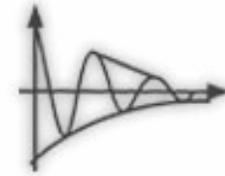




**VI Escola do CBPF**

Rio de Janeiro, 17 a 28 de julho de 2006



# Das Galáxias à Energia Escura: Fenomenologia do Universo

Martín Makler

**ICRA/CBPF**

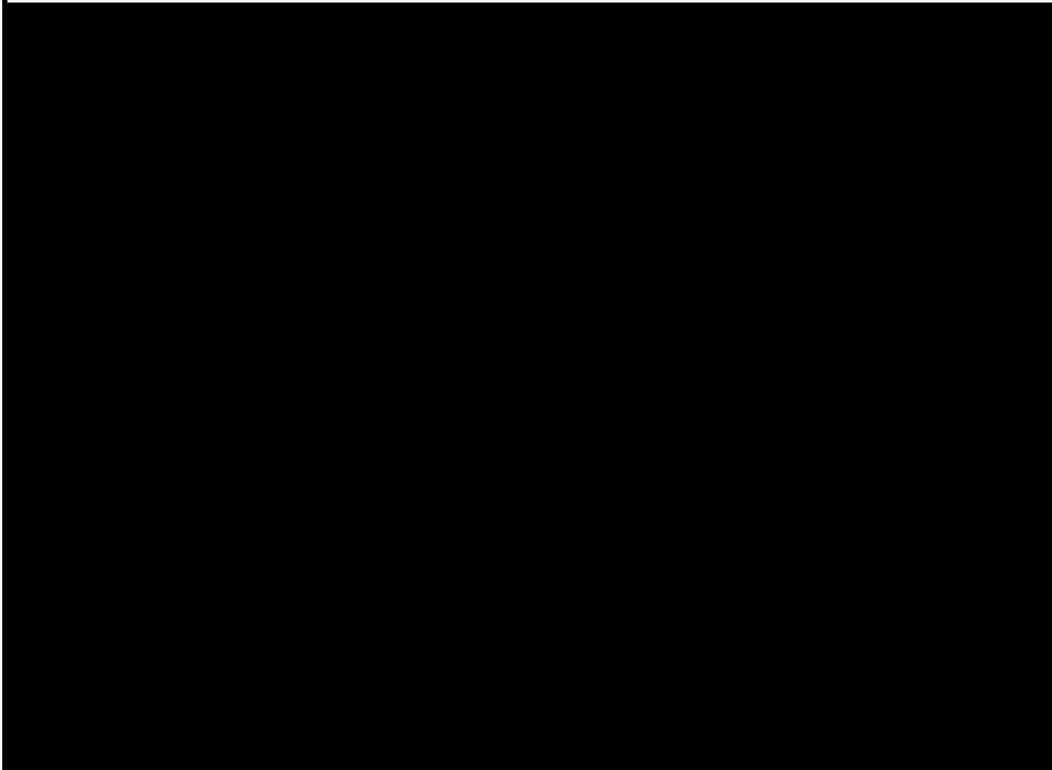


Ministério da  
Ciência e Tecnologia

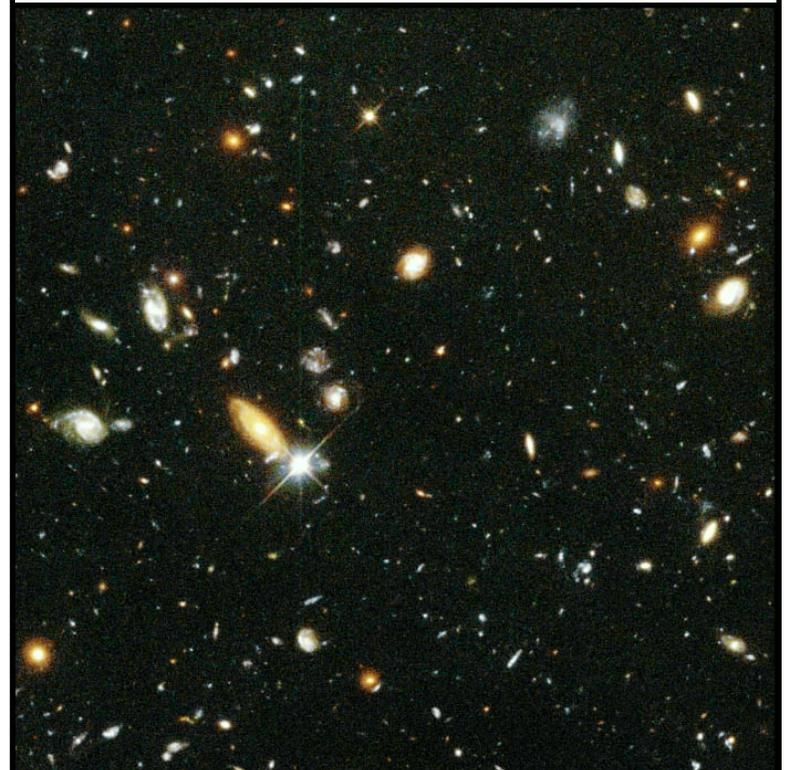


# Fenomenologia

**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.**

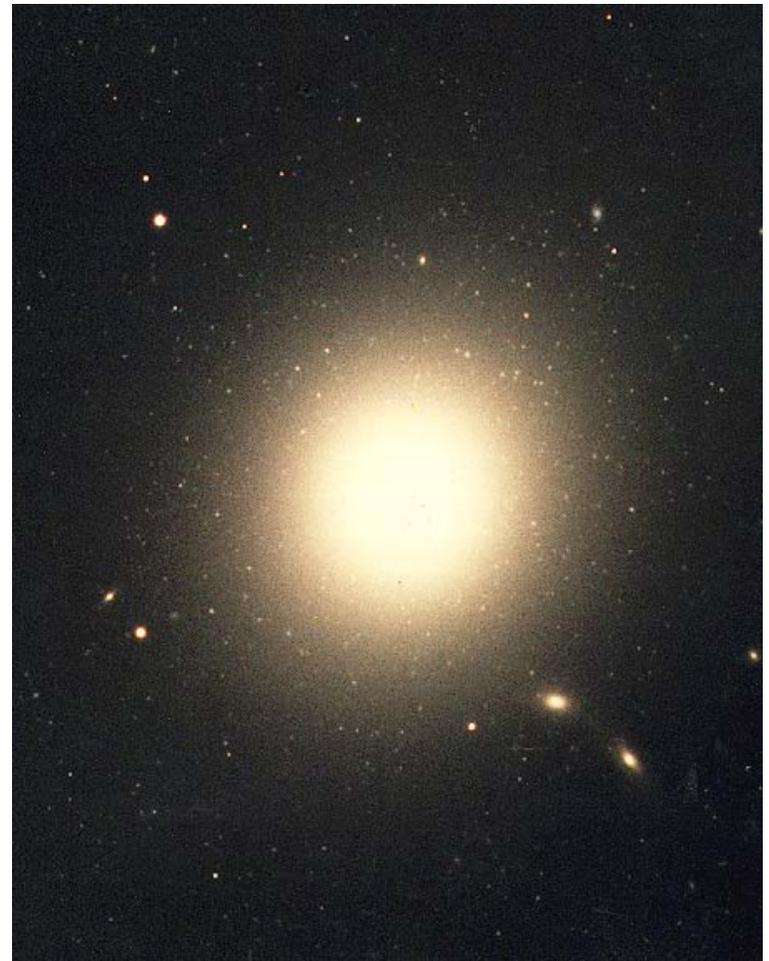
- *Ponte entre teoria e observação*
- *Análise estatística*
- *Modelagem, incluindo todos os processos físicos (simulações, aproximações)*
- *Observáveis: onde posso esperar detectar um dado fenômeno?*
- *Área interdisciplinar*

# 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
- Parte VI: Incógnitas e perspectivas

# Blocos fundamentais: *Galáxias*

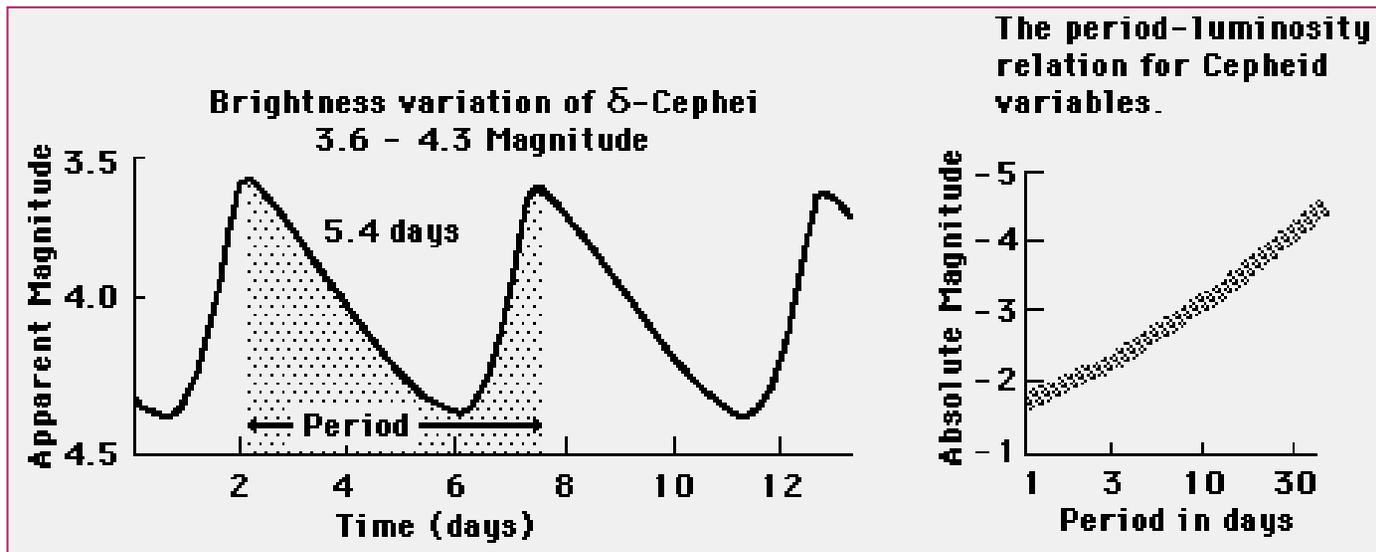


# Propriedades Básicas das Galáxias

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.

