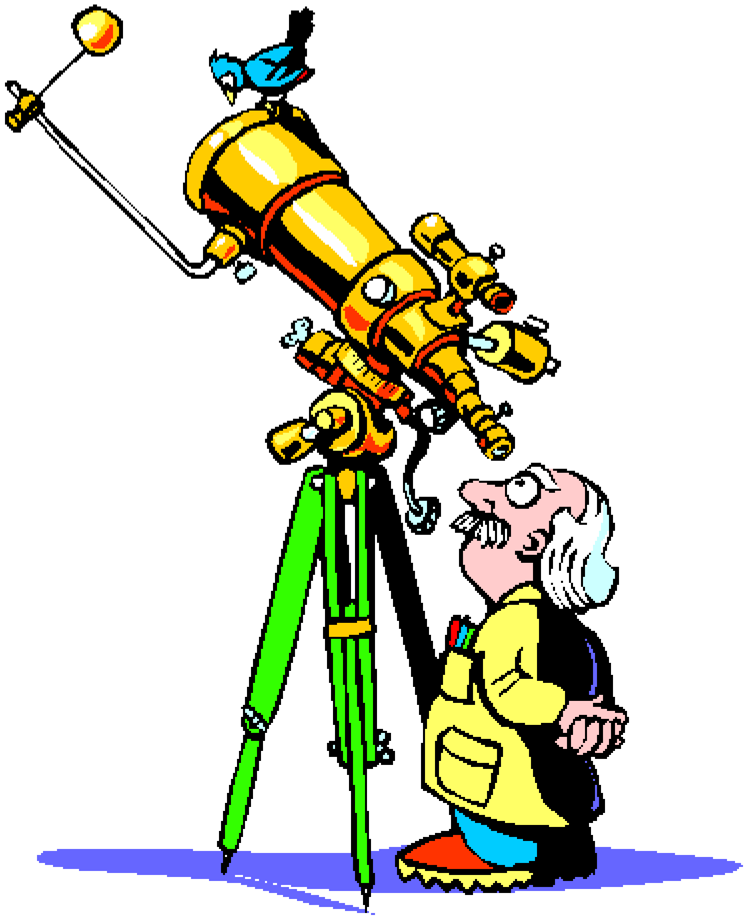
CAP4 parte 1 –
RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA E SUA INTERACÃO COM A MATÉRIA



Alguns slides de P. Armitage, G. Djorgovski e Elisabete Dal Pino

INTRODUÇÃO

- Estrelas → mais importante fonte/sorvedouro de matéria na evolução das galáxias.

- Maior parte da massa visível no Universo está em estrelas

- Informação básica sobre evolução do Universo (via observações):
  - idade
  - origem
  - composição

função do tempo

INTRODUÇÃO (continuação)

1. OBSERVAÇÕES

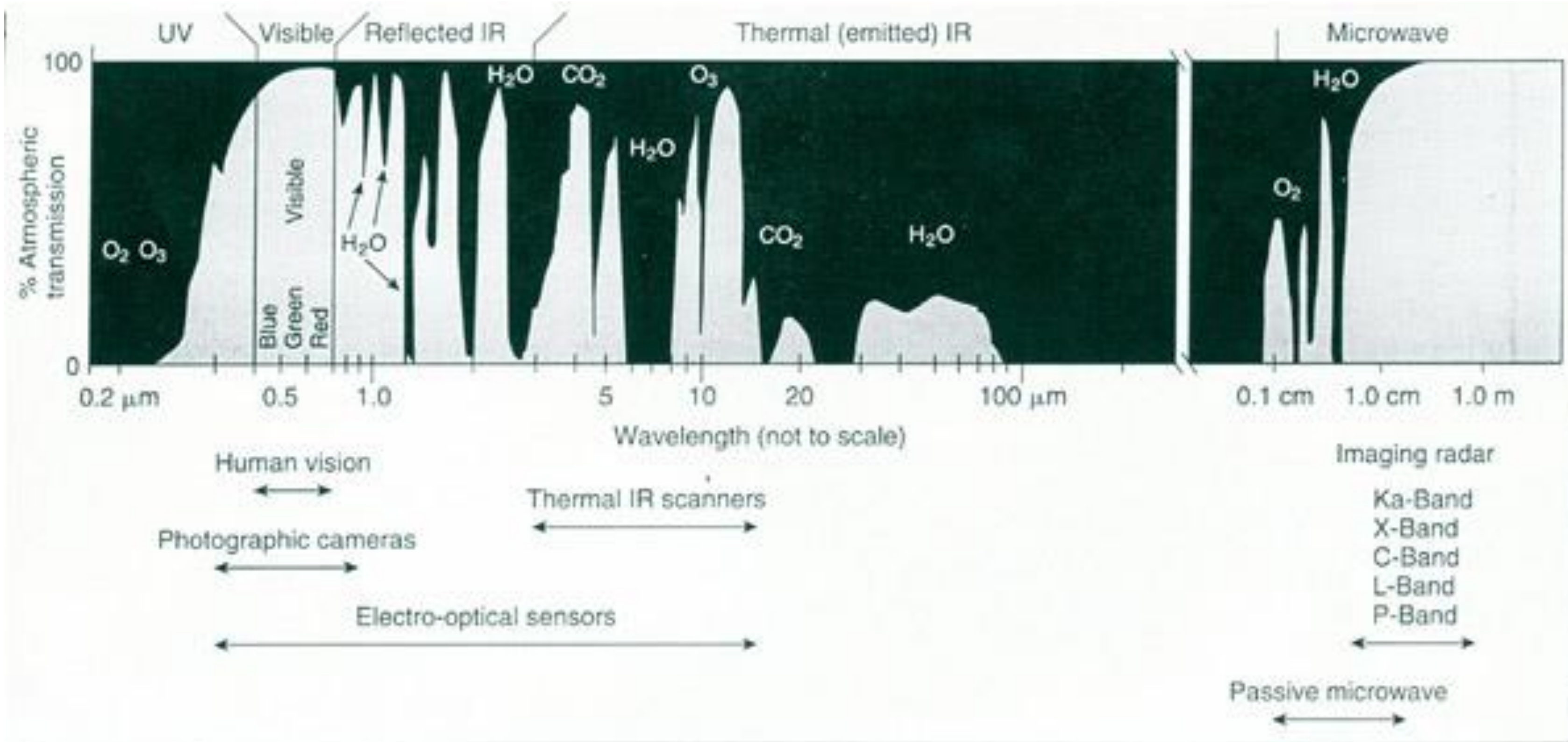
A - Radiação EM (ver slide seguinte)

- ***I (ν)*** (espectro) irradiado a partir das camadas mais altas (atmosfera)
  ($\Rightarrow$ temp. superficial, pressão, composição).
  Observado desde o raio γ até o rádio
- Posição $\Rightarrow$ distância
- Velocidade $\Rightarrow$ dinâmica, massa
- Variabilidade $\Rightarrow$ raio, modos internos
- Polarização $\Rightarrow$ geometria

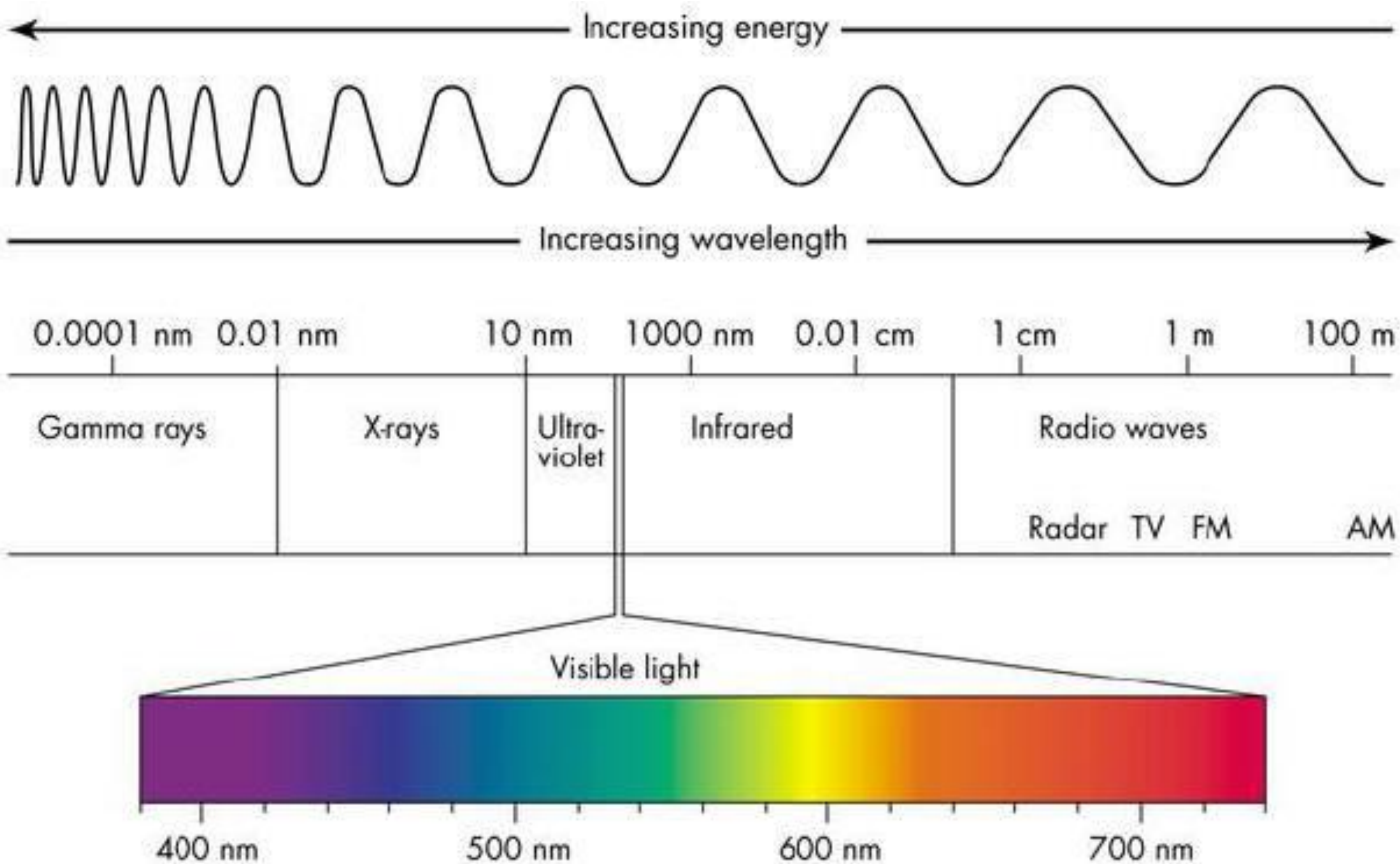
B - Outras radiações

- Neutrinos $\Rightarrow$ reações nucleares (observado para o Sol, SN1987A)
- Radiação Gravitacional $\Rightarrow$ dinâmica de objetos compactos (ainda não observado)

ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO I



ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO II



Luz:

Caráter Corpuscular ou Ondulatório?

