Física Experimental IV

Ondas Eletromagnéticas

Prof. Dr. Lucas Barboza Sarno da Silva

SUMÁRIO

- Introdução às ondas eletromagnéticas
- Equações de Maxwell e ondas eletromagnéticas
- Espectro de ondas eletromagnéticas
- Ondas eletromagnéticas planas e a velocidade da luz
- Energia de uma onda eletromagnética
- Momento e pressão de radiação
- Princípio de Huygens
- Difração em uma fenda
- Interferência em uma onda
- Experiência da dupla fenda de Young
- Referências

Introdução

O que é luz?

A unificação da teoria da eletricidade e do magnetismo, conhecida como eletromagnetismo.

Equações de Maxwell.

Essas equações mostram que um campo magnético variável funciona como fonte de campo elétrico e que um campo elétrico variável funciona como uma fonte de campo magnético.

Esses campos $\vec{E}$ e $\vec{M}$ podem se sustentar mutuamente, formando uma **onda eletromagnética** que se propaga no espaço.

Exemplos de fontes emissoras de ondas eletromagnéticas

Luz visível emitida por um filamento de lâmpada incandescente

Emissoras de rádio e TV

Osciladores de micro-ondas

Aparelhos de raios X

- <u>Diferem entre si, apenas pela frequência e pelo comprimento de onda.</u>

Diferentemente das ondas em uma corda ou do som se propagando em um fluido, **as ondas eletromagnéticas não precisam de um meio para se propagar**.

A luz das estrelas que enxergamos em uma noite clara, viajou sem nenhuma dificuldade por dezenas de anos-luz através do espaço vazio.

Equações de Maxwell e ondas eletromagnéticas

Equações de Maxwell

$$\oint_S \vec{E}.d\vec{s} = \frac{q}{\varepsilon_0}$$ (Lei de Gauss)

$$\oint_S \vec{B}.d\vec{s} = 0$$ (Lei de Gauss para o magnetismo)

$$\oint_C \vec{E}.d\vec{r} = -\frac{d\phi_B}{dt}$$ (Lei de Faraday)

$$\oint_C \vec{B}.d\vec{r} = \mu_0 i + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}$$ (Lei de Ampère)

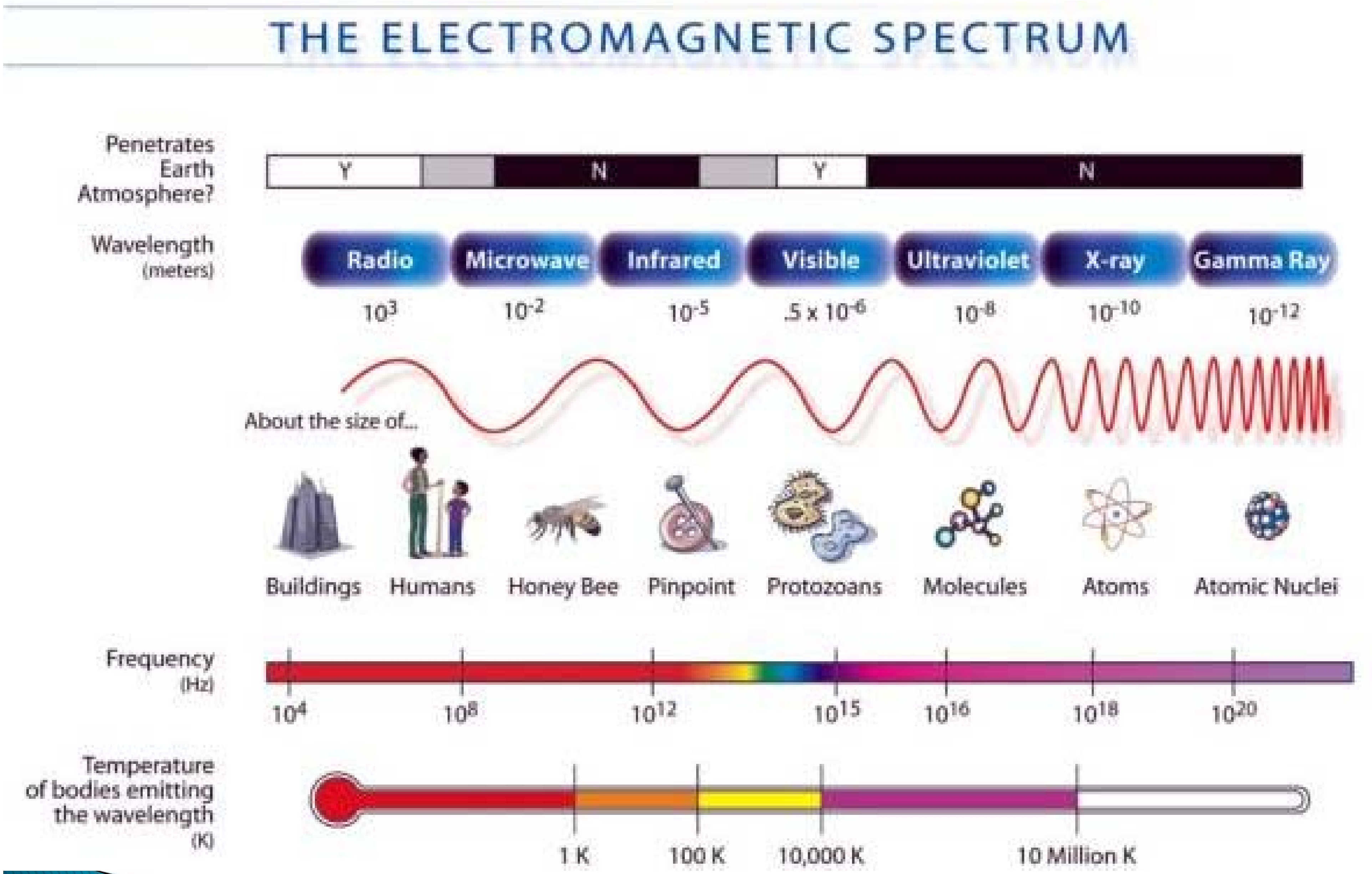
As duas últimas equações mostram que variações espaciais ou temporais do campo elétrico (magnético) provocam variações espaciais ou temporais do campo magnético (elétrico).

- Uma carga puntiforme em repouso produz um campo elétrico estático, mas não gera campo magnético.
- Uma carga puntiforme que se move com uma velocidade constante produz tanto campo elétrico como campo magnético.

