

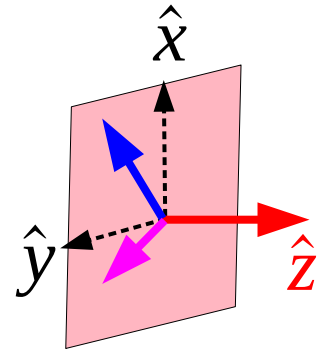
# Física IV (IF 2023)

## Aula 19

- Objetivos de aprendizagem:
  - Descrever uma onda plana da forma mais geral possível
  - Descrever uma onda plana monocromática geral que se propaga na direção  $z$
  - Reconhecer as figuras descritas pela projeção do campo elétrico no plano perpendicular à direção de propagação associadas à polarização
  - Reconhecer as condições sobre os campos elétricos e magnéticos correspondentes aos vários tipos de polarização (linear, circular, elíptica)
  - Descrever uma onda com polarização arbitrária por meio de uma superposição de ondas circularmente polarizadas das duas quiralidades.

# Onda viajante plana arbitrária

- Direção de propagação  $\hat{u} = \hat{z} \longrightarrow$
- 2 componentes do campo  $E$  no plano perpendicular  $\vec{E} = f(z - vt)\hat{x} + g(z - vt)\hat{y}$
- $B$  idem



$$\vec{B} = \frac{\hat{z}}{v} \times \vec{E}$$

$$\vec{B} = -\frac{1}{v} g(z - vt)\hat{x} + \frac{1}{v} f(z - vt)\hat{y}$$

# Onda plana monocromática

- Componentes - ondas harmônicas de mesma frequência (notação complexa):

$$\vec{E} = E_x \hat{x} + E_y \hat{y} \quad E_x = a e^{i(kz - \omega t + \delta_x)} \quad E_y = b e^{i(kz - \omega t + \delta_y)}$$

- Diferença de fase  $\delta = \delta_y - \delta_x$

- Parte real (campo verdadeiro):

$$\Re(E_x) = a \cos(kz - \omega t + \delta_x) = a \cos(\theta), \quad \theta = (kz - \omega t + \delta_x)$$

$$\Re(E_y) = b \cos(kz - \omega t + \delta_y) = b \cos(\theta + \delta)$$

# Vetor campo elétrico (o.e.m.p.m.)

- Cada componente oscila harmonicamente com a mesma frequência.
- Dependendo da diferença de fase e das amplitudes, o comprimento do vetor e sua orientação no plano  $xy$  variam em função do tempo, para cada ponto no espaço.
- Para  $z$  constante, a ponta do vetor campo elétrico descreve, em geral, uma elipse.

# Campo elétrico no plano $z=0$

- A fase da componente  $x$  é uma função do tempo:

(Notação real)

$$E_x = a \cos(\theta) \quad \theta(0, t) = (-\omega t + \delta_x)$$

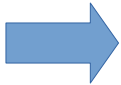
- E a da componente  $y$  também:  $E_y = b \cos(\theta + \delta)$
- ... mas há uma defasagem constante:  $\delta = \delta_y - \delta_x$
- → desmos <https://www.desmos.com/calculator/zsbdfh1ro9>

# Determinando a “trajetória” do E

$$E_x = a \cos(\theta)$$

$$E_y = b \cos(\theta + \delta)$$

- Eliminar a fase da primeira componente para obter uma componente como função da outra.

  
(Eq. elipse)

$$\left(\frac{E_y}{b}\right)^2 - 2\left(\frac{E_y}{b}\right)\left(\frac{E_x}{a}\right)\cos\delta + \left(\frac{E_x}{a}\right)^2 = \text{sen}^2\delta \quad (5.31)$$

→ desmos de novo  
Variar parâmetros

# Tipos de polarização

- Polarização linear

$$\delta = 0, \pm\pi, \pm 2\pi, \dots = n\pi, \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

