AGA0293 Astrofísica Estelar

Profa. Jane Gregorio-Hetem

Capítulo 3
O Espectro contínuo de luz

3.1 Paralaxe estelar

3.2 A escala de magnitudes

3.3 A natureza ondulatória da luz

3.4 Radiação de corpo-negro

3.5 Quantização de energia

3.6 O índice de cor

3.1 Paralaxe Estelar

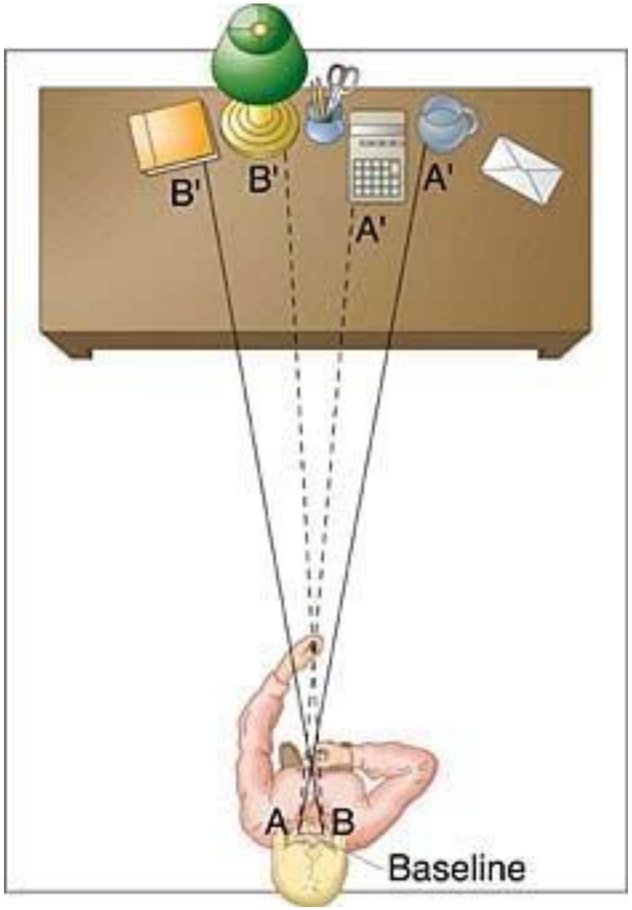
Determinação da Distância das Estrelas

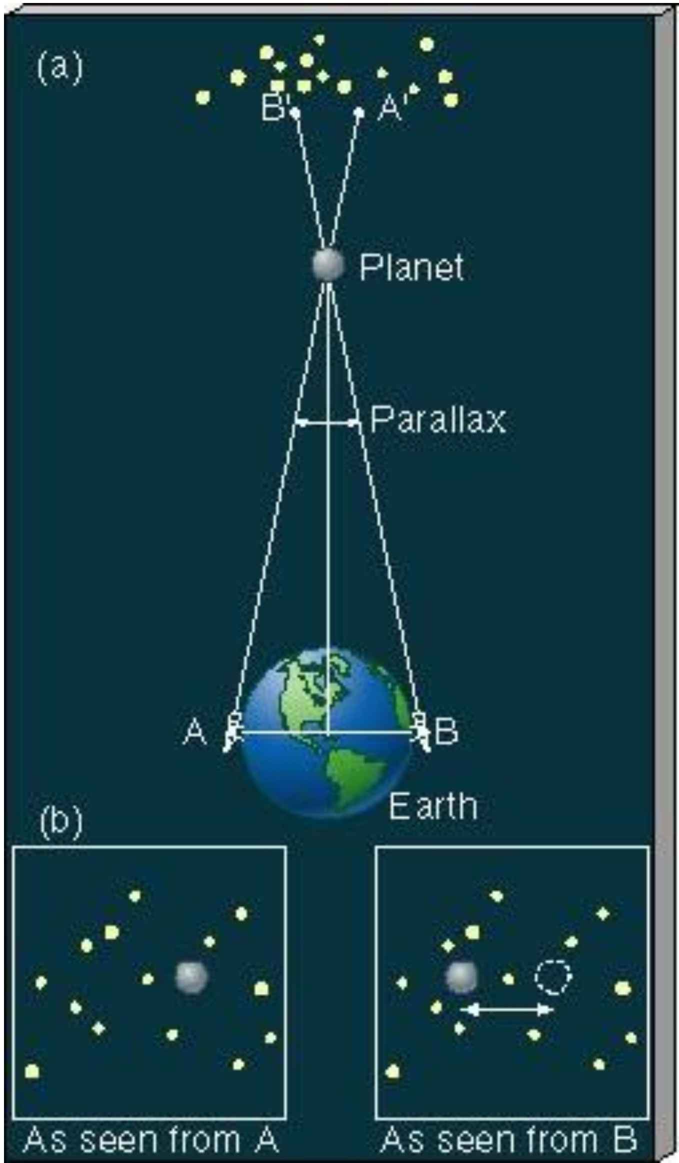
Métodos usados para o sistema solar (radares ou leis de Kepler - movimentos orbitais), não podem ser aplicados às estrelas.

Distâncias envolvidas grandes demais → outras formas de determinar o quanto elas estão distantes.

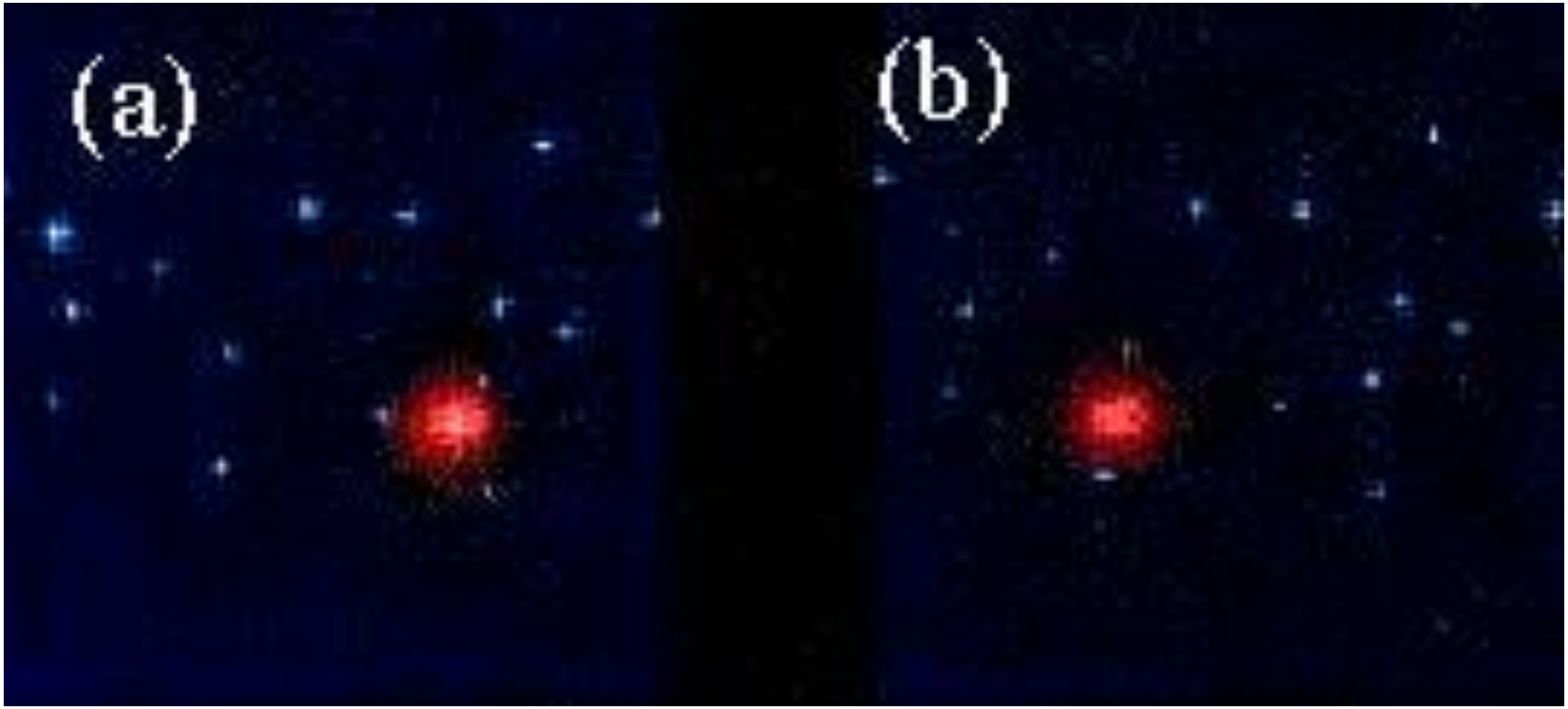
Paralaxe: ângulo medido a partir de diferentes pontos de vista (linha de base).