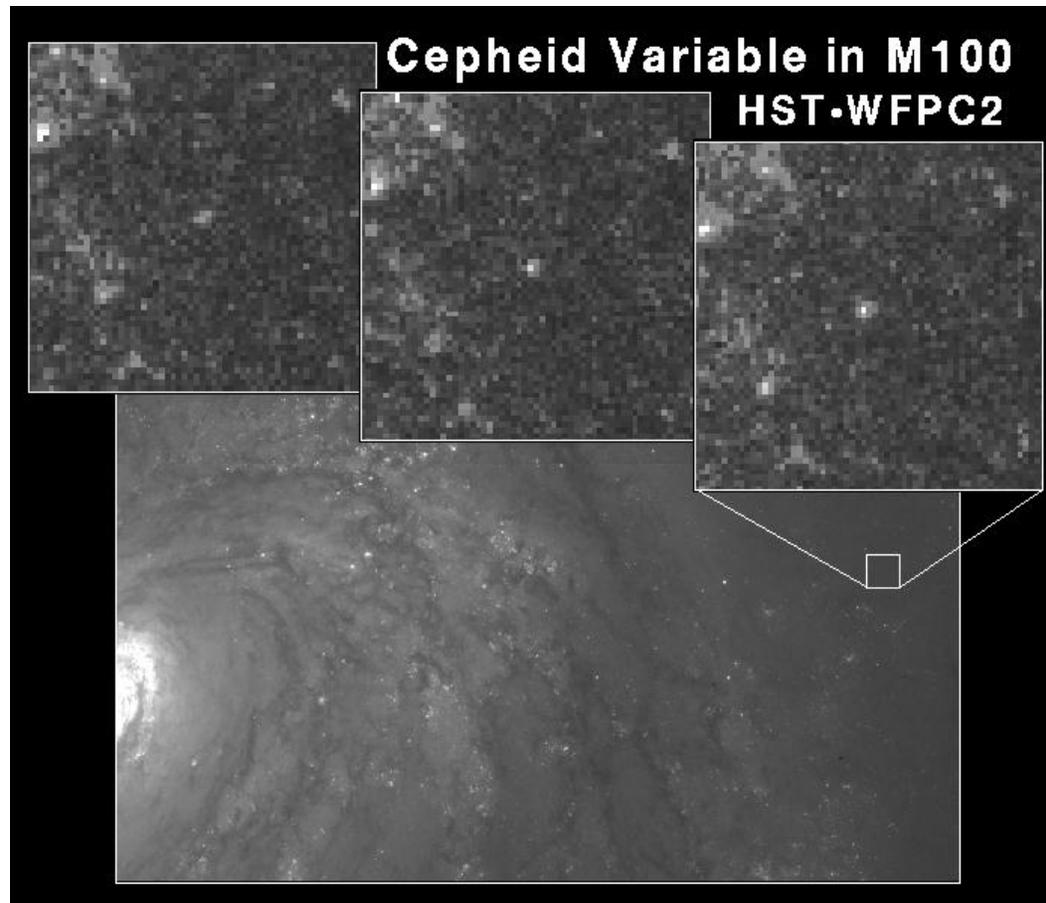
# Natureza das Galáxias

- 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

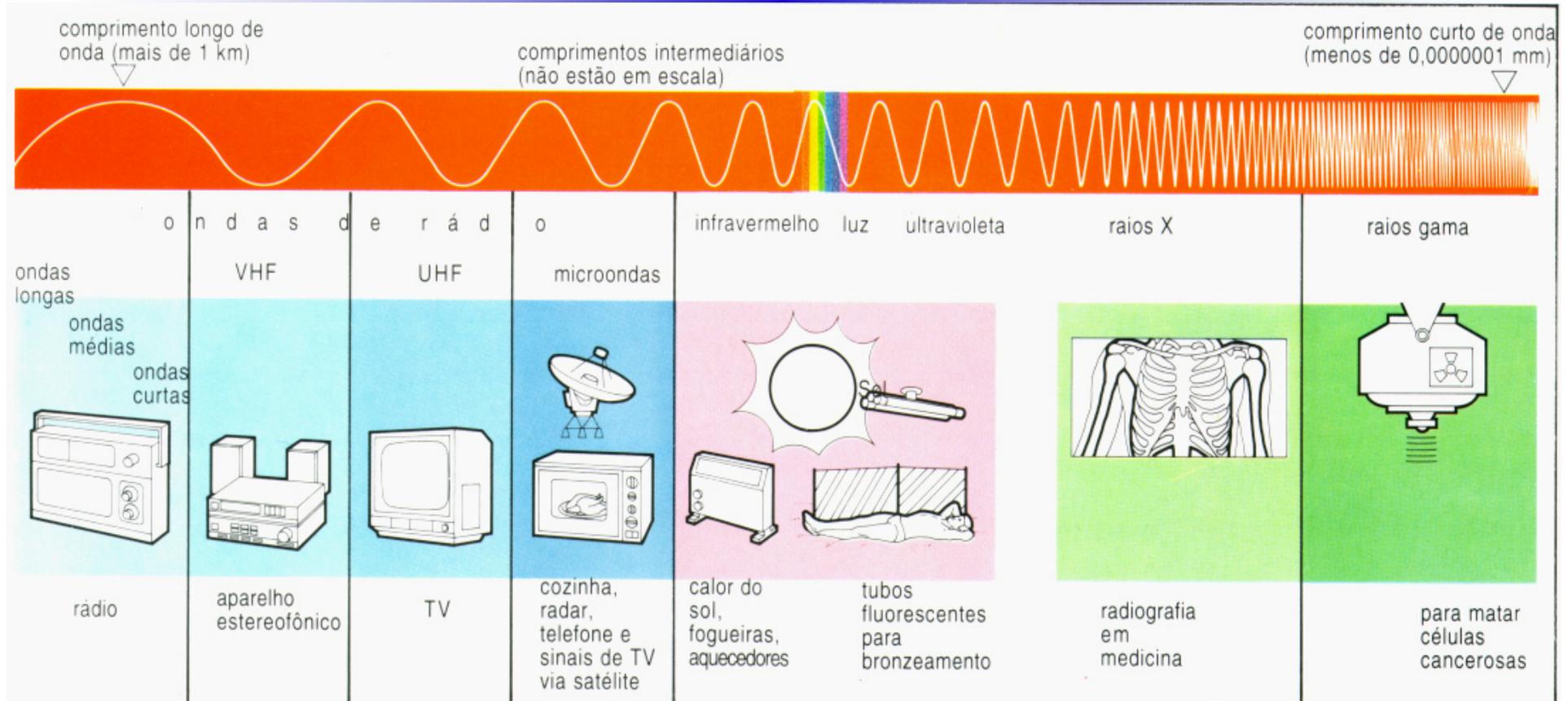


# Natureza das Galáxias

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

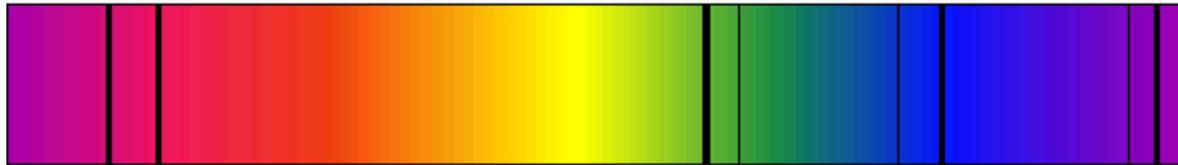


# Espectro Eletromagnético



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

# Espectro de Linhas

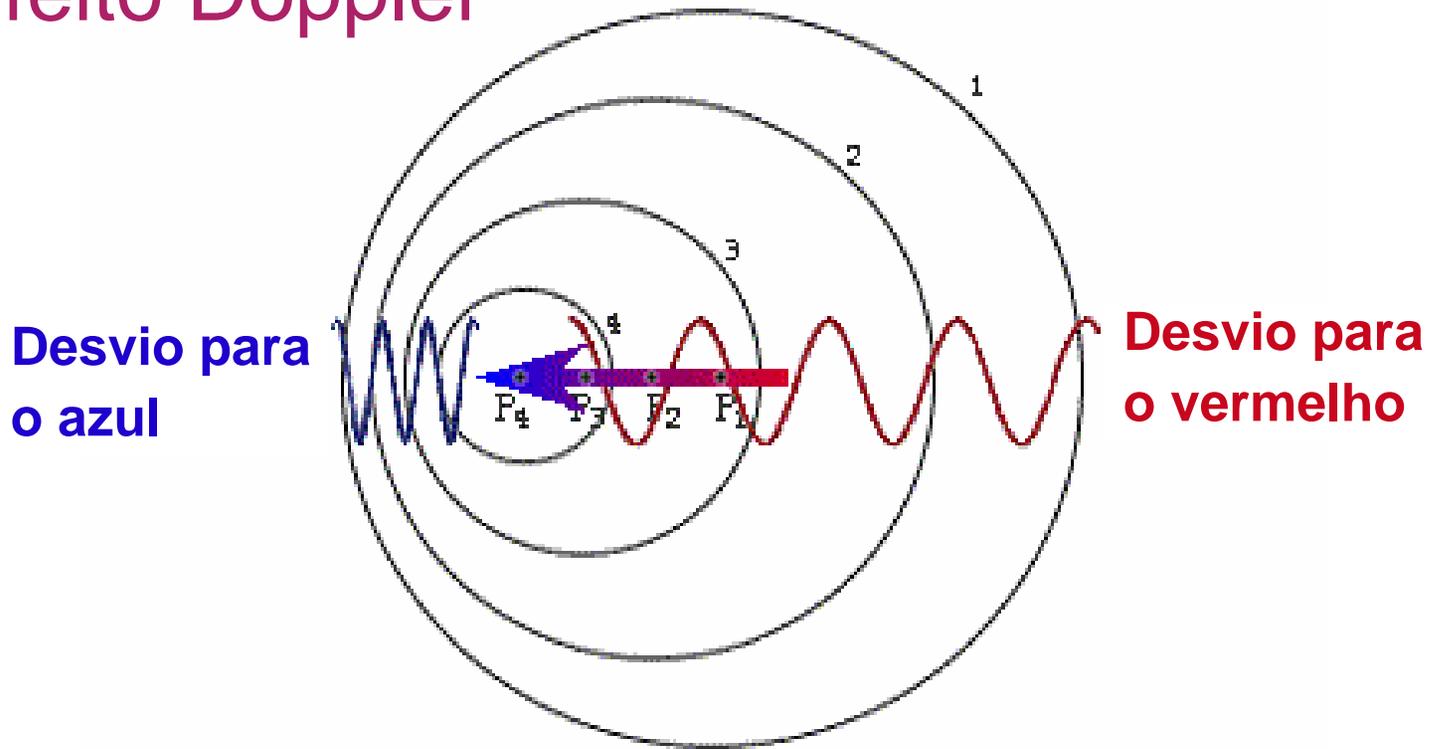


## Linhas de absorção devido à presença de gás

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

# O Desvio para o Vermelho

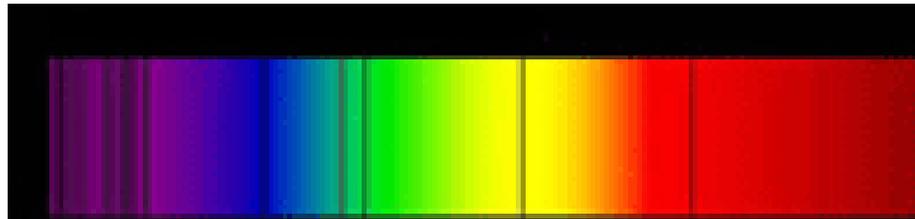
- Efeito Doppler



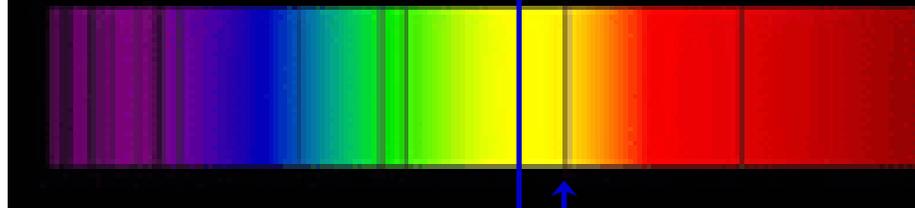
$$z := \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}} - 1 \approx v/c, \text{ para } v \ll c$$

# O desvio para o vermelho

Espectro “de referência”



