Curso de Cosmologia 2013B

Aula 2

Martín Makler

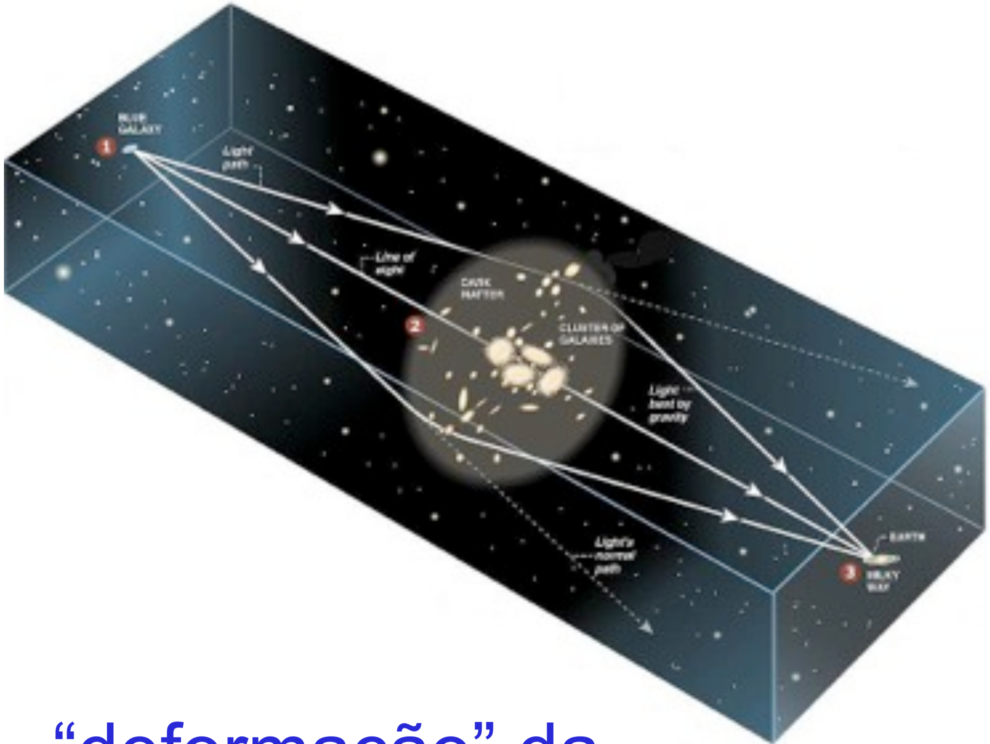
CBPF

ICRA CBPF

MCTI

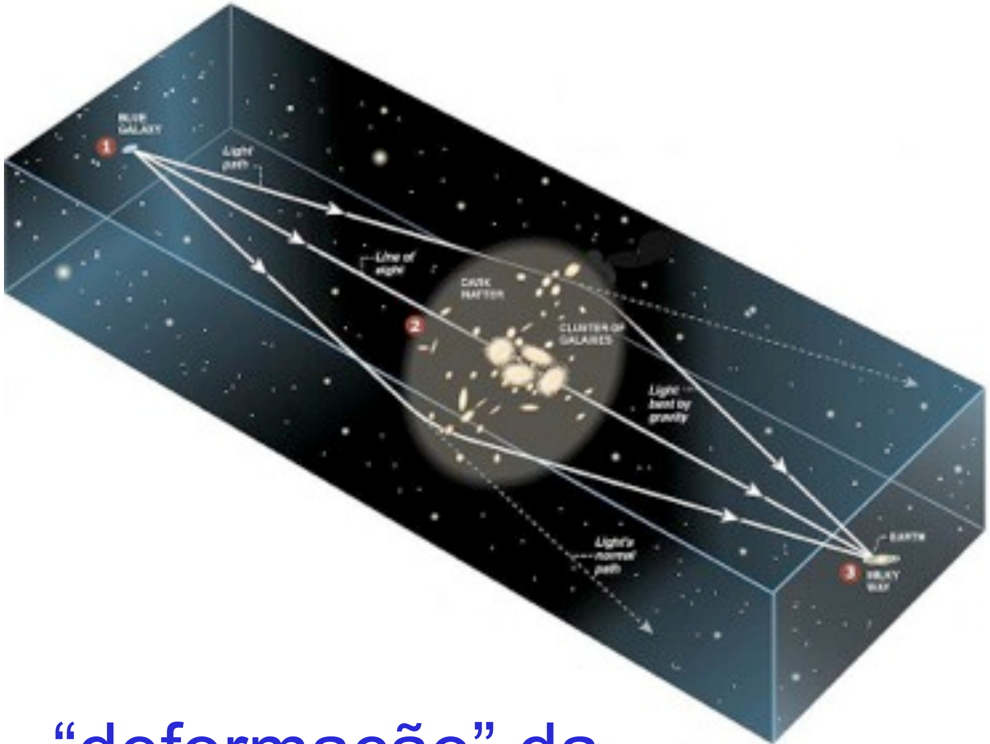
GOVERNO FEDERAL BRASIL PAÍS RICO É PAÍS SEM POBREZA

Lentes Gravitacionais

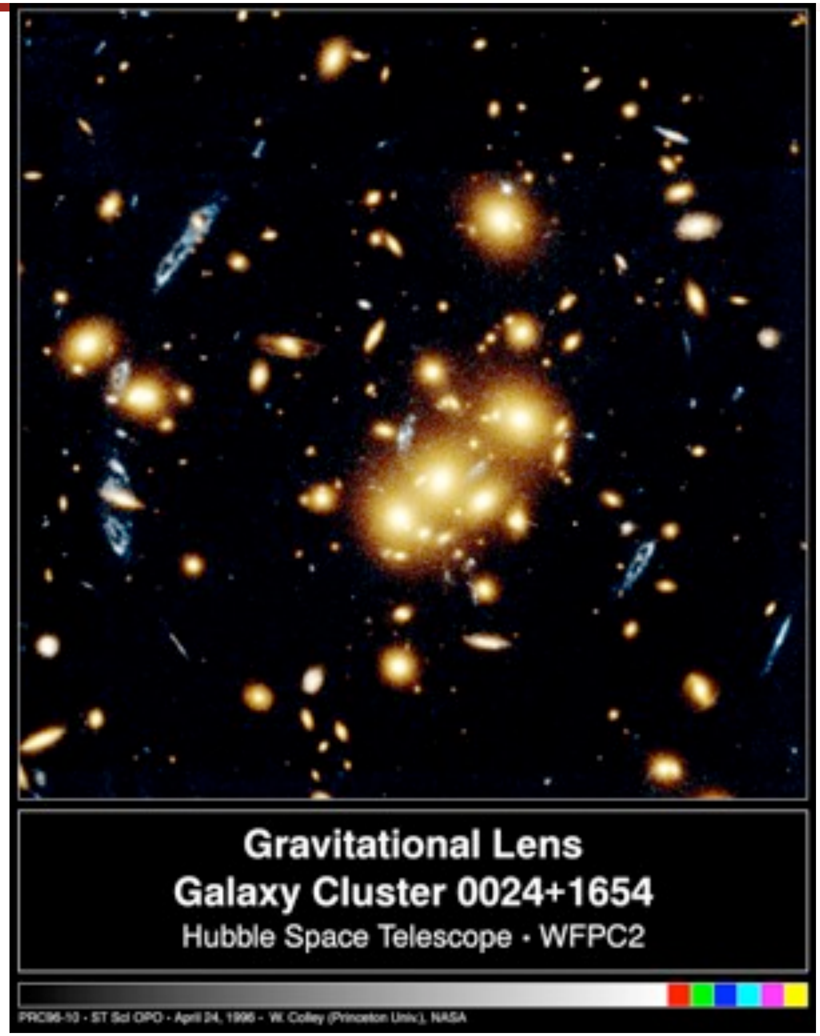


“deformação” da trajetória da luz pelo espaço-tempo curvo

Lentes Gravitacionais



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



Imagens múltiplas

Efeito fraco de lente

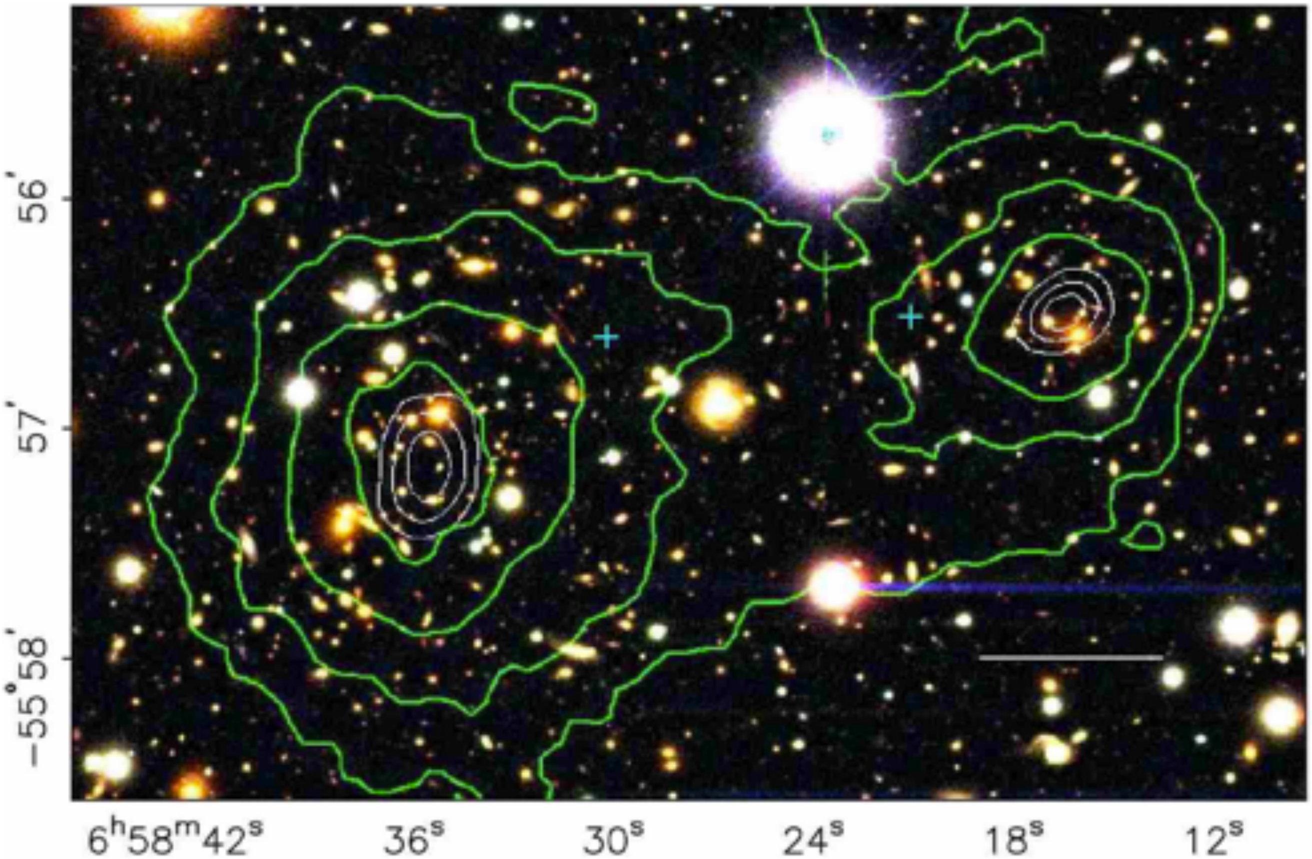
- Deformação (e magnificação) das imagens de galáxias de fundo
- Orientações na direção tangencial
- Efeito estatístico
- A matéria escura é menos concentrada

Efeito fraco de lente

- Deformação (e magnificação) das imagens de galáxias de fundo
- Orientações na direção tangencial
- Efeito estatístico
- A matéria escura é menos concentrada

O Aglomerado da bala

- Imagem ótica + sinal de lentes

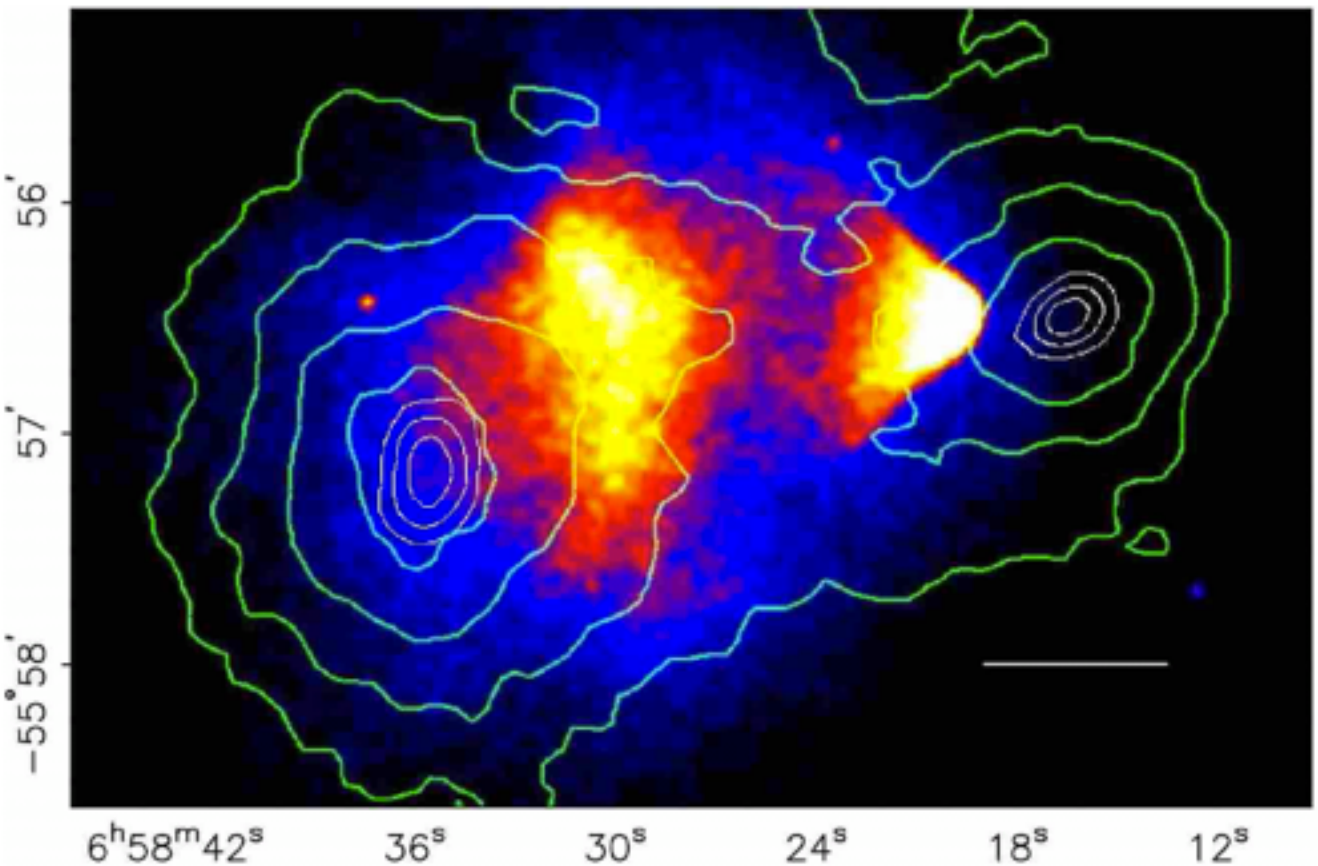


astro-ph/0608407

Reconstrução da massa usando o fenômeno de lente gravitacional

Evidência para a matéria escura

- Distribuição do gás (maior parte da matéria bariônica)



