

# Universidade de São Paulo Instituto de Física

## Física Aplicada Aula 02

<http://disciplinas.stoa.usp.br/course/view.php?id=24279>

**Profa. Márcia de Almeida Rizzutto**

Edifício Oscar Sala – sala 220

[rizzutto@if.usp.br](mailto:rizzutto@if.usp.br)

**2º Semestre de 2016**

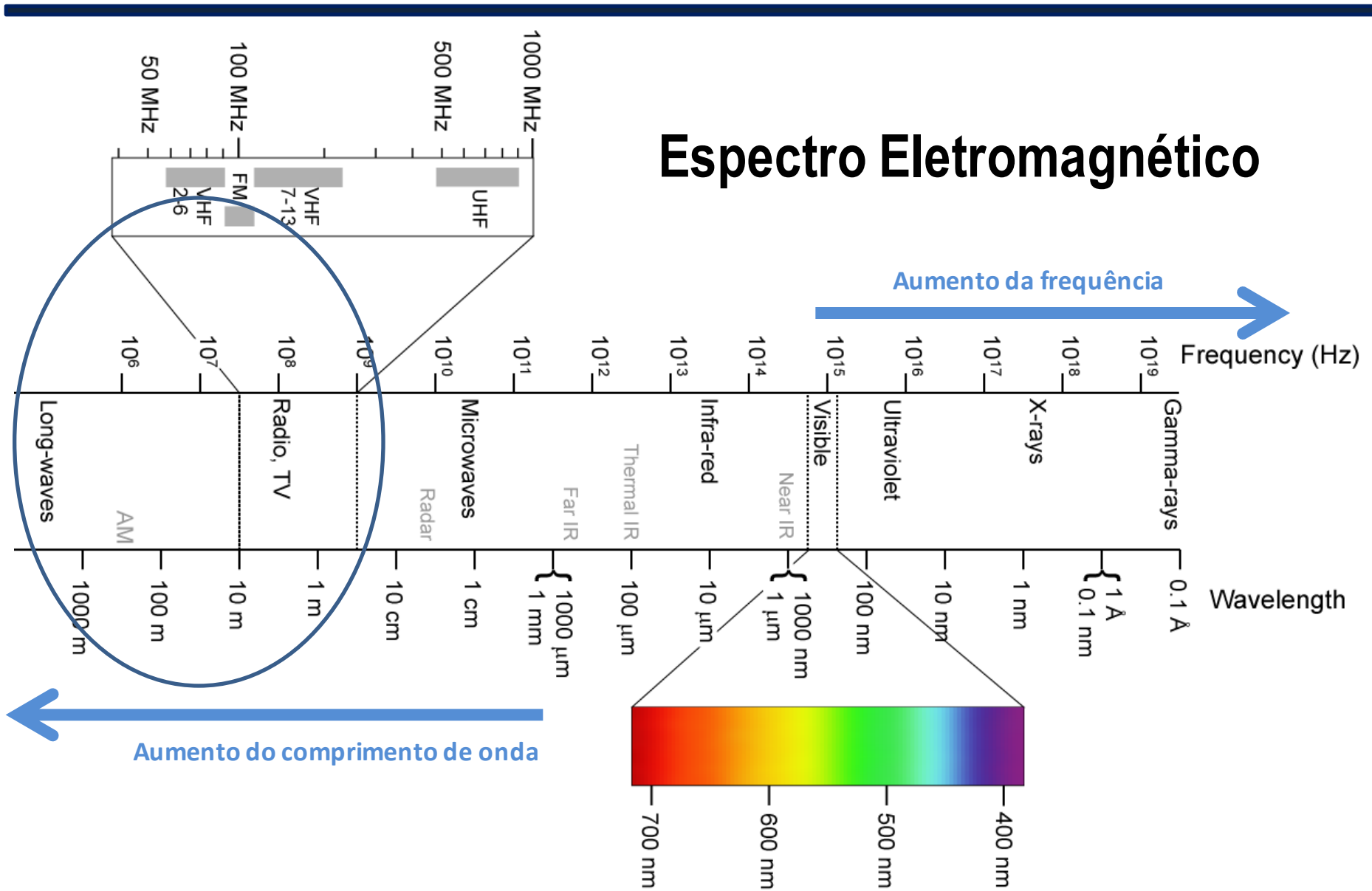
# Programa

- O Espectro Eletromagnético
  - Dimensões dos objetos
  - Produção de energia
- Revisão sobre ondas Mecânicas;
- Princípios de acústica - Efeito Doppler;
  - Ondas de rádio;
  - Imagens por Ultrassom
  - Levitação mecânica.
- Revisão das Equações de Maxwell - Equação da onda eletromagnética
  - Lasers e Aplicações
    - Estrutura atômica – Revisão de física moderna;
    - Descrição dos princípios de geração dos Raios-X: tubos de raios-X e radiação Síncrotron;
  - Propriedades dos Raios-X – Absorção e interação com a matéria
- Imagens médicas obtidas com Raios-X – Radiografia e tomografia.
  - Uso de técnicas atômico-nucleares para análise de materiais
    - Ressonância magnética nuclear

Domingo	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado
agosto						
	Aula 1		Aula 2			
	Aula 3		Aula 4			
	Aula 5		Aula 6			
	Aula 7		Aula 8			
setembro						
	SEMANA DA	DA	PÁTRIA			
	AULA 9		não AULA			
	não AULA		não AULA			
	Aula 10		Aula 11/AP1			
outubro						
	Aula 12/AP2		Aula 13/AP3			
SEMANA Física	Aula 14		Período			
	Aula 15/AP4		Aula 16/AP5			
	Aula 17/AP6		Aula 18 /AP7			
	Aula 19/AP8					
novembro			Período			
	Aula 20		Aula 21			
	RECESSO	Período	não AULA			
	Aula 22		Aula 23			
	Aula 24		Aula 25			
dezembro						
	PROVA					

# Calendário

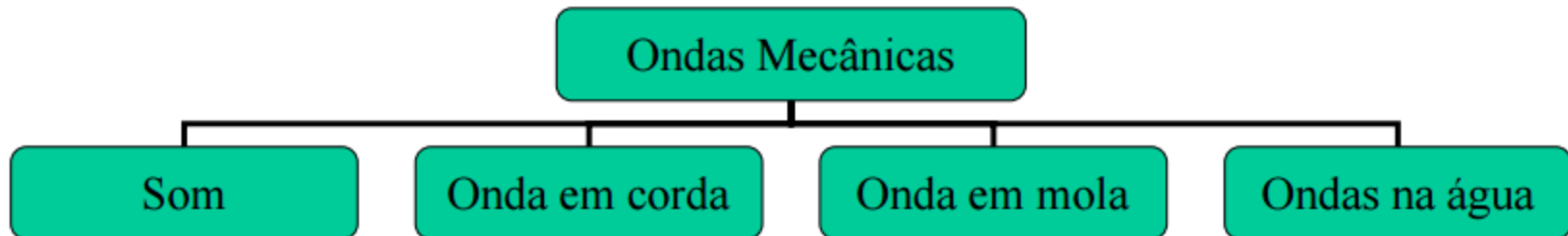
# Revisão sobre ondas mecânicas



# Revisão sobre ondas

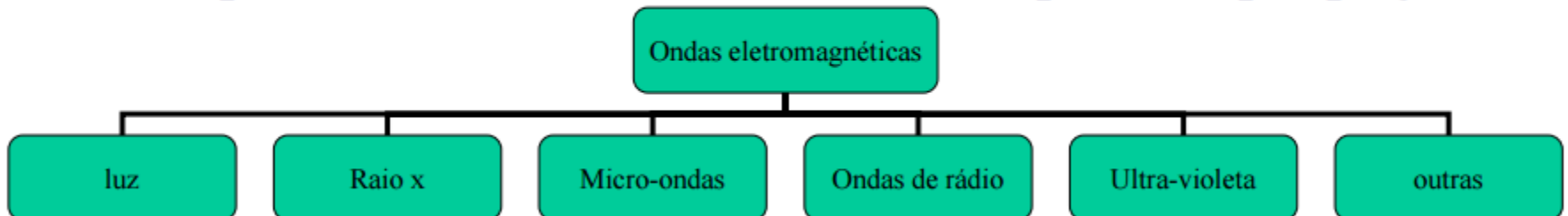
Ondas Mecânicas

**Precisam de um meio material para se propagar.**



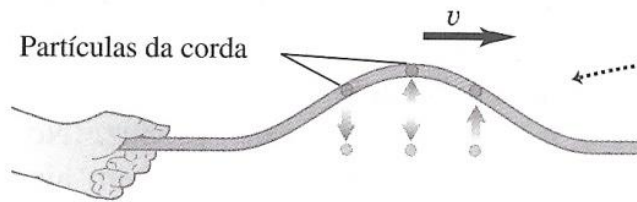
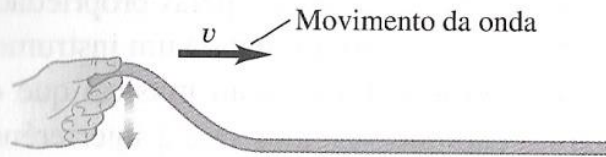
Ondas Eletromagnéticas

**Não precisam de um meio material para se propagar**



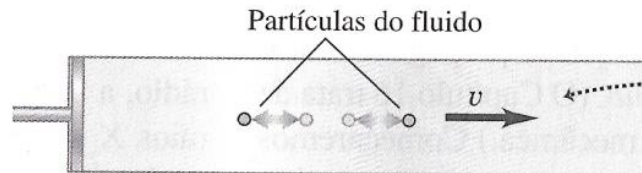
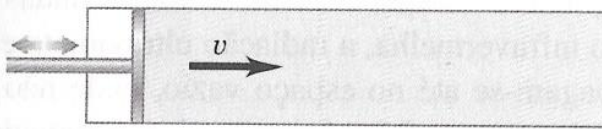
# Revisão sobre ondas

(a) Onda transversal em uma corda.



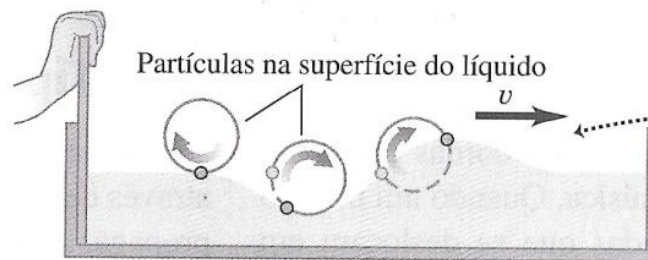
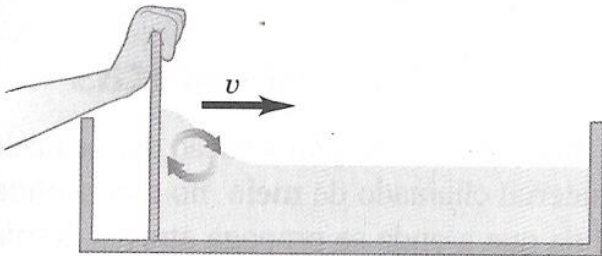
À medida que a onda passa, cada partícula da corda se move para cima e para baixo, transversalmente ao movimento da onda em si.

(b) Onda longitudinal em um fluido.



À medida que a onda passa, cada partícula do fluido se move para a frente e para trás, paralelamente ao movimento da onda em si.

(c) Ondas na superfície de um líquido.



À medida que a onda passa, cada partícula da superfície do líquido se move em um círculo.

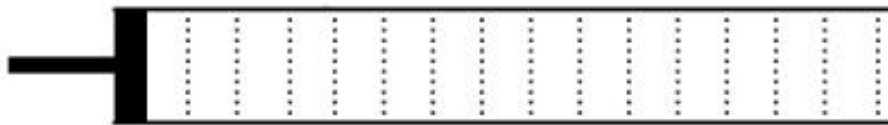
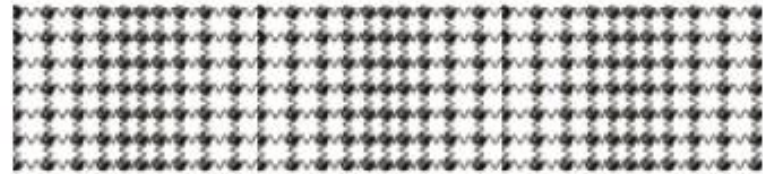
**Figura 15.1** Três modos de criar uma onda que se desloca para a direita. (a) A mão move a extremidade da corda para cima e depois retorna à posição inicial, produzindo uma onda transversal. (b) O pistão comprime um líquido ou um gás para a direita e depois retorna, produzindo uma onda longitudinal. (c) A placa empurra para a direita e depois retorna, produzindo a superposição de uma onda longitudinal com uma onda transversal. Nos três casos uma onda solitária se propaga para a direita.

# Revisão sobre ondas

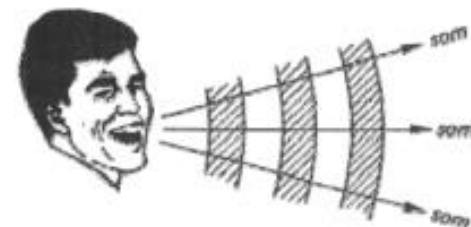
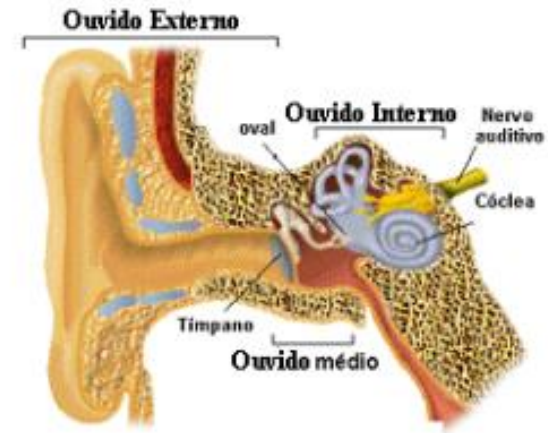
## Ondas Longitudinais

Que se propagam na mesma direção do pulso

onda que se propaga para frente e para trás



Ondas sonoras são longitudinais:



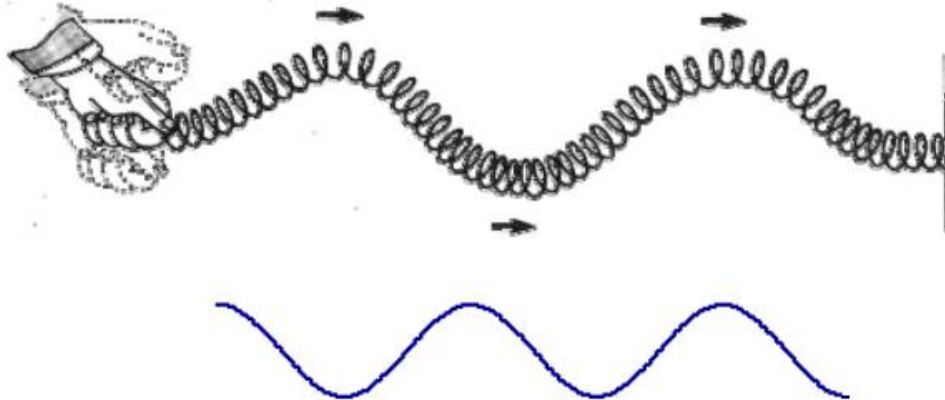
# Revisão sobre ondas

## Ondas Transversais

Que a partícula da corda se move para cima e para baixo transversalmente ao movimento da onda

## Ondas Periódicas

Quando balançamos a extremidade da corda em movimento repetitivo ou periódico. Neste caso a partícula da corda também executará um movimento periódico à medida que a onda se propaga e ai temos uma onda periódica



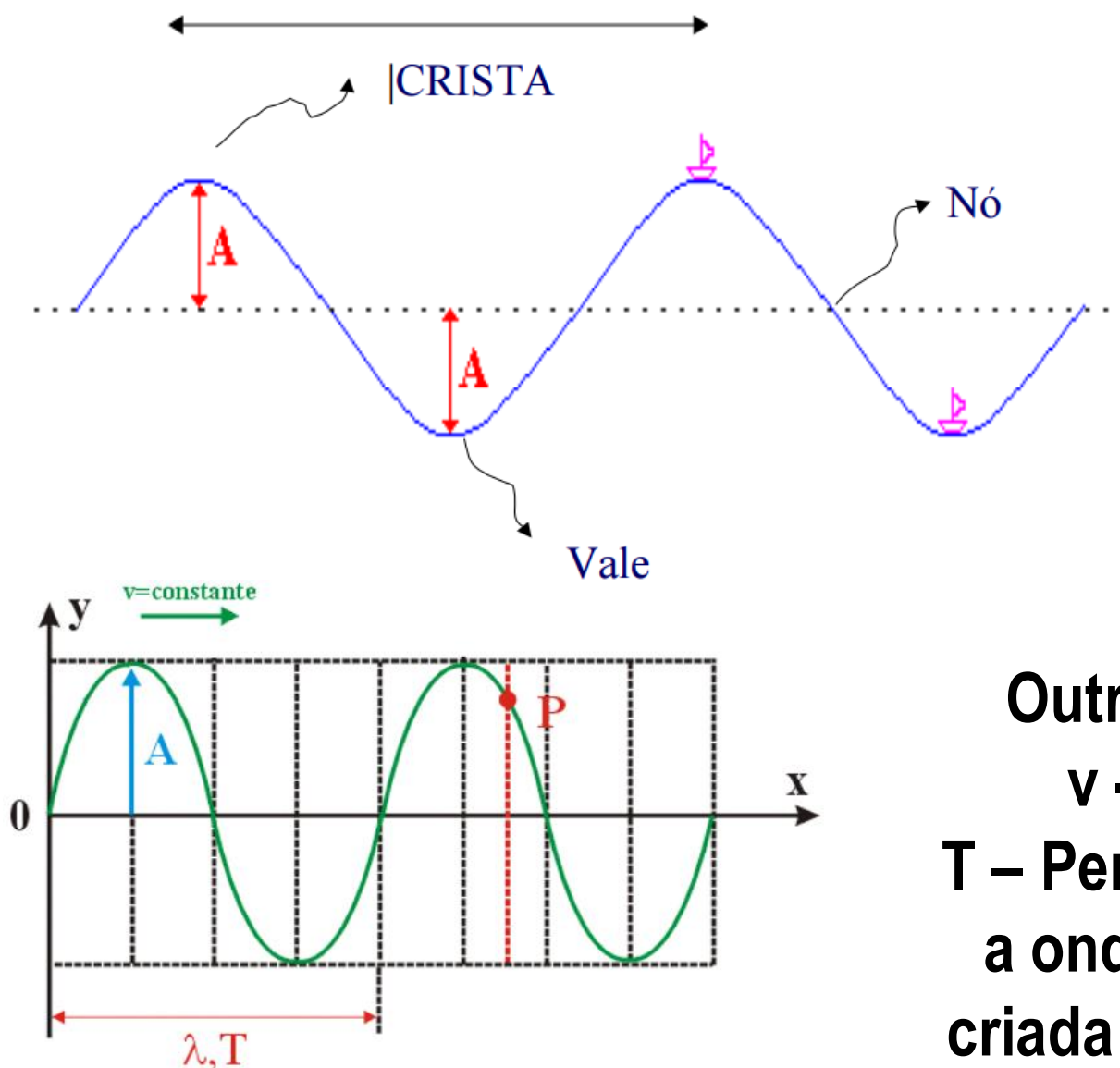
Também podemos ter ondas periódica longitudinais



# COMPRIENTO DE ONDA

 $\lambda$ 

# Movimento harmônico simples (MHS)



**Outras grandezas:**  
 $v$  - velocidade  
 $T$  – Período: tempo que a onda leva para ser criada ou  $\lambda$  seja criado

# Revisão sobre ondas

---

## Outras grandezas:

**Frequência (f)** – representa quantas oscilações completas (um comprimento de onda  $\lambda$ ) uma onda dá a cada segundo

$$T = \frac{1}{f} \quad V = \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad V = \frac{\lambda}{T} \quad V = \lambda \cdot f$$