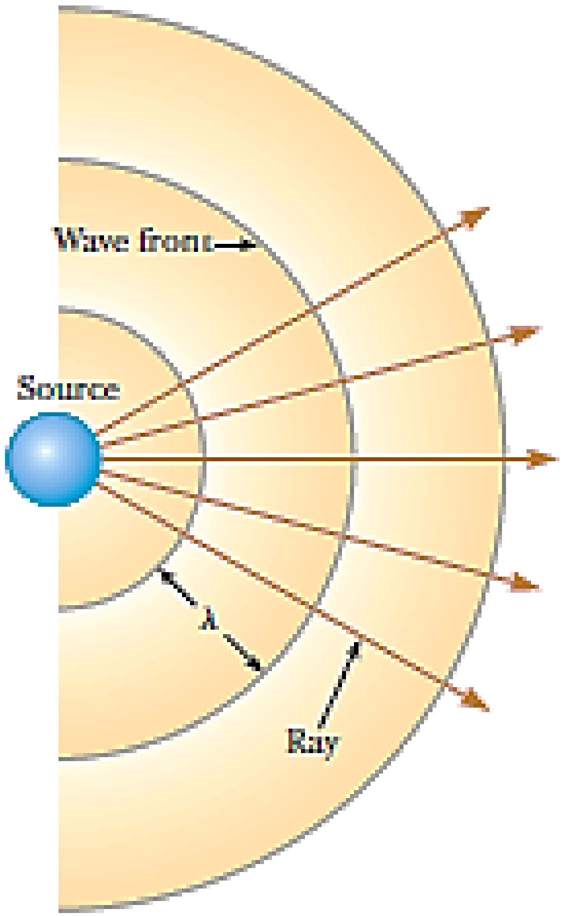
Para produzir ondas eletromagnéticas é necessário que a carga esteja acelerada.

Todo telefone celular, modem sem fio ou transmissor de rádio emite sinais na forma de ondas eletromagnéticas

Linhas de transmissão de energia elétrica transportam uma forte corrente alternada, gerando ondas eletromagnéticas

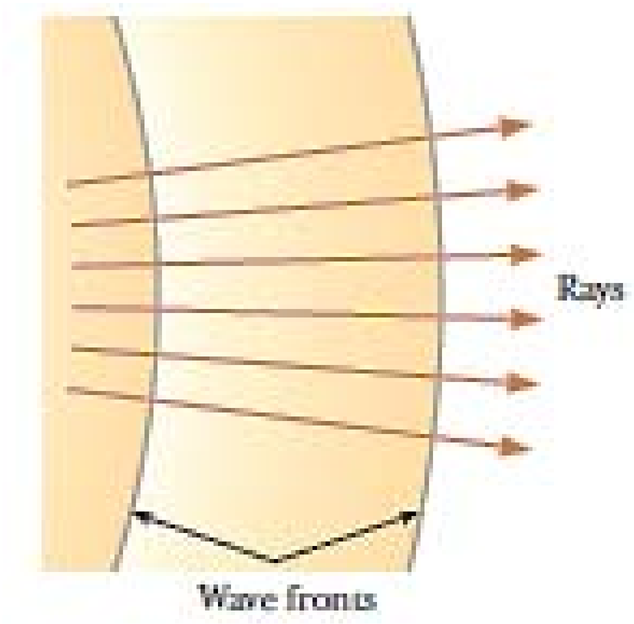

THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM
Penetrates Earth Atmosphere?
Y
N
Y
N
Wavelength (meters)
Radio
Microwave
Infrared
Visible
Ultraviolet
X-ray
Gamma Ray
10^3
10^{-2}
10^{-5}
$.5 \times 10^{-6}$
10^{-8}
10^{-10}
10^{-12}
About the size of...
Buildings
Humans
Honey Bee
Pinpoint
Protozoans
Molecules
Atoms
Atomic Nuclei
Frequency (Hz)
10^4
10^8
10^{12}
10^{15}
10^{16}
10^{18}
10^{20}
Temperature of bodies emitting the wavelength (K)
1 K
100 K
10,000 K
10 Million K

Ondas esféricas e ondas planas



- **Representação:** arcos circulares concêntricos à fonte
- Cada arco representa uma superfície onde a fase da onda é uma constante. Essa superfície é a frente de fase, ou **frente de onda**.
- A distância entre frentes de fase adjacentes é igual ao **comprimento de onda** λ.
- As retas radiais que saem da fonte são os **raios**.

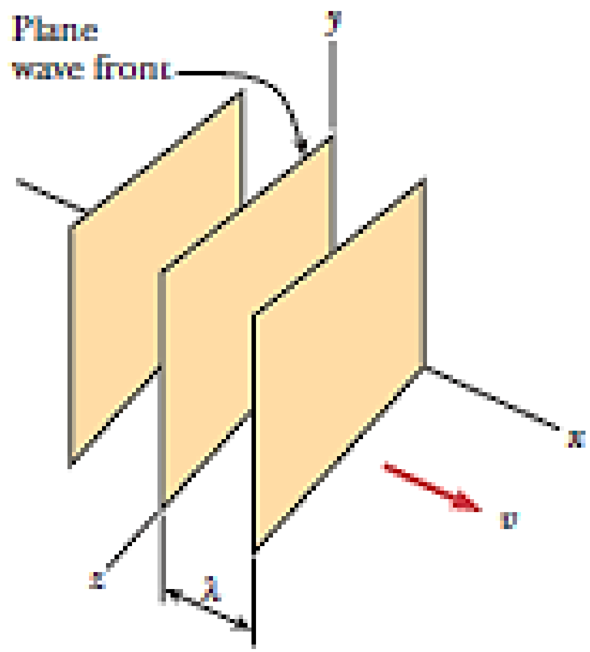
Ondas esféricas e ondas planas



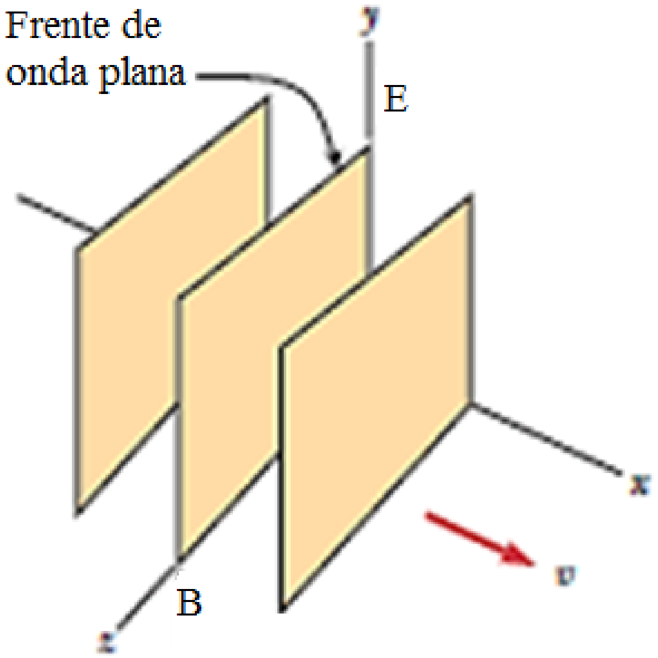
Pequena parte das frentes de onda a grande distância da fonte.

