

# Aula 19

Professor:

*Mauricio Kischinhevsky*

## Óptica (Parte 1)

Conteúdo:

Propagação, reflexão e refração da luz - Parte 1

# Propriedades da luz

A sensibilidade do olho humano corresponde a comprimentos de onda de aproximadamente 400nm até 700nm.

## Dualidade onda-partícula

A natureza ondulatória foi demonstrada por Young, através do estudo do padrão de interferência de duas fontes de luz coerentes (uma fonte de luz e duas fendas) e teve seu ápice em termos de sistematização com as leis de Maxwell e suas previsões das ondas eletromagnéticas.

## Continuação

No início do século XX, Einstein identificou a necessidade de propor que a luz é composta por elementos de energia como partículas, a que denominou **fótons**. A energia destas partículas de luz está relacionada com a frequência pela equação de Einstein:

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}, \text{ onde } h \text{ é a constante de Planck,}$$

$$h = 6,626 \times 10^{-34} J.s = 4,136 \times 10^{-15} eV.s$$

Propagação e trocas de energia regidas por regras "diferentes".

## Espectros

Newton foi o primeiro a relatar a observação de que a luz branca é uma mistura de todas as cores com intensidades aproximadamente iguais. Esta observação foi comprovada pela decomposição da luz solar incidida sobre um prisma, refratada e projetada em um painel. Pode-se utilizar a saída da radiação eletromagnética do prisma para sensibilizar um filme fotográfico. Assim pode-se identificar que a luz proveniente do Sol contém uma faixa contínua de comprimentos de onda, no que se denomina **espectro contínuo**. A luz emitida por átomos de gases a baixa pressão como mercúrio em lâmpada fluorescente, contém apenas um conjunto discreto de comprimentos de onda. Cada comprimento de onda produz uma imagem isolada da fenda colimadora no espectroscópio. O espectro é denominado **espectro de linha**. A maioria das fontes comuns de luz visível é de transições de elétrons externos em átomos.

## Continuação

No visível,

$$E_{400nm} = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{1240 \text{ eV nm}}{400 \text{ nm}} = 3,1 \text{ eV} ,$$

$$E_{700nm} = \frac{1240 \text{ eV nm}}{700 \text{ nm}} = 1,77 \text{ eV}$$

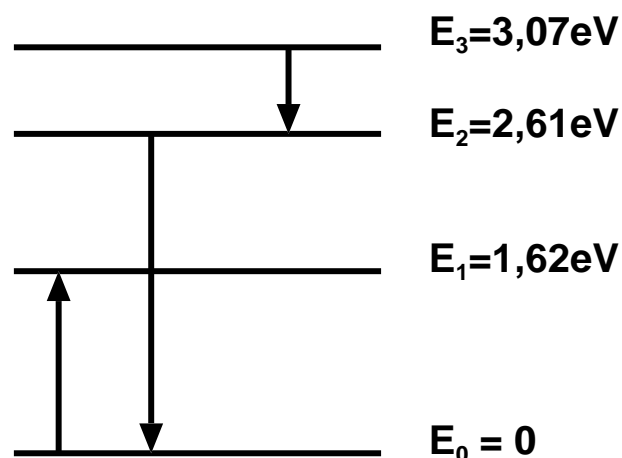
## Propriedades da luz

Quando os átomos estão próximos uns dos outros e interagem fortemente, como em sólidos e líquidos, os níveis de energia dos átomos individuais estão espalhados em bandas de energia, resultando faixas contínuas de níveis de energia e de espectro de emissão. Como exemplo, em um material incandescente, como filamento de metal quente, os elétrons são aleatoriamente acelerados pelas freqüentes colisões, resultando em largo espectro de radiação térmica. A radiação para temperaturas abaixo de  $600^{\circ}\text{C}$  é concentrada na faixa de infravermelho, não visível. Entre  $600^{\circ}\text{C}$  e  $700^{\circ}\text{C}$  a concentração se move para o visível, correspondendo a tom avermelhado, seguido de vermelho-brilhante evoluindo para branco.

## Exemplo (emissão e absorção ressonantes):

O primeiro estado excitado do potássio está em  $E_1=1,62\text{eV}$  acima do estado fundamental  $E_0$ , que pode ser considerado como zero. O segundo e o terceiro estados do potássio possuem níveis de energia em  $E_2=2,61\text{eV}$  e  $E_3=3,07\text{eV}$  acima do fundamental.

(a) Qual o máximo comprimento de onda da radiação que pode ser absorvido pelo potássio quando em seu estado fundamental? Calcule o comprimento de onda do fóton emitido quando o átomo faz uma transição do (b) segundo estado excitado ( $E_2$ ) para o estado fundamental e do (c) terceiro estado excitado ( $E_3$ ) para o segundo estado excitado ( $E_2$ ).



