

Aula 1: Introdução à Cosmologia

Primeira Escola de Ciências Física Brasil-Cabo Verde
3-13 de abril 2017

Oliver F. Piattella
Universidade Federal do Espírito Santo
Vitória, Brasil



UFES



*Conselho Nacional de Desenvolvimento
Científico e Tecnológico*

Programa

- Aula 1. Introdução à Cosmologia: Escadaria cósmica, Universo em expansão, lei de Hubble e teoria do Big Bang.
- Aula 2. Cosmologia Relativística: métrica de FRLW, equações de Friedmann e expansão acelerada do Universo
- Aula 3. O conteúdo do Universo: Matéria Escura, Energia escura, CMB

Webpage do grupo COSMO-UFES:
<http://www.cosmo-ufes.org/members.html>

Minha webpage:
<http://ofp.cosmo-ufes.org>

Cosmo-UFES



Referências

- Barbara Ryden, *Introduction to Cosmology*
- Andrew Liddle, *An Introduction to Modern Cosmology*
- Scott Dodelson, *Modern Cosmology*
- Viatcheslav Mukhanov, *Physical foundations of Cosmology*
- Steven Weinberg, *Cosmology*

Cosmologia

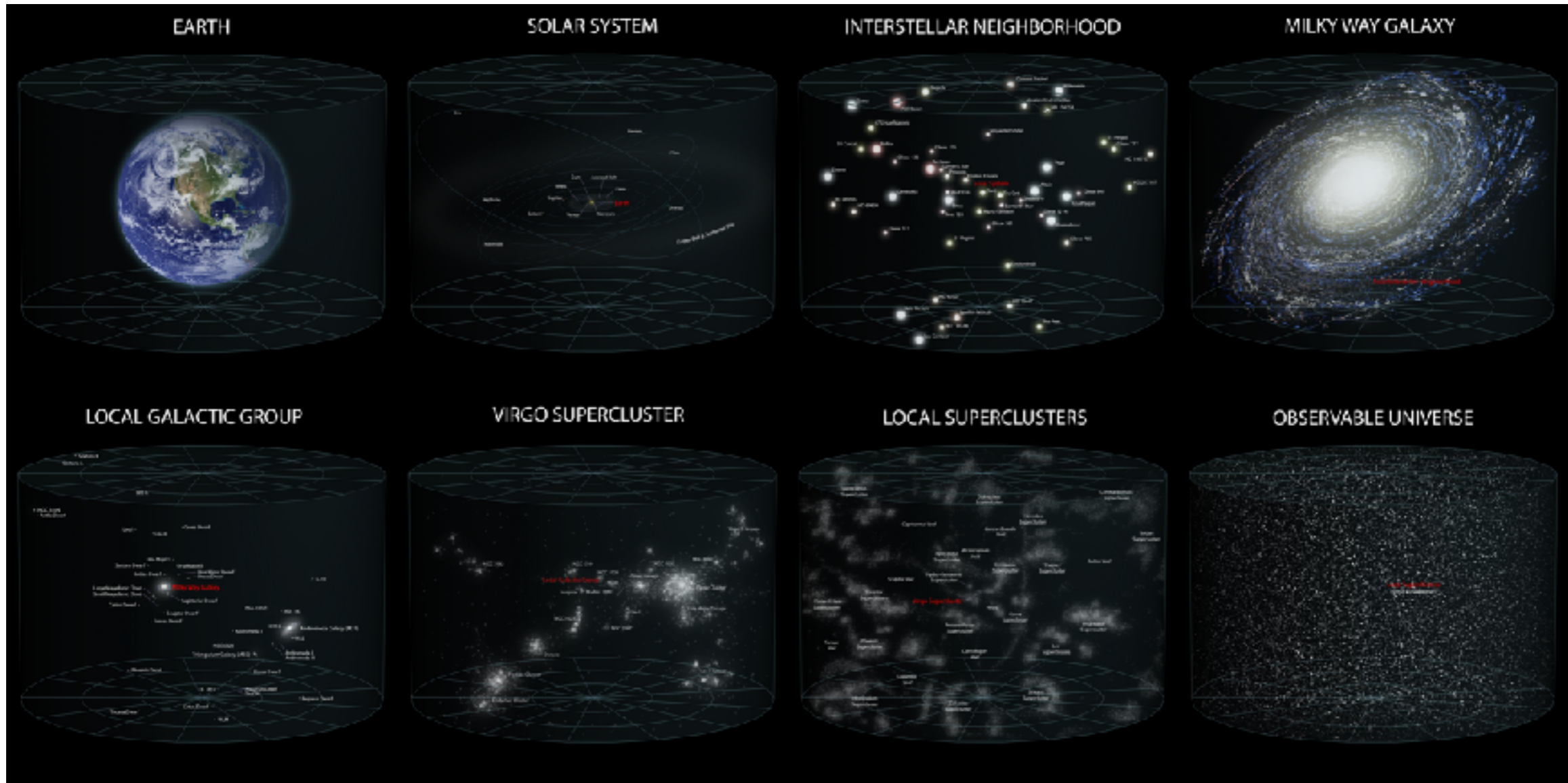
- Cosmos (κόσμος) = Universo, ordem, beleza, ...
- Logos (λόγος) = palavra (estudo, princípio de ordem e conhecimento)

Estudo do Universo como um todo, **em grande escala**, tentando entender:

- A sua origem
- A sua estrutura e composição (de onde vêm as galáxias, as estrelas, os planetas, ...)
- A sua evolução
- O seu fim (?)



Onde estamos e em que escalas começa a Cosmologia?



Pequeno resumo da nossa posição no universo

- Modelo Geocentrico (Aristoteles, sec. IV a.C. - Ptolomeu, sec. II d.C.)
- Modelo Heliocêntrico (Aristarco de Samos, sec. III a.C. - Copérnico, sec. XVI)
- Galactocentrismo (Herschel, 1785)
- Ocupamos uma posição periférica da Via Láctea, mas esta é todo o Universo (Shapley, 1918). As outras galáxias são *Nebulae* contidas na nossa.
- A nossa galáxia é uma entre muitas outras (Curtis, grande debate entre Shapley e Curtis, 1920).

Unidades de medida mais apropriadas

Para grandes distâncias é mais conveniente usar o ano luz (ly), parsec (pc) e múltiplos (kpc, Mpc, Gpc)

$$1 \text{ ly} = 9,4607 \times 10^{15} \text{ m}$$

$$1 \text{ pc} = 3,086 \times 10^{16} \text{ m}$$

$$1 \text{ Gpc} = 1000 \text{ Mpc}, 1 \text{ Mpc} = 1000 \text{ kpc}, 1 \text{ kpc} = 1000 \text{ pc}$$

Por comparação, a distância (média) Terra-Sol é:

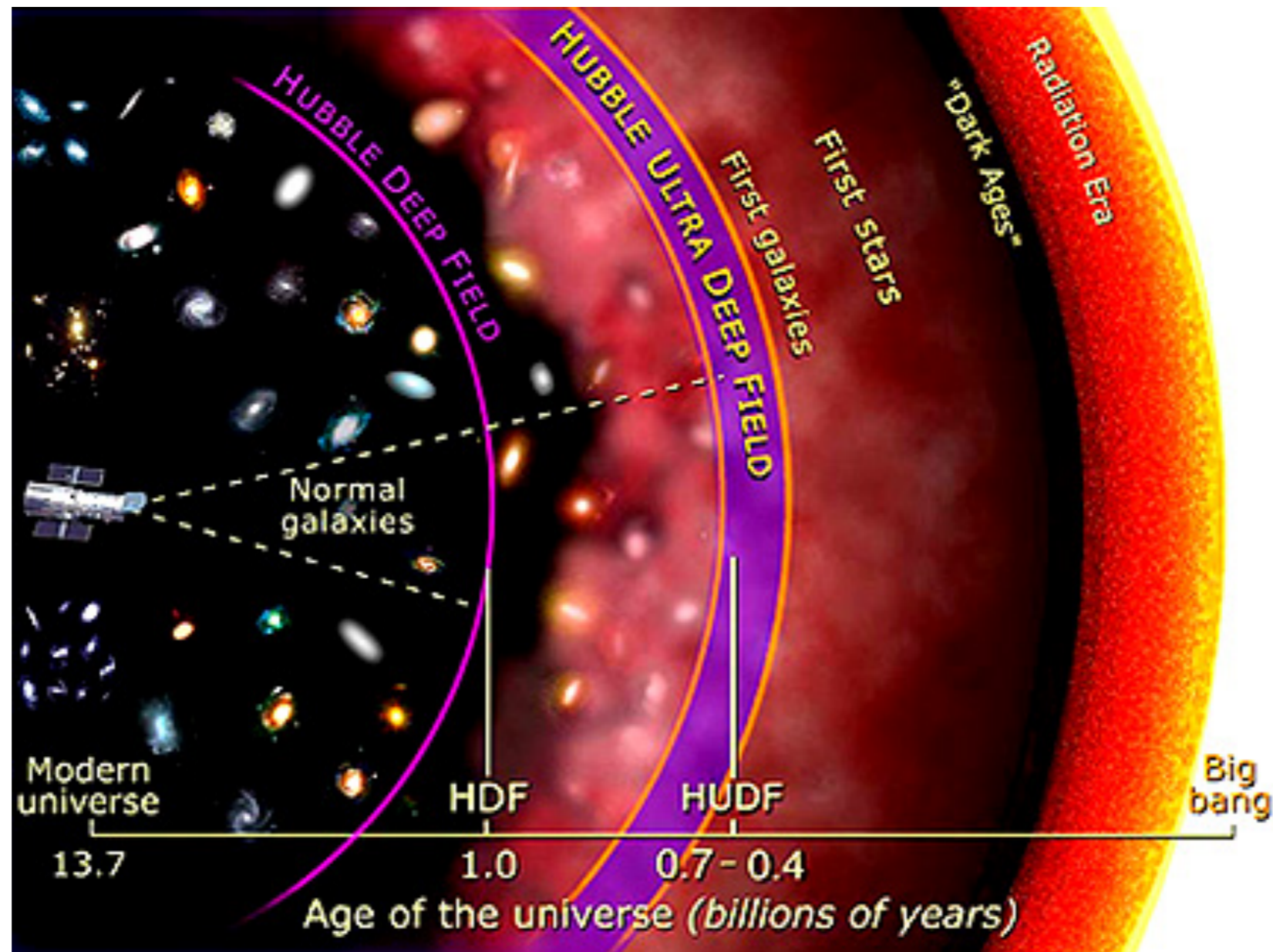
$$1 \text{ AU (unidade astronômica)} = 1,496 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$1 \text{ pc} = 2,1 \times 10^5 \text{ AU}$$

Dada a dificuldade de esticarmos réguas daqui até as galáxias, mais comum é o uso do desvio para o vermelho (redshift) z da luz. (O veremos mais em detalhe em breve!)