Espectro observado



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

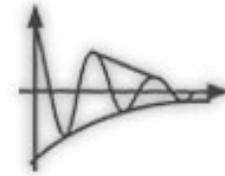
$\lambda_e$

$\lambda_r$



**VI Escola do CBPF**

Rio de Janeiro, 17 a 28 de julho de 2006



# O Cosmos Dinâmico

---

O Universo em Expansão

# A Expansão do Universo

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

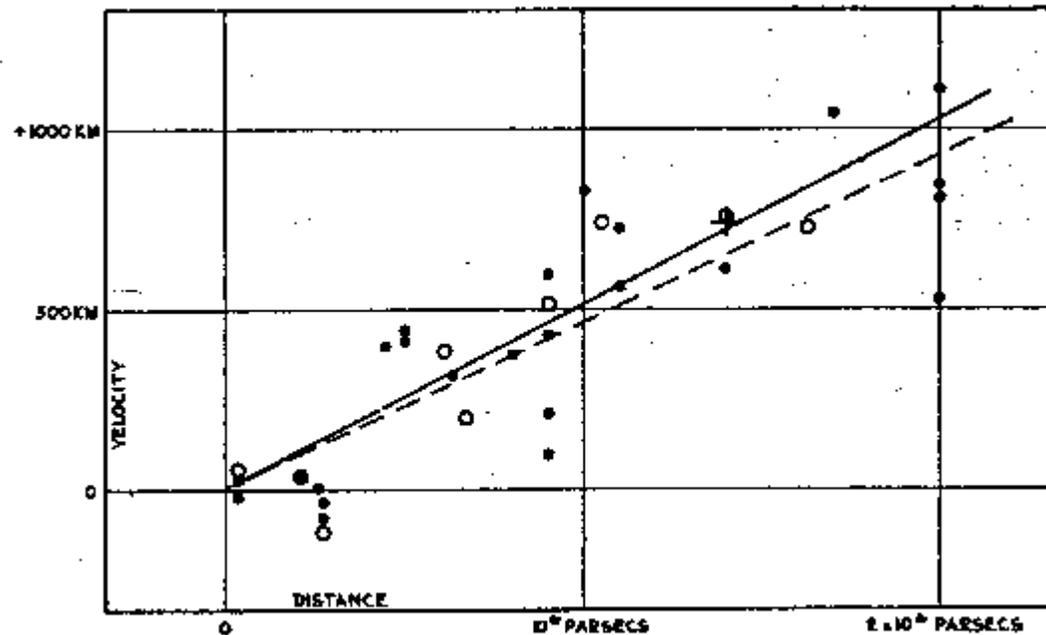
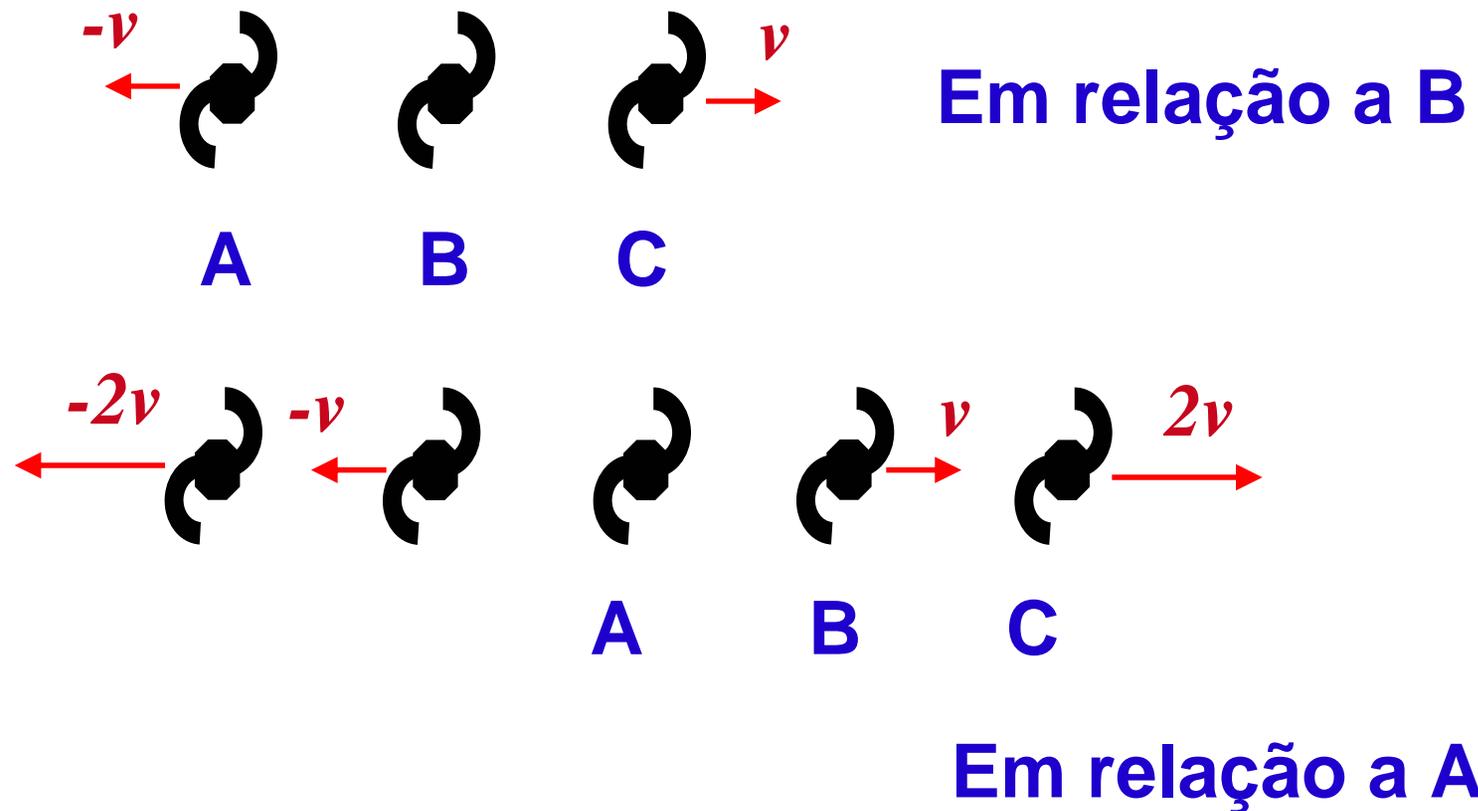


FIGURE 1

- 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:

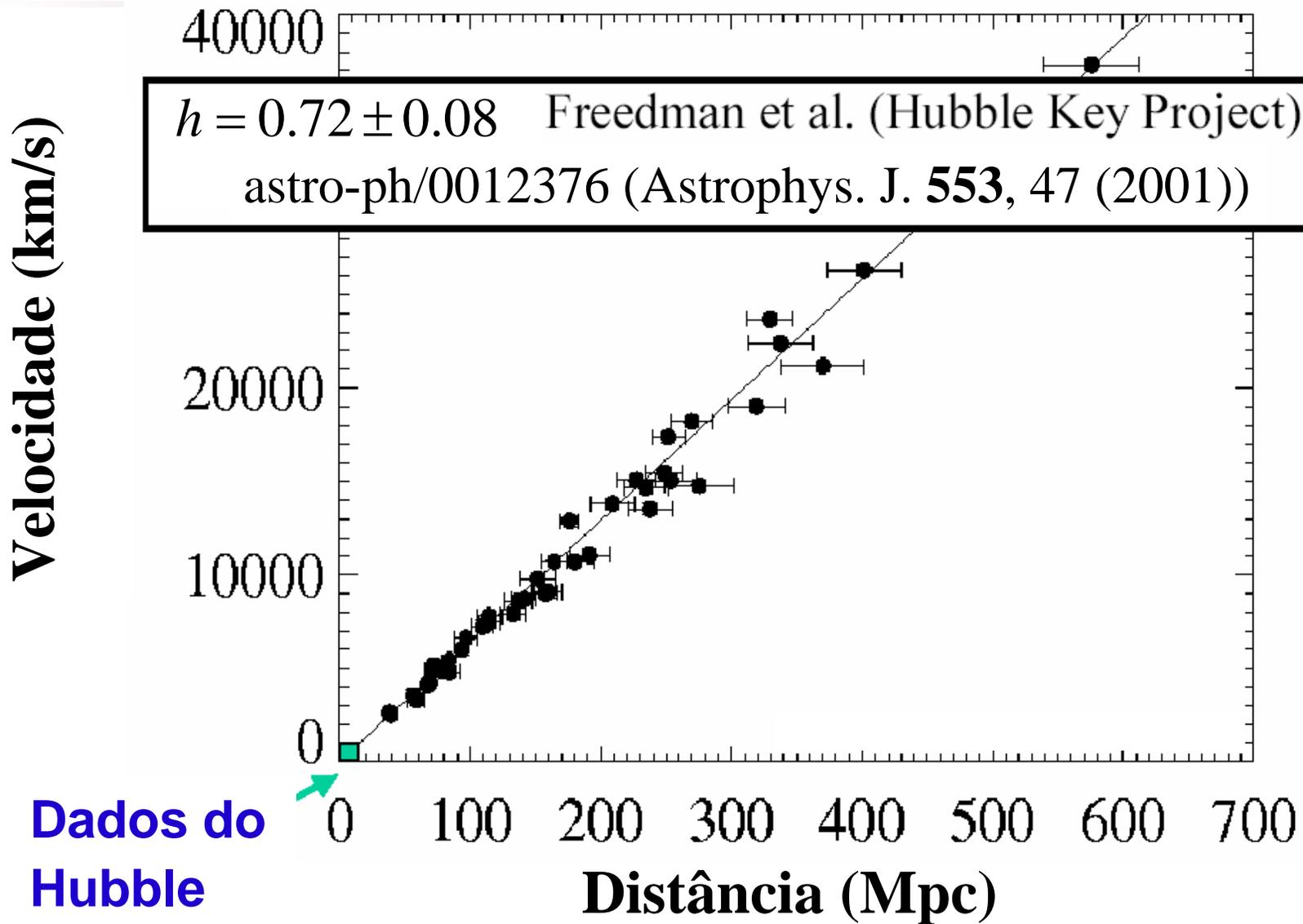
$$v = H_0 d$$

O Parâmetro de Hubble:

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

Dados do Hubble:  $h = 5$

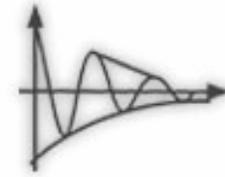
# O Diagrama de Hubble (Versão Atual)





