

# Introdução à Cosmologia

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

3 Maio 2017



UFES



# Cosmo-UFES



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

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

# Plano do colóquio

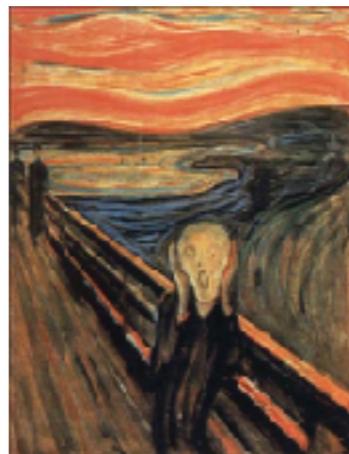
- O que é Cosmologia?
- As distâncias cosmológicas e a Escadaria Cósmica
- O universo em expansão
- A Cosmologia Relativística e as Equações de Friedmann
- Matéria Escura e Energia Escura

# Cosmologia

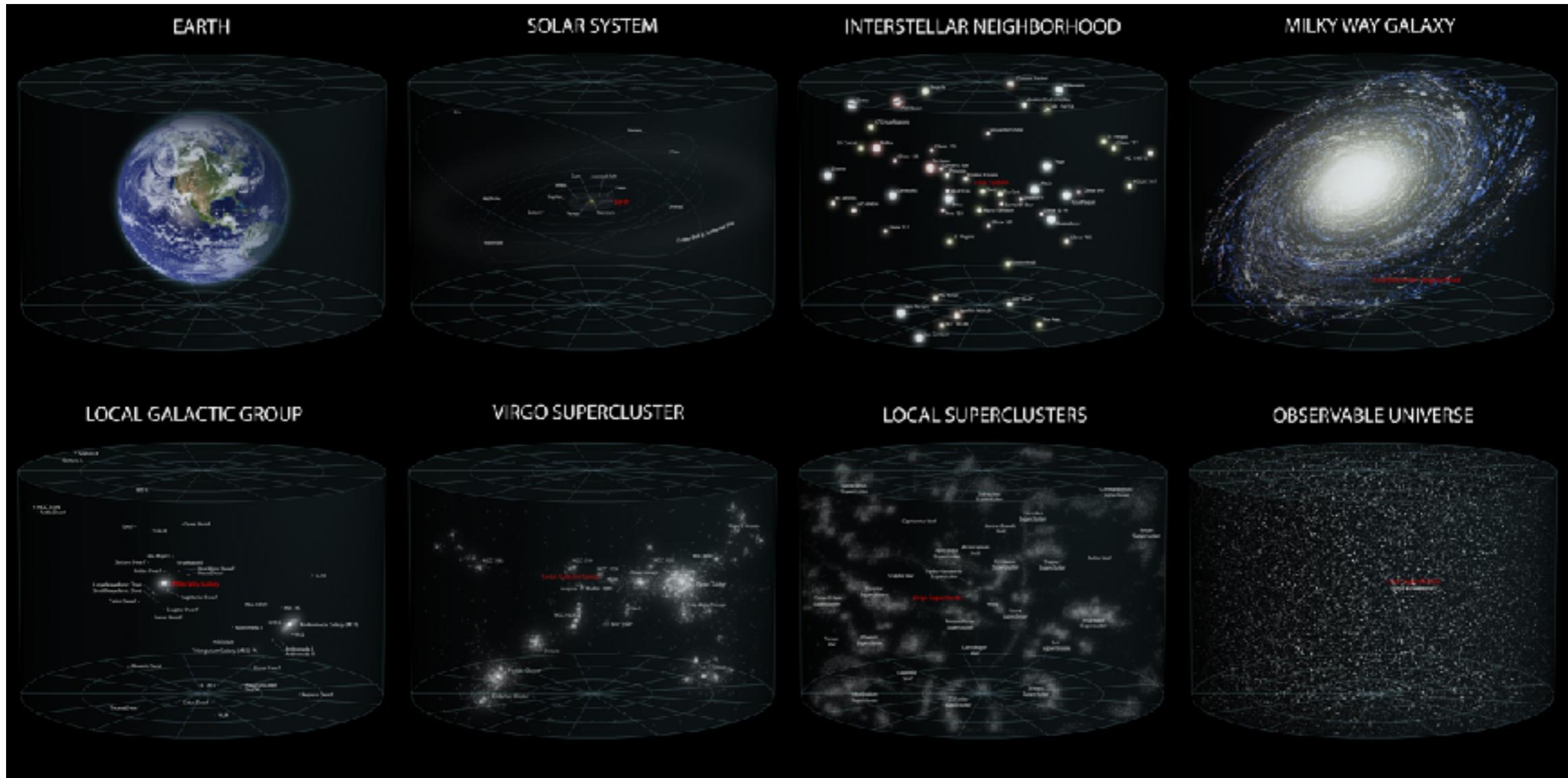
- Cosmos (κόσμος) = Universo, ordem, beleza, ...
- Logos (λόγος) = palavra (estudo, princípio de ordem e conhecimento)

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:

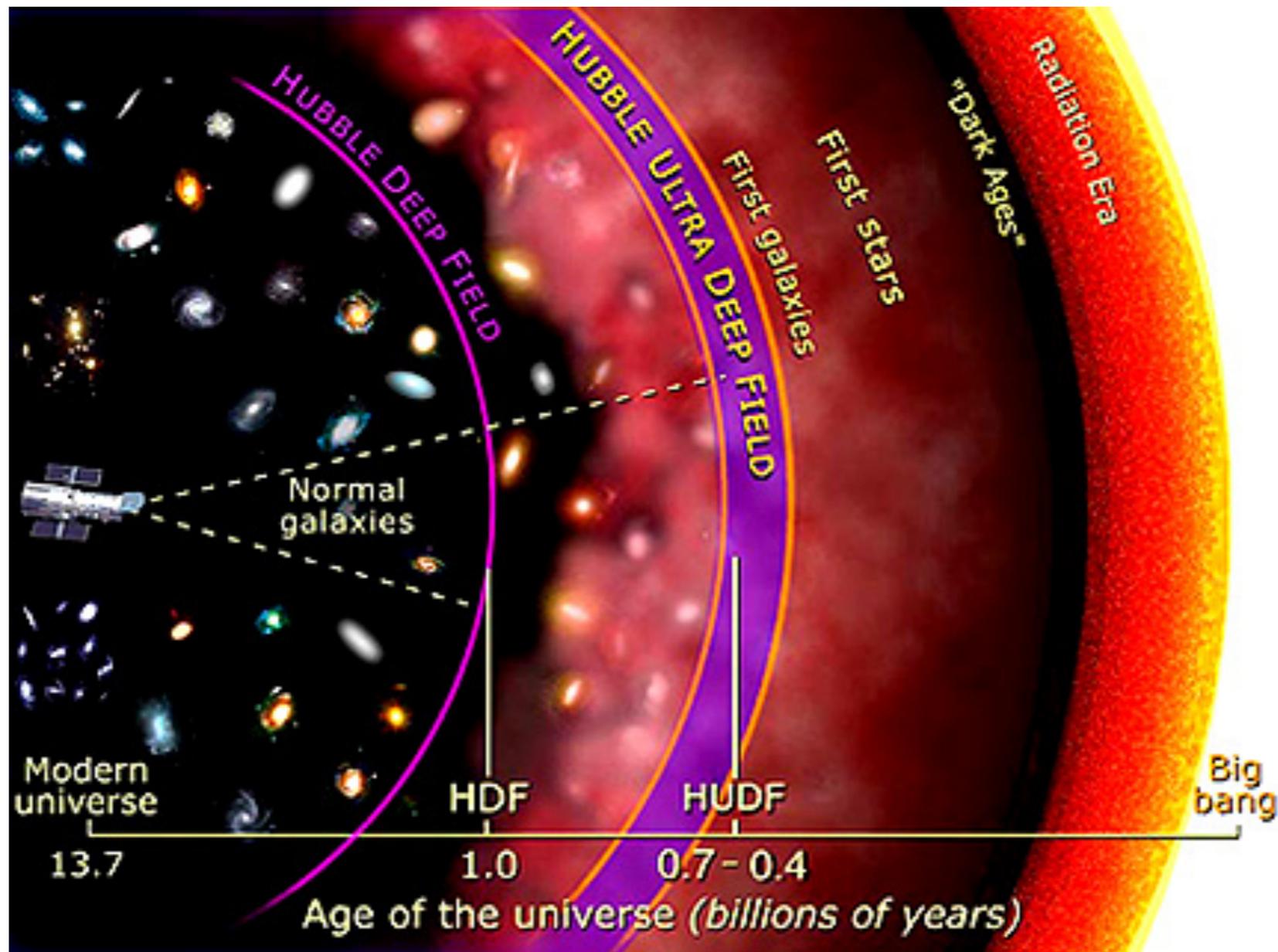
$$1 \text{ AU (unidade astronômica)} = 1,496 \times 10^{11} \text{ m}$$

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

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”

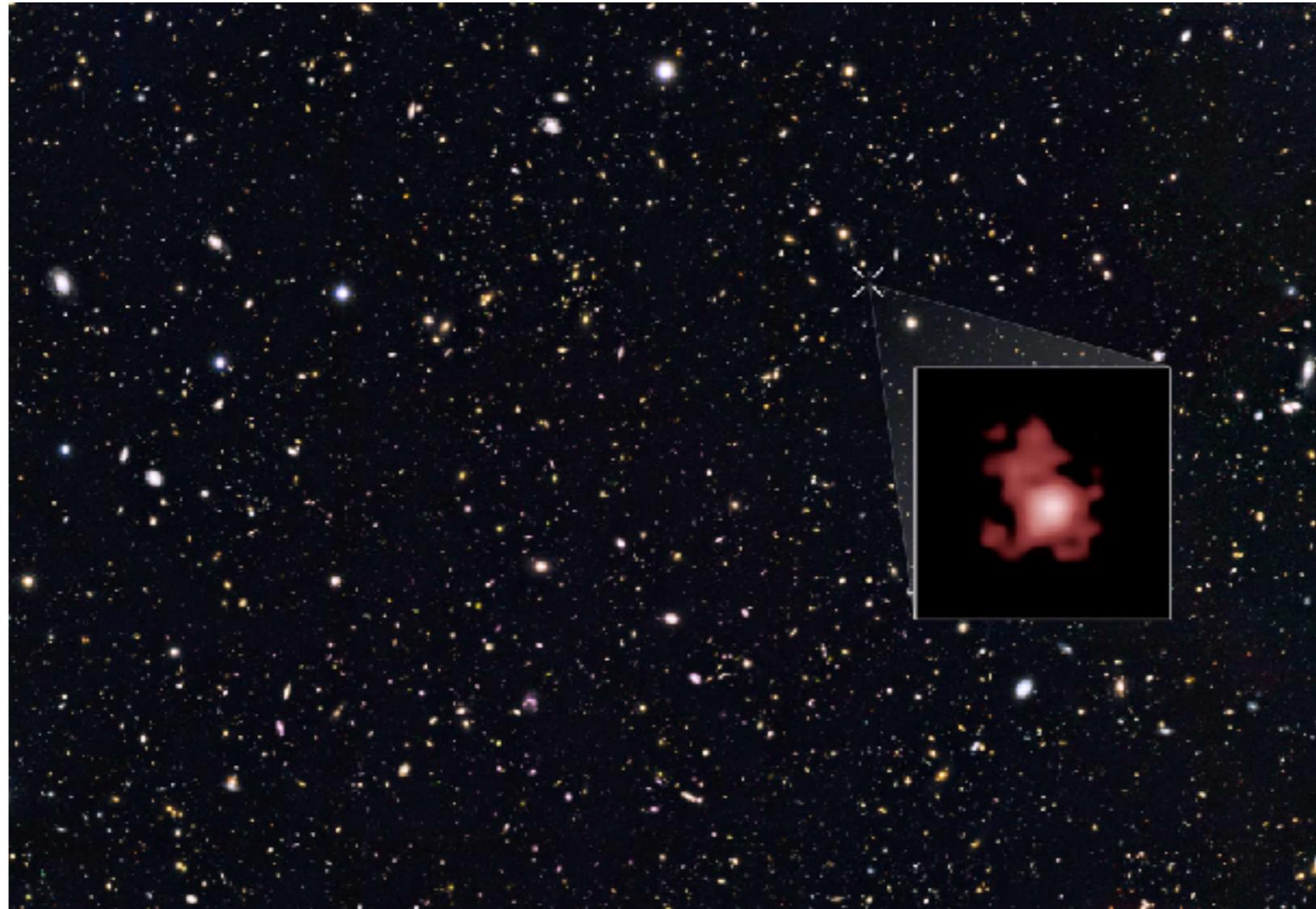


# Escalas de distância típicas

- 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 (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

