

# **CURSO DE COSMOLOGIA**

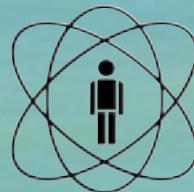
## **2013B**

### **PARTE I**

### **AULA 7**

MARTÍN MAKLER  
CBPF

**ICRA**



**CBPF**

**MCTI**

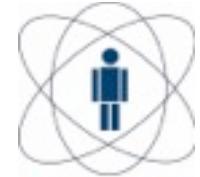




# Resumo RCF

- Universo recombina em  $z \sim 1100$  e reionizou em  $z \sim 10$
- Universo  $\sim$  plano, requer matéria e energia escuras
- Instabilidade gravitacional é suficiente para formar estruturas em grandes escalas
- Perturbações adiabáticas e gaussianas
  - Inflação
- Problemas?
  - Amplitude e alinhamento de baixos multipolos
- Futuro
  - Polarização, modos B, pequenas escalas

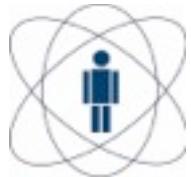
# Inflação e origem das flutuações



- Problema da isotropia e homogeneidade
- Problema da curvatura
- Problema dos “monopólos magnéticos”
- Origem das flutuações primordiais

→ Solução:

Expansão acelerada  
Campo escalar



# Inflação

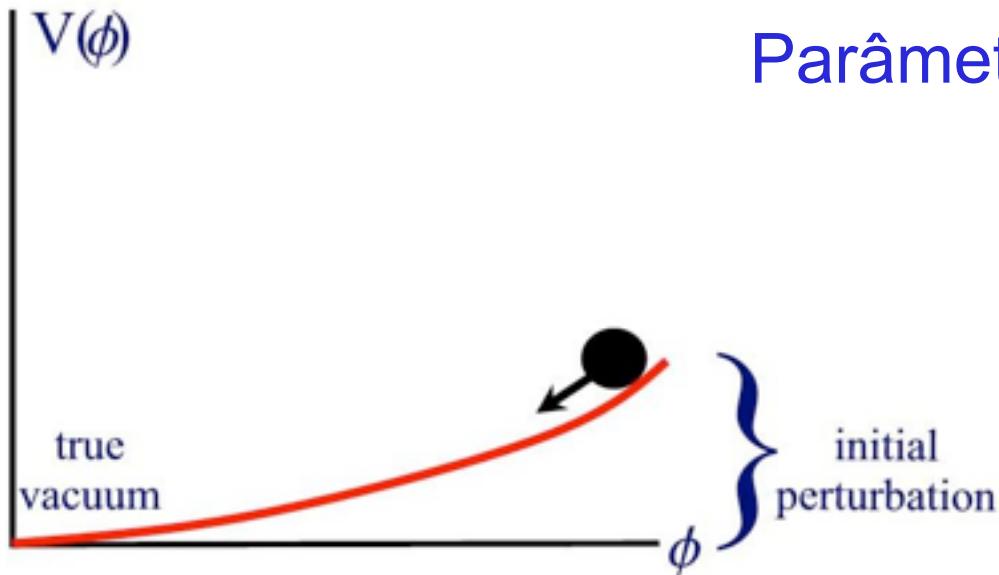
- Campo escalar

$$L = \frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - V(\phi)$$

$$p = \frac{1}{2} \dot{\phi} - V(\phi)$$

$$\rho = \frac{1}{2} \dot{\phi} + V(\phi)$$

- Rolamento lento



Parâmetros de *slow roll*:

$$\eta(\phi) = \frac{M_p^2}{8\pi} \left( \frac{V''}{V} \right)$$

$$\epsilon(\phi) = \frac{M_p^2}{16\pi} \left( \frac{V'}{V} \right)$$



# Inflação

- Problema: Universo esfria
- Solução: reaquecimento
- Acoplamento com campos de matéria:  
criação de partículas
- Perturbações: amplificação de  
flutuações quânticas
  - Flutuações adiabáticas e gaussianas
  - Espectro invariante de escala!

# Estrutura em Grande Escala (EGE)

## Estatística: Função de Correlação

- Contraste de densidade:

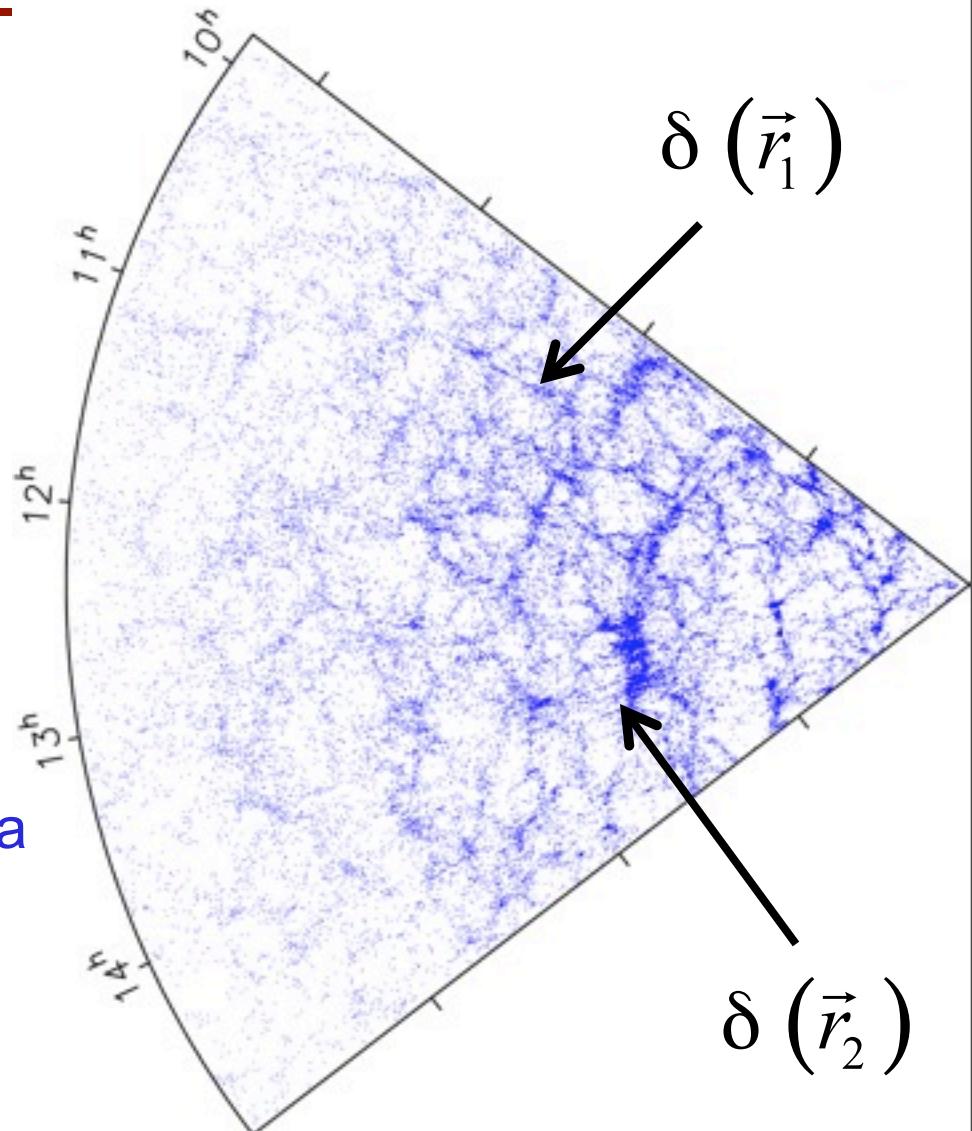
$$\delta_{obs}(\vec{r}) = \frac{n(\vec{r}) - \bar{n}(\vec{r})}{\bar{n}(\vec{r})}$$

- 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 da RCF e EGE:

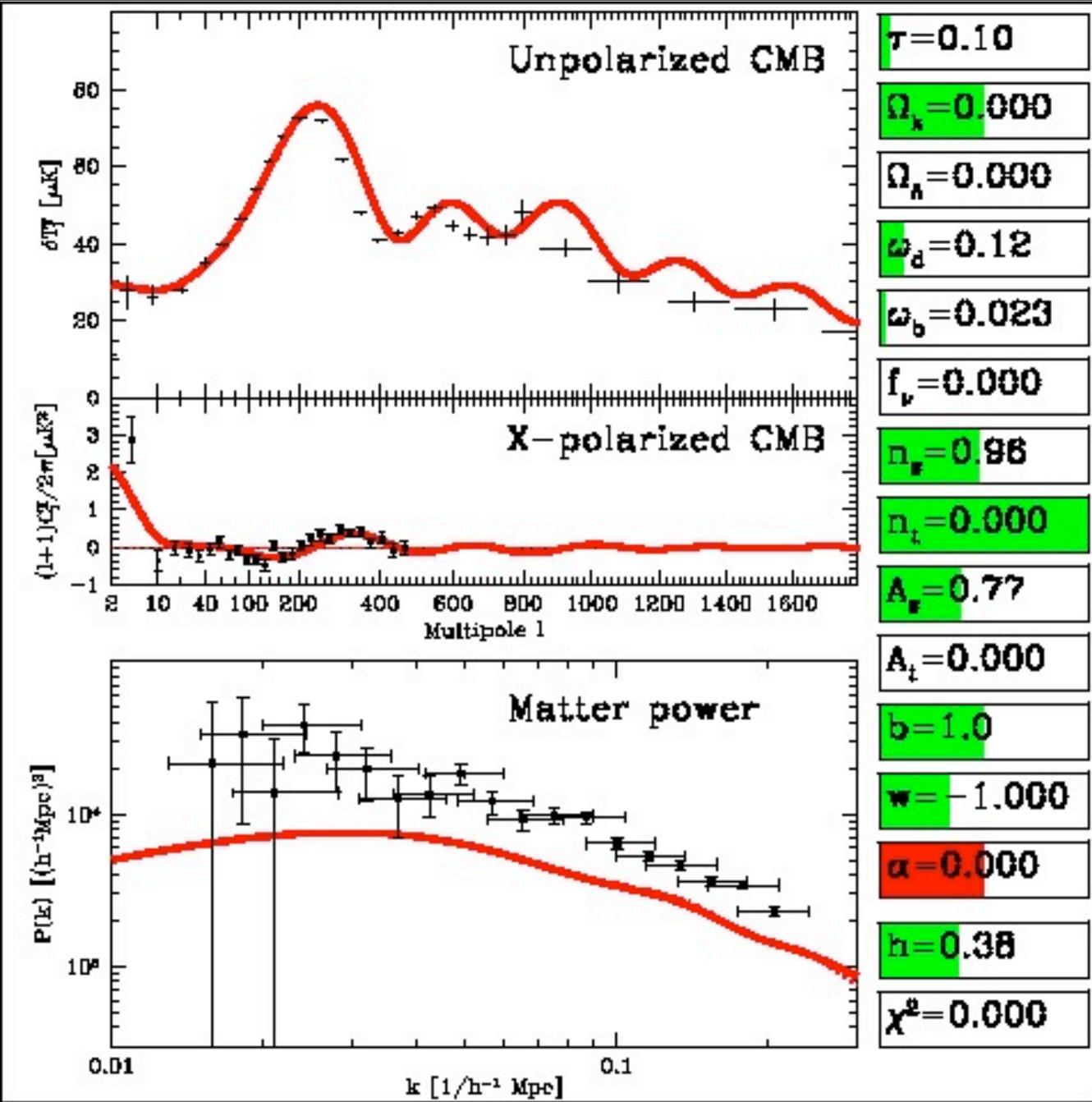
## Energia Escura

Forma das flutuações primordiais

Matéria escura

Massa dos neutrinos

Quantidade de bárions



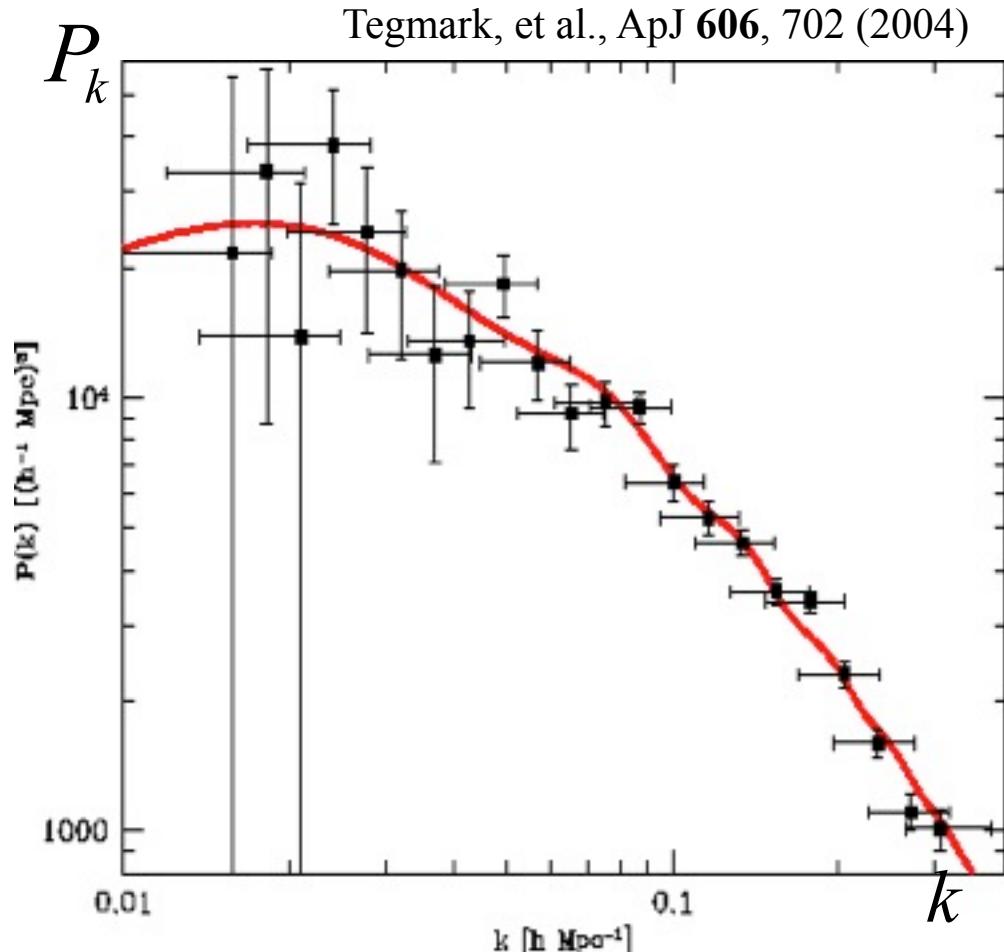
# EGE: Dados e Teoria

## Espectro de Potência:

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

## Exemplo (do SDSS):

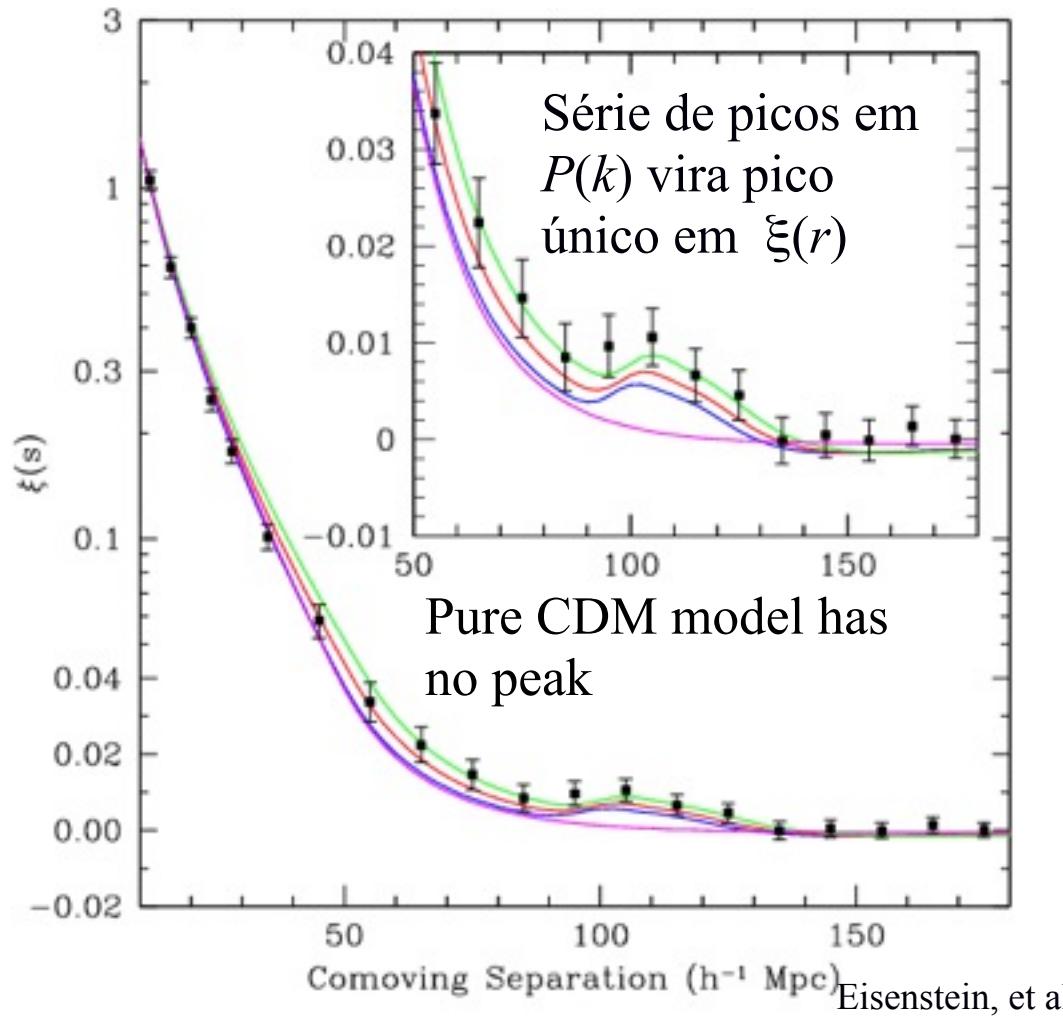
$$\Omega_m = 0.30 \pm 0.03$$



205.443 galáxias do SDSS

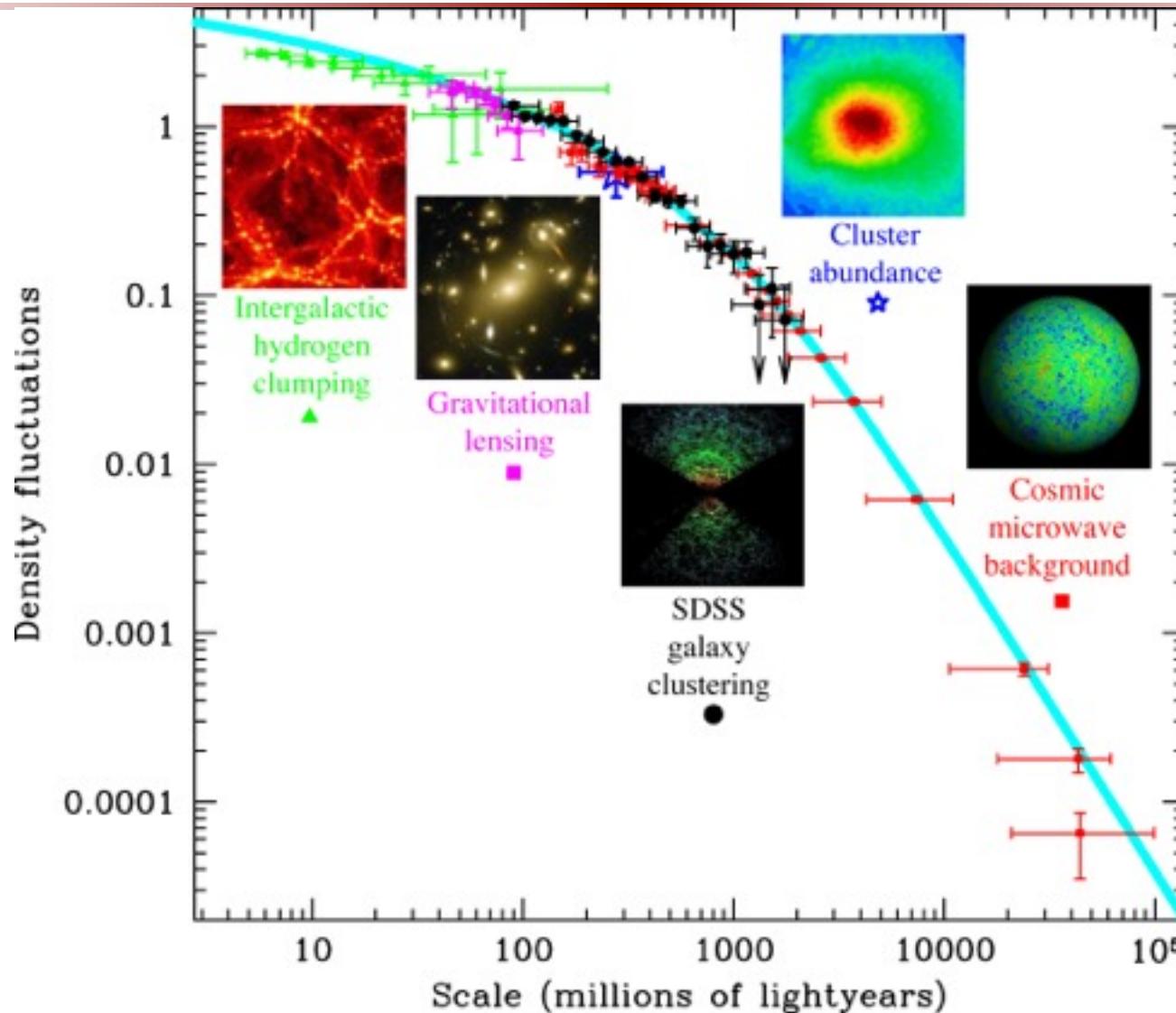
# Oscilações acústicas de bárions na estrutura em grande escala

- Oscilações de Bárions (picos acústicos)
- Medida de  $D_A$  em baixos  $z$
- Réguas padrão
- Evolução em  $z$
- Energia escura





# Flutuações em Todas as Escalas





# Evolução Não Linear

- Antes da recombinação:

- Radiação e matéria acoplados



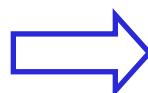
$$\frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} \approx 10^{-4}$$

- Hoje:

- Radiação e matéria desacoplados



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

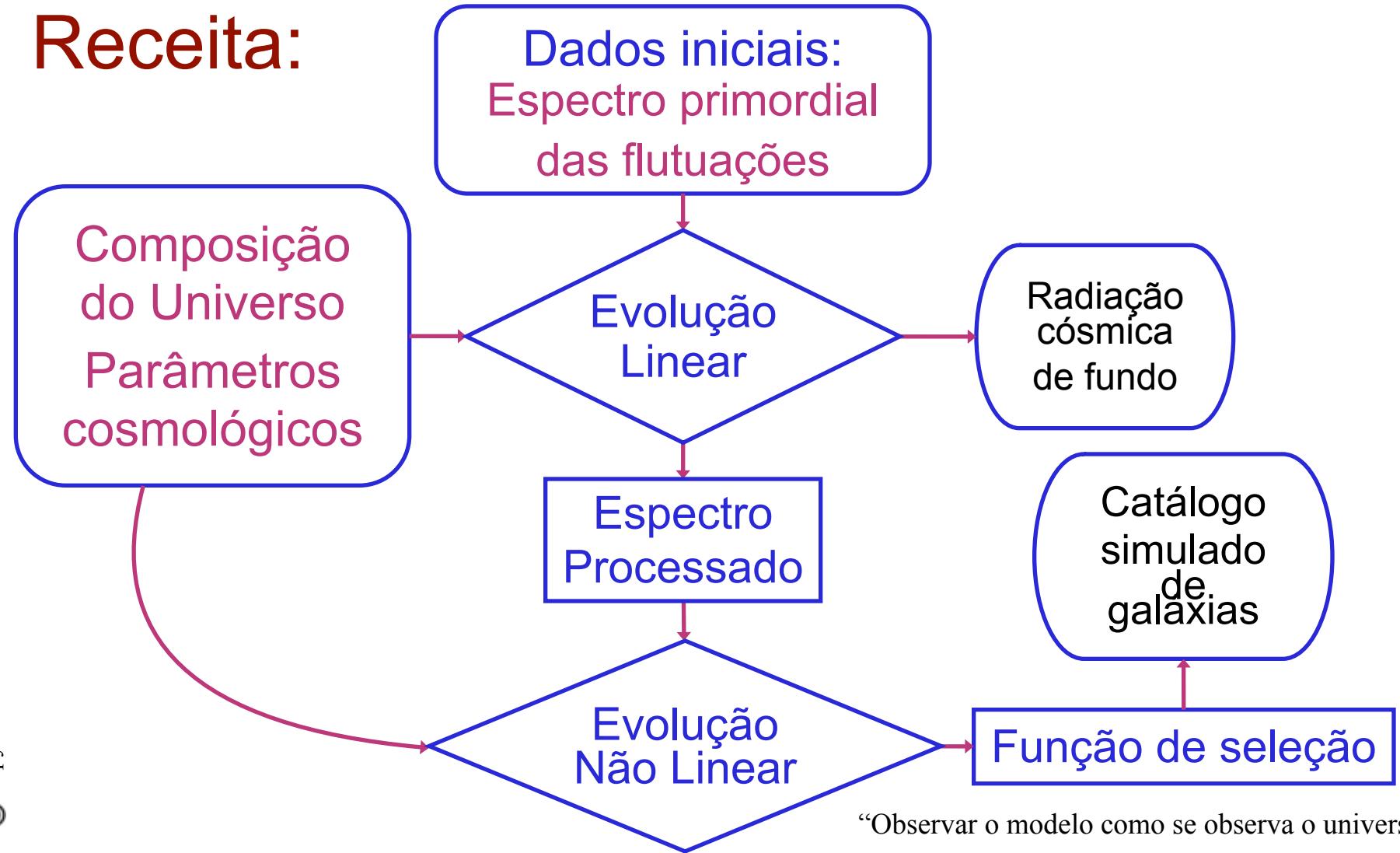


**Necessidade de estudar o regime não-linear**

# Como Gerar um Catálogo de Galáxias?



Receita:

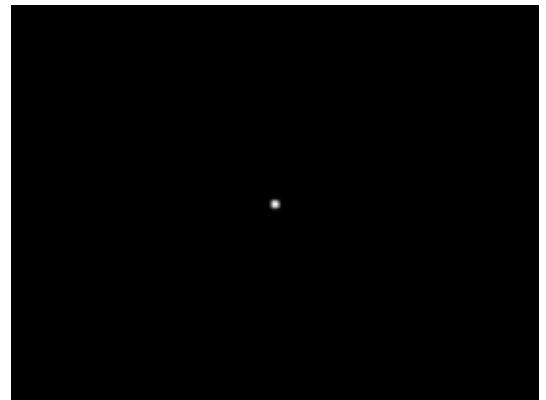




# Simulações Computacionais

- Universo bidimensional fechado, representado pela superfície de uma esfera em expansão

Simula-se uma porção “apreciável” do Universo, e utiliza-se condições de contorno periódicas.

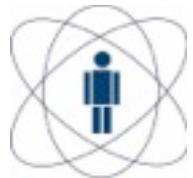


Receita: composição do universo + condições iniciais



(dinâmica: evolução temporal)

Catálogo simulado

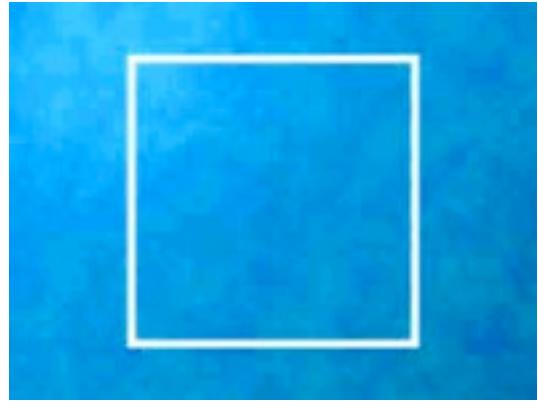


# Simulações Computacionais

- Cosmologia newtoniana:

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \bar{\rho} \delta$$

$$\frac{d^2 \vec{x}}{d\tau^2} = -a^2 \left( \vec{\nabla} \phi + \frac{\vec{\nabla} p}{\rho} \right)$$



Grand Challenge Cosmology Consortium



# Simulações Computacionais

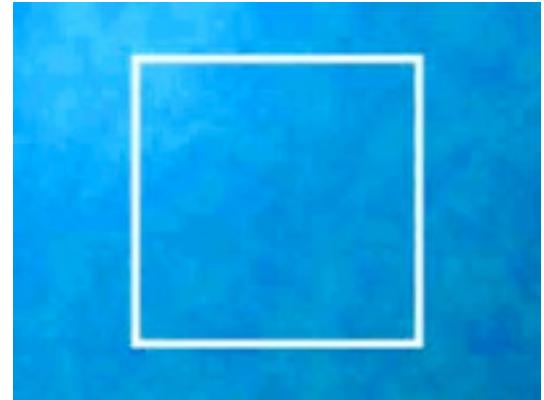
- Cosmologia newtoniana:

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \bar{\rho} \delta$$

$$\frac{d^2 \vec{x}}{d\tau^2} = -a^2 \left( \vec{\nabla} \phi + \frac{\vec{\nabla} p}{\rho} \right)$$

- Coordenadas comóveis (acompanham a expansão média):

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



Grand Challenge Cosmology Consortium



# Simulações Computacionais

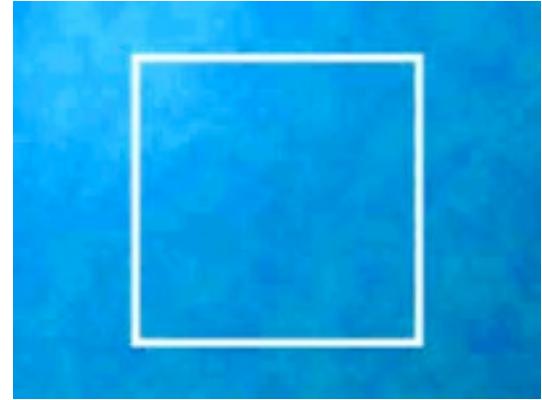
- Cosmologia newtoniana:

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \bar{\rho} \delta$$

$$\frac{d^2 \vec{x}}{d\tau^2} = -a^2 \left( \vec{\nabla} \phi + \frac{\vec{\nabla} \rho}{\rho} \right)$$

- Coordenadas comóveis (acompanham a expansão média):

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



Grand Challenge Cosmology Consortium



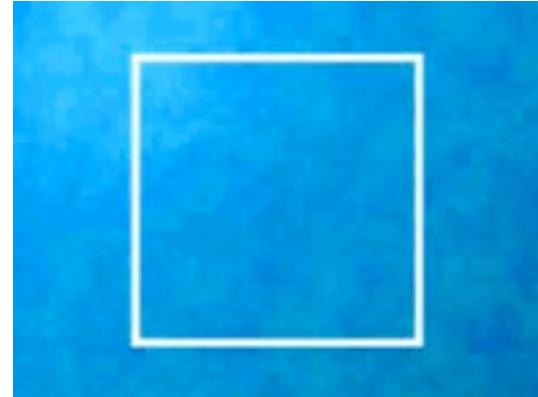
# Simulações Computacionais

- Cosmologia newtoniana:

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

- Coordenadas comóveis (acompanham a expansão média):

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



Grand Challenge Cosmology Consortium



# Simulações Computacionais

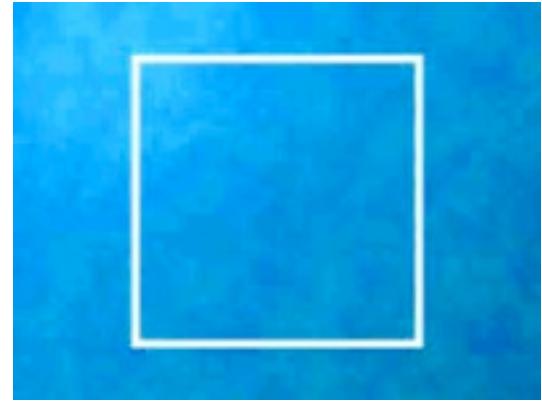
- Cosmologia newtoniana:

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

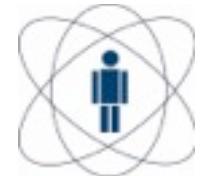
- Coordenadas comóveis (acompanham a expansão média):

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

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

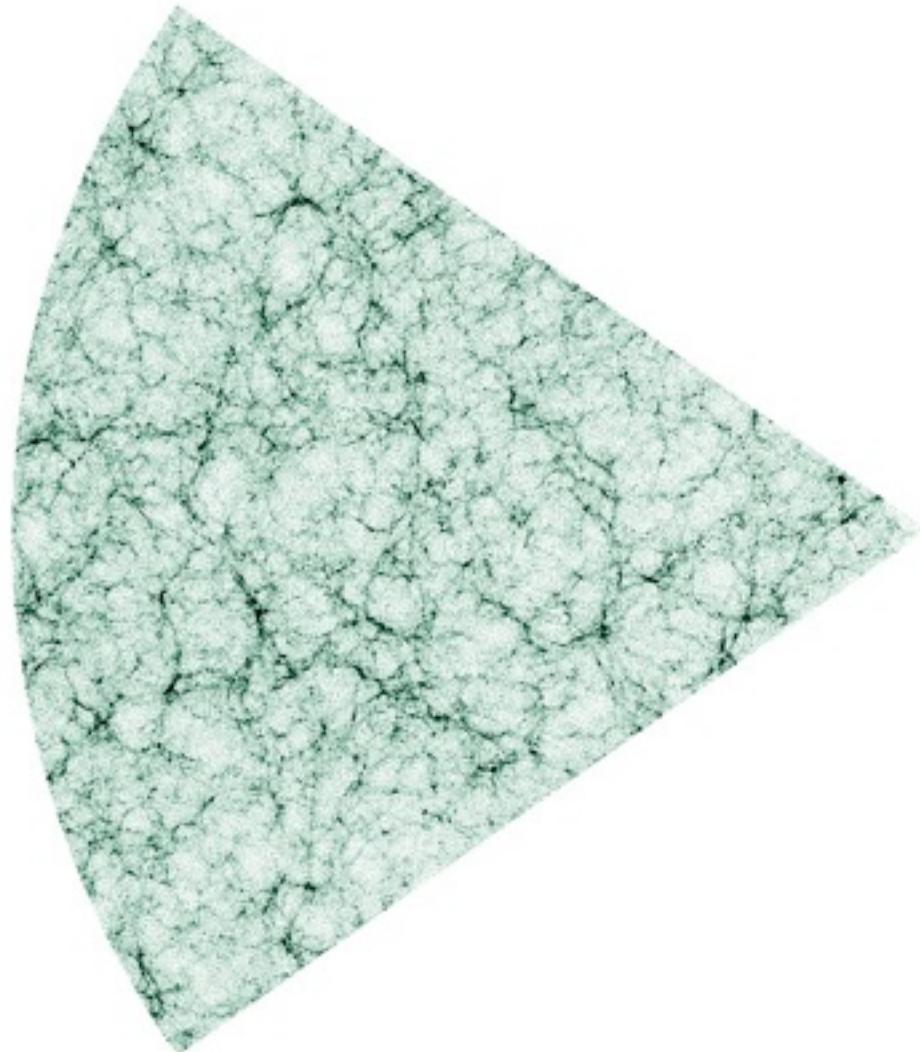


Grand Challenge Cosmology Consortium



# Resultados de Simulações

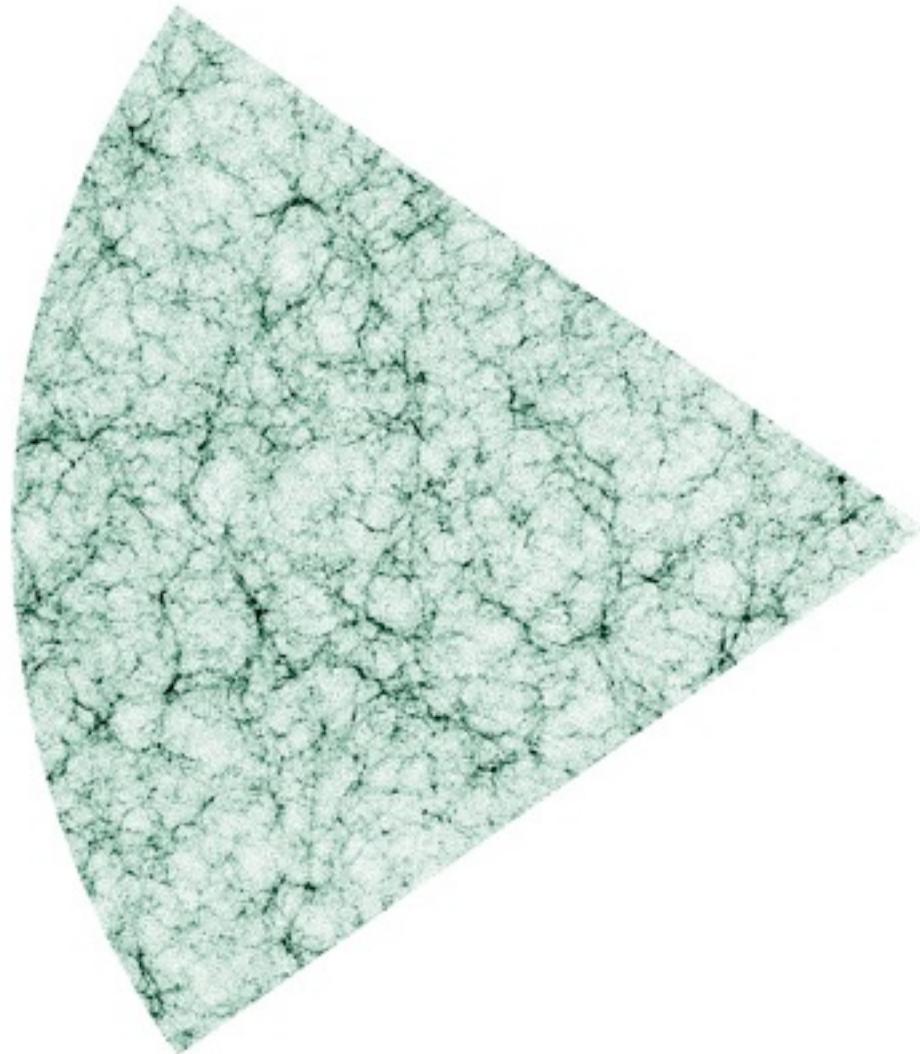
- Simulações do *Hubble Volume*. Área similar à do SDSS  $10^6$  “partículas”
- 500 Gb de dados





