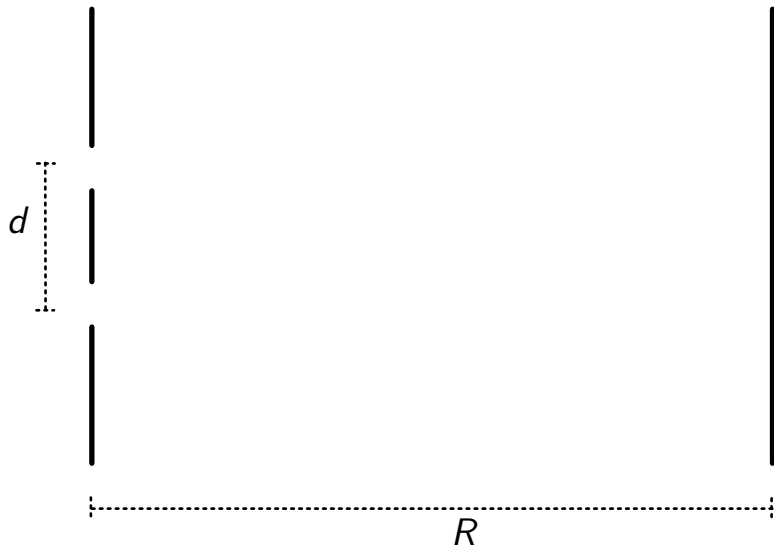
$$r_1 - r_2 = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad m \in \mathbb{Z}$$



No caso de ondas luminosas, não existe nenhum método prático para obter uma relação de fase constante entre duas fontes independentes.

No entanto, podemos dividir a luz proveniente de uma única fonte gerando fontes secundárias com fase relativa constante.

