

# **RADIAÇÃO**

## **INFORMAÇÃO DO COSMOS**

**COMO SE EXTRAÍ A INFORMAÇÃO VINDA DA LUZ  
EMITIDA POR OBJETOS ASTRONÔMICOS**

# INFORMAÇÕES QUE SE DISPÕE SOBRE O UNIVERSO:

- **ANÁLISE DIRETA:** meteoritos que caem na Terra, amostras recolhidas na Lua e rochas de Marte analisadas in loco.

- **PARTÍCULAS MICROSCÓPICAS:**
  - raios cósmicos
  - neutrinos

- **ONDAS:**
  - eletromagnéticas
  - gravitacionais

**Quase todos os objetos astronômicos estão a distâncias muito grandes**



**Andrômeda está a  $2.5 \times 10^6$  anos-luz de distância...**

**Para compreender estes objetos é necessário estudar qualquer tipo de radiação por eles emitida ou que interaja com eles**

# **RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA**

**PQ? R: nossos olhos são sensíveis a uma pequena faixa da radiação eletromagnética**



**radiação visível ou luz visível**

# Definições:

**RADIAÇÃO**



**qualquer forma de transmissão de energia através do espaço de um ponto a outro (sem necessidade de uma ligação física entre os dois pontos)**

**RADIAÇÃO  
ELETROMAGNÉTICA**



**Energia transmitida por rápidas variações (flutuações) de campos elétrico e magnético**

# Definições:

**Luz visível**



**Tipo particular de radiação eletromagnética a qual o olho humano é sensível**

**A MAIOR PARTE DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA É INVISÍVEL AO OLHO HUMANO**



**RÁDIO ♦ INFRAVERMELHO ♦ ULTRAVIOLETA ♦ RAIOS-X ♦ RAIOS- $\gamma$**

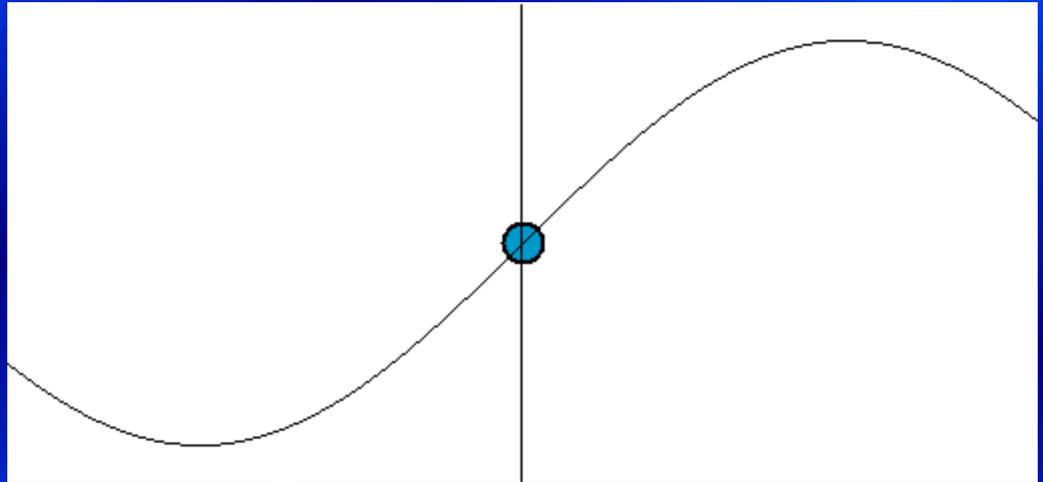
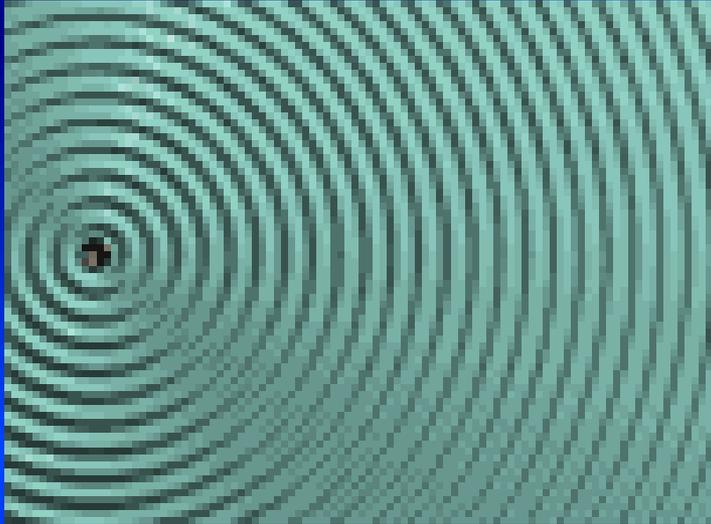
# ONDAS

**Todos os tipos de radiação é-mag viajam pelo espaço sob a forma de ondas**

**Uma onda é uma forma de transmitir informação de um lugar a outro, sem nenhum transporte de matéria entre estes lugares**

