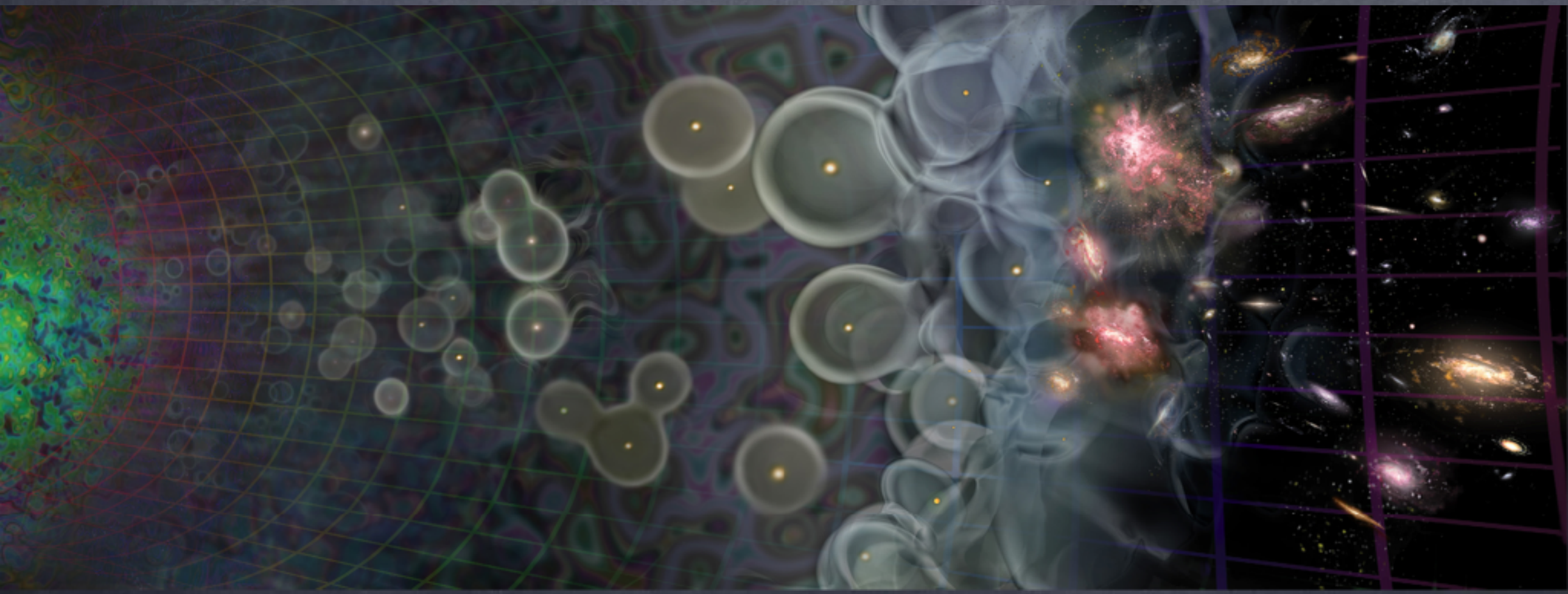
Introdução à Cosmologia Física

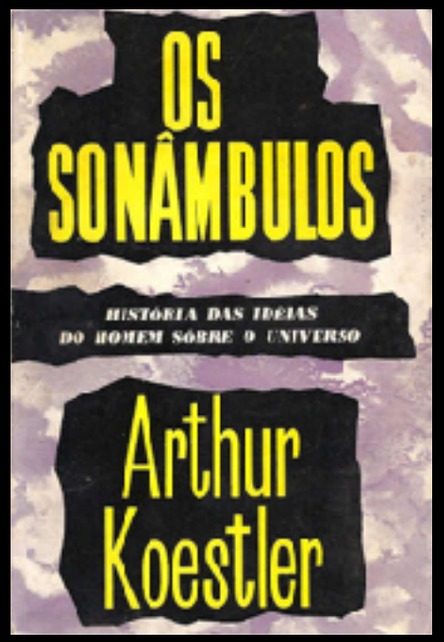


Obs: Lista 1 p/ 29/8 (4a-feira)

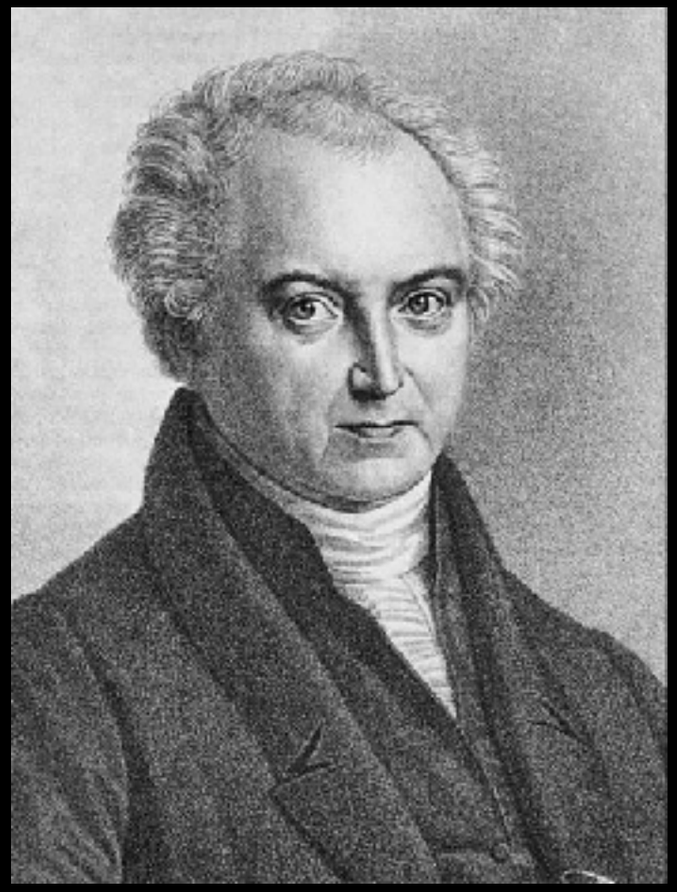
Cosmologia "A.H." (Antes de Hubble)

Até a era Medieval a Terra era vista como o centro de um universo estático

Copérnico Kepler e depois Galileu Newton etc. começaram a mudar isso com a descoberta da "mecânica celeste"



O Paradoxo de Olbers

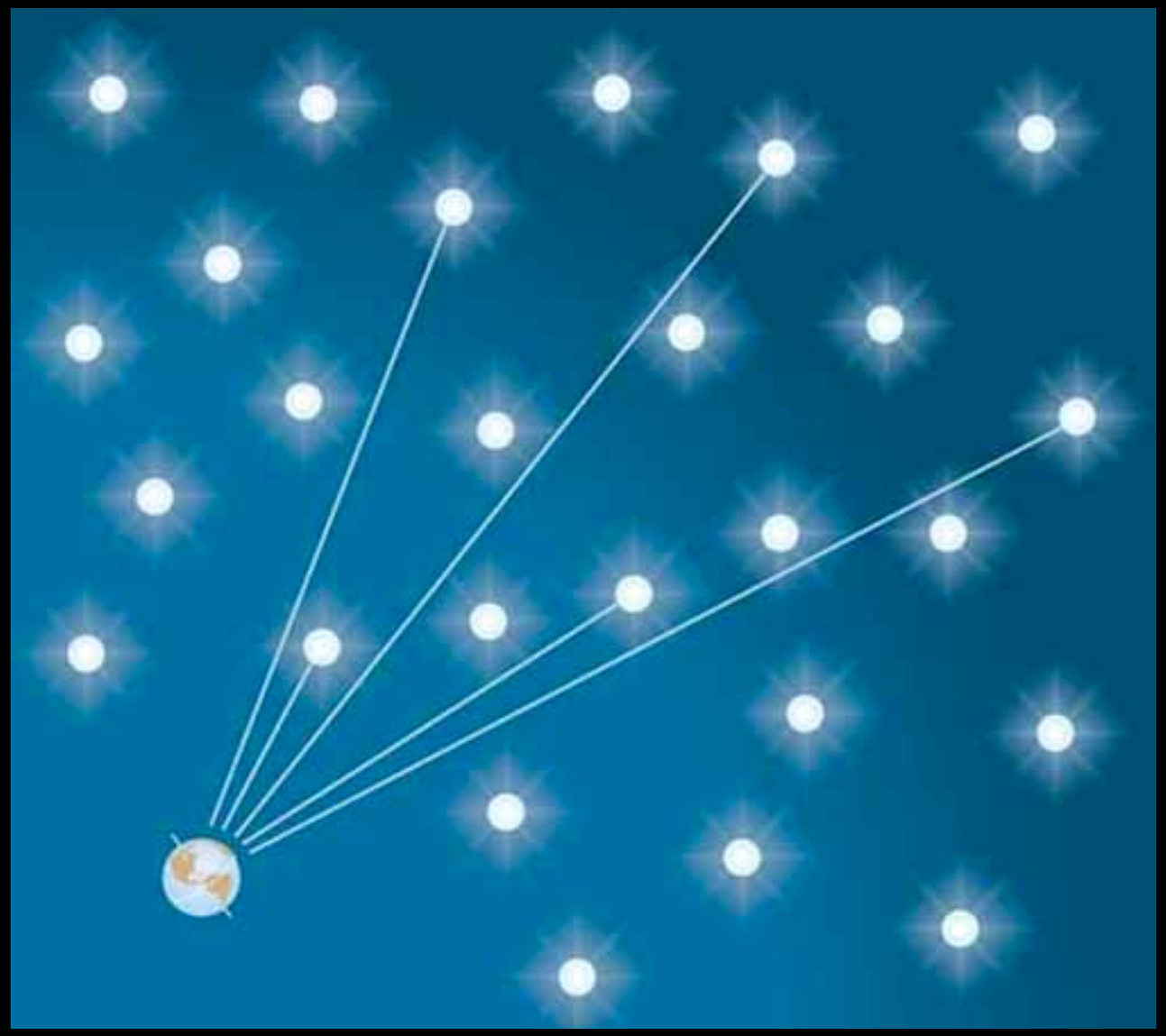


Heinrich W. M. Olbers
1758-1840

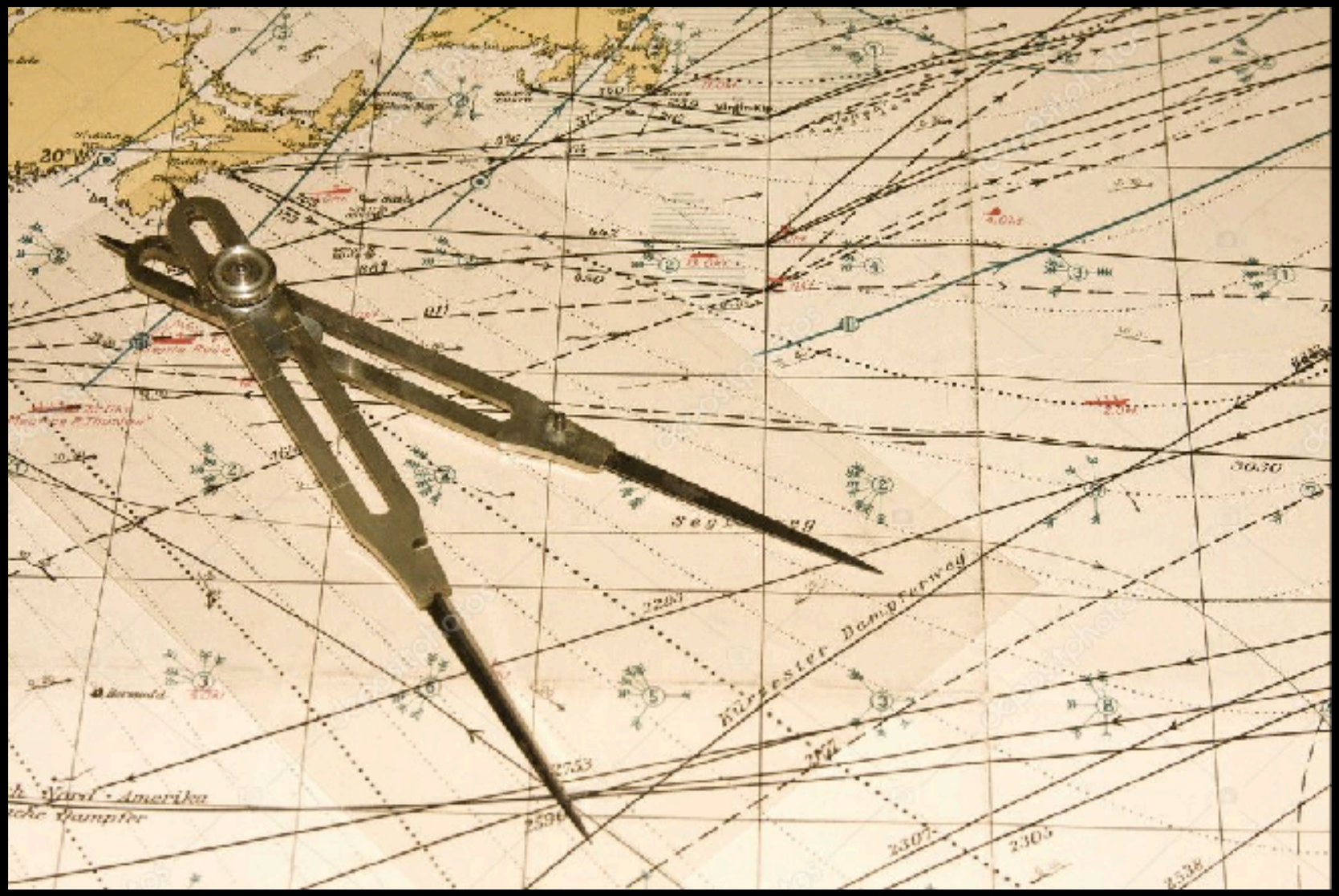
Médico e Astrônomo

Descobridor de vários cometas e asteróides

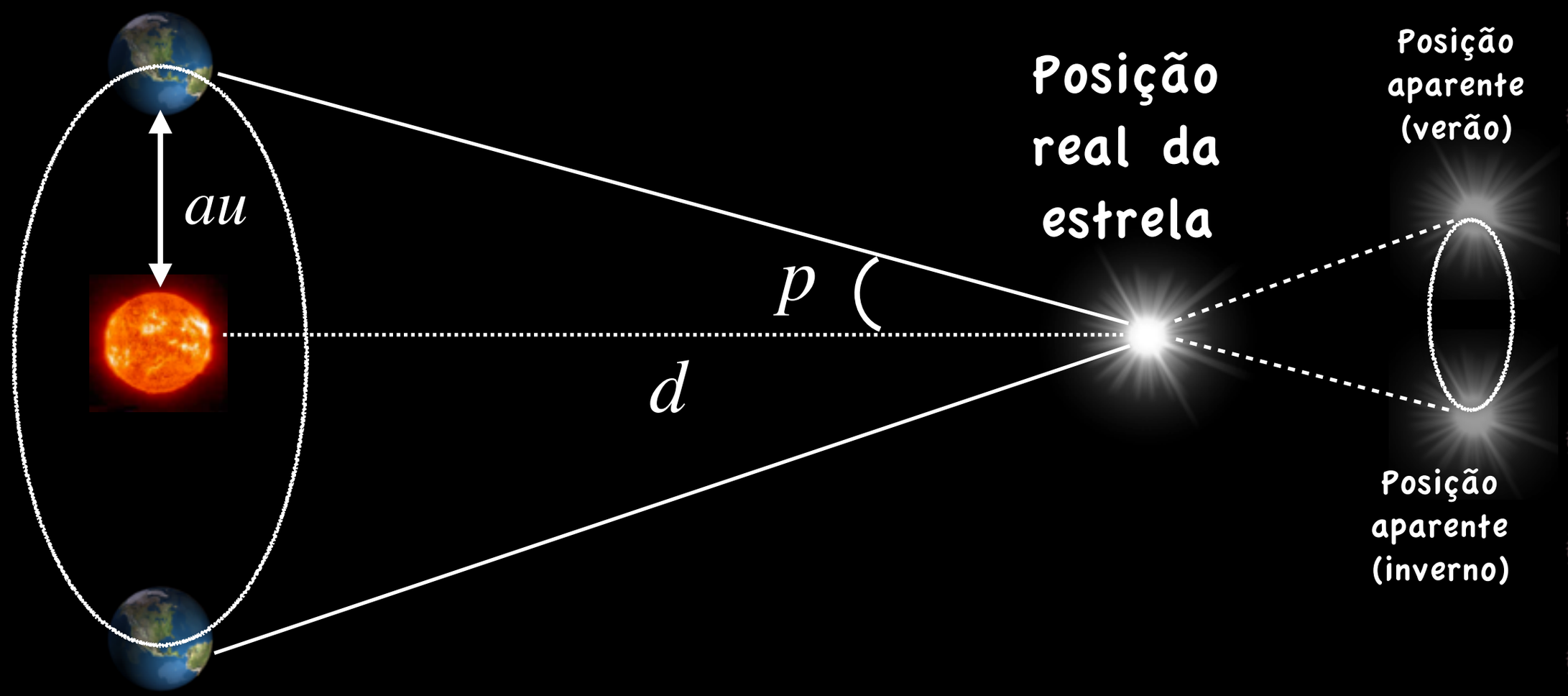
O Paradoxo de Olbers



Medindo distâncias: os primeiros “cartógrafos" do universo



Paralaxe



Estrelas muito distantes ("fixas")

