

Universidade de São Paulo

Instituto de Física

Física Ciências Biológicas

Aula 12

Prof. Paulo R. Costa
pcosta@if.usp.br

2o. Semestre de 2022
Monitoras: Giovanna Fleming/Beatriz Costa Bonzoi

Agradecimentos: Profa. Marcia Rizutto e Prof. Odilon D. D. Couto Jr.

	Datas	Aulas	Tema
	15/08	1	ABERTURA DO CURSO
Introdução ao curso	22/08	2	Introdução ao método experimental
	29/08	3	Exercícios sobre gráficos e tratamento de dados
	05/09		Semana da pátria
	12/09	4	Resultados dos experimentos com as bolinhas
Forças e movimento	19/09	5	Movimento/Forças/Biomecânica
Fluidos	26/09	6	Pressão/hidrostática/hidrodinâmica
	03/10	7	25ª Semana temática da Biologia
Calor e termodinâmica	10/10	8	Calor/termodinâmica
Ondas e som	17/10	9	Ondulatório/audição
Avaliação 1	24/10	10	Prova 1
Eletricidade	31/10	11	Campo elétrico/capacitores/potencial de Nerst
Ondas eletromagnéticas	07/11	12	Radiação/interferência/difração
	14/11		Proclamação da República
Física moderna	21/11	13	Modelos atômicos/dualidade onda-partícula
	28/11	14	Teoria quântica/física nuclear
Avaliação 2	05/12	15	Prova 2
	12/12	16	Prova substitutiva

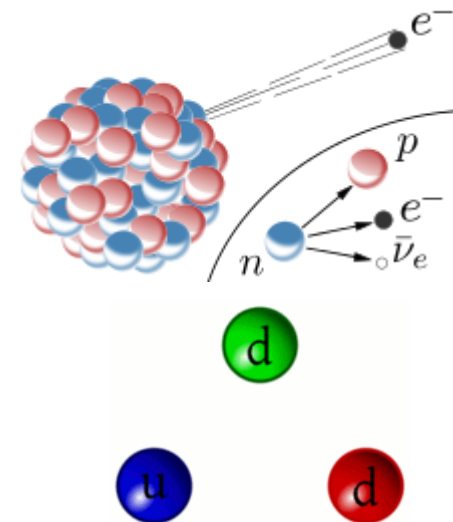
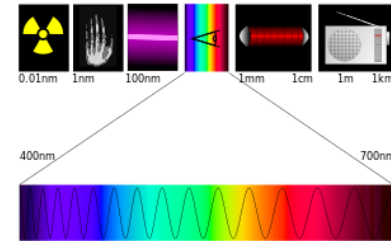
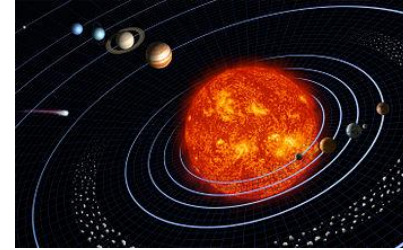


Ondas eletromagnéticas

- Radiação eletromagnética
- Fenômenos ondulatórios
- Propagação de ondas eletromagnéticas
- Interferência
- Princípio de Huygens
- Experimento de Young
- Difração

Forças fundamentais da natureza

- Gravitacional ($1/d^2$)
 - Massas/curvatura do espaço-tempo
- Eletromagnética ($1/d^2$)
 - Cargas elétricas, átomos, sólidos
- Nuclear fraca
 - União entre as partículas nucleares
- Nuclear forte (10^{-13} cm)
 - União entre os quarks

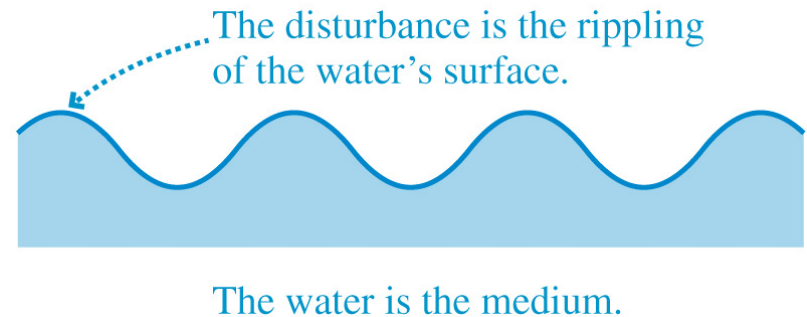


Ondas

- Ondas mecânicas:
 - forma mais simples se refere a ondas unidimensionais como ondas em uma corda.
- Grandezas
 - comprimento de onda (λ)
 - velocidade de propagação (v)
 - frequência (f)
 - período (T)

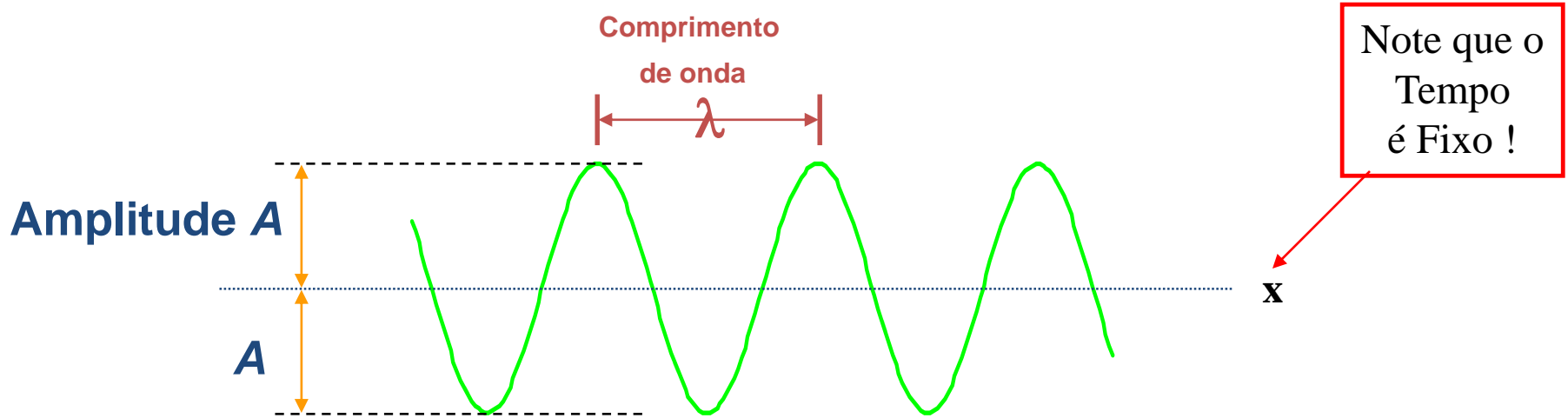
O Modelo de Ondas

- Enfatiza os aspectos comuns do comportamento ondulatório de todas as ondas
 - ondas de água, ondas de som, ondas de luz etc.
- Baseado na idéia de que ondas que se propagam são perturbações que se propagam com velocidades bem definidas.



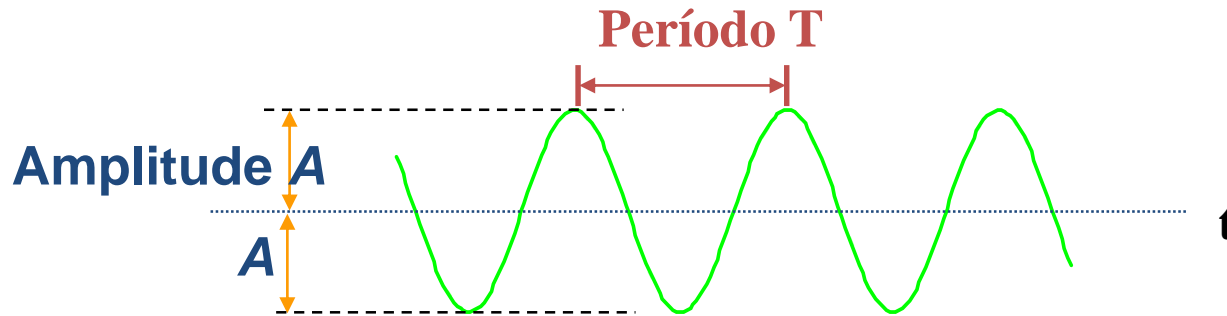
1. **Ondas Mecânicas** podem ser propagadas apenas através de um meio (ar ou água).
Exemplos: ondas sonoras, ondas na água.
2. **Ondas Eletromagnéticas** são oscilações auto-sustentáveis que não requerem um meio e podem propagar-se no vácuo.
Exemplos: ondas de rádio, micro-ondas, luz, raios-x, raios- γ , etc.
3. **Ondas da matéria** também podem ser propagadas no vácuo e constituem-se na base da física quântica (i.e. mecânica quântica).
Exemplos: funções de onda de elétrons, fótons, átomos, etc.

Propriedades das Ondas (ou Anatomia das Ondas)



- | **Comprimento de onda:** Distância λ entre dois pontos idênticos na onda
- | **Amplitude:** O deslocamento máximo A de um ponto na onda

Propriedades das Ondas (ou Anatomia das Ondas)

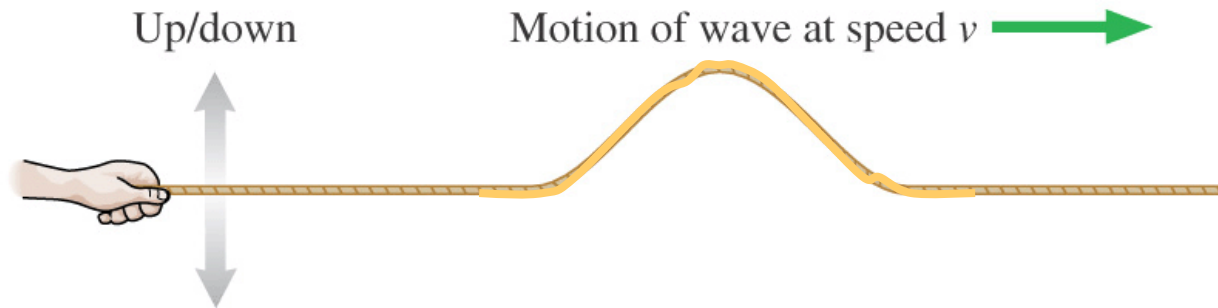


Note que a
posição x
é Fixa !

| **Velocidade v** : A onda desloca-se um comprimento de onda λ em um período T . Sendo assim $v = \lambda / T$.

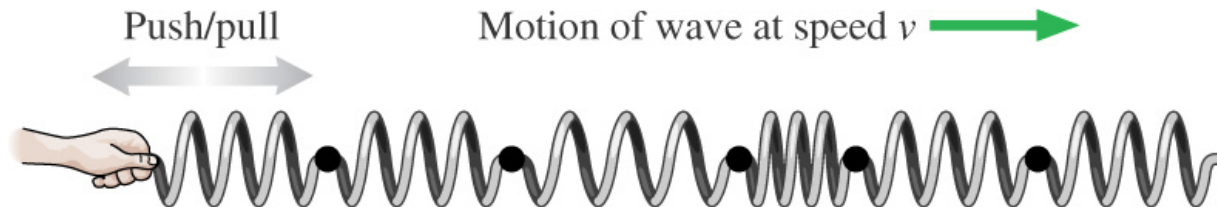
| **Frequencia:** $f = 1/T =$ ciclos/segundo ➔ $v = \lambda f$
Frequencia Angular : $\omega = 2\pi f =$ radianos/segundo

Dois Tipos de Movimento de Ondas



Uma **onda transversal** é aquela na qual as partículas do meio movem-se **perpendicularmente** à direção do movimento da onda. Elas podem ser polarizadas.

Exemplos: ondas em uma corda, ondas eletromagnéticas.



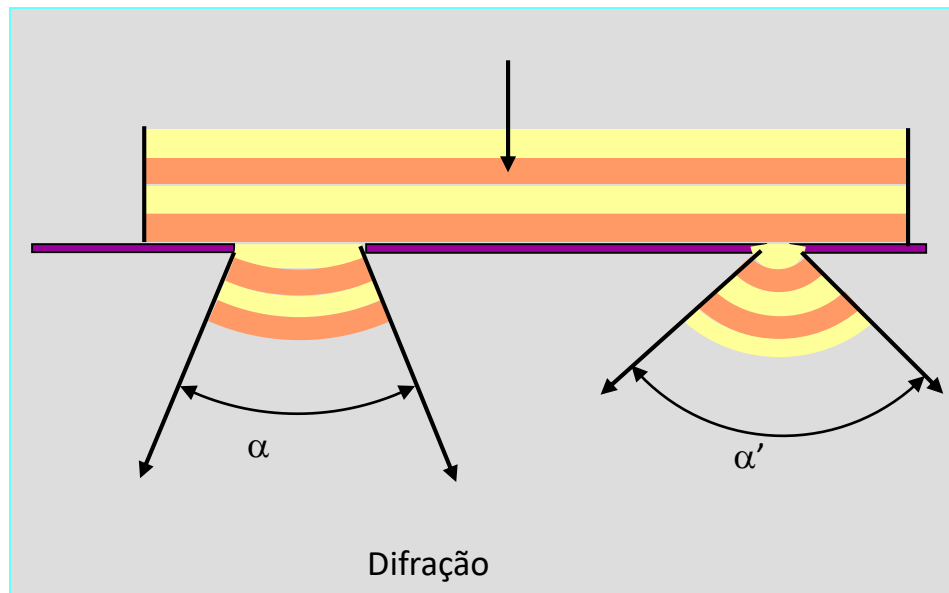
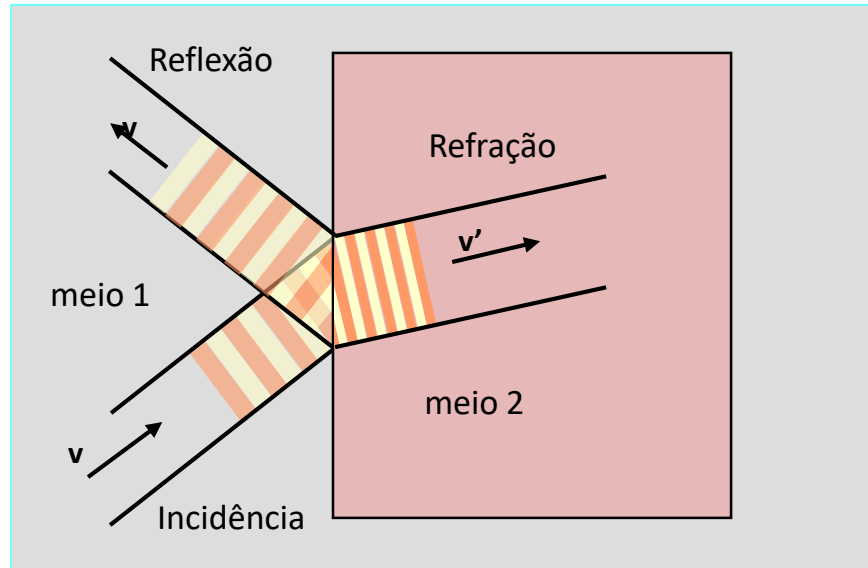
Uma **onda longitudinal** é uma onda na qual as partículas do meio movem-se **paralelamente** à direção do movimento da onda. Elas não podem ser polarizadas.

Exemplo: ondas de som.

Ondas

- Fenômenos
 - Refração
 - Reflexão
 - Interferência
- Aplicam-se também às eletromagnéticas.

FENÔMENOS ONDULATÓRIOS



Refração

https://www.youtube.com/watch?v=CMd2KnrQwQI&list=PL1Dg4Oxxk_RI2Ppb541vQyaUbqUuXtiuJ&index=20

Reflexão e refração

<https://www.youtube.com/watch?v=sTwCP2VIP-c>

Ondas Eletromagnéticas (OEM)

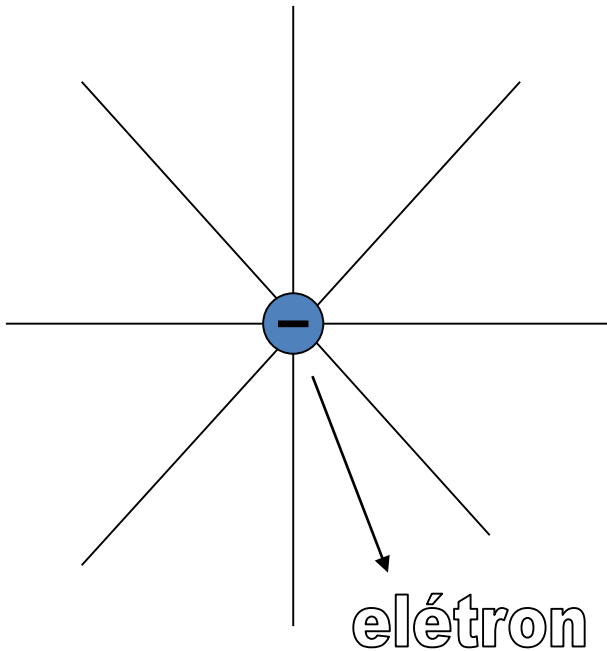
- *Radiação eletromagnética*
 - Vivemos imersos em ondas eletromagnéticas, as quais nos referimos também como, de diferentes comprimentos de onda e frequência
- Aplicações
 - aparelhos e utensílios, cujo principio básico de funcionamento baseia-se na propagação de ondas eletromagnéticas

O que é radiação?

- Radiação
 - Energia transportada de um lugar a outro no espaço
 - Exemplos
 - Vibrações mecânicas
 - Ondas eletromagnéticas
 - Rádio, microondas, luz visível, raios X, etc
 - Comprimento de onda (λ), frequência (ν) e energia (E)
 - Partícula ou radiação corpuscular

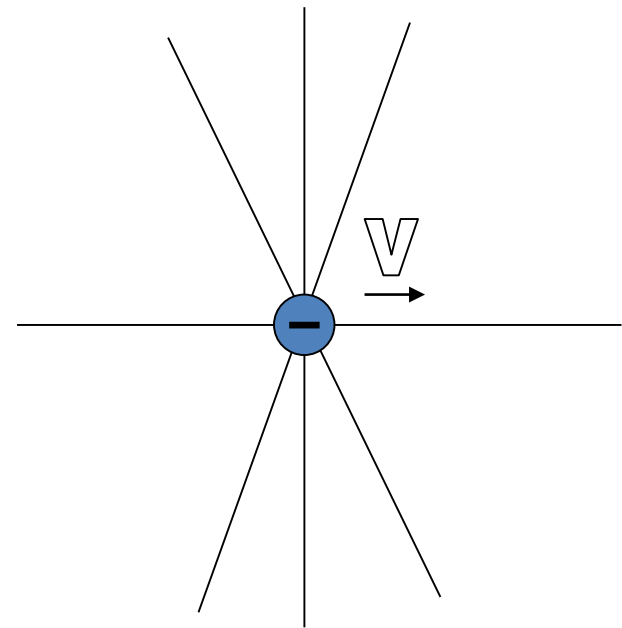
O que é
radiação
eletromagnética?