A paralaxe é inversamente proporcional à distância do objeto.

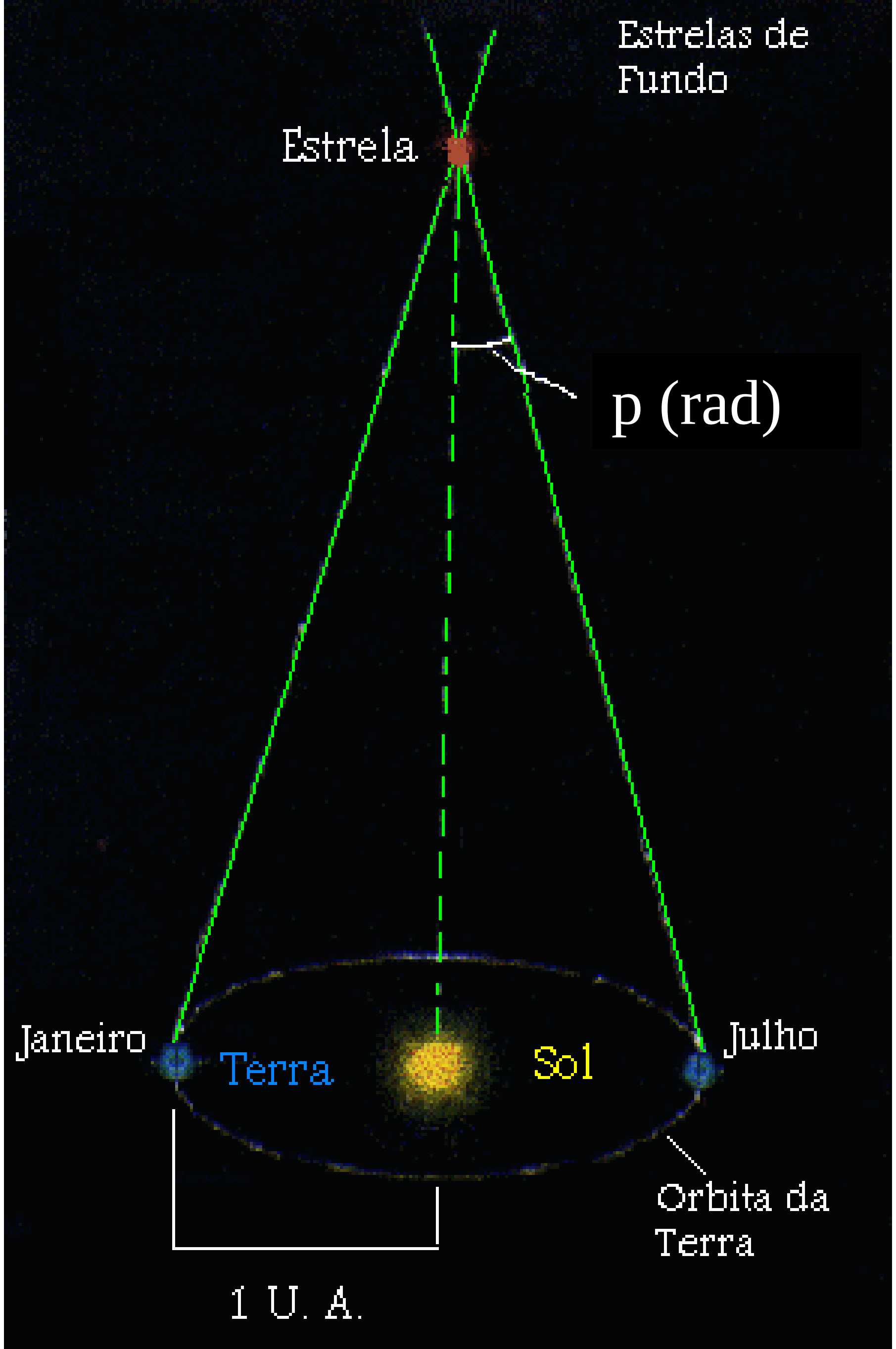




Maiores linhas de base permitem medir maiores distâncias pelo método da paralaxe:



As imagens (a) e (b) correspondem a uma mesma região do céu observada com seis meses de diferença, mostrando o movimento aparente de uma estrela, com relação às estrelas "*fixas*", ao fundo.



Paralaxe Trigonométrica

Quanto mais distante a estrela, menor é o ângulo paralático ➔ medida mais usual da paralaxe é dada em de segundos de arco (p ")*.

*Usando a aproximação de pequenos ângulos: tan p ≈ p (rad)

1 rad = 57,2958º = 206264,806”

Paralaxe Trigonométrica (cont.)

- Por convenção: uma estrela com paralaxe de 1" está a uma distância de 206265 U.A.
- Define-se essa distância como sendo de 1 **parsec** (1pc = $3{,}1 \times 10^{16}$ m =3,3 anos-luz) ➔ se conhecermos a medida da paralaxe (p") teremos a distância da estrela em parsec, dada por

$$d\ (pc) = 1/p''.$$

Exemplo: Bessel anunciou em 1938 o ângulo paralático p = 0,316" medido para estrela 61 Cygni, indicando uma distância $d = 1/\ 0{,}316'' = 3{,}16$ pc.

Paralaxe Trigonométrica (cont.)

