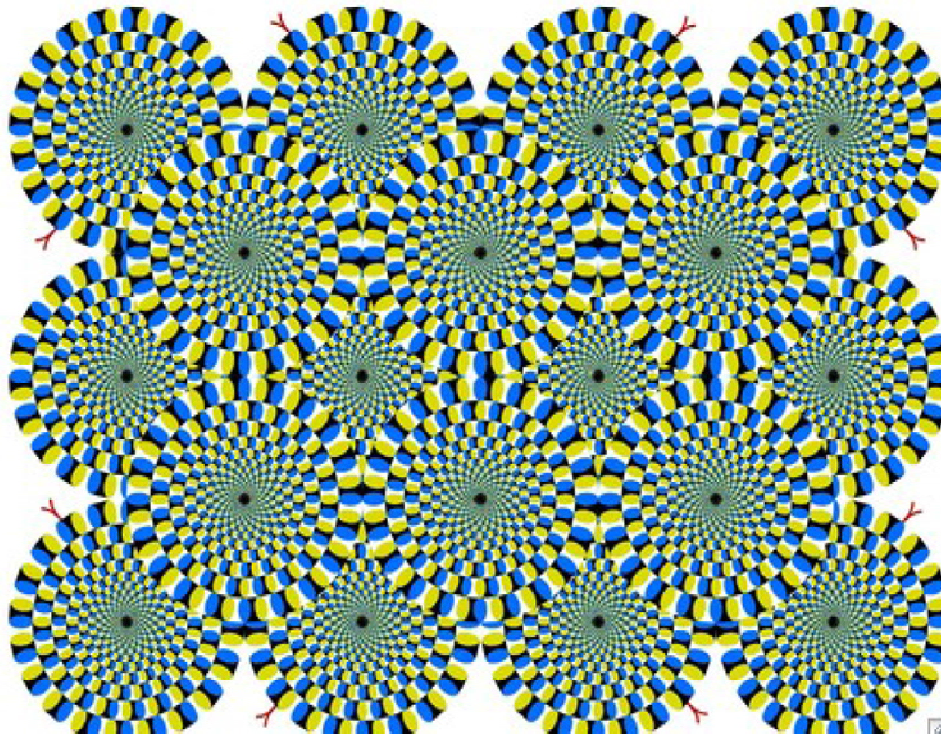


# A Óptica e a Natureza Ondulatória da Luz



**Eduardo Ribeiro de Azevedo**

Instituto de Física de São Carlos  
Grupo de Ressonância Magnética Nuclear  
Email: [azevedo@ifsc.usp.br](mailto:azevedo@ifsc.usp.br)

## Uma definição de Óptica:

A **óptica** é um ramo da **Física** que estuda a **luz** ou, mais amplamente, a **radiação eletromagnética**, visível ou não. A óptica explica os fenômenos de **reflexão**, **refração** e **difração**, a interação entre a **luz** e o meio, entre outras coisas.

## Como abordar os fenômenos Ópticos:

**Sem se preocupar com a natureza ondulatória da luz:** Neste caso a luz é tratada como um raio que se propaga de um ponto a outro do espaço, obedecendo a leis específicas. Muitos fenômenos envolvendo a luz podem ser explicados neste contexto, geralmente usando somente previsões sobre a geometria (caminhos) dos raios de luz. Por isso, nesta abordagem a óptica é conhecida como **Óptica geométrica**. Cientistas importante relacionados a essa visão são: Newton, Fermat, Snell e Descartes.

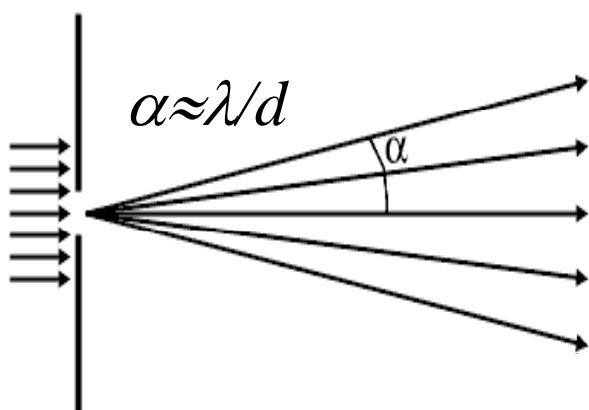
**Considerando a natureza ondulatória da luz:** : O caráter da luz como onda é levado em conta de modo a explicar muitos fenômenos que não poder ser explicados pela óptica geométrica. Neste caso estamos no campo da **Óptica Ondulatória**, que é mais geral e Engloba a Óptica Geométrica. Alguns, cientistas importante relacionados a essa visão são: Huygens, Fresnell, Fraunhofer, Brewster, Malus .

**Considerando a luz como radiação eletromagnética:** A luz é considerado como uma onda como onda decorrente de flutuações campos elétricos e magnéticos e pode ser descrita pelas leis do eletromagnetismo clássico ou quântico. Neste caso a Óptica torna-se um ramo do eletromagnetismo e é usualmente referida como **Óptica Física**. Alguns, cientistas importante relacionados a essa visão são: Maxwell, Lorentz, Einstein .

## Quando usar uma abordagem ou outra?



**Óptica Geométrica:** Quando a luz atravessa orifícios ou barreiras com dimensões ( $d$ ) muito maiores que seu comprimento de onda ( $\lambda$ ) não manifesta seu caráter ondulatório e efeitos como a difração podem ser ignorados. A luz pode ser representada por raios que em um meio uniforme se propagam em linha reta com velocidade  $c/n$ .



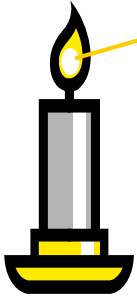
**Óptica Ondulatória:** Quando a luz atravessa orifícios ou barreiras com dimensões ( $d$ ) da ordem do seu comprimento de onda ( $\lambda$ ) manifesta-se seu caráter ondulatório em fenômenos como a difração.

## Óptica Geométrica



# Óptica Geométrica

A luz é tratada como um raio, isto é, um feixe de luz extremamente estreito.



Em um meio material homogêneo a luz se propaga em linha reta com velocidade

$$v = \frac{c}{n}$$

$c$  : velocidade da luz no vácuo  
 $c = 300000 \text{ km/s}$

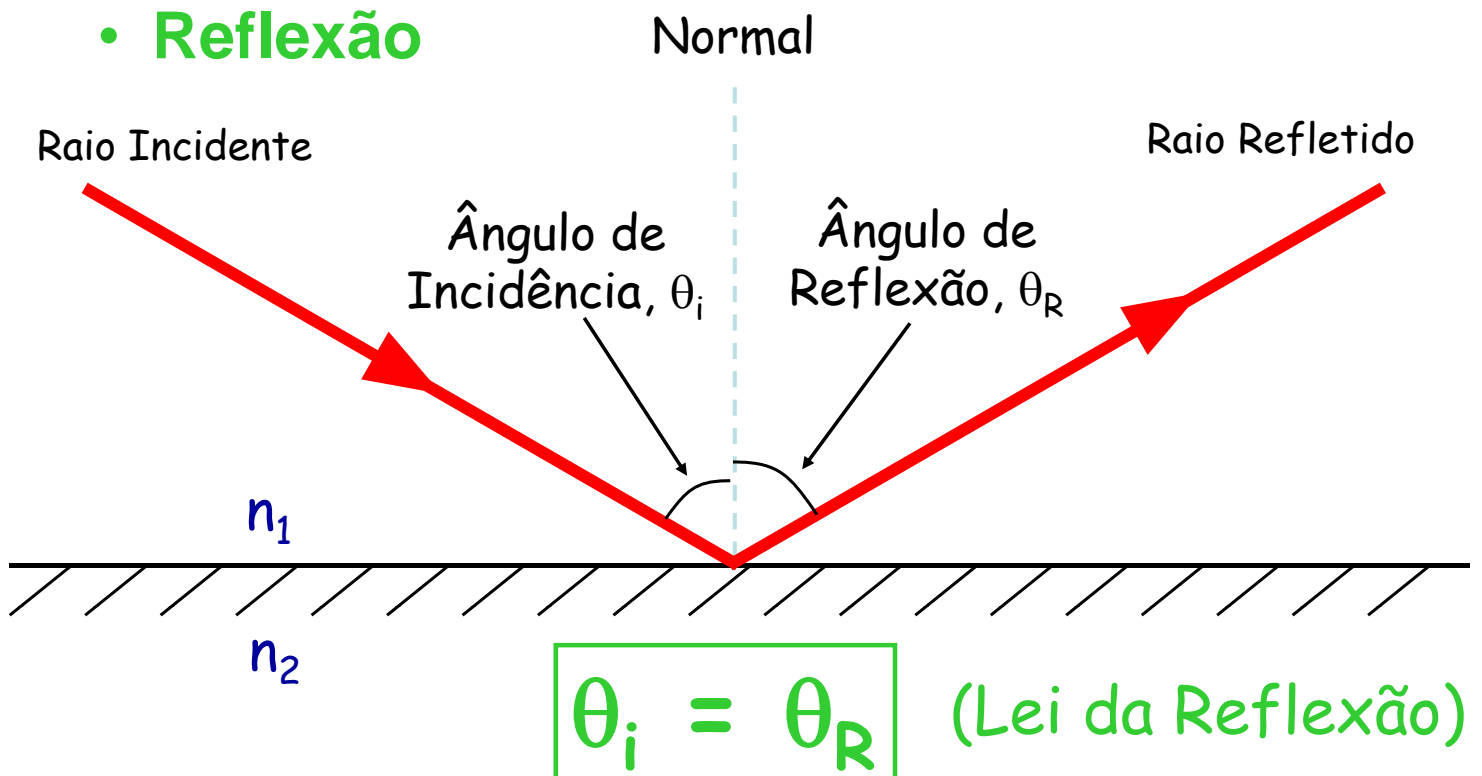
$n$  Além disso a cor da luz é outra característica da luz

$n$  : índice de refração do meio. É uma propriedade do meio

Ex:  $n_{\text{ar}} = 1,00029$ ,  $n_{\text{água}} = 1,33$ ,  $n_{\text{vidro comum}} = 1,51$   
( $T=288 \text{ K}$ ,  $P = 1 \text{ atm}$ )

## Leis Básicas da Óptica Geométrica

### • Reflexão



Toda vez que um raio de luz incide em uma meio com índice de refração diferente daquele meio de onde ele veio acontece reflexão de luz. A quantidade de luz refletida depende da refletividade da superfície ( Em um espelho perfeito 100% da luz é refletida, no vidro comum ~ 4% da luz é refletida)

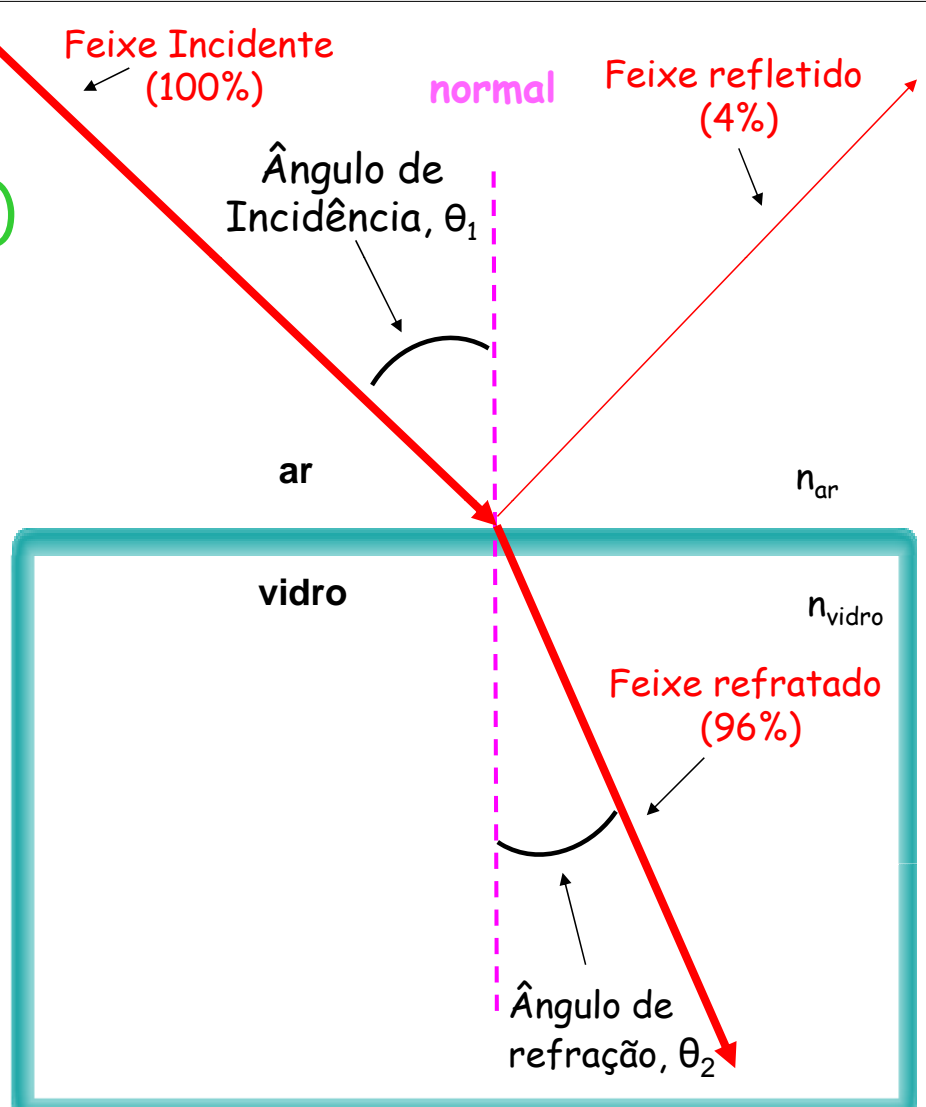


# Refração (Desviando a luz)

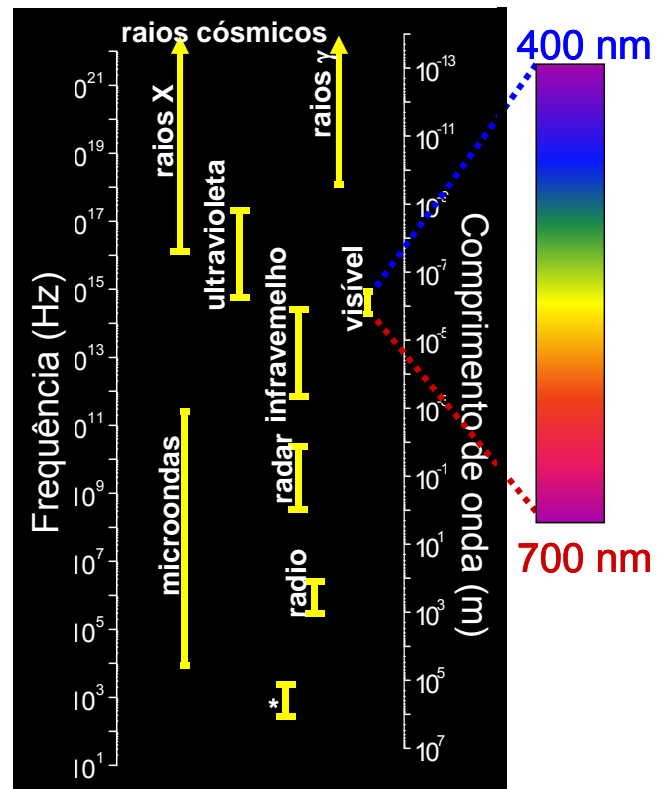
Toda vez que a luz é transmitida de um meio para outro com índice de refração diferente ela muda sua velocidade de propagação, o que acarreta em uma mudança em sua direção de acordo com a Lei de Snell.

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2$$

Lei de Snell



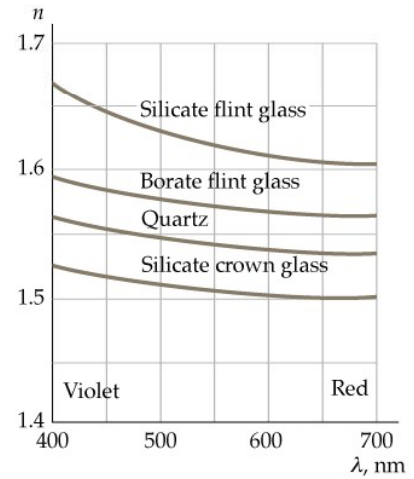
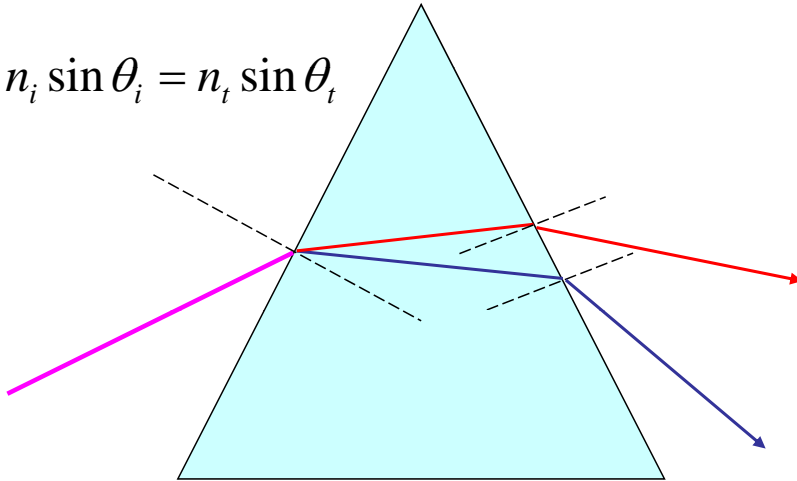
## Espectro Eletromagnético



- Azul 0.4  $\mu\text{m}$
- Verde 0.5  $\mu\text{m}$
- Vermelho 0.6  $\mu\text{m}$

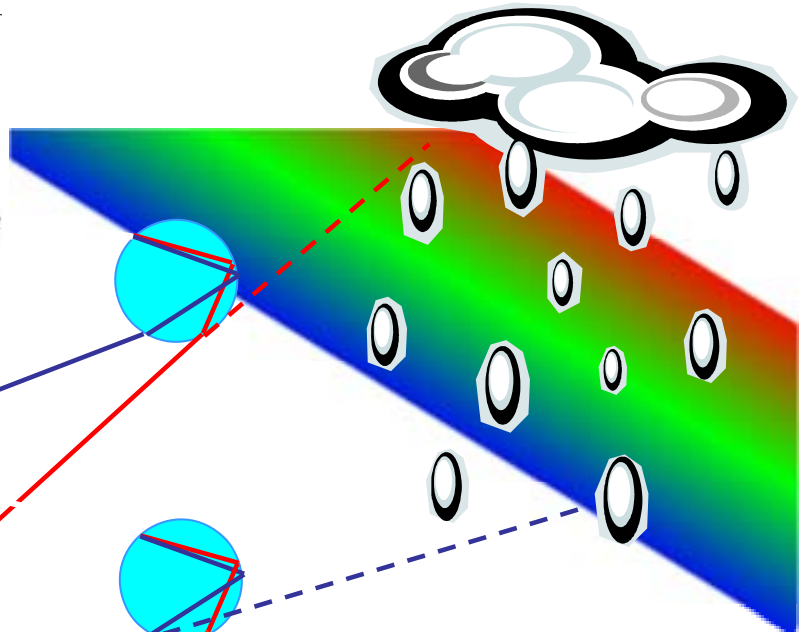
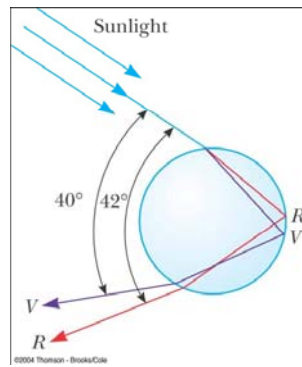
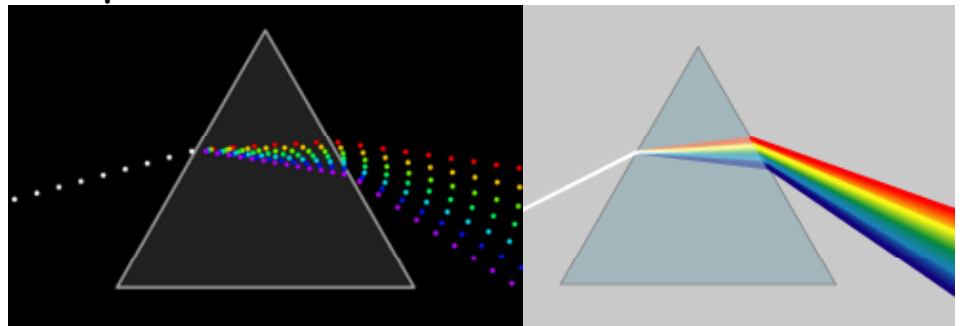
# Dispersão da Luz por Prismas

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

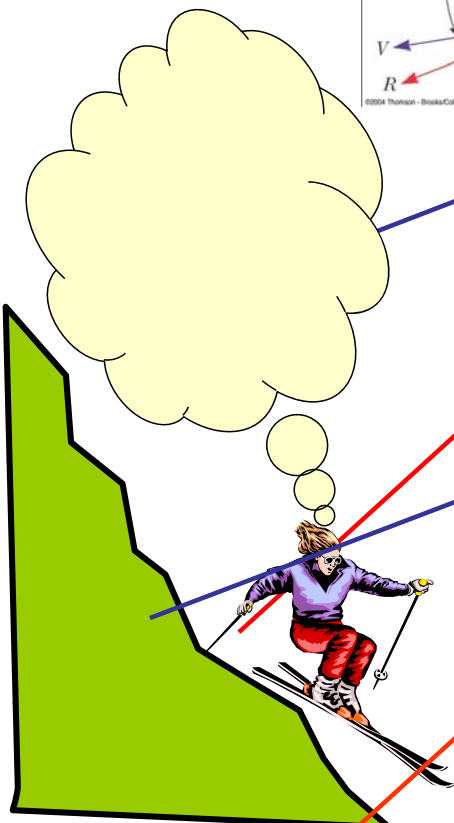


Desvio depende do comprimento de onda , i.e.  $n = n(\omega)$

É possível separar os diversos comprimentos de onda (cores) da luz utilizando um prisma.



O esquiador vê vermelho no topo do arco íris e azul em baixo. Arco-íris são os exemplos mais belos de dispersão da luz na natureza.



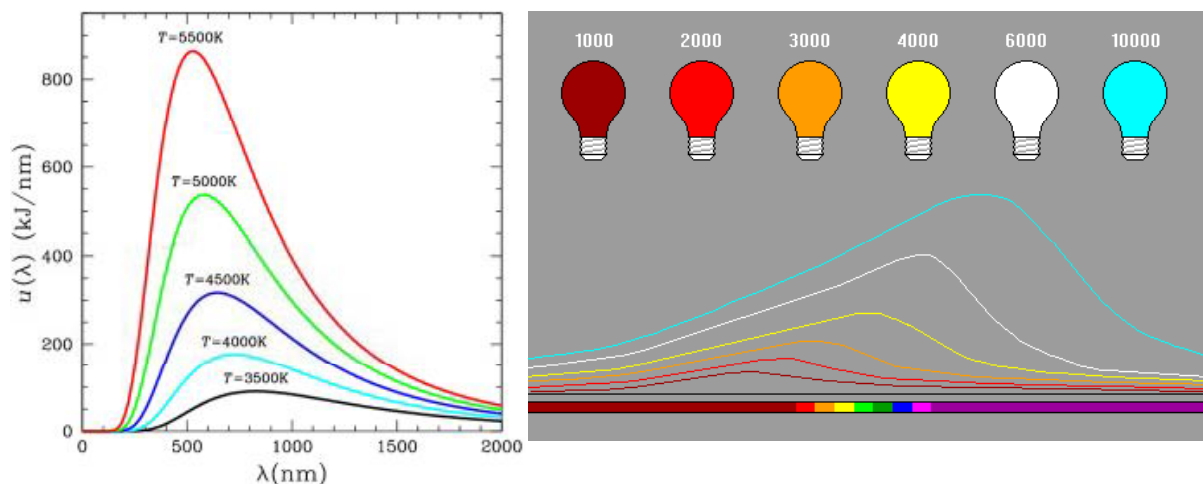
# Algumas Fontes de Luz

## Fontes Incandescentes:

Origem da Luz: Oscilação de cargas em um material devido ao efeito de temperatura

Espectro da Luz: contínuo (emissão em banda larga: todas as cores).

Ex: Luz solar, lâmpada incandescente.



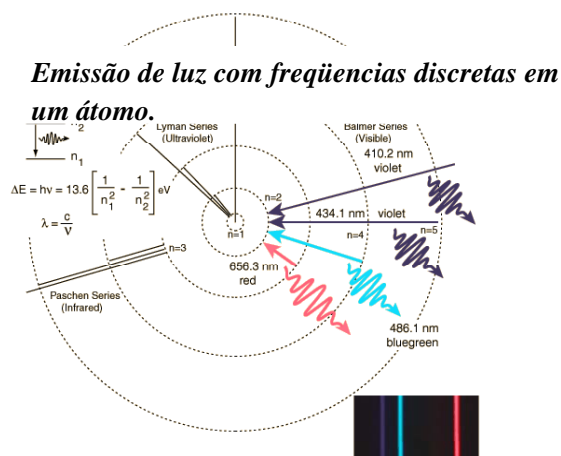
# Algumas Fontes de Luz

## Fontes Fluorescentes:

Origem da Luz: Transições atômicas.

Espectro da Luz: discreto, com a presença de apenas algumas cores definidas que dependem do tipo de material (átomo) que e feito a lâmpadas.

Ex: Lâmpadas espectrais, lâmpada fluorescente doméstica.



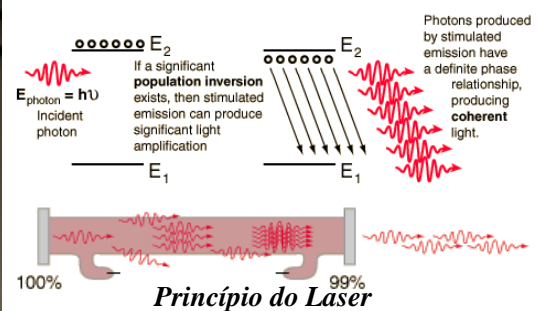
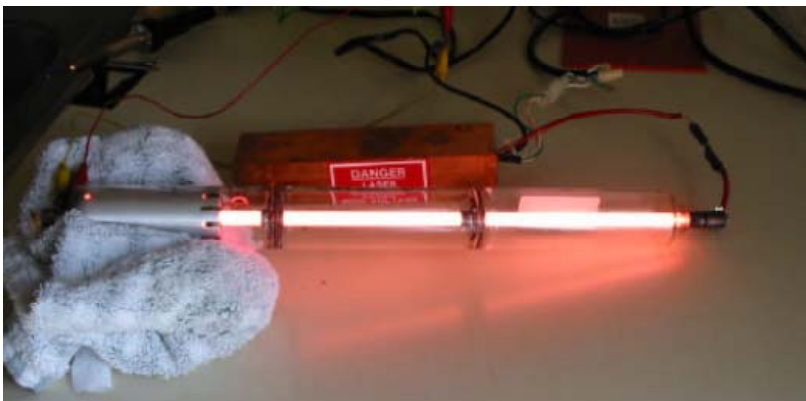
# Algumas Fontes de Luz

## Fontes LASER:

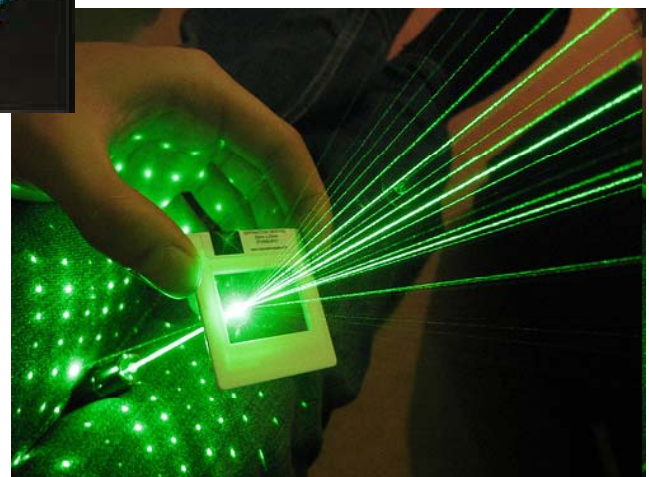
Origem da Luz: Transições atômicas via emissão estimulada de radiação

Espectro da Luz: monocromático (somente uma cor bem definida)

Ex: LASER de gases, LASER de estado sólidos, LASER químico.



