

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

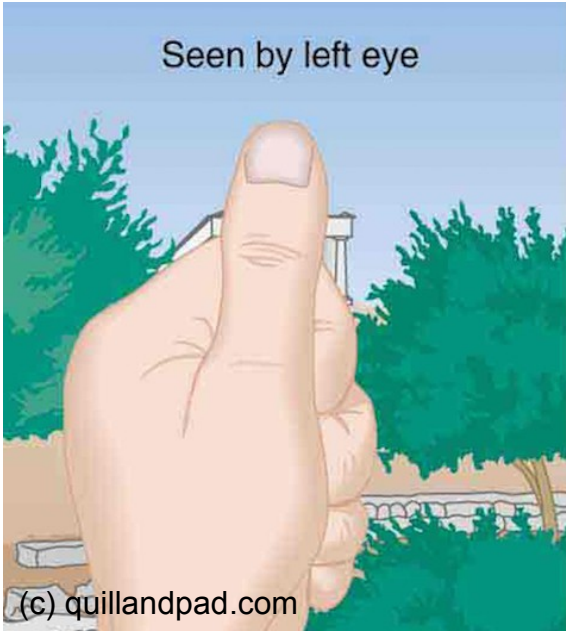
3.5 Quantização de energia

3.6 O índice de cor

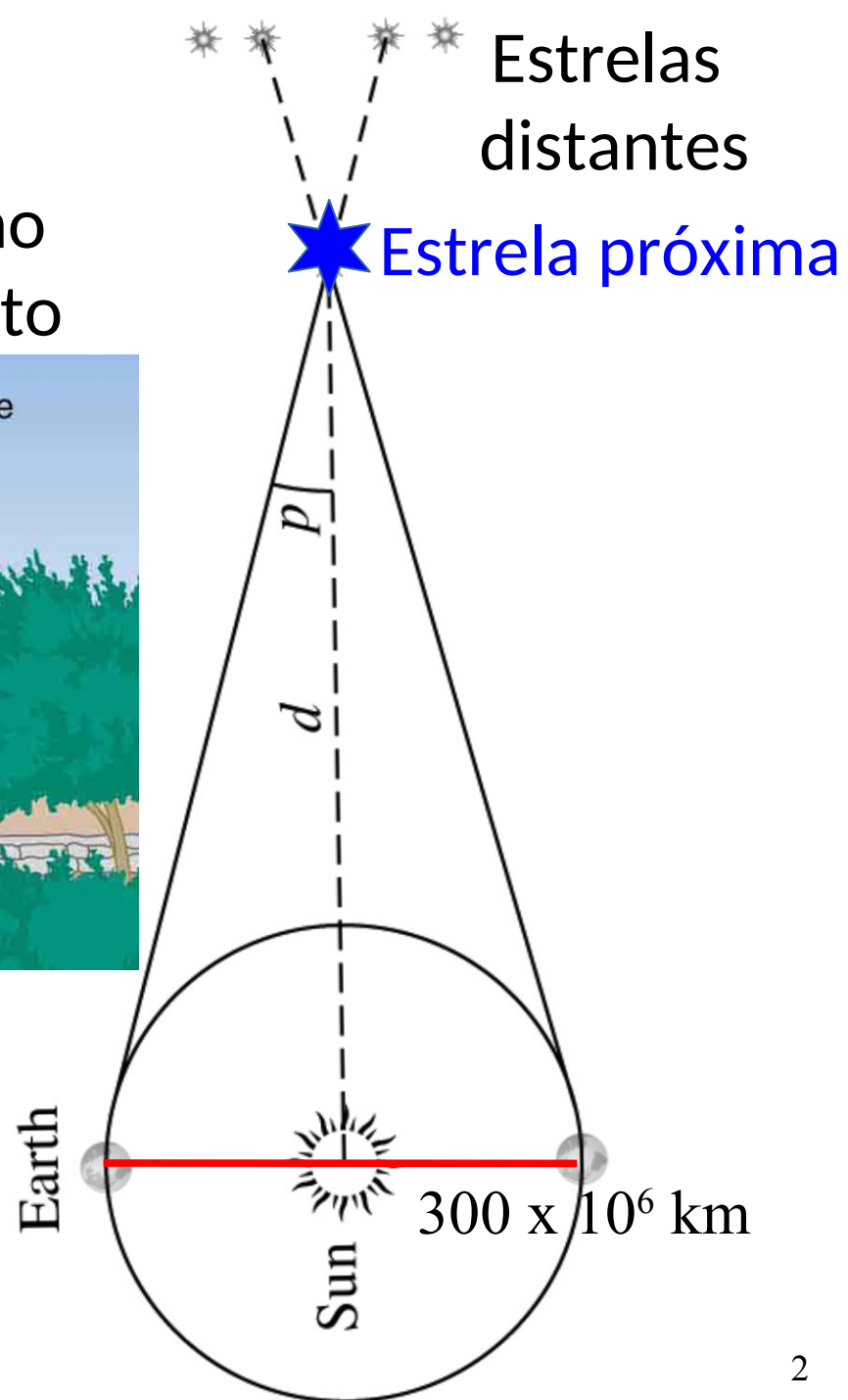
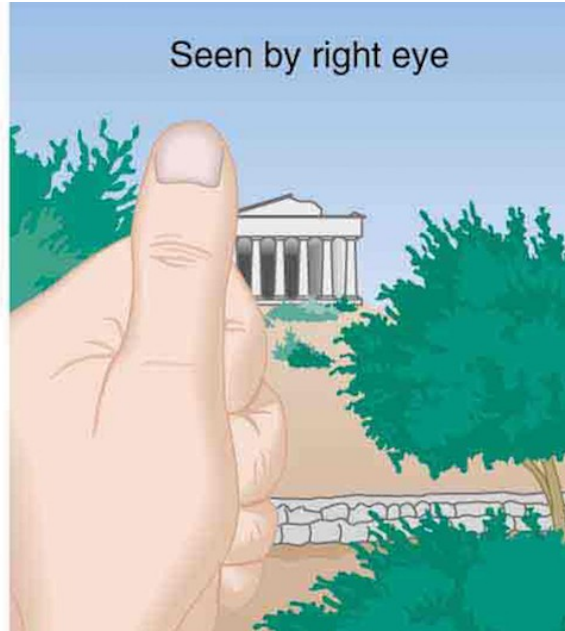


3.1 Paralaxe (p)

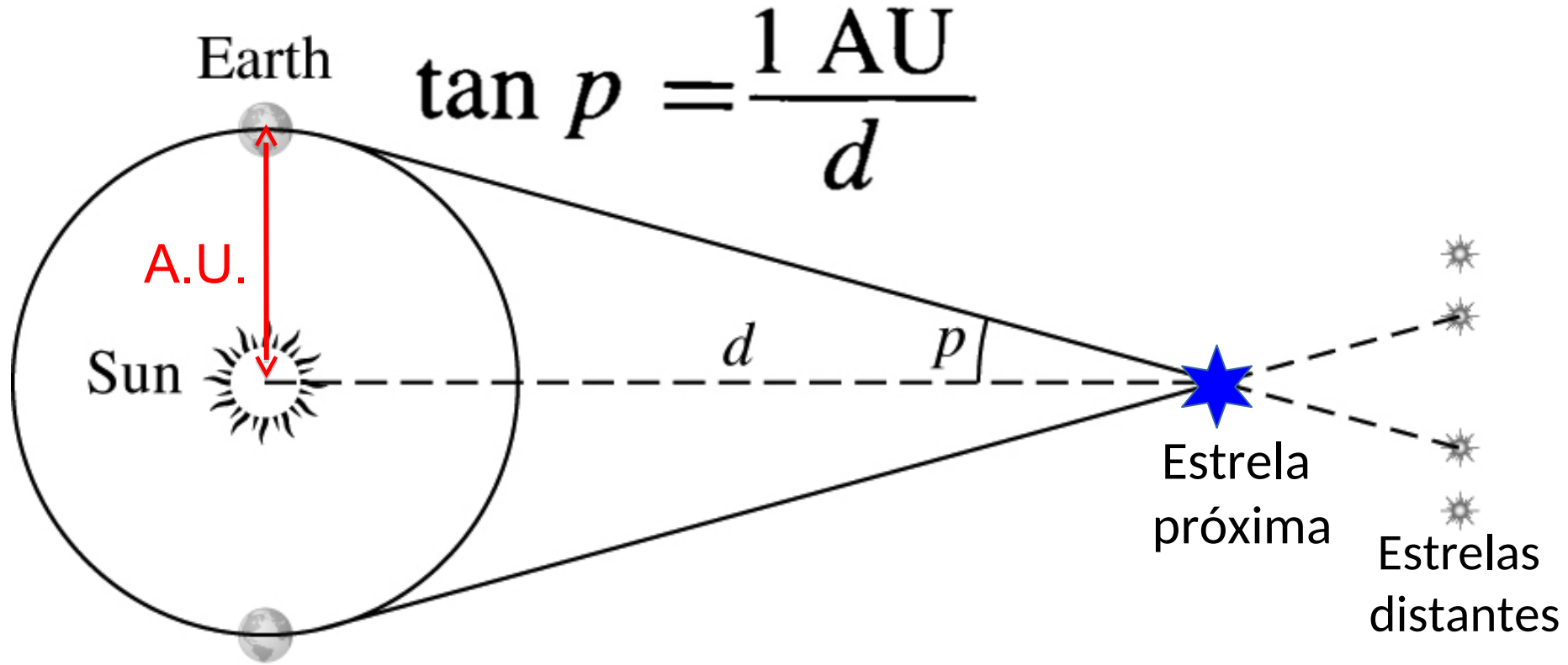
Visto pelo olho esquerdo



Visto pelo olho direito

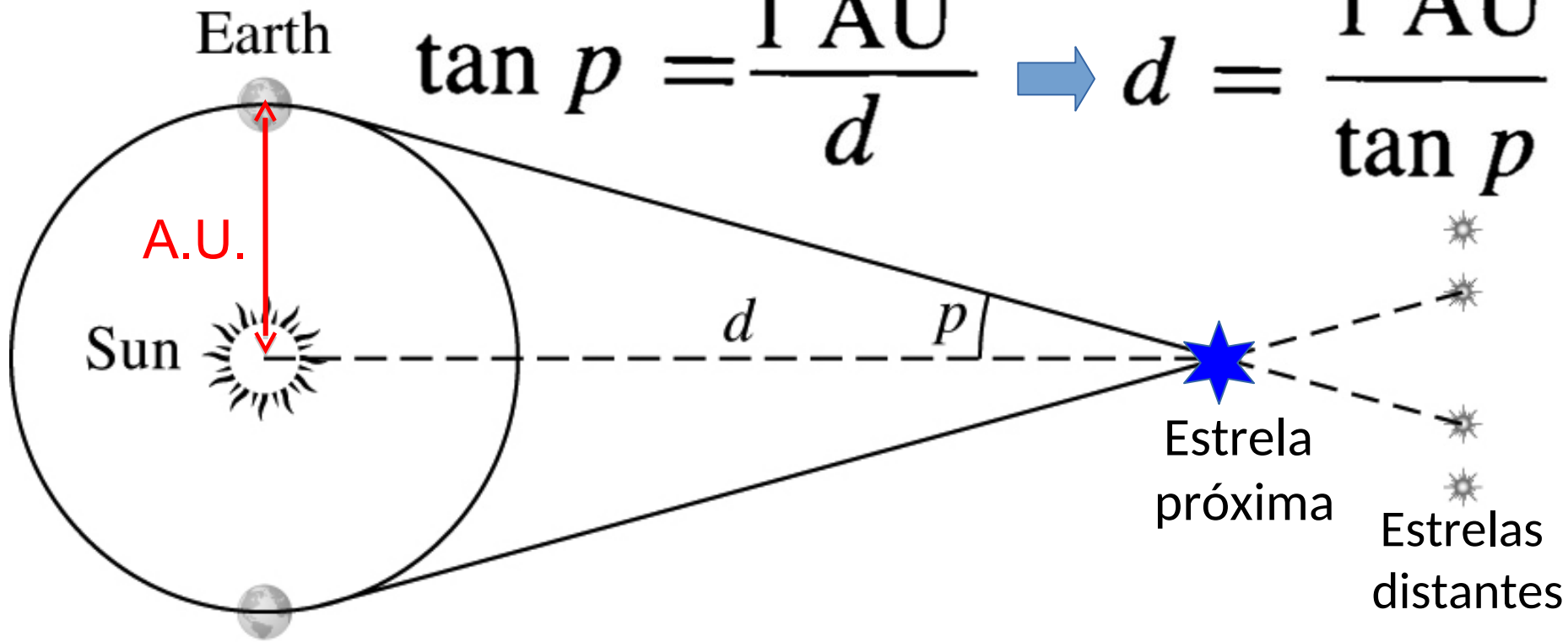


3.1 Paralaxe Trigonométrica Estelar



3.1 Paralaxe Trigonométrica Estelar

$$\tan p = \frac{1 \text{ AU}}{d} \rightarrow d = \frac{1 \text{ AU}}{\tan p}$$



A paralaxe é dada em segundos de arco (p'')