Descrição do movimento

$$y(x, t) = A \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \frac{2\pi}{T} t\right) = A \operatorname{sen}(kx - \omega t)$$

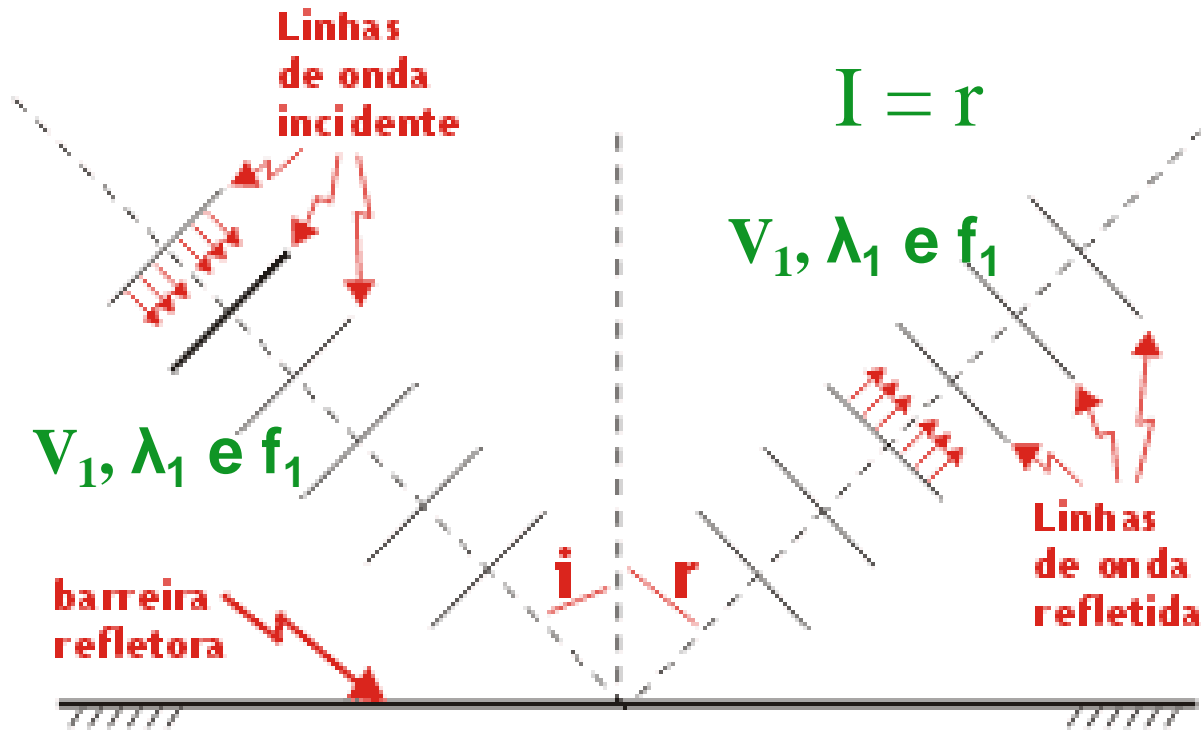
Onda senoidal movendo-se no sentido de +x

Número de onda

frequência

# Fenômenos ondulatórios

**Reflexão:** a onda incidente em uma superfície volta ao mesmo meio.



## Leis da reflexão

- 1) o RI, o RR e a N são coplanares.
- 2)  $\hat{i} = \hat{r}$ .

$$v = \text{cte}$$

$$\lambda = \text{cte}$$

$$f = \text{cte}$$

# Fenômenos ondulatórios

---

## Reflexão:

Quando há mudança na propriedade do meio de propagação de uma onda também temos fenômenos de reflexão mas com inversão de fase.

Densidade de A < Densidade de B

Meio de densidade A.

Meio de densidade B.



Observa-se INVERSÃO da fase da onda refletida.

# Fenômenos ondulatórios

---

## Reflexão:

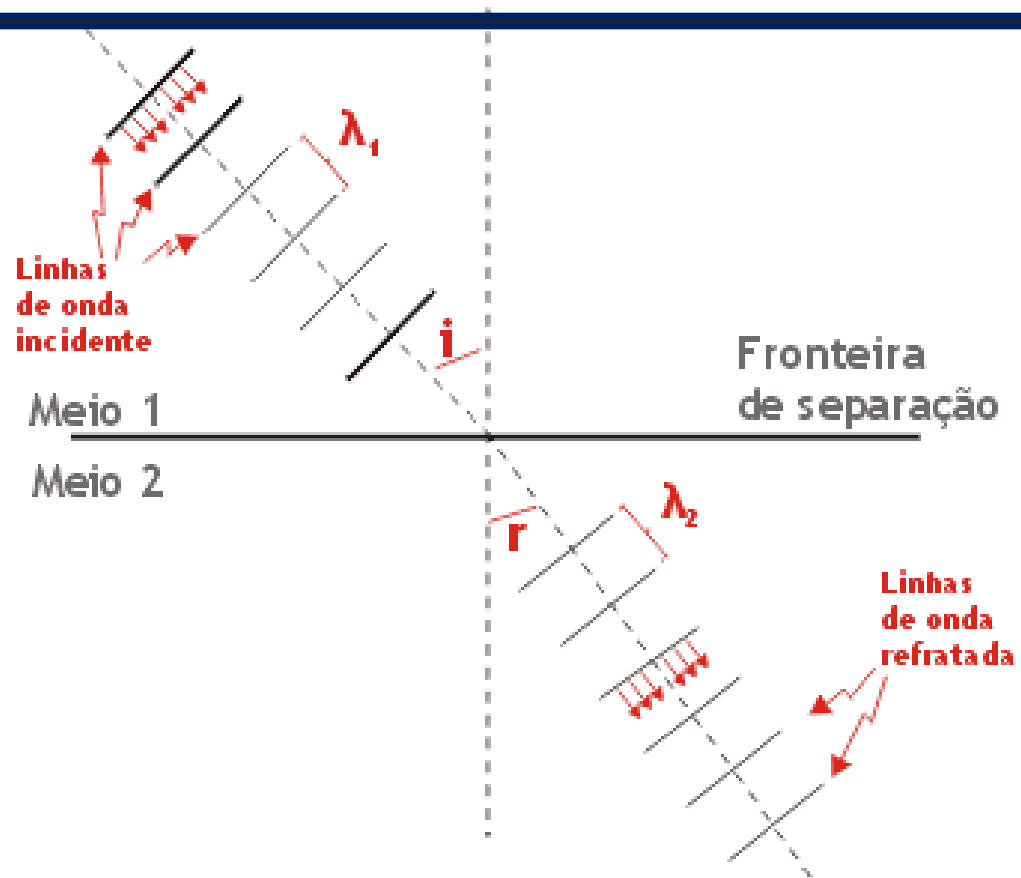
Densidade de A  $>$  Densidade de B

---

Observa-se a **NÃO** inversão da fase da onda refletida.

# Fenômenos ondulatórios

## Refração:



### Propriedades:

- 1a. propriedade: na refração, a frequência e a fase não variam.
- 2a. propriedade: a velocidade de propagação e o comprimento de onda variam na mesma proporção.

# Fenômenos ondulatórios

---

$$v = \lambda \cdot f \quad \Rightarrow \quad f = \frac{v}{\lambda}$$

$$f_1 = f_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2}$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

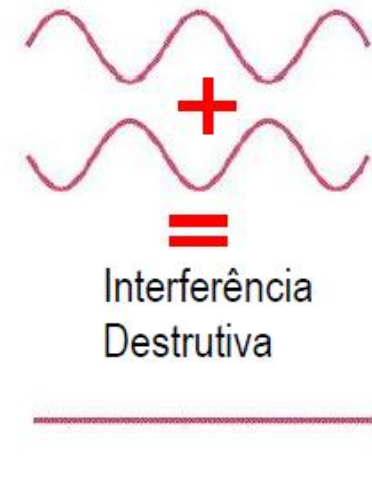
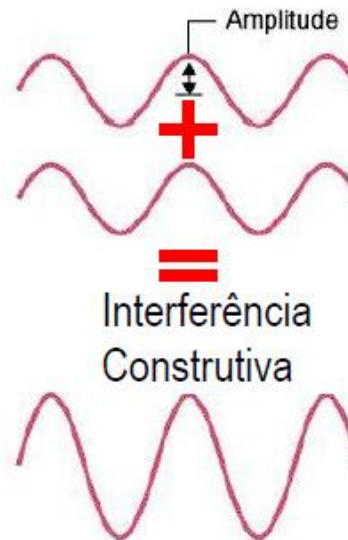
# Fenômenos ondulatórios

## Interferência

<http://www.daviddarling.info/encyclopedia/I/interference.html>



Importante é entender a superposição de duas ou mais ondas na mesma região do espaço





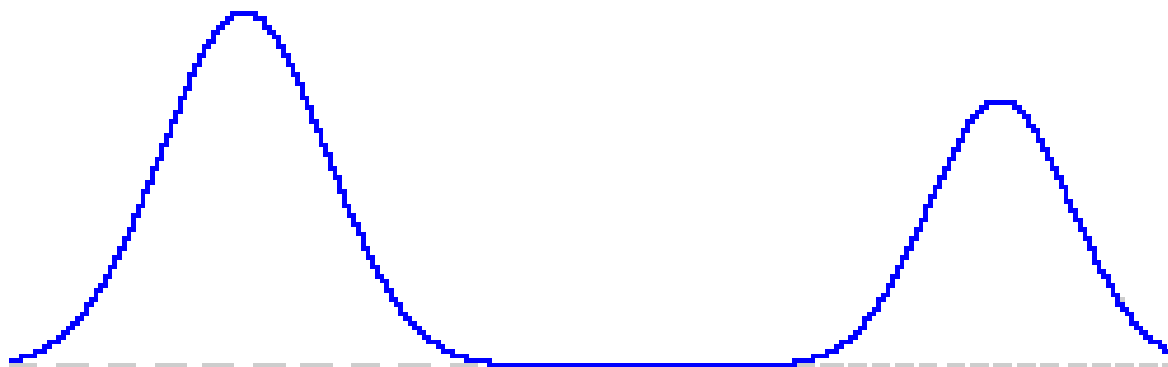
# Fenômenos ondulatórios

---

## PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO

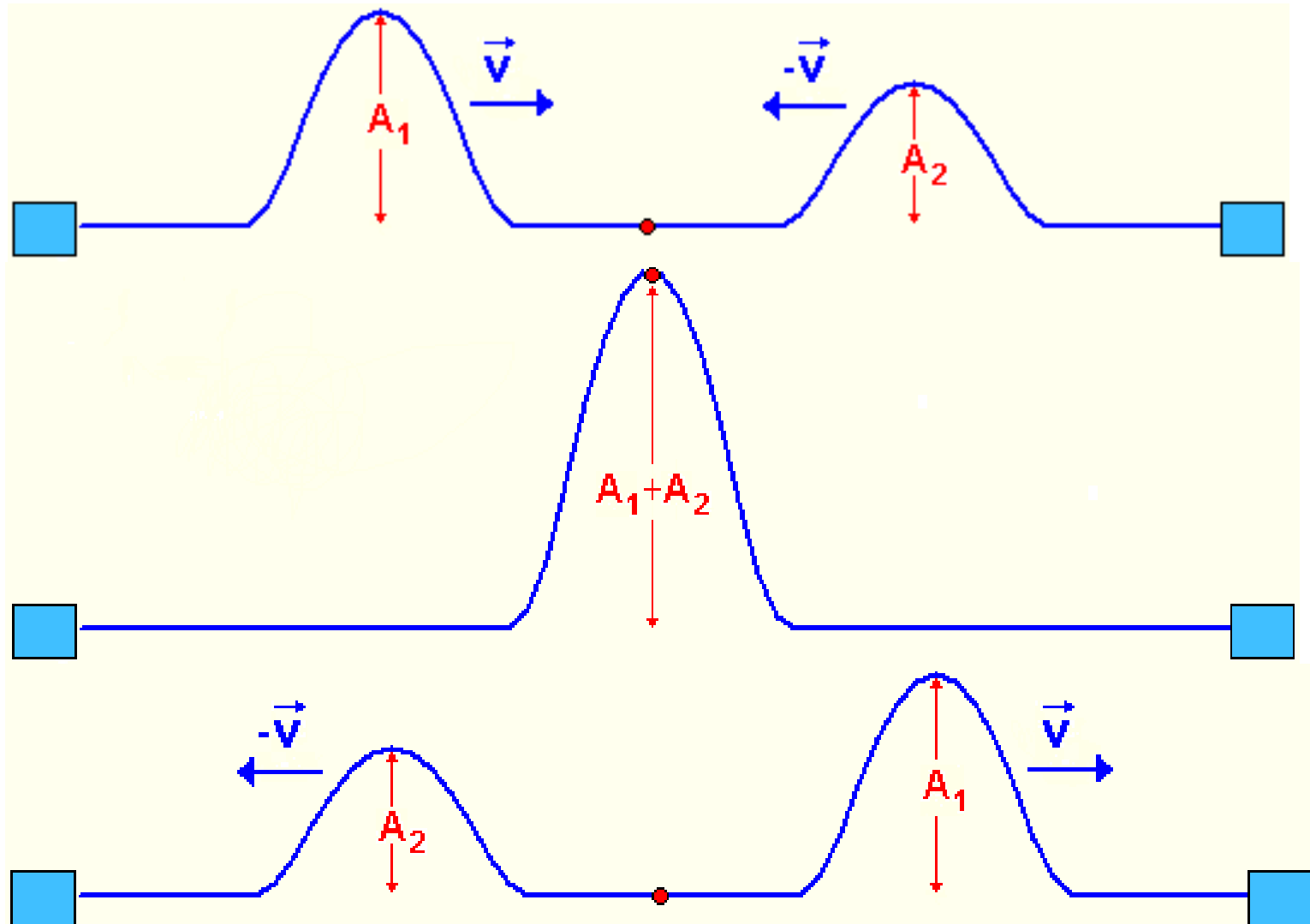
**A perturbação resultante em cada ponto do meio, durante a superposição, é a adição das perturbações que seriam causadas pelas ondas separadamente.**

**Depois da superposição, as ondas têm a mesma forma que antes e continuam a se propagar como antes (Independência das ondas).**



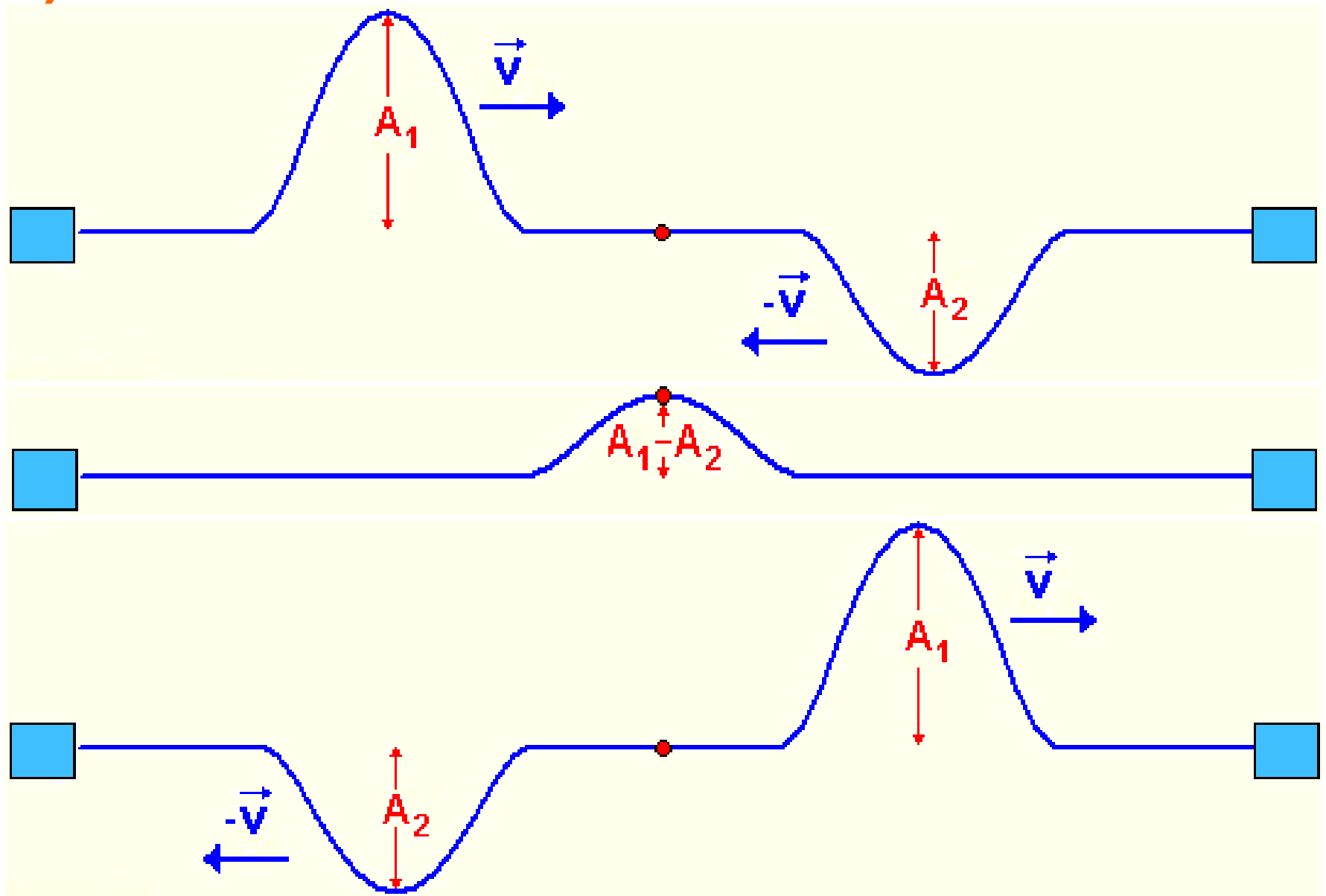
# Fenômenos ondulatórios

## a) Construtiva: Interferência



# Fenômenos ondulatórios

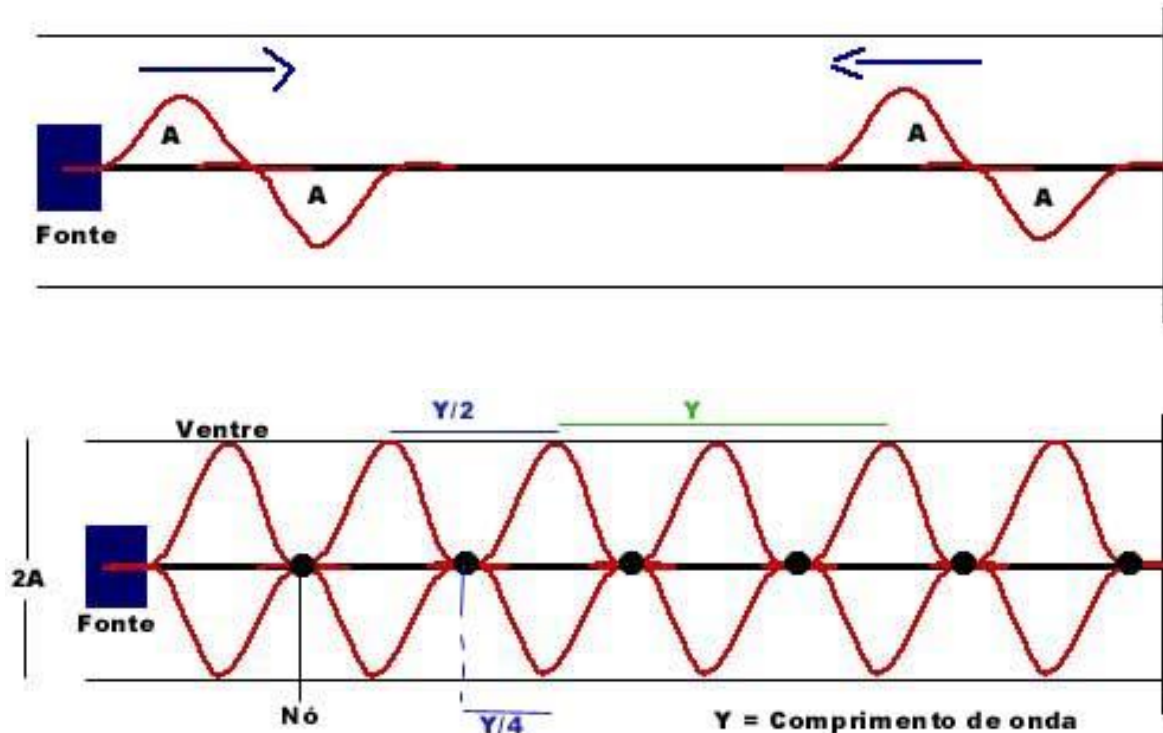
## b) Destrutiva:



# Fenômenos ondulatórios

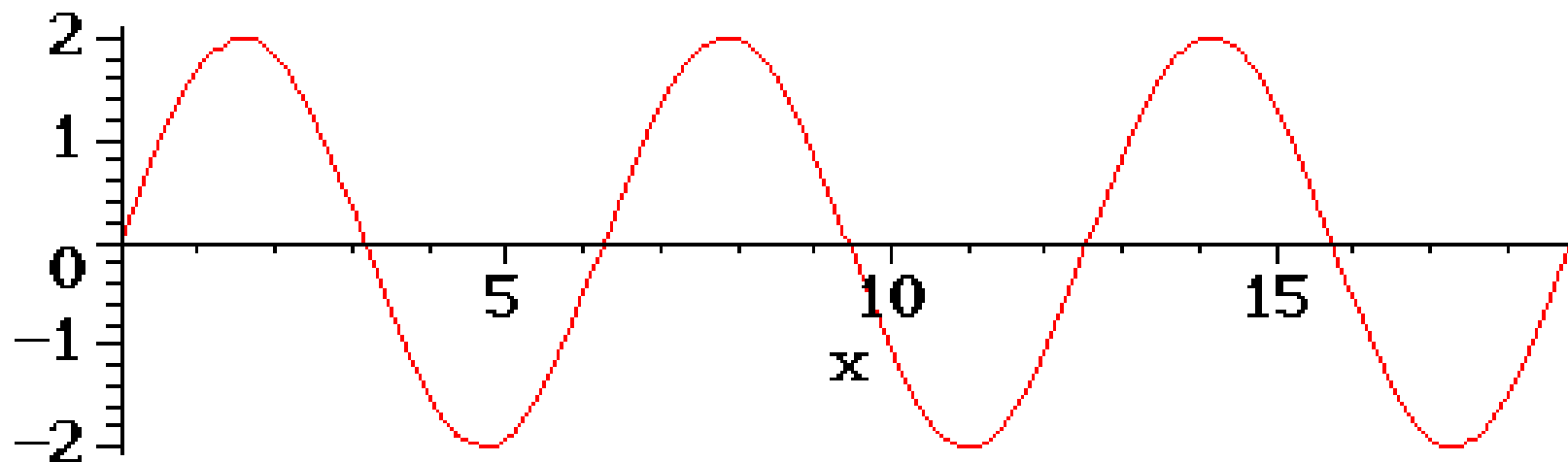
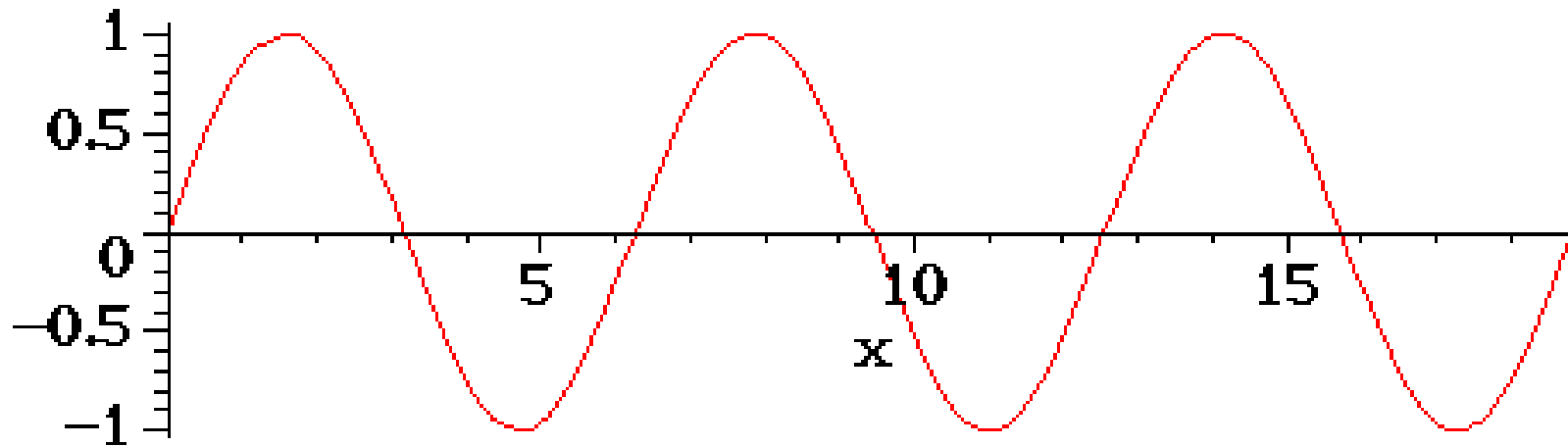
## C- ONDA ESTACIONÁRIA

Quando duas ondas periódicas de frequências, comprimentos de ondas e amplitudes iguais e de sentidos contrários se superpõem num dado meio, ocorre a formação de uma figura de interferência denominada onda estacionária.

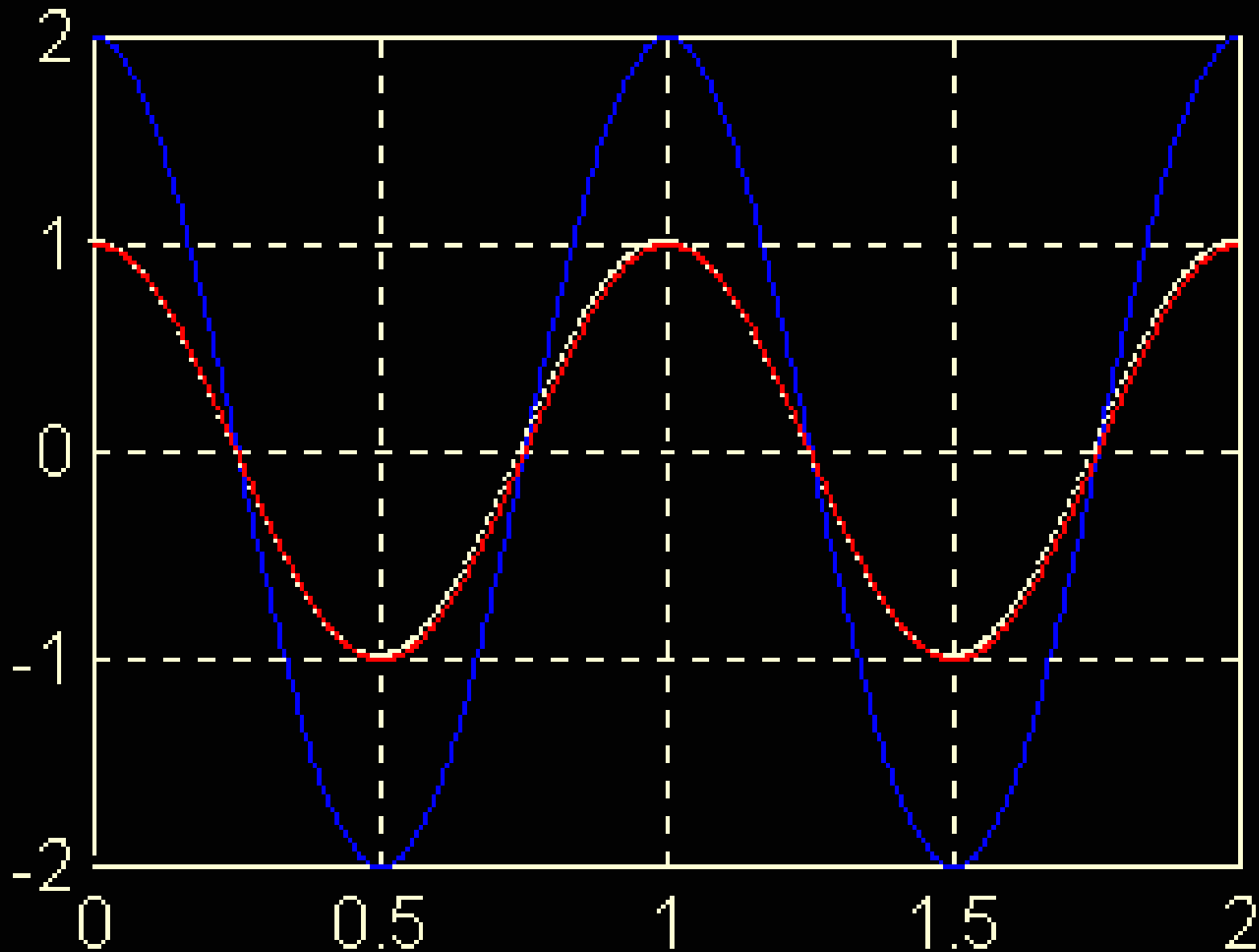


# Fenômenos ondulatórios

## ONDA ESTACIONÁRIA

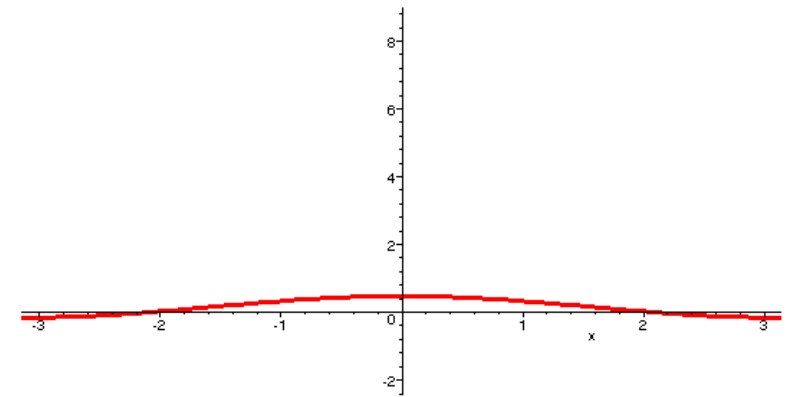


# ONDA ESTACIONÁRIA



# Fenômenos ondulatórios

Várias ondas, quando convenientemente somadas podem tomar a forma de um pulso:



# Fenômenos ondulatórios

---

## **RESSONÂNCIA**

**É o fenômeno, em que um corpo ou sistema passa a vibrar (oscilar) após ser atingido por uma onda com frequência natural de oscilação deste corpo ou sistema.**

**A ressonância ocorre quando há transferência de energia entre dois sistemas que oscilam com a mesma frequência. Na ressonância, há um aumento progressivo da amplitude de oscilação.**



# Fenômenos ondulatórios

---

## RESSONÂNCIA



# Fenômenos ondulatórios

## RESSONÂNCIA

É o fenômeno, em que um corpo ou sistema passa a vibrar (oscilar) após ser atingido por uma onda com frequência natural de oscilação deste corpo ou sistema.

A ressonância ocorre quando há transferência de energia entre dois sistemas que oscilam com a mesma frequência. Na ressonância, há um aumento progressivo da amplitude de oscilação.



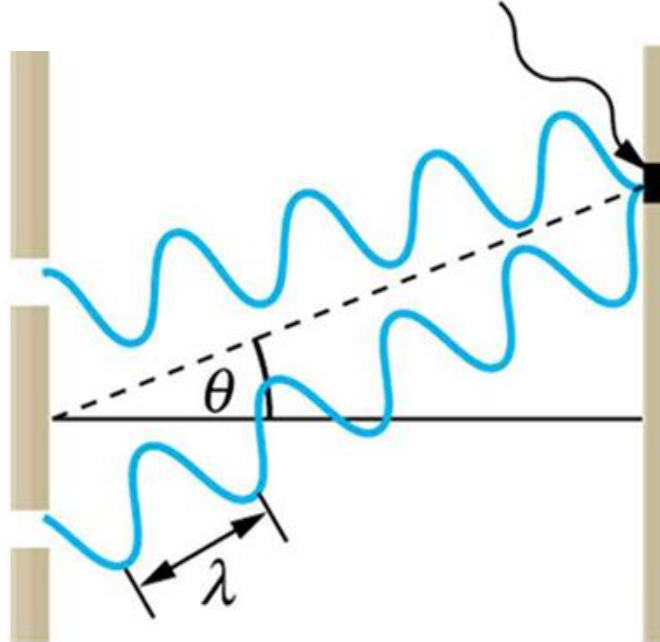
# Fenômenos ondulatórios

## Interferência de 2 Fendas

**Ponto Escuro**

Interferência

Destrutiva

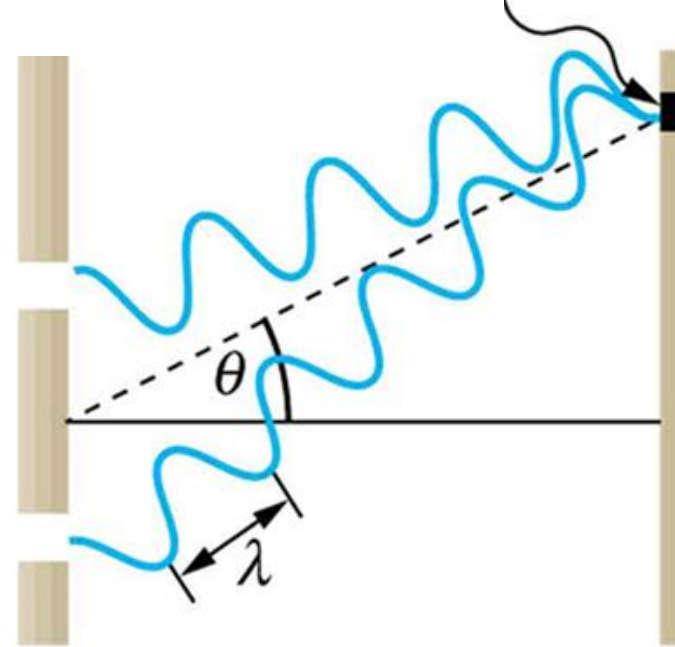


(a)

**Ponto Claro**

Interferência

Construtiva



(b)

## Interferência de 2 Fendas

**Ponto Claro**

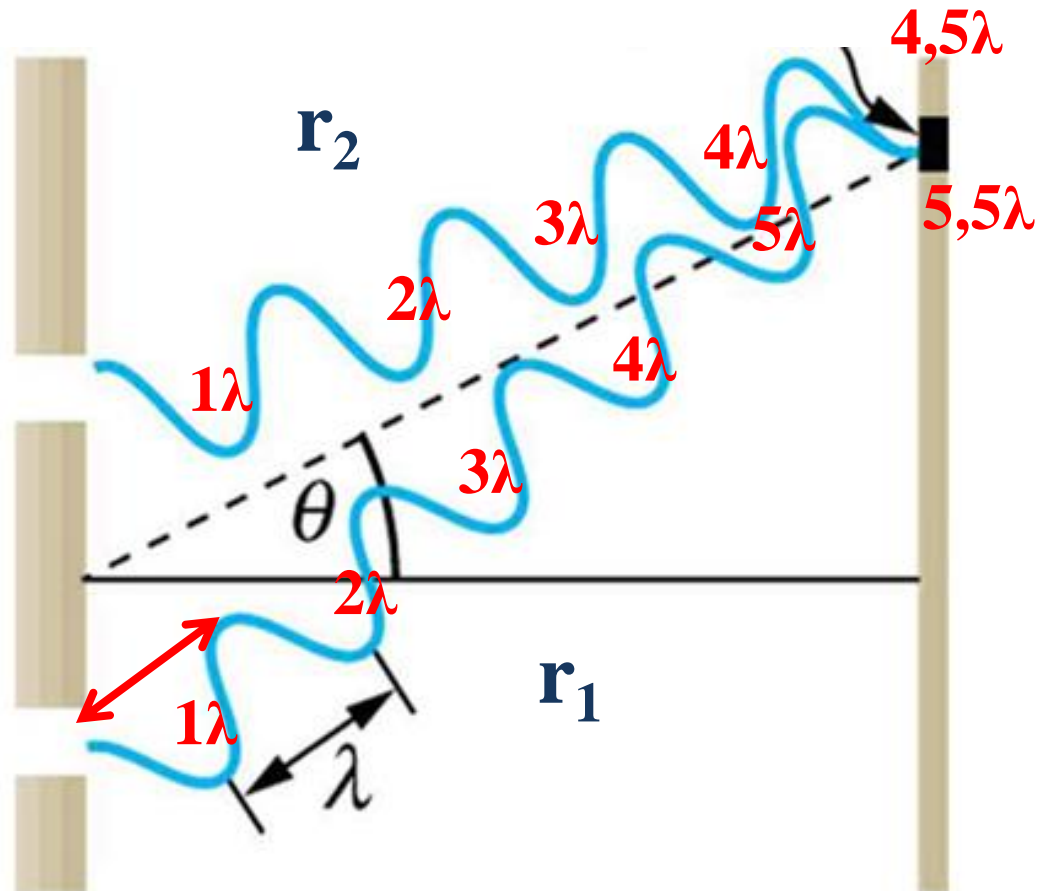
**Interferência  
Construtiva**

$$|r_1 - r_2| = 5,5\lambda - 4,5\lambda$$

$$|r_1 - r_2| = 1\lambda$$

$$|r_1 - r_2| = m \lambda$$

$$m = 0, 1, 2, 3 \dots$$



(b)