Radiação eletromagnética



Da teoria eletromagnética

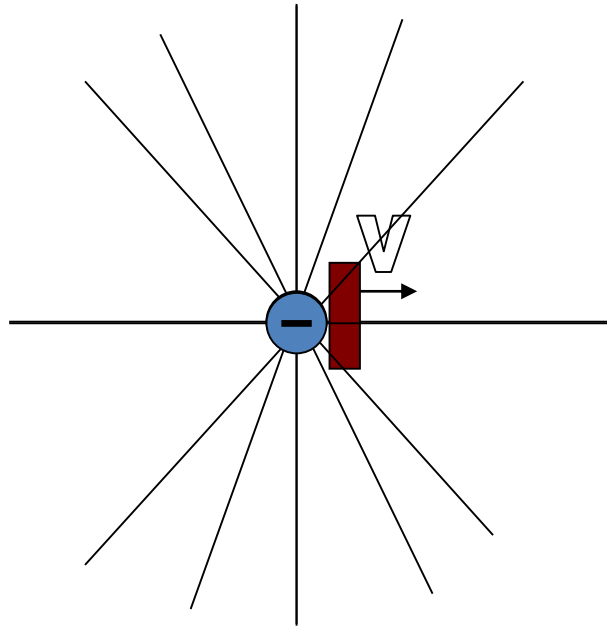
- carga elétrica \leftrightarrow campo elétrico
- linhas de campo contínuas
- preenchem todo o espaço

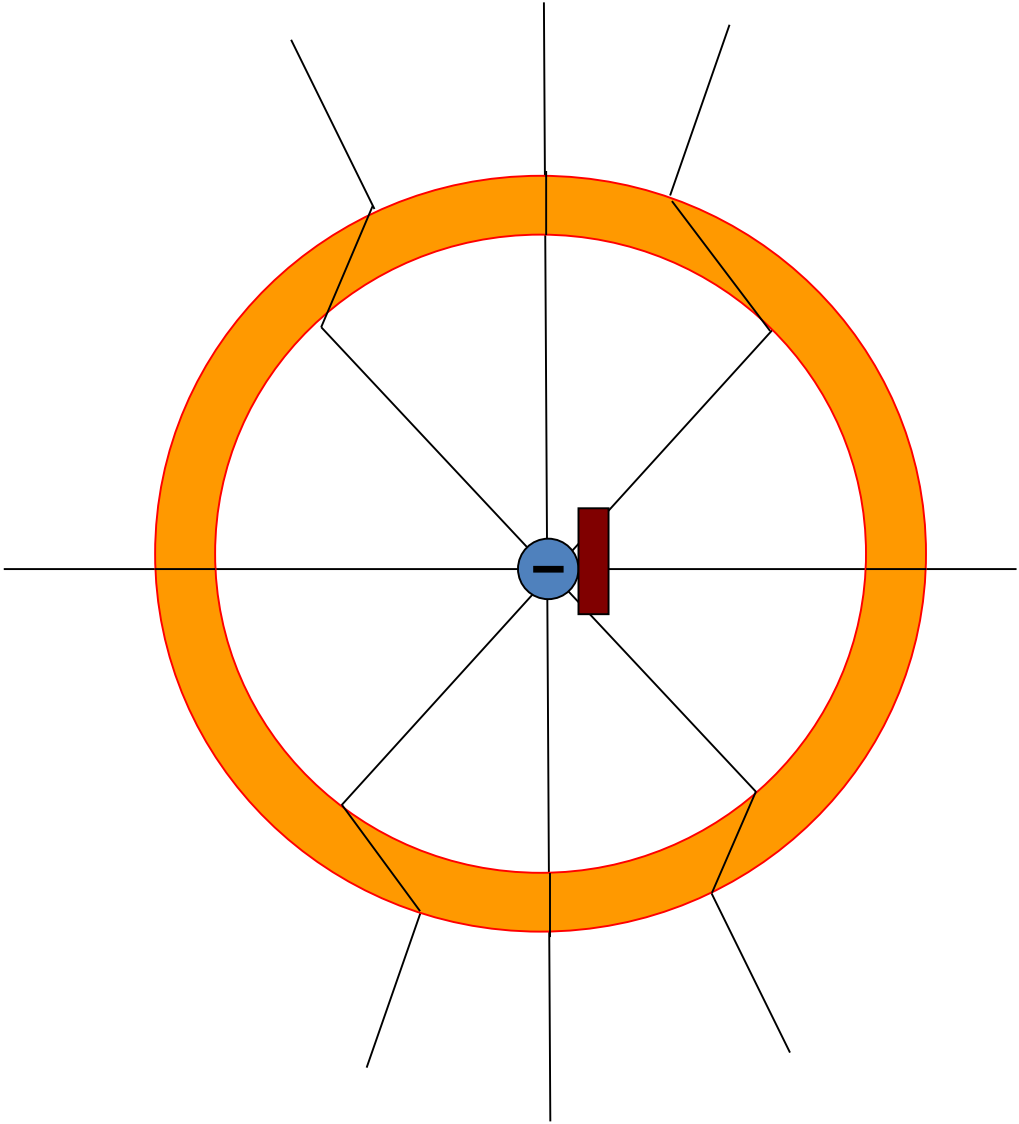


Da teoria da relatividade

- contração do espaço
- linhas de campo tb se contraem
- velocidade máxima da informação = c

Radiação eletromagnética





O que são ondas eletromagnéticas?

- **Oscilações eletromagnéticas que se propagam no espaço tridimensional.**
 - Descritas matematicamente pelas equações de Maxwell
 - Resumem e combinam a descrição de campos elétricos e magnéticos e sua propagação.
 - Maxwell
 - reuniu as informações conhecidas para explicar experimentos e através de sua contrapartida à Lei da Indução de Faraday
 - mostrou que a radiação eletromagnética, como a luz, é a **propagação de campos elétricos e magnéticos.**

Faraday

Lei de Indução de Faraday e contrapartida de Maxwell

- Um campo elétrico (**E**) é criado no espaço onde um campo magnético (**B**) esteja variando com o tempo
- Contrapartida de Maxwell
 - **B** é gerado no espaço onde **E** varia com o tempo
- Os campos **E** e **B** gerados são perpendiculares entre si e se propagam com a velocidade de onda que é dada por:

$$c = \frac{E}{B} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \cong 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

– Onde

- μ_0 = constante de permeabilidade do vácuo (magnética) = $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$
- ϵ_0 = constante de permissividade do vácuo ou elétrica = $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$

Transferência de energia

- A propagação de uma onda envolve a **transferência de energia** de um ponto a outro do espaço ou do meio de propagação (por isso, sentimo-nos aquecidos quando expostos ao sol ou em frente à lareira).



Transferência de energia

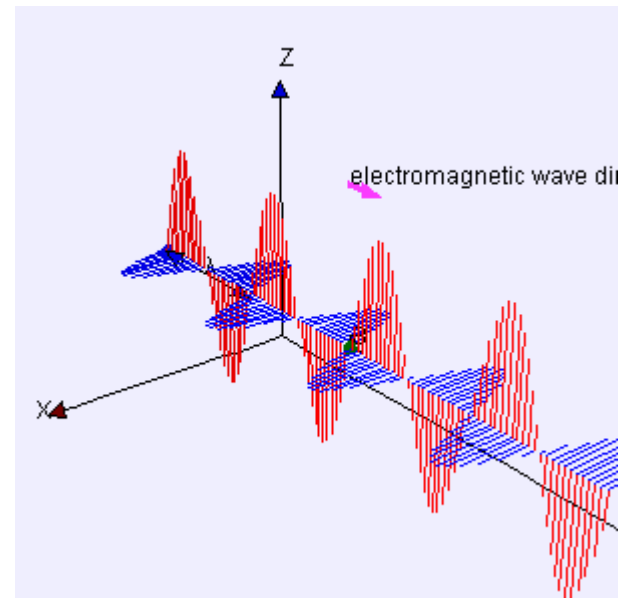
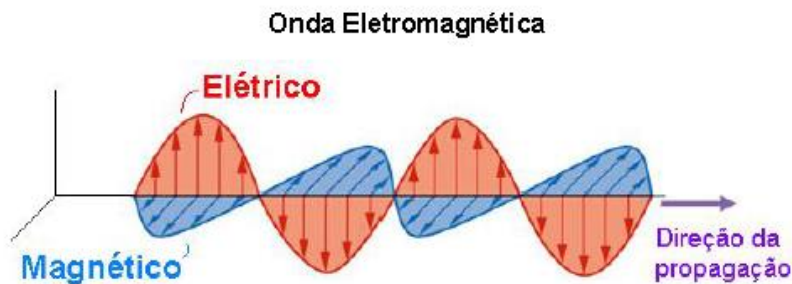
- **Energia é transferida no mesmo sentido de propagação da onda**
- Perpendicular aos campos elétrico e magnético
- Envolve o modulo da amplitude das ondas que os descrevem
- Descreve-se a transferência de energia através do seu fluxo em termos da potencia (energia por unidade de tempo) por unidade de área:

$$I = \frac{E_0^2}{2\mu_0 c} = \frac{c}{2\mu_0 B_0^2} \quad [\text{W/m}^2]$$

A intensidade é o valor médio do conhecido vetor de *Poynting*, que relaciona as amplitudes dos campos em questão e cuja direção e sentido indicam a propagação da energia eletromagnética.

Propagação de uma OEM

- **E** e **B** possuem módulo e orientação como desenhado
- ambos são sempre perpendiculares entre si ao longo do eixo de propagação x



Fonte: "Electromagneticwave3D" por Lookang many thanks to Fu-Kwun Hwang and author of Easy Java Simulation = Francisco Esquembre - Obra do próprio. Licenciado sob CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons

Propriedades das ondas eletromagnéticas (qualquer que seja a fonte)

- E e B são perpendiculares a direção de propagação
- Campos variam senoidalmente com a mesma frequência e em fase.

$$E = E_0 \text{sen}(kx - \omega t)$$

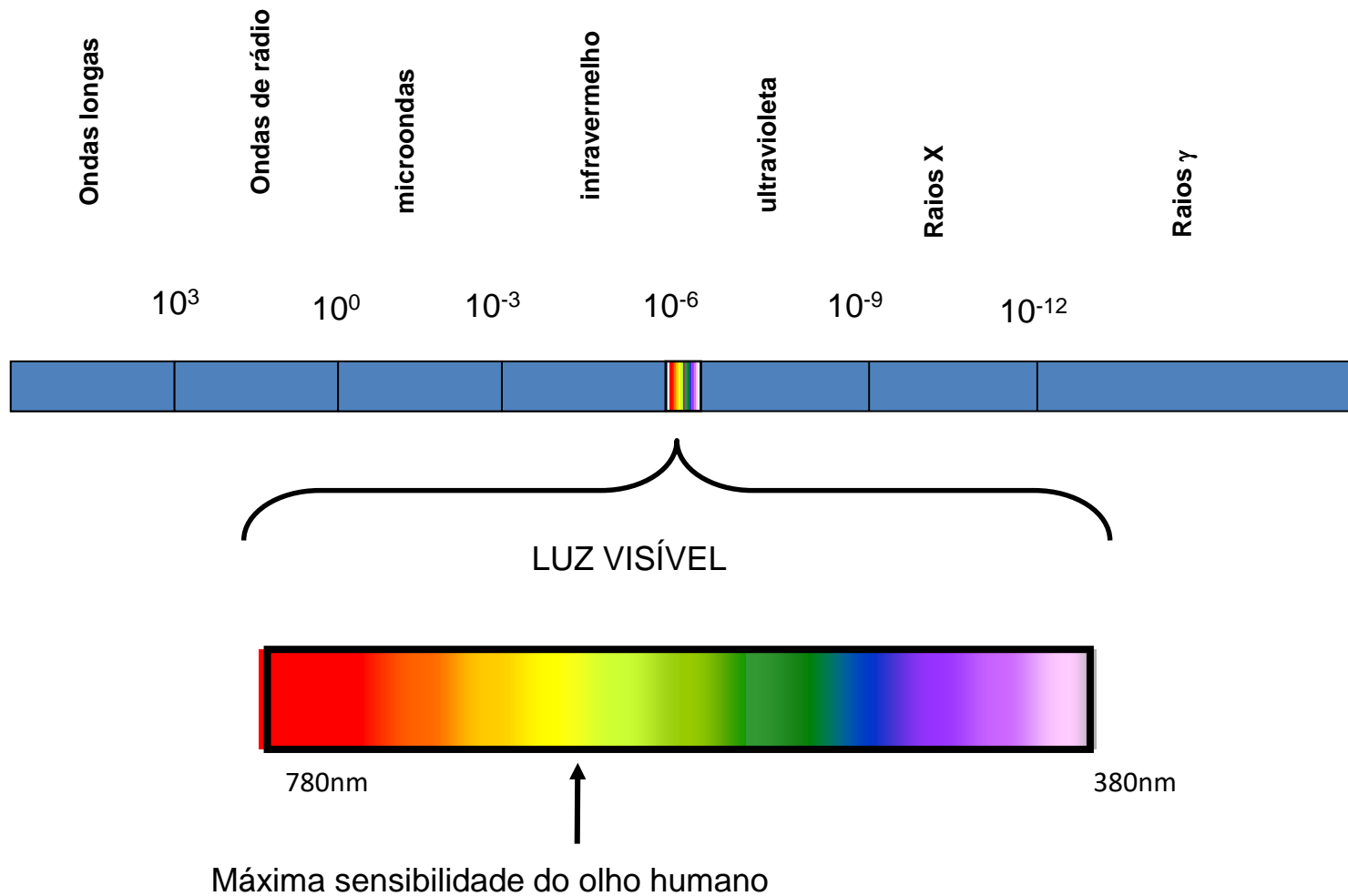
$$B = B_0 \text{sen}(kx - \omega t)$$

- Cada campo tem sua própria onda
- Cada onda não pode existir separadamente (por quê?)
 - Porque a variação de um induz o aparecimento de outro
 - Um equilibra o outro para que se tenha conservação de energia e seja mantida a velocidade de propagação.

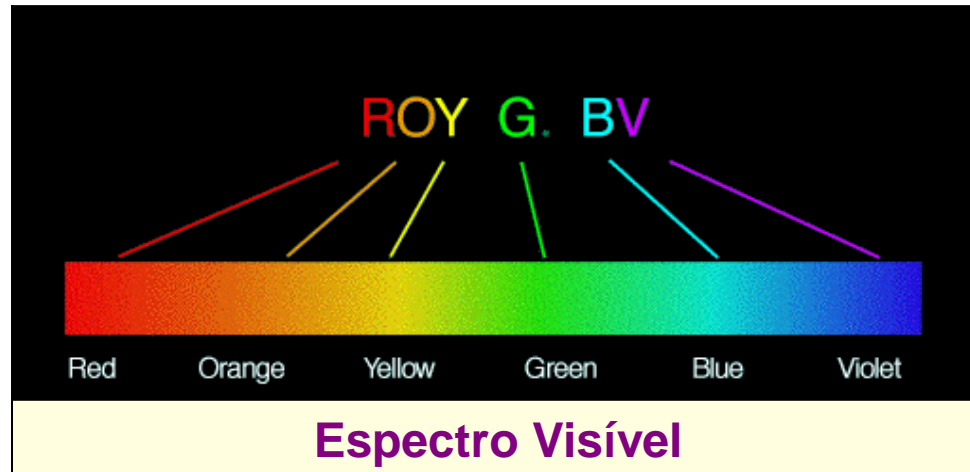
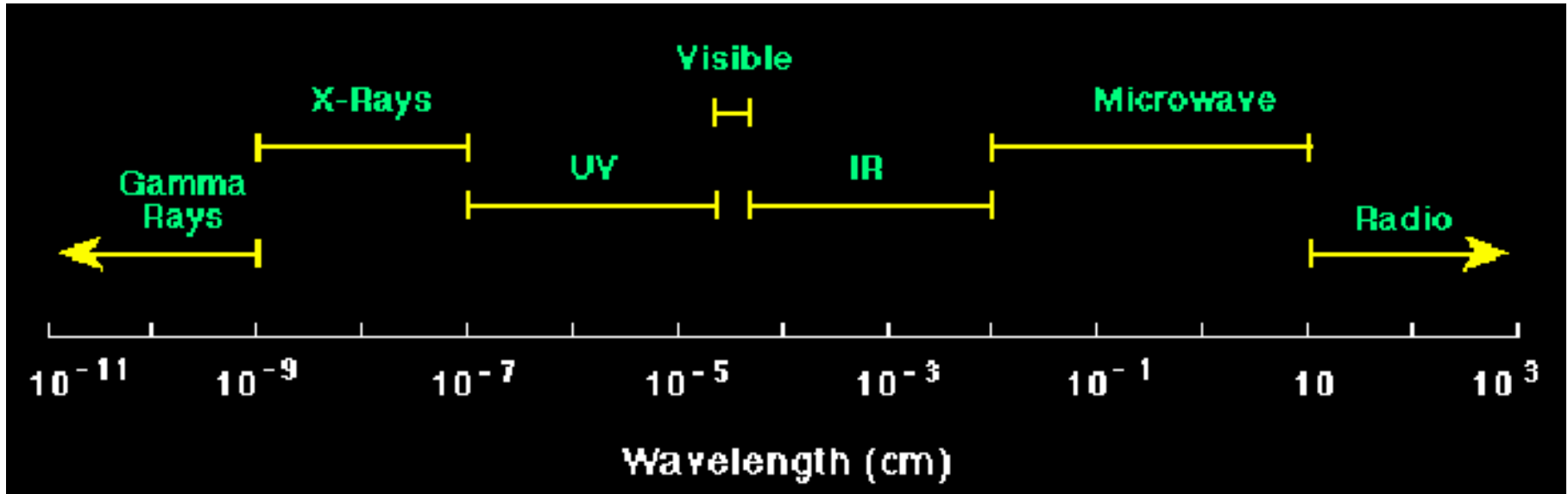
Como se origina uma OEM?

- Tem diferentes fontes de origem, dependendo do comprimento de onda.
 - Raios X e raios γ : origem atômica e nuclear
 - Ondas de comprimentos maiores, na faixa de 1 m, podem ser produzidas por circuitos elétricos (fontes de ondas macroscópicas).

Espectro Eletromagnético



O espectro eletromagnético





<u>Cor</u>	<u>Frequência</u>	<u>Comprimento de onda</u>
<u>violeta</u>	668–789 THz	380–450 nm
<u>azul</u>	606–668 THz	450–495 nm
<u>verde</u>	526–606 THz	495–570 nm
<u>amarelo</u>	508–526 THz	570–590 nm
<u>Laranja</u>	484–508 THz	590–620 nm
<u>vermelho</u>	400–484 THz	620–750 nm

Interferência

- Fenômeno tipicamente ondulatório.
- Princípio da Superposição de Huygen's.
 - soma algébrica das perturbações de cada onda quando há cruzamento de uma onda com outra.
 - Superposição
 - regiões onde as ondas se reforçam positivamente (encontro de dois picos ou cristas = interferência construtiva)
 - onde o reforço é negativo (encontro de dois vales), ou onde se anulam (vale + crista = interferência destrutiva)

interferência

https://www.youtube.com/watch?v=AG5HYoHojgc&list=PL1Dg4Oxxk_RI2Ppb541vQyaUbqUuXtiuJ&index=17

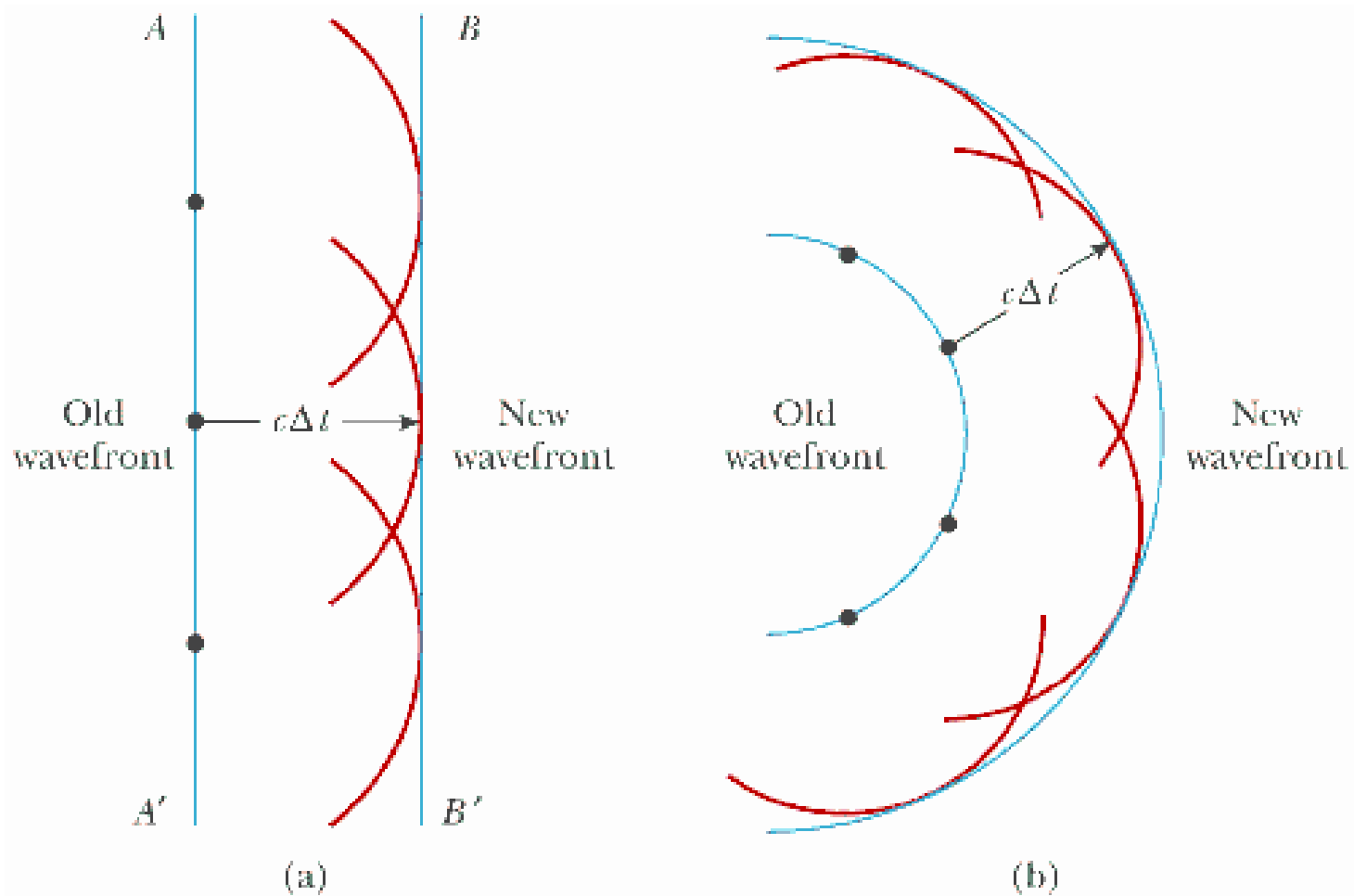
Huygens

Princípio de Huygens

- *Cada ponto de onda pode ser considerado uma nova fonte de ondas secundarias que se propagam em todas as direções*
- *Em cada instante, a superfície que envolve a fronteira dessas ondas é a nova frente de onda.*
- **Condição para interferência**
 - Necessidade de **fontes coerentes**
 - fontes com mesma fase (ou diferença de fase constante) e frequência (martelinhos oscilantes que batem gerando ondas na agua)

Princípio de Huygens

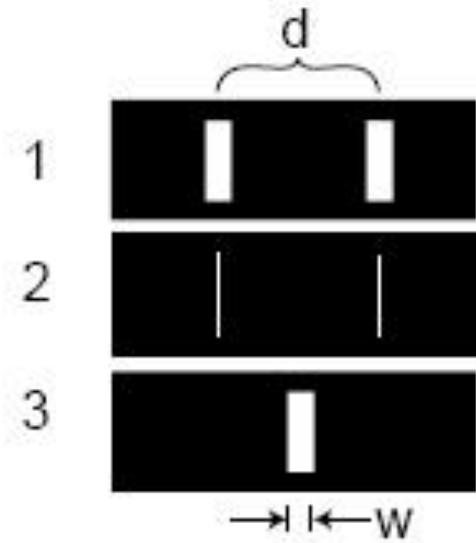
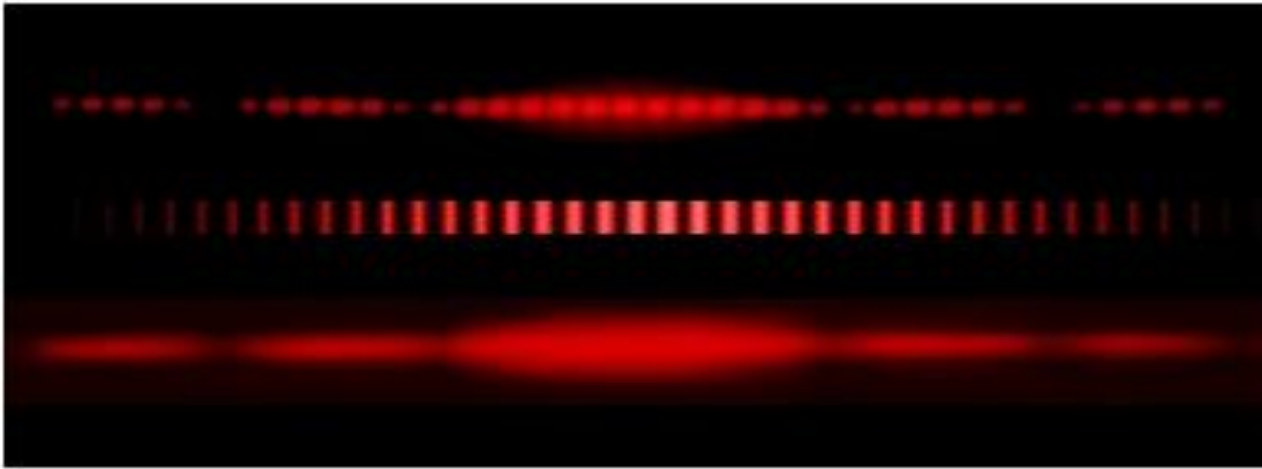
Todos os pontos de uma frente de onda se comportam como fontes pontuais de ondas secundárias. Depois de um intervalo de tempo t a nova posição da frente de onda é dada por uma superfície tangente a essas novas ondas secundárias.