# A Natureza ondulatória da Luz

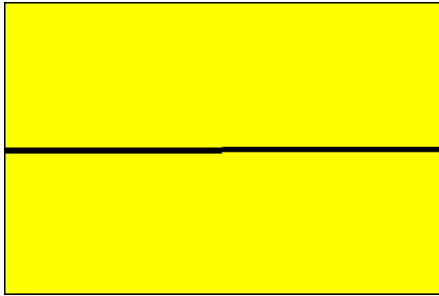




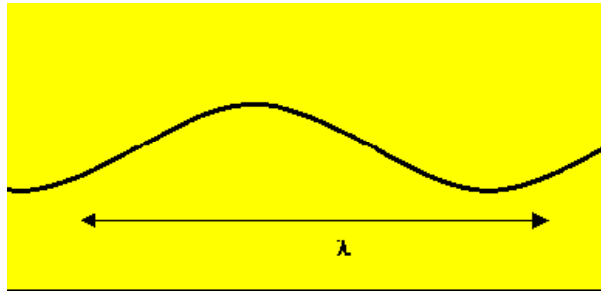
# Relembrando: O que é uma onda?

É uma perturbação que se move ao longo do espaço e do tempo transportando energia e quantidade de movimento de um ponto a outro, sem porém que haja transporte de matéria.

Exemplos:



Um pulso propagante



Uma onda senoidal propagante

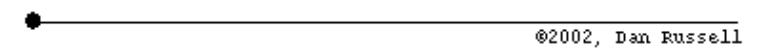


A onda não transporta matéria

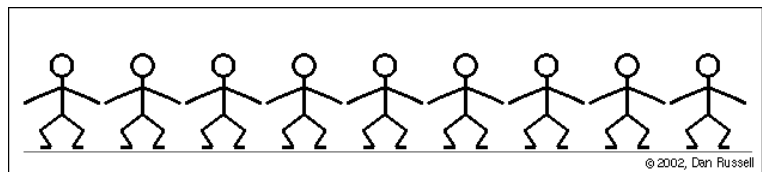
## Ondas Mecânicas

Transversais:

Perturbação é perpendicular a propagação



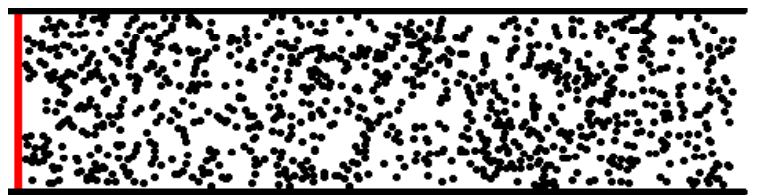
©2002, Dan Russell



©2002, Dan Russell

Longitudinais:

Perturbação é paralela a propagação

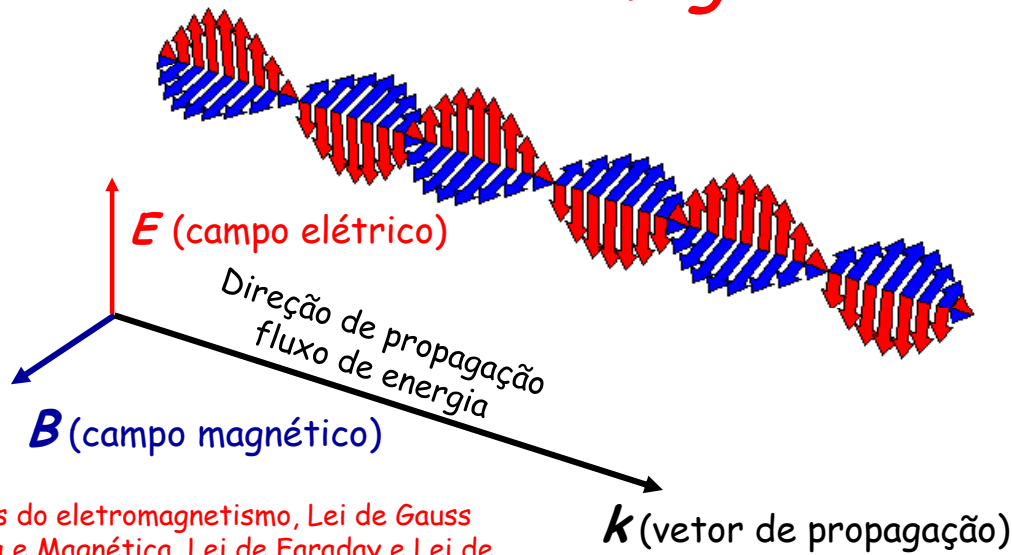


©2002, Dan Russell



Todas as onda Mecânicas Necessitam de um meio para se propagar  
Ex: Som se propaga no ar; Ondas do mar se propagam na água, etc.

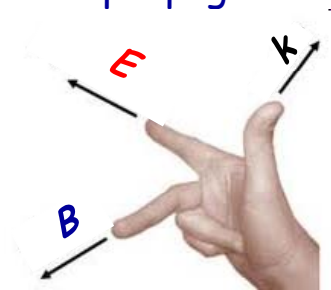
# Ondas Eletromagnéticas



(das leis do eletromagnetismo, Lei de Gauss Elétrica e Magnética, Lei de Faraday e Lei de Ampere-Maxwell - Equações de Maxwell)

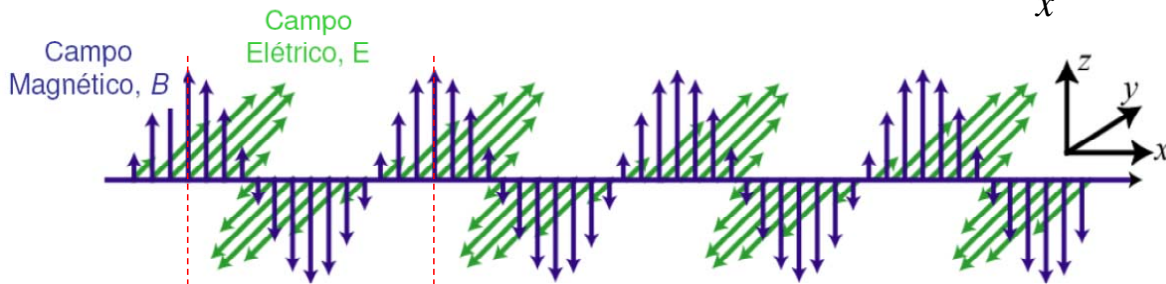
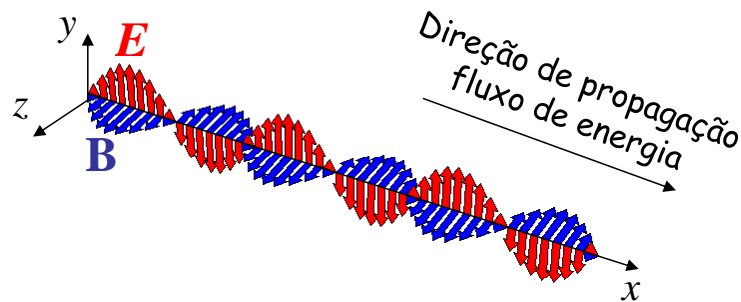
- Ondas Eletromagnéticas são **sempre** Transversais
- Ondas Eletromagnéticas **não** necessitam de meio para se propagar (podem se propagar no vácuo)
- $E$ ,  $B$  e  $k$  são **sempre** perpendiculares entre si com

$$E = cB$$



## Luz é uma onda eletromagnética

(Oscilações no tempo e no espaço transversais de Campos Elétricos e Magnéticos que se propagam e transportam energia em uma certa direção)



$\lambda$ , comprimento de onda (período da oscilação espacial)

$T$ , período (período da oscilação temporal)

Frequência (cor) :  $f$

$$f = \frac{1}{T} \text{ e } \lambda = \frac{c}{f}$$

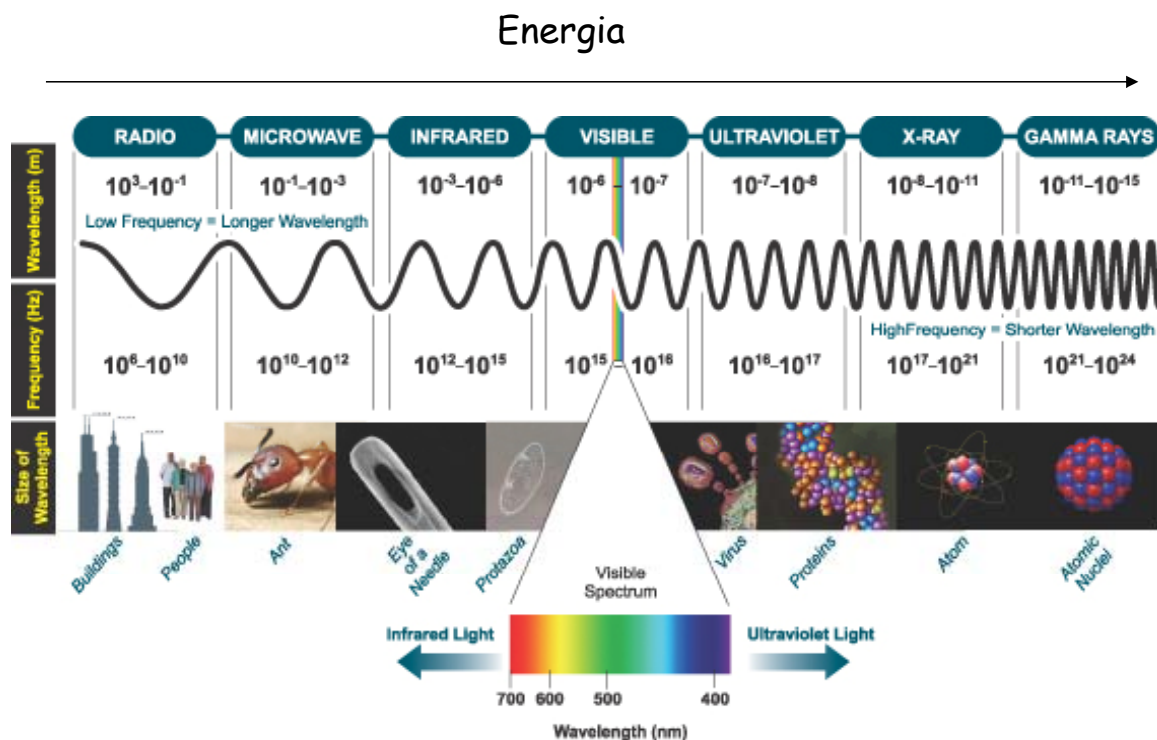
$c = 300000 \text{ km/s}$

$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$  (constante de Planck)

Energia (cor) :  $E$

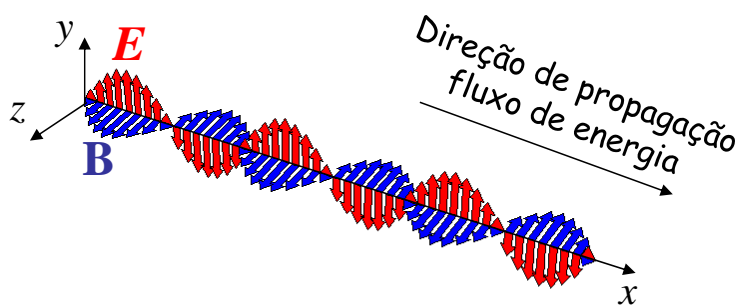
$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

# Espectro Eletromagnético:



Cor da luz visível é definida por sua frequência  $f$  ou comprimento de onda  $\lambda$

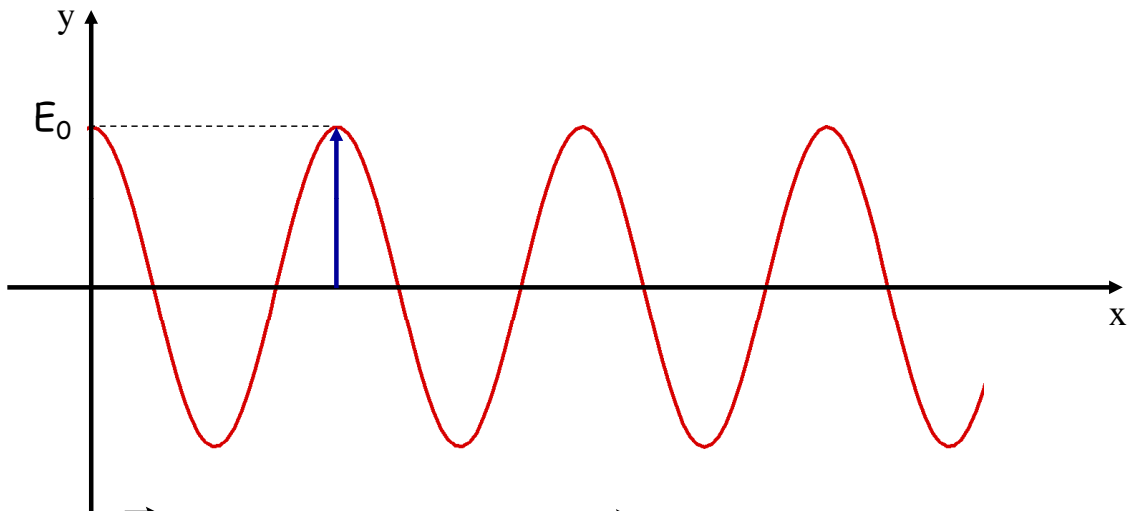
**Até agora afirmamos que : Luz é uma onda eletromagnética**



**A pergunta agora é: Como podemos verificar o caráter ondulatório da Luz?**

# Caracterizando um onda Eletromagnética

## A) Amplitude e direção do vetor campo elétrico



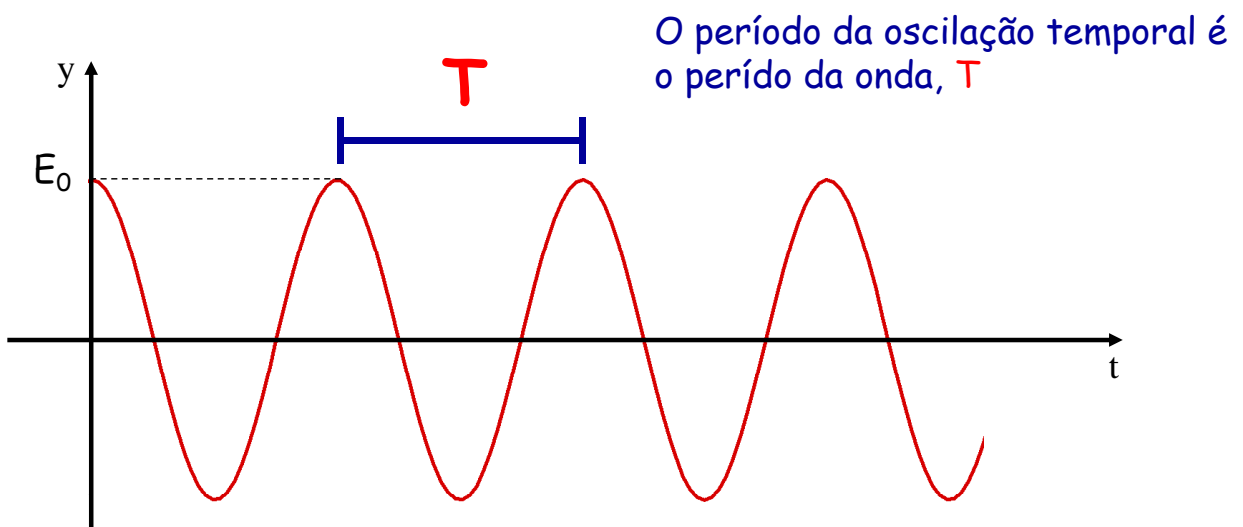
$$\vec{E}_0 = E_0 \hat{y} \quad \rightarrow \quad \vec{B}_0 = B_0 \hat{z} = cE_0 \hat{z}$$

Direção de  $\vec{E}$  é a direção de Polarização da onda EM

Automáticamente  $\Rightarrow$  Não precisa especificar direção de  $\vec{B}$

# Caracterizando um onda Eletromagnética

## B) A oscilação no tempo



O período da oscilação temporal é o período da onda,  $T$

A freqüência da oscilação temporal é freqüência da onda  $f=1/T$  e define a energia (cor) da luz  $E = hf$

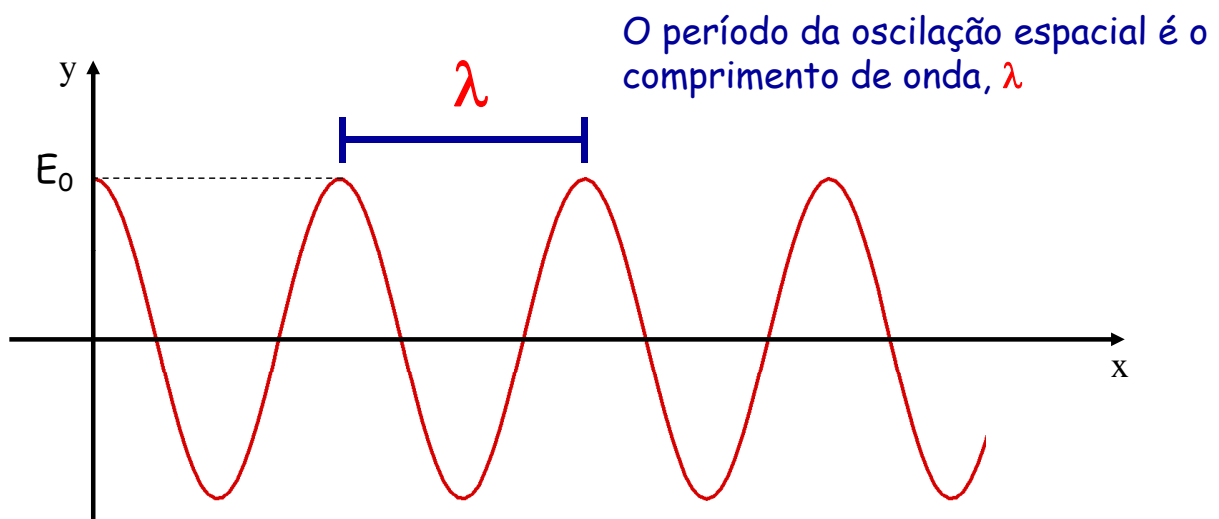
A freqüência angular da oscilação temporal é  $\omega = 2\pi/T$

$$\vec{E}(t) = E_0 \cos(\omega t) \hat{y}$$

Para uma certa posição  $x$

# Caracterizando um onda Eletromagnética

## C) A oscilação no espaço



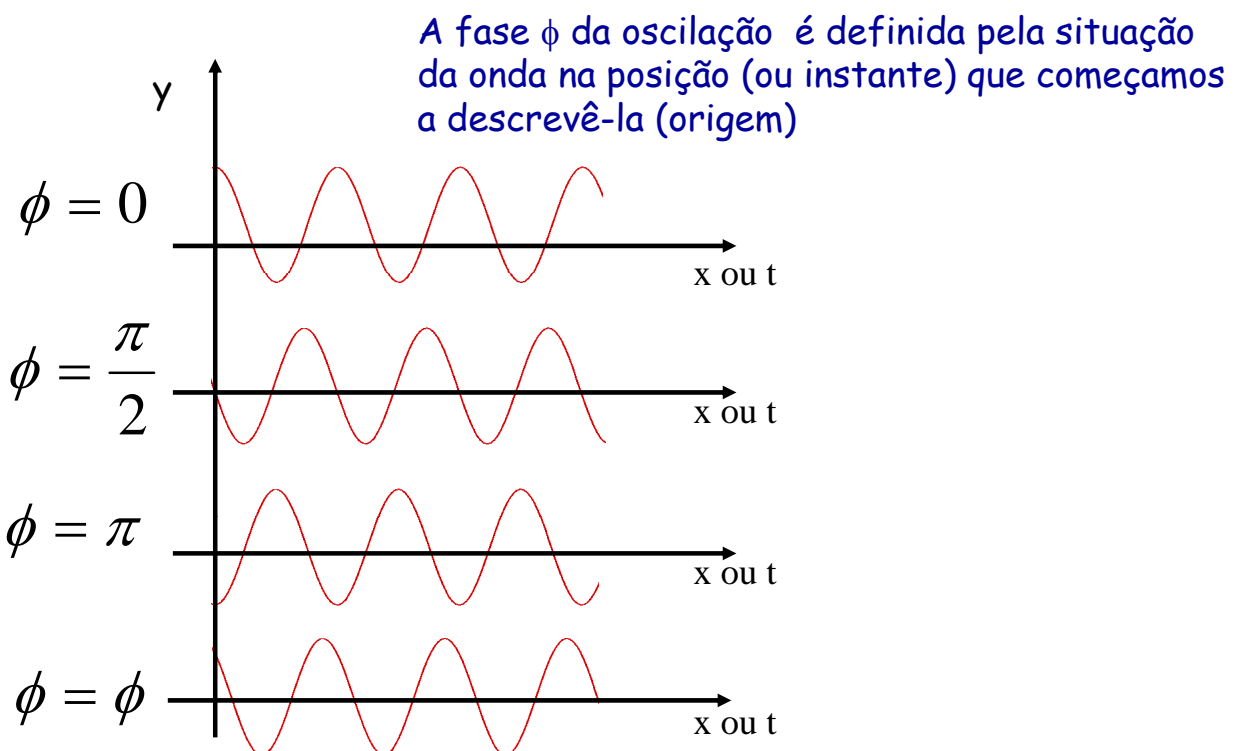
A freqüência da oscilação espacial é o número de onda,  $\kappa = 1/\lambda$  (no vácuo) ou  $\kappa = n/\lambda$  (em um meio de índice de refração  $n$ ).

A freqüência angular da oscilação espacial é a amplitude do vetor de onda,  $k = 2\pi/\lambda$  (no vácuo) ou  $k = (n2\pi)/\lambda$  (em um meio de índice de refração  $n$ ).

$$\vec{E}(x) = E_0 \cos(kx) \hat{y} \quad \text{Para um certo instante } t \text{ (fotografia da onda)}$$

# Caracterizando um onda Eletromagnética

## D) A Fase da oscilação

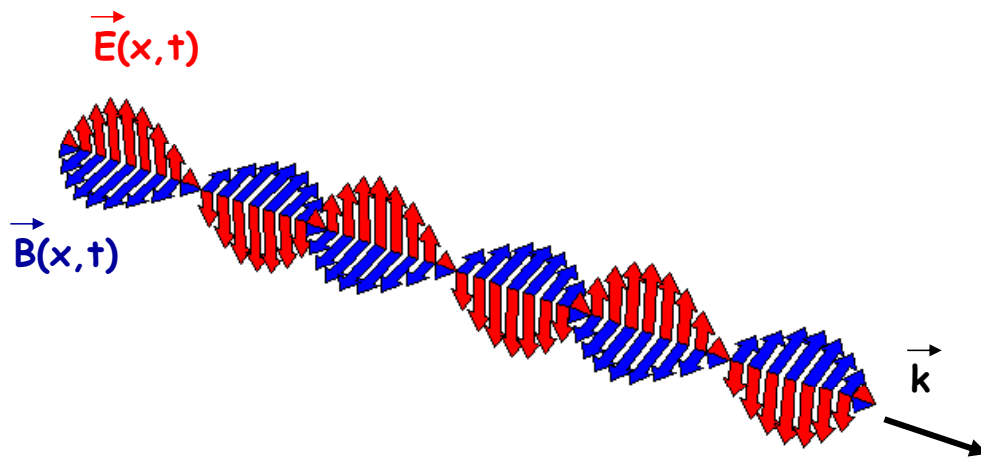


$$\vec{E}(x) = E_0 \cos(kx + \phi) \hat{y} \quad \text{ou} \quad \vec{E}(t) = E_0 \cos(\omega t + \phi) \hat{y}$$



# Caracterizando um onda Eletromagnética

C) Juntando A), B) e C)



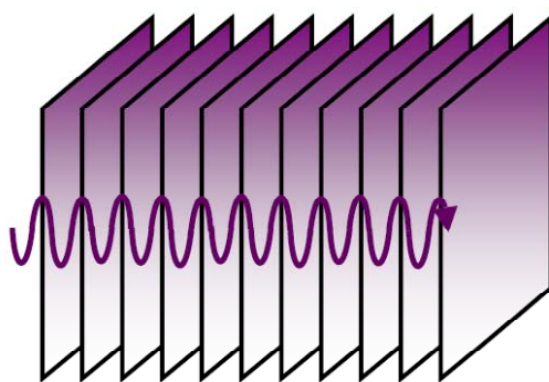
$$\vec{E}(x,t) = E_0 \cos(kx - \omega t + \phi) \hat{y}$$

$$k = n \frac{2\pi}{\lambda} \quad \omega = 2\pi f$$

Onda harmônica Plana  
(é um tipo específico de onda E.M., mas que é uma descrição bastante precisa da luz se propagando longe das sua fonte)

## Representação gráfica de uma onda Plana

$$\vec{E}(x,t) = E_0 \cos(kx - \omega t + \phi) \hat{y}$$



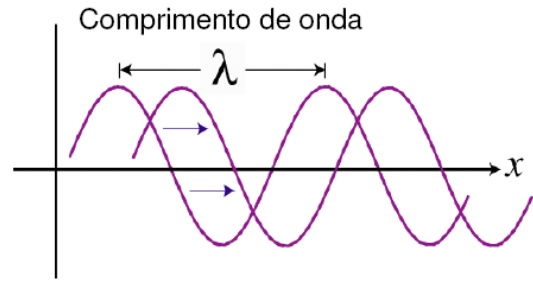
Frentes de onda planas, igualmente espaçadas



Pode-se representar por linhas paralelas.

Quão rápido uma onda viaja?

Velocidade é por definição a divisão entre a **distância percorrida** pelo **tempo gasto** para propagar essa distância.



