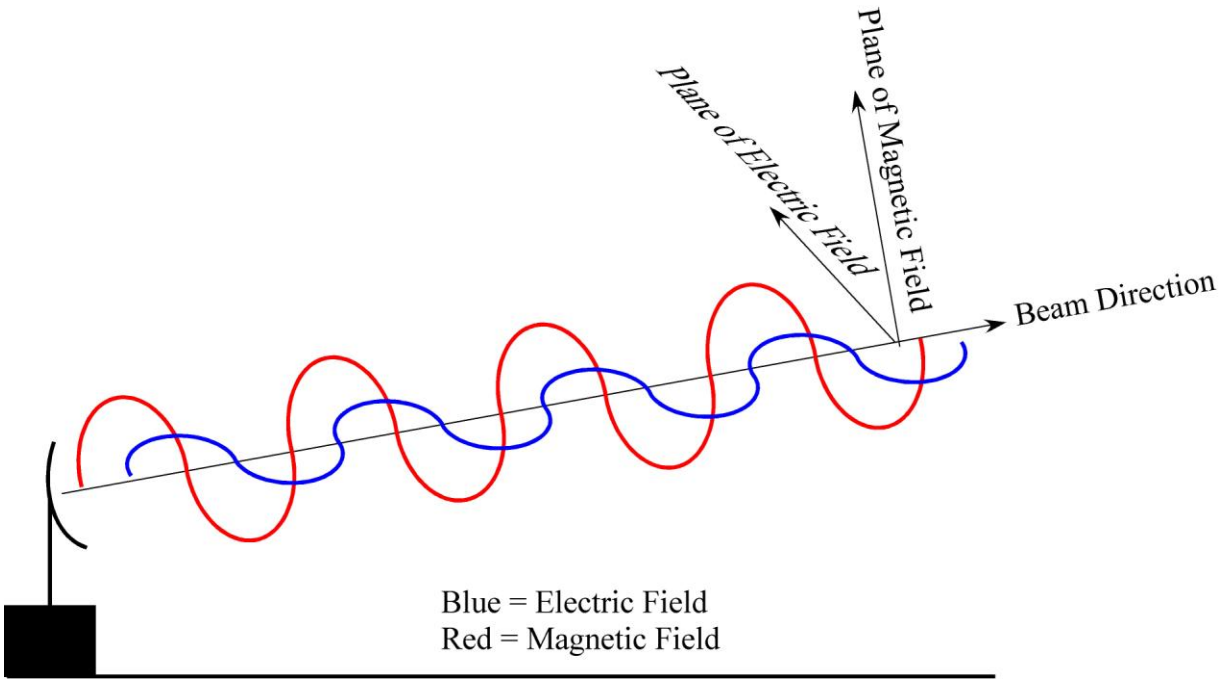
Revisão:
Ondas Eletromagnéticas (EM)



Capítulo 2 do Battan.

Campo Elétrico - E

• O campo elétrico – E - é um conceito definido pela força que uma carga (usualmente uma carga de teste) experimentaria se fosse deslocada a uma distância, r, relativa a carga q2.

•Logo o campo elétrico existe na presença de um corpo carregado

•Portanto tem magnitude e direção

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{q}{r^2}\hat{a}_r \left[\frac{N}{C}\right] ou \left[\frac{V}{m}\right]$$

Onde

r é a distância entre as duas cargas

a_r é o vetor unitário apontando de q2 a q1

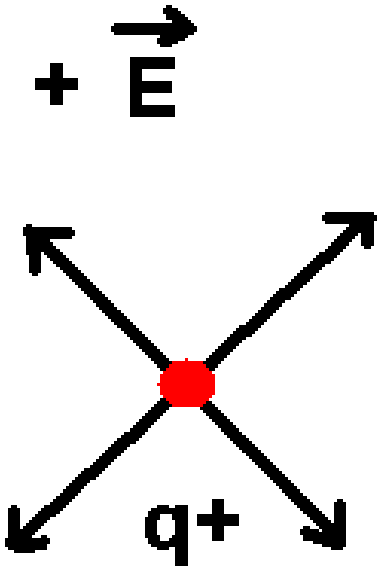
ε permissividade di-elétrica do ar

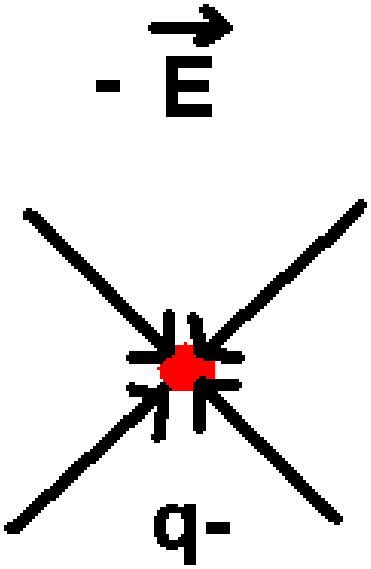
$k = 4\pi\varepsilon$ = cte de Coulomb ou cte Eletrostática

Sendo que 1/k (MKS) = $10^{-7}c^2$

(c = velocidade da luz = $3x10^8$ m/s)

A polaridade da carga definirá a propagação das linhas de Campo Elétrico, ou seja, a direção.





O campo elétrico pode ser representado através do vetor de deslocamento elétrico – D, o qual leva em consideração as características do meio que o campo elétrico existe:

$$D(Cm^{-2}) = \varepsilon E$$

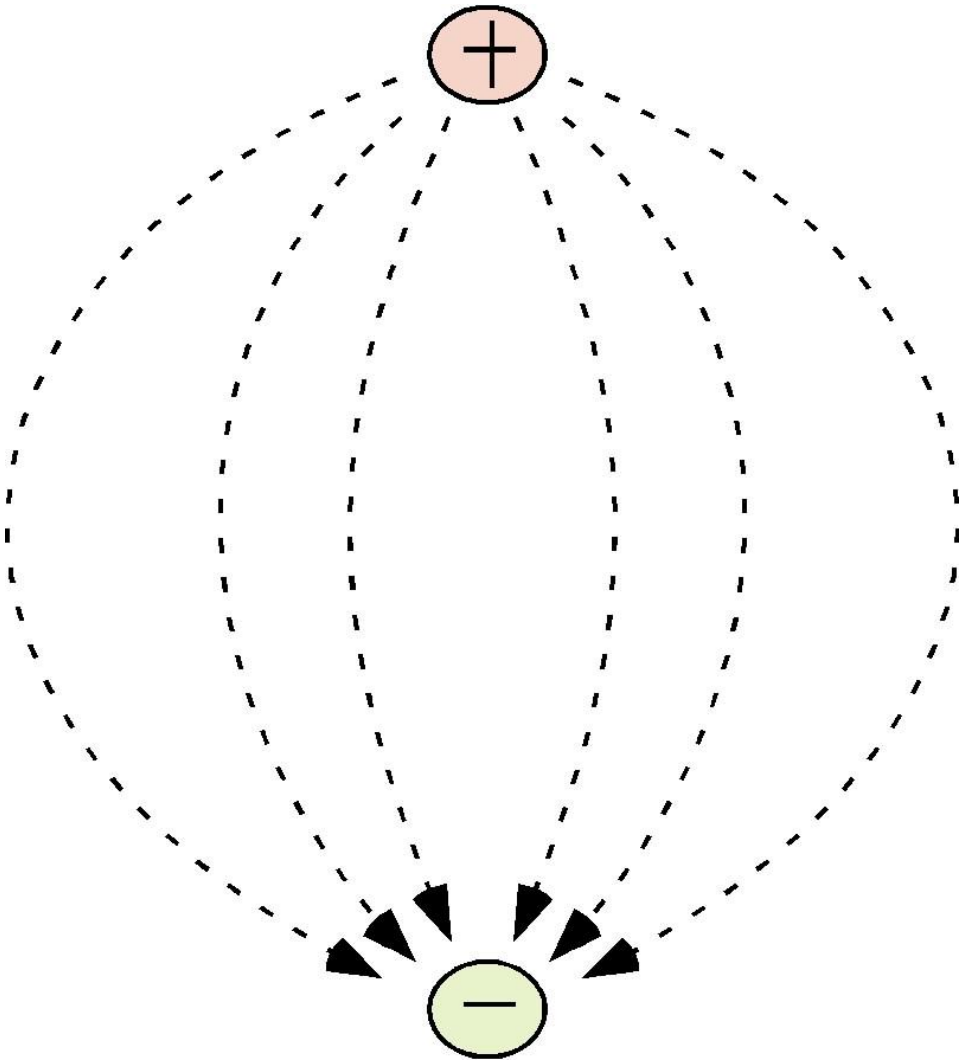
Lembrando que ε, permissividade ou capacidade de condução elétrica e está relacionado com a habilidade do meio em armazenar a energia potencial elétrica.

