



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

# Cosmologia Observacional Charla I

Carlos Alexandre Wuensche  
Divisão de Astrofísica - INPE

III Curso Boliviano de Astrofísica y  
Cosmologia  
La Paz, Setiembre 2005



# Programa das aulas

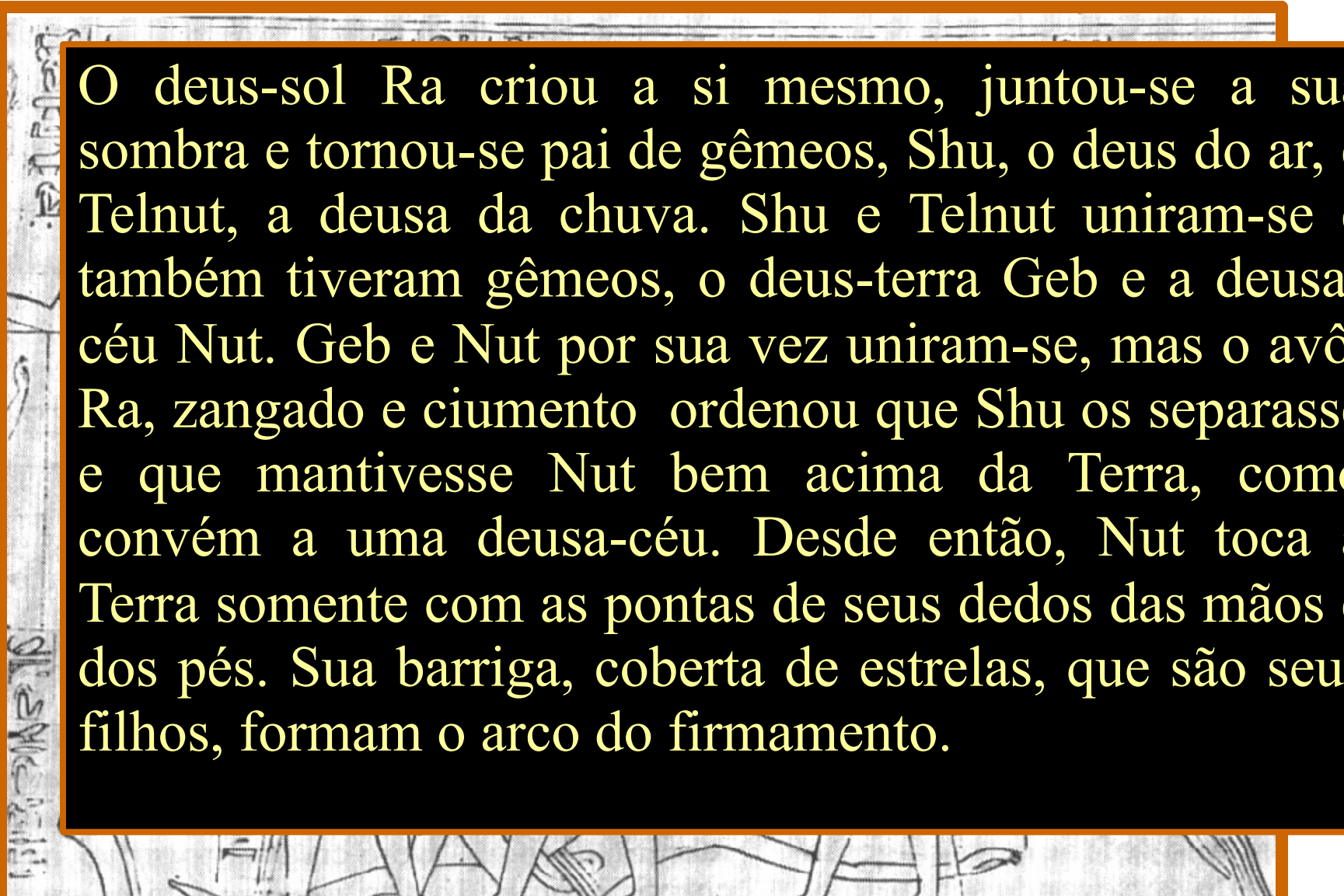
- Uma visão geral do Universo
- O modelo cosmológico padrão e suas extensões
- A Radiação Cósmica de Fundo em Microondas (RCF)



# The observable Universe

- Some interesting tales...
- The cosmological distance scale
- The composition
- Dark energy and dark matter

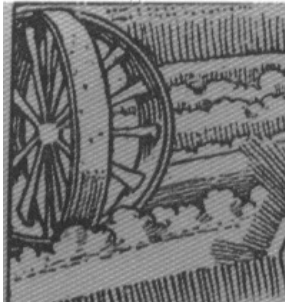
# Uma visão do Universo por volta de 2000 a.C.



O deus-sol Ra criou a si mesmo, juntou-se a sua sombra e tornou-se pai de gêmeos, Shu, o deus do ar, e Telnut, a deusa da chuva. Shu e Telnut uniram-se e também tiveram gêmeos, o deus-terra Geb e a deusa-céu Nut. Geb e Nut por sua vez uniram-se, mas o avô, Ra, zangado e ciumento ordenou que Shu os separasse e que mantivesse Nut bem acima da Terra, como convém a uma deusa-céu. Desde então, Nut toca a Terra somente com as pontas de seus dedos das mãos e dos pés. Sua barriga, coberta de estrelas, que são seus filhos, formam o arco do firmamento.

# Uma visão do Universo por volta de 1000 d.C.

Nessa época os modelos de Universo consideravam que a Terra estava no centro de tudo e que o céu era uma tampa com buracos. A luz proveniente de fogos ardendo no lado de fora brilharia através dos buracos e alcançaria a Terra como a luz das estrelas.

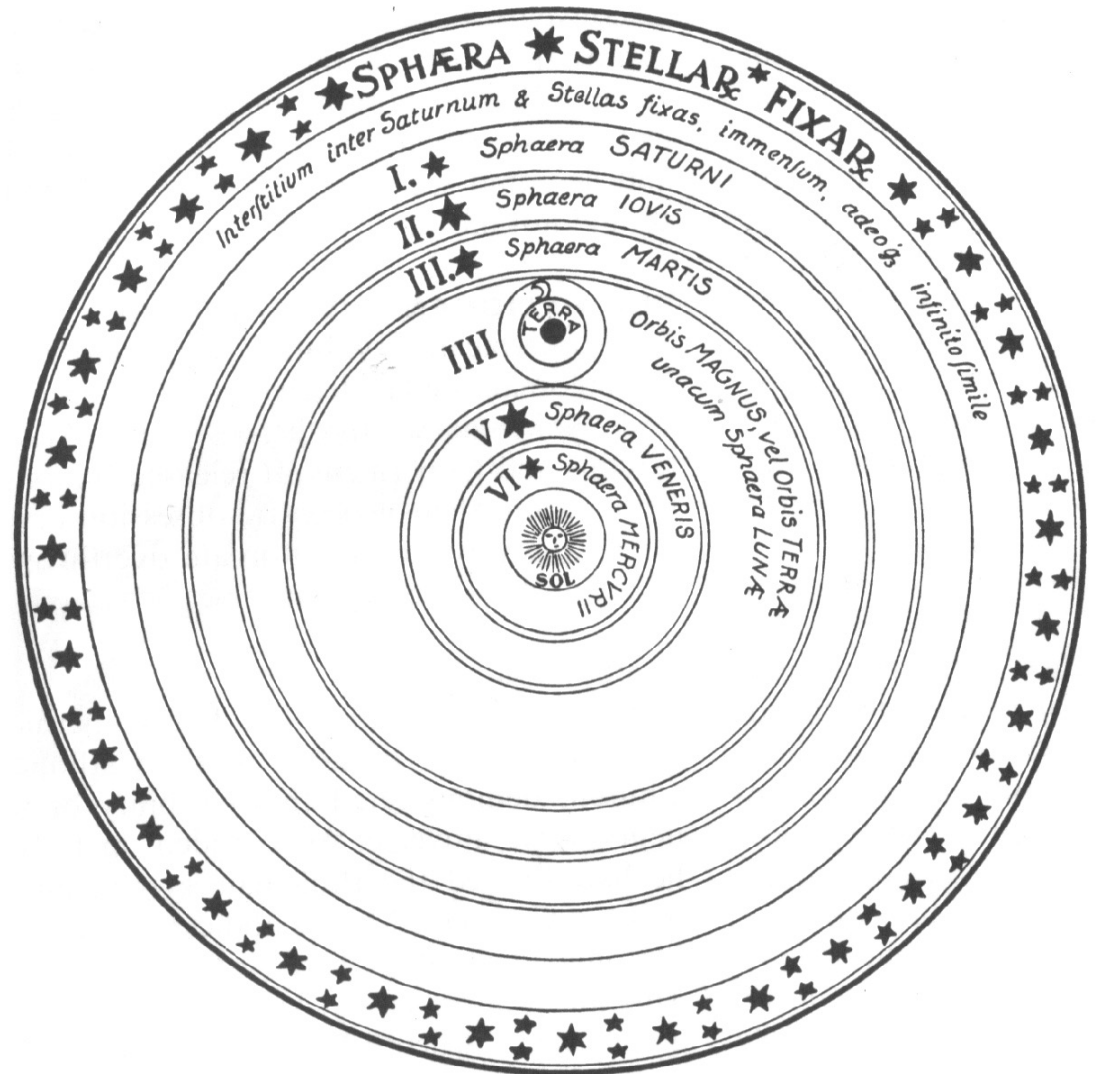




# Uma visão do Universo por volta de 1500 d.C.



Niclas Kopernik  
(1473 – 1543)





# Uma visão do Universo por volta de 1900 d.C.

**Composição: estrelas**

**Organização:**

**Sistema Solar**



**30,000 anos luz**

**Origem: ?**

**William Herschel  
(1738-1822)**

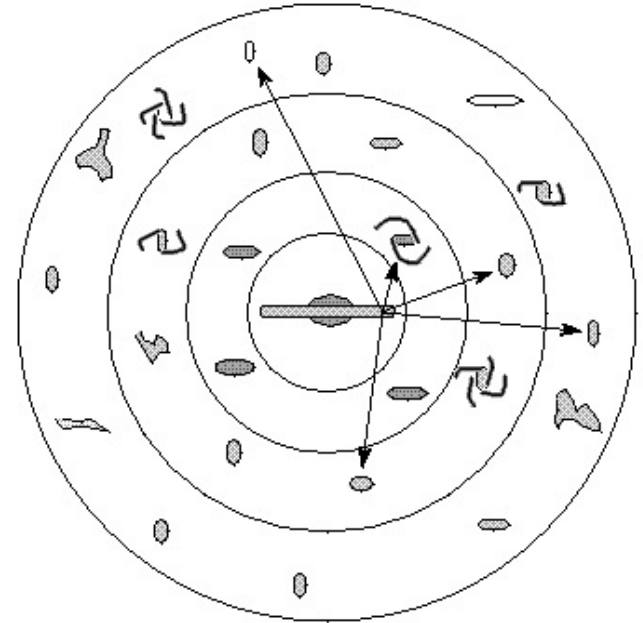


*Uma visão do Universo  
por volta de 2000 d.C.*



# O Paradoxo de Olbers

- Se o Universo é infinito e contém um número infinito de estrelas, porque o céu é escuro à noite?



