

# FUNDAMENTOS DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS

---

ONDAS ELETROMAGNÉTICAS - SR

Prof. Flávio Vaz

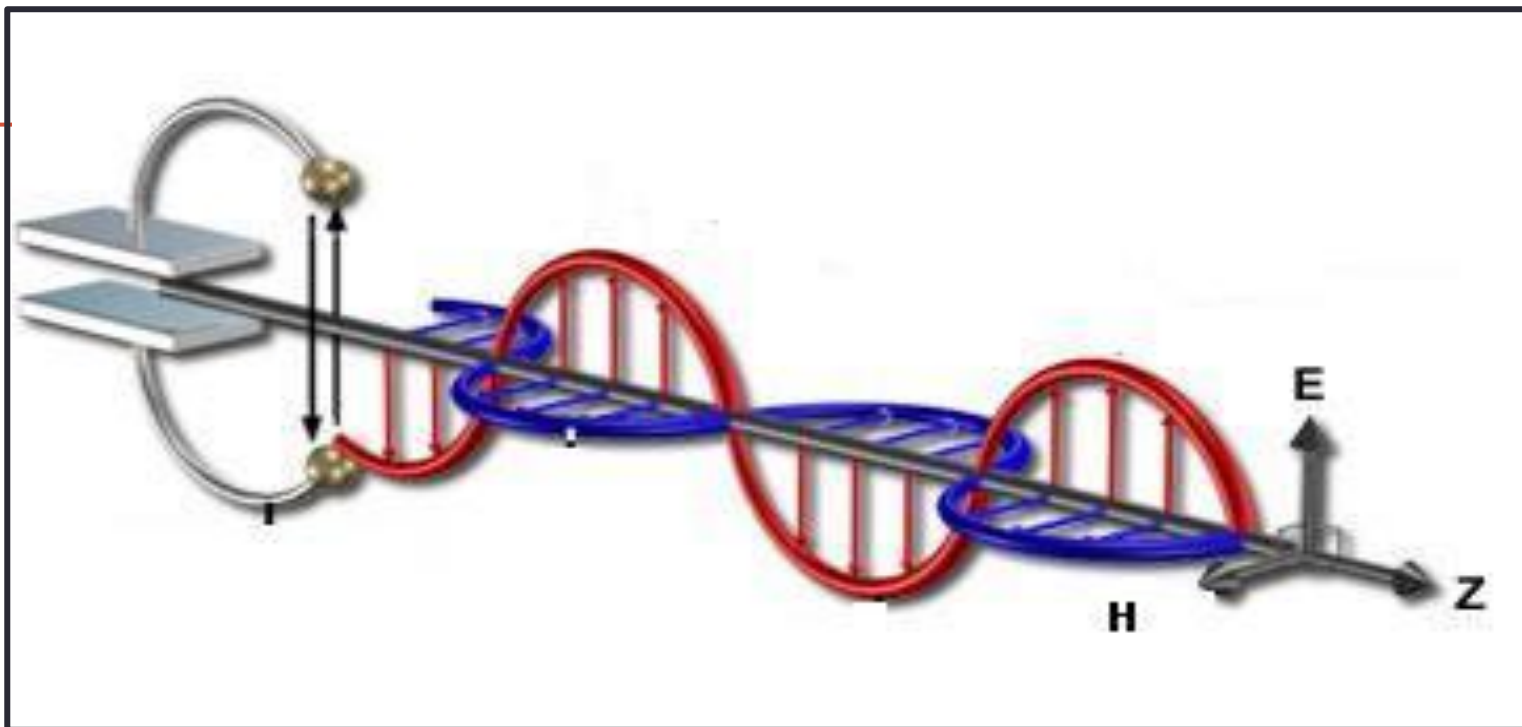
[flaviovaz@usp.br](mailto:flaviovaz@usp.br)

# Objetivos

**Apresentar definições das ondas eletromagnéticas, os conceitos básicos das perturbações que ocorrem durante a sua propagação e os princípios básicos que regem seu funcionamento**

# O que é onda eletromagnética?

Onda eletromagnética é uma forma de energia da Natureza que envolve o campo elétrico **E** e o campo magnético **H** (ou **B**) variando no tempo e no espaço.



O primeiro momento da Natureza que gerou ondas eletromagnéticas foi no BIG BANG.

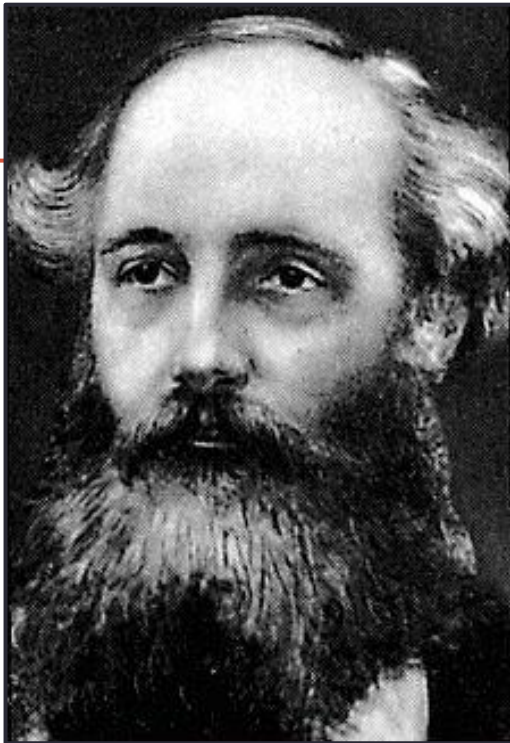
A confirmação do BIG BANG foi feita pela emissão de micro-ondas remanescente no Universo por Arnold Penzias e Robert Wilson ( premio Nobel de Física em 1978).



<http://www.pbs.org/wgbh/aso/databank/entries/dp65co.html>

**James Clerk Maxwell (1831-1879) físico e matemático escocês. Estabeleceu a relação entre eletricidade, magnetismo e luz.**

**Suas equações foram a chave para a construção do primeiro transmissor e receptor de rádio, para compreensão do radar e das micro-ondas.**



$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho / \epsilon_0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

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

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu_0 \vec{J}$$

Lei de Gauss (eletrostática)

Lei de Gauss (magnetostática)

Lei de Faraday

Lei de Ampère .

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}$$

Lei de Gauss (eletricidade)

Lei de Gauss (magnetismo)

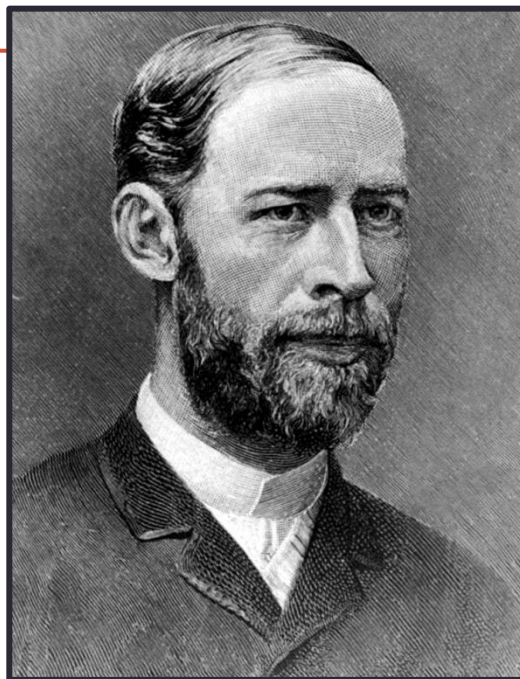
Lei de Faraday

Lei de Ampère

**Heinrich Rudolf Hertz (Hamburgo, 22 de Fevereiro de 1857 — Bonn, 1 de Janeiro de 1894) foi um físico alemão .**

**Hertz demonstrou a existência da radiação eletromagnética criando aparelhos emissores e detectores de ondas de rádio.**

**Hertz pôs em evidência em 1888 a existência das ondas eletromagnéticas imaginadas por James Maxwell em 1873**



**Guglielmo Marconi** (Bolonha, 25 de abril de 1874 — Roma, 20 de julho de 1937) **Engenheiro e inventor italiano nascido em Bolonha, inventor da telegrafia sem fio, com o qual ficou conhecido mundialmente depois que as inovações introduzidas em seu invento revolucionaram os meios de comunicação.**



**Roberto Landell de Moura** (Porto Alegre, 21 de janeiro de 1861 — Porto Alegre, 30 de junho de 1928) foi um padre católico, cientista e inventor brasileiro, considerado o *Patrono dos Radioamadores do Brasil* e o *Pai Brasileiro do Rádio*.

Foi pioneiro na transmissão da voz, utilizando equipamentos de rádio de sua construção, patenteados no Brasil em 1901, e, posteriormente, nos Estados Unidos em 1904.





