Física IV para a Escola Politécnica (Engenharia Elétrica)

4320293 – TURMA 3

Professor: Dr. Marcos A. G. Alvarez

Departamento de Física Nuclear (DFN) – IFUSP

Edifício Oscar Sala – (sala 246)

Escaninho 22

malvarez@if.usp.br

LIVRO: Princípios de Física (Óptica e Física Moderna)

Raymond A. Serway / John W. Jewett Jr.

Volume 4

CAPÍTULO 27: ÓTICA ONDULATÓRIA

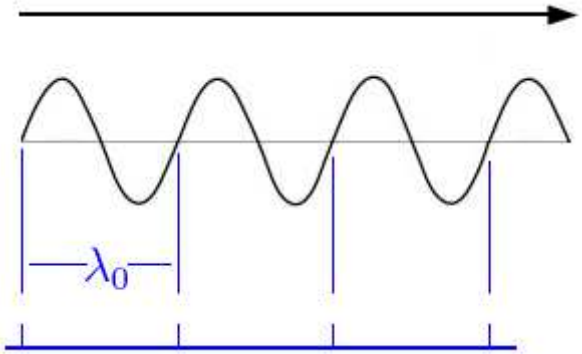
- ❑ FONTES COERENTES (diferença de fase constante)
- ❑ INTERFERÊNCIA DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS
- ❑ FENDA DUPLA (Experiência de Thomas Young)
- ❑ MUDANÇA DE FASE NA REFLEXÃO
- ❑ PELÍCULAS FINAS

LISTA DE EXERCÍCIOS – CAPÍTULO 27

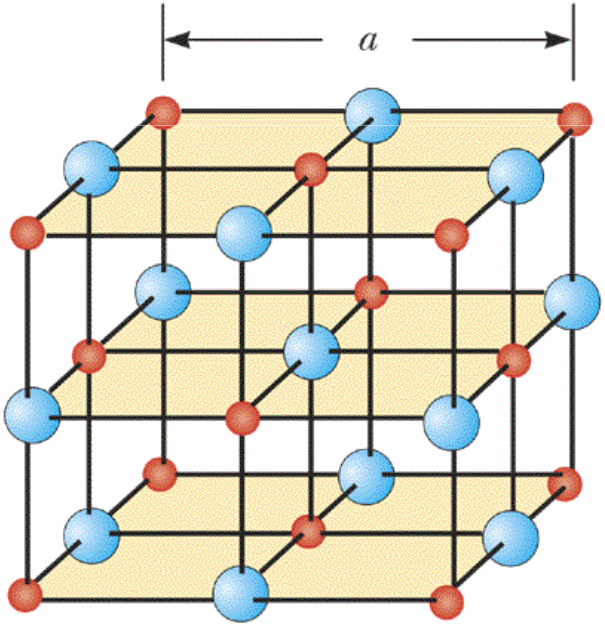
❑ **Exs.: 2, 3, 5, 8, 10, 13, 14, 15, 18, 19, 23, 25, 26, 29, 32, 37, 43, 48, 51**

- ❑ LUZ (λ,f) – ondas eletromagnéticas
- ❑ Aberturas (fendas) – (d,a)
- ❑ Anteparo (tela) – (θ,D)

LUZ

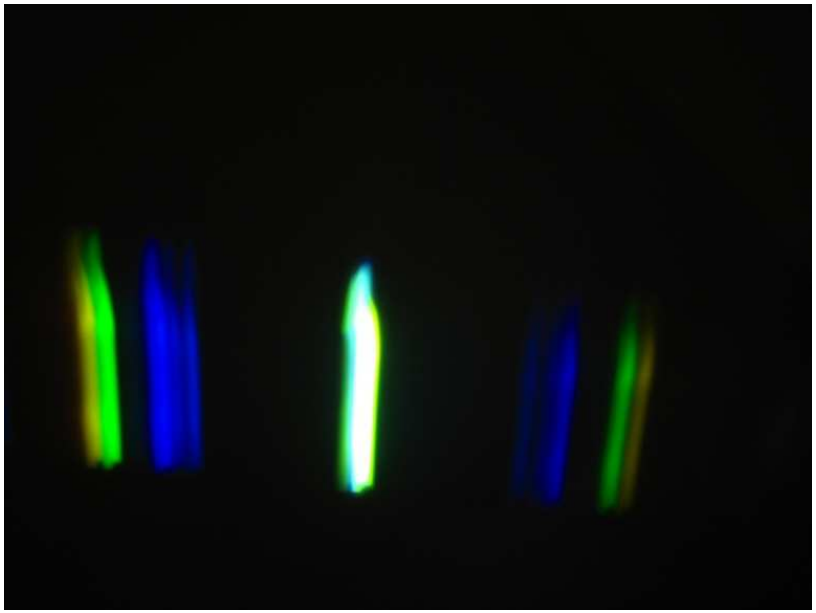


Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.24

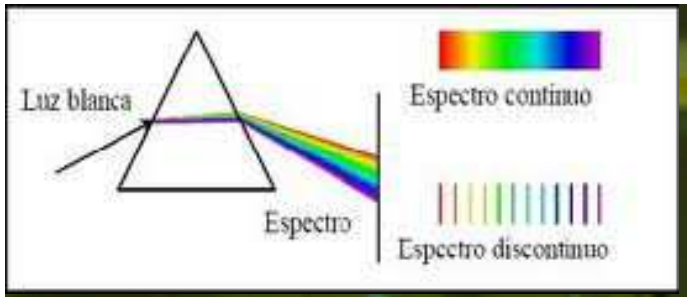


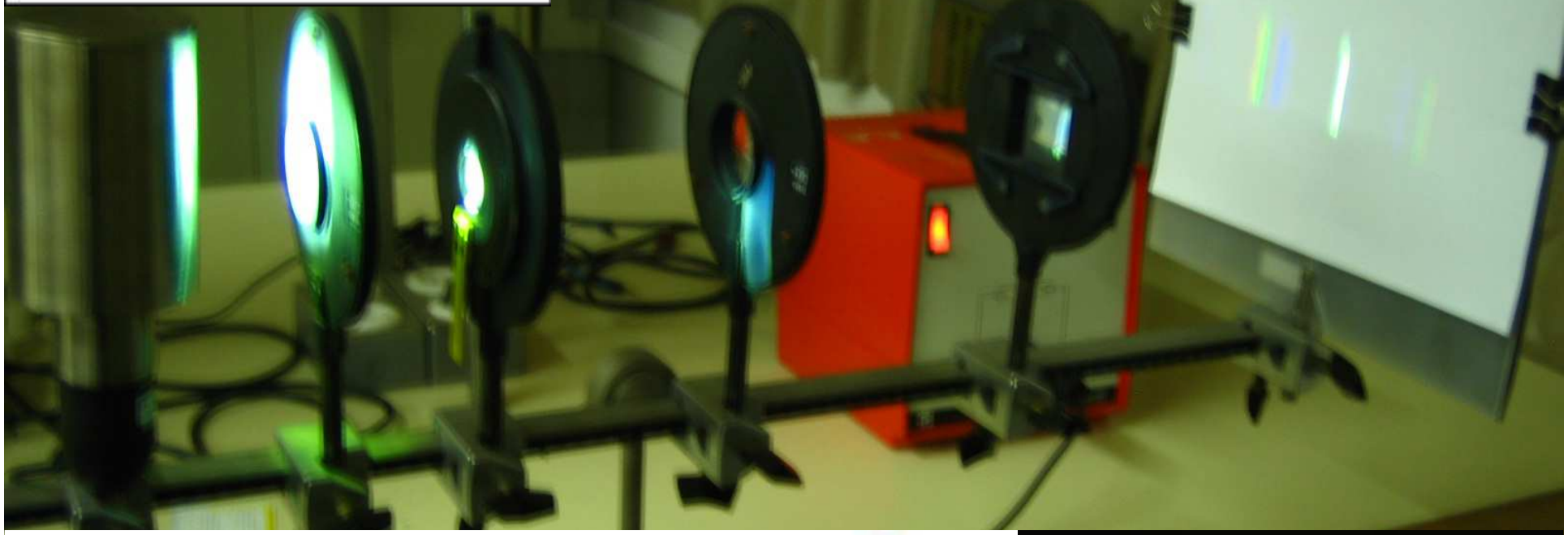
Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

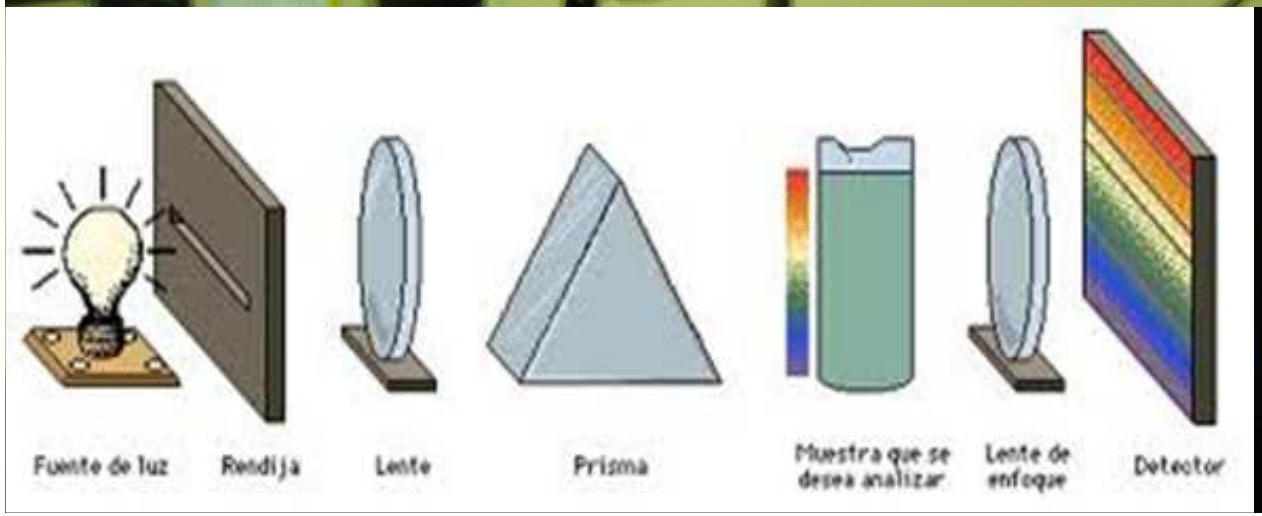
ABERTURAS (FENDAS)

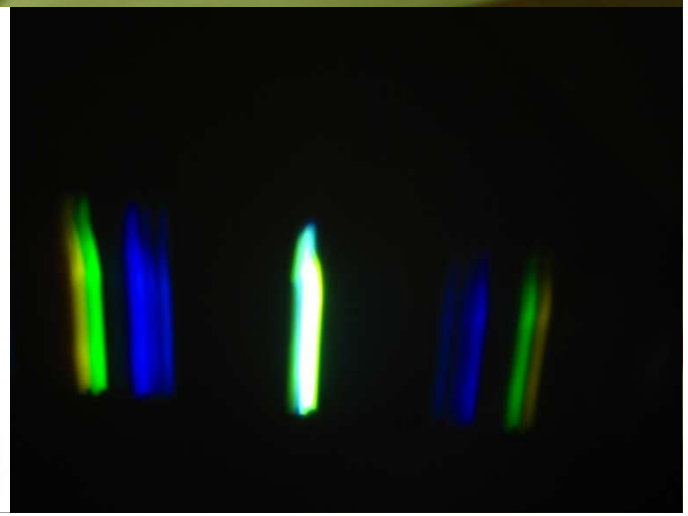


ANTEPARO (TELA) DE PROJEÇÃO


Luz blanca
Espectro
Espectro continuo
Espectro discontinuo




Fuente de luz
Rendija
Lente
Prisma
Muestra que se desea analizar
Lente de enfoque
Detector



FONTES COERENTES

Fontes coerentes são formadas por **ondas com a mesma frequência** e **direção** cuja **fase** entre dois pontos distintos da mesma onda se mantêm **constante**.

Isto é, quando conhecemos **o valor instantâneo do campo elétrico em um primeiro ponto, podemos calcular o valor no segundo ponto.**

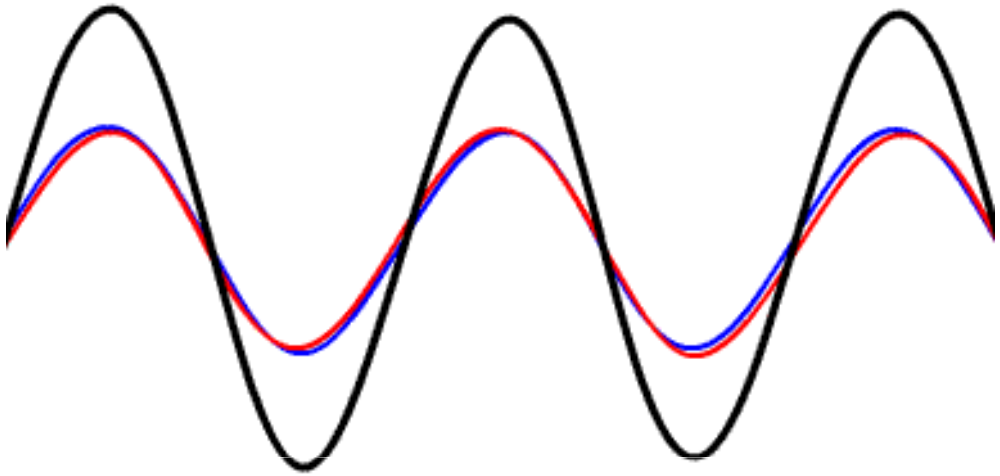
A luz de um **LASER** (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) é:

- **coerente: os raios de luz individuais em um feixe de laser mantêm uma relação de fase fixa entre si, sem nenhuma interferência destrutiva.**

- **monocromática:** tem uma **faixa muito pequena de comprimentos de onda λ**

- **tem um ângulo de divergência pequeno** – o feixe se espalha muito pouco, mesmo a grandes distâncias

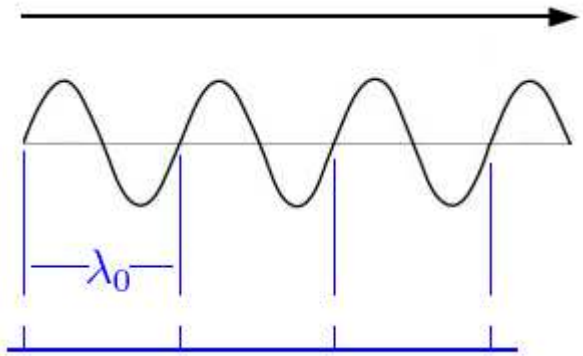
Interferência de **ondas luminosas** é o resultado da **superposição linear** de **duas ou mais ondas em um determinado ponto.**



Um **padrão de interferência** **contínuo no tempo** é observado se:

(1) As fontes têm ***comprimentos de onda idênticos***

(2) As fontes são ***coerentes***

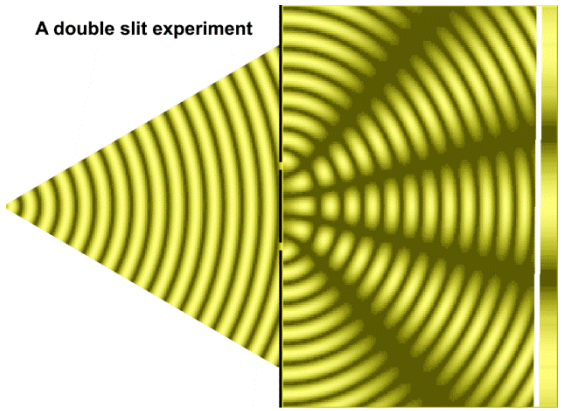


Difração é o **espalhamento da luz** a partir de uma trajetória em linha reta quando a luz passa através de uma **abertura ou ao redor de obstáculos.**

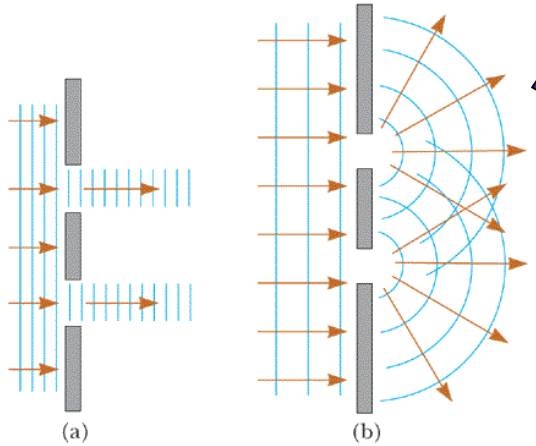
Interferência de **ondas luminosas** é o resultado da **superposição linear** de **duas ou mais ondas em um determinado ponto.**

(a) Se as ondas luminosas não se espalhassem ao atravessar as fendas, nenhuma interferência ocorreria.

(b) Considerando duas fendas onde ocorre **difração**, as ondas luminosas (circulares) se superpõem à medida que se espalham. produzindo **padrões de interferência.**



Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.11

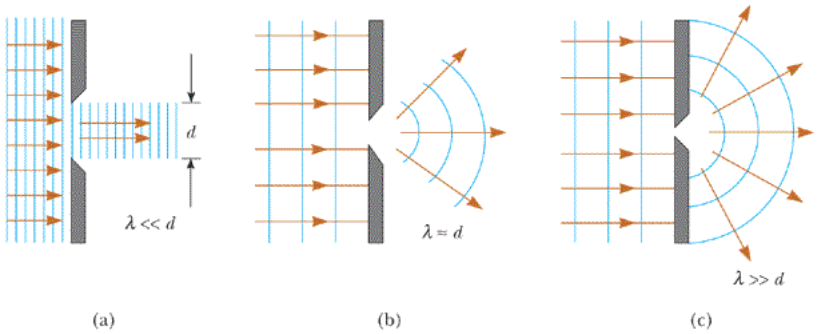


Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

Se uma **onda plana** encontrar uma barreira que contém uma abertura (fenda), podem ocorrer distintos **fenômenos**, dependendo do diâmetro da abertura (d) e do comprimento da onda λ. Estes fenômenos podem ser tratos por **ótica geométrica** e/ou **ótica ondulatória**

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 25.2

Ótica geométrica



Ótica ondulatória

onda plana convertida em uma onda circular

Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

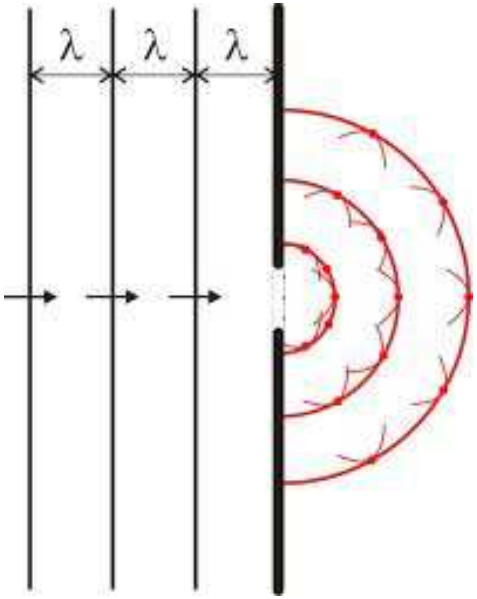
Se d>> λ as ondas continuam a deslocar-se em uma linha reta (exceto por alguns pequenos efeitos de borda). Portanto a **aproximação retilínea** é válida.

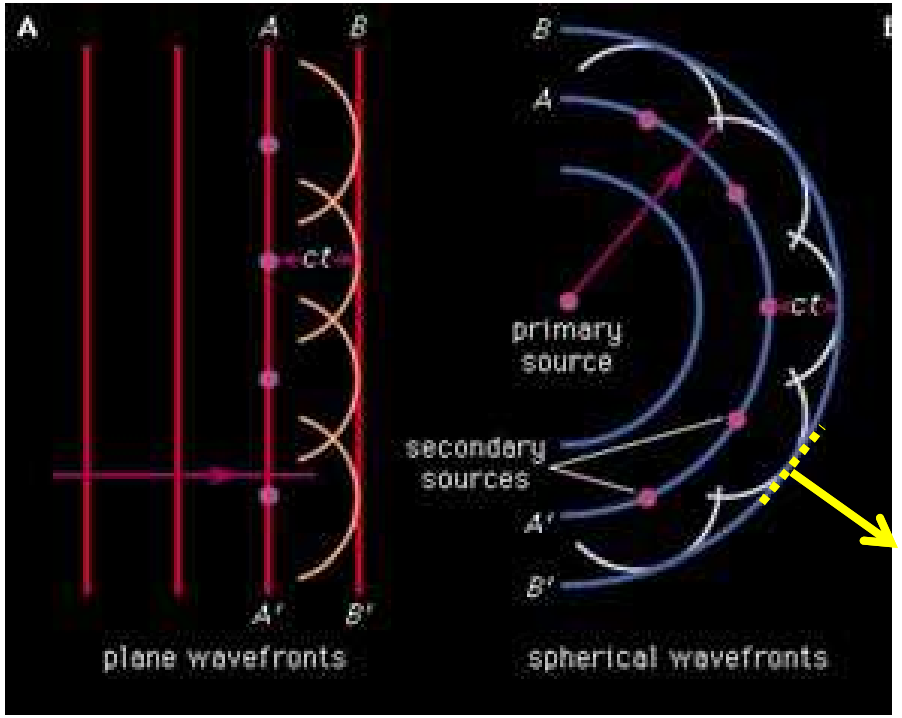
Se d~ λ as ondas (e os raios traçados) **espalham-se para fora da abertura** em todas as direções. Dizemos que a onda plana sofre uma **difração** ao atravessar a abertura.

Se d<< λ a **difração** é tão intensa que a abertura pode ser tratada como uma **fonte puntiforme de ondas (efeito parecido ao obtido atirando uma pedra na água)**

Portanto, quando uma **onda plana** atravessar uma **abertura** produzindo **ondas circulares** estamos diante de um processo de **difração**.

Pelo **Princípio de Huygens**…





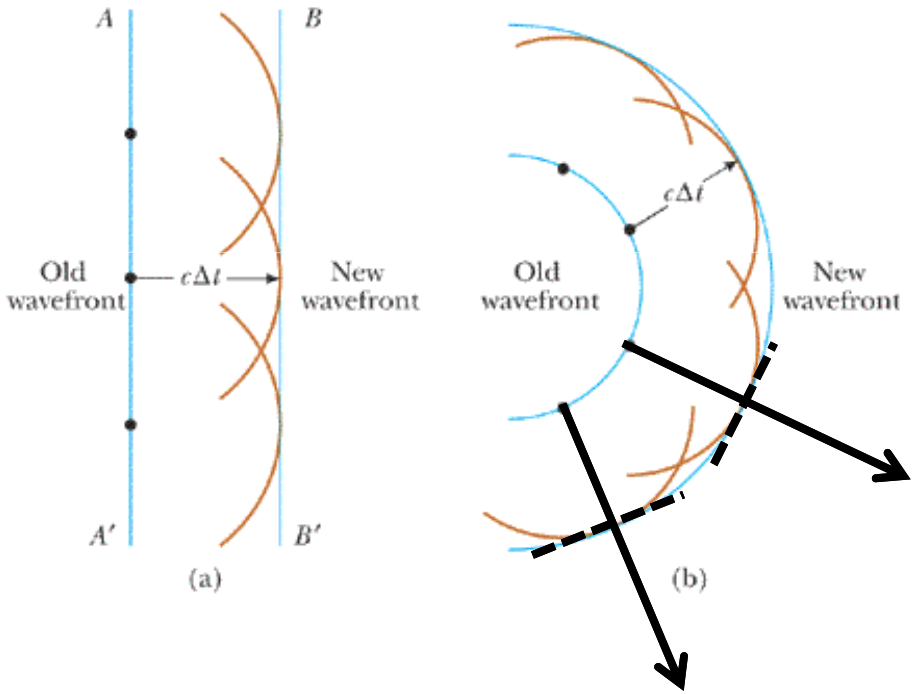
todos os pontos de uma frente de onda se comportam como **fontes pontuais** para a produção de **ondas secundárias**.

Após um certo intervalo de tempo "t" a **nova posição da frente de onda** é dada por uma **superfície tangente a essas ondas secundárias**

Resumindo, na difração:

Ondas planas incidentes (produzidas anteriormente às fendas) emergem à saída das fentas como **ondas circulares bidimensionais** que se propagam para fora.

cada ponto na frente de onda atua como uma fonte puntual de onda circular.

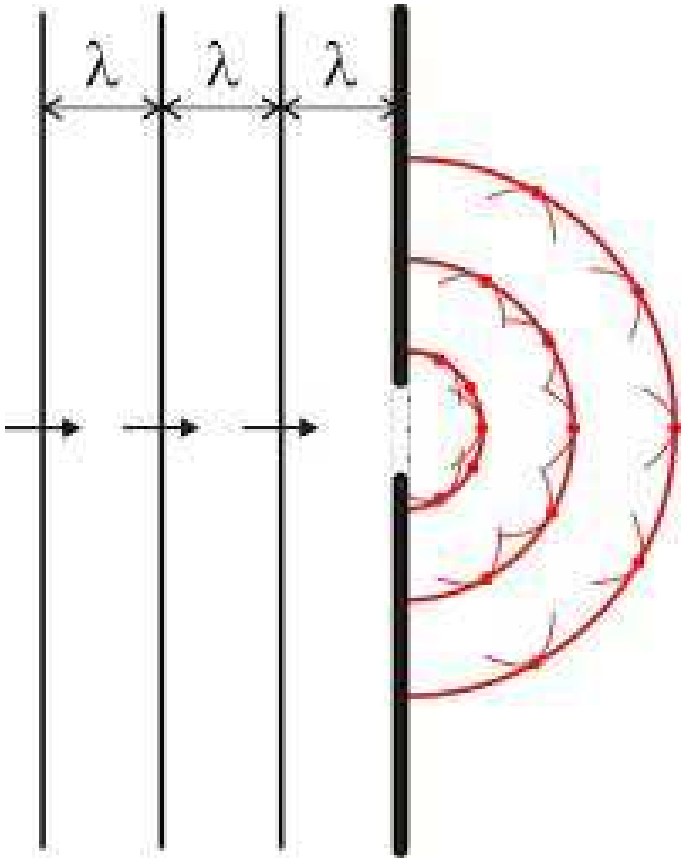


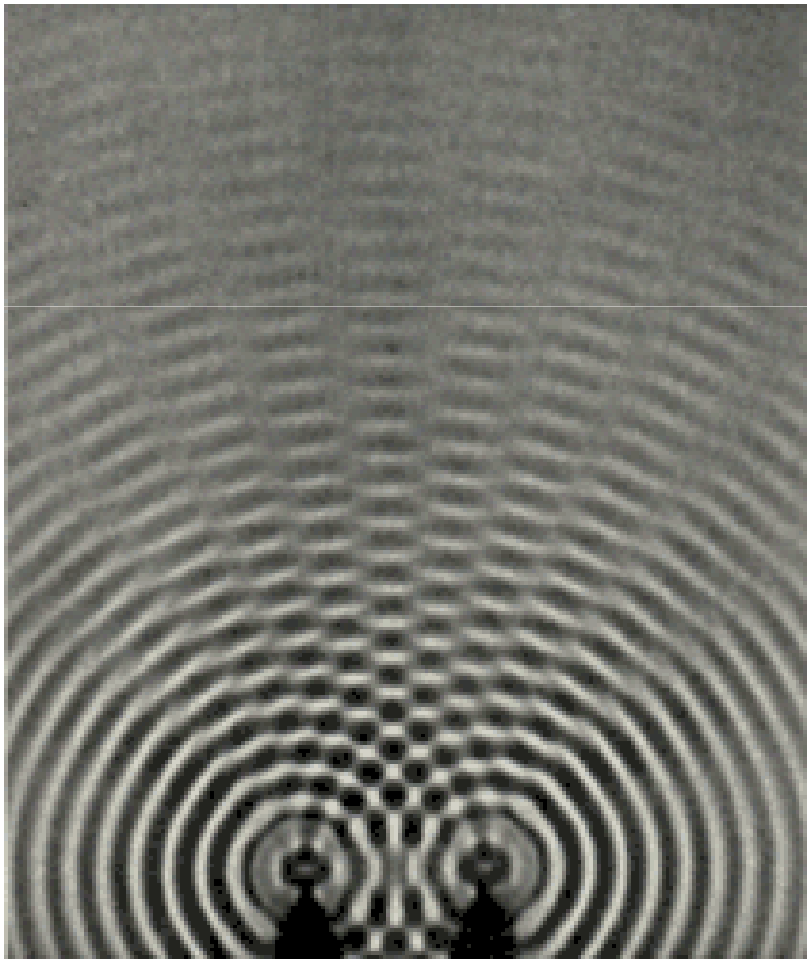
Em um momento posterior, a **tangente em relação às frentes de onda circulares** se **propaga em linha reta perpendicular à dita tangente** (frente de onda).

Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

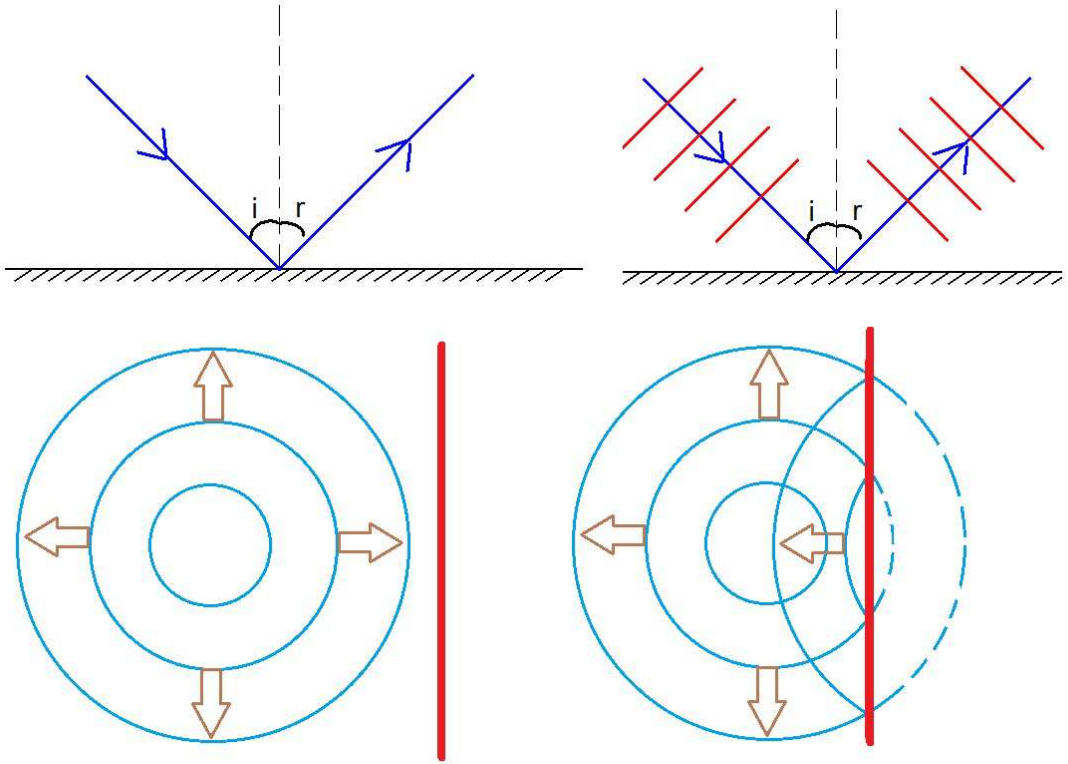
Uma demonstração das **pequenas ondas de Huygens** se da através de **ondas de água em um tanque de ondas**.

Uma **onda plana** incide sobre uma barreira com **duas aberturas pequenas**;
As aberturas atuam como fontes de pequenas ondas circulares

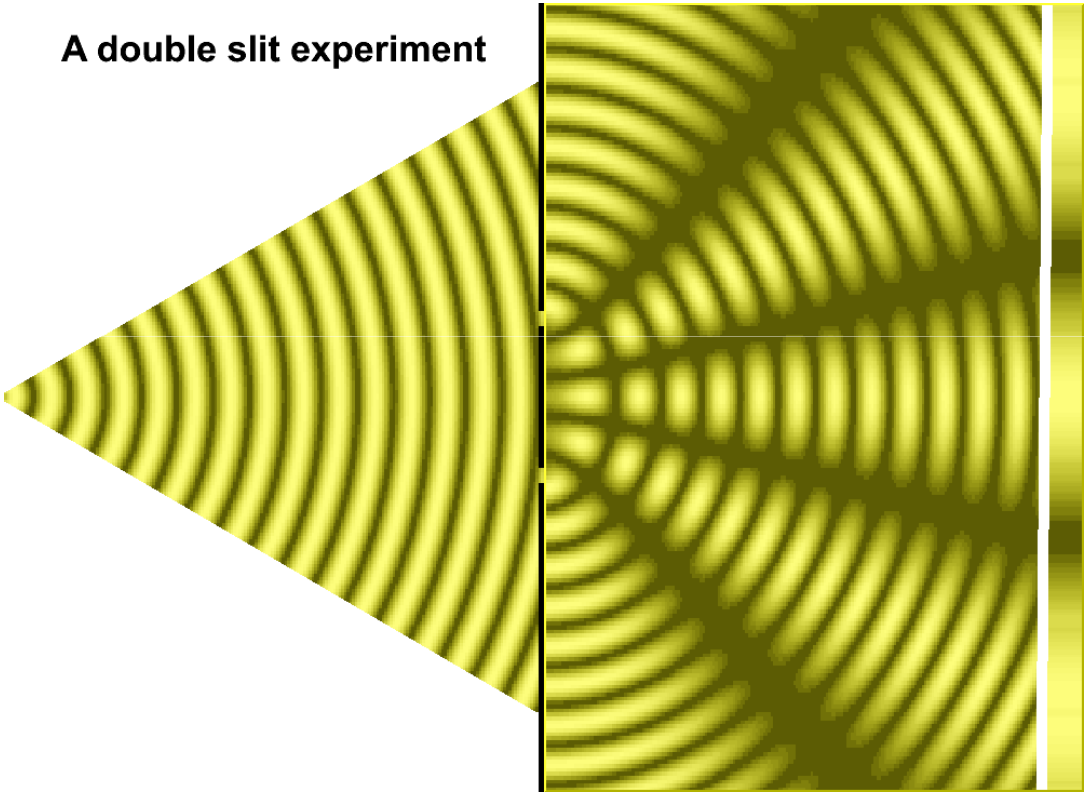


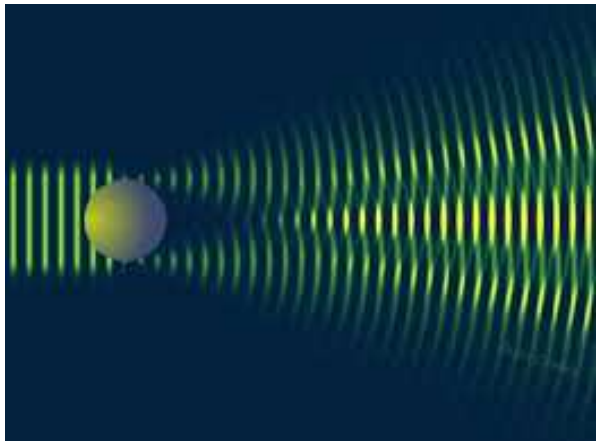


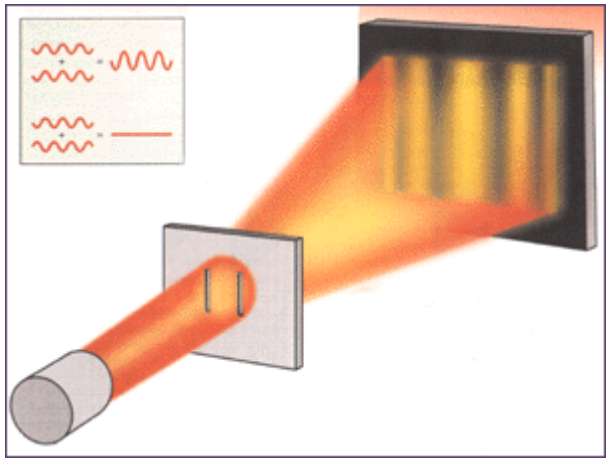
Quando as **frentes de onda encontram barreiras** **ondas de todos os pontos na frente de ondas** são **refletidas**, **exceto as que encontram aberturas**.



Ao incidir luz colimada contra uma **rede de difração**, (mais de uma abertura) as frentes de onda, atravessam a rede pelas partes transparentes (fendas) e se propagam como ondas secundárias segundo o **princípio de Huygens** **(cada abertura atua como uma fonte pontual)**.





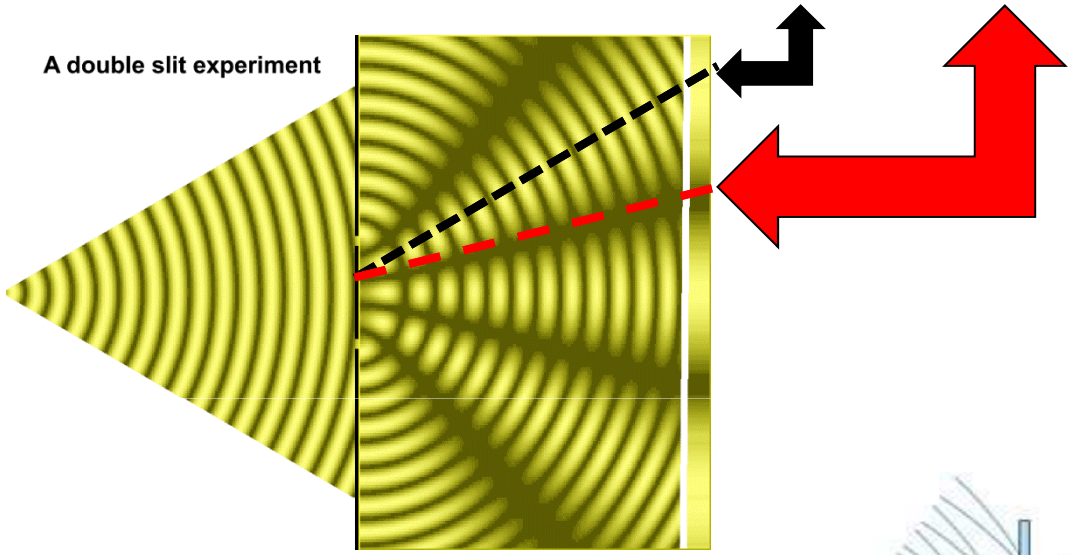


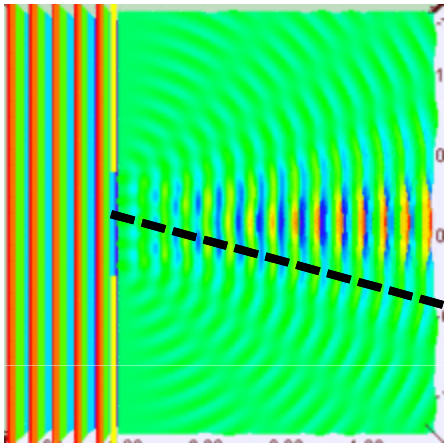
A LUZ interaciona **produzindo fenômenos de interferência** demonstrados em 1801 por Thomas Young…

Em 1801 **Thomas Young** provou que a luz era uma onda.

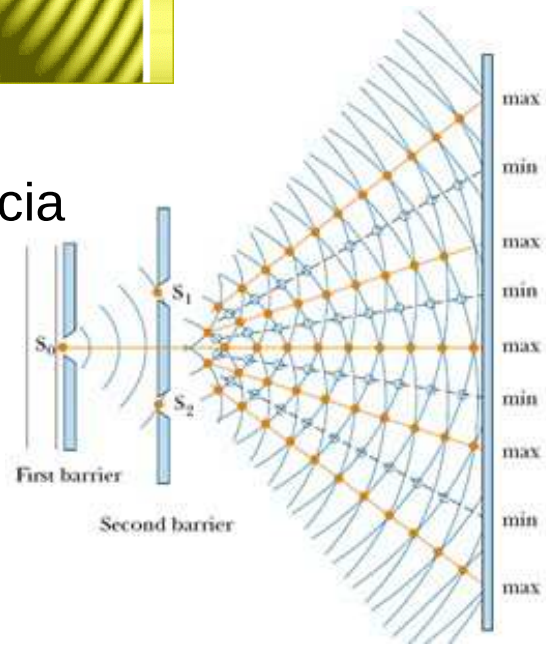
- **A luz difratada na fenda S1 interfere com a luz difratada na fenda S2**
- A imagem formada apresenta **regiões claras e escuras (franjas)**

(produto de interferências construtivas e destrutivas devido à fase das ondas).





Projetando a interferência em um anteparo:



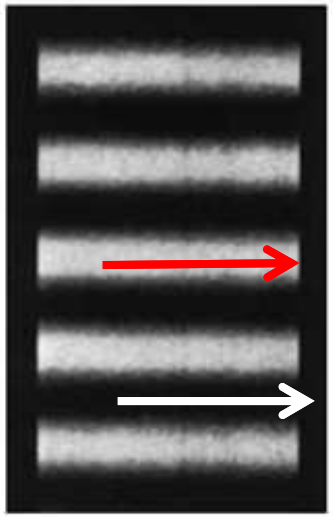


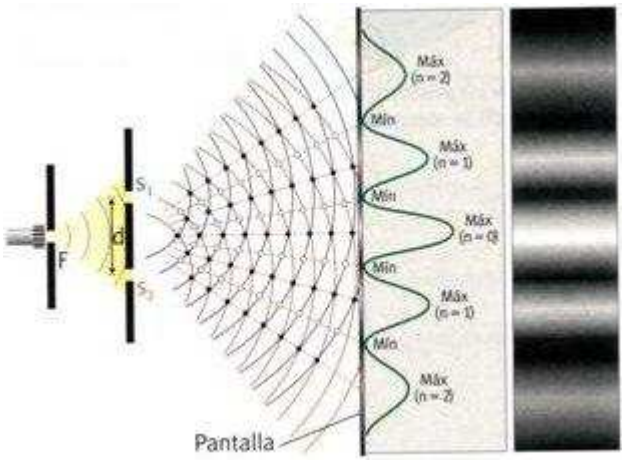
Diagrama da experiência de dupla fenda de Young.

As fendas S1 e S2 comportam-se como **fontes de ondas luminosas coerentes** (com o mesmo comprimento de onda) que produzem um **padrão de interferência** no anteparo de observação.

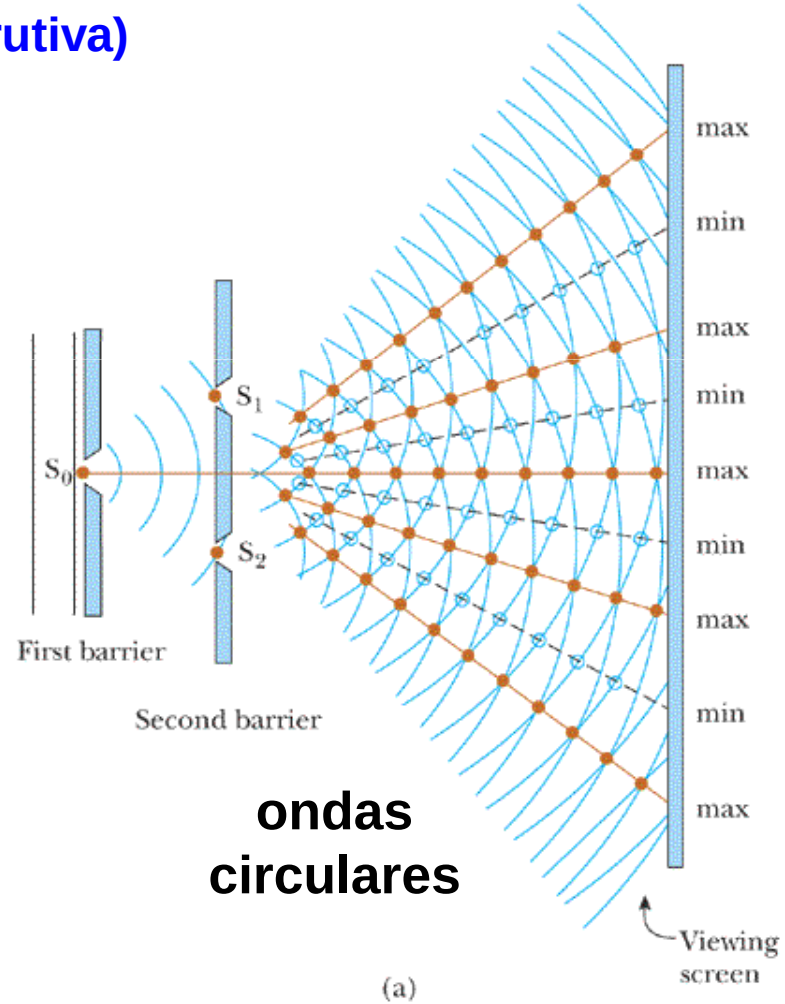
Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.1a

Padrão de interferência (construtiva ou destrutiva)

- ❑ **interferência construtiva – franja brilhante**
- ❑ **interferência destrutiva – franja escura**



onda plana

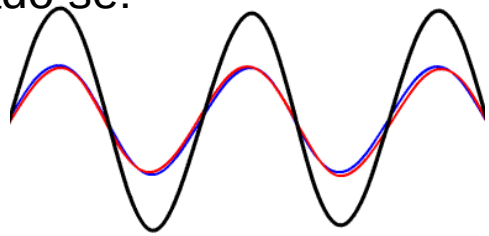


ondas circulares

Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

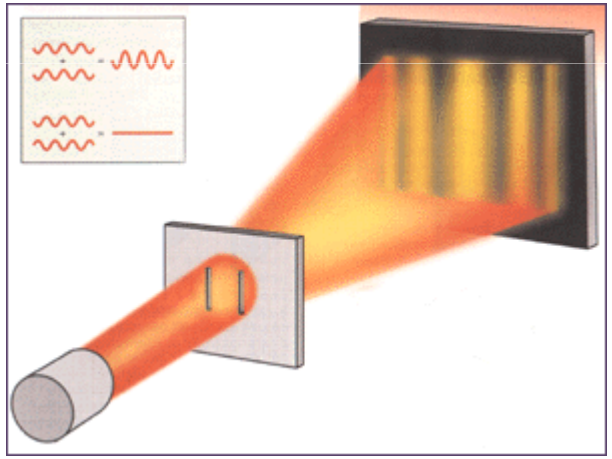
A **interferência de ondas luminosas** é o resultado da **superposição linear de duas ou mais ondas em um determinado ponto.**

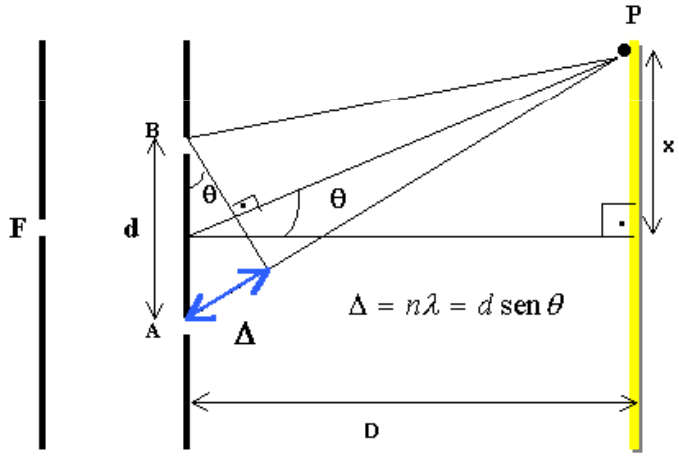
Um **padrão de interferência contínuo no tempo** é observado se:



(1) As **fontes** têm **comprimentos de onda idênticos** e
(2) As **fontes** são **coerentes**

Na **experiência de dupla fenda de Young**, **duas fendas separadas por uma distância "d"** são iluminadas por uma **fonte de luz monocromática - coerente.**



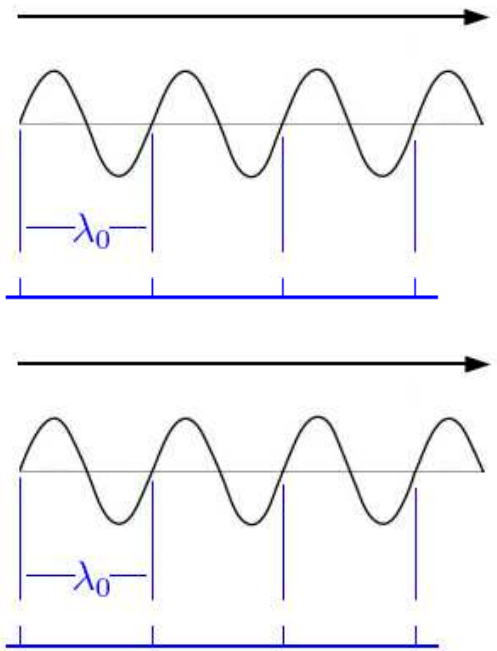


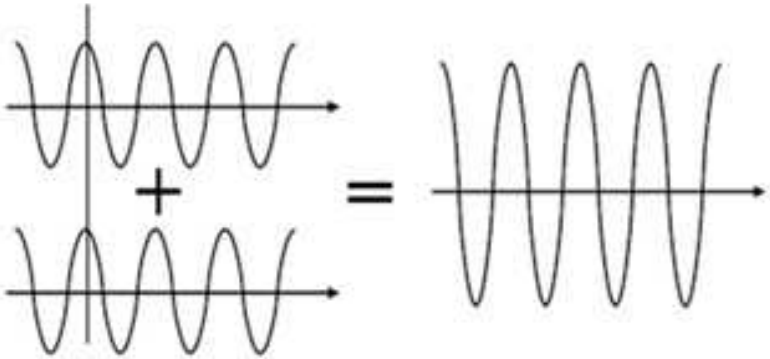
É observado um padrão de interferência, consistindo em **franjas brilhantes e escuras** sobre uma tela que está a uma **distância D>>d** das fendas.

Interferência entre ondas está conectada à (diferença de) fase entre as ondas.

A diferença de fase entre duas ondas pode mudar

Interferência construtiva

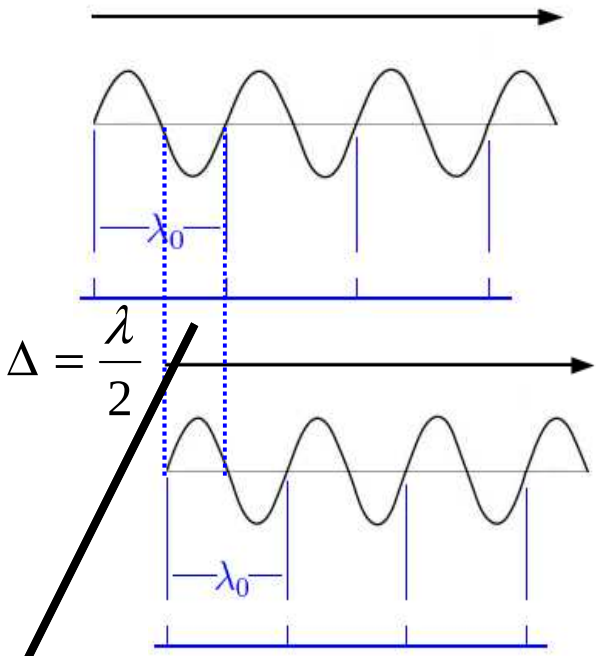




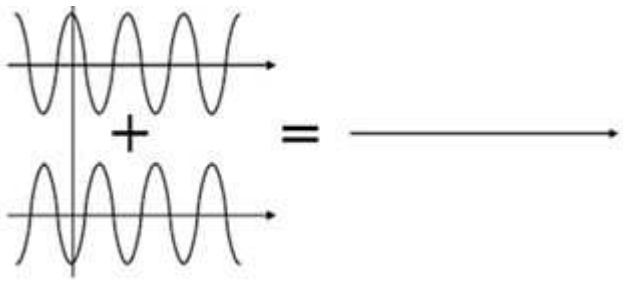
duas ondas completamente em fase
cristas coincidem com cristas e
vales coincidem com vales

Interferência entre ondas está conectada à (diferença de) fase entre as ondas.

A diferença de fase entre duas ondas pode mudar



Interferência destrutiva



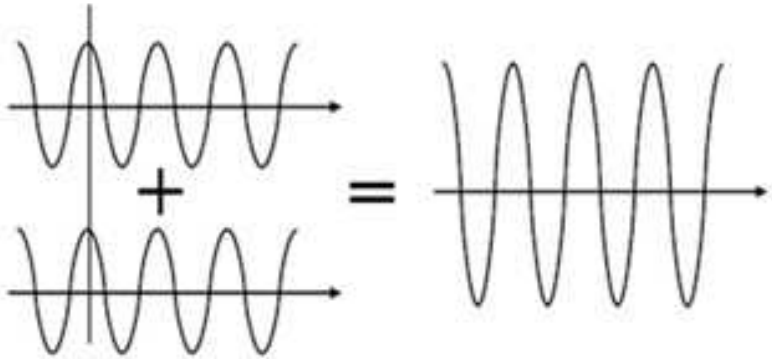
$$\Delta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2 \ldots)$$

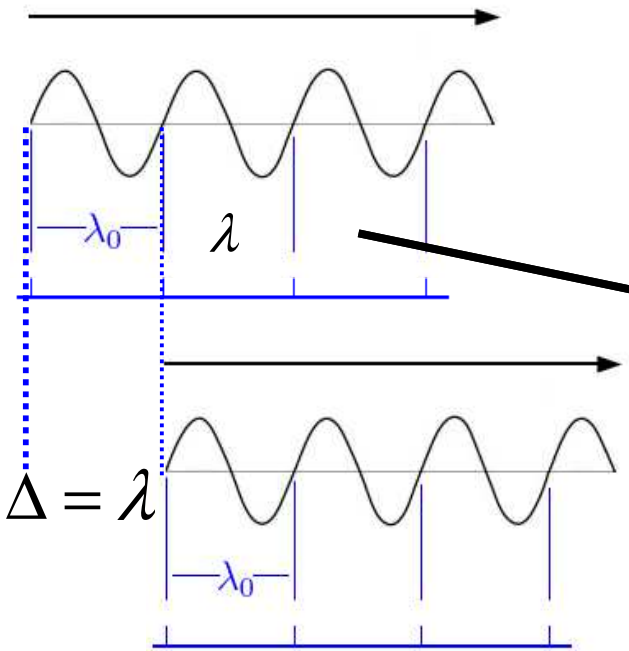
~ metade de um comprimento de onda inteiro

Interferência entre ondas está conectada à (diferença de) fase entre as ondas.