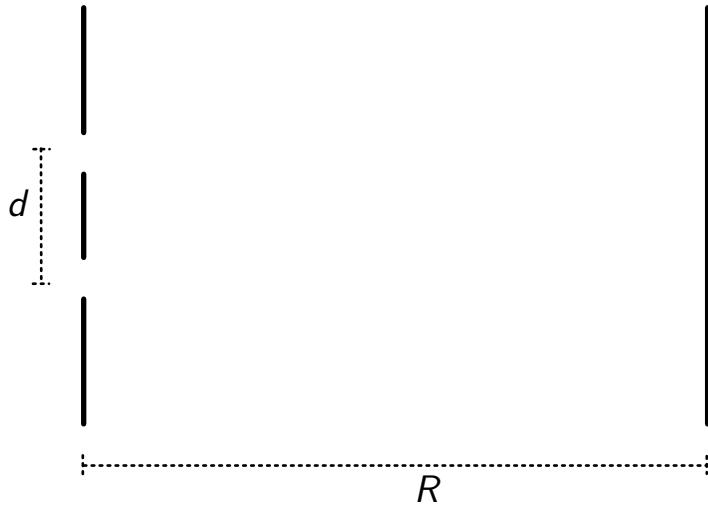
O Experimento de Young

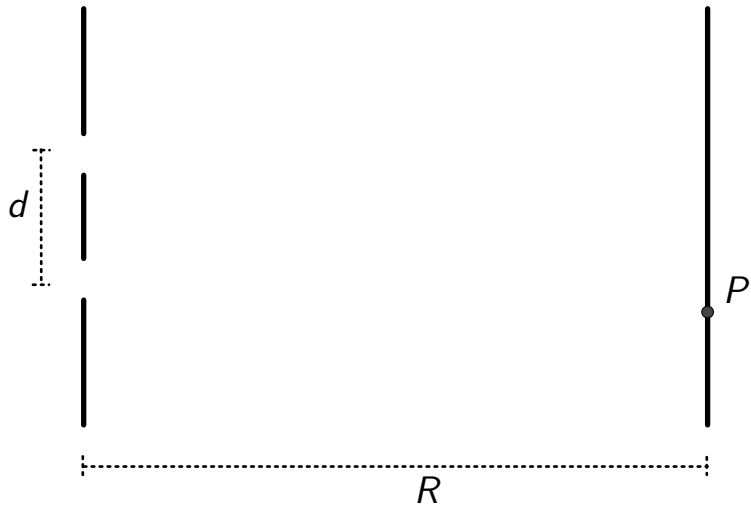


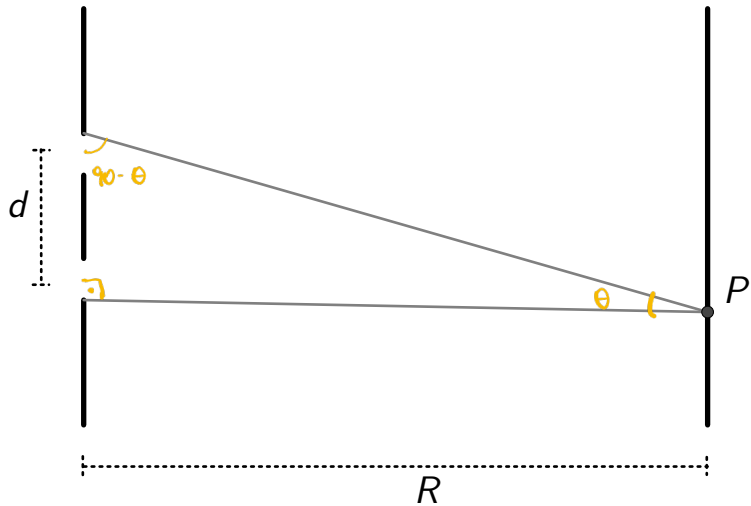
Condições para termos interferência construtiva e destrutiva