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 informaçao – 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

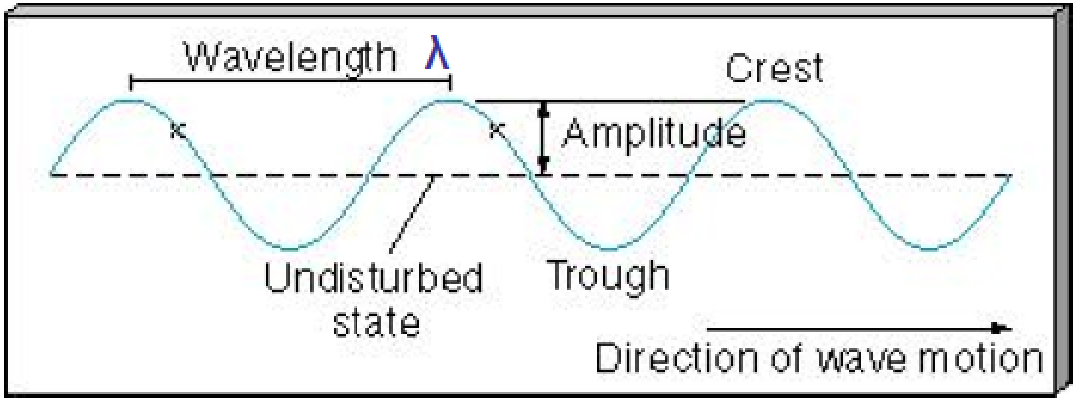
Onda: Movimento Oscilatorio

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

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

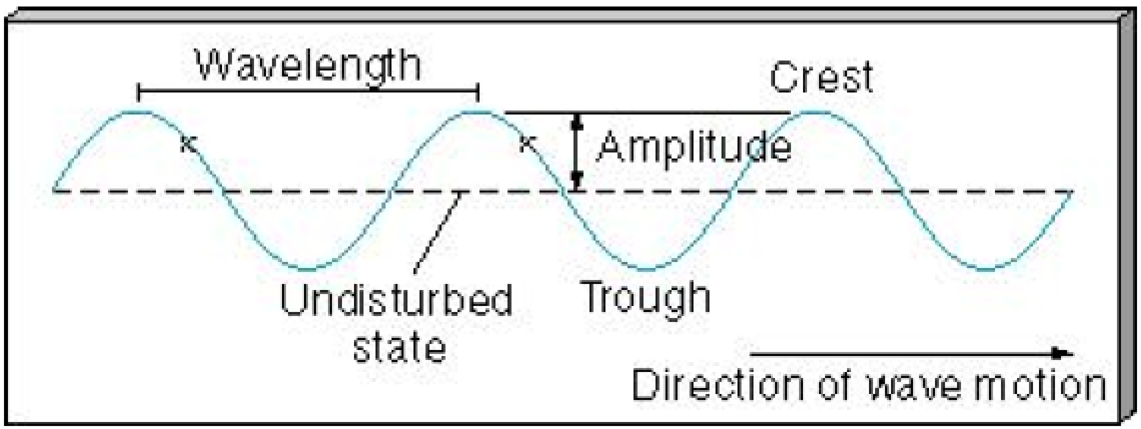
⇨ **fixando t=0** ⇨ $$h = H\ sen\left[\frac{2\pi\, x}{\lambda}\right]$$

O primeiro máximo será dado por $x = \dfrac{\lambda}{4}$ ⇨ **h = H**



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

Onda: movimento oscilatorio



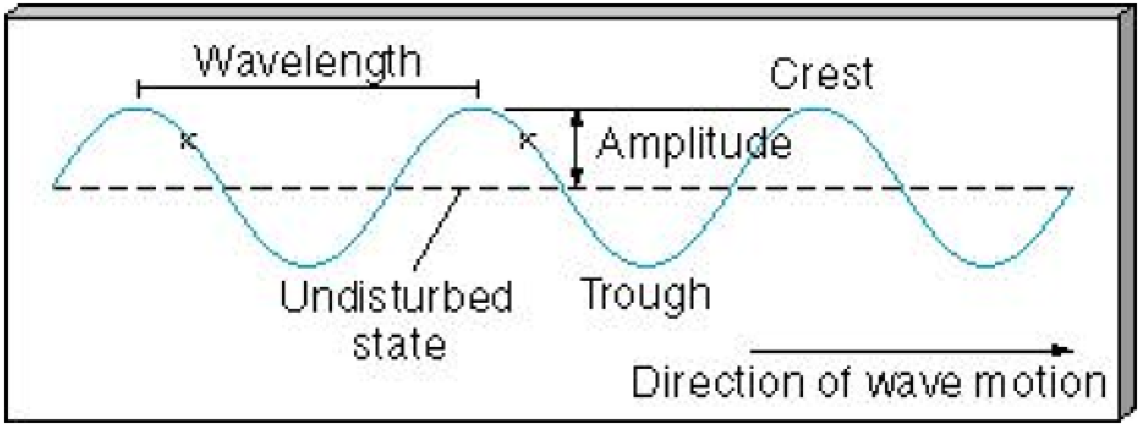
⇨ **evolução no tempo** : $h = H \text{ sen}\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x - \text{v } t)\right]$

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

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

$\nu = \frac{\text{v}}{\lambda}$ ⇨ **FREQÜÊNCIA**

Onda eletromagnetica: LUZ



λ : comprimento de onda - distancia entre dois maximos (cristas)

$P = \lambda / c$ ⇨ **PERÍODO**

$\nu = 1/P = c/\lambda$ ⇨ **FREQÜÊNCIA**

c : velocidade da Luz no vacuo

Natureza da Luz: seu carater ondulatorio

Onda eletromagnetica:

- Uma carga em repouso gera um campo elétrico em sua volta.

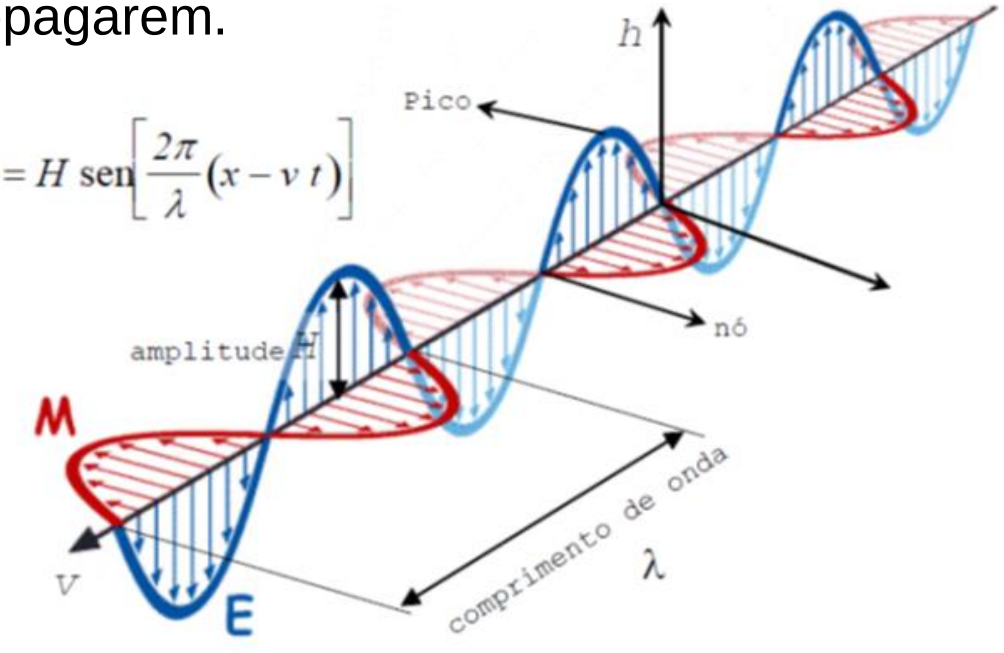
- Se esta carga estiver em movimento acelerado, o campo elétrico, em uma posição qualquer, estará variando no tempo e gerará um campo magnético que também varia com o tempo.

- Estes campos, em conjunto, constituem uma **onda eletromagnética**, que se propaga mesmo no vácuo.

Radiação Eletromagnética

- Oscilação dos campos elétrico e magnético (plano de oscilaçao):
  - eles são perpendiculares;
  - as ondas são transversais.
  - ondas mecânicas precisam de um meio para se propagarem. **Ondas E-M não**.

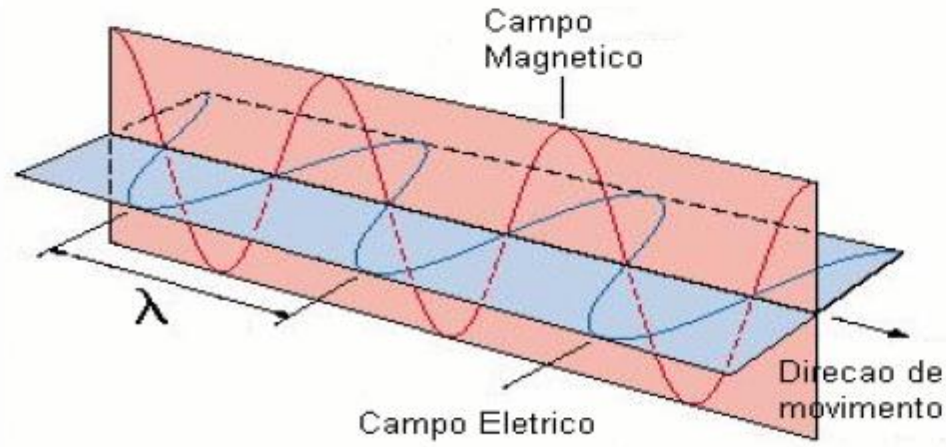
$$h = H \operatorname{sen}\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x - v\,t)\right]$$



propagação com a velocidade da luz

Ondas eletromagnéticas

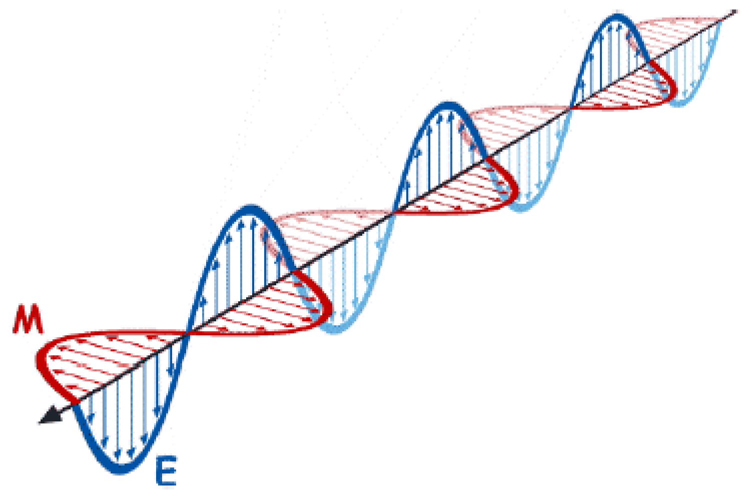
- Campos elétrico e magnético vibram em planos perpendiculares entre si com velocidade *c*.
- A direção de oscilação do campo elétrico (ou magnético) e a direção de propagação definem o **plano de polarização**.
- Permite conhecer o meio por onde a radiação se propaga.



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

Ondas eletromagnéticas

- Variáveis básicas:
  - λ : comprimento de onda
  - ν : freqüência
  - v : velocidade de propagação



- Para radiação eletromagnética:
  - $v = c$ (velocidade da luz)
  - $\lambda \cdot \nu = c$

μ = micrômetro = 10^{-6} m

nm = nanômetro = 10^{-9} m

Å = Angstron = 10^{-10} m

. λ é medido em unidade de comprimento:

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

Radiação Eletromagnética

- Em muitos casos em Astronomia, vemos a radiação como um fenômeno de partícula: sob esse ponto de vista, a luz consiste de fotons se movendo com a velocidade da luz ao longo de linhas retas através do espaço.
- Eles podem ser criados ou destruídos à medida que interagem com a matéria. Gases quentes ou nuvens de poeira podem ser resfriadas através da emissão de muitos fotons. É esse tipo de radiação que observamos no telescópio.
- Mas, a radiação que é emitida em uma região pode ser absorvida por outra matéria, podendo então ser aquecida radiativamente.
- Assim, a radiação pode atuar como transportadora de calor e/ou troca de momentum entre porções de matéria, as quais de outro modo estariam muito longe umas das outras para interagirem entre si.