A diferença de fase entre duas ondas pode mudar

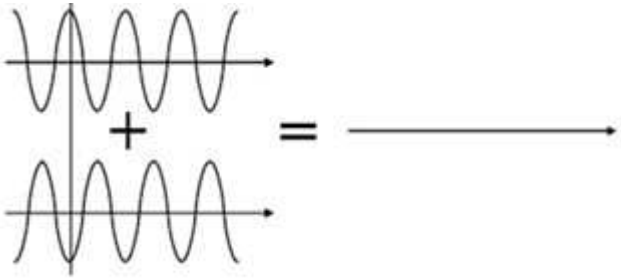
Interferência construtiva





$$\Delta = n\lambda \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2 \ldots)$$

Interferência destrutiva

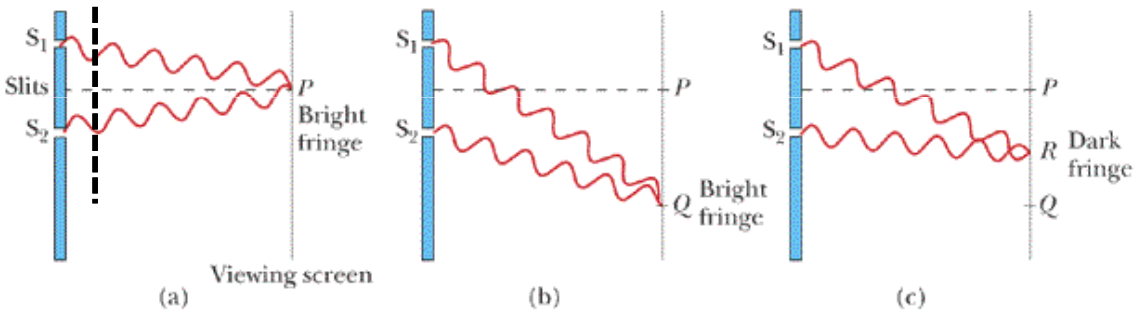


$$\Delta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2 \ldots)$$

FENDAS DUPLAS

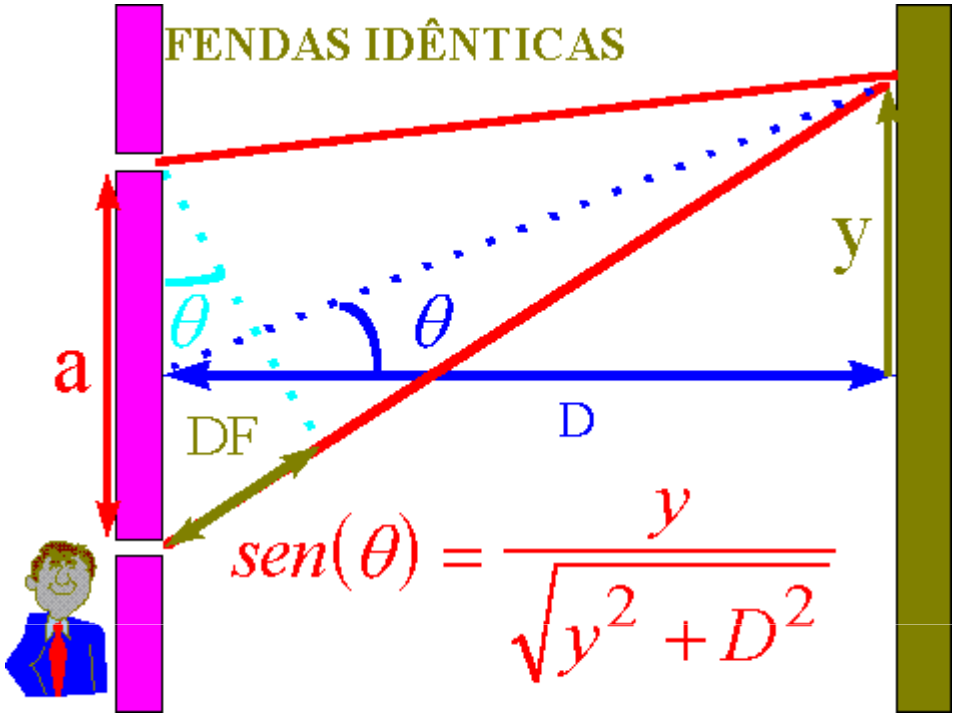
(a) A **interferência construtiva** ocorre no ponto P quando as ondas se combinam.
(b) A **interferência construtiva** também ocorre no ponto Q do anteparo onde as ondas se combinam em uma **ordem de interferência** superior com diferença múltipla de um comprimento de onda.

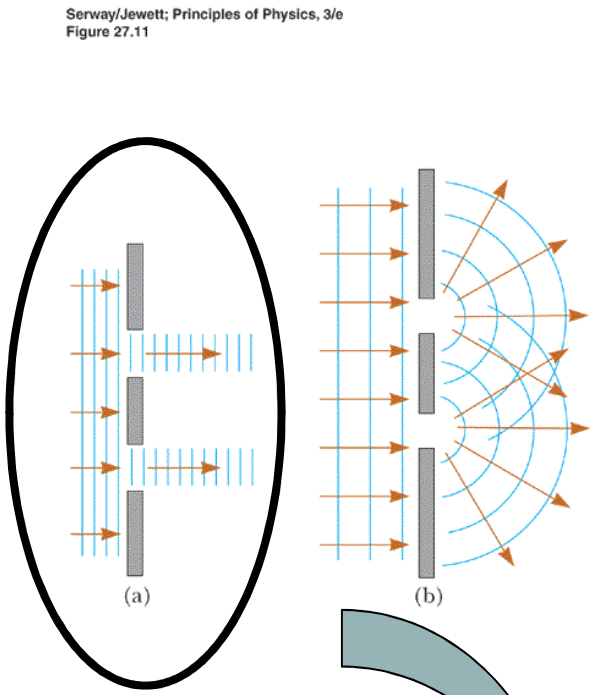
Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.2



Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

(c) A **interferência destrutiva** ocorre no ponto R porque a onda proveniente da fenda S1 está **atrasada de meio comprimento de onda em relação à fenda S2**.





$$DF = \Delta = n\lambda \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2 \ldots)$$

DF: diferença de percurso

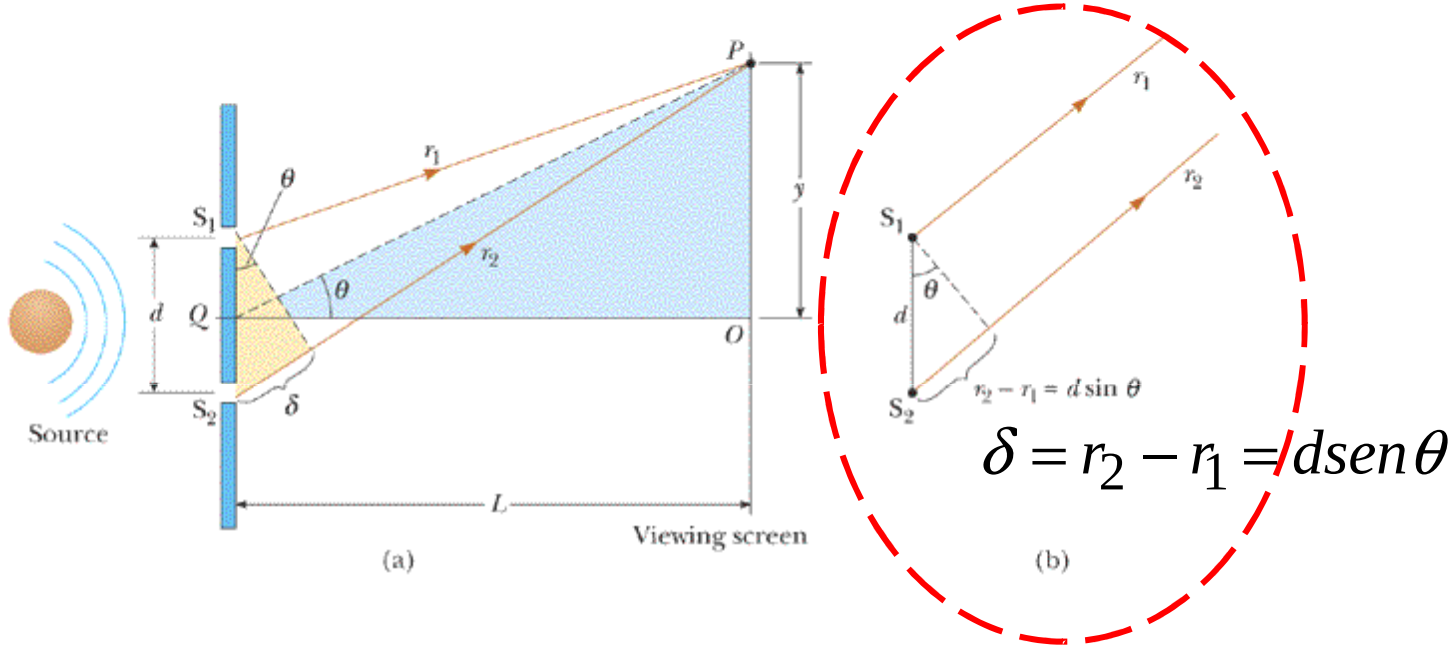
$$sen\theta = \frac{\Delta}{a = d} \Rightarrow \Delta = dsen\theta; \quad \therefore$$

$n\lambda = dsen\theta$ é a condição para interferência construtiva

$$\frac{n\lambda}{d} = sen\theta \Rightarrow \text{se } \lambda << d \Rightarrow sen\theta \downarrow$$ Ótica geométrica

Suponha duas ondas coerentes saindo das fendas S1 e S2 e chegando ao ponto P

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.3



$$\delta = r_2 - r_1 = dsen\theta$$

Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

(a) Construção geométrica para descrever a experiência de Young da dupla fenda.

(b) Quando consideramos que a trajetória r1 é paralela a r2 a diferença de percurso entre os dois raios é: $\delta = r_2 - r_1 = dsen\theta$

Para que esta aproximação seja válida é essencial que L>>d

A condição para interferência construtiva é:

$$\Delta = d sen\theta_{brilh} = n\lambda \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2 ...)$$

$$n\lambda = d sen\theta$$

$n \equiv$ inteiro (ordem de interferência)

$\lambda \equiv$ comprimento de onda

$d \equiv$ distância entre fendas

$\theta \equiv$ ângulo de saída

A condição para interferência destrutiva é

$$\Delta = d sen\theta_{esc} = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2 \ldots)$$

$$n\lambda = d sen\theta$$

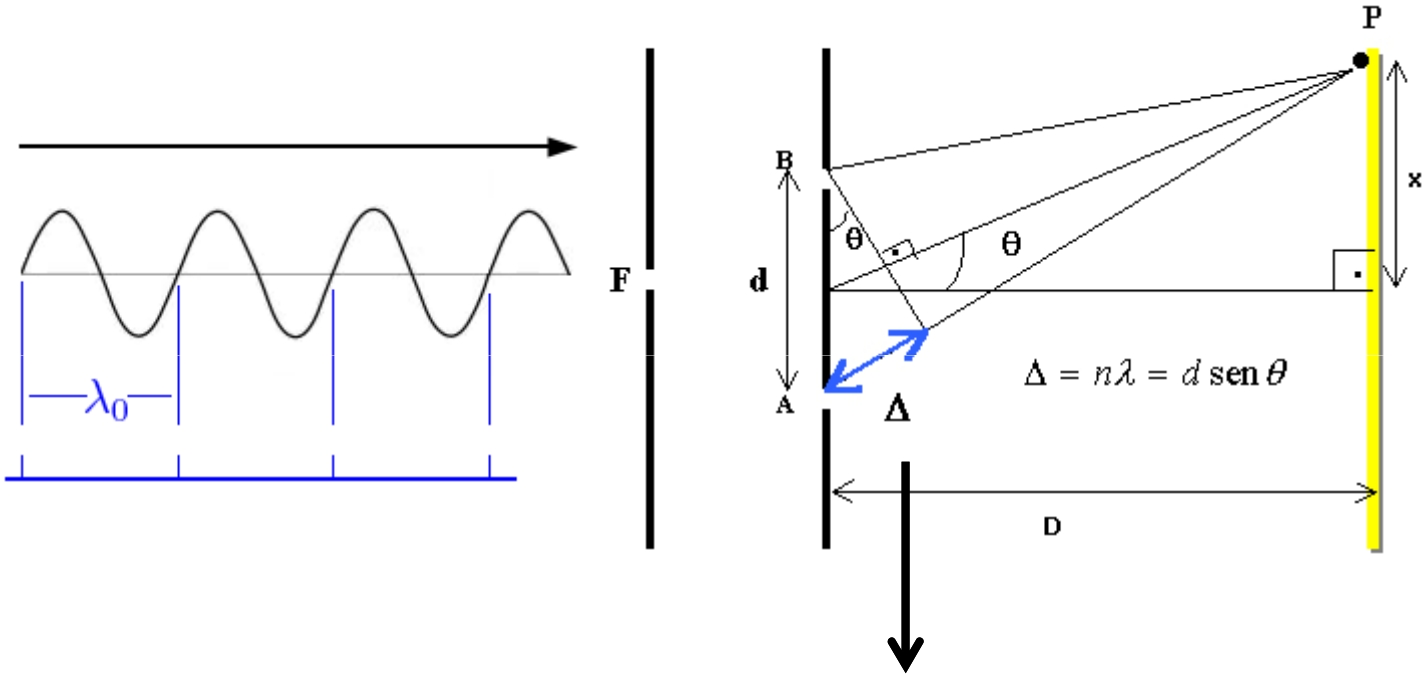
$n \equiv$ inteiro (ordem de interferência)

$\lambda \equiv$ comprimento de onda

$d \equiv$ distância entre fendas

$\theta \equiv$ ângulo de saída

As **zonas "iluminadas" ou máximo das ondas**, correspondem aos pontos na tela nos quais a distância às origens das ondas (fendas), **diferem de um comprimento de onda** (n=1), **dois comprimentos de onda** (n=2), **três comprimentos de onda** (n=3) e assim sucessivamente, ou seja **um múltiplo inteiro de um comprimento de onda**, o qual determina a **"ordem"** do máximo de interferência.

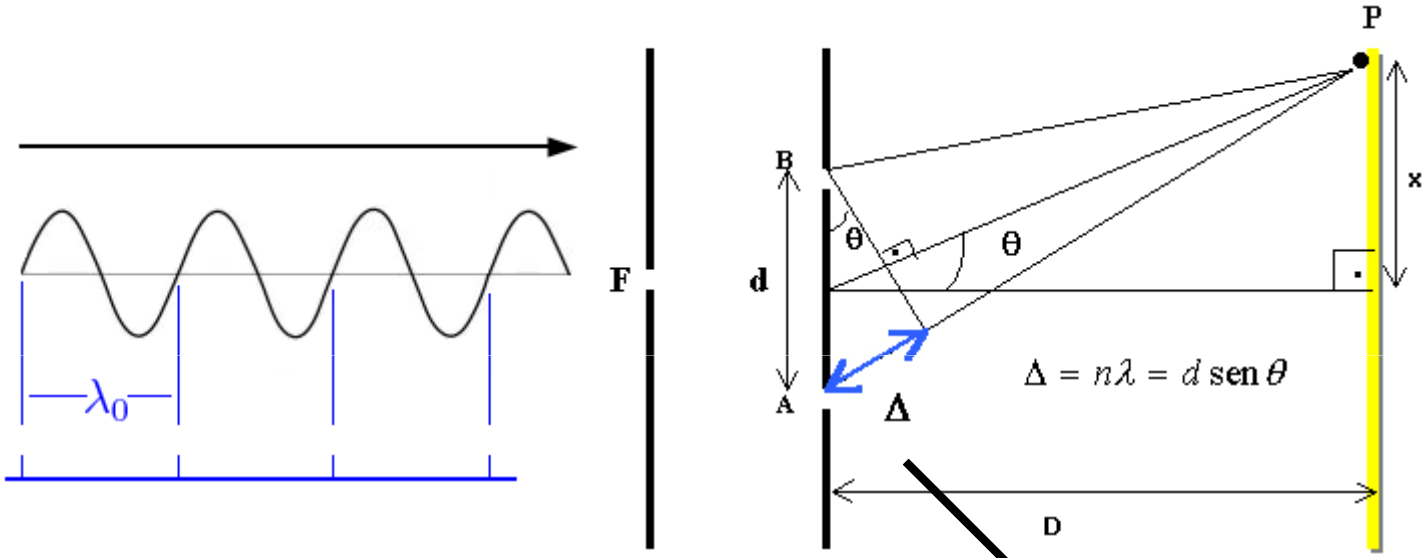


$$\Delta = 1\lambda; 2\lambda; 3\lambda \ldots n\lambda$$

$$\Delta = d sen\theta_{brilh} = n\lambda \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2 \ldots)$$

As **zonas escuras** correspondem aos pontos na tela nos quais a distância às origens das ondas (fendas) , diferem de:

meio comprimento de onda, **três meios** comprimento de onda, **cinco meios** comprimentos de onda e assim sucessivamente



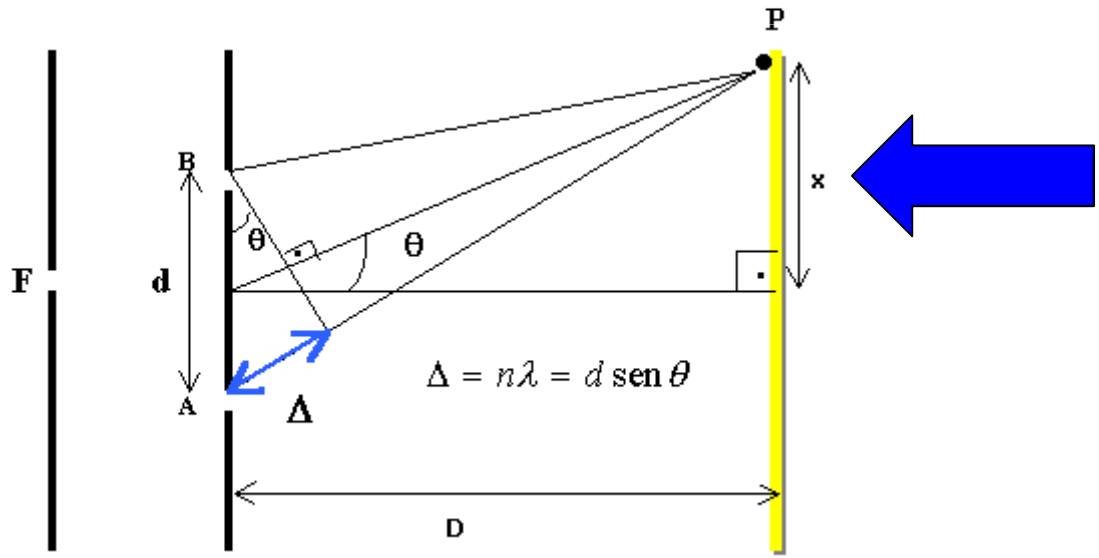
$$\Delta = d sen\theta_{esc} = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2 \ldots) \quad \Delta = \frac{1}{2}\lambda; \frac{3}{2}\lambda; \frac{5}{2}\lambda \ldots$$

O cancelamento exato ou interferência destrutiva se produz entre ondas em oposição de fase.

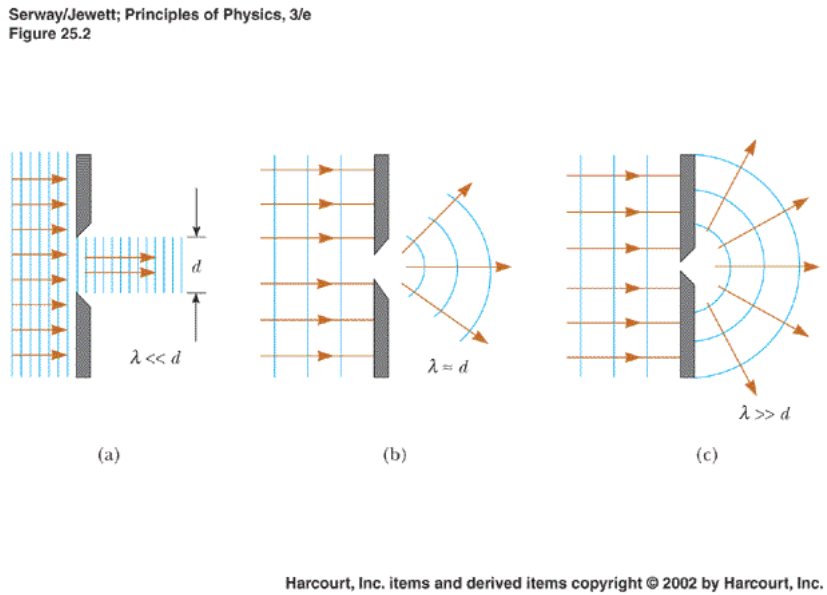
$$\Delta = d sen\theta_{brilh} = n\lambda \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2 \ldots)$$

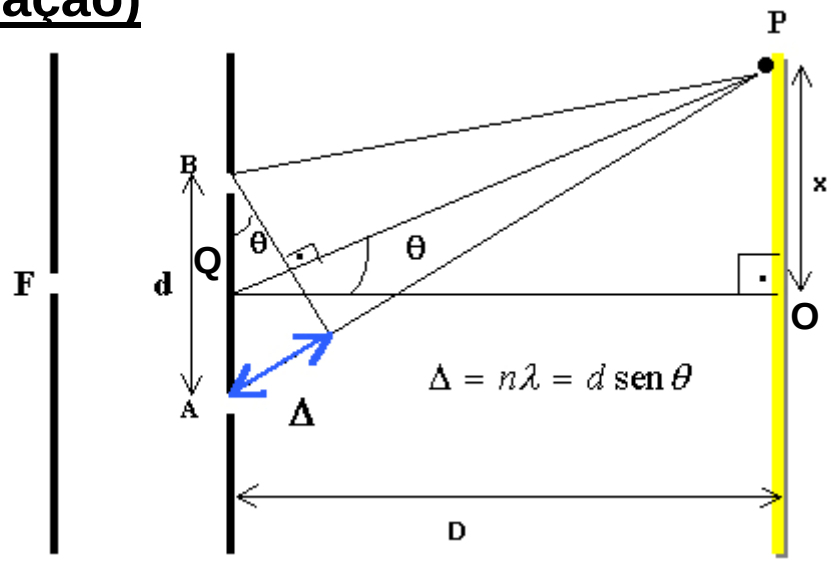
$$\Delta = d sen\theta_{esc} = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2 \ldots)$$

Estas equações fornecem as **posições angulares das franjas**. Podemos obter **expressões para as posições lineares "x" ao longo do anteparo**



Supomos d<<λ (condição de "super" difração)





Supomos L>>d

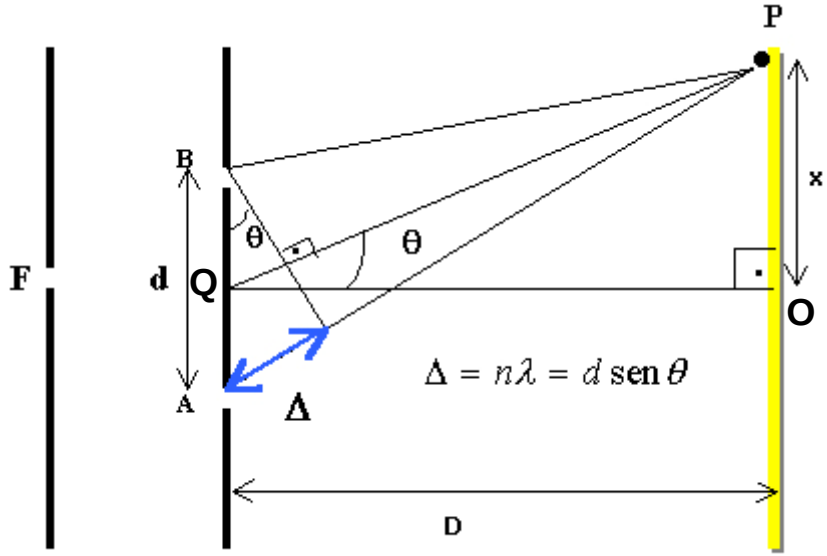
Estas situações prevalecem na prática para a luz visível, onde ***"L"* normalmente é da ordem de 1m**, ***"d"* é da ordem de frações do 1mm** e ***"λ"* é da ordem de frações do 1μm (micrômetro).**

Sob estas condições ***"θ"* é pequeno** para as primeira franjas e assim podemos utilizar a **aproximação para ângulos pequenos onde *sen θ ~tg θ*** e $sen\theta \approx tg\theta(\theta \leq 4^o)$

a partir do modelo geométrico do **triângulo OPQ** na figura, observamos que:

$$sen\theta \approx tg\theta = \frac{x}{D} \Rightarrow sen\theta = \frac{x}{D}$$

$$dsen\theta = n\lambda \Rightarrow sen\theta = \frac{n\lambda}{d},$$



igualando temos:

$$\frac{x}{D} = \frac{n\lambda}{d} \Rightarrow x = \frac{n\lambda D}{d}$$

FRANJAS ILUMINADAS - BRILHANTES

$$x_{bril}(n)$$

Análogamente:

$$sen\theta \approx tg\theta = \frac{x}{D} \Rightarrow sen\theta = \frac{x}{D}$$

$$sen\theta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{d}, \quad \text{igualando temos:}$$

$$\frac{x}{D} = \left(n + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{d} \Rightarrow x = \left(n + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda D}{d}$$

FRANJAS ESCURAS

$$x_{esc}(n)$$

EXEMPLO 27.1 Medindo o comprimento de onda de um LASER

É utilizado um LASER para iluminar uma dupla fenda. A distância entre as duas fendas é de 0.030 mm. Um anteparo está separado da dupla fenda por 1.2m. A franja brilhante de segunda ordem (n=2) está a 5.1 cm da linha central.

(a) Determine o comprimento de onda da luz de laser.
Solução: D>>d, portanto

(b) Calcule a distância entre as franjas adjacentes brilhantes

$$n\lambda = d sen\theta$$

$$sen\theta \approx tg\theta = \frac{x}{D} \Rightarrow sen\theta = \frac{x}{D}$$

$$d sen\theta = n\lambda \Rightarrow sen\theta = \frac{n\lambda}{d},$$

igualando temos:

$$\frac{x}{D} = \frac{n\lambda}{d} \Rightarrow x = \frac{n\lambda D}{d}$$

EXEMPLO 27.1 Medindo o comprimento de onda de um LASER

É utilizado um LASER para iluminar uma dupla fenda. A distância entre as duas fendas é de 0.030 mm. Um anteparo está separado da dupla fenda por 1.2m. A franja brilhante de segunda ordem (n=2) está a 5.1 cm da linha central.

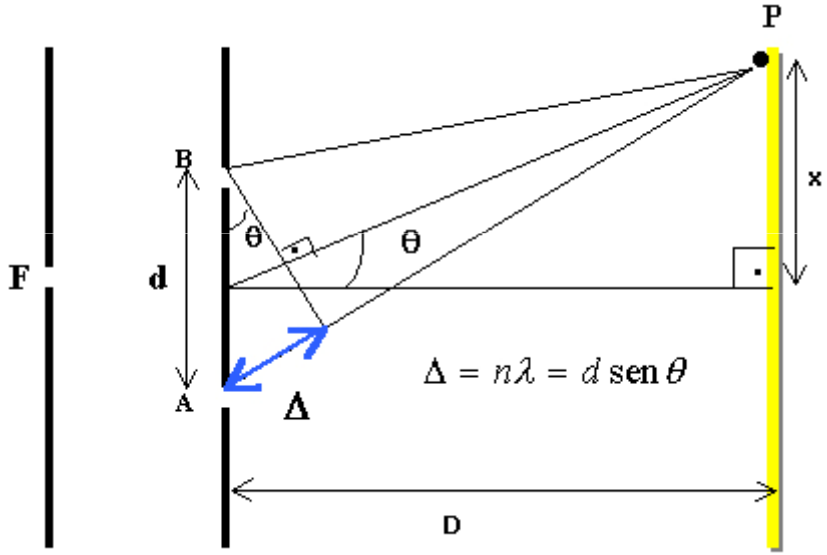
(a) Determine o comprimento de onda da luz de laser.
Solução: D>>d, portanto

$$n\lambda = d sen\theta$$

$$2\lambda = 0.00003m \cdot sen\theta$$

$$sen\theta = \frac{0.051m}{1.2m}$$

$$\lambda = \frac{0.00003}{2} \cdot \left(\frac{0.051}{1.2}\right) = 637.5nm$$



EXEMPLO 27.1 Medindo o comprimento de onda de um LASER

É utilizado um LASER para iluminar uma dupla fenda. A distância entre as duas fendas é de 0.030 mm. Um anteparo está separado da dupla fenda por 1.2m. A franja brilhante de segunda ordem (n=2) está a 5.1 cm da linha central.