**Maaaass... Toda a onda de luz tem associada a ela uma partícula = FÓTON**  
**⇒ dualidade onda-partícula da luz**

# COMPORTAMENTO ONDULATÓRIO

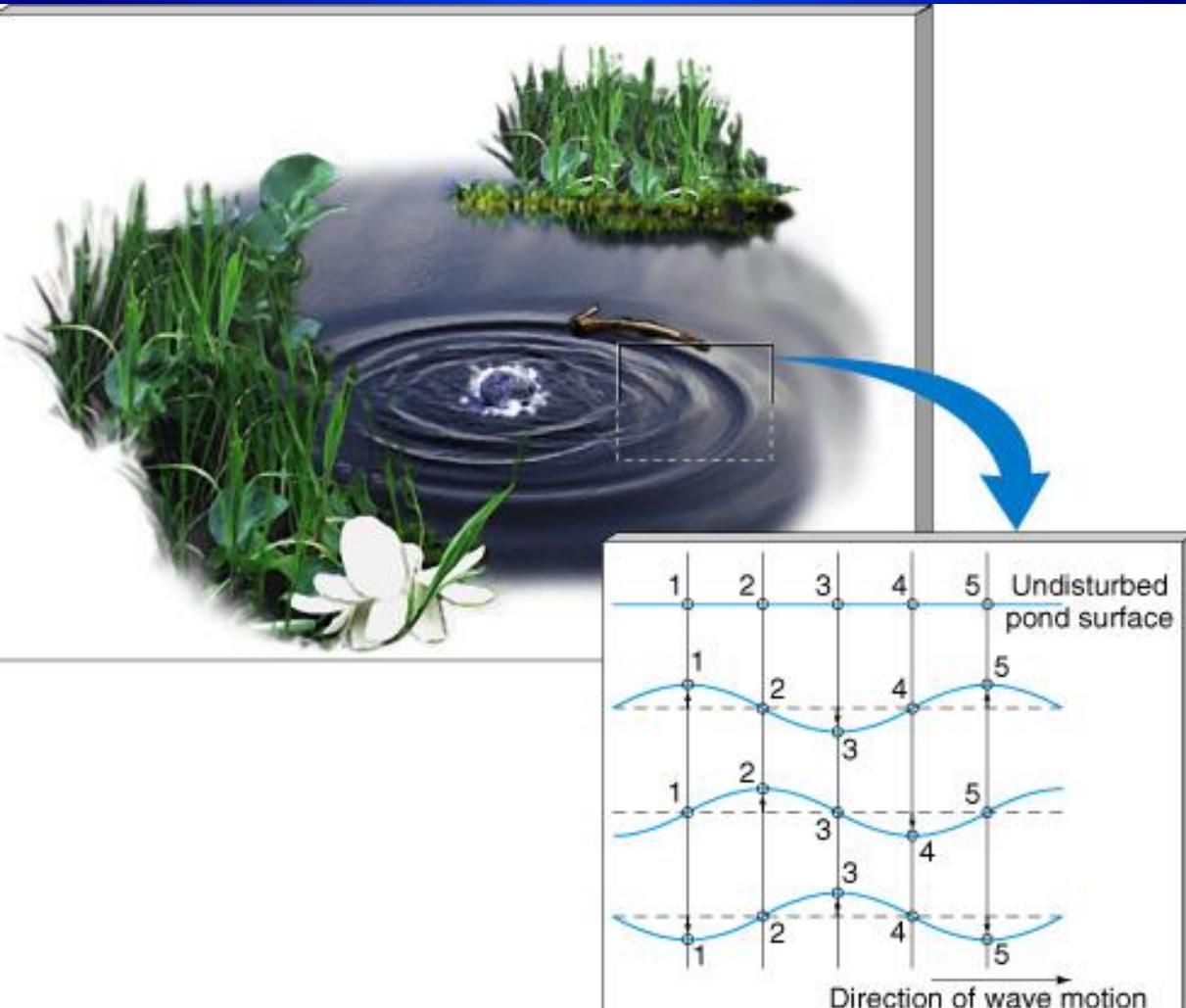


**Ondas na superfície da água**



**Não há transferência de água de um ponto a outro da superfície e sim apenas o movimento de um PADRÃO = ONDA**

# A perturbação gerada pela pedra é transmitida ao galho através da propagação das ondas



**Somente observando o galho se consegue informações sobre a pedra.**

**A maioria das ondas precisam de um meio para se propagar:**

**a) ondas de água : superfície da água**

**b) ondas sonoras : ar**

**c) ondas sísmicas : terra sólida**

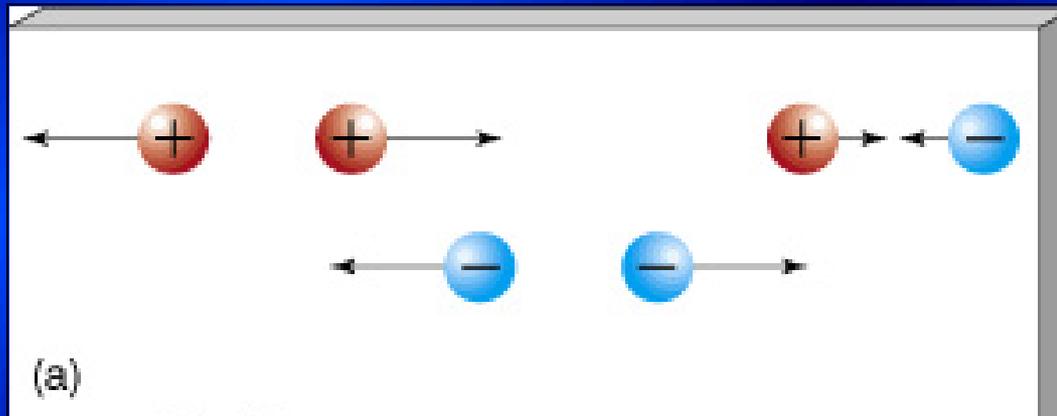
**Mas e a luz??**



**propaga-se  
através do vácuo**

# Como a luz pode se propagar sem um meio ?

**R : interação entre partículas carregadas**



**(a) Propriedades das cargas elétricas  $\Rightarrow$  atração e repulsão**

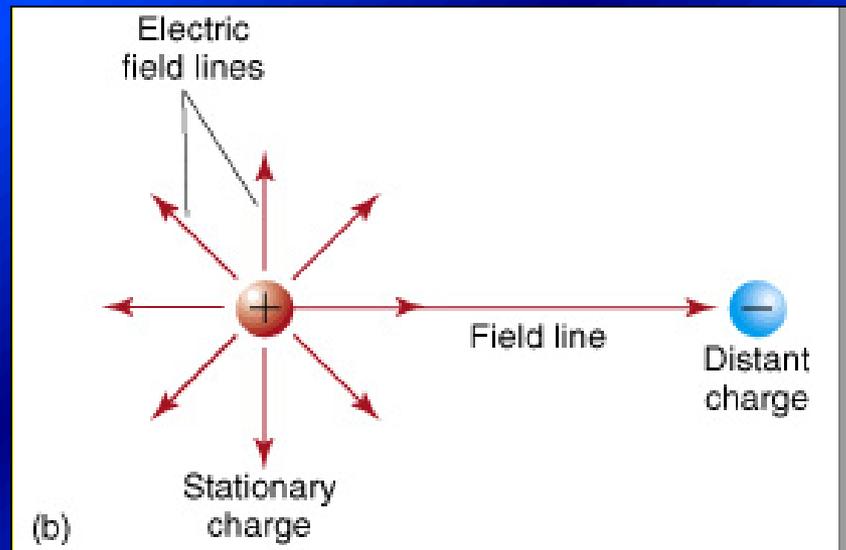
**Assim como existe a  $F_G$ , uma partícula carregada exerce uma  $F_e$  em cada partícula carregada existente no universo: lei de Coulomb**

$$\vec{F} = K \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

# Como a luz pode se propagar sem um meio ?

**R : interação entre partículas carregadas**

**Como a força elétrica é transmitida através do espaço??**



**(b) campo elétrico se estende em todas as direções**

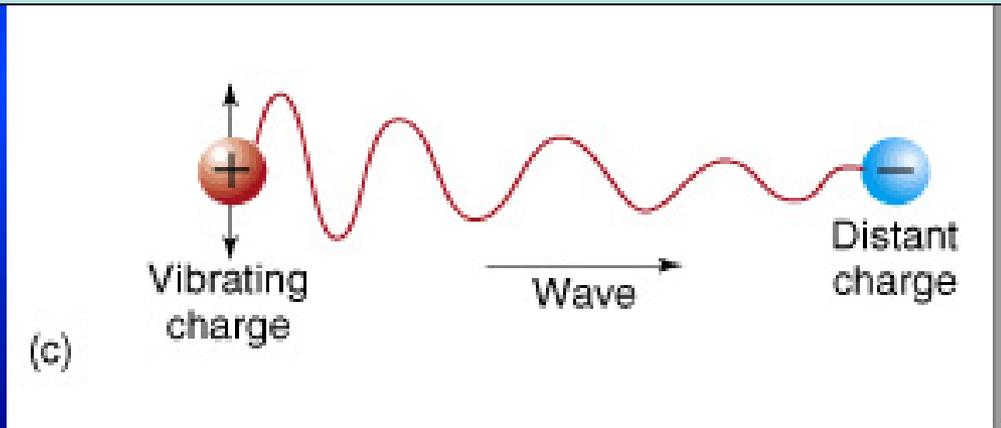
**A presença da partícula carregada é “sentida” por outra partícula carregada através do campo elétrico**

**Assim como a força gravitacional a força elétrica varia com o inverso do quadrado da distância ( $1/r^2$ )**

# Como a luz pode se propagar sem um meio ?

**R : interação entre partículas carregadas**

**Supondo que partículas carregadas possam vibrar (pelo calor ou colisão com outras partículas)**



**Vibração causa variação do campo elétrico**

**variação do campo elétrico : medida da variação na força exercida sobre uma outra carga dá informação sobre o movimento da partícula original.**

**Portanto a informação sobre o estado de movimento de uma partícula é transmitida através do espaço pela variação do campo elétrico. Esta “perturbação” no campo elétrico viaja pelo espaço sob forma de uma onda.**

# TERMINOLOGIA



**amplitude = altura da onda**

**Comprimento de onda =  
distância entre duas cristas adjacentes**

**Número de cristas que passam num dado  
ponto por unidade de tempo = frequência**

$$frequência = \frac{1}{período}$$

**Uma onda se move a uma distância igual a UM comprimento de onda em UM período de tempo**



**A velocidade da onda é produto da frequência pelo comprimento de onda :**

**Velocidade = comprimento de onda  $\times$  frequência**

$$v = \lambda \times \nu$$

**No caso da luz:**

$$v = c = 3 \times 10^5 \text{ km/s}$$

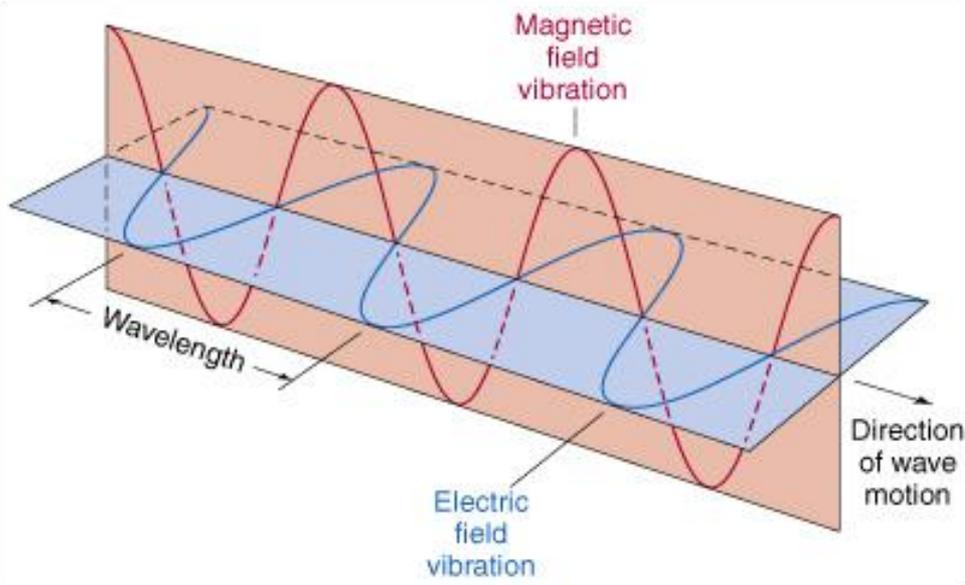
**c = velocidade da luz**



$$\lambda \times \nu = c$$

# LUZ OU ONDA ELETROMAGNÉTICA

**ONDA ELETROMAGNÉTICA**  $\Rightarrow$  toda a variação de um campo elétrico criará uma variação num campo magnético e vice-versa:



**campo elétrico e magnético estão intrinsecamente ligados**

**Estes campos não existem como entidades independentes : são diferentes aspectos de um fenômeno físico só: o ELETROMAGNETISMO**

# LUZ OU ONDA ELETROMAGNÉTICA

As leis que regem as interações e-magnéticas são dadas pelas equações de Maxwell :

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

→ Lei de Ampère (corrente elétrica gera campo magnético).