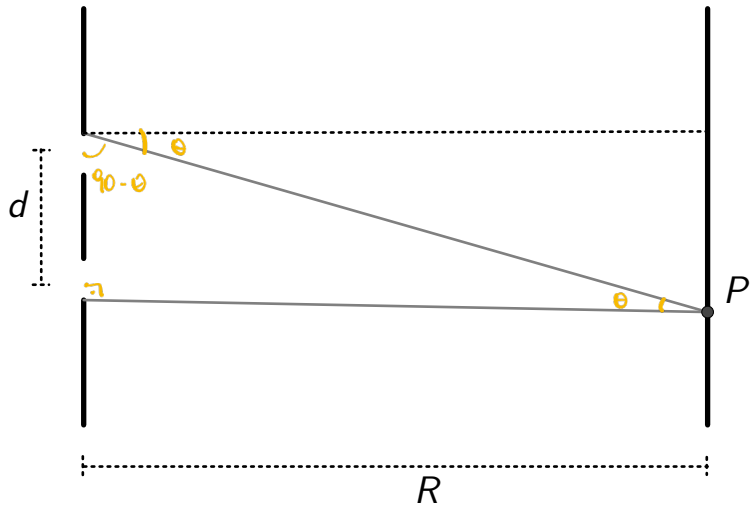
Aproximação

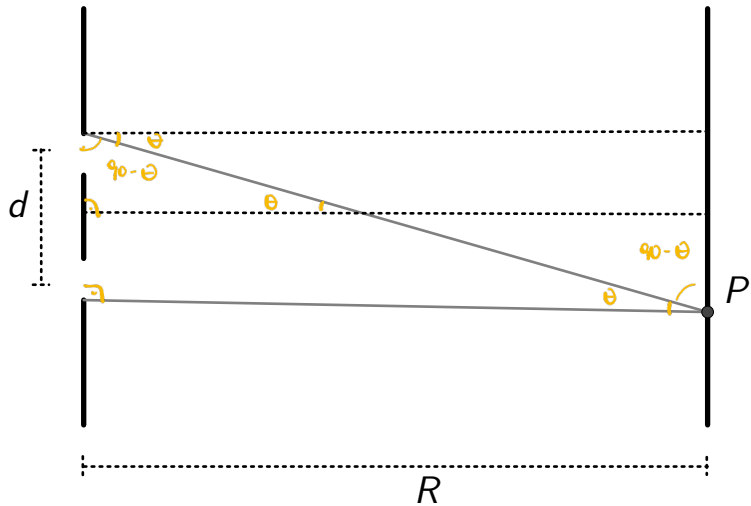
$$R \gg d$$

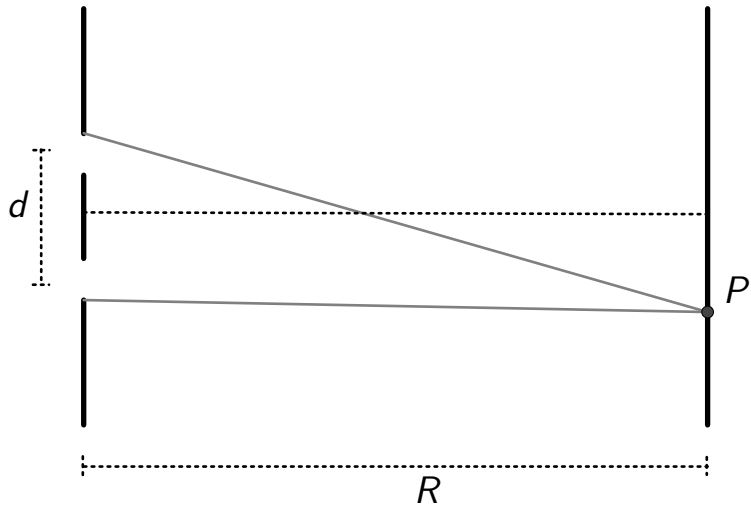


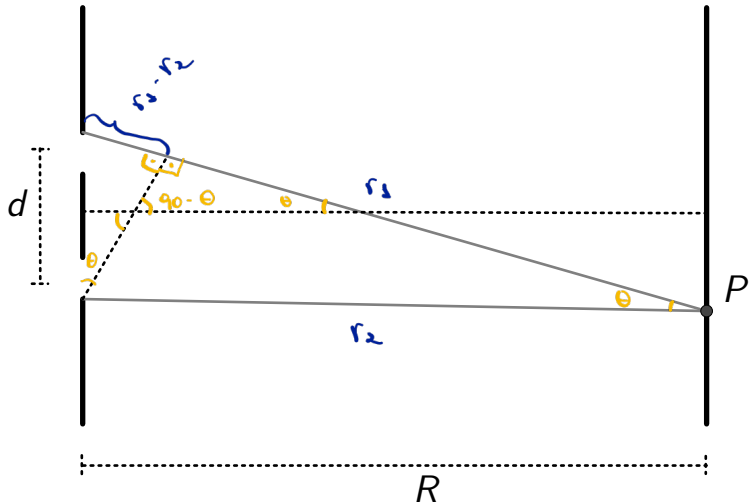








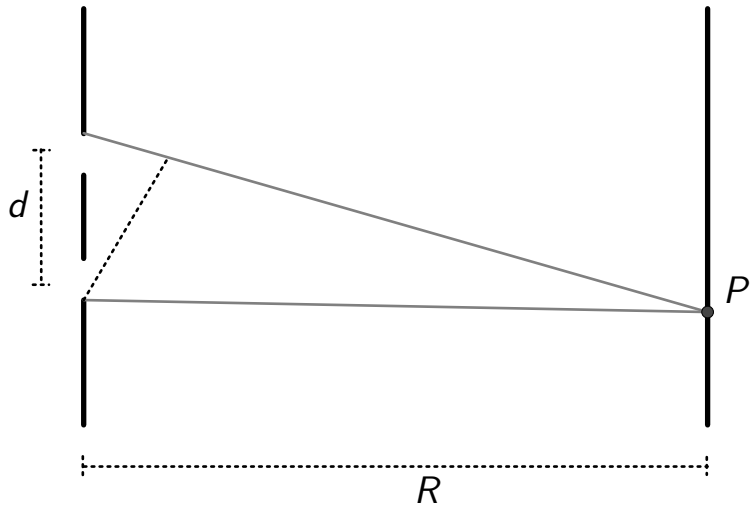




$$r_1 - r_2$$

$$\sin(\theta) = \frac{r_1 - r_2}{d}$$

$$r_1 - r_2 = d \sin(\theta)$$



$$r_1 - r_2 = d \operatorname{sen}(\theta)$$

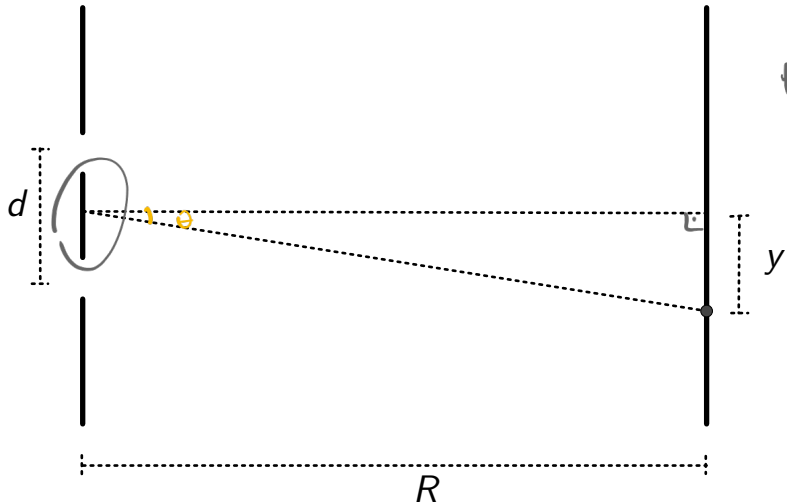
Interferência construtiva

$$d \sin(\theta) = m\lambda \quad m \in \mathbb{Z}$$

$$\sin(\theta) = \frac{m\lambda}{d}$$

Interferência destrutiva

$$d \sin(\theta) = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad m \in \mathbb{Z}$$



$$\tan(\theta) = \frac{y}{R}$$

$\Leftrightarrow$

$$\sin(\theta) = \frac{y}{R}$$

Interferência construtiva

$$y_m = R \sin(\theta_m) = \frac{mR\lambda}{d} \quad m \in \mathbb{Z}$$

$$y = \frac{mR\lambda}{d}$$

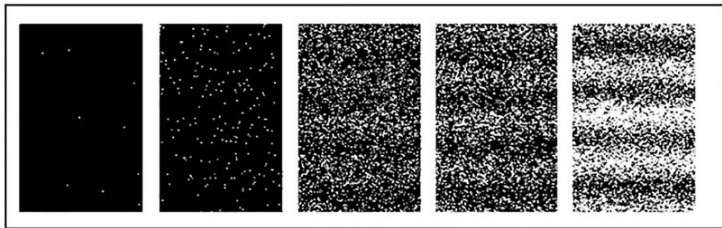
Cálculo da intensidade em qualquer ponto da
tela

