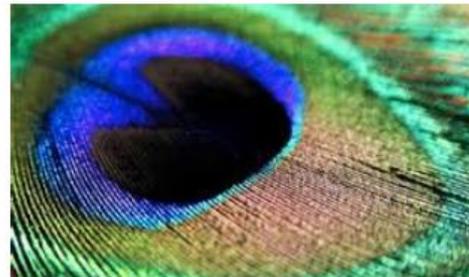


Aula 10 - Ótica - 2020

A luz como onda

Interferência da luz em películas finas Polarização da luz



(Alguns slides baseados em aulas da Profa. Elisabeth Andreoli)

Onda Eletromagnética

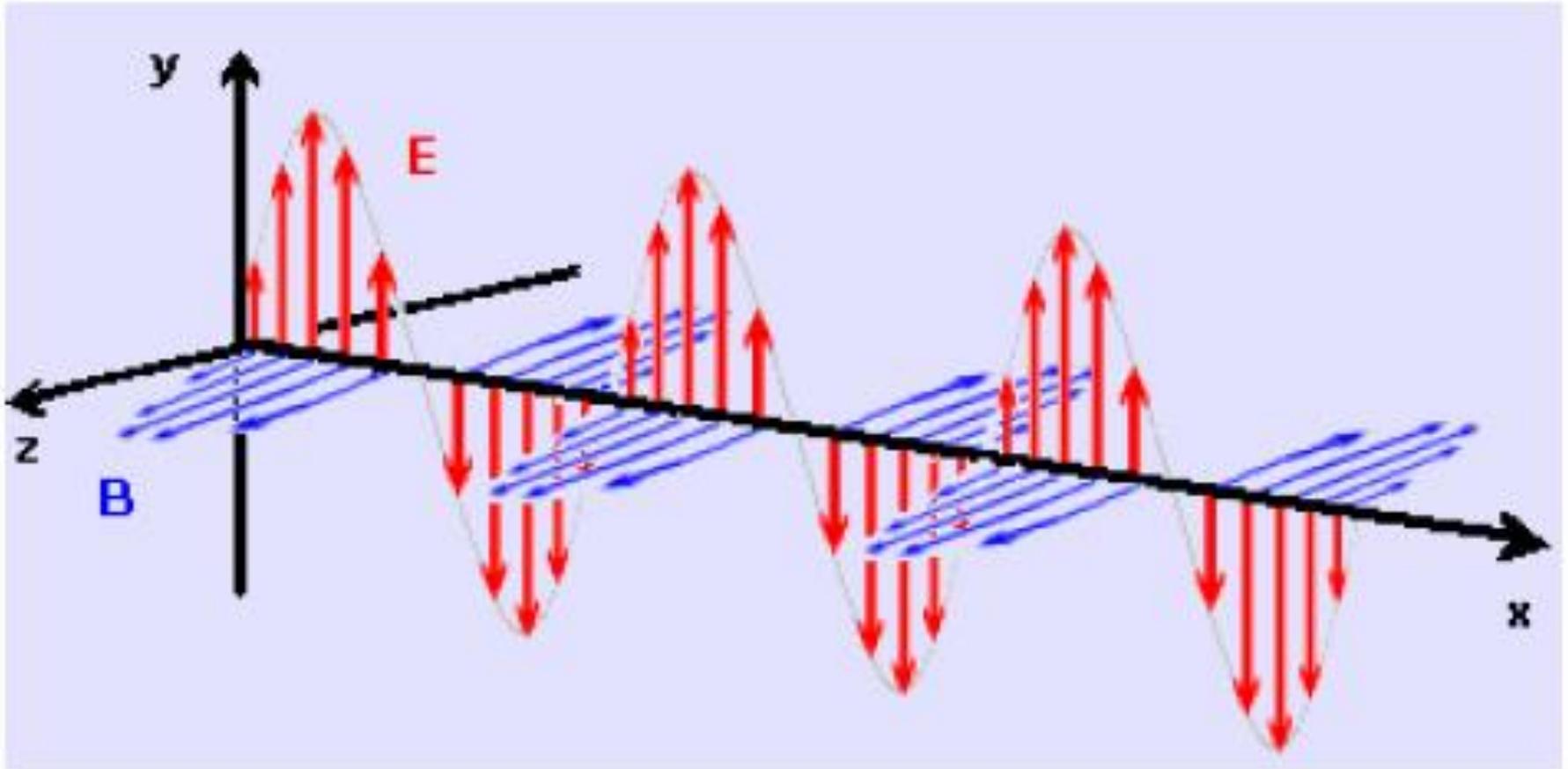
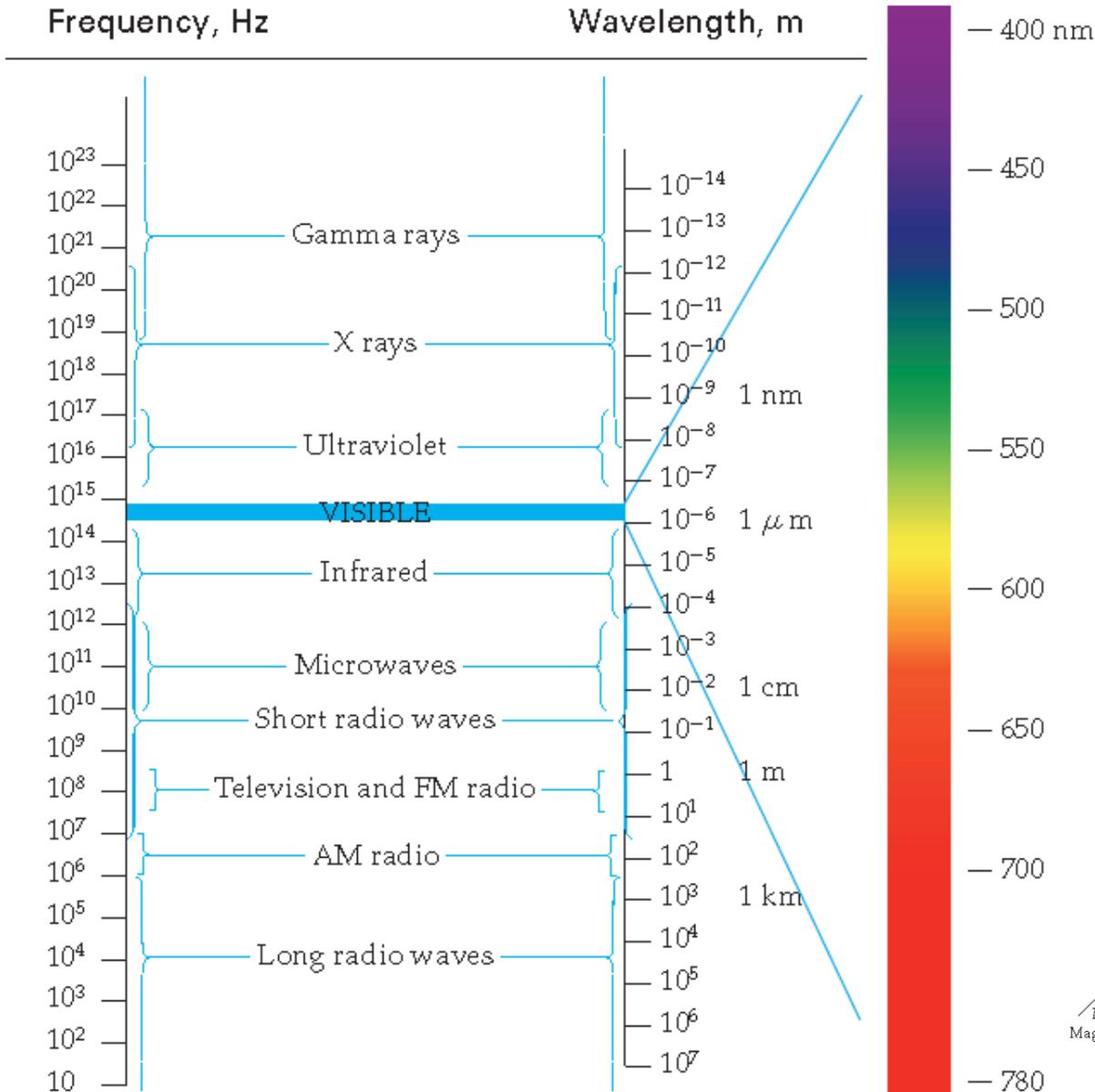
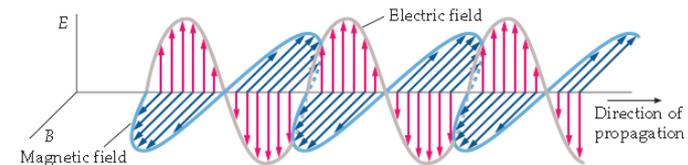