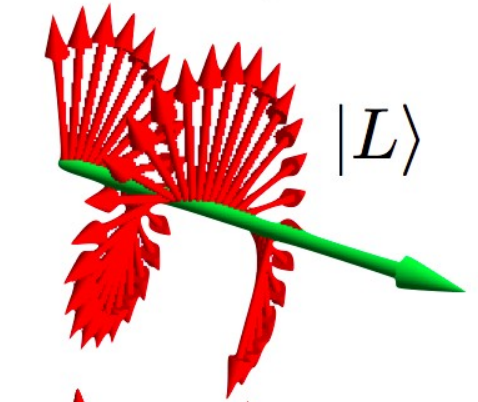
- Polarização circular ( $a=b$ )

$$\delta = \pm\frac{\pi}{2}, \pm 3\frac{\pi}{2}, \dots = n\pi + \frac{\pi}{2}, \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

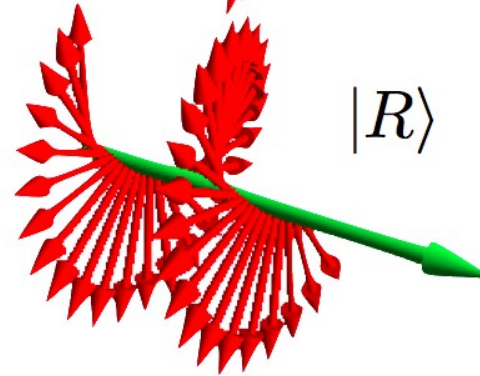
- Qual é o sentido da rotação, na polarização circular?

# Polarização de mão esquerda/direita

Esquerda

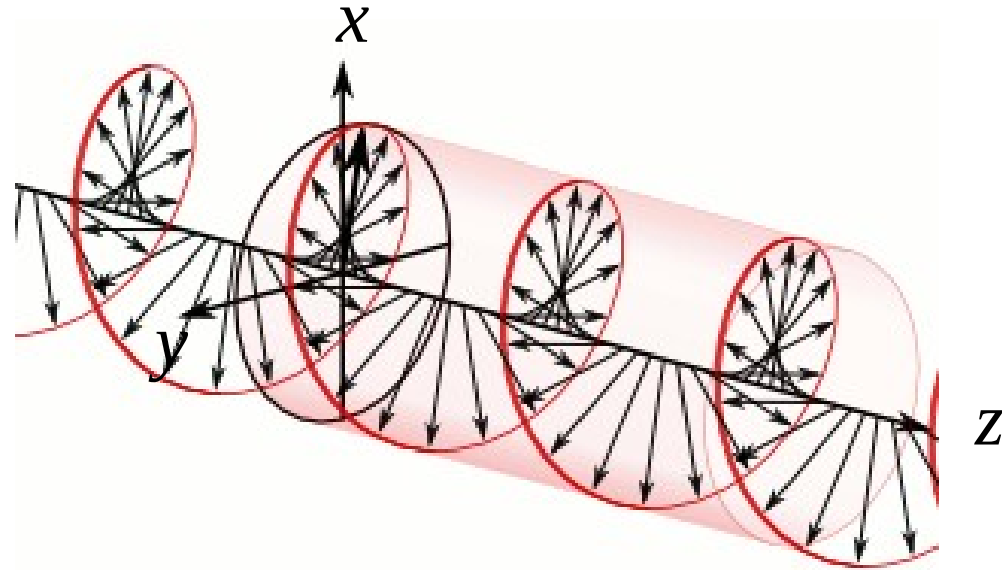


Direita





# Onda circularmente polarizada



Mão direita → [Link para GIF](#)  
(Movimento horário no plano  $xy$ )

# Tipos de polarização

- Polarização linear

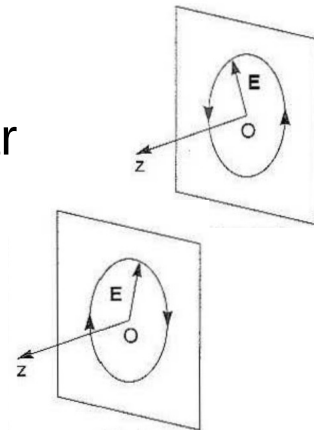
$$\delta = 0, \pm\pi, \pm 2\pi, \dots = n\pi, \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

- Polarização circular ( $a=b$ )

$$\delta = \pm\frac{\pi}{2}, \pm 3\frac{\pi}{2}, \dots = n\pi + \frac{\pi}{2}, \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

- Qual é o sentido da rotação, na polarização circular?