## Interferência de 2 Fendas

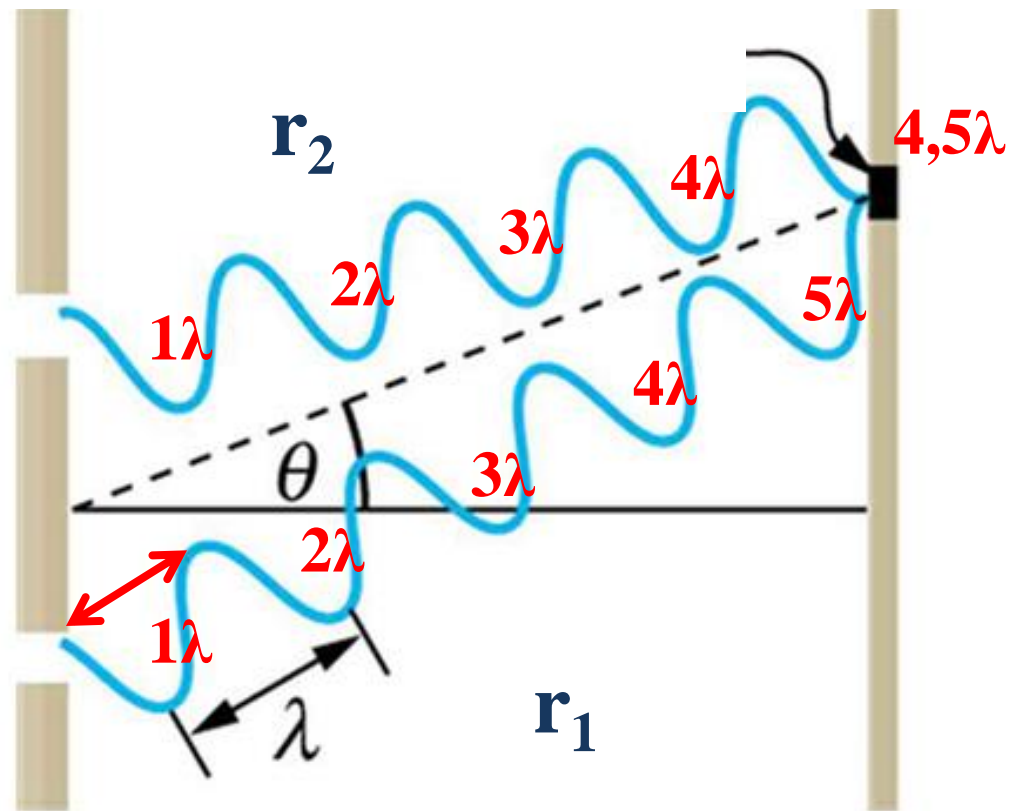
**Ponto Escuro**  
**Interferência**  
**Destrutiva**

$$|r_1 - r_2| = 5\lambda - 4,5\lambda$$

$$|r_1 - r_2| = 0,5\lambda$$

$$|r_1 - r_2| = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda$$

$$m = 0, 1, 2, 3 \dots$$

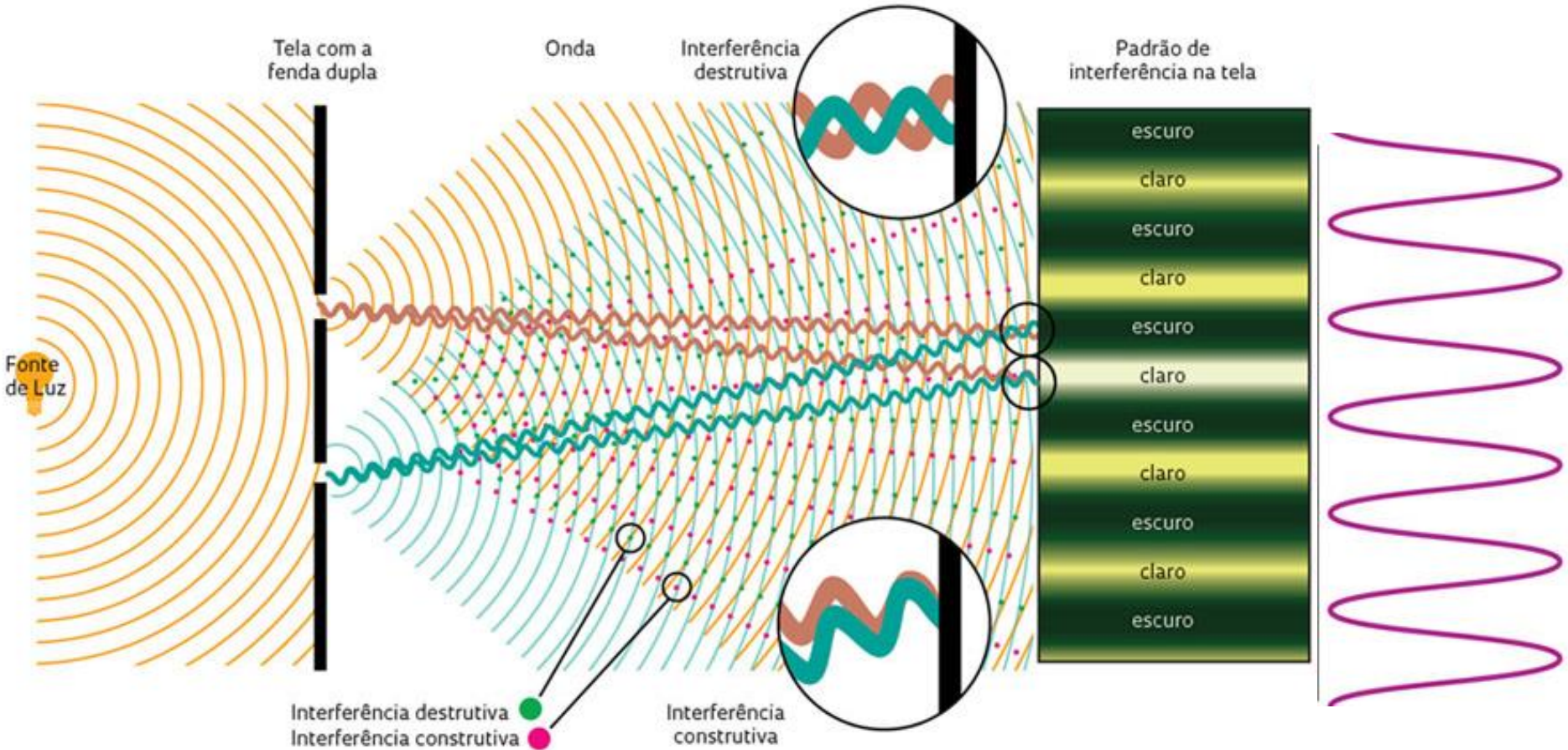


(a)

# Fenômenos ondulatórios

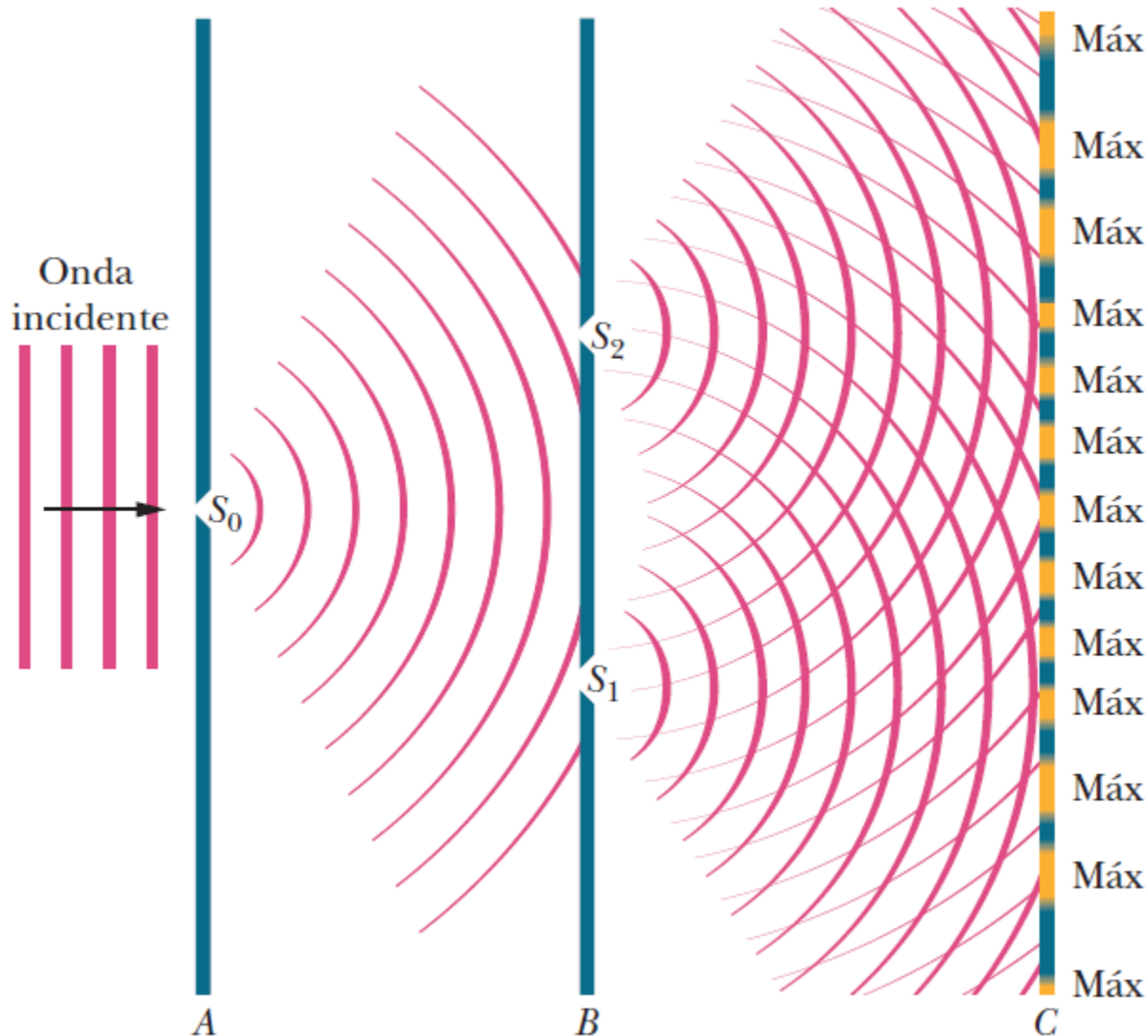
## Interferência de 2 Fendas

De forma similar a ondas na superfície de um lago, a luz atravessa uma fenda dupla e se recombina como se em cada buraco houvesse uma fonte luminosa. Essa interação gera os chamados padrões de interferência



# Fenômenos ondulatórios

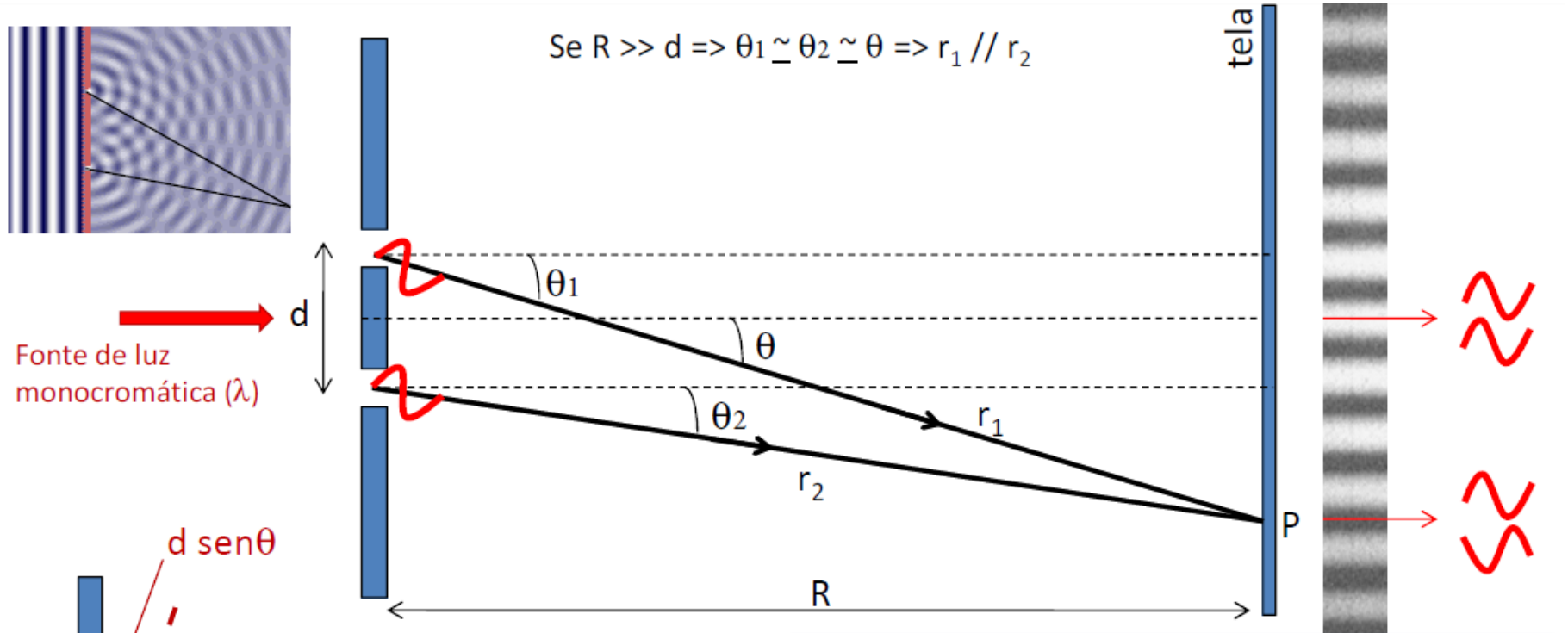
## Experimento de Young



As ondas que passam pelas duas fendas se superpõem e formam uma figura de interferência.

# Fenômenos ondulatórios

## Interferência de 2 Fendas



No ponto P na tela:

IC :  $|r_1 - r_2| = m\lambda$

(ponto claro)

$d \sin \theta = m\lambda$

$m = 0, 1, 2, \dots$

ID :  $|r_1 - r_2| = (m+1/2)\lambda$

(ponto escuro)

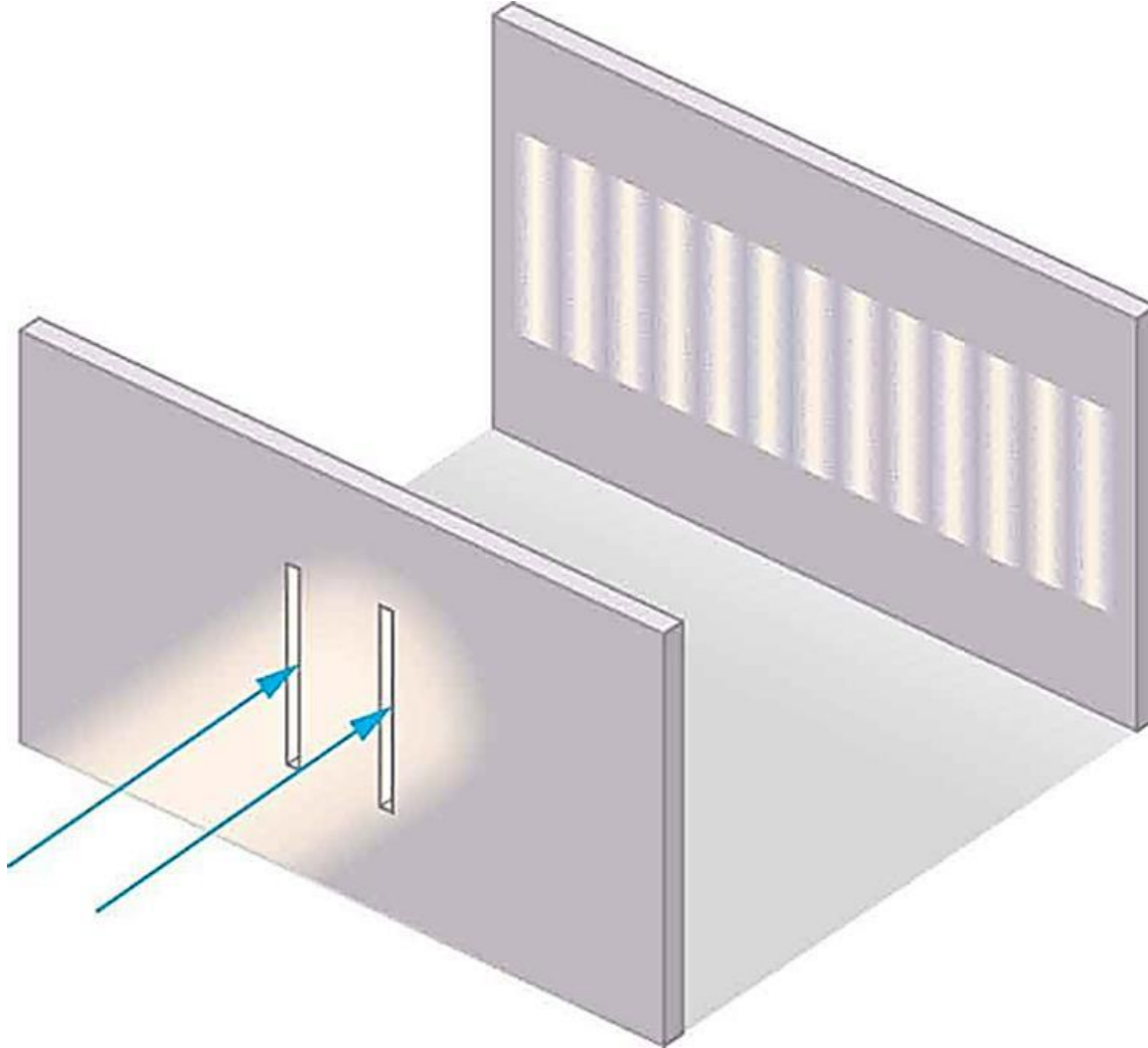
$d \sin \theta = (m+1/2)\lambda$

$m = 0, 1, 2, \dots$



# Fenômenos ondulatórios

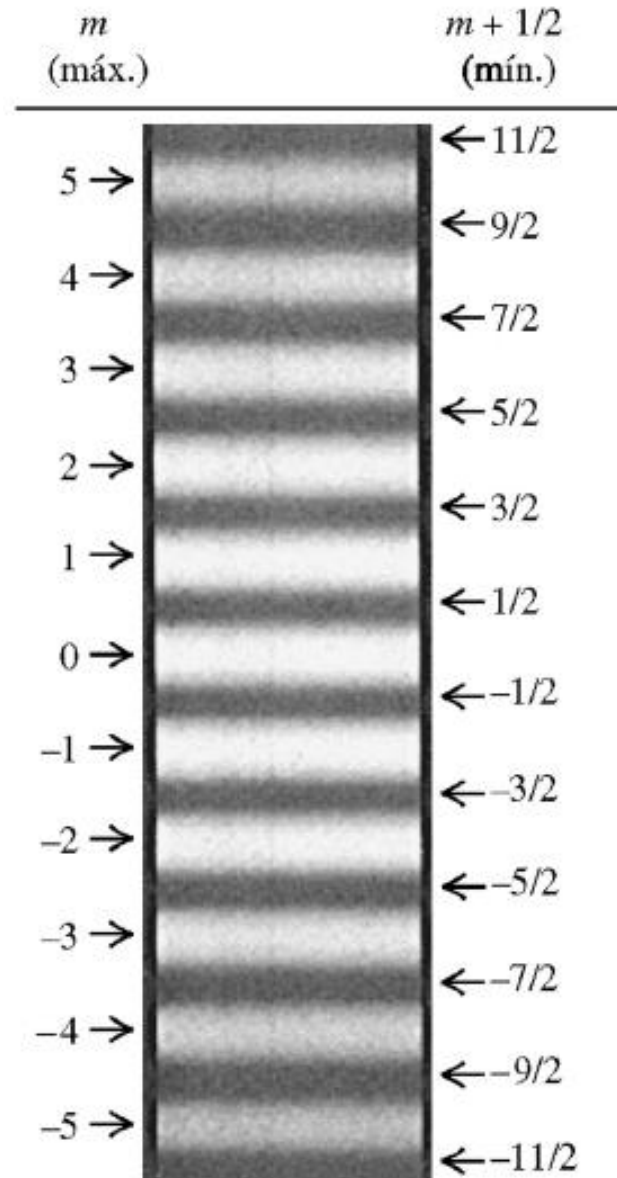
## Interferência de 2 Fendas



# Fenômenos ondulatórios

## Interferência de 2 Fendas

Figura formada na tela: franjas de interferência cujo centro é uma franja larga e brilhante ( $m=0$ ).

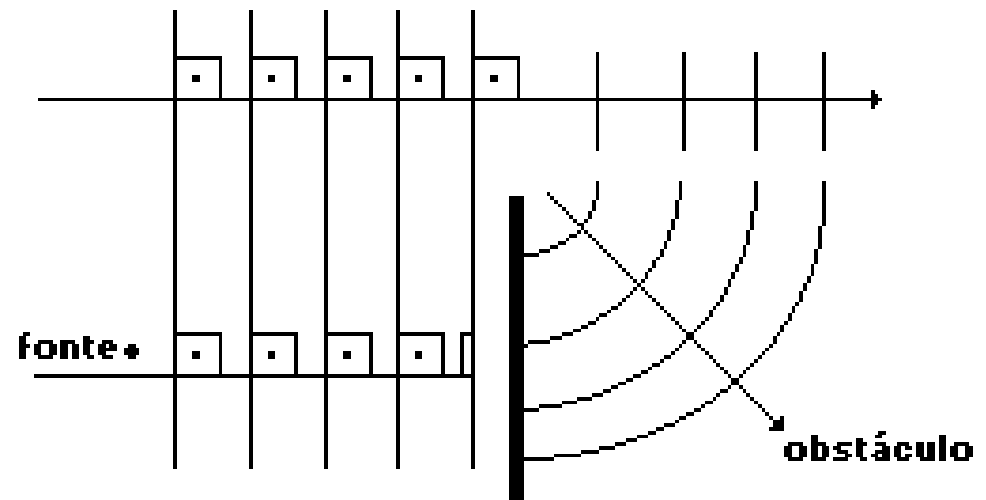
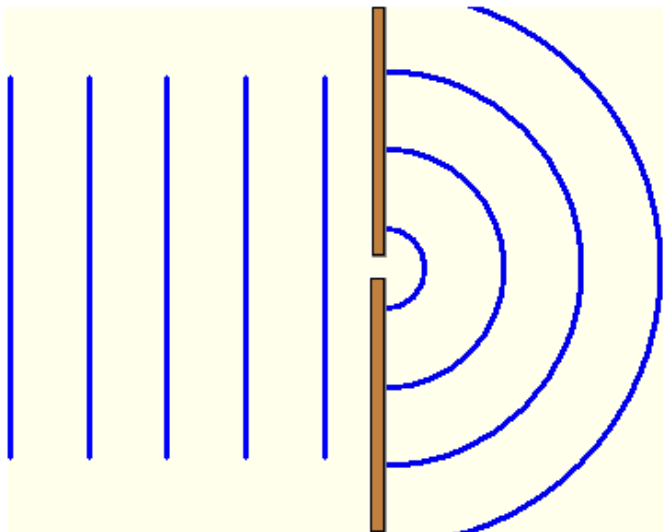


# Fenômenos ondulatórios

## Difração:

é o fenômeno que consiste de uma onda passar por orifícios.