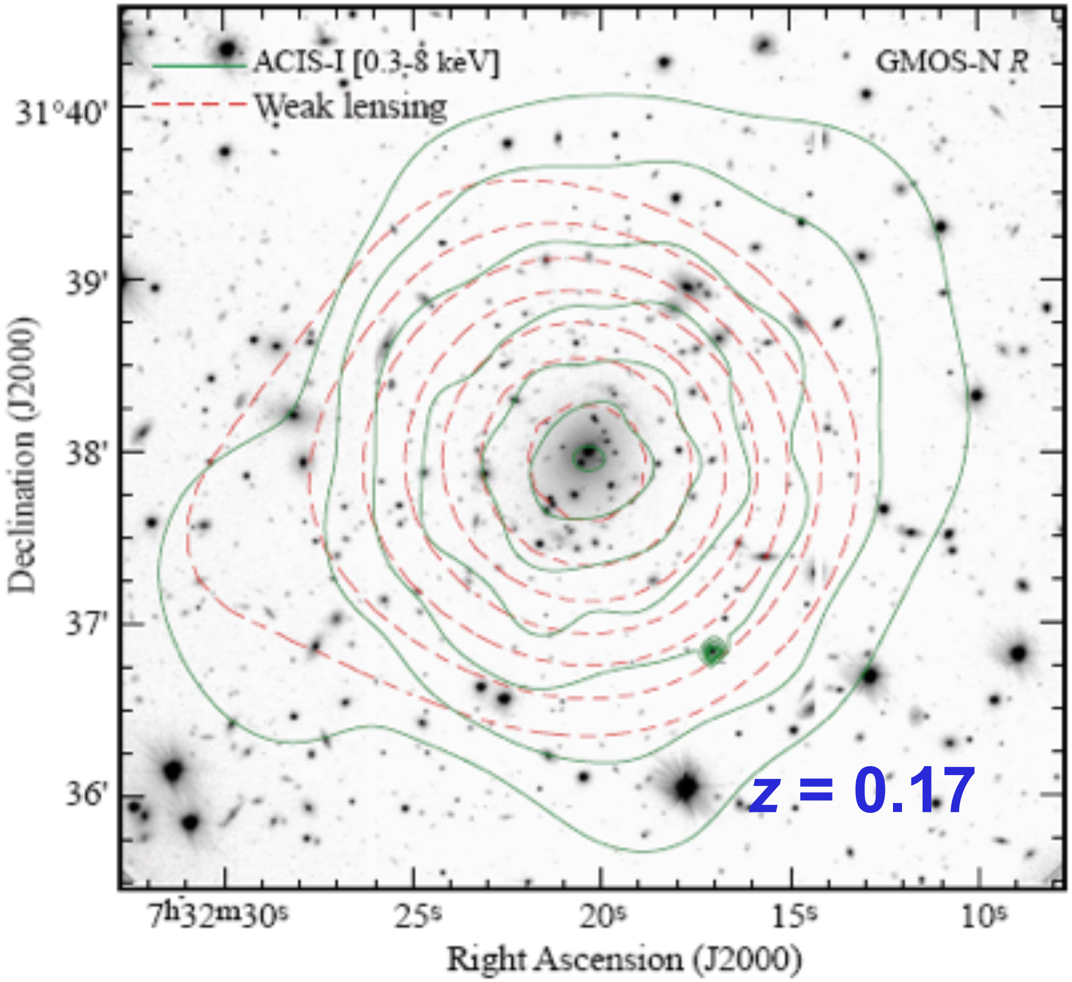
astro-ph/0608407

Desvio de 8σ nos centros das distribuições

Anel de matéria escura

- Óticos (HST) + lenteamento fraco

Comparação entre medidas da matéria escura em aglomerados

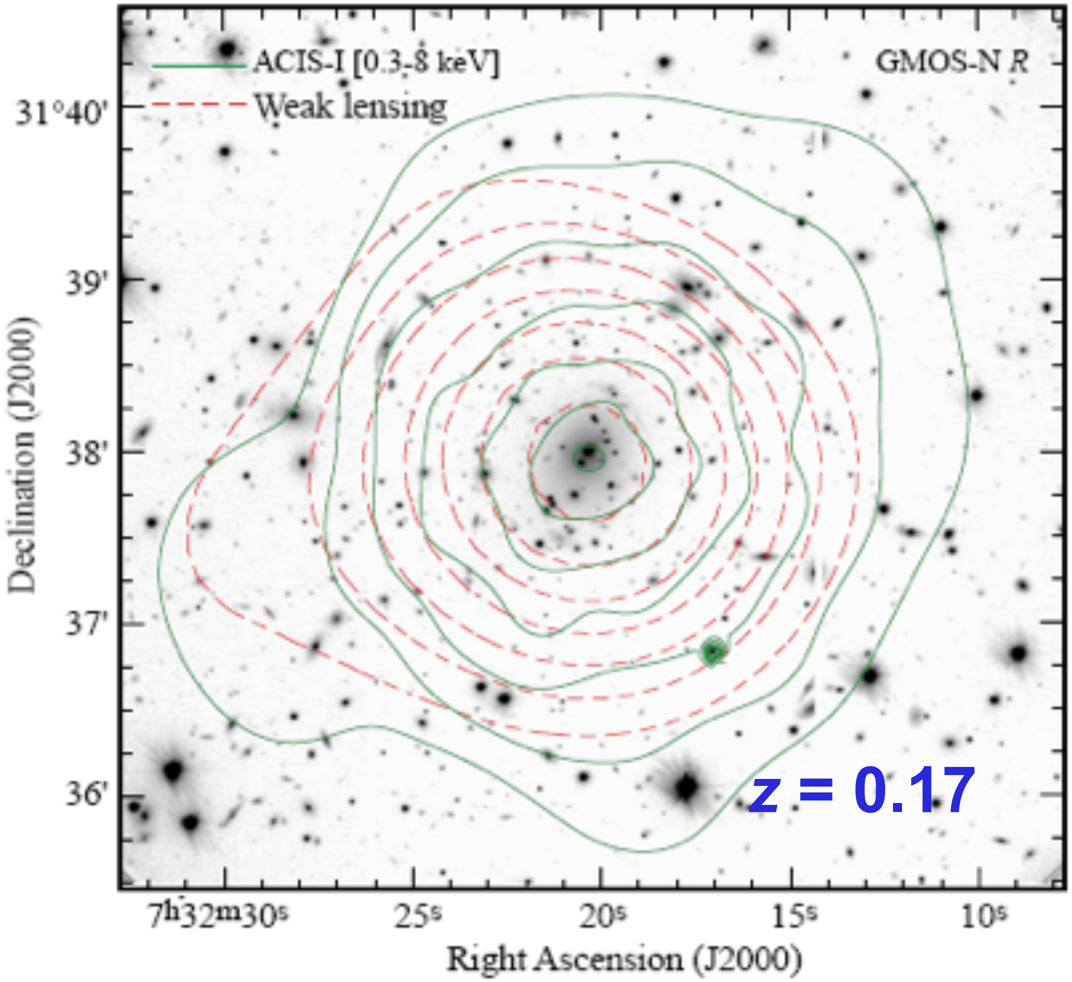


E. S. Cypriano, et al., astro-ph/0504036

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

➔ concordam em ~ 20%
(para aglomerados relaxados)

Comparação entre medidas da matéria escura em aglomerados



E. S. Cypriano, et al., astro-ph/0504036

- 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

- Curvas de rotação de galáxias

Estimativa simples:

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

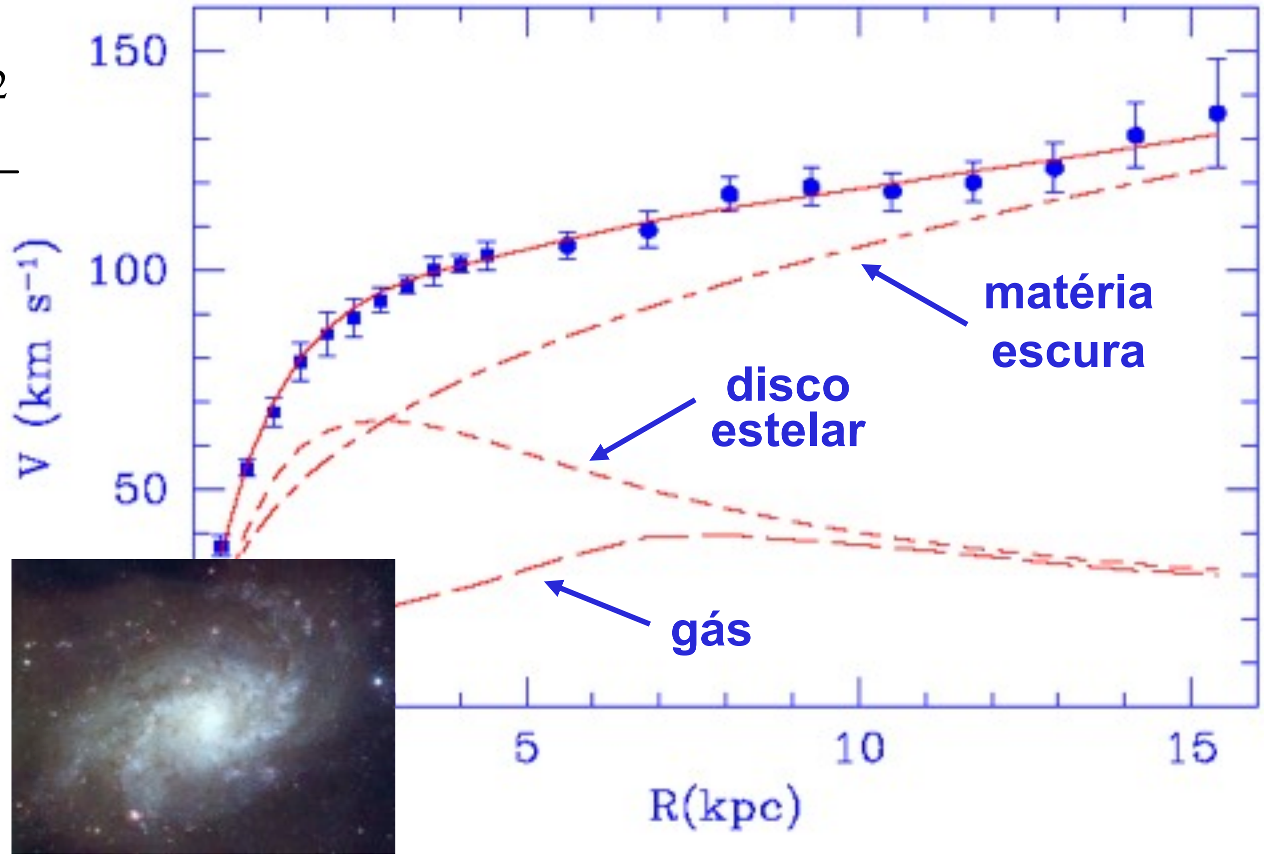
A Matéria Escura em Galáxias

- Curvas de rotação de galáxias

Estimativa simples:

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

M33 astro-ph/9909252



A Matéria Escura em Galáxias

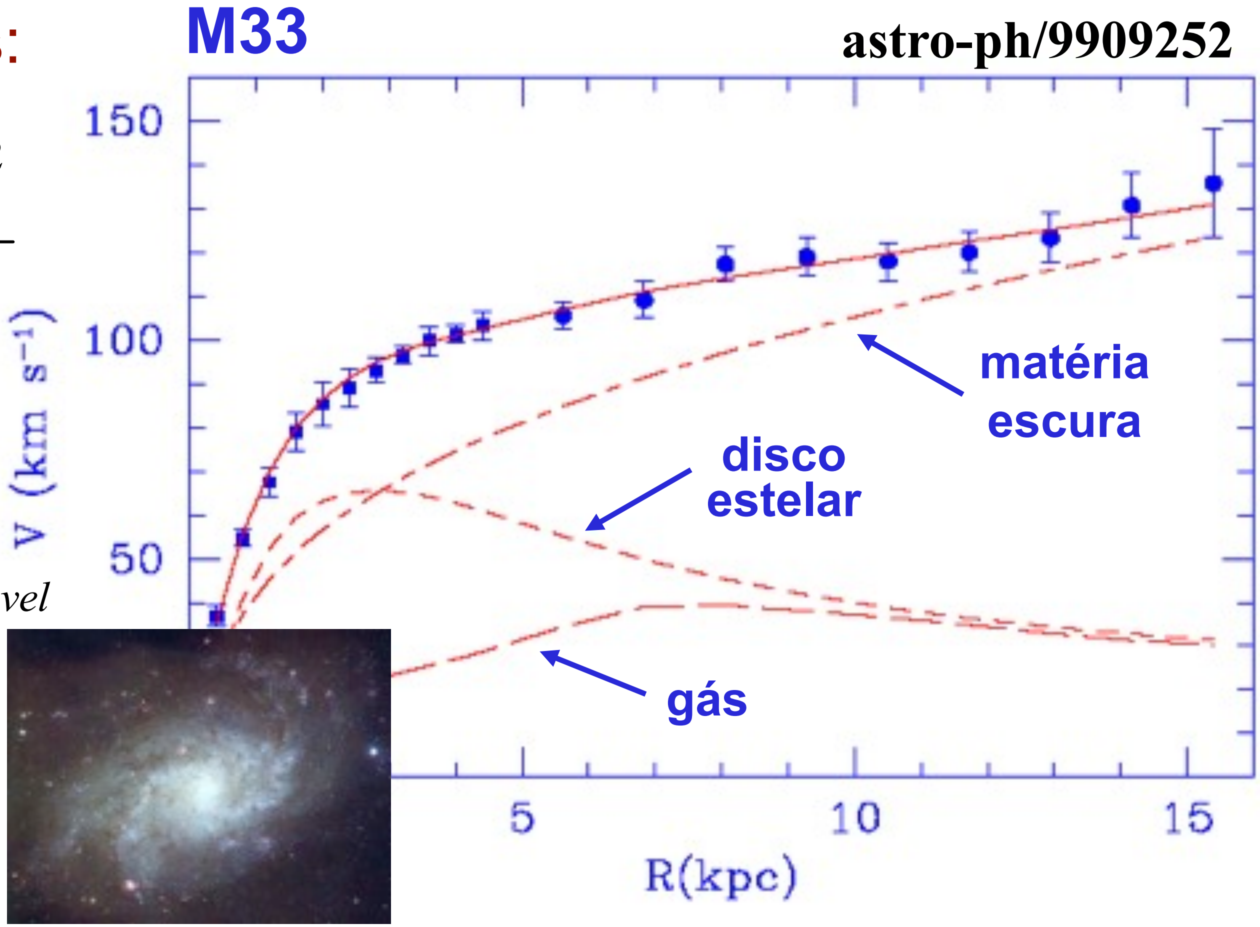
- Curvas de rotação de galáxias

Estimativa simples:

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

$$\Downarrow$$

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



A Matéria Escura em Galáxias

- Curvas de rotação de galáxias

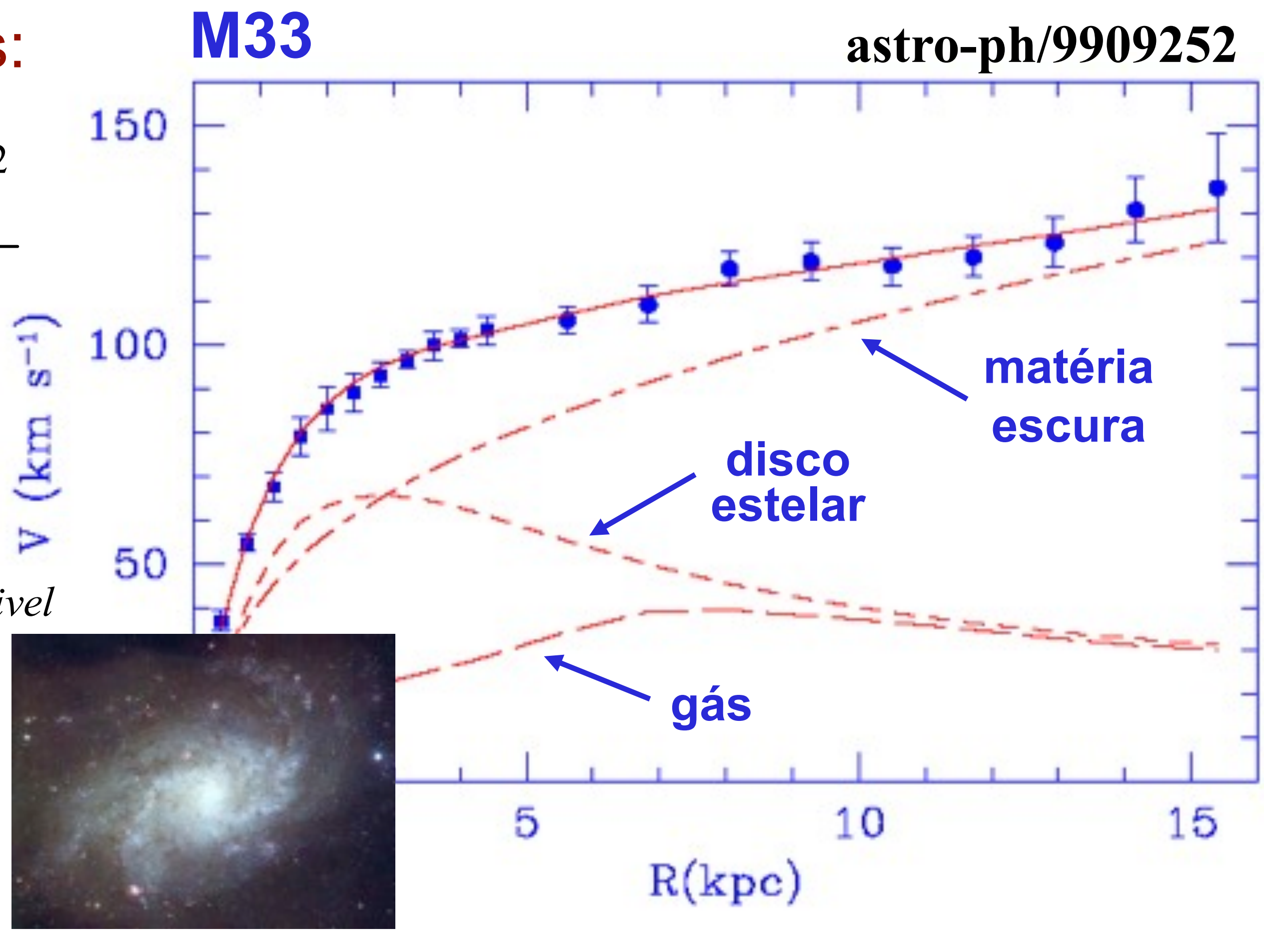
Estimativa simples:

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

$$\Downarrow$$

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

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!

