

# Interferência

# INTRODUÇÃO

## Eletrromagnetismo

Antes de Maxwell já era sabido que as forças elétricas e magnéticas variavam com o **inverso do quadrado da distância** e portanto, a longas distâncias, seu efeito é pequeno.

Maxwell tentou unificar estas leis. Mas eram inconsistentes. Para conseguir esta unificação teve que **adicionar um novo termo**, desconhecido até aquele momento.

Este novo termo previa que parte do campo elétrico e magnético diminuiria com a distância na primeira potencia e não com o quadrado!!!!

Desta forma, correntes elétricas num local poderiam afetar cargas a longas distâncias, colocando as bases da transmissão de radio, o funcionamento do radar, etc. O que só é possível devido a que o campo varia com a distância à primeira potência!!!!

Além disso, a luz foi reconhecida como um fenômeno E/M..... que exerce sua influência (nas nossas retinas) após percorrer as vezes distâncias enormes!!!

Vejamos qual era a situação na época de Maxwell:

Na época de Maxwell eram conhecidas:

**a Lei da Gravitação Universal**

$$\vec{F} = G \frac{Mm}{r^2} \vec{e}_r$$

**A Lei de Coulomb**

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Nesta última equação, para completar o quadro é necessário escrever as equações que determinam os valores dos vetores **E** e **B**

**Qual a equação para o campo elétrico e magnético produzido por uma única carga?**

# INTRODUÇÃO

## Eletrromagnetismo

De fato não são equações simples:

O campo elétrico:

$$\vec{E} = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{\vec{e}_{r'}}{r'^2} + \frac{r'}{c} \frac{d}{dt} \left( \frac{\vec{e}_{r'}}{r'^2} \right) + \frac{1}{c^2} \frac{d^2}{dt^2} \vec{e}_{r'} \right]$$

O primeiro termo é a Lei de Coulomb (neste caso o vetor unitário  $\vec{e}_{r'}$  aponta do ponto P, onde o campo é medido, ao ponto q onde se encontra a carga que produz o campo).

Mas a Lei de Coulomb está errada!!

Esta equação tem que ser corrigida pelo atraso temporal  $\frac{r'}{c}$ . Mas, ainda assim está errada!!!

A verdadeira história é mais complicada, faltam vários termos!!!

A derivada do termo  $\frac{\vec{e}_{r'}}{r'^2}$  multiplicado pelo atraso temporal é uma tentativa da natureza de calcular qual o valor do campo AGORA (não no passado) extrapolando sua variação pelo tempo do atraso.

Mas isso não é tudo, há um terceiro termo!!! que é a segunda derivada respeito de t, do vetor unitário que aponta para a carga q. **Essa é a formula correta (inclui tudo o que conhecemos até agora) para calcular o campo produzido por uma carga em movimento.**

O campo magnético:

$$\vec{B} = -\vec{e}_{r'} \times \frac{\vec{E}}{c}$$

# INTRODUÇÃO

## Radiação E/M

Vamos discutir a questão da radiação (a única que se propaga a grandes distâncias) e para isso só precisamos do termo que varia com o inverso da distância à primeira potência, ou seja:

$$\vec{E} = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{\vec{e}_{r'}}{r'^2} + \frac{r'}{c} \frac{d}{dt} \left( \frac{\vec{e}_{r'}}{r'^2} \right) + \frac{1}{c^2} \frac{d^2}{dt^2} \vec{e}_{r'} \right]$$

Este termo é o único que sobrevive a grandes distâncias e está relacionado à aceleração do vetor unitário  $\vec{e}_{r'}$

$$\vec{E} = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{c^2} \frac{d^2 \vec{e}_{r'}}{dt^2}$$

Vamos supor um movimento aleatório da carga  $q$  que gera o campo  $\mathbf{E}$ .

O vetor  $\vec{e}_{r'}$  vai ter uma componente radial e uma transversal.

Para grandes distancias, a componente radial é desprezível se comparada com a componente transversal (para a demonstração vejam *Lectures on Physics* R. Feynman capitulo 28 “radiação”)

Se desconsideramos a variação radial teremos somente a aceleração na direção transversal. Assumimos para simplificar que o movimento da carga  $q$  não é relativístico (ou seja, que o atraso temporal é constante, ou seja, a partícula está a uma distância constante), então:

$$E_x(t) = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \frac{1}{c^2} a_x \left( t - \frac{r}{c} \right)$$

# INTRODUÇÃO

## Dipolo

$$E_x(t) = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r c^2} a_x \left( t - \frac{r}{c} \right)$$

Reflexão, refração, interferência, espalhamento, etc. tudo pode ser entendido a partir desta equação.

Até aqui descrevemos toda a historia para entender de onde vem e como se encaixa nas lei físicas que conhecemos.

Vamos demonstrar agora alguns experimentos que permitem melhor entender esta lei. Para isso precisamos de uma carga acelerada (vamos utilizar uma corrente, que é uma superposição de cargas).

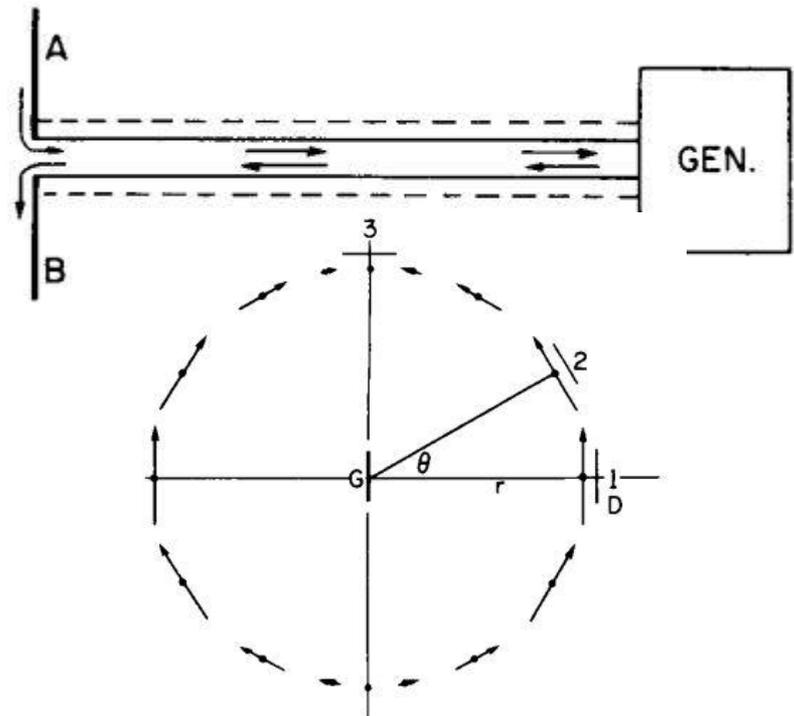
Utilizamos dois condutores e um gerador.

O dispositivo se comporta como se fosse um único fio onde as cargas sobem e descem.

O dispositivo gera um campo e o detectamos com algo similar (com um retificador e um amplificador).

Na presença de um campo elétrico escutaremos um ruído forte.

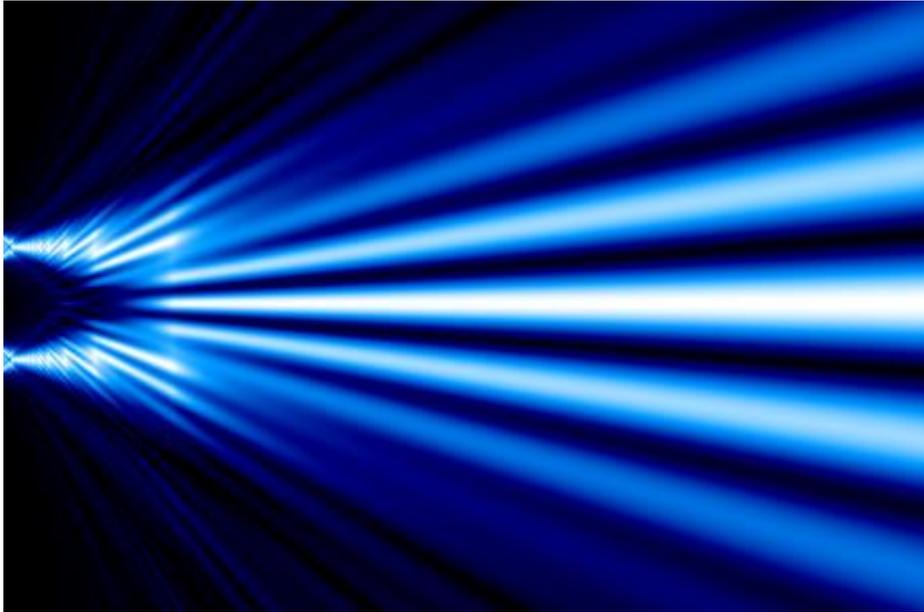
Analisemos o que acontece na figura ao lado



# INTRODUÇÃO

## Interferência

O que acontece se colocamos dois dipolos lado a lado?



É possível também demonstrar que a soma dos campos é uma soma vetorial !!!

E a interferência demonstra o atraso temporal !!!!

