

# EXPERIMENTAR E APRENDER: UMA INTRODUÇÃO À DUALIDADE PARTÍCULA-ONDA

Vitorvani Soares

Richard Kohara

Instituto de Física — Universidade Federal do Rio de Janeiro

PMEF — Programa de Mestrado em Ensino de Física — IF-UFRJ

Abril de 2014

# 1 MOTIVAÇÃO

# 2 APARATO EXPERIMENTAL

# 3 CARACTERIZAÇÃO DA LUZ

# 4 CONCLUSÃO



Centros luminosos produzidos por uma rede de difração de  $n = 140$  linhas/mm, a uma distância do plano imagem igual  $D = 5$  cm.

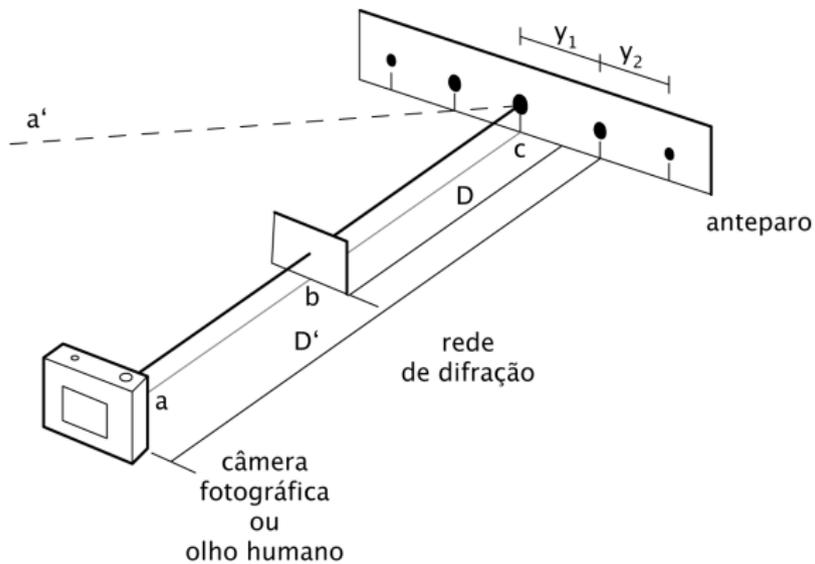
- Apresentação de conceitos, leis e fórmulas de maneira desarticulada.
  - A lei da interferência

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

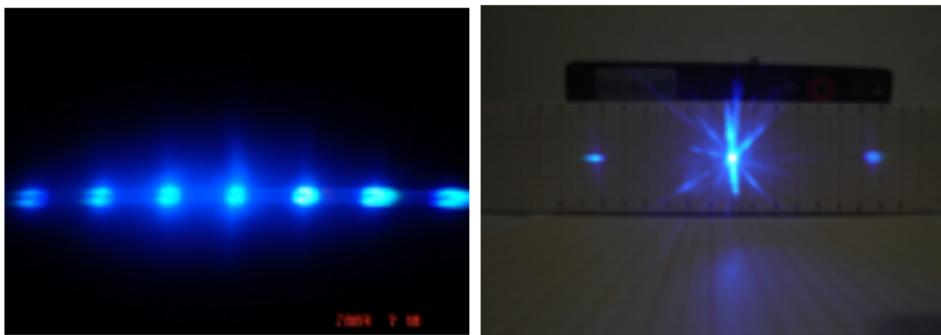
- O objetivo do trabalho é mostrar que podemos estabelecer esta lei a partir somente de um experimento em óptica e sem nenhum conhecimento teórico prévio destas relações.
- Este roteiro de trabalho pode servir como base para as atividades de um laboratório de ensino em óptica física.



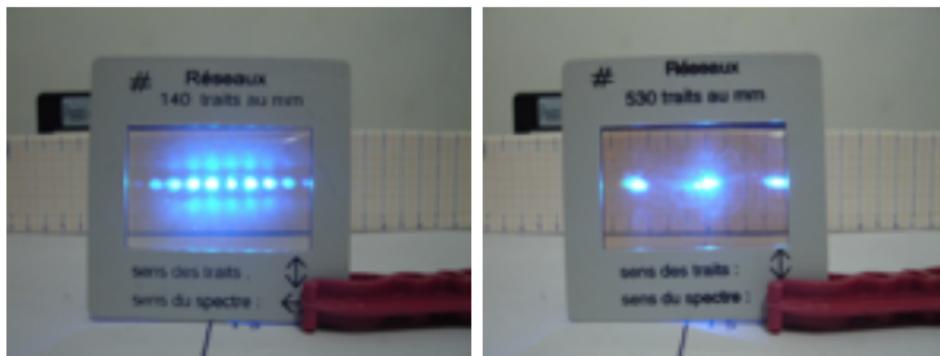
Ilustração da montagem para o experimento. Em primeiro plano, a câmara, em seguida temos a rede de difração e, ao fundo, o anteparo e a fonte luminosa.