*Olbers' Paradox:* No matter what direction you look, you will eventually see a bright object. Farther away objects are fainter, but there are more of them. So each shell has the **same** overall brightness. The night sky should be bright!



Considere um número infinito de estrelas com luminosidade  $L$  e densidade espacial  $n$ . A densidade de fluxo  $F$  recebida de uma estrela é dada por:

$$S = L/4\pi r^2.$$

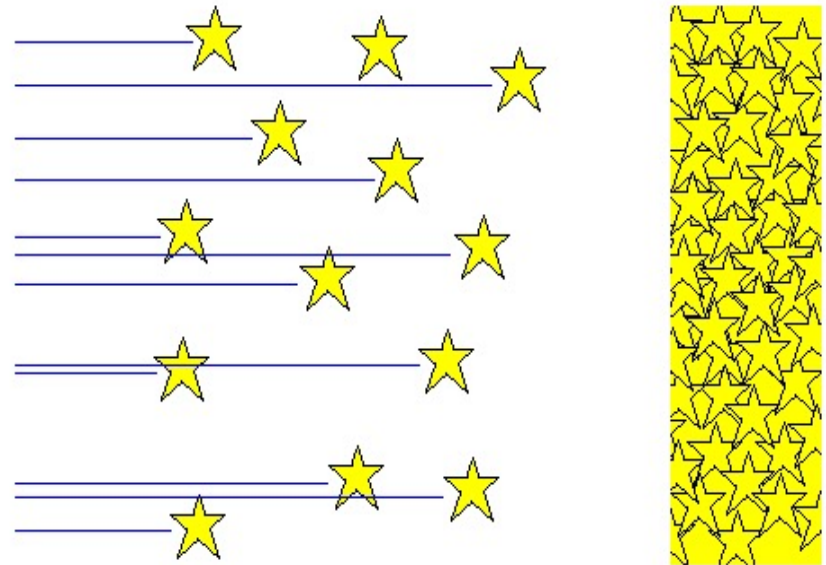
Se o número de estrelas no intervalo de distâncias  $r$  e  $r+dr$  é  $4\pi r^2 ndr$  a intensidade total chegando na Terra, vinda de todas as estrelas deve ser

$$I = \int_0^{\infty} \frac{L}{4\pi r^2} 4\pi r^2 ndr$$
$$= Ln \int_0^{\infty} dr \rightarrow \infty$$



**Logo, o brilho do céu deveria ser igual ao da superfície das estrelas!!!**

Olber's paradox

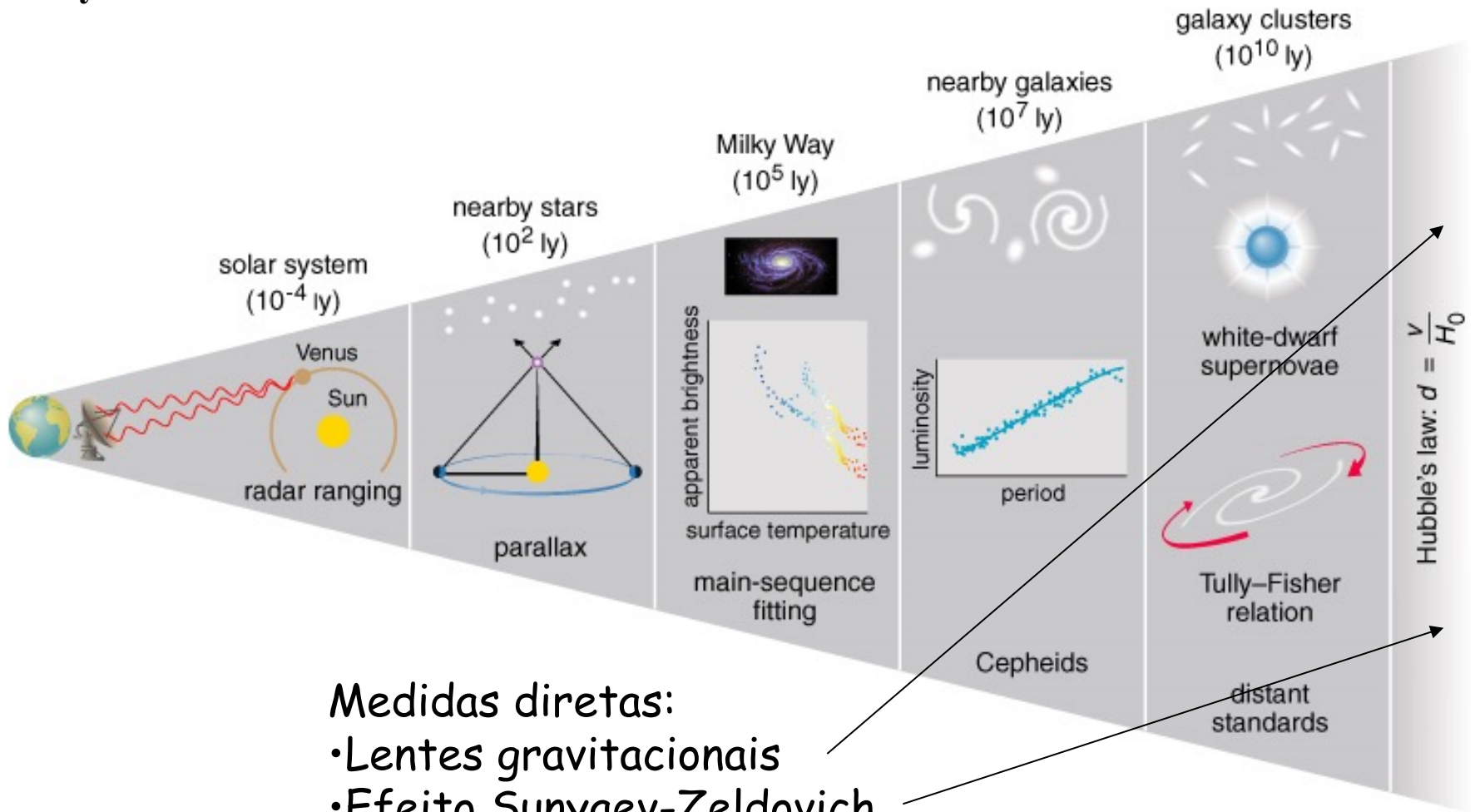


**Solução: o Universo não pode ser estático!!!**



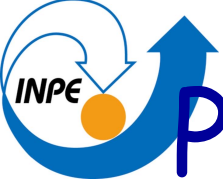
# A Escala de distâncias cosmológicas

1 ly = 1 ano-luz =  $9.46 \times 10^{17}$  cm



Medidas diretas:

- Lentes gravitacionais
- Efeito Sunyaev-Zeldovich



# Por que a escala é importante?

- ❁ **The cosmological distance scale (John P. Huchra)**
  - ❁ Journal: "Proceedings of the 13th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics", Chicago, IL, Dec. 14-19, 1986, World Scientific Publishing Co., 1987, p. 1-7.
  - ❁ Publication Date: **1987**
  - ❁ Abstract: The problems involved in determining the cosmological distance scale and the Hubble constant  $H_0$  ... best current value is  **$H_0=90$  km/s Mpc, with a 1 sigma external error of about 25 percent.**
  
- ❁ **The Extragalactic Distance Scale (J. Jensen et al.)**
  - ❁ Journal: "Measuring and Modeling the Universe", Cambridge University Press (Carnegie Observatories Astrophysics Series), W. L. Freedman (editor), 2004, p. 99.
  - ❁ Publication Date: **2004**
  - ❁ Abstract: Significant progress has been made during the last 10 years ... current value of the Hubble parameter,  **$H_0$ , is now arguably known with an accuracy of 10% (between 70 and 75 km/s Mpc),....**