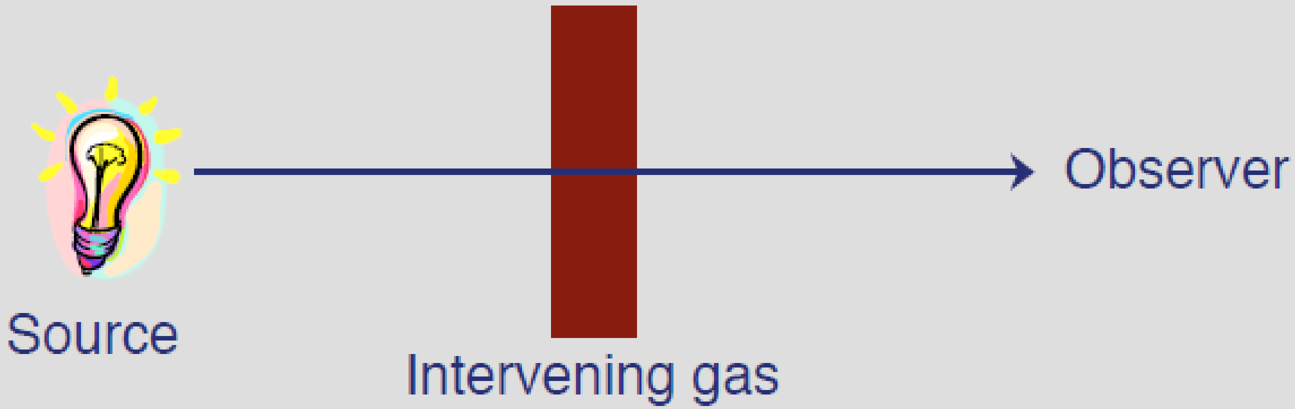
- Em outras palavras: radiação não é somente instrumento de diagnóstico, mas também um ingrediente crítico no balanço térmico dos objetos que observamos.

- A interpretação de observações leva-nos a aprender sobre emissão, absorção e transporte da radiação dentro de nossos objetos de interesse.

- A teoria de “transferência radiativa” (ou transporte radiativo) é a teoria de como radiação e matéria interagem baseada na descrição corpuscular da luz.

- Para a maioria dos propósitos astrofísicos, essa descrição de partícula é suficiente para entender a produção e transferência de radiação em/através de objetos astrofísicos, pelo menos no nível macroscópico.

1. Radiation processes



a) How is radiation affected as it propagates to the observer?
- In general
- Use results to understand spectra of stars, nebulae.

b) Mechanisms that produce radiation:
- Transitions within atoms (or molecules)
- Acceleration of electrons in a plasma by electric or magnetic fields.

Basic properties of radiation

Electromagnetic radiation of frequency ν, wavelength λ in free space obeys:

$$\lambda \upsilon = c \longleftarrow \text{speed of light}$$

Individual photons have energy:

$$E = h\nu \qquad \text{h = Planck's constant}$$

Common to measure energies in electron volts, where:

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-12} \text{ erg} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

In c.g.s. units:

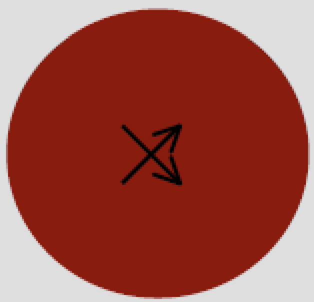
$$h = 6.626 \times 10^{-27} \text{ erg s}$$

$$c = 3.0 \times 10^{10} \text{ cm s}^{-1}$$

Simplification: astronomical objects are normally much larger than the wavelength of radiation they emit:

- Diffraction can be neglected
- Light rays travel to us along **straight lines**

Complexity: at one point, photons can be traveling in several different directions:



e.g. center of a star, photons are moving equally in all directions.

radiation from a star seen by a distant observer is moving almost exactly radially

Full specification of radiation needs to say how much radiation is moving in each direction.

IMPORTANTE

Em muitas situações astrofísicas estamos mais interessados ou

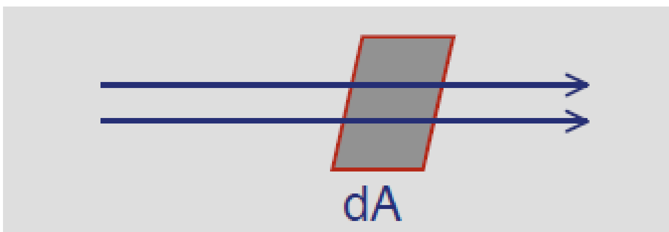
- na **potência** (energia por unidade de tempo) passando através de uma área unitária

ou

- na **potência total** (energia por unidade de tempo) passando através de toda a superfície.

Fluxo

- Considere uma área pequena *dA*, exposta à radiação durante um certo tempo *dt*. A energia que passa através dessa área é *F.dA.dt*, onde *F* é o **fluxo de energia** (erg s^{-1} cm^{-2}).



A menos que a radiação seja **isotrópica** (a mesma em todas as direções), F dependerá da orientação de dA.

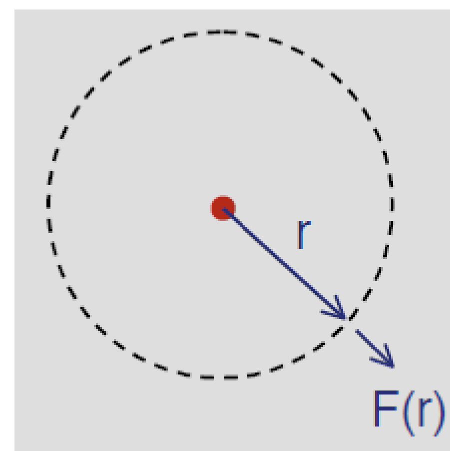
- Considere fonte estacionária esfericamente simétrica de ***luminosidade L***.

  Pela conservação de energia:

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

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

Lei do Inverso do Quadrado

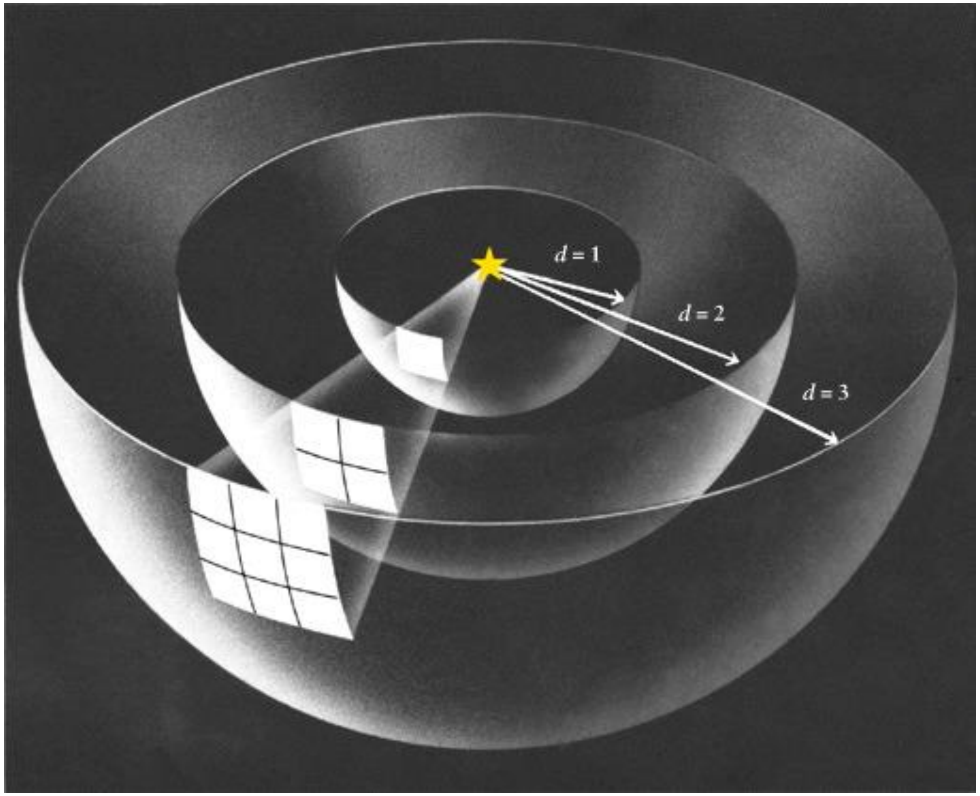


FOTOMETRIA

LEI DO INVERSO DO QUADRADO DA DISTÂNCIA

Lei do Inverso do Quadrado da distância $\rightarrow$ a luz se dissipa com o quadrado da distância

$$\boxed{B \propto 1/d^2}$$



- À distância d, a potência total irradiada é espalhada sobre uma esfera de área **$4\pi d^2$**.

- Assim, o brilho cai com o inverso do quadrado da distância

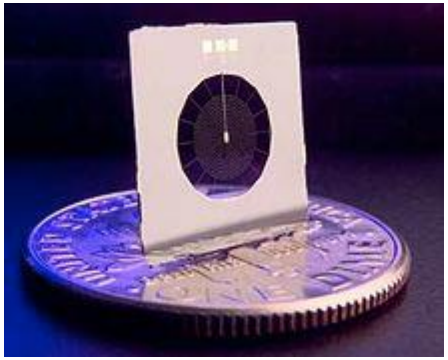
$$\boxed{B_{d1} / B_{d2} = d_2^{\,2} / d_1^{\,2}}$$

Como definido:

- ***L*** é a luminosidade total emitida em todos os comprimentos de onda.

- ***F*** é o fluxo de energia integrado em todos os comprimentos de onda.

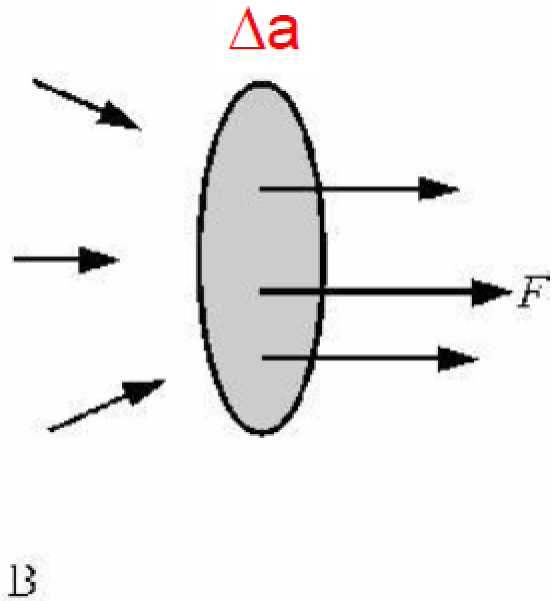
- Portanto, L é chamada de luminosidade bolométrica (porque um bolômetro é um aparelho que mede energia em todos os comprimentos de onda – integrada em λ)



Bolômetro Spiderweb para medidas da radiação cósmica de fundo em microondas.

