

# Evidências para o que sabemos (e para o que não sabemos) sobre o Universo




Henrique S. Xavier  
henrique.xavier@usp.br

IAG-USP (São Paulo, Brasil)

# Evidências para o que sabemos (e para o que não sabemos) sobre o Universo

## Plano de apresentação

- O que sabemos sobre o Universo (principais características)
  - Evidências observacionais
  - O que sabemos que não sabemos:
    - Problemas que viraram solução
    - Problemas que são só problemas
- 

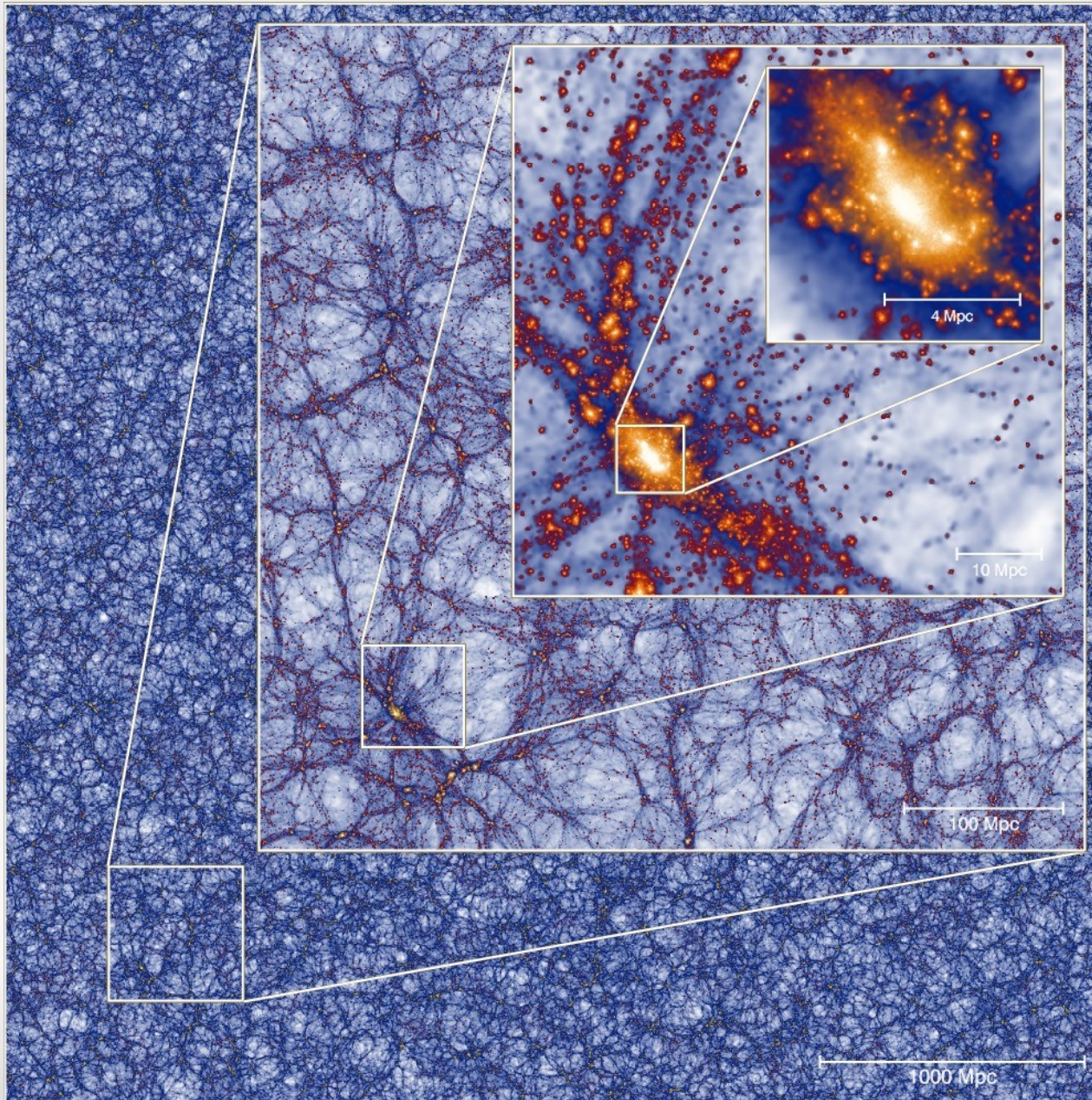
**Do que estamos falando?  
O que é o Universo?**

**Do que estamos falando?  
O que é o Universo?**



**PureEducation**

# Distribuição de matéria no Universo



Simulação em super-  
Computador  
Millennium XXL

Fatia mostra estrutura  
filamentar

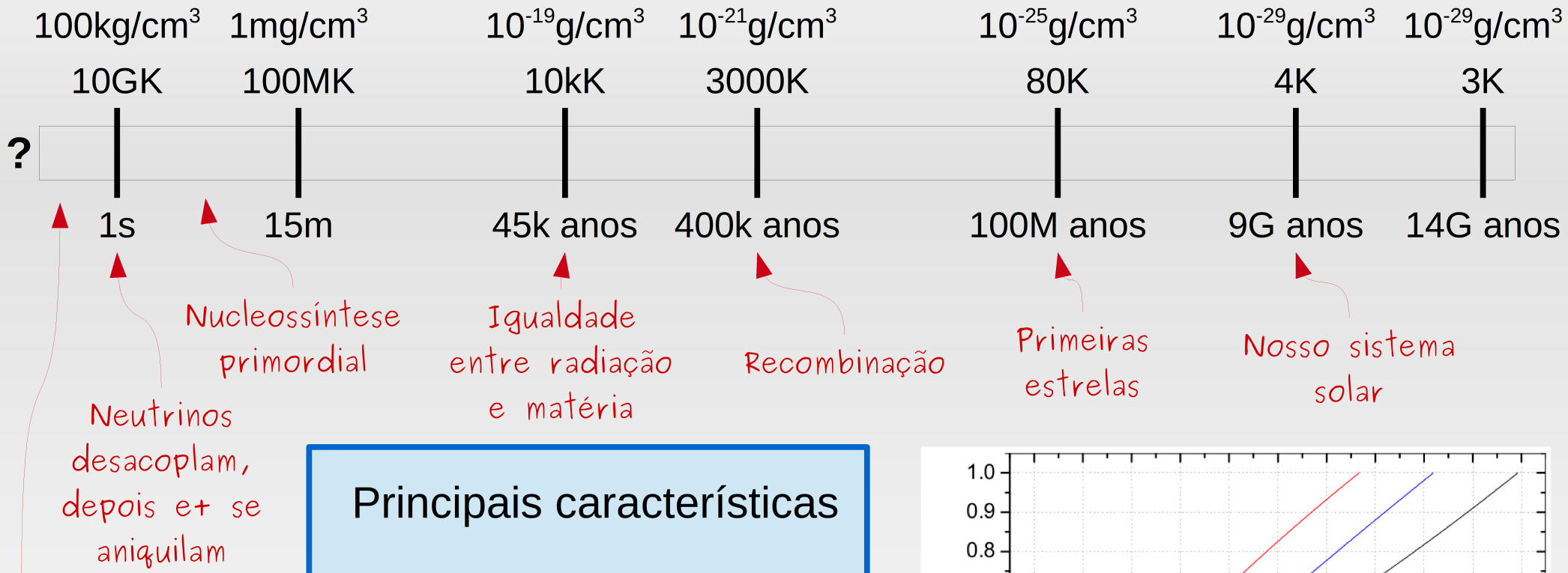
Vazios de  $\sim 100$  Mpc de  
diâmetro

Escala de  
homogeneidade:  
250 Mpc (800 Ma.I.)

*Relat. Geral*  
Força atuante: gravidade

**x 28** = diâmetro do  
Universo observável  
(90G a.I.)

# Evolução do Universo: Linha do tempo



Neutrinos  
desacoplam,  
depois e+ se  
aniquilam

Nucleossíntese  
primordial

Igualdade  
entre radiação  
e matéria

Recombinação

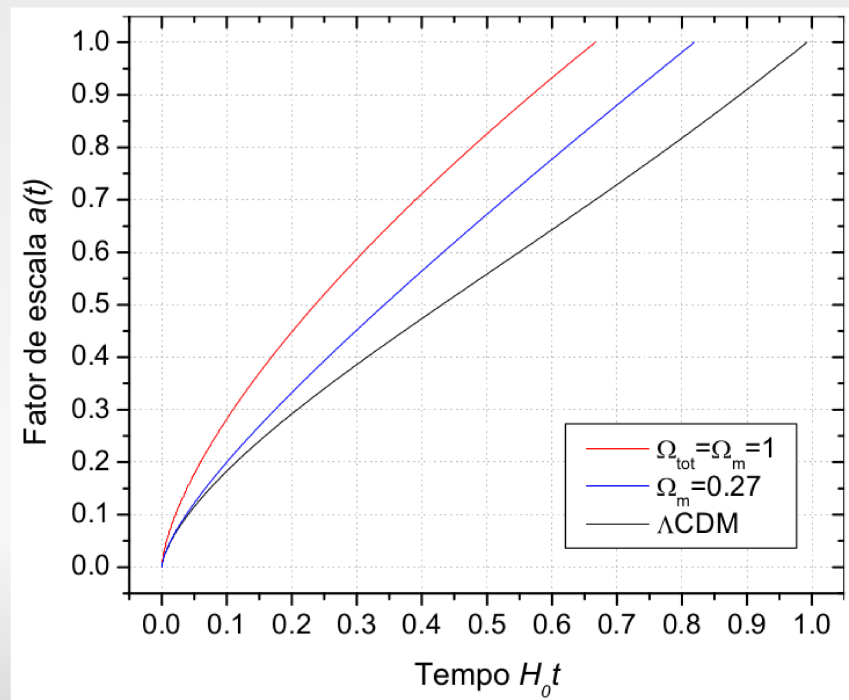
Primeiras  
estrelas

Nosso sistema  
solar

Plasma de  
quarks e  
gluons

## Principais características

- Surgiu há 14G de anos atrás;
- Inicialmente denso, quente e homogêneo;
- Vem expandindo, esfriando e formando estruturas



# **Evolução do Universo: uma expansão permanente**



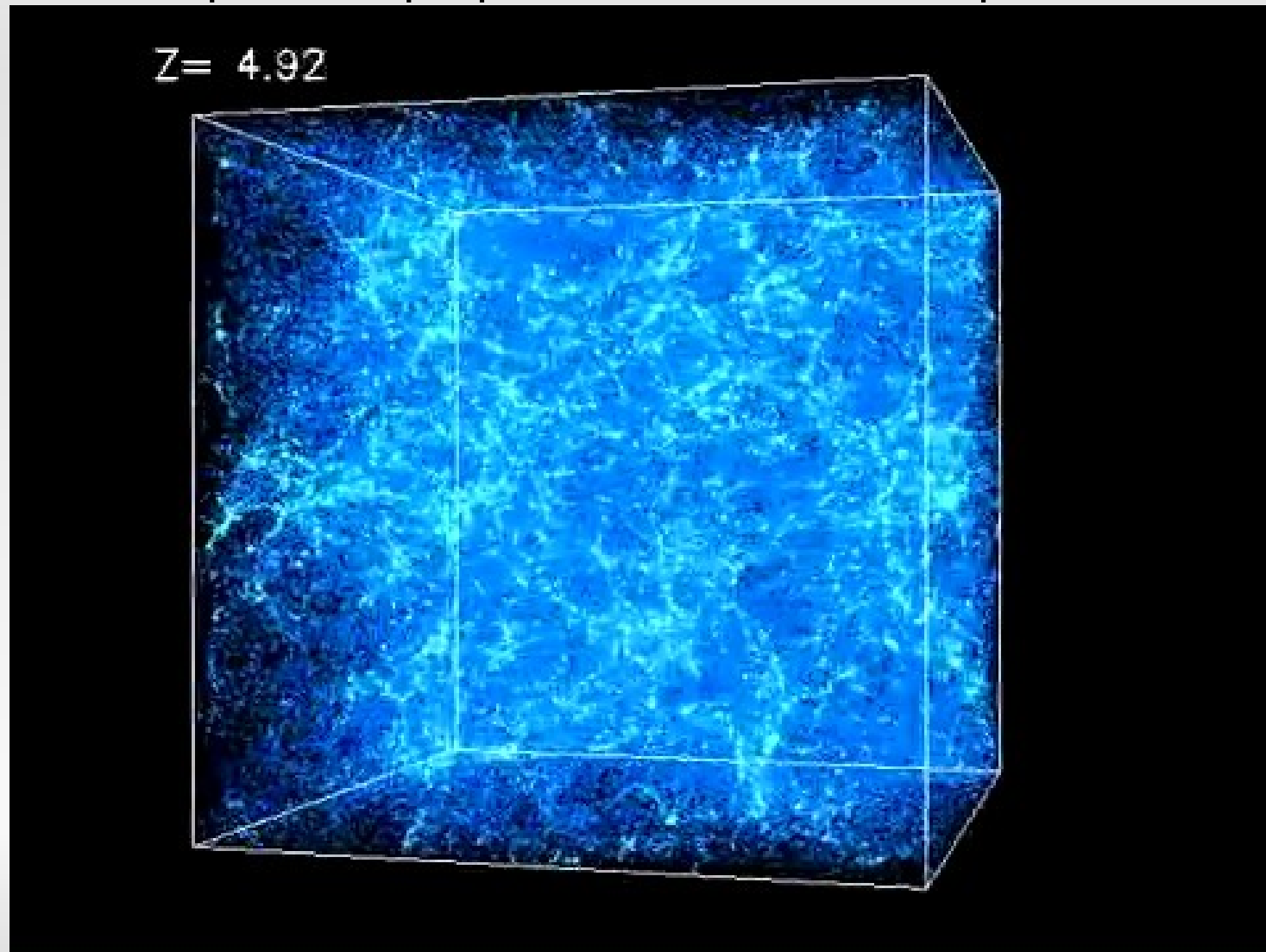
# **Evolução do Universo: formando estruturas**

O Universo vai se tornando cada vez mais inhomogêneo, formando primeiro pequenas estruturas e depois as maiores.



# Evolução do Universo: formando estruturas

O Universo vai se tornando cada vez mais inhomogêneo, formando primeiro pequenas estruturas e depois as maiores.