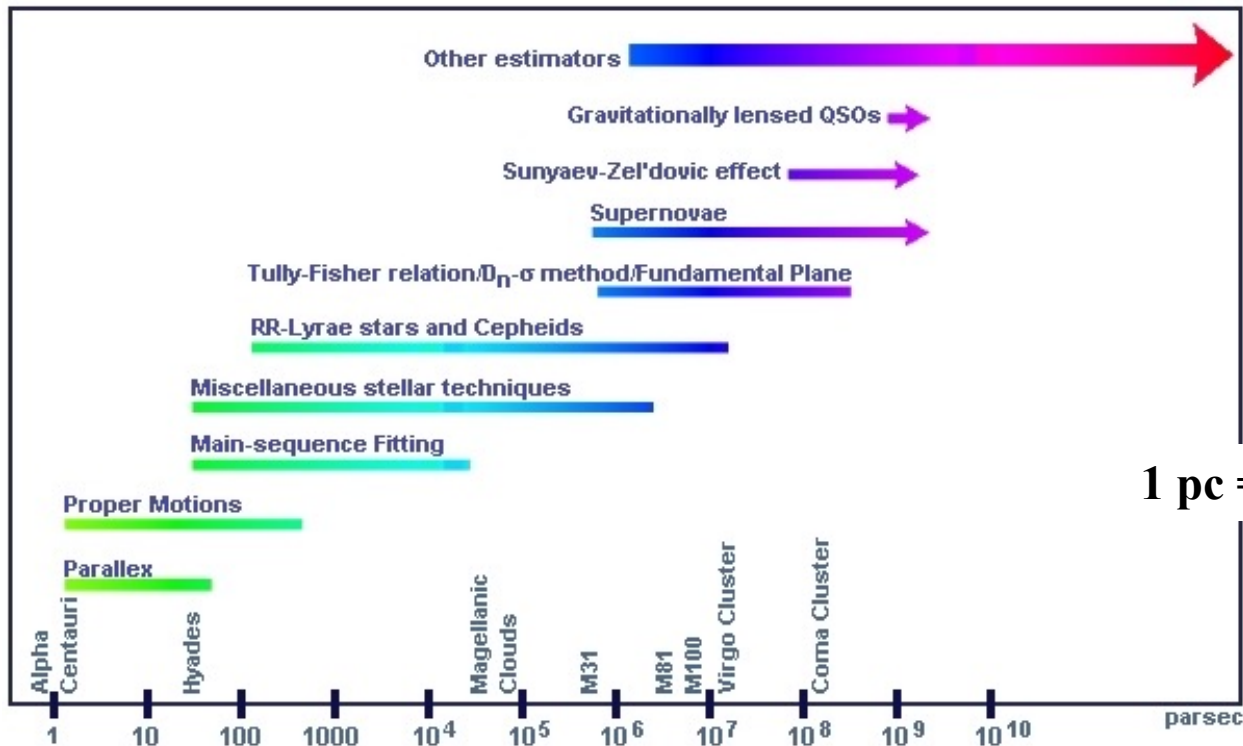


# Indicadores de distância

- Medidas de distância são muito importantes para a Cosmologia
- Entretanto, medidas de distância são **MUITO DIFÍCEIS** de realizar
- Usamos uma **Escala de Distância** da vizinhança local para distâncias cosmológicas

↳ **Indicadores primários** → medidas de distância diretas (dentro da Galáxia)

↳ **Indicadores secundários** → baseados em indicadores primários para medir objetos mais distantes e calibrar indicadores secundários

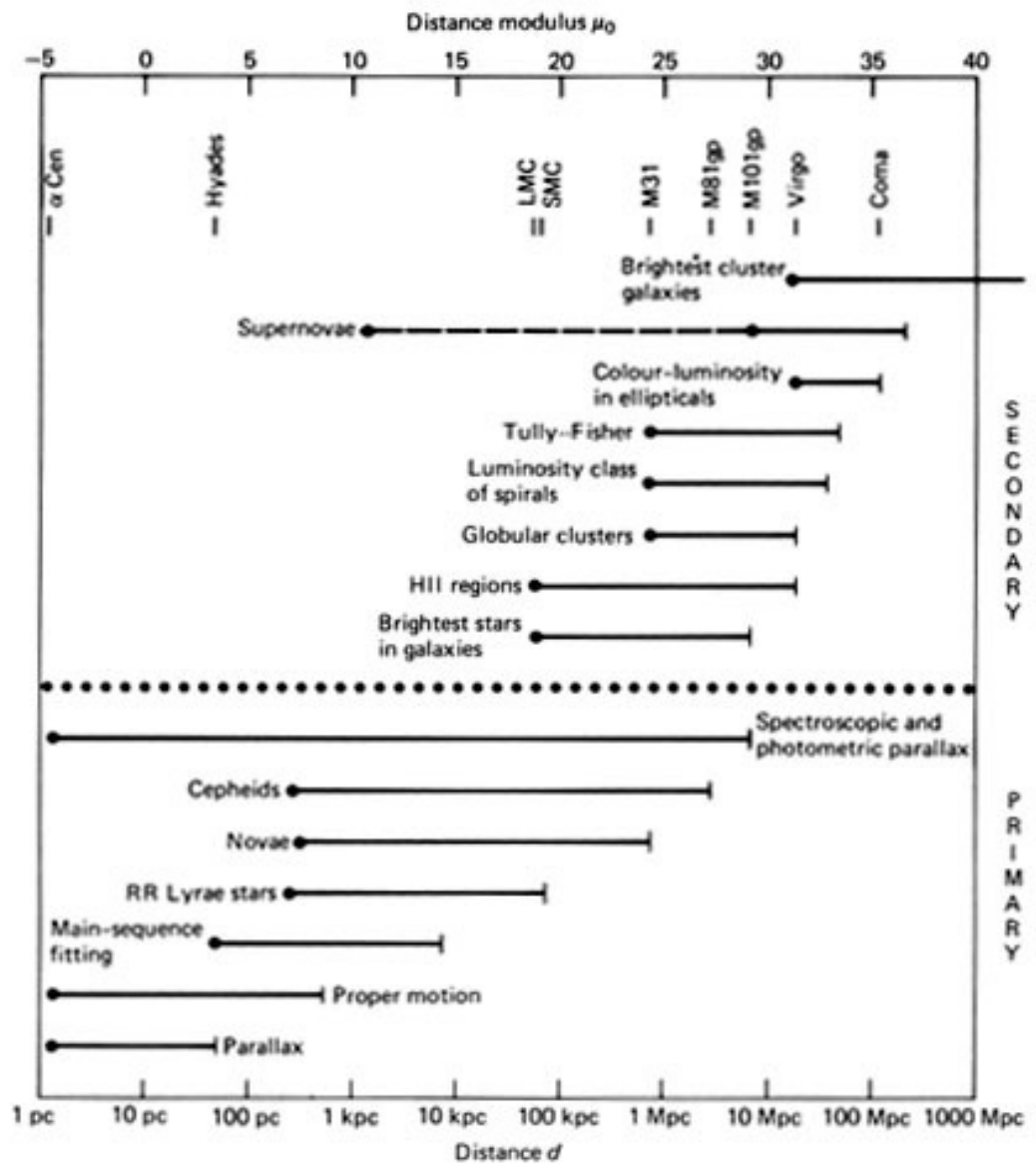


$$1 \text{ pc} = 3,26 \text{ a.l.} = 3.086 \times 10^{18} \text{ cm}$$





# Indicadores de distância



## Indicadores secundários

- Tully-Fisher Relation
- Fundamental Plane
- Supernovae
- Sunyaev-Zeldovich Effect
- HII Regions
- Globular Clusters
- Brightest Cluster Member
- Gravitationally Lensed QSOs
- Surface Brightness Fluctuations

## Indicadores primários

- Radar Echo
- Parallax
- Moving Cluster Method
- Main-Sequence Fitting
- Spectroscopic Parallax
- RR-Lyrae stars
- Cepheid Variables
- Galactic Kinematics



# A escala cosmológica

Comparação de oito métodos usados para calcular a distância ao aglomerado de Virgo.

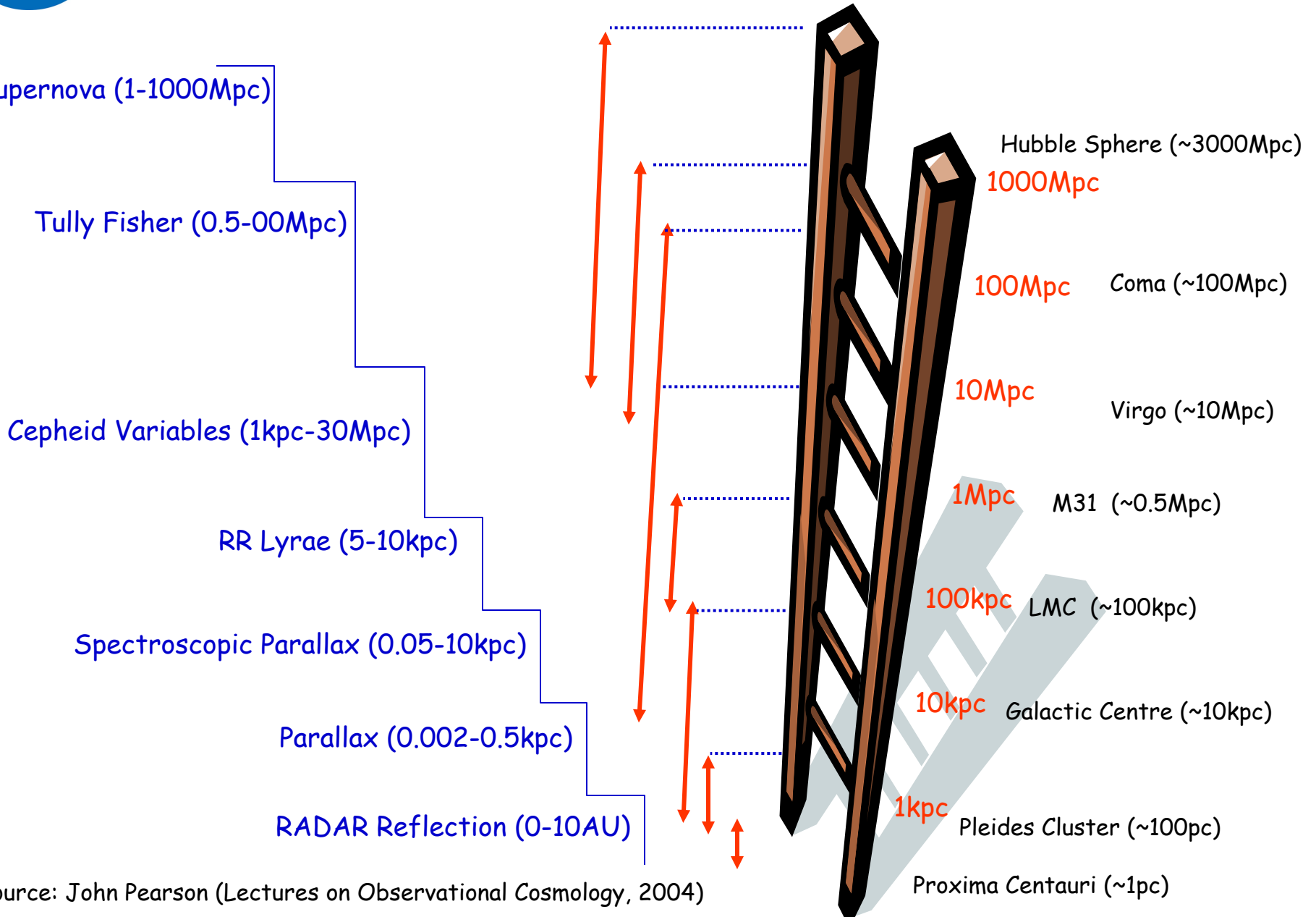
	Method	Distance Mpc
1	Cepheids	14.9±1.2
2	Novae	21.1 ±3.9
3	Planetary Nebula	15.4 ±1.1
4	Globular Cluster	18.8 ±3.8
5	Surface Brightness	15.9 ±0.9
6	Tully Fisher	15.8 ±1.5
7	Faber Jackson	16.8 ±2.4
8	Type Ia Supernova	19.4 ±5.0