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

→ Lei de Faraday (indução é-mag: produção de corrente elétrica por um campo magnético variável.

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

→ Lei de Gauss (relação entre o fluxo elétrico e a quantidade de carga elétrica )

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

→ ausência de pólos magnéticos livres

Maxwell mostrou que a radiação e-magnética, ou seja a luz, se propaga como uma onda.

A partir de transformações matemáticas que ele realizou sobre as 4 equações do eletromagnetismo, Maxwell mostrou que elas se reduziam a uma equação de propagação de um fenômeno ondulatório.

**A luz que recebemos das estrelas nada mais é do que a radiação e-magnética produzida por fenômenos físicos que ocorrem no seu interior e, posteriormente, emitida por elas.**

**Estas ondas e-magnéticas se propagam no meio interestelar e chegam até nós permitindo-nos ver os objetos celestes.**

**Também foi Maxwell que mostrou, a partir da obtenção da equação de propagação ondulatória da luz, que a velocidade desta propagação, ou seja a velocidade da luz, no vácuo é  $3 \times 10^8$  km/s**

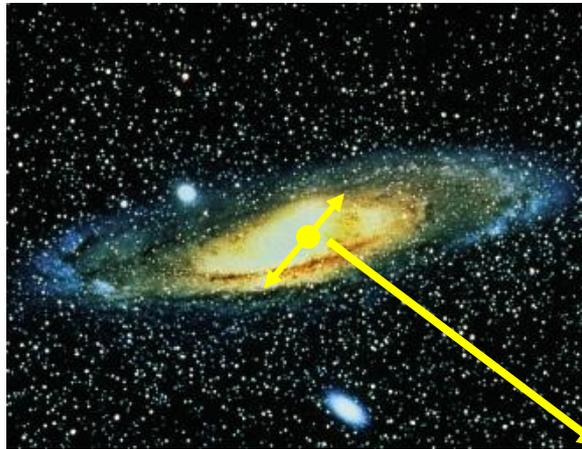
**Um aspecto fundamental das equações de Maxwell para o campo eletromagnético é a existência de soluções sob a forma de ondas que se deslocam, e que transportam energia, de um ponto para outro. Estas equações governam o campo eletromagnético em um meio linear, homogêneo, no qual a densidade de carga é zero, seja este meio condutor ou não condutor.**

**Equações da onda para os campos elétrico e magnético:**

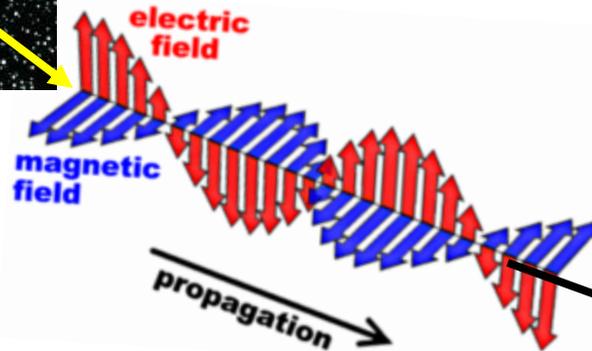
$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0$$
$$\nabla^2 \vec{H} - \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} - \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0$$

# PROPAGAÇÃO DA INFORMAÇÃO

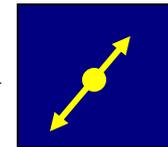
**Onda émag  $\Rightarrow$  carrega informações sobre distintos pontos no universo.**



**Partículas carregadas se movimentam num dado objeto (galáxia, estrela, etc) dando origem a ondas émag que viajam pelo espaço até um detector.**

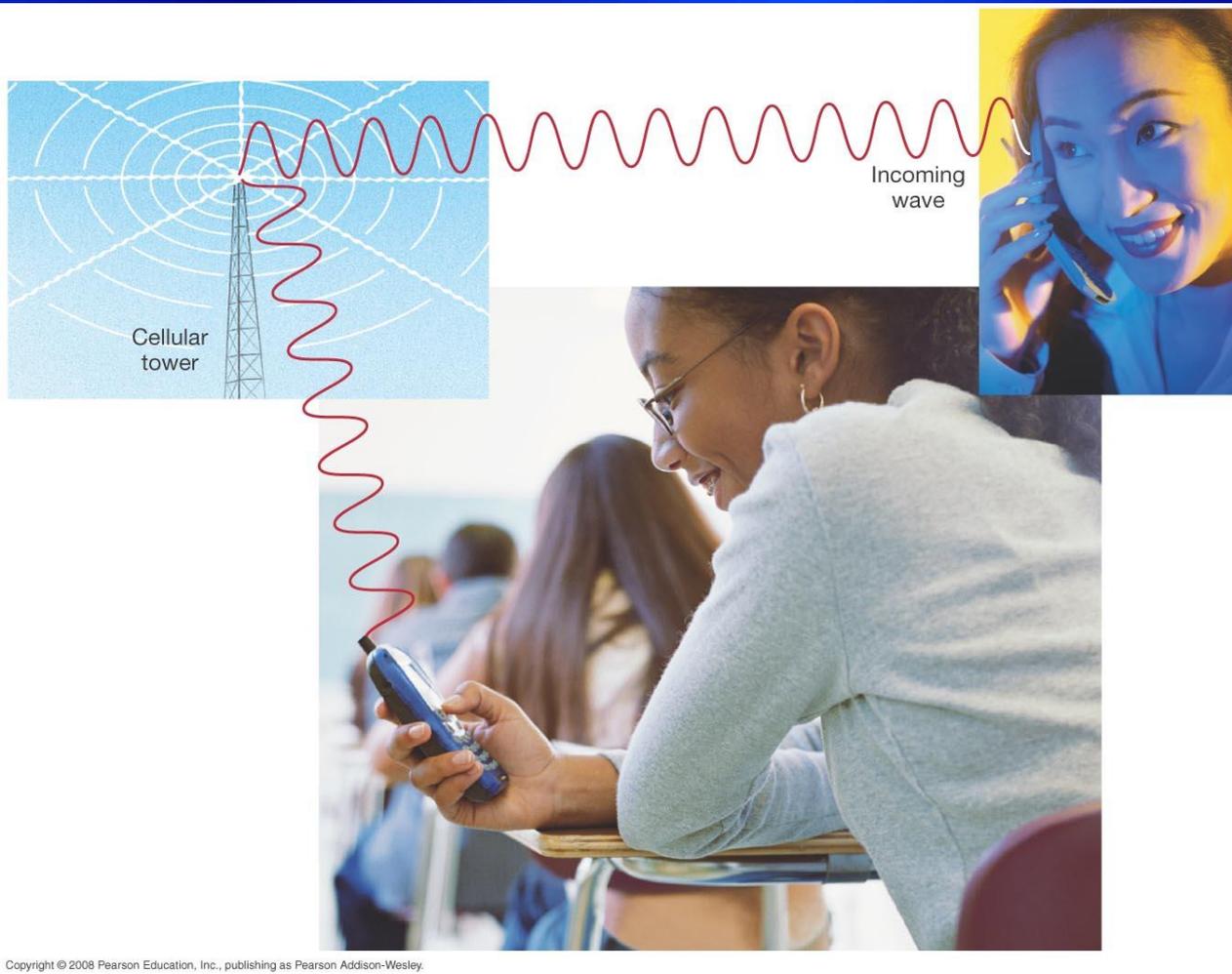


**A luz incidente faz partículas carregadas no detector também se agitarem. A agitação é dependente do movimento original das partículas da fonte de luz**