$$d = \frac{1\ au}{\tan p}$$

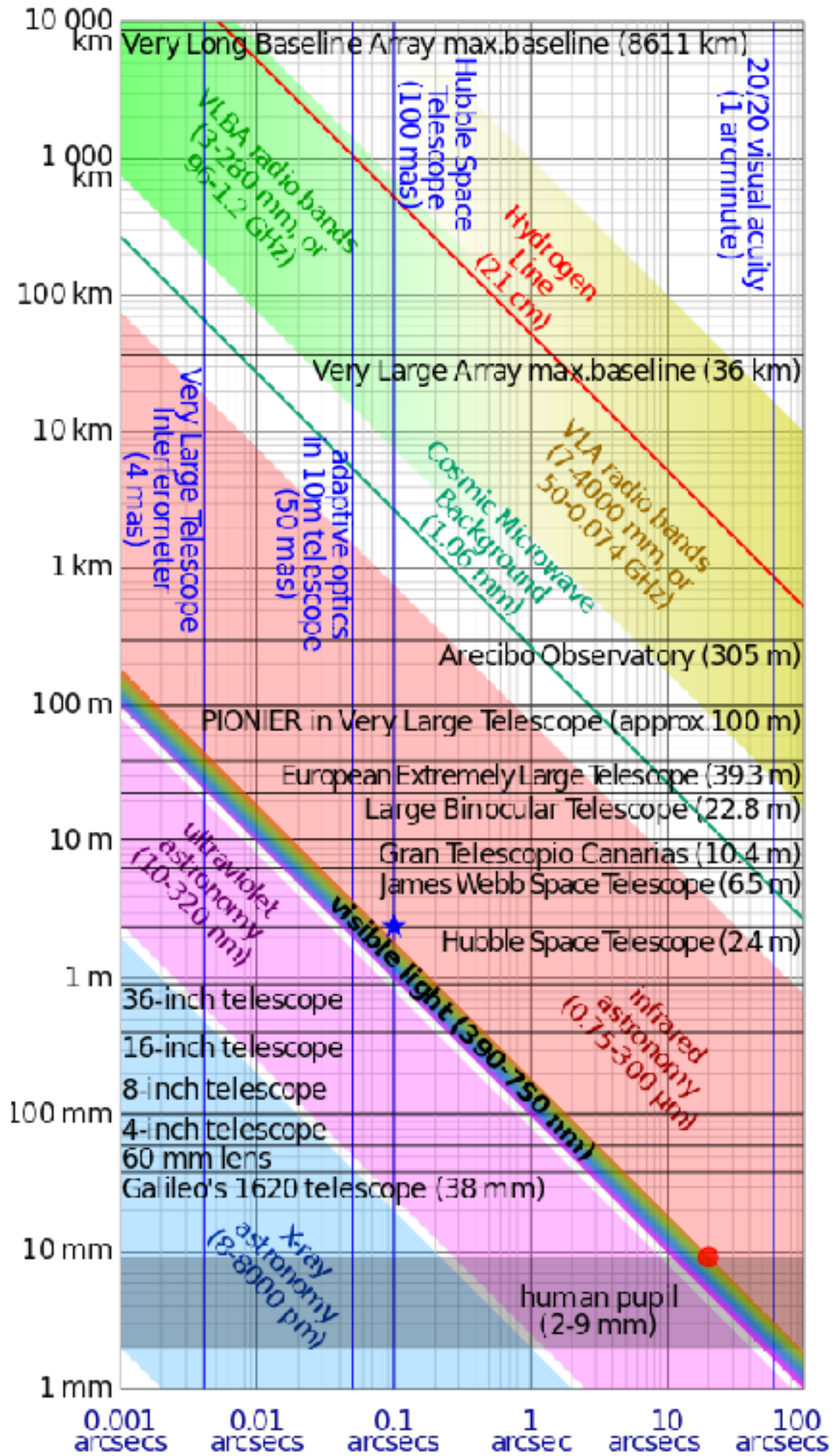
$1\ au = 1.5813 \times 10^{-5}$ ly

Paralaxe das estrelas mais próximas

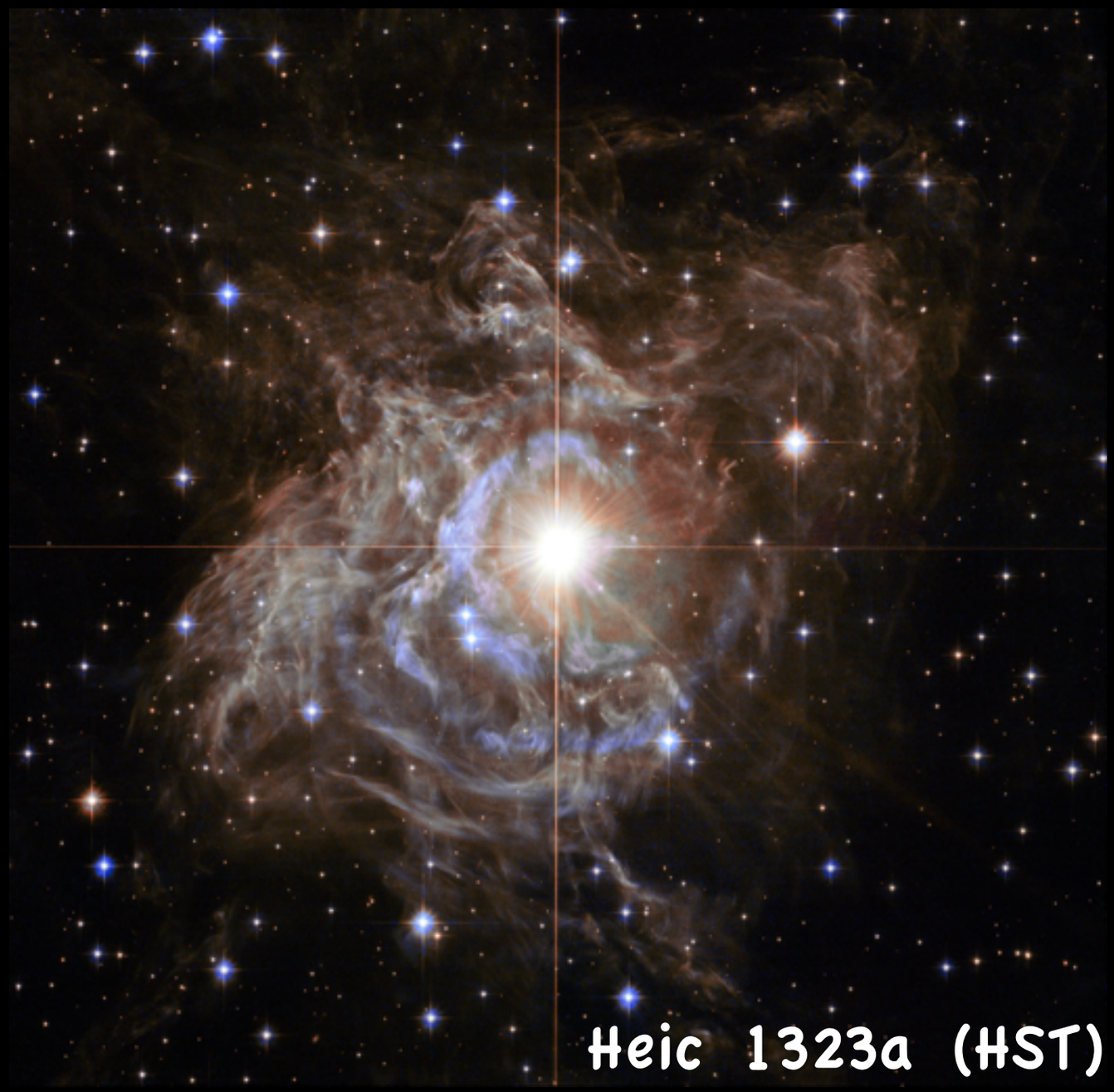
Nome	Paralaxe (mas)	Distância (anos-luz)	RA	DEC
Proxima Centauri	768.87 ± 0.29	4.2421 ± 0.0016	14h 29m 43.0s	-62º 40’ 46"
Estrela de Barnard	546.98 ± 1.00	5.9630 ± 0.0109	17h 57m 48.5s	04º 41’ 36"
Sirius	380.02 ± 1.28	8.5828 ± 0.0289	06h 45m 08.9s	-16º 42’ 58"
Polaris (Cefeida)	7.54 ± 0.11 (??)	425 (??) ± (??)	02h 31m 49.1s	89º 15’ 50.8"

1 *pc* = 3.26 ly : distância p/ paralaxe de 1" = 1000 mas

Limites de resolução angular



Henrietta Leavitt e as Cefeidas



Heic 1323a (HST)

Henrietta Leavitt
1868-1921

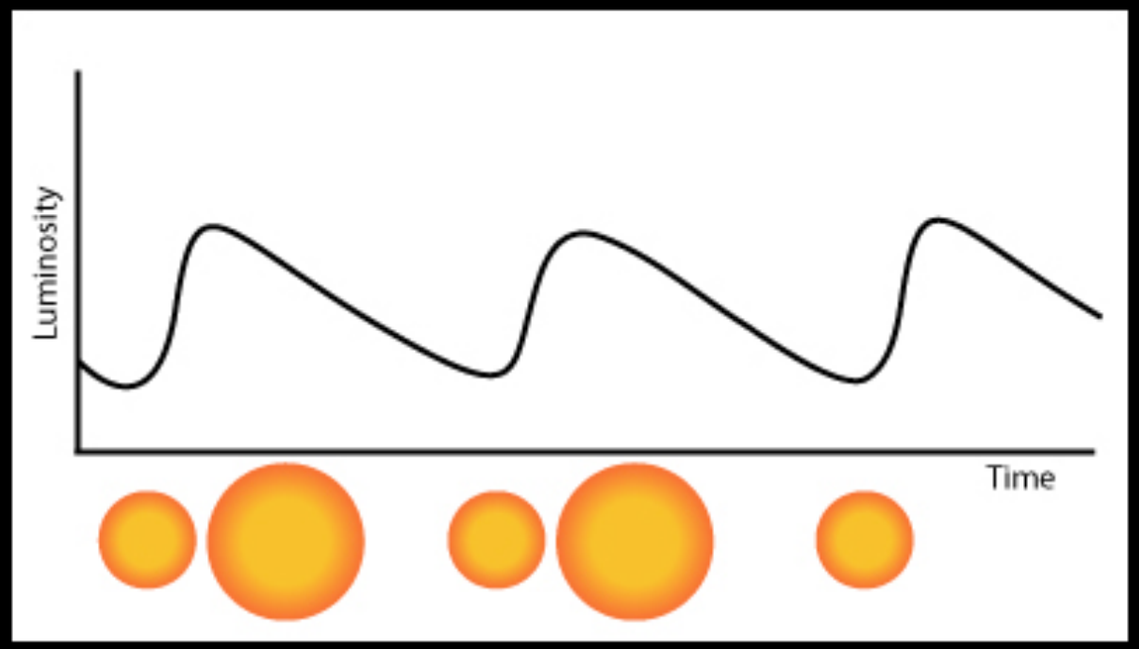
* Começou sua carreira como "computadora" no Harvard Observ.

* Hubble achava que ela era merecedora do Prêmio Nobel

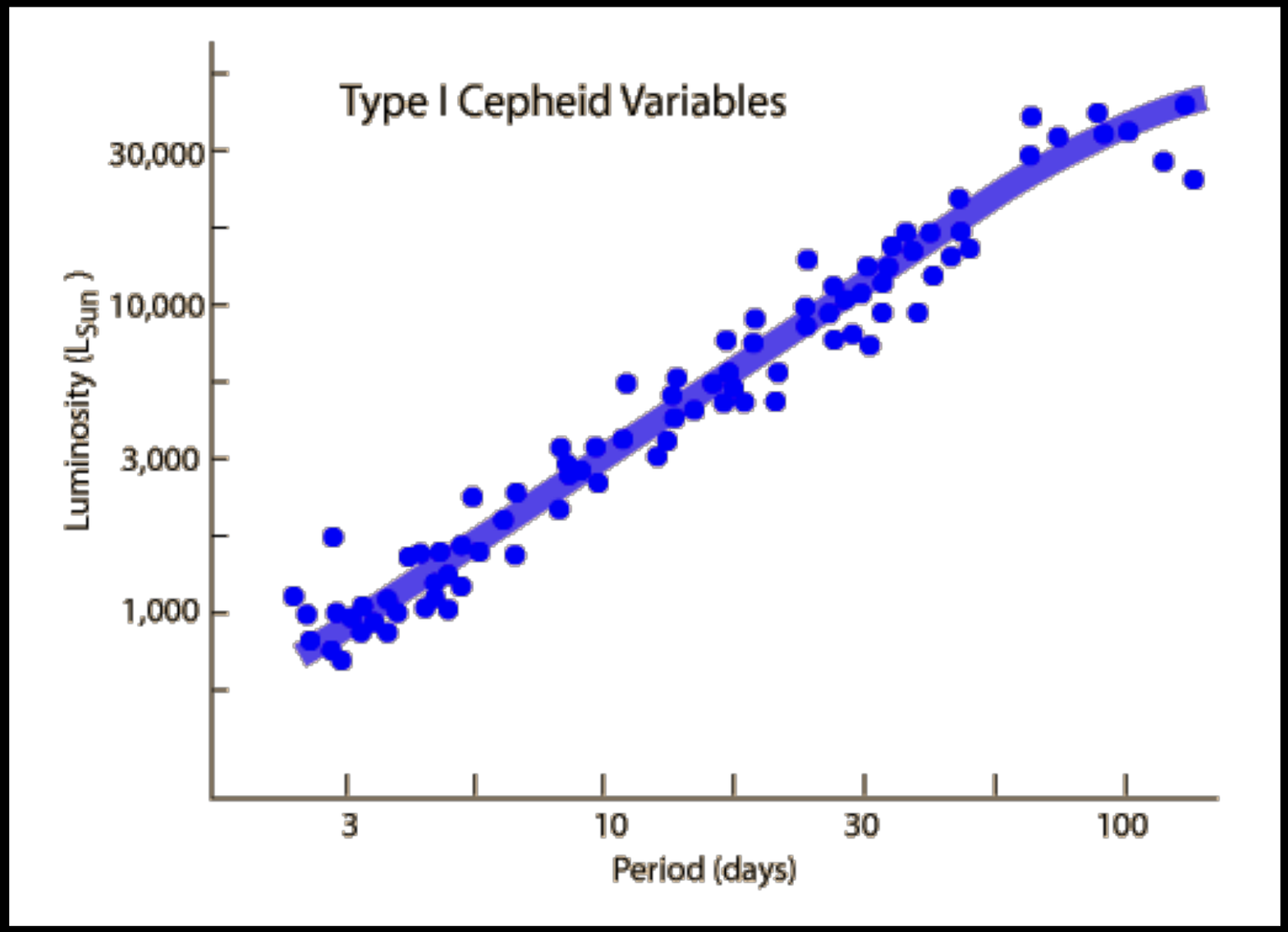
Estrelas Cefeidas "clássicas"

- Massas 4-20 x $M_\odot$
- Períodos de pulsação de dias a meses
- Estrelas supergigantes até 10^5 x mais brilhantes que o sol
- Mais de 700 conhecidas apenas na Via Lactea
- Henrietta Leavitt estudava Cefeidas nas Nuvens de Magalhães quando fez a sua descoberta:

"Relação entre o período e a luminosidade da estrela"

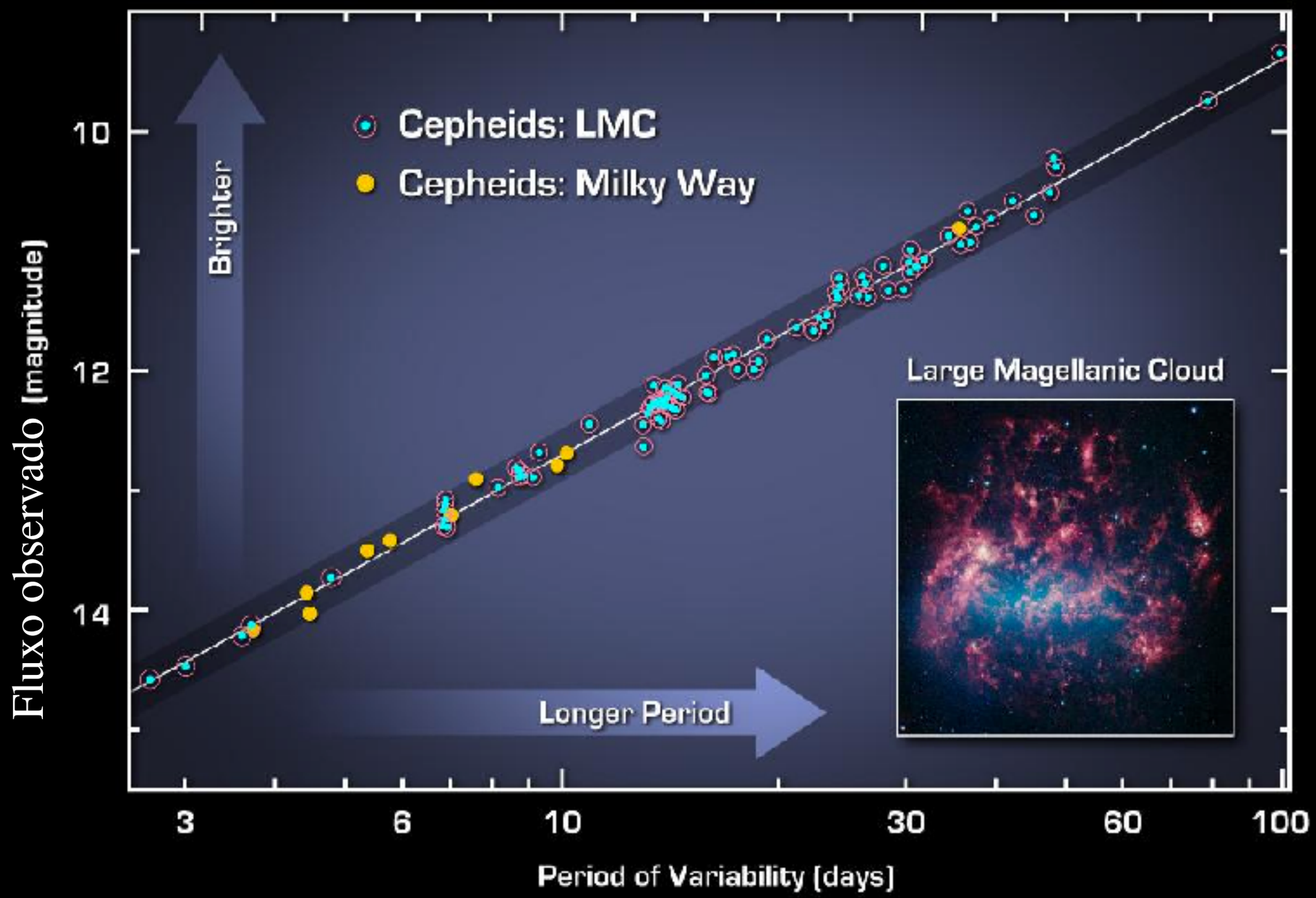


Cefeidas e distâncias



$$P \rightarrow \text{Luminosidade} \quad \longleftrightarrow \quad \frac{\text{Luminosidade}}{4\pi d^2} = \text{brilho observado}$$

Cefeidas e distâncias



* Há vários tipos diferentes de Cefeidas!

* Relação depende da "cor" da estrela

$$5\log_{10} d[pc] = V + 3.34\log_{10} P[dias] - 2.5(V - I) + 7.5$$

Potência Fluxo Radiância Brilho

Potência é a energia total por unidade de tempo que é gerada (ou transmitida) por alguma fonte.

