

# Capítulo 35 - Interferência



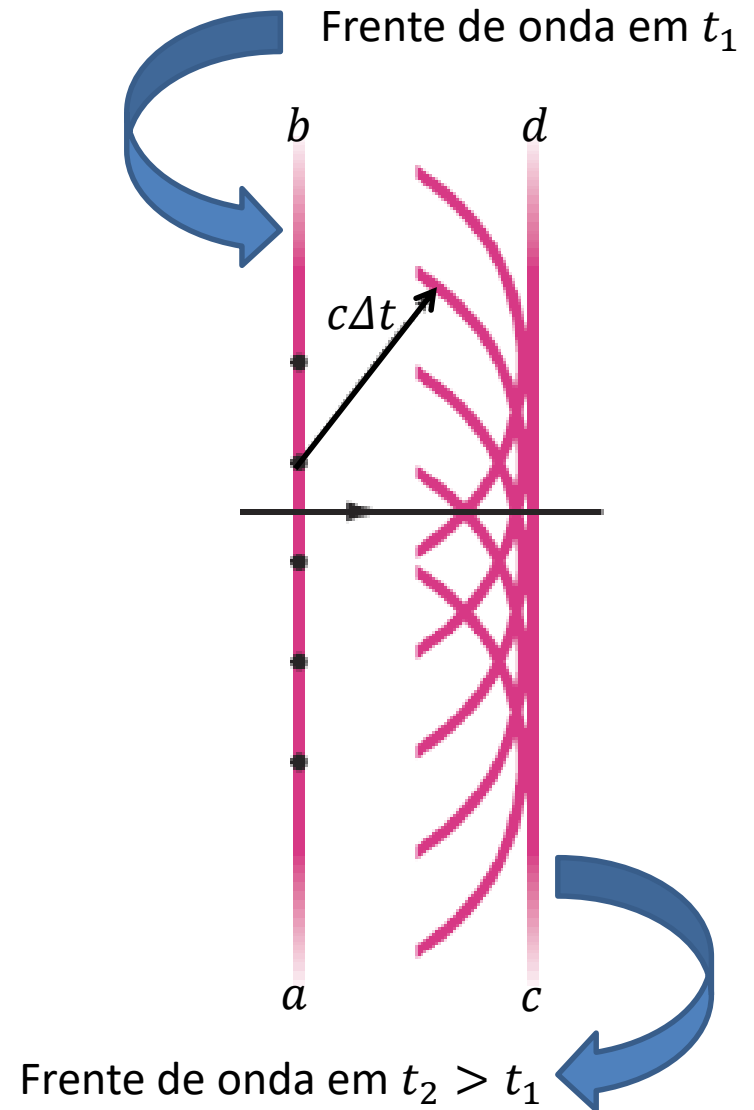
Muitas cores da natureza se devem à **interferência ótica**. Por exemplo, as asas de uma borboleta *Morpho* são castanhas e sem graça, como pode ser visto na superfície inferior da asa, mas na superfície superior o castanho é substituído por um azul brilhante devido à interferência da luz. Além disso, a cor é variável: a asa pode ser vista com vários tons de azul, dependendo do ângulo de observação.

**Por que a cor das asas da borboleta *Morpho* depende do ângulo de observação?**

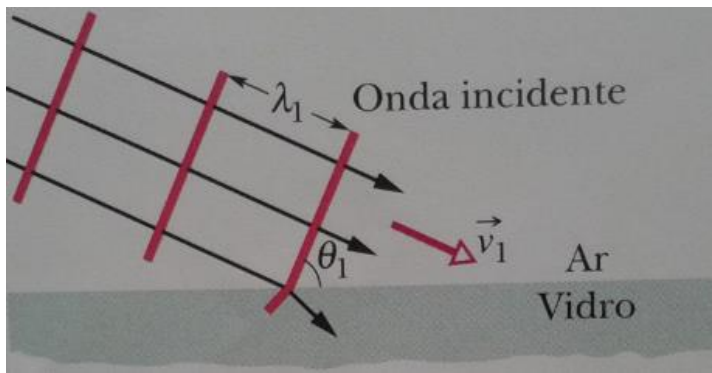
## 35.2 A Luz como uma Onda

A teoria ondulatória de Christian Huygens utiliza uma construção geométrica que permite prever onde estará uma dada frente de onda em qualquer instante futuro ( $t_2$ ) se conhecermos sua posição atual ( $t_1 < t_2$ ). Essa construção se baseia no **Princípio de Huygens (1678)**, que afirma o seguinte:

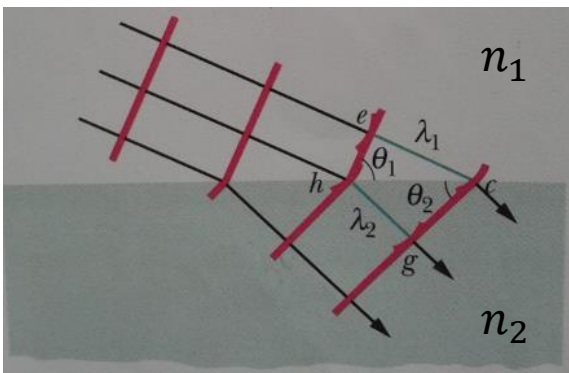
Todos os pontos de uma frente de onda se comportam como fontes pontuais de ondas secundárias. Depois de um intervalo de tempo  $\Delta t = t_2 - t_1$  a nova posição da frente de onda é dada por uma superfície tangente a essas ondas secundárias.



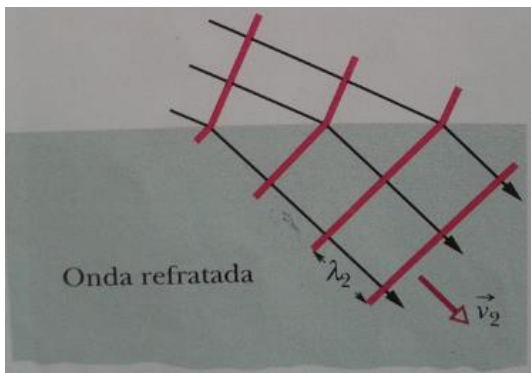
# A Lei da Refração



(a)



(b)



(c)

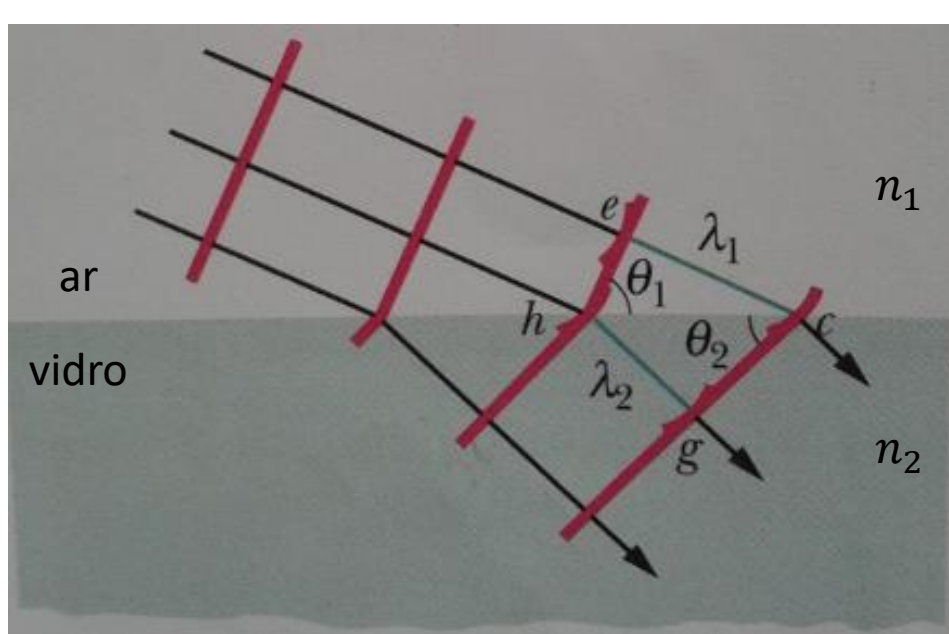
A refração de uma onda plana em uma interface ar-vidro, de acordo com o **Princípio de Huygens**. O comprimento de onda no vidro é menor do que no ar. Para simplificar o desenho, a onda refletida não é mostrada. As partes (a), (b) e (c) mostram três estágios sucessivos da refração.