Crédito da imagem: NASA/JPL – Caltech

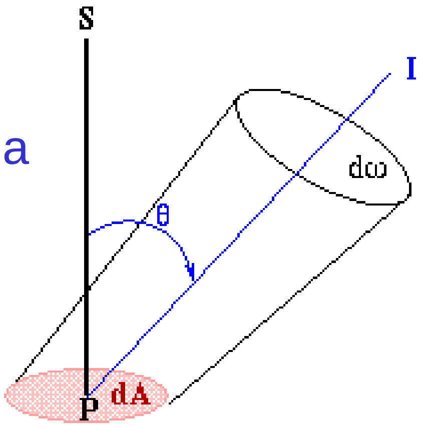
Fluxo



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

FLUXO (*F*) através de uma superfície

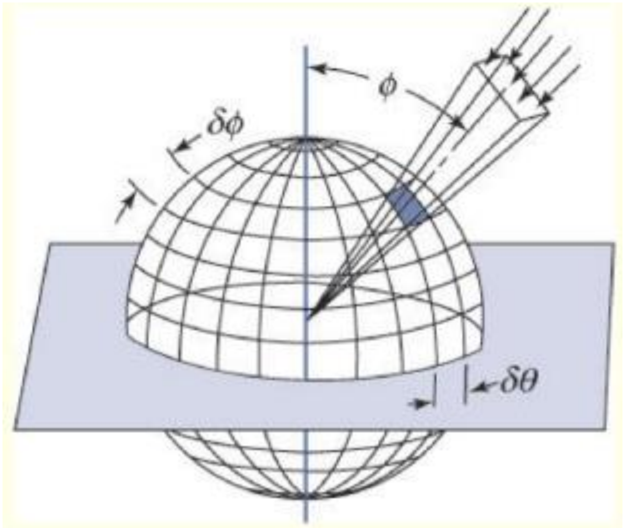
= energia / unid. de tempo / unid. área / unid. frequência



$$F_\nu = \frac{1}{dA\, d\nu\, dt} \int_S dE_\nu = \int_S I_\nu \cos\theta \, d\omega$$

- **Fluxo total** (integrado em frequência):

$$F = \int_S I \cos\theta \, d\omega \qquad [\mathrm{F}] = \mathrm{erg / s / cm^2}$$



Sendo o campo de radiação (**I**) isotrópico :

→ *I independe de θ e de ϕ*

→ não há fluxo líquido

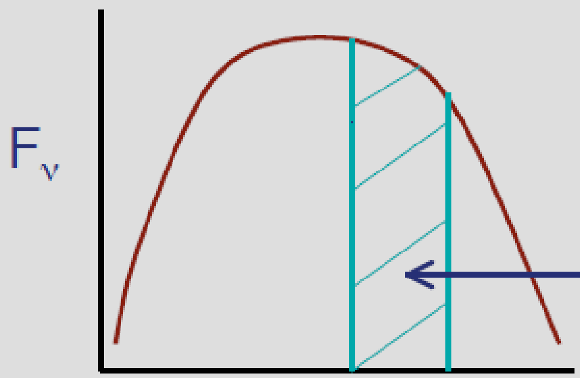
$$F_\nu = \int I_\nu \cos\theta \, d\omega = I \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi = 0$$

Apparent magnitudes

For historical reasons, fluxes in the optical and infra-red are instead measured in magnitudes:

$$m = -2.5\log_{10} F + \text{constant}$$

If F is the total flux (all wavelengths), then m is the bolometric magnitude. Usually instead consider a range of wavelengths.



e.g. in the visible band (V, centered around 550 nm):

$$m_V = -2.5\log_{10} F + \text{constant}$$

flux integrated over the range of wavelengths for this band

Magnitudes Aparentes

- Enquanto o olho percebe passos lineares no brilho, a intensidade da luz muda de fatores multiplicativos. Isso é interessante porque se o olho respondesse linearmente ao invés de logaritmcamente à intensidade de luz, poderíamos distinguir objetos na luz do sol, mas seríamos cegos na sombra.

- Dado que o olho é um detector logaritmico e o sitema de magnitudes é baseado na resposta do olho humano, segue que o sistema de magnitudes é uma escala logarítmica. No sistema de magnitudes original, uma diferença de 5 magnitudes correspondia a um fator aproximadamente 100 na intensidade da luz. O sistema de magnitudes foi formalizado para admitir que um fator 100 em intensidade corresponda a exatamente uma diferença de 5 magnitudes. Como a escala logaritmica é baseada em fatores multiplicativos, cada magnitude corresponde a $\sqrt[5]{100} = 2.512$ em intensidade.

- A escala de magnitude é portanto uma escala logaritmica na base $100^{1/5} = 2.512$. Veja a tabela seguinte:

Diferença de magnitudes(Δm)	Intensidade relativa
0	1
1	2.51
2	6.31
3	15.8
4	39.8
5	100
10	104
15	106

$$I_A / I_B = (2.512)^{(m_B - m_A)}$$

$$\log_{10}(I_A / I_B) = \log_{10} (2.512)^{(m_B - m_A)}.$$

$$\log_{10}(I_A / I_B) = (m_B - m_A) \log_{10} 2.512$$

$$\log_{10}(I_A / I_B) = 0.4 (m_B - m_A).$$

$$\rightarrow m_B - m_A = 2.5 \log_{10} (I_A / I_B).$$

- A intensidade da estrela B é um fator 10 maior que de uma estrela A. A estrela A tem uma magnitude de 2.4. Qual a magnitude da estrela B?

R. Primeiro, pense qual é a mais brilhante. Estime de quantas magnitudes as estrelas devem diferir. Deveria B ter uma magnitude maior ou menor que A?

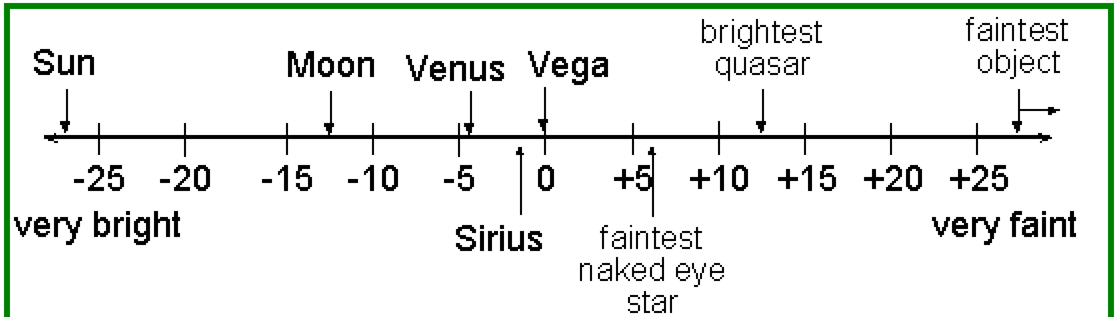
$$m_B - m_A = 2.5 \log_{10} (I_A / I_B)$$
$$m_B = m_A + 2.5 \log_{10} (I_A / I_B)$$
$$m_B = 2.4 + [\ 2.5 \log_{10} (0.1)\ ]$$
$$m_B = 2.4 + [\ 2.5 (-1)\ ]$$
$$m_B = -0.1$$

- Magnitude Aparente
  - Para duas estrelas com magnitudes aparentes $\boldsymbol{m_1}$ e $\boldsymbol{m_2}$, medidas no mesmo arranjo experimental:

$$m_2 - m_1 = 2.5\log\left(\frac{F_1}{F_2}\right)$$

ou

$$m_2 - m_1 = -2.5\log\left(\frac{F_2}{F_1}\right)$$



Apparent brightnesses of some objects in the magnitude system.

- Exemplo:

Duas estrelas, com magnitudes aparentes 3 e 4, estão tão próximas que parecem uma estrela única quando vistas pelo telescópio. Qual a magnitude aparente da combinação?

Se as estrelas são ***A*** e ***B*** e a combinação é ***C***, então:

$$m_B - m_A = 4 - 3 = 1 = 2.5\log\left(F_A / F_B\right) \Rightarrow \frac{F_A}{F_B} = 10^{\frac{1}{2.5}} = 10^{0.4} = 2.512$$

Adicinando 1 em ambos os lados:

$$\frac{F_A}{F_B} + 1 = \frac{F_A + F_B}{F_B} = \frac{F_C}{F_B} = 3.512$$

Então:

$$m_B - m_C = 2.5\log(F_C / F_B)$$

$$m_C = 4 - 2.5\log(3.512) = 2.64$$

Basic properties of magnitudes:

Consider two stars, one of which is a hundred times fainter than the other in some waveband (say V).

$$
\begin{aligned}
m_1 &= -2.5\log F_1 + \text{constant} \\
m_2 &= -2.5\log(0.01F_1) + \text{constant} \\
&= -2.5\log(0.01) - 2.5\log F_1 + \text{constant} \\
&= 5 - 2.5\log F_1 + \text{constant} \\
&= 5 + m_1
\end{aligned}
$$

Source that is 100 times **fainter** in flux is five magnitudes fainter (**larger** number).

Faintest objects detectable with *HST* have magnitudes of ~ 28 in R/I bands. The sun has m_V = -26.75 mag

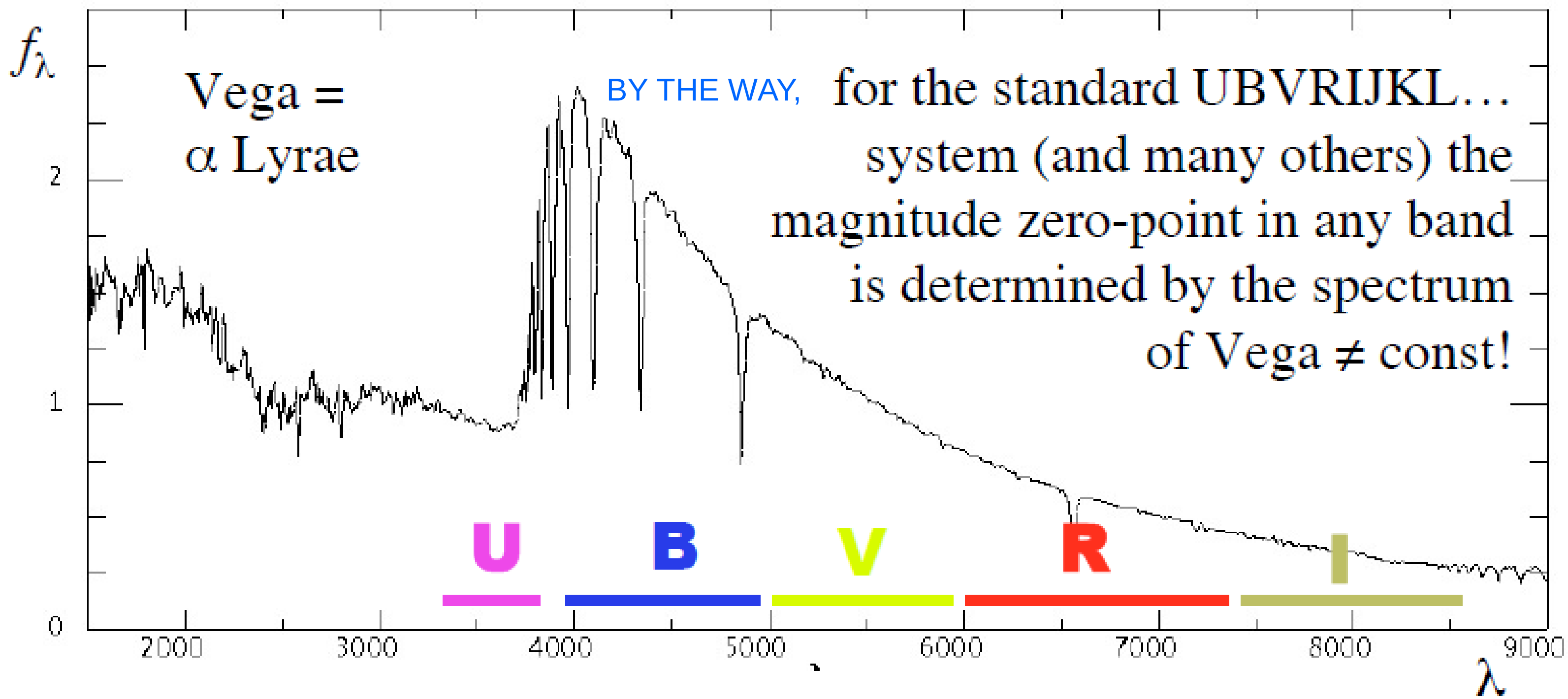
Common wavebands:

U (ultraviolet)	365nm
B (blue)	440nm
V (visible)	550nm
R (red)	641nm
K (infra-red)	2.2μm

These are the central wavelengths of each band, which extend ~10% in wavelength to either side.

