

# Radiação Eletromagnética (cap. 4)

**Gustavo Guerrero**

**FIS004**

- **Introductory Astronomy & Astrophysics, M. Zeilek, S. A. Gregory & E. v. P. Smith (Cap. 2)**
- **Apostila, J. Gregorio-Hetem, V. Jatenco-Pereira, C. Mendes de Oliveira ([www.iag.usp.br/~dalpino/aga215](http://www.iag.usp.br/~dalpino/aga215))**
- **Agradecimentos: Elisabete M. de Gouveia Dal Pino**

- 1ª prova: 19 de abril
  - Mecânica do sistema solar, a terra e a lua, o sistema solar, radiação eletromagnética, linhas espectrais
- 2ª prova: ~22 de maio, ESTRELAS
  - Distancias e magnitudes, classificação espectral, estrutura e evolução, estágios avançados de evolução, estrelas variáveis
- 3ª prova: ~26 de junho
  - A via láctea, outras galáxias (normais e ativas), estrutura do universo, cosmologia.

# Radiação Eletromagnética

- **Luz emitida pelos objetos astronômicos:** chave para entendimento do Universo
- **Temperatura, composição química, movimento:** obtidos a partir da **Radiação Eletromagnética**

Luz que vemos: **começou sua jornada décadas, séculos, milhões de anos, bilhões de anos**

**Ceu nos mostra não apenas luz DISTANTE, mas luz de MUITO TEMPO ATRAS !**

- **Radiação eletromagnética:**
  - transporte de energia por flutuações do campo elétrico e magnético
  - Diferentes faixas espectrais: visível, IV, UV, rádio, raios-X, raios- $\gamma$
  - **Compreende-la antes de estudar emissão e física estelar**

# Natureza da Luz



- Natureza da luz foi um dos “motores” da física.
- Duas visões do século XVII:
  - Isaac Newton acreditava que a luz era **composta de partículas**
  - Christian Huygens acreditava que a luz era uma **onda**

**Luz:**

**Carater Corpucular ou  
Ondulatorio?**

**Veremos que AMBOS !  
DUALIDADE**

# Natureza da Luz: seu carater ondulatorio

- **Onda eletromagnetica:**

luz viaja por meio de ondas que **não precisam de meio fisico** para serem transportadas (diferente de ondas sonoras, agua, ondas sismicas, etc.)

## **Carater ondulatorio:**

Similar a pedra lançada na agua – esta forma ondas circulares que deslocam folha proxima:

ENERGIA e informação – transportadas do lugar onde pedra foi lançada ate o local da folha pela onda

## **Onda não é objeto fisico:**

nenhuma agua viajou da pedra até a folha – superficie da agua oscilou à medida que ONDA passava

## **O que se moveu?**

Onda é o padrao de movimento: sobe-desce (**oscilatorio**) que se move através da superficie da agua



# Onda: Movimento Oscilatorio

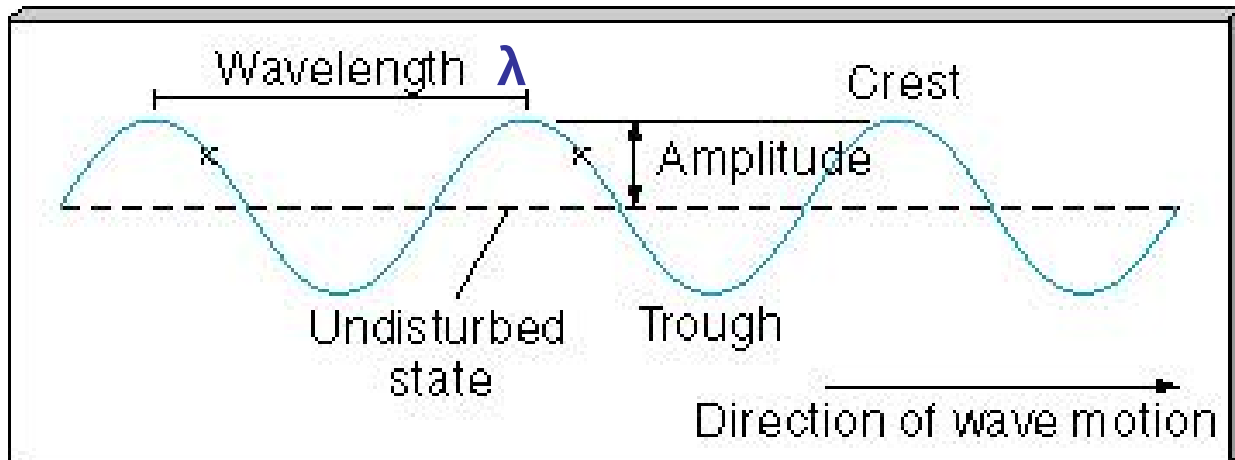
Propagação de uma onda de **amplitude H**, **velocidade v**, e **comprimento da onda  $\lambda$**  :

$$h = H \operatorname{sen} \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (x - v t) \right]$$

$\Rightarrow$  **fixando  $t=0$**   $\Rightarrow$   $h = H \operatorname{sen} \left[ \frac{2\pi x}{\lambda} \right]$

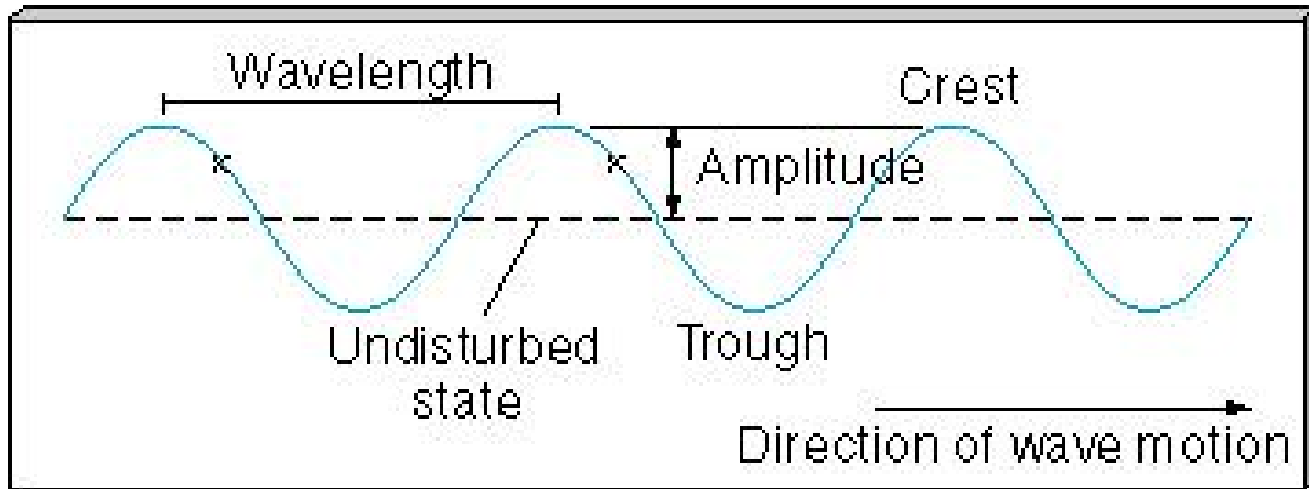
$x = \frac{\lambda}{4} \Rightarrow$   **$h = H$**

O primeiro máximo será dado por



Novo maximo quando:  $x = \frac{\lambda}{4} + \lambda \Rightarrow$   **$h = H$**

# Onda: movimento oscilatorio



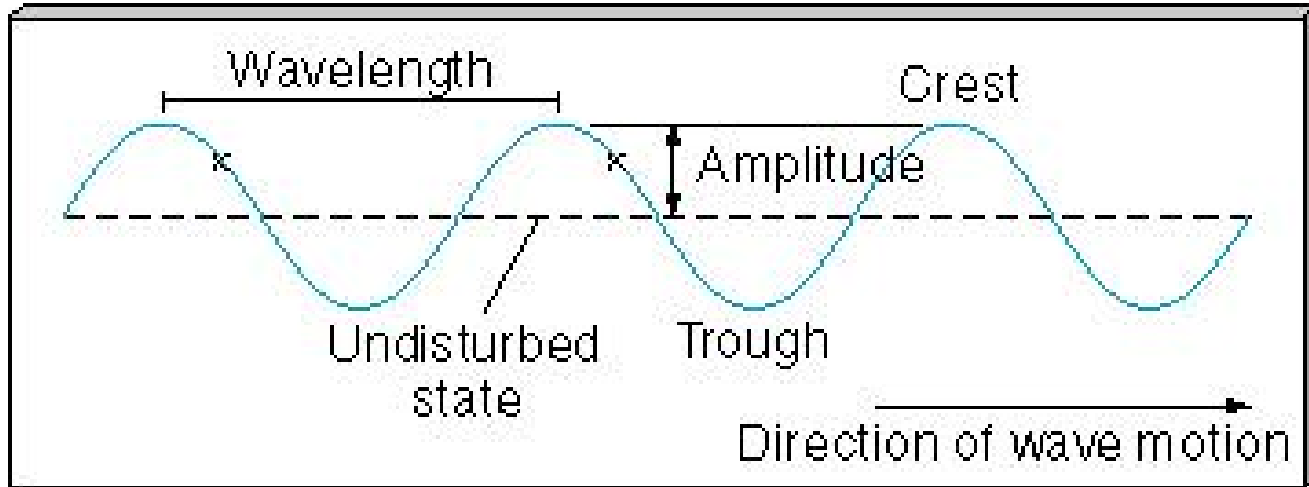
⇒ **evolução no tempo** :  $h = H \operatorname{sen} \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (x - v t) \right]$

⇒ **fixando** ⇒  $x = \frac{\lambda}{4}$  ⇒  $h = H \operatorname{sen} \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{\lambda}{4} - v t \right) \right]$  ⇒  $h = H \operatorname{sen} \left[ \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{\lambda} v t \right]$

**Máximos  $h=H$ : em  $t=0$  e  $t = \frac{\lambda}{v}$  ⇒ PERÍODO**  
 $v = \frac{v}{\lambda}$  ⇒ **FREQÜÊNCIA**



# Onda eletromagnetica: LUZ



$\lambda$  : comprimento de onda - distancia entre dois maximos (cristas)

$$P = \lambda/c \Rightarrow \text{PERÍODO}$$

$c$  : velocidade da Luz no vacuo

$$\nu = 1/P = c/\lambda \Rightarrow \text{FREQUÊNCIA}$$

# Velocidade da Luz

- Velocidade da luz é medida pela 1ª vez em 1675 por Ole Roemer:
  - Utilizou observação de eclipses das luas de Júpiter:
    - Os eclipses ocorriam antes do previsto quando a Terra estava mais próxima de Júpiter e após o previsto quando a Terra estava mais longe.
    - Diferença devido ao tempo necessário para a luz se propagar.
- Hoje:
  - A velocidade da luz no vácuo,  $c$ , é uma constante da natureza e seu valor é

$$c = 299.792,458 \text{ km/s}$$

# Natureza da Luz: seu caráter ondulatorio

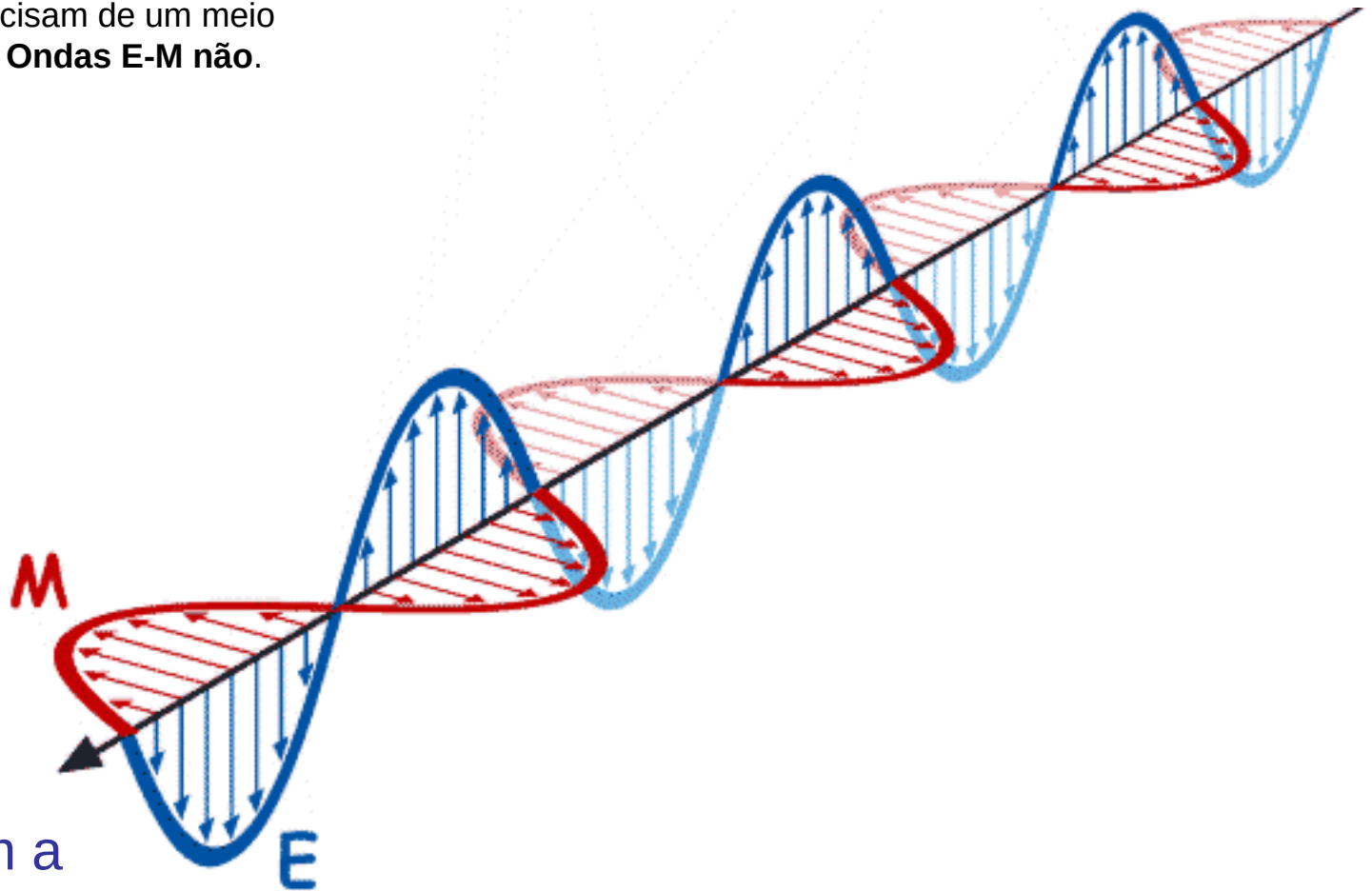
## Onda electromagnética:

- Uma carga em repouso gera um campo elétrico em sua volta.
- Se esta carga estiver em movimento acelerado, o campo elétrico, em uma posição qualquer, estará variando no tempo e gerará um campo magnético que também varia com o tempo.
- Estes campos, em conjunto, constituem uma **onda eletromagnética**, que se propaga mesmo no vácuo.