**Resposta:**

Pode-se calcular os comprimentos de onda das radiações absorvida na transição do nível fundamental para o primeiro (item a) e emitidas nas transições entre o terceiro e o fundamental (item b) e entre o terceiro e o segundo (item c):

$$(a) \text{ Absorção } \lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta E} = \frac{h \cdot c}{E_1 - E_0} = \frac{1240 \text{ eV nm}}{1,62 \text{ eV} - 0} = 765 \text{ nm} ,$$

$$(b) \text{ Emissão } \lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta E} = \frac{h \cdot c}{E_3 - E_0} = \frac{1240 \text{ eV nm}}{3,07 \text{ eV} - 0} = 404 \text{ nm} ,$$

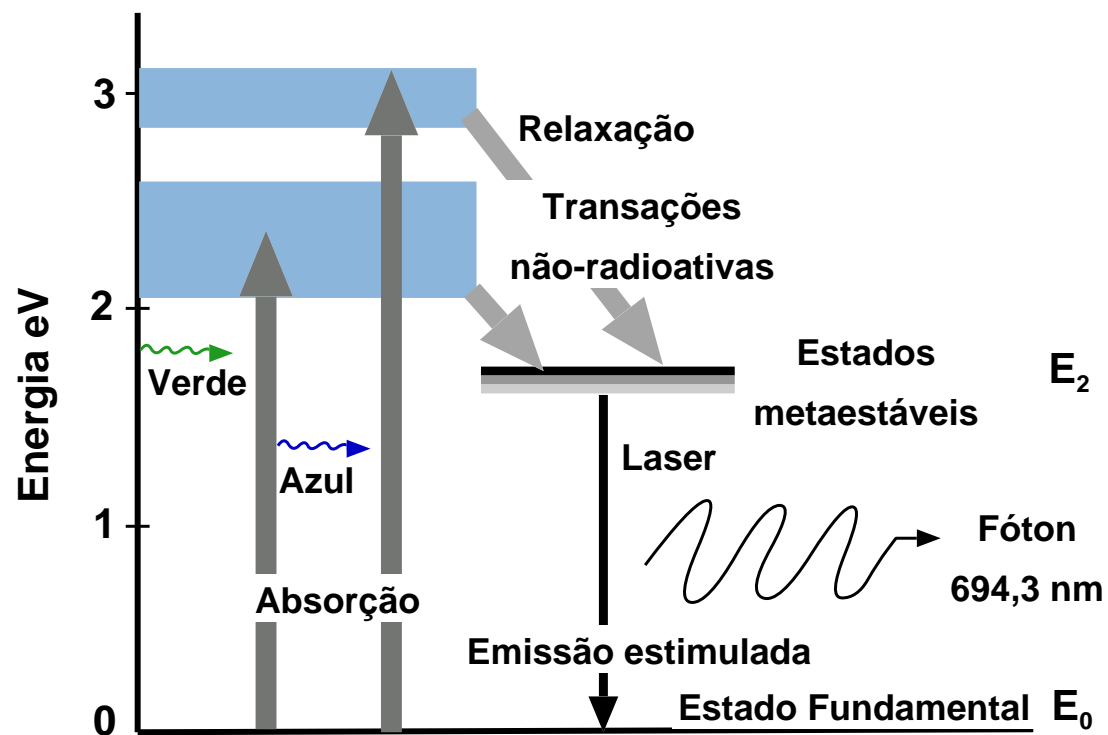
$$(c) \text{ Emissão } \lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta E} = \frac{h \cdot c}{E_3 - E_2} = \frac{1240 \text{ eV nm}}{3,07 \text{ eV} - 261 \text{ eV}} = 2700 \text{ nm} .$$