- Dada a definição de parsec e a conversão de radianos para segundos de arco:

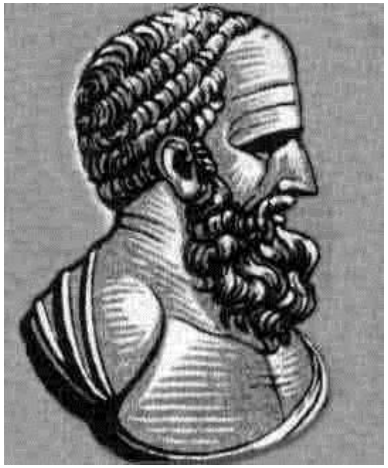
$$\boxed{d(pc) = \frac{1}{p('')}}$$

$$\boxed{d(UA) = \frac{206265}{p('')}}$$

se a paralaxe é dada em radianos, temos a distância em U.A.

$$\boxed{d(UA) = \frac{1}{p(rad)}}$$

3.2 Escala de Magnitude



Magnitude Aparente (m)

- Definida por Hiparcos, refinada por Ptolomeu.
- Estrelas mais brilhantes* ⇨ 1ª magnitude,
  magnitude aparente m_1 ⇨ F_1.
- Estrelas de menor brilho 6ª magnitude, m_6 ⇨ F_6.
- Na convenção moderna ⇨ $F_1 = 100\ F_6$.

(*) vamos usar F_i (fluxo radiante) para denotar o brilho aparente de uma estrela com magnitude m_i.

Uma diferença de 5 magnitudes corresponde a um fator 100 em brilho:

- $\Delta m = m_6 - m_1 = 5 \Rightarrow F_1 / F_6 = 100$
- $\Delta m = m_5 - m_1 = 4 \Rightarrow F_1 / F_5 = 100^{4/5}$
- $\Delta m = m_4 - m_1 = 3 \Rightarrow F_1 / F_4 = 100^{3/5}$
- $\Delta m = m_3 - m_1 = 2 \Rightarrow F_1 / F_3 = 100^{2/5}$
- $\Delta m = m_2 - m_1 = 1 \Rightarrow F_1 / F_2 = 100^{1/5} = 2{,}512$

Uma diferença de 1 magnitude corresponde a um fator 2,512 em brilho

Razão de fluxos em função das diferenças de magnitudes:

$\Delta m = m_j - m_i \Rightarrow F_i / F_j = 100^{\Delta m/5}$

$$\log \frac{F_i}{F_j} = \left(\frac{m_j - m_i}{5} \right) \log 100 \Rightarrow \log \frac{F_i}{F_j} = 0{,}4 \left(m_j - m_i \right)$$

$$m_j - m_i = 2{,}5 \log \frac{F_i}{F_j}$$

Expressão genérica
magnitude zero ⇨ fluxo de calibração

Admite-se que: $m_i = 0$ ⇨ $F_i = F_0$ = constante.

Para estabelecermos a magnitude $m_j = m$ de uma estrela, vamos supor que seu fluxo seja $F_j = F$:

$$m_j - m_i = 2{,}5 \log \frac{F_i}{F_j} \quad \Rightarrow \quad m - 0 = 2{,}5 \log \frac{F_0}{F}$$

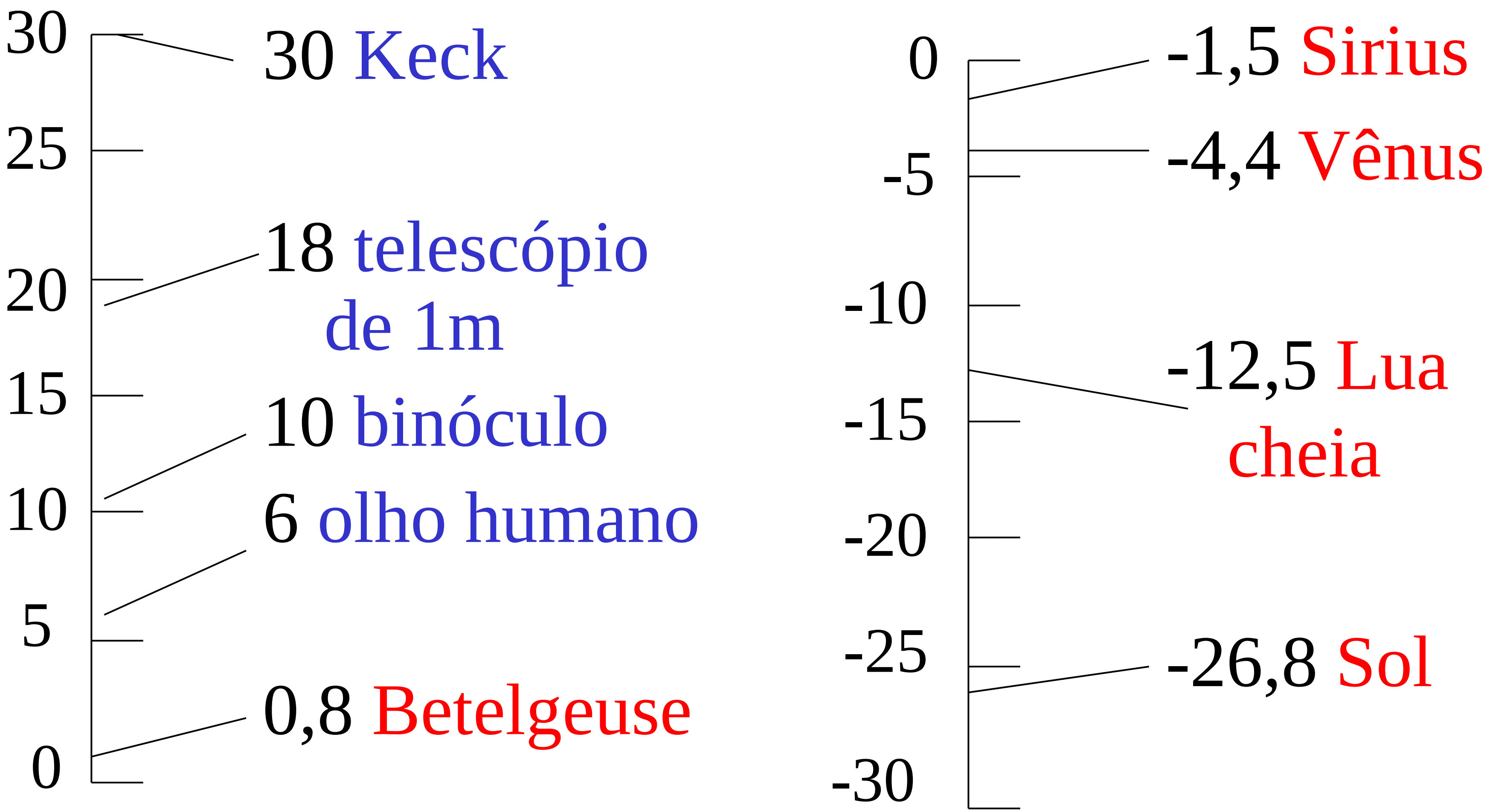
$$m = 2{,}5 \log F_0 - 2{,}5 \log F$$

C = cte.

$$\boxed{m = C - 2{,}5 \log F}$$

Limite de detecção de alguns telescópios e magnitude aparente de alguns astros

$$m \propto -2{,}5 \log F$$



Fluxo, Luminosidade
e a lei do inverso do quadrado da distância

- Brilho aparente pode ser medido

(fluxo = energia detectada numa dada área de superfície coletora, num intervalo de tempo).

- Luminosidade: Variação de energia por unidade de tempo (Potência) emitida na superfície da estrela.

Ex: Sol: $L_{\odot} \sim 4 \times 10^{26}$ Watts.