# Radiação eletromagnética

. Oscilação dos campos elétrico e magnético (plano de oscilação)

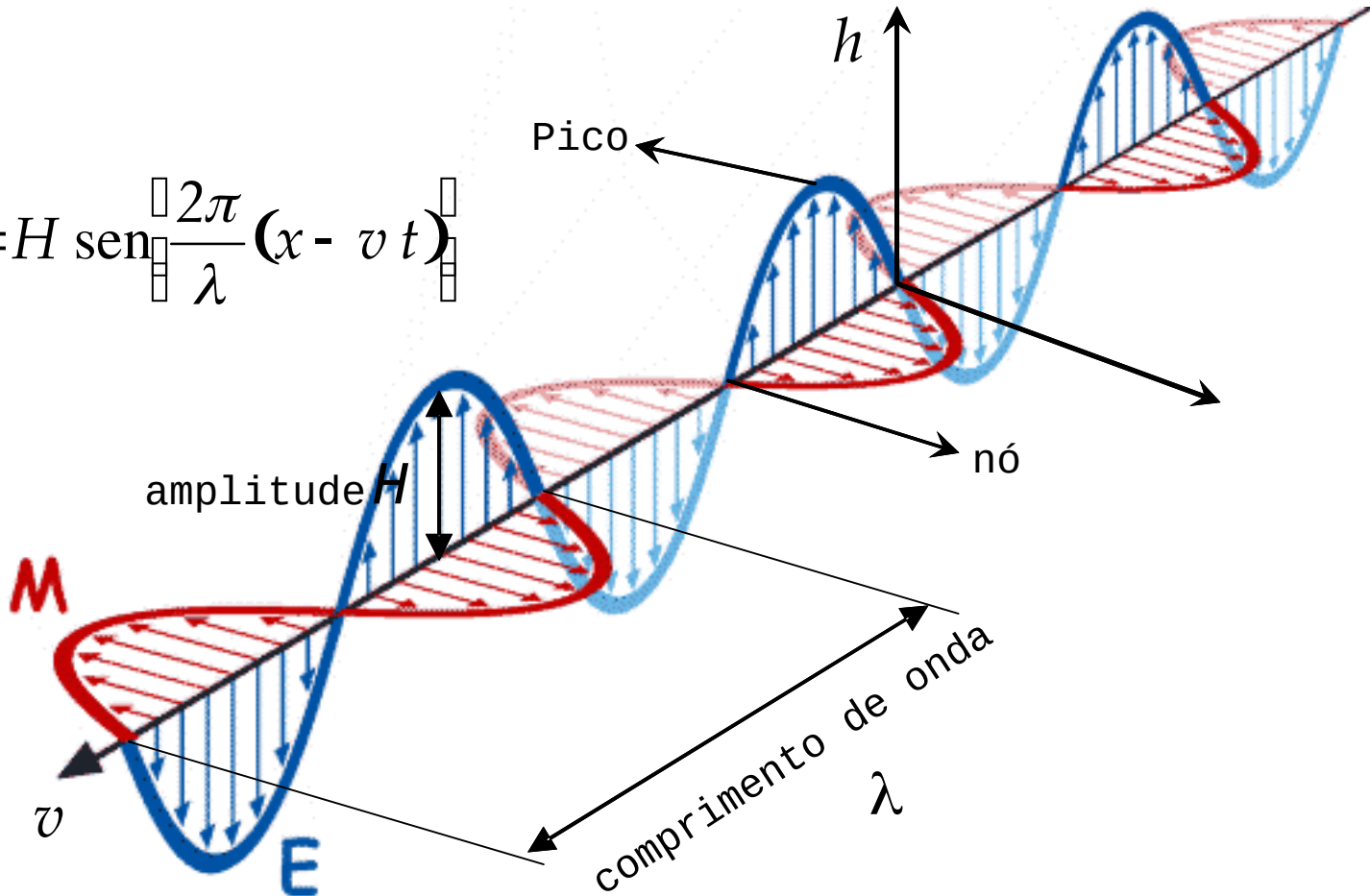
- eles são perpendiculares;
- as ondas são transversais.
- ondas mecânicas precisam de um meio  $p/$  se propagarem. **Ondas E-M não.**



propagação com a  
velocidade da luz

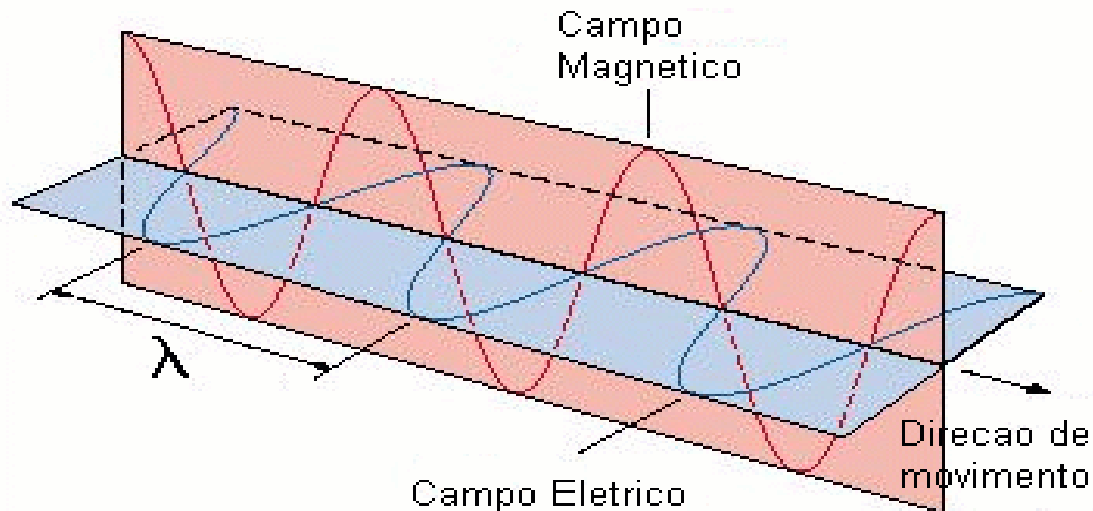
# Ondas eletromagnéticas

$$h = H \operatorname{sen} \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) \right]$$



# Ondas eletromagnéticas

- Campos elétrico e magnético vibram em planos perpendiculares entre si com velocidade  $c$ .
- A direção de oscilação do campo elétrico (ou magnético) e a direção de propagação definem o plano de polarização.
- Permite conhecer o meio por onde a radiação se propaga.



Se  $E$  sempre oscila no mesmo plano: luz plano-polarizada

# Ondas eletromagnéticas

- Variáveis básicas:
  - $\lambda$  : comprimento de onda
  - $\nu$  : frequência
  - $v$  : velocidade de propagação

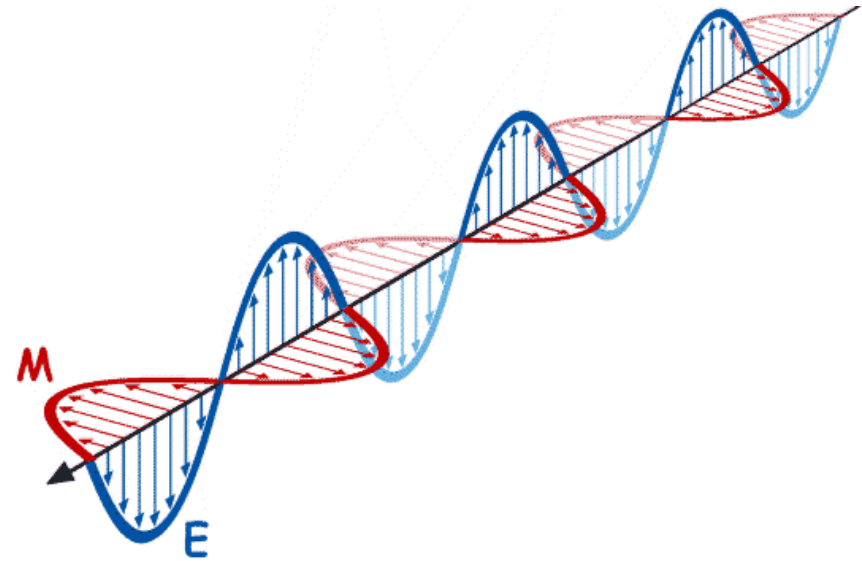
- Para radiação eletromagnética:

$$v = c \text{ (velocidade da luz)}$$

$$\lambda \cdot \nu = c$$

- $\lambda$  é medido em **unidade de comprimento**:

- $\nu$  é medida em **unidade de frequência**, i.e., [1/tempo]  
Hertz, megahertz, gigahertz, etc...



$$\mu = \text{micrômetro} = 10^{-6} \text{ m}$$

$$\text{nm} = \text{nanômetro} = 10^{-9} \text{ m}$$

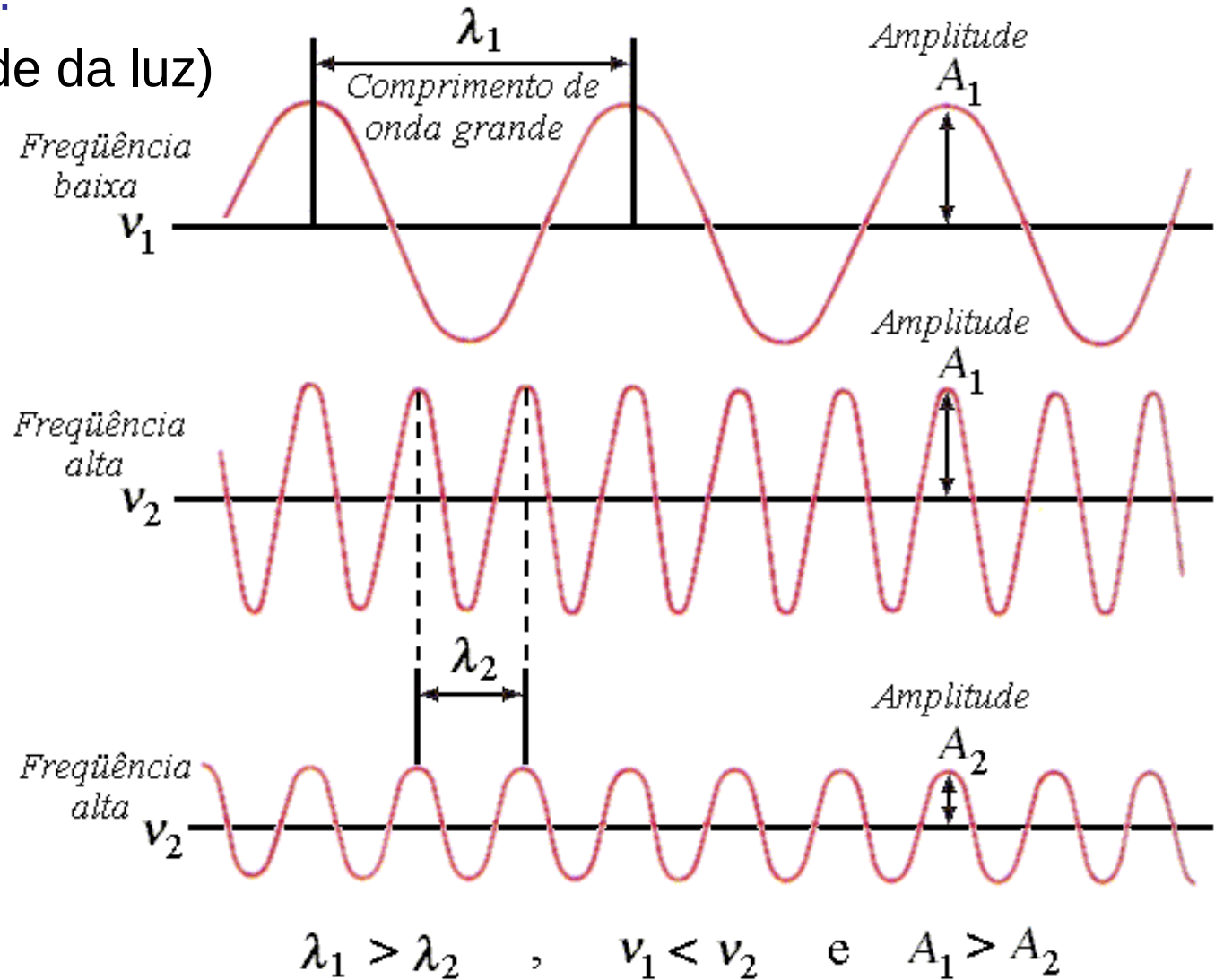
$$\text{Å} = \text{Angstrom} = 10^{-10} \text{ m}$$

# Ondas eletromagnéticas

- Para radiação eletromagnética:

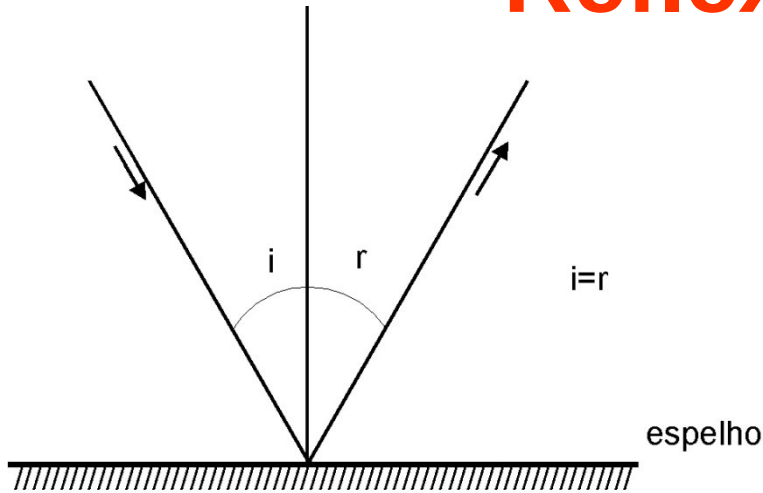
$$v = c \text{ (velocidade da luz)}$$

$$\lambda \nu = c$$





# Reflexão e Refração



## Reflexão:

luz ao incidir em espelho

ângulo de incidência = ângulo de reflexão

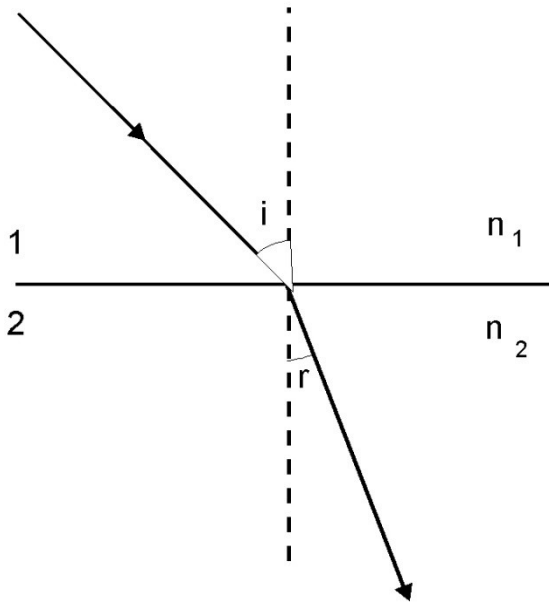
## Refração:

Quando a luz propaga atravessando diferentes meios, ela sofre **refração**, mudando de velocidade em função dos diferentes **índices de refração ( $n$ )**.

Se  $n_2 > n_1$ , temos:

$$n_1 \text{ sen } i = n_2 \text{ sen } r$$

→ lei de Snell-Descartes → luz é distorcida ou refratada:



Exemplos do caminho da luz em telescópios refletores e refratores.

