



www.estudar.com.vc

Física

Física Moderna





1. Introdução

O curso de física IV visa introduzir aos alunos os conceitos de física moderna através de uma visão conceitual dos fenômenos e uma abordagem simplificada das demonstrações.

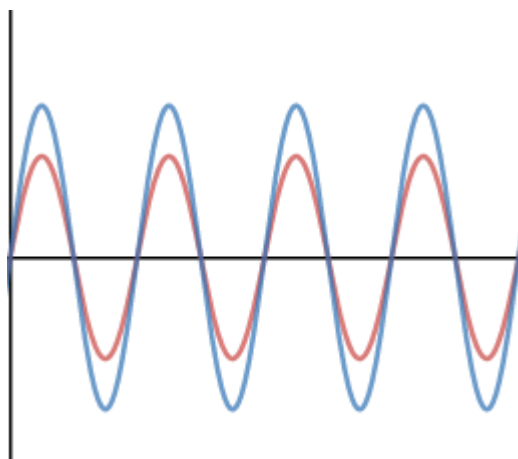
2. Interferência

O fenômeno da Interferência caracteriza-se pela superposição de duas ou mais ondas em um mesmo ponto do espaço. Quando esse fenômeno ocorre a onda resultante será dada pelo princípio da **superposição**, que basicamente nos diz que a onda resultante será a soma das ondas iniciais.

Fontes Coerentes: duas fontes são ditas coerentes quando apresentam a mesma frequência, mesma direção de propagação e sua diferença de fase permanece constante com o tempo, não necessariamente indica que as fontes estão em fase. Tudo que iremos analisar sobre interferência supõe que as fontes são coerentes.

Fontes (ondas) em fase: duas fontes estarão em fase quando estão sincronizadas entre si, ou seja, a diferença de fase inicial entre elas é 0° .

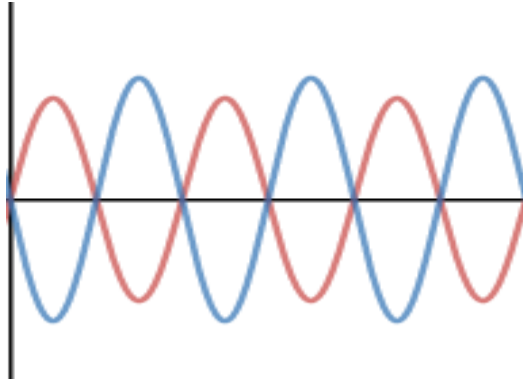
Exemplo:





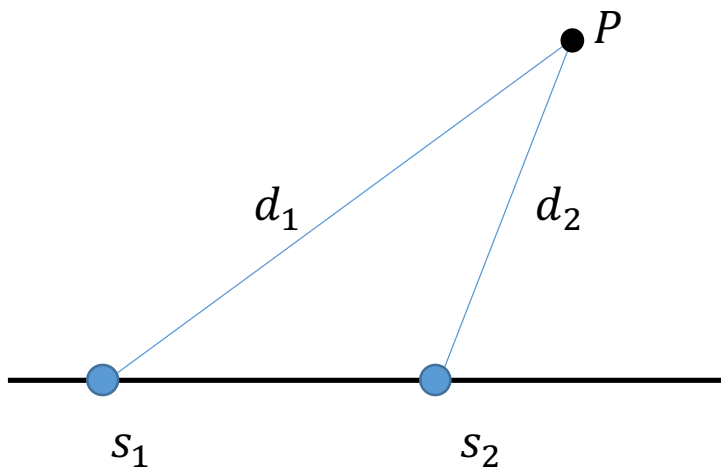
Fontes em Oposição de fase: Duas fontes estão em oposição de fase se a diferença de fase inicial entre elas é π rad

Exemplo:



Diferença de caminho (Δd): A diferença de caminho representa a diferença de percurso entre duas fontes até encontrar o ponto do espaço em que será analisada a interferência.

Exemplo: Supondo a existência de duas fontes s_1 e s_2 , iremos analisar a interferência no ponto P.



$$\Delta d = d_1 - d_2$$



Interferência Construtiva: A interferência entre duas ondas é dita **construtiva** quando a amplitude da onda resultante é **maior** que a amplitude das ondas iniciais.