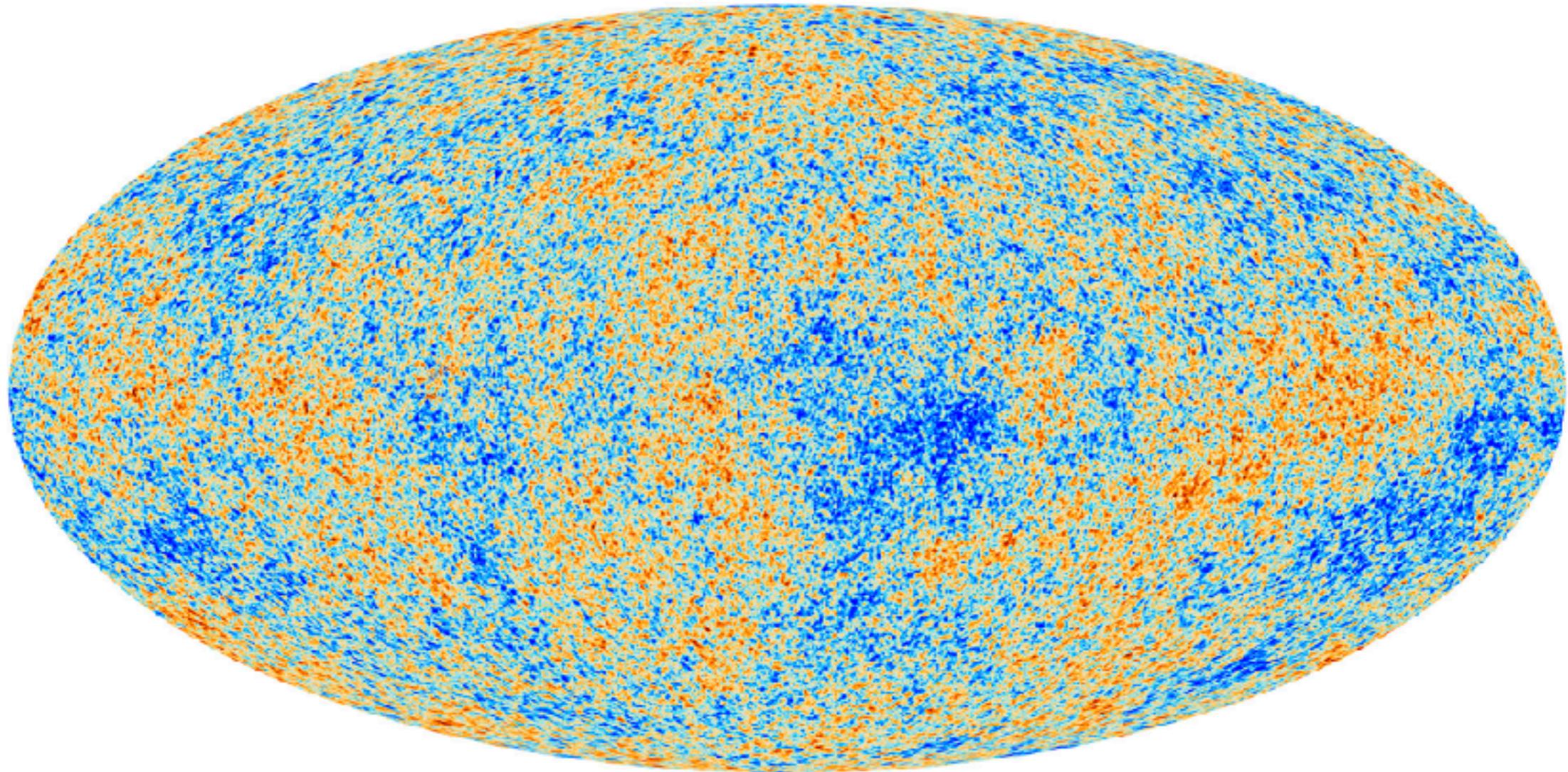
GN-z11 ( $z = 11.09$ ). Distância: 13.39 Gly ou 4.1 Gpc



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

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

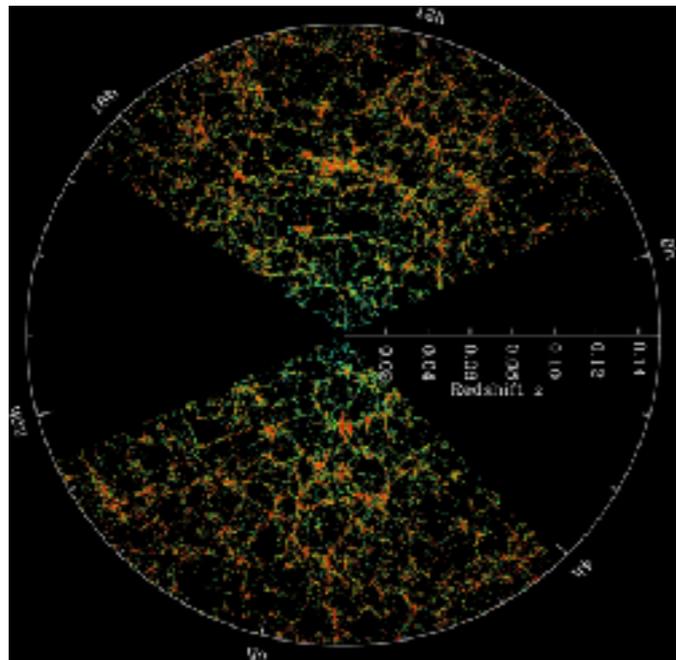
$z = 1000$ , distância de aproximadamente 14 Gly (próxima à idade do Universo)



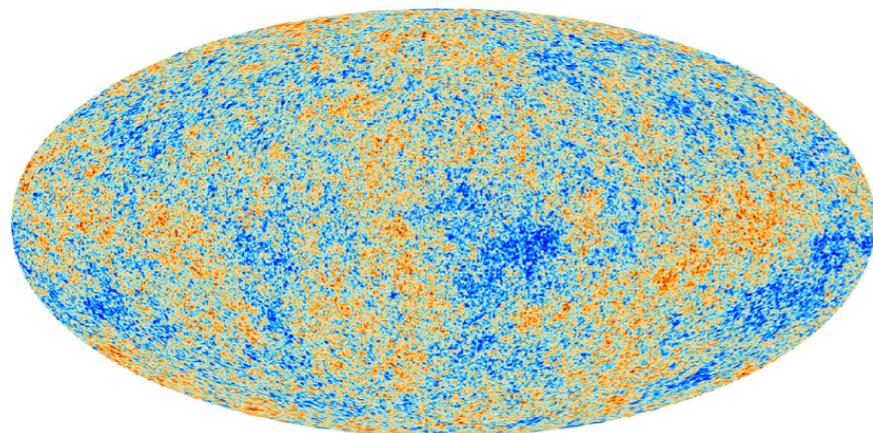
# Fontes importantes para cosmologia

- 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.

# 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

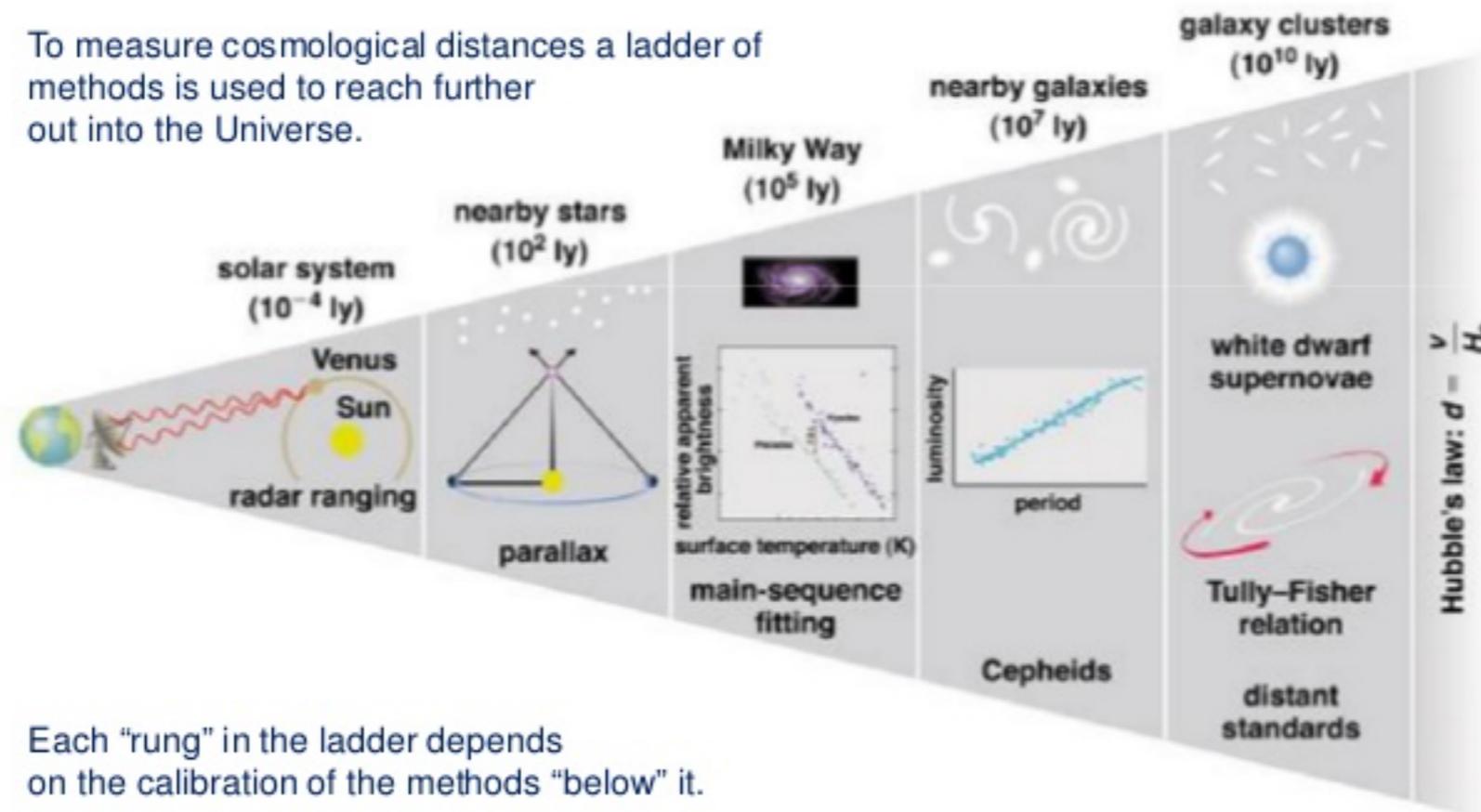
# Escadaria Cósmica



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.