Vácuo : $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \; [C^2 \; N^{-1} \; m^{-2}] ou \; [Fm^{-1}]$

Ar : $\varepsilon_1 = 8,876 \times 10^{-12} \; [C^2 \; N^{-1} \; m^{-2}] ou \; [Fm^{-1}]$

Razão : $\dfrac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} = 1,003$

O Vetor de deslocamento elétrico – D é utilizado para desenhar as linhas de força



Campo Magnético

- O campo magnético, B, é um campo produzido pelo movimento das cargas elétricas, *logo B existe na presença de uma corrente elétrica*

- Intensidade do Campo Magnético – H

- Tem magnitude e direção

O Campo magnético – H é representado pelo vetor de indução magnética – B, o qual leva em consideração as caracteristicas do meio em que a corrente elétrica flui.

$$B = \mu H$$

onde μ é a capacidade indutiva magnética ou permeabilidade, e está relacionada com a habilidade do meio em armazenar a energia potencial magnética

Vácuo : $\mu_0 = 1,260 \times 10^{-6} \; J \; A^{-2} \; m^{-1}$

Ar : $\mu_1 = 1,260 \times 10^{-6} \; J \; A^{-2} \; m^{-1}$

Razão : $\dfrac{\mu_1}{\mu_0} = 1.000$

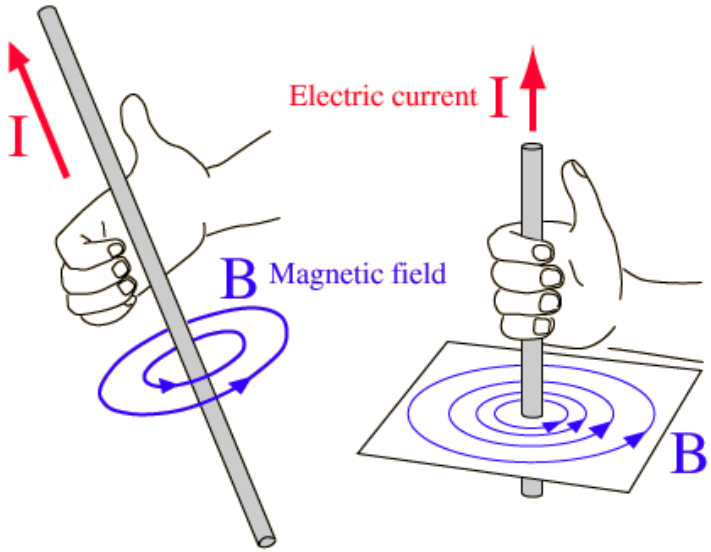
Campos Magnéticos estão associados com cargas em movimentos – corrrentes elétricas

$$F = I \times B$$

I: Corrente $\left(C \quad s^{-1} \quad ou \quad A\right)$

B: Indução Magnética $\left(J \quad A^{-1} \quad m^{-2}\right)$

As linhas de campo magnético são círculos fechados em volta das correntes que o produzem



Equações de Maxwell

- Lei de Gauss
- Lei de Faraday
- Lei de Gauss para o Magnetismo
- Lei de Ampere

Lei de Gauss

$$\nabla \bullet E = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

A divergência do campo elétrico é função da densidade de carga

(onde *ρ* é a densidade de carga)

Lei de Faraday

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

Variações temporais no fluxo do campo magnético irão produzir variações de corrente, logo teremos linhas de campo elétrico fluindo em um circuito fechado (condutor).

Lei de Gauss para o Magnetismo

$$\nabla \bullet B = 0$$

A divergência do campo magnético é nula (circuitos fechados)

Lei de Ampere

$$\nabla \times B = \mu_0 I + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

Campo magnético existirá na presença de corrente e ou variação temporal do campo elétrico.

Ondas eletromagnéticas (EM):
A solução das equações de Maxwell implica no campo magnético e elétrico

A EM se propaga na velocidade da luz quando no vácuo

$$c = 3 \times 10^{8} \; m \; s^{-1}$$

Os campos elétrico e magnético se propagam em ondas descritas como:

$$E(r,\theta,\phi,t) = \frac{A(\theta,\phi)}{r} \exp\left\{ i\,2\pi\nu \left(t - \frac{r}{c} \right) + i\Psi \right\}$$

ou:

$$E(r,\theta,\phi,t) = \frac{A(\theta,\phi)}{r} \cos\left\{ 2\pi\nu \left(t - \frac{r}{c} \right) + \Psi \right\}$$

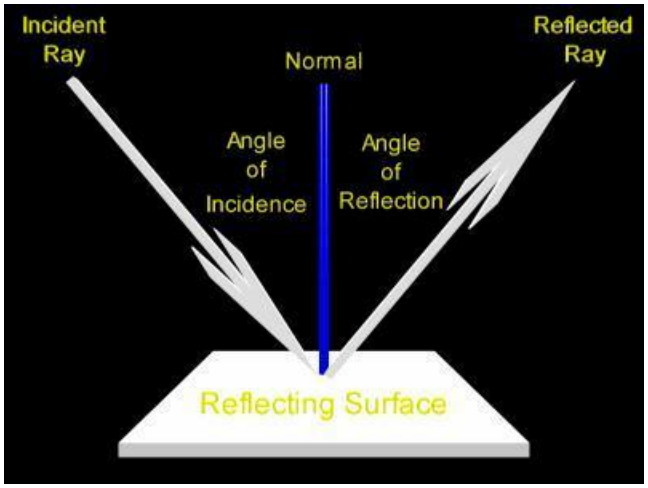
onde:

$$\exp(ix) = \cos(x) + i\sin(x)$$

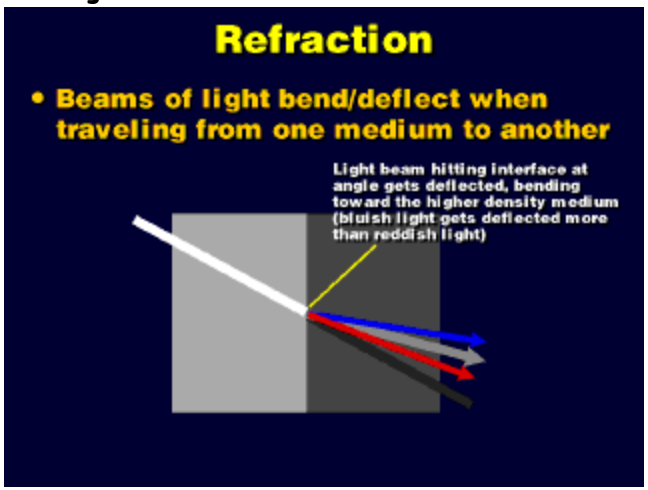
r , θ e φ são as coordenadas. A é a amplitude, υ é a frequência e ψ é uma fase arbitrária.

As ondas EM podem interagir de 4 maneiras:

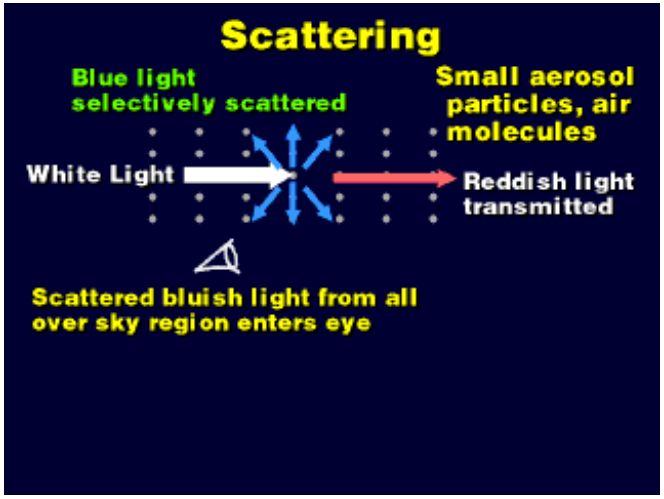
Reflexão:



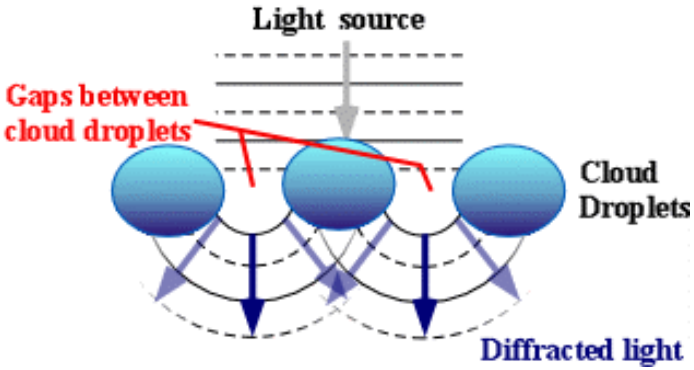
Refração:

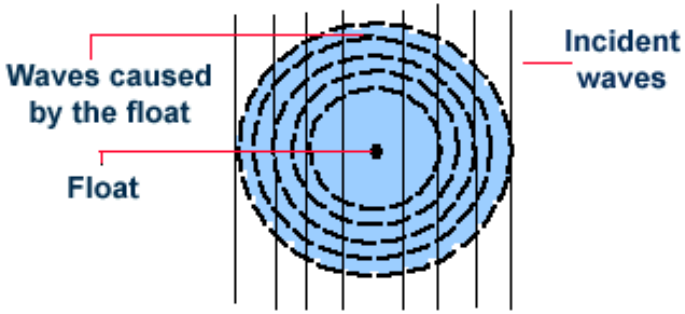


Espalhamento:



Difração:



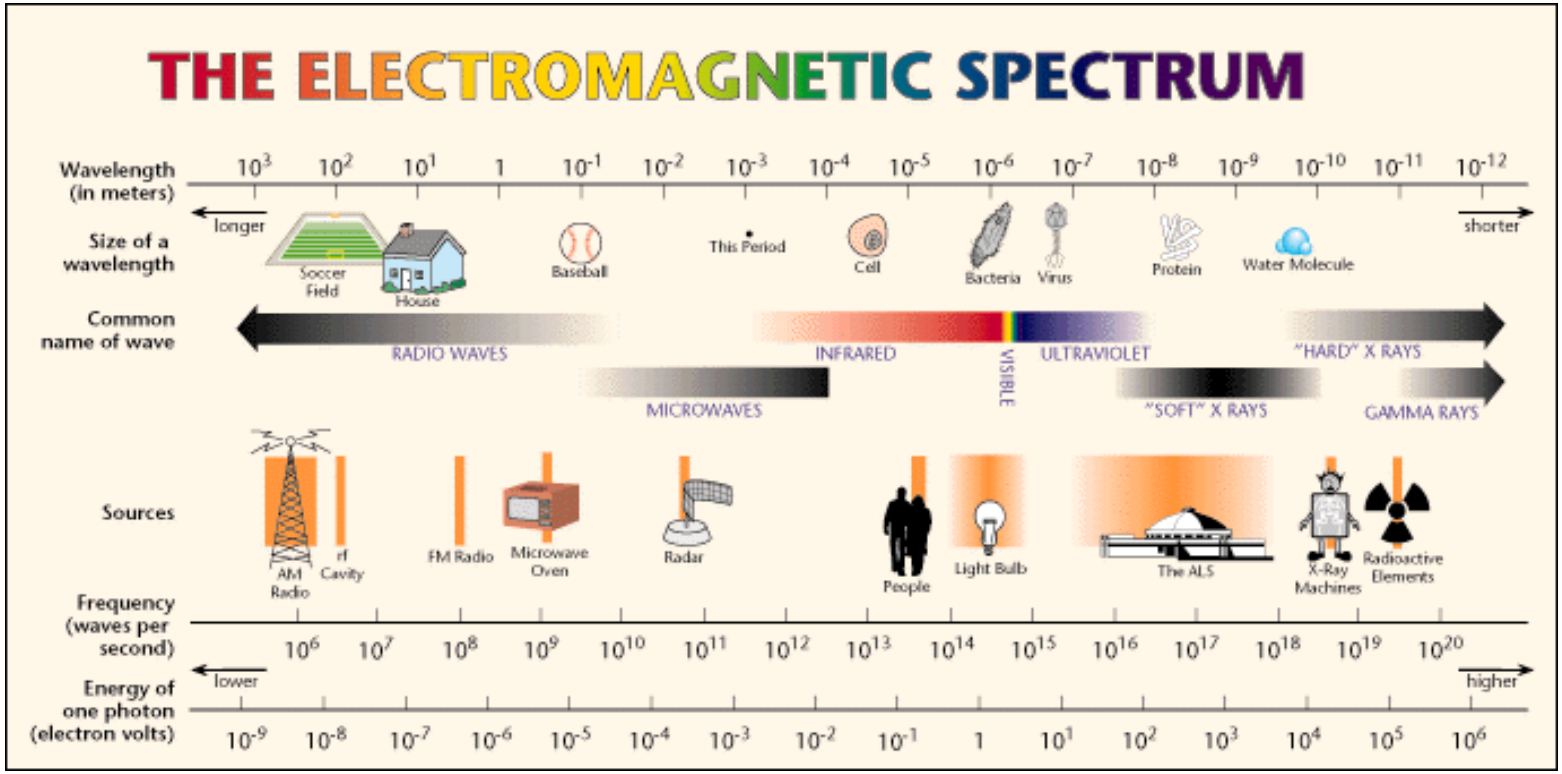


As ondas EM são caracterizadas por:

Comprimento de onda, λ [m, cm, mm, mm etc]

Frequencia, v [s^{-1}, hertz (Hz), megahertz (MHz), gigahertz (GHz)

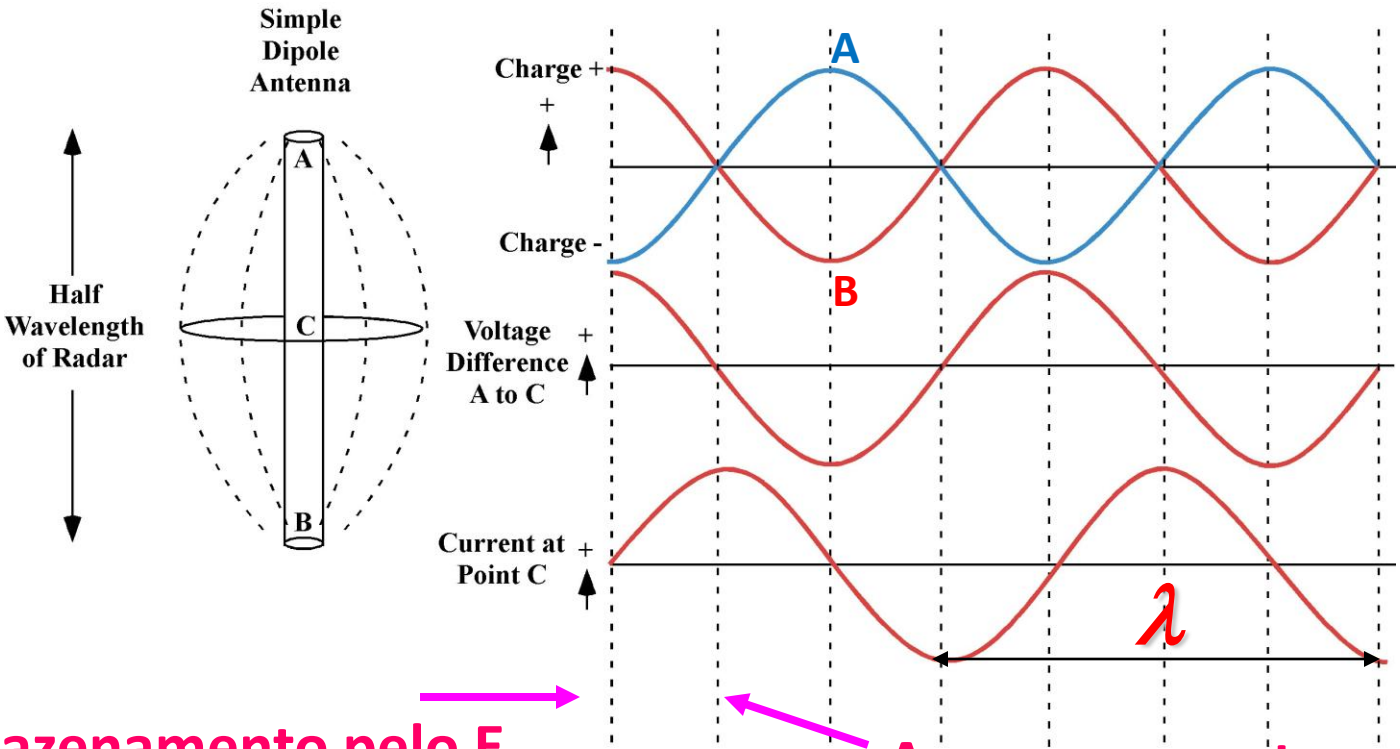
onde: $c = \lambda v$



Como as ondas EM são irradiadas?

- Resposta: *Através da variação temporal da carga, voltagem e corrente*

Exemplo da Variação temporal da carga, voltagem e corrente para uma antena simples de Dipolo



Armazenamento pelo E
Max V

Armanezamento pelo B
(Max I)

De forma simplificada temos que a energia é

1) **Armazenada alternadamente em campos E e B;**
2) **Irradiada em ondas EM;**
3) **Dissipação desprezível na forma de calor pela antena**

