

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)**
- **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- γ
 - **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

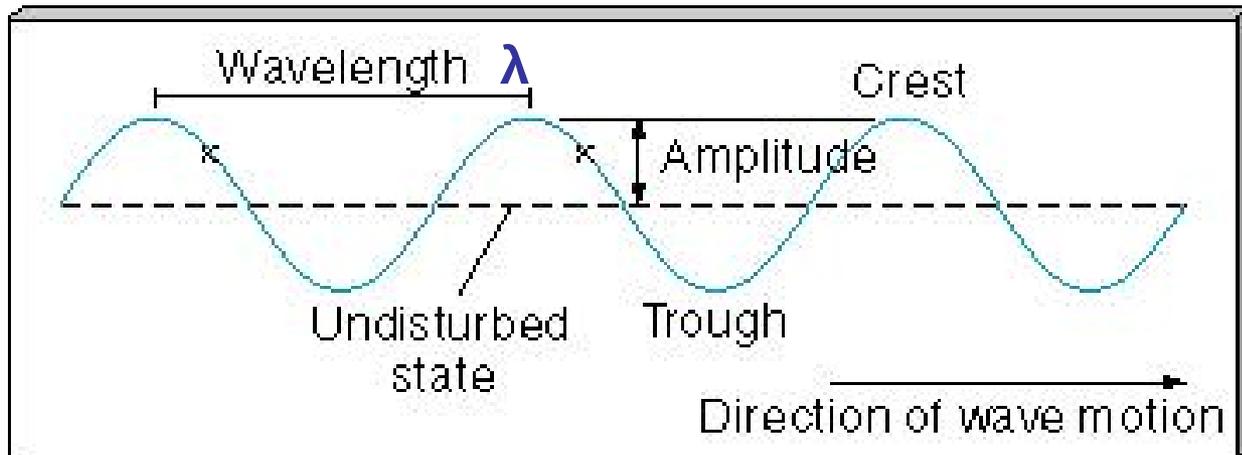
Propagação de uma onda de **amplitude H**, **velocidade v**, e **comprimento da onda λ** :

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

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

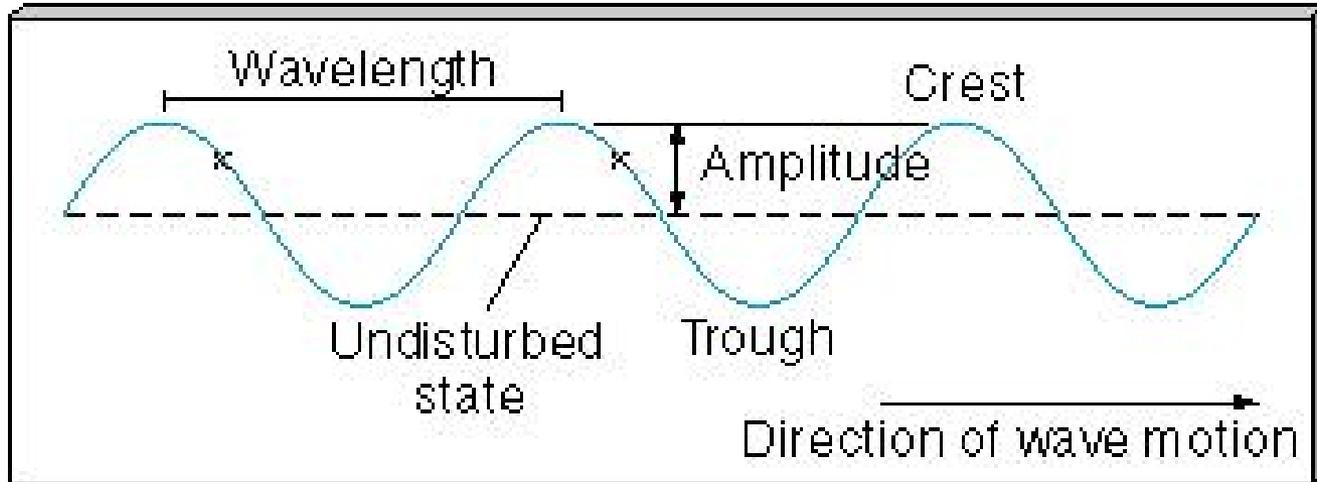
$x = \frac{\lambda}{4} \Rightarrow$ **$h = H$**

O primeiro máximo será dado por



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

Onda: movimento oscilatorio

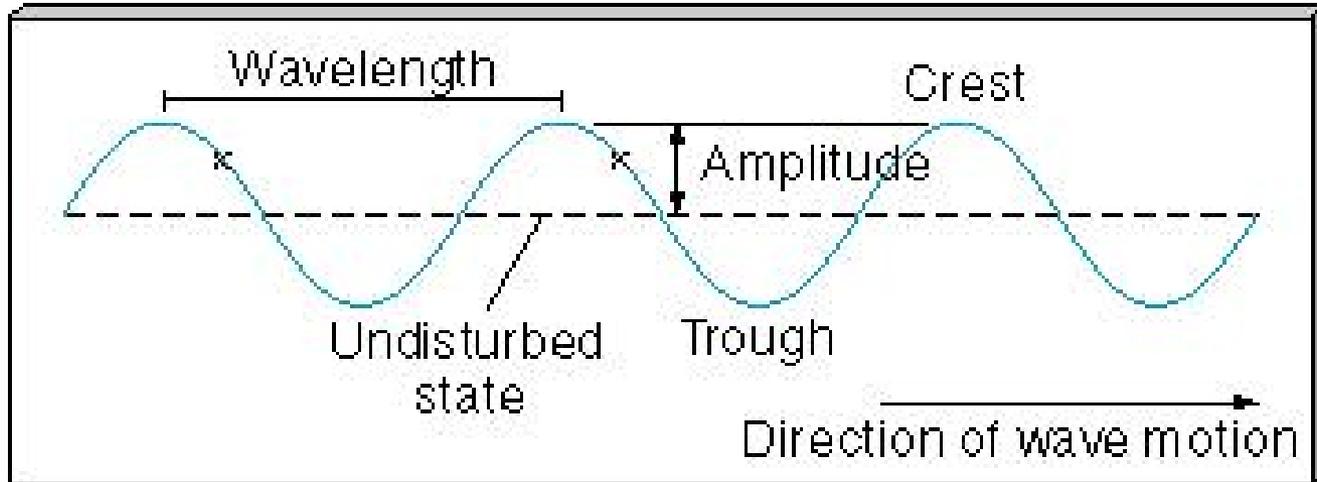


⇒ **evolução no tempo** : $h = H \operatorname{sen} \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x - v t) \right]$

⇒ **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



λ : 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

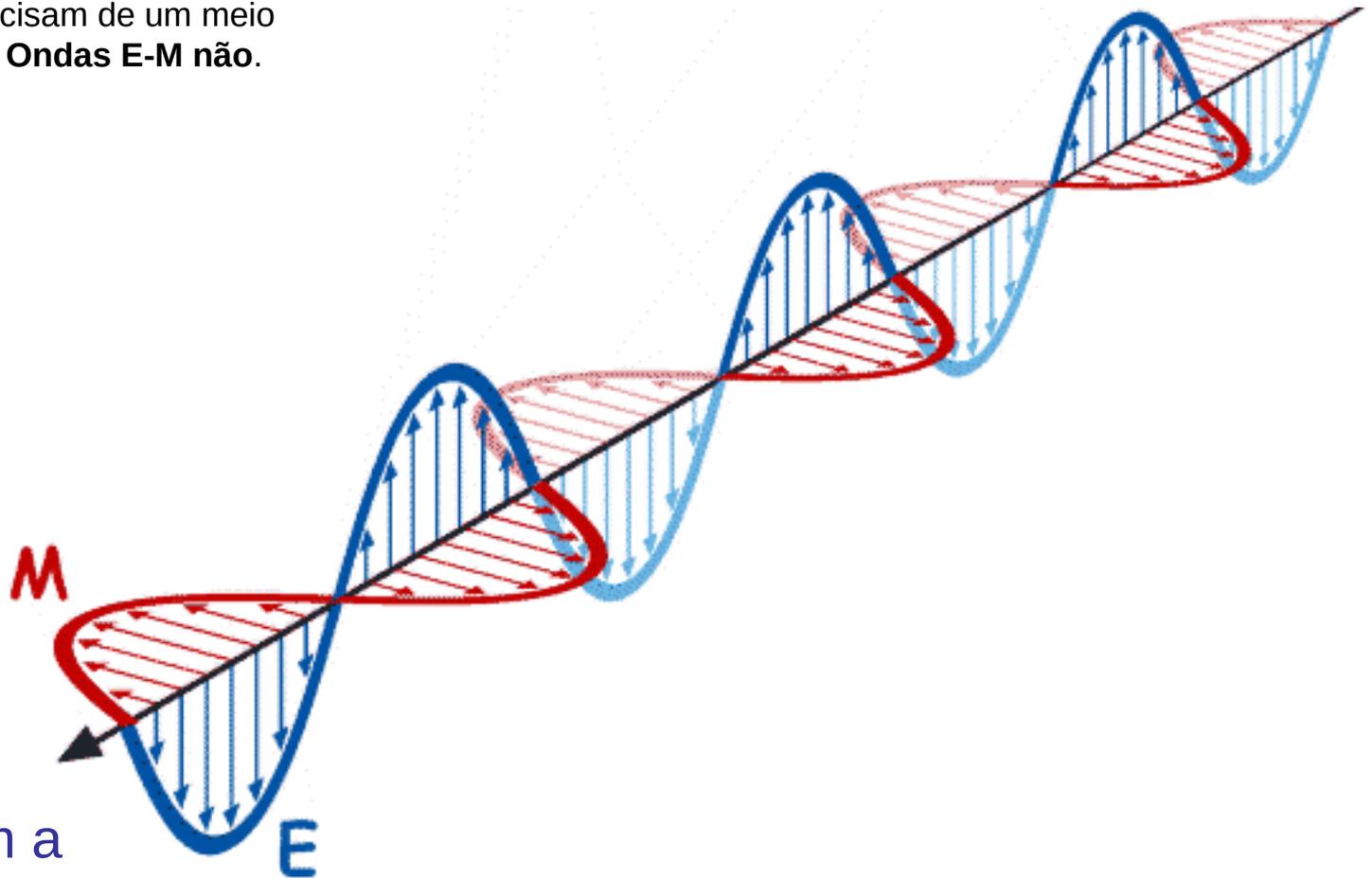
Onda electromagnética:

- 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)

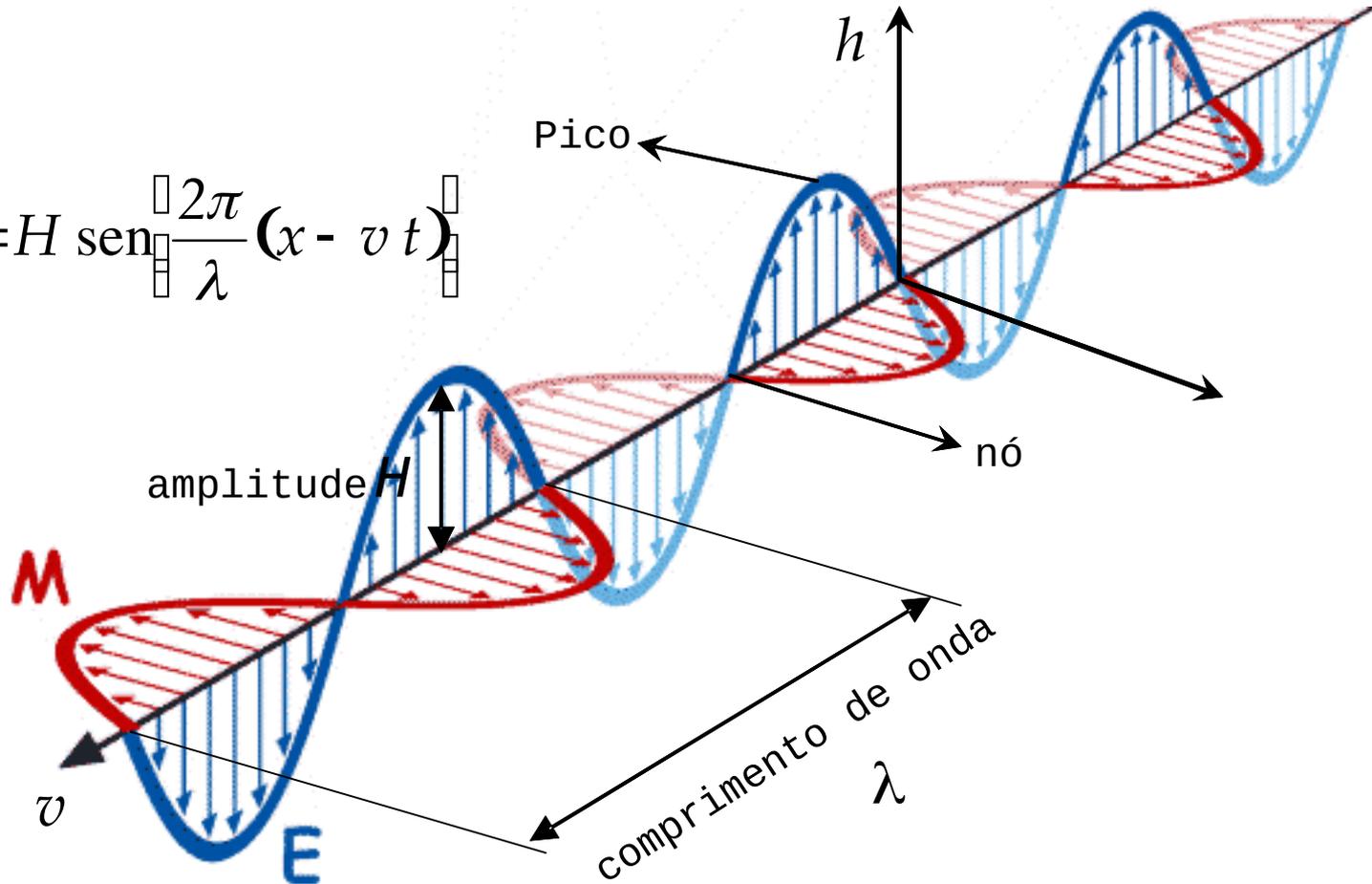
- eles são perpendiculares;
- as ondas são transversais.
- ondas mecânicas precisam de um meio ρ / se propagarem. **Ondas E-M não.**