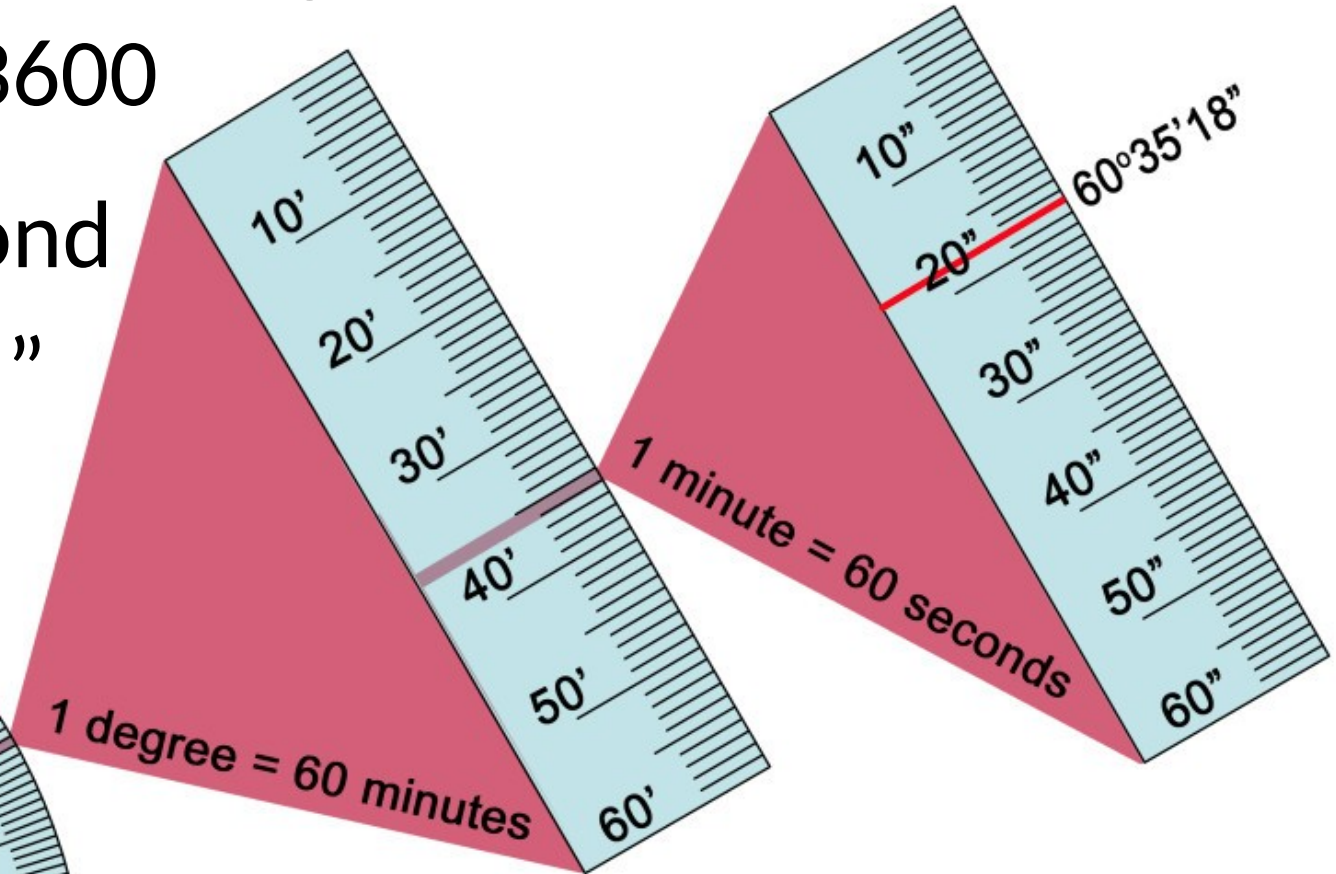
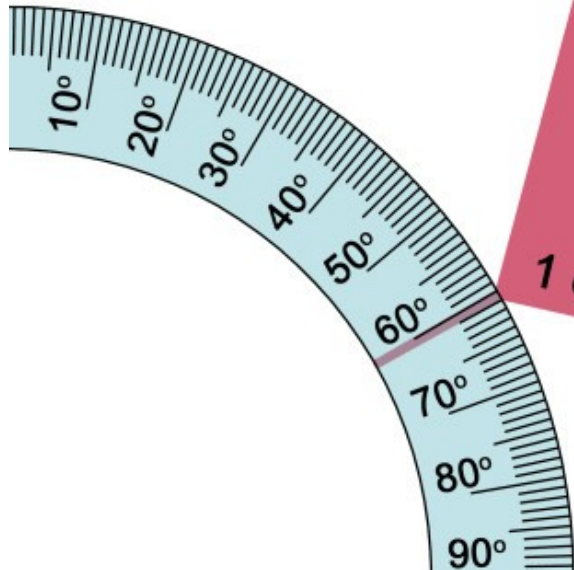
1 grau = 60 minutos de arco, $1^\circ = 60'$

1 min. arco = 60 segundos de arco, $1' = 60''$

$\rightarrow 1'' = 1^\circ/3600$

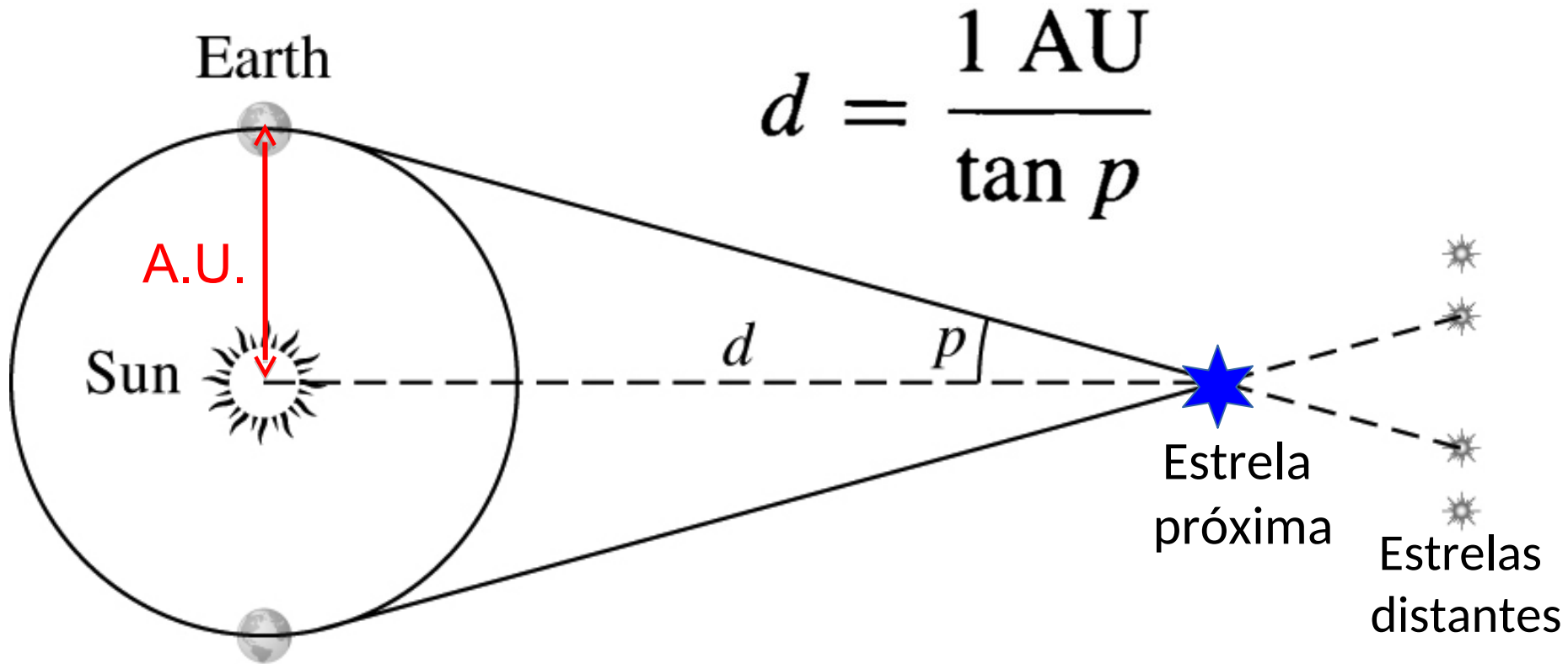
MilliArcSecond

1 mas = $10^{-3}''$



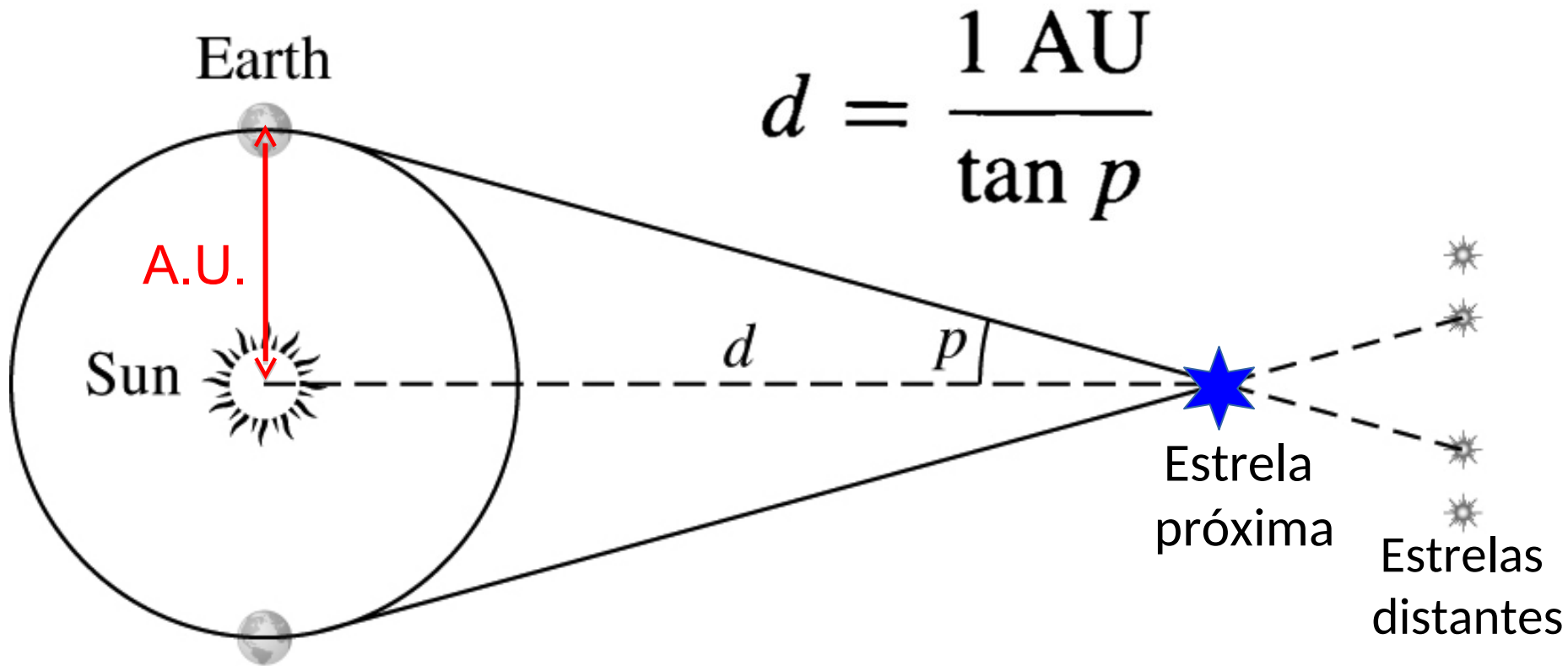
MicroArcSecond: $1 \mu\text{as} = 10^{-6}''$

