

Na última aula vimos:

- Na *experiência de fenda-dupla*, aplicando o *método dos fasores* para somar os campos elétricos das ondas emergentes das fendas, obtivemos a **intensidade** da

ondas em cada ponto P do anteparo: $I(P) = 4I_0 \cos^2(\phi/2)$;

e usando que $\phi = Kd \sin \theta \equiv$ diferença de fase das ondas no ponto P:

$$I(P) = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta\right)$$

- Quando $L \gg d$, $\sin \theta \sim \tan \theta = y/L \Rightarrow$ fazendo $I_0' = 4I_0$:

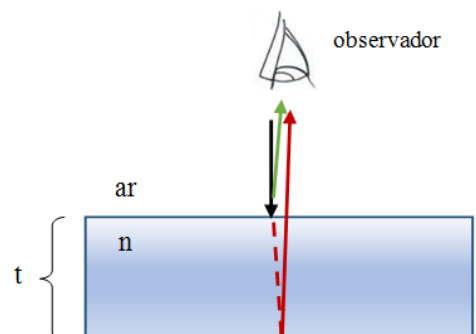
$$I(P) = I_0' \cos^2\left(\frac{\pi d}{\lambda} \frac{y}{L}\right)$$

Interferência em Filmes Finos (Películas Delgadas)

- Este estudo que agora faremos permitirá que entendamos como ocorre a formação das manchas coloridas em bolhas de sabão, óleo no asfalto, etc.



- Considere uma película com índice de refração n , espessura uniforme t :



➤ A figura mostra um feixe luminoso incidindo na primeira interface da película, sendo *refletido com inversão de fase* (já que $n_2^{película} > n_1^{ar}$), e refratado (transmitido para o meio) que a seguir sofre nova reflexão na segunda interface (agora, *sem inversão de fase*, já que $n_2^{ar} < n_1^{película}$), e finalmente atravessa a primeira interface (sem mudança de fase), atingindo o olho do observador.

➤ De forma que, quando a diferença de percurso $\delta = 2t$ for um número inteiro de comprimentos de onda (da luz no interior da película, ou seja, $\lambda' = \lambda/n$), então ocorrerá **interferência destrutiva** (devido à inversão de fase que ocorreu na segunda interface).

➤ Ou seja, teremos **interferência destrutiva** se $\delta = 2t = m\lambda' = m\lambda/n \Rightarrow$

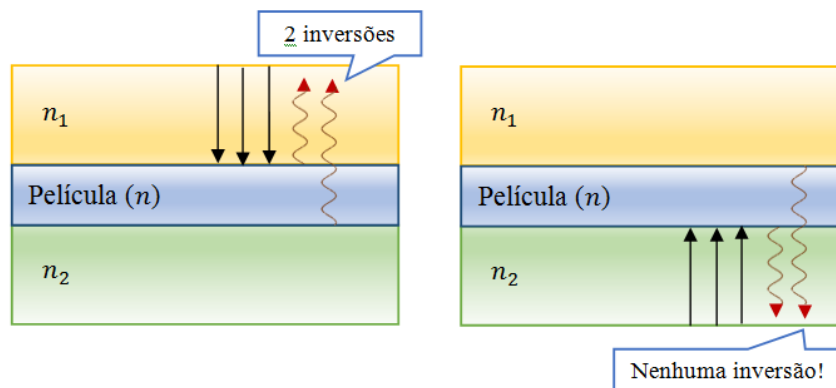
$$\Rightarrow \text{para: } \begin{cases} 2nt = m\lambda^{ar} \rightarrow \text{interferência será } \underline{\text{destrutiva}} \\ 2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda^{ar} \rightarrow \text{interferência será } \underline{\text{construtiva}} \end{cases}$$

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

➤ Perceba que estes critérios foram determinados considerando a película estando imersa no ar ($n^{película} > n^{ar}$); mas e se ela estivesse imersa na água, por exemplo, com $n^{meio} > n^{película}$?

➤ Os critérios permanecem estes mesmos, já que ainda ocorre só uma inversão de fase, agora correspondendo à reflexão na primeira interface!

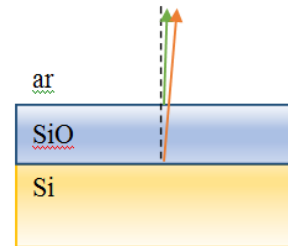
➤ Porém, no caso da película estar posicionada entre dois meios distintos, de forma que $n_1 > n^{película} > n_2$ (ou o inverso, $n_1 < n^{película} < n_2$) então ocorrerão duas inversões de fase (ou nenhuma!).