Quando a onda incidente se aproxima do vidro, uma onda secundária de Huygens com origem no ponto *e* se expande (no ar) até chegar ao ponto *c*, a uma distância  $\lambda_1$  do ponto *e*. O intervalo de tempo necessário para a expansão é dado por

$$\Delta t = \frac{\lambda_1}{v_1}.$$

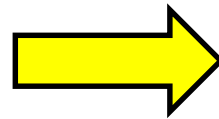
Nesse mesmo intervalo de tempo  $\Delta t$ , uma onda secundária de Huygens com origem no ponto *h* se expande (no vidro) com uma velocidade diferente,  $v_2$ , e com um comprimento de onda diferente,  $\lambda_2$ , até chegar ao ponto *g*. Assim sendo,

$$\Delta t = \frac{\lambda_2}{v_2} \quad \longrightarrow \quad \frac{\lambda_1}{v_1} = \frac{\lambda_2}{v_2}. \quad (35.1)$$



- $\theta_1$  é o ângulo entre a **frente de onda** da onda incidente e o plano da interface; note que  $\theta_1$  também é o ângulo de incidência.
- $\theta_2$  é o ângulo entre a **frente de onda** da onda refratada e o plano da interface; note que  $\theta_2$  também é o ângulo de refração.

$$\begin{cases} \text{sen } \theta_1 = \frac{\lambda_1}{hc} \text{ (triângulo } hce) \\ \text{sen } \theta_2 = \frac{\lambda_2}{hc} \text{ (triângulo } hcg) \end{cases}$$



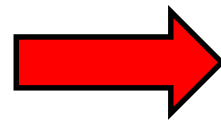
$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (35.2)$$

$$n = \frac{c}{v} \text{ (índice de refração)} \quad (35.3)$$



$$n_1 = \frac{c}{v_1} \text{ e } n_2 = \frac{c}{v_2}. \quad (35.4)$$

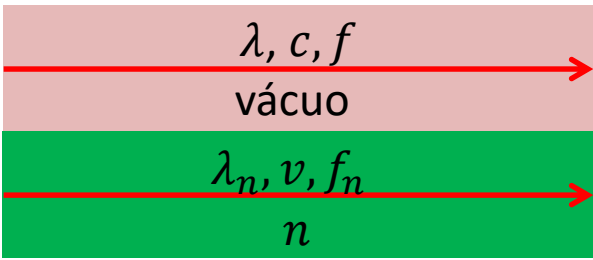
$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (35.5)$$



$$n_1 \text{sen } \theta_1 = n_2 \text{sen } \theta_2 \quad (\text{lei da refração}) \quad (35.6)$$

# Comprimento de Onda e Índice de Refração

Suponha que um feixe de luz monocromática tem comprimento de onda  $\lambda$  e uma velocidade  $c$  no vácuo e um comprimento de onda  $\lambda_n$  e uma velocidade  $v$  em um meio cujo índice de refração é  $n$ .



Como

$$\frac{\lambda_1}{v_1} = \frac{\lambda_2}{v_2} \quad \text{blue arrow} \quad \frac{\lambda}{c} = \frac{\lambda_n}{v} \quad \text{green arrow} \quad \lambda_n = \lambda \frac{v}{c}. \quad (35.7)$$

Mas

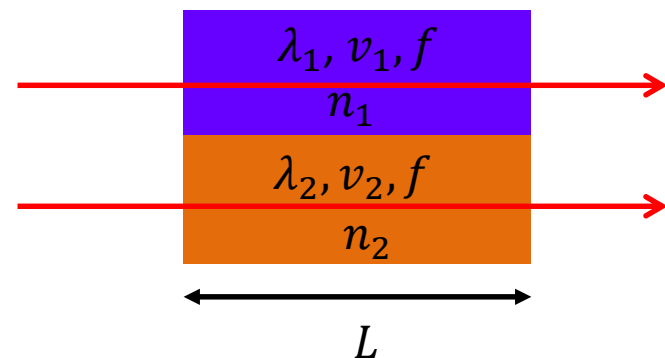
$$\frac{v}{c} = \frac{1}{n} \quad \text{orange arrow} \quad \lambda_n = \frac{\lambda}{n}. \quad (35.8)$$

Como se comporta a frequência da luz?

$$\begin{cases} \lambda f = c \text{ (no vácuo)} \\ \lambda_n f_n = v \text{ ("meio n")} \end{cases} \quad \text{yellow arrow} \quad f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{c/n}{\lambda/n} = \frac{c}{\lambda} = f \quad \text{red arrow} \quad f_n = f.$$

➤ A velocidade e o comprimento de onda da luz são diferentes no “meio  $n$ ” e no vácuo, mas a frequência da luz é a mesma no “meio  $n$ ” e no vácuo!

Duas ondas luminosas atravessam dois meios com índices de refração diferentes, como na figura ao lado.



