



# Das Galáxias à Energia Escura: Fenomenologia do Universo

Martín Makler

**Centro Brasileiro de  
Pesquisas Físicas**



# Das Galáxias à Energia Escura: Fenomenologia do Universo

“Toda pergunta é um grito para  
conhecer o mundo, não existem  
perguntas imbecis”

Carl Sagan

# Fenomenologia

**Universo do Cosmólogo Teórico:**  
**Homogêneo e isotrópico**  
**Dominado por matéria/energia escura**

**Universo do Astrônomo:**  
**Galáxias, gás, estrelas, etc.**



# Fenomenologia

---

**Universo do Cosmólogo Teórico:**

**Homogêneo e isotrópico**

**Dominado por matéria/energia escura**

**Universo do Astrônomo:**

**Galáxias, gás, estrelas, etc.**

- *Ponte entre teoria e observação*
- Análise estatística
- Modelagem, incluindo todos os processos físicos (simulações, aproximações)
- Observáveis: onde posso esperar detectar um dado fenômeno?
- Área interdisciplinar

# Programação

---

- Parte I: Um Passeio pelo Universo
- Parte II: O Universo Homogêneo
- Parte III: História Térmica
- Parte IV: O Universo Perturbado
- Parte V: O Universo Muito Perturbado  
Incógnitas e perspectivas



# Blocos fundamentais: *Galáxias*



M87 © Anglo-Australian Observatory  
Photo by David Malin

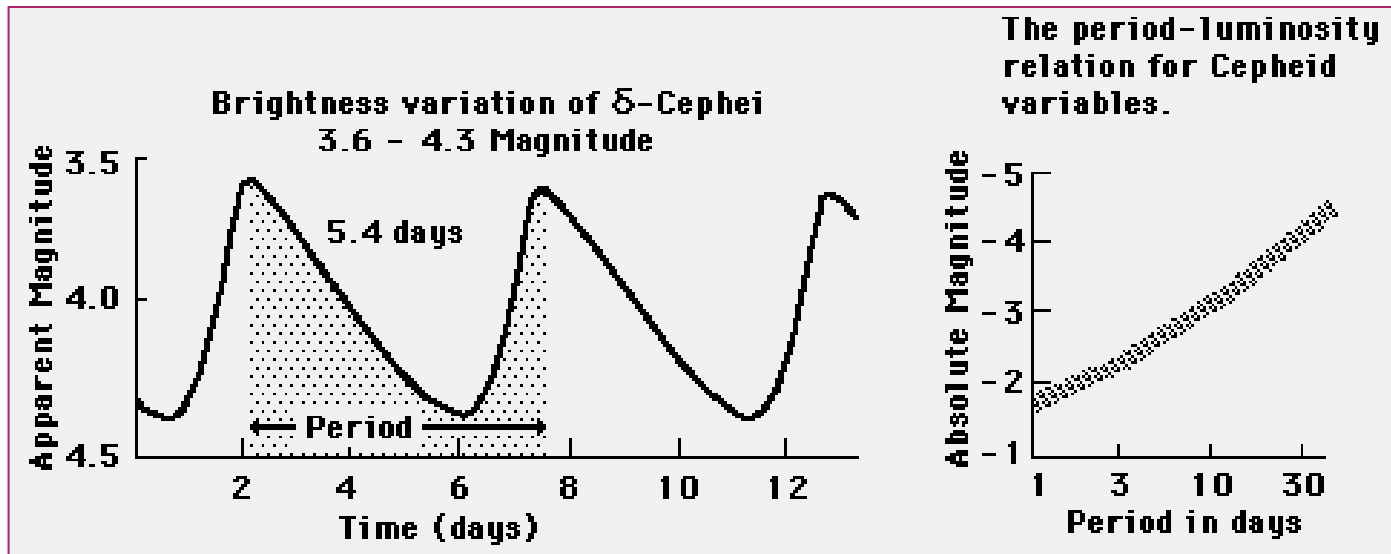
# Propriedades Básicas das Galáxias

Propriedade	Espirais	Elípticas	Irregulares
Forma e estrutura	Disco achatado de gás e estrelas, braços espirais, bojo e halo.	Sem disco, com estrelas distribuídas em um elipsóide.	Sem estrutura.
Conteúdo de estrelas	Disco: jovens e velhas. Halo: só velhas.	Só estrelas velhas.	Velhas e novas.
Gás e poeira	Disco: muito. Halo: pouco.	Pouco ou nenhum.	Muito
Formação estelar	Ainda produzindo	Insignificante	Grande
Movimento estelar	Gás e estrelas no disco: órbitas circulares; no bojo: mov. aleatório.	Órbitas aleatórias.	Estrelas e gás têm órbitas irregulares.



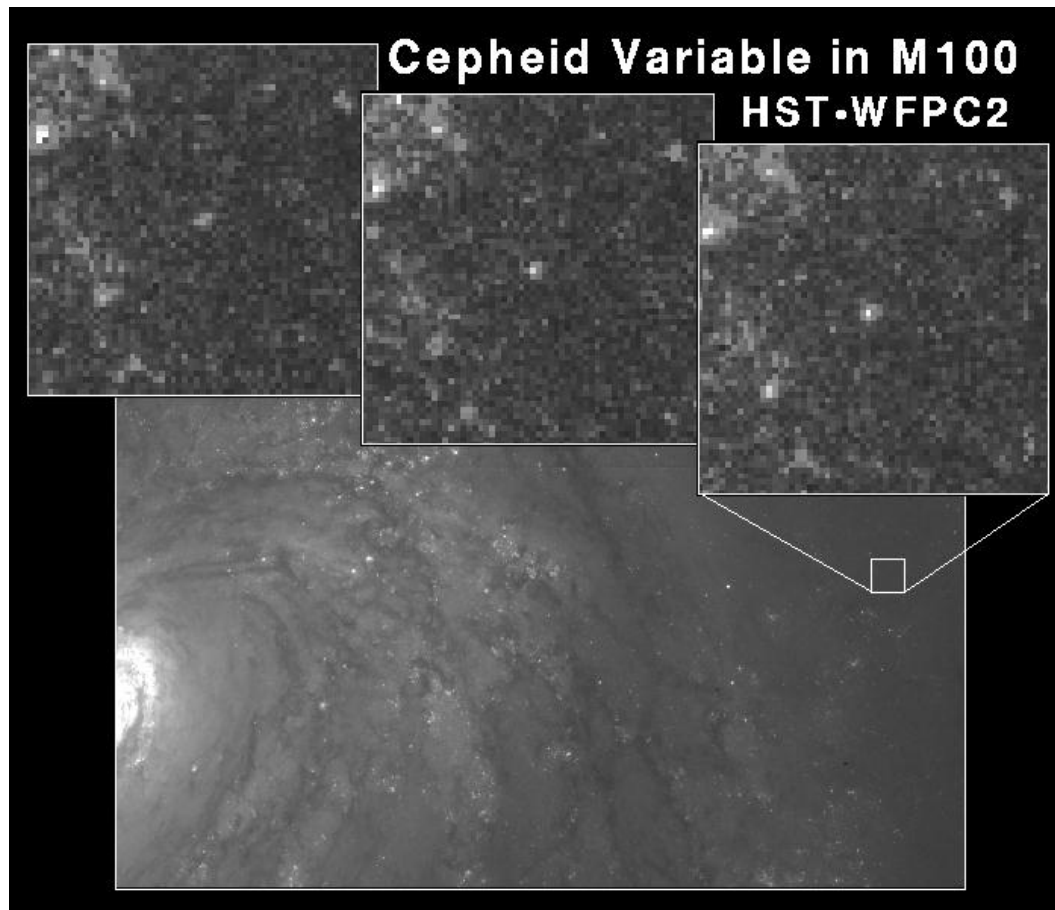
# Natureza das Galáxias

- Galileo Galilei (1610): a Via Láctea é formada por estrelas
- Wilhelm Herschel (1785): habitamos uma nebulosa e as outras são externas
- William Parsons (1845): “nebulosas espirais”
- Henrietta Leavitt (1912): relação entre período de estrelas variáveis cefeidas e sua luminosidade intrínseca

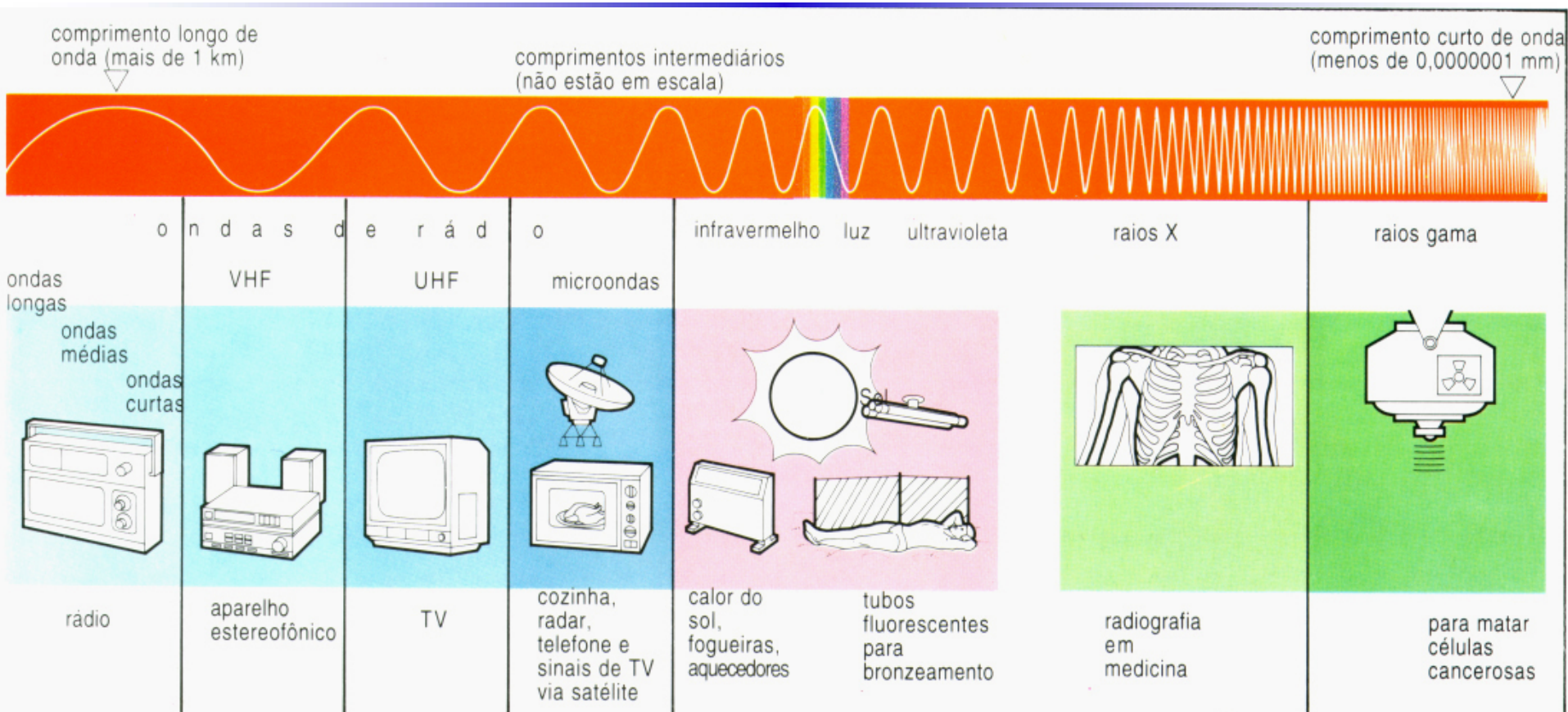


# Natureza das Galáxias

- Edwin Hubble (1923): determina a distância da “nebulosa” de Andrômeda (M31), usando uma estrela cefeida



# Espectro Eletromagnético



- Hoje o universo é observado em todos os comprimentos de onda
- Espectro típico: corpo negro + linhas de absorção e emissão

# Espectro de Linhas

---



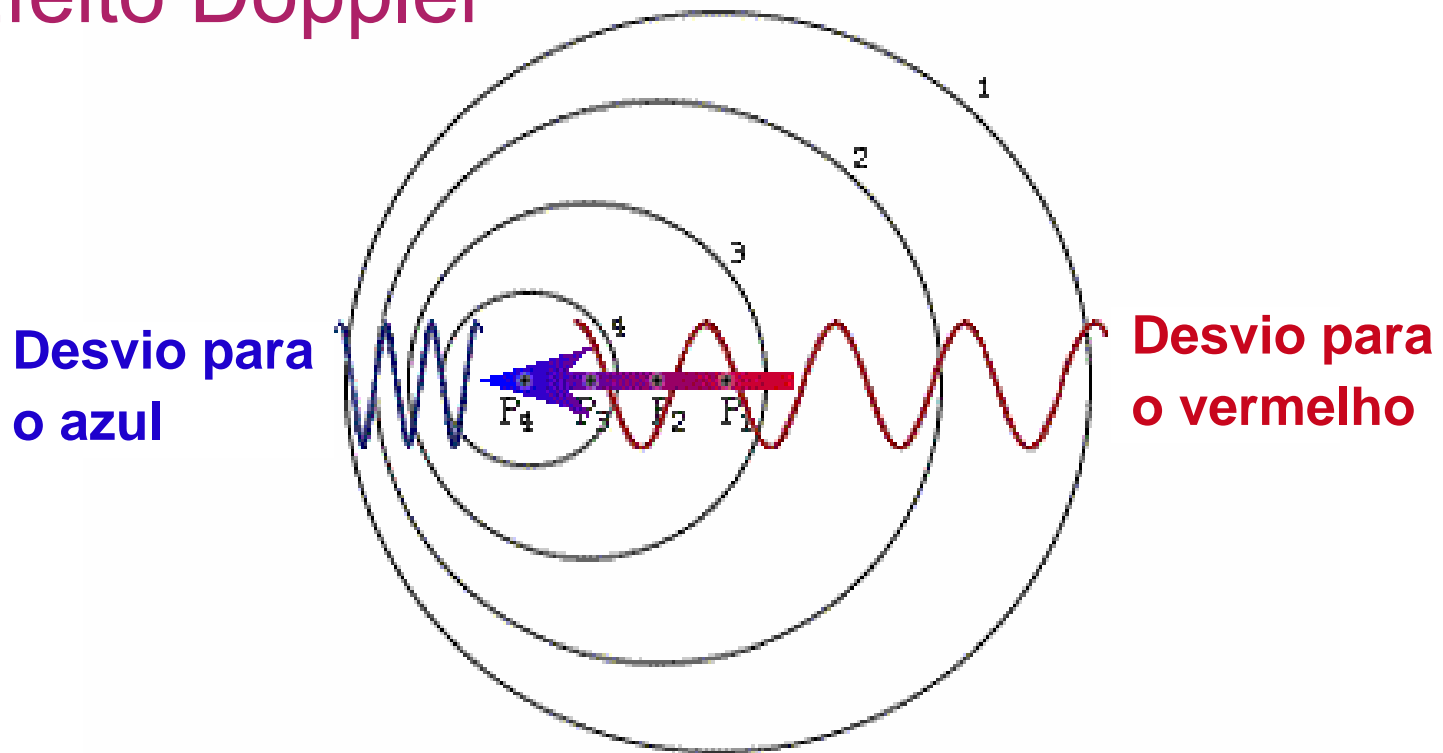
## Linhas de absorção devido à presença de gás

- Cada elemento químico possui linhas características
- Instrumento central em Astronomia
  - Composição química....
  - e
  - Velocidade!



# O Desvio para o Vermelho

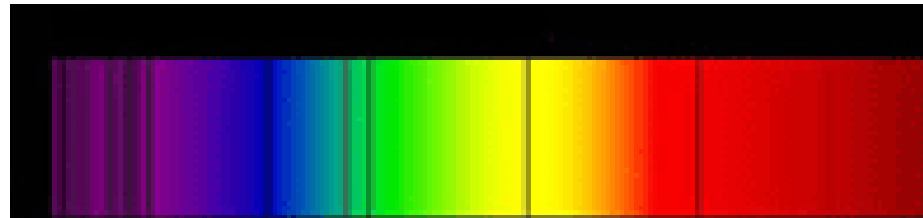
- Efeito Doppler



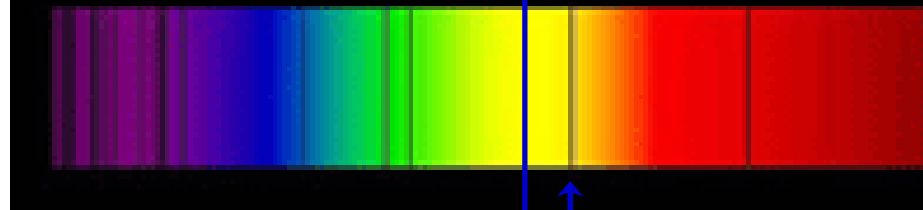
$$z := \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}} - 1 \approx v/c, \text{ para } v \ll c$$

# O desvio para o vermelho

Espectro “de referência”



Espectro observado



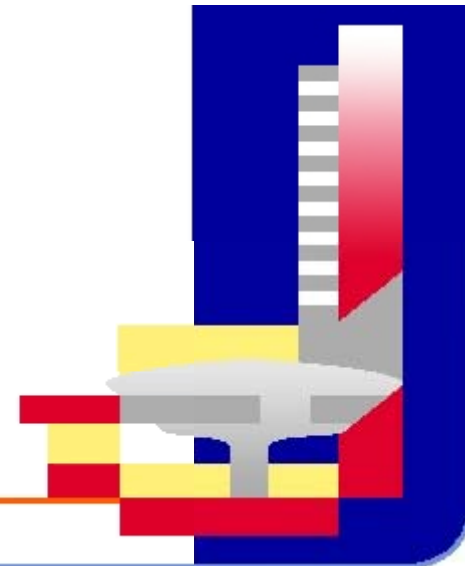
$$z = \frac{\lambda_r - \lambda_e}{\lambda_e}$$

$\lambda_e$

$\lambda_r$

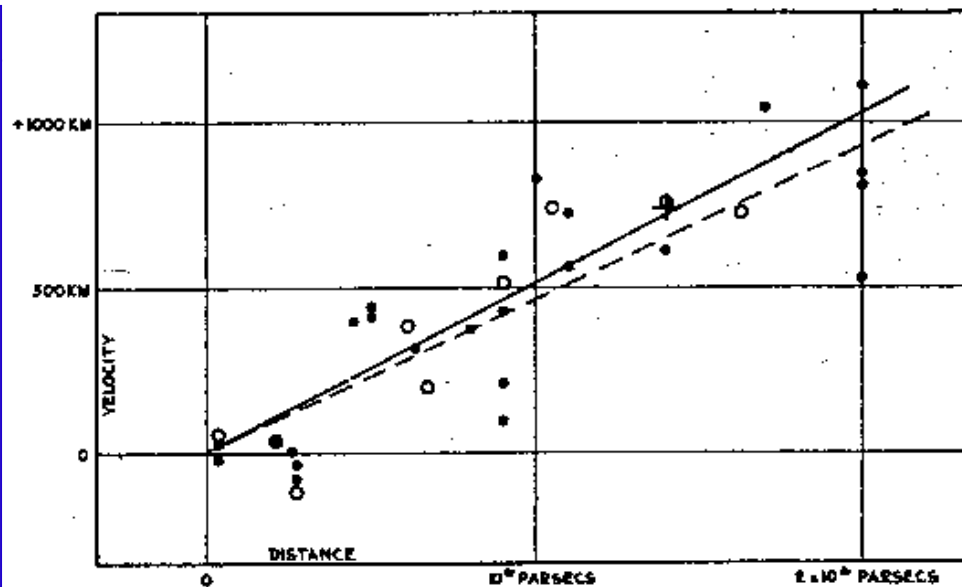
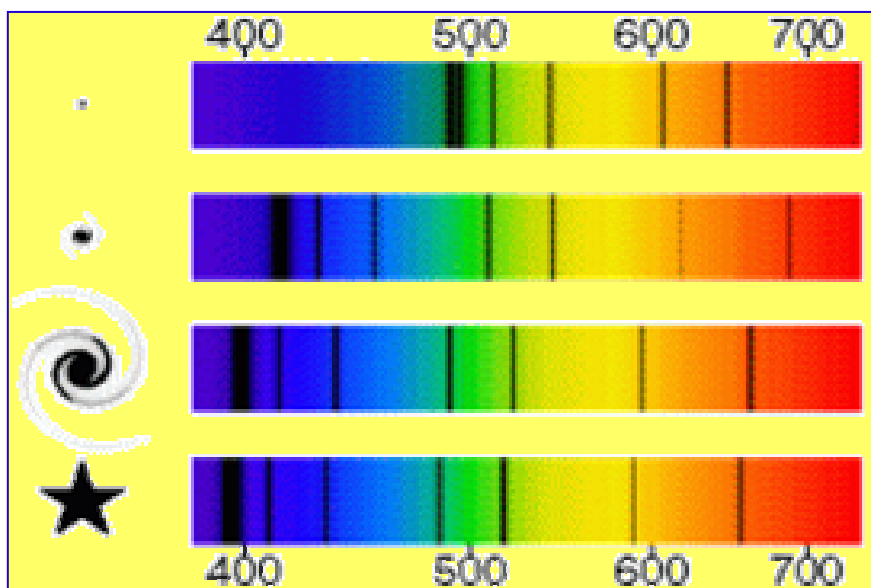
# O Cosmos Dinâmico

## O Universo em Expansão



# A Expansão do Universo

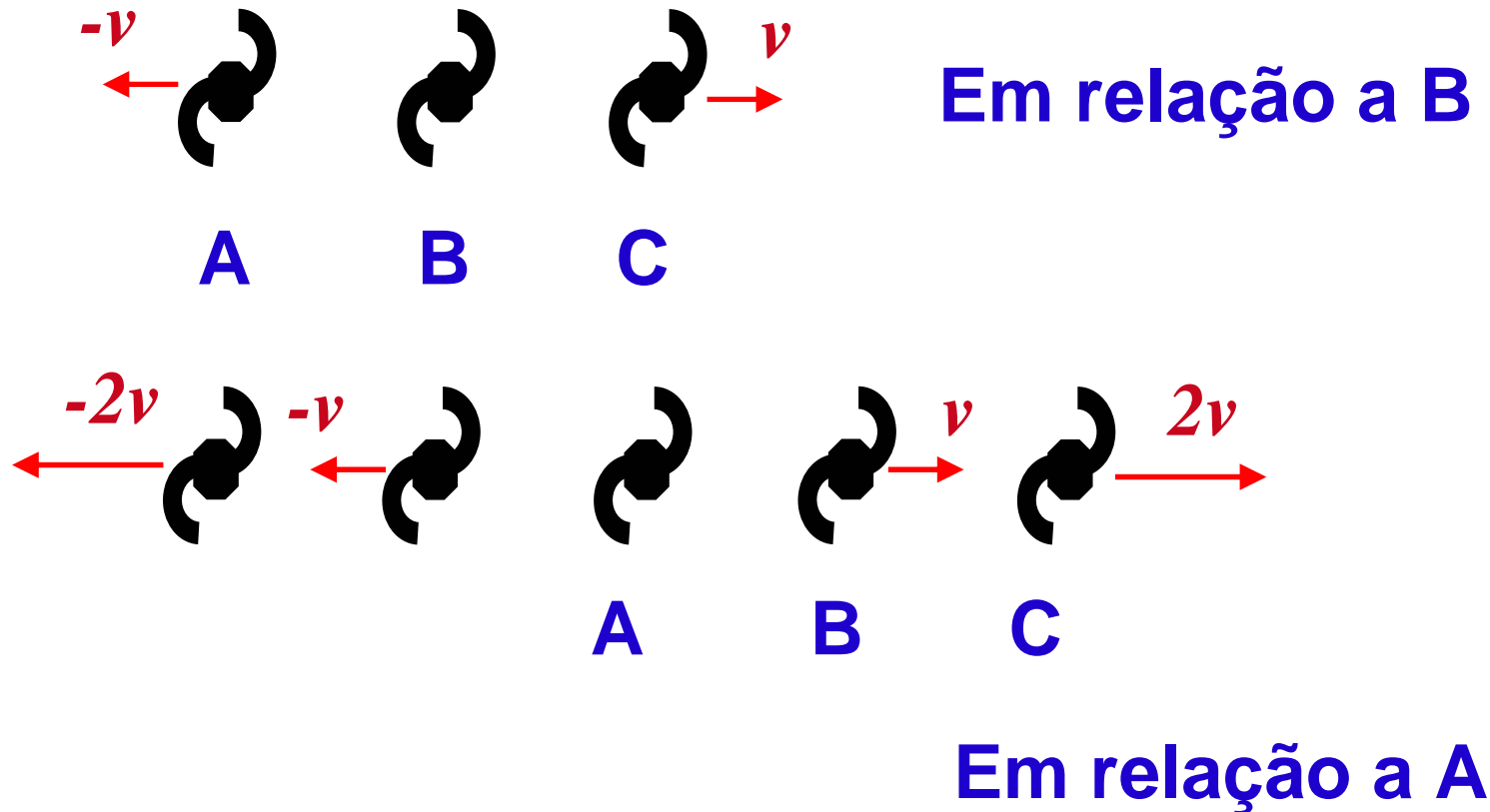
- o Vesto Slipher (1917): desvio para o vermelho de galáxias (13 de 15)



- o Hubble (1929): descobre a expansão do universo



# A Expansão do Universo I



Homogênea e aumenta linearmente com a distância

# A Expansão do Universo I

**Homogênea e Isotrópica em Grandes Escalas**

**Não é explosão! Não possui centro!**

Relação linear:

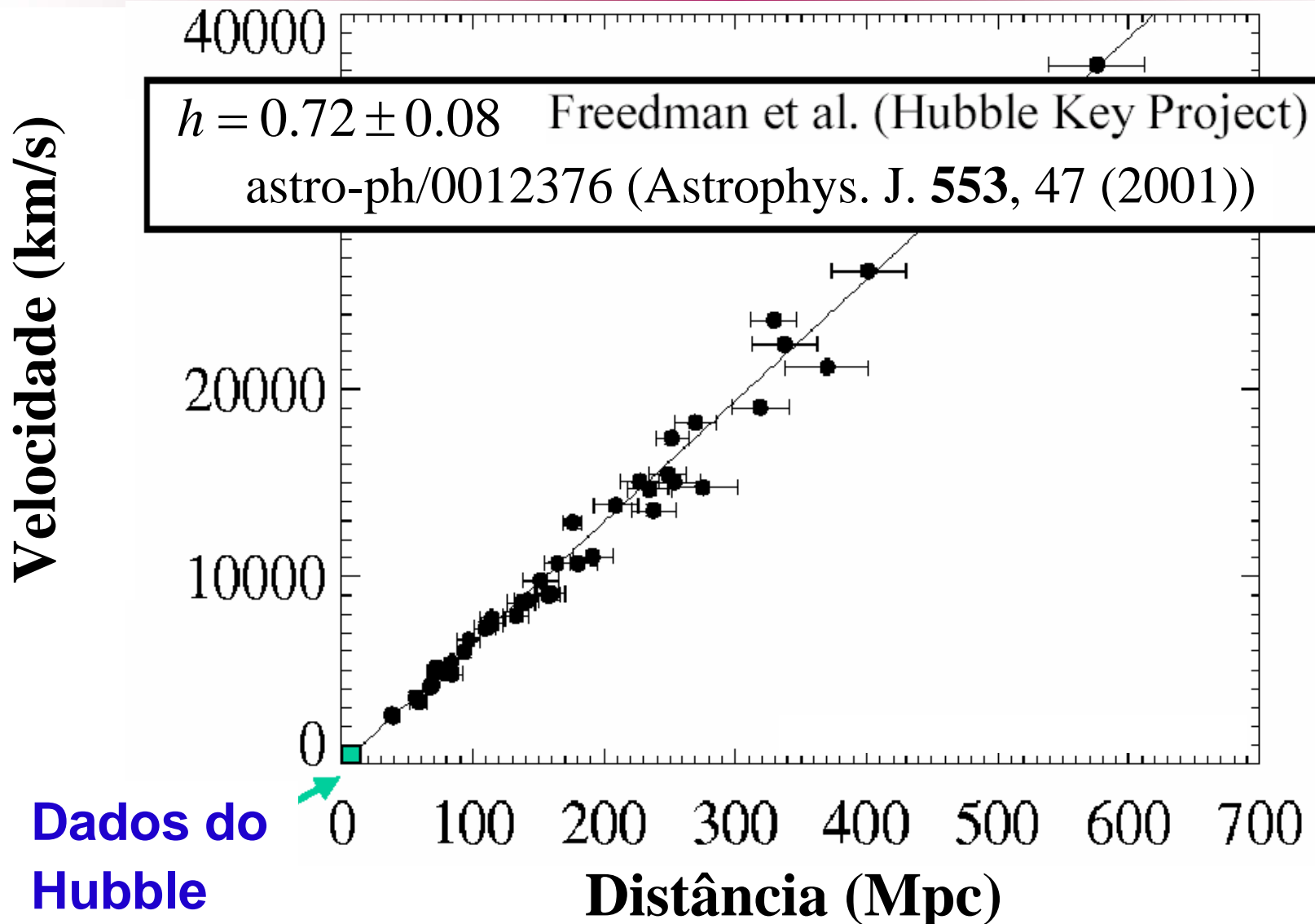
$$v = H_0 d$$

O Parâmetro de Hubble:

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

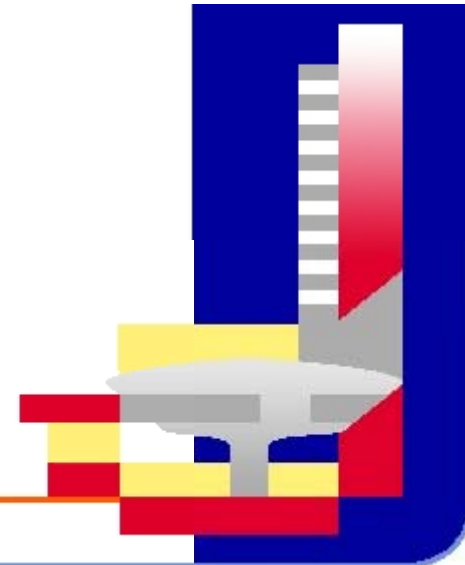
Dados do Hubble:  $h = 5$

# O Diagrama de Hubble (Versão Atual)



# O Lado Escuro do Universo

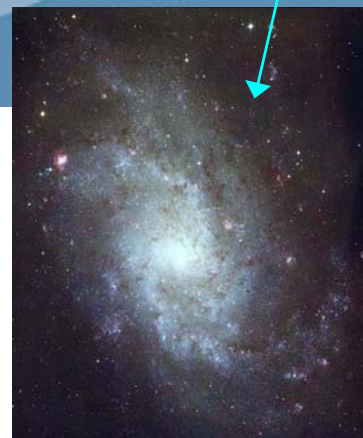
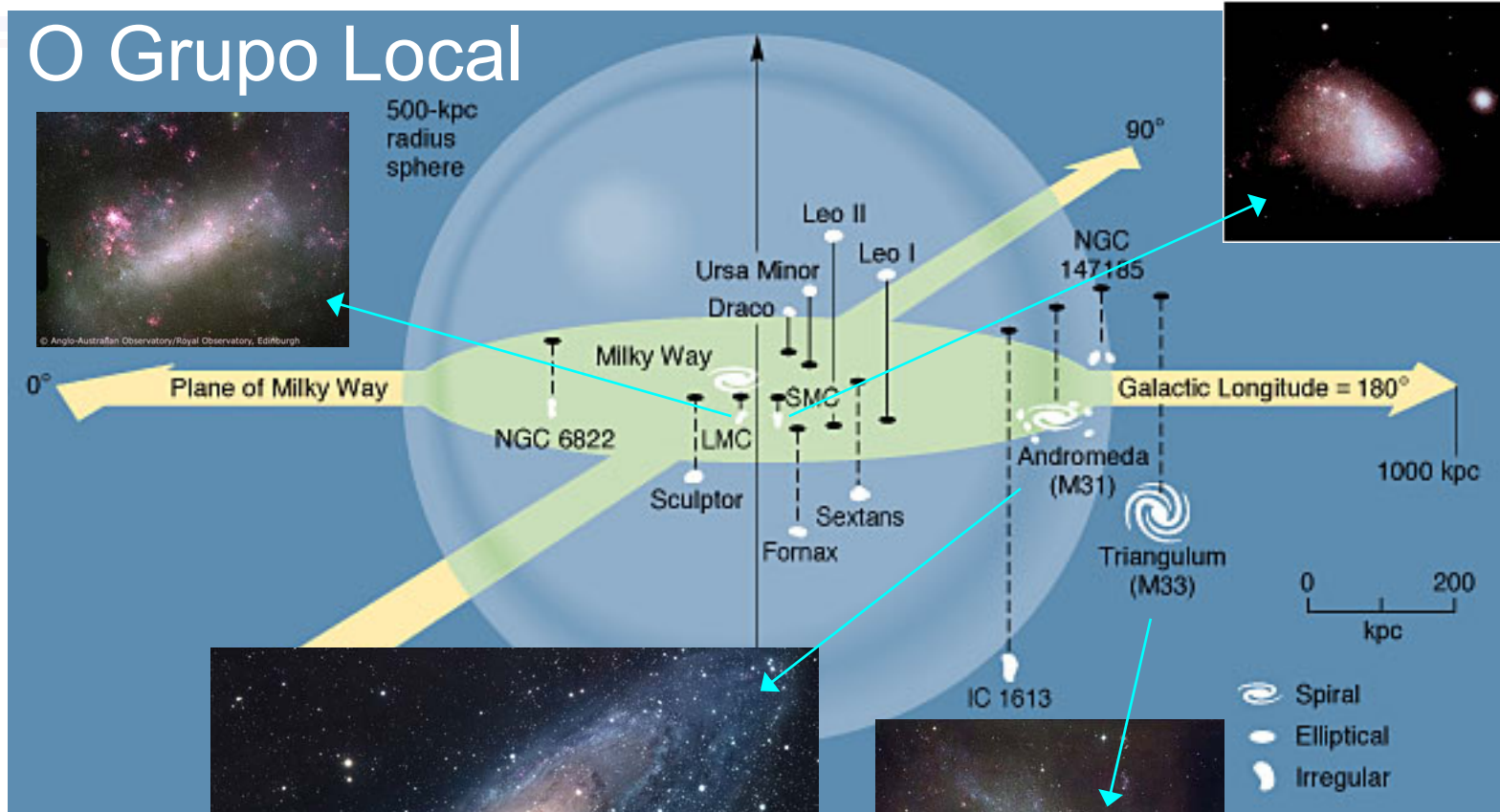
## Episódio I





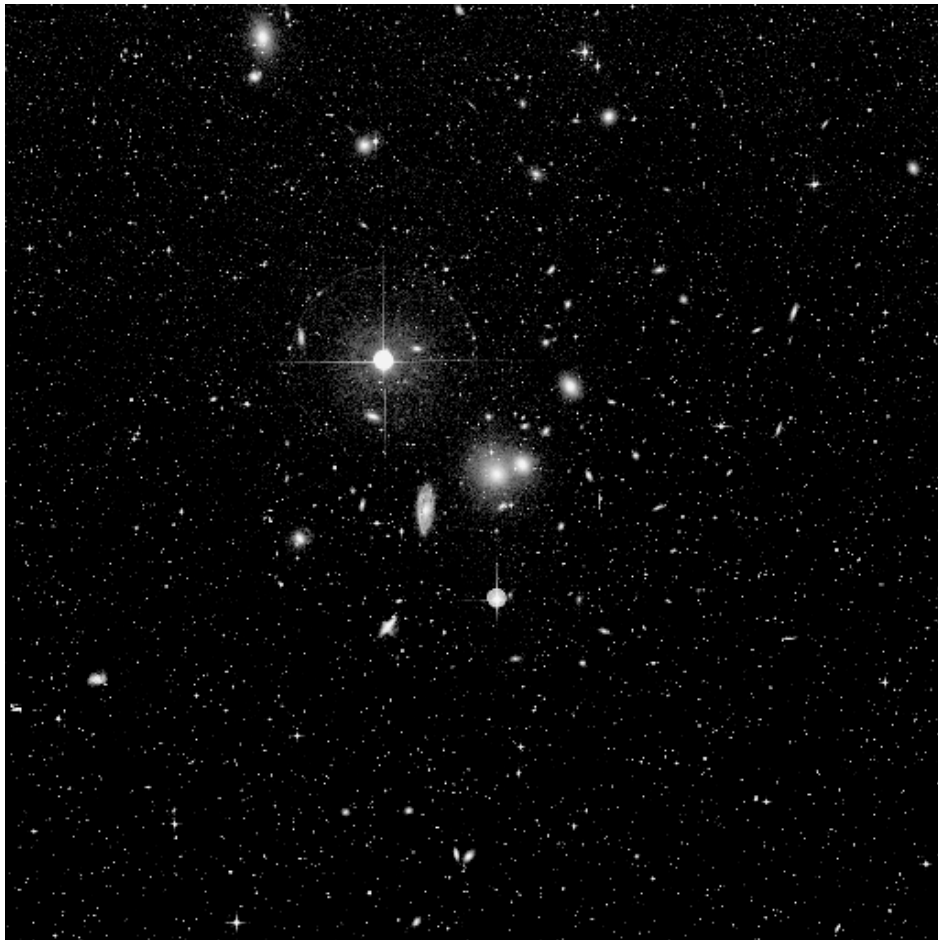
# Grupos de Galáxias

## O Grupo Local



**Tamanhos  
fora de escala**

# Aglomerados de Galáxias



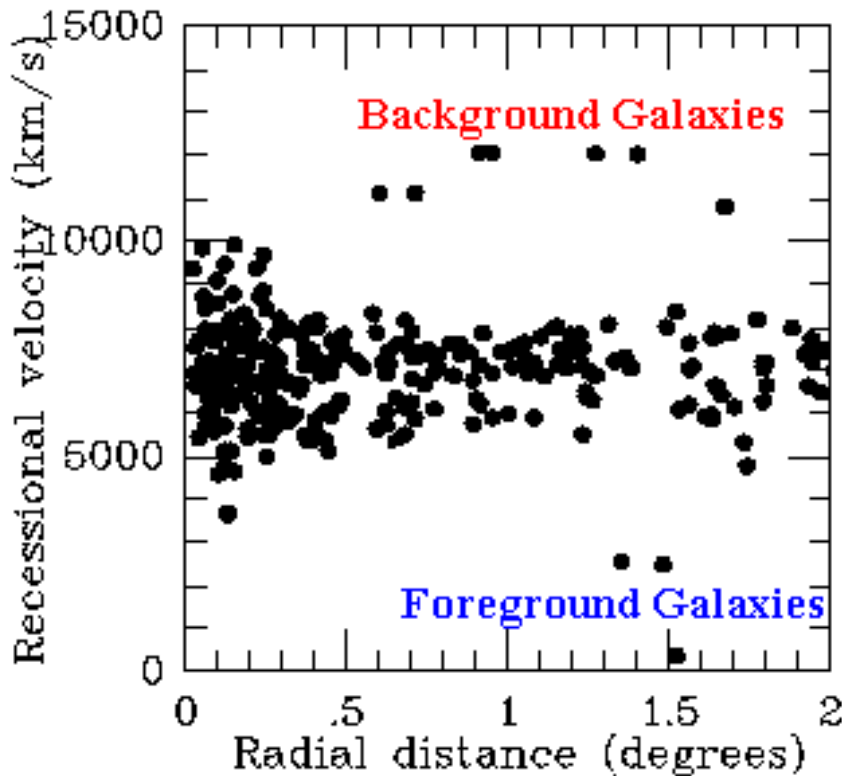
Aglomerado de Hydra



Aglomerado de Coma

# A Matéria Escura

- Dispersão de velocidades em aglomerados (Zwicky 1934)



Teorema do Virial

$$2\langle E_K \rangle = -\langle E_G \rangle$$

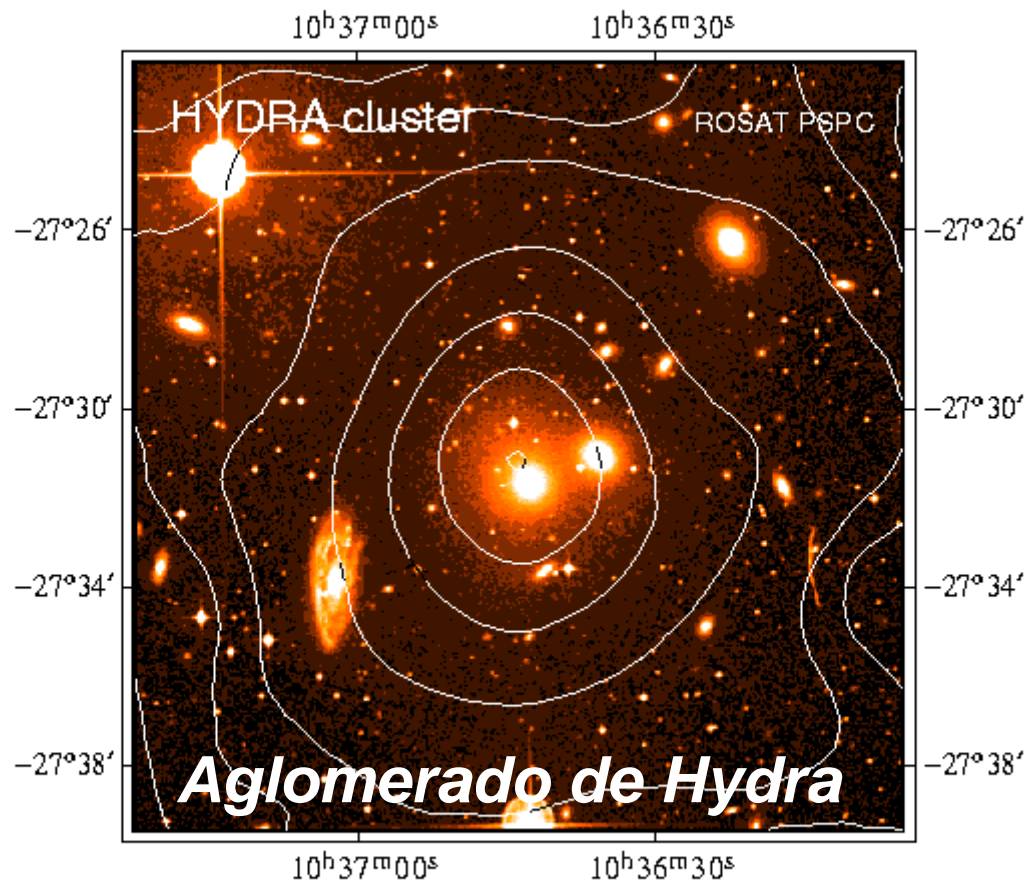


$$\frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2 \sim -\frac{1}{2} \left( -\frac{1}{2} \frac{GM^2}{R} \right)$$

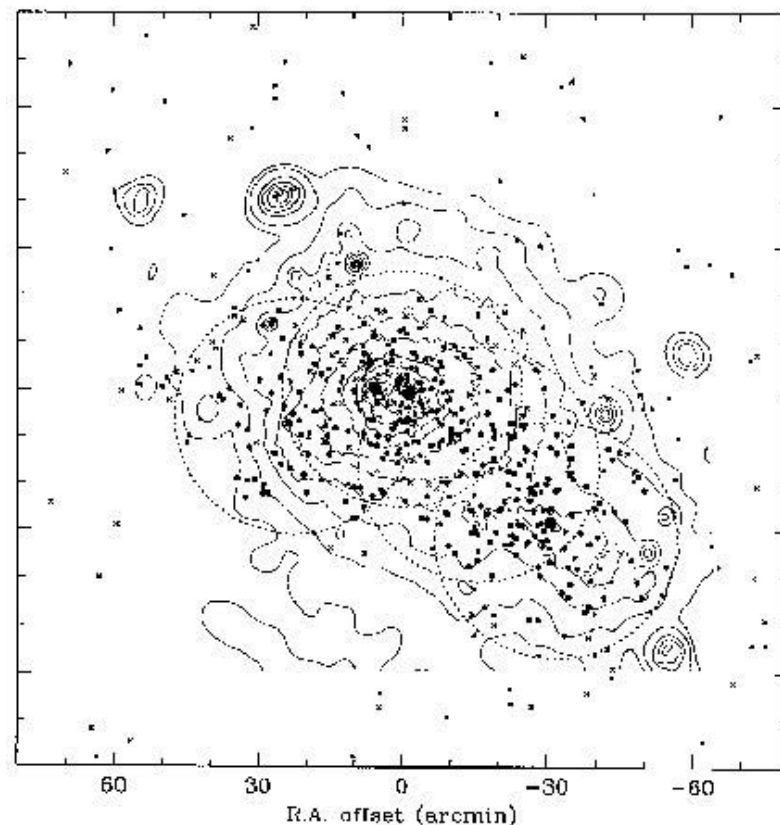
$$M \sim \frac{2Rv^2}{G}$$

Matéria  
escura

# Aglomerados em raios-x



Right Ascension (2000.0)



- The Coma cluster fields observed with Hydra (dotted circles) and the positions of the with redshift measurements (new data dots, literature data crosses), superimposed on ours of the ROSAT observations of White et al. (1993). The three dominant galaxies (74, NGC 4889 and NGC 4839) are shown as larger dots.



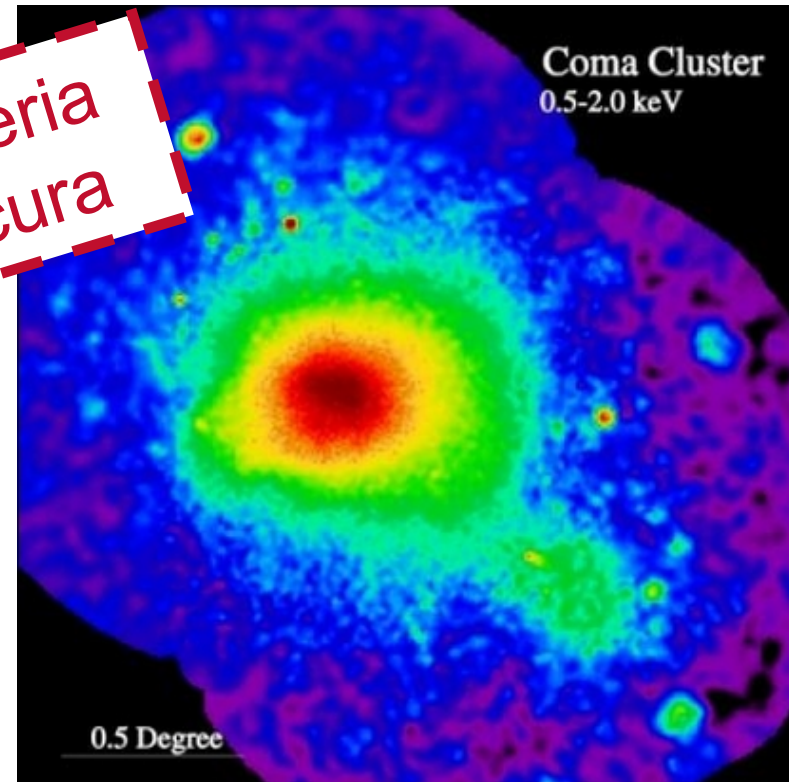
# Aglomerado de coma



Coma no ótico

Coma em raios x

Matéria escura

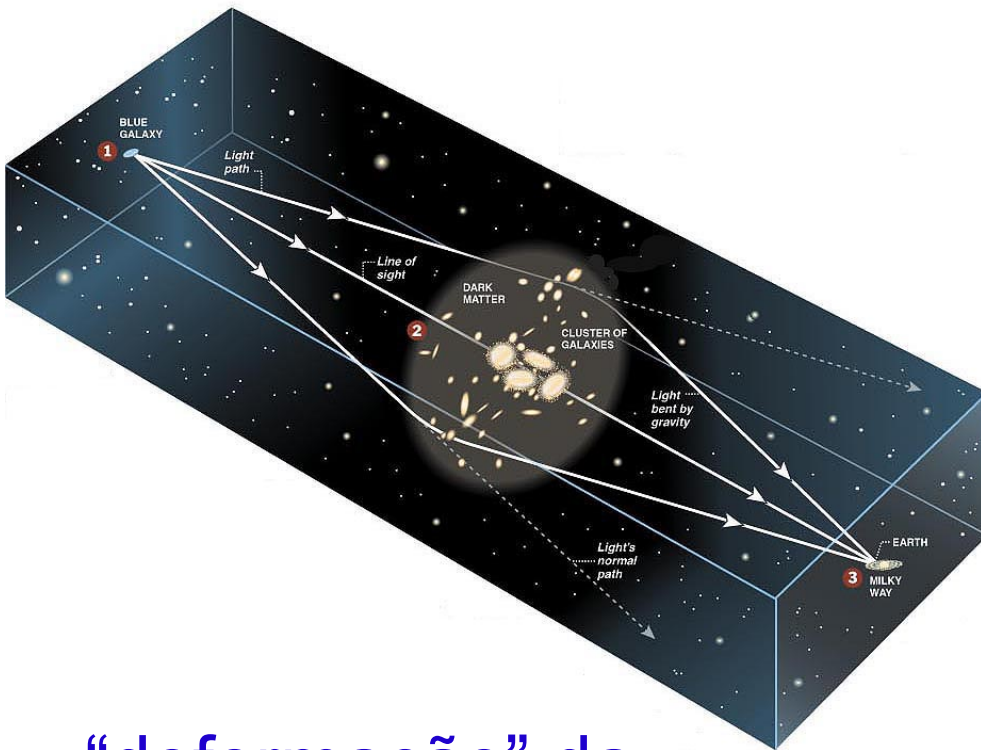


$M_{\text{gás}} \sim 20 \times M_{\text{estrelas}}$

Ainda assim matéria escura é 80%

**Gás é distribuído mais suavemente**

# Lentes Gravitacionais



“deformação” da trajetória da luz pelo espaço-tempo curvo



**Gravitational Lens**  
**Galaxy Cluster 0024+1654**  
Hubble Space Telescope · WFPC2

Imagens múltiplas

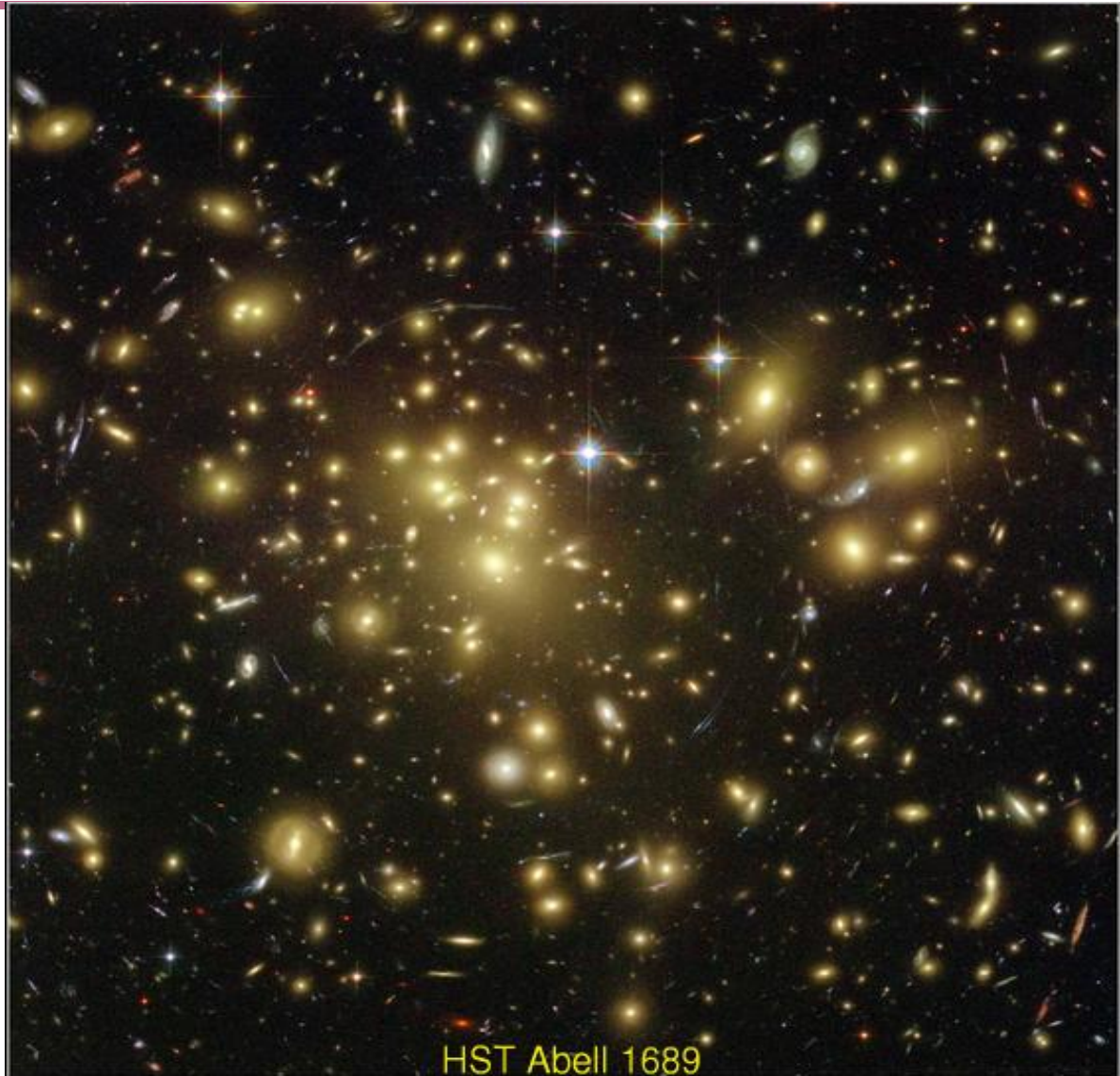


# Efeito Fraco de Lente Gravitacional

⊙ Deformação (e magnificação) das imagens das galáxias

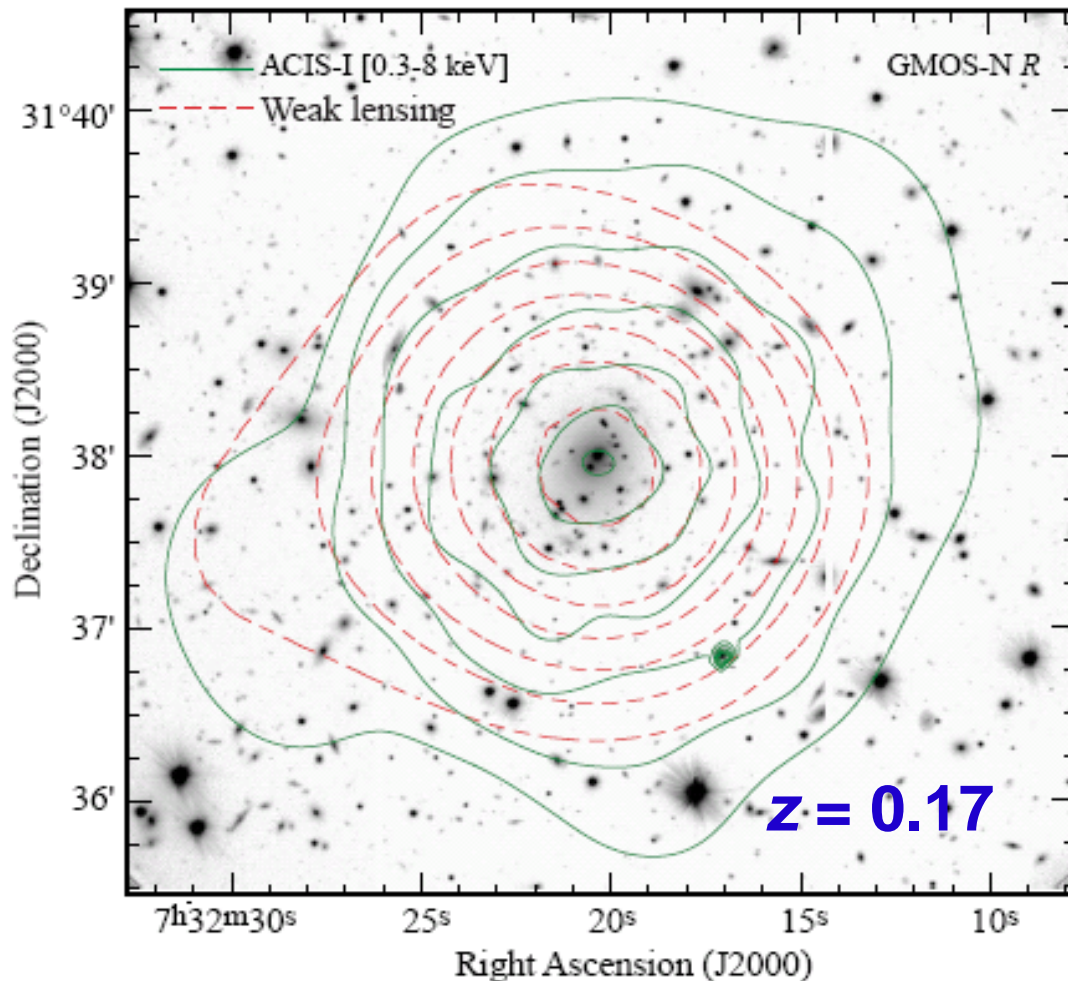
⊙ Orientação na direção tangencial

Matéria  
escura



HST Abell 1689

# Comparação entre medidas da matéria escura em aglomerados



- efeito fraco de lente gravitacional
- emissão de raios-x
- dispersão de velocidades

⇒ concordam em  $\sim 20\%$   
(para aglomerados relaxados)

**Matéria escura é  
menos concentrada**

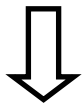
# A Matéria Escura em Galáxias

- Curvas de rotação de galáxias

Matéria  
escura

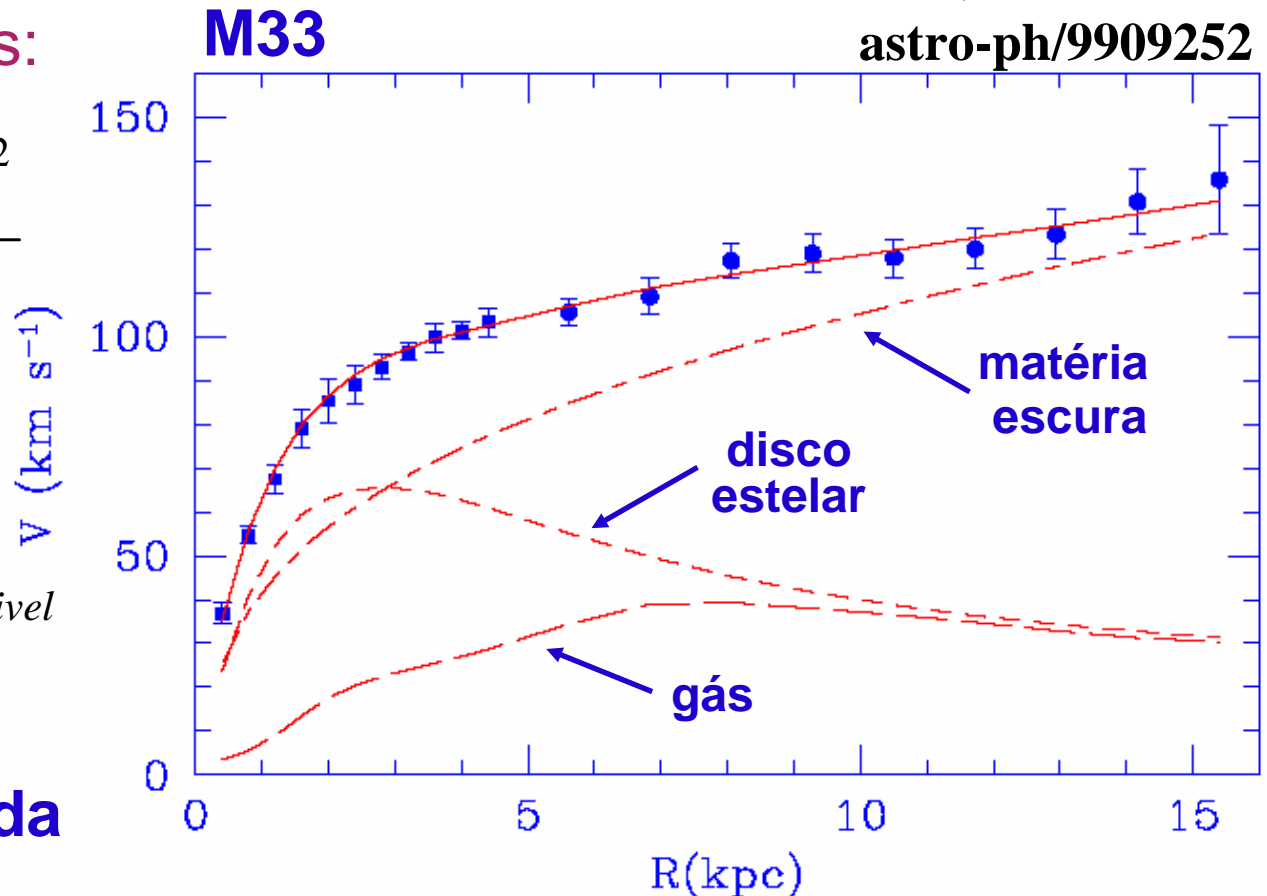
Estimativa simples:

$$G \frac{M(r)}{r^2} = \frac{[V(r)]^2}{r}$$



$$M_{Halo} \approx 3 - 10 M_{Visivel}$$

Matéria escura é  
menos concentrada



# Matéria Escura no Universo

## Evidências:

- Curvas de rotação de galáxias
- Movimentos de galáxias e aglomerados (virial e grande escala)
- Fluxos de raios-X em aglomerados
- Lentes gravitacionais
- Efeito Sunyaev-Zel'dovich

Há ~5x mais *matéria escura* que matéria usual!