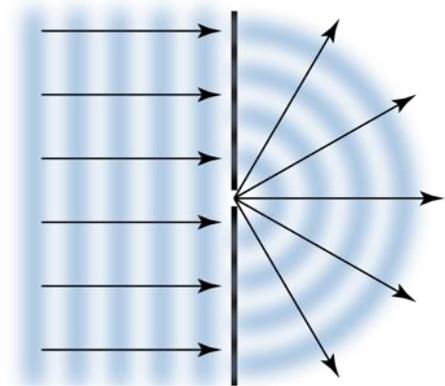
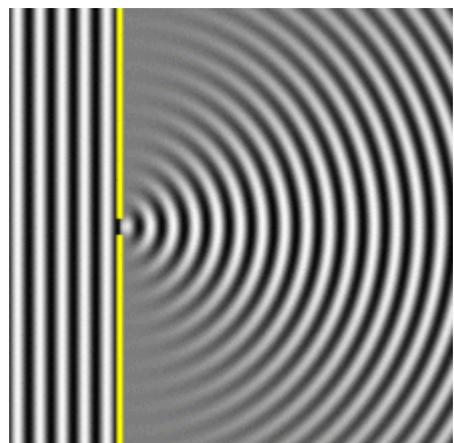
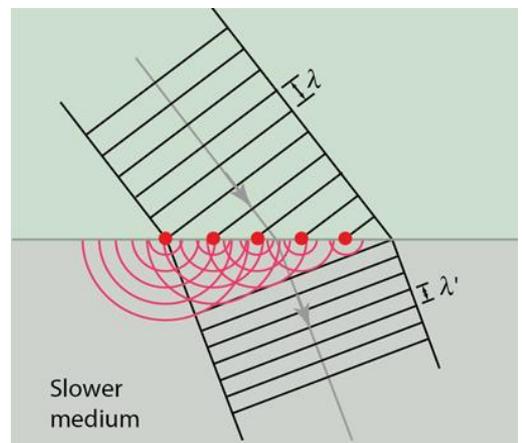
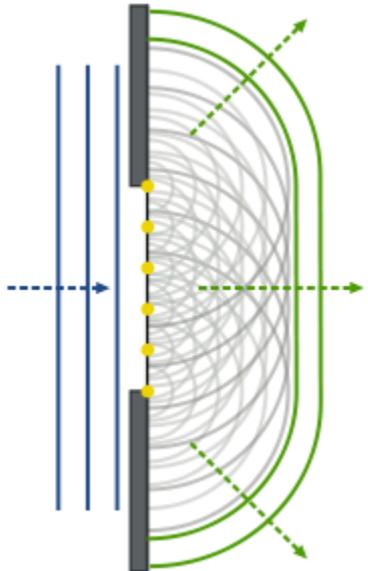
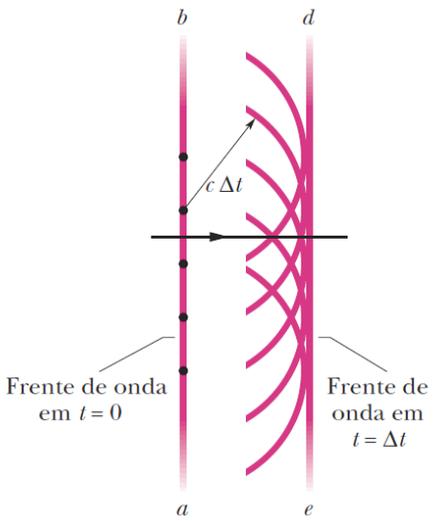
Assim as principais propriedades da equação  $E_x(t) = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \frac{1}{c^2} a_x \left( t - \frac{r}{c} \right)$  foram demonstradas

Vamos agora ver o Princípio de Huygens, um dos primeiros modelos desenvolvidos para explicar o comportamento da luz.

# A Luz como uma Onda

## Princípio de Huygens

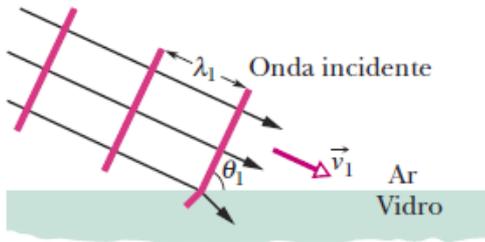
**TODOS** os pontos de uma frente de onda se comportam como fontes pontuais de ondas secundárias. Depois de um intervalo de tempo  $t$ , a nova posição da frente de onda é dada por uma superfície tangente a todas essas ondas secundárias.



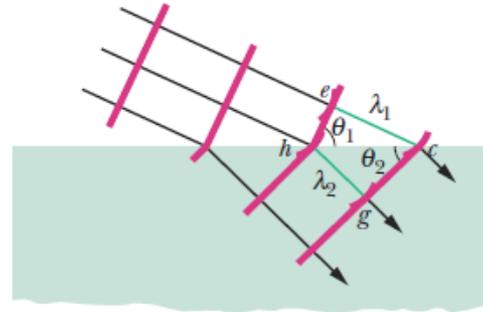
# A Luz como uma Onda: Lei da Refração

Explicando a refração segundo o princípio de Huygens...

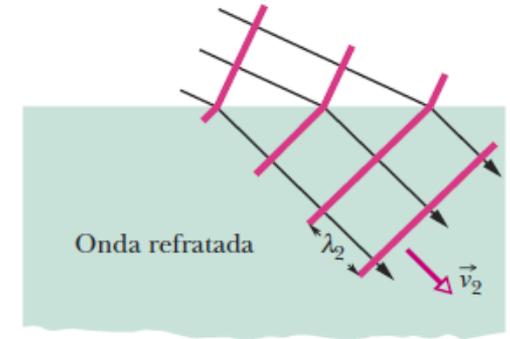
A refração ocorre na superfície e faz a onda mudar de direção.



(a)



(b)



(c)

A refração de uma onda plana em uma interface ar-vidro, de acordo com o princípio de Huygens. O comprimento de onda no vidro é menor que no ar. Para simplificar o desenho, não é mostrada a onda refletida. As partes (a) a (c) mostram três estágios sucessivos da refração.

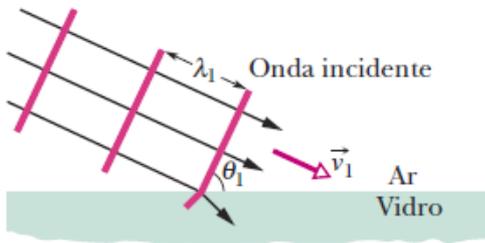
O tempo para a frente de onda ir de “e” até “c” é o mesmo que para ir de “h” até “g” (figura b) com velocidades diferentes...portanto o comprimento de onda muda (e é proporcional à velocidade da luz nesse meio) ou seja, como na figura  $t = \lambda/v$  obtemos:

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

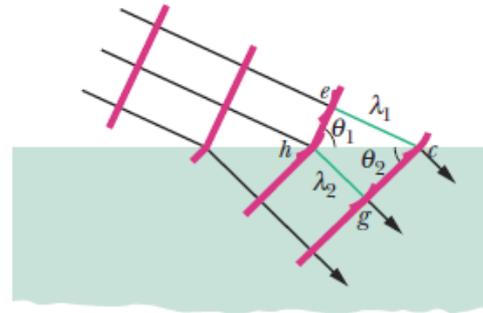
# A Luz como uma Onda: Lei da Refração

Explicando a refração segundo o princípio de Huygens...

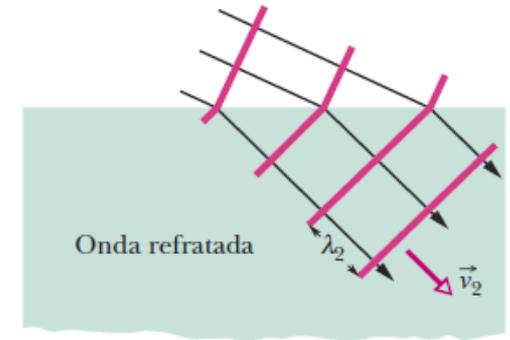
A refração ocorre na superfície e faz a onda mudar de direção.



(a)



(b)



(c)

A refração de uma onda plana em uma interface ar-vidro, de acordo com o princípio de Huygens. O comprimento de onda no vidro é menor que no ar. Para simplificar o desenho, não é mostrada a onda refletida. As partes (a) a (c) mostram três estágios sucessivos da refração.

Comparando triângulos (hec e hgc) podemos escrever  $\text{sen}\phi_1 = \frac{\lambda_1}{hc}$        $\text{sen}\phi_2 = \frac{\lambda_2}{hc}$

dividendo e comparando com a equação anterior temos:

$$\frac{\text{sen}\phi_1}{\text{sen}\phi_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Assim como fizemos na aula passada (para o índice de refração relativo), definimos o índice de refração absoluto como a relação entre:

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

# A Luz como uma Onda: Comprimento de Onda e Índice de Refração

O comprimento de onda muda mas, e a frequência....?

Além disso....

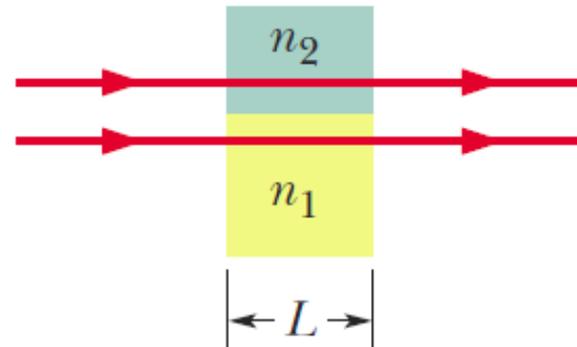
$$\lambda_n = \lambda \frac{v}{c}$$

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

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

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

A diferença dos índices de refração produz uma diferença de fase entre as duas ondas.



Duas ondas luminosas atravessam dois meios com diferentes índices de refração.

