

---

# INTRODUÇÃO À COSMOLOGIA

Oliver F. Piattella  
*Università degli Studi dell'Insubria e UFES*

17 Setembro 2022

**Universo no Parque**





---

# COSMO-UFES



<http://www.cosmo-ufes.org>

<https://ppgcosmo.cosmo-ufes.org/>

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



# COMO



---

# SUMÁRIO

- **O que é Cosmologia?**
- **As distâncias cosmológicas e a Escadaria Cósmica**
- **O universo em expansão**



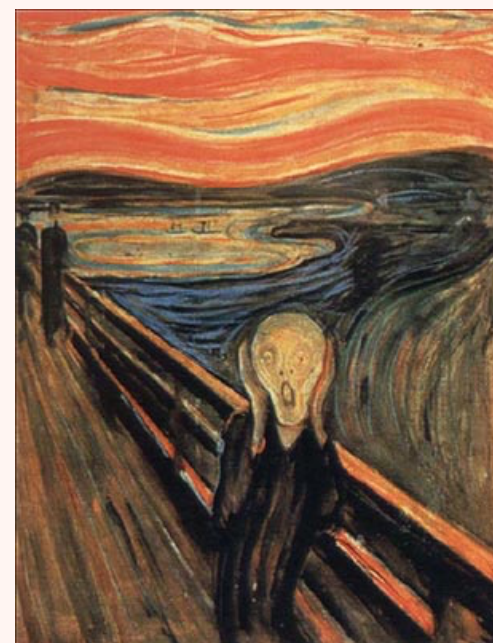
---

# COSMOLOGIA

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

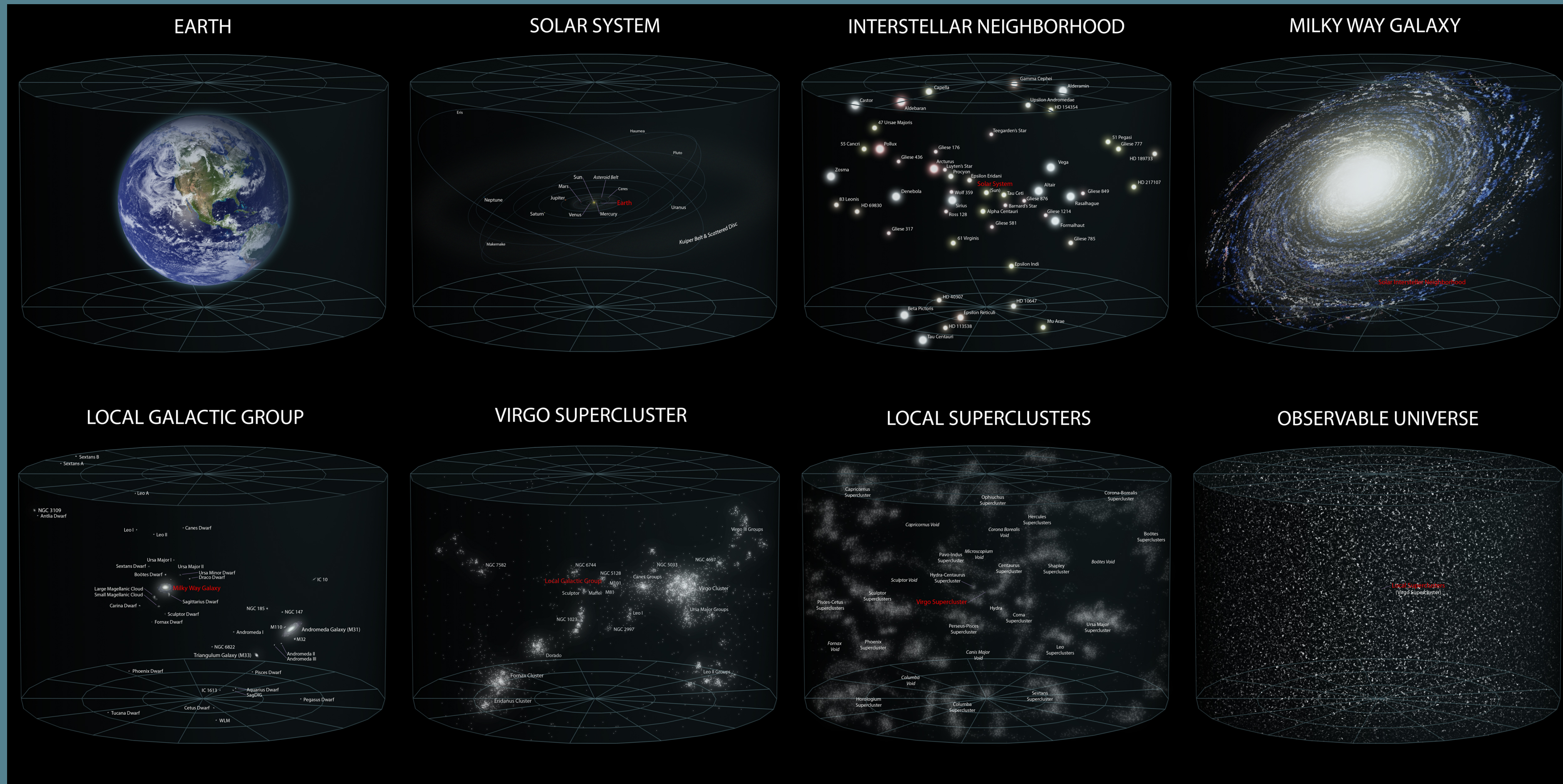
**Estudo do Universo como um todo, em grande escala, procurando entender:**

- **A sua origem (?)**
- **A sua estrutura e composição (como se formaram as galáxias, as estrelas, os planetas, ...)**
- **A sua evolução**
- **O seu fim (?)**





# Onde estamos e em que escalas começa a Cosmologia?



<http://www.spaceexplained.com>



---

# PEQUENA HISTÓRIA 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:

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

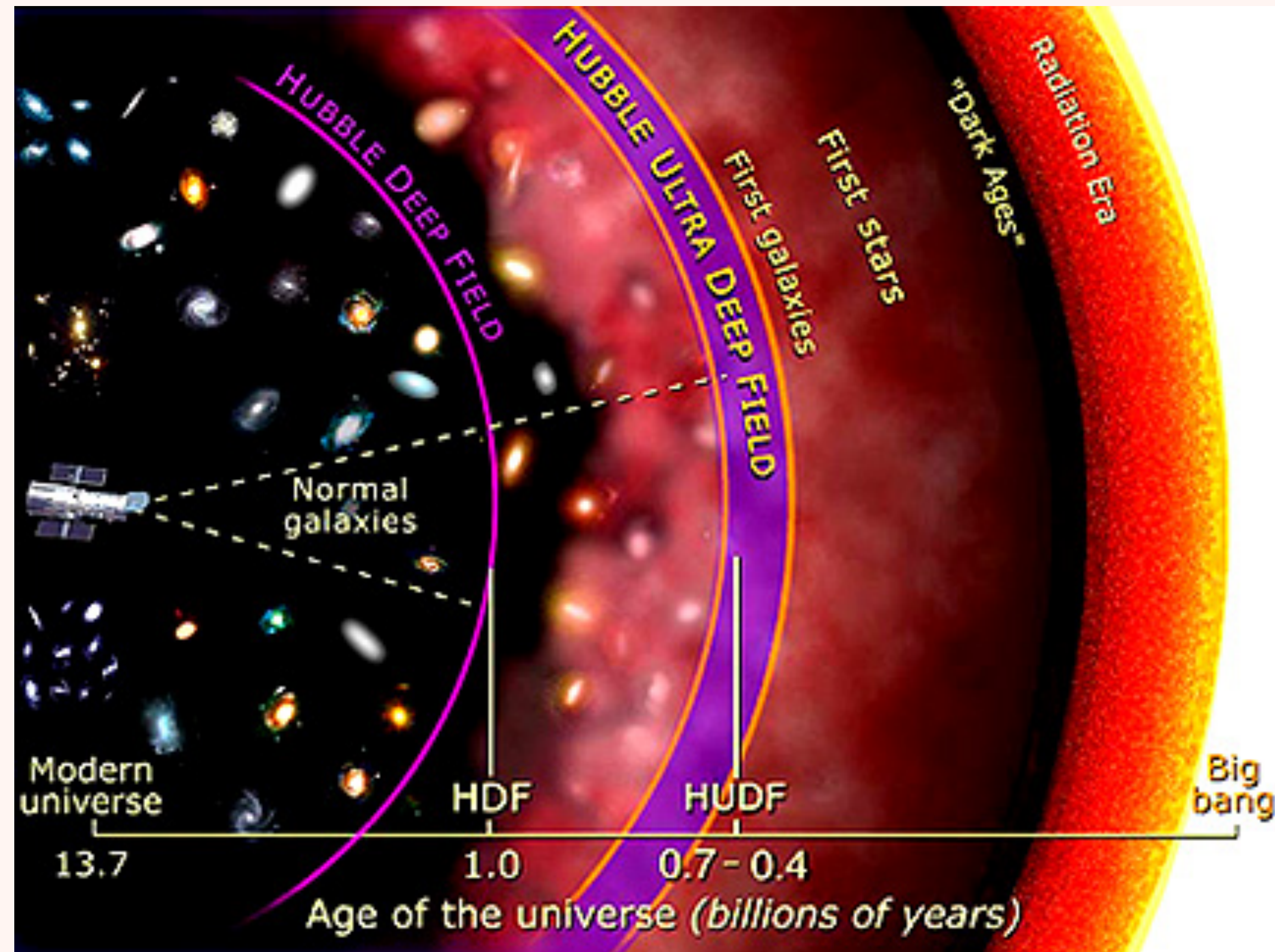
$$1 \text{ pc} = 2,1 \times 10^5 \text{ AU}$$