3.1 Paralaxe Trigonométrica Estelar



A estrela mais próxima, Próxima Centauri: $p = 0,77''$

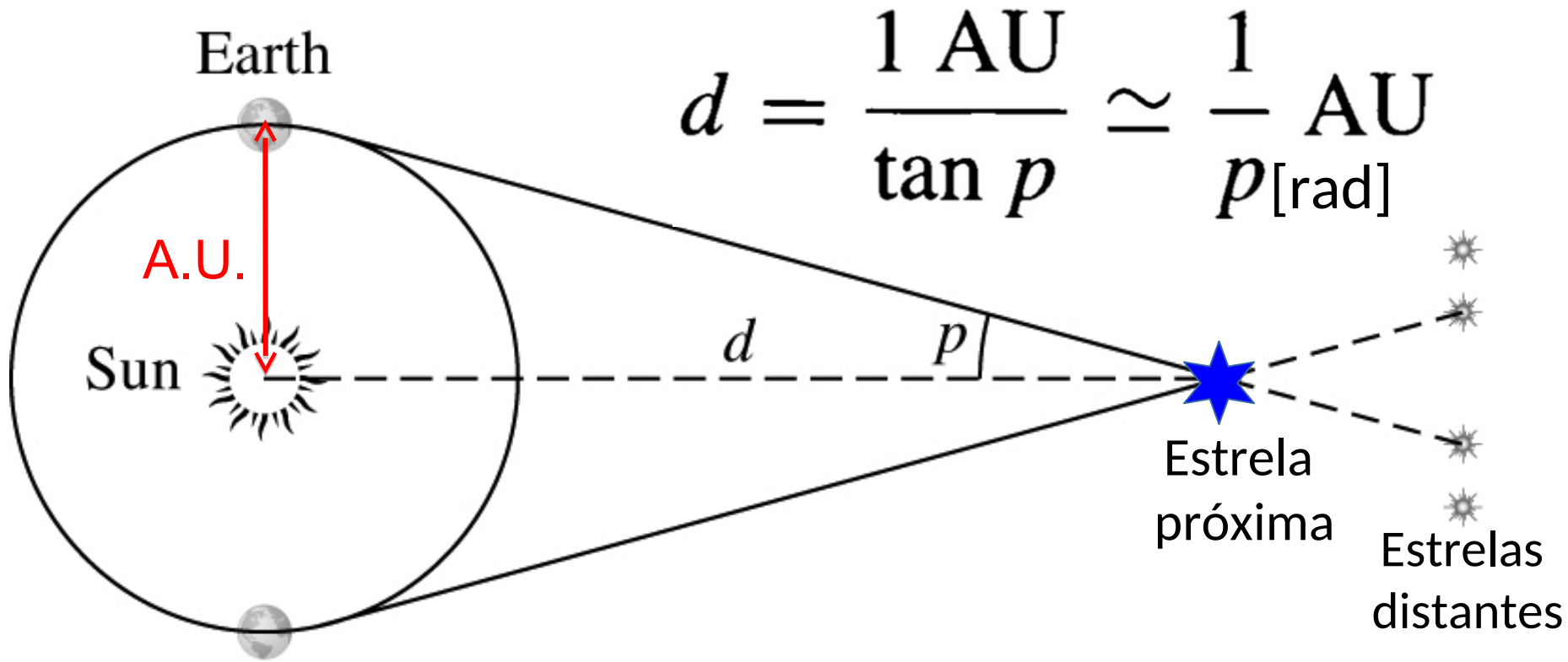
3.1 Paralaxe Trigonométrica Estelar



A estrela mais próxima, Próxima Centauri: $p = 0,77''$

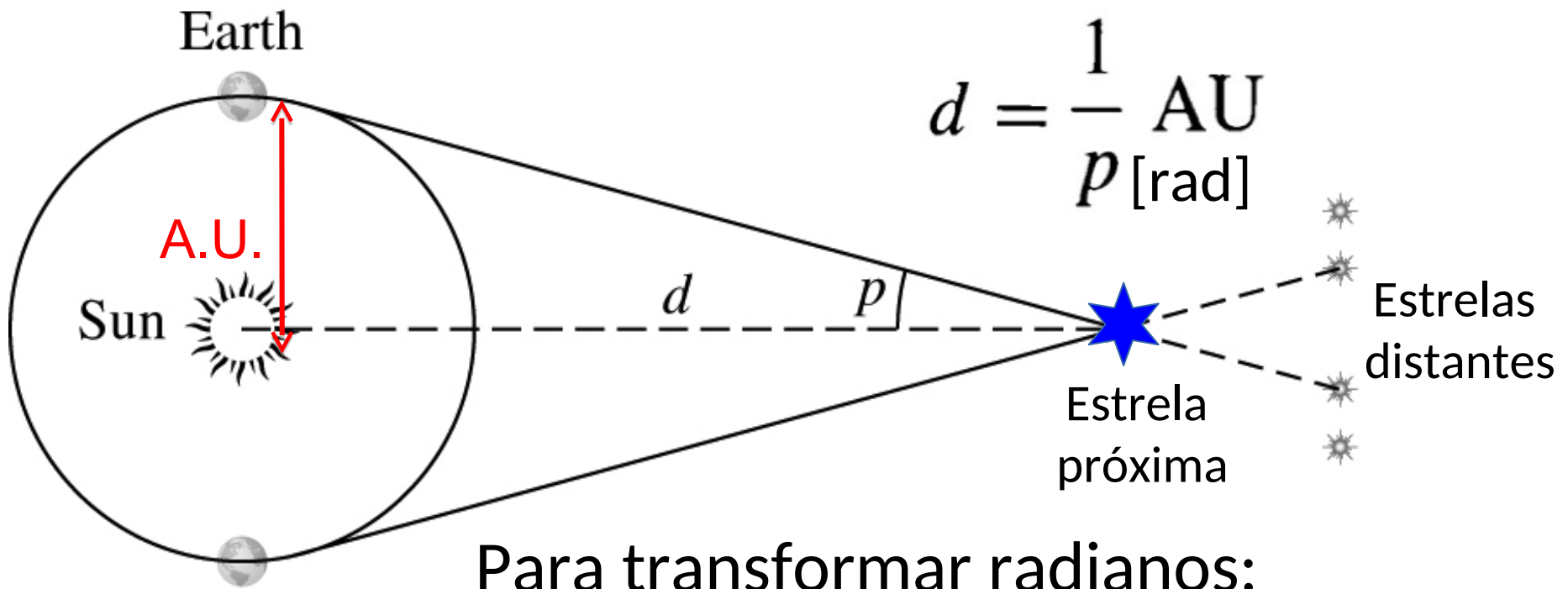
Podemos usar aproximação de pequenos ângulos: $\tan p \approx p(\text{rad})$

3.1 Paralaxe Trigonométrica Estelar



A estrela mais próxima, Próxima Centauri: $p = 0,77''$

Podemos usar aproximação de pequenos ângulos: $\tan p \approx p(\text{rad})$



Para transformar radianos:

$$2\pi \text{ rad} = 360^\circ \rightarrow 1 \text{ rad} = 57,2958^\circ$$

$$1 \text{ rad} = 57,2958^\circ \times (60' / 1^\circ) \times (60'' / 1') = 206265''$$

$$d = 206265 \text{ UA} / p [']$$

$$d = 206265 \text{ UA} / p ["]$$

- Estrela com paralaxe de 1" → distância de 206265 UA

$$d = 206265 \text{ UA} / p ["]$$

- Estrela com paralaxe de $1''$ → distância de 206265 UA
- Essa distância é definida como 1 **parsec** → se a paralaxe é dada em ($''$), temos a distância em parsec:

$$d [\text{pc}] = 1/p["]$$

Exemplo: Friedrich Bessel anunciou em 1838, $p = 0,316''$ para a estrela 61 Cygni

→ distância $d = 1/0,316'' = 3,16 \text{ pc}$

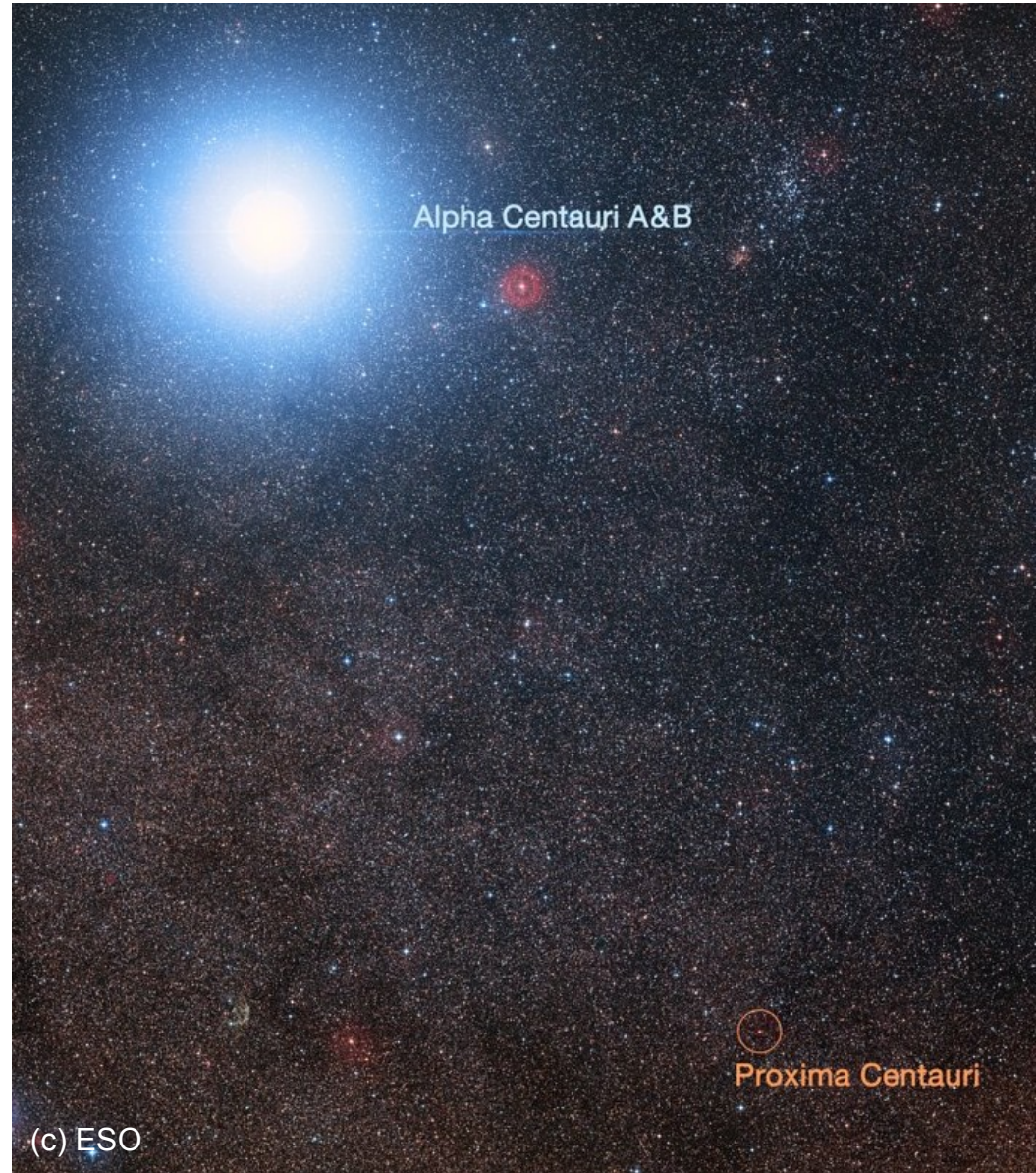
Equivalencia entre parsec e anos-luz:

$$1 \text{ pc} = 206265 \text{ UA} = 3,085 \times 10^{16} \text{ m} = 3,26 \text{ anos-luz}$$

Exemplo, a estrela mais próxima:

Próxima Centauri tem paralaxe $p = 0,7685''$.

$$\begin{aligned} d [\text{pc}] &= 1/p = 1/0,7685 \\ &= 1,30 \text{ parsecs} \\ &= 1,30 \times 3,26 \text{ anos-luz} \\ &= 4,24 \text{ anos-luz} \end{aligned}$$





SIMBAD: Query

other query modes :

Identifier query

Coordinate query

Criteria query

Reference query

Basic query

Script submission

TAP

Query an identifier

Identifier :

Examples

sirius, M31, MCG+02-60-010

*How to write an identifier can be found
IAU format can also be used, with the f*

iau [J/B]1230+08 [enlarging-factor*

you can choose to query :

only this object ▾

around the object, define a radius :

2

arc min ▾

submit id

clear



SIMBAD: Query

other query modes :

Identifier query

Coordinate query

Criteria query

Reference query

Basic query

Script submission

TAP

Query an identifier

Identifier :

aldebaran

Examples

sirius, M31, MCG+02-60-010

*How to write an identifier can be found
IAU format can also be used, with the f*

iau [J/B]1230+08 [enlarging-factor*

you can choose to query :

only this object

around the object, define a radius :

2

arc min

submit id

clear

Basic data :

* **alf Tau** -- Long Period Variable candidate

Other object types:

* (*,AG,...), ** (**,ADS,...), IR (I
(V*,CSV), UV (CEL,TD1), LP? (Ref)

ICRS coord. (*ep=J2000*) :

04 35 55.23907 +16 30 33.4885 (Opt:

FK4 coord. (*ep=B1950 eq=1950*) : 04 33 02.89342 +16 24 37.5957 [7.:

Gal coord. (*ep=J2000*) :

180.97190559 -20.24829953 [7.38 5

Proper motions *mas/yr* :

63.45 -188.94 [0.84 0.65 0] A 2007

Radial velocity / Redshift / cz :

V(km/s) 54.26 [0.03] / z(spectrosc
(Opt) A 2018MNRAS.479.1332M

Parallaxes (*mas*):

48.94 [0.77] A 2007A&A...474..653V

Spectral type:

K5+III B 1989ApJS...71..245K

Fluxes (8) :

U 4.32 [-] C 2002yCat.2237....0D

B 2.40 [-] C 2002yCat.2237....0D

V 0.86 [-] C 2002yCat.2237....0D

Basic data :

* **alf Tau** -- Long Period Variable candidate

Other object types:

* (*,AG,...), ** (**,ADS,...), IR (I
(V*,CSV), UV (CEL,TD1), LP? (Ref)

ICRS coord. (*ep=J2000*) :

04 35 55.23907 +16 30 33.4885 (Opt:

FK4 coord. (*ep=B1950 eq=1950*) : 04 33 02.89342 +16 24 37.5957 [7.:

Gal coord. (*ep=J2000*) :

180.97190559 -20.24829953 [7.38 5

Proper motions *mas/yr* :

63.45 -188.94 [0.84 0.65 0] A 2007

Radial velocity / Redshift / cz :

V(km/s) 54.26 [0.03] / z(spectrosc
(Opt) A 2018MNRAS.479.1332M

→ Parallaxes (*mas*):

48.94 [0.77] A 2007A&A...474..653V

Spectral type:

K5+III B 1989ApJS...71..245K

Fluxes (8) :

U 4.32 [-] C 2002yCat.2237....0D

B 2.40 [-] C 2002yCat.2237....0D

V 0.86 [-] C 2002yCat.2237....0D

Lembrando:

mas = mili segundo de arco = 10^{-3} "

Do it yourself:

Qual a distância de Aldebaran ($p=48,94$ mas) em parsecs?

E em anos-luz?

Paralaxe Trigonométrica (cont.)

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

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

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

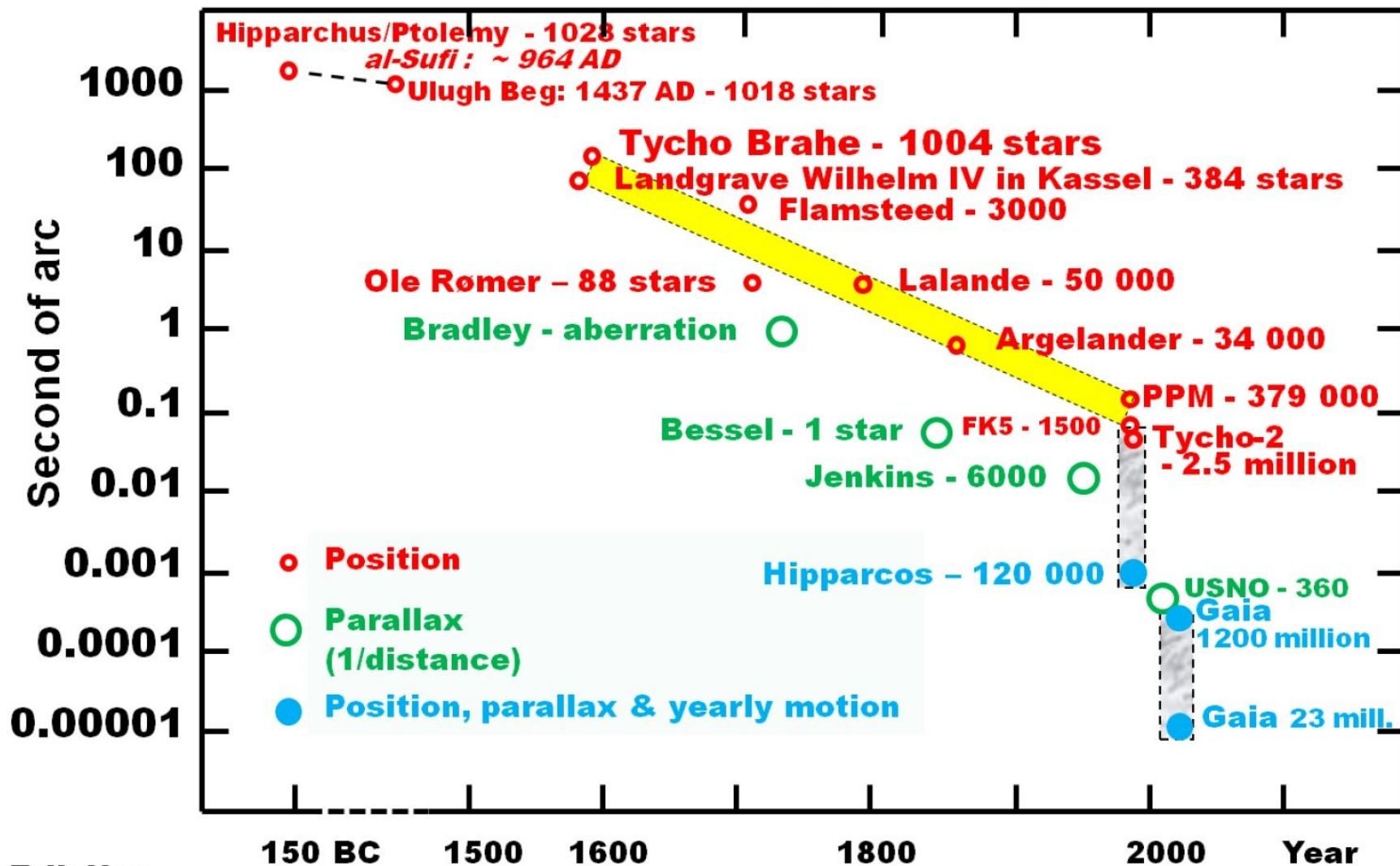
Como o ângulo é pequeno, geralmente é usado “mas” (mili segundo de arco). Por ex. $0.015'' = 15\text{mas}$