Isso ocorre quando as dimensões das fendas são da ordem de grandeza do comprimento de onda.



# Fenômenos ondulatórios

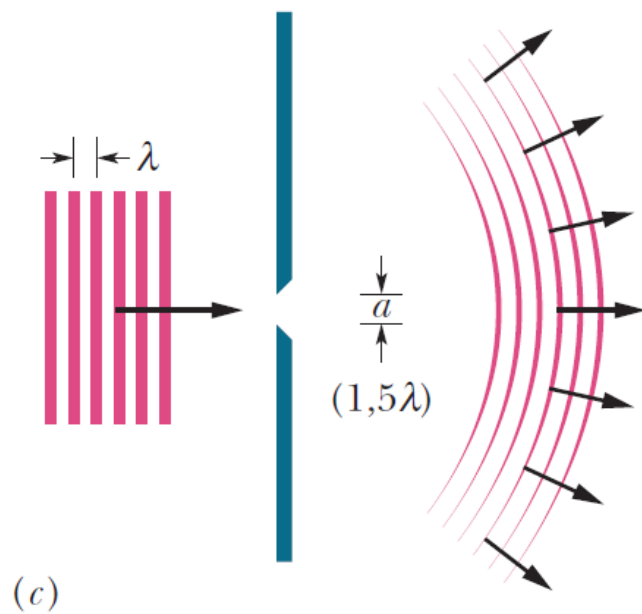
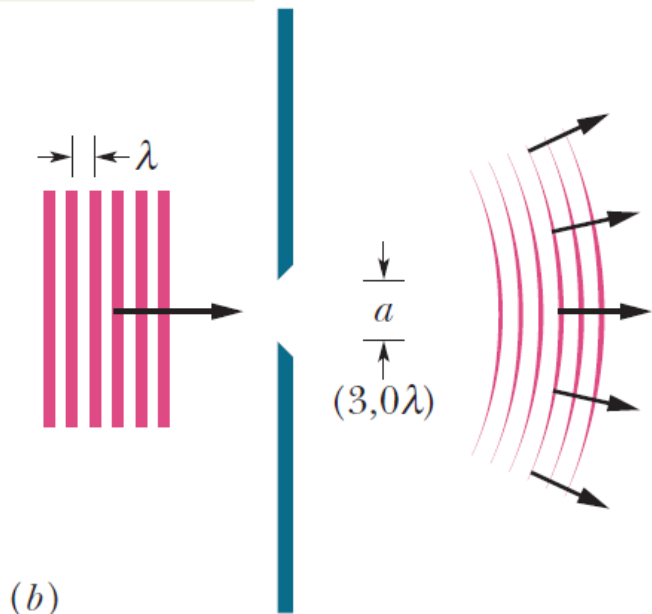
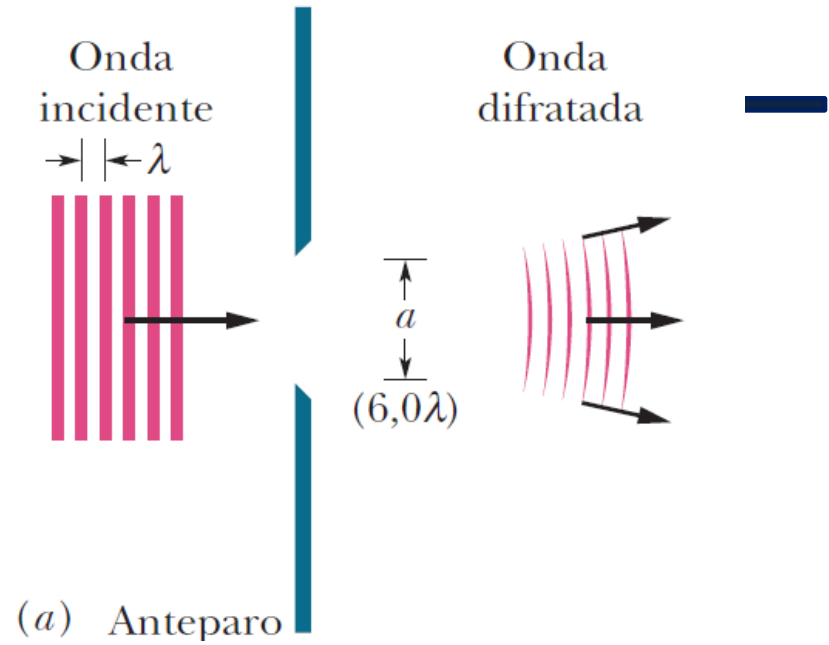
---

**DIFRAÇÃO**



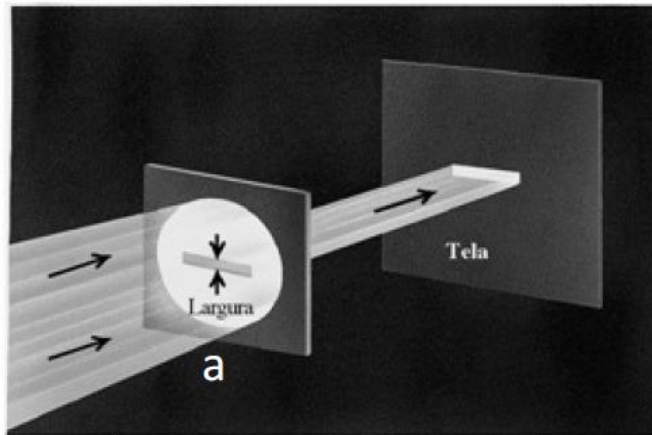
# DIFRAÇÃO

## Fenômenos on

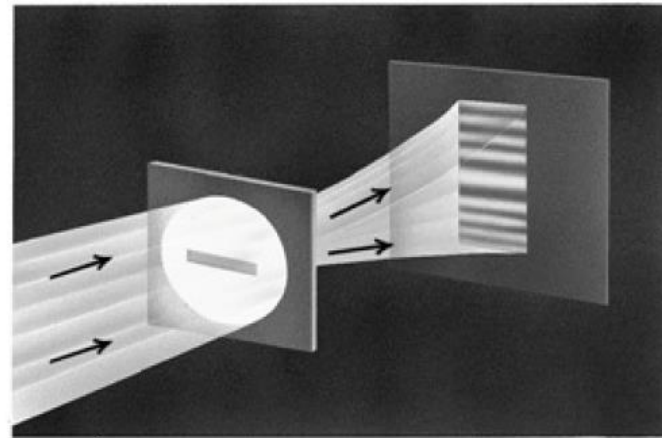


# Fenômenos ondulatórios

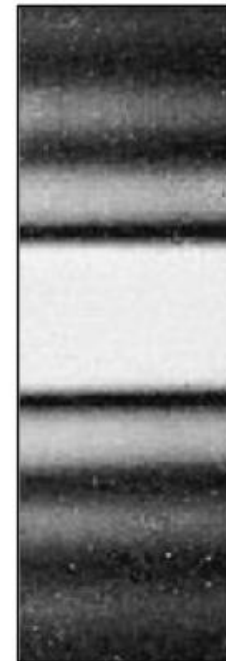
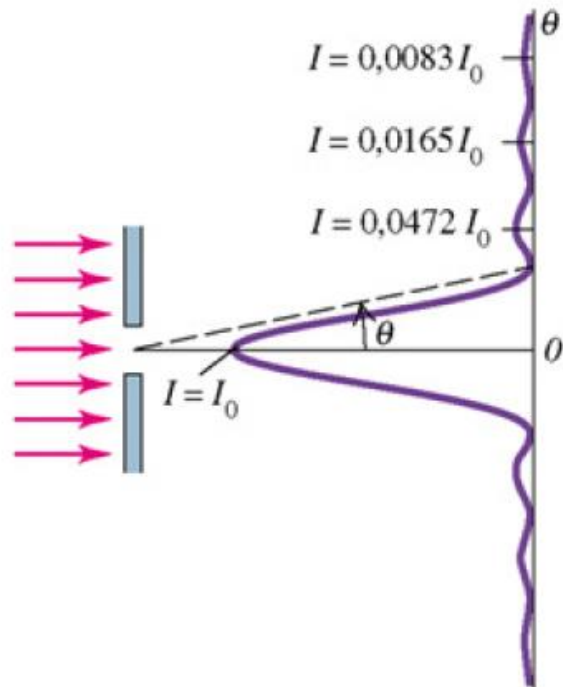
## Difração em uma fenda



$a \gg \lambda$

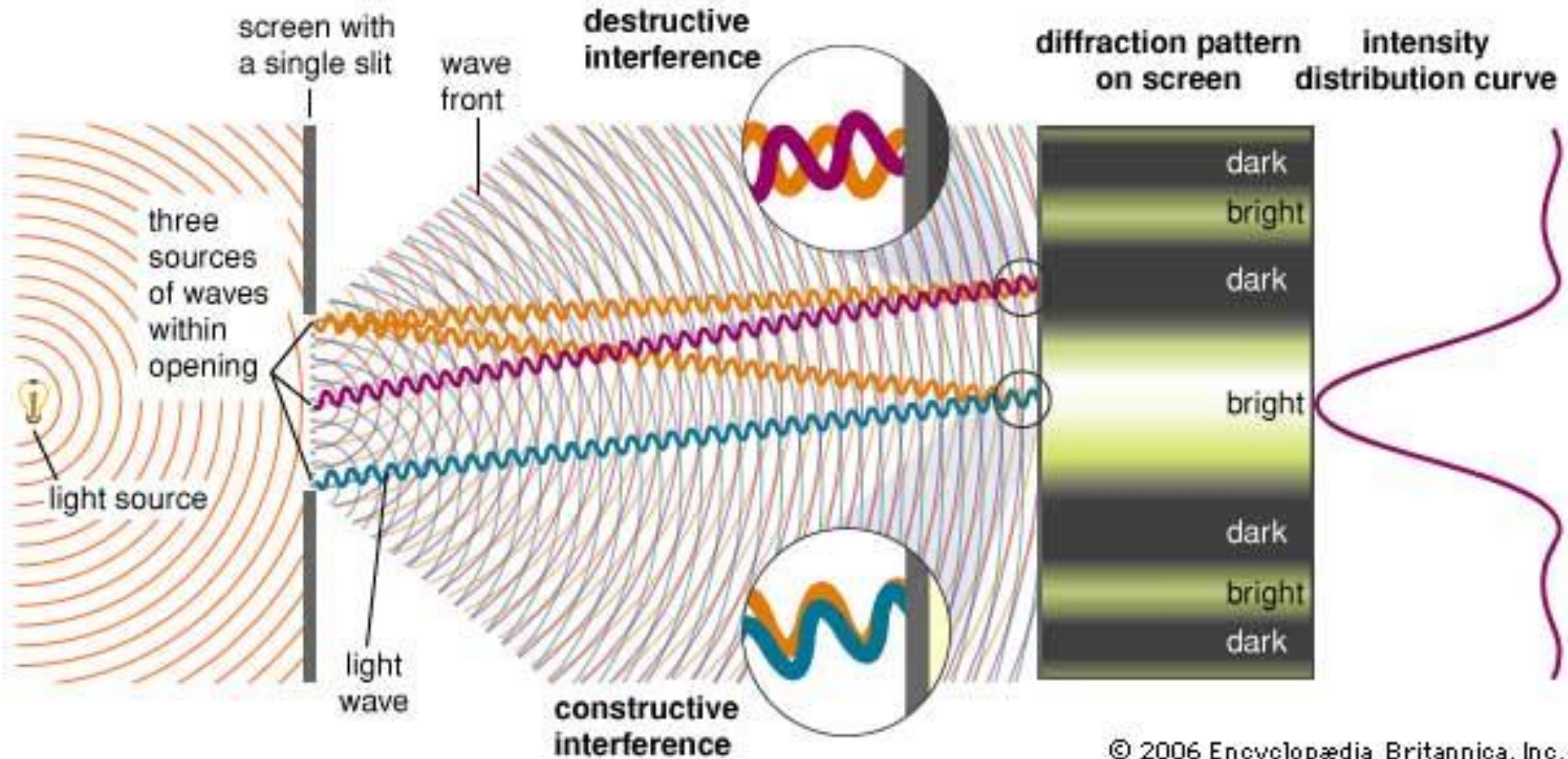


$a \sim \lambda$



# Fenômenos ondulatórios

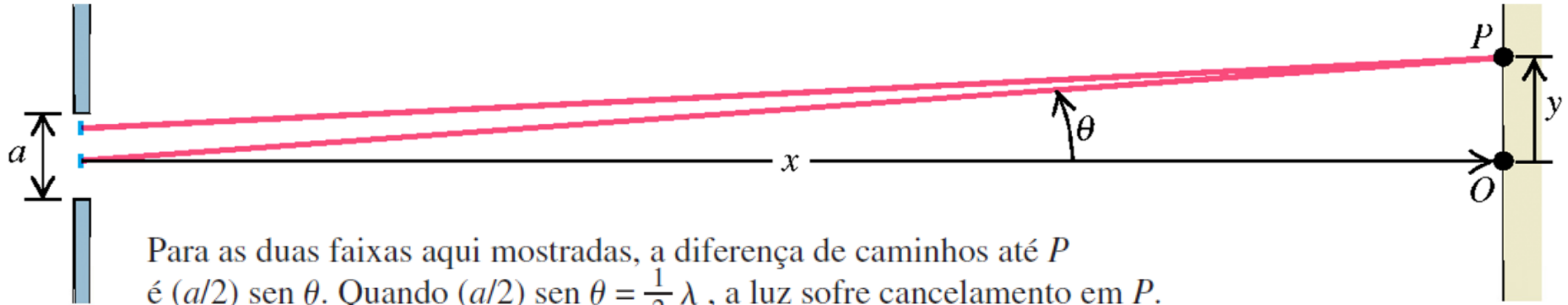
## Difração em uma fenda



© 2006 Encyclopædia Britannica, Inc.

# Fenômenos ondulatórios

## Difração em uma fenda

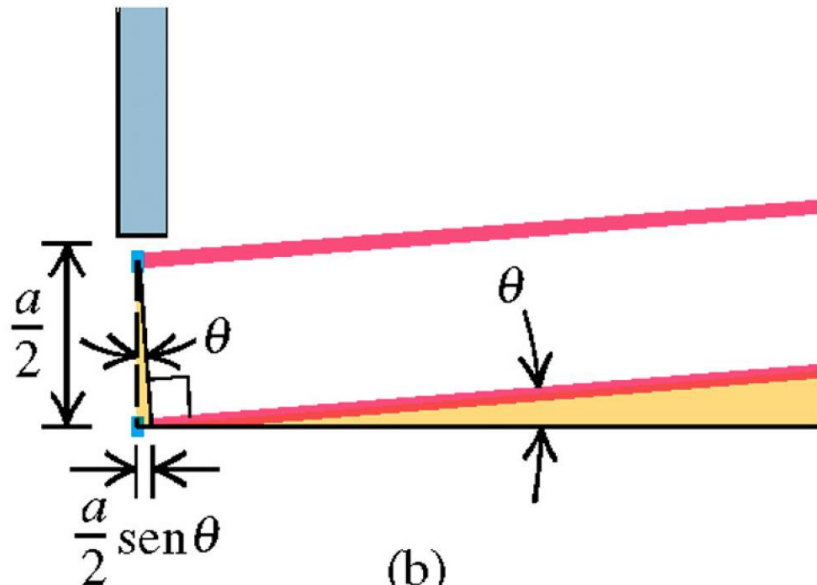


Para as duas faixas aqui mostradas, a diferença de caminhos até  $P$  é  $(a/2) \sin \theta$ . Quando  $(a/2) \sin \theta = \frac{1}{2} \lambda$ , a luz sofre cancelamento em  $P$ . Isso é verdade para a fenda toda; logo,  $P$  representa uma franja escura.

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{y}{x}$$

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

(b) Ampliação da metade superior da fenda.



Pontos de mínima intensidade:

$$\sin \theta = m \lambda / a \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

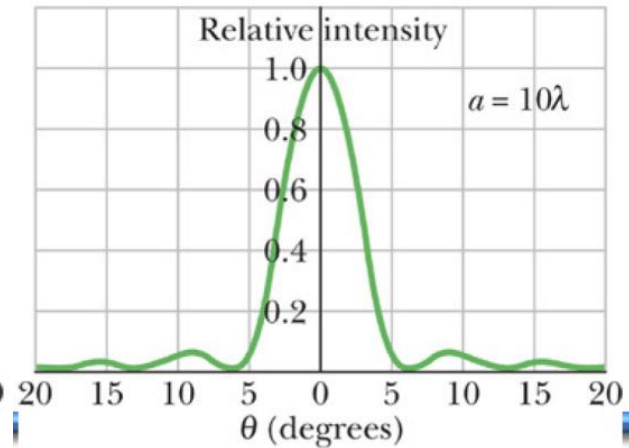
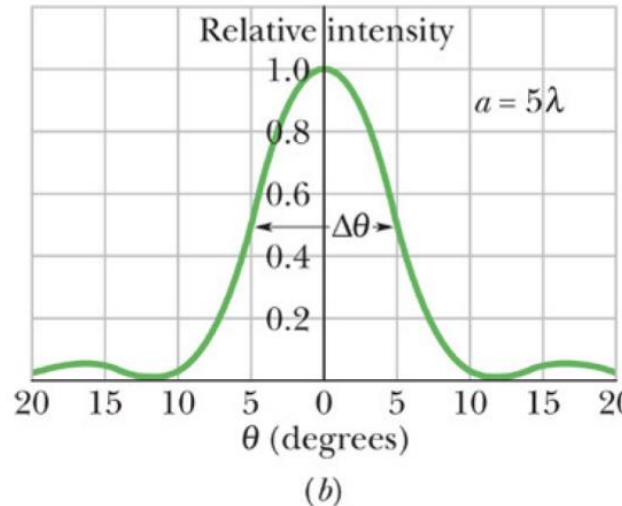
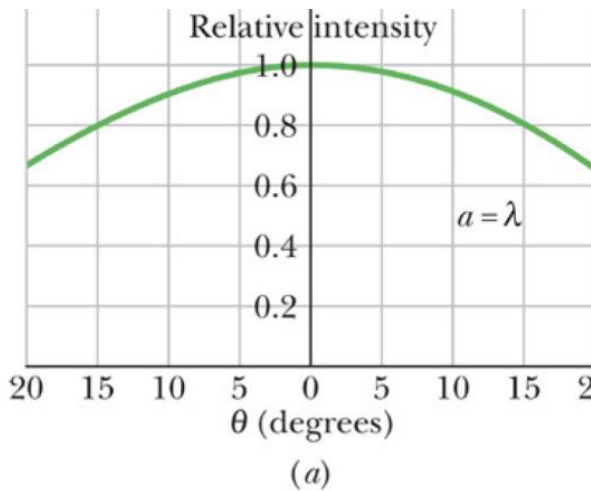
$\theta$  geralmente é muito pequeno, então podemos usar as aproximações  $\sin \theta = \theta$  e  $\operatorname{tg} \theta = \theta$ . Assim, a condição para uma faixa escura é

$$y_m = x \frac{m \lambda}{a}$$



# Fenômenos ondulatórios

## Largura da Difração



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

$$m = 1 \text{ (1}^\circ \text{ m\u00ednimo)}$$

$$\frac{a}{\lambda} = \frac{1}{\text{sen } 90} = 1$$

$$a = \lambda$$

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

$$m = 1 \text{ (1}^\circ \text{ m\u00ednimo)}$$

$$\frac{a}{\lambda} = \frac{1}{\text{sen } 12} = 4,8$$

$$a = 4,8\lambda$$

$$a \sin\theta = m\lambda$$
$$m = 1 \text{ (1}^\circ \text{ m\u00ednimo)}$$

$$\frac{a}{\lambda} = \frac{1}{\text{sen } 6} = 9,6$$

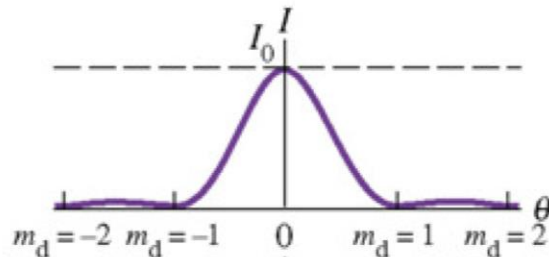
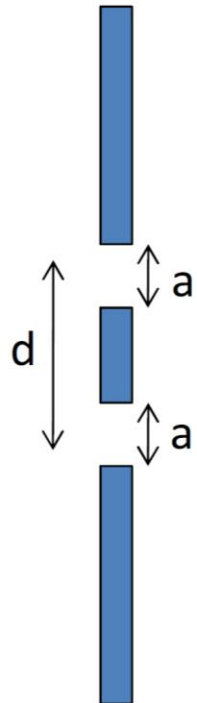
$$a = 9,6\lambda$$