Intensidade

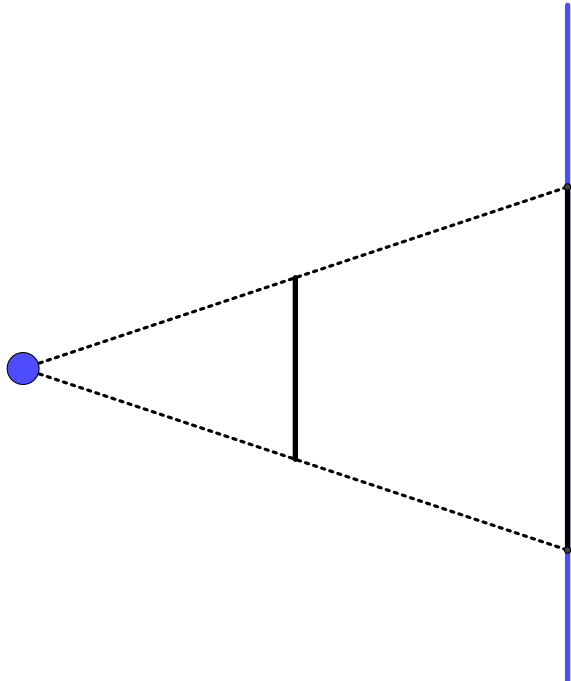
$$I = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda}\right)$$

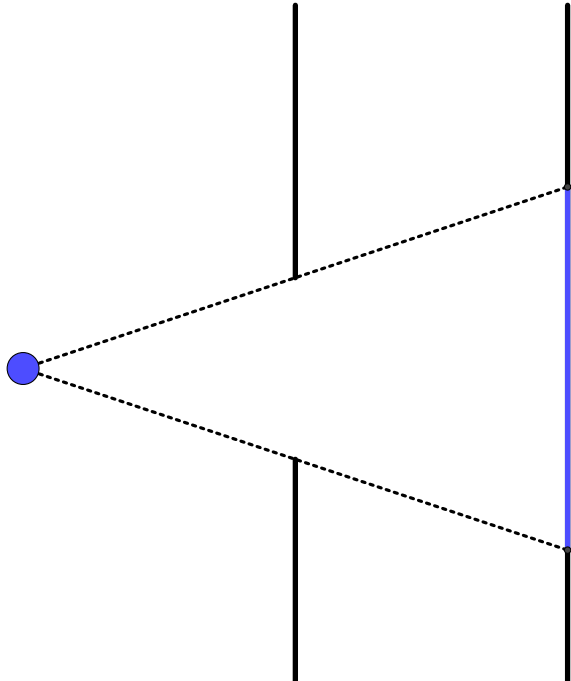
Intensidade

$$I = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi dy}{R\lambda}\right)$$



Ótica Geométrica





Não é isso que acontece!

Quando a luz atinge um obstáculo que apresenta uma abertura ou uma extremidade vemos figuras de interferência, chamadas **figuras de difração**.

Princípio de Huygens

Princípio de Huygens

Cada ponto de uma frente de onda eletromagnética pode ser considerado uma fonte secundária.

Princípio de Huygens

Cada ponto de uma frente de onda eletromagnética pode ser considerado uma fonte secundária.

Cada fonte secundária produz ondas que se propagam com a mesma frequência, velocidade e na mesma direção das ondas originais.

Combinamos o princípio de Huygens com o princípio de superposição.

Difração de Fresnel ou difração de campo próximo

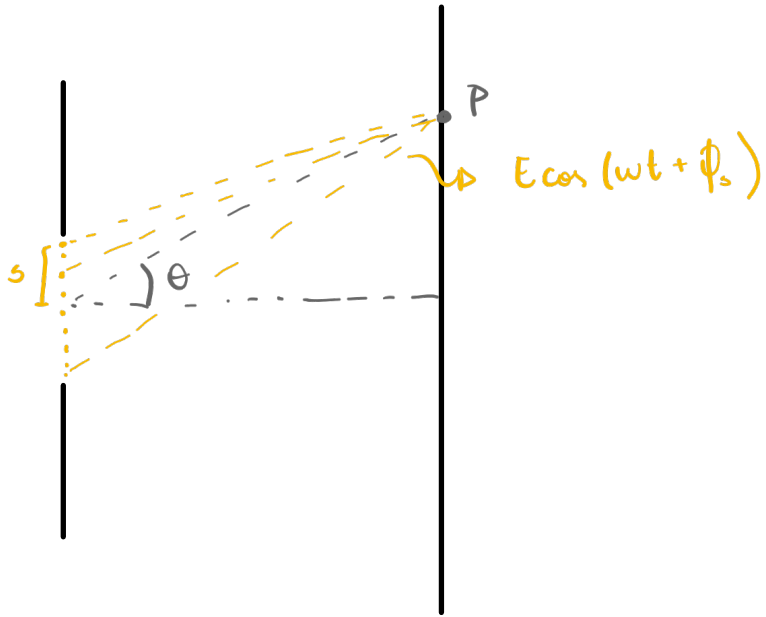
As distâncias entre a fonte, o obstáculo e a tela são relativamente pequenas.