Dada a dificuldade de esticarmos réguas daqui até as galáxias, mais comum é o uso do desvio para o vermelho (*redshift*, indicado com a letra *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  $\Rightarrow$  "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 (Capital do Império, centro da Via Láctea): 8 kpc**
- **Tamanho da Via Láctea: 50 kpc**
- **Distância até Andromeda: 1 Mpc**



---

# A GALÁXIA MAIS DISTANTE OBSERVADA

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



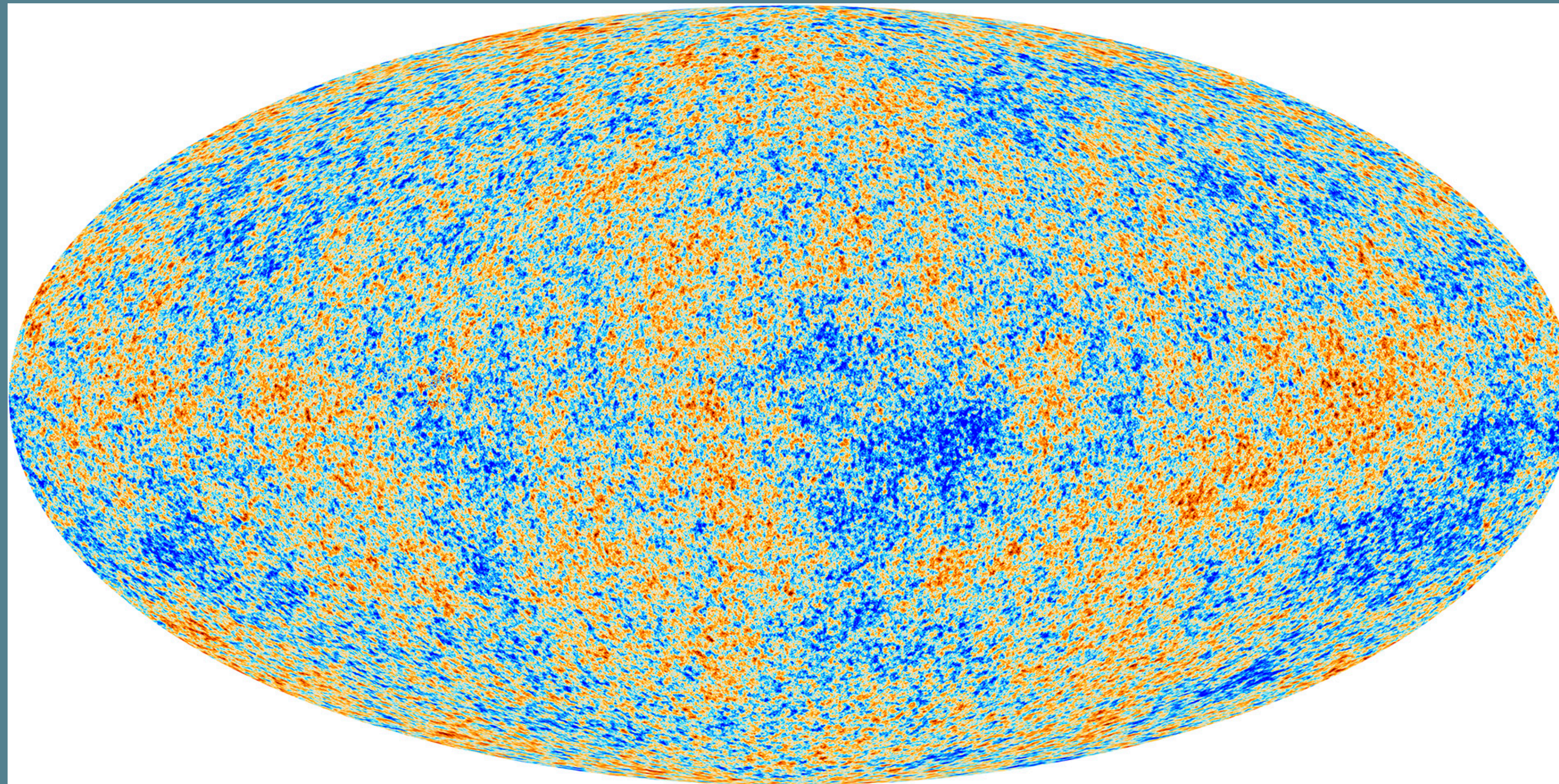
[Spitzer Space Telescope's Great Observatories Origins Deep Survey-North \(GOODS-North\)](#)