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

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

$$N_1 = \frac{L}{\lambda_{n_1}} = \frac{L}{\lambda/n_1} = \frac{Ln_1}{\lambda}. \quad (35.9)$$

Em seguida, fazemos o mesmo para o meio 2:

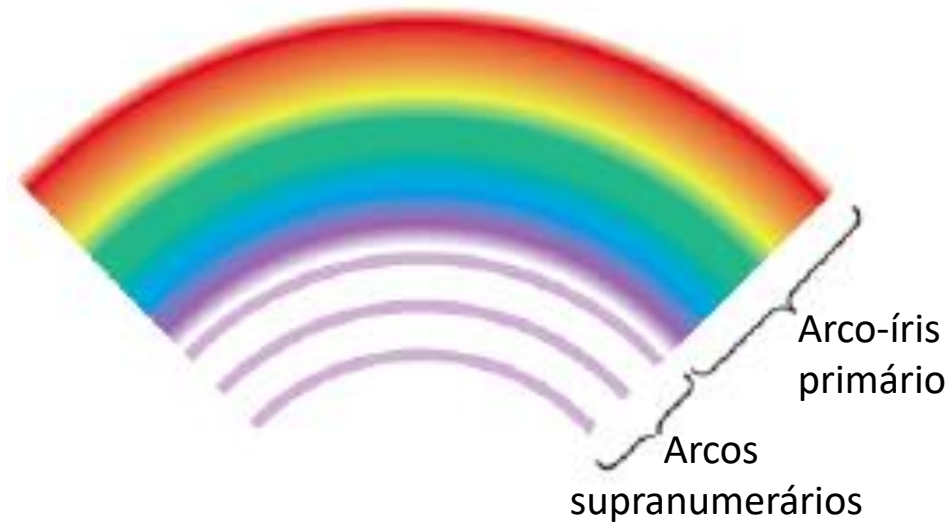
$$N_2 = \frac{L}{\lambda_{n_2}} = \frac{L}{\lambda/n_2} = \frac{Ln_2}{\lambda}. \quad (35.10)$$

Para calcular a diferença de fase entre as duas ondas basta determinar o módulo da diferença entre  $N_1$  e  $N_2$ :

$$|N_1 - N_2| = \frac{L}{\lambda} |n_1 - n_2| \quad (35.11) \quad \Rightarrow \quad |N_1 - N_2| = \begin{cases} 75,0 \Rightarrow \text{ondas totalmente em fase} \\ 3,5 \Rightarrow \text{ondas totalmente fora de fase} \end{cases}$$

... e se  $|N_1 - N_2| = 5,9$ ?

# O Arco-íris e a Interferência Ótica



O arco-íris primário e os arcos supranumerários são causados por interferência construtiva.

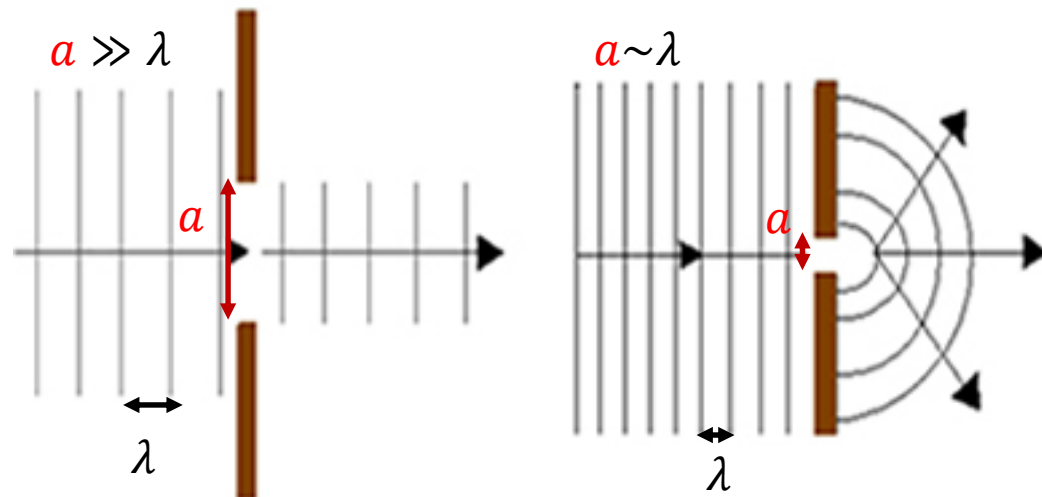
- Ondas luminosas penetram em toda a superfície da gota que está voltada para o Sol.
- Diferentes partes da onda incidente descrevem trajetórias diferentes no interior da gota.
- Isso significa que as ondas saem da gota com fases diferentes. Assim, para alguns ângulos de saída a luz está em fase e acontece **interferência construtiva**.
- O arco-íris é resultado dessa **interferência construtiva**.
- Por exemplo: o vermelho do arco-íris aparece porque as ondas de luz vermelha do arco-íris saem em fase das gotas de chuva na direção da qual você está observando essa parte do arco-íris.