A velocidade de fase é (comprimento de onda)/período:  $v = \lambda/T$

Como  $f = 1/T$ :  $v = \lambda f$

No vácuo:  $v = c$ , logo:

$$c = \lambda f \rightarrow c = \frac{\lambda}{T} \rightarrow c = \frac{2\pi\lambda}{2\pi T} \rightarrow c = \frac{\omega}{k}$$

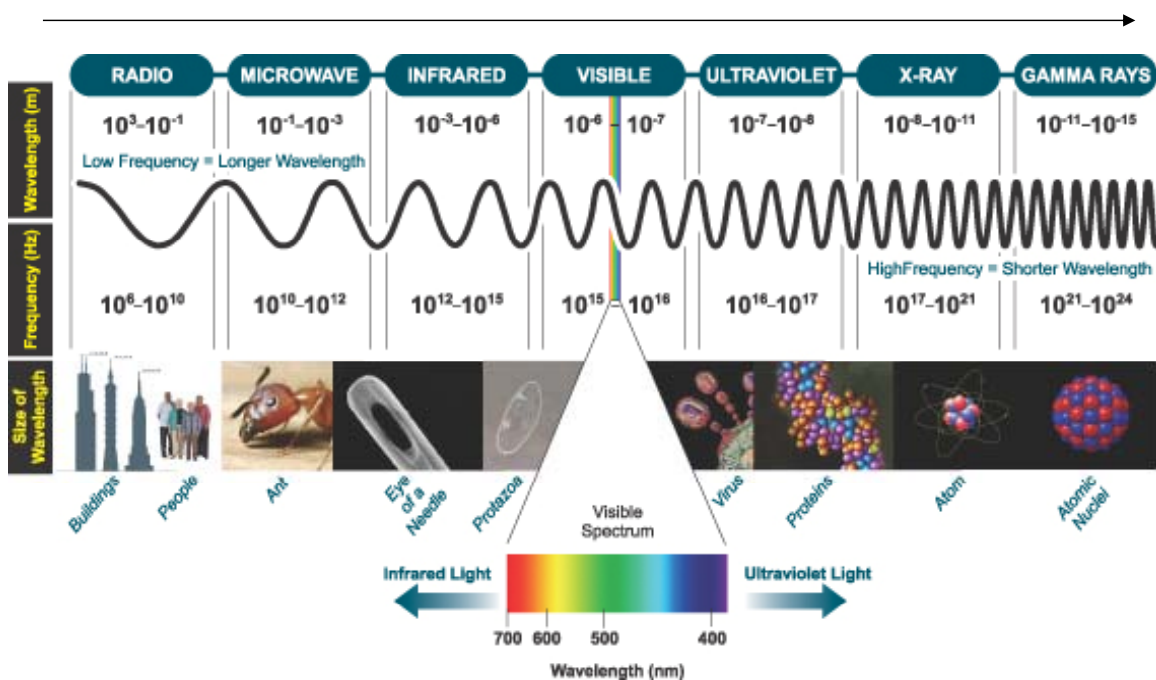
Em um meio material de índice de refração  $n$ :

$$v = \lambda f \rightarrow v = \frac{\lambda}{T} \rightarrow \frac{c}{n} = \frac{2\pi\lambda}{2\pi T} \rightarrow \frac{c}{n} = \frac{\omega}{k} \rightarrow \boxed{k = n \frac{\omega}{c}}$$

Como assumido anteriormente

## Relembrando:

Energia



A Física por traz de todo o espectro é a mesma, o que muda é só a frequência (energia)

Mas isso faz com que o uso seja extremamente amplo!!!!

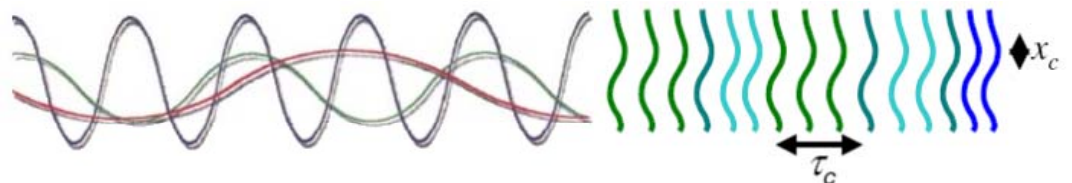
Freqüência aproximada e comprimento de onda no vácuo para várias cores

Cor	Comprimento de onda $\lambda$ (nm)	Freqüência $\nu$ (THz)
Vermelho	780-622	384-482
Laranja	622-597	482-503
Amarelo	597-577	503-520
Verde	577-492	520-610
Azul	492-455	610-659
Violeta	455-390	659-769

1 terahertz (THz)= $10^{12}$  Hz, 1 nanômetro (nm)= $10^{-9}$  m

## Coerência de feixes de Luz:

Luz Policromática  
Incoerente  
(incoerência espacial e  
temporal)



Luz Monocromática  
Incoerente  
(coerência temporal  
incoerência espacial)



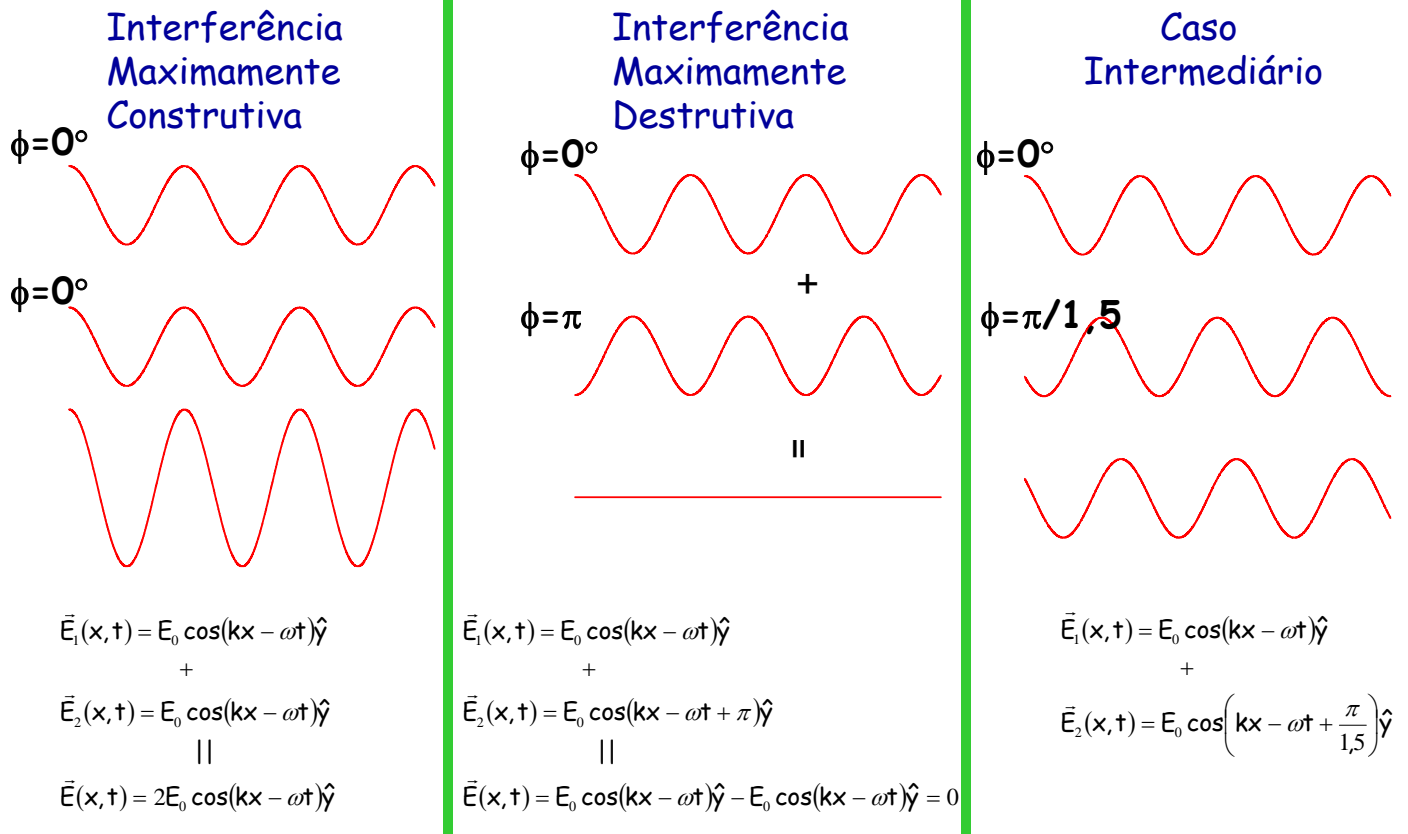
Luz Monocromática  
Coerente (coerência  
espacial e temporal)



**Coerência temporal** nos diz quão monocromática é a fonte de luz.

**Coerência espacial** nos diz quão uniforme é a fase da frente de onda

# Princípios de Interferência de Ondas EM

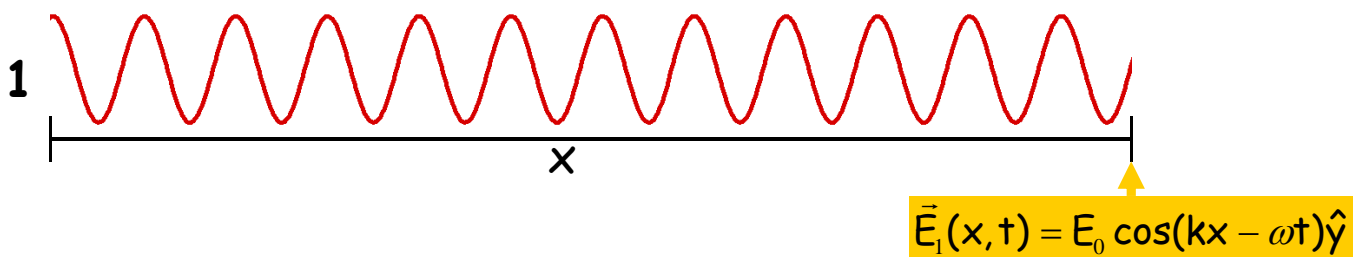


Intensidade da luz resultante da interferência de dois feixes coerentes depende somente da diferença de fase entre os feixes.

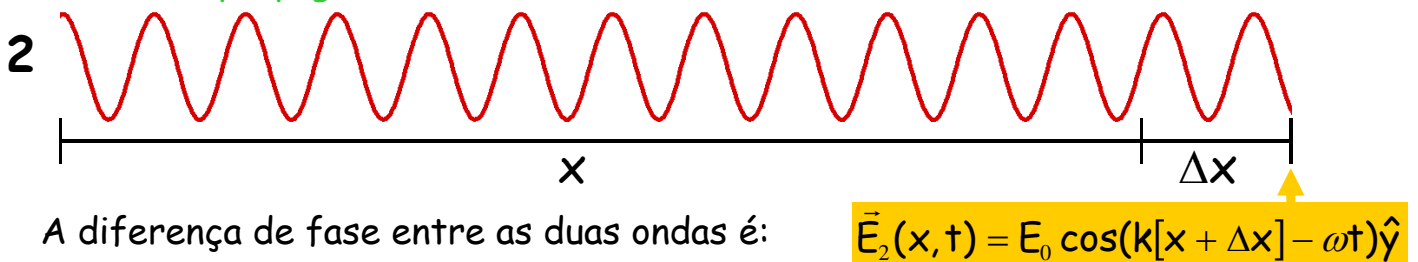
## Caminho Óptico

Como fazer com que dois feixes coerentes de luz adquiram uma diferença de fase entre si.

Onda 1: propaga uma distância  $x$  em um meio com índice de refração  $n$



Onda 2: propaga uma distância  $x + \Delta x$  em um meio com índice de refração  $n$



A diferença de fase entre as duas ondas é:

$$\Delta\Phi = k[x + \Delta x] - \omega t - (kx - \omega t) \Rightarrow \Delta\Phi = k\Delta x$$

$$\Delta\Phi = n \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x \Rightarrow \Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \underbrace{n\Delta x}_{\text{Diferença de caminho óptico}}$$

Diferença de caminho óptico

Toda vez que dois feixes coerentes percorrem caminhos ópticos diferentes aparecerá uma diferença de fase entre eles que é proporcional a diferença de caminho óptico

## Princípio de Interferência de Ondas EM

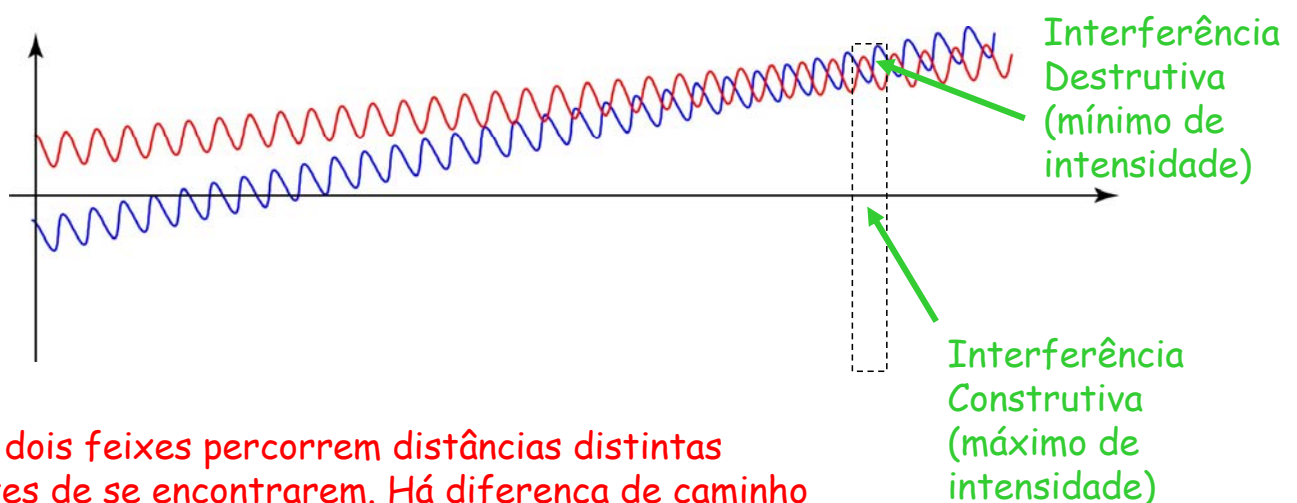
- Para produzir uma diferença de fase entre dois feixes coerentes podemos fazer com que os dois feixes percorram caminhos diferentes e se unam em algum ponto do espaço para exibir o padrão de interferência.



Os dois feixes percorrem a mesma distância antes de se encontrarem. Não há diferença de caminho óptico e a interferência é construtiva no ponto de encontro

## Princípio de Interferência de Ondas EM

- Para produzir uma diferença de fase entre dois feixes coerentes podemos fazer com que os dois feixes percorram caminhos diferentes e se unam em algum ponto do espaço para exibir o padrão de interferência.

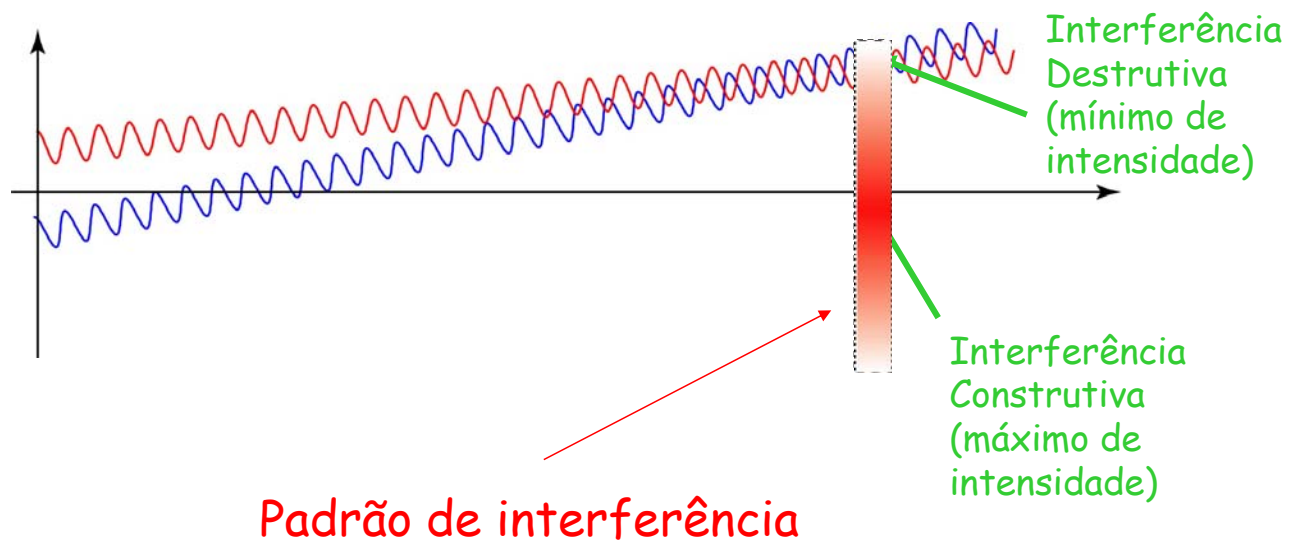


Os dois feixes percorrem distâncias distintas antes de se encontrarem. Há diferença de caminho óptico e a interferência deixa de ser maximamente construtiva, podendo chegar até a se destrutiva quando a diferença de caminho óptico é tal que  $\Delta\Phi = m\pi$ ,  $m=1,2,3,4\dots$



# Interferência de Ondas EM

• Para produzir uma diferença de fase entre dois feixes coerentes podemos fazer com que os dois feixes percorram caminhos diferentes e se unam em algum ponto do espaço para exibir o padrão de interferência.



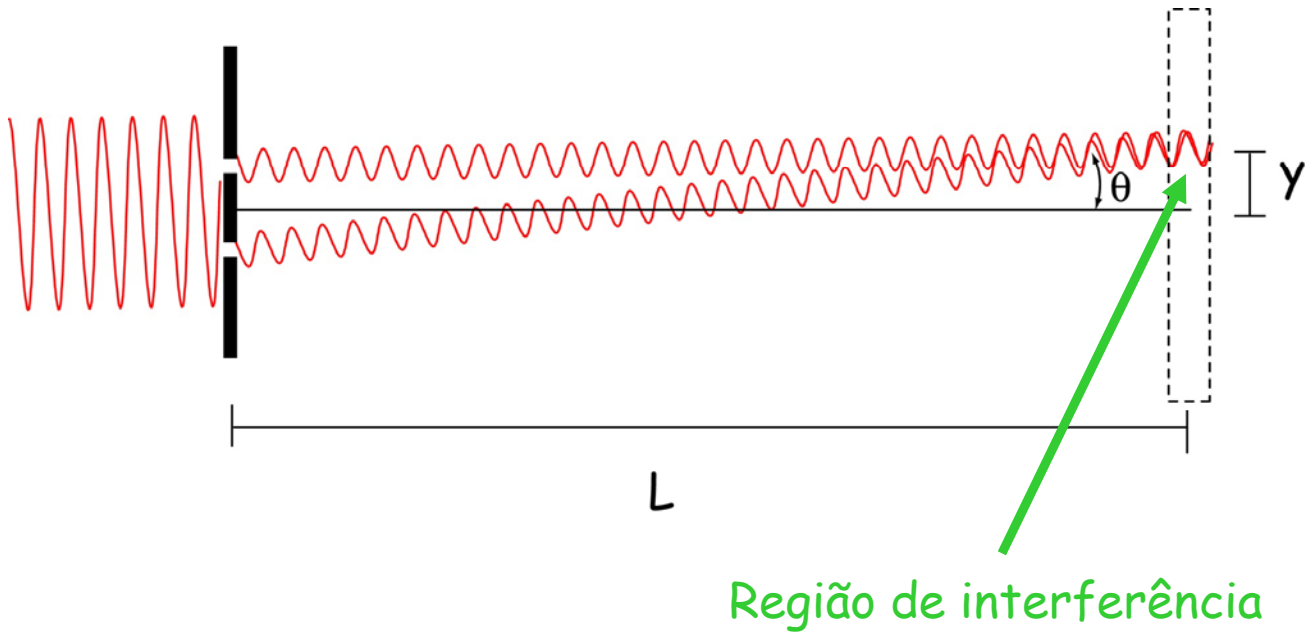
## Um "duelo" científico histórico sobre a Natureza da Luz

Sir Isaac Newton (1642-1727) : luz era constituída de corpúsculos. Os principais fenômenos óticos (reflexão e refração) podiam ser explicados com o uso da teoria corpuscular.

Christian Huygens (1629-1695): Luz tem caráter ondulatório

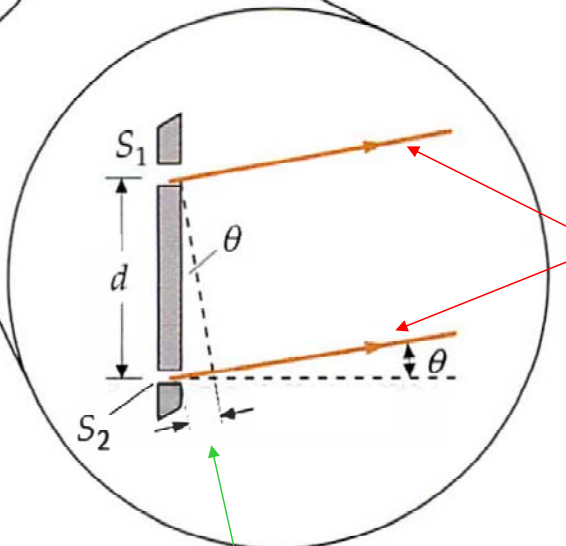
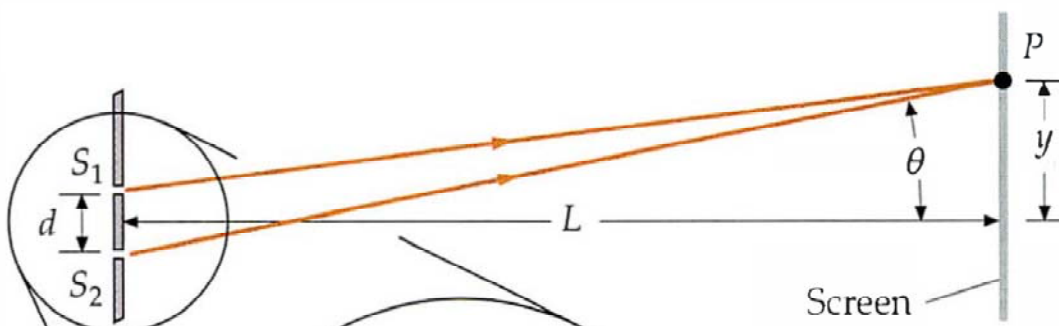
Por muito tempo o prestígio de Newton fez prevalecer a teoria corpuscular até que ~ 1801 Thomas Young (1773-1829) resolveu a questão em favor de Huygens usando o seu famoso experimento de dupla fenda.

# O Experimento de Dupla fenda de Young



A pergunta que temos que responder é: Quais são as posições  $y$  em que a interferência dos feixes vindos das duas fendas é construtiva e destrutiva ?

## Vamos modelar o problema



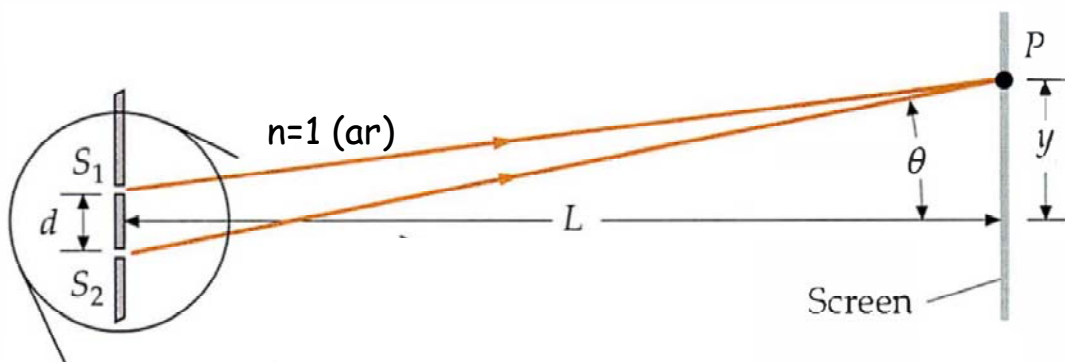
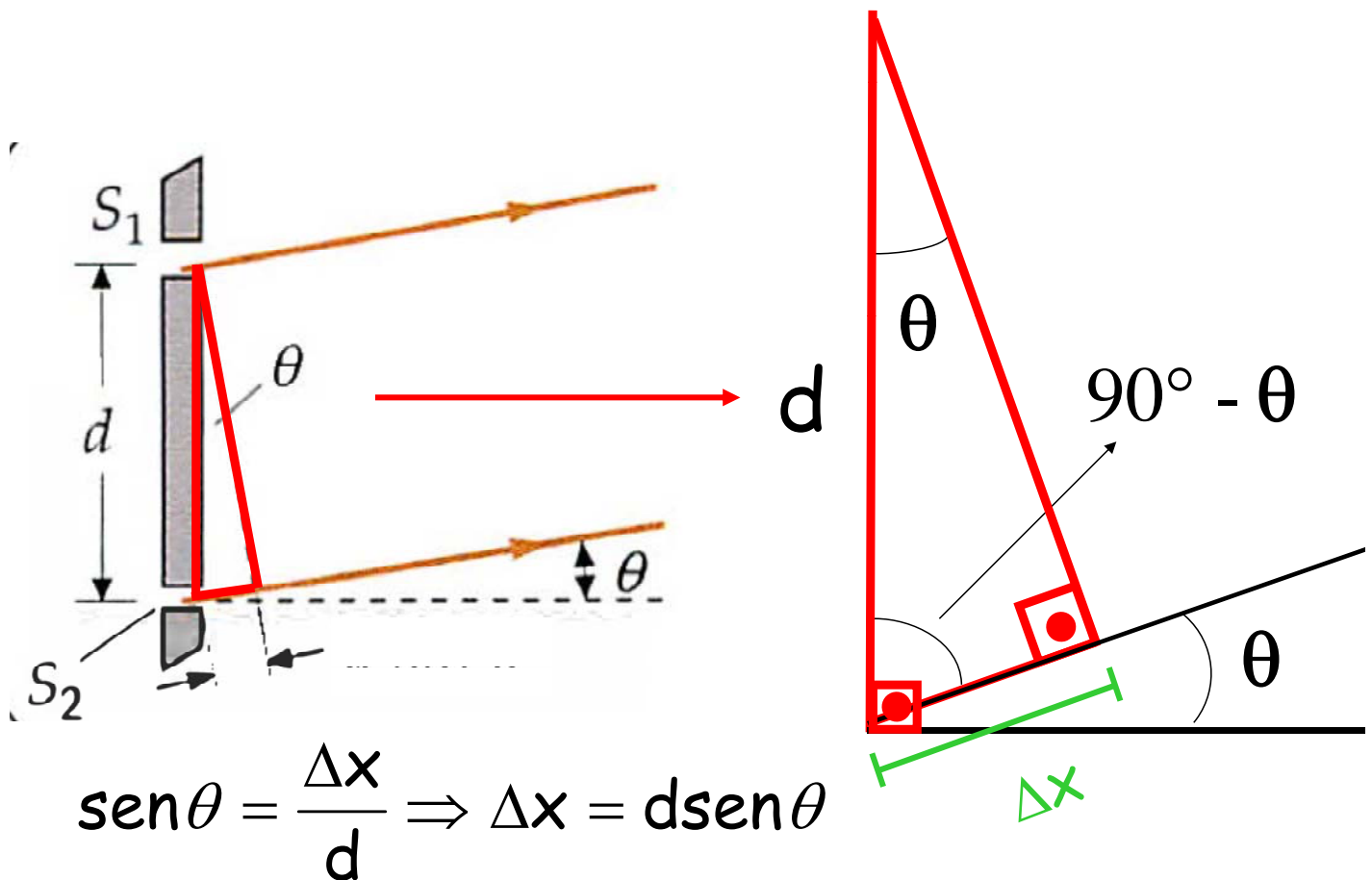
A condição é:

$$d \ll L$$

(raios saem das fendas praticamente paralelos)

x = Diferença de caminho óptico

## Vamos modelar o problema



Interferência construtiva em P (máximos de interferência)