---

## Fundo cósmico de microondas (Cosmic Microwave Background, CMB)

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



<http://www.esa.int>

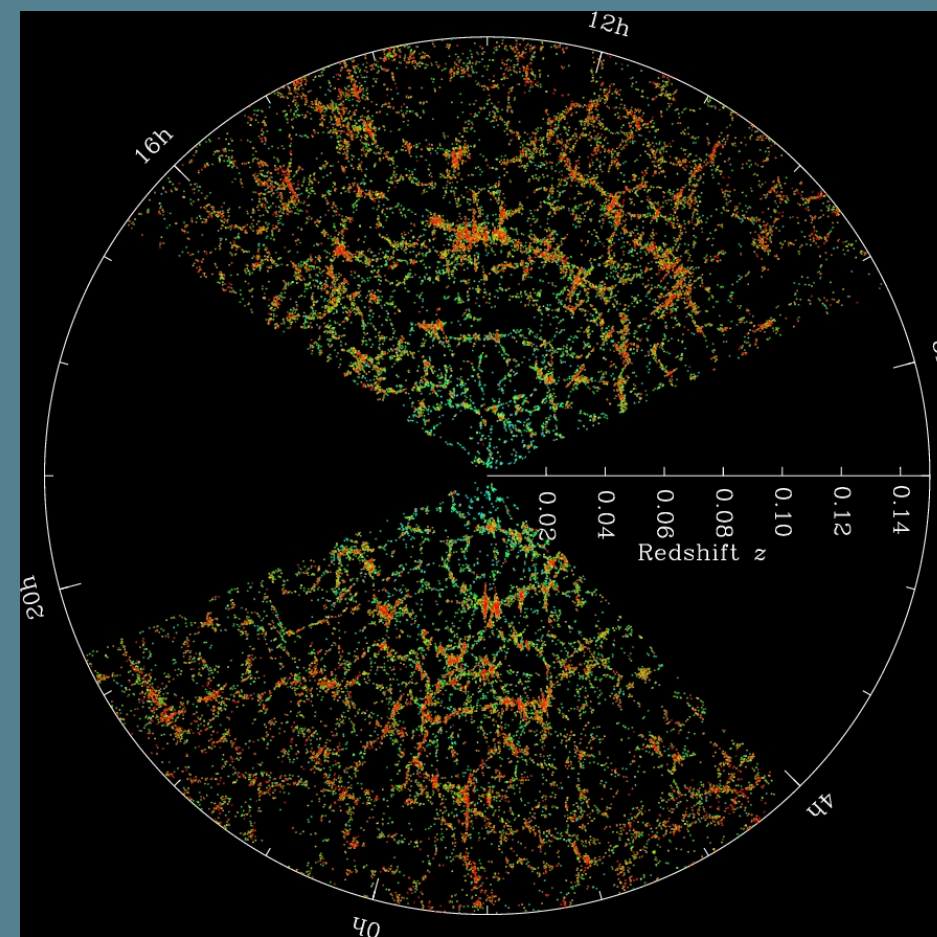


---

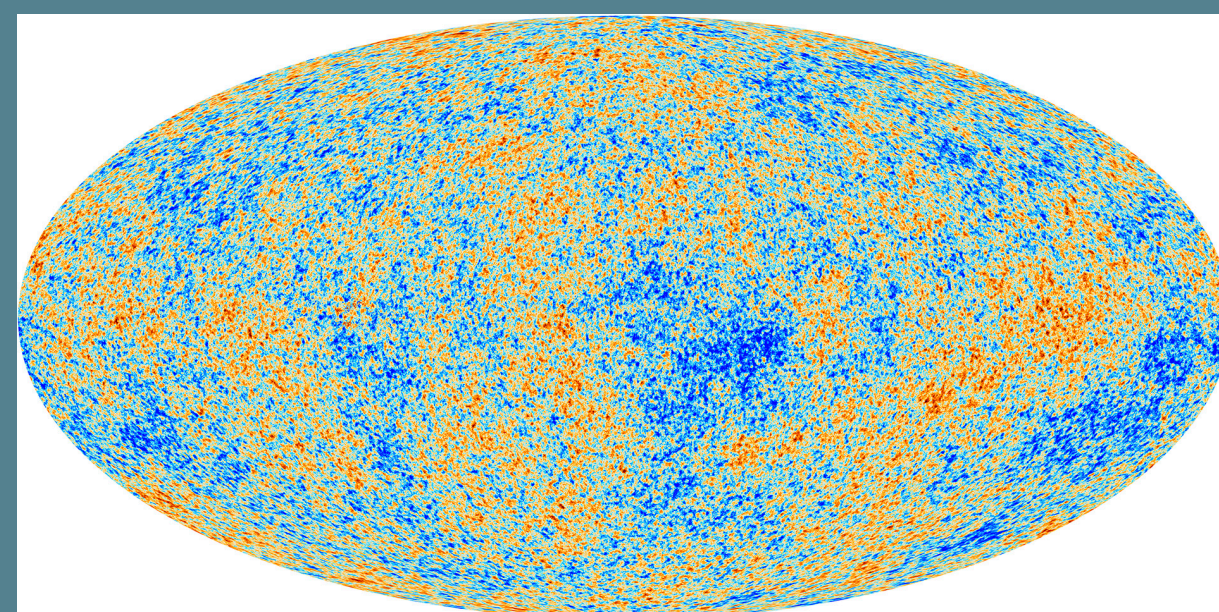
# FONTES IMPORTANTES PARA COSMOLOGIA

- **Estrelas, mas não todas: Supernovae de tipo Ia. Vela 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.**

# A cosmologia é importante para a física das partículas



<http://www.sdss3.org>



Vínculos sobre a massa do neutrino

$$\sum m_\nu < 0.17 \text{ eV}$$

95% CL  
arXiv:1703.10829



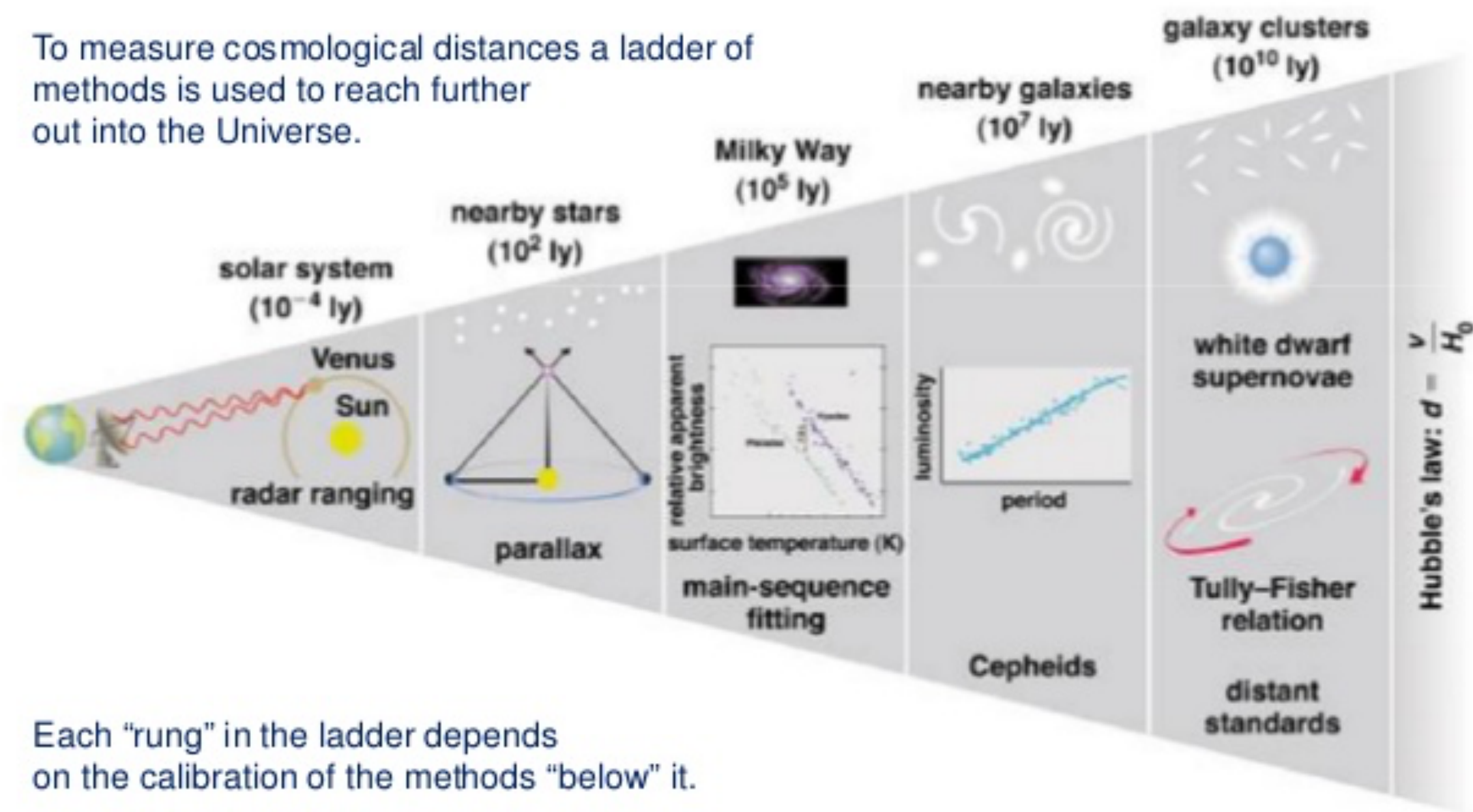
# ESCADARIA CÓSMICA



Size and Scale of the Universe

## THE COSMIC LADDER

To measure cosmological distances a ladder of methods is used to reach further out into the Universe.