(b) Calcule a distância entre as franjas adjacentes brilhantes

Solução: $sen\theta \approx tg\theta = \frac{x}{D} \Rightarrow sen\theta = \frac{x}{D}$

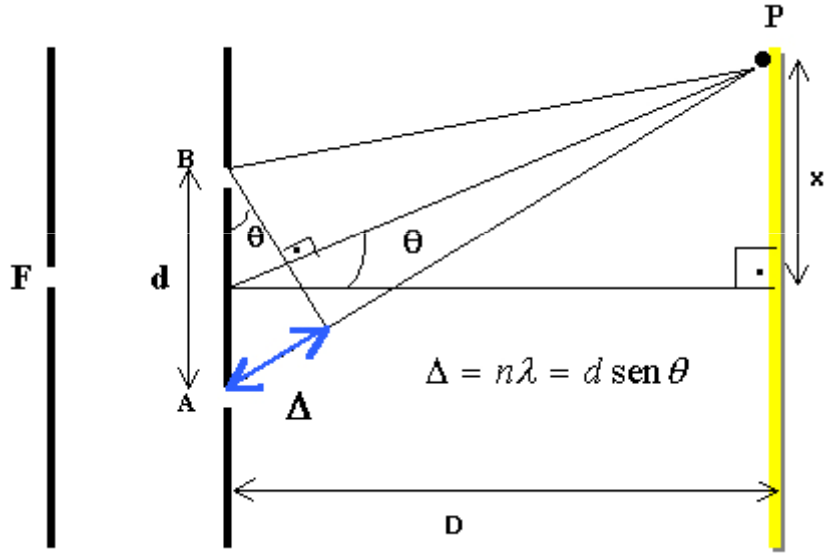
$$x = \frac{n\lambda D}{d}$$

$$x_{(n+1)} = \frac{(n+1)\lambda D}{d}$$

$$x_{(n)} = \frac{(n)\lambda D}{d}$$

$$x_{(n+1)} - x_{(n)} = \frac{(n+1)\lambda D}{d} - \frac{(n)\lambda D}{d} = 1\frac{\lambda D}{d}$$

$$\frac{\lambda D}{d} = \frac{\left(637.5\times10^{-9}m\right)\cdot(1.2m)}{0.00003m} \approx 2.55cm$$

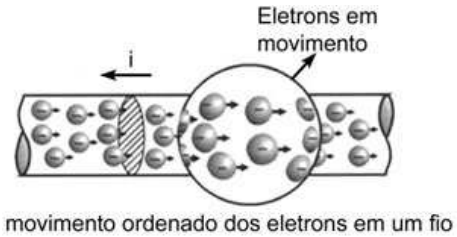


A intensidade média do padrão de interferência de dupla fenda

❑ Ondas eletromagnéticas transportam energia e à medida que se propagam podem **transferir energia** à matétria situada em seu caminho.

❑ A **taxa** do **fluxo de energia** **atravessando uma unidade de área** em uma onda eletromagnética é dada por um vetor, chamado de vetor S, conhecido como **vetor de Poynting** (John Henry Pointing – 1852 – 1914):

$\vec{S} \equiv$ taxa de transporte de energia por unidade de área



$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\vec{E}\times\vec{B}$$

$$\Delta E = IA\Delta t$$

fluxo de energia

$$\text{taxa} \Rightarrow \frac{Energia/tempo}{área} \Rightarrow S = \left(\frac{Joule/segundo}{área}\right) \approx \left(\frac{W}{m^2}\right) \equiv \frac{Potência}{Área}$$

$$|S| = \left(\frac{Joule/segundo}{área}\right)_{inst} \approx \left(\frac{W}{m^2}\right)_{inst}$$

Ondas eletromagnéticas transportam energia e a **taxa de fluxo de energia** atravessando uma unidade de área ***"A"*** é descrita pelo vetor de pointing ***"S"***

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} = \vec{E} \times \vec{B}$$

Calculando $\vec{S}$ para uma onda eletromagnética plana.

$\vec{E}$ e $\vec{B}$ são perpendiculares entre sí $\Rightarrow \left|\vec{E} \times \vec{B}\right| = EB$, assim neste caso:

$S = \dfrac{EB}{\mu_0}$, sendo $B = \dfrac{E}{c}$ também podemos formular:

$S = \dfrac{E^2}{\mu_0 c} = \dfrac{cB^2}{\mu_0}$ equações para S que se aplicam a $\forall$ instante de tempo.

A média temporal de S por um ou mais ciclos é a intensidade.

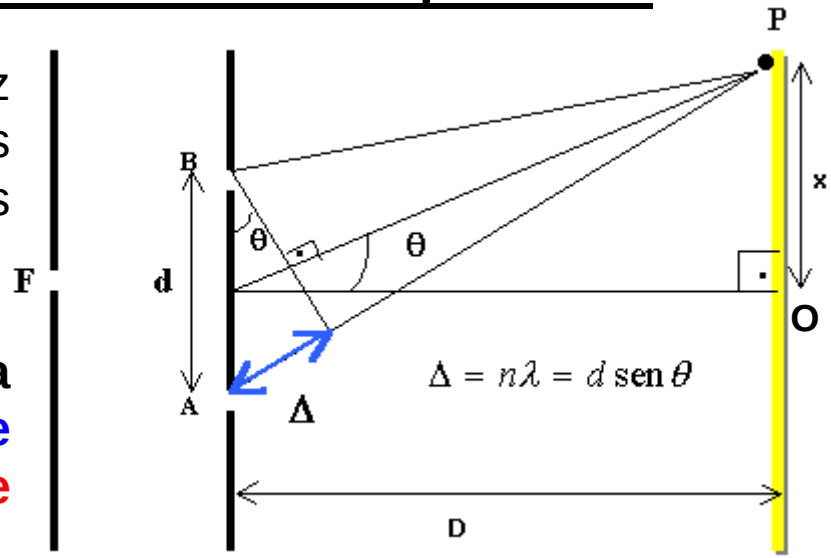
Isso involve a média temporal de $\cos^2(kx - \omega t)$ que é igual a $\dfrac{1}{2}$.

Desta forma, o valor médio de S ou a intensidade da onda é:

$$I = \bar{S} = \frac{E_{\max} \cdot B_{\max}}{2\mu_0} = \frac{E_{\max}^2}{2\mu_0 c} = \frac{cB_{\max}^2}{2\mu_0}$$

A intensidade média do padrão de interferência de dupla fenda

Duas fendas iluminadas pela mesma luz **monocromática** (λ) de modo que as duas fendas representam **fontes coerentes** de ondas senoidais **(relação de fase constante).**



Neste caso as **duas ondas têm a mesma frequência angular "ω"** e uma **diferença de fase constante em um ponto "P"** que **depende da diferença de percurso:**

$$\delta = d\,sen\theta$$

$$d\,sen\theta = n\lambda = \lambda(n=1) \Rightarrow$$ uma **diferença de percurso "λ"** corresponde a uma **diferença de fase** de **2π rad**,

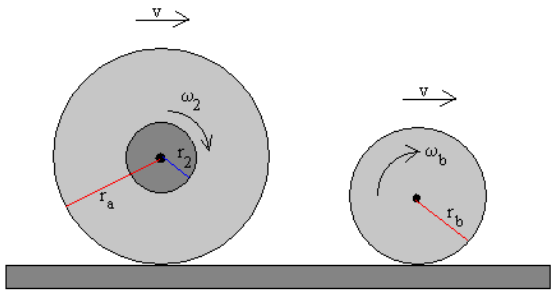
$$\delta = \lambda \Rightarrow$$

$$\phi = 2\pi$$

de modo que podemos considerar as igualdades

$$\frac{\delta}{\phi} = \frac{\lambda}{2\pi} \Rightarrow \phi = \frac{2\pi}{\lambda} d\,sen\theta$$

$$\phi(\theta)$$



A intensidade média do padrão de interferência de dupla fenda é

$$I_{méd} = I_{máx} \cos^2\left(\frac{\pi \cdot d \cdot sen\theta}{\lambda}\right)$$

alternativamente, como $sen\theta \approx \dfrac{x}{L = D}$

para valores pequenos de θ temos

$$I_{méd} = I_{máx} \cos^2\left(\frac{\pi d}{\lambda L} x\right)$$

onde $I_{máx}$ é a intensidade máxima na tela

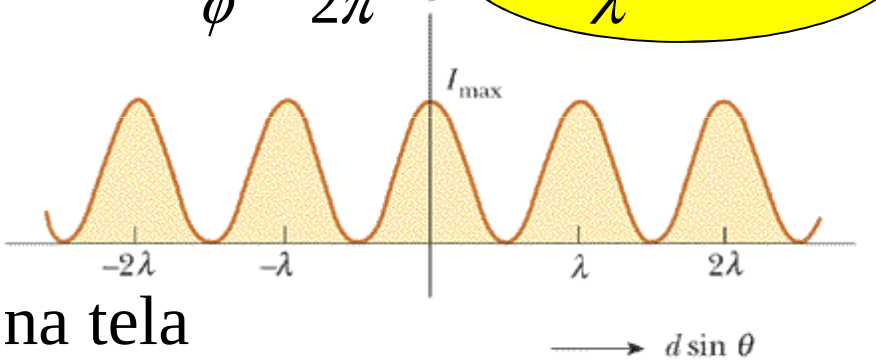
Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.4 (bottom)

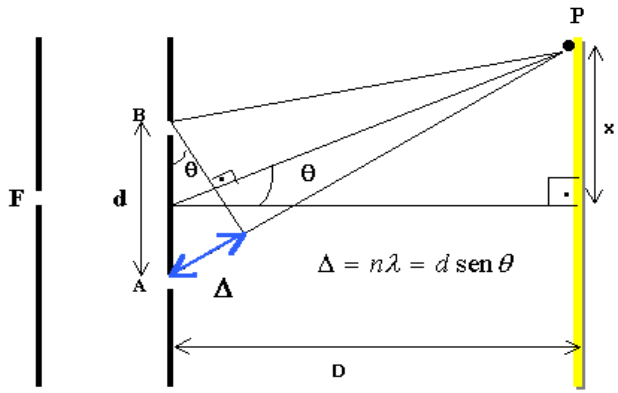
$$\delta = dsen\theta = n\lambda = \lambda(n=1) \Rightarrow$$

$$\delta = \lambda \Rightarrow$$

$$\phi = 2\pi \quad \div$$

$$\frac{\delta}{\phi} = \frac{\lambda}{2\pi} \Rightarrow \phi = \frac{2\pi}{\lambda} dsen\theta$$





Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

$$I_{méd} = I_{máx} \cos^2\left(\frac{\pi \cdot d \cdot sen\theta}{\lambda}\right)$$

alternativamente, como $sen\theta \approx \dfrac{x}{L = D}$

para valores pequenos de θ temos

$$I_{méd} = I_{máx} \cos^2\left(\frac{\pi d}{\lambda L} x\right)$$

onde $I_{máx}$ é a intensidade máxima na tela

que ocorre quando

$$\left(\frac{\pi d}{\lambda L} x\right) \approx n\pi \Rightarrow x = \frac{n\pi L\lambda}{\pi d} = \frac{nL\lambda}{d}$$

Este valor coincide com o valor obtido para a posição das franjas brilhantes, no caso da interferência de dupla fenda (veja próximo “slide”)

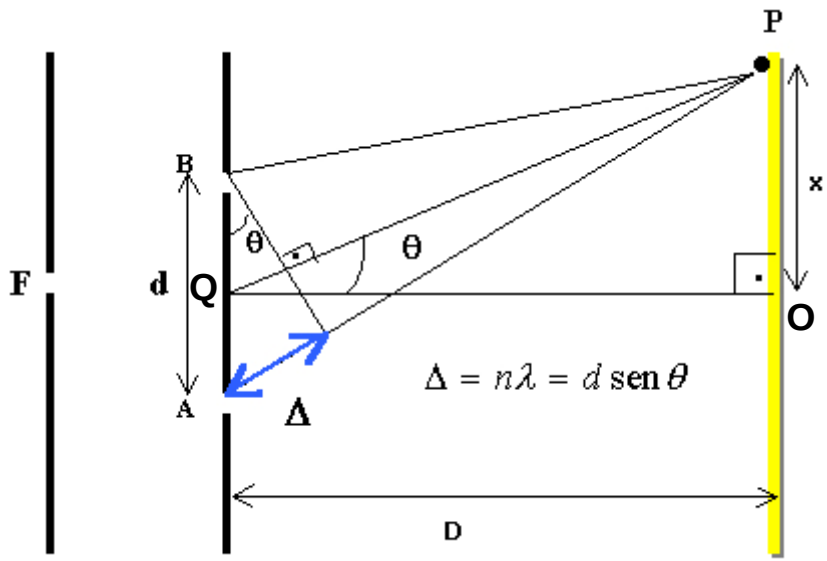
$$sen\theta \approx tg\theta = \frac{x}{D} \Rightarrow sen\theta = \frac{x}{D}$$

$$dsen\theta = n\lambda \Rightarrow sen\theta = \frac{n\lambda}{d},$$

igualando temos:

$$\frac{x}{D} = \frac{n\lambda}{d} \Rightarrow x = \frac{n\lambda D}{d}$$

$$x_{bril}(n)$$



FRANJAS ILUMINADAS - BRILHANTES

Análogamente:

$$sen\theta \approx tg\theta = \frac{x}{D} \Rightarrow sen\theta = \frac{x}{D}$$

$$sen\theta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{d}, \quad \text{igualando temos:}$$

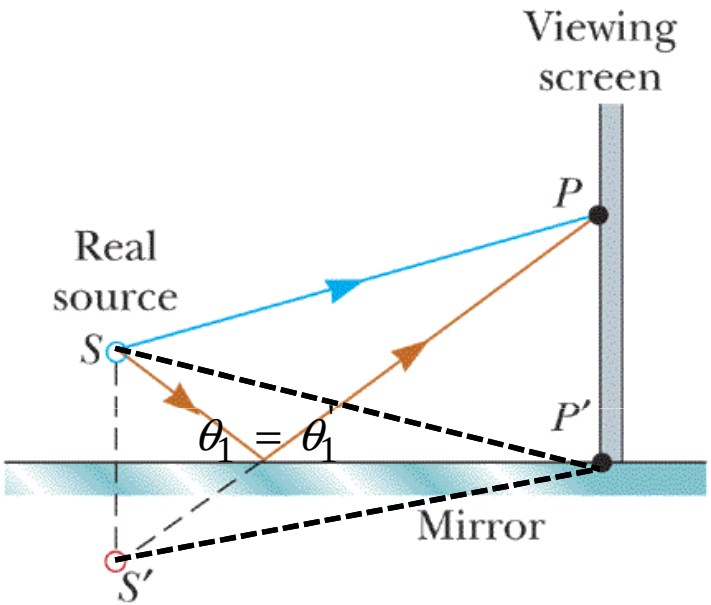
$$\frac{x}{D} = \left(n + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{d} \Rightarrow x = \left(n + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda D}{d}$$

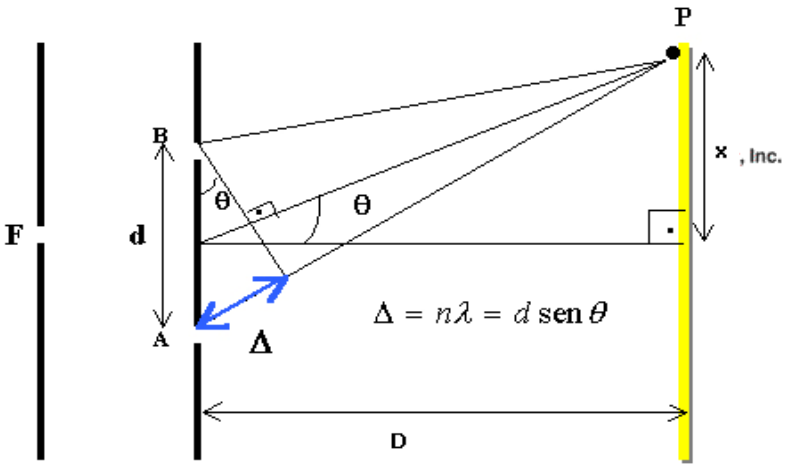
$$x_{esc}(n)$$

FRANJAS ESCURAS

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.5

Espelho de Lloyd





Supondo uma **diferença de percurso proporcional a um número inteiro de comprimentos de onda** entre **SP (azul) e SP (amarelo) ou virtualmente S'P.**

Qual a interferência esperada em P?

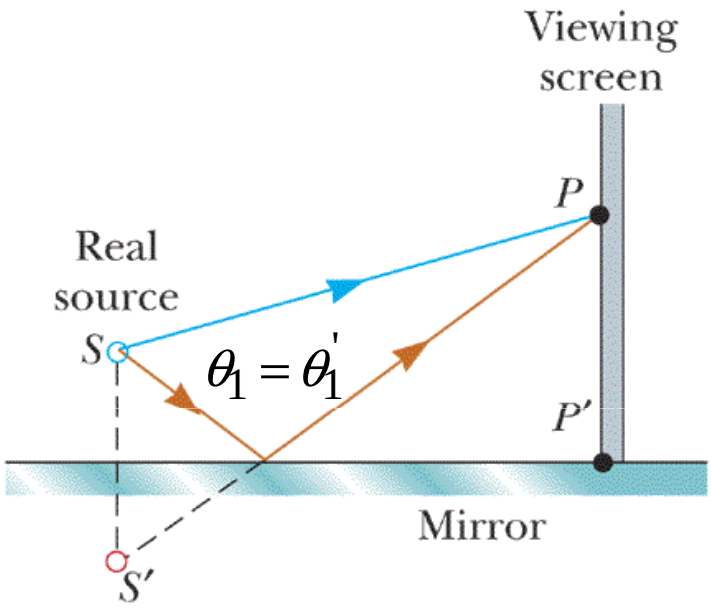
Supondo um percurso simétrico entre SP' e S'P'

Qual a interferência esperada em P'?

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.5

Em pontos distantes da fonte (P), se espera um padrão de interferência

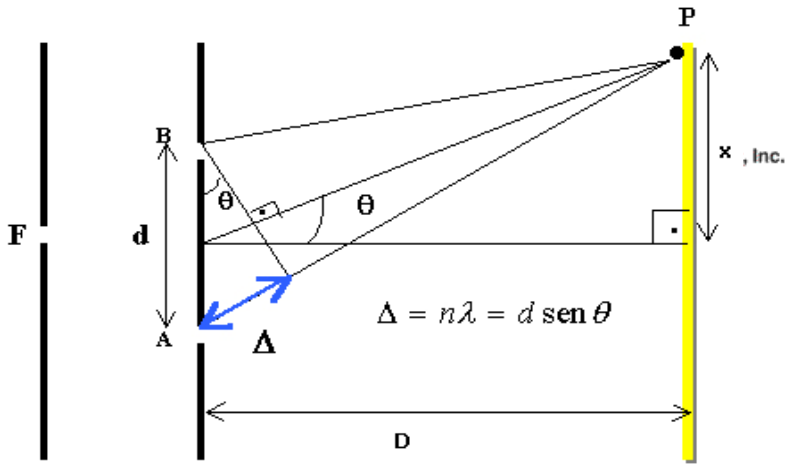
Espelho de Lloyd



Se observa que a **posição das franjas brilhantes e escuras estão invertidas** em relação ao padrão de interferência de duas fontes reais (exp. dupla fenda de Young).

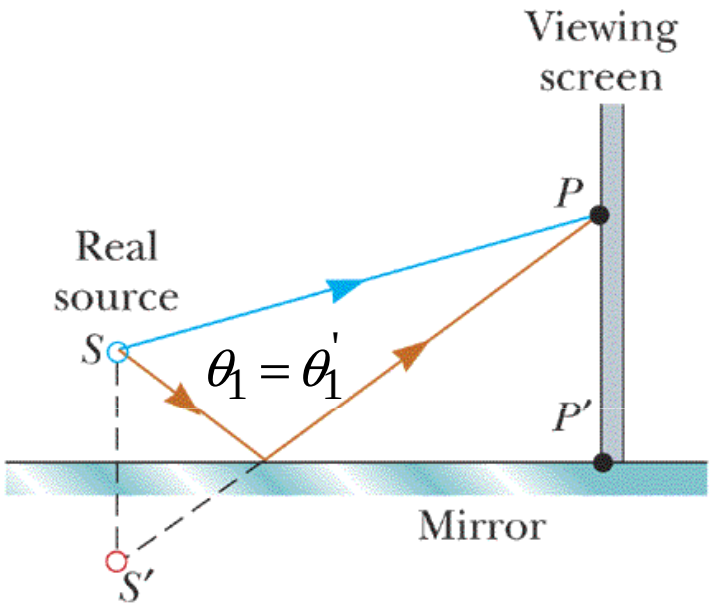
Isso ocorre porque as fontes coerentes S e S' possuem uma diferença de fase de 180º

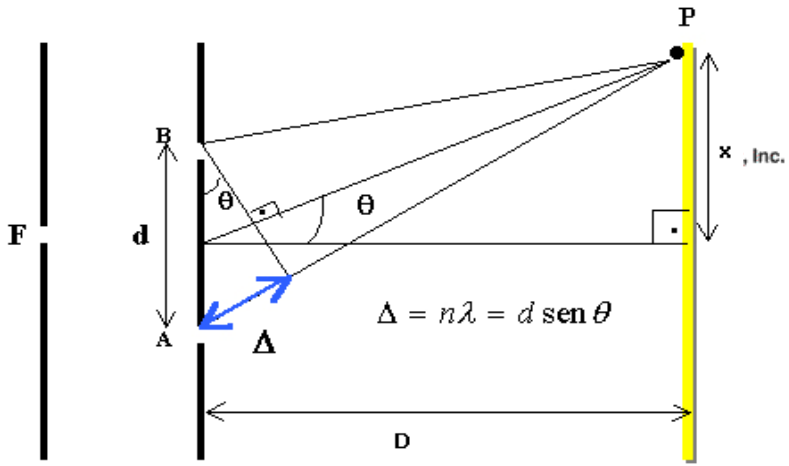
Essa mudança de 180º é produzida na reflexão sofrida pelo raio amarelo.



Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.5

Espelho de Lloyd

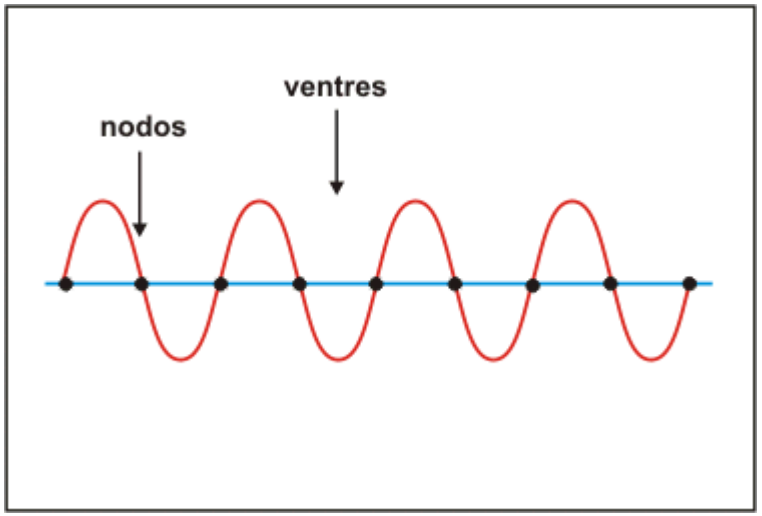




O ponto P' é equidistante de S e S'.

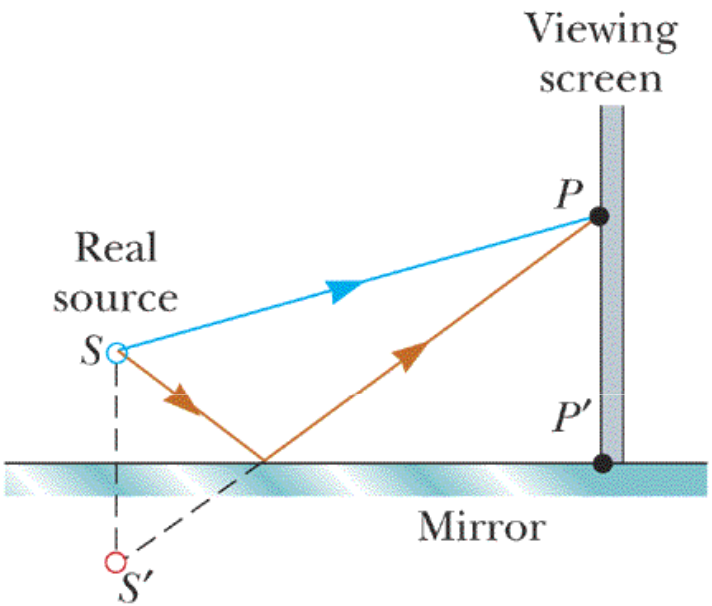
Se a diferença de percurso fosse a única responsável pela diferença de fase teríamos uma franja brilhante em P'

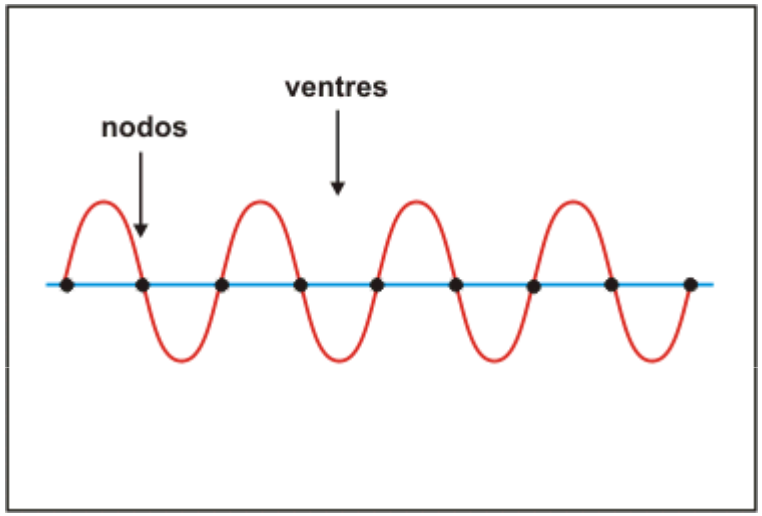
Em vez disso se observa uma franja escura em P' porque uma mudança de fase de 180º é produzida na reflexão.



Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.5

Espelho de Lloyd





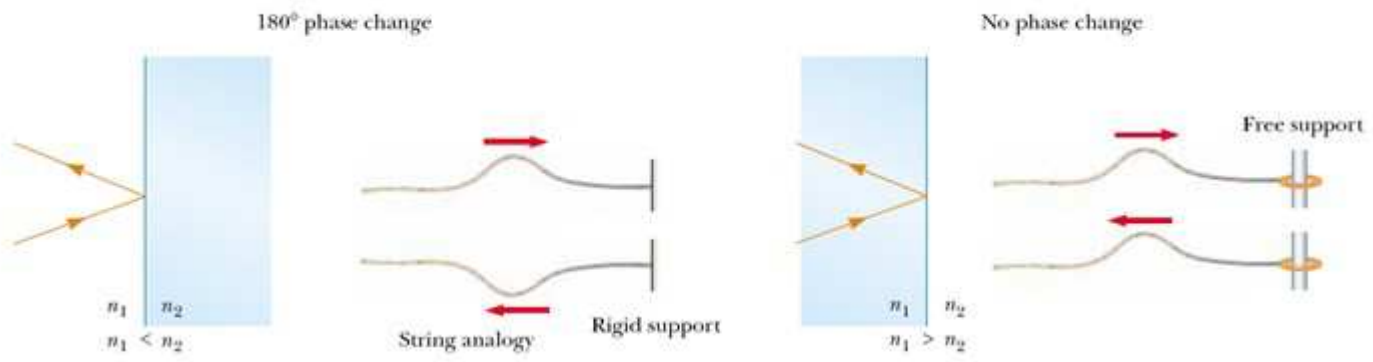
Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

Conclusão: **uma onda eletromagnética sofre uma mudança de fase de 180º na reflexão por um meio com índice de refração maior do que aquele em que está se propagando.**

PELÍCULAS FINAS: Interferência em filmes finos

1. uma **onda eletromagnética** propagando-se através de um meio cujo índice de refração é n1 em direção a um meio cujo índice de refração é n2 sofre uma **mudança de fase de 180º** **na reflexão** quando **n2>n1**

2. **NÃO há mudança de fase na onda refletida se n2<n1.**

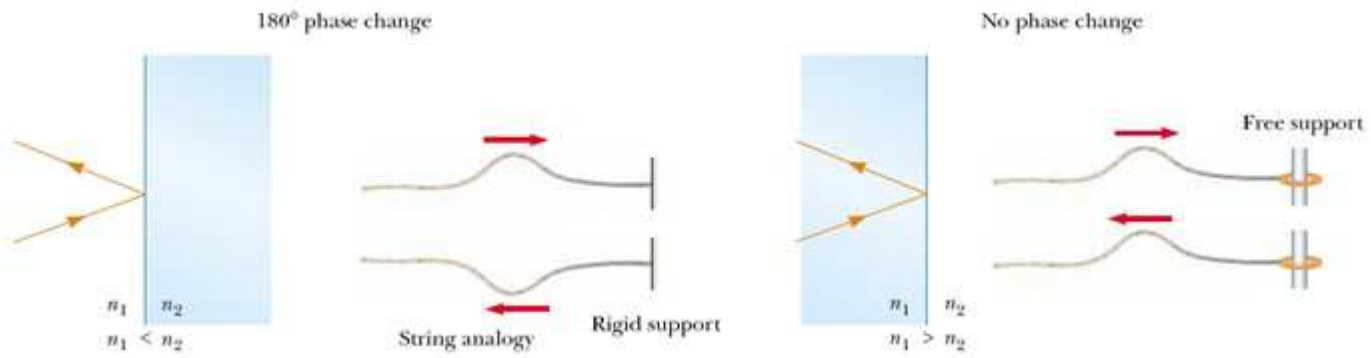


3. o comprimento de onda ***"λn"*** da luz em um meio com índice de refração "n" é dado por:

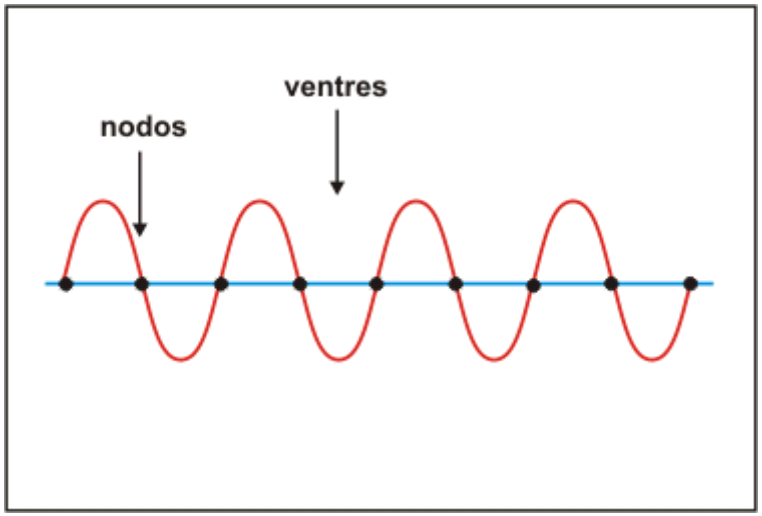
$$\lambda_n^{luz-meio} = \frac{\lambda^{luz-vácuo}}{n}$$

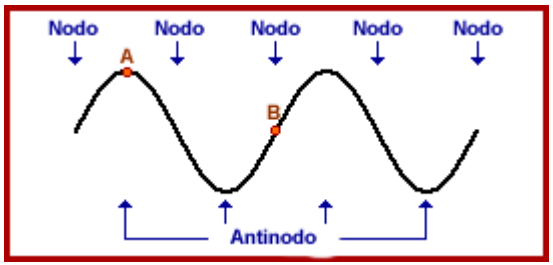
onde λ é o comprimento de onda da luz no vácuo

Condições de contorno das equações de Maxwell para a onda plana incidente refletida

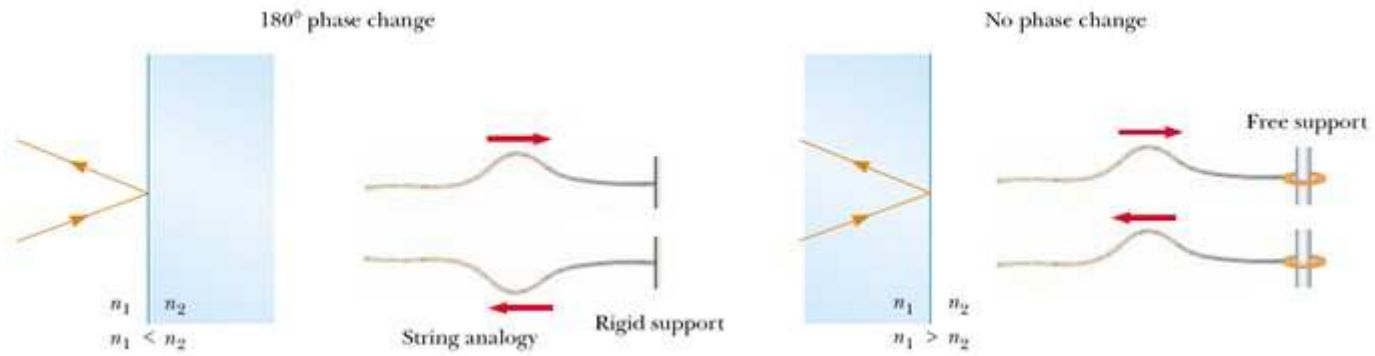


Reflexão de n menor para n maior: Δ=0.5λ e **Reflexão de n maior para n menor Δ=0**

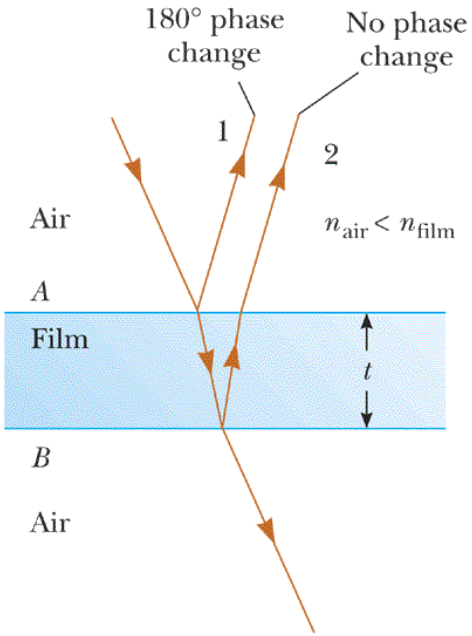




PELÍCULAS FINAS: Interferência em filmes finos



Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.7



Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

De acordo com a **primeira regra**, o raio 1, que é refletido a partir da superfície superior (A), sofre uma mudança de fase de 180º em relação à onda incidente.

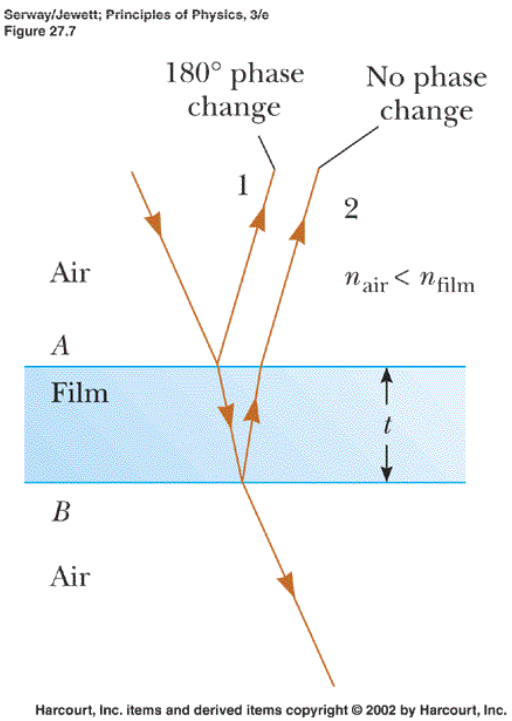
O raio 2, que é refletido pela superfície inferior (B), não sofre mudança de fase em relação à onda incidente.

Portanto, ignorando por hora a diferença de percurso, o raio 1 emergente está 180º fora de fase em relação ao raio 2. Uma diferença de fase equivalente a: $\frac{\lambda_n}{2}$

Entretanto, devemos considerar também que o raio 2 percorre uma distância extra aproximadamente igual a 2t (sendo t a espessura do filme) antes de as ondas se recombinarem.

A diferença de fase total surge da combinação da diferença de percurso e da mudança de fase de 180º na reflexão.

Por exemplo, se: $2t = \frac{\lambda_n}{2}$ os raios 1 e 2 se recombinarão em fase, resultando em uma interferência construtiva.



Em geral, **a condição para interferência construtiva** é:

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_n \quad (\mathrm{m} = 0,1,2,\ldots)$$

Esta condição leva em conta dois fatores:

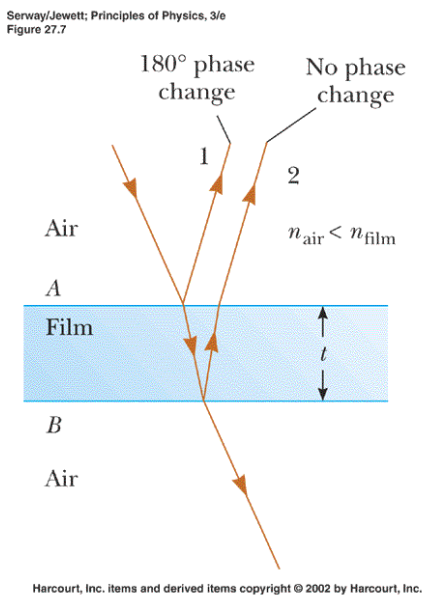
(a) A diferença na diferença do percurso ótico para os dois raios, o termo ($m\lambda_n$) e

(b) A mudança de fase de 180º na reflexão, o termo: $\frac{\lambda_n}{2}$

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

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_n, \quad \therefore$$

$$2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \qquad (\mathrm{m} = 0,1,2...)$$



Se a distância extra 2t percorrida pelo raio 2 corresponde a um múltiplo de λ_n as duas ondas irão se combinar fora de fase, resultando em uma interferência destrutiva.

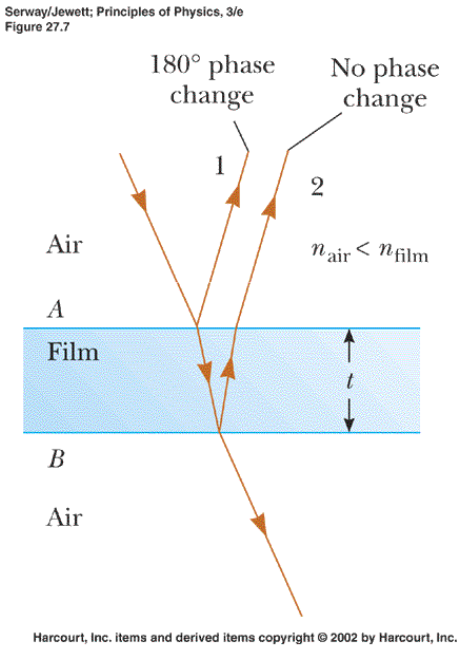
Analogamente a equação geral para a interferência destrutiva é:

$$2nt = m\lambda \qquad (\mathrm{m} = 0,1,2,...)$$

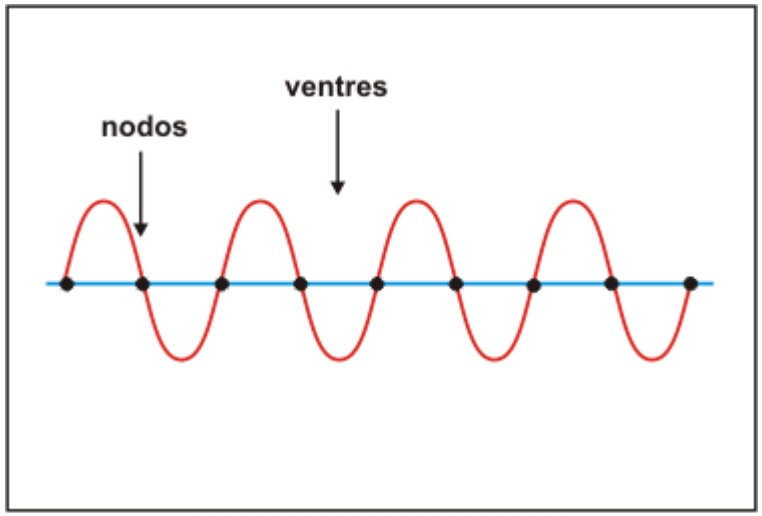
Estas condições são válidas quando o meio acima da superfície do filme for o mesmo abaixo da superfície do mesmo.

Estratégia de resolução de problemas de interferência em filmes finos

1. **Identificar o filme fino**
2. **O <u>tipo de interferência</u> é determinado pela <u>relação de fase</u> entre as partes de onda refletidas nas superfícies superior e inferior**



1. **As diferenças de fase têm duas causas:**
   a. **diferenças entre as distâncias percorridas**
   b. **mudanças de fase que ocorrem na reflexão**



Exemplo 27.3 Revestimento anti-refletores para células solares:

Semicondutores como o silício são utilizados para fabricar células solares (fotovoltáicas) – dispositivos que absorvem energia eletromagnética convertendo em energia elétrica. Átomos de silício são ionizados, produzindo elétrons que sob a aplicação de uma diferença de potencial se convertem em uma corrente elétrica.

Células solares geralmente são revestidas com um filme fino e transparente, como o monóxido de silício (SiO, n=1.45), a fim de minimizar as perdas por reflexão na superfície .

Suponha que uma célula solar de silício (n=3.5) seja revestida com essa finalidade por um filme fino de monóxido de silício. Determine a espessura mínima do filme que produz a menor reflexão em um comprimento de onda de 550nm, que é o centro do espectro visível.

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_n \quad (\mathrm{m} = 0,1,2,...)$$

Interferência construtiva

$$2nt = m\lambda \quad (\mathrm{m} = 0,1,2,...)$$

Interferência destrutiva

A luz refletida é mínima quando os raios 1 e 2 satisfazem as condições de interferência destrutiva.

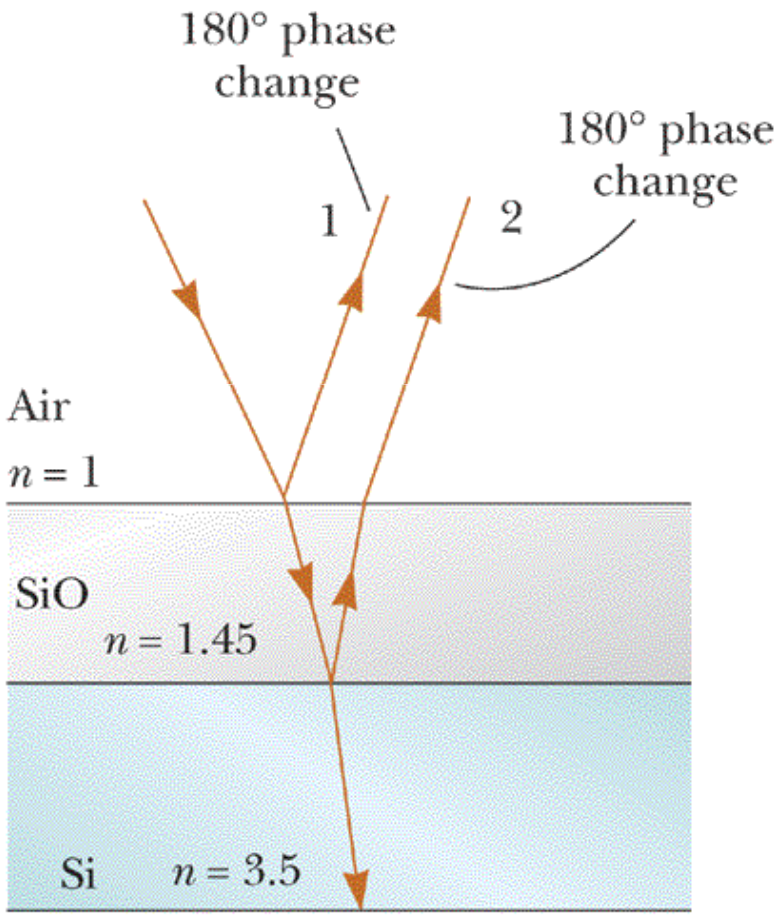
Observe que os dois raios sofrem mudança de fase de 180º na reflexão, neste caso, uma na superfície superior outra na superfície inferior.

Portanto, é nula a mudança total da fase na reflexão, e a condição para o mínimo de reflexão requer uma diferença de percurso de:

$$\frac{\lambda_n}{2}, \text{logo}, 2t = \frac{\lambda}{2n} \Rightarrow$$

$$t = \frac{\lambda}{4n} = \frac{550nm}{4(1.45)} = 94.8nm$$

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.8



Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

Monitoria: sala C1-07,
das 11:00 as 12:00h toda 4a feira

CAPÍTULO 27: ÓTICA ONDULATÓRIA

- ❑ FONTES COERENTES (diferença de fase constante)
- ❑ INTERFERÊNCIA DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS
- ❑ FENDA DUPLA (Experiência de Thomas Young)
- ❑ **MUDANÇA DE FASE NA REFLEXÃO**
- ❑ **PELÍCULAS FINAS**

REVISÃO e MAIS DETALHES

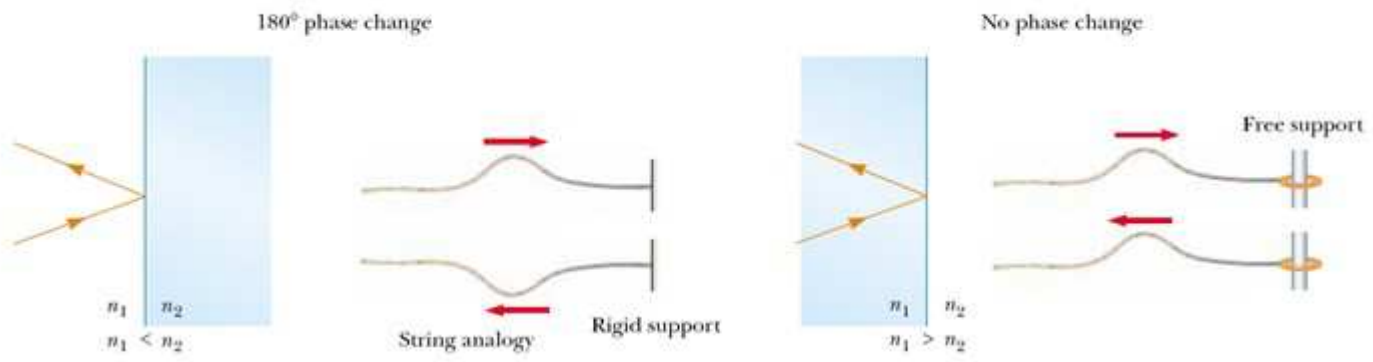
LISTA DE EXERCÍCIOS – CAPÍTULO 27

❑ **Exs.: 2, 3, 5, 8, 10, 13, 14, 15, 18, 19, 23, 25, 26, 29, 32, 37, 43, 48, 51**

PELÍCULAS FINAS: Interferência em filmes finos

1. uma **onda eletromagnética** propagando-se através de um meio cujo índice de refração é n1 em direção a um meio cujo índice de refração é n2 sofre uma **mudança de fase de 180º** **na reflexão** quando **n2>n1**

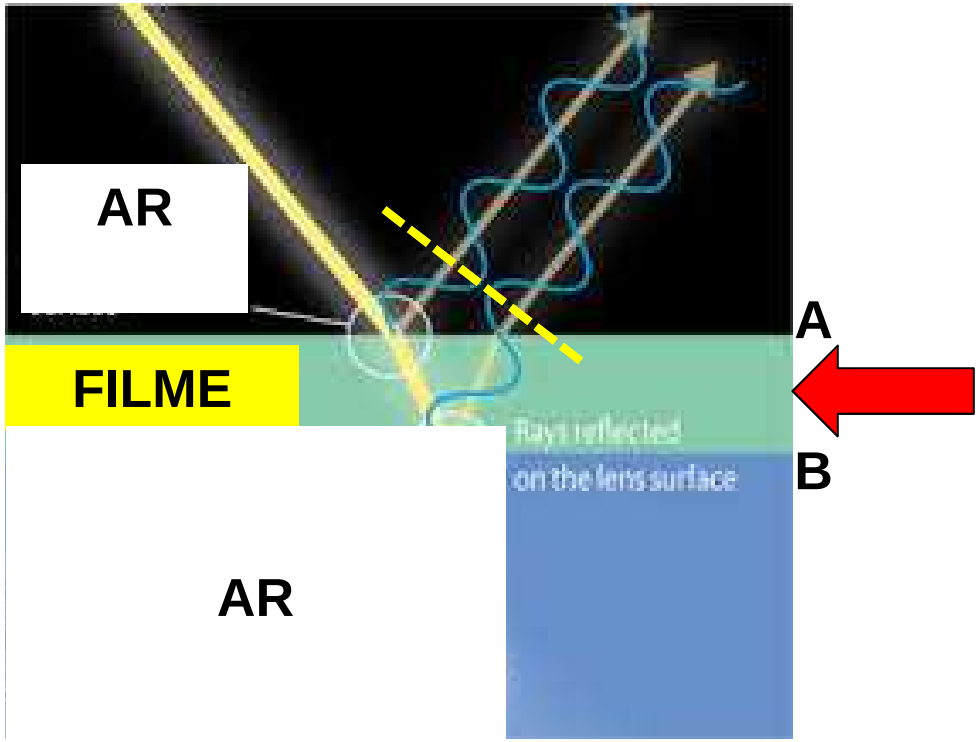
2. **NÃO há mudança de fase na onda refletida se n2<n1.**

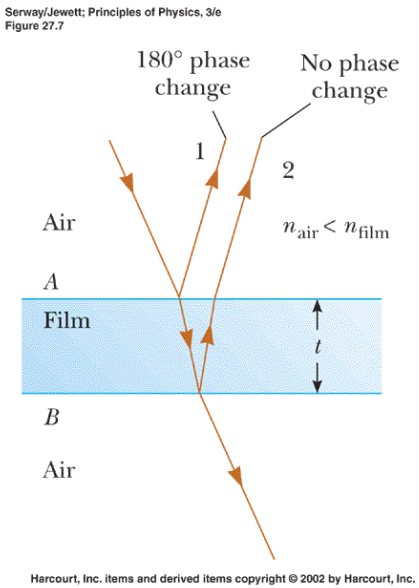


3. o comprimento de onda ***"λn"*** da luz em um meio com índice de refração "n" é dado por:

$$\lambda_n^{luz-meio} = \frac{\lambda^{luz-vácuo}}{n}$$

normalmente λ é o comprimento de onda da luz no vácuo
e λ_n é o comprimento de onda da luz no meio





De acordo com a **primeira regra**, o raio 1, que é refletido a partir da superfície superior (A), sofre uma mudança de fase de 180º em relação à onda incidente.

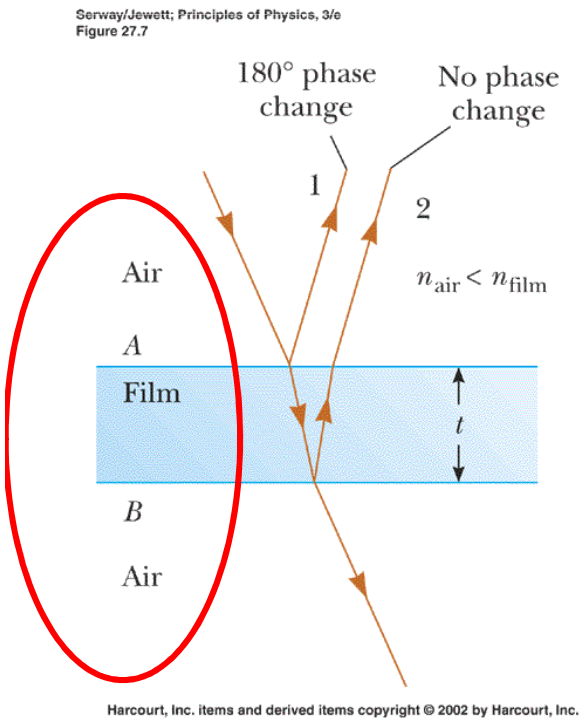
O raio 2, que é refletido pela superfície inferior (B), não sofre mudança de fase em relação à onda incidente.

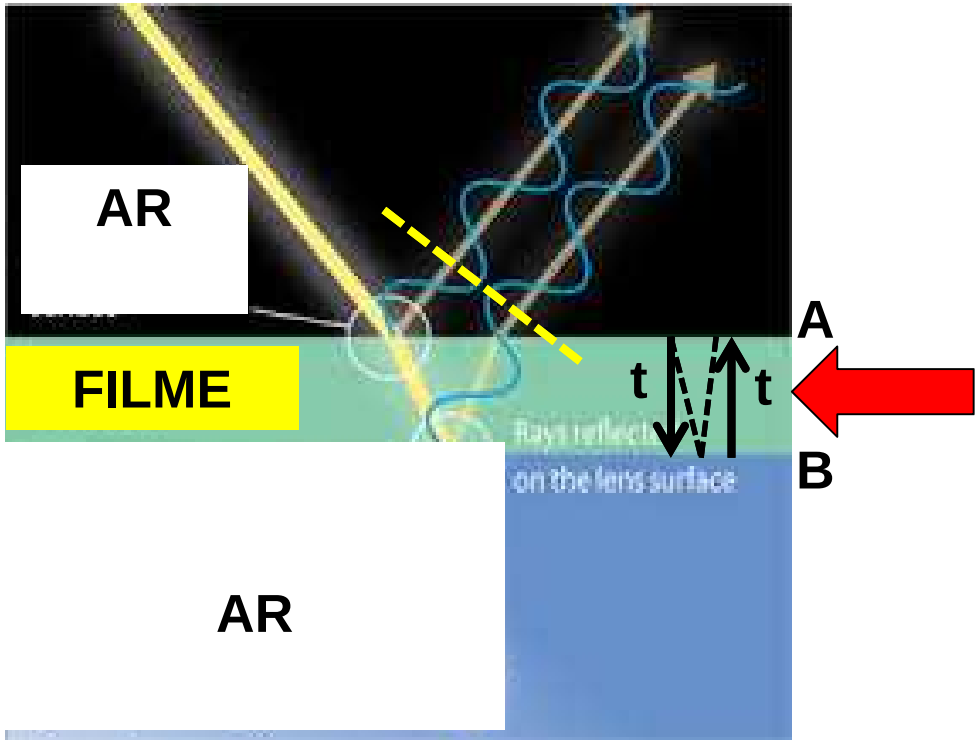
Portanto, ignorando por hora a diferença de percurso,
o raio 1 emergente está 180º fora de fase em relação ao raio 2.
Uma diferença de fase equivalente a: $\frac{\lambda_n}{2}$

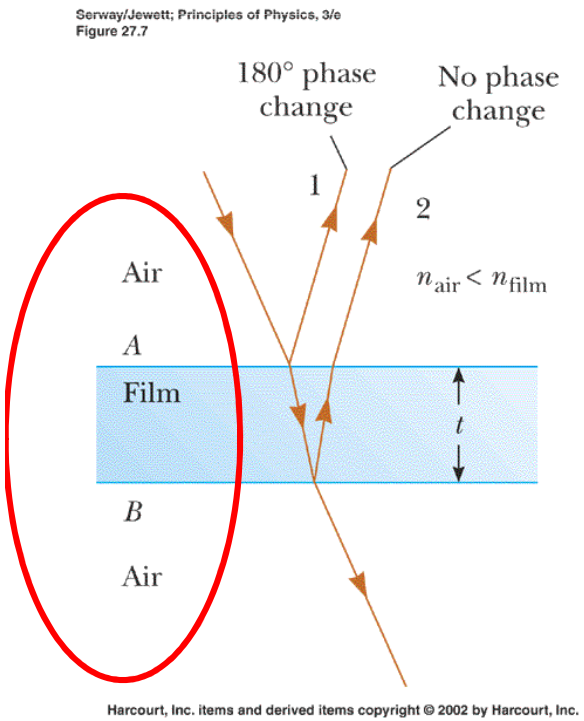
Entretanto, **devemos considerar também que o raio 2 percorre uma distância** extra **aproximadamente igual a 2t** (sendo t a espessura do filme) antes de as ondas se recombinarem.

A diferença de fase total surge da combinação da diferença de percurso e da mudança de fase de 180º na reflexão.

Por exemplo, se: $2t = \frac{\lambda_n}{2}$ os raios 1 e 2 se recombinarão em fase, resultando em uma interferência construtiva.