# Fenômenos ondulatórios

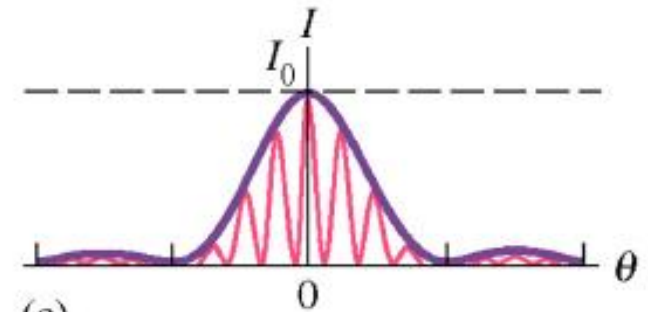
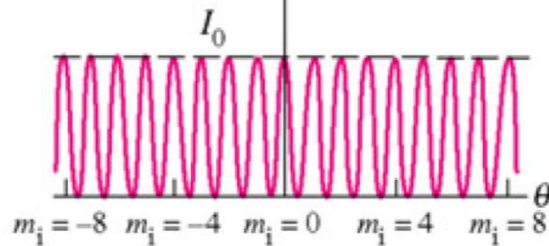
## Interferência e difração de duas fendas

Pontos de mínima intensidade:

$$\text{sen } \theta = m\lambda / a \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

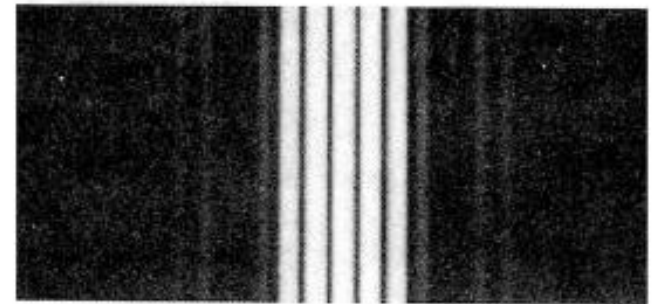


(a)



(c)

(d)



IC:  $|r_1 - r_2| = m\lambda$  (ponto claro)

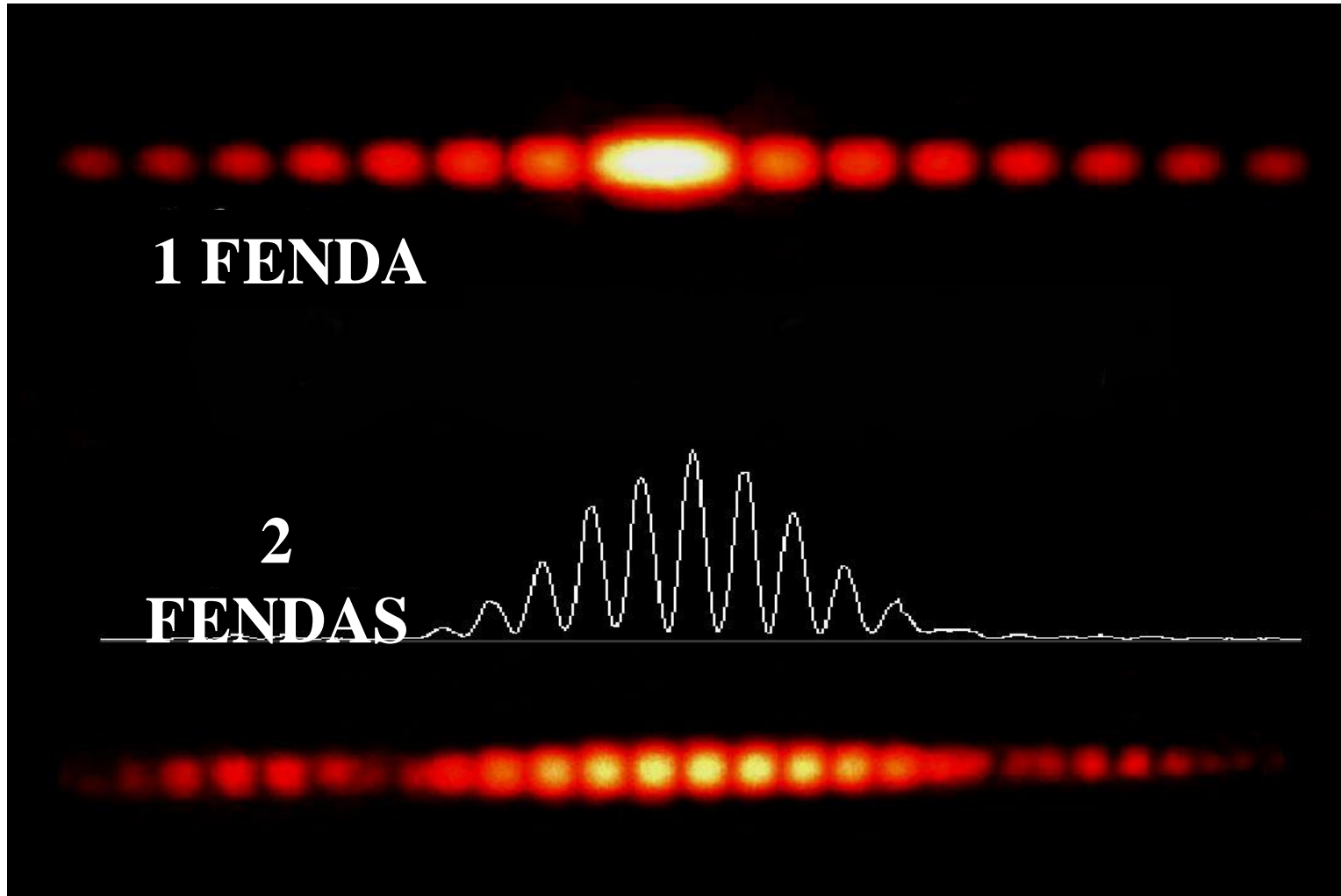
$d \text{ sen } \theta = m\lambda$   $m = 0, 1, 2, \dots$

ID:  $|r_1 - r_2| = (m+1/2)\lambda$  (ponto escuro)

$d \text{ sen } \theta = (m+1/2)\lambda$   $m = 0, 1, 2, \dots$

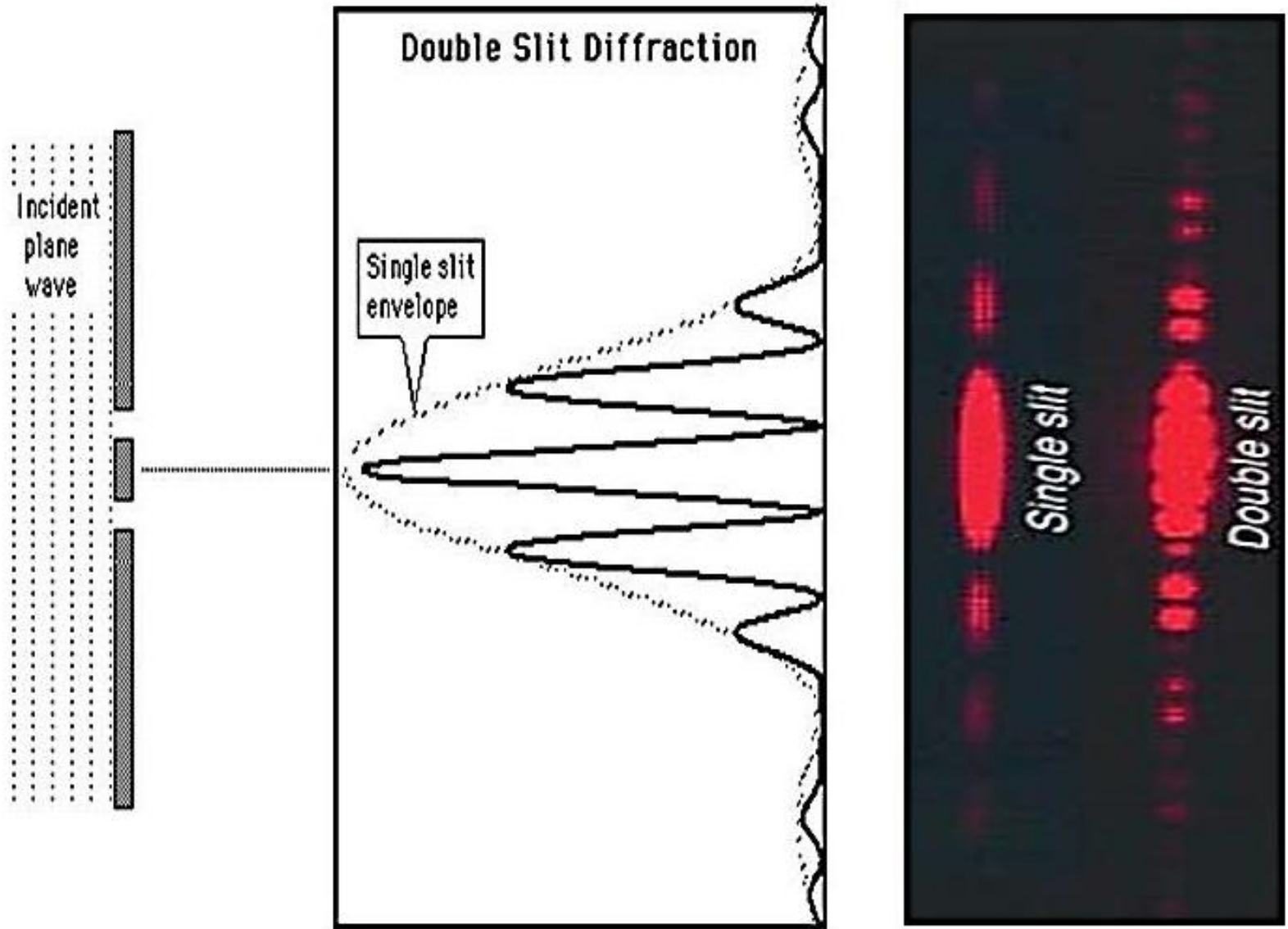
# Fenômenos ondulatórios

## Interferência e difração



# Fenômenos ondulatórios

## Interferência e difração

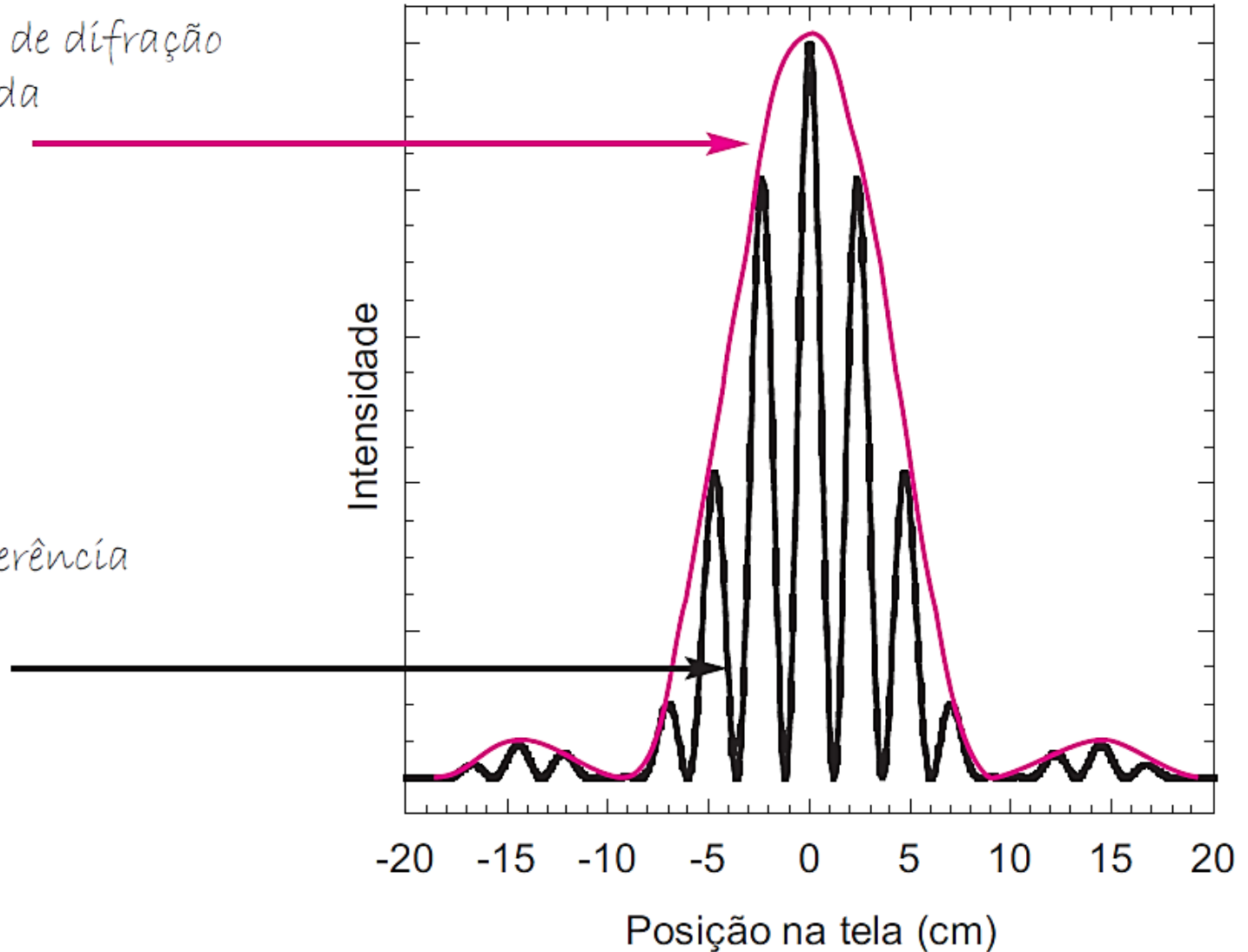


# Fenômenos ondulatórios

## Interferência e difração

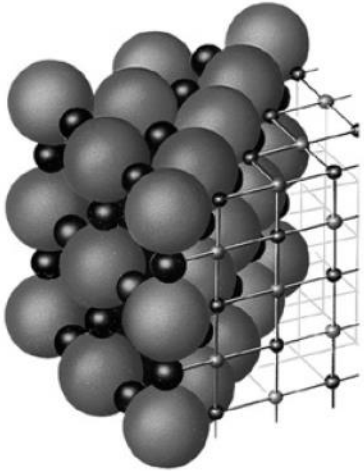
padrão de difração  
da fenda

padrão de interferência  
entre as fendas

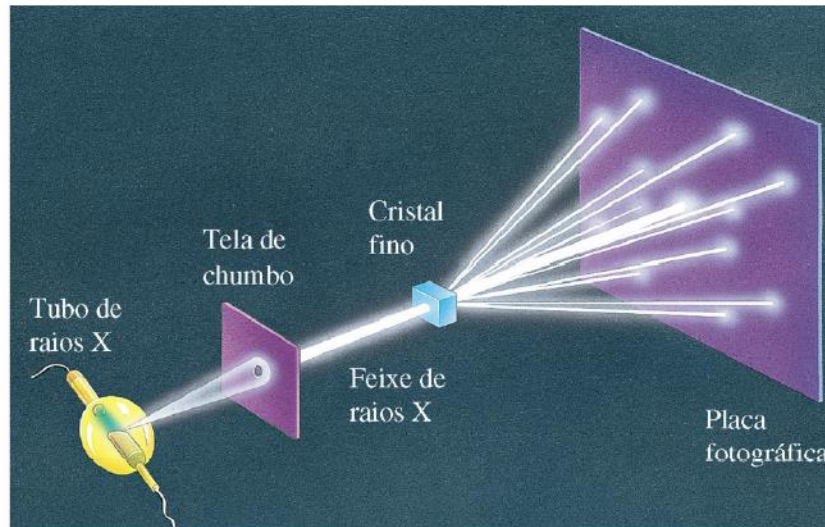


# Fenômenos ondulatórios

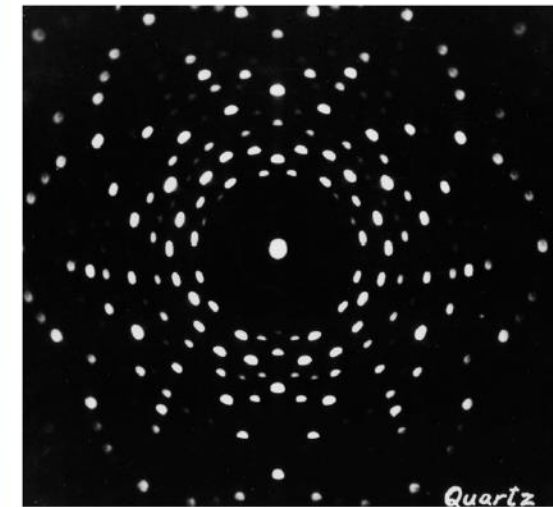
## Difração de raios X



**FIGURA 38.17** Modelo do arranjo dos íons em um cristal de NaCl (sal de cozinha). Os íons de Na são as esferas negras pequenas; os íons de Cl são as outras esferas.