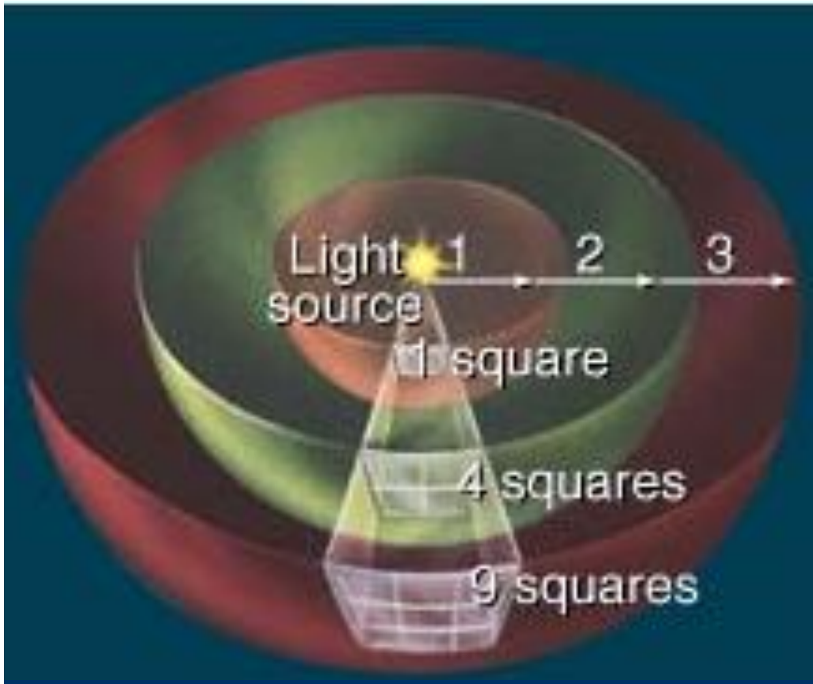
é intrínseca: não depende da localização ou do movimento da estrela, mas não é diretamente observável.

Fluxo de Radiação Estelar

Imagine uma estrela de luminosidade L rodeada por uma enorme esfera de raio r. Qual é o fluxo de radiação medido à distância r?

À medida que nos distanciamos de uma fonte de luz, sua radiação é diluída, de forma que a radiação recebida em um detector diminui com o quadrado da distância.

$$F(r) = \frac{L}{4\pi r^2}$$



Créditos: Chaisson & McMillan (Cap. 10)

Exemplo: Irradiância solar (constante solar)

A luminosidade do Sol é $L_\odot = 3{,}839 \times 10^{26}$ W. A uma distância de 1 U.A. = $1{,}496 \times 10^{11}$ m, a Terra recebe um fluxo de radiação acima de sua atmosfera absorvedora de:

$$\boxed{F = \frac{L}{4\pi r^2} = \frac{3{,}839\text{x}10^{26}}{4\pi\,(1{,}496\text{x}10^{11})^2} = 1365\ \mathrm{W\,m^{-2}}}$$

O fluxo (F) observado depende da luminosidade (L) e da distância (d) da estrela:

$$F(d) = \frac{L}{4\pi d^2}$$

$$m = C - 2{,}5 \log F$$

$$m = C - 2{,}5 \log L + 2{,}5 \log(4\pi d^2)$$

$$\boxed{m = C' - 2{,}5 \log L + 5 \log d}$$

onde C'=C+(2,5log 4 π) e

m é a magnitude aparente da estrela.

Magnitude Absoluta

- Para comparação entre diversas estrelas adota-se uma mesma distância (10 pc) para todas:

M, 10pc, L_*, F_{10}

m, d, L_*, F_d

M = m(d=10pc)

$$m = C' - 2{,}5\log L + 5\log d$$

$$\boxed{M = C' - 2{,}5\log L + 5}$$

Módulo de distância

- Comparação entre magnitudes aparente (observada) e absoluta (determinada pela luminosidade da estrela).

$$m\text{-}M = (C' - 2{,}5 log L + 5 log d) + (C' - 2{,}5 log L + 5 log 10)$$

$$m - M = 5\log d - 5 \quad \Rightarrow \quad \boxed{m - M = 5\log\frac{d}{10}}$$

ATENÇÃO: distância em pc.

(*) Supondo ausência de extinção interestelar, a qual afeta a magnitude aparente.

Exemplo: Magnitude absoluta do Sol (M_{Sol})*

A magnitude aparente do Sol é m_{Sol} = -26,83 mag. e sua distância é d = 1 U.A. = 4,949 × 10^{-6} pc. Pela equação do módulo de distância temos:

$$\boxed{m - M = 5 \log \frac{d}{10}}$$

$$\boxed{M_{Sol} = m_{Sol} - 5 \log \frac{d(pc)}{10}}$$

$$\boxed{M_{Sol} = -26{,}83 - 5 \log \frac{4{,}949 \times 10^{-6}}{10}}$$

$$\boxed{M_{Sol} = +4{,}74}$$

* Vamos adotar para as magnitudes m e M com "Sol" sub-escrito, para evitar confusão com o símbolo de massa solar $M_{\odot}$

- Comparando duas estrelas à mesma distância:

$$M = C' - 2{,}5\log L + 5$$

$$M_1 - M_2 = -2{,}5\log\left(\frac{L_1}{L_2}\right)$$

- Supondo que uma delas é o Sol, temos a magnitude absoluta da outra estrela:

$$M_* = M_{Sol} - 2{,}5\log\left(\frac{L_*}{L_{Sol}}\right)$$

- Útil para determinar a distância das estrelas variáveis pulsantes.

3.3 Natureza ondulatória da luz

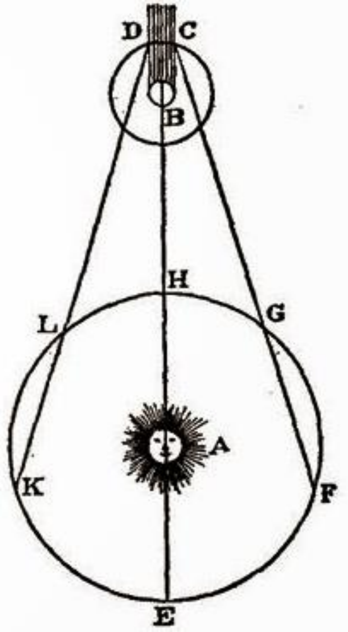
A velocidade da luz: experiência de Roemer

- Observação das luas de Júpiter quando passavam pela sombra do planeta → usando leis de Kepler → previsão dos próximos eclipses das luas;
- Quando a Terra estava mais próxima de Júpiter, os eclipses ocorriam antes do previsto;
- Roemer concluiu que a discrepância era causada pela diferença no tempo que a luz leva para se deslocar entre os dois planetas → 22 minutos para cruzar o diâmetro da órbita da Terra*

  → $v_{luz} \sim 2{,}2 \times 10^{8}$ m s^{-1}
- Em 1983 v_{luz} no vácuo formalmente definida:

$c = 2{,}99792458 \times 10^{8}$ m s^{-1}

Ole Christensen Roemer
(1644-1710)

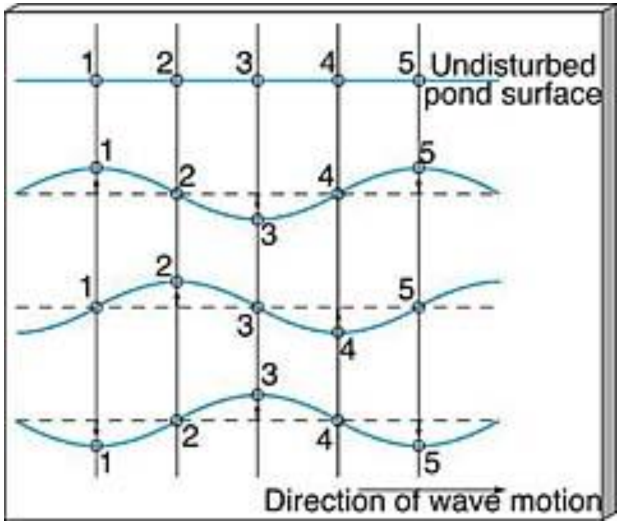


* Hoje sabemos que a luz leva cerca de 16,5 minutos para cruzar 2 U.A.