➤ Nestes casos, os critérios de interferência (construtiva/destrutiva) obtidos acima devem ser trocados.

- É importante saber que o fenômeno da interferência luminosa devido a películas delgadas envolve muitas aplicações práticas, como por exemplo, revestimentos anti-reflexo em vidros e lentes.

- **Exemplo:** Semicondutores, como o silício, são utilizados para fabricar células solares, que geralmente são revestidas por um filme fino e transparente para minimizar as perdas por reflexão. Suponha então que uma pastilha de silício ($n_{Si} = 3,5$) é recoberta com uma película de monóxido de silício ($n_{SiO} = 1,5$). Qual é a mínima espessura da película para que ocorra a mínima reflexão para o comprimento de onda $\lambda = 550nm$?



- **Resolução:** Este valor de λ situa-se na região central do espectro visível, que vai de $\lambda_{vermelho} \sim 700nm$ ao $\lambda_{violeta} \sim 400nm$.
- Como ocorre a inversão de fase em cada uma das reflexões (em cada interface) então a condição para que ocorra *interferência destrutiva* (para minimizar a reflexão) será:

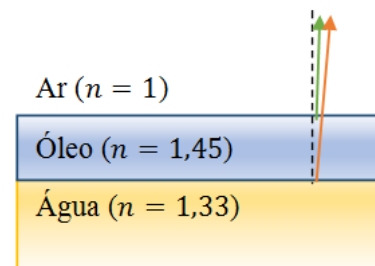
$$2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda; \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

- Como o problema pede a espessura mínima ($m = 0$):

$$t_{\min} = \frac{\lambda}{4n} = \frac{550 \times 10^{-9}}{(4)(1,45)} \Rightarrow \underline{t_{\min} = 95nm}$$

- **Exercício 13 – Livro:** Um filme de óleo ($n = 1,45$) flutuando sobre a água ($n = 1,33$) é iluminado normalmente com luz branca. Se o filme tem espessura $t = 280nm$:

- Qual é a cor dominante na luz refletida?
- Qual é a cor dominante na luz transmitida?



- **Resolução:**

- Como ocorre apenas uma inversão de fase (na primeira interface), ocorrerá interferência construtiva (cor dominante) quando:

$$2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \Rightarrow \lambda = \frac{(2)(1,45)(280 \times 10^{-9})}{(m + 1/2)} = \frac{8,12 \times 10^{-7}}{(m + 1/2)}$$

$$\text{Portanto, para: } \begin{cases} m = 0 & \Rightarrow \lambda_0 = 1620nm \text{ (infravermelho)} \\ m = 1 & \Rightarrow \lambda_1 = 541nm \text{ (luz verde)} \\ m = 2 & \Rightarrow \lambda_2 = 325nm \text{ (ultravioleta)} \end{cases}$$

Como λ_0 e λ_2 situam-se fora do espectro visível, a luz dominante observada será o **verde**.

b) Quanto à cor dominante da luz transmitida, esta será justamente aquela que sofre interferência destrutiva na reflexão.

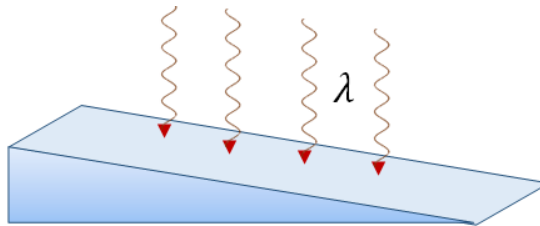
Interferência destrutiva (na reflexão): $2nt = m\lambda \Rightarrow \lambda = \frac{8,12 \times 10^{-7}}{m}$

Ou seja, para: $\begin{cases} m=1 \Rightarrow \lambda_1 = 812nm \text{ (infravermelho)} \\ m=2 \Rightarrow \lambda_2 = 406nm \text{ (violeta)} \\ m=3 \Rightarrow \lambda_3 = 271nm \text{ (ultravioleta)} \end{cases}$

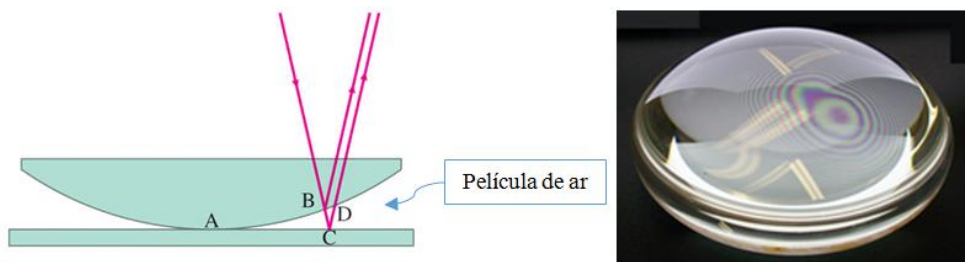
Portanto a cor transmitida dominante será a *violeta*.

