

# Ondas eletromagnéticas

## Parte 2

Fundamentos de física para gestão  
ambiental – 2016

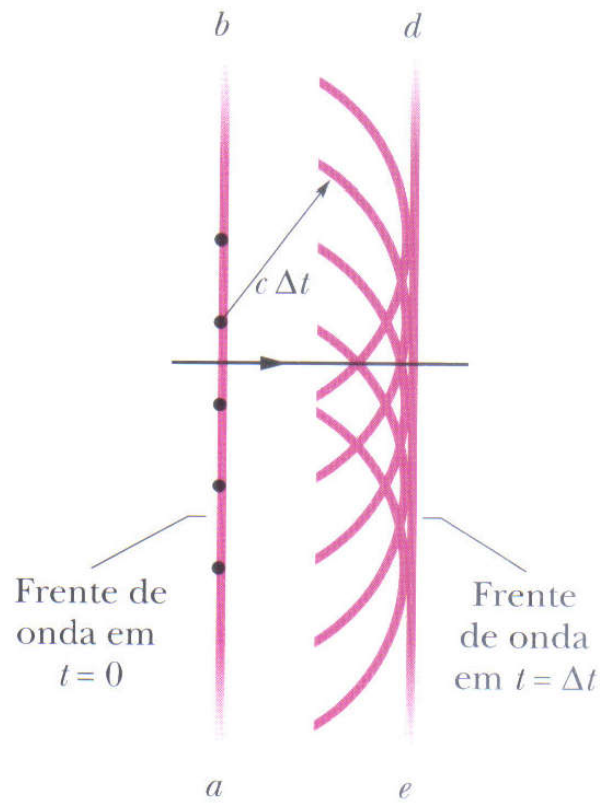
Conteúdo - Halliday 8ª ed. Cap.35

# Interferência

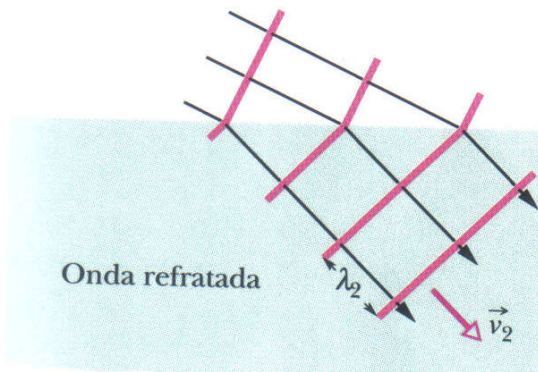
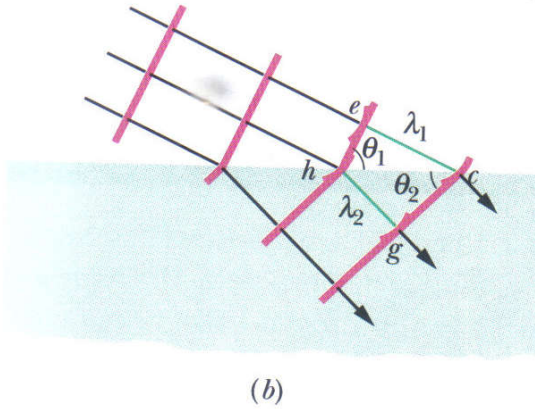
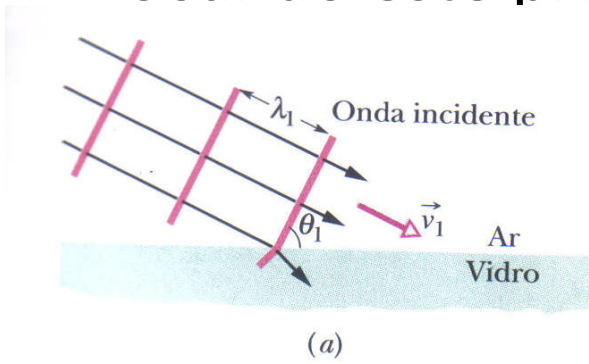
- Refração
- Difração
- Experimento de Young
- Coerência
- Iridescência
- O Interferômetro de Michelson

# Refração - 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 ondas secundárias.



# Usando este princípio para chegar na lei da refração



$$v_2 < v_1: \quad \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\text{sen } \theta_1 = \frac{\lambda_1}{hc} \quad (\text{para o triângulo } hce)$$

$$\text{sen } \theta_2 = \frac{\lambda_2}{hg} \quad (\text{para o triângulo } hcg).$$

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}, \quad n = \frac{c}{v} \quad (\text{índice de refração}).$$

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \quad \text{e} \quad n_2 = \frac{c}{v_2}$$

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2 \quad (\text{lei de refração})$$

# Comprimento de onda e índice de refração

$$\lambda_n = \lambda \frac{v}{c}$$

Substituindo  $v/c$  e  $1/n$

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n}$$

E as frequências?