Dualidade partícula-onda: experiência de Young

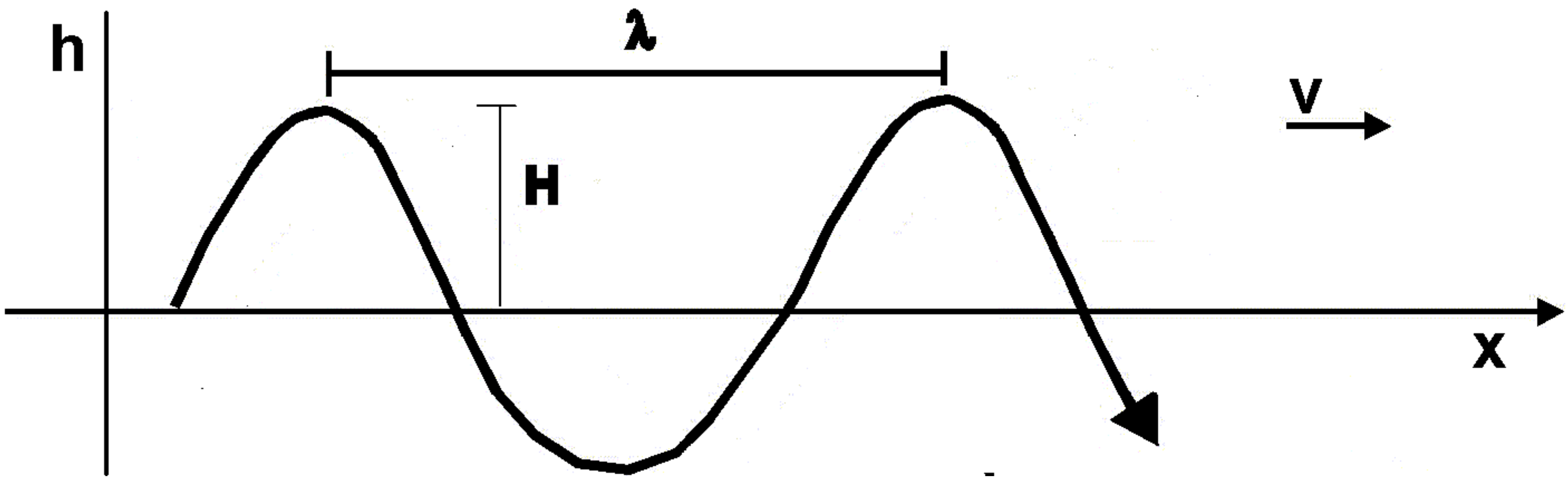
- Newton acreditava que a luz consistia de um feixe de partículas;
- Hyugens (1629 – 1695) sugeriu que a luz fosse ondas semelhantes a outros exemplos de ondas encontrados na natureza*

A distância entre duas cristas é o comprimento de onda λ e o número de ondas que passam por um determinado ponto no espaço é a frequência ν, tal que a velocidade da luz é $c = \lambda \nu$



* Ao contrário dos outros tipos, as ondas eletromagnéticas não necessitam de um meio físico para serem transportadas.

A natureza da luz: ondulatória (cont.)



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

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

Determinação do Período e da Frequência de oscilação

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

- Expressão num dado instante:

quando fixamos t=0 ⇨

$$h = H \ sen\left[\frac{2\pi\, x}{\lambda}\right]$$

o primeiro máximo será dado por

onde h = H

$$x = \frac{\lambda}{4}$$

Período e frequência de oscilação (cont.)

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

Evolução no tempo

fixando $x = \dfrac{\lambda}{4}$ ⇨

$$h = H\ sen\left[\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{\lambda}{4} - \mathrm{v}\,t\right)\right]$$

$$h = H\ \mathrm{sen}\left[\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{\lambda}\mathrm{v}\ \mathrm{t}\right]$$

máximos (h=H)

em t=0 e em

período

$$\boxed{\mathrm{t} = \frac{\lambda}{\mathrm{v}}}$$

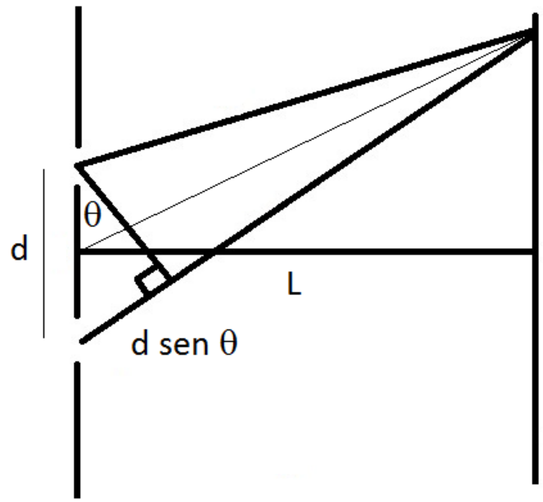
$$\boxed{\mathrm{f} = \frac{\mathrm{v}}{\lambda}}$$

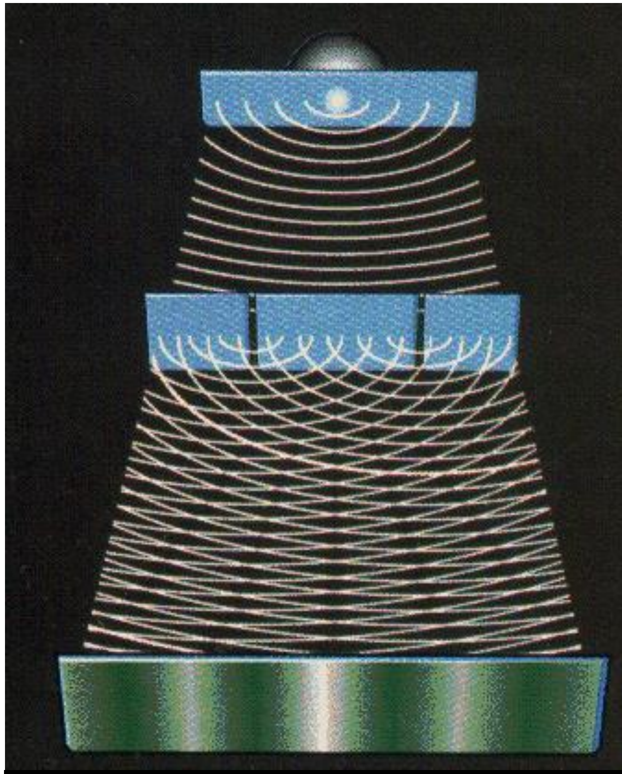
frequência

$$\boxed{\nu = \frac{c}{\lambda}(Hz)}$$

A natureza ondulatória da luz só foi conclusivamente demonstrada por Thomas Young (1773-1829), com o experimento da dupla fenda

A luz atravessa duas fendas separadas pela distância d, atingindo uma tela atrás das fendas, a uma distância L.