## Lasers

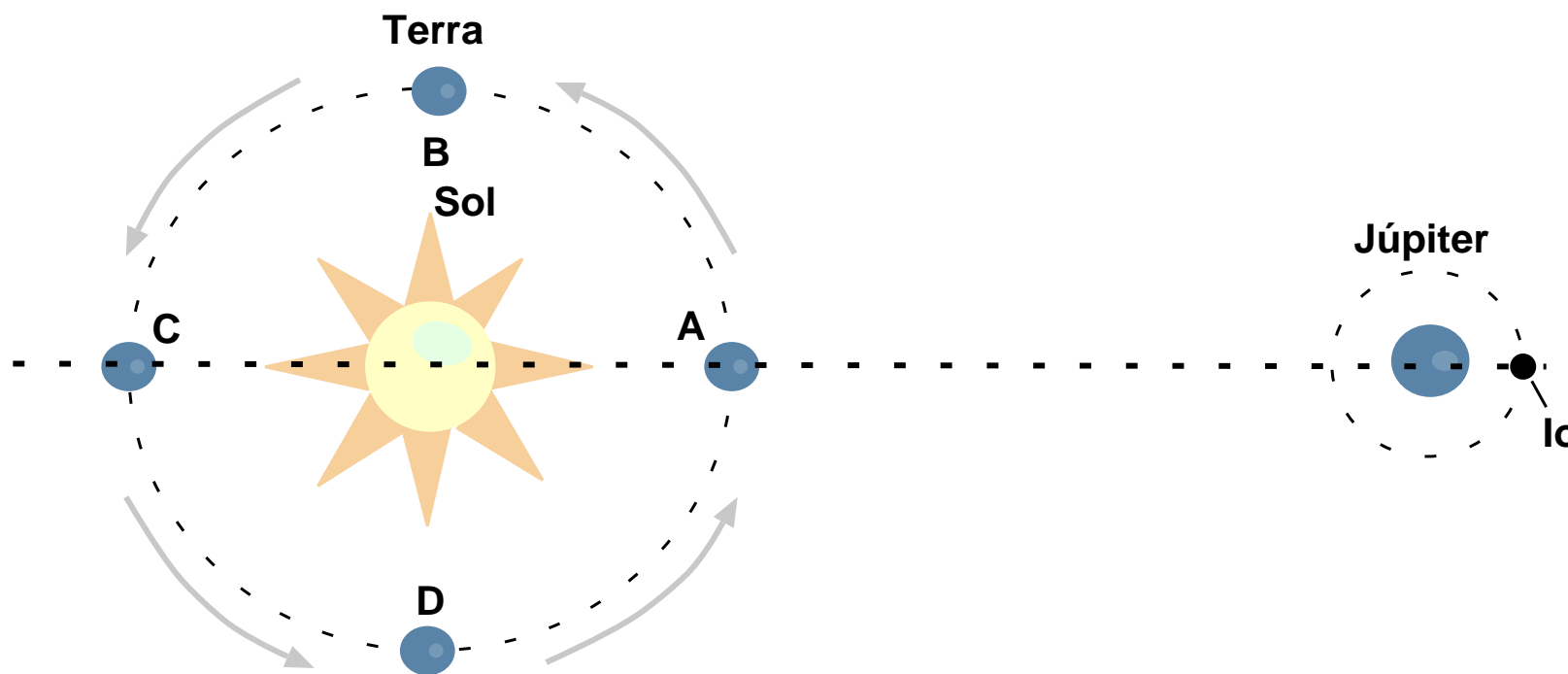
Light amplification by stimulated emission of radiation produz um forte feixe de fótons coerentes por emissão estimulada. Considere um sistema consistindo de átomos que possuem um estado fundamental de energia e um estado excitado metaestável. Se esses átomos são irradiados por fótons com energia igual à diferença de energia entre os estados, estando inicialmente no estado fundamental, haverá absorção e muitos átomos passam ao estado excitado, do qual retornam ao fundamental espontaneamente ou de forma estimulada. Produz-se, então, com auxílio de irradiação auxiliar, uma superpopulação do estado excitado (inversão de população, por decaimento radioativo e por colisões), para que o processo de emissão seja dominante.