Table 30-1

The Electromagnetic Spectrum

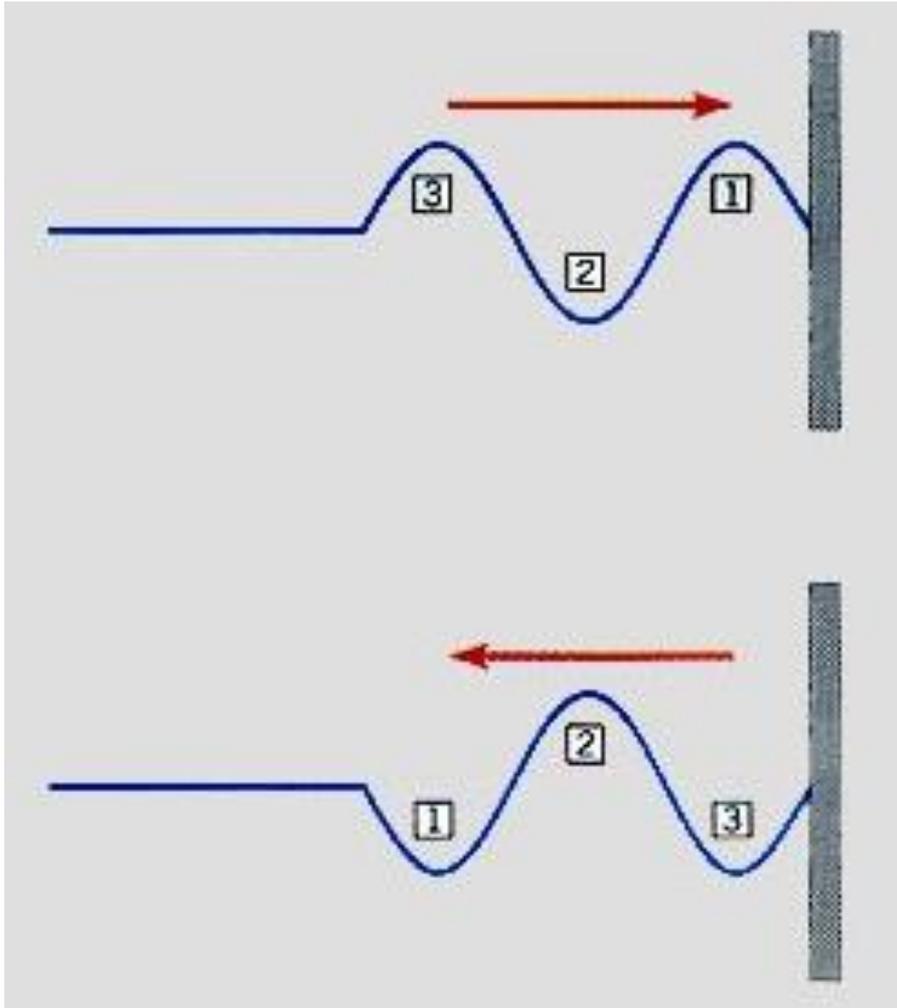


Espectro Eletromagnético



(Tipler, Mosca)

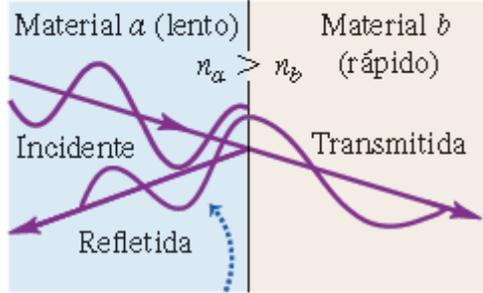
Às vezes existe mudança de fase na onda refletida...



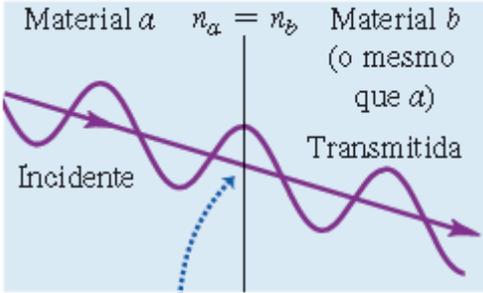
Sempre que uma onda é refletida na interface entre dois meios, sendo que o segundo meio tem índice de refração **MAIOR** do que o do primeiro, existe uma mudança de fase de $\lambda/2$ ou π

Para a luz, é possível demonstrar isso com as **Equações de Maxwell**.
Acho que vocês verão em **Eletromagnetismo 2**

Ondas eletromagnéticas propagando-se em materiais óticos

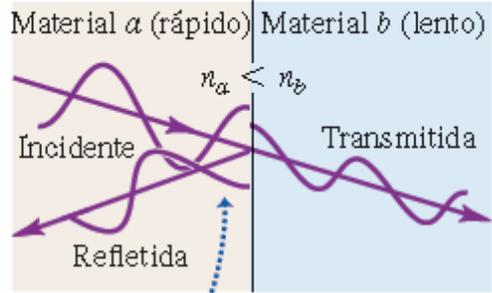


... a onda refletida não passa por mudança de fase.



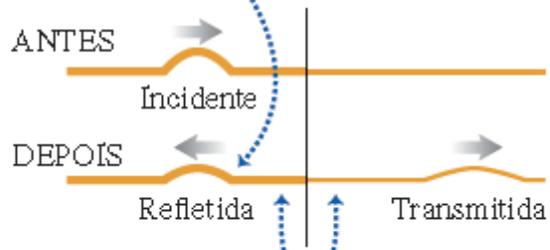
... não há reflexão.

onda incidente...

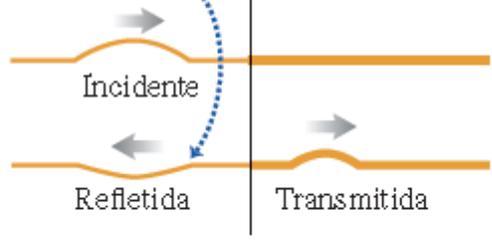
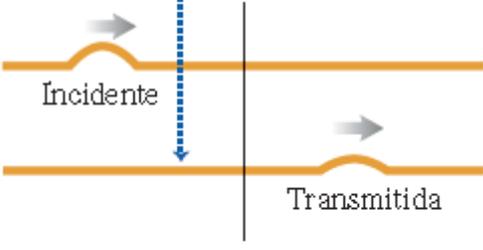


... a onda refletida passa por uma diferença de fase de meio ciclo.