# Caracterização da onda eletromagnética

**A onda eletromagnética é caracterizada pela:**

- ▶ **Fase  $\varphi$**
- ▶ **Frequência  $f$  ou comprimento da onda  $\lambda$**
- ▶ **Intensidade  $P$**
- ▶ **Banda de frequência  $BW$**
- ▶ **Polarização e grau de polarização  $S$**

# Fase da onda eletromagnética

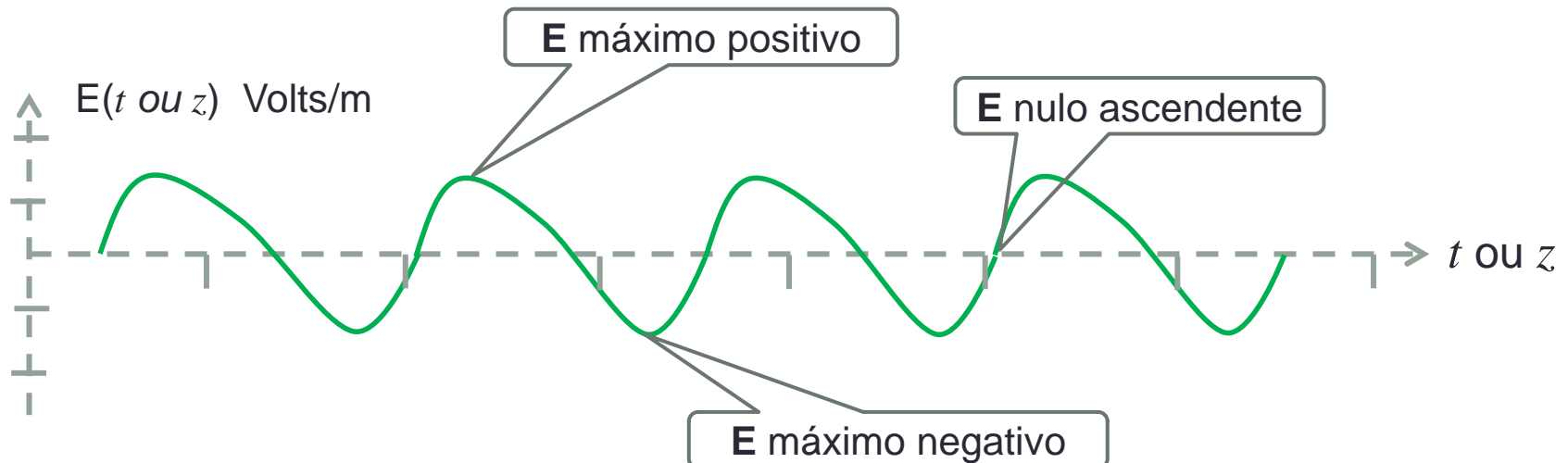
Embora a onda contenha os dois campos oscilatórios de força,  $E$  e  $H$ , a literatura se atém mais ao campo  $E$  devido a sua maior interação com os meios não vazios.

Como o processo oscilatório é periódico o campo se repete no tempo ( $t$ ) e no espaço ( $z$ ).

A fase é um conceito mais subjetivo pois envolve uma referência no tempo e no espaço.

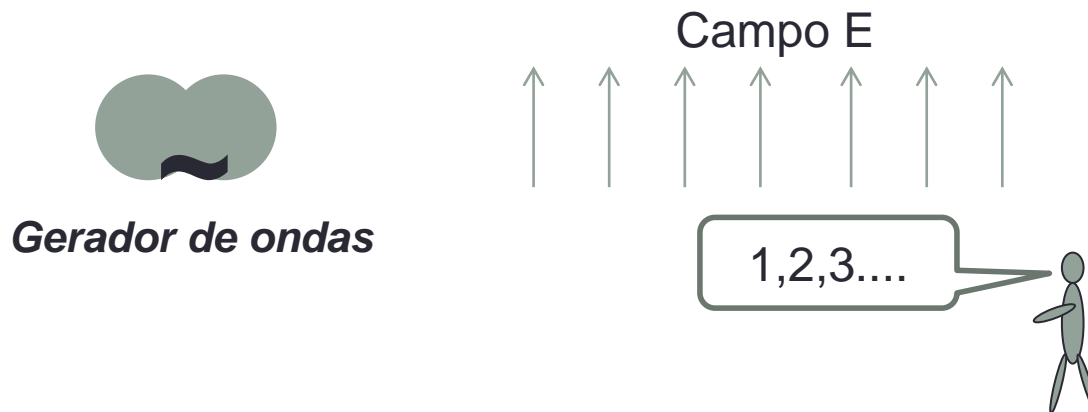
# Fase da onda eletromagnética

Fase denota o estado que a oscilação do campo  $E$  se encontra em determinado tempo e em determinado ponto no espaço.



# Frequência da onda eletromagnética

Admitindo que o gerador da onda e o observador estejam estacionários, a frequência de uma onda é o número de vezes, por unidade de tempo, que o campo (E ou H) passa na mesma fase pelo observador.



*Se o observador correr junto com a onda a frequência será 0 (zero)*

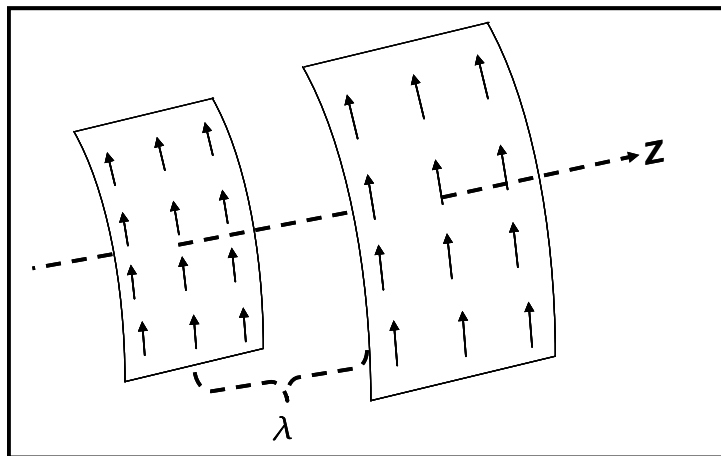
# Comprimento da onda eletromagnética

O comprimento da onda ( $\lambda$ ) é a distância entre duas frentes de onda sucessivas, nas quais os campos estão nas mesmas condições, isto é, na mesma fase.

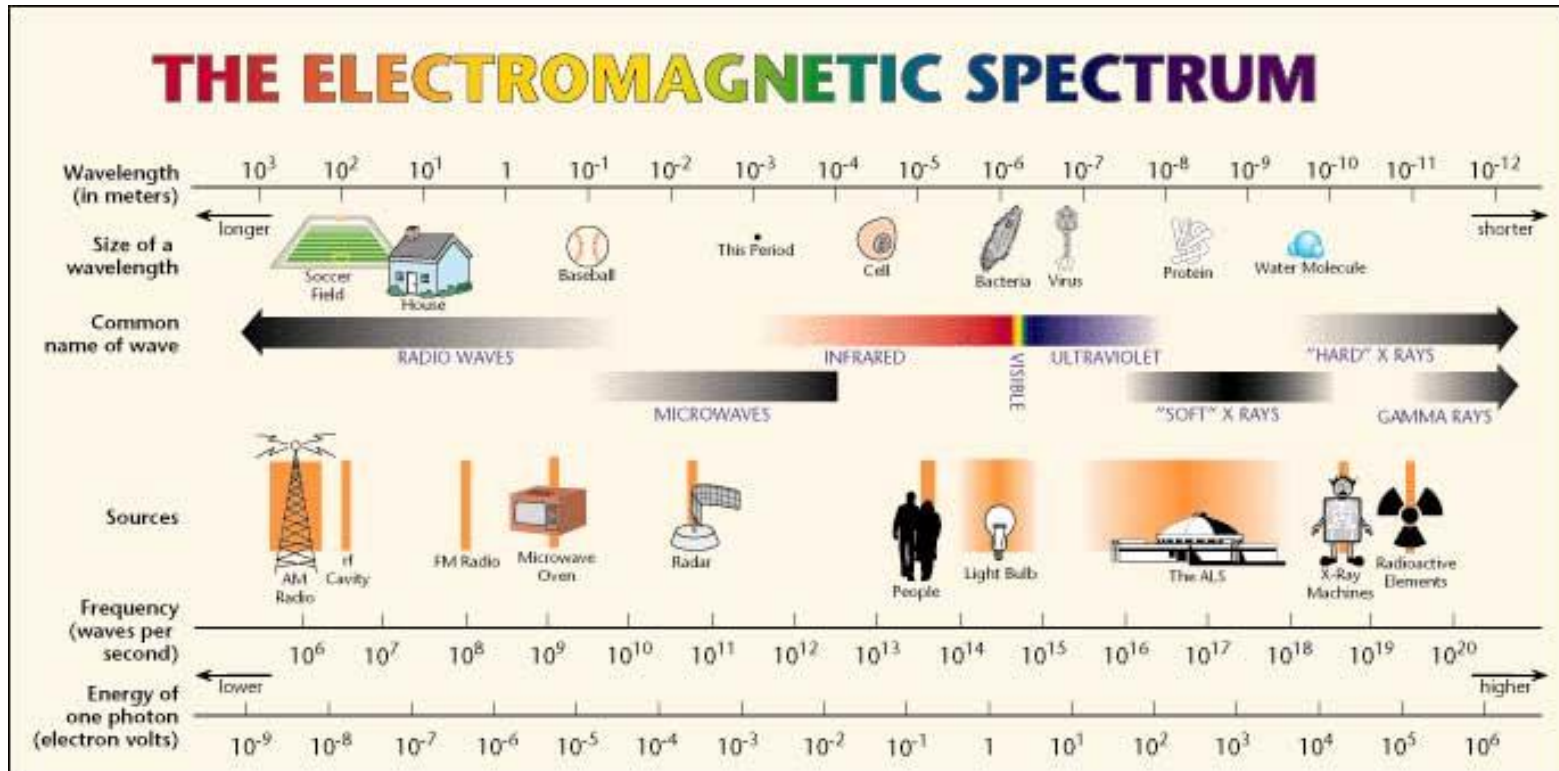
O comprimento da onda depende da frequência ( $f$ ) e da velocidade ( $v$ ) no meio em que está se propagando.