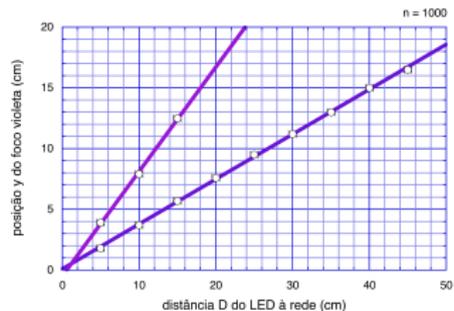
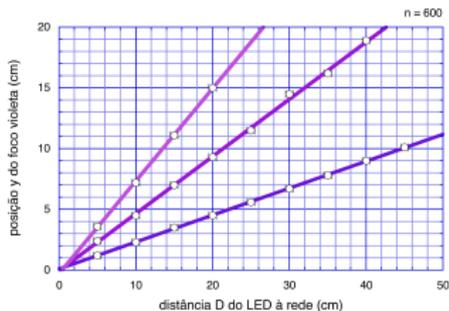
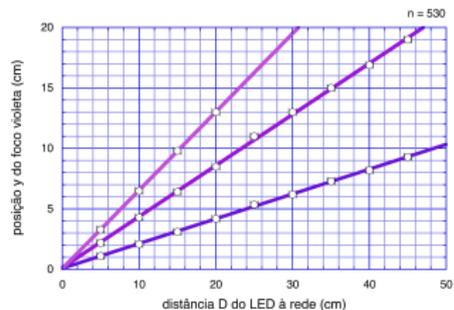
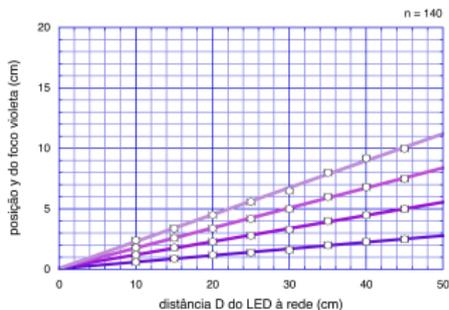
Representação esquemática da montagem para o experimento.



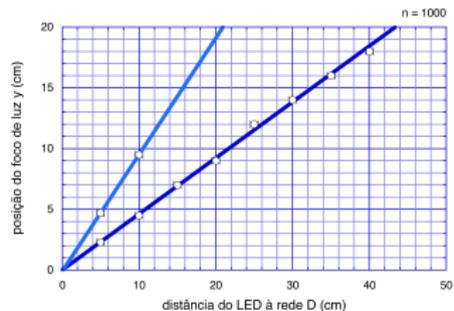
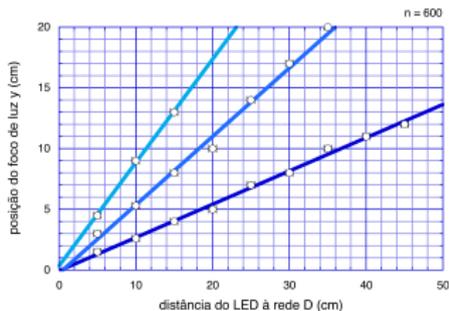
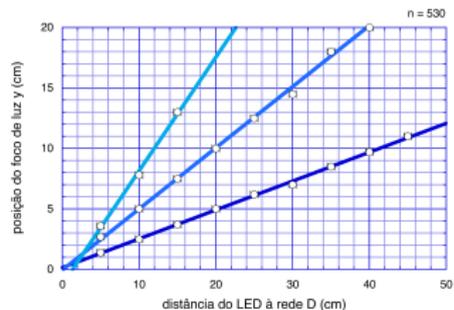
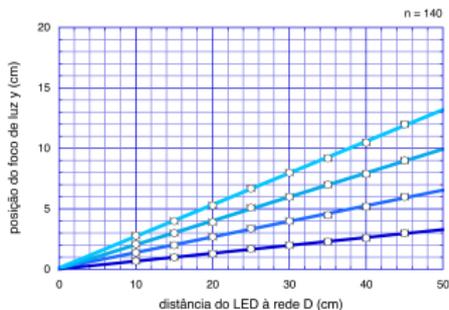
Centros luminosos para uma rede de mesmo numero de linhas por milímetro mas a diferentes distâncias da fonte luminosa (LED violeta). A da esquerda está a uma distância  $D = 5$  cm e a da direita  $D = 20$  cm.