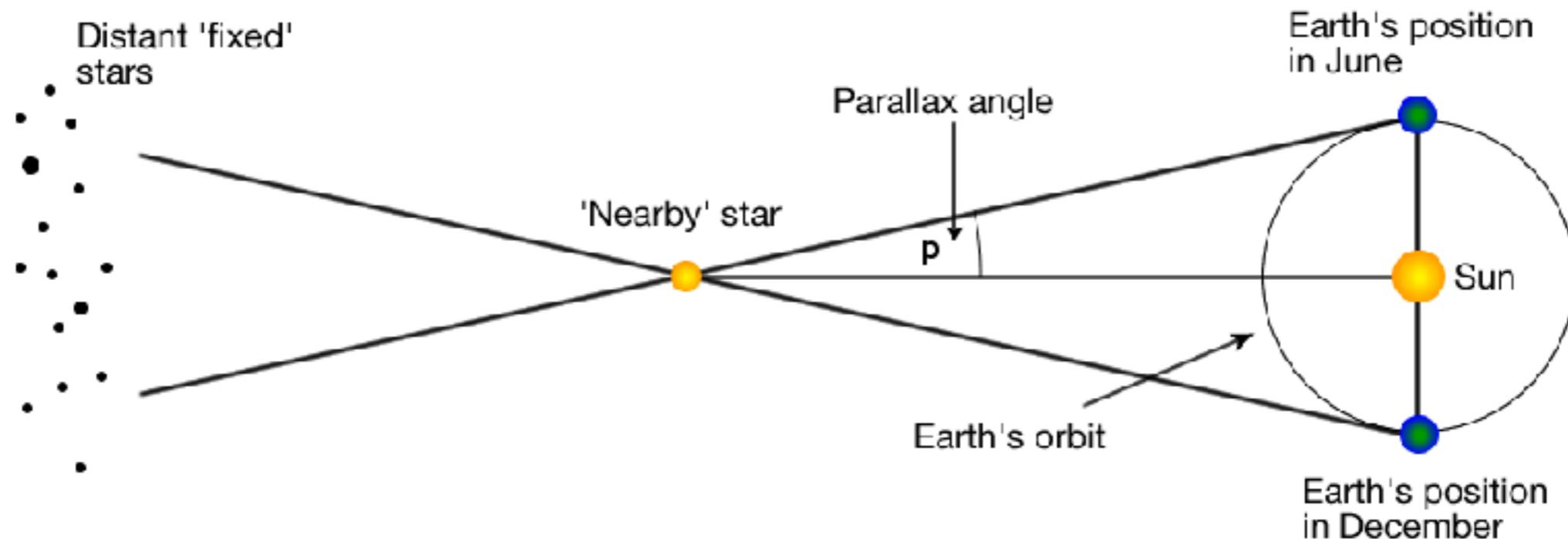
Each "rung" in the ladder depends on the calibration of the methods "below" it.

# Parallax

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

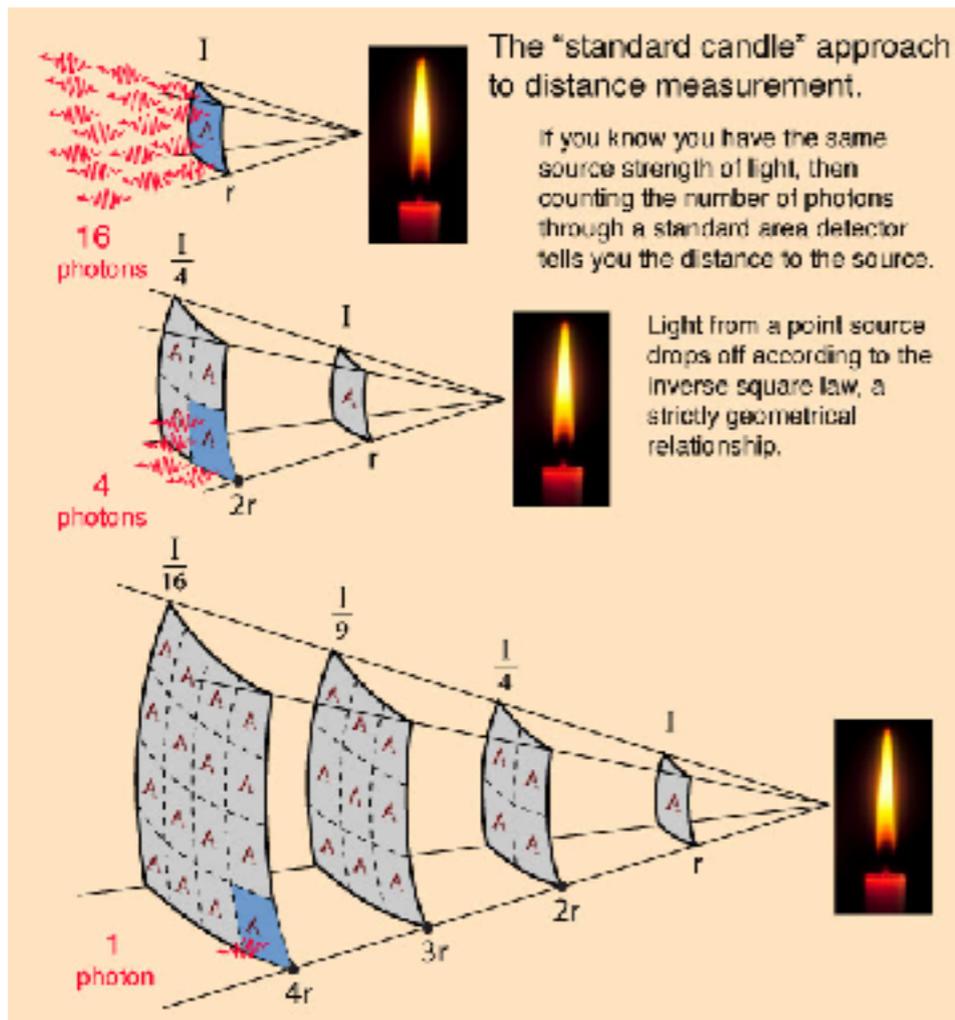
A partir de satélites, usando esta técnica, atualmente consegue-se medir distâncias de aproximadamente 1.500 anos luz.

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

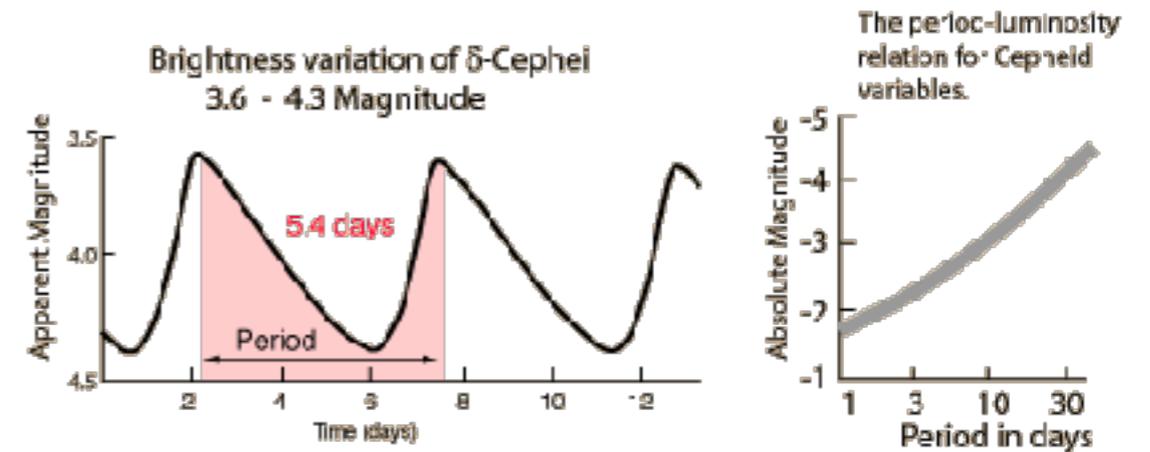
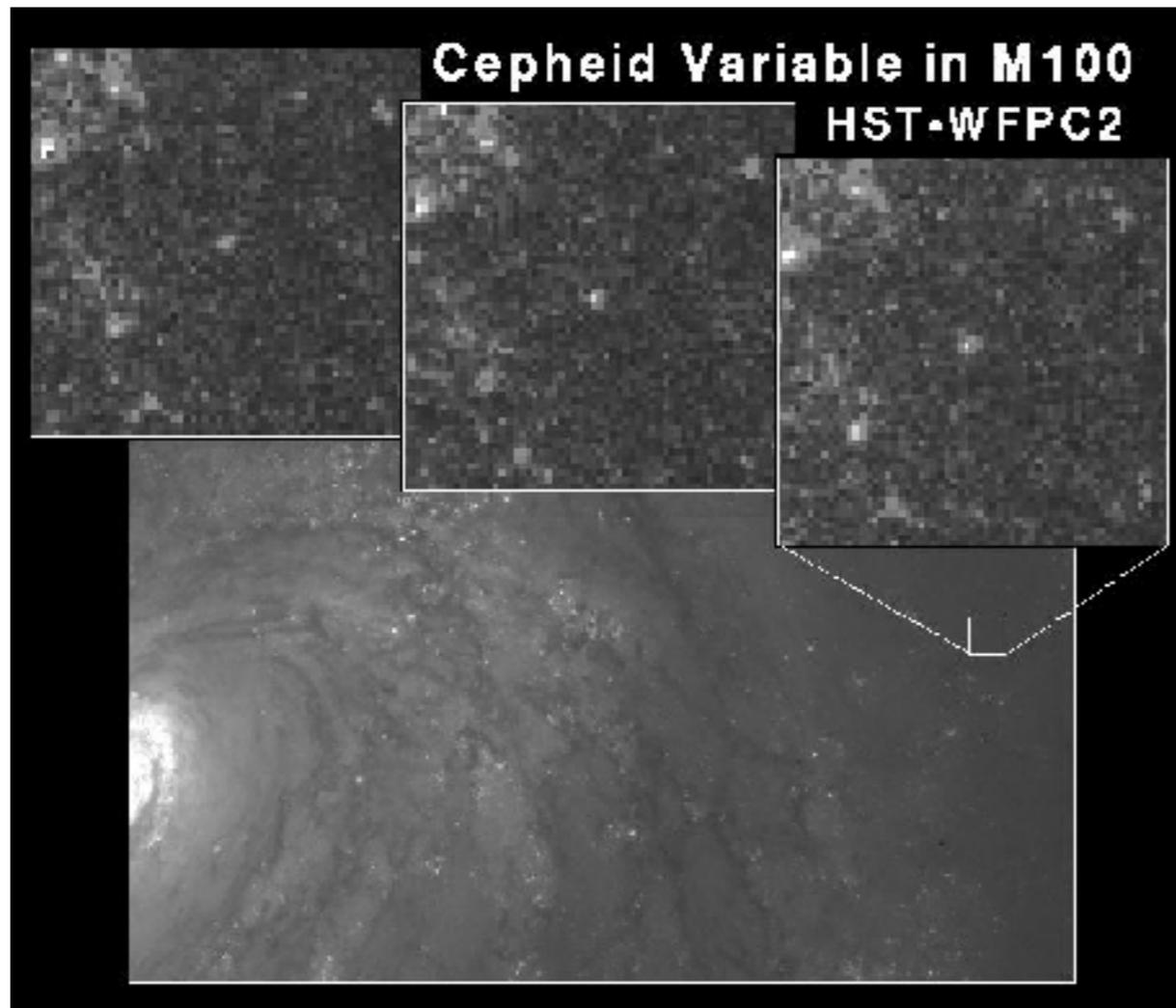
Objeto cuja luminosidade é conhecida. Então medindo o fluxo é possível determinar a distância.