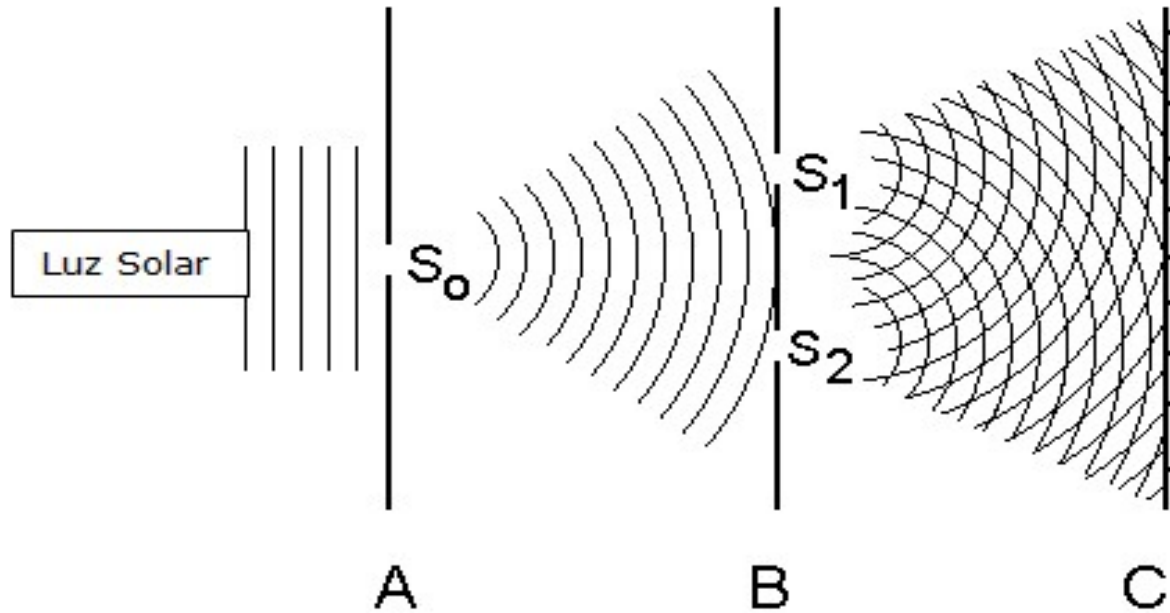
Princípio de Huygens

- Até 1801, acreditava-se que a luz era formada por corpúsculos (teoria corpuscular), fortemente defendida por Newton, uma vez que para ele a luz viajava em linhas retas em um meio material
- Neste ano, Thomas Young realizou o primeiro experimento que mostrou ser a luz uma onda, por exibir o fenômeno de interferência tal como ondas mecânicas
- Foi comprovado matematicamente mais tarde por Maxwell

Fenda dupla de Young

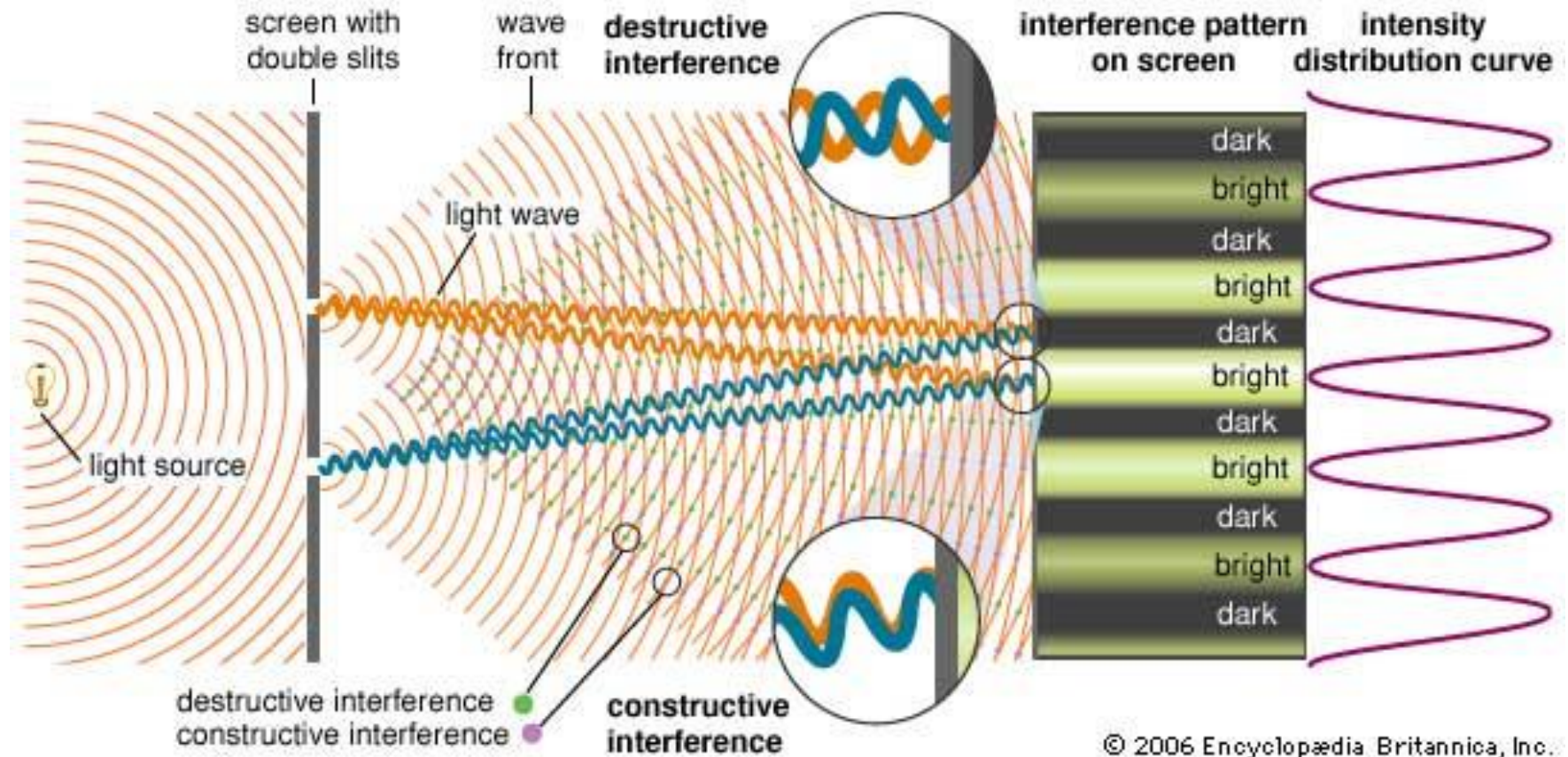


Experimento de Young



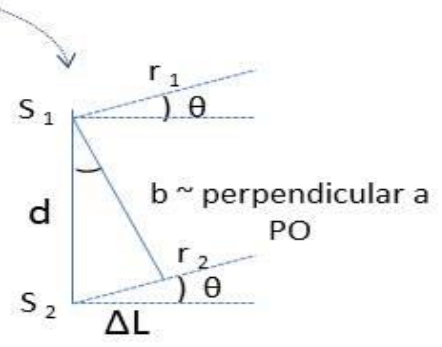
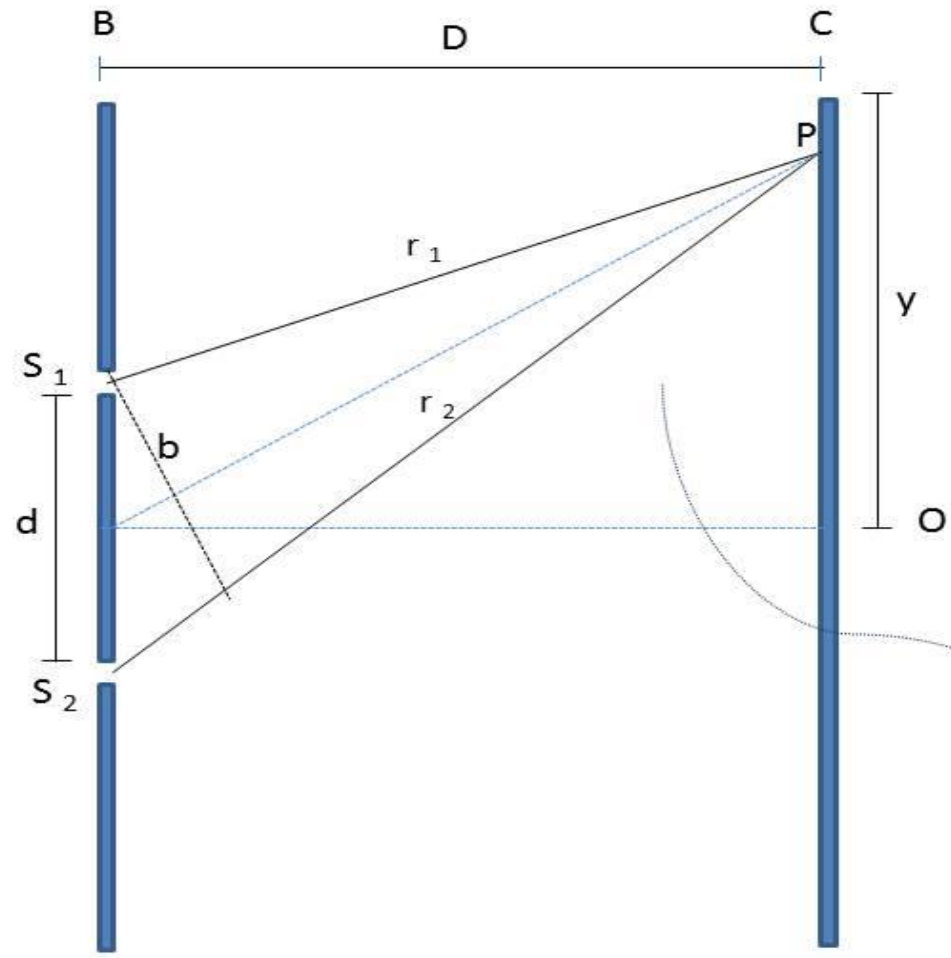
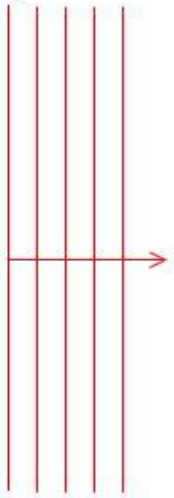
Young

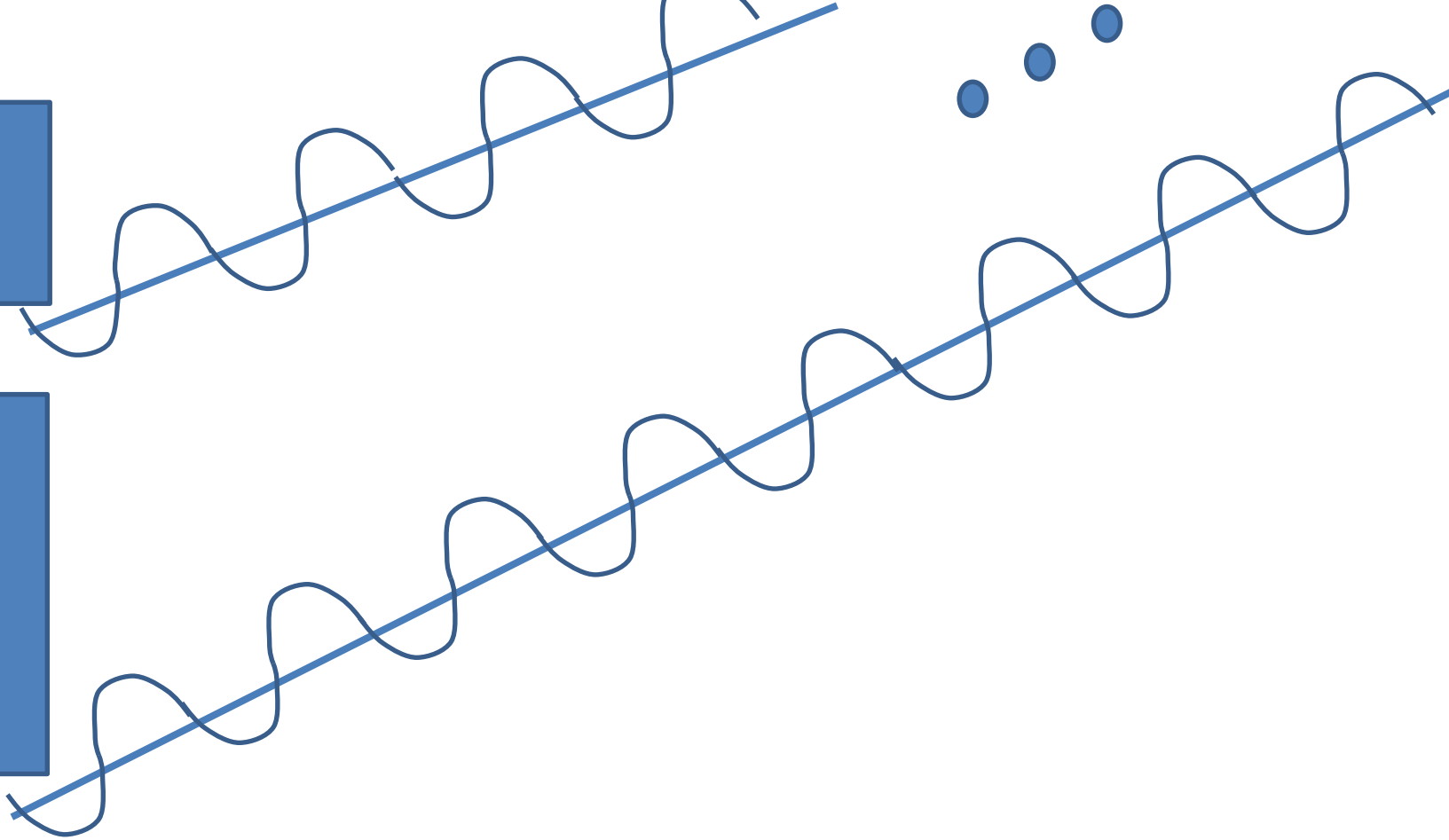
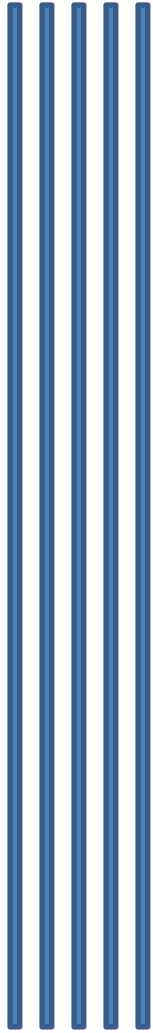
Fenda dupla de Young