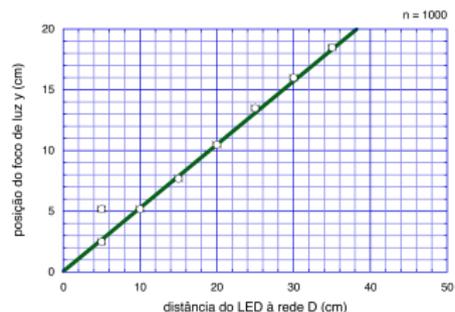
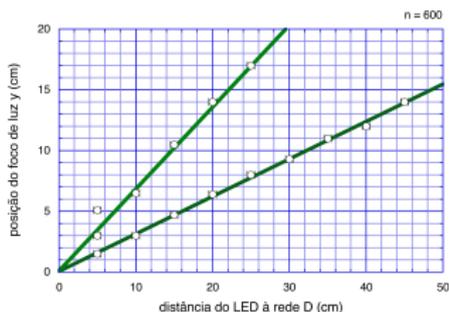
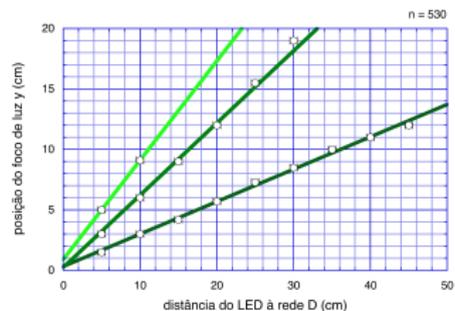
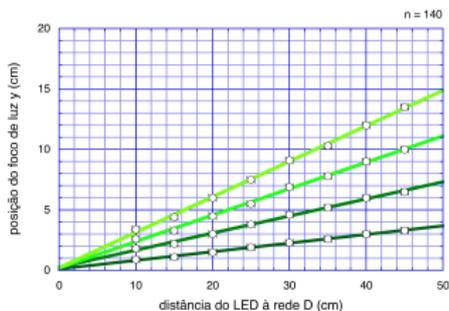
Centros luminosos para duas redes de numero de linhas por milímetro diferentes à uma mesma distância da fonte luminosa (LED violeta). A da esquerda  $n = 140$ linhas/mm e a da direita  $n = 530$ linhas/mm.



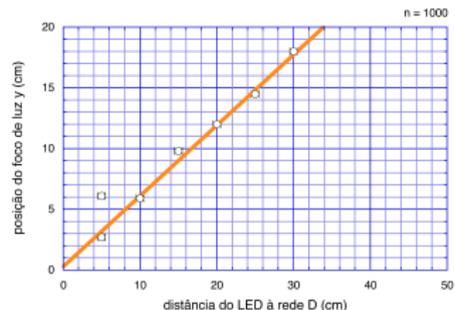
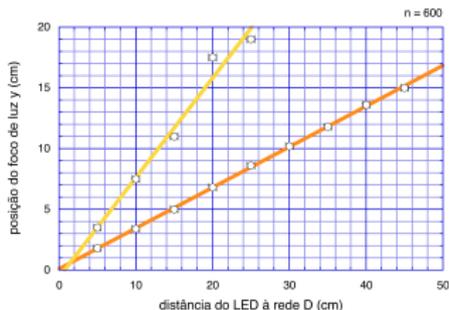
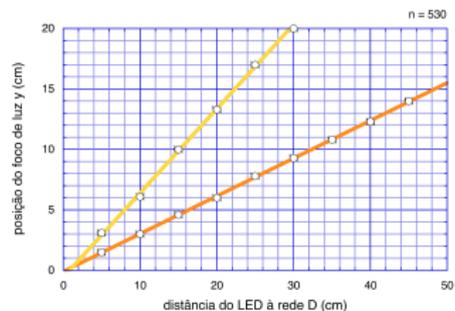
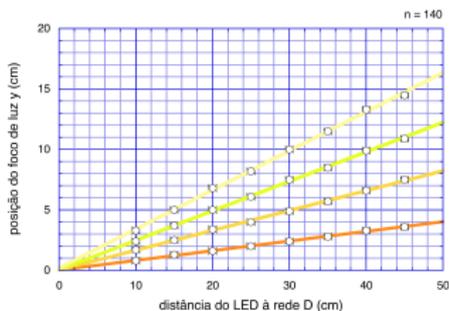
Representação da posição dos centros luminosos do LED violeta para diferentes distâncias da rede ao anteparo, para diferentes redes:  $n = 140$ ,  $530$ ,  $600$ ,  $1000$  linhas/mm.



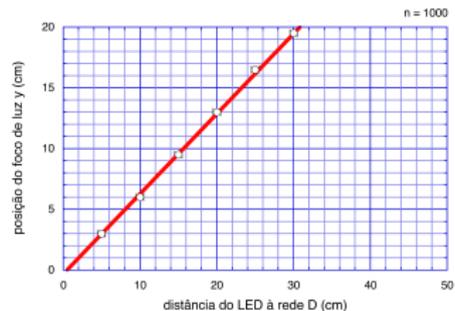
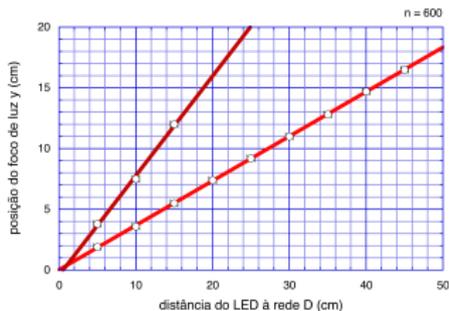
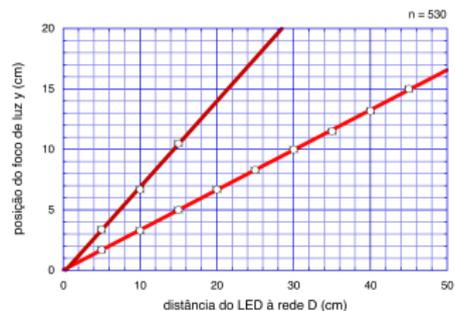
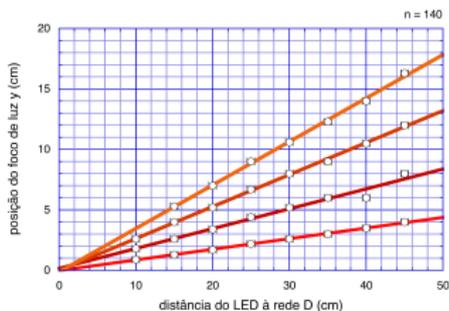
Representação da posição dos centros luminosos do LED azul para diferentes distâncias da rede ao anteparo, para diferentes redes:  $n = 140, 530, 600, 1000$  linhas/mm.