# A Luz como uma Onda:

## Comprimento de Onda e Índice de Refração

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

Para calcular a diferença de fase em termos de comprimentos de onda, primeiro contamos o número de comprimentos de onda  $N_1$  em uma distância  $L$  no meio 1.

$$N_1 = \frac{L}{\lambda_{n,1}} = \frac{L \cdot n_1}{\lambda} \qquad \lambda_{n,1} = \frac{\lambda}{n_1}$$

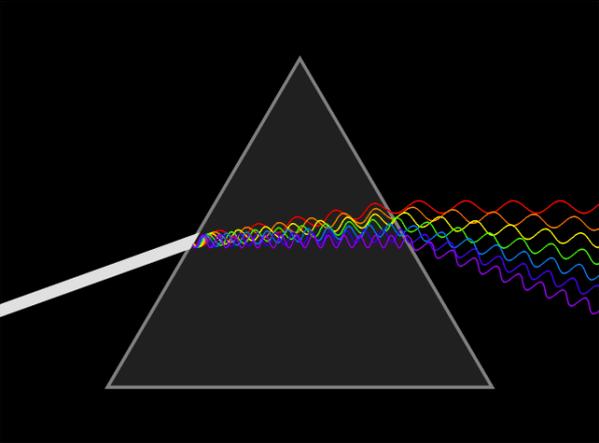
Em seguida, fazemos o mesmo para o meio 2.

$$N_2 = \frac{L}{\lambda_{n,2}} = \frac{L \cdot n_2}{\lambda}$$

Finalmente, calculamos o **módulo da diferença** entre  $N_1$  e  $N_2$ . Supondo que  $n_2 > n_1$ , temos:

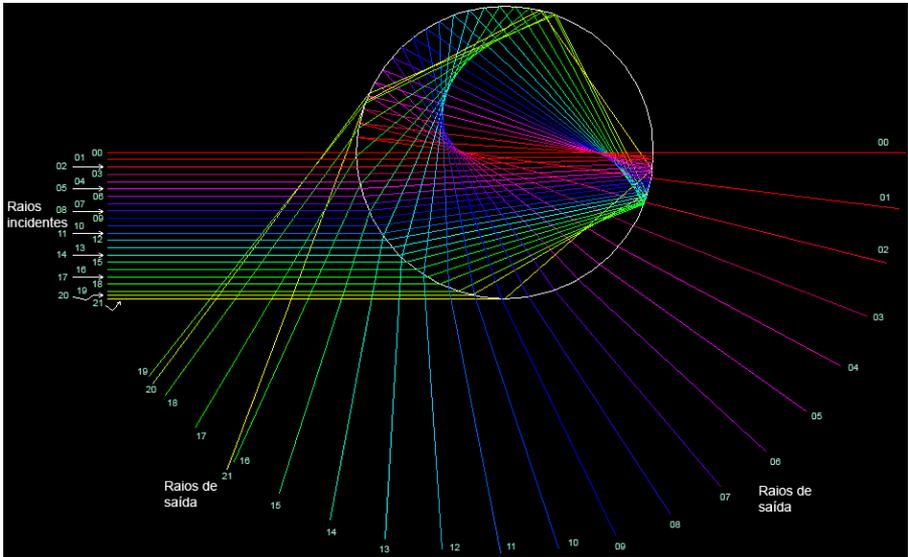
$$N_2 - N_1 = \frac{Ln_2}{\lambda} - \frac{Ln_1}{\lambda} = \frac{L}{\lambda} (n_2 - n_1)$$

# A Luz como uma Onda: O Arco-íris e a Interferência Óptica



As ondas luminosas penetram em toda a superfície da gota que esta voltada para o Sol. Diferentes partes da onda incidente descrevem trajetórias diferentes no interior da gota.

Isso significa que as ondas saem da gota com fases diferentes. Para alguns ângulos de saída, a luz está em fase e acontece uma interferência construtiva.



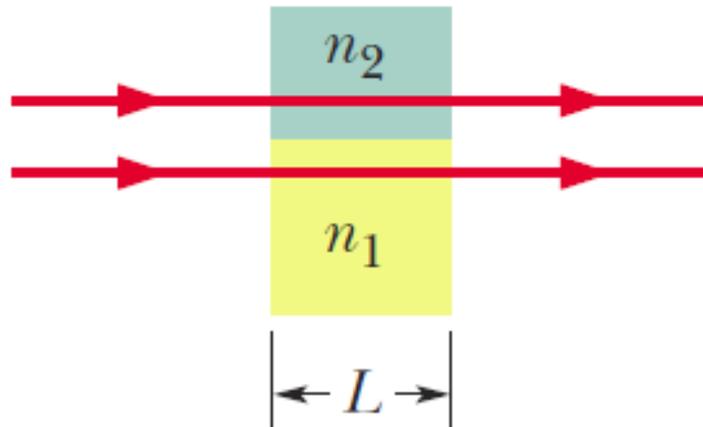
# Resolver: Diferença de Fase de Duas Ondas Devido a uma Diferença dos Índices de Refração

Na figura, duas ondas luminosas representadas por raios, têm um comprimento de onda de  $550,0 \text{ nm}$  antes de penetrar nos meios 1 e 2.

As ondas têm a mesma amplitude e estão inicialmente em fase.

Suponha que o meio 1 seja o próprio ar e que o meio 2 seja um plástico transparente com índice de refração  $1,6$  e uma espessura de  $2,6 \mu\text{m}$ .

(a) Qual é a diferença de fase entre as duas ondas emergentes em comprimentos de onda, radianos e graus? Qual é a diferença de fase efetiva (em comprimentos de onda)?



# Resolver: Diferença de Fase de Duas Ondas Devido a uma Diferença dos Índices de Refração

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

Isso acontece porque os comprimentos de onda são diferentes em meios diferentes.

Podemos calcular a mudança da diferença de fase contando o número de comprimentos de onda em cada meio e calculando a diferença entre os dois números:

$$N_2 - N_1 = \frac{L}{\lambda} (n_2 - n_1) = \frac{2,6 \cdot 10^{-6}}{5,5 \cdot 10^{-7}} (1,6 - 1,0) = 2,84$$

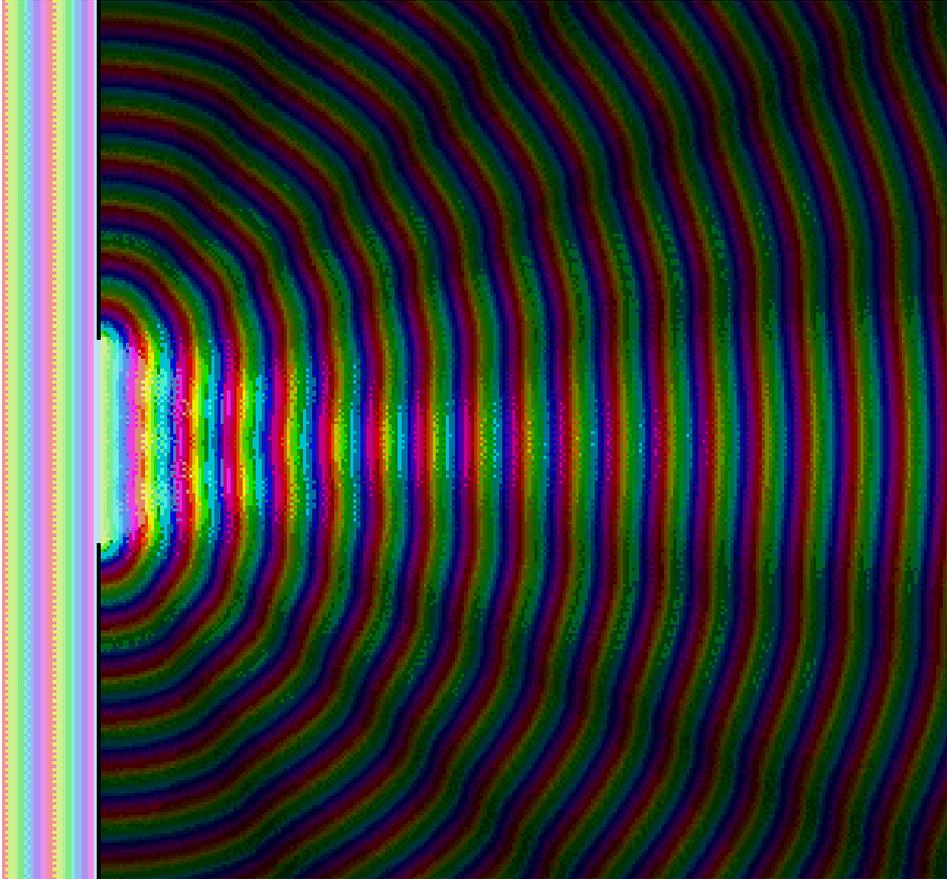
O que isso significa em comprimentos de onda, radianos, graus e diferença de fase efetiva (a que realmente conta)?

$$360^\circ = 2\pi \text{ radianos} = 1 \text{ comprimento de onda}$$

$$\text{Diferença de fase efetiva} = 0,84 \lambda$$

Numa tela distante que tipo de interferência teríamos, o que veríamos?

# Difração: Fatos

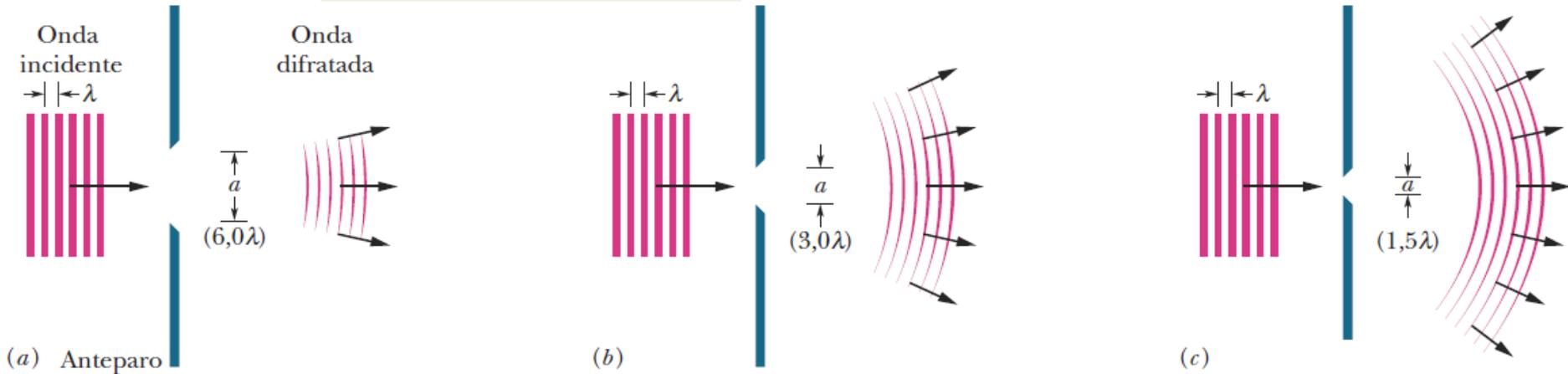


Quando uma onda encontra um obstáculo que possui uma abertura de dimensões comparáveis ao comprimento de onda, a parte da onda que passa pela abertura se alarga (é *difratada*) na região que fica do outro lado do obstáculo.

Esse alargamento ocorre de acordo com o princípio de Huygens. A difração não está limitada apenas às ondas luminosas, mas pode ocorrer com ondas de todos os tipos.

