Ondas Eletromagnéticas – Interferência

Luz como onda

A luz é uma onda eletromagnética (Maxwell, 1855). Essa onda é formada por dois campos, $\vec{E}$ (campo elétrico) e $\vec{B}$ (campo magnético). Esses campos estão colocados de uma forma perpendicular entre si e também perpendicular à direção de propagação da onda (esse tipo de onda é chamada onda transversal), como está colocado na figura 1. Nessa figura o campo $\vec{B}$ oscila no eixo z, o campo $\vec{E}$ oscila no eixo y e a onda se propaga na direção x.

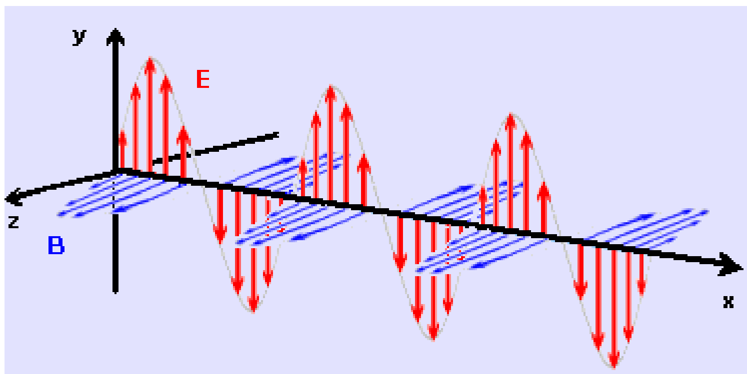


Figura 1: **http://www.ecientificocultural.com/ECC2/artigos/polar03.htm**

Existe uma relação entre os módulos de $\vec{B}$ e $\vec{E}$ dada por: $|\vec{E}| = c.|\vec{B}|$ onde $c = 3x10^8 m/s$, sendo c a velocidade de propagação da onda eletromagnética (OEM) no vácuo.

Esse tipo de onda pode interagir com a matéria, por exemplo, o campo elétrico interage com a nuvem de elétrons dos átomos que constituem a matéria e faz a mesma oscilar. Dessa interação podemos ter dois fenômenos diferentes, sendo eles espalhamento e absorção.

A equação de uma onda que caminha na direção x:

$$\vec{E}(x,t) = E_0 sen(kx - \omega t)\vec{y}$$

$$\vec{B}(x.t) = B_0 sen(kx - \omega t)\vec{z}$$

Onde $\vec{E}$ oscila na direção y e $\vec{B}$ oscila na direção z. $\vec{E}$ e $\vec{B}$ oscilam com o mesmo k e ω, e estão em fase.

Em 1855, Maxwell escreve a equação de ondas eletromagnéticas, que são constituídas por campos elétricos e magnéticos, que caminham com velocidade c.

Algumas propriedades das OEM, que saem das equações escritas por Maxwell:

- $\vec{E}$ é perpendicular a $\vec{B}$
- $\vec{E}$ e $\vec{B}$ são perpendiculares a velocidade $\vec{v}$, sendo assim uma onda transversal.
- $\vec{E} \times \vec{B} // \vec{v}$
- $\vec{E}$ e $\vec{B}$ tem a mesma fase, mesma freqüência, mesmo λ e mesma velocidade $\vec{v}$.
- No vácuo $|\vec{v}| = |\vec{c}| = 3x10^8 m/s$.

Interferência

Antes de Maxwell, Huygens, em 1679, propõe que a luz seja uma onda, mas não é aceito. Porém Young, em 1801, mostra que a luz é uma onda, com experimentos de interferência. A interferência acontece com qualquer tipo de onda. Quando temos mais de uma onda caminhando no mesmo espaço, elas se somam e formam uma figura de interferência. Veja as figuras abaixo.