Zero-points (i.e. the constants in the equation for m_V etc) are defined such that the magnitude of a standard star (Vega) is zero in all wavebands.

Magnitude Zero Points



Vega calibration ($m = 0$): at $\lambda = 5556$:

$f_\lambda = 3.39 \times 10^{-9}$ erg/cm²/s/Å

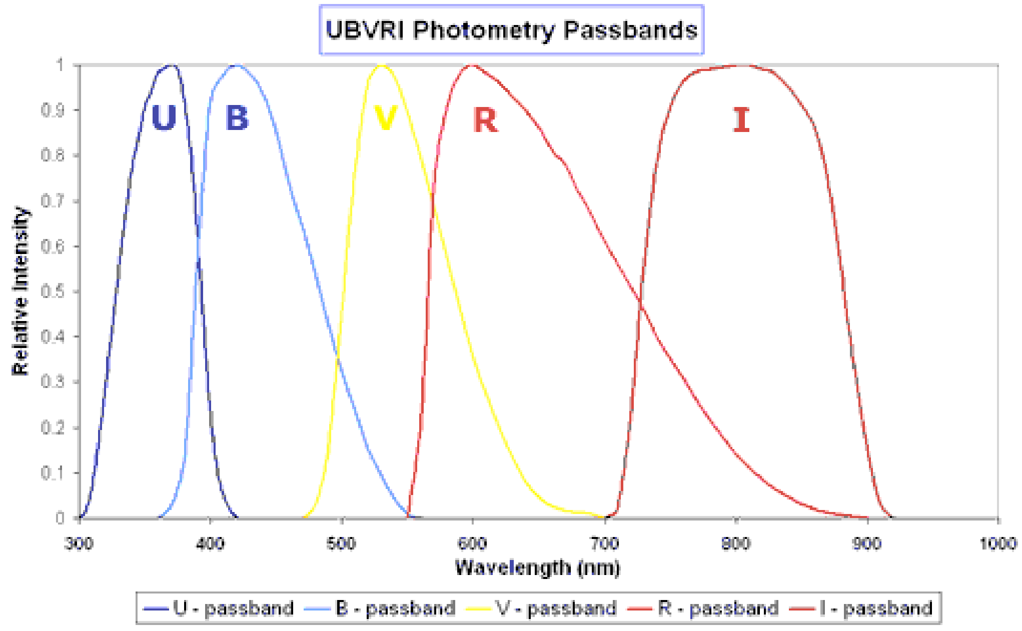
$f_\nu = 3.50 \times 10^{-20}$ erg/cm²/s/Hz

$N_\lambda = 948$ photons/cm²/s/Å

A more logical system is AB_ν magnitudes:

$$AB_\nu = -2.5 \log f_\nu \text{ [cgs]} - 48.60$$

- Praticamente,



Definition: "Apparent Magnitude":

$$m_\nu = -2.5\lg_{10}\frac{F_\nu}{F_{\nu,0}}$$

where F_ν is the specific flux density of the radiation from an object (eg. a star)

$F_{\nu,0}$ is some standard specific flux density

m_ν is the apparent magnitude of the object

Band		Effective wavelength (nm)	Band width (nm)	$F_{\nu,0}$ ($W\ m^{-2}\ Hz^{-1}$)	$F_{\lambda,0}$ ($erg\ s^{-1}cm^{-2}nm^{-1}$)
U	Ultraviolet	367	66	1.88×10^{-23}	4.35×10^{-8}
B	Blue	436	94	4.44×10^{-23}	7.20×10^{-8}
V	Visual	545	88	3.81×10^{-23}	3.92×10^{-8}
R	Red	638	138	3.01×10^{-23}	1.76×10^{-8}
I	Infrared	797	149	2.34×10^{-23}	8.30×10^{-9}

Magnitudes e Cores

- Considere as observações de duas estrelas,
  - uma com magnitude na banda B denotada por $m_{B,1}$
  - outra com uma magnitude na banda B denotada por $m_{B,2}$

  onde *1* e *2* corresponde às estrelas 1 e 2.

- Agora, $m_B = -2.5\, log \frac{F_B}{F_{B,0}}$

refere-se à calibração em fluxo absoluto (ver slide anterior)

- Então,

$$m_{B,1} - m_{B,2} = -2.5\, log \frac{F_{B,1}}{F_{B,0}} + 2.5\, log \frac{F_{B,2}}{F_{B,0}} = -2.5\, log \frac{F_{B,1}}{F_{B,2}}$$

- Portanto, $\frac{F_{B,1}}{F_{B,2}} = 10^{\frac{-(m_{B,1} - m_{B,2})}{2.5}} \Rightarrow m_{B,1} - m_{B,2} = -2.5\, log \frac{F_{B,1}}{F_{B,0}}$

- Se a estrela 1 tem uma magnitude aparente na banda B que é 5 vezes maior que para a estrela 2, então

$$m_{B,1} - m_{B,2} = +5.0 \quad \Longrightarrow \quad \frac{F_{B,1}}{F_{B,2}} = 10^{-\frac{5.0}{2.5}} = 10^{-2}$$

Logo, a estrela 2 deve ter uma densidade de fluxo específico na banda B maior que na estrela 1.

- Se a estrela 1 é 10 vezes mais brilhante (em densidade de fluxo específico) que a estrela 2, então

$$\frac{F_{B,1}}{F_{B,2}} = 10 \quad \Rightarrow \quad m_{B,1} - m_{B,2} = -2.5$$

Logo, a estrela 2 deve ter uma magnitude aparente na banda B maior que a estrela 1

Magnitudes, A Formal Definition

$$m = -2.5\left[\log \int d\lambda R(\lambda) f_\lambda - \log \int d\lambda R(\lambda) f_\lambda(\alpha \text{ Lyr})\right]$$

Because Vega (= α Lyrae) is declared to be the zero-point! (at least for the UBV… system)

e.g.,

$$U = -2.5 \log \int d\lambda R_U(\lambda) f_\lambda - 14.08 + c_U,$$

$$B = -2.5 \log \int d\lambda R_B(\lambda) f_\lambda - 13.00 + c_B,$$

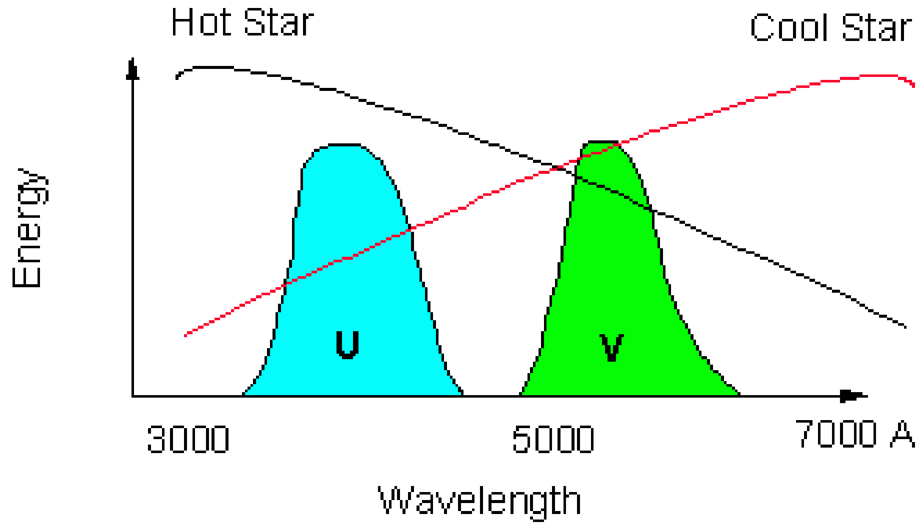
$$V = -2.5 \log \int d\lambda R_V(\lambda) f_\lambda - 13.76 + c_V,$$

where the peak of the response function is normalized to unity, and c represents the magnitude of α Lyr; $c_U = 0.02$, $c_B = c_V = 0.03$ (Johnson and Morgan 1953).

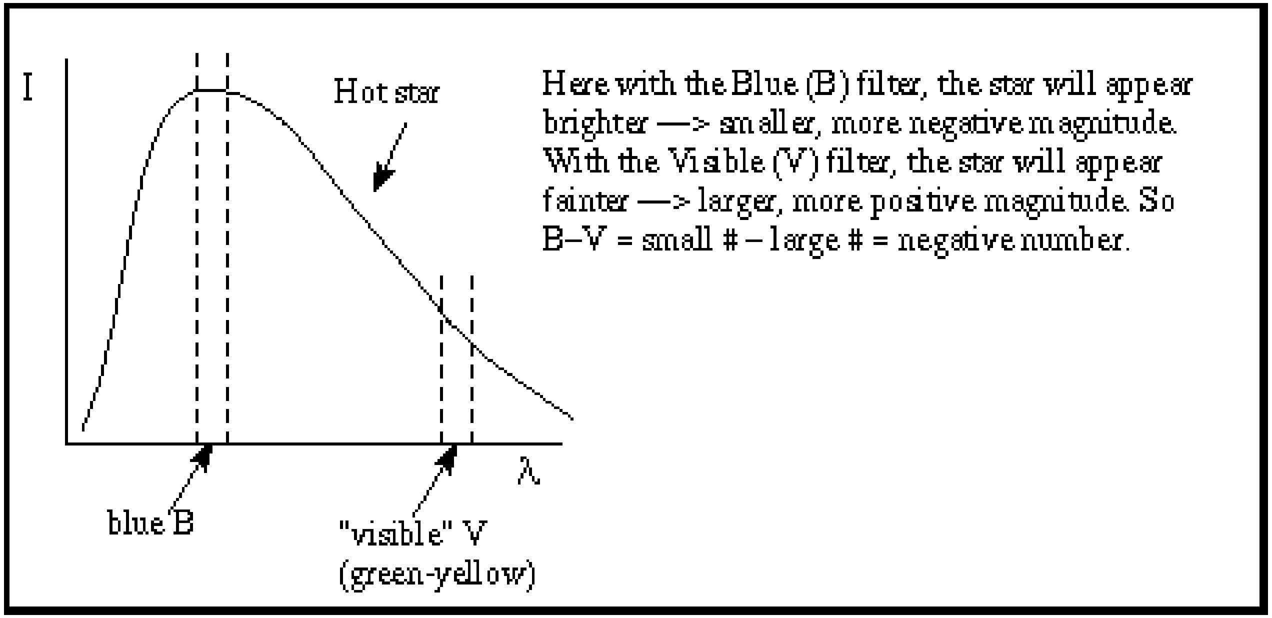
- U em 3500 A => ultravioleta
- B em 4300 A => azul.
- V em 5500 A => visível

Uma estrela quente tem mais fluxo no filtro U que no filtro V comparada a uma estrela fria.