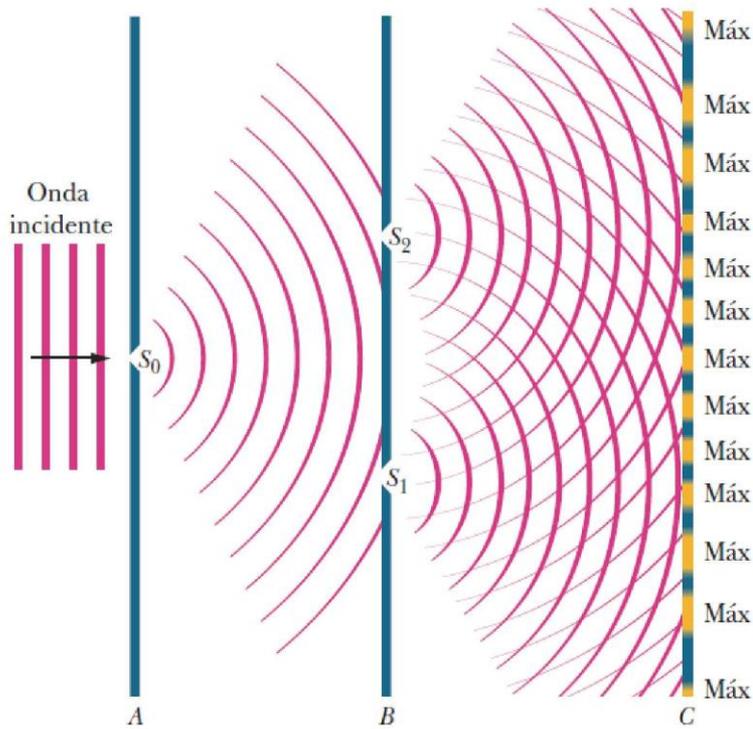
# Difração: Fatos

Um feixe luminoso que passa por uma fenda sofre um alargamento (é difratado).

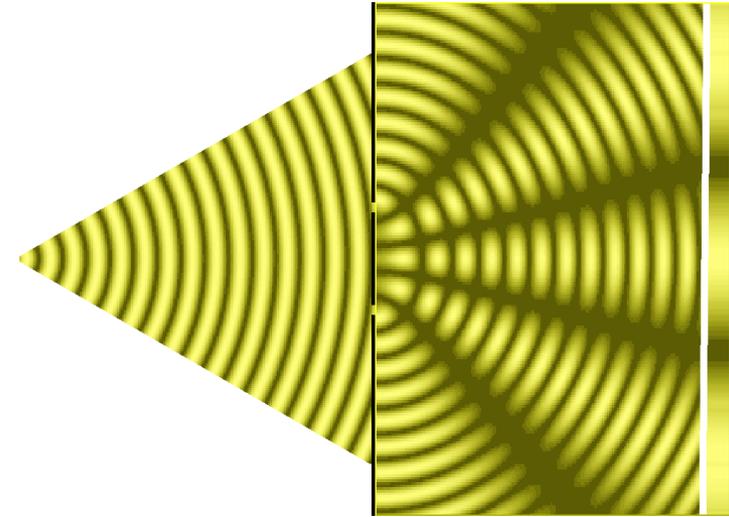


Difração de uma onda. Para um dado comprimento de onda  $\lambda$ , quanto menor a largura  $a$  da fenda, mais pronunciada é a difração. As figuras mostram os casos em que a largura da fenda é (a)  $a = 6,0\lambda$ , (b)  $a = 3,0\lambda$  e (c)  $a = 1,5\lambda$ . Nos três casos, a fenda e o anteparo se estendem perpendicularmente para dentro e para fora do papel.

# O Experimento de Young

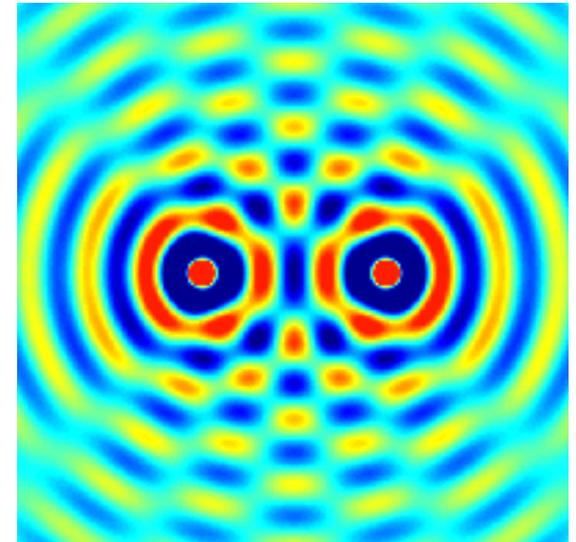


As ondas que passam pelas duas fendas se superpõem e formam uma figura de interferência.



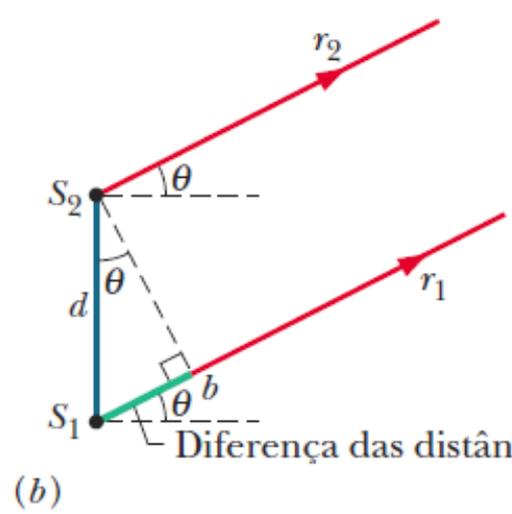
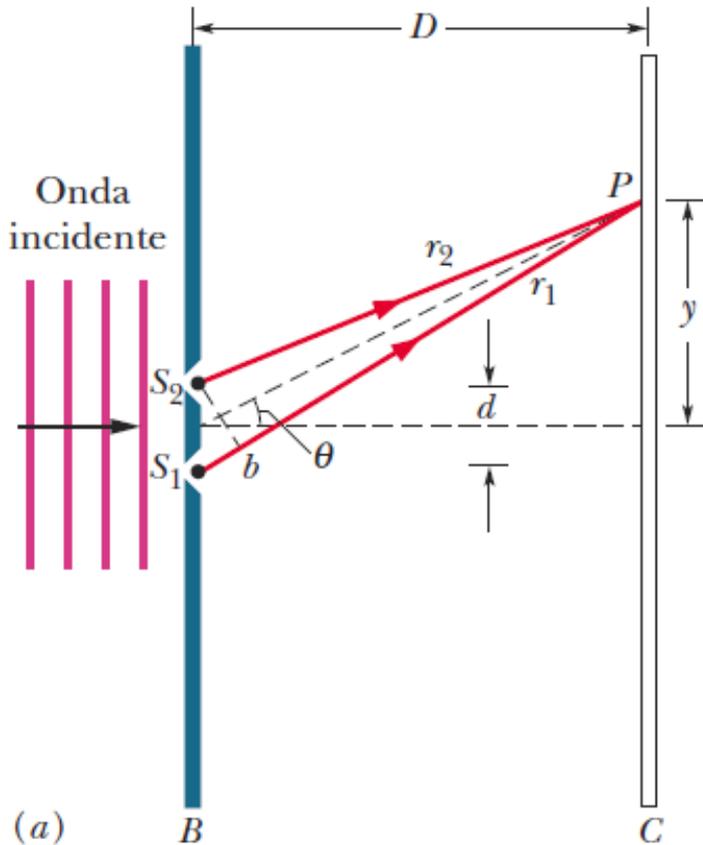
Interferência em 3D

No experimento de interferência de Young, a luz monocromática incidente é difratada pela fenda  $S_0$ , que se comporta como uma fonte luminosa pontual, emitindo frentes de onda semicirculares. Quando a luz chega ao anteparo  $B$ , é difratada pelas fendas  $S_1$  e  $S_2$ , que se comportam como duas fontes luminosas pontuais. As ondas luminosas que deixam as fendas  $S_1$  e  $S_2$  se combinam e sofrem interferência, formando um padrão de interferência, composto de máximos e mínimos, na tela de observação  $C$ . A ilustração é apenas uma seção reta; as telas, as fendas e a figura de interferência se estendem para dentro e para fora do papel. Entre os anteparos  $B$  e  $C$ , as frentes de onda semicirculares com centro em  $S_2$  mostram as ondas que existiriam se apenas a fenda  $S_2$  estivesse descoberta; as frentes de onda semicirculares com centro em  $S_1$  mostram as ondas que existiriam se apenas a fenda  $S_1$  estivesse descoberta.



# O Experimento de Young

Vamos localizar a posição das franjas de interferência



A interferência é causada pela diferença  $\Delta L$  entre  $r_1$  e  $r_2$ .

$$\Delta L = d \sin \theta \quad (\text{diferença de percurso})$$

$$d \sin \theta = m\lambda \quad \text{para } m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{máximos; franjas claras})$$

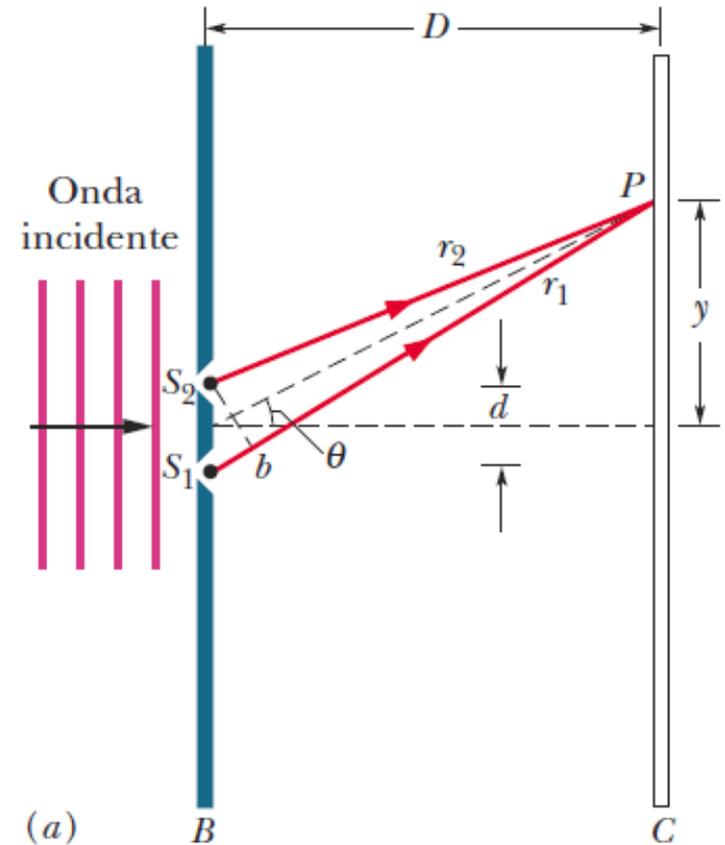
$$d \sin \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad \text{para } m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{mínimos; franjas escuras})$$

# Resolver: Interferência de Dupla Fenda

Qual é a distância, na tela C da figura ao lado, entre dois máximos vizinhos perto do centro da figura de interferência?