- Raios quase paralelos
- Frentes de onda quase planas

Frente de onda plana



Ondas eletromagnéticas planas e a velocidade da luz



$$\oint_C \vec{E}.d\vec{r} = -\frac{d\phi_B}{dt}$$ (Lei de Faraday)

$$\oint_C \vec{B}.d\vec{r} = \mu_0 i + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}$$ (Lei de Ampère)

Com essas expressões, e com a hipótese de a onda ser plana, chega-se às seguintes equações:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial x} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial x} = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Derivando em relação a *x*:

$$\Rightarrow \quad \frac{\partial \vec{E}}{\partial x} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) = -\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial x}\right)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = -\frac{\partial}{\partial t}\left(-\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\right)$$

$$\boxed{\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{\partial \vec{B}}{\partial x} = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x}\left(-\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\right)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial t}\left(-\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial x}\right)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial t}\left[-\mu_0 \varepsilon_0 \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right)\right]$$

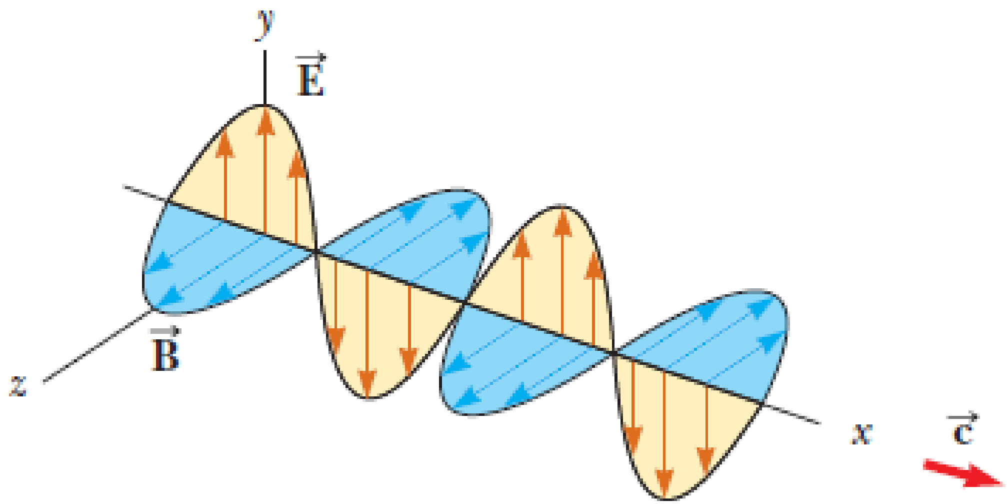
$$\boxed{\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}}$$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \dfrac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \longrightarrow E = E_m \cos(kx - \omega t) \\[2ex] \dfrac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \dfrac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \longrightarrow B = B_m \cos(kx - \omega t) \end{cases}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

Com isso, encontra-se o valor de *c*:

c = 2,99792 x 10^8 m/s



$$\begin{cases} E = E_m \cos(kx - \omega t) \\ B = B_m \cos(kx - \omega t) \end{cases}$$

onde, E_m e B_m são os valores máximos dos campos.

$k = \dfrac{2\pi}{\lambda} \longrightarrow$ número de onda

$\omega = \dfrac{2\pi}{T} \longrightarrow$ frequência angular

$\dfrac{\omega}{k} = \lambda f = c \longrightarrow$ velocidade da luz

$\lambda \longrightarrow$ comprimento de onda

$f \longrightarrow$ frequência

$$\begin{cases} E = E_m \cos(kx - \omega t) \\ B = B_m \cos(kx - \omega t) \end{cases}$$

Lembrando que:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial x} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Tomando as derivadas parciais, temos:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -kE_m \sin(kx - \omega t)$$

$$-\frac{\partial B}{\partial t} = -\omega B_m \sin(kx - \omega t)$$

$$kE_m = \omega B_m$$

$$\frac{E_m}{B_m} = \frac{\omega}{k} = c$$

Ou seja, em qualquer instante, a razão entre o campo elétrico e o campo magnético de uma onda eletromagnética é igual à velocidade da luz.

Resumo das propriedades das ondas eletromagnéticas:

1) As soluções da terceira e da quarta equações de Maxwell são ondulatórias, e os campos E e B obedecem à mesma equação de onda.
2) As ondas eletromagnéticas se propagam no vácuo com a velocidade da luz, c.
3) O campo elétrico e o campo magnético, componentes das ondas planas eletromagnéticas, são perpendiculares um ao outro e também perpendiculares à direção de propagação da onda. Essa última propriedade pode ser resumida na afirmação de as eletromagnéticas serem ondas transversais.
4) Os módulos de $\boldsymbol{E}$ e $\boldsymbol{B}$, no vácuo, estão relacionados por $E/B = c$.
5) As ondas eletromagnéticas obedecem ao princípio da superposição.

Energia de uma onda eletromagnética

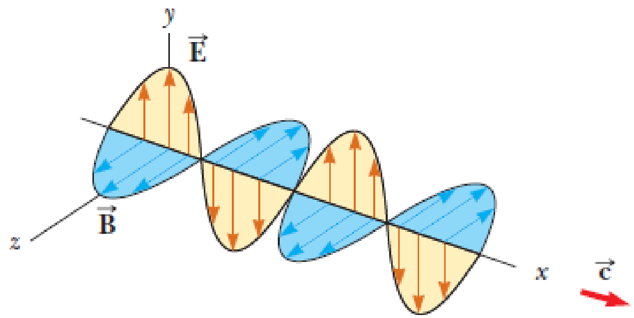
As ondas eletromagnéticas são portadoras de energia e, ao se propagarem no espaço, podem transferir energia para os corpos que se encontram na trajetória percorrida.

A taxa de fluxo de energia, numa onda eletromagnética, é descrita por um vetor ***S***, denominado o **vetor de Poynting**, que se define por:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\vec{E} \times \vec{B}$$

O módulo do vetor de Poynting representa a taxa em qual a energia passa por uma superfície de área unitária perpendicular à direção de propagação.

Potência por unidade de área.



Para uma onda eletromagnética plana temos:

$$S = \frac{EB}{\mu_0} \longrightarrow S = \frac{E^2}{\mu_0 c} = \frac{cB^2}{\mu_0}$$

Lembrando que:

$$B = \frac{E}{c}$$

Essas equações se aplicam em qualquer instante de tempo.

A média de S sobre o tempo, tomada em um ou mais de um ciclo é chamada de **intensidade da onda**, I.

$$I = S_{méd} = \frac{E_m B_m}{2\mu_0} = \frac{{E_m}^2}{2\mu_0 c} = \frac{c{B_m}^2}{2\mu_0}$$

Exemplo:

Energia solar

O Sol proporciona cerca de 1000 W/m^2 de fluxo eletromagnético à superfície da Terra. Calcular a potência incidente num telhado de 8 m x 20 m.