**VI Escola do CBPF**

Rio de Janeiro, 17 a 28 de julho de 2006



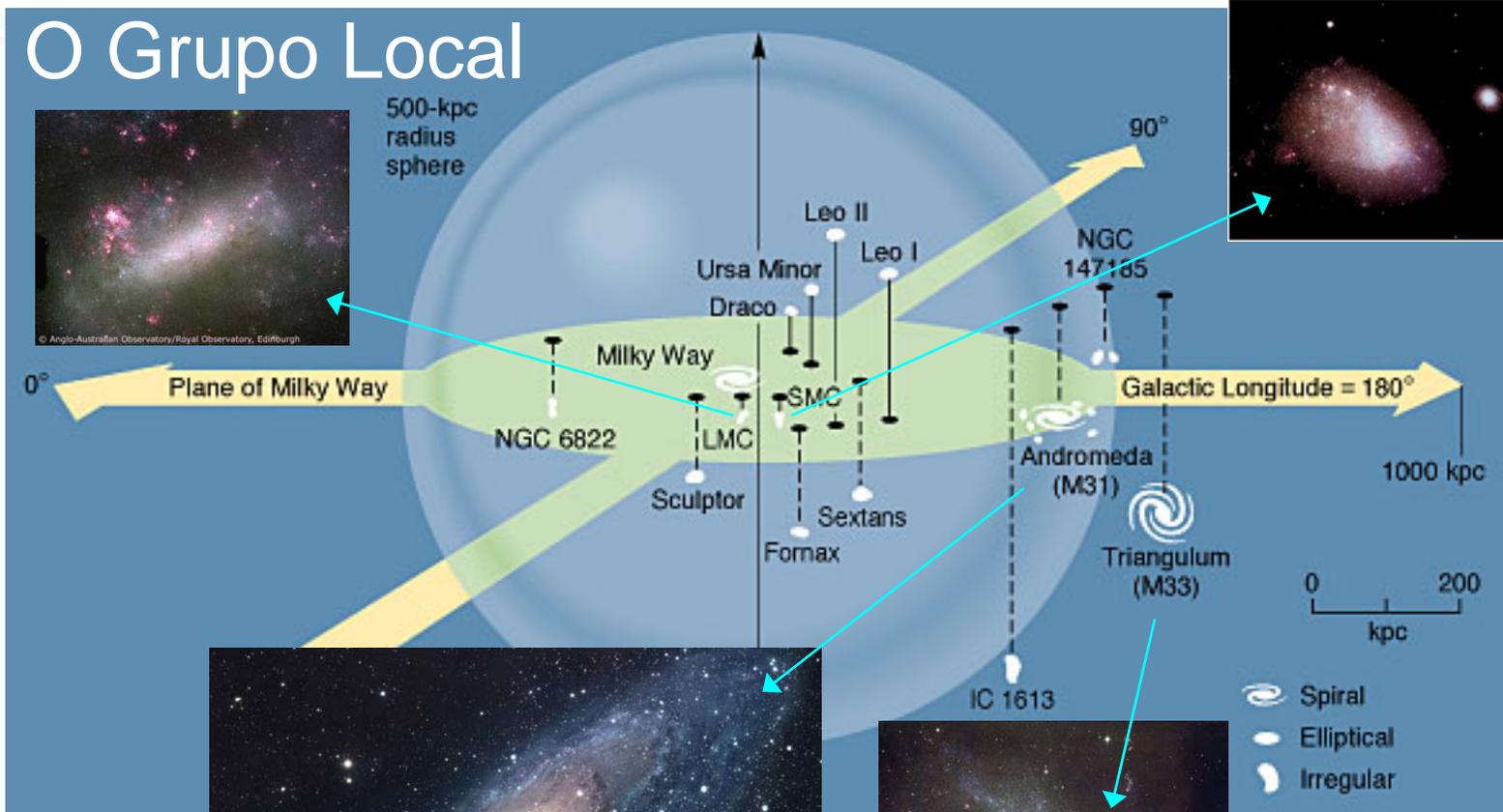
# O Lado Escuro do Universo

---

Episódio I

# Grupos de Galáxias

## O Grupo Local



Tamanhos  
fora de escala

# Aglomerados de Galáxias



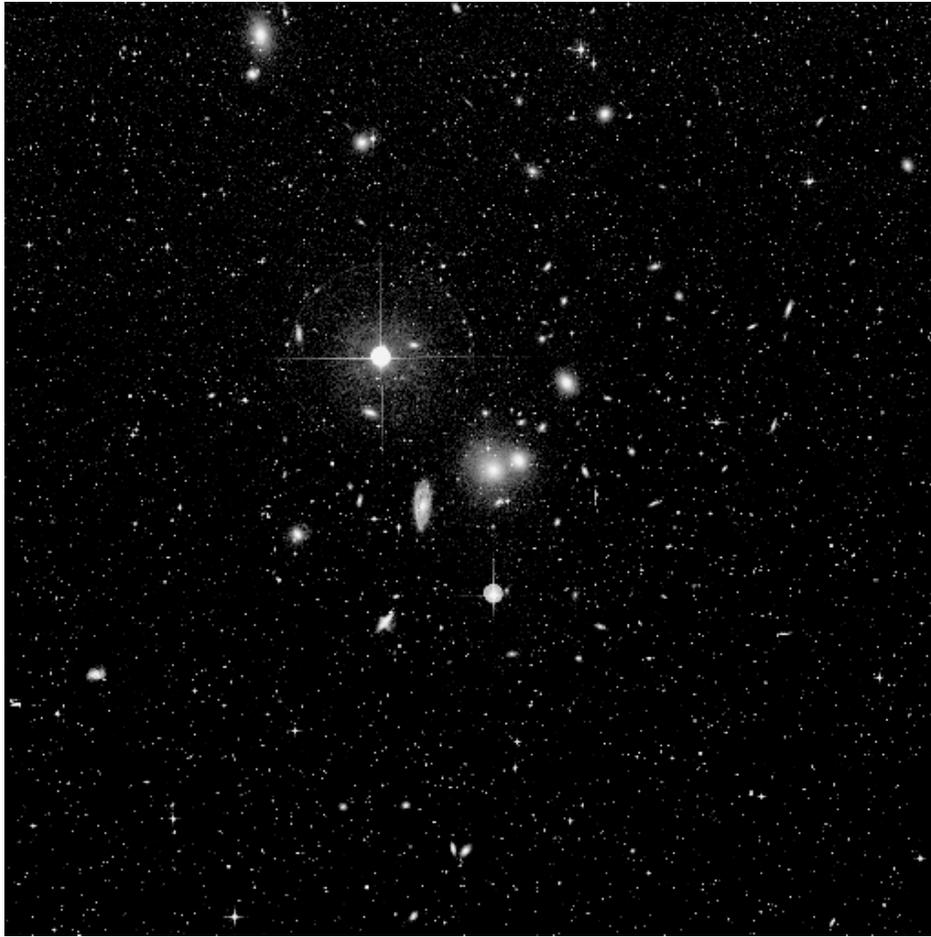
**Aglomerado no SDSS**

**Região qualquer do céu**

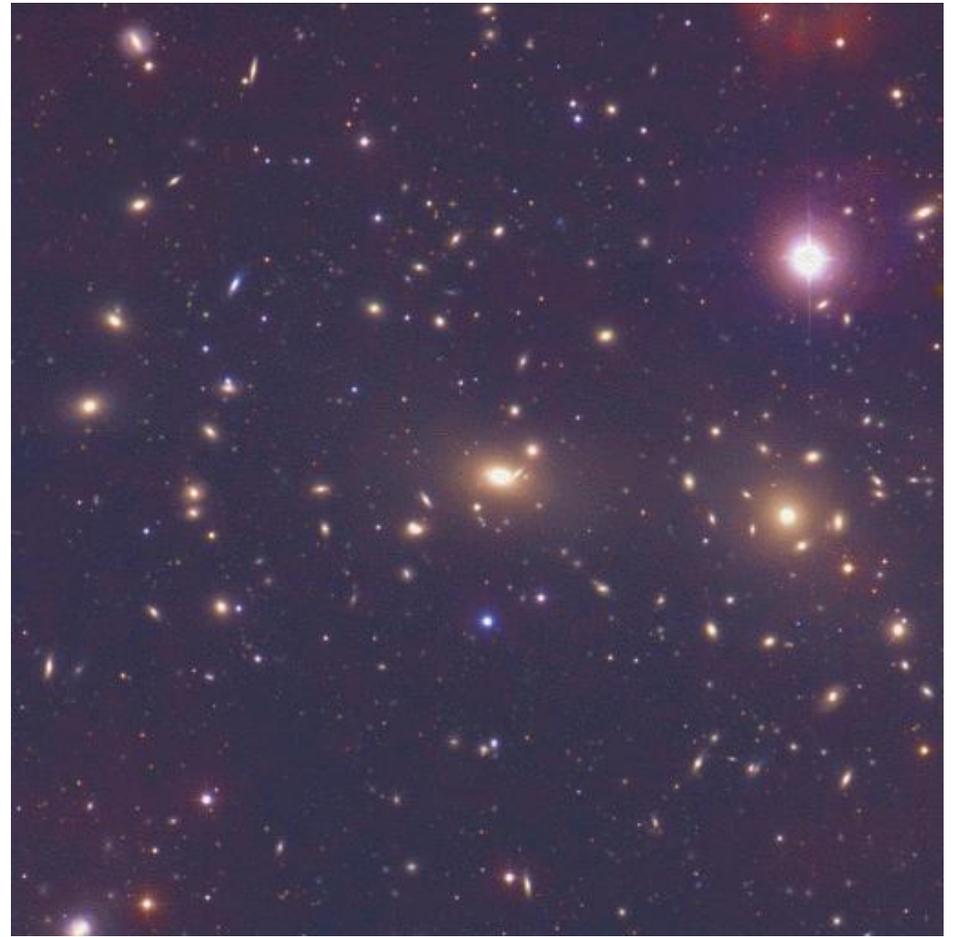


Random Sky  
SDSS Imaging

# Aglomerados de Galáxias



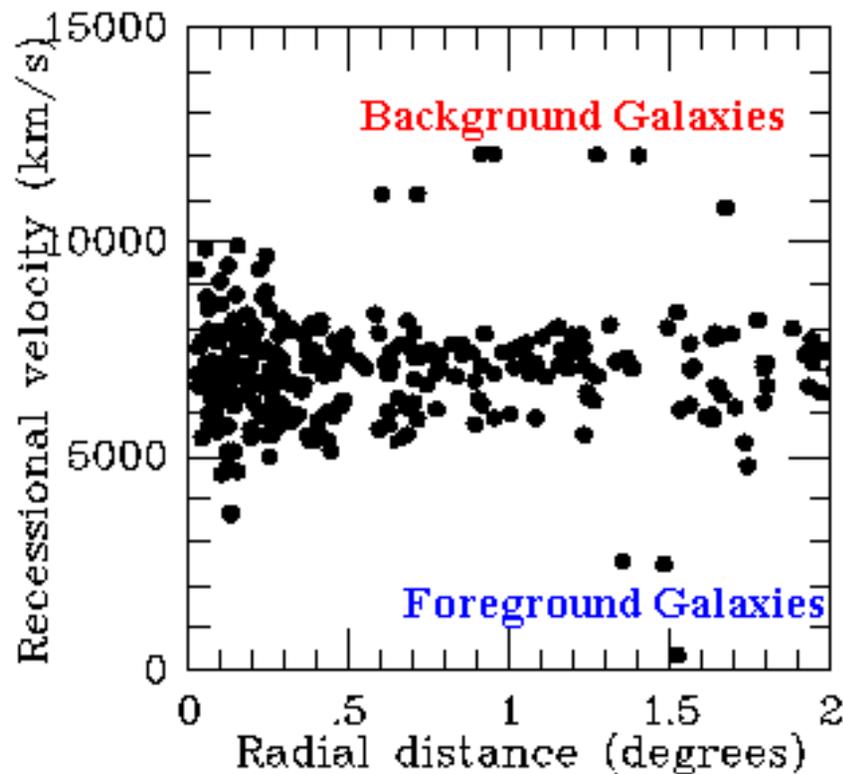
Aglomerado de Hydra



Aglomerado de Coma

# A Matéria Escura

- Dispersão de velocidades em aglomerados (Zwicky 1934)



Teorema do Virial

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

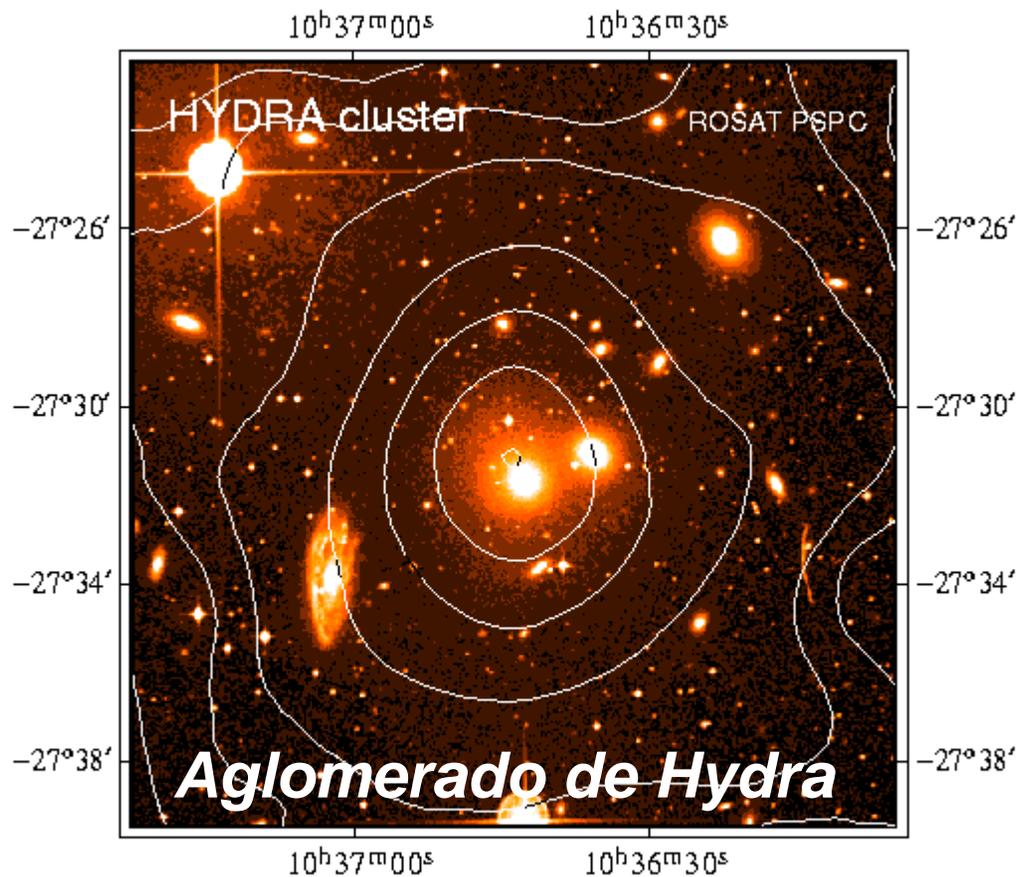


$$\frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2 \approx -\frac{1}{2} \left( -\frac{1}{2} \frac{GM^2}{R} \right)$$