O comprimento de onda  $\lambda$  da luz incidente é 546 nm, a distância entre as fendas é de 0,12 nm e a distância  $D$  entre as fendas e a tela é 55 cm.

Suponha que o ângulo  $\theta$  da figura é suficientemente pequeno para que sejam válidas as aproximações  $\sin \theta \sim \tan \theta \sim \theta$ , onde  $\theta$  está expresso em radianos.



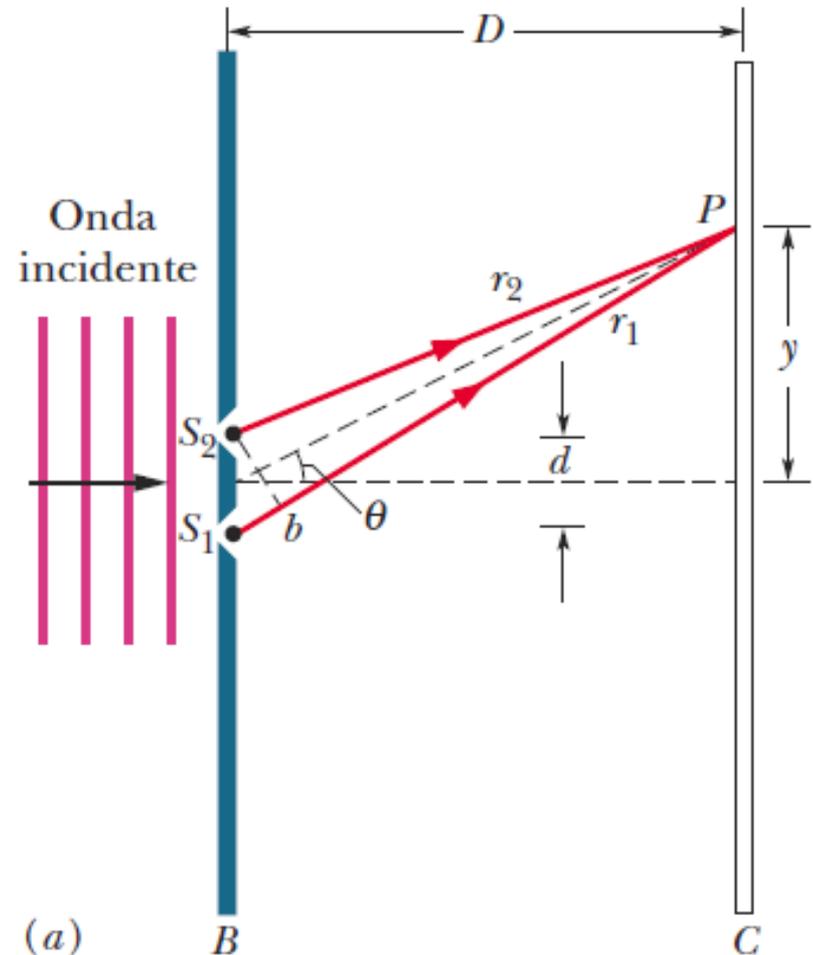
# Resolver: Interferência de Dupla Fenda

Em primeiro lugar, escolhemos um máximo com um valor pequeno de  $m$  para termos certeza de que está nas proximidades do centro. De acordo com a figura a distância vertical  $y_m$  entre um máximo secundário e o centro da figura de interferência está relacionada ao ângulo  $\theta$  correspondente ao mesmo ponto através da equação:

$$\operatorname{tg}\theta \simeq \theta = \frac{y_m}{D}$$

O ângulo  $\theta$ , que corresponde a um máximo de ordem  $m$ , é dado pela equação (como já vimos)

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



# Resolver: Interferência de Dupla Fenda

**Cálculos** Igualando as duas expressões e explicitando  $y_m$ , temos:

$$y_m = \frac{m\lambda D}{d}. \quad (35-17)$$

Fazendo o mesmo para o máximo de ordem  $m + 1$ , obtemos:

$$y_{m+1} = \frac{(m + 1)\lambda D}{d}. \quad (35-18)$$

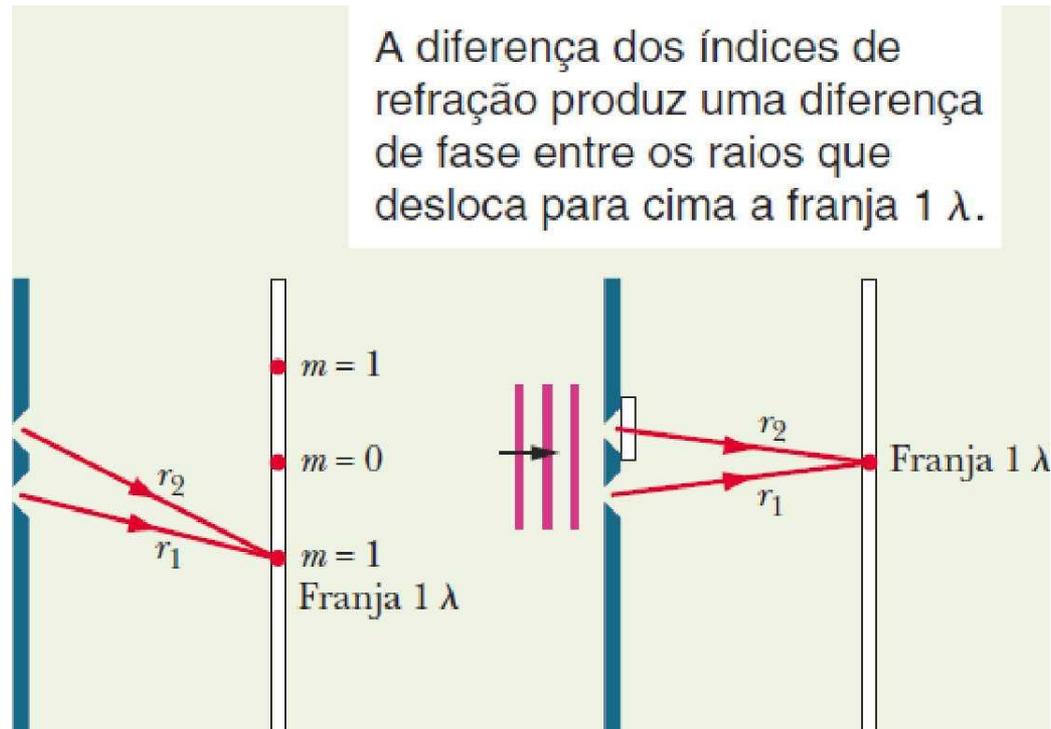
Para obter a distância entre esses máximos vizinhos, basta subtrair a Eq. 35-17 da Eq. 35-18:

$$\begin{aligned} \Delta y &= y_{m+1} - y_m = \frac{\lambda D}{d} \\ &= \frac{(546 \times 10^{-9} \text{ m})(55 \times 10^{-2} \text{ m})}{0,12 \times 10^{-3} \text{ m}} \\ &= 2,50 \times 10^{-3} \text{ m} \approx 2,5 \text{ mm}. \quad (\text{Resposta}) \end{aligned}$$

Este resultado mostra que, para  $d$  e  $\theta$  pequenos, a distância entre as franjas de interferência é independente de  $m$ , ou seja, o espaçamento das franjas é constante.

# Resolver: Interferência de Dupla Fenda

Uma figura de interferência é produzida em um experimento de dupla fenda como o da figura. A luz é monocromática, com um comprimento de onda  $\lambda = 600 \text{ nm}$ . Uma folha de plástico transparente cujo índice de refração é  $n = 1,5$  é colocada em uma das fendas, fazendo com que a figura de interferência se desloque em relação à figura original. A figura mostra as posições originais do máximo central ( $m = 0$ ) e das franjas claras de primeira ordem ( $m = 1$ ) acima e abaixo do máximo central. O objetivo do plástico é deslocar a figura de interferência para cima, fazendo com que a franja clara de primeira ordem fique no centro da tela. O plástico deve ser colocado na fenda superior (como está mostrado arbitrariamente na figura à direita) ou na fenda inferior? Qual deve ser a espessura  $L$  da folha de plástico?



# Resolver: Interferência de Dupla Fenda

## **Comprimento de onda no plástico:**

O comprimento de onda da luz  $\lambda_n$  em um material de índice de refração  $n$  e dado por:

$$\lambda_n = \lambda/n$$

Isso significa que o comprimento de onda da luz é menor no plástico ( $n = 1,4$ ) que no ar ( $n = 1,0$ ).

Assim, a luz que passa pelo plástico apresenta mais oscilações que a luz que passa pelo ar.

## **Espessura:**

Para calcular a espessura  $L$  da folha de plástico, observamos que as ondas, que estão inicialmente em fase, percorrem distâncias iguais,  $L$ , em diferentes materiais (plástico e ar).