Potência = S.A
Potência = (1.000 W/m^2).(8 x 20 m^2)
Potência = 1,60 x 10^5 W

Momento e pressão de radiação

As ondas eletromagnéticas são portadoras de momento linear, assim como de energia. Então, quando uma onda eletromagnética incide sobre uma superfície, exerce uma pressão (pressão de radiação) sobre a superfície.

Absorção completa:

momento linear: $p = \frac{U}{c}$ pressão de radiação: $P_{rad} = \frac{S_{méd}}{c} = \frac{I}{c}$

Reflexão completa:

momento linear: $p = \frac{2U}{c}$ pressão de radiação: $P_{rad} = \frac{2S_{méd}}{c} = \frac{2I}{c}$

Exemplo:

Energia solar

O Sol proporciona cerca de 1000 W/m² de fluxo eletromagnético à superfície da Terra. Calcular a pressão de radiação e a força de radiação sobre o telhado, admitindo que o telhado seja um absorvedor perfeito. Área de 8 m x 20 m.

Pressão de radiação:

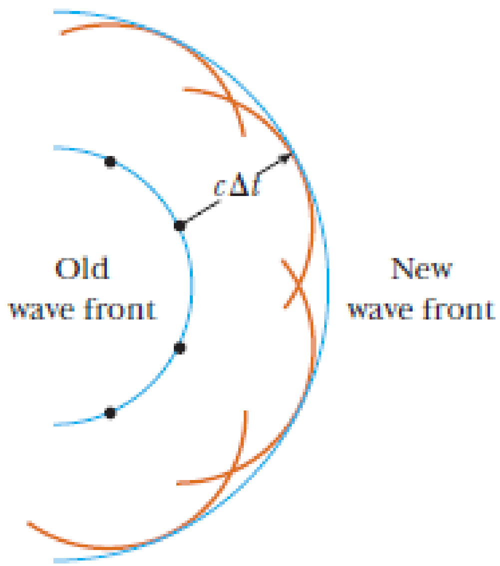
$$P = \frac{S}{c} = \frac{1.000\ W/m^2}{3 \times 10^8\ m/s} = 3{,}33 \times 10^{-6}\ N/m^2$$

Força de radiação:

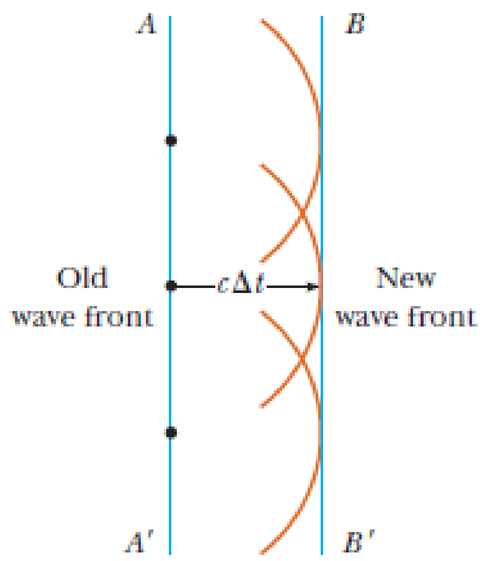
$$F = P.A = (3{,}33 \times 10^{-6}\ N/m^2).(160\ m^2)$$
$$F = 5{,}33 \times 10^{-4}\ N$$

Princípio de Huygens

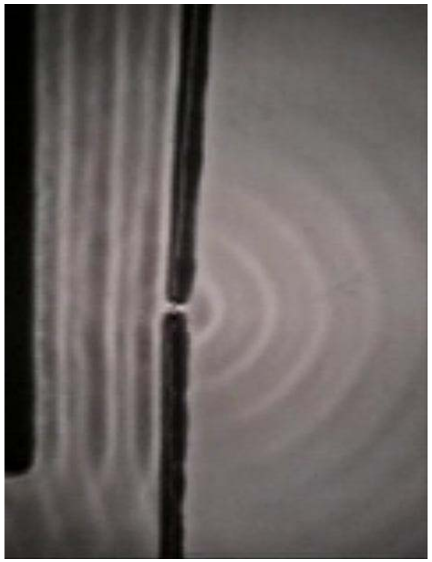
"Todos os pontos de uma certa frente de onda são fontes puntiformes de ondas esféricas secundárias, pequeninas ondas, que se propagam para frente com velocidade característica das ondas do meio. Depois de um certo intervalo de tempo, a nova posição da frente de onda é a superfície tangente a todas essas pequeninas ondas".