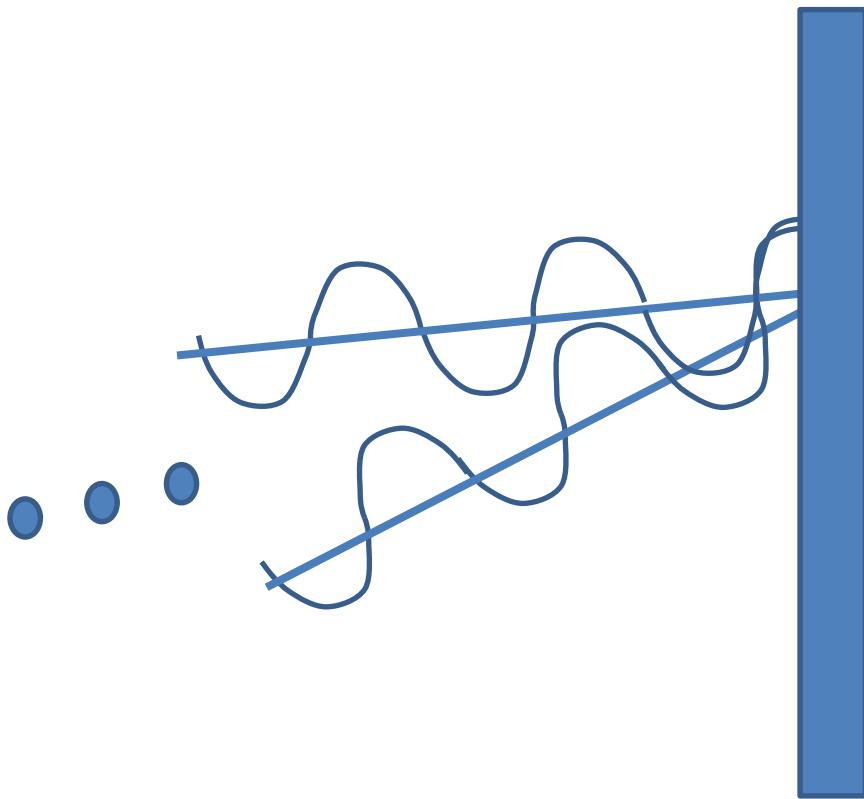


$$a \ll \lambda$$

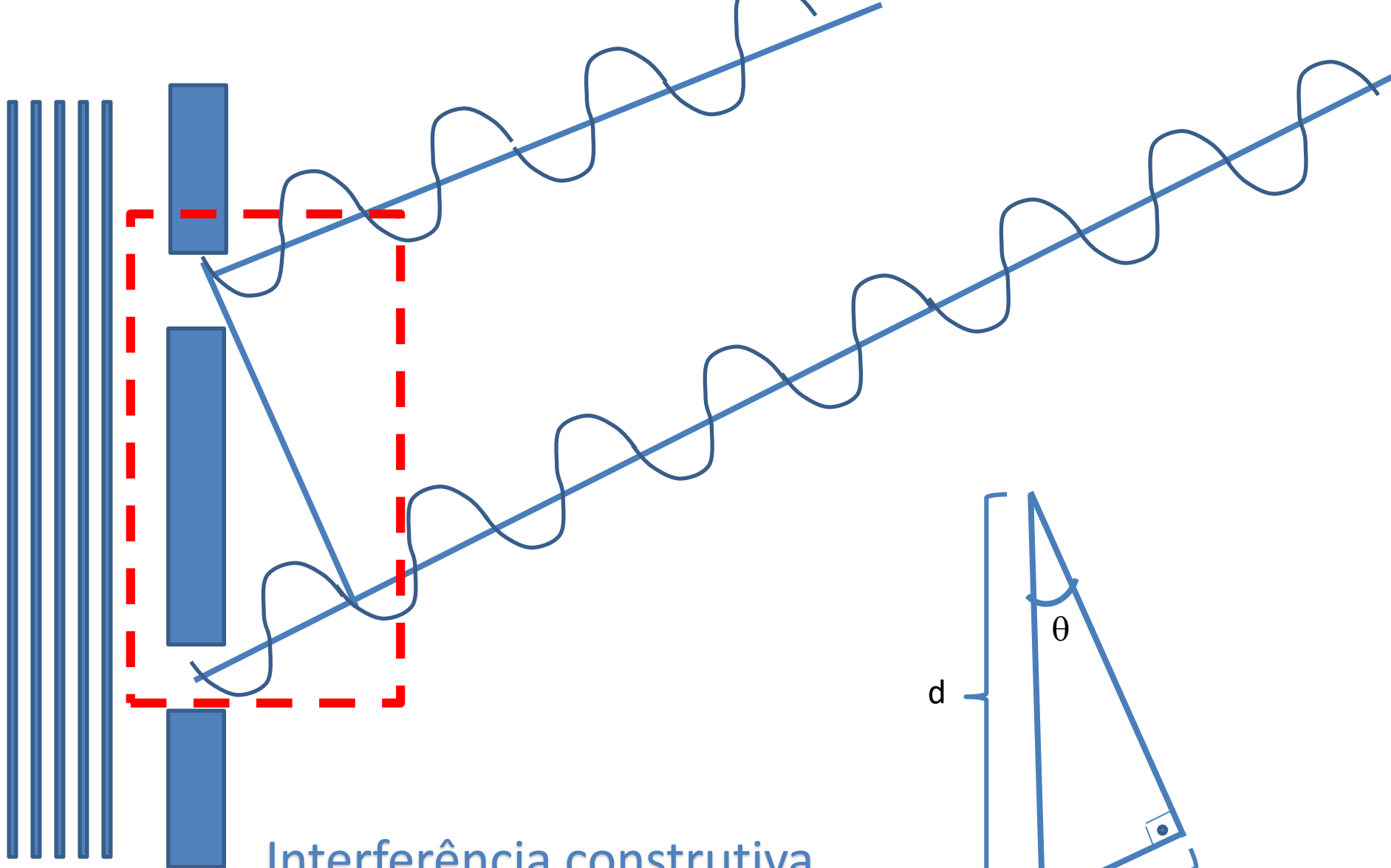
Onda plana





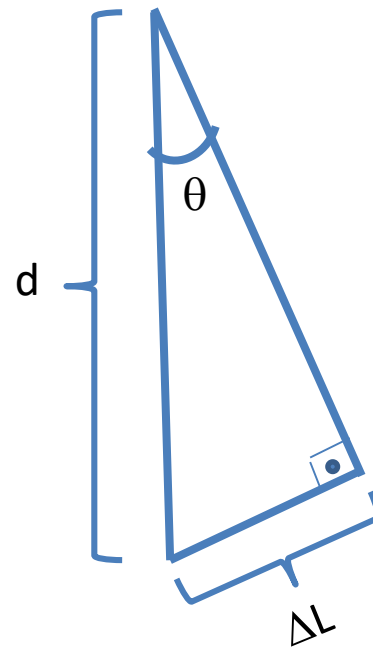


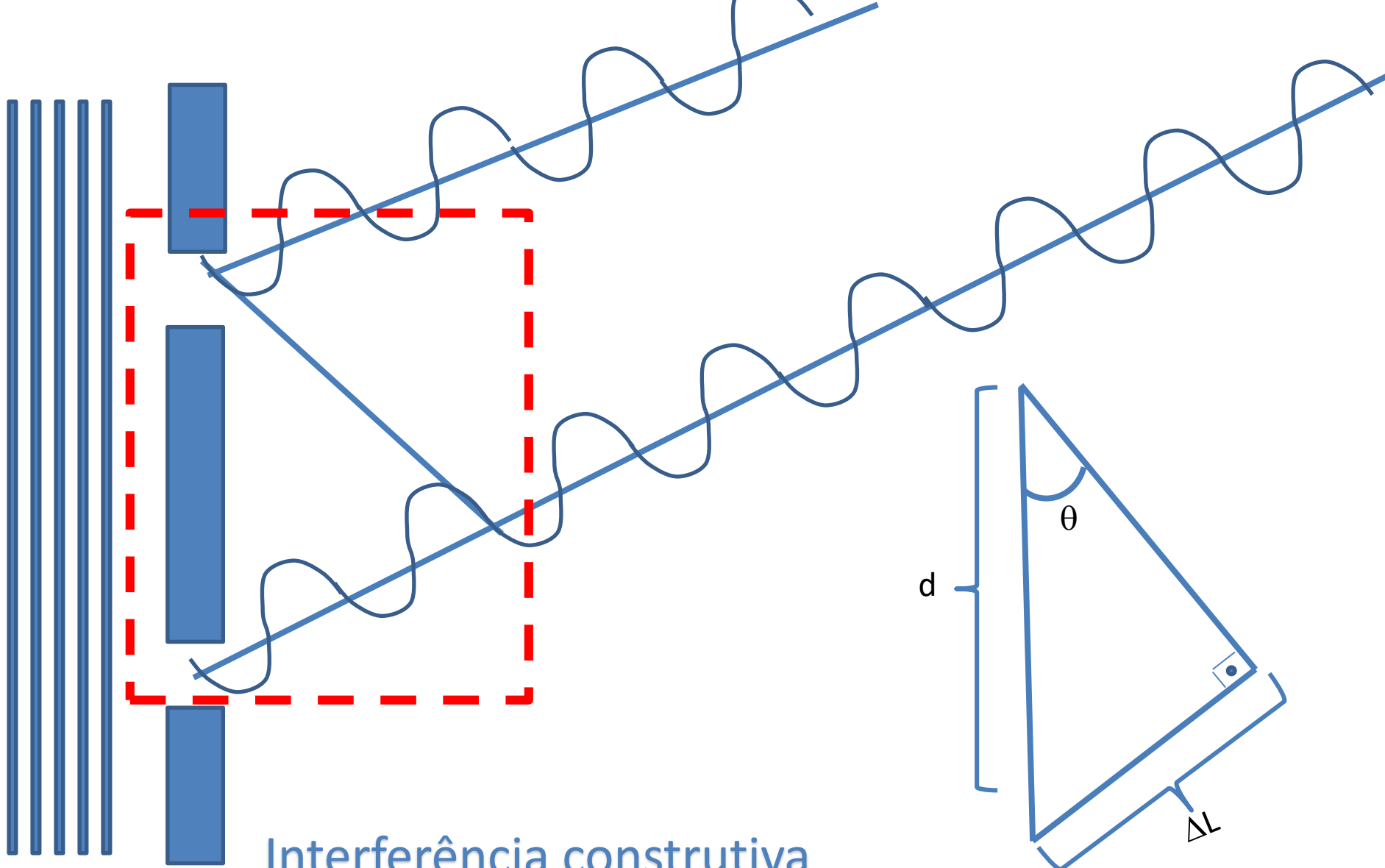
Interferência construtiva



Interferência construtiva

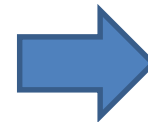
$$\Delta L = \lambda = d \sin \theta \Rightarrow \sin \theta = \frac{\lambda}{d}$$



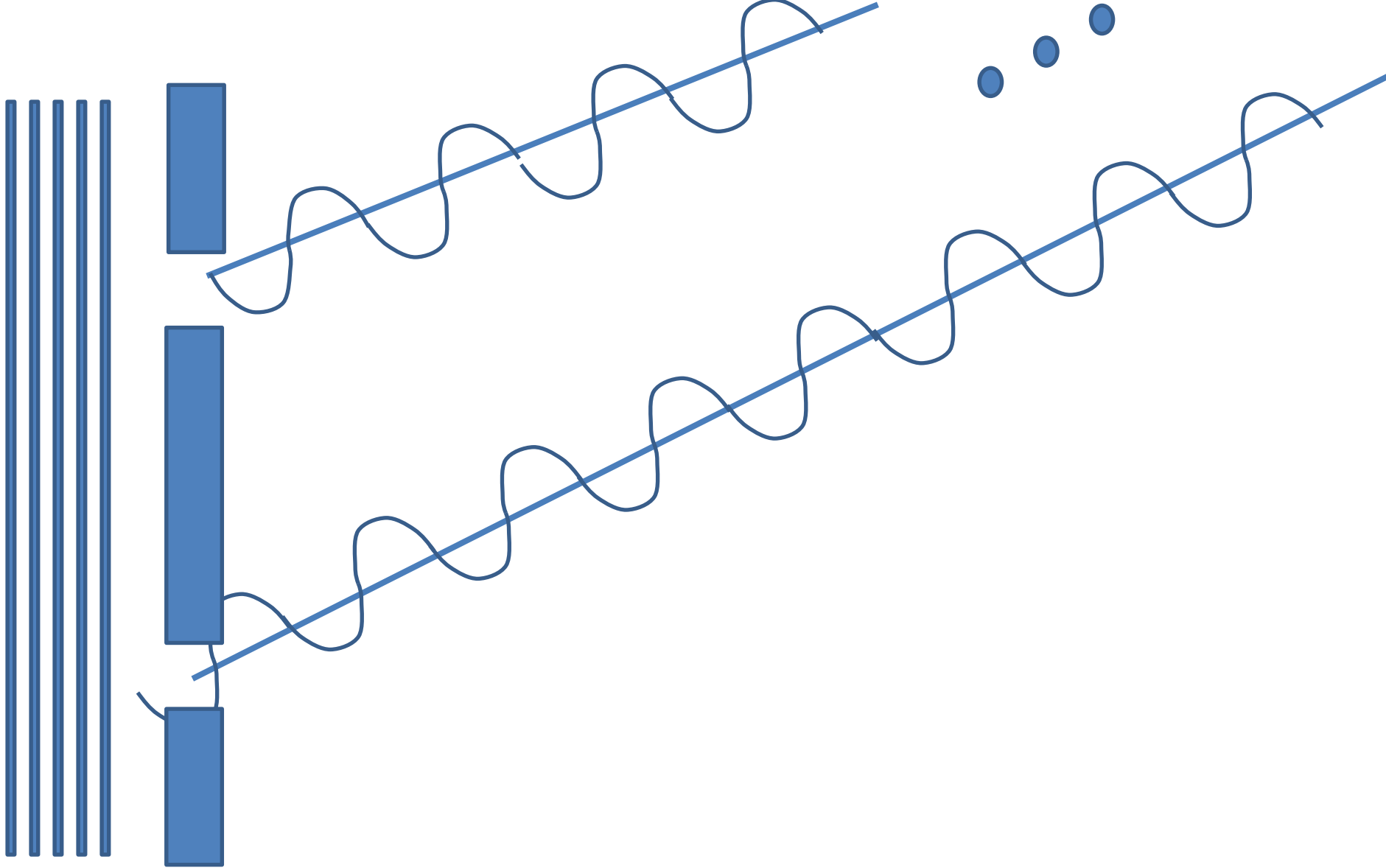


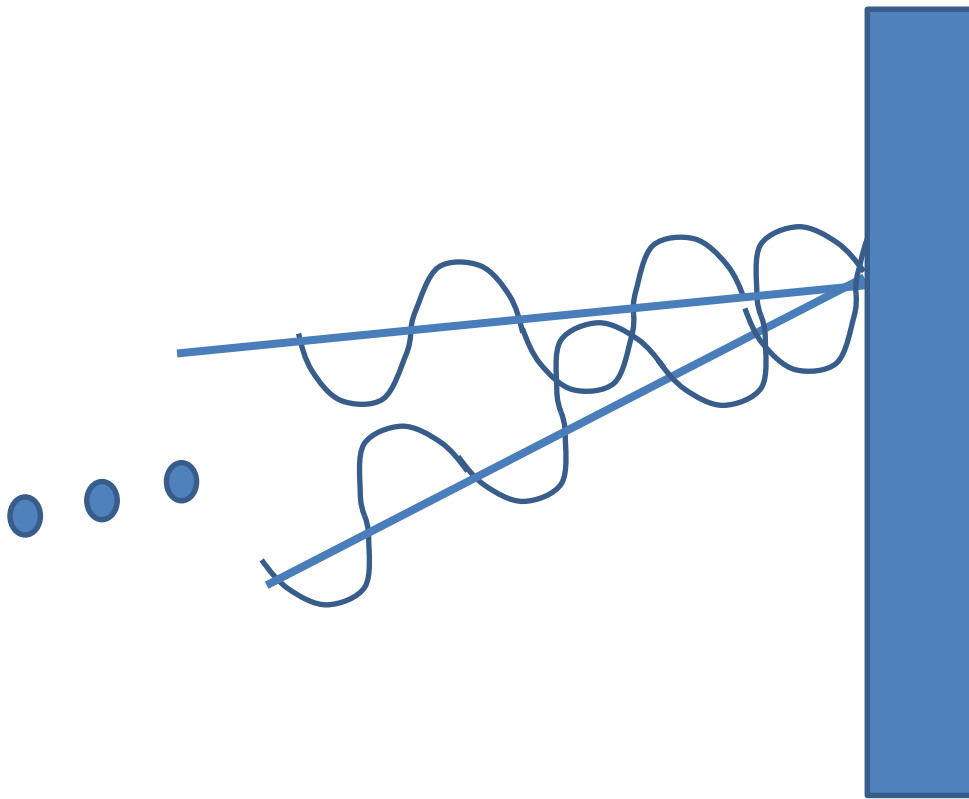
Interferência construtiva

$$\Delta L = 2\lambda = d \sin \theta \Rightarrow \sin \theta = \frac{2\lambda}{d}$$

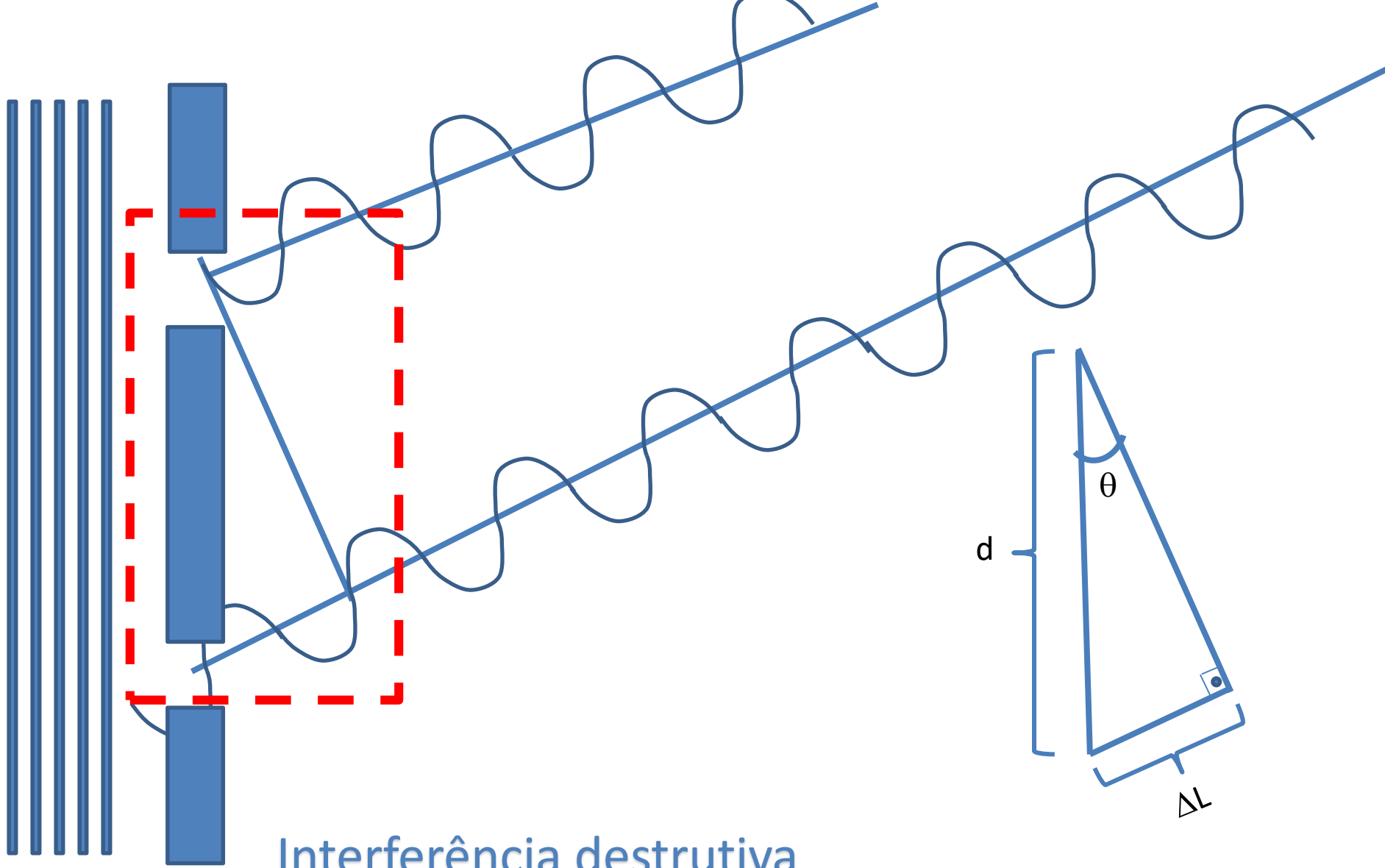


$$\sin \theta = \frac{n\lambda}{d}$$

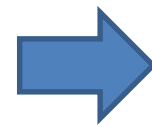




Interferência destrutiva

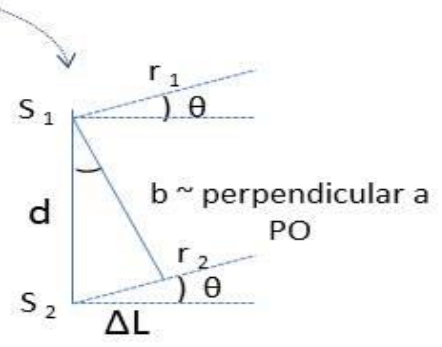
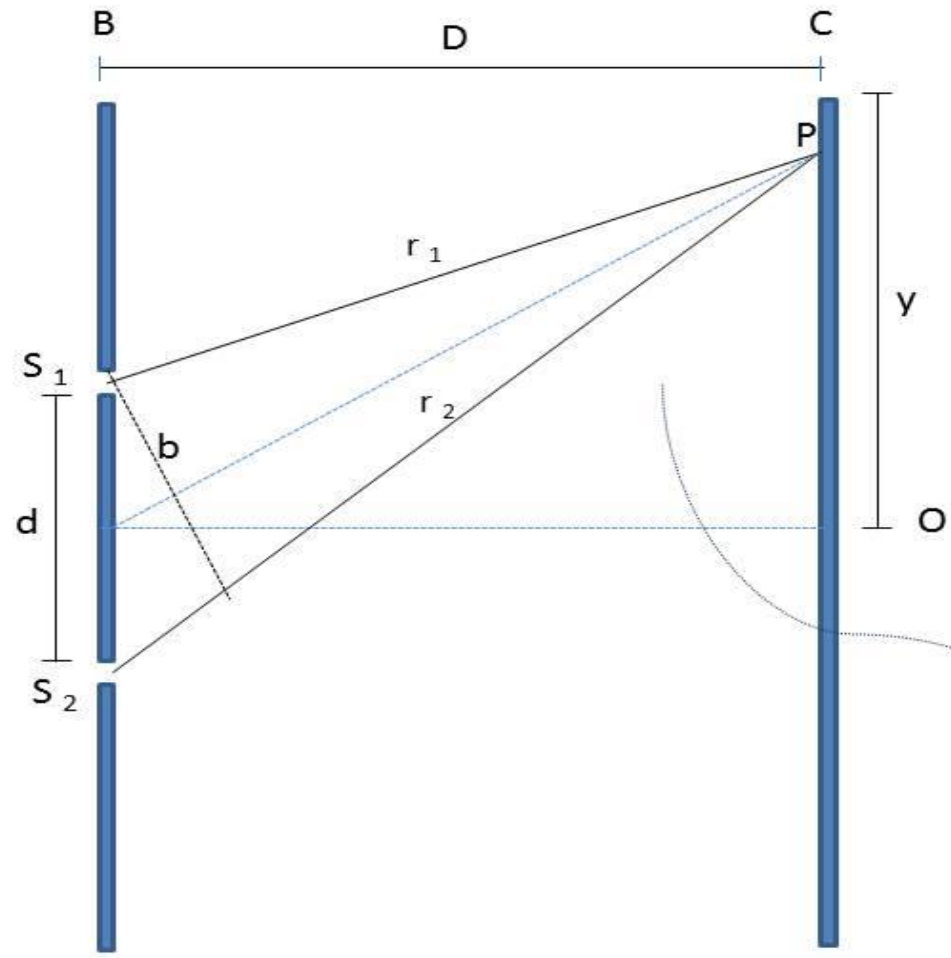
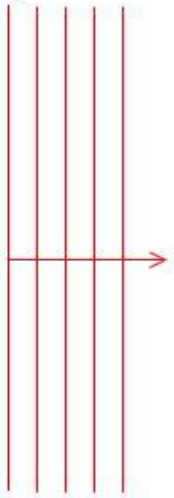


$$\Delta L = \frac{\lambda}{2} = d \text{sen} \theta \Rightarrow \text{sen} \theta = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{d}$$