$$\lambda = v/f$$

No espaço vazio a velocidade é constante =  $c$

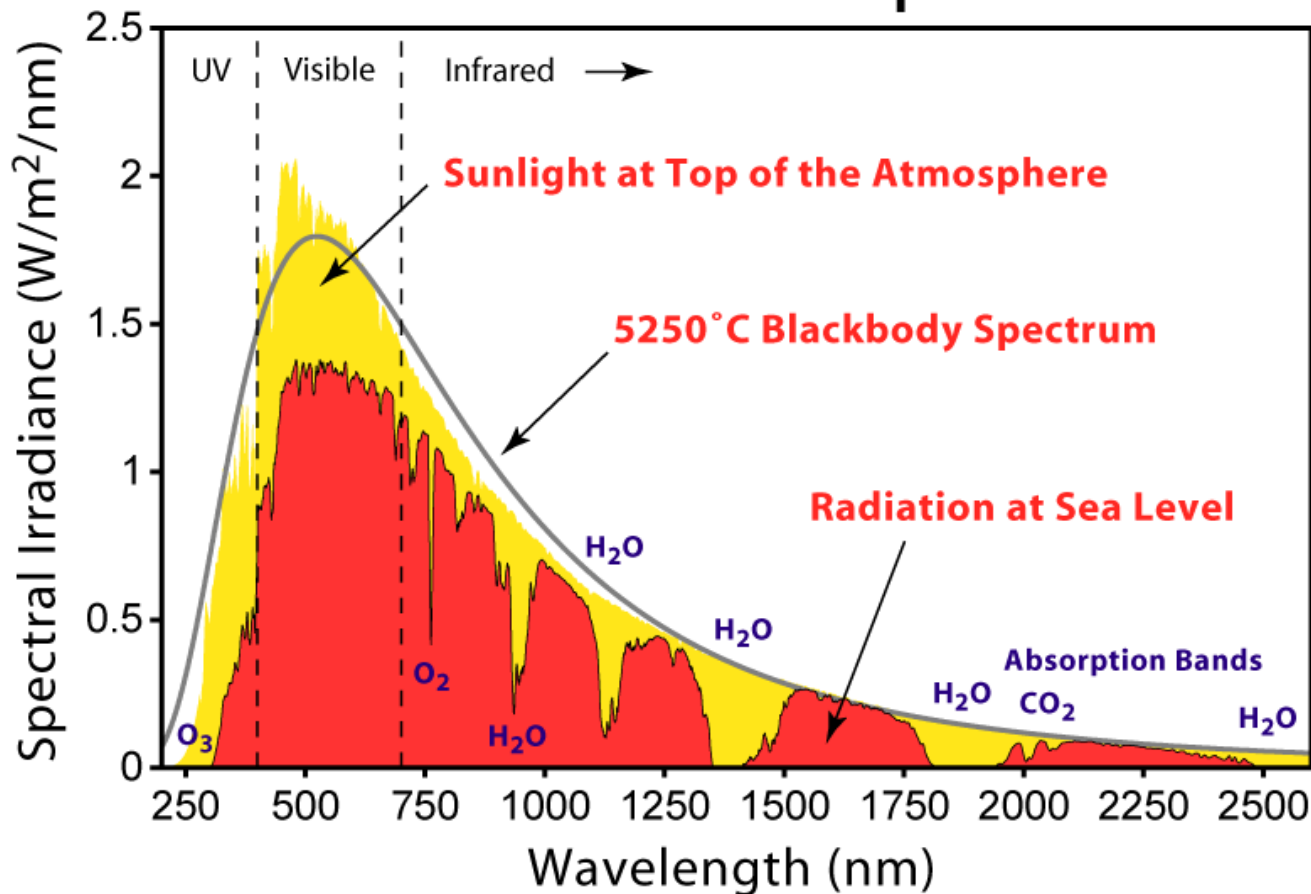


# Espectro das ondas eletromagnéticas



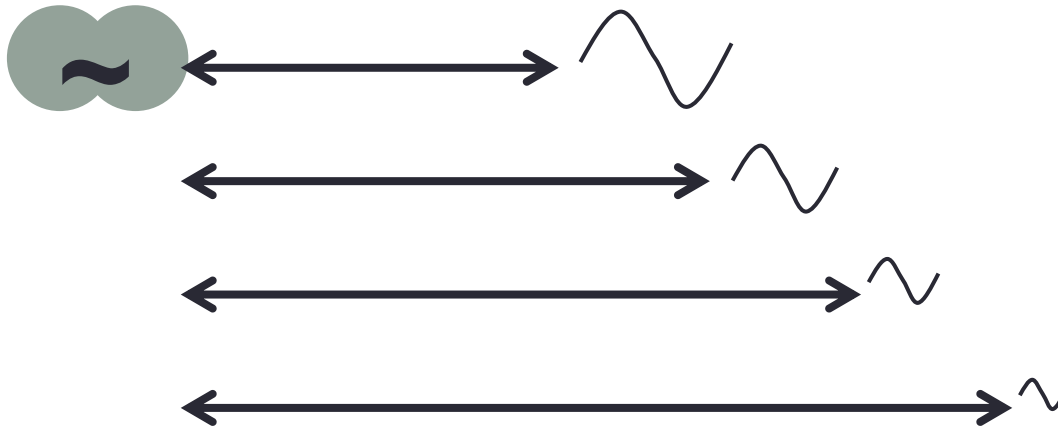
# Intensidade da radiação solar

## Solar Radiation Spectrum



# A onda no espaço vazio

**Distância do gerador (R)**



**Para ondas na faixa de rádio e micro-ondas, a perda de intensidade em função da distância no espaço vazio é dada por:**

$$L = 32.4 + 20 \cdot \text{Log}(f) + 20 \cdot \text{Log}(R) \quad \text{em dB}$$

onde:

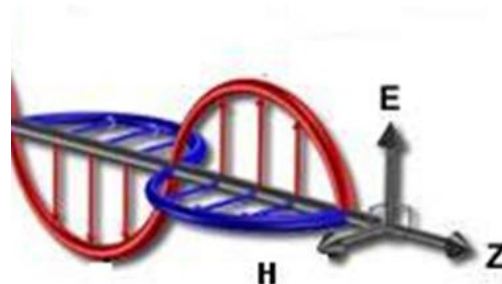
f = frequência em MHz

R = distância do gerador em km

Exemplo do GPS: f ~ 1500 MHz R ~ 23 000 km L ~ 183 dB (~ 10<sup>-18</sup>)



# O campo elétrico $E$



Teoricamente o campo  $E$  de um onda monocromática com variação no tempo e no espaço pode ser modelada matematicamente por apenas uma senoide. A intensidade do campo  $E$  no tempo  $t$  e na distancia  $z$  pode ser expressa por:

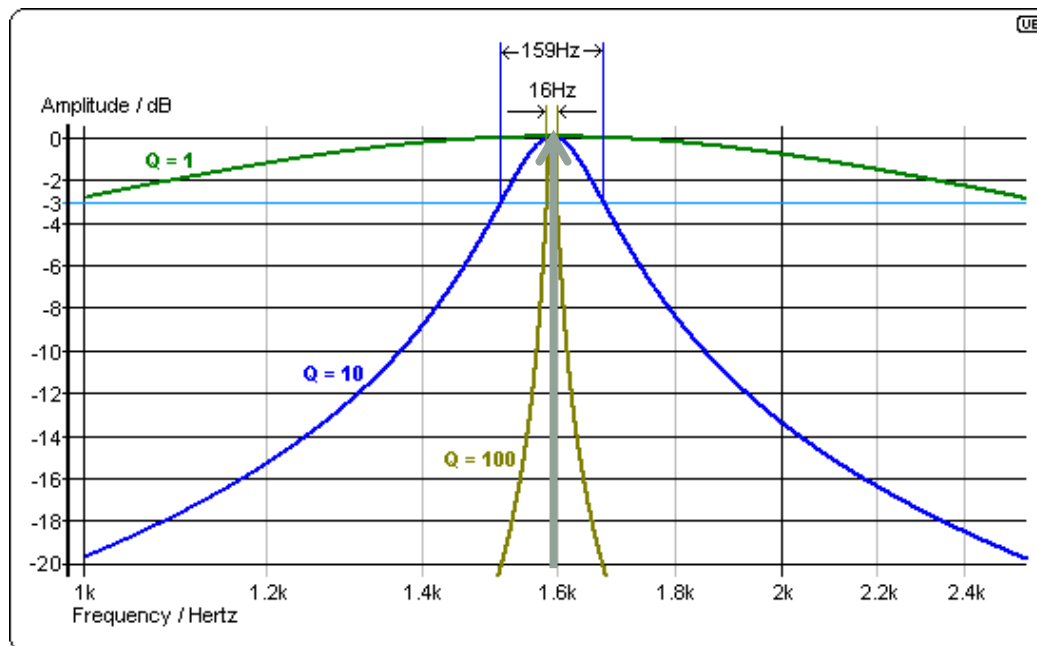
$$E(t, z) = E_0 \exp^{-\alpha z} \text{sen}[(2\pi f)t + \varphi_0 - \beta z]$$