Se p é em radianos,
 d é em U.A. \rightarrow

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

Do solo: Bessel 1 paralaxe em 1838; alguns milhares antes do ano 2000. Do espaço: Hipparcos 120 mil, Gaia 1 bilhão

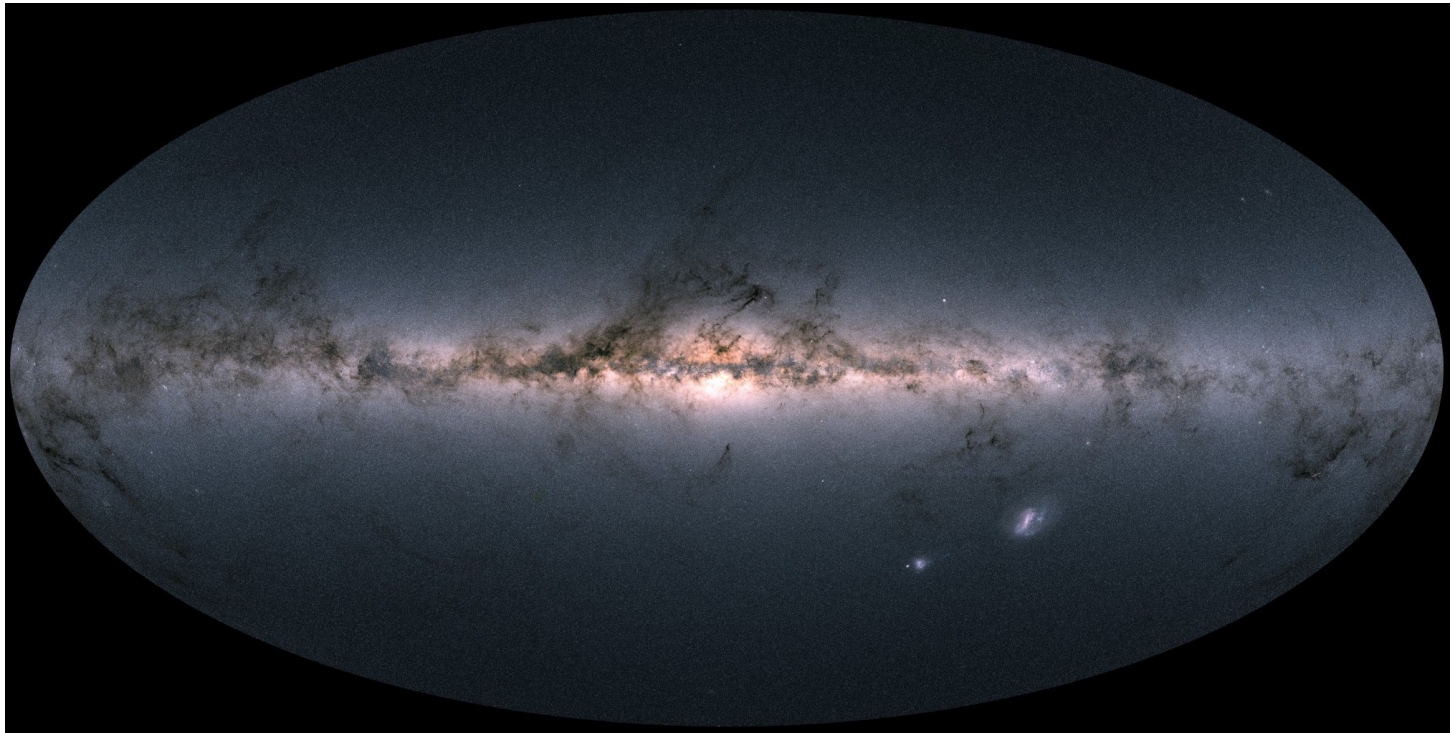
Astrometric Accuracy during 2000 Years



Missão espacial europeia GAIA



G magnitudes for 1.7 billion sources, colors for 1.4 billion.
Positions, parallaxes, proper motions for 1.3 billion stars.
 T_{eff} for 161 million, Radial velocities for 7.2 million stars

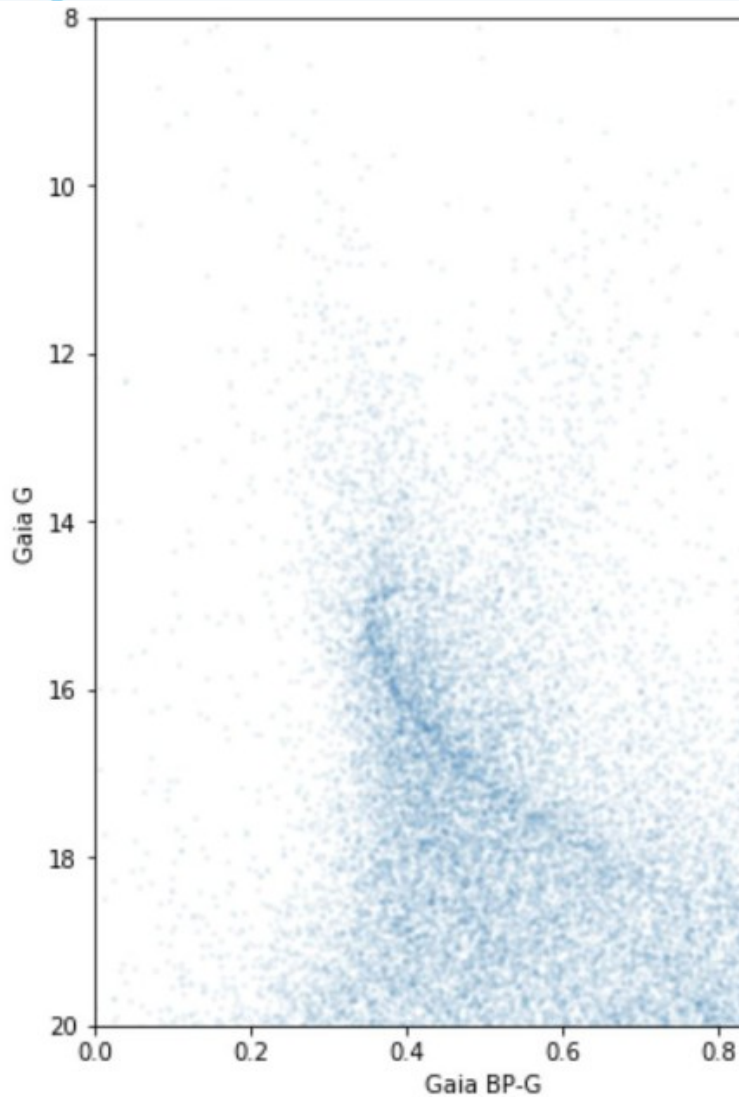


Release 25/April/2018. More than 60 papers in 4 weeks!



Natalie Gosnell @Nattie_G_ · 25 de abr

A quick trip into the [#GaiaDR2](#) data, chasing my favorite open cluster, NGC 188. Here are all ~37k sources within 1 deg of NGC 188. The main sequence is visible, but can we do better?

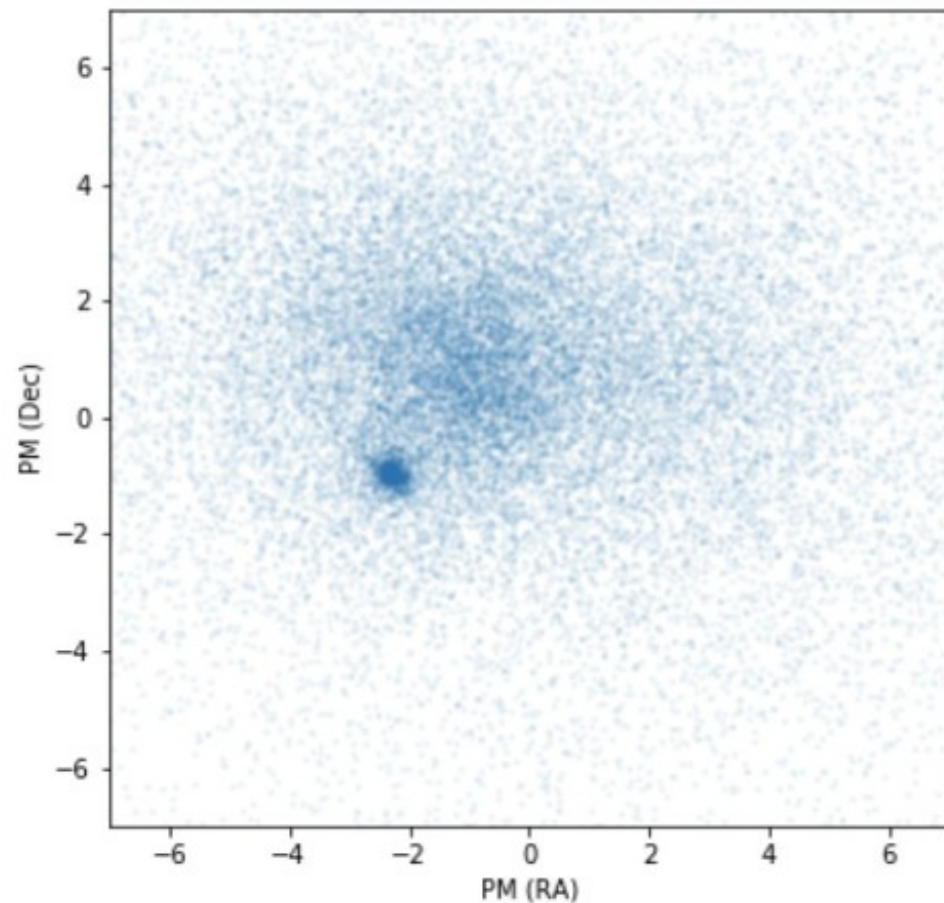


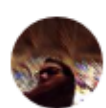
Natalie Gosnell @Nattie_G_ · 25 de abr

Let's look at the proper motions! The overdensity around -2.25 RA, -1.0 Dec is the cluster! What happens if we make a quick cut around that overdensity?

****drum roll****

[Traduzir Tweet](#)