# Velocidade da Luz em diferentes meios

Refração:

$$v = c/n$$

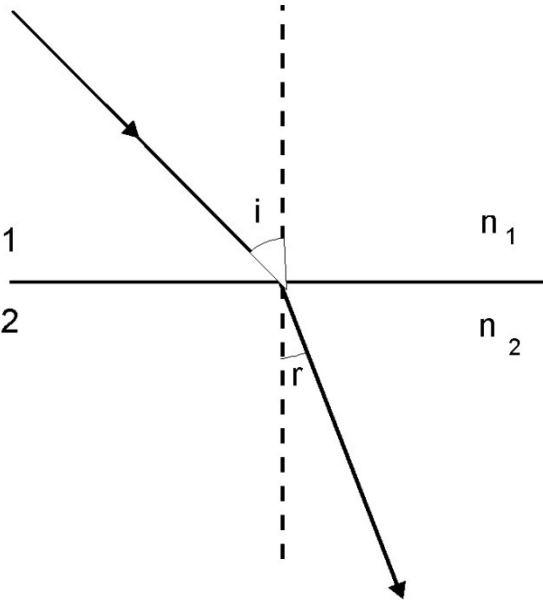
Vacuo:  $n = 1$

Ar:  $n = 1,0003$

Vidro:  $n = 1,5$

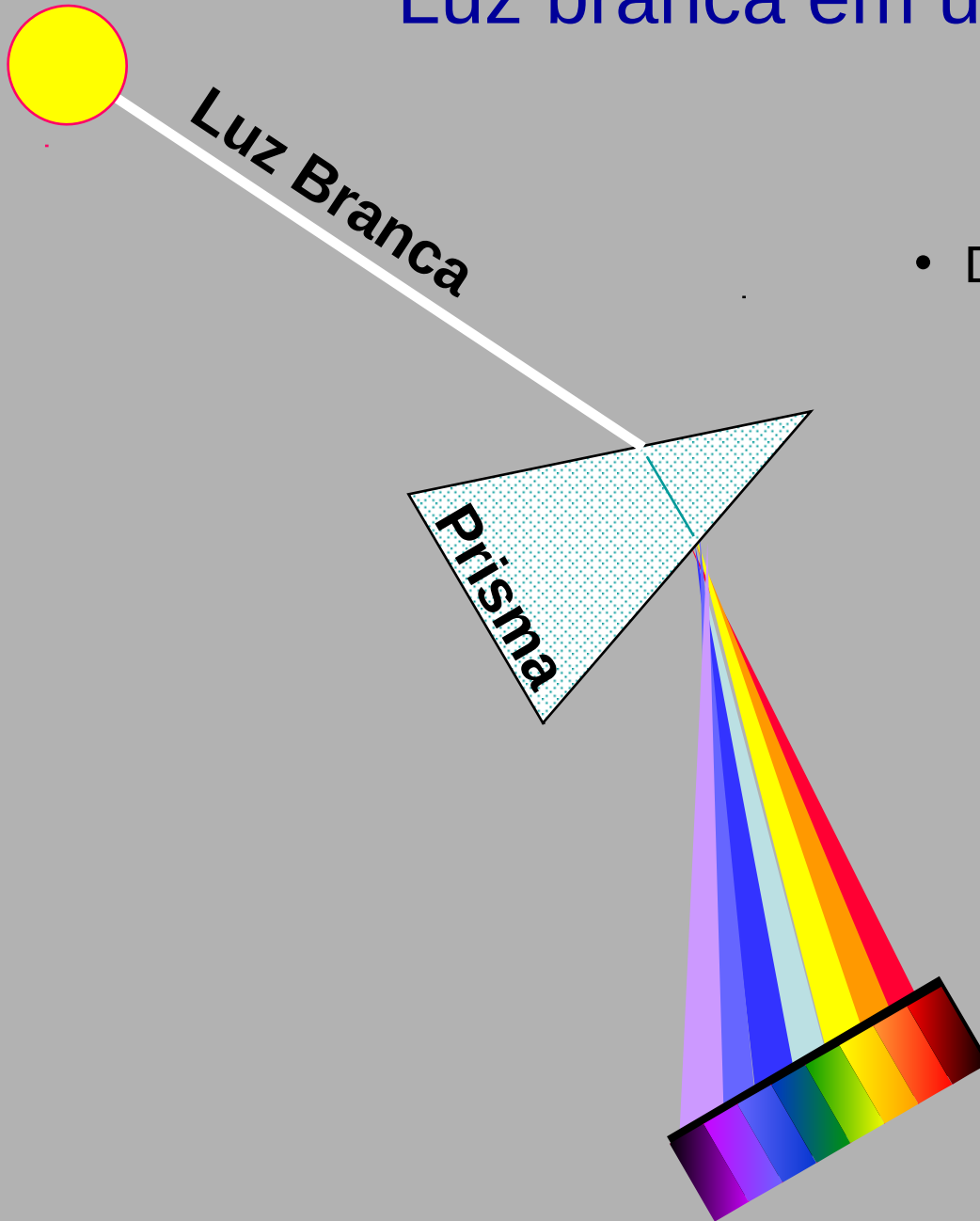
Índice de refração depende de  $\lambda$ :

$$n = n(\lambda)$$



→ Quando luz **BRANCA** (mistura de cores) atravessa **PRISMA**:  
decomposta em vários  $\lambda$ s (diferentes cores)

# Luz branca em um prisma

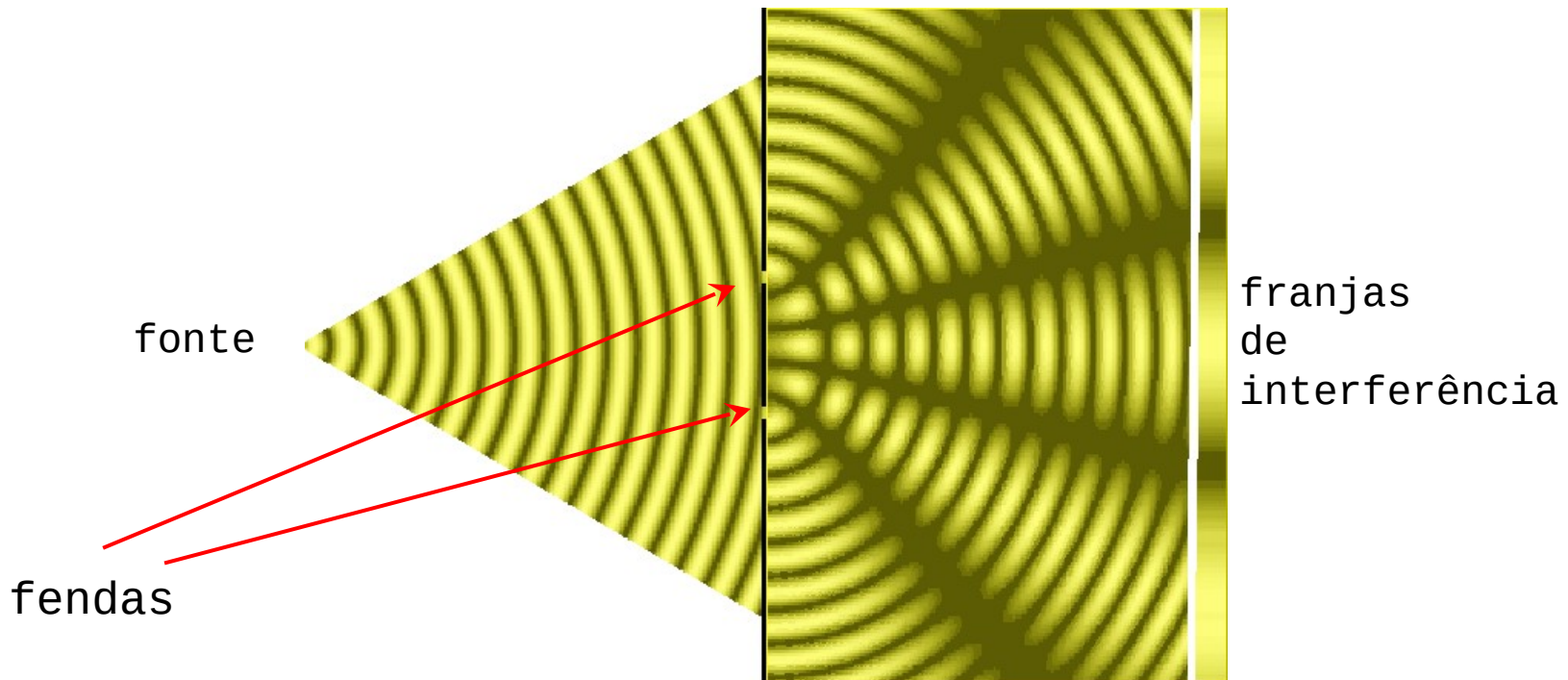


- Decomposição da luz
  - Um prisma separa (refrata) a luz branca nas cores do arco-íris (nos diferentes  $\lambda$ s).

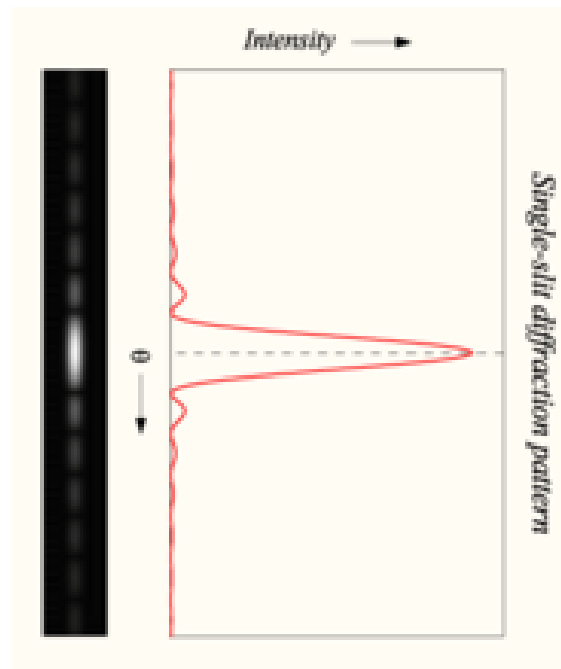
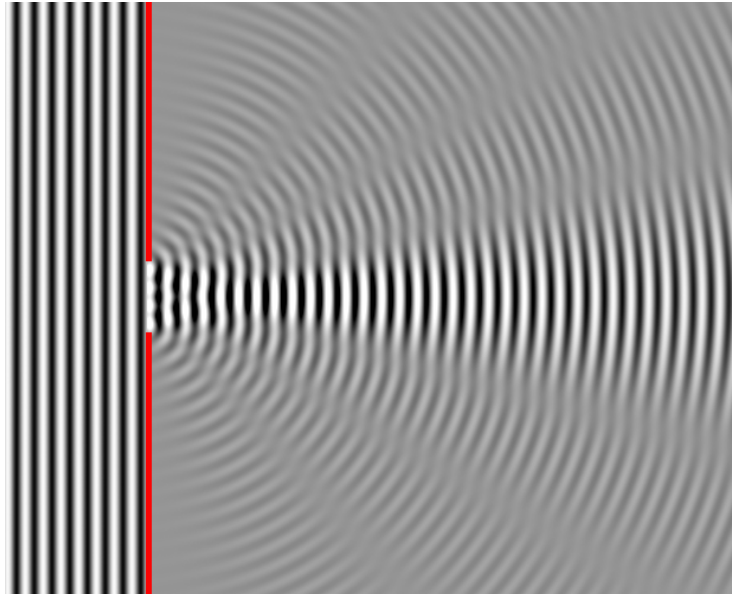
**Espectro  
contínuo**

# Luz: Difração e Interferência

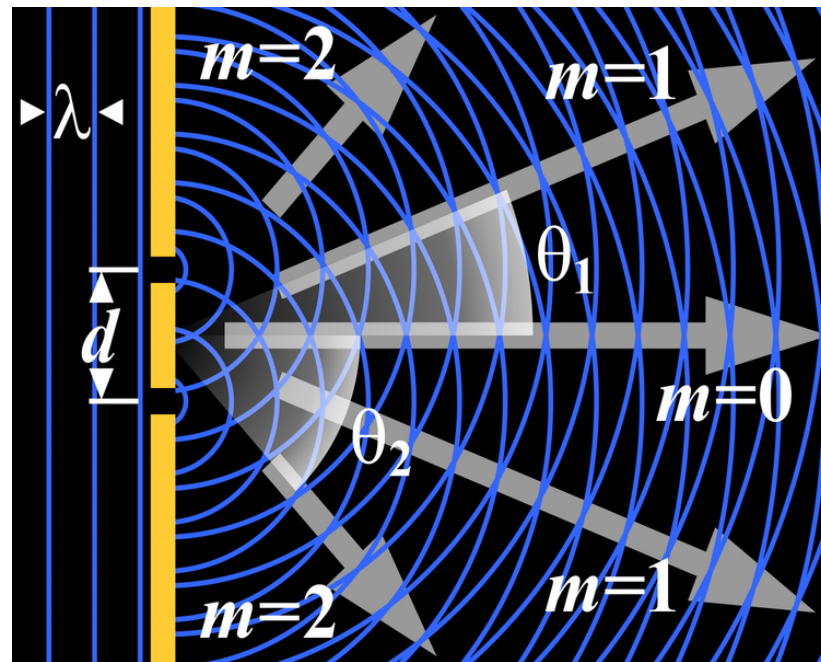
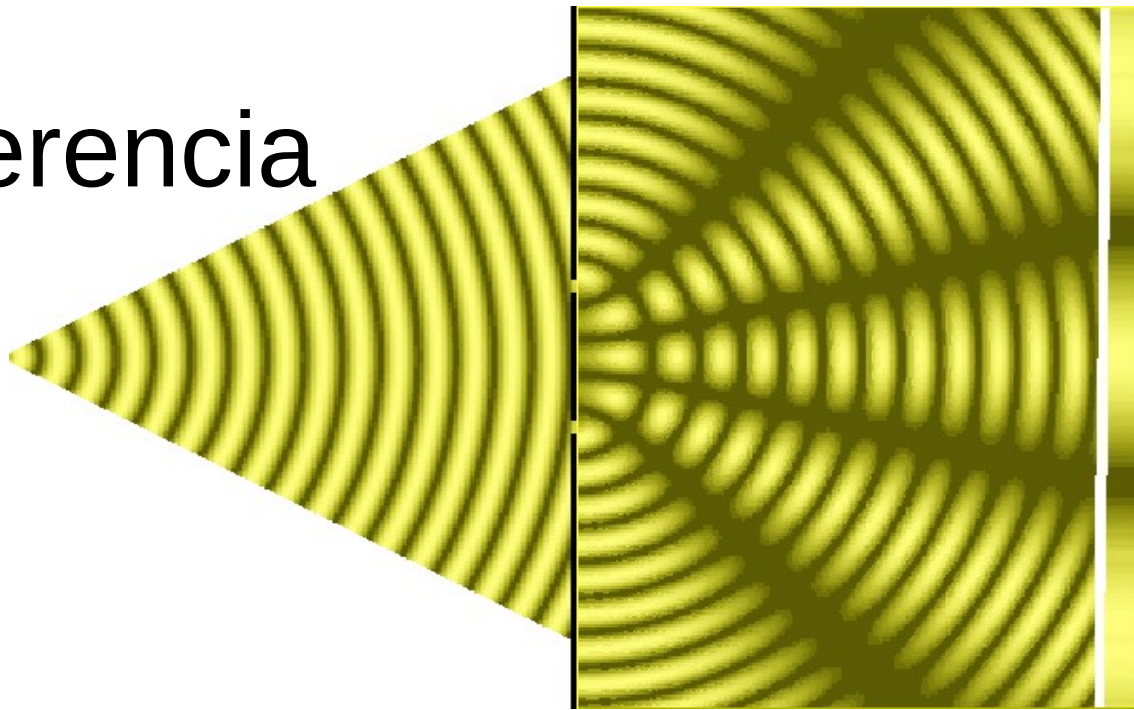
- **Thomas Young** realiza a experiência da fenda dupla, mostra o fenômeno de **interferência** da luz e conclui sobre sua natureza ondulatória.
- Tal como água: ondas de luz quando encontram obstáculo (1 fenda): **difratam**. Quando convergem encontrando outras: **interferem**
- **Interferência de 2 ondas passando por 2 fendas:**



# Difracao



# Inteferencia



# Difração

A intensidade da luz que passa pela fenda está dada por

$$I \propto E^2$$

Em um ponto arbitrário da tela  $E = E_0 [\sin(a) + \sin(a+b)]$

O ângulo de fase  $b$  corresponde à diferença de caminhos das ondas provenientes das duas aberturas. A intensidade ficaria

$$I \propto E_0^2 [\sin^2(a) + \sin^2(a+b) + 2 \sin(a) \sin(a+b)]$$

A largura angular do ângulo de difração principal é

$$\theta \simeq \lambda / d$$

$\lambda$  : Comprimento de onda

$d$  : Apertura da fenda

Limite de difração – resolução angular

E.X. a resolução de um telescópio de  $d=1$  m no comprimento de onda de 500 nm

$$\theta \simeq 500 \text{ nm} / 10^9 \text{ nm} = 0.1 \text{ arcsegundo}$$

# Efeito Doppler

Fonte emissora desloca-se em relação ao observador.