Não Bariônica: Não interage com a matéria bariônica  
(não dissipa nem emite luz)

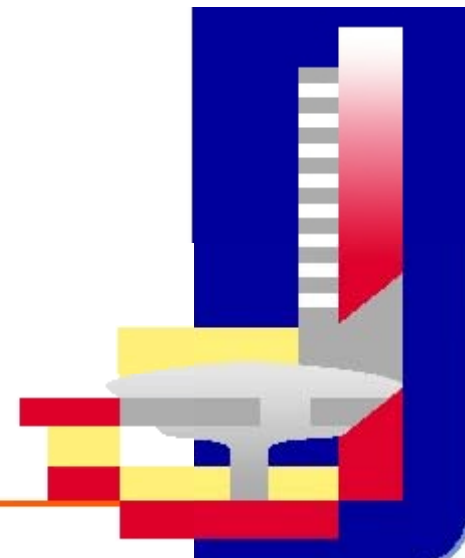
Onde está a matéria “ordinária”?

- Matéria visível (estrelas): 10%
- A maior parte da matéria bariônica é “escura” (gás, planetas, BN)

A matéria escura é a componente - que se aglomera -  
dominante da densidade de massa do Universo

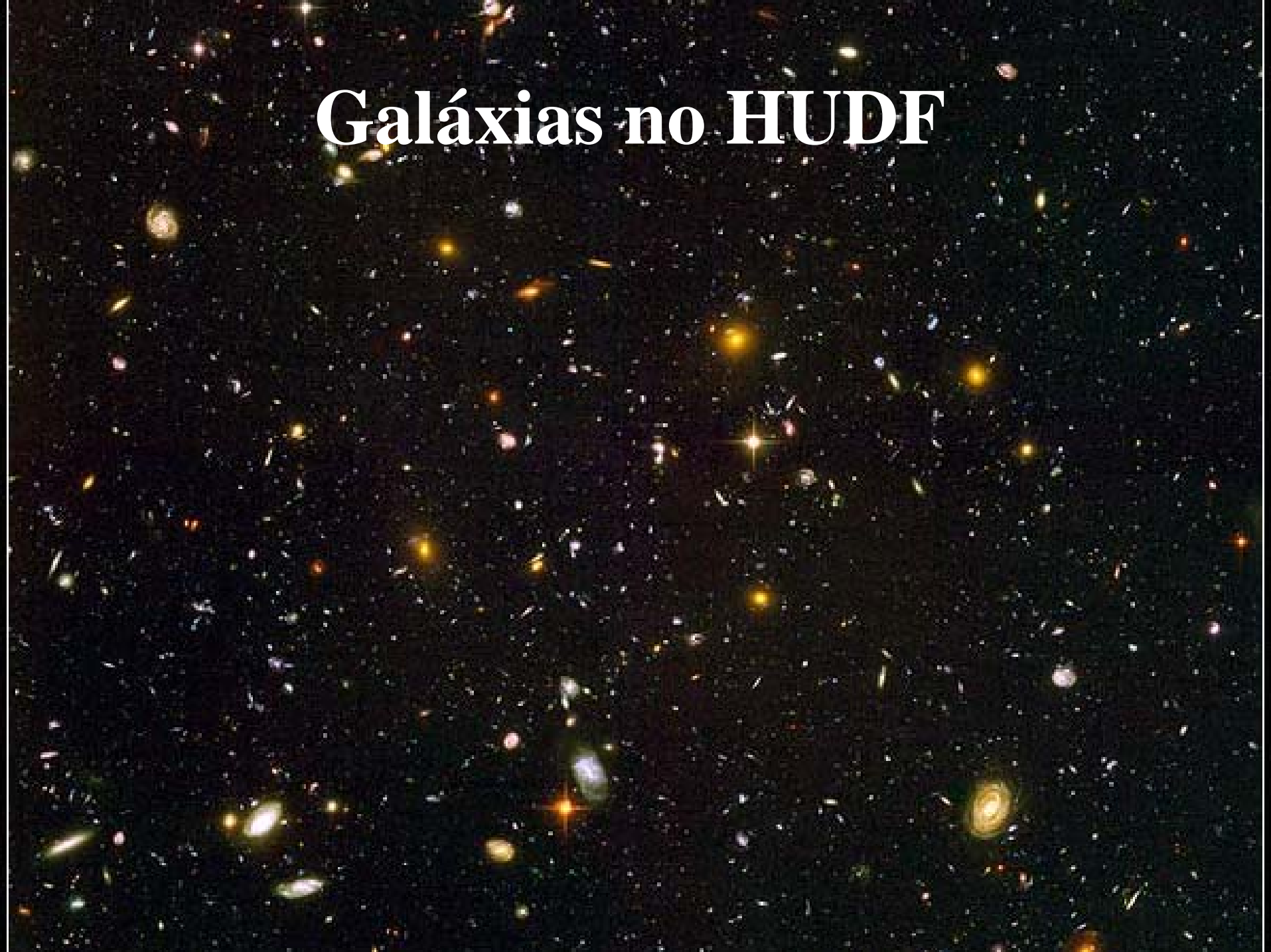
# A Estrutura em Grande Escala

Fazendo um “Mapa” do Universo



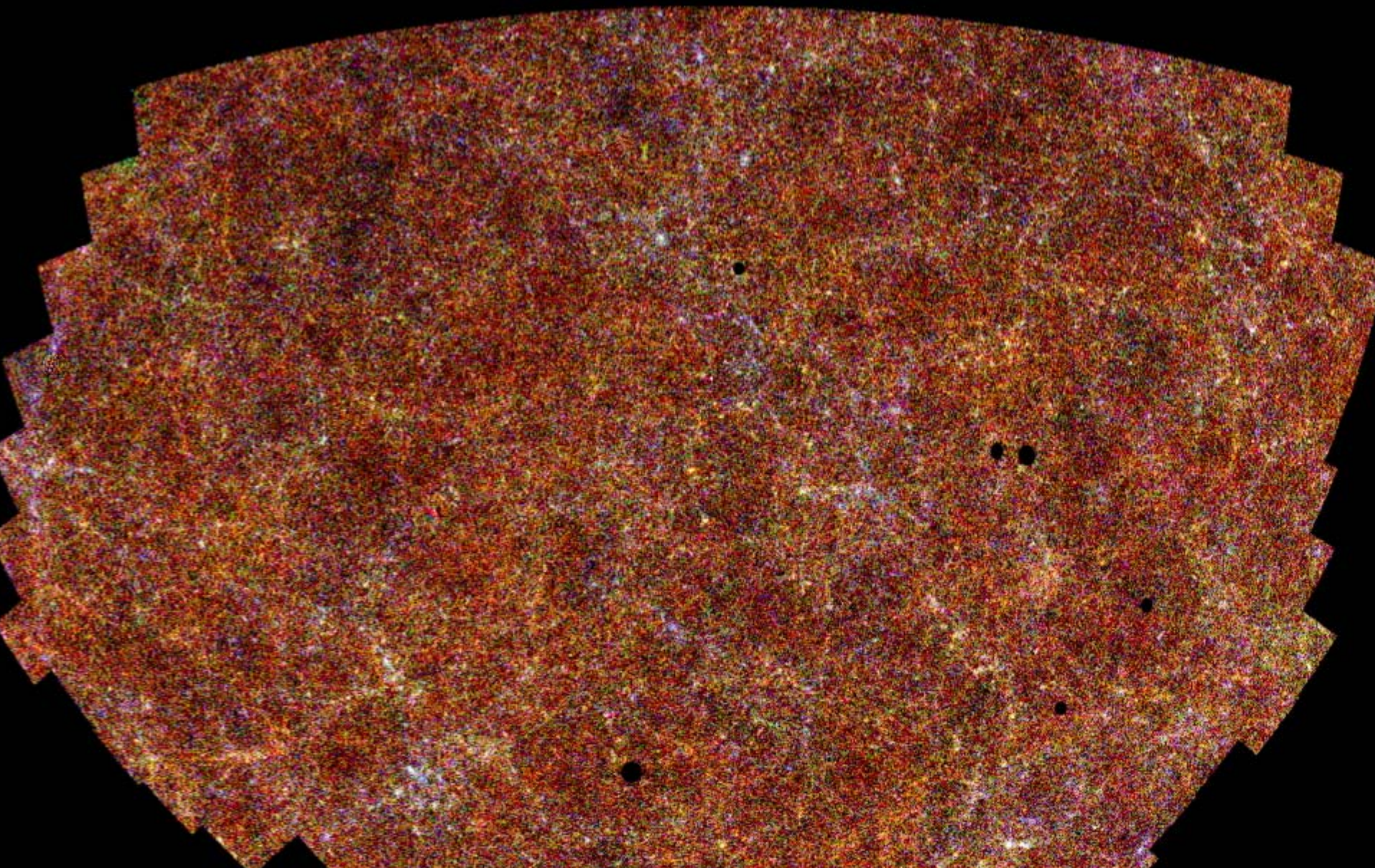


# Galáxias no HUDF





# Estrutura em Grande Escala





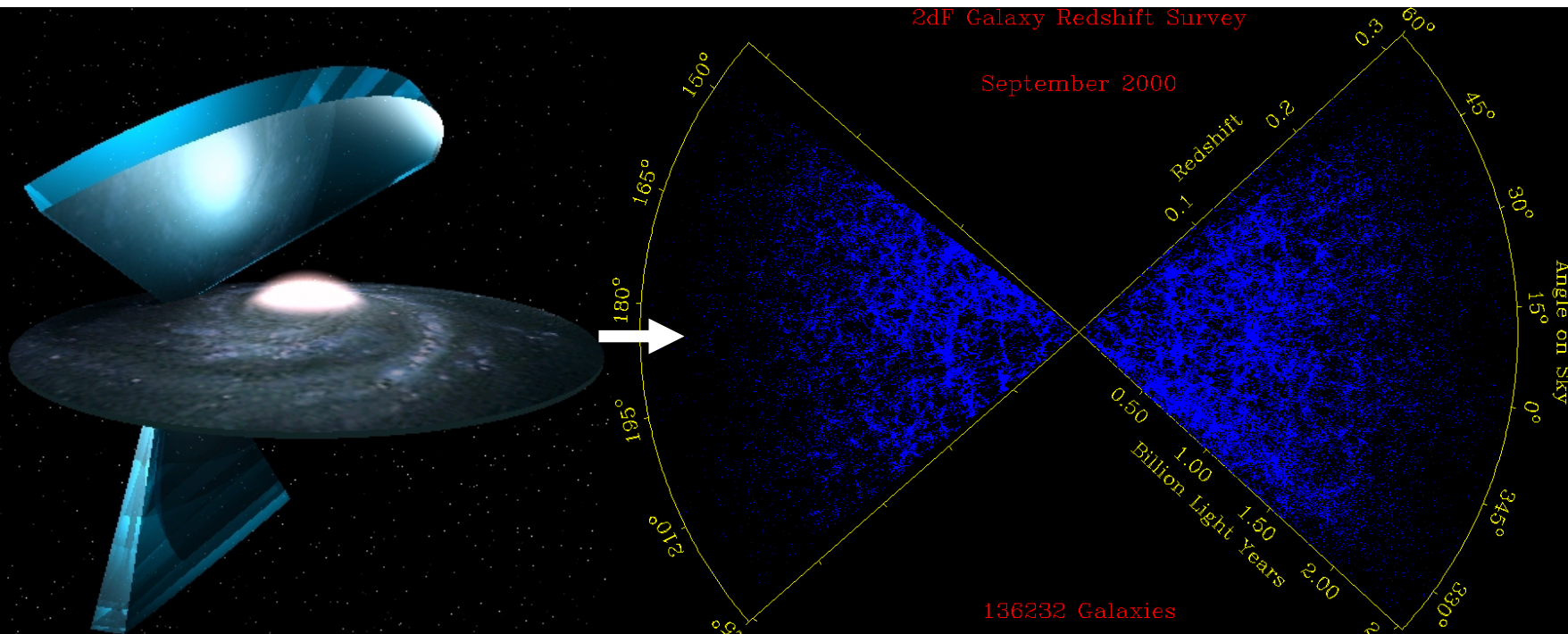
# Mapa 3D do Universo

Lei de Hubble (de Sitter)  $v \approx H_0 d$

Efeito Doppler  $v = cz = c \Delta\lambda / \lambda$

$$d \approx H_0^{-1} cz$$

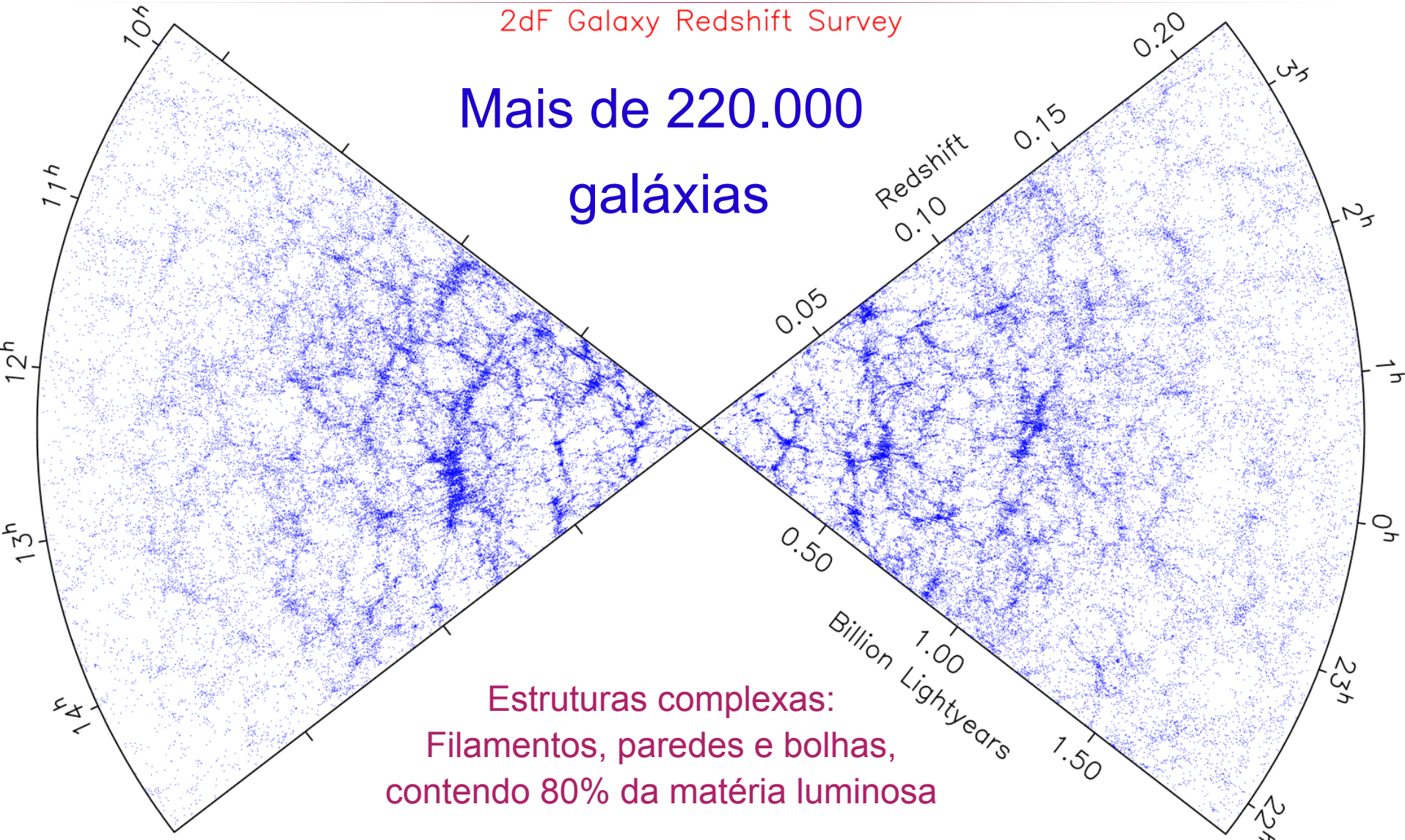
na realidade  $\mathbf{v} = \mathbf{v}_{\text{exp}} + \mathbf{v}_{\text{pec}}$



# Mapa do *Two Degree Field*

2dF Galaxy Redshift Survey

Mais de 220.000  
galáxias

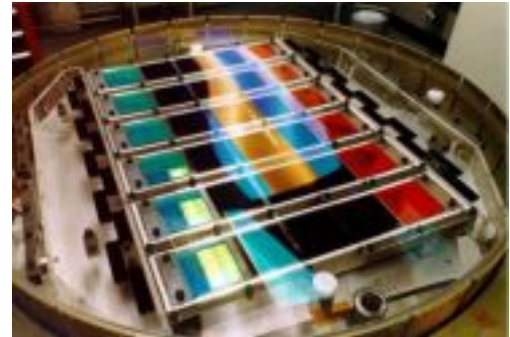


Estruturas complexas:  
Filamentos, paredes e bolhas,  
contendo 80% da matéria luminosa

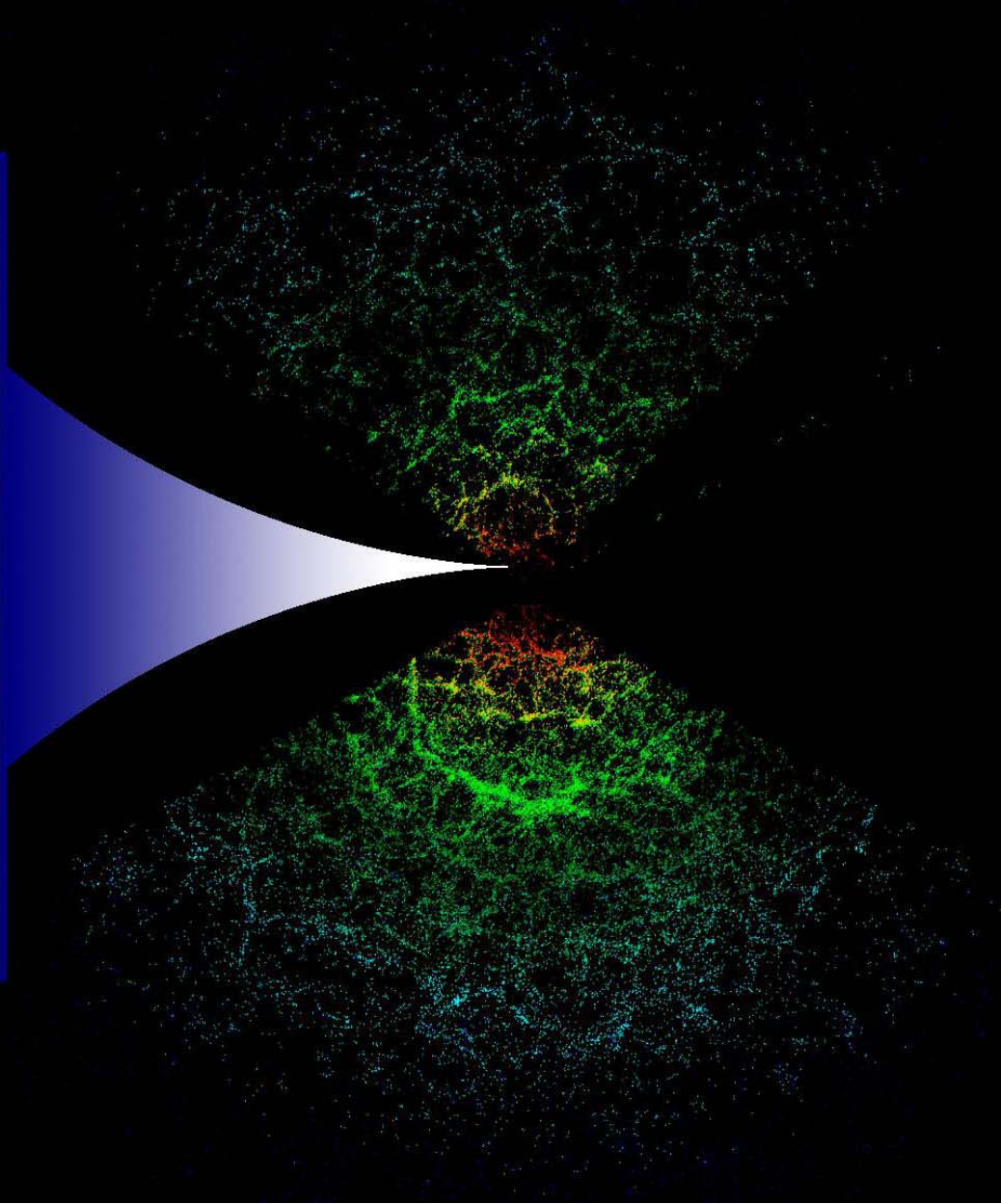
# Fazendo um Mapa do Universo



## Sloan Digital Sky Survey





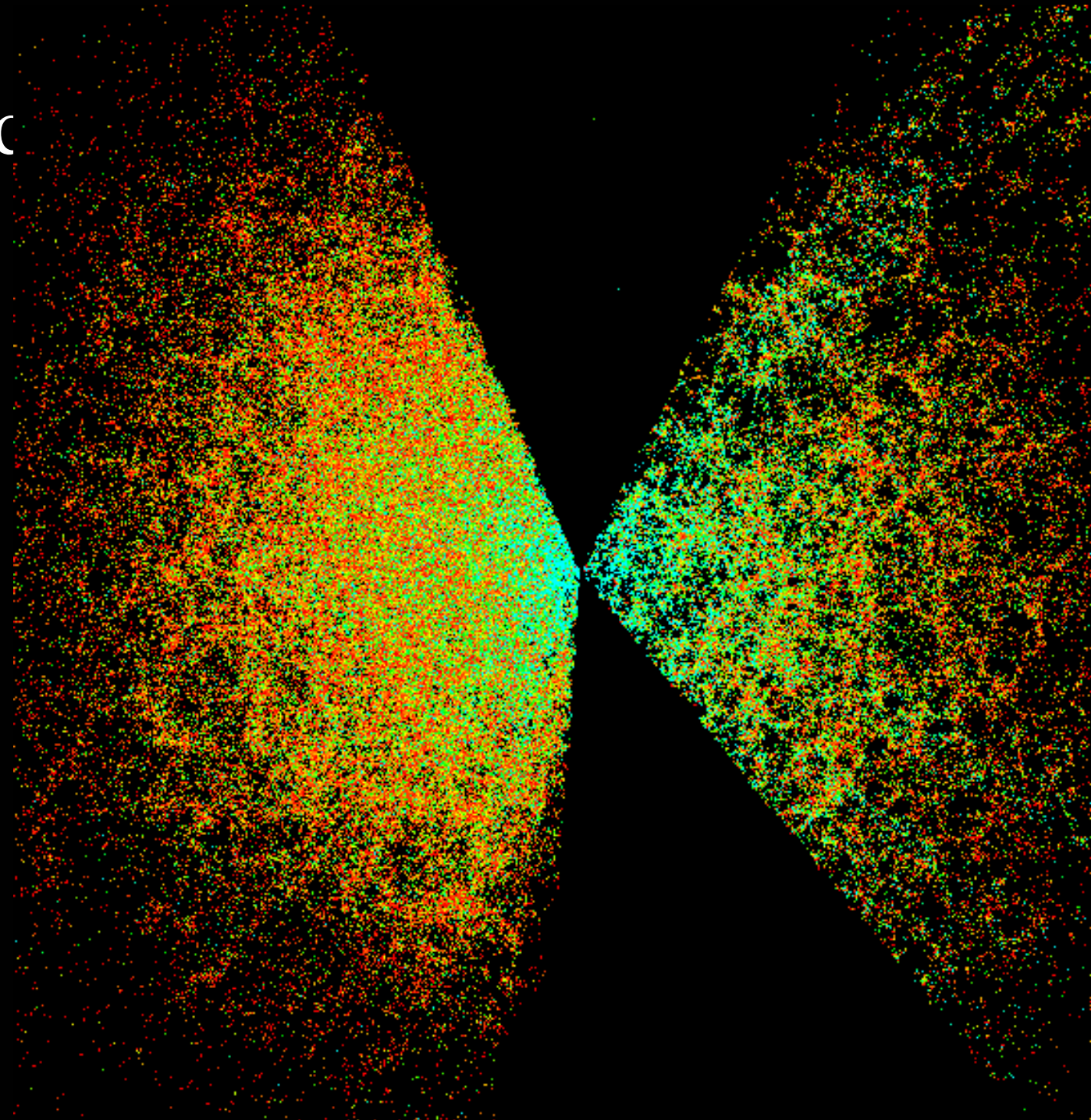


Imagens das galáxias (2D)  $\longrightarrow$  Posição incluindo a distância (3D)



# Mapa 3D c

- Cor  
intínseca (g-r)
- Relação  
cor-luminosidade



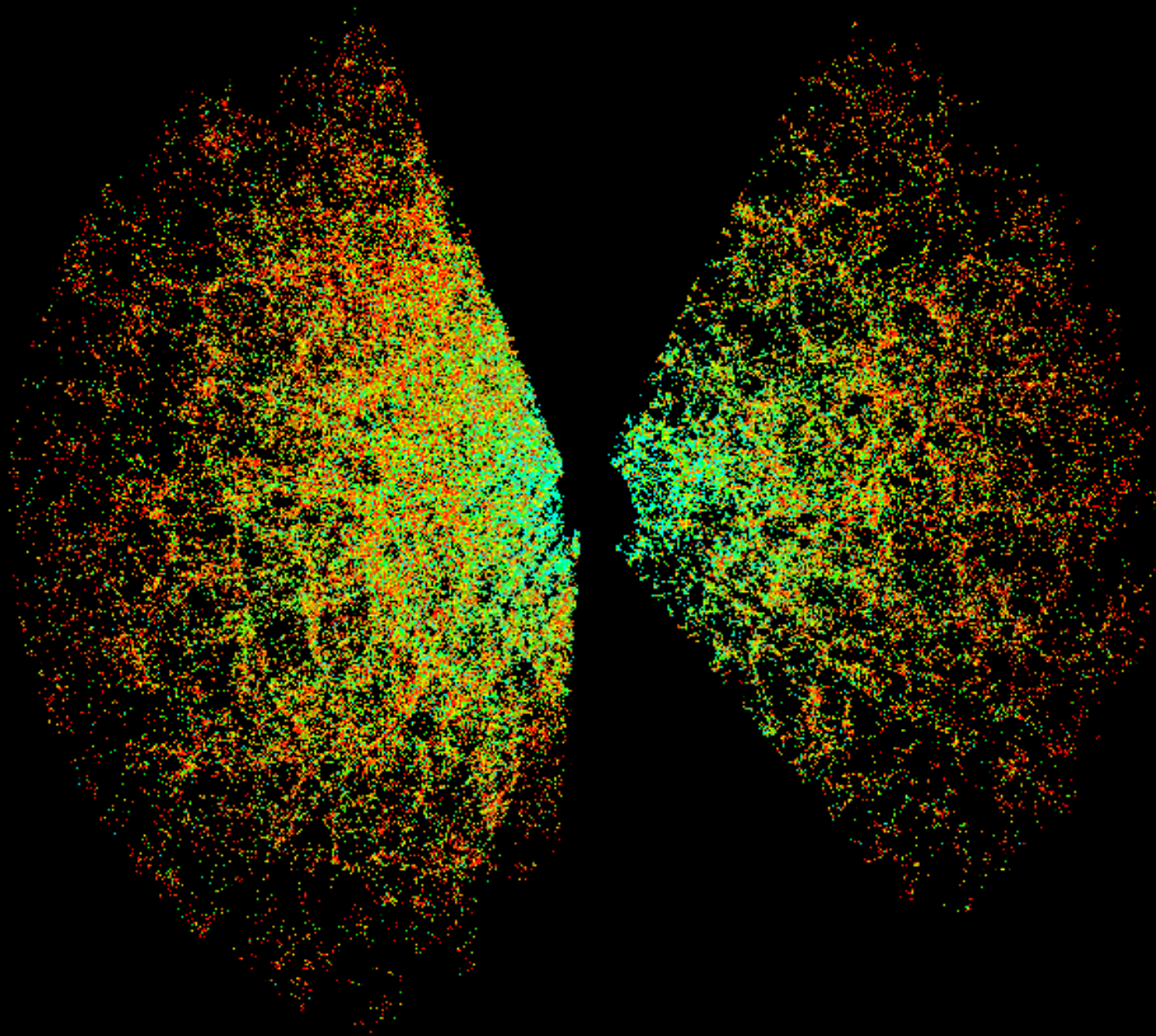


# Mapa 3D

○ 145.000  
Galáxias

$0.02 < z < 0.22$

Relação  
cor-densidade  
“dedos de Deus”  
vermelhos



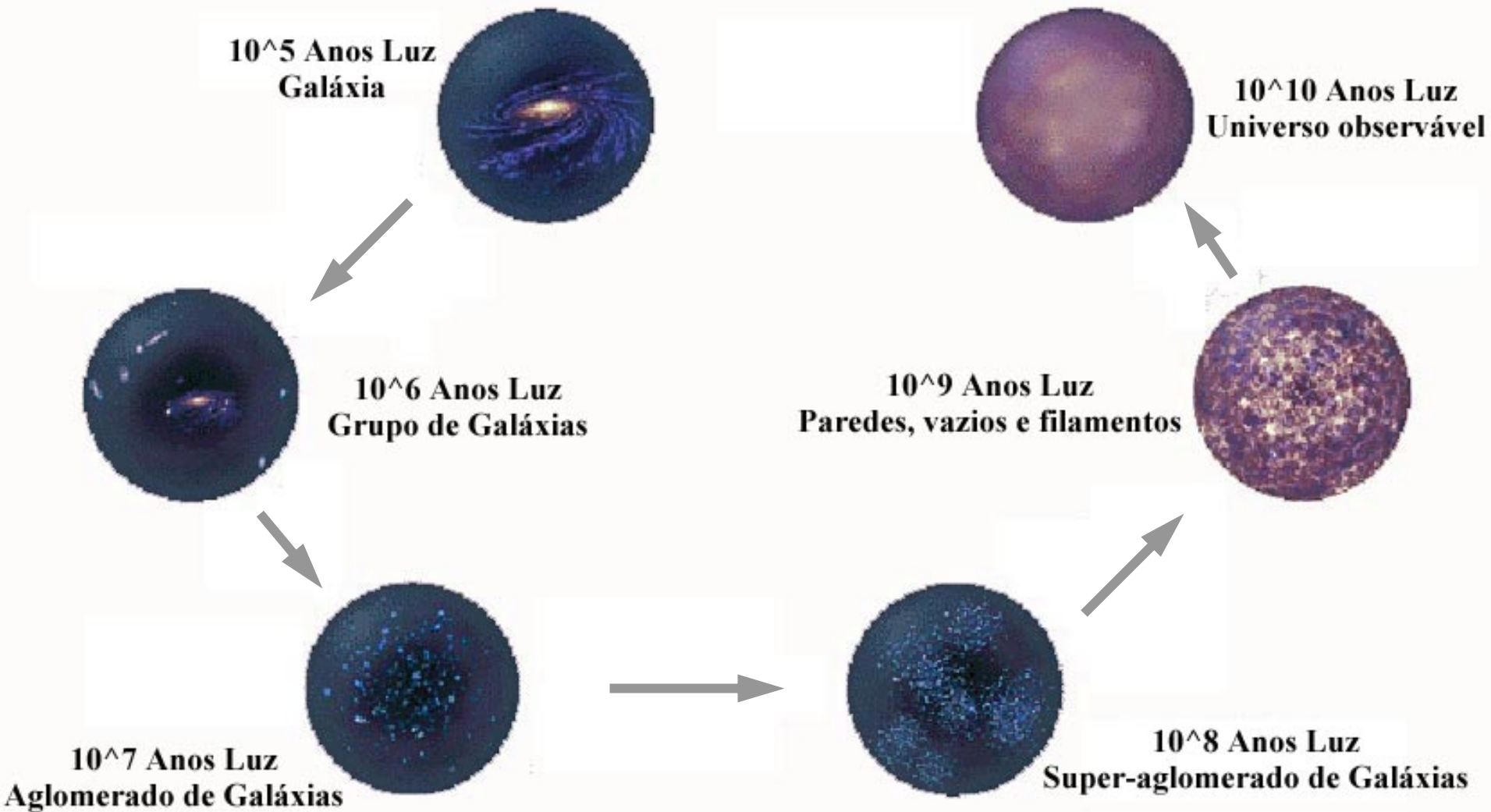
# O Sloan Digital Sky Survey

---

## Dados tornados públicos em 2005 (DR4):

- q Cobertura angular de ~16% do céu
- q Fotometria de 180 milhões de galáxias, quasares e estrelas
- q Espectro (desvio para o vermelho) de 565.715 galáxias, 76.483 quasares e 153.087 estrelas
- q 12 TB de dados
- q A fotometria já foi completada (9100 graus quadrados)

# As escalas no Universo



# As escalas no Universo

$10^5$  Anos Luz  
Galáxia



$10^{10}$  Anos Luz  
Universo observável



Existem cerca de 60 bilhões de galáxias no Universo!