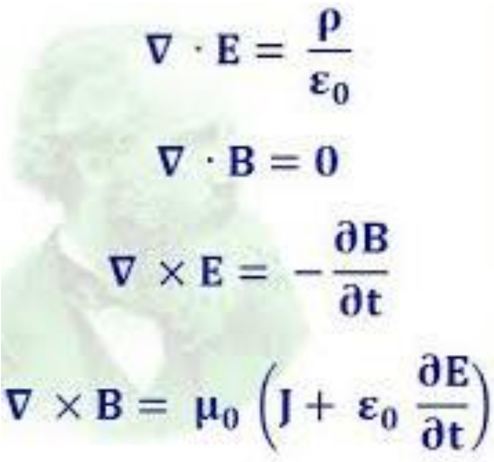


Interference fringes, the constructive and destructive interference of light waves.

abyss.uoregon.edu/~js/21st_century_science/lectures/lec13.html

Na tela aparecem franjas de interferência, cujo padrão é dado pela diferença dos caminhos percorridos pela luz: d sen θ (se L >> d), tal que:

$$d \operatorname{sen}\theta = \begin{cases} n\,\lambda & (n = 0,1,2,..\text{franjas brilhantes}) \\ (n-\tfrac{1}{2})\,\lambda & (n = 1,2,..\text{franjas escuras}) \end{cases}$$



A teoria de Ondas Eletromagnéticas (cont.)

James Clerk Maxwell
(1831-1879)

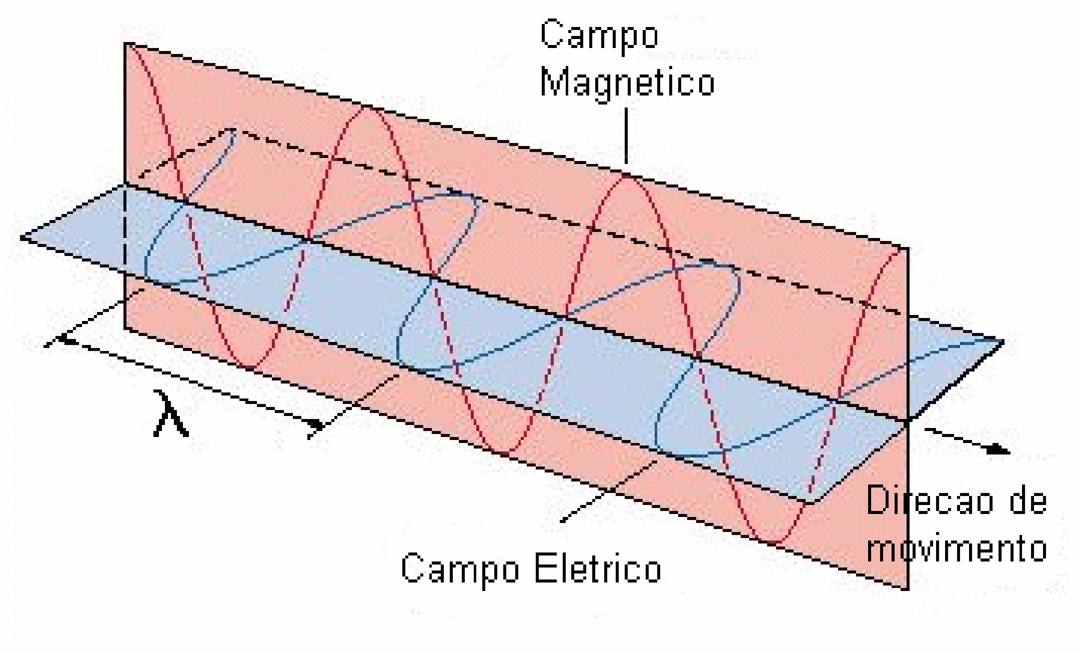
Das equações de Maxwell → campos elétrico (**E**) e magnético (**B**) → equação de ondas eletromagnéticas → deslocam-se no vácuo à velocidade:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_o \mu_o}}$$

Substituindo pelos valores das constantes ε_o e μ_o Maxwell descobriu que as ondas eletromagnéticas viajam à velocidade da luz.

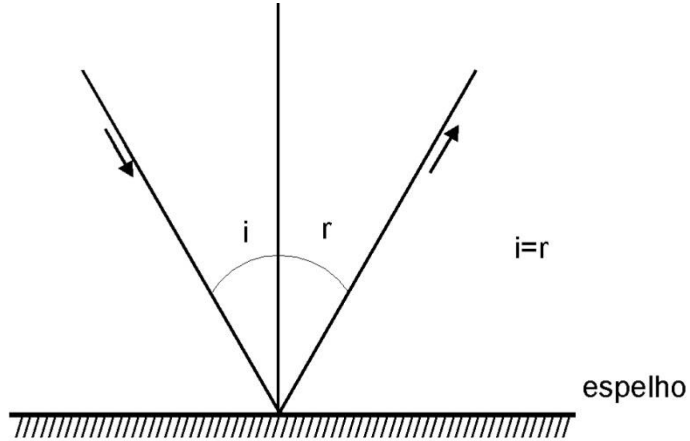
Em 1904, H. Hertz produziu ondas rádio em laboratório, demonstrando que as ondas eletromagnéticas têm propriedades de reflexão, refração e polarização.

Ondas Eletromagnéticas

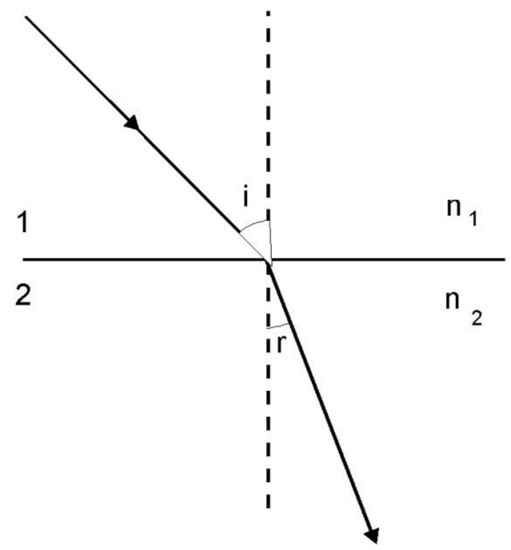


Campos elétrico e magnético vibram em planos perpendiculares entre si. Juntos, eles formam uma onda eletromagnética que se move através do espaço à velocidade da luz.

Reflexão e Refração



- Nos casos em que a luz se propaga atravessando diferentes meios, como no exemplo dos telescópios refratores, ela sofre refração, mudando de velocidade em função dos diferentes índices de refração (*n*).



