

Interferência

Óptica e Física Moderna

Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Campus Angicos

10 de agosto de 2022

Fonte deste material: Halliday, Resnick, Walker; Fundamentos de Física; Volume 4 - Mecânica; 8ª Edição, LTC



Sumário

A Luz Como Uma Onda

- A lei da Refração (lei de Snell-Descartes)
- Comprimento de Onda e Índice de Refração

O Experimento de Young

- Difração
- O Experimento de Young
- A Posição das Franjas
- Coerência
- Intensidade das Franjas de Interferência

Interferência em Filmes Finos

O Interferômetro de Michelson



A Luz Como Uma Onda

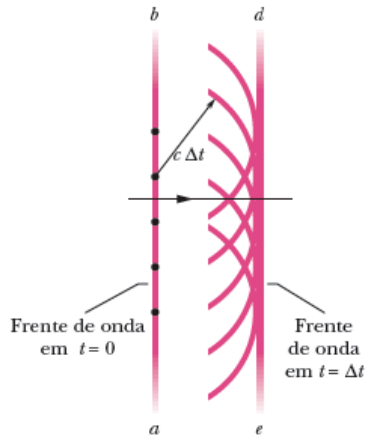
- ▶ A primeira pessoa a apresentar uma teoria ondulatória convincente para a luz foi o físico holandês Christian Huygens, em 1678.
- ▶ A teoria ondulatória de Huygens baseia-se no chamado **princípio de Huygens**, que diz o seguinte:

Princípio de Huygens

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



A Luz Como Uma Onda

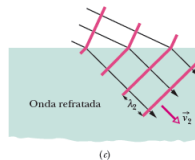
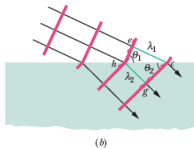
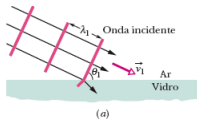


A lei da Refração (lei de Snell-Descartes)

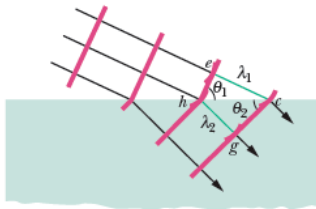
- Vamos agora usar o princípio de Huygens para deduzir a lei da refração (lei de Snell-Descartes):

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1$$

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



A lei da Refração (lei de Snell-Descartes)



Triângulo retângulo
hce:

$$\text{sen}\theta_1 = \frac{\lambda_1}{hc} \quad (2)$$

Triângulo retângulo
hcg:

$$\text{sen}\theta_2 = \frac{\lambda_2}{hc} \quad (3)$$

$$\Delta t_1 = \Delta t_2$$

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

$$\Rightarrow \boxed{\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}} \quad (1)$$

Combinando as
equações (1), (2) e
(3):

$$\boxed{\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}}$$



A lei da Refração (lei de Snell-Descartes)

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (A)$$

Podemos definir um índice de refração n para cada meio como a razão entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio. Assim,

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

Para os dois meios:

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \quad (B) \quad \text{e} \quad n_2 = \frac{c}{v_2} \quad (C)$$

Combinando as equações (A), (B) e (C):

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \Rightarrow$$

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$



Comprimento de Onda e Índice de Refração

Seja a equação que obtivemos:

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

Suponha uma **luz monocromática** com:

- ▶ comprimento de onda λ e uma velocidade c no vácuo;
- ▶ um comprimento de onda λ_n e uma velocidade v em um meio cujo índice de refração é n .

Para essa luz, a equação acima pode ser reescrita da seguinte forma:

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



Comprimento de Onda e Índice de Refração

Usando a definição de **índice de refração** $n = \frac{c}{v}$ na equação

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

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



Frequência e Índice de Refração

Usando a relação geral $v = \lambda f$:

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

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

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

em que f é a frequência da luz no vácuo.

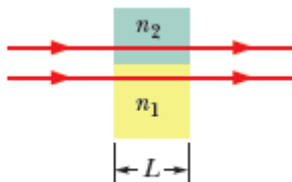
Embora a velocidade e o comprimento de onda da luz sejam diferentes no meio e no vácuo, a frequência da luz é a mesma no meio e no vácuo.



Diferença de fase

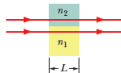
A diferença de fase entre duas ondas luminosas pode mudar se as ondas atravessarem materiais com diferentes índices de refração.