60.000.000.000

$10^7$  Anos Luz  
Aglomerado de Galáxias



$10^8$  Anos Luz  
Super-aglomerado de Galáxias



## Parte II

---

# O Universo Homogêneo I

# Cosmologia Newtoniana I:

## A equação de Friedmann

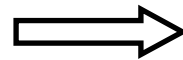
- Distribuição esfericamente simétrica e uniforme:

$$R(t) = a(t)r$$

**Equação de Friedmann**

- “Conservação da energia”

$$\frac{1}{2}m\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 - \frac{GMm}{R} = E$$



$$\dot{a}^2 = \frac{8\pi G}{3}a^2\rho - K$$

- Sabendo  $\rho(a)$ , podemos obter  $a(t)$

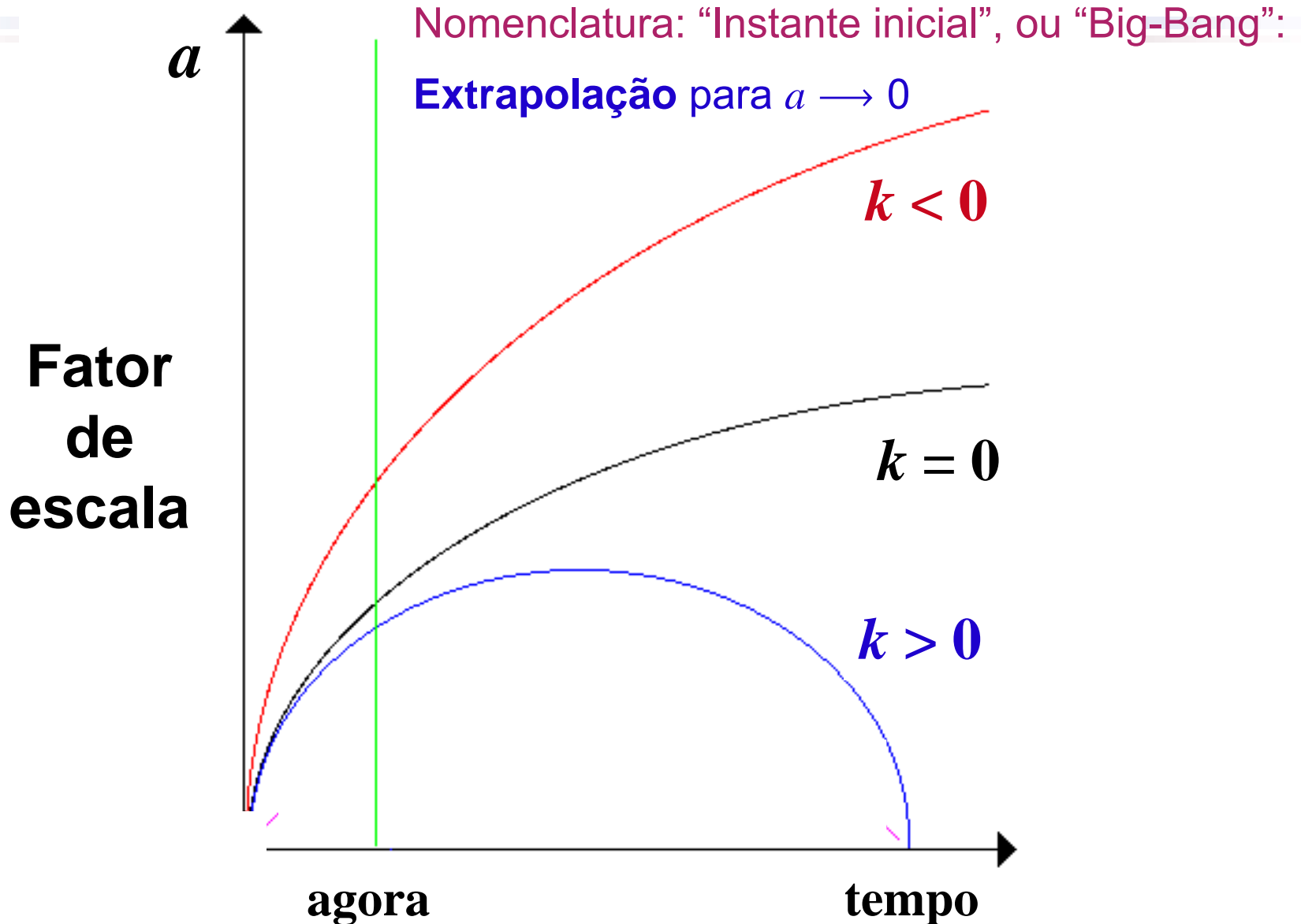
q Exemplo I: Matéria (partículas):  $\rho \propto a^{-3}$

–  $K = 0 \longrightarrow a \propto t^{2/3}$  Einstein - de Sitter

–  $K \neq 0$



# Evolução do Universo ( $\Lambda = 0$ )



# Densidade de Energia e Fator de Escala

## ○ Conservação da Energia

$$dE = -PdV$$

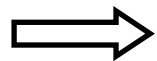
→ **Energia interna**

- **Densidade de energia:**  $\rho = \rho_0 + \varepsilon = nmc^2 + \varepsilon$

$$dE = d(\varepsilon V) = a^3 d\varepsilon + \varepsilon 3a^2 da$$

## ○ Conservação da Massa de Repouso

$$dMc^2 = d(\rho_0 V) = a^3 d\rho_0 + \rho_0 3a^2 da = 0$$



$$d\rho + 3(\rho + p) \frac{da}{a} = 0$$

**Válida também na relatividade geral!**

# Conservação da Energia

- Conservação da Energia para Cada Componente:

$$d\rho_i + 3(\rho_i + p_i)\frac{da}{a} = 0$$

**Exemplo 1: bárions (hoje), matéria escura:  $p = 0$**

$$\Rightarrow \rho_M \propto a^{-3}$$

**Exemplo 2: radiação:  $p = \rho/3$**

$$\Rightarrow \rho_r \propto a^{-4} \quad \rho_\gamma = \sigma T^4 \quad \longrightarrow \quad T_\gamma \propto a^{-1}$$

**Exemplo 3: “vácuo”:  $p = -\rho$**

$$\Rightarrow \rho_v = \text{const.}$$

# Quem “Comanda” a Expansão?

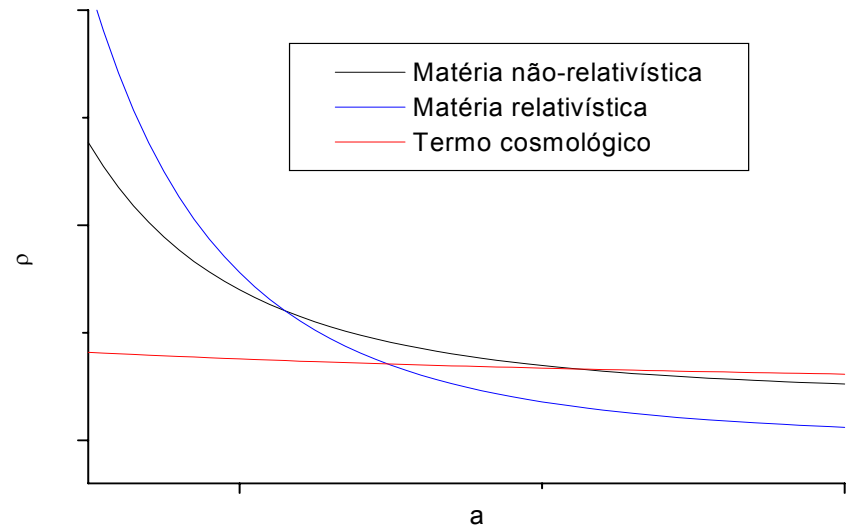
## o Comportamento dos ingredientes

$\rho_{\text{radiação}} \propto a^{-4}$ ,  $\rho_{\text{matéria}} \propto a^{-3}$ ,  $\rho_x \propto a^{-3(1+w_x)}$ , com  $w_x < -1/2$

### Equação de Friedmann

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \sum \rho_i - \frac{K}{a^2}$$

- Era dominada pela radiação
- Era dominada pela matéria
- Era dominada pela curvatura?
- Era da expansão acelerada (energia escura?)



## Problema da coincidência



# Parâmetros Cosmológicos

- Equação de Friedmann

$$H^2 = \left( \frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \sum_i \rho_i - \frac{K}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

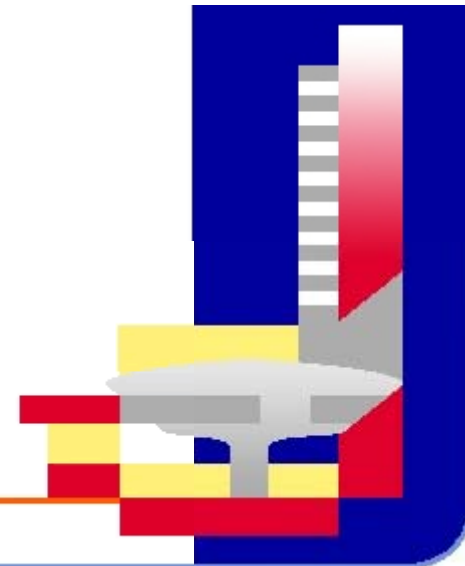
- Parâmetros de densidade

$$\Omega_i := \frac{\rho_{i0}}{\rho_{crit}} \quad \text{com} \quad \rho_{crit} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \quad \text{e} \quad \Omega_k = -\frac{K}{H_0^2}$$

- Parâmetro de Hubble

$$H^2(a) = H_0^2 \left[ \Omega_r a^{-4} + \Omega_M a^{-3} + \Omega_k a^{-2} + \Omega_\Lambda \right]$$

# A Geometria do Cosmos



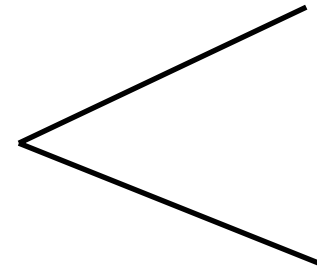
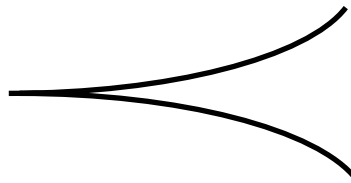
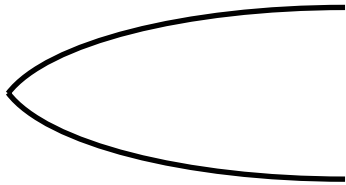
# A Métrica (Espacial) do Universo Homogêneo

- Métrica:  $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$
- Seção espacial, isotropia:  
 $(d\vec{r})^2 = f(r)dr^2 + g(r)(r^2 d\theta^2 + r^2 \text{sen}^2 \theta d\phi^2)$
- $r'$  definido pela área
- Curvatura constante:  $f = \frac{1}{1 - Kr^2}$

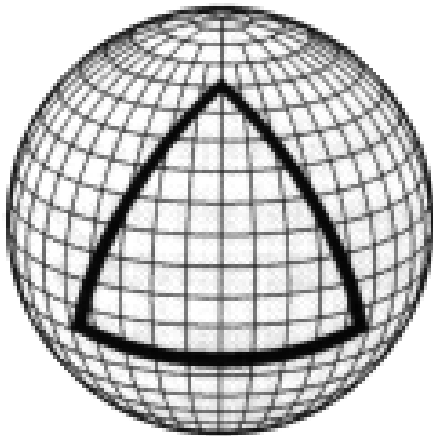
$$(d\vec{r})^2 = \frac{1}{1 - Kr^2} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \text{sen}^2 \theta d\phi^2$$

# Geometria

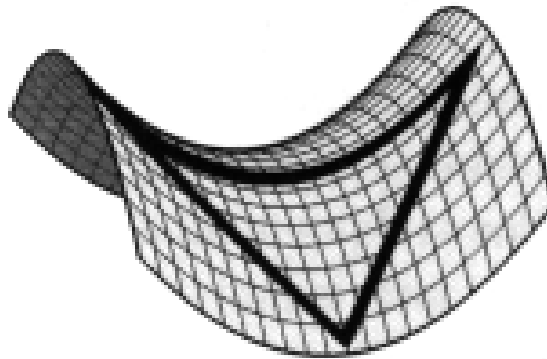
**Ângulos:**



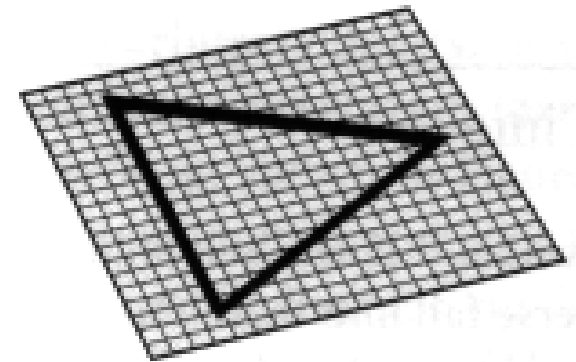
**Analogia 2D:**



**Esférica**



**Hiperbólica**

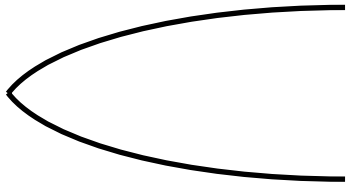


**Plana**

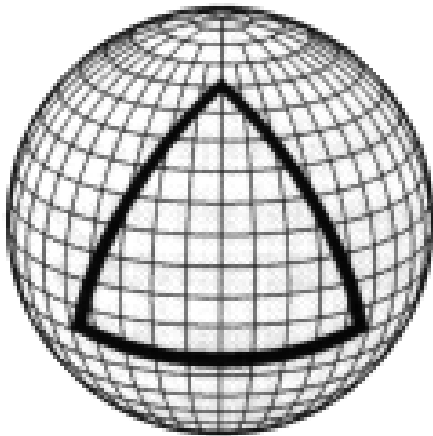


# Geometria

**Ângulos:**



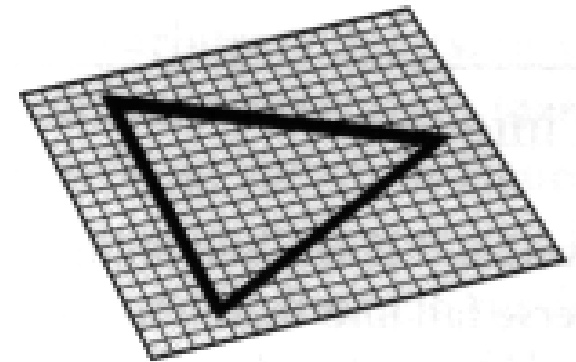
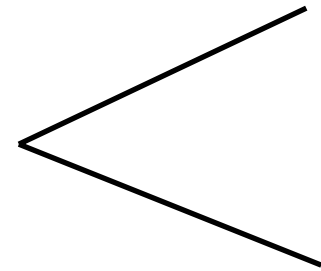
**Analogia 2D:**



**Esférica**



**Hiperbólica**




**Plana**

# Geometria Espaço-Temporal do Universo Homogêneo

- Invariante:  $ds^2 = dt^2 - (d\vec{x})^2$
- Todas as escalas expandem com  $a(t)$ :

$$(d\vec{x})^2 = a^2(t)(d\vec{r})^2 = a^2(t) \left( \frac{1}{1-Kr^2} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \text{sen}^2 \theta d\phi^2 \right)$$


$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) \left( \frac{1}{1-Kr^2} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \text{sen}^2 \theta d\phi^2 \right)$$



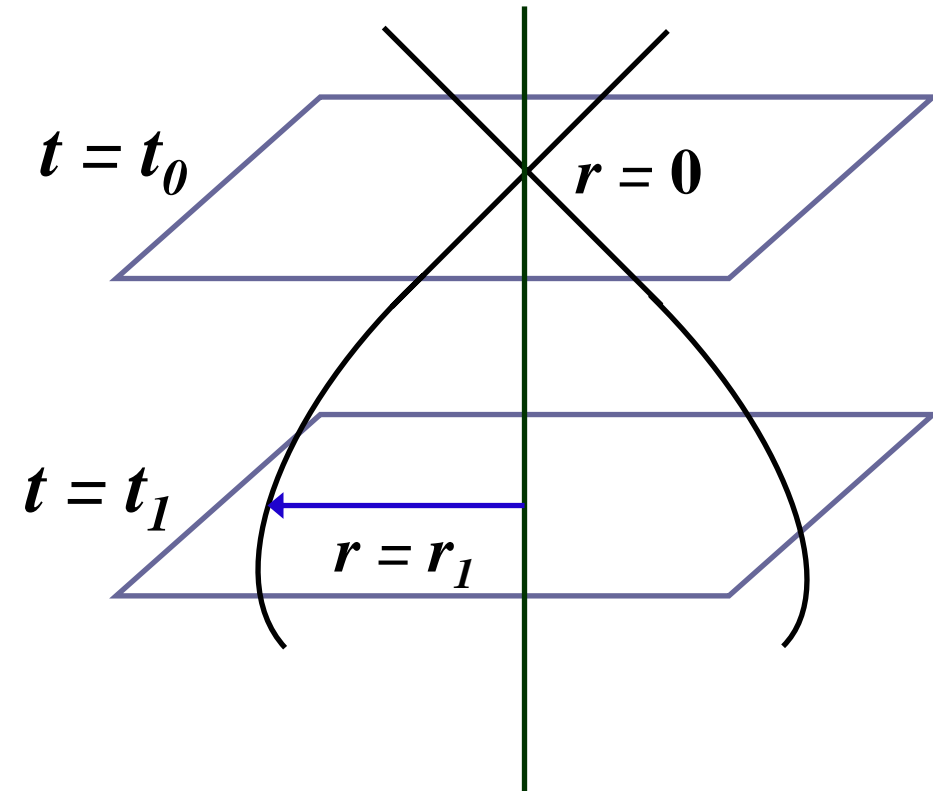
**Métrica de Friedmann (Robertson-Walker)**

# Propagação da Luz e Desvio para o Vermelho

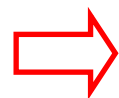
- Integrando uma geodésica nula na direção radial:

$$\int_{t_1}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} = \int_0^{r_1} \frac{dr}{\sqrt{1 - Kr^2}} \equiv f(r_1)$$

$$\Rightarrow \frac{\delta t_1}{a(t_1)} = \frac{\delta t_0}{a(t_0)}$$



**Desvio para o vermelho**



$$z := \frac{\lambda_0 - \lambda_1}{\lambda_1} = \frac{a(t_0)}{a(t_1)} - 1$$

$$a(t) = (1 + z)^{-1}$$

# Distância de Luminosidade

$$d_L^2 := \frac{L}{4\pi F}$$

$F$ : Energia por unidade de área por unidade de tempo

Área da  $S^2$  centrada na fonte no instante de detecção  $t_0$ :  $4\pi a^2(t_0)r_1^2$

Variação da energia:  $h\nu_1/h\nu_0 = (1+z)^{-1}$

Diferença de tempo:  $\delta t_0 / \delta t_1 = a(t_0) / a(t_1) = 1+z$



$$d_L^2 = a^2(t_0)r_1^2(1+z)^2$$



# Distância de Luminosidade

$$d_L = a(t_0) r_1 (1 + z)$$

Como

$$\int_{t_1}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} = \int_0^{r_1} \frac{dr}{\sqrt{1 - Kr^2}} = \begin{cases} \sin^{-1}(\sqrt{K} r_1) / \sqrt{K}, & \text{para } K > 0 \\ r_1, & \text{para } K = 0 \\ \sinh^{-1}(\sqrt{K} r_1) / \sqrt{K}, & \text{para } K < 0 \end{cases}$$

teremos

$$d_L = (1 + z) \operatorname{sen}_K \left( H_0 \sqrt{1 - \Omega_0} \int_0^z \frac{dz'}{H(z')} \right) / H_0 \sqrt{1 - \Omega_0}$$

# Distância de Luminosidade

Expansão em série:

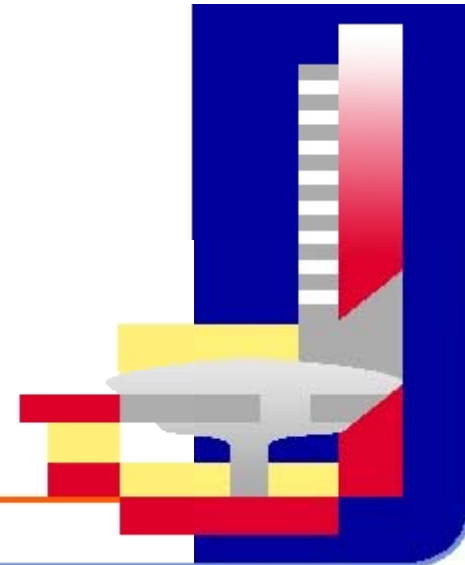
$$H_0 d_L(z) = cz \left[ 1 + \frac{1}{2}(1 - q_0)z - \frac{1}{6}(1 - q_0 - 3q_0^2 + j_0)z^2 + O(z^3) \right]$$

No caso plano:

$$\begin{aligned} d_L &= (1+z) \int_0^z \frac{dz'}{H(z')} \\ &= \frac{(1+z)}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_r (1+z')^4 + \Omega_M (1+z')^3 + \Omega_k (1+z')^2 + \Omega_\Lambda}} \end{aligned}$$

# O Lado Escuro do Universo

## Episódio II



# Supernovas do Tipo Ia e Cosmologia

## Vantagens:

- Luminosidade

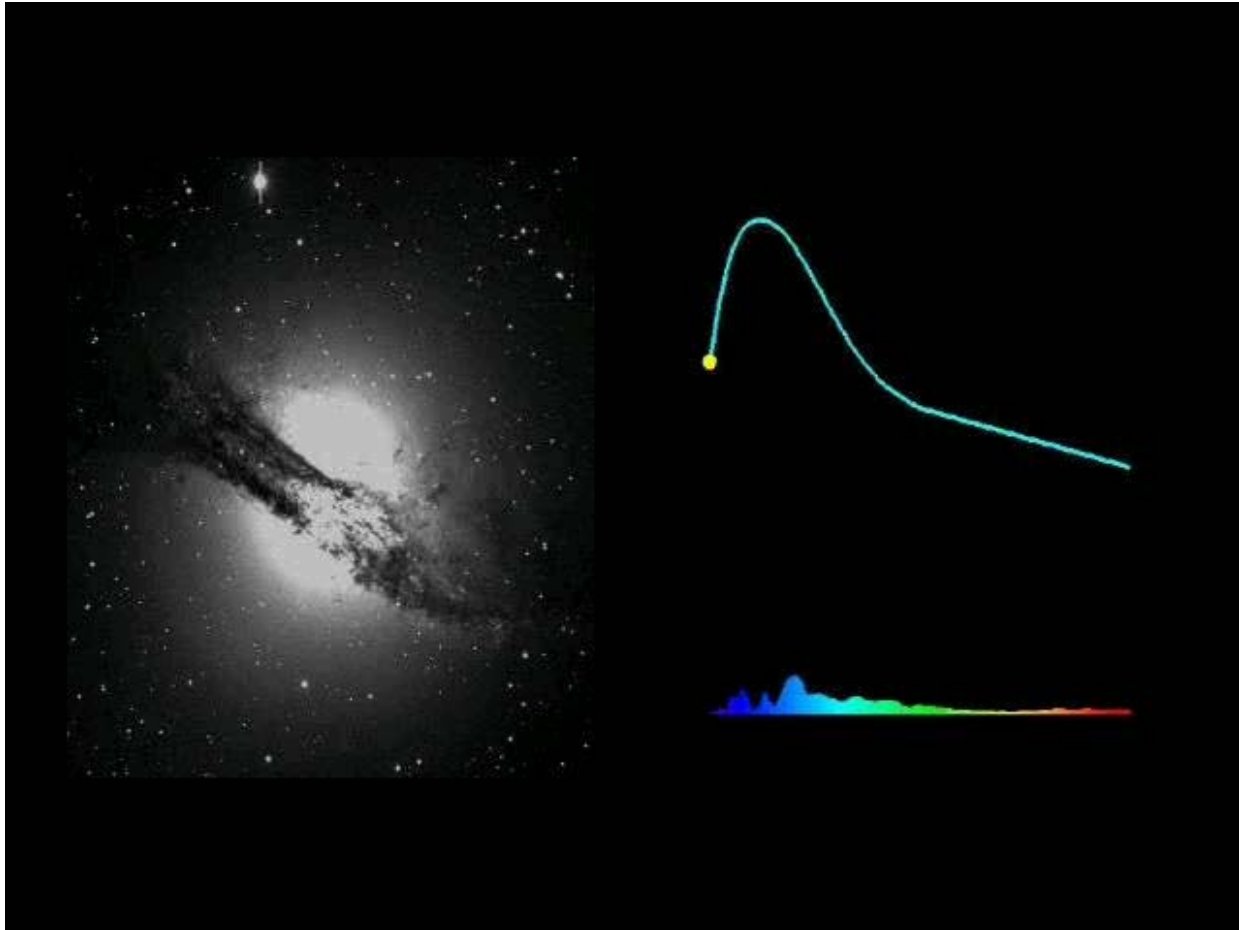
Extrema

( $10^9 - 10^{10} L_{\odot}$ )