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n}$$

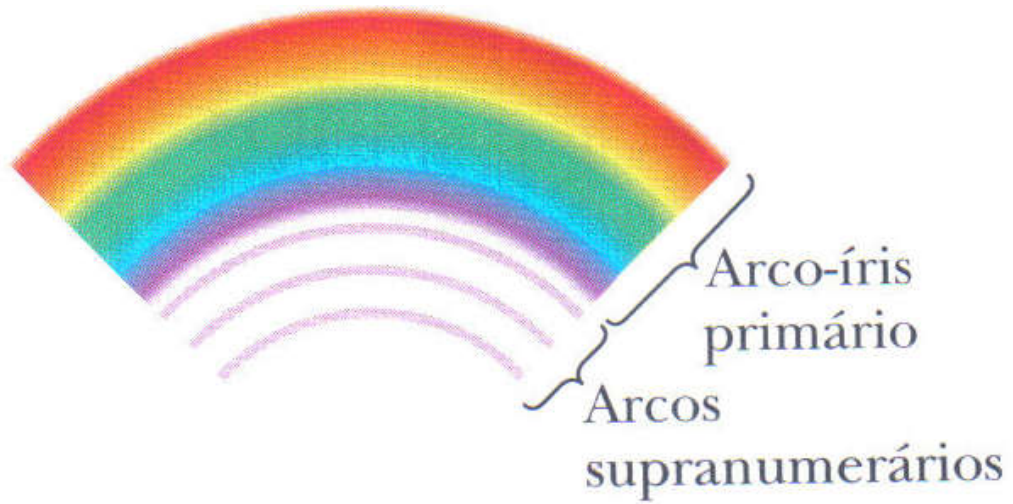
$$f_n = \frac{c/n}{\lambda/n} = \frac{c}{\lambda} = f,$$

➤ A diferença de fase entre duas ondas luminosas pode mudar se as ondas atravessarem materiais com diferentes índices de refração.

$$N_1 = \frac{L}{\lambda_{n1}} = \frac{Ln_1}{\lambda}$$

$$N_2 = \frac{L}{\lambda_{n2}} = \frac{Ln_2}{\lambda}$$

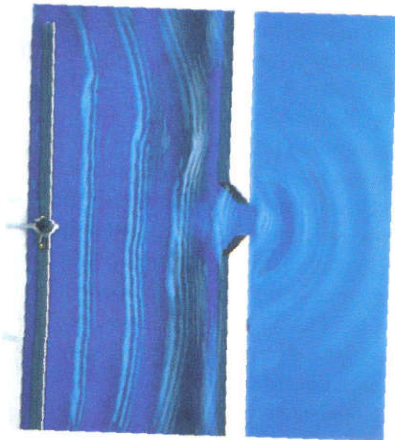
$$N_2 - N_1 = \frac{Ln_2}{\lambda} - \frac{Ln_1}{\lambda} = \frac{L}{\lambda} (n_2 - n_1)$$



O arco-íris é um fenômeno de interferência

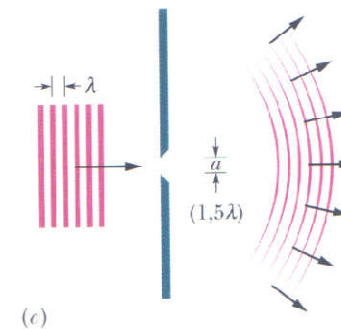
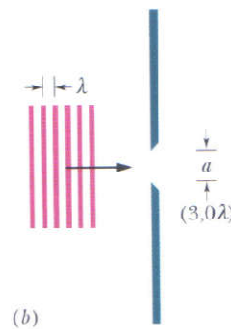
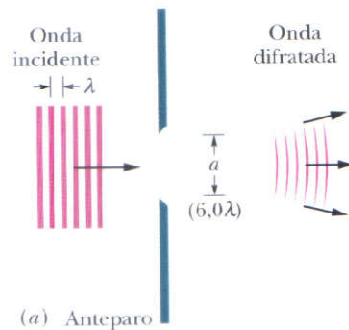
# Difração

Quando uma onda encontra um obstáculo com abertura de dimensões comparáveis a seu comprimento, parte da onda que passa pela abertura se “alarga” (difrata)