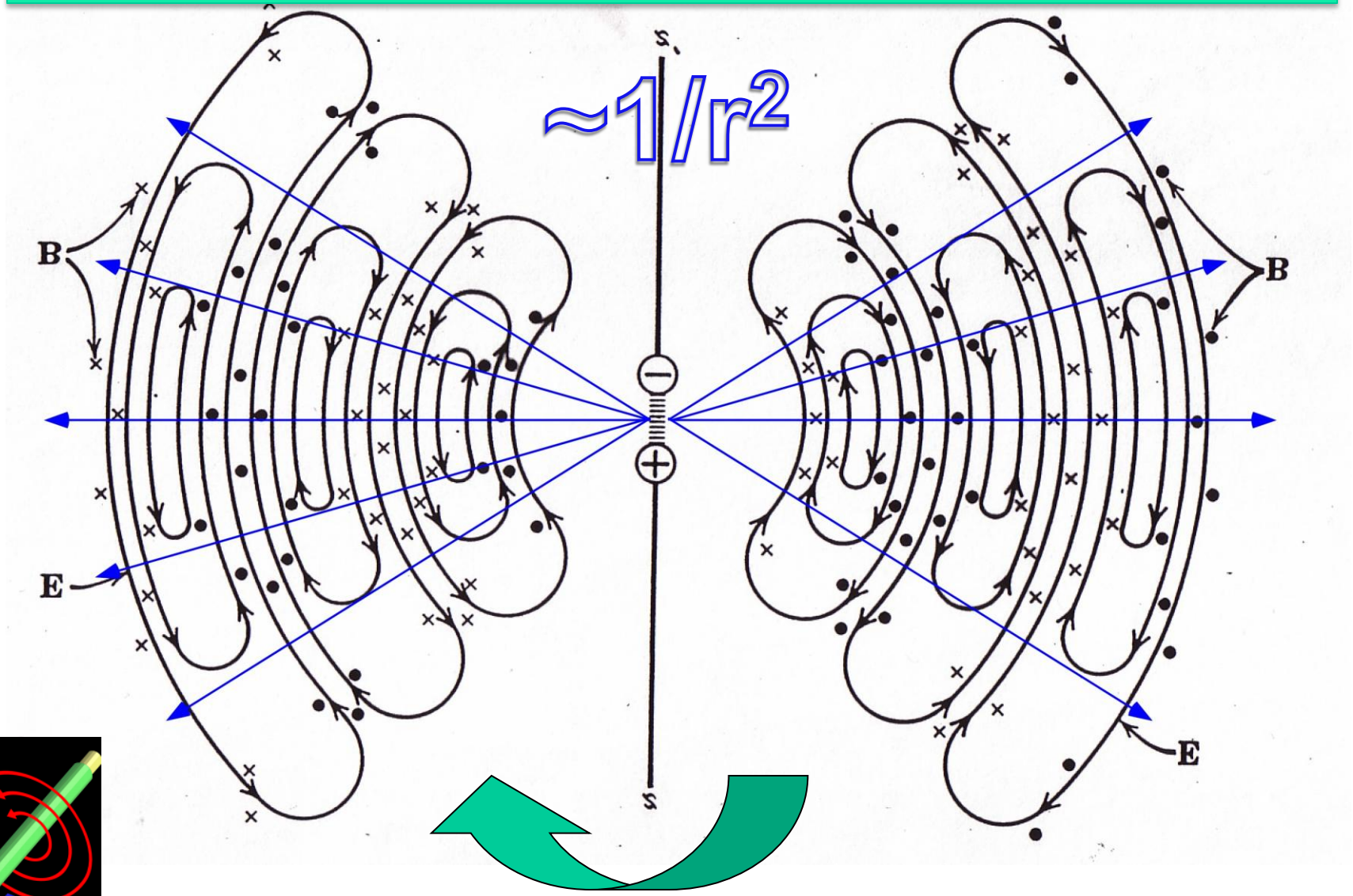
Próximo da antena

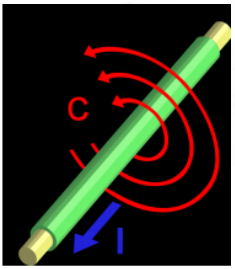
A energia armazenada nos campos de indução (E e B) é muito maior que a energia irradiada (campo próximo)

Para distâncias maiores *que alguns λs* da antena:

Energia irradiada é muito maior que a energia armazenada nos campos de indução (campo distante)

Vetor de propagação dos campos Elétrico e Magnético

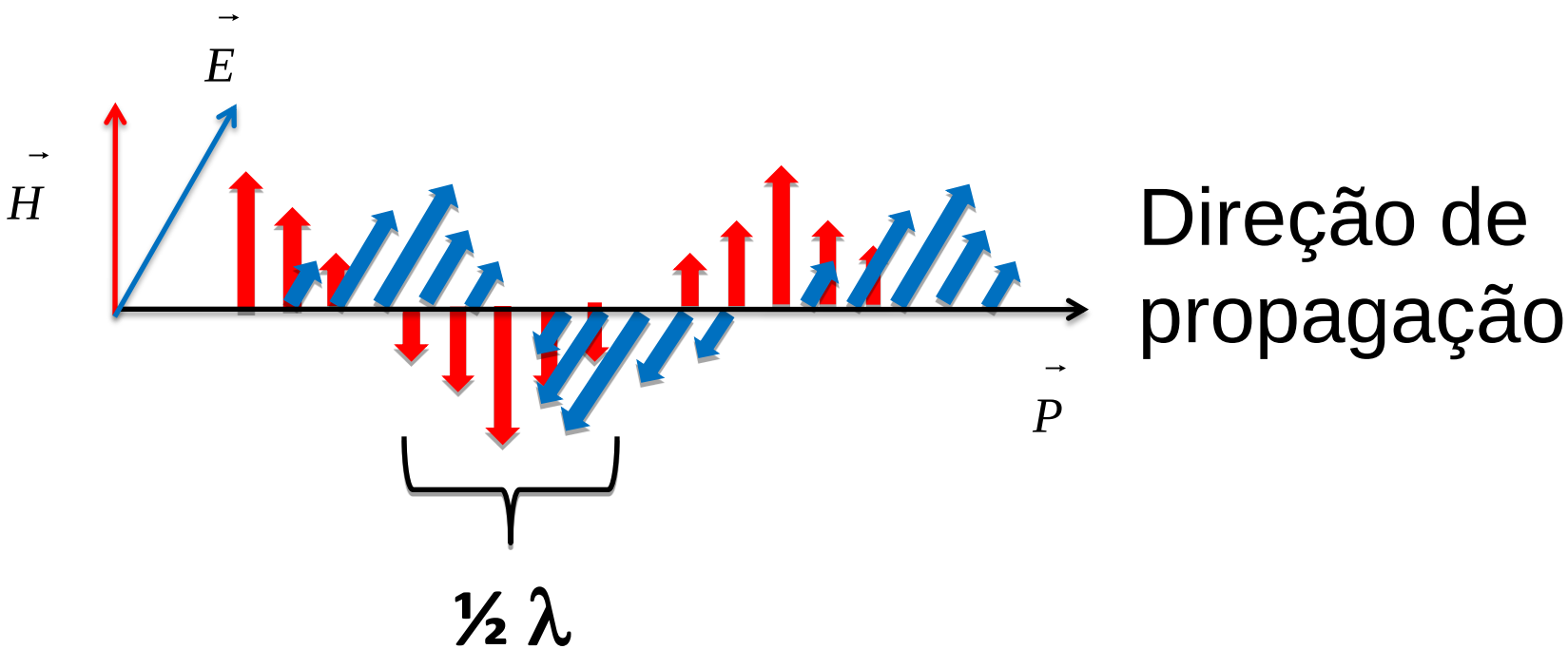




O H e E permanecem perpendiculares e em qualquer lugar no espaço variam senoidalmente e são perpendiculares à direção de propagação.

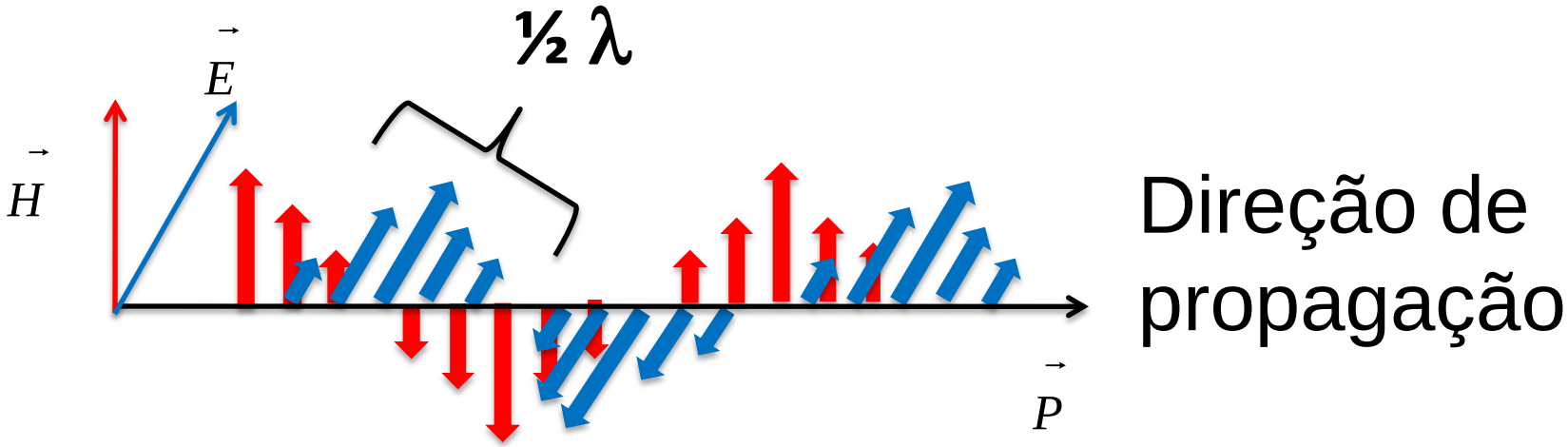
As linhas magnéticas ficam circulares e concêntricas em relação à antena e ao planos perpendiculares

A cada ½ λ ocorre um reverso da direção do campo E e H

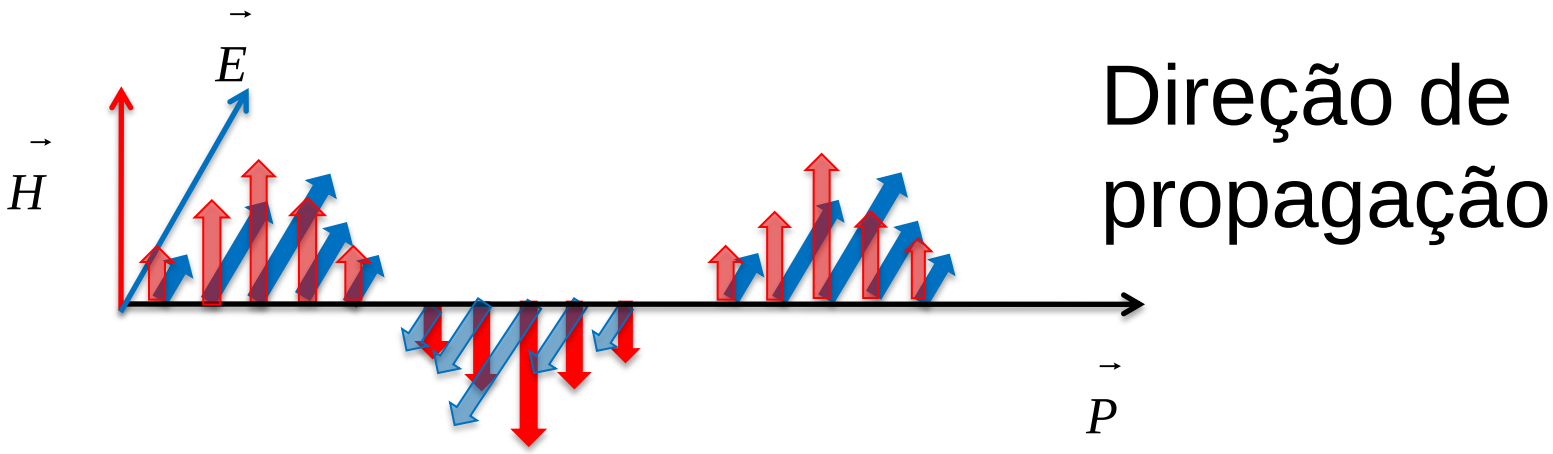


As linhas de fluxo elétrico estão sobre o plano da antena

A cada ½ λ ocorre um reverso da direção



Após a uma certa distância da antena os campos E e H encontram-se em fase.