Ondas em fase | Ondas defasadas de $\lambda/2$

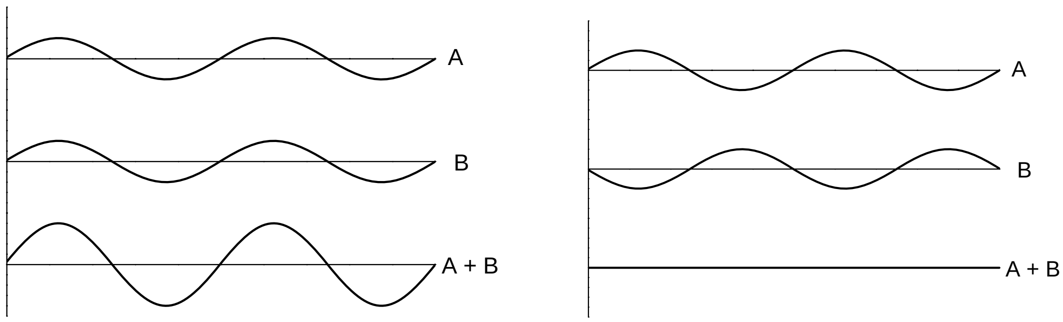
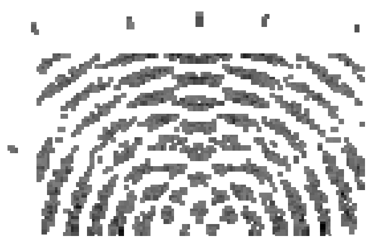


Figura2

Ondas na água, originárias de duas fontes “pontuais” A e B:



A B

Figura 3

Uma *frente de onda* ou superfície de onda é o lugar geométrico de todos os pontos em que a fase de vibração ou variação harmônica de uma quantidade física é a mesma. Por exemplo, a posição de todos os máximos.

As *ondas eletromagnéticas* radiadas por uma pequena fonte de luz podem ser representadas por frentes de onda que são superfícies esféricas concêntricas (centros coincidentes) à fonte e a uma distância grande da fonte, como superfícies planas.

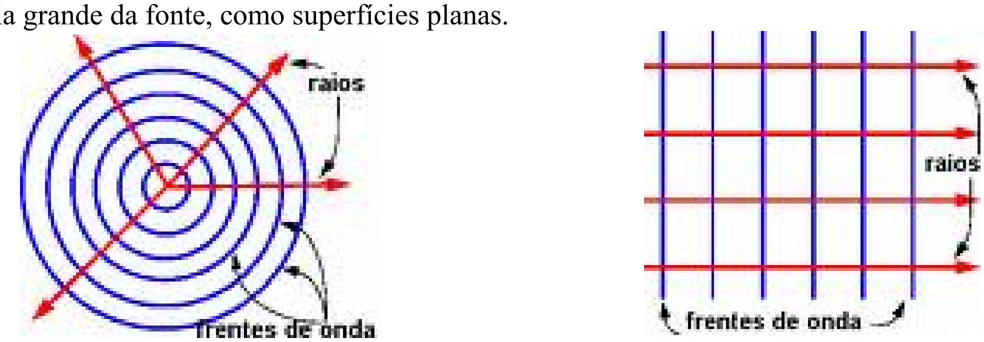


Figura 4

Princípio de Huygens

Cada ponto em uma frente de onda atua como fonte de ondas esféricas secundárias, de tal maneira que a frente de onda seguinte é formada por um envelope dessas ondas secundárias com a mesma freqüência. Ver figura abaixo. Com esse principio pode-se explicar a refração e a reflexão (ver site http://www.walter-fendt.de/ph11br/huygenspr_br.htm.).