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

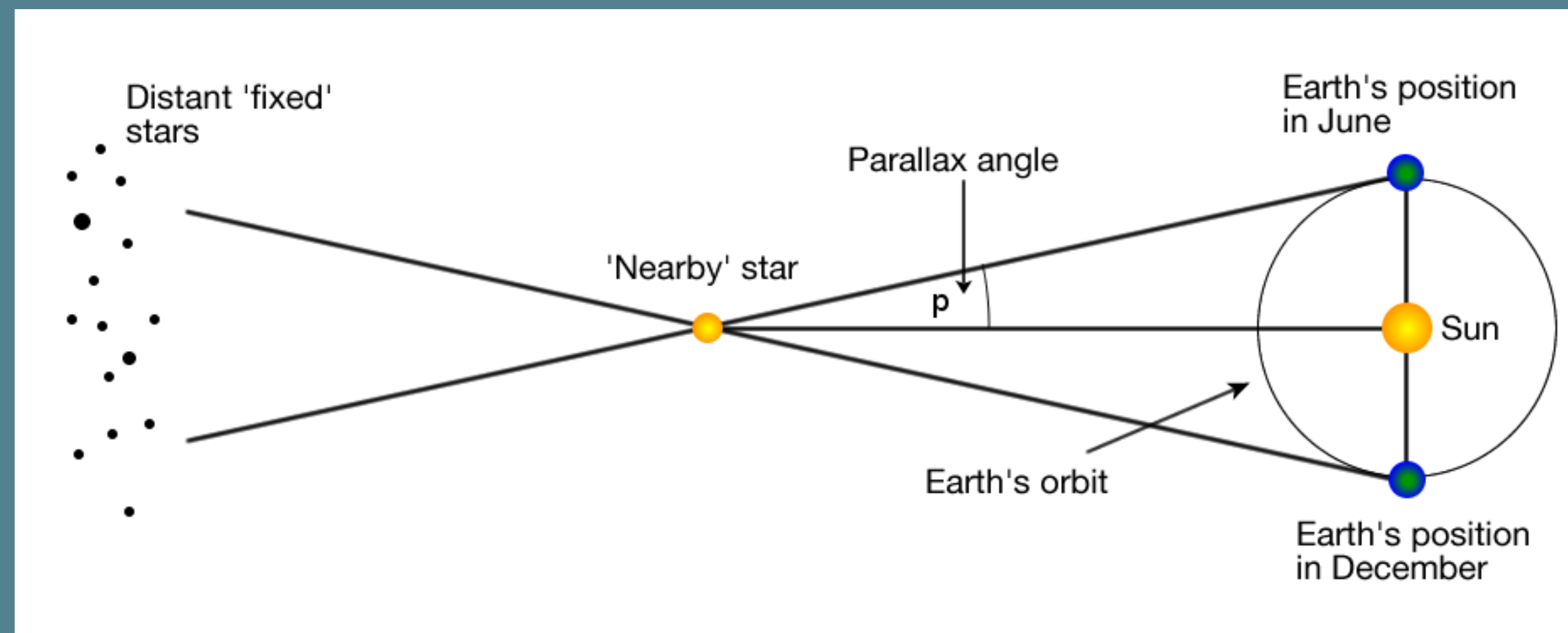
Image credit: Addison Wesley

# Paralaxe

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.