Difração de Fraunhofer

As distâncias entre a fonte, o obstáculo e a tela são relativamente grandes.

Difração produzida por uma fenda

Discutiremos a figura de difração formada por um feixe de luz monocromática polarizada que atravessa uma fenda estreita e comprida.



Localizando as franjas escuras

Cada elemento de área da abertura da fenda pode ser considerado uma fonte de onda secundária.

Podemos calcular a intensidade resultante em um ponto P sobre a tela somando as contribuições das ondas secundárias individuais, levando em consideração fases e amplitudes.

$$I_R = I_0 \frac{\text{sen}^2\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)^2}$$

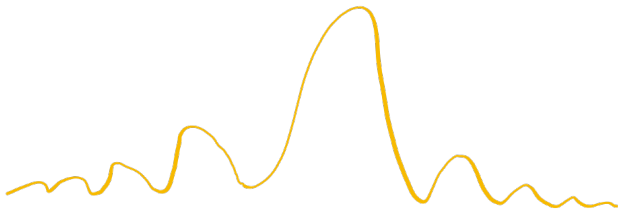
Interferência destrutiva

$$\text{sen}(\theta) = \frac{m\lambda}{a}$$

Máximos da figura de difração produzida por uma fenda

Devemos encontrar os máximos da função $\frac{\sin^2(x)}{x^2}$.

Equação transcendental que deve ser resolvida numericamente.



Largura da figura de difração produzida por uma fenda

Posição da primeira franja escura

$$\theta_1 = \frac{\lambda}{a}$$

$\frac{\lambda}{a}$ caracteriza o espalhamento angular do máximo central.

$$\lambda \ll a$$

θ_1 é pequeno e praticamente toda luz se concentra no foco geométrico.

$$\lambda \gg a$$

O máximo central se espalha até 180° e não podemos ver qualquer franja escura.

Fendas duplas

Consideramos a interferência entre duas fontes puntiformes ou da luz proveniente de duas fendas estreitas.

Desprezamos o efeito produzido pela largura da fenda.

Largura da figura de difração produzida por uma fenda

Posição da primeira franja escura

$$\theta_1 = \frac{\lambda}{a}$$

$\frac{\lambda}{a}$ caracteriza o espalhamento angular do máximo central.

$$\lambda \ll a$$

θ_1 é pequeno e praticamente toda luz se concentra no foco geométrico.

$$\lambda \gg a$$

O máximo central se espalha até 180° e não podemos ver qualquer franja escura.

$$\lambda \gg a$$

Nesse regime podemos supor que a luz proveniente de cada fenda se espalha uniformemente em todas as direções.

$$\lambda \gg a$$

$$I = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda}\right)$$

$$\lambda \gg a$$

Fornece uma série de máximos com igual intensidade.

Não é exatamente isso que acontece.