Observar fontes muito afastadas equivale a observar no passado

A velocidade da luz é finita: $c = 3 \times 10^8$ m/s => “Arqueologia cósmica”

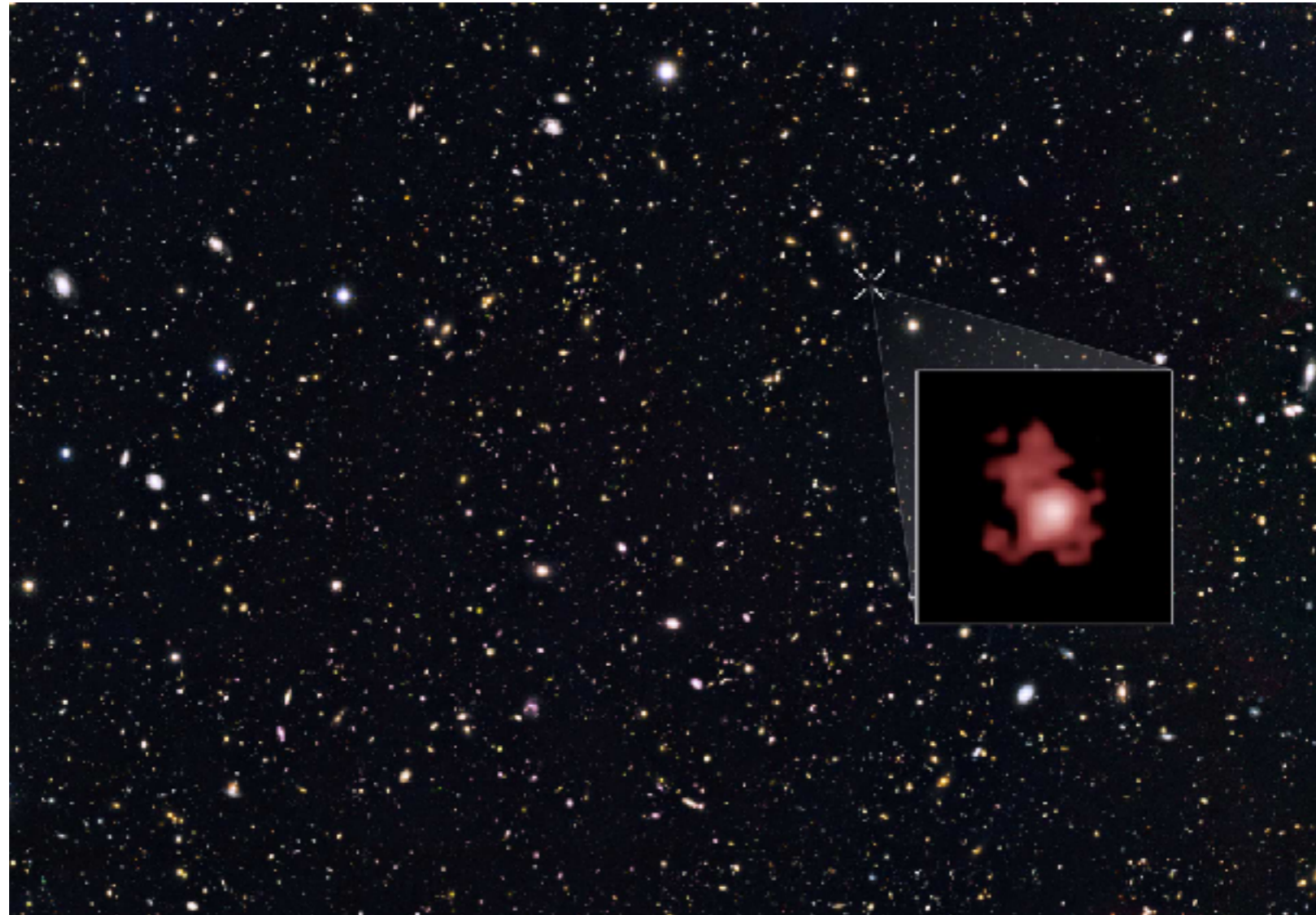


Escalas de distância típicas

- Raio da Terra: 6.371 km
- Distância Terra-Sol: 1 AU
- Afélio de Plutão: 50 AU
- Estrela mais próxima do Sol (Proxima Centauri): 4 ly
- Distância até TRAPPIST-1: 12 pc
- Distância até Trantor (Centro da Via Láctea): 8 kpc
- Tamanho da Via Láctea: 50 kpc
- Distância até Andromeda: 1 Mpc

A galáxia mais longe

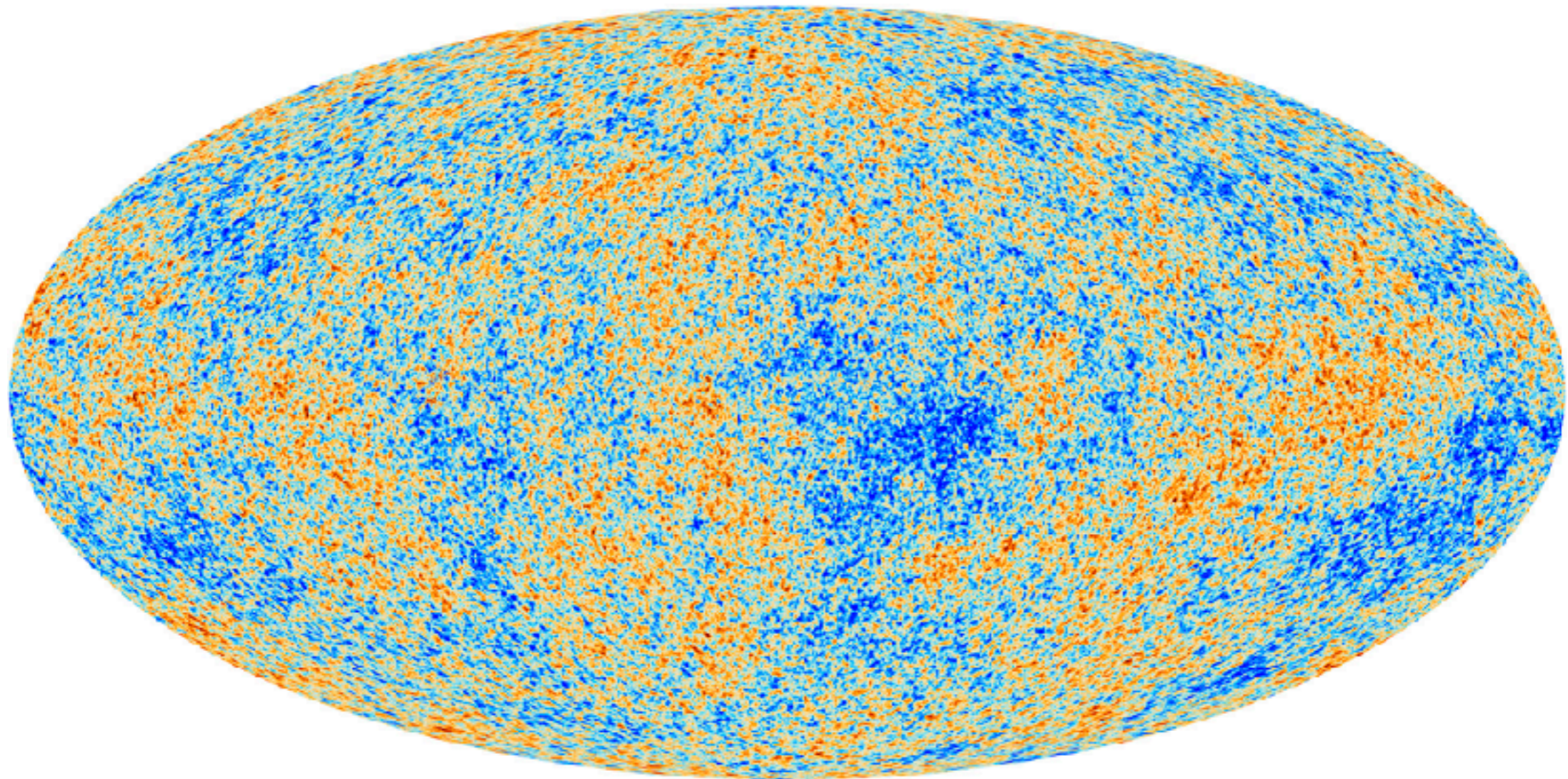
GN-z11 ($z = 11.09$). Distância: 13.39 Gly ou 4.1 Gpc



[Spitzer Space Telescope's Great Observatories Origins Deep Survey-North \(GOODS-North\)](#)

Fundo cósmico de microondas (Cosmic microwave background, CMB)