**detector/olho**

**INFORMAÇÕES SOBRE AS CONDIÇÕES FÍSICAS DA FONTE DA LUZ SE PROPAGOU ATÉ O DETECTOR**



## Exemplo do cotidiano: celular

**O transmissor do celular causa a vibração de cargas elétricas numa antena receptora, que por sua vez recupera o som e imagens transmitindo novamente (vibração de cargas elétricas) para a antena do celular.**

**A informação viaja no máximo a velocidade = c  
!!! Não existe transmissão INSTANTÂNEA de  
informação**

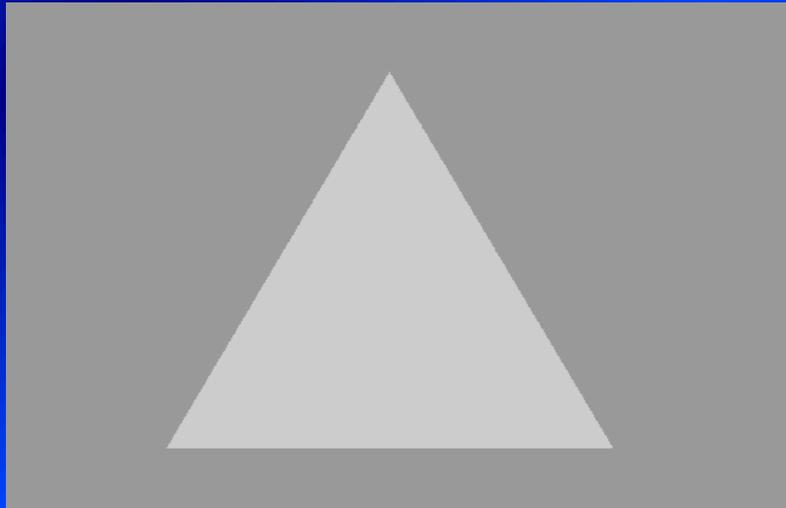
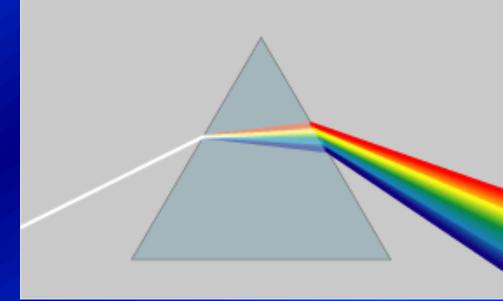


**levou 2.5 milhões de  
anos para recebermos  
a luz de Andrômeda**



**informação sobre a  
galáxia a 2.5 milhões de  
anos atrás**

# O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO



## refração da luz

O que determina a cor ?

R. comprimento de onda  $\lambda$   
ou frequência  $\nu$

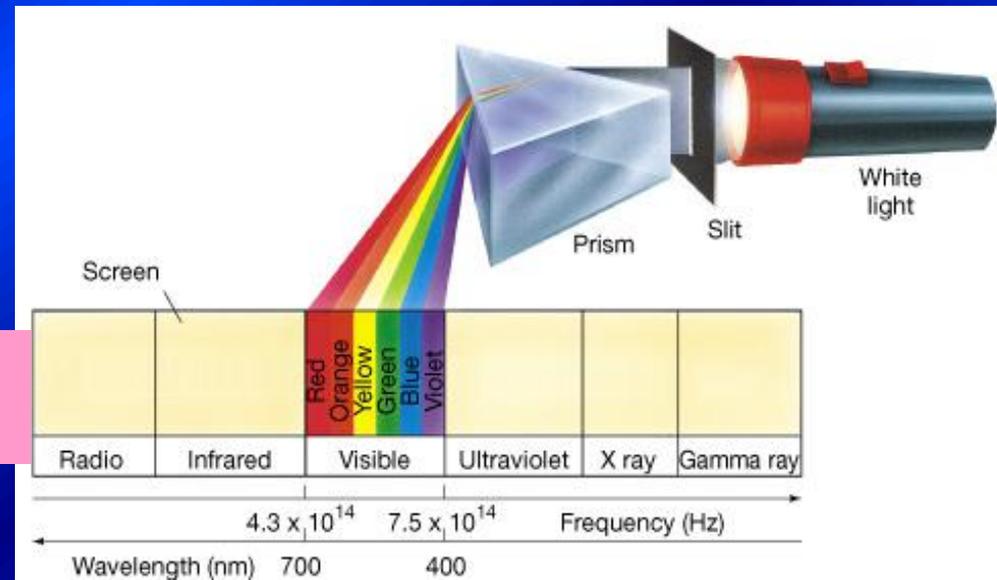
$\lambda$  é dado em nm (nanometros) ou Å (angstroms)  
 $1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m} = 10^{-4} \mu\text{m}$

$\nu$  é dada em ciclos/s = Hz

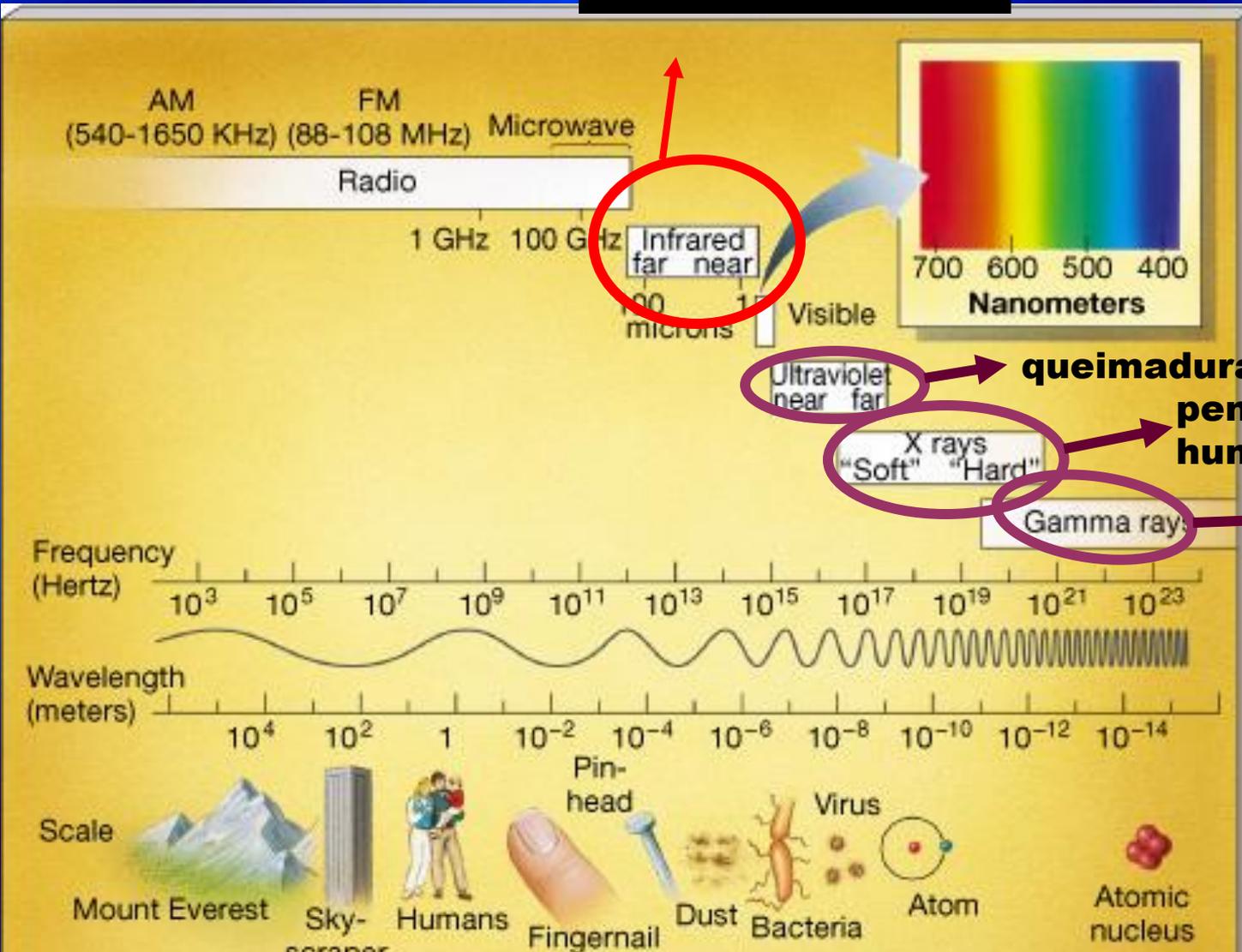
Luz visível: 3900 a 7800 Å

Cor + azul  $\Rightarrow \lambda$  menor ( $\nu$  maior)

Cor + vermelha  $\Rightarrow \lambda$  maior ( $\nu$  menor)