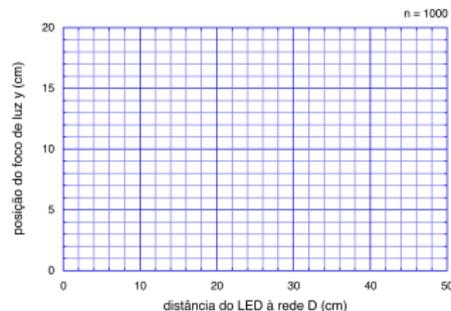
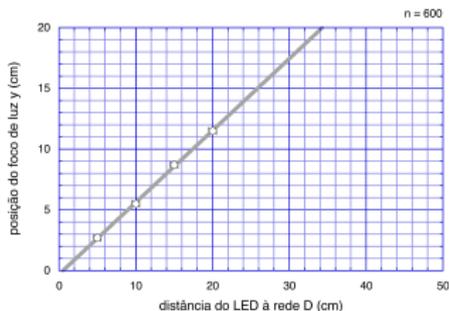
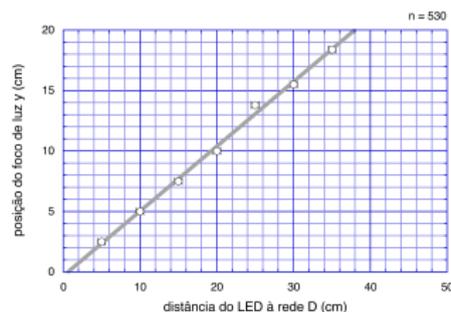
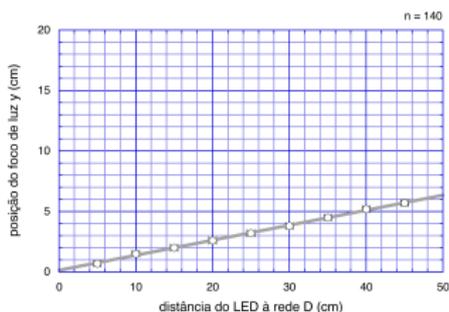
Representação da posição dos centros luminosos do LED verde para diferentes distâncias da rede ao anteparo, para diferentes redes:  $n = 140$ ,  $530$ ,  $600$ ,  $1000$  linhas/mm.



Representação da posição dos centros luminosos do LED amarelo para diferentes distâncias da rede ao anteparo, para diferentes redes:  $n = 140$ ,  $530$ ,  $600$ ,  $1000$  linhas/mm.



Representação da posição dos centros luminosos do LED vermelho para diferentes distâncias da rede ao anteparo, para diferentes redes:  $n = 140$ ,  $530$ ,  $600$ ,  $1000$  linhas/mm.

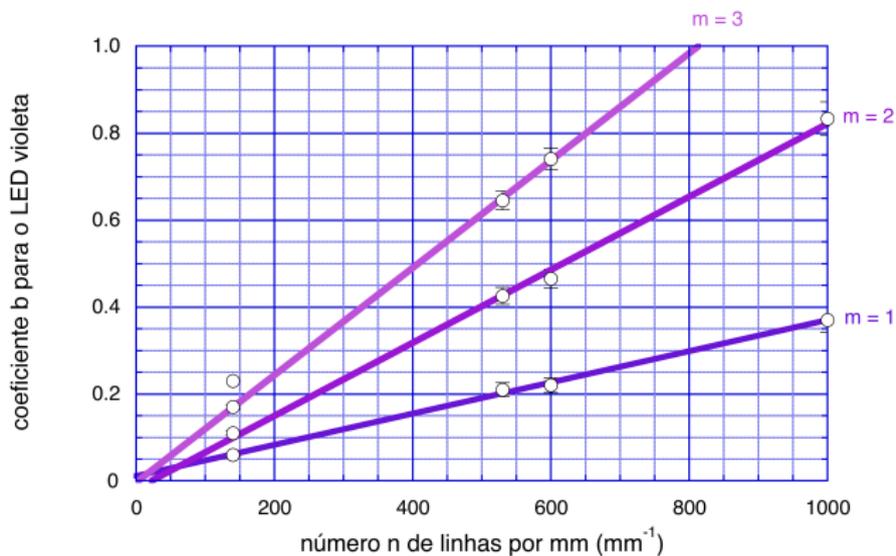


Representação da posição dos centros luminosos do LED infravermelho para diferentes distâncias da rede ao anteparo, para diferentes redes:  $n = 140$ ,  $530$ ,  $600$ ,  $1000$  linhas/mm. Observamos que a rede  $n=1000$  lpm já não revela mais os centros para a nossa câmara.