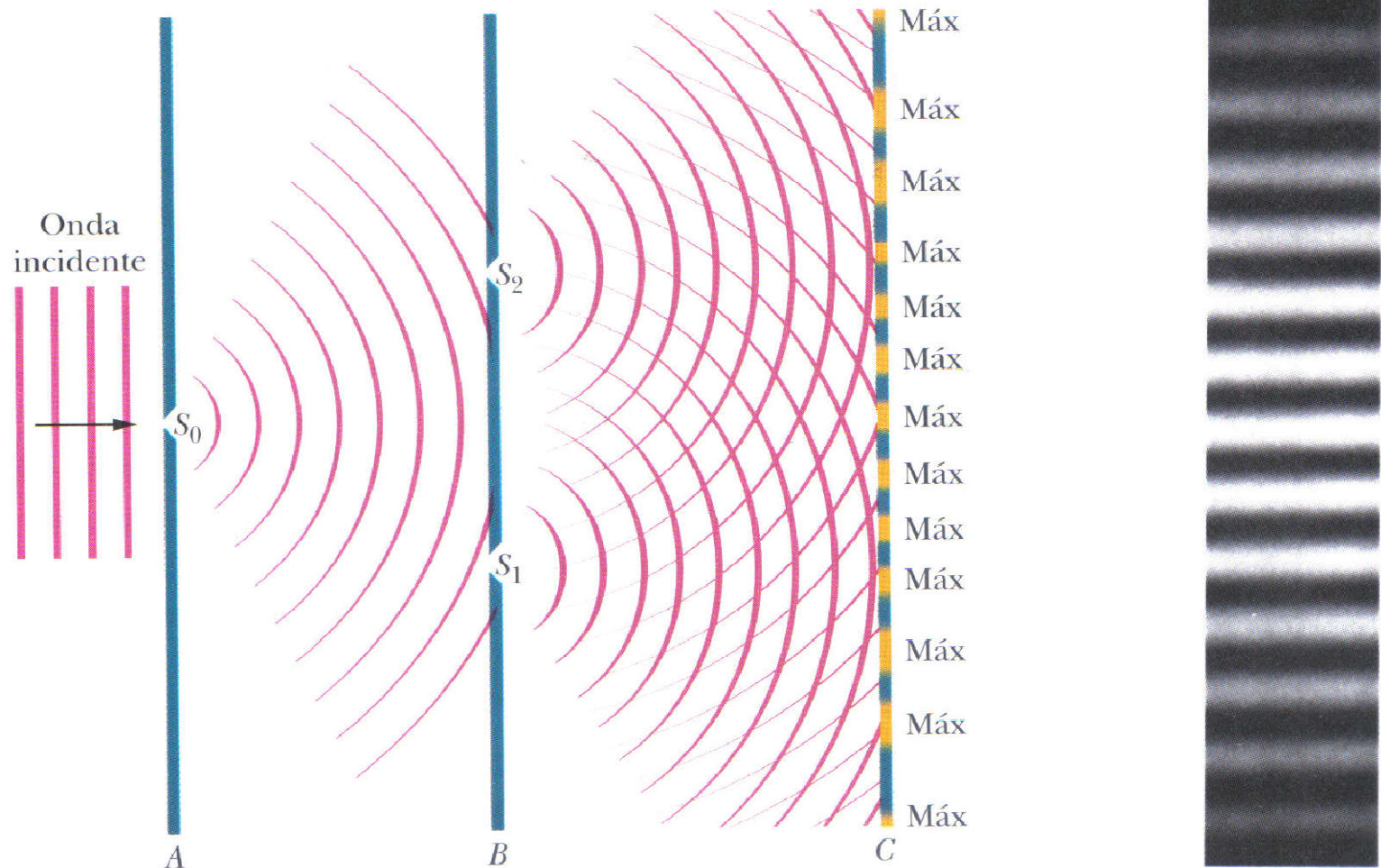
Onda mecânicas

Ondas luminosas





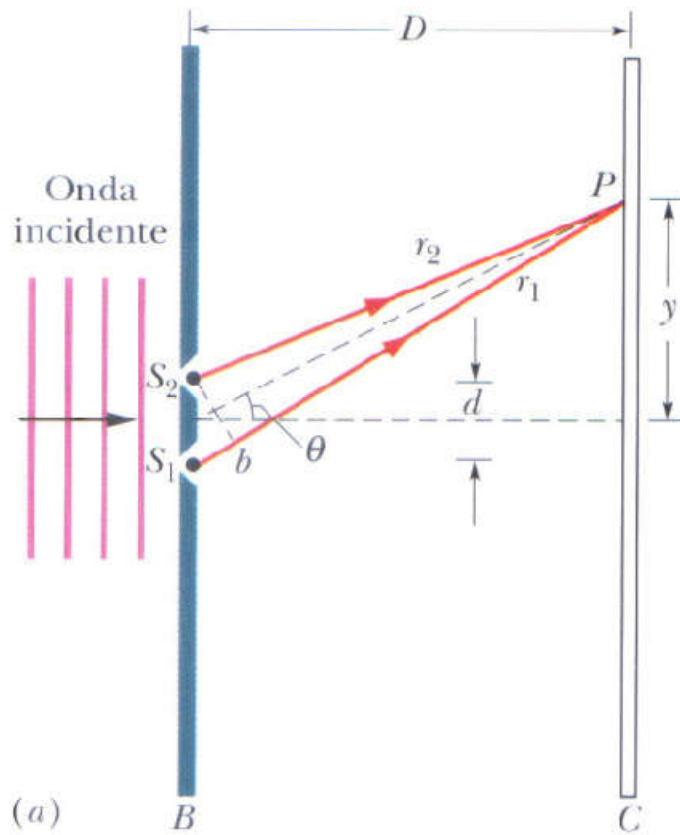
# O experimento de Young (1801)



# Qual a localização das franjas?

▶ A diferença de fase entre duas ondas pode mudar se as ondas percorrerem distâncias diferentes.