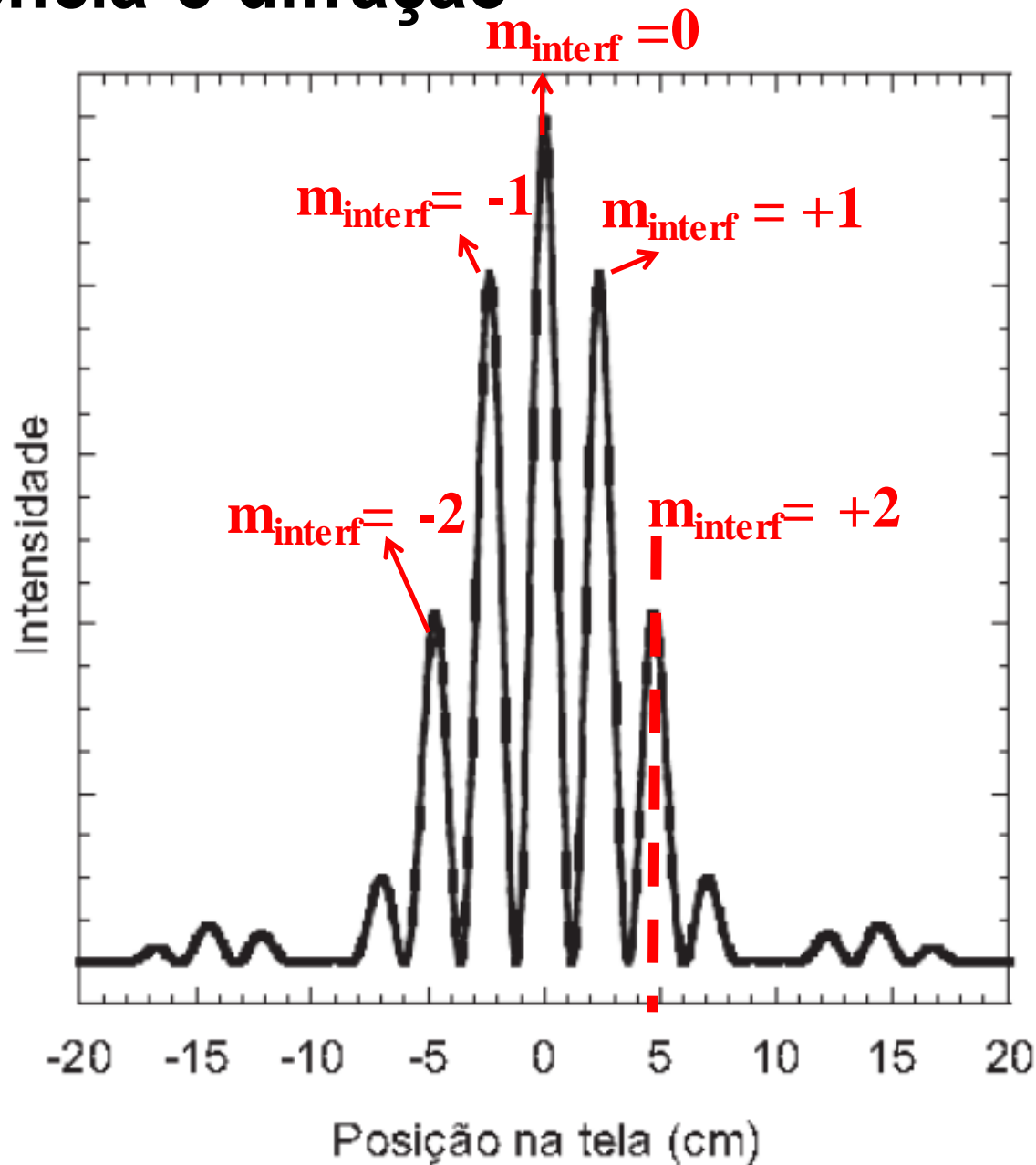
(a)



(b)

**FIGURA 38.16** (a) Em uma experiência de difração de raios X, muitos raios X passam em linha reta através do cristal. Alguns, porém, são espalhados e formam uma figura de interferência que impressiona o filme com uma configuração relacionada com o arranjo atômico na rede cristalina. (b) Figura de difração (ou *figura de difração de Laue*) formada direcionando-se um feixe de raios X sobre uma pequena seção de um cristal de quartzo.

## Interferência e difração

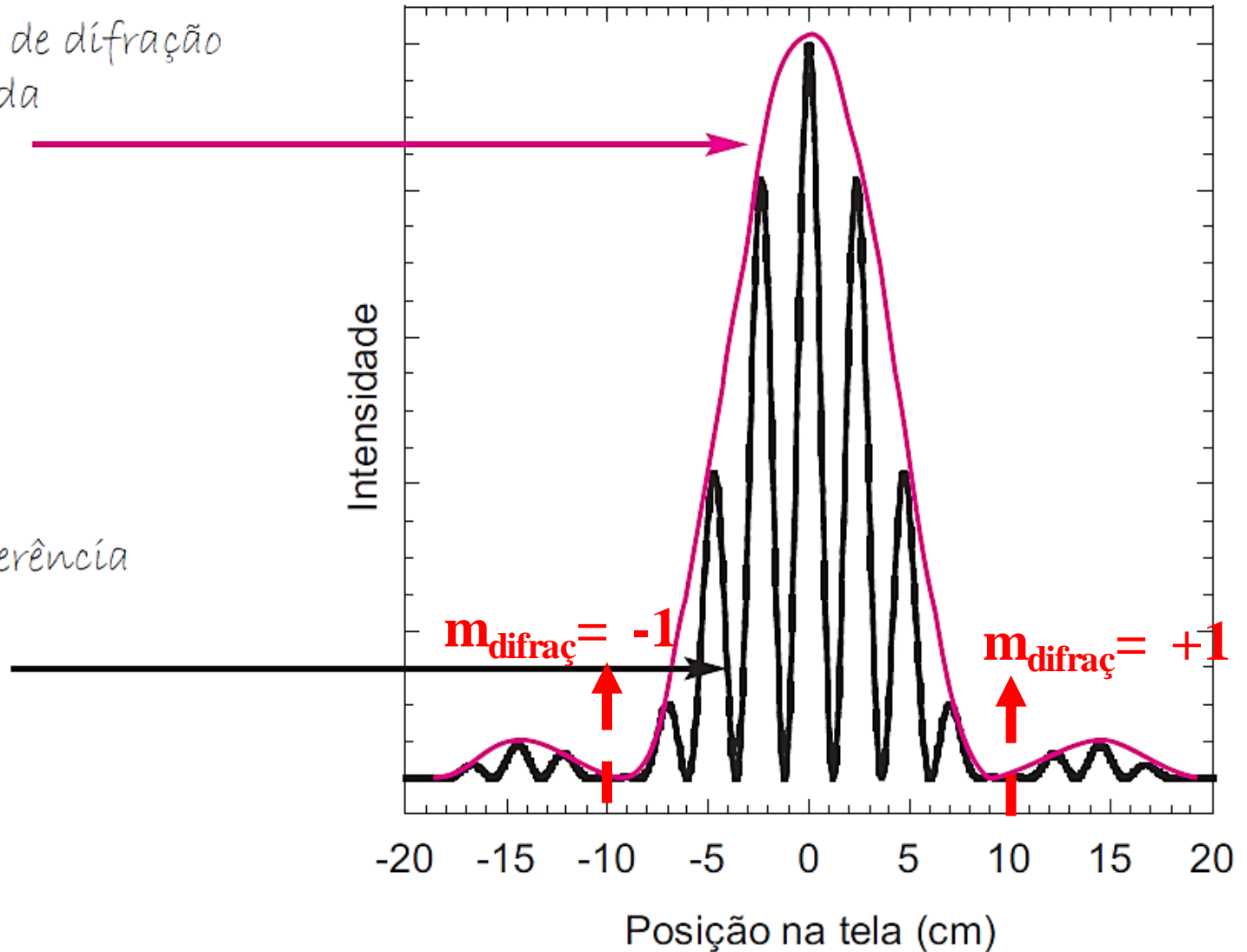


# Fenômenos ondulatórios

## Interferência e difração

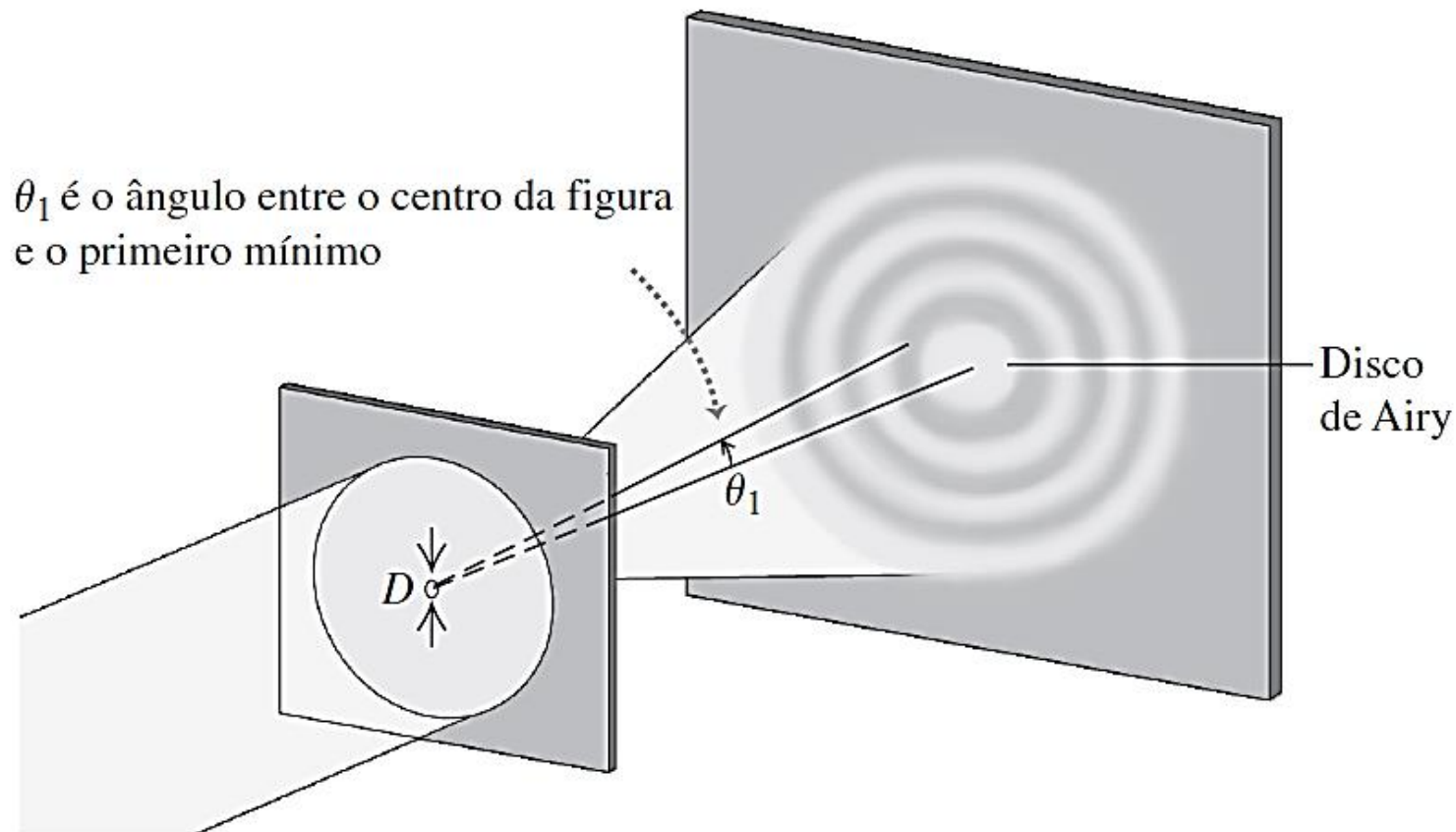
padrão de difração  
da fenda

padrão de interferência  
entre as fendas



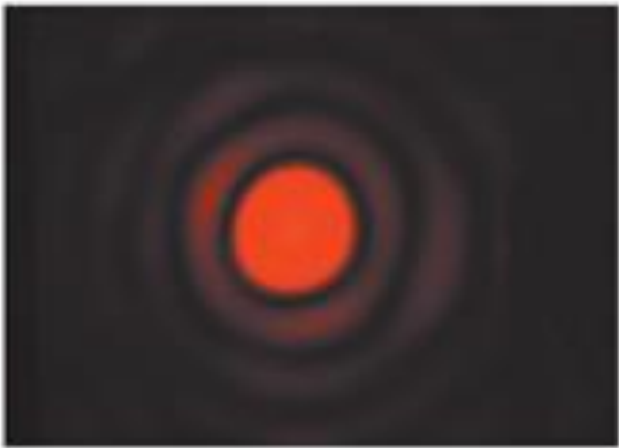


## Difração em orifícios circulares



**Figura 36.26** Figura de difração formada por uma abertura circular com diâmetro  $D$ . A figura é constituída por um disco central brilhante circundado por anéis claros e escuros. O raio angular do  $\theta_2$  do segundo anel escuro é indicado. (Este diagrama não foi desenhado em escala.)

## Difração em orifícios circulares



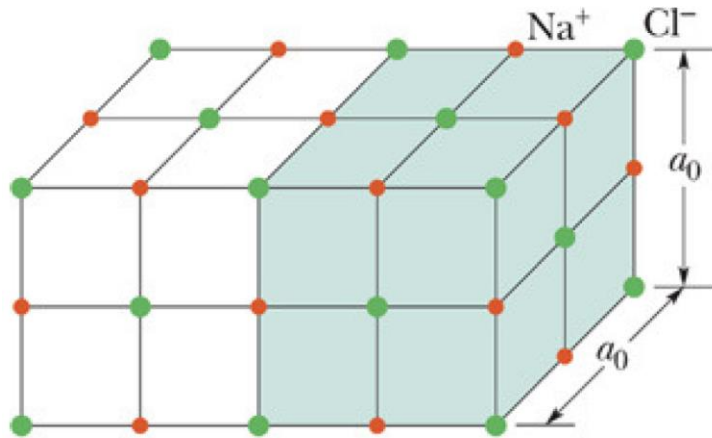
**Figura 36-10** Figura de difração de uma abertura circular. Observe o máximo central e os máximos secundários circulares. A fotografia foi superexposta para tornar mais visíveis os máximos secundários, que são muito menos intensos que o máximo central. (*Jearl Walker*)

$$\sin \theta = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (\text{primeiro mínimo; abertura circular})$$

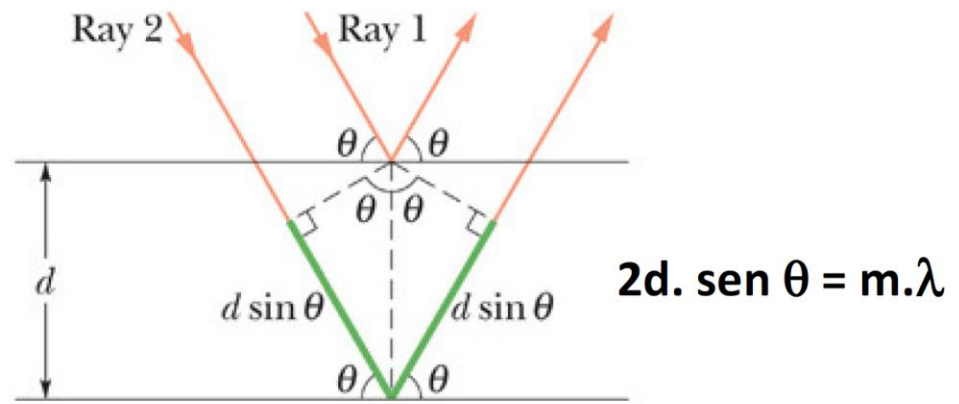
$$\theta_R = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (\text{critério de Rayleigh})$$

# Fenômenos ondulatórios

## Difração de raios-X

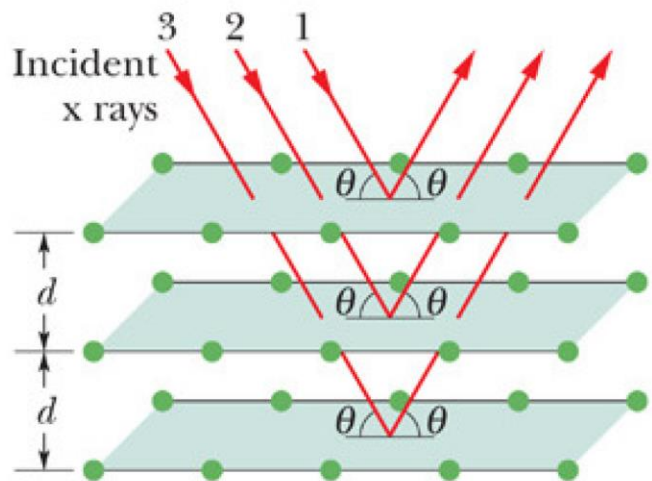


(a)

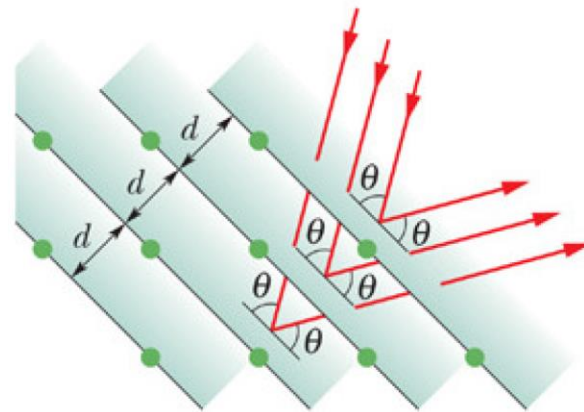


(c)

$$2d \cdot \sin \theta = m \cdot \lambda$$



(b)

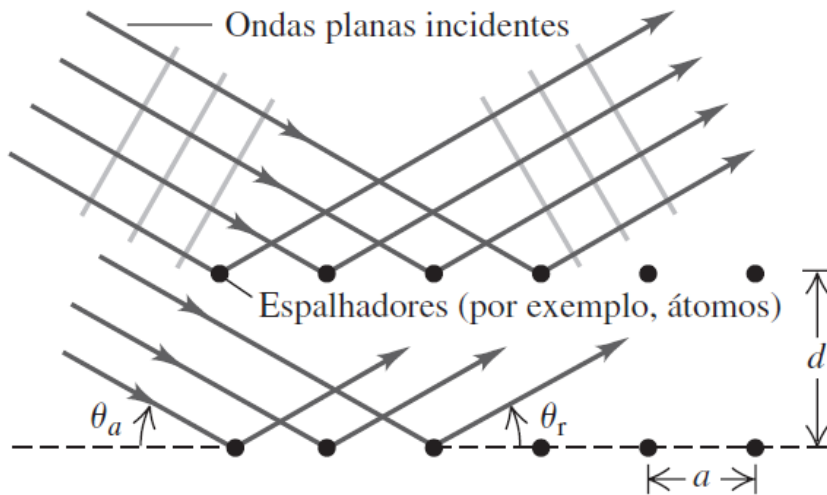


(d)

# Fenômenos ondulatórios

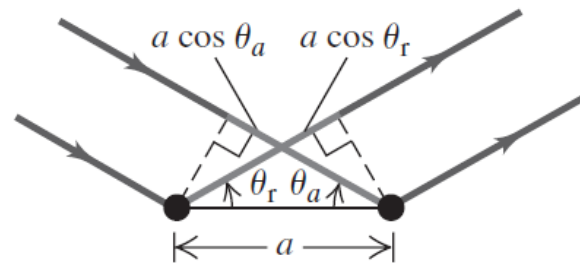
## Difração de raios-X

(a) Espalhamento de ondas de uma rede retangular.

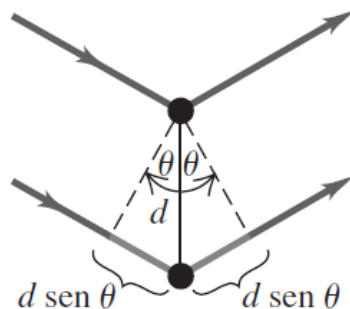


(b) Espalhamento de átomos adjacentes em uma mesma linha.

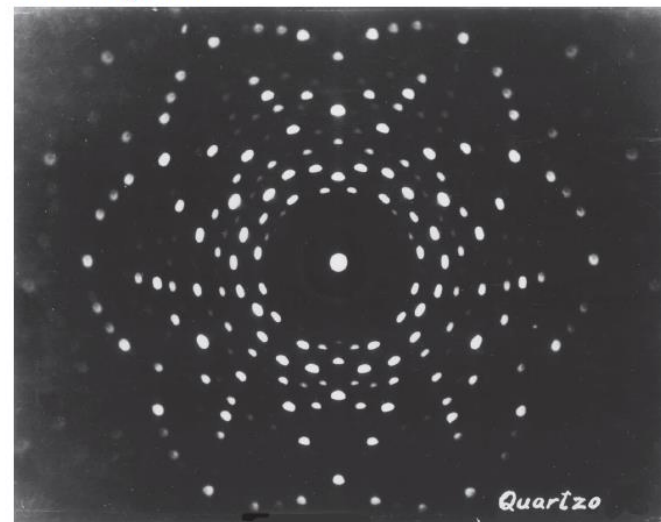
A interferência de ondas provenientes de átomos adjacentes da mesma linha é construtiva quando  $a \cos \theta_a = a \cos \theta_r$ , ou seja, quando o ângulo de incidência  $\theta_a$  é igual ao ângulo de reflexão  $\theta_r$ .