Cores de uma estrela quente vs uma estrela fria



$$\left[\frac{\text{Flux at U}}{\text{Flux at V}}\right]_{\text{Hot Star}} > \left[\frac{\text{Flux at U}}{\text{Flux at V}}\right]_{\text{Cool Star}}$$



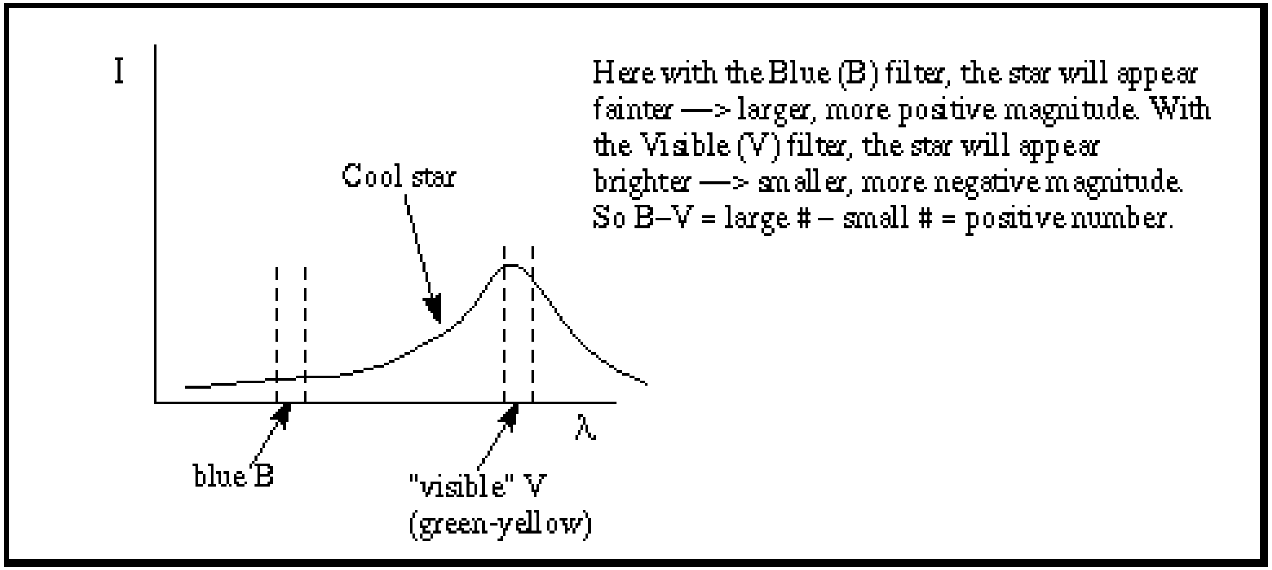
- $I_B > I_V$

Como I ↑ mag ↓

$\Rightarrow$ B < V

B - V < 0

- estrela quente



- $I_B < I_V$

Como I ↑ mag ↓

$\Rightarrow$ B > V

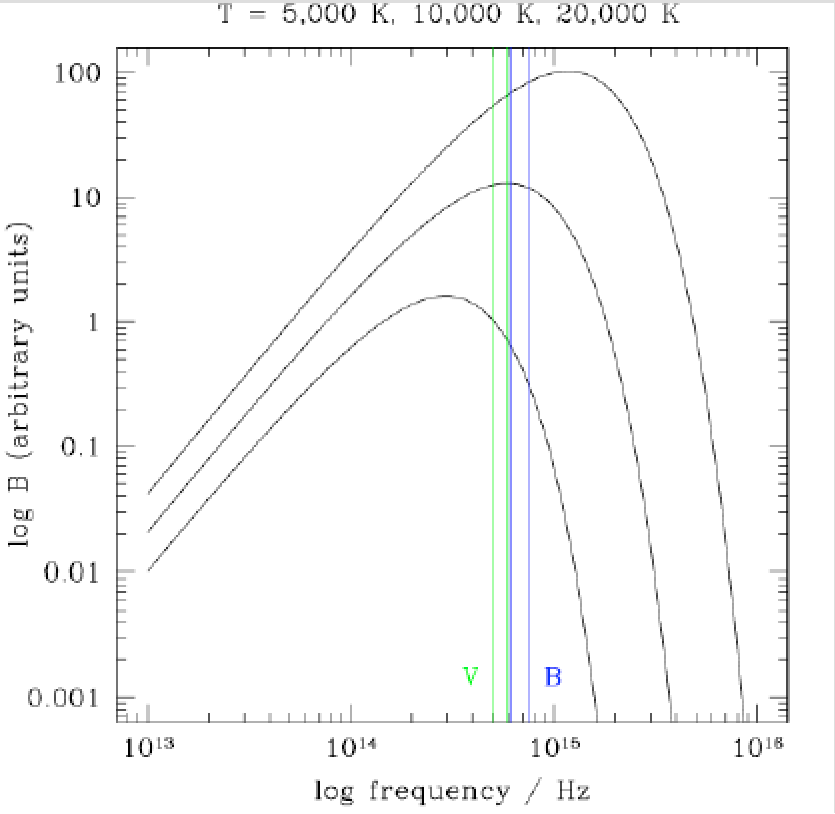
B - V > 0

- estrela fria

Colors

The color of a star or other object is defined as the difference in the magnitude in each of two bandpasses:

e.g. the (B-V) color is: B-V = m_B-m_V



Stars radiate roughly as blackbodies, so the color reflects surface temperature.

Vega has T = 9500 K, by definition color is zero.

Which sense for hotter / cooler stars?

COR E TEMPERATURA EFETIVA

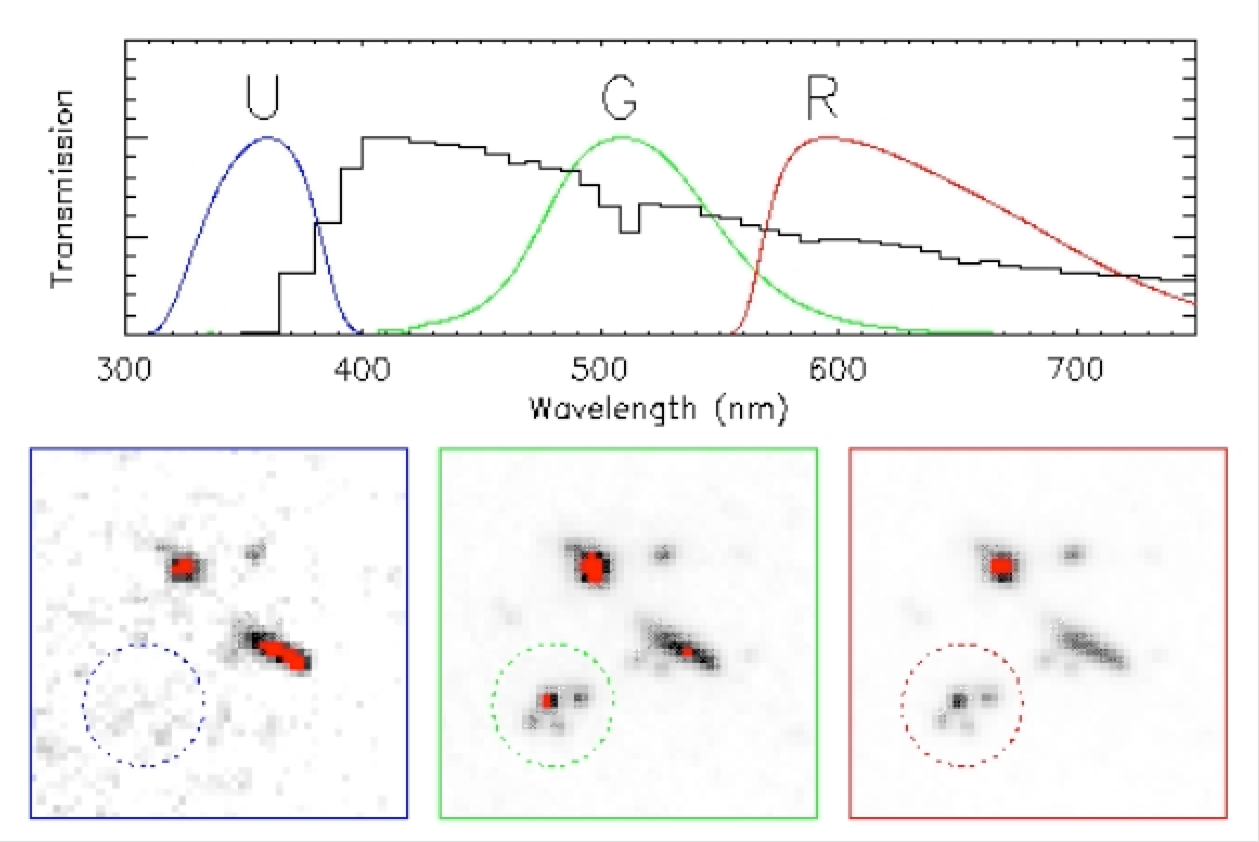
- ***Índice de cor ou COR***: a diferença entre magnitude medidas em dois filtros. Por exemplo, para as bandas ***B*** e ***V***:

$$\boxed{\begin{aligned} B-V &= m_B - m_V = M_B - M_V \\ &= 2.5\log\left(\frac{F_V}{F_B}\right) \end{aligned}}$$

- Na ausência de extinção, a ***índice de cor*** é um índice da temperatura efetiva T_{eff} das estrelas.

Color does not reflect temperature for objects with spectra very different from that of a blackbody.

Still can be useful - e.g. basis of most successful method for finding very distant (high redshift) galaxies:



Observed galaxy spectrum shifts to the right for source at higher redshift. Because spectrum has a sharp `break', flux in U band drops off sharply.

Apparent vs. Absolute Magnitudes

The absolute magnitude is defined as the apparent mag. a source would have if it were at a distance of 10 pc:

$$M = m + 5 - 5 \log d/\mathrm{pc}$$

It is a measure of the **luminosity** in some waveband.
For Sun: $M_{\odot B} = 5.47$, $M_{\odot V} = 4.82$, $M_{\odot bol} = 4.74$

Difference between the apparent magnitude m and the absolute magnitude M (any band) is a ***measure of the distance*** to the source

$$\underbrace{m - M}_{\textbf{Distance modulus}} = 5 \log_{10}\left(\frac{d}{10\ \mathrm{pc}}\right)$$

(From P. Armitage)

- Considere a definição de magnitude absoluta.
- Note que, como a luminosidade (específica) L_ν

está relacionada à densidade de fluxo (específico) F_ν

via $L_\nu = 4\pi r^2 F_\nu$,

então $\frac{F_\nu(r)}{F_\nu(r{=}10\ pc)} = \left(\frac{10\ pc}{r}\right)^2$.