Ondas mecânicas propagando-se em cordas



As ondas se propagam mais lentamente em cordas grossas que em cordas finas.



Não há mudança de fase na onda transmitida/refratada

Primeiro, vamos recordar...

$$v_{\text{meio}} = \lambda_{\text{meio}} f \quad \text{então} \quad \lambda_{\text{meio}} = \frac{v_{\text{meio}}}{f} \quad \text{e} \quad \lambda_{\text{ar}} = \frac{v_{\text{ar}}}{f}$$

Como $n = \frac{c}{v}$, portanto, $v = \frac{c}{n}$ e $\frac{\lambda_{\text{meio}}}{\lambda_{\text{ar}}} = \frac{v_{\text{meio}}}{v_{\text{ar}}}$ então $\frac{\lambda_{\text{meio}}}{\lambda_{\text{ar}}} = \frac{n_{\text{ar}}}{n_{\text{meio}}}$

Se fazemos e $\lambda_{\text{ar}} \approx \lambda_{\text{v\u00e1cuo}} \approx \lambda$ e, portanto, $n_{\text{ar}} \approx 1$

Como $\frac{\lambda_{\text{meio}}}{\lambda_{\text{ar}}} = \frac{n_{\text{ar}}}{n_{\text{meio}}}$ então $\frac{\lambda_n}{\lambda} = \frac{1}{n_{\text{meio}}}$

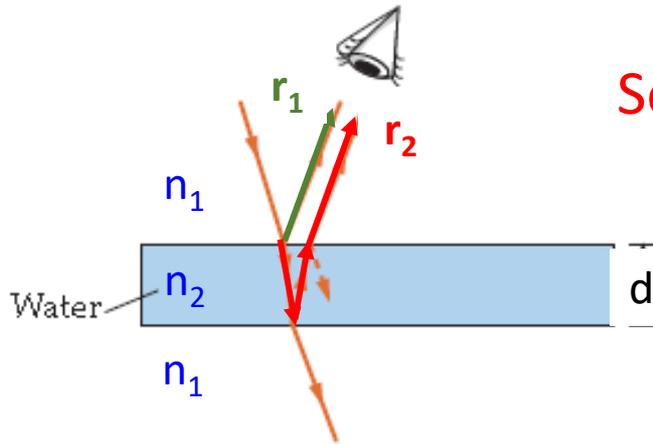
Podemos escrever $\lambda_n = \frac{\lambda}{n}$ sendo $\lambda_{\text{ar}} \approx \lambda_{\text{v\u00e1cuo}} \approx \lambda$

Sendo λ_n o comprimento de onda da luz em um meio de \u00edndice de refra\u00e7\u00e3o n , considerando o \u00edndice de refra\u00e7\u00e3o do ar = 1

Para uma onda refletida na interface entre dois meios, **SE** o segundo meio tem índice de refração **MAIOR** do que o do primeiro, existe uma mudança de fase de $\lambda/2$ ou π

O que acontece quando uma onda atinge um filme de espessura d ??

Se vemos a onda refletida, o que vemos??



Vamos simplificar o problema, supondo incidência vertical.

Portanto, a diferença de **caminho geométrico** entre os dois raios que chegam ao meu olho é:

$$r_2 - r_1 \approx 2d$$

E a **diferença de caminho óptico**???

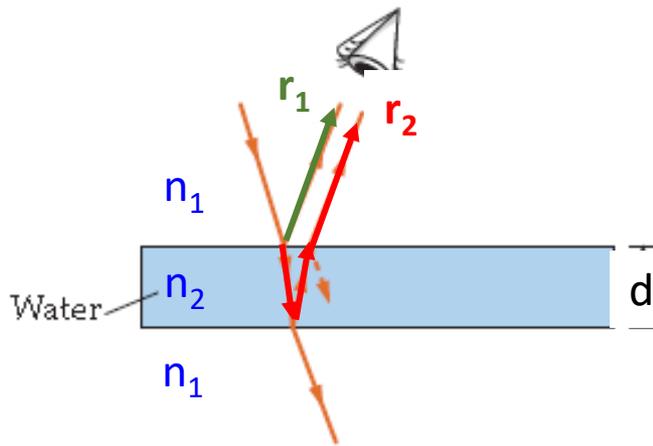
Vai depender se houve, ou não, mudança de fase nas duas reflexões.

Portanto depende de n_1 e n_2 .

FIGURE 33-1 Light rays reflected from the top and bottom surfaces of a thin film are coherent because both rays come from the same source. If the light is incident almost normally, the two reflected rays will be very close to each other and will produce interference.

Raios r_1 e r_2 **são coerentes**: originaram da mesma fonte

(Tipler, Mosca)



Diferença de caminho ótico

=

diferença de caminho geométrico

+

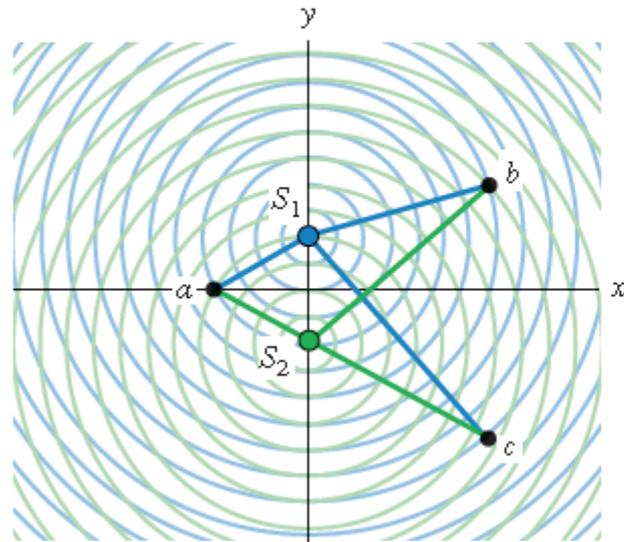
defasagem devida a reflexões das ondas

FIGURE 33-1 Light rays reflected from the top and bottom surfaces of a thin film are coherent because both rays come from the same source. If the light is incident almost normally, the two reflected rays will be very close to each other and will produce interference.

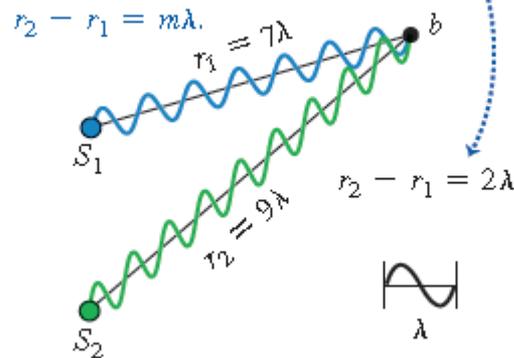
(Tipler, Mosca)

Lembrando a última aula...