- Interferência Construtiva para fontes em fase: supondo duas fontes inicialmente em fase que emitem ondas com comprimento de onda λ , a condição de interferência construtiva será dada por:

$$\Delta d = d_1 - d_2 = m \lambda, \text{ com } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

- Interferência Construtiva para fontes em oposição de fase: supondo duas fontes em oposição de fase que emitem ondas com comprimento λ , a condição para interferência construtiva será dada por:

$$\Delta d = d_1 - d_2 = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda, \text{ com } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Interferência Destrutiva: A interferência entre duas ondas é dita **destrutiva** quando a amplitude da onda resultante é **menor** que a amplitude das ondas iniciais.

- Interferência Destrutiva para fontes em fase: supondo duas fontes inicialmente em fase que emitem ondas com comprimento de onda λ , a condição de interferência destrutiva será dada por:

$$\Delta d = d_1 - d_2 = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda, \text{ com } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

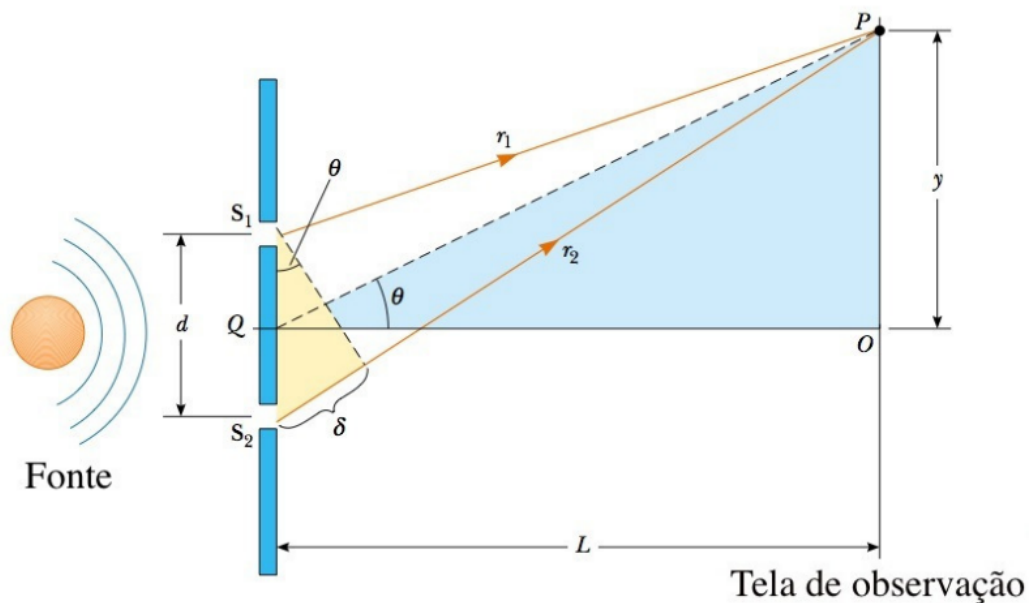
- Interferência Destrutiva para fontes em oposição de fase: supondo duas fontes em oposição de fase que emitem ondas com comprimento λ , a condição para interferência destrutiva será dada por:



$$\Delta d = d_1 - d_2 = m \lambda, \text{ com } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

3. Interferência em fendas duplas

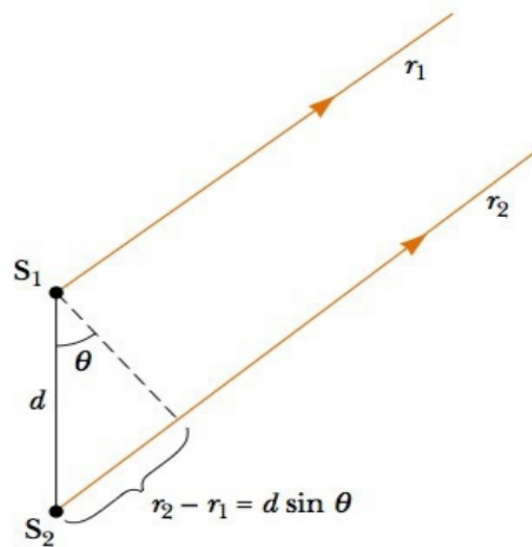
O experimento de Interferência em fendas duplas foi estudado de forma mais precisa através do experimento de Thomas Young.



Interferência em Fendas Duplas (Serway)

No experimento de Young vamos analisar a interferência no Ponto P gerada pelas Fontes S_1 e S_2 , que estão em fase devido à existência de uma fonte S_0 posicionada antes da tela com a fenda dupla.

Na experiência $L \gg d$, então a diferença de caminho se resume a δ , uma vez que os raios r_1 e r_2 podem ser tomados como paralelos (figura abaixo).