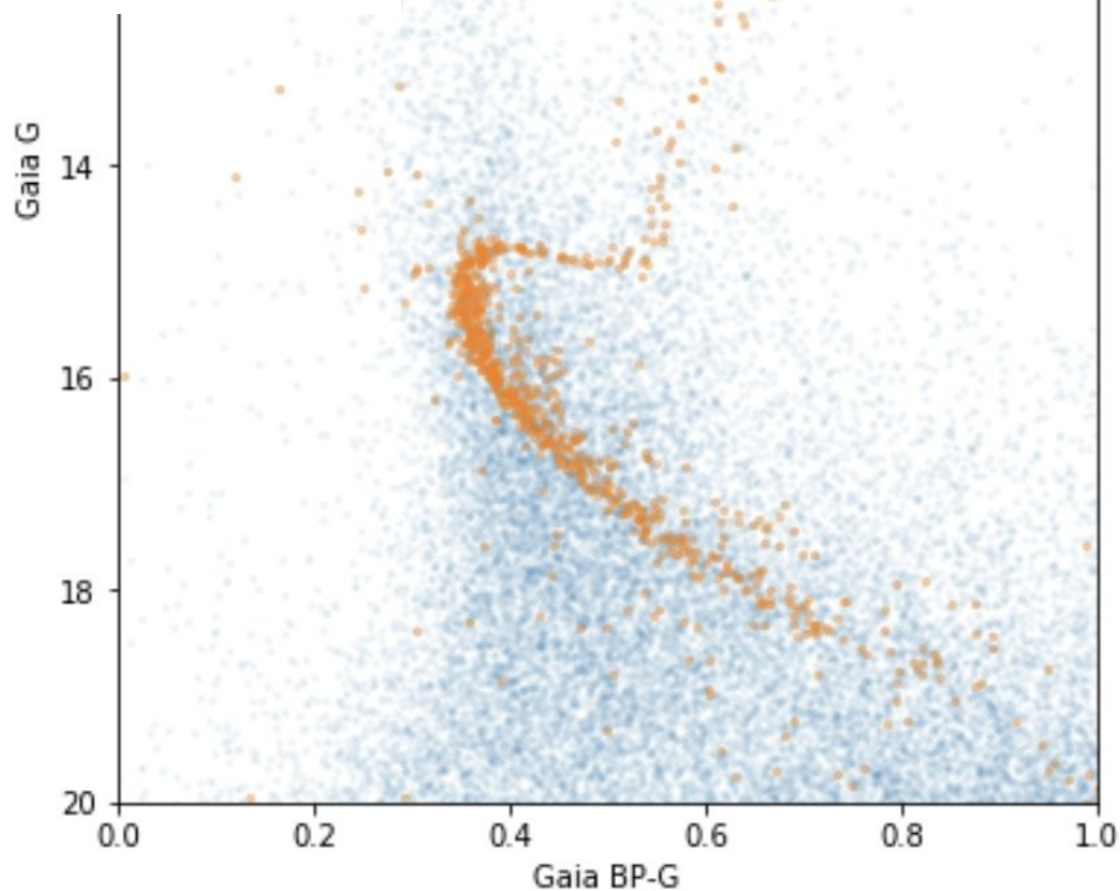
Natalie Gosnell

@Nattie_G_

Seguir

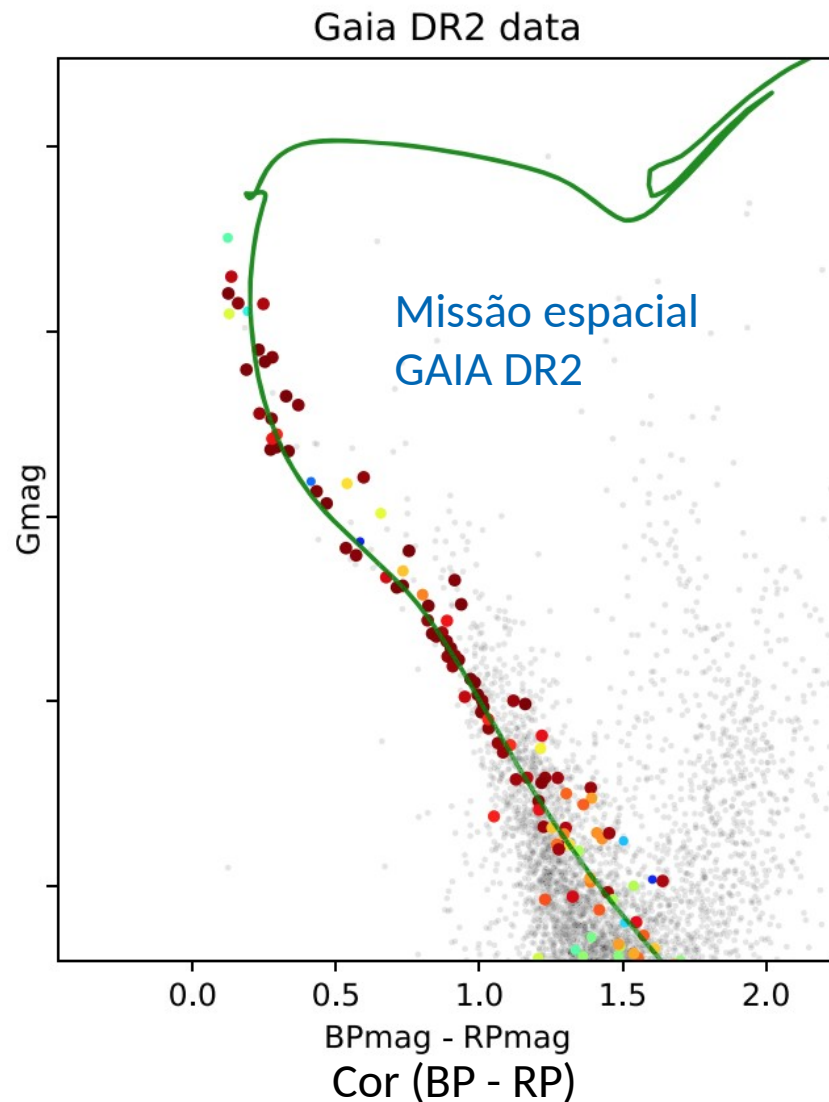
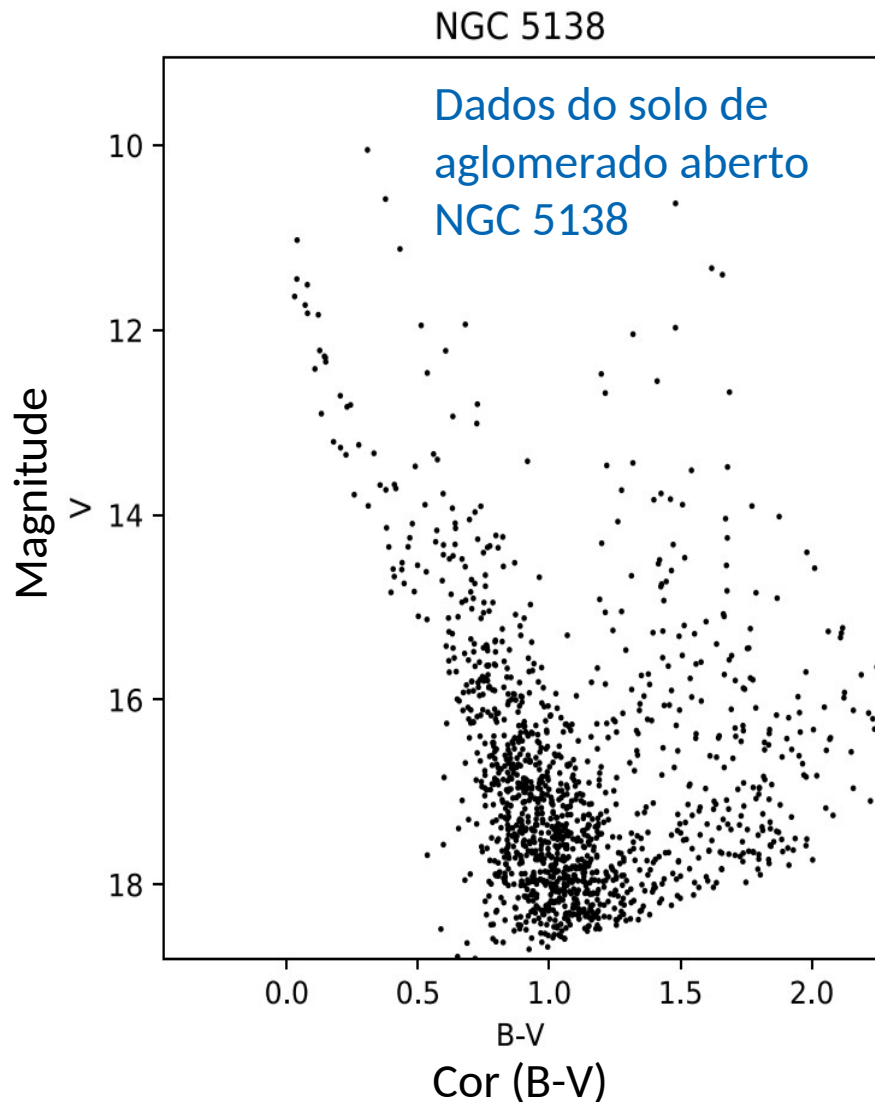


THE CLUSTER CMD POPS OUT JUST LIKE THAT! Folks. This used to take YEARS of painstaking proper motion analysis. YEARS! And my blue stragglers are there!!! THIS IS SO COOL!!! ✨ #GaiaDR2



Astrometric and photometric study of Dias 4, Dias 6, and other five open clusters using ground-based and *Gaia* DR2 data

Wilton S. Dias (UNIFEI) et al. 2018





Hiparco (190 – 120 a.C.)

3.2 Escala de Magnitude

Magnitude Aparente (m) e
fluxo da estrela (F)



Ptolomeu (100 – 170)

- Definida por Hiparco, refinada por Ptolomeu
- Estrelas mais brilhantes 1^a magnitude, $m_1 \Rightarrow F_1$
- Estrelas de menor brilho 6^a magnitude, $m_6 \Rightarrow F_6$
- Na convenção moderna $\Rightarrow F_1 = 100 F_6$

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

$$\Delta m = m_6 - m_1 = 5 \Rightarrow F_1 / F_6 = 100$$

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

$$\Delta m = m_2 - m_1 = 1 \Rightarrow F_1 / F_2 = 100^{1/5} = 2,512$$

Razão de fluxos em função das diferenças de magnitudes dos objetos i e j :

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

Razão de fluxos em função das diferenças de magnitudes dos objetos i e j :

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

Para calibrar o sistema precisamos de uma referência, por exemplo $m_j = 0$

$$m - 0 = -2,5 \log \frac{F}{F_0}$$

Magnitude zero \Rightarrow fluxo de calibração

Se $m_j = 0 \Rightarrow F_j = F_0 = \text{constante}$

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

$$m = \underbrace{2,5 \log F_0}_{C = \text{constante}} - 2,5 \log F$$

$C = \text{constante}$

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

Ponto zero para o filtro “V” (visível)

$$m_V = -21.1 - 2.5 \log f_V \quad \text{onde } f \text{ é o fluxo em}$$
$$V = -21.1 - 2.5 \log f_V \quad 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$$

Relação de m_V para o fluxo f_V :

$$f_V = f_{0,V} 10^{-0.4m_V}$$

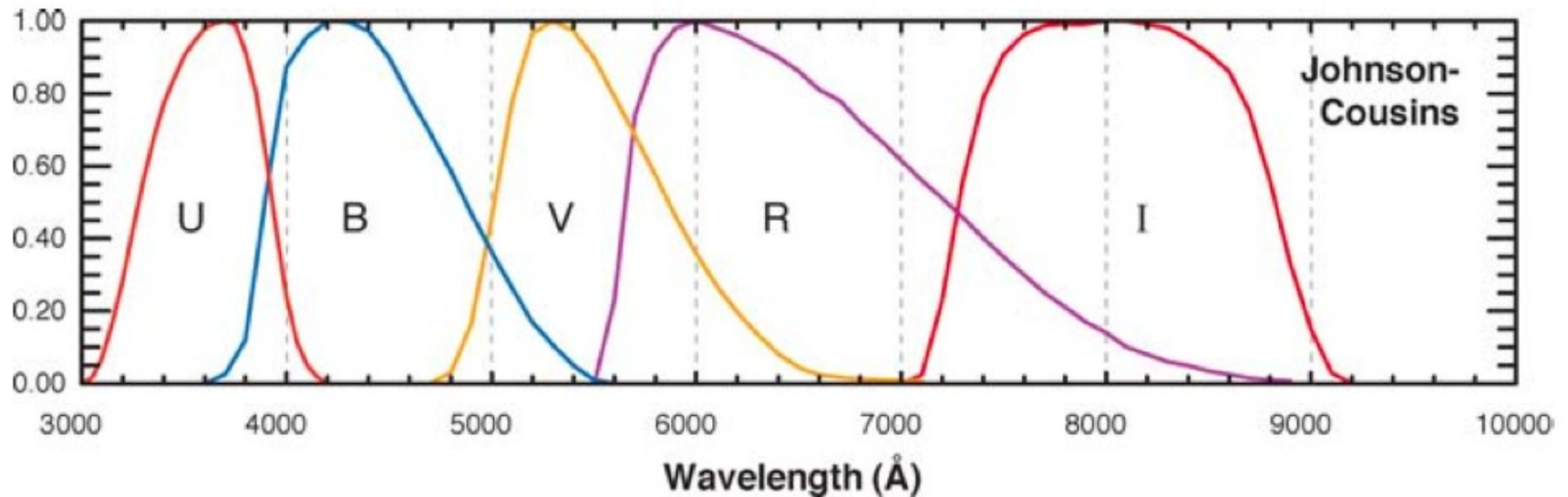
$$f_{0,V} = 363,1 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$$

Transformação de magnitude m_λ para fluxo f_λ nos filtros U,B,V,R,I

filtro	U	B	V	R	I
$f_{0,\lambda}$	417.5	632	363.1	217.7	112.6

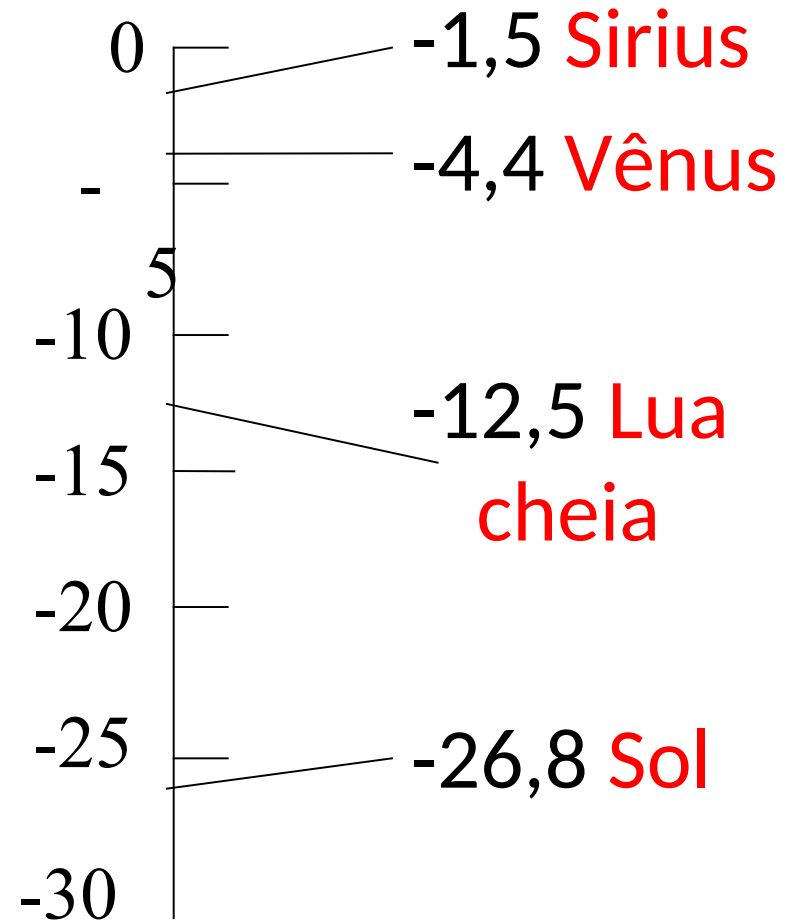
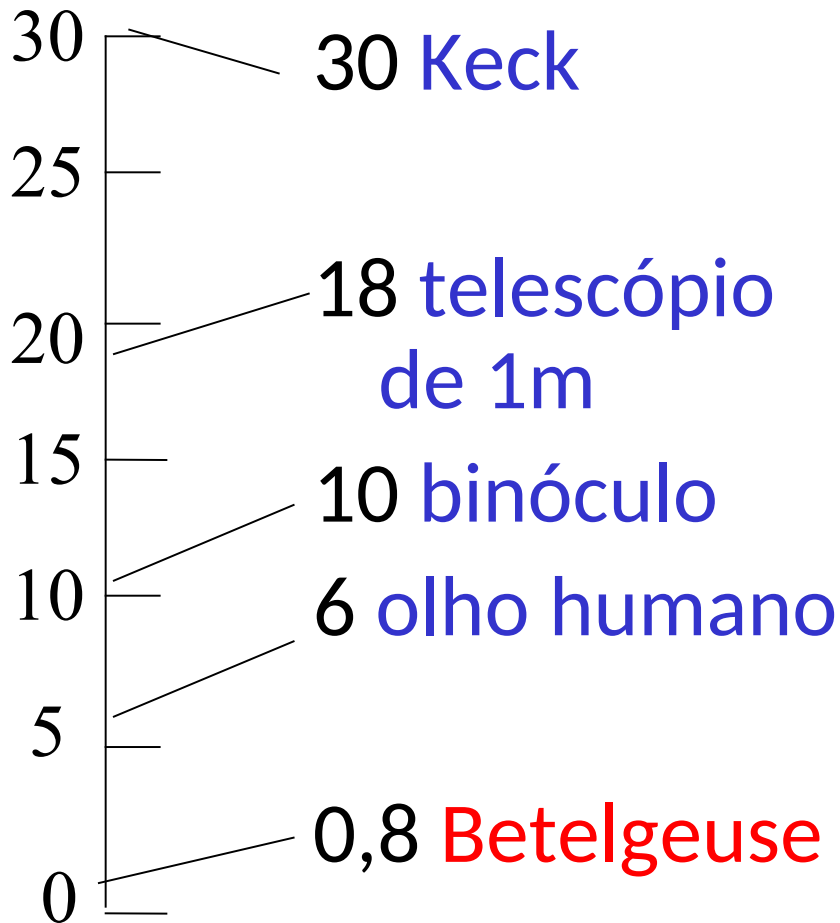
$f_{0,\lambda}$ é o fluxo (em 10^{-11} erg cm^{-2} s^{-1} \AA^{-1}) para $m_\lambda = 0$