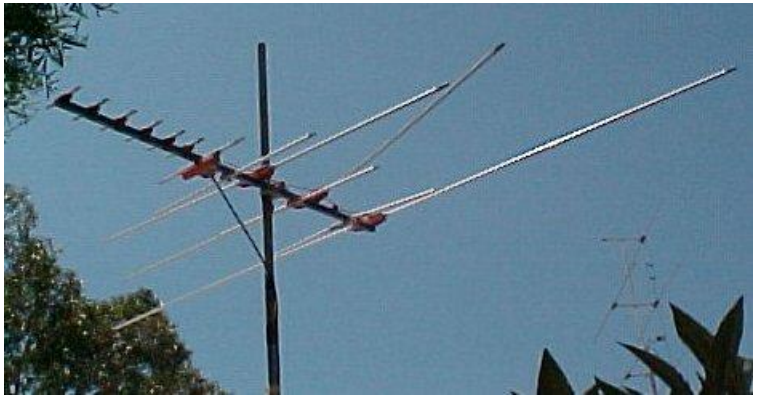


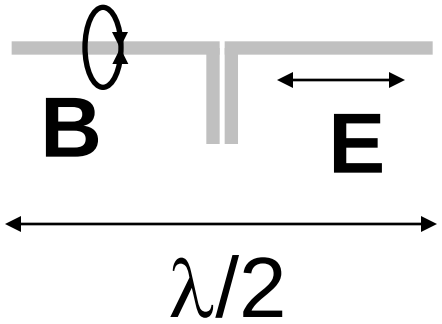
• A cada ponto, a variação temporal do B induz um gradiente de voltagem no espaço, E, que também varia no tempo e pode ser comparado com a corrente. (***corrente de deslocamento***). Como conseqüência, este efeito produz um B, logo uma corrente de condução.

• Dessa maneira, o B variável estabelece um E variável, o que por sua vez leva a formação de um B variável.

• *Em resumo, cada campo leva a formação de cada um periodicamente, e assim nenhum campo pode propagar sem o outro.*

Antenas de Dipolo





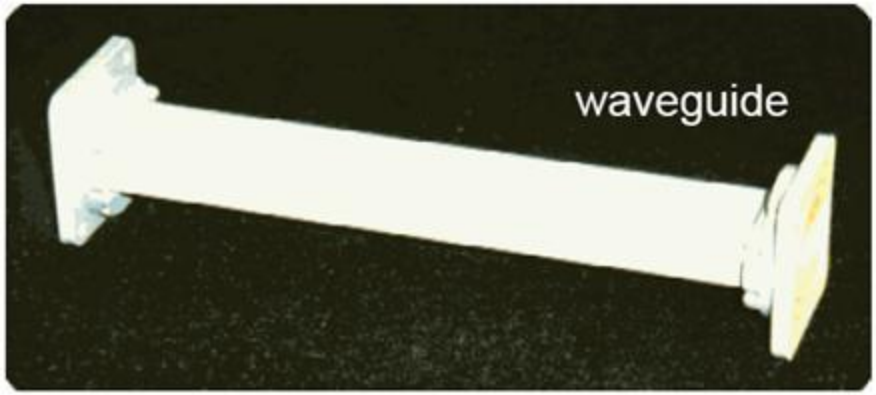
Ao longo da antena, corrente, voltagem e cargas oscilam a um frequência *f* (ou c/λ), proporcionando oscilações de **E** e **B**, e assim a radiação EM é irradiada na mesma ***f***

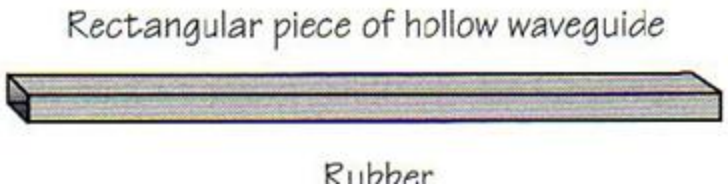
Máximo fluxo de I – toda energia em **B**
Máxima Voltagem – toda energia em **E**

•Além das antenas de dipolo, os guias de onda são adequados para este tipo de propagação em microondas.

•*Os guias de onda são um cano metálico.*

•Para concentrar a energia em um feixe fino, os guias de onda são conectados a refletores focados (antenas parabólicas)



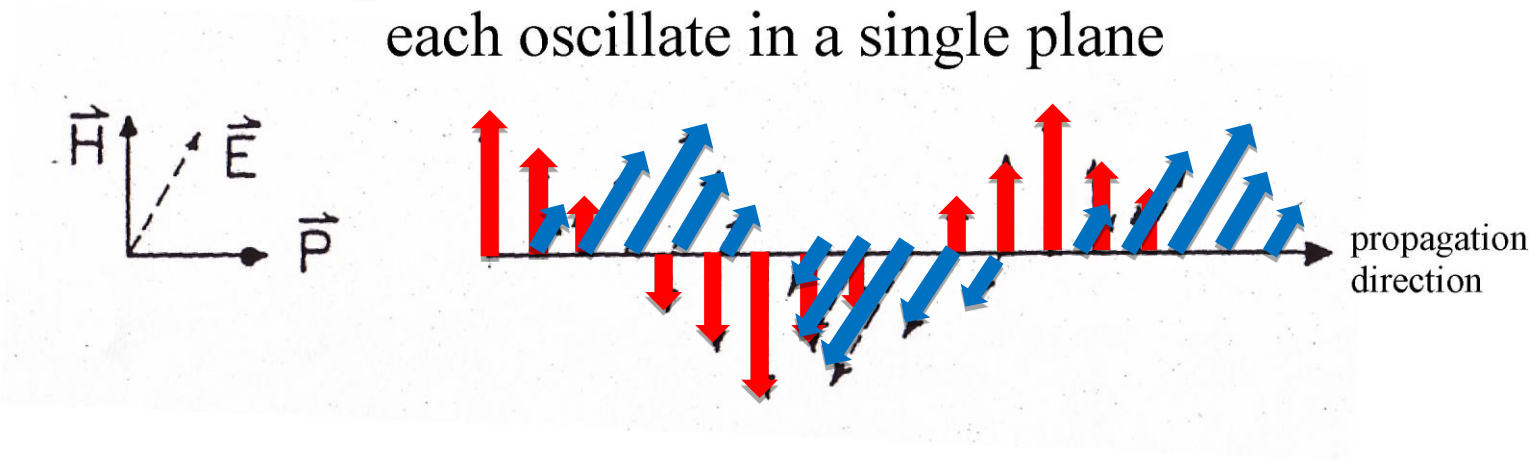


Polarização das ondas eletromagnéticas

- **A polarização é definida pela orientação do campo eletromagnético.**

- **O plano contendo o E é conhecido como plano de polarização ou plano de vibração.**