- Considerando o caso em que $n_2 > n_1$, temos a relação:

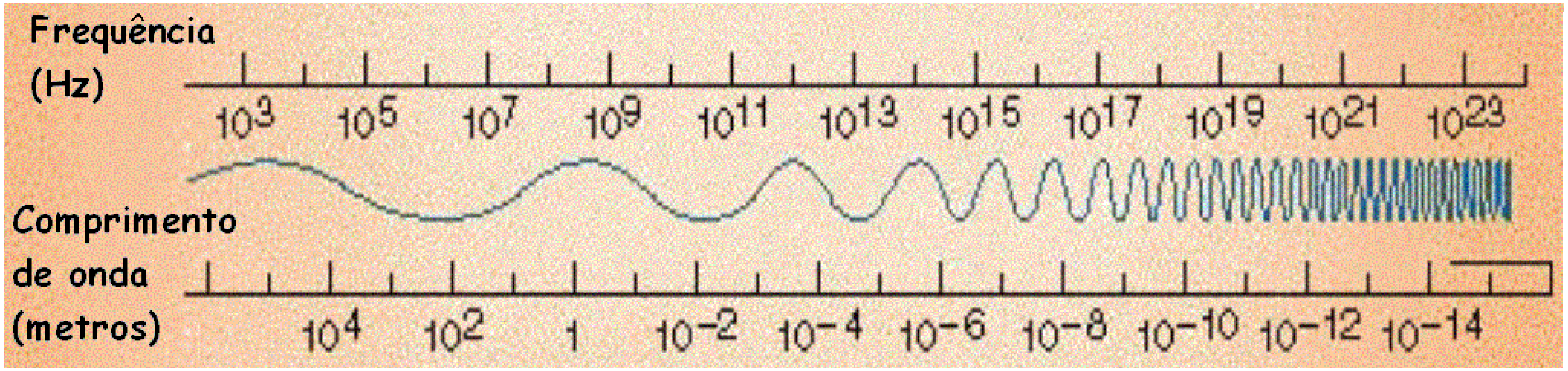
n_1 sen i = n_2 sen r , *conhecida por* lei de Snell.

O Espectro Eletromagnético

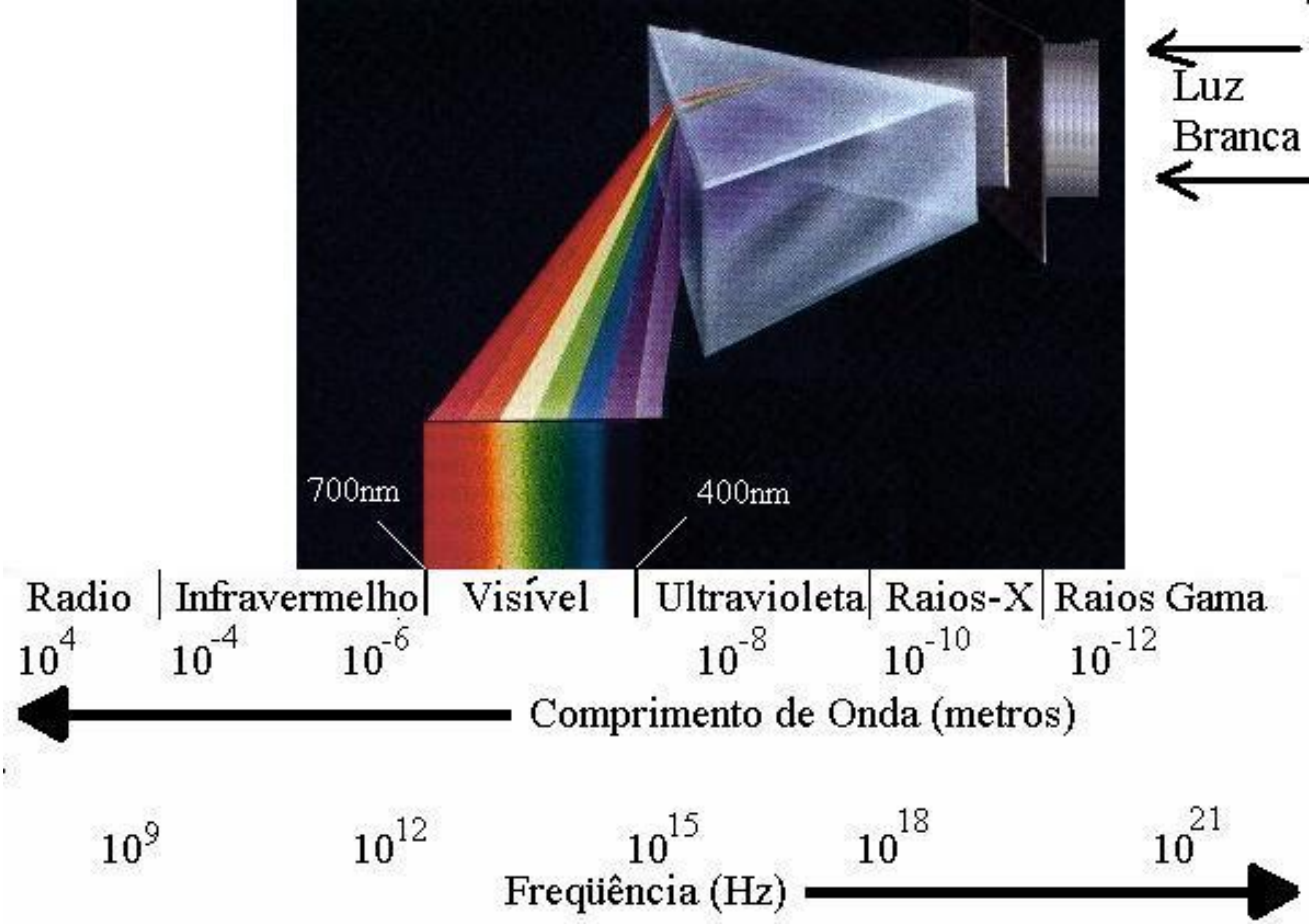
- O espectro eletromagnético óptico (faixa do visível) cobre comprimentos de onda desde o