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, sem reações nucleares)

- estruturas, *bullet*, nucleossíntese...

Onde está a matéria "ordinária"?

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

Matéria Escura no Universo

Evidências:

- Curvas de rotação de galáxias
- Movimentos de galáxias e ... escala)
- Fluxos de ...
-
-

Ha...

Nã...

...ações nucleares)

...ose...

Onde ... "ordinária"?

- Mat... ...vel (estrelas): 10%
- A maior parte da matéria bariônica é "escura" (gás, planetas, BN)

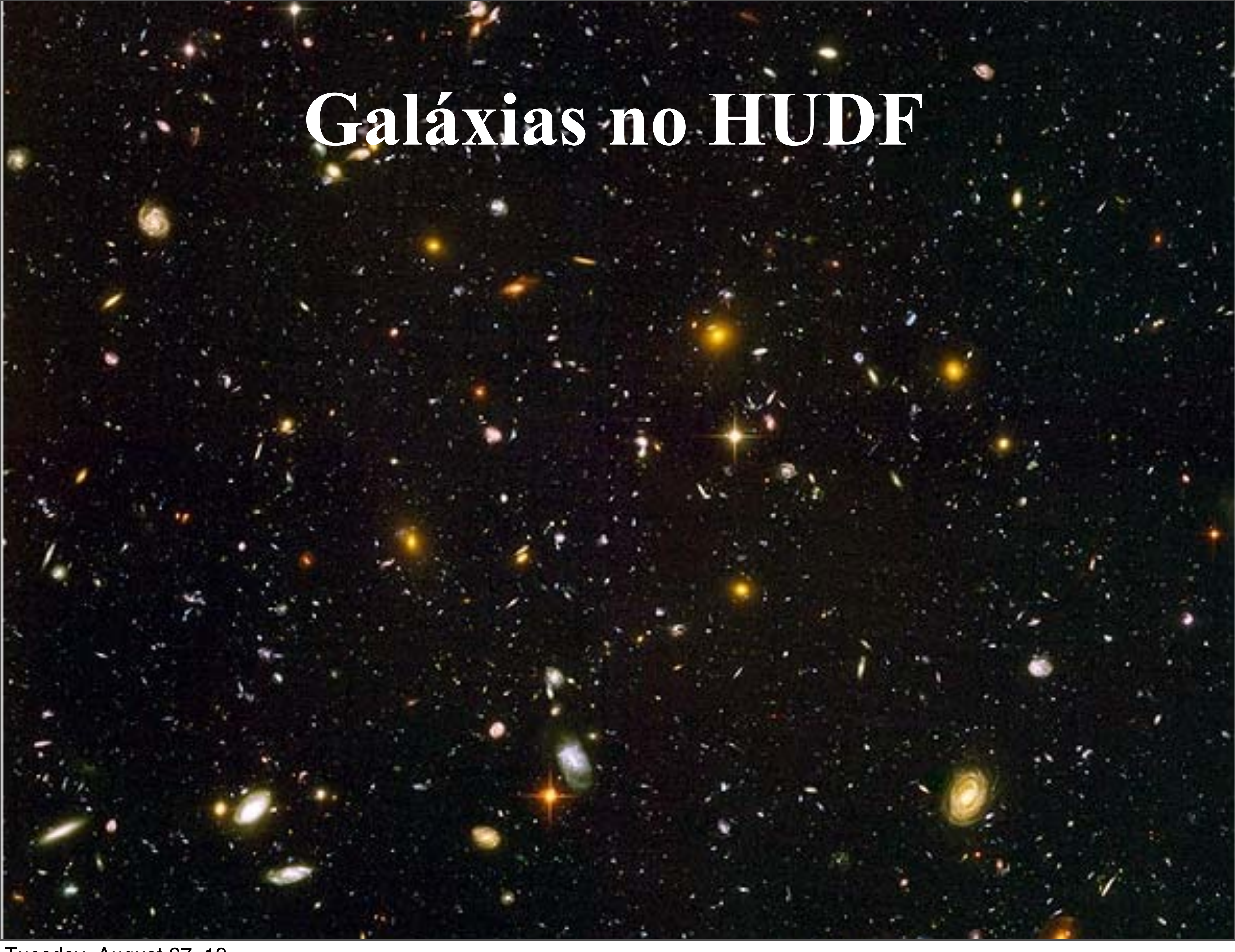
A matéria escura é a componente - que se aglomera - dominante da densidade de massa do Universo

