


PROGRAMA

- Aula 1: *Overview* de lentes e formalismo básico
- Aula 2: Conceitos, formalismo, modelos e soluções, exemplos
- Aula 3: Desvio temporal e Efeito fraco de lentes
- Aulas 4 e 5: Revisão de cosmologia, Cosmologia e lentes
- Tópicos avançados:
 - Cosmologia (LSS + CMB)
 - Testes de gravidade modificada
 - Lentes e modelos de matéria escura



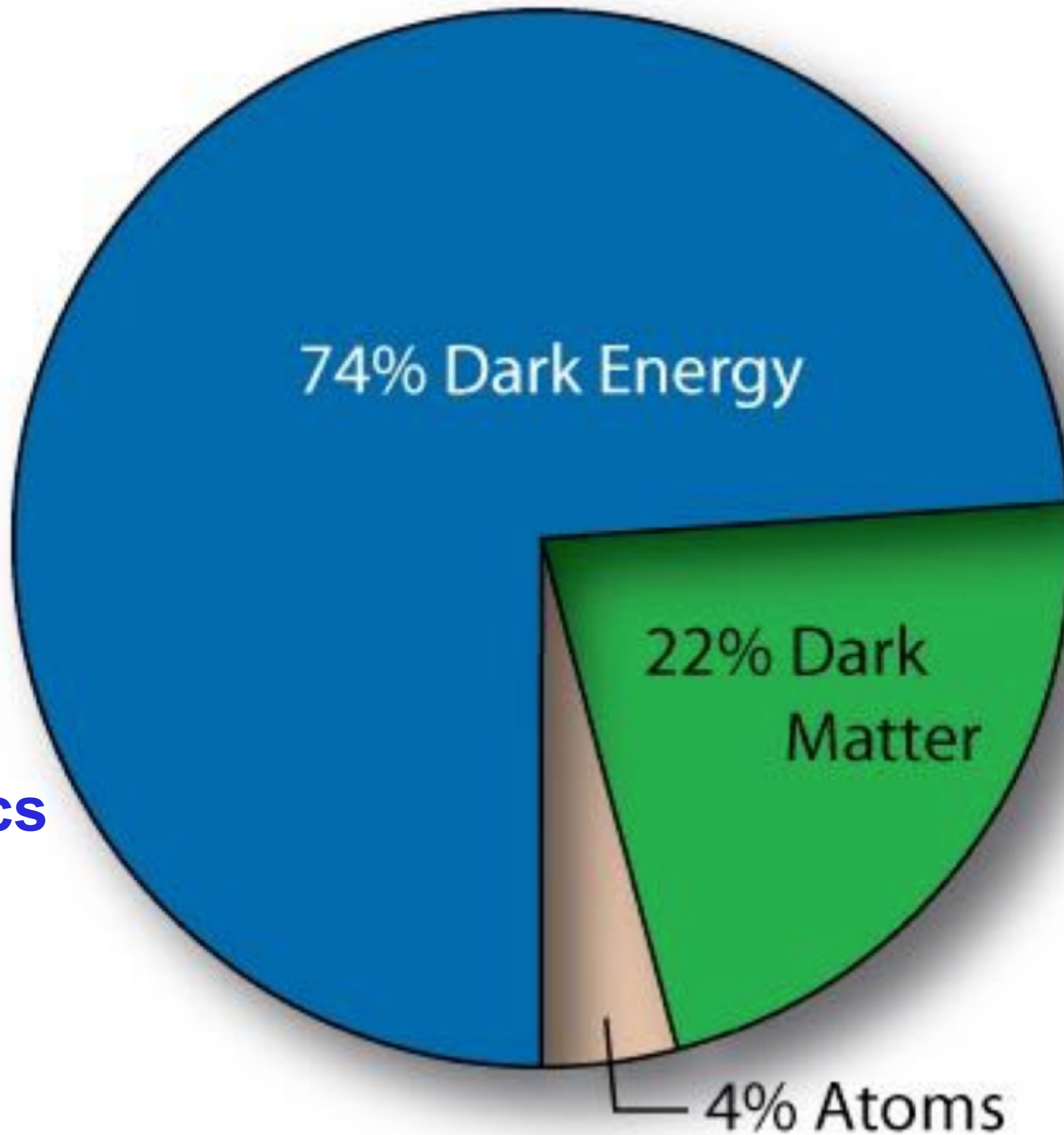
A scenic view of a beach with turquoise water and a clear blue sky. The text is overlaid on the image.

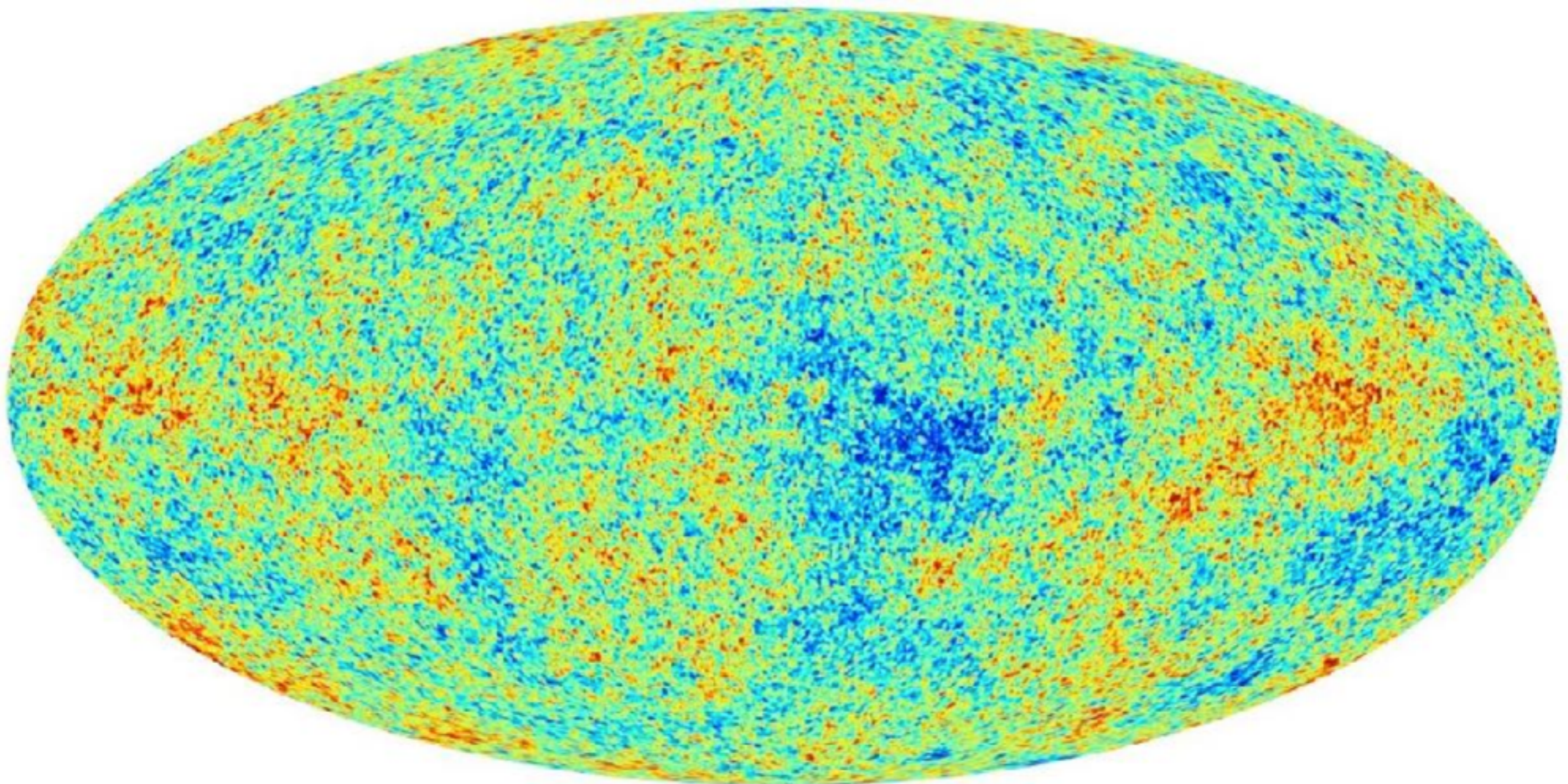
PREPARAÇÃO: MICRO-REVISÃO DE COSMOLOGIA

Cosmologia em uma aula...

- Matéria e energia escuras, estrutura em grande escala
- Distâncias cosmológicas
- Formação de estruturas: fator de crescimento e espectro de potências
- Radiação cósmica de fundo, desacoplamento, e oscilações acústicas de bárions

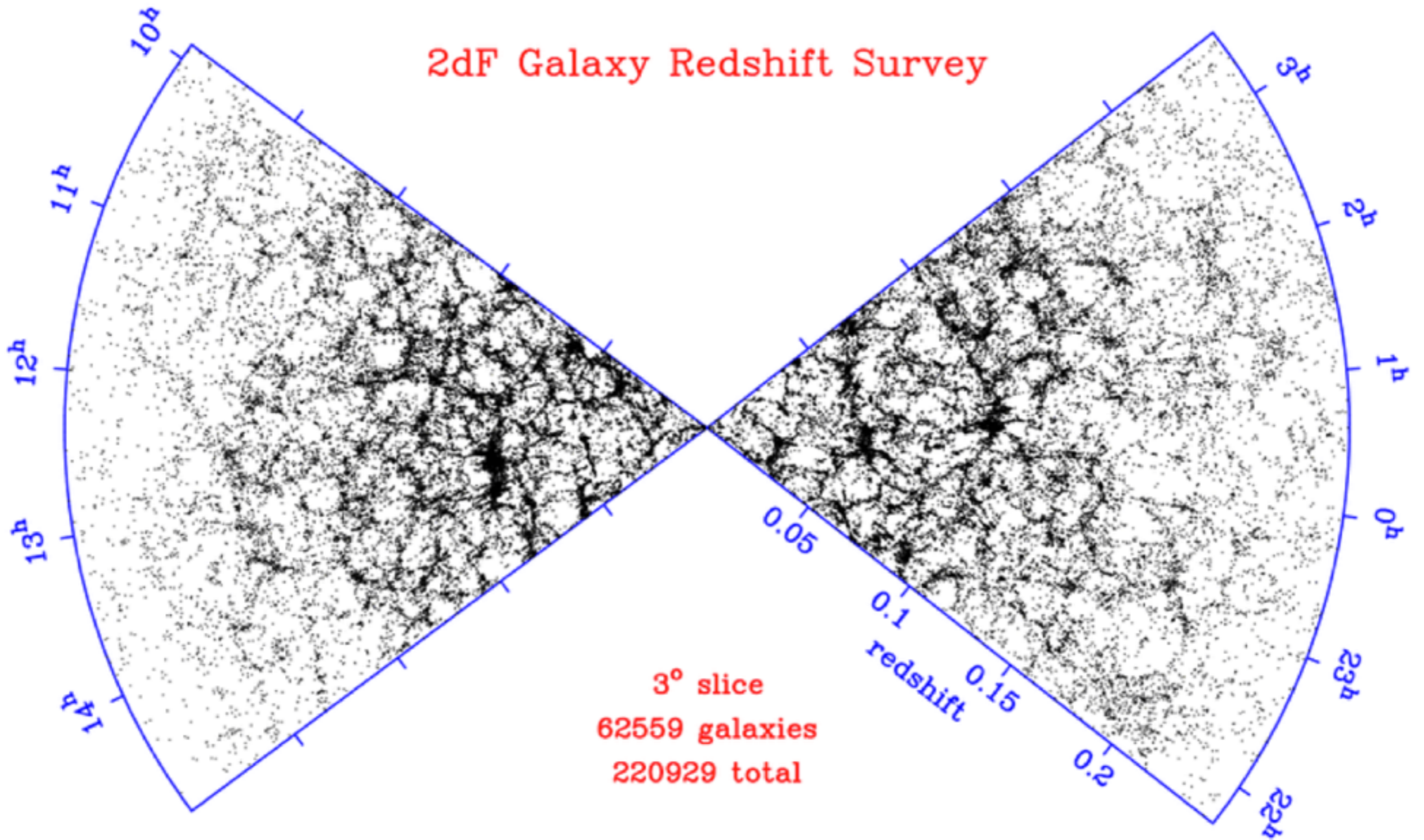
**Content
+ dynamics**





Initial conditions

Cleanest cosmological observable

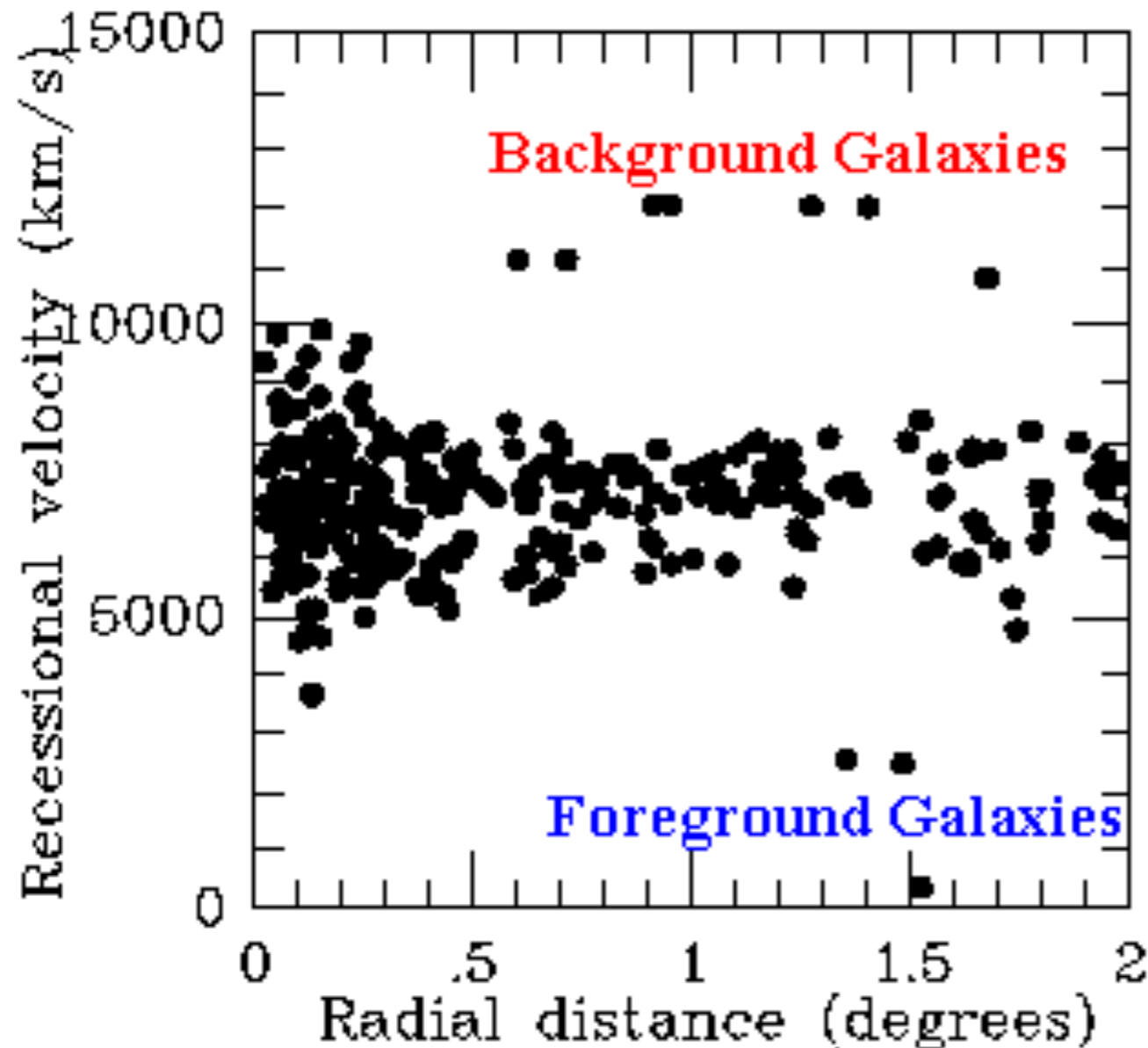


Large-scale structure
Linear and nonlinear evolution of
primordial seeds



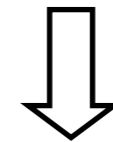
Dark Matter

- Velocity dispersion in galaxy clusters
(Zwicky 1934)



Virial theorem

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



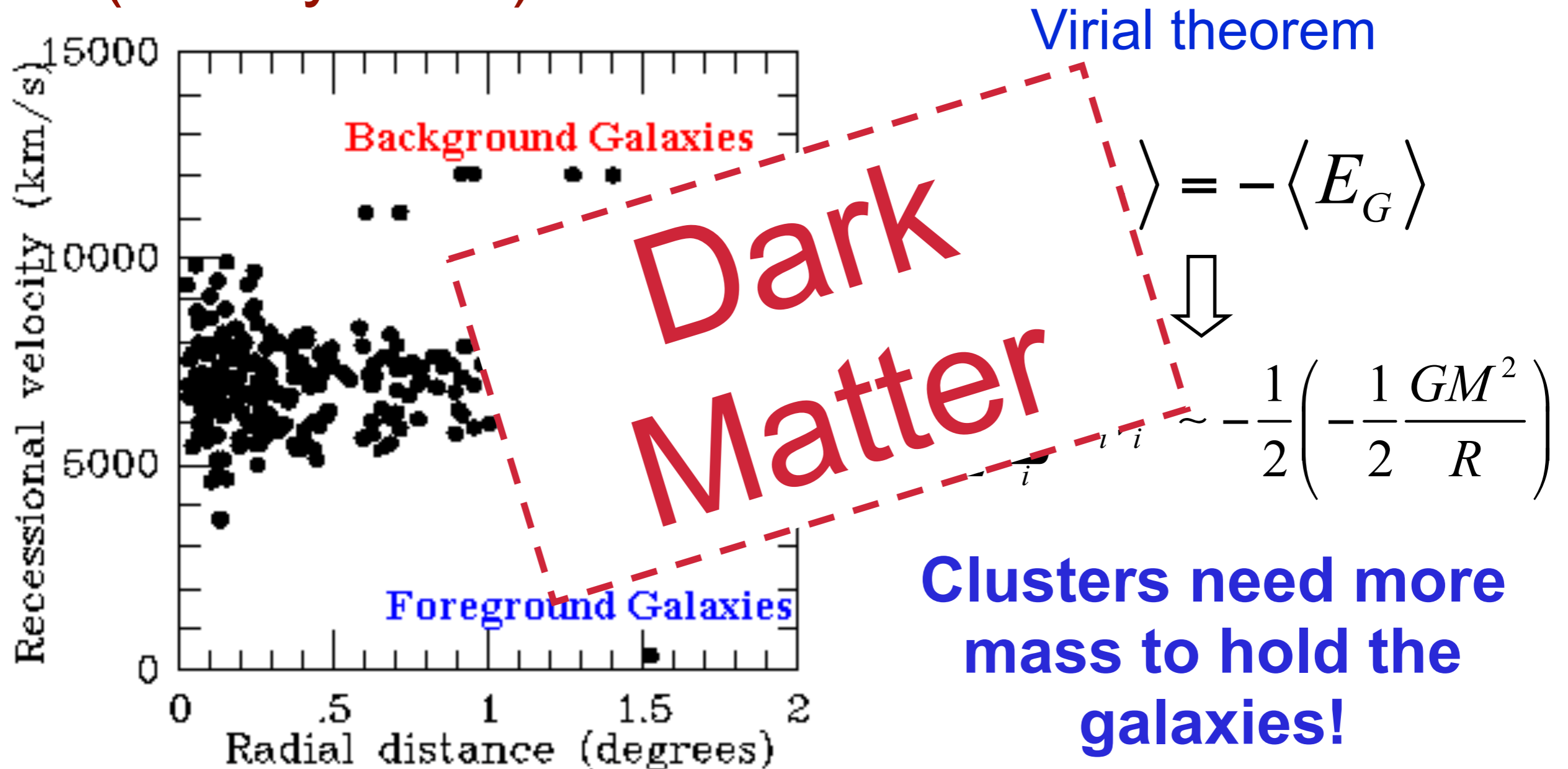
$$\frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2 \sim -\frac{1}{2} \left(-\frac{1}{2} \frac{GM^2}{R} \right)$$

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



Dark Matter

- Velocity dispersion in galaxy clusters (Zwicky 1934)





Hot Gas in Clusters

Intra-cluster gas

$T \sim 10.000.000 \text{ }^\circ\text{C}$

→ x-ray emission

Hydrostatic equilibrium

$$\nabla\phi = -\frac{1}{\rho}\nabla p$$

→ temperature depends on mass

Example

$$\rho(r) = \frac{kT_e}{2\pi G m_e r^2}$$

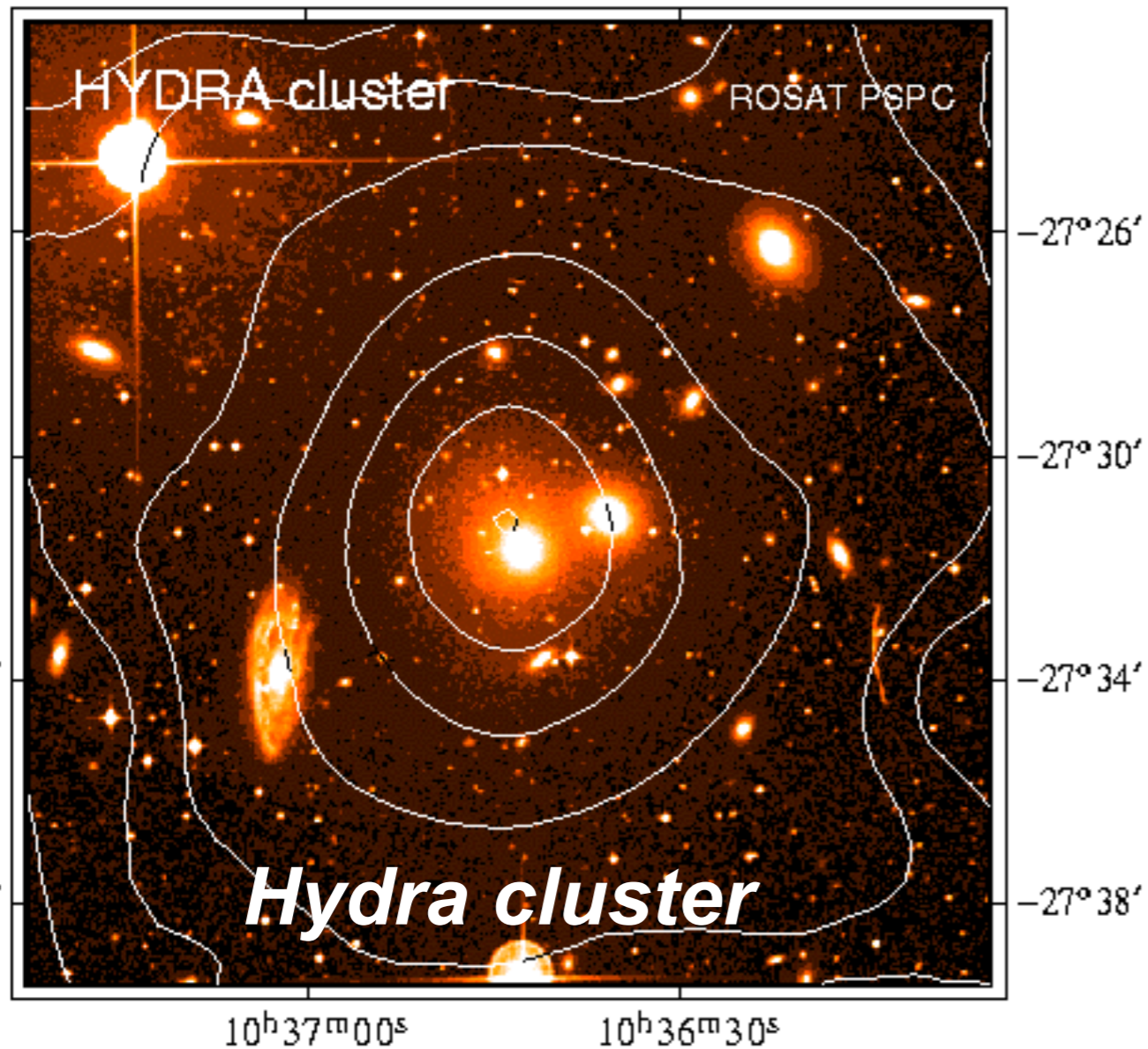


Hydra in the optical



X-ray Clusters

The gas is more uniformly distributed



Hydra in x-ray

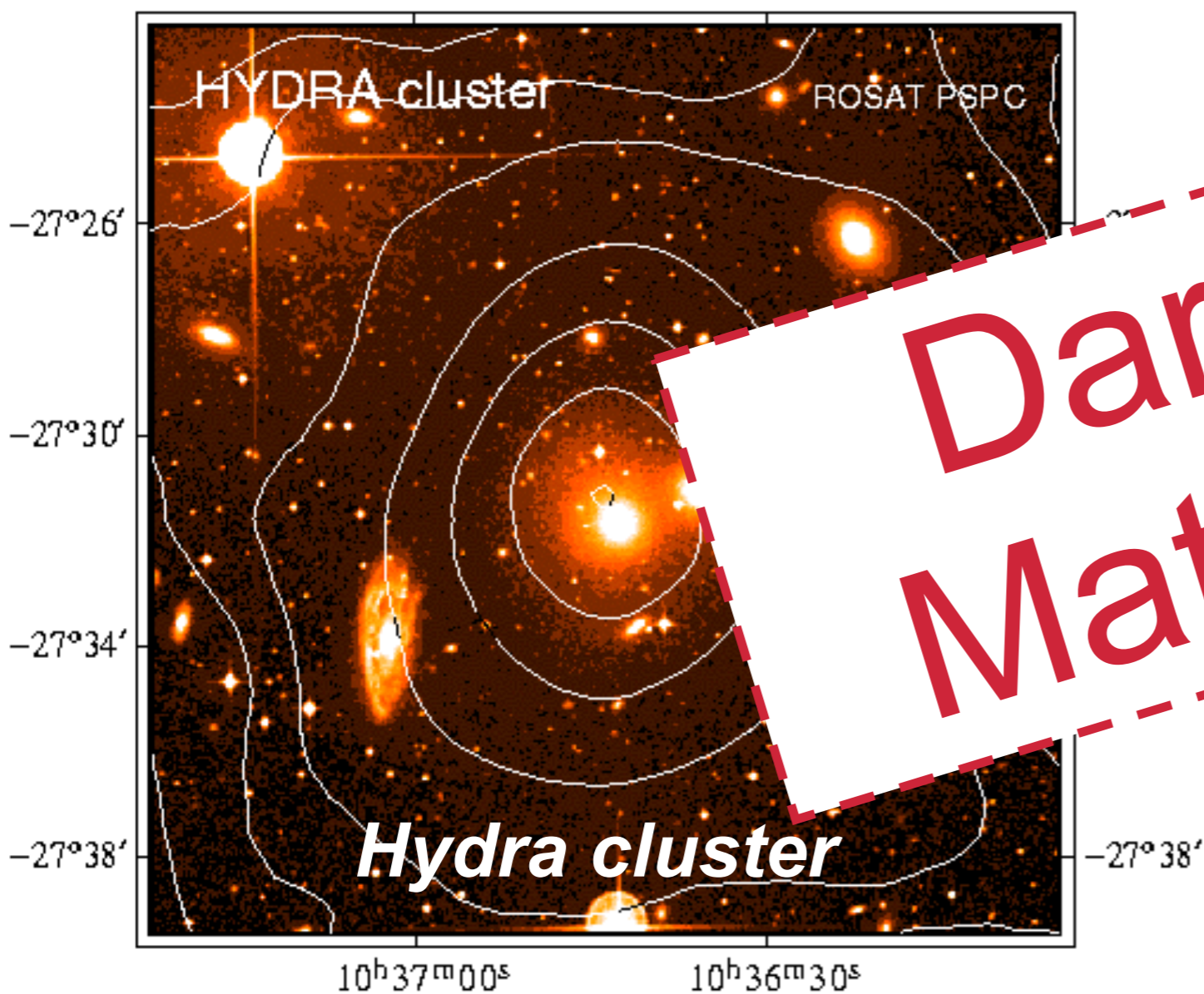


$M_{\text{gas}} \sim 20 \times M_{\text{stars}}$
Dark matter is still 80%



X-ray Clusters

The gas is more uniformly distributed



Hydra in x-ray



Dark Matter

$$M_{\text{gas}} \sim 20 \times M_{\text{stars}}$$

Dark matter is still 80%



Dark Matter in Galaxies

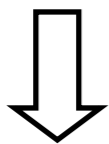
● Galaxy rotation curves

Back of envelope estimation

M33

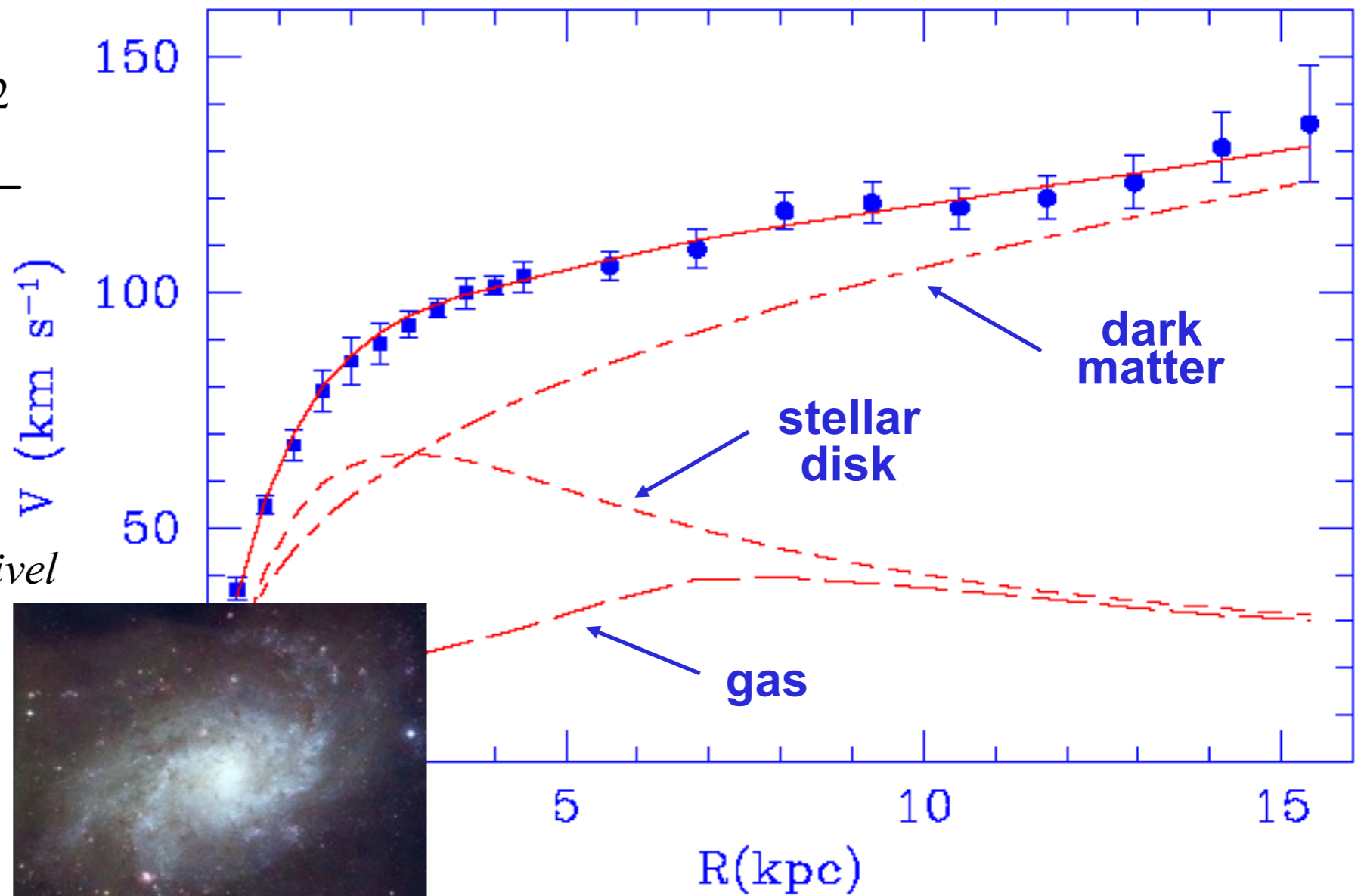
astro-ph/9909252

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



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

Dark Matter is less concentrated





Dark Matter in the Universe

Evidences:

- Galaxy rotation curves
- Motions in galaxies, clusters, and large-scale structure
- X-ray flux in clusters
- Gravitational lensing
- Sunyaev-Zel'dovich effect

There is $\sim 5x$ more *dark matter* than usual (SM) matter!