## Lasers (continuação)



## Medidas da velocidade da luz:

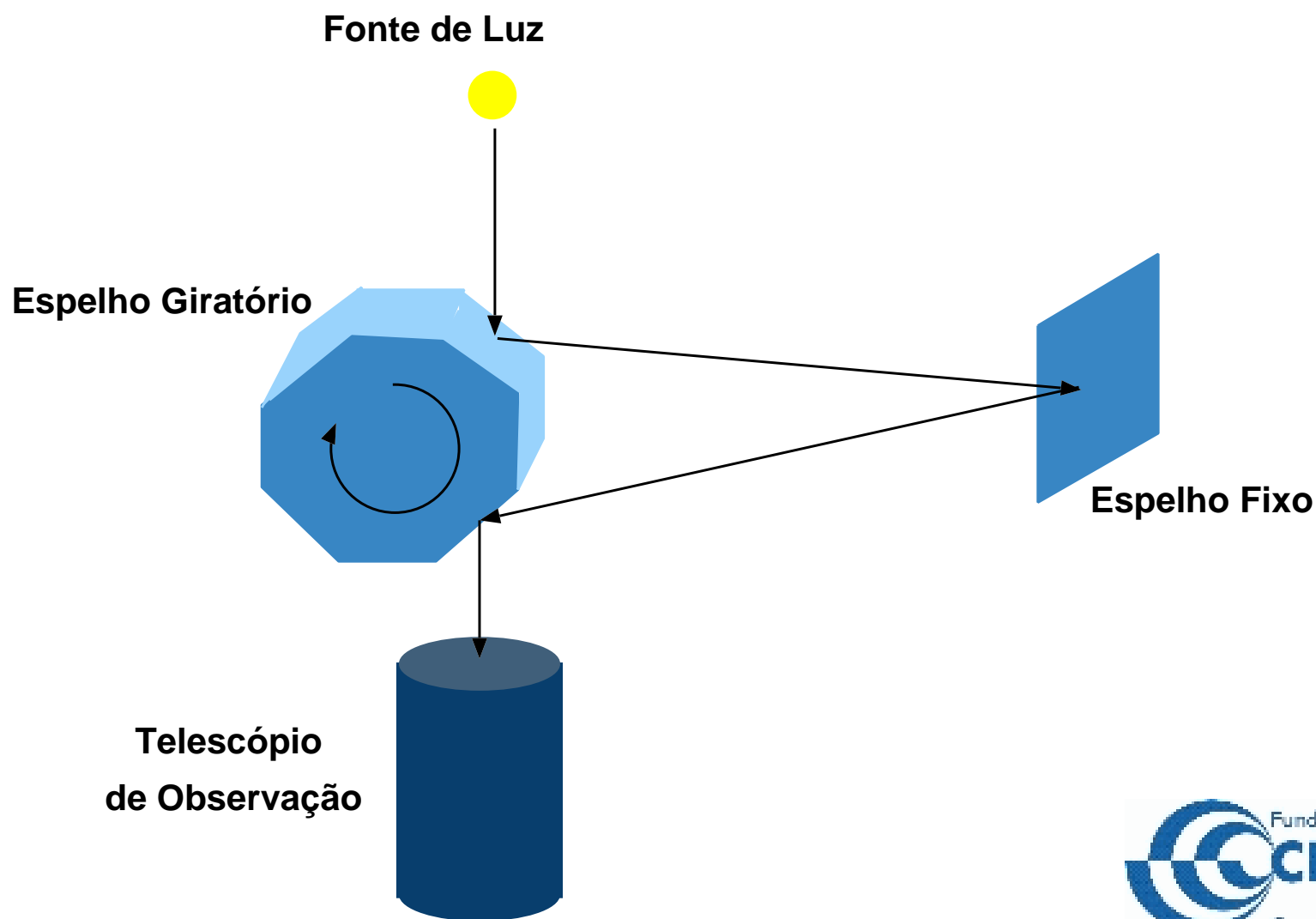
Galileu : as lanternas descobertas pelos dois experimentalistas ("inconclusivo"); Römer (1675) :



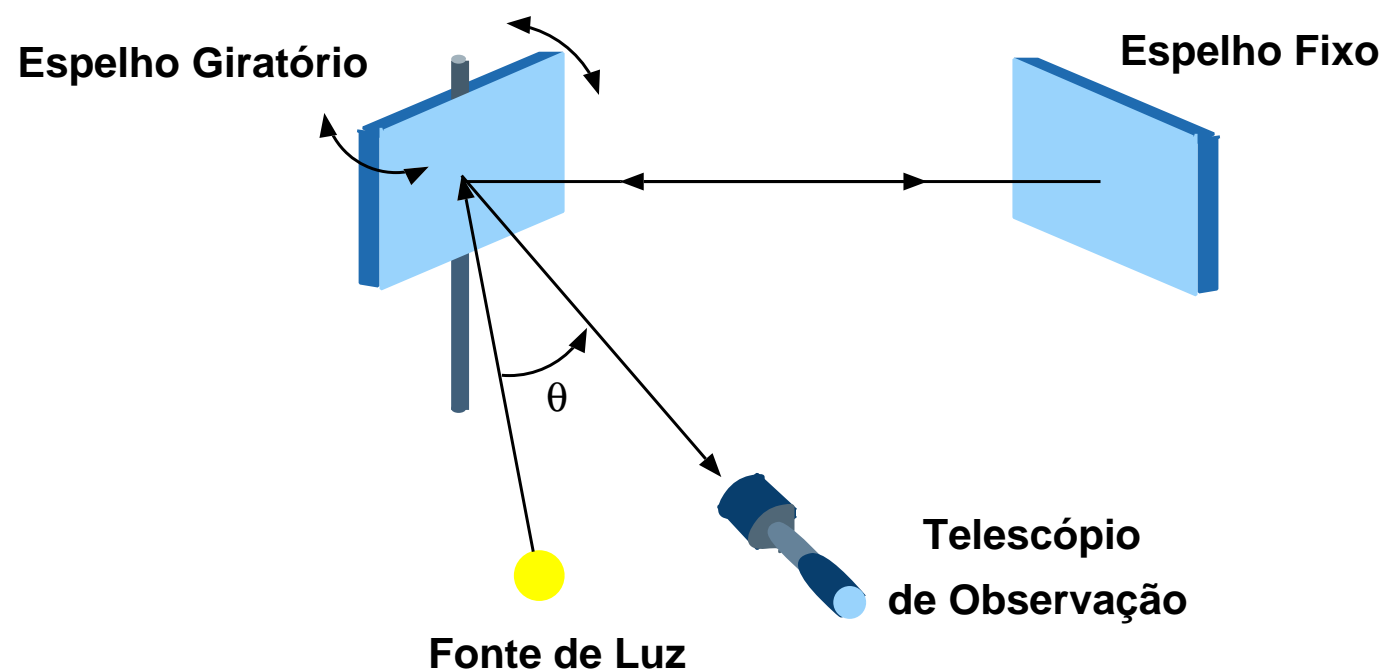
O período de Io, lua de Júpiter tem seu valor medido variado ao longo do ano. Com a medida do início de um eclipse de Io sendo 16,6 minutos mais tarde quando o sol está entre a Terra e Júpiter do que quando a Terra está entre o Sol e Júpiter, mediu-se a velocidade da luz como aquela que corresponde ao tempo para percorrer o diâmetro da órbita da Terra.