propagação com a
velocidade da luz

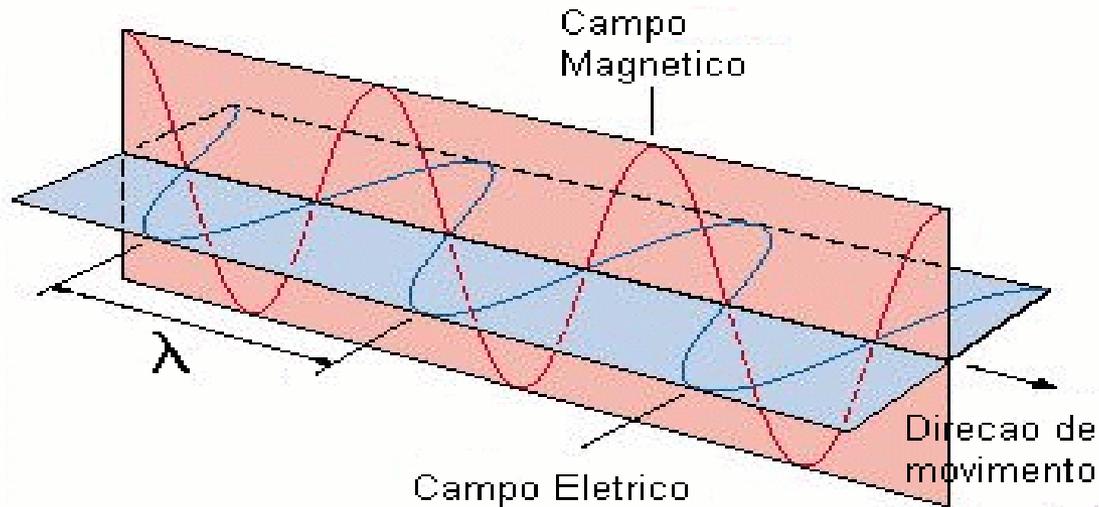
Ondas eletromagnéticas

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



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:
 - λ : comprimento de onda
 - ν : frequência
 - v : velocidade de propagação

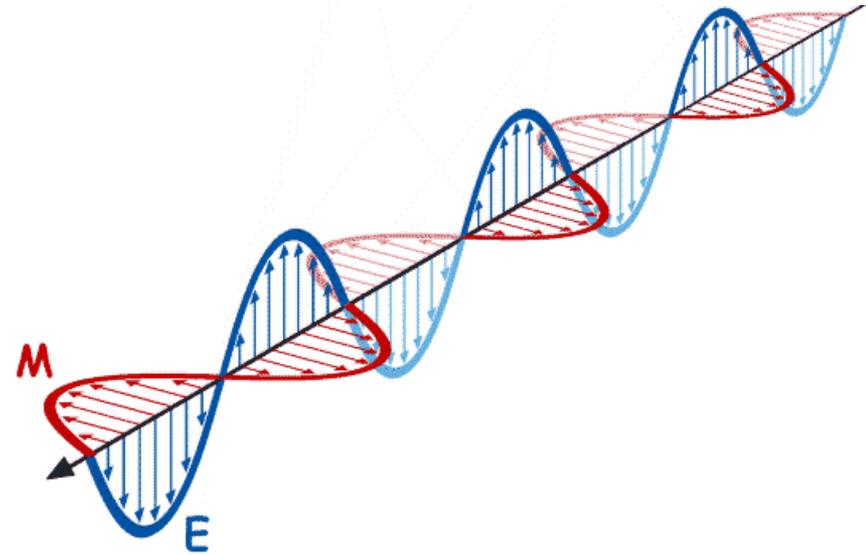
- Para radiação eletromagnética:

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

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

- λ é medido em **unidade de comprimento**:

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



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

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

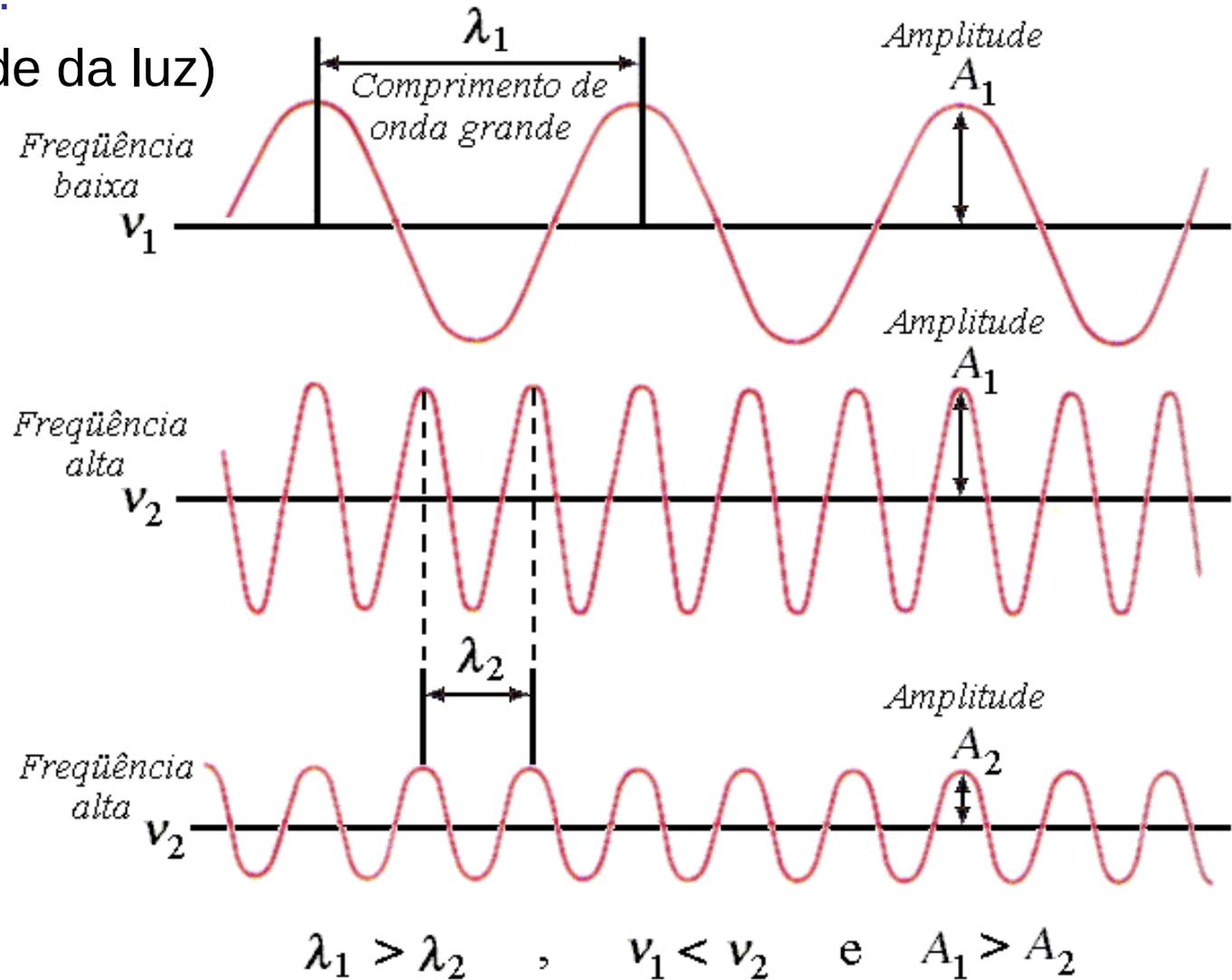
$$\text{Å} = \text{Angstrom} = 10^{-10} \text{ m}$$

Ondas eletromagnéticas

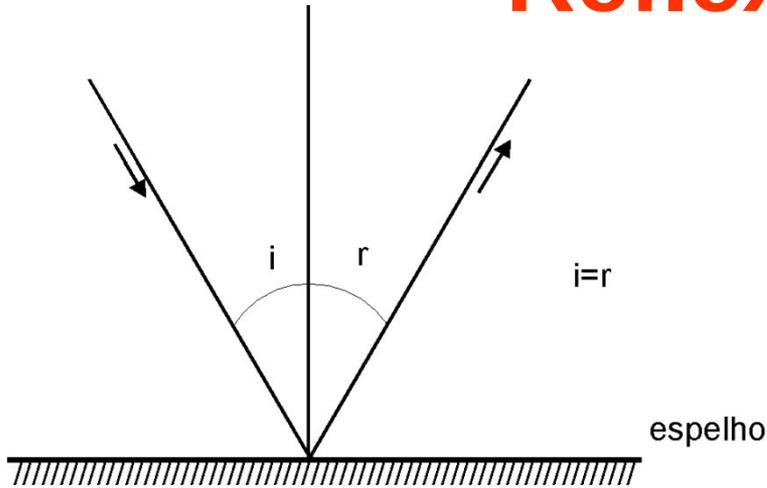
- Para radiação eletromagnética:

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

$$\lambda \nu = c$$



Reflexão e Refração



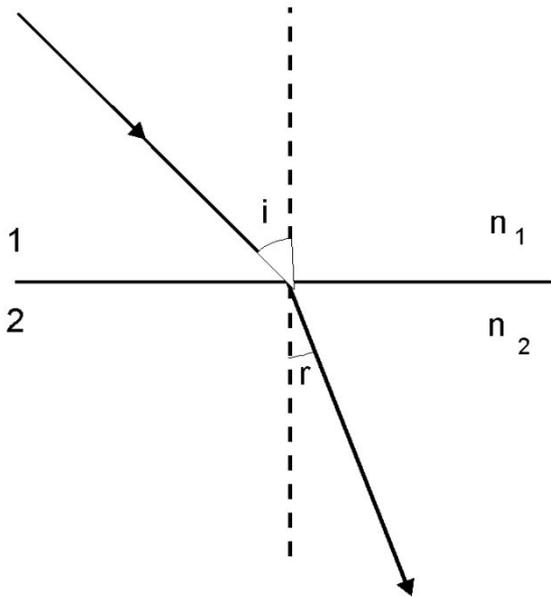
Reflexão:

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:

$$v = c/n$$

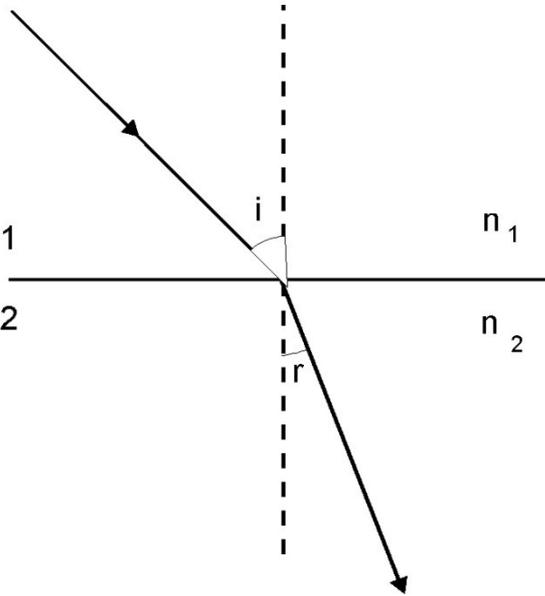
Vacuo: $n = 1$

Ar: $n = 1,0003$

Vidro: $n = 1,5$

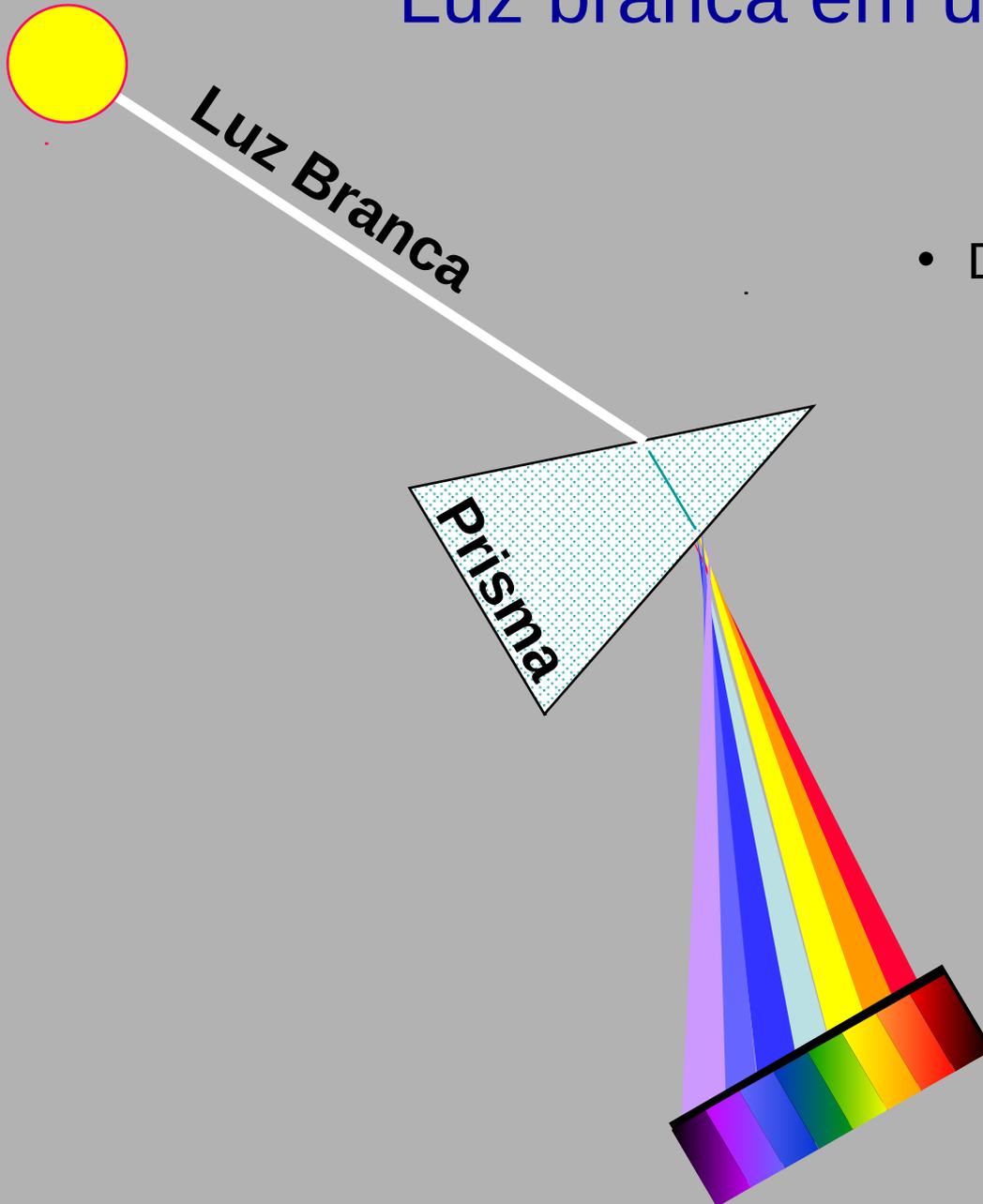
Índice de refração depende de λ :