Non-baryonic: Does not interact with baryonic matter

(weak/no dissipation, no light emission, no nuclear reactions)

■ structures, *bullet*, nucleosynthesis...

Where is the “ordinary matter”?

- Visible matter (stars): 10%
- Most part of baryonic matter is “dark” (gas, planets, BH)



Dark Matter in the Universe

Evidences:

- Galaxy rotation curves
- Motions in galaxies
- X-ray flux

Tr
No

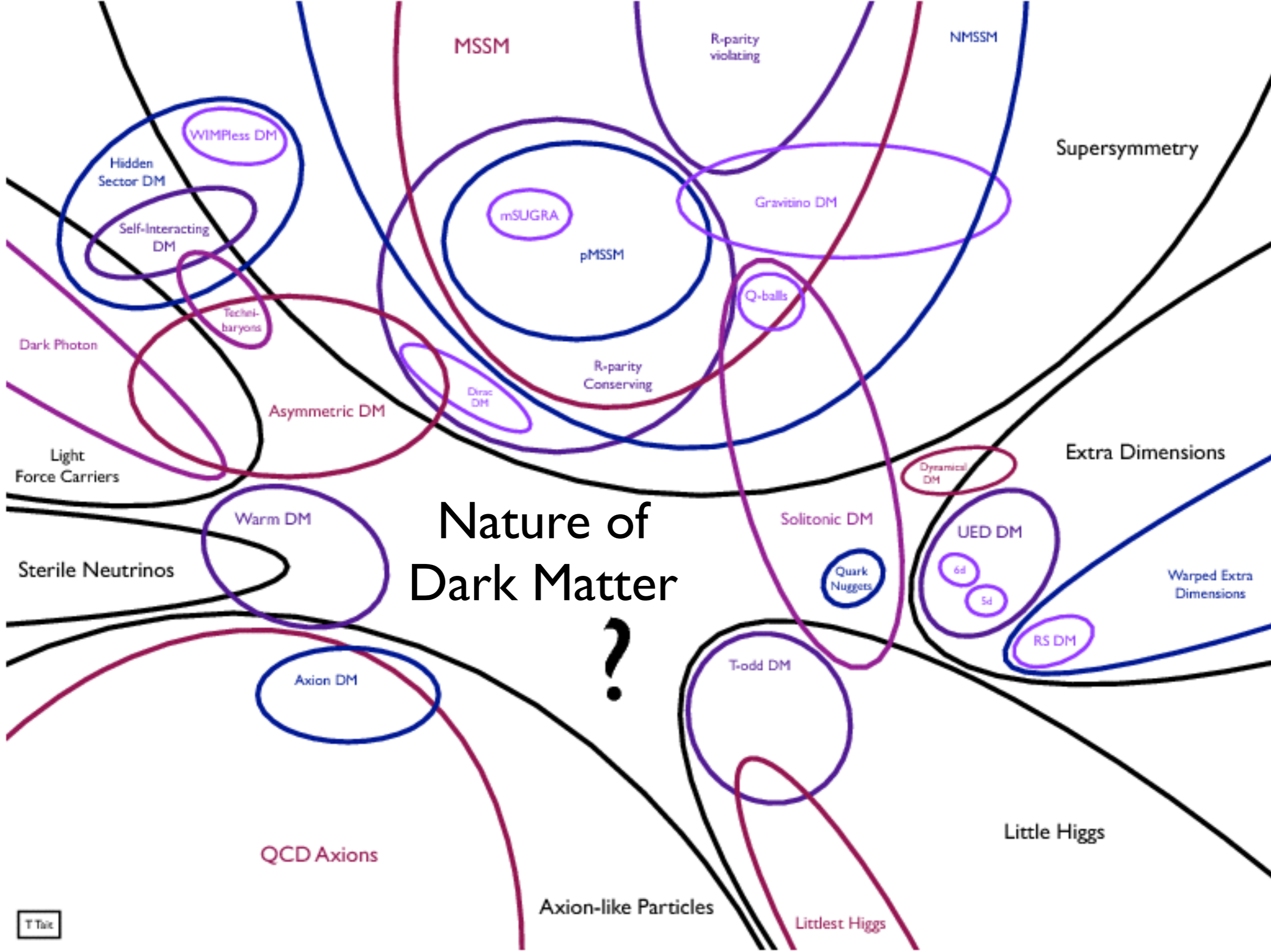
- Visible
- Most

Dark Matter is the component - that clusters - that dominates the mass density of the Universe

The Universe is more homogeneous that is seems when looking only at galaxies

DMC matter is "dark" (gas, planets, BH)

Nature of Dark Matter



LEMBRETE: DISTÂNCIA DE DIÂMETRO ANGULAR

Caso plano:

$$D_A(z_1, z_2) = \frac{1}{1+z_2} \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{H(z)}$$

No modelo w CDM

$$p = w\rho$$

$$H^2(a) = H_0^2 \left[\Omega_r a^{-4} + \Omega_M a^{-3} + \Omega_k a^{-2} + \Omega_{DE} a^{-3(1+w)} \right]$$

de modo que

$$D_A(z_1, z_2) = \frac{(1+z_2)^{-1}}{H_0} \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_M (1+z')^3 + (1-\Omega_M) (1+z')^{3(1+w)}}}$$

$$D_{LS} = D_A(z_L, z_S), \text{ etc.}$$

Type Ia Supernovae and Cosmology



Advantages:

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

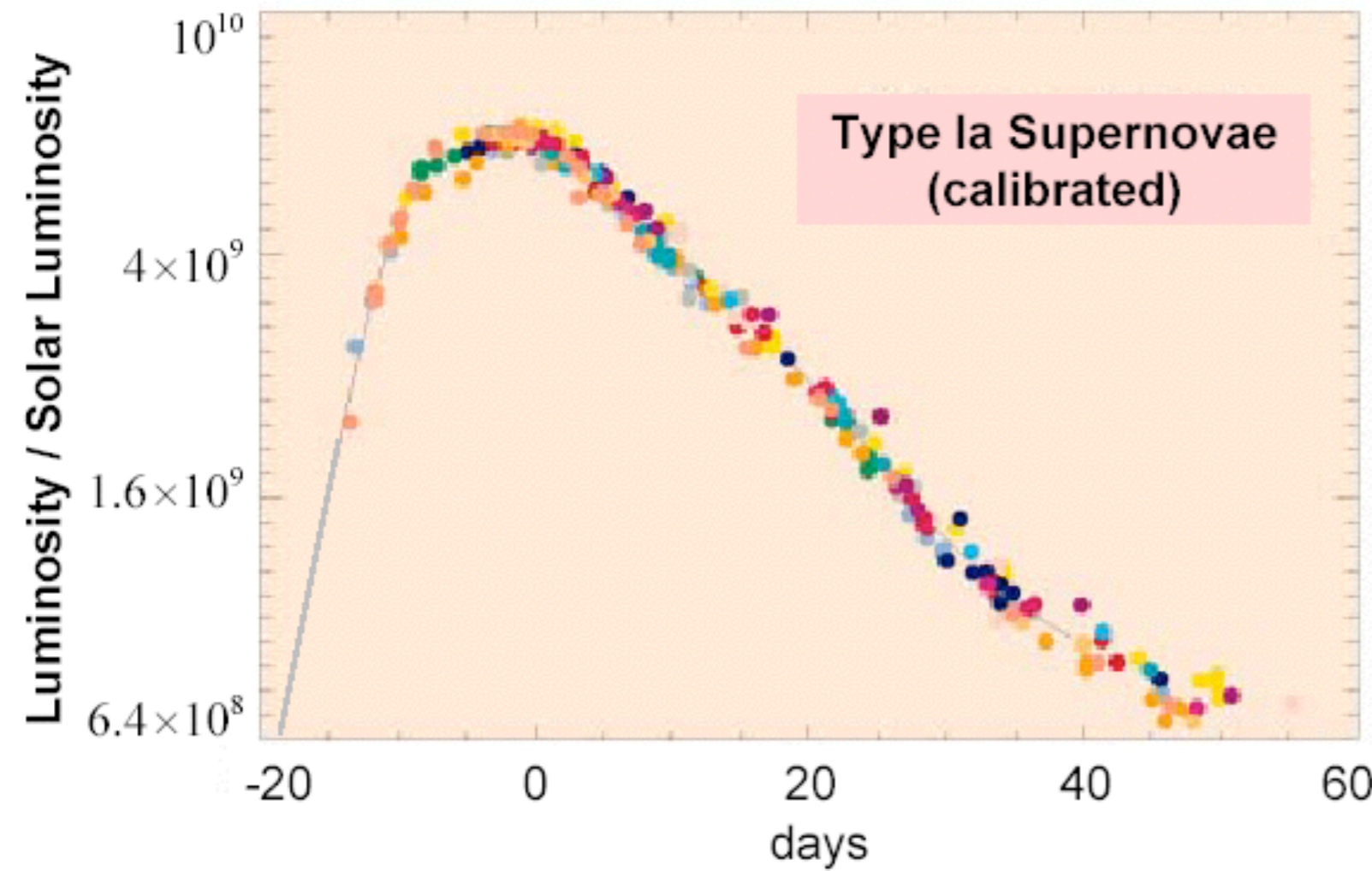
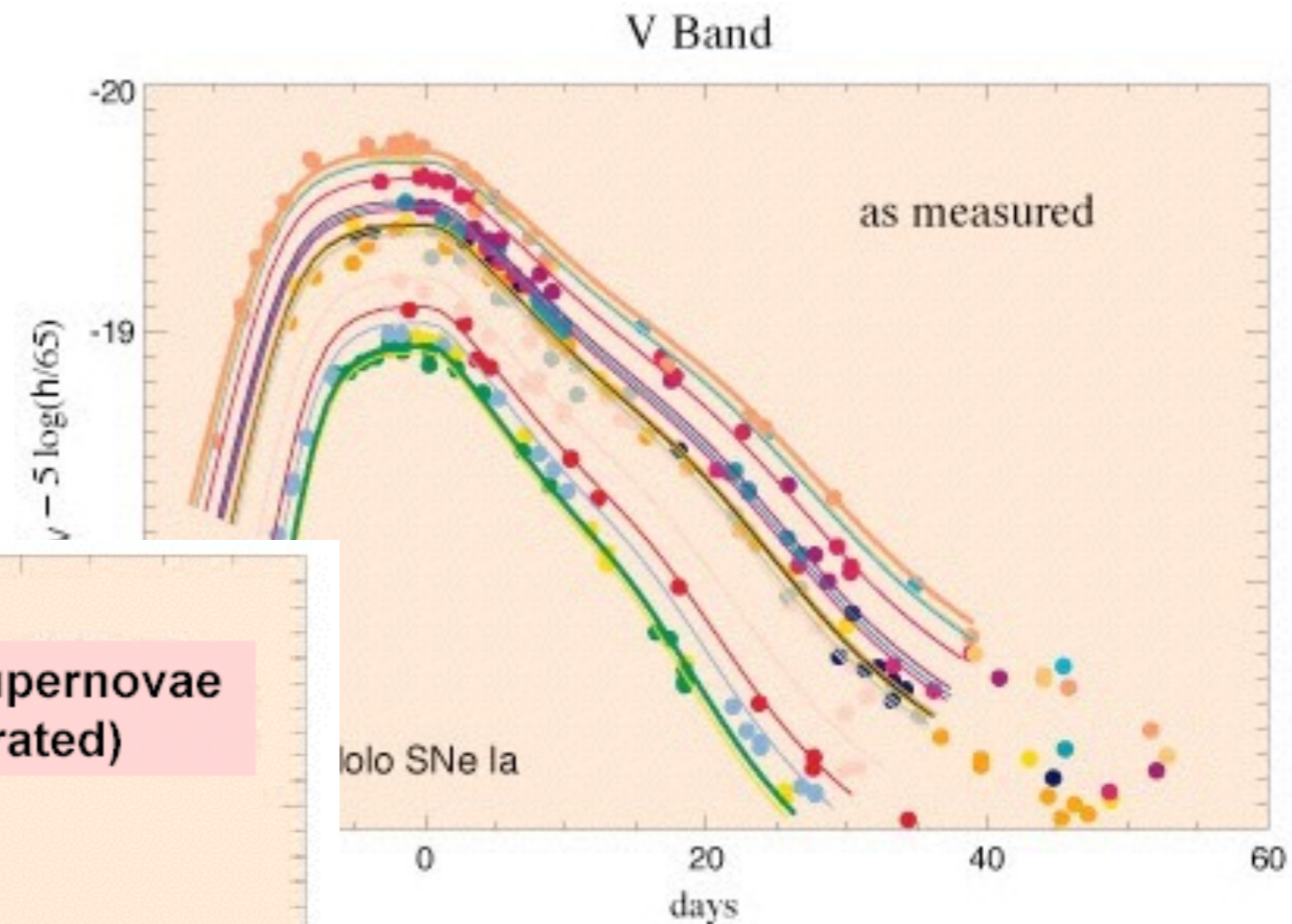
→ May be detected at
large distances



Type Ia Supernovae Light Curves



Very homogeneous
→ Standardizable candles



$$D_L(z) = (1 + z)^2 D_A(z)$$

Type Ia Supernovae and Cosmology



Advantages:

- Extreme Luminosities ($10^9 - 10^{10} L_{\odot}$)
- Very homogeneous
→ Standardizable candles

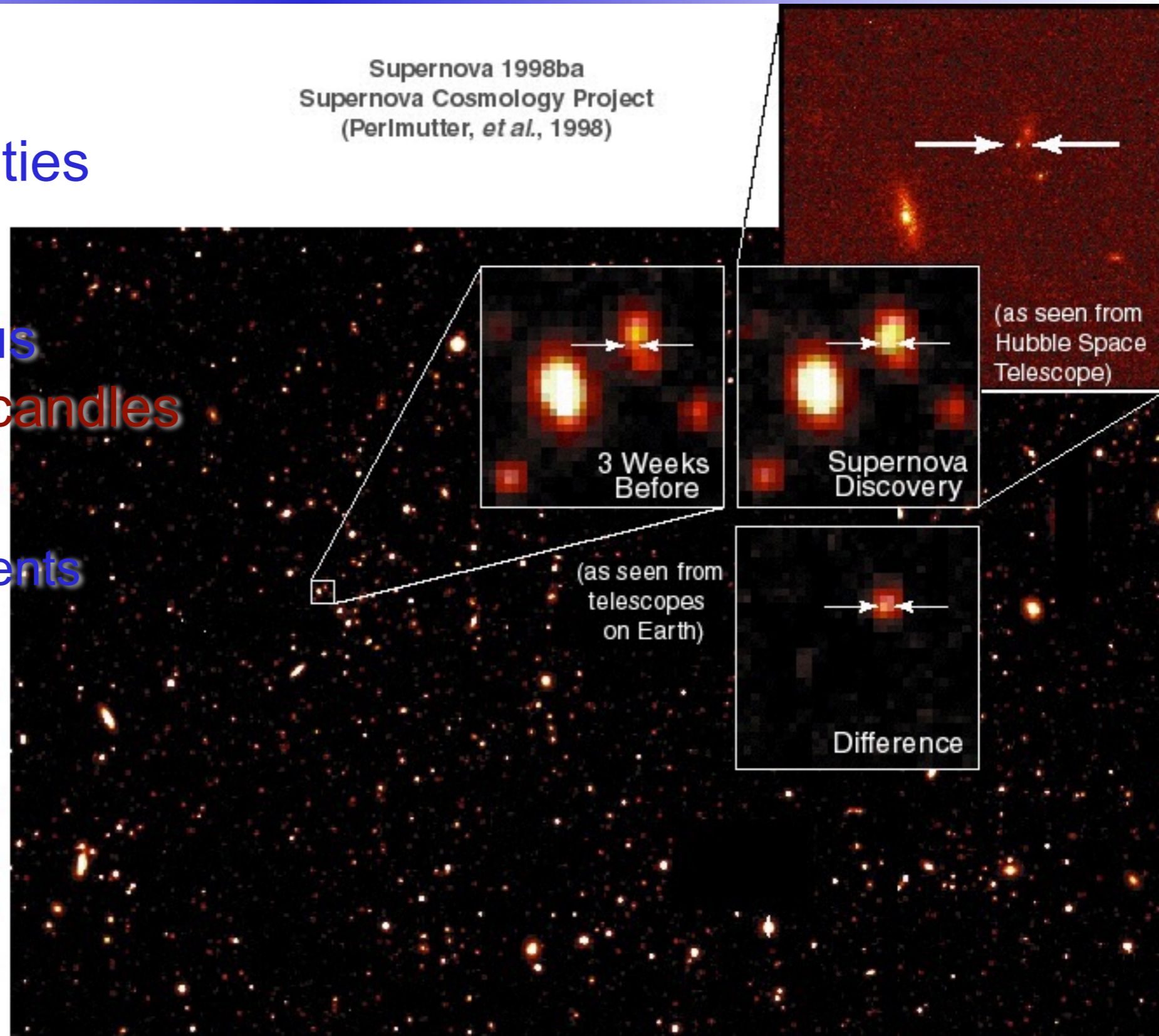
Disadvantages:

- Rare and random events
~ 1/500 yr/galaxy
- Short duration

Solution:

- Automated search
- SCP, High-z team

Supernova 1998ba
Supernova Cosmology Project
(Perlmutter, *et al.*, 1998)





The Accelerating Universe

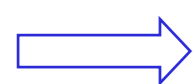
- Hubble diagram for large distances

→ The expansion is accelerating

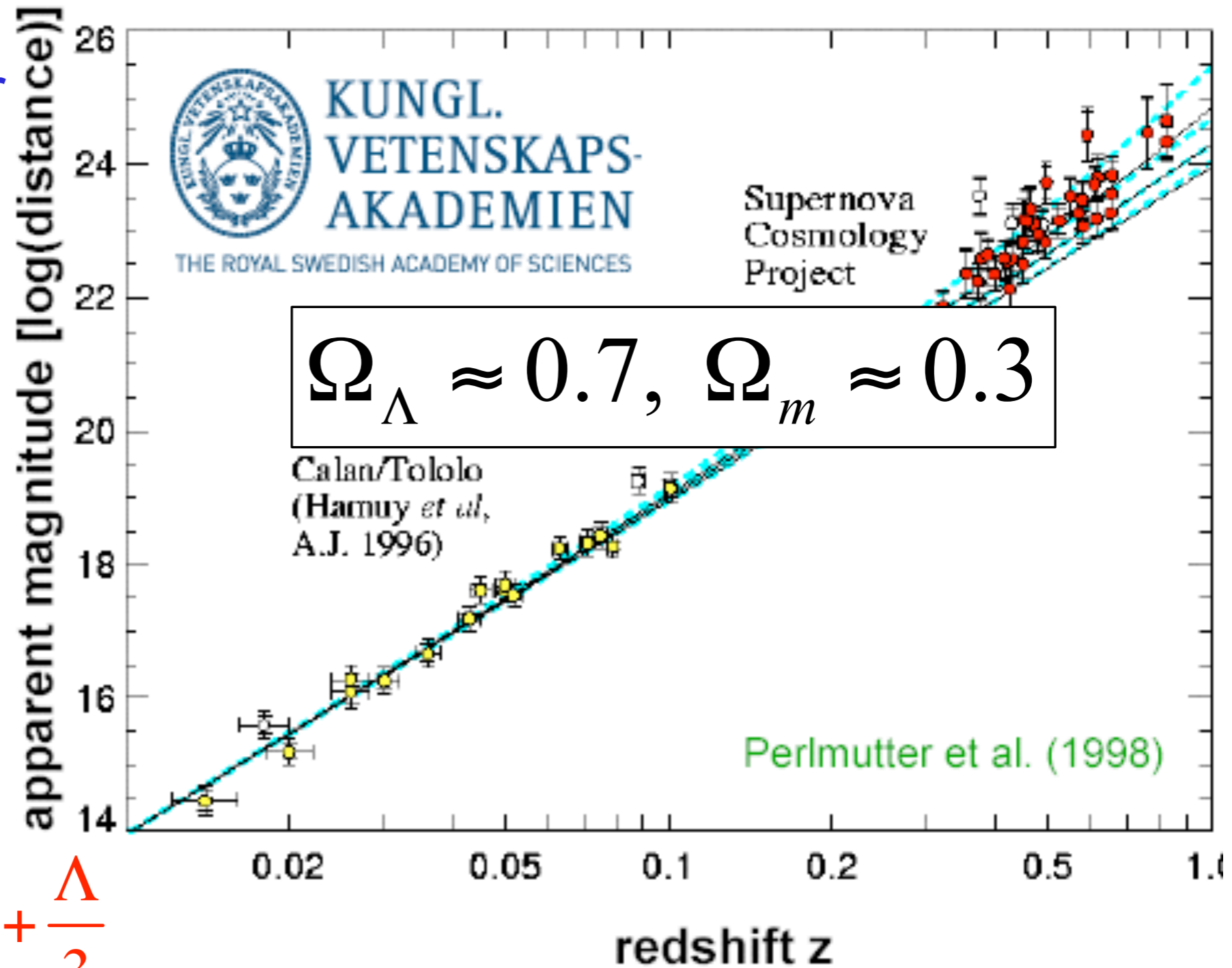
$$q_0 = -\frac{\ddot{a}_0}{a_0 H_0^2}$$

But

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

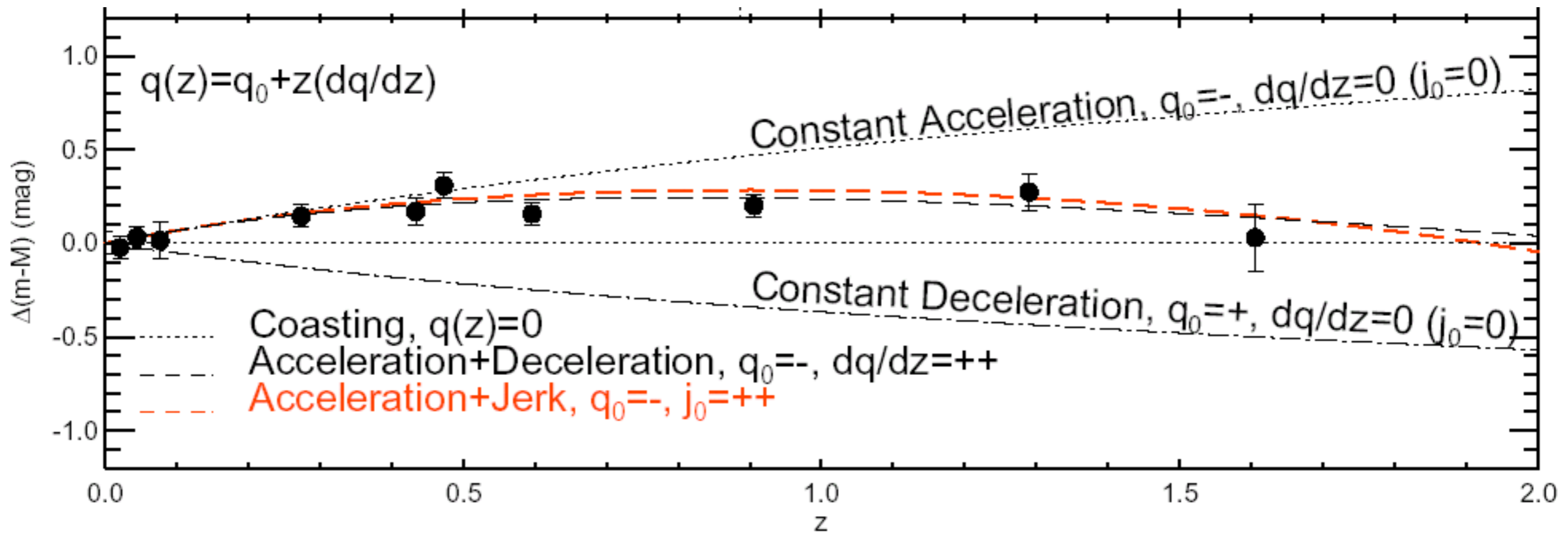


Dark Energy or Cosmological Constant





The Decelerated Universe!