Exemplos:

Potência de uma lâmpada

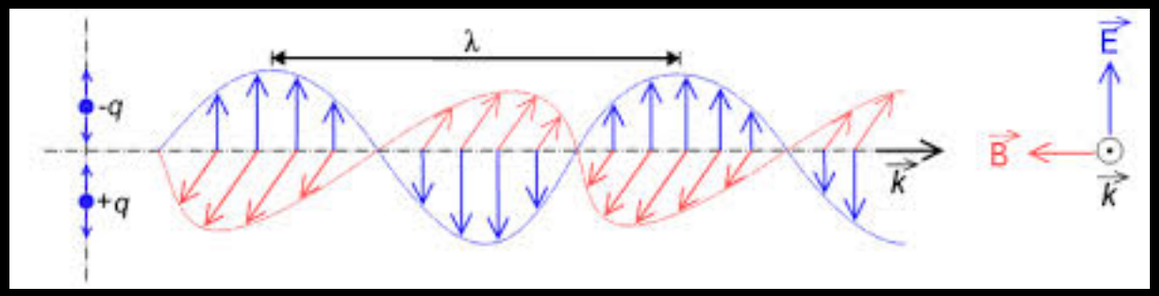
$P = 100$ W $= 100$ erg/s

Potência de um carro

$P = 100$ cavalos $= 100$ x 735.5 W

Potência de uma onda eletromagnética

$$P = |\vec{S}| = \left| \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{2\mu_0} \right|$$

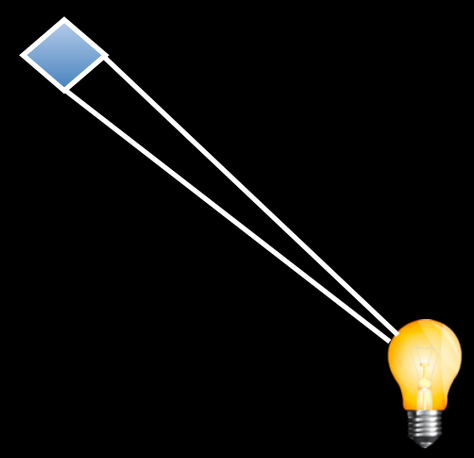


Fluxo

Fluxo de radiação ou fluxo radiativo é a potência que atravessa uma certa área.

Exemplo:

Fluxo de uma lâmpada de 100 W concentrado num ângulo sólido de 1 grau quadrado a 1m da lâmpada:



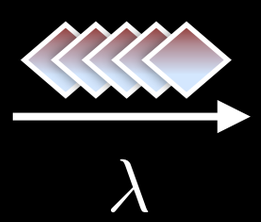
$$F = \frac{100\ W}{\Delta\Omega \times r^2} = \frac{100\ W}{(\pi/180)^2 \times (1\ m)^2}$$

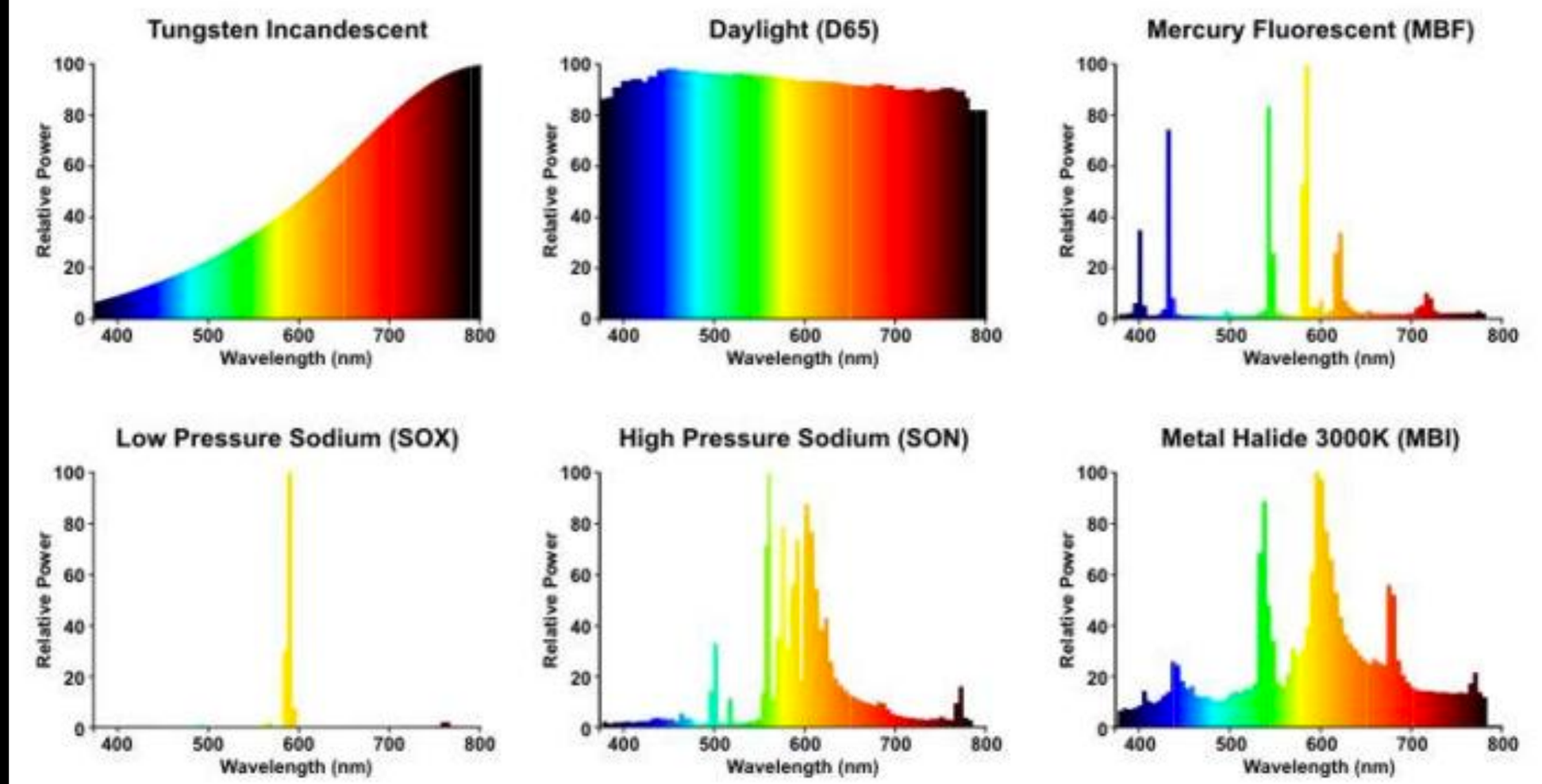
$$\simeq 3.28 \times 10^5\ W\ m^{-2}$$

Fluxo espectral

É o fluxo de radiação por unidade de comprimento de onda da luz

Exemplos:





Radiância

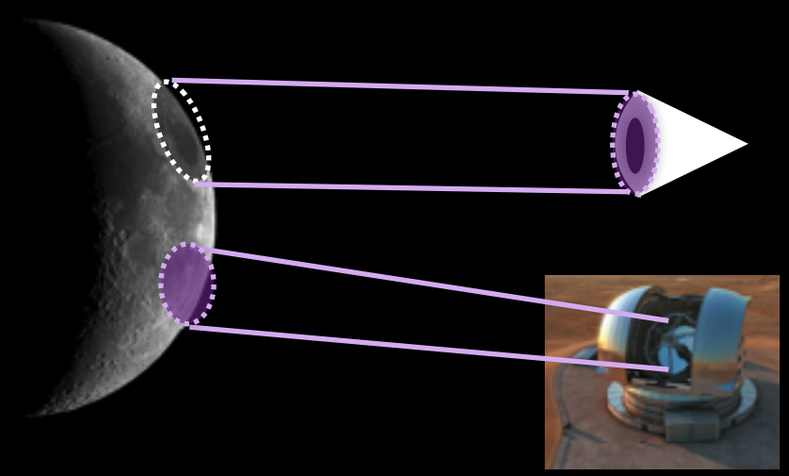
É o fluxo espectral que é emitido de uma dada superfície e incide sobre um determinado ângulo sólido.

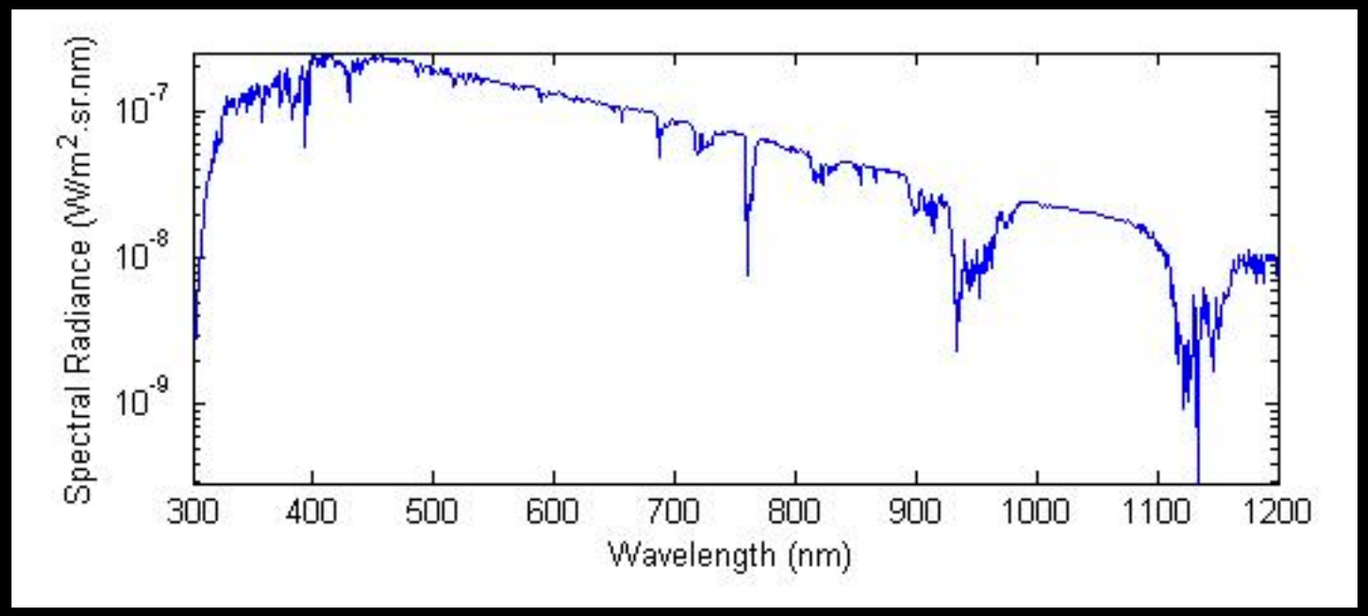
OU:

É o fluxo espectral que é emitido de um certo ângulo sólido e incide sobre uma determinada área.

Exemplo:

A radiância (ou brilho) da Lua à meia-noite



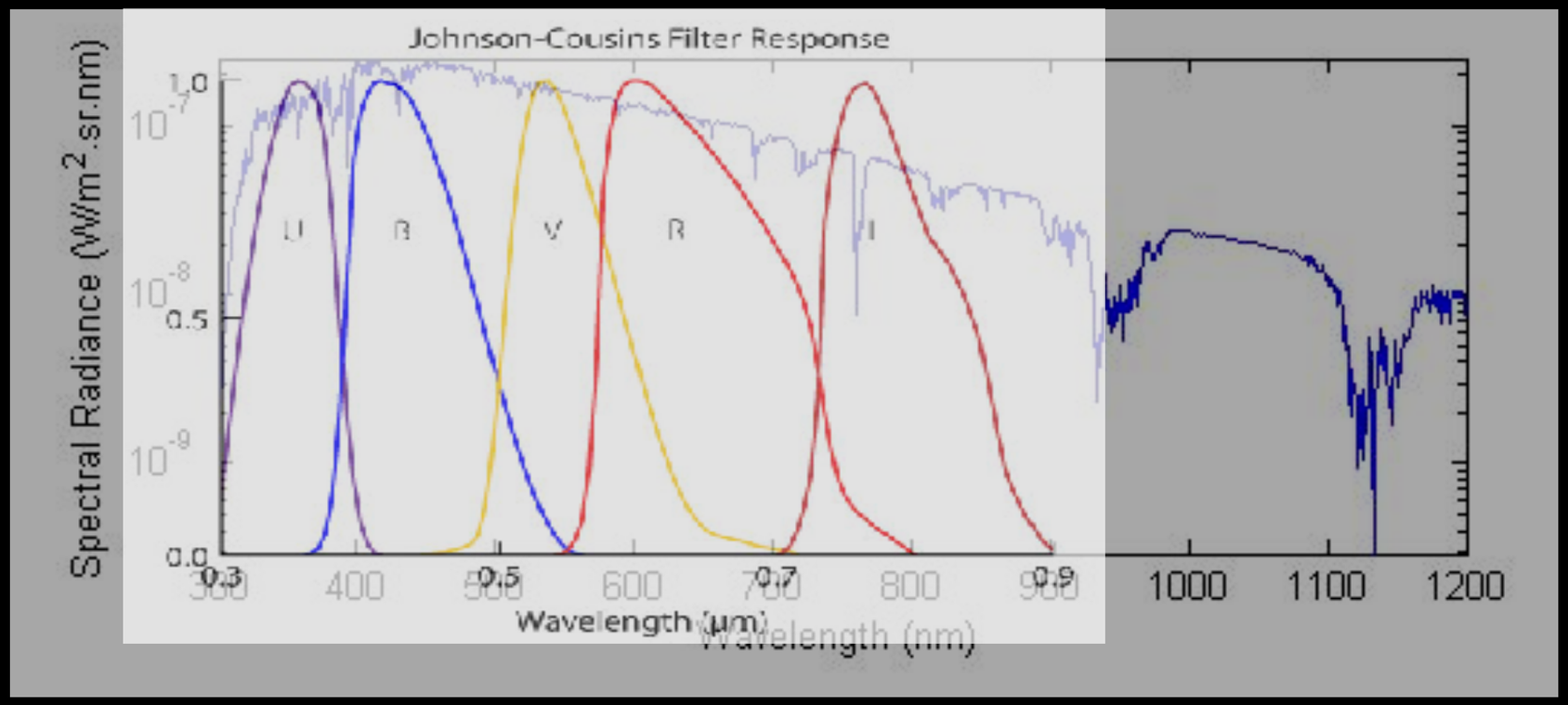


Luminância (brilho/brightness)

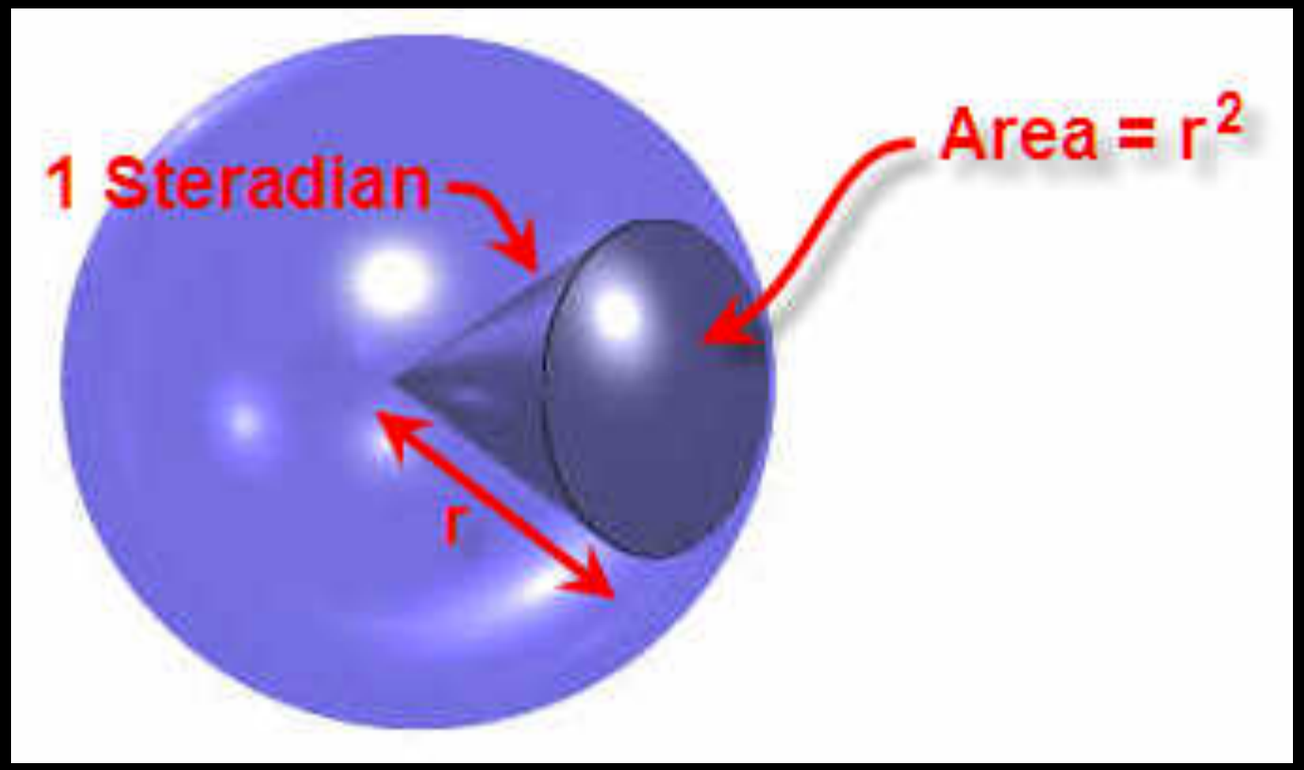
É a radiância integrada sobre uma certa banda de comprimentos de onda.

Exemplo:
Bandas U B V R I

$$\Rightarrow W\ m^{-2}\ sr^{-1}$$



O que raios é um sr = steradiano?



Ângulo sólido total de uma esfera:

$$4\pi\, sr$$

Área correspondente a um certo ângulo sólido:

$$\Delta\Omega = X\, sr \quad \rightarrow \quad A = X \times r^2$$

Magnitudes

A magnitude aparente é a medida do brilho (ou fluxo numa certa banda) de um objeto celeste (estrela galáxia quasar) como observado na Terra.

Assim como dB magnitudes empregam uma escala logarítmica (em base 10) e assumem um certo "padrão" arbitrário

Fluxo na banda b

Fluxo do "padrão" na banda b

$$F_b \rightarrow \frac{F_b}{F_{0,b}} \rightarrow \log_{10}\left(\frac{F_b}{F_{0,b}}\right)$$

magnitude aparente na banda b

$$b \equiv -2.5 \times \log_{10}\left(\frac{F_b}{F_{0,b}}\right)$$

A magnitude do "padrão" é zero por definição

Algumas magnitudes aparentes (banda v - visual)

Sol	v = -26.7
1 lux	v = -14.2
Lua cheia (max)	v = -12.9
Vênus (max)	v = - 4.9
Lua nova (min)	v = -2.5
Sirius (★ + brilhante)	v = -1.5
Vega	v = 0 (→ 0.03)
★ no limiar do olho humano (cidade)	v = 3 - 4
galáxia de Andrômeda (M31)	v = 3.5
★ no limiar do olho humano (cond. ideais)	v = 6.5
Netuno	v = 8
Objeto menos brilhante visível com o HST	v = 31.5

Mais brilhante

Magnitude absoluta

A magnitude absoluta é a medida do brilho/fluxo (relativo ao "padrão" - vega) que seria observado na Terra se o objeto estivesse a uma distância padrão (fixa) de 10 pc

$$M \equiv -2.5 \times \log_{10}\left(\frac{F}{F_0} \times \frac{D^2}{D_0^2}\right)$$

$$= m - 2.5 \times \log_{10}\left(\frac{D^2}{(10\,\mathrm{pc})^2}\right) = m - 5 \times (\log_{10} D\,[\mathrm{pc}] - 1)$$

$$\boxed{M = m - 25 - 5 \times \log_{10} D\,[\mathrm{Mpc}]}$$

Algumas magnitudes absolutas...