O universo é mais homogêneo do que parece olhando apenas as galáxias

A Estrutura em Grande Escala

Fazendo um “Mapa” do Universo

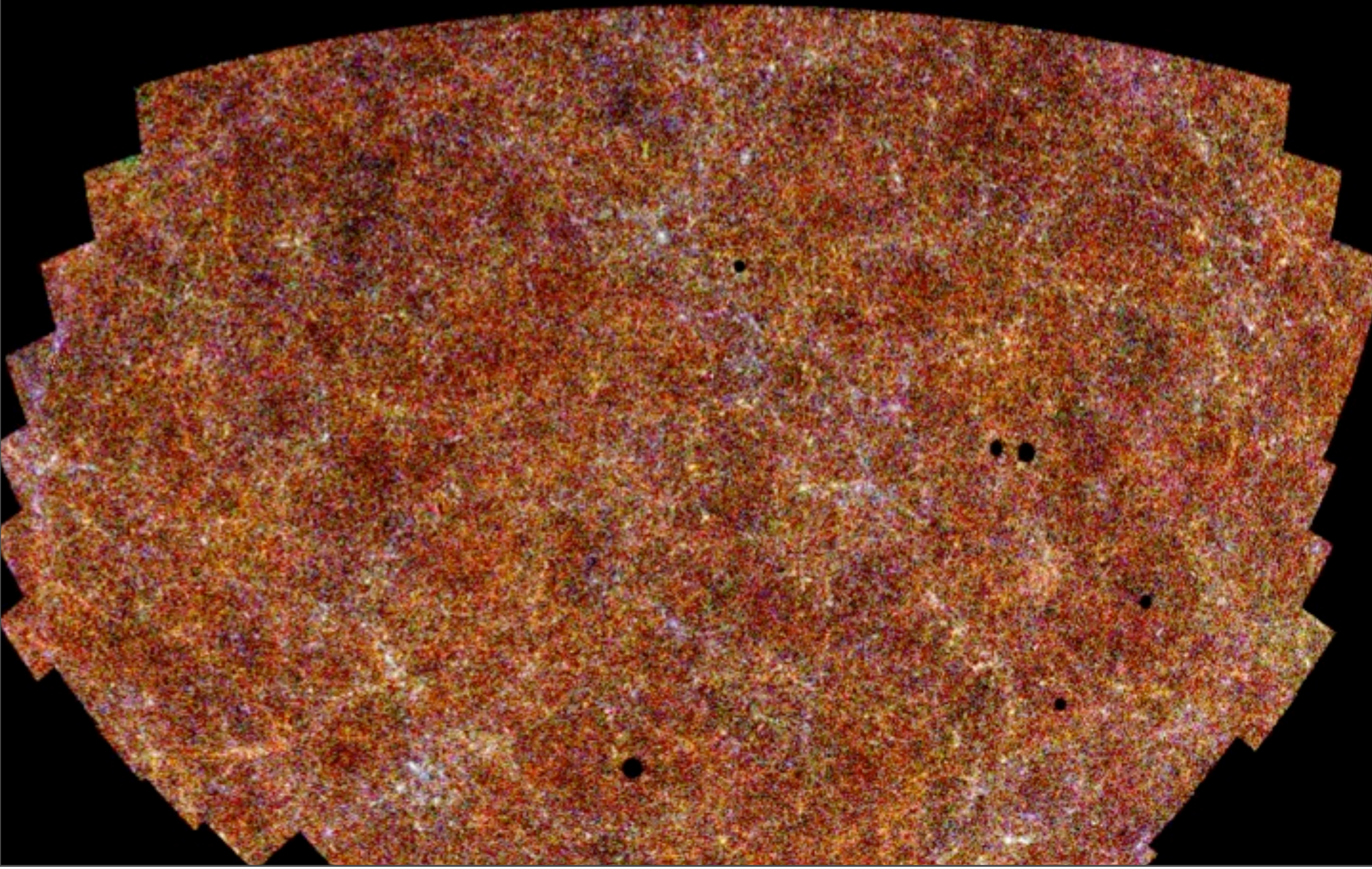
Galáxias no HUDF



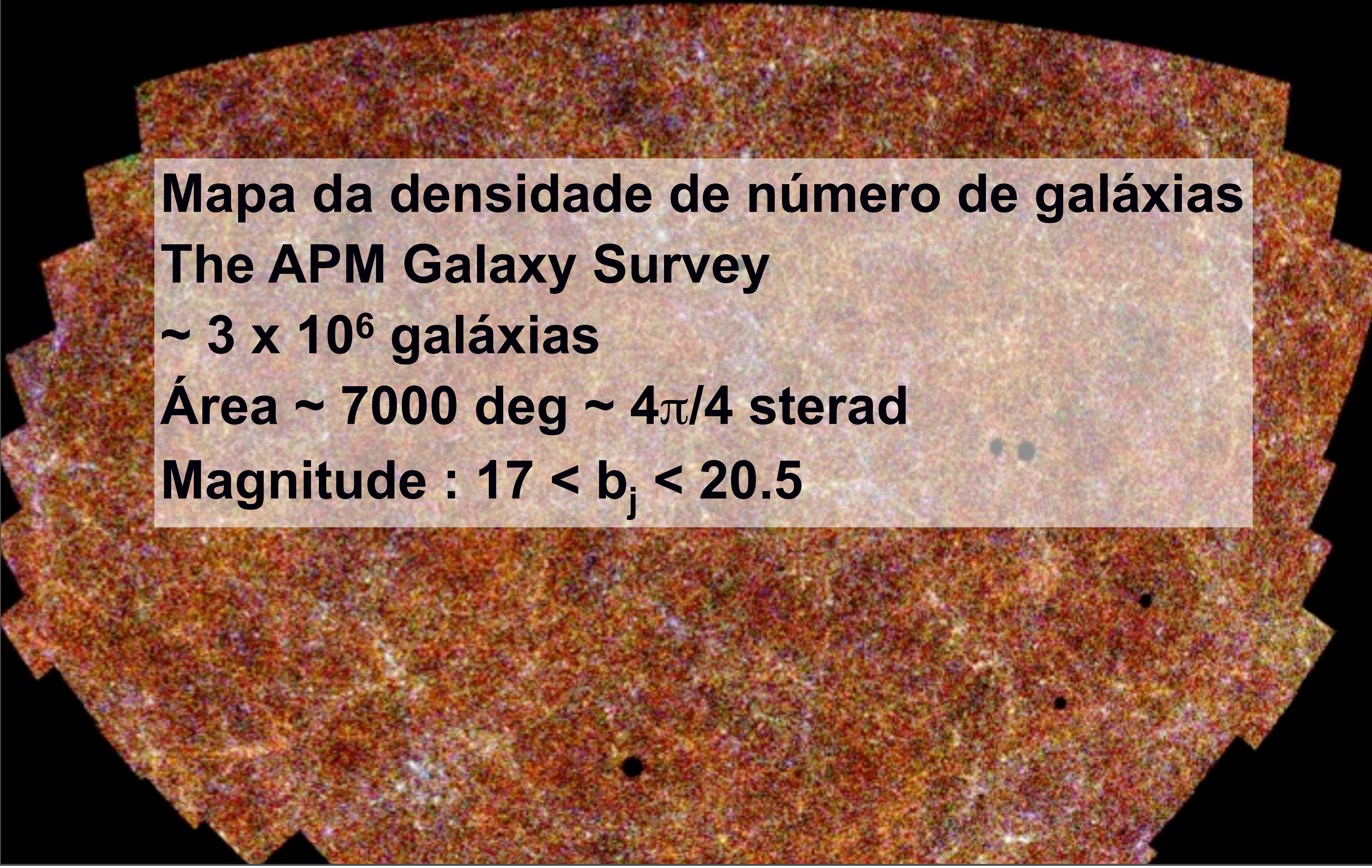
Galáxias no HUDF

área ~ 11 arcmin^2
Magnitude limite ~ 27
~10.000 galáxias

Estrutura em Grande Escala



Estrutura em Grande Escala



Mapa da densidade de número de galáxias

The APM Galaxy Survey

~ 3 x 10^6 galáxias

Área ~ 7000 deg ~ $4\pi/4$ sterad

Magnitude : $17 < b_j < 20.5$

Mapa 3D do Universo

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

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

Mapa 3D do Universo

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

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

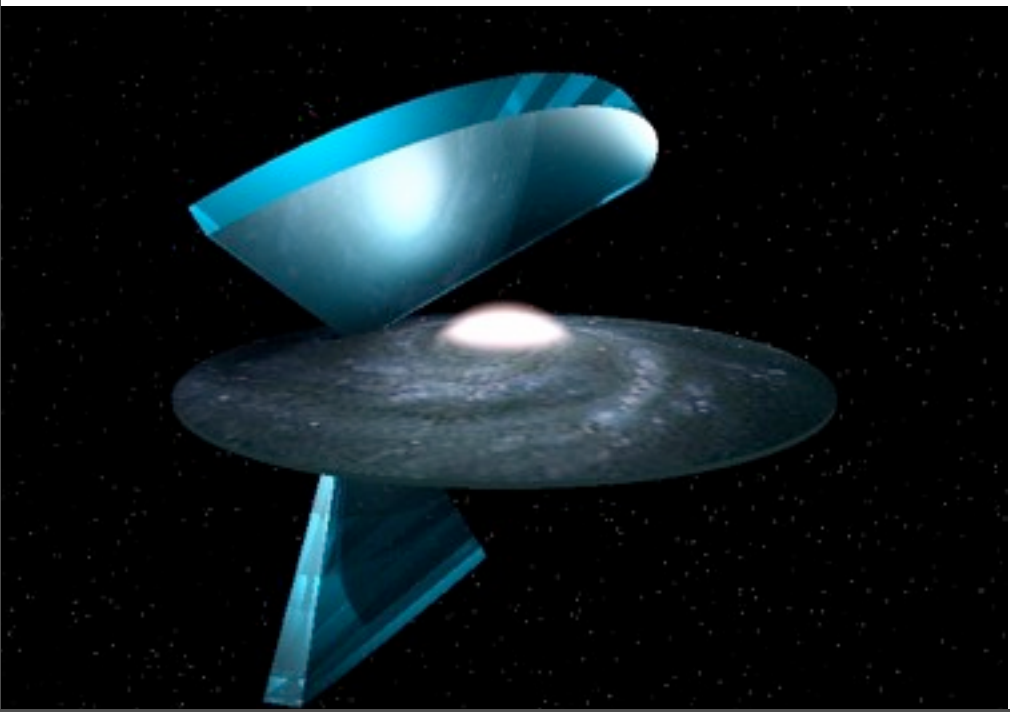
$$\boxed{d \approx H_0^{-1} cz}$$

Mapa 3D do Universo

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

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

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

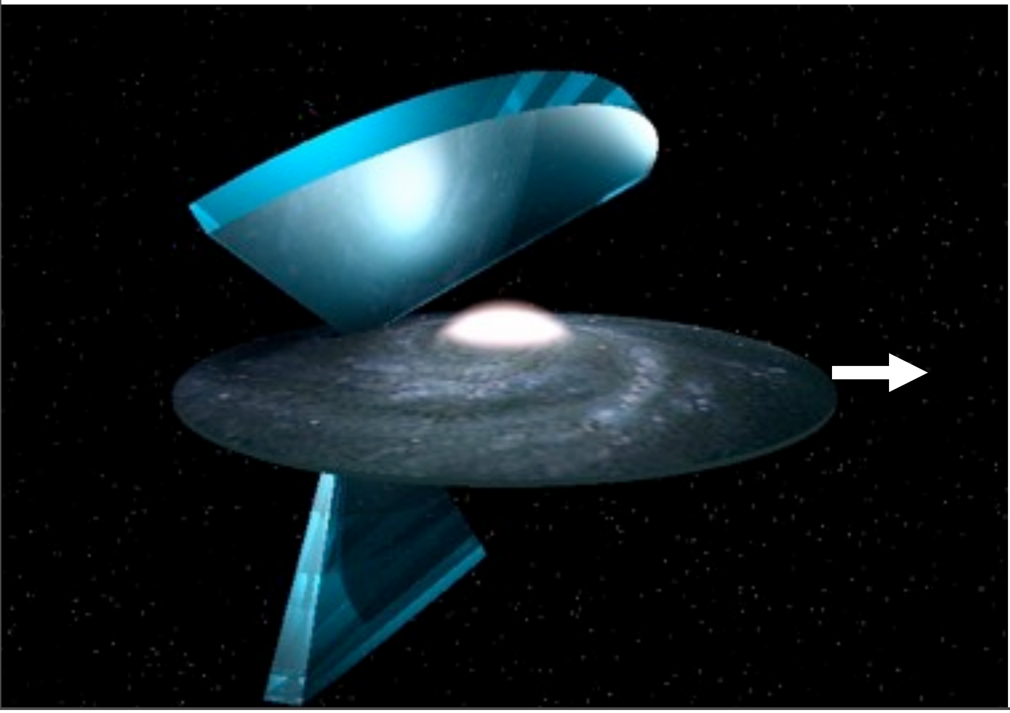


Mapa 3D do Universo

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

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

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

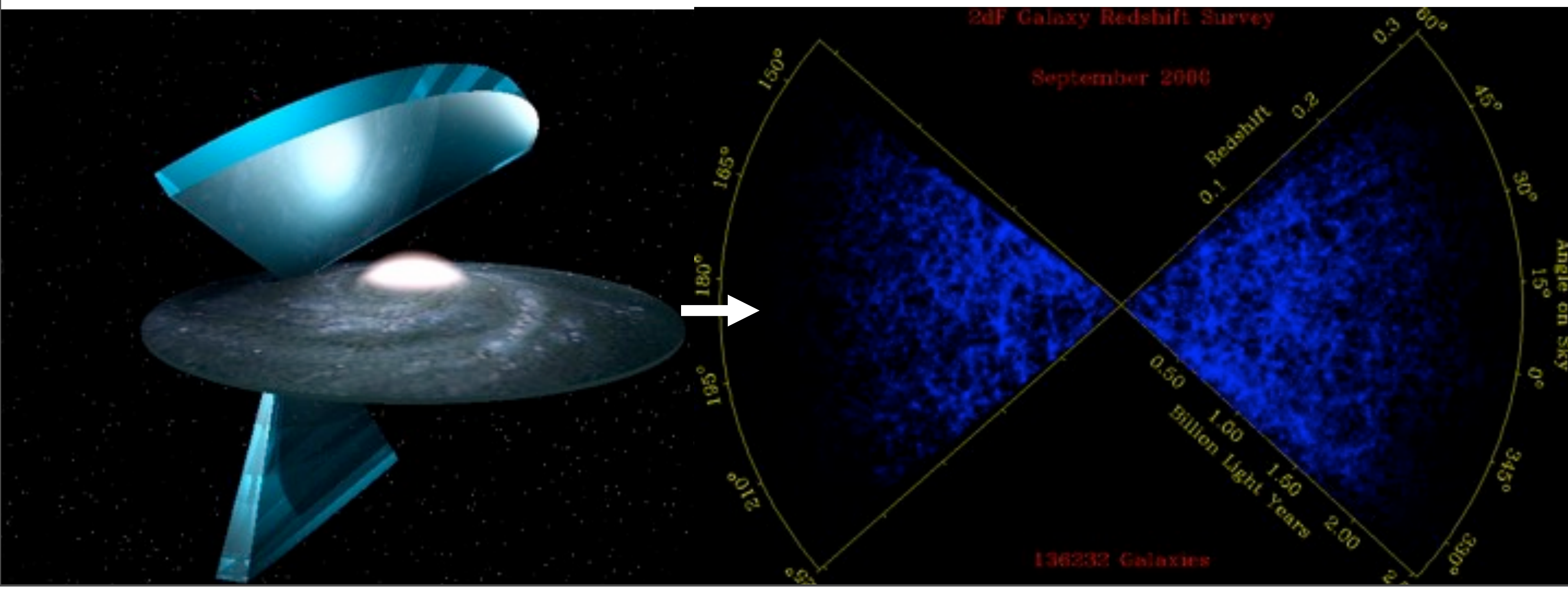


Mapa 3D do Universo

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

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

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



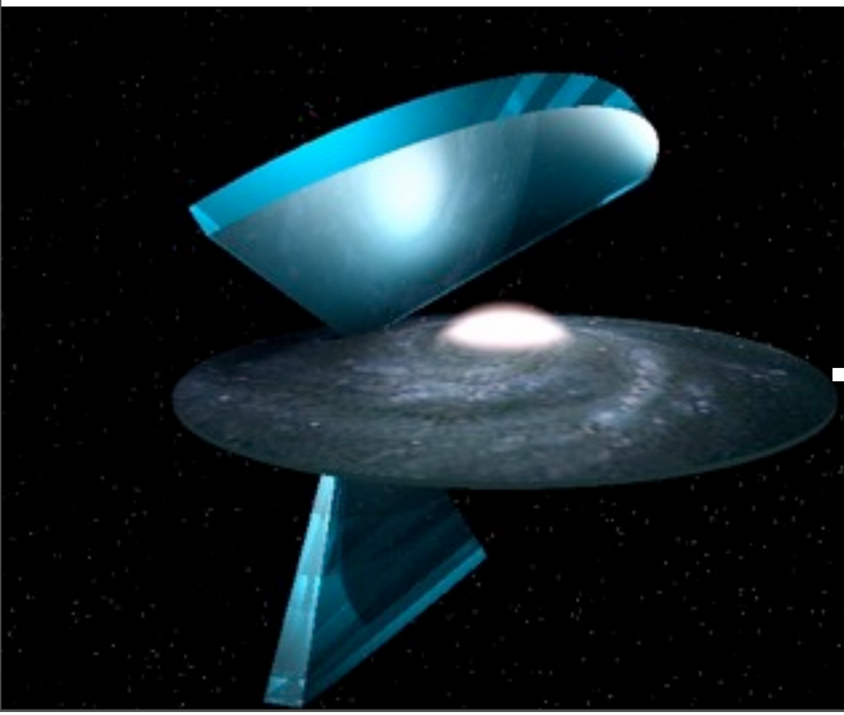
Mapa 3D do Universo

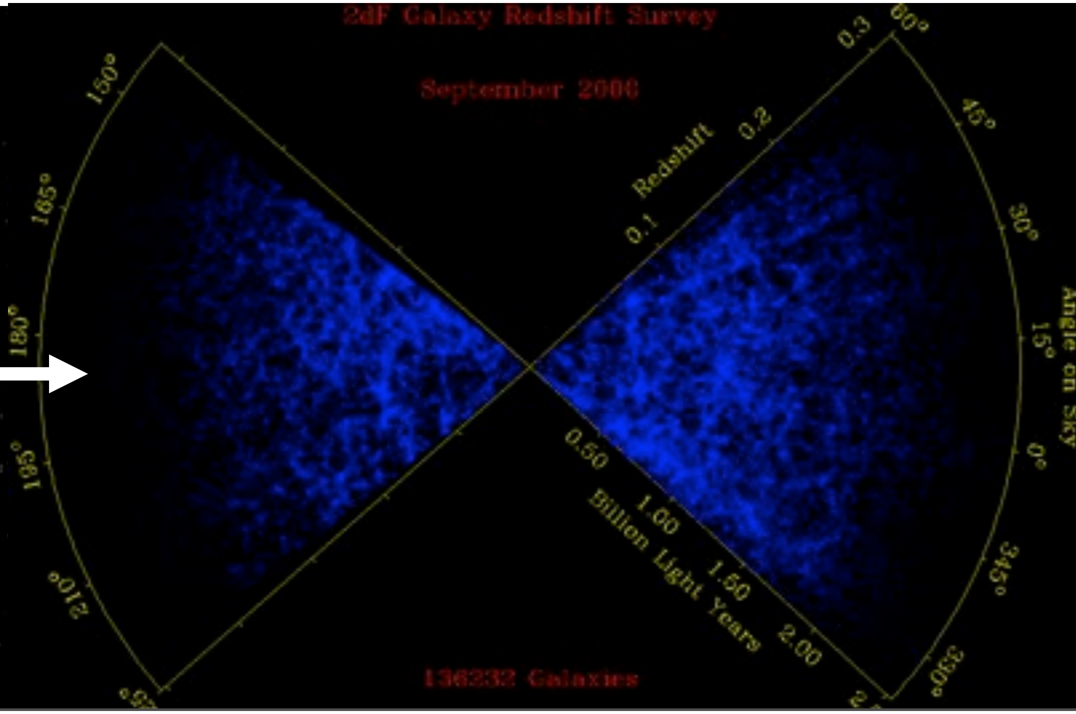
Lei de Hubble (de Sitter) $v \approx H_0 d$