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

# Cefeidas

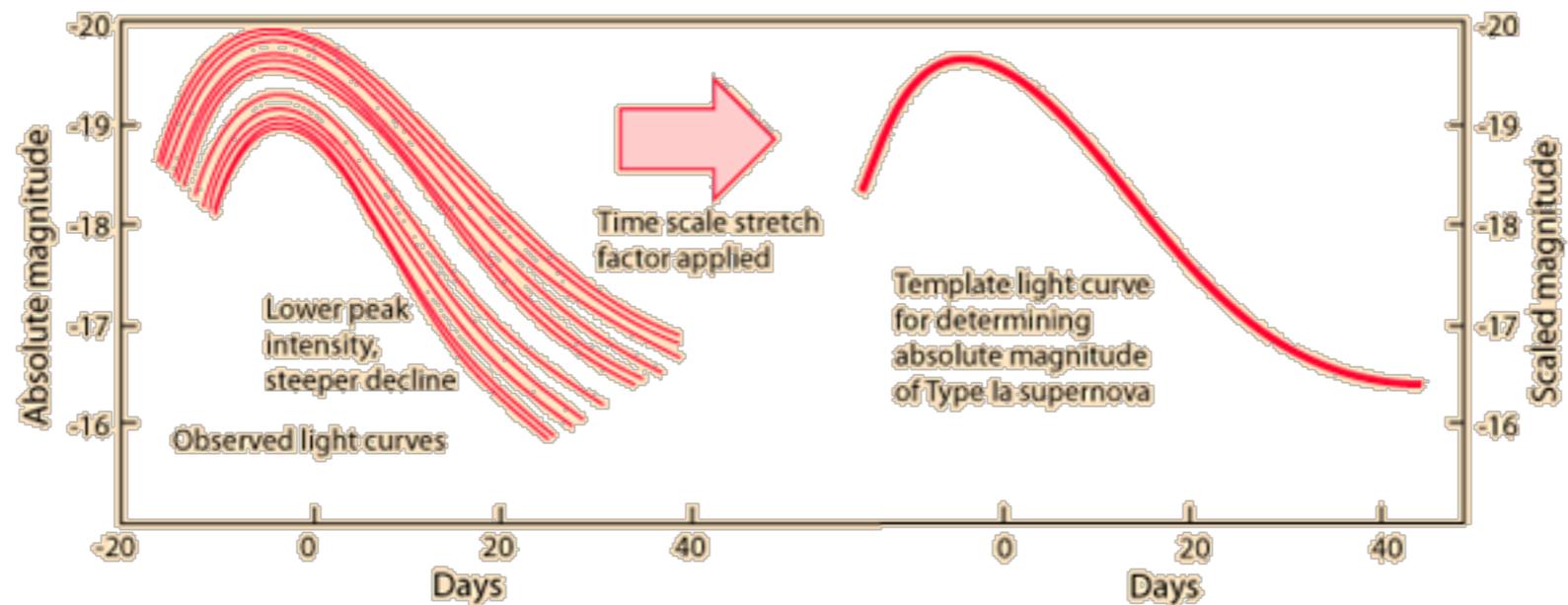
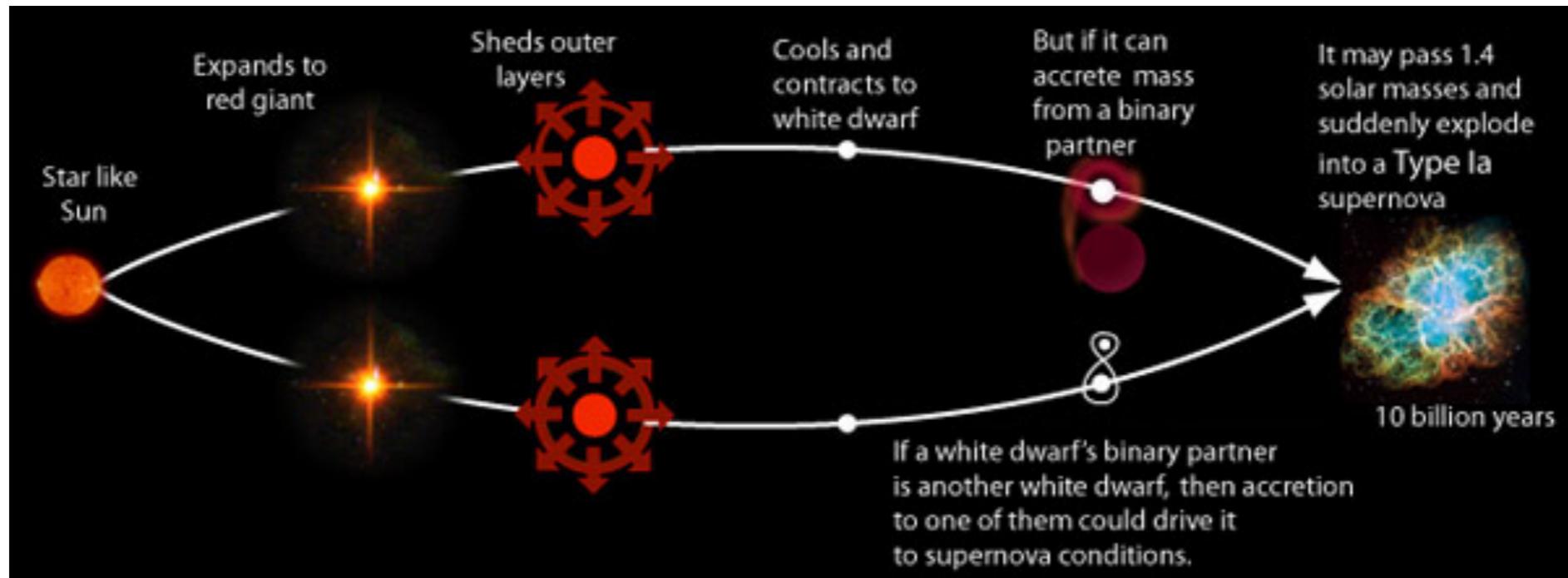
Estrelas que pulsam com período dependente da luminosidade



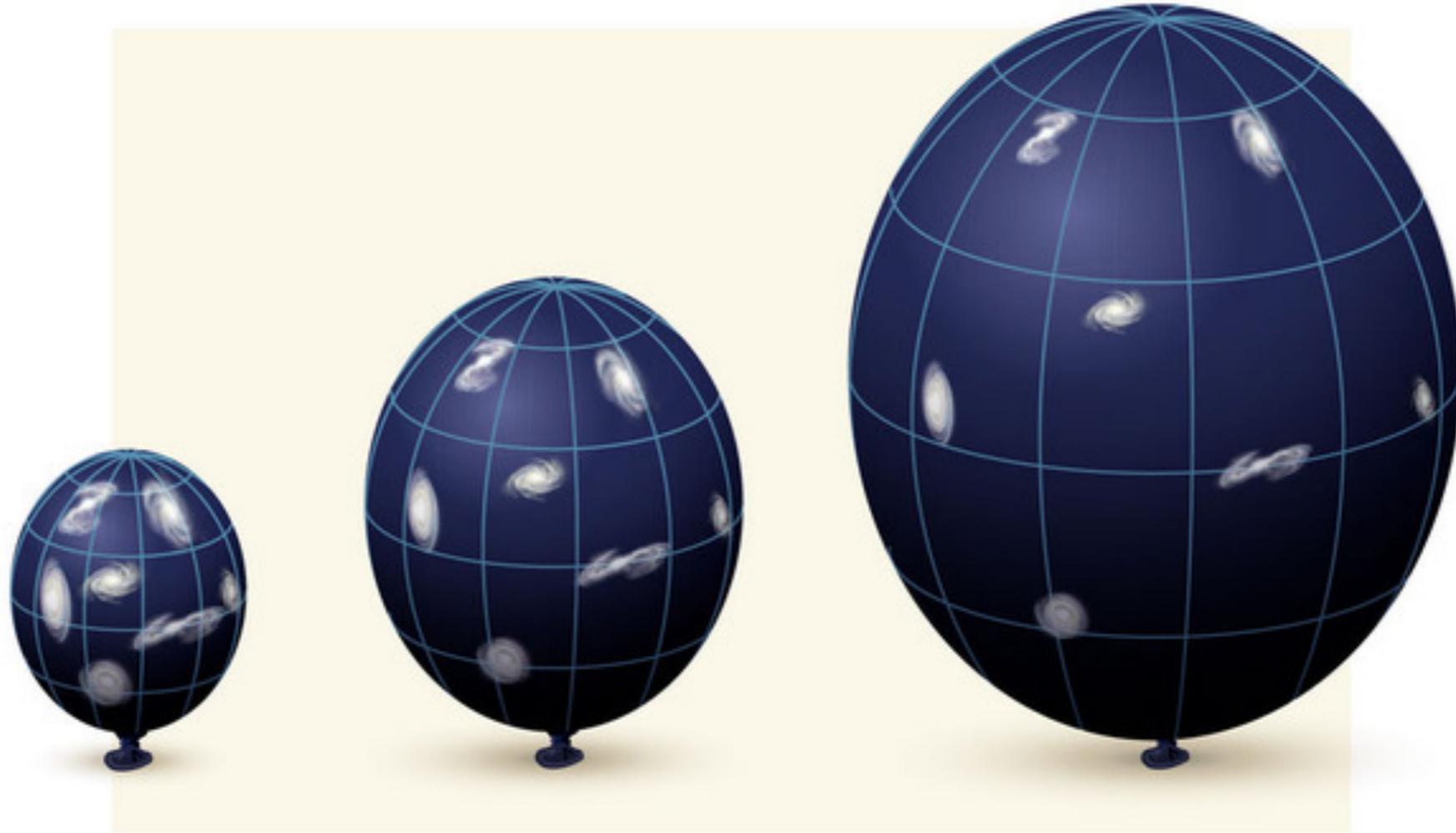
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Astro/cepheid.html>

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

# Supernova de tipo Ia

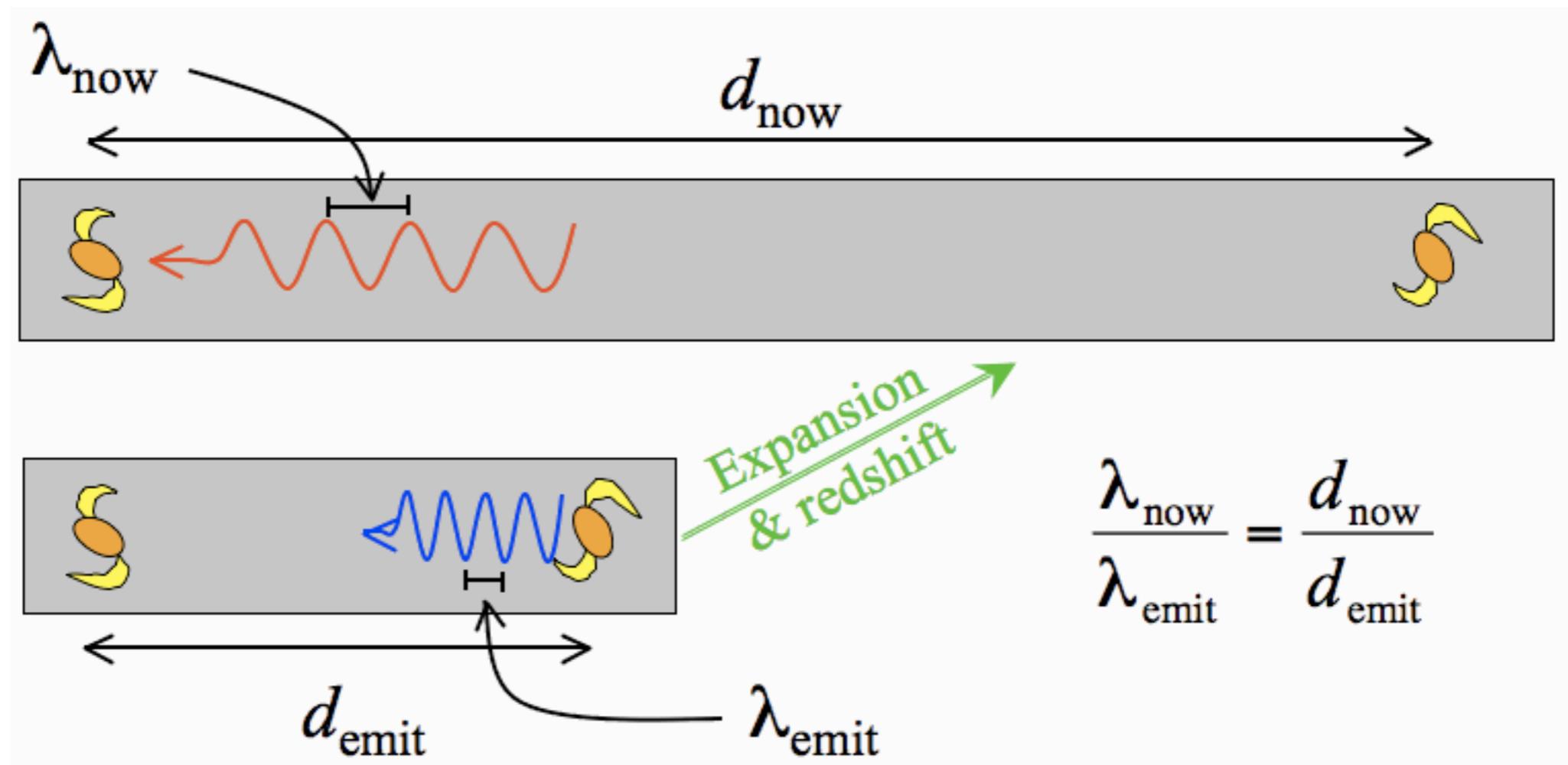


# Universo em expansão



# Último degrau da escadaria cósmica: O desvio para o vermelho

O Universo está se expandindo!