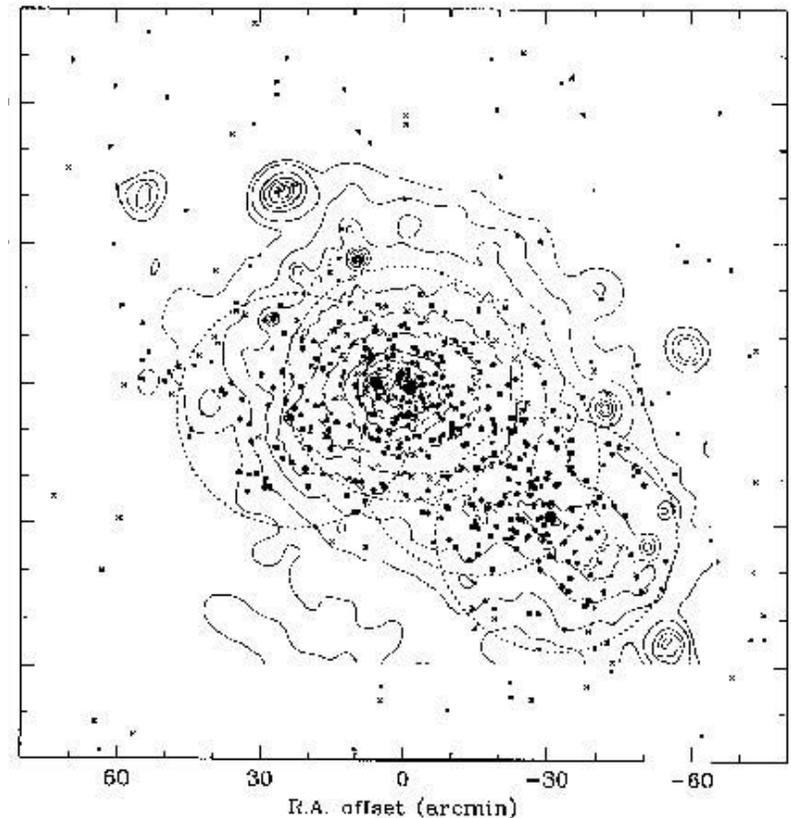
$$M \approx \frac{2Rv^2}{G}$$

Matéria  
escura

# Aglomerados em raios-x



Right Ascension (2000.0)



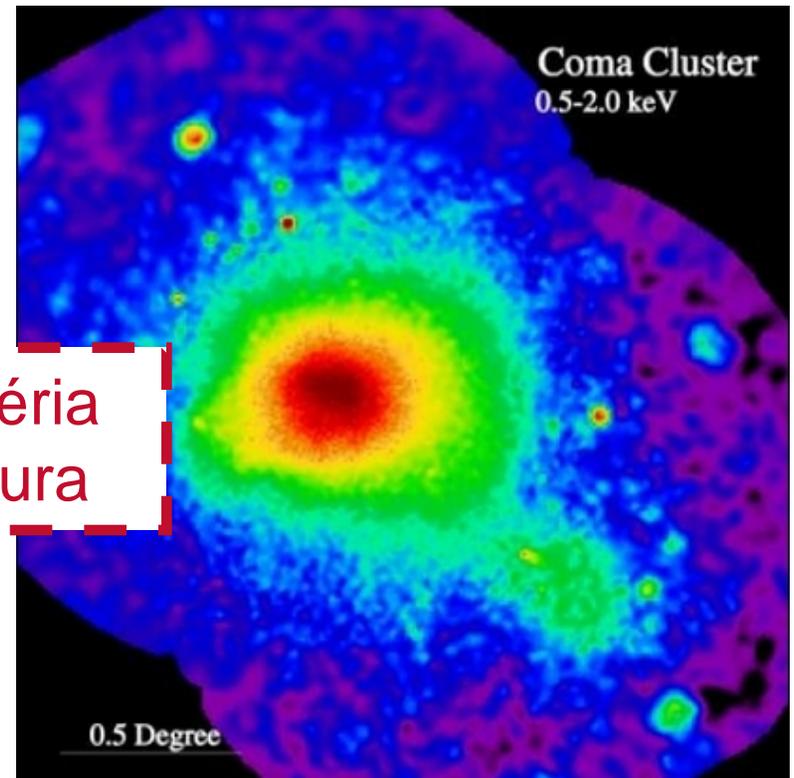
- The Coma cluster fields observed with Hydra (dotted circles) and the positions of the with redshift measurements (new data dots, literature data crosses), superimposed on ours of the ROSAT observations of White et al. (1993). The three dominant galaxies (74, NGC 4889 and NGC 4839) are shown as larger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

# Aglomerado de coma



Coma no ótico

Coma em raios x



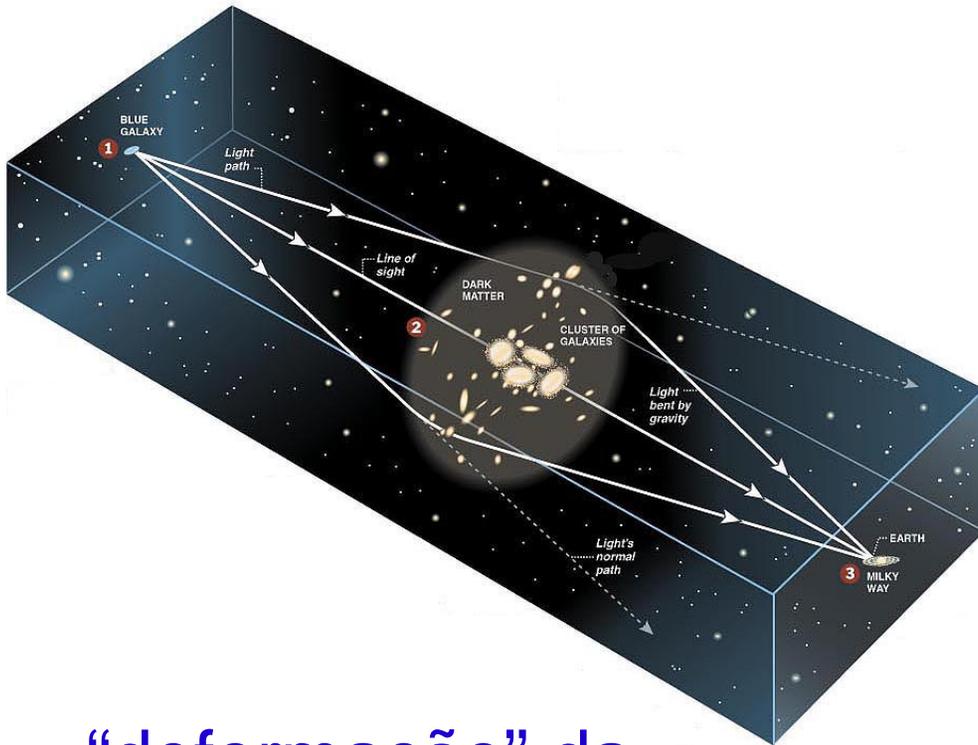
Matéria  
escura

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

Ainda assim matéria escura é 80%

**Gás é distribuído mais suavemente**

# Lentes Gravitacionais



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

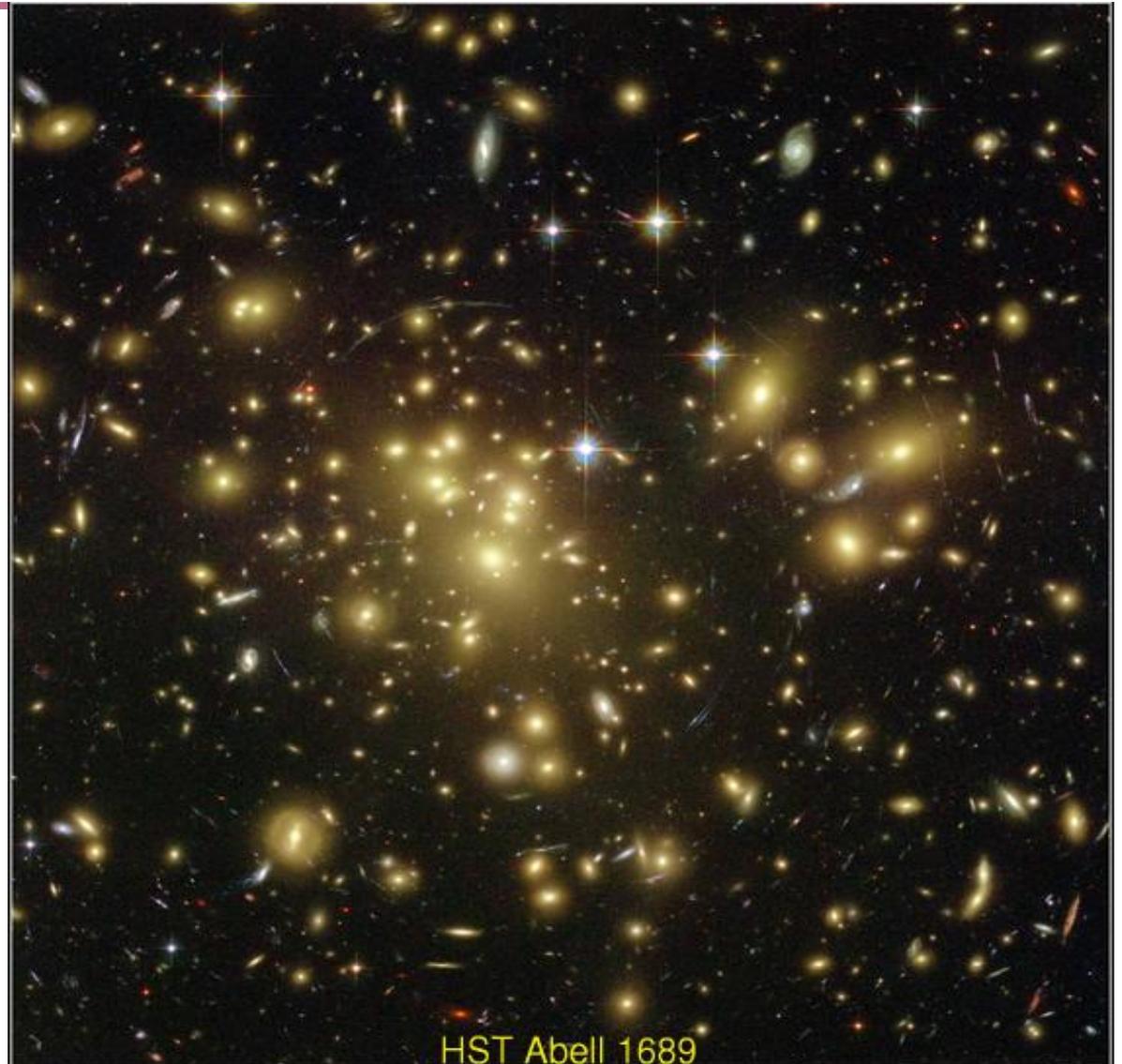


Imagens múltiplas

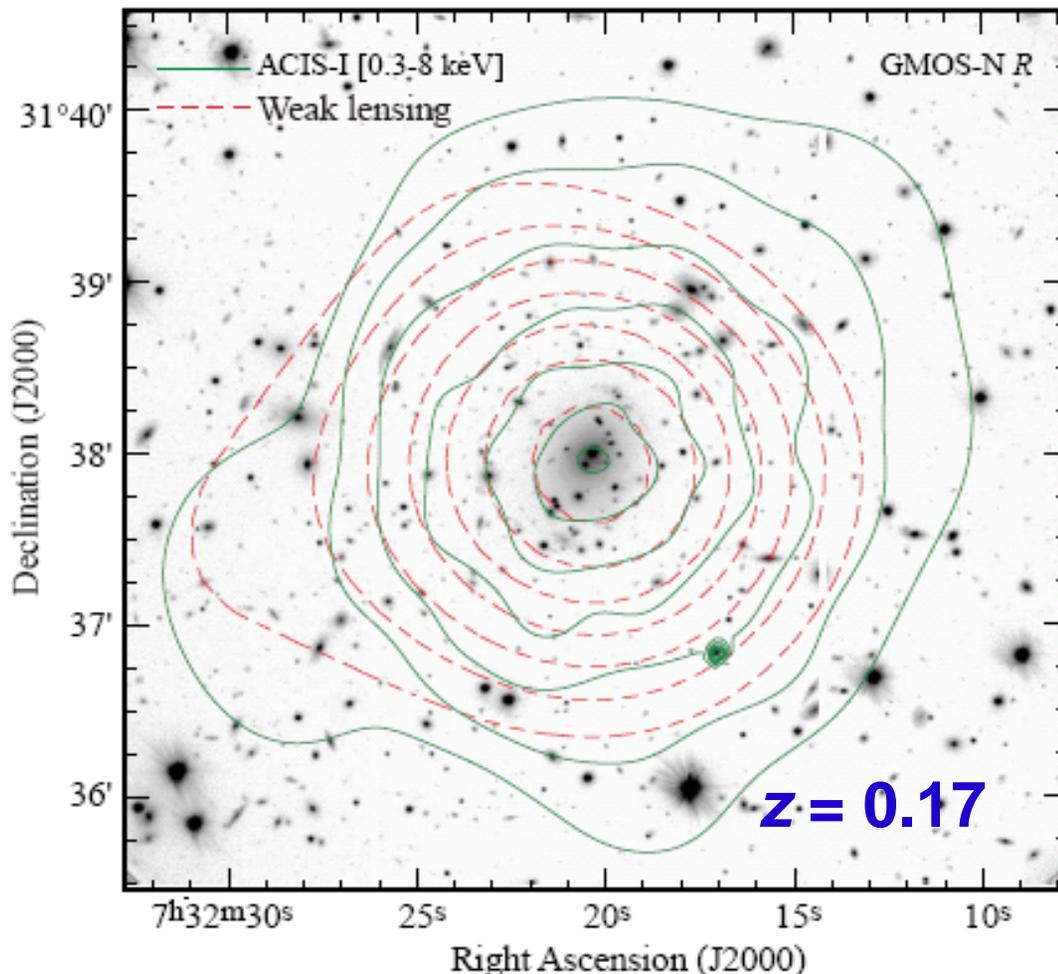
# Efeito Fraco de Lente Gravitacional

- Deformação (e magnificação) das imagens das galáxias
- Orientação na direção tangencial
- Efeito estatístico