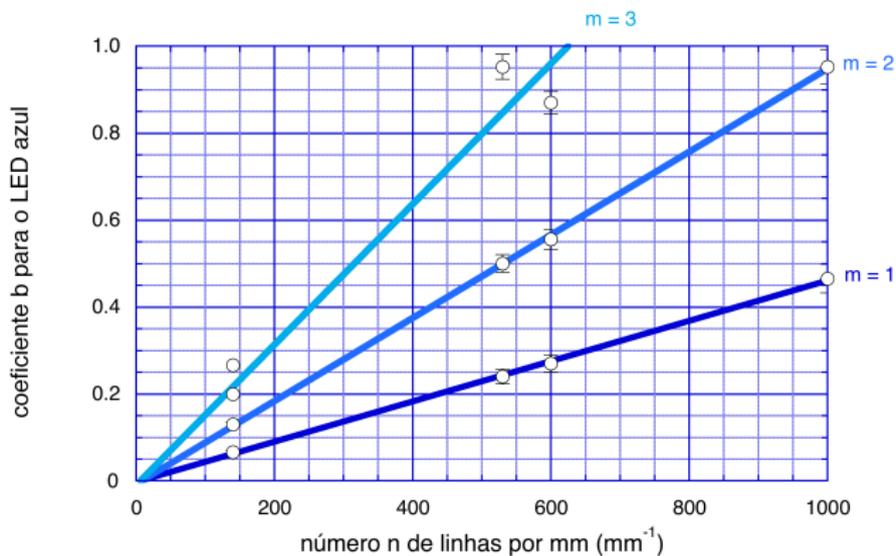
- A posição dos centros luminosos são linearmente proporcionais à distancia da rede a fonte.
- Os coeficientes angulares  $b$  destas relações dependem não somente da ordem  $m$  do centro considerado (se o primeiro, o segundo, e assim por diante) mas também do numero  $n$  de linhas por milímetro da rede empregada.
  - A distribuição dos centros luminosos:

$$y_m = b_{m,n} D$$

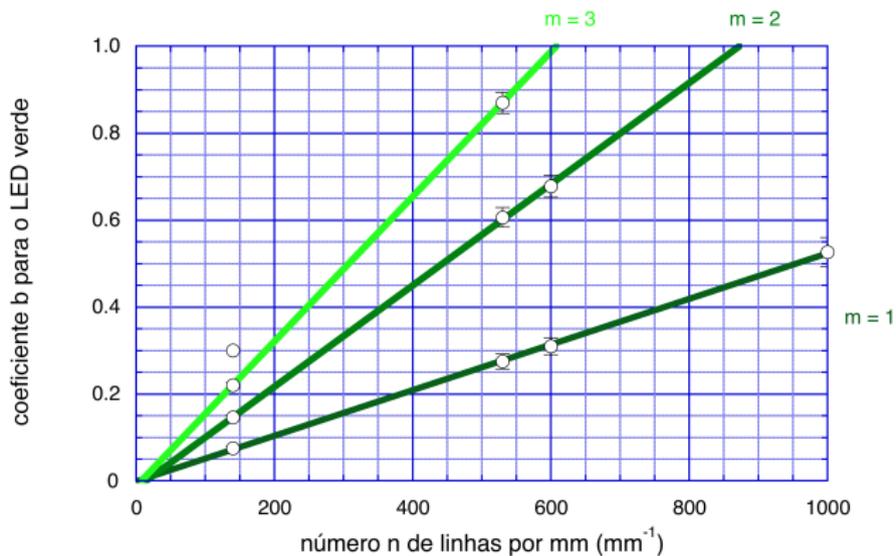
- Isto nos sugere analisar o comportamento destes coeficientes com o numero  $n$  de linhas da rede.



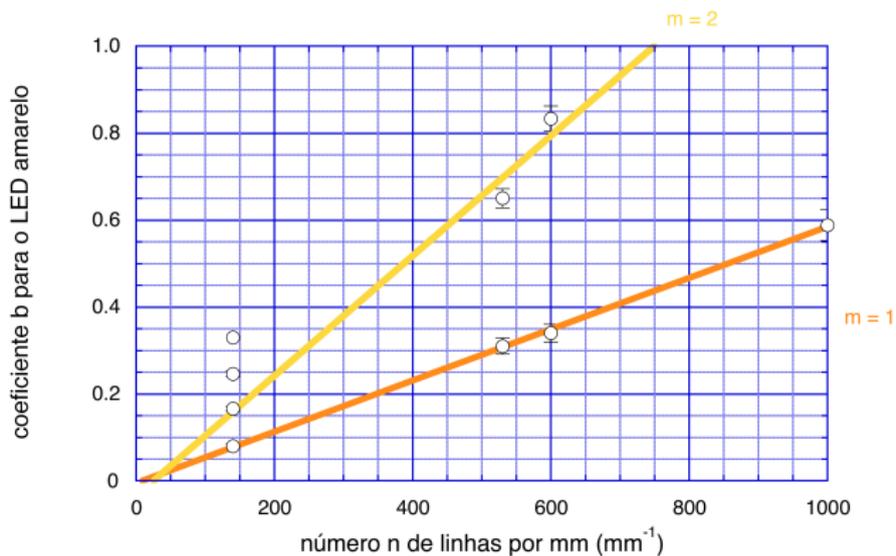
Coeficientes  $b$  para o violeta em função do número  $n$  de linhas por milímetro das diferentes redes. Observe o aumento linearmente proporcional dos coeficientes com o aumento do número  $n$ .