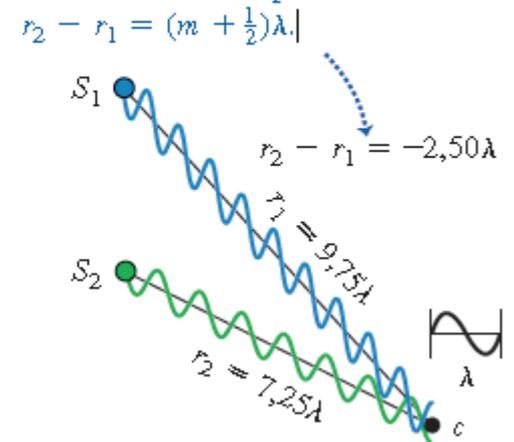
(a) Duas fontes de ondas coerentes separadas por uma distância 4λ



(b) Condições para a interferência construtiva: As ondas interferem construtivamente quando a diferença entre seus caminhos é um número inteiro de comprimentos de onda:



(c) Condições para a interferência destrutiva: As ondas interferem destrutivamente quando a diferença entre seus caminhos é um número semi-inteiro de comprimentos de onda:



Interferência construtiva:

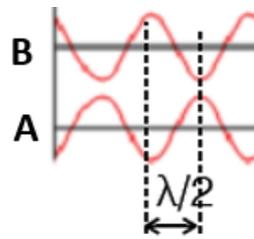
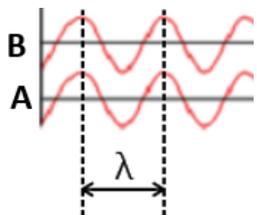
$r_2 - r_1 = m \lambda$ sendo $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Interferência destrutiva:

$r_2 - r_1 = n \lambda/2$ sendo $n = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$

Diferença de caminho geométrico = número inteiro de λ

Diferença de caminho geométrico = número ímpar de $\lambda/2$



Ondas r_1 e r_2 caminham no mesmo meio!

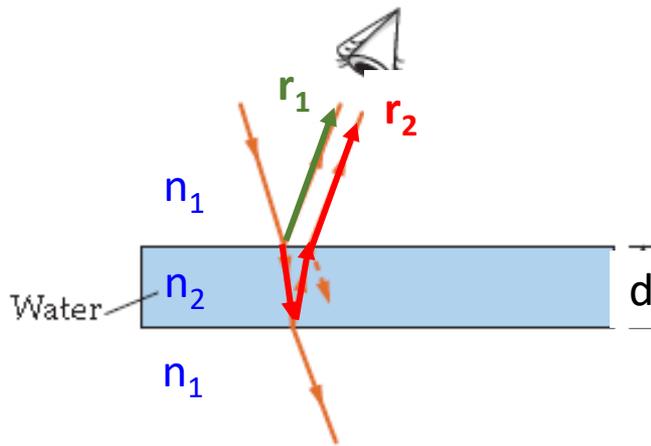


FIGURE 33-1 Light rays reflected from the top and bottom surfaces of a thin film are coherent because both rays come from the same source. If the light is incident almost normally, the two reflected rays will be very close to each other and will produce interference.

(Tipler, Mosca)

Diferença de caminho ótico
=
diferença de caminho geométrico
+
defasagem devida a reflexões das
ondas

O que não é o caso neste problema!

Então, além da diferença de caminho geométrico percorrido por cada uma das ondas, r_1 e r_2 , temos que considerar possíveis mudanças de fase neste caminho:

diferença de caminho ótico

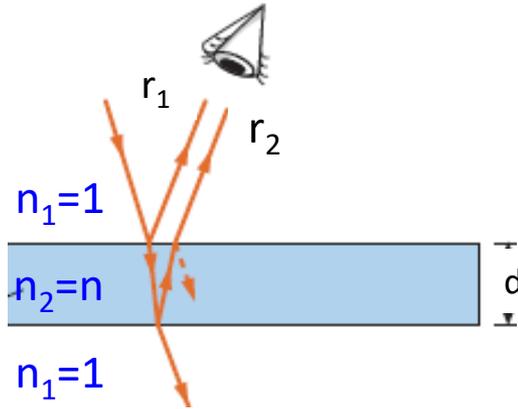
Exemplo 1: Luz incidindo perpendicularmente em uma película de sabão (bolha de sabão)

$$n_1 = n_{\text{ar}} = 1 \quad n_2 = n \text{ da película de sabão}$$

Como $n > 1$ **tem** mudança de fase na luz incidente refletida na interface ar-película de sabão.

E **não tem** mudança de fase na luz refletida película de sabão-ar

Lembrar que **não tem** mudança de fase na luz refratada (transmitida).



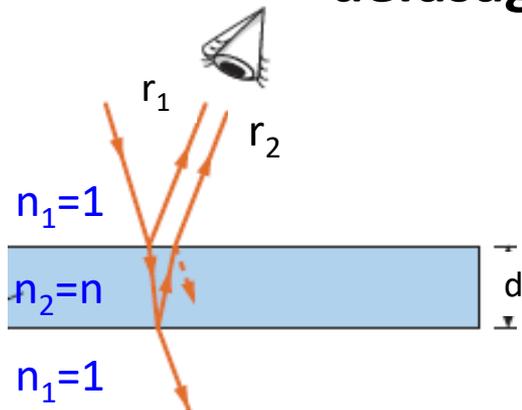
Qual a diferença de **caminho ótico** entre as ondas de luz 1 e 2 que irão interferir no seu olho??

Diferença de caminho ótico = diferença de caminho geométrico + defasagem entre as ondas 1 e 2 devida à reflexão

$$= 2d + \frac{\lambda_n}{2} \quad \text{onda 2 caminhou em meio com índice de refração } n$$

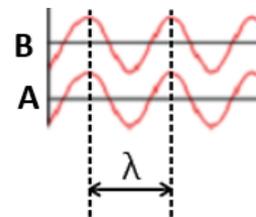
Exemplo 1: Luz incidindo perpendicularmente em uma película de sabão (bolha de sabão)

Diferença de caminho ótico = diferença de caminho geométrico + defasagem entre as ondas devida à reflexão

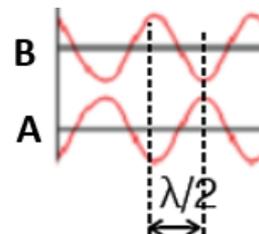


$$\text{Diferença de caminho ótico} = 2d + \frac{\lambda_n}{2}$$

Interferência construtiva: $2d + \frac{\lambda_n}{2} = m\lambda_n$ $m = 1, 2, 3, \dots$



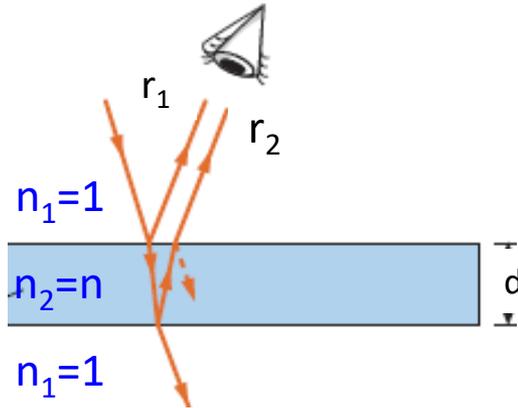
Interferência destrutiva: $2d + \frac{\lambda_n}{2} = m\frac{\lambda_n}{2}$ $m = 3, 5, 7, \dots$



Exemplo 1: Luz incidindo perpendicularmente em uma película de sabão (bolha de sabão)

$$n = 1,33$$

$$d = 320 \text{ nm}$$



Qual o(s) comprimento(s) de onda de radiação visível (luz) no vácuo que apresentarão interferência construtiva?