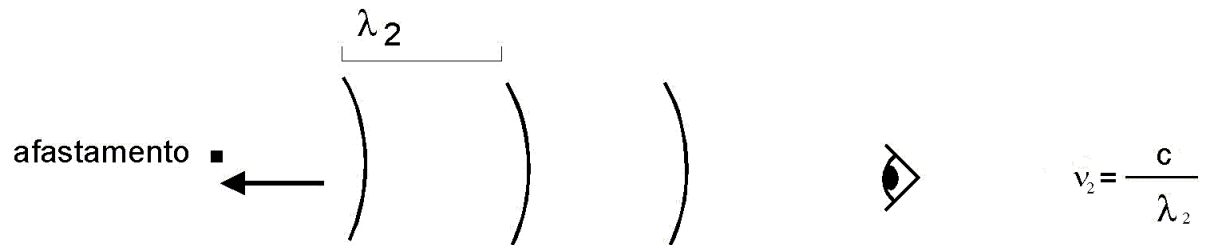
Fonte em repouso, emitindo luz a um comprimento de onda  $\lambda_0$ .



Fonte aproxima-se do observador:  $\Rightarrow$  comprimento de onda observado será menor ( $\lambda_1 < \lambda_0$ ).



Fonte afasta-se: comprimento de onda observado será maior ( $\lambda_2 > \lambda_0$ ).

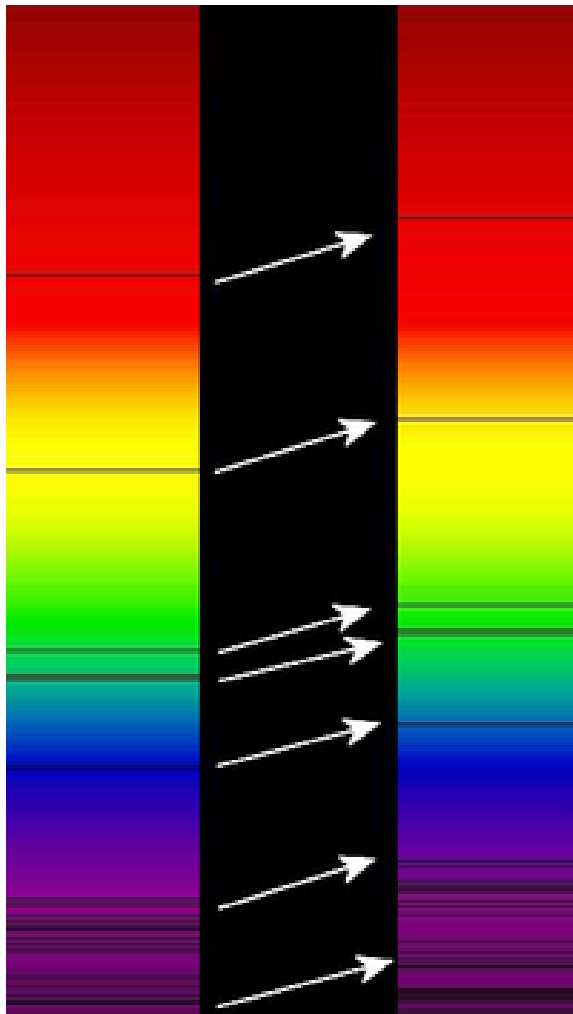




# Desvio para o vermelho

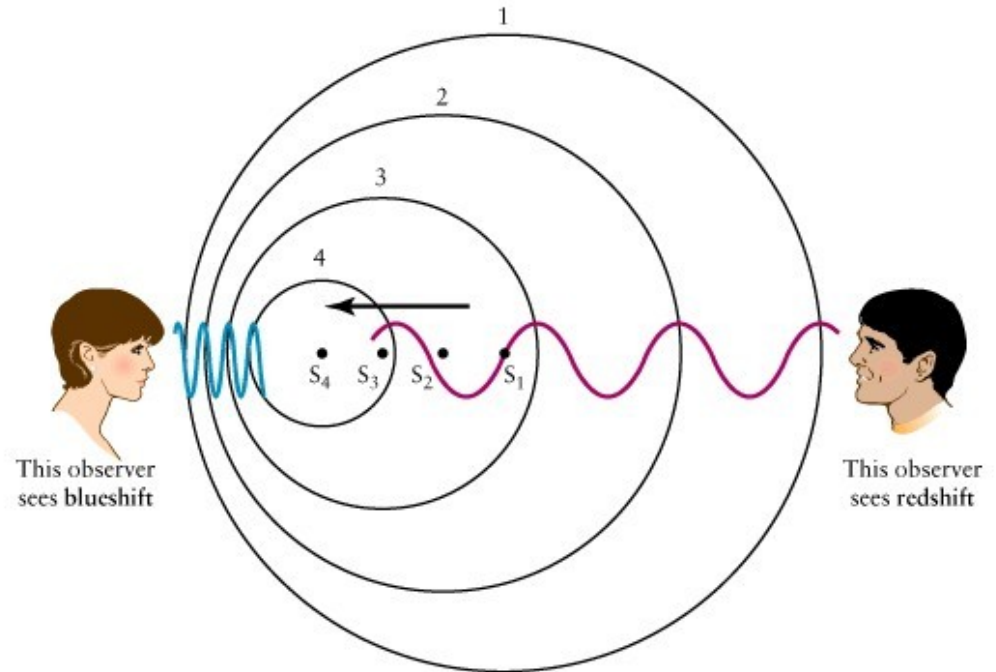
Para velocidades não-relativísticas (fonte com  $v \ll c$ )

repouso                      afastamento

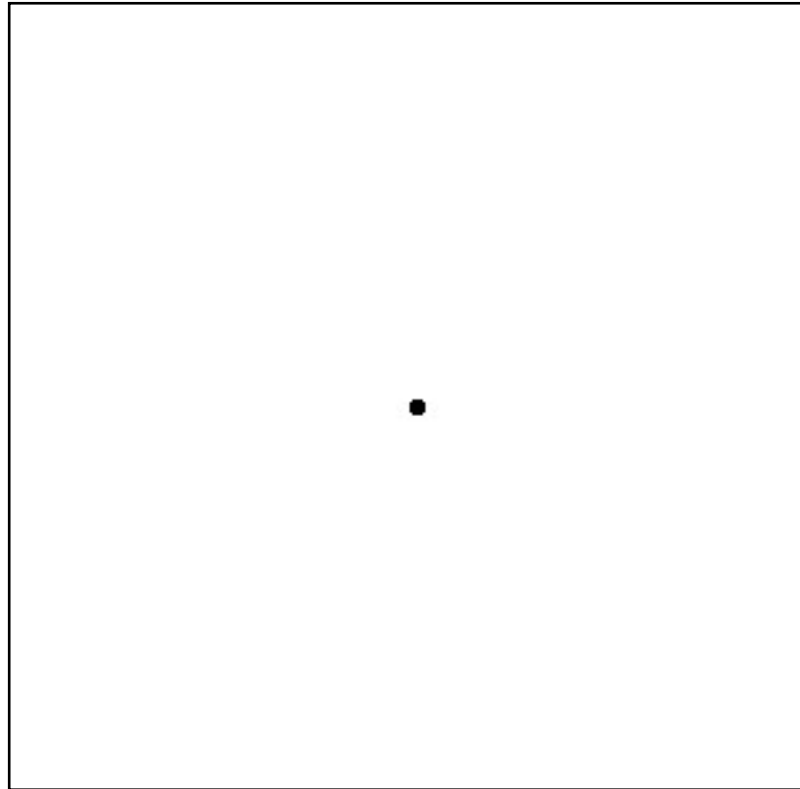


$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_0 \left( \frac{v}{c} \right)$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$



# Desvio para o vermelho



**Desvio para o  
vermelho**

$$\lambda > \lambda_0$$

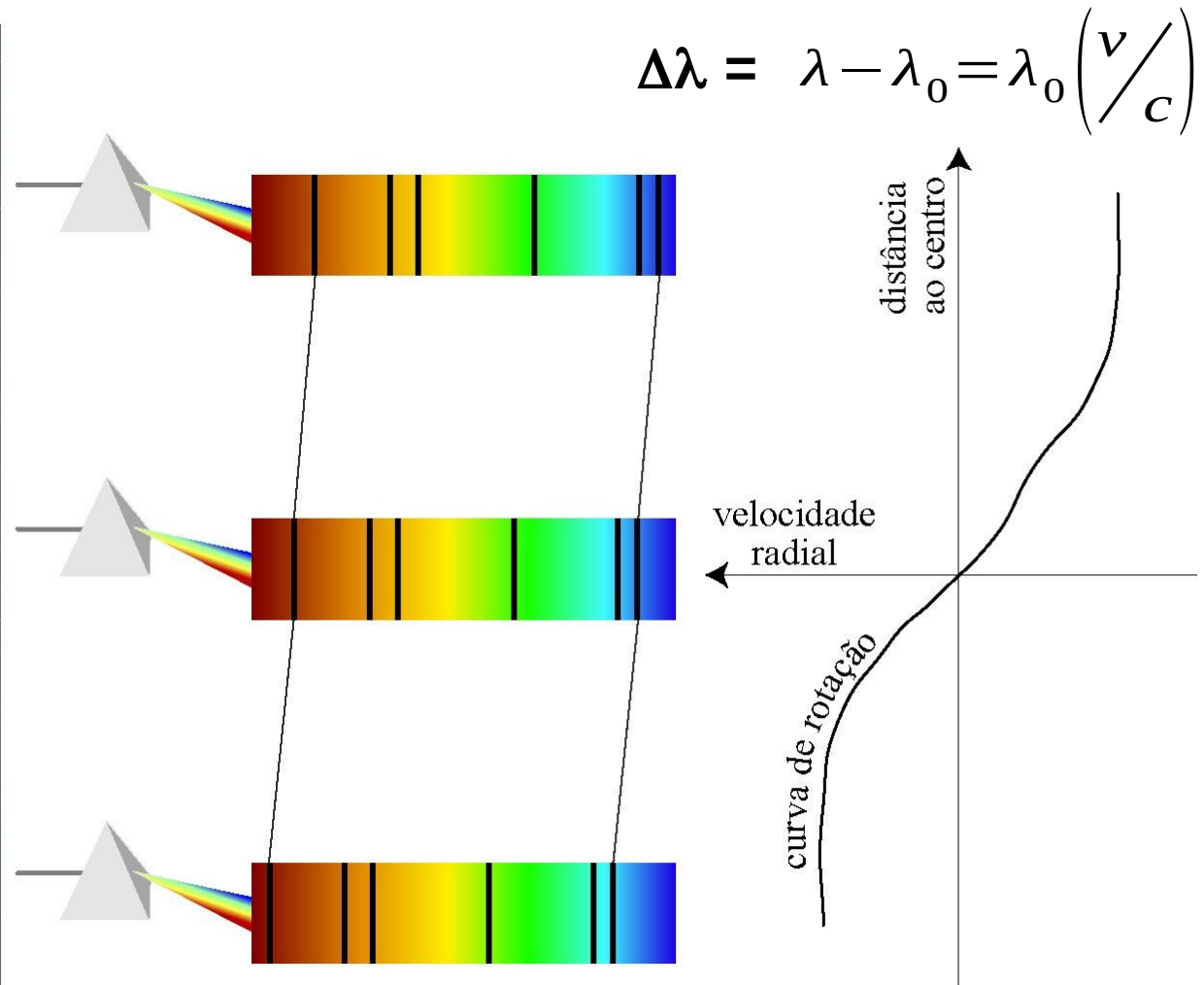
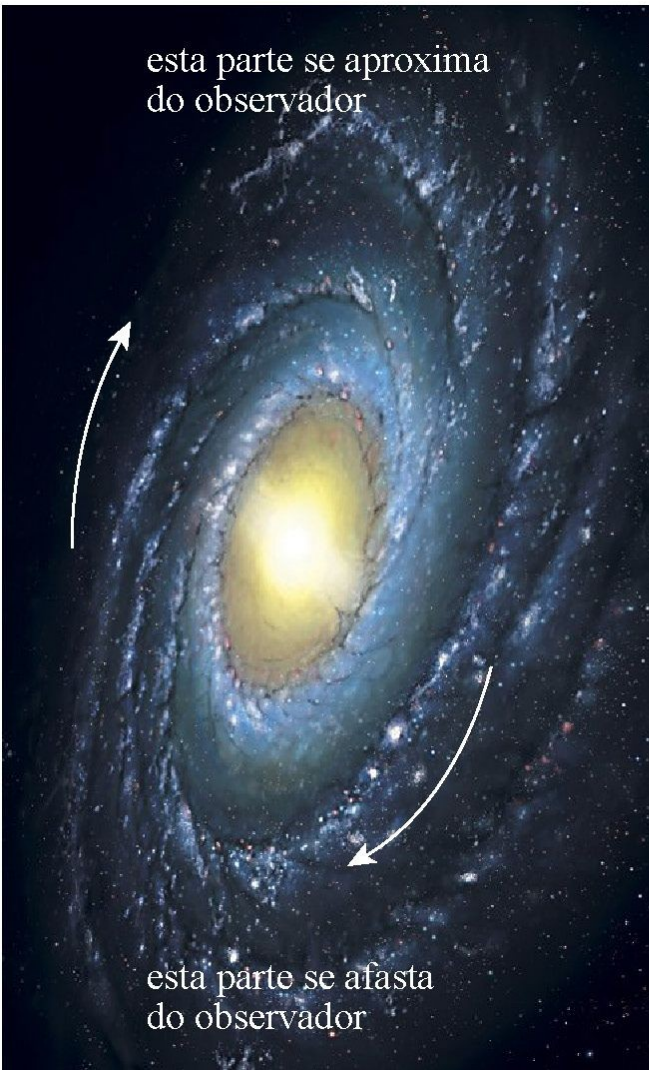
**Velocidade  
positiva**

**Desvio para o  
azul**

$$(\lambda < \lambda_0).$$

**Velocidade negativa**

# Rotação: efeito doppler



- Efeito doppler usado para determinar a rotação de um objeto.