(caixa comóvel, que acompanha a expansão do Universo)

# Evidências observacionais



IF IT LOOKS LIKE A DUCK  
AND QUACKS LIKE A  
DUCK, IT'S A DUCK

Quack Quack Quack Quack Quack

# Evidências observacionais: Diagrama de Hubble

$$v = c \underbrace{z}_{\text{Redshift}} = c \left( \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{em}} - 1 \right) = \frac{dr}{dt} \stackrel{\text{Dist. física}}{=} \frac{d}{dt} a(t) \underbrace{\chi}_{\text{Dist. comóvel}} = \frac{da(t)}{dt} \frac{1}{a(t)} a(t) \chi = \underbrace{\left( \frac{da(t)}{dt} \frac{1}{a(t)} \right)}_{\text{Param. De Hubble}} r$$

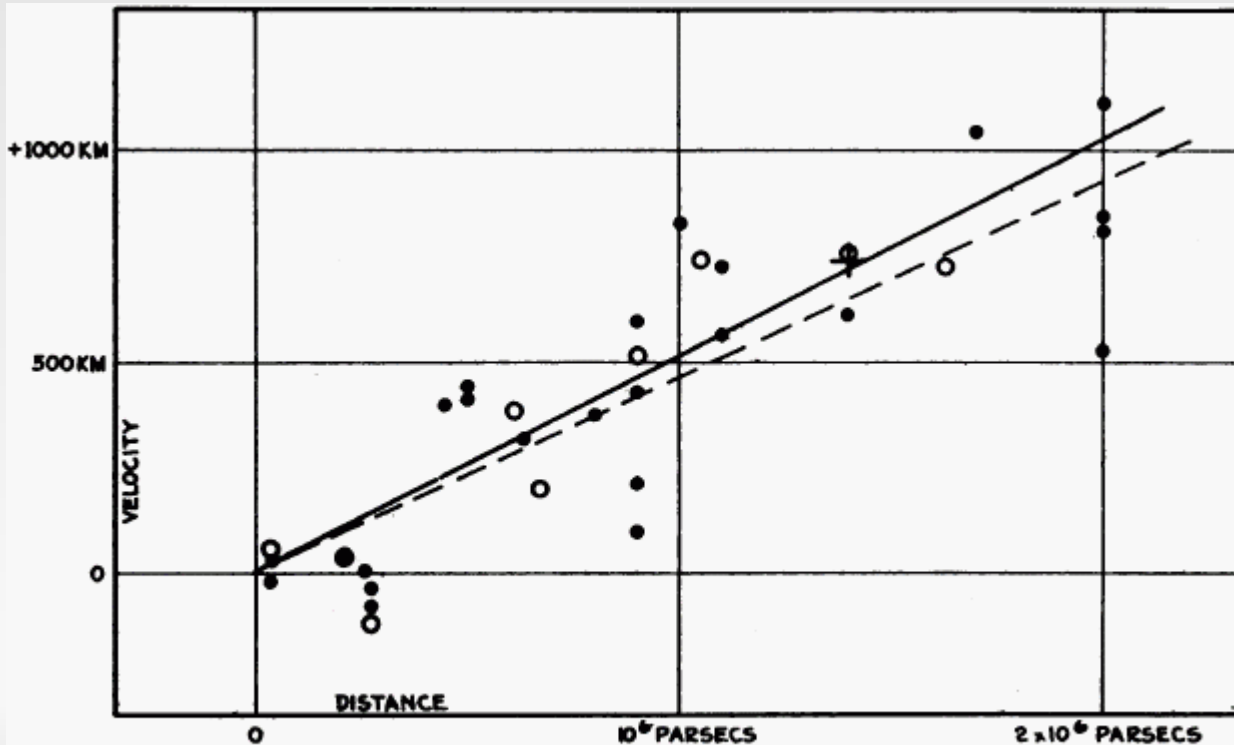


FIGURE 1

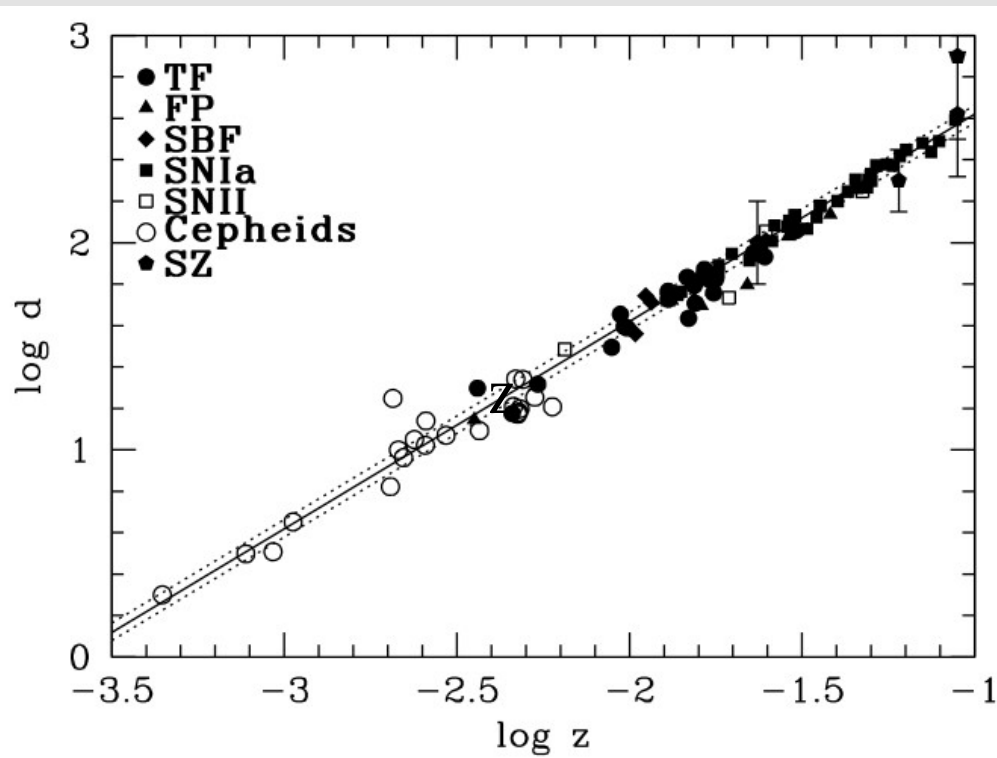
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Observações originais  
de Edwin Hubble em  
1929

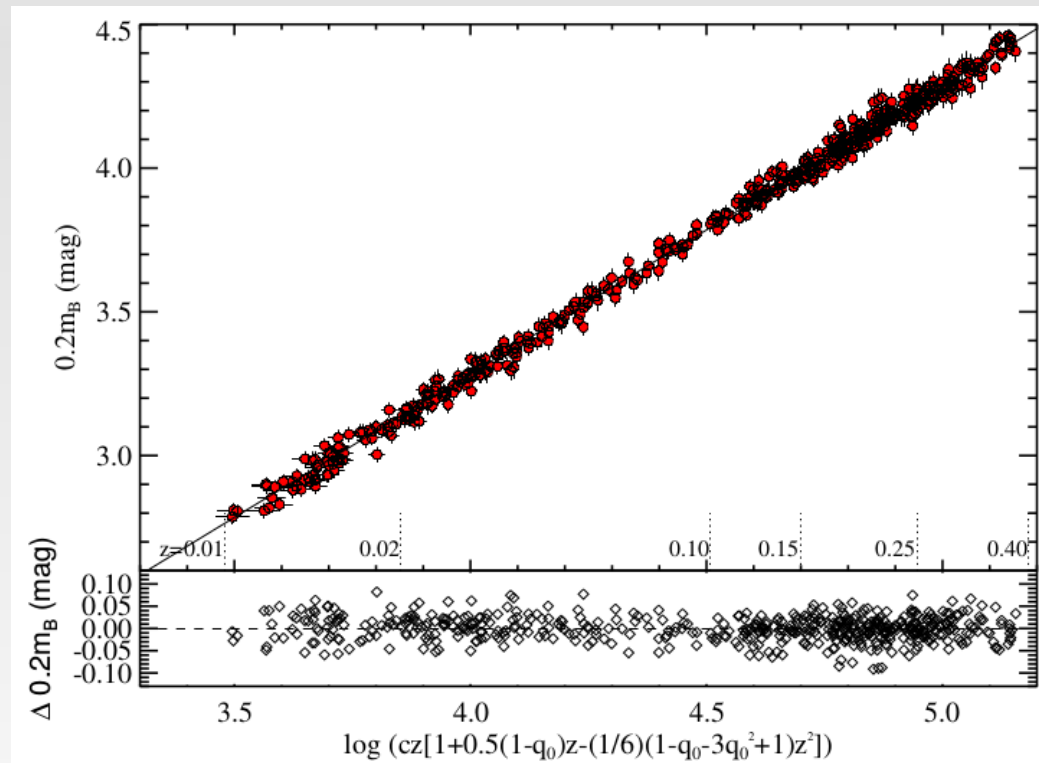
Distâncias medidas  
com luminosidade de  
estrelas Cefeidas

# Evidências observacionais: Diagrama de Hubble

## Trabalhos recentes e diversos indicadores



Freedman et al. 2001



Riess et al. 2016

$$H_0 = 73.24 \pm 1.74 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

(Riess et al. 2016)

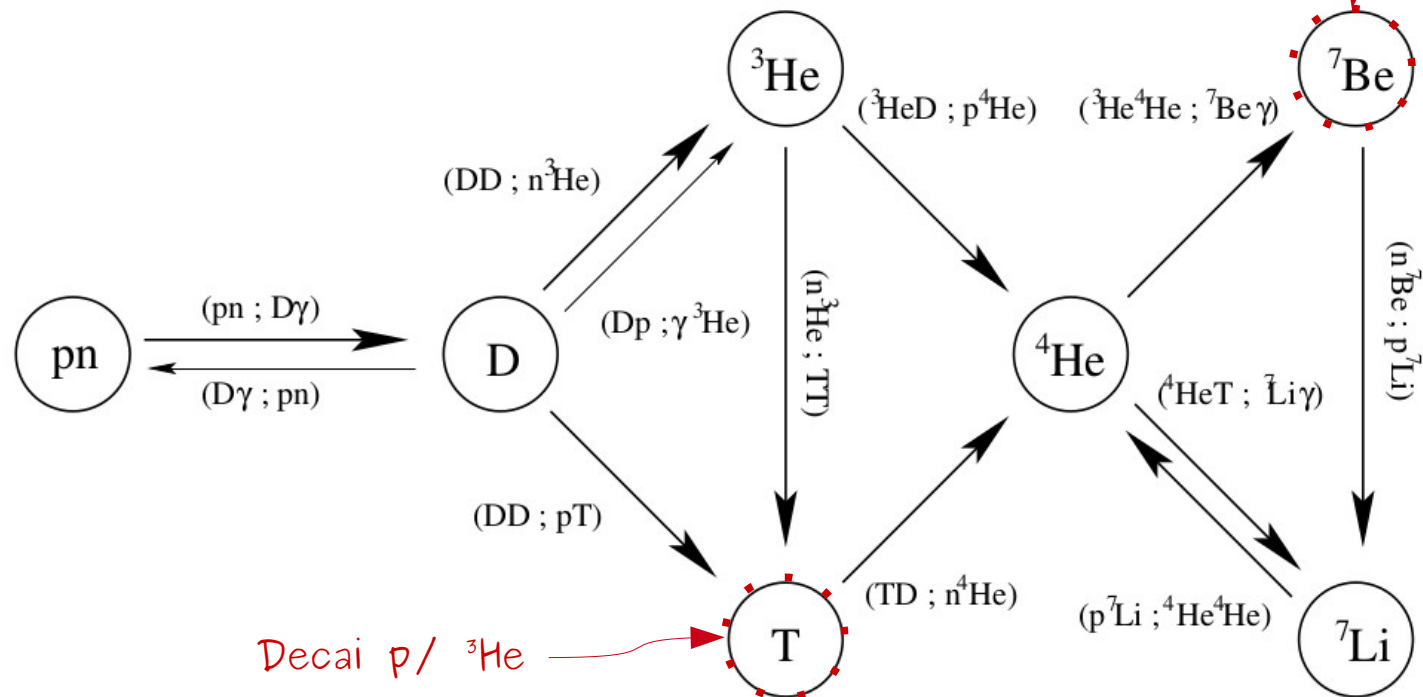
Param. De Hubble hoje

# Evidências observacionais: nucleossíntese primordial

Observações de regiões de baixa formação estelar indicam que ~25% da massa bariônica está na forma de Hélio

Formação estelar não pode ser responsável por tanto Hélio:  
L/M seria muito grande! (50x)

Reações esperadas no contexto da BBN



$^4\text{He}$  tem uma alta energia de ligação, dificultando formação de elementos mais pesados

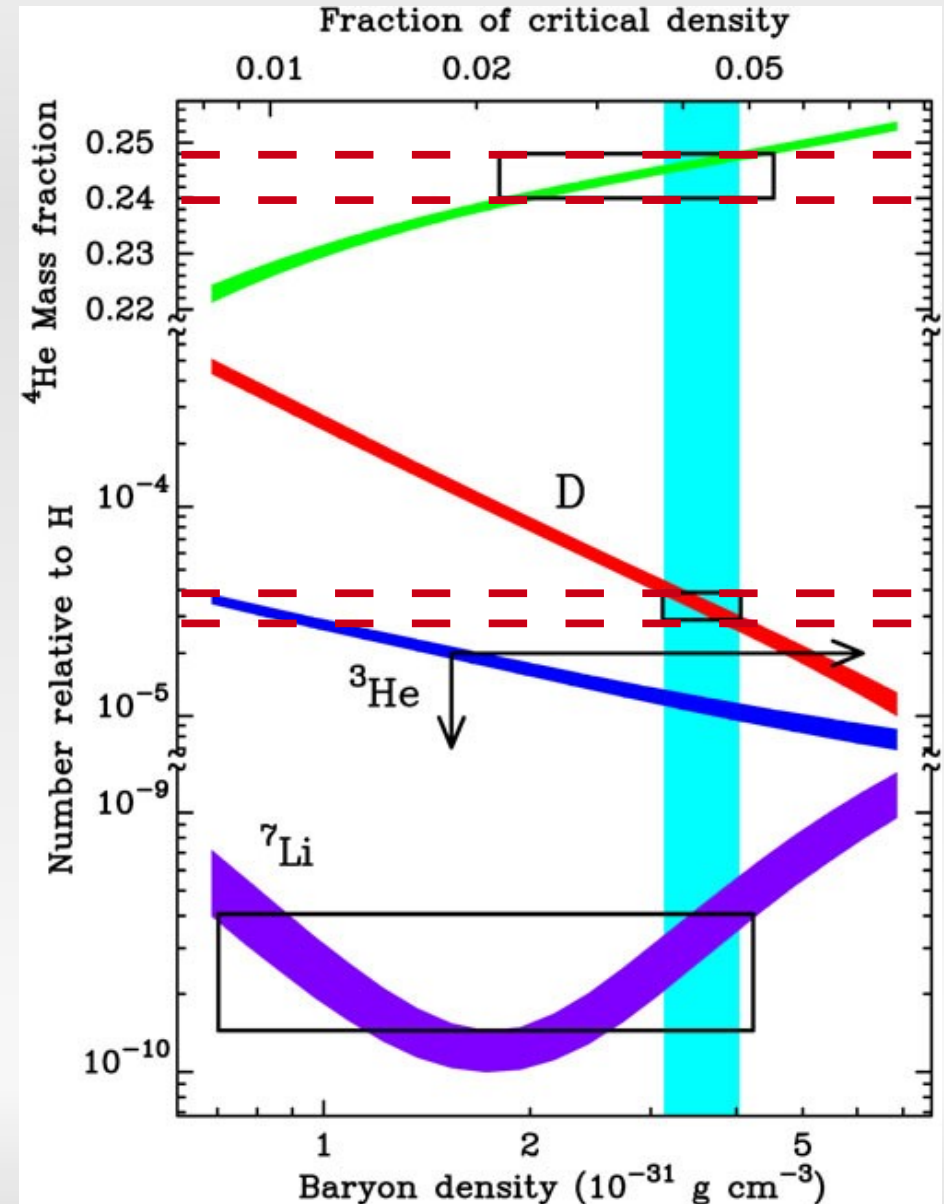
# Os problemas que são soluções: constituintes do Universo

- BBN prevê frações de H,  $^4\text{He}$  e D bastante bem.
- BBN indica um Universo primordial quente em rápida expansão.
- Não conhecemos outros processos capazes de criar D na quantidade observada.