Interferência construtiva: $2d + \frac{\lambda_n}{2} = m\lambda_n \quad m = 1, 2, 3, \dots$

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

$$2d + \frac{\lambda}{n} = m\frac{\lambda}{n} \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

$$2d = m\frac{\lambda}{n} - \frac{\lambda}{n} = (m - \frac{1}{2})\frac{\lambda}{n} \quad \text{então } \lambda = \frac{2dn}{(m - 1/2)} \quad \text{sendo } m = 1, 2, 3, \dots$$

Exemplo 1: Luz incidindo perpendicularmente em uma película de sabão (bolha de sabão)

$$n = 1,33$$

$$d = 320 \text{ nm}$$

Interferência construtiva: $2d + \frac{\lambda_n}{2} = m\lambda_n \quad m = 1, 2, 3, \dots$

$$\lambda = \frac{2dn}{(m - 1/2)} \quad \text{sendo } m = 1, 2, 3, \dots$$

$$m = 1 \Rightarrow \lambda = 1702 \text{ nm} \Rightarrow \text{Infra Vermelho}$$

$$m = 2 \Rightarrow \lambda = 567 \text{ nm} \Rightarrow \text{verde-amarelado - Visível!}$$

$$m = 3 \Rightarrow \lambda = 340 \text{ nm} \Rightarrow \text{Ultra Violeta}$$

$$m = 4 \dots\dots$$

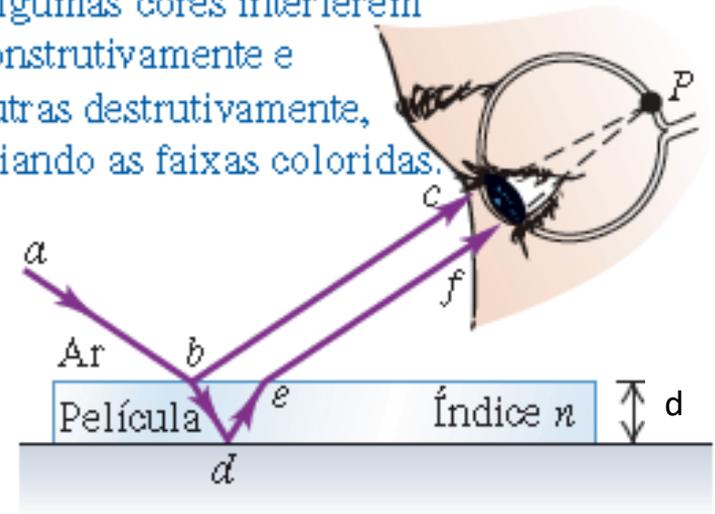
Então, caso incida luz branca nesta película de sabão, eu, olhando a luz refletida nela, verei, principalmente, a combinação de cores que dão melhor interferência construtiva, junto com a falta das cores que dão interferência destrutiva.

E por que vemos muitas cores na luz refletida nas bolhas de sabão???

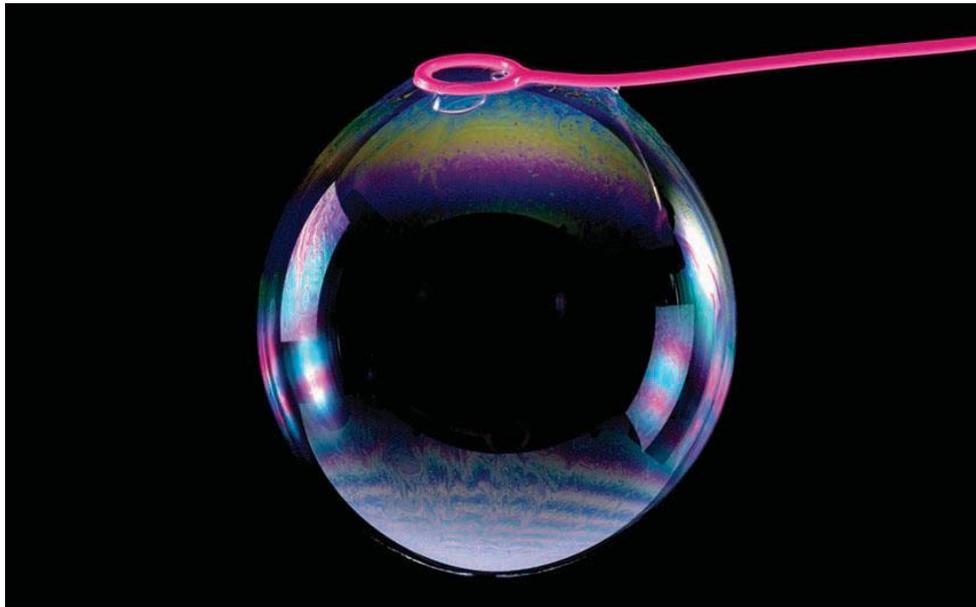


A luz refletida nas superfícies superior e inferior da película encontra-se no olho no ponto P e sofre interferência.

Algumas cores interferem construtivamente e outras destrutivamente, criando as faixas coloridas.



(Young, Freedman)

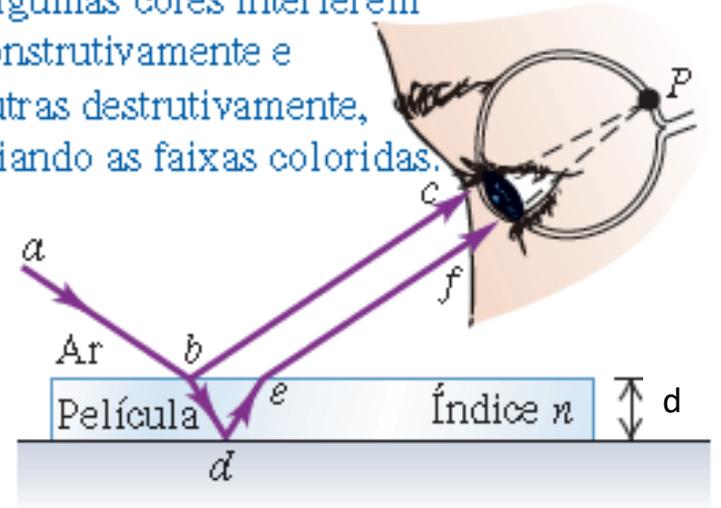


E por que vemos muitas cores na luz refletida nas bolhas de sabão???



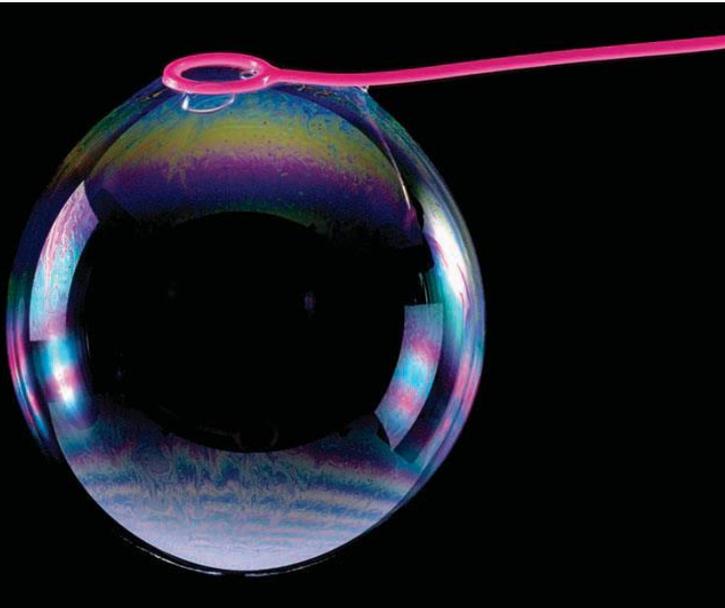
A luz refletida nas superfícies superior e inferior da película encontra-se no olho no ponto P e sofre interferência.

Algumas cores interferem construtivamente e outras destrutivamente, criando as faixas coloridas.



(Young, Freedman)

Porque a espessura d varia ao longo da camada de sabão!