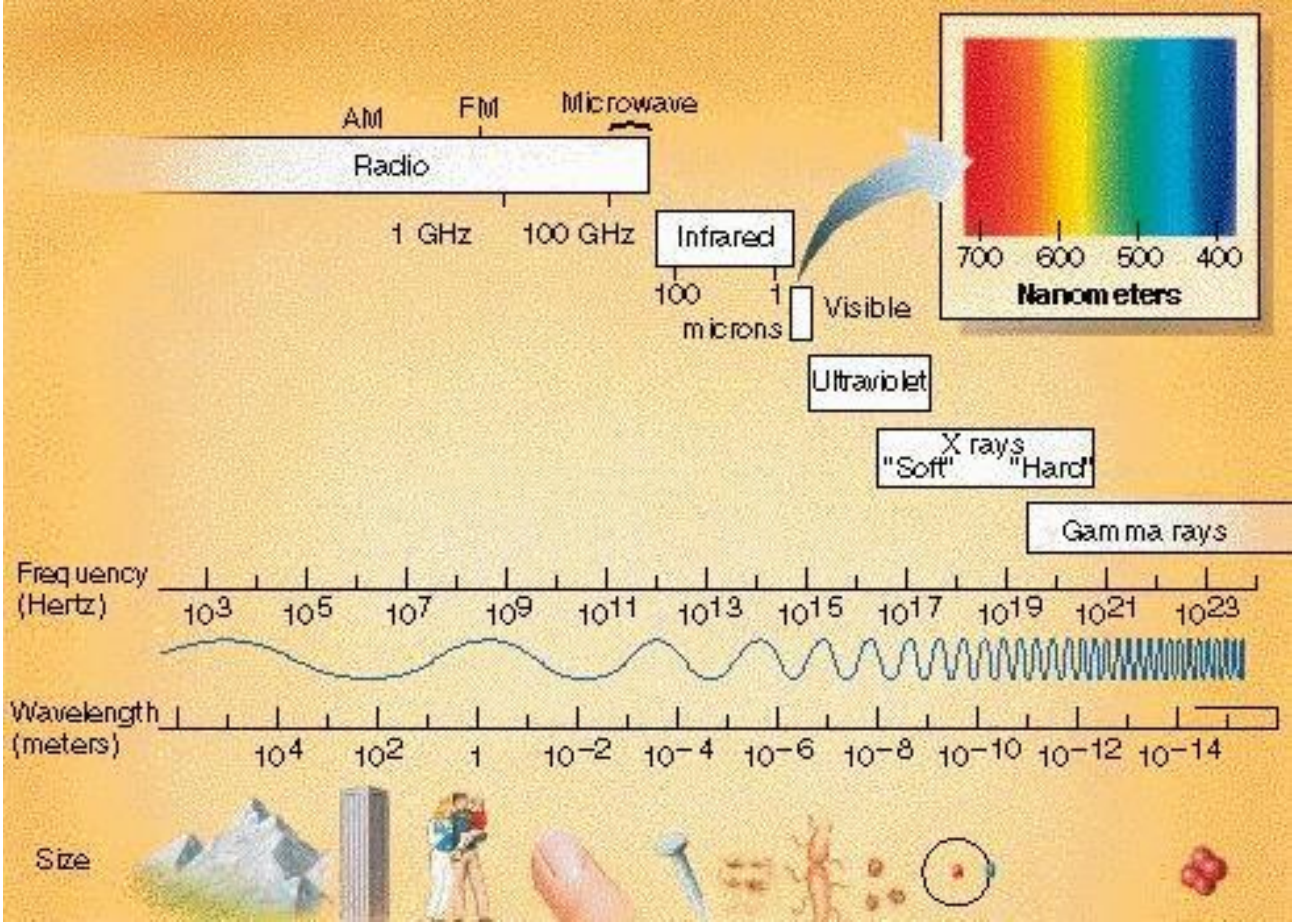
violeta: 3900 Å até o vermelho: 7200 Å

radiação da luz solar, que pode ser decomposta em diferentes frequências.



(1 Ångstrom = 10^{-8} cm = 0,1 nm)


Luz
Branca
700nm
400nm
Radio
Infravermelho
Visível
Ultravioleta
Raios-X
Raios Gama
10^4 10^{-4} 10^{-6} 10^{-8} 10^{-10} 10^{-12}
Comprimento de Onda (metros)
10^9 10^{12} 10^{15} 10^{18} 10^{21}
Freqüência (Hz)



AM
FM
Microwave
Radio
1 GHz
100 GHz
Infrared
100
1
microns
Visible
700
600
500
400
Nanometers
Ultraviolet
X rays
"Soft"
"Hard"
Gamma rays
Frequency (Hertz)
10^3 10^5 10^7 10^9 10^{11} 10^{13} 10^{15} 10^{17} 10^{19} 10^{21} 10^{23}
Wavelength (meters)
10^4 10^2 1 10^{-2} 10^{-4} 10^{-6} 10^{-8} 10^{-10} 10^{-12} 10^{-14}
Size

Região espectral	**λs típicos**	**λ (em metros)**
Raios-γ	< 0,1 Å	$< 10^{-11}$
Raios-X	0,1 – 100 Å	$10^{-11} - 10^{-8}$
UV	100 Å – 3000 Å	$10^{-8} - 3\ 10^{-7}$
Visível	4000 - 7000 Å	$3{,}5\ 10^{-7} - 9\ 10^{-7}$
IV	1 μm – 100 μm	$10^{-6} - 10^{-3}$
Microondas	1 mm -10 cm	$10^{-3} - 10^{-1}$
Rádio	> 10 cm	$> 10^{-1}$

O vetor de Poynting e Pressão de Radiação:

Ondas carregam energia e momento na direção de propagação.

O vetor de Poynting: $\vec{S} = \frac{1}{\mu_o} \vec{E} \times \vec{B}$

fornece (em $W\ m^{-2}$) a taxa na qual a energia é carregada pela luz e atravessa uma dada área perpendicular na direção de propagação.

O valor médio (no tempo) do vetor de Poynting é: $\langle S \rangle = \frac{1}{2\mu_o} E_o B_o$

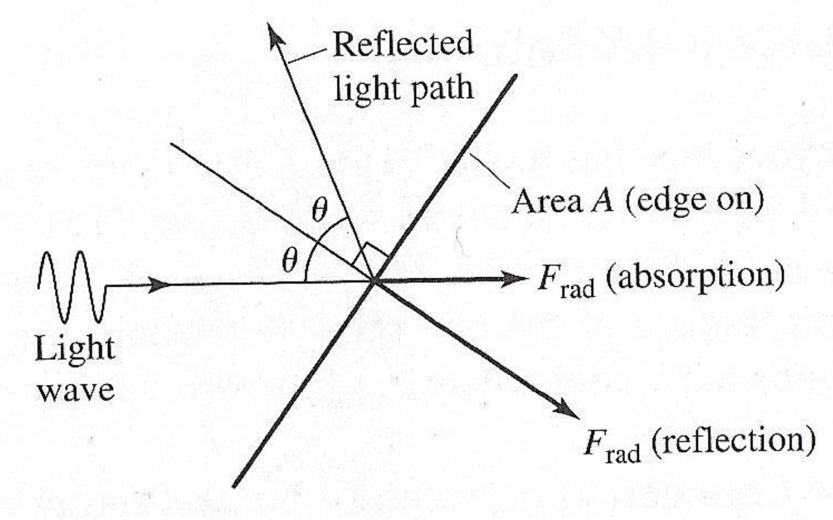
onde E_o e B_o descrevem a onda para um específico comprimento de onda.

Pressão de Radiação

Ondas carregam momento e exercem uma força na superfície onde há incidência da luz, dependendo se é refletida ou absorvida.

$$F_{rad} = \frac{\langle S \rangle A}{c} \cos\theta \;\; (absorção)$$

$$F_{rad} = \frac{2\langle S \rangle A}{c} \cos^2\theta \;\; (reflexão)$$



Embora essa pressão seja desprezível nas condições normais, tem um papel dominante em ambientes astrofísicos relacionados a objetos muito luminosos, como estrelas quentes, supergigantes vermelhas e processos de acreção em objetos compactos.

Seu efeito é significativo em partículas de poeira do meio interestelar.

BIBLIOGRAFIA

- Carroll & Ostlie (2007, Cap. 3)
- Karttunen et al. (1997, Cap. 4)

Próxima Aula

- Radiação de corpo negro, quantização de energia, índice de cor