⇒ Podem ser vistas  
a grandes distâncias



# Curvas de luz de Supernovas do Tipo Ia

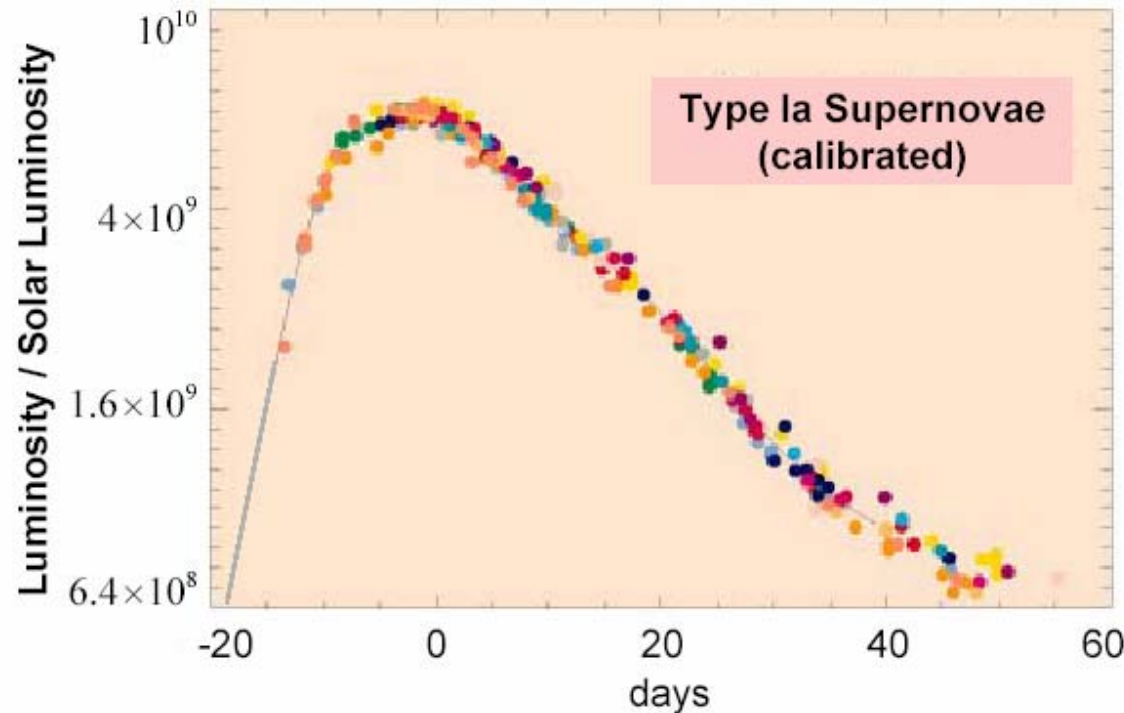
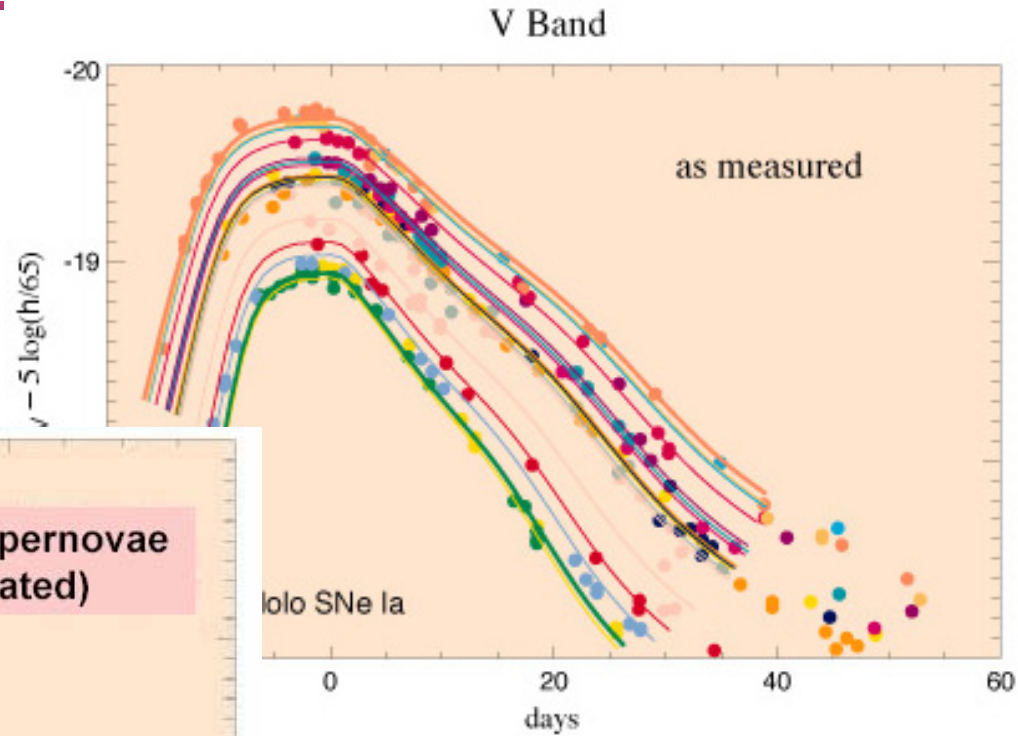




# Curvas de luz de Supernovas do Tipo Ia

Altamente homogêneas

⇒ Velas padronizáveis



# Supernovas do Tipo Ia e Cosmologia

## Vantagens:

- Luminosidade Extrema ( $10^9 - 10^{10} L_{\odot}$ )
- Altamente homogêneas  
⇒ Velas padronizáveis

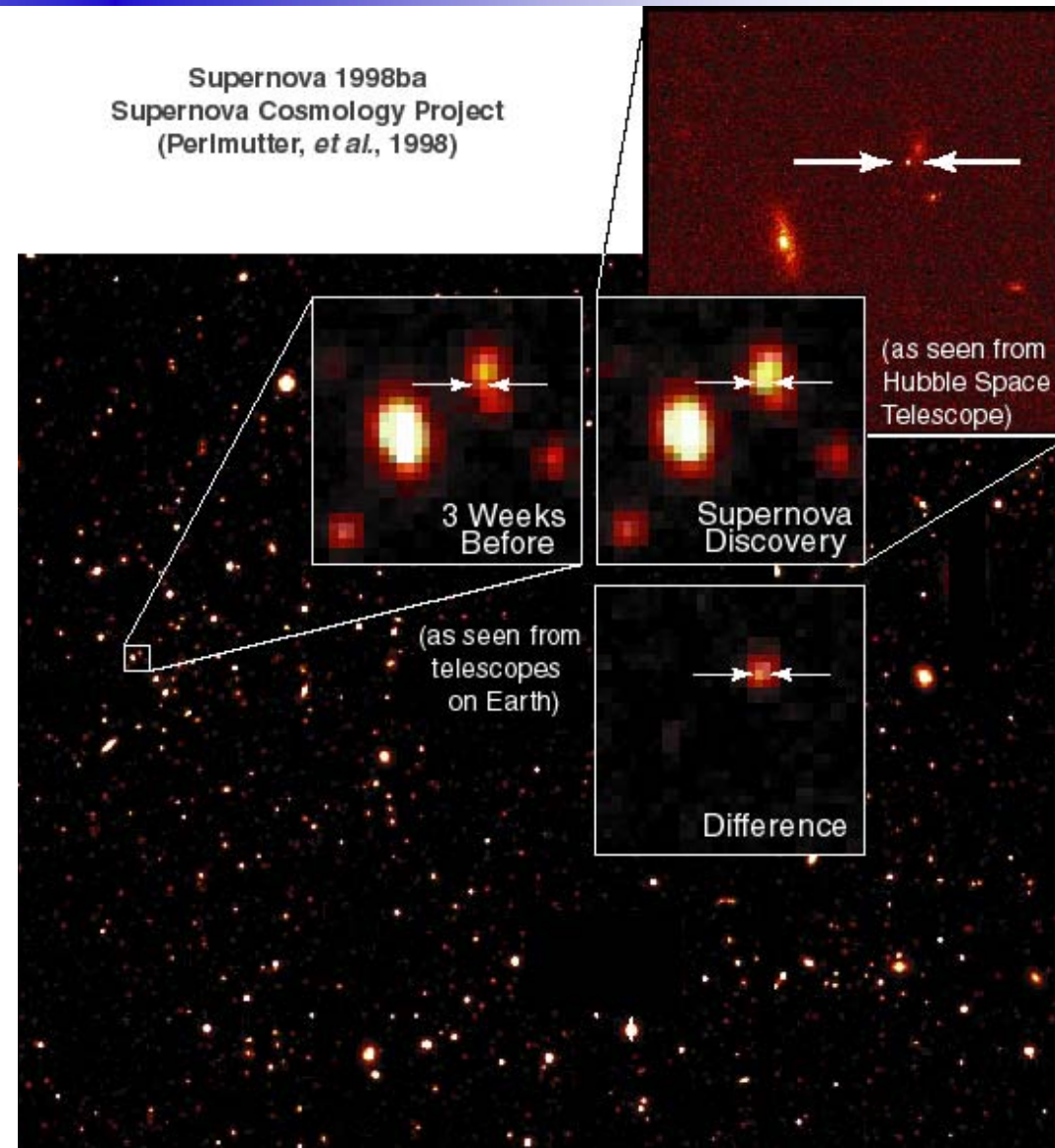
## Desvantagens:

- Eventos raros e aleatórios  
 $\approx 1/500$  ano/galáxia

- Duração curta

## Solução:

- Busca automatizada
- SCP, High-z team



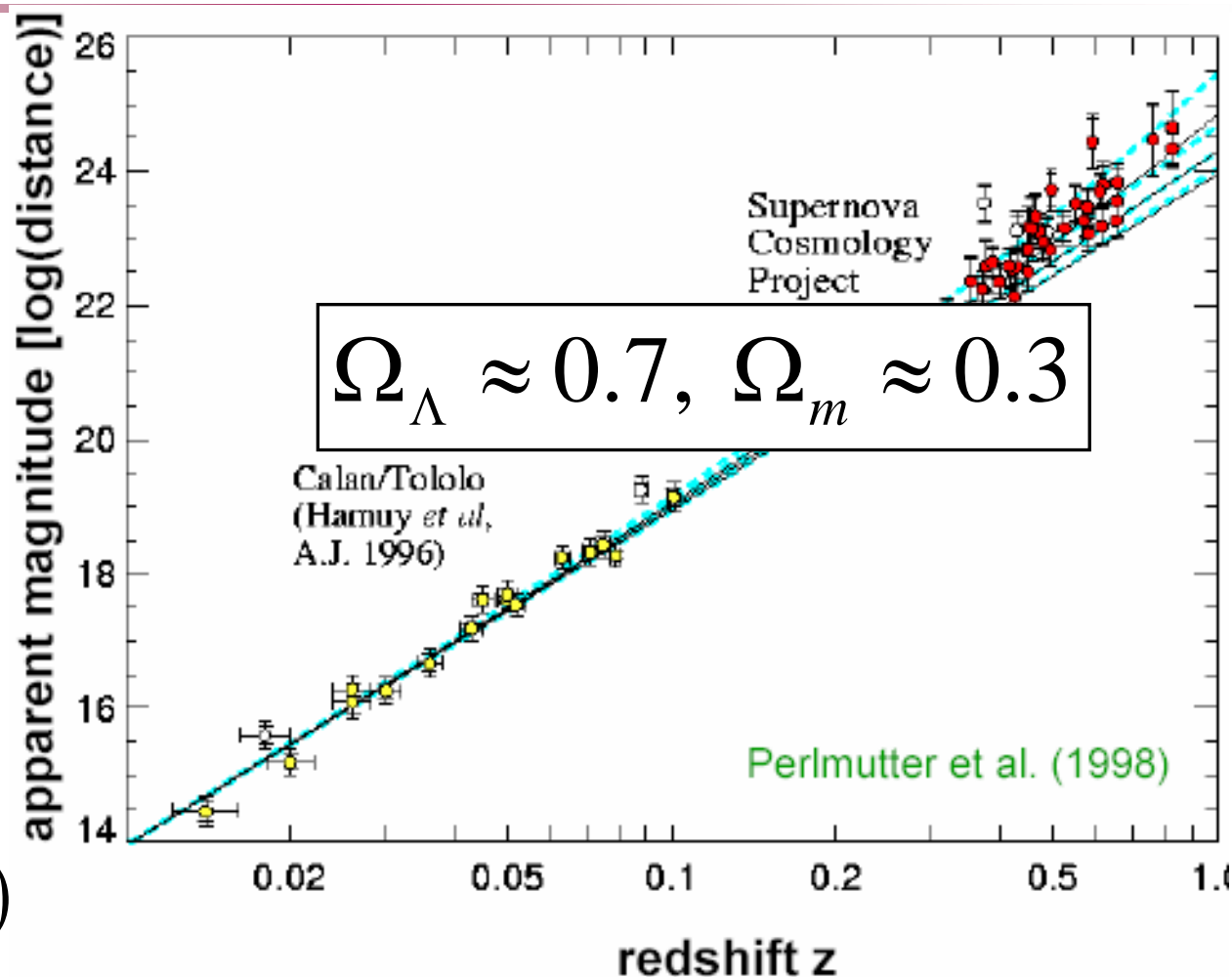
# O Universo Acelerado

⇒ Diagrama de Hubble para grandes  $z$ , com boa precisão

⇒ **O Universo está em expansão acelerada.**

⇒ **Mas**

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



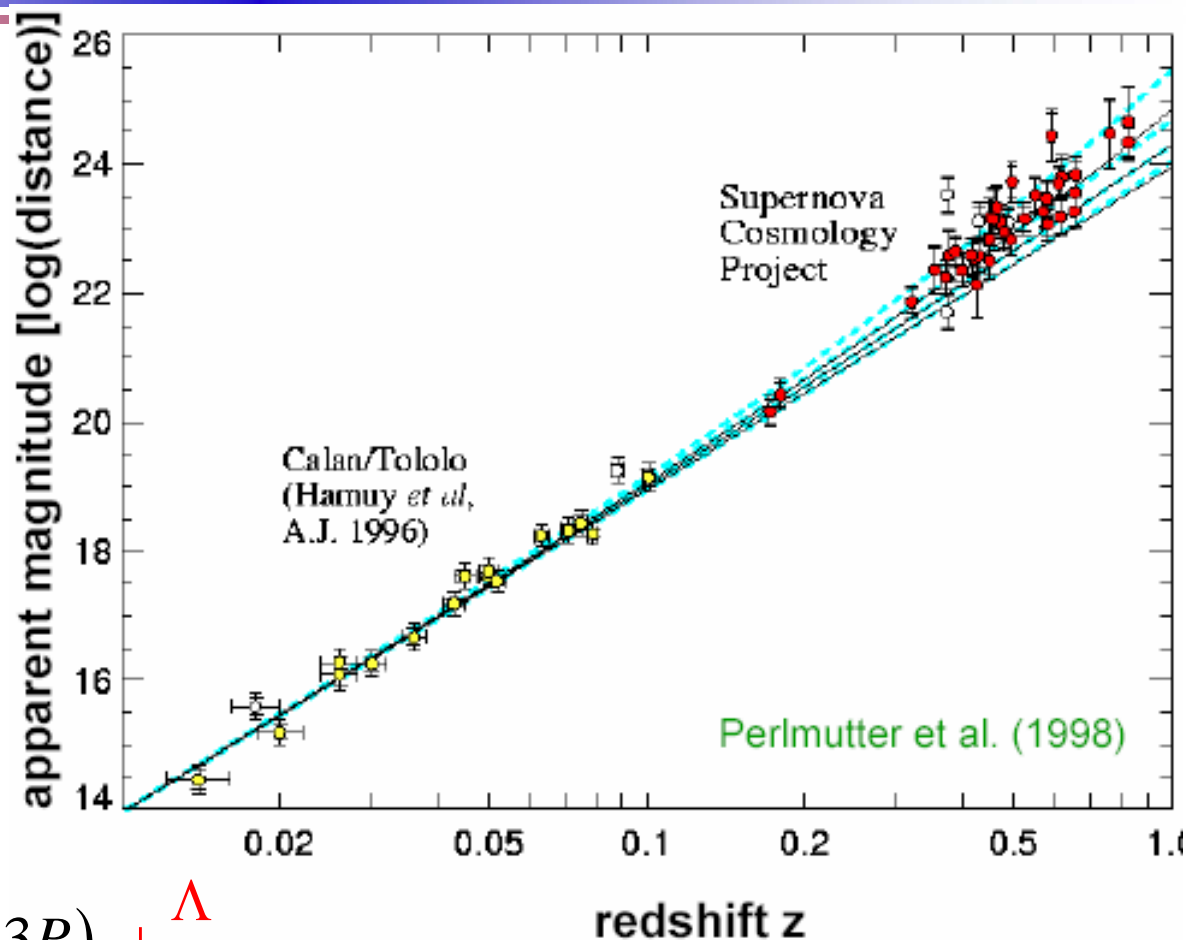
⇒ **Energia escura, ou constante cosmológica!**

# O Universo Acelerado

Diagrama de Hubble para grandes distâncias

⇒ O Universo está em expansão acelerada.

⇒ Mas



$$\text{aceleração} \propto -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P) + \frac{\Lambda}{3}$$

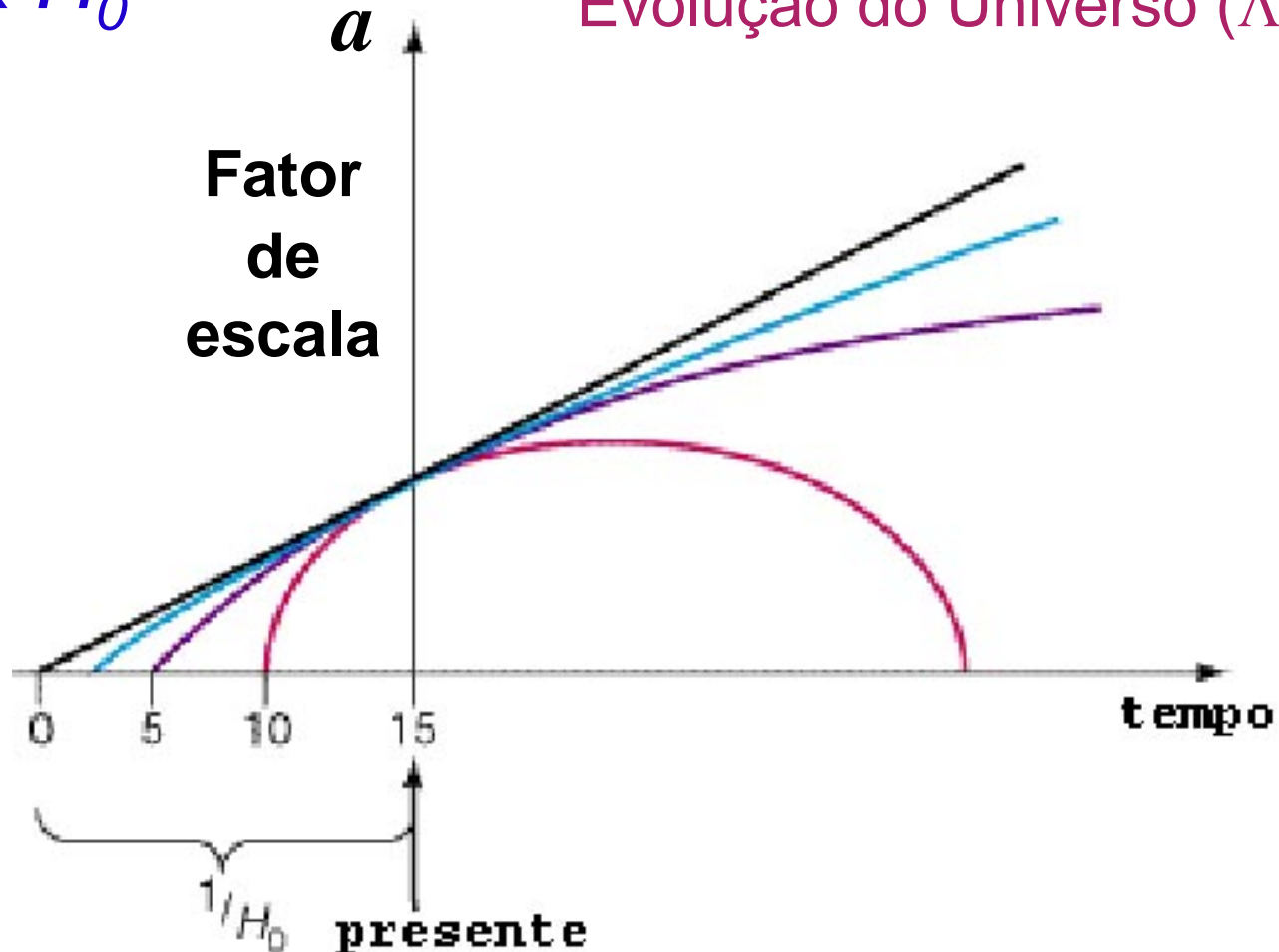
densidade      pressão

**Constante cosmológica!**

# A Idade do Universo

Idade  $\times H_0^{-1}$

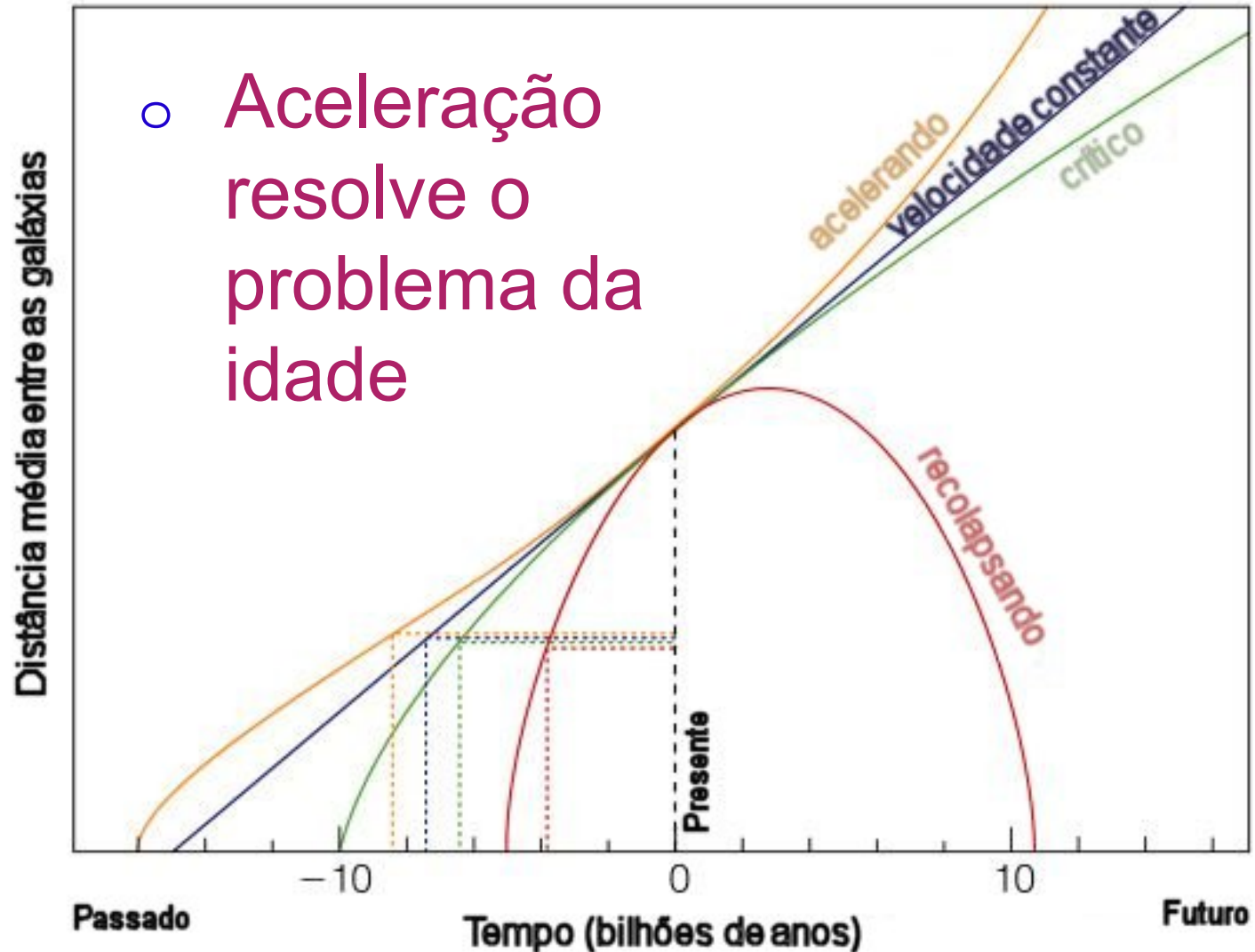
Evolução do Universo ( $\Lambda = 0$ )





# A Idade do Universo

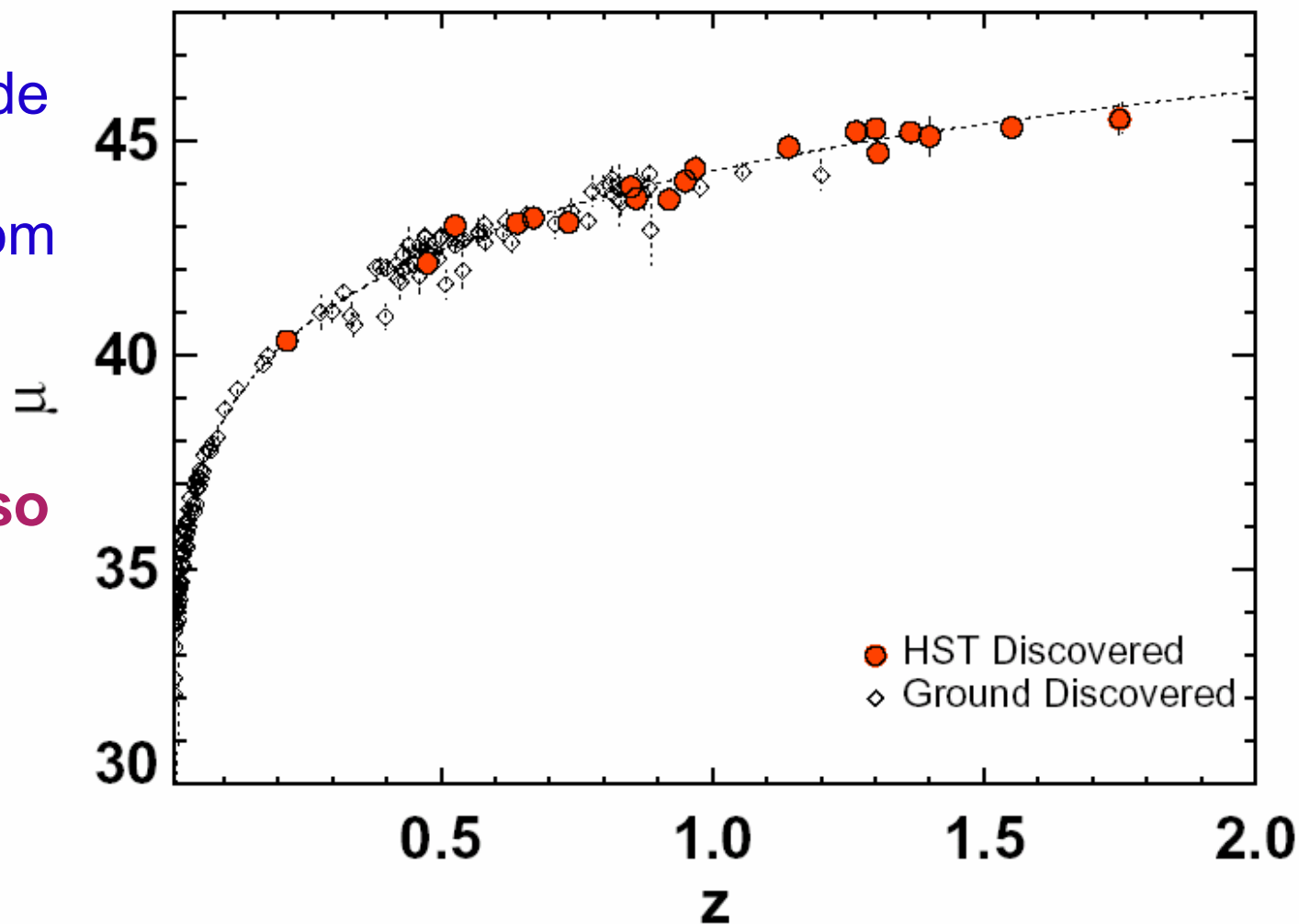
- Aceleração resolve o problema da idade



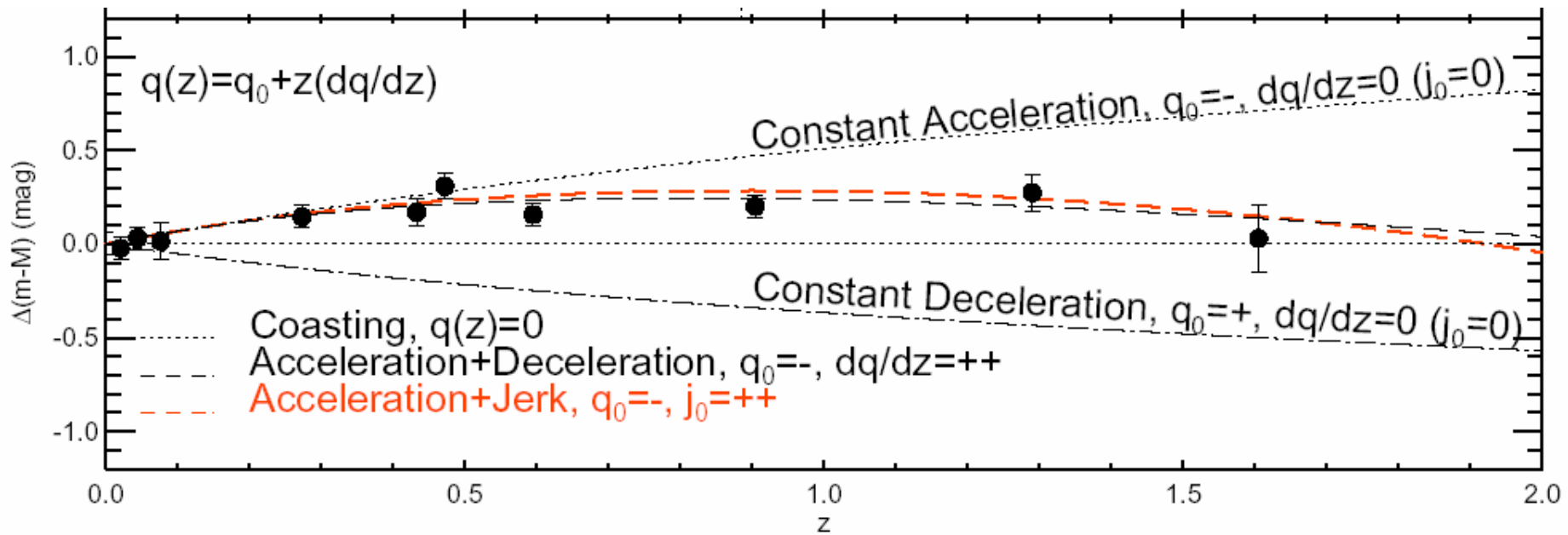
# O Universo Acelerado

⇒ Diagrama de Hubble para grandes  $z$ , com boa precisão

⇒ O Universo está em expansão acelerada



# O Universo Desacelerando!



# Energia Escura

2/3 da densidade do universo estão sob a forma de Energia Escura!