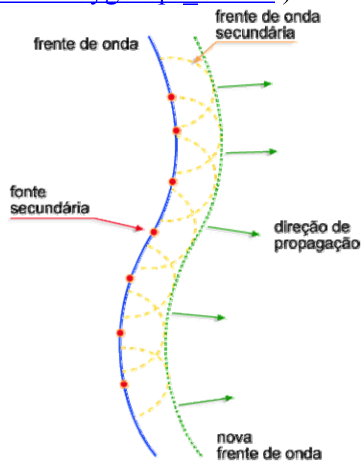
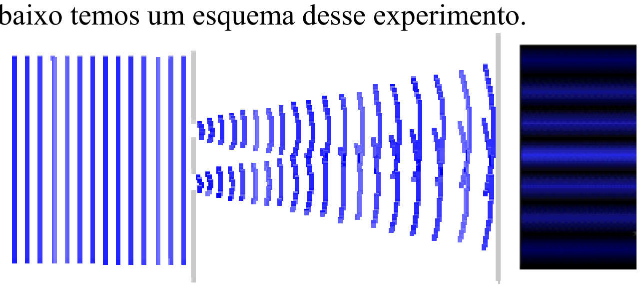


Figura 5

Interferência de duas fendas

Para vermos interferência, precisamos de fontes coerentes de luz. Ondas coerentes são aquelas com mesma freqüência e diferença de fase definida. Na montagem abaixo, as ondas que chegam nas duas fendas estão em fase. Podemos usar uma lâmpada atrás das duas fendas, mas não duas lâmpadas, pois as lâmpadas incandescentes emitem com fases aleatórias, sendo portanto incoerentes.

Em 1801, Thomas Young fez um experimento de interferência com a luz e mostrou que ela é uma onda, na figura abaixo temos um esquema desse experimento.



Ondas incidentes Fendas Anteparo

Figura 6

Como sabemos se no anteparo teremos um ponto claro ou um ponto escuro? Isso depende de como as ondas se somam nesse ponto. Para termos um ponto claro, que chamamos de máximo, as ondas precisam se encontrar em fase no anteparo.

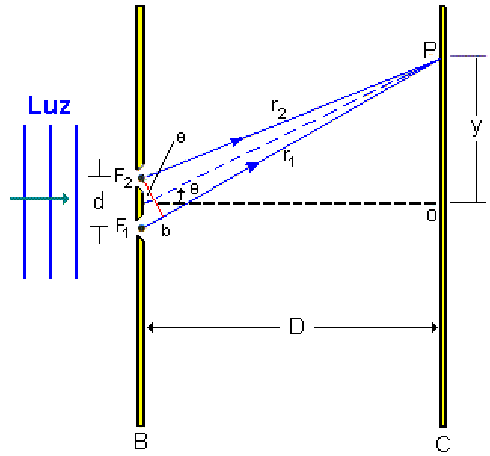


Figura 7

Escrevendo as equações para as duas ondas, em um determinado ponto do anteparo, temos:

$$\vec{E}(r_1,t) = E_0\cos(kr_1 - \omega t)$$

$$\vec{E}(r_2,t) = E_0\cos(kr_2 - \omega t)$$

Sendo r_1 e r_2 os caminhos percorridos pelas ondas que saem das duas fendas até o anteparo.

A diferença de fase entre elas é dada por:

$$\delta \equiv (kr_2 - \omega t) - (kr_1 - \omega t) = k(r_2 - r_1)$$

Para que elas cheguem em fase no ponto do anteparo, é preciso que $k(r_2 - r_1) = 2\pi n$, seja um múltiplo de 2π. Colocando que $k = 2\pi/\lambda$, temos: $(r_2 - r_1) = n\lambda$, onde $n = 0,1,2,...$. Isso define os pontos claros.

Para os pontos escuros, precisamos que a diferença de fase seja um múltiplo impar de π, ou seja, $k(r_2 - r_1) = (2n+1)\pi$. Do mesmo modo temos, $(r_2 - r_1) = (2n+1)\dfrac{\lambda}{2}$.