- Assim temos que:

$$m_\nu(r) = -2.5\ log\frac{F_\nu(r)}{F_{\nu,0}} \quad \text{e} \quad M_\nu = -2.5\ log\frac{F_\nu(r{=}10\ pc)}{F_{\nu,0}}$$

Logo,

$$m_\nu - M_\nu = -2.5\ log\frac{F_\nu(r)}{F_{\nu,0}} + 2.5\ log\frac{F_\nu(r{=}10\ pc)}{F_{\nu,0}} = -2.5\ log\frac{F_\nu(r)}{F_\nu(r{=}10\ pc)}$$

- Mas,

$$\frac{F_\nu(r)}{F_\nu(r = 10\ pc)} = \left(\frac{10\ pc}{r}\right)^2$$

- Então,

$$m_\nu - M_\nu = 5.0\ log\,\frac{r_{pc}}{10\ pc}$$

- Ou, alternativamente,

$$\underbrace{m_\nu - M_\nu}_{\text{módulo de distância}} = 5.0\ log\, r_{pc}\ - 5.0$$

Magnitudes absolutas e aparente bolométricas *M* e *m* de uma estrela estão relacionadas por:

$$M = m - 5\log\left(d/10pc\right)$$

$$M = 4.74 - 2.5\log\left(L/Lsol\right)$$

LUMINOSIDADE (*L*)

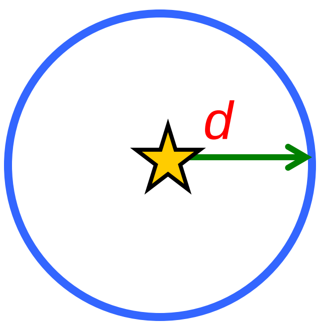
= energia emitida por uma fonte em todas as direções / unid. tempo

L = fluxo recebido na Terra (erg/s cm²) × área da esfera com raio igual à distância ***d***

$$\boxed{L = F\, 4\pi\, d^2}$$

ou

Se a estrela irradia *isotropicamente*, ***F*** deve se o mesmo passando por qualquer esfera de raio *d* centrada na estrela



Potência através da esfera =

$$\underbrace{\text{área da esfera}}_{=\ 4\,\pi\, d^2} \times \underbrace{\text{potência / unid área}}_{F}$$

Isto deve ser igual à luminosidade, L — *de outro modo, a energia se acumularia na esfera*

DEFINIÇÕES

- *Intensidade em uma determinada frequência =*

  energia/ unidade de área/ unidade de frequência / unidade de ângulo sólido/ unidade de tempo $\Rightarrow$ depende da direção

  (erg / cm^2/ Hz / str / s)

- *Fluxo em uma determinada frequência*

  (QUANTIDADE OBSERVÁVEL) =

  energia/ unidade de área/ unidade de frequência/ unidade de tempo $\Rightarrow$ independe da direção

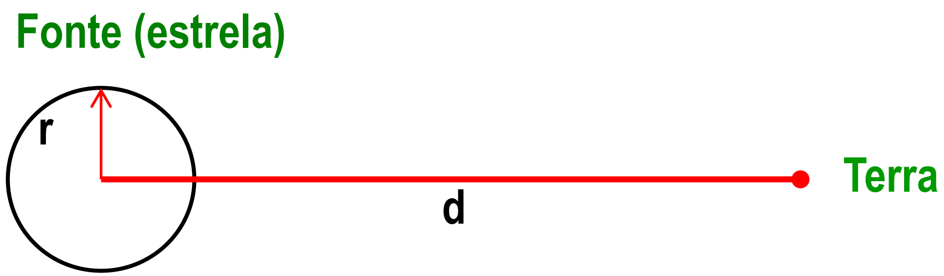
  (erg / cm^2 / Hz / s)

- *Luminosidade* = energia/ unidade de tempo (erg / s) $\Rightarrow$ independe da distância

OBS.: Quantidades integradas em frequência = independentes da frequência

Para melhor entendimento

- Considere a estrela como sendo esférica, com raio *r*



- L_* = luminosidade

energia total emitida em todas as direções / tempo

$\Downarrow$

potência irradiada : $L = \Delta E / \Delta t$

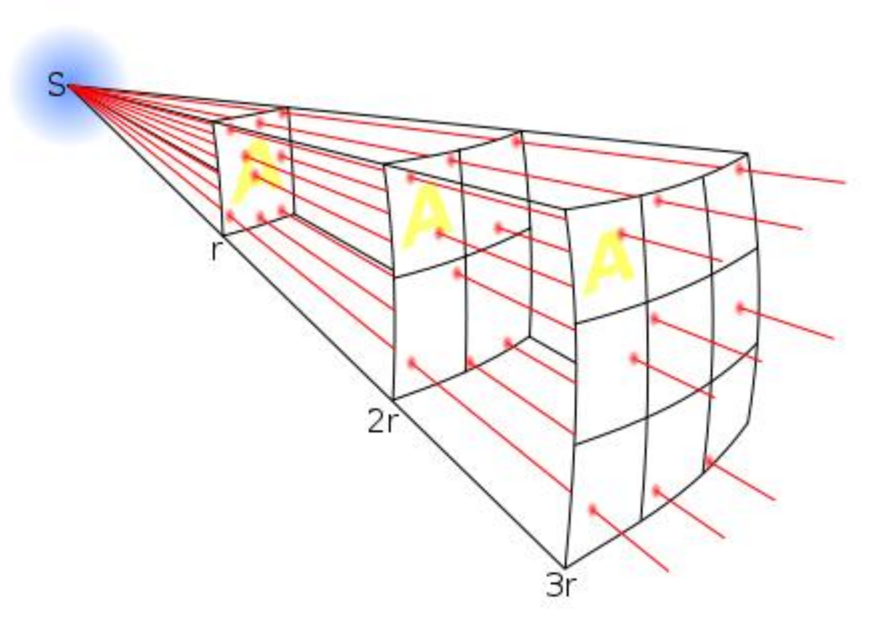
Fluxo na superfície da estrela:

$$\boxed{F_* = L_* / (4\pi r^2)} \qquad \text{(erg/cm}^2\text{/s)}$$

Observador à distância *d* da fonte receberá um fluxo:

$$\boxed{F_{obs}(d) = \frac{L_*}{4\pi d^2} = \left(\frac{r}{d}\right)^2 F_*}$$

Fluxo e distância



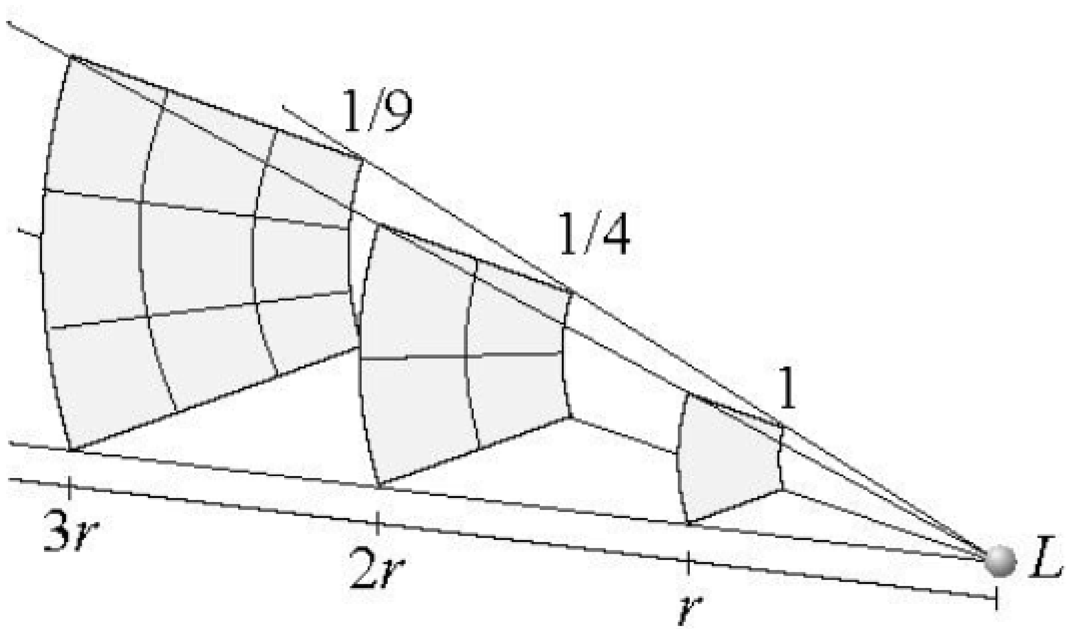
- O fluxo de uma fonte de luminosidade *L* decresce inversamente ao quadrado da distância.

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

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^2.

  - **luminosidade de Sirius** (αCMa): $1{,}0 \times 10^{28}$ watt (i.e., $26{,}1 \times L_\odot$)
  - **Fluxo (brilho aparente) de Sirius na Terra**: 0,12 watt/km^2



Mais algumas definições

… a final definition

Specific energy density u_ν

$$u_\nu = \frac{1}{c}\int_S I_\nu \, d\omega$$

[J m^{-3} Hz^{-1}]

Total energy density u

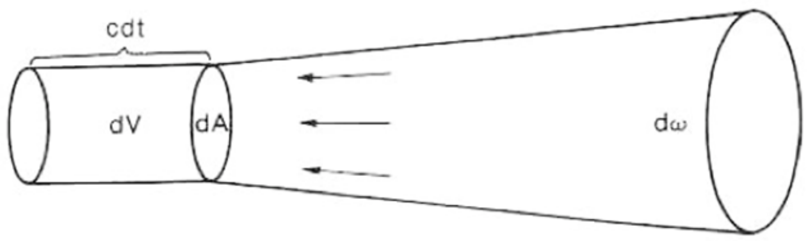
$$u = \frac{1}{c}\int_S I \, d\omega$$

[J m^{-3}]