## Linhas de absorção em QSOs

QSO	$z$	D/H
PKS 1937-1009	3.572	$3.25 \pm 0.3 \times 10^{-5}$
Q1009+299	2.504	$3.98^{+0.59}_{-0.67} \times 10^{-5}$
HS 0105+1619	2.536	$2.54 \pm 0.23 \times 10^{-5}$
Q1243+3047	2.525675	$2.42^{+0.35}_{-0.25} \times 10^{-5}$
Q2206-199	2.0762	$1.65 \pm 0.35 \times 10^{-5}$

Kirkman et al. 2003



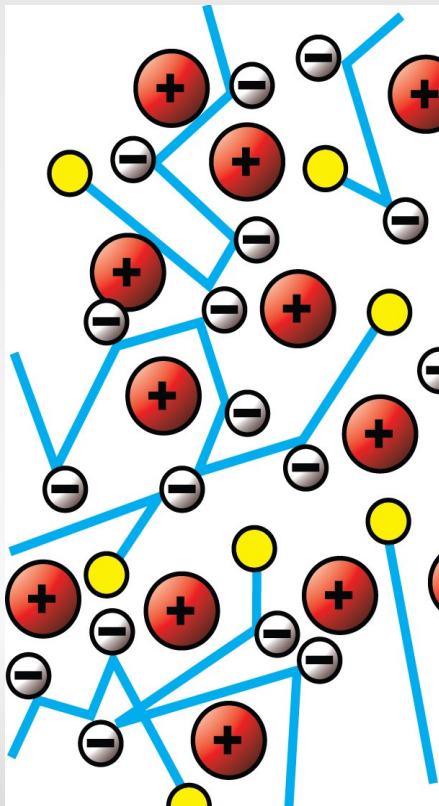
Burles et al. 2001

# Evidências observacionais: radiação cósmica de fundo

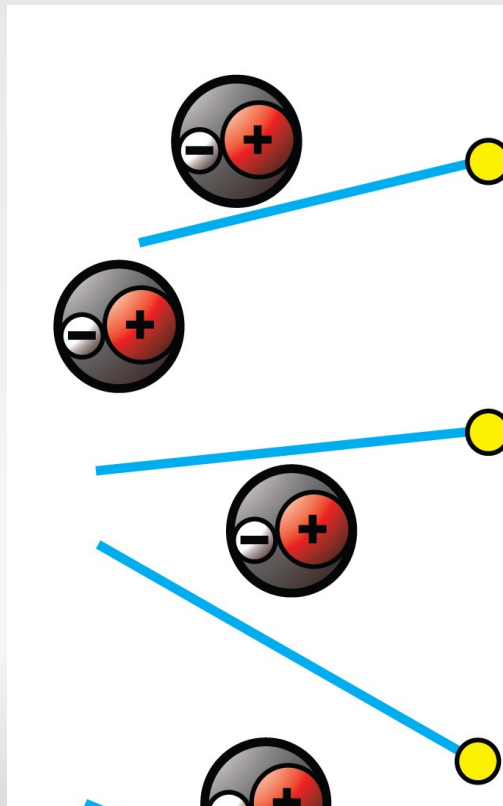
Universo quente (10k K)  
Plasma  
Fótons em interação constante  
Distribuição de equilíbrio

Universo esfria (3k K)  
Gás neutro (transparente)  
Fótons andam livremente  
Forma da distribuição mantida

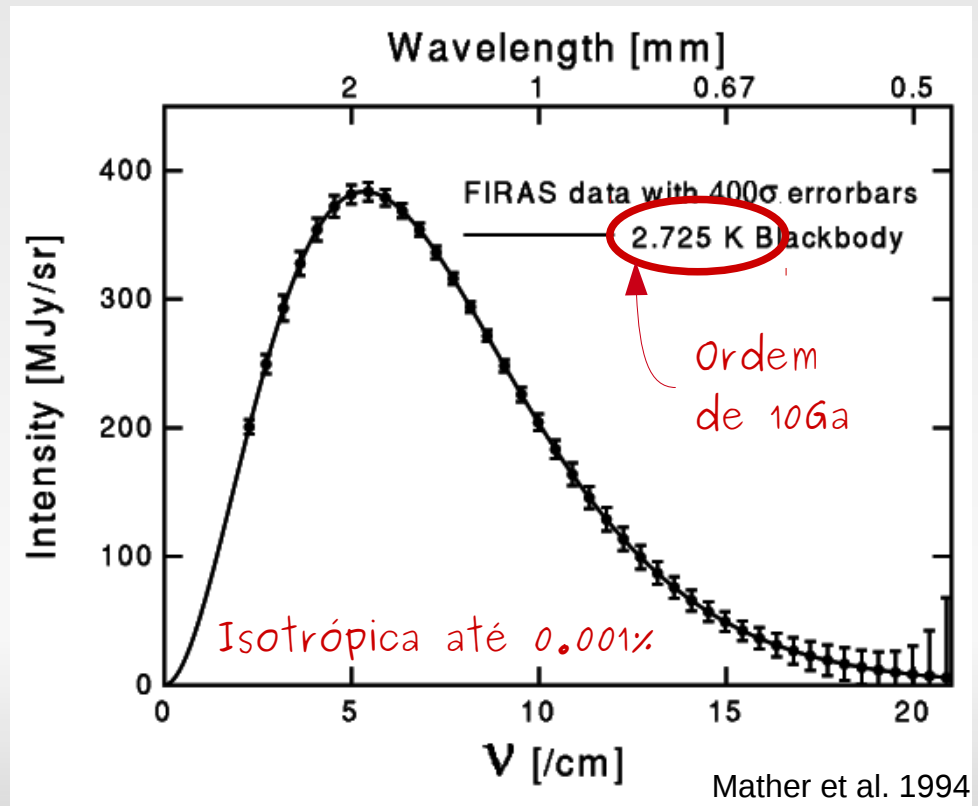
Plasma



Gás neutro



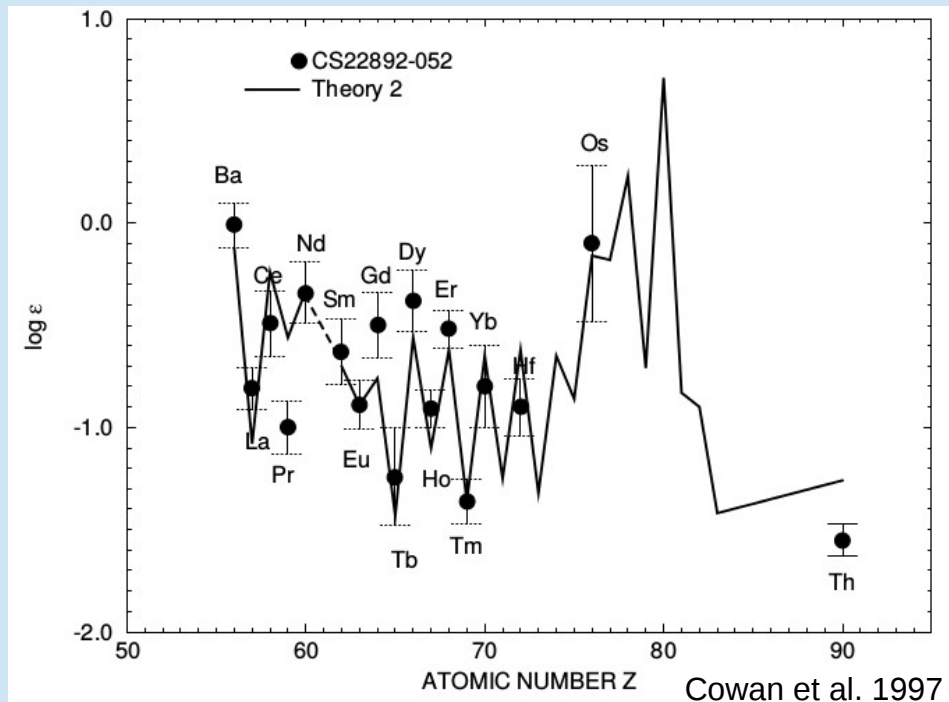
Espectro de corpo negro



# Evidências observacionais: idade de objetos

## Razão entre elementos radioativos

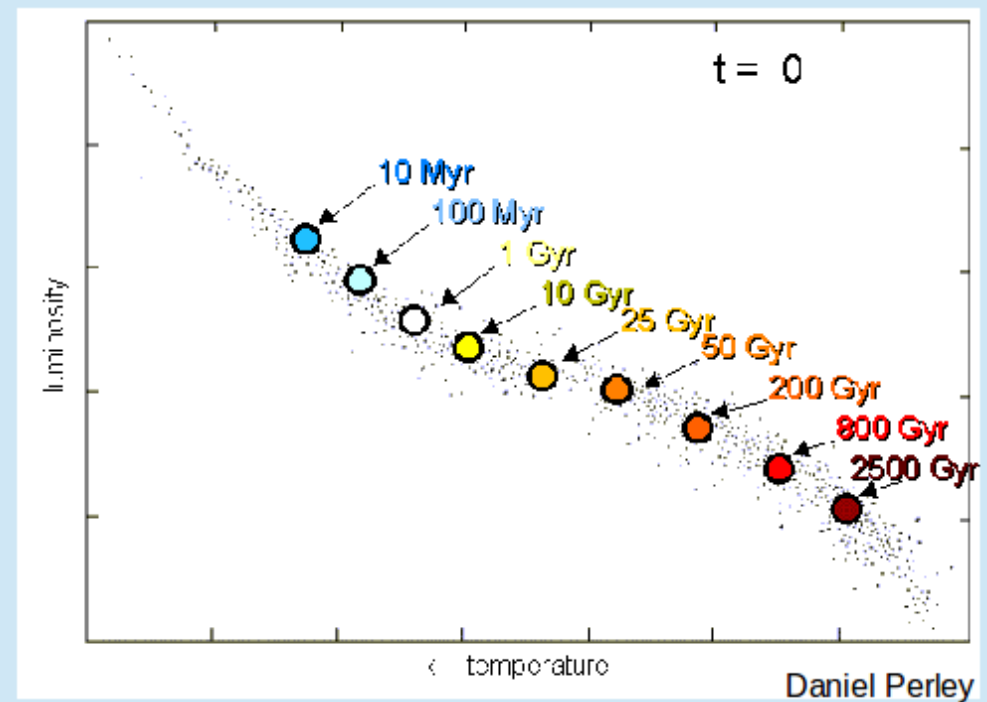
Abundância de elementos pesados (formados no processo r) em estrelas antigas



- 14,1  $\pm$  3 Ga (CS 22892-052, Sneden et al. 2003)
- 13,8  $\pm$  4 Ga (BD+17°3248, Cowan et al. 2002)
- 12,5  $\pm$  3 Ga (CS31082-001, Cayrel et al. 2001)

## Turn-off da sequência principal

Aglomerados globulares são agrupamentos de estrelas de mesma idade, medida pela sequência principal



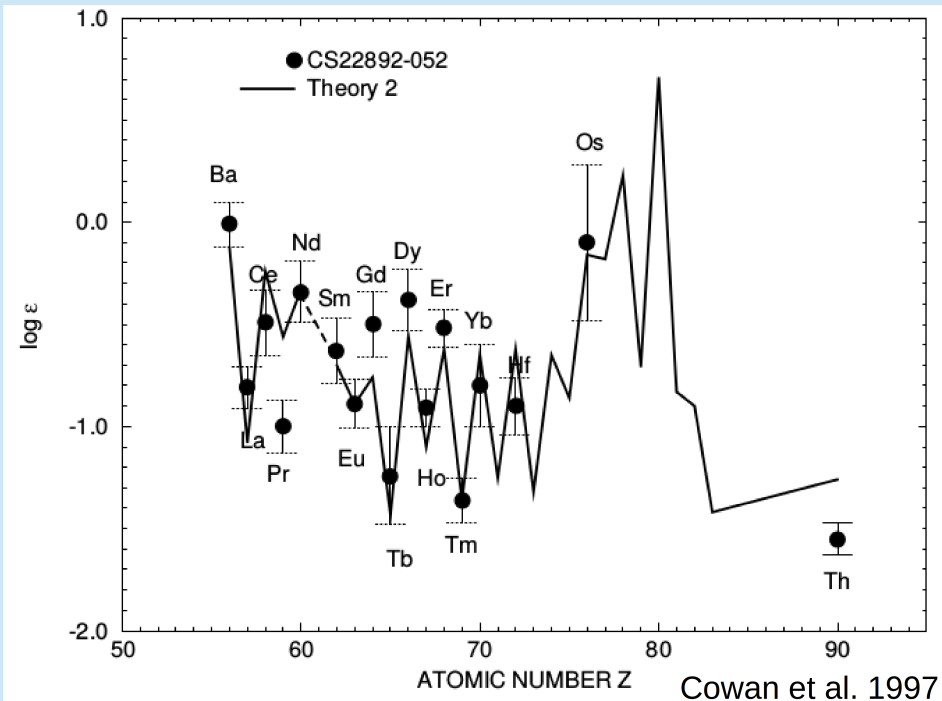
- 14,6  $\pm$  1,7 Ga (Chaboyer et al. 1997)
- 11,8  $\pm$  2,3 Ga (Gratton et al. 1997)
- 12,5  $\pm$  0,5 Ga (Reid et al. 1997)
- 11,5  $\pm$  1,3 Ga (Chaboyer et al. 2001)