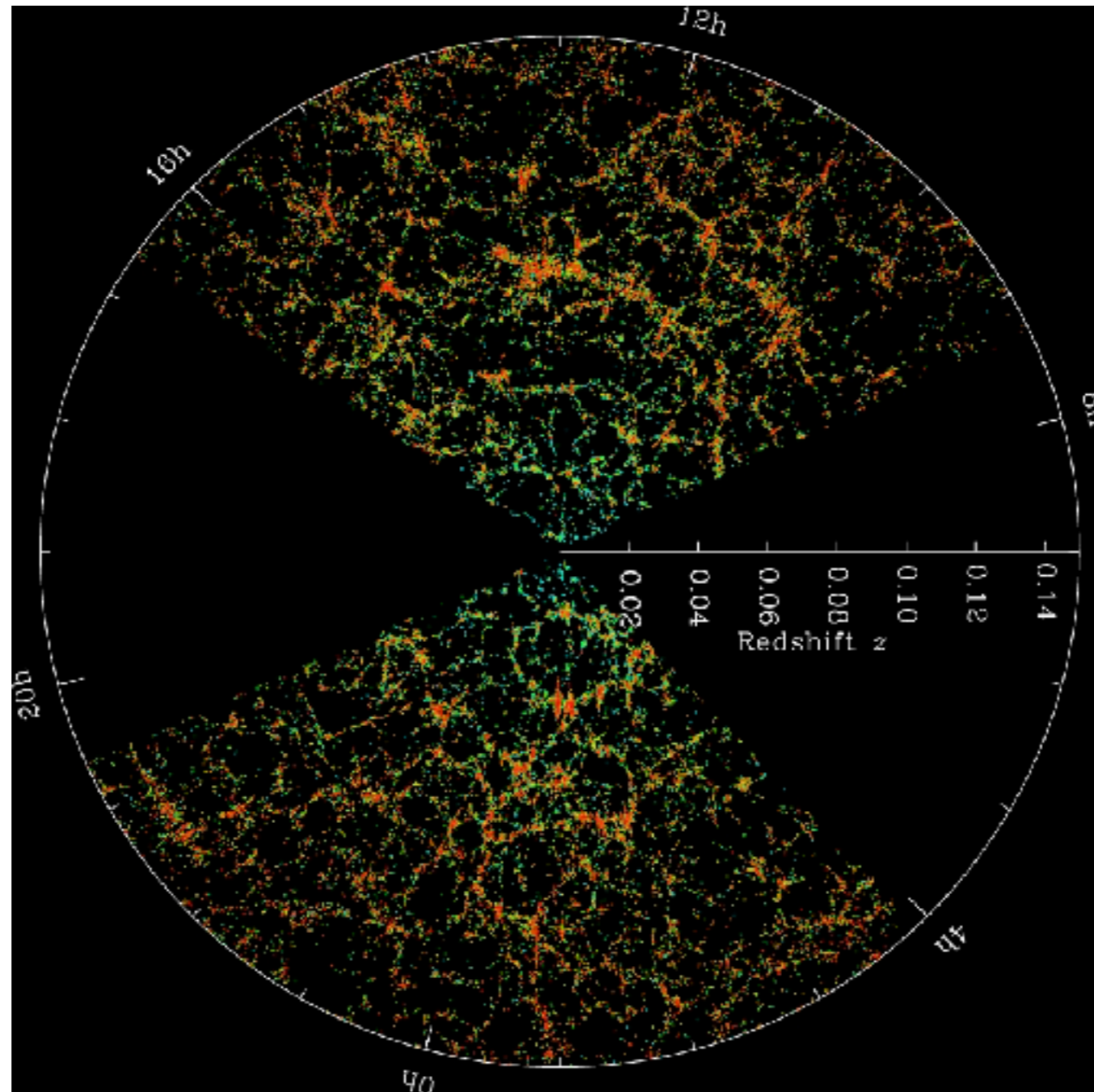
$z = 1000$, distância de aproximadamente 14 Gly (próxima à idade do Universo)



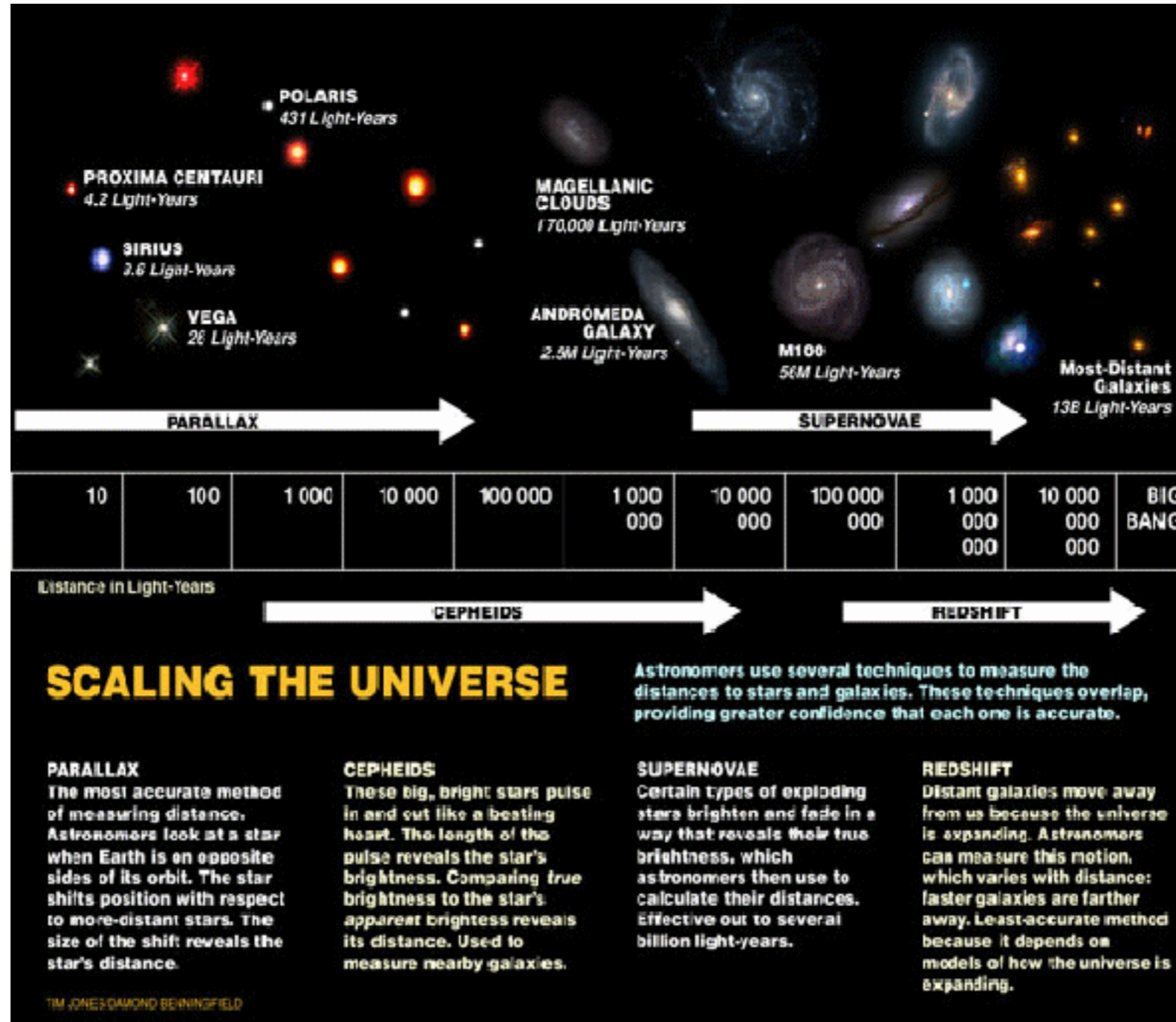
Fontes importantes para cosmologia

- Estrelas, mas não todas: Supernovae de tipo Ia. Velas padrão.
- Galáxias. A sua distribuição contém preciosas informações sobre o processo de formação de estruturas.
- Aglomerados de galáxias. Coleção de 100-1000 galáxias. Importantes pelo lenteamento gravitacional fraco.
- CMB. Provavelmente o fenômeno mais importante para a Cosmologia.