$$n = n(\lambda)$$



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

Luz branca em um prisma

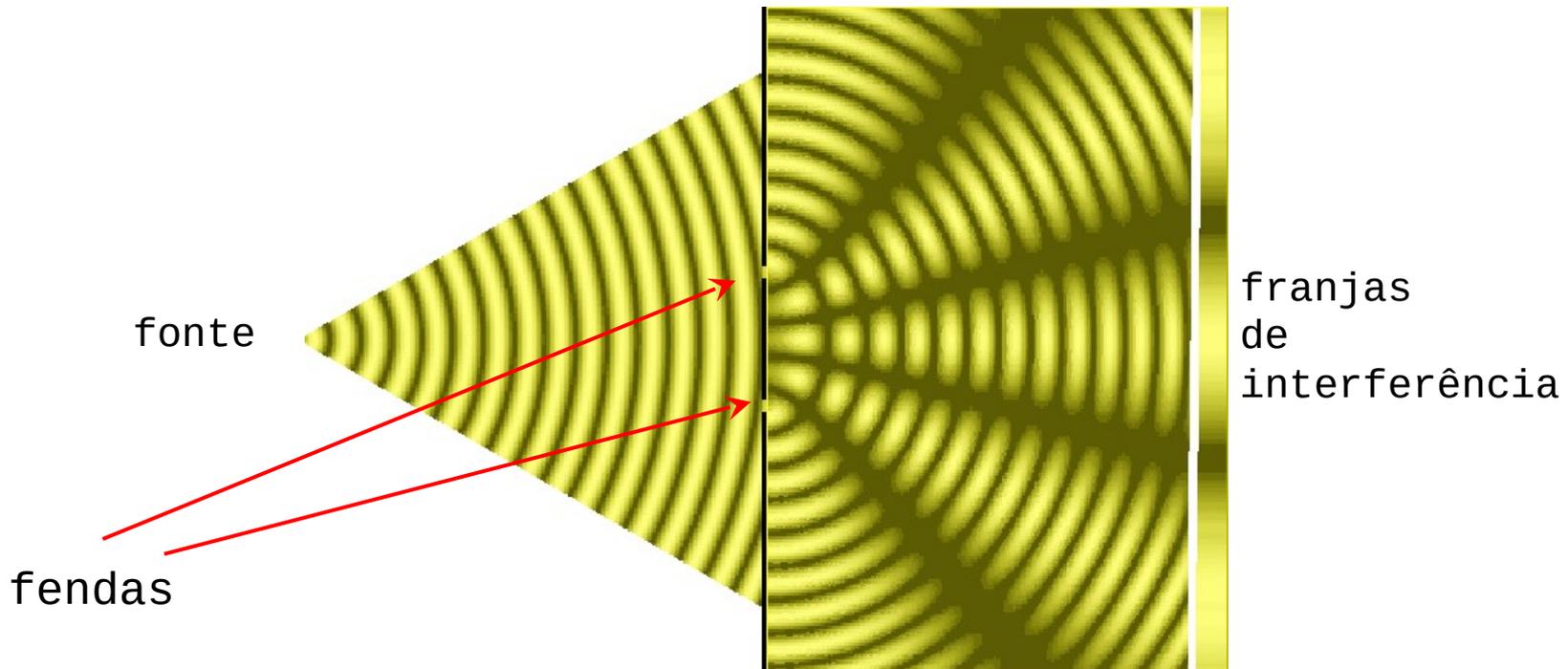


- Decomposição da luz
 - Um prisma separa (refrata) a luz branca nas cores do arco-íris (nos diferentes λ s).

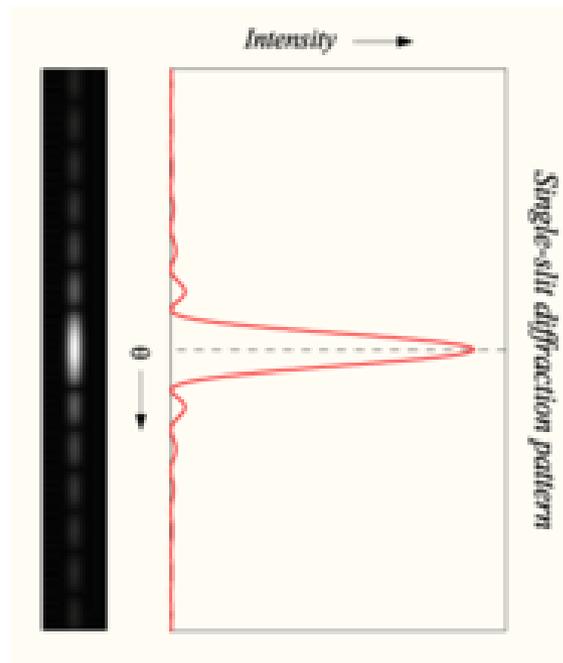
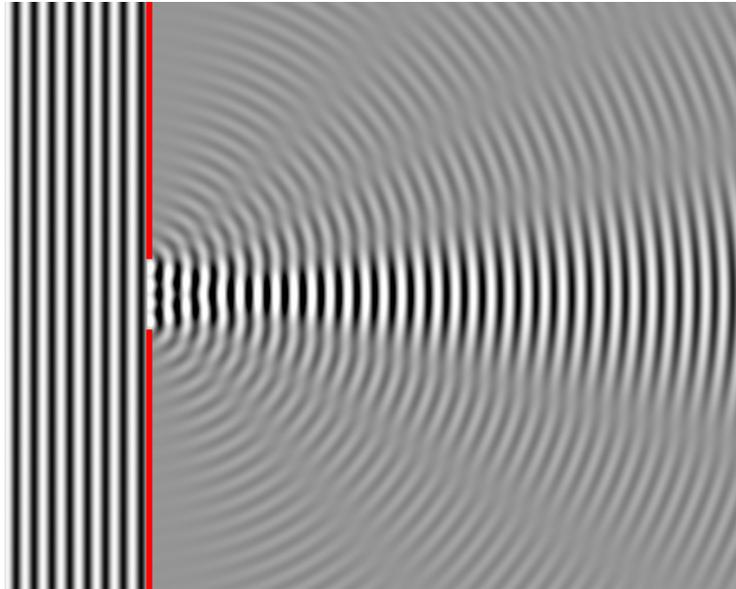
**Espectro
contínuo**

Luz: Difração e Interferência

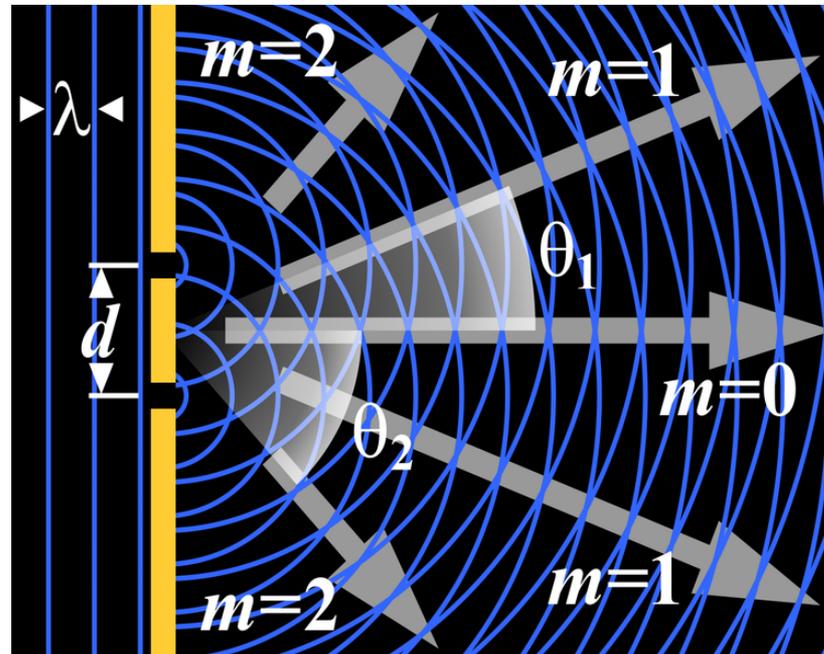
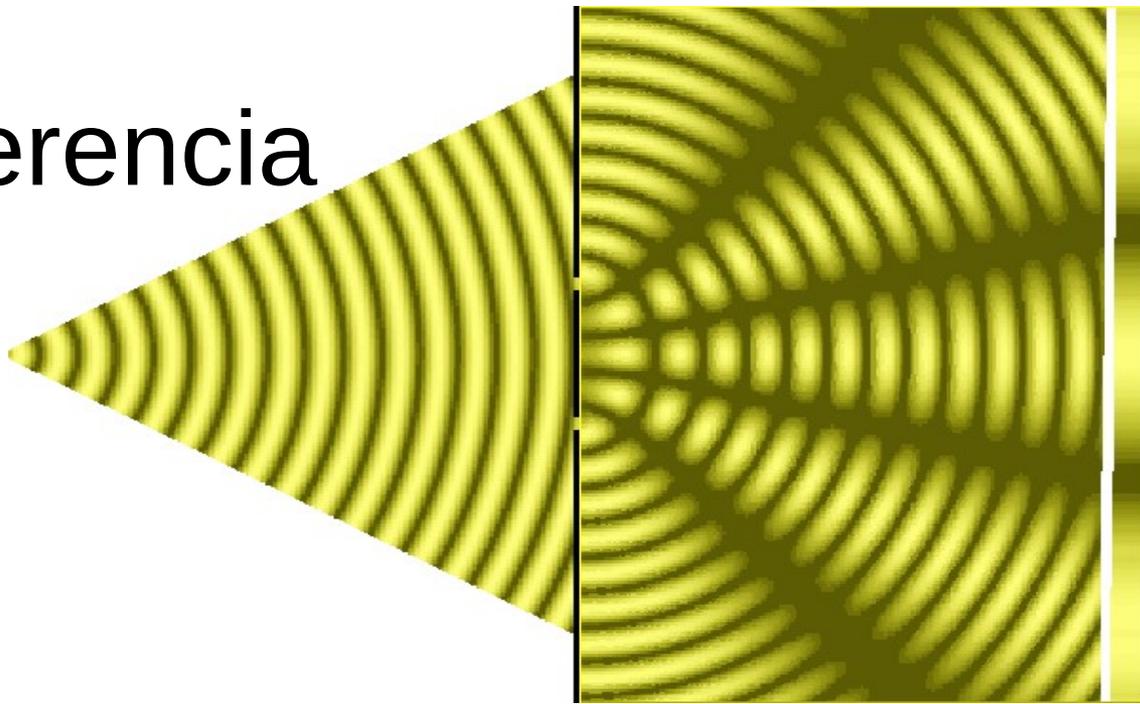
- **Thomas Young** realiza a experiência da fenda dupla, mostra o fenômeno de **interferência** da luz e conclui sobre sua natureza ondulatória.
- Tal como água: ondas de luz quando encontram obstáculo (1 fenda): **difratam**. Quando convergem encontrando outras: **interferem**
- **Interferência de 2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

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

λ : Frequência
 d : Abertura 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.

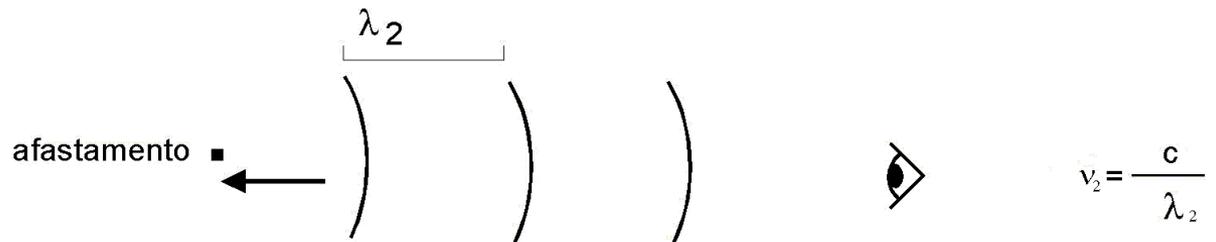
Fonte em repouso, emitindo luz a um comprimento de onda λ_0 .



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



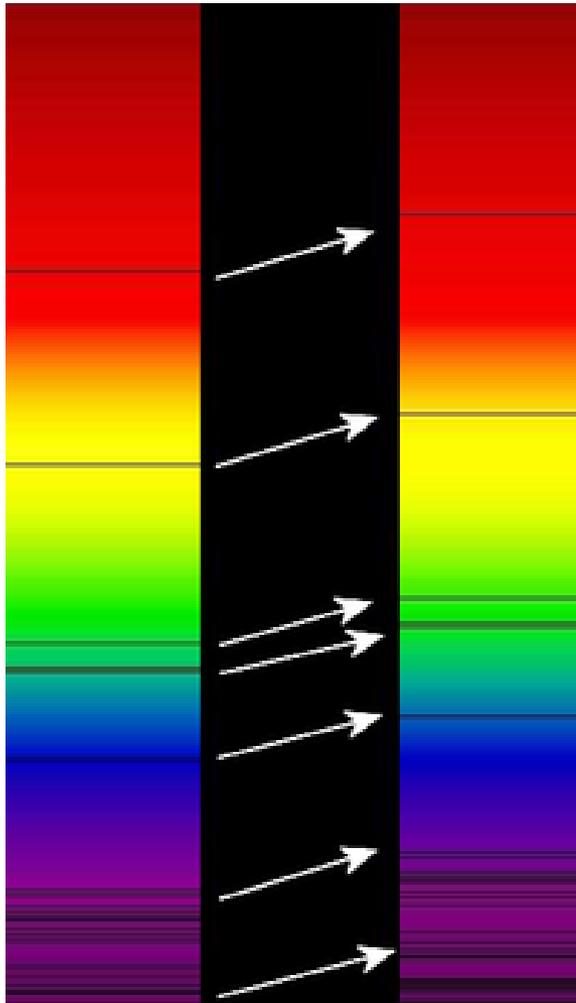
Fonte afasta-se: comprimento de onda observado será maior ($\lambda_2 > \lambda_0$).