$$f_\lambda = f_{0,\lambda} 10^{-0.4m_\lambda}$$



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

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

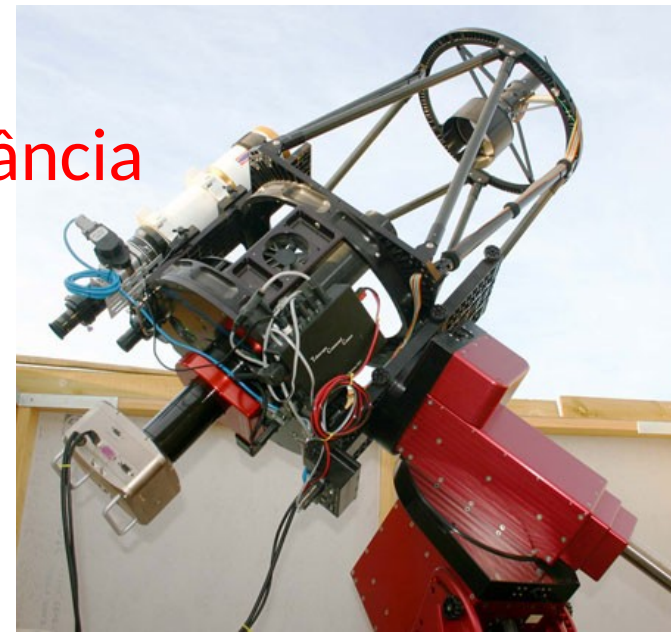


Fluxo, Luminosidade e a lei do inverso do quadrado da distância

- **Brilho aparente** pode ser medido (fluxo = energia detectada numa dada área de superfície coletora, num intervalo de tempo).
- **Luminosidade**: Energia por unidade de tempo (Potência) emitida pela estrela.

Ex: Sol: $L_{\odot} \sim 3,84 \times 10^{26}$ Watts.

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

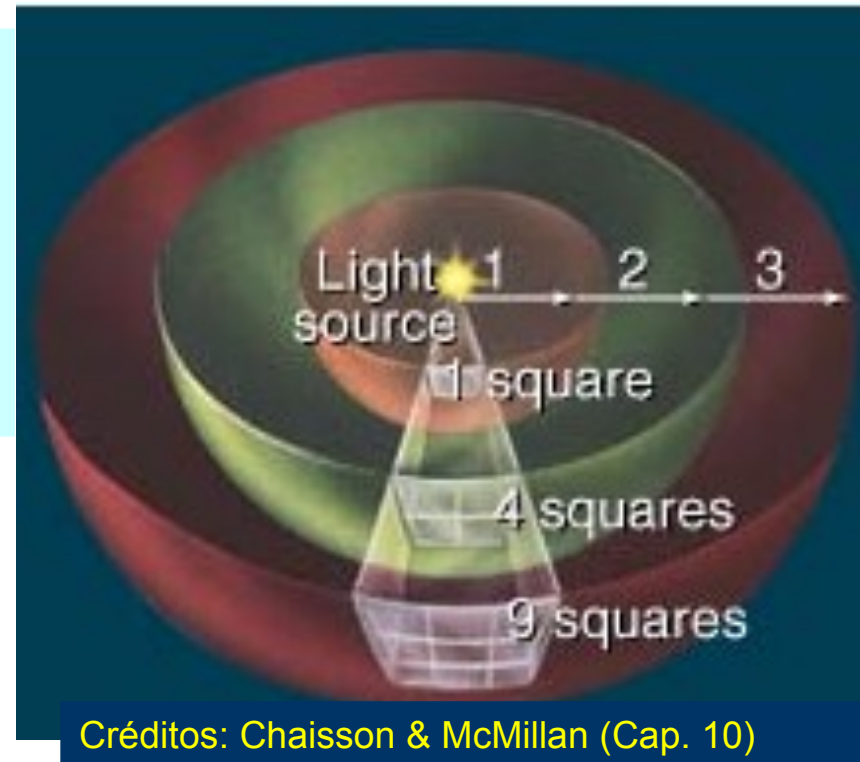


Fluxo de Radiação Estelar

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 com o quadrado da distância.

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



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:

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

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

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

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

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

Onde: $C' = C + (2,5 \log 4\pi)$

m é a **magnitude aparente**

Magnitude Absoluta $M = m$ ($d=10$ pc)

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

m, d, L_*, F_d

$M, 10\text{pc}, L_*, F_{10}$

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

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

Módulo de distância: $m - M$

Comparação entre magnitudes aparente (observada) e absoluta (que depende da luminosidade da estrela)

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

$$m - M = 5 \log d - 5$$

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

ATENÇÃO:

(1) distância em pc.

(2) Supondo ausência de extinção interestelar, que afeta a magnitude aparente

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

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

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

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

$$M_{\text{Sol}} = -26,83 - 5 \log \frac{4,949 \times 10^{-6}}{10} = 4,74$$

Vamos adotar 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:

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

3.3 Natureza da luz

- Observação das luas de Júpiter
→ usando leis de Kepler →
previsão de eclipses das luas

- Terra mais próxima de Júpiter → eclipses ocorriam antes do previsto; mais longe → eclipse ocorria depois

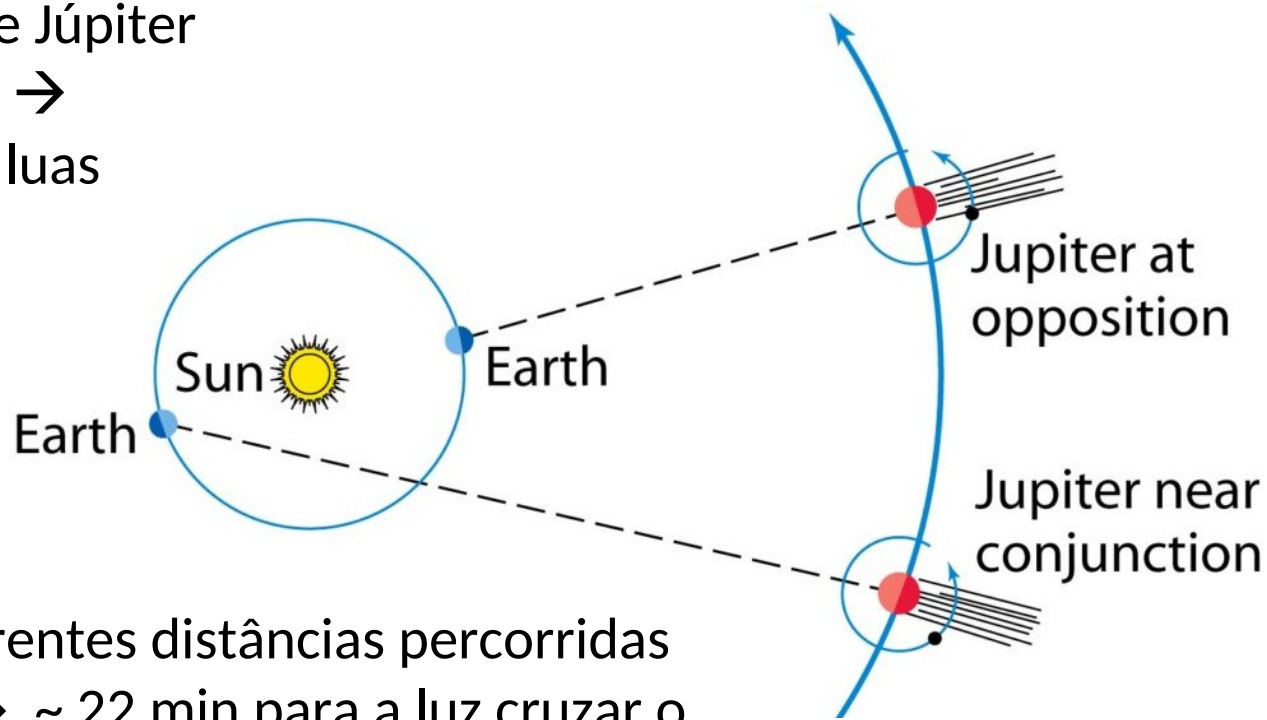
- Roemer em 1676: diferentes distâncias percorridas entre Júpiter e a Terra → ~ 22 min para a luz cruzar o diâmetro da órbita da Terra*

$$\rightarrow v_{\text{luz}} \sim 2,2 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

- Em 1983 v_{luz} no vácuo foi definida: $c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

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

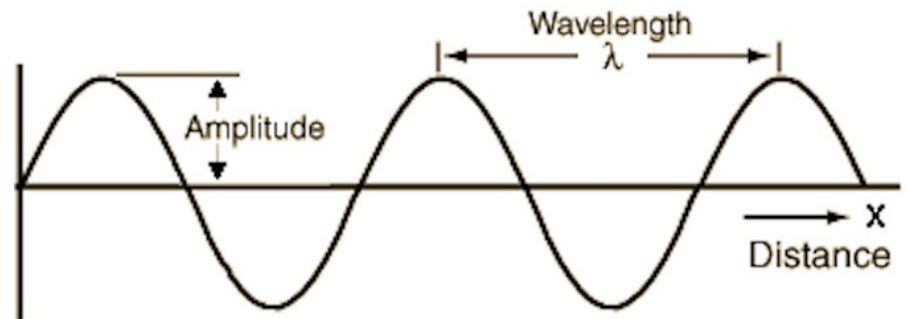
A velocidade da luz:
A experiência de Ole Roemer



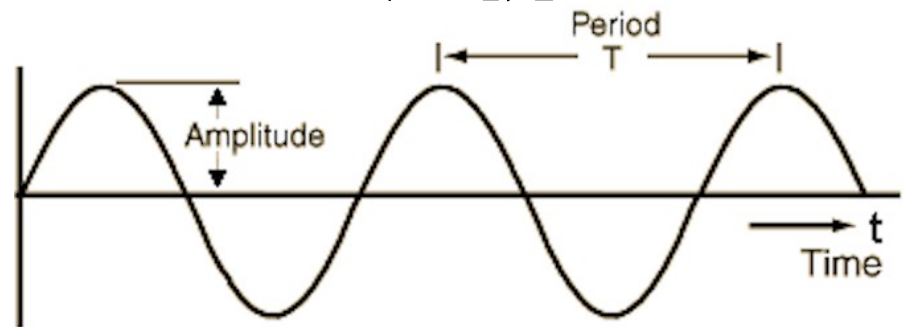
<https://historyofscience101.files.wordpress.com>

Debate: a luz é partícula ou onda?

- Newton (1643 - 1727): luz é um feixe de partículas;
- Huygens (1629 - 1695): luz são ondas*
- comprimento de onda λ : distância entre duas cristas
- frequência ν : número de ondas por segundo que passam por um determinado ponto no espaço
- velocidade da luz é $c = \lambda \nu$



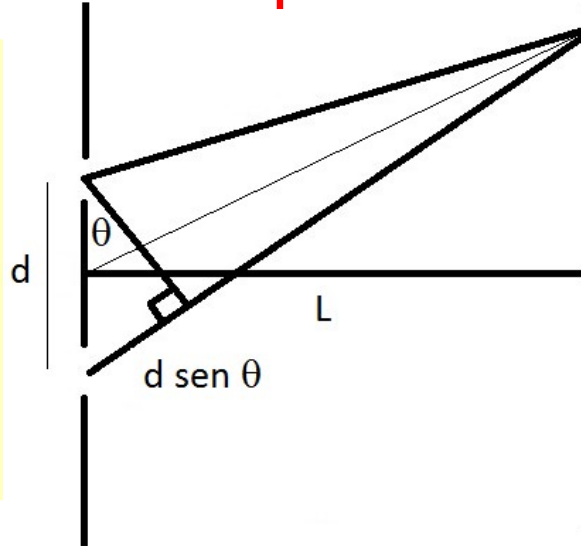
$$\nu = 1/T$$



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

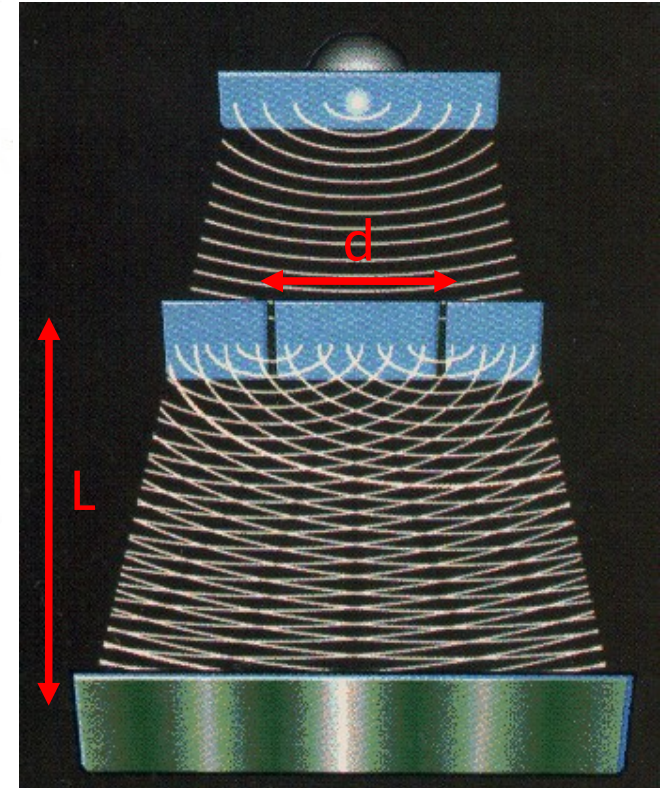
A natureza ondulatória da luz só foi conclusivamente demonstrada em 1801 por Thomas Young (1773-1829), com o **experimento da dupla fenda**