# 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

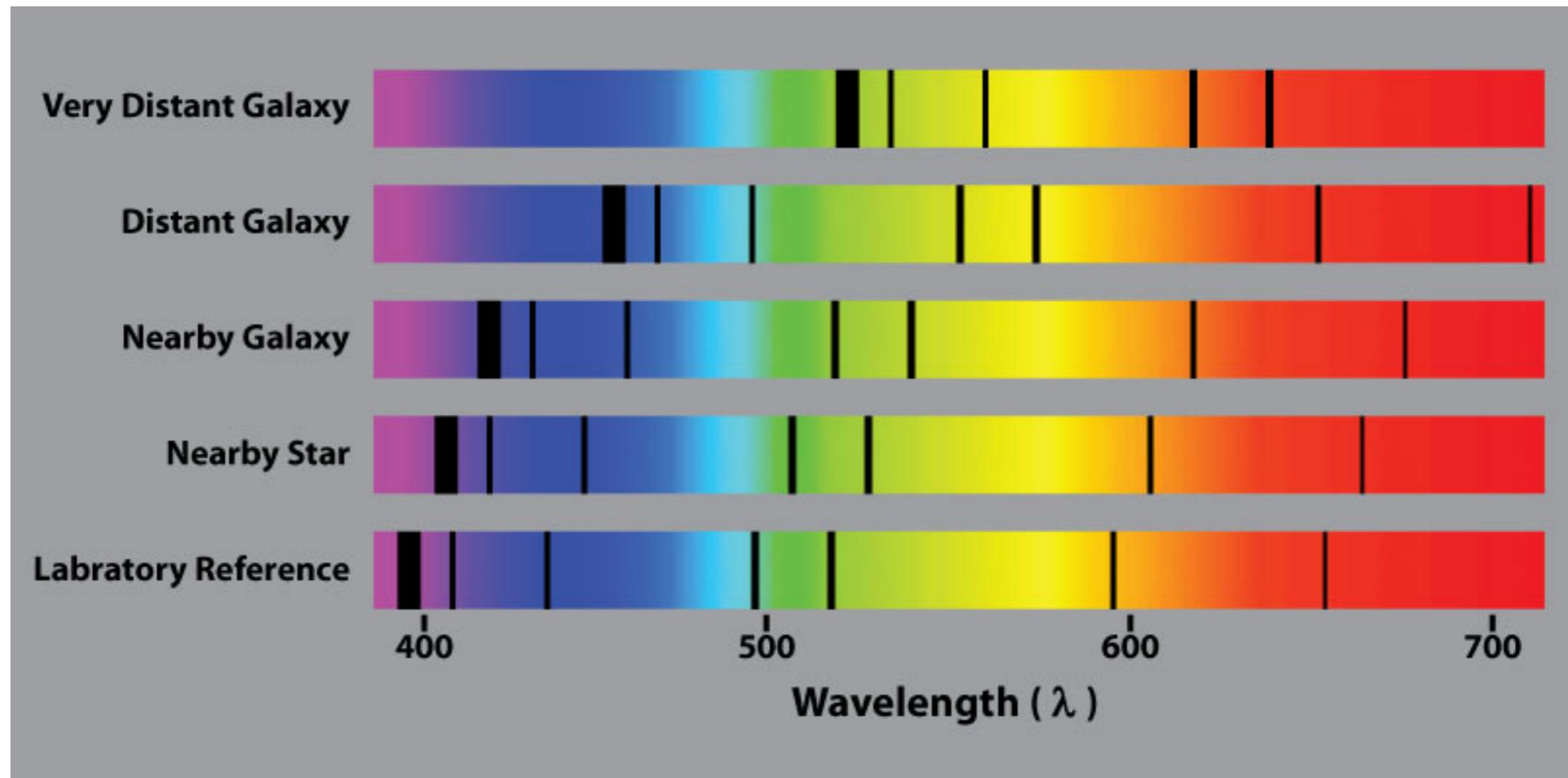
$$1 + z = \gamma \left( 1 + \frac{v_{\parallel}}{c} \right)$$

Para velocidades pequenas:

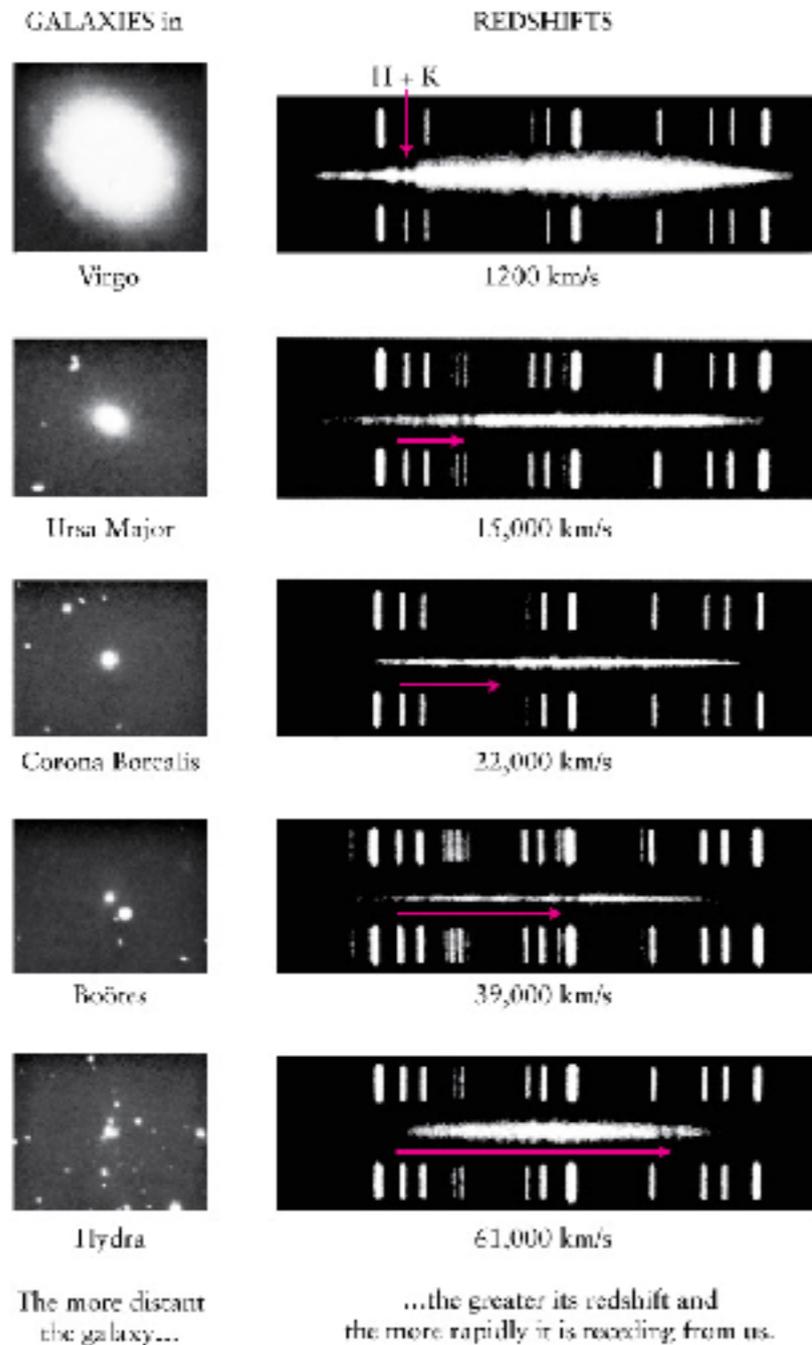
$$z \approx \frac{v_{\parallel}}{c}$$

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

# Como se observa o Redshift: espectroscopia



# Redshift de galáxias

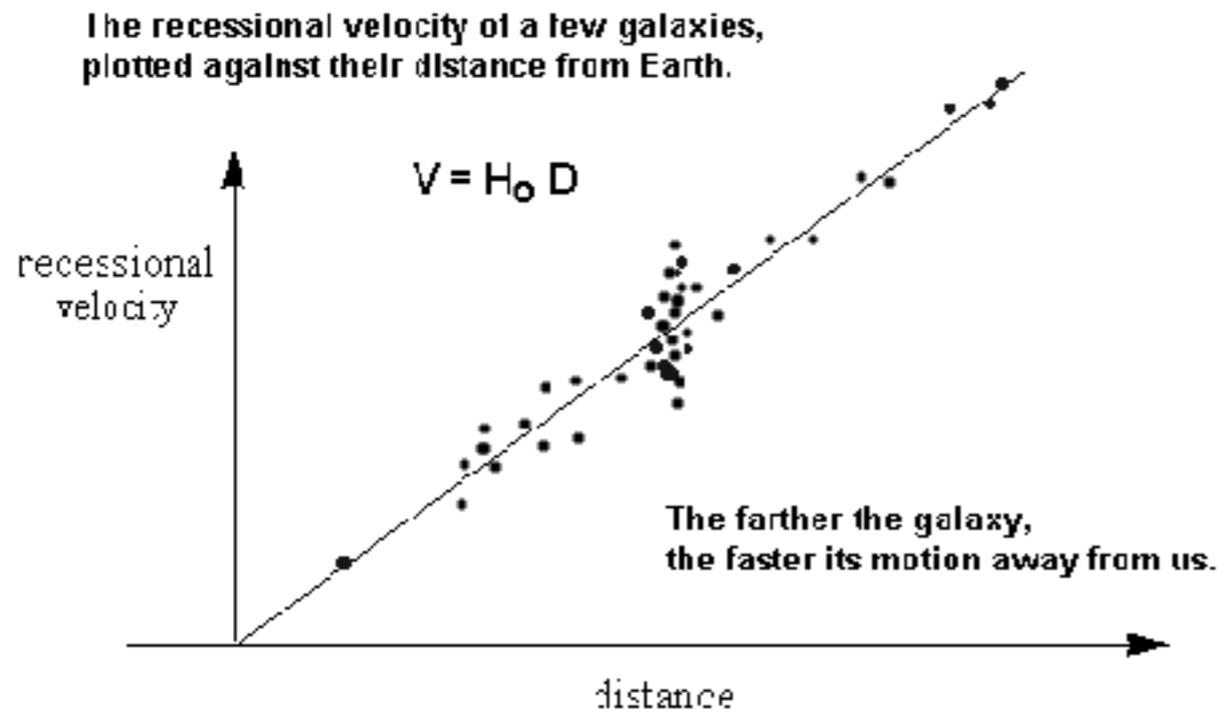


Vesto Slipher (1875-1969)



# 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](https://www.wvu.edu/skywise/hubble_relationship.html)



# A constante de Hubble $H_0$

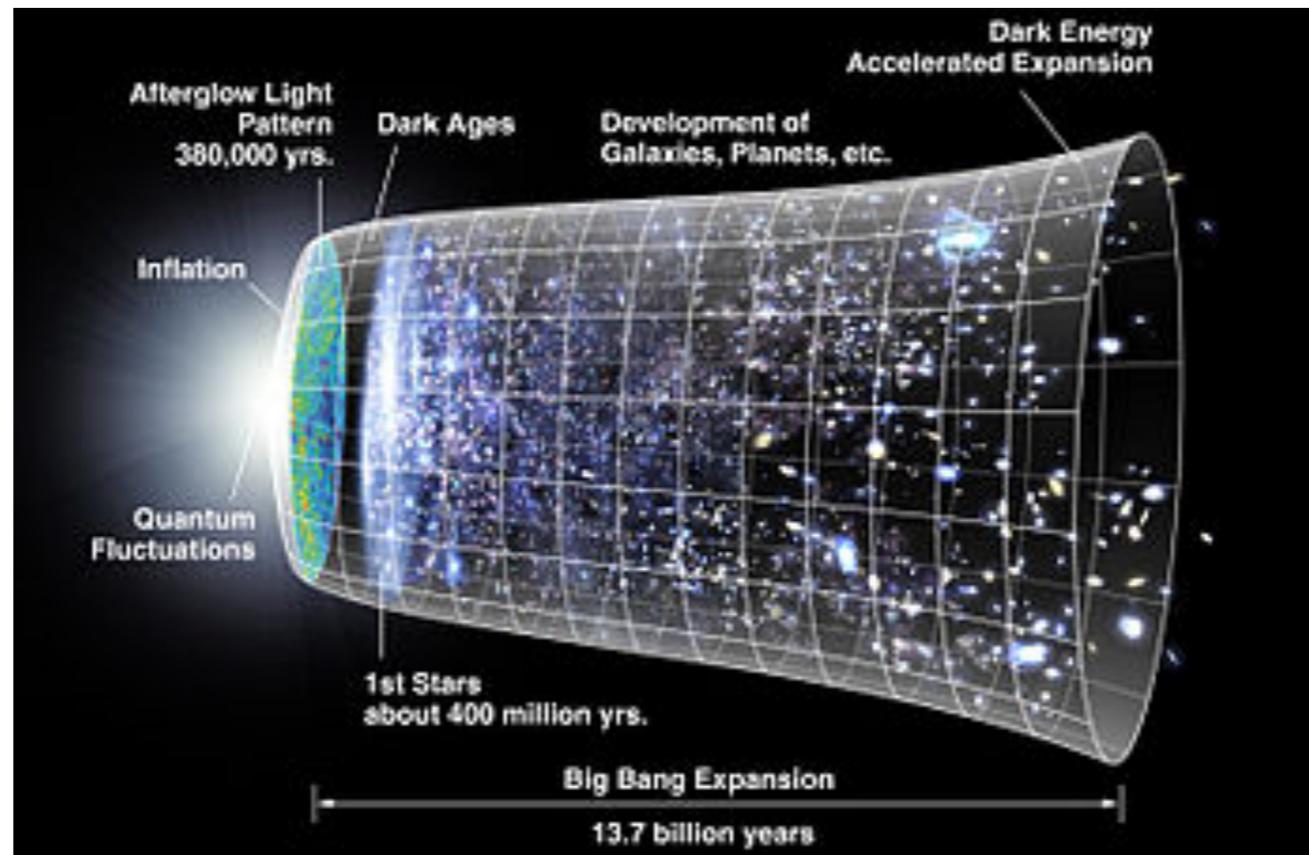
A constante de Hubble foi medida inúmeras vezes, com precisão sempre maior:

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

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

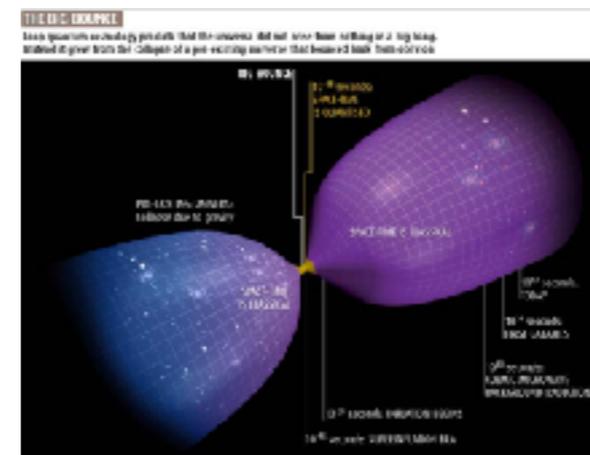
Ao mesmo tempo  $c/H_0$  dá a ordem de magnitude do tamanho do universo visível:  $3 h^{-1} \text{ Gpc}$

# 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.



# Abordagem matemática à Cosmologia

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

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



# Como aplicamos Relatividade Geral à Cosmologia?

Equações de Einstein: 
$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

- Relatividade Geral em Cosmologia -> Cosmologia Relativística
- Qual é a métrica do Universo? (Precisamos dela para calcular o tensor de Einstein)
- Qual é o conteúdo material do Universo? (De que é feito o Universo? Precisamos saber disto para calcular o tensor energia-momento)

# Equações de Friedmann

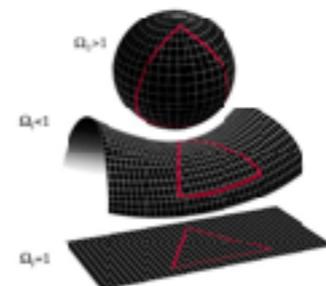
Descrevem a evolução do Universo,  $a(t)$ , com relação ao conteúdo material do mesmo

Calculando o tensor de Einstein a partir da métrica FLRW e acoplando-o a um fluido de densidade  $\rho$  e pressão  $P$

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2}$$

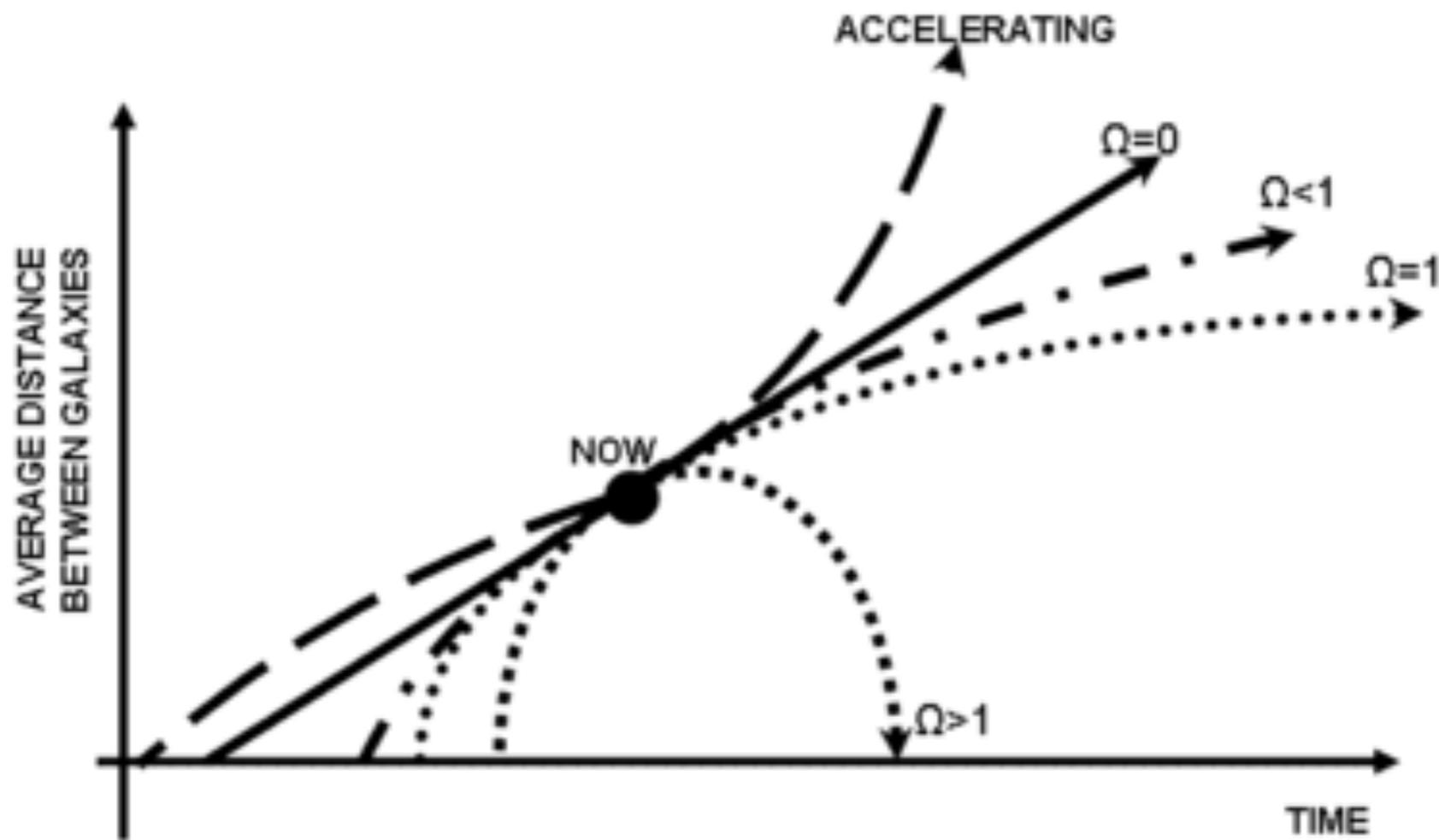
A densidade crítica e o parâmetro de densidade são:

$$\rho_c \equiv \frac{3H^2}{8\pi G} \quad \Omega \equiv \frac{\rho}{\rho_c}$$



# O destino do Universo

Density is Destiny!



# 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.

# Equações de Friedmann

Existe outra equação de Friedmann, conhecida como equação da aceleração:

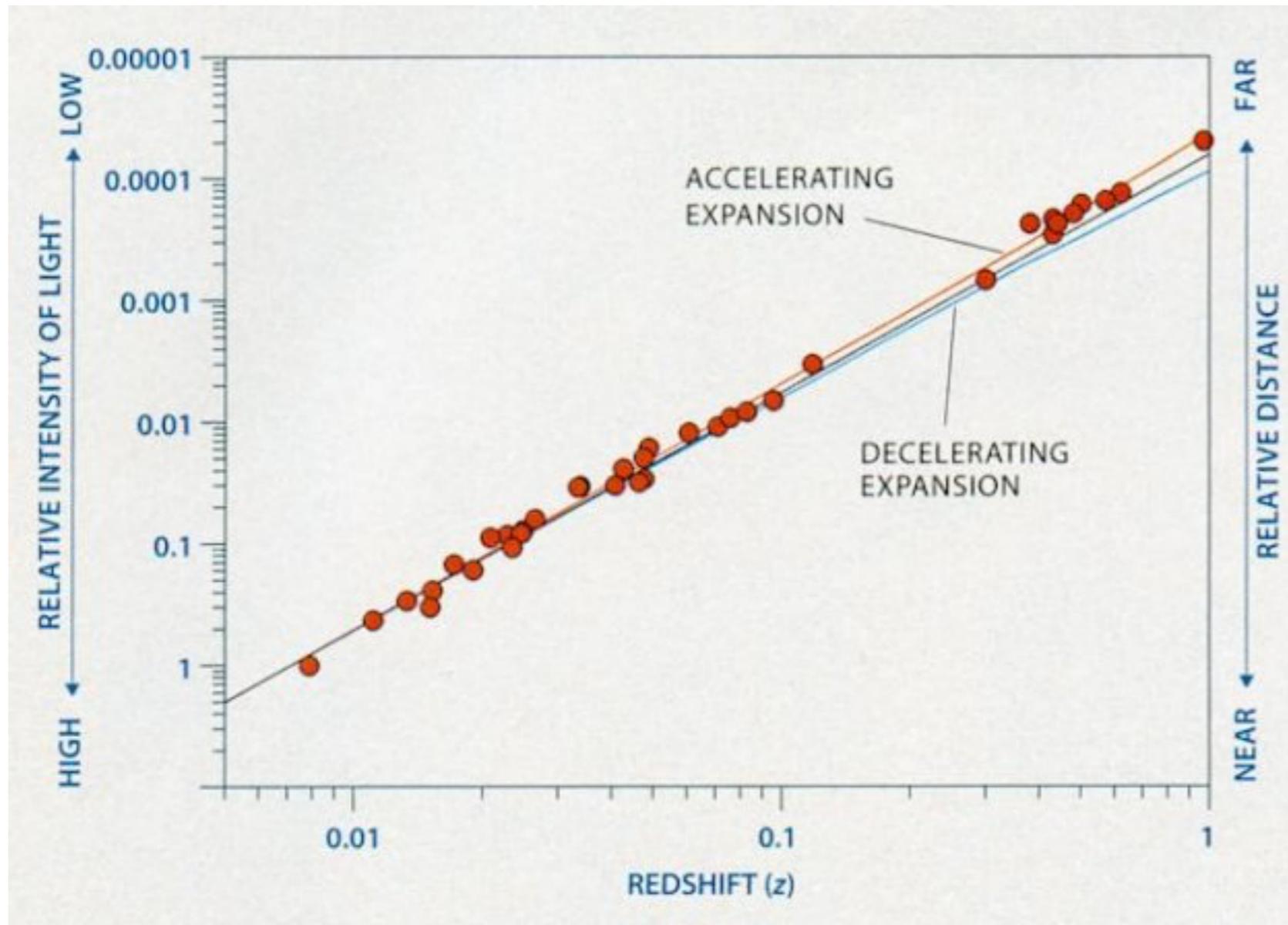
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3P/c^2)$$

Matéria normal possui densidade e pressão positivas então esperamos que a expansão seja desacelerada.

Esperávamos por isso, pois a gravidade é um força atrativa.

Mas é assim mesmo?

# A expansão acelerada do Universo



Premio Nobel 2011



Photo: Andrew Frankel/National  
Lao  
Saul Perlmutter



Photo: Robert Posters/Associated  
National University  
Brian P. Schmidt



Photo: Scorpia/AP  
Adam G. Riess

# Mas, o que gera esta aceleração? Energia Escura

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3P/c^2)$$

Se a aceleração é positiva, a pressão tem que ser negativa.