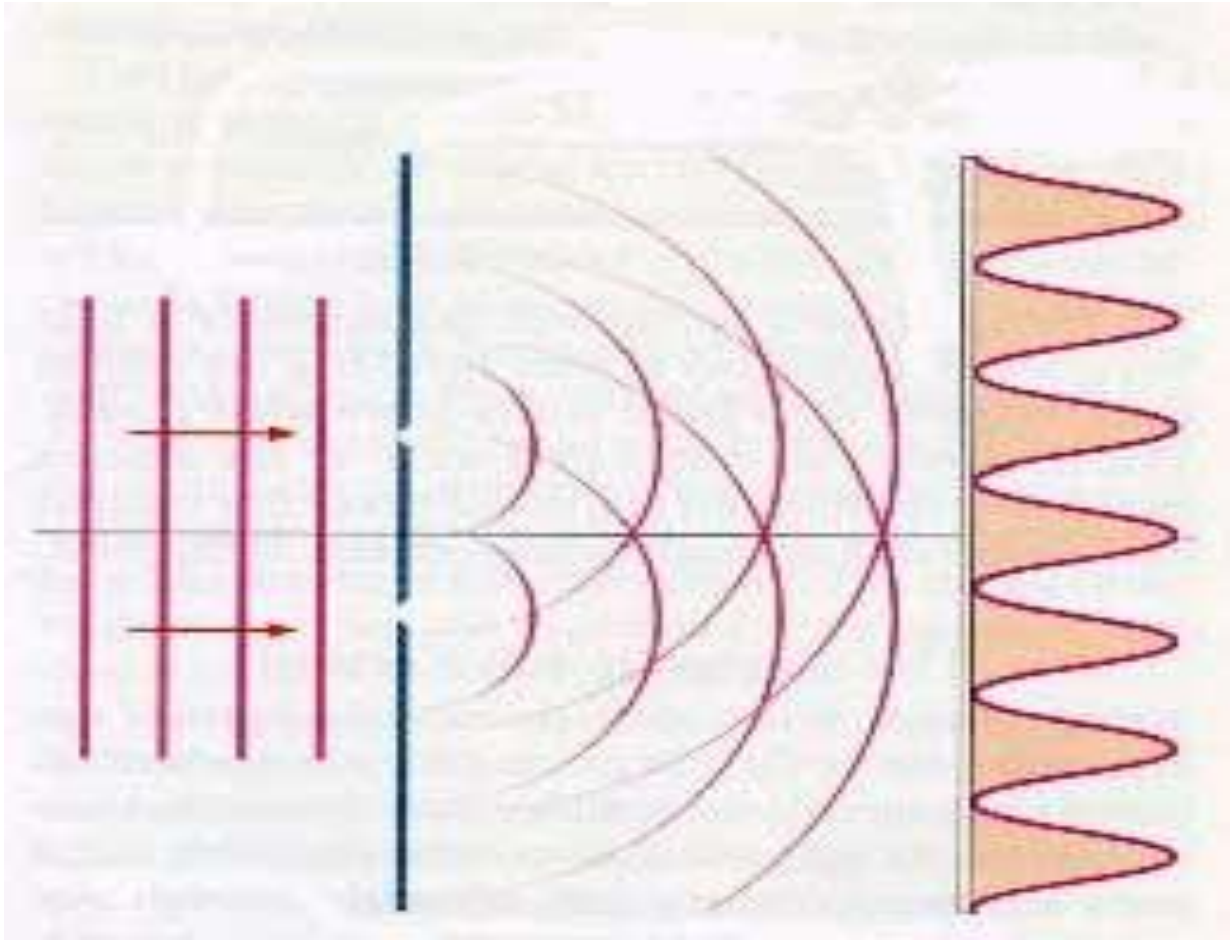
$$\text{sen} \theta = \left(n + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{d}$$

Onda plana



Experimento de Young

- $D \gg d$;
- S1, S2 e b formam um triângulo retângulo com ângulo θ no vértice S2 :
- Franja clara: $\Delta L = d \sin \theta \Rightarrow \sin \theta_n = n \frac{\lambda}{d}$ 
 - número inteiro de λ , ou seja, para $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$
- Franja escura: $\Delta L = d \sin \theta = (n + \frac{1}{2}) \lambda \Rightarrow \sin \theta_n = (n + \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{d}$ 
 - $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$



Difração

- Fenômeno ondulatório de contorno a obstáculos
 - desvios de propagação
- Espalhamento → a onda passa através de um objeto ou fenda que “rompe” a sua propagação, e pode ser seguido por interferência.
- Pode ser explicada pelo princípio de Huygens

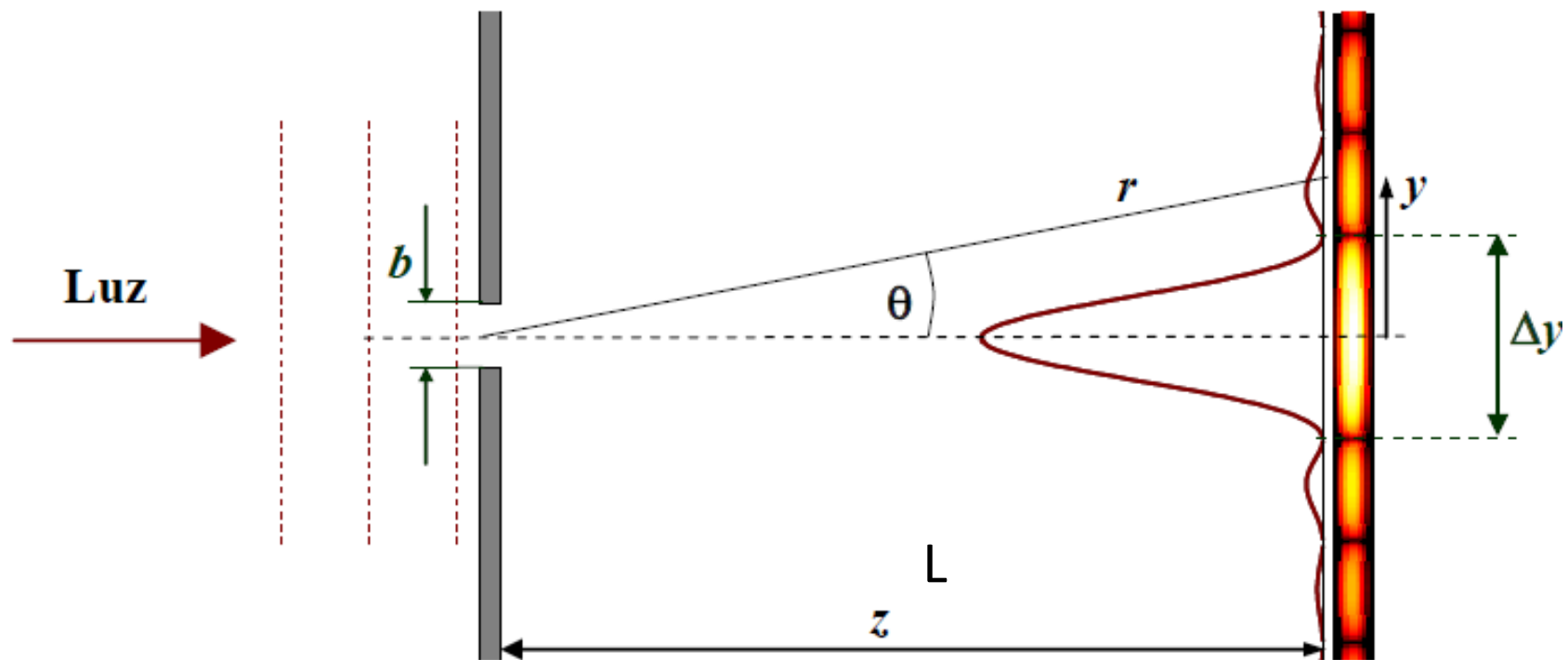
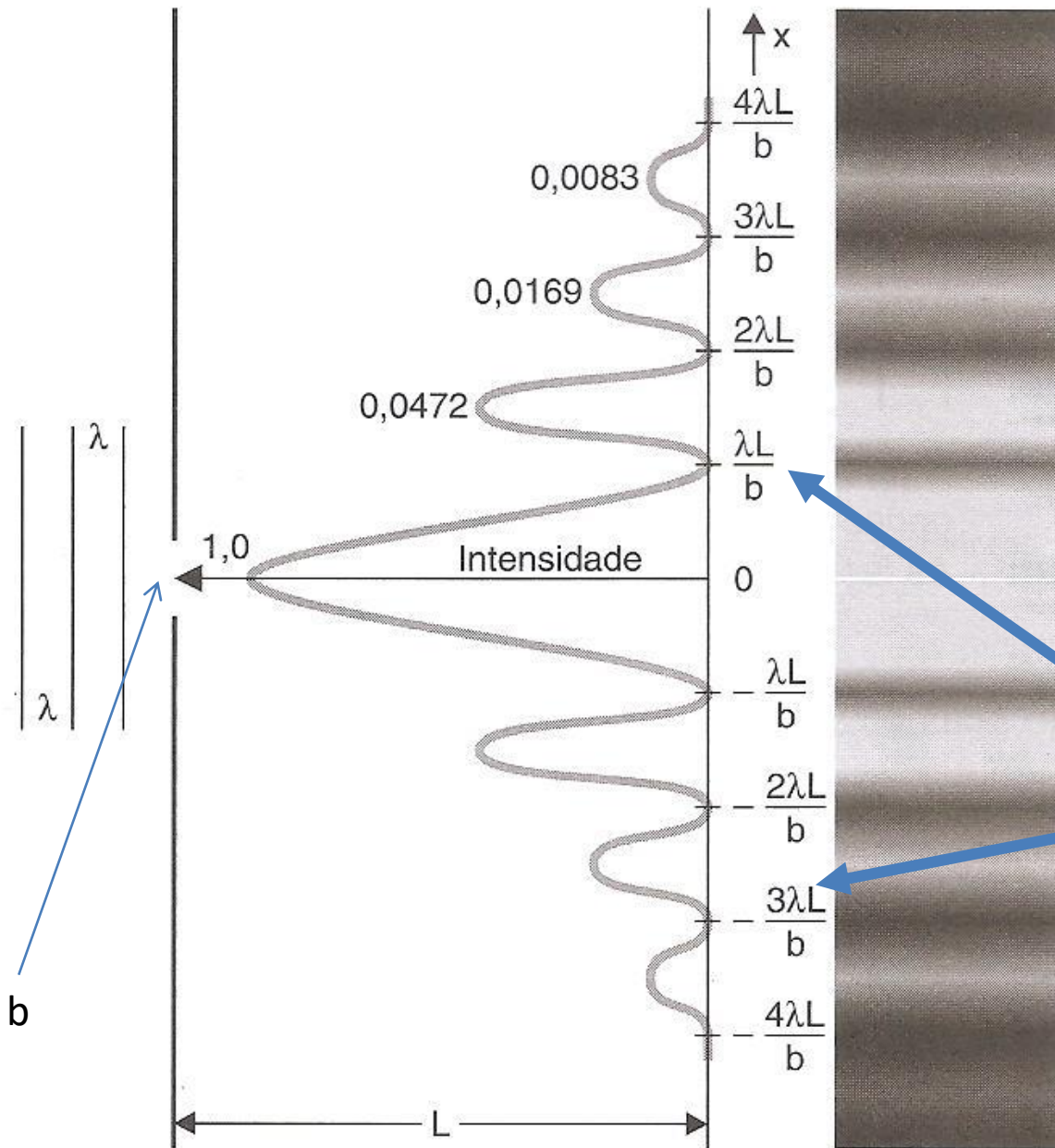


Fig. 1. Difração da luz por uma fenda de largura b vista em um anteparo a uma distância z . A largura do máximo central é Δy .



$$L \gg b$$

$$\text{tg } \theta_n = \frac{\text{sen } \theta_n}{\text{cos } \theta_n} \approx \text{sen } \theta_n = \frac{x_n}{L}$$

Interferência destrutiva
(franja escura)

$$\text{sen } \theta_n = n \frac{\lambda}{b}$$

$$x_n = n \frac{\lambda L}{b}$$

n = +1
n = -3

Interferência construtiva
(franja clara)

$$\text{sen } \theta_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{b}$$



Difração

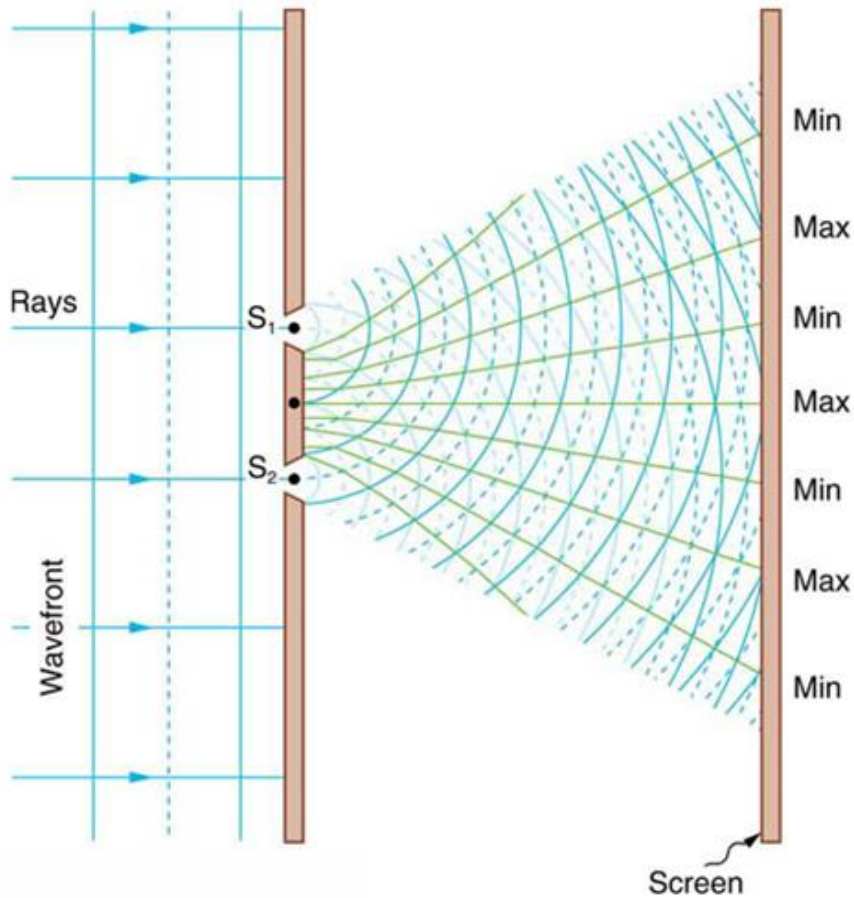
- dimensões do obstáculo ou da abertura
 - mesma ordem de grandeza do comprimento da onda incidente.
- ocorre para qualquer tipo de onda

Difração

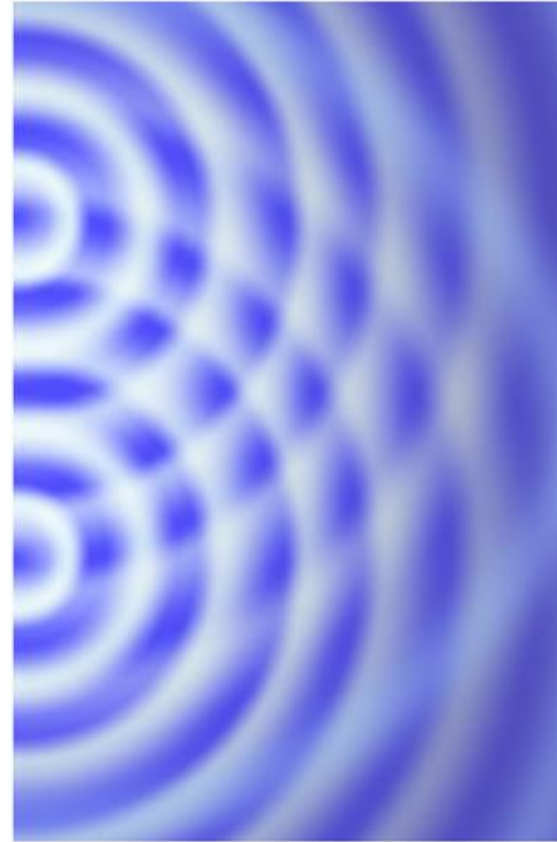
Figuras de difração

<https://www.youtube.com/watch?v=DYYGFb36lvE>

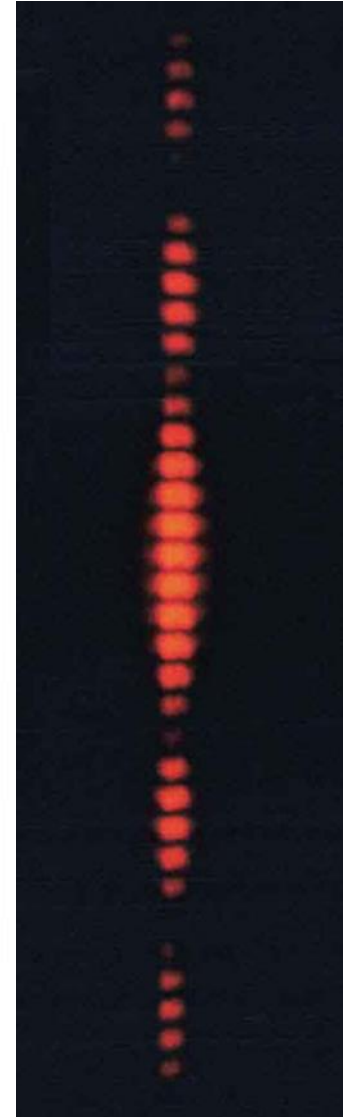
Voltando à fenda dupla de Young



(a)

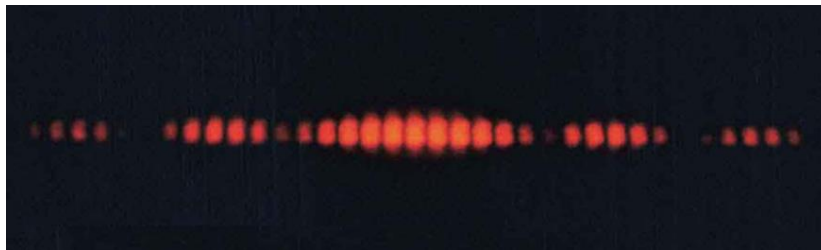
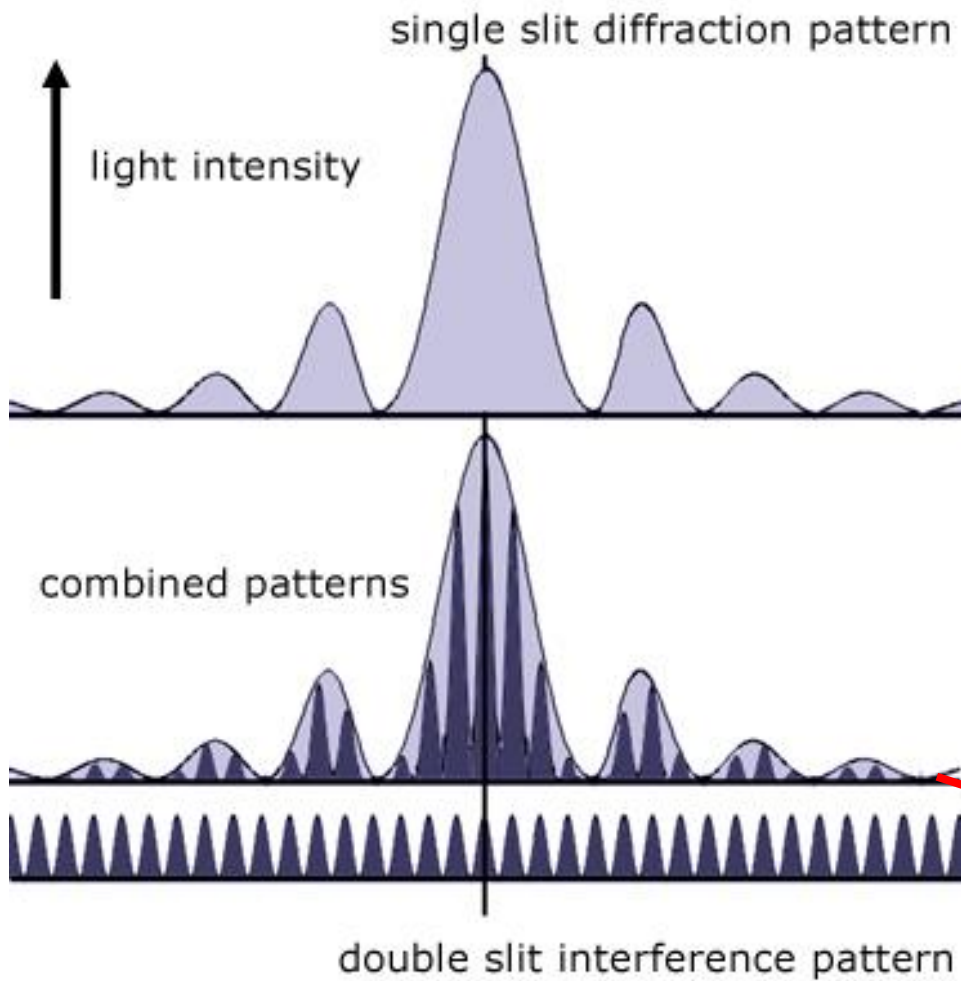


(b)



Difração de fenda dupla e N fendas

- No caso de uma fenda dupla (como no experimento de Young), teremos a combinação do padrão de interferência com o de difração, em que o padrão de difração modula a interferência