# Evidências observacionais: idade de objetos

## Razão entre elementos radioativos

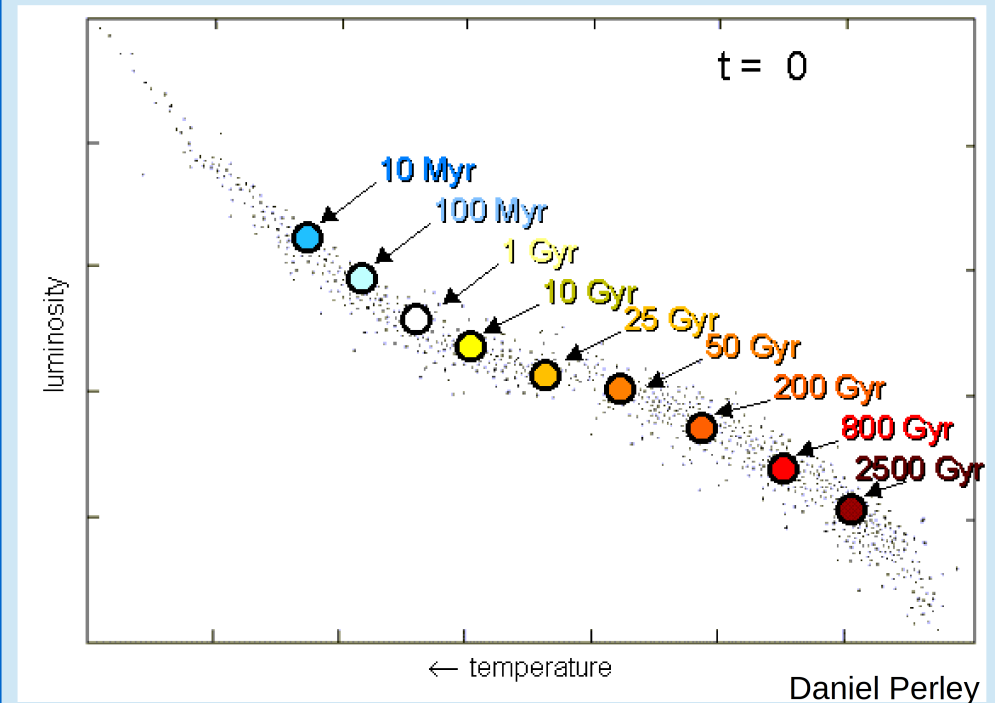
Abundância de elementos pesados (formados no processo r) em estrelas antigas



- 14,1 ± 3 Ga (CS 22892-052, Sneden et al. 2003)
- 13,8 ± 4 Ga (BD+17°3248, Cowan et al. 2002)
- 12,5 ± 3 Ga (CS31082-001, Cayrel et al. 2001)

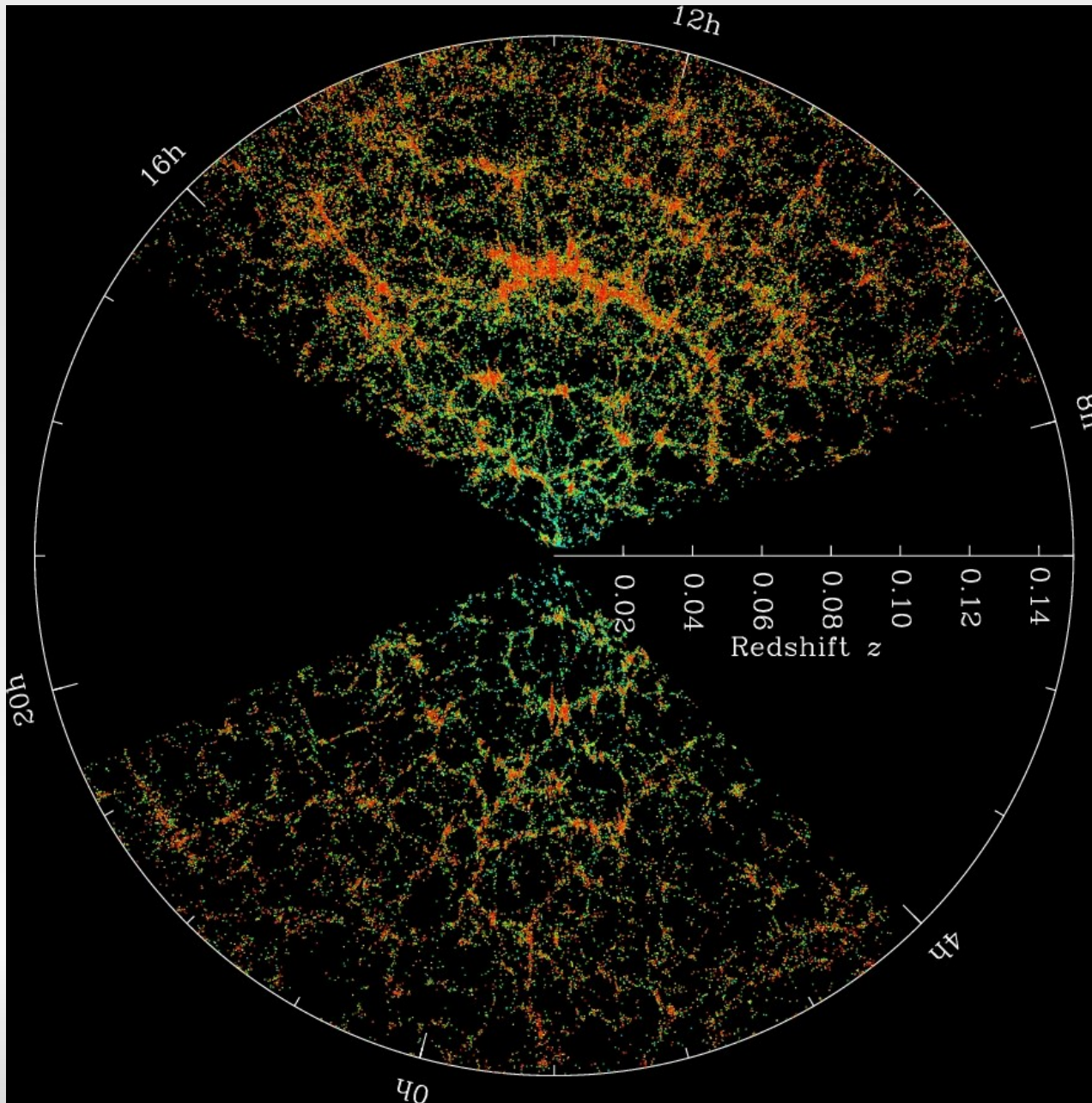
## Turn-off da sequência principal

Aglomerados globulares são agrupamentos de estrelas de mesma idade, medida pela sequência principal



- 14,6 ± 1,7 Ga (Chaboyer et al. 1997)
- 11,8 ± 2,3 Ga (Gratton et al. 1997)
- 12,5 ± 0,5 Ga (Reid et al. 1997)
- 11,5 ± 1,3 Ga (Chaboyer et al. 2001)

# Evidências observacionais: distribuição de matéria no Universo



Observações do  
Sloan Digital Sky  
Survey (SDSS)

Fatias mostram  
estrutura filamentar  
do Universo.

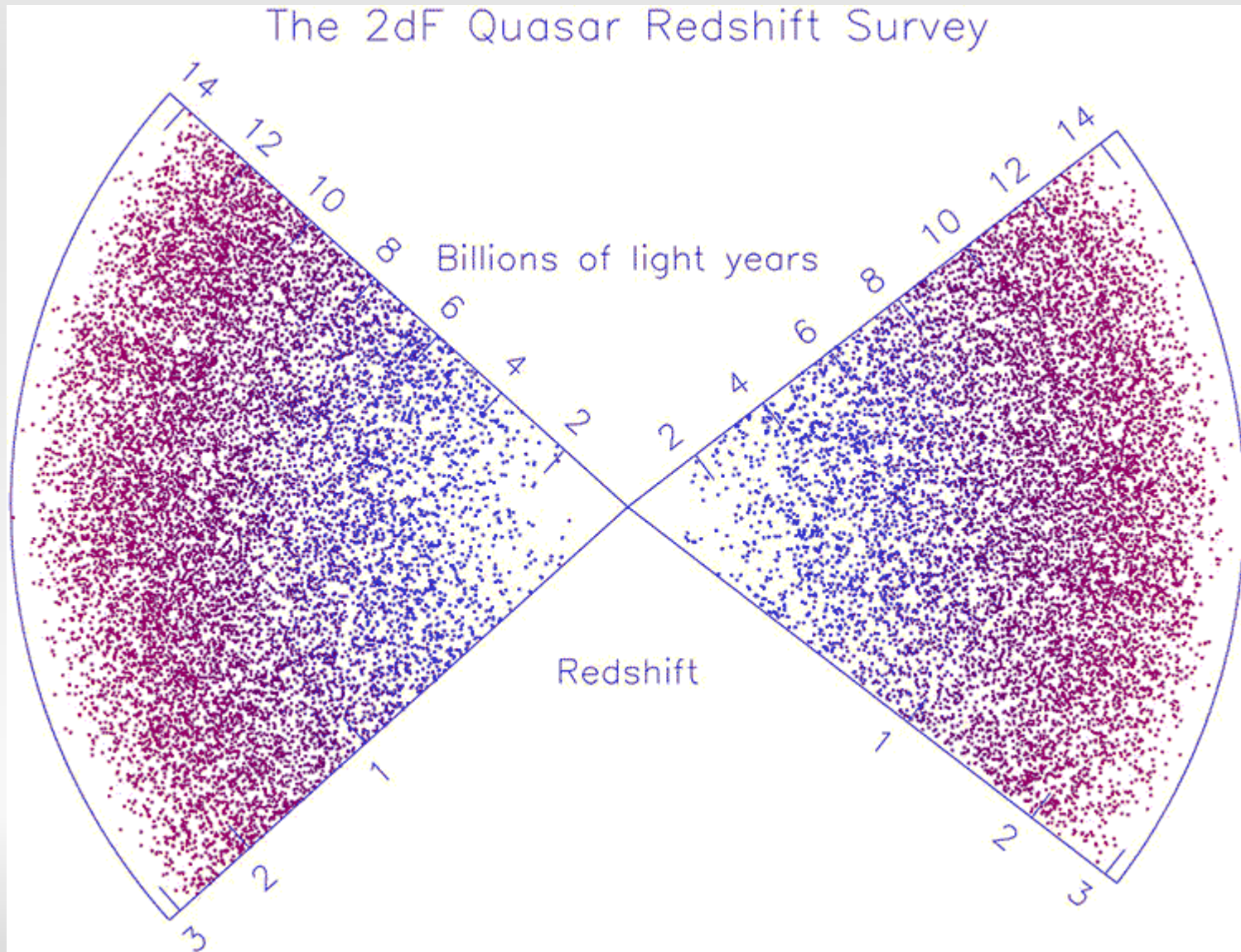
Vazios de mesmo  
diâmetro

Raio de 600 Mpc (2 Ga.l.)