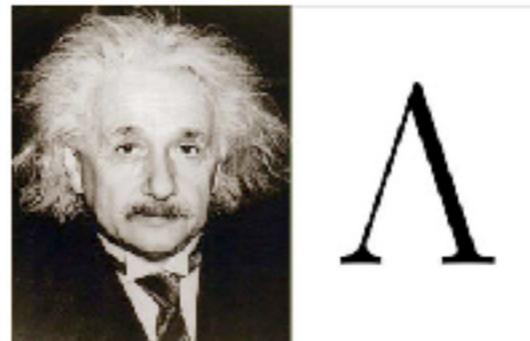
Não conhecemos formas de matéria com estas características. Do que se trata?



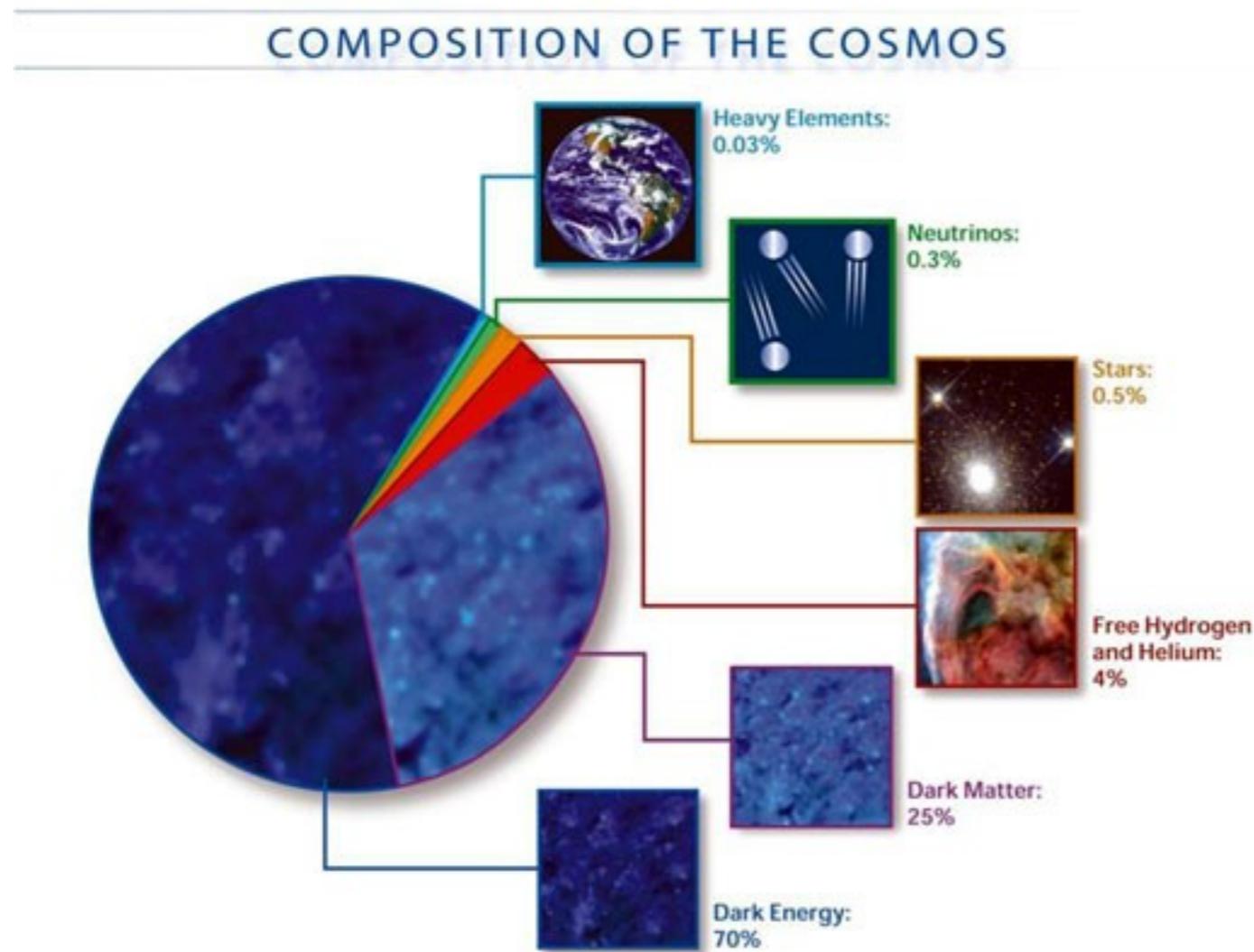
# Exercício para casa: descobrir o que é energia escura

Possíveis candidatos:

- A constante cosmológica. Originariamente introduzida por Einstein para obter uma solução estática de Universo (1916).
- Campos escalares e outras componentes exóticas
- Modificações e extensões da Relatividade Geral



# É um problema não saber o que é energia escura?



Constitui 70% do Universo.

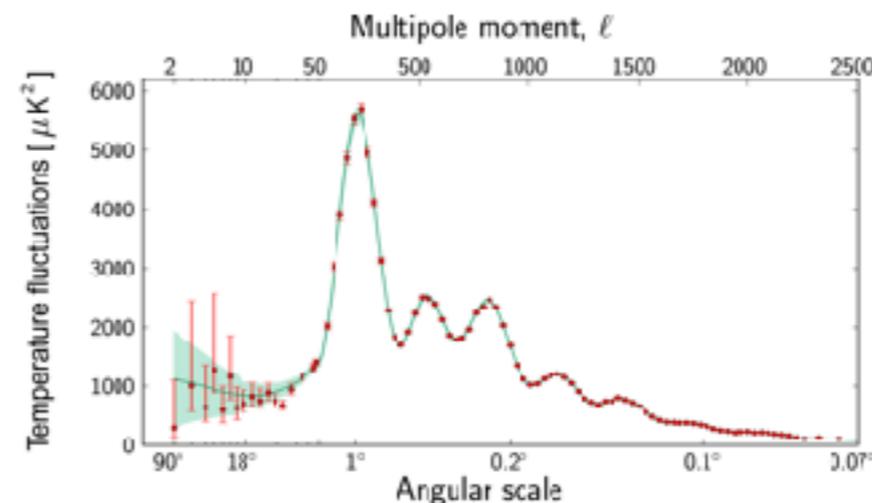
# Matéria Escura

- Uma forma de matéria distinta da Energia Escura e da matéria ordinária
- É chamada de escura pois não interage (não é visível)
- A sua evidência (muito forte) vem de efeitos puramente gravitacionais.
- Do que se trata? Novas partículas além do modelo padrão?



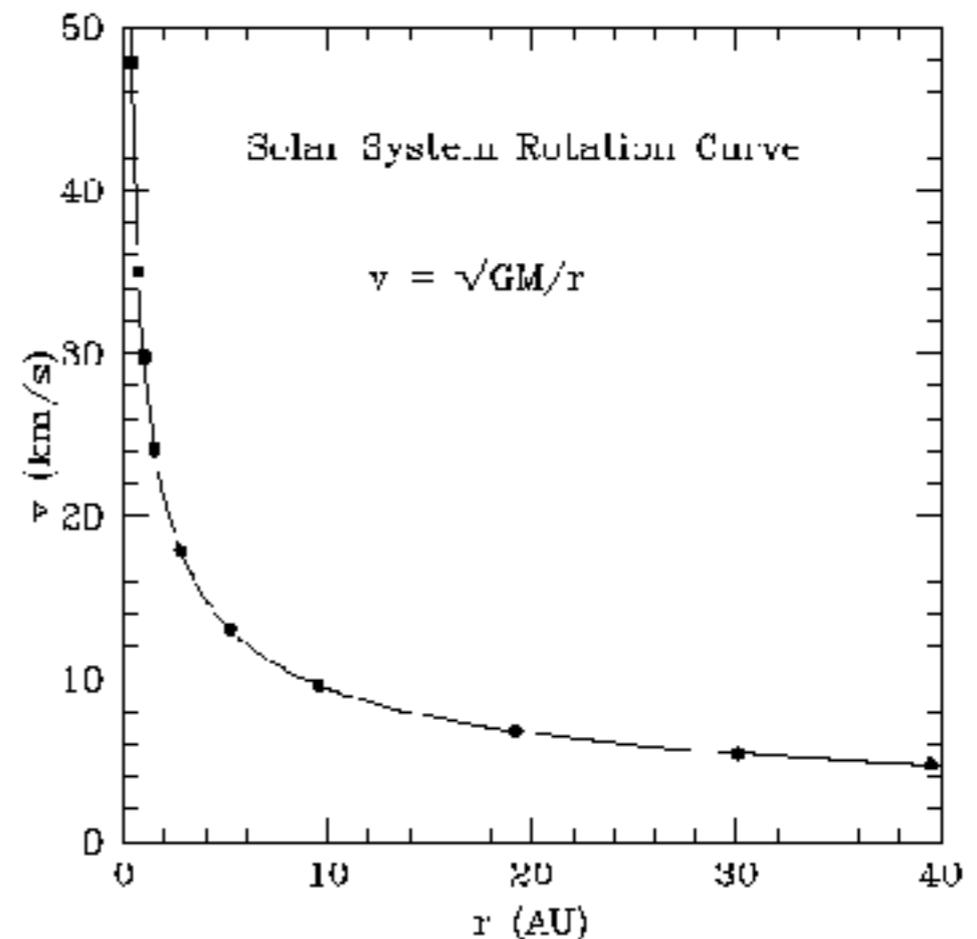
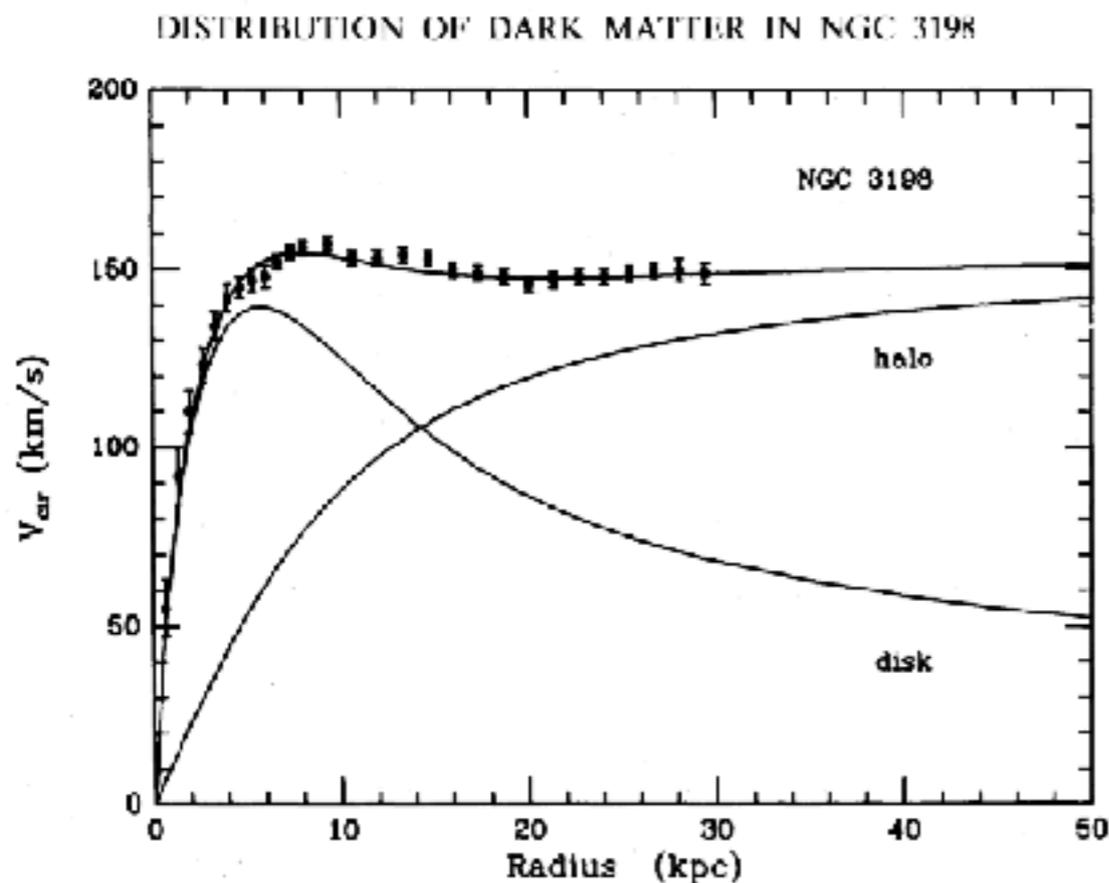
# A matéria escura: evidências observacionais

- Dinâmica em aglomerados de galáxias (já em 1933, Zwicky). A matéria escura tem uma história de cerca de 80 anos enquanto a energia escura de 20 anos.
- Curvas de rotações das galáxias.
- Emissão em raio-X de aglomerados de galáxias.
- Lenteamento gravitacional.
- As anisotropias da CMB.
- A formação de estruturas.