Matéria  
escura



# Comparação entre medidas da matéria escura em aglomerados



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

⇒ concordam em ~ 20%  
(para aglomerados relaxados)

**Matéria escura é  
menos concentrada**

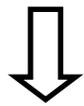
# A Matéria Escura em Galáxias

- o Curvas de rotação de galáxias

Matéria  
escura

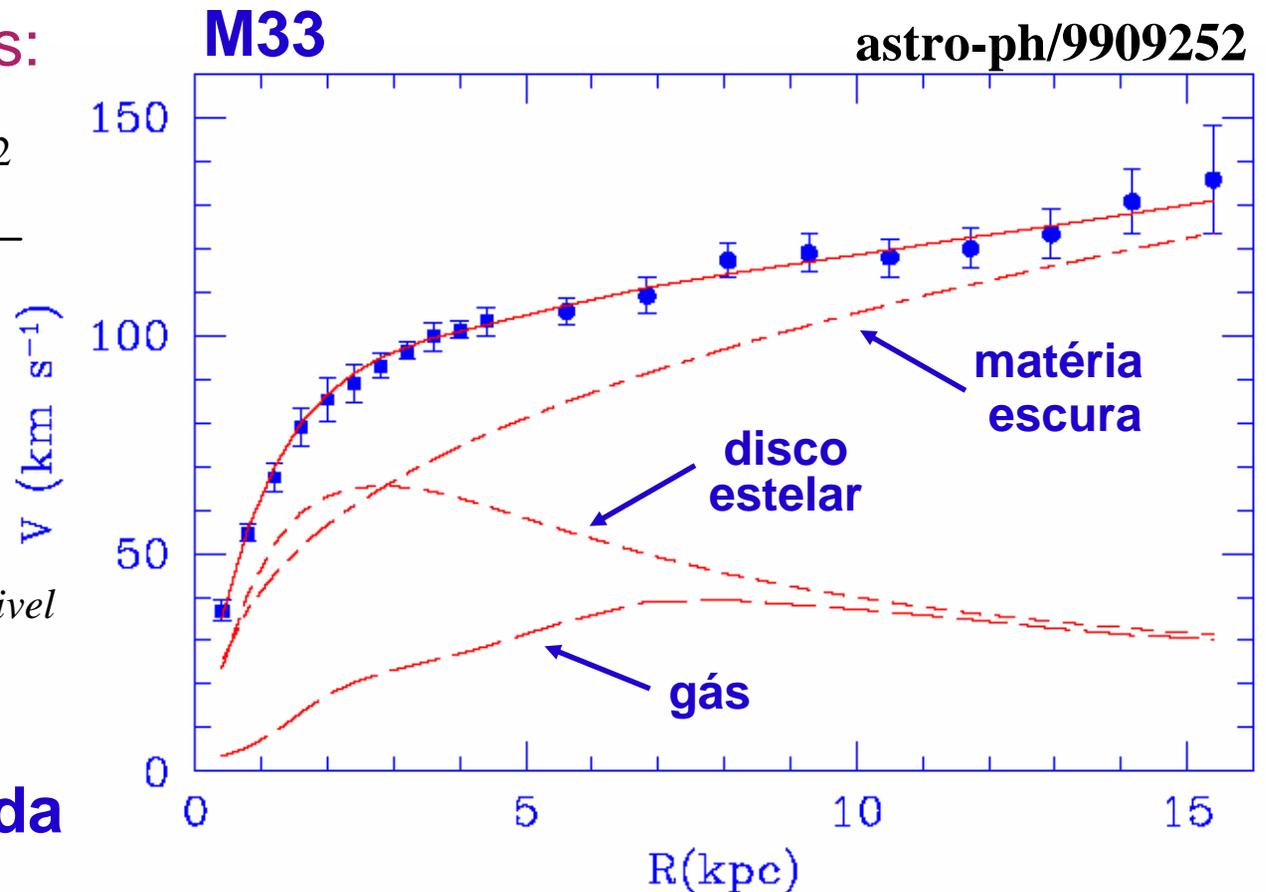
Estimativa simples:

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



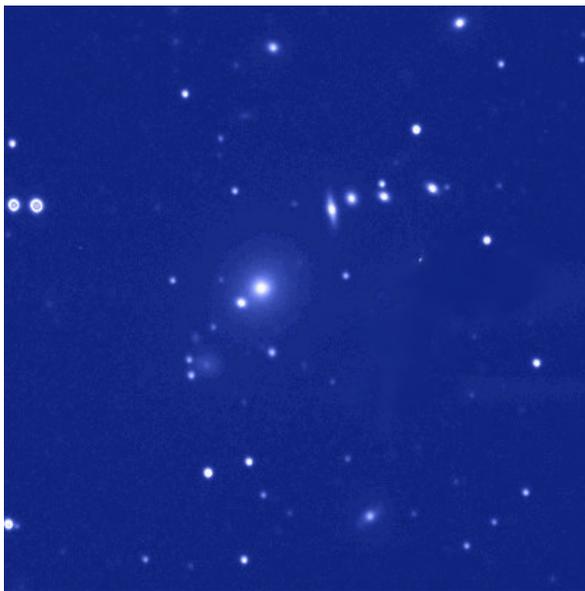
$$M_{Halo} \approx 3 - 10 M_{Visivel}$$

**Matéria escura é  
menos concentrada**



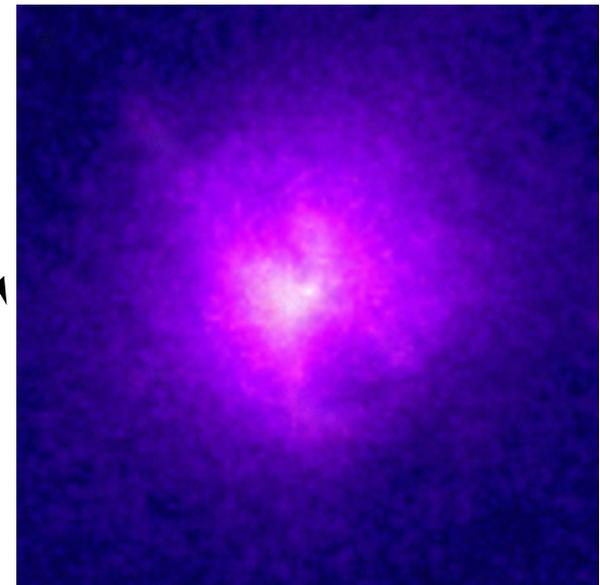
# Aglomerados de Galáxias

- 3 formas de medir a massa com aglomerados:
  - ☐ Movimento das galáxias (virial)
  - ☐ Lente gravitacional
  - ☐ Emissão de raios-x



Hydra A  
no ótico

Hydra A  
em raios x



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

Ainda assim matéria escura é 80%

**Gás é distribuído mais suavemente**

# 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”?

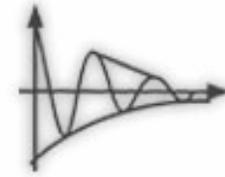
- Matéria visível (estrelas): 10%
- A maior parte da matéria bariônica é “escura” (gás, planetas, BN)

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



**VI Escola do CBPF**

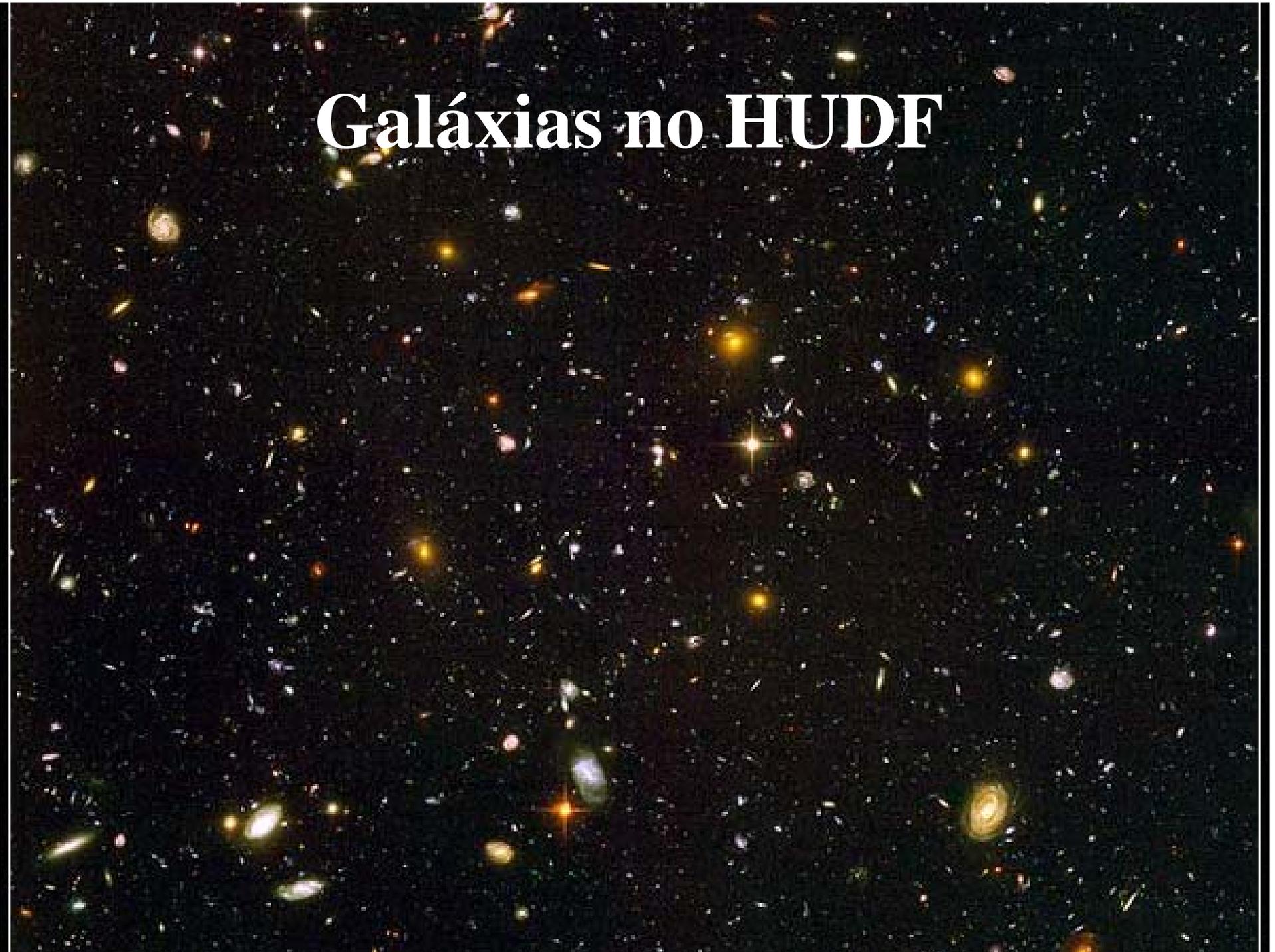
Rio de Janeiro, 17 a 28 de julho de 2006