**Sentimos radiação IR como calor**



**queimaduras**

**penetra o tecido humano**

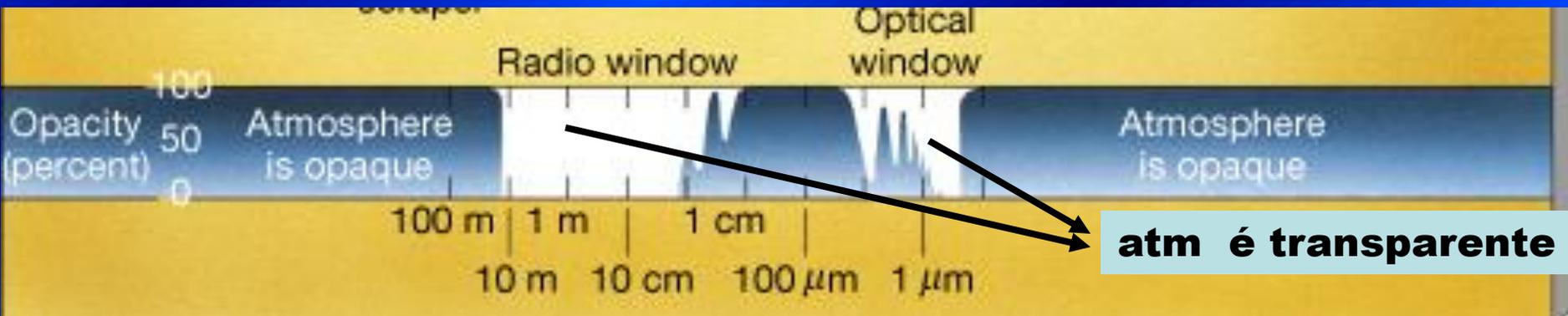
**associado com radioatividade causa danos às células vivas**

**A radiação visível vai aproximadamente de 3900 Å (violeta) até cerca 7800 Å (vermelho).**

**Freqüências e comprimentos de onda para várias cores, no vácuo.**

Cor	Comprimento de onda (Å)	Freqüência (10 <sup>12</sup> Hz)
violeta	3900 - 4550	659 - 769
azul	4550 - 4920	610 - 659
verde	4920 - 5770	520 - 610
amarelo	5770 - 5970	503 - 520
laranja	5970 - 6220	482 - 503
vermelho	6220 - 7800	384 - 482

# OPACIDADE ATMOSFÉRICA : capacidade da atmosfera de bloquear a radiação



**atmosfera transparente = janelas que deixam passar radiação em  $\lambda$  de rádio e visível  $\Rightarrow$  estudo dos objetos astronômicos**

**O que bloqueia a radiação:**

**$H_2O$  e  $O_2 \Rightarrow$  absorve ondas de rádio de  $\lambda < 1$  cm**

**$CO_2 \Rightarrow$  absorve radiação no IR**

**$O_3 \Rightarrow$  absorve radiação UV, raios-X e raios- $\gamma$**

**ionosfera  $\Rightarrow$  absorve ondas de rádio de  $\lambda > 10$  m**

# Transmissão da Atmosfera da Terra

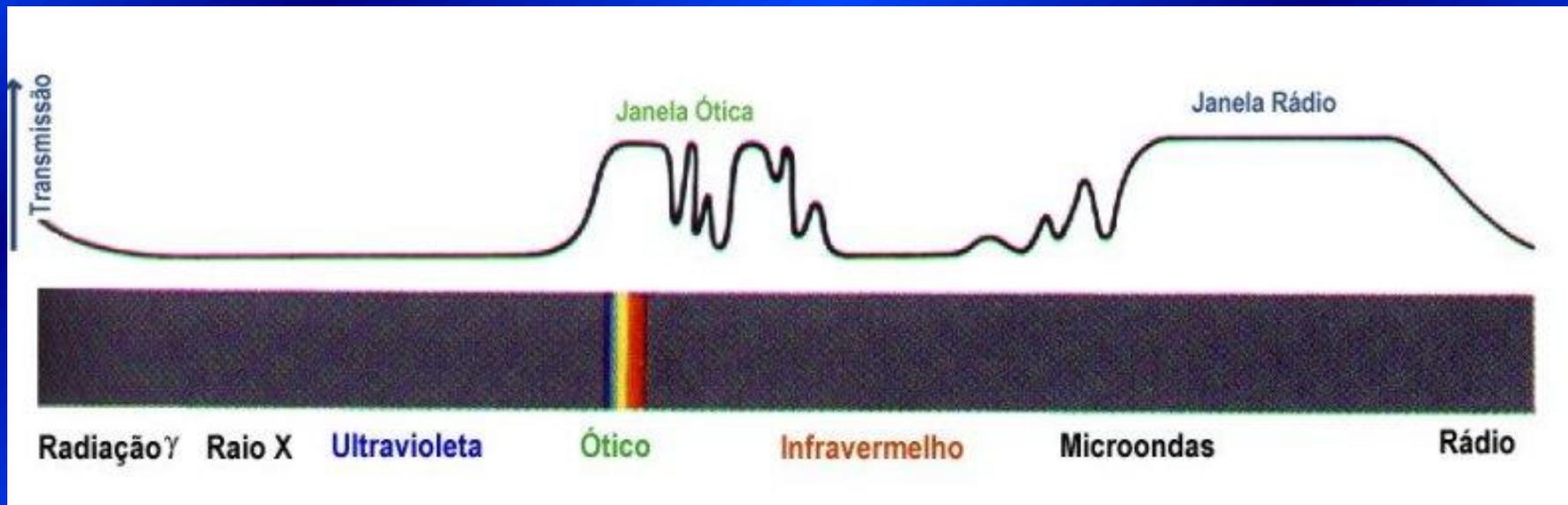


- A atmosfera é ~ transparente na faixa visível (3500 Å a 6500 Å), absorve fortemente no UV (1000 Å a 3500 Å) e em várias bandas do IR (1  $\mu\text{m}$  a 1 mm), de modo que não podemos medir UV do solo, e IR somente acima de 2000 m de altura

- Na atmosfera existem vários componentes que difundem a luz em todas as direções (moléculas, partículas sólidas de poeira e fumaça), causando uma extinção contínua, em todos os  $\lambda$ .

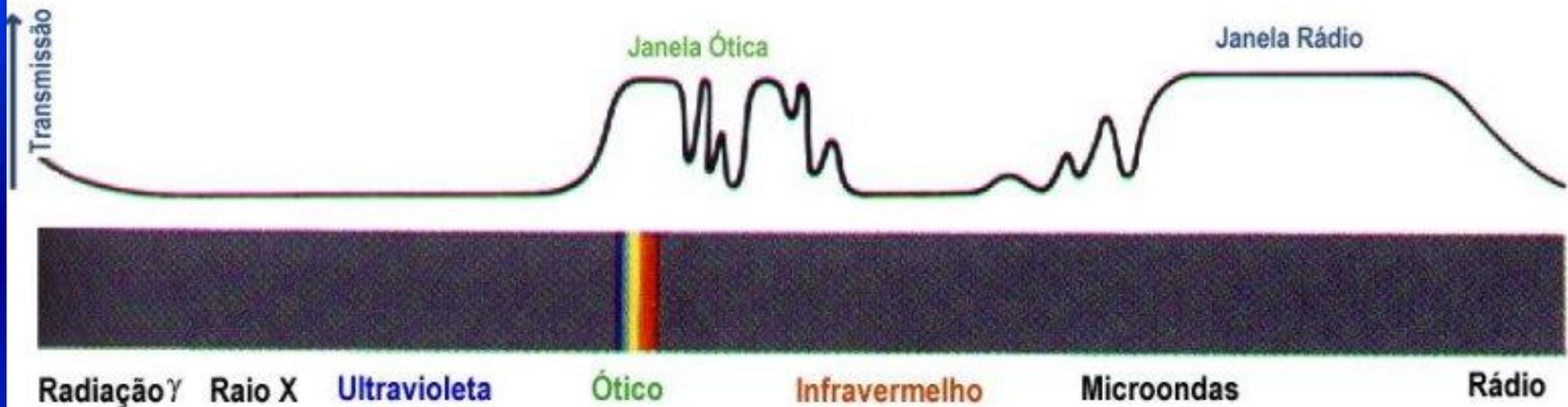
- A extinção é tanto maior quanto maior for a quantidade de ar atravessada pela luz. É por este motivo que podemos olhar diretamente para o Sol no horizonte.