▶ Em um experimento de interferência de dupla fenda de Young a intensidade luminosa em cada ponto da tela de observação depende da diferença  $\Delta L$  entre as distâncias percorridas pelos dois raios que chegam ao ponto.



$$\Delta L = d \text{ sen } \theta$$

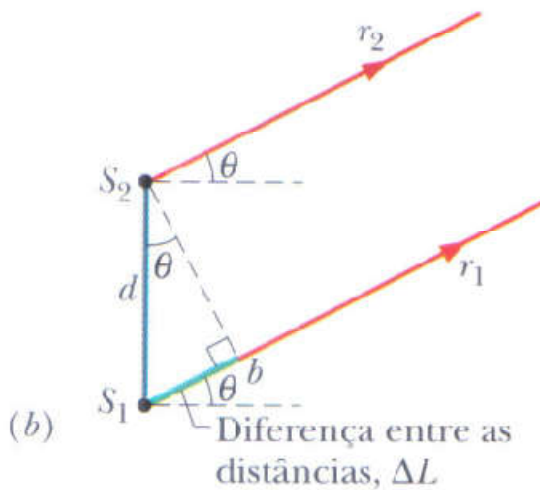
(diferença entre as distâncias percorridas)

Franjas claras

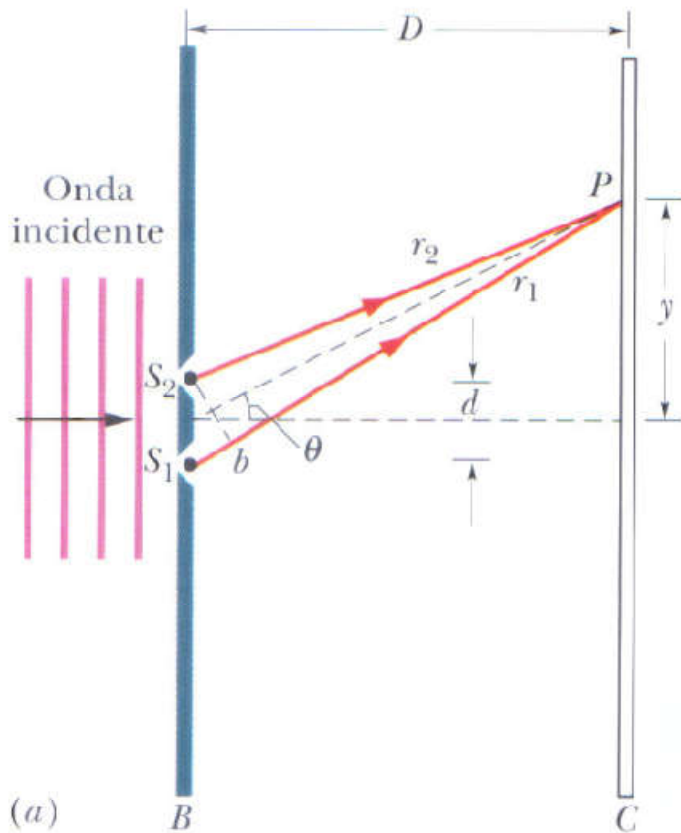
$$\Delta L = d \text{ sen } \theta = (\text{número inteiro})(\lambda),$$

ou

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



(máximos — franjas claras).



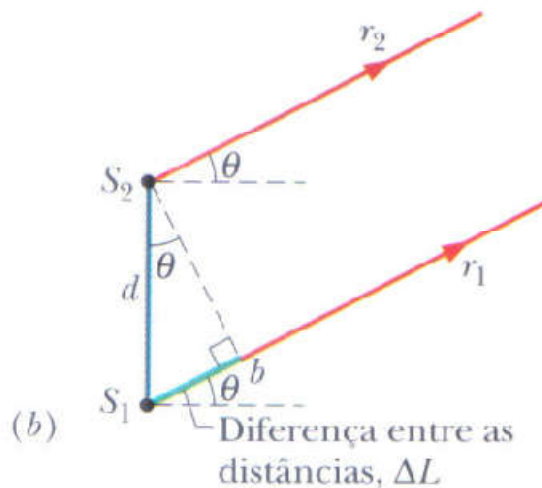
Franjas escuras

$$\Delta L = d \sin \theta = (\text{número ímpar}) \left( \frac{1}{2} \lambda \right),$$

ou

$$d \sin \theta = \left( m + \frac{1}{2} \right) \lambda, \quad \text{para } m = 0, 1, 2, \dots$$

(mínimos — franjas escuras).