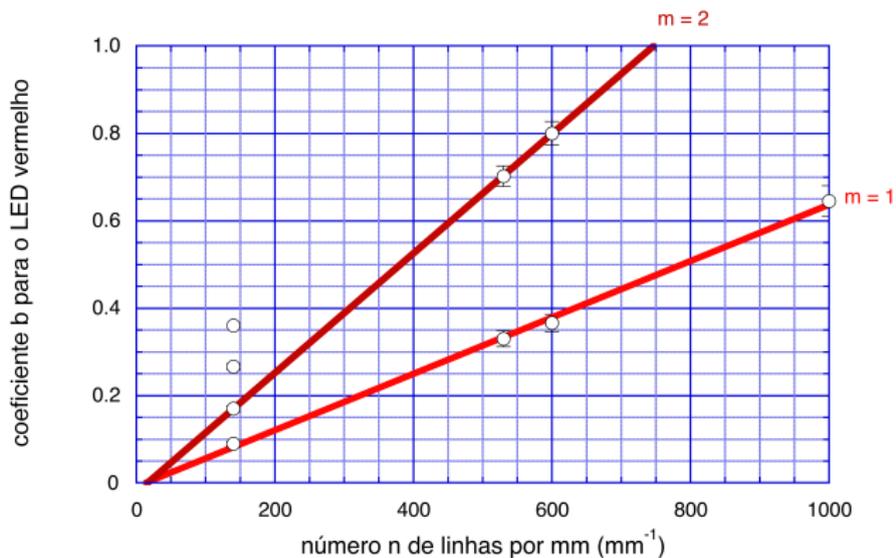
Coeficientes  $b$  para o azul em função do número  $n$  de linhas por milímetro das diferentes redes. Observe o aumento linearmente proporcional dos coeficientes com o aumento do número  $n$ .



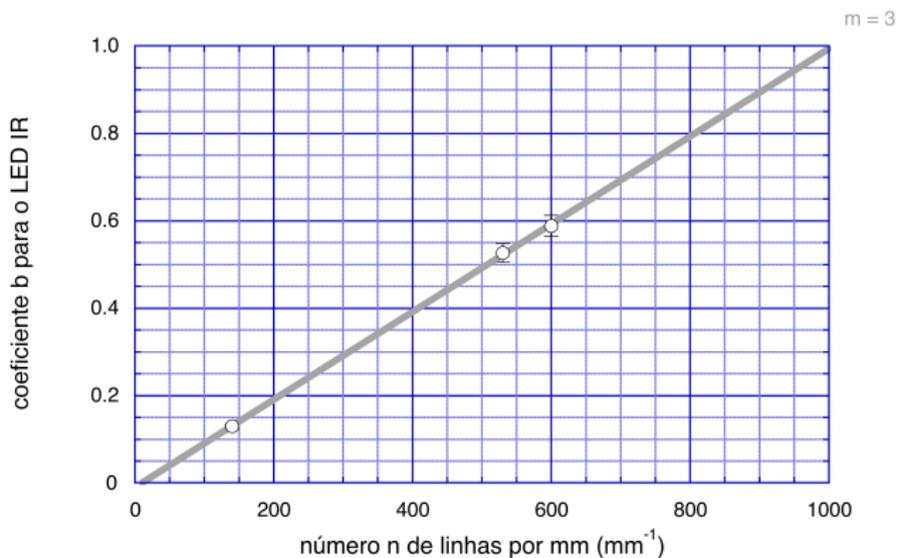
Coeficientes  $b$  para o verde em função do número  $n$  de linhas por milímetro das diferentes redes. Observe o aumento linearmente proporcional dos coeficientes com o aumento do número  $n$ .



Coeficientes  $b$  para o amarelo em função do número  $n$  de linhas por milímetro das diferentes redes. Observe o aumento linearmente proporcional dos coeficientes com o aumento do número  $n$ .



Coeficientes  $b$  para o vermelho em função do número  $n$  de linhas por milímetro das diferentes redes. Observe o aumento linearmente proporcional dos coeficientes com o aumento do número  $n$ .



Coeficientes  $b$  para o infravermelho em função do número  $n$  de linhas por milímetro das diferentes redes. Observe o aumento linearmente proporcional dos coeficientes com o aumento do número  $n$ .

- Os coeficientes angulares  $b_{m,n}$  destas relações dependem linearmente do número  $n$  de linhas por milímetro da rede empregada;
- O fator de proporcionalidade depende da ordem do centro luminoso considerado:



$$b_{m,n} = a_{m,n} n$$

- Isto nos sugere analisar o comportamento do coeficiente  $a_{m,n}/m$  e o número  $n$  de linhas da rede.