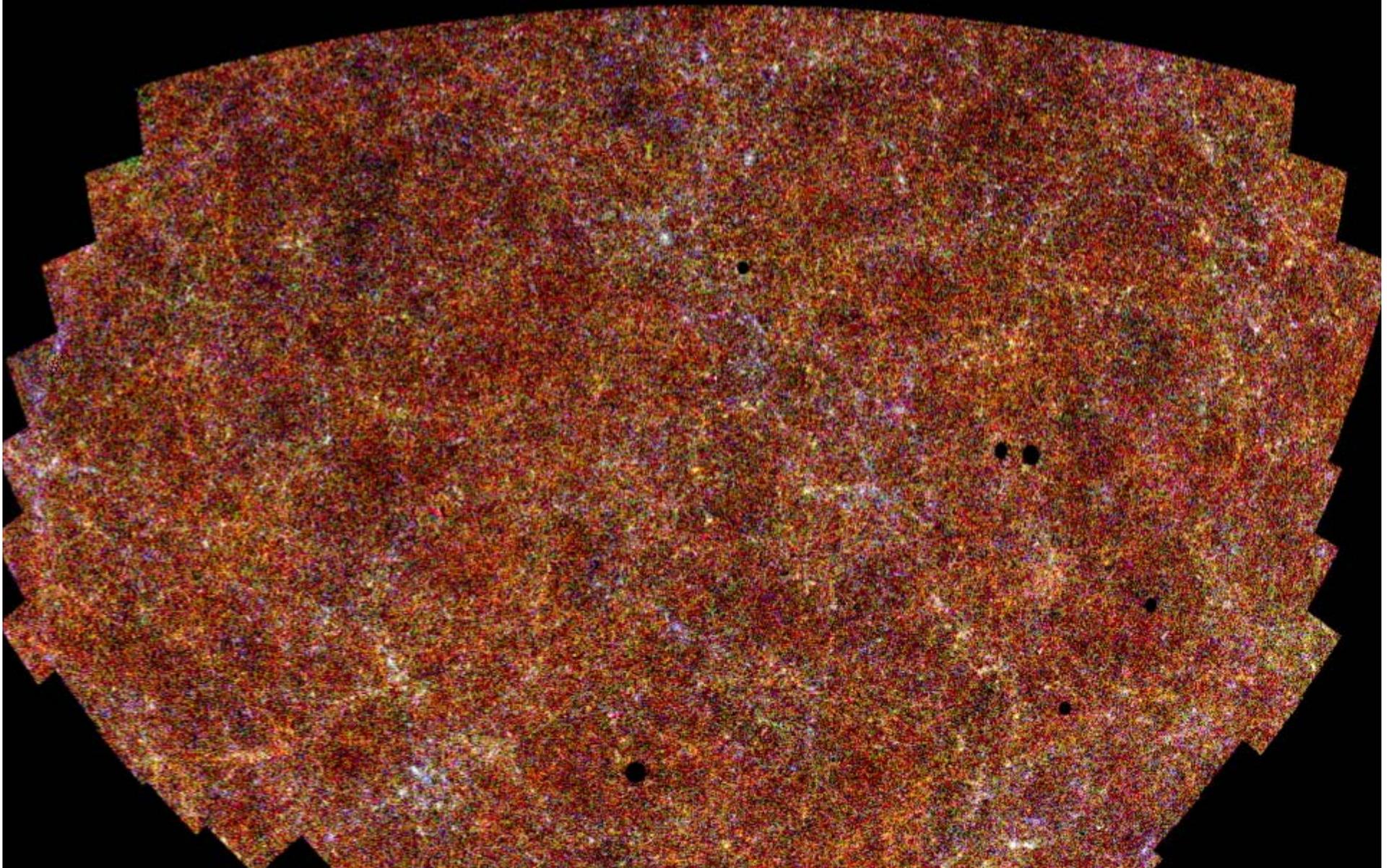
# A Estrutura em Grande Escala

Fazendo um “Mapa” do Universo

# Galáxias no HUDF



# Estrutura em Grande Escala



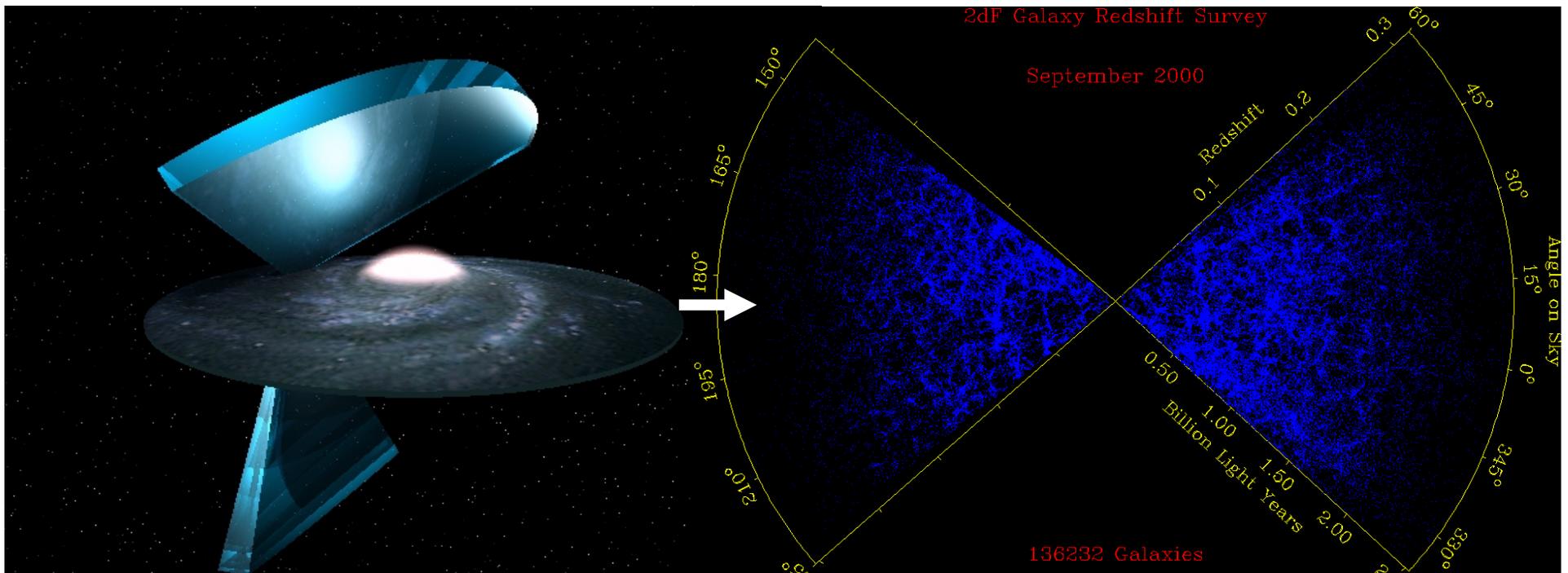
# Mapa 3D do Universo

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

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

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

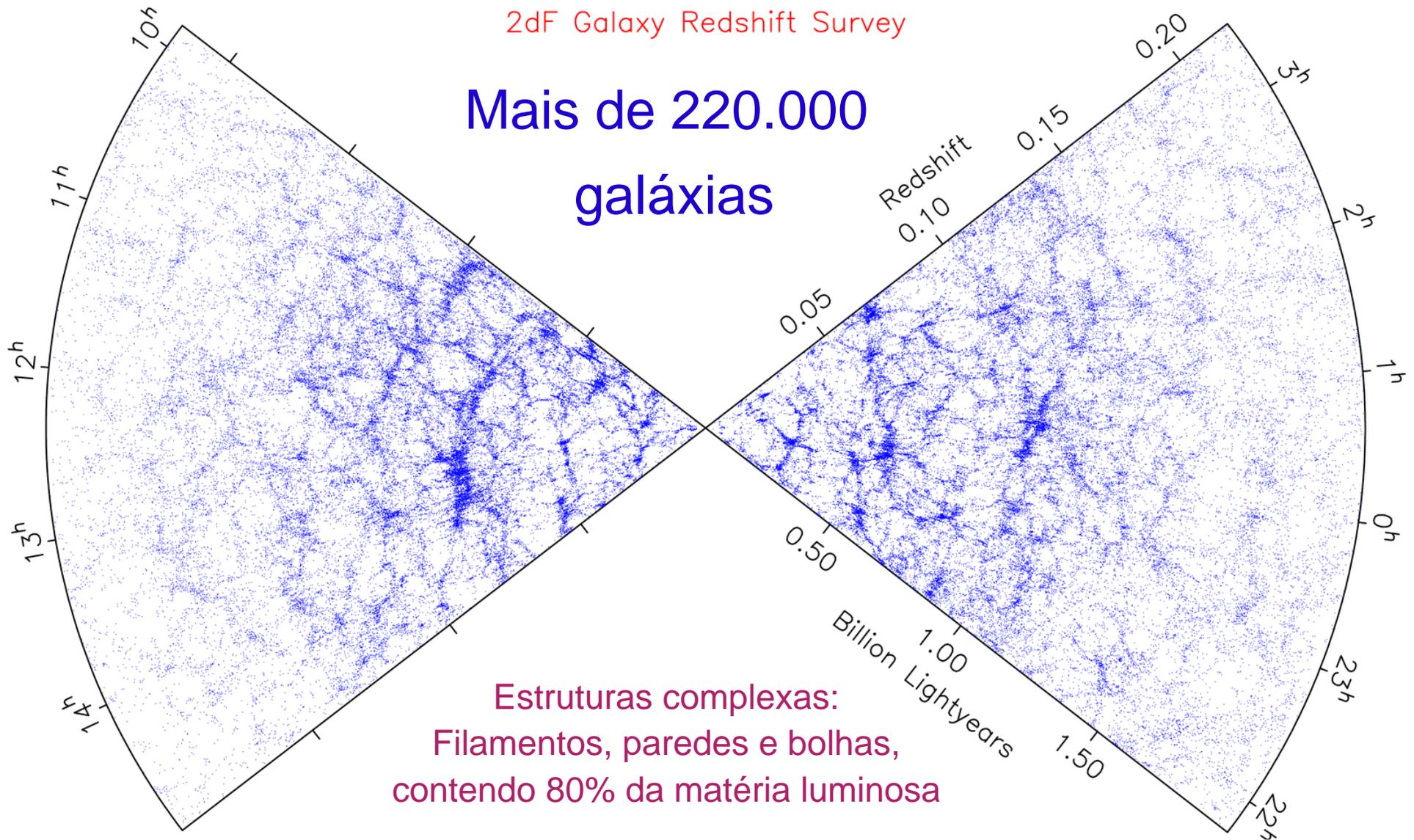
na realidade  $\mathbf{v} = \mathbf{v}_{\text{exp}} + \mathbf{v}_{\text{pec}}$



# Mapa do *Two Degree Field*

2dF Galaxy Redshift Survey

Mais de 220.000  
galáxias

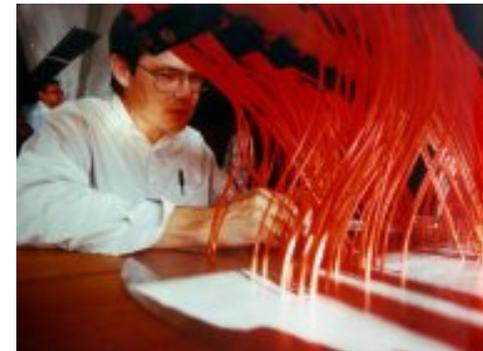
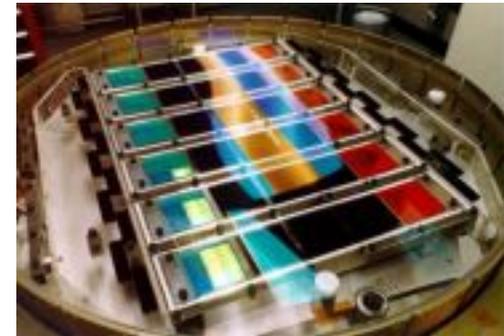