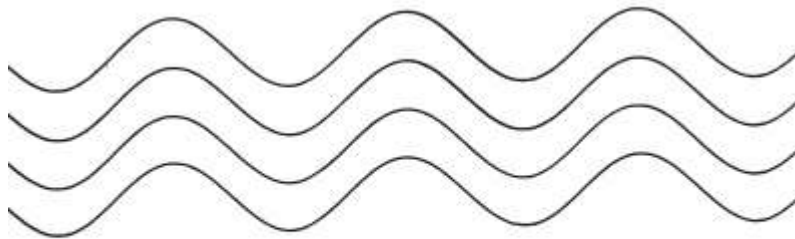
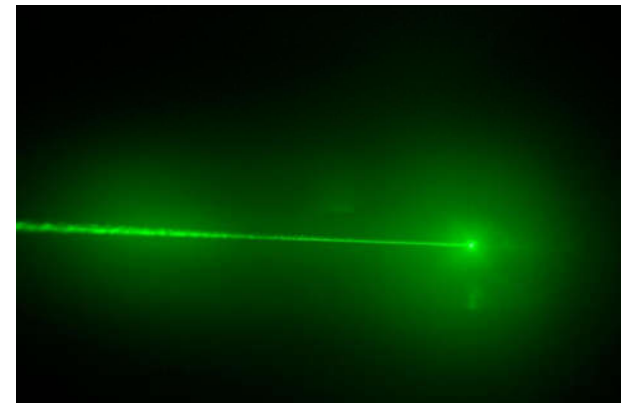
# Coerência

Quando a diferença de fase entre duas ondas permanece constante com o tempo, dizemos que os raios são **coerentes**



Adaptada de: *University of Oregon* (<http://oregonstate.edu/ehs/laser/training/definition-and-properties-laser-light>)