Desvio para o vermelho

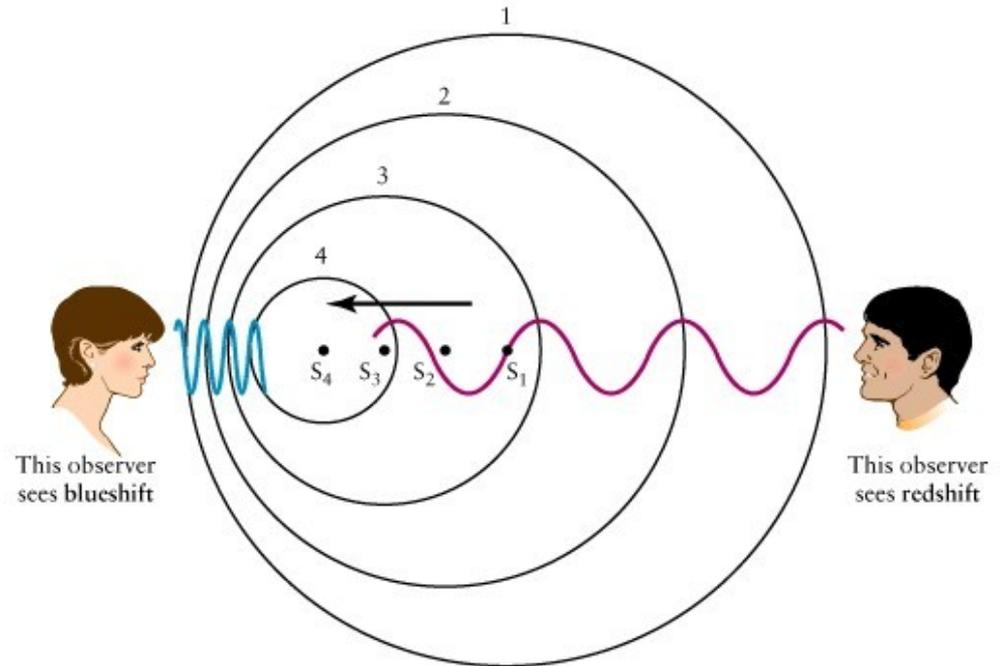
Para velocidades não-relativísticas (fonte com $v \ll c$)

repouso afastamento

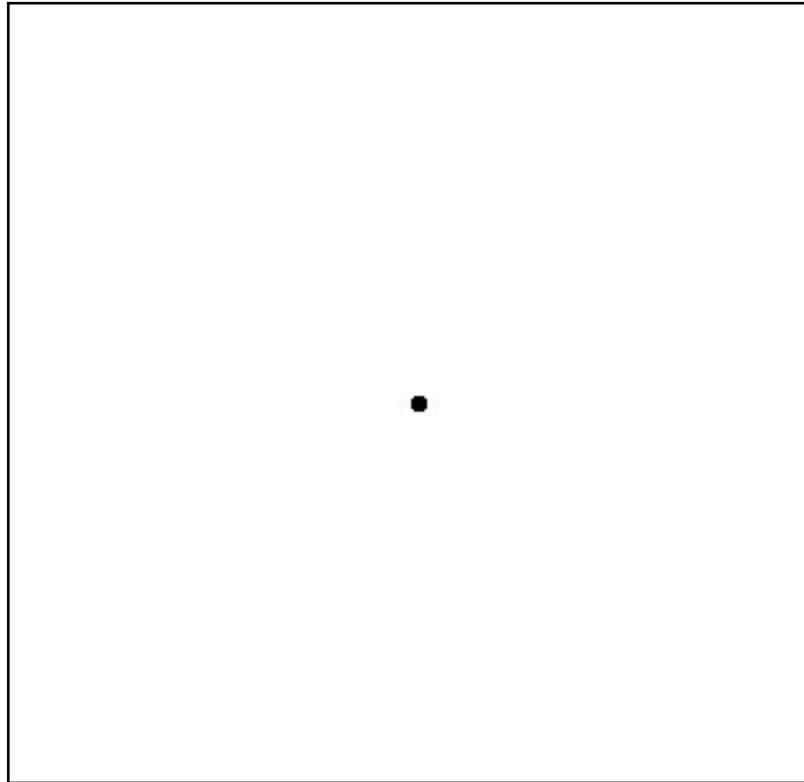


$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_0 \left(\frac{v}{c} \right)$$

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



Desvio para o vermelho



**Desvio para o
vermelho**

$$\lambda > \lambda_0$$

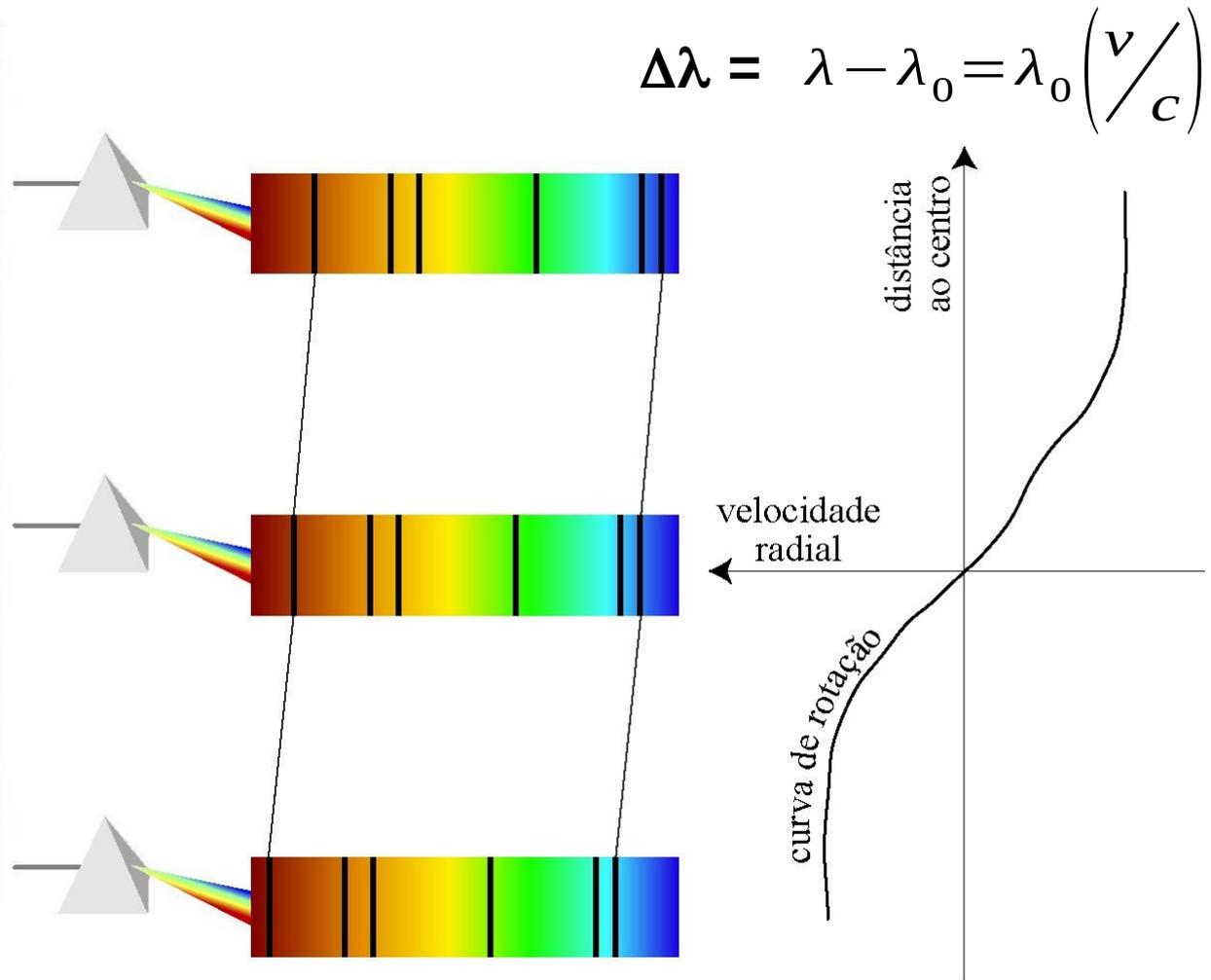
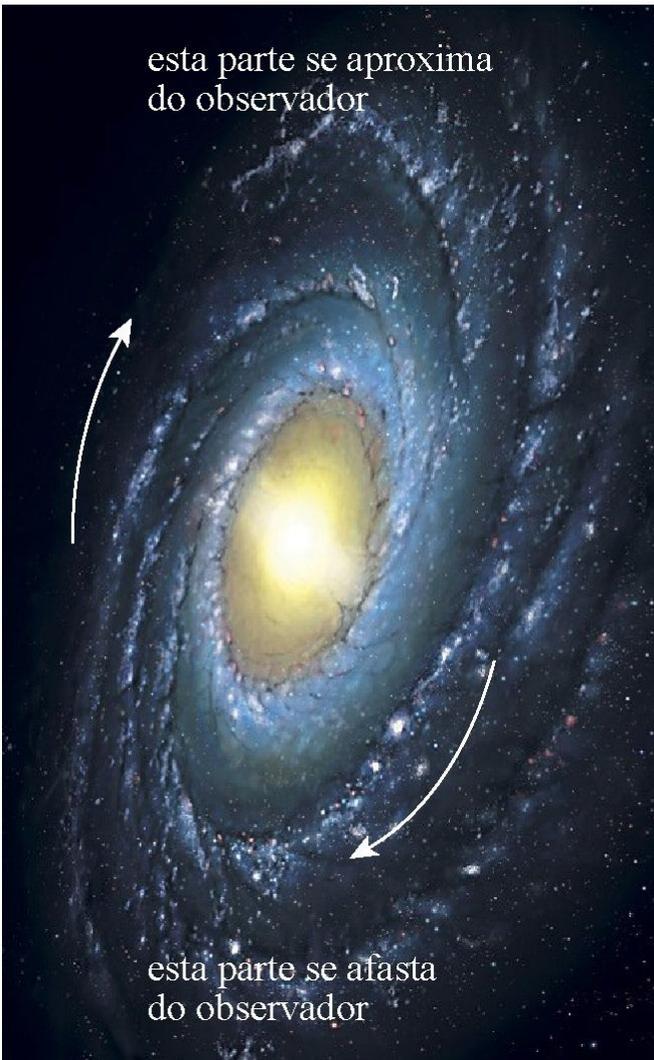
**Velocidade
positiva**

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

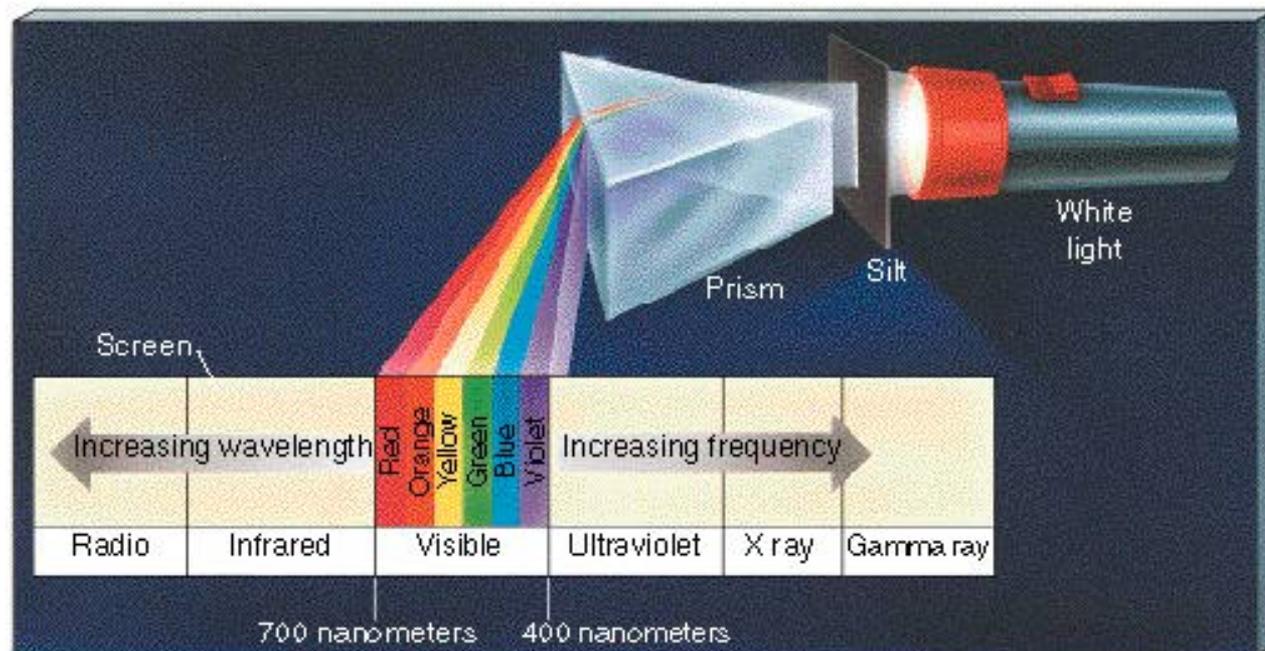
eV = eletrivolt, energia de um elétron que passa por uma diferença de potencial de 1 volt.