Em geral, **a condição para interferência construtiva** é:

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_n \quad (\mathrm{m} = 0,1,2,\ldots)$$

Esta condição leva em conta dois fatores:

(a) A diferença na diferença do percurso ótico para os dois raios, o termo ($m\lambda_n$) e

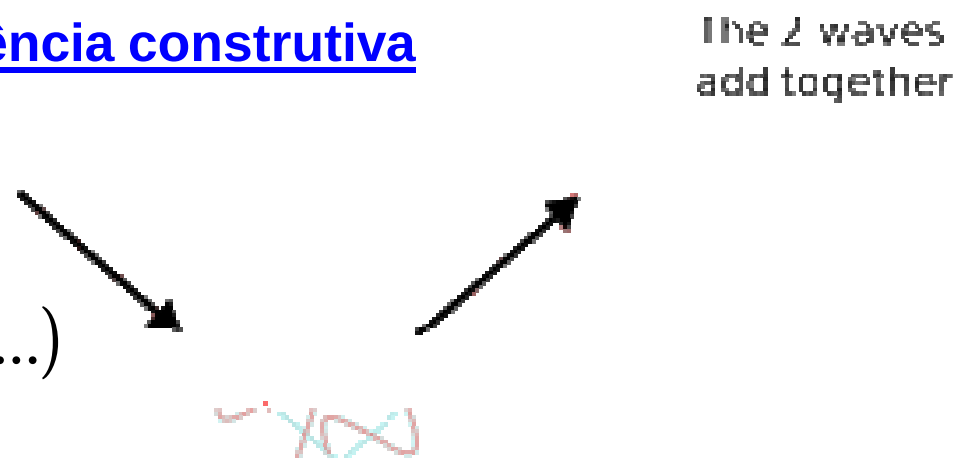
(b) A mudança de fase de 180º na reflexão, o termo: $\frac{\lambda_n}{2}$

Como $\lambda_n = \dfrac{\lambda}{n}$

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_n, \quad \therefore$$

$$2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \qquad (\mathrm{m} = 0,1,2...)$$

interferência construtiva

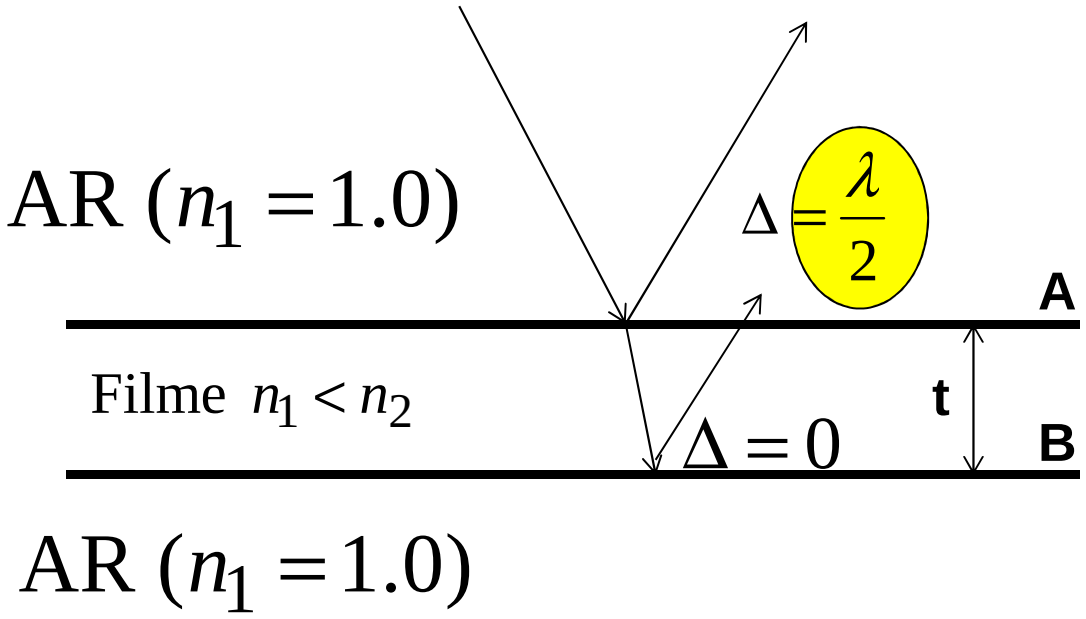


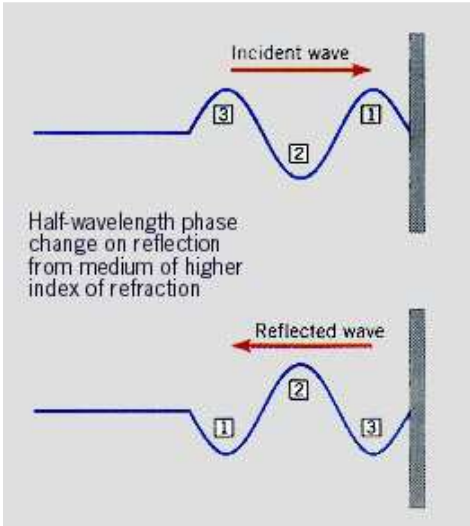
Se a distância extra 2t percorrida pelo raio 2 corresponde a um múltiplo de λ_n as duas ondas irão se combinar fora de fase, resultando em uma interferência destrutiva.

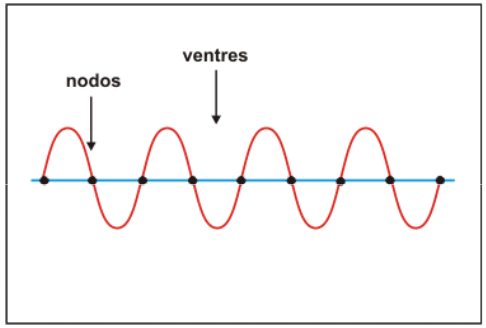
Analogamente a equação geral para a interferência destrutiva é:

$$2nt = m\lambda \qquad (\mathrm{m} = 0,1,2,...)$$

Estas condições são válidas quando o meio acima da superfície do filme for o mesmo abaixo da superfície do mesmo.

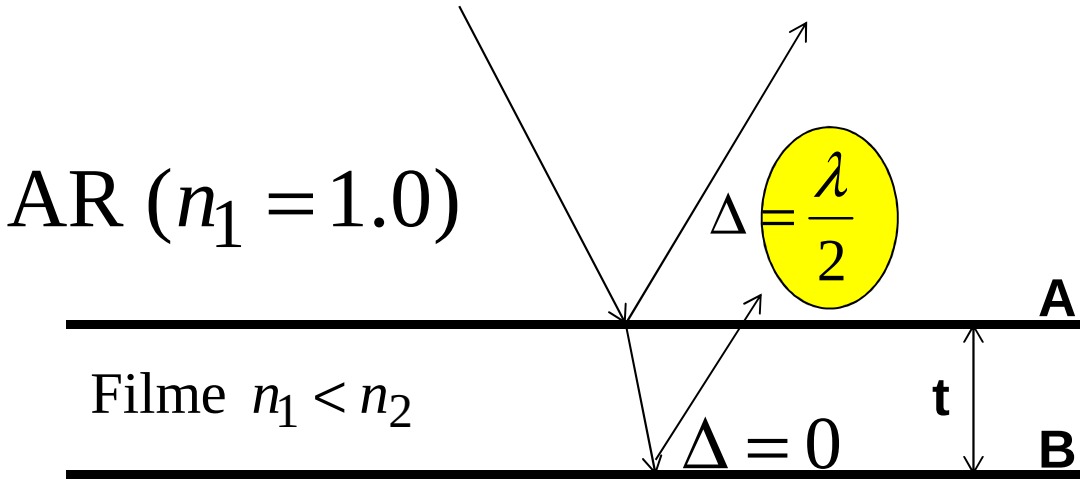


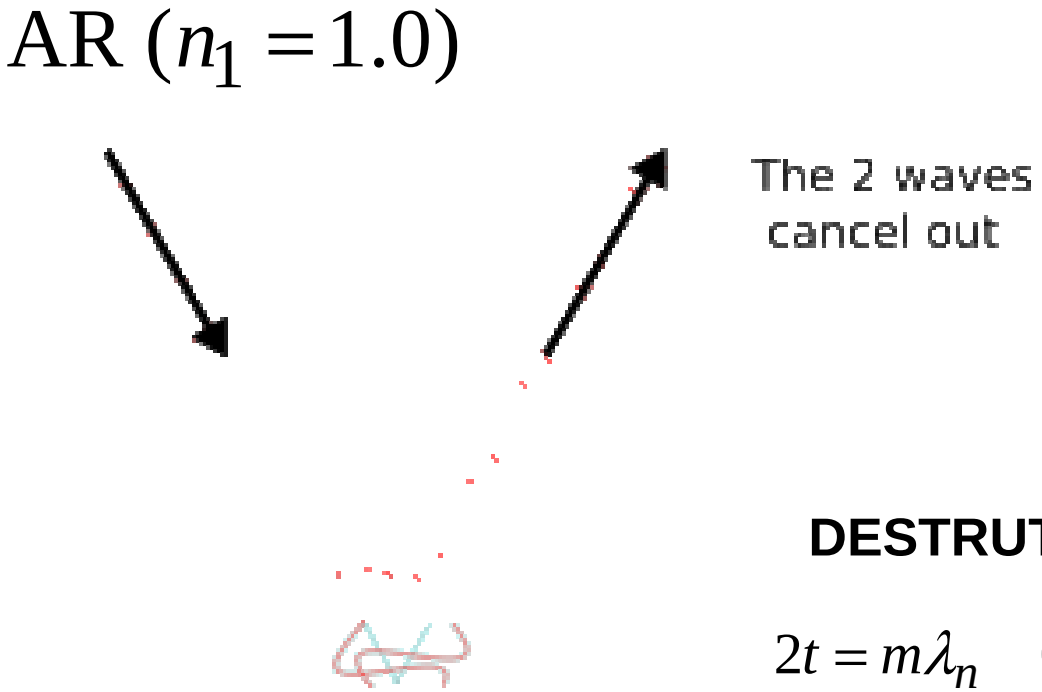




CONSTRUTIVO

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_n \quad (\mathrm{m} = 0,1,2,\ldots)$$

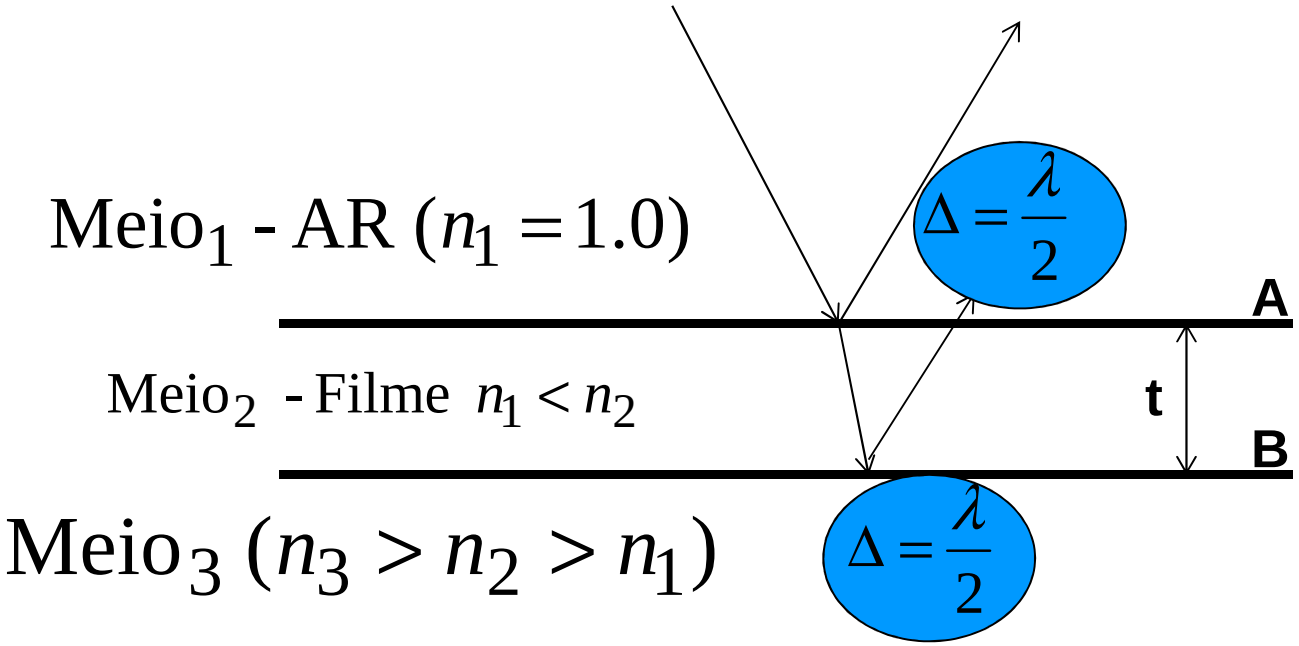




DESTRUTIVO

$$2t = m\lambda_n \quad (\mathrm{m} = 0,1,2,\ldots)$$

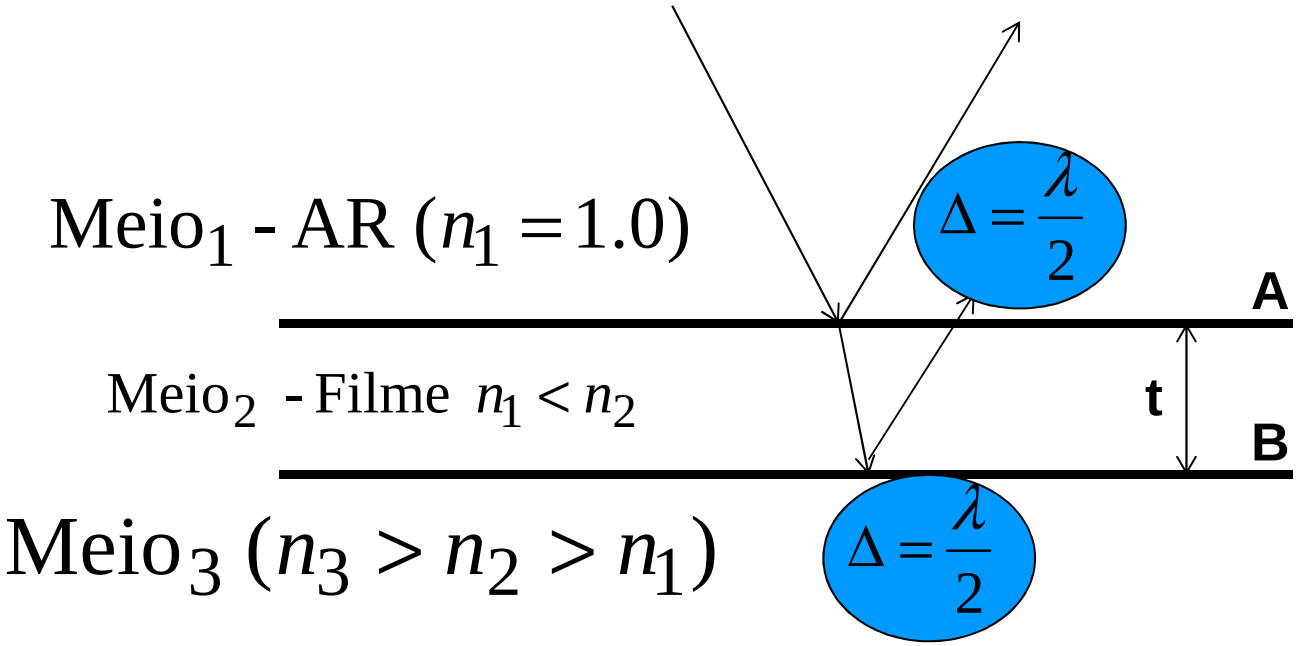
$$2t = m\frac{\lambda}{n} \Rightarrow 2nt = m\lambda$$

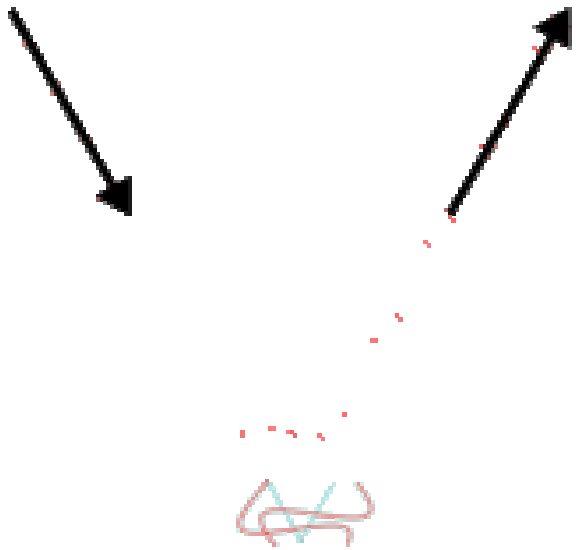


CONSTRUTIVO

$$2t = m\lambda_n \quad (\mathrm{m} = 0,1,2,\ldots)$$

$$2t = m\frac{\lambda}{n} \Rightarrow 2nt = m\lambda$$





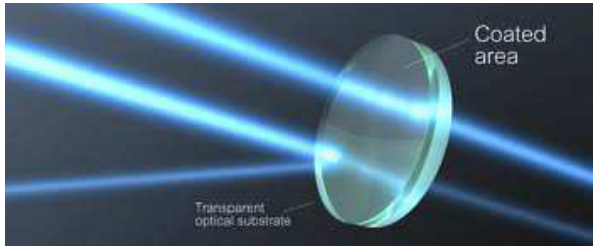
DESTRUTIVO

$$2t = \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda_n \quad (\mathrm{m} = 0,1,2,\ldots)$$

Exemplo 27.3 Revestimento anti-refletores para células solares:

Semicondutores como o silício são utilizados para fabricar células solares (fotovoltáicas) – dispositivos que absorvem energia eletromagnética convertendo em energia elétrica. Átomos de silício são ionizados, produzindo elétrons que sob a aplicação de uma diferença de potencial se convertem em uma corrente elétrica.

Células solares geralmente são revestidas com um filme fino e transparente, como o monóxido de silício (SiO, n=1.45), a fim de minimizar as **perdas por reflexão** na superfície **(maximizar a transmitância).**



Suponha que uma célula solar de silício (n=3.5) seja revestida com essa finalidade por um filme fino de monóxido de silício. Determine a espessura mínima do filme que produz a **menor reflexão (máxima destruição)** em um comprimento de onda de 550nm, que é o centro do espectro visível.

$$\lambda_n^{luz-meio} = \frac{\lambda^{luz-vácuo}}{n} = \frac{550nm}{1.45}$$

$$\lambda_n^{luz-meio} \approx 380nm \Rightarrow$$

$$\frac{\lambda_n}{2} \approx 190nm \text{ (máximo de interferência destrutiva)}$$

INTERFERÊNCIA DESTRUTIVA

$$2t = \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda_n \quad (\mathrm{m} = 0,1,2,...)$$

$$2t = ((m = 0) + \frac{1}{2}) \lambda_n \Rightarrow$$

$$t = \frac{\lambda_n}{4} \approx \frac{190}{2} \approx 95nm$$

$$\lambda_n^{luz-meio} = \frac{\lambda^{luz-vácuo}}{n} = \frac{550nm}{1.45}$$

$$\lambda_n^{luz-meio} \approx 380nm \Rightarrow$$

$$\frac{\lambda_n}{2} \approx 190nm$$

$$\frac{\lambda_n}{2} \approx 95nm$$

Construtivo

$$2nt = m\lambda \quad (\mathrm{m} = 0,1,2,...)$$

$$2t = \left((m=0) + \frac{1}{2}\right)\lambda_n \quad (\mathrm{m} = 0,1,2,...)$$

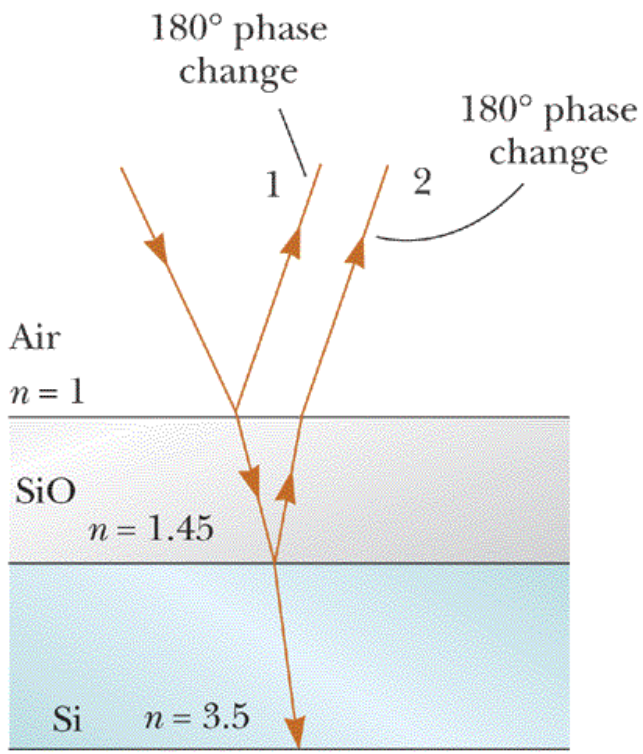
Destrutivo

$$\text{logo, } 2t = \frac{\lambda}{2n} \Rightarrow$$

$$t = \frac{\lambda}{4n} = \frac{550nm}{4(1.45)} = 94.8nm$$

m=0, não há defasagem entre uma reflexão e a outra; não necessito um número inteiro de comprimentos de onda para gerar a interferência destrutiva

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.8



Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

A luz refletida que diminui com a instalação de um filme de anti reflexão (pela otimização da transmitância)
é mínima quando os raios 1 e 2 satisfazem as condições de interferência destrutiva.

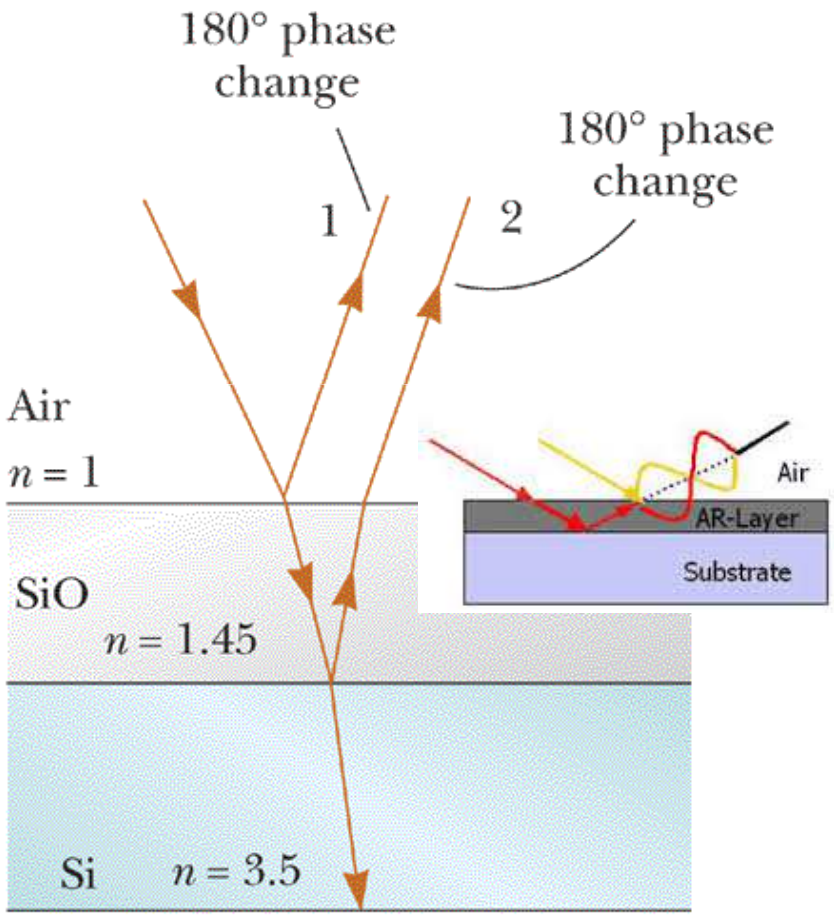
Os **dois raios sofrem mudança de fase** de **180º na reflexão**, neste caso, **uma na superfície superior outra na superfície inferior por passar de um material de menor índice de refração para um material com maior índice.**

Portanto, é nula a mudança total da fase na reflexão, e a condição para o **mínimo de reflexão (máximo de interferência destrutiva)** requer uma diferença de percurso de:

$$\frac{\lambda_n}{2}, \text{logo}, 2t = \frac{\lambda}{2n} \Rightarrow$$

$$t = \frac{\lambda}{4n} = \frac{550nm}{4(1.45)} = 94.8nm$$

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.8

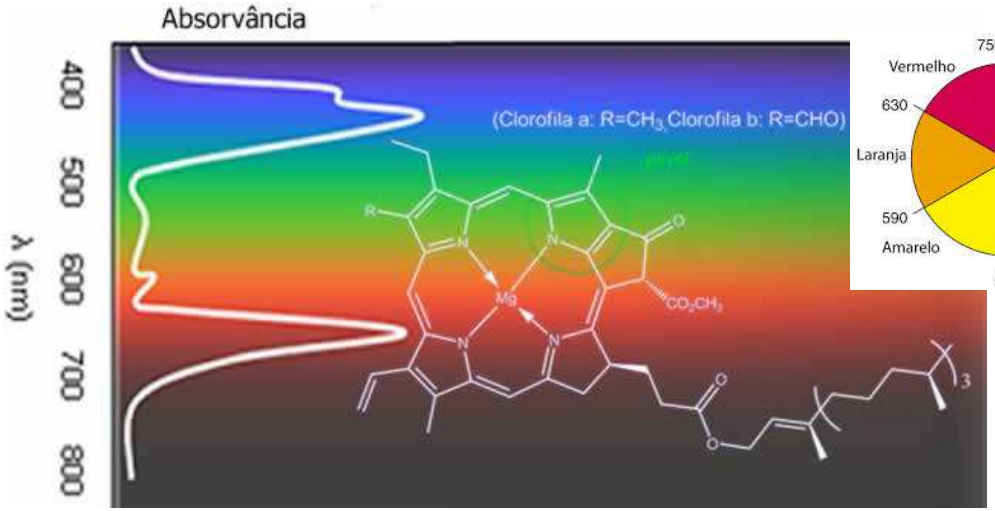


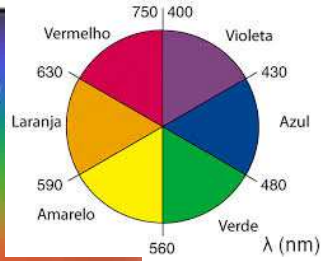
Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

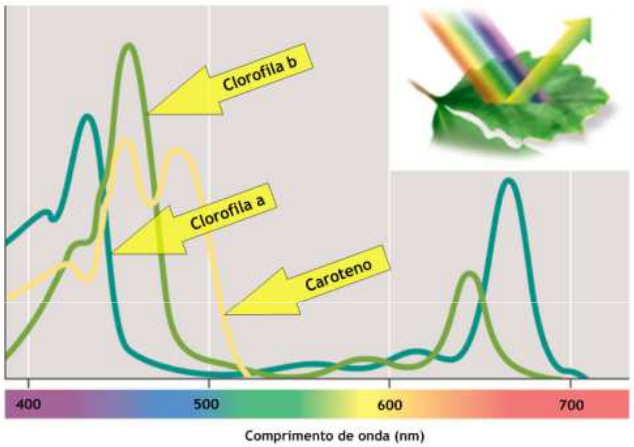
❑ Quando os **raios** atingem um corpo, encontram átomos e moléculas que podem absorver/dispersar/refletir a energia do Sol. **Vemos o que é refletido!!!**

Um exemplo em Física do Meio Ambiente: FOTOSSÍNTESE

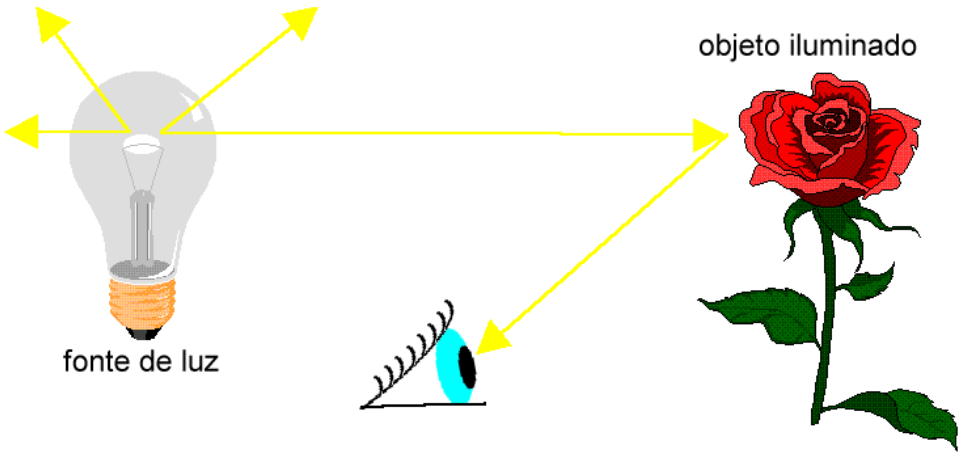
Clorofila (absorção) da LUZ nas plantas, com λ diferente do verde, o qual é refletido