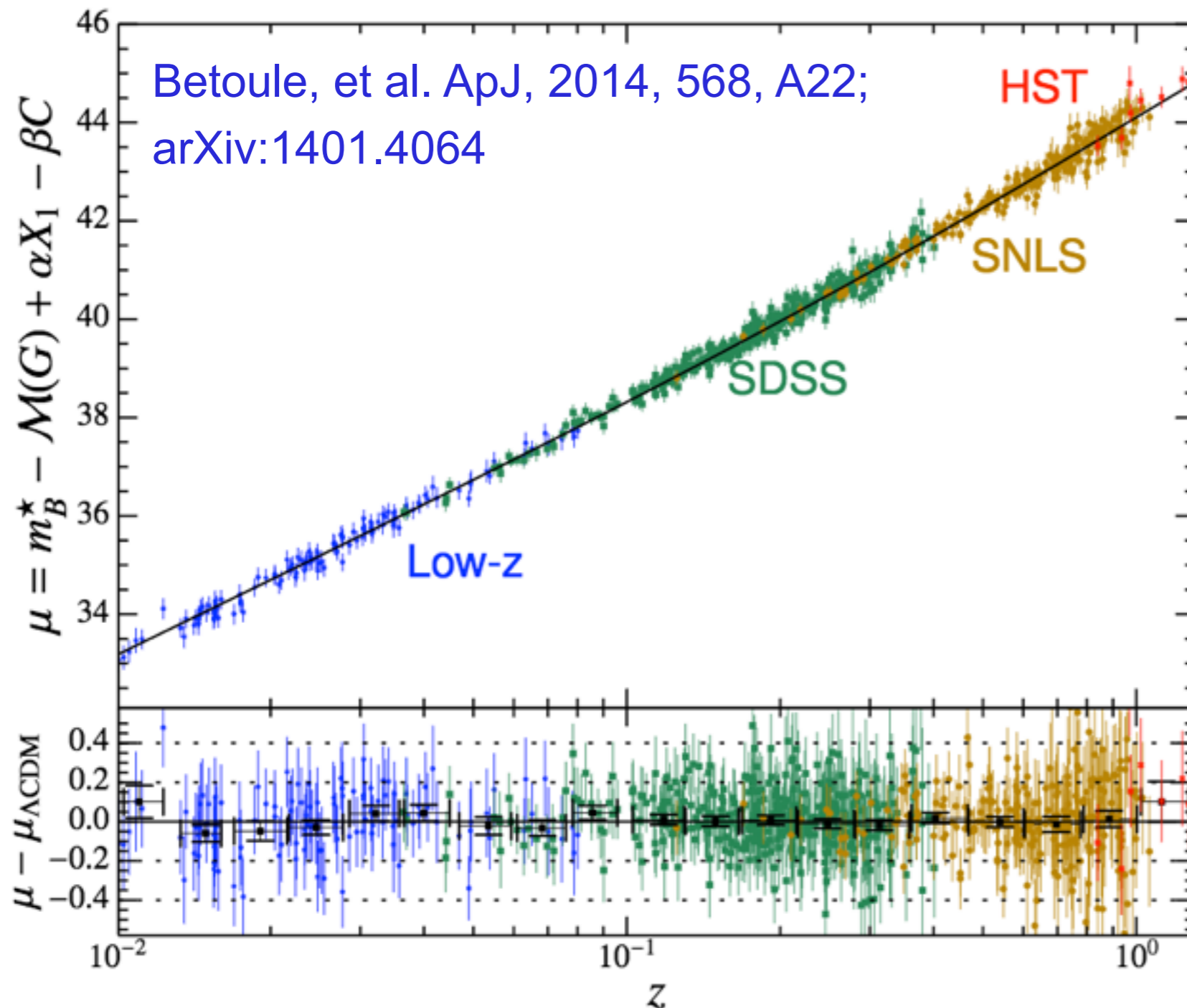




Current Results

Joint light-curve analysis (JLA)

Betoule, et al. ApJ, 2014, 568, A22;
arXiv:1401.4064



$$\Omega_m = 0.295 \pm 0.034$$

$$p = w\rho$$

Combined with CMB (+flat):

$$w = -1.027 \pm 0.055$$

Combined with BAO (+flat):

$$w = -1.018 \pm 0.057$$



Dark Energy

2/3 of the energy density of the Universe are in the form of Dark Energy! (or $\Lambda \neq 0$)

Evidences:

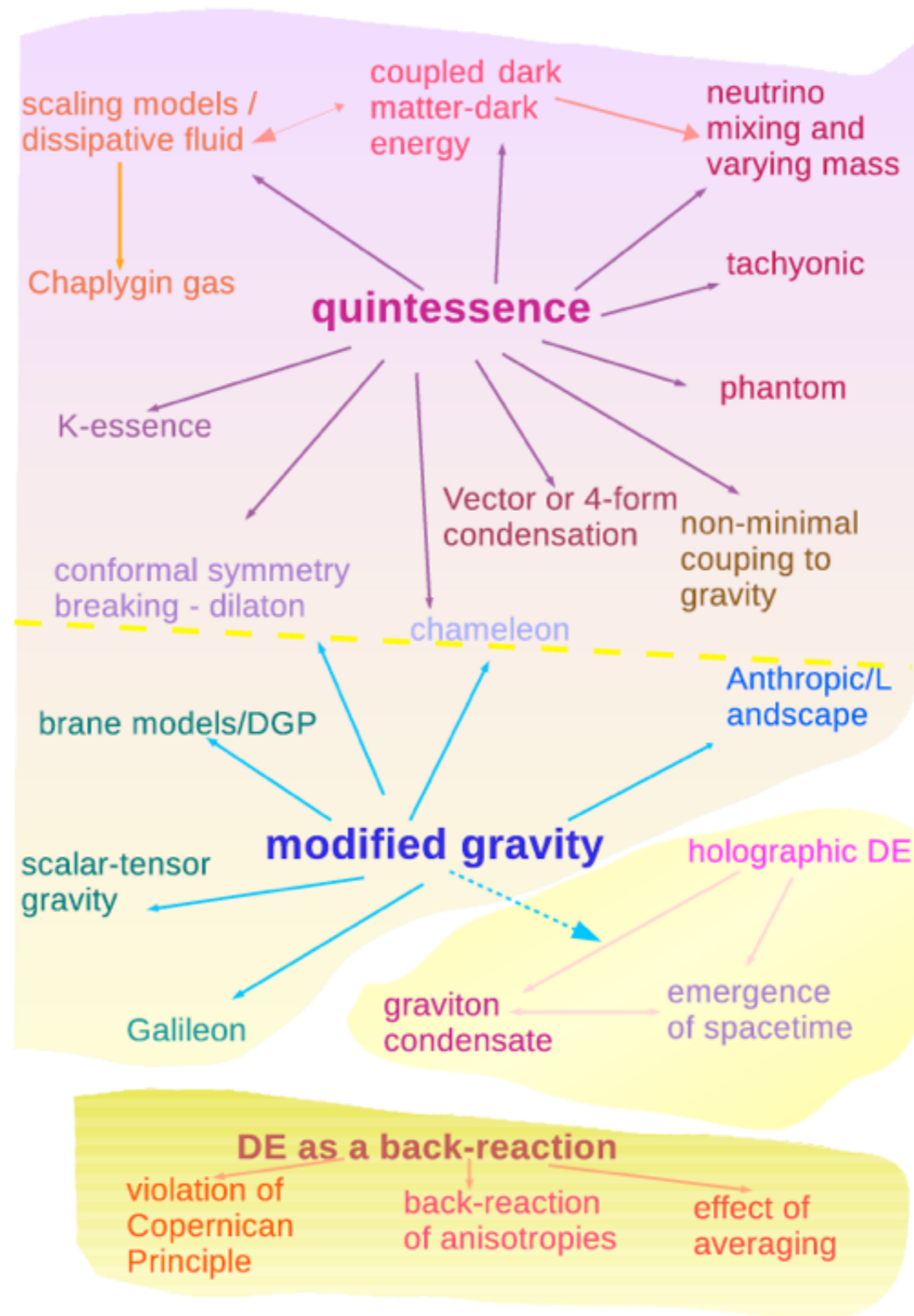
- Accelerated expansion of distant galaxies
- Age of the Universe
- Small curvature
- Integrated Sachs-Wolfe effect
- Combined analyses of cosmological observables (cosmic concordance)

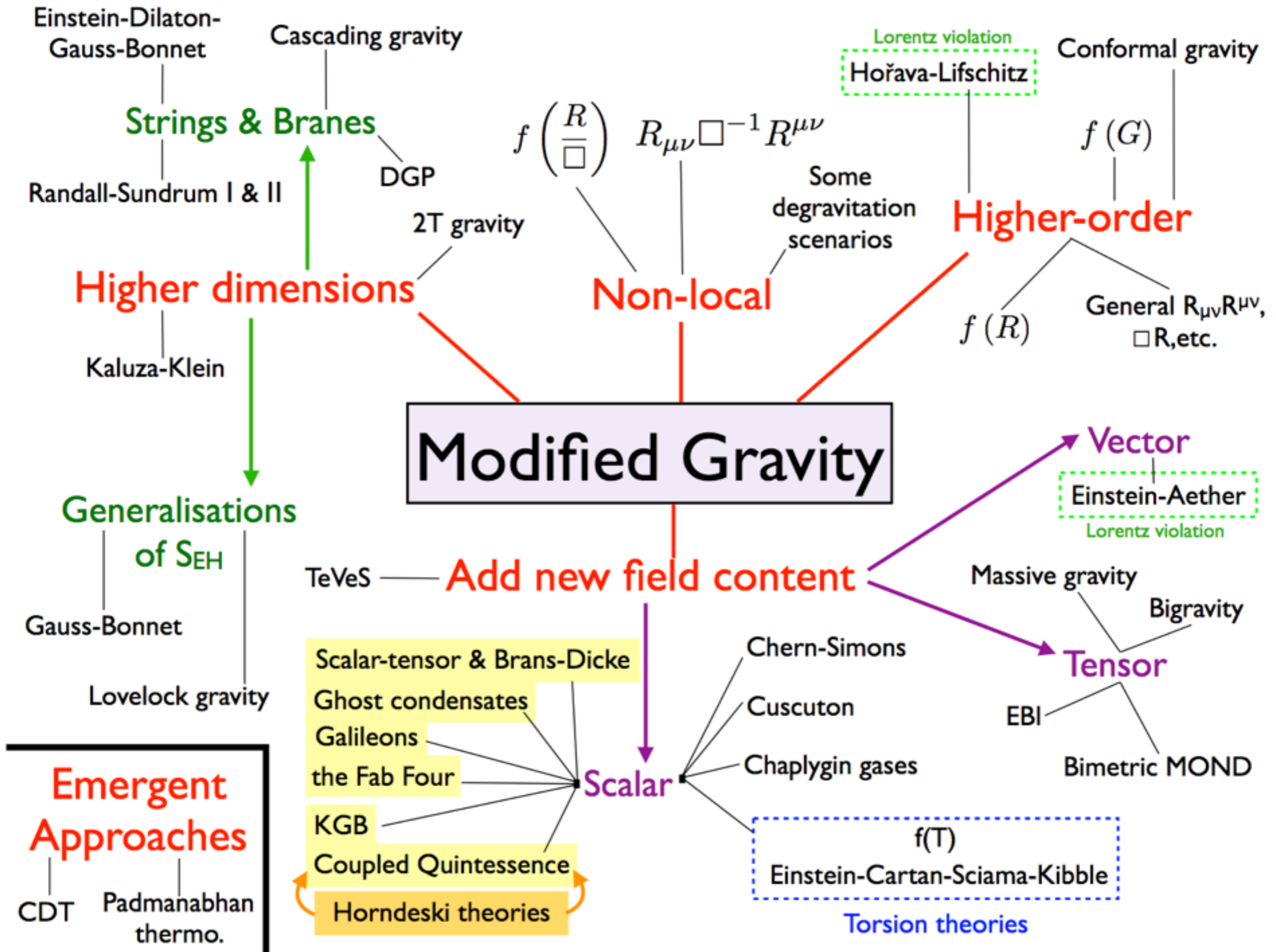
Candidates (Taxonomy of Dark Energy):

- Cosmological constant
- Scalar field:
 - Quintessence
 - Quartessence, k-essence, spintessencia, snot...

Modified gravity

A zoo of Dark Energy Models





Formação de Estruturas e Perturbações Lineares



- Perturbações dentro do raio de Hubble: Análise newtoniana
- Fora do raio de Hubble: tratamento relativístico
- Antes do desacoplamento: equações de Boltzmann
- Após: basicamente gravitação



Teoria de perturbação relativística

- O ponto de partida da teoria de perturbação cosmológica é a métrica de Robertson-Walker perturbada:

$$\begin{aligned} ds^2 &= \left[g_{\mu\nu}^{(0)} + g_{\mu\nu}^{(1)} \right] dx^\mu dx^\nu \\ &= a^2(\tau) \left[-d\tau^2 + \gamma_{ij}(\vec{x}) dx^i dx^j + h_{\mu\nu}(\vec{x}, \tau) dx^\mu dx^\nu \right] , \end{aligned}$$

- Desacoplamento entre os modos no regime linear
- Perturbações escalares:

$$ds^2 = a^2(\tau) \left[-(1 + 2\Psi)d\tau^2 + (1 - 2\phi)\gamma_{ij} dx^i dx^j \right]$$

(para um fluido perfeito $\phi = \Psi$)



Teoria de formação de estruturas

- Equações da cosmologia newtoniana em coordenadas co-moventes:

$$\frac{1}{a} \frac{d\vec{v}}{d\tau} + \frac{\dot{a}}{a^2} \vec{v} = -\vec{\nabla}\phi - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla}p, \quad \frac{d\vec{v}}{d\tau} + a(1+\delta)\theta = 0, \quad \nabla^2 \tilde{\phi} = 4\pi G a^2 \delta\rho$$

onde $\delta = (\rho - \rho_b)/\rho_b$, $\mathbf{v} = (d\mathbf{x}/d\tau)/a$, $\theta = \nabla \cdot \mathbf{v}$ and $\mathbf{x} = \mathbf{r}/a(t)$.
Utiliza-se o tempo conforme, dado por $d\tau := dt/a^2(t)$.

- É possível resolver essas equações no regime linear, para vários fluidos nas diversas eras cosmológicas. A análise linear ajuda a compreender a RCF e os primórdios da formação de estruturas;



Flutuações dentro do Horizonte

- Equação de evolução das perturbações (adiabáticas):

$$\ddot{\delta} + \frac{\dot{a}}{a} \dot{\delta} = 4\pi G \bar{\rho} a^2 \delta + c_s^2 \nabla^2 \delta$$

- Espaço de Fourier:

$$\ddot{\delta} + \frac{\dot{a}}{a} \dot{\delta} = (4\pi G \bar{\rho} a^2 - k^2 c_s^2) \delta \equiv (k_J^2 - k^2) c_s^2 \delta ,$$

- Para $k > k_J$: oscilações acústicas



Flutuações dentro do Horizonte

- Equação de evolução das perturbações (adiabáticas):

$$\ddot{\delta} + \frac{\dot{a}}{a} \dot{\delta} = 4\pi G \bar{\rho} a^2 \delta + c_s^2 \nabla^2 \delta$$

- Espaço de Fourier:

$$\ddot{\delta} + \frac{\dot{a}}{a} \dot{\delta} = (4\pi G \bar{\rho} a^2 - k^2 c_s^2) \delta \equiv (k_J^2 - k^2) c_s^2 \delta ,$$

- Para $k \ll k_J$ e matéria escura

- fatores de crescimento e decaimento

$$\delta = D_+ \left(\vec{\Omega}, z \right) \delta_0 \quad \delta = \frac{\rho(z, \vec{x}) - \bar{\rho}(z)}{\bar{\rho}(z)}$$

DEPENDE DA
MATÉRIA E DA
ENERGIA
ESCURAS

Resultados da análise linear

Necessidade de Matéria Escura

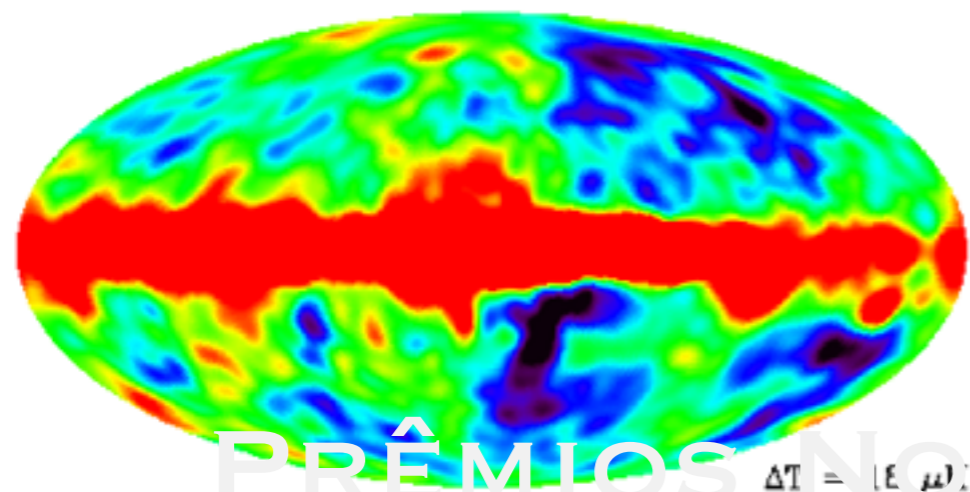
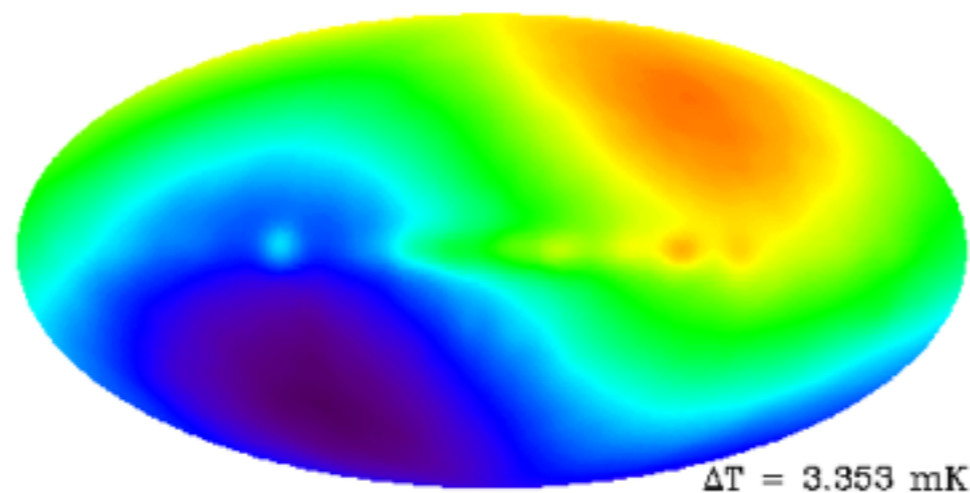
- Matéria bariônica: só pode se aglomerar depois de t_{dec} (~ 380.000 anos) e para $r > \lambda_j$
- CDM se aglomera a partir de t_{eq} (~ 56.000 anos)
- Bárions seguem os poços de potencial da matéria escura
- Amortecimento de Silk diminui amplitude de perturbações nos bárions

Flutuações na radiação cósmica de fundo

ANISOTROPIAS



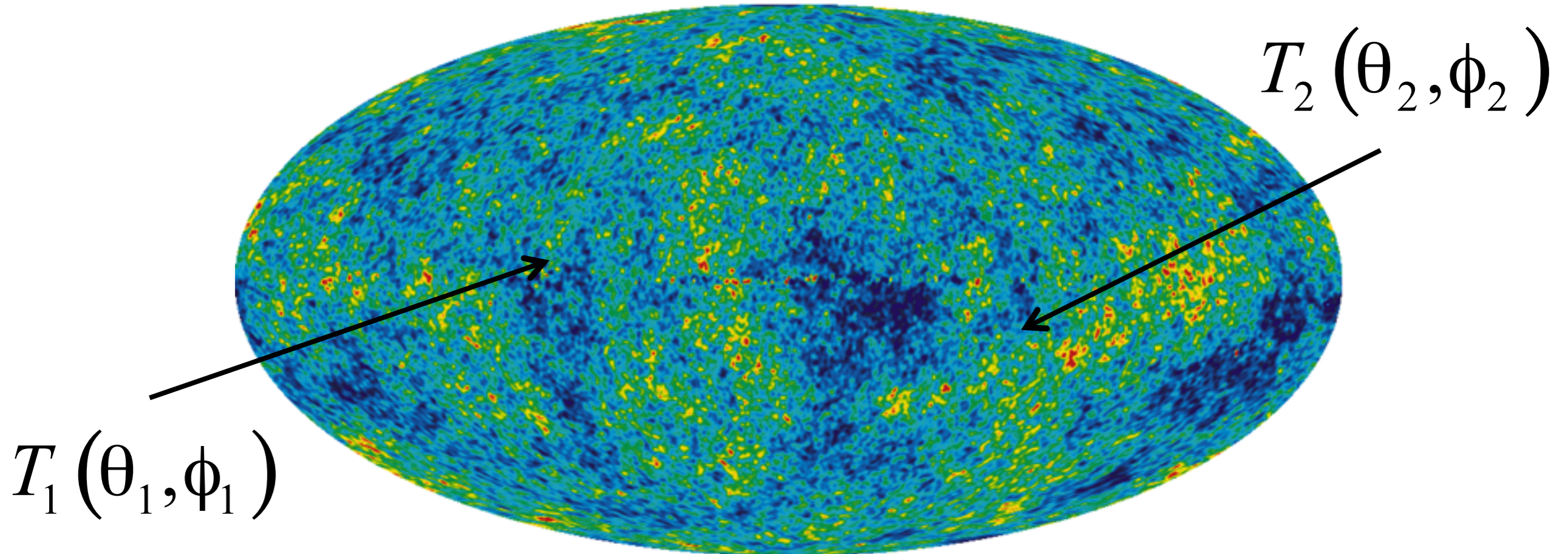
Anisotropias na Radiação C3smica de Fundo



- $T_0 = 2.725 \pm 0.002$. Desvio para o vermelho, $z = 1089$
- Universo primordial altamente homog4neo
- Dipolo:
 $\Delta T = 3.346 \pm 0.017 \text{ mK}$
 $\Rightarrow v_{\text{gal}} = 360 \text{ Km/s}$
- Flutua33es de temperatura:

$$\frac{\Delta T}{T} \approx 10^{-5}$$

Espectro de Potência da Radiação Cós mica de Fundo

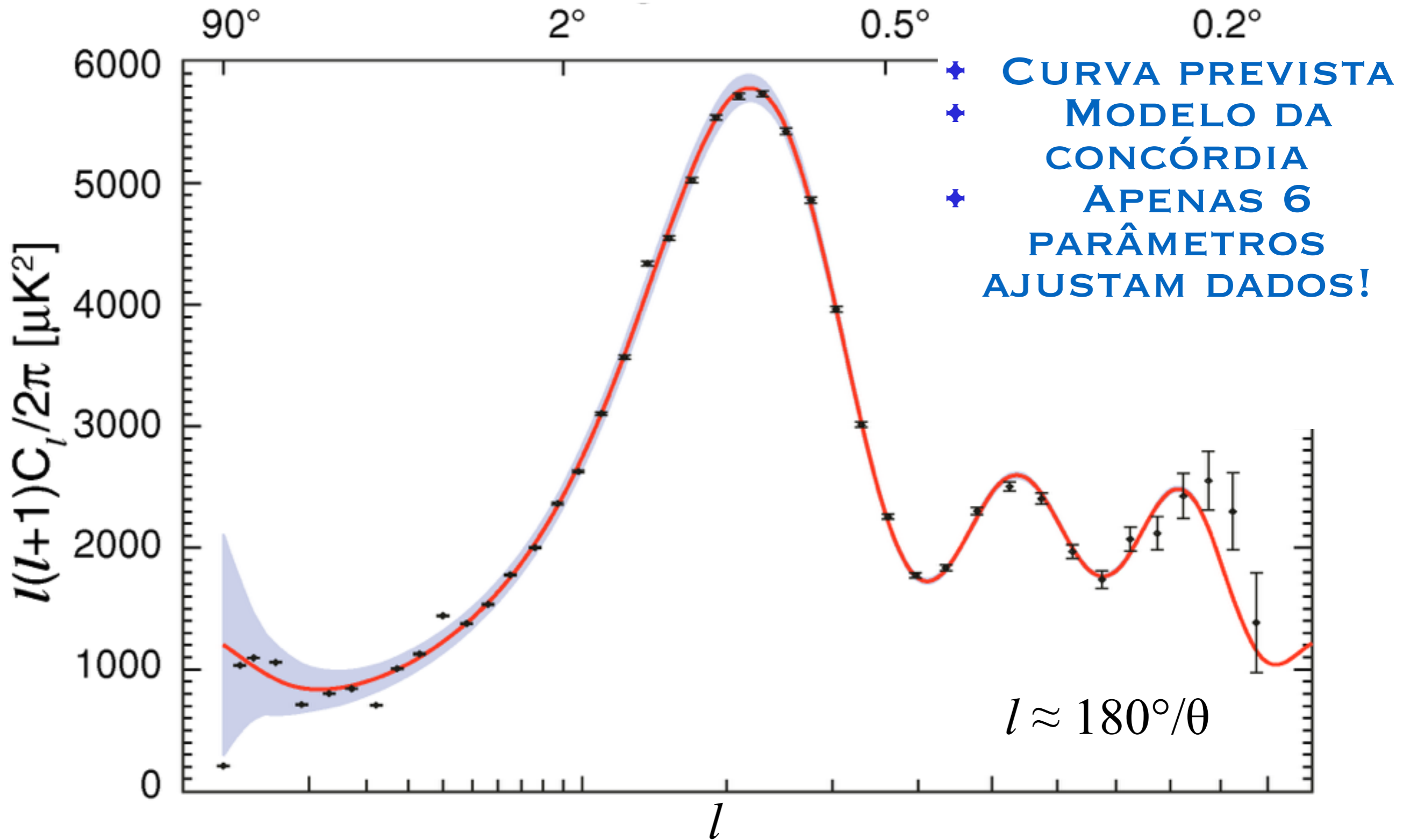


$$\langle T_1 T_2 \rangle = \sum a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