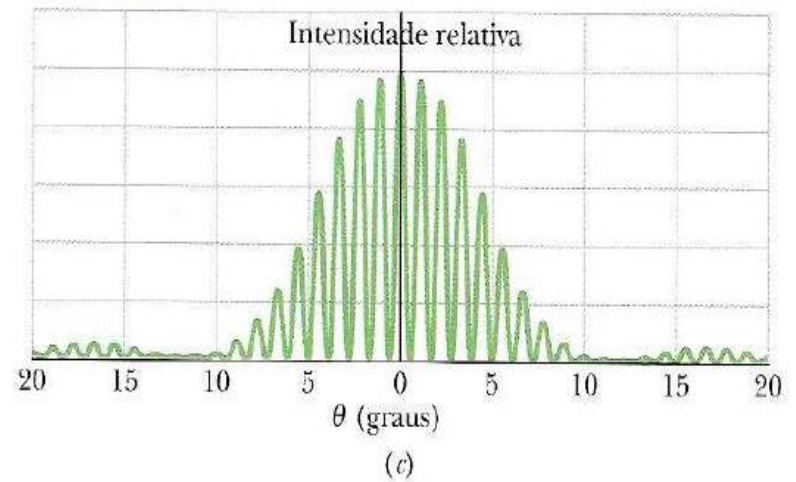
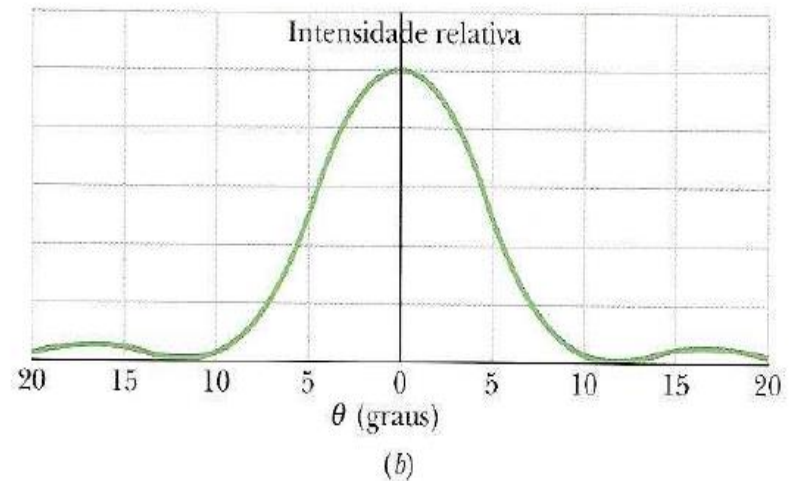
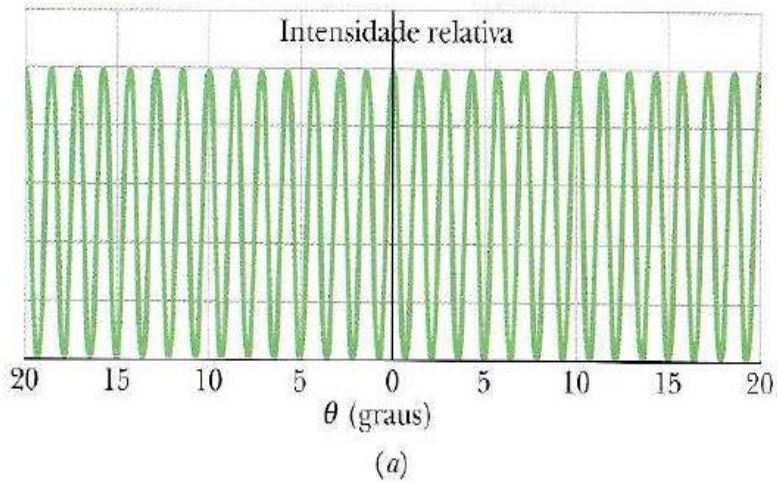
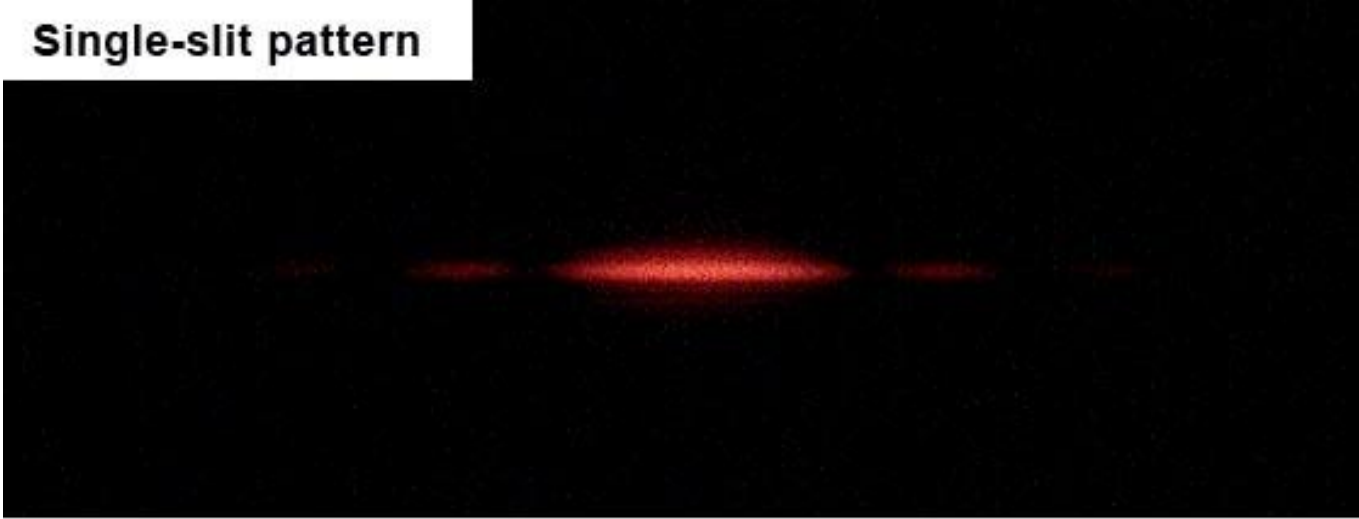


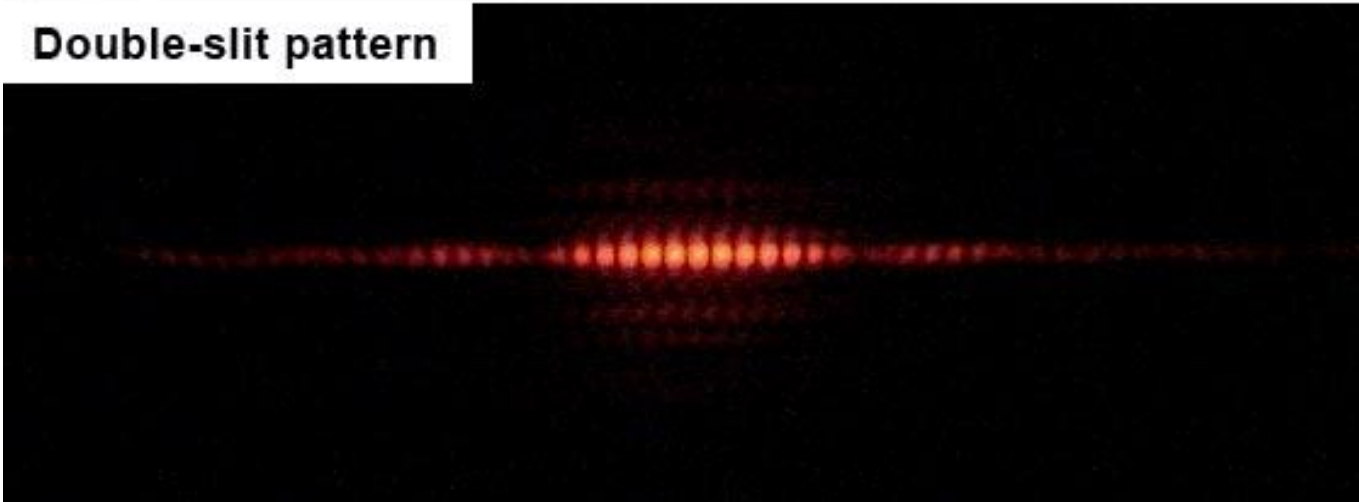
FIG. 36-15 (a) Gráfico teórico da intensidade em um experimento de interferência com duas fendas infinitamente estreitas. (b) Gráfico teórico da difração produzida por uma única fenda de largura a finita. (c) Gráfico teórico da intensidade em um experimento com duas fendas de largura a finita. A curva de (b) se comporta como uma envoltória, modulando a intensidade das franjas de (a). Observe que os primeiros mínimos da curva de difração de (b) eliminam as franjas de (a) que aparecem nas proximidades de 12° em (c).

Difração em fendas simples e duplas

Single-slit pattern



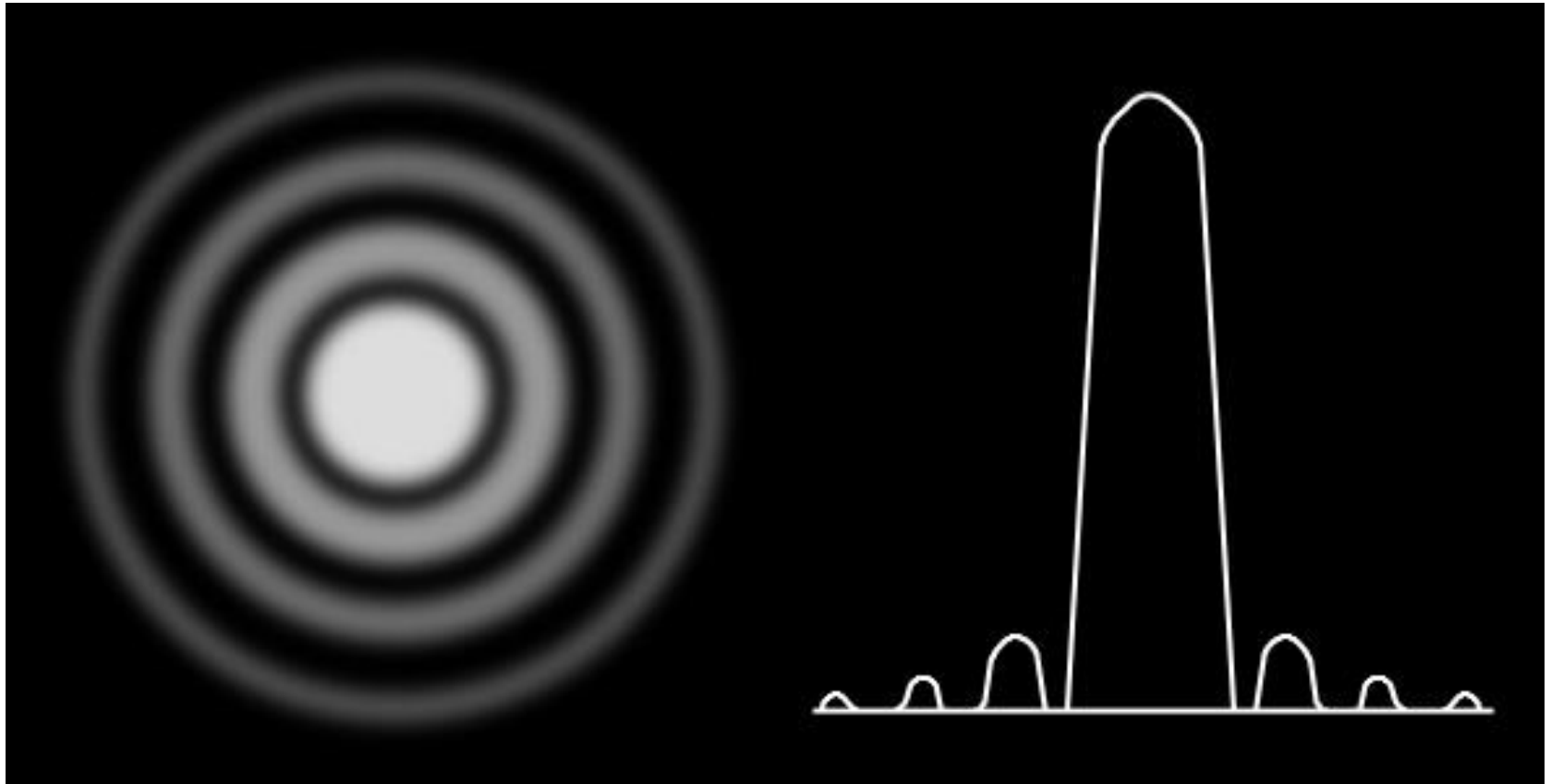
Double-slit pattern



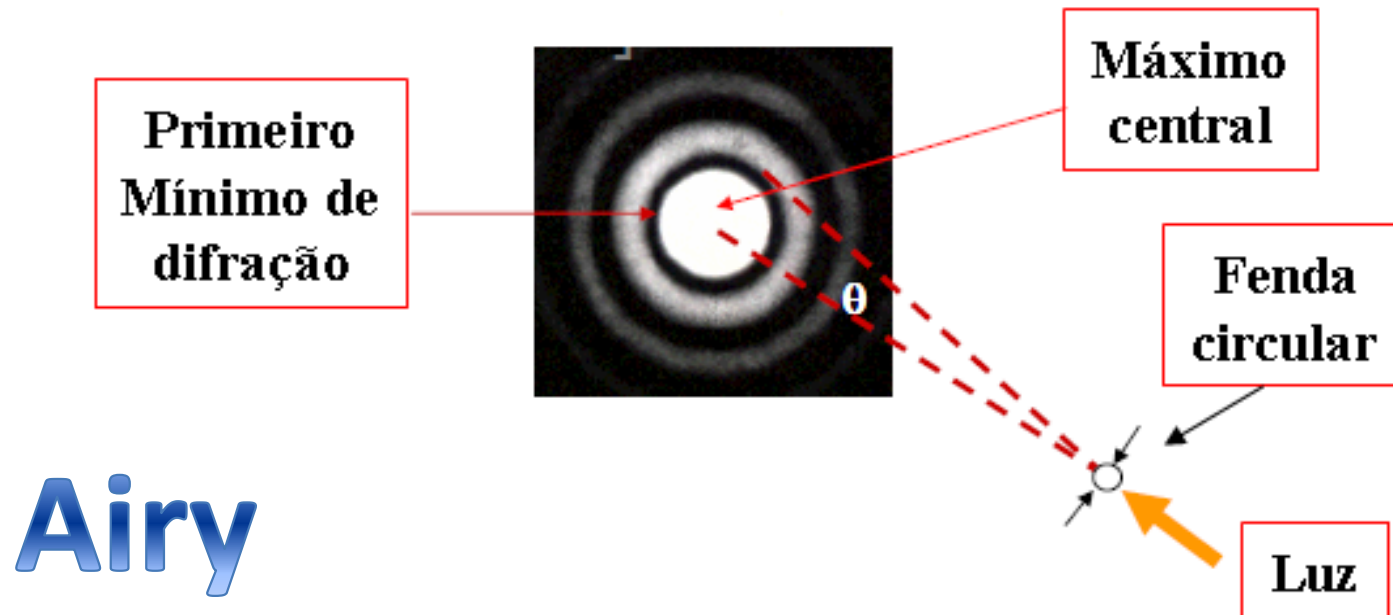
Difração por abertura circular

- Ao invés de uma fenda, tem-se um orifício por onde a onda passa, sendo difratada, formando a imagem de um disco central luminoso, cercado de anéis claros e escuros, cuja intensidade luminosa decresce com o raio do anel.
- Região central da figura de difração, referente ao máximo central, é o *disco de Airy*.

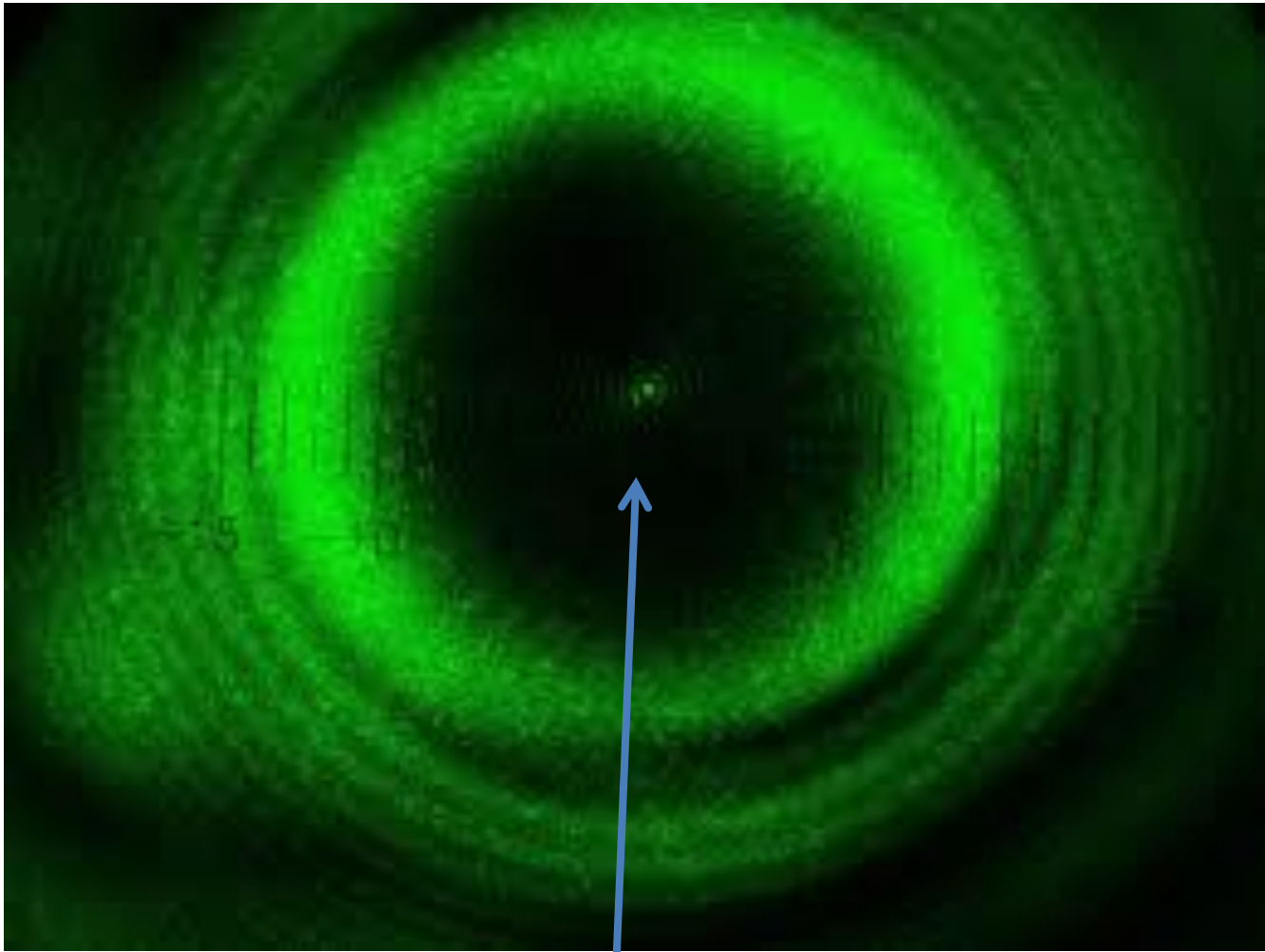
Difração por uma abertura circular



- Disco de Airy: utilizado para determinar a resolução espacial máxima de um sistema ótico, como uma máquina fotográfica ou um telescópio.