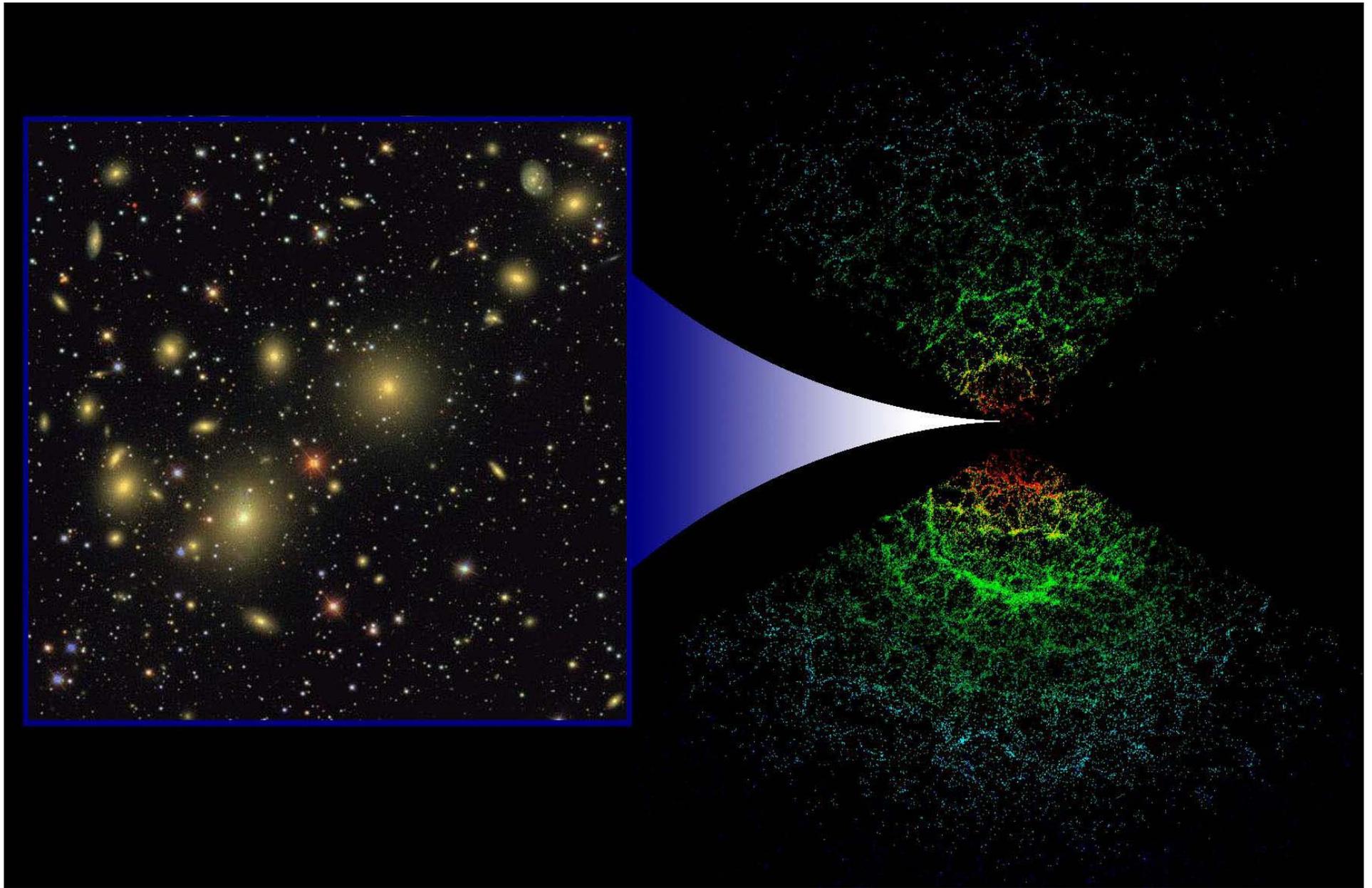
Estruturas complexas:  
Filamentos, paredes e bolhas,  
contendo 80% da matéria luminosa

# Fazendo um Mapa do Universo



## Sloan Digital Sky Survey





Imagens das galáxias (2D) → Posição incluindo a distância (3D)

# Mapa 3D

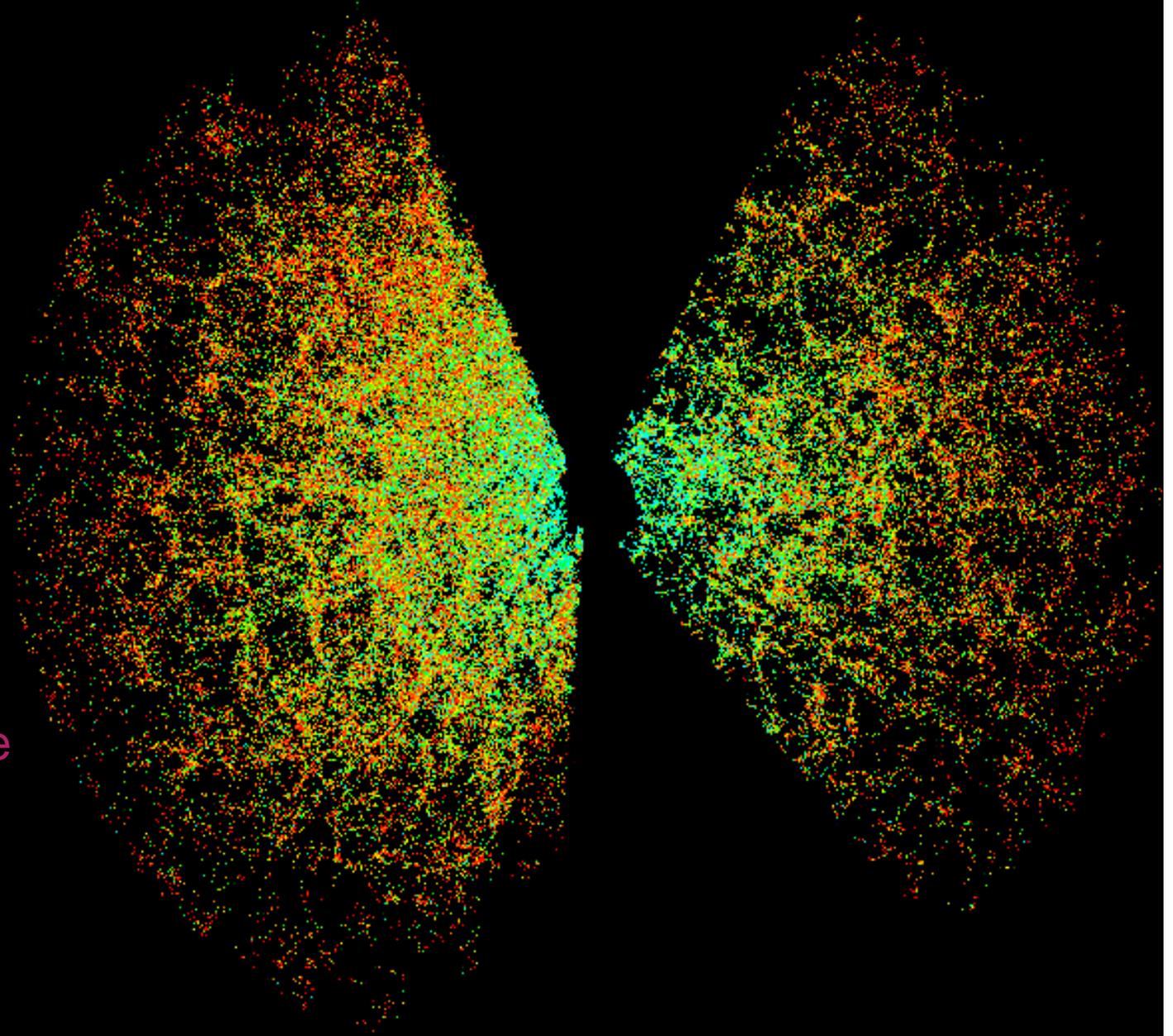
- 145.000 Galáxias

- $0.02 < z < 0.22$

- Cor intrínseca (g-r)

- Relação cor-luminosidade

- Relação cor-densidade  
“dedos de Deus”  
vermelhos

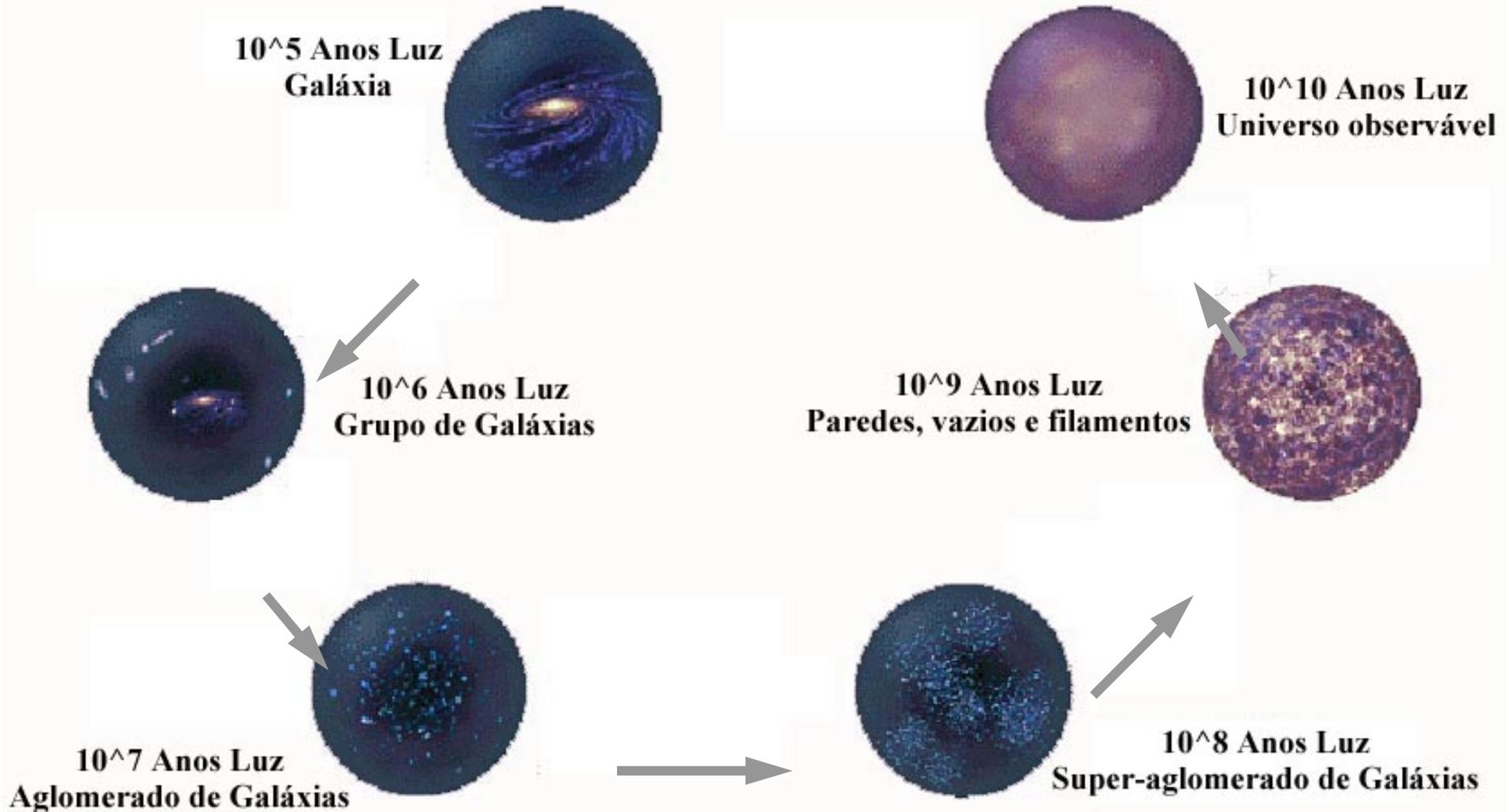


# O Sloan Digital Sky Survey

## 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)
- o Futuro: *Dark Energy Survey*, LSST

# As escalas no Universo



Existem cerca de 60 bilhões de galáxias  
no Universo observável!