# Natureza corpuscular da Luz: FOTON

- Quando luz interage com materia (atomos ou moleculas): comporta-se como pacote discreto: **Quantum de luz ou energia = fóton**
- Energia do fóton é proporcional à freqüência da radiação eletromagnética:  
**energia = freq  $\times$   $h$  ou  $E = h \nu$**
- $h$  é a constante de Planck:

$$\begin{aligned}h &= 6,62607 \times 10^{-34} \text{ joule} \times \text{segundo} \\ &= 6,62607 \times 10^{-27} \text{ erg} \times \text{segundo}\end{aligned}$$

Exemplo luz verde:

- $\lambda = 510 \text{ nm}$  ou  $5100 \text{ \AA}$  ou  $0,00051 \text{ mm}$
- $\nu = 5,878 \times 10^{14} \text{ Hz}$  ou  $587.828 \text{ GHz}$
- $E = 3,895 \times 10^{-12} \text{ erg}$  ou  $9,3 \times 10^{-20} \text{ calorias}$  ou **2,43 eV**

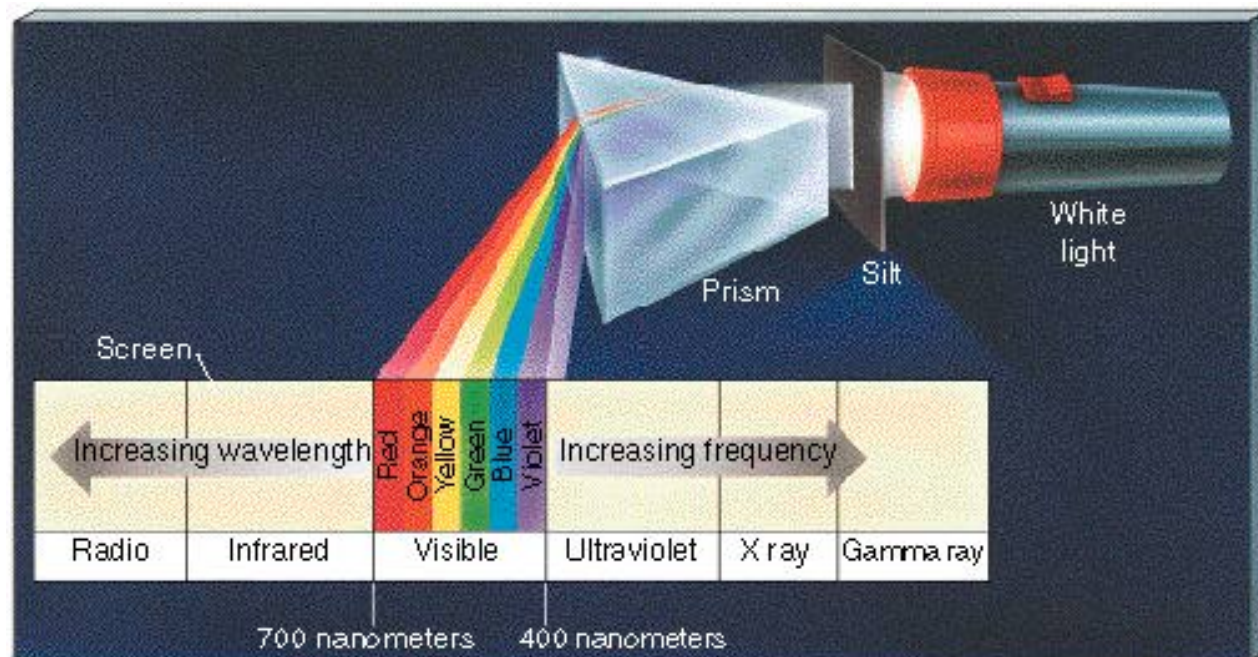
**eV = eletrivolt, energia de um elétron que passa por uma diferença de potencial de 1 volt.**

# Espectro Eletromagnético

Luz que chega das estrelas na forma de ondas eletromagnéticas pode ser estudada por:

**Sua intensidade** em dada faixa do espectro:  $I(\lambda)$

Ou na forma de luz dispersada em um **espectro**



# O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Penetra a atmosfera?



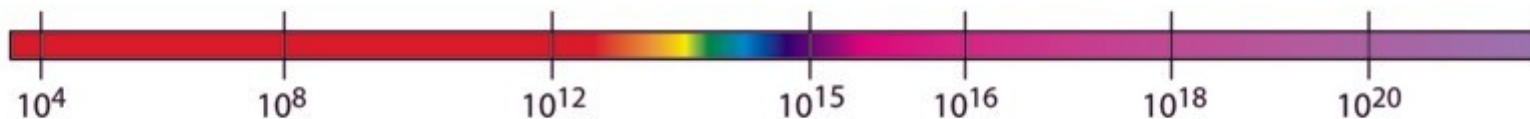
Comprimento de onda ( $\lambda$ ) - em metros



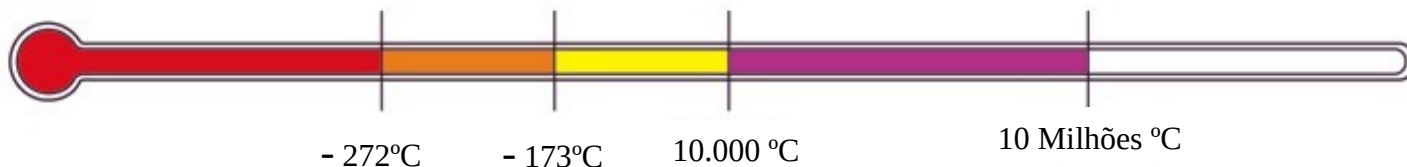
Do tamanho de...



frequência - em Hertz



Temperatura - em Celsius



# Espectro Eletromagnético

**Baixas frequências ( $\lambda$  grandes):** à esquerda da luz visível

**Radio** (AM, FM, TV)

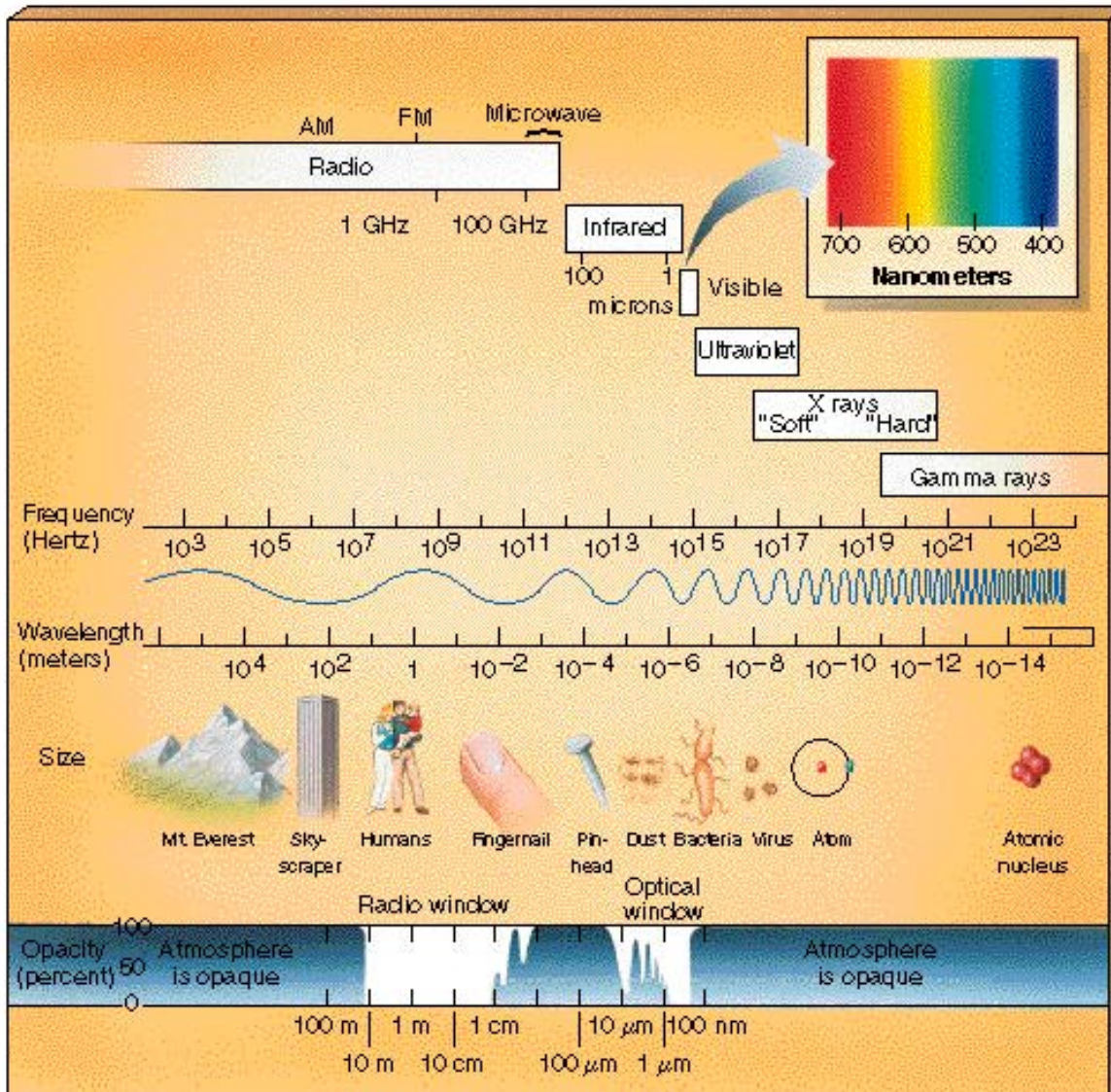
**IV:** percebemo-lo como calor

**Altas frequências ( $\lambda$ s pequenos):** à direita do visível:

**UV:** bronzeamento e queimaduras solares

**raios-X:** penetram tecido humano

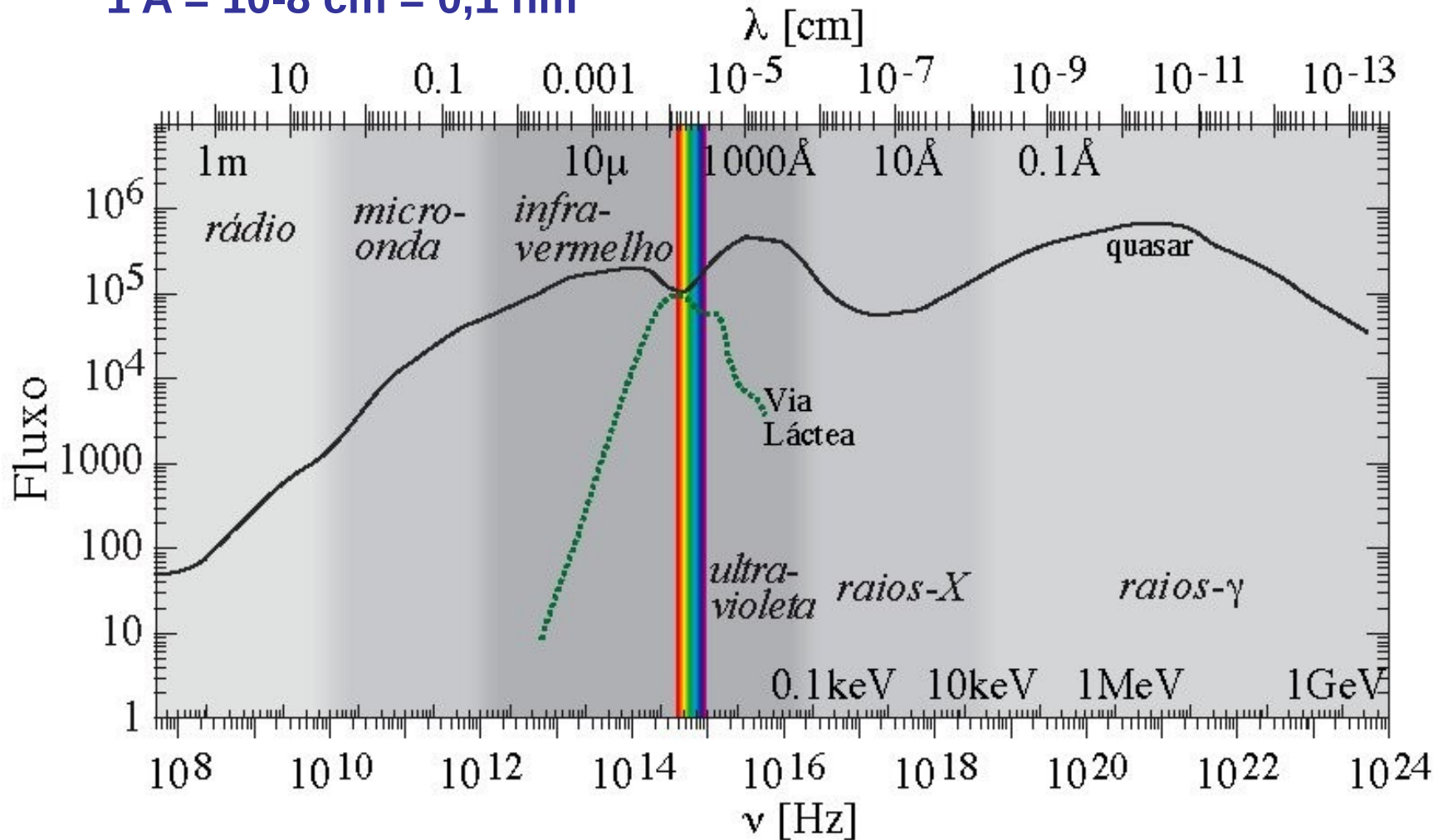
**raios- $\gamma$ :** menores  $\lambda$ s, associados a radio-atividade, danosos a células vivas



# Espectro eletromagnético

**VISIVEL:** do violeta ao azul: 3900 A a 7200 A

**1 A = 10<sup>-8</sup> cm = 0,1 nm**

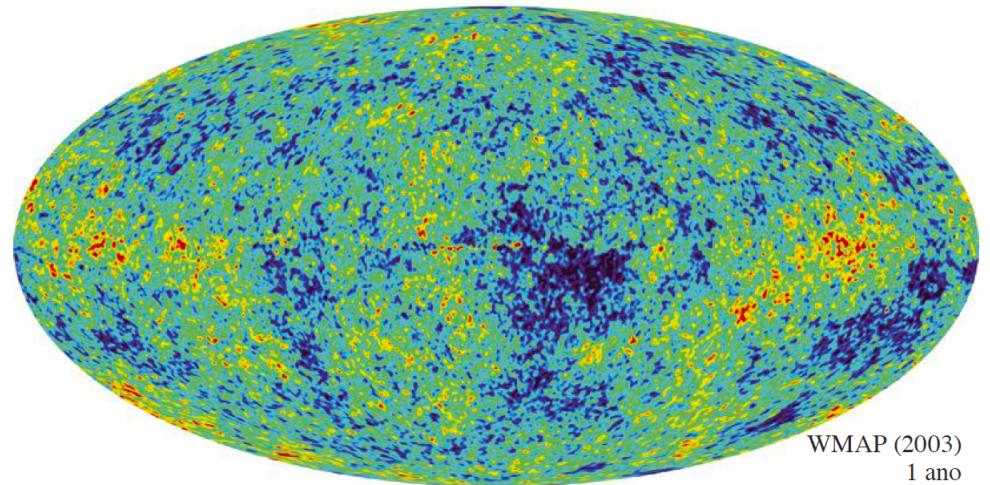
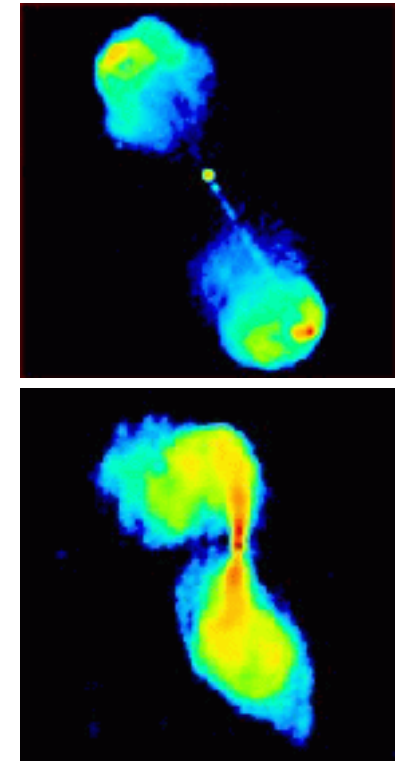


Informação sobre as propriedades físicas dos astros são obtidas direta ou indiretamente de seus espectros: temperaturas, densidades e composições



# Rádio e microondas

- AM: 500–1700 kHz
- FM: 87–108 MHz
- TV (VHF): 30–300 Mhz
- TV (UHF), celular: 300–3000 MHz
- Hidrogênio neutro: 1400 MHz (21 cm)
- Monóxido de carbono (CO): 115, 230, 345 GHz
- Radiação cósmica de fundo (max): 220 GHz
- jatos de partículas relativísticas, Sol