Por exemplo, para ter uma idéia ilustrativa, olhem o site:

http://br.geocities.com/saladefisica3/laboratorio/interferencia/interferencia.htm

Aproximação de Fraunhofer

A distância entre as fendas (d) é muito menor que a distância da fenda até o anteparo (D). A diferença $r_2 - r_1$ pode ser aproximada por $dsen\theta$. Então temos:

Máximos: $dsen\theta = n\lambda$

Minimos: $dsen\theta = (2n+1)\dfrac{\lambda}{2}$, onde n=0,1,2,…

Se soubermos a distância entre um ponto no anteparo e o centro do mesmo, ponto O na Figura 7. Podemos calcular a distância y, usando a aproximação para ângulos pequenos,

$tg\theta = \dfrac{y}{D} \cong sen\theta$ e também usando o fato que o 1º máximo acontece quando $sen\theta = \dfrac{\lambda}{d}$. Com isso temos, $\dfrac{y}{D} = \dfrac{\lambda}{d} \Rightarrow y = \dfrac{D\lambda}{d}$.

Na figura abaixo temos um gráfico da intensidade da luz observada em um anteparo como resultado da interferência:

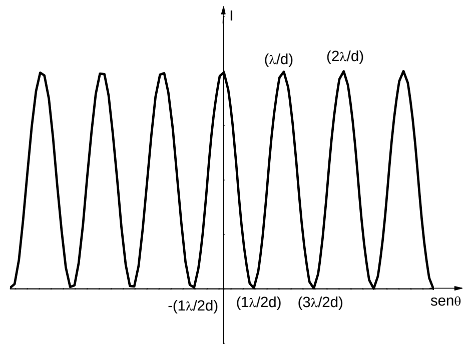


Figura 8

Com isso podemos ver que quanto maior d em relação a λ, mais se aproximam os máximos. Se $d >> \lambda$, os máximos e mínimos são muito próximos, só enxergamos um continuo, não distinguimos uma figura de interferência. Se $2d < \lambda$, o primeiro zero não acontece, pois $sen\theta = \dfrac{\lambda}{2d} > 1$, portanto a luz é espalhada em todo o anteparo.

Difração

A difração por uma única fenda, dependendo da largura a da fenda, pode ser considerada como a interferência de muitas fontes, com isso no anteparo também são observados claros e escuros.

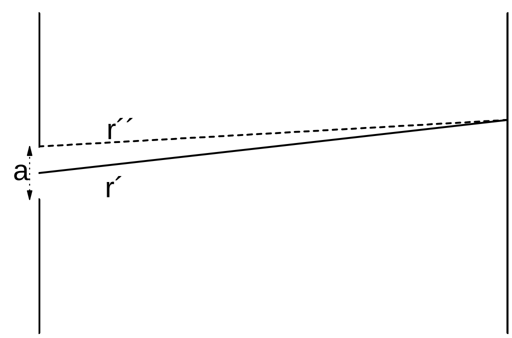


Figura 9

No 1º escuro do anteparo, todos os raios que saem da fenda devem se anular. Isso acontecerá se o raio que sai do ponto superior (r''), anular o que sai do meio da fenda (r'), desse modo a parte superior anulará a parte inferior. Para que os raios se anulem é preciso que $(r''-r') = \lambda/2$.

Aproximação de Fraunhofer

Quando a largura da fenda é muito menor que a distância entre a fenda e o anteparo (D), a diferença $(r''-r')$, pode ser aproximada por: $(r''-r') = \frac{a}{2} sen\theta$. Como colocado na Figura 10. Igualando a equação do item anterior, $(r''-r') = \lambda/2$, com essa temos: $sen\theta = \frac{\lambda}{a}$. Se θ for muito pequeno, temos que $sen\theta \approx tg\theta = \frac{y}{D}$. Com isso o primeiro zero acontece em: $a\frac{y}{D} = \lambda$. A figura de difração depende da relação entre a e λ.