## Evidências:

- Expansão acelerada de galáxias distantes
- Idade do Universo
- Curvatura pequena
- Análise combinada de diversos observáveis cosmológicos

## Candidatos (Taxonomia da Energia Escura):

- q Constante cosmológica
- q Campo escalar:
  - Quintessência
  - k-essência, spintessência, meleca...

## Nova teoria da gravitação

## Parte III

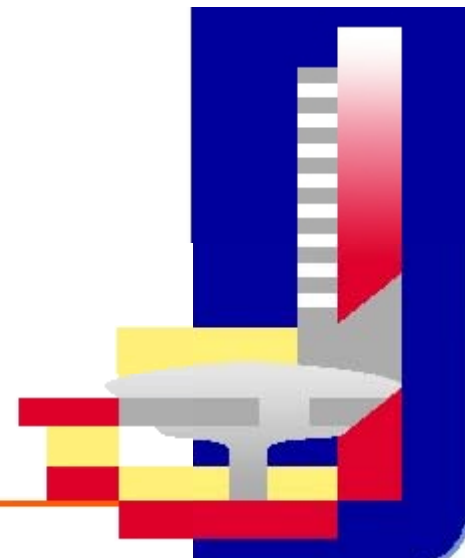
# O Universo Homogêneo II:

## Breve História Térmica do Universo

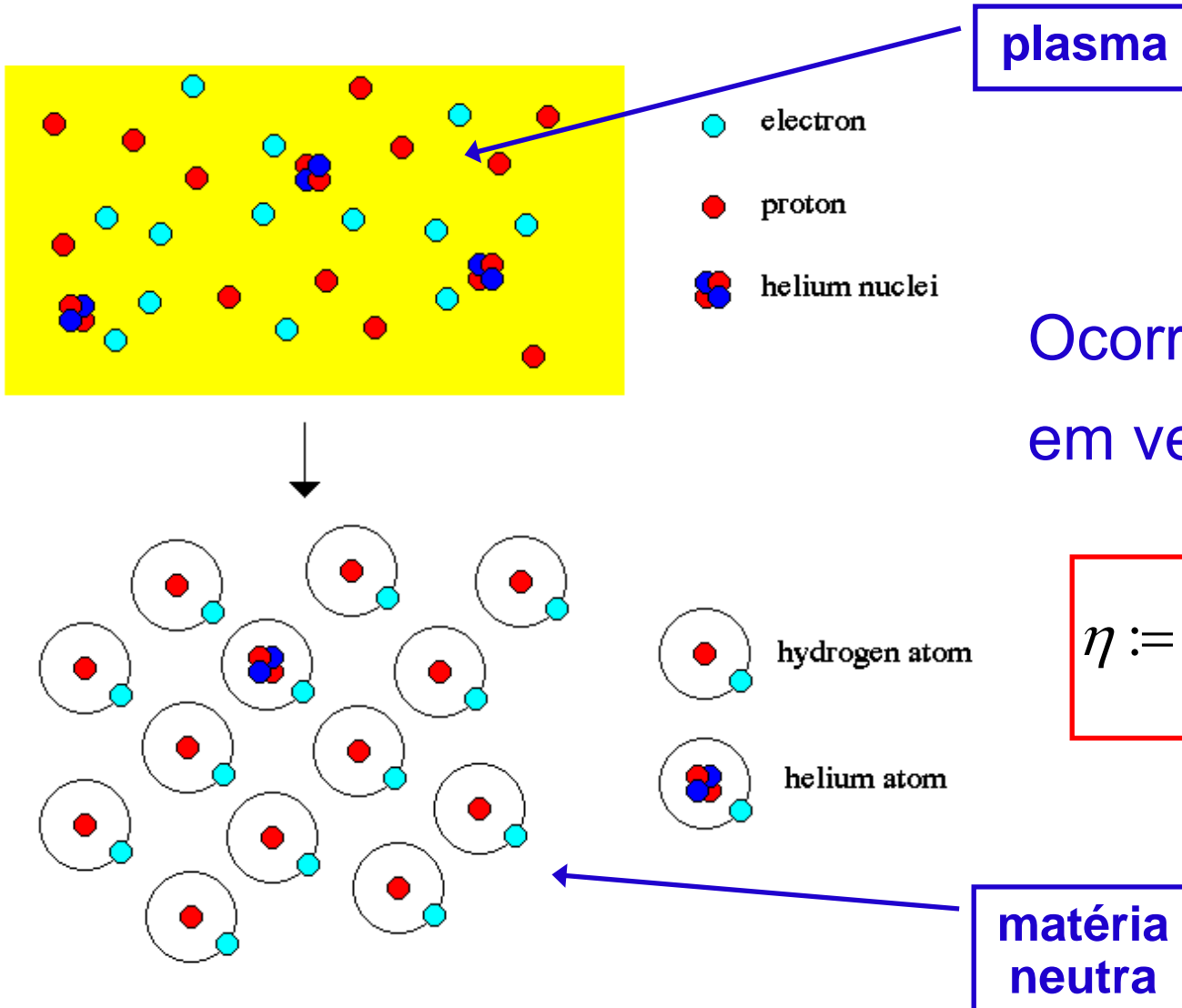


# Uma História do Universo

Cabum!!



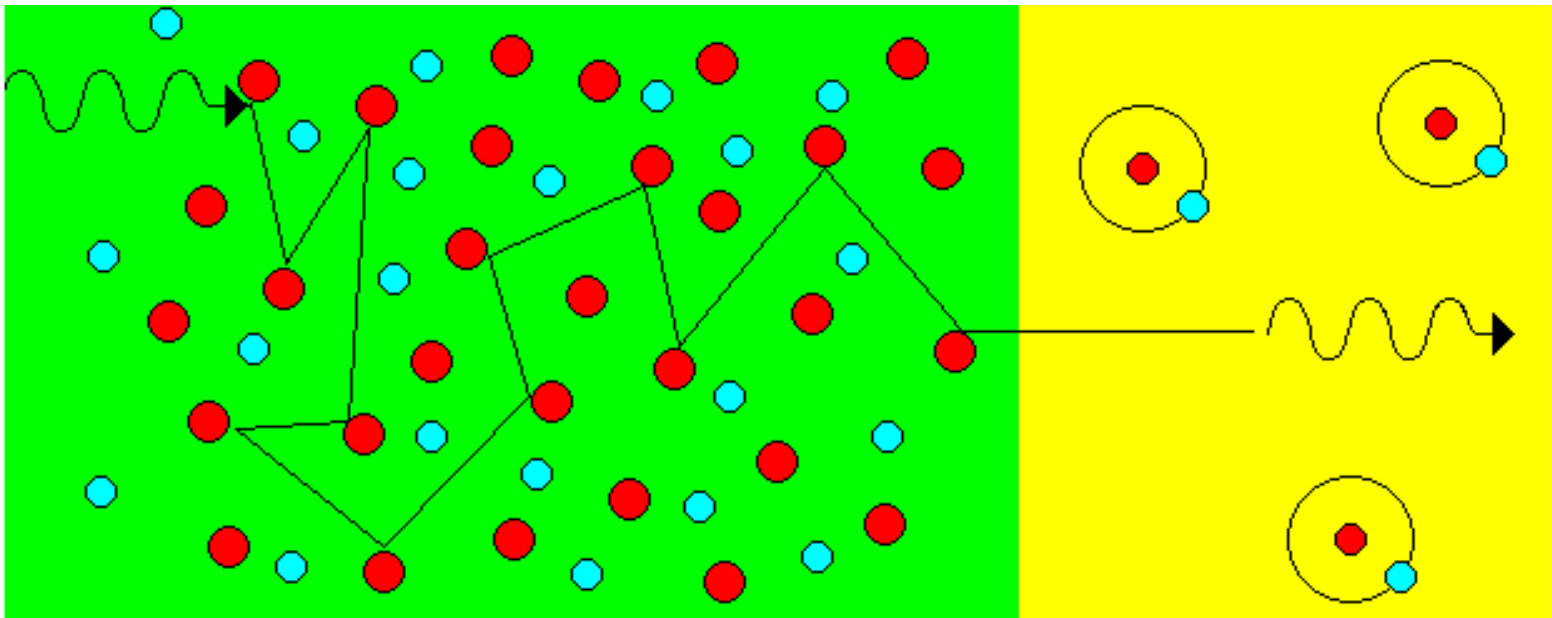
# Recombinação



Ocorre a 0.26eV  
em vez de 13.6eV!

# Recombinação

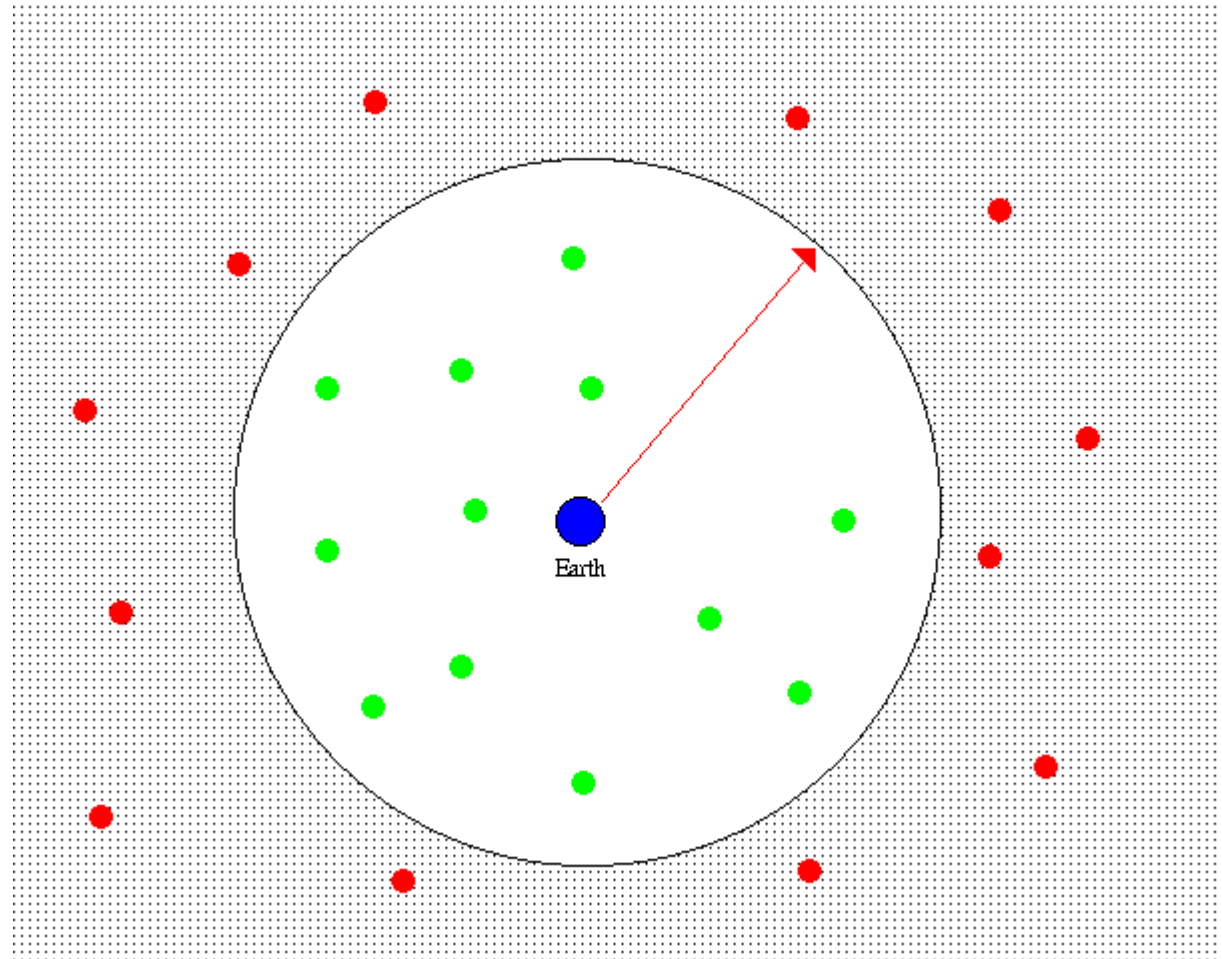
- Quando a temperatura cai abaixo dos 3.000K os elétrons ficam presos aos núcleos
  - O Universo passa a ser transparente
  - A luz se propaga livremente



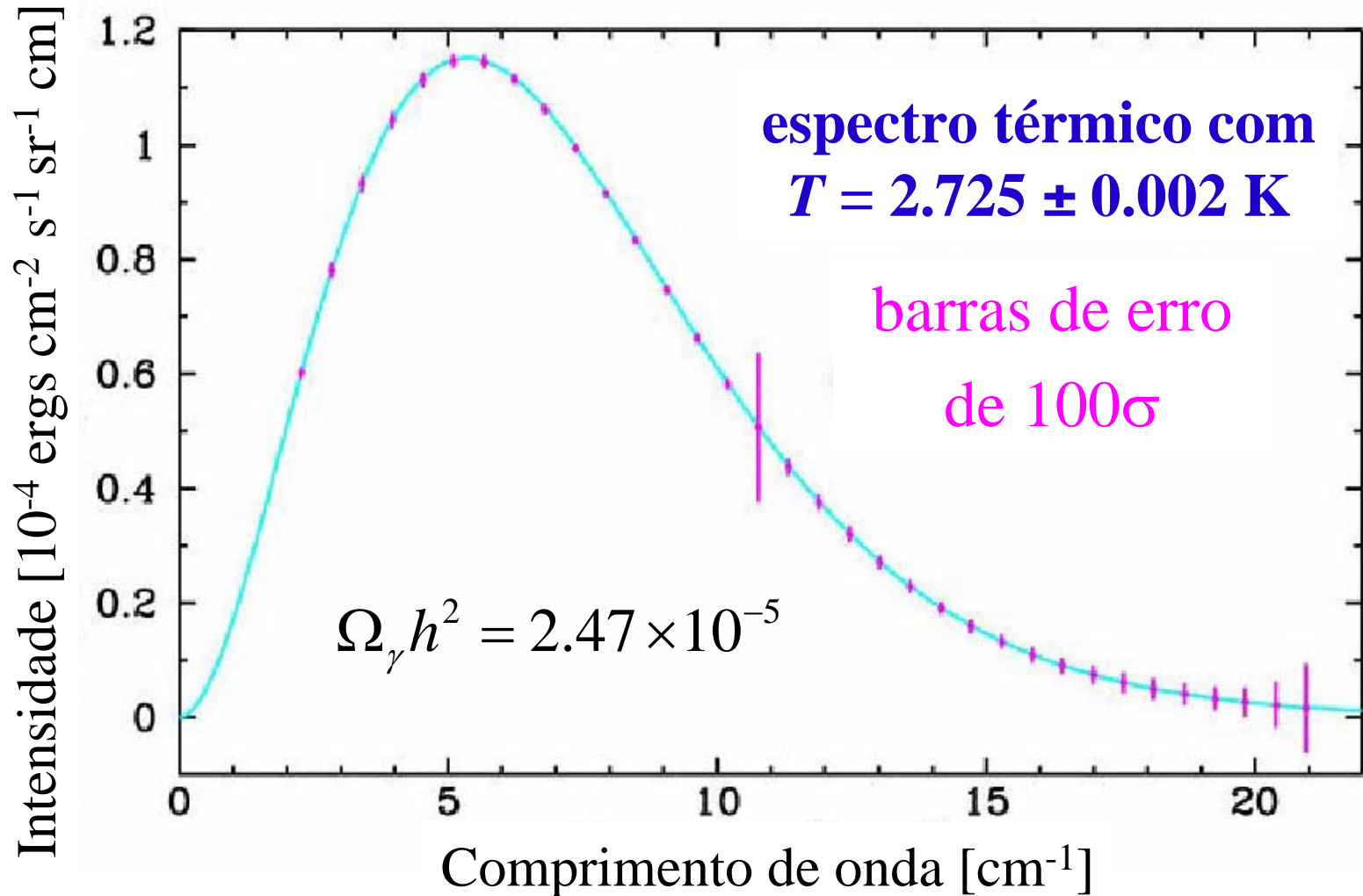
# A Radiação C3smica de Fundo

“Fotosfera”  
vista da nossa  
gal3xia

Esperamos ver:  
Corpo negro,  
com desvio para  
o vermelho  
 $z \sim 1000$



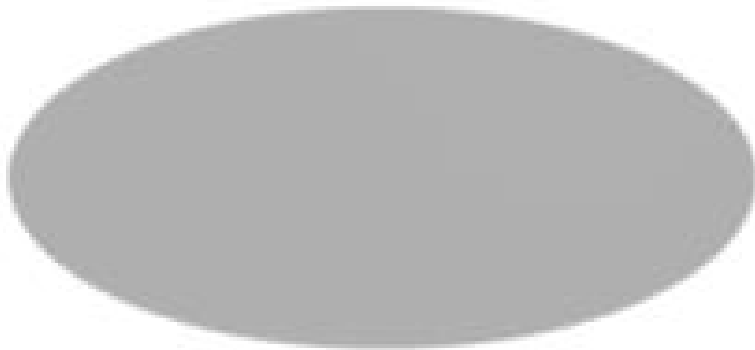
# O Espectro da Radiação C3smica de Fundo





# Radiação Cós mica de Fundo I

## Mapa da Radiação Cós mica:



Contraste: 1×

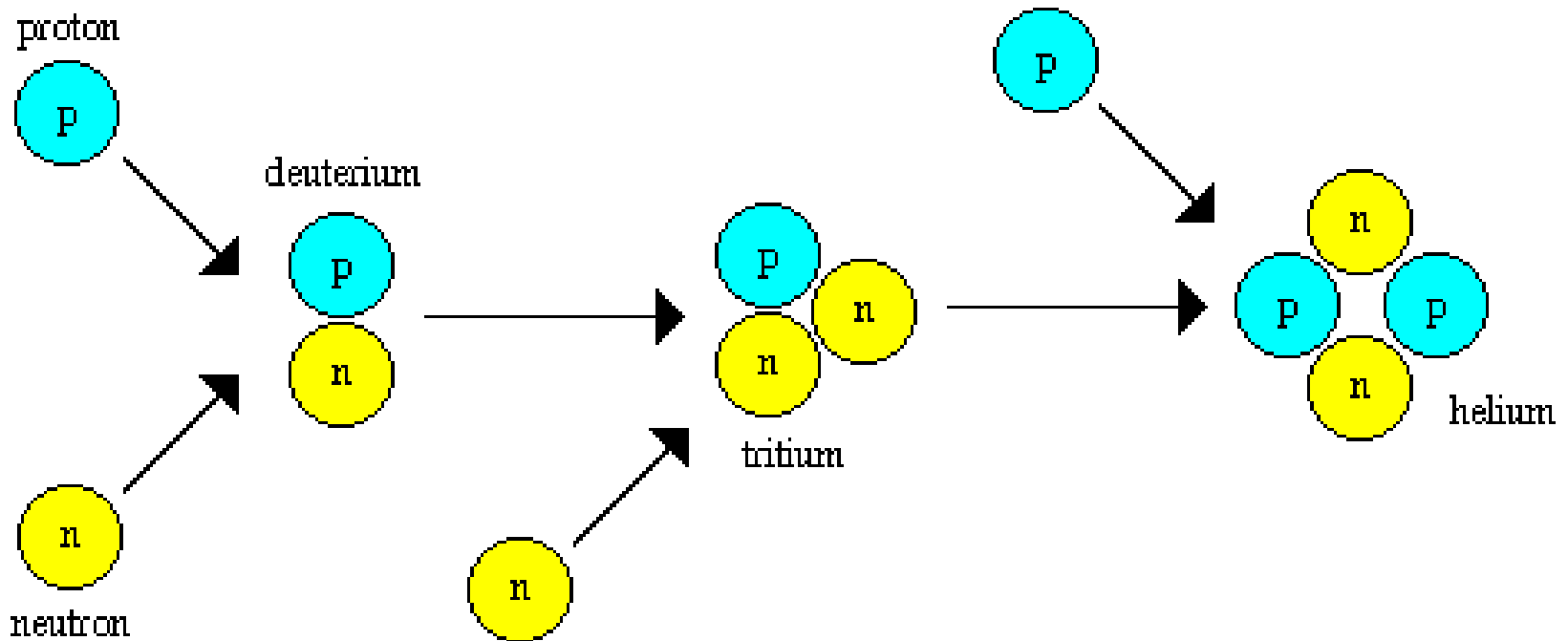


400×

- Época do desacoplamento entre matéria e radiação (em torno de 380.000 anos após o “*Big-Bang*”).
- $T_0 = 2.725 \pm 0.002$ . Desvio para o vermelho,  $z = 1089$ .
- Universo primordial altamente homogêneo.
- Dipolo:  $\Delta T = 3.346 \pm 0.017$  mK  $\Rightarrow v_{\text{gal}} = 360$  Km/s

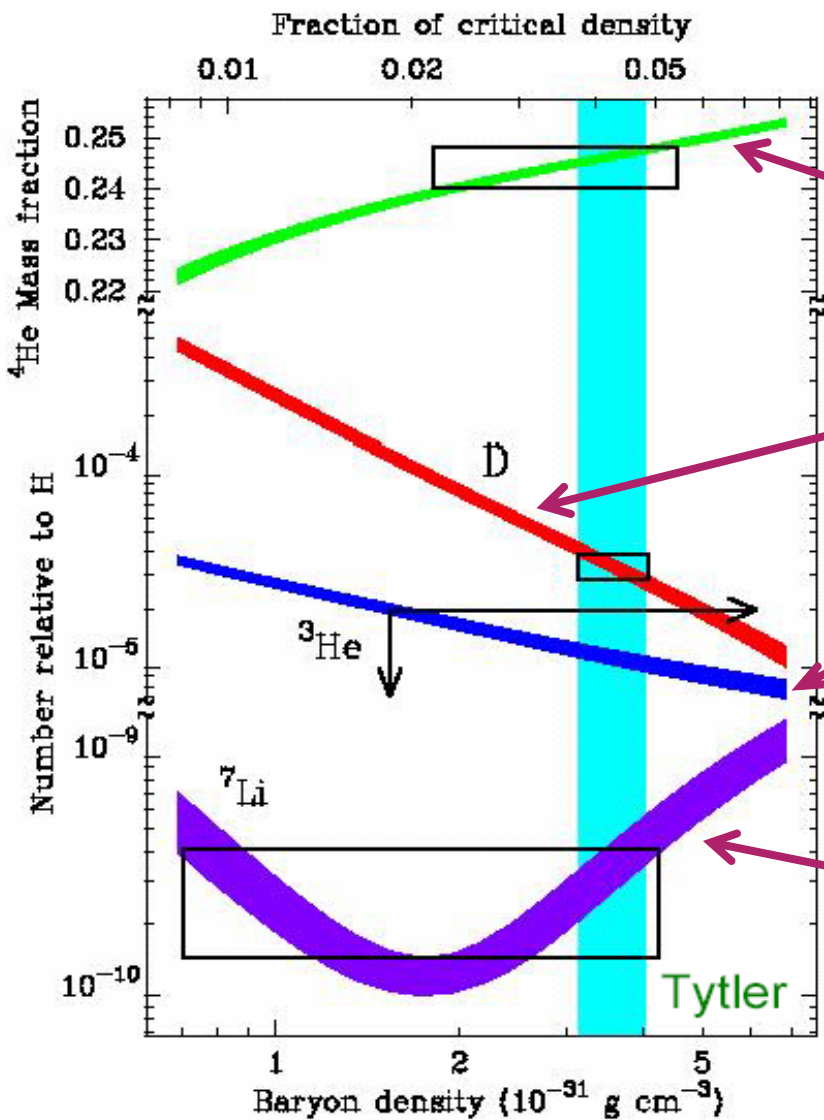
# Nucleossíntese: Alquimia no Universo Primordial

## Produção de ${}^7\text{Li}$ , ${}^3\text{He}$ , D, ${}^4\text{He}$



$z \sim 10^4$ ,  $3\text{MeV}$ ,  $T \sim 10^{10} \text{ K} - 10^9 \text{ K}$ ,  $1\text{s}$  a  $3\text{min}$  “DBB”

# Abundância de Elementos Leves



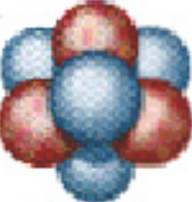
Helio 4



Deutério



Helio 3



Litio

Produção de <sup>7</sup>Li, <sup>3</sup>He, D, <sup>4</sup>He  
 Todos com o mesmo  $\eta$ !

D é o melhor “bariômetro”

➔  $\Omega_b \approx 0,04$

Independente da  
 matéria escura

# Assimetria Matéria/Anti-Matéria

- No universo primordial: equilíbrio entre partículas e anti-partículas (equipartição)
- $T \sim 175 \text{ MeV}$  ( $t \sim 10^{-5} \text{ s}$  “DBB”):  
Plasma de Quarks e Glúons  $\Rightarrow$  Hadronização
- Aniquilação  $\Rightarrow$  Universo dominado por píons
- Aniquilação produz fótons:

$$\eta = \frac{n - \bar{n}}{n} = 6 \times 10^{-10}$$

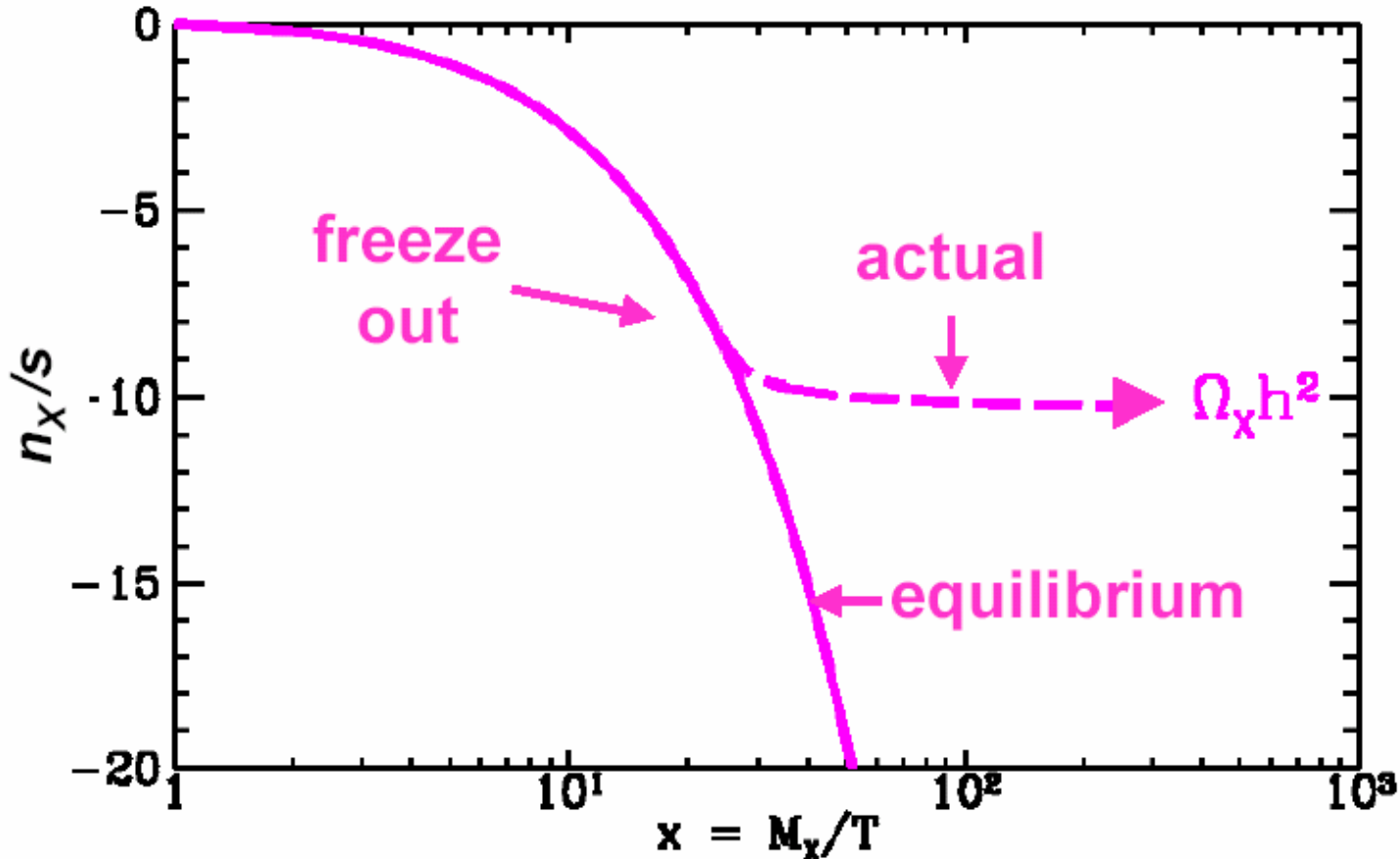
- Assimetria de 1 parte em  $10^9$ !

# Alguns Marcos da História do Universo

$kT$ (radiação)	Evento
$2 \times 10^{-4}$ eV	Hoje
$10^{-3}$ eV	Formação das Galáxias
1 eV	Recombinação do H
10 eV	Dominação pela matéria
300 keV	Formação dos elementos leves ( $\text{He}^4$ , $\text{He}^3$ , D e Li)
0.5 MeV	Fim da era leptônica
100 MeV	Fim da era hadrônica e início da era leptônica
1000 GeV	Transição de fase eletrofraca
$10^{15}$ GeV	Bariossíntese? Grande Unificação?
$10^{19}$ GeV	Fim da era quântica? Inflação?