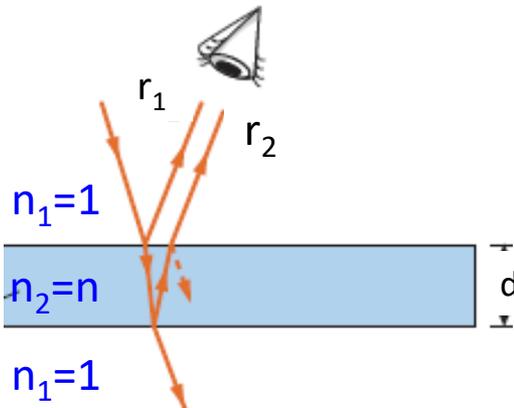


Porque só vemos múltiplas cores em películas finas??

Uma das razões:

Se $d \gg \lambda$ a espessura da película varia muito e não conseguimos distinguir as diferentes cores.

Existem outras razões que não vou discutir aqui. Estão no material bibliográfico que coloquei no Moodle.



Porque uma película muito fina

$$d \ll \lambda$$

é escura?

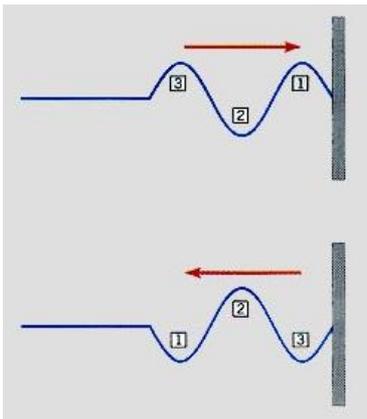
Diferença de caminho óptico entre raios r_1 e r_2

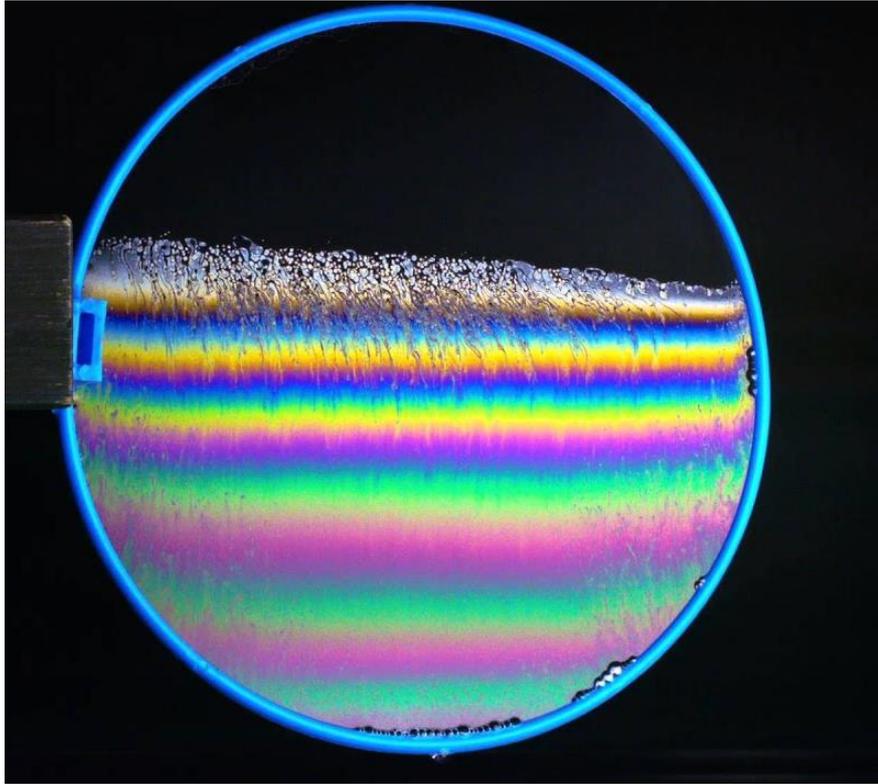
$$= 2d + \frac{\lambda_n}{2}$$

$$2d \ll + \frac{\lambda_n}{2}$$

$$\text{Diferença de caminho óptico} \approx \frac{\lambda_n}{2}$$

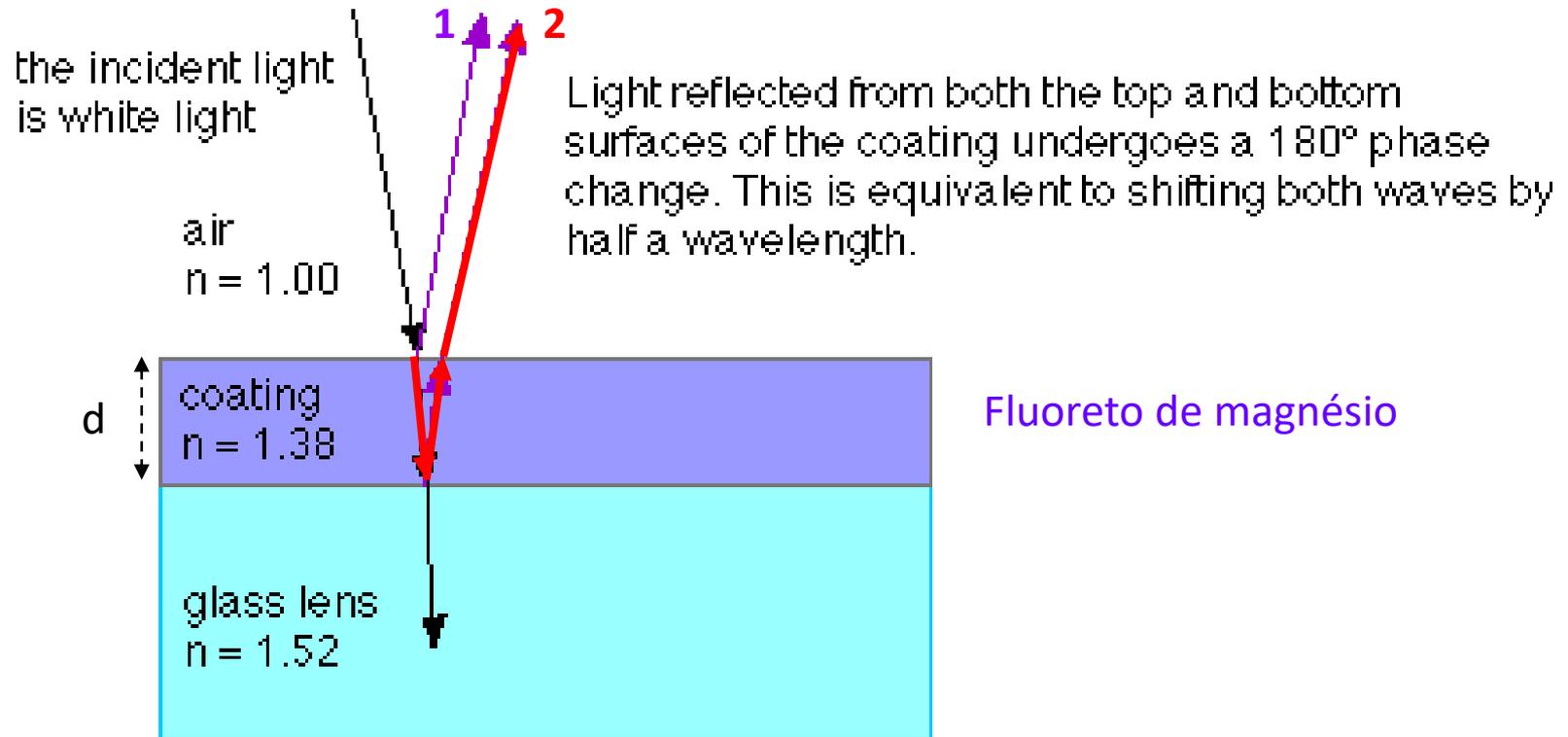
Interferência destrutiva para todos os valores de λ





Se você criar uma película de sabão em um “arame”, verá que à medida que o tempo passa, as cores vão mudando, pois o sabão vai escorrendo... e a parte de cima vai ficando escura, pois a camada superior fica muito fina... até estourar.