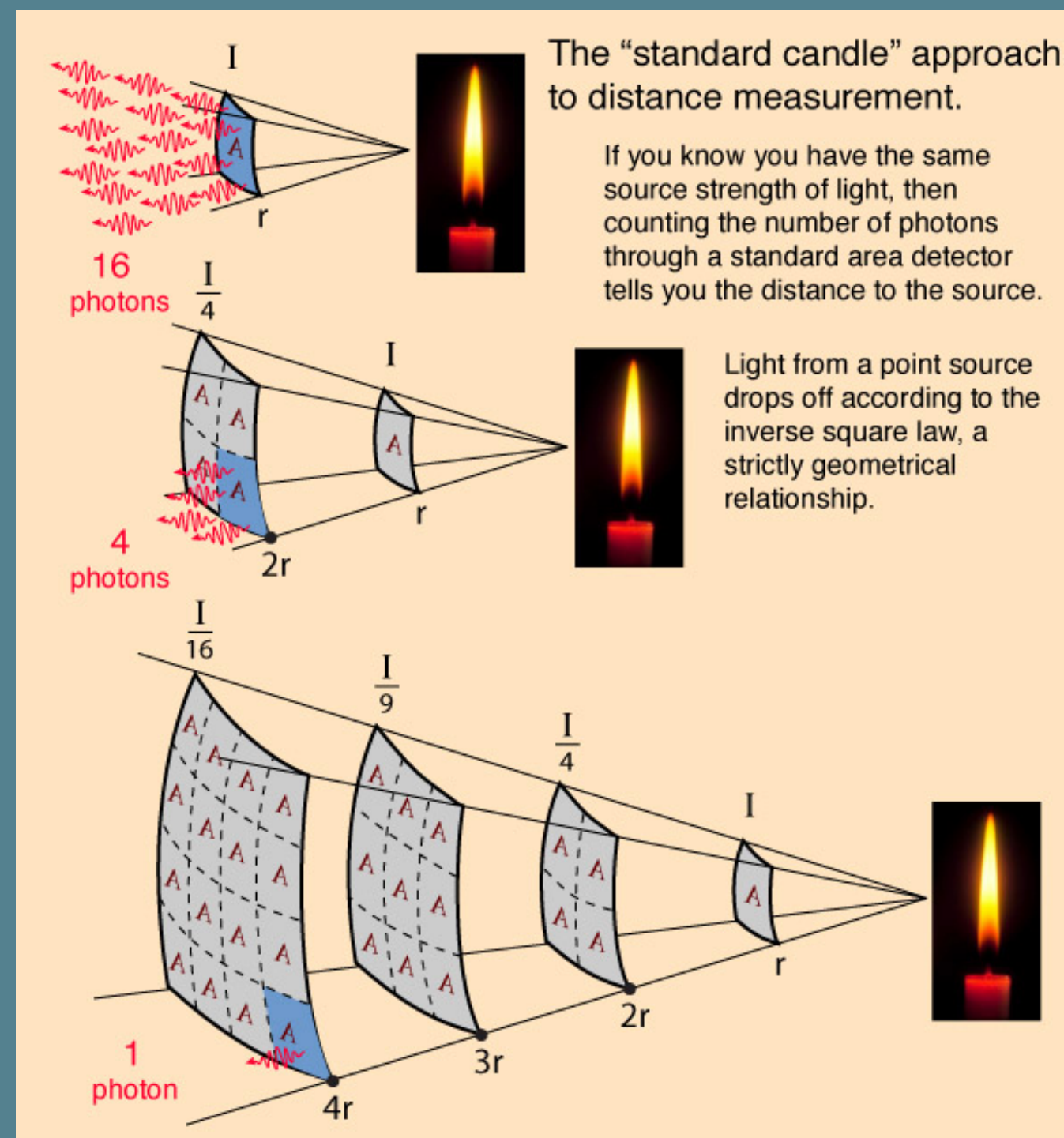


<http://www.physics.smu.edu/jcotton/ph1311/ch10a.htm>



# Vela padrão

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

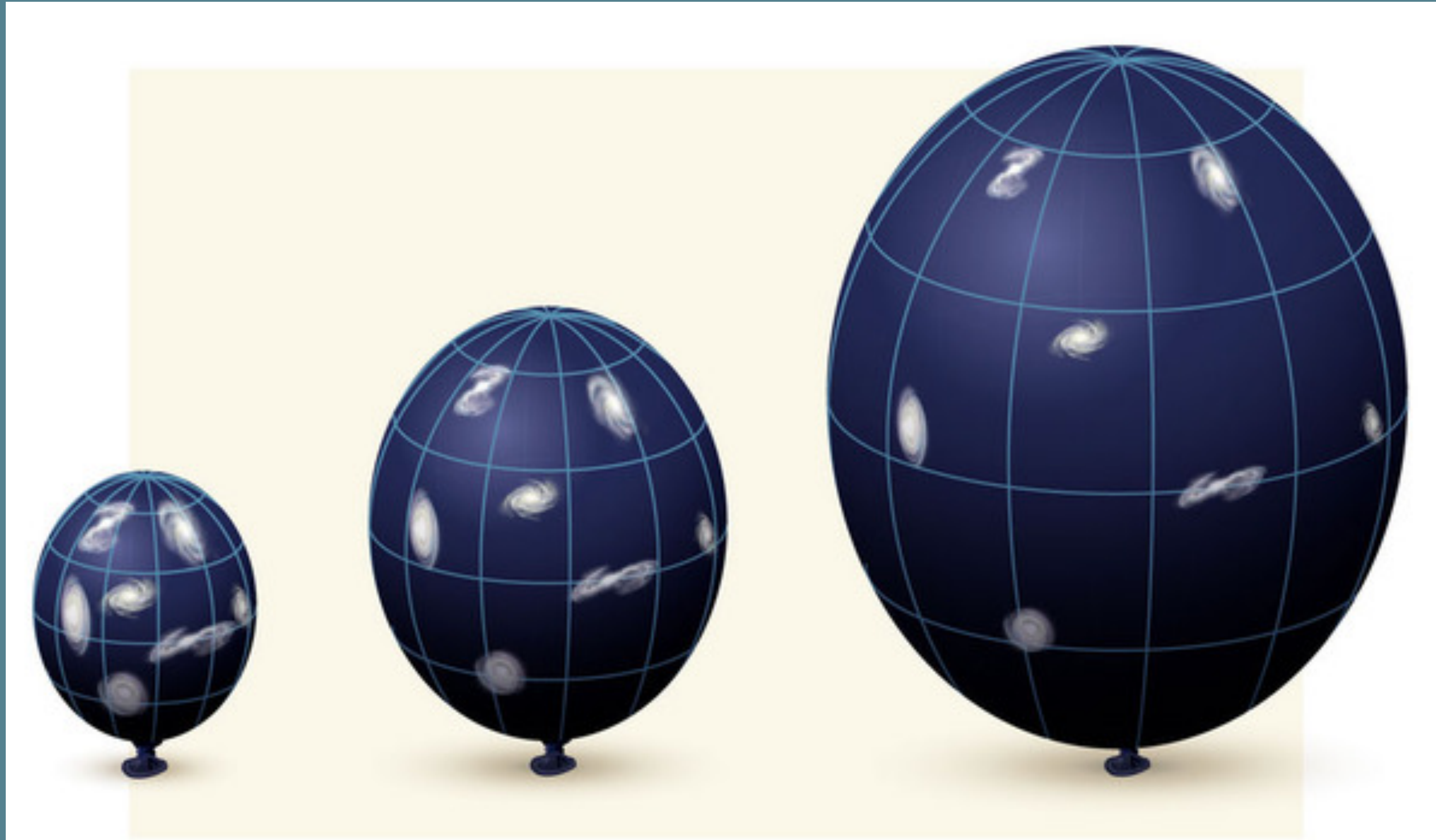


$$\mathcal{F} = \frac{\mathcal{L}}{4\pi d^2} \Rightarrow d^2 = \frac{\mathcal{L}}{4\pi \mathcal{F}}$$