Fizeau(1849)-Foucault(1850)-Michelson(1880).

Medidas não astronômicas baseadas na criação de uma "porta" periodicamente aberta para a passagem de luz refletida a grande distância. Fizeau, roda dentada; Foucault, espelho duplo giratório e Michelson, prisma octogonal com espelhos nas faces.



## Fizeau(1849)-Foucault(1850)-Michelson(1880). (Continuação)



## Exemplo:

No experimento de Fizeau, sua roda possuía 720 dentes, e a luz foi observada quando a roda girava a 25,2 rps (rotações por segundo). Se a distância da roda para o espelho mais distante era de 8,63km, qual era o valor de Fizeau para a velocidade da luz?

**Resposta:**

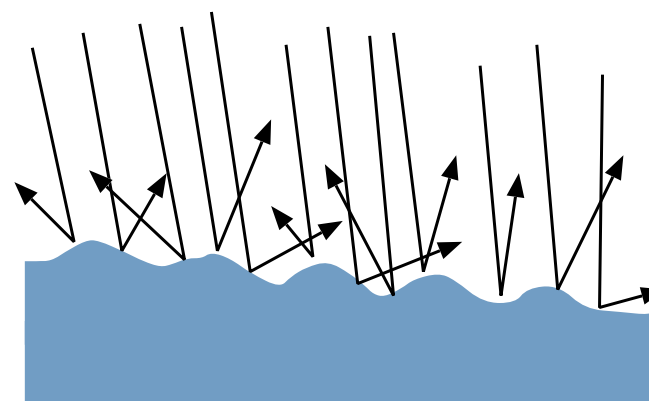
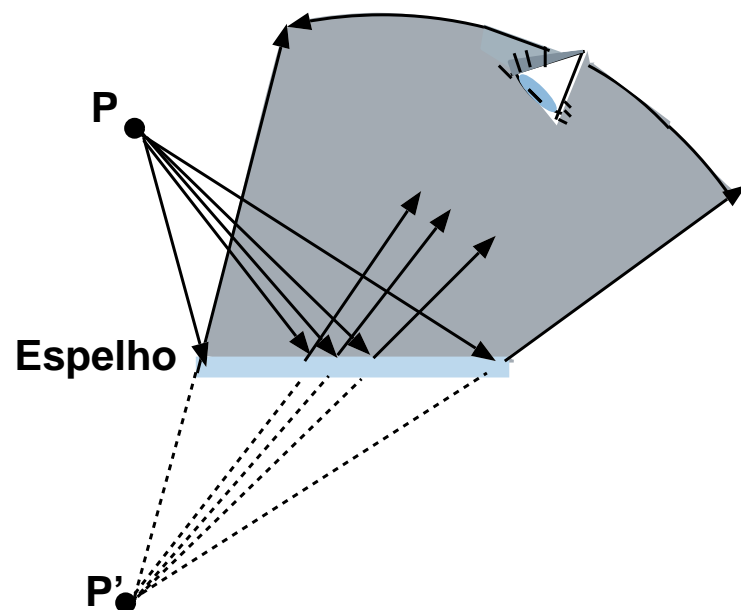
O tempo que a luz leva para percorrer a distância total da roda até o espelho e voltar é o tempo para um dente da roda ter passado. Assim,

$$c = \frac{2 \cdot L}{\Delta t} ,$$

$$\Delta\theta = w \cdot \Delta t , \quad \Delta t = \frac{\Delta\theta}{w} \quad \text{e, portanto,}$$

$$\begin{aligned} c \cdot \frac{2 \cdot L \cdot w}{\Delta\theta} &= \\ &= \frac{2 \cdot (8,63 \times 10^3 m) \cdot (25,2 \text{ rotação/segundo})}{\frac{1}{720} \text{ rotação}} = 3,13 \times 10^8 m/s . \end{aligned}$$

## Reflexão especular e reflexão difusa, refração, reflexão interna total





### Exemplo:

A luz se deslocando no ar (índice de refração igual a 1) entra na água com ângulo de incidência de  $45^\circ$  e o índice de refração da água é 1.33, qual o ângulo de refração?