Clorofila: $C_{XX}H_{YY}O_ZN_4Mg$



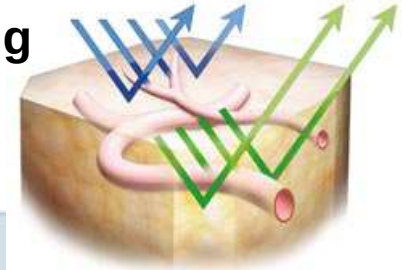
Materiais Reflectantes ou Brilhantes – favorecem a “visão”

coletes

Equipamentos para ciclistas e motociclistas

diamantes

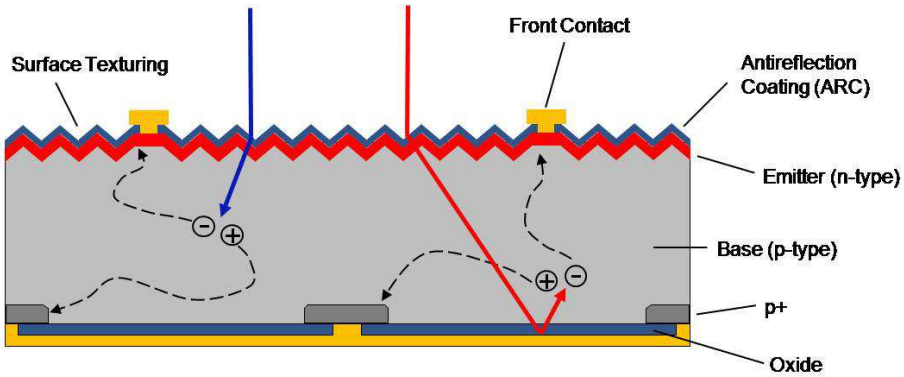
narrow bandwidth imagining
NBI

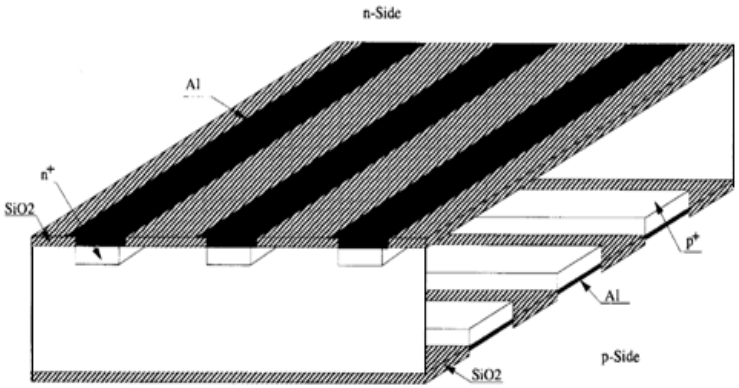


Revestimento anti-reflexo em células solares:

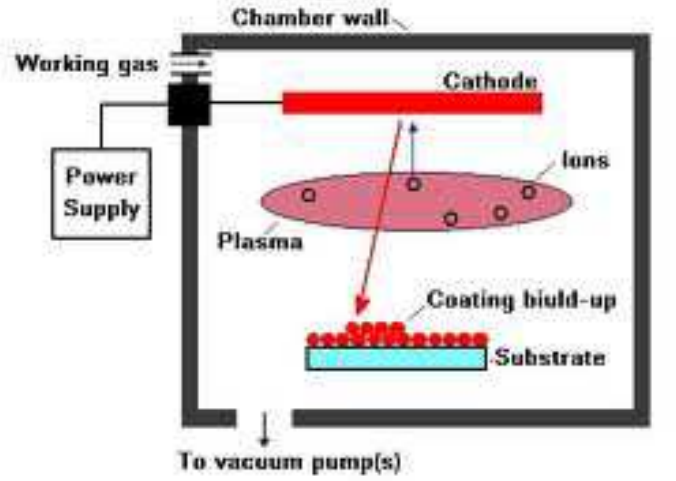
Como o **silício puro é "brilhante"**, pode refletir da ordem de **35 por cento da luz solar**.

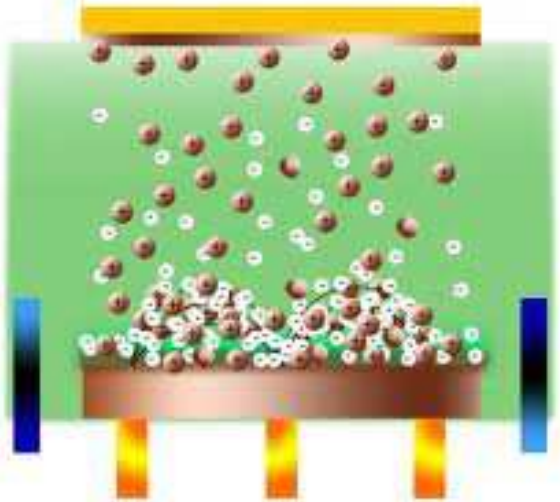
Para reduzir a quantidade de luz solar perdida, **um revestimento anti-reflexo** é colocado sobre a "wafer" de silício principalmente **dióxido de titânio, óxido de silício** e outros são utilizados.





O material usado para o **<u>revestimento</u>** pode ser aquecido até que suas moléculas evaporem e viajem para o silício e condensem, ou o material é **<u>depositado sobre o silício</u>** (uma espécie de pulverização - sputtering).

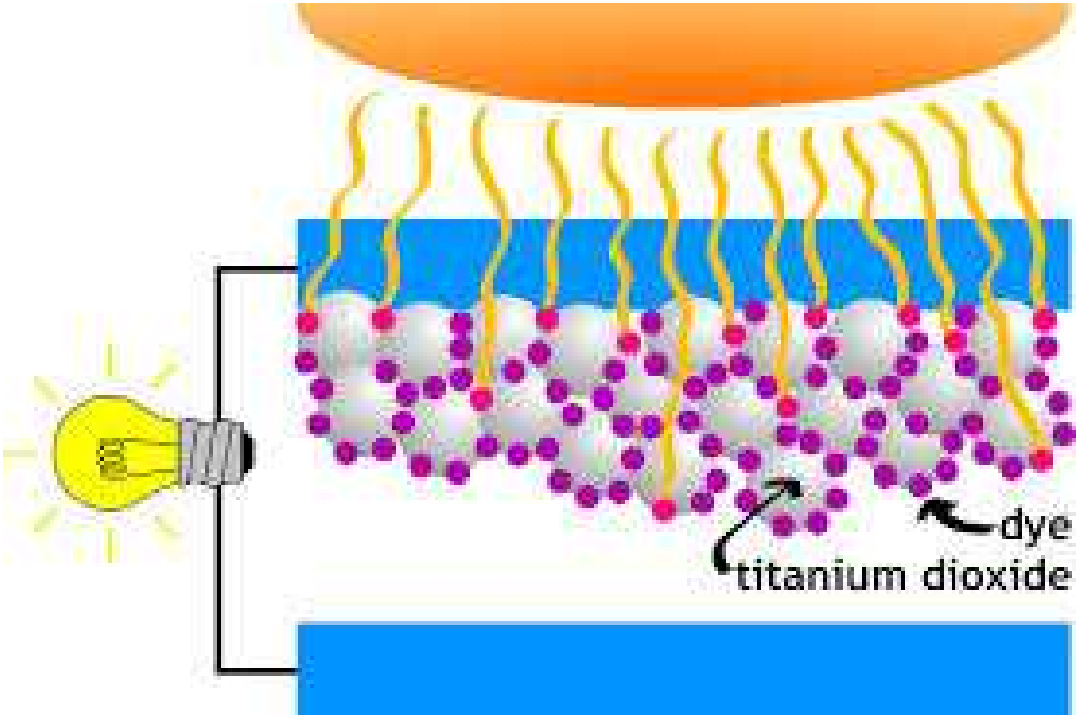




Moléculas ejetadas do catodo são depositadas sobre o filme (neste caso silício)

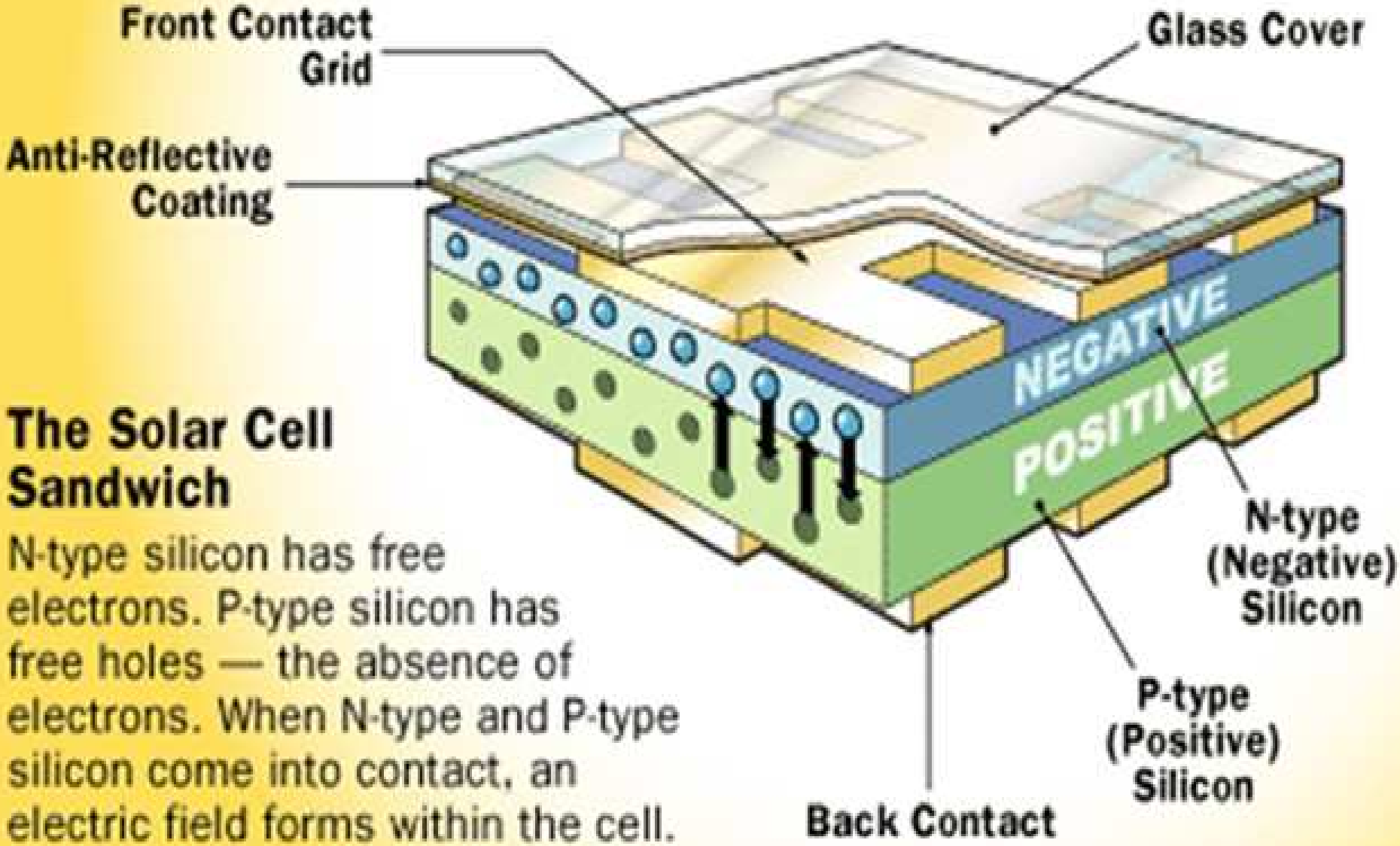
Outro método é permitir a reação química do próprio silício com os gases contendo oxigênio, nitrogênio para formar óxidos de silício ou nitrato de silício ou titânio.

Células solares comerciais usam estes óxidos e nitratos.



How Solar Cells Work

©2006 HowStuffWorks

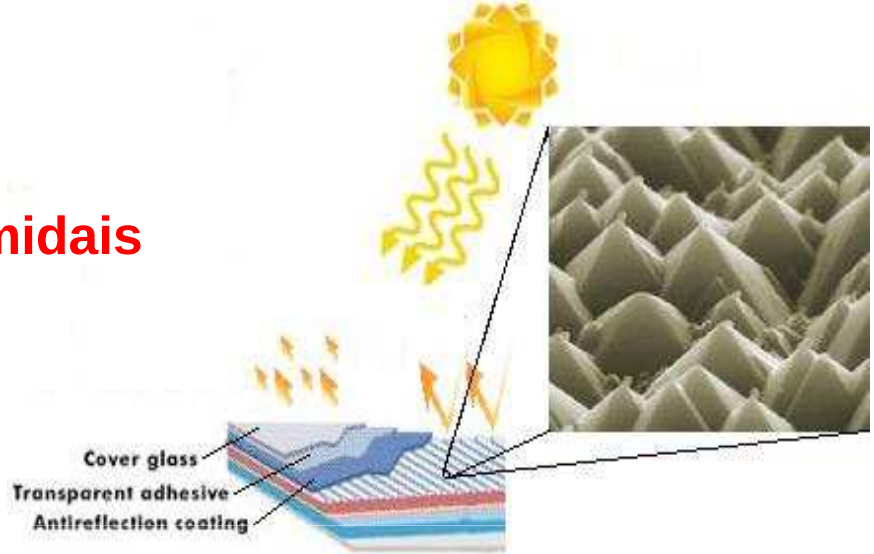


The Solar Cell Sandwich

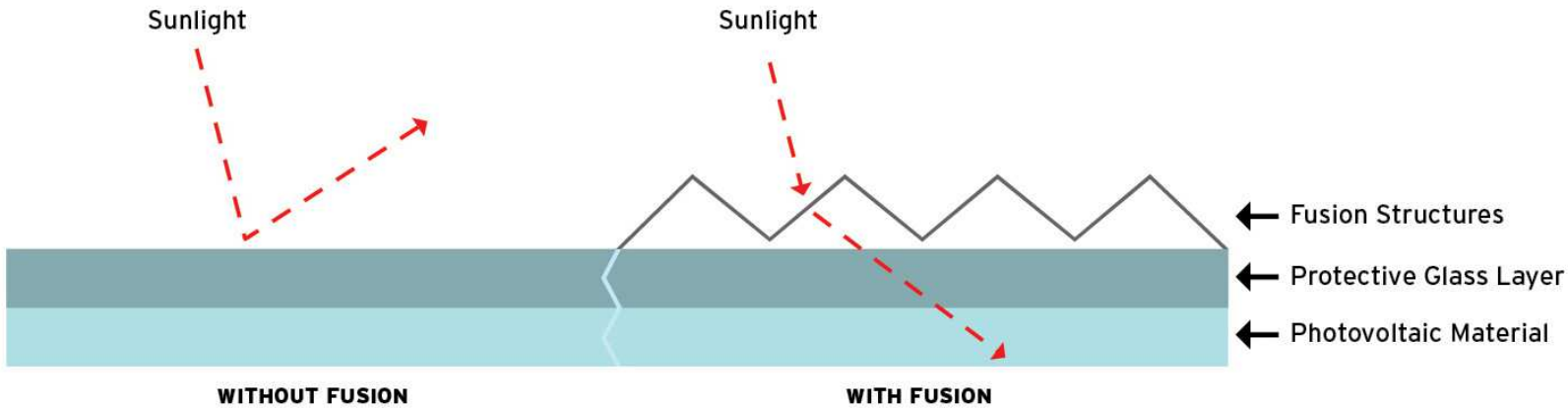
N-type silicon has free electrons. P-type silicon has free holes — the absence of electrons. When N-type and P-type silicon come into contact, an electric field forms within the cell.

<u>Outro método</u> para fazer o silício (ou semicondutor) **absorver mais luz** é construir (manufaturar) sua superfície com uma forma granulada, i.e. com uma **forma piramidal**.

Nano estruturas piramidais

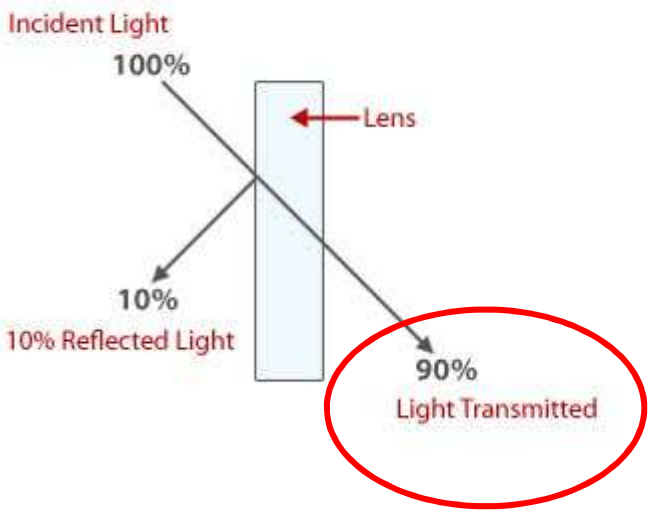


See more at:
http://www.eai.in/ref/global/ae/sol/celltech/cell_tech.html#sthash.HfT85Ev8.dpuf

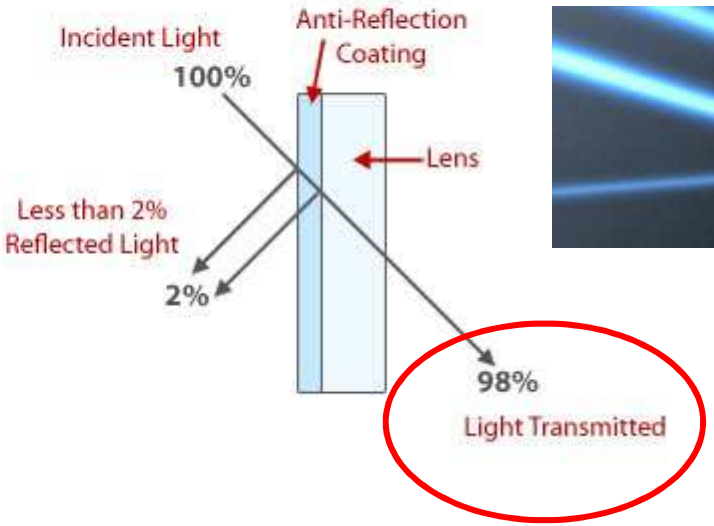


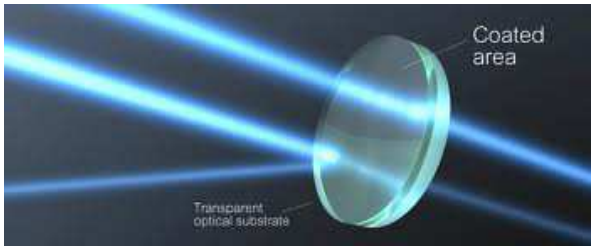
Not to scale. Structures differ in geometry. Rays drawn to simulate effect.

Lens Without Anti-Reflection Coating

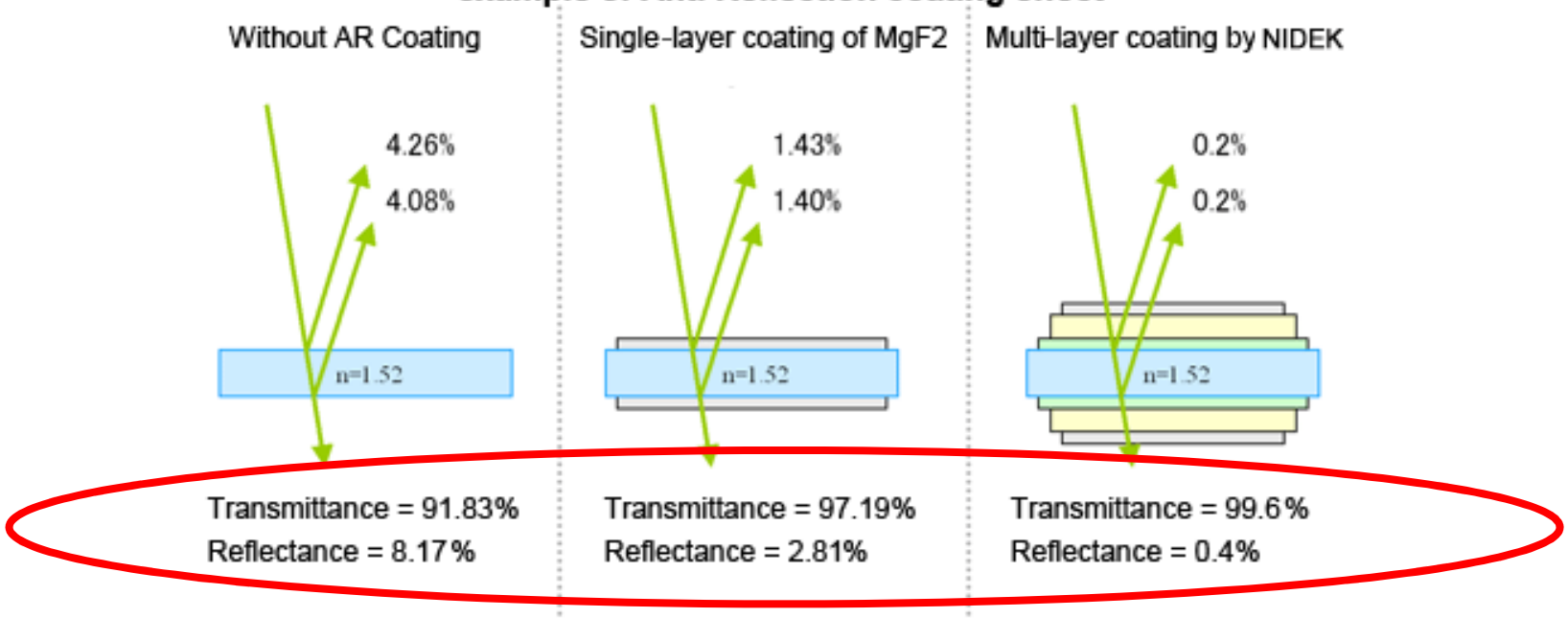


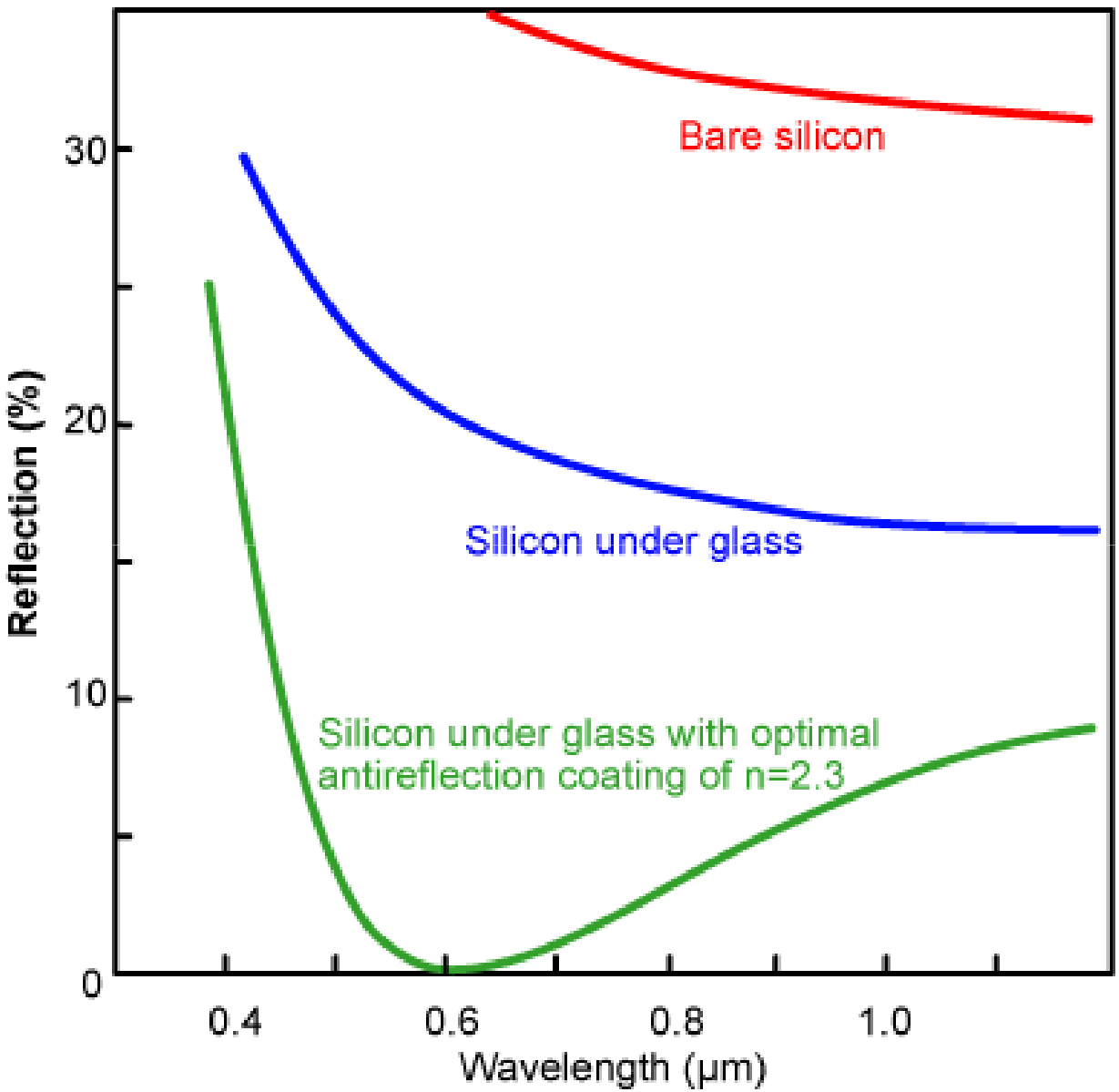
Lens With Anti-Reflection Coating





example of Anti Reflection coating effect




Bare silicon
Silicon under glass
Silicon under glass with optimal
antireflection coating of n=2.3
Reflection (%)
30
20
10
0
0.4
0.6
0.8
1.0
Wavelength (μm)

14. Um meio possível de tornar um avião invisível ao radar é revestir a aeronave com um polímero anti-refletor.

Se as ondas de radar têm um comprimento de onda de 3cm e o índice de refração do polímero é n=1.50, com qual espessura você faria o revestimento?

16. Um material que tem índice de refração de 1.30 é usado para revestir um pedaço de vidro (n=1.50). Qual deveria ser a espessura mínima desse filme para minimizar a reflexão da luz de 500nm?