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

---

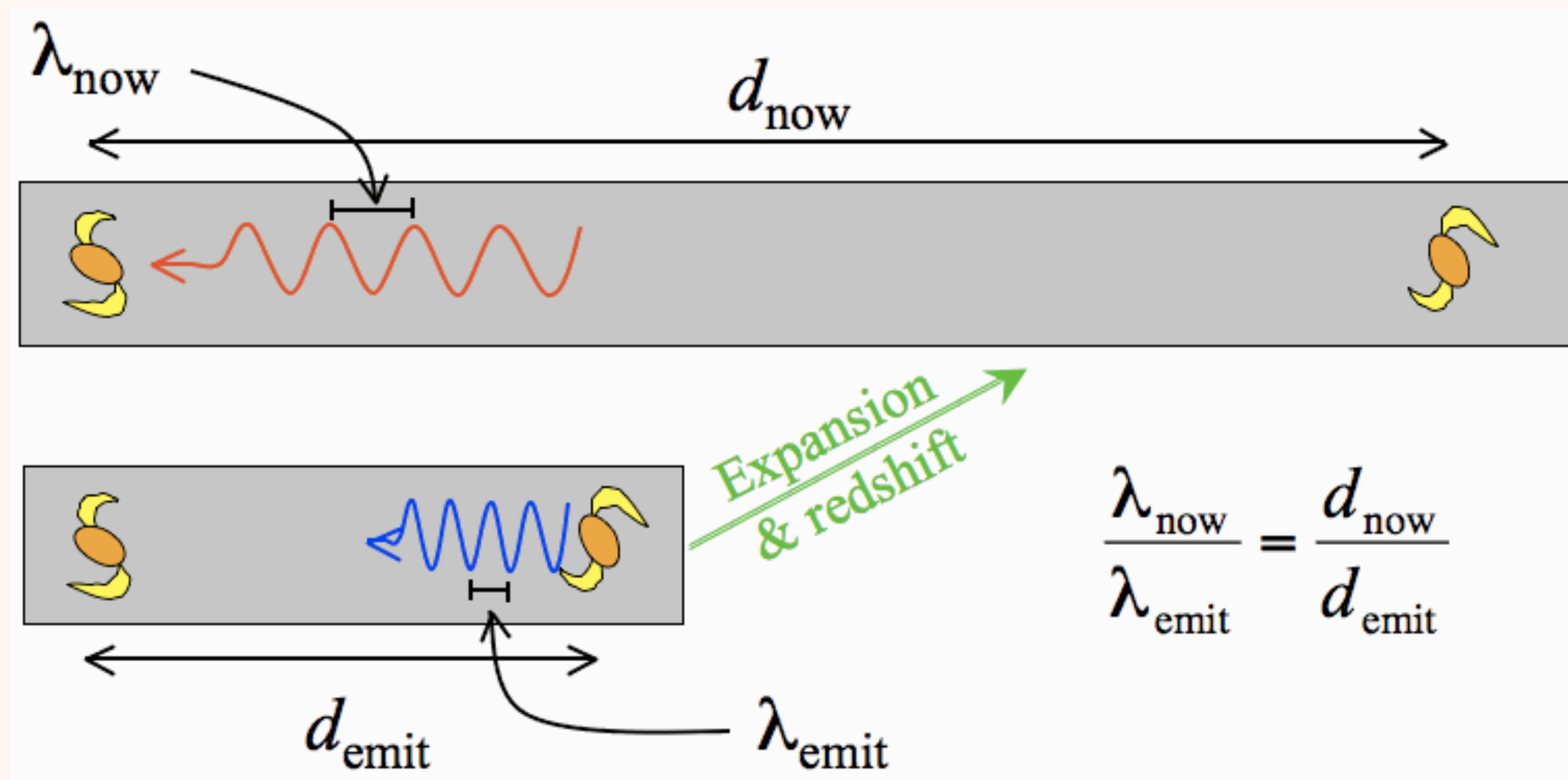
# UNIVERSO EM EXPANSÃO





# ÚLTIMO DEGRAU DA ESCADARIA CÓSMICA: O DESVIO PARA O VERMELHO

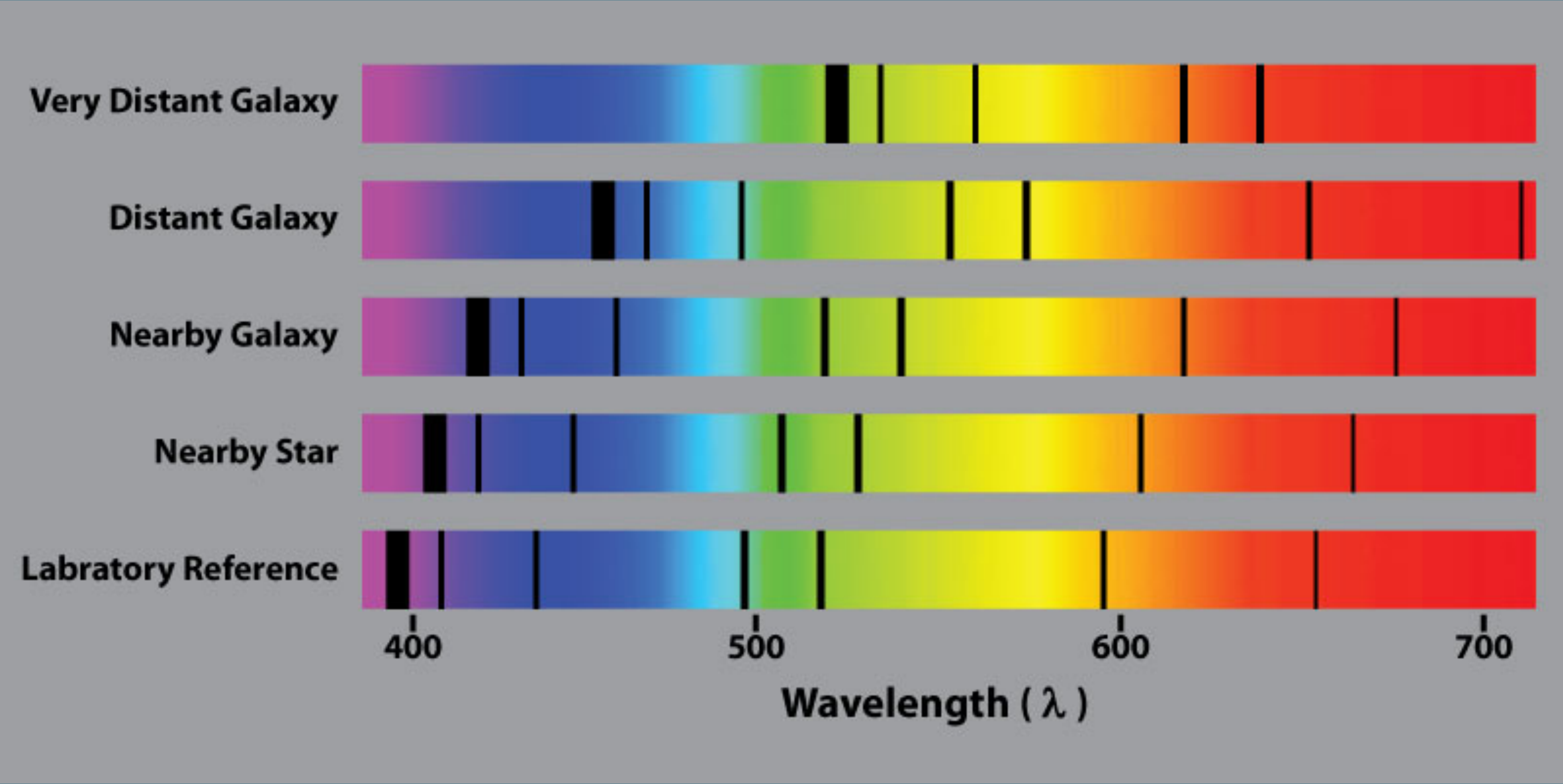
O Universo está se expandindo!



[http://people.virginia.edu/~dmw8f/astr5630/Topic16/Lecture\\_16.html](http://people.virginia.edu/~dmw8f/astr5630/Topic16/Lecture_16.html)



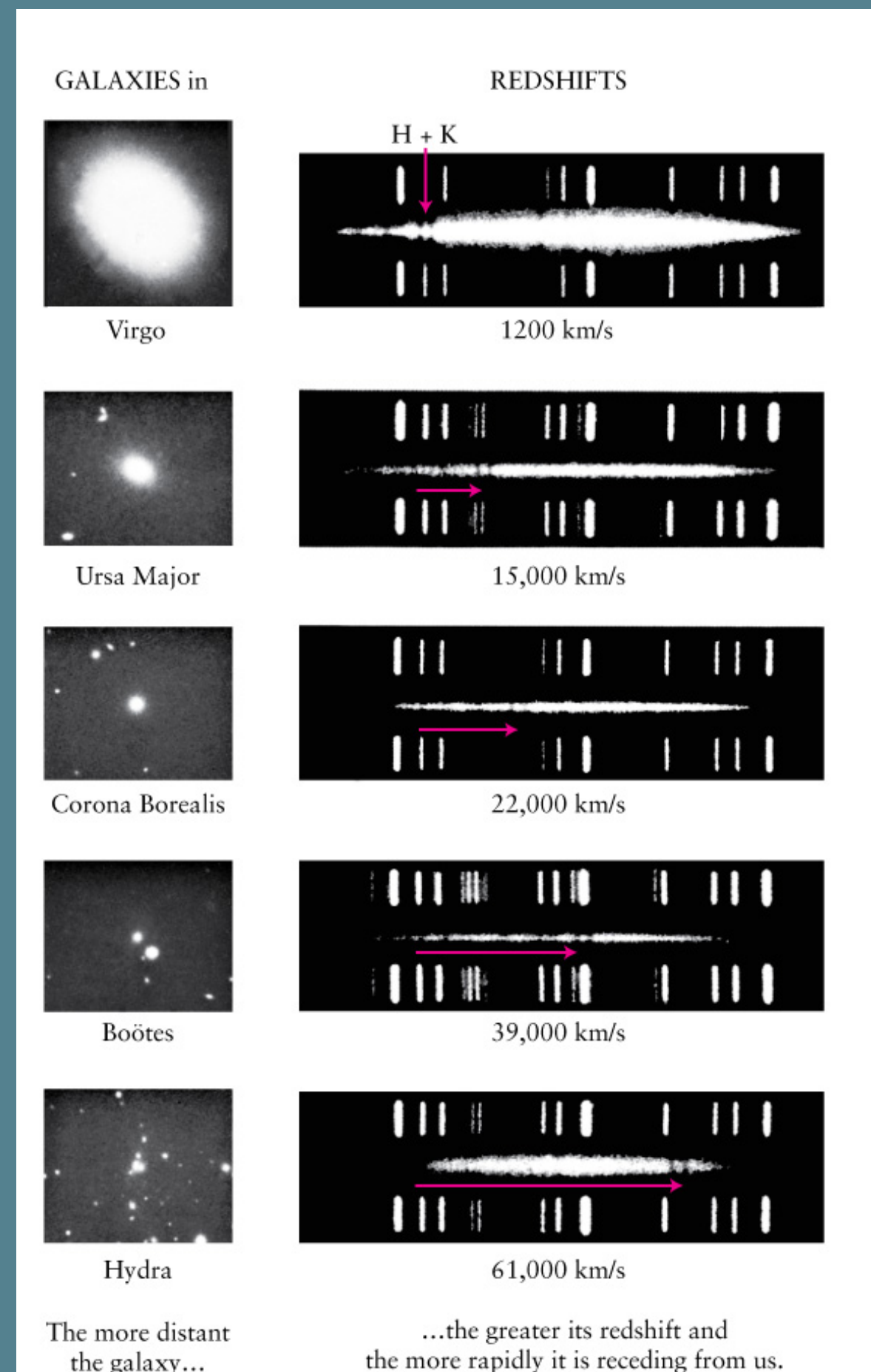
# Como se observa o Redshift: espectroscopia