Distribuição das galáxias



Medição de distâncias: Escadaria Cósmica

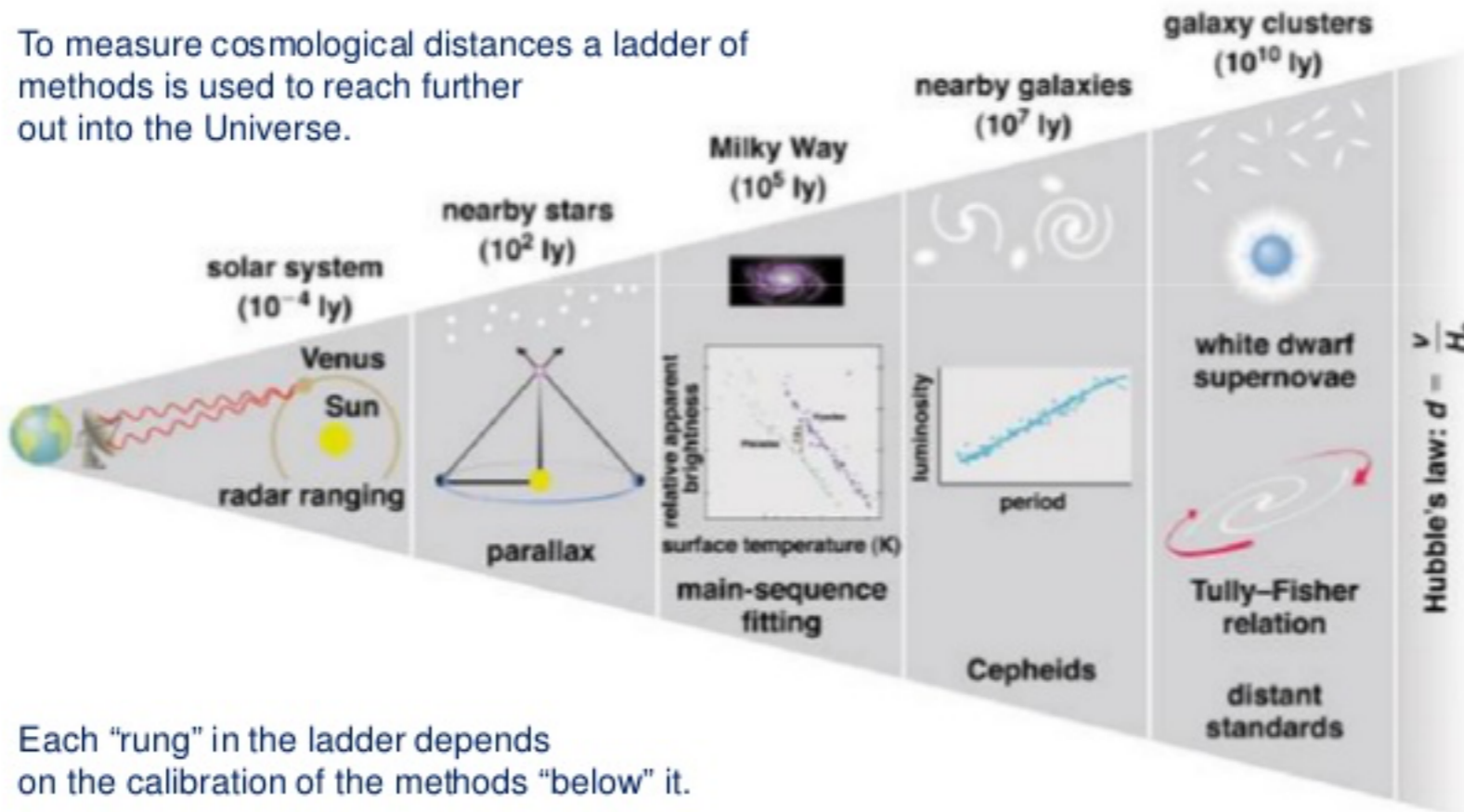


Escadaria Cósmica



Size and Scale of the Universe

THE COSMIC LADDER



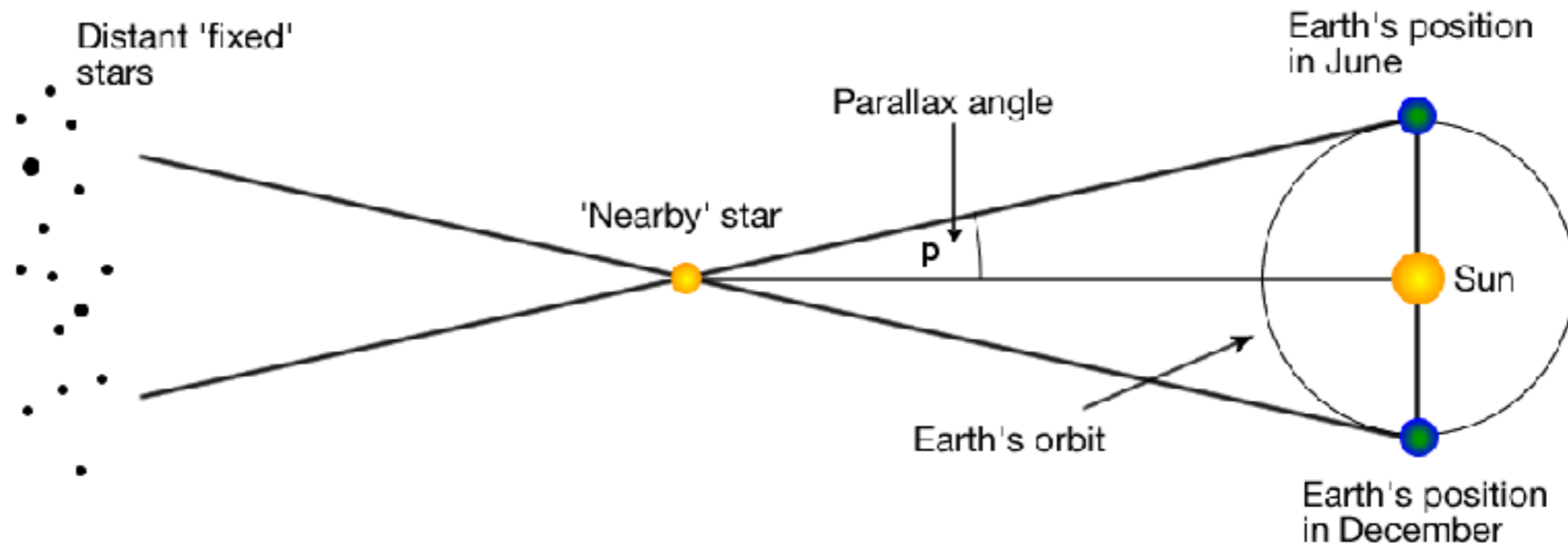
Each "rung" in the ladder depends on the calibration of the methods "below" it.

Parallax

Técnica bastante simples e robusta, mas de "curto" alcance.

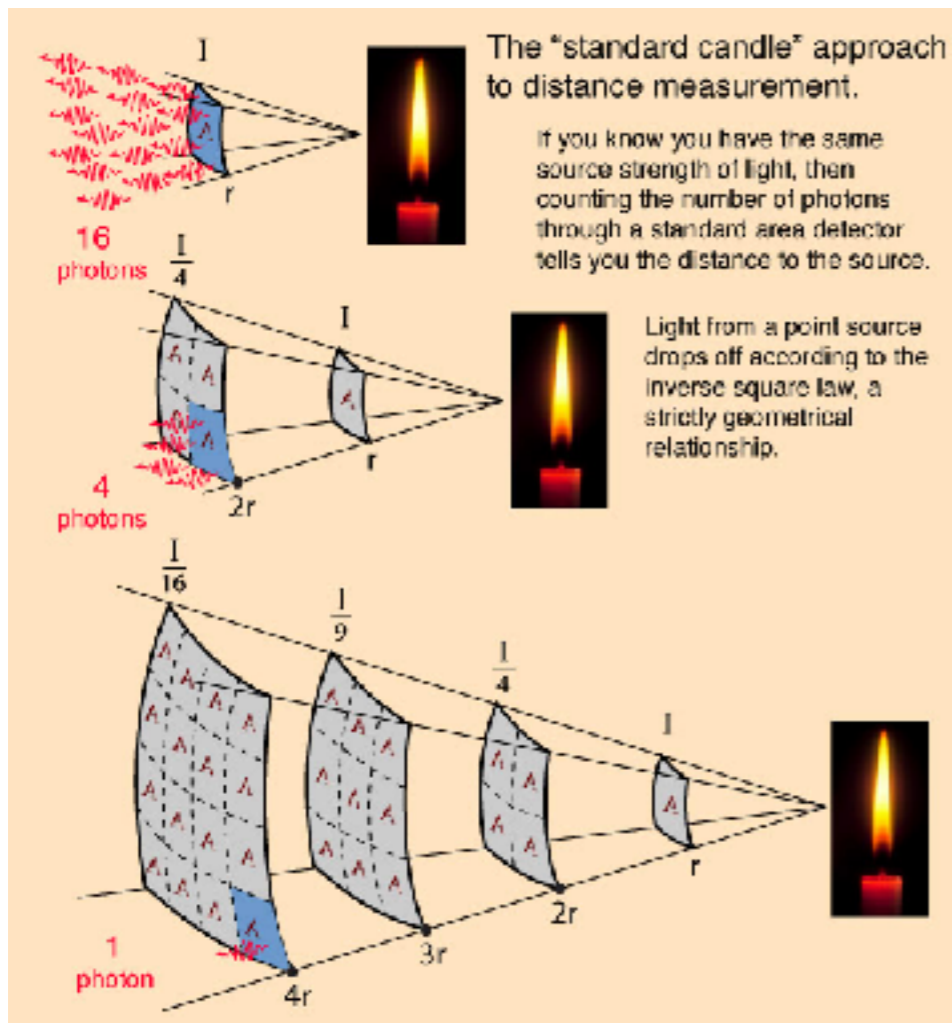
A partir de satélites, usando esta técnica, atualmente consegue-se medir distâncias de aproximadamente 1.500 anos luz.

Entretanto, isto é insuficiente para nossa própria galáxia! Nossa distância ao centro da Via Láctea é de 8 kpc, ou seja, uns 26.000 anos luz.