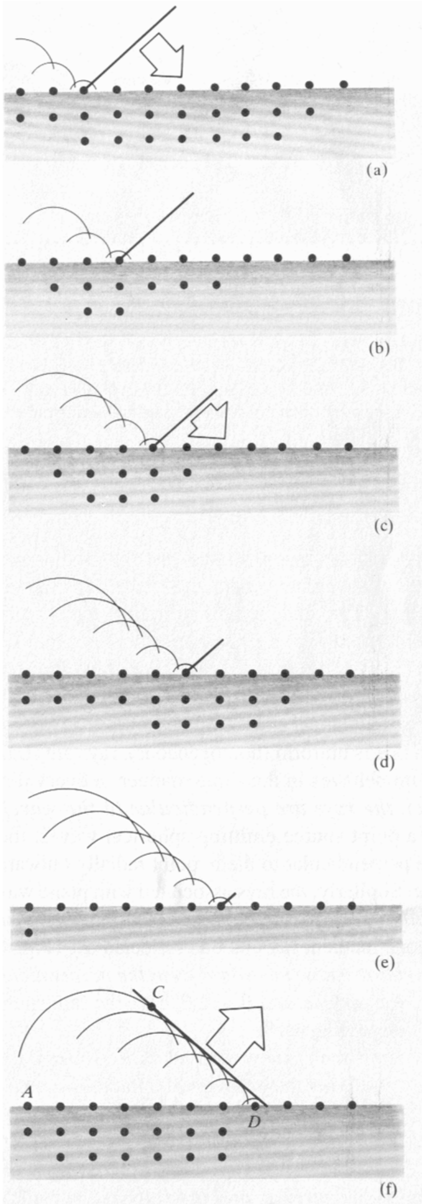
Onda esférica

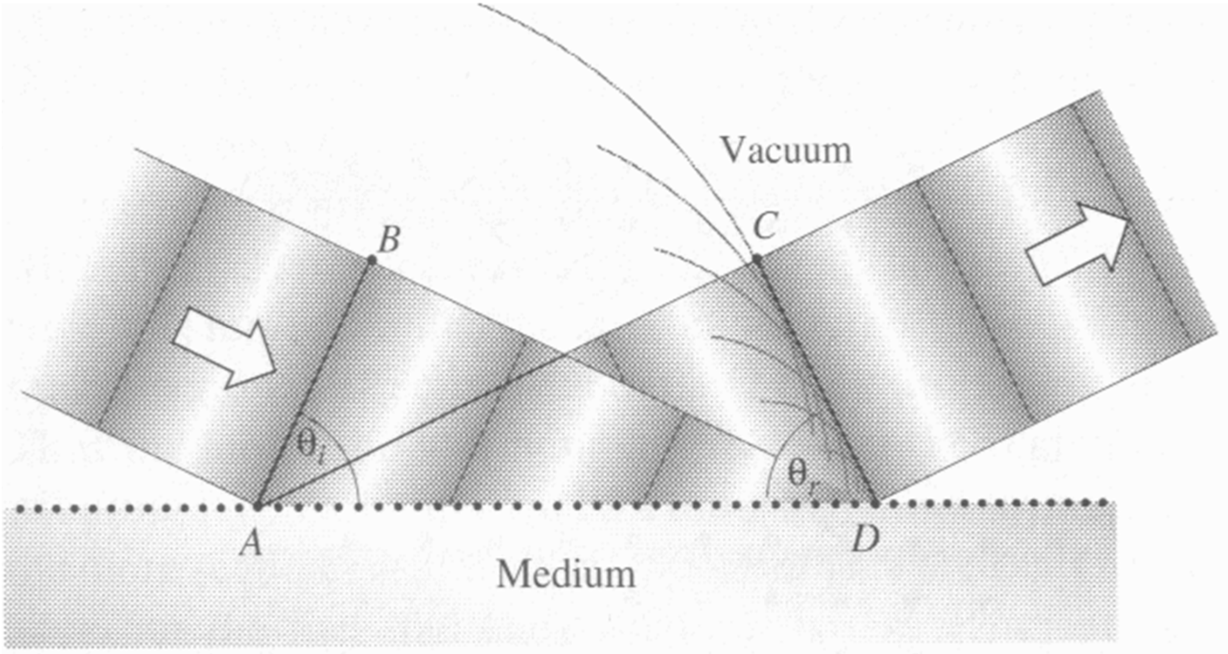


Onda se propagando p/ direita



Tanque de ondas

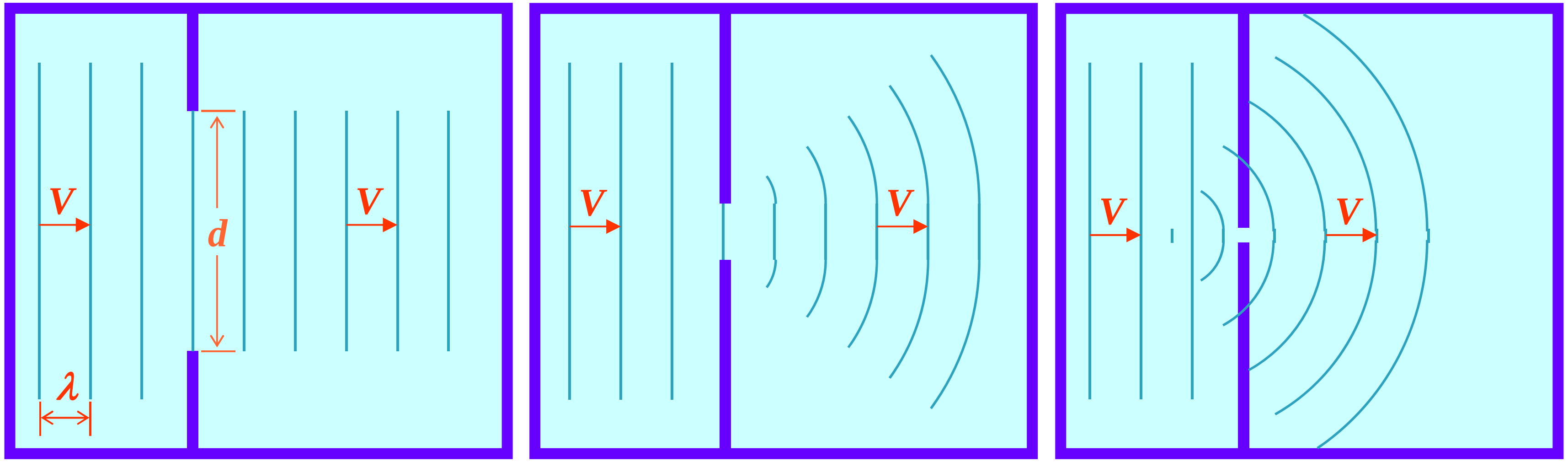




Verificamos que na **reflexão**: $\theta_i = \theta_r$

Difração em uma fenda

$\lambda << d$ | $\lambda \cong d$ | $\lambda >> d$

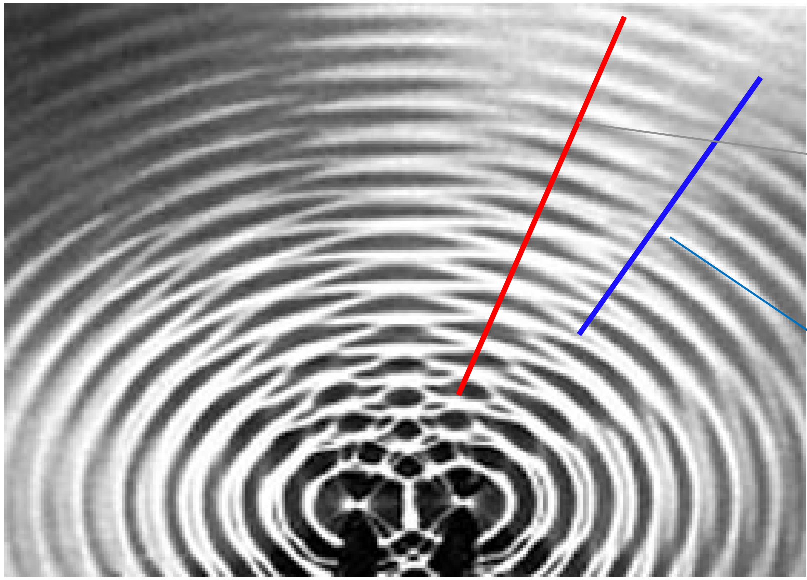


Não ocorre difração | Ocorre difração | Ocorre difração acentuada

Interferência de duas ondas

<u>Interferência:</u> é quando ondas distintas, de mesmas características, geradas a partir de duas fontes, se sobrepõem em um ponto do espaço, a intensidade da onda resultante naquele ponto pode ser maior ou menor que a intensidade de qualquer uma das duas ondas.