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

WMAP2008

Espectro de Potência Segundo o WMAP5





Picos na Radiação Cós mica de Fundo

ESCALA ANGULAR DO HORIZONTE ACÚSTICO NO DESACOPLAMENTO:

$$\theta_A = \frac{r_s(z_{dec})}{d_A(z_{dec})}$$



HORIZONTE ACÚSTICO

$$r_s = \int_0^{\tau_{dec}} c_s d\tau$$

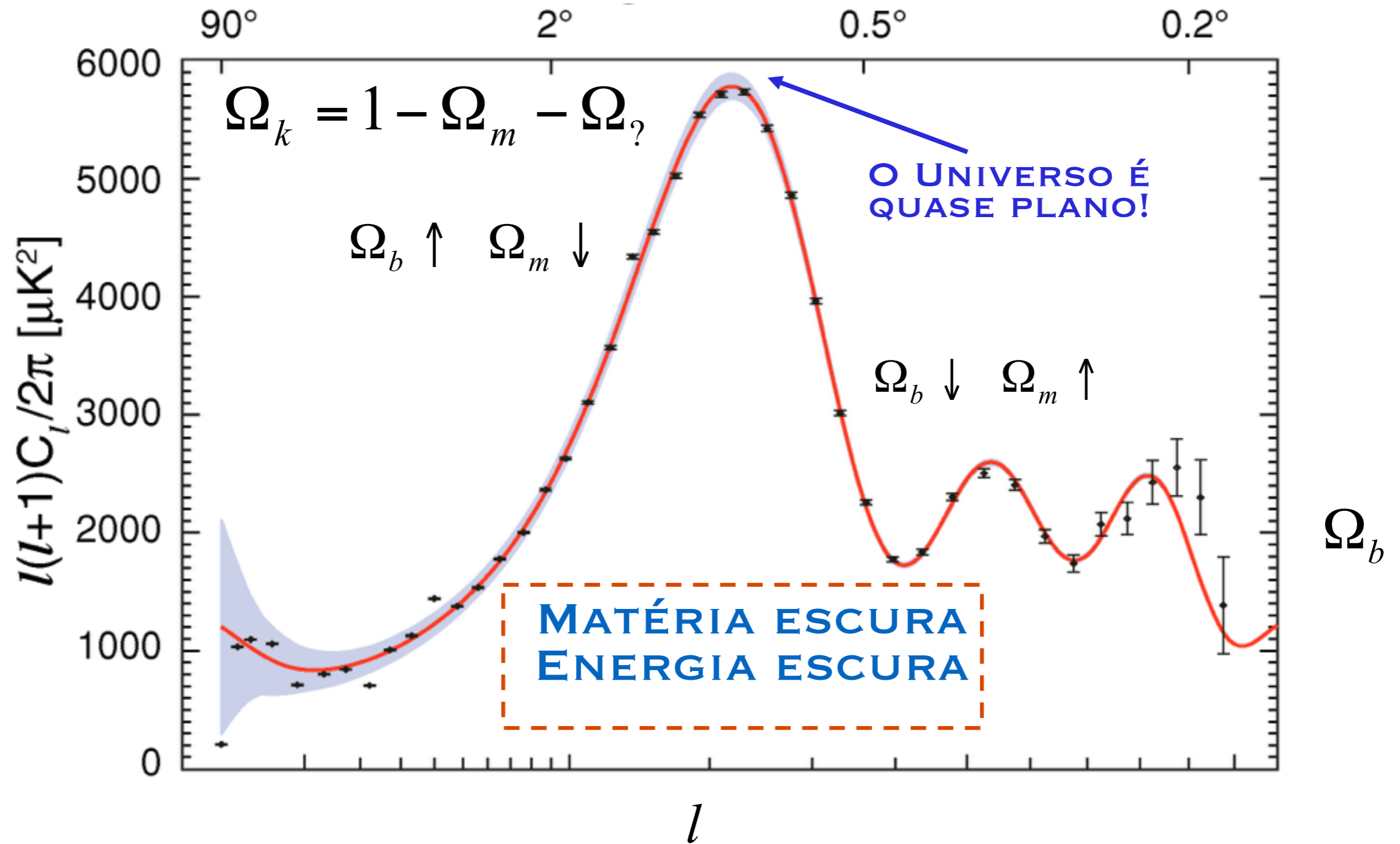
ONDE

$$c_s = \frac{1}{\sqrt{3 \left(1 + \frac{3 \rho_b}{4 \rho_\gamma} \right)}}$$

DISTÂNCIA DIÂMETRO ANGULAR

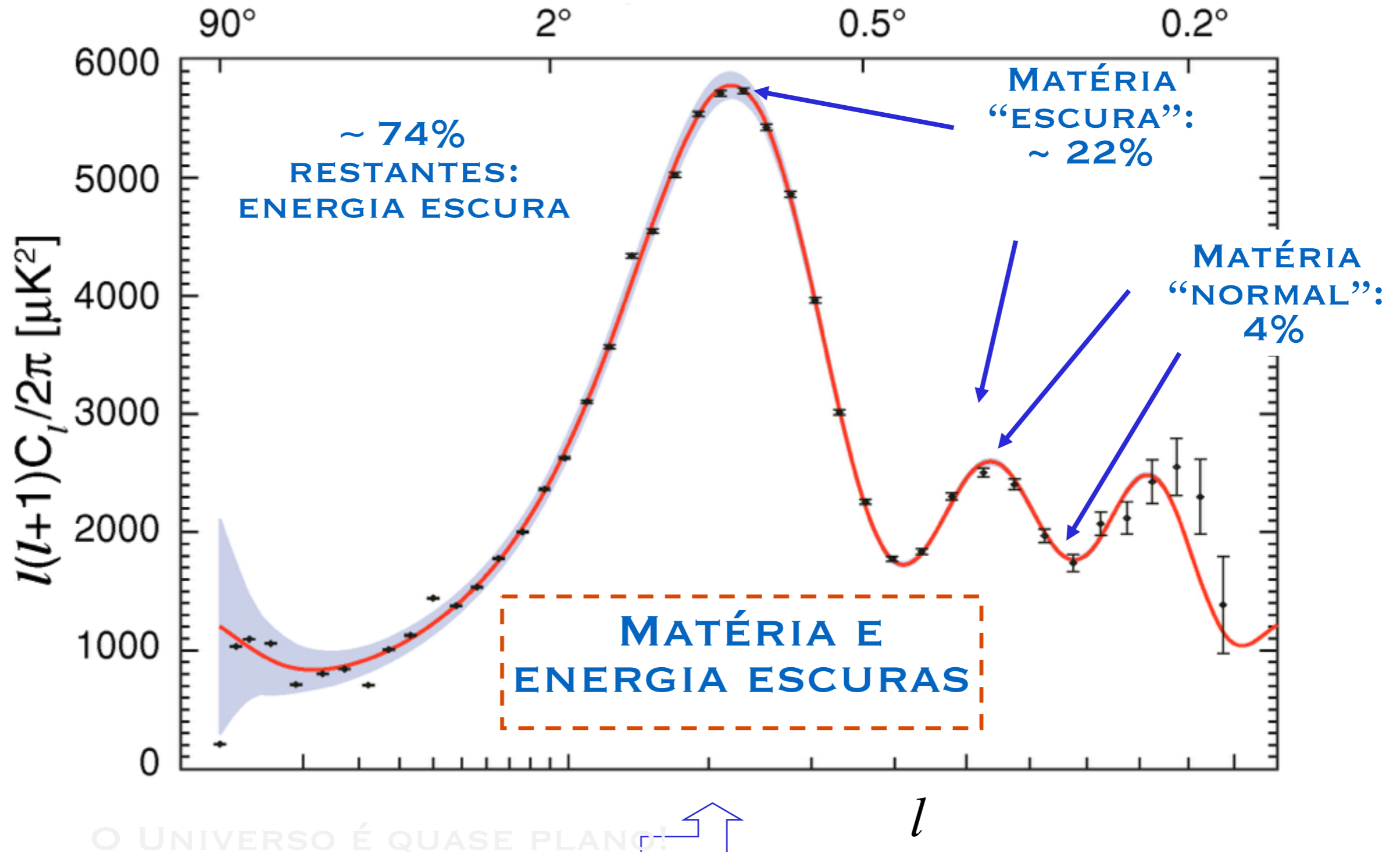
$$d_A = c (1+z)^{-1} \frac{1}{\sqrt{|1-\Omega_0|}} S \left(\sqrt{|1-\Omega_0|} \int_0^z \frac{dz'}{H(z')} \right)$$

Espectro de Potência Segundo o WMAP5



Informações preciosas sobre o Universo

“O Graal da Cosmologia”



Estrutura em Grande Escala (EGE)

Estatística: Função de Correlação

- **Contraste de densidade:**

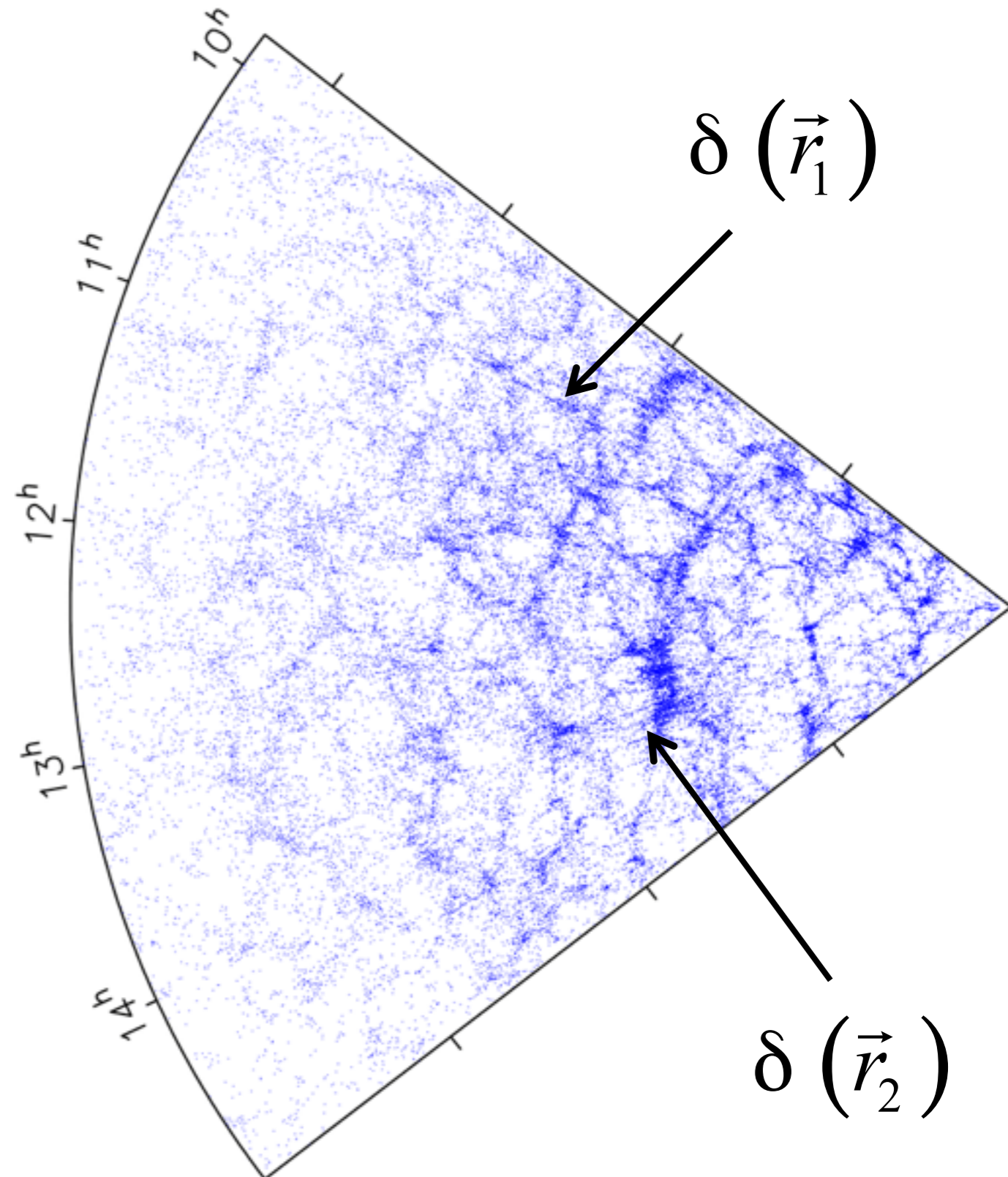
$$\delta_{obs}(\vec{r}) = \frac{n(\vec{r}) - \bar{n}(\vec{r})}{\bar{n}(\vec{r})}$$

- **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:

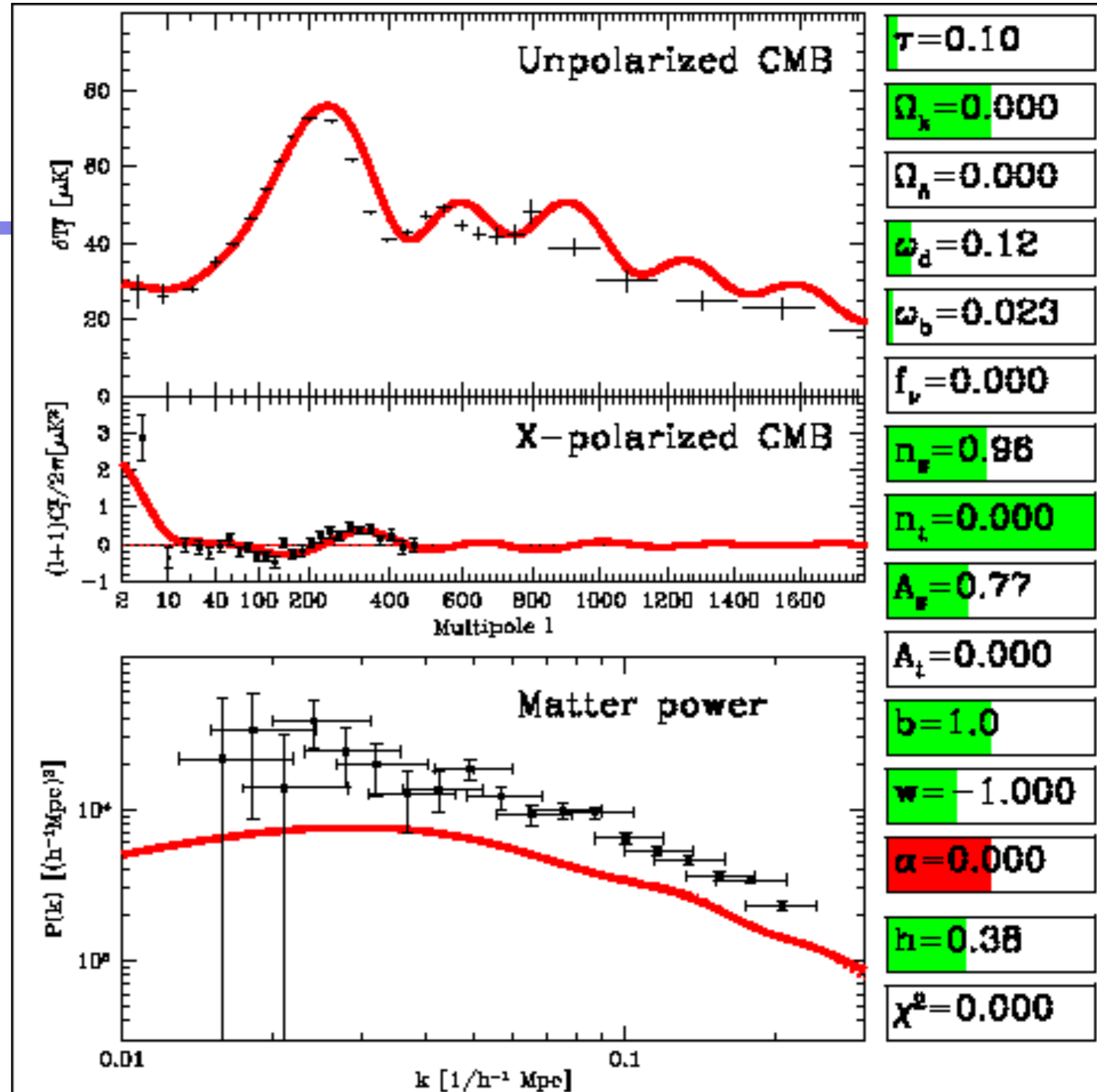
Energia Escura

Forma das flutuações primordiais

Matéria escura

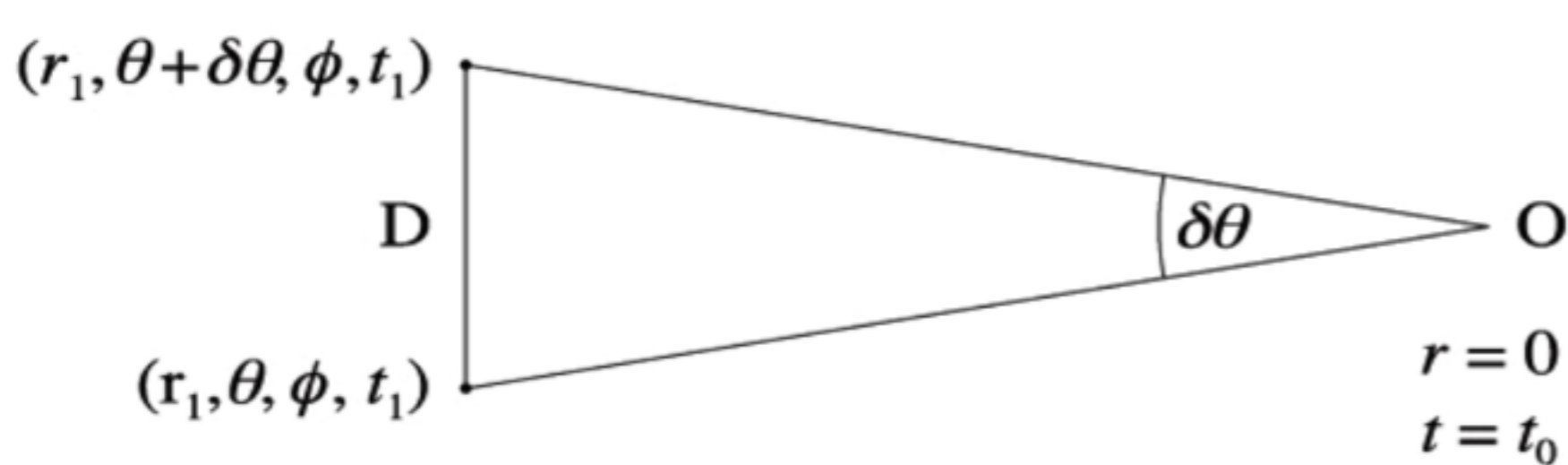
Massa dos neutrinos

Quantidade de bárions





Angular Diameter Distance



$$d_A \equiv \frac{D}{\delta\theta}$$

(for $\delta\theta \ll 1$)

Standard ruler

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

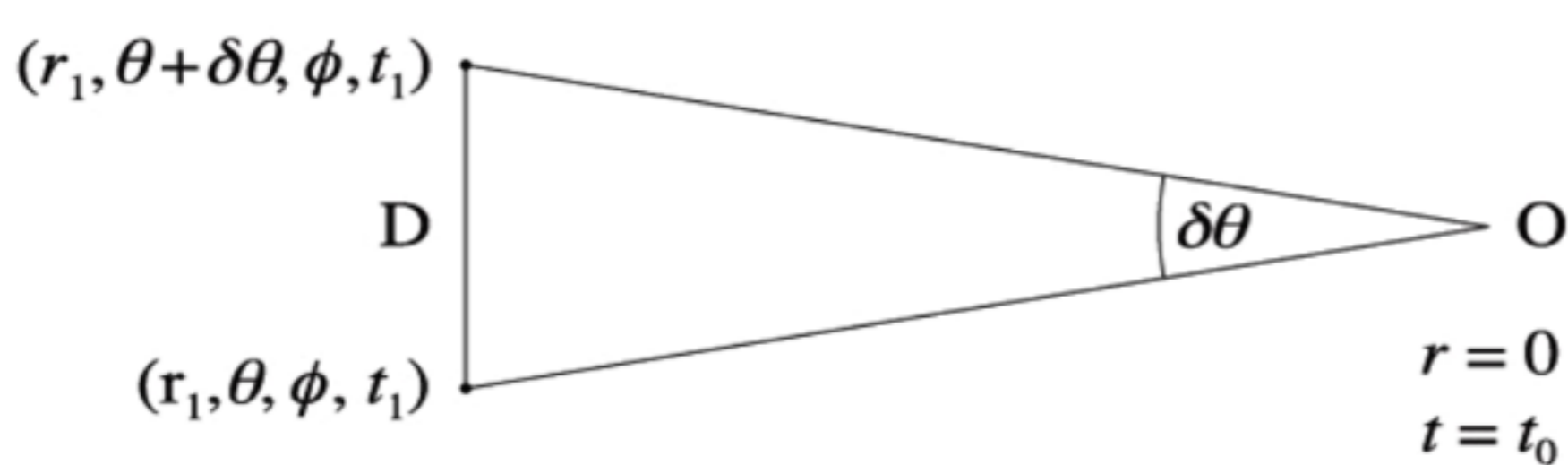
thus $D = a(t_1) r_1 \delta\theta$ such that $d_A = a(t_1) r_1$

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

d_A may decrease with z !



Angular Diameter Distance



$$d_A \equiv \frac{D}{\delta\theta}$$

(for $\delta\theta \ll 1$)

Standard ruler

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

thus $D = a(t_1) r_1 \delta\theta$ such that $d_A = a(t_1) r_1$

$$d_A = (1 + z)^{-2} d_L$$

Valid for any space-time!

Peaks in the Cosmic Microwave Background

Angular scale of acoustic horizon at decoupling:

$$\theta_A = \frac{r_s(z_{dec})}{d_A(z_{dec})}$$

Acoustic horizon

$$r_s = \int_0^{\tau_{dec}} c_s d\tau \quad \text{where} \quad c_s = \frac{1}{\sqrt{3 \left(1 + \frac{3}{4} \frac{\rho_b}{\rho_\gamma} \right)}}$$

Angular diameter distance

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

At $z \sim 1000$ θ_A is mostly sensitive on $\Omega_K = 1 - \Omega_0$

For a flat Universe, $\theta_A \simeq 1^\circ$

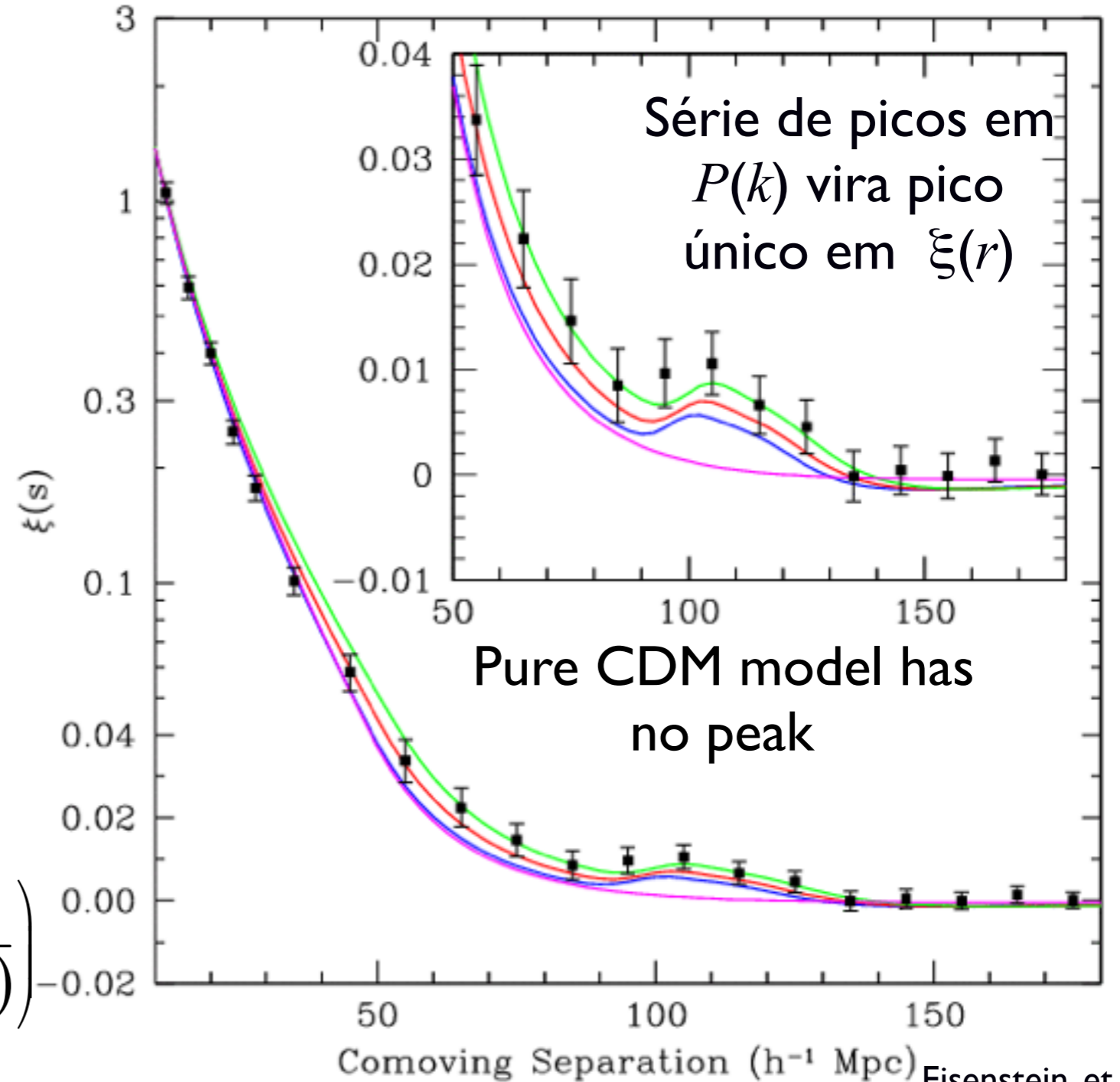
Standard ruler

Aglomeraco Angular e Oscilaoes Acsticas de Bárions

- Oscilaoes de Bárions (picos acústicos)
- Rgua padrão

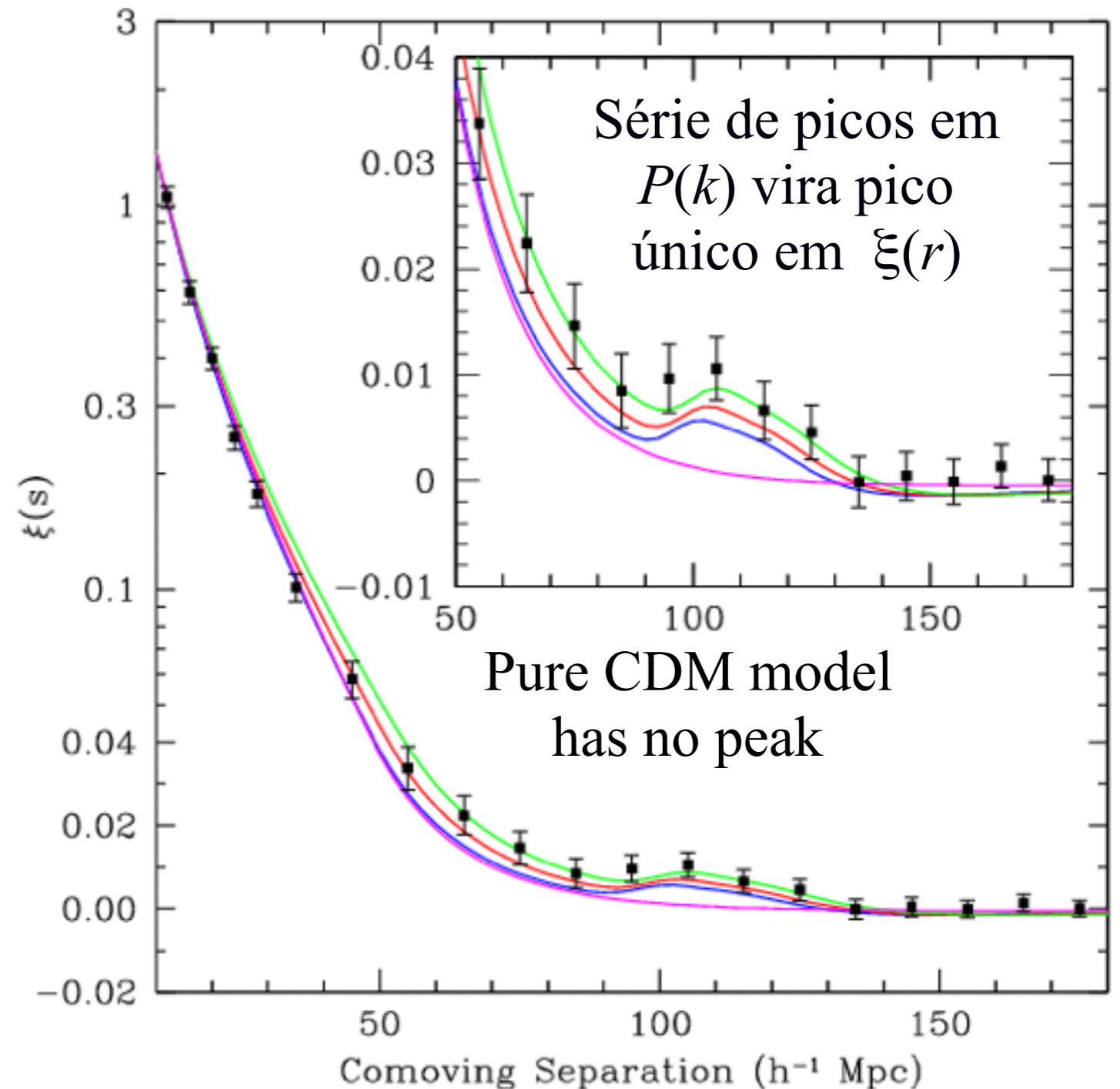
$$\theta_A = \frac{r_s(z_{dec})}{d_A(z_{dec})}$$

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

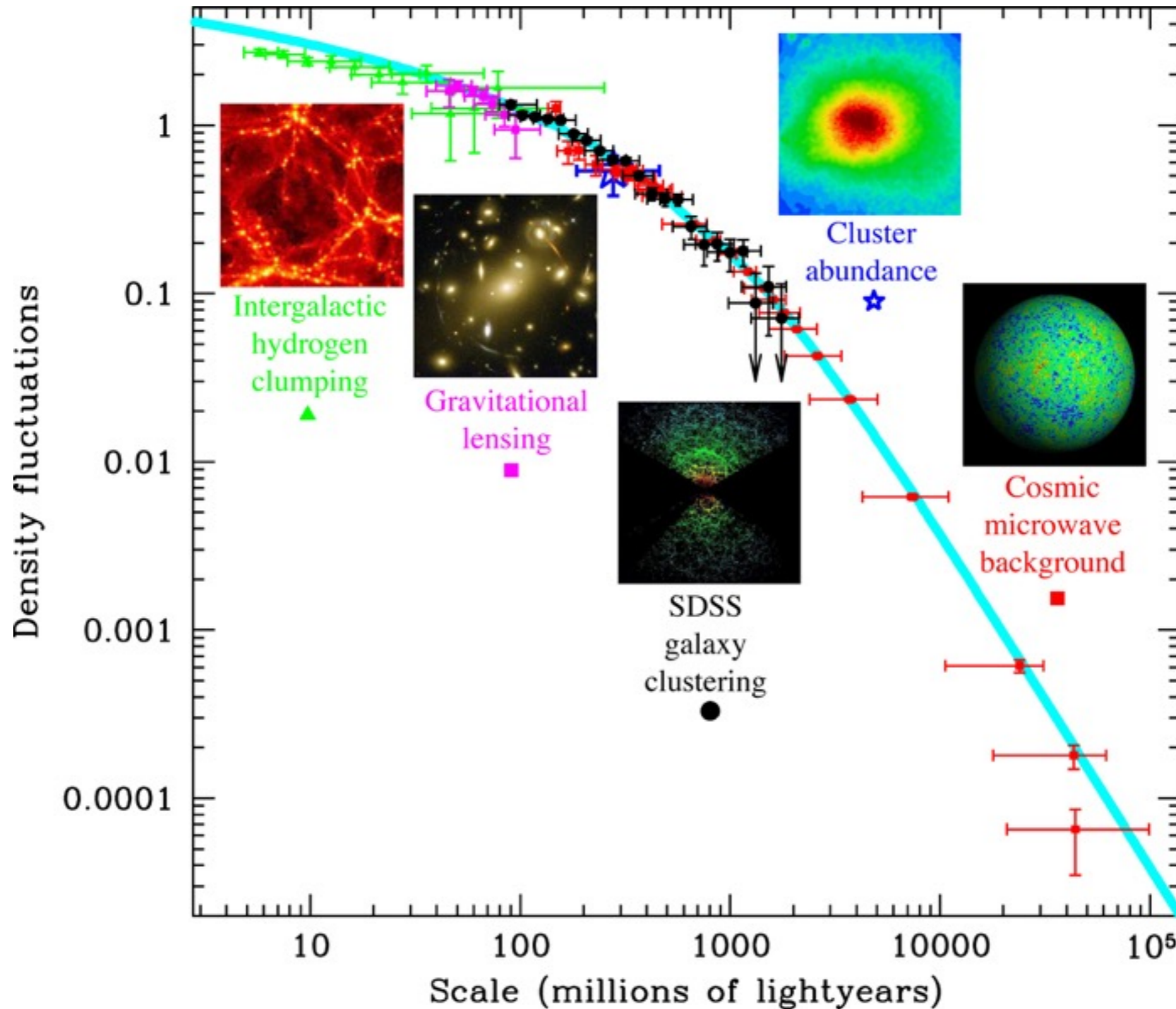


Oscilações acústicas de bárions na estrutura em grande escala

- Oscilações de Bárions (picos acústicos)
- Medida de D_A em baixos z
- Régua 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