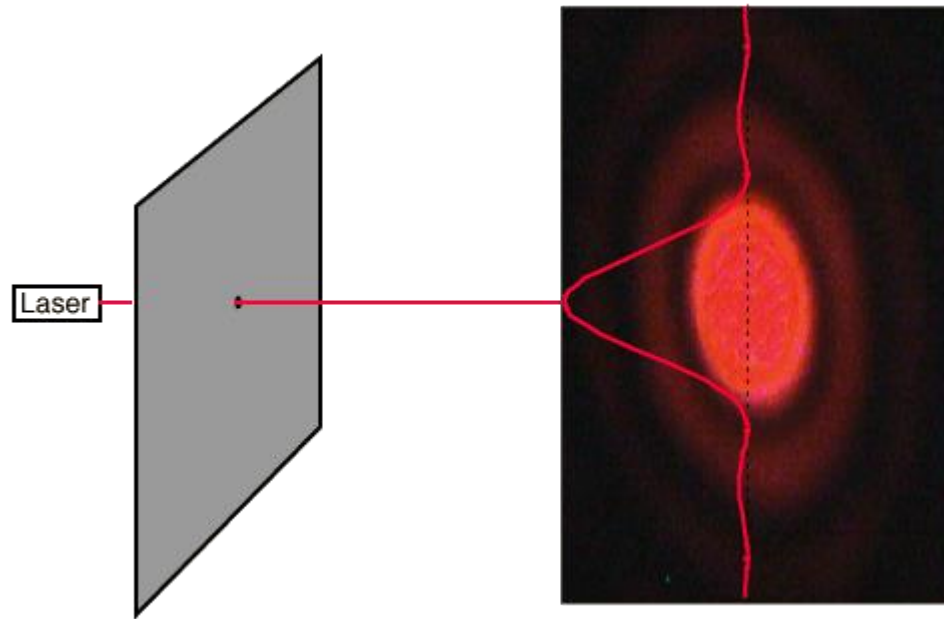
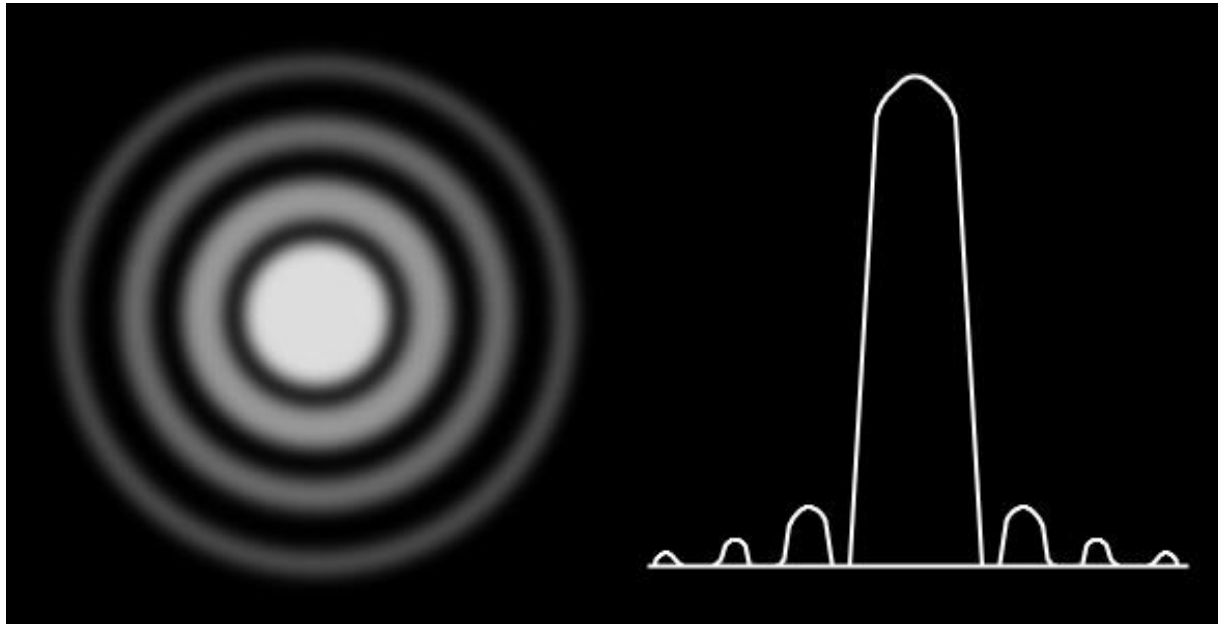


Difração por um disco circular



Ponto claro de Poisson (Fresnel)

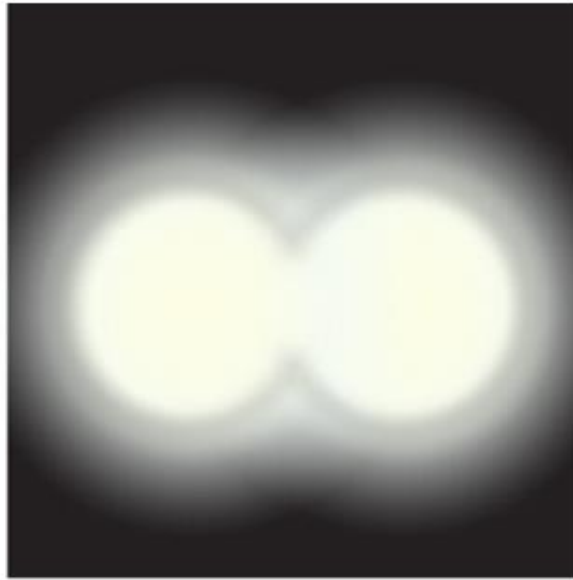
Difração por uma abertura circular



Resolução



(a)



(b)

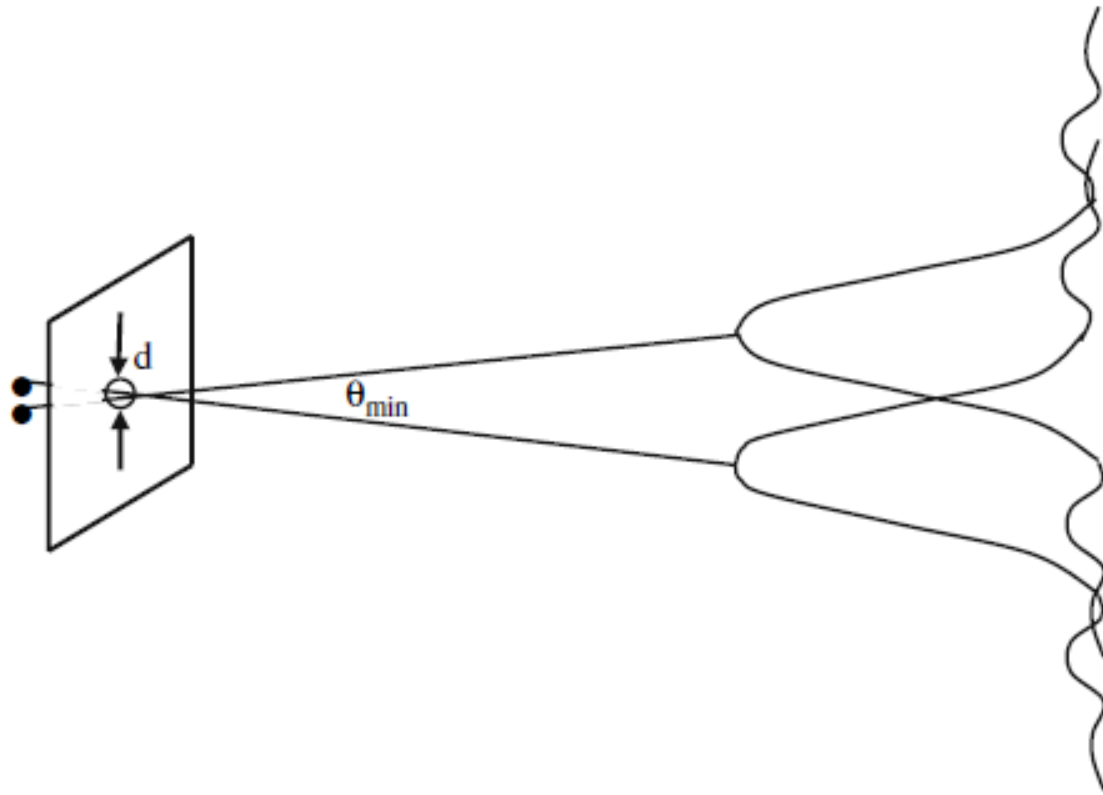


(c)

$$\text{sen}(\theta_R) = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$



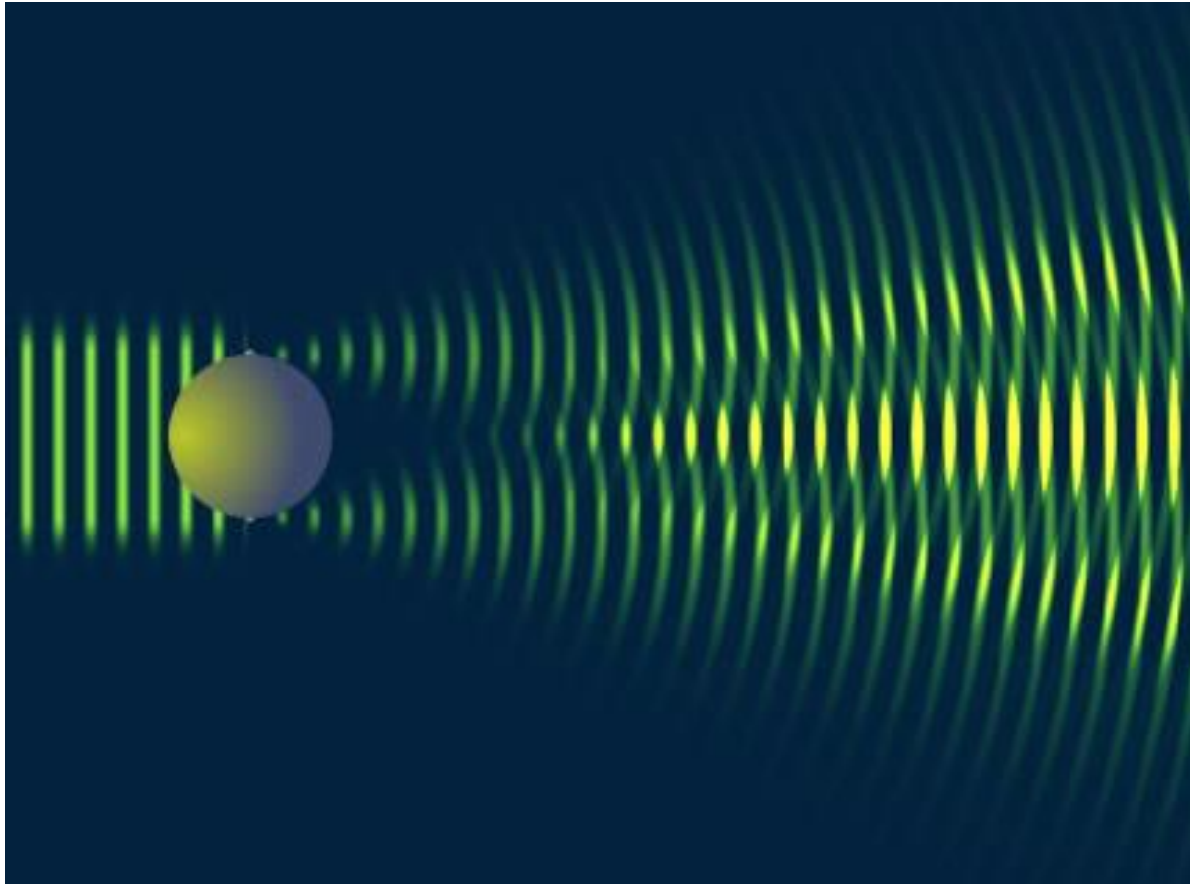
Resolução



$$\text{sen}(\theta_R) = 1,22 \frac{\lambda}{d} \rightarrow \theta_{min} \approx 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