Sol	4.8
Sirius	1.4
Vega	0.58
SMC	-16.2
galáxia de Andrômeda (M31)	-20.9
Quasar 3C 273	-26.7
Galáxias mais brilhantes do universo	-30

Mais brilhante

Edwin Hubble e a descoberta da expansão do universo

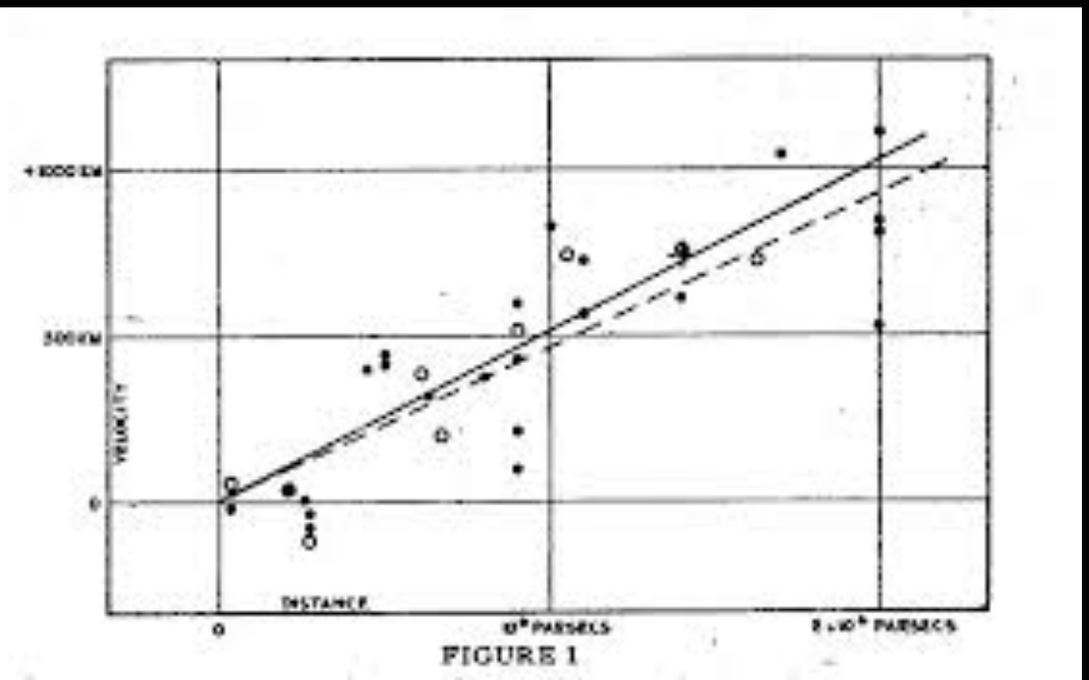
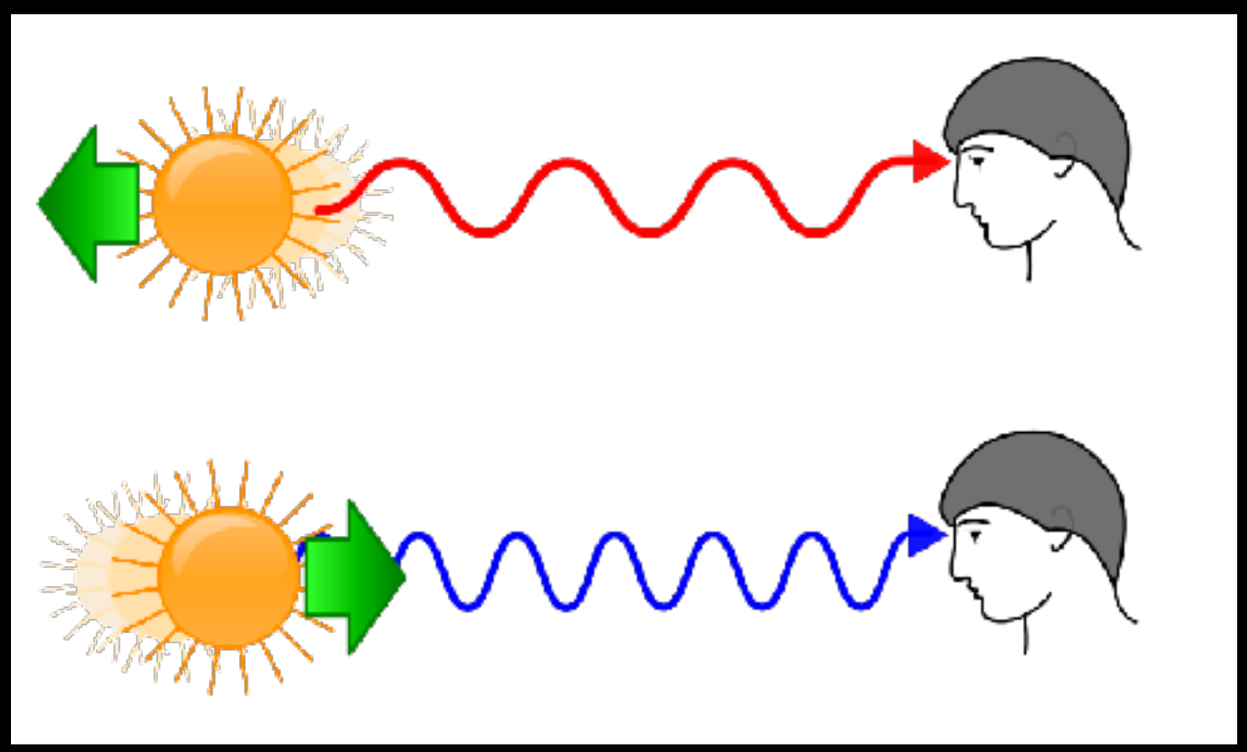
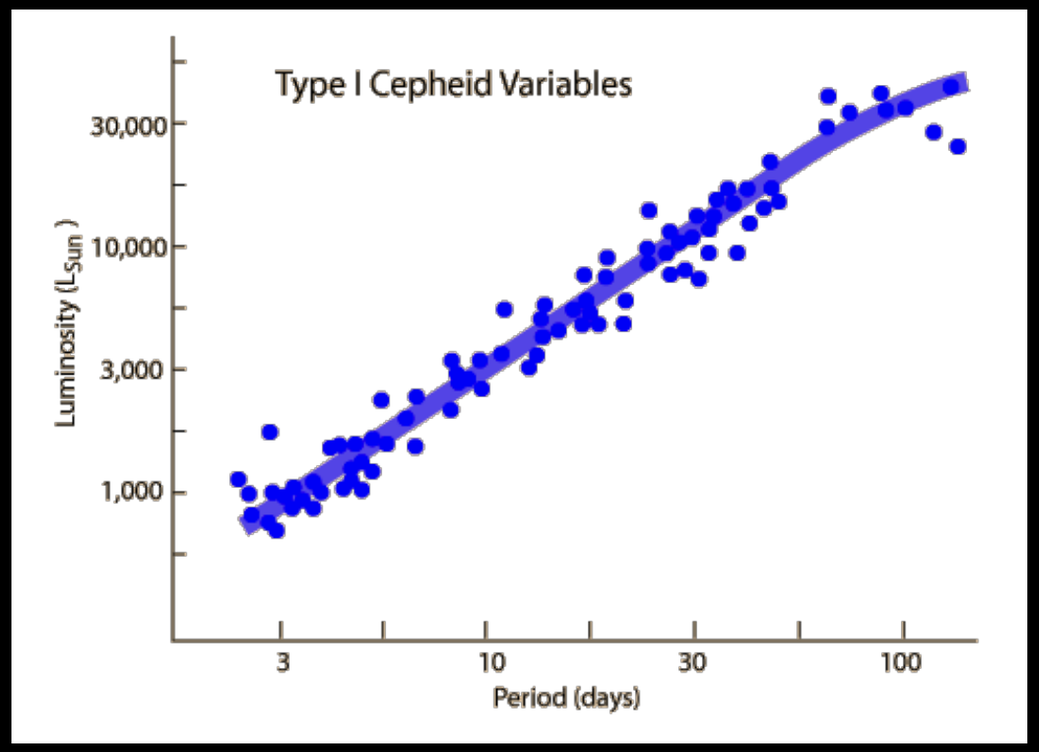


FIGURE 1

Hubble mediu distâncias e velocidades de "nebulosas" usando estrelas cefeidas nessas nebulosas

Artigo original:
http://apod.nasa.gov/diamond_jubilee/d_1996/hub_1929.html





$$\lambda_{obs} = \lambda_{em} \times (1+z)$$

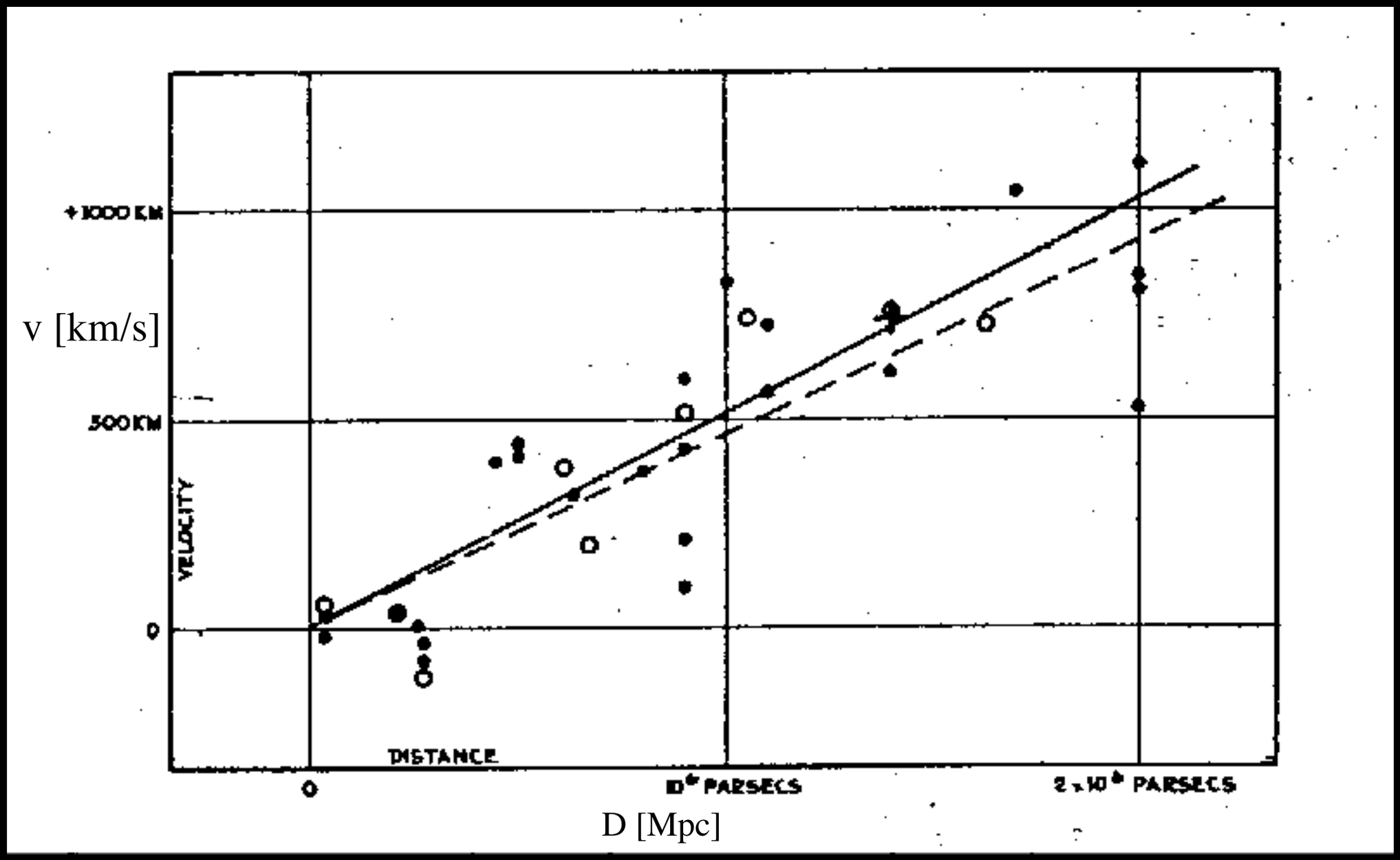
$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda em}{\lambda_{em}} \simeq \frac{v_{||}}{c} + \mathcal{O}(v/c)^2$$

$$F = \frac{L(p)}{4\pi\, D^2}$$

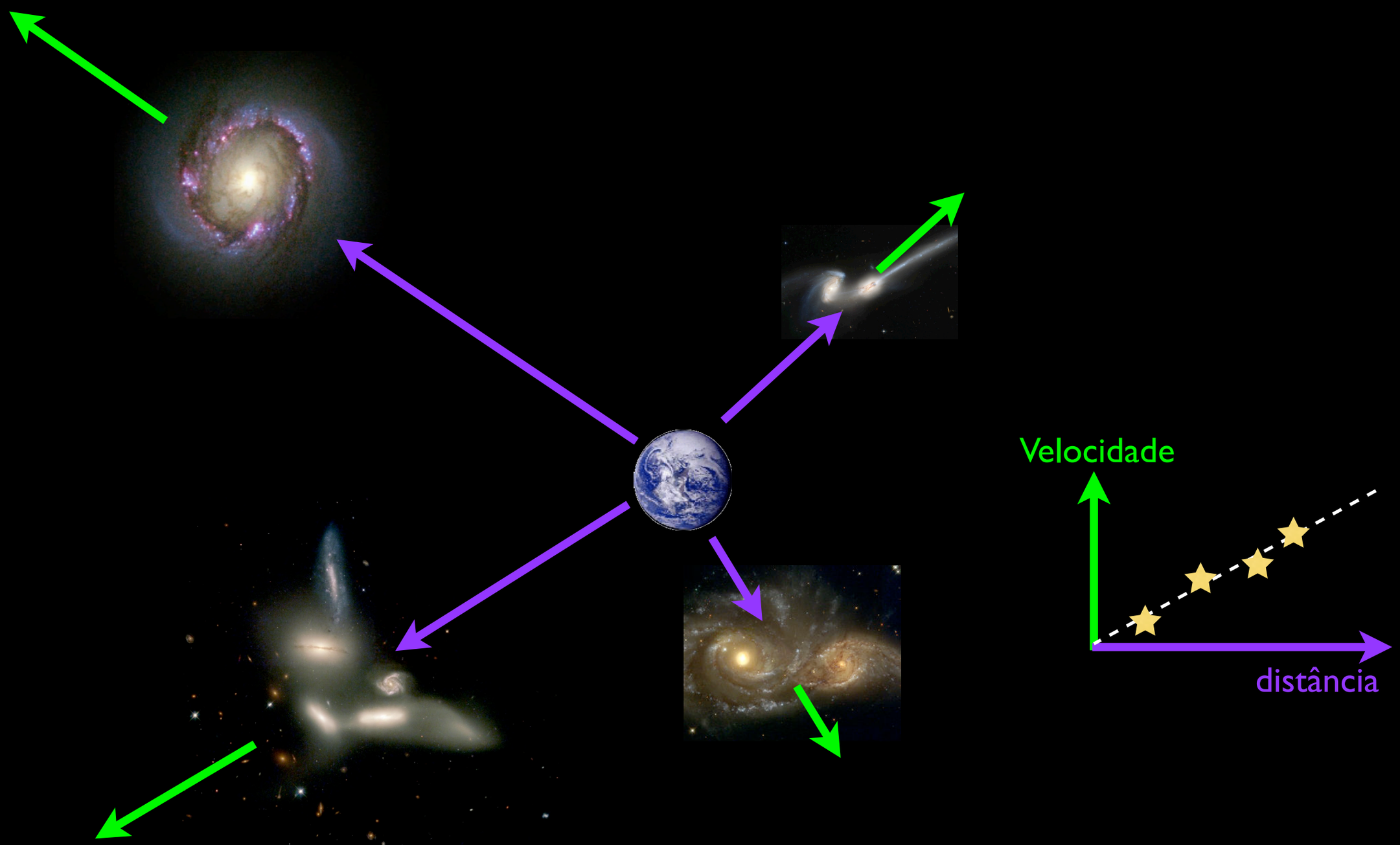
$$D = \sqrt{4\pi\, \frac{L(p)}{F}}$$

… e o resultado foi:

http://apod.nasa.gov/diamond_jubilee/d_1996/hub_1929.html

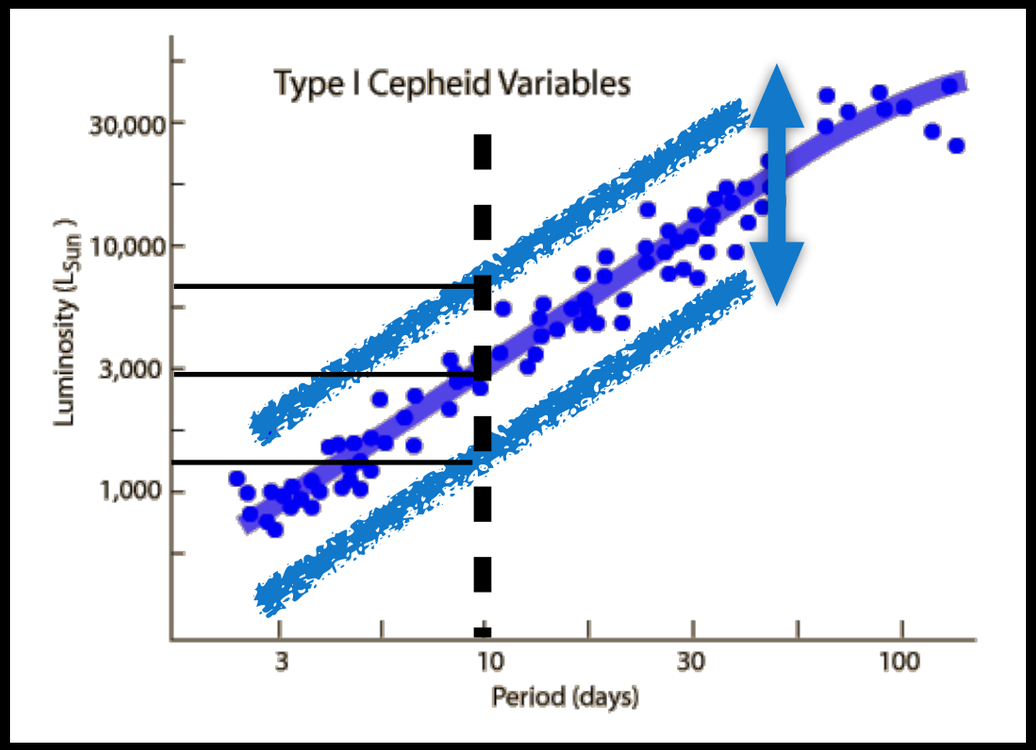


O universo está se expandindo!!!