**Resposta:**

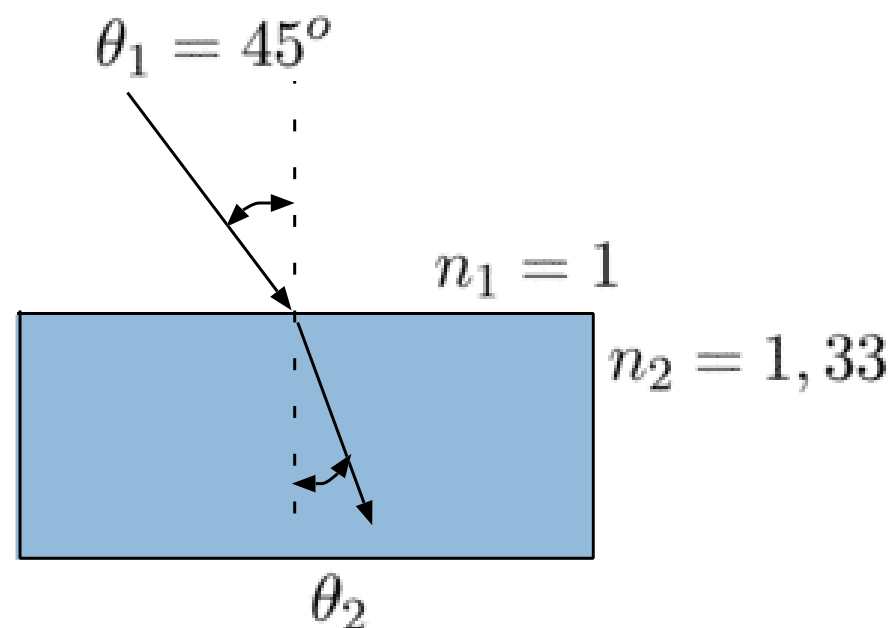
O ângulo de refração resulta da Lei de Snell. Portanto,

$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2$  , ou seja,

$$\text{sen} \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \text{sen} \theta_1 \rightarrow \theta_2 = \text{sen}^{-1} \left( \frac{n_1}{n_2} \text{sen} \theta_1 \right) =$$

$$= \text{sen}^{-1} \left( \frac{1.00}{1.33} \text{sen} \frac{\theta}{4} \right) =$$

$$= \text{sen}^{-1}(0.532) = 32,1^\circ .$$



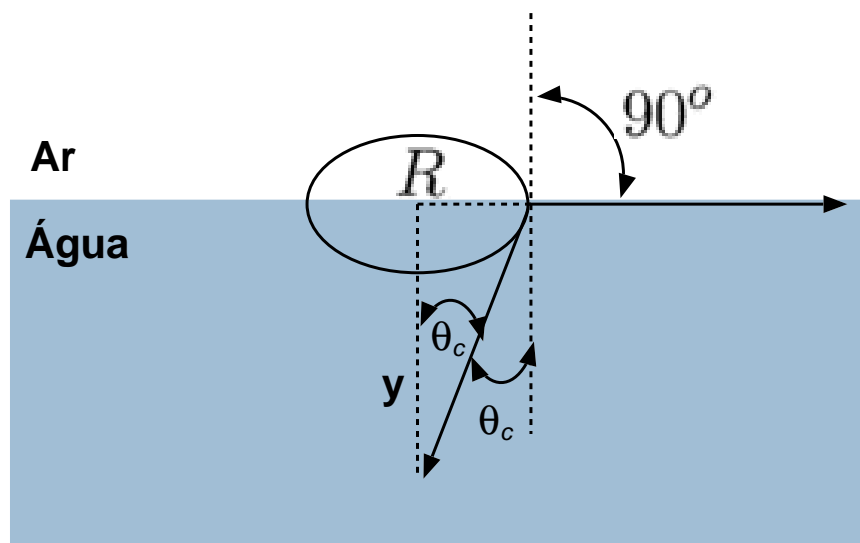
Observando a lei de Snell há um **ângulo crítico**, no meio de maior índice de refração, no qual o ângulo no meio de menor índice será de  $90^\circ$ .