Espectro Eletromagnético

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

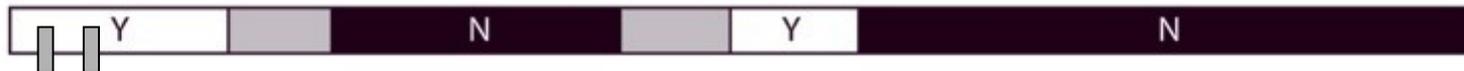
Sua intensidade em dada faixa do espectro: $I(\lambda)$

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



O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Penetra a atmosfera?



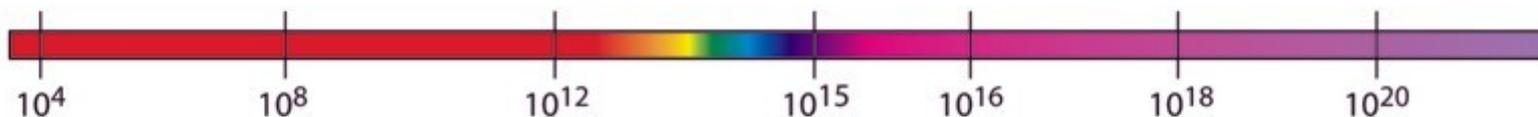
Comprimento de onda (λ) - em metros



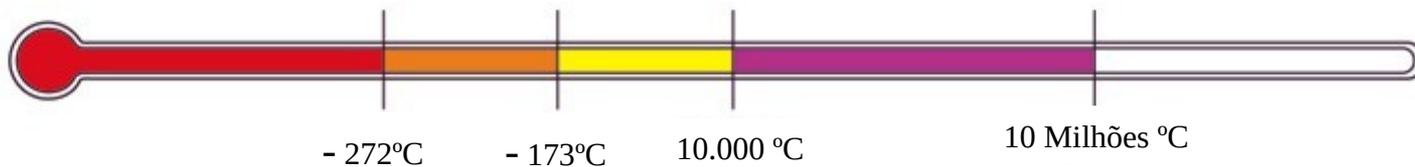
Do tamanho de...



frequência - em Hertz



Temperatura - em Celsius



Espectro Eletromagnético

Baixas frequências (λ grandes): à esquerda da luz visível

Radio (AM, FM, TV)

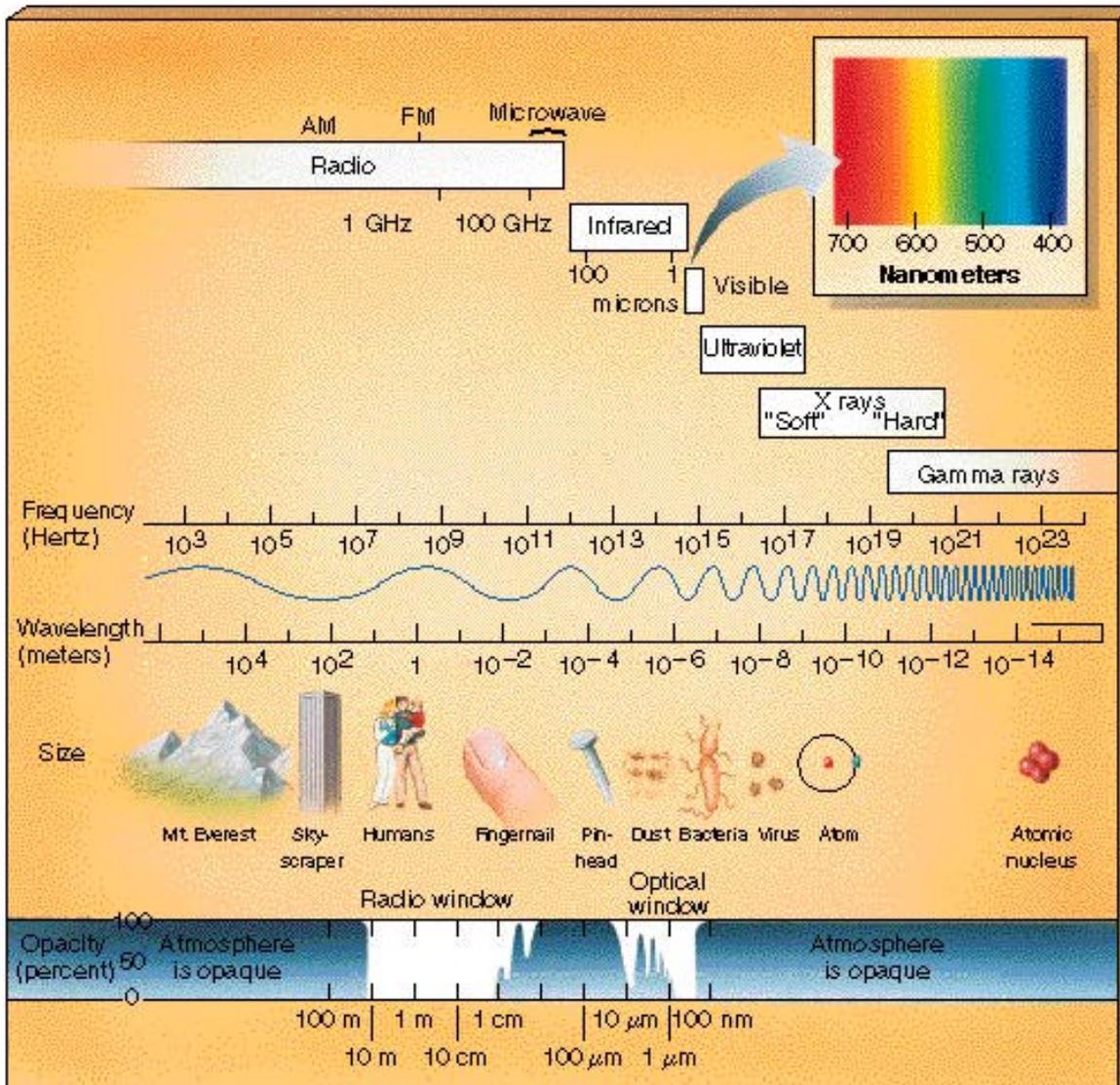
IV: percebemo-lo como calor

Altas frequências (λ s pequenos): à direita do visível:

UV: bronzeamento e queimaduras solares

raios-X: penetram tecido humano

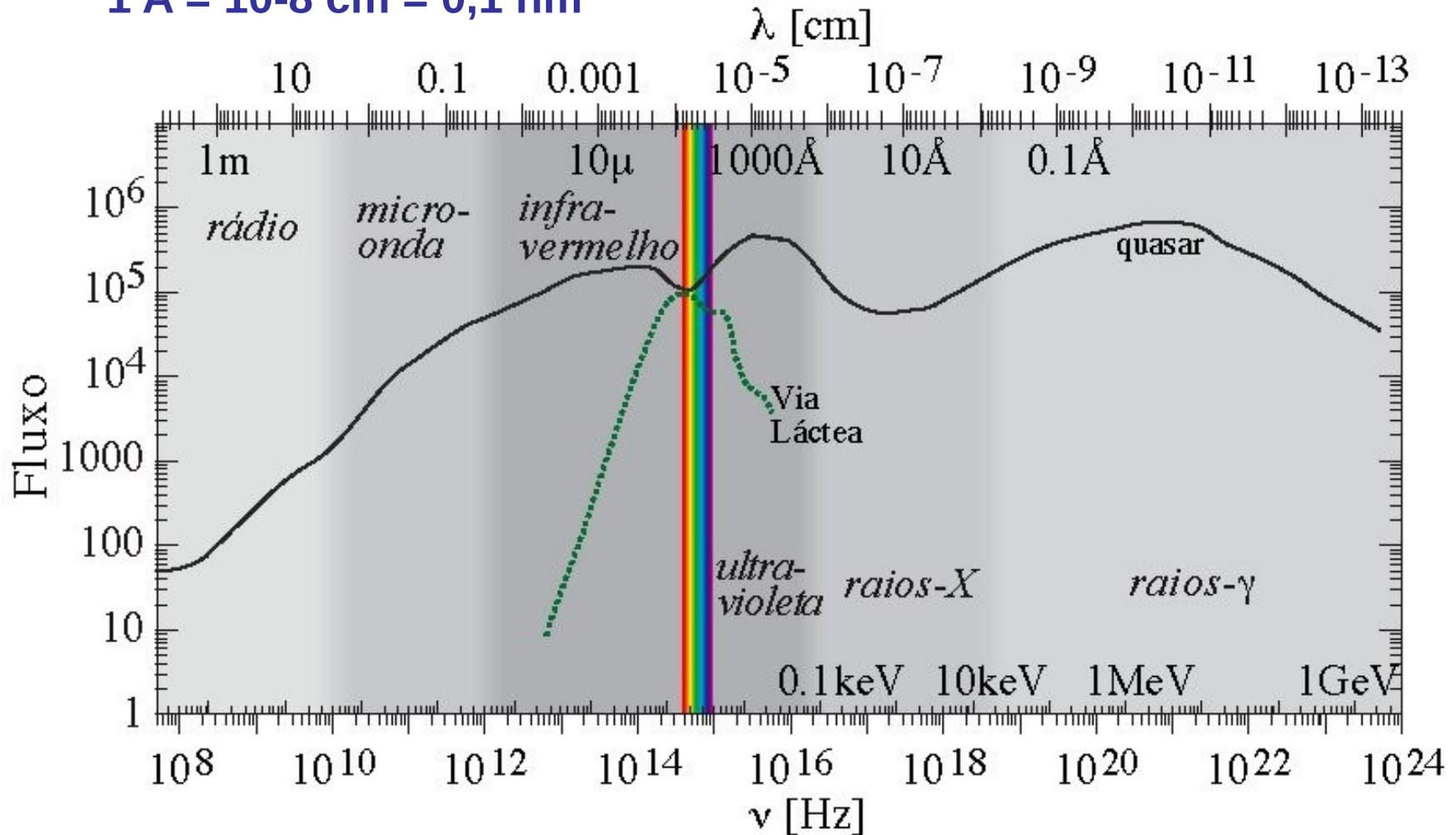
raios- γ : menores λ s, associados a radio-atividade, danosos a células vivas



Espectro eletromagnético

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

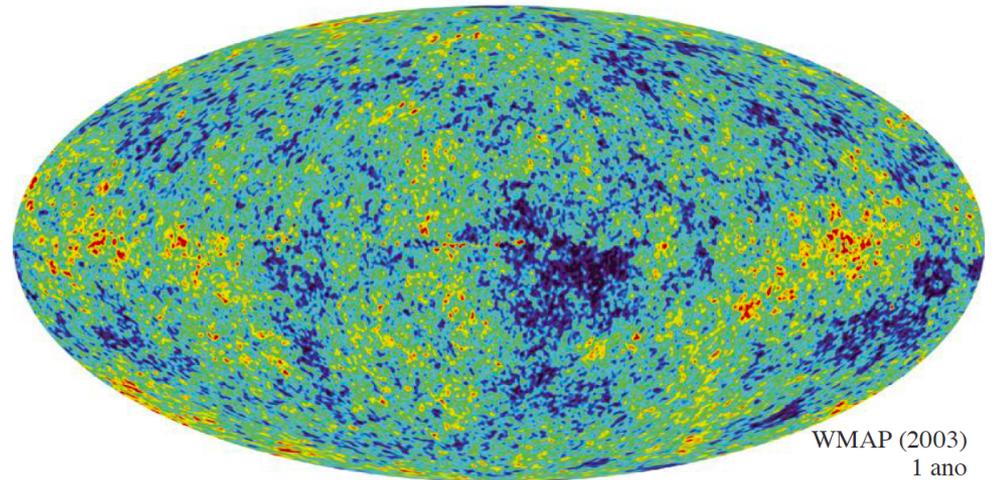
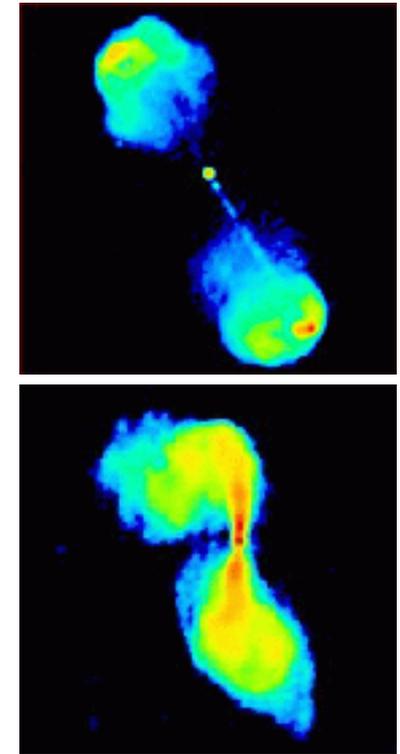
1 A = 10⁻⁸ cm = 0,1 nm



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

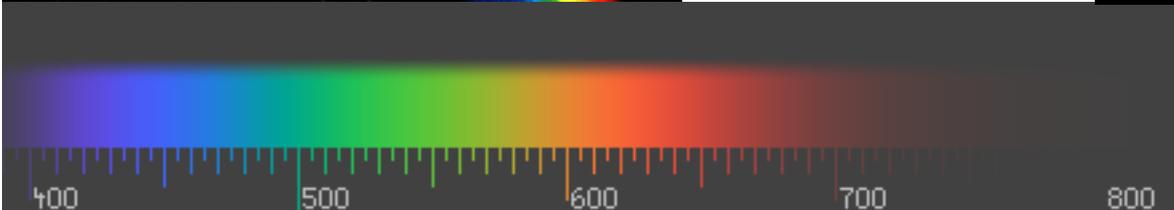
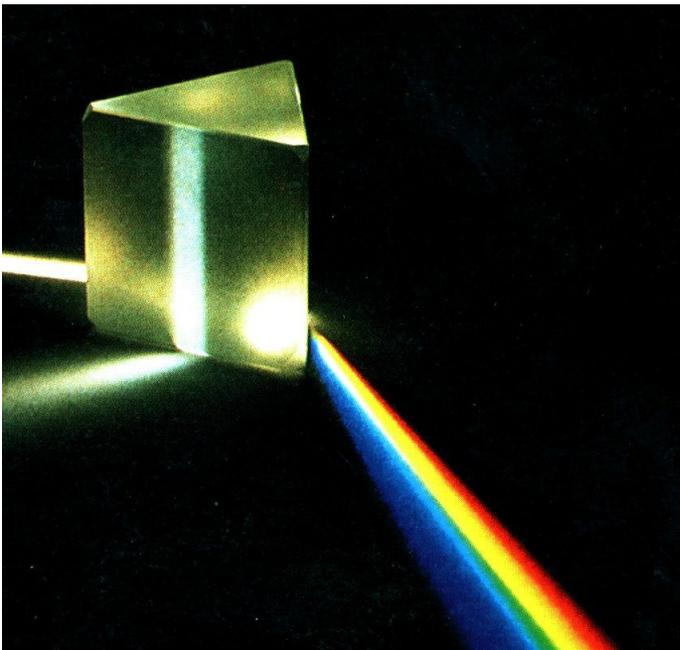
Infravermelho