# Resultados de Simulações

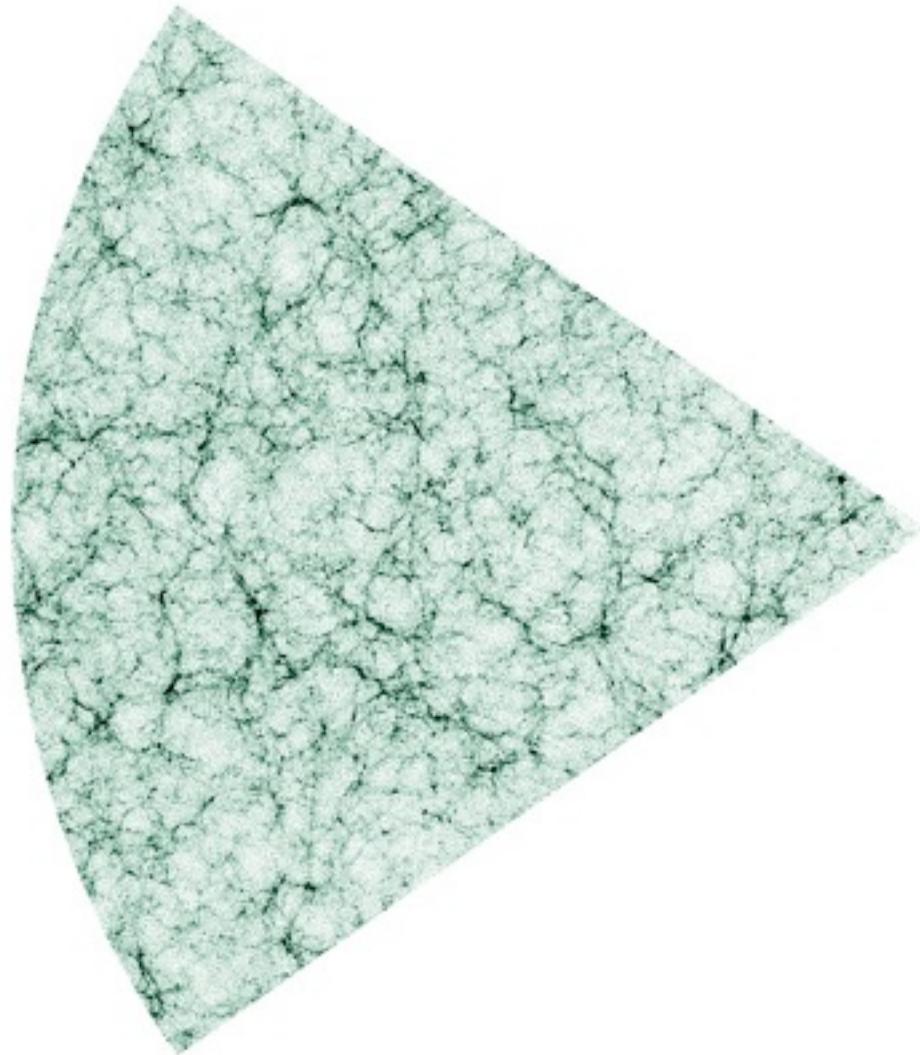
- Simulações do *Hubble Volume*. Área similar à do SDSS  $10^6$  “partículas”
- 500 Gb de dados
- O modelo de matéria escura fria e energia escura reproduz satisfatoriamente a maioria das propriedades do nosso universo

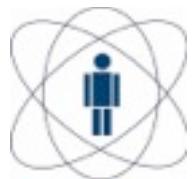




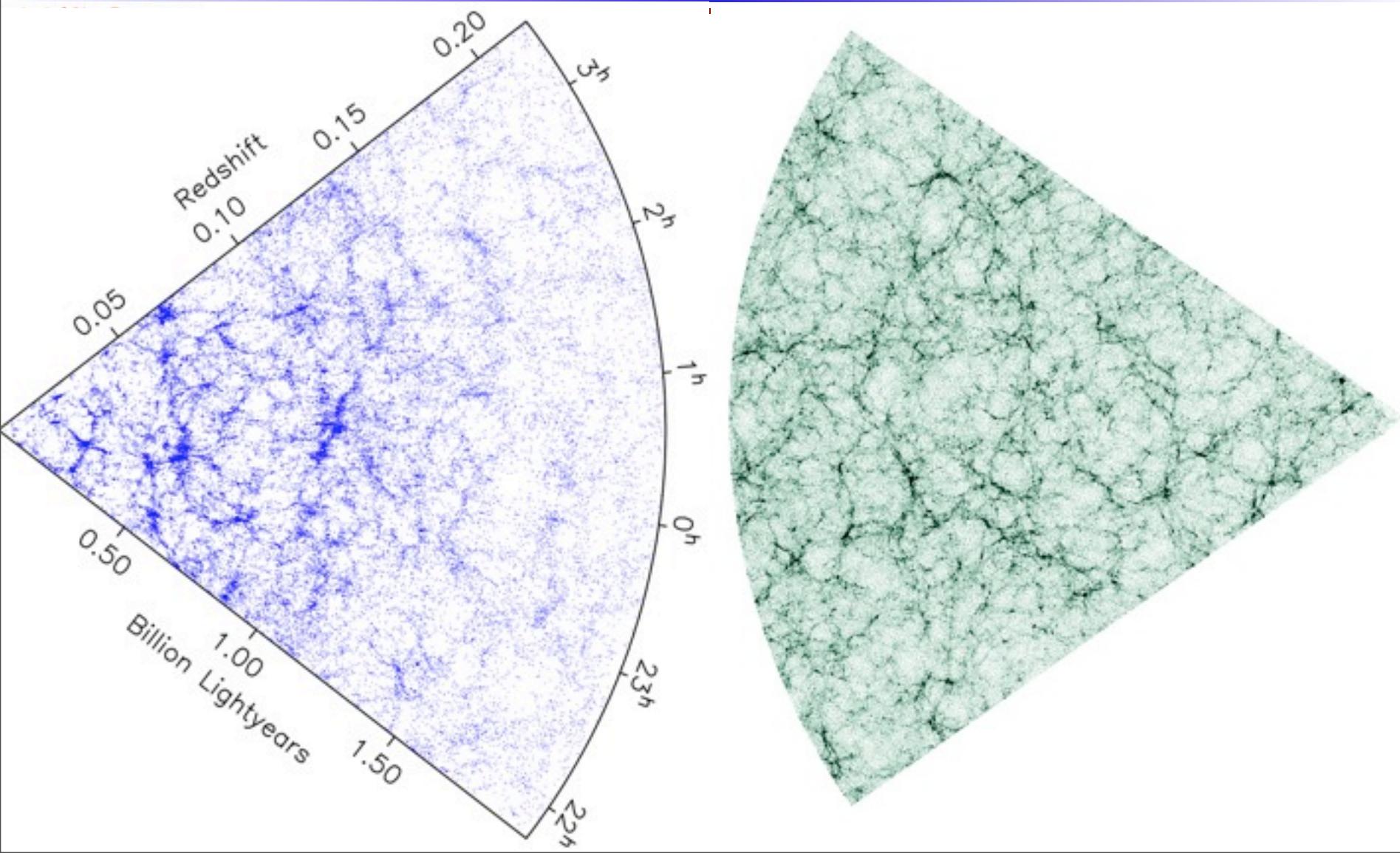
# Resultados de Simulações

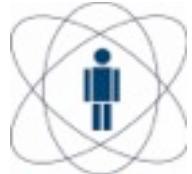
- Simulações do *Hubble Volume*. Área similar à do SDSS  $10^6$  “partículas”
- 500 Gb de dados
- O modelo de matéria escura fria e energia escura reproduz satisfatoriamente a maioria das propriedades do nosso universo