Raios paralelos (Serway)

A diferença de caminho será $d \sin \theta$, logo a condição para **interferência construtiva** será dada por:

$$d \sin \theta = m\lambda, \text{ com } m \in \mathbb{Z}$$

As **interferências destrutivas** serão dadas por:

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

Utilizando a aproximação $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$, pode-se determinar as **posições dos máximos (y_m)**, que correspondem às interferências construtivas:

$$\begin{aligned} \tan \theta_m &= \frac{y_m}{L} \\ \tan \theta_m &\approx \sin \theta_m \\ \sin \theta_m &= \frac{m\lambda}{d} \\ \mathbf{y_m} &= \frac{\mathbf{m\lambda L}}{\mathbf{d}} \end{aligned}$$



4. Intensidade das Figuras de Interferência

A intensidade das figuras de Interferência estará relacionada a Intensidade do campo elétrico resultante da superposição de dois campos elétricos em um mesmo ponto do espaço.

Genericamente, dado um campo elétrico $E(t) = E_p \cos(\omega t + \phi)$ a intensidade será dada por:

$$I = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_p^2$$

Onde:

$\epsilon_0 =$ *permissividade elétrica do vácuo*

$c =$ *velocidade da luz no vácuo*

Supondo dois campos elétricos $E_1(t) = E \cos(\omega t + \phi)$ e $E_2(t) = E \cos(\omega t)$ a amplitude resultante (E_p) da superposição desses campos será:

$$E_p = 2E \left| \cos \frac{\phi}{2} \right|$$

Usando essa expressão pode-se calcular a expressão da Intensidade resultante e analisar onde seus valores serão **máximos** e **mínimos**.

$$I = 2\epsilon_0 c E^2 \cos^2 \left(\frac{\phi}{2} \right)$$

$$I_0 = 2\epsilon_0 c E^2$$

$$I = I_0 \cos^2 \left(\frac{\phi}{2} \right)$$

Analisando a expressão da intensidade tem-se que seu valor máximo será para $\cos^2 \left(\frac{\phi}{2} \right) = 1$ e seu valor mínimo para $\cos^2 \left(\frac{\phi}{2} \right) = 0$. Assim, pode-se escrever que:



$$\phi = 2m\pi, \text{ com } m \in \mathbb{Z}$$

máximos de Intensidade

$$\phi = (2m + 1)\pi, \text{ com } m \in \mathbb{Z}$$

mínimos de Intensidade

Relação entre diferença de Fase e diferença de Caminho: Dada uma diferença de fase ϕ ela se relacionará com uma diferença de caminho Δd seguindo a seguinte proporção:

$$\frac{\phi}{2\pi} = \frac{\Delta d}{\lambda}$$

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d$$

Relação entre comprimento de onda em meio com índice de refração n e o comprimento de onda no vácuo: Supondo que o comprimento de onda em um meio com índice de refração n seja λ , sua relação com o comprimento de onda λ_0 no vácuo será dado por:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

5. Interferência em películas finas

Uma película fina é uma pequena camada de um material, imersa em um meio com índice de refração diferente do seu. A condição de película fina deve ser atendida para que se possa tomar os raios refletidos e refratados em sua superfície como coerentes.

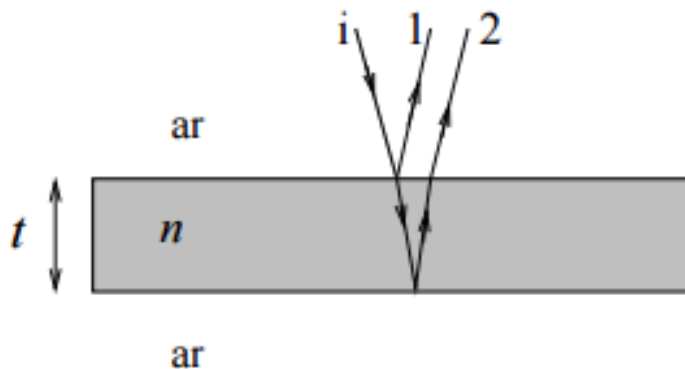


Mudança de fase na reflexão: Suponha que uma onda eletromagnética viaje no meio 1 (índice de refração n_1) e seja refletida na interface de separação com um meio 2 (índice de refração n_2), tem-se as seguintes situações:

- Se $n_1 < n_2$ haverá uma **mudança de fase de π** no campo elétrico refletido, ou seja, se tomarmos a onda incidente e refletidas elas estarão em **oposição de fase**.
- Se $n_1 > n_2$ **não haverá uma mudança de fase** no campo elétrico refletido, ou seja, se tomarmos a onda incidente e refletidas elas estarão **em fase**.