A interferência pode ser tanto **construtiva** quanto **destrutiva** dependendo da fase relativa entre as duas ondas

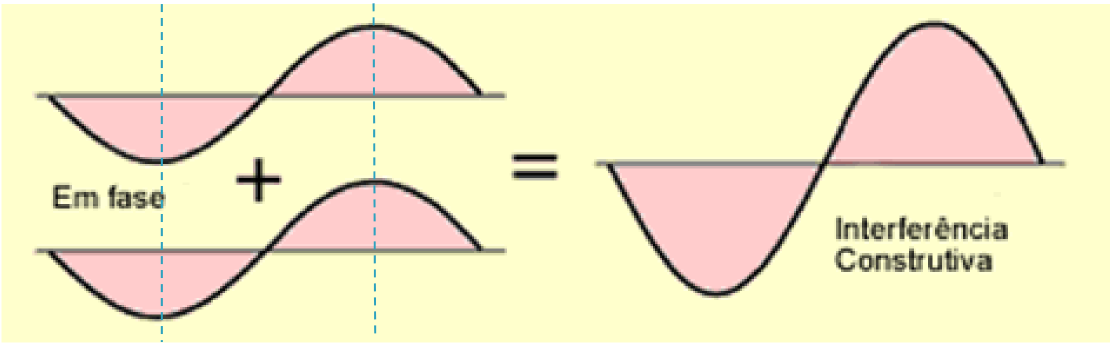


Interferência construtiva

Interferência destrutiva

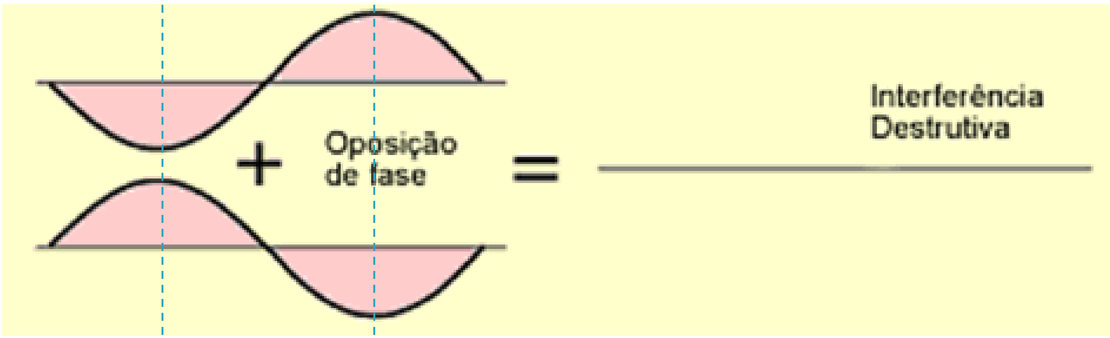
Interferência Construtiva:

Diferença de fase (em radianos) de duas ondas é de 0, 2π, 4π, ...



Interferência Destrutiva:

Diferença de fase (em radianos) de duas ondas é de π, 3π, 5 π, ..., ou seja, fora de fase 180º.



Não são fáceis de observar os efeitos da interferência das ondas luminosas em virtude dos curtos comprimentos de ondas que estão envolvidos (entre cerca 4.10^{-7} m até cerca de 7.10^{-7} m). Para se observar a interferência continuada das ondas luminosas é necessário cumprir as seguintes condições:

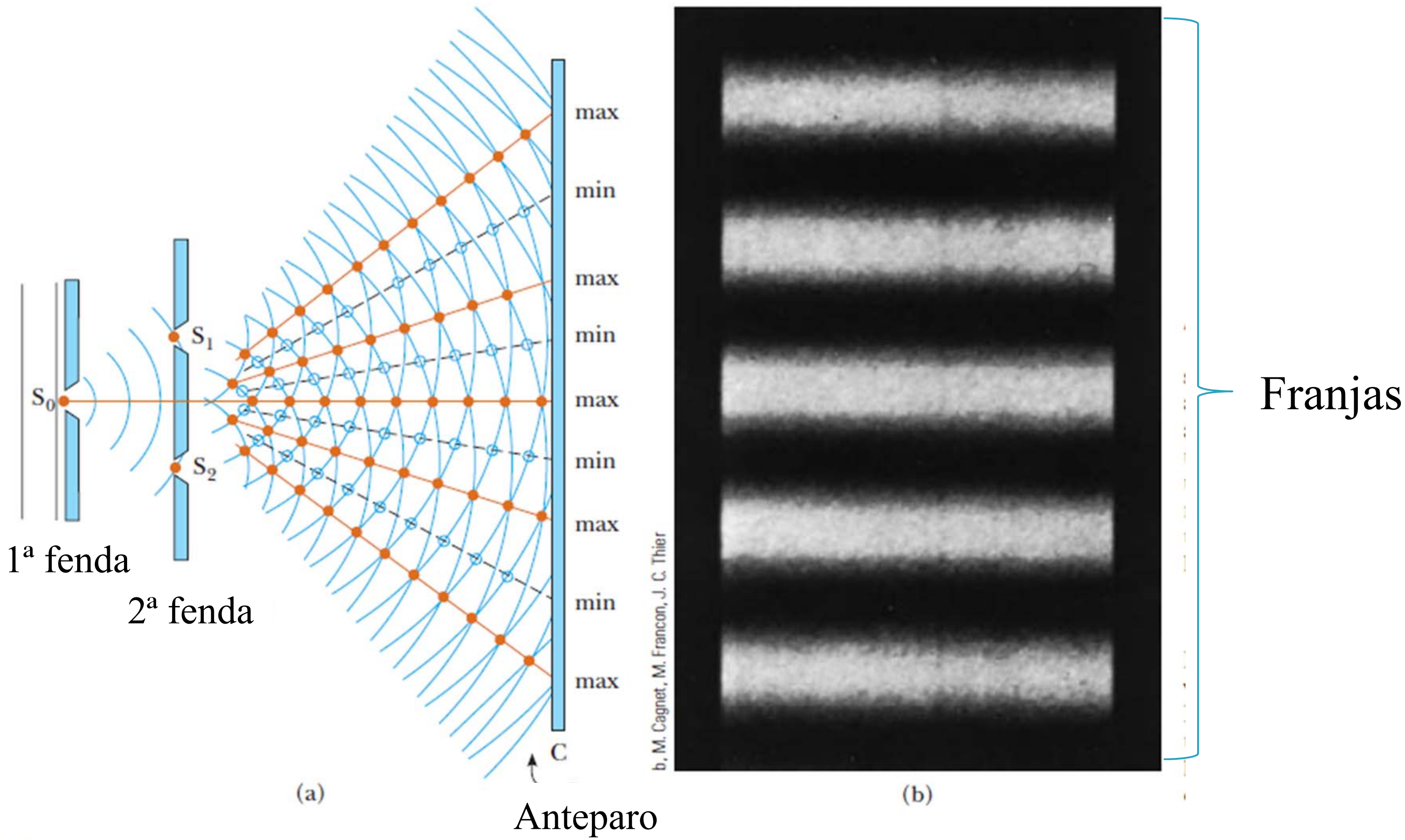
- As fontes devem ser **coerente**, isto é, deve manter uma relação de fase constante, uma com a outra.
  <u>Exemplo</u>: *Dois alto-falantes lado a lado, alimentados pelo mesmo amplificador.*

- As fontes devem ser **monocromáticas**, isto é, emitem um único comprimento de onda.