Revestimento de óculos com películas não refletoras



(<http://physics.bu.edu/py106/notes/Thinfilm.html>)

(ver exercício 2 para entregar)

Polarização da Luz

O que determina a direção de polarização da OEM, a luz por exemplo, é a direção da oscilação do **campo elétrico** da OEM

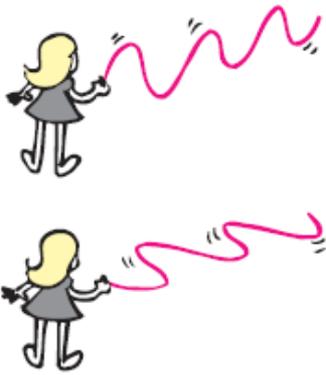


FIGURE 29.28

A vertically plane-polarized wave and a horizontally plane-polarized wave.

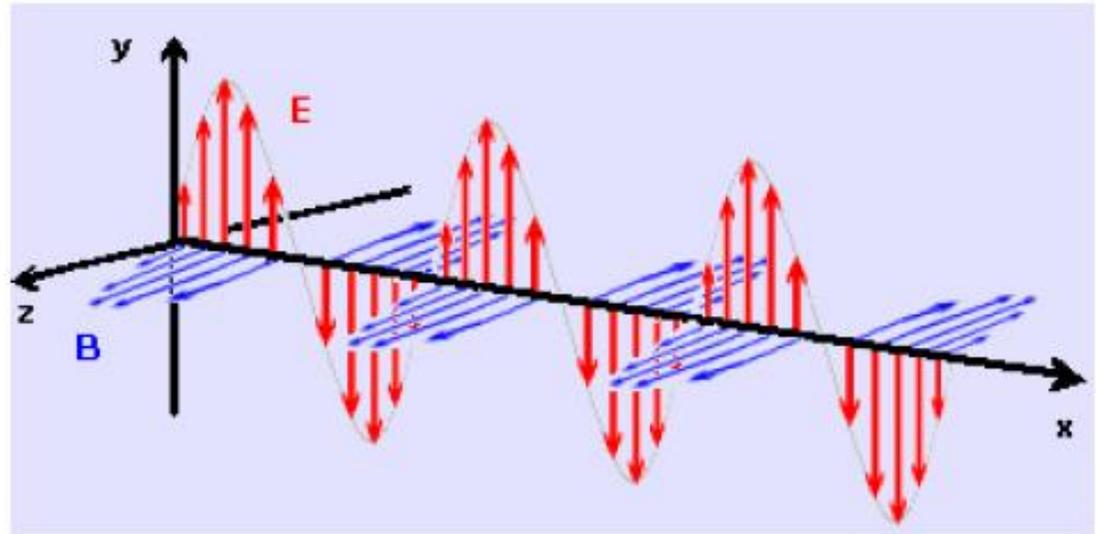
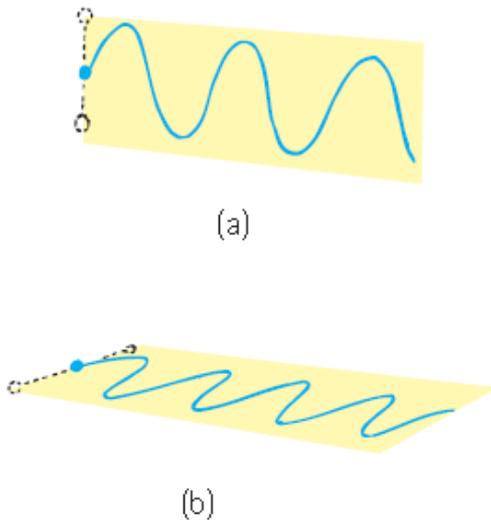


FIGURE 29.29

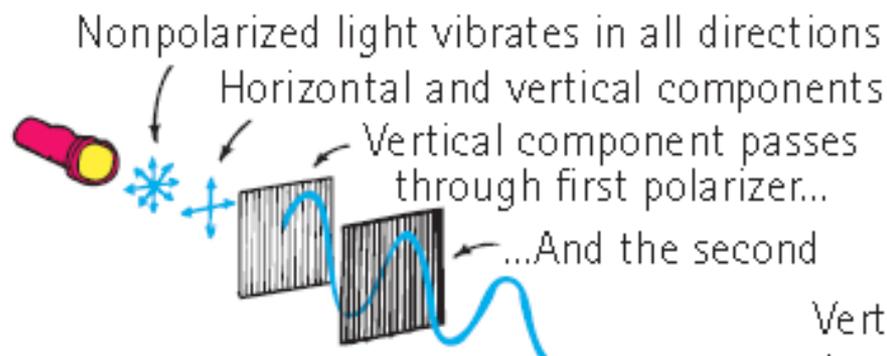
(a) A vertically plane-polarized wave from a charge vibrating vertically.
(b) A horizontally plane-polarized wave from a charge vibrating horizontally.

(P.G. Hewitt)

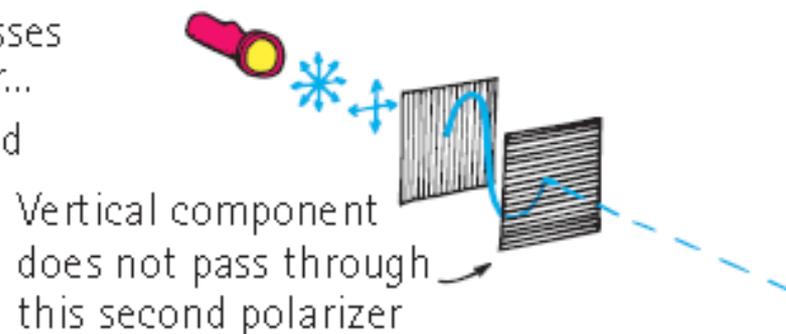
A luz do sol, de uma lâmpada usual, de uma vela, é não polarizada:
a direção do campo elétrico varia aleatoriamente

Polarizadores

São películas que só deixam a luz passar polarizada em uma determinada direção, isto é, com o **campo elétrico** naquela direção



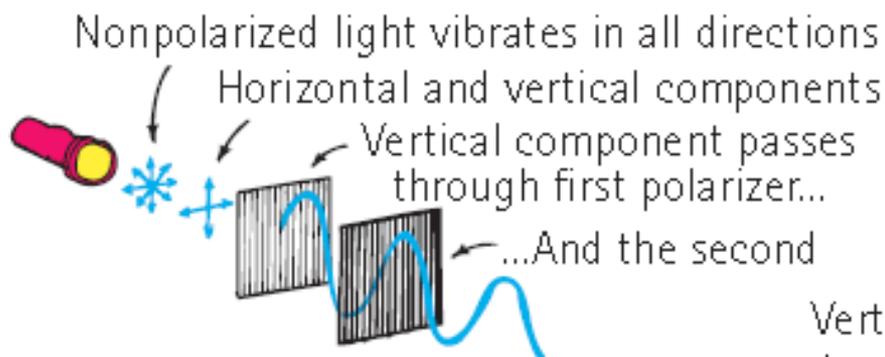
Polarizadores cruzados



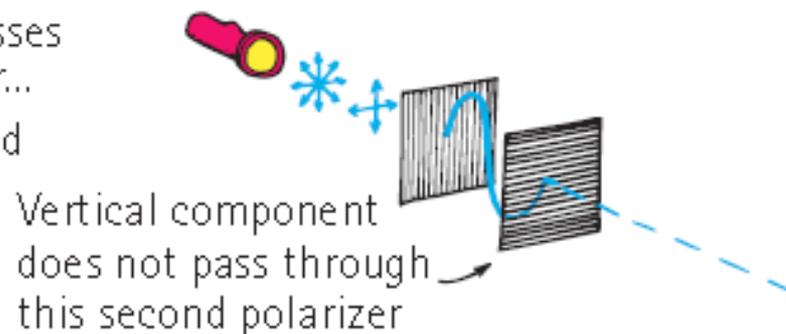
A luz do sol, de uma lâmpada usual, de uma vela, é não polarizada:
a direção do campo elétrico varia aleatoriamente