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x = m2\pi \rightarrow \frac{2\pi}{\lambda} d \text{sen } \theta = m2\pi \rightarrow \boxed{d \text{sen } \theta = m\lambda}$$

$m = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$  (ordem da interferência)

Condição de máximo de interferência

$$\text{sen } \theta = \frac{y}{\sqrt{L^2 + y^2}} \rightarrow \text{Se } y \ll L \rightarrow \text{sen } \theta = \frac{y}{L} \rightarrow d \frac{y}{L} = m\lambda$$

Posição onde aparecem os máximos de interferência de ordem m

$$\boxed{y_m^{\text{max}} = \frac{m\lambda L}{d}}$$

## Interferência destrutiva em P (mínimos de interferência)

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x = \pi + m2\pi \rightarrow \Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \text{sen}\theta = \pi + m2\pi$$

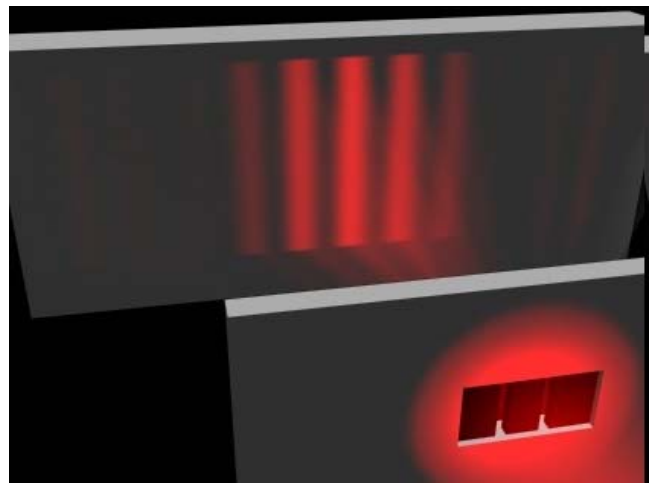
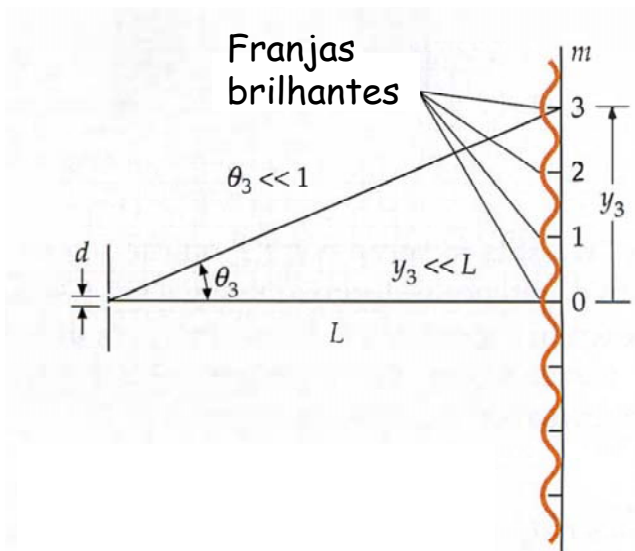
Condição de mínimo de interferência

$$d \text{sen}\theta = \left(\frac{1}{2} + m\right)\lambda$$

$$\text{sen}\theta = \frac{y}{\sqrt{L^2 + y^2}} \rightarrow \text{Se } y \ll L \rightarrow \text{sen}\theta = \frac{y}{L} \rightarrow d \frac{y}{L} = \left(\frac{1}{2} + m\right)\lambda$$

Posição onde aparecem os máximos de interferência de ordem m

$$y_m^{\text{max}} = \left(\frac{1}{2} + m\right) \frac{\lambda L}{d}$$



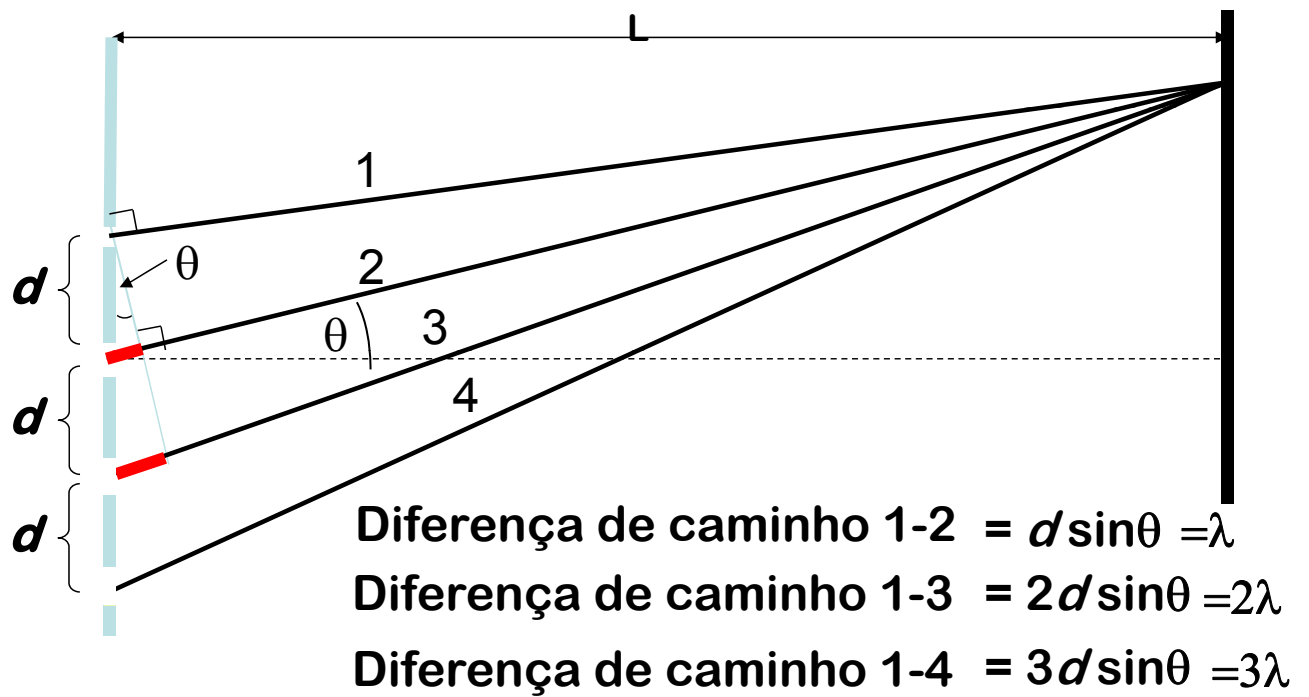
Uma constatação:

Os máximos ocorrem quando  $d \text{sen}\theta = m\lambda$

Logo:  $\text{sen}\theta = \frac{m\lambda}{d}$

Quanto mais próximas estiverem as fendas (menor  $d$ ) maior será o  $\text{sen}\theta$  e, conseqüentemente, mais separados estarão os máximos de interferência. Em outras palavras quanto menor for  $d$  mais fácil será medir o padrão de interferência

# Muitas Fendas

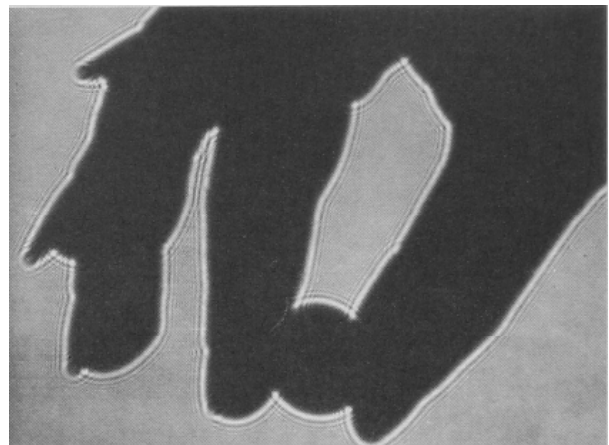
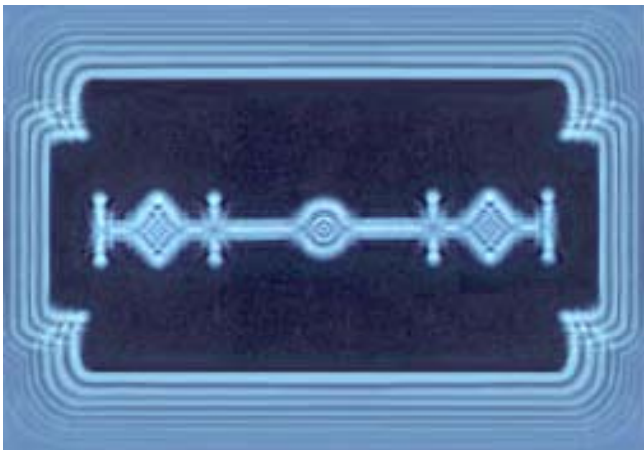


Interferencia construtiva para todos os casos quando:

$$d \sin \theta = m \lambda$$

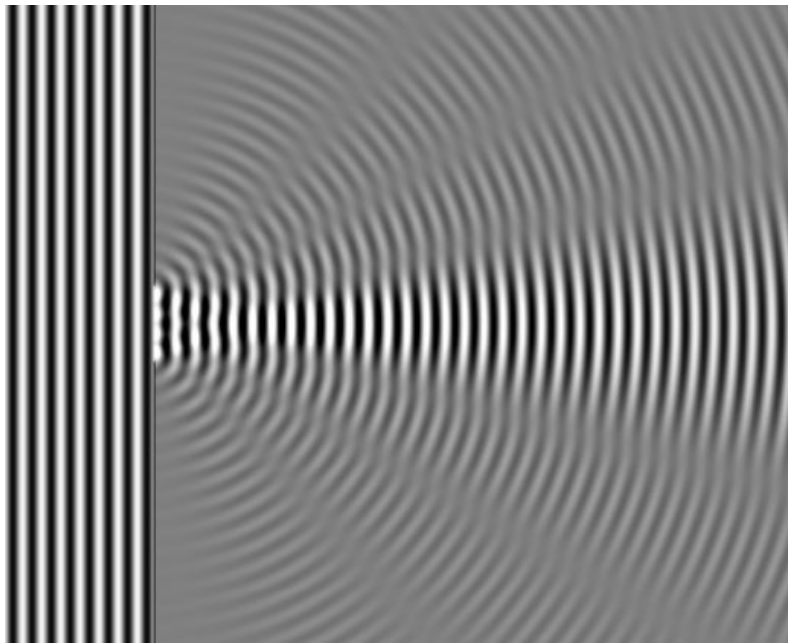
Fórmula é igualmente válida para muitas fendas

# Difração



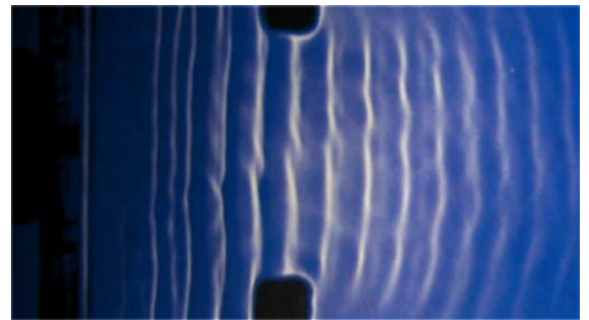
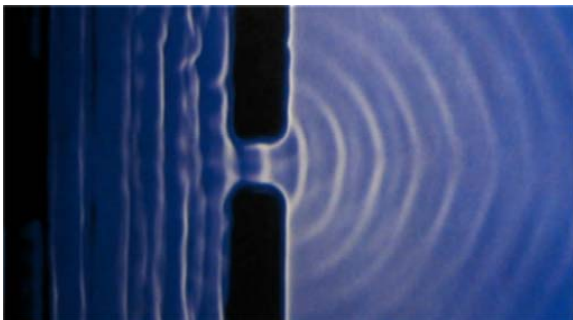


# O que é difração?

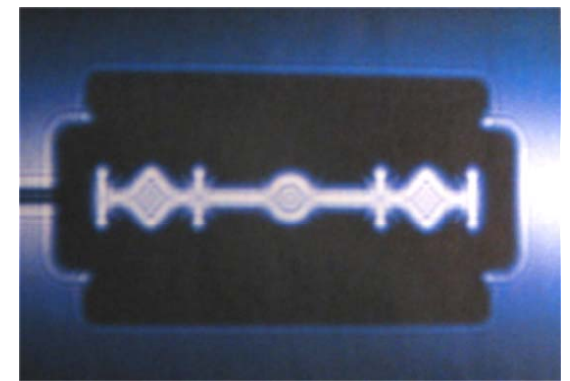
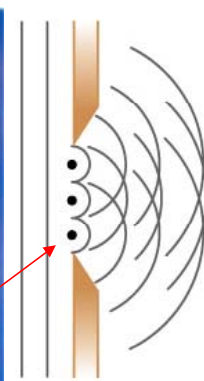
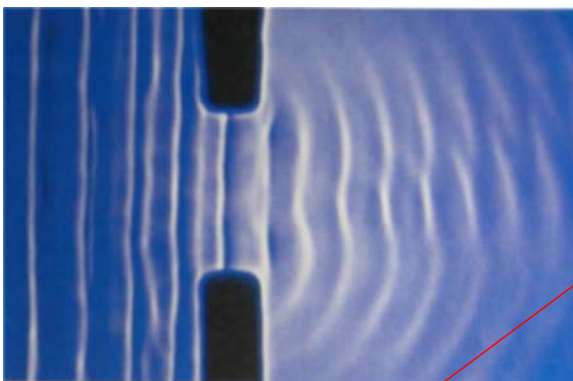


Difração é um fenômeno que ocorre com as ondas quando elas passam por um orifício ou contornam um objeto cuja dimensão é da mesma ordem de grandeza que o seu comprimento de onda. A difração é um fenômeno tipicamente ondulatório. As ondas, ao passar pelo orifício de um anteparo, abrem-se ou difratam-se, formando um feixe divergente.

## Difração por Fenda Simples



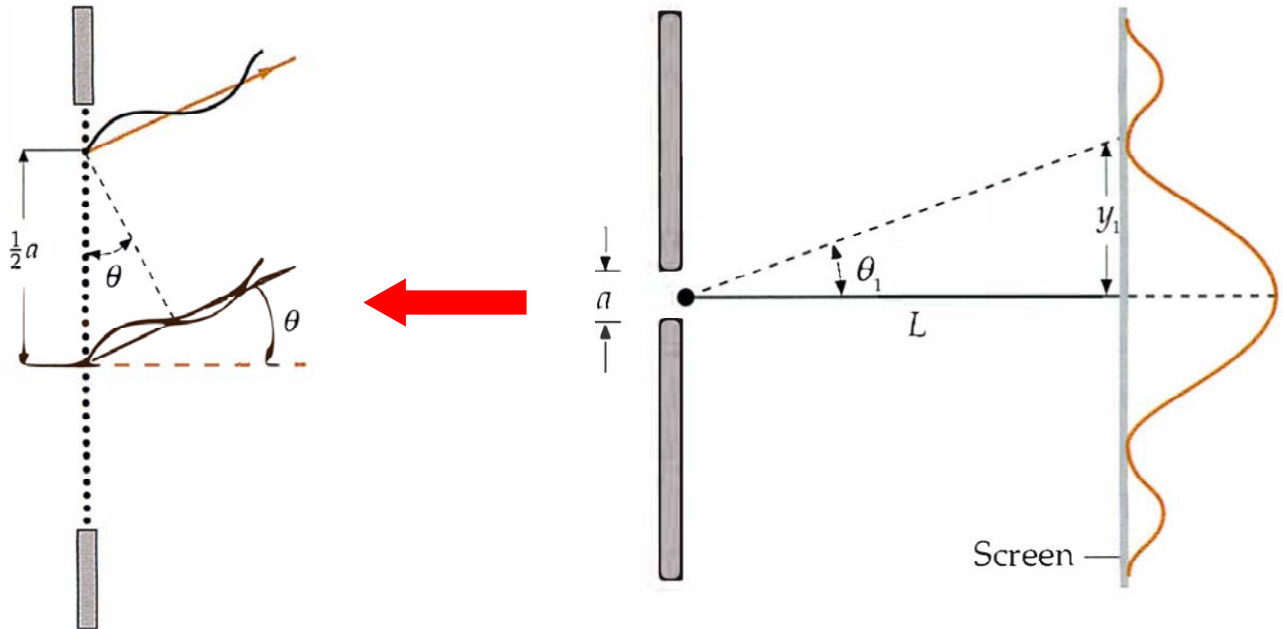
As ondas se curvam em torno dos lados



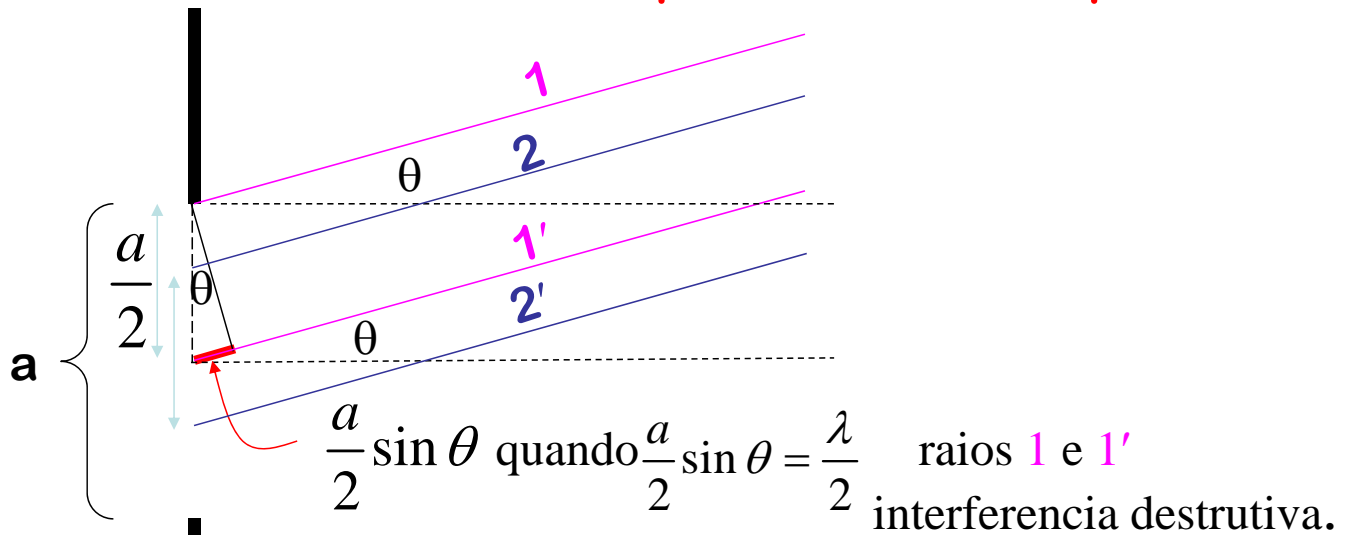
Ao passar pela fenda cada ponto torna-se uma nova fonte (princípio de Huygens). A interferência entre essas fontes é que causa a difração

Sombra de uma lâmina de barbear

# Descrição da Difração por Fenda Simples



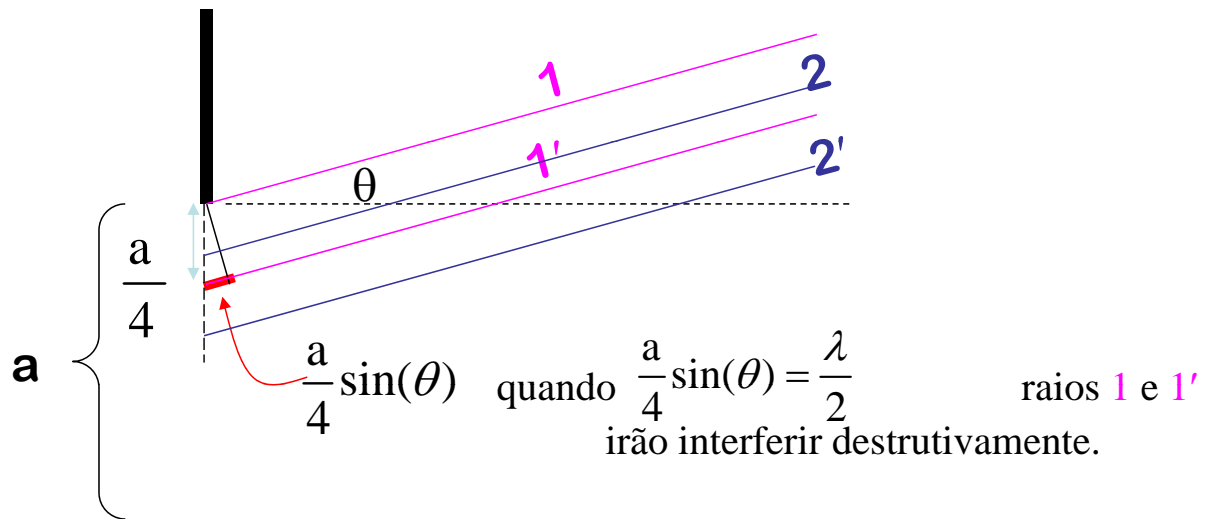
## Mínimos de difração por Fenda Simples



Raios 2 e 2' também começam afastados de  $a/2$  e tem a mesma diferença de caminho.

Nessas condições cada raio originado na parte de cima interfere com o raio correspondente originado na parte de baixo.

**1<sup>st</sup> mínimo em  $\sin \theta = \lambda/a$**

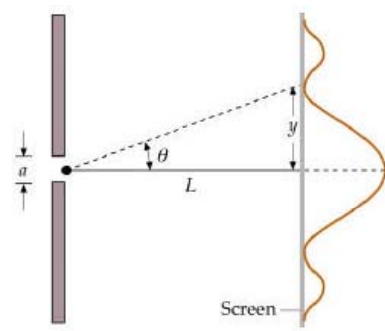


Raios 2 e 2' também começam a  $a/4$  de distância entre si e tem a mesma diferença de caminho.

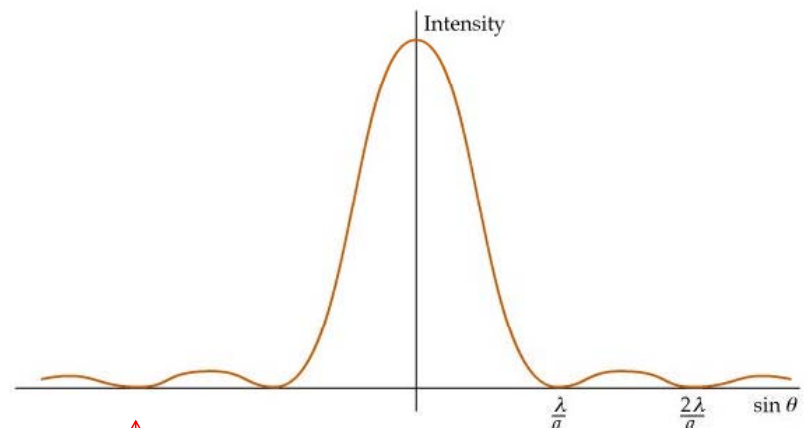
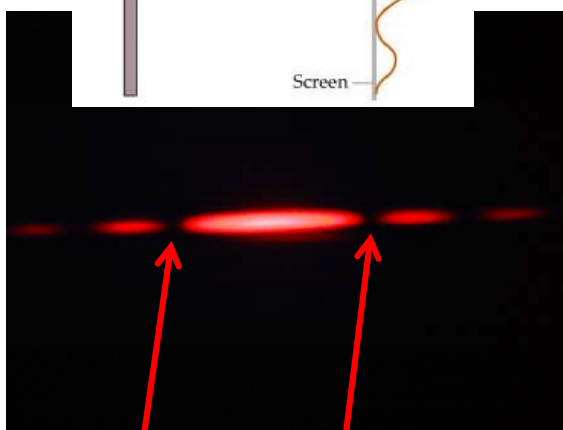
Nessas condições cada raio originado no primeiro quarto interfere com o raio correspondente no segundo quarto. O mesmo acontece para o terceiro e quarto quarto

**2<sup>nd</sup> mínimo em  $\sin \theta = 2\lambda/a$**

## Padrão de Difração de Fenda Simples



Quanto mais estreita for a fenda maior será a distância entre os mínimos de difração e conseqüentemente mais largo o máximo central