# Relíquias Térmicas Frias e Matéria Escura

$\Gamma \ll H^{-1} \rightarrow$  desacoplamento



$$\Omega_X \propto \sigma_A^{-1} \text{ (independente da massa)}$$

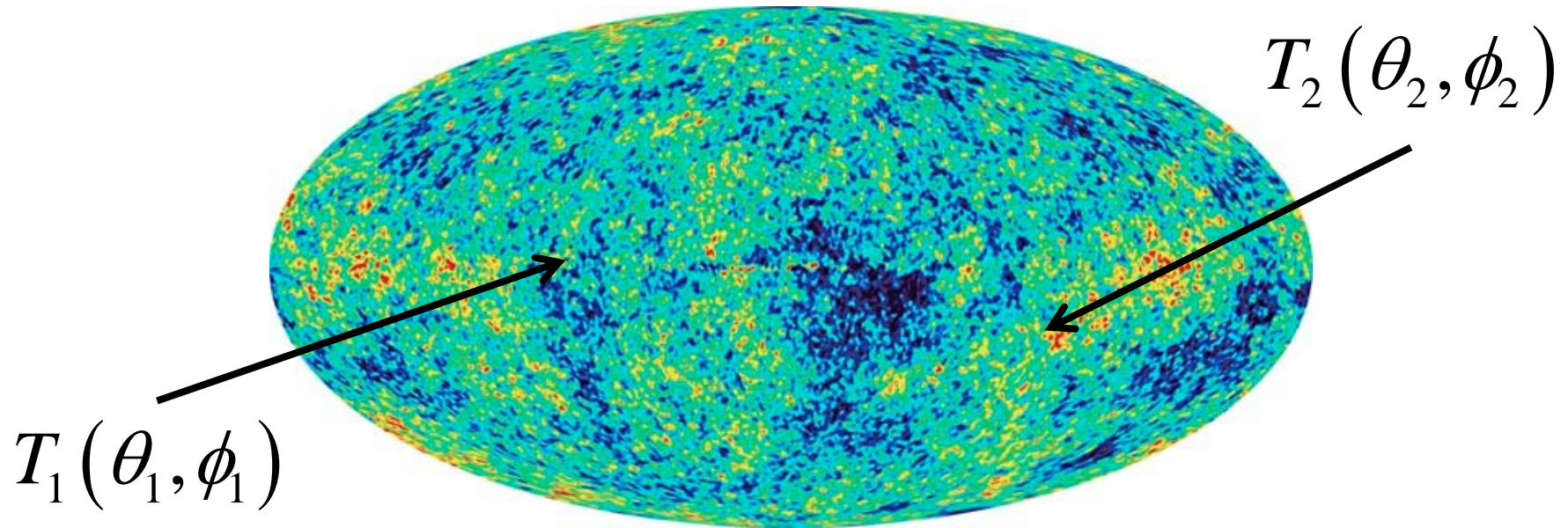


## Parte IV

---

# Sabores do Universo Heterogêneo

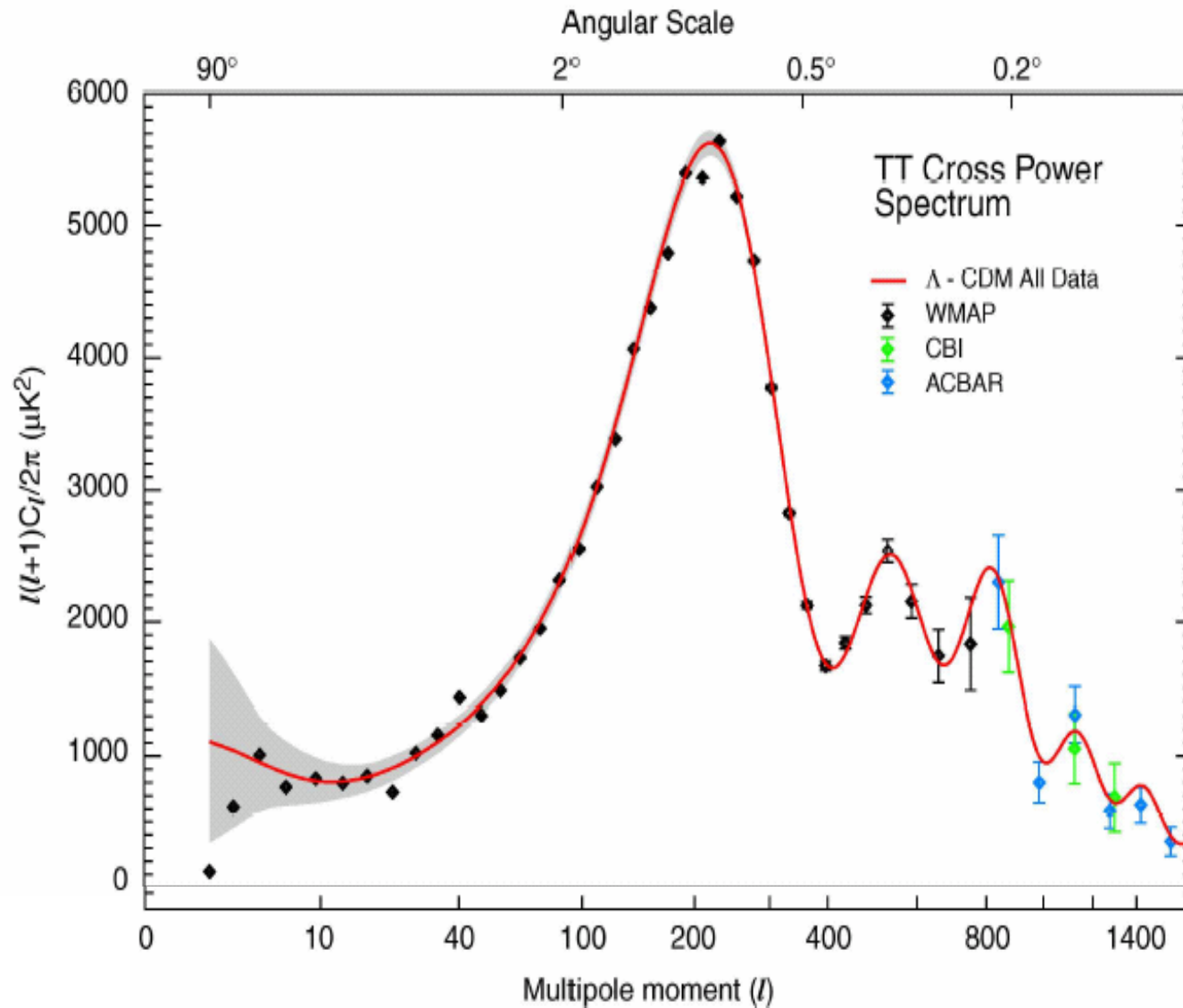
# Espectro de Potência da Radiação Cósmica de Fundo



$$\langle T_1 T_2 \rangle = \sum a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

$$\left\langle |a_{lm}|^2 \right\rangle^{1/2} \equiv C_l$$

# Espectro de Potência Segundo WMAP



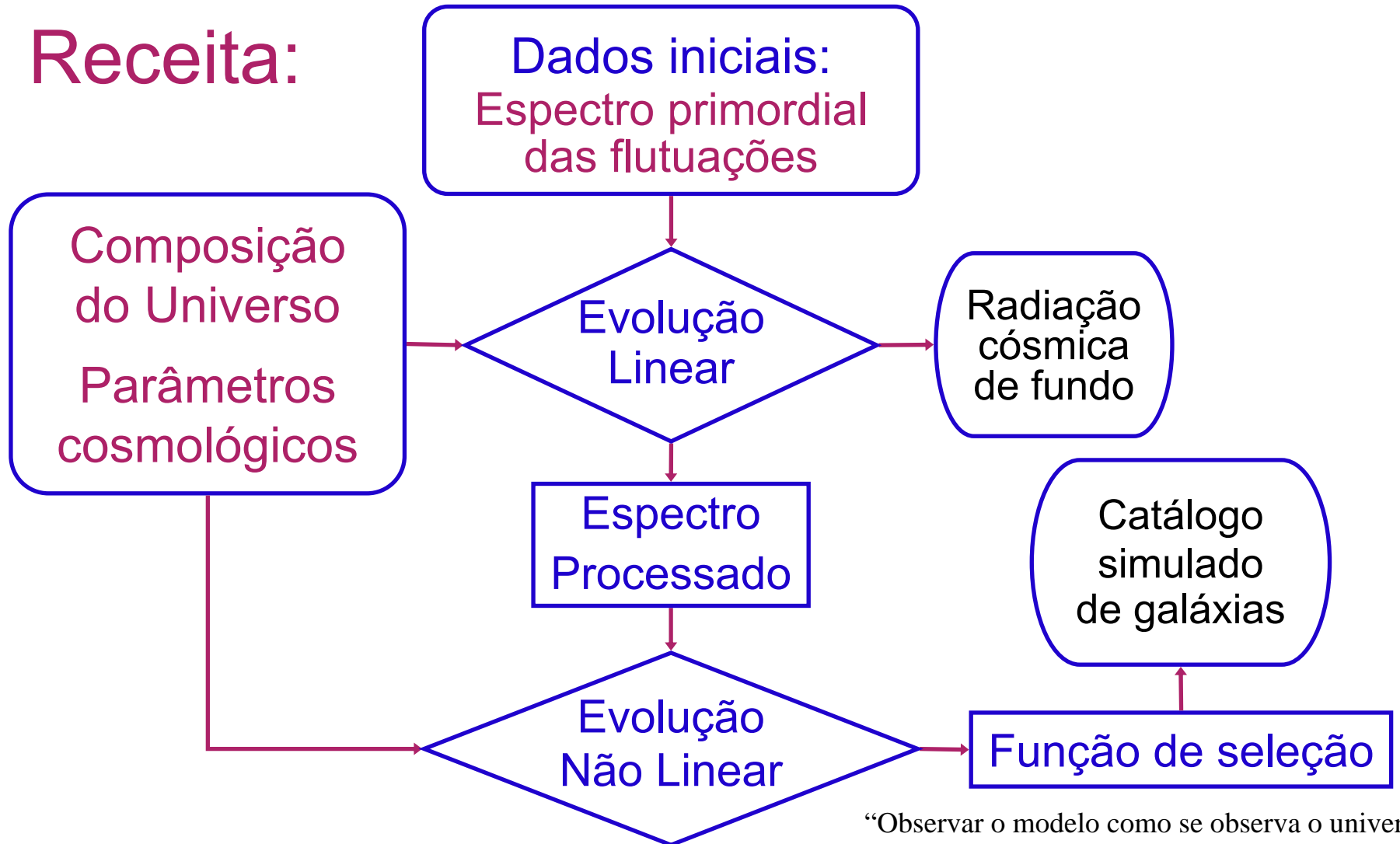
# Resultados da análise linear

## Necessidade de Matéria Escura

- q Matéria bariônica: só pode se aglomerar depois de  $t_{\text{dec}}$  ( $\sim 380.000$  anos) e para  $r > \lambda_J$
- q CDM se aglomera a partir de  $t_{\text{eq}}$  ( $\sim 56.000$  anos)
- q Bárions seguem os poços de potencial da matéria escura
- q Amortecimento de Silk diminui amplitude de perturbações nos bárions

# Como Gerar um Catálogo de Galáxias?

## Receita:



“Observar o modelo como se observa o universo”

# Simulações Computacionais

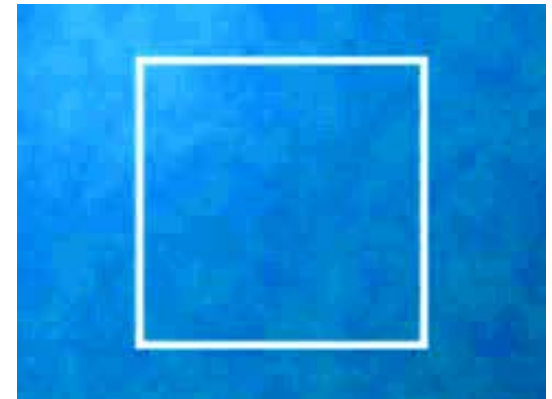
- Cosmologia newtoniana:

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \phi &= 4\pi G \bar{\rho} \delta \\ \frac{d^2 \vec{x}}{d\tau^2} &= -a^2 \left( \vec{\nabla} \phi + \cancel{\frac{\vec{\nabla} \rho}{\rho}} \right) \end{aligned} \right\} \rightarrow N\text{-corpos}$$

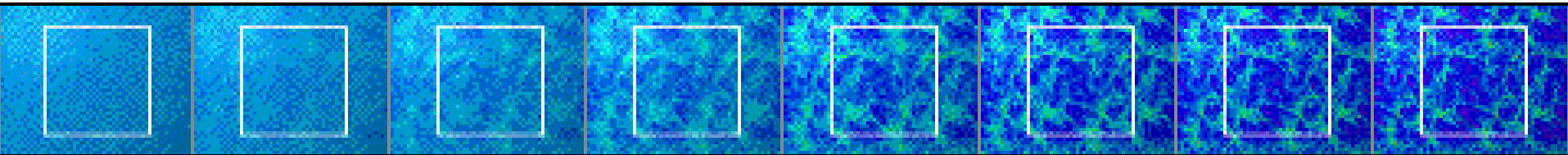
- Coordenadas comóveis (acompanham a expansão média):

$$\vec{x} = \vec{r} / a(t)$$

As pequenas flutuações iniciais crescem e se agrupam em grandes estruturas.



Grand Challenge Cosmology Consortium



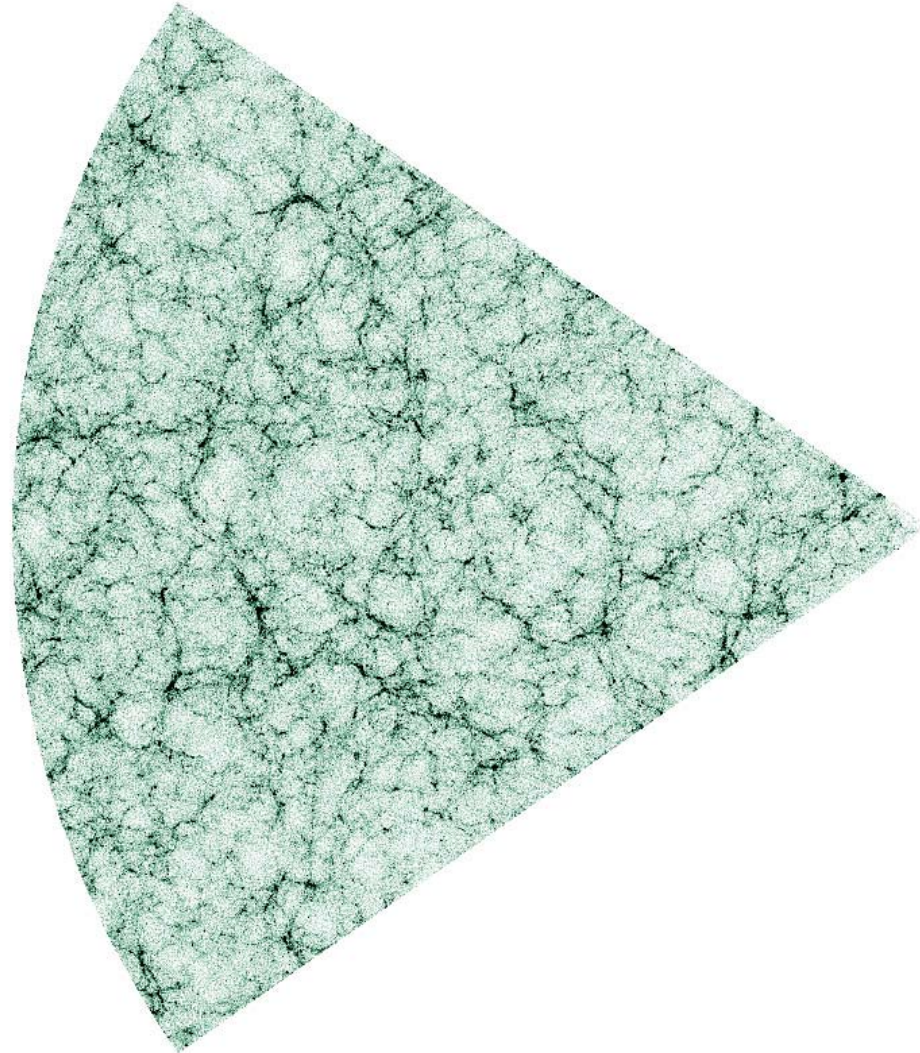


# A Simulação do Milênio

---

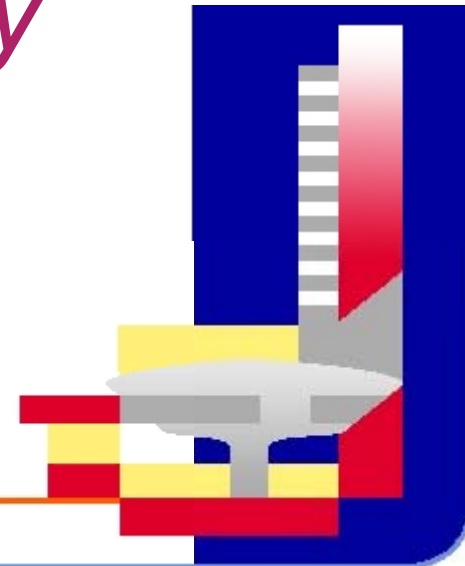
# Resultados de Simulações

- Simulações do *Hubble Volume*. Área similar à do SDSS  $10^6$  “partículas”
- 500 Gb de dados
- O modelo de matéria escura fria e energia escura reproduz satisfatoriamente a maioria das propriedades do nosso universo

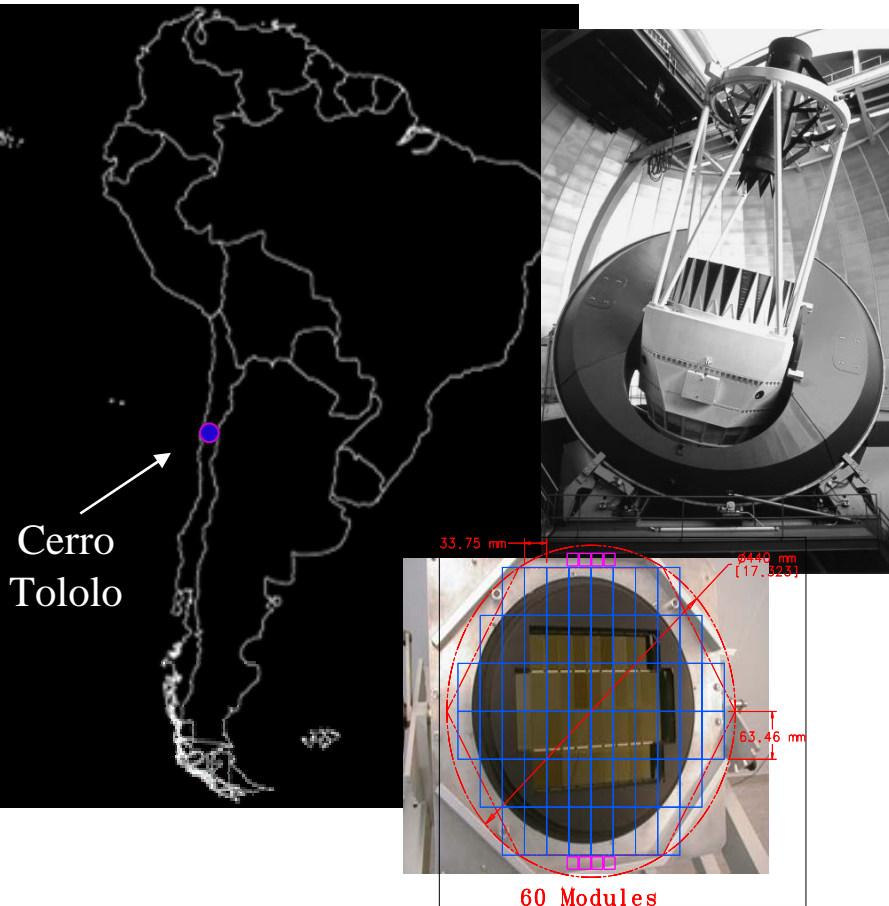


# Um Pedacoço do Futuro no Brasil

## *Dark Energy Survey*



# Dark Energy Survey (DES)



- q Câmera de 500 Megapíxels
- q Telescópio de 4m do CTIO

Mapear 5000 graus<sup>2</sup> do céu  
Cosmologia

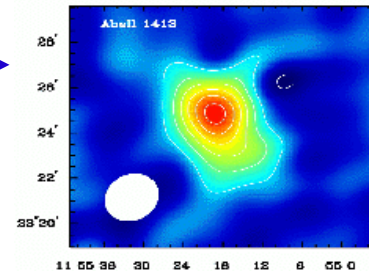
- q Aglomerados de galáxias
- q Distribuição espacial de galáxias
- q Supernovas do tipo Ia

Melhor instrumento óptico para a cosmologia de sua época

# O Futuro do Universo e o DES

- Realizar medidas de precisão dos efeitos da energia escura
- Novos métodos
  - q Contagem de aglomerados de galáxias
  - q Efeito fraco de lentes gravitacionais
  - q Distribuição espacial de galáxias
  - q Distâncias de supernovas do tipo Ia

$$\sigma_{w,w} \frac{P_{0.05}}{\rho}$$



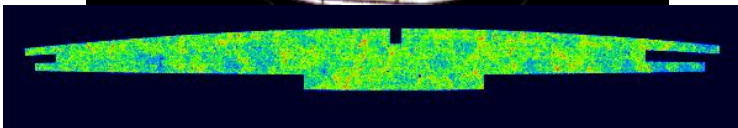
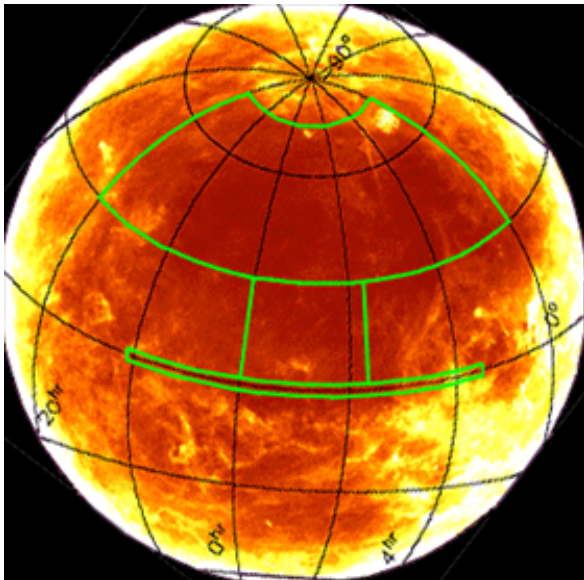
## DESafios Computacionais

- 100 Tb/ano
- Busca de supernovas em tempo real
- Simulações e análise de dados

⇒ Processamento compartilhado



# Participação Brasileira no DES



**Participantes: CBPF,  
ON, IF-UFRJ, INPE,  
IAG, IF-USP, UESC**

## *Por que o DES?*

- Escala de tempo ideal
- Histórico de colaboração com Fermilab
- Instrumento versátil:
  - Outros interesses astrofísica brasileira
- Projetos Brasileiros:
  - Montagem de um *cluster* no CBPF + ON (100 Tb/ano)

**Workshop 10 e 11  
de novembro!**



# Conclusões

---

- ⊙ **A Cosmologia é hoje parte de física e da astronomia**
  - ➔ Nova física a partir da cosmologia!
- ⊙ Nesta última década houve uma revolução na cosmologia com uma avalanche de dados observacionais de alta qualidade
- ⊙ Entendemos muita coisa sobre o Universo
- ⊙ Há questões fundamentais que não entendemos ainda
- ⊙ Muitas novidades no futuro próximo!
- ⊙ ***Dark Energy Survey:***
  - ➔ Possibilidade do Brasil estar na vanguarda da cosmologia

**Seja bem vindo a participar deste fascinante ramo da ciência!**

---

Obrigado!

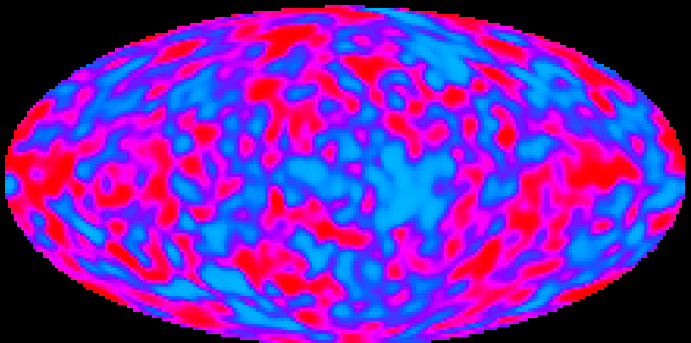
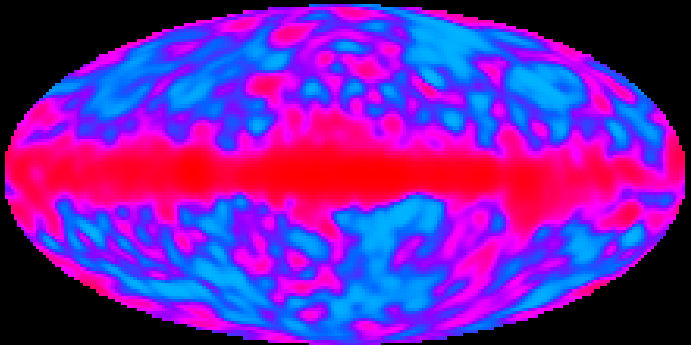
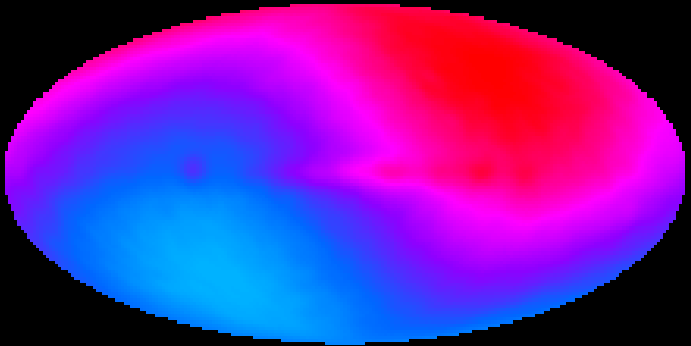


## Parte IV

---

# O Universo Perturbado

# A radiação cósmica de fundo



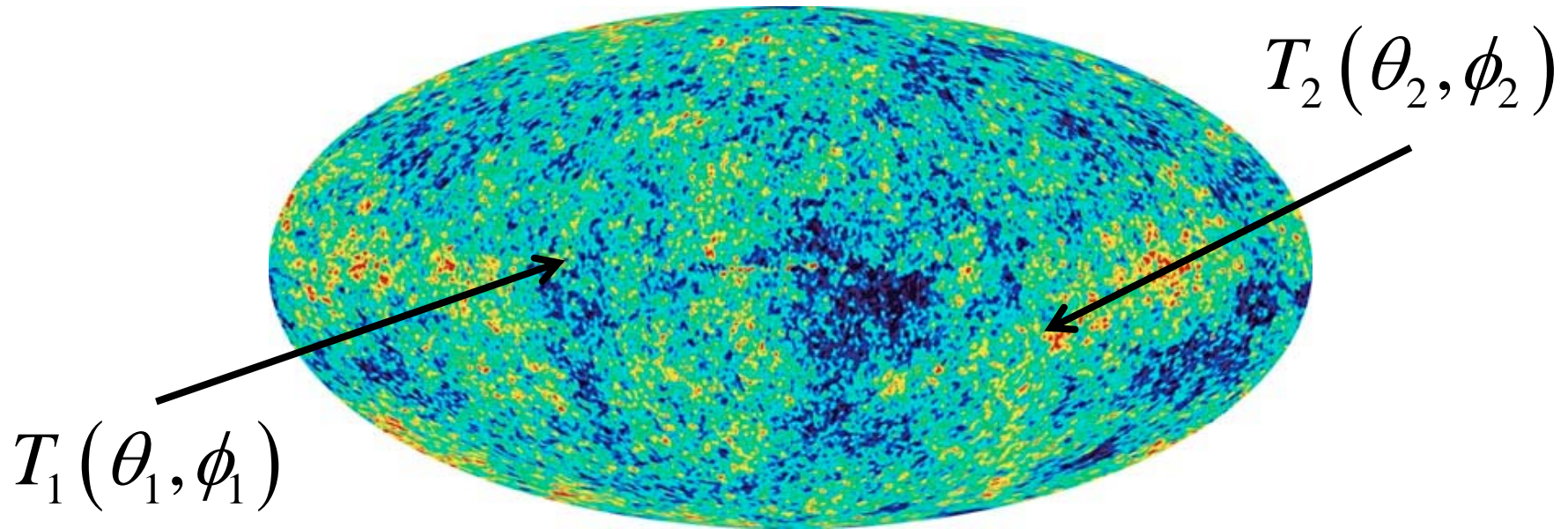
- Desacoplamento matéria-radiação,  $z = 1089$ .
- Universo primordial altamente homogêneo.
- Resultados obtidos pelo COBE:

$$\frac{\Delta T}{T} \approx 10^{-5} \rightarrow \frac{\Delta \rho}{\rho} \approx 10^{-2} - 10^{-3}$$