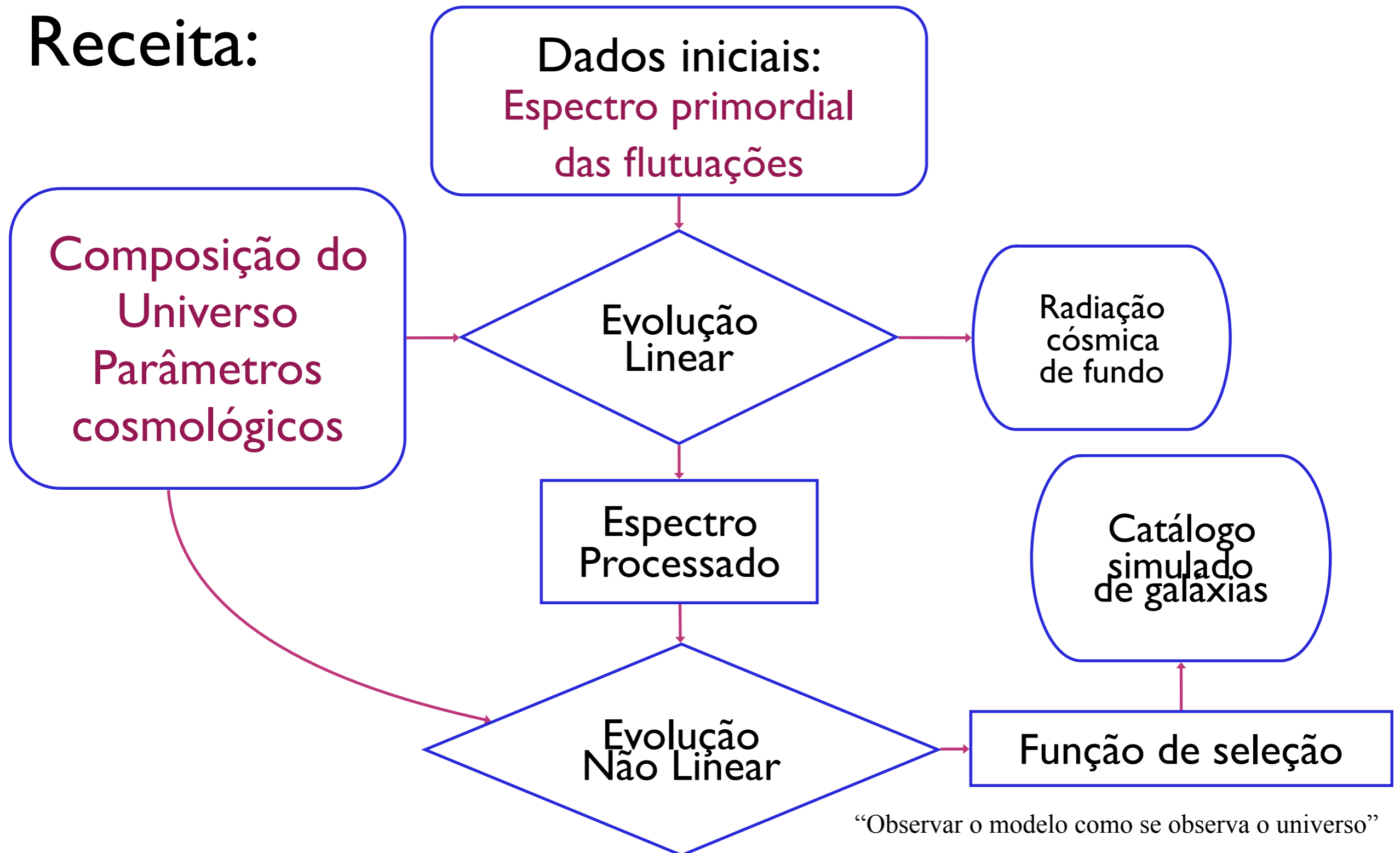
$$\frac{\Delta\rho_{Gal}}{\bar{\rho}} \approx 10^6$$



**NECESSIDADE DE ESTUDAR
O REGIME NÃO-LINEAR**

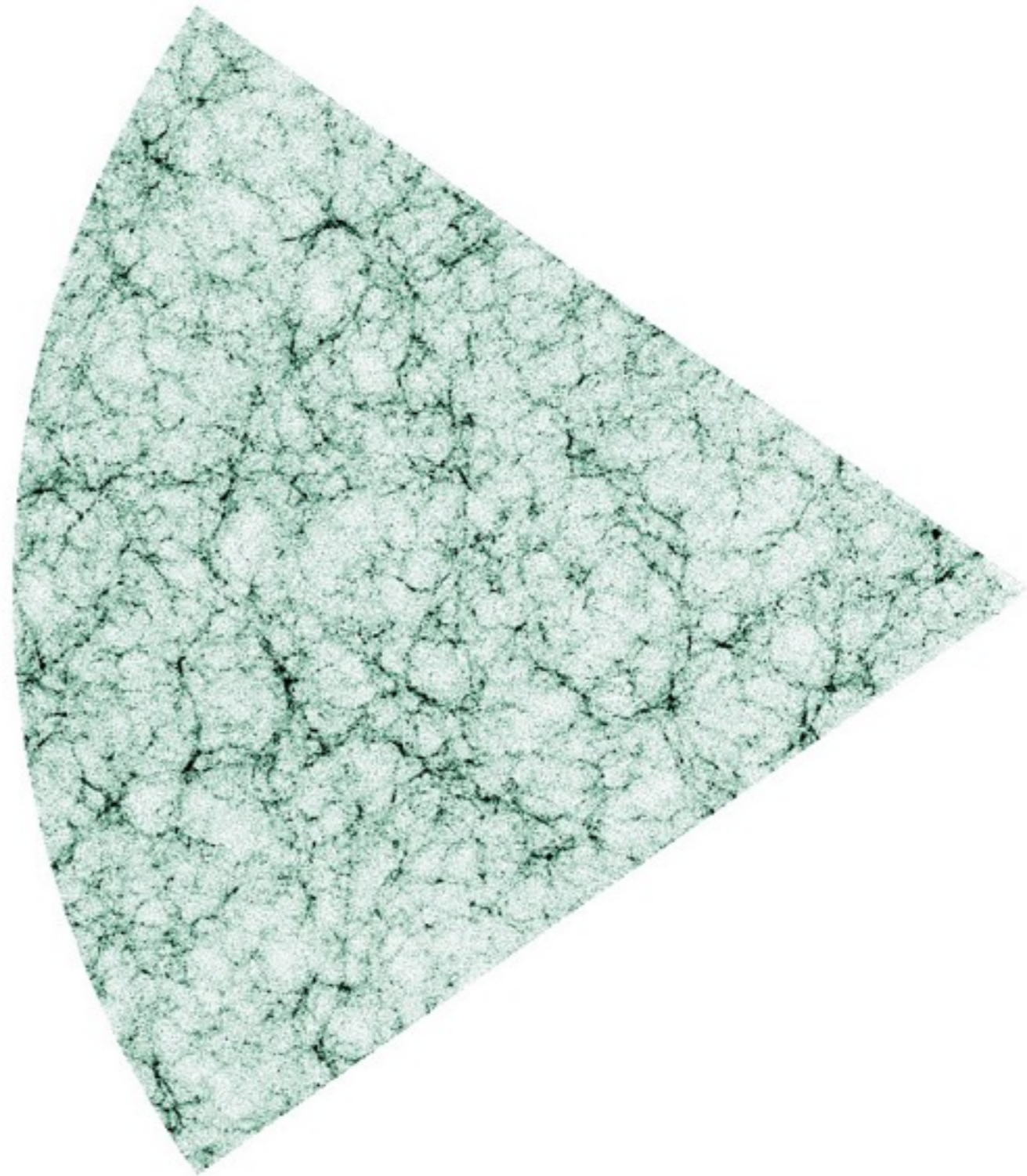
Como Gerar um Catálogo de Galáxias?

Receita:



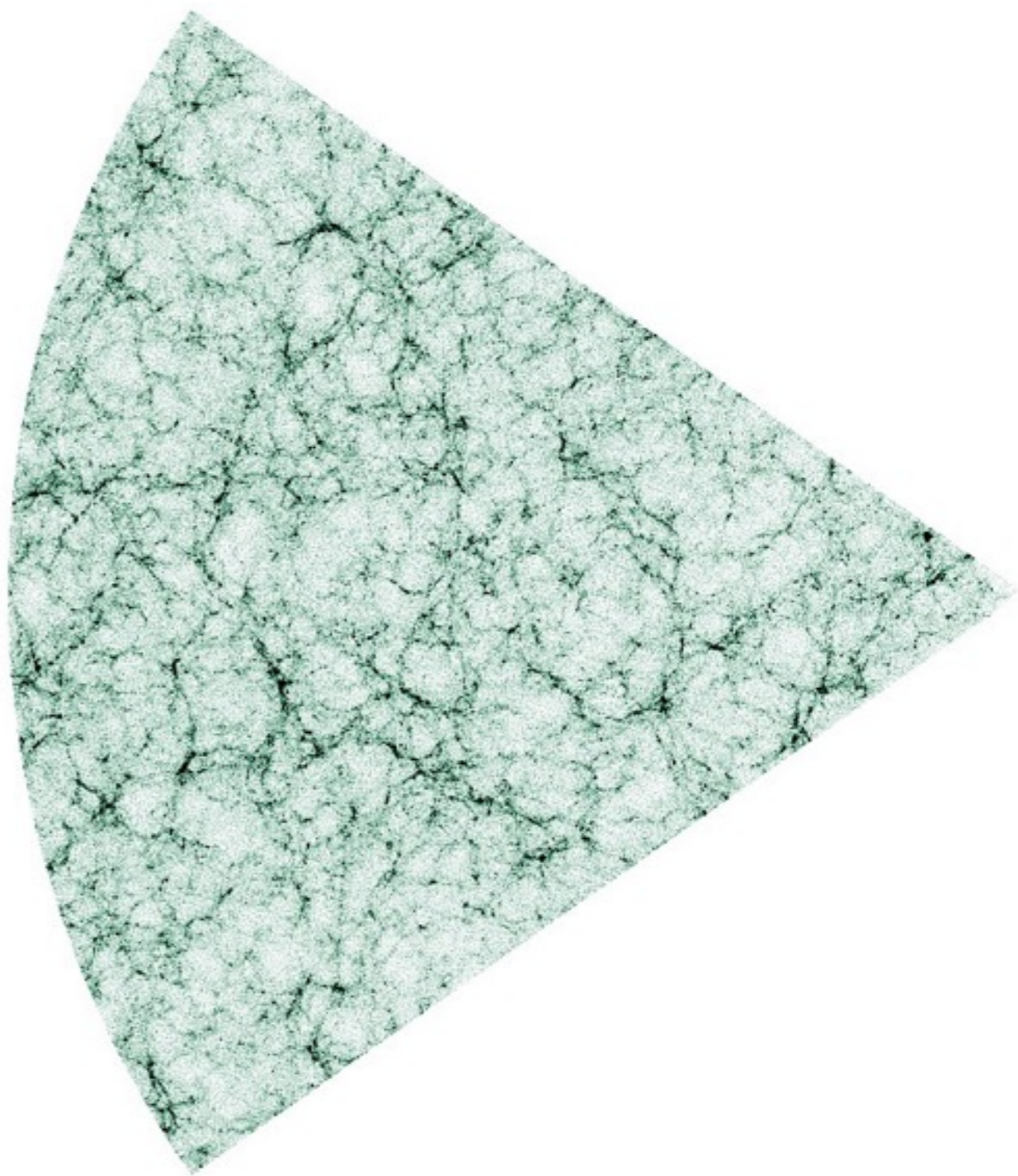
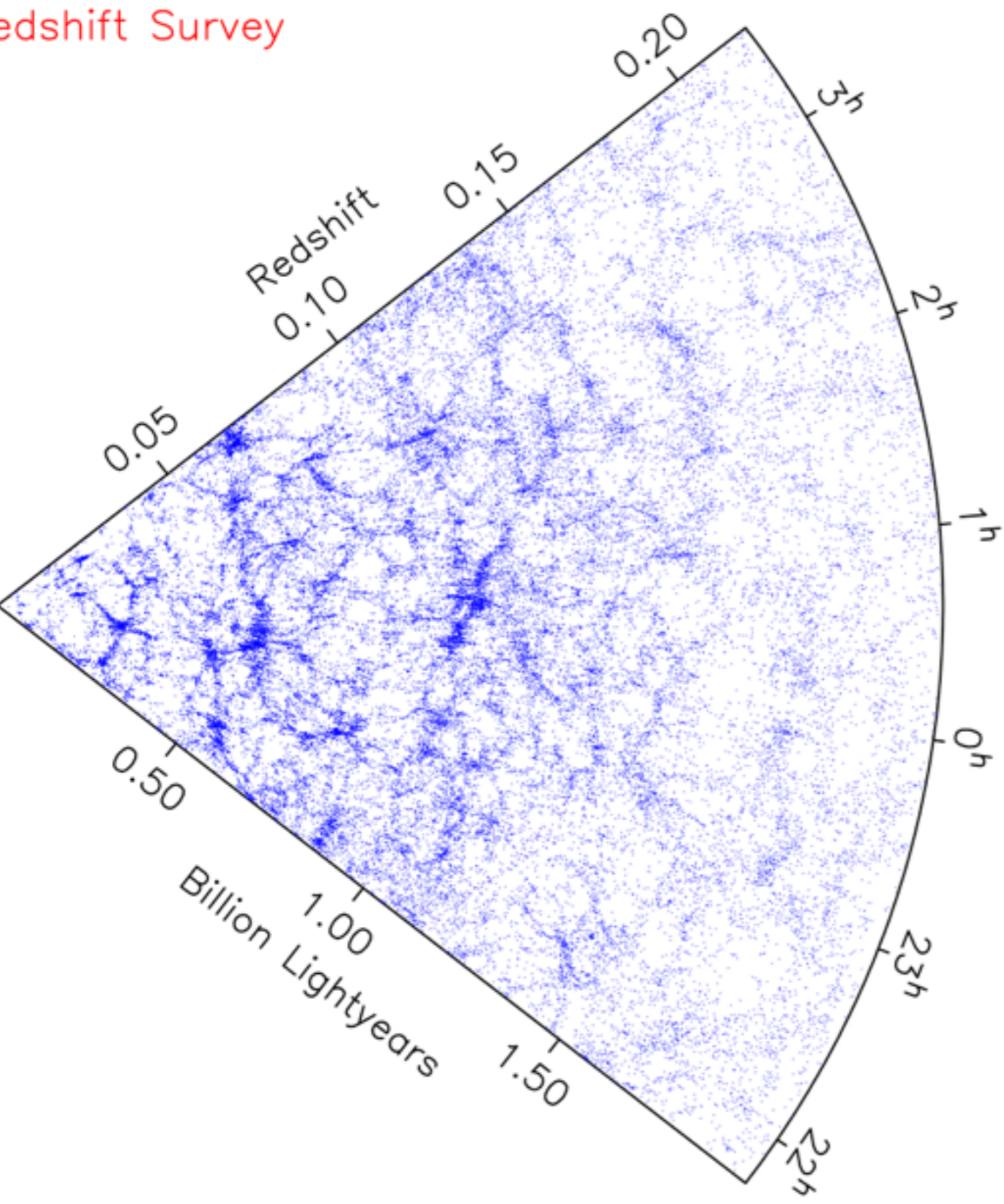
Resultados de Simulações

- 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

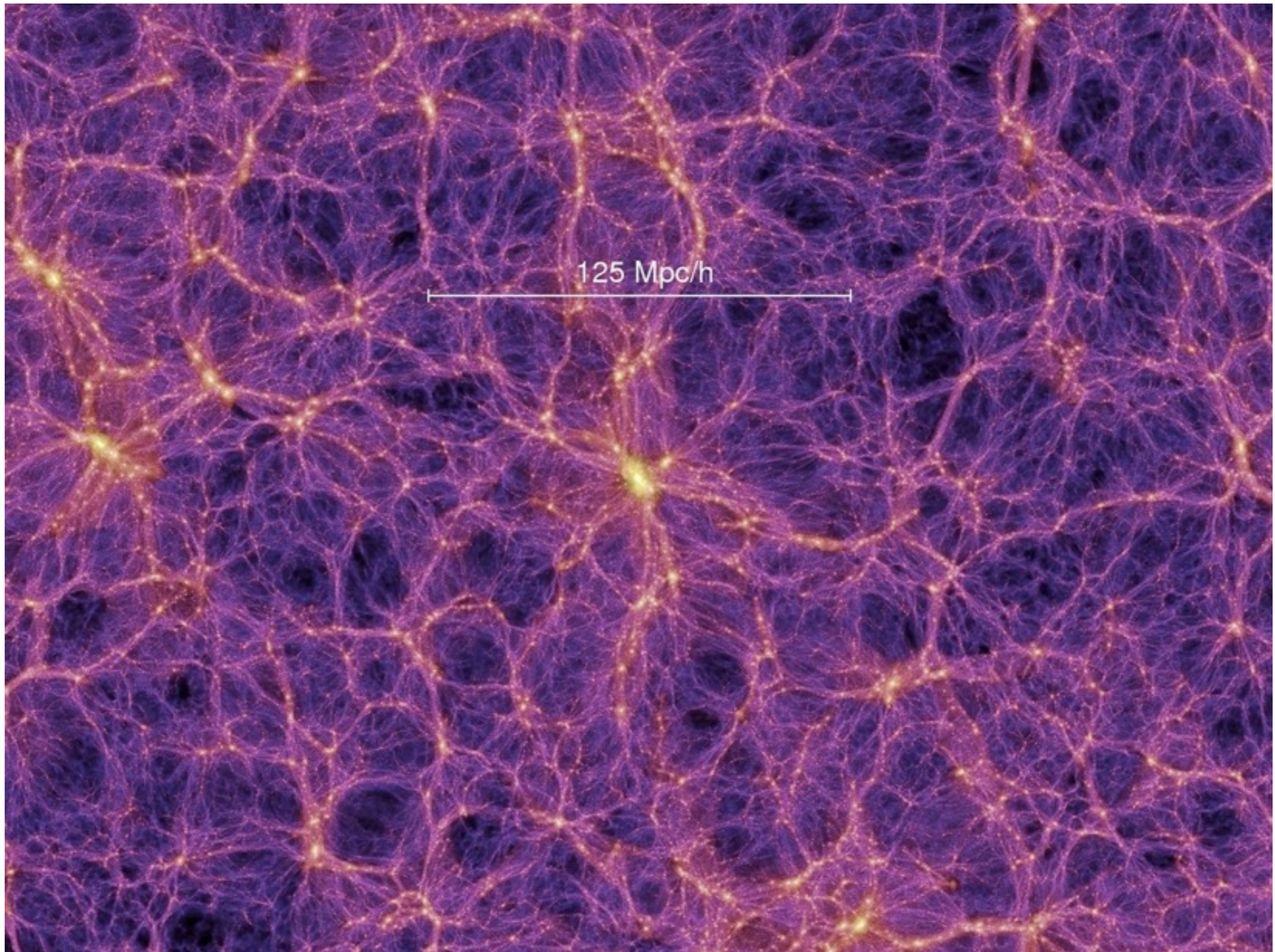


Resultados de Simulações

Redshift Survey



A Simulação do Milênio



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)

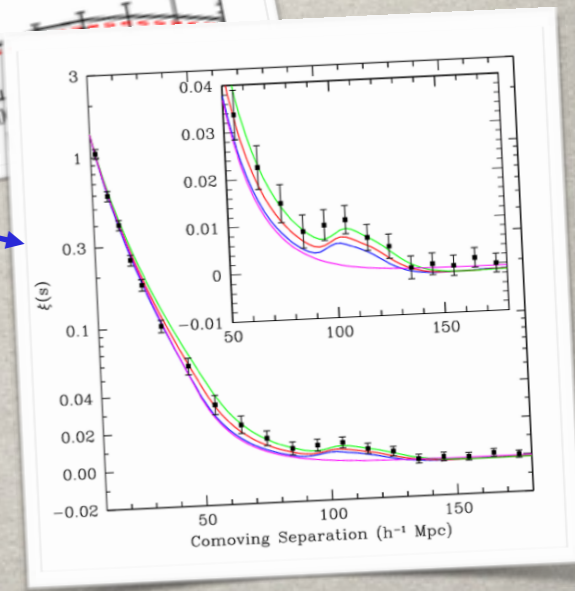
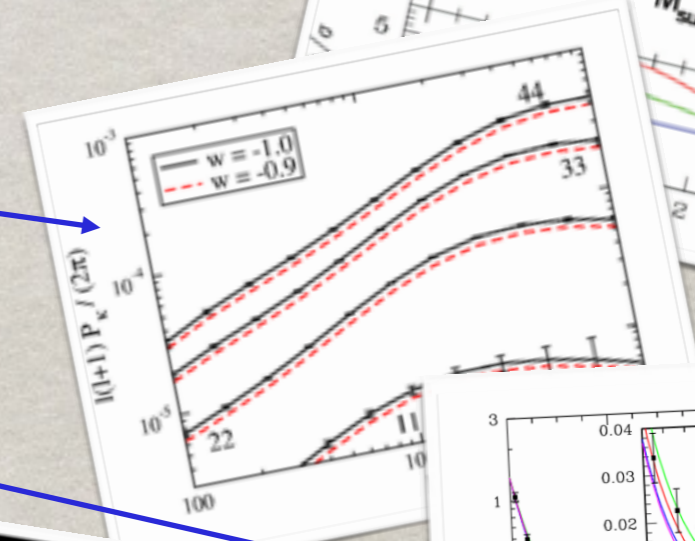
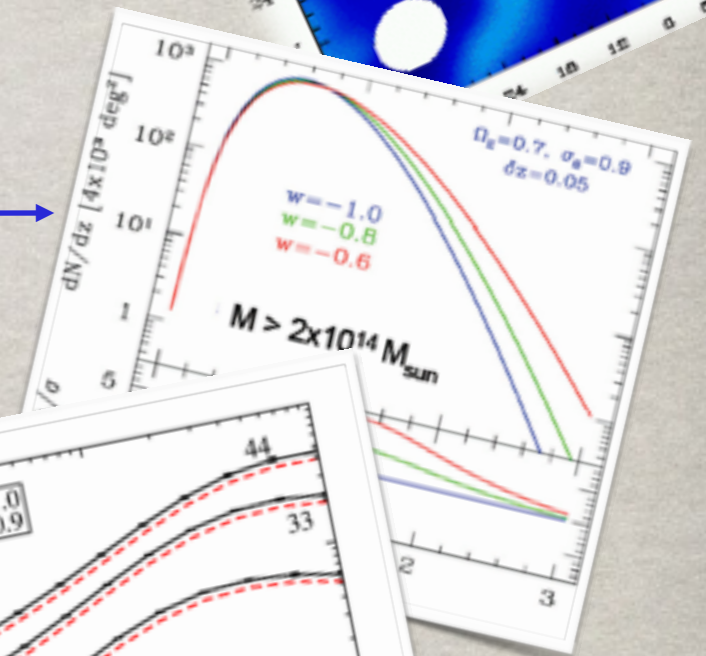
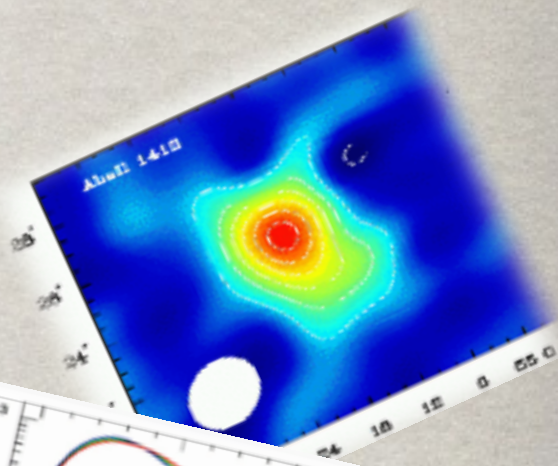
- Supernovas

- Técnica fundamental para os levantamentos de imagens:

- Desvios para o vermelho fotométricos

EXEMPLO: MEDIDAS DA ENERGIA ESCURA COM O DARK ENERGY SURVEY

- Realizar medidas **complementares** e de precisão dos efeitos da energia escura
- “Novos métodos”
 - Contagem de aglomerados de galáxias
 - 20,000 aglomerados de grande massa
 - 200,000 grupos e aglomerados
 - Efeito fraco de lentes gravitacionais
 - 300 milhões de galáxias com medida da forma
 - Distribuição espacial de galáxias
 - 300 milhões de galáxias
- Medida “padrão da energia escura”
 - Distâncias de supernovas do tipo Ia
 - ~ 2000 supernovas



Aglomerados de Galáxias e Energia Escura

- Função de Massa:

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

- Sensível à Energia Escura!