Light  
Amplification by the  
Stimulated  
Emission of  
Radiation



Coherent Light Waves

# Intensidade das franjas de interferência

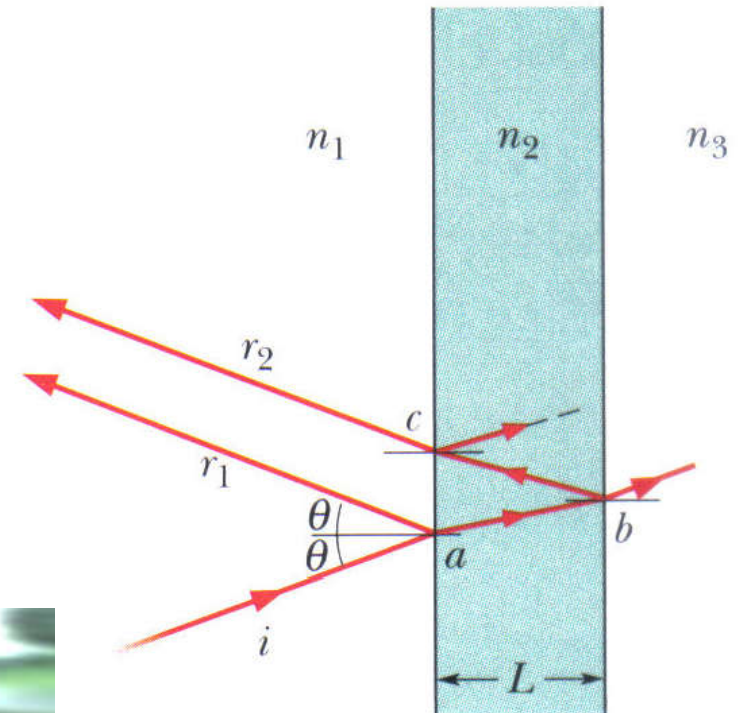
$$E_1 = E_0 \text{sen } \omega t$$

$$E_2 = E_0 \text{sen}(\omega t + \phi).$$

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{1}{2} \phi,$$

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \text{sen } \theta.$$

# Interferência em filmes finos

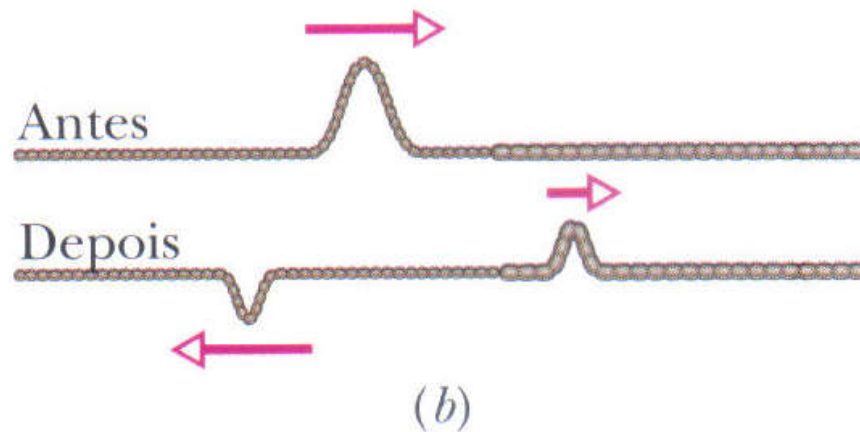
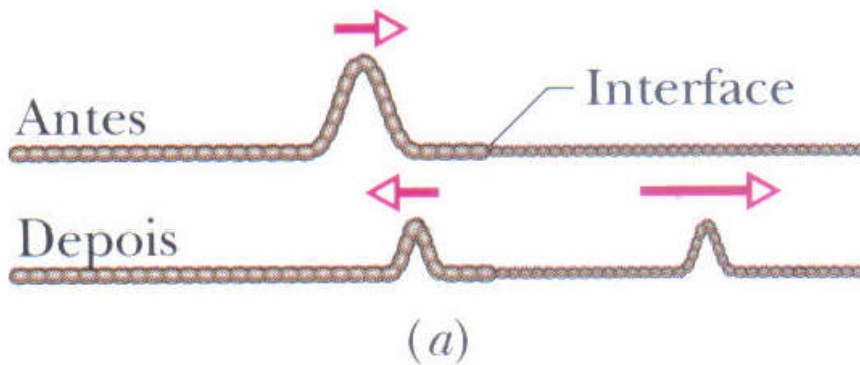


Adaptados da UCSD <http://graphics.ucsd.edu/~iman/SoapBubbles/>



# Mudanças de fase causadas por reflexões

A diferença de fase entre duas ondas pode mudar se uma das ondas for refletida ou se ambas forem refletidas.



Reflexão	Mudança de fase
Em um meio com $n$ menor	0
Em um meio com $n$ maior	$0,5\lambda$

# O que pode causar diferença de fase?

Tabela para a Interferência em Filmes Finos no Ar (Fig. 35-17)<sup>a</sup>

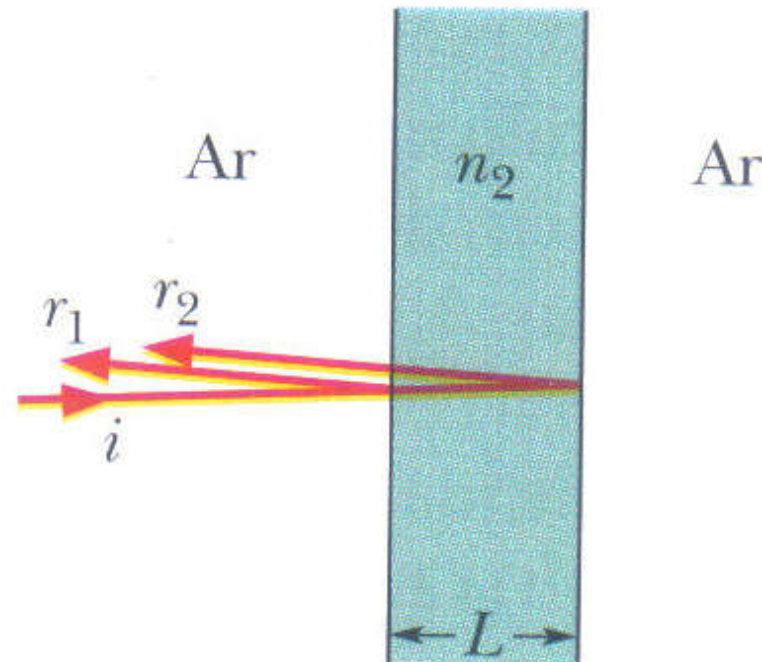
	$r_1$	$r_2$
Mudança de fase por reflexão	$0,5\lambda$	0
Diferença entre as distâncias	$2L$	
Índice no qual ocorre a diferença de distâncias	$n_2$	

Em fase<sup>a</sup>:  $2L = \frac{\text{número ímpar}}{2} \times \frac{\lambda}{n_2}$

Fora de fase<sup>a</sup>:  $2L = \text{número inteiro} \times \frac{\lambda}{n_2}$

<sup>a</sup>Válido para  $n_2 > n_1$  e  $n_2 > n_3$ .

- Reflexão de uma das ondas
- Diferença de percurso entre as duas ondas
- Propagação das duas ondas em meios com diferentes índices de refração

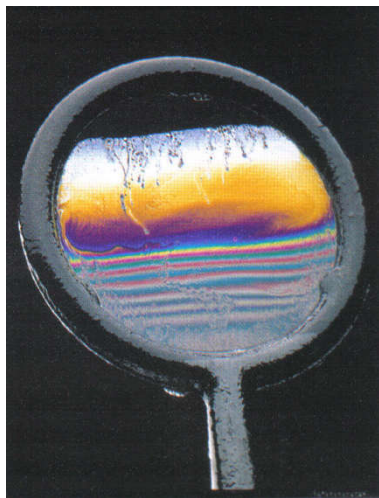


Deste modo:

$$2L = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{n_2}, \text{ para } m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{m\u00e1ximos—filme claro no ar}).$$

$$2L = m \frac{\lambda}{n_2}, \text{ para } m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{m\u00ednimos—filme escuro no ar}).$$