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



Diferença de fase

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



Para calcular a diferença de fase em termos de comprimentos de onda, primeiro contamos o número de comprimentos de onda N_1 no comprimento L do meio 1:

$$N_1 = \frac{L}{\lambda_{n1}} = \frac{L n_1}{\lambda}$$

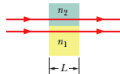
Em seguida, contamos o número de comprimentos de onda N_2 no comprimento L do meio 2:

$$N_2 = \frac{L}{\lambda_{n2}} = \frac{L n_2}{\lambda}$$



Diferença de fase

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



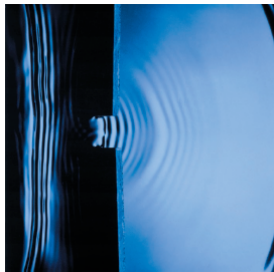
A diferença de fase entre as duas ondas é o valor absoluto da diferença entre N_1 e N_2 . Supondo que $n_2 > n_1$, temos

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



Difração

- ▶ Quando uma onda encontra um obstáculo que possui uma abertura de dimensões comparáveis ao comprimento de onda, a parte da onda que passa pela abertura se alarga (é difratada) na região que fica do outro lado do obstáculo.
- ▶ Esse alargamento acontece de acordo com o princípio de Huygens.
- ▶ A difração não se limita às ondas luminosas; pode ocorrer com ondas de todos os tipos.



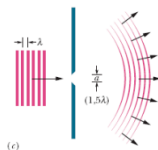
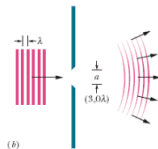
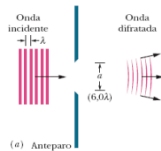
George Resch/Fundamental Photographs

Difração de ondas na superfície de um tanque com água



Difração

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



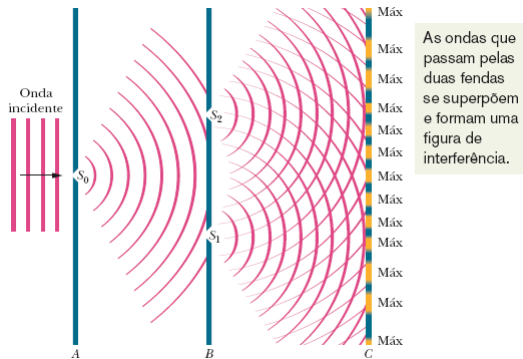
O Experimento de Young

- ▶ Em 1801, Thomas Young provou experimentalmente que a luz é uma onda, ao contrário do que pensavam muitos cientistas da época.
- ▶ O que o cientista fez foi demonstrar que a luz sofre interferência, como as ondas do mar, as ondas sonoras e todos os outros tipos de ondas.
- ▶ Além disso, Young conseguiu medir o comprimento de onda médio da luz solar; o valor obtido, 570 nm, está surpreendentemente próximo do valor atualmente aceito, 555 nm.
- ▶ Vamos agora discutir o experimento de Young como um exemplo de interferência de ondas luminosas.

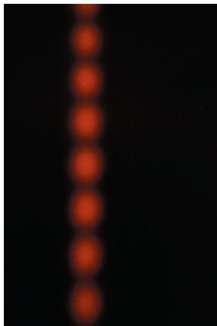


O Experimento de Young

- A luz de uma fonte monocromática distante ilumina a fenda S_0 do anteparo A . A luz difratada pela fenda se espalha e é usada para iluminar as fendas S_1 e S_2 do anteparo B . Uma nova difração ocorre quando a luz atravessa essas fendas e duas ondas esféricas se propagam simultaneamente no espaço à direita do anteparo B , interferindo uma com a outra.



O Experimento de Young



Cortesia de Jearl Walker

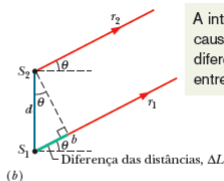
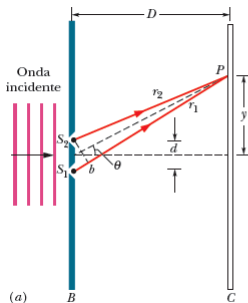
- ▶ Fotografia da figura de interferência produzida com fendas curtas. (A fotografia é uma vista frontal de parte da tela C.)
- ▶ Os máximos e mínimos de intensidade são chamados de franjas de interferência porque lembram as franjas decorativas usadas em colchas e tapetes.



A Posição das Franjas

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

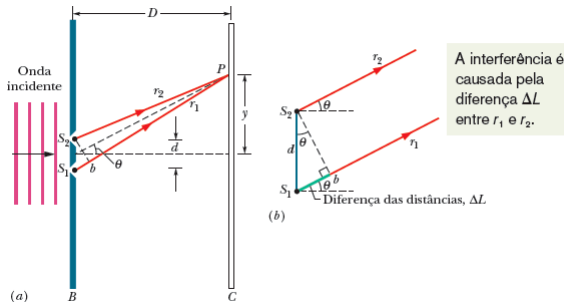
Em um experimento de interferência de dupla fenda de Young, a intensidade luminosa em cada ponto da tela de observação depende da diferença ΔL entre as distâncias percorridas pelos dois raios até chegarem ao ponto.