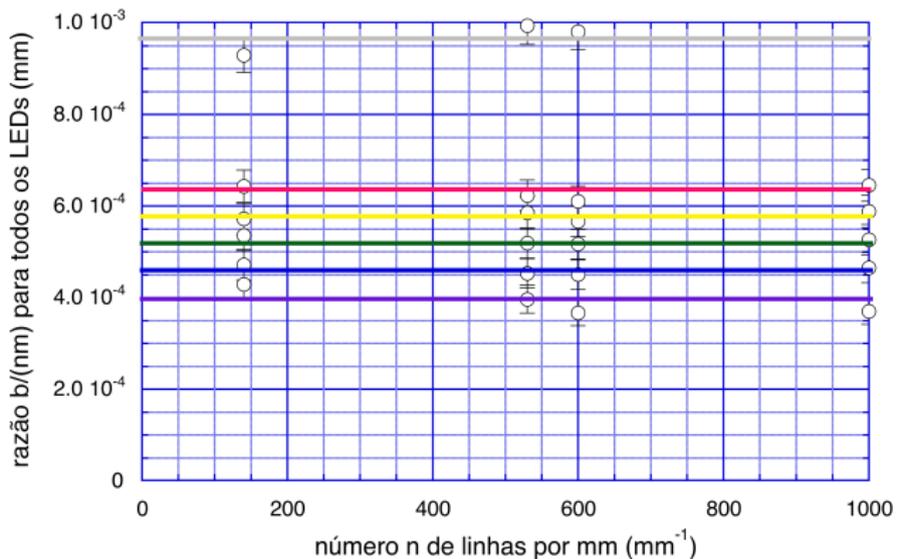


Gráfico da razão  $a_{m,n}/m$  vs. número  $n$  de linhas por milímetro da rede. Observe que a razão  $a_{m,n}/m$  não depende de  $m$  ou de  $n$ .

- A razão  $a_{m,n}/m$  não depende de  $m$  ou de  $n$ ;
- A razão  $a_{m,n}/m = \lambda$  é uma característica da cor do LED considerado e tem dimensão de comprimento:

- $$a_{m,n} = \lambda m$$

- $$y_m \approx b_{m,n} D = a_{m,n} n D = \lambda m n D$$

- $$\frac{1}{n} \frac{y_m}{D} \approx m \lambda$$

- $$d \tan \theta_m \approx m \lambda$$

## Conclusão:

- Newton, apesar de não ser taxativo, insinua em seus escritos que a luz poderia ser constituída de partículas diminutas de tal forma que estas partículas compõem os raios luminosos e interagem com o éter e as partes sólidas deste último começariam a vibrar.
- “[. . .] estas partículas de luz seriam produzidas no interior da fonte luminosa sem nenhum intervalo perceptível de tempo”.
- Elas se propagariam no meio etéreo e após algum tempo alcançariam uma velocidade enorme, constante e finita, como demonstravam as observações de Roemer.

I. Newton, “A hipótese da luz – uma hipótese explicativa das propriedades da luz sobre as quais discorrem meus diversos artigos”, in: I. B. Cohen e R. Westfall (eds.), *Newton: textos, antecedentes, comentários*. Rio de Janeiro:Contraponto:EdUERJ, 2002, págs. 30-34; I.

Newton, *Opticks: Or a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections & Colours of Light-Based on the Fourth Edition London, 1730*, New York: Dover, 1952, 1979.

- Deste modo, podemos acrescentar então que estas partículas alcançariam um anteparo com uma frequência  $f$  dada pelo inverso do tempo de propagação para percorrer a distancia  $\lambda$ :



$$f = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda}.$$



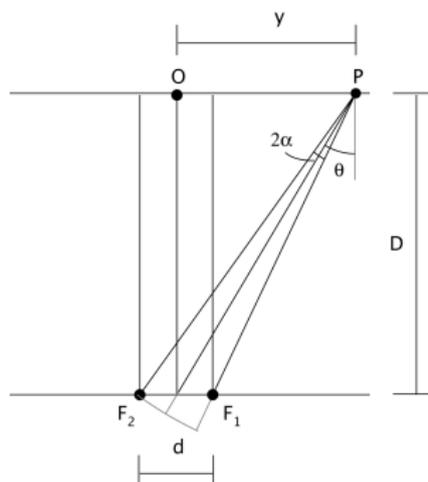
$$\lambda \approx 1000 \text{ nm} \quad c \approx 10 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$$



$$f \approx 1 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

- Com as intensidades usuais, o olho humano não seria capaz de distinguir os choques sucessivos destas partículas de luz contra a tela onde a imagem é formada.

- As partículas de luz transportariam então momento e energia e o desvio da luz ao atravessar um meio para outro seria consequência da interação dessas partículas com os componentes do meio considerado. As figuras de reflexão, refração e interferência seriam o resultado dos múltiplos desvios das partículas de luz ao atravessar o meio permeado de éter.
- A autoridade de Newton fez prevalecer este modelo até o início do século XVIII. Entretanto, esta não é a única maneira de considerarmos o problema. Como foi revelado por Euler e Fresnel, o modelo ondulatório também permite descrever o feixe luminoso como um tubo percorrido por oscilações transversais na direção do feixe retilíneo. O termo “interferência” teria então na óptica ondulatória o significado de perturbação da superposição da energia dos diferentes feixes luminosos em uma dada localização espacial.