… which for isotropic radiation gives

$$u_\nu = \frac{4\pi}{c} I_\nu$$

$$u = \frac{4\pi}{c} I$$

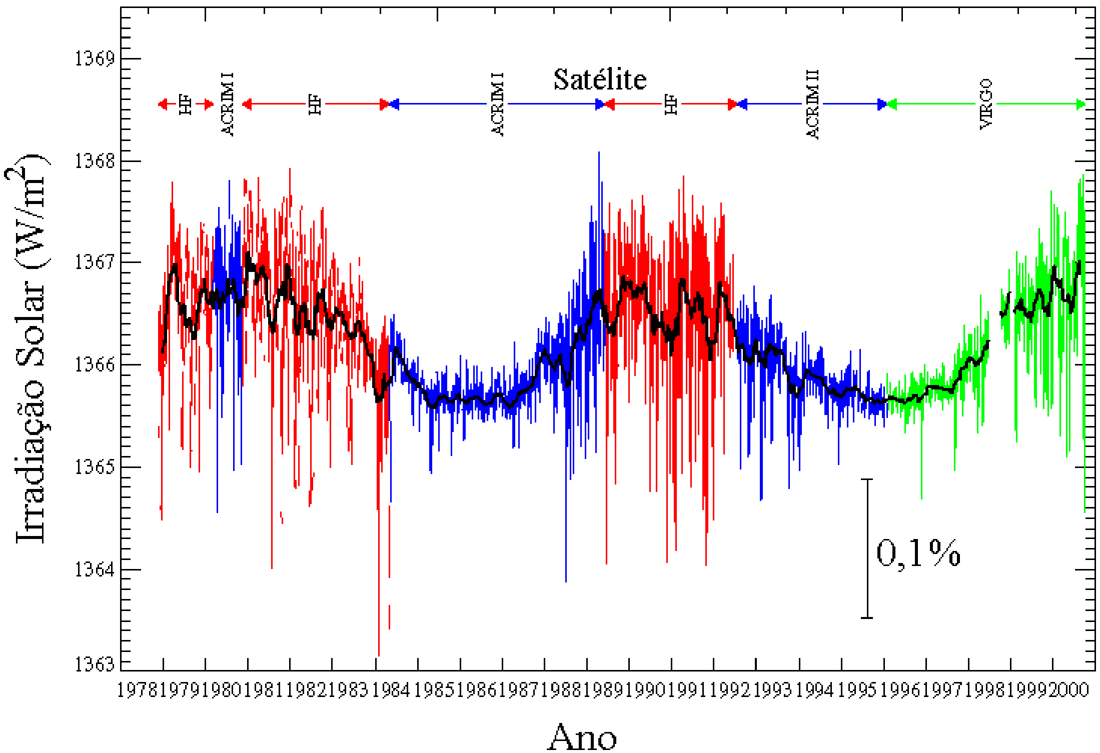


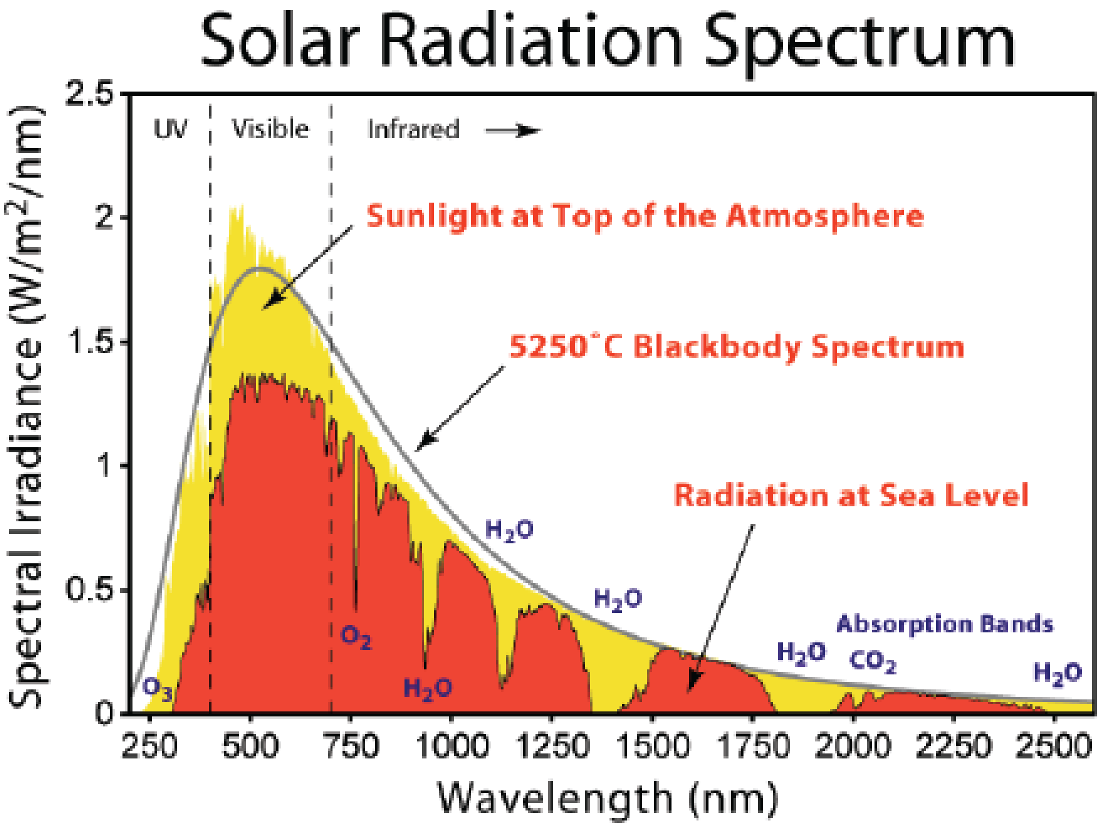
Energia do Sol na Terra

Quantidade de energia solar que chega, por unidade de tempo e por unidade de área a uma superfície perpendicular aos raios solares, à distância média Terra-Sol = fluxo (brilho aparente medido por satélites logo acima da atmosfera terrestre).

Varia, dependendo da época, em ciclos de 11 anos, entre 1364,55 a 1367,86 Watts/m^2

Fluxo na Terra: equivalente a 14 lâmpadas de 100W iluminando uma área de 1m^2





…Ignore all the physics details for now

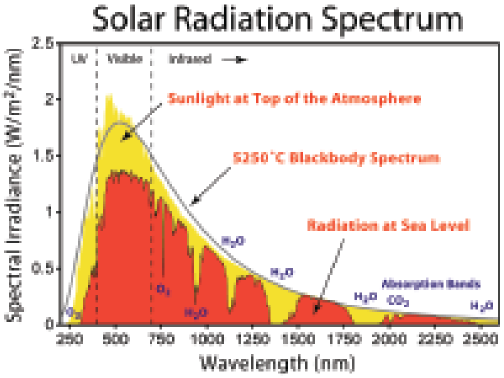
"Irradiance" is same as Specific Flux Density

Note units used: [W m^{-2} nm^{-1}]

equivalent to (say): [W m^{-2} Hz^{-1}]

due to simple relationship between wavelength and frequency

[Image Credit: Wikipedia]



From plot, Specific Flux Density
of radiation from Sun (at top of atmosphere)
is
~0 W m^{-2} nm^{-1} at 200nm (far UV)
peaks at
~2 W m^{-2} nm^{-1} at 500nm (visible)
then decreases to
< 0.5 W m^{-2} nm^{-1} above ~1200nm (IR)

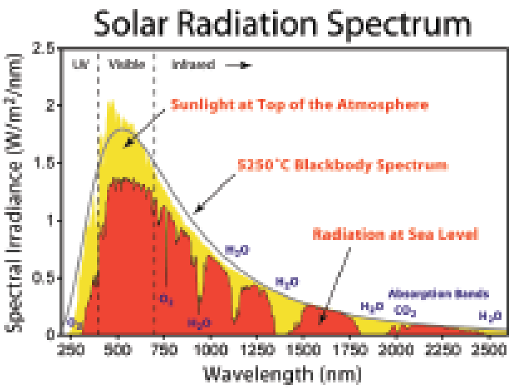
.. We can of course sum the specific flux densities over all wavelengths

to get the Total Flux Density
(of radiation from Sun at Top of the atmosphere)

which turns out to be ~ 1.4 kW m^{-2} (on average)

(known as the Solar Constant – even though it varies)

[Image Credit: Wikipedia]



Total Flux Density

(of radiation from Sun at Top of atmosphere)

F_{TOA} ~ 1.4 kW m^{-2}

..so total power incident on illuminated side of Earth's atmosphere is

$$P_{TOA} = F_{TOA}\,\pi\, R_{\oplus}^{2}$$

ie ~ 1.7×10^{17} W

cf World consumption rate of ~1.5×10^{13} W (2008)

... mainly (~90%) from combustion of fossil fuels

Vejamos como calcular o valor do fluxo na Terra.

- Por definição: $$F_{terra} = \frac{L_{Sol}}{4\pi r^2}$$

onde *r* é a distância do Sol à Terra, de 1 unidade astronômica (UA) = 150 milhões de km, e L_{sol} = 3.9 x 10^{33} erg/s^2.

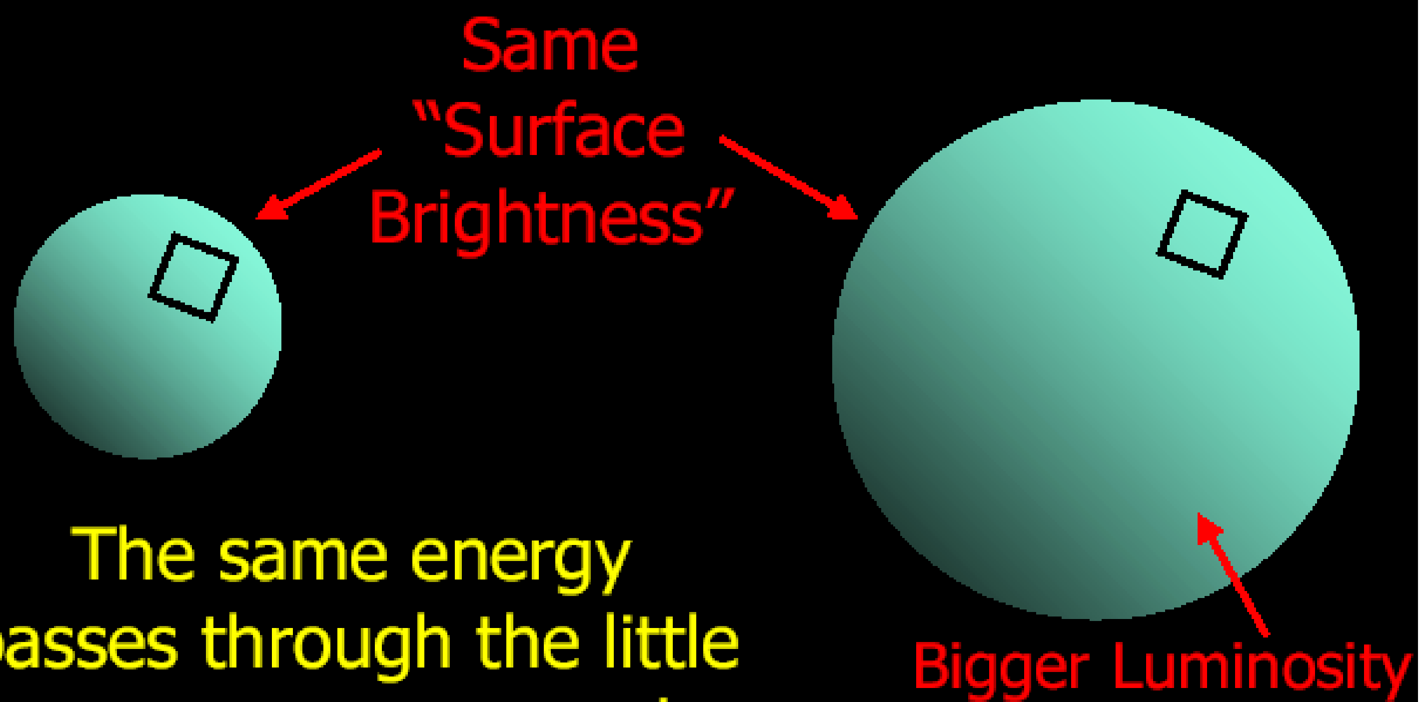
- Portanto a potência luminosa interceptada pela Terra, que tem uma secção reta $\pi r^2{}_{terra}$, onde é o raio da Terra= 6400 km, é dada por:

$$P = \pi r^2{}_{terra} F_{terra} = \pi r^2{}_{terra} \frac{L_{sol}}{4r^2}.$$

- Devido à rotação da Terra, o fluxo médio incidente é obtido dividindo a potência interceptada na Terra pela área total da Terra, $4\pi r^2{}_{terra}$.

$$\bar{F}_{terra} = \frac{P}{4\pi r^2{}_{terra}} = \frac{L_{sol}}{16\pi r^2} = 3.5 \times 10^5 \text{ ergs s}^{-1}\text{cm}^{-2}$$

ATENÇÃO: Luminosity is different than "surface brightness"



The same energy passes through the little square every second.