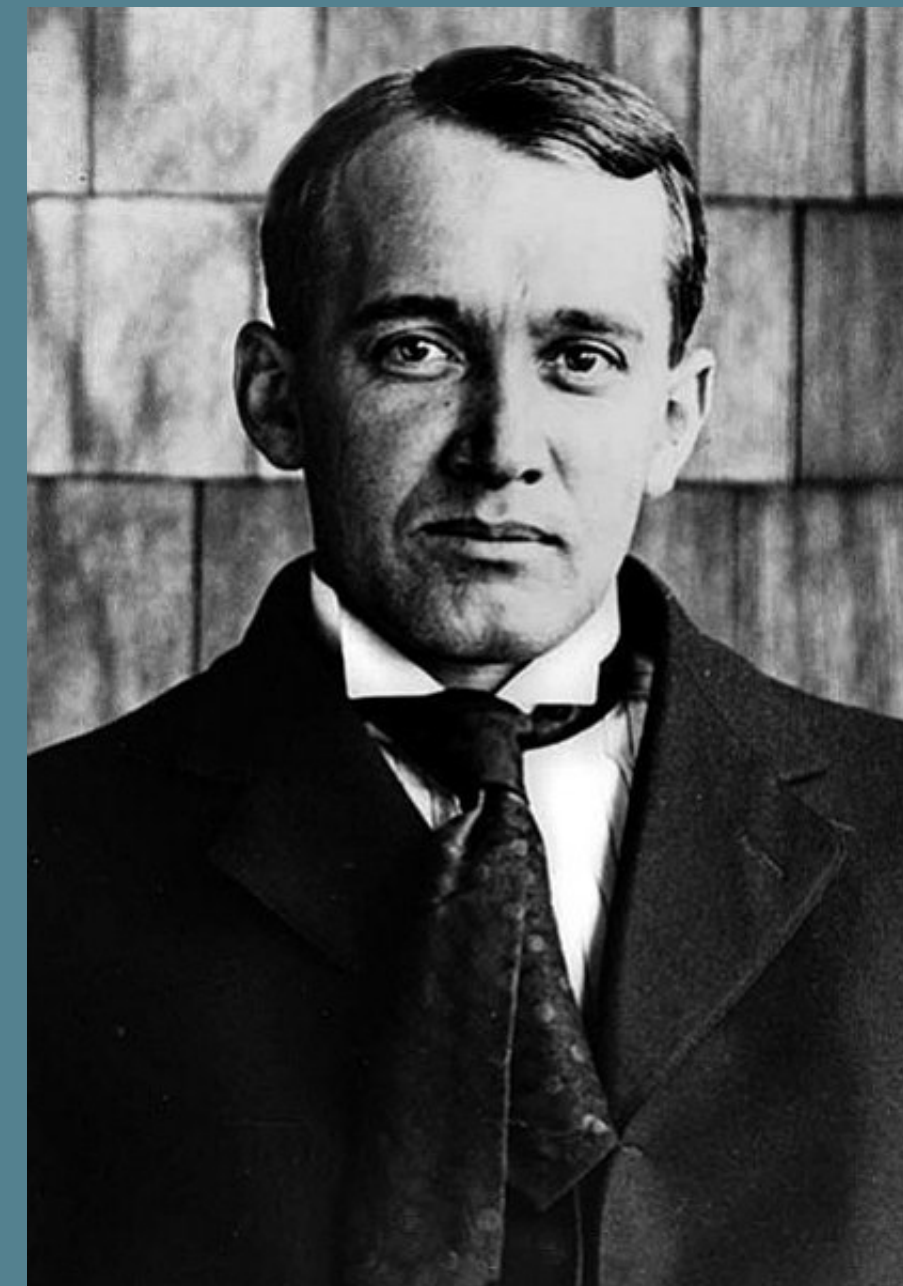
<http://scienceblogs.com/startswithabang/2013/06/12/what-is-the-big-bang-all-about/>



# REDSHIFT DE GALÁXIAS



Vesto Slipher (1875-1969)

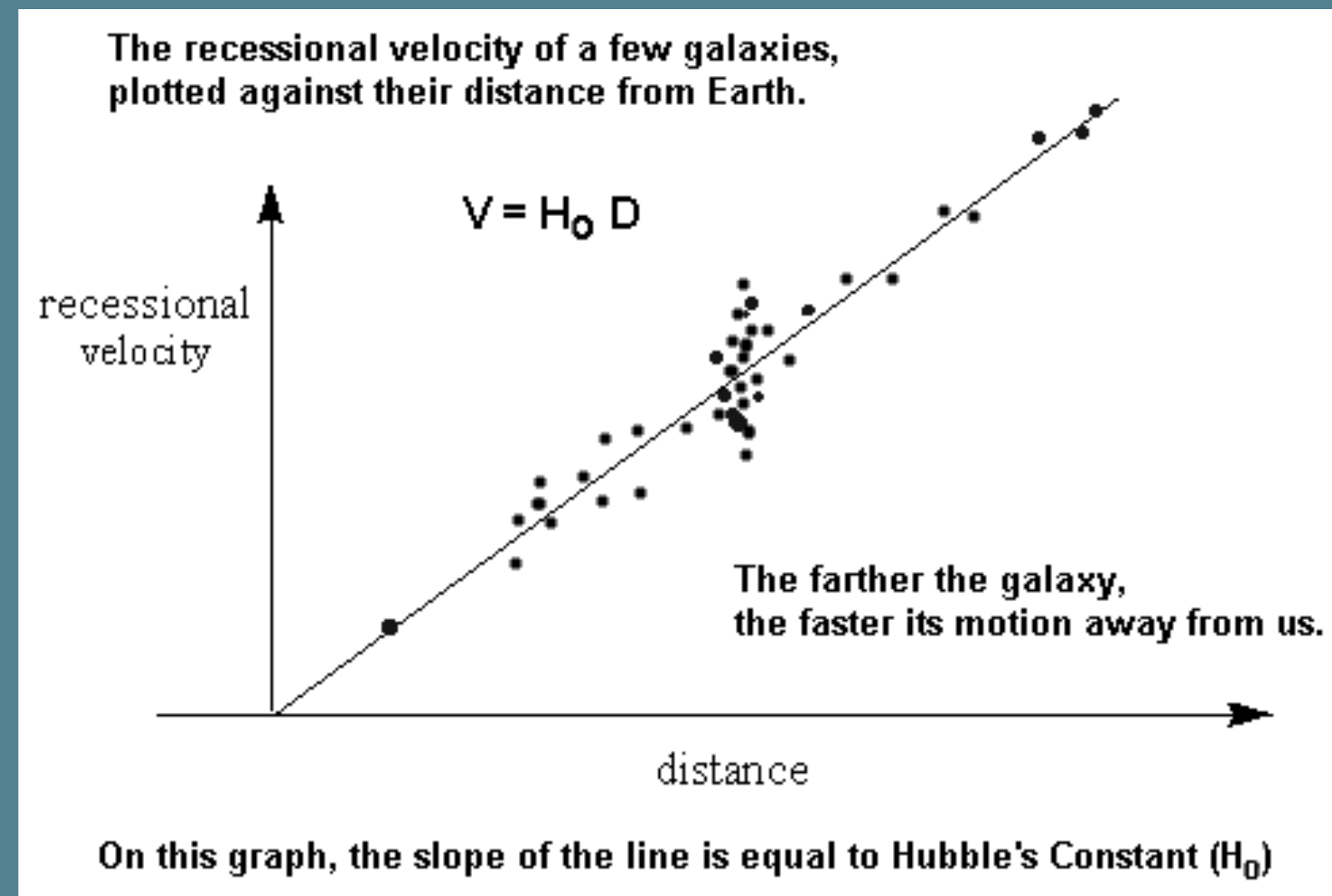


<http://www.public.asu.edu/~atpcs/atpcs/Univ10e/chapter23-05.html>



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

Mais distante a galáxia, mais rapidamente se afasta



[https://www.wvu.edu/skywise/hubble\\_relationship.html](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:**