Quando as fendas possuem larguras comparáveis a λ , os picos da figura de interferência de fenda dupla são modulados pela figura de difração característica da largura de cada fenda.

$$I = I_0 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \left[\frac{\text{sen}\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\frac{\beta}{2}} \right]^2$$

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \text{sen}(\theta)$$

$$\beta = \frac{2\pi a}{\lambda} \text{sen}(\theta)$$

Fendas múltiples

|

|

|

|

|

|

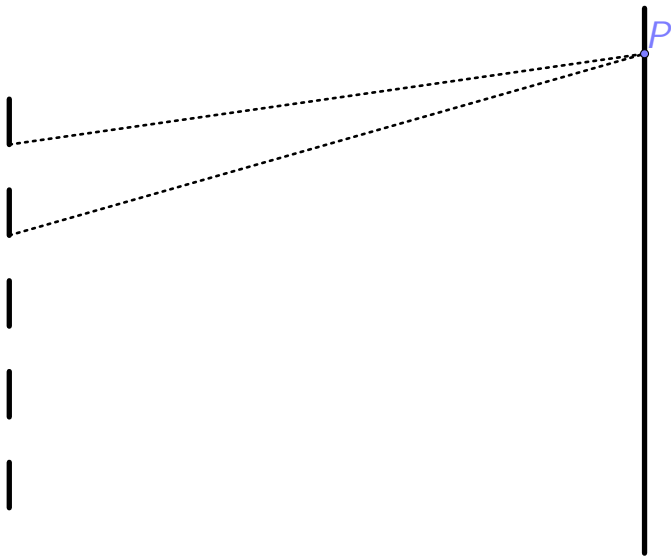
P

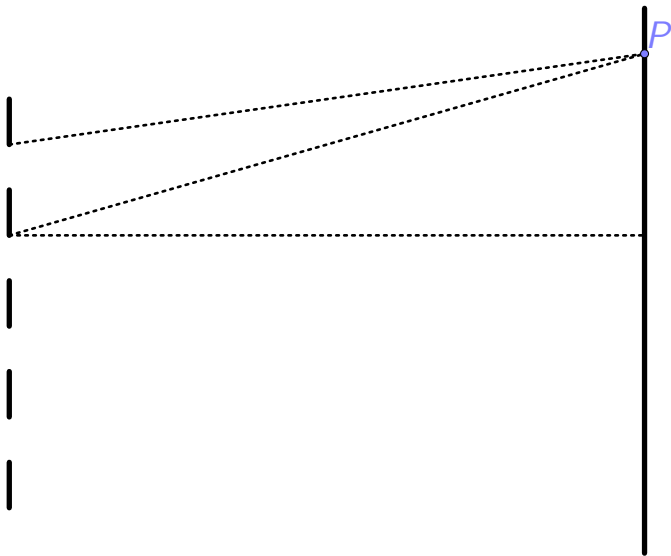
$$\lambda \gg a$$

O máximo central se espalha até 180° e não podemos ver qualquer franja escura.



P





Incidência normal

Ocorre interferência construtiva quando a diferença de fase entre os raios que partem de duas fendas consecutivas é 2π .

Incidência normal

Ocorre interferência construtiva quando a diferença de caminho entre os raios que partem de duas fendas consecutivas é $m\lambda$.

Interferência construtiva

$$d \sin(\theta) = m\lambda$$

Fenda dupla

Existe apenas um mínimo entre dois máximos principais.

n fendas

Temos um mínimo quando a diferença de fase é um múltiplo de $\frac{2\pi}{n}$.

n fendas

Existem $n - 1$ mínimos entre cada par de máximo principais.

$$I = I_0 \frac{\text{sen}^2\left(\frac{N\phi}{2}\right)}{N^2 \text{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right)}$$

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

Efeito da difração

Quando as fendas possuem larguras comparáveis a λ , os picos da figura de interferência de fenda múltipla são modulados pela figura de difração característica da largura de cada fenda.

$$I = I_0 \frac{\text{sen}^2\left(\frac{N\phi}{2}\right)}{N^2 \text{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right)} \left[\frac{\text{sen}\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\frac{\beta}{2}} \right]^2$$

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \text{sen}(\theta)$$

$$\beta = \frac{2\pi a}{\lambda} \text{sen}(\theta)$$

Rede de difração

Chamamos de **rede de difração** um conjunto que contém um grande número de fendas paralelas, todas com a mesma largura e espaçamento d entre fendas consecutivas.

d é chamado **espaçamento da rede**.