Problemas já apontados na época:

"Distances of extra-galactic nebulae depend ultimately upon the application of absolute-luminosity criteria to involved stars whose types can be recognized. These include among others Cepheid variables novae and blue stars involved in emission nebulosity. ***Numerical values depend upon the zero point of the period-luminosity relation among Cepheids*** the other criteria merely check the order of the distances."



De fato a normalização ("zero point") da relação período-luminosidade das cefeidas estava <u>errada</u>!

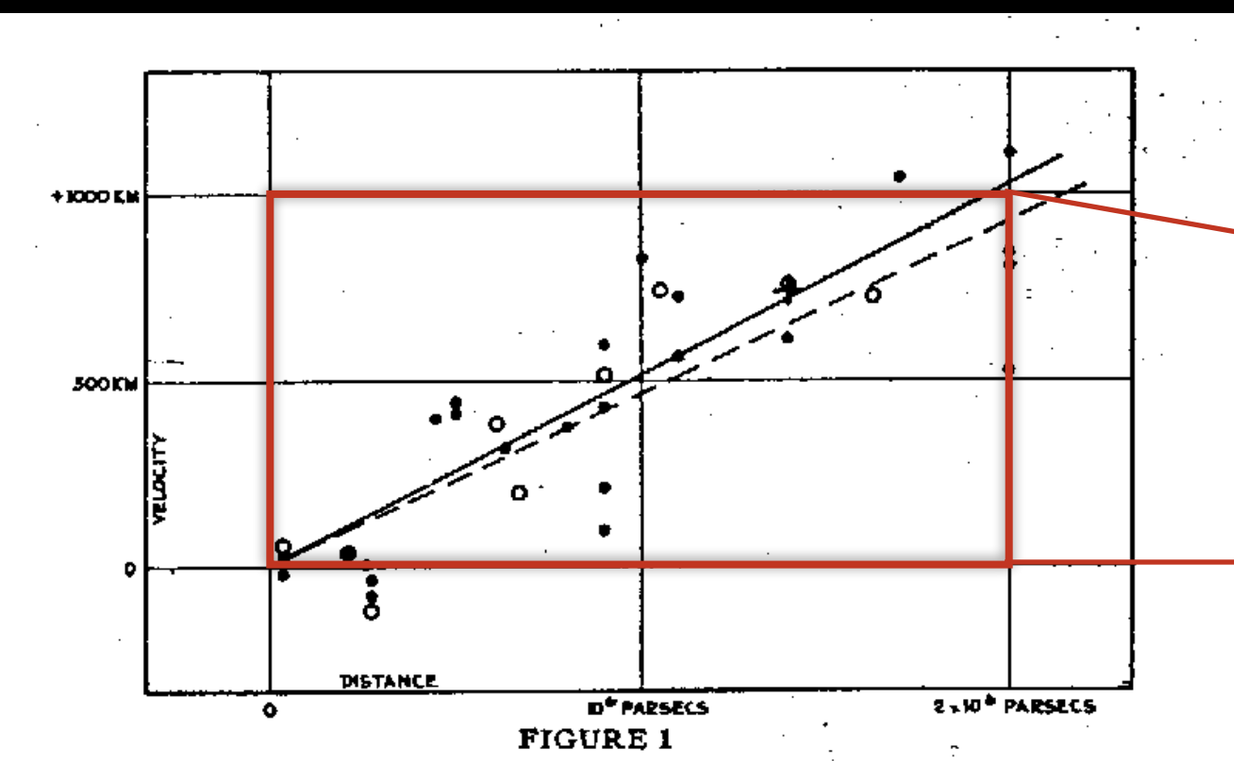
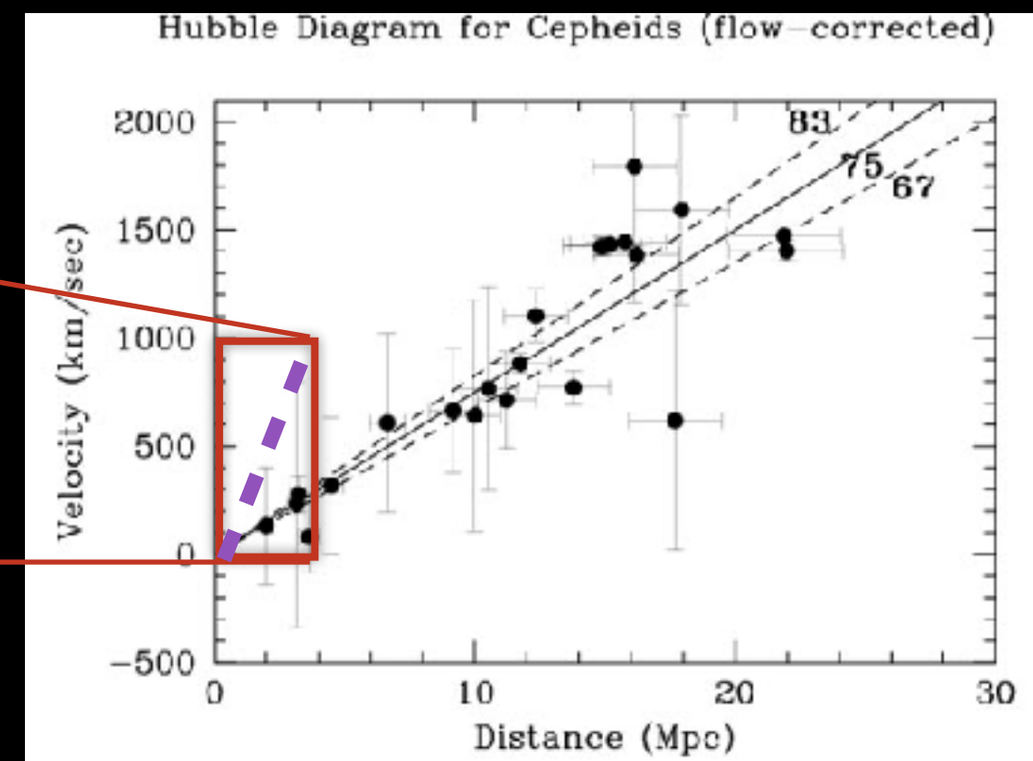


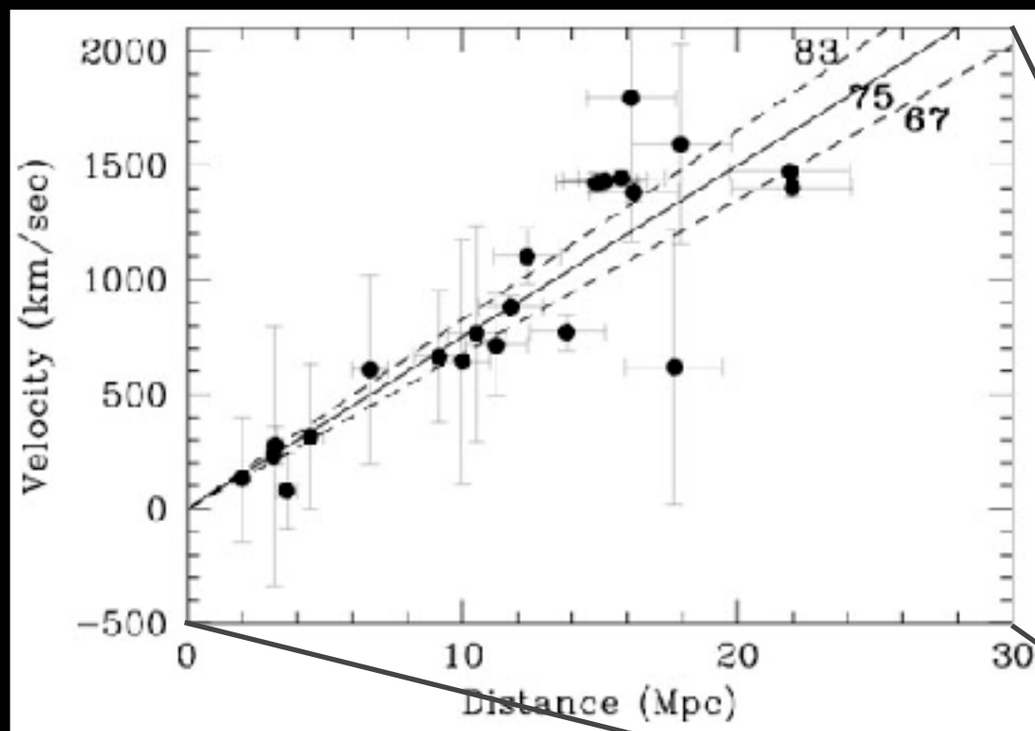
FIGURE 1



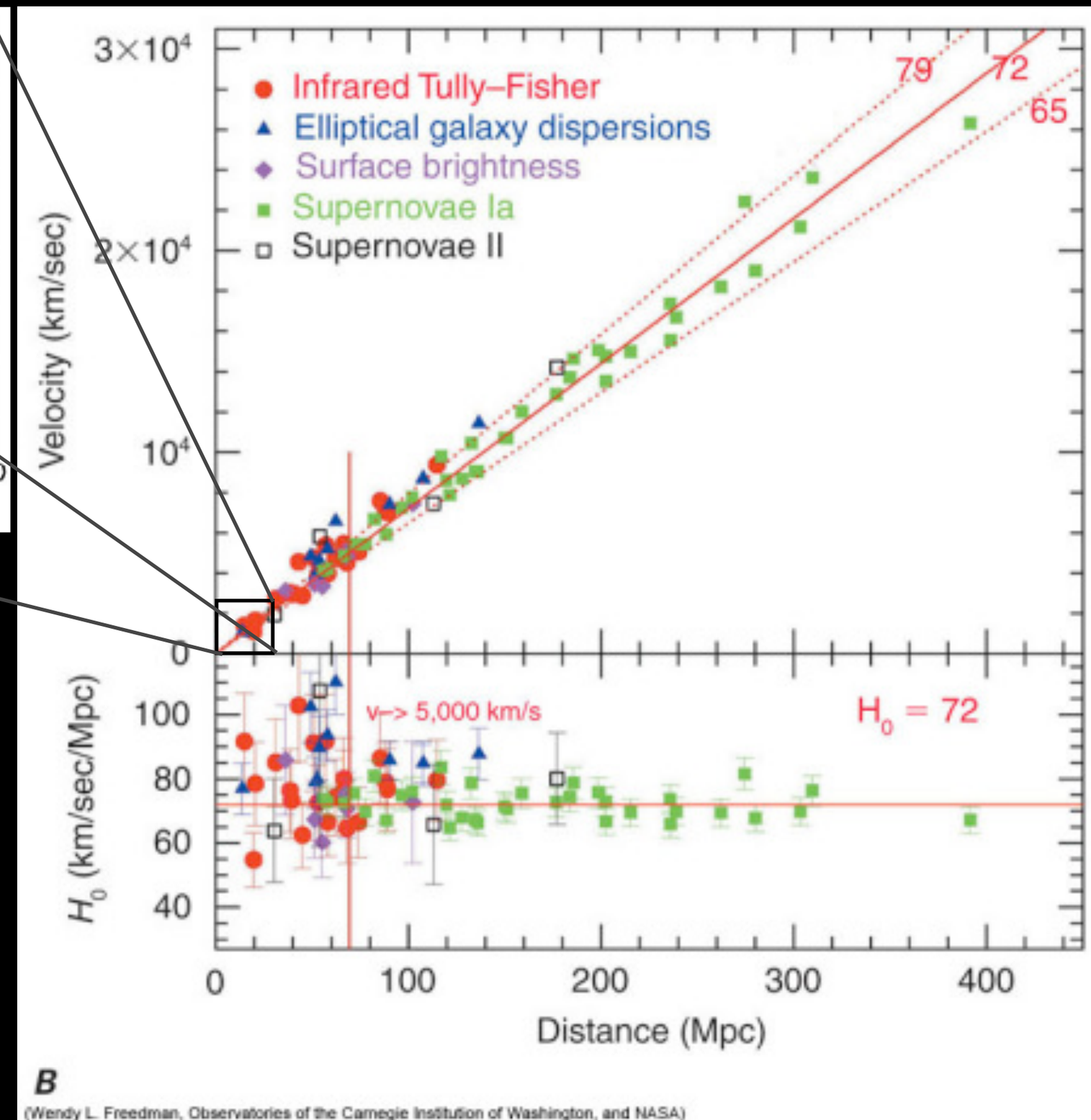
Hubble

Hubble Space Telescope "Key Project"
W. Freedman et al. 2001

Medidas recentes



(Apenas cefeidas)



Freedman et al. 2001

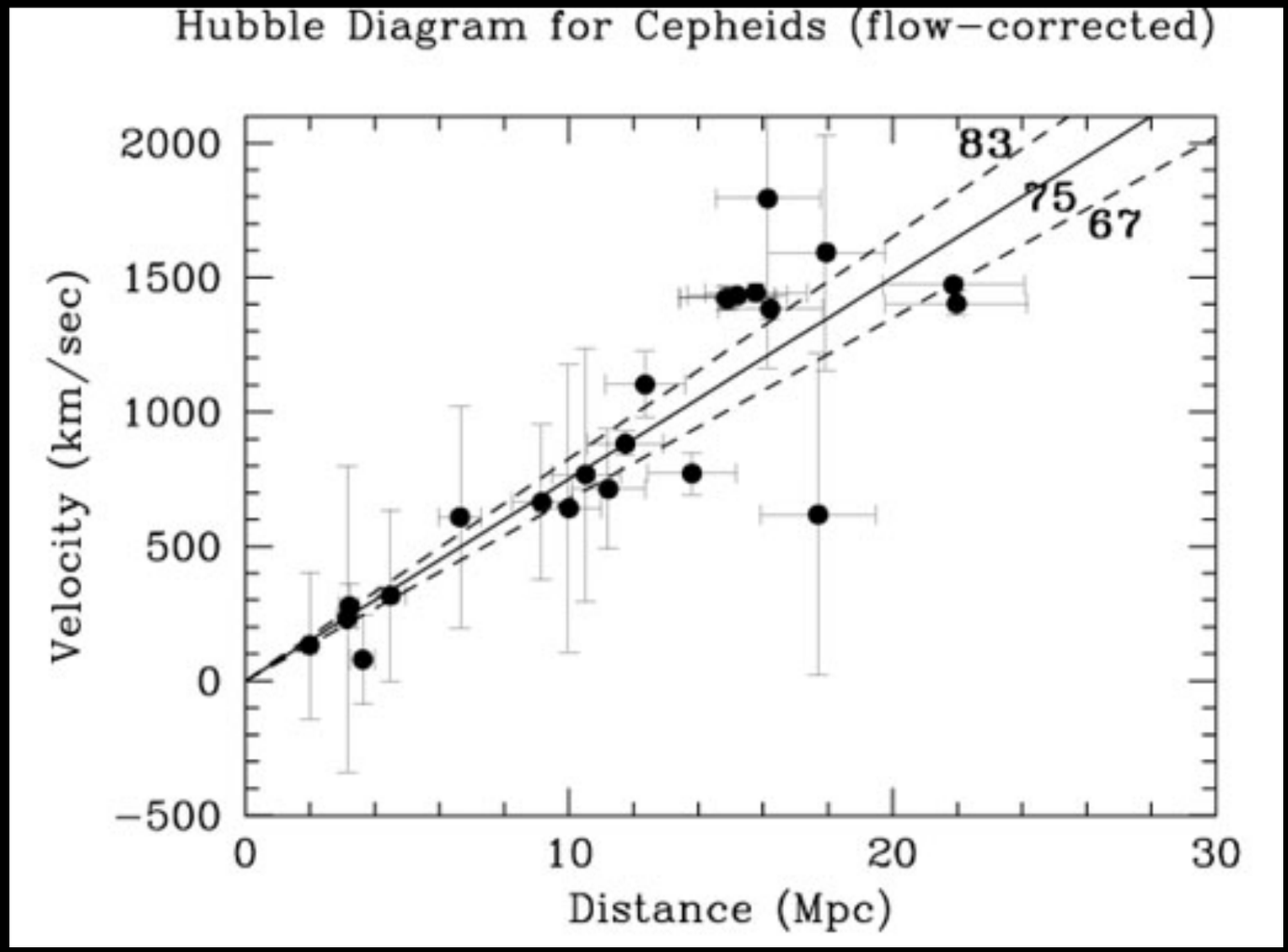
O fato entretanto foi bem estabelecido por Hubble:

quanto maior a distância maior a velocidade de afastamento das "nebulosas extragalácticas"

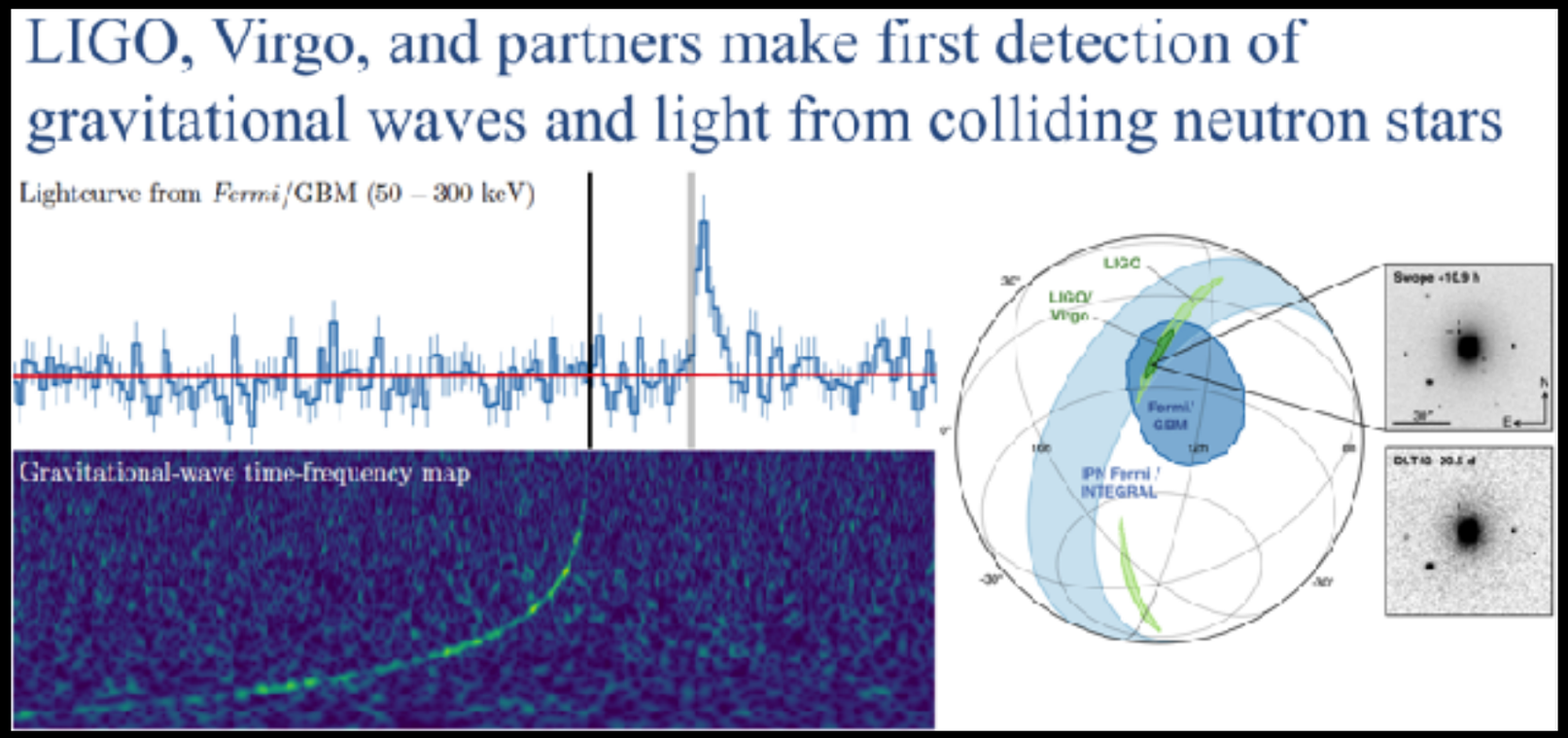
$$v = H_0 D$$

Medidas mais recentes: HST+GAIA (Riess et al. 2018):