Escala a cada 85 Mpc

# Evidências observacionais: distribuição de matéria no Universo

## Homogeneidade em grandes escalas

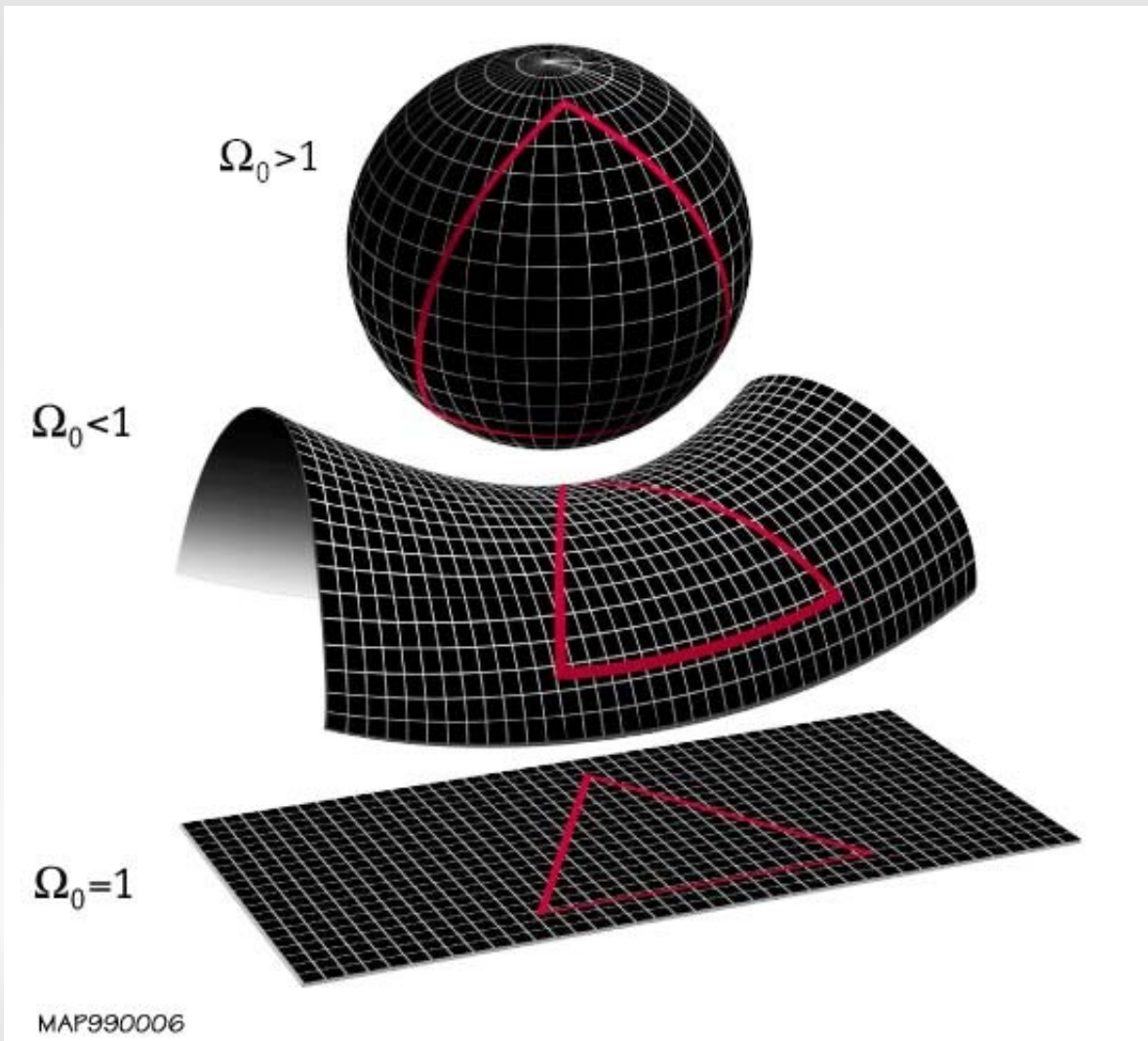


# Os problemas que são soluções



# Os problemas que são soluções: (geometria do espaço)

A matéria altera as propriedades geométricas do espaço  
através da gravidade



Universo fechado:  
raios de luz convergem

Universo aberto:  
raios de luz divergem

Universo plano:  
raios de luz mantêm  
orientação

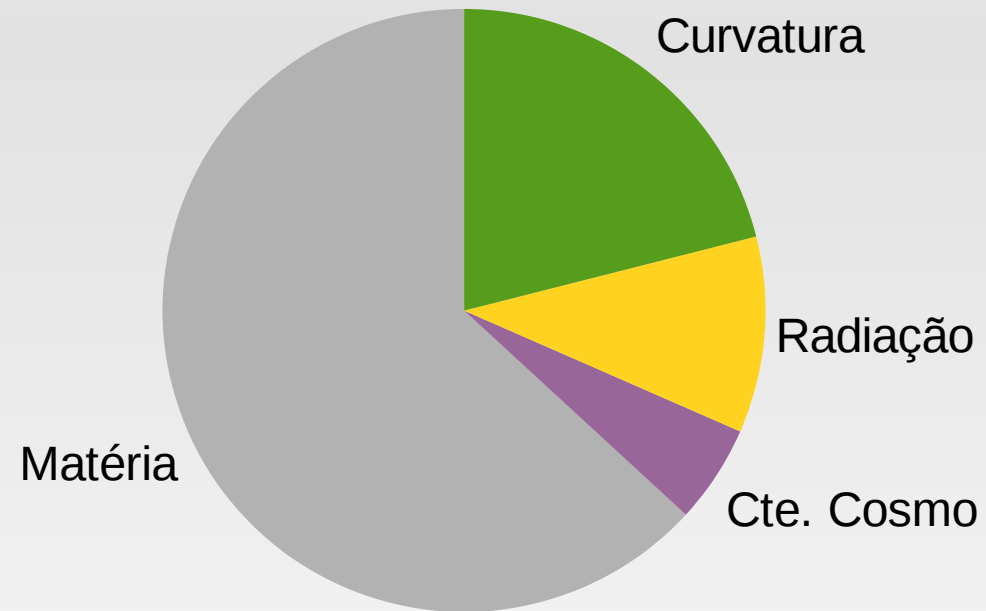
# Os problemas que são soluções: constituintes do Universo

$$H^2(t) = \frac{8\pi G}{3c^2} \rho(t) - \frac{c^2 k}{a^2(t)} + \frac{c^2 \Lambda}{3}$$

$$\rho(t) = \frac{\rho_m}{a^3(t)} + \frac{\rho_r}{a^4(t)}$$

$$H^2(t) = H_0^2 \left[ \frac{\Omega_m}{a^3(t)} + \frac{\Omega_r}{a^4(t)} + \frac{\Omega_k}{a^2(t)} + \frac{\Omega_\Lambda}{1} \right]$$

Qual seria a composição atual?



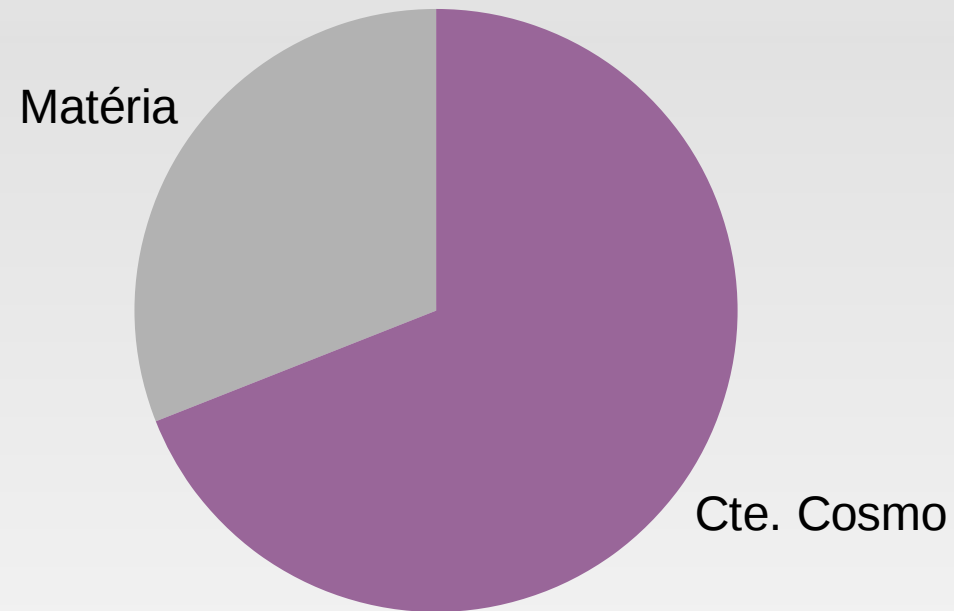
# Os problemas que são soluções: constituintes do Universo

$$H^2(t) = \frac{8\pi G}{3c^2} \rho(t) - \frac{c^2 k}{a^2(t)} + \frac{c^2 \Lambda}{3}$$

$$\rho(t) = \frac{\rho_m}{a^3(t)} + \frac{\rho_r}{a^4(t)}$$

$$H^2(t) = H_0^2 \left[ \frac{\Omega_m}{a^3(t)} + \frac{\Omega_r}{a^4(t)} + \frac{\Omega_k}{a^2(t)} + \frac{\Omega_\Lambda}{1} \right]$$

Parece ser esta!

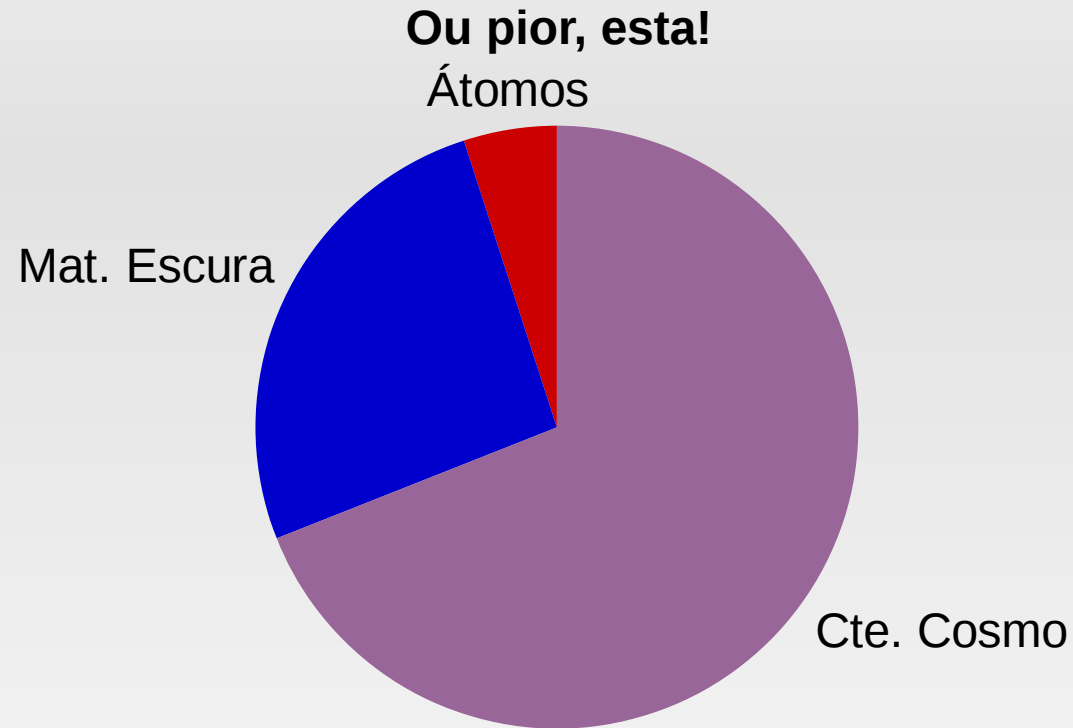


# Os problemas que são soluções: constituintes do Universo

$$H^2(t) = \frac{8\pi G}{3c^2} \rho(t) - \frac{c^2 k}{a^2(t)} + \frac{c^2 \Lambda}{3}$$

$$\rho(t) = \frac{\rho_m}{a^3(t)} + \frac{\rho_r}{a^4(t)}$$

$$H^2(t) = H_0^2 \left[ \frac{\Omega_m}{a^3(t)} + \frac{\Omega_r}{a^4(t)} + \frac{\Omega_k}{a^2(t)} + \frac{\Omega_\Lambda}{1} \right]$$



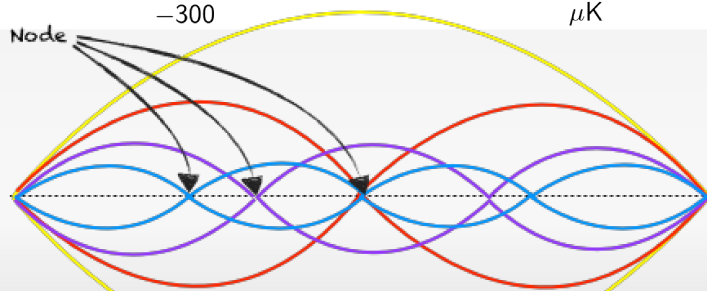
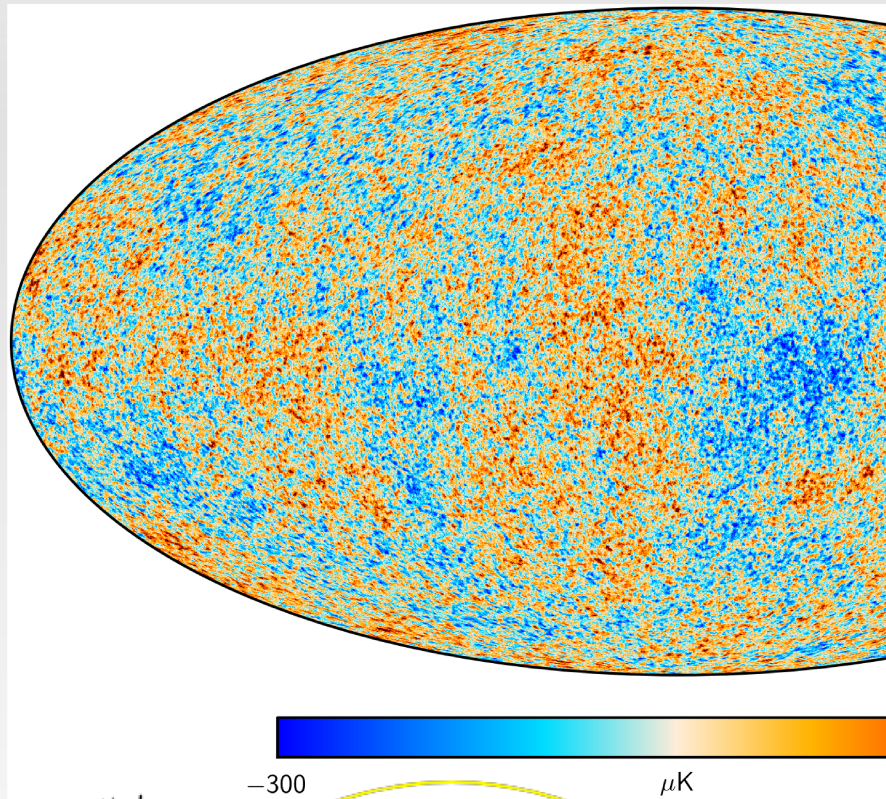
**A grosso modo, os ingredientes atuais são:**

- 5% de bárions (e leptons, ou seja, matéria conhecida);
- 25% de matéria escura;
- 70% de constante cosmológica (ou energia escura).