Quando aumentamos o número de fendas, mantendo d constante, obtemos uma figura de interferência na qual os máximos principais estão nas mesmas posições do experimento de fenda dupla, mas são mais estreitos.

Como esses máximos são muito estreitos, podemos usar suas posições angulares para determinar o valor de d ou de λ .

Máximos principais

$$d \operatorname{sen}(\theta) = m\lambda$$

Máximos principais

$$d = \frac{m\lambda L}{y}$$

Espectroscopia

Podemos utilizar uma rede de difração para medir o espectro de uma fonte de luz.

Espectroscopia

Ao passar por uma rede de difração, os diferentes comprimentos de onda da luz incidente sofrerão difração e a posição dos máximos na figura de difração depende do comprimento de onda.

Difração de raios-X

Para observarmos efeitos de difração e interferência, o comprimento de onda da luz deve ser da ordem da abertura das fendas.

Raios-X

$$\lambda \simeq 10^{-10}$$

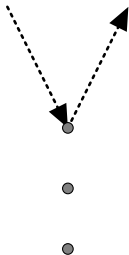
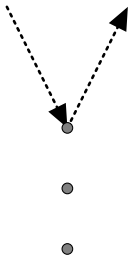
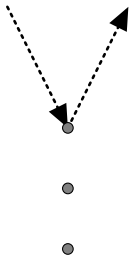
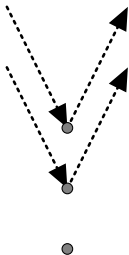
Posição da primeira franja escura

Mesma ordem de grandeza do espaçamento entre os átomos dispostos em um arranjo regular em um sólido cristalino.

Um cristal funciona como uma rede de difração tridimensional para os raios-X.

Um modelo simples para a difração de raios-X





A figura de interferência resultante é obtida pela superposição de todas as ondas espalhadas.

Para determinar as diferenças de fase, precisamos considerar a distância entre a fonte e os átomos e entre os átomos e o anteparo.

Interferência construtiva

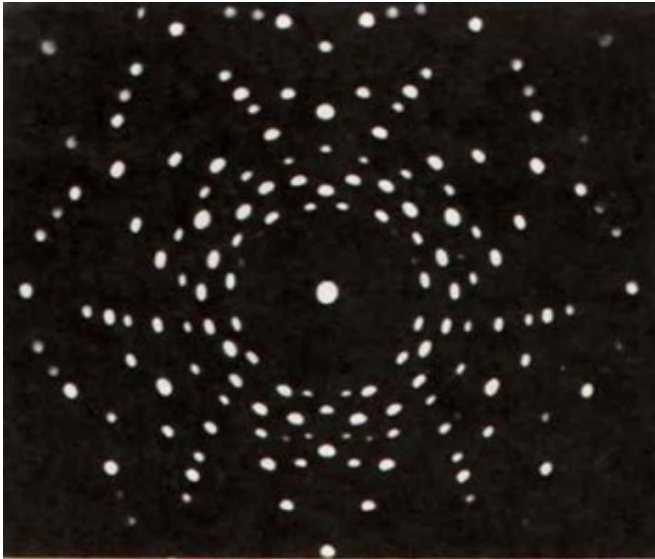
Para linhas adjacentes, acontece quando

$$2d \sin(\theta) = m\lambda$$

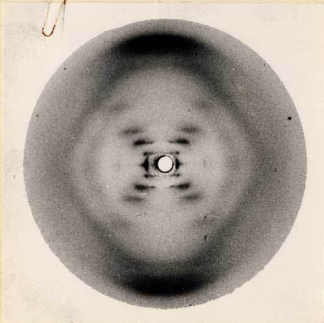
Condição de Bragg para interferência construtiva

$$2d \sin(\theta) = m\lambda$$

Diagrama de Laue







Franklin &
Gosling
No. 98. ~~Amelate~~
Type I

Plate 1