Representação esquemática para a análise do experimento de interferência de ondas. O ponto  $O$  representa o ponto luminoso central sobre o anteparo,  $F_1$  e  $F_2$  são as fontes a partir da rede e o ponto  $P$  é onde se forma outro centro luminoso sobre o mesmo anteparo a uma distancia  $y$  a partir de  $O$ . A distância entre as fontes é  $d$  e o anteparo está a uma distância  $D$  da rede.

$$a_1 = A \operatorname{sen} \left[ 2\pi f \left( t - \frac{d_1}{c} \right) \right],$$
$$a_2 = A \operatorname{sen} \left[ 2\pi f \left( t - \frac{d_2}{c} \right) \right].$$

$$F_1 P = d_1,$$

$$F_2 P = d_2.$$

Superposição:

$$\begin{aligned} a &= a_1 + a_2 \\ &= A \operatorname{sen} \left[ 2\pi f \left( t - \frac{d_1}{c} \right) \right] + A \operatorname{sen} \left[ 2\pi f \left( t - \frac{d_2}{c} \right) \right] \\ &= 2A \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \frac{(d_2 - d_1)}{2} \right] \times \operatorname{sen} \left[ 2\pi f t - \frac{2\pi}{\lambda} \frac{(d_2 + d_1)}{2} \right] \end{aligned}$$

Amplitude:

$$\begin{aligned} A_0 &= 2A \left| \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \frac{(d_2 - d_1)}{2} \right] \right| \\ &= 2A \left| \cos \left( \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \right| \end{aligned}$$

Diferença de fase:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{(d_2 - d_1)}{\lambda}$$

Intensidade luminosa:

$$I \propto (A_0)^2 = 4A^2 \left| \cos \left( \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \right|^2$$

Quando  $\Delta\varphi$  for igual a um múltiplo ímpar de  $\pi$  obtemos intensidade nula:

$$\Delta\varphi = (2m + 1) \pi$$

Quando  $\Delta\varphi$  for igual a um múltiplo par de  $\pi$  obtemos intensidade máxima:

$$\Delta\varphi = (2m) \pi$$

Portanto, a diferença de fase é definida pela diferença de caminhos luminosos entre os dois raios incidentes sobre o ponto  $y_m$ . Deste modo, quando a diferença de caminhos for um múltiplo inteiro do comprimento de onda  $\lambda$ , obtemos

$$d_2 - d_1 = m\lambda$$

e obteremos o máximo de intensidade luminosa no ponto considerado.

Da geometria do problema, temos que esta diferença depende da distância perpendicular da linha que une as fontes luminosas e o ponto  $P$ :

$$\begin{aligned}d_2 - d_1 &= \frac{D}{\cos(\theta + \alpha)} - \frac{D}{\cos(\theta - \alpha)} \\ &= D \left[ \frac{2\operatorname{sen}\theta \sin \alpha}{\cos(\theta + \alpha) \cos(\theta - \alpha)} \right].\end{aligned}$$

Para  $\alpha \approx 0$  (distância pequena entre as fontes:  $d \ll D$ ) temos então que

$$\cos(\theta + \alpha) \approx \frac{D}{\sqrt{D^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2}}$$

$$\cos(\theta - \alpha) \approx \frac{D}{\sqrt{D^2 + (y - \frac{d}{2})^2}}$$

$$\text{sen}\alpha \approx \frac{d/2}{\sqrt{D^2 + (y + \frac{d}{2})^2}}$$

$$\text{sen}\theta \approx \frac{y}{\sqrt{D^2 + y^2}}$$

Para  $\alpha \approx 0$  e  $\theta \approx 0$  (centros luminosos não muito distantes do máximo central) temos então que  $y$  e  $d$  são pequenos comparados com a distancia  $D$ . Deste modo, os máximos de intensidade serão dados quando

$$d_2 - d_1 = m\lambda = D \left[ \frac{2\text{sen}\theta \sin \alpha}{\cos(\theta + \alpha) \cos(\theta - \alpha)} \right] \approx d \text{sen}\theta_m \approx d \frac{D}{y_m}.$$

Para  $\alpha \approx 0$  e  $\theta \gg 0$  (centros luminosos significativamente afastados do centro) ainda teremos  $d$  pequeno comparado com a distancia  $D$ , mas agora não poderemos ignorar  $y$ . Deste modo, os máximos de intensidade serão dados quando

$$d_2 - d_1 = m\lambda = D \left[ \frac{2\sin\theta \sin\alpha}{\cos(\theta + \alpha) \cos(\theta - \alpha)} \right] \approx d \sin\theta_m \approx d \frac{y_m}{\sqrt{D^2 + y_m^2}}.$$

Podemos dizer que então que a superposição das ondas emitidas a partir das fontes sobre a rede produzem a figura de interferência e a representação ondulatória é uma representação adequada para a luz.

## Resumindo:

- Apresentação de conceitos, leis e fórmulas de maneira articulada (observação – modelo).
  - A lei da interferência

$$m\lambda = d \operatorname{sen} \theta_m$$

- Podemos estabelecer esta lei a partir somente de um experimento em óptica e sem nenhum conhecimento teórico prévio destas relações.
- Este roteiro de trabalho pode servir como base para as atividades de um laboratório de ensino em óptica física.



Kohara, R.Y..H

*Experimental e aprender: uma introdução à dualidade partícula-onda.*

Rio de Janeiro: Projeto de Instrumentação para o Ensino de física — Instituto de física/UFRJ, 2011.