→ Flutuações lineares



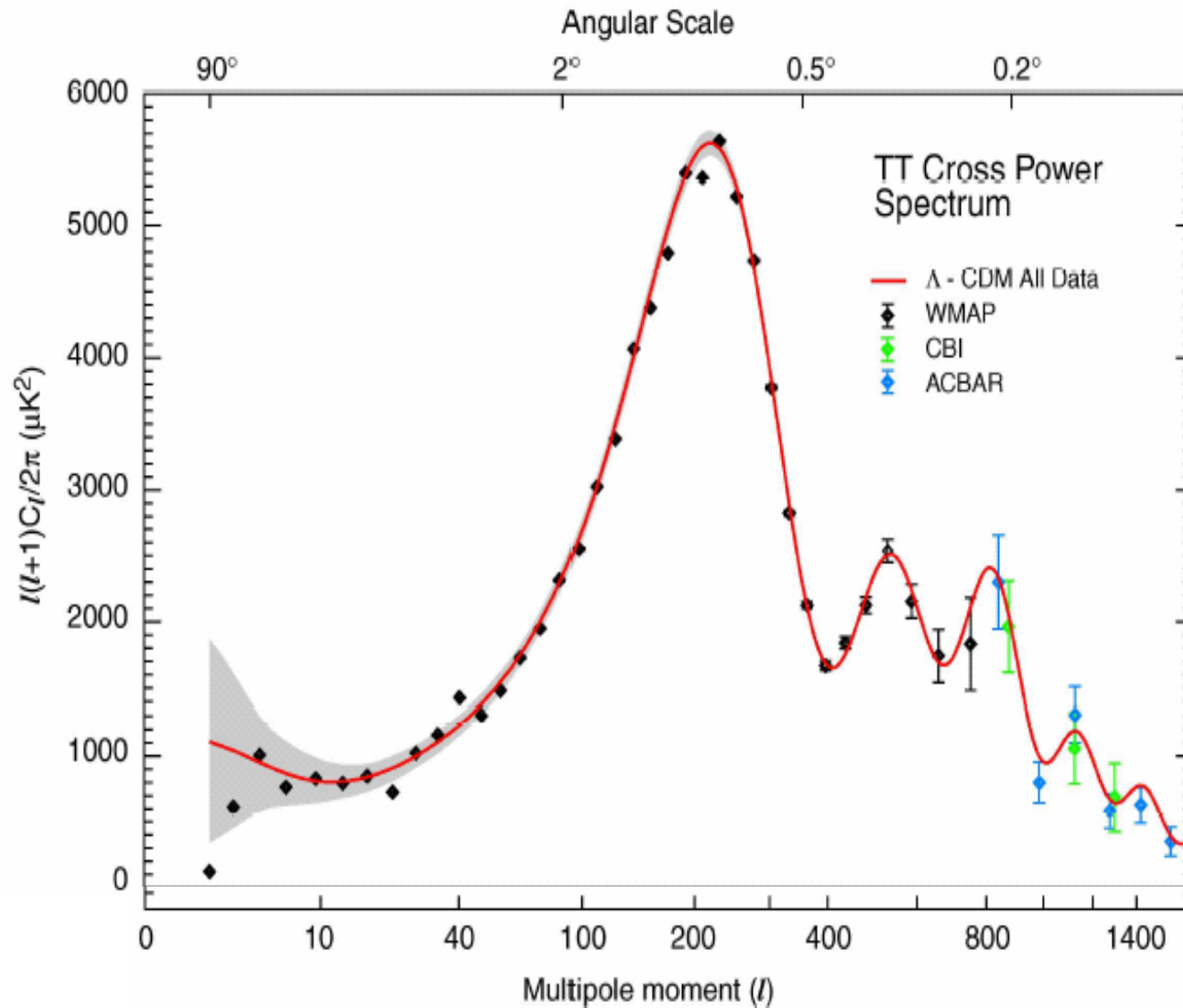
# Espectro de Potência da Radiação Cósmica de Fundo



$$\langle T_1 T_2 \rangle = \sum a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

$$\left\langle |a_{lm}|^2 \right\rangle^{1/2} \equiv C_l$$

# Espectro de Potência Segundo WMAP





# Resultados da análise linear

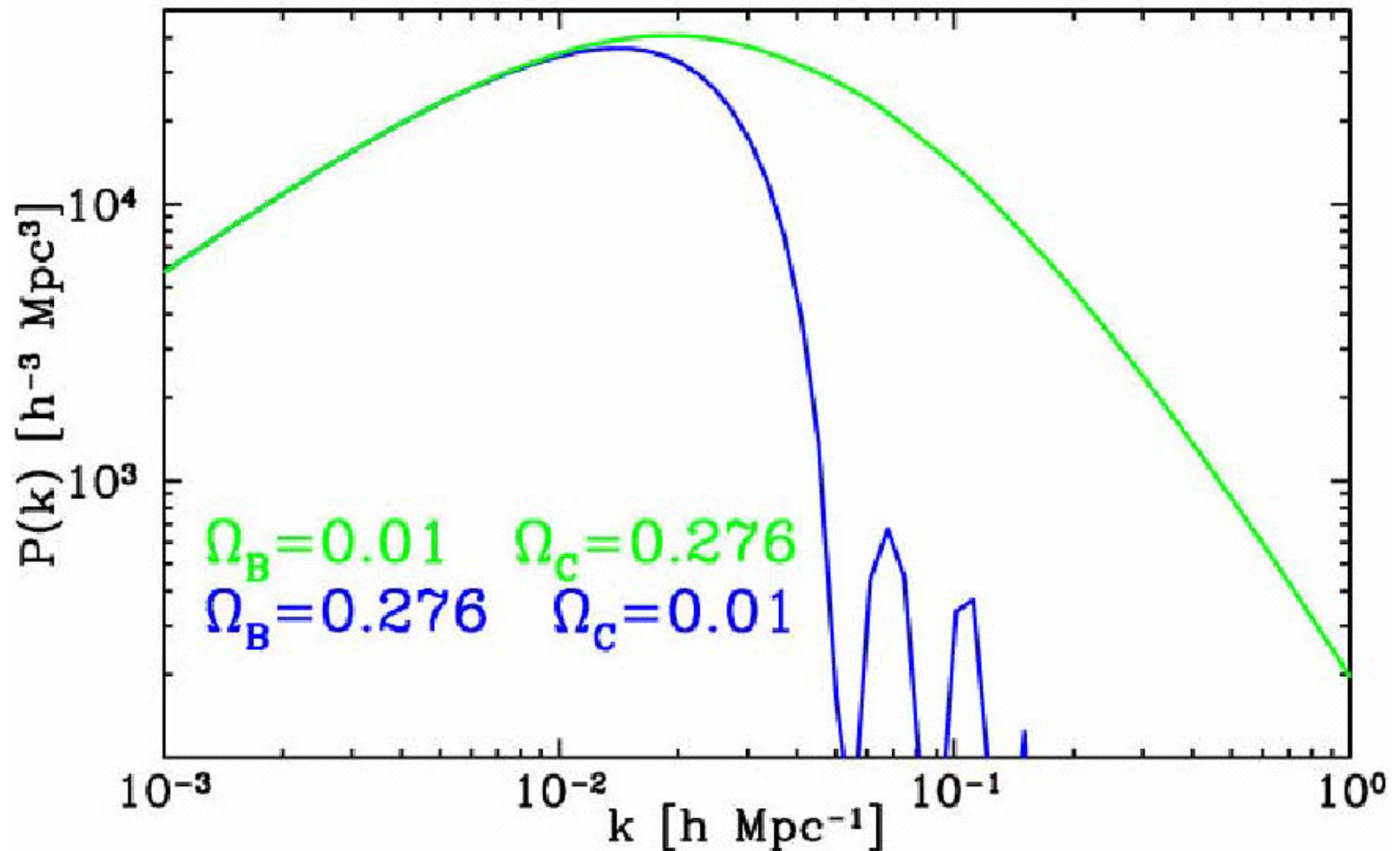
---

## Necessidade de Matéria Escura

- q Matéria bariônica: só pode se aglomerar depois de  $t_{\text{dec}}$  ( $\sim 380.000$  anos) e para  $r > \lambda_J$
- q CDM se aglomera a partir de  $t_{\text{eq}}$  ( $\sim 56.000$  anos)
- q Bárions seguem os poços de potencial da matéria escura
- q Amortecimento de Silk diminui amplitude de perturbações nos bárions

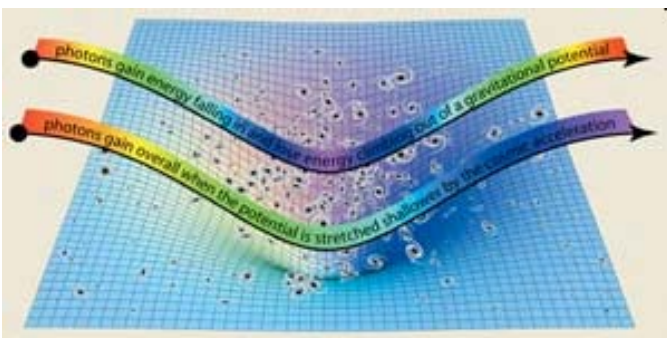
# Resultados da análise linear

## Necessidade de Matéria Escura



# Efeito Sachs-Wolfe Integrado

- Efeito acumulado dos desvios gravitacionais:



$$\frac{\delta T_{ISW}}{T} = 2 \int_{\tau_{dec}}^{\tau_0} \frac{\partial \phi}{\partial \tau} d\tau$$

- Evolução linear, EdS:  $\phi = const.$
- Efeito tardio:
  - Correlação entre radiação cósmica de fundo e estrutura em grande escala!



**Energia escura**

# Estatística: Função de Correlação

- Contraste de densidade:

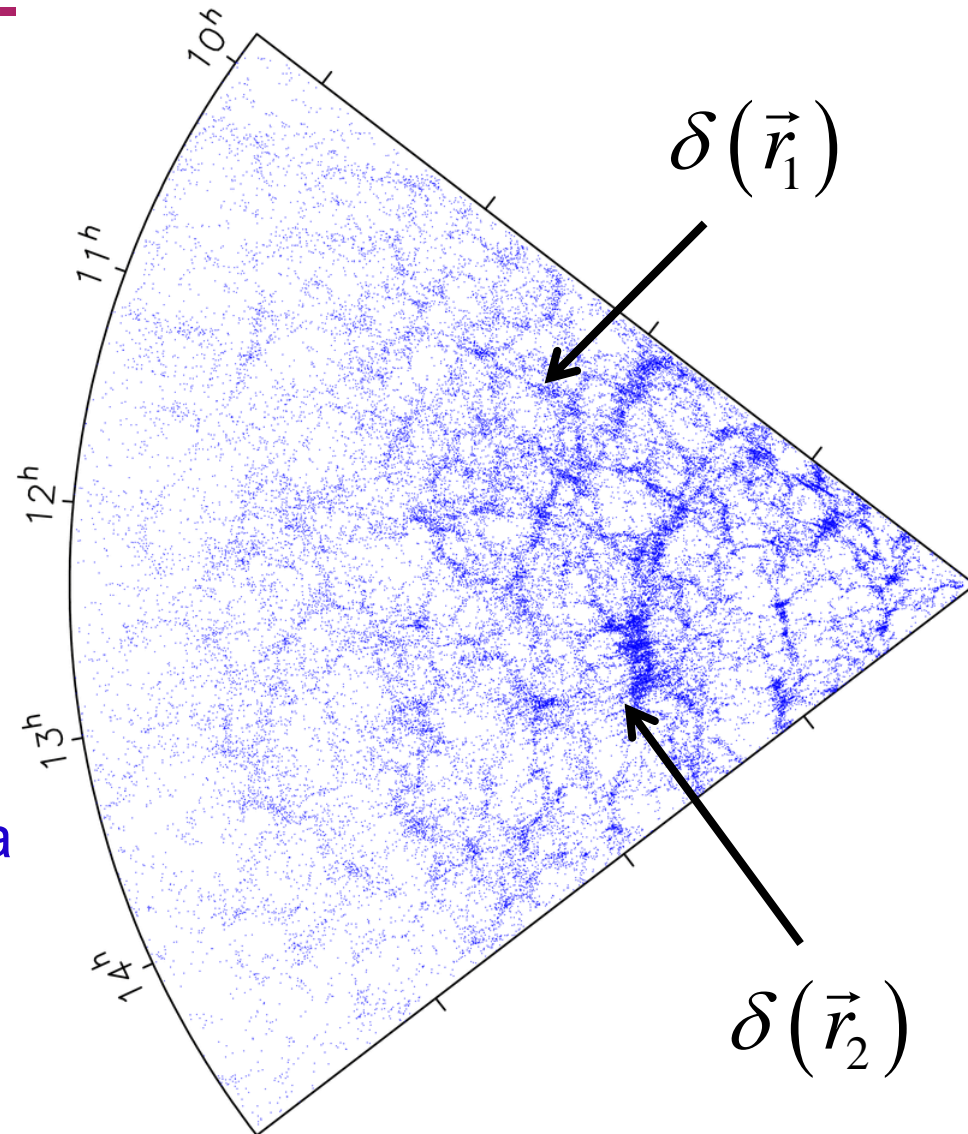
$$\delta_{obs}(\vec{r}) = \frac{n(\vec{r}) - \bar{n}(\vec{r})}{\bar{n}(\vec{r})}$$

- Função de correlação:

$$\xi(\vec{r}_{12}) = \langle \delta(\vec{r}_1) \delta(\vec{r}_2) \rangle$$

Sobredensidade de pontos próximo de uma partícula aleatória

- Espectro de potência:  
transformada de Fourier



# Espectro de Potência:

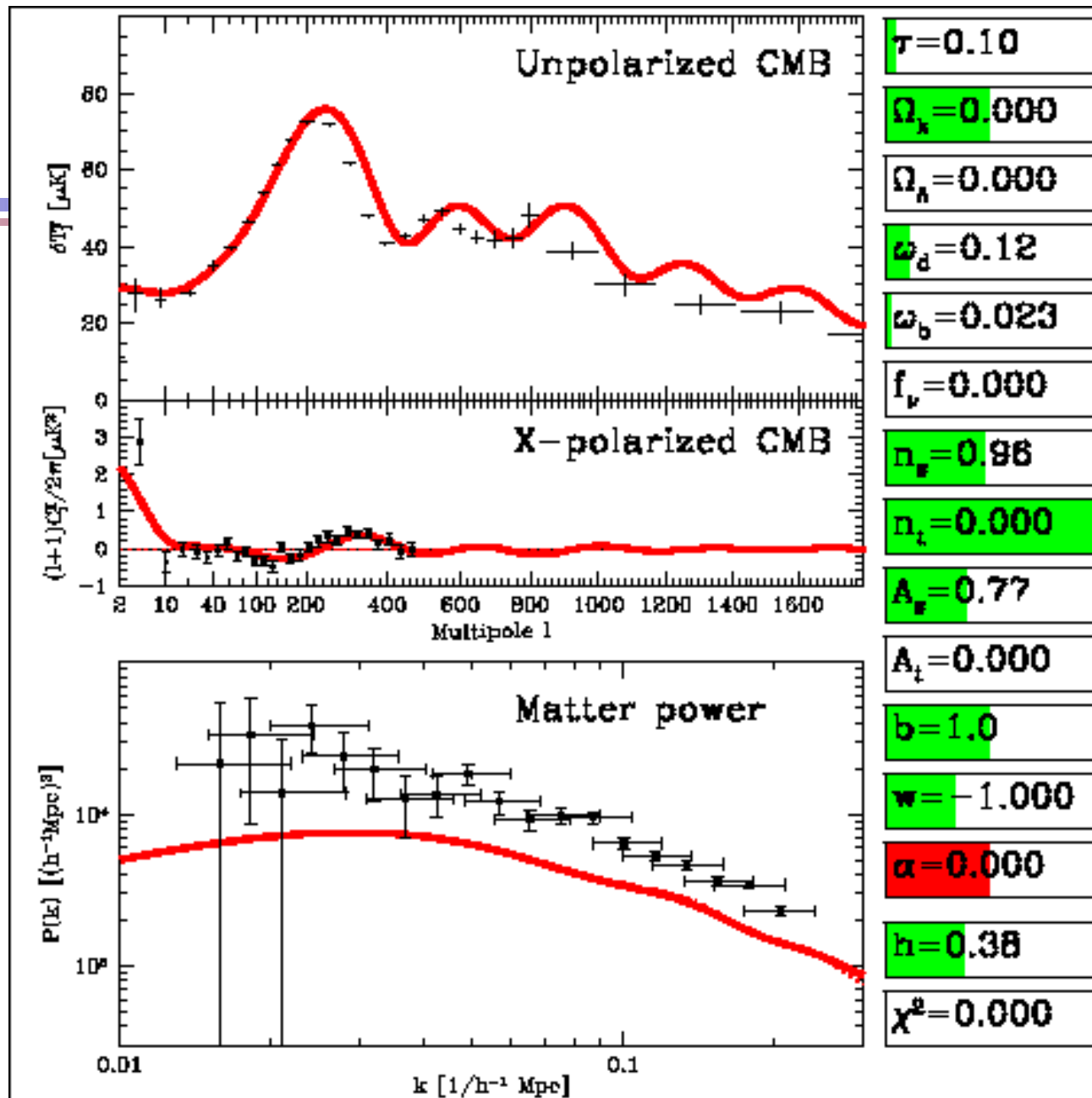
Energia Escura

Forma das flutuações primordiais

Matéria escura

Massa dos neutrinos

Quantidade de bárions



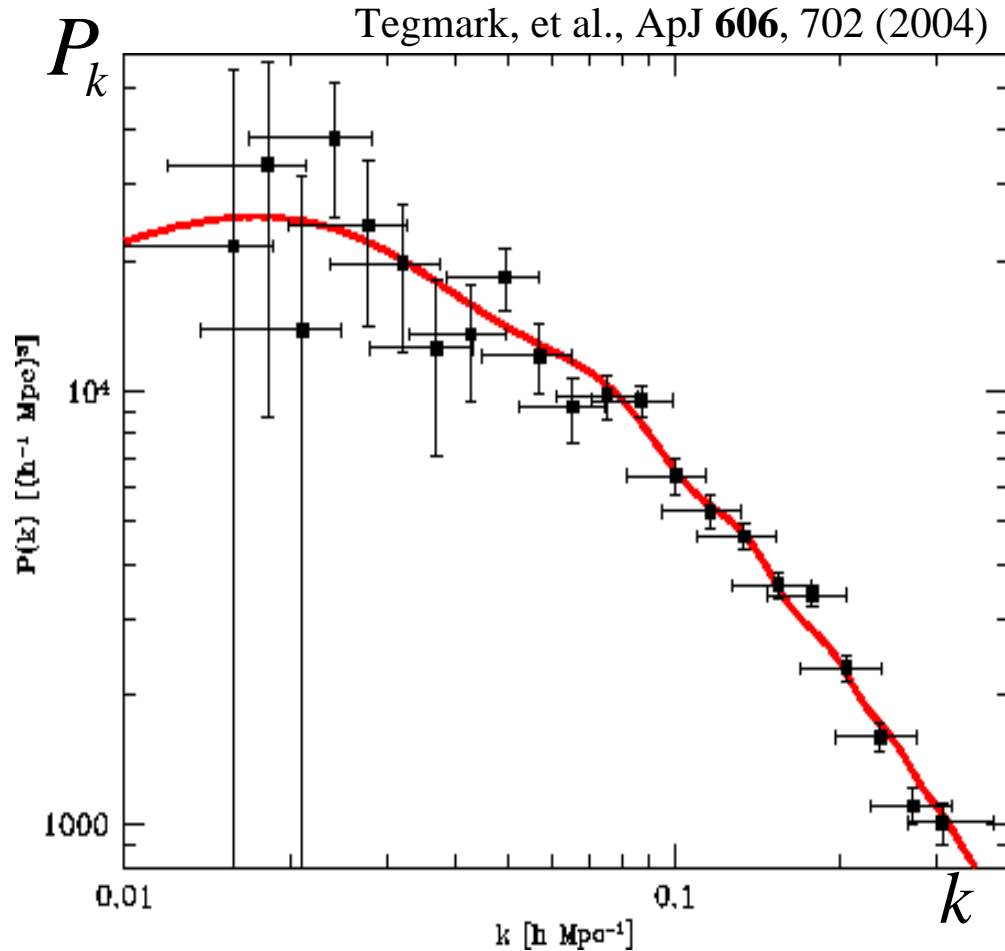
# Dados e Teoria

## Espectro de Potência:

- Forma das flutuações primordiais
- Matéria escura
- Massa dos neutrinos
- Quantidade de bárions

## Exemplo (do SDSS):

$$\Omega_m = 0.30 \pm 0.03$$



205.443 galáxias do SDSS



## Parte V

# O Universo Muito Perturbado

# Evolução Não Linear

- Antes da recombinação:

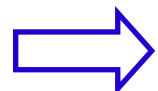
- q Radiação e matéria acoplados

- q  $\frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} \approx 10^{-4}$

- Hoje:

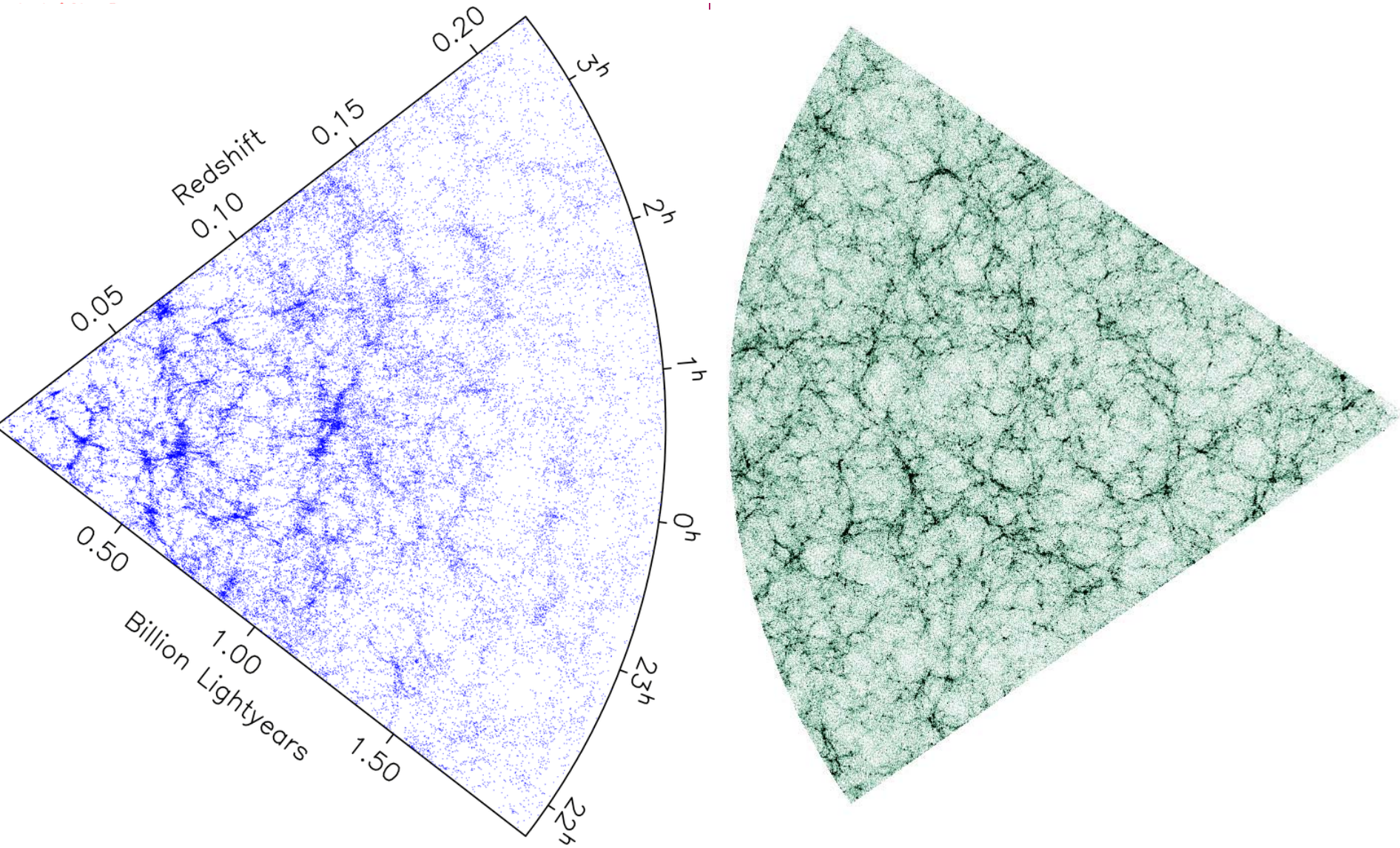
- q Radiação e matéria desacoplados

- q  $\frac{\Delta\rho_{Gal}}{\bar{\rho}} \approx 10^6$



**Necessidade de estudar o regime não-linear**

# Resultados de Simulações



# Parte VI

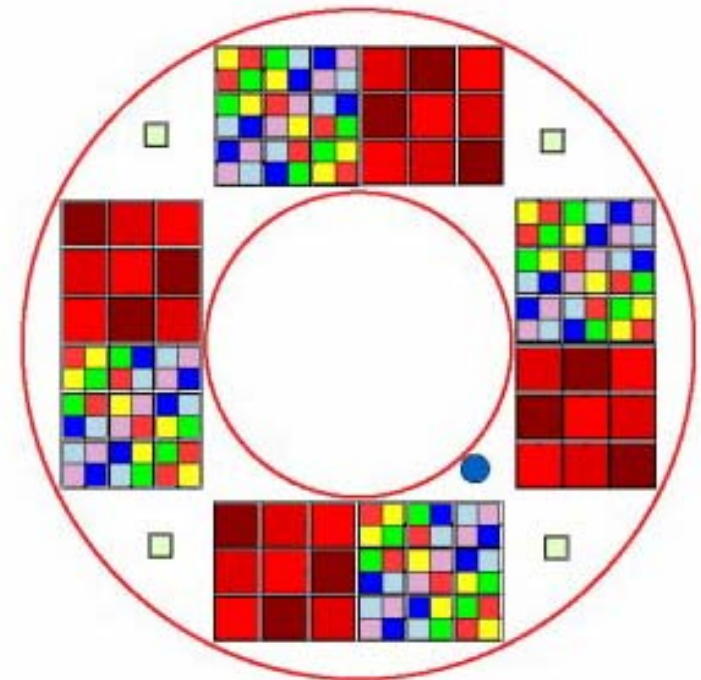
---

## Olhando para o Futuro

# Futuro: Levantamentos a Partir do Espaço

## ○ NASA (Beyond Einstein Program)/DOE

- Sonda dedicada à busca e acompanhamento de SNIa
- CCD de  $0.7 \text{ grau}^2$ ,  $10^9$  pixels
- Espectroscopia de NIR a NUV
- 2000 SNIa com  $0.1 < z < 1.7$  por ano
- **Ciência:**
  - Supernovas
  - Aglomerados de galáxias
  - Lentes gravitacionais fracas



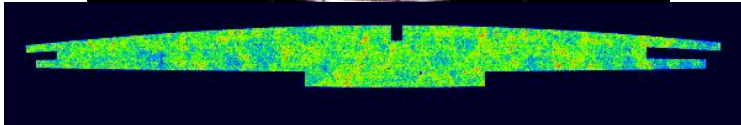
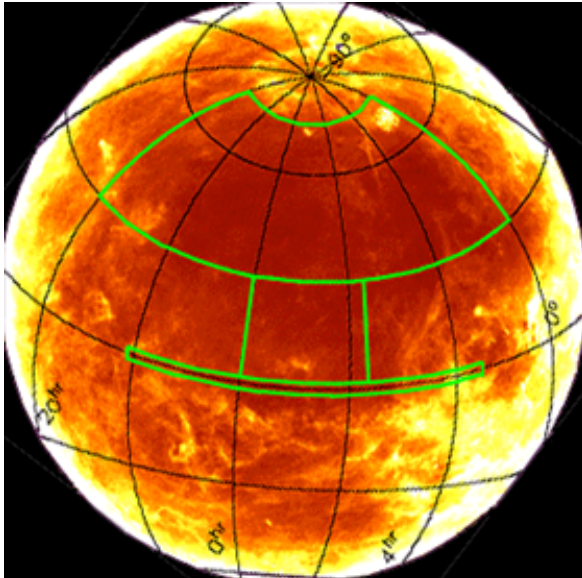
Plano focal





DARK ENERGY  
Survey

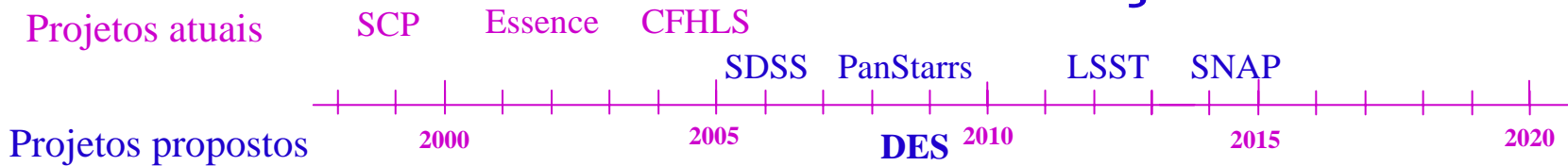
# Levantamento da Energia Escura



Superposição com o SPT SZ survey  
e com a tira 82 do SDSS (e outros)

- o Dark Energy Survey (DES):
  - q Câmera de 500 Megapíxeis
  - q Campo  $\sim 2$  graus<sup>2</sup>
  - q Telescópio de 4m do CTIO 4 cores para zs fotométricos
  - q Acurácia:  $\delta z < 0.02$  até  $z = 1$
  - q 10-20 galáxias/minuto de arco<sup>2</sup>
  - q Cobertura 5000 graus<sup>2</sup>

## Colaboração com o DES





# Medidas da Energia Escura com o DES

- Realizar medidas de precisão dos efeitos da energia escura

- Novos métodos

- q Contagem de aglomerados de galáxias  $\sigma(w) \sim 0.05$

- 20,000 aglomerados até  $z = 1$  com  $M > 2 \times 10^{14} M_{\odot}$
    - 200,000 grupos e aglomerados

- q Efeito fraco de lentes gravitacionais  $\sigma(w) \sim 0.05$

- 300 milhões de galáxias com medida da forma

- q Distribuição espacial de galáxias  $\sigma(w) \sim 0.1$

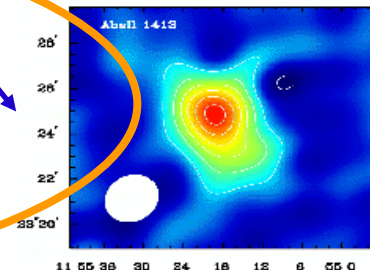
- 300 milhões de galáxias

- Medida “padrão da energia escura”

- q Distâncias de supernovas do tipo Ia  $\sigma(w) \sim 0.15$

- 2000 supernovas até  $0.3 < z < 0.8$
    - Imagens repetidas de  $40 \text{ graus}^2$
    - Curvas de luz precisas

$$w = \frac{P}{\rho}$$



# Considerações Finais

- Avanços notáveis na cosmologia observacional e nas simulações
- Sucessos importantes do modelo padrão
- Incógnitas e problemas fundamentais em aberto:
  - q Pequenas escalas
    - Satélites
    - Halos pontiagudos (*cuspy*)
    - Buracos negros supermassivos?
  - q Grandes escalas
    - Baixos multipolos da radiação cósmica de fundo
    - Anisotropia raios cósmicos?
  - q **Não sabemos o que compõe 96% da densidade do Universo → “*Novo éter*”?**
- ➔ Nova física a partir da cosmologia!
- ⊗ **Seja bem vindo a participar deste fascinante ramo da ciência!**

# Outros Mistérios

---

- Porquê há mais matéria do que anti-matéria?
- Quais são os fenômenos físicos no universo primordial?
- De onde vem e o que são os pulsos de raios gama?
- Como se formam as galáxias? (Quasares, AGN e buracos negros)