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

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

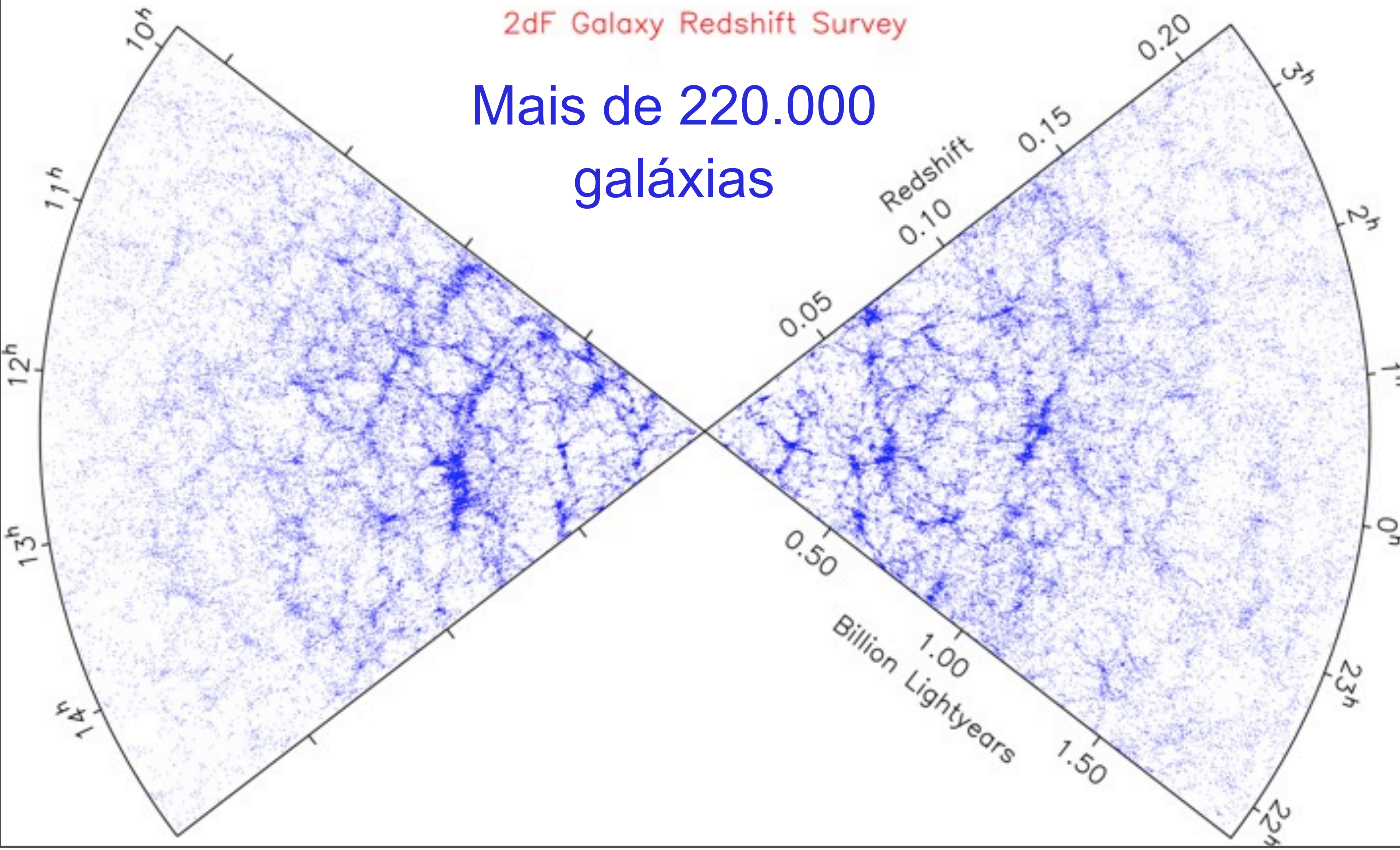
na realidade $v = v_{exp} + v_{pec}$



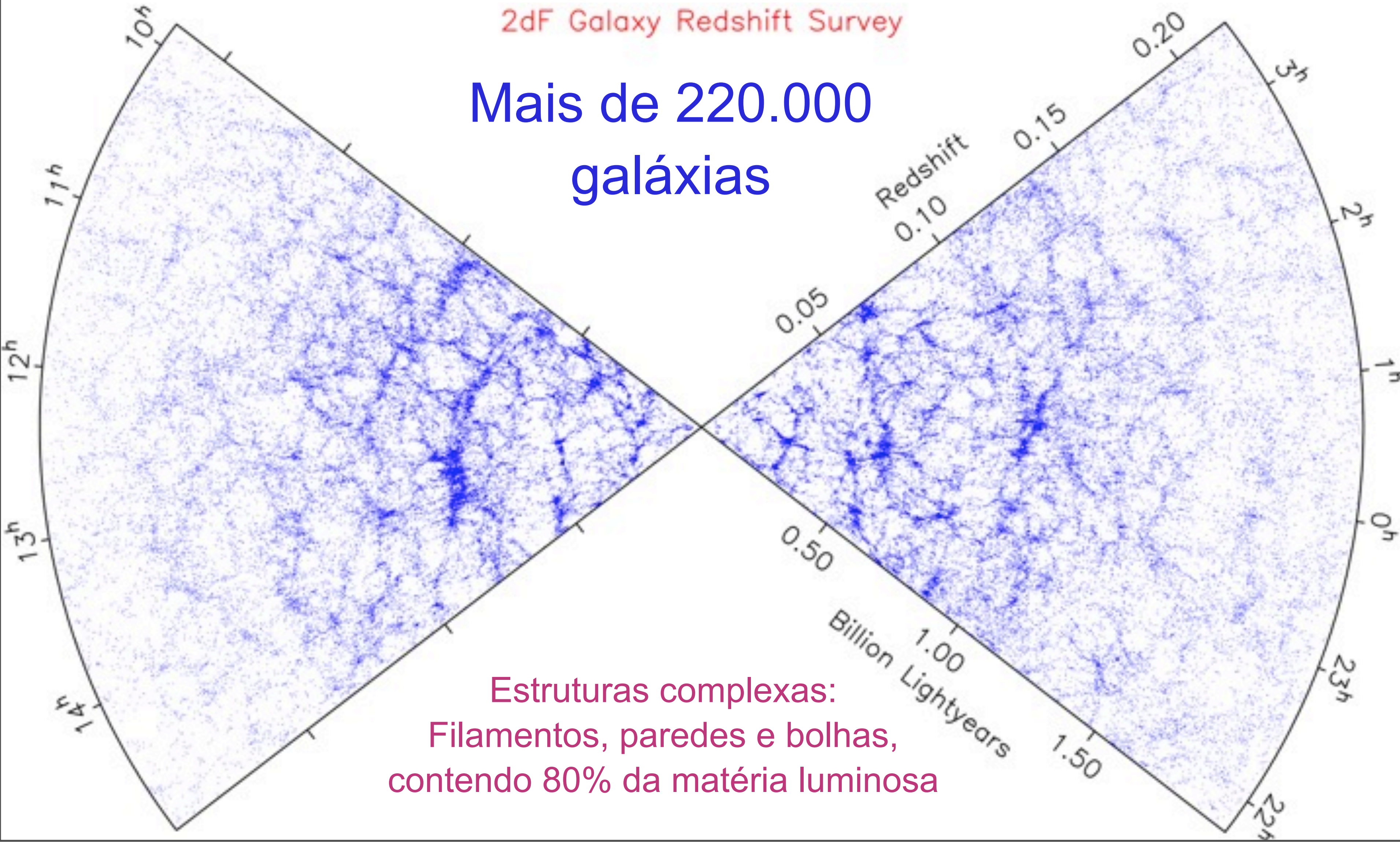


Mapa do *Two Degree Field*

Mais de 220.000 galáxias



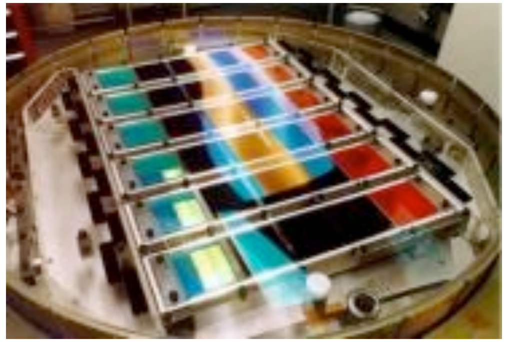
Mapa do *Two Degree Field*



Fazendo um Mapa do Universo

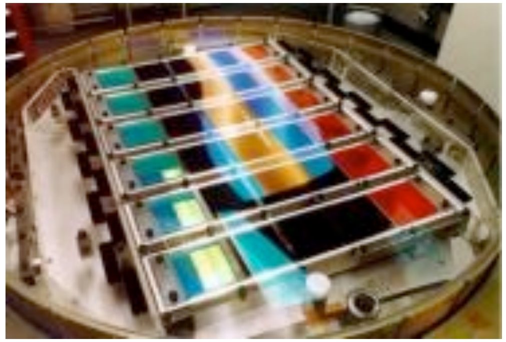
SDSS

Sloan Digital Sky Survey



Fazendo um Mapa do Universo

Sloan Digital Sky Survey

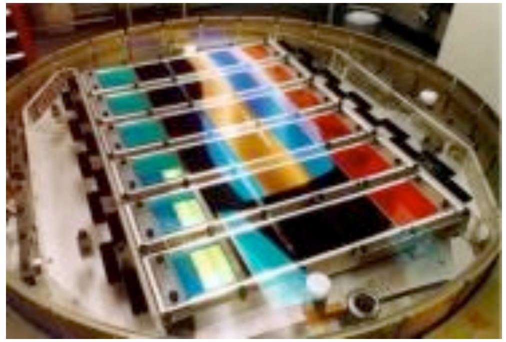


Fibras óticas e CCDs: prêmios Nobel de 2009

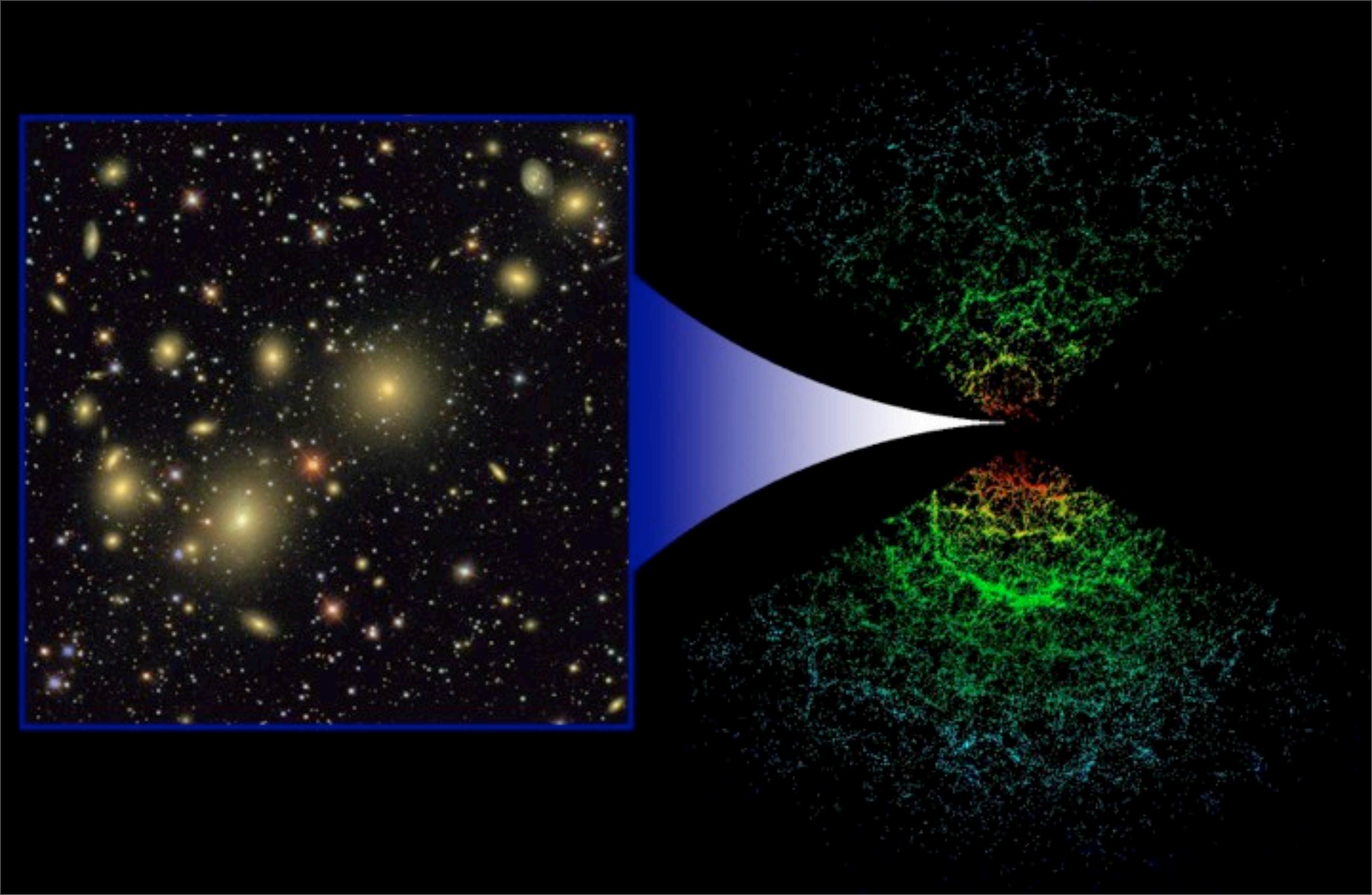
Fazendo um Mapa do Universo

SDSS

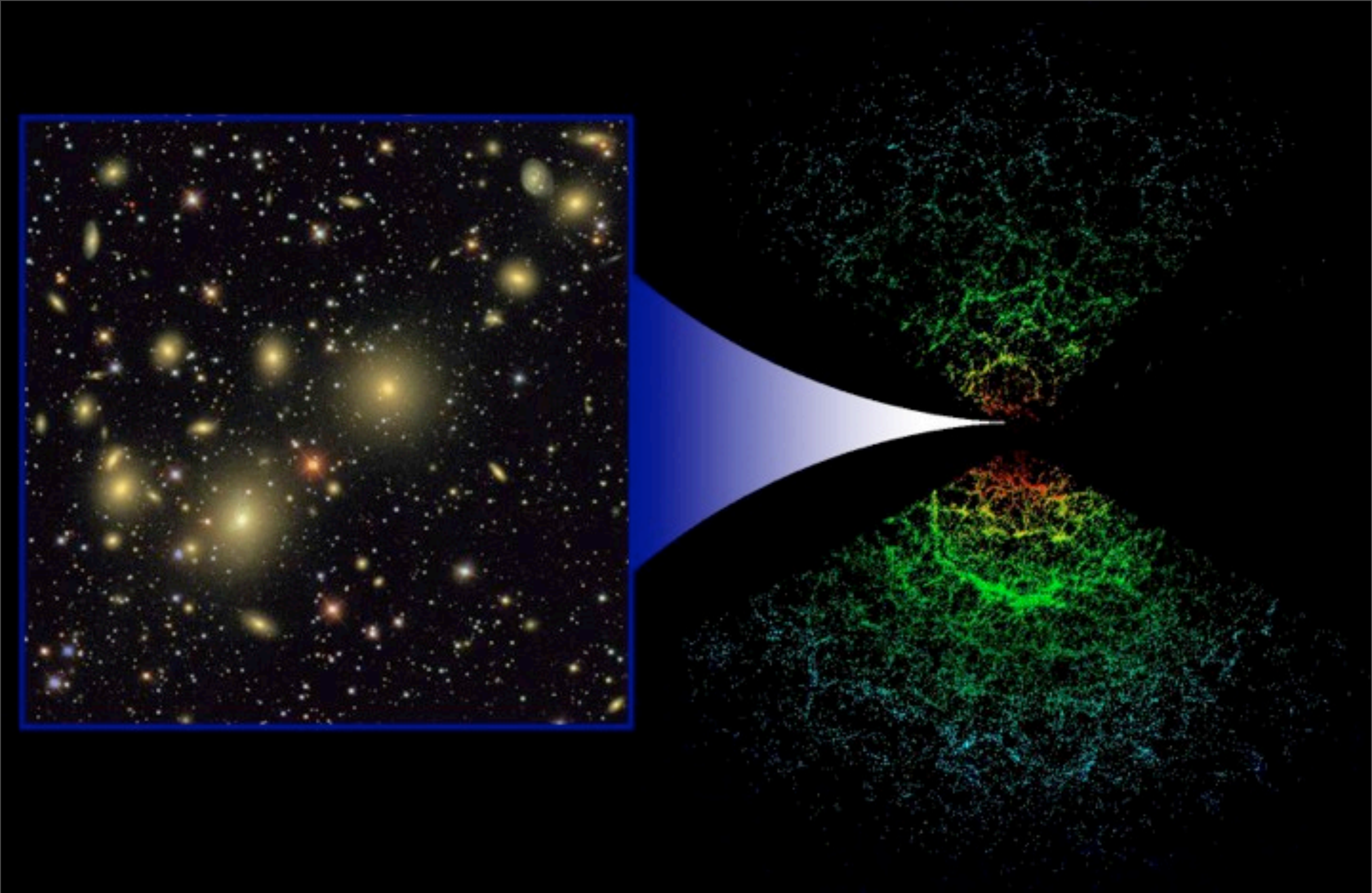
Sloan Digital Sky Survey



Fibras óticas e CCDs: prêmios Nobel de 2009



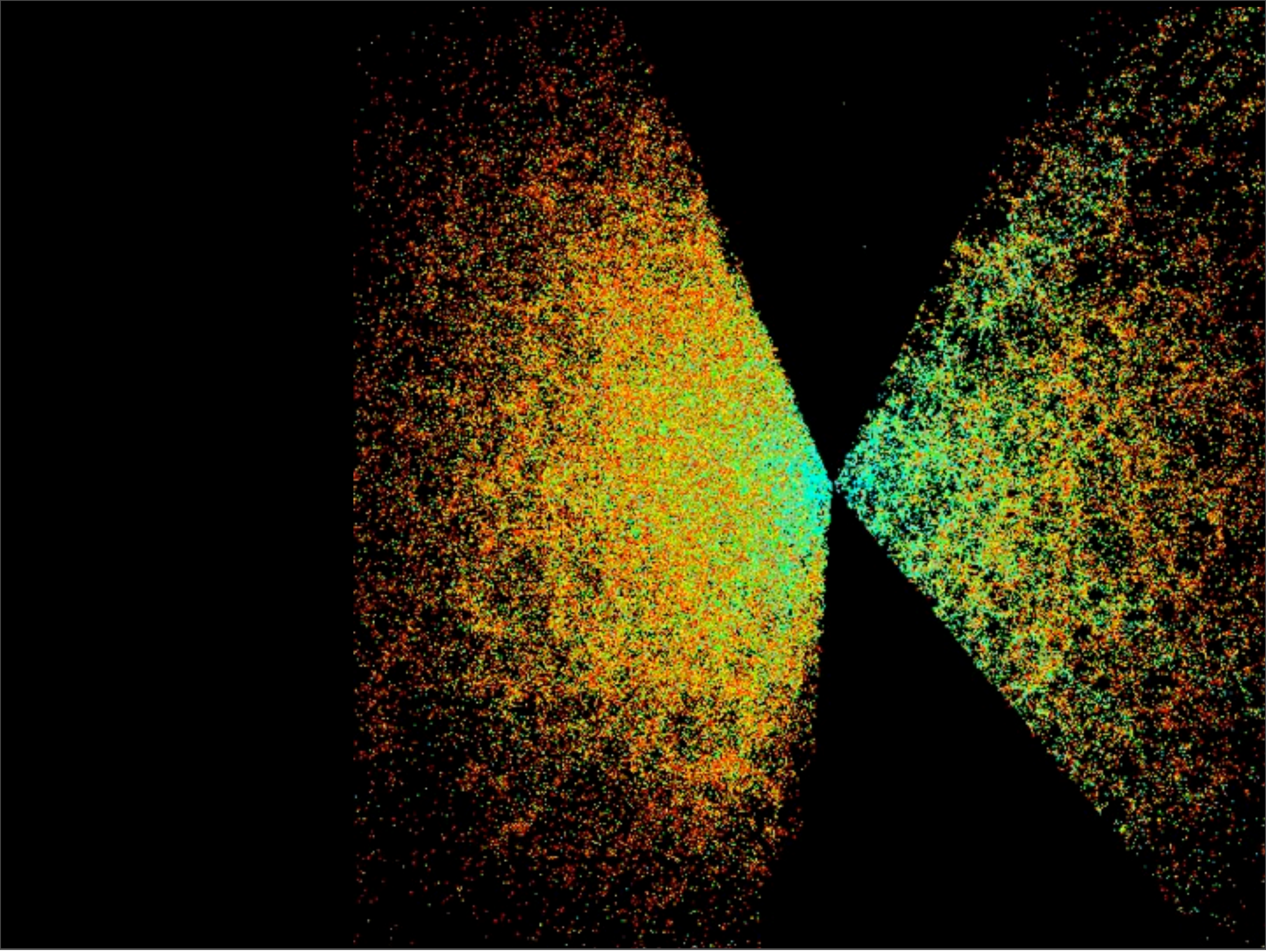
Imagens das galáxias (2D) $\rightarrow$ Posição incluindo a "distância" (3D)



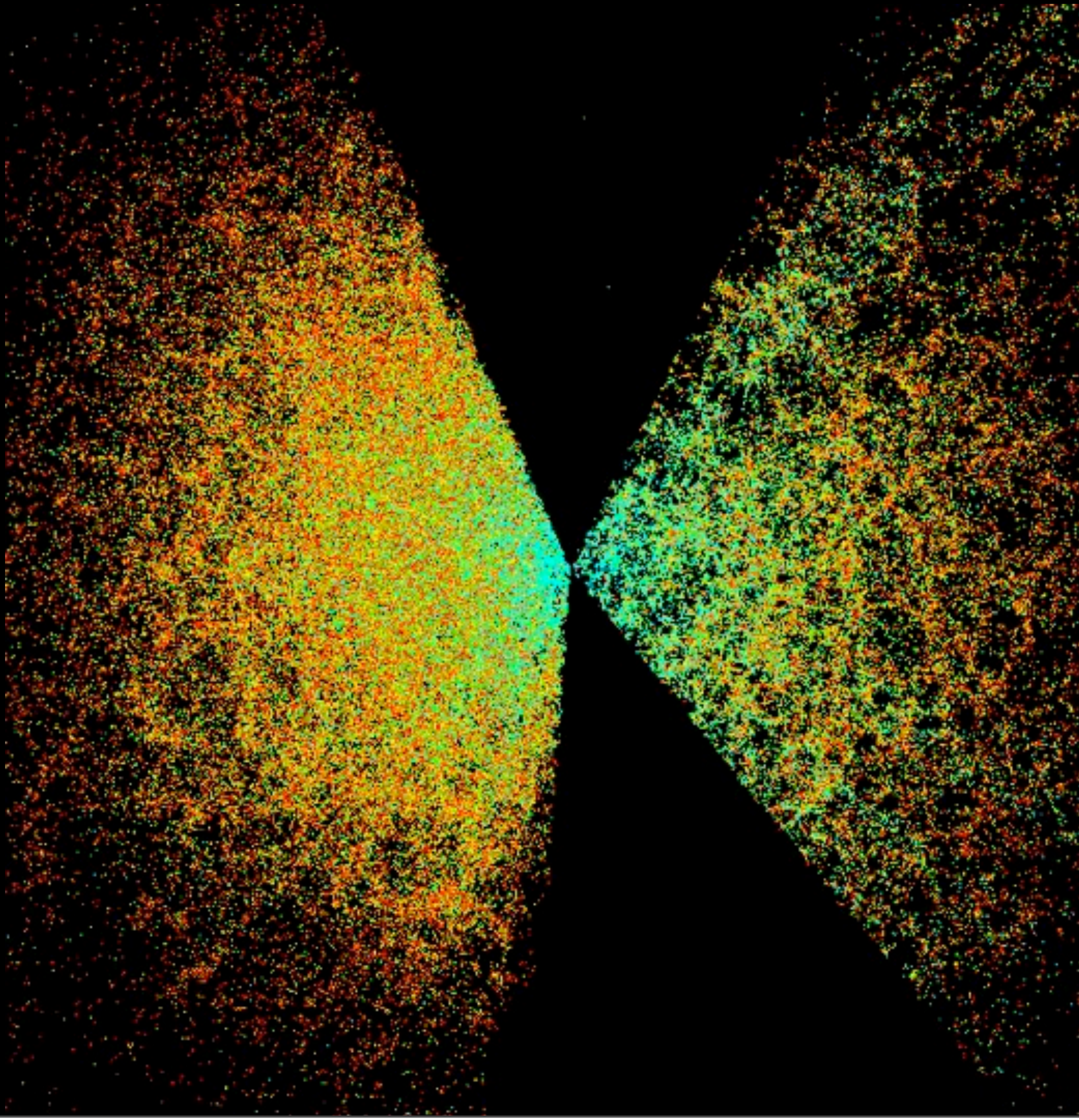
Imagens das galáxias (2D) $\rightarrow$ Posição incluindo a "distância" (3D)