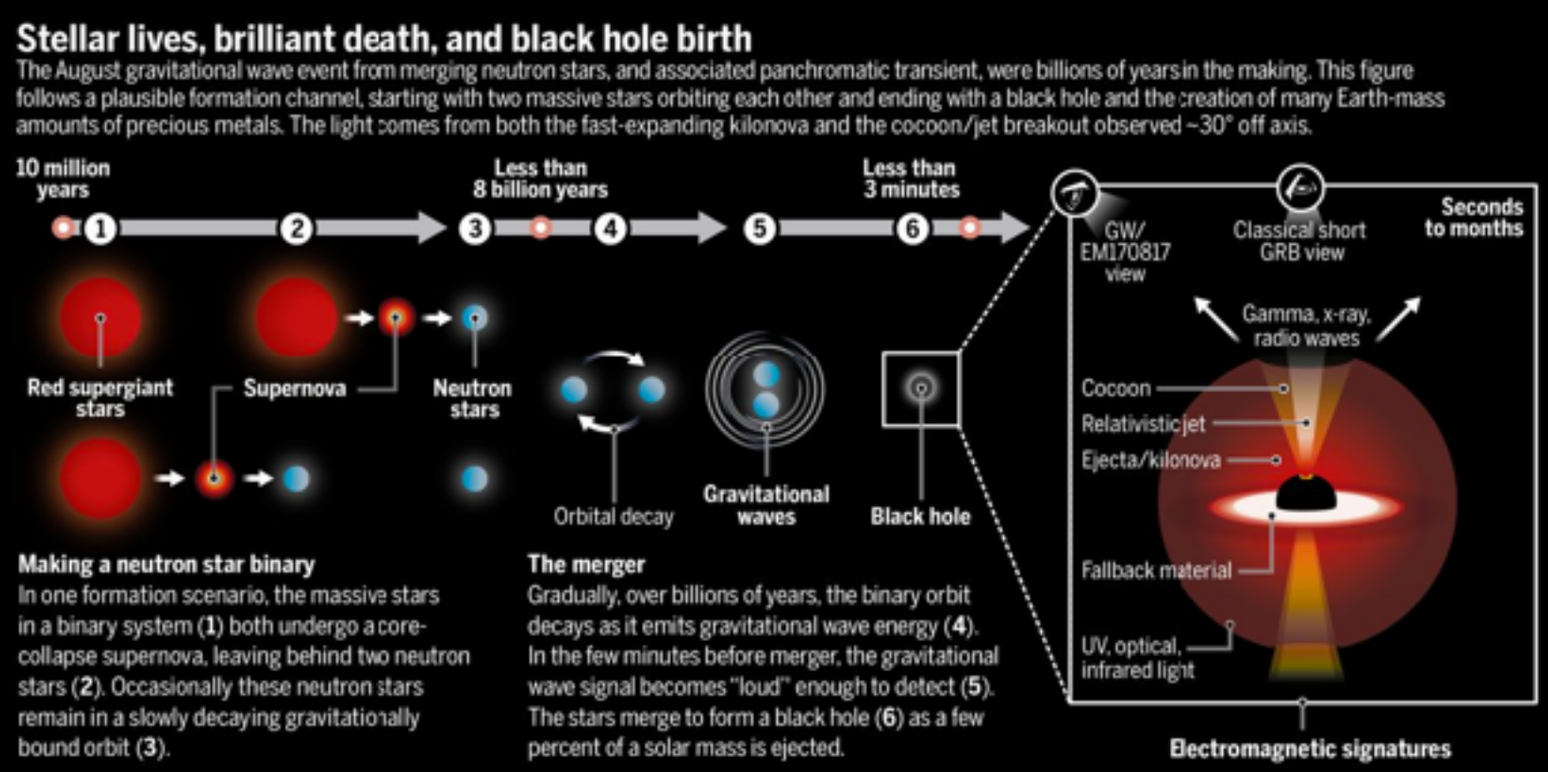
$H_0 = (73.45 \pm 1.66)$ km s^{-1} Mpc^{-1}



Distância medida por meio da detecção de ondas gravitacionais



LIGO/Virgo



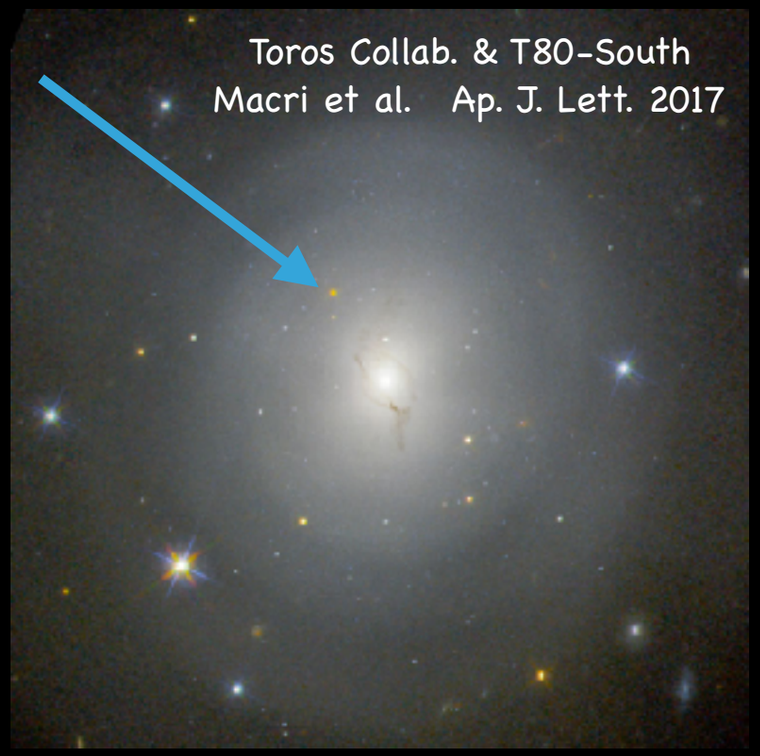
Bloom & Sigurdsson
Science 2017

Distância medida por meio da detecção de ondas gravitacionais

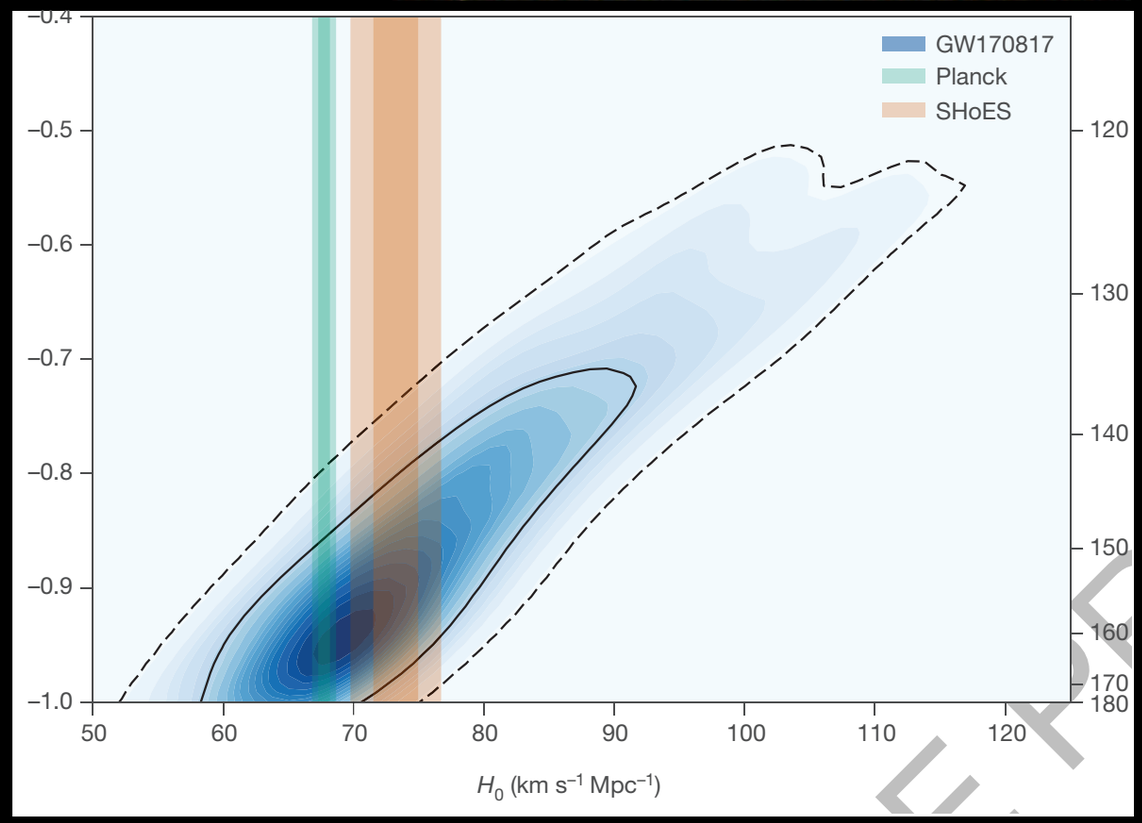
Pela primeira vez uma contrapartida óptica foi detectada (Fermi/LAT Swope SN survey).

Identificamos a galáxia hospedeira das ondas gravitacionais e dos raios-gamma — NGC 4993

- ➡ Conhecemos o redshift daquela galáxia
- ➡ Do fluxo das ondas gravit. inferimos a distância até a galáxia (a menos do ângulo do plano do sistema)



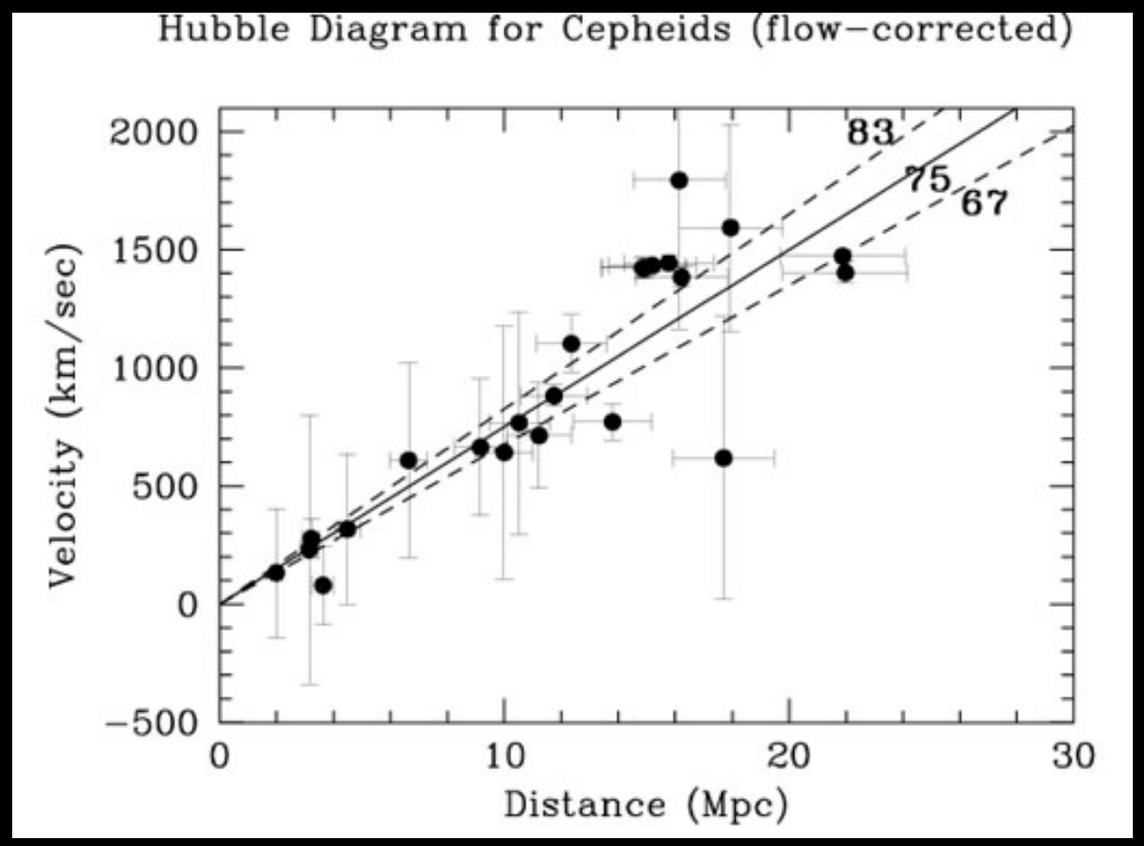
$$F_{obs} \approx \frac{F_0}{4\pi\, d^2} \cos^2\theta$$



Distâncias Cosmológicas

(Ryden Capítulos 4-5-6-7)

Expansão do universo



$$v = H_0 D$$

??

Geralmente expressamos o parâmetro de Hubble como: $H_0 = 100\ \boldsymbol{h}$ km s^{-1} Mlc-1

Medidas mais recentes, HST+GAIA (Riess et al. 2018): $H_0 = (73.45 \pm 1.66)$ km s^{-1} Mpc^{-1}

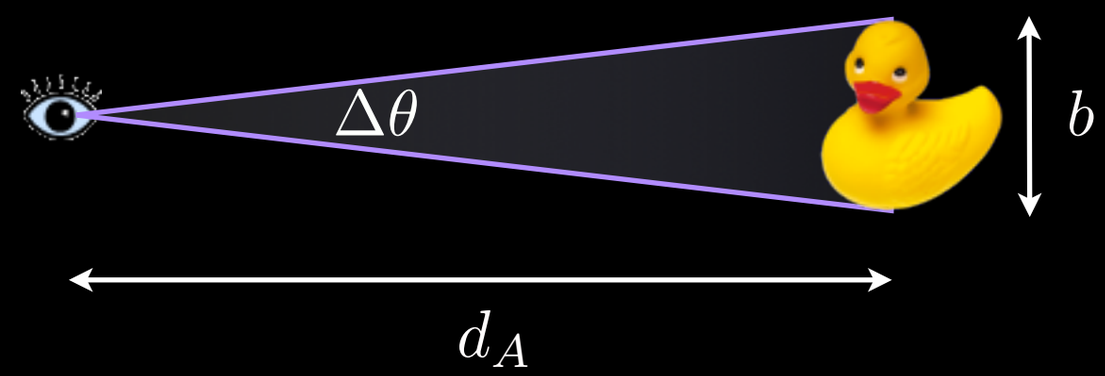
$\Rightarrow h = 0.7345 \pm 0.0166$

Escala “padrão" de distâncias cosmológicas: $c/H_0 = 2997.92\ \boldsymbol{h}^{-1}$ Mpc

Distâncias cosmológicas

1. Distância angular (ou: distância de diâmetro angular)

Podemos usar um objeto cujo **comprimento transversal** é conhecido para estimar a distância até ele a partir de seu **tamanho angular**:



$$d_A = \frac{b}{\Delta\theta}$$

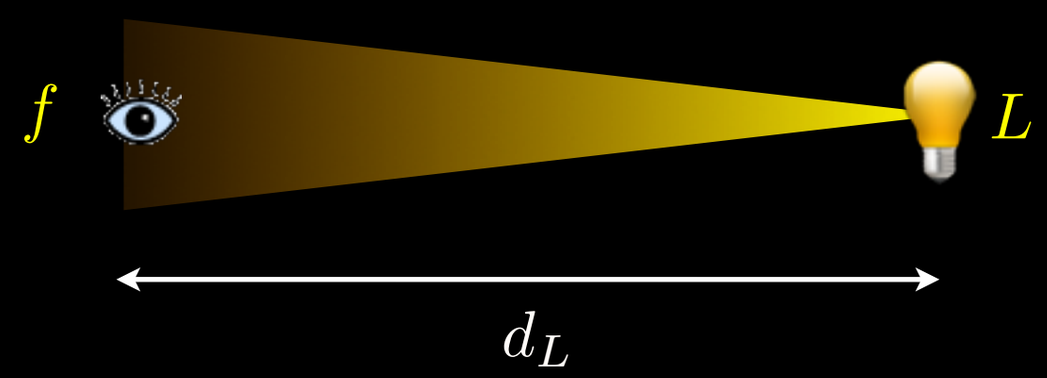
Em FLRW esses dois comprimentos estão relacionados. Em dois dos nossos sistemas de coordenadas favoritos:

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t)\left[\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\Omega^2\right] \qquad = b^2 \qquad d_A = a\,r = \frac{r}{1+z}$$

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t)\left[d\chi^2 + \frac{1}{k}\sin^2\left(\sqrt{k}\,\chi\right) d\Omega^2\right] \qquad = b^2 \qquad d_A = \frac{1}{1+z}\frac{1}{\sqrt{k}}\sin\left(\sqrt{k}\,\chi\right)$$

2. Distância luminosidade

Podemos também usar um objeto cuja **luminosidade** é conhecida para estimar a distância até ele:



$$f = \frac{L}{4\pi\, d_L^2}$$

Em FLRW os fótons da fonte de luz sofrem **dois** efeitos não-triviais:

1. A sua energia decai com o redshift segundo $E \sim 1/a$;
2. A frequência com que os fotons são emitidos e depois atingem o ponto de observação também sofre um "redshift", por um fator idêntico de $1/a$.