Como conhecemos a diferença de fase e estamos interessados em determinar o valor de  $L$ , usamos a equação:

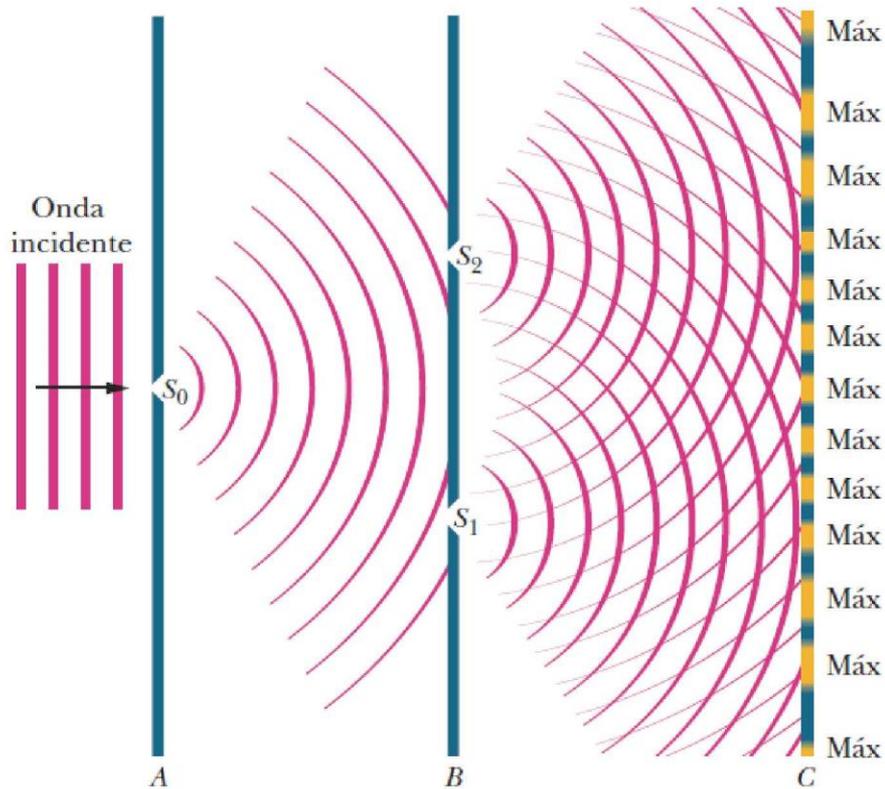
$$N_2 - N_1 = \frac{L}{\lambda} (n_2 - n_1)$$

Como a diferença de fase deve ser de um comprimento de onda, sabemos que  $N_2 - N_1 = 1$

Sabemos também que  $n_2 = 1,5$ ,  $n_1 = 1,0$  e  $\lambda = 600 \times 10^{-9}$  m. Explicitando  $L$  obtemos:

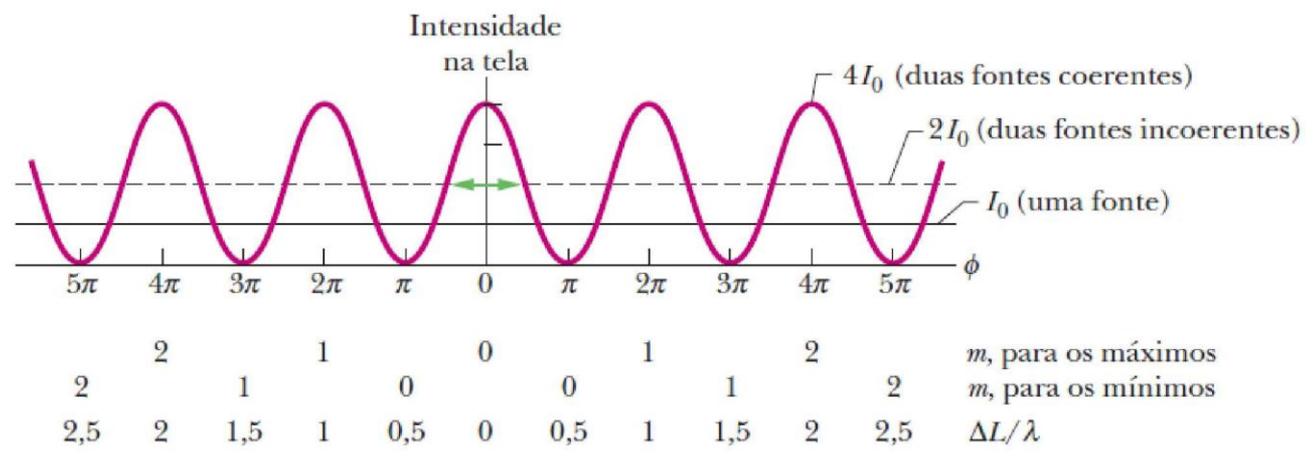
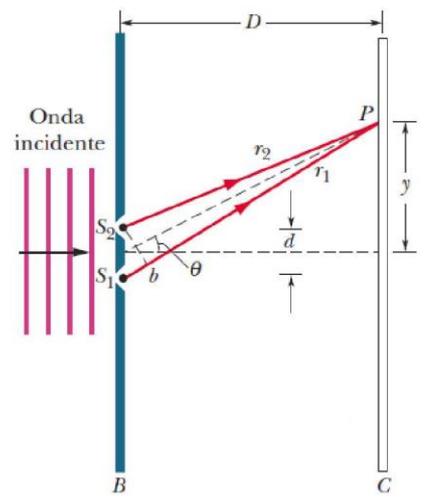
$$L = \lambda \frac{N_1 - N_2}{(n_2 - n_1)_2} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

# O que é Coerência



Para que uma figura de interferência apareça na tela C, é preciso que a diferença de fase entre as ondas que chegam a um ponto qualquer da tela não varie com o tempo. Quando isso acontece, dizemos que os raios luminosos que saem das fendas  $S_1$  e  $S_2$  são **coerentes**. Se a diferença de fase entre dois raios luminosos varia com o tempo, dizemos que os raios luminosos são **incoerentes**.

# Intensidade das Franjas de Interferência



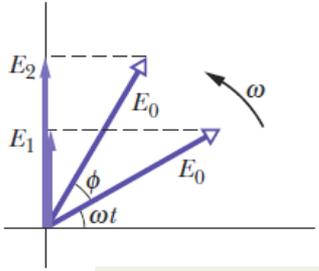
As componentes do campo elétrico das duas ondas que chegam ao ponto  $P$  da tela são dadas por:

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

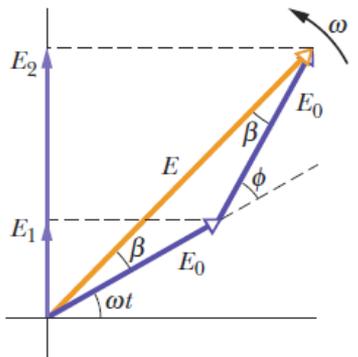
$$E_2 = E_0 \text{sen}(\omega t + \phi)$$

Somando os campos utilizando o método dos fasores teremos:

# Intensidade das Franjas de Interferência



(a) Fasores que representam ondas podem ser somados para obter a onda resultante.



(b)

Evidentemente  $\phi = 2\beta$  e a soma dos campos  $E_1$  e  $E_2$  no ponto P (veja a figura) será:

$$E = 2(E_0 \cos \beta) = 2 \left( E_0 \cos \frac{\phi}{2} \right)$$

Onde o ângulo  $\phi$  é a diferença de fase entre os campos  $E_1$  e  $E_2$ .

A intensidade é:

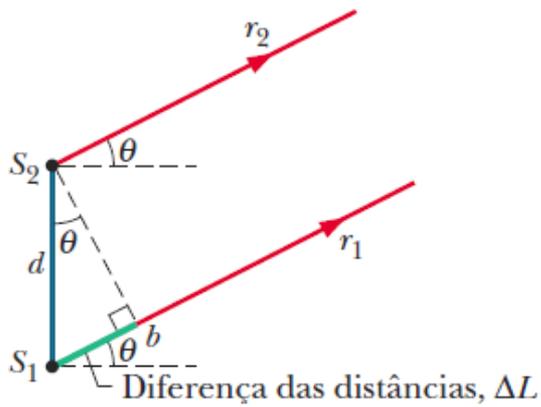
$$I = E^2 = 4I_0^2 \cos^2 \frac{\phi}{2}$$

A diferença de fases  $\phi$  está relacionada à diferença de percurso  $\Delta L$  entre os feixes luminosos que é:

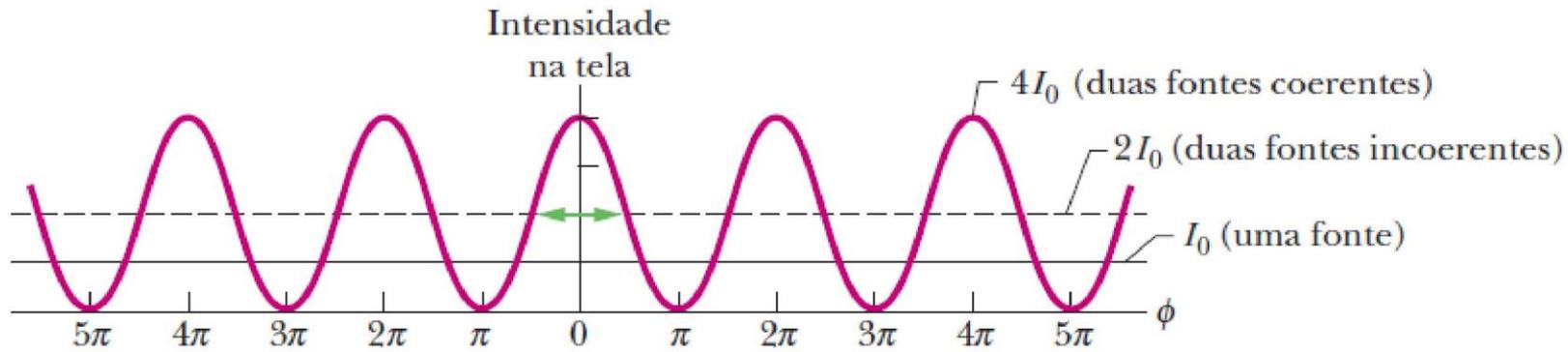
$$\Delta L = d \operatorname{sen} \theta$$

□

$$\text{diferença de fases} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L = \frac{2\pi}{\lambda} d \operatorname{sen} \theta$$