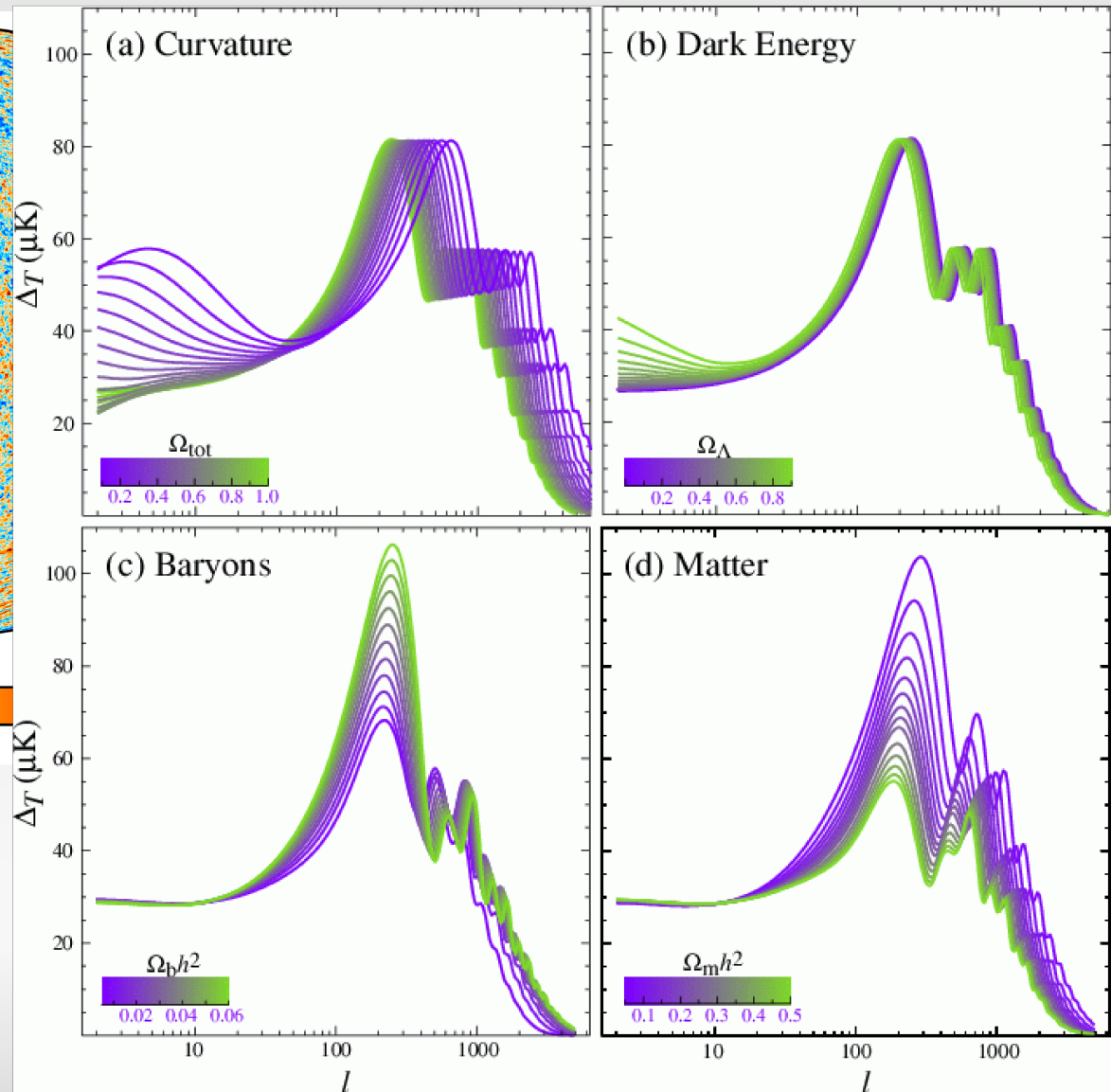


# Os problemas que são soluções: constituintes do Universo

Espectro de potência da CMB depende dos constituintes do Universo

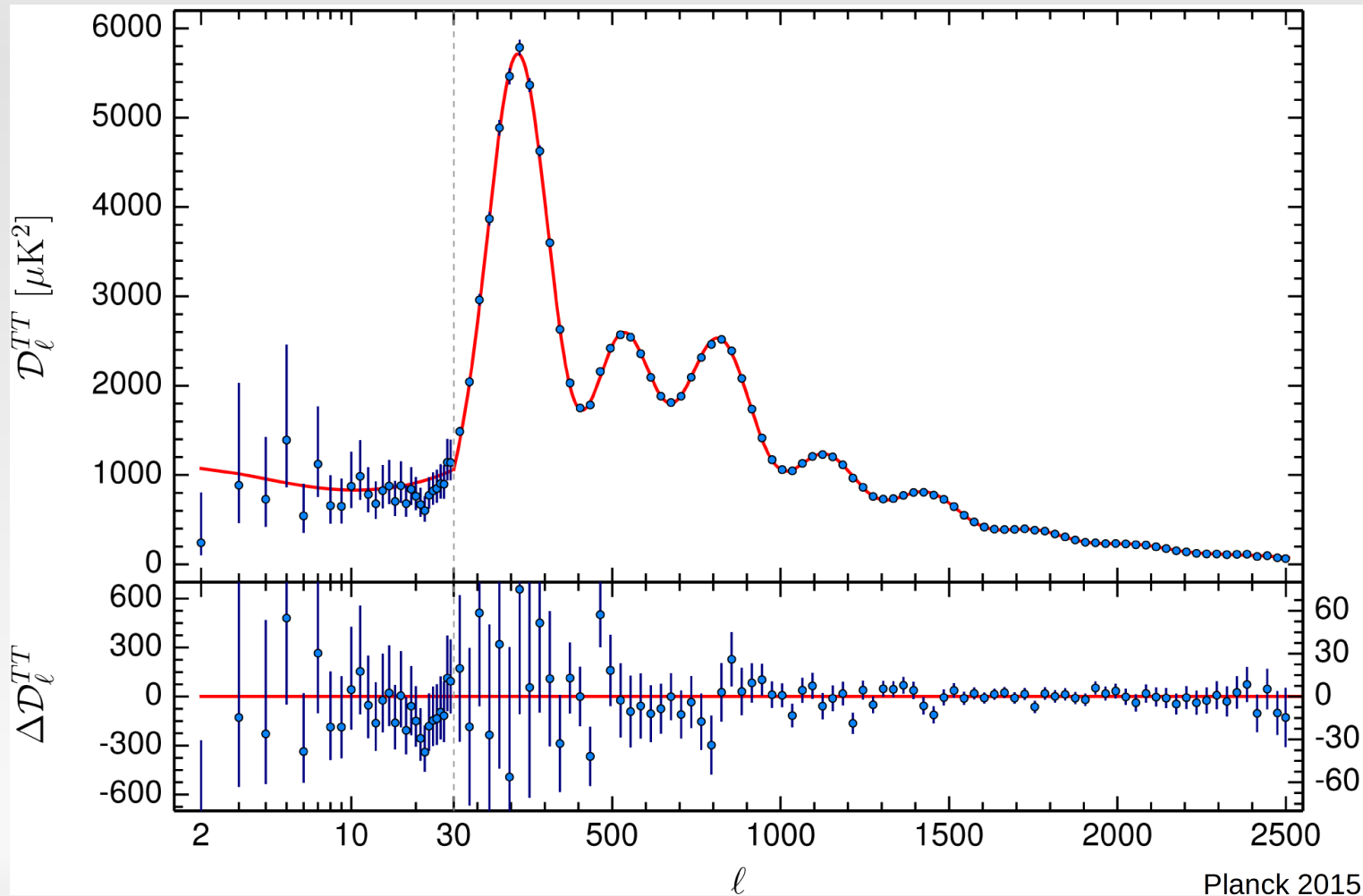


- Starting note/string
- 1st Harmonic (One Octave up)
- 2nd harmonic (One octave + a fifth up)
- 3rd harmonic (Two octaves up)



# Os problemas que são soluções: constituintes do Universo

Espectro de potência da CMB depende dos constituintes do Universo



$$\Omega_k = -0.042(45)$$

*Conservador*

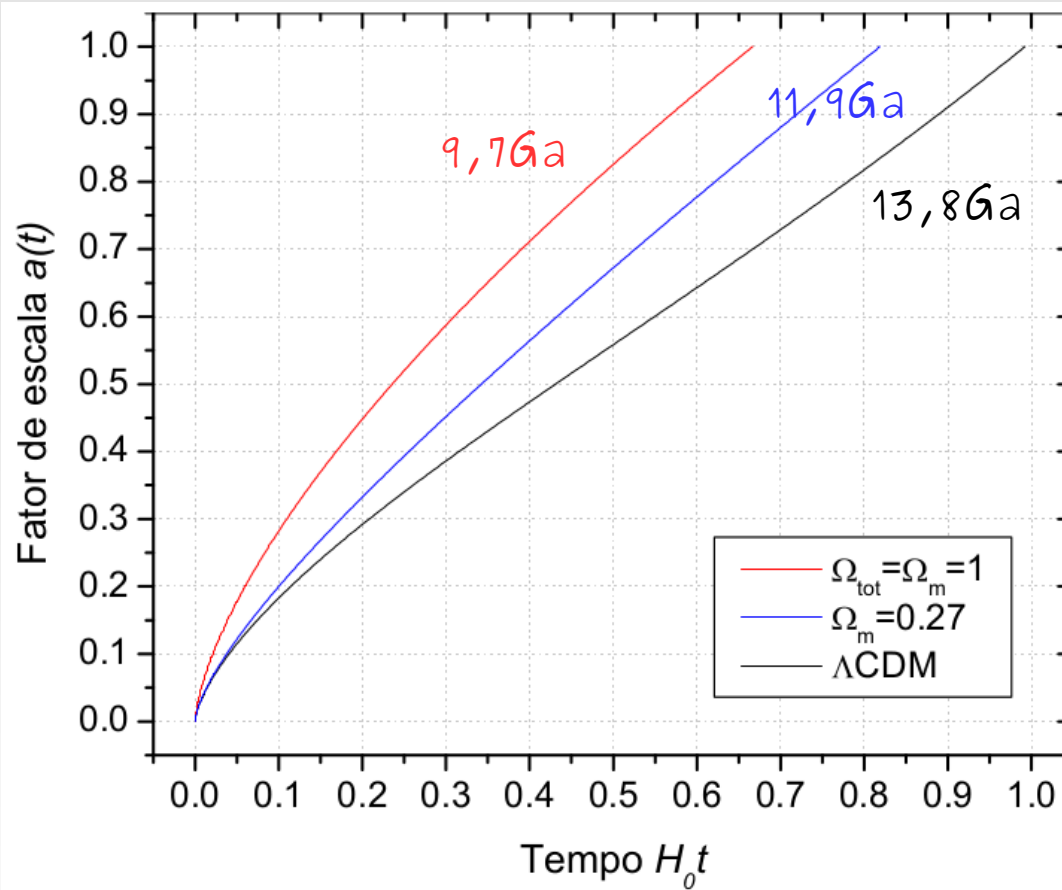
$$\Omega_c = 0.2642(92)$$

$$\Omega_b = 0.0490(15)$$

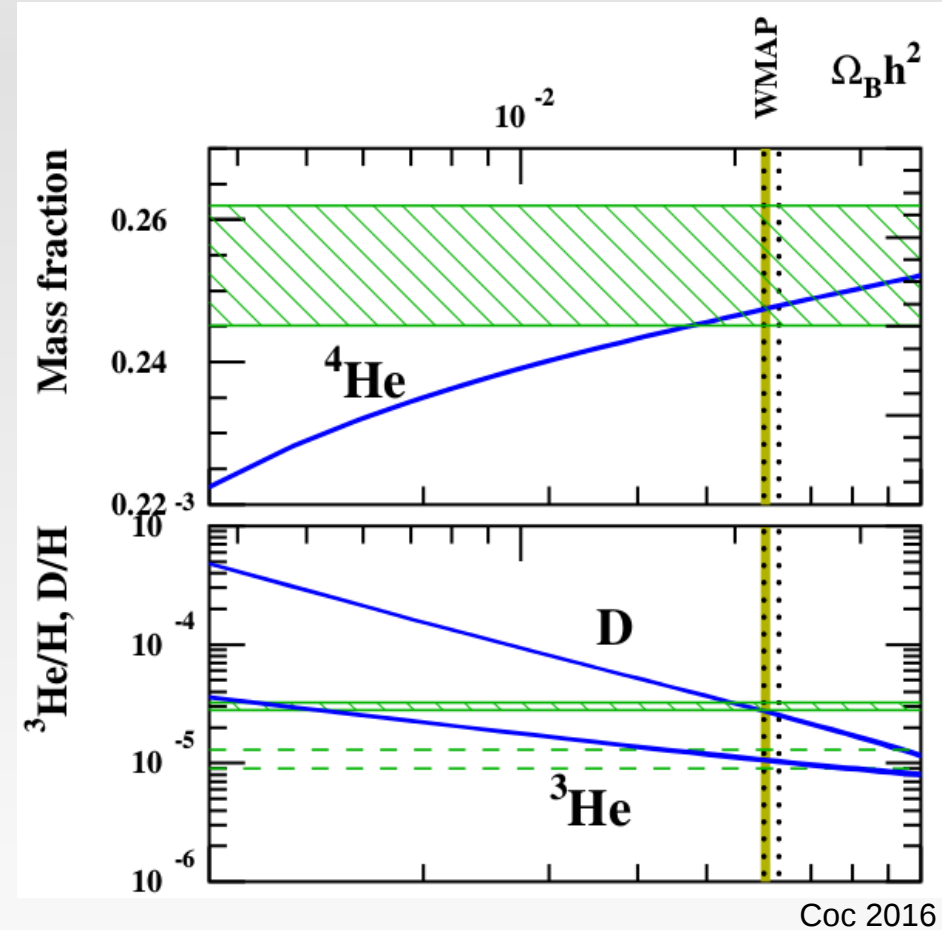
$$\Omega_\Lambda = 0.729(46)$$

# Os problemas que são soluções: compatibilidade entre observáveis

CMB é compatível com idades



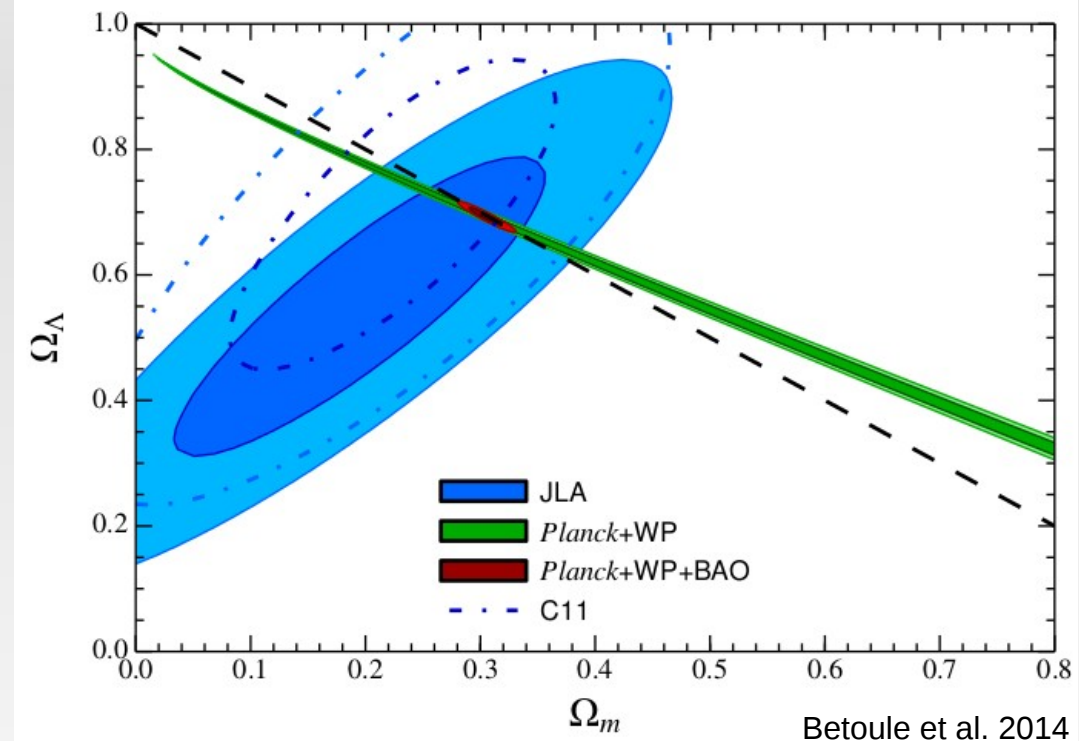
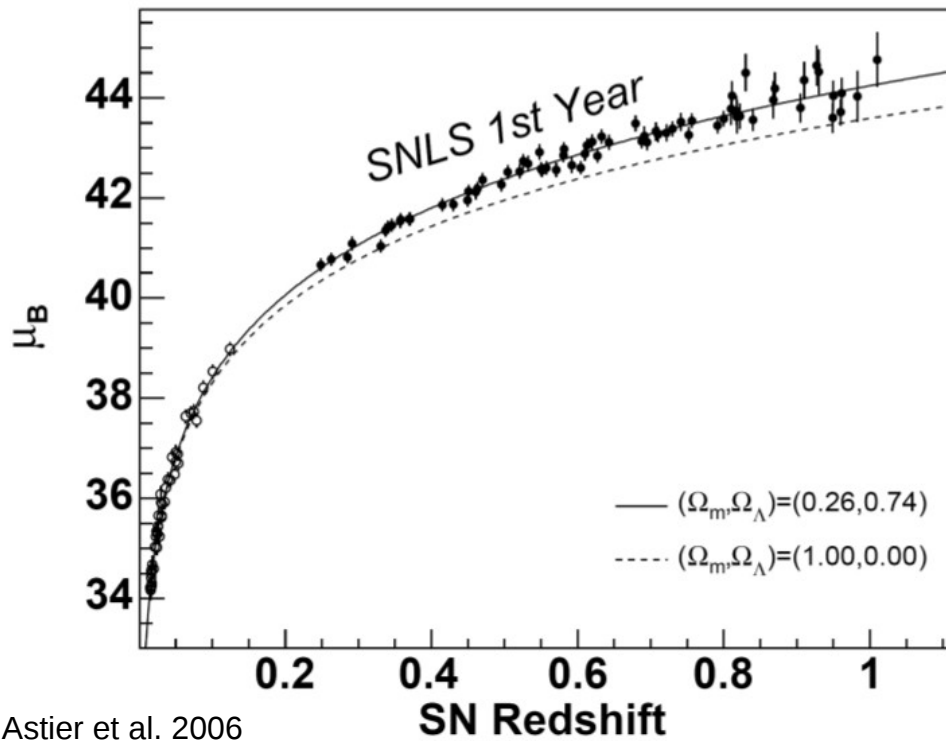
CMB é compatível com BBN