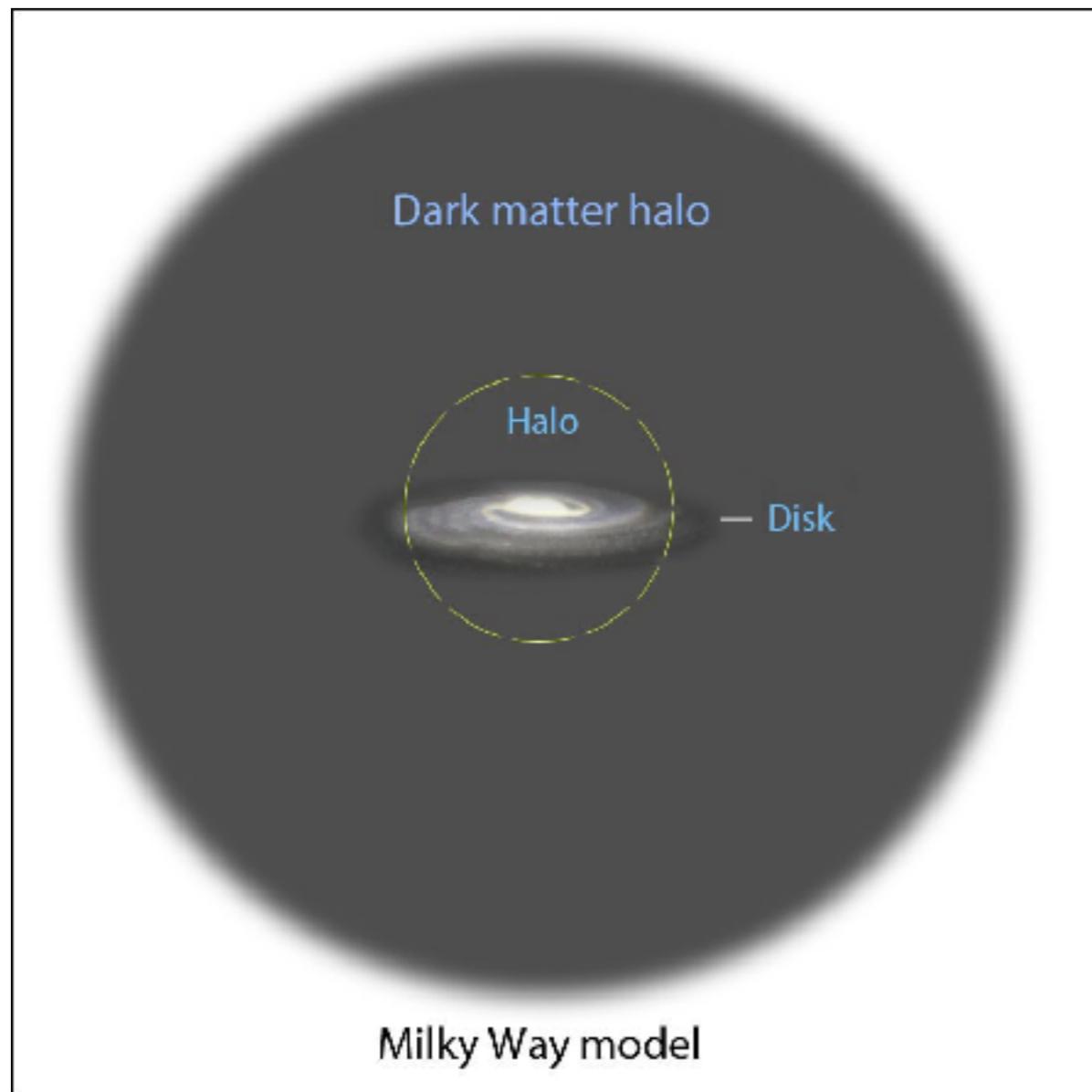


# Curvas de rotação das galáxias

Onde esperamos uma queda Kepleriana, a velocidade de rotação é sustentada pela matéria escura.



# O conceito de halo de matéria escura

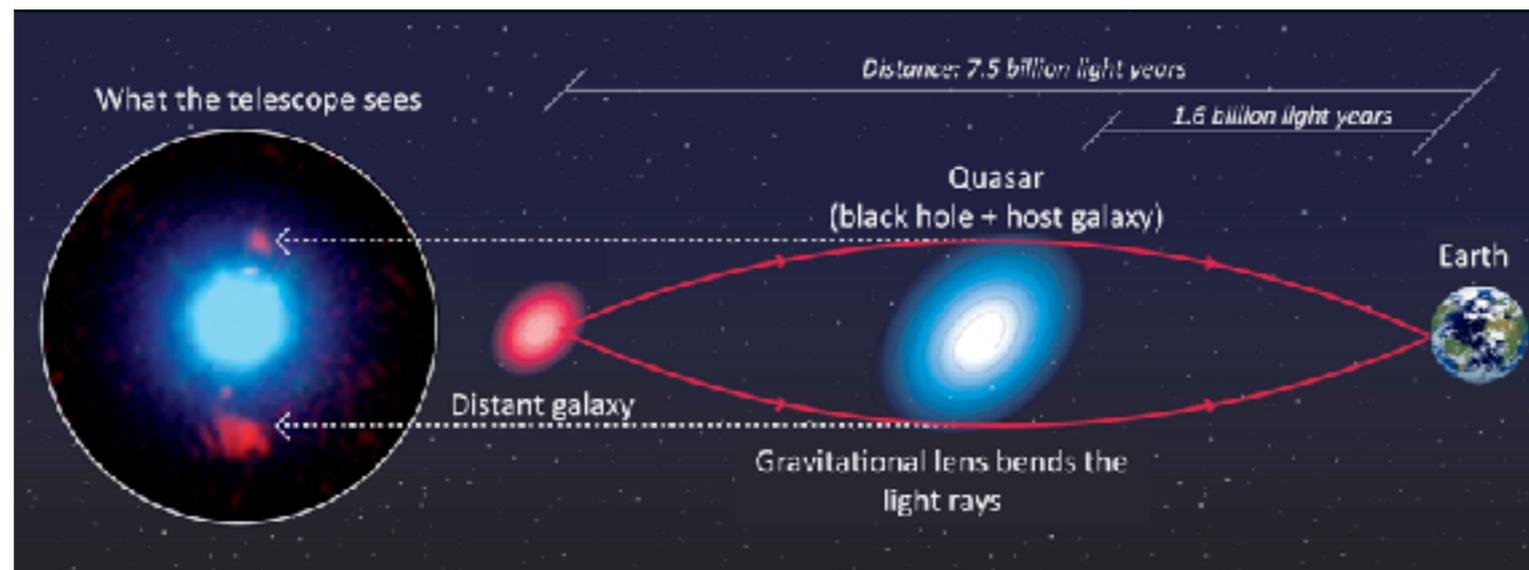


As estruturas, galáxias e aglomerados de galáxias, estão submergidas num halo de matéria escura.

# Lentes gravitacionais

A presença de matéria cria um poço de potencial que curva as trajetórias dos raios de luz.

Maior a massa da lente, maior a curvatura. Observação: a massa da componente estelar sozinha não basta -> matéria escura.



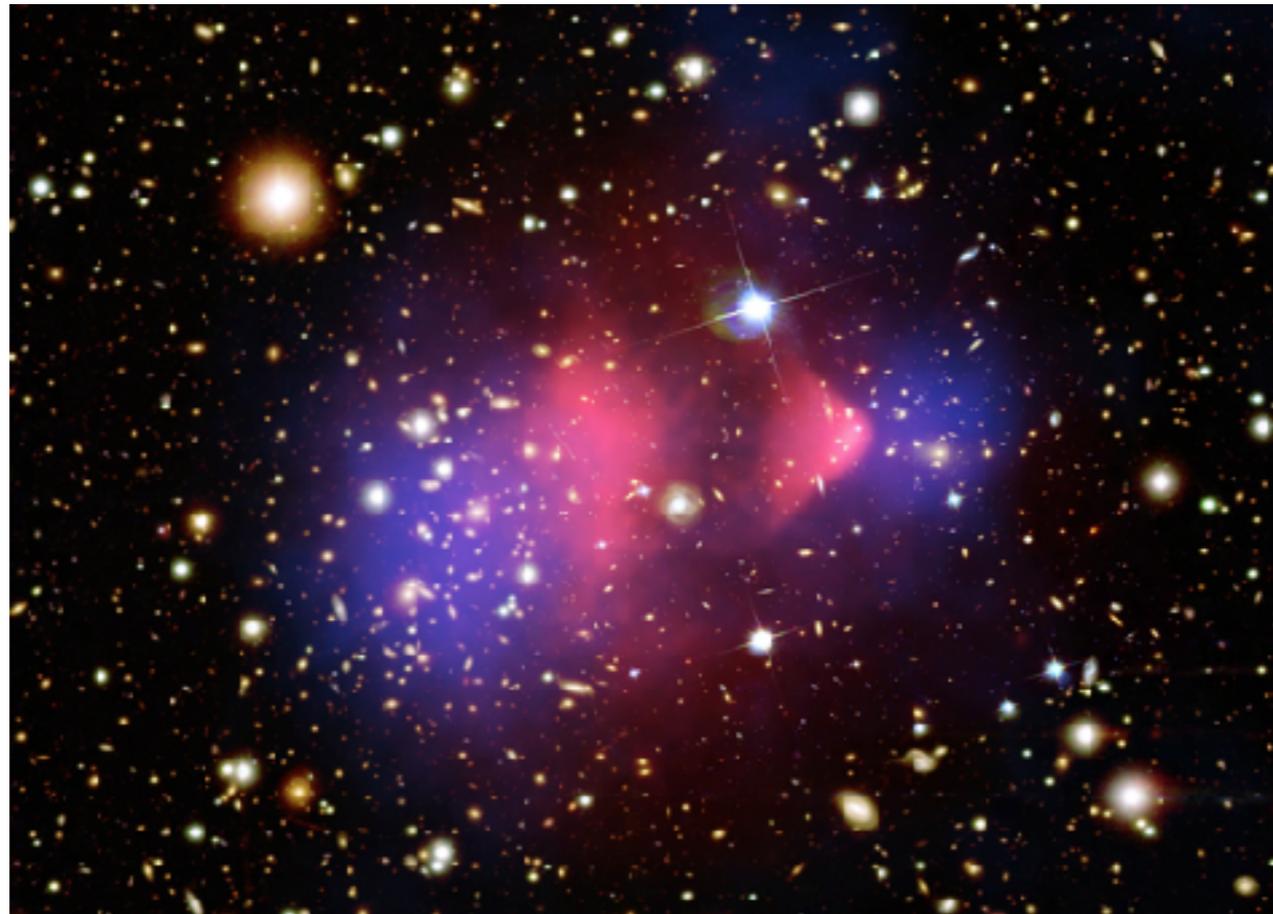


# Lentes gravitacionais



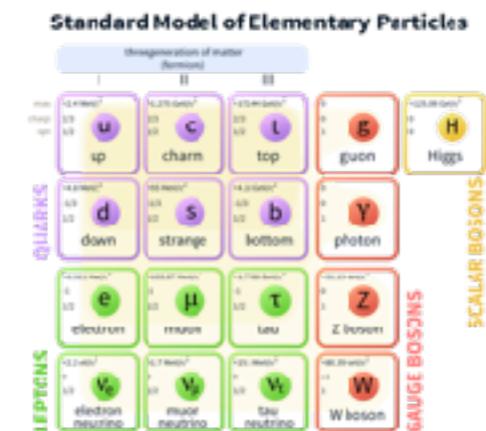
# Dinâmica de aglomerados: O *Bullet Cluster*

Colisão entre dois aglomerados. Os halos de matéria escura passam um através do outro sem interagir enquanto o gás fica por trás.



# Candidatos para matéria escura

- Weakly Interacting Massive Particles (WIMP)
- Axions
- Neutrinos estereis
- Outras partículas além do modelo padrão
- Buracos negros primordiais
- Massive Compact Halo Objects (MACHO)
- Modificações da teoria da Relatividade Geral



# 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