Fotometria (hoje "2.5D") $\rightarrow$ Espectroscopia

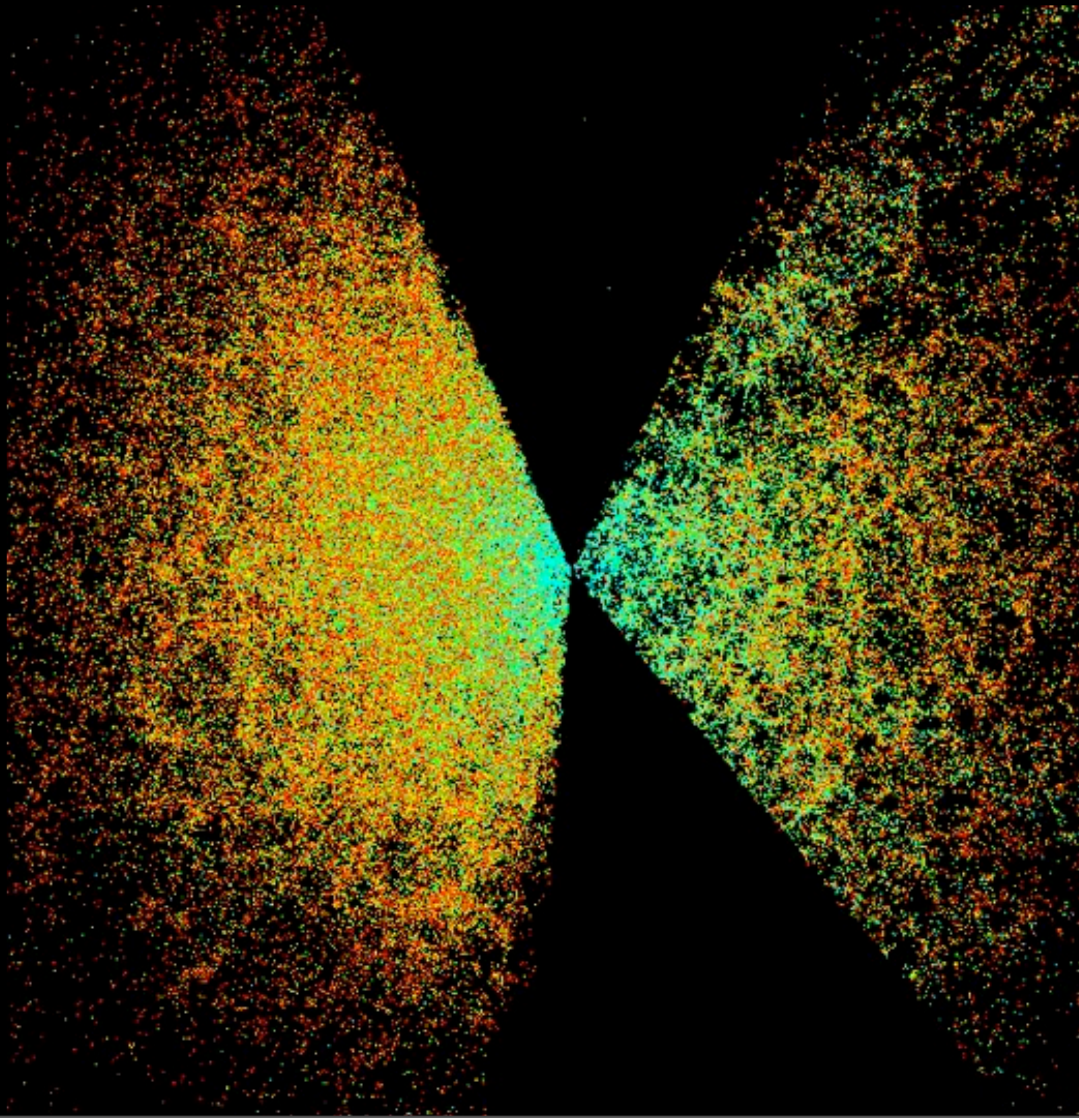
Mapa 3D da Estrutura em Grande Escala



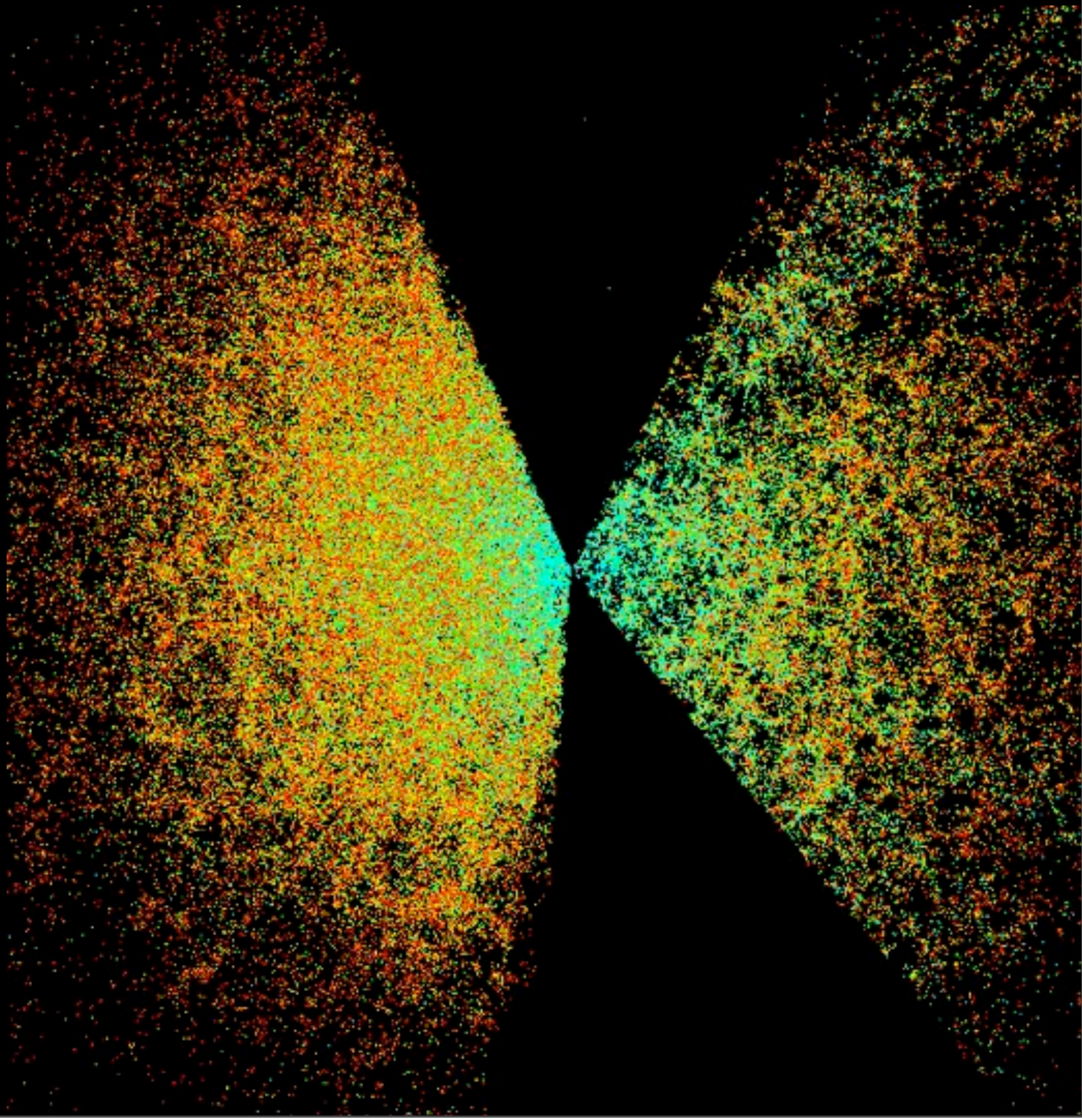
- Cor



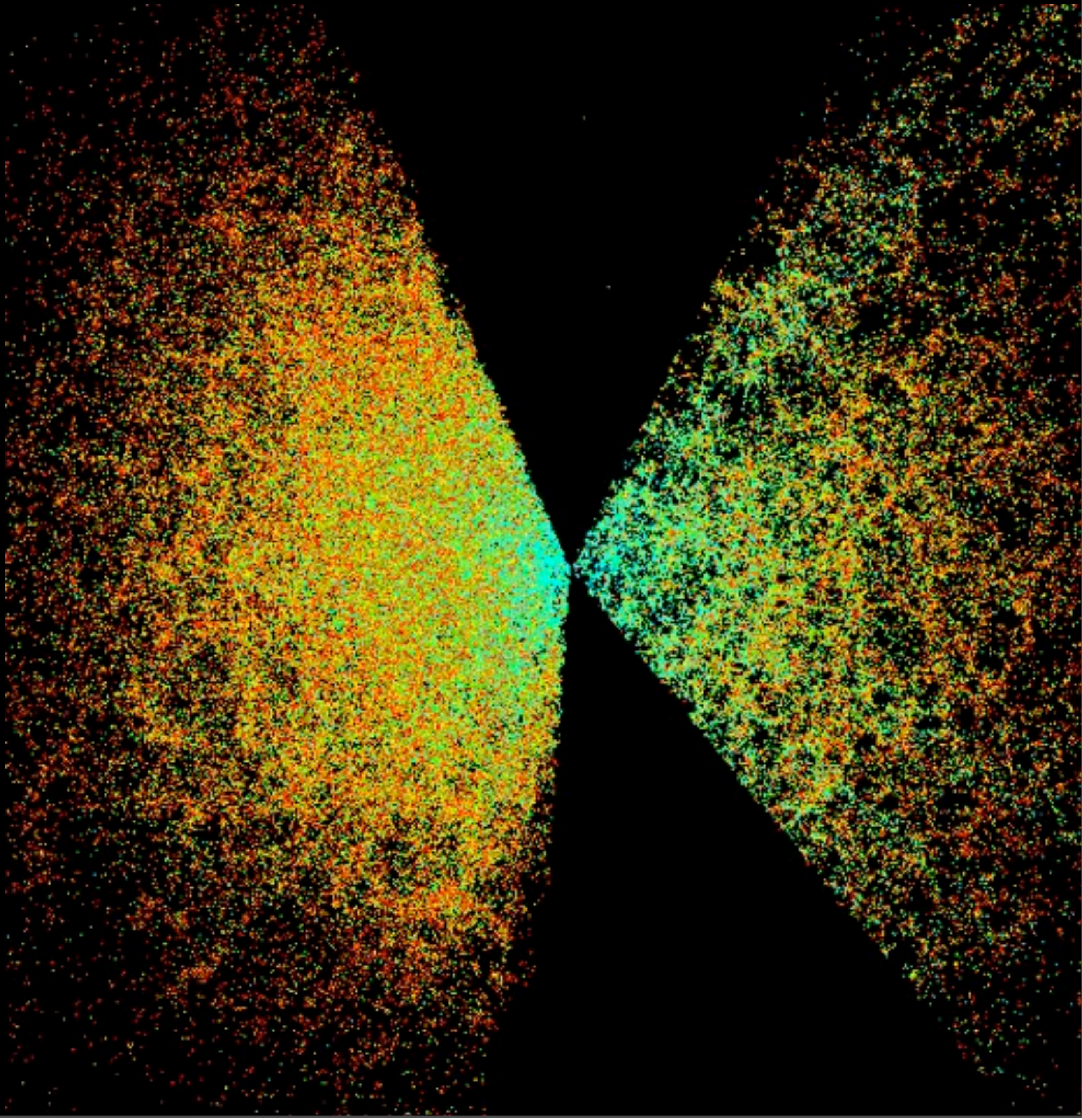
- Cor intínseca (g-r)



- Cor intínseca (g-r)

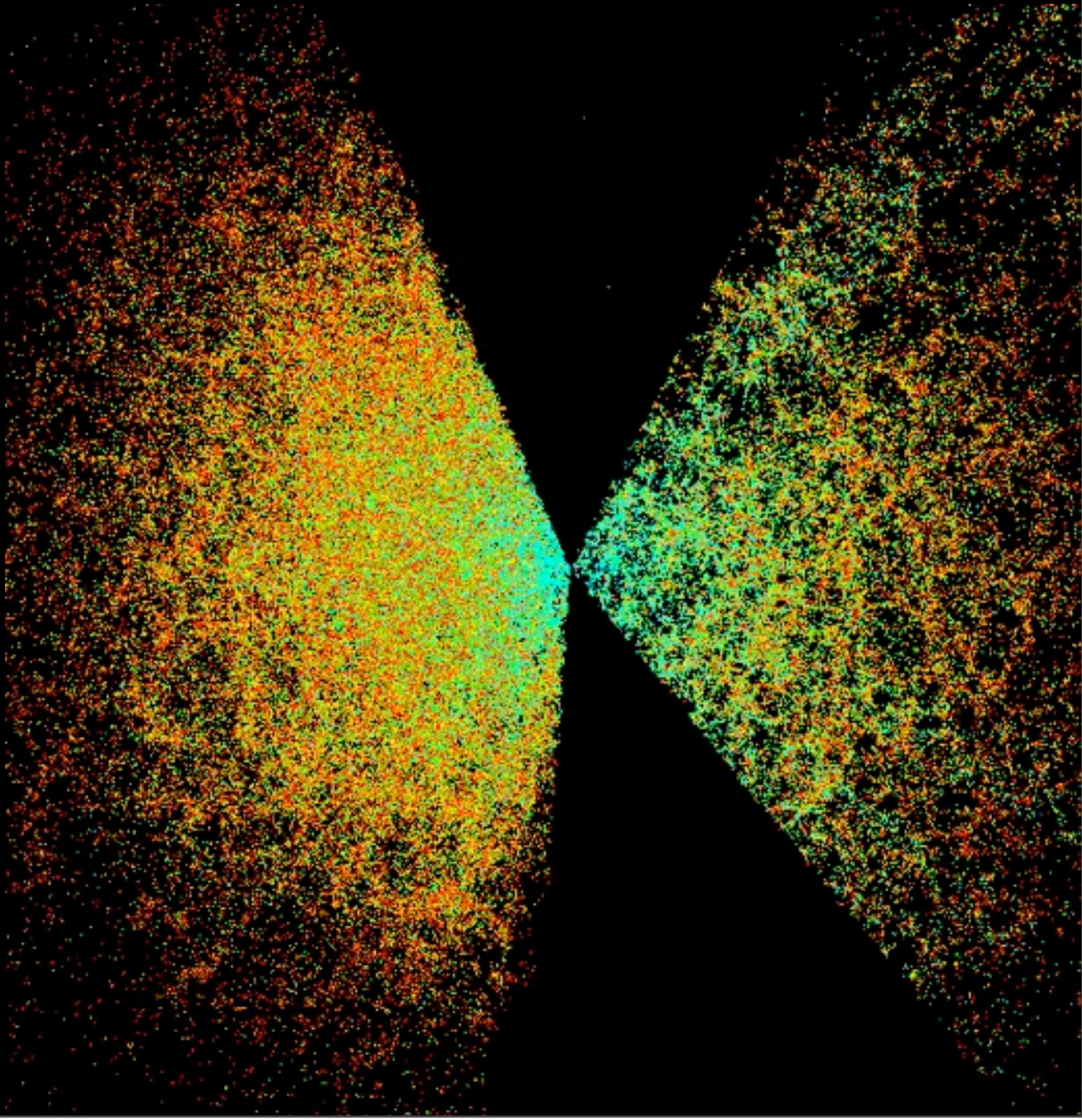


- Cor intínseca (g-r)