### Exemplo:

Em uma ocasião, você está na piscina. Estando debaixo d'água, cujo índice de refração é 1.33, você olha para cima e verifica que pode ver objetos acima em um círculo de luz com raio de 2.0m e o resto da sua visão são os ladrilhos da piscina. Qual a sua profundidade (dos seus olhos)?

**Resposta:**

Utilizando a Lei de Snell, obtém-se



$$\operatorname{tg} \theta_c = \frac{R}{y}, \text{ ou seja,}$$

$$y = \frac{R}{\operatorname{tg} \theta_c}, \text{ sendo } \theta_c \text{ obtido por}$$

$$\operatorname{sen} \theta_c = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{1.33} = 0.752 \rightarrow \theta_c = 48.8^\circ$$

$$\text{ou seja, } y = \frac{R}{\operatorname{tg} \theta_c} = \frac{2.0m}{\operatorname{tg} 48.8^\circ} = 1.75m .$$

## Fibras óticas

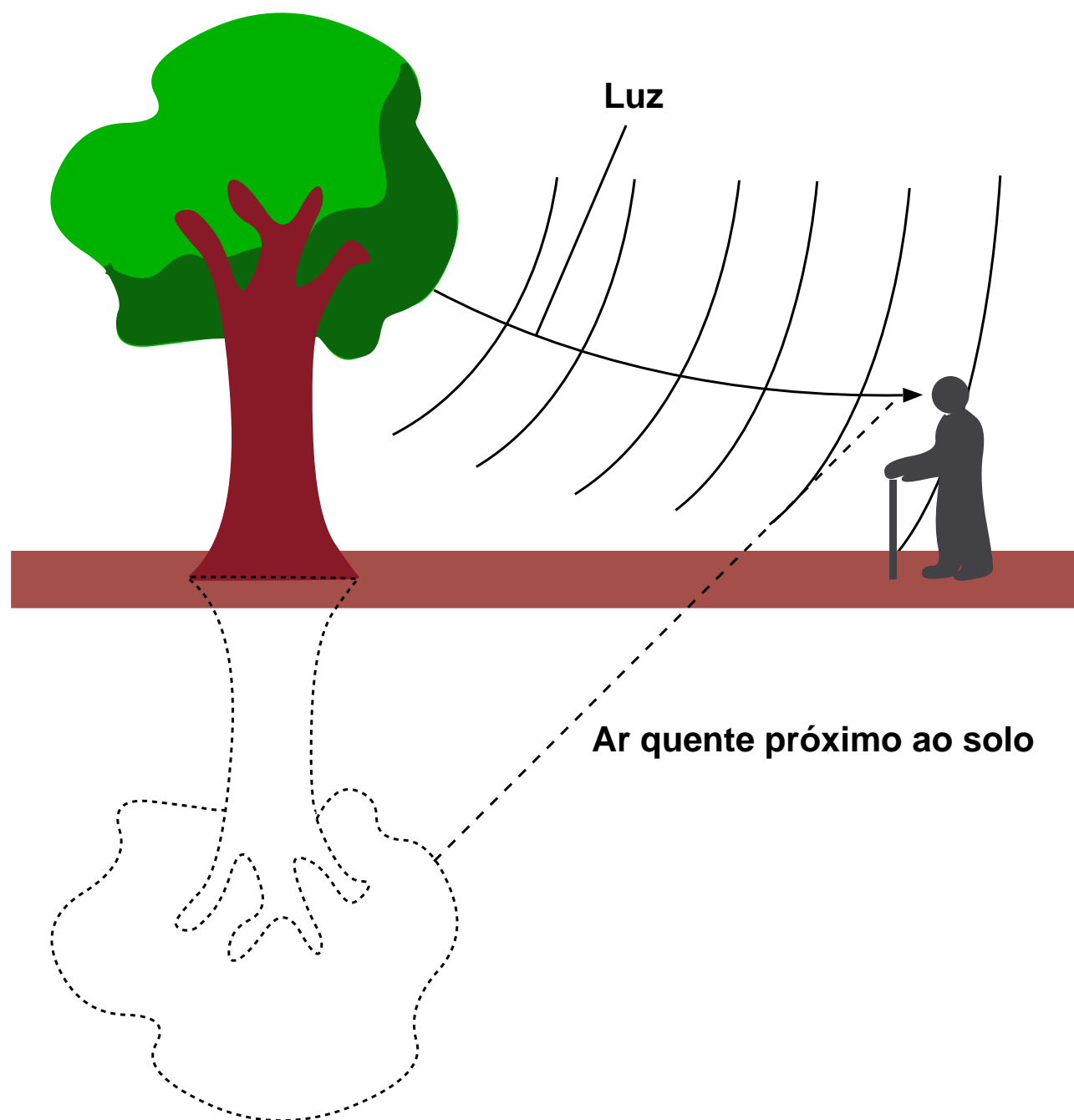
Quando o ângulo crítico é ultrapassado, ocorre **reflexão interna total**.