Vela padrão

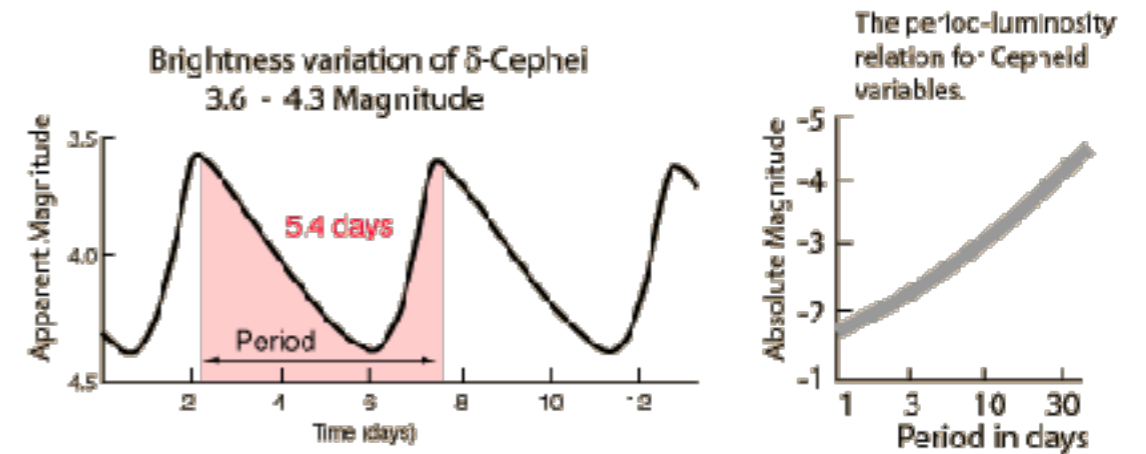
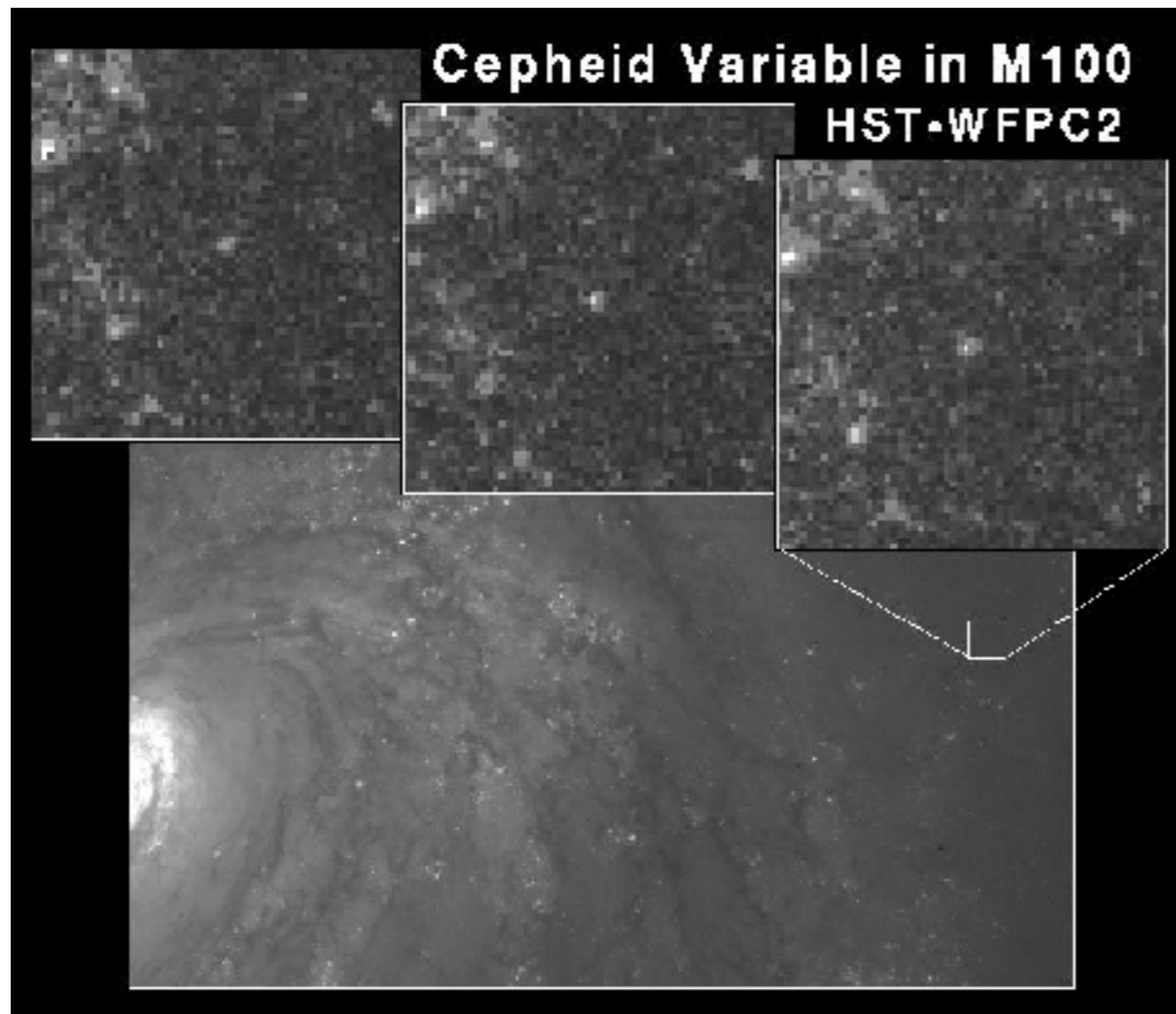
Objeto cuja luminosidade é conhecida. Então medindo o fluxo é possível determinar a distância.



$$\mathcal{F} = \frac{\mathcal{L}}{4\pi d^2} \Rightarrow d^2 = \frac{\mathcal{L}}{4\pi \mathcal{F}}$$

Cefeidas

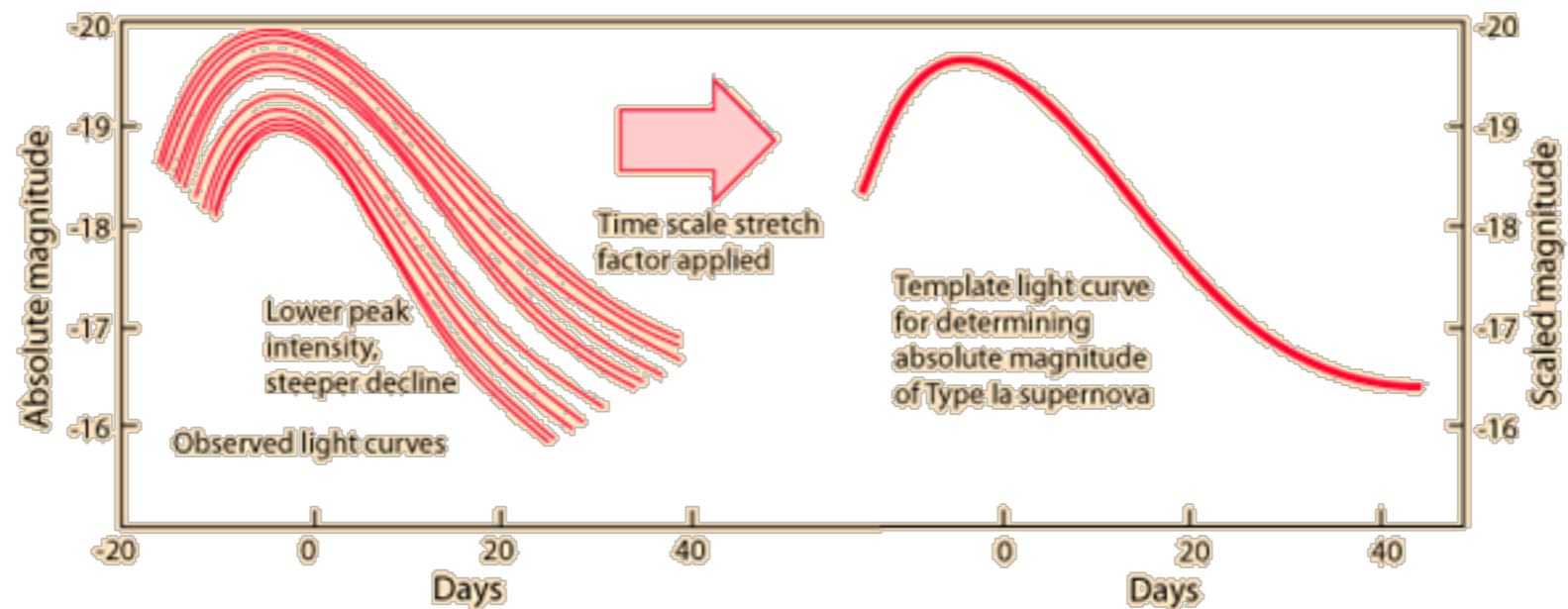
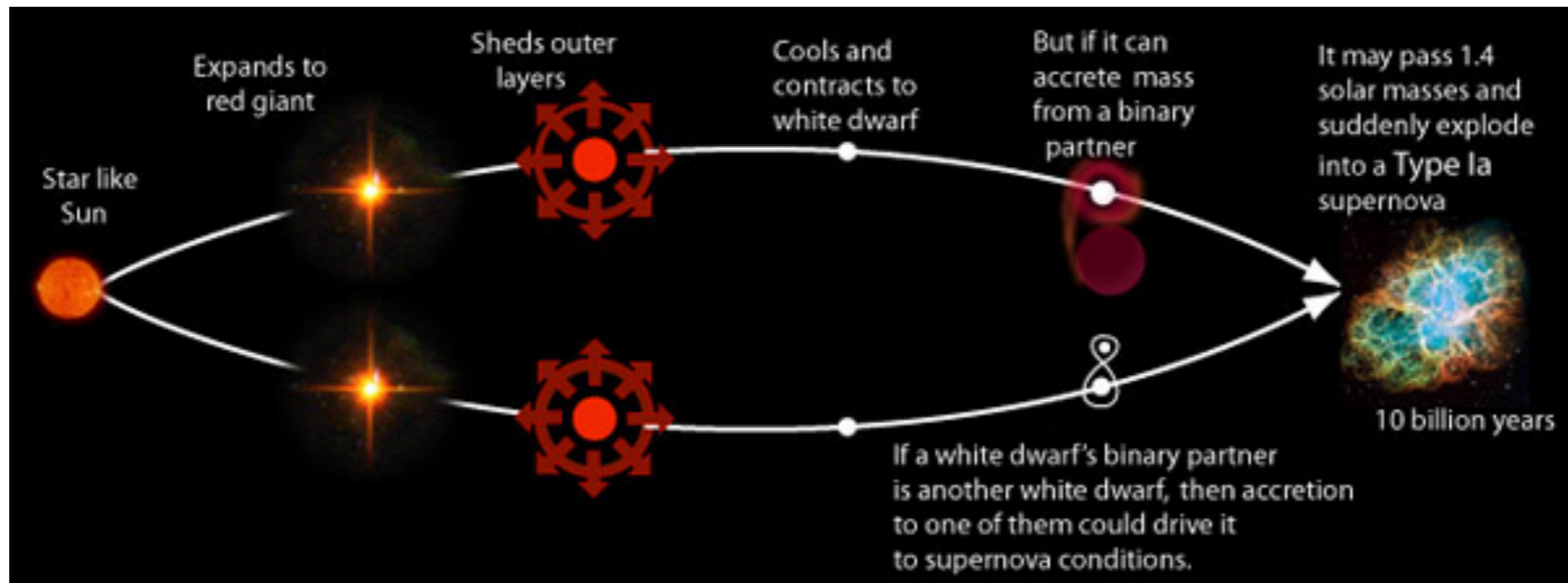
Estrelas que pulsam com período dependente da luminosidade