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



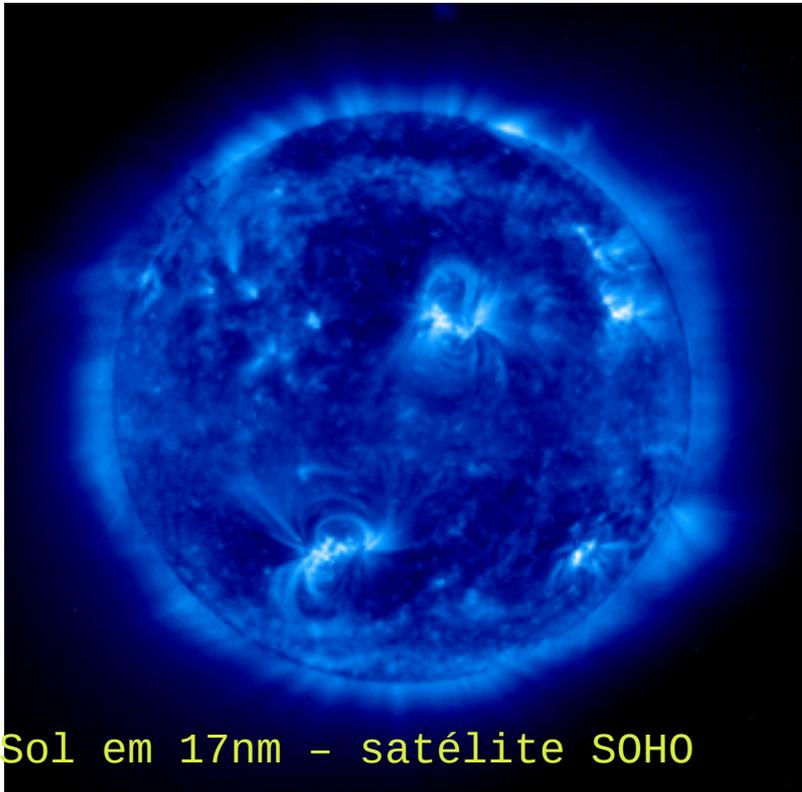
Visível

- 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

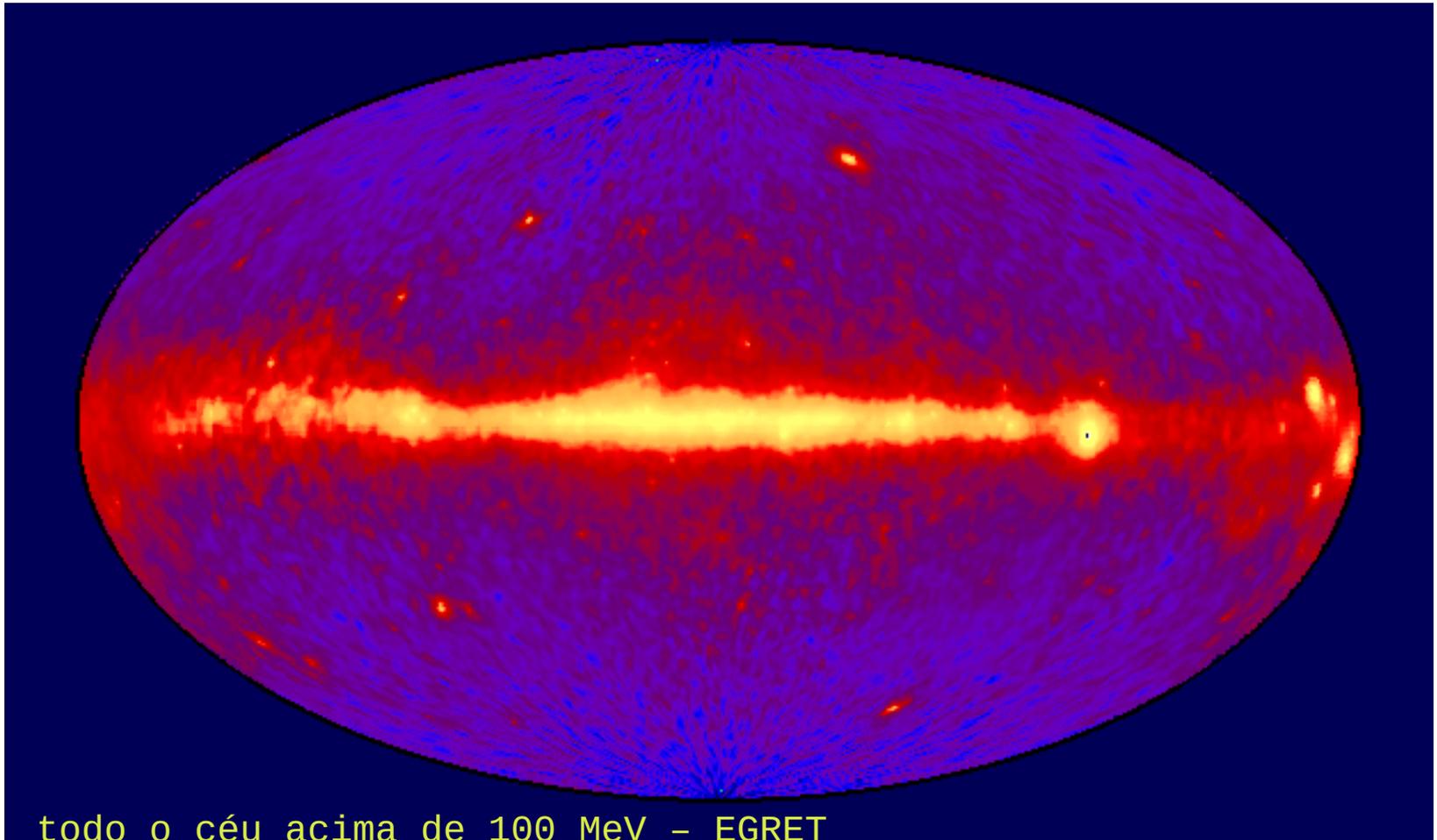
- **raios-X moles:** 0,1–10 keV (1 keV= 1000 eV)
 - núcleos ativos de galáxias, gás intra-aglomerado de galaxias
- **raios-X duros:** 10–100 keV
 - jatos de partículas relativísticas



aglomerado de galáxias 1E 0657-56 – Chandra

Raios- γ

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



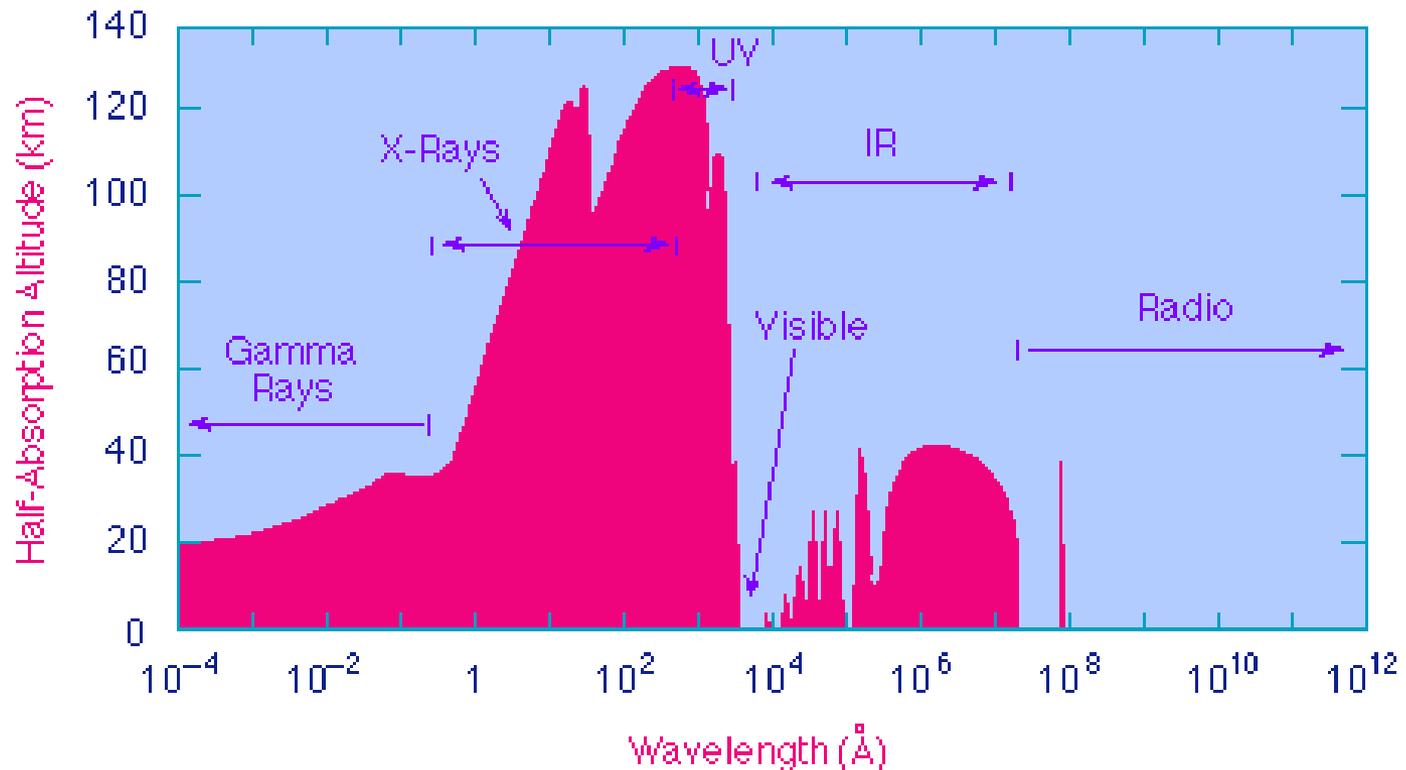
Janelas atmosféricas no espectro eletromagnético

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

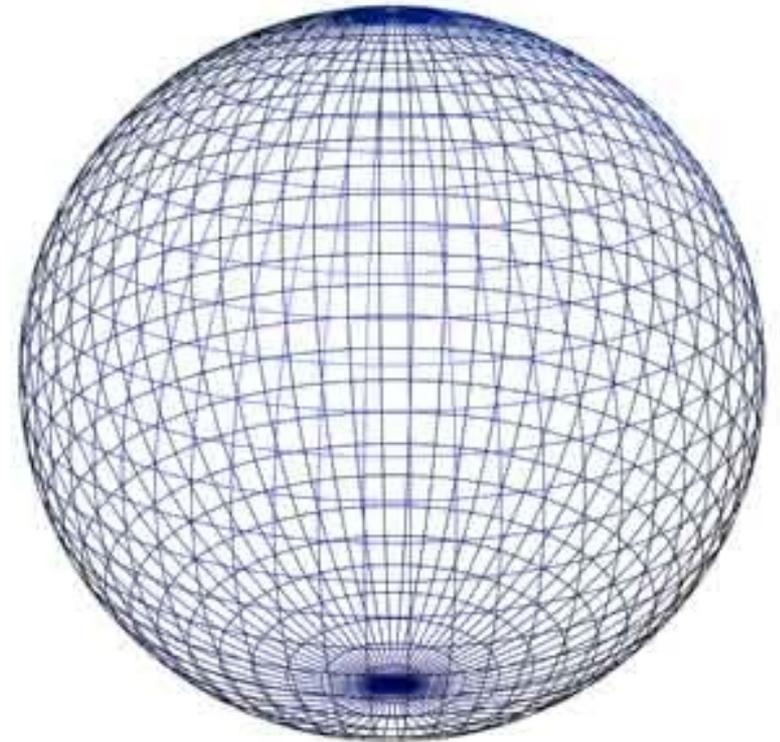
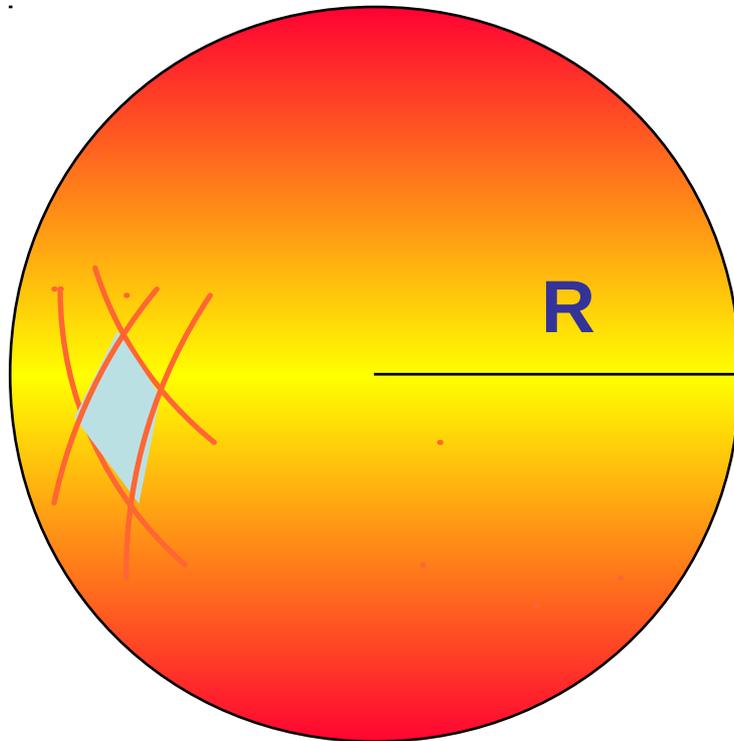
Para descrever radiação que chega na Terra:

⇒ 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

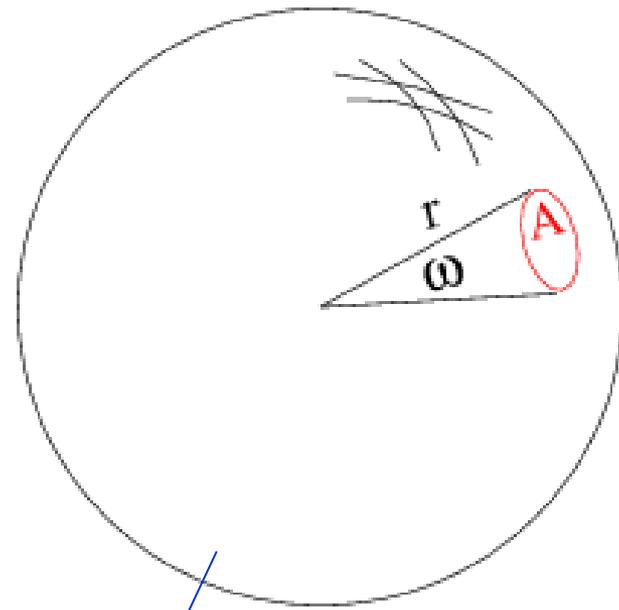
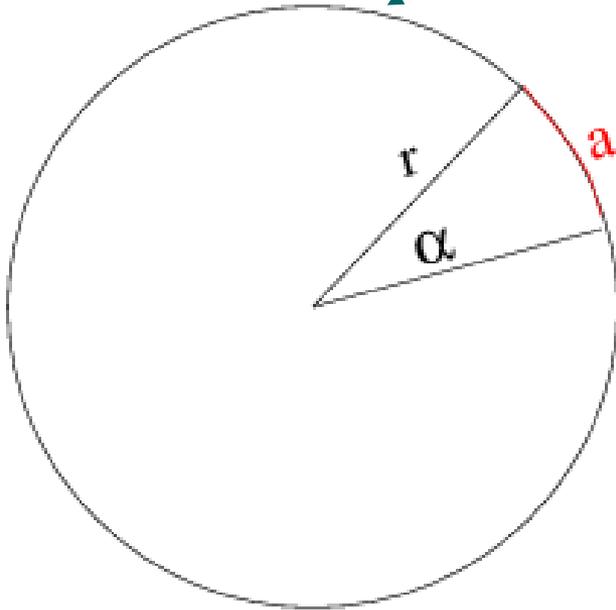


$$A = 4 \pi R^2$$

No círculo: ângulo entre duas retas

$$\alpha = a / r$$

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



Na esfera: ângulo sólido (abertura do cone)

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

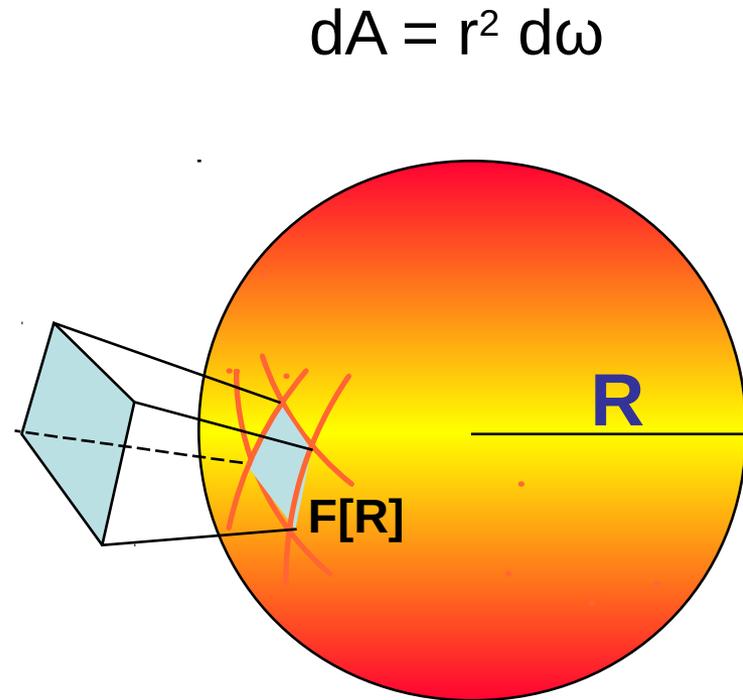
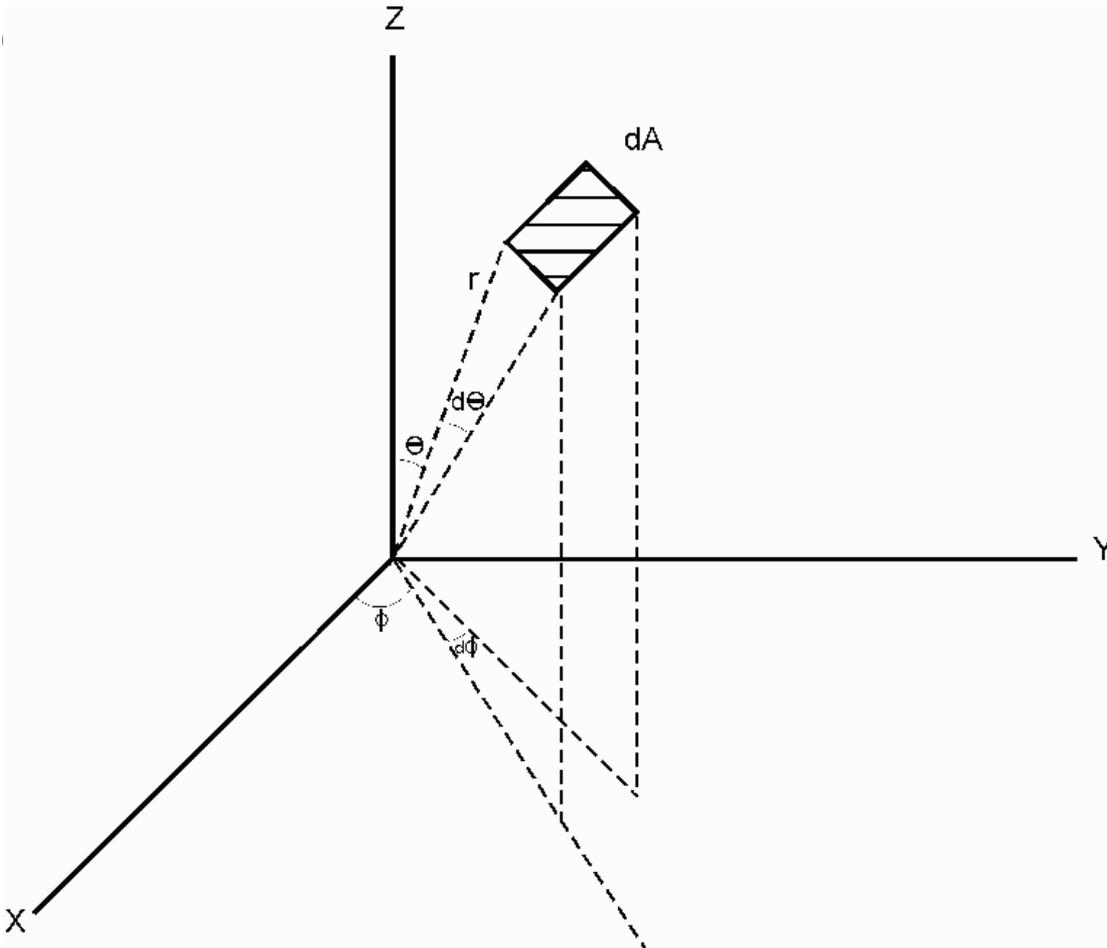
ω é medido em estero-radianos ($\omega = 4\pi$, toda a esfera; área de superfície $A = 4\pi r^2$)

Ângulo Sólido

Ângulo sólido em coordenadas esféricas:

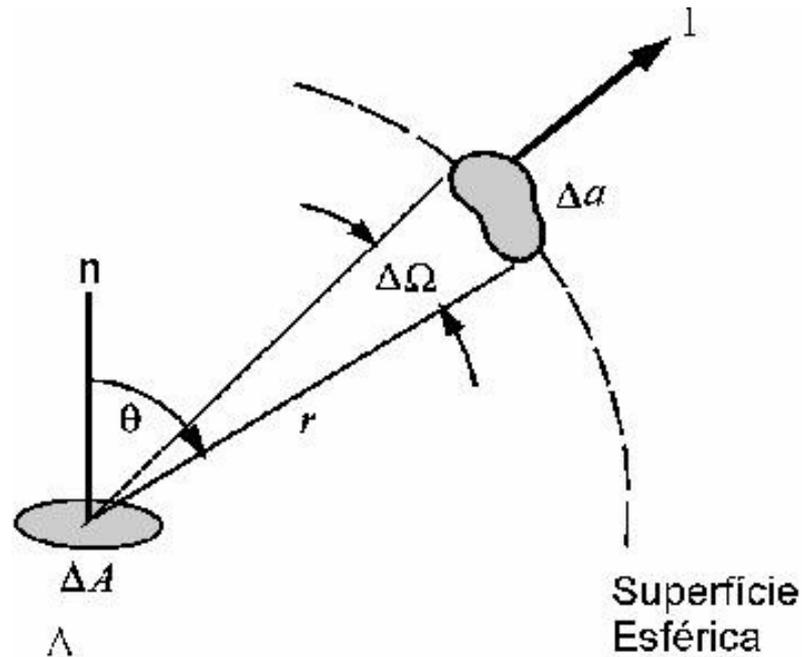
Elemento de área $dA = (r d\theta) (r \sin\theta d\phi) \longrightarrow dA = (r^2 \sin\theta d\theta d\phi)$

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



Considere \Rightarrow elemento de área Δa , formando um ângulo θ com a normal ao elemento ΔA :

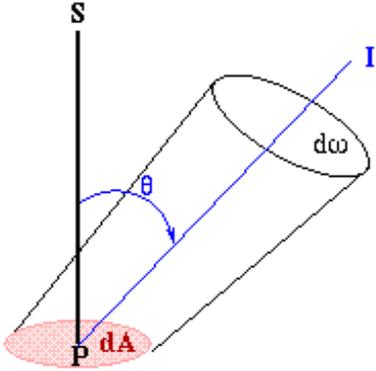
Intensidade I na direção θ : depende da posição, da direção e do tempo.



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

Intensidade monocromática (I_ν)

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



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

nas unidades:

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

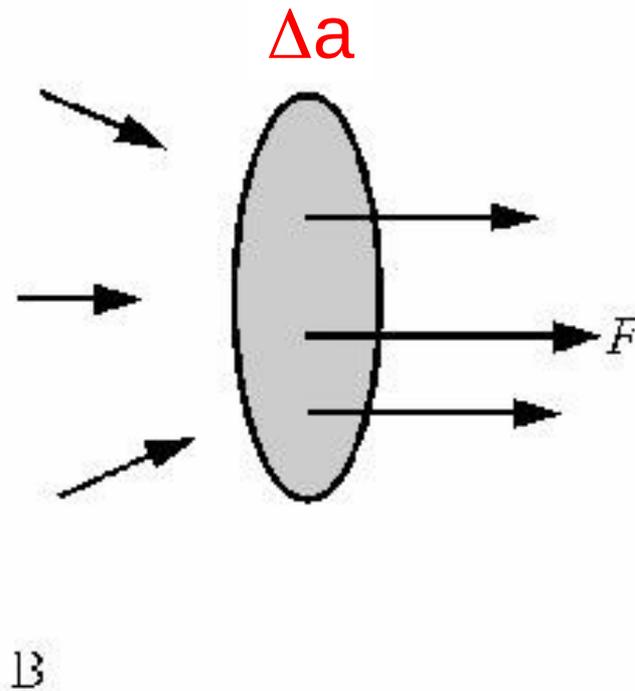
sr = esterorradiano \rightarrow unidade de ângulo sólido

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



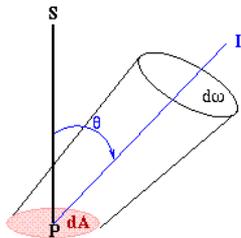
Fluxo: relaciona-se à energia que chega por unidade de tempo a uma unidade de área da superfície coletora (de um telescópio)

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 (Δt), por uma unidade de área (da superfície coletora) ΔA , 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_{ν} a uma dada freqüência, corresponde à integral das intensidades I_{ν} em todos ângulos sólidos:

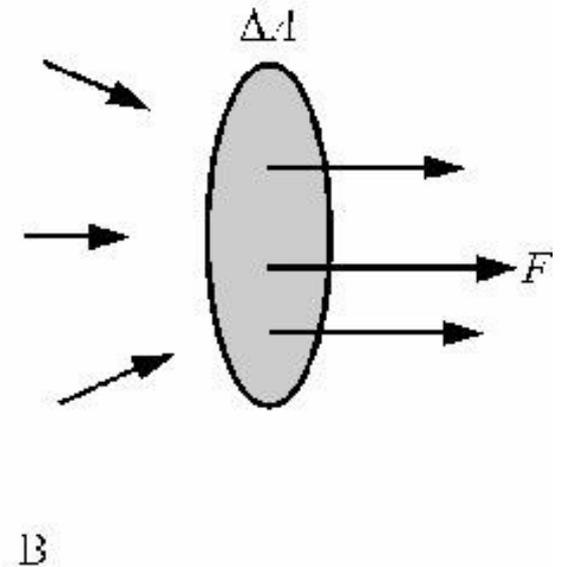
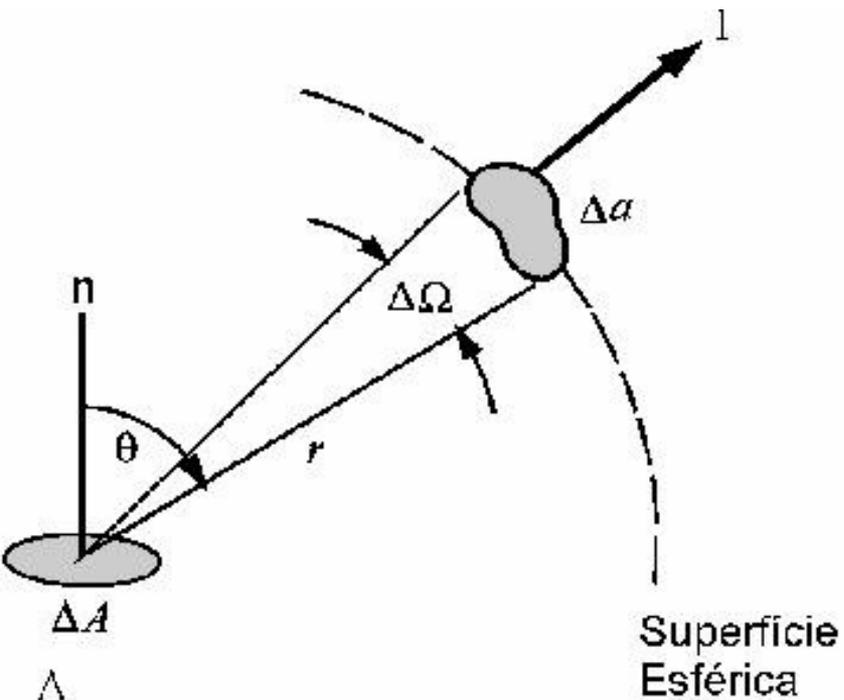


$$F_{\nu} = \int I_{\nu} \cos \theta d\omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} I_{\nu} \cos \theta \sin \theta d\theta d\Phi$$

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

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

Intensidade X Fluxo



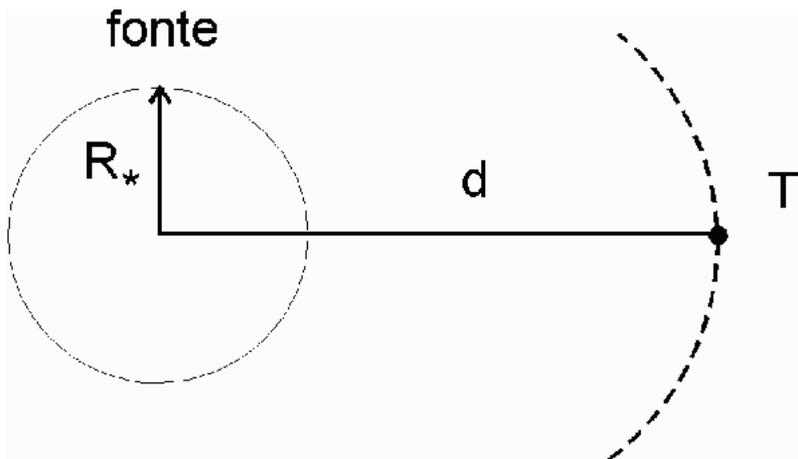
(A) **Intensidade**: relaciona-se a energia por uma unidade de área ΔA da fonte emissora, que atravessa um elemento de área Δa . (B) **Fluxo**: corresponde a energia que atravessa a unidade de area Δa da superfície (coletora) - **é composta de feixes de todas as direções**

Luminosidade

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

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

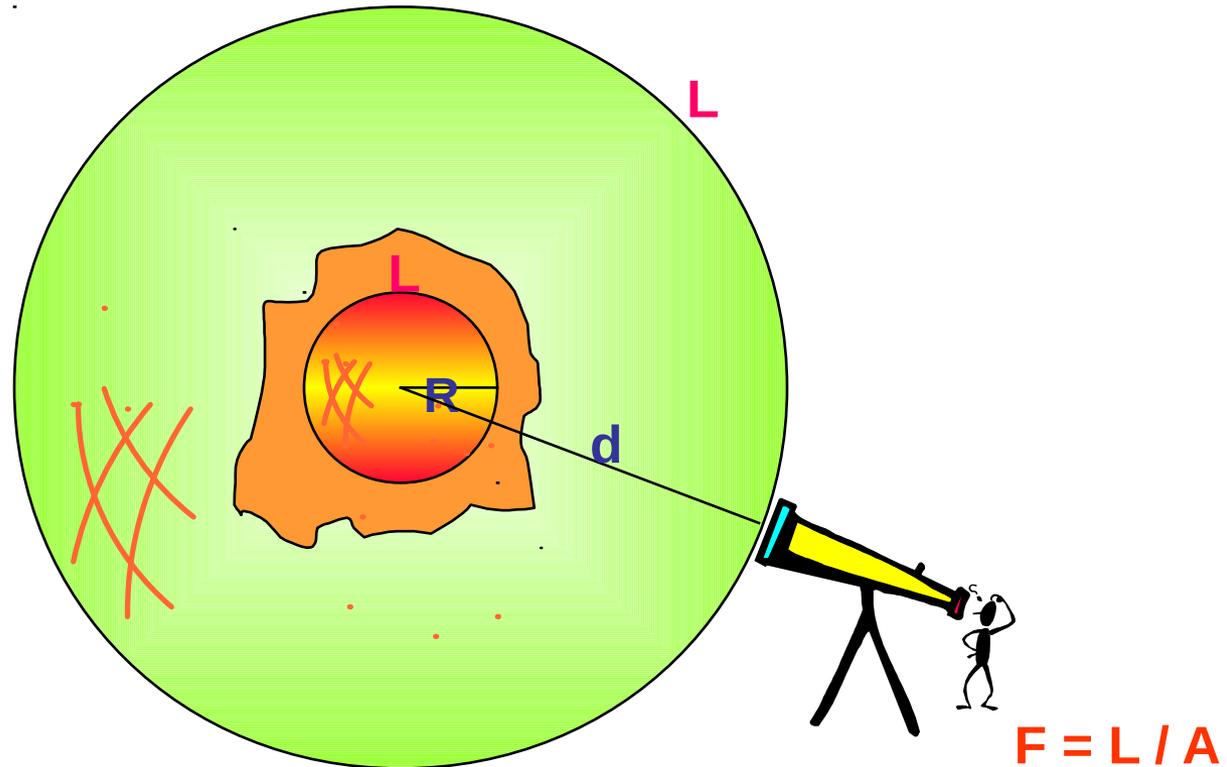
\Rightarrow potência irradiada :



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

[Watts ou
erg/s]

Fluxo à distância d



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

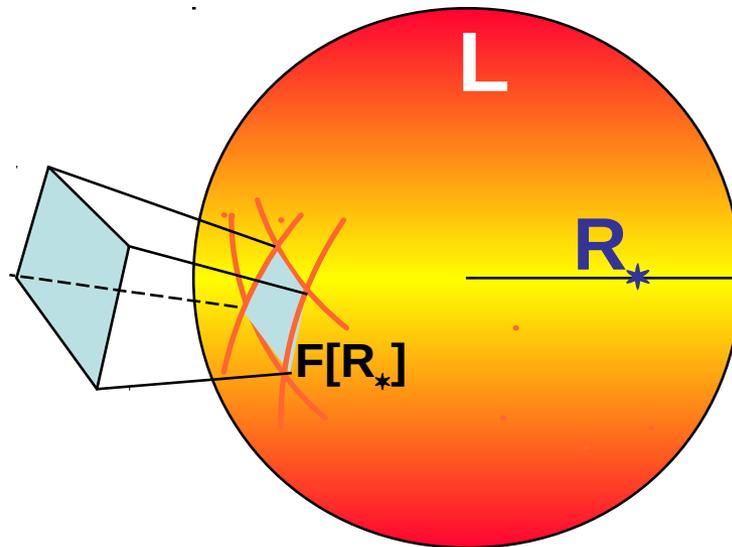
$$F = F[d] = L / (4\pi d^2)$$

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 está na superfície da estrela:

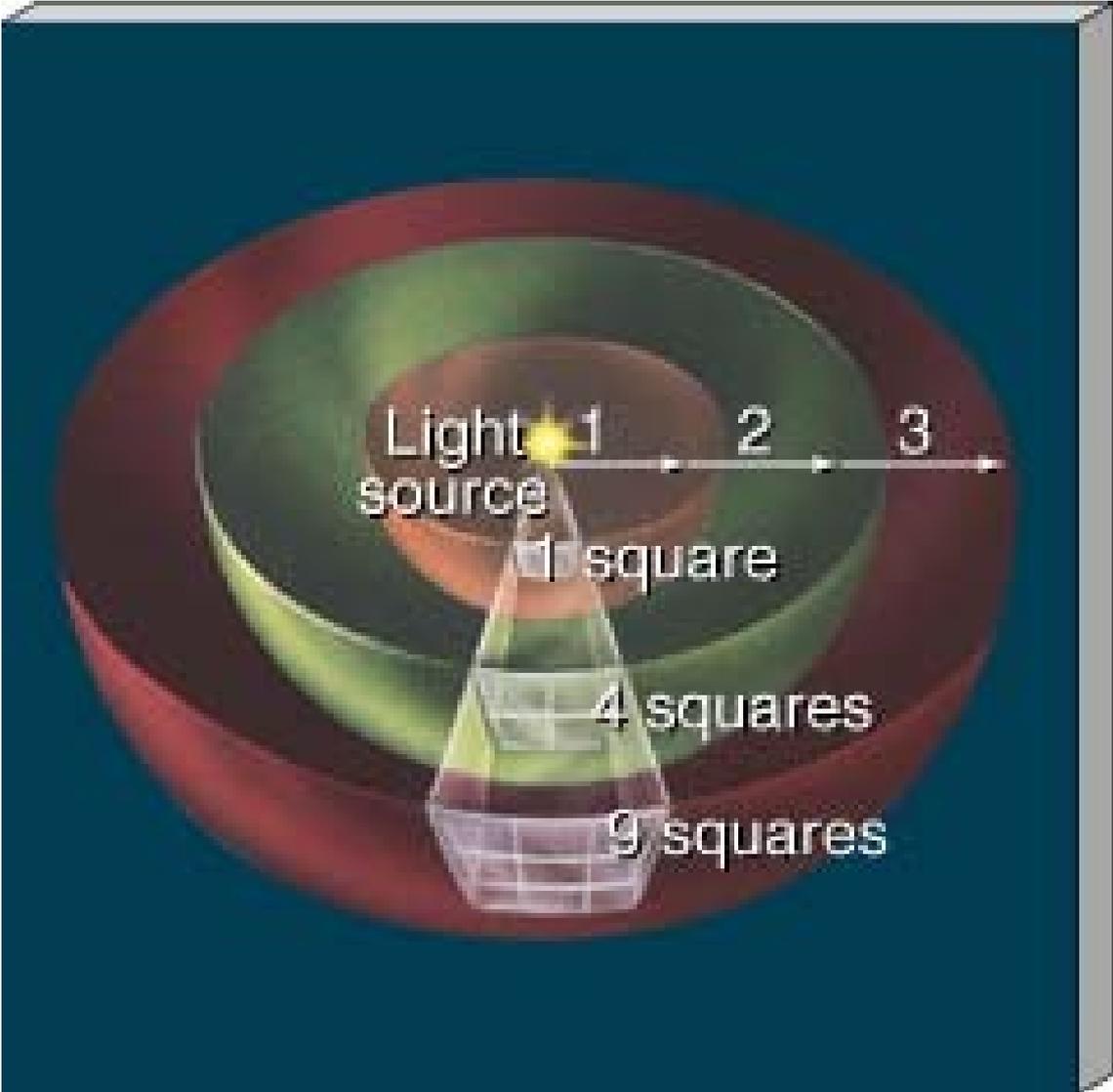
$$F(R_s) = \frac{L_s}{4\pi R_s^2} \quad \longrightarrow \quad L_s = 4\pi R_s^2 F(R_s)$$

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

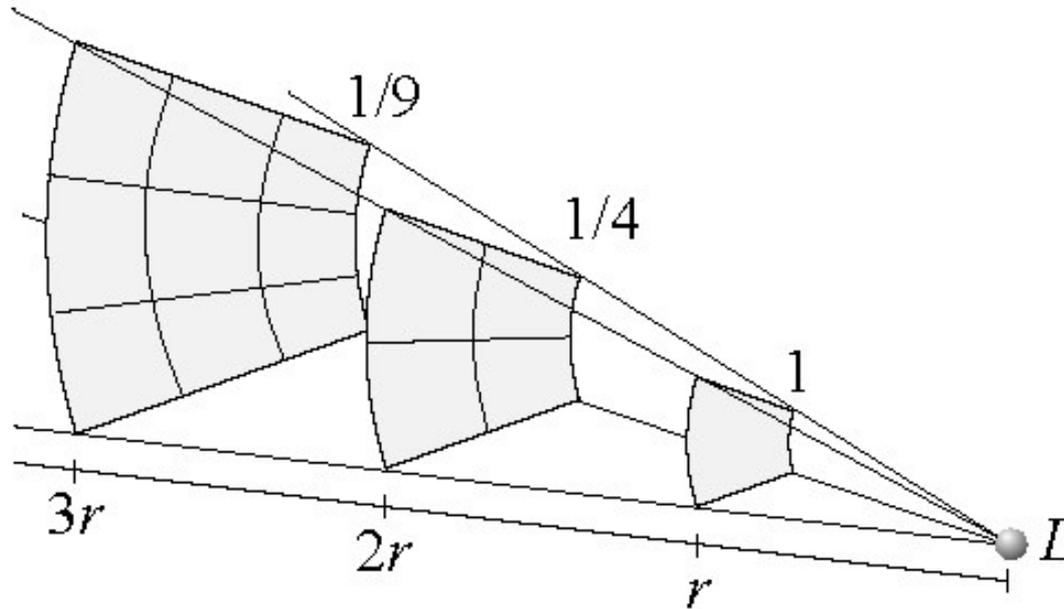
desta forma, o fluxo observado a uma distância d , é:

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

→ 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/metro².
 - luminosidade de Sirius (α CMa): $1,0 \times 10^{28}$ watt (i.e., $26,1 \times L_{\odot}$)
 - Fluxo (brilho aparente) de Sirius na Terra: $0,12$ watt/km²