Fibras óticas são uma aplicação da reflexão interna total. A fibra ótica é uma fibra de vidro fina e transparente que transmite ondas eletromagnéticas com pouca perda e que não pode ser dobrada de modo a preservar o feixe de ondas eletromagnéticas incidindo nas paredes da fibra com ângulos maiores que o ângulo crítico. Em telecomunicações, uma fibra com a espessura de um fio de cabelo pode transmitir informações de áudio ou vídeo equivalentes 32 mil vozes falando simultaneamente. Utiliza-se preferencialmente  $10^{14}$  Hz (infravermelho) como frequência de transmissão do que  $10^6$  Hz (rádio).

## Miragens

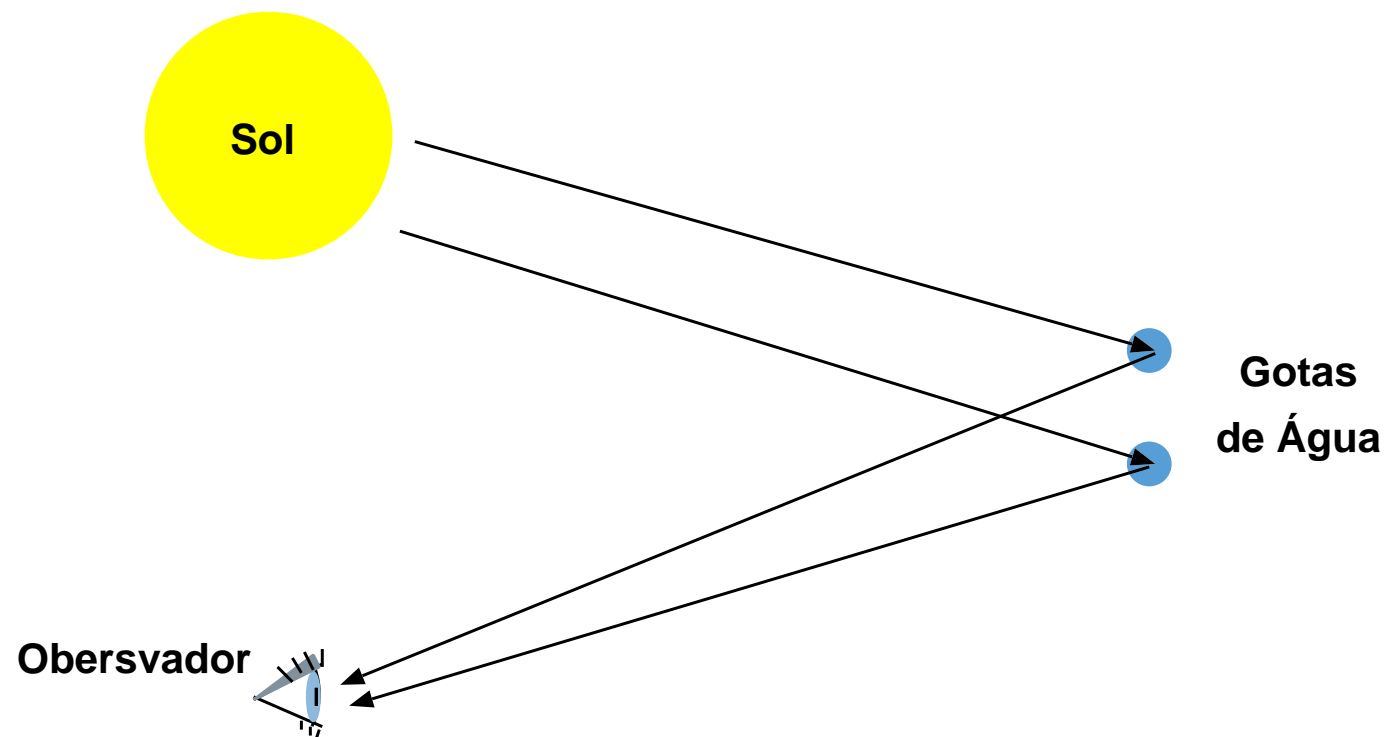
Quando o índice de refração varia gradualmente a refração é contínua, levando a uma curvatura gradual da luz. Nas camadas de ar próximas a superfícies quentes a densidade do ar é menor, produzindo velocidade um pouco maior do que onde a densidade é maior. Este fenômeno produz as poças fictícias avistadas sobre o pavimento quente

## Miragens (Continuação)



## Arco-íris

A passagem da luz por dentro das gotas de água produz os desvios estudados na refração/reflexão, de modo que ocorre:





## Arco-íris (Continuação)