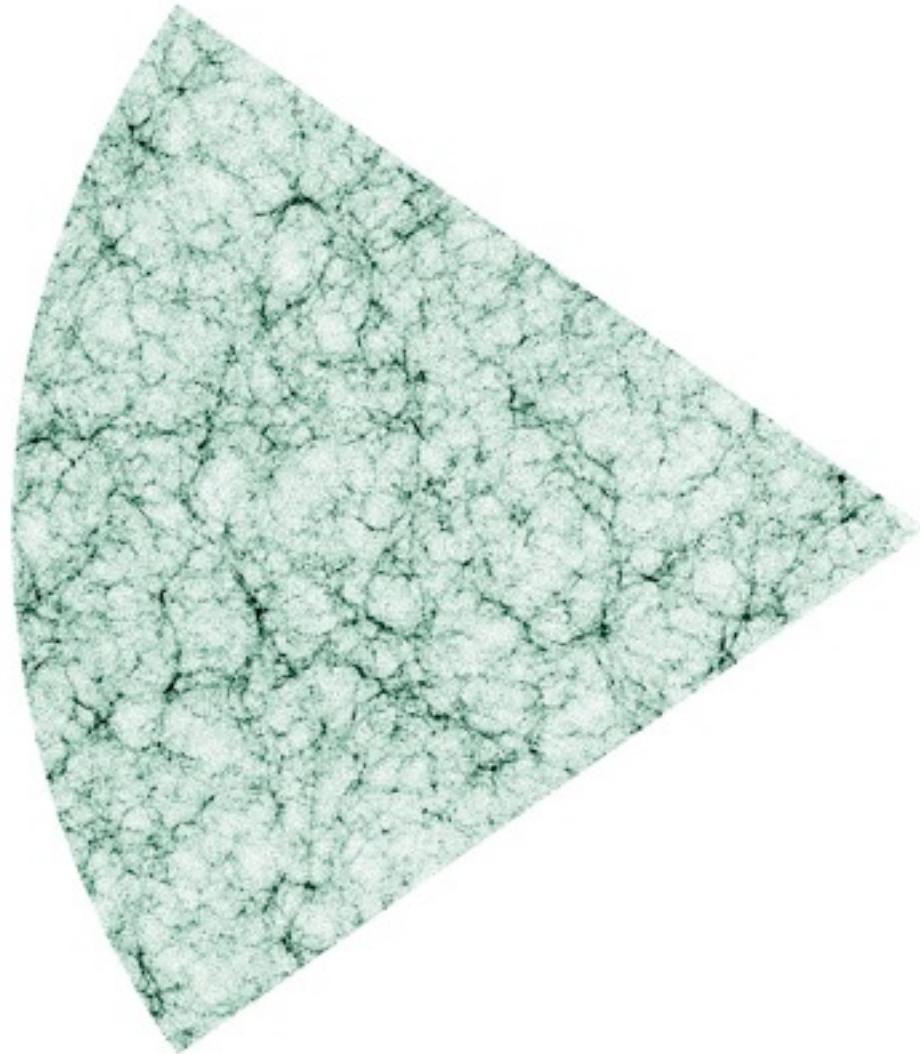
# Resultados de Simulações





# Resultados de Simulações

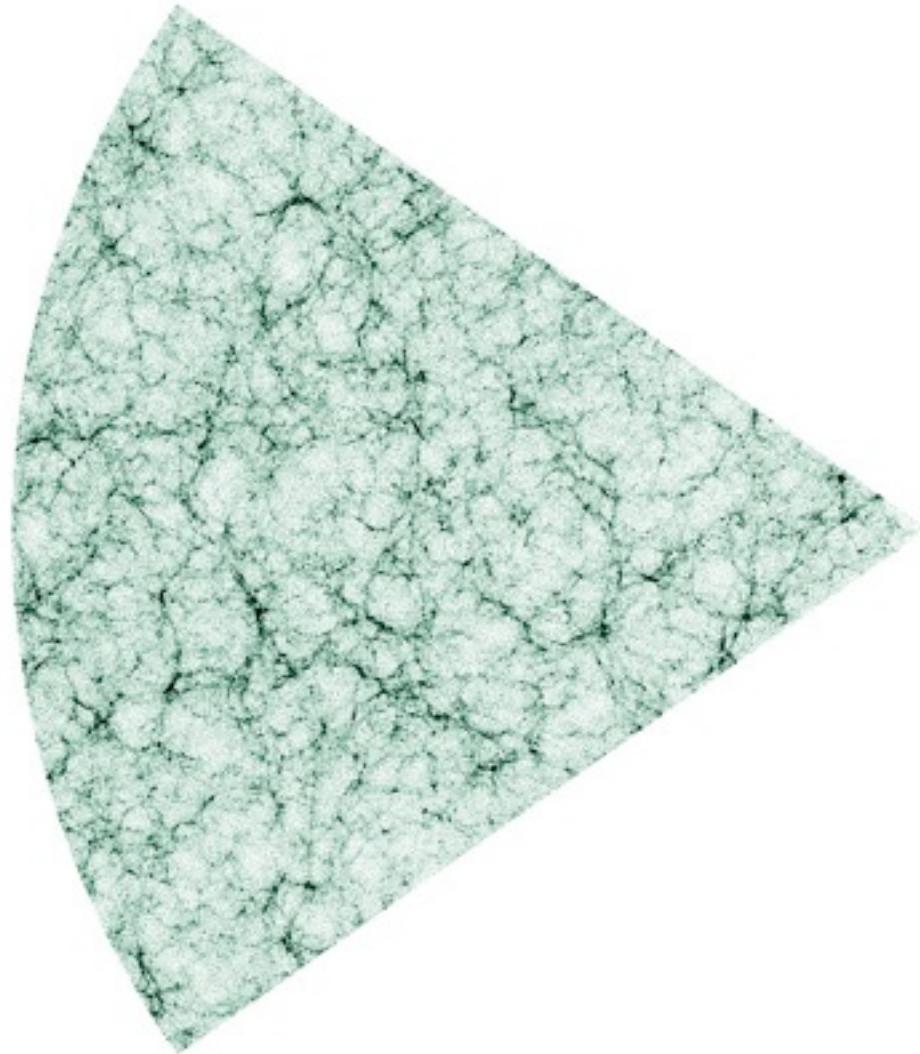
- Simulações do *Hubble Volume*. Área similar à do SDSS  $10^6$  “partículas”
- 500 Gb de dados
- O modelo de matéria escura fria e energia escura reproduz satisfatoriamente a maioria das propriedades do nosso universo

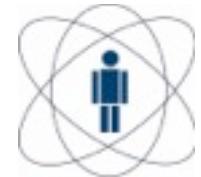




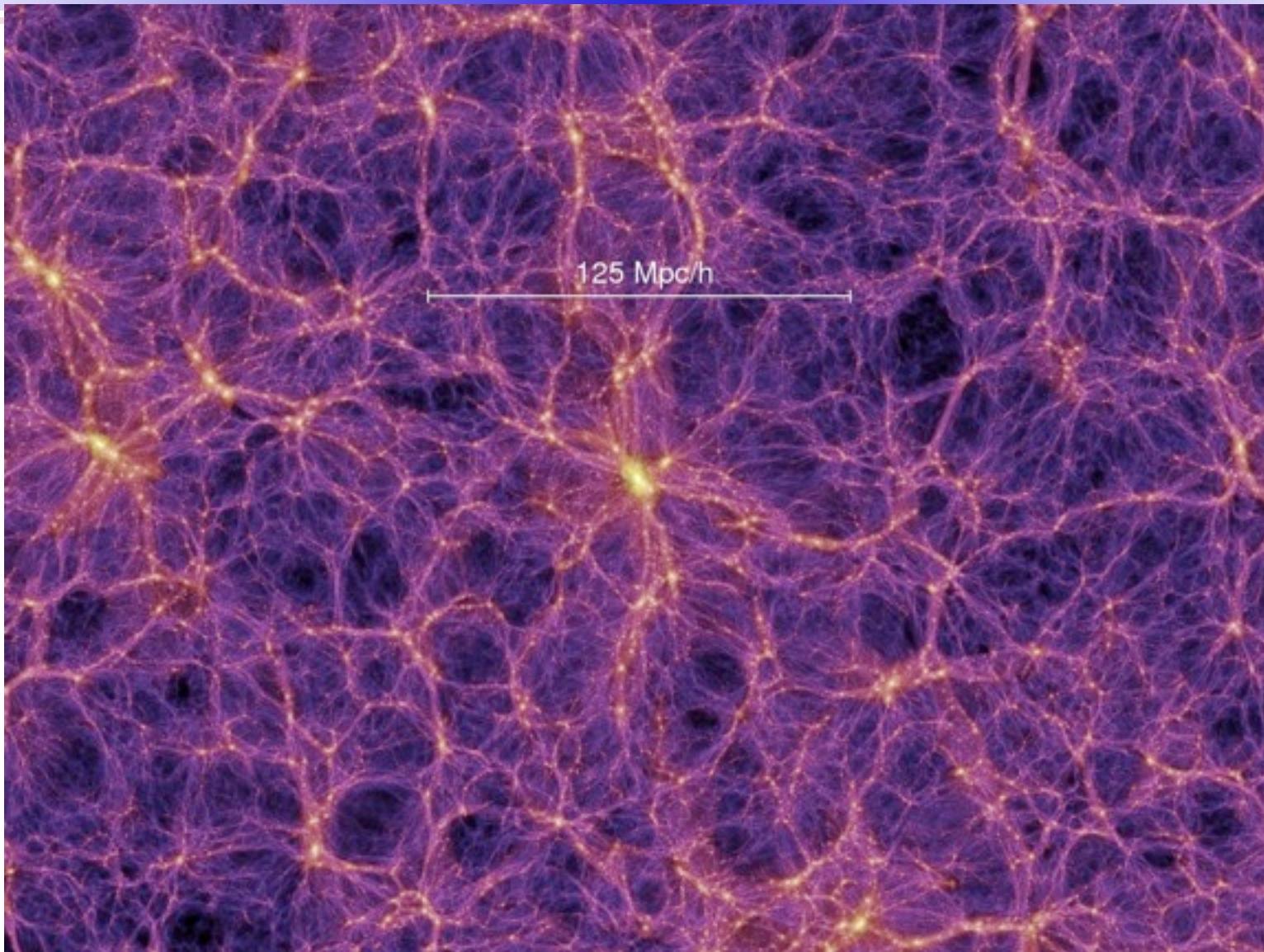
# Resultados de Simulações

- 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





# A Simulação do Milênio



# OUTROS OBSERVÁVEIS



# Observáveis da Energia Escura

- Os projetos atuais com foco na energia escura se concentram em 4 observáveis (além da RCF):
  - Abundância de aglomerados de galáxias
  - Estrutura em Grande Escala (oscilações acústicas de bárions)
  - Lenteamento gravitacional fraco (tomografia cósmica)
  - Supernovas
- Técnica fundamental para os levantamentos de imagens:
  - Desvios para o vermelho fotométricos

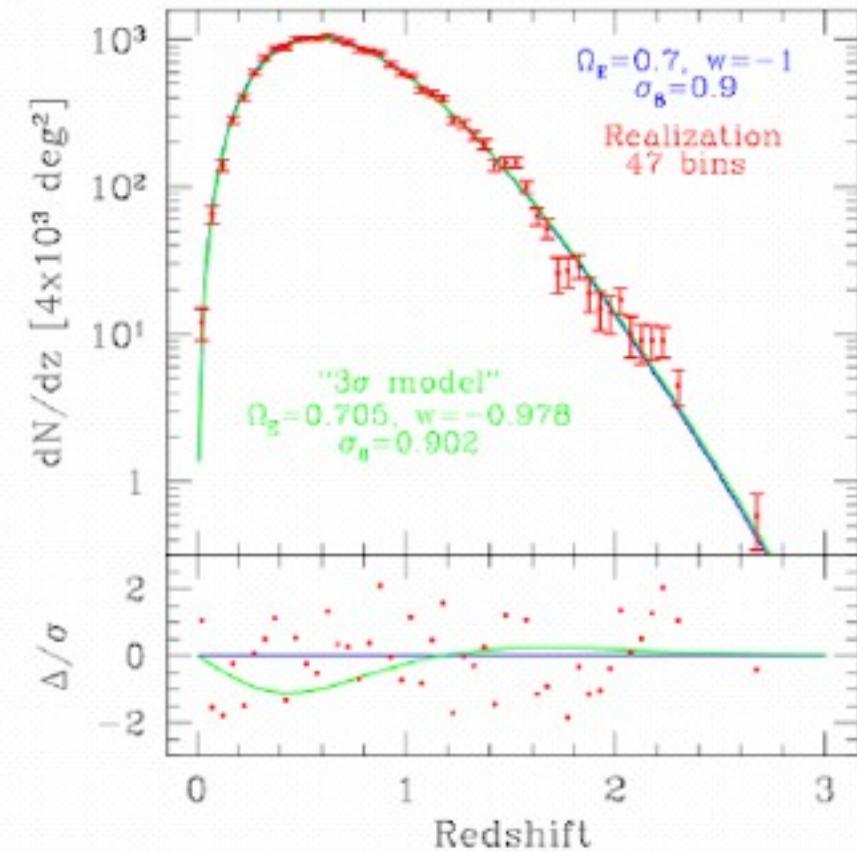
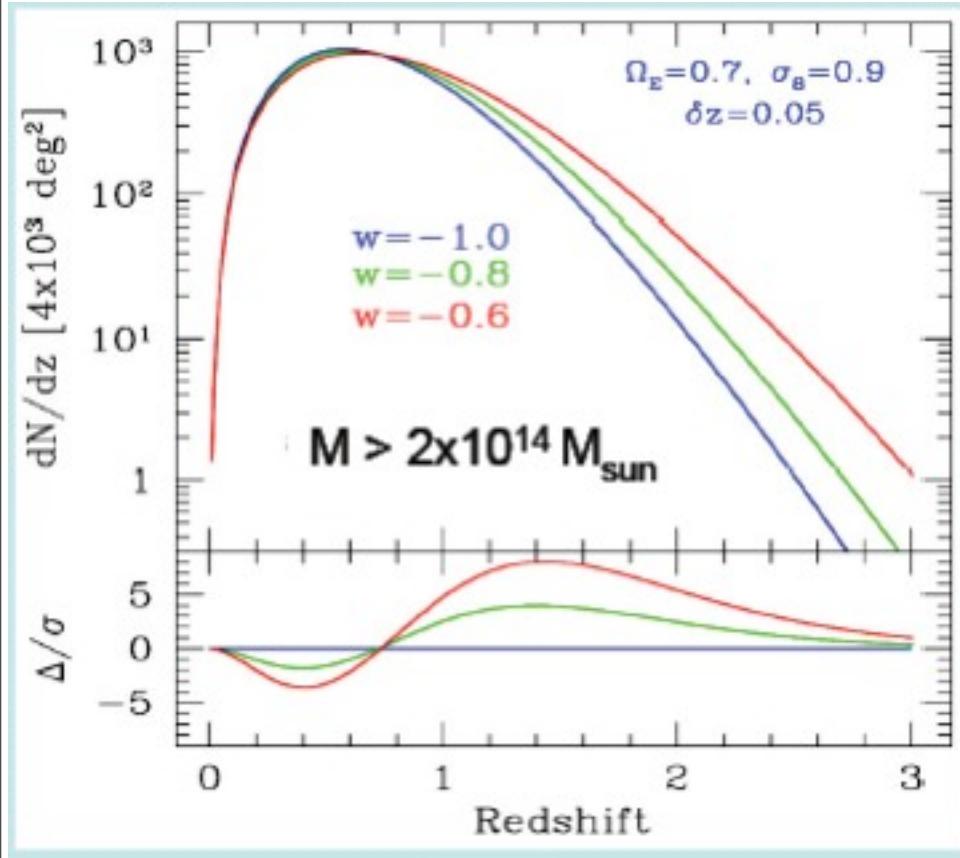
# Aglomerados de Galáxias e Energia Escura

- Função de Massa:

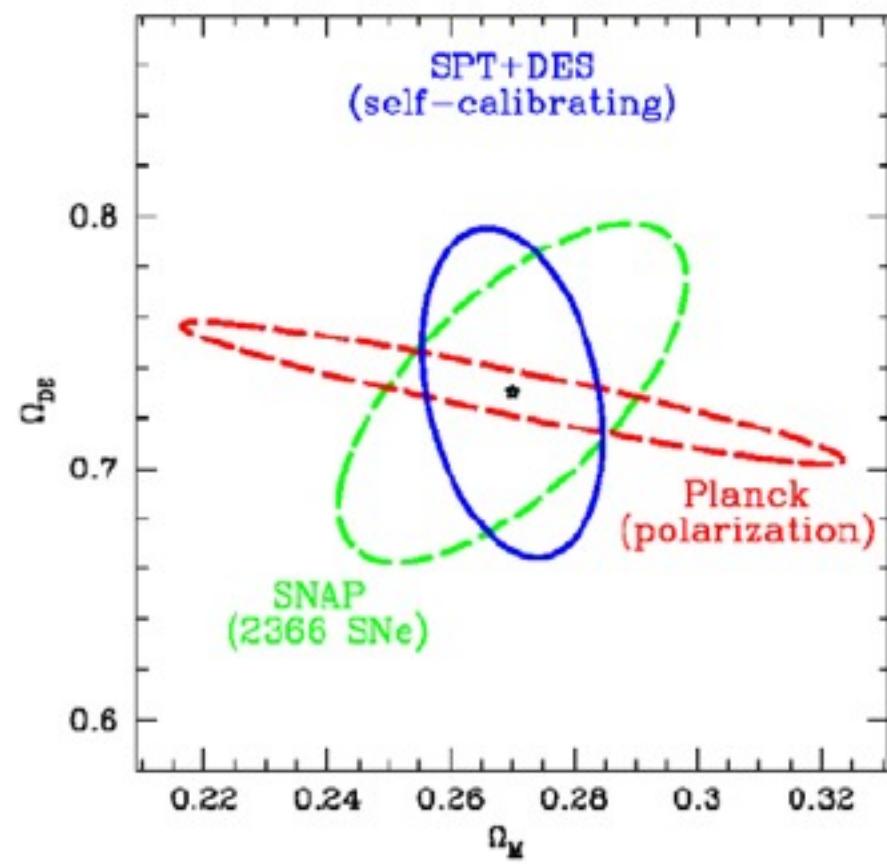
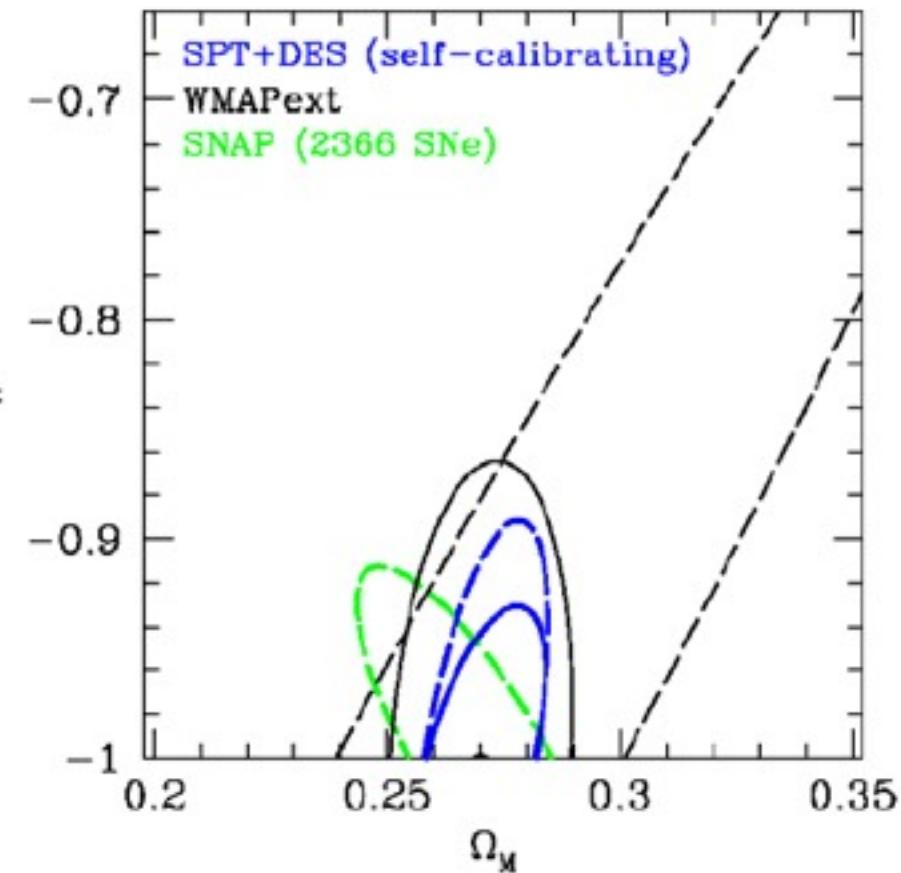
$$\frac{d^2N}{dzd\Omega}(z) = \frac{d^2V}{dzd\Omega}(z) n_{com}(z) = \frac{c}{H(z)} D_A^2(1+z)^2 F(D_z(z), \sigma_M)$$

- Sensível à Energia Escura!

# Aglomerados de Galáxias e Energia Escura



# Limites Esperados a Partir de Aglomerados



# Aglomerados de Galáxias e Energia Escura

- Função de Massa:

$$\frac{d^2N}{dzd\Omega}(z) = \frac{d^2V}{dzd\Omega}(z) n_{com}(z) = \frac{c}{H(z)} D_A^2 (1+z)^2 F(D_z(z), \sigma_M)$$

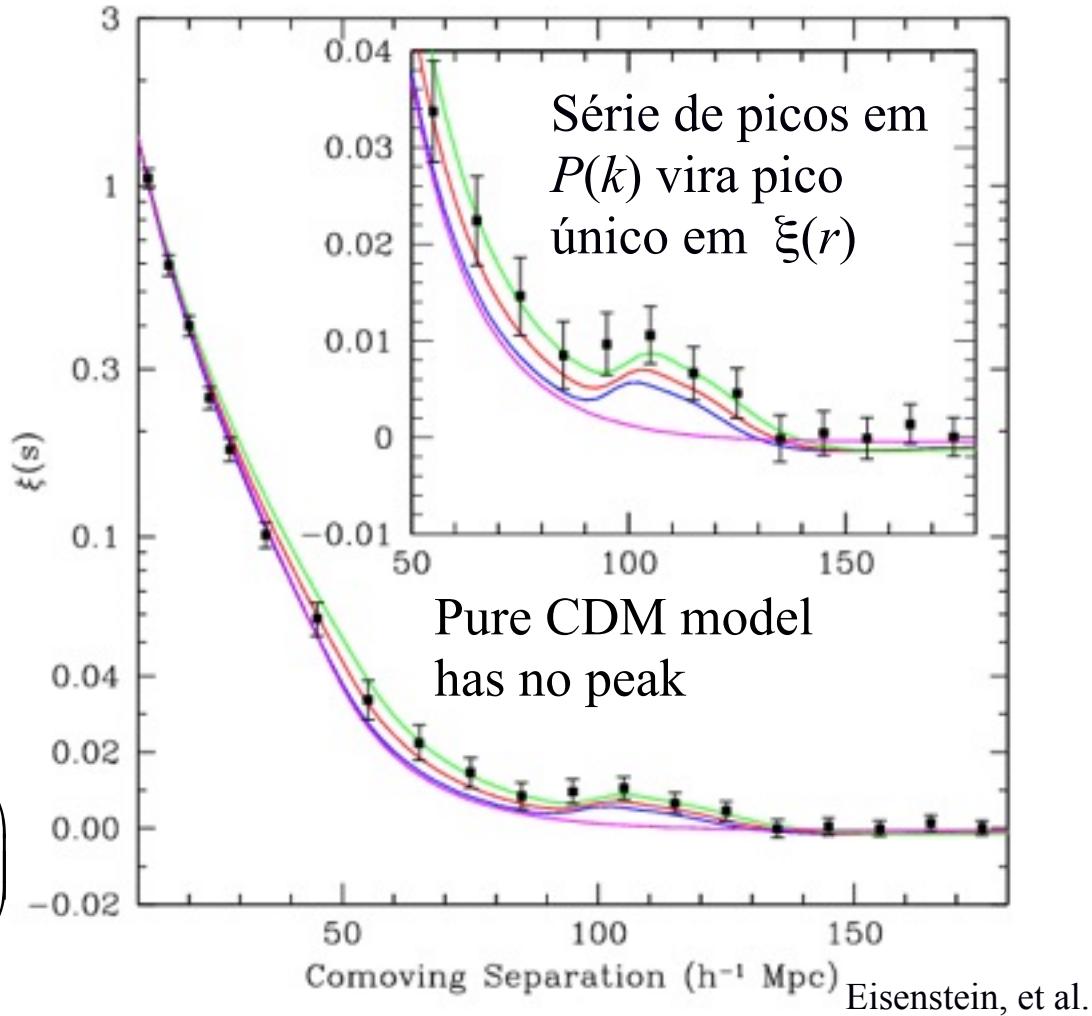
- Sensível à Energia Escura!
- Medidas da massa em altos z:
  - $M > 2 \times 10^{14} M_\odot$ : efeito SZ, weak lensing
  - $M < 2 \times 10^{14} M_\odot$ : weak lensing, riqueza (estatístico)
- Espectro de potência de aglomerados: aglomeração de aglomerados e viés
- Erros sistemáticos completamente independentes

# Aglomeração Angular e Oscilações Acústicas de Bárions

- Oscilações de Bárions (picos acústicos)
- Régua padrão

$$\theta_A = \frac{r_s(z)}{d_A(z)}$$

$$d_A = c(1+z)^{-1} \frac{1}{\sqrt{|1-\Omega_0|}} S \left( \sqrt{|1-\Omega_0|} \int_0^z \frac{dz'}{H(z')} \right)$$

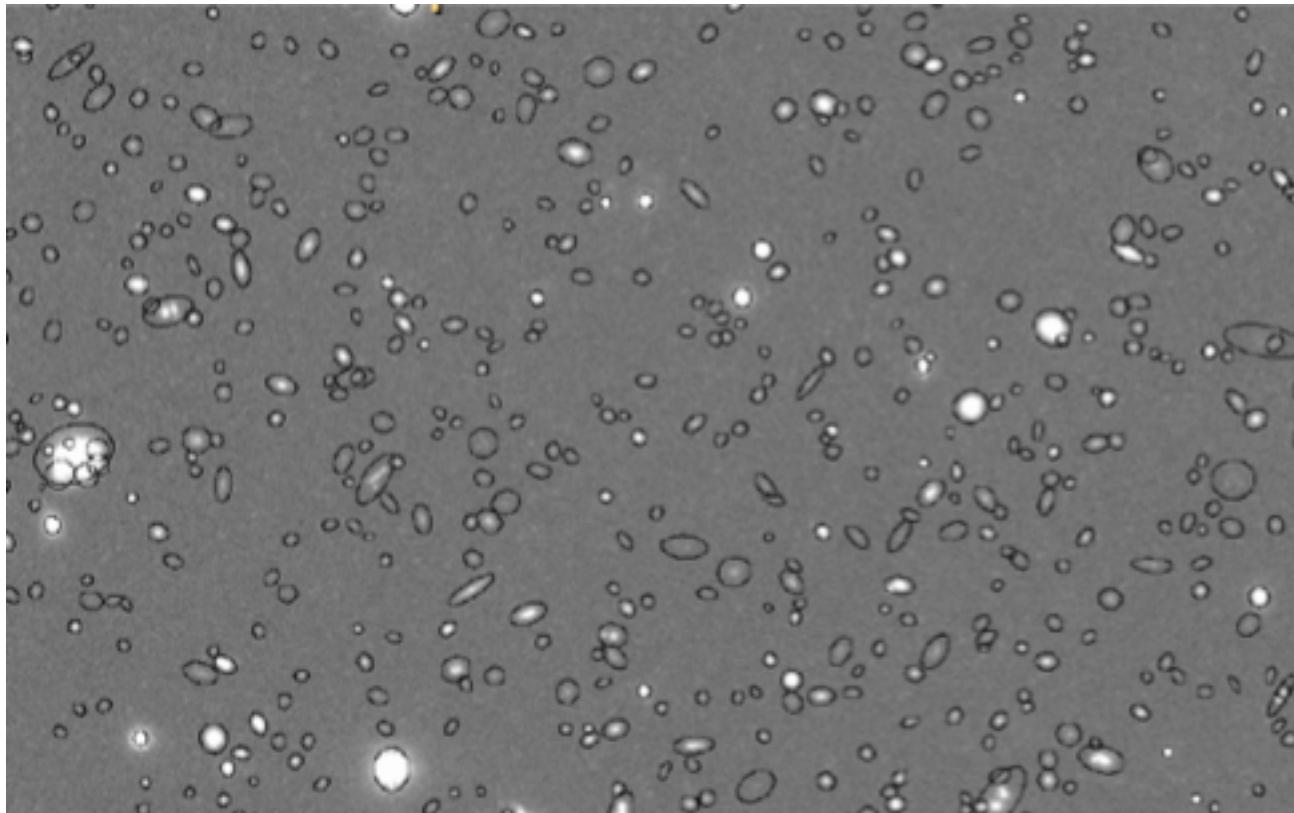




DARK ENERGY  
SURVEY

# Efeito Fraco de Lente Gravitacional

- ➊ Deformação (e magnificação) das imagens das galáxias
- ➋ Orientação na direção tangencial; Correlações