Onde:

- $E_0$  → Intensidade do campo no momento inicial e no ponto inicial  $o$  (V/m)
- $\alpha$  → Coeficiente de redução do campo (nepers/m)
- $z$  → *Distância a partir da origem 0* (m)
- $f$  → Frequência (Hz)
- $t$  → Tempo transcorrido a partir do momento inicial 0 (s)
- $\varphi_0$  → Fase no momento inicial 0 (rad)
- $\beta$  → Número de ondas por unidade de distância (rad/m)

# Banda de frequência - BW

A banda de frequência é definida pelo espectro relativo á frequência central



Radiação monocromática  $BW = 0$   $Q = f/BW = \infty$

Radiação em banda muito larga

$Q = 1$

Radiação em banda média

$Q = 10$

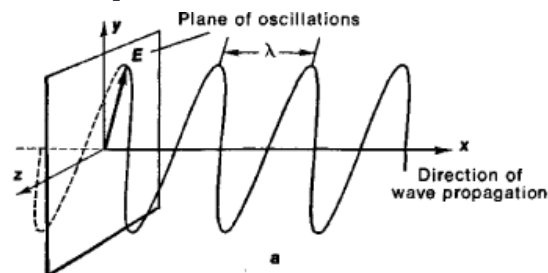
Radiação em banda estreita

$Q = 100$

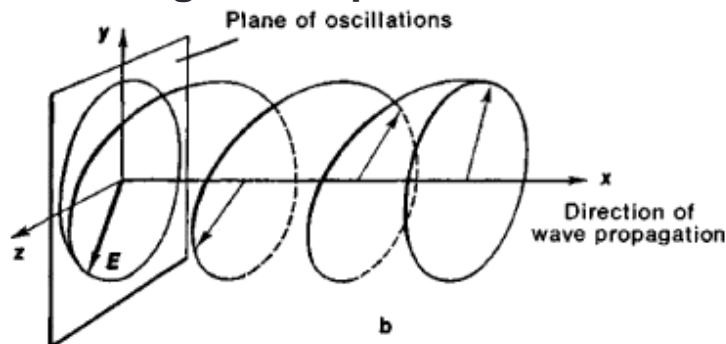
# Polarização

Define-se a polarização de uma onda pelo comportamento espacial do campo elétrico percorrendo a distância igual ao seu comprimento de onda.

Quando o campo permanece sempre em um plano fixo no espaço a onda é polarizada linearmente.



Quando o campo efetua um giro completo a onda é circularmente polarizada.



Quando o campo apresenta um comportamento espacial aleatório a onda não é polarizada.

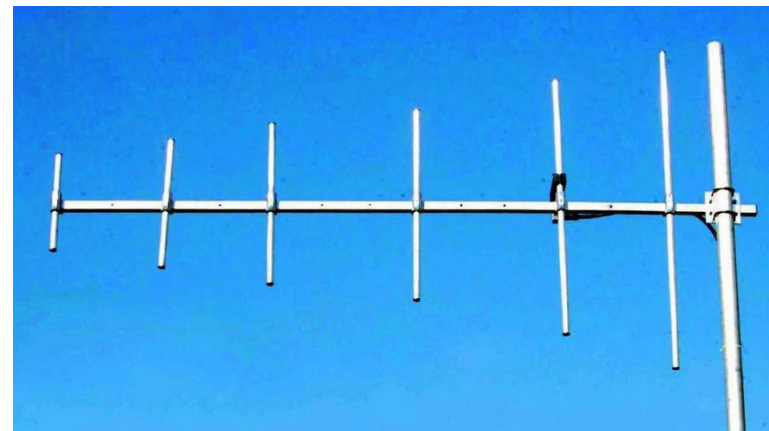
# Polarização na faixa rádio

As ondas de rádio geradas na natureza geralmente não são polarizadas ou apenas parcialmente.

Por outro lado as ondas geradas nas antenas de transmissores são totalmente polarizadas e dependendo do tipo pode ser linear ou circular.



Os satélites GPS transmitem em polarização circular a direita.



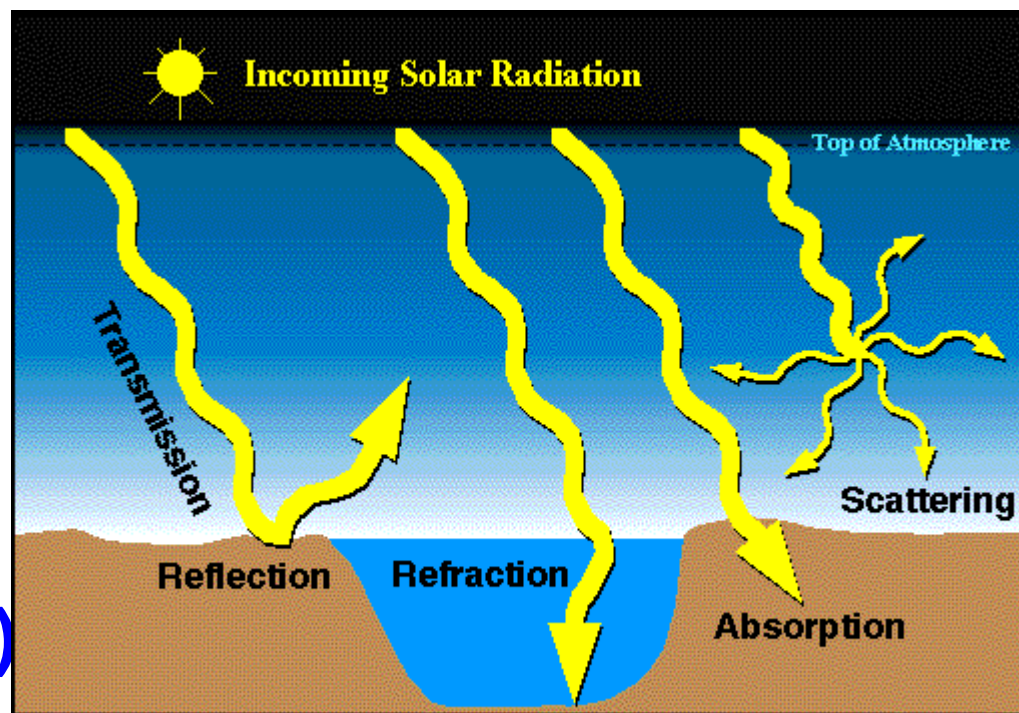
$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Right-hand circularly polarized

# Efeitos na propagação da onda eletromagnética

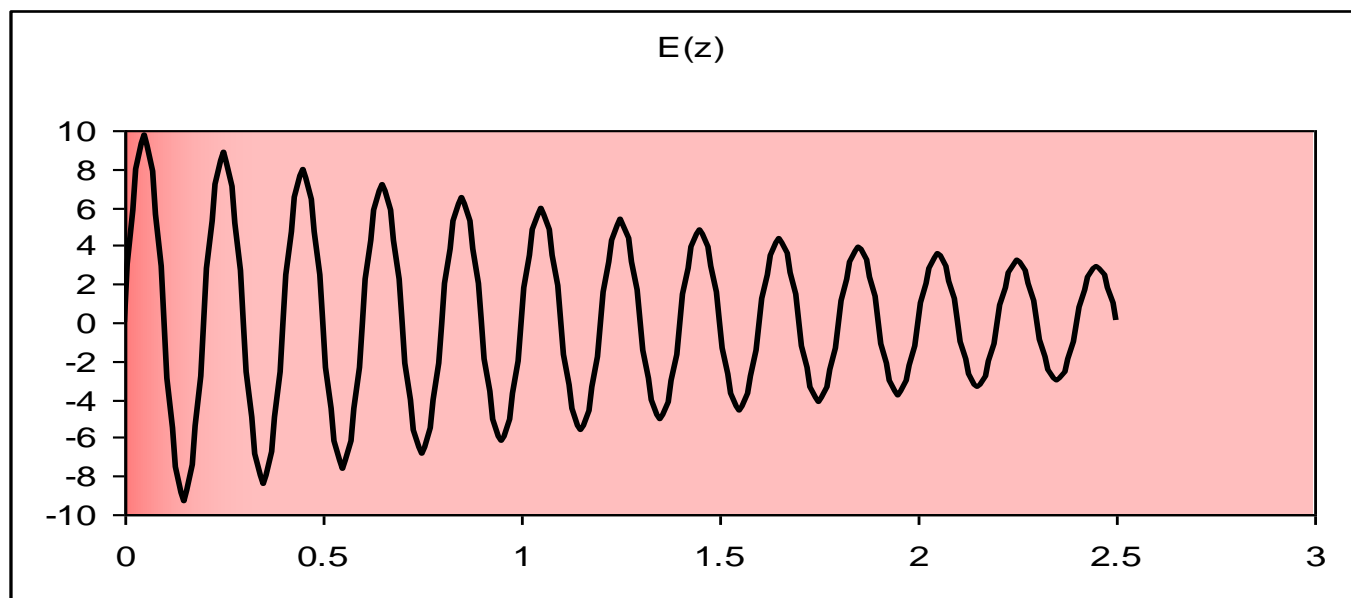
A onda eletromagnética ao se propagar em meios não vazios sofre varias perturbações:

Atenuação  
Refração  
Cintilação  
Reflexão  
Bloqueio  
Espalhamento  
Difração (fenda)

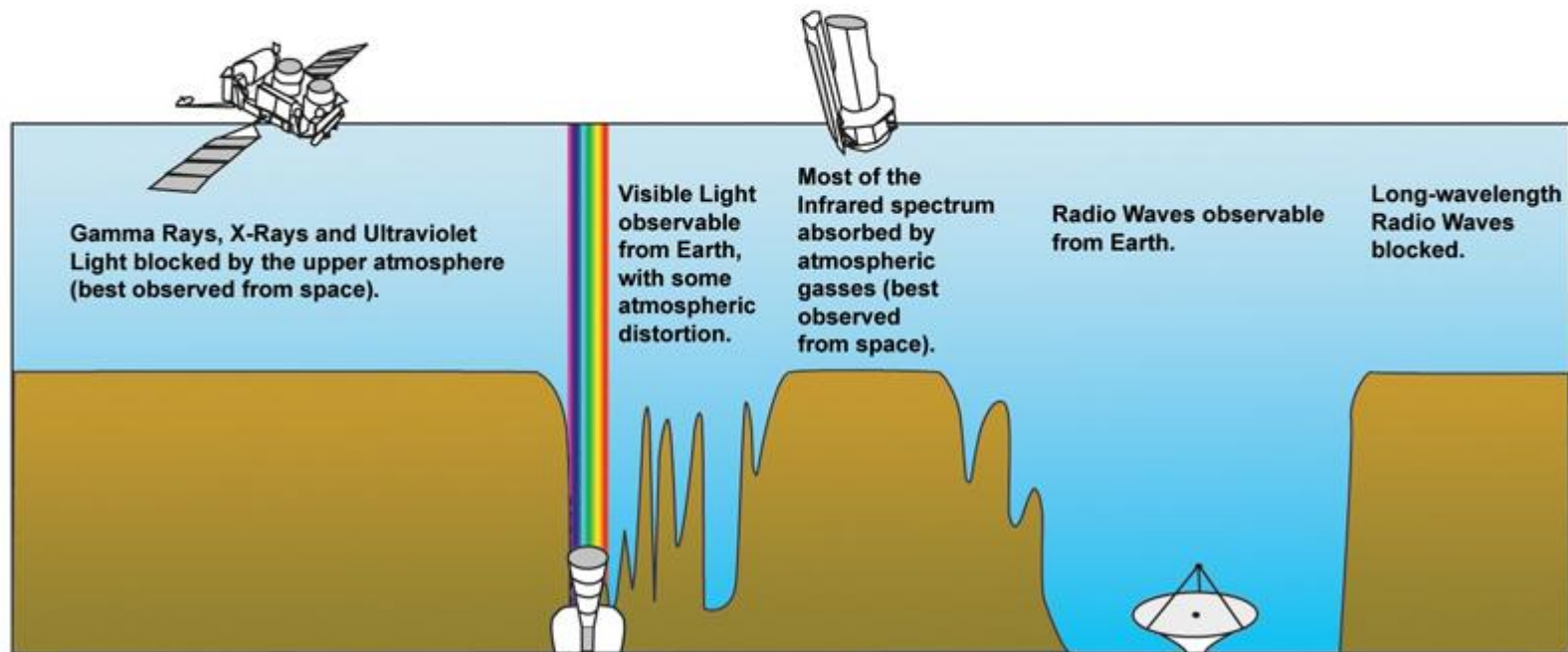
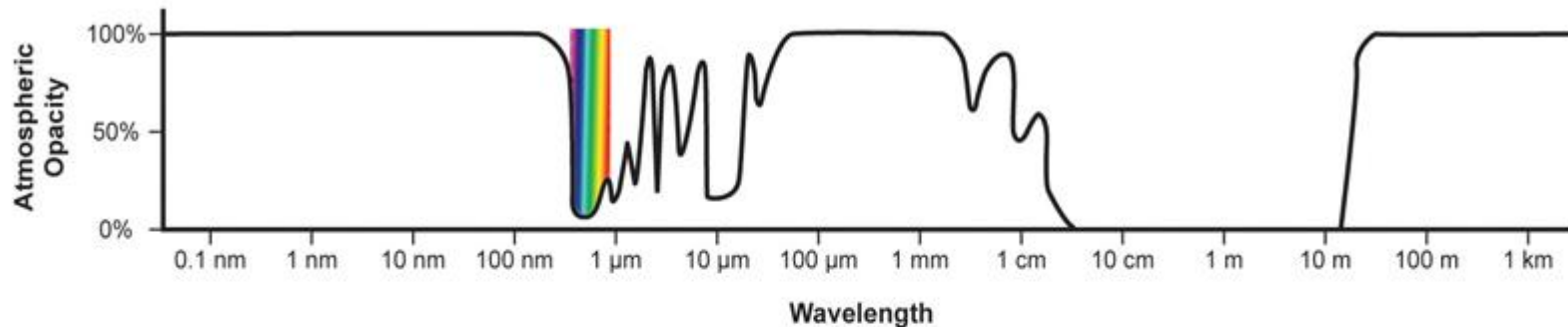


# Atenuação da onda em meios não vazios

A atenuação depende da frequência e do material



# Opacidade da Atmosfera



# Atenuação na Ionosfera

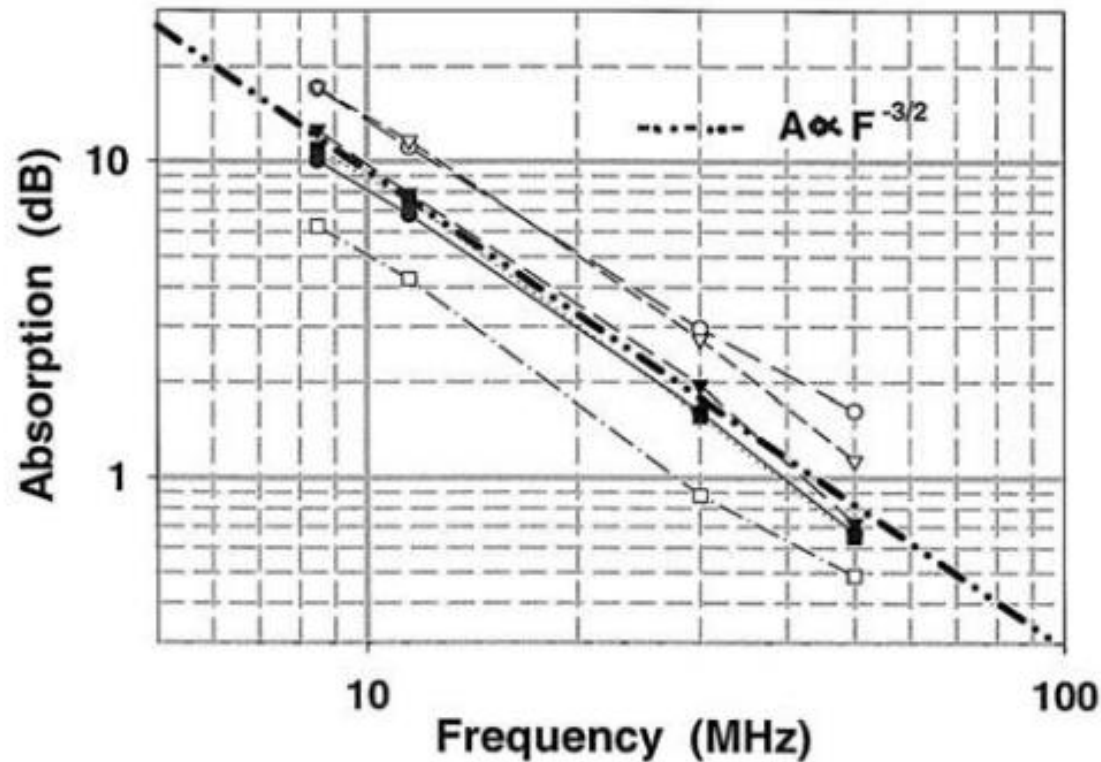


Figure 2. Transionospheric absorption versus frequency.

SPACE WEATHER, VOL. 6, S12002, doi:10.1029/2008SW000399, 2008



Global mapping of ionospheric HF/VHF radio wave absorption due to solar energetic protons

Herbert H. Sauer<sup>1</sup> and Daniel C. Wilkinson<sup>1</sup>



# Índice de Refração

***A Refração é a mudança de velocidade das frentes de onda em relação ao meio vazio.***

Define-se por Índice de Refração da Fase ( $n$ ) de um meio pela relação da velocidade da fase ( $v$ ) com a velocidade no espaço vazio ( $c$ ):

$$n = c/v$$

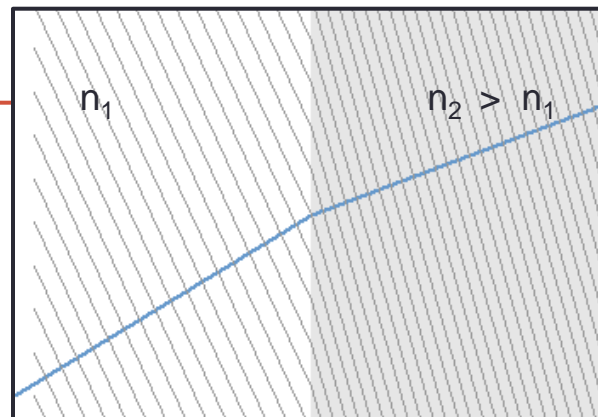
O meio é dispersivo quando  $v$  é função da frequência.