- **O espalhamento da radiação depende do  $\lambda$  da radiação e do tamanho das partículas.**
- **Se o tamanho da partícula for muito maior do que o comprimento de onda da radiação ( $d \gg \lambda$ ), o espalhamento é independente do comprimento de onda. Por isto o céu fica cinza em dias nublados: a luz do Sol é espalhada igualmente em todos os comprimentos de onda visuais.**
- **Se  $d \sim \lambda$ , como no espalhamento da luz visível pela poeira ou vapor d'água, a intensidade varia com  $1/\lambda$ , chamado espalhamento de Mie (**Gustav L. Mie**(1869-1957)). de modo que luz azul se espalha mais do que luz vermelha.**
- **Se  $d \ll \lambda$ , o espalhamento depende fortemente do comprimento de onda, e a intensidade varia com  $1/\lambda^4$ , chamado espalhamento de Rayleigh (John Rayleigh (1842-1919)). O azul do céu é causado pelo espalhamento Rayleigh pelas moléculas do ar.**



•A janela visual se estende desde cerca de 3200 Å a cerca de 1,4 μm (14000 Å). O corte no ultravioleta é causado pela fina camada de moléculas de ozônio (O<sub>3</sub>) a uma altura da ordem de 25 km.

•No IR (1-100 μm), o corte é mais gradual, com uma série de janelas estreitas se estendendo até 24 μm, entre as bandas de absorção causadas principalmente pela água (H<sub>2</sub>O) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Estas janelas são usadas para observações no IR, principalmente em montanhas desérticas.

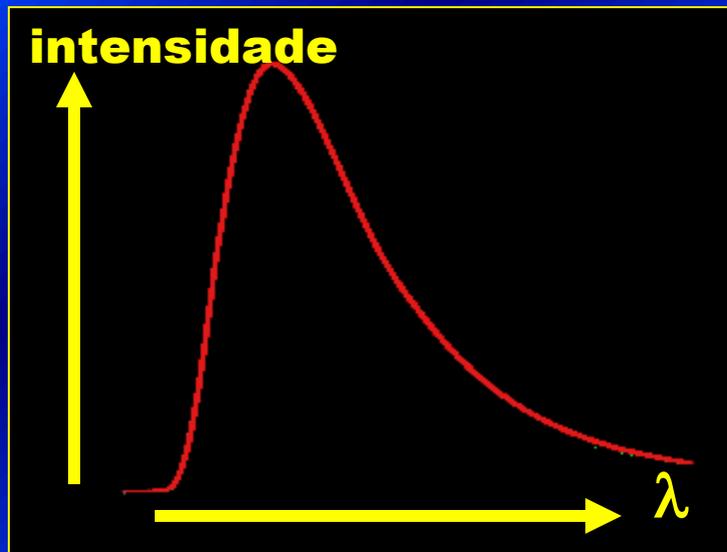


- **A janela rádio se estende entre aproximadamente 8 mm e 15 m, embora haja redução por vapor de água e moléculas de oxigênio ( $O_2$ ) para comprimentos de onda acima de 300  $\mu\text{m}$ .**
- **O corte em  $\lambda$  maiores (faixa kHz e MHz) se dá por reflexão crítica na ionosfera (camada da atmosfera acima de 100 km), onde há alta densidade de elétrons livres e íons. As ondas de rádio não podem penetrar neste plasma por que suas baixas frequências estão abaixo da frequência de plasma natural da ionosfera.**
- **Esta reflexão é entretanto usada para comunicação, refletindo as ondas de rádio na ionosfera. A atividade solar altera o nível de ionização da alta atmosfera, modificando as frequências de reflexão.**

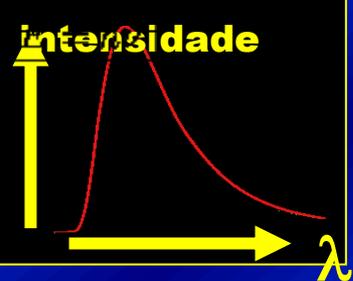
# DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO

- um objeto qualquer (**não importa o tamanho, forma, composição ou temperatura**) emite radiação em múltiplos comprimentos de onda ou frequências
- como descrever matematicamente como um corpo aquecido irradia energia? Quanto ele emite em cada  $\lambda$  ?

**Forma da distribuição da radiação emitida  
= CURVA DE CORPO NEGRO (PLANCK)**



**idealização matemática : um corpo que absorve toda a energia que incide sobre ele deverá re-emitir a mesma quantidade de energia que ele absorve para ficar em equilíbrio termodinâmico (ET) (absorvedor e emissor perfeito)**



a energia e-magnética só pode se propagar em quantas discretos (FÓTONS), cada um com energia: (Planck (1858-1947) determinou h).

$$E = h\nu$$

Onde h= constante de Planck  
 =  $6,626 \times 10^{-27}$  ergss ou  $6,626 \times 10^{-34}$  Js



**Dedução da forma(intensidade) do campo de radiação :**

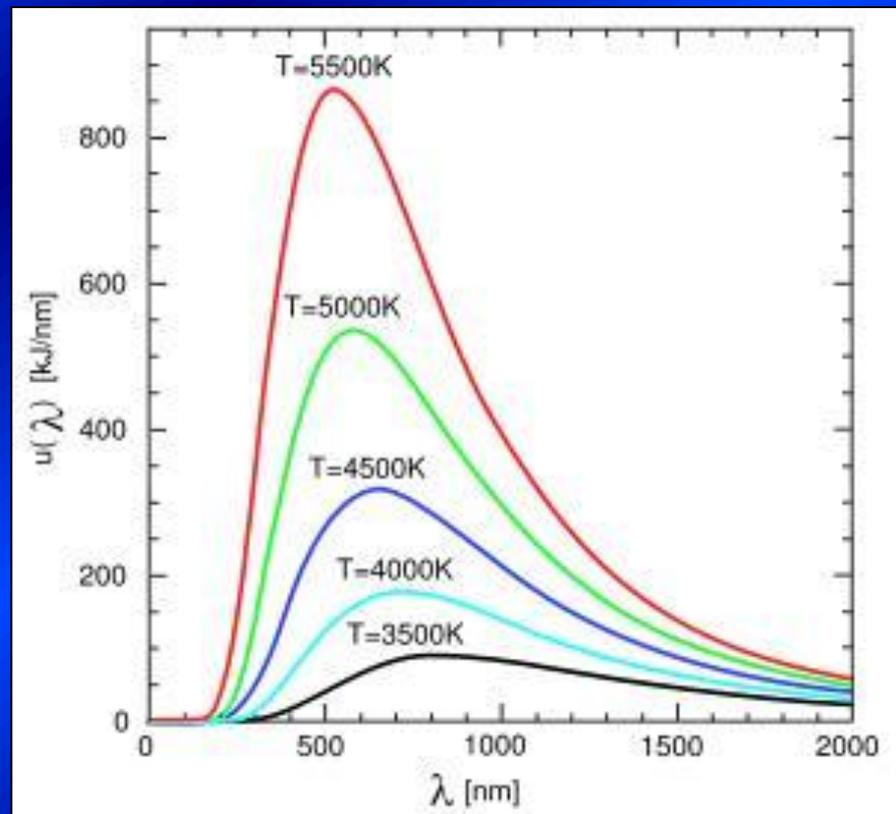
$B_\lambda(T)$  é a intensidade específica monocromática (energia/  $\lambda$  x t x área x ângulo sólido) de um corpo de temperatura uniforme T em ET com seu próprio campo de radiação (opaco).

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

ou

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

Onde k=é a constante de Boltzman =  $1,38 \times 10^{-16}$  ergs/K  
 $1,3806503 \times 10^{-23}$  m<sup>2</sup> kg/s<sup>2</sup> K