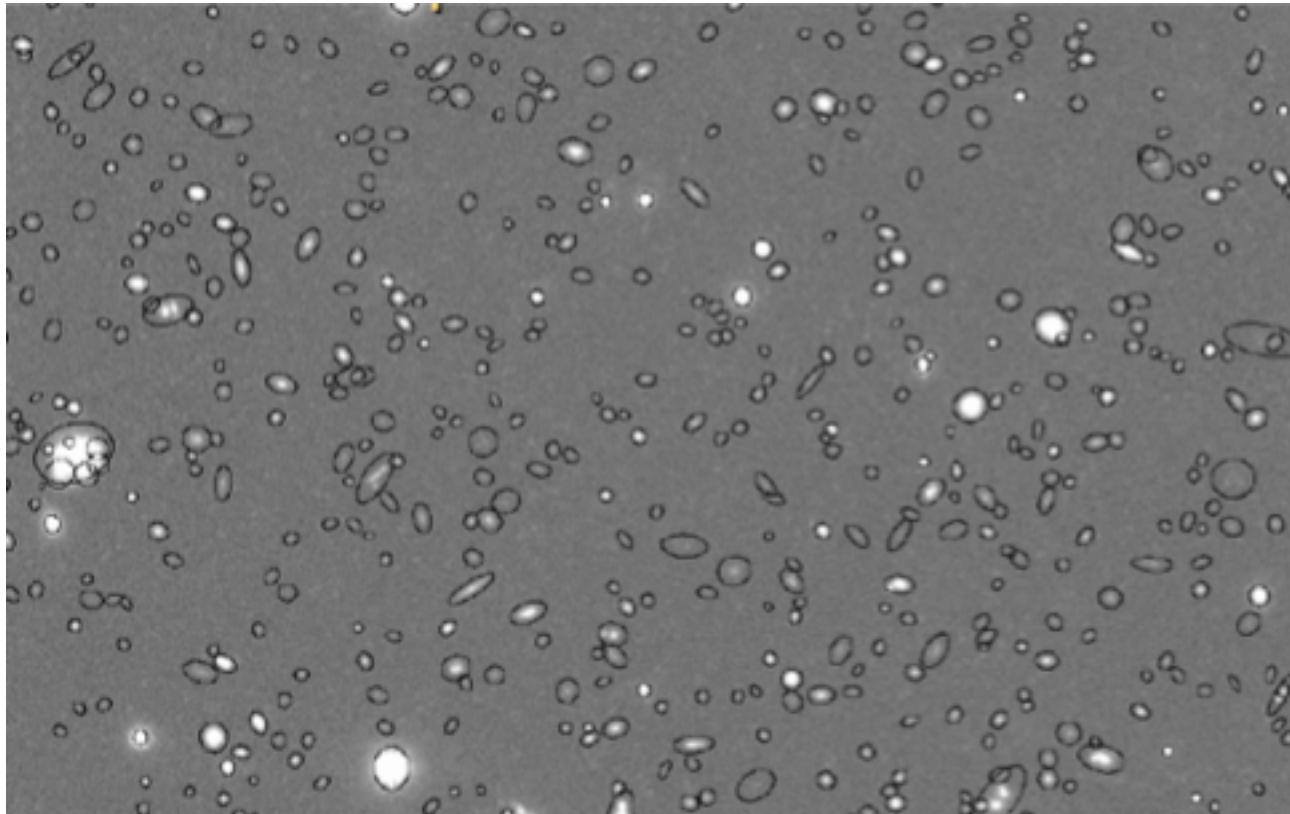




DARK ENERGY  
SURVEY

# Efeito Fraco de Lente Gravitacional

- ➊ Deformação (e magnificação) das imagens das galáxias
- ➋ Orientação na direção tangencial; Correlações



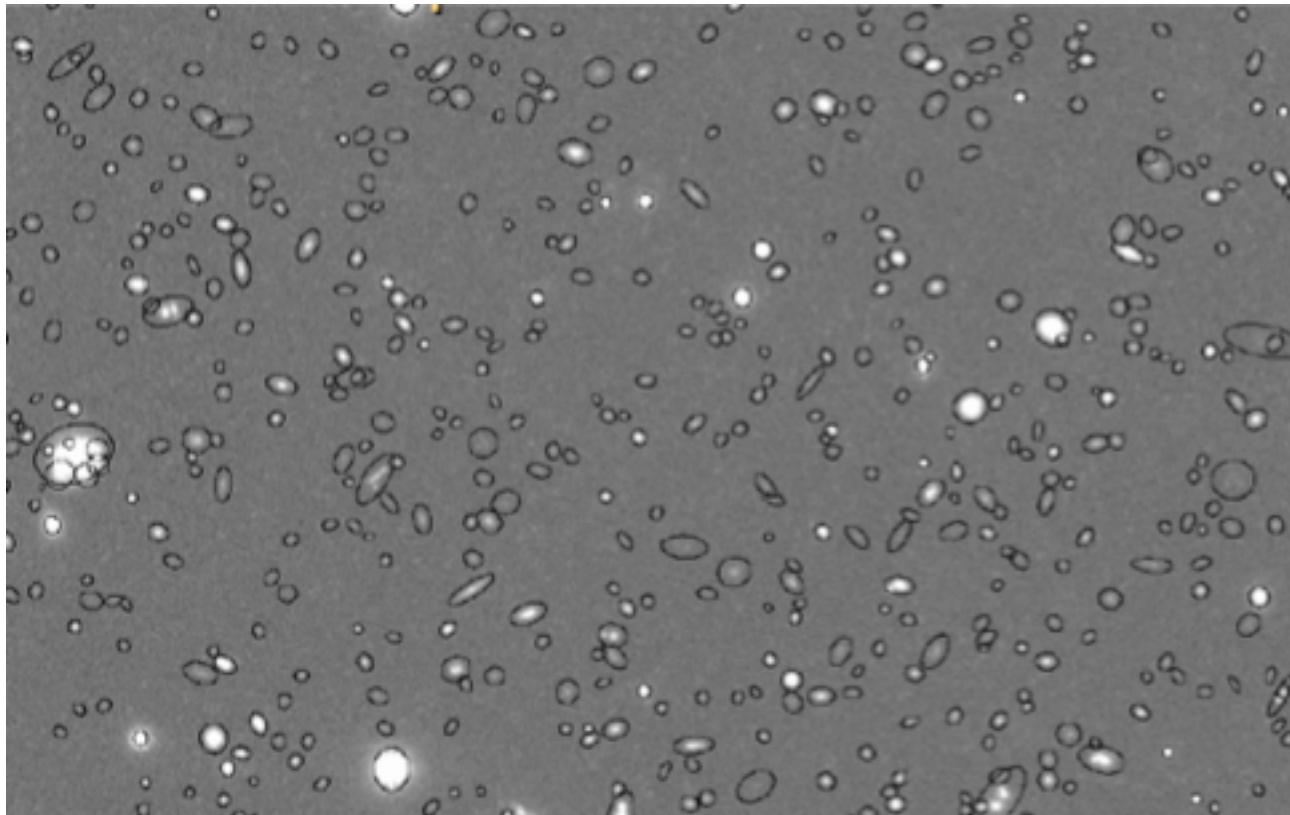
- ➌ Sensível à energia escura (distância, curvatura, fator de crescimento)



DARK ENERGY  
SURVEY

# Efeito Fraco de Lente Gravitacional

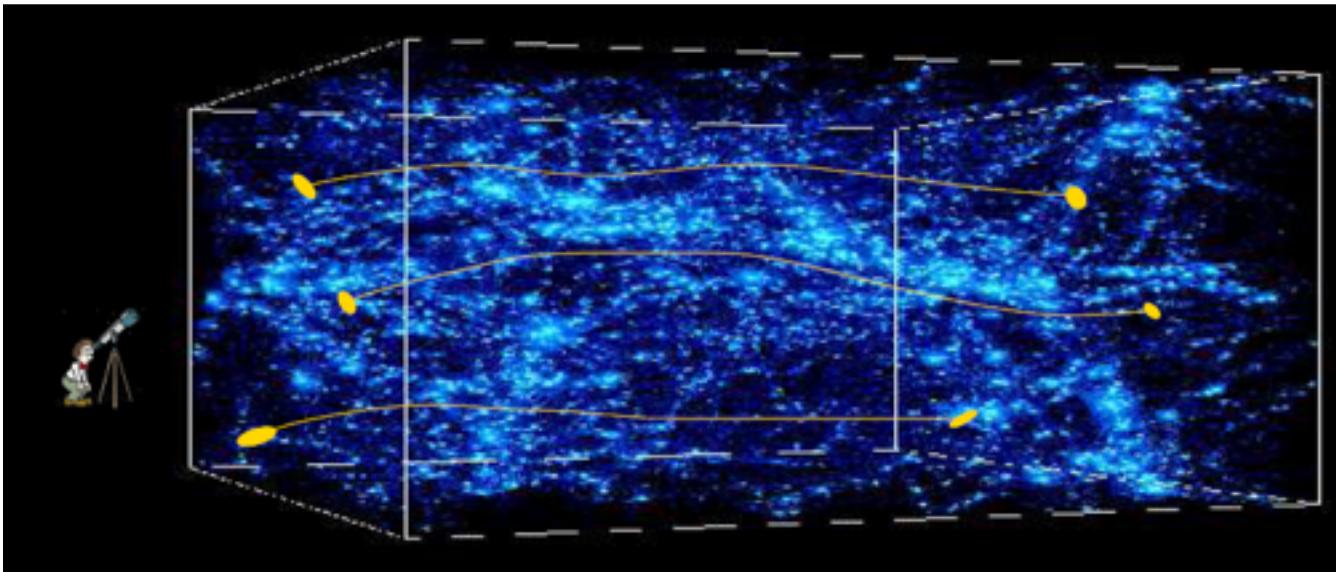
- ➊ Deformação (e magnificação) das imagens das galáxias
- ➋ Orientação na direção tangencial; Correlações



- ➌ Sensível à energia escura (distância, curvatura, fator de crescimento)
- ➍ Menos sensível à física bariônica

# Cisalhamento cósmico

- Estudo da estrutura do Universo em grandes escalas
- Tomografia

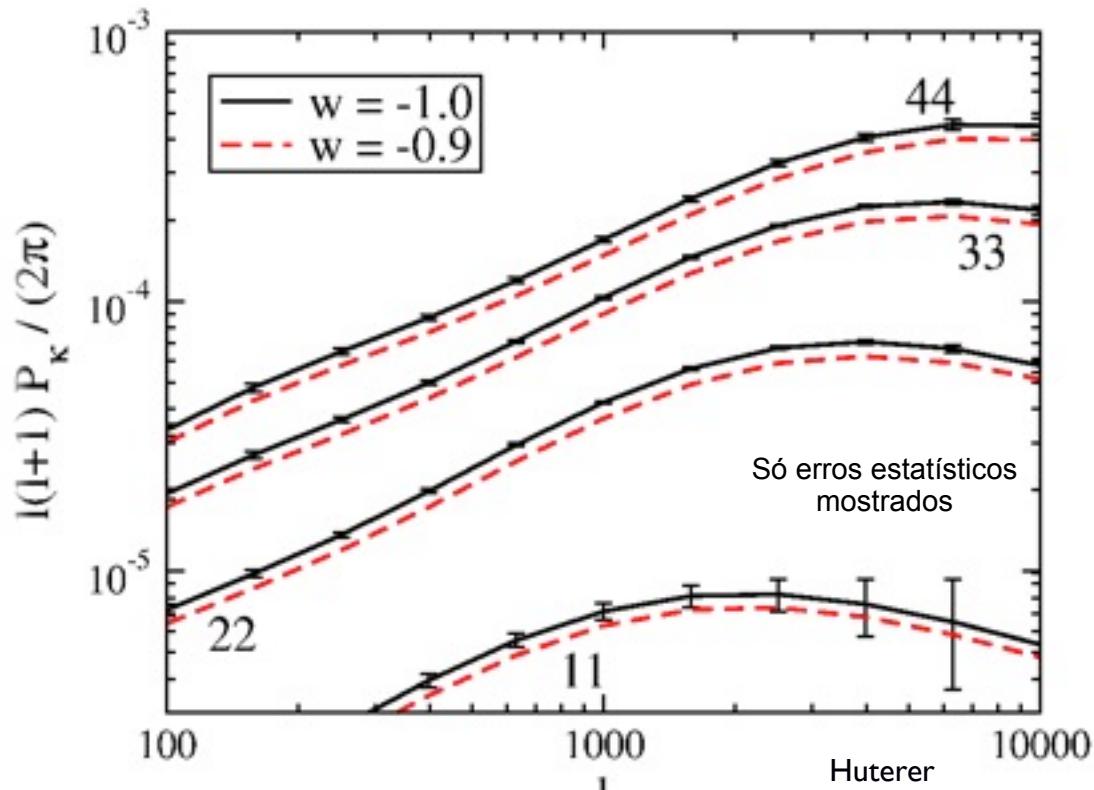


# Cisalhamento cósmico

- Efeito fraco de lente (estatístico)
- Sensível à energia escura (geometria + fator de crescimento)
- Menos sensível à física bariônica
- Grandes separações: linear
- Exemplo: espectro de potência do cisalhamento cósmico em quatro fatias de foto z's (tomografia)