Define-se Refratividade ( $N$ ) pela expressão:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6$$

# Refração

A refração pode causar a mudança de direção de propagação da onda.



$$v_{\text{vermelho}} > v_{\text{laranja}} > v_{\text{amarelo}} > v_{\text{verde}} > v_{\text{azul}} > v_{\text{anil}} > v_{\text{violeta}}$$

$$n_{\text{vermelho}} < n_{\text{laranja}} < n_{\text{amarelo}} < n_{\text{verde}} < n_{\text{azul}} < n_{\text{anil}} < n_{\text{violeta}}$$

# Meio dispersivo

O meio é dito dispersivo quando a frente de onda caminha em velocidade diferente em cada frequência.

Dependendo da faixa de frequência (rádio ou ótica) o comportamento é bem distinto.

O ar próximo a superfície é dispersivo na faixa ótica mas não é na faixa rádio.

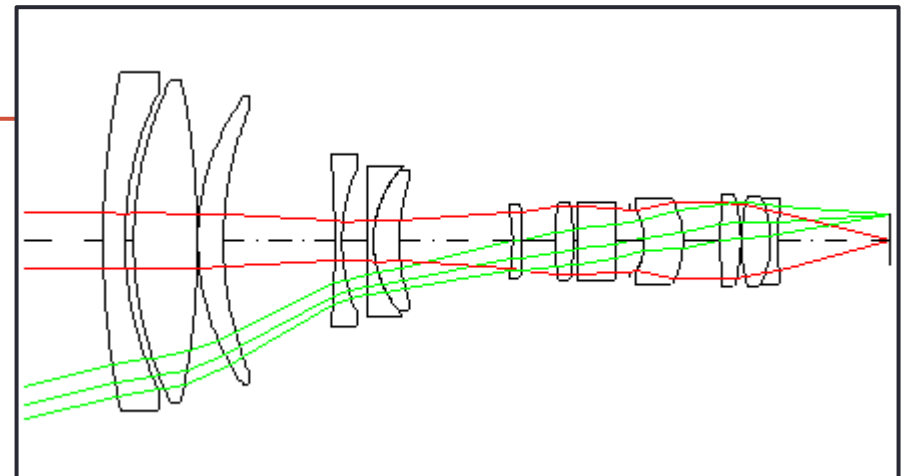
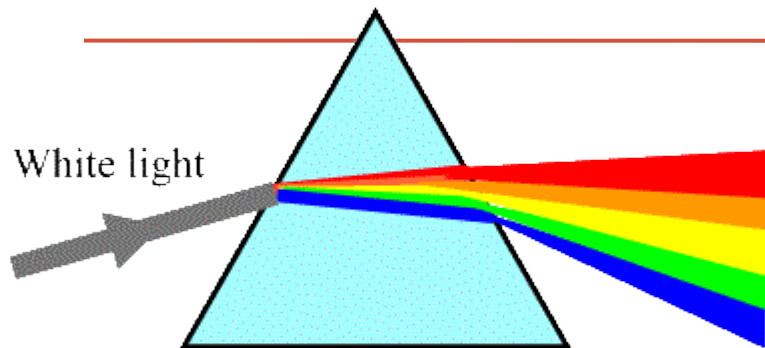
A ionosfera é dispersiva na faixa rádio mas não é na faixa ótica.

# Refração

A refração é muito mais conhecida pela mudança de direção do que pela mudança de velocidade de fase.

(mudança de velocidade das frentes de onda)

Refraction through a prism



O vidro é um meio dispersivo na faixa ótica

Lentes complexas são necessárias para que todas as cores fiquem focadas no mesmo plano.

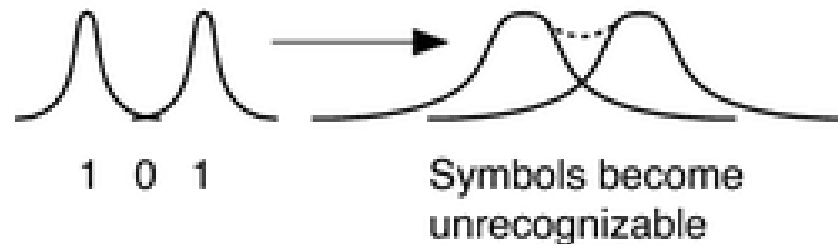
# Dispersão de pulso ótico

A dispersão causa um alargamento no tempo de um pulso ótico

## Dispersion



As a pulse travels down a fiber, dispersion causes pulse spreading. This limits the distance and the bit rate of data on an optical fiber.



# Refração na ionosfera

O índice de refração dado por:

$$n = \frac{c}{v_{ionosfera}} = \left( 1 - \frac{4\pi N_e e^2}{m_e \omega^2} \right)^{1/2}$$

Onde:

$N_e$  densidade de elétrons  
 $e$  carga do elétron  
 $m_e$  massa do elétron  
 $\omega$  frequência rad/s

Efetuada –se simplificações demonstra-se que

$$n_{fase} = 1 - \frac{40.30}{f^2} N_e < 1$$

$$n_{grupo} = 1 + \frac{40.30}{f^2} N_e > 1$$

A velocidade de fase é maior que c enquanto que a velocidade da propagação da informação é menor que c.

# Cintilação

A cintilação nos é muito familiar na luz das estrelas



Todo mundo sabe que as estrelas brilham, mas os planetas não. A razão tem a ver com tamanho angular. Estrelas são pontos distantes menores que as irregularidades térmicas na atmosfera da Terra que refratam a luz. Cada pacote de ar que passa em frente de uma estrela produz uma mudança bem definida na cor ou brilho.

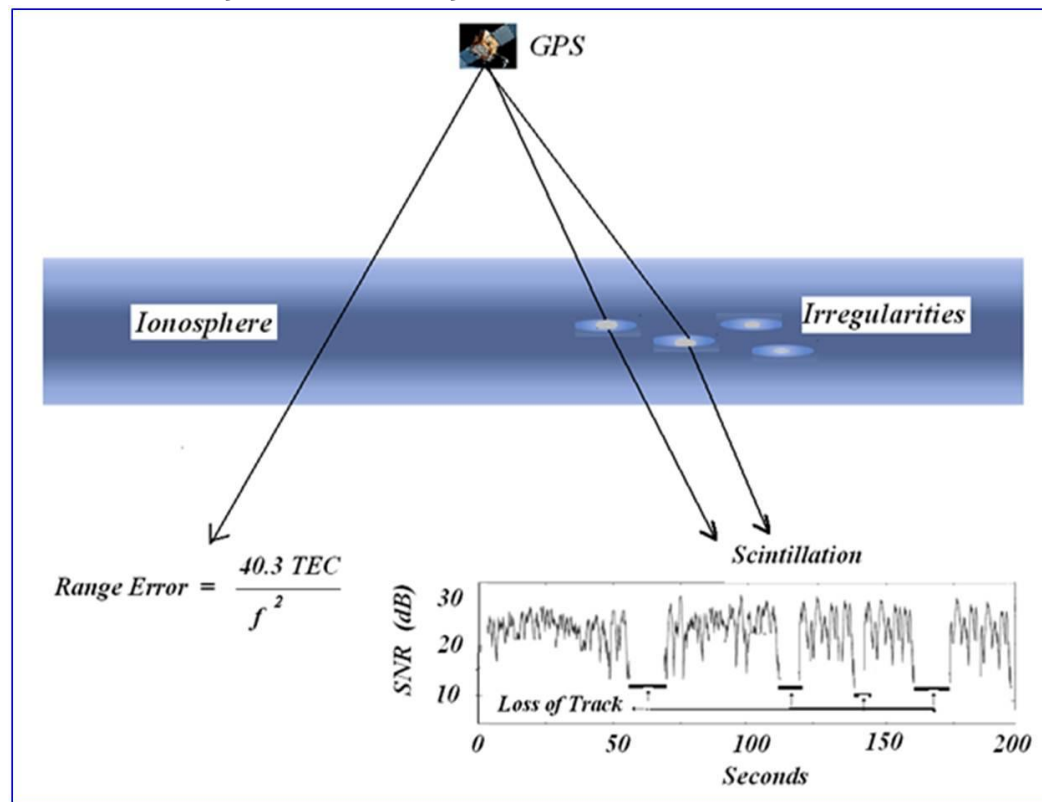
Planetas, por outro lado, são relativamente próximo e de largura angular maior. Eles abrangem muitas irregularidades atmosféricas, o que tende a suavizar a ação prismática

# Cintilação ondas rádio

A refração do sinal GPS/GNSS é causada por irregularidades ionosféricas que produzem variações no atraso do grupo de ondas e avanço de fase.

