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.

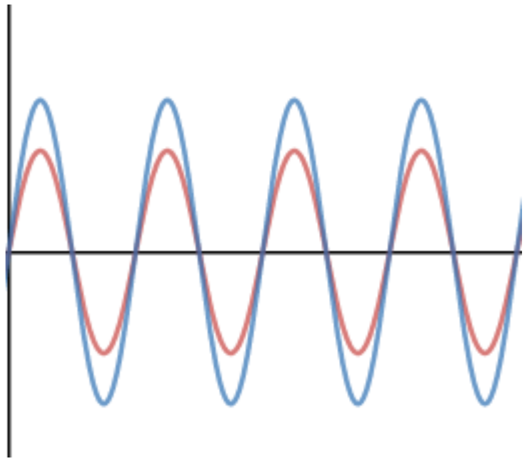
# 2. Interferência

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.

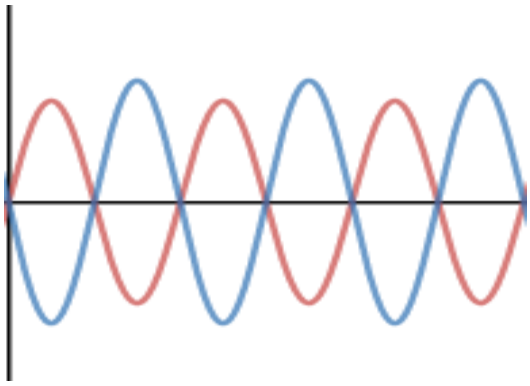
**Fontes (ondas) em fase:** duas fontes estarão em fase quando estão sincronizadas entre si, ou seja, a diferença de fase inicial entre elas é $0°$.

Exemplo:



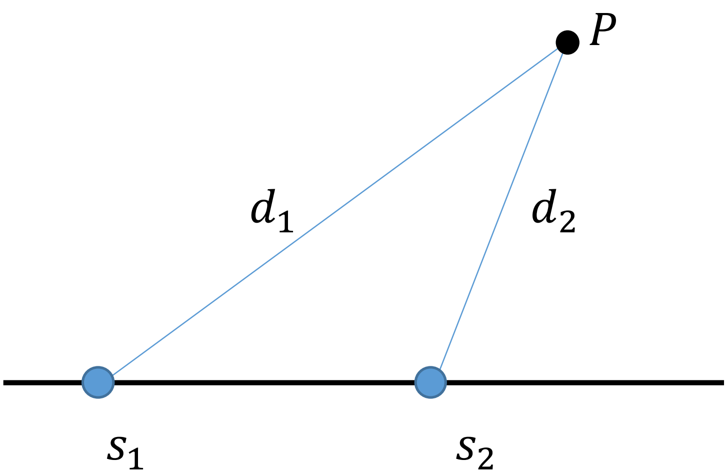
**Fontes em Oposição de fase:** Duas fontes estão em oposição de fase se a diferença de fase inicial entre elas é $\pi$ rad

Exemplo:



**Diferença de caminho ($\Delta d$):** 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.




$$\boxed{\boldsymbol{\Delta d = d_1 - d_2}}$$

**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 $\lambda$, a condição de interferência construtiva será dada por:

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

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

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

**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 $\lambda$, a condição de interferência destrutiva será dada por:

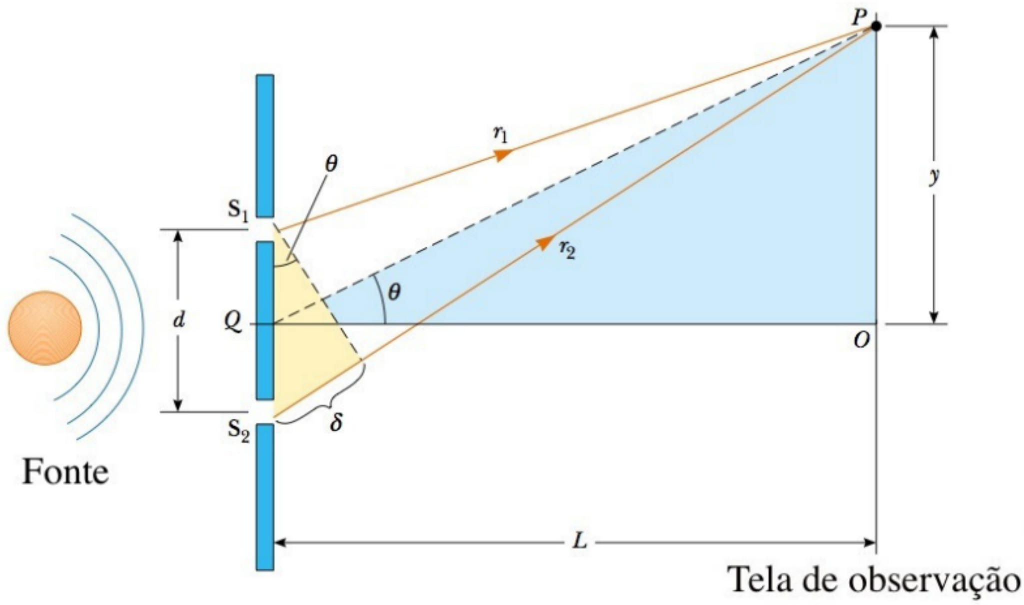
$$\Delta d = d_1 - d_2 = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda\,, com\ m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