$m = -1$

$m = -1$

Mínimos de difração

$a \sin \theta = m \lambda$

$m = -2$

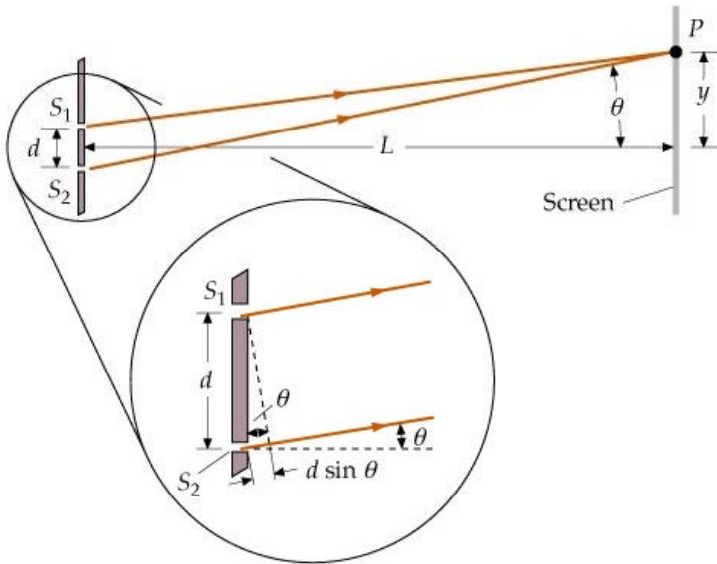
$m = -1$

$m = 0$

$m = +1$

$m = +2$

## Voltando ao caso de duas fendas



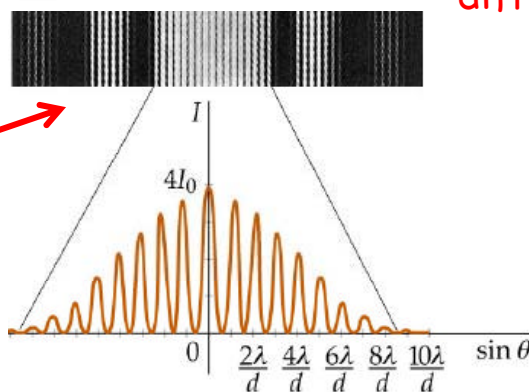
Se considerarmos que as duas fendas, separados por uma distância  $d$  e abertura  $a$  finita então, o **padrão de interferência** com **máximos** em:

$$d \sin \theta = m \lambda$$

Se rá modulado pelo **padrão de difração** com **mínimos** em:

$$a \sin \theta = m \lambda$$

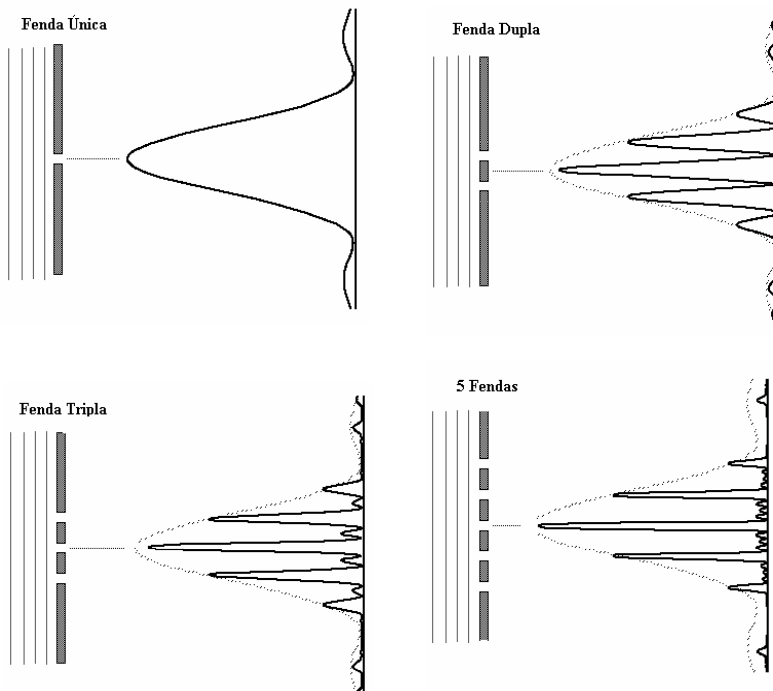
Padrão de interferência de duas fendas



## O que acontece se aumentarmos o número de fendas ?

Posição dos máximos de interferência é independente do número de fendas

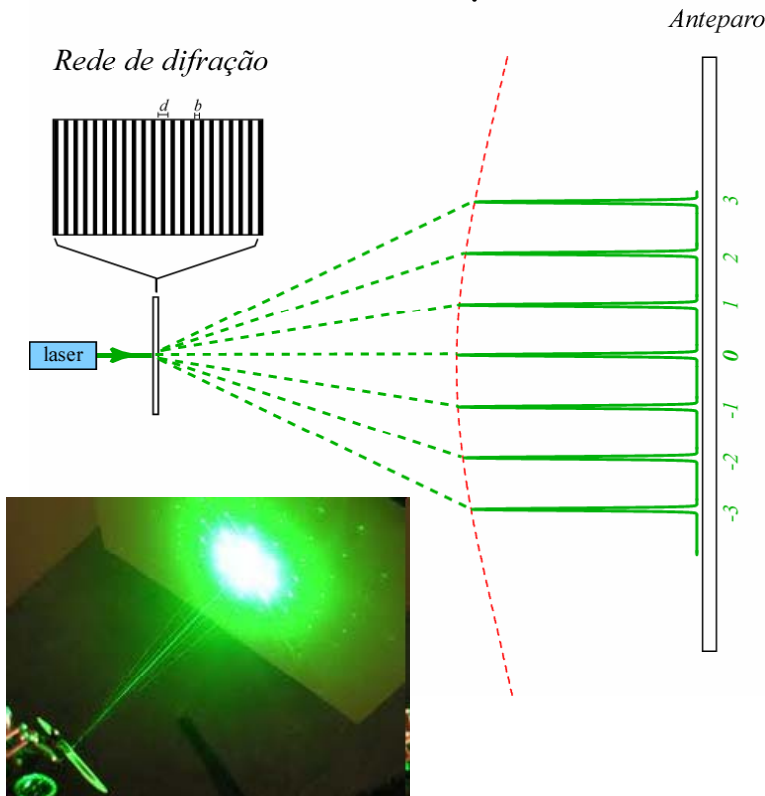
$$d \sin \theta = m \lambda$$



*A medida que o número de fendas aumenta os picos se tornam mais estreitos e bem definidos*

# Redes de Difração

Um rede de difração são um conjunto de fendas muito próximas e muito estreita. Tipicamente da ordem de centenas de fendas por mm



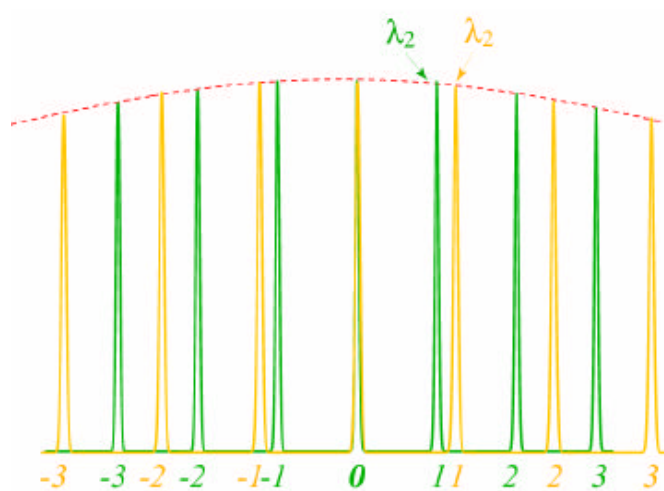
máximos de interferência

$$d \sin \theta = m \lambda$$

$$\frac{\text{número de fendas}}{\text{mm}} = \frac{1 \text{ mm}}{d}$$

↑  
Parâmetro da rede de difração

Se a luz incidente não for monocromática, ou seja, tiver mais de um comprimento de onda

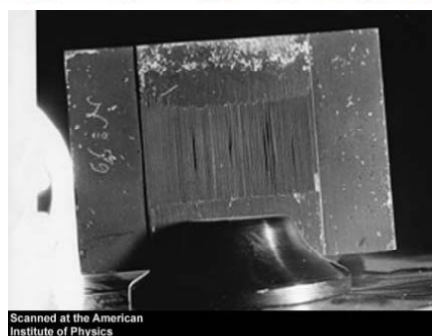


$$d \sin \theta = m \lambda$$

Componentes da luz com comprimentos de onda distintos aparecem separado no padrão de difração da rede

Resolução espectral (poder de separação das linhas) é maior para ordens maiores.

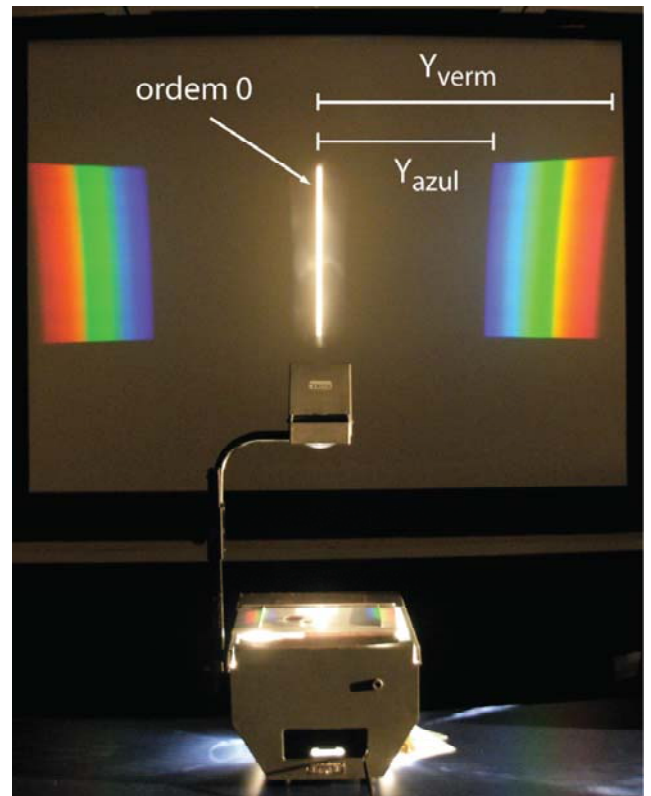
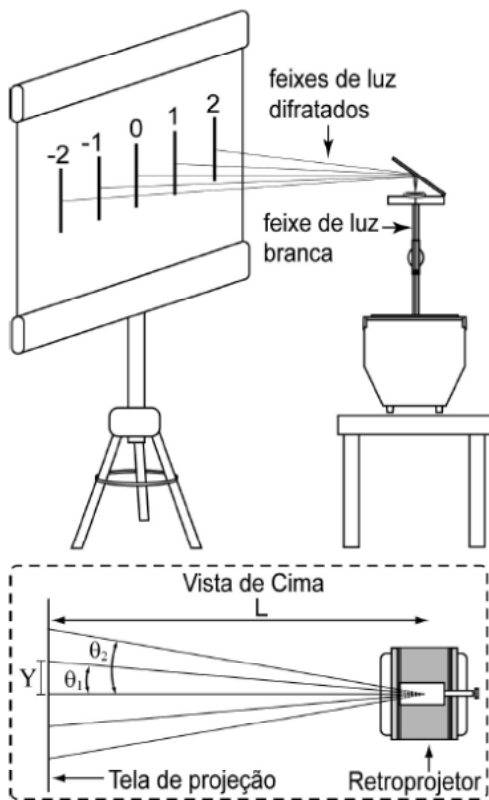
Grade de difração construída por Fraunhofer



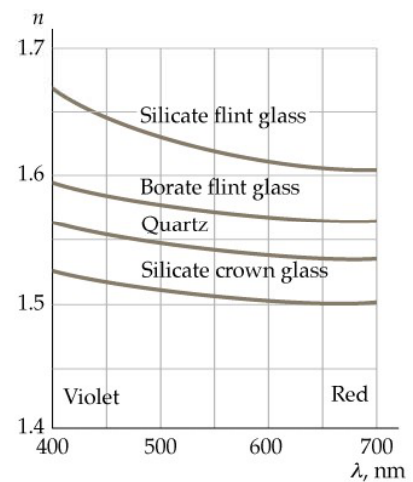
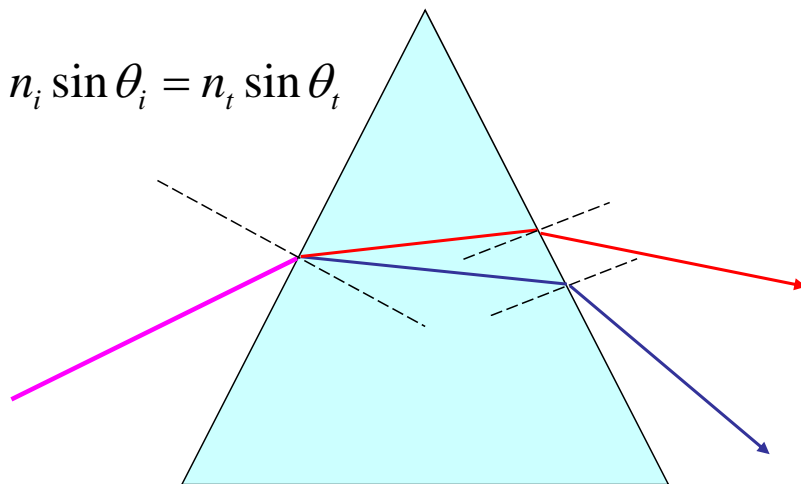
Rede de difração pode ser usada como elemento para separar os comprimentos de onda assim como um prisma.



# Dispersão da luz com uma grade de difração



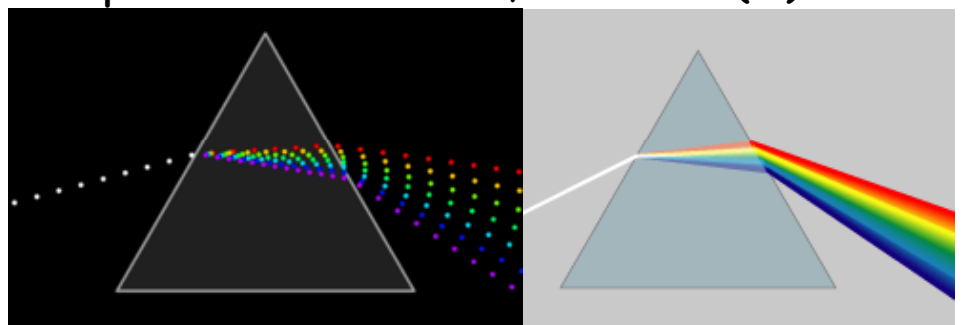
## Comparação com a Dispersão da Luz por Prismas



Desvio depende do comprimento de onda, i.e.  $n = n(\omega)$

É possível separar os diversos comprimentos de onda (cores) da luz utilizando um prisma.

Quais são as vantagens e desvantagens da grade e do prisma?

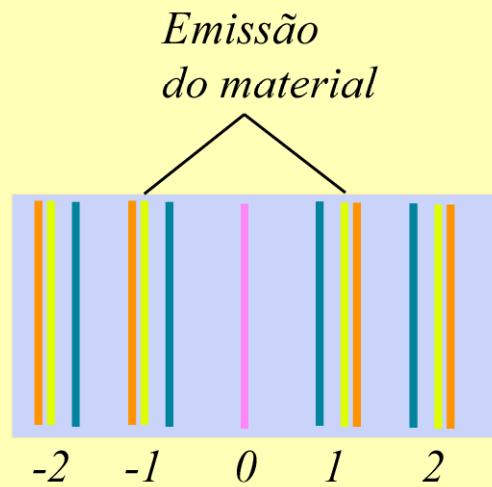
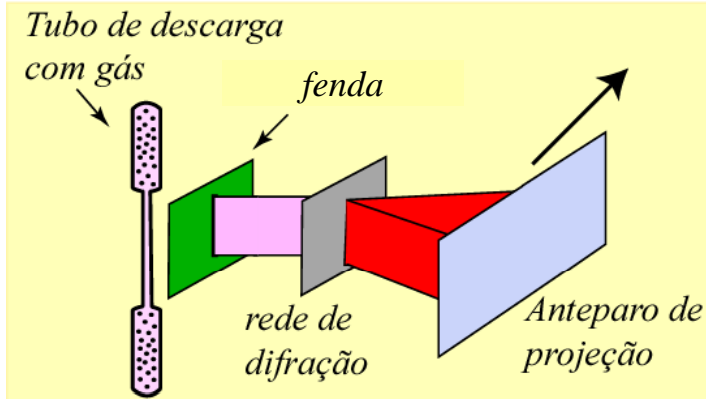




# PRINCÍPIOS DE ESPECTROSCOPIA ÓPTICA

## 6-) Espectroscopia de Emissão:

*Raias de emissão são características de cada material*

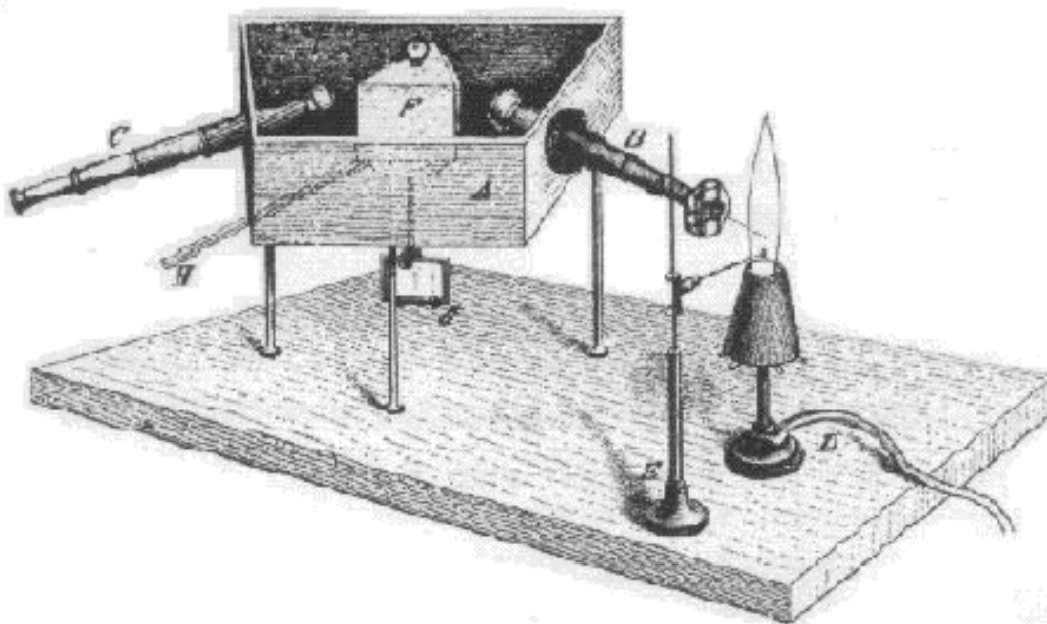


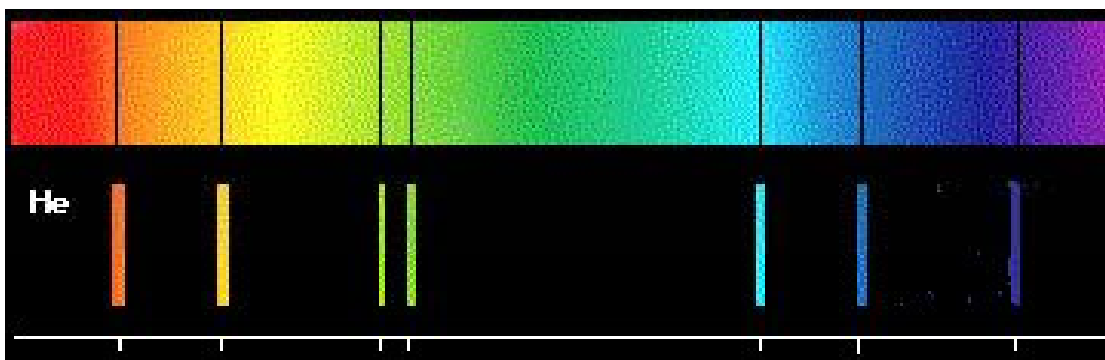
## Primeiro espectrógrafo

Bunsen



Kirchoff

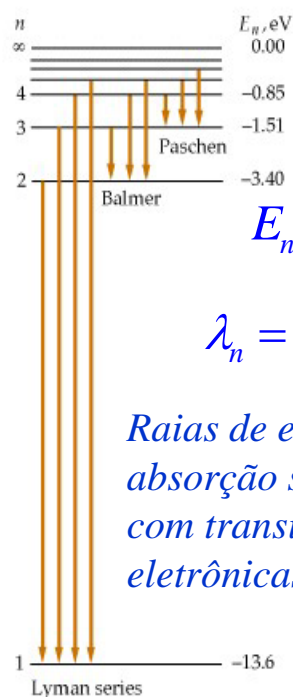
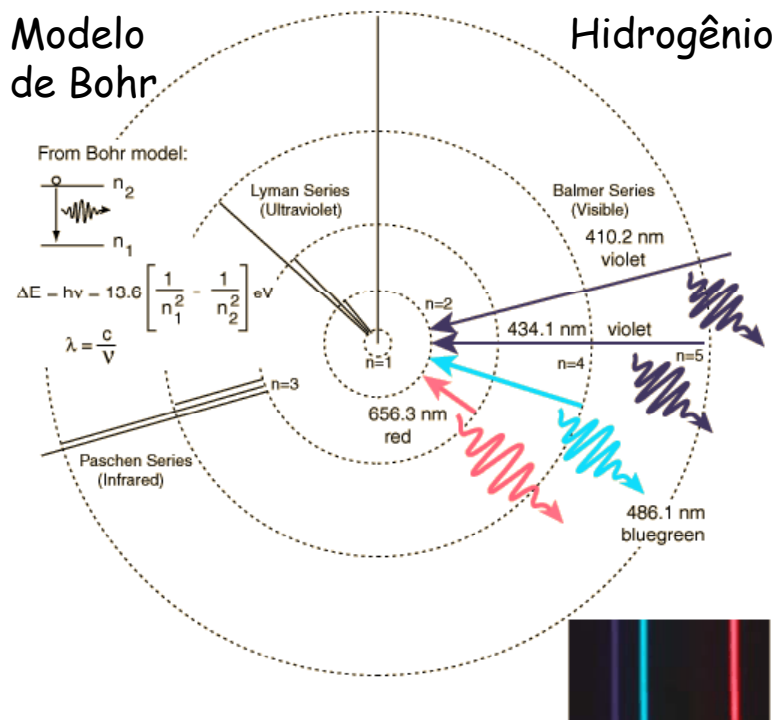




## SISTEMAS ATÔMICOS

### Átomo de Hidrogênio:

### Niels Bohr



$$E_n = -\frac{13,6\text{eV}}{n^2}$$

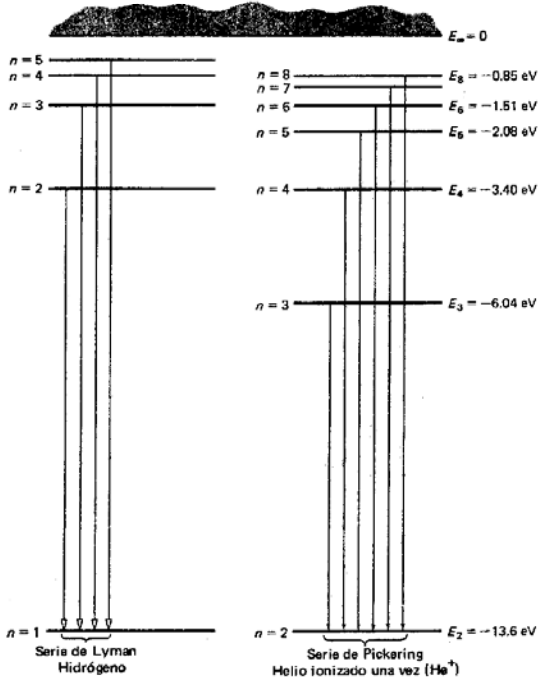
$$\lambda_n = \frac{hc}{E_n}$$

*Raias de emissão e absorção são associadas com transições eletrônicas permitidas*



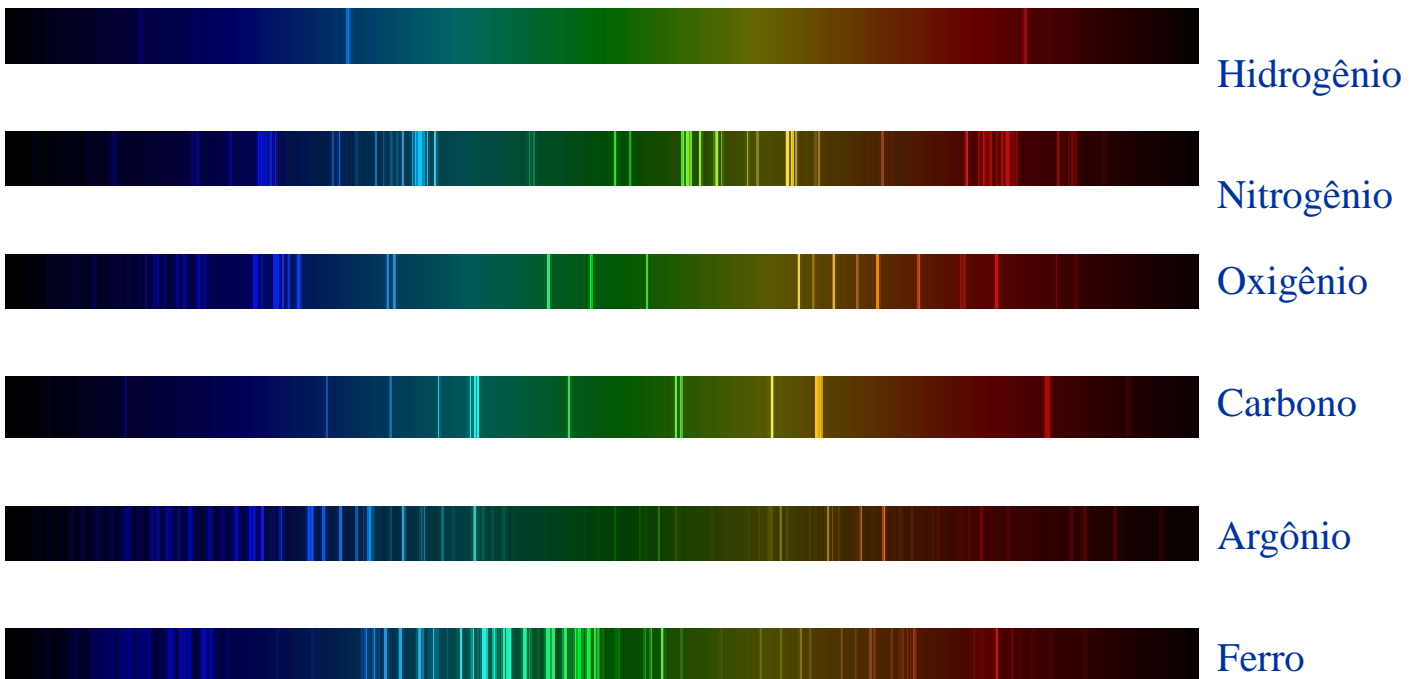
# Comparação do Átomo de Hidrogênio e o Átomo de He<sup>+</sup>:

Comparação entre os níveis de energia do H e do He<sup>+</sup>



*Raias de emissão são características de cada tipo de átomo*

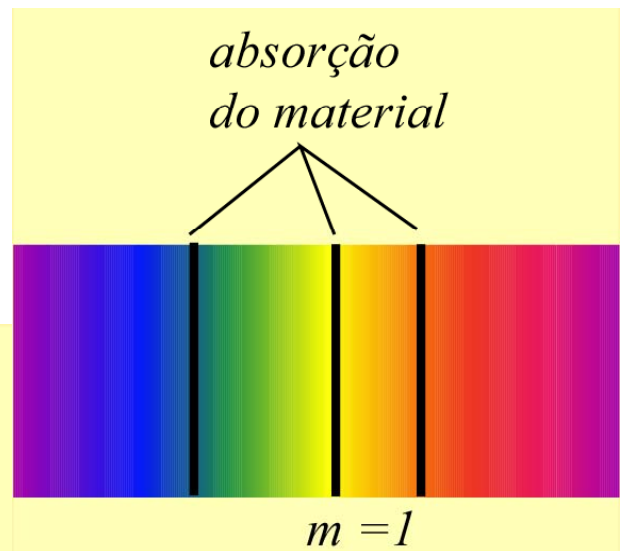
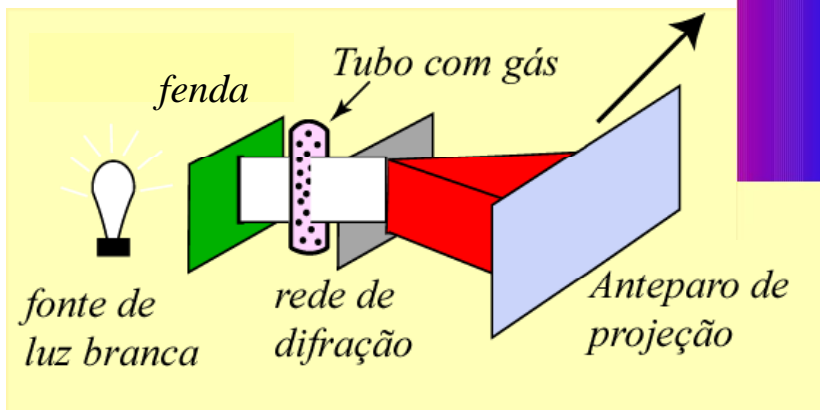
## Exemplos de Espectros atômicos:



# PRINCÍPIOS DE ESPECTROSCOPIA ÓPTICA

## Espectroscopia por Absorção:

*Raias de absorção são características de cada material*



## Fontes de Luz Branca

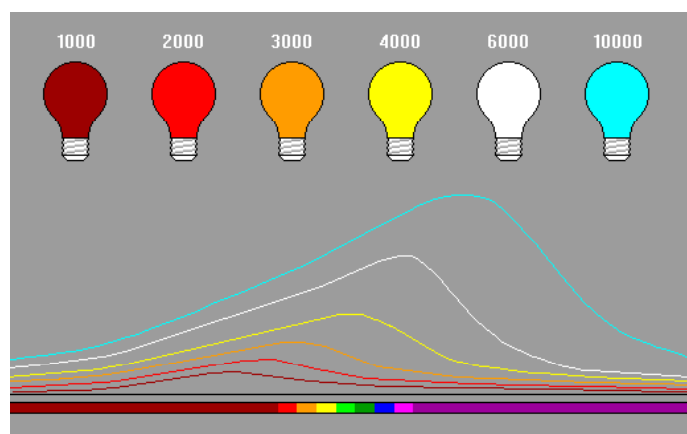
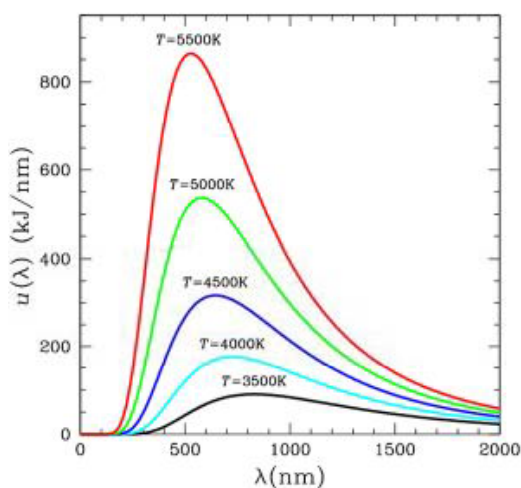
### Fontes Incandescentes:

Origem da Luz: Oscilação de cargas em um material devido ao efeito de temperatura

Espectro da Luz: contínuo (radiação de corpo negro)

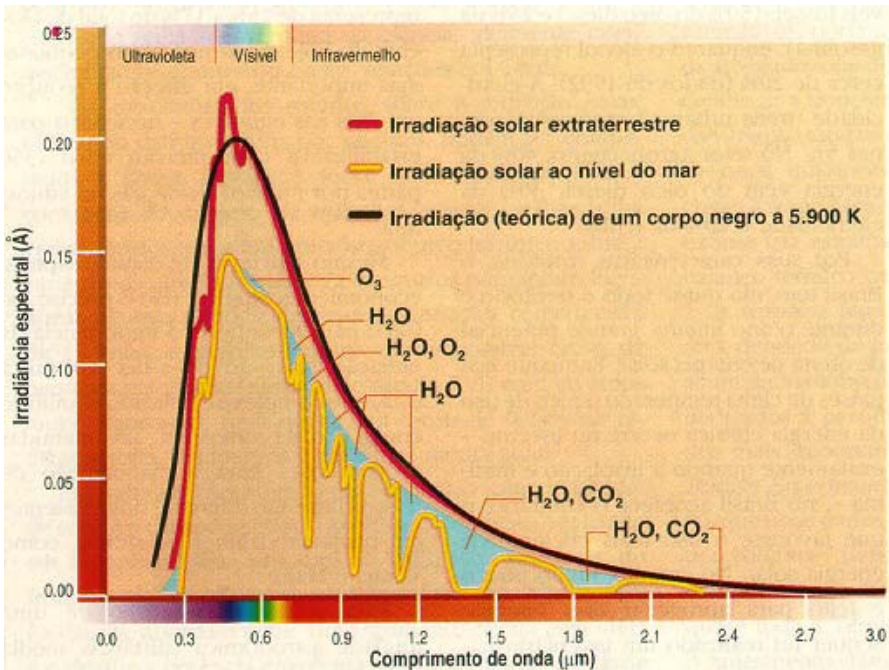
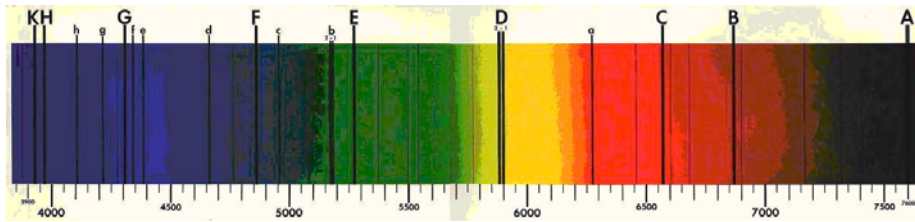
Luz incoerente (comprimento de coerência praticamente nulo).

Ex: Luz solar, lâmpada incandescente.





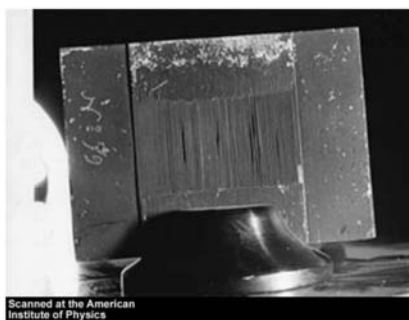
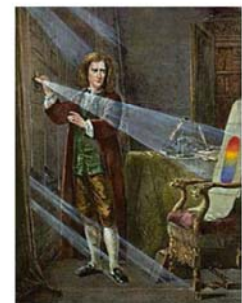
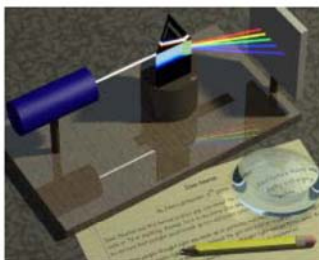
# O ESPECTRO SOLAR



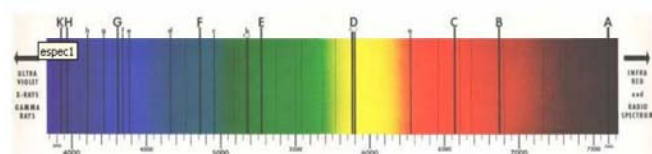
Alguns comprimentos de onda estão ausentes no espectro quando medido na terra, o que é atribuído à absorção de luz por moléculas e átomos da atmosfera da terra e do sol

## Historia

Em 1814 Joseph von Fraunhofer repetiu a experiência Clássica realizada por Isaac Newton



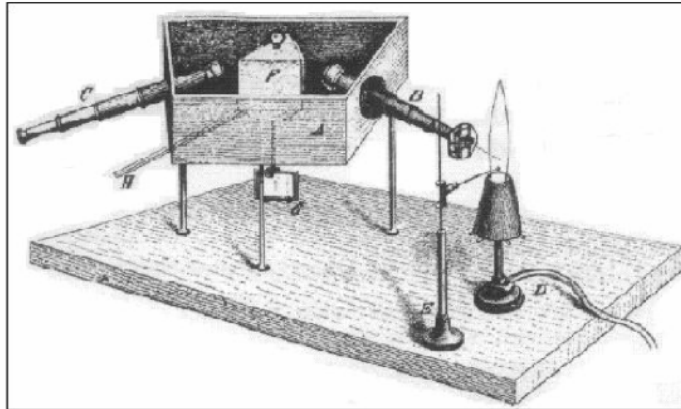
Grade de difração desenvolvida por Fraunhofer



Fraunhofer Identificou mais de 600 linhas Inclusive as linhas D do Sódio

Por volta de 1857 o químico alemão Robert Wilhem Bunsen inventou um queimador a gás, conhecido como “bico de Bunsen”

Em 1859 Bunsen e Gustav Kirchhoff construíram o primeiro espectroscópio



Cada elemento químico mostra um espectro com um arranjo único de linhas brilhantes

Em 1860 Bunsen e Kirchhoff identificaram uma nova linha no azul em amostra de água mineral, assim descobriram o Césio. Que do latim “caesium”, que significa azul-acinzentado.

No ano seguinte descobriram um conjunto de linhas na região do vermelho, assim esta descoberto o rubídio. Que do latim “rubidium”, que significa vermelho.

Durante a eclipse solar de 1868 alguns astrônomos decidiram fazer uma análise espectral da luz proveniente da parte mais externa do sol, assim descobriram o Hélio, palavra derivada do grego “helios” que significa sol

Somente em 1895 o Hélio foi observado na Terra pelo escocês William Ramsay.

Em 1913 o físico dinamarquês Niels Bohr propôs um modelo para o átomo de hidrogênio que combinava os trabalhos de Max Planck, Albert Einstein, e Ernst Rutherford.





FIM



## A natureza ondulatória da Luz Aula Prática



**Eduardo Ribeiro de Azevedo**

Instituto de Física de São Carlos  
Grupo de Ressonância Magnética Nuclear  
Email: azevedo@ifsc.usp.br

**Técnico de Lab.:** Ércio Santoni, Helio Nineli

**Monitores:** Thaís Merlo, Mariana Bunoro, Marcos de Oliveira Junior. Thiago Branquinho, Rafael Moreira



## Roteiro para o Grupo que fará a apresentação do tópico Difração por Fendas e Redes

### **Conteúdo**

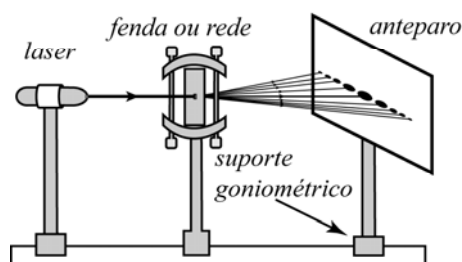
1. Difração por fenda
2. Rede de difração
3. Espectro de uma lâmpada de luz branca.
4. Espectro de uma lâmpada de mercúrio (Espectroscopia de Emissão).

### **Atenção:**

Em alguns dos experimentos que seguem será utilizado luz o Laser. Embora o laser utilizados seja de baixa potência, a luz laser é extremamente direcional e se incidir diretamente no olho pode causar queimaduras na retina. Assim, nunca olhe diretamente para o Laser e tome cuidado para não direcioná-lo para o olho dos demais em sala. Procure não se abaixar durante o experimento de modo que o seu olho fique no mesmo nível do laser.

Nos experimentos com a lâmpada de vapor de Hg, embora a mesma fique protegida em uma caixa própria chamada "housing", procure não olhar diretamente para a lâmpada pois ela emite radiação ultravioleta que também pode causar danos ao olho humano.

## Difração por Fendas



**Figura 1** – Esquema do Arranjo Experimental para experimentos com redes de difração

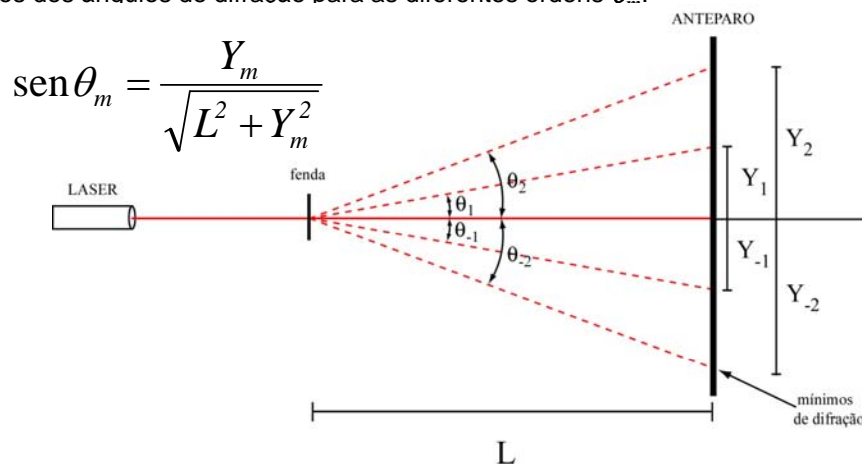
### Arranjo Experimental:

Neste experimento utilizaremos uma fenda estreita para demonstrar o fenômeno de difração da luz. Para isso será utilizados o aparato mostrado na Figura1, que consiste basicamente de um laser de He/Ne uma fenda retangular estreita e um anteparo de projeção. O feixe de laser incide na fenda e é difratado, sendo o padrão de difração observado em um anteparo a uma distância de aproximadamente 1m da fenda. A determinação da posição dos mínimos de difração e a análise utilizando a equação de difração para fendas permite a determinação com grande precisão do diâmetro da fenda que pode ser da ordem de micrometros. Em um experimento complementar, a fenda é substituída por um fio de cabelo, produzindo um padrão similar ao da fenda retangular. Assim, com uma análise similar podemos também determinar a espessura do fio.

### Procedimento Experimental:

- a) Alinhe o feixe de um laser He/Ne em relação ao trilho óptico. Para isso, coloque um pino no centro do trilho e faça o laser incidir sobre ele.
- b) Posicione um anteparo, onde está fixa uma régua com escala em centímetros, a cerca de 1 m de distância de modo que o laser incida na escala da régua, exatamente em seu centro (indicação 30 cm).
- c) Na sua bancada está disponível um slide, identificado como A, com quatro fendas retangulares. Coloque o slide no suporte a aproximadamente 5 cm na frente do laser perpendicularmente ao feixe do laser. Você garantir a perpendicularidade olhando se a reflexão do laser na borda da fenda voltar sobre o feixe incidente. Mova o slide lateralmente, utilizando o suporte com ajuste lateral, de modo a insereir o laser na fenda retangular, de abertura desconhecida, indicada como 1 no slide.
- d) Apague a luz da bancada e observe o padrão de difração formado no anteparo.
- e) Certifique-se que o anteparo de projeção está posicionado paralelamente à fenda. Para isso observe o padrão de difração formado no anteparo e certifique que os mínimos positivos ( $m= 1, 2, 3, \dots$ ) e negativos ( $m= -1, -2, -3, \dots$ ) estejam equidistantes do máximo central. Se não estiverem, gire o anteparo ligeiramente em torno do seu eixo até conseguir esta situação. Após fazer esse ajuste fixe o anteparo apertando o parafuso de fixação.
- f) Quando estiver tudo ajustado, você pode retirar um fotografia da montagem e do padrão de difração caso deseje utilizá-la em seu seminário de apresentação final.
- g) Com a luz da bancada apagada, faça uma marca com lápis da posição dos zeros de intensidade  $Y_m$  do padrão de difração. Procure fazer essa marcação próximo a régua fixa no anteparo para facilitar a medição. Acenda a luz da bancada e utilizando a régua faça a leitura da posição dos zeros de difração em relação ao centro do padrão. Tente pegar pelo menos dois mínimos de cada lado, positivos ( $m = 1, 2$ ) e negativos ( $m = -1, -2$ ).

- h) Meça a distância da rede ao anteparo  $L$  e usando a relação abaixo e a posição do mínimos  $Y_m$ , determine os senos dos ângulos de difração para as diferentes ordens  $\theta_{...}$ .



**Figura 2** – Esquema mostrando a posição dos mínimos de difração de diferentes ordens.

- i) Com os valores dos senos dos ângulos  $\theta_m$  e o comprimento de onda do laser de He/Ne  $\lambda = 632.8$  nm utilize a equação abaixo para estimar a abertura da fenda utilizando as medidas com  $m = -2, -1, 1, 2$ .

$$a = \frac{m\lambda}{\text{sen}\theta_m}$$

- j) Com os resultados da quatro medidas calcule o valor médio da abertura da fenda.

- k) Repita o procedimento anterior para a fenda 2 do slide A .

Número da Fenda	Ordem de difração, $m$	Posição do mínimo $Y_m$ (cm)	$\text{sen}\theta_m$	abertura da fenda (mm)
1				
	<b>Valor médio da abertura da fenda:</b>			
2				
	<b>Valor médio da abertura da fenda:</b>			
Distância fenda-anteparo:				



- l) Retire um fio de cabelo de membros do grupo e posicione-o em frente ao feixe de laser. O que acontece? Meça a posição dos mínimos ( $m = -2, -1, 1, 2$ ) usando o mesmo procedimento anterior. Calcule o seno do ângulo de difração e estime a espessura do fio de cabelo. Neste caso  $a$  é a espessura do fio de cabelo.

$$a = \frac{m\lambda}{\text{sen}\theta_m}$$

Fio de cabelo	Ordem de difração, $m$	Posição do mínimo $Y_m$ (cm)	$\text{sen}\theta_m$	Espessura do fio (mm)
<b>1</b>				
<b>Espessura do fio de cabelo:</b>				
Distância fenda-anteparo:				

- m) Substitua o slide com as fendas simples por outro com fendas duplas com diferentes separações entre as fendas, indicado como B.
- n) Posicione o slide de modo a visualizar o padrão da fenda dupla identificada como 1. Meça a largura do máximo central ( $D$ ) de difração e o número de máximos de interferência localizados no mesmo ( $N$ ). A partir daí determine a distância entre máximos de interferência como  $D/(N-1)$ .

- o) Utilizando esse valor e a equação para interferência para  $m=1$ , determine a separação entre as fendas

$$d = \frac{\lambda}{\text{sen}\theta_m}$$



- p) Substitua a fenda dupla 1 pela 2. Observe o que acontece com o padrão de difração (em relação ao da fenda 1). Você pode inferir (sem fazer medidas) qual das duas fendas possui maior separação. Justifique sua resposta baseado na equação para os mínimos de difração.

fenda	Posição do primeiro máximo de interferência $Y_m$ (cm)	$\text{sen}\theta_m$	Separação entre as fenda (mm)
<b>1</b>			
Distância fenda-anteparo:			

- q) Substitua o slide B pelo slide C. No mesmo existem fendas dupla, tripla, quádrupla e quádrupla, todas de mesma largura. Observe o padrão de interferência em cada uma e ordene as fendas em termos da largura dos máximos de interferência. A partir do comportamento observado induza o que acontece com o padrão de difração quando aumentamos o número de fendas. Não é necessário fazer as medidas novamente, apenas descreva o que acontece com o padrão à medida que se varia a largura das fendas e discuta se está de acordo com o esperado
- r) Com no que viu até aqui faça uma discussão detalhada (suportada pelas equações pertinentes) sobre difração por fendas. Alguns tópicos para sugeridos para a discussão são: i) Como varia o padrão de difração a medida que aumentamos ou diminuimos a largura das fendas? Como varia o padrão de interferência a medida que aumentamos ou diminuimos a separação entre as fendas? Como varia o padrão de interferência a medida que aumentamos ou diminuimos o comprimento de onda? Por que razão (qualitativamente) aparecem os máximos secundários quando existem mais que duas fendas?

## Redes de Difração



**Figura 3** – Esquema do Arranjo Experimental para experimentos com redes de difração

### Arranjo Experimental:

Uma rede de difração é um conjunto de fendas paralelas; com da ordem de centenas de fendas por milímetro. Isso faz com que os máximos de interferência sejam bastante intensos e estreitos. Como o número de fendas é da ordem de centenas por milímetro, a distância entre elas é da ordem de micrômetros, apenas uma ordem de grandeza a mais do que o comprimento de onda da luz visível. Sendo a distância até o anteparo da ordem de um metro, a equação  $m\lambda = d \sin \theta$  diz que a diferença entre os máximos será da ordem de vários centímetros, e portanto pode ser medida sem grandes dificuldades. Neste experimento iremos observar e medir o padrão de interferência gerado por uma rede de difração e, a partir do mesmo, vamos determinar o número de fendas de uma rede. Para isso, usaremos um laser de He/Ne posicionado a ~10 cm de uma rede de difração e um anteparo localizado a ~5 cm da rede, conforme mostrado na figura 3.

### Procedimento Experimental:

- a) Alinhe o feixe de um laser He/Ne em relação ao trilho óptico.
- b) Na frente do laser coloque uma rede de difração identificada como  $D$ .
- c) Posicione um anteparo fixo a aproximadamente 30 cm de distância da rede. Certifique-se que o anteparo de projeção está posicionado paralelamente à rede, figuras 5. Para isso, observe o padrão de difração formado no anteparo e certifique que os máximos positivos ( $m = 1, 2, \dots$ ) e negativos ( $m = -1, -2, \dots$ ) estão equidistantes do máximo central. Caso não estejam gire o anteparo para obter essa situação.
- d) Quando estiver tudo ajustado, se desejar retire uma fotografia da montagem e do padrão caso deseje usá-lo em seu seminário de apresentação final.
- e) No anteparo meça a distância entre máximos de interferência até segunda ordem ( $m = -2, -1, 1, 2$ ) e o máximo central ( $m = 0$ ).
- f) Utilizando esses dados e a distancia  $L$  entre a rede e o anteparo determine o seno do ângulo  $\theta_m$  para cada máximo.
- g) Utilize os senos ângulos  $\theta_m$  e o comprimento de onda do laser de He/Ne e determine a separação  $d$  entre as fendas da rede de difração. Calcule o parâmetro da rede (número de fendas da rede de difração)

$$\lambda = \frac{d \sin \theta}{m} \quad \frac{\text{número de fendas}}{\text{mm}} = \frac{1 \text{ mm}}{d}$$



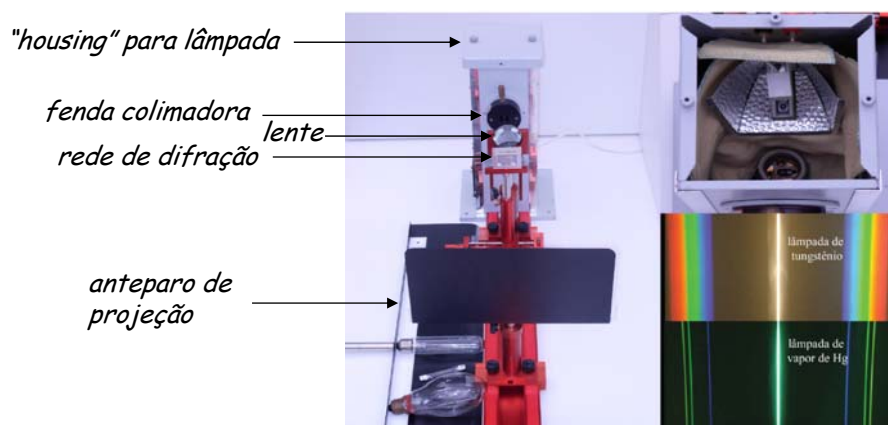
h) Substitua a rede de difração pela rede identificada como G. Use o mesmo procedimento para calcular o número de linhas da rede, mas agora faça o cálculo utilizando somente os máximos de primeira ordem.

	Ordem de difração, $m$	Distância em relação ao máximo central (cm)	Ângulo de difração $\theta_m$ (graus)	Separação entre as linhas da rede (mm)
Rede D	2			
	1			
	-1			
	-2			
Rede G	1			
	-1			
Número de linhas/mm da rede D:		Número de linhas/mm na rede G:		

i) Substitua a rede de difração por um pedaço de CD com a parte reflexiva removida. Use o mesmo procedimento para calcular o número de trilhas do CD.

	Ordem de difração, $m$	Distância em relação ao máximo central (cm)	Ângulo de difração $\theta_m$ (graus)	Separação entre as trilhas (mm)
CD	1			
	-1			
Número de trilhas do CD:		Número de trilhas do DVD:		

## Espectroscopia Óptica (opcional)

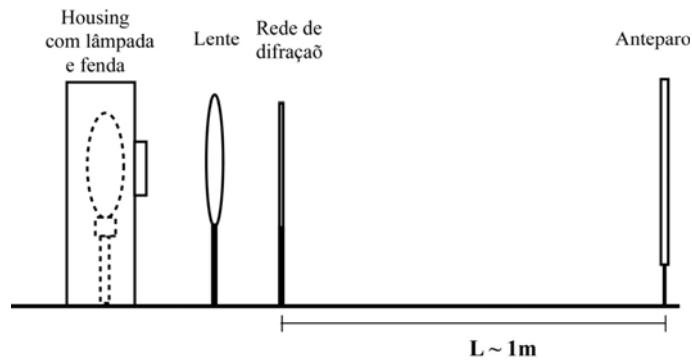


**Figura 4** – Esquema do Arranjo Experimental para Experimentos de Espectroscopia Óptica.

### Arranjo Experimental:

Neste experimento estudaremos uma das principais aplicações dos fenômenos de interferência e difração. Trata-se da espectroscopia óptica, que além de ter sido fundamental na elaboração da teoria quântica moderna, também é um dos principais métodos experimentais para caracterização e identificações de compostos. Na montagem experimental a luz proveniente de uma fonte térmica (lâmpada de filamento tungstênio ou de vapor de Hg) é colimada por uma fenda estreita e então focalizada, por uma lente de distância focal curta, na posição onde está uma rede de difração. A rede de difração separa a luz em seus diversos comprimentos de onda que são então projetados em um anteparo. À esquerda, o suporte para a lâmpada, a lente e a rede de difração, e o anteparo. À direita (em cima) detalhe mostrando os soquetes para conexão das lâmpadas filamento de tungstênio e das lâmpadas de vapores metálicos. À direita (em baixo) espectro típicos de uma lâmpada de filamento de tungstênio e de vapor de mercúrio.

# Espectroscopia Óptica de Emissão



**Figura 5** – Esquema do Arranjo Experimental para Experimentos de Espectroscopia Óptica de absorção.

## Arranjo Experimental:

Neste experimento utilizaremos o arranjo experimental da Figura 5 para estudar a emissão de luz de forma discreta (somente em algumas freqüência/cores) por uma lâmpada de vapor de Hg. Para isso utilizaremos a montagem da Figura 5. A lâmpada de vapor de Hg encontra-se dentro de uma caixa (housing) e emite luz com freqüências (cores) características de acordo com a configuração dos níveis de energia do Hg. Assim, o feixe de luz que emerge colimado pelo conjunto fenda e lente incide na rede de difração de modo que o seu padrão espectral seja projetado em um anteparo a ~70cm de distância da rede, permitindo a sua leitura e determinação dos comprimentos de onda emitidos pela lâmpada de Hg.

## Procedimento Experimental:



- Monte o aparato experimental constituído por um suporte para lâmpada com uma fenda variável acoplada, uma lente de distância focal  $\sim 10$  cm, um suporte para rede de difração, e um anteparo de projeção a aproximadamente 62 cm da fenda.
- Com o cabo do suporte para lâmpada desligado da tomada (chave inferior do suporte para baixo), insira uma lâmpada de vapor de mercúrio, rosqueando-a até que se escute um leve “click”. Esse som se refere ao fechamento de uma chave interna do suporte que permite que se habilite o circuito da lâmpada.
- Ligue a lâmpada em 220 V (ambas as chave superior e inferior do suporte para cima) e aguarde até que a sua luminosidade máxima tenha sido atingida ( $\sim 5$  min).
- Alinhe todo o sistema de modo que a luz proveniente da fenda passe pelo centro da lente e seja projetada no centro do anteparo de projeção. Ajuste a distância lente-fenda até que uma imagem nítida da lente seja formada no centro do anteparo.
- Insira a rede de difração identificada como G. Você deverá observar a cor branca azulado no centro do padrão (máximo central), e linhas coloridas de cada lado.
- Ajuste novamente a posição da lente até que uma imagem nítida da fenda seja formada no centro do anteparo, e alinhe o sistema para que as linhas correspondentes (de mesma cor) em cada lado fiquem equidistantes do máximo central.
- Observe e descreva o padrão espectral de primeira ordem formado no anteparo e, se necessário, ajuste novamente a posição da lente para que essas linhas apareçam nítidas. Ajuste também a abertura da fenda de modo a minimizar a largura das linhas. Quando estiver tudo ajustado peça para um monitor tirar uma fotografia da montagem e do padrão para você utilizar em seu seminários de apresentação final.