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

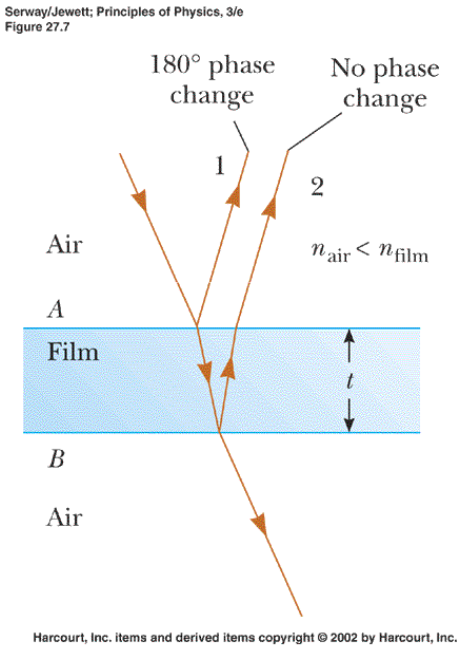
$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_n, \quad \therefore$$

$$2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (\mathrm{m} = 0,1,2...)$$

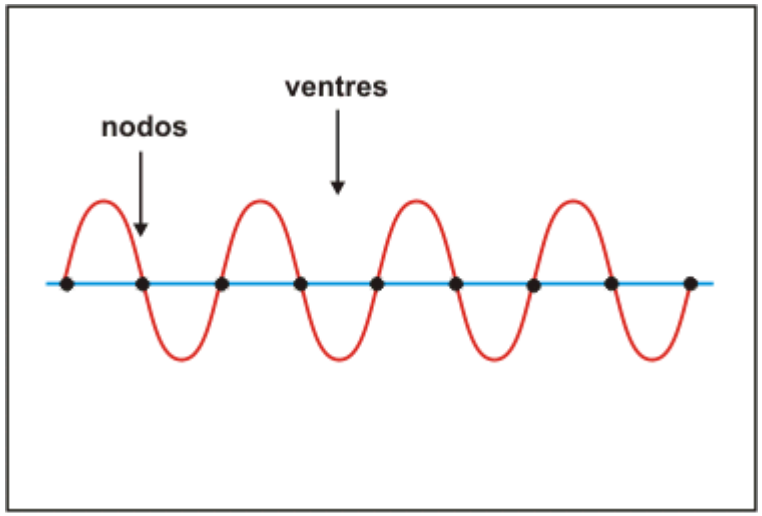
$$2nt = m\lambda \quad (\mathrm{m} = 0,1,2,...)$$

Estratégia de resolução de problemas de interferência em filmes finos

1. **Identificar o filme fino**
2. **O <u>tipo de interferência</u> é determinado pela <u>relação de fase</u> entre as partes de onda refletidas nas superfícies superior e inferior**



1. **As diferenças de fase têm duas causas:**
   a. **diferenças entre as distâncias percorridas**
   b. **mudanças de fase que ocorrem na reflexão**



14. Um meio possível de tornar um avião invisível ao radar é revestir a aeronave com um polímero anti-refletor.

Se as ondas de radar têm um comprimento de onda de 3cm e o índice de refração do polímero é n=1.50, com qual espessura você faria o revestimento?

Buscamos interferência destrutiva na reflexão

Portanto, na equação:

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{n}$$

$$\mathrm{m} = 0 \Rightarrow$$

$$t = \frac{1}{4} \cdot \frac{\lambda}{n} = \frac{3.0cm}{4 \cdot (1.50)} = 0.5cm$$

16. Um material que tem índice de refração de 1.30 é usado para revestir um pedaço de vidro (n=1.50). Qual deveria ser a espessura mínima desse filme para minimizar a reflexão da luz de 500nm?

$$2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \Rightarrow t = \left(m + \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{\lambda}{2n}$$

$$\text{condição de mínimo de reflexão } (\mathrm{m} = 0)$$

$$t = \left(\frac{1}{2}\right)\frac{(500nm)}{2 \cdot (1.30)} = 96.2nm$$

CAPÍTULO 27

- ❑ **DIFRAÇÃO DE FRAUNHOFER**
- ❑ **FENDA SIMPLES**
- ❑ CRITÉRIO DE RAYLEIGH
- ❑ DIFRAÇÃO DE RAIOS-X
- ❑ LEI DE BRAGG

LISTA DE EXERCÍCIOS – CAPÍTULO 27

❑ **Exs.: 2, 3, 5, 8, 10, 13, 14, 15, 18, 19, 23, 25, 26, 29, 32, 37, 43, 48, 51**

RELEMBRANDO e DIFERENCIANDO CONCEITOS:

Reflexão envolve uma **mudança na direção** das ondas quando **colidem contra uma barreira**.

Refração envolve uma **mudança na direção** das ondas à medida que passam **de um meio para outro.**

Difração envolve uma mudança na direção das ondas à medida que passam **através de uma abertura ou de um obstáculo** em seu caminho.

Ondas de água tem a capacidade de viajar em torno de cantos (bordas), em torno de obstáculos e através das aberturas. As ondas sonoras fazem o mesmo. **Mas o que dizer da luz?**

Ondas de luz curvam-se em torno de obstáculos e através de aberturas?

Quando a **luz encontra um obstáculo no seu caminho**, **o bloqueio do obstáculo à luz tende a causar a formação de uma sombra na região por trás do obstáculo.**

A luz **não apresentam uma capacidade muito perceptível** para curvar o obstáculo e iluminar atrás. No entanto, **a luz difrata (espalha – muda de direção) em torno de obstáculos.**

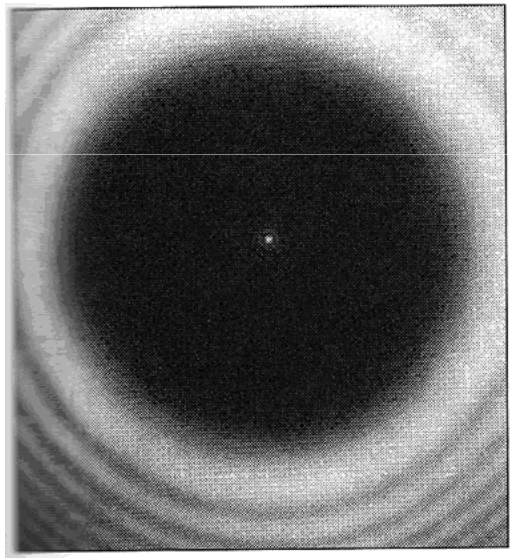
Observando uma sombra com cuidado, notamos **bordas difusas**.

Efeitos de interferência ocorrem devido à difração da luz em torno de diferentes lados do objeto, fazendo com que a sombra do objeto seja distorcida.

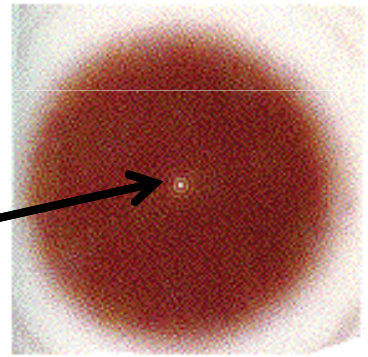
Isso é demonstrado com uma **luz incidindo contra uma moeda.**

A difração de luz em torno às bordas esquerda e direita da moeda pode produzir uma interferência construtiva ou destrutiva.

O resultado é que um padrão de interferência é criado; **o padrão consiste em anéis de luz e escuridão alternada**. Esse padrão só é perceptível se um **feixe de luz monocromática é dirigido à moeda**.



ponto brilhante de Arago



Light diffracts around a penny - observe the light spot in the center of pattern.

Uma vez que, **as ondas de luz difratam em torno das bordas da moeda**, as ondas são **divididas em diferentes frentes de onda** que **convergem num ponto na tela para produzir o padrão de interferência mostrado na fotografia e o ponto brilhante de Arago.**

RELEMBRANDO:

Difração é o **espalhamento da luz** a partir de uma trajetória em linha reta quando a luz passa através de uma **abertura ou ao redor de obstáculos.**

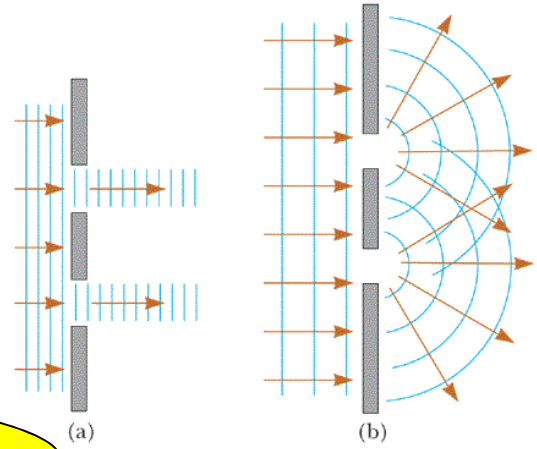
Um **padrão de difração** pode ser analisado à medida que a **interferência de um grande número de fontes de Huygens coerentes se espalha através da abertura.**

(a) Se as ondas luminosas não se espalhassem ao atravessar as fendas, nenhuma interferência ocorreria.

(b) As **ondas luminosas das duas fendas se superpõem** à medida que se espalham, preenchendo as regiões sombreadas com luz e **produzindo franjas de interferência** conhecido como **padrão de difração**.

(c) O QUE OCORRE PARA UMA ÚNICA FENDA????

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.11

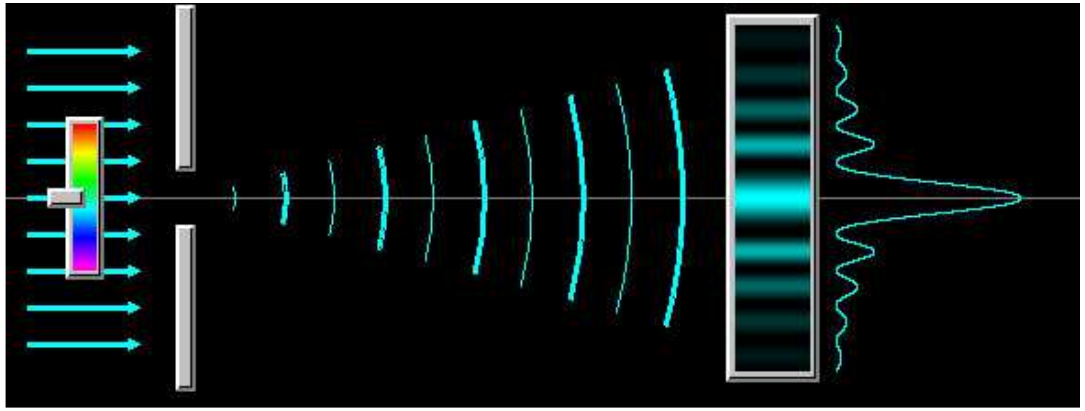


Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

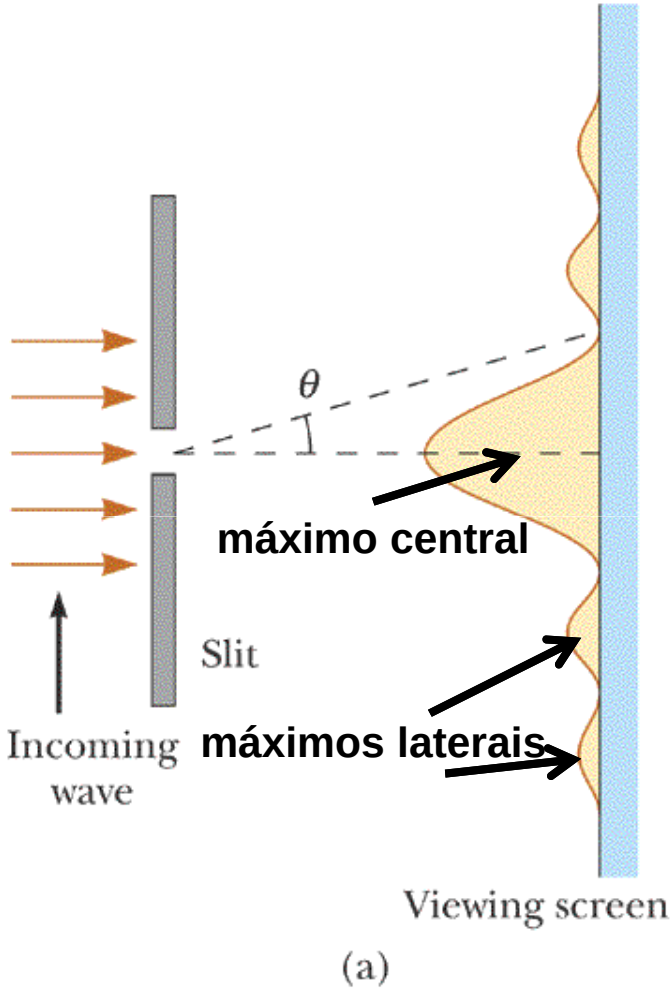
Neste caso, temos
uma região central brilhante (ESPERADA)

flanqueada por máximos e mínimos muito menos intensos alternando com zonas escuras. Isto é, temos um padrão de difração

O **padrão de difração de Fraunhofer** consiste no **padrão de difração** obtido pela **difração de fenda única**.



Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.14a



Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

COMO EXPLICAR ESTE FENÔMENO ?

Claramente temos um processo de interferência projetado no anteparo

Difração é o **espalhamento da luz** a partir de uma trajetória em linha reta quando a luz passa através de uma **abertura ou ao redor de obstáculos.**

Um **padrão de difração** pode ser analisado à medida que a **interferência de um grande número de fontes de Huygens coerentes se espalha através da abertura ou ao redor de obstáculos.**

Então podemos considerar, **por exemplo**, as **bordas superior e inferior** como dois obstáculos independentes
(ou pensar nas bordas de um orifício circular em 2D).

Para analisar o **padrão de difração de fenda única** é conveniente dividir a fenda em duas porções (metades) – **(tratamento unidimensional da fenda – diferente de quando pensamos em um orifício circular – 2D).**

Todas as ondas que se originam na fenda estão em fase (fontes coerentes).

Podemos descrever este problema considerando
as ondas provenientes de várias porções da fenda.

Considere as ondas 1 e 3 que se originem na base e no centro da fenda.

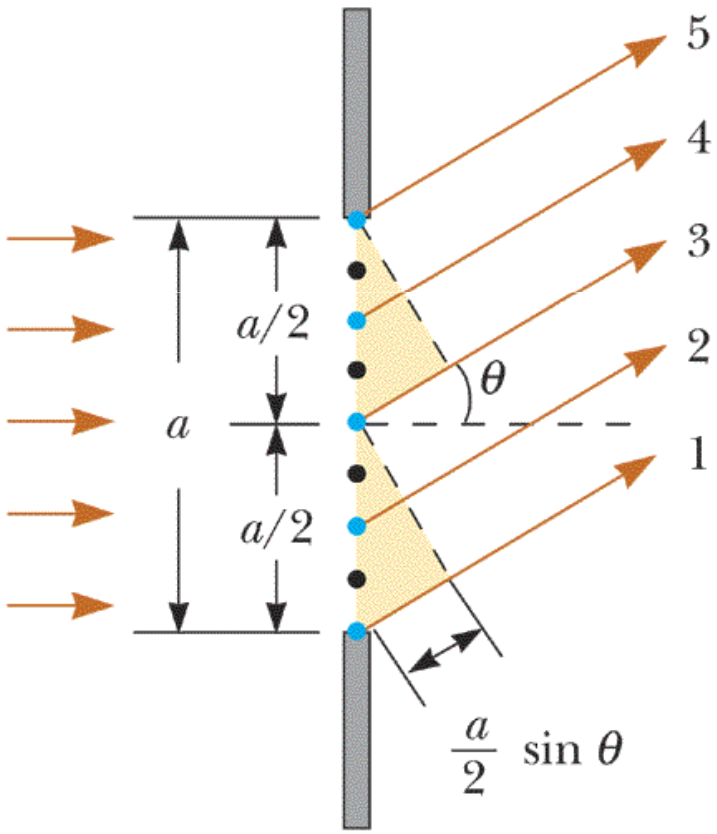
Para alcançar o mesmo ponto no anteparo, a onda 1 percorre uma distância maior.

Analogamente ao caso da dupla fenda:

$$sen\theta = \frac{\Delta}{a/2} = \frac{a}{2} sen(\theta) = \Delta$$

onde "a" é a largura da fenda

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.15



Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

Podemos descrever este problema considerando
as ondas provenientes de várias porções da fenda.

Considere as ondas 3 e 5 que se originem no centro da fenda e na base superior.

Para alcançar o mesmo ponto no anteparo, a onda 3 percorre uma distância maior.
De modo que:

$$\Delta = \frac{a}{2} sen(\theta)$$

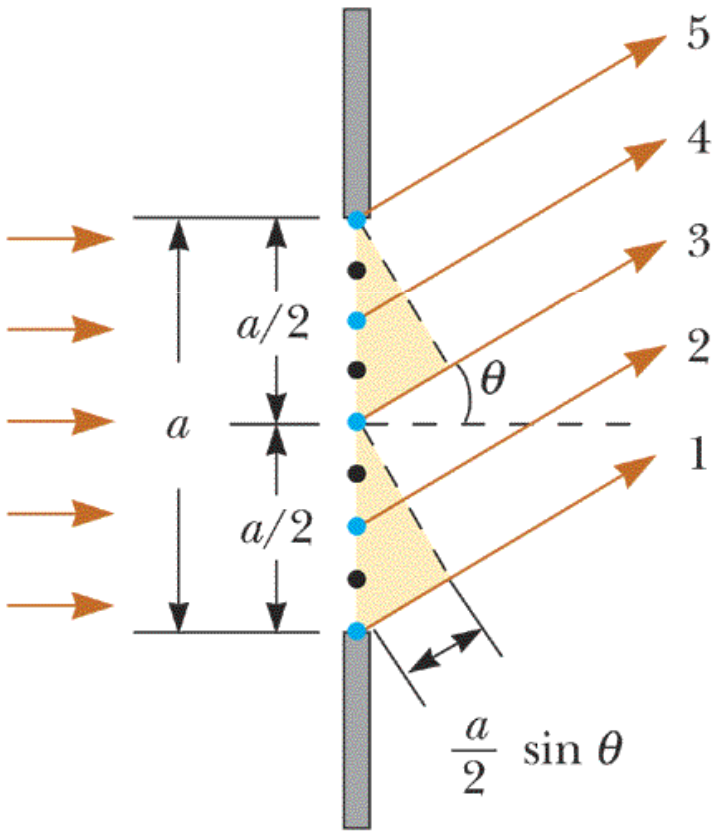
onde "a" é a largura da fenda

Analogamente ao caso das ondas 3 e 5 está o caso das ondas 1 e 3 onde:

$$\Delta = \frac{a}{2} sen(\theta)$$

onde "a" é a largura da fenda

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.15



Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

Difração da luz por uma fenda estreita de largura "a".

Cada porção da fenda atua como uma fonte pontual de ondas.

A diferença de percurso entre os raios 1 e 3 ou entre os raios 3 e 5 é de: $\frac{a}{2} sen\theta$

As ondas da metade superior interferem destrutivamente com as ondas da metade inferior da fenda quando:

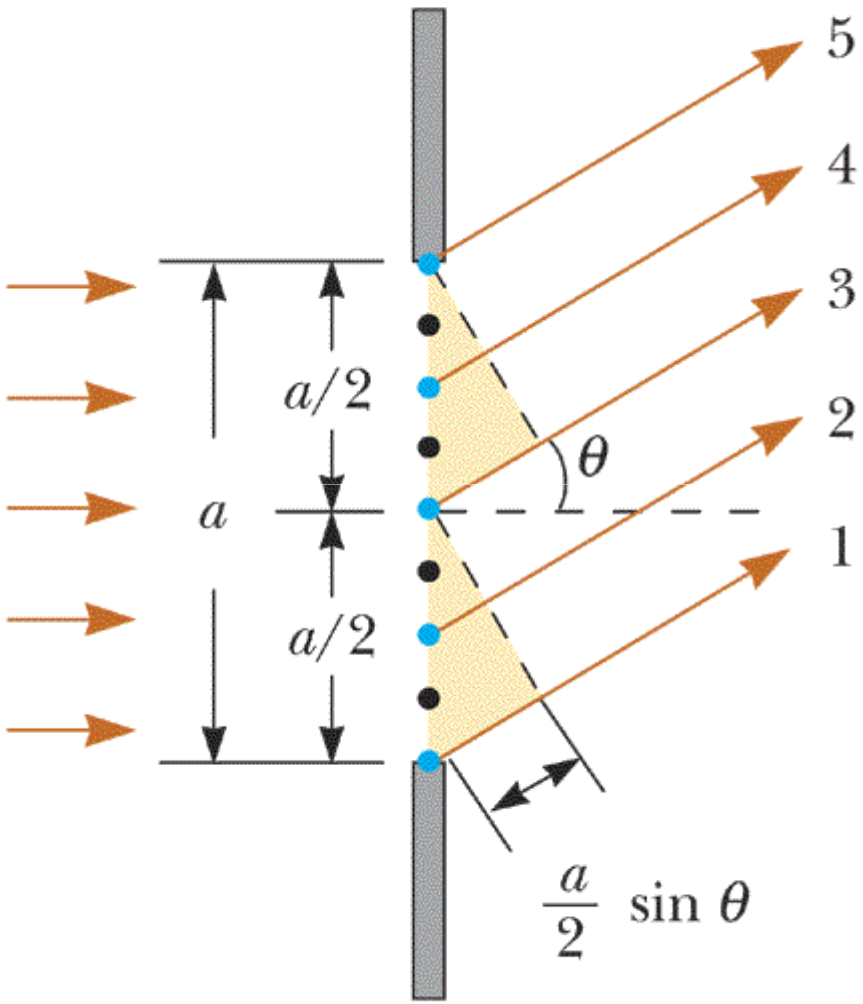
$$\Delta = \frac{a}{2} sen\theta = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow a \cdot sen\theta = \lambda \Rightarrow$$

$$sen\theta = \frac{\lambda}{a}$$

Interferência destrutiva

O resultado é simétrico ao eixo de propagação. Portanto são identificadas as posições dos dois mínimos de cada lado do máximo central.

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.15

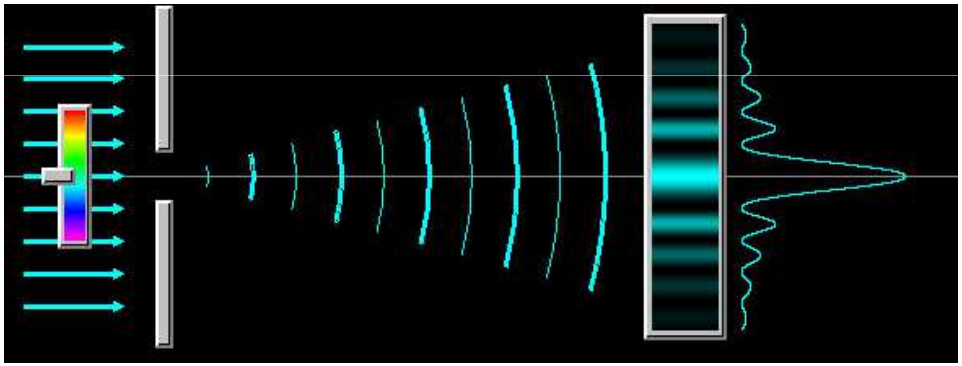


Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

Os ângulos Θ nos quais o **padrão de difração de fenda única** têm **intensidade nula** são dados por:

$$sen\theta_{esc} = n\frac{\lambda}{a} \quad (n = \pm 1, \pm 2, \pm 3...)$$

Esta equação tem a **mesma forma da equação que descreve as regiões brilhantes em um padrão de interferência de dupla fenda**, porém, neste caso (de fenda única) descreve as **regiões escuras**, além disso **n=0 não representa uma franja escura**.



Cuidado as fórmulas são idênticas mas em fenda única é para mínimos de intensidade (franja escura) e em fenda dupla é para máximo de intensidade (franja brilhante)

Padrão de Interferência (difração) de dupla fenda:

$$\Delta = dsen\theta_{brilh} = n\lambda \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2...)$$

$$sen\theta_{brilh} = \frac{n\lambda}{d}$$

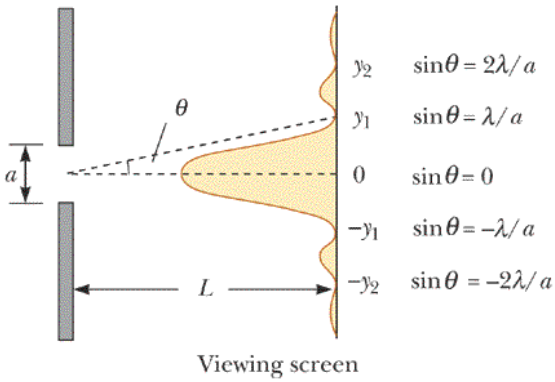
Exemplo 27.5: Onde se apresentam as franjas escuras?

Uma luz de comprimento de onda de 580 nm incide sobre uma fenda cuja largura é de 0.300 mm. O anteparo está a 2 m da fenda. Encontre as posições das primeiras franjas escuras e a largura da franja brilhante central.

Solução:

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.16

$$sen\,\theta_{esc} = \pm n\frac{\lambda}{a} \qquad (\mathrm{n} = \pm 1, \pm 2, \pm 3...)$$



$$\theta = \frac{y_1}{L} \text{ e como } \theta \text{ é muito pequeno}$$

$$sen\,\theta \approx tg\,\theta \approx \frac{y_1}{L}$$

Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

Distribuição da intensidade luminosa para o padrão de difração de Fraunhofer de uma fenda única de largura “a”.

<u>São identificadas as posições dos dois mínimos de cada lado do máximo central.</u>

$$sen\theta_{esc} = n\frac{\lambda}{a} \quad (n = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \ldots)$$

$$n = \pm 1 \Rightarrow sen\theta_{esc} = \pm\frac{\lambda}{a}$$

dividindo a fenda em 4 porções temos :

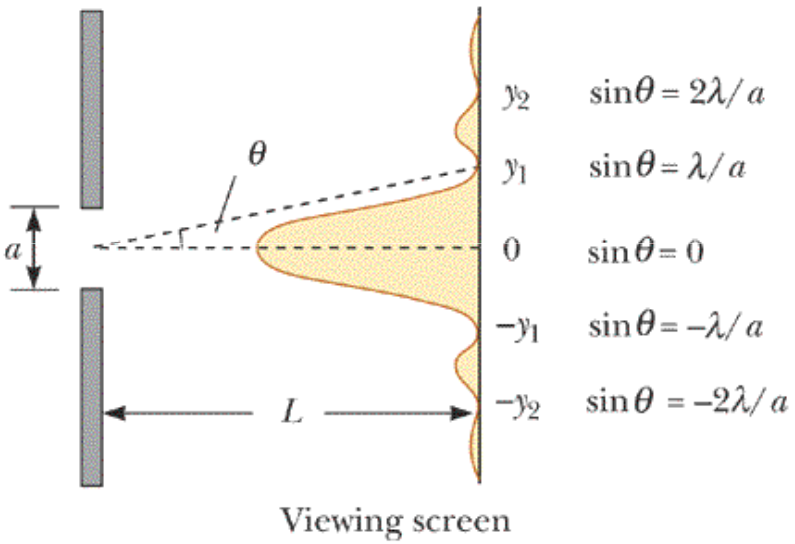
$$n = \pm 2 \Rightarrow sen\theta_{esc} = \pm 2\frac{\lambda}{a}$$

$$sen\theta = \frac{\Delta}{a/4} = \frac{a}{4}sen(\theta) = \Delta = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow$$

$$asen\theta = 2\lambda \Rightarrow sen\theta = \frac{2\lambda}{a}$$

onde "a" é a largura da fenda

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.16



Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

Exemplo 27.5: Onde se apresentam as franjas escuras?

Uma luz de comprimento de onda de 580 nm incide sobre uma fenda cuja largura é de 0.300 mm. O anteparo está a 2 m da fenda. Encontre as posições das primeiras franjas escuras e a largura da franja brilhante central.

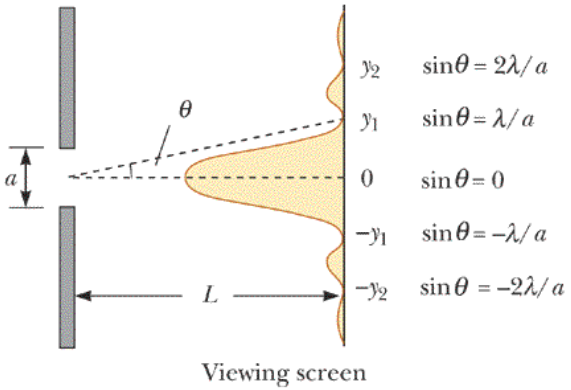
Solução: $$sen\theta_{esc} = n\frac{\lambda}{a} \quad (\mathrm{n} = \pm 1, \pm 2, \pm 3...)$$

As primeiras franjas escuras que ladeiam a franja central brilhante correspondem a n=±1 e portanto

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 27.16

$$sen\theta_{esc} = \pm\frac{\lambda}{a} = \pm\frac{5.8\times10^{-7}m}{0.300\times10^{-3}m} = \pm1.93\times10^{-3}$$

A partir do triângulo da figura



$$\theta = \frac{y_1}{L} \text{ e como } \theta \text{ é muito pequeno}$$

$$sen\theta \approx tg\theta \approx \frac{y_1}{L}$$

$$y_1 \approx Lsen\theta_{esc} = 2m\cdot\left(\pm1.93\times10^{-3}\right)$$

$$y_1 \approx \pm3.86\times10^{-3}m \Rightarrow 2\times3.86\times10^{-3}m = 7.72mm$$

Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.