<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Astro/cepheid.html>

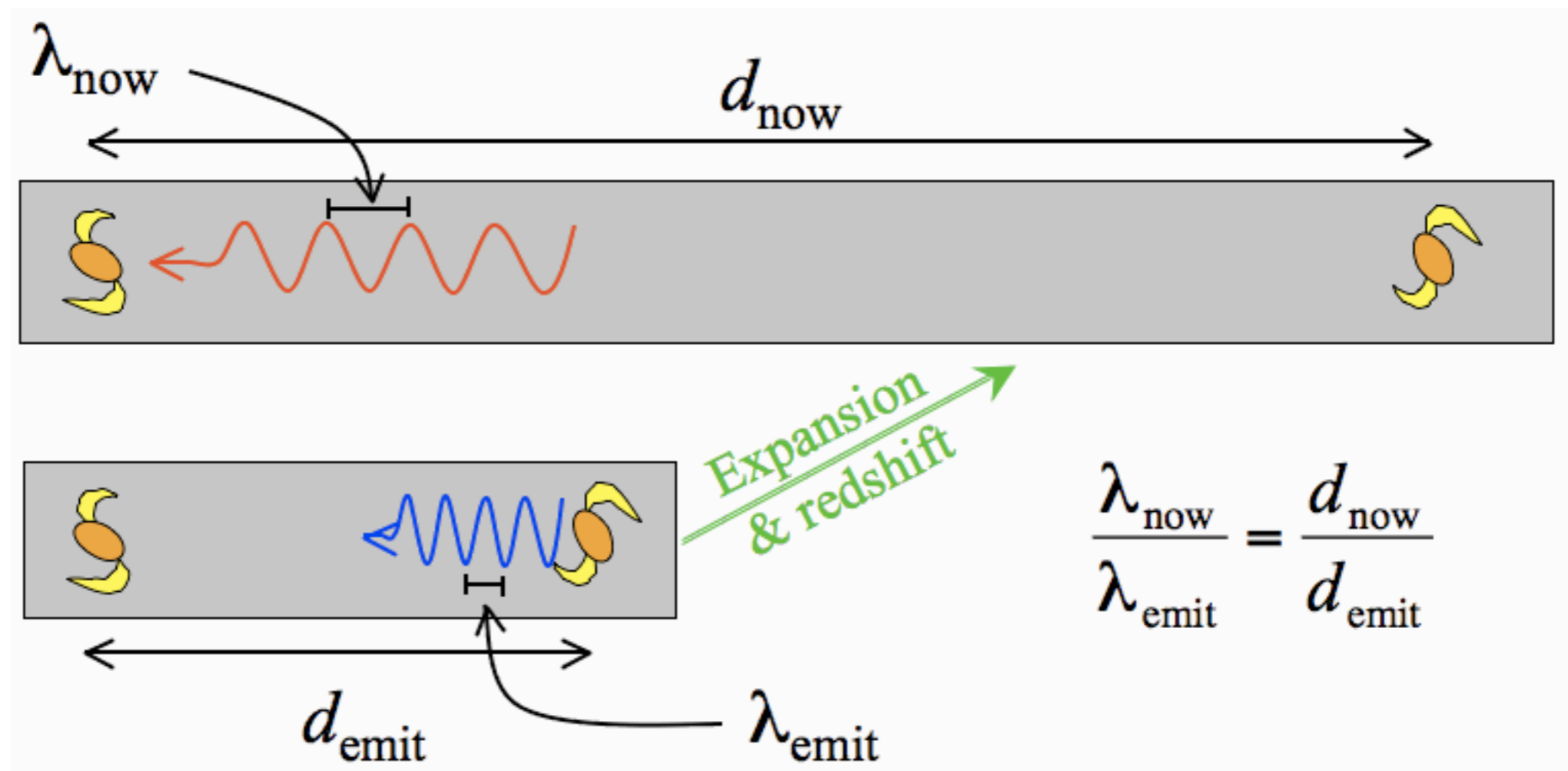
<http://spiff.rit.edu/classes/phys240/lectures/cepheid/cepheid.html>

Supernova de tipo Ia

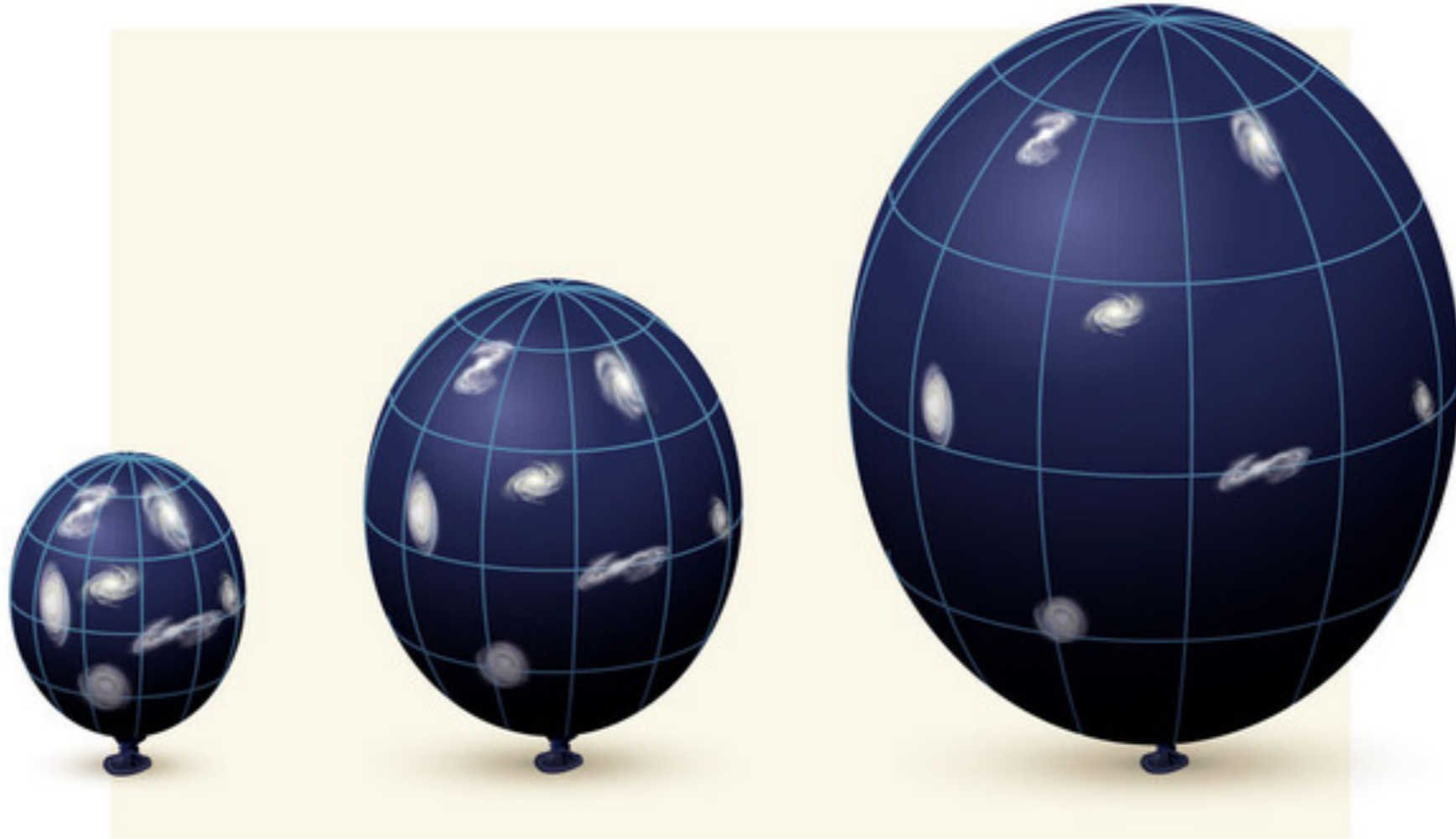


Último degrau da escadaria cósmica: O desvio para o vermelho

O Universo está se expandindo!