WMAP (2003)  
1 ano

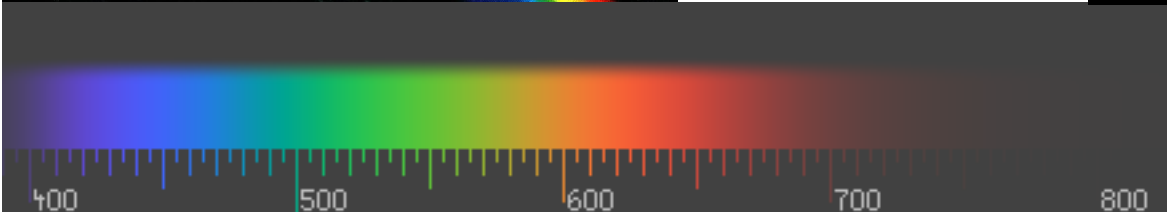
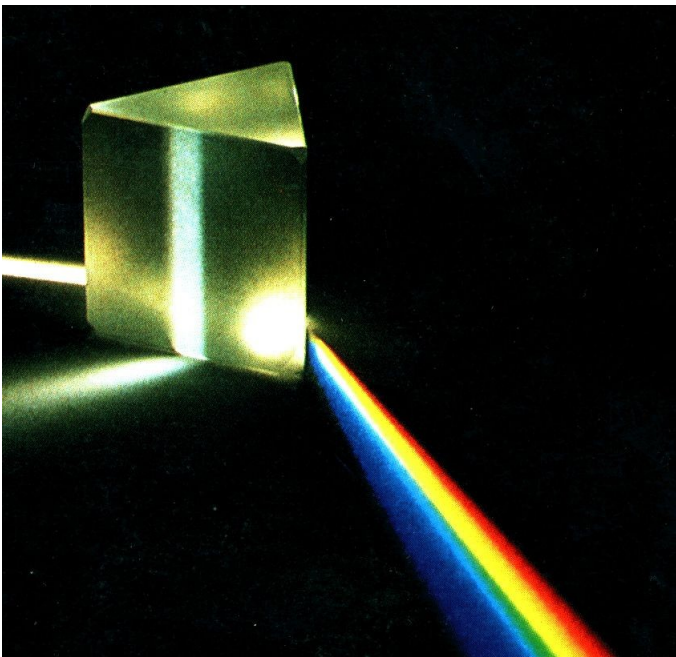
# Infravermelho

- **IV distante (*do visível*):** 20–300  $\mu$  (0,02–0,3 milímetros)
  - emissão de poeira
- **IV médio:** 1,4–20  $\mu$ 
  - emissão de galáxias distantes, estrelas de baixa massa
- **IV próximo:** 0,7–1,4  $\mu$ 
  - emissão de galáxias distantes, estrelas de baixa massa



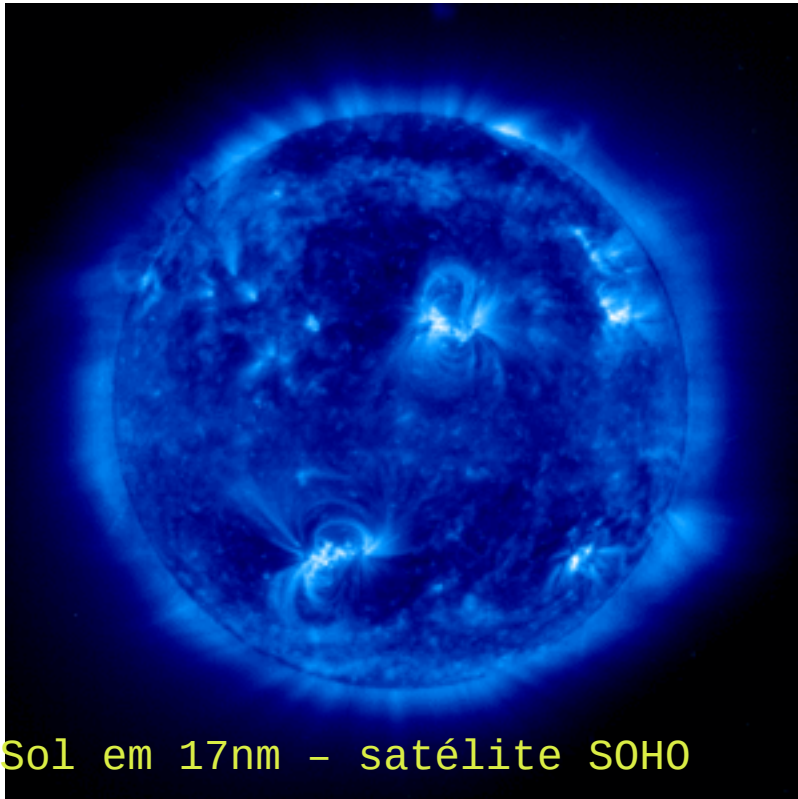
# Visível

- emissão de estrelas, nebulosas.
- **3800–7400 Å**
  - vermelho (740–625 nm); laranja (590–625); amarelo (565–590); verde (500–565), azul (485–500), anil (440–485), violeta (380–440)



# Ultravioleta

- **UV próximo:** 200–380 nm
  - regiões de formação estelar, núcleos ativos de galáxias, estrelas massivas
- **UV distante:**  $\lambda=10\text{--}200\text{ nm}$  ( $E= h\nu =120\text{--}6,2\text{ eV}$ )
  - núcleos ativos, gás quente extra-galáctico



# Raios-X

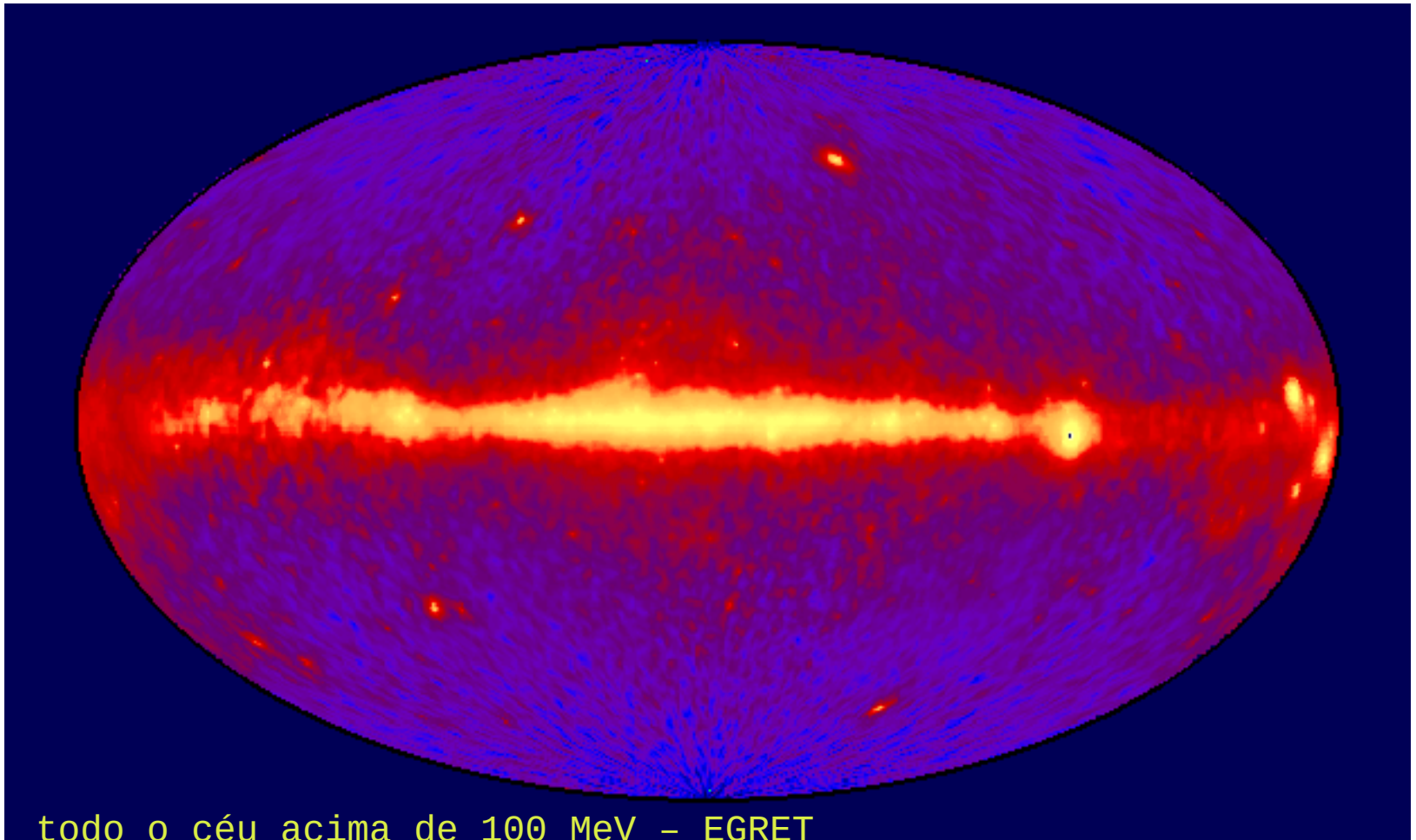
- **raios-X moles:** 0,1–10 keV (1 keV= 1000 eV)
  - núcleos ativos de galáxias, gás intra-aglomerado de galaxias
- **raios-X duros:** 10–100 keV
  - jatos de partículas relativísticas



aglomerado de galáxias 1E 0657-56 – Chandra

# Raios- $\gamma$

- **100 keV–1 GeV** (fótons ainda mais energéticos foram detectados) (**1 GeV =  $10^9$  eV**)
- “gamma-ray bursts”, núcleos ativos, objetos compactos



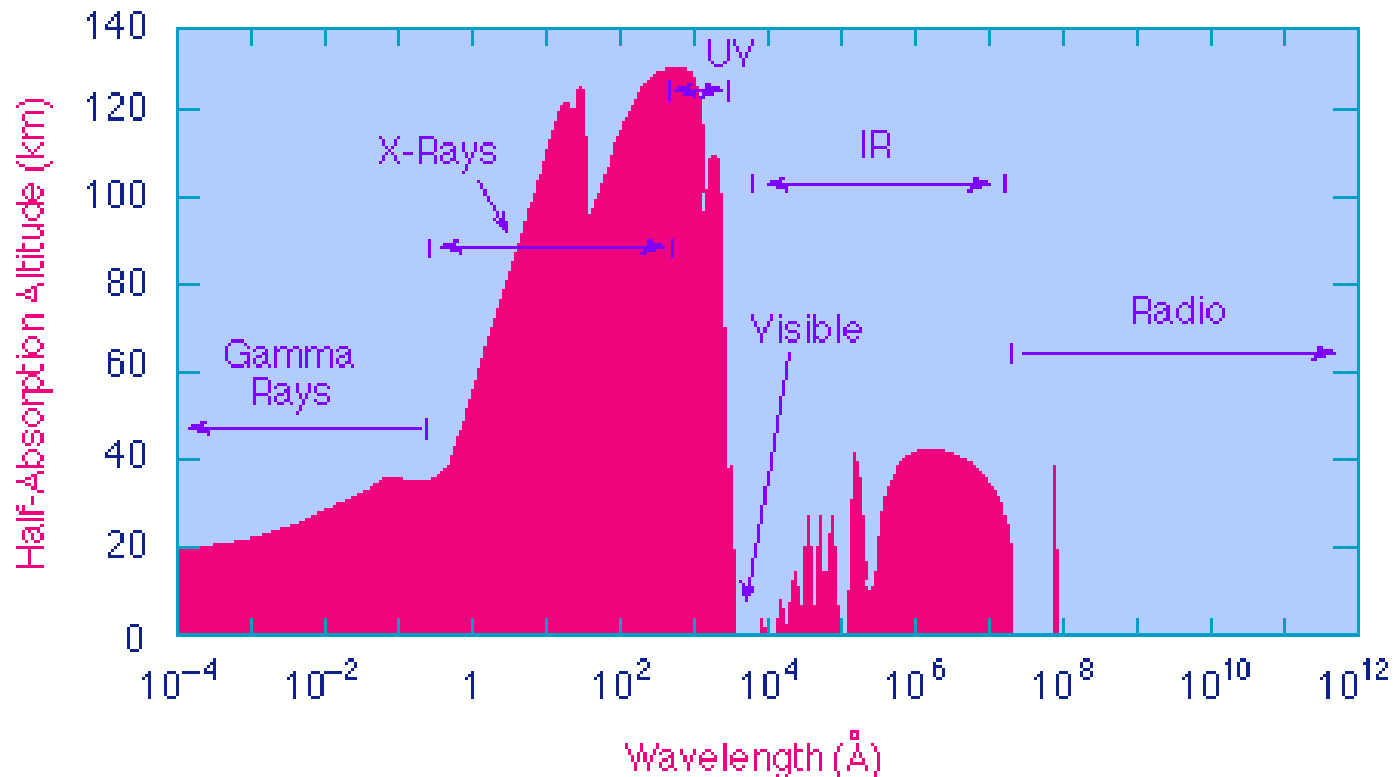
# Janelas atmosféricas no espectro eletromagnético

A atmosfera terrestre absorve a radiação ao longo do espectro EM:  
Onde atmosfera é **TRANSPARENTE** à radiação: há **JANELAS**

**visível e rádio: atmosfera é transparente:** podemos observar Universo desde a superfície da Terra

**IR: parcialmente transparente**

**UV, raios-X e raios-γ: atmosfera é opaca:** observações devem ser feitas por satélites em orbitas



# Intensidade, Fluxo e Luminosidade

Para descrever radiação que chega na Terra:

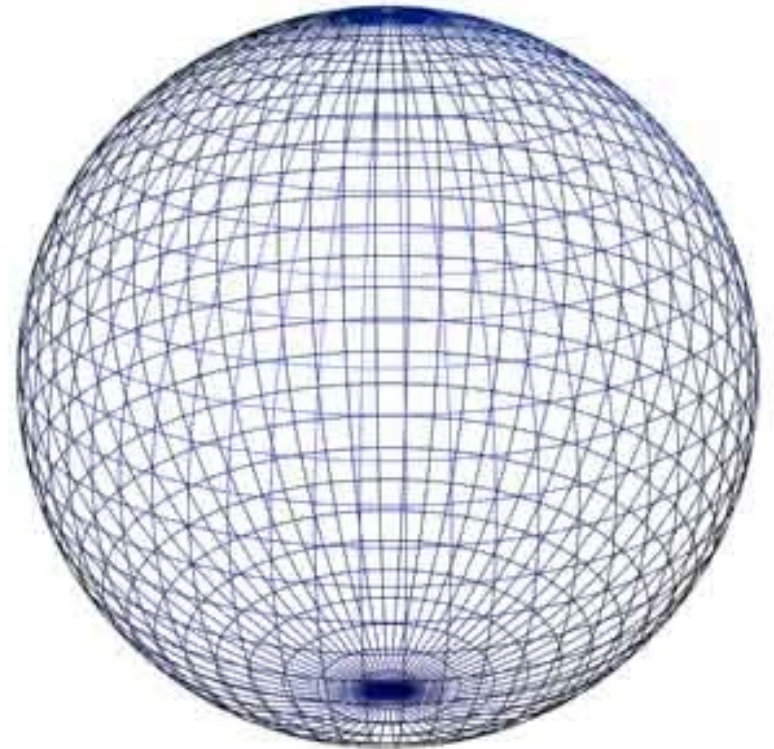
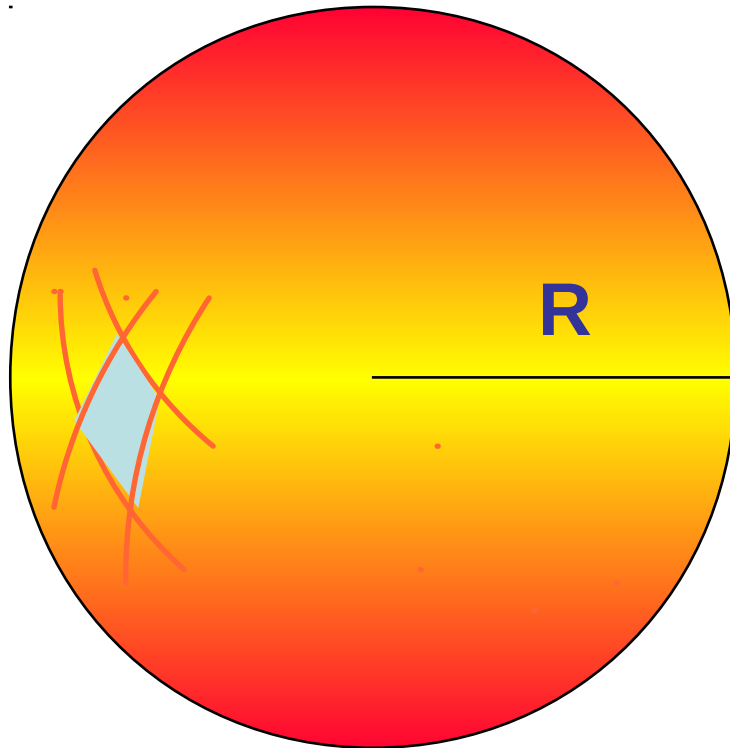
⇒ conceitos geométricos

⇒ ângulo sólido de um feixe de radiação

⇒ definido em função da área  $A$  interceptada pelo feixe numa superfície esférica de raio  $R$ .