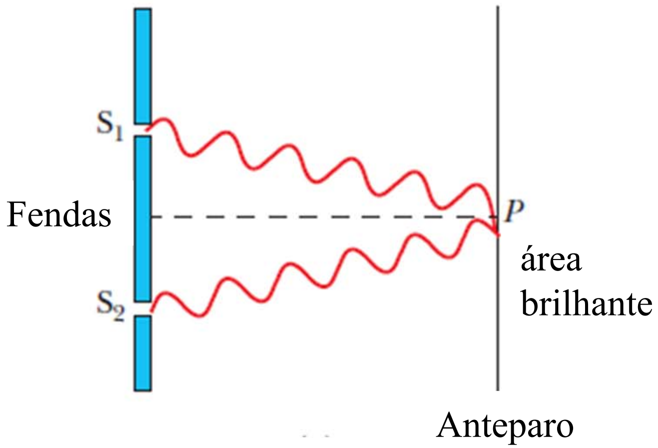
- O **princípio da superposição** deve ser aplicável.

Experiência da dupla fenda de Young

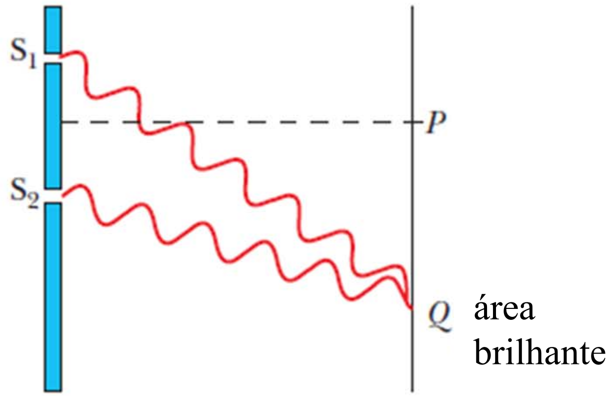
Thomas Young, em 1801



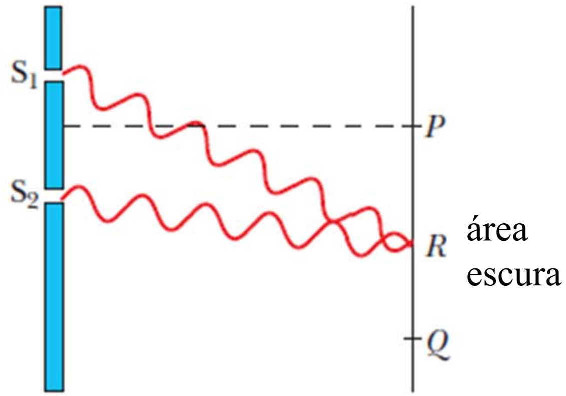
Uma forma <u>qualitativa</u> de se observar a experiência de Young