Universo em expansão



Definição de redshift: a relação com a velocidade

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_{\text{em}}}$$

Em Relatividade (restrita) podemos relacionar z com a velocidade

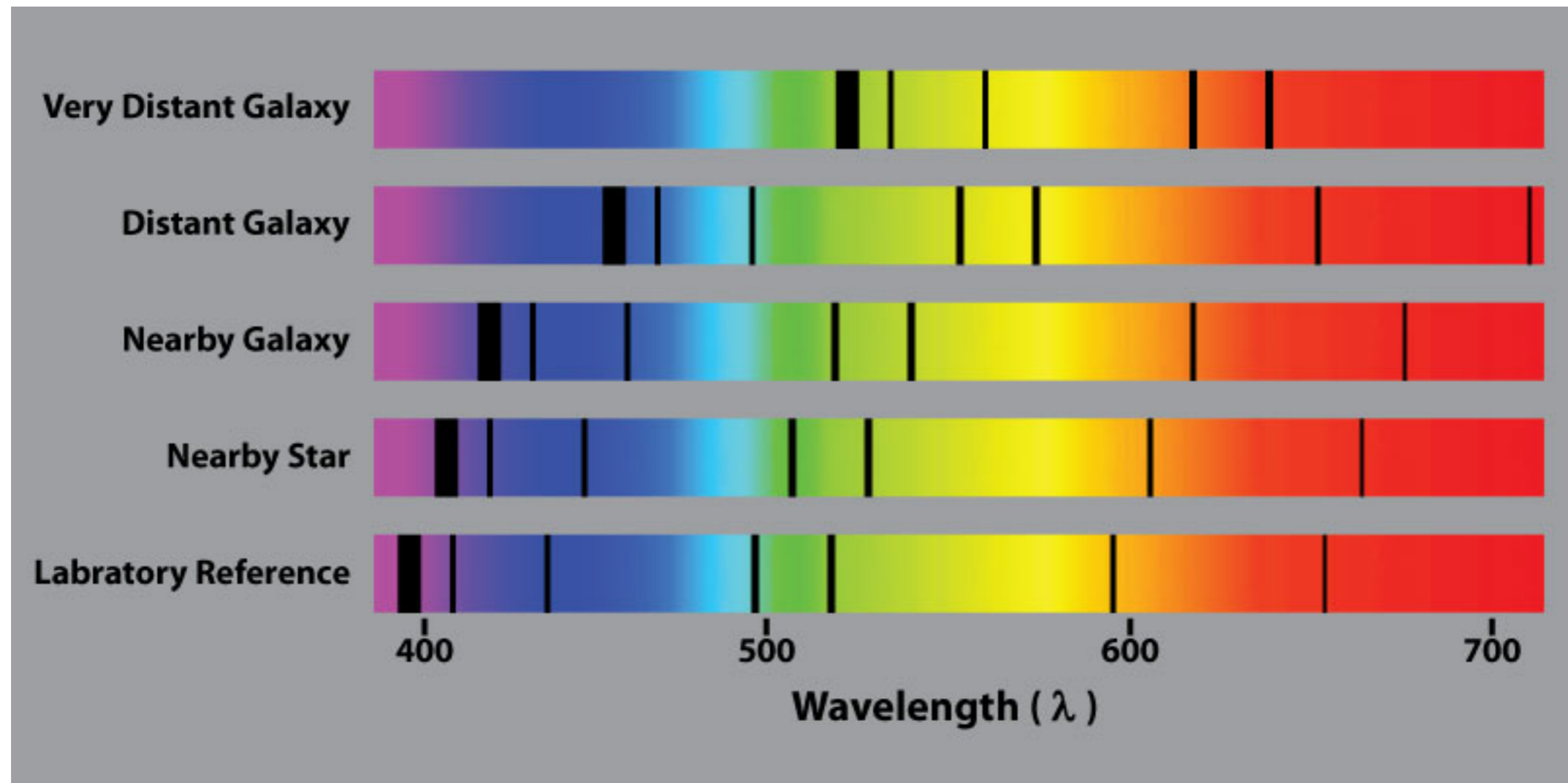
$$1 + z = \gamma \left(1 + \frac{v_{\parallel}}{c} \right)$$

Para velocidades pequenas:

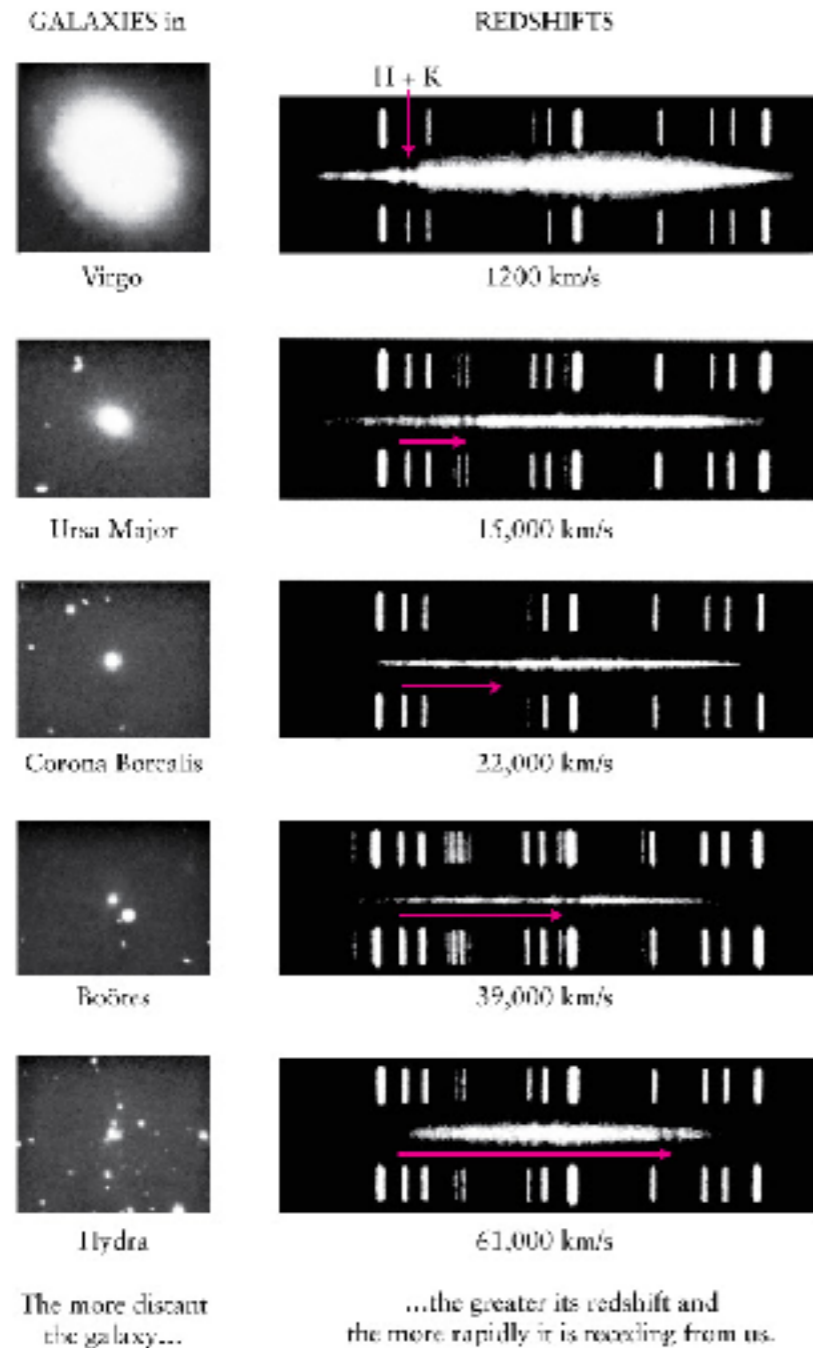
$$z \approx \frac{v_{\parallel}}{c}$$

No caso da cosmologia a velocidade é dada da expansão do Universo

Como se observa o Redshift: espectroscopia



Redshift de galáxias

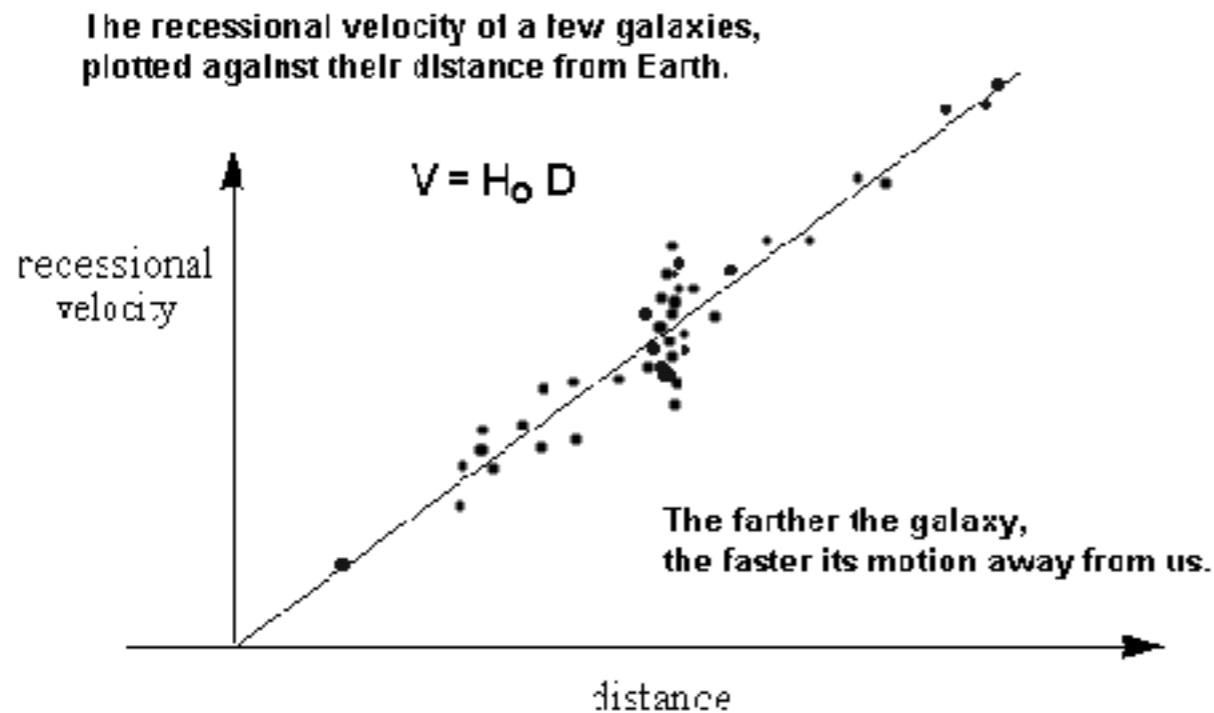


Vesto Slipher (1875-1969)



O último passo, relacionar velocidade com distância: a Lei de Hubble (1929)