## 35.3 Difração



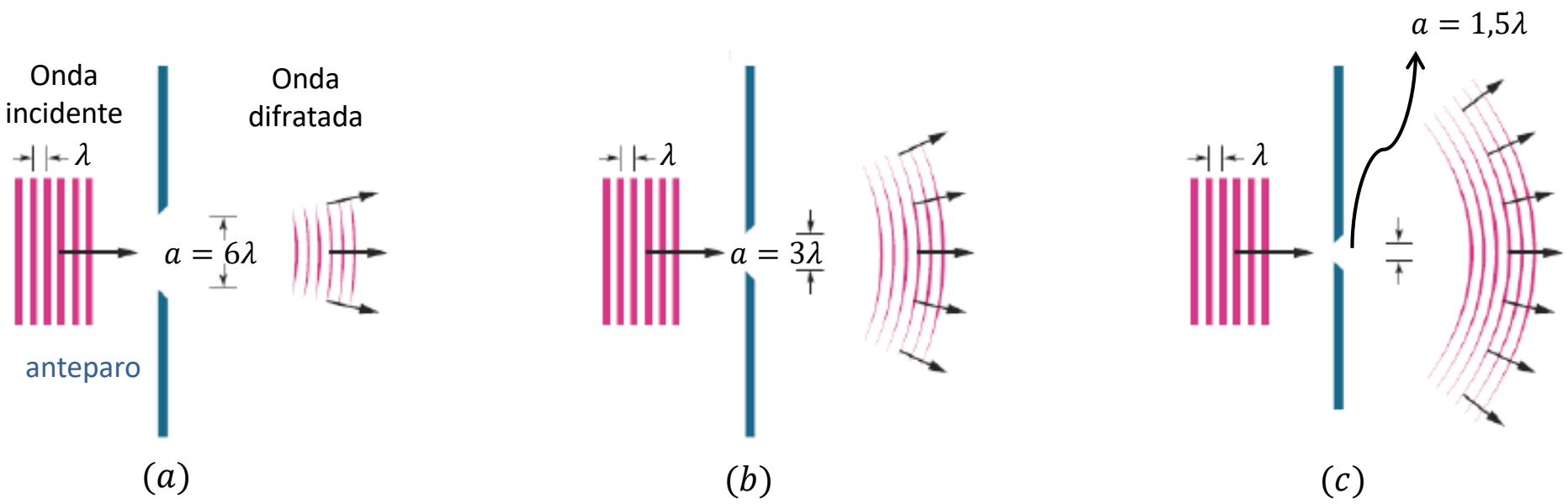
Difração de ondas na água de um tanque. As ondas são produzidas do lado esquerdo e passam por uma abertura estreita para chegar ao lado direito.

- Quando uma onda encontra um obstáculo que possui uma abertura de dimensões comparáveis ao comprimento de onda, a parte que passa pela abertura se alarga (é **difratada**) na região que fica do outro lado do obstáculo. Essa alargamento ocorre de acordo com o **Princípio de Huygens**.
- A **difração** não está limitada apenas às ondas luminosas, mas pode ocorrer com ondas de todos os tipos.





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



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

- A **difração** representa uma limitação para a **ótica geométrica**, na qual as ondas eletromagnéticas são representadas por raios.

**Exercícios sugeridos da Seção 35.2: 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 12 e 13.**

**4)** O comprimento de onda da luz amarela de sódio no ar é  $589 \text{ nm}$ .

**(a)** Qual a frequência da luz?

**(b)** Qual é o comprimento de onda da luz em um vidro com índice de refração 1,52?

**(c)** Use os resultados dos itens **(a)** e **(b)** para calcular a velocidade da luz no vidro.

[Dica:  $\lambda_n f_n = v$  e  $\lambda_n = \lambda/n$ .]

Respostas: (a)  $f = 5,09 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ; (b)  $\lambda_n = 338 \text{ nm}$  e (c)  $v = 1,97 \times 10^8 \text{ m/s}$ .