Interferência
Construtiva

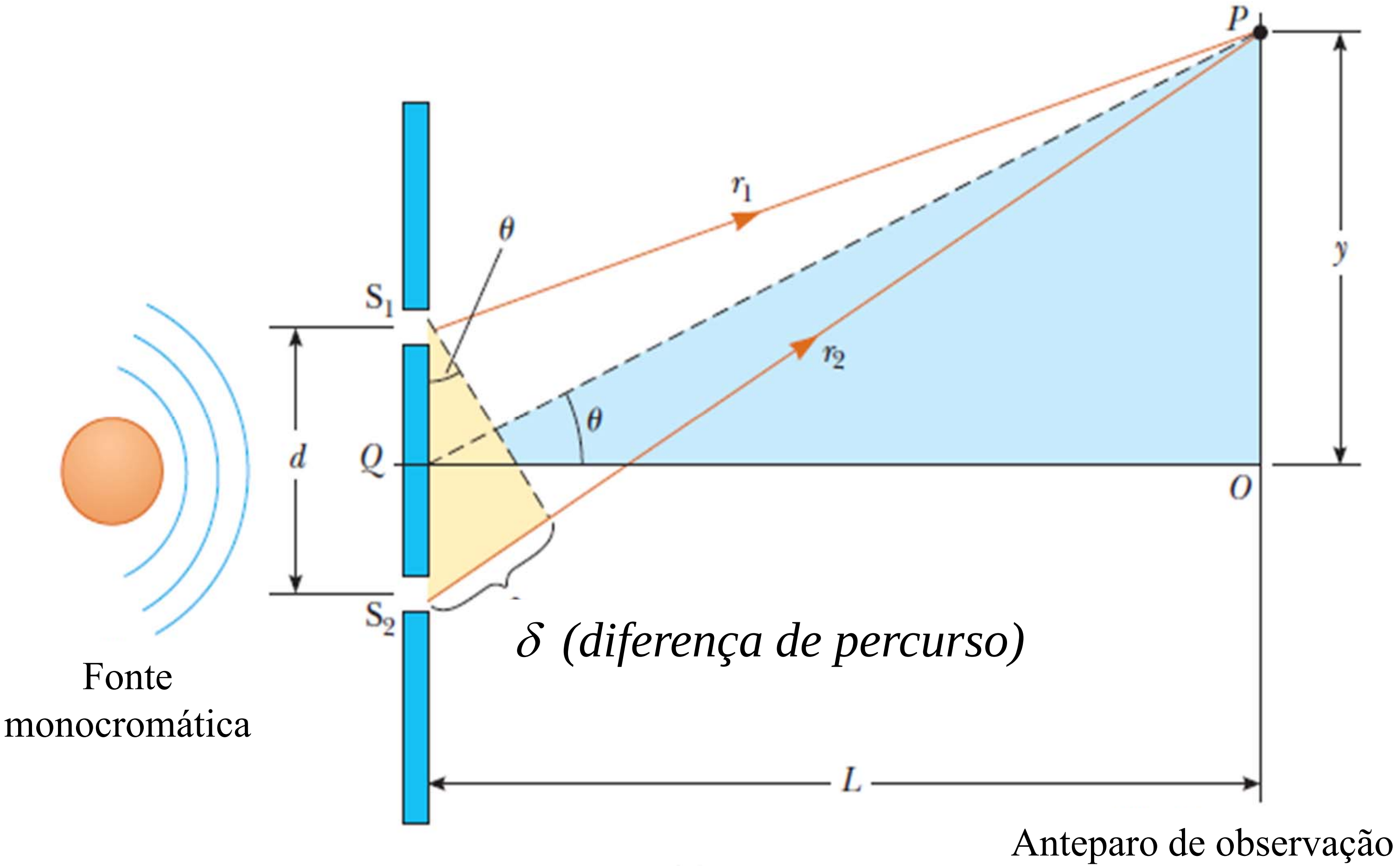


Interferência
Construtiva

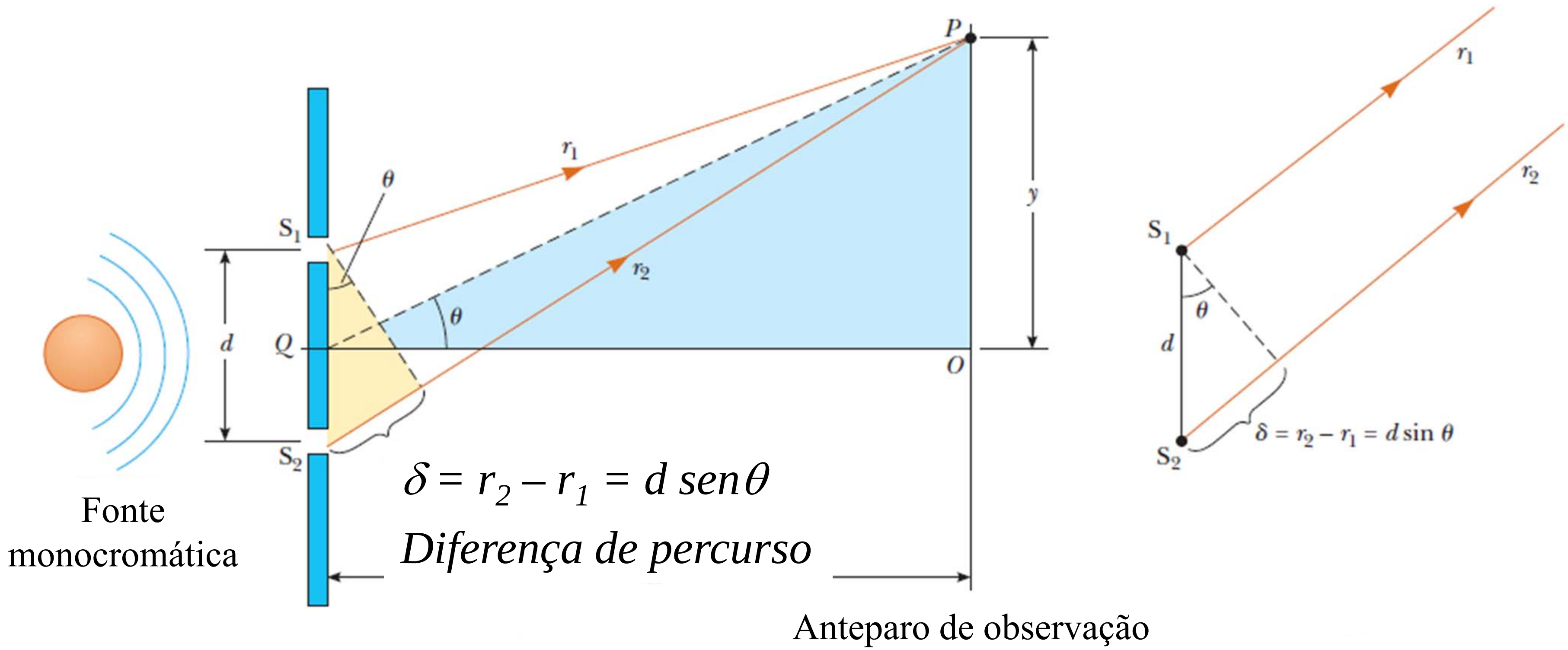


Interferência
Destrutiva

Uma forma quantitativa de se observar a experiência de Young



p/ $L >> d$ ⇨ r_1 e r_2 paralelos



Diferença de percurso:

Interferência Construtiva: $\boxed{\delta = d\,sen\theta = m\lambda}$

Interferência Destrutiva: $\boxed{\delta = d\,sen\theta = (m + \tfrac{1}{2})\lambda}$

$m = 0, \pm1, \pm2, \ldots$

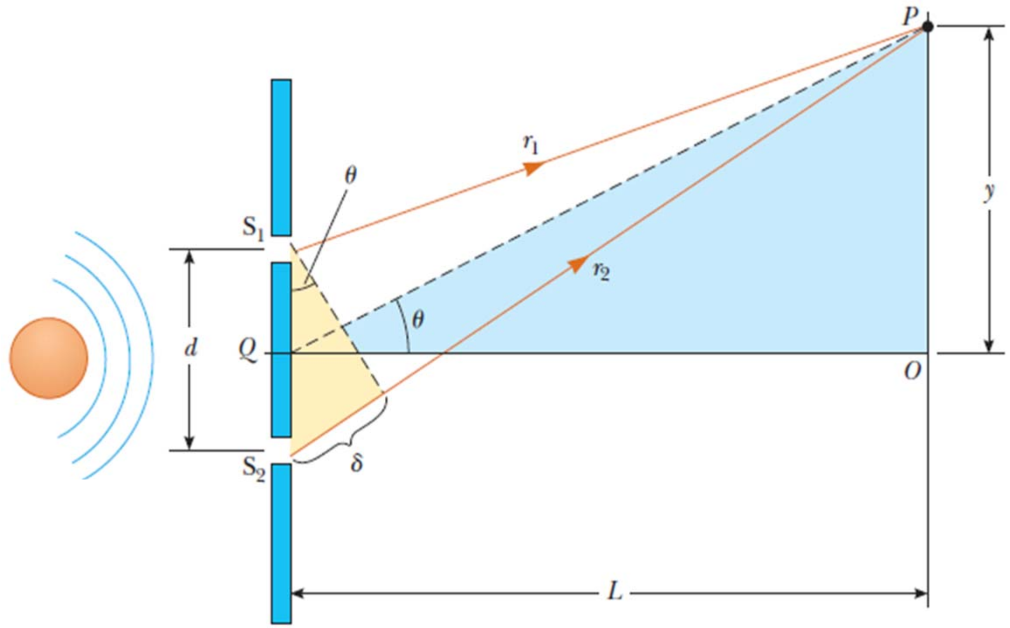
ordem da franja

p/ $L >> d$

Então, θ é pequeno

O triângulo OPQ

$$\operatorname{sen}\,\theta \cong \tan\,\theta = \frac{y}{L}$$



Interferência Construtiva: $\delta = d\,sen\theta = m\lambda$

$$\boxed{y_{bril} = \frac{\lambda L}{d} m}$$

Interferência Destrutiva: $\delta = d\,sen\theta = (m + ½)\lambda$

$$\boxed{y_{esc} = \frac{\lambda L}{d}(m + 1/2)}$$

Referências:

Sears e Zemansky; Física III, 12ª Edição, editora Pearson, 2012.

Serway; Física 3, 3ª Edição, editora LTC, 1992.