Portanto o **fluxo observado** (ou seja a **potência**) é dada por:

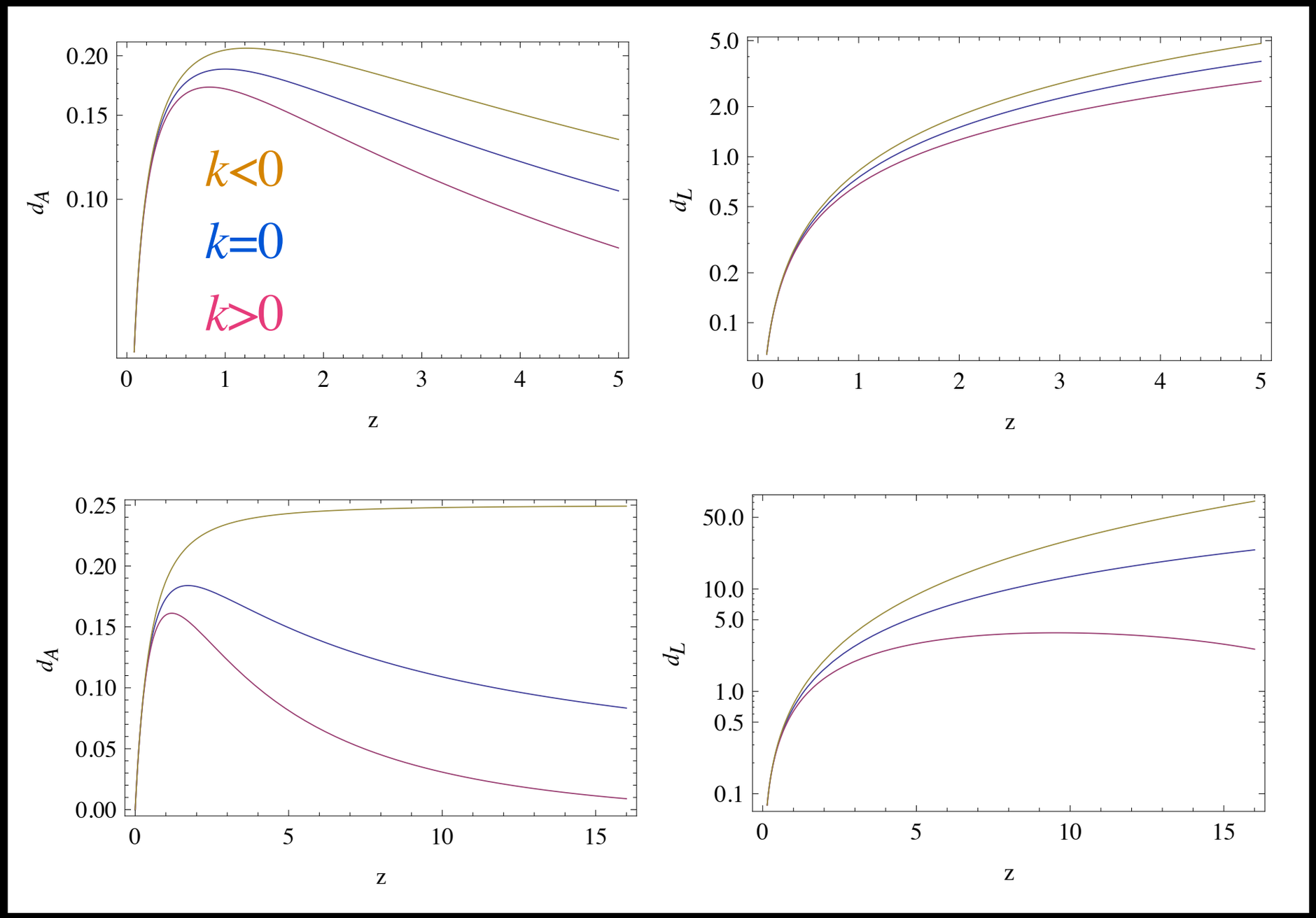
$$f_0 = \left(\frac{a_\mathrm{e}}{a_0}\right)^2 \frac{L}{4\pi\, r^2} \quad \Rightarrow \quad d_L = \frac{r}{a_e} = (1+z)\, r$$

Distâncias de diâmetro angular e de luminosidade: exemplos

Usando a geodésica nula radial: $\chi = \int \frac{dt}{a(t)}$

$a \sim t^{2/3}$

$a \sim t^{2}$



Cosmografia

Vamos escrever o **raio comóvel** como:

Inverta limites de integração

$$\chi = \int \frac{dt}{a(t)} = \int \frac{dt}{da}\frac{da}{a} = \int \frac{da}{a^2 H} = \int \frac{dz}{H(z)}$$

$$a = \frac{1}{1+z}$$

$$da = -\frac{dz}{(1+z)^2}$$

$$a(t) = 1 + H_0(t-t_0) - \frac{1}{2}q_0 H_0^2 (t-t_0)^2 + \ldots$$

$$H(t) = H_0\left[1 - H_0(1+q_0)(t-t_0) + \ldots\right]$$

H_0: parâmetro de Hubble hoje

q_0: parâmetro de desaceleração

Invertendo obtemos:

$$(t-t_0) = -H_0^{-1}\left[z - \left(1 + \frac{1}{2}q_0\right) z^2 + \ldots\right]$$

Substituindo de volta na primeira expressão e integrando obtemos:

$$\chi \simeq H_0^{-1}\left[z - \frac{1}{2}(1+q_0)\, z^2 + \ldots\right]$$

A distância-luminosidade pode ser expandida (para **k=0!**) como:

Exercício: e quando temos curvatura espacial?

$$d_L(z) = H_0^{-1}\left[z + \frac{1}{2}(1-q_0)z^2 + \ldots\right]$$

Ou, em termos do fluxo medido de um objeto de luminosidade conhecida:

$$f = \frac{L}{4\pi\, d_L^2(z)} = \frac{L\, H_0^2}{4\pi\, z^2}\left[1 + \frac{1}{2}(q_0-1)z + \ldots\right]$$

Como já vimos na aula passada, os astrônomos expressam os fluxos medidos nos telescópios em termos de **magnitudes**. A **magnitude aparente** (ou **brilho**) é:

$$\Delta m_{12} = m_1 - m_2 = -2.5\,\log_{10}\frac{f_1}{f_2}$$

Já vimos que o objeto "padrão" para medir magnitudes é a estrela **Vega.**

Só como lembrança, aqui estão algumas "magnitudes aparentes":

$$m \equiv -2.5 \log_{10} \frac{f}{f_{\rm Vega}}$$

Magnitude aparente (m)	Objeto
-27	Sol
-13	Lua cheia
-5	Venus
0	Vega* Saturno
6	Limite do olho humano
8	Netuno
14	Plutão
20	Galáxia em z=1
27	Limite da luz visível por um telescópio de 8m
32	Limite do telescópio HST

* Para ser exato o padrão moderno é uma "Vega teórica". A Vega real foi melhor observada em tempos mais recentes e em termos da definição original temos que $m_{\rm VEGA} = 0.03$!

Magnitude absoluta

Podemos definir uma luminosidade "absoluta" colocando um objeto numa dada distância padrão. Em Astronomia essa distância padrão é **10 pc** , onde **1 pc=3.26 ano-luz**.

Então:

$$M \equiv m + 2.5\,\log_{10}\frac{f}{f_{10\,\mathrm{pc}}} = m - \underbrace{5\,[\log_{10} d_L(\mathrm{pc}) - 1]}_{\mu}$$

μ
módulo de distância

$$M = m - \mu$$

Portanto, se uma distância é conhecida e a magnitude relativa é medida, podemos calcular a magnitude absoluta de um objeto astronômico.

Reciprocamente: se a **magnitude absoluta** de um objeto pode ser **conhecida,** e se conseguimos **medir** a sua **magnitude relativa,** então podemos inferir o **módulo de distância** — e a **distância-luminosidade**!

Exemplo: Supernovas do tipo Ia

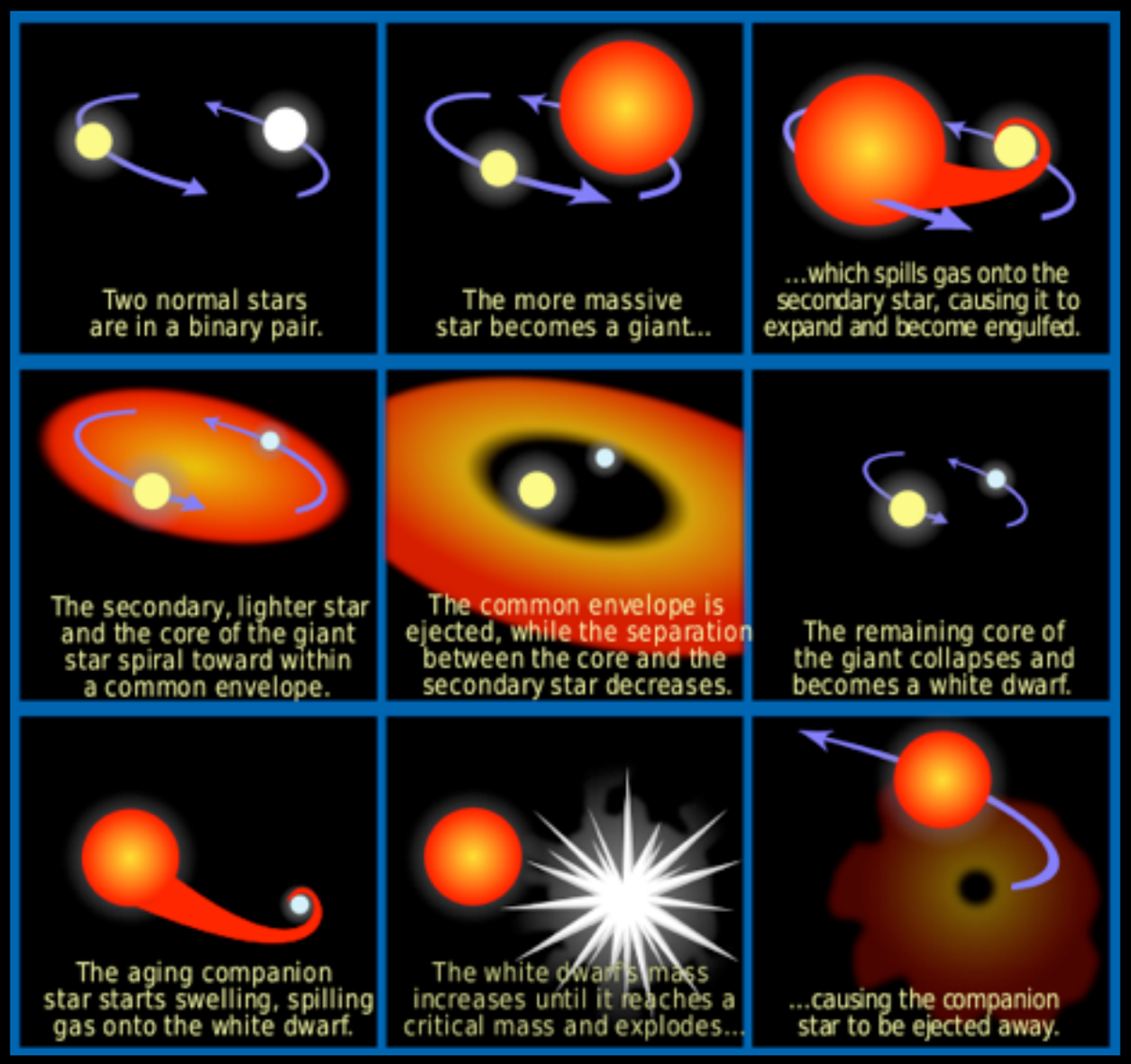
Supernovas são as maiores explosões estelares no Universo.

A luz dessas explosões pode ofuscar a luz de uma galáxia inteira!

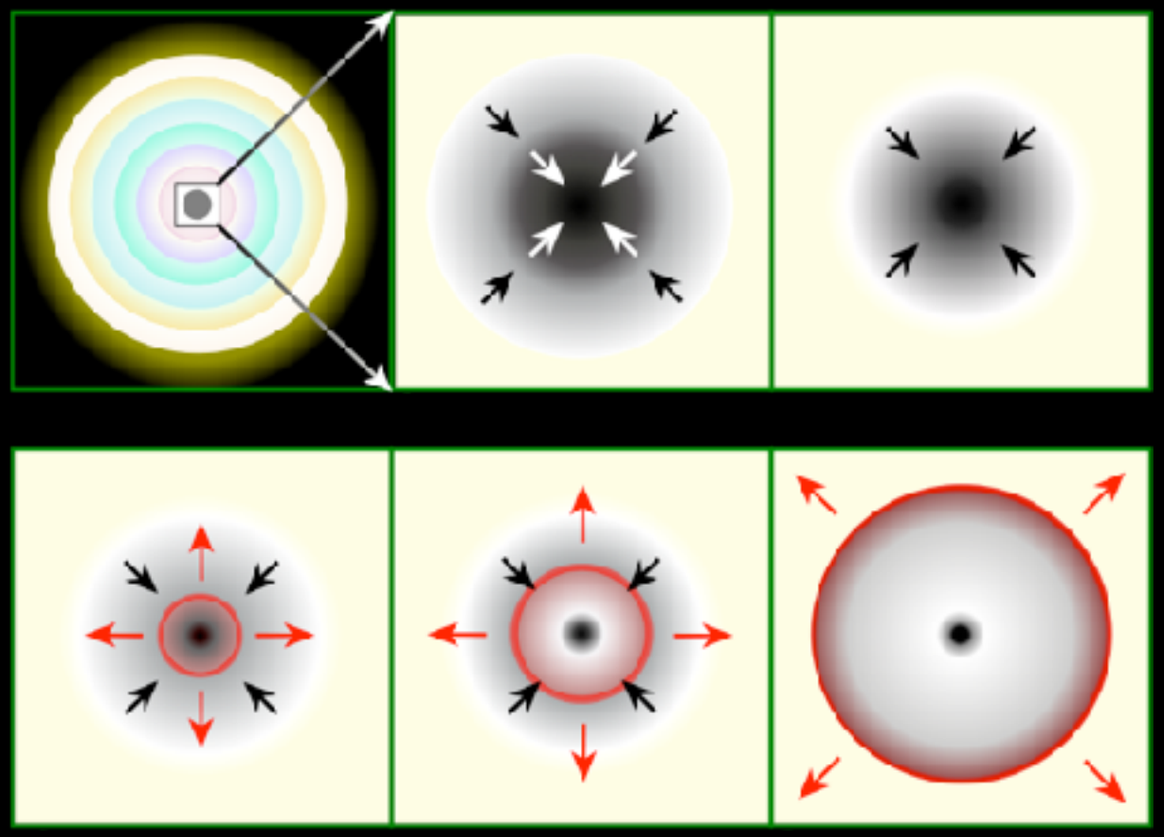
As supernovas vêm em diversos tipos, mas basicamente:

Tipo I: explosão de uma anã branca tipo CO

(Explosão ativada para valores parecidos da massa)

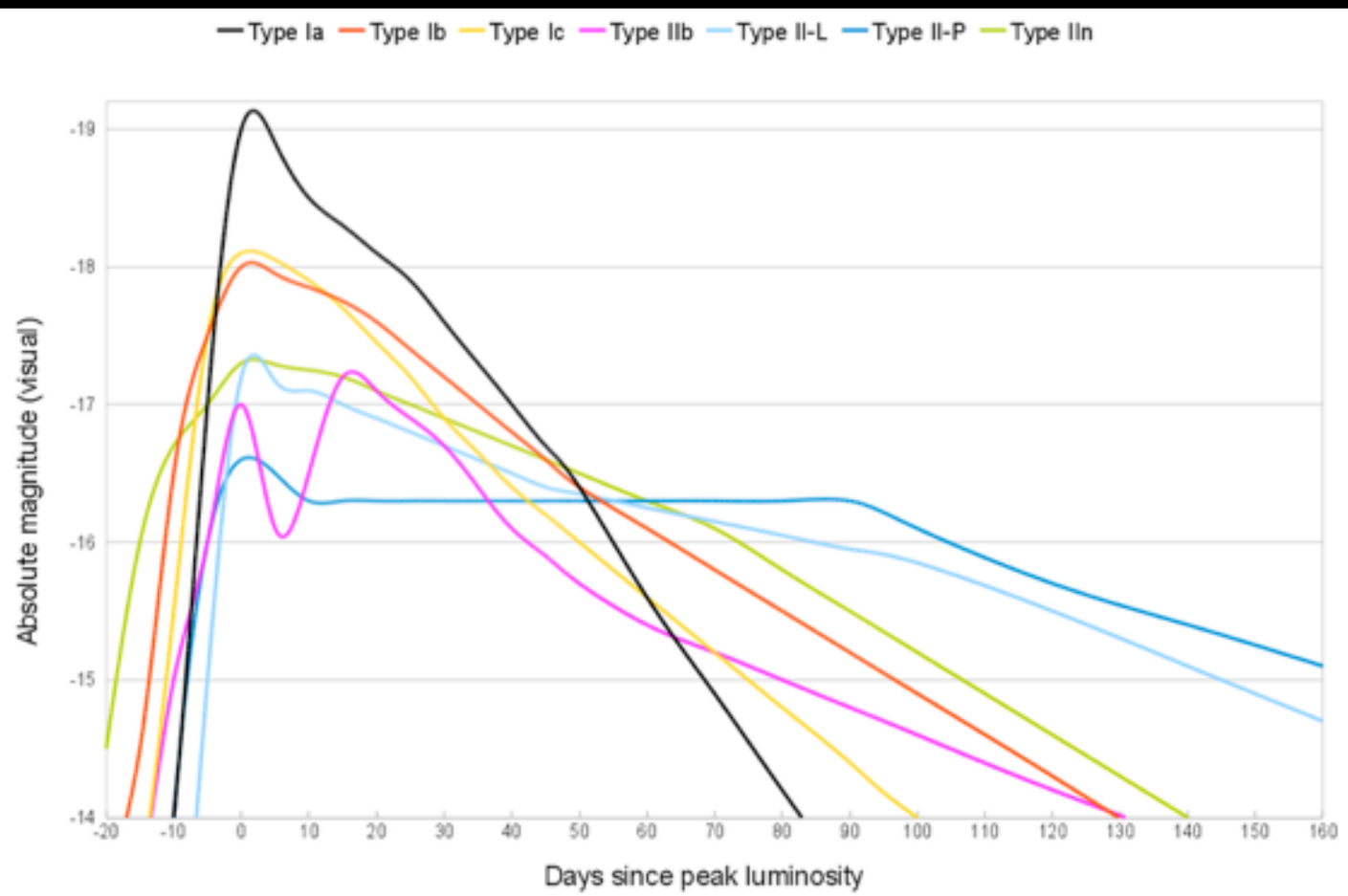


Tipo II - core-collapse

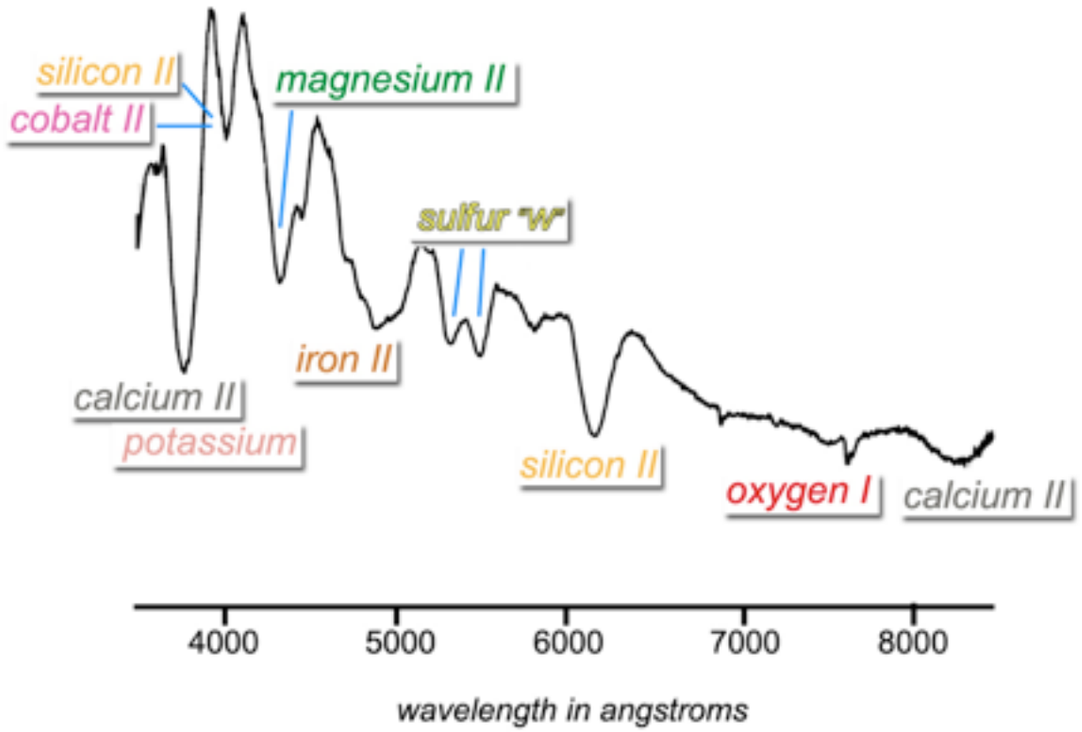


Supernovas são subdivididas em termos das suas **curvas de luz** (ou seja, como a luz da explosão se desenvolve ao longo do tempo) e também em termos dos seus **espectros** (ou SEDs - Spectral Energy Distributions).