Obs: não há mudança de fase na refração.

Exemplo: Analisar as condições de interferência construtiva e destrutiva entre os raios 1 e 2 na película fina abaixo, com $n > n_{ar}$.



O raio 1 é originado na reflexão na primeira interface de separação entre a película e o ar, como ele vem do ar e vai para a película e temos $n_{ar} < n$, essa reflexão ocorre com mudança de fase de $\pi \text{ rad}$. O raio 2 é originado da reflexão na segunda interface de separação, como ele vai do meio com índice de refração n para a película, não há mudança de fase na reflexão, logo pode-se concluir que os raios 1 e 2 são emitidos inicialmente em oposição de fase.



Supondo que a incidência seja normal, podemos supor que a diferença de caminho entre os raios 1 e 2 (Δd) será igual a $2t$. Assim, as condições de **interferência construtiva** serão:

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda_n \text{ com } m = 0, 1, 2, \dots$$
$$\text{como } \lambda_n = \frac{\lambda_0(\text{vácuo})}{n}$$
$$2tn = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda_0$$

As condições para **interferências destrutiva** será:

$$2tn = m\lambda_0$$

6. Difração

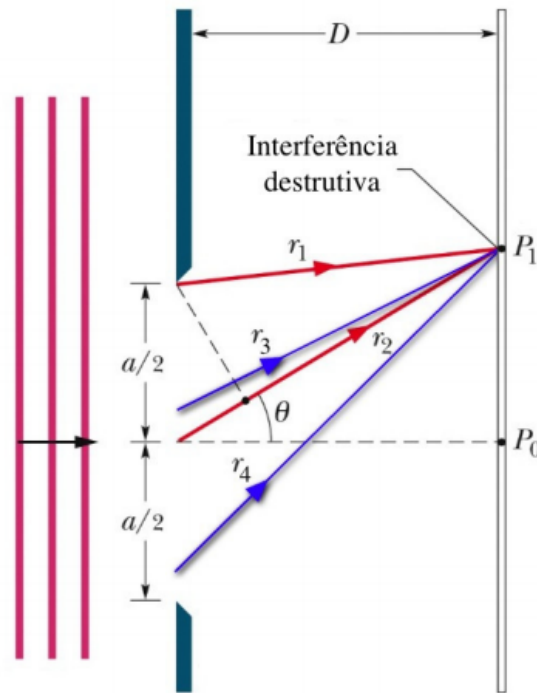
Princípio de Huygens: Cada ponto da frente de onda pode ser tomado como um conjunto de fontes circulares secundárias, de tal forma, que é possível determinar a posição da onda no instante $t + \Delta t$ a partir do instante t apenas traçando a envoltória das frentes de onda circulares.

7. Difração em fendas simples

Dada uma fenda simples de tamanho não desprezível a , as condições para os **mínimos de difração** podem ser estimadas com o auxílio do princípio de Huygens e utilizando difração de Fraunhofer que supõe que os raios saindo da fenda podem ser supostos paralelos, tais mínimos serão dados pela seguinte expressão:

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

Note que agora $m = 0$ nos dá um máximo e não um mínimo.



Difração em fendas simples (Halliday)

Posição dos máximos: A posição dos máximos será estimada como no ponto médio entre dois mínimos, ou seja, se θ_1 é a posição do primeiro mínimo e θ_2 é a posição do segundo, a posição primeiro máximo, além do máximo central, será dada por:

$$\theta_{1max} = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$$

Intensidade na Difração de Fendas simples:

$$I = I_0 \left(\frac{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\frac{\beta}{2}} \right)^2$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta$$



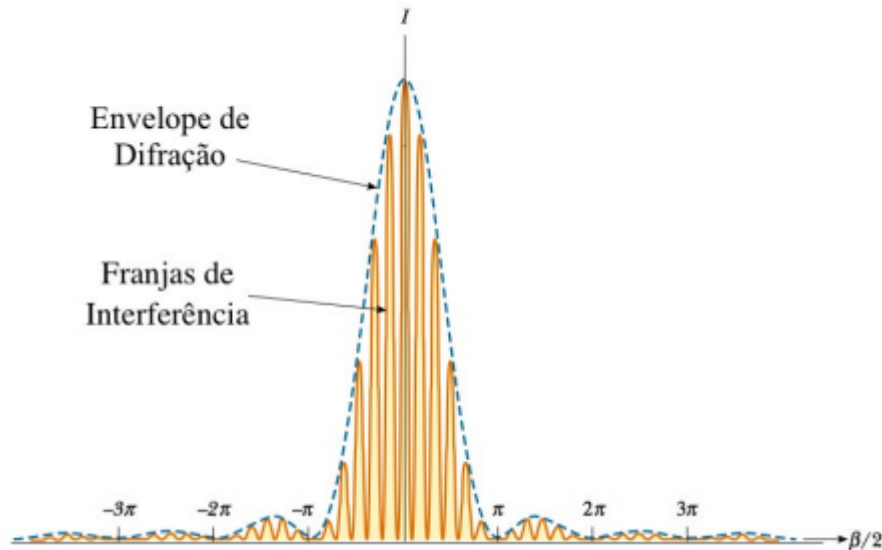
8. Intensidade na Difração em Fendas Duplas:

Quando se utiliza a experiência das fendas duplas com fendas de tamanhos a não desprezíveis e separadas por uma distância d , a figura de Interferência e difração terá a seguinte característica:

$$I = I_0 \left(\frac{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\frac{\beta}{2}} \right)^2 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta$$

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



Interferência e Difração (Serway).

Na figura de interferência e difração o “envelope” da curva corresponde ao fenômeno da difração enquanto as franjas internas ao “envelope” estão relacionadas ao fenômeno da interferência.



9. Difração em orifícios circulares

Dado um orifício circular de diâmetro d , a posição angular do primeiro mínimo de difração será dado por:

$$\sin \theta_1 = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

10. Critério de Rayleigh

Dois objetos estão começando a ser distinguíveis quando o centro da figura de difração de um deles coincide com o mínimo de difração do outro. A separação mínima angular entre eles será chamada de limite de resolução, no caso de lentes circulares como telescópios tem-se:

$$\theta_{min} = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

Para fontes puntiformes que incidem em uma fenda única de largura a , a separação angular mínima será dada por:

$$\theta_{min} = \frac{\lambda}{a}$$

11. Relatividade

Evento: Um evento é uma ocorrência caracterizada por valores definidos para a posição e para o tempo.

Tempo Próprio: O intervalo de tempo entre dois eventos que ocorrem num **mesmo ponto do espaço** é chamado tempo próprio e designado por Δt_0 . Em um dado sistema que se move com velocidade \vec{u} existe uma infinidade de outros sistemas que se movem com velocidade relativa em relação a esse primeiro



sistema, porém há um único sistema em que a velocidade relativa é nula, assim, o tempo natural é mais fundamental que os outros intervalos de tempo medidos em outros referenciais e esse referencial será tomado como sistema de referência.

Dilatação do Tempo: Dado que o intervalo de tempo próprio entre dois eventos é Δt_0 (medido no sistema de referência), então para um observador que se move com velocidade \vec{u} em relação a esse sistema de referência o intervalo de tempo medido será:

$$\Delta t = \Delta t_0 * \gamma$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

Comprimento Próprio: Pode-se definir que o comprimento de um corpo quando medido em um **sistema de referência em que o corpo se encontra em repouso** é chamado de comprimento próprio e designado por l_0 .

Contração do Comprimento: Supondo conhecido o comprimento próprio l_0 de um corpo e que exista um referencial que se move com velocidade \vec{u} em relação ao sistema de referência, o comprimento medido nesse novo sistema será dado por:

$$l = \frac{l_0}{\gamma}$$



12. Transformações de Lorentz

As transformações de Lorentz nos ajudam a responder a seguinte questão: Dado que temos as coordenadas (x, y, z, t) de um evento em um referencial S , quais são as coordenadas (x', y', z', t') desse mesmo evento em um referencial S' que se move em relação a S com velocidade \vec{u} .

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \gamma(x - ut), \\ y' = y, \\ z' = z, \\ t' = \gamma\left(t - \frac{ux}{c^2}\right), \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} x = \gamma(x' + ut'), \\ y = y', \\ z = z', \\ t = \gamma\left(t' + \frac{ux'}{c^2}\right), \end{array} \right.$$

13. Efeito Doppler Relativístico

O efeito Doppler relativístico é a aparente mudança de frequência da onda eletromagnética quando há movimento relativo entre fonte e observador.

Quando a fonte se afasta do observador com velocidade v , a frequência Doppler f será dada por:

$$f = f_0 \sqrt{\frac{c - v}{c + v}}$$

Onde:

$$f_0 = \text{frequência natural da onda}$$

Quando a fonte se aproxima do observador com velocidade v , a frequência Doppler f será dada por:



$$f = f_0 \sqrt{\frac{c + v}{c - v}}$$