Idade de objetos não é compatível com  
Universo com muita matéria

# Os problemas que são soluções: compatibilidade entre observáveis

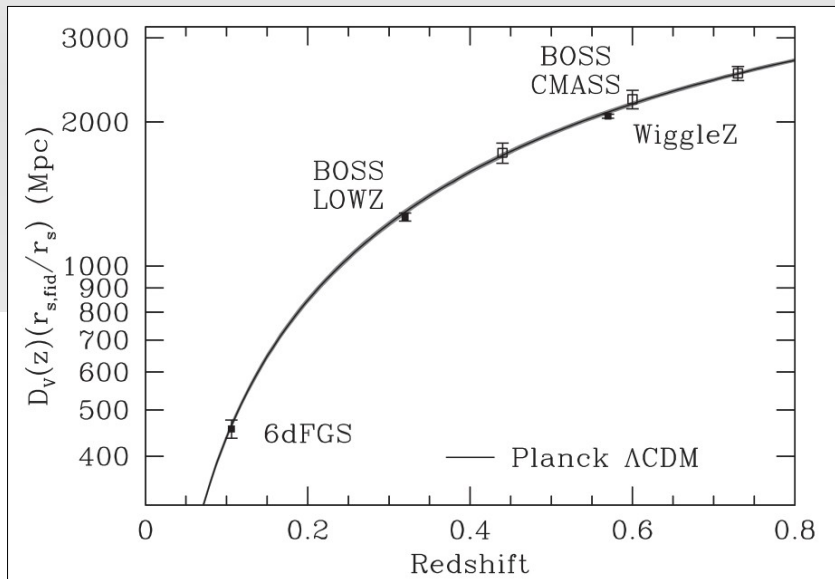
## CMB é compatível com Supernovas Ia



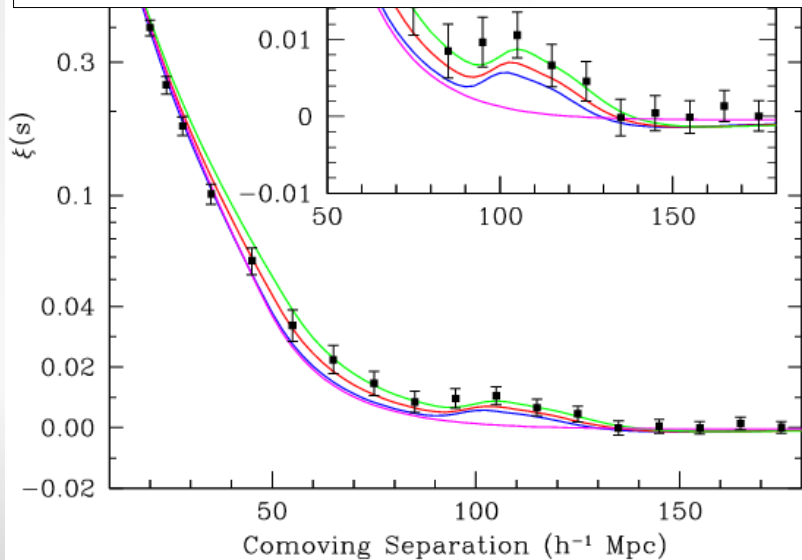
Relação entre redshift e distância (medida através da magnitude aparente de SNIas) indicam que o Universo está acelerando.

# Os problemas que são soluções: compatibilidade entre observáveis

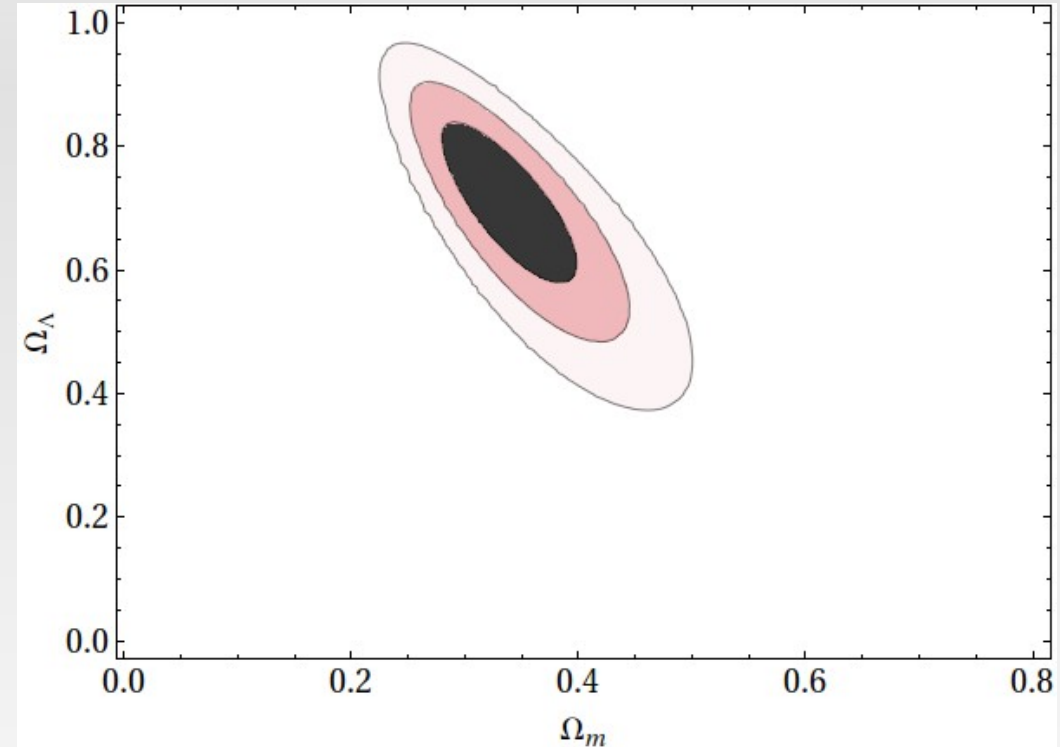
CMB é compatível com distribuição de galáxias (BAO)



Anderson et al. 2014



Eisenstein et al. 2005

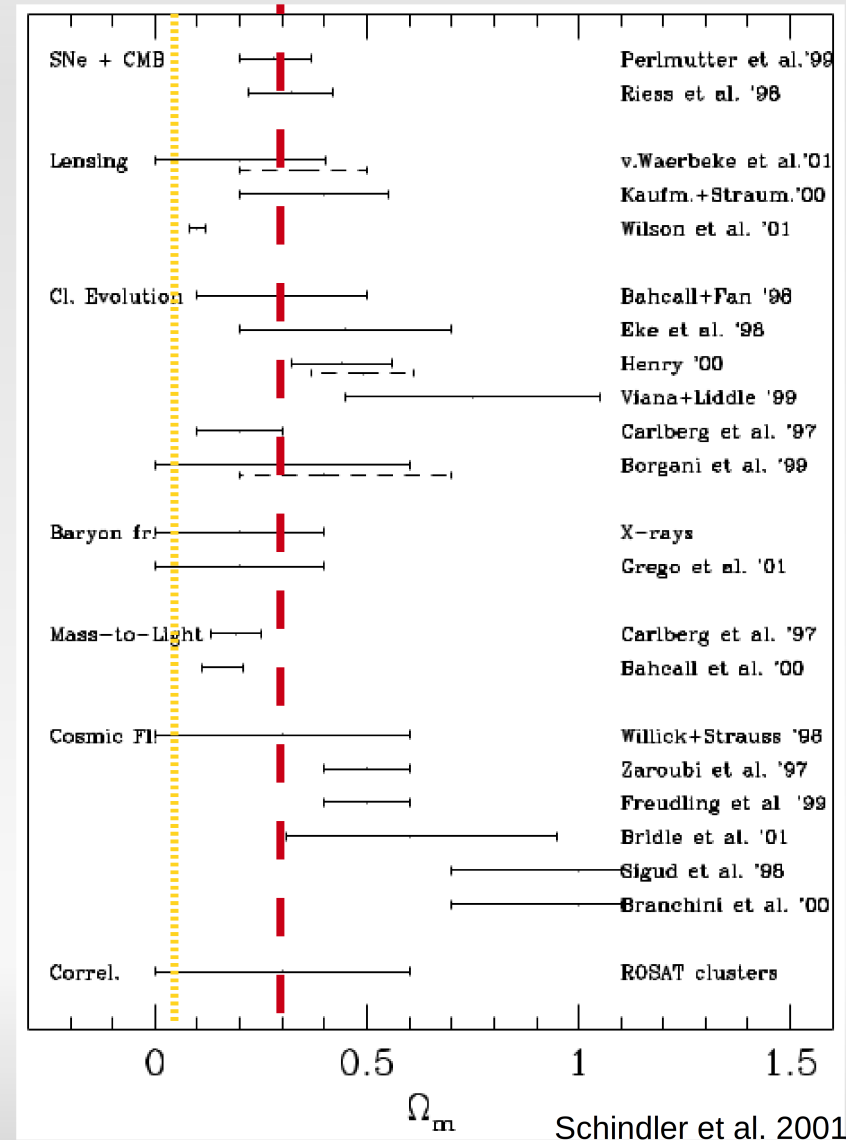
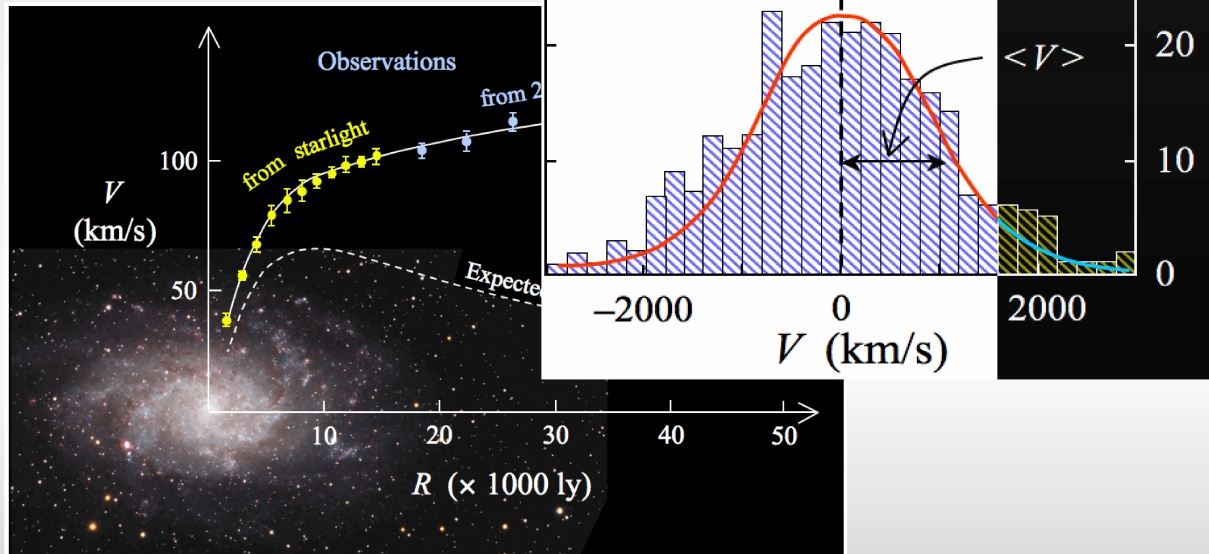


Contornos calculados com dados de Anderson et al 2014 (ao lado) e *prior* em  $H_0 = 73.24 \pm 1.74 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  (Riess et al. 2016)