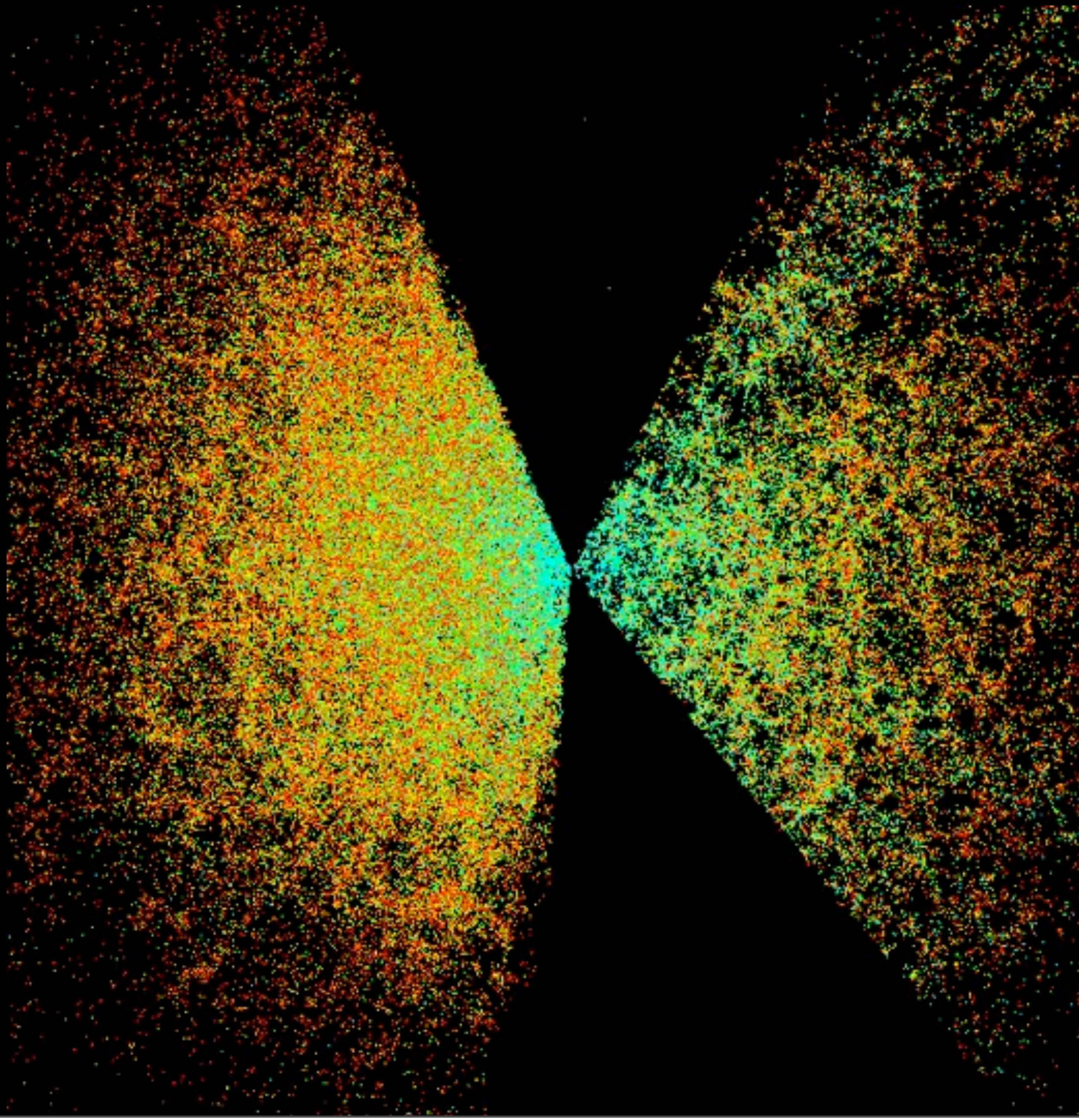


- Cor intínseca (g-r)

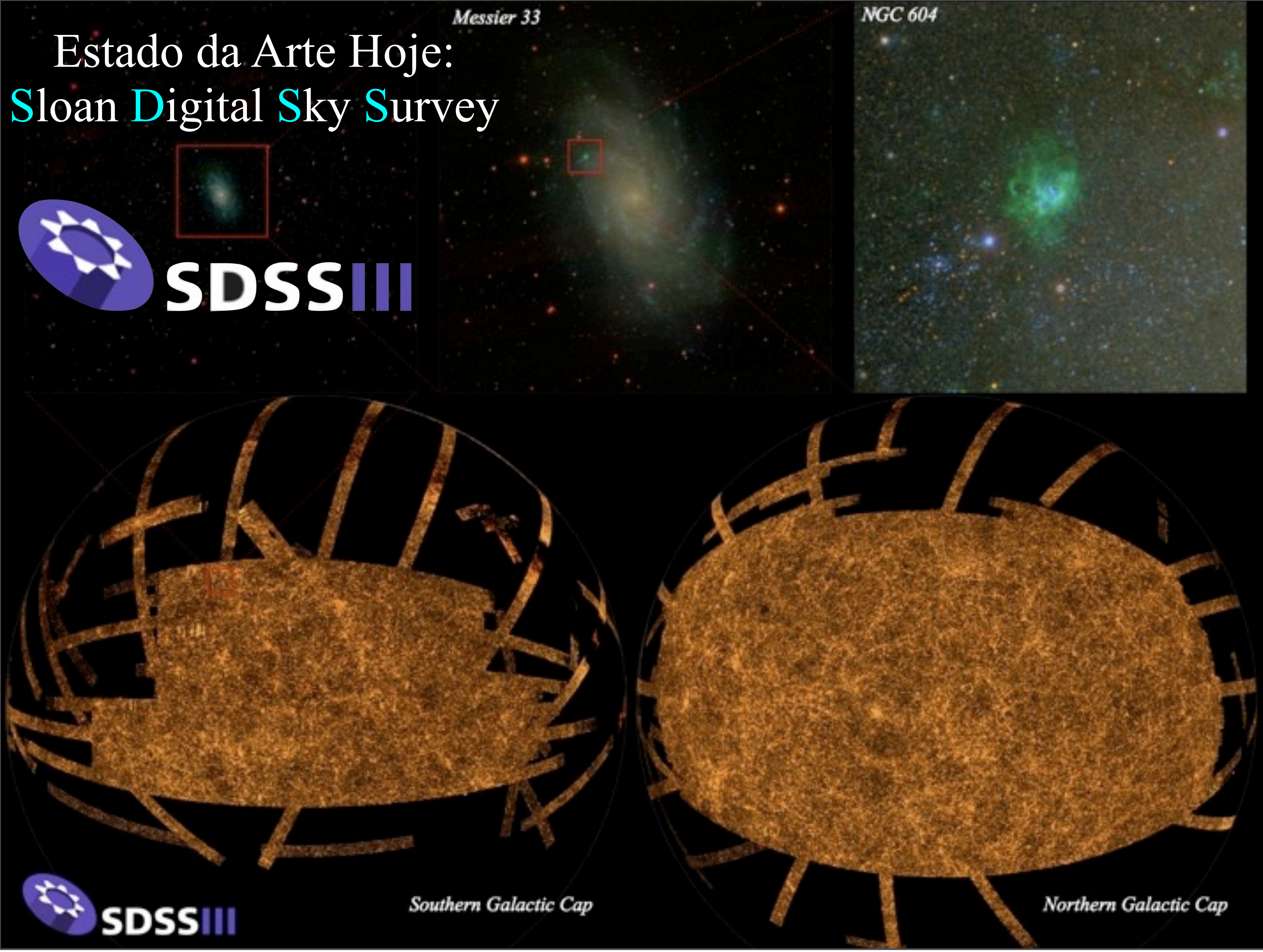
- Relação



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



Estado da Arte Hoje: Sloan Digital Sky Survey



Sloan Digital Sky Survey

Data Release 10: 2013:

Sloan Digital Sky Survey

Data Release 10: 2013:

- Cobertura angular: 14.555 deg^2 (~35% do céu)
- Fotometria (imagens) de 469 milhões de galáxias, quasares, estrelas e outros objetos
- Espectros (desvio para o vermelho) de 1.880.584 galáxias e 312.309 quasares
- > 50 TB de dados

Sloan Digital Sky Survey

SDSS III
BRAZILIAN PARTICIPATION GROUP

Data Release 10: 2013:

Sloan Digital Sky Survey

Data Release 10: 2013:

- Futuro: *Dark Energy Survey*, LSST,

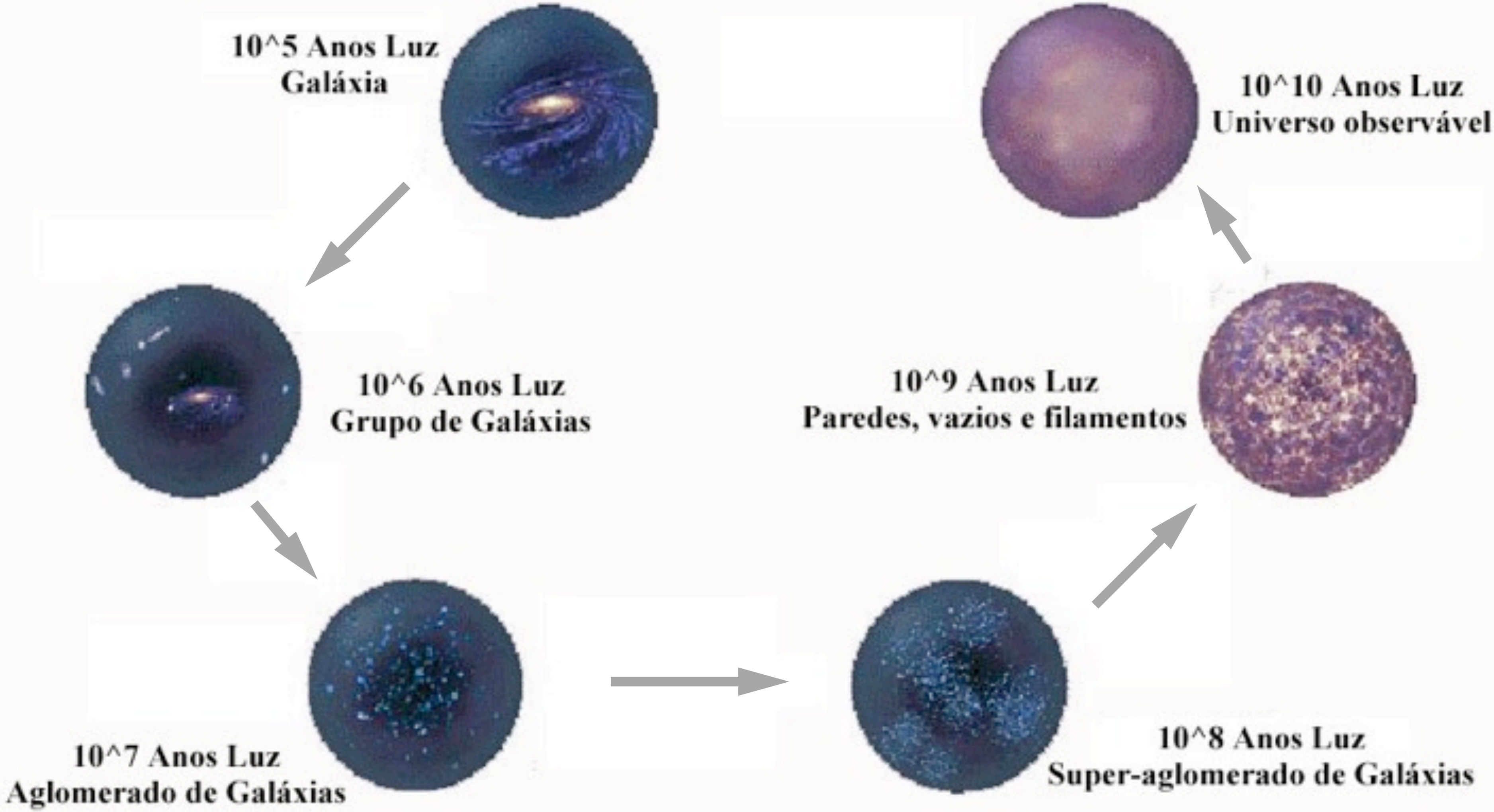
Sloan Digital Sky Survey

Data Release 10: 2013:

- Futuro: *Dark Energy Survey*, LSST, eBOSS, MS-DESI, etc.

DES-BRAZIL

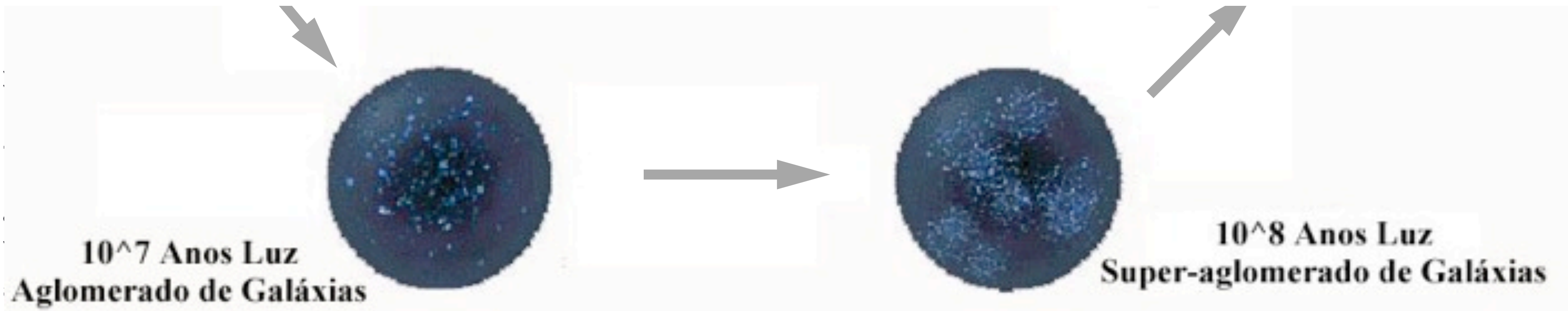
As Escalas no Universo



As Escalas no Universo

Existem cerca de 60 bilhões de galáxias no Universo observável!