# Área da superfície de uma esfera

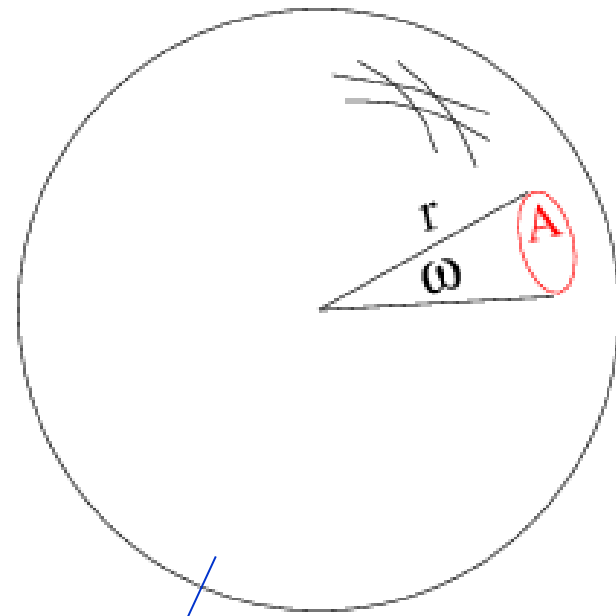
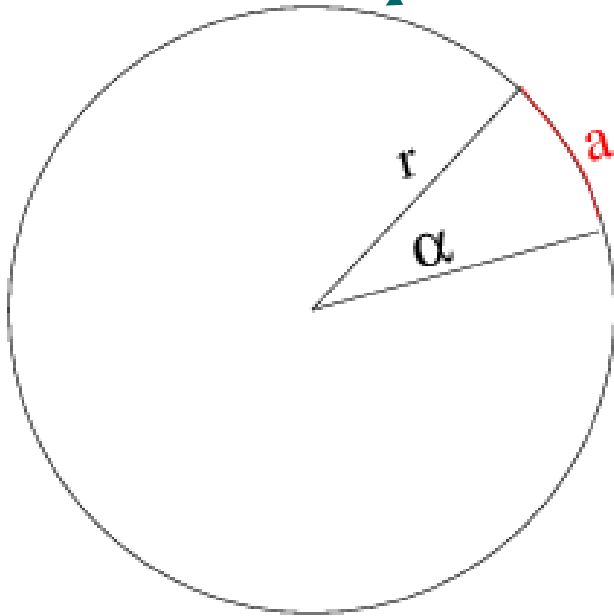


$$A = 4 \pi R^2$$

No círculo: ângulo entre duas retas

$$\alpha = a / r$$

$\alpha$  é medido em radianos ( $\alpha = 2\pi$ , toda circunferência;  
perímetro =  $2\pi r$ ).



Na esfera: ângulo sólido (abertura do cone)

$$\omega = A / r^2$$

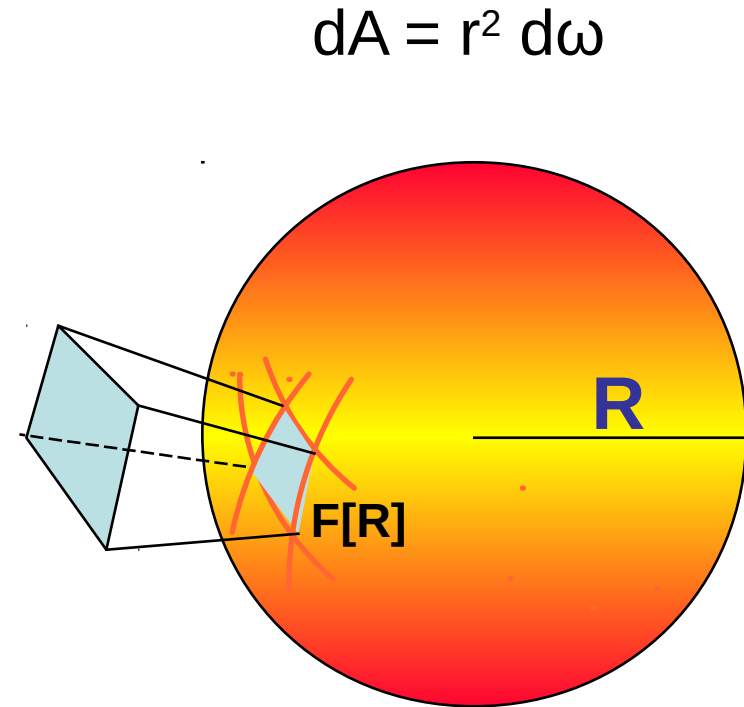
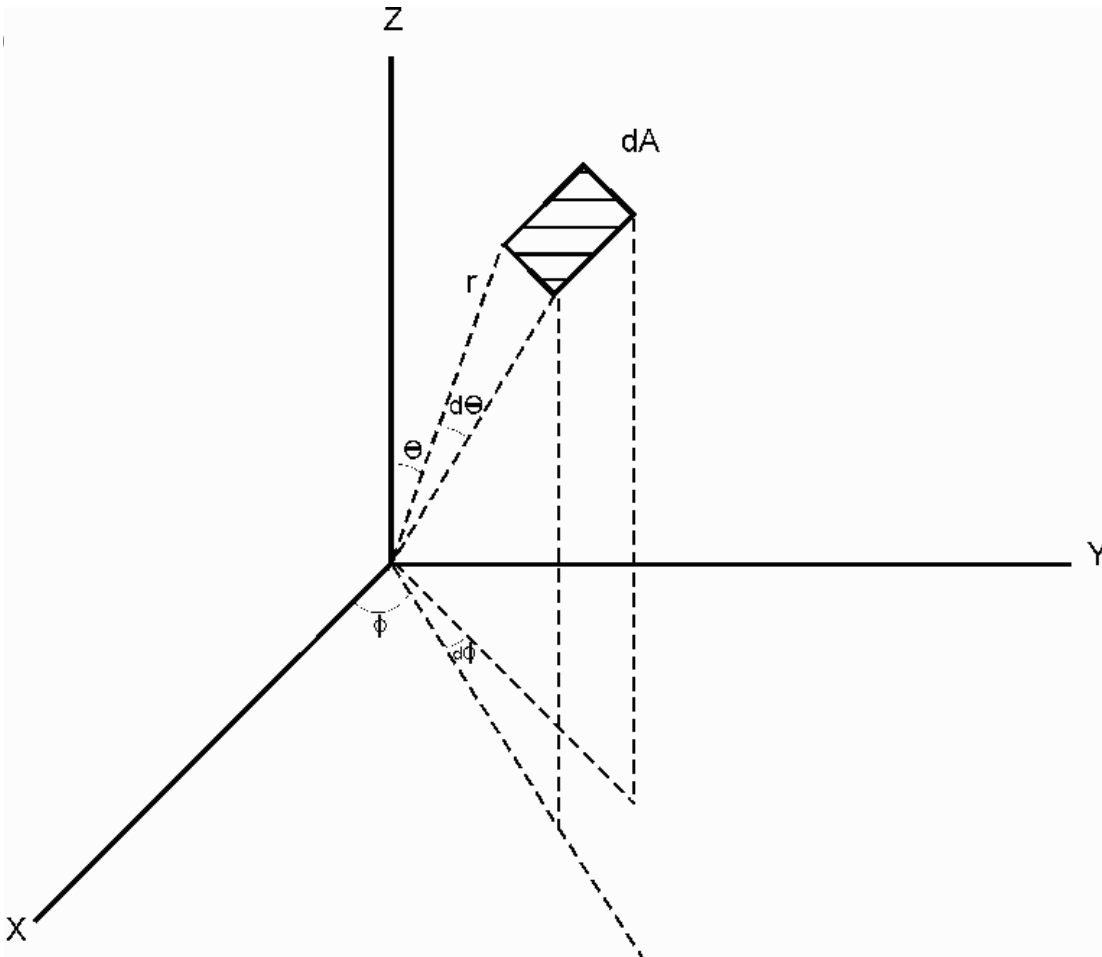
$\omega$  é medido em estero-radianos ( $\omega = 4\pi$ , toda a esfera; área de superfície  $A = 4\pi r^2$ )

# Ângulo Sólido

Ângulo sólido em coordenadas esféricas:

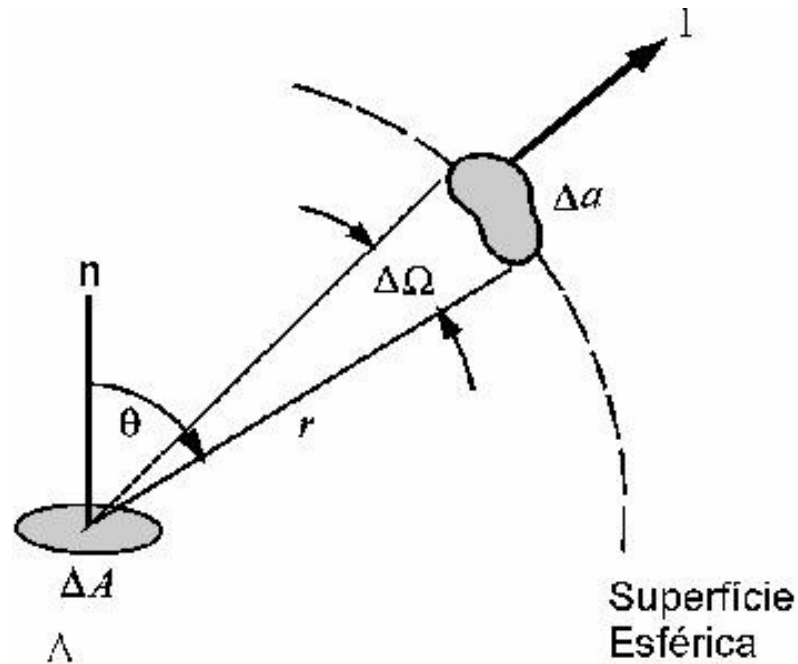
Elemento de área  $dA = (r d\theta) (r \sin\theta d\phi) \longrightarrow dA = (r^2 \sin\theta d\theta d\phi)$

ângulo sólido elementar subtendido pela área  $dA$ :  $d\omega = \sin\theta d\theta d\phi$



Considere  $\Rightarrow$  elemento de área  $\Delta a$ , formando um ângulo  $\theta$  com a normal ao elemento  $\Delta A$ :

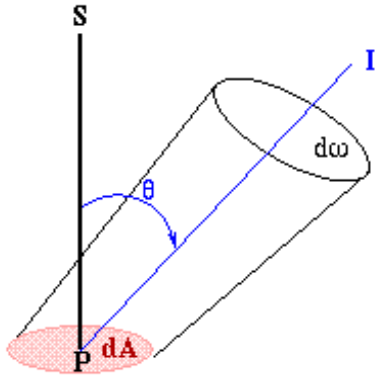
**Intensidade  $I$  na direção  $\theta$ :** depende da posição, da direção e do tempo.



**Intensidade : energia por unidade de tempo, por uma unidade de área  $\Delta A$  da fonte emissora, que atravessa um elemento de área  $\Delta a$  (ou o ângulo sólido  $\Delta \Omega$  na direção  $\theta$ )**

# Intensidade monocromática ( $I_\nu$ )

a quantidade de energia emitida por unidade de tempo  $\Delta t$ , por unidade de área da fonte  $\Delta A$ , por unidade de frequência  $\Delta \nu$ , por unidade de ângulo sólido  $d\omega$  em uma dada direção  $\theta$ :



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

nas unidades:

$\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{Hz}^{-1}$ .

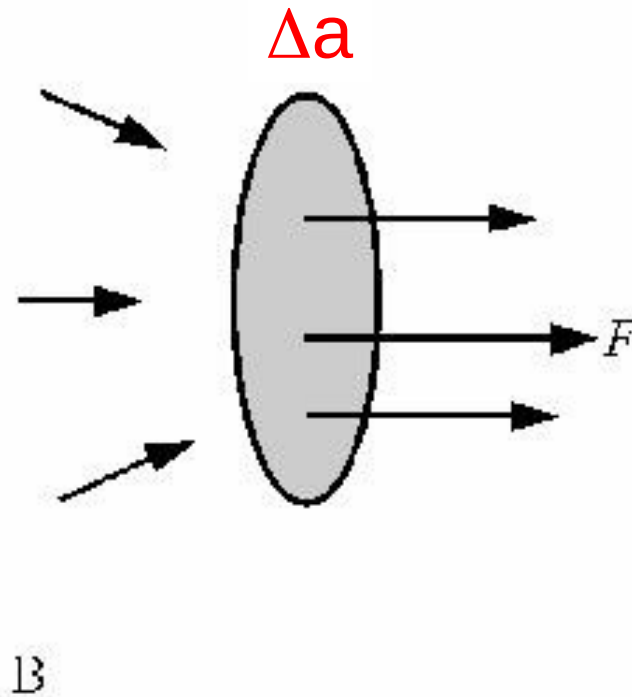
sr = esterorradiano  $\rightarrow$  unidade de ângulo sólido

Sabendo que:  $I_\nu d\nu = I_\lambda d\lambda$

A intensidade *integrada* (compreende fótons de todas as frequências ou comprimentos de onda) é dada por

$$I = \int I_\nu d\nu = \int I_\lambda d\lambda$$

# Fluxo



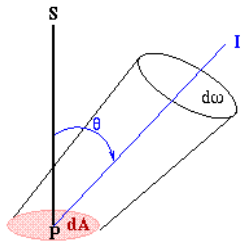
**Fluxo:** relaciona-se à energia que chega por unidade de tempo a uma unidade de área da superfície coletora (de um telescópio)

**Fluxo** - relaciona-se com energia **coletada (medida) por um telescópio** (ou que atravessa uma superfície)

**Fluxo (F):** *energia que chega na superfície (do detetor) por unidade de tempo ( $\Delta t$ ), por uma unidade de área (da superfície coletora)  $\Delta A$ , por unidade de freqüência ( $\Delta \nu$ )*

$$F_{\nu} = \frac{\text{energia}}{\Delta A \Delta t \Delta \nu} \quad \text{unidades: erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$$

O **fluxo**  $F_{\nu}$  a uma dada freqüência, corresponde à integral das intensidades  $I_{\nu}$  em todos ângulos sólidos:

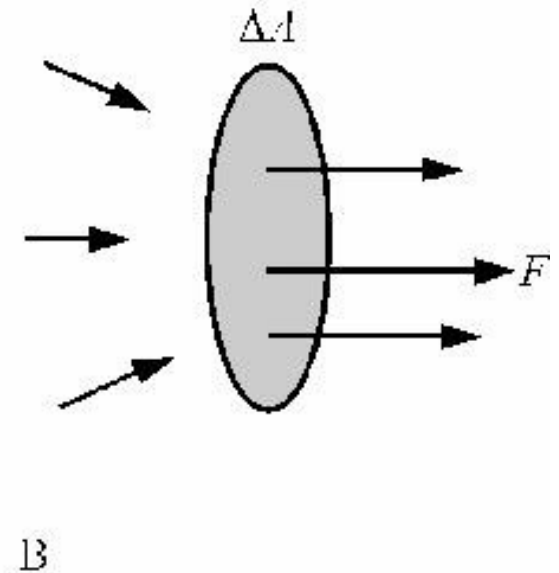
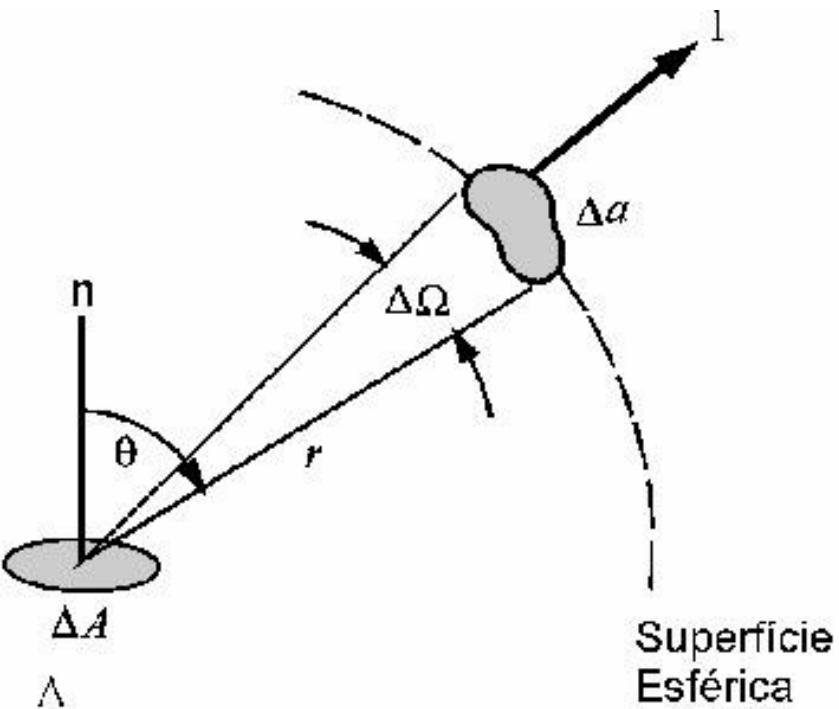


$$F_{\nu} = \int I_{\nu} \cos \theta d\omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} I_{\nu} \cos \theta \sin \theta d\theta d\Phi$$

O **fluxo total** é dado pela integral de  $F_{\nu}$  em todas as freqüências:

$$F = \int F_{\nu} d\nu = \text{energia} / \Delta A \Delta t$$

# Intensidade X Fluxo



(A) **Intensidade**: relaciona-se a energia por uma unidade de área  $\Delta A$  da fonte emissora, que atravessa um elemento de área  $\Delta a$ . (B) **Fluxo**: corresponde a energia que atravessa a unidade de area  $\Delta a$  da superfície (coletora) - **é composta de feixes de todas as direções**

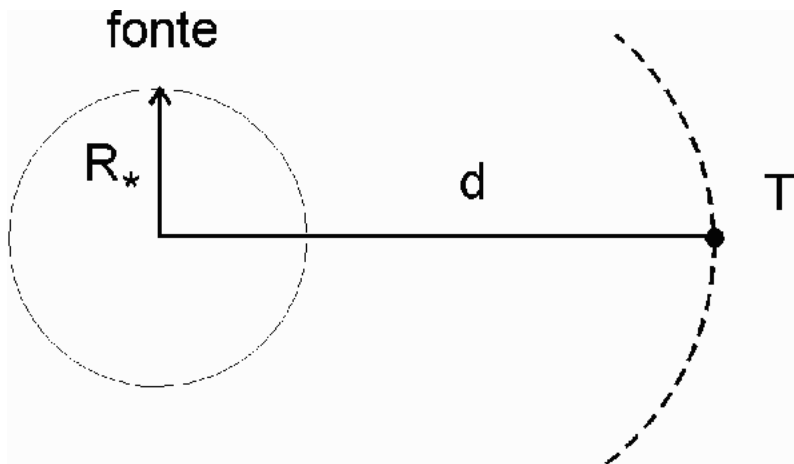


# Luminosidade

Estrela de raio  $R_*$ , localizada a uma distância  $d$  do observador.

A luminosidade  $L_*$   $\Rightarrow$  energia total emitida em todas as direções

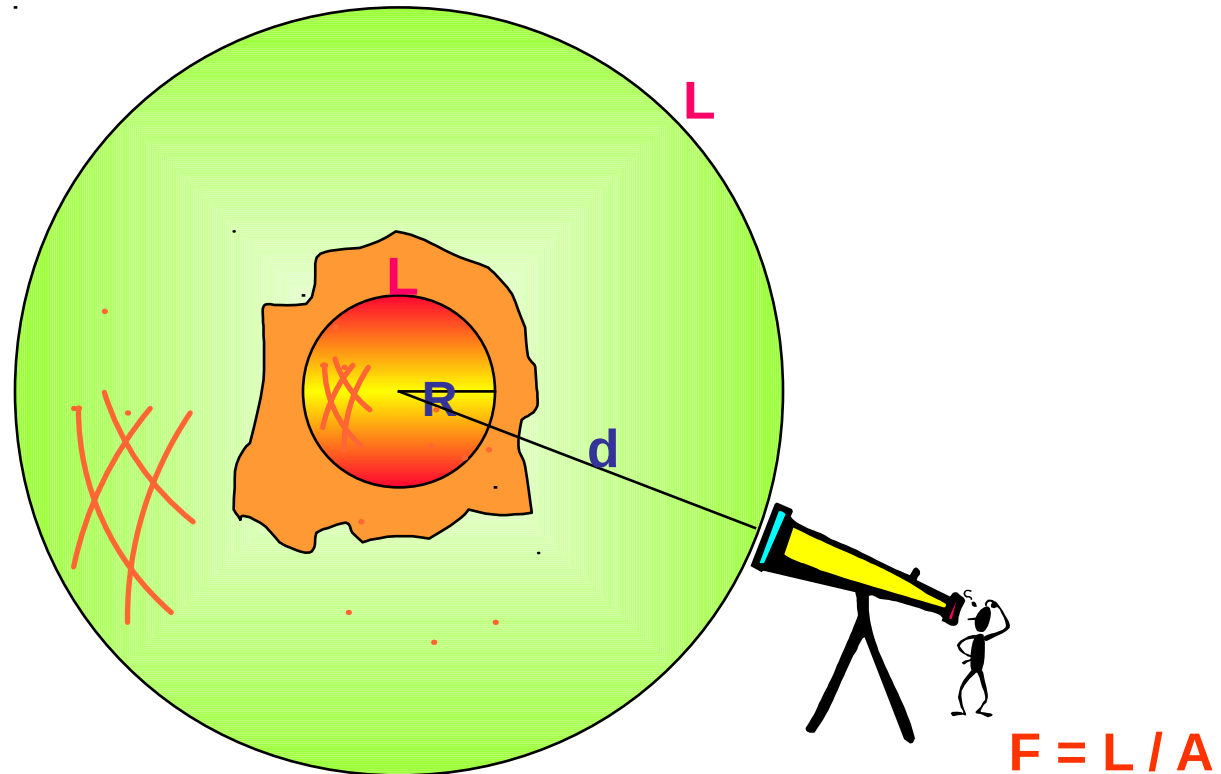
$\Rightarrow$  potência irradiada :



$$L = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

[ Watts ou  
erg/s]

# Fluxo à distância d



É a potência medida  
por unidade de área à uma distância  
ao centro da estrela.

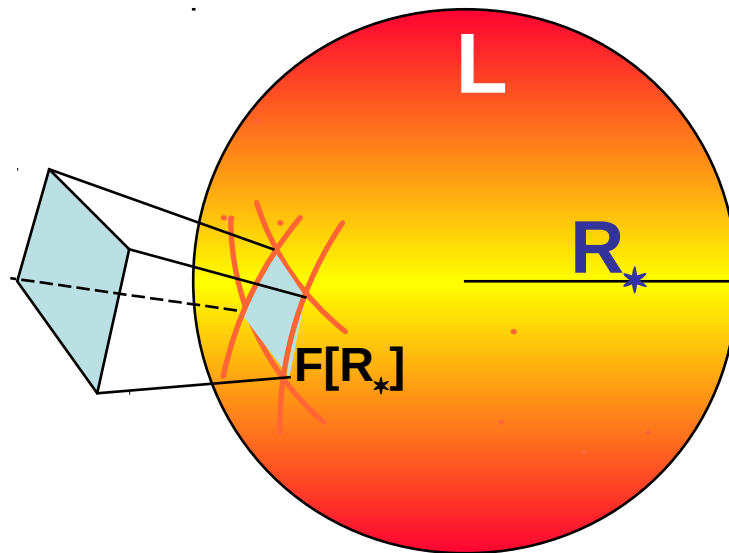
$$F = F[d] = L / (4\pi d^2)$$

# Fluxo emitido na superfície da estrela $F(R_\star)$

Se a superfície concêntrica está na superfície da estrela:

$$F(R_s) = \frac{L_s}{4 \pi R_s^2} \quad \longrightarrow \quad L_s = 4 \pi R_s^2 F(R_s)$$

# Fluxo Superficial



É a potência emitida  
por unidade de área da estrela.

$$F[R_s] = L / (4 \pi R_s^2)$$

# Fluxo emitido na superfície da estrela $F(R_\star)$

Se a superfície concêntrica esta na superfície da estrela:

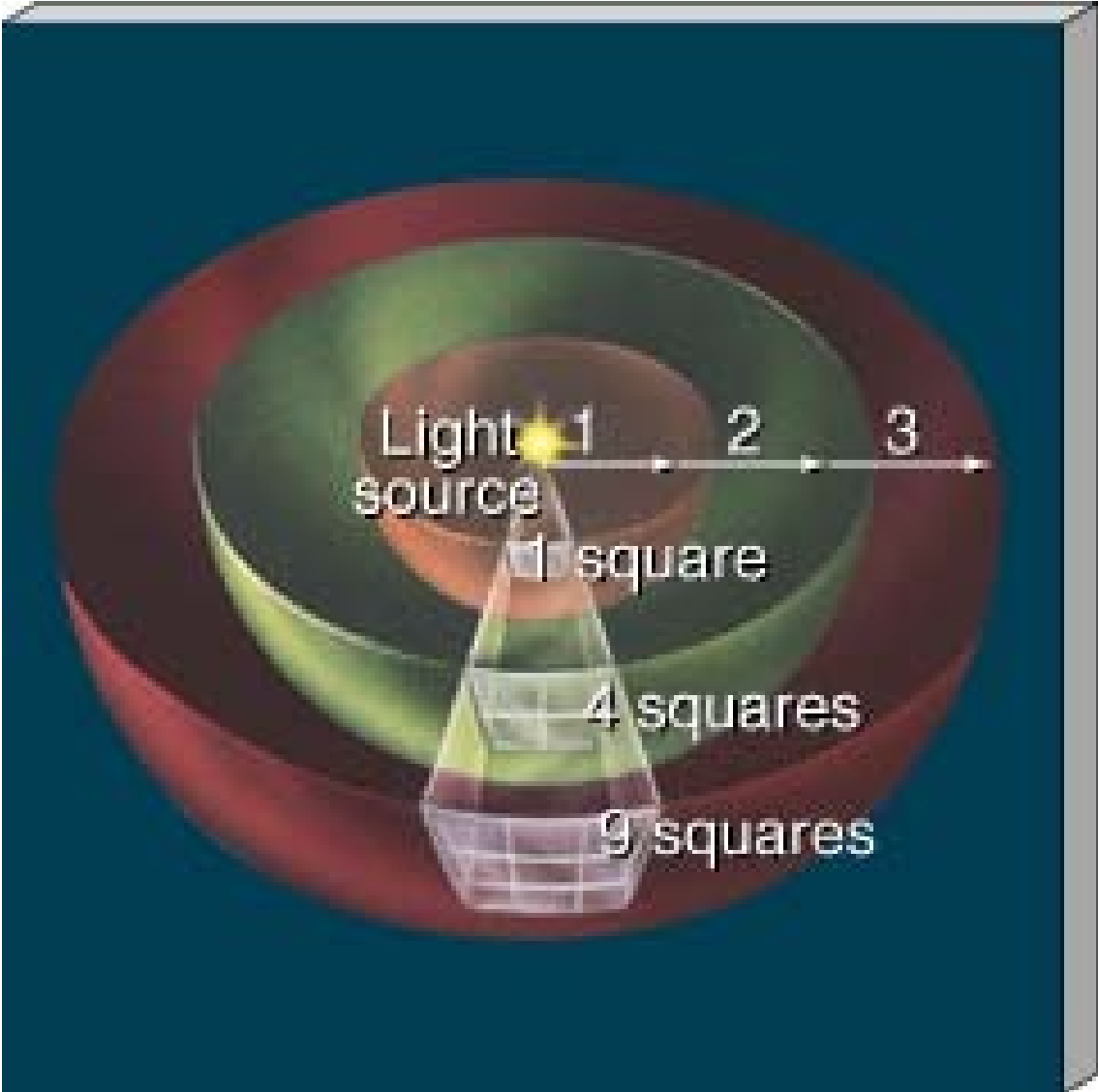
$$F(R_s) = \frac{L_s}{4 \pi R_s^2} \quad \longrightarrow \quad L_s = 4 \pi R_s^2 F(R_s)$$

A uma distância  $d$ , a luminosidade é dada por  $L_s = 4 \pi d^2 F(d)$

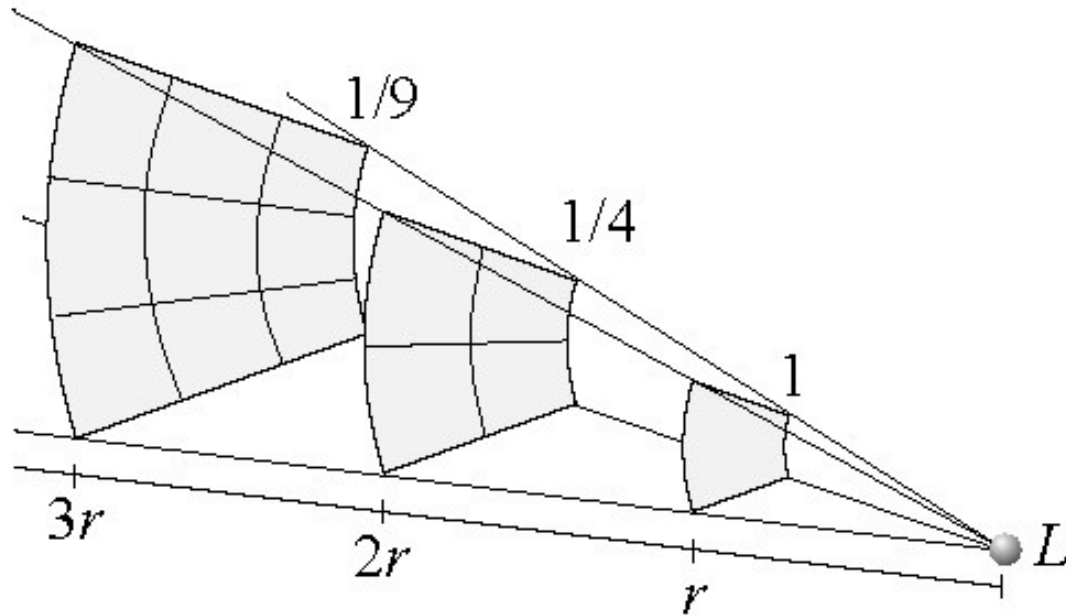
desta forma, o fluxo observado a uma distancia  $d$ , é:

$$F(d) = \left( \frac{R_s}{d} \right)^2 F(R_s)$$

→ O fluxo cai com o inverso do quadrado da distância à fonte



# Fluxo e distância



- O fluxo de uma fonte de luminosidade  $L$  decresce inversamente ao quadrado da distância.

$$\text{fluxo} = \frac{\text{luminosidade}}{4\pi \text{ distância}^2}$$

# Fluxo e Luminosidade da radiação

- Por exemplo:
  - luminosidade do Sol:  $3,86 \times 10^{26}$  watt
  - Fluxo (brilho aparente) do Sol na Terra:  $1373$  watt/metro<sup>2</sup>.
  - luminosidade de Sirius ( $\alpha$ CMa):  $1,0 \times 10^{28}$  watt (i.e.,  $26,1 \times L_{\odot}$ )
  - Fluxo (brilho aparente) de Sirius na Terra:  $0,12$  watt/km<sup>2</sup>