**Se a espessura do filme for muito menor que  $\lambda$**

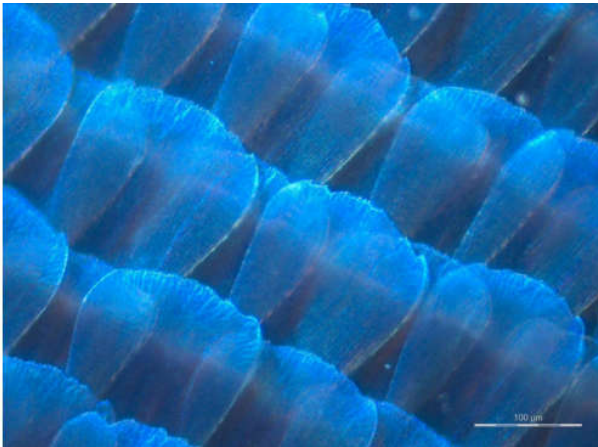


$2L$  \u00e9 t\u00e3o pequeno que pode ser desprezado ( $m=0$ )

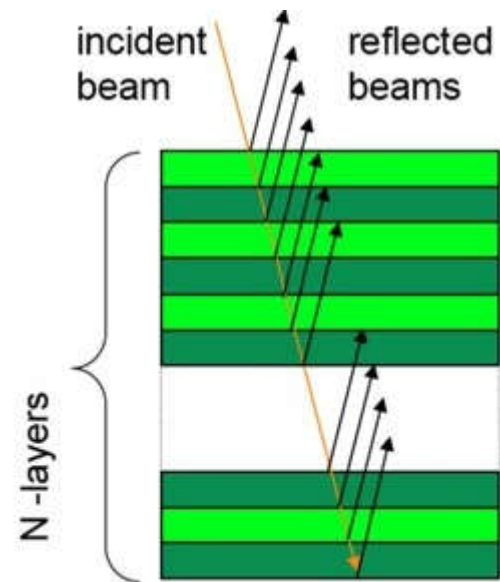
Se a espessura aumenta, as franjas aparecem

# Iridescência

Fenômeno no qual a superfície exibe faixas coloridas devido à interferência



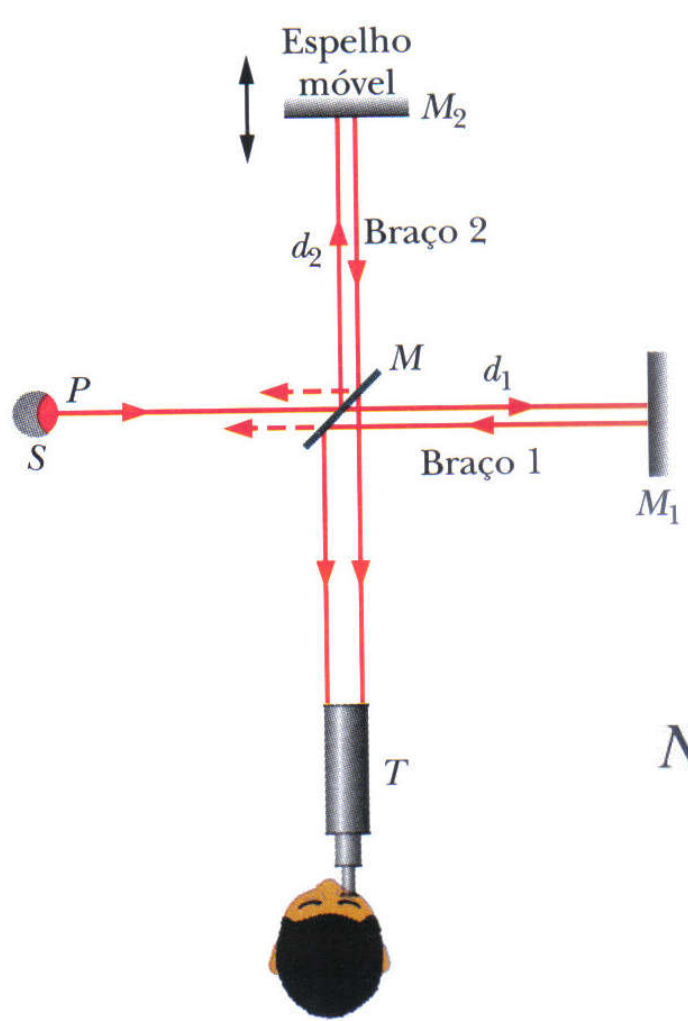
**Butterfly Inspired Material Design**  
Zachary Flood & Euihyun "Brian" Baek



[http://www.uvm.edu/~dahammon/Structural\\_Colors/Structural\\_Colors/The\\_Blue\\_Morpho\\_Butterfly.html](http://www.uvm.edu/~dahammon/Structural_Colors/Structural_Colors/The_Blue_Morpho_Butterfly.html)