(c) Espalhamento de átomos em linhas adjacentes. A interferência de átomos em linhas adjacentes é construtiva quando a diferença de caminho  $2d \sin \theta$  é igual a um número inteiro de comprimentos de onda, como na Equação (36.16).



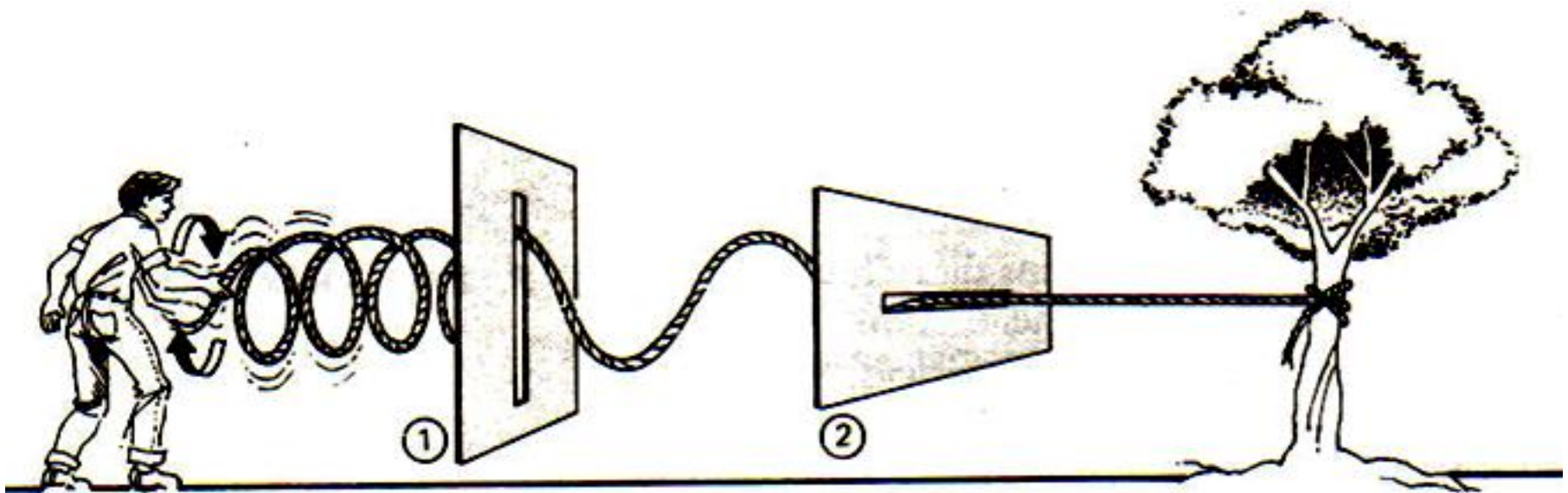
(b) Figura de difração de Laue para uma seção fina de cristal de quartzo.



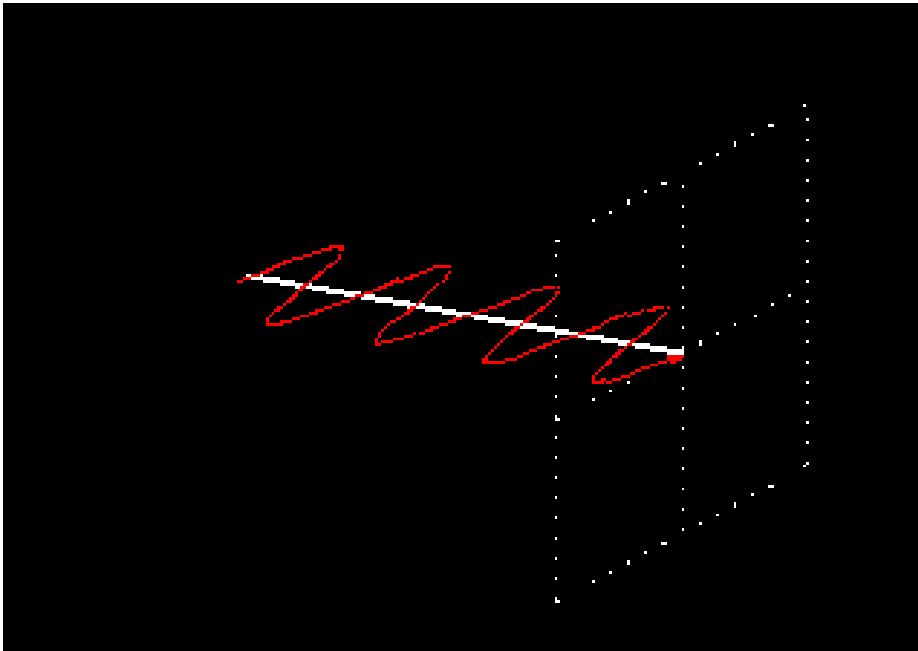
# Fenômenos ondulatórios

## Polarização:

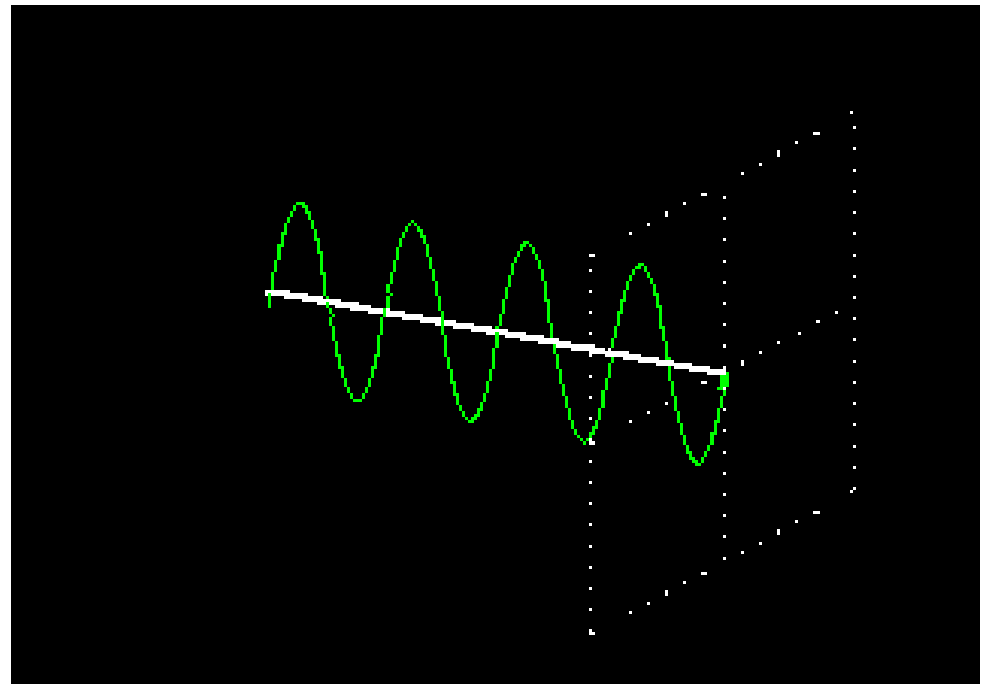
Uma onda natural (não polarizada) é aquela que possui várias direções de vibração, em relação a direção de propagação. Polarizar uma onda é fazê-la vibrar em uma única direção. A polarização é exclusiva das ondas transversais, não ocorrendo esse fenômeno com as ondas longitudinais.



Polarização horizontal

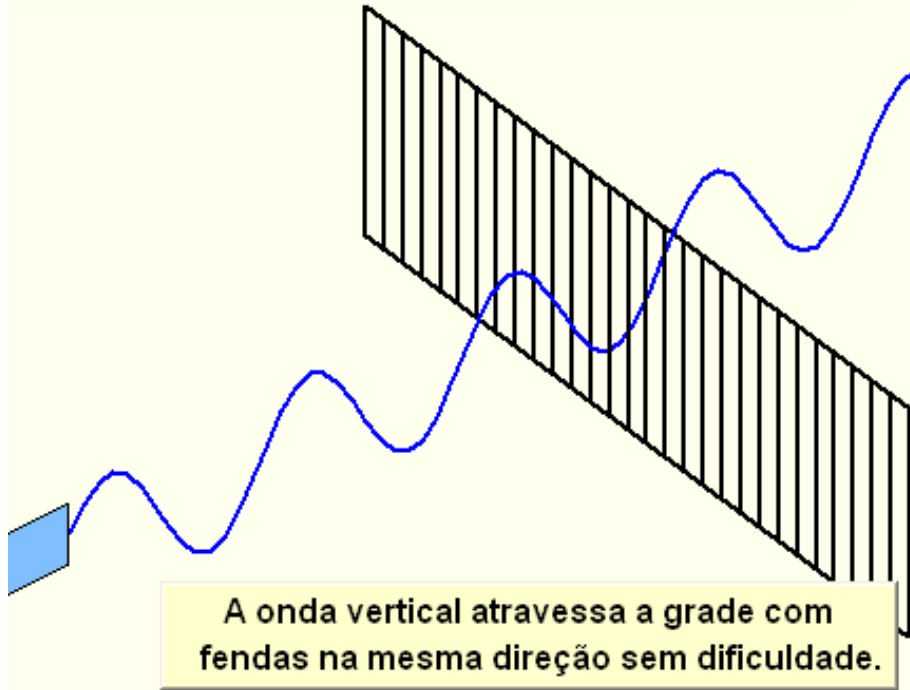


Polarização vertical



# Fenômenos ondulatórios

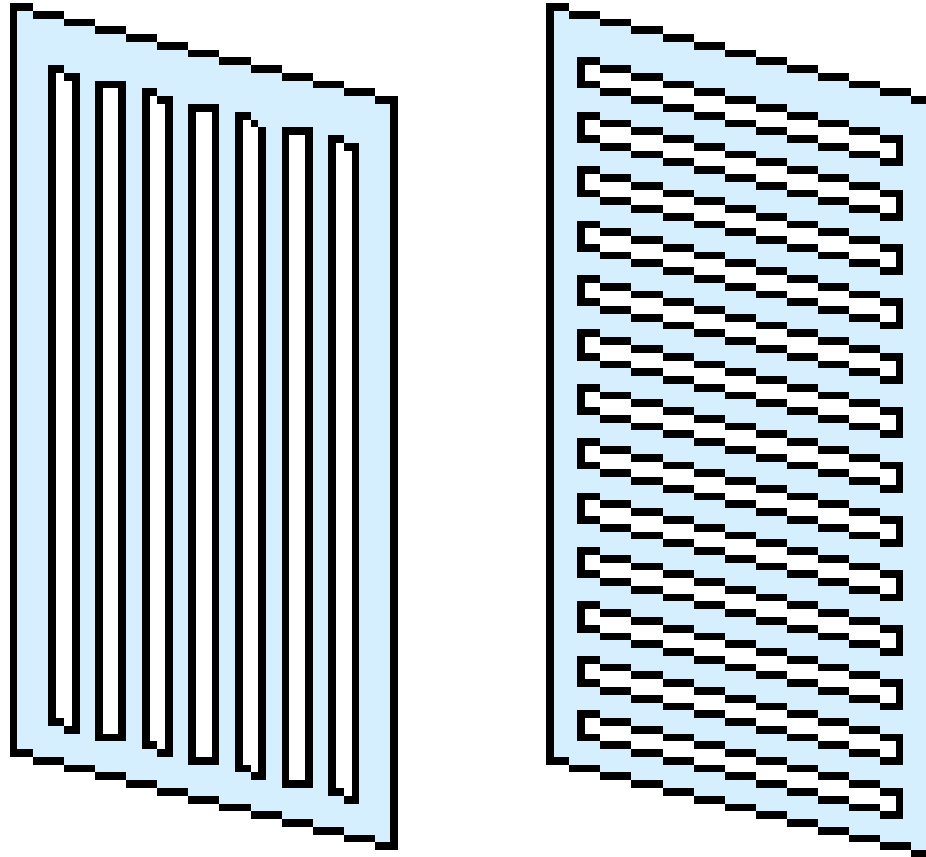
## Polarização:



A diagram illustrating wave polarization. A blue wave pulse is shown on the left, moving towards a horizontal slit (a grid of horizontal lines). The wave pulse is oriented vertically, with its oscillations parallel to the slit. The wave pulse is blocked by the slit. To the right, a text box explains: "A onda vertical não atravessa a grade com fendas na horizontal, sendo aniquilada."

# Fenômenos ondulatórios

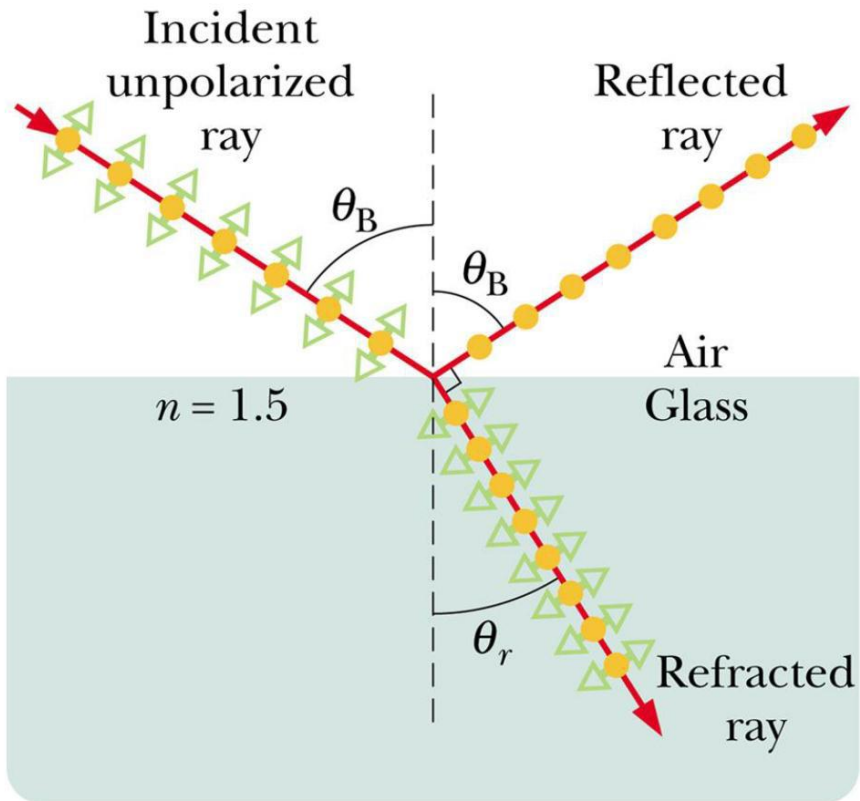
## Polarização:





# Fenômenos ondulatórios

## Polarização por reflexão



● Componente perpendicular a página

↔ Componente paralela a página

Raios refletidos: podem ser total ou parcialmente polarizados.

Para o ângulo de Brewster, a luz refletida possui apenas componente perpendicular → Totalmente Polarizada.

Geralmente → Parcialmente Polarizada

*Lei de Brewster*

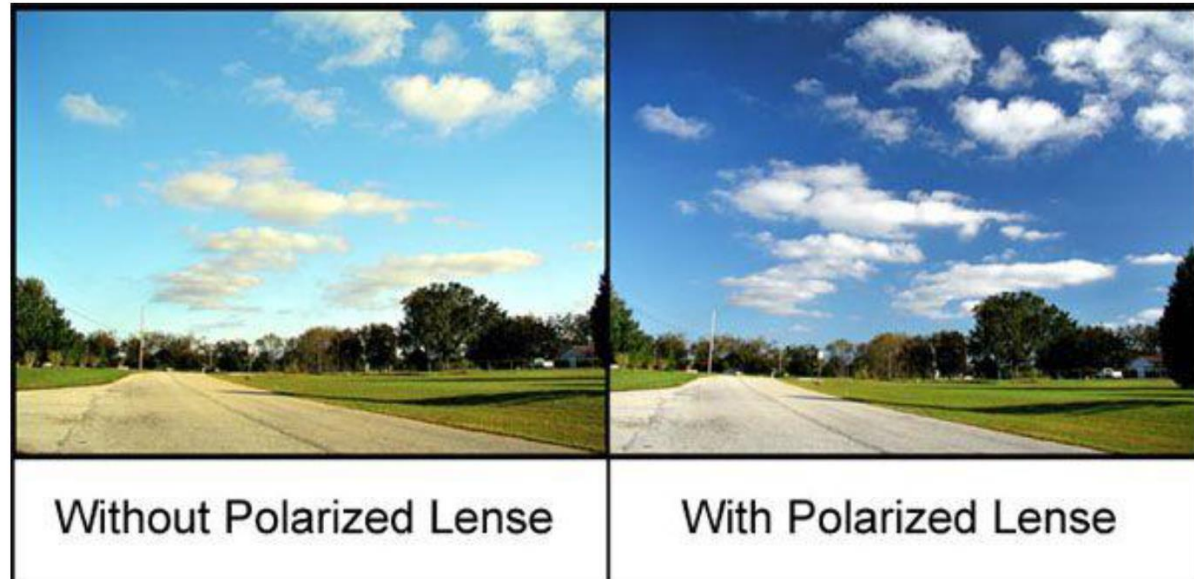
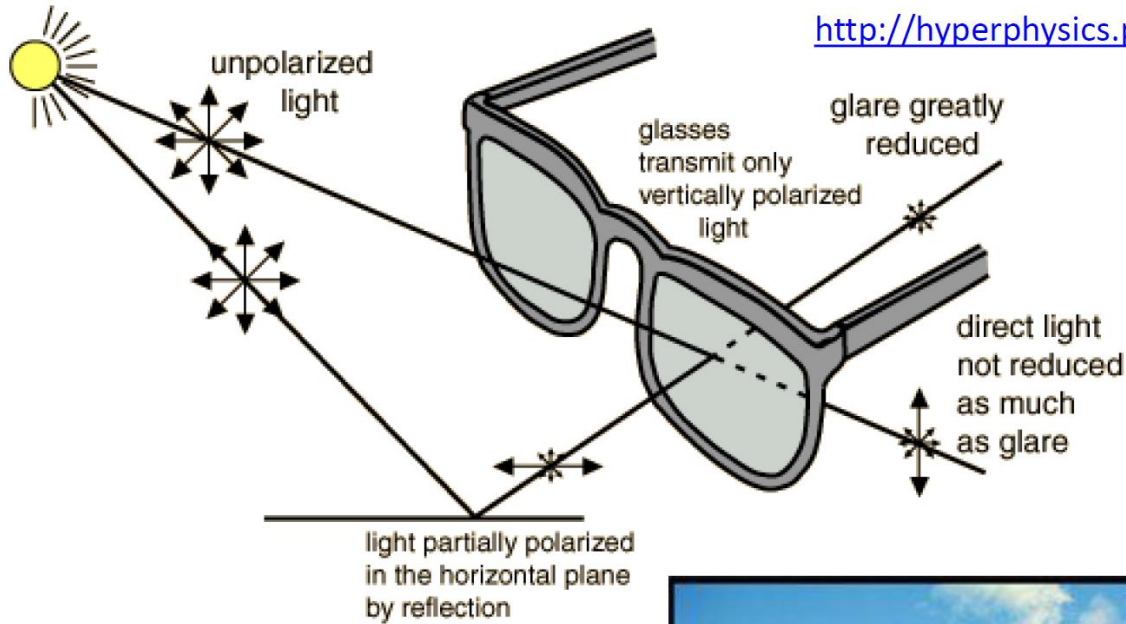
$$\theta_B = \arctan(n_2/n_1)$$



# Fenômenos ondulatórios

## Polarização por reflexão

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polabs.html>



# REFERÊNCIAS UTILIZADAS NESTA AULA

- Halliday, Resnicke Walker  
Fundamentos de Física –Vol. III e IV – 9<sup>a</sup> ed.
- Sears e Zemansky  
Fundamentos de Física Vol. III e IV – 12<sup>a</sup> ed.
- H. Moysés Nussenzveig  
Curso de Física Básica – Vol 3 e 4
- <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/I/interference.html>