Função de Massa

A distribuição da abundância de aglomerados em função do desvio para o vermelho é dada por

$$\frac{dN}{dz} = \underbrace{A_{\text{survey}} \frac{c}{H(z)} \left(\int_0^z dz'' \frac{c}{H(z'')} \right)^2}_{\text{volume}} \int_{M_{\text{min}}}^{\infty} \underbrace{\frac{dn(M, z)}{d \ln M}}_{\text{função de massa}}.$$

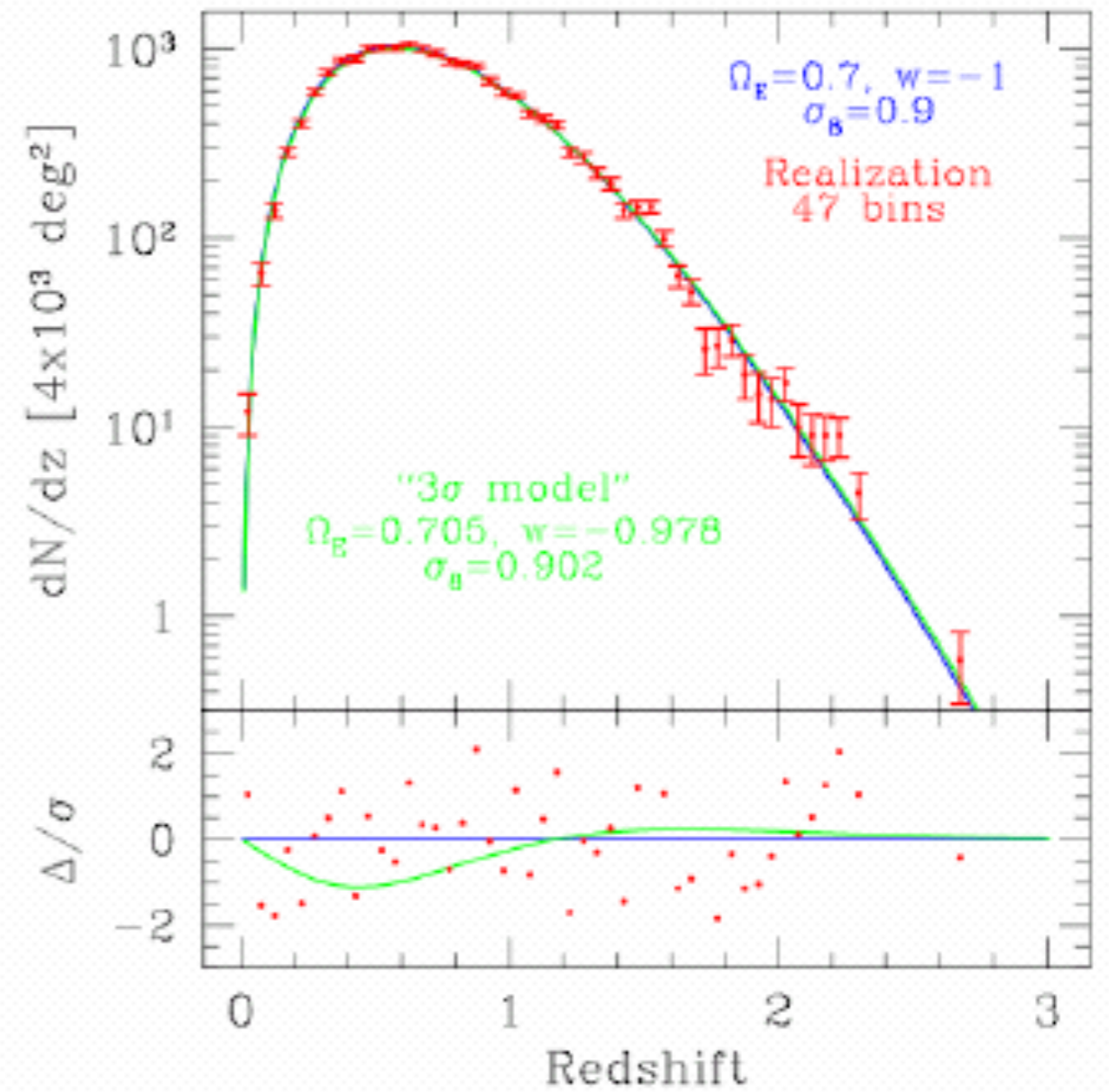
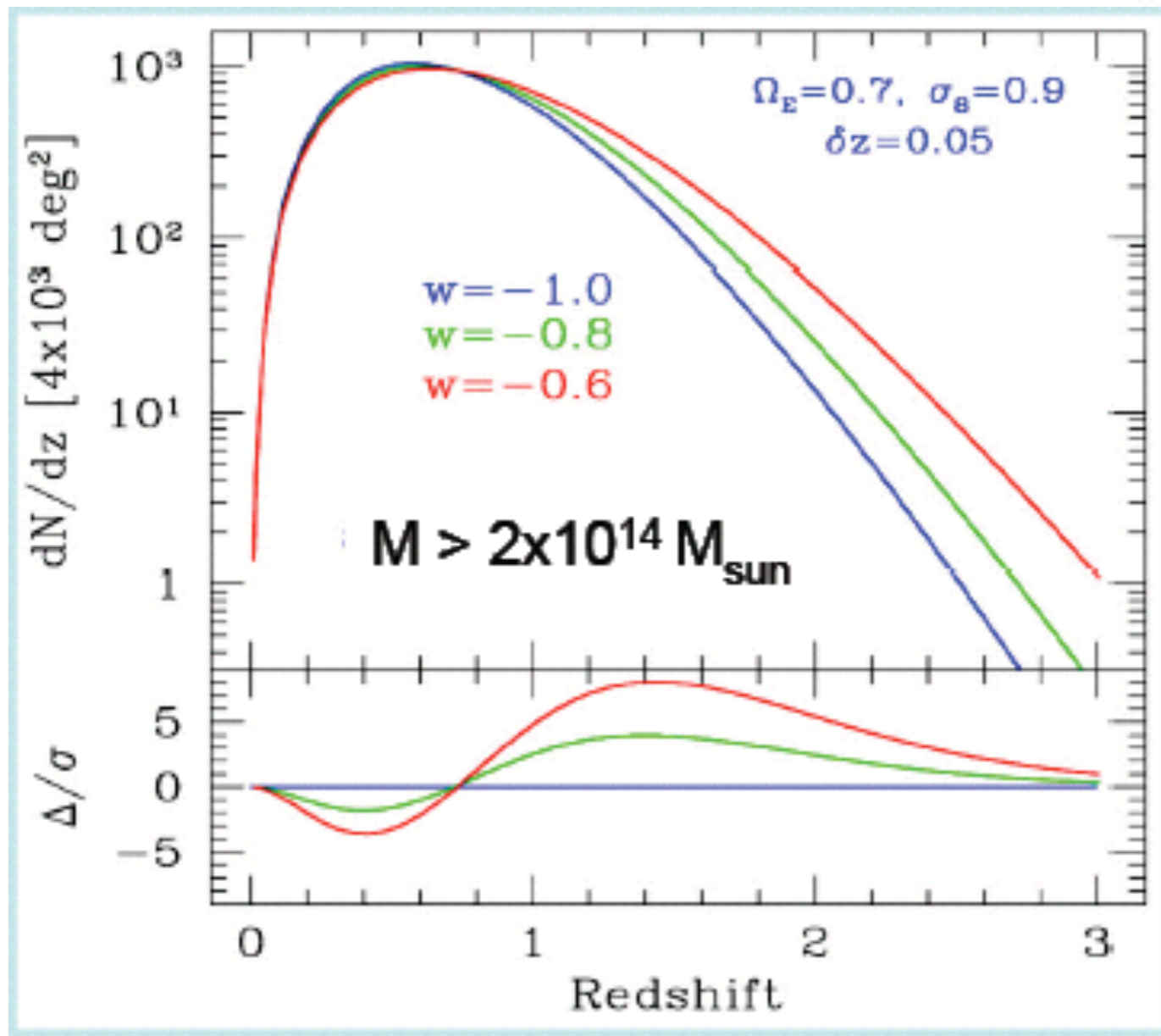
- Função de Hubble:

$$H(z) = H_0 \left[\Omega_r (1+z)^4 + \Omega_m (1+z)^3 + \Omega_{DE} (1+z)^{3(1+w_0+w_1)} e^{-3w_1 \frac{z}{1+z}} \right]^{1/2}$$

- considerando universo plano ($\Omega_k = 0$) e a equação de estado da energia escura

$$p = \left(w_0 + \frac{z}{1+z} w_1 \right) \rho.$$

Aglomerados de Galáxias e Energia Escura



A força de múltiplos observáveis

Suposições:

Aglomerados:

$\sigma_8=0.75$, $z_{\max}=1.5$,
calibração de WL
(sem aglomeração)

BAO: $\ell_{\max}=300$

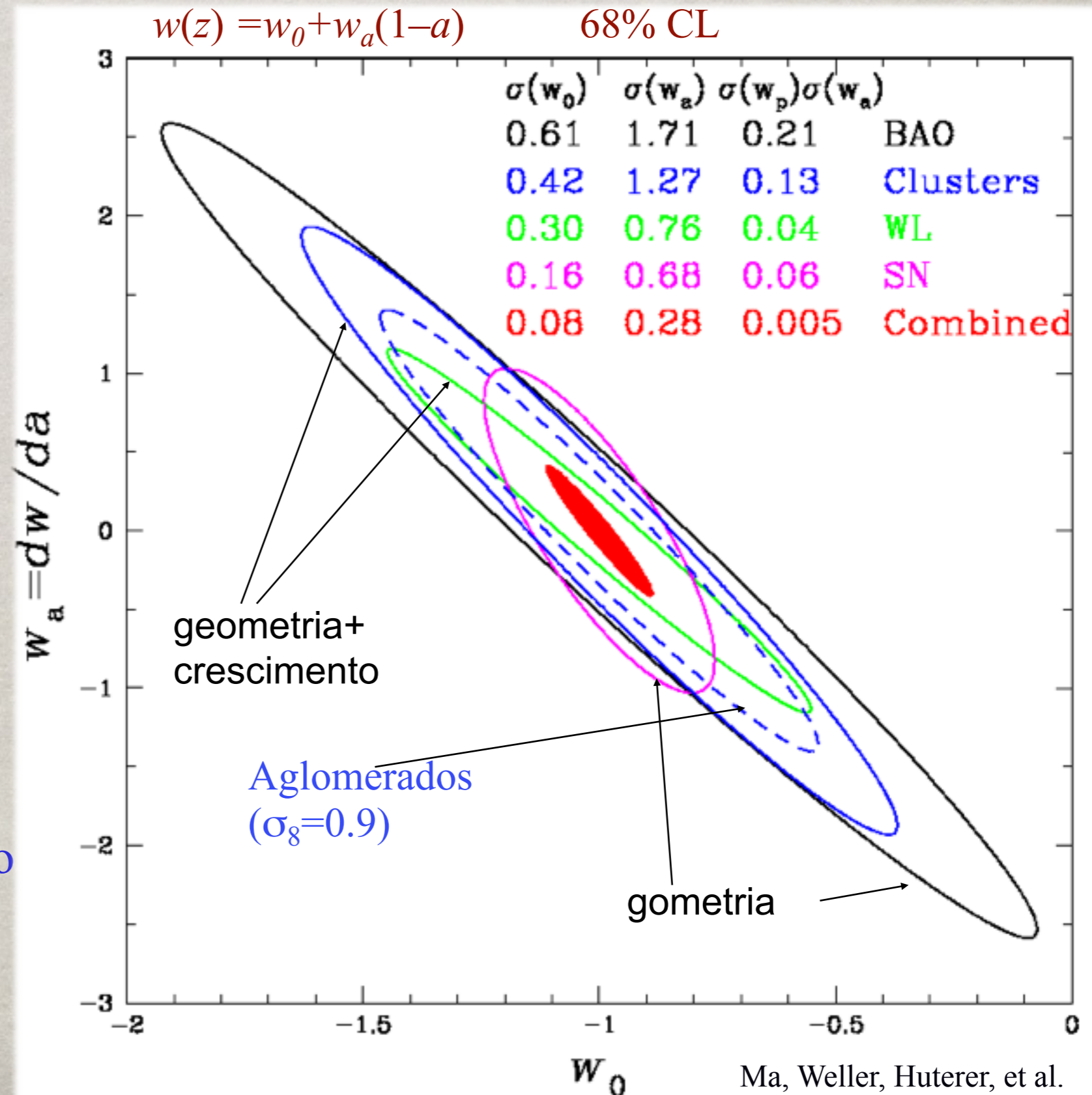
WL: $\ell_{\max}=1000$

(sem bi-espectro; gal-mass
incluído na combinação

Erros estatísticos, sistemáticos
de 0.002 e photo-z apenas

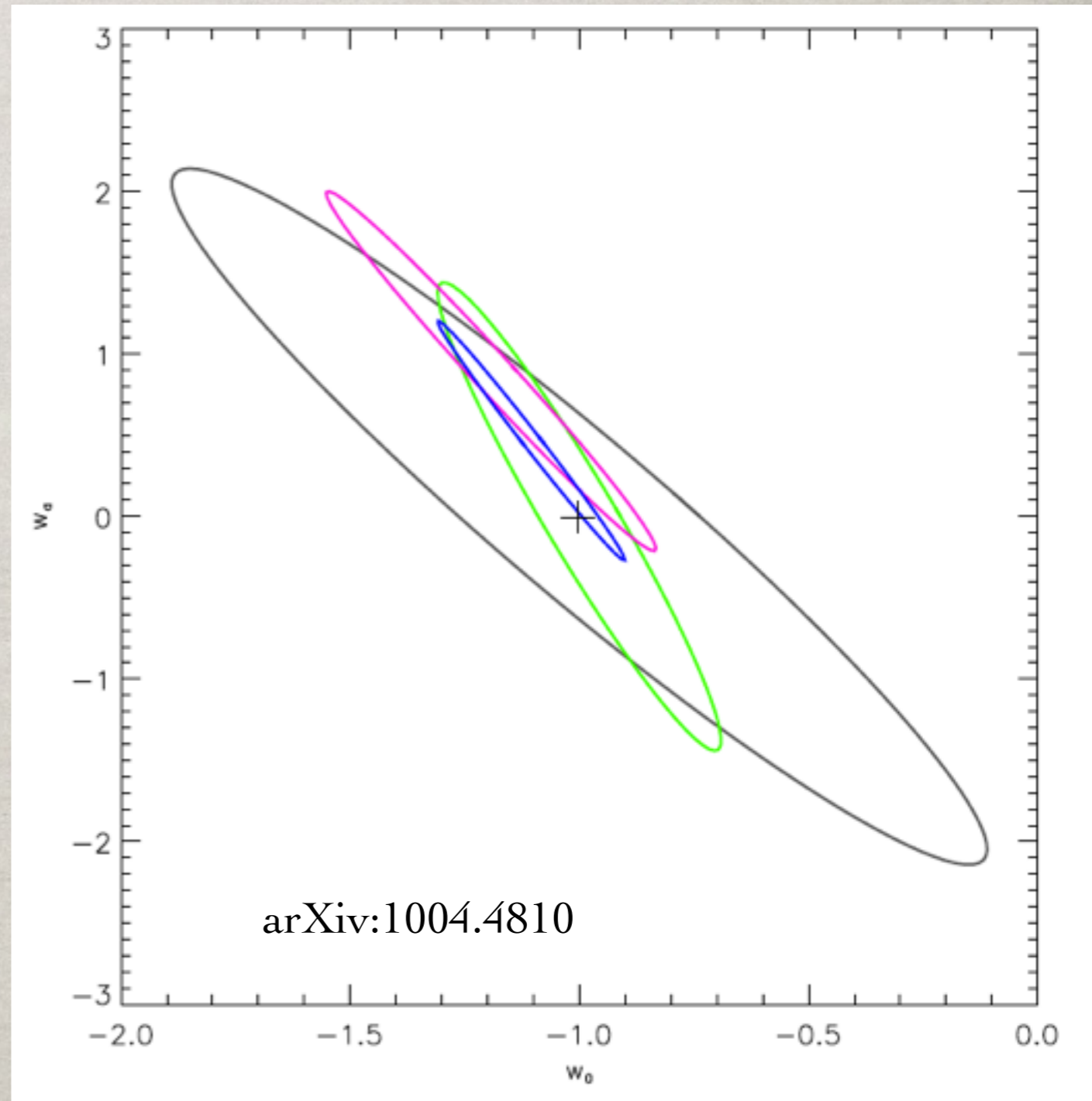
Curvatura espacial,
marginalizado no viés galáctico

A priori de CMB do Planck



TEORIA

- Muito além da Energia Escura
 - Testes da relatividade geral e
 - Gravidade modificada
 - Perturbações na energia escura
 - Modelos com grandes heterogeneidades
- Limites na não gaussianidade
- Estratégia observacional
- Novos observáveis e combinação
 - Efeito Sachs Wolfe integrado
- Métodos estatísticos e a priori



A scenic view of a beach with turquoise water and a clear blue sky. The text is overlaid on the image.

**LENTEAMENTO
GRAVITACIONAL
FRACO POR GALÁXIAS
E ÁGLOMERADOS**

Lenteamento por galáxias e aglomerados

- Maior sinal
- Centro de referência
- Ajuste de modelos
- Objetos individuais ou *Stacking* do sinal

Aplicações

- Calibração da massa para testes cosmológicos
- Perfis radiais x modelos
- Relação massa estelar/massa total
- etc.

Cisalhamento médio e perfis radiais

É possível mostrar que

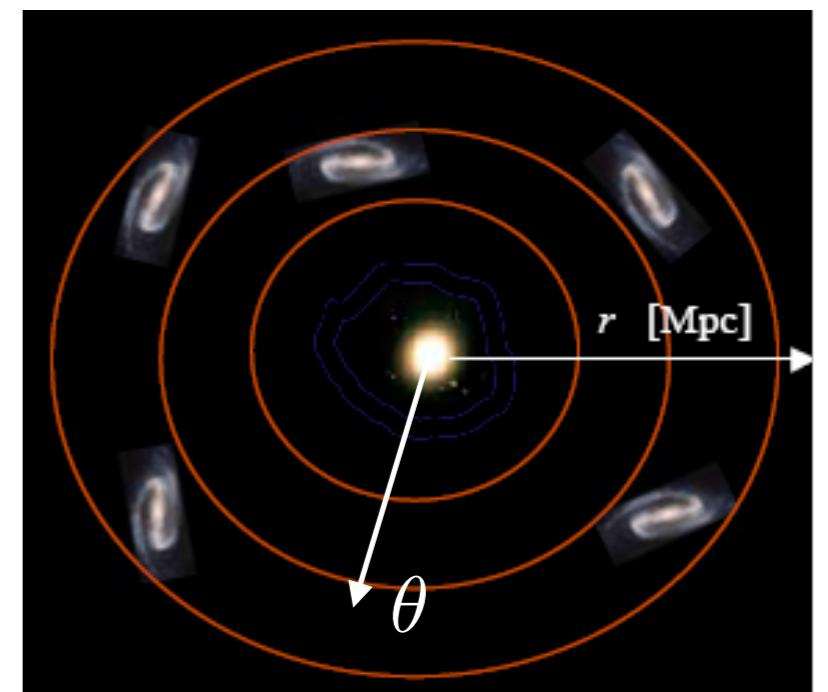
$$\langle \gamma_t(\theta) \rangle = \bar{\kappa}(\theta) - \langle k(\theta) \rangle$$

↑
média em um círculo da
componente tangencial do
cisalhamento

↑
média em um
disco de raio

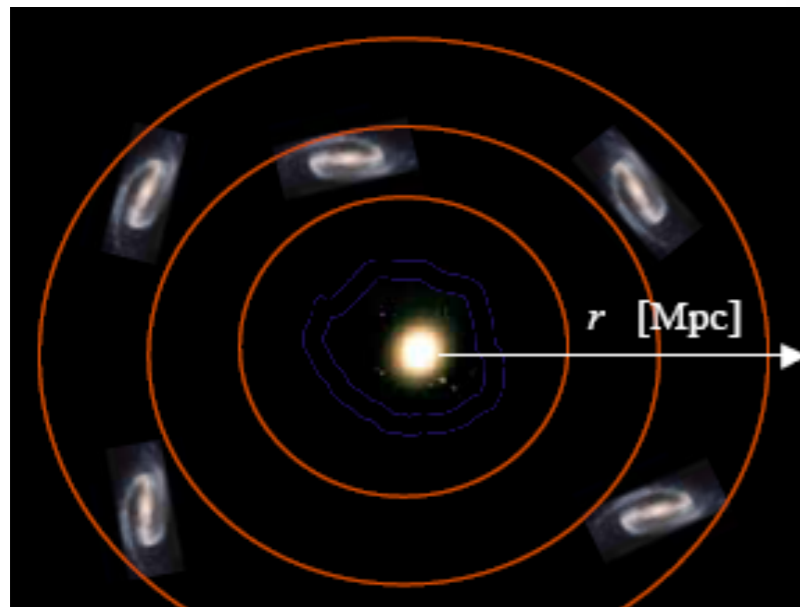
↑
média no círculo

Na prática: média em anéis
(bins radiais)



Reconstrução de massa em aglomerados

- Medir cisalhamento tangencial pra obter $\Delta\Sigma$



$$\Delta\Sigma(r) \equiv \bar{\Sigma}(<r) - \bar{\Sigma}(r) = \Sigma_{crit} \times \gamma_t(r)$$

$$\Sigma_{crit} = \frac{c^2}{4\pi G} \frac{D_{OS}}{D_{OL} D_{LS}}$$

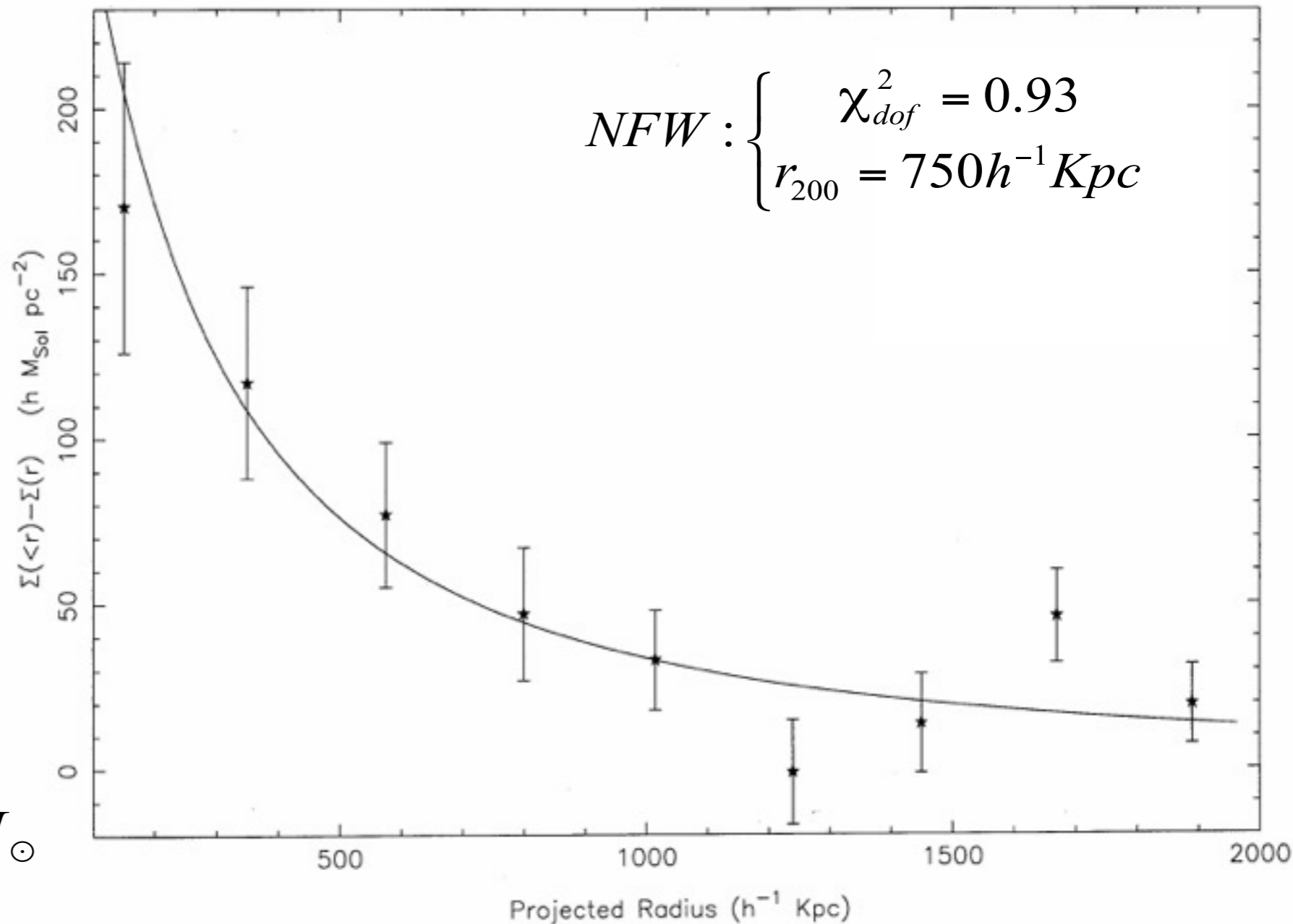
- Massas:

$$\bar{M}_{NFW} = (1.0 \pm 0.2) 10^{14} h^{-1} M_{\odot}$$

$$\frac{\Delta M_{200}}{M_{200}} \approx 2.5\%$$

Fit to the lensing data (NFW with C=5)

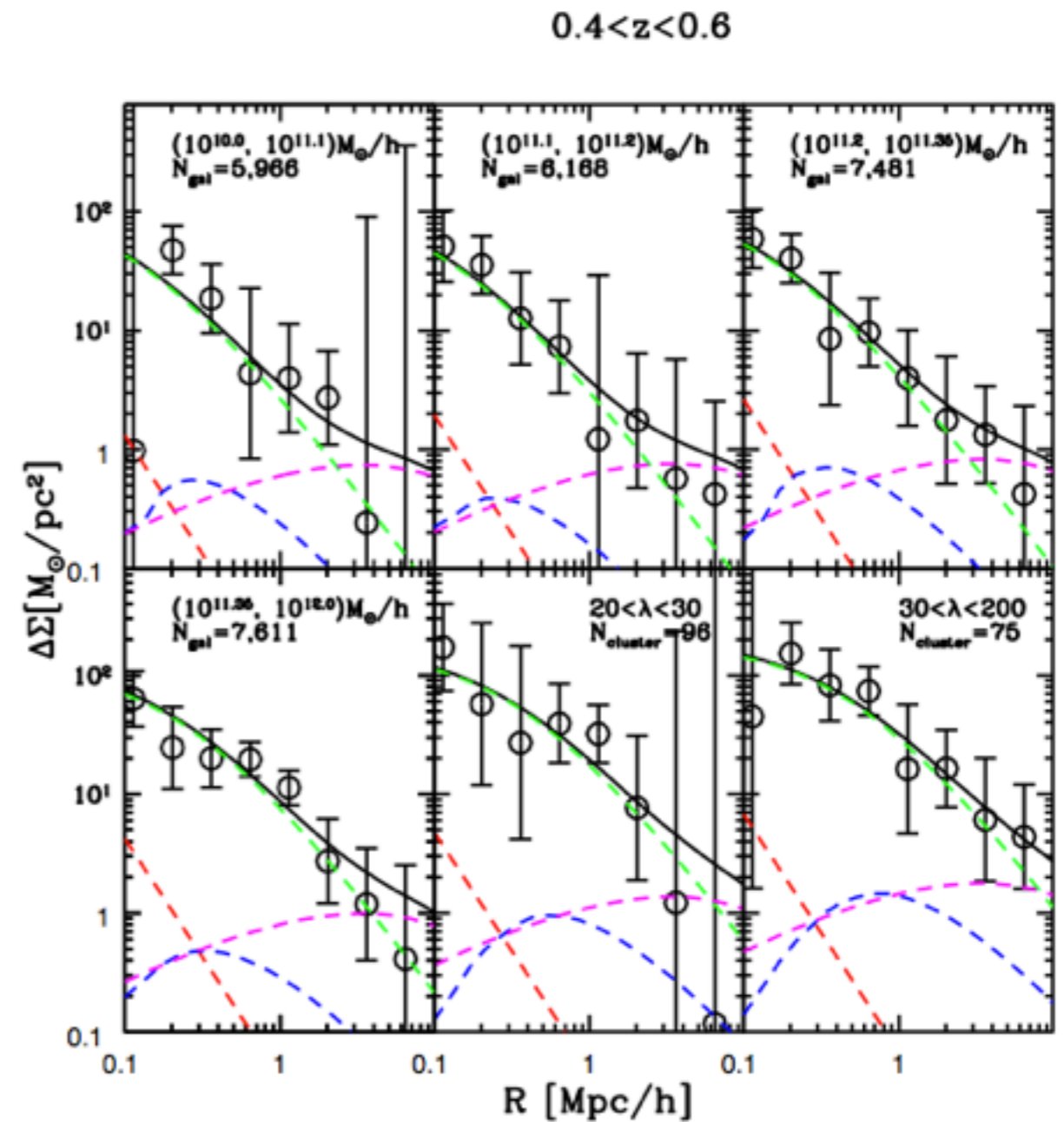
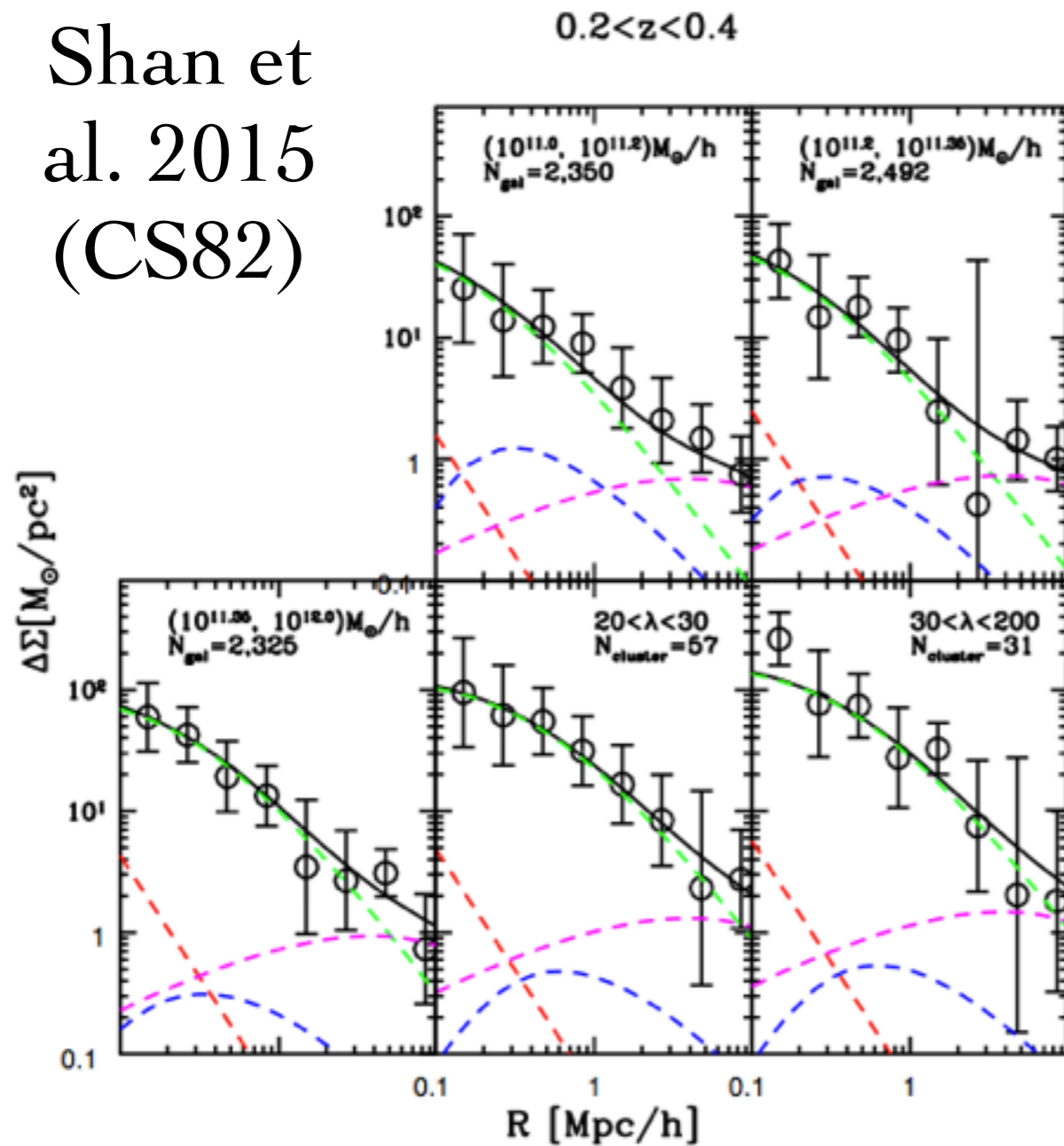
Makler 2002