Jacoby et al 1992, PASP, 104, 599

**HST Measures distance to Virgo (Nature 2002)  $D=17.1 \pm 1.8$ Mpc**



# A Escala de distâncias



Source: John Pearson (Lectures on Observational Cosmology, 2004)



# Como entendemos a cosmologia hoje?

- ❖ Cosmologia é a ciência que descreve o Universo como um todo, detalhando suas propriedades térmicas, dinâmicas, químicas e estruturais e buscando entender suas origens, evolução e futuro
- ❖ Ela é a ciência que exige as maiores extrapolações, uma vez que só existe UM Universo (não é possível fazer estatística) e as distâncias e tempos são extremos (não é possível reproduzi-lo no laboratório)



# O modelo cosmológico padrão

- ✪ A cosmologia moderna parte de algumas hipóteses de trabalho.
  - As leis da física, válidas no sistema solar valem também para o resto do Universo.
  - As leis da física, podem também ser extrapoladas para o passado.



A. A. Friedmann

**Princípio de Copérnico:** não ocupamos um lugar privilegiado - somos observadores típicos.

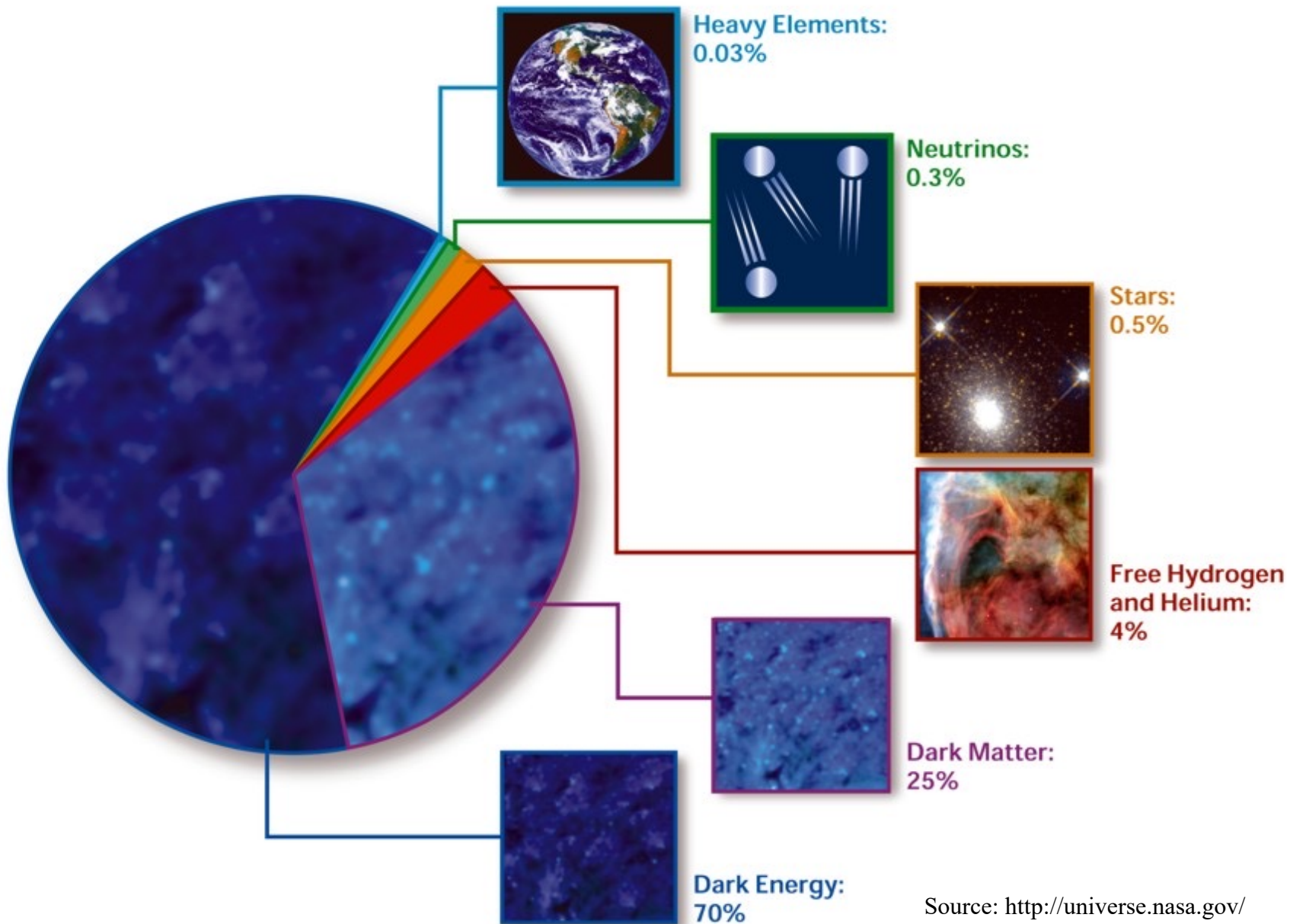
**Princípio Cosmológico:** o Universo é espacialmente homogêneo e isotrópico.

**isotropia local + homogeneidade = isotropia global**

**Gravitação é dominante em grandes escalas: alcance das interações fraca e forte  $\sim 10^{-13}$  cm. Embora  $e^2/GM_p^2 \gg 1$ , os grandes agregados são eletricamente neutros.**



# COMPOSITION OF THE COSMOS



Source: <http://universe.nasa.gov/>



# Componentes: matéria visível

- Concentrada em galáxias
- Tipicamente,  $n_{\text{stars}} \sim 10^{10}$  a  $10^{11}$
- $\langle L_{\text{gal}} \rangle \sim 2 \times 10^{10} L_{\text{Sun}}$  ( $L_{\text{Sun}} = 2,4 \times 10^{45} \text{ eV/s}$ )
- Maior parte da matéria não se encontra visível e é espalhada por um halo esferóide em torno do plano.
- $\langle M_{\text{vis}}/L \rangle \sim 3(M_{\text{Sun}}/L_{\text{Sun}})$



# Componentes: matéria visível

- Concentração em pequenas escalas devido à interação gravitacional
- Espalhada em escalas maiores que 100 Mpc ( $n_{gal} \sim 0,005 \text{ Mpc}^{-3}$ )
- Devido a efeitos de seleção (somente as galáxias mais brilhantes são vistas em distâncias maiores), o número total de galáxias no Universo visível é mal definido.
- Podemos estimar uma "densidade crítica" a partir de uma análise Newtoniana:

$$\begin{aligned}\rho_{crit} &= \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 0,92 \times 10^{-28} \text{ g.cm}^{-3} \\ &= 1,4 \times 10^{11} M_{\oplus} \text{ Mpc}^{-3}\end{aligned}$$



# Componentes: matéria visível

- Em geral, é conveniente normalizar densidades cosmológicas para uma densidade crítica, tal que:

$$\Omega_T = \frac{\rho_T}{\rho_{crit}}$$

- A densidade de matéria visível fica, portanto,

$$\Omega_{vis} = \frac{\rho_{vis}}{\rho_{crit}} = 0,002$$



# Componentes: bárions

$$\Omega_b = (0,04 \pm 0,01)h_{70}^{-2}$$

- A estimativa acima vem da nucleossíntese primordial.
- Composição química original do Universo: H(75%),  $^4\text{He}$ (24%) and traces of  $^3\text{He}$ , De and Li.
- Como  $\Omega_b \sim 20\Omega_{\text{vis}}$ , onde estão os bárions "escuros"?  
No meio intergaláctico em objetos compactos escuros e nuvens moleculares frias.
- O Universo parece não conter anti-bárions.





# Componentes: Cold Dark Matter

$$\Omega_{CDM} \sim \Omega_M \sim 0,3$$

- Assumida por diferentes modelos de formação de estruturas
- Conhecida desde a década de 30, passou a ser levada a sério na década de 80
- Seus componentes (teóricos) são os chamados WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) ou parceiros super-simétricos de férmions ou bósons (não observados até o momento)
- Não-relativístico!



# Componentes: radiação

$$\Omega_{\gamma} = 5.06 \times 10^{-5}$$

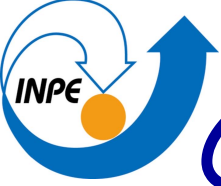
- ❖ Fótons são as partículas mais abundantes do Universo
- ❖ Densidade  $\sim 411 \text{ cm}^{-3}$
- ❖ Temperatura da radiação  $T = 2.725 \text{ K}$  (muito maior do que o número de fótons gerados por estrelas)
- ❖ A radiação não é completamente uniforme e apresenta variações de 1 parte em  $10^5$ .  
Acredita-se que essas variações estão associadas com as sementes das formações de estruturas.



# Componentes: neutrinos

$$\Omega_\nu > 0.0004$$

- Neutrinos são quase tão abundantes quanto fótons.
- Três "sabores":  $e$ ,  $\mu$ ,  $\tau$
- Gerados por decaimento  $\beta$  associado com a partícula correspondente (elétron, múon,  $\tau$ -méson)
- Estimativa atual das massas:
  - $m_e < 10$  eV,  $m_\mu < 170$  keV,  $m_\tau < 18.2$  MeV
  - Experimentos sensíveis a diferenças de massa, mas não a medidas diretas
- Teorias e observações atuais favorecem a idéia de oscilações de neutrinos
- Chances de detectar neutrinos cosmológicos é baixíssima.