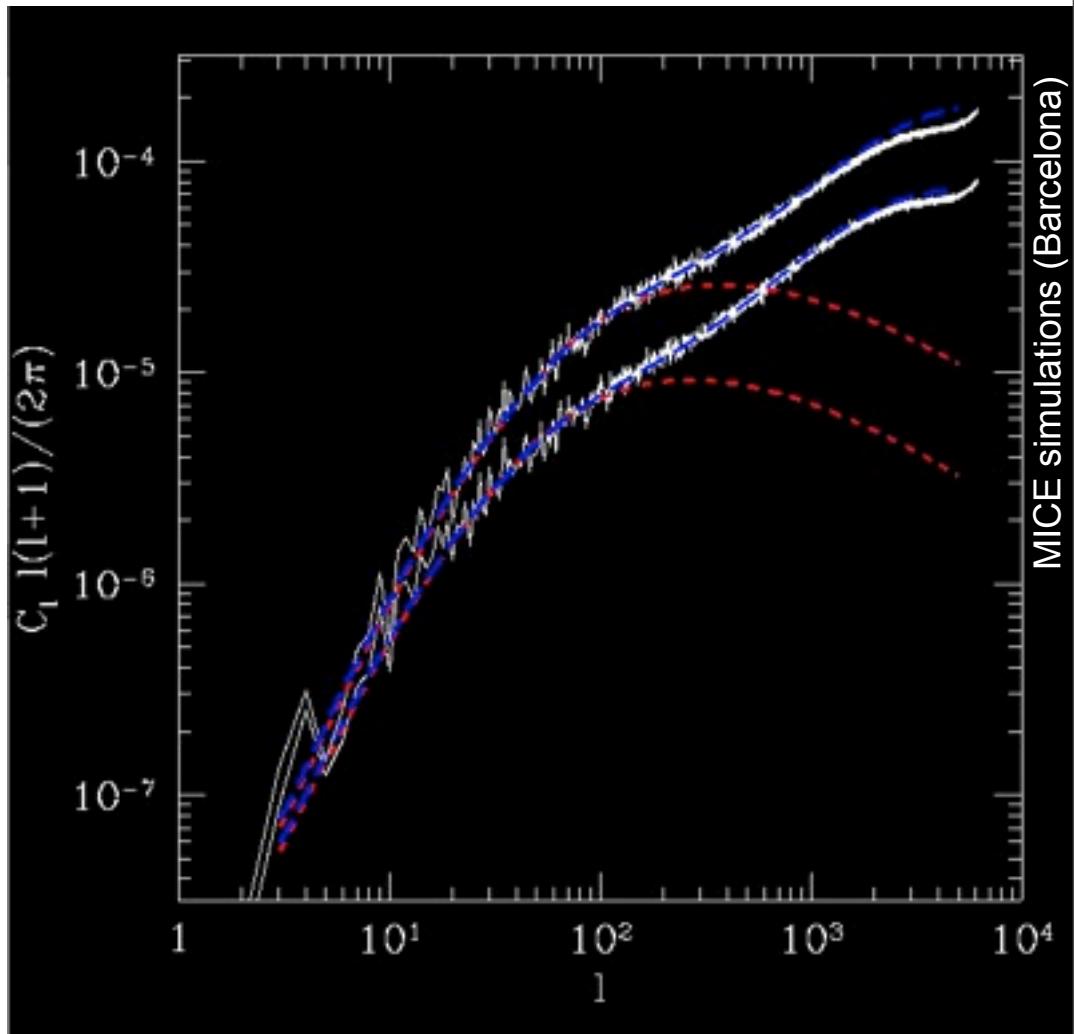
$$C_\ell^{x_a x_b} = \int dz \frac{H(z)}{D_A^2(z)} W_a(z) W_b(z) P^{s_a s_b}(k = \ell/D_A; z)$$

$$\Delta C_\ell = \sqrt{\frac{2}{(2\ell+1)f_{sky}}} \left( C_\ell + \frac{\sigma^2(\gamma_i)}{n_{eff}} \right)$$



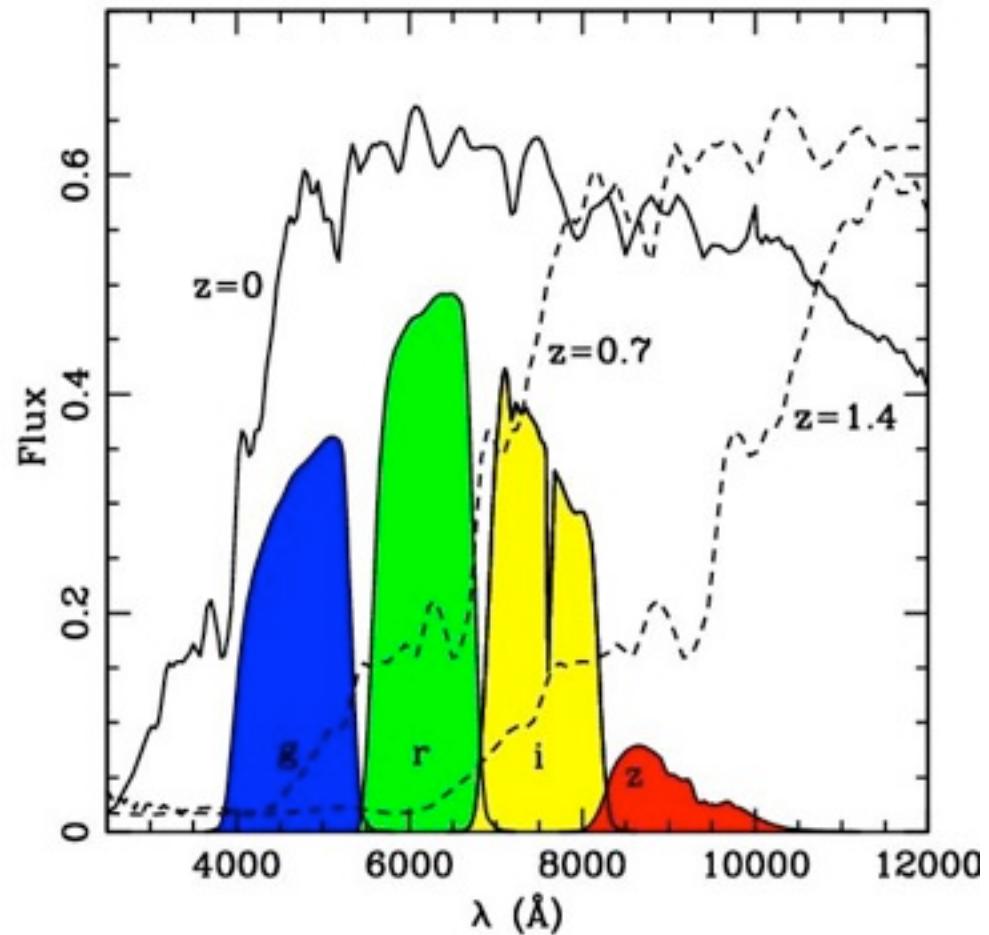
# Cisalhamento cósmico

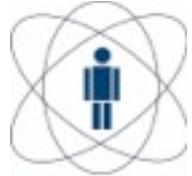
- Medida de correlações
- Espectro de potência da convergência
- Linear x não-linear
- Sensibilidade cosmológica
  - Composição e geometria do Universo:  $H(z)$ ,  $d_A(z)$
  - Crescimento de estruturas:  $G(z)$
  - Natureza da energia escura:  
 $w = p/(c^2) = -1?$  const?
    - Condições iniciais:  $n_s$ , inflação
    - Amplitude das flutuações de densidade:  $\sigma_8$



# Desvios para o vermelho fotométricos

- Características marcantes do espectro (quebra de 4000 Å)
- Diferença no fluxo através dos filtros quando a galáxia é desviada para o vermelho

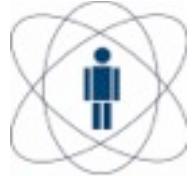




# O Universo Conhecido

Hoje medimos com precisão:

- A Expansão do Universo
- A Radiação Cósmica de Fundo
- A Abundância de Elementos Leves
- A Curvatura do Universo
- Movimentos no Cosmos
- Distribuição de Matéria



# O Universo Conhecido

Hoje medimos com precisão:

- A Expansão do Universo
- A Radiação Cósmica de Fundo
- A Abundância de Elementos Leves
- A Curvatura do Universo
- Movimentos no Cosmos
- Distribuição de Matéria
- ...



# O Universo Conhecido

Hoje medimos com precisão:

- A Expansão do Universo
- A Radiação Cósmica de Fundo
- A Abundância de Elementos Leves
- A Curvatura do Universo
- Movimentos no Cosmos
- Distribuição de Matéria
- ...

Com

Todos os comprimentos de onda

Lentes gravitacionais

Diversos “objetos”: RCF, galáxias, quasares, gás, aglomerados...

# Resumo da Cosmologia Padrão



# Resumo da Cosmologia Padrão



- Composição do Universo:

# Resumo da Cosmologia Padrão



## ● Composição do Universo:

1/3 de CDM, 2/3 de “energia escura”, 4% de matéria bariônica

# Resumo da Cosmologia Padrão



## ● Composição do Universo:

1/3 de CDM, 2/3 de “energia escura”, 4% de matéria bariônica  
(CMB, LSS, D/H,  $H_0$ ,  $q_0$ , lentes gravitacionais, raios-x, etc.)



# Resumo da Cosmologia Padrão

- Composição do Universo:

1/3 de CDM, 2/3 de “energia escura”, 4% de matéria bariônica  
(CMB, LSS, D/H,  $H_0$ ,  $q_0$ , lentes gravitacionais, raios-x, etc.)

- Origem das flutuações: Inflação



# Resumo da Cosmologia Padrão

## ● Composição do Universo:

1/3 de CDM, 2/3 de “energia escura”, 4% de matéria bariônica  
(CMB, LSS, D/H,  $H_0$ ,  $q_0$ , lentes gravitacionais, raios-x, etc.)

## ● Origem das flutuações: Inflação

Flutuações gaussianas,  $k = 0$ , presença de picos



# Resumo da Cosmologia Padrão

## ● Composição do Universo:

1/3 de CDM, 2/3 de “energia escura”, 4% de matéria bariônica  
(CMB, LSS, D/H,  $H_0$ ,  $q_0$ , lentes gravitacionais, raios-x, etc.)

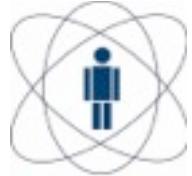
## ● Origem das flutuações: Inflação

Flutuações gaussianas,  $k = 0$ , presença de picos

## ● Formação de estruturas: amplificação gravitacional (+ hidrodinâmica + outros processos físicos)

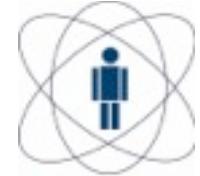


# Problemas?



# Problemas?

- Incógnitas e problemas fundamentais em aberto:
  - Pequenas escalas
    - Satélites
    - Halos pontiagudos (*cuspy*)
    - Buracos negros supermassivos?
  - Grandes escalas
    - Baixos multipolos da radiação cósmica de fundo
  - **Não sabemos o que compõe 96% da densidade do Universo → “Novo éter”?**



# O Universo Desconhecido



# O Universo Desconhecido

- Não sabemos o que compõe 96% da densidade do Universo



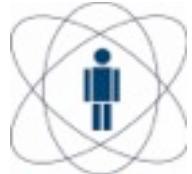
# O Universo Desconhecido

- Não sabemos o que compõe 96% da densidade do Universo
- Não sabemos a sua geometria



# O Universo Desconhecido

- Não sabemos o que compõe 96% da densidade do Universo
- Não sabemos a sua geometria
- Não Entendemos a Formação de Galáxias



# O Universo Desconhecido

- Não sabemos o que compõe 96% da densidade do Universo
- Não sabemos a sua geometria
- Não Entendemos a Formação de Galáxias
- Não entendemos o Universo Primordial
  - Porquê há mais matéria do que anti-matéria?
  - Outros processos físicos?
  - Gravitação quântica
  - Homogeneidade e isotropia
  - Singularidade, ricochete, origem, expansão eterna.