A interferência é causada pela diferença ΔL entre r_1 e r_2 .



A Posição das Franjas



- ▶ Diferença de percurso: $\Delta L = d \sin \theta$
- ▶ No caso de uma franja clara, um **máximo**, ΔL é igual a zero ou a um número inteiro de comprimentos de onda:

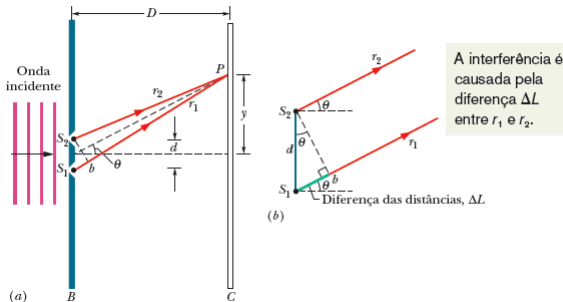
$$\Delta L = d \sin \theta = (\text{número inteiro}) (\lambda)$$

ou

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



A Posição das Franjas



- ▶ Diferença de percurso: $\Delta L = d \sin \theta$
- ▶ No caso de uma franja escura, um **mínimo**, ΔL é um múltiplo ímpar de metade do comprimento de onda:

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

ou

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



Intensidade das Franjas de Interferência

- Pode-se obter uma expressão para a intensidade I das franjas em função do ângulo θ (detalhes da demonstração no livro-texto):

$$I = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{1}{2} \phi \right)$$

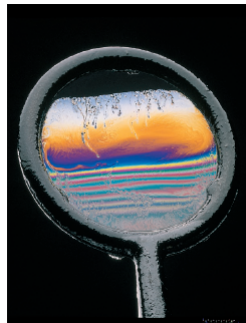
em que I_0 é a intensidade da luz que chega à tela quando uma das fendas está temporariamente coberta, e

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



Interferência em Filmes Finos

- ▶ As cores que vemos quando a luz solar incide em uma bolha de sabão ou em uma mancha de óleo são causadas pela interferência das ondas luminosas refletidas pelas superfícies anterior e posterior de um filme fino transparente.
- ▶ A espessura do filme é tipicamente da mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda da luz (visível) envolvida.
- ▶ Maiores espessuras destroem a coerência da luz necessária para produzir as cores.

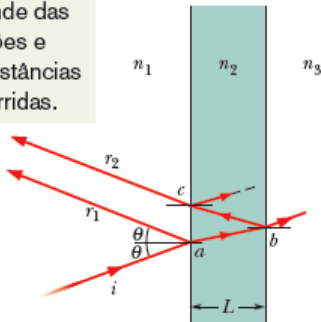


Richard Megna/Fundamental Photographs



Interferência em Filmes Finos

A interferência depende das reflexões e das distâncias percorridas.



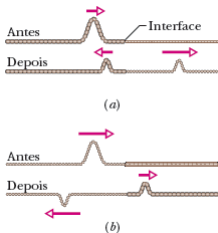
Richard Megna/Fundamental Photographs



Interferência em Filmes Finos

Diferença de fase em filmes finos

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



- ▶ As **refrações** em interfaces não causam mudanças de fase;
- ▶ no caso das **reflexões** pode haver ou não mudança de fase, dependendo dos valores relativos dos índices de refração dos dois lados da interface.

Reflexão	Mudança de Fase
Em um meio com n menor	0
Em um meio com n maior	0,5 comprimento da onda



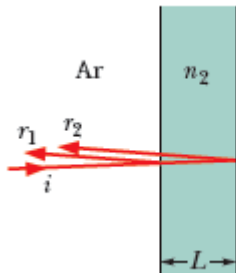
Diferença de Percurso em Filmes Finos

- ▶ Considere agora a diferença de comprimento entre os percursos de r_1 e r_2 , $2L$.
- ▶ Para que os raios r_1 e r_2 estejam em fase, é preciso que a diferença de fase seja um múltiplo ímpar de meio comprimento de onda:

$$2L = \frac{\text{número ímpar}}{2} \times \lambda_{n2}$$

- ▶ Logo, para os **máximos** (filme claro no ar).