# Componentes: energia de vácuo

$$\Omega_{\Lambda} \sim \frac{\Lambda}{3H_0^2} \sim 0.7$$

- ❊ Não está associada com partículas, logo não decai com a expansão
- ❊ O modelo padrão de física de partículas não consegue explicar seu valor (maior por um fator de  $10^{123}$ )
- ❊ O efeito Casimir é explicado pelo E.V.  $\Omega_M$
- ❊ Coincidentemente da ordem de
- ❊ Possíveis modelos: quintessência (variável) e a constante cosmológica (constante).



# A formação de estruturas

- ✿ Galáxias, aglomerados, superaglomerados e "paredes" e filamentos são ESTRUTURAS.
- ✿ Irregularidades na distribuição primordial de matéria e radiação constituem centros de atração gravitacional
- ✿ As galáxias se formam nos locais onde o efeito da gravitação suplanta a força de expansão do Universo e condensa nuvens primordiais de Hidrogênio
- ✿ Agrupamentos de galáxias se formam posteriormente, da mesma forma.



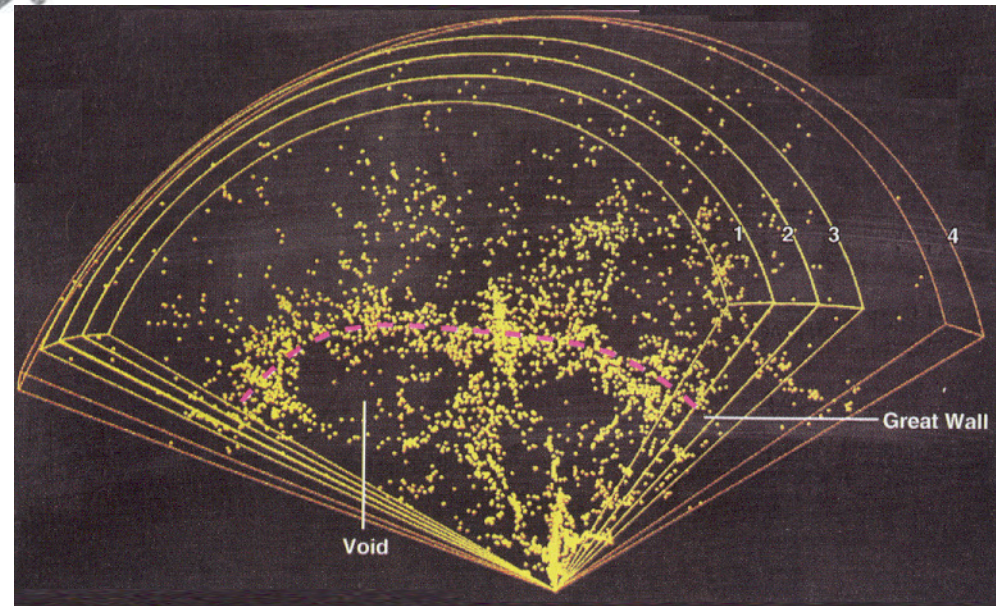
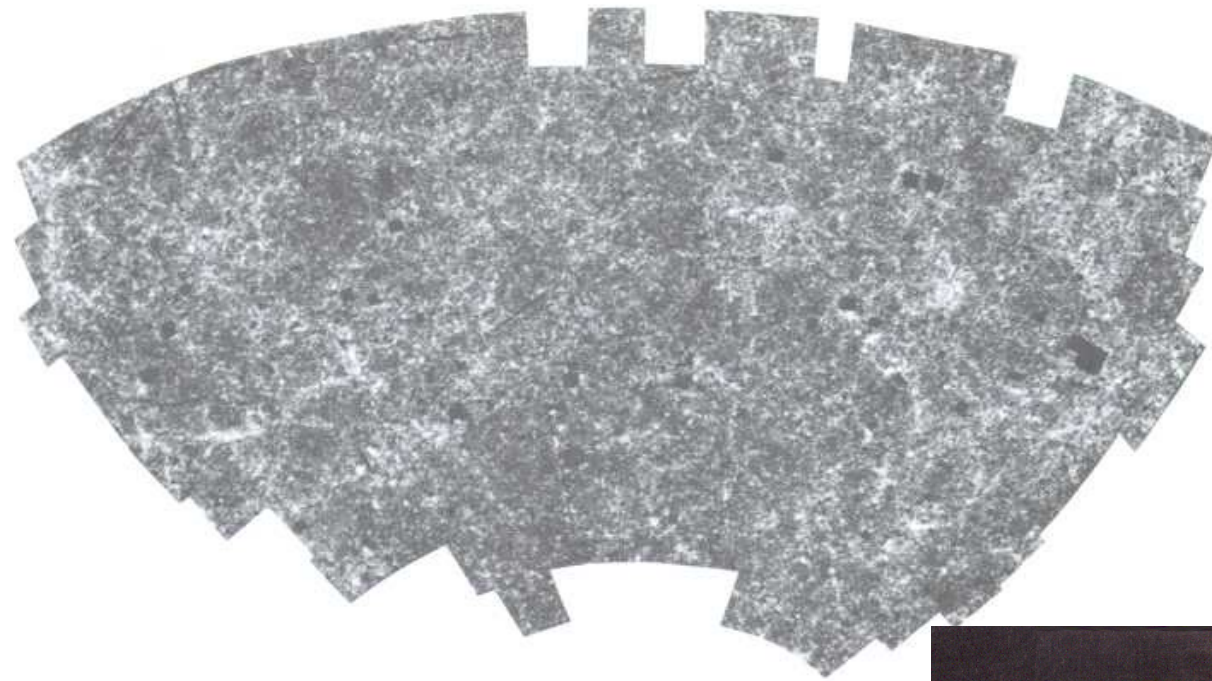


# *As estruturas...*

- ❁ As distâncias das estruturas em grande escala variam de alguns milhões a alguns bilhões de anos luz.
- ❁ A combinação de medidas dessas estruturas e das flutuações de temperatura na RCF são as ferramentas mais poderosas de que dispomos hoje para estudar o Universo jovem.