- h) Para cada uma das linhas espectrais observadas, meça a sua posição, isto é, a distância entre a linha e o máximo central. A partir desse valor (e da distância entre a rede e o anteparo), você pode determinar o ângulo de difração  $\theta$  da mesma maneira que foi feita para o experimento de redes difração.
- i) Utilize a equação abaixo, os ângulos  $\theta$  calculados e a separação  $d$  entre as fendas da rede de difração e calcule os comprimentos de onda correspondente a cada raia observada no espectro. Basta utilizar as linhas correspondente a  $m=1$ .

$$\lambda = \frac{d \sin \theta}{m} \quad \frac{\text{número de fendas}}{\text{mm}} = \frac{1 \text{ mm}}{d}$$

j) Explique por que você observa as linhas UV, mesmo que o comprimento de onda da mesma esteja fora da faixa de sensibilidade do olho humano. A cor desta raia corresponde a sua frequência?

k) Compare com os valores encontrados na referência **Quim. Nova, Vol. 31, No. 8, 2199-2204, 2008.**

Raia	Distância em relação ao máximo central (cm)	Ângulo de difração $\theta$ (graus)	Comprimento de onda (nm)
laranja			
verde			
azul			
UV 1			
UV 2			
Distância rede-anteparo:		Número de linhas da rede:	



- l) Desligue a lâmpada de vapor (mova a chave inferior do suporte para baixo e em seguida remova o cabo da tomada) e aguarde até que ela esfrie (~15 min).
- m) Substitua a lâmpada de vapor por uma fonte lâmpada incandescente. Ligue a lâmpada em 220V.
- o) Alinhe todo o sistema de modo que a luz proveniente da fenda passe pelo centro da lente e seja projetada no centro do anteparo de projeção. Ajuste a distância lente-fenda até que uma imagem nítida da fenda seja formada no centro do anteparo.
- p) Observe e discuta o padrão observado no anteparo, explicando o que acontece com a luz branca ao passar pela grade. Quando estiver tudo ajustados e desejar retire uma fotografia da montagem e do padrão para utilizar em seu seminário de apresentação final.
- q) Meça a distância do máximo central até o ponto no anteparo em que você deixa de enxergar a luz azul. Com essa medida e sabendo a distância rede-anteparo e a distância entre as fendas da rede determine o ângulo  $\theta$  e o comprimento de onda correspondente, utilizando o mesmo procedimento anterior. Esse comprimento de onda corresponde ao mínimo comprimento de onda que seu olho é capaz de enxergar. Repita o procedimento e determine o máximo comprimento de onda que você é capaz de enxergar.

Cor da luz	Distância em relação ao máximo central (cm)	Ângulo de difração $\theta$ (graus)	Comprimento de onda (nm)
azul			
vermelho			
Distância rede-anteparo: Número de linhas da rede:			



# A natureza ondulatória da Luz

## Aula Prática



**Eduardo Ribeiro de Azevedo**

Instituto de Física de São Carlos  
Grupo de Ressonância Magnética Nuclear  
Email: azevedo@ifsc.usp.br

**Técnico de Lab.:** Ércio Santoni, Helio Nineli

**Monitores:** Thaís Merlo, Mariana Bunoro, Marcos de Oliveira Junior. Thiago Branquinho, Rafael Moreira



## Roteiro para o Grupo que fará a apresentação do tópico Espectroscopia Óptica de Emissão

### Conteúdo

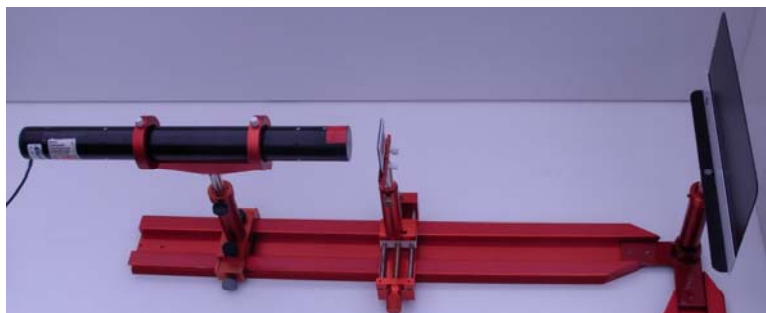
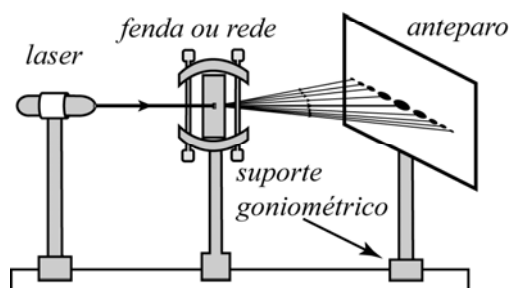
1. Rede de difração
2. Espectro de uma lâmpadas de vapor (Espectroscopia de Emissão).
3. Espectro de uma lâmpada de luz branca.
4. Difração por fenda

### Atenção:

Em alguns dos experimentos que seguem será utilizado luz o Laser. Embora o laser utilizados seja de baixa potência, a luz laser é extremamente direcional e se incidir diretamente no olho pode causar queimaduras na retina. Assim, nunca olhe diretamente para o Laser e tome cuidado para não direcioná-lo para o olho dos demais em sala. Procure não se abaixar durante o experimento de modo que o seu olho fique no mesmo nível do laser.

Nos experimentos com a lâmpada de vapor de Hg, embora a mesma fique protegida em uma caixa própria chamada "housing", procure não olhar diretamente para a lâmpada pois ela emite radiação ultravioleta que também pode causar danos ao olho humano.

## Redes de Difração



**Figura 3** – Esquema do Arranjo Experimental para experimentos com redes de difração

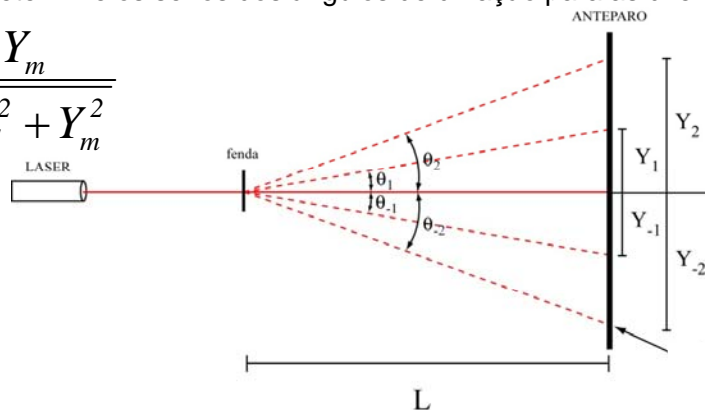
### Arranjo Experimental:

Uma rede de difração é um conjunto de fendas paralelas; com da ordem de centenas de fendas por milímetro. Isso faz com que os máximos de interferência sejam bastante intensos e estreitos. Como o número de fendas é da ordem de centenas por milímetro, a distância entre elas é da ordem de micrômetros, apenas uma ordem de grandeza a mais do que o comprimento de onda da luz visível. Sendo a distância até o anteparo da ordem de um metro, a equação  $m\lambda = d\sin\theta$  diz que a diferença entre os máximos será da ordem de vários centímetros, e portanto pode ser medida sem grandes dificuldades. Neste experimento iremos observar e medir o padrão de interferência gerado por uma rede de difração e, a partir do mesmo, vamos determinar o número de fendas de uma rede. Para isso, usaremos um laser de He/Ne posicionado a ~10 cm de uma rede de difração e um anteparo localizado a ~5 cm da rede, conforme mostrado na figura 3.

### Procedimento Experimental:

- a) Alinhe o feixe de um laser He/Ne em relação ao trilho óptico. Para isso, coloque um pino no centro do trilho e faça o laser incidir sobre ele.
- b) Na frente do laser coloque uma rede de difração identificada como F.
- c) Posicione um anteparo fixo a aproximadamente 30 cm de distância da rede. Certifique-se que o anteparo de projeção está posicionado paralelamente à rede, figuras 5. Para isso, observe o padrão de difração formado no anteparo e certifique que os máximos positivos ( $m = 1, 2, \dots$ ) e negativos ( $m = -1, -2, \dots$ ) estão equidistantes do máximo central. Caso não estejam gire o anteparo para obter essa situação.
- d) Quando estiver tudo ajustado, se desejar, retire uma fotografia da montagem e do padrão caso deseje usá-lo em seu seminário de apresentação final.
- e) Meça a distância da rede ao anteparo  $L$  e usando a relação abaixo e a posição dos máximos de interferência  $Y_m$  ( $m = -2, -1, 1, 2$ ) e determine os senos dos ângulos de difração para as diferentes ordens  $\sin\theta_m$ .

$$\sin\theta_m = \frac{Y_m}{\sqrt{L^2 + Y_m^2}}$$



f) Utilize os  $\text{sen } \theta_m$  e o comprimento de onda do laser de He/Ne  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  e determine a separação  $d$  entre as fendas da rede de difração. Calcule o parâmetro da rede (número de fendas da rede de difração)

$$\lambda = \frac{d \text{sen } \theta}{m} \quad \frac{\text{número de fendas}}{\text{mm}} = \frac{1 \text{ mm}}{d}$$

f) Substitua a rede F pela rede G, repita o procedimento anterior e calcule o parâmetro de rede para esta fenda.

	Ordem de difração, $m$	Distância em relação ao máximo central (cm)	$\text{sen } \theta_m$ (graus)	Separação entre as linhas da rede (mm)
Rede F	2			
	1			
	-1			
	-2			
Rede G	1			
	-1			
Número de linhas/mm da rede F:		Número de linhas/mm na rede G:		

## Espectroscopia Óptica

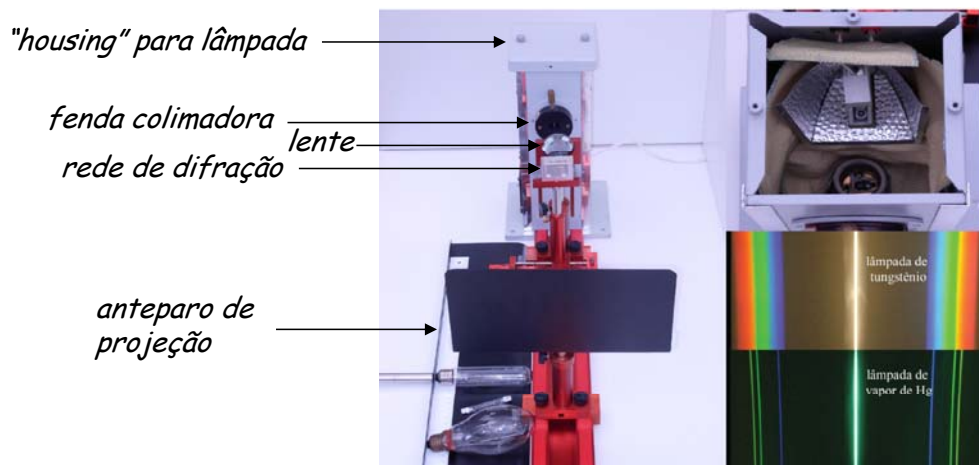
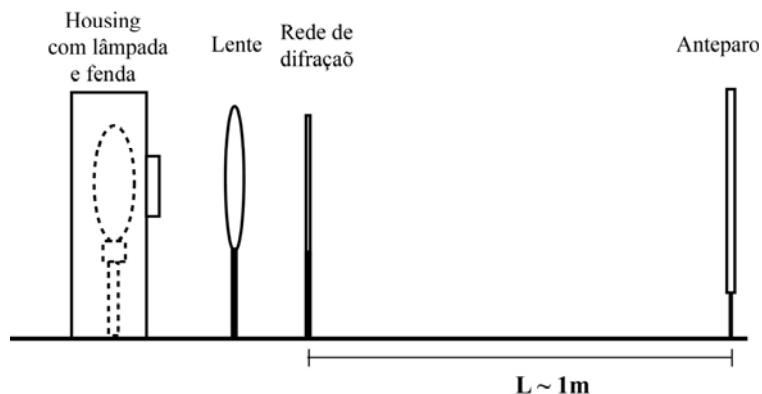


Figura 4 – Esquema do Arranjo Experimental para Experimentos de Espectroscopia Óptica.

### Arranjo Experimental:

Neste experimento estudaremos uma das principais aplicações dos fenômenos de interferência e difração. Trata-se da espectroscopia óptica, que além de ter sido fundamental na elaboração da teoria quântica moderna, também é um dos principais métodos experimentais para caracterização e identificações de compostos. Na montagem experimental a luz proveniente de uma fonte térmica (lâmpada de filamento tungstênio ou de vapor de Hg) é colimada por uma fenda estreita e então focalizada, por uma lente de distância focal curta, na posição onde está uma rede de difração. A rede de difração separa a luz em seus diversos comprimentos de onda que são então projetados em um anteparo. À esquerda, o suporte para a lâmpada, a lente e a rede de difração, e o anteparo. À direita (em cima) detalhe mostrando os soquetes para conexão das lâmpadas filamento de tungstênio e das lâmpadas de vapores metálicos. À direita (em baixo) espectro típicos de uma lâmpada de filamento de tungstênio e de vapor de mercúrio.





**Figura 5** – Esquema do Arranjo Experimental para Experimentos de Espectroscopia Óptica de absorção.

## Arranjo Experimental:

Neste experimento utilizaremos o arranjo experimental da Figura 5 para estudar a emissão de luz de forma discreta (somente em algumas frequência/cores) por uma lâmpada de vapor de Hg. Para isso utilizaremos a montagem da Figura 5. A lâmpada de vapor de Hg encontra-se dentro de uma caixa (housing) e emite luz com frequências (cores) características de acordo com a configuração dos níveis de energia do Hg. Assim, o feixe de luz que emerge colimado pelo conjunto fenda e lente incide na rede de difração de modo que o seu padrão espectral seja projetado em um anteparo a ~60cm de distância da rede, permitindo a sua leitura e determinação dos comprimentos de onda emitidos pela lâmpada de Hg.

## Procedimento Experimental:



- Monte o aparato experimental constituído por um suporte para lâmpada com uma fenda variável acoplada, uma lente de distância focal  $\sim 10$  cm, um suporte para rede de difração, e um anteparo de projeção a aproximadamente 62 cm da fenda.
- Com o cabo do suporte para lâmpada desligado da tomada (chave inferior do suporte para baixo), insira uma lâmpada de vapor de mercúrio, rosqueando-a até que se escute um leve “click”. Esse som se refere ao fechamento de uma chave interna do suporte que permite que se habilite o circuito da lâmpada.
- Ligue a lâmpada em 220 V (ambas as chave superior e inferior do suporte para cima) e aguarde até que a sua luminosidade máxima tenha sido atingida ( $\sim 5$  min).
- Alinhe todo o sistema de modo que a luz proveniente da fenda passe pelo centro da lente e seja projetada no centro do anteparo de projeção. Ajuste a distância lente-fenda até que uma imagem nítida da lente seja formada no centro do anteparo.
- Insira a rede de difração identificada como G. Você deverá observar a cor branca azulado no centro do padrão (máximo central), e linhas coloridas de cada lado.
- Ajuste novamente a posição da lente até que uma imagem nítida da fenda seja formada no centro do anteparo, e alinhe o sistema para que as linhas correspondentes (de mesma cor) em cada lado fiquem equidistantes do máximo central.
- Observe e descreva o padrão espectral de primeira ordem formado no anteparo e, se necessário, ajuste novamente a posição da lente para que essas linhas apareçam nítidas. Ajuste também a abertura da fenda de modo a minimizar a largura das linhas. Quando estiver tudo ajustado peça para um monitor tirar uma fotografia da montagem e do padrão para você utilizar em seu seminários de apresentação final.



h) Para cada uma das linhas espectrais observadas, meça a sua posição, isto é, a distância entre a linha e o máximo central. A partir desse valor (e da distância entre a rede e o anteparo), você pode determinar o seno do ângulo de difração  $\theta$  da mesma maneira que foi feita para o experimento de redes difração.

i) Utilize a equação abaixo, os  $\text{sen}\theta$  calculados e a separação  $d$  entre as fendas da rede de difração e calcule os comprimentos de onda correspondente a cada raia observada no espectro. Basta utilizar as linhas correspondente a  $m=1$ .

$$\lambda = \frac{d \text{sen}\theta}{m} \quad \frac{\text{número de fendas}}{\text{mm}} = \frac{1 \text{ mm}}{d}$$

j) Explique por que você observa as linhas UV, mesmo que o comprimento de onda da mesma esteja fora da faixa de sensibilidade do olho humano. A cor desta raia corresponde a sua frequência?

k) Varie a abertura da fenda de entrada e descreva o que acontece com a largura das linhas. Discuta o que acontece com a largura das linhas se abrir ou fechar a fenda de entrada. O que isso significa em termos de resolução espectral.

l) Compare com os valores encontrados na referência *Quim. Nova, Vol. 31, No. 8, 2199-2204, 2008*.

Raia	Distância em relação ao máximo central (cm)	$\text{sen}\theta_m$	Comprimento de onda (nm)
laranja			
verde			
azul			
UV 1			
UV 2			
Distância rede-anteparo:		Número de linhas da rede:	



m) Mude na distância rede anteparo para 31 cm e substitua a rede G pela rede F. Discuta o que acontece com o padrão de difração. Observe o que acontece com a separação entre as linhas para segunda e terceira ordens de difração.

n) Discuta o que acontece com a resolução do espectro (separação entre linhas referentes a diferentes comprimentos de onda) à medida que se aumenta a ordem de difração. Qual é a vantagem e a desvantagem de se utilizar ordem maiores de difração para análise de espectros de emissão?

o) Usando o mesmo procedimento anterior determine os comprimentos de onda. Compare com os resultados anteriores e discuta qual é mais preciso

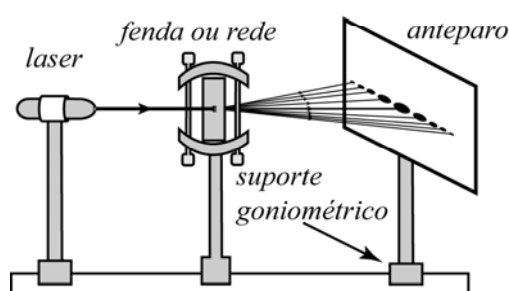
Raia	Distância em relação ao máximo central (cm)	Comprimento de onda (nm)
laranja		
verde		
azul		
UV 1		
UV 2		
Distância rede-anteparo:		Número de linhas da rede:



- Desligue a lâmpada de vapor (mova a chave inferior do suporte para baixo e em seguida remova o cabo da tomada) e aguarde até que ela esfrie (~15 min).
- Substitua a lâmpada de vapor por uma fonte lâmpada incandescente. Ligue a lâmpada em 220V.
- Alinhe todo o sistema de modo que a luz proveniente da fenda passe pelo centro da lente e seja projetada no centro do anteparo de projeção. Ajuste a distância lente-fenda até que uma imagem nítida da fenda seja formada no centro do anteparo.
- Observe e discuta o padrão observado no anteparo, explicando o que acontece com a luz branca ao passar pela grade. Quando estiver tudo ajustado e desejar retire uma fotografia da montagem e do padrão para utilizar em seu seminário de apresentação final.
- Meça a distância do máximo central até o ponto no anteparo em que você deixa de enxergar a luz azul. Com essa medida e sabendo a distância rede-anteparo e a distância entre as fendas da rede determine o seno do ângulo  $\theta$  e o comprimento de onda correspondente, utilizando o mesmo procedimento anterior. Esse comprimento de onda corresponde ao mínimo comprimento de onda que seu olho é capaz de enxergar. Repita o procedimento e determine o máximo comprimento de onda que você é capaz de enxergar.

Cor da luz	Distância em relação ao máximo central (cm)	Ângulo de difração $\theta$ (graus)	Comprimento de onda (nm)
azul			
vermelho			
Distância rede-anteparo: Número de linhas da rede:			

## Difração por Fendas (opcional)



**Figura 1** – Esquema do Arranjo Experimental para experimentos com redes de difração

### Arranjo Experimental:

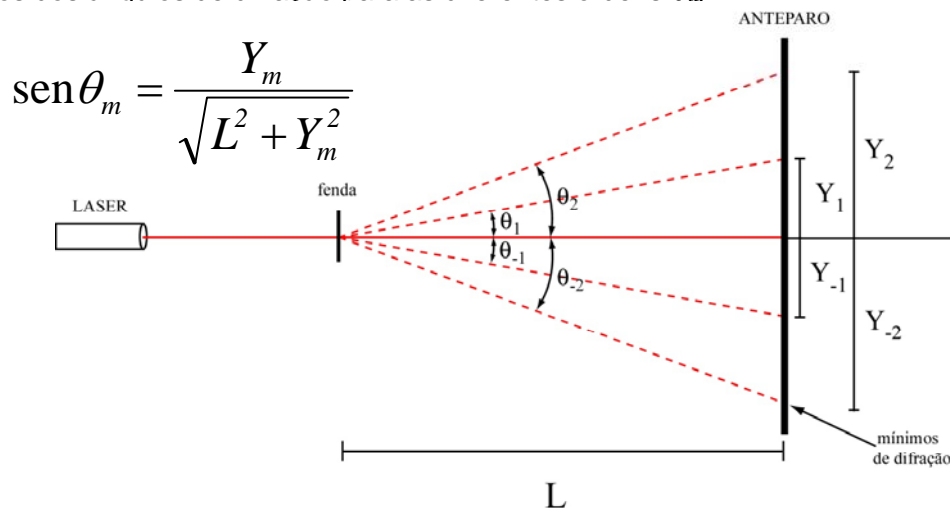
Neste experimento utilizaremos uma fenda estreita para demonstrar o fenômeno de difração da luz. Para isso será utilizado o aparato mostrado na Figura 1, que consiste basicamente de um laser de He/Ne, uma fenda retangular estreita e um anteparo de projeção. O feixe de laser incide na fenda e é difratado, sendo o padrão de difração observado em um anteparo a uma distância de aproximadamente 1m da fenda. A determinação da posição dos mínimos de difração e a análise utilizando a equação de difração para fendas permite a determinação com grande precisão do diâmetro da fenda que pode ser da ordem de micrometros. Em um experimento complementar, a fenda é substituída por um fio de cabelo, produzindo um padrão similar ao da fenda retangular. Assim, com uma análise similar podemos também determinar a espessura do fio.

## Procedimento Experimental:



- Alinhe o feixe de um laser He/Ne em relação ao trilho óptico. Para isso, coloque um pino no centro do trilho e faça o laser incidir sobre ele.
- Posicione um anteparo, onde está fixa uma régua com escala em centímetros, a cerca de 1 m de distância de modo que o laser incida na escala da régua, exatamente em seu centro (indicação 30 cm).
- Na sua bancada está disponível um slide, identificado como A, com quatro fendas retangulares. Coloque o slide no suporte a aproximadamente 5 cm na frente do laser perpendicularmente ao feixe do laser. Você garantir a perpendicularidade olhando se a reflexão do laser na borda da fenda voltar sobre o feixe incidente. Mova o slide lateralmente, utilizando o suporte com ajuste lateral, de modo a insideir o laser na fenda retangular, de abertura desconhecida, indicada como 1 no slide.
- Apague a luz da bancada e observe o padrão de difração formado no anteparo.
- Certifique-se que o anteparo de projeção está posicionado paralelamente à fenda. Para isso observe o padrão de difração formado no anteparo e certifique que os mínimos positivos ( $m= 1, 2, 3...$ ) e negativos ( $m= -1, -2, -3...$ ) estejam eqüidistantes do máximo central. Se não estiverem, gire o anteparo ligeiramente em torno do seu eixo até conseguir esta situação. Após fazer esse ajuste fixe o anteparo apertando o parafuso de fixação.
- Com a luz da bancada apagada, faça uma marca com lápis da posição dos zeros de intensidade  $Y_m$  do padrão de difração. Procure fazer essa marcação próximo a régua fixa no anteparo para facilitar a medição. Acenda a luz da bancada e utilizando a régua faça a leitura da posição dos zeros de difração em relação ao centro do padrão. Tente pegar pelo menos dois mínimos de cada lado, positivos ( $m = 1, 2$ ) e negativos ( $m = -1, -2$ ).

- Meça a distância da rede ao anteparo  $L$  e usando a relação abaixo e a posição do mínimos  $Y_m$ , determine os senos dos ângulos de difração para as diferentes ordens  $\theta...$



- Com os valores dos ângulos  $\theta_m$  e o comprimento de onda do laser de He/Ne  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  utilize a equação abaixo para estimar a abertura da fenda utilizando as medidas com  $m= -2, -1, 1, 2$ .

$$a = \frac{m\lambda}{\text{sen}\theta_m}$$

- Com os resultados da quatro medidas calcule o valor médio da abertura da fenda.

Número da Fenda	Ordem de difração, m	Posição do mínimo $Y_m$ (cm)	$\text{sen}\theta_m$	abertura da fenda (mm)
1				
<b>Valor médio da abertura da fenda:</b>				
Distância fenda-anteparo:				

- l) Retire um fio de cabelo de membros do grupo e posicione-o em frente ao feixe de laser. O que acontece? Meça a posição dos mínimos ( $m = -2, -1, 1, 2$ ) usando o mesmo procedimento anterior. Calcule os ângulos de difração e estime a espessura do fio de cabelo. Neste caso  $a$  é a espessura do fio de cabelo.

$$a = \frac{m\lambda}{\text{sen}\theta_m}$$

Fio de cabelo	Ordem de difração, m	Posição do mínimo $Y_m$ (cm)	$\text{sen}\theta_m$	Espessura do fio (mm)
1				
<b>Espessura do fio de cabelo:</b>				
Distância fenda-anteparo:				





# A natureza ondulatória da Luz

## Aula Prática



**Eduardo Ribeiro de Azevedo**

Instituto de Física de São Carlos  
Grupo de Ressonância Magnética Nuclear  
Email: azevedo@ifsc.usp.br

**Técnico de Lab.:** Ércio Santoni, Helio Nineli

**Monitores:** Thaís Merlo, Mariana Bunoro, Marcos de Oliveira Junior. Thiago Branquinho, Rafael Moreira

## Roteiro para o Grupo que fará a apresentação do tópico Espectroscopia Óptica de Absorção



### Conteúdo

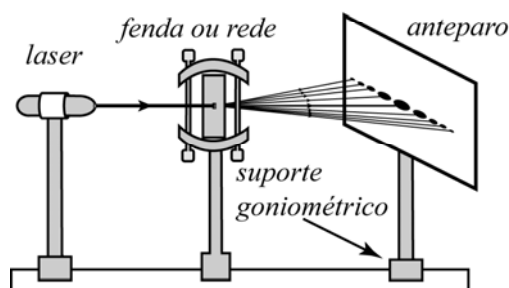
1. Rede de difração
2. Espectro de uma lâmpada de luz branca.
3. Espectro de absorção de soluções de sais de terra rara
4. Espectro de emissão de uma lâmpada de vapor de Hg.
5. Absorção de soluções de sais de terra rara iluminador por uma lâmpada de vapor de Hg.
6. Difração por fenda

### Atenção:

Em alguns dos experimentos que seguem será utilizado luz o Laser. Embora o laser utilizados seja de baixa potência, a luz laser é extremamente direcional e se incidir diretamente no olho pode causar queimaduras na retina. Assim, nunca olhe diretamente para o Laser e tome cuidado para não direcioná-lo para o olho dos demais em sala. Procure não se abaixar durante o experimento de modo que o seu olho fique no mesmo nível do laser.