Disponível em [www.iofluidics.bee.cornell.edu](http://www.iofluidics.bee.cornell.edu)

# Interferômetro de Michelson (1881) (Nobel de Física em 1907)



$$N_m = \frac{2L}{\lambda_n} = \frac{2Ln}{\lambda}$$

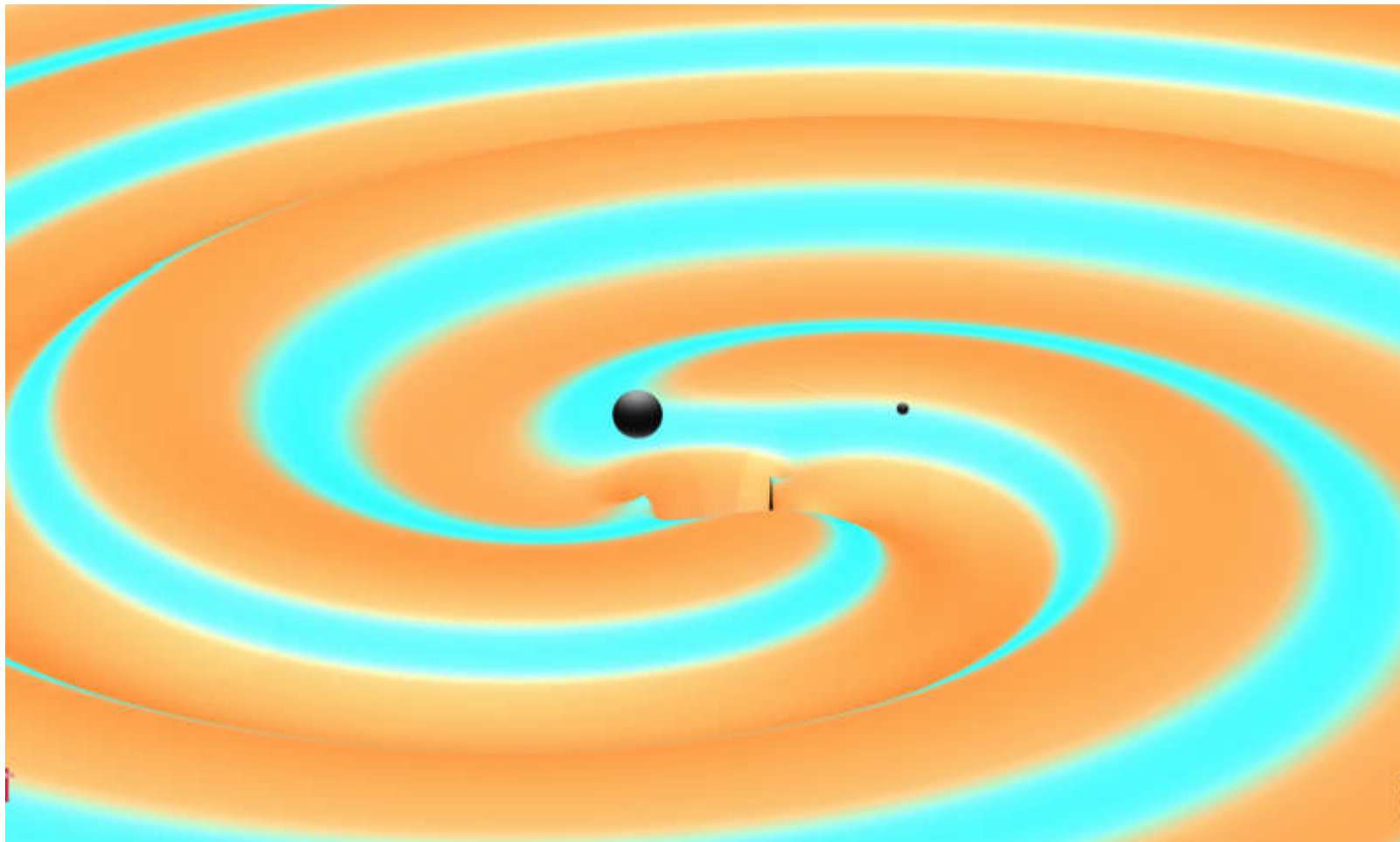
$$N_a = \frac{2L}{\lambda}$$

$$N_m - N_a = \frac{2Ln}{\lambda} - \frac{2L}{\lambda} = \frac{2L}{\lambda} (n - 1)$$

On December 26, 2015 at 03:38:53 UTC, scientists observed gravitational waves

"GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22 Solar-mass Binary Black Hole Coalescence," by the LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration, has been accepted for publication in the journal *Physical Review Letters*.

Read more at: <http://phys.org/news/2016-06-gravitational-pair-colliding-black-holes.html#jCp>



<http://phys.org/news/2016-06-gravitational-pair-colliding-black-holes.html>