A polarized wave: E field and H field each oscillate in a single plane

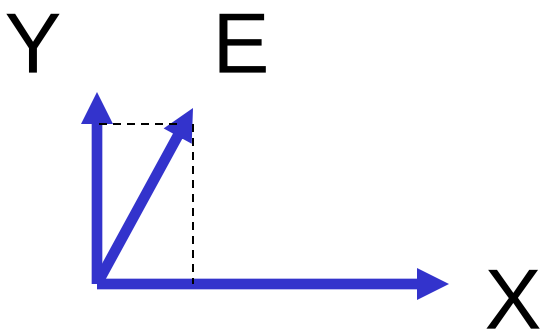


O E irá oscilar no plano x,y com z sendo a direção de propagação

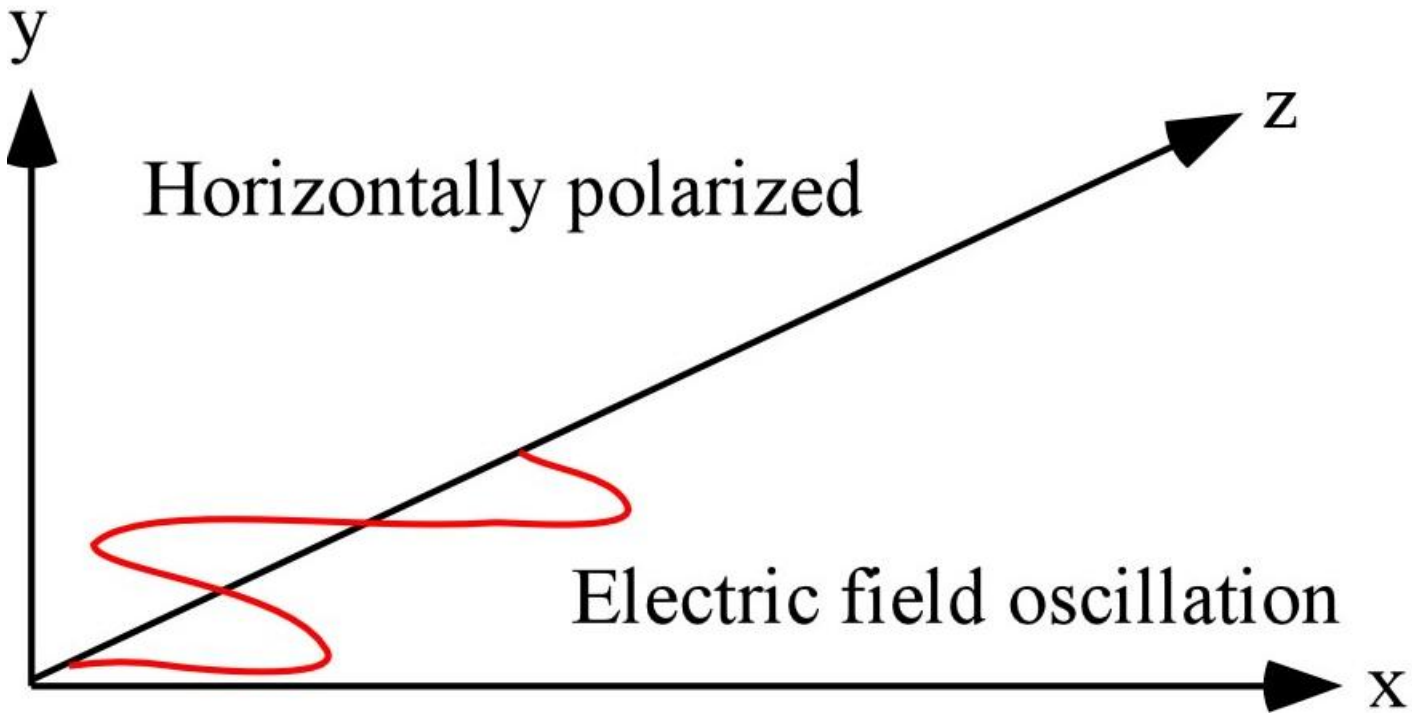
Onda monocromática:

$$E_x = E_{xm} \cos(2\pi ft)$$

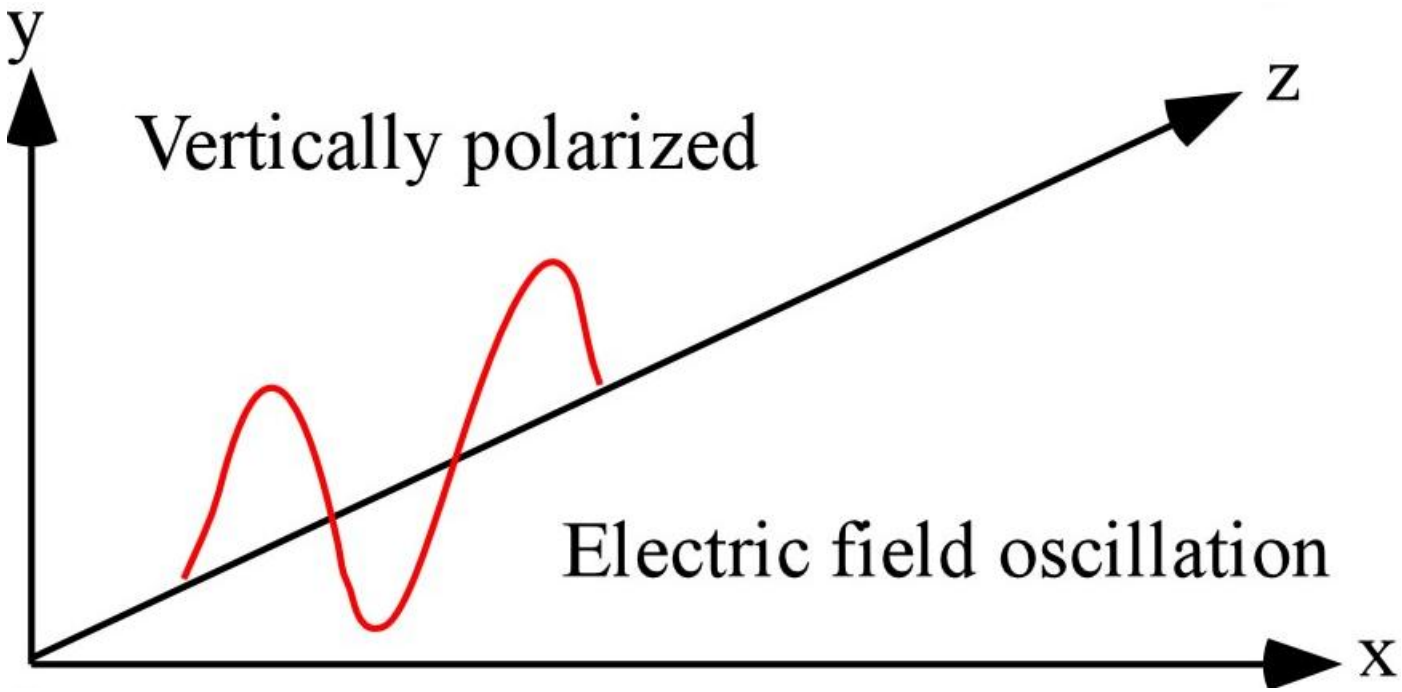
$$E_y = E_{ym} \cos(2\pi ft + \delta)$$



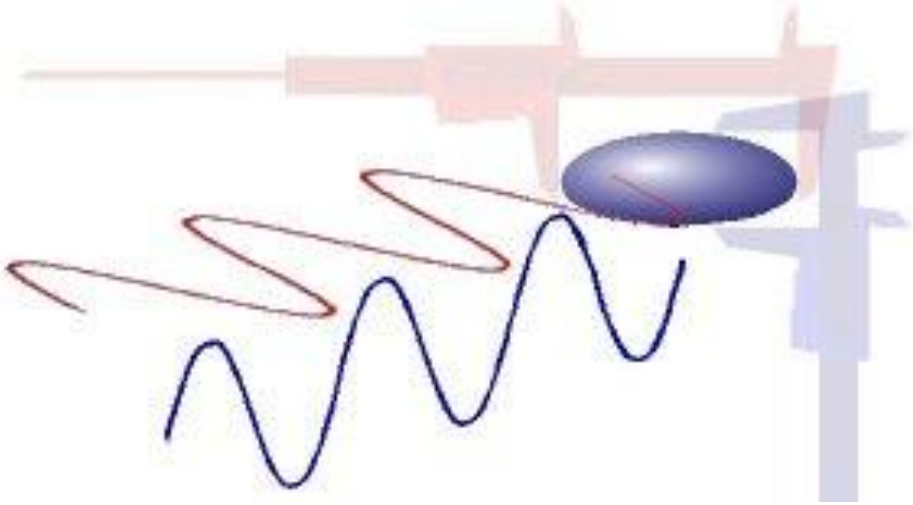
Onde ***f*** é a frequência, δ diferença de fase entre E_{xm} e E_{ym} e a coordenada ***X*** é paralela ao horizonte, ***Y*** normal a ***X*** e ***Z*** sendo a direção de propagação.



Se $E_{ym} = 0$, o E oscila na direção X e a onda é dita como "***polarizada horizontalmente***"



Se $E_{xm} = 0$, o E oscila na direção Y e a onda é dita como "***polarizada verticalmente***"