Interferência provocada por película na forma de cunha

- Se um filme fino na forma de cunha é iluminado com radiação monocromática, uma seqüência de franjas escuras e brilhantes será observada devido às diferentes espessuras t em cada região da cunha.

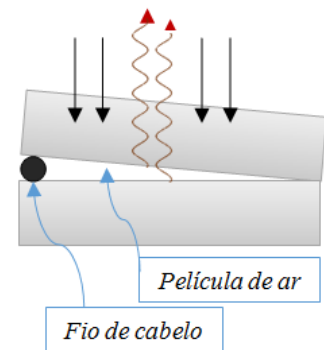


- Se a cunha for iluminada com luz branca, várias franjas coloridas surgirão.
- Esta explicação também serve para entendermos a formação dos *anéis de Newton* que são observados quando uma lente plano-convexa é colocada sobre uma placa de vidro.



- A película de ar que se forma entre a lente e a placa de vidro é que acaba produzindo o efeito observado, notando que ocorre apenas uma inversão de fase (na interface ar-placa do vidro).

- **Exercício 15 – Livro:** Um fio de cabelo é colocado entre duas placas de vidro. Quando o conjunto é iluminado com radiação de comprimento de onda $\lambda = 600\text{nm}$, 30 franjas escuras são observadas. Calcule o diâmetro (d) do fio de cabelo.



- **Resolução:** Franjas escuras: interferência destrutiva

$$2nt = m\lambda \Rightarrow n = n_{ar} = 1$$

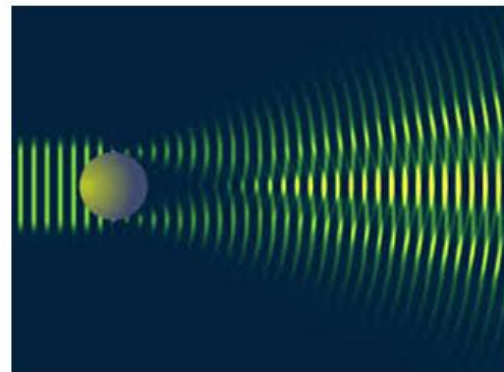
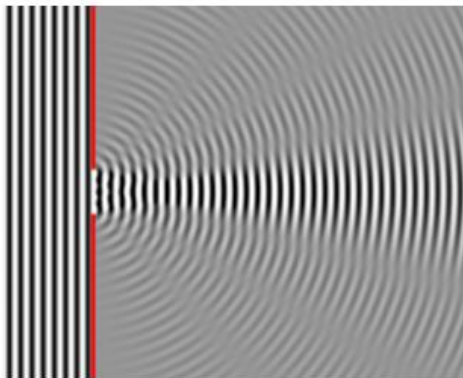
franja escura: 1^a 2^a 3^a 4^a ... 30^a

valor de m : 0 1 2 3 ... 29

$$\therefore 2d = (29)(600 \times 10^{-9}) \Rightarrow \underline{d = 8700\text{nm} = 8,7\mu\text{m}}$$

Difração por Fendas e Obstáculos

- Experimentalmente observa-se que mesmo no caso de uma única fenda, quando suas dimensões são da ordem de grandeza do comprimento de onda (λ) da radiação eletromagnética incidente, observam-se franjas escuras e brilhantes em um anteparo distante. (ver figuras abaixo)



- Ou seja, a radiação “*espalha-se*” atingindo regiões de sombra, caso as ondas eletromagnéticas se propagassem em linha reta e nenhum tipo de “interferência ondulatória” estivesse ocorrendo.
- Para se compreender o efeito da *difração*, consideremos um grande número de “*emissores secundários*” (segundo a proposta de Huygens) na região de uma fenda de largura a , de onde partem raios paralelos (supondo satisfeita a condição $L \gg a$) até o ponto P em um anteparo distante.
- Faremos isso na próxima aula.