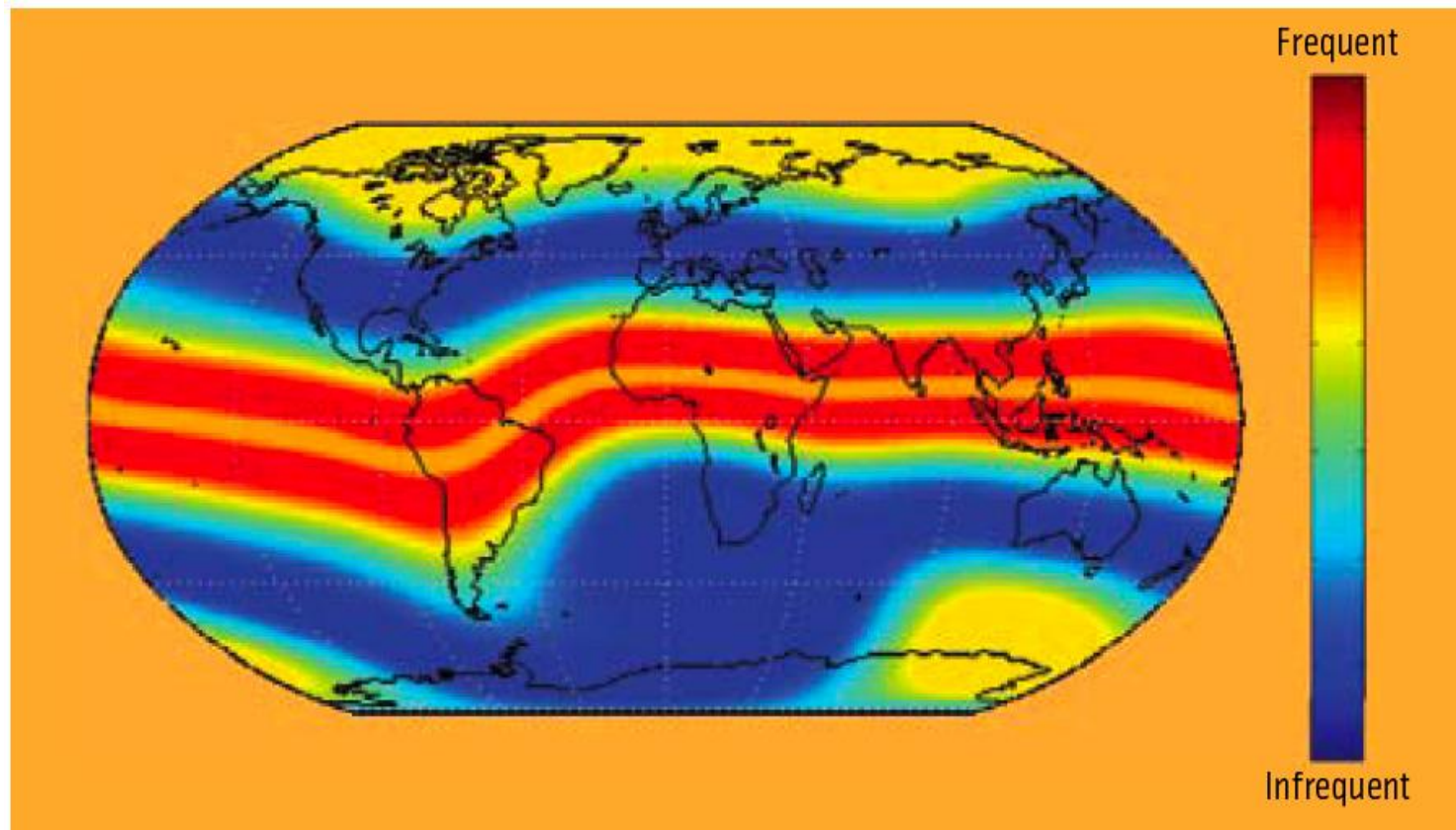
A difração é causada pela dispersão do sinal (*scattering*) na ionosfera, resultando em ondas de rádio que atingem os receptores através de múltiplos caminhos, causando assim, flutuações na amplitude e fase do sinal.

Ambos os efeitos de difração e refração sobre os sinais são referidos como cintilação.



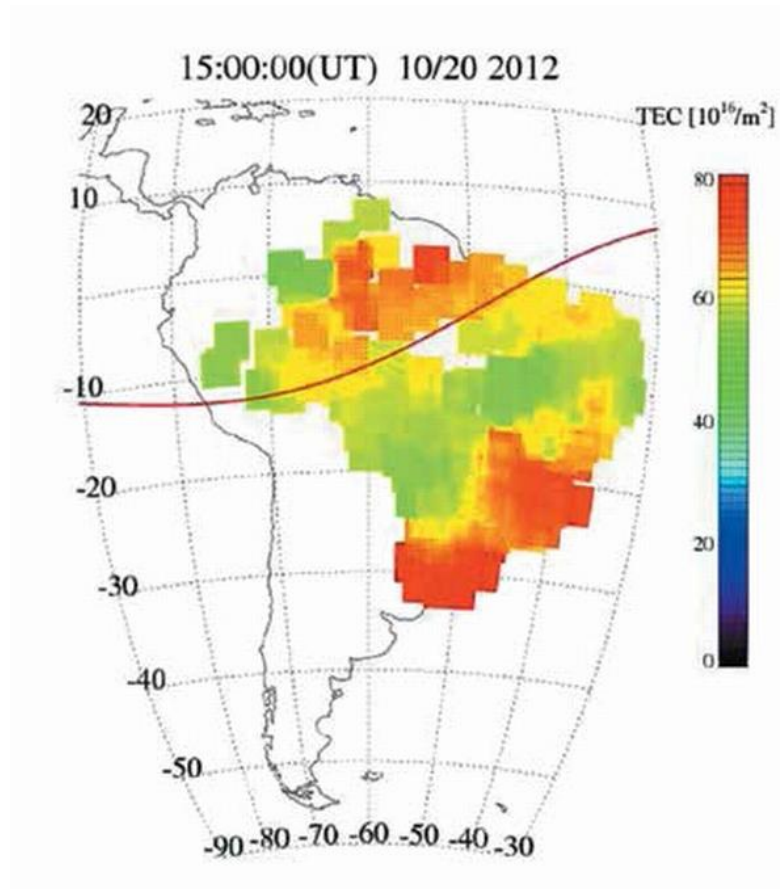


# Cintilação na atividade máxima do Sol

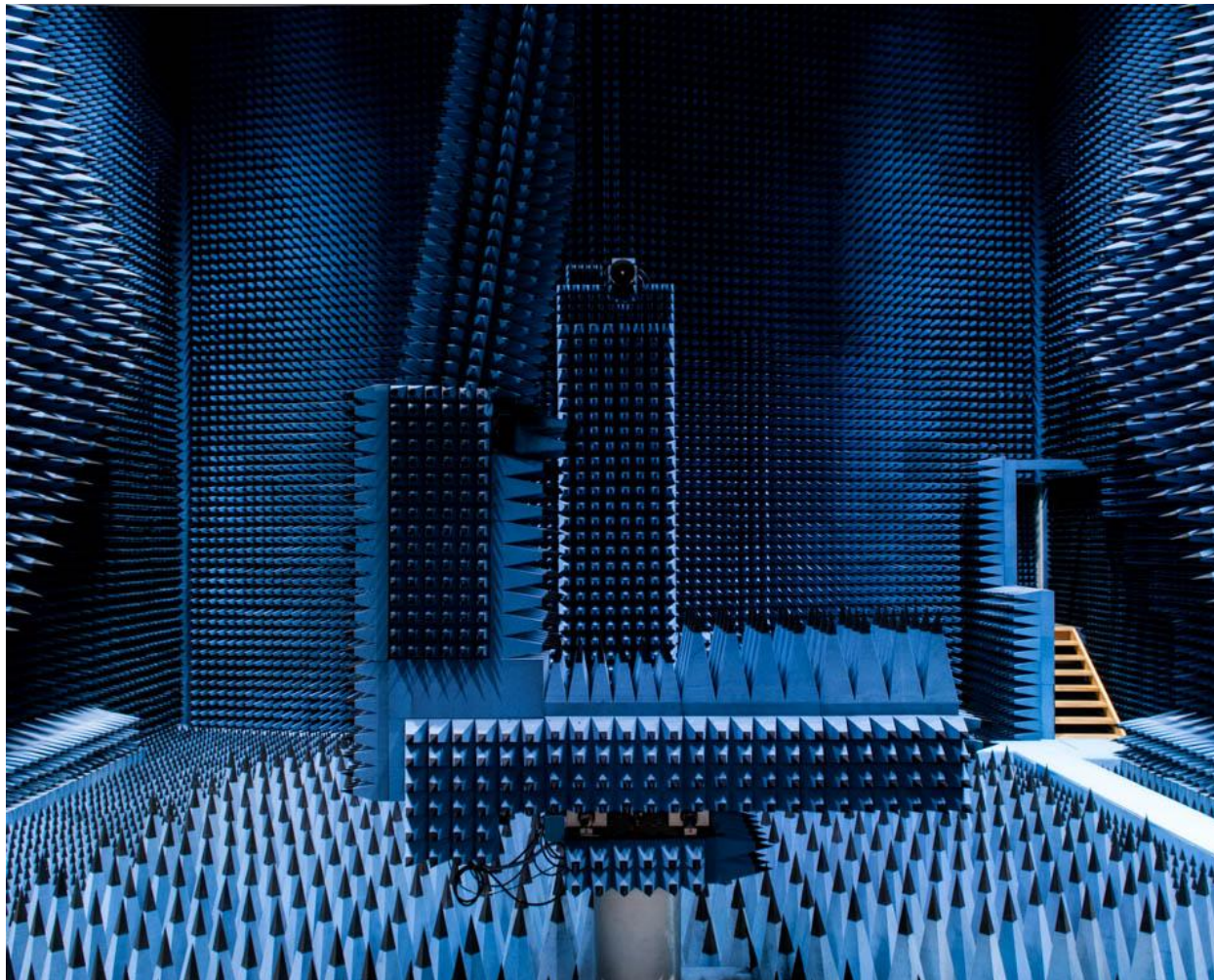


**FIGURE 1** Scintillation map showing the frequency of disturbances at solar maximum. Scintillation is most intense and most frequent in two bands surrounding the magnetic equator, up to 100 days per year. At poleward latitudes, it is less frequent and it is least frequent at mid-latitude, a few to ten days per year.