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



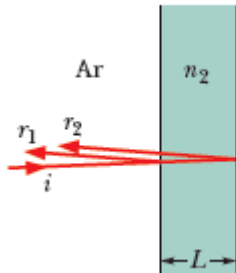
Diferença de Percurso em Filmes Finos

- Para que a diferença de fase entre os raios r_1 e r_2 seja meio comprimento de onda, é preciso que a diferença de fase introduzida pela diferença de percursos $2L$ seja um número inteiro de comprimentos de onda

$$2L = \text{número inteiro} \times \lambda_{n_2}$$

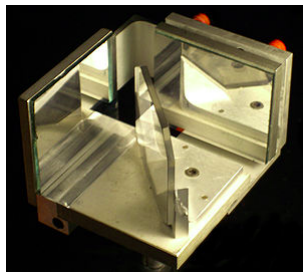
- Logo, para os **mínimos** (filme escuro no ar).

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



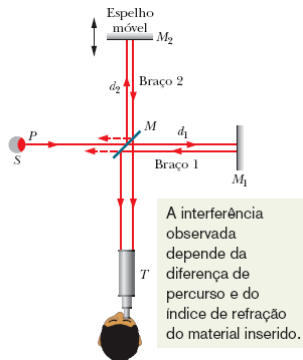
O Interferômetro de Michelson

- ▶ O **interferômetro** é um dispositivo que pode ser usado para medir comprimentos ou variações de comprimento com grande precisão por meio de franjas de interferência.
- ▶ Vamos descrever o modelo de interferômetro projetado e construído por A. A. Michelson em 1881.



O Interferômetro de Michelson

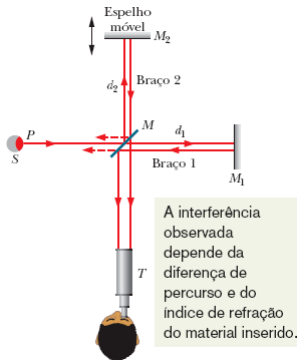
1. Considere a luz que deixa o ponto P de uma fonte macroscópica S e encontra o divisor de feixe M . **Divisor de feixe** é um espelho que transmite metade da luz incidente e reflete a outra metade.
2. Em M , a luz se divide em dois feixes: um é transmitido ao espelho M_1 e o outro é refletido para M_2 .
3. As ondas são refletidas pelos espelhos M_1 e M_2 e voltam ao espelho M , de onde chegam ao olho do observador após passarem pelo telescópio T .
4. O que o observador vê é uma série de **franjas de interferência**.



O Interferômetro de Michelson

Deslocamento do Espelho

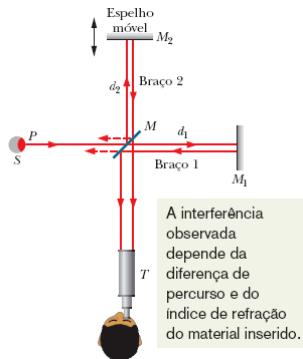
- ▶ A diferença das distâncias percorridas pelas duas ondas é $2d_2 - 2d_1$;
- ▶ Qualquer coisa que altere essa diferença modifica a figura de interferência vista pelo observador.



O Interferômetro de Michelson

Inserção

A modificação da figura de interferência também pode ser causada pela inserção de uma substância transparente no caminho de um dos raios.



O Interferômetro de Michelson

Inserção

- ▶ Se um bloco de material transparente, de espessura L e índice de refração n , for colocado na frente do espelho M_1 , o número de comprimentos de onda percorridos no material será

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

- ▶ O número de comprimentos de onda na mesma distância $2L$ antes de o bloco ser introduzido é

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

- ▶ Quando o bloco é introduzido, a luz que volta do espelho M_1 sofre uma variação de fase adicional (em comprimentos de onda) dada por

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

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



O Interferômetro de Michelson

Padrão de Comprimento

- ▶ Na época de Michelson, o padrão de comprimento, o metro, tinha sido definido, por um acordo internacional, como a distância entre duas marcas de uma barra de metal guardada em Sèvres, perto de Paris.
- ▶ Michelson conseguiu mostrar, usando seu interferômetro, que o metro-padrão era equivalente a 1.553.163,5 comprimentos de onda da luz vermelha monocromática emitida por uma fonte luminosa de cádmio. Por essa medição altamente precisa, Michelson recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1907.
- ▶ Seu trabalho estabeleceu a base para que a barra do metro fosse abandonada como padrão (em 1961) e substituída por uma nova definição do metro em termos do comprimento de onda da luz.
- ▶ Em 1983, a definição do metro foi mudada novamente, dessa vez com base em um valor arbitrado para a velocidade da luz.