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

$$\Delta d = d_1 - d_2 = m\,\lambda\,, com\; m = 0, \pm1, \pm2, \ldots$$

## 3. Interferência em fendas duplas

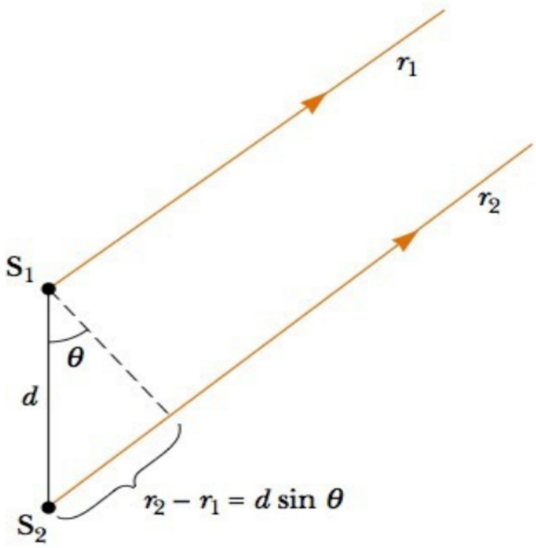
O experimento de Interferência em fendas duplas foi estudado de forma mais precisa através do experimento de Thomas Young.




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 $\delta$, 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:

$$d \sin \theta = m\lambda, com\ m \in Z$$

As **interferências destrutivas** serão dadas por:

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

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

$$\tan \theta_m = \frac{y_m}{L}$$

$$\tan \theta_m \approx \sin \theta_m$$

$$\sin \theta_m = \frac{m\lambda}{d}$$

$$\boldsymbol{y_m = \frac{m\lambda L}{d}}$$

## 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 $E(t) = E_p \cos(wt + \phi)$ a intensidade será dada por:

$$I = \frac{1}{2}\varepsilon_0 c\, E_p^2$$

Onde:

$\varepsilon_0 = permissividade\ elétrica\ do\ vácuo$
$c = velocidade\ da\ luz\ no\ vácuo$

Supondo dois campos elétricos $E_1(t) = E\cos(wt + \phi)$ e $E_2(t) = cos\ (wt)$ 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.**

$$I = 2\varepsilon_0 c\, E^2 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right)$$
$$I_0 = 2\varepsilon_0 c\, E^2$$
$$I = I_0 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right)$$

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:

$$\phi = 2m\pi, com\ m \in Z$$
$$\boldsymbol{m\acute{a}ximos}\ de\ Intensidade$$

$$\phi = (2m+1)\pi, com\ m \in Z$$
$$\boldsymbol{m\acute{i}nimos}\ de\ Intensidade$$

**Relação entre diferença de Fase e diferença de Caminho:** Dada uma diferença de fase $\phi$ ela se relacionará com uma diferença de caminho $\Delta d$ 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 $\boldsymbol{n}$ e o comprimento de onda no vácuo:** Supondo que o comprimento de onda em um meio com índice de refração $n$ seja $\lambda$, sua relação com o comprimento de onda $\lambda_0$ no vácuo será dado por:

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

## 5. Interferência em películas finas

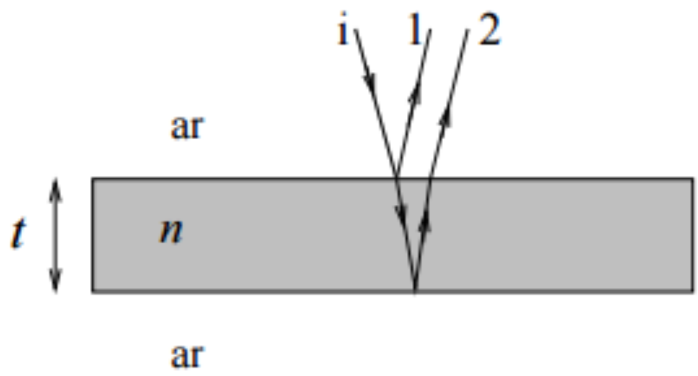
Uma película fina é uma pequena camada de um material, imersa em um meio com índice de refração diferente do seu. A condição de película fina deve ser atendida para que se possa tomar os raios refletidos e refratados em sua superfície como coerentes.