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



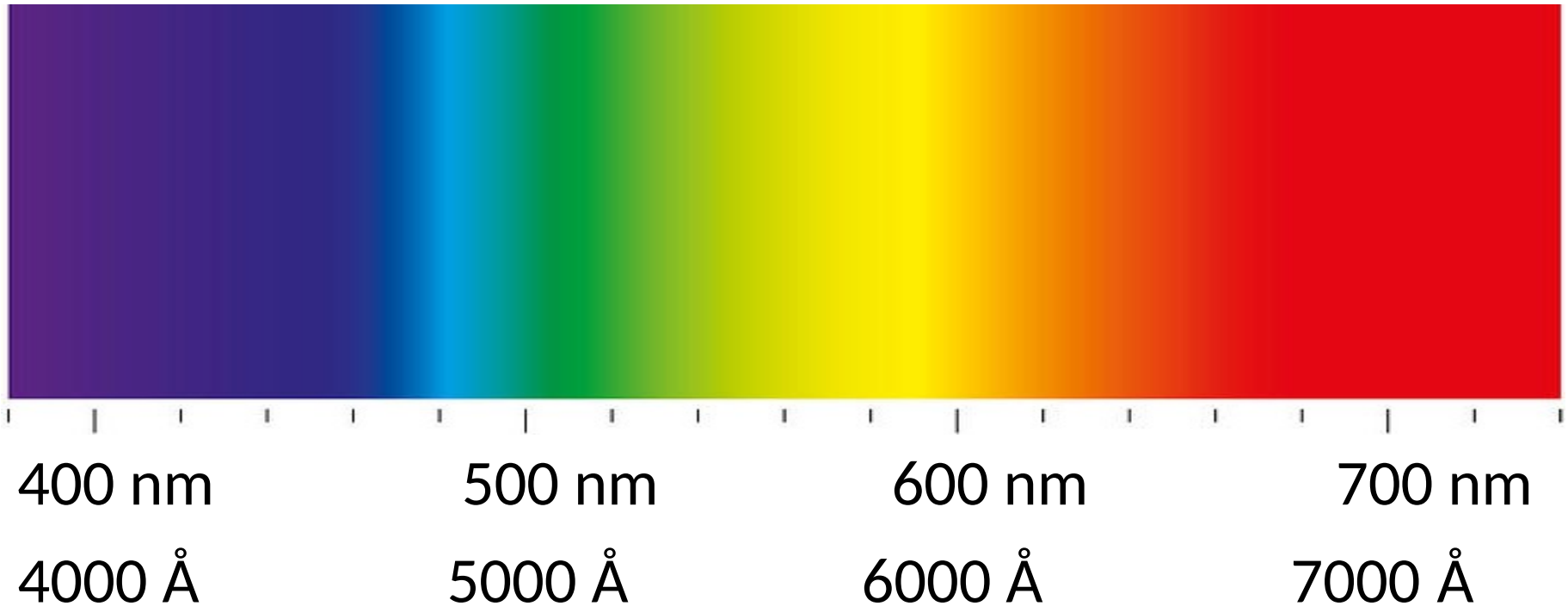
Na tela aparecem **franjas de interferência**, cujo padrão é dado pela **diferença dos caminhos** percorridos pela luz, dado por $d \sin \theta$ (se $L \gg d$), tal que:

$$d \sin \theta \begin{cases} n \lambda & (n = 0, 1, 2, \dots \text{franjas brilhantes}) \\ (n - \frac{1}{2}) \lambda & (n = 1, 2, \dots \text{franjas escuras}) \end{cases}$$



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

Com o experimento, Thomas Young determinou o comprimento de onda da luz visível, de ~ 400 nm no extremo violeta e ~ 700 nm no extremo vermelho



Em Astronomia é usado muito o Angstrom, $1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm}$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

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

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

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$$

A teoria de Ondas Eletromagnéticas



James Clerk Maxwell
(1831-1879)

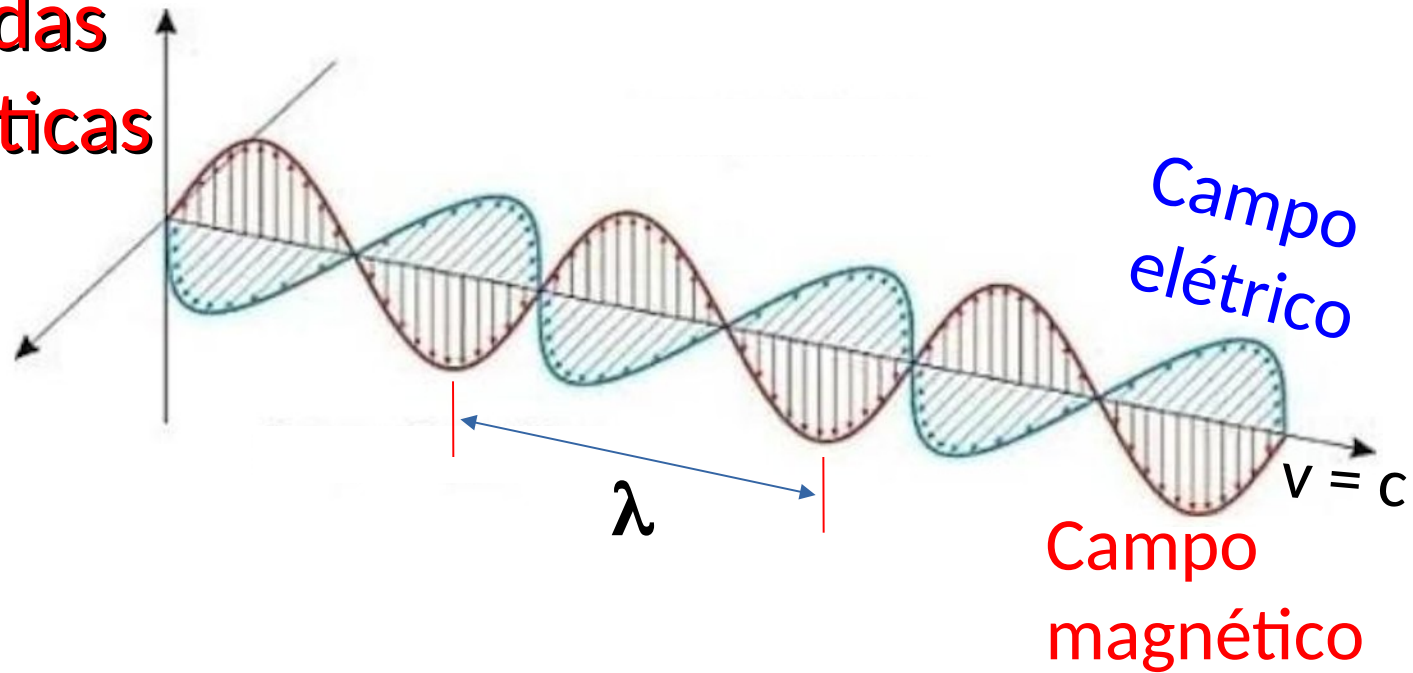
Das equações de Maxwell (1864) dos campos **elétrico (E)** e **magnético (B)** → equação de ondas eletromagnéticas que se deslocam no vácuo à velocidade:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Substituindo pelos valores das constantes ϵ_0 e μ_0 Maxwell descobriu que as ondas eletromagnéticas viajam à velocidade da luz.

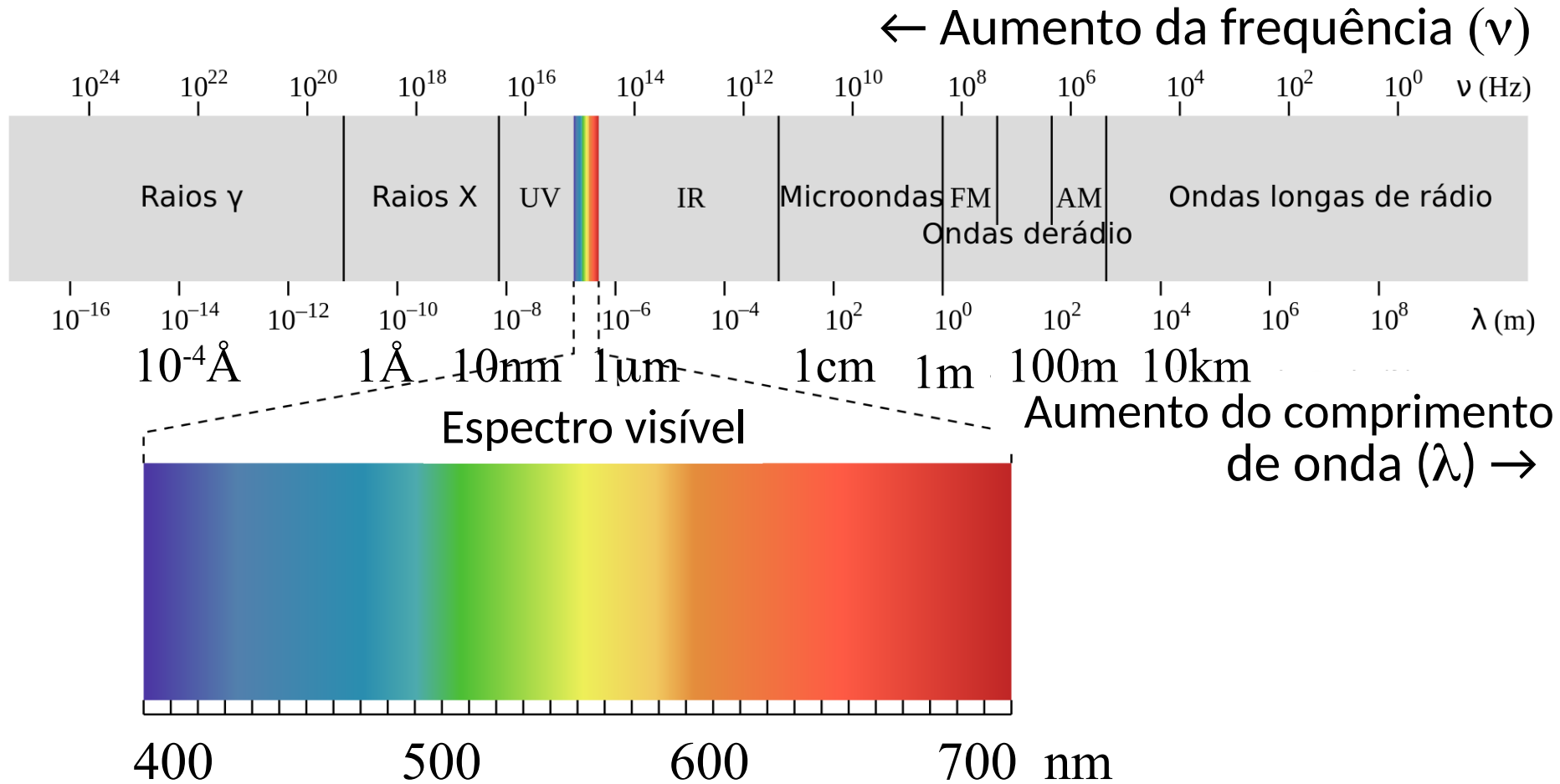
Em 1889, H. Hertz produziu ondas rádio em laboratório, demonstrando que as ondas eletromagnéticas têm propriedades de reflexão, refração e polarização.

Equações de Maxwell: Ondas Eletromagnéticas são ondas transversais



Os campos **elétrico** e **magnético** vibram em planos perpendiculares à direção de propagação da onda. Juntos, eles formam uma onda eletromagnética que se move através do espaço à velocidade da luz.

O Espectro Eletromagnético



O espectro óptico (visível) cobre comprimentos de onda desde o violeta ($\sim 4000 \text{ \AA}$) até o vermelho ($\sim 7000 \text{ \AA}$)
(1 Ångstrom = $10^{-8} \text{ cm} = 0,1 \text{ nm}$)

Região espectral	λs típicos	λ (em metros)
Raios- γ	$< 0,1 \text{ \AA}$	$< 10^{-11}$
Raios-X	$0,1 - 100 \text{ \AA}$	$10^{-11} - 10^{-8}$
UV	$100 \text{ \AA} - 4000 \text{ \AA}$	$10^{-8} - 4 \cdot 10^{-7}$
Visível	$4000 - 7000 \text{ \AA}$	$4 \cdot 10^{-7} - 7 \cdot 10^{-7}$
IV	$1 \text{ }\mu\text{m} - 100 \text{ }\mu\text{m}$	$10^{-6} - 10^{-3}$
Microondas	$1 \text{ mm} - 10 \text{ cm}$	$10^{-3} - 10^{-1}$
Rádio	$> 10 \text{ cm}$	$> 10^{-1}$

O vetor de Poynting e Pressão de Radiação:

Ondas carregam **energia** e **momento** na direção de propagação.