**Esta intensidade específica não depende de qualquer propriedade do corpo a não ser sua  $T$ .**

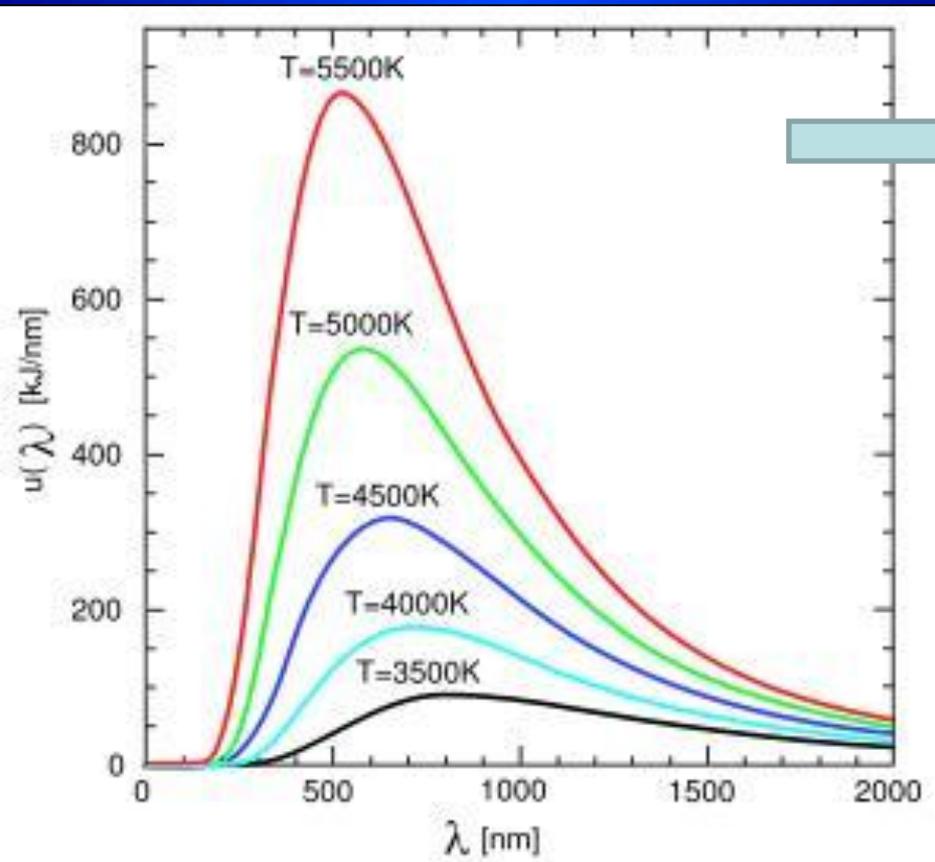
**Qualquer corpo em ET emitirá fótons com uma distribuição de comprimentos de onda dada pela Lei de Planck .**

**Esta radiação, chamada de *radiação de corpo negro*, não depende da direção de emissão e não é polarizada.**

**Estudando o comportamento de um objeto que emite/absorve como um corpo negro se entende melhor o que acontece com objetos reais.**

**kelvin = celsius + 273  
(zero absoluto = -273°C)**

## **PROPRIEDADES**

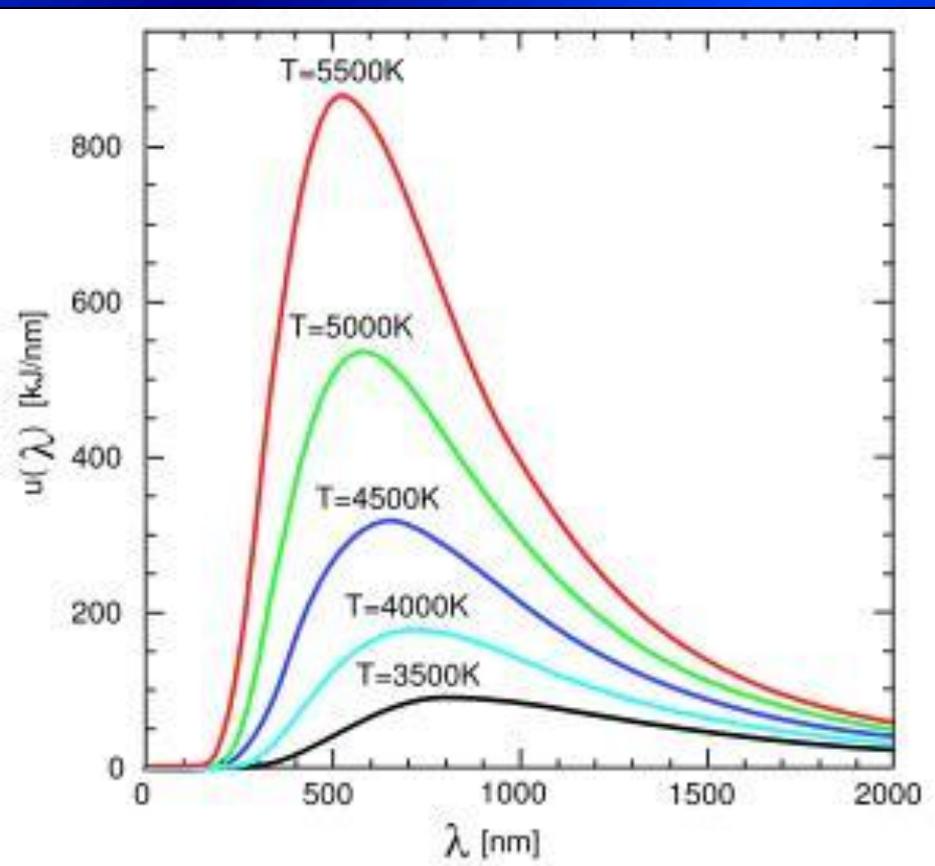


**O comprimento de onda em que a intensidade é máxima  $\lambda_{\text{max}}$  varia com a T**

**O máximo (e o mínimo) de qualquer função é dado para o ponto em que a derivada é nula.**

$$\frac{dB_{\lambda}(T)}{d\lambda} = 0$$

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2900\text{nm}}{T(10^3\text{K})}$$

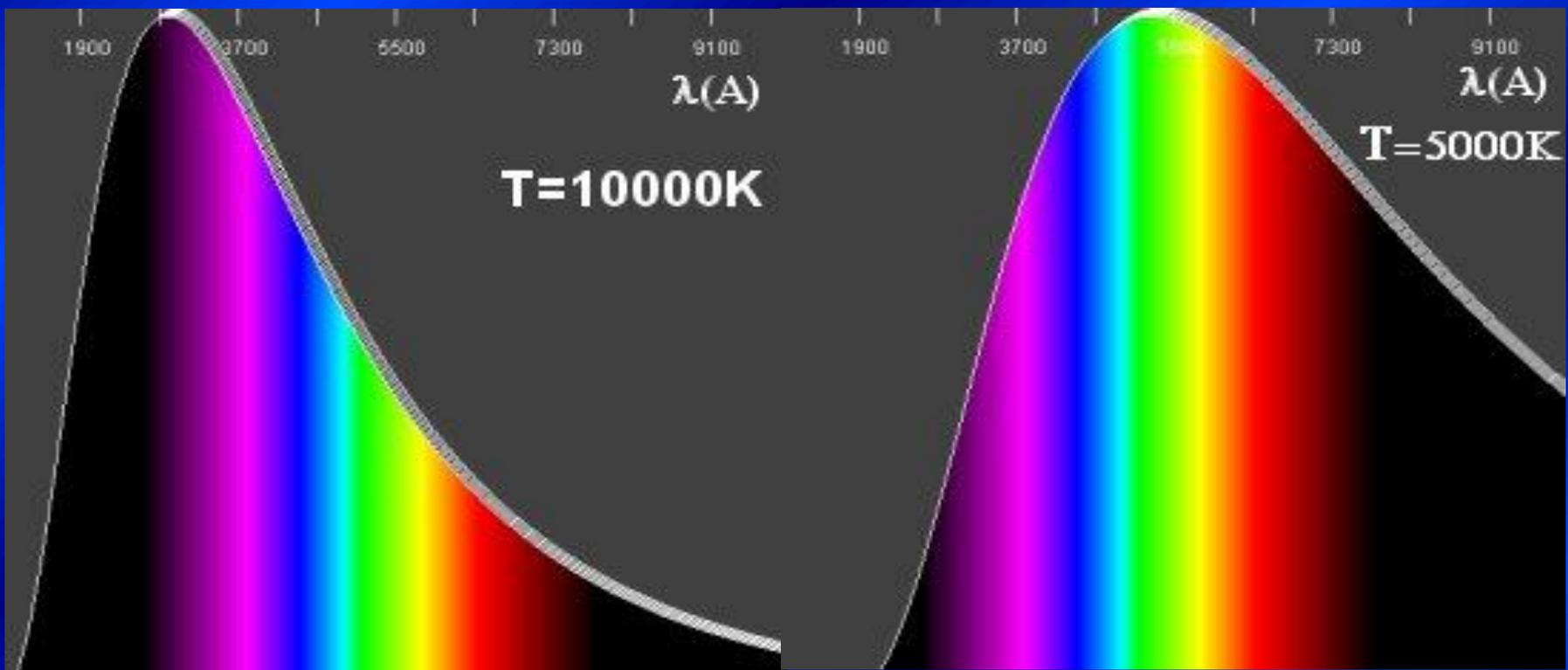


**Relação entre  $\lambda_{\text{max}}$  e temperatura = lei de Wien:**

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2900 \text{ nm}}{T (10^3 \text{ K})}$$

**Quanto maior T, menor  $\lambda_{\text{max}}$**

**Lei de Wien nos diz que quanto mais quente o objeto mais azul é a sua radiação, ou quanto mais frio mais vermelha é a sua radiação.**