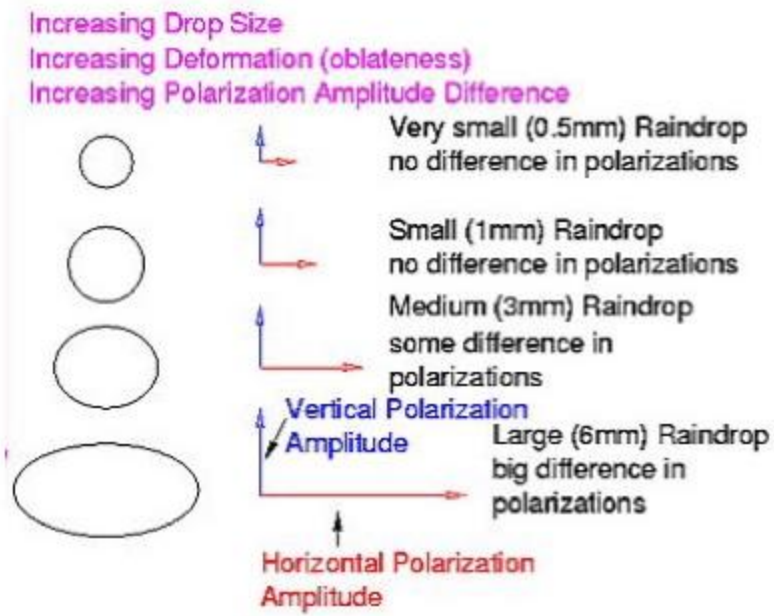
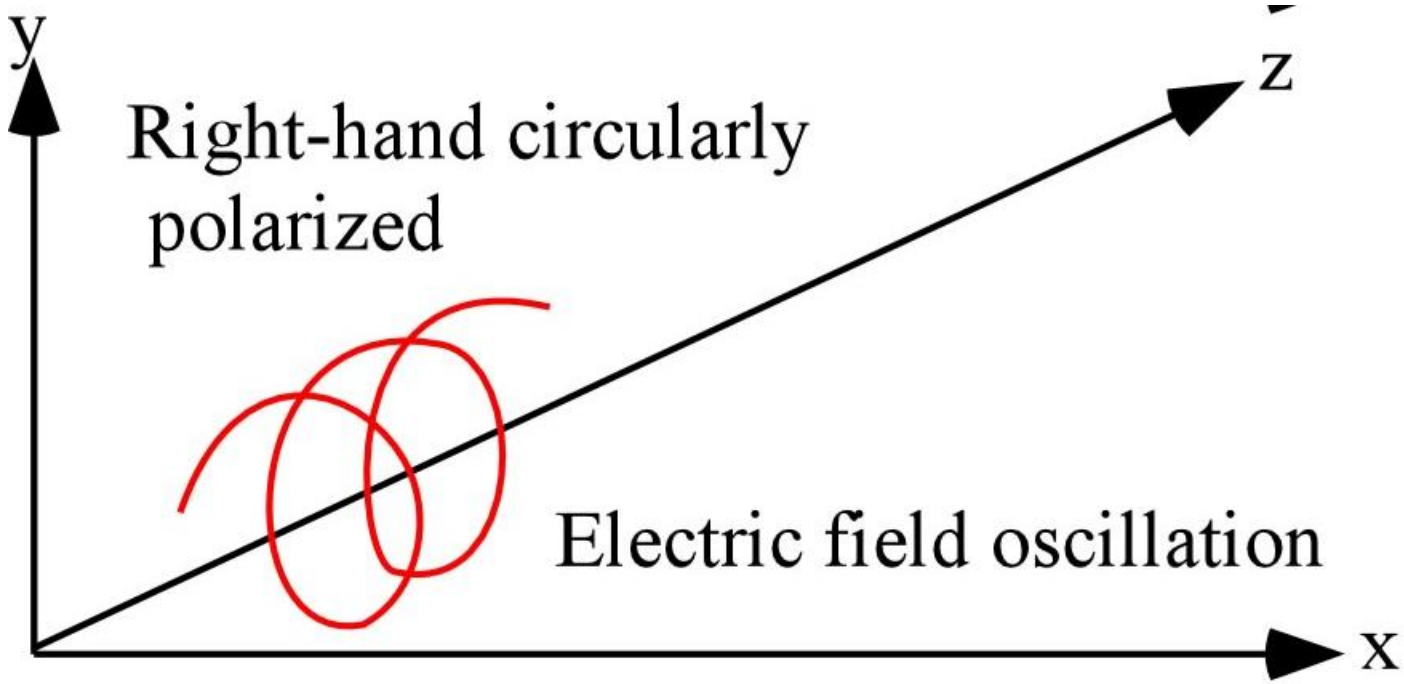
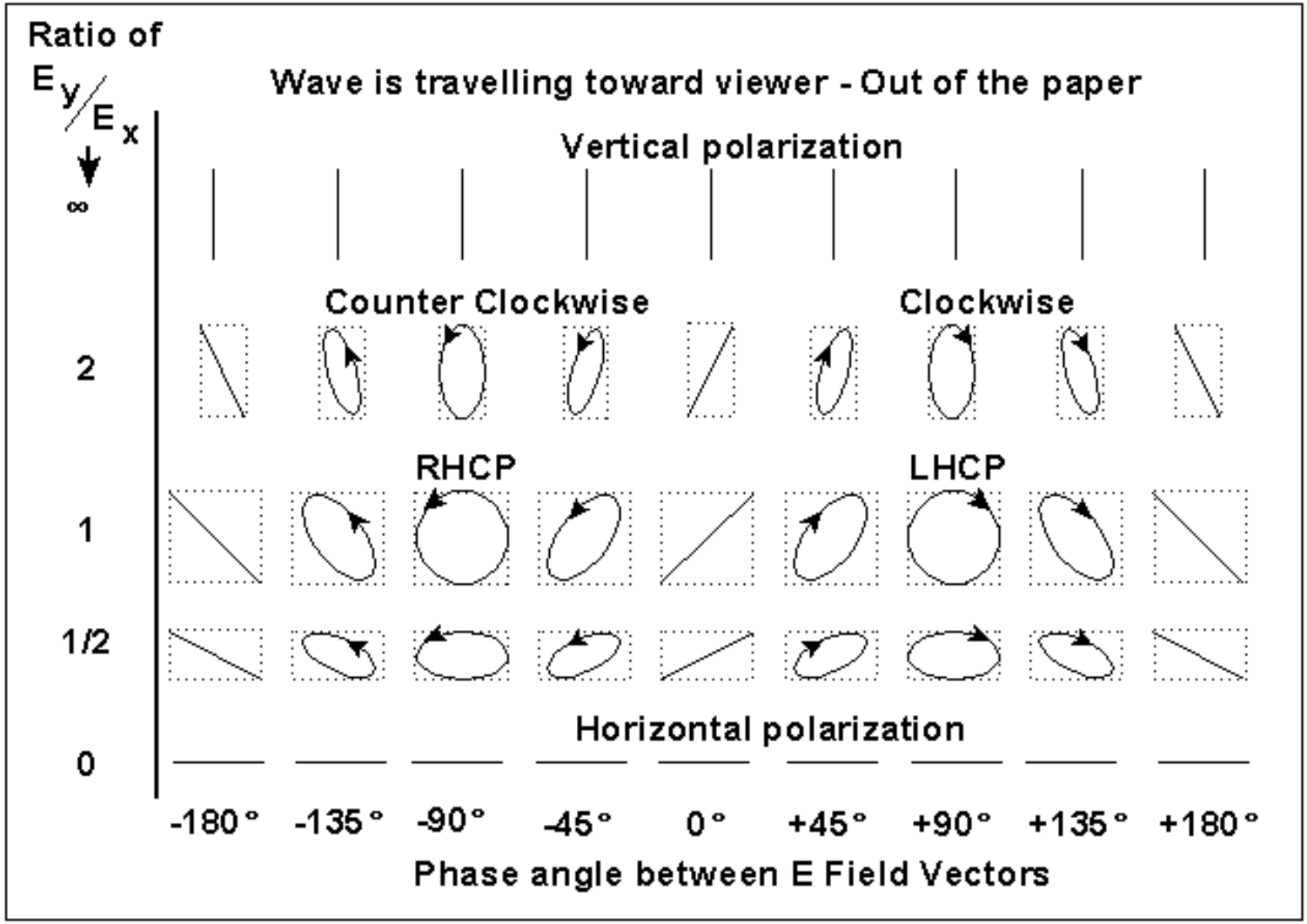


Image from Chilbolton Observatory



Se $E_{xm} = E_{ym}$, e $\delta = \pi/2$ ou $-\pi/2$, o vertor E gira em um circulo e a onda é dita como "***polarizada circularmente***"