42 aglomerados (RASS/SDSS), Sheldon, et al., ApJ 554, 88 (2001)

Calibração de massa

Shan et al. 2015 (CS82)



Contribuições de:

- Estrutura em grande escala
- Incerteza no centro
- Potencial central

Exemplos de erros sistemáticos se fossem ignorados

Reconstrução da Massa

Potencial projetado

$$\psi(\vec{\xi}) = 2G \int d^2\xi' \Sigma(\vec{\xi}') \ln |\xi - \xi'|$$

Potencial de Lente(amento) $\Psi \equiv \frac{2}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_{OS} D_{OL}} \psi$

Densidade superficial crítica $\Sigma_{\text{crit}} = \frac{c^2}{4\pi G} \frac{D_{OS}}{D_{OL} D_{LS}}$

Convergência $\kappa(\vec{\theta}) = \frac{\Sigma(\vec{\theta})}{\Sigma_{\text{crit}}}$

$$\Psi(\vec{\theta}) = \frac{1}{\pi} \int d^2\theta' \kappa(\vec{\theta}') \ln \left| \left(\vec{\theta} - \vec{\theta}' \right) \right|$$

Reconstrução da Massa

Potencial de lente

$$\Psi(\vec{\theta}) = \frac{1}{\pi} \int d^2\theta' \kappa(\vec{\theta}') \ln \left| \left(\vec{\theta} - \vec{\theta}' \right) \right|$$

Cisalhamento:

$$\gamma_1(\vec{\theta}) = \frac{1}{2} (\Psi_{11} - \Psi_{22})$$

$$\gamma_2(\vec{\theta}) = \Psi_{12} = \Psi_{21}$$

$$\Gamma := \gamma_1 + i\gamma_2 = \left(\frac{\partial_1^2 - \partial_2^2}{2} + i\partial_1\partial_2 \right) \Psi$$

$$\Gamma = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\partial_1^2 - \partial_2^2}{2} + i\partial_1\partial_2 \right) \int d^2\theta' \kappa(\vec{\theta}') \ln \left| \left(\vec{\theta} - \vec{\theta}' \right) \right|$$

Reconstrução da Massa

Convolução da convergência

$$\begin{aligned}\Gamma(\vec{\theta}) &= \frac{1}{\pi} \left(\frac{\partial_1^2 - \partial_2^2}{2} + i\partial_1\partial_2 \right) \int d^2\theta' \kappa(\vec{\theta}') \ln |\vec{\theta} - \vec{\theta}'| \\ &= \frac{1}{\pi} \int d^2\theta' \kappa(\vec{\theta}') D(\vec{\theta} - \vec{\theta}').\end{aligned}$$

Kernel

$$D(\vec{\theta}) \equiv \left(\frac{\partial_1^2 - \partial_2^2}{2} + i\partial_1\partial_2 \right) \ln |\vec{\theta}| = \frac{-1}{(\theta_1 - i\theta_2)^2}.$$

Espaço de Fourier

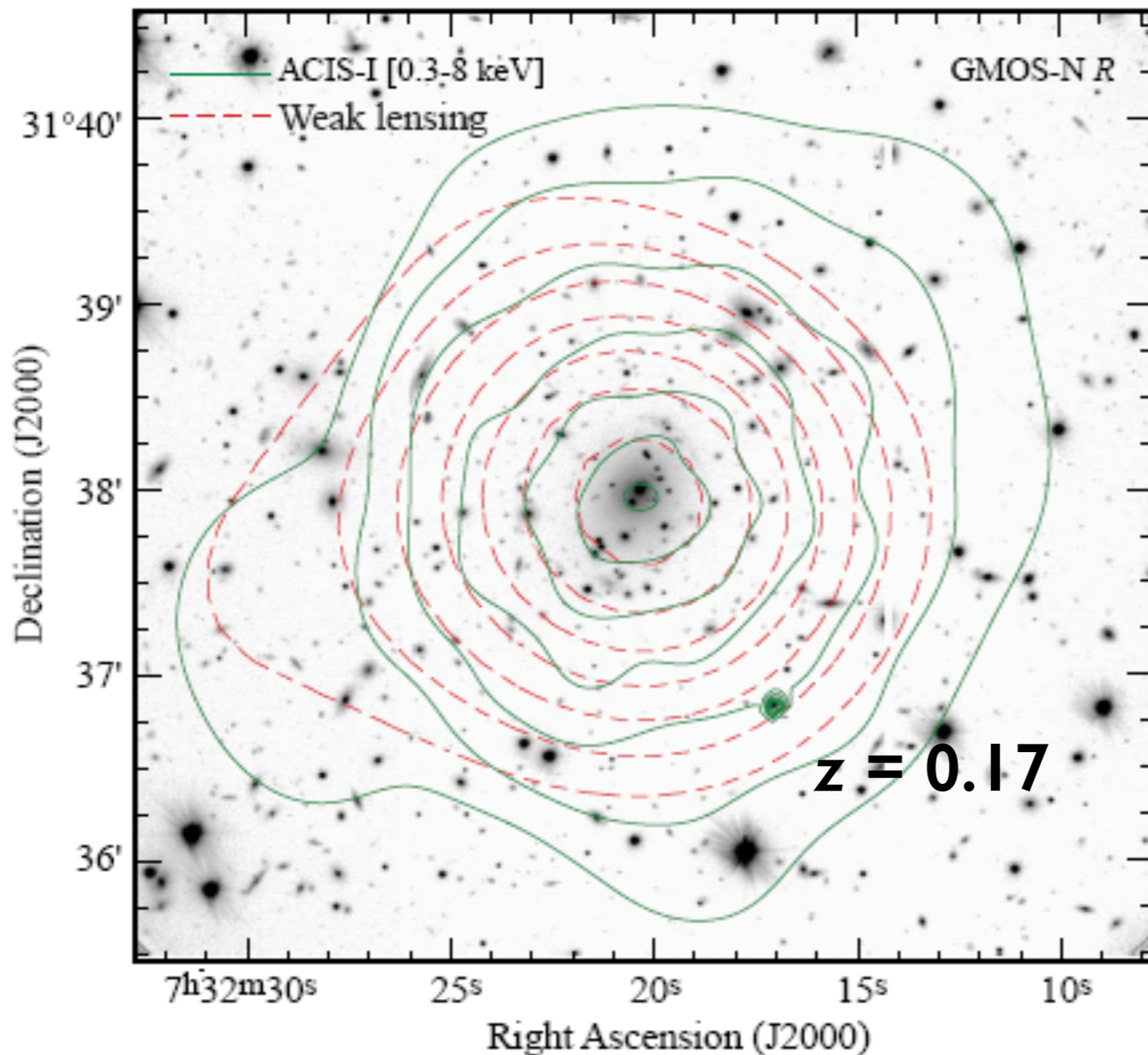
$$D(\vec{\ell}) \equiv \int d^2\theta D(\vec{\theta}) e^{i\vec{\theta} \cdot \vec{\ell}} = \pi \frac{\ell_1^2 - \ell_2^2 + 2i\ell_1\ell_2}{|\vec{\ell}|^2}.$$

Note que $D(\vec{\ell})D^*(\vec{\ell}) = \pi^2$ Como $\Gamma(\vec{\ell}) = D(\vec{\ell})\kappa(\vec{\ell})/\pi$
temos que $\kappa(\vec{\ell}) = D^*(\vec{\ell})\Gamma(\vec{\ell})/\pi$.

$$\kappa(\vec{\theta}) = \kappa_0 + \frac{1}{\pi} \int d^2\theta' D^*(\vec{\theta} - \vec{\theta}') \Gamma(\vec{\theta}').$$

Reconstrução de massa em Aglomerados

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



Distribuição de massa

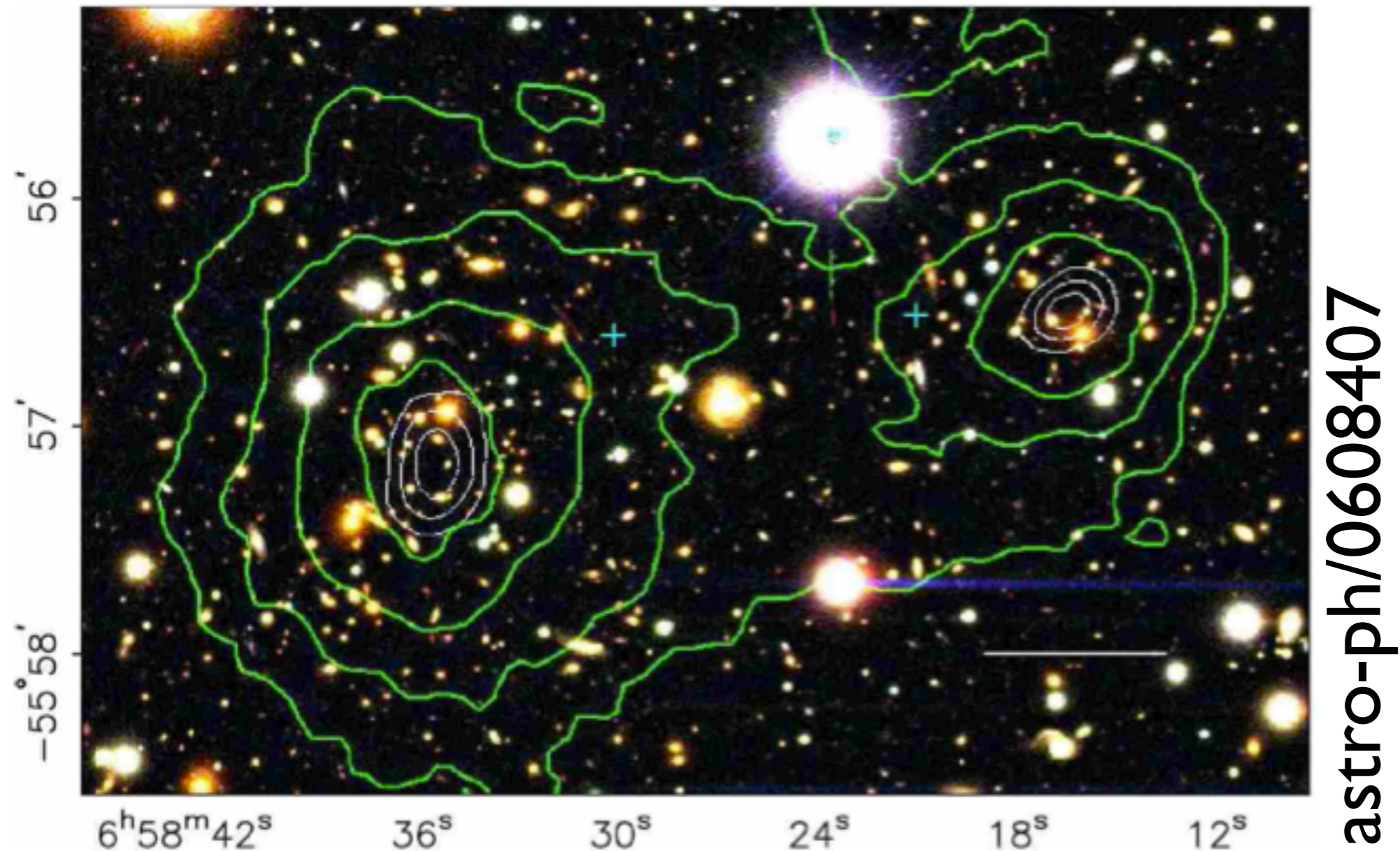
- Lentes fracas
- Emissão raios-x
- Dispersão de velocidades

concordam em 20%
(para aglomerados relaxados)

Matéria escura domina!

Evidência “direta” da matéria escura

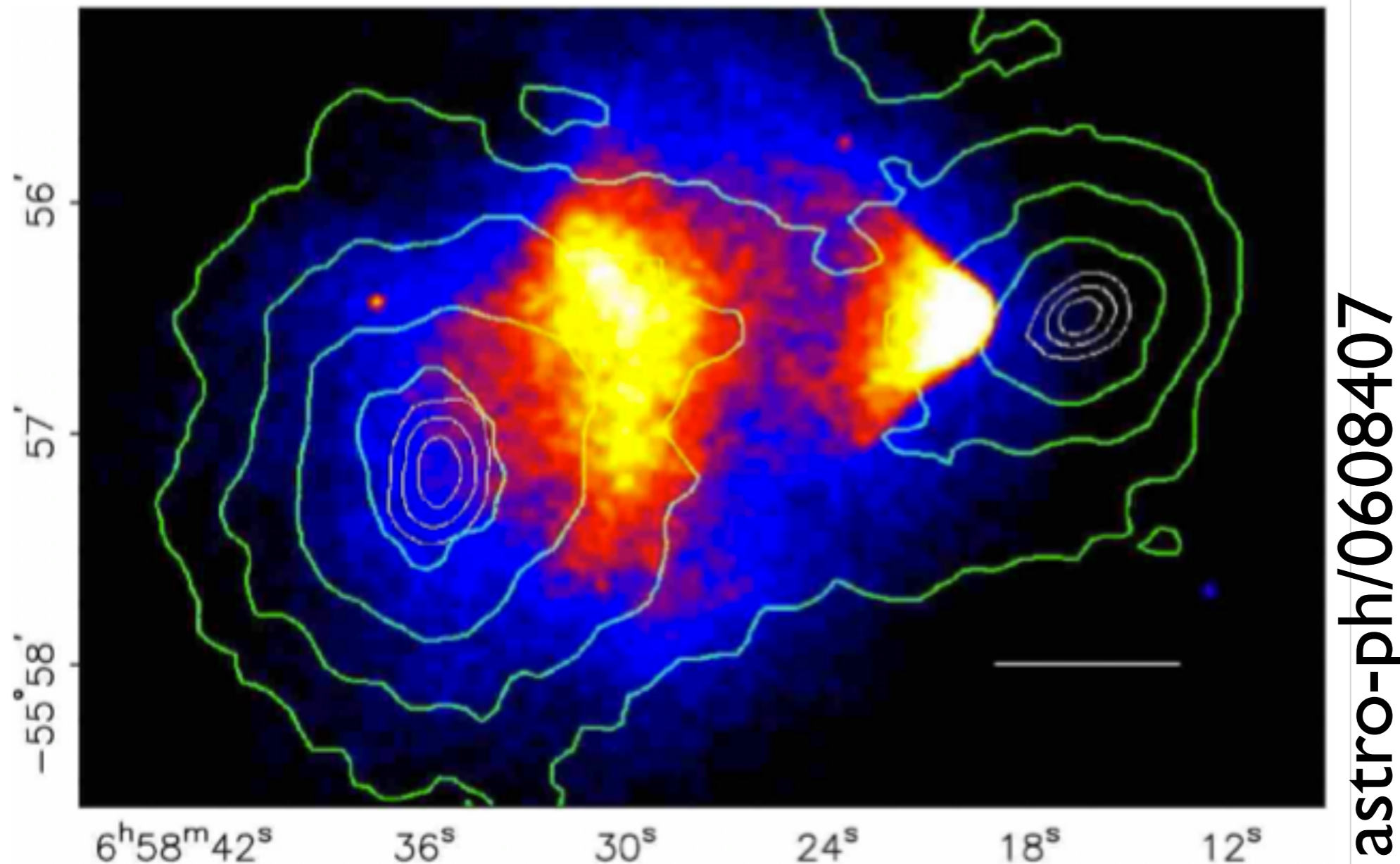
- Aglomerado da bala (IE0657-558)




Reconstrução da massa pelo efeito fraco de lente gravitacional

Evidência “direta” da matéria escura

- Distribuição do gás



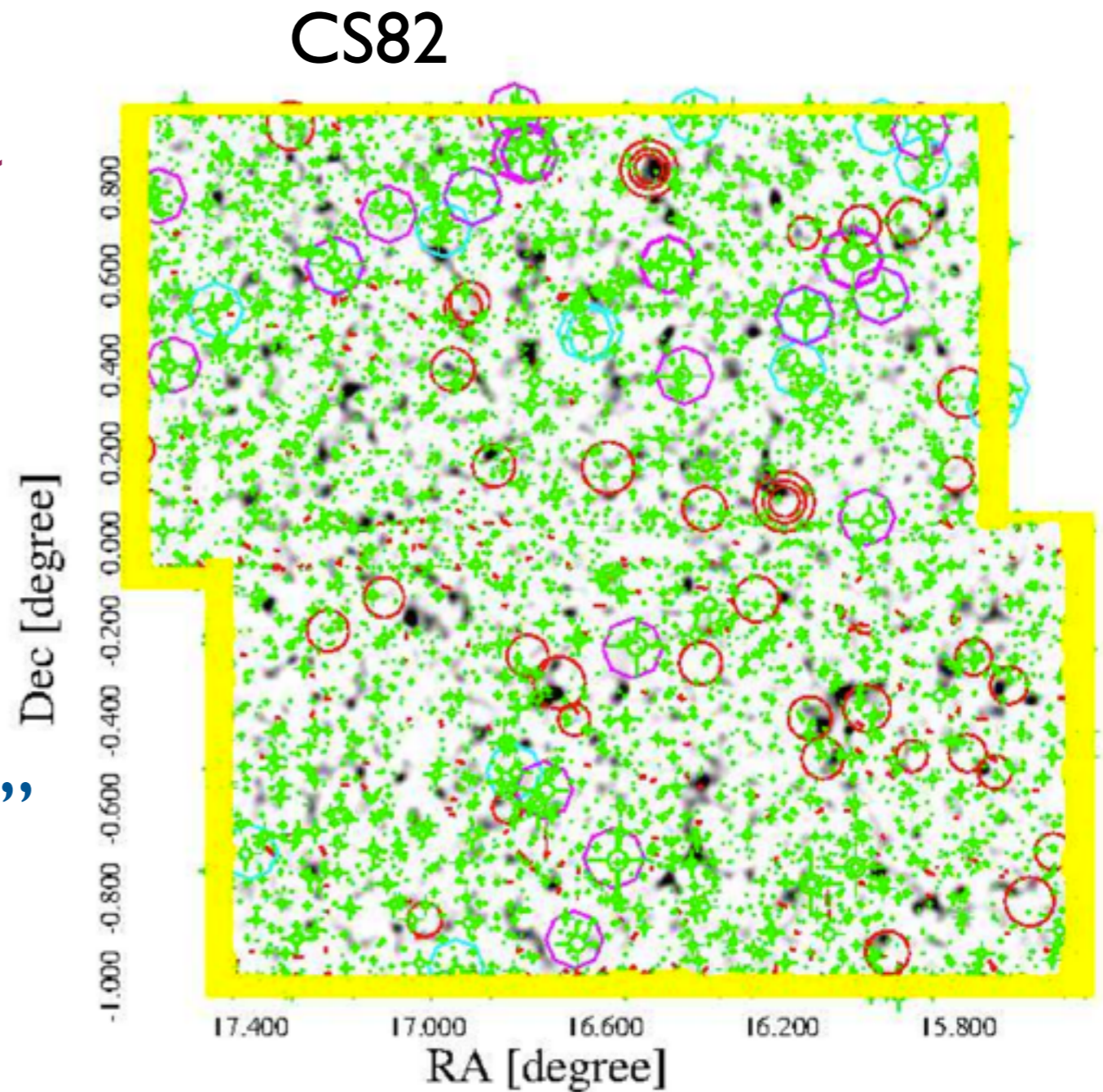
Desvio de 8σ nos centros de massa!

A scenic view of a beach with turquoise water and a clear blue sky. The text is overlaid in the center of the image.

**LENTEAMENTO
GRAVITACIONAL PELA
ESTRUTURA DO UNIVERSO
EM GRANDES ESCALAS**

Estrutura em grande escala

- Mapas de convergência
- CS82
 - i' seeing: 0.65"
 - Area: 173 deg²
 - Maior mapa contíguo
- Picos → aglomerados?
 - Arcos em “picos escuros”
 - Correlação com outros catálogos/comprimentos de onda





Press Room

MKAOC

http://pipes.yahoo.com/pipes/pipe.info?_id=57c480a2957709025424f74908f37978

[Extreme Volcanism: Image Captures one of the Brightest Volcanoes Ever Seen in the Solar System](#)

Aug 1, 2014 | Gemini Observatory

[read more](#)

[Next-Generation Thirty Meter Telescope Begins Construction in Hawaii](#)

Jul 18, 2014 | Thirty Meter Telescope

(PAES/Brasília, Hilo, HI) The second annual Pacific Astronomy and Engineering Summit (PAES), sponsored by the Thirty Meter Telescope (TMT) and hosted by the Imiloa Astronomy Center, will gather high school students and educators from the TMT partner countries: Japan, China, India, Canada and the United States (Hawaii Island). PAES Students at Sunset on Mauna Kea [read more](#)

[Large number of Dark Matter peaks found using Gravitational Lensing](#)

Jul 17, 2014 | Canada France Hawaii Telescope

A number of studies have shown that Dark Matter is the principal mass component of the Universe making up about 80% of the mass budget. The most direct technique to reveal the Dark Matter distribution is by using the gravitational lensing technique. Indeed, following Einstein's theory of Gravitation, we know that a mass concentration will deform locally the Space-Time and the observed shapes of distant galaxies seen through the such concentration will be deflected and distorted. By measuring the exact shapes of millions of these distant galaxies we can then map accurately the mass distribution in the Universe, and identify the mass peaks tracing mass concentration along their line of sight. Importantly, the number of mass peaks as a function of the mass peak significance encodes important information on the cosmological world model. In particular this distribution is sensitive to the nature of Gravitational force at large scales as well as the geometry of the Universe. Measuring mass peaks is thus one of the most attractive way to probe the relative importance and nature of Dark Matter and Dark Energy, measure the evolution the Universe and predict its fate. In a new publication of the Monthly Notice of Royal Astronomical Society, an international team, comprising researchers from Swiss, France, Brazil, Canada, and Germany present the first detailed analysis of the weak lensing peaks. This work is considered as a milestone, given the possible importance of the weak lensing peaks for cosmology. Because mass peaks are identified in two-dimensional dark matter maps directly, they can provide constraints that are free from potential selection effects and biases involved in identifying and measuring the masses of galaxy clusters. In fact a small fraction of the mass peaks are just mass concentration excess along the line of sight, and not genuine massive clusters. To detect the weak lensing mass peaks, the research team used the Canada-France-Hawaii Telescope Stripe 82 Survey (CS82 in short), still one of the largest weak lensing survey yet. The Survey covers ~170 square degrees of the Stripe 82 of the Sloan Digital Sky Survey (SDSS), an equatorial region of the South Galactic Cap that has been extensively studied by the SDSS project. With the precise shape measurement for more than four million faint distant galaxies, a dark matter mass map was generated. Huan Yuan Shan, the lead author of this publication explains that: "By studying the mass peaks in the map, we found that the abundance of mass peaks detected in CS82 is consistent with predictions from a Λ CDM cosmological model. This result confirms that the dark matter distribution from weak lensing measurement can be used as a cosmological probe". For additional details and figures, please see <http://icfht.hawaii.edu/en/news/MassPeaks/>

[Science Results - Umbrella Galaxy's Merger Models the Cosmic Food Chain](#)

Jul 1, 2014 | Subaru Telescope

Scientists have used the Subaru Telescope and the W.M. Keck Observatory to study the Umbrella Galaxy (NGC 4651) and to accurately model how it is swallowing a smaller galaxy.

[Science Results - Jupiter's Moons Remain Slightly Illuminated, Even in Eclipse](#)

Jun 18, 2014 | Subaru Telescope

Astronomers have found that Jupiter's Galilean satellites remain slightly bright even when in the Jovian shadow

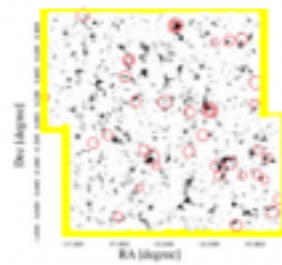
Jul 17, 2014

[Fingerprinting the formation of giant planets](#)

Category/Press Release

Canada France Hawaii Telescope

A team of Brazilian and American astronomers used CFHT observations of the system 16 Cygni to discover evidence of how giant planets like Jupiter form. One of the main models to form giant planets is called "core accretion". In this scenario, a rocky core forms first by aggregation of solid particles until it reaches a few Earth masses when it becomes massive enough to accrete a gaseous envelope. For the first time, astronomers have detected evidence



Jul 17, 2014

[Large number of Dark Matter peaks found using Gravitational Lensing](#)

Category/Press Release

Canada France Hawaii Telescope

A number of studies have shown that Dark Matter is the principal mass component of the Universe making up about 80% of the mass budget. The most direct technique to reveal the Dark Matter distribution is by using the gravitational lensing technique. Indeed, following Einstein's theory of Gravitation, we know that a mass concentration will deform locally the Space-Time and the observed shapes of distant galaxies seen through the such concentration will be deflected and distorted. By measuring the exact shapes of millions of these distant galaxies we can then map accurately the mass distribution in the Universe, and identify the mass peaks tracing mass concentration along their line of sight. Importantly, the number of mass peaks as a function of the mass peak significance encodes important information on the cosmological world model. In particular this distribution is sensitive to the nature of Gravitational force at large scales as well as the geometry of the Universe. Measuring mass peaks is thus one of the most attractive way to probe the relative importance and nature of Dark Matter and Dark Energy, measure the evolution the Universe and predict its fate. In a new publication of the Monthly Notice of Royal Astronomical Society, an international team, comprising researchers from



A SBF

Sócios

Serviços Online

Eventos

Acontece na SBF

Destaque em Física

Opinião

Memória

Publicações

Acordos

Relatórios

Ensino

Mural do Sócio

Boletins

Premiações

Anúncios da SBF

Pesquisa

MNPEF

PLAF

Seguros

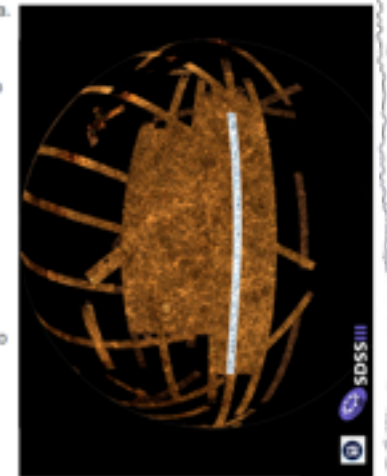
Novo mapeamento da matéria escura

Destaque em Física, semana de 31 de julho de 2014

A matéria escura é um dos grandes mistérios da física moderna. Existem diversos modelos para explicar sua existência, mas o fato de que sua única manifestação detectável até agora é a força gravitacional que ela exerce sobre grandes objetos, como galáxias, dificulta o esclarecimento. E o que é mais chocante: ela responde por cerca de 80% do inventário total de matéria existente no Universo.

Agora, um grupo internacional de pesquisadores com importante participação brasileira realizou um mapeamento detalhado da presença de matéria escura numa faixa do céu com 124 graus quadrados de área. Para tanto, a equipe usou dados colhidos com o Telescópio Canadá-França-Havaí e extrapolou a presença de matéria escura a partir da observação de lentes gravitacionais – efeito previsto pela teoria da relatividade geral de Albert Einstein em que raios de luz são curvados ao passar por objetos massivos, sejam eles de matéria convencional ou escura.