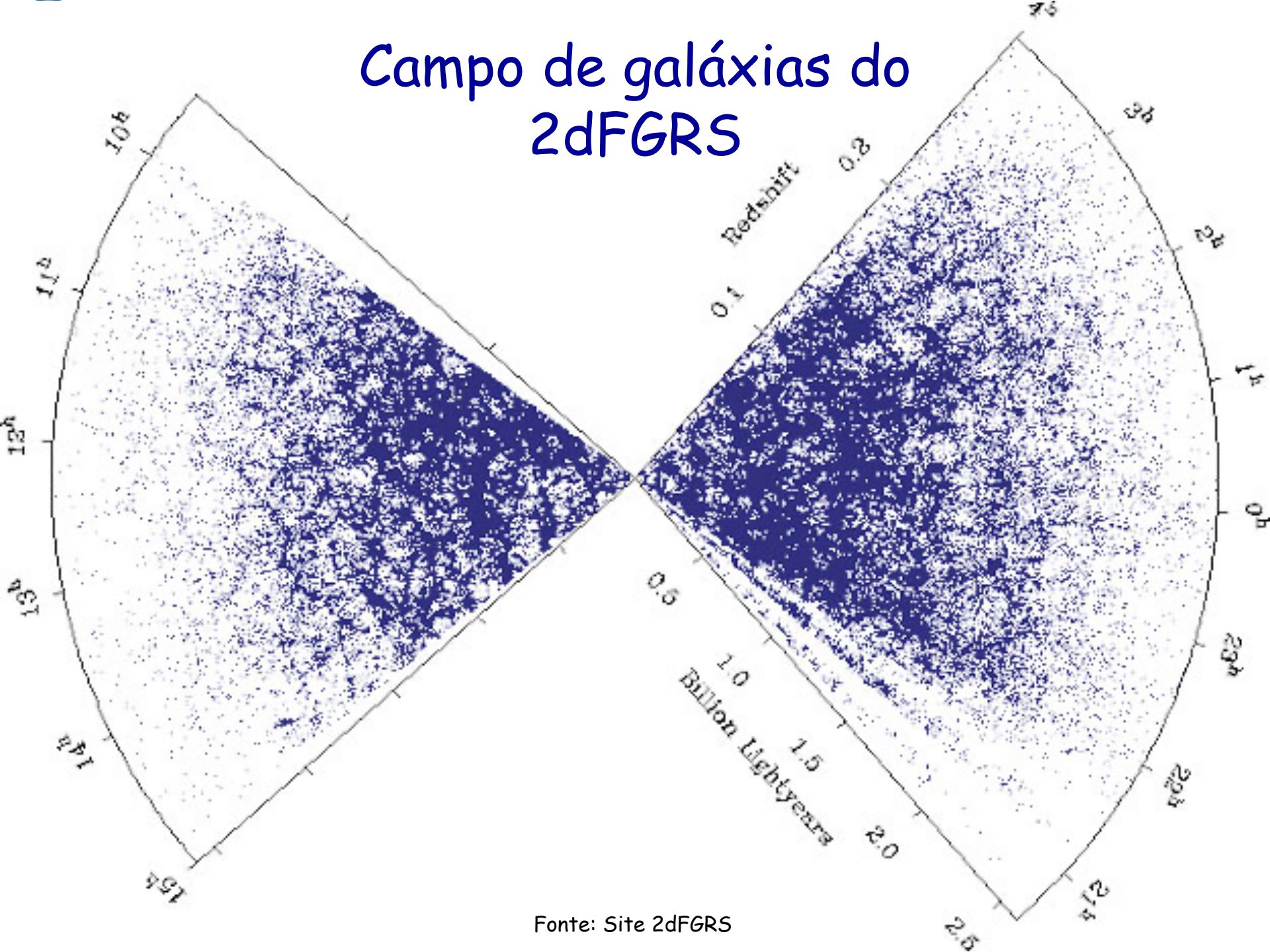


# *A distribuição de matéria*



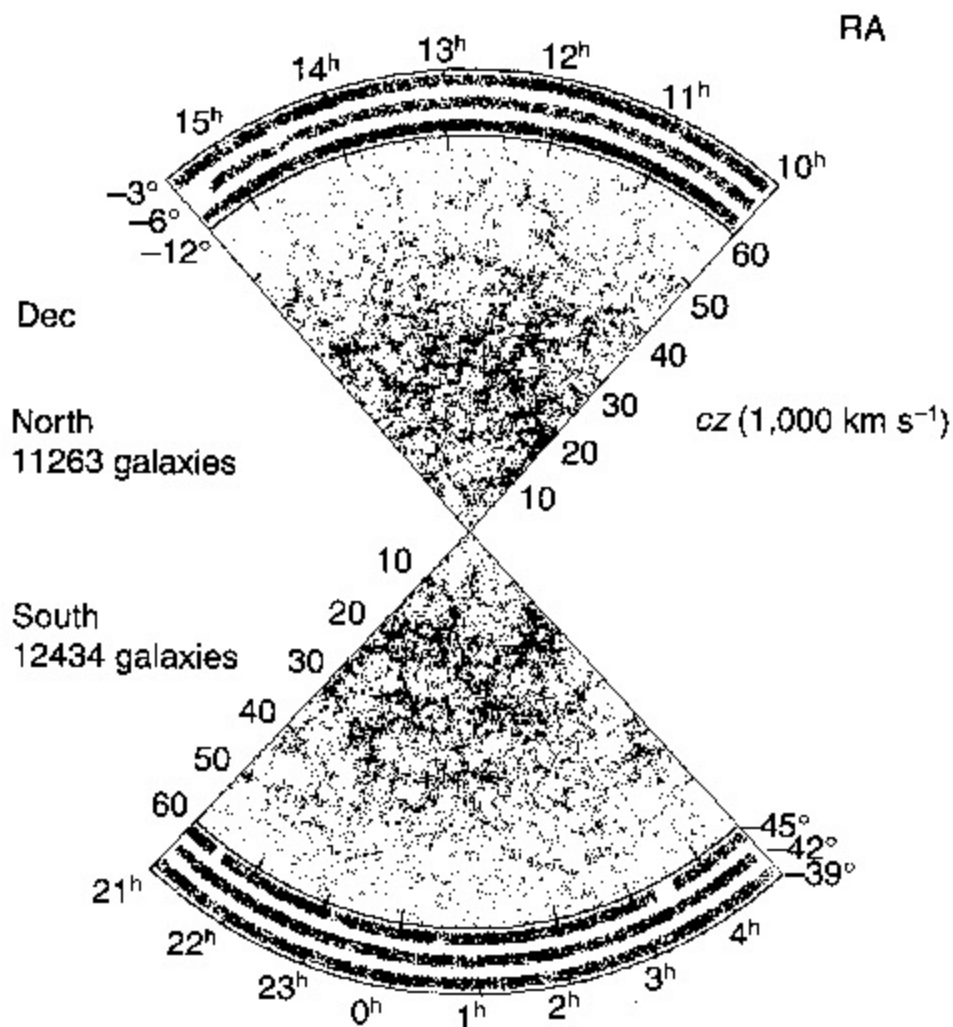


# Campo de galáxias do 2dFGRS





# A distribuição de matéria



Distribuição de matéria atual:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \gg 10^5 \text{ em galáxias}$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \gg 10^2 - 10^3 \text{ em aglomerados}$$

São observadas estruturas complexas: filamentos, paredes e bolhas.



*Mas existe algo errado!!!!*

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_{crit}} = \frac{8\pi G\rho}{3H^2}$$

- Densidade crítica do Universo é dada por  $\rho_c = 10^{-29} \text{ g.cm}^{-3}$ .
- Valores típicos para  $\rho_{Lum} \sim 0,01\rho_c$ .
- Parâmetro de densidade:  $\Omega = \rho/\rho_{crit}$ , descreve as contribuições das diversas componentes que contribuem para a dinâmica do Universo.



- Valores típicos para as densidades de matéria "ordinária" conhecidas no Universo são:

$$\Omega_b = 0,01, \Omega_{lum} = 0,004, \Omega_M = 0,4$$

- Essa diferença entre  $\Omega_M$  e  $\Omega_b$ , não explicada pelas observações, deu origem à hipótese da **matéria escura...**



# *O que é a Matéria Escura?*

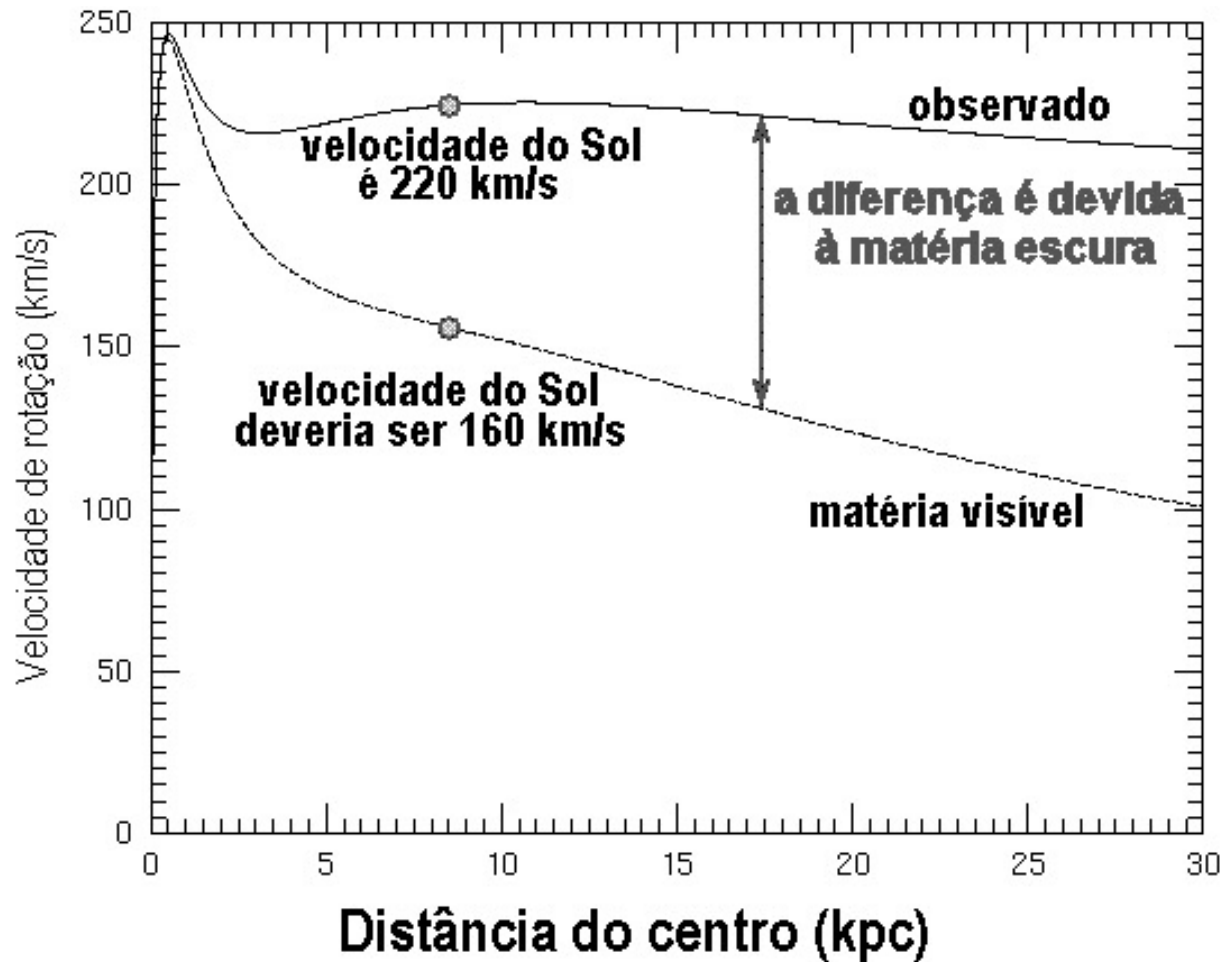
- ❁ Só pode ser percebida através de efeitos da gravidade; não emite radiação eletromagnética.
  - ❁ ME bariônica (prótons e nêutrons): protoestrelas, anãs marrons e buracos negros.
  - ❁ ME não-bariônica: diversos candidatos, entre eles o neutrino.
- ❁ Responsável por algo entre 39% e 99% de toda a matéria existente no Universo. Logo, praticamente desconhecemos de que tipo de matéria o Universo é feito.





# De onde veio essa idéia estranha?

Das curvas de rotação de galáxias!!!