# Os problemas que são soluções: compatibilidade entre observáveis

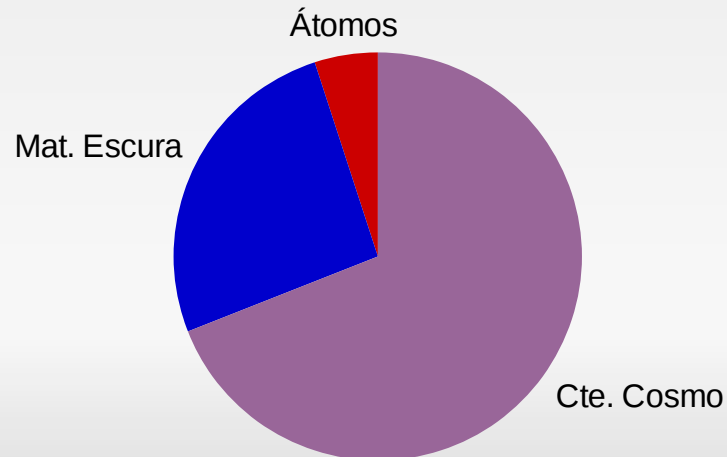
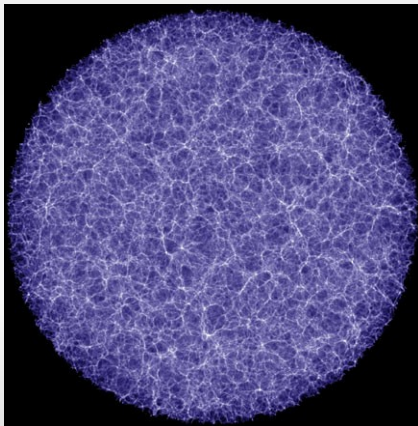
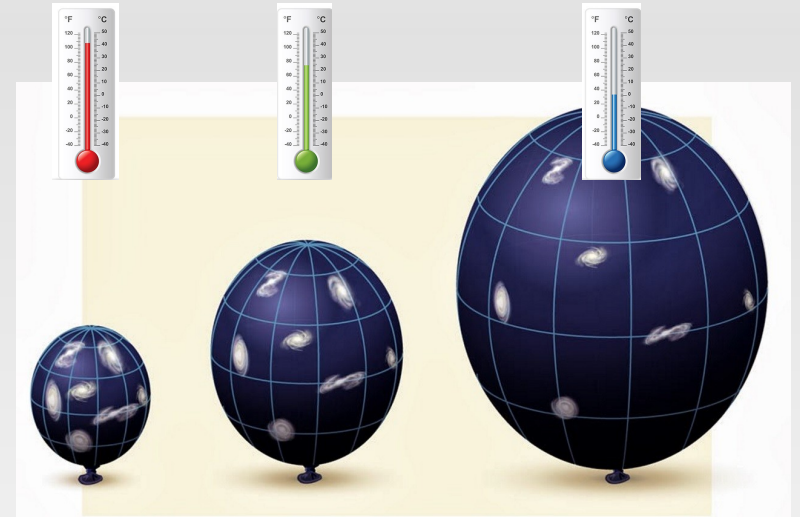
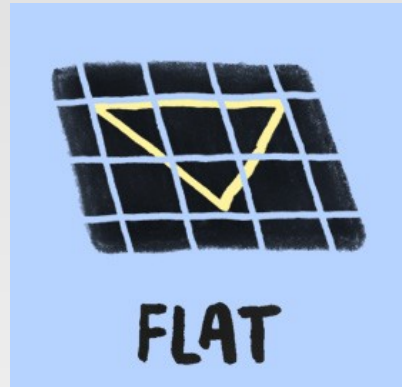
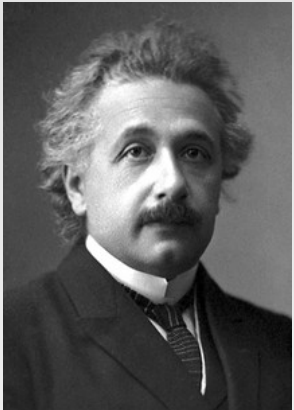
## Evidências para matéria escura não vêm só da cosmologia

- Curvas de rotação de galáxias
- Dispersão de velocidades em aglomerados
- Raios-X em aglomerados
- Lentes gravitacionais
- ...

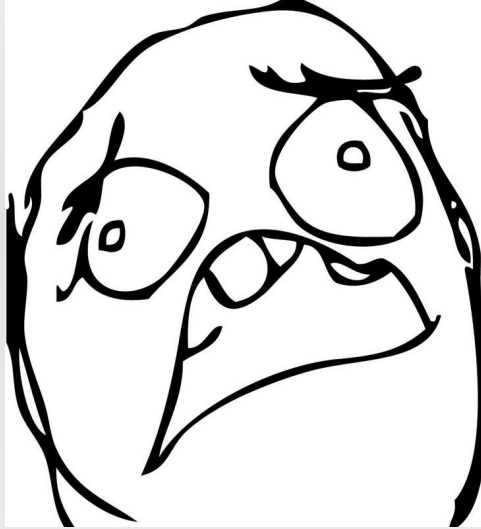


# O modelo cosmológico padrão

Em resumo:



# Os problemas que são problemas



- Falta de Lítio (detectamos menos lítio que o esperado pela BBN)
- Falta de bárions (observado é menor que previsto pela BBN)
- As galáxias satélites perdidas (menos do que esperado)
- Diferença *cusp-core* (perfil observado tem núcleo cte, diferente do simulado)
- A relação entre massa faltante e aceleração "bariônica" (perfil de matéria escura é previsível a partir da matéria bariônica)
- $H_0$  de SNIas e da CMB (tensão de  $3.4\sigma$ )

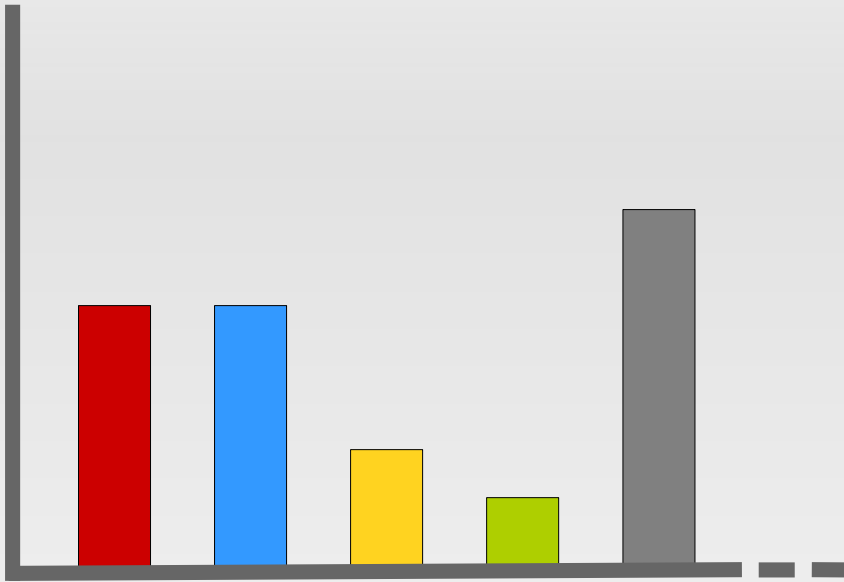


# Evidências para o que sabemos (e para o que não sabemos) sobre o Universo

Obrigado!

# Slides Extras

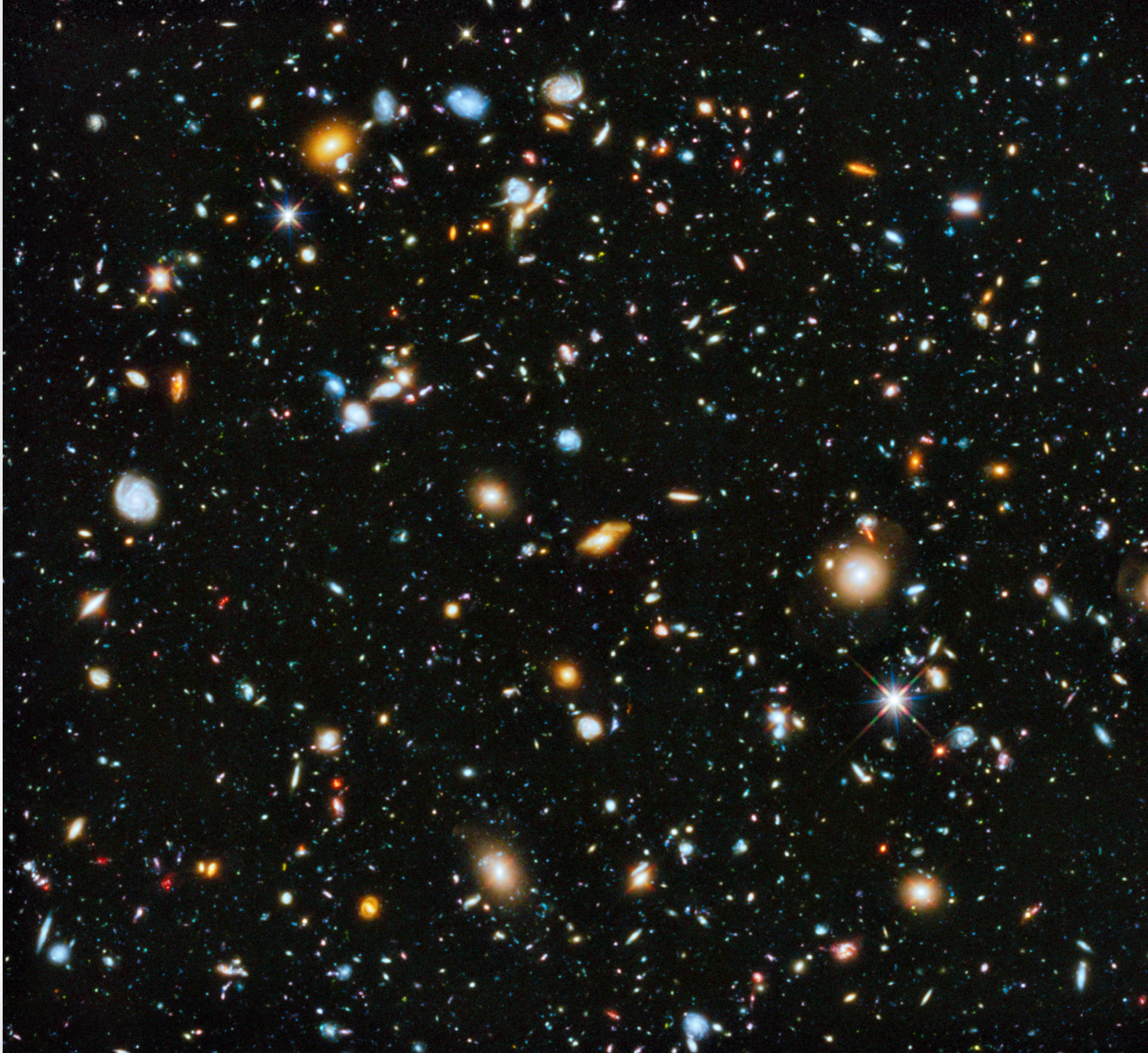
# Constituintes e suas quantidades; propriedades do espaço vazio



Universo neutro

Muitos fótons e neutrinos  
pouco energéticos

# Distribuição de matéria no Universo



Imagens do Hubble  
Ultra Deep Field

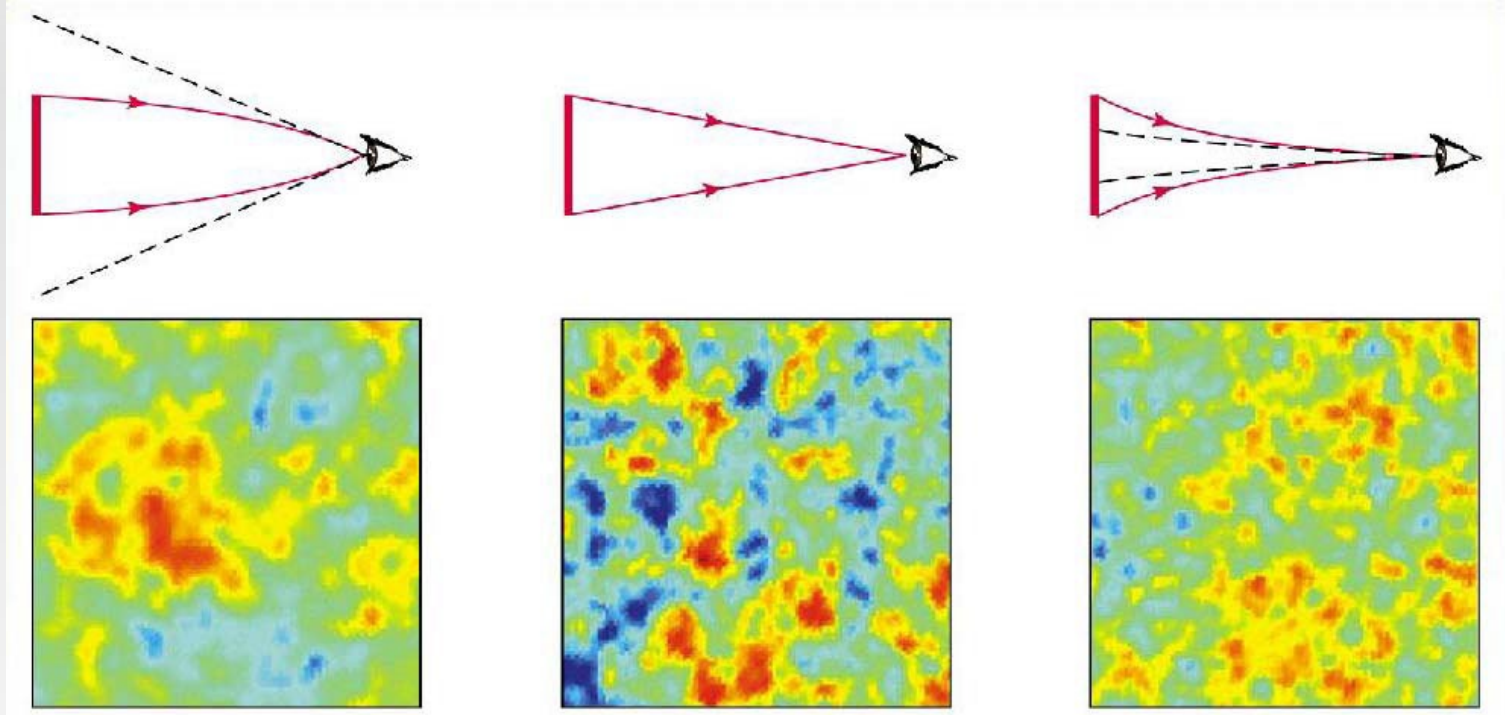
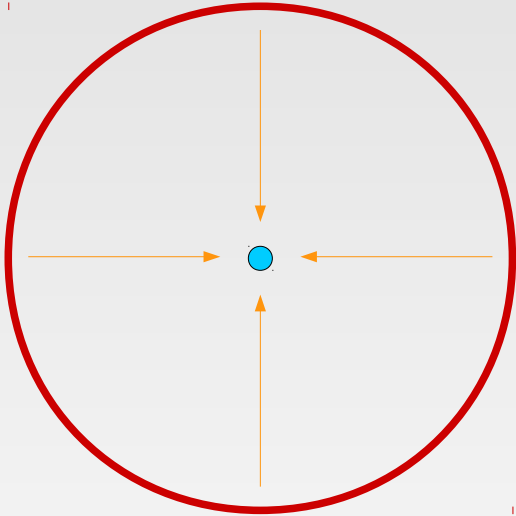
1/10 do diâmetro da  
Lua

Galáxias a  
distâncias de  
21, 27, 33 Ga.l...

# Os problemas que são soluções: constituintes do Universo

Tamanho das regiões quentes e frias indicam que Universo é plano

Superfície de último espalhamento (LSS)



O que também pode alterar essa escala:

- Efeitos sobre propagação de ondas no Universo jovem;
- Variações na distância até a LSS.

*Menos significativas e deixam traços*