- Esquerda (movimento anti-horário no plano  $xy$  com  $z$  fixo),  $n$  par
- Direita (movimento horário no plano  $xy$  com  $z$  fixo),  $n$  ímpar



# Polarização circular na notação complexa

$$\vec{E} = E_x \hat{i} + E_y \hat{j} = E_x \hat{x} + E_y \hat{y} = ae^{i\theta} \left( \hat{x} + e^{\pm i \frac{\pi}{2}} \hat{y} \right)$$

$$\vec{E} = ae^{i\theta} (\hat{x} \pm i \hat{y})$$

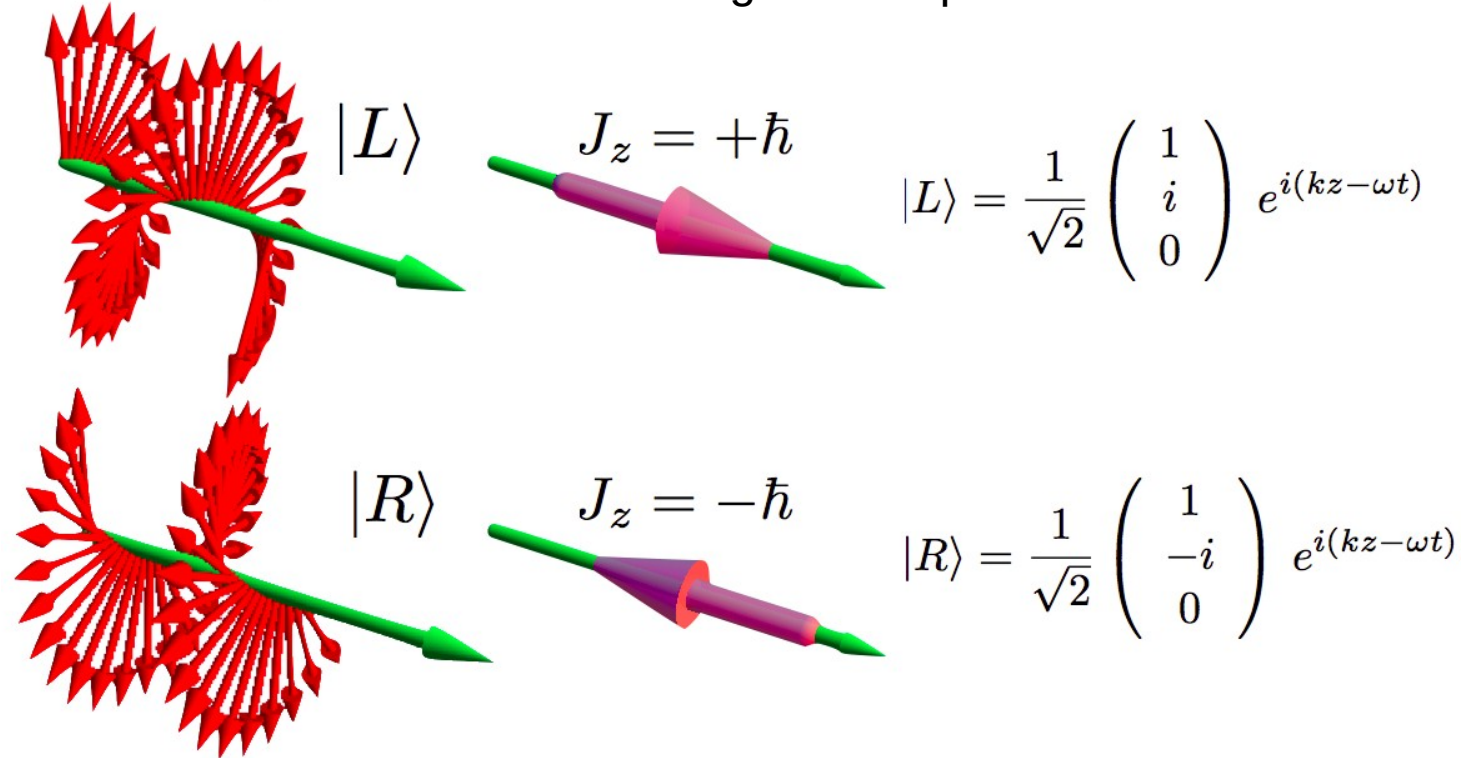
# Versores de polarização circular

- Mão direita e mão esquerda:

$$\hat{\varepsilon}_- = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{x} - i\hat{y}) \quad \hat{\varepsilon}_+ = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{x} + i\hat{y})$$

# Polarização de mão esquerda/direita

Momento angular de spin



# Superposição de ondas de polarização circular

$$\vec{E} = E_x \hat{x} + E_y \hat{y}$$

Reescrevendo os versores cartesianos em termos de circulares:

$$\vec{E} = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_x - i E_y) \hat{\varepsilon}_+ + \frac{1}{\sqrt{2}} (E_x + i E_y) \hat{\varepsilon}_-$$

# Polarização elíptica

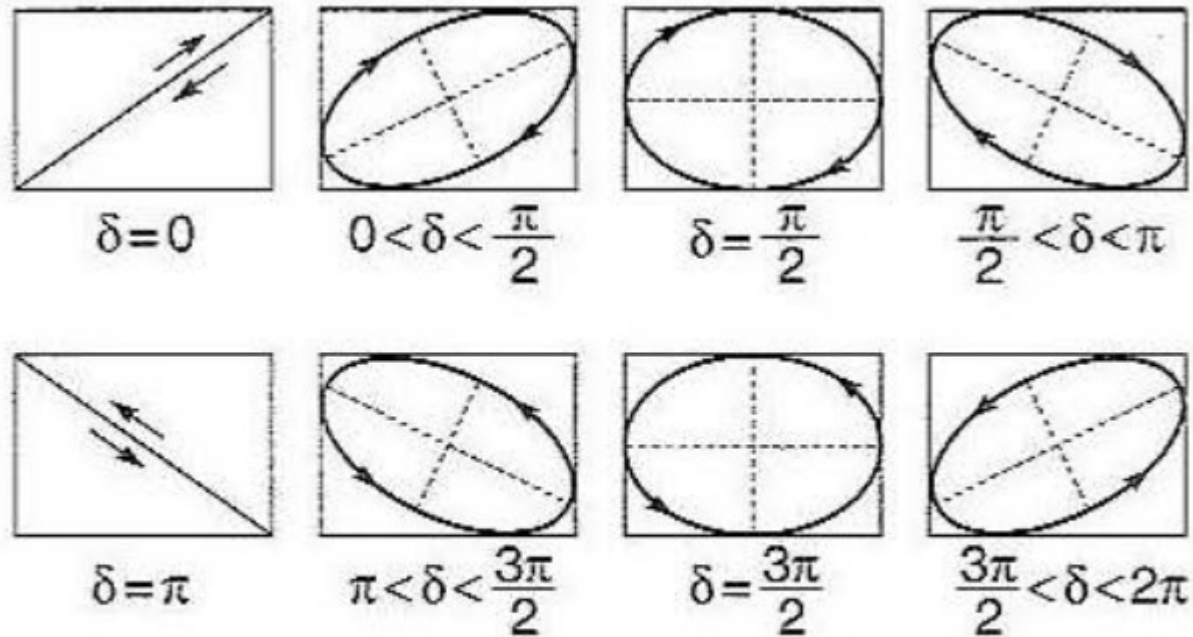


Fig. 5.3 Polarização elíptica