# Intensidade das Franjas de Interferência



	2	1	1	0	0	1	2		<i>m</i> , para os máximos			
	2	1	0	0	1	2			<i>m</i> , para os mínimos			
	2,5	2	1,5	1	0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	$\Delta L/\lambda$

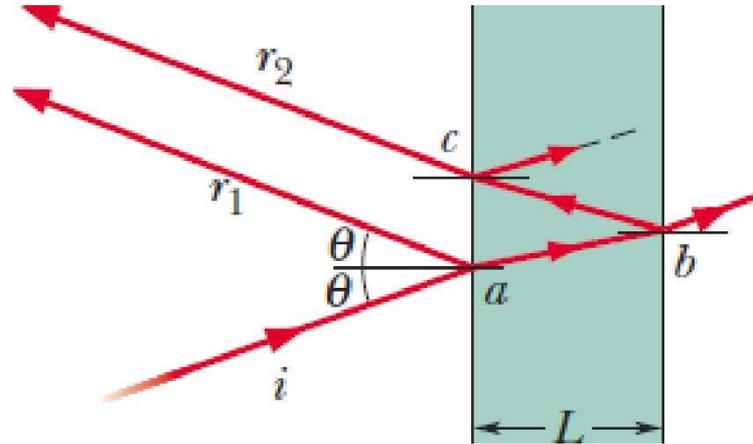
$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \text{sen } \theta$$

Máximos :  $\frac{1}{2}\phi = m\pi$  para  $m = 0, 1, 2, \dots \Rightarrow 2m\pi = \frac{2\pi d}{\lambda} \text{sen } \theta \Rightarrow d \text{sen } \theta = m\lambda$

Mínimos :  $\frac{1}{2}\phi = (m + \frac{1}{2})\pi$  para  $m = 0, 1, 2, \dots \Rightarrow d \text{sen } \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda$

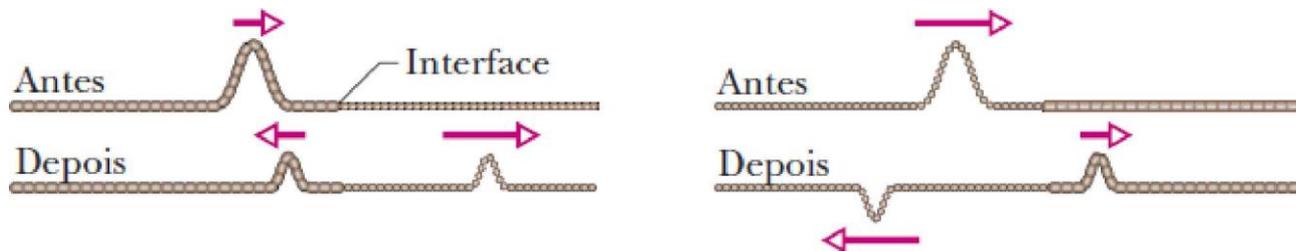
# Interferência em Filmes Finos

Nestes casos, a interferência depende das distâncias percorridas pelos raios refletidos



# Interferência em Filmes Finos

A diferença de fase entre duas ondas pode mudar (no ato da reflexão) dependendo da relação dos índices de refração

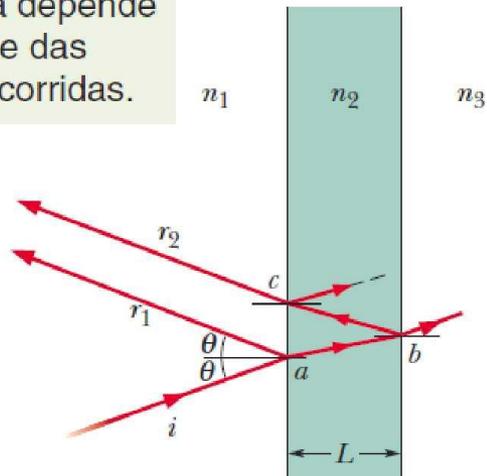


A fase muda quando um pulso é refletido na interface de duas cordas esticadas de densidades lineares diferentes. A velocidade das ondas é menor na corda menos densa. Na figura da esquerda o pulso incidente está na corda mais densa. Na figura da direita o pulso incidente está na corda menos densa. Apenas neste caso a onda incidente e a onda refletida têm fases opostas.

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

# Interferência em Filmes Finos

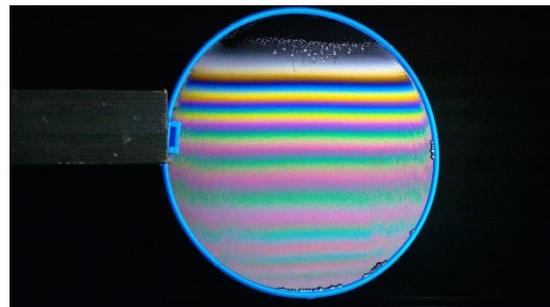
A interferência depende das reflexões e das distâncias percorridas.



Qual deve ser a diferença de percurso para que os raios  $r_1$  e  $r_2$  estejam em fase e sofram interferência totalmente construtiva? (considere, para simplificar, que o raio incidente é perpendicular à superfície do filme e portanto a diferença de percurso entre  $r_1$  e  $r_2$  é  $2L$ )

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

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



Porquê a parte superior das interferências é preta?

O que aconteceria se o filme fosse muito grosso?

# Resolver: Interferência em um Filme Fino de Água no Ar

Um feixe de luz branca, com intensidade constante na faixa de comprimentos de onda da luz visível (400 — 690 nm), incide perpendicularmente em um filme de água com índice de refração  $n_2 = 1,33$  e espessura  $L = 320$  nm, suspenso no ar.

Para que comprimento de onda  $\lambda$  a luz refletida pelo filme se apresenta mais intensa a um observador?

A luz refletida pelo filme é mais intensa para comprimentos de onda  $\lambda$  tais que os raios refletidos estejam em fase.

**Solução:** Neste caso, os raios refletidos estão em fase (e, portanto, a intensidade da luz refletida é máxima) para

$$2L = \frac{\text{número ímpar}}{2} \times \frac{\lambda}{n_2},$$

$$2L = (m + \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{n_2}.$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot 320 \cdot 1,33}{m + \frac{1}{2}}$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot 320 \cdot 1,33}{1 + \frac{1}{2}} = 567 \text{ nm}$$

# Resolver: Interferência no Revestimento de uma Lente de Vidro

Uma das superfícies de uma lente de vidro é revestida com um filme fino de fluoreto de magnésio ( $MgF_2$ ) para reduzir a reflexão da Luz. O índice de refração do  $MgF_2$  é 1,38; o do vidro é 1,50.

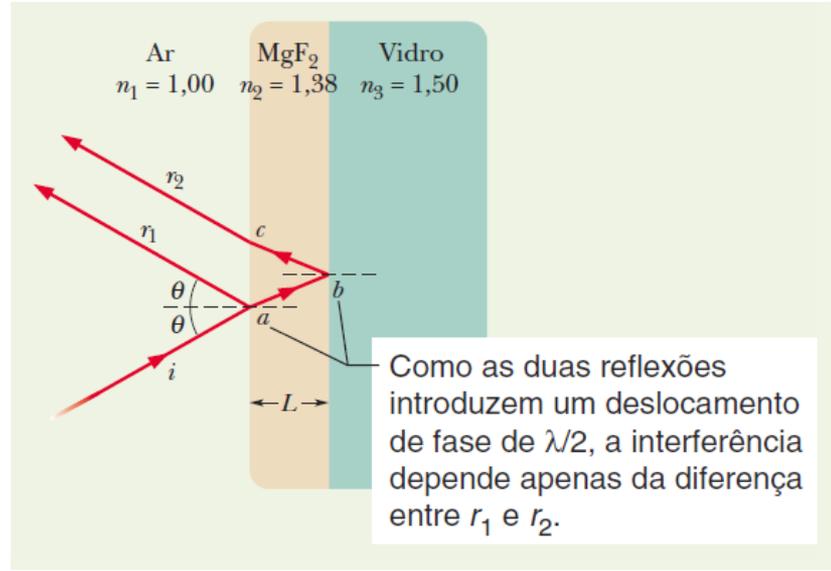
Qual é a menor espessura do revestimento capaz de eliminar (por interferência) os reflexos no centro do espectro da luz visível ( $\lambda = 550 \text{ nm}$ )? Suponha que a luz incide perpendicularmente à superfície da lente.

A reflexão será eliminada se a espessura  $L$  do filme for tal que as ondas luminosas refletidas pelas duas interfaces do filme tenham fases opostas.

**Solução:** Na primeira interface, a luz incidente esta se propagando no ar, que tem um índice de refração menor que o do  $MgF_2$  (material de que é feito o filme). Assim, na reflexão ganhamos 0,5 comprimento de onda no feixe refletido.

Na segunda interface, a luz refratada (agora incidente) esta se propagando no  $MgF_2$ , que tem um índice de refração menor que o do vidro que fica do outro lado da interface. Assim, aqui também ganhamos meio comprimento de onda na reflexão.