**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 $\pi$** 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 $\pi\ rad$. 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 <u>os raios 1 e 2 são emitidos inicialmente em oposição de fase</u>.

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

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_n \ \ com \ \ m = 0,1,2, \ldots$$

$$como \ \lambda_n = \frac{\lambda_0(vácuo)}{n}$$

$$2tn = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_0$$

As condição para **interferências destrutiva** será:

$$2tn = m\lambda_0$$

**6. Difração**

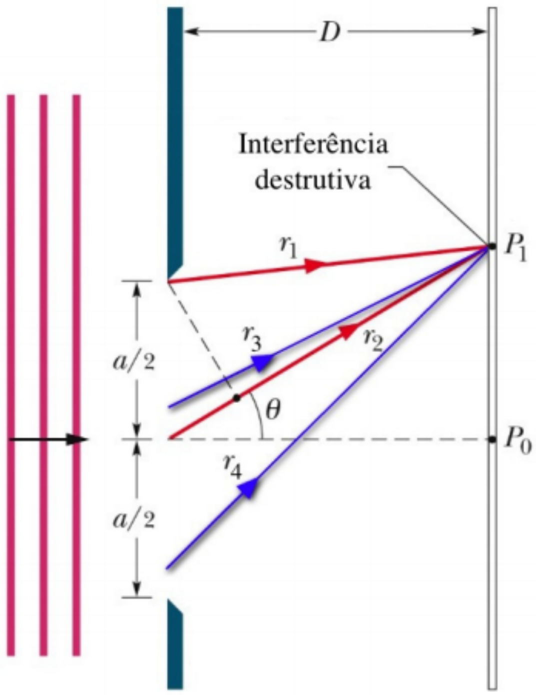
**Princípio de Huygens:** Cada ponto da frente de onda pode ser tomado como um conjunto de fontes circulares secundárias, de tal forma, que é possível determinar a posição da onda no instante $t + \Delta t$ a partir do instante $t$ apenas traçando a envoltória das frentes de onda circulares.

## 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:

$$a \sin\theta = m\,\lambda\,, com\; m = 1,2,3, \ldots$$

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 $\theta_1$ é a posição do primeiro mínimo e $\theta_2$ 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:**

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

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

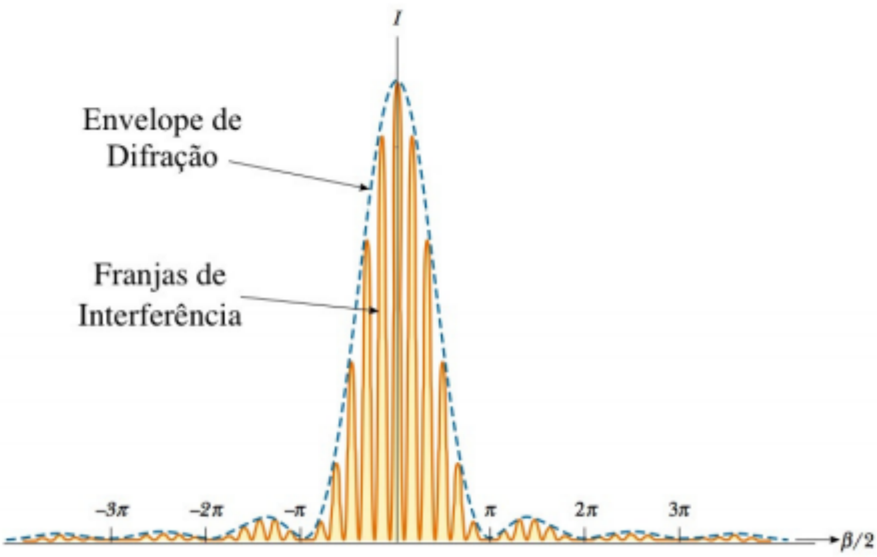
**8. Intensidade na Difração em Fendas Duplas:**

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 $\Delta \boldsymbol{t_0}$. 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 $\Delta t_0$ (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 $\vec{u}$.

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

## 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:

$$f_0 = frequência\ natural\ da\ onda$$

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

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