Nos experimentos com a lâmpada de vapor de Hg, embora a mesma fique protegida em uma caixa própria chamada "housing", procure não olhar diretamente para a lâmpada pois ela emite radiação ultravioleta que também pode causar danos ao olho humano.

## Redes de Difração



Esquema do Arranjo Experimental para experimentos com redes de difração

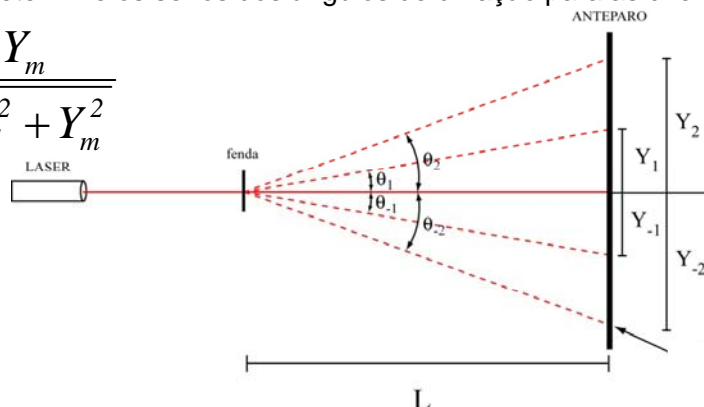
### Arranjo Experimental:

Uma rede de difração é um conjunto de fendas paralelas; com da ordem de centenas de fendas por milímetro. Isso faz com que os máximos de interferência sejam bastante intensos e estreitos. Como o número de fendas é da ordem de centenas por milímetro, a distância entre elas é da ordem de micrômetros, apenas uma ordem de grandeza a mais do que o comprimento de onda da luz visível. Sendo a distância até o anteparo da ordem de um metro, a equação  $m\lambda = d \sin \theta$  diz que a diferença entre os máximos será da ordem de vários centímetros, e portanto pode ser medida sem grandes dificuldades. Neste experimento iremos observar e medir o padrão de interferência gerado por uma rede de difração e, a partir do mesmo, vamos determinar o número de fendas de uma rede. Para isso, usaremos um laser de He/Ne posicionado a ~10 cm de uma rede de difração e um anteparo localizado a ~5 cm da rede, conforme mostrado na figura 3.

### Procedimento Experimental:

- a) Alinhe o feixe de um laser He/Ne em relação ao trilho óptico. Para isso, coloque um pino no centro do trilho e faça o laser incidir sobre ele.
- b) Na frente do laser coloque uma rede de difração identificada como F.
- c) Posicione um anteparo fixo a aproximadamente 30 cm de distância da rede. Certifique-se que o anteparo de projeção está posicionado paralelamente à rede, figuras 5. Para isso, observe o padrão de difração formado no anteparo e certifique que os máximos positivos ( $m = 1, 2, \dots$ ) e negativos ( $m = -1, -2, \dots$ ) estão equidistantes do máximo central. Caso não estejam gire o anteparo para obter essa situação.
- d) Quando estiver tudo ajustado, se desejar, retire uma fotografia da montagem e do padrão caso deseje usá-lo em seu seminário de apresentação final.
- e) Meça a distância da rede ao anteparo  $L$  e usando a relação abaixo e a posição dos máximos de interferência  $Y_m$  ( $m = -2, -1, 1, 2$ ) e determine os senos dos ângulos de difração para as diferentes ordens  $\sin \theta_m$ .

$$\sin \theta_m = \frac{Y_m}{\sqrt{L^2 + Y_m^2}}$$



f) Utilize os  $\text{sen } \theta_m$  e o comprimento de onda do laser de He/Ne  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  e determine a separação  $d$  entre as fendas da rede de difração. Calcule o parâmetro da rede (número de fendas da rede de difração)

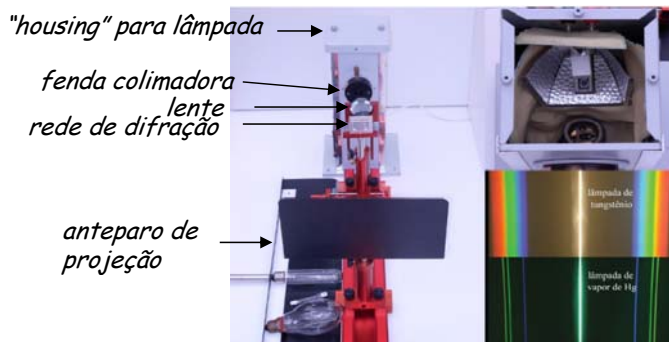
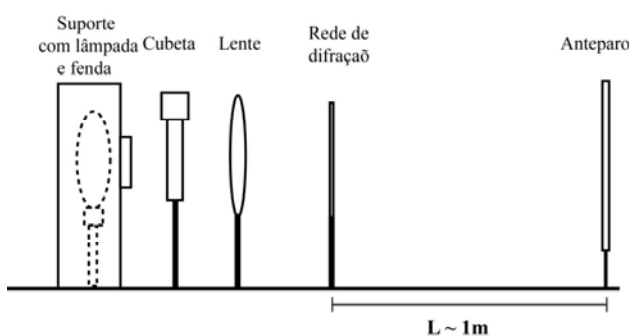
$$\lambda = \frac{d \text{sen } \theta}{m} \quad \text{número de fendas} = \frac{1 \text{ mm}}{d}$$

f) Substitua a rede F pela rede G, repita o procedimento anterior e calcule o parâmetro de rede para esta fenda.

	Ordem de difração, $m$	Distância em relação ao máximo central (cm)	$\text{sen } \theta_m$ (graus)	Separação entre as linhas da rede (mm)
Rede F	2			
	1			
	-1			
	-2			
Rede G	1			
	-1			

Número de linhas/mm da rede F: \_\_\_\_\_ Número de linhas/mm na rede G: \_\_\_\_\_

## Espectroscopia Óptica de Absorção



Esquema do Arranjo Experimental para Experimentos de Espectroscopia Óptica de absorção.

### Arranjo Experimental:

Neste experimento utilizaremos o arranjo experimental da Figura 7 para estudar a absorção de luz de forma discreta (somente em algumas frequências/cores) por alguns materiais. Antes disso, faremos a decomposição espectral (em cores) da luz proveniente de uma fonte de luz branca e determinaremos os limites de comprimento de onda que podemos observar a olho nu. Para isso utilizaremos inicialmente a montagem da Figura 5 sem a cubeta. De modo que o feixe de luz que emerge colimado pelo conjunto fenda e lente incida na rede de difração de modo que o seu padrão espectral seja projetado em um anteparo a  $\sim 1\text{m}$  de distância da rede. No segundo experimento incidiremos a cubeta com uma solução com íons terra raras e o que se observará são raias escuras no anteparo, que correspondem aos comprimentos de onda absorvidos pelo material na cubeta.

## Procedimento Experimental:

- Monte o aparato experimental constituído por um suporte para lâmpada com uma fenda variável acoplada, uma lente de distância focal  $\sim 10$  cm, um suporte para rede de difração, e um anteparo de projeção a aproximadamente 62 cm da fenda.
- Com o cabo do suporte para lâmpada desligado da tomada (chave inferior do suporte para baixo), insira uma lâmpada incandescente.
- Ligue a lâmpada em 220 V (ambas as chave superior e inferior do suporte para cima) e aguarde até que a sua luminosidade máxima tenha sido atingida ( $\sim 1$  min).
- Alinhe todo o sistema de modo que a luz proveniente da fenda passe pelo centro da lente e seja projetada no centro do anteparo de projeção. Ajuste a distância lente-fenda até que uma imagem nítida da lente seja formada no centro do anteparo.
- Insira a rede de difração identificada como G. Você deverá observar uma faixa colorida de cada lado (padrão espectral da luz branca).
- Ajuste novamente a posição da lente até que uma imagem nítida da fenda seja formada no centro do anteparo, e alinhe o sistema para que as linhas correspondentes (de mesma cor) em cada lado fiquem equidistantes do máximo central.
- Observe e discuta o padrão observado no anteparo, explicando o que acontece com a luz branca ao passar pela grade. Quando estiver tudo ajustado, se desejar, retire uma fotografia da montagem e do padrão para utilizar em seu seminário de apresentação final.

- Meça a distância do máximo central até o ponto no anteparo em que você deixa de enxergar a luz violeta. Com essa medida e sabendo a distância rede-anteparo e a distância entre as fendas da rede determine o ângulo  $\theta$  e o comprimento de onda correspondente, utilizando o mesmo procedimento anterior. Esse comprimento de onda corresponde ao mínimo comprimento de onda que seu olho é capaz de enxergar. Repita o procedimento e determine o máximo comprimento de onda que você é capaz de enxergar.

Cor da luz	Distância em relação ao máximo central (cm)	Ângulo de difração $\theta$ (graus)	Comprimento de onda (nm)
azul			
vermelho			
<b>Distância rede-anteparo:</b>			
<b>Número de linhas da rede:</b>			

f) Na bancada você encontrará uma cubeta com solução aquosas de cloreto de neodímio ( $\text{NdCl}_3$ ) e outra com cloreto de Érbio ( $\text{ErCl}_3$ ).



g) Observe e anote a cor da solução quando olhada na luz amarela da lâmpada da bancada. Observe e anote também a cor quando a solução é iluminada por uma lâmpada fluorescente.

h) Insira uma das cubetas entre a fenda e a lente. Observe o aparecimento de linhas escuras no padrão espectral.

i) Ajuste a posição da lente e a largura da fenda até que essas linhas se tornem nítidas no anteparo. Quando estiver tudo ajustado, se desejar, retire uma fotografia da montagem e do padrão para você utilizar em seu seminários de apresentação final. Discuta o que acontece com a resolução espectral quando a largura da fenda de entrada é diminuída ou aumentada.

i) Meça a posição de todas as linhas escuras observadas em relação ao máximo central e determine os comprimentos de onda correspondentes usando o mesmo procedimento anterior.

Linha	Distância em relação ao máximo central (cm)	$\text{sen}\theta$	Comprimento de onda (nm)
Distância rede-anteparo:			
Número de linhas da rede:			

j) Substitua a cubeta pela outra e repita o procedimento de modo a determinar os comprimentos de onda que a solução absorve.



k) Compare com os valores encontrados na referência **Quim. Nova, Vol. 31, No. 8, 2199-2204, 2008** e identifique qual das cubetas contem  $\text{Nd Cl}_3$ .

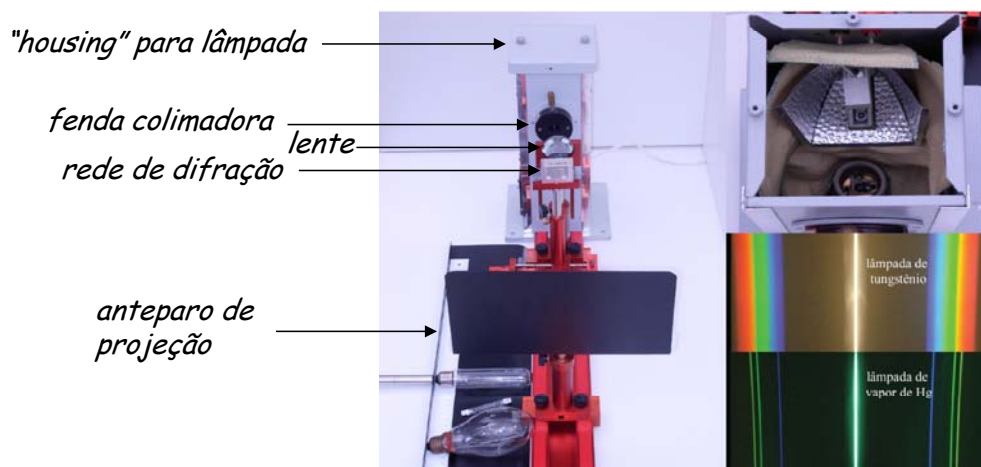
Linha	Distância em relação ao máximo central (cm)	$\text{sen}\theta$	Comprimento de onda (nm)
Distância rede-anteparo:			
Número de linhas da rede:			

j) Baseado nos resultados explique as cores observadas para as cubetas quando iluminadas com luz da lâmpada incandescente e fluorescente.

k) Insira novamente uma das cubetas entre a fenda e a lente. Descreva o que acontece.

h) Ajuste a posição da lente e a largura da fenda até que essas linhas se tornem nítidas no anteparo. Quando estiver tudo ajustado, se desejar, retire uma fotografia da montagem e do padrão para você utilizar em seus seminários de apresentação final.

## Espectroscopia Óptica de Emissão

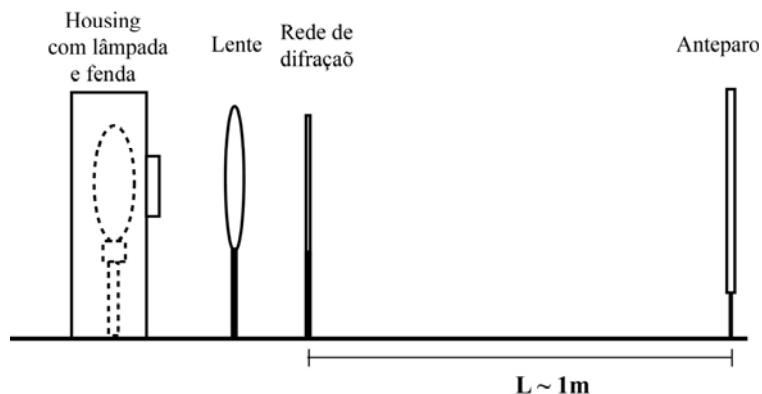


Esquema do Arranjo Experimental para Experimentos de Espectroscopia Óptica.

### Arranjo Experimental:

Neste experimento estudaremos uma das principais aplicações dos fenômenos de interferência e difração. Trata-se da espectroscopia óptica, que além de ter sido fundamental na elaboração da teoria quântica moderna, também é um dos principais métodos experimentais para caracterização e identificações de compostos. Na montagem experimental a luz proveniente de uma fonte térmica (lâmpada de filamento tungstênio ou de vapor de Hg) é colimada por uma fenda estreita e então focalizada, por uma lente de distância focal curta, na posição onde está uma rede de difração. A rede de difração separa a luz em seus diversos comprimentos de onda que são então projetados em um anteparo. À esquerda, o suporte para a lâmpada, a lente e a rede de difração, e o anteparo. À direita (em cima) detalhe mostrando os soquetes para conexão das lâmpadas filamento de tungstênio e das lâmpadas de vapores metálicos. À direita (em baixo) espectro típicos de uma lâmpada de filamento de tungstênio e de vapor de mercúrio.





**Figura 5** – Esquema do Arranjo Experimental para Experimentos de Espectroscopia Óptica de absorção.

## Arranjo Experimental:

Neste experimento utilizaremos o arranjo experimental da Figura 5 para estudar a emissão de luz de forma discreta (somente em algumas frequência/cores) por uma lâmpada de vapor de Hg. Para isso utilizaremos a montagem da Figura 5. A lâmpada de vapor de Hg encontra-se dentro de uma caixa (housing) e emite luz com frequências (cores) características de acordo com a configuração dos níveis de energia do Hg. Assim, o feixe de luz que emerge colimado pelo conjunto fenda e lente incide na rede de difração de modo que o seu padrão espectral seja projetado em um anteparo a ~60cm de distância da rede, permitindo a sua leitura e determinação dos comprimentos de onda emitidos pela lâmpada de Hg.

## Procedimento Experimental:



- Monte o aparato experimental constituído por um suporte para lâmpada com uma fenda variável acoplada, uma lente de distância focal ~ 10 cm, um suporte para rede de difração, e um anteparo de projeção a aproximadamente 62 cm da fenda.
- Com o cabo do suporte para lâmpada desligado da tomada (chave inferior do suporte para baixo), insira uma lâmpada de vapor de mercúrio, rosqueando-a até que se escute um leve “click”. Esse som se refere ao fechamento de uma chave interna do suporte que permite que se habilite o circuito da lâmpada.
- Ligue a lâmpada em 220 V (ambas as chaves superior e inferior do suporte para cima) e aguarde até que a sua luminosidade máxima tenha sido atingida (~ 5 min).
- Alinhe todo o sistema de modo que a luz proveniente da fenda passe pelo centro da lente e seja projetada no centro do anteparo de projeção. Ajuste a distância lente-fenda até que uma imagem nítida da lente seja formada no centro do anteparo.
- Insira a rede de difração identificada como G. Você deverá observar a cor branca azulada no centro do padrão (máximo central), e linhas coloridas de cada lado.
- Ajuste novamente a posição da lente até que uma imagem nítida da fenda seja formada no centro do anteparo, e alinhe o sistema para que as linhas correspondentes (de mesma cor) em cada lado fiquem equidistantes do máximo central.
- Observe e descreva o padrão espectral de primeira ordem formado no anteparo e, se necessário, ajuste novamente a posição da lente para que essas linhas apareçam nítidas. Ajuste também a abertura da fenda de modo a minimizar a largura das linhas..

h) Para cada uma das linhas espectrais observadas, meça a sua posição, isto é, a distância entre a linha e o máximo central. A partir desse valor (e da distância entre a rede e o anteparo), você pode determinar o ângulo de difração  $\theta$  da mesma maneira que foi feita para o experimento de redes difração.

i) Utilize a equação abaixo, os ângulos  $\theta$  calculados e a separação  $d$  entre as fendas da rede de difração e calcule os comprimentos de onda correspondente a cada raia observada no espectro. Basta utilizar as linhas correspondente a  $m=1$ .

$$\lambda = \frac{d \sin \theta}{m} \quad \frac{\text{número de fendas}}{\text{mm}} = \frac{1 \text{ mm}}{d}$$

j) Explique por que você observa as linhas UV, mesmo que o comprimento de onda da mesma esteja fora da faixa de sensibilidade do olho humano. A cor desta raia corresponde a sua frequência?

k) Varie a abertura da fenda de entrada e descreva o que acontece com a largura das linhas. Discuta o que acontece com a largura das linhas se abrir o fechar. O que isso significa em termos de resolução espectral.

l) Compare com os valores encontrados na referência **Quim. Nova, Vol. 31, No. 8, 2199-2204, 2008.**

Raia	Distância em relação ao máximo central (cm)	$\sin \theta_m$	Comprimento de onda (nm)
laranja			
verde			
azul			
UV 1			
UV 2			
<b>Distância rede-anteparo:</b>		<b>Número de linhas da rede:</b>	

h) Insira a cubeta de  $\text{NdCl}_3$  entre a fenda e a lente. O que acontece com a cor da solução?

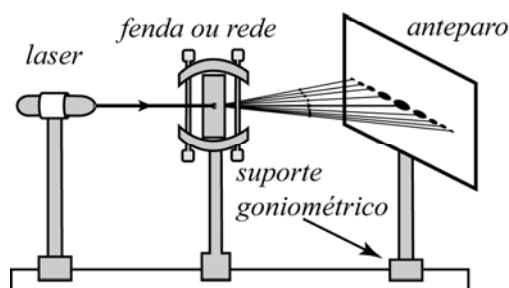
i) O que você observa no padrão espectral da lâmpada de Hg observado no anteparo quando a cubeta é introduzida? Como você explica esse comportamento?

j) Como a mudança no espectro explica a mudança na cor da solução?

k) Repita os itens h) i) e j) para a solução de  $\text{ErCl}_3$

l) Em vista dos resultados anteriores, faça uma discussão detalhada sobre os seguintes tópicos.: i) Como a largura da fenda de entrada afeta a resolução do espectro? Qual a vantagem e desvantagem de se utilizar essa fenda mais aberta (ou mais fechada)? ii) Como a separação entre a rede de difração e o anteparo afeta o espectro? Qual a vantagem e desvantagem de se utilizar o anteparo mais próximo ou mais distante da rede. iii) De que depende a cor que vemos um composto? É possível identificar compostos baseado somente em sua cor quando iluminado com uma fonte luminosa? É possível identificar compostos baseado em seu espectro de absorção. Qual a vantagem de se utilizar luz branca em espectroscopia óptica por absorção?

## Difração por Fendas (opcional)



**Figura 1** – Esquema do Arranjo Experimental para experimentos com redes de difração

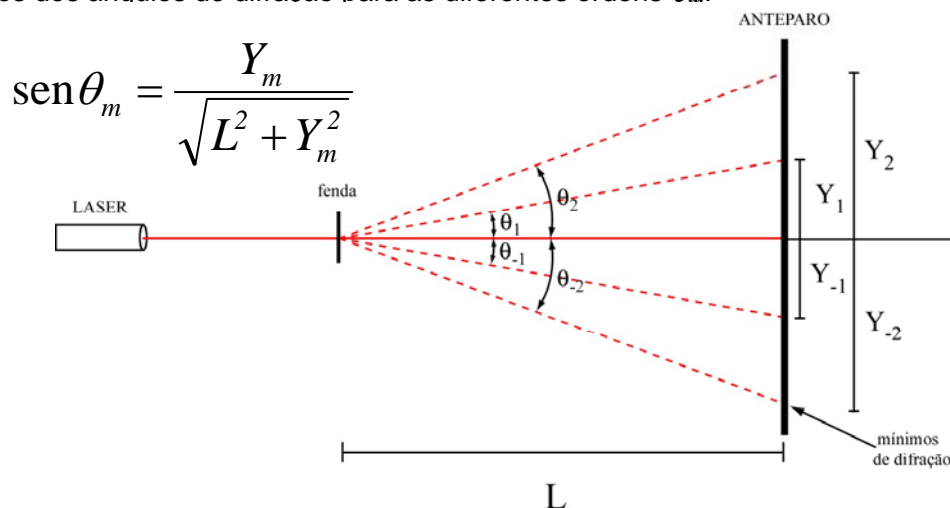
### Arranjo Experimental:

Neste experimento utilizaremos uma fenda estreita para demonstrar o fenômeno de difração da luz. Para isso será utilizado o aparato mostrado na Figura 1, que consiste basicamente de um laser de He/Ne, uma fenda retangular estreita e um anteparo de projeção. O feixe de laser incide na fenda e é difratado, sendo o padrão de difração observado em um anteparo a uma distância de aproximadamente 1 m da fenda. A determinação da posição dos mínimos de difração e a análise utilizando a equação de difração para fendas permite a determinação com grande precisão do diâmetro da fenda que pode ser da ordem de micrometros. Em um experimento complementar, a fenda é substituída por um fio de cabelo, produzindo um padrão similar ao da fenda retangular. Assim, com uma análise similar podemos também determinar a espessura do fio.

### Procedimento Experimental:

- Alinhe o feixe de um laser He/Ne em relação ao trilho óptico. Para isso, coloque um pino no centro do trilho e faça o laser incidir sobre ele.
- Posicione um anteparo, onde está fixa uma régua com escala em centímetros, a cerca de 1 m de distância de modo que o laser incida na escala da régua, exatamente em seu centro (indicação 30 cm).
- Na sua bancada está disponível um slide, identificado como A, com quatro fendas retangulares. Coloque o slide no suporte a aproximadamente 5 cm na frente do laser perpendicularmente ao feixe do laser. Você garante a perpendicularidade olhando se a reflexão do laser na borda da fenda voltar sobre o feixe incidente. Mova o slide lateralmente, utilizando o suporte com ajuste lateral, de modo a inserir o laser na fenda retangular, de abertura desconhecida, indicada como 1 no slide.
- Apague a luz da bancada e observe o padrão de difração formado no anteparo.
- Certifique-se que o anteparo de projeção está posicionado paralelamente à fenda. Para isso observe o padrão de difração formado no anteparo e certifique que os mínimos positivos ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ) e negativos ( $m = -1, -2, -3, \dots$ ) estejam equidistantes do máximo central. Se não estiverem, gire o anteparo ligeiramente em torno do seu eixo até conseguir esta situação. Após fazer esse ajuste fixe o anteparo apertando o parafuso de fixação.
- Com a luz da bancada apagada, faça uma marca com lápis da posição dos zeros de intensidade  $Y_m$  do padrão de difração. Procure fazer essa marcação próximo a régua fixa no anteparo para facilitar a medição. Acenda a luz da bancada e utilizando a régua faça a leitura da posição dos zeros de difração em relação ao centro do padrão. Tente pegar pelo menos dois mínimos de cada lado, positivos ( $m = 1, 2$ ) e negativos ( $m = -1, -2$ ).

h) Meça a distância da rede ao anteparo  $L$  e usando a relação abaixo e a posição do mínimos  $Y_m$ , determine os senos dos ângulos de difração para as diferentes ordens  $\theta...$



i) Com os valores dos ângulos  $\theta_m$  e o comprimento de onda do laser de He/Ne  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  utilize a equação abaixo para estimar a abertura da fenda utilizando as medidas com  $m = -2, -1, 1, 2$ .

$$a = \frac{m\lambda}{\text{sen}\theta_m}$$

j) Com os resultados da quatro medidas calcule o valor médio da abertura da fenda.

Número da Fenda	Ordem de difração, m	Posição do mínimo $Y_m$ (cm)	$\text{sen}\theta_m$	abertura da fenda (mm)
1				
<b>Valor médio da abertura da fenda:</b>				
Distância fenda-anteparo:				

l) Retire um fio de cabelo de membros do grupo e posicione-o em frente ao feixe de laser. O que acontece? Meça a posição dos mínimos ( $m = -2, -1, 1, 2$ ) usando o mesmo procedimento anterior. Calcule os ângulos de difração e estime a espessura do fio de cabelo. Neste caso  $a$  é a espessura do fio de cabelo.

$$a = \frac{m\lambda}{\text{sen}\theta_m}$$

Fio de cabelo	Ordem de difração, m	Posição do mínimo $Y_m$ (cm)	$\text{sen}\theta_m$	Espessura do fio (mm)
1				
<b>Espessura do fio de cabelo:</b>				
Distância fenda-anteparo:				

- l) Retire dois fios de cabelo de membros do grupo e posicione-os (um de cada vez) em frente ao feixe de laser. O que acontece? Meça a posição dos mínimos de primeira ordem ( $m = -2, -1, 1, 2$ ) usando o mesmo procedimento anterior. Calcule os ângulos de difração e estime a espessura do fio de cabelo. Neste caso  $a$  é a espessura do fio de cabelo.

$$a = \frac{m\lambda}{\text{sen}\theta_m}$$

### Tabela de Resultados

Fio de cabelo	Ordem de difração, $m$	Posição do mínimo $Y_m$ (cm)	$\text{sen}\theta_m$	Espessura do fio (mm)
1				
<b>Espessura do fio de cabelo:</b>				
Distância fenda-anteparo:				