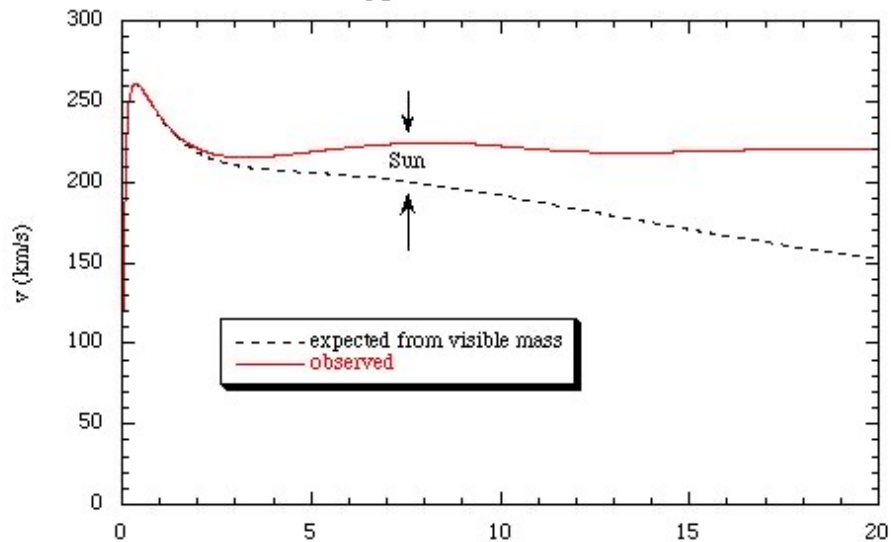


Estimativa simples:

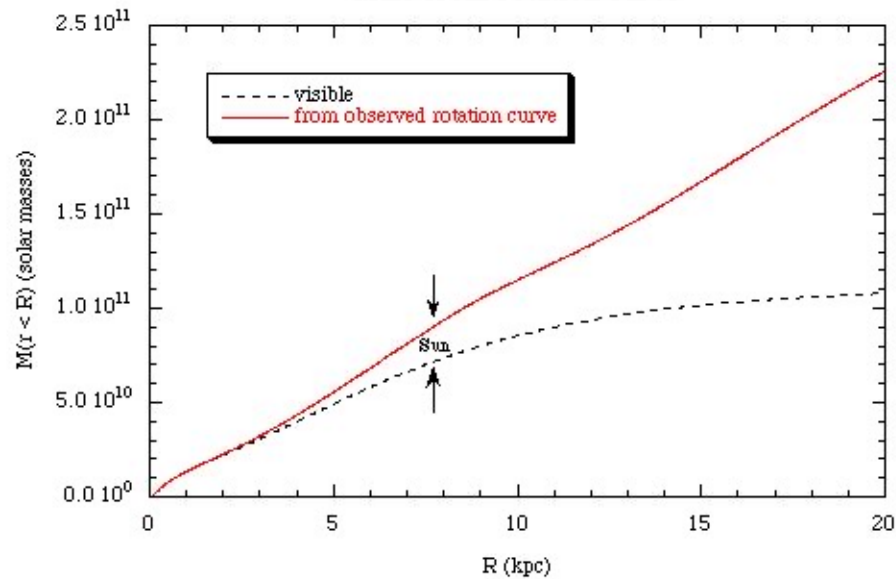
$$G \frac{mM}{r^2} = m \frac{V^2}{r}$$

$$M = \frac{V^2 R}{G}$$

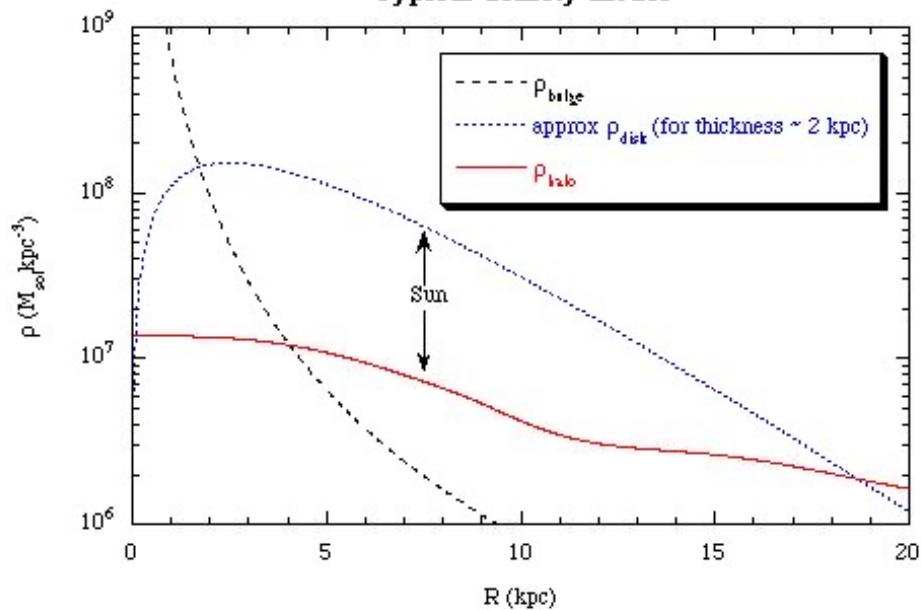
Typical rotation curves



Mass from rotation curve



Typical density model





# Matéria escura no Universo

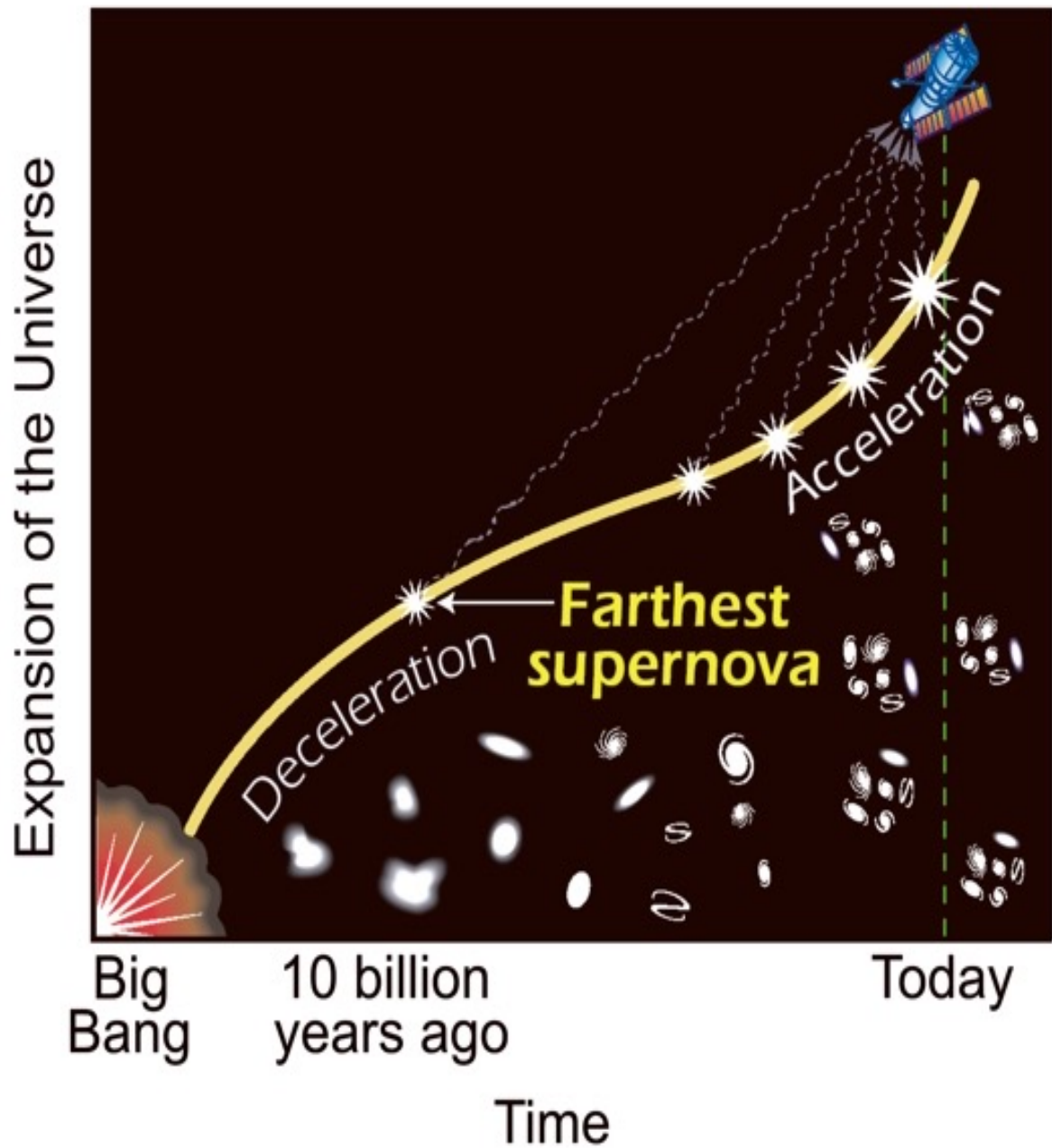
Movimentos de galáxias em aglomerados (Virial):