Mais distante a galáxia, mais rapidamente se afasta



On this graph, the slope of the line is equal to Hubble's Constant (H_0)

https://www.wvu.edu/skywise/hubble_relationship.html



A constante de Hubble H_0

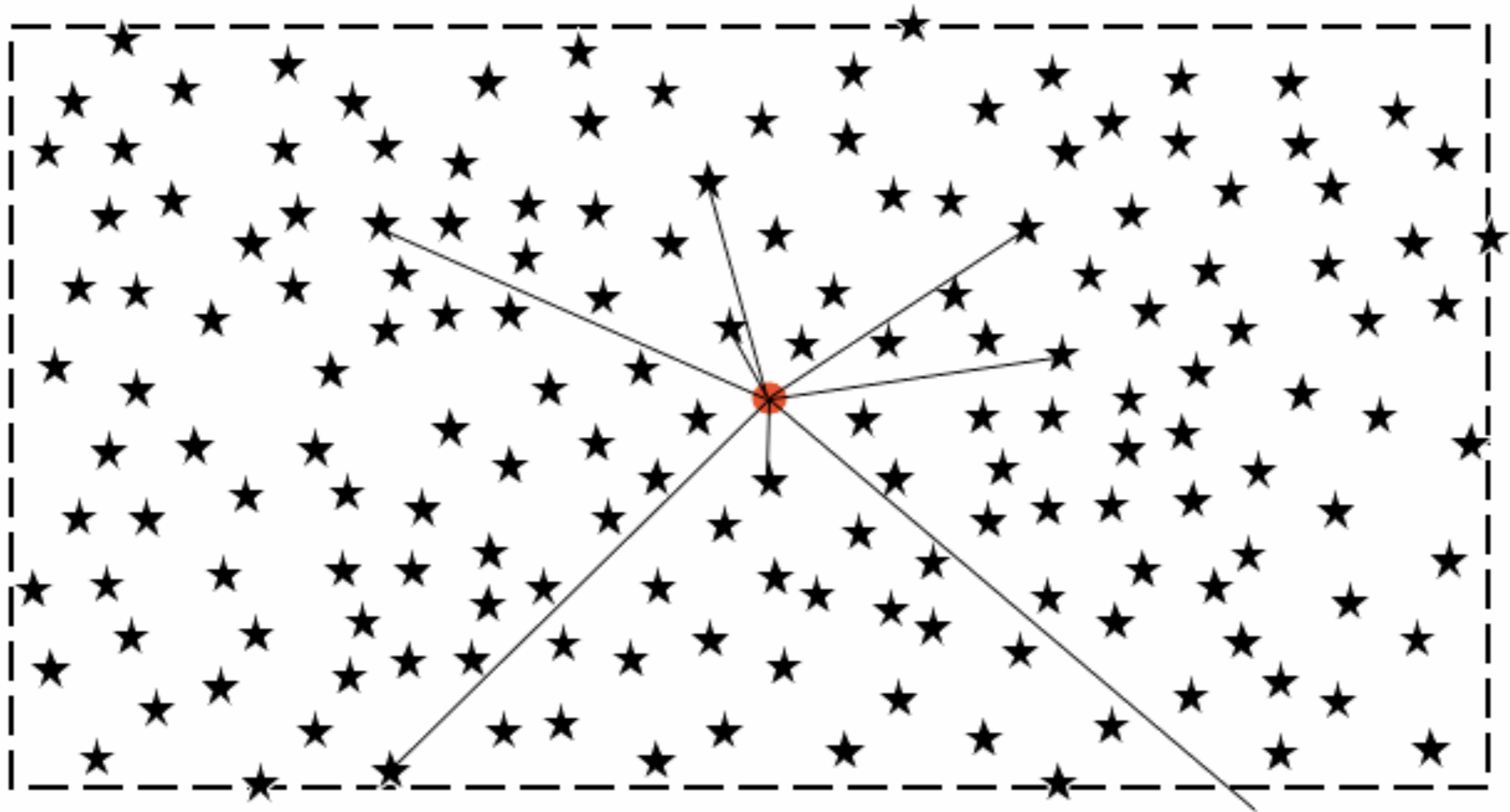
A constante de Hubble foi medida inúmeras vezes, com precisão sempre maior:

$$H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc} = 100 h \text{ km/s/Mpc}$$

A dimensão é de tempo⁻¹, então $1/H_0$ dá uma ideia da idade do universo: $10 h^{-1} \text{ Gyr}$

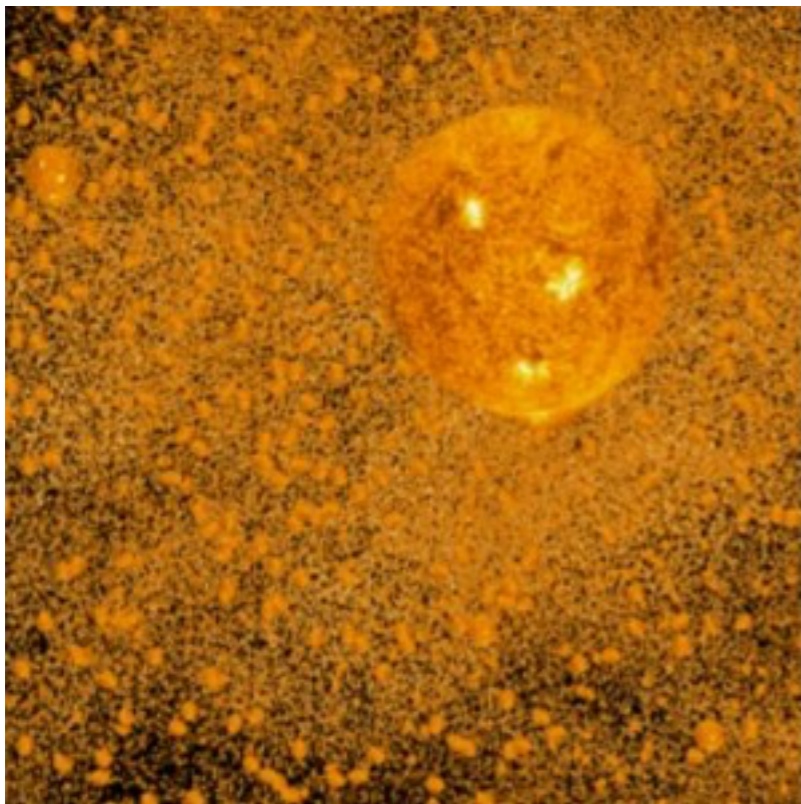
Ao mesmo tempo c/H_0 dá a ordem de magnitude do tamanho do universo visível: $3 h^{-1} \text{ Gpc}$

Dedução lógica da expansão do Universo.
Paradoxo de Olbers (1758-1840): porque o
céu de noite é escuro?



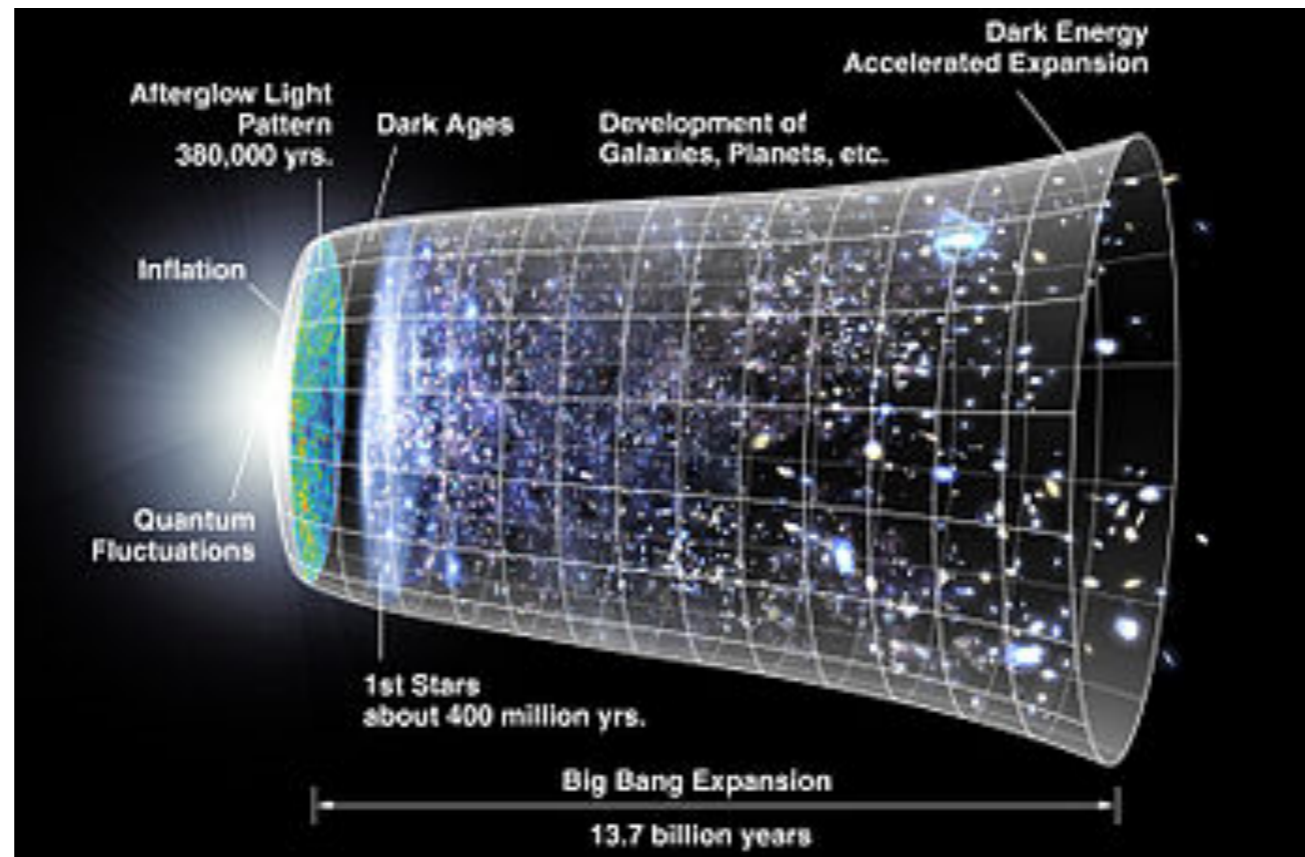
O paradoxo de Olbers

Suponha o universo ser infinito, eterno e conter infinitas estrelas distribuídas uniformemente. Então, o céu de noite deveria ser claro.



- O Universo não é infinito, não tem infinitas estrelas;
- O Universo não é eterno, a luz de algumas estrelas não chegou ainda;
- O Universo está em expansão, a luz de algumas estrelas nunca chegará até nós.

De onde veio a expansão? Big Bang!



A teoria do Big Bang

- O Universo evolve se expandindo de um estado quente e denso (Hot Big Bang) num estado mais frio e diluído.
- Sucessos observacionais: expansão, CMB, abundância dos elementos (nucleossíntese primordial) e a formação das galáxias e da estrutura em grande escala.
- Problema: a singularidade.