# Mapa de cintilação

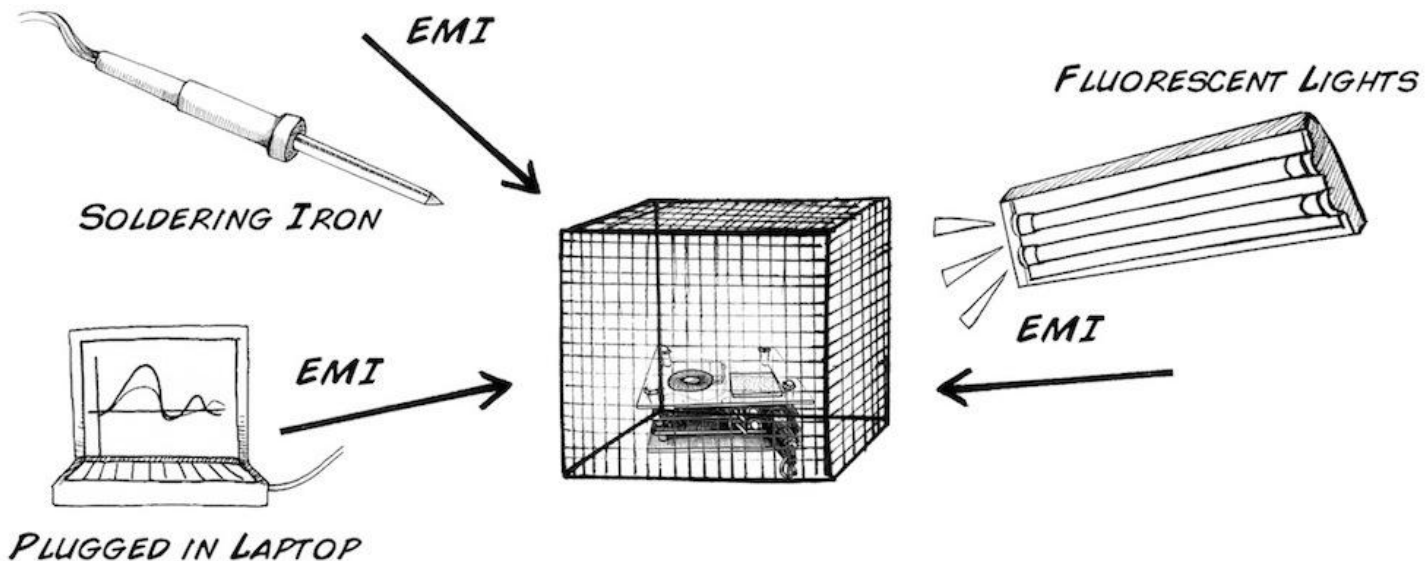


# Câmera sem reflexão - rádio



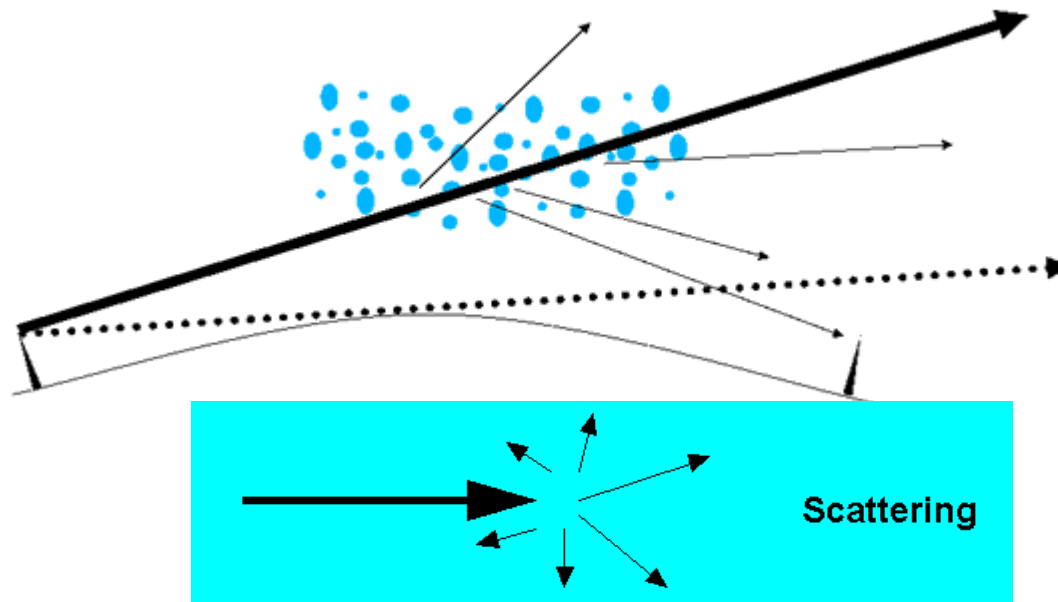
# Bloqueio

Há casos que o bloqueio é deliberado para evitar interferências eletromagnéticas (EMI)  
Na faixa rádio se usa a gaiola de Faraday e na ótica a câmera escura.



# Espalhamento ( *scatter* )

O espalhamento ocorre quando a frente de onda encontra irregularidades ou partículas no meio

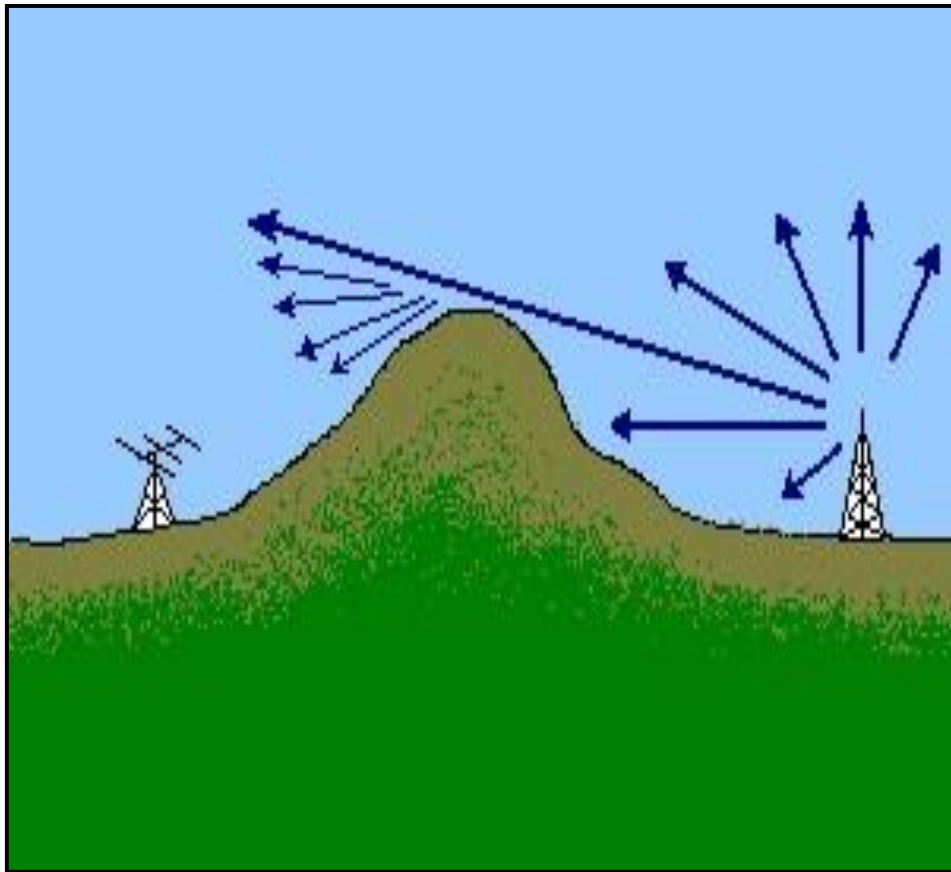


<http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/scatter.htm>

<http://www.mike-willis.com/Tutorial/PF9.htm>

# Difração

Difração é o nome que se dá ao fenômeno de uma onda contornar um obstáculo



# OBRIGADO!

---

PTR5003 – Ondas Eletromagnéticas - SR

flaviovaz@usp.br

Adaptado Material Prof. E. Schaal