Outras situações: o E rotaciona como um elipse



http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/index.php?topic=35

Exemplos de polarização H/V/C

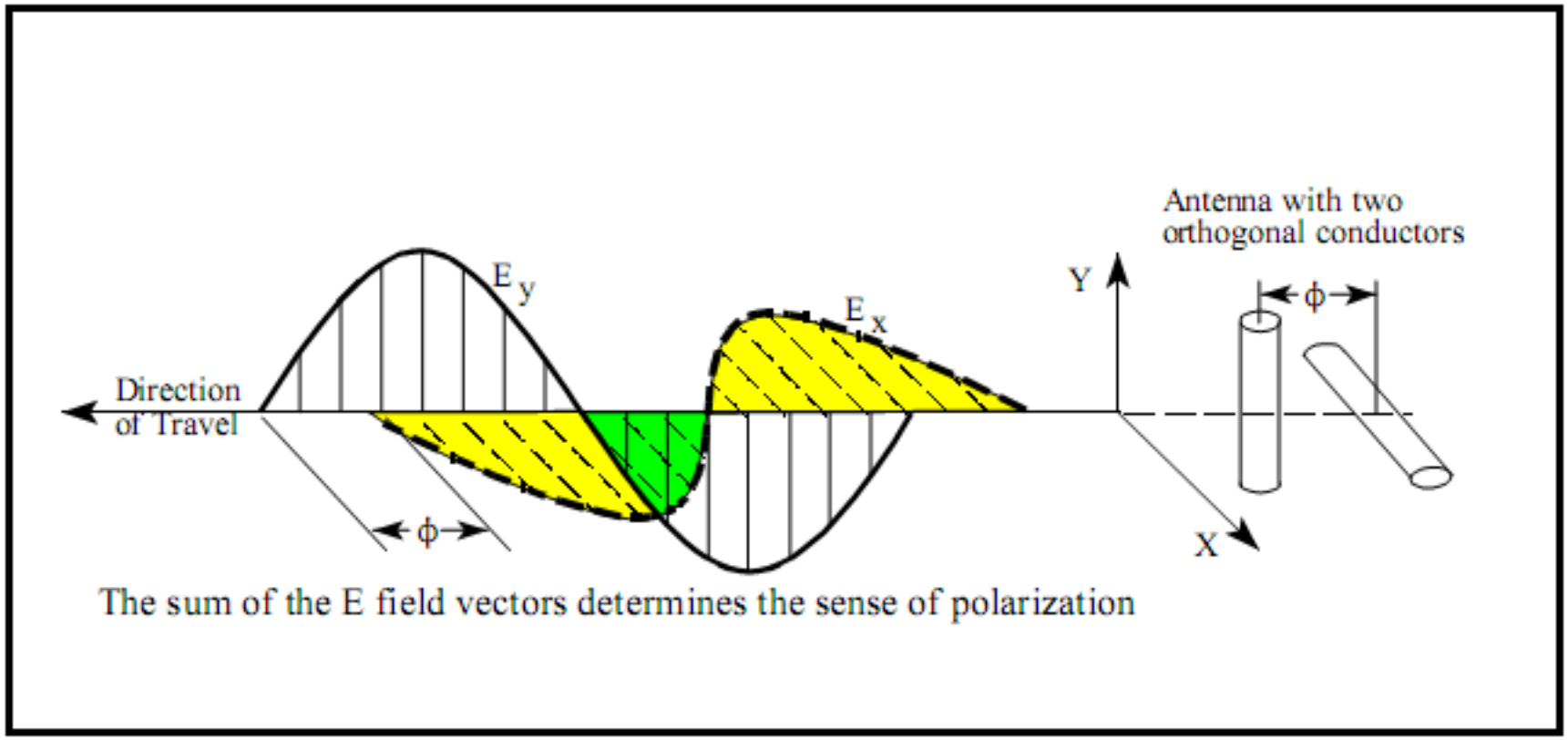


Figure 1. Polarization Coordinates

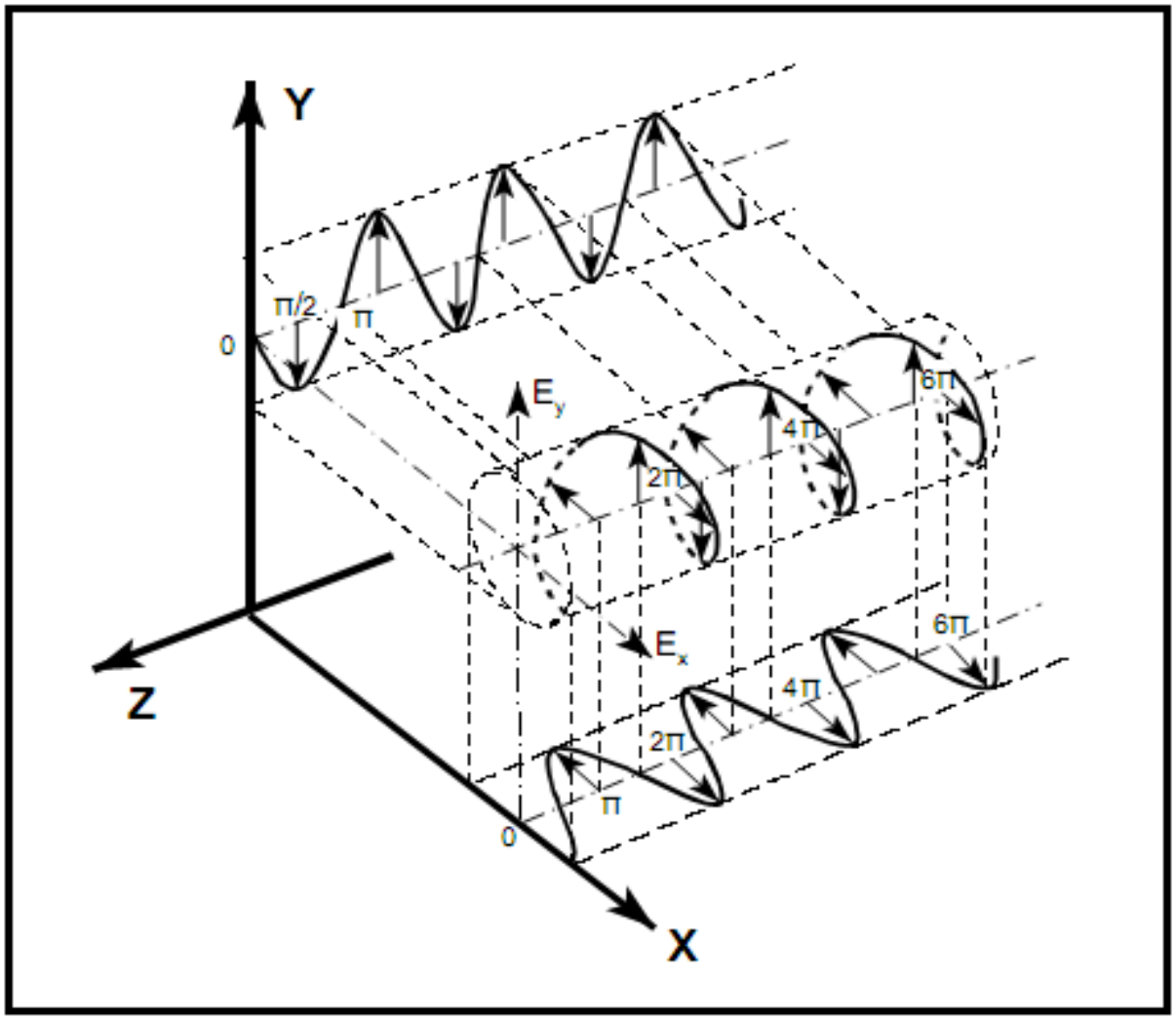


Figure 3. Circular Polarization - E Field

LHCP – polarização circular sentido horário – mão esquerda
RHCP – polarização circular sentido anti-horário– mão direita

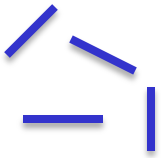
Polarização Circular: Exemplos de aplicação

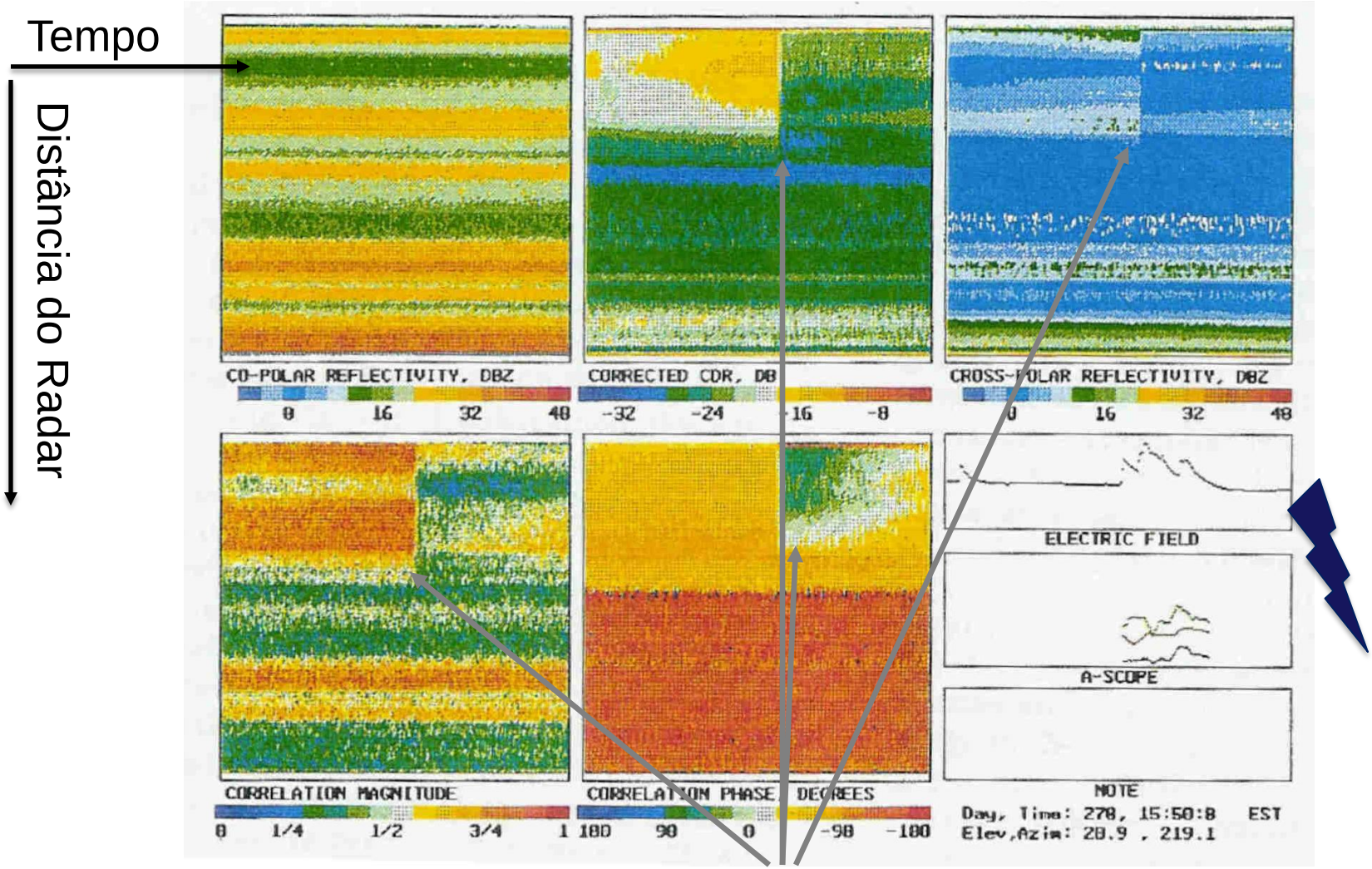
- **Razão de depolarização circular** é definido como **CDR** = 10 $\log_{10}$ (I_{LH}/I_{RH}), onde I_{LH} é a refletividade canal paralelo (transmissão)/esquerda e I_{RH} é a refletividade no canal ortogonal/direita.

- **CDR** deve estar entre o intervalo 0 e -∞ já que I_{LH}/I_{RH} varia entre 1 e 0.

- Para espalhadores finos e longos — **CDR** = 0. (I_{LH}/I_{RH} = 1)
- Para esferas perfeitas, — **CDR** = -∞ (I_{LH}/I_{RH} = 0)
- Para alvos quase-esféricos, — **CDR** < -30 dB ($I_{LH} << I_{RH}$)
- Para gotas de chuva oblatas, — -20 < **CDR** < -15 dB
- Para agregados derretendo, — **CDR** = -10 dB

- Aplicações? Classificação/identificação de hidrometeoros
- Eletrificação de nuvens
  (*orientação de particulas de gelo*)





Note mudanças nos parâmetros de polarimetria circular quando um raio ocorre, em especial mudanças na orientação das particulas (de vertical para aleatória)

Krehbiel et al. (1996; Met Atmos Phys)