O vetor de Poynting: $\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$

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

O valor médio (no tempo) do vetor de Poynting é: $\langle S \rangle = \frac{1}{2\mu_0} E_o B_o$

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

No vácuo, $E_o = c B_o$

Pressão de Radiação

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

$$p = E/c \text{ (momentum of light)}$$

$$F = dp/dt \text{ (change in momentum)}$$

$$F = (dE/dt) / c$$

$\langle S \rangle$: taxa de energia transferida por unidade de área, em Watts por metro quadrado ($W \cdot m^{-2}$)

$$\rightarrow F = \langle S \rangle A / c$$

Absorção total: $F_{rad} = \frac{\langle S \rangle A}{c}$

Reflexão total: $F_{rad} = \frac{2\langle S \rangle A}{c}$

Incidência normal



Pressão de Radiação

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

Com ângulo de incidência θ :

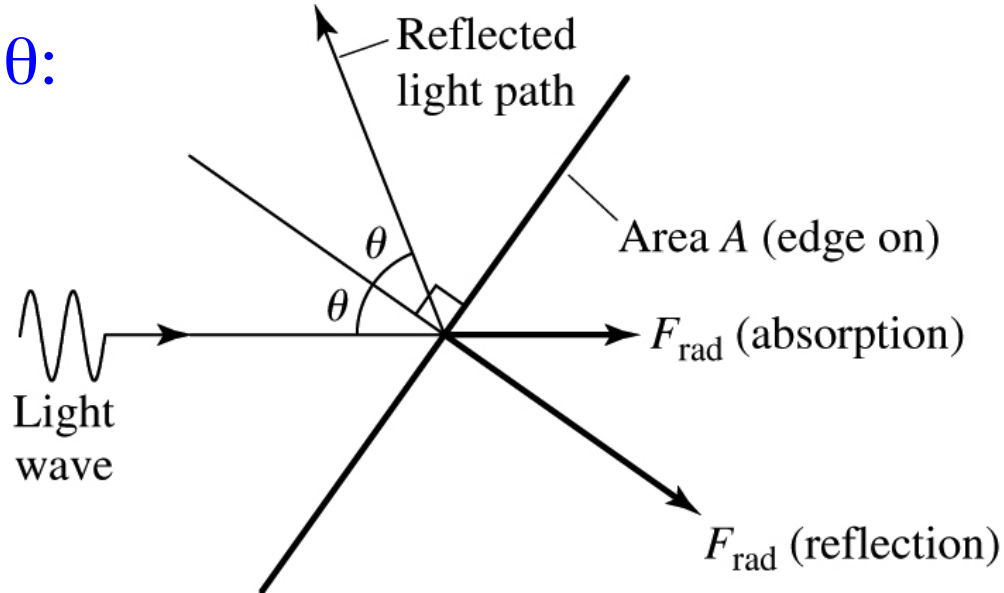
Absorção:

$$F_{rad} = \frac{\langle S \rangle A}{c} \cos \theta$$

Light wave

Reflexão:

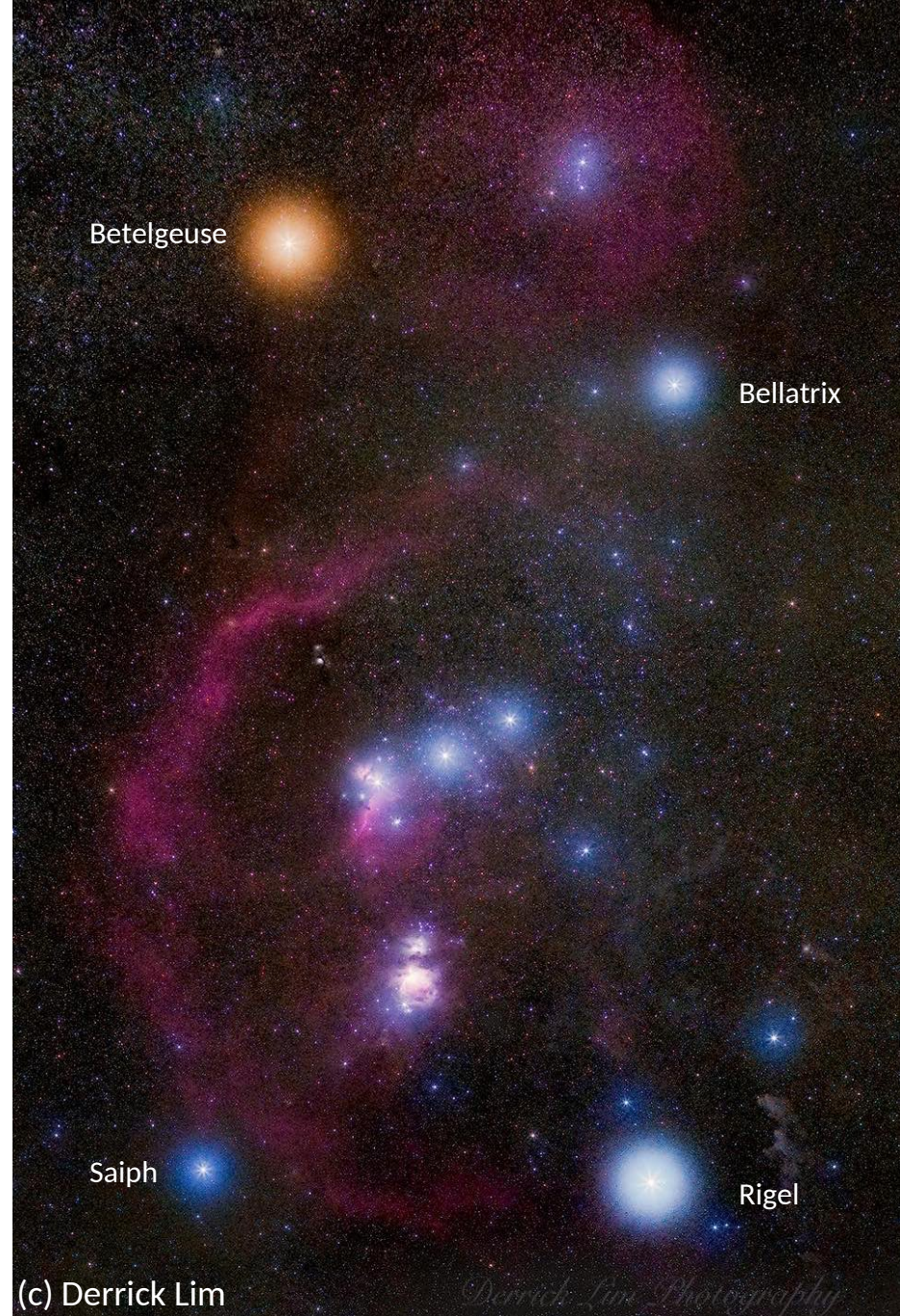
$$F_{rad} = \frac{2\langle S \rangle A}{c} \cos^2 \theta$$



Quando a onda incide no ângulo θ , então uma área de unidade da superfície intercepta uma área $\cos \theta$ da frente de onda. O componente da força resultante normal para a superfície traz um segundo fator de $\cos \theta$. A força é o dobro pela reação do radiação refletida.

Pressão de Radiação

A pressão de radiação não é relevante em estrelas frias como o Sol, mas é importante em **estrelas quentes**, como por exemplo nas estrelas **Saiph** e **Bellatrix** da constelação de Orion



(c) Derrick Lim

Derrick Lim Photography

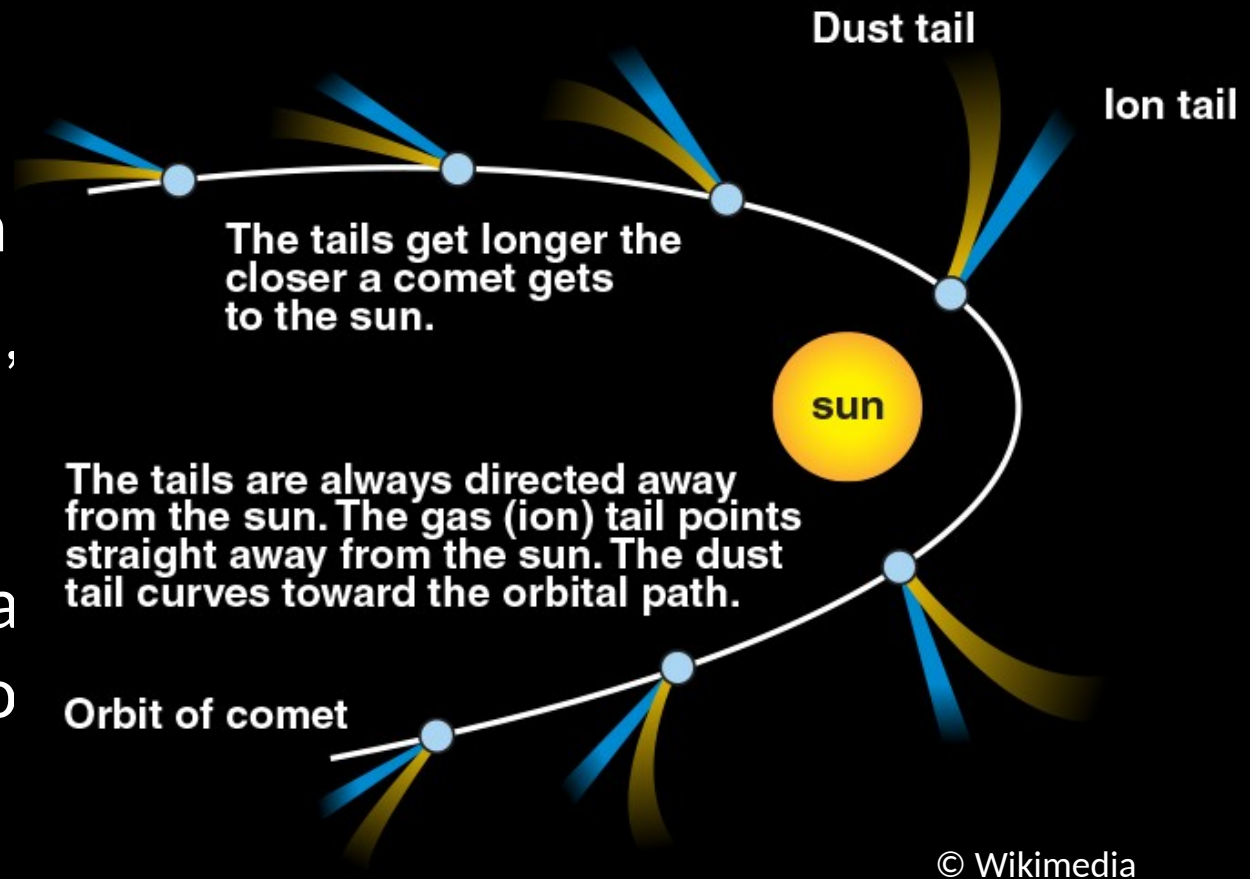
Pressão de Radiação



Cometa
C/2020 F3
#Neowise
(c) Takao
Sambommatsu,
23/Jul/2020

Ao se aproximar ao Sol, a radiação solar aquece o núcleo do cometa, liberando partículas e gases, que são levados para longe pelo vento solar (**cauda de íons**) e a pressão de radiação (**poeira**)

O gás é ionizado (principalmente CO^+ , N_2^+ , CO_2^+) pela radiação UV do Sol, e a interação dos íons com o vento solar causa a cauda de íons, apontando em direção oposta ao Sol.



A poeira é empurrada pela pressão de radiação, criando uma cauda de poeira curvada na direção da órbita

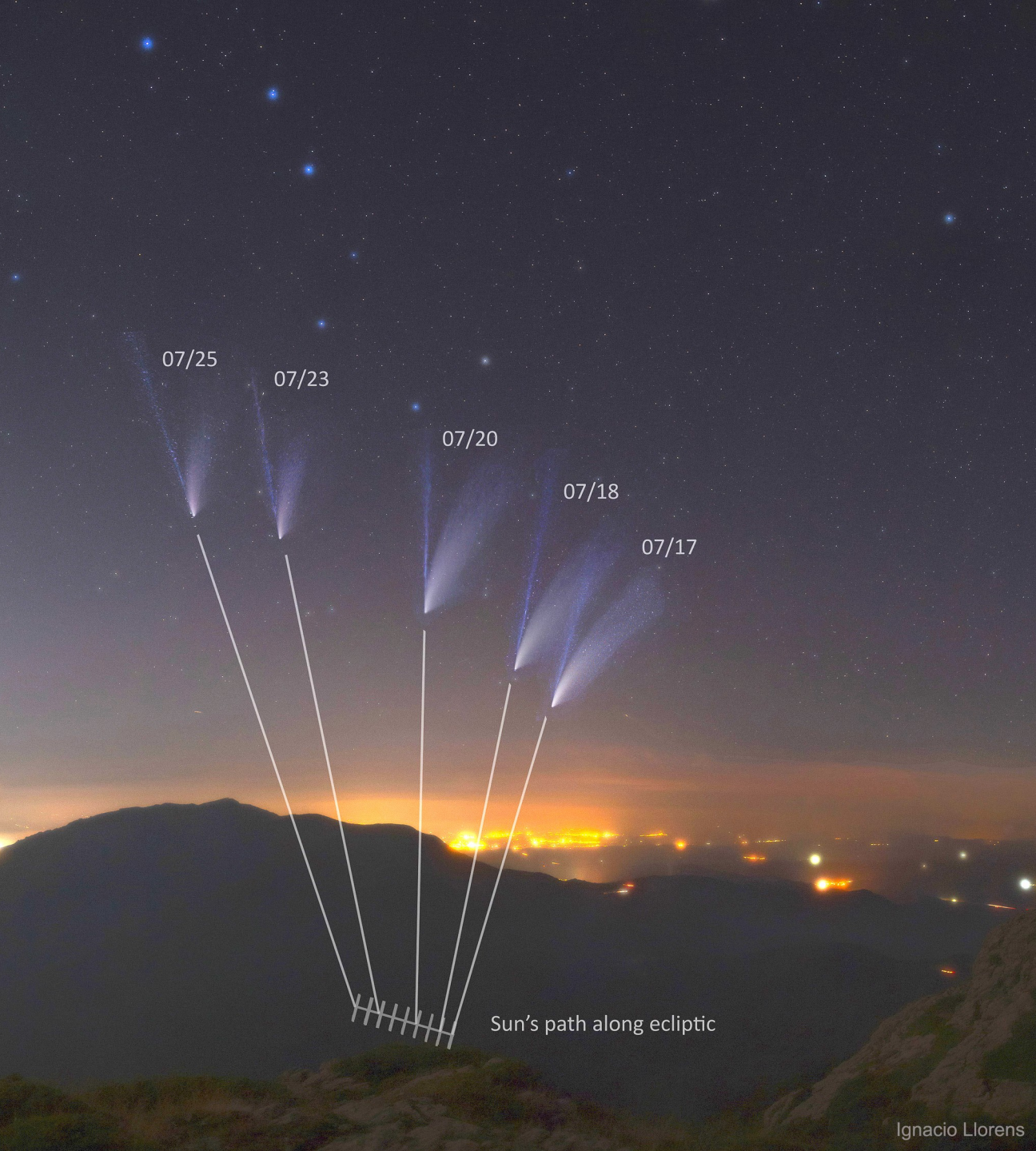


Imagem
composta do
cometa C/2020 F3
#Neowise
(c) Ignacio Llorens
17-25/Jul/2020

As caudas do
cometa Neowise,
apontando em
direção oposta ao
Sol