Como as duas reflexões produzem uma mudança de fase de meio comprimento de onda, elas tendem a colocar os dois feixes refletidos  $r_1$  e  $r_2$  em fase. Como queremos que as ondas estejam defasadas, a diferença entre as distancias percorridas pelos dois raios deve ser igual a um número impar de comprimentos de onda:



$$2L = \frac{\text{número ímpar}}{2} \times \frac{\lambda}{n_2}$$

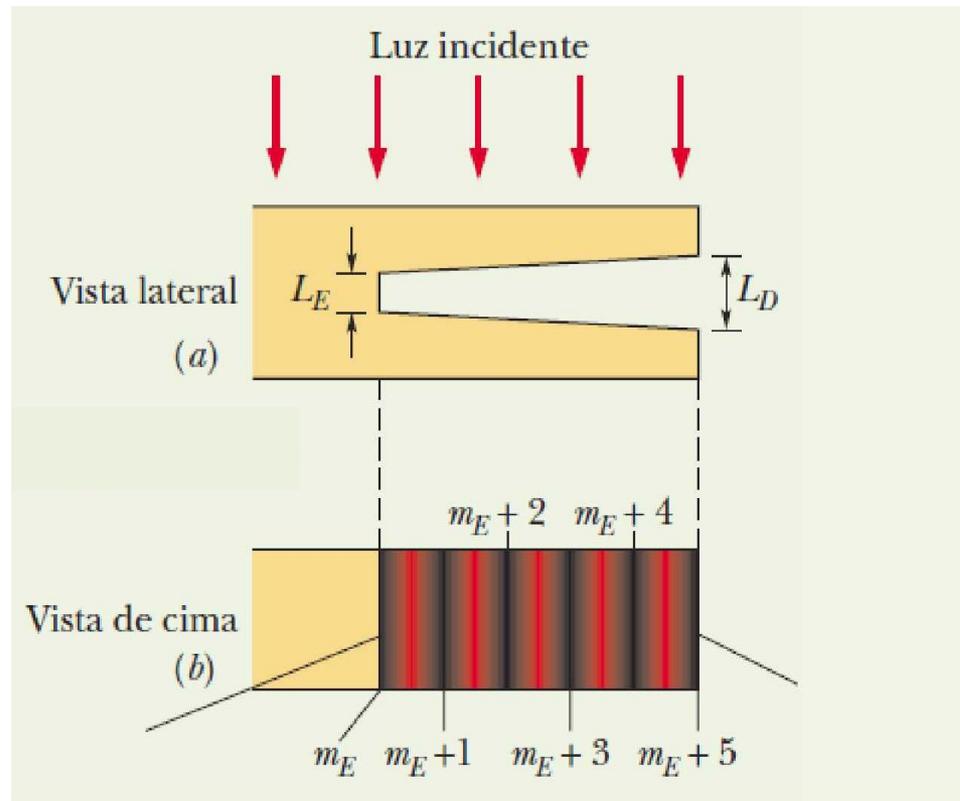
$$L = (m + \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{2n_2}, \text{ para } m = 0, 1, 2, \dots$$

$$L = \frac{\lambda}{4n_2} = \frac{550 \text{ nm}}{(4)(1,38)} = 99,6 \text{ nm.} \quad (\text{Resposta})$$

# Problema: Interferência em uma Cunha de Ar

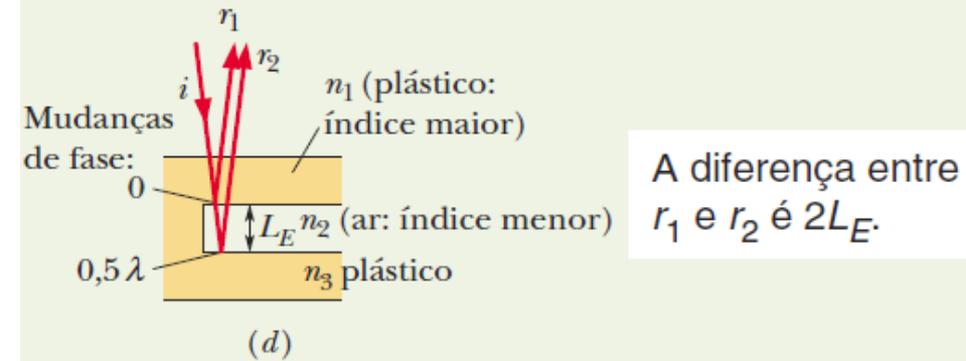
Sobre um bloco de plástico transparente com uma fina cunha de ar do lado direito, incide verticalmente luz vermelha de comprimento de onda  $\lambda=632,8$  nm. A espessura da cunha de ar varia uniformemente desde uma espessura  $L_E$  até uma espessura  $L_D$ .

As camadas de plástico acima e abaixo da cunha são espessas demais para se comportarem como um filme fino. Um observador que olha para o bloco de cima para baixo vê uma figura de interferência formada por seis franjas escuras e cinco franjas vermelhas. Qual é a variação de espessura  $\Delta L = L_D - L_E$  ao longo da cunha?



# Solução:

Na extremidade esquerda da cunha teremos:

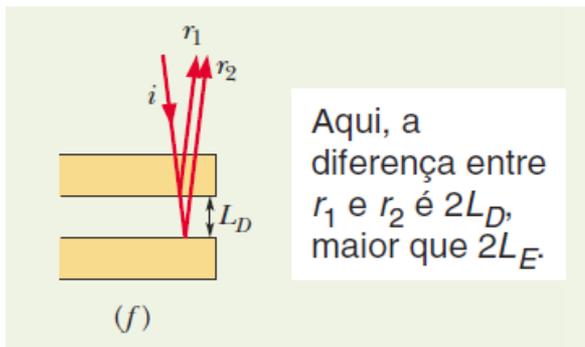


$$2L = \text{número inteiro} \times \frac{\lambda}{n_2},$$

$$2L = m \frac{\lambda}{n_2}, \quad \text{para } m = 0, 1, 2, \dots$$

Na extremidade direita da cunha teremos:

$$L_E = (m_E) \frac{\lambda}{2n_2}, \quad L_D = (m_E + 5) \frac{\lambda}{2n_2}.$$



Para determinar  $\Delta L$ , basta subtrair  $L_E$  de  $L_D$  e substituir  $\lambda$  e  $n_2$  por seus valores (como a cunha é feita de ar,  $n_2 = 1,00$ ):

$$\begin{aligned} \Delta L = L_D - L_E &= \frac{(m_E + 5)\lambda}{2n_2} - \frac{m_E\lambda}{2n_2} = \frac{5}{2} \frac{\lambda}{n_2} \\ &= 1,58 \times 10^{-6} \text{ m.} \end{aligned} \quad \text{(Resposta)}$$

# O Interferômetro de Michelson

Serve para medir distâncias com extrema precisão, deslocando o espelho  $M_2$  e olhando para o deslocamento das franjas de interferência. Mas também serve para medir espessuras.

Se um material de espessura  $L$  e índice de refração  $n$  é colocado *enfrente do espelho 2*, o número de comprimentos de onda percorridos dentro do material é dado por:

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

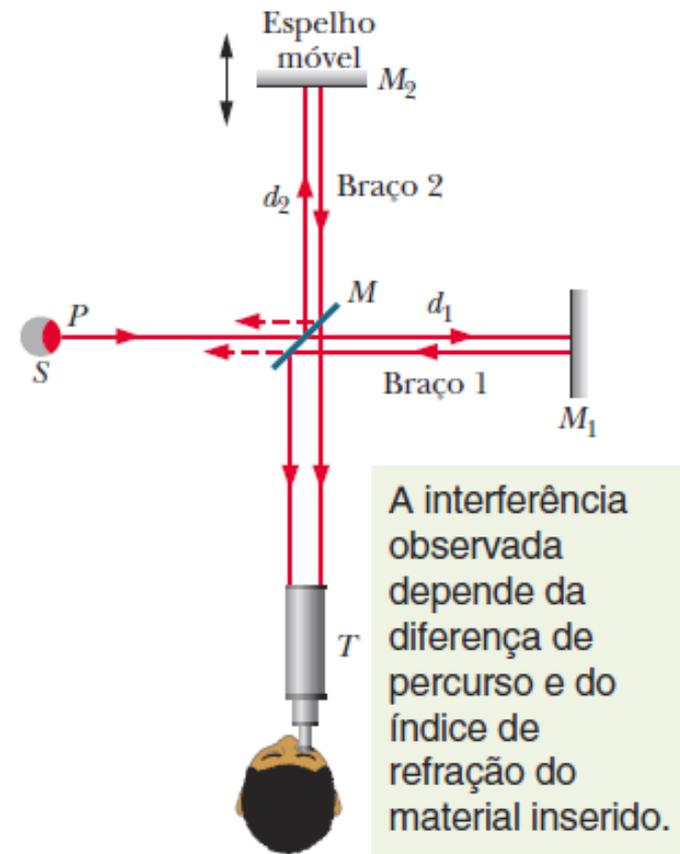
O número de comprimentos de onda na mesma espessura  $2L$  antes que o material fosse introduzido era:

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

Quando o material é introduzido, a luz que volta do espelho  $M_2$  sofre uma variação de fase adicional (em termos de comprimentos de onda) dada por:

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

Para cada variação de fase de um comprimento de onda, a figura de interferência é deslocada uma franja. Assim, observando de quantas franjas foi o deslocamento da figura de interferência quando o material foi introduzido, é possível determinar a espessura  $L$  do material em termos de  $\lambda$ .



Interferômetro de Michelson, mostrando o caminho seguido pela luz que parte de um ponto  $P$  de uma fonte  $S$ . O espelho  $M$  divide a luz em dois raios, que são refletidos pelos espelhos  $M_1$  e  $M_2$  de volta para  $M$  e daí para o telescópio  $T$ . No telescópio, o observador vê uma figura de interferência.

# Borboleta *Morpho*

A cor azul metálica brilhante (fortemente brilhante) da superfície superior da asa da borboleta *Morpho* chama a atenção. Se mudar de posição (ou a asa se mover) a cor muda fortemente...há algo de errado....



De fato a asa da borboleta é de cor castanho, um castanho bem comum (que pode ser visto na superfície inferior da asa). A cor azul é fruto de interferência, e devido a essa interferência óptica muda de tonalidade de acordo com o ponto de vista do observador.

# Questionário

1. Responda todas as perguntas do final do capítulo sobre interferência do Halliday
2. Os objetos tem cor?
3. Explique a necessidade de corrigir a Lei de Coulomb
4. Explique o comportamento do campo elétrico gerado por cargas aceleradas
5. Descreva o Princípio de Huygens e como explica os fenômenos de reflexão e difração
6. Obtenha a equação da difração
7. Explique passo a passo a formação do arco-íris
8. Resolva exercícios de cálculo da diferença de fases devida á diferença de percursos
9. Explique a experiencia de interferência de Young (dupla fenda)
10. Resolva exercícios de dupla fenda (encontrar máximos e mínimos)
11. Entenda o conceito de coerência e sua importância para a interferência
12. Estude a interferência em filmes finos e localize a posição de máximos e mínimos
13. Qual o problema com filmes “grossos” ou “muito finos”?
14. Descreva e explique o funcionamento do interferômetro de Michelson