## LEI DE STEFAN-BOLTZMANN

**Quando a T de um objeto cresce, a sua energia total irradiada cresce rapidamente.**

**Definindo como fluxo F a energia irradiada por unidade de área e por unidade de tempo que chega a um detector (quantidade realmente medida).**

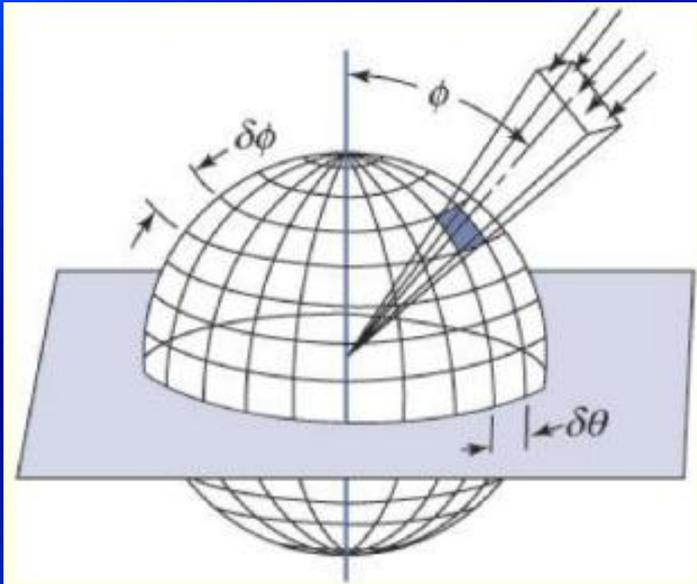
**Formalmente, o fluxo em uma certa frequência, em um dado ponto e em uma dada direção, é a quantidade líquida de energia radiante cruzando a unidade de área, por unidade de tempo, e por intervalo de frequência, ou seja:**

$$dF_{\nu} = \frac{dE \cos \theta}{dA dt d\nu}$$

# LEI DE STEFAN-BOLTZMANN

Quando a luz é emitida de uma fonte isotrópica (que emite igualmente em todas as direções), ela se expande esfericamente.

É como se a fonte estivesse no centro de uma esfera, composta de  $4\pi$  ângulos sólidos unitários, e cujo raio vai aumentando à medida que a luz se propaga. A energia que atravessa a unidade de área da fonte, por unidade de tempo e por unidade de ângulo sólido, é chamada intensidade específica:



$$dB_{\nu} = \frac{dE}{dA dt d\nu d\omega}$$

A unidade de ângulo sólido:  
 $d\omega = \sin\theta d\theta d\phi$

## LEI DE STEFAN-BOLTZMANN

Então  $F$  pode ser relacionado à intensidade específica como:

$$dF_{\nu} = \frac{dE \cos \theta}{dA dt d\nu} = B_{\nu} \cos \theta d\omega$$

Resolvendo a equação acima:

$$F = 2\pi \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta \int_0^{\infty} B_{\nu}(T) d\nu = \sigma T^4$$

## LEI DE STEFAN-BOLTZMANN

A energia total irradiada é proporcional a quarta potência da temperatura.

Energia total = energia somada em todos os  $\lambda$

$$F = \sigma T^4$$

$\sigma$  = constante de stefan-boltzmann

$$= 5,67 \times 10^{-5} \text{ ergs/cm}^2\text{K}^4\text{s} = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

F = energia por unidade de área e tempo ou potência por unidade de área.

**Na verdade  $T$  = temperatura efetiva da estrela  $T_{eff}$   
= temperatura da atmosfera da estrela**

**Definição = temperatura de um corpo negro que emite a mesma quantidade de energia por unidade de área e tempo.**

$$\lambda_{\max} = \frac{2900nm}{T_{eff} (10^3 K)}$$

$$F = \sigma T_{eff}^4$$

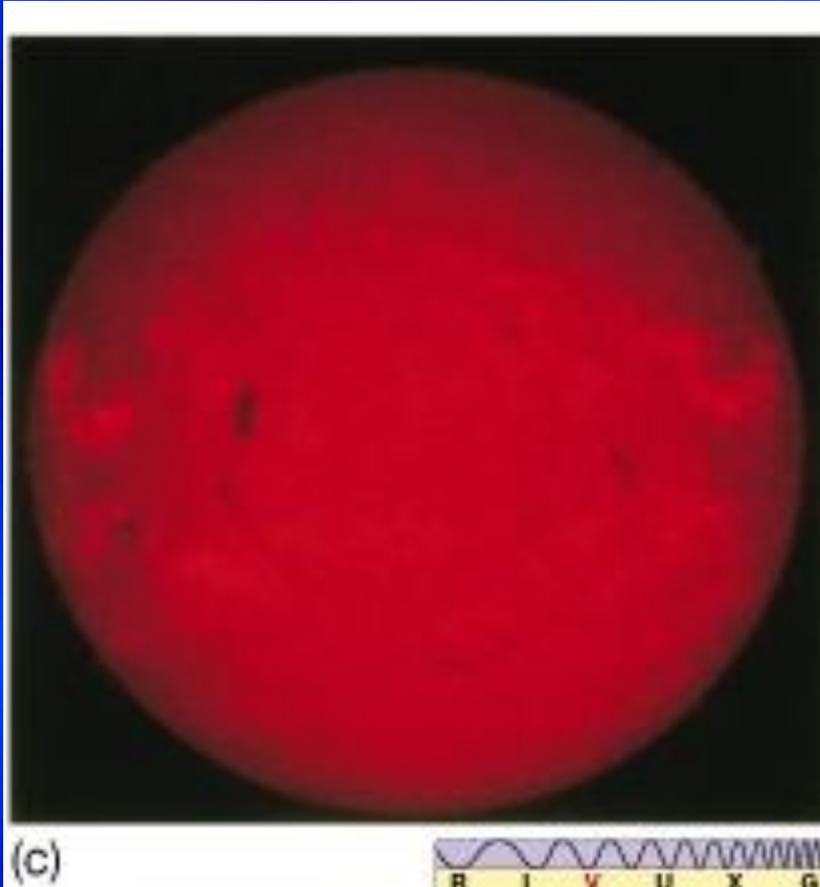
## APLICAÇÃO

Medindo a distribuição  
de radiação do sol :

$$\lambda_{\max} = 480 \text{ nm}$$

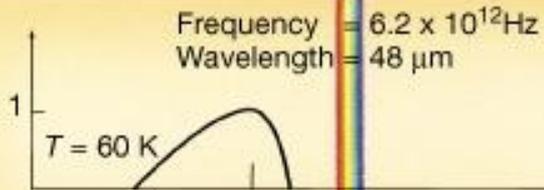


**Lei de Wien:  $T \sim 6000 \text{ K}$  é a  
temperatura na sua superfície**

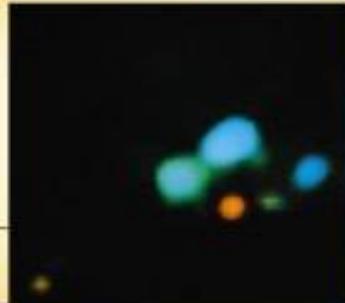
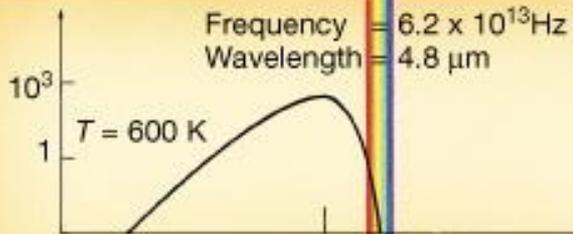


- Se  $T \sim 6000 \text{ K}$ , então cada metro quadrado do Sol irradia energia na taxa de  $\sigma T^4 = 6,4 \times 10^7 \text{ W}$  (64 MW).
- Sabendo o raio do Sol = 700.000 km temos a área total da sua superfície =  $4\pi R^2$ , multiplicando pelo fluxo temos a energia total emitida pelo Sol =  $4 \times 10^{26} \text{ W}$ .

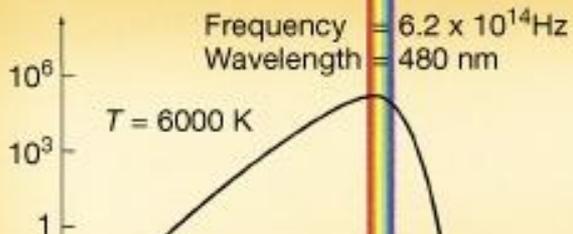
Infrared Visible spectrum Ultraviolet



**nuvem de gás frio  
 $\rho$ - Ophiucci**



**Estrela jovem  
(vermelho) no centro  
da nebulosa de órion**



**SOL**