[Leia mais...](#)



Desenvolvendo nanotubos de carbono



- Inscrições para a [XXXVIII Reunião Anual da SAB](#)
- Quando: 31 de agosto a 4 de setembro de 2014
- Onde: [Hotel Atlântico](#), Búzios, RJ

POSTS RECENTES NO BLOG

[CARTA DA SAB AO MINISTRO DO MCTI. CLELIO CAMPOLINA DINIZ](#)

29 Jul 2014 2:28 PM • [Adriana Valio](#)

[GRUPO FAZ MAPEAMENTO DETALHADO DA MATÉRIA ESCURA DO UNIVERSO](#)

28 Jul 2014 5:43 PM • [Adriana Valio](#)

[RONALDO ROGÉRIO DE FREITAS MOURÃO \(1935-2014\)](#)

26 Jul 2014 5:15 PM • [Adriana Valio](#)

[MARCELLE SOARES-SANTOS RECEBE PRÊMIO ALVIN TOLLESTRUP 2014](#)

26 Jul 2014 2:26 PM • [Adriana Valio](#)

PRÓXIMOS EVENTOS

[Curso de Extensão Universitária em Astronomia e Astrofísica](#)

28 Jul 2014 • IAG - USP, São Paulo

[Composite Spectra: Reconstrução](#)

28 Jul 2014 • Observatório Nacional

[III Jayme Tiomno School of Cosmology](#)

04 Aug 2014 • Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ

[Workshop: Oportunidades científicas e tecnológicas dos instrumentos do Gemini e SOFIST](#)

08 Aug 2014 • Delphin Hotel, Guanabara

- AGRONOMIA
- AGROPECUÁRIA
- AMBIENTE
- ANTROPOLOGIA
- ARQUEOLOGIA
- ARQUITETURA
- ARTES VISUAIS
- ASTRONOMIA**
- BIODIVERSIDADE
- BIOENERGIA
- BIOLOGIA
- BIOL. CELULAR
- BIOQUÍMICA
- BIOTECNOLOGIA
- BOTÂNICA
- CIÊNC. POLÍTICA
- CIENCIOMETRIA
- CINEMA
- CIÊNC.
- ATMOSFÉRICAS
- COMPUTAÇÃO
- COMUNICAÇÃO
- DANÇA
- DEMOGRA
- DEMOGRAFIA
- DIPLOMACIA
- DIREITO
- ECOLOGIA
- ECONOMIA

CIÊNCIA



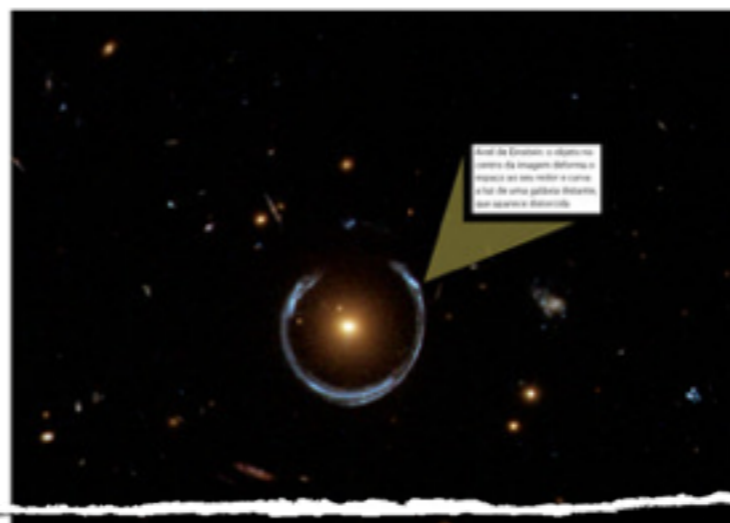
Lupas cósmicas

Distorção gravitacional na luz de supernovas e de galáxias ajuda a investigar a distribuição de matéria e energia no Universo

REINALDO JOSÉ LOPES | ED. 223 | SETEMBRO 2014



Físicos do Rio de Janeiro, com colegas do exterior, estão dominando a arte de usar um fenômeno especial que ocorre com a luz para entender a composição e a estrutura do Universo em grandes escalas. Chamado de lente gravitacional, esse fenômeno funciona como uma espécie de lente de aumento gigantesca – uma lupa cósmica – e permite enxergar objetos celestes que muitas



Busca



ed. 228 | Fevereiro 2015

Folheie a ed. 228

Como “descozinhar” o ovo

Vigilante urbano

Folheie a revista

Sumário da edição

Anuncie

Assine

Edições Anteriores

Suplementos Especiais

Edições Internacionais

RÁDIO

Pesquisa BRASIL



Pediatra explica quais são os riscos de uma cesariana desnecessária para a saúde dos bebês

Grupo faz mapeamento detalhado da matéria escura no Universo

Novo levantamento revelou pontos de concentração em algumas áreas inesperadas do Cosmos

Invisível, matéria escura é um dos maiores mistérios da astronomia e precisa de 'truque' para ser identificada

SALVADOR NOGUEIRA
COLABORAÇÃO PARA A FOLHA

Um grupo internacional de cientistas acaba de concluir um mapeamento detalhado da distribuição da misteriosa matéria escura no Universo.

Ninguém sabe exatamente do que ela é feita, o que se torna ainda mais constrangedor diante do fato de que ela responde por cerca de 80% de toda a matéria do Cosmos.

Os novos resultados parecem apoiar o modelo mais popular entre os cientistas, segundo o qual a matéria escura é composta por partículas que se movem a velocidades muito inferiores às da luz e que, apesar de terem massa, interagem muito fracamente com a matéria convencional.

Contudo, o estudo ainda está longe de ser capaz de dis-

criminar de forma definitiva entre os diversos modelos cosmológicos possíveis.

"Ainda há muitas alternativas que se encaixam", disse à *Folha* Martin Makler, do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e que participou do trabalho, publicado "Monthly Notices of the Royal Astronomical Society".

Não é trivial fazer um mapeamento de uma forma de matéria que não emite luz e que, portanto, é invisível. É preciso recorrer ao único efeito detectável produzido pela matéria escura: a gravidade que ela exerce sobre objetos visíveis. Em particular, o grupo, que tem pesquisadores da Suíça, da França, do Canadá, da Alemanha e do Brasil, explorou um fenômeno que foi primeiro previsto pela teoria da relatividade geral, de Einstein: as lentes gravitacionais.

É a ideia de que um corpo celeste mais próximo, que esteja entre nós e outro objeto mais distante, faz com que os raios de luz do objeto afastado se curvem suavemente, do mesmo jeito que a refração de

MACIÇA E INTOCÁVEL
Matéria escura é um dos grandes mistérios da ciência



O QUE É MATÉRIA ESCURA

- > A matéria escura é invisível
- > Astrônomos sabem que ela existe porque ela mantém galáxias coesas: galáxias giram tão rápido que, sem a gravidade da matéria escura, jogaria estrelas para fora

- > A matéria escura deve ser feita de partículas diferentes, que não interagem com átomos da maneira usual (por meio da força eletromagnética); experimentos especiais tentam capturá-la

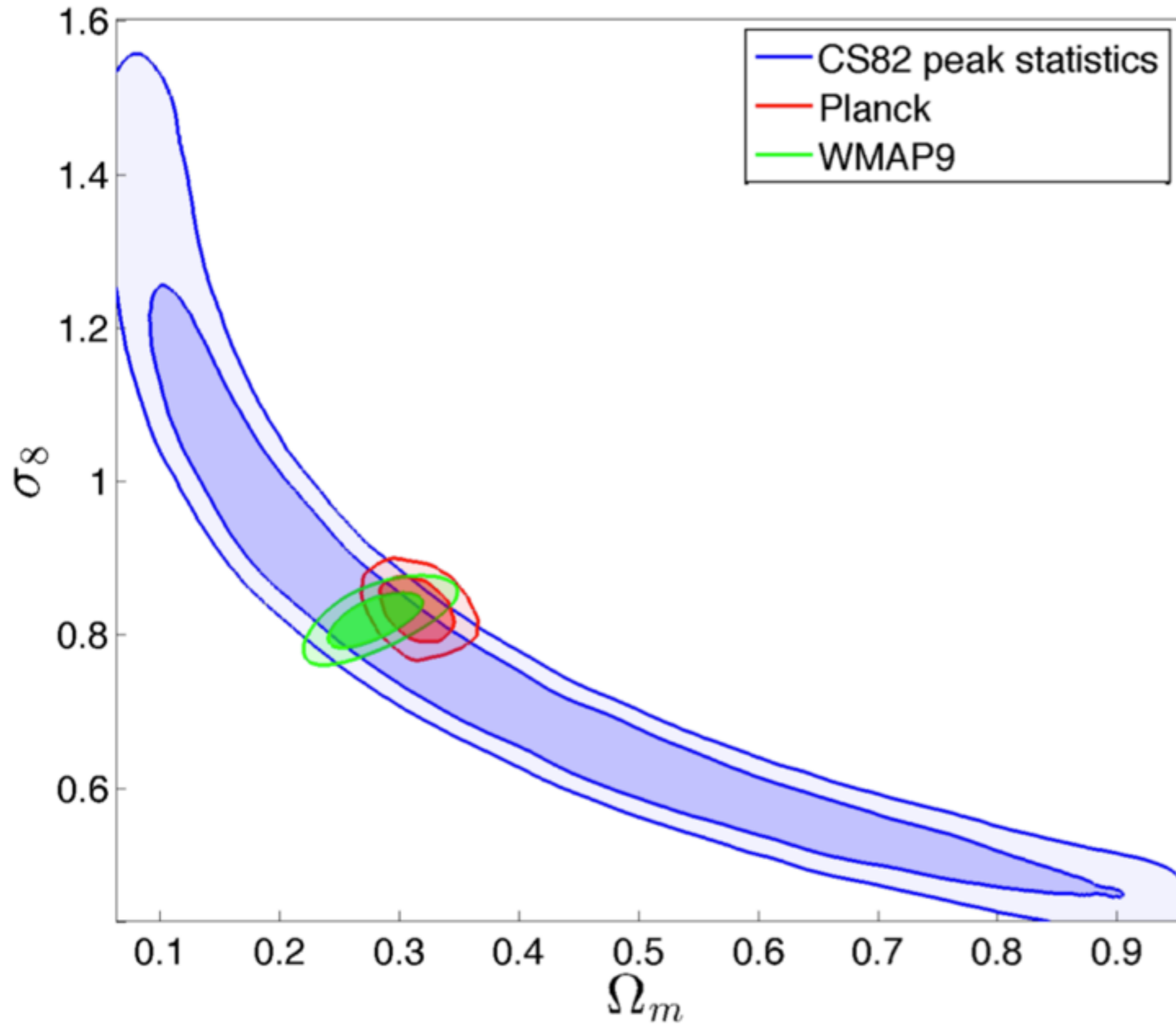
uma lente convencional faz. Como a matéria escura representa muito mais massa do que a convencional, seu efeito nas lentes gravitacionais é pronunciado. Ao detectar as distorções nos caminhos da luz, é possível estimar a quantidade de matéria escura até o objeto.

O resultado do esforço, feito com o Telescópio Canadá-França-Havaí, é um mapa bidimensional — sem profundidade — da distribuição da matéria escura, que cobre uma faixa do céu com 170 graus quadrados de área.

Uma das novidades importantes do estudo é a inclusão de concentrações não muito grandes de matéria escura.

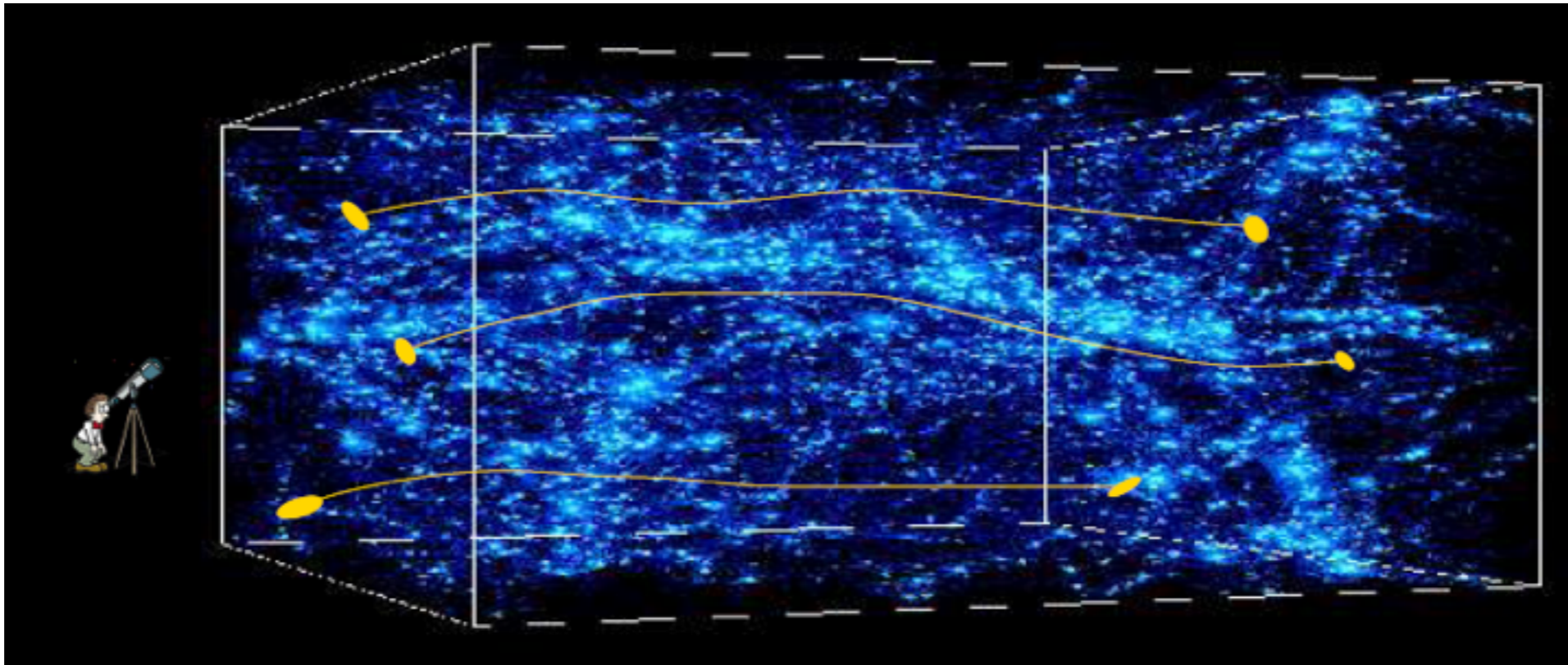
O trabalho também traz novos mistérios. Os pesquisadores encontraram alguns picos que não correspondem a grupos e aglomerados de galáxias. Ou seja, os "objetos" que teriam curvado os raios de luz seriam 100% escuros, sem matéria convencional. Os cientistas agora estão concentrados em confirmar que esses picos são reais.

Estatística de Picos no CS82



Cisalhamento cósmico

- Estudo da estrutura do Universo em grandes escalas
- Tomografia



Lenteamento pela estrutura em grade escala: além da aproximação de lente fina

Métrica de Friedmann com perturbação escalar

$$ds^2 = a^2(\tau) \left\{ \left(1 + 2\frac{\varphi}{c^2}\right) d\tau^2 - \left(1 - 2\frac{\varphi}{c^2}\right) [d\chi^2 + r^2(\chi)(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)] \right\}$$

Equação de geodésica

$$\frac{d^2 x^i}{d\lambda^2} = -g^{ik} \left(\frac{\partial g_{kl}}{\partial x^m} - \frac{1}{2} \frac{\partial g_{lm}}{\partial x^k} \right) \frac{dx^m}{d\lambda} \frac{dx^l}{d\lambda}$$

Ângulo de desvio

$$\theta_\sigma(\chi) = \theta_\sigma^0 - \frac{2}{c^2} \int_0^\chi \frac{d\chi'}{r^2(\chi')} \int_0^{\chi'} d\chi'' \varphi_{,\sigma}(\vec{\theta}r(\chi''), \chi'')$$

Funções de lente

Ângulo de desvio

$$\theta_\sigma(\chi) = \theta_\sigma^0 - \frac{2}{c^2} \int_0^\chi \frac{d\chi'}{r^2(\chi')} \int_0^{\chi'} d\chi'' \varphi_{,\sigma}(\vec{\theta}r(\chi''), \chi'')$$

Se reduz a uma integral ao longo da trajetória do fóton

$$\theta_\sigma(\chi) = \theta_\sigma^0 - \frac{2}{c^2} \int_0^\chi d\chi' \varphi_{,\sigma}(\vec{\theta}r(\chi'), \chi') \frac{r(\chi - \chi')}{r(\chi)r(\chi')}$$

Potencial de lente

$$\Psi = \frac{2}{c^2 r(\chi)} \int_0^\chi d\chi' \varphi(\vec{\theta}r(\chi'), \chi') \frac{r(\chi - \chi')}{r(\chi')}$$

Convergência

$$\kappa(\vec{\theta}) = \frac{1}{2} \nabla_\theta^2 \Psi = \frac{1}{c^2} \int_0^\chi d\chi' \nabla_\perp^2 \varphi(\vec{x}_\perp, \chi') \frac{r(\chi - \chi')r(\chi')}{r(\chi)}$$

Funções de lente

Usando a equação de Poisson para as perturbações

$$\nabla^2 \varphi(\vec{x}, \tau) = \frac{3H_0^2 \Omega_m}{2a(\tau)} \delta(\vec{x}, \tau)$$

A convergência fica

$$\kappa(\vec{\theta}) = \frac{3H_0^2 \Omega_m}{2c^2} \int_0^{\chi_H} d\chi \delta(\vec{x}_\perp, \chi) \frac{g(\chi)}{a(\chi)}$$

Onde

$$g(\chi) = r(\chi) \int_\chi^{\chi_H} d\chi' \frac{r(\chi - \chi') n(\chi')}{r(\chi')}$$

Funções de lente

$$\kappa(\vec{\theta}) = \frac{3H_0^2 \Omega_m}{2c^2} \int_0^{\chi_H} d\chi \delta(\vec{x}_\perp, \chi) \frac{g(\chi)}{a(\chi)}$$

No espaço de Fourier

$$\kappa(\vec{\ell}) = \int d^2\theta \kappa(\vec{\theta}) e^{i\vec{\ell} \cdot \vec{\theta}}$$

temos

$$\langle \kappa(\vec{\ell}) \kappa(\vec{\ell}') \rangle = (2\pi)^2 \delta^{(2)}(\vec{\ell} - \vec{\ell}') P_\kappa(\ell)$$

e o espectro de potências é dado por

$$P_\kappa(\ell) = \frac{9H_0^4 \Omega_m^2}{4c^4} \int_0^{\chi_H} d\chi \frac{g^2(\chi)}{a^2(\chi)} P_\delta \left(\frac{\ell}{r(\chi)}, \chi \right)$$

Cisalhamento cósmico

- Efeito fraco de lente (estatístico)

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

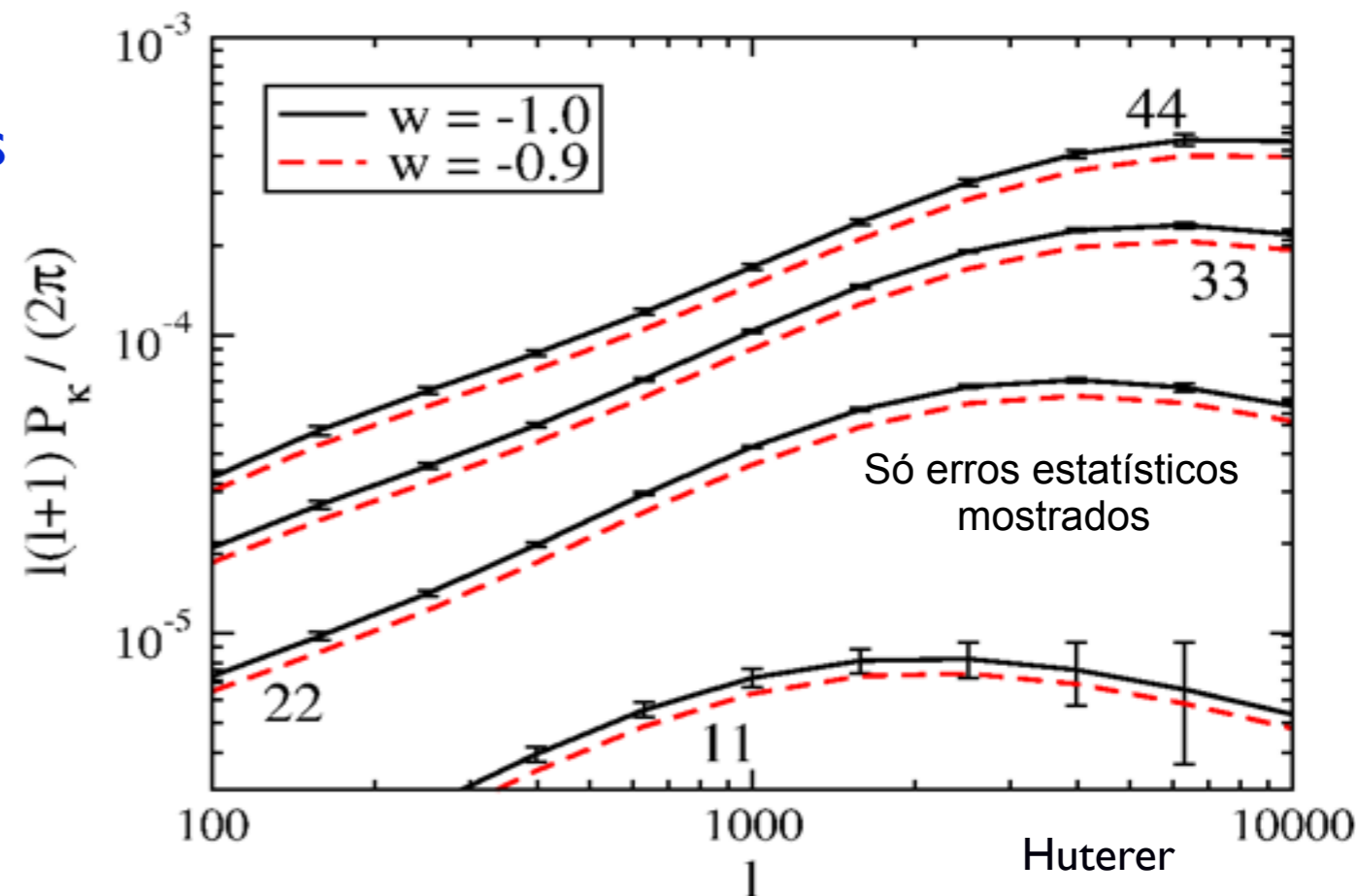
- ⊗ **Sensível à energia escura (geometria + fator de crescimento)**

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

- ⊗ **Menos sensível à física bariônica**

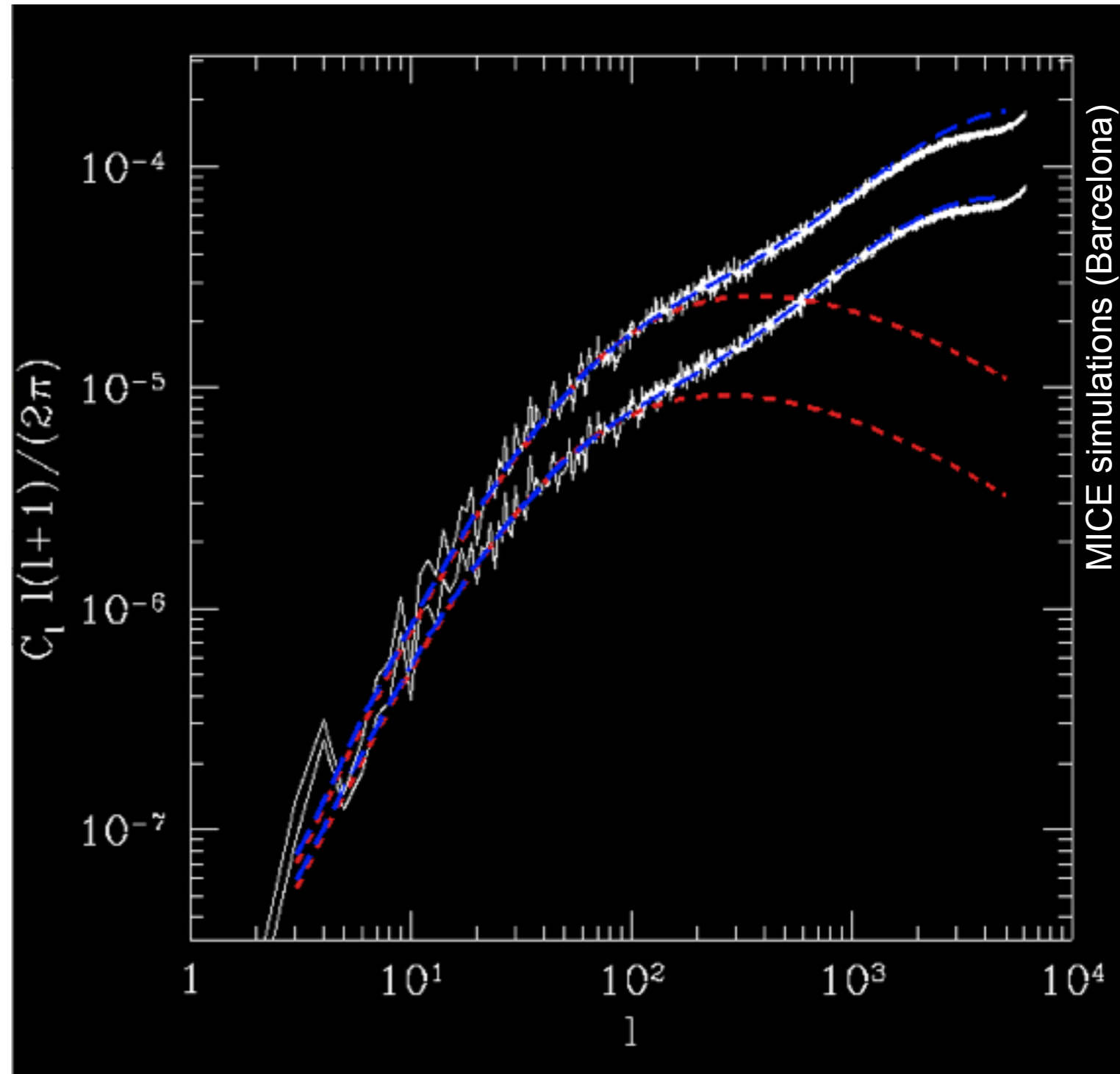
10-20 galáxias/arcmin²

- Grandes separações: linear
- Exemplo: espectro de potência do cisalhamento cósmico em quatro fatias de foto z's (tomografia)
- **Dark Energy Survey:**
 - ✓ combinação única de área, seeing e profundidade
 - ✓ Formas de ~ 300 milhões de galáxias com $\langle z \rangle = 0.7$



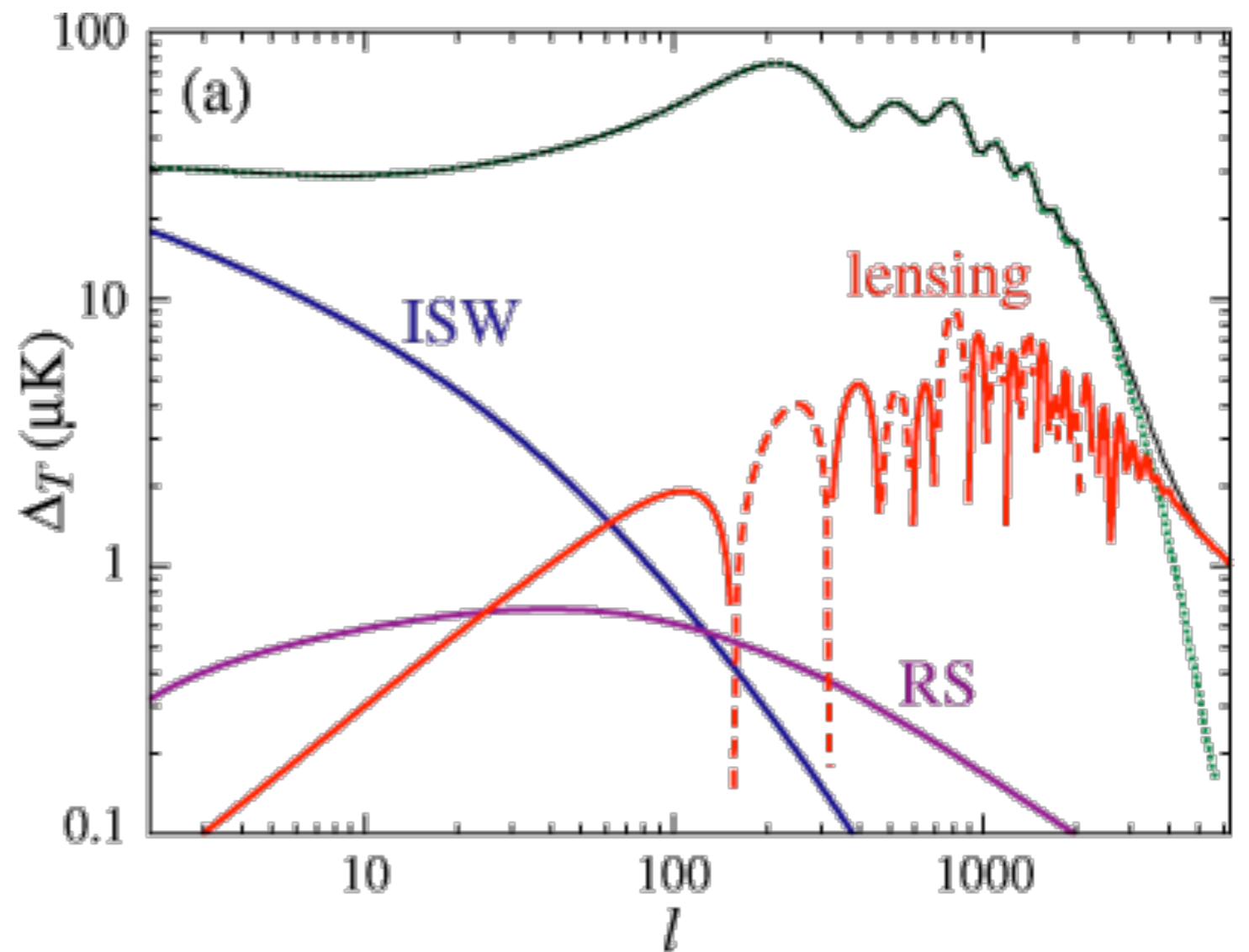
Cisalhamento cósmico

- 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: σ_8