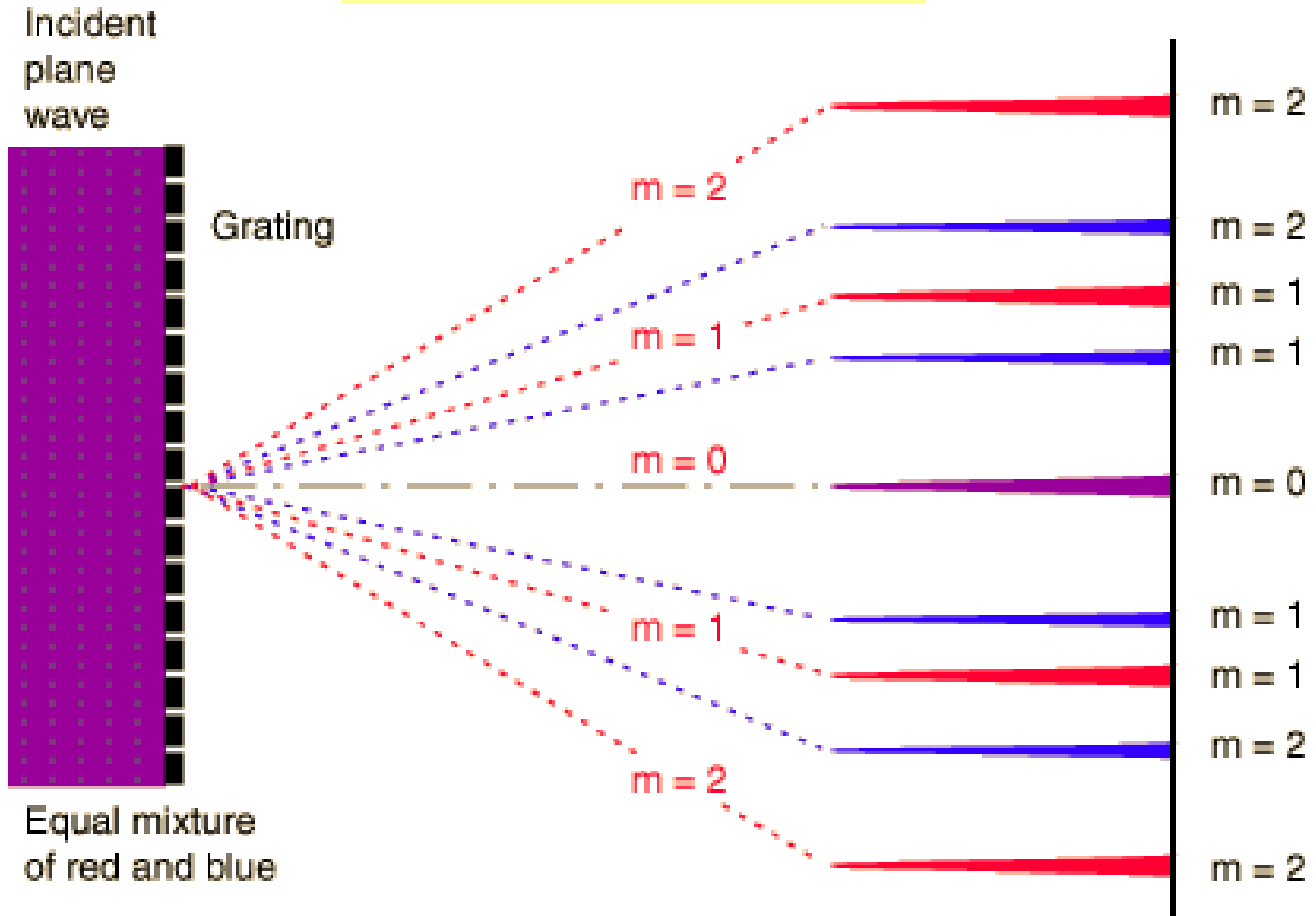


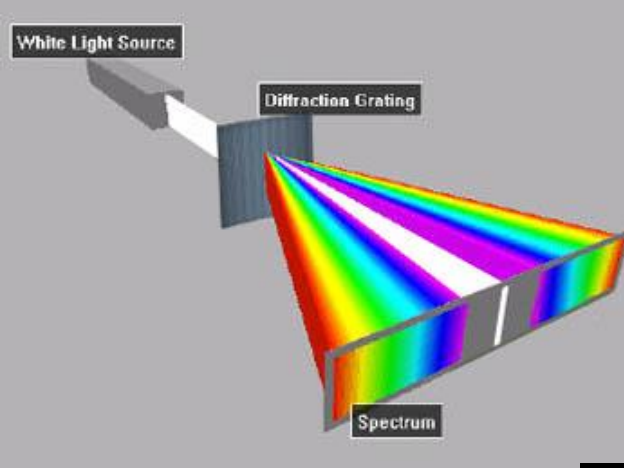
Difração por um obstáculo



Redes de difração

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

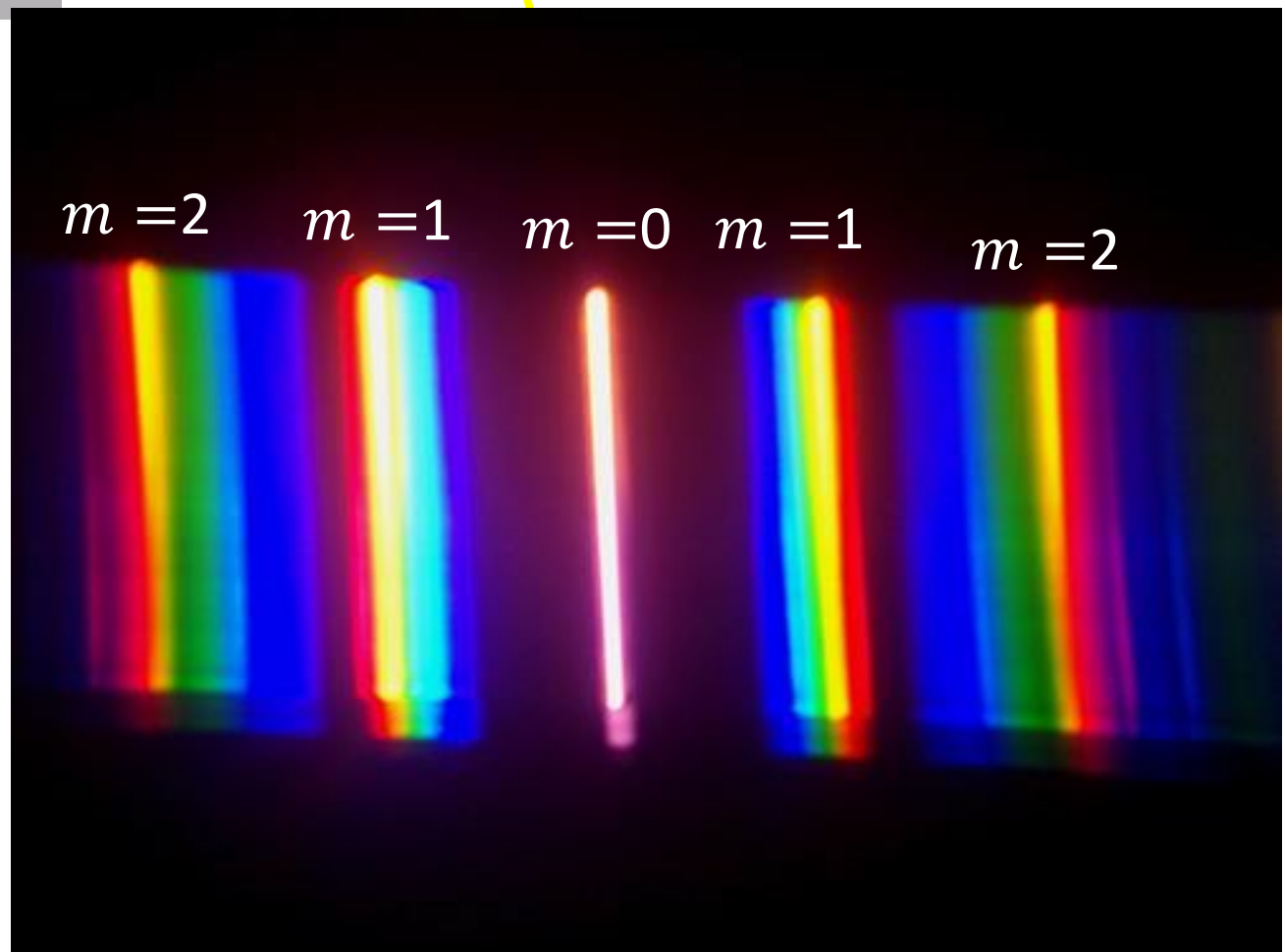




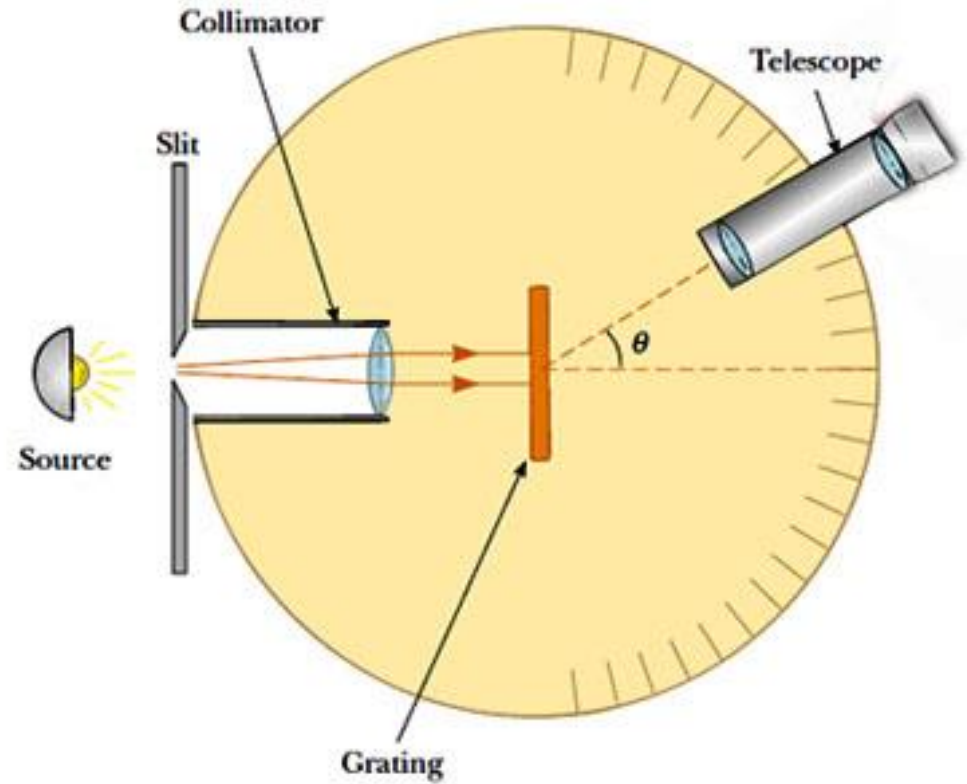
Redes de difração

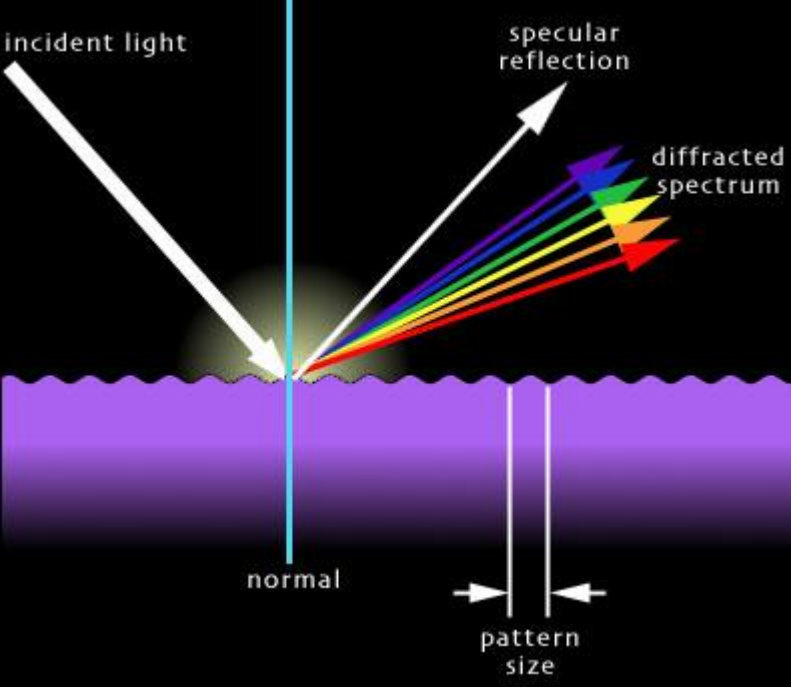
$$d \sin \theta = m \lambda$$

$m = 0 \rightarrow$ igual para todos os λ



Espectroscópio com rede de difração

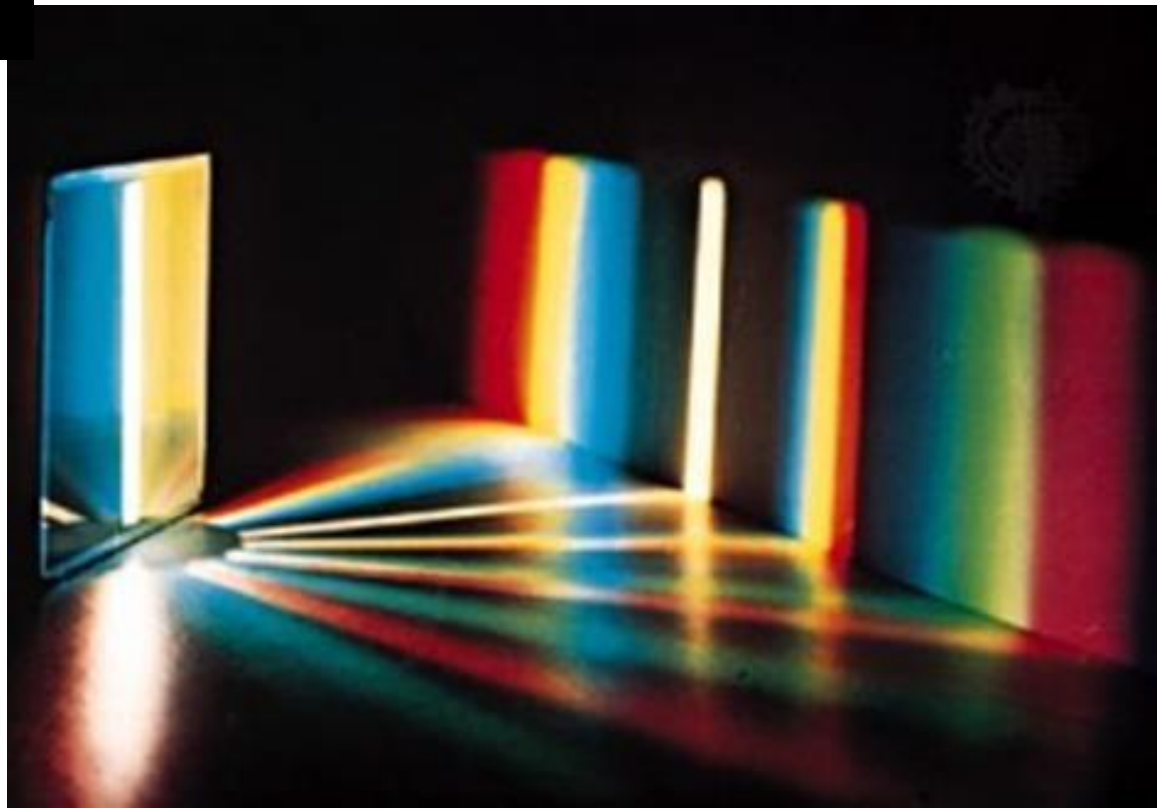




Grade de difração



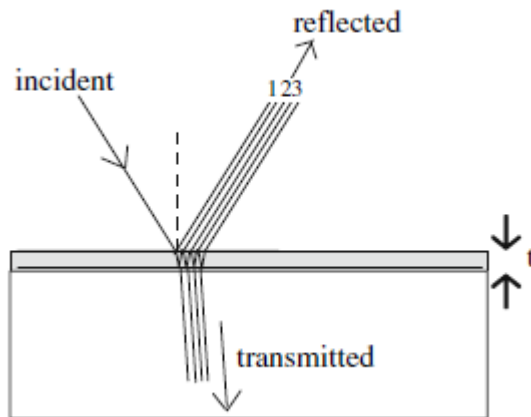
O mesmo efeito se consegue ao se fazer ranhuras em uma superfície refletora



Interferência por filmes finos

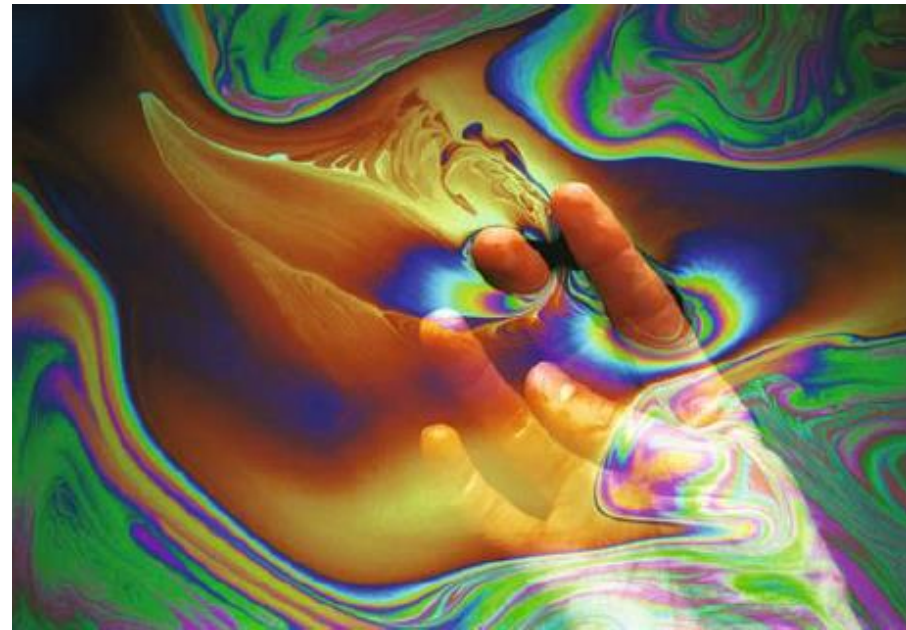
Interferência em filmes finos

https://www.youtube.com/watch?v=MoNOwr4xqIk&list=PL1Dg4Oxxk_RI2Ppb541vQyaUbgUuXtiuJ&index=18



$$2nt = m\lambda, \quad (\text{destructive interference}),$$

$$2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda. \quad (\text{constructive interference}).$$



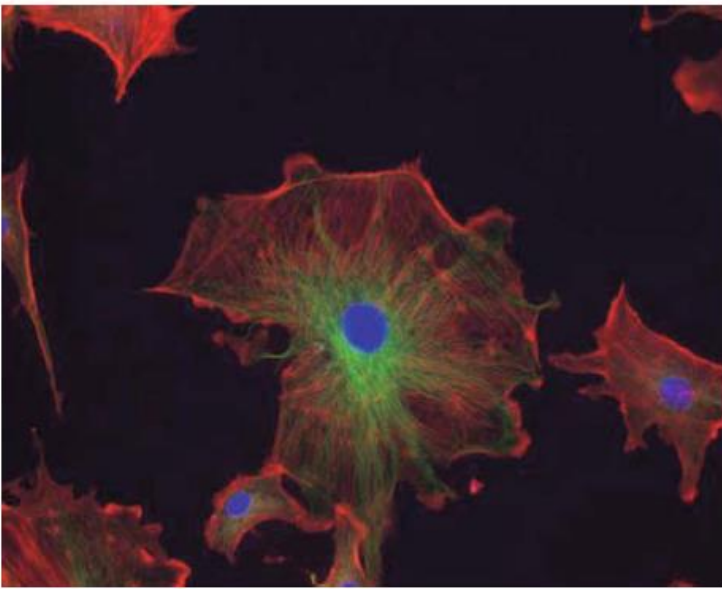


FIGURE 23.4 Three-color fluorescence image of an endothelial cell showing the tubulin (green), nucleus (blue), and actin cytoskeleton (red).

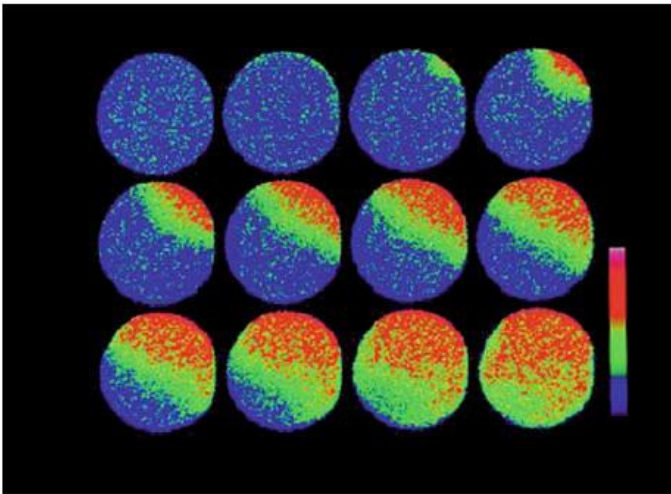


FIGURE 23.5 A wave of increase in calcium ion concentration sweeps across an egg cell just after fertilization as monitored by the green fluorescence from a Ca-sensitive dye attached to small dextran molecules. The images are taken 5 s apart and show the Ca wave starting around the 1:30 o'clock position and spreading across the cell.

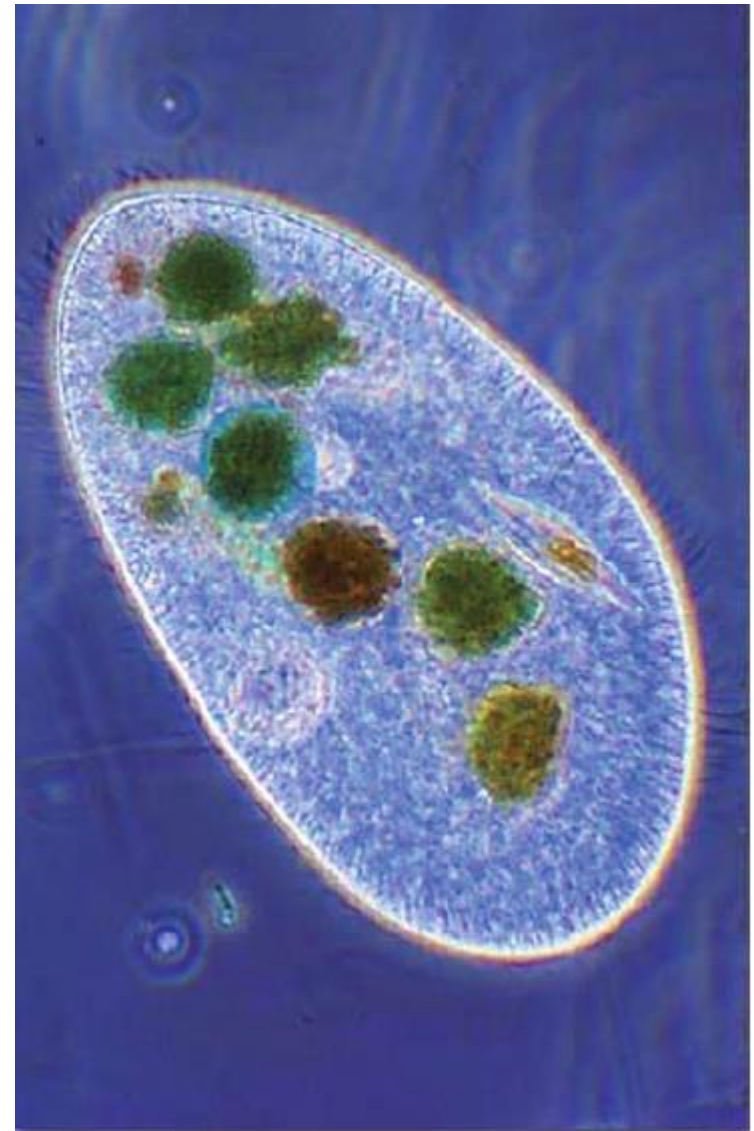


FIGURE 23.7 Phase contrast micrograph of a paramecium.

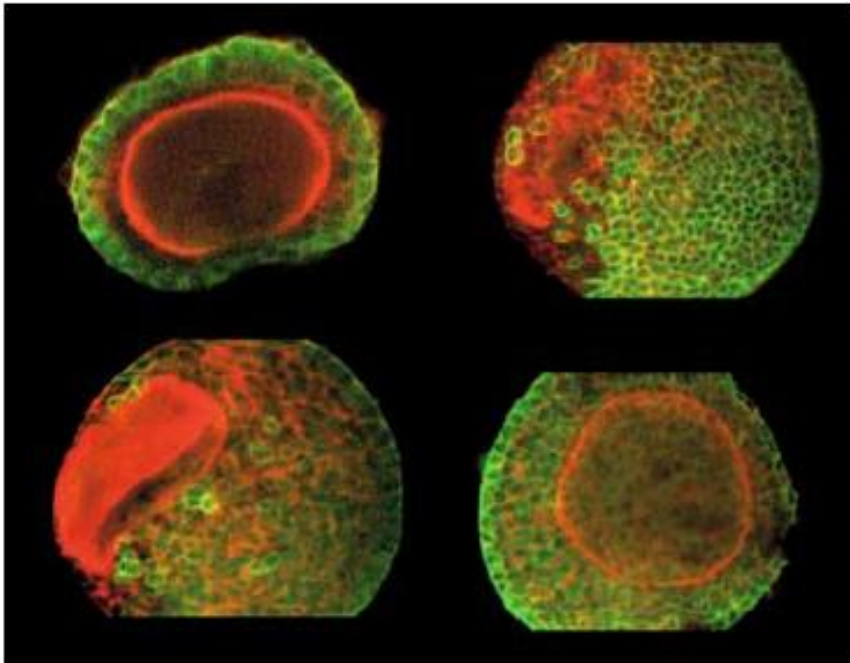


FIGURE 23.10 *Laser-scanning confocal microscopic images of mouse oocytes showing microtubules in red and actin filaments in green.*

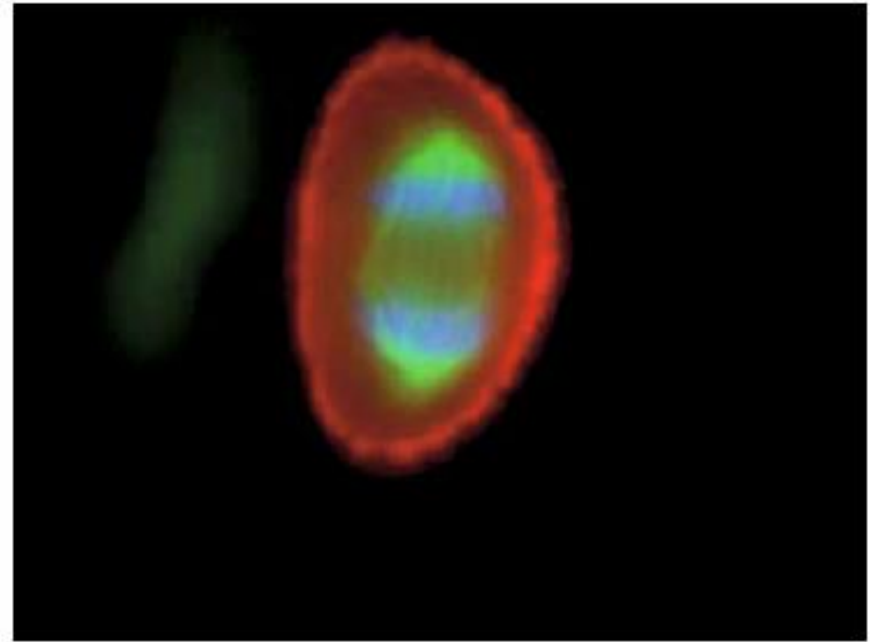
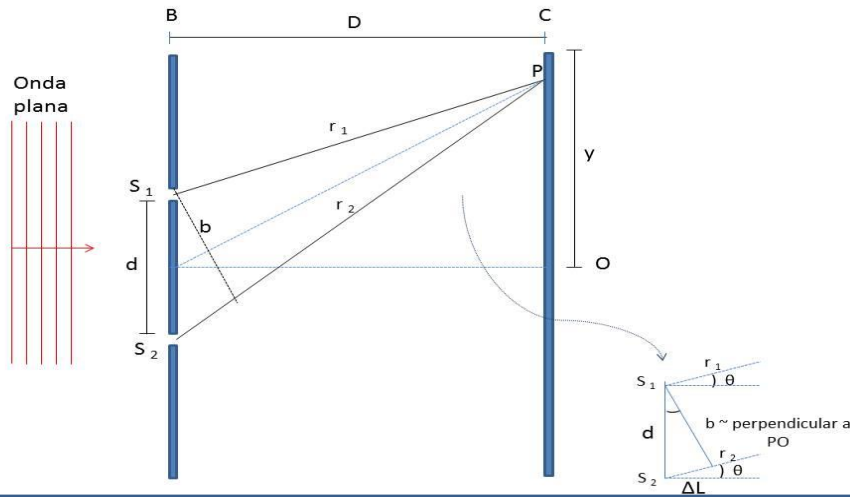


FIGURE 23.11 *Confocal microscopic image of anaphase in a cultured epithelial cell showing chromosomes (blue), spindle apparatus (green), and actin (red).*

Fenda dupla



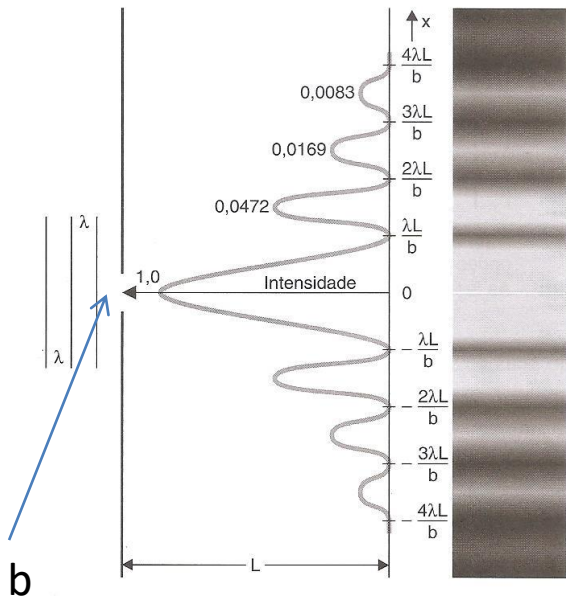
Franja clara (construtiva)

$$\Delta L = d \sin \theta \Rightarrow \sin \theta_n = n \frac{\lambda}{d}$$

Franja oscura (destrutiva)

$$\Delta L = d \sin \theta = \left(n + \frac{1}{2}\right) \lambda \Rightarrow \sin \theta_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{d}$$

Fenda simples



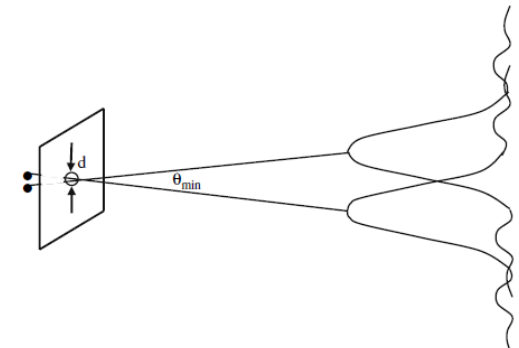
$$L \gg b$$

$$\tan \theta_n = \frac{\sin \theta_n}{\cos \theta_n} \approx \sin \theta_n = \frac{x_n}{L}$$

Franja oscura (destrutiva)

$$\sin \theta_n = n \frac{\lambda}{b}$$

$$x_n = n \frac{\lambda L}{b}$$



$$\sin(\theta_R) = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

$$\theta_{min} \approx 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

EM RADIANTOS

Agora é a hora da diversão!!!

LISTAS DE EXERCÍCIOS



Não esqueçam de colocar os nomes de todos os integrantes do grupo presentes na aula

Lista de casa 7 e síntese 4 (esta aula) para 14/11