60.000.000.000



Parte II

O Universo Homogêneo I

Parte II

O Universo Homogêneo I

Cosmologia Newtoniana I: A equação de Friedmann

- Distribuição esfericamente simétrica e uniforme:

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

- "Conservação da energia"

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

- Sabendo $\rho(a)$, podemos obter $a(t)$
  - Exemplo I: Matéria (partículas): $\rho \propto a^{-3}$
    - $K = 0$
    - $K \neq 0$

Cosmologia Newtoniana I: A equação de Friedmann

- Distribuição esfericamente simétrica e uniforme:

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

- "Conservação da energia"

$$\frac{1}{2}m\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 - \frac{GMm}{R} = E \quad \Longrightarrow \quad \boxed{\dot{a}^2 = \frac{8\pi G}{3}a^2\rho - K}$$

- Sabendo $\rho(a)$, podemos obter $a(t)$
  - Exemplo I: Matéria (partículas): $\rho \propto a^{-3}$
    - $K = 0$
    - $K \neq 0$

Cosmologia Newtoniana I: A equação de Friedmann

- Distribuição esfericamente simétrica e uniforme:

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

- "Conservação da energia"

Equação de Friedmann

$$\frac{1}{2}m\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 - \frac{GMm}{R} = E \quad \Longrightarrow \quad \boxed{\dot{a}^2 = \frac{8\pi G}{3}a^2\rho - K}$$

- Sabendo $\rho(a)$, podemos obter $a(t)$
  - Exemplo I: Matéria (partículas): $\rho \propto a^{-3}$
    - $K = 0$
    - $K \neq 0$

Cosmologia Newtoniana I: A equação de Friedmann

- Distribuição esfericamente simétrica e uniforme:

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

- "Conservação da energia"

$$\frac{1}{2}m\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 - \frac{GMm}{R} = E \quad \Longrightarrow \quad \boxed{\dot{a}^2 = \frac{8\pi G}{3}a^2\rho - K}$$

Equação de Friedmann

- Sabendo $\rho(a)$, podemos obter $a(t)$
  - Exemplo I: Matéria (partículas): $\rho \propto a^{-3}$
    - $K = 0$
    - $K \neq 0$

Cosmologia Newtoniana I: A equação de Friedmann

- Distribuição esfericamente simétrica e uniforme:

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

- "Conservação da energia"

Equação de Friedmann

$$\frac{1}{2}m\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 - \frac{GMm}{R} = E \quad \Longrightarrow \quad \boxed{\dot{a}^2 = \frac{8\pi G}{3}a^2\rho - K}$$

- Sabendo $\rho(a)$, podemos obter $a(t)$
  - Exemplo I: Matéria (partículas): $\rho \propto a^{-3}$
    - $K = 0$ $\longrightarrow$
    - $K \neq 0$

Cosmologia Newtoniana I: A equação de Friedmann

- Distribuição esfericamente simétrica e uniforme:

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

- "Conservação da energia"

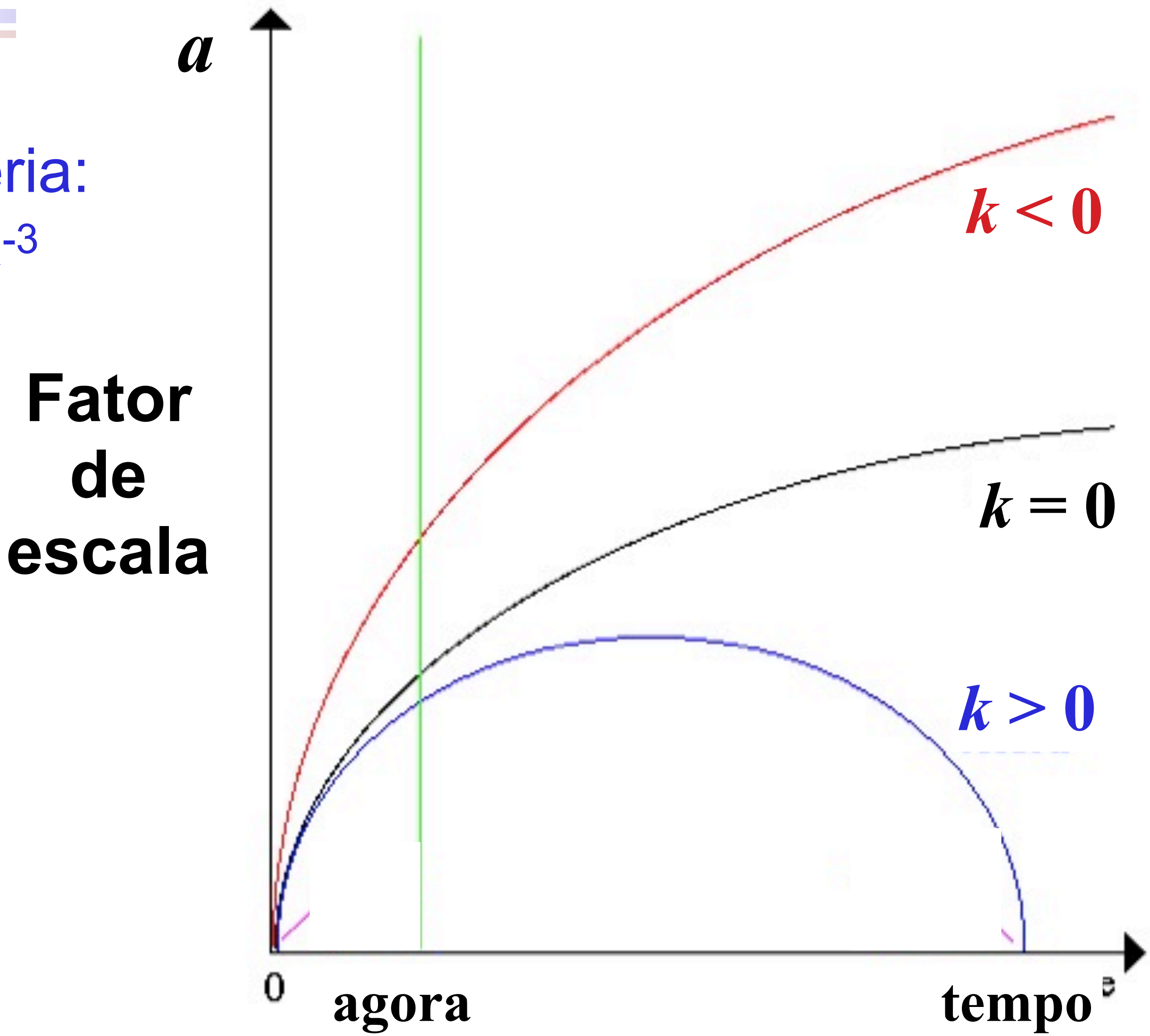
Equação de Friedmann

$$\frac{1}{2}m\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 - \frac{GMm}{R} = E \quad \Longrightarrow \quad \boxed{\dot{a}^2 = \frac{8\pi G}{3}a^2\rho - K}$$

- Sabendo $\rho(a)$, podemos obter $a(t)$
  - Exemplo I: Matéria (partículas): $\rho \propto a^{-3}$
    - $K = 0 \longrightarrow a \propto t^{2/3}$ Einstein - de Sitter
    - $K \neq 0$

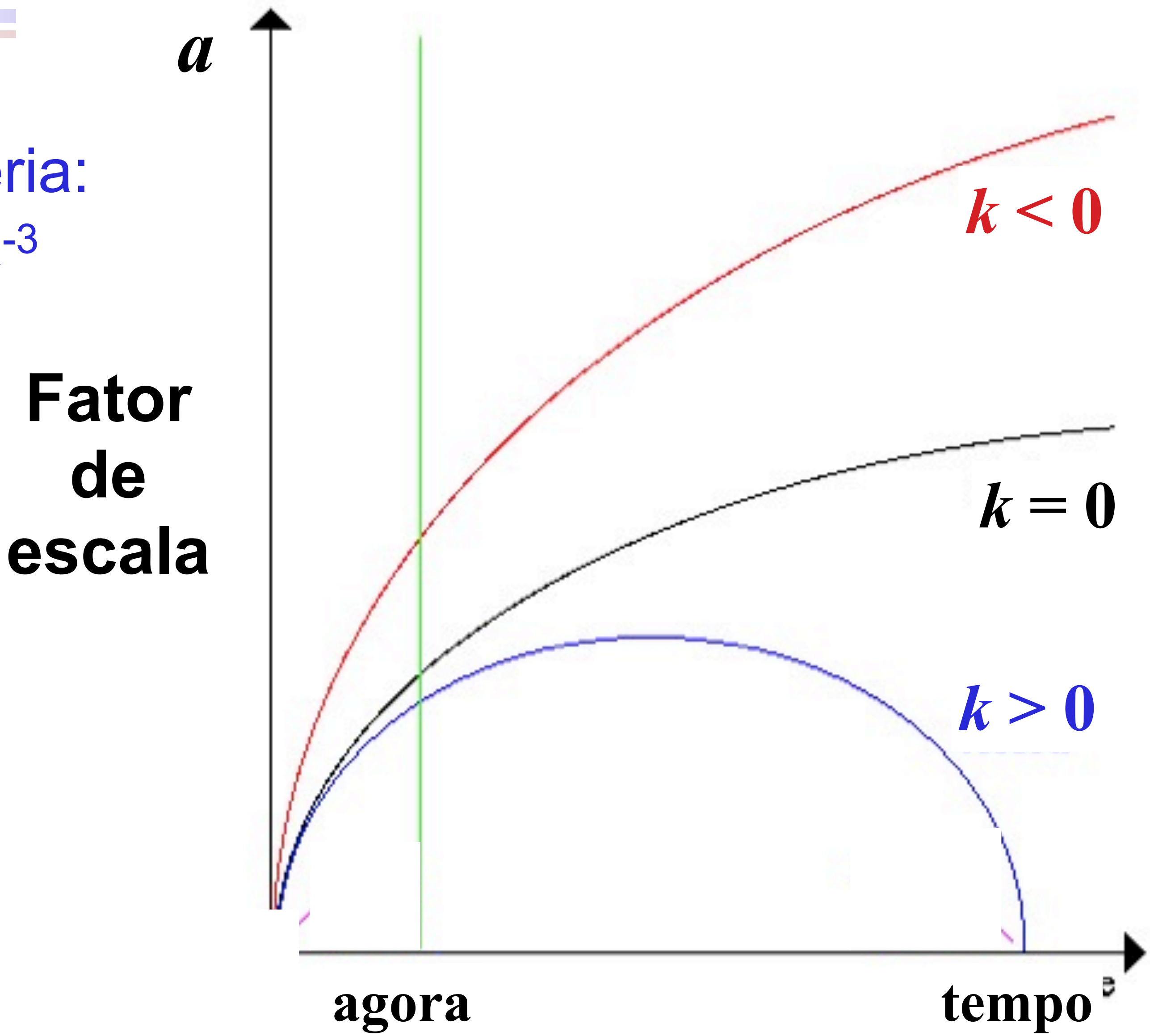
Evolução do Universo ($\Lambda = 0$)

matéria:
$\rho \propto a^{-3}$



Evolução do Universo ($\Lambda = 0$)

matéria:
$\rho \propto a^{-3}$



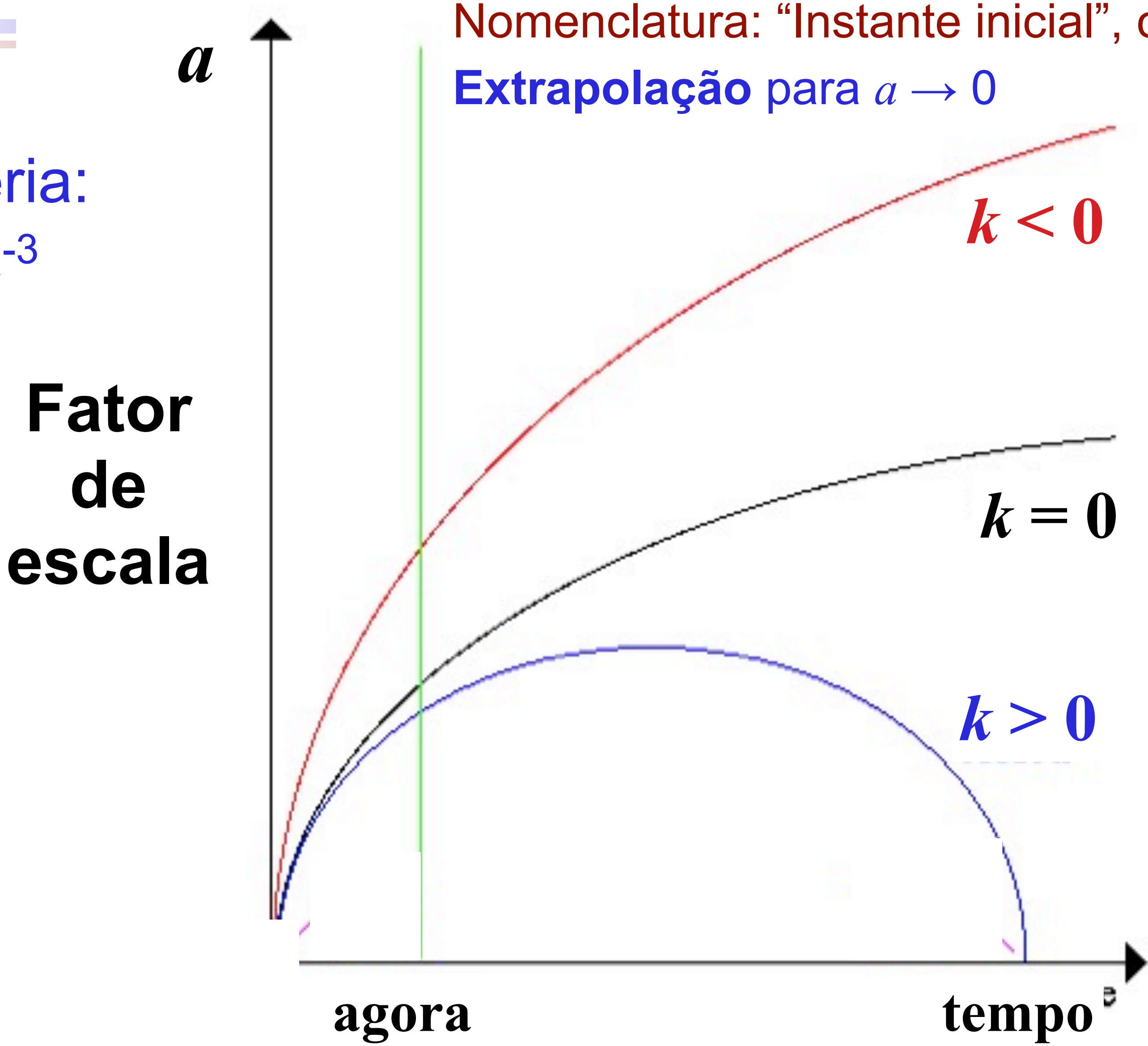
Evolução do Universo ($\Lambda = 0$)

Nomenclatura: “Instante inicial”, ou “Big-Bang”:

Extrapolação para $a \to 0$

matéria:

$\rho \propto a^{-3}$



Densidade de Energia e Fator de Escala

- Conservação da Energia

$$dE = -pdV$$

Densidade de Energia e Fator de Escala

- Conservação da Energia

$$dE = -pdV$$

Energia interna

Densidade de Energia e Fator de Escala

- Conservação da Energia

$$dE = -pdV$$

Energia interna

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

Densidade de Energia e Fator de Escala

- Conservação da Energia

$$dE = -pdV$$

Energia interna

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

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

Densidade de Energia e Fator de Escala

- Conservação da Energia

$$dE = -pdV$$

Energia interna

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

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

- Conservação da Massa de Repouso

Densidade de Energia e Fator de Escala

- Conservação da Energia

$$dE = -pdV$$

Energia interna

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

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

- Conservação da Massa de Repouso

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

Densidade de Energia e Fator de Escala

- Conservação da Energia

$$dE = -pdV$$

Energia interna

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

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

- Conservação da Massa de Repouso

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

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

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

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

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

Válida também na relatividade geral!

Evolução dos Constituintes

- Conservação da energia para cada componente:

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

Evolução dos Constituintes

- Conservação da energia para cada componente:

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

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

Evolução dos Constituintes

- Conservação da energia para cada componente:

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

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

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

Evolução dos Constituintes

- Conservação da energia para cada componente:

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

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

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

Exemplo 2: radiação: *p = ρ/3*

Evolução dos Constituintes

- Conservação da energia para cada componente:

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

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

$$\Longrightarrow \quad \rho_M \propto a^{-3}$$

Exemplo 2: radiação: *p = ρ/3*

$$\Longrightarrow \quad \rho_r \propto a^{-4}$$

Evolução dos Constituintes

- Conservação da energia para cada componente:

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

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

$$\Longrightarrow \quad \rho_M \propto a^{-3}$$

Exemplo 2: radiação: *p = ρ/3*

$$\Longrightarrow \quad \rho_r \propto a^{-4} \qquad \rho_\gamma = \sigma T^4$$

Evolução dos Constituintes

- Conservação da energia para cada componente:

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

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

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

Exemplo 2: radiação: *p = ρ/3*

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

Evolução dos Constituintes

- Conservação da energia para cada componente:

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

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

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

Exemplo 2: radiação: *p = ρ/3*

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

Exemplo 3: “vácuo”: *p = -ρ*

Evolução dos Constituintes

- Conservação da energia para cada componente:

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

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

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

Exemplo 2: radiação: *p = ρ/3*

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

Exemplo 3: "vácuo": *p = -ρ*

$$\Rightarrow \quad \rho_v = const.$$

Soluções da Equação de Friedmann

Equação de Friedmann

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

Conservação da energia

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

Soluções da Equação de Friedmann

Equação de Friedmann

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

Conservação da energia

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

- $K = 0$
  - *Radiação* $\Rightarrow$ $a \propto t^{1/2}$
  - *Matéria* $\Rightarrow$ (Einstein-de Sitter)
  - "Vácuo" $\Rightarrow$ (De Sitter)

Soluções da Equação de Friedmann

Equação de Friedmann

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

Conservação da energia

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

- $K = 0$
  - *Radiação* $\Rightarrow$ $a \propto t^{1/2}$
  - *Matéria* $\Rightarrow$ $a \propto t^{2/3}$ (Einstein-de Sitter)
  - "Vácuo" $\Rightarrow$ $a \propto e^{Ht}$ (De Sitter)
- $K \neq 0$
  - "Vazio" $\Rightarrow$ $a \propto t$

Soluções da Equação de Friedmann

Equação de Friedmann

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

Conservação da energia

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

- $K = 0$
  - *Radiação* $\Rightarrow$ $a \propto t^{1/2}$
  - *Matéria* $\Rightarrow$ $a \propto t^{2/3}$ (Einstein-de Sitter)
  - "Vácuo" $\Rightarrow$ $a \propto \mathrm{e}^{Ht}$ (De Sitter)
- $K \neq 0$
  - "Vazio" $\Rightarrow$ $a \propto t$

Exercício:
$p = w\,\rho$