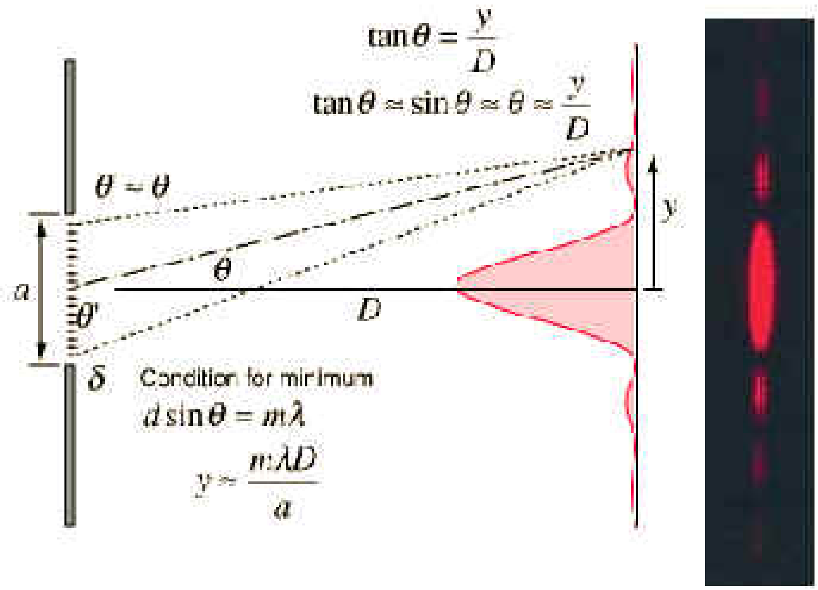


Figura 10.

Para $a >> \lambda$, temos $sen\theta = \frac{\lambda}{a} << 1$. A luz fica concentrada no centro, como mostrado na Figura 11.

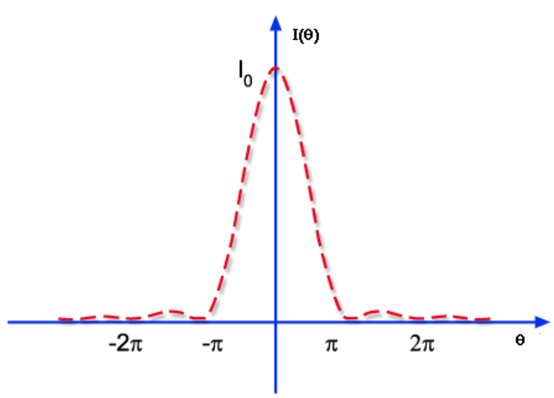


Figura 11: gráfico da intensidade observada no anteparo.

Para $\lambda > a$, temos $sen\theta = \frac{\lambda}{a} > 1$ e com isso não temos o primeiro mínimo, a luz é espalhada em todo o anteparo. Se a é a dimensão de um objeto e $a < \lambda$, não conseguimos enxerga-lo.

Se tivermos duas fendas com largura $a \cong \lambda$, separadas por uma distância $d \cong \lambda$. Vemos uma figura de interferência modulada por uma figura de difração, como colocado na figura abaixo.

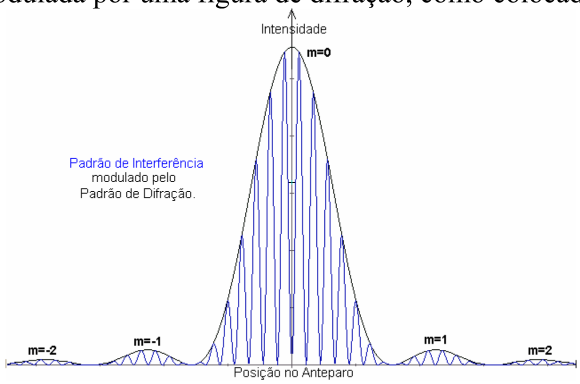


Figura 12

Difração de uma fenda circular: 1º zero: $asen\theta = 1{,}22\frac{\lambda}{a}$, onde a é o diâmetro da fenda. O efeito é equivalente à presença de um obstáculo.

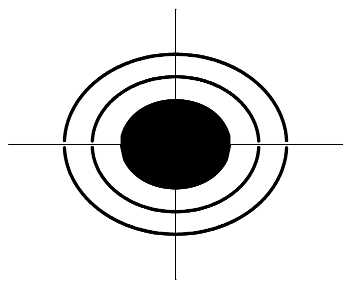


Figura 13