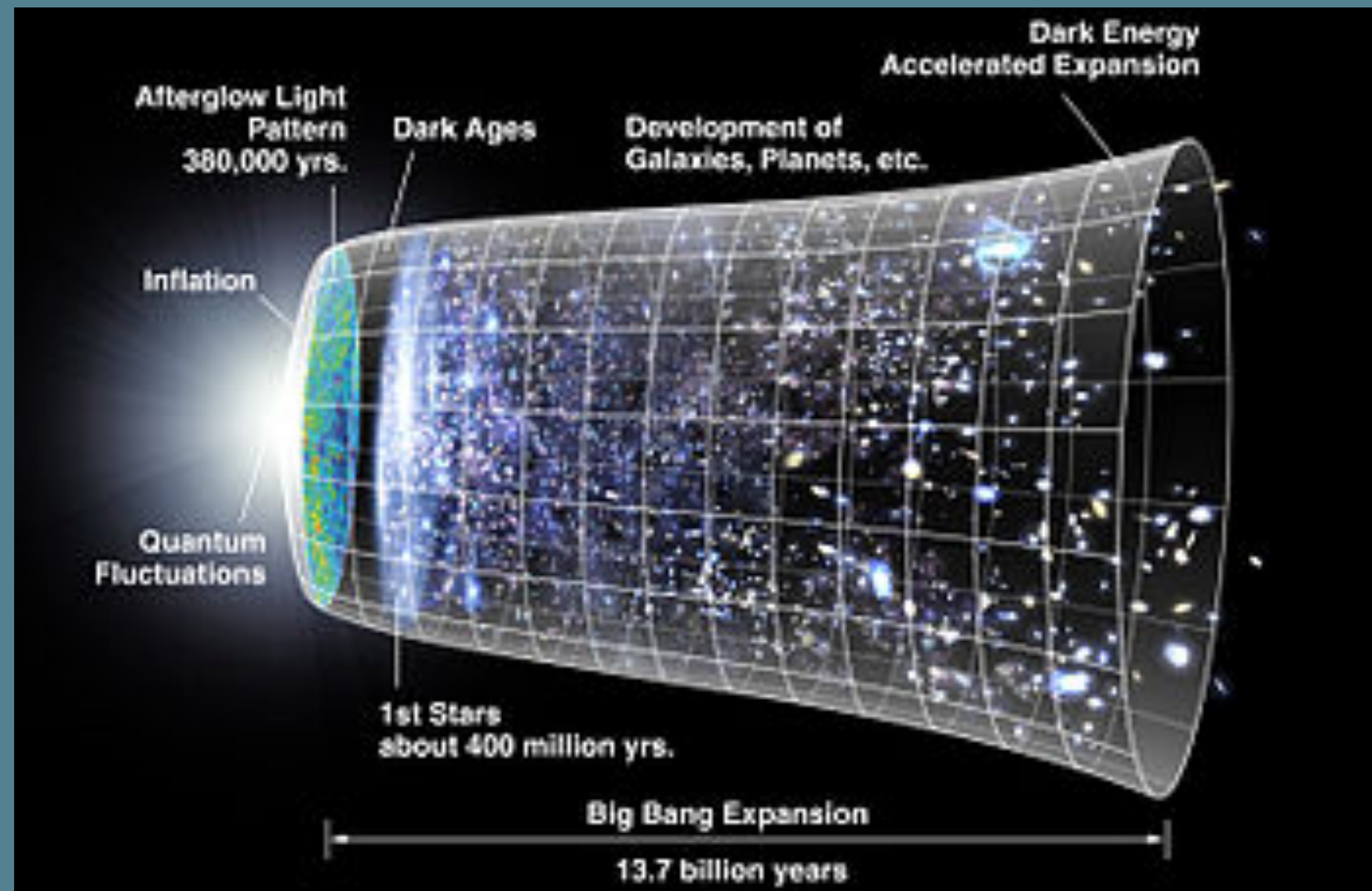
$$H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc} = 100 h \text{ km/s/Mpc}$$

**A dimensão é de tempo<sup>-1</sup>, então  $1/H_0$  dá uma ideia da idade do universo:  $10 h^{-1}$  Gyr**

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



# O QUE É O 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.**



---

# ABORDAGEM MATEMÁTICA À COSMOLOGIA

**Qual interação fundamental determina as propriedades do Universo em grande escala?**

- **Interação forte**
- **Interação fraca**
- **Interação eletromagnética**
- **Interação gravitacional**



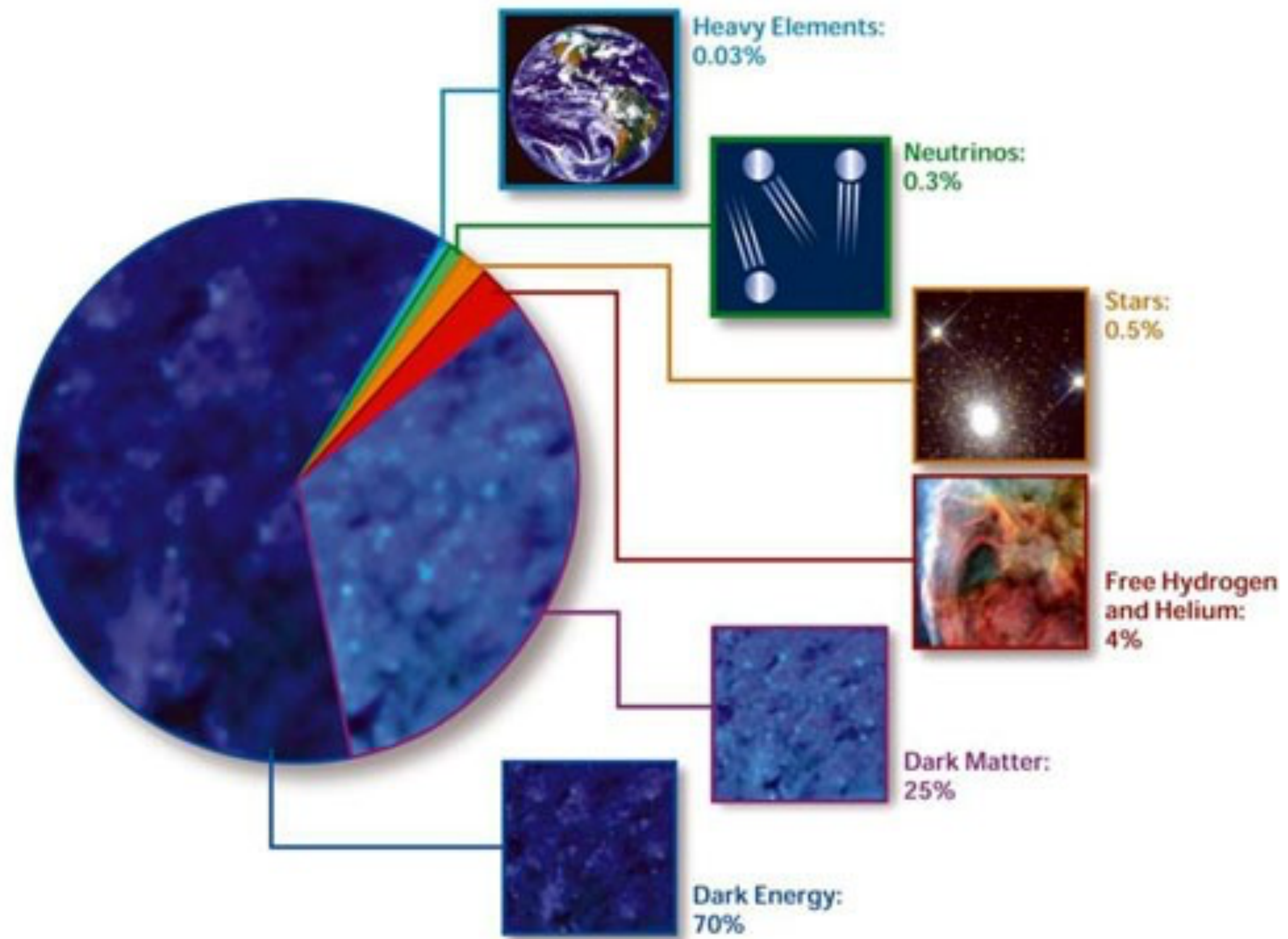
---

# ESCATOLOGIA: UMA COLEÇÃO DE *BIG*

- ***Big Crunch***: a densidade do universo está acima do valor crítico. A expansão desacelera e a um certo ponto inverte de tendência, se tornando uma contração que acaba numa singularidade.
- ***Big Freeze (Big Chill)***: a densidade do universo está abaixo do valor crítico. A expansão dura até a morte térmica (estado de máxima entropia).
- ***Big Rip***: o universo expande tão rapidamente que a distância entre as galáxias se torna infinita num tempo finito.



## COMPOSITION OF THE COSMOS



---

# RESUMO

- **O Cosmo é grande e em expansão -> Desvio para o vermelho e lei de Hubble -> Possibilidade de medirmos a distância de objetos afastados**
- **Cosmologia relativística: métrica FLRW e equações de Friedmann**
- **Expansão acelerada do universo -> Energia Escura**
- **Formação de estruturas, dinâmica galáctica, ... -> Matéria Escura**
- **Matéria escura e energia escura = setor escuro do universo: 95% do conteúdo energético**