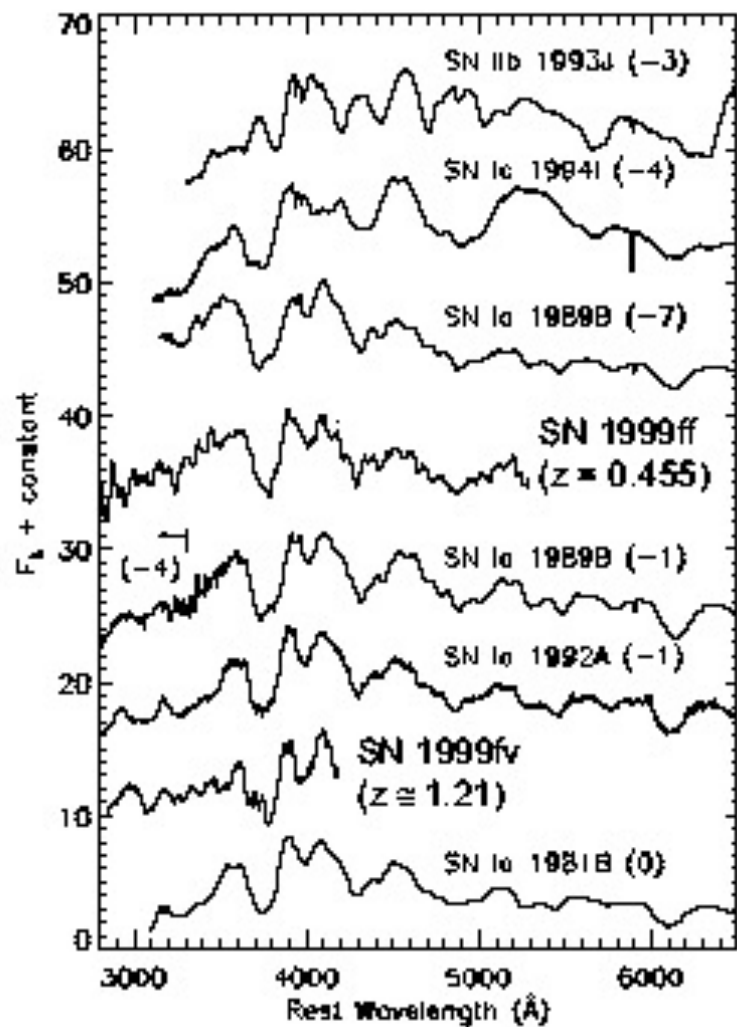
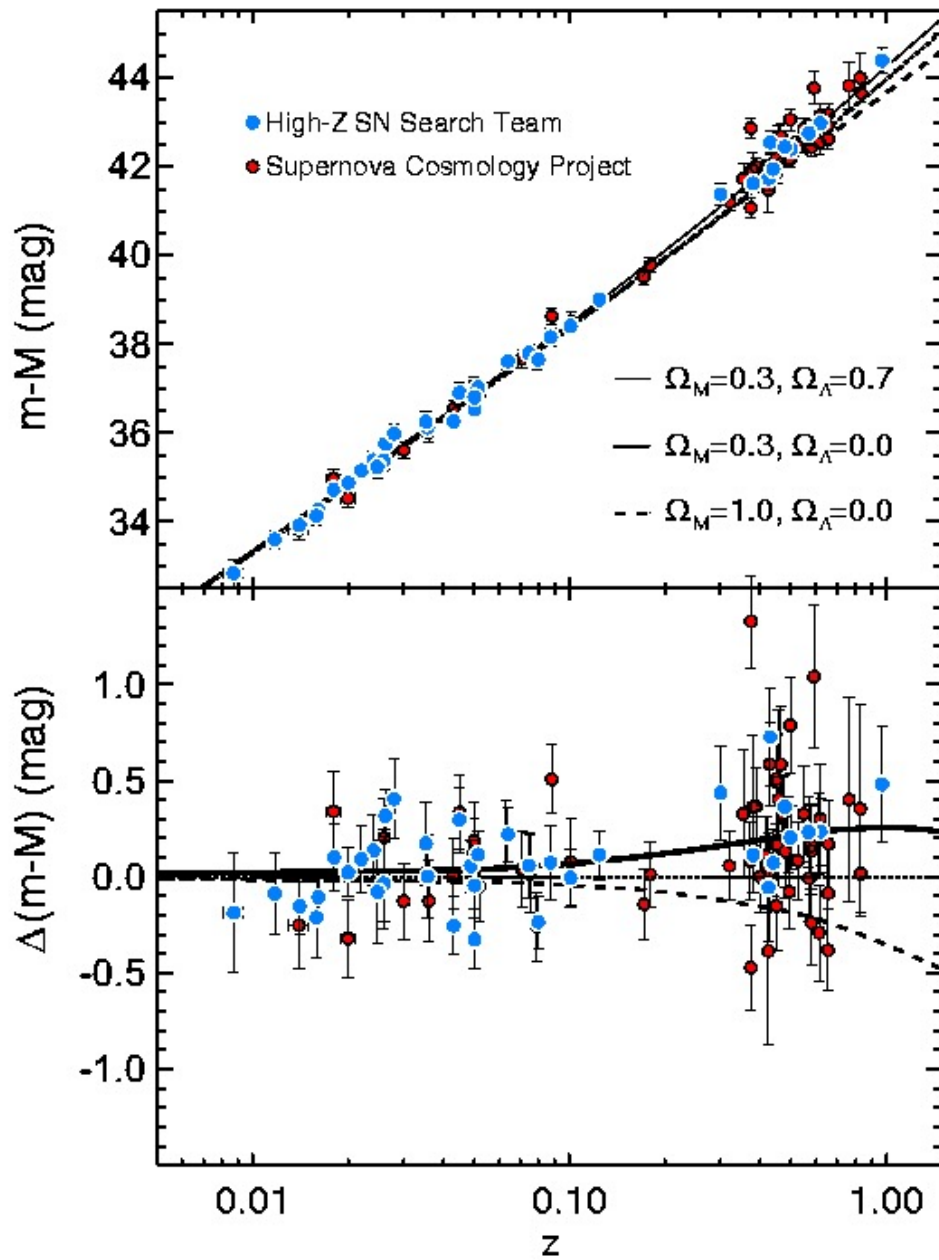
$$\Omega_{Matéria} \gg 0,04$$

Nucleossíntese primordial:

$$\Omega_{Barions} \gg 0,05$$

A maior parte da matéria escura é não bariônica e é  
a componente dominante da matéria do Universo.

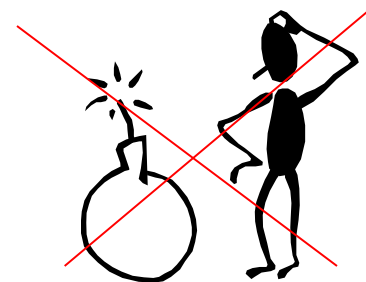






# *O que essas observações podem significar?*

❊ A Teoria da Relatividade Geral está errada.



❊ As observações estão erradas, aparentando serem mais fracas no passado.



❊ O Universo está acelerando.





# *O que causa essa aceleração?*

A existência de uma "energia de vácuo", ou "energia escura" que pode ser associada à constante cosmológica proposta por Einstein (lembrem-se da eq. de Friedmann?).

Ela pode ser explicada através da existência de uma pressão negativa que, ao invés de comprimir a matéria (como a gravidade), repele-a, contrabalançando assim a força gravitacional.





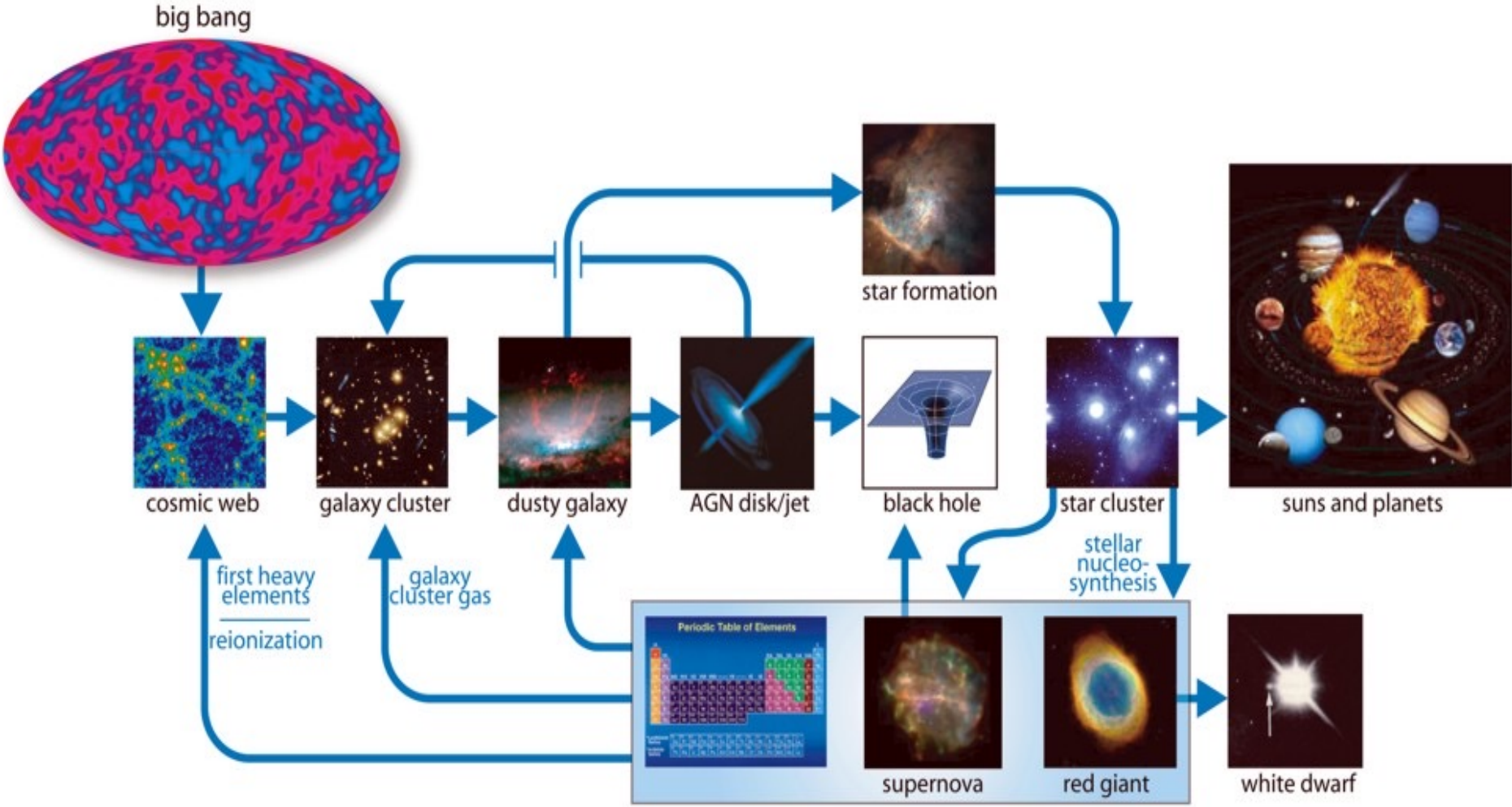


# E o que é a energia escura?

- Forma **hipotética** de energia, que permeia todo o Universo e que possui **pressão negativa**, ou seja, que repele os componentes do Universo em grande escala, contrabalançando a força gravitacional.
- Duas possibilidades: constante cosmológica (estático) e quintessência (dinâmico).
- Características: muito homogênea e pouco densa
- Evidências complementares da existência de algo parecido foram obtidas com medidas da:
  - RCFM
  - Lentes gravitacionais
  - Nucleossíntese primordial
  - Estruturas em grande escala



# SEU CYCLES OF MATTER AND ENERGY





# Exercícios #1

1. Use a 3a. Lei de Kepler para estimar a velocidade orbital do Sistema Solar, localizado a cerca de 8 kpc do centro da nossa Galáxia
2. Mostre que a distribuição de massas da Galáxia  $\rho \propto r^{-2}$  é consistente com curvas de rotação planas.
3. A densidade de matéria correspondente à matéria escura na vizinhança solar é de  $\sim 0.3 \text{ GeV/cm}^3$ . Suponha que ela é feita de WIMPs com energia de repouso 100 GeV. Quantos WIMPs estão dentro de seu corpo num instante qualquer?
4. Por que o Universo está se expandindo?