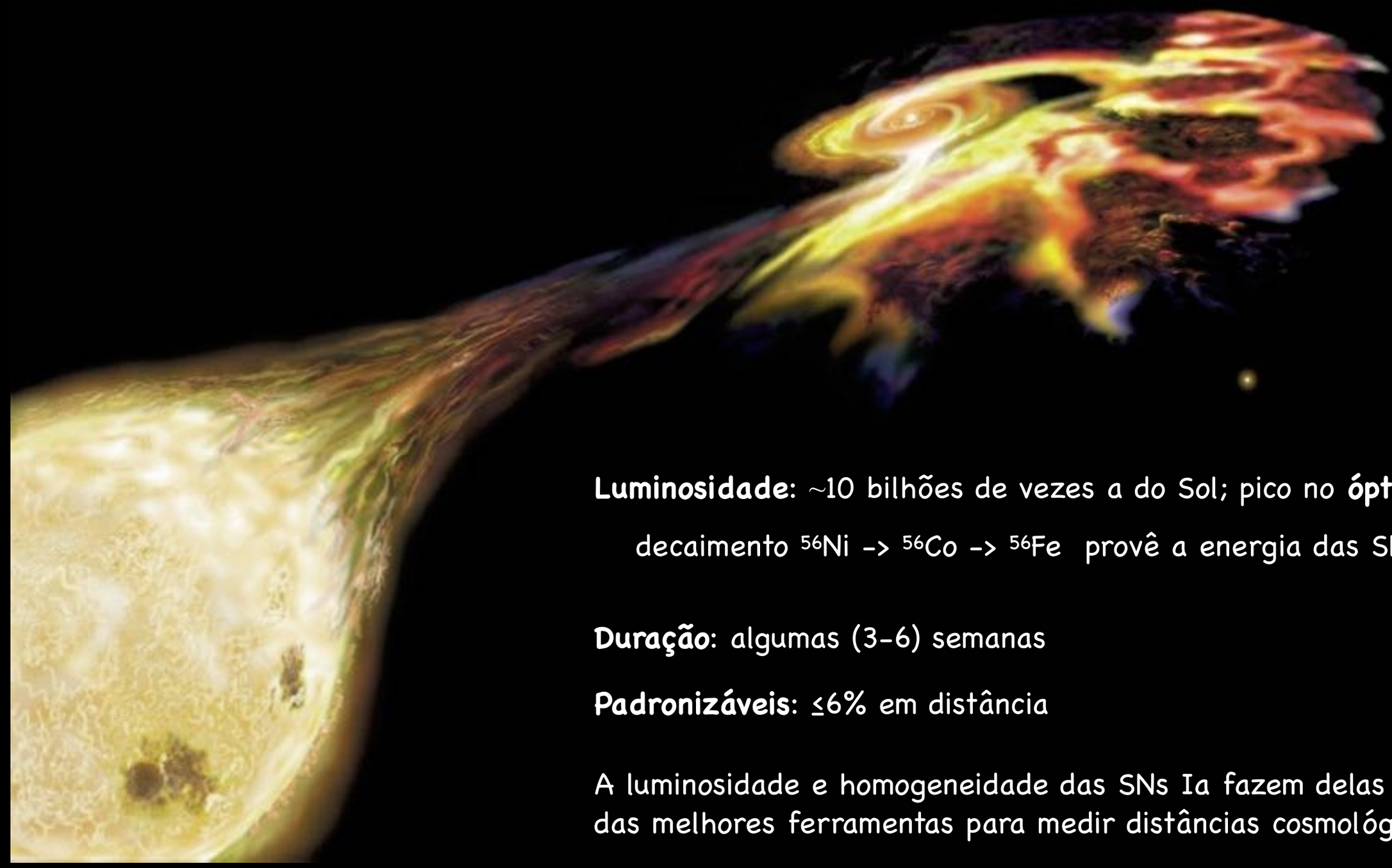
Curvas de luz de diversos tipos de SNs



Espectro típico de uma SN Ia



Supernovas Ia são particularmente interessantes: elas parecem ter **luminosidades absolutas muito similares** o que indica que as massas dos progenitores devem ser similares



Luminosidade: ~10 bilhões de vezes a do Sol; pico no **óptico**

decaimento $^{56}Ni \rightarrow {}^{56}Co \rightarrow {}^{56}Fe$ provê a energia das SNs Ia

Duração: algumas (3-6) semanas

Padronizáveis: ≤6% em distância

A luminosidade e homogeneidade das SNs Ia fazem delas uma das melhores ferramentas para medir distâncias cosmológicas!

Em 1993, após observar diversas SNs Ia em galáxias próximas (cujas distâncias eram bem conhecidas), **M. Phillips** (Ap. J. Lett. 413: L105–L108) notou uma curiosa relação entre as **curvas de luz** e as **magnitudes absolutas**. De acordo com essa relação:

$$M_B = -21.726 + 2.698\,\Delta m_{15}(B)$$

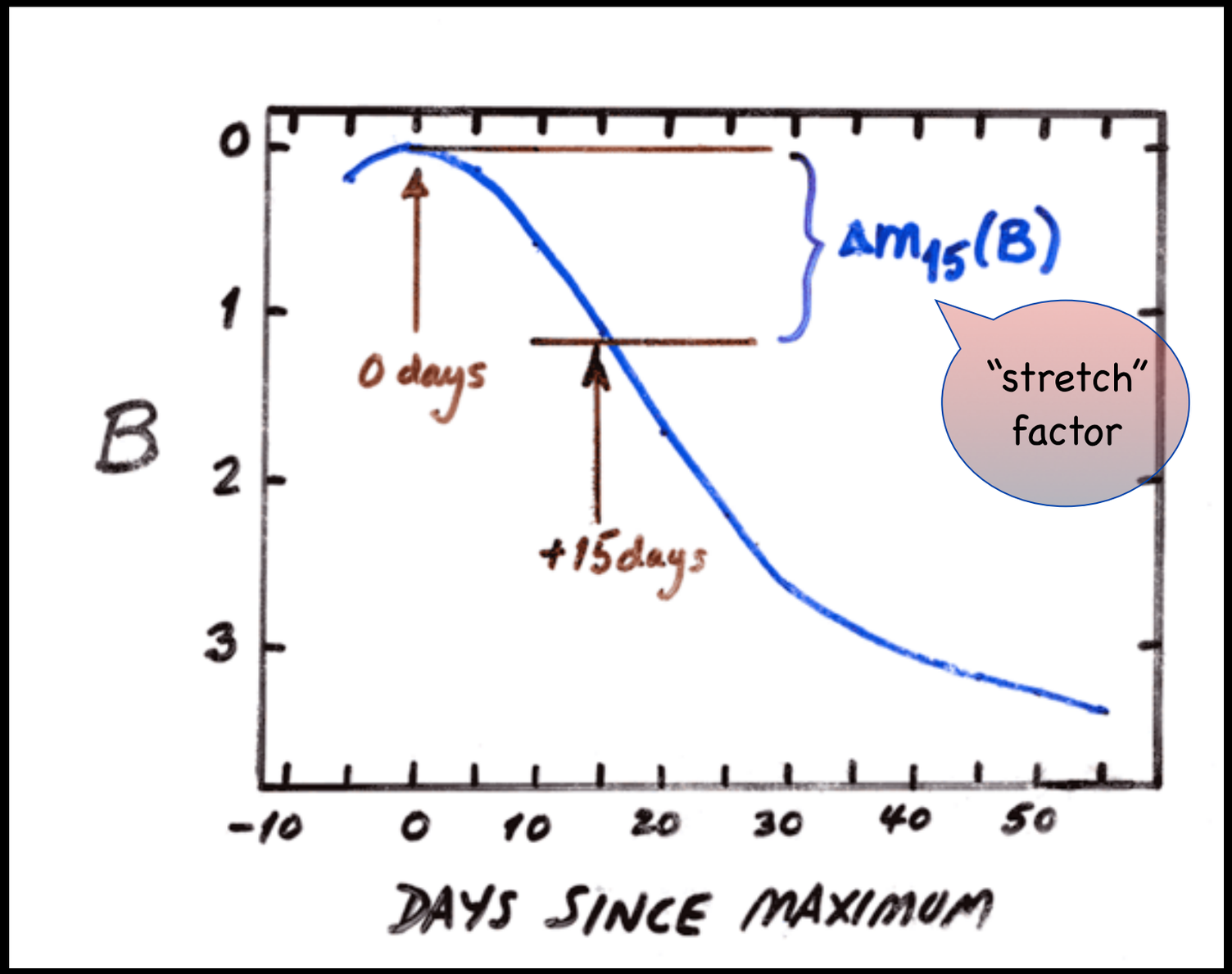


Diagrama original de Phillips

A relação de Phillips foi depois refinada com **correções** dependendo da "**cor**" da supernova.

Essa relação é **totalmente fenomenológica** - não há nenhuma boa teoria por trás dela.

Entretanto, ela parece funcionar muito bem!

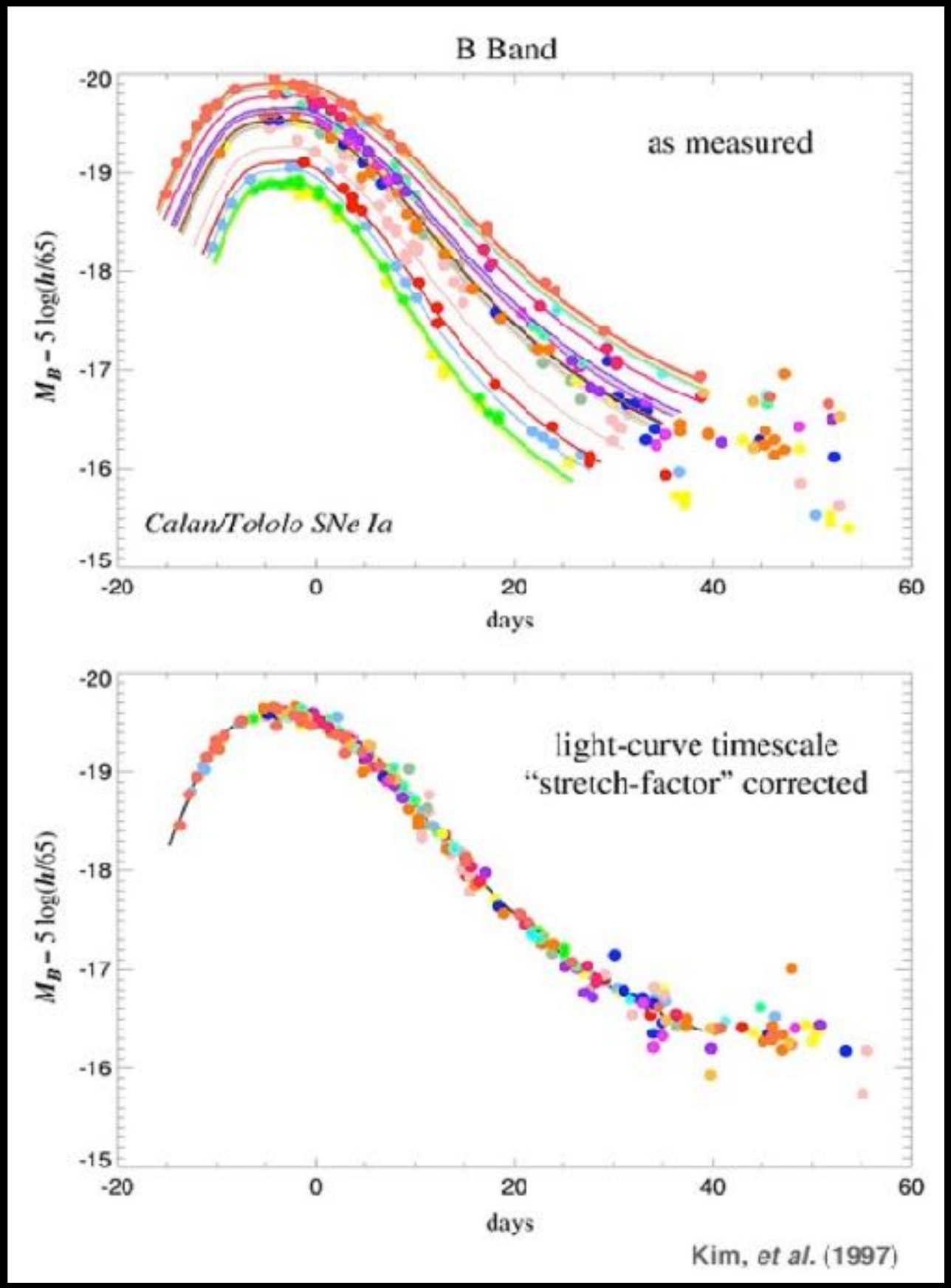
Portanto, podemos definir um "**módulo de distância**" para as Supernovas Ia, que é uma medida da **distância luminosidade:**

Observação

$$\mu_B = m_b - M_B + \alpha\,\Delta m_{15} + \beta\, c$$

Teoria

$$\mu_B \to 5\,\log_{10}\frac{d_L}{10\,\mathrm{pc}}$$



Podemos então usar as SNs Ia para traçar um diagrama de **distância v. redshift** – ou melhor, do **módulo de distância v. redshift**:

$$\mu_B \to 5\,\log_{10}\frac{d_L}{10\,\mathrm{pc}} \qquad d_L(z) = (1+z)\,\chi = H_0^{-1}\left[z + \frac{1}{2}(1-q_0)z^2 + \ldots\right]$$

[Shift: M_B - 5 $\log_{10}$ (c/H_0/10pc)]

-> **Forma** dessa curva pode determinar q_0 !

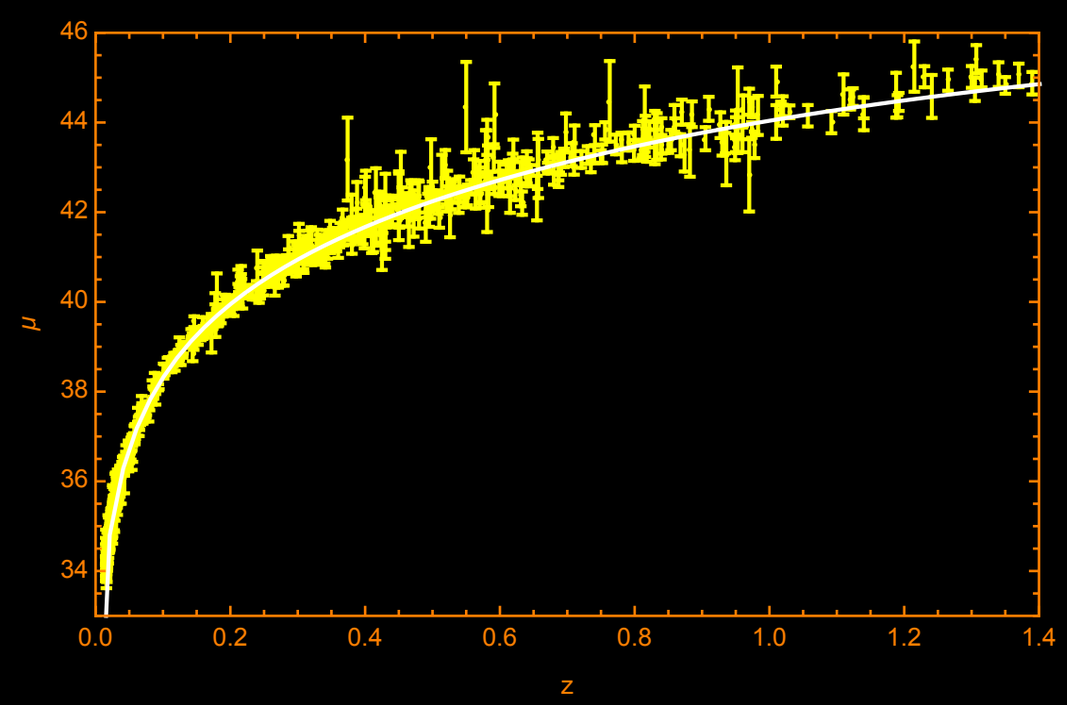
Observações: $q_0 \cong -0.5$

O universo não está apenas se expandindo – ele está acelerando!

Primeira atividade prática (próxima aula): esquentando os motores

1. Tome os dados das supernovas do Union2.1 (estará disponível nos terminais da sala 201 e no site da disciplina); importe esses dados no seu computador
2. Faça gráficos do módulo de distância (μ) e da teoria (cosmografia), "chutando" valores de H_0, q_0 e $k\ (\sim 0)$
3. Encontre valores para H_0 e para q_0 que ajustem bem os dados

z	μ	err(μ)
0.028488	35.3466	0.223906
0.050043	36.6824	0.166829
0.052926	36.8177	0.155756
0.070086	37.4467	0.158467
0.062668	37.4834	0.156099
0.087589	38.2291	0.187746
0.078577	37.4882	0.155636
0.017227	34.6544	0.199337
0.042233	36.3365	0.167174
0.045295	36.6403	0.164981
0.03648	35.9053	0.170175
…	…	…



H_0 ?

q_0 ?