Polarizadores

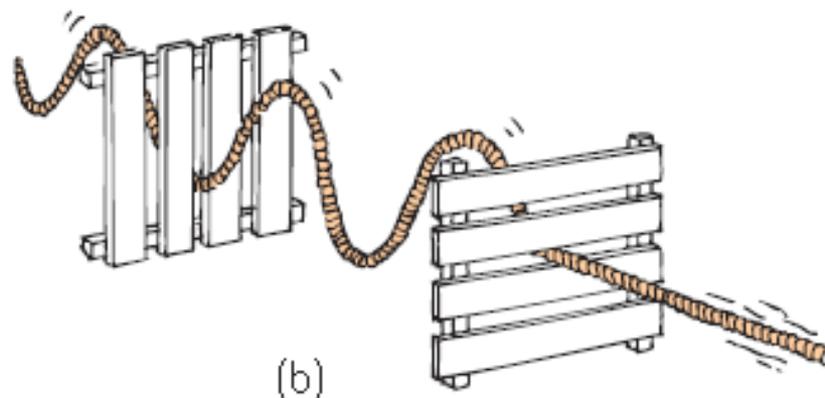
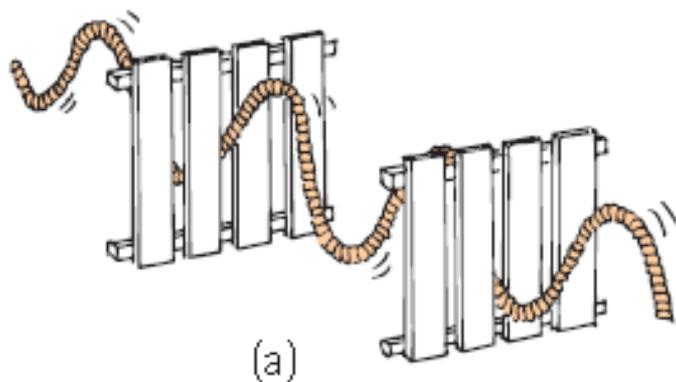
São películas que só deixam a luz passar polarizada em uma determinada direção, isto é com o campo elétrico naquela direção



Polarizadores cruzados

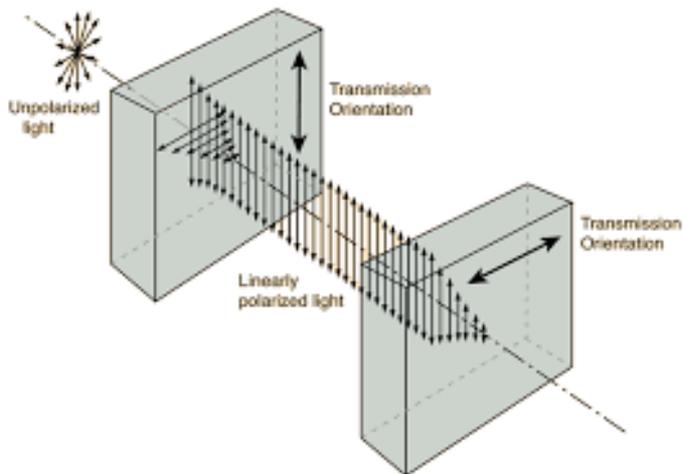


Analogia com onda mecânica



Imagens de polarizadores na internet...

Polarizadores cruzados



Single Polarizer



Two Polarizers:
Same Orientation



Two Polarizers:
Opposite Orientation

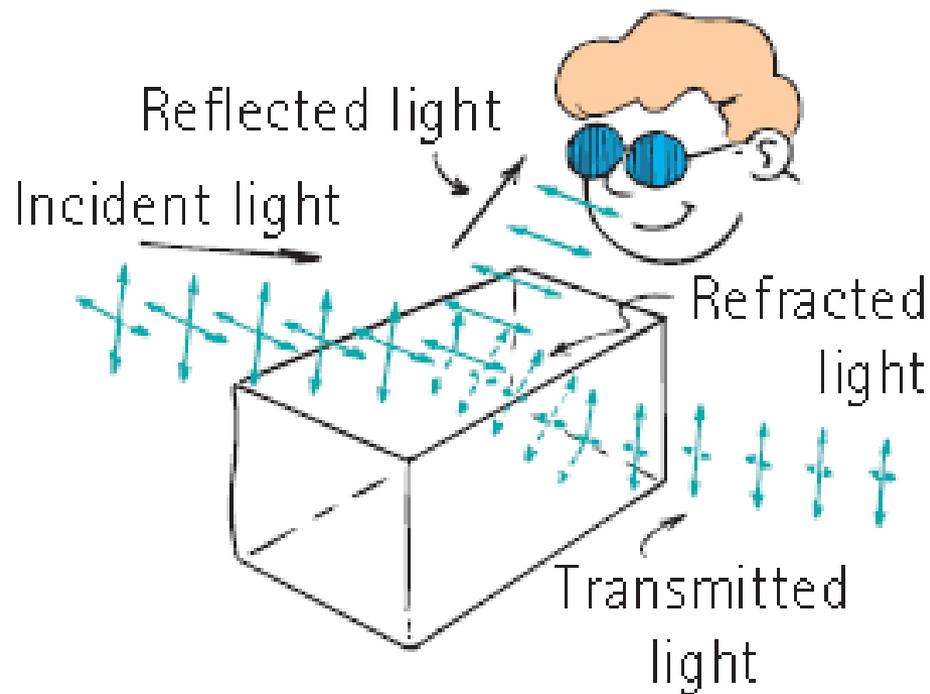


FIGURE 29.33

Most glare from nonmetallic surfaces is polarized. Note how components of incident light parallel to the surface are reflected and how components perpendicular to the surface pass through the surface into the medium.

(P.G. Hewitt)

A maior parte da luz refletida em superfícies não-metálicas é polarizada.

Daí o uso de óculos com lentes “polaroides”, polarizadores, para evitar enxergar a reflexão nas superfícies.

Repare que a polarização da luz refletida é na horizontal, portanto os óculos têm polarizadores na vertical

Exercícios para entregar

1. Uma película de sabão ($n = 1,33$) no ar tem espessura de 320 nm. Se for iluminada com luz branca em incidência normal, que cor, ou cores (comprimentos de onda no vácuo) **não** estará(ão) presente(s) na luz refletida? (Considere incidência normal)
2. As lentes são usualmente revestidas com películas finas de substâncias transparentes como MgF_2 ($n = 1,38$) para reduzir a reflexão da superfície de vidro ($n = 1,50$). Que espessura o revestimento deve ter para gerar uma reflexão mínima no centro do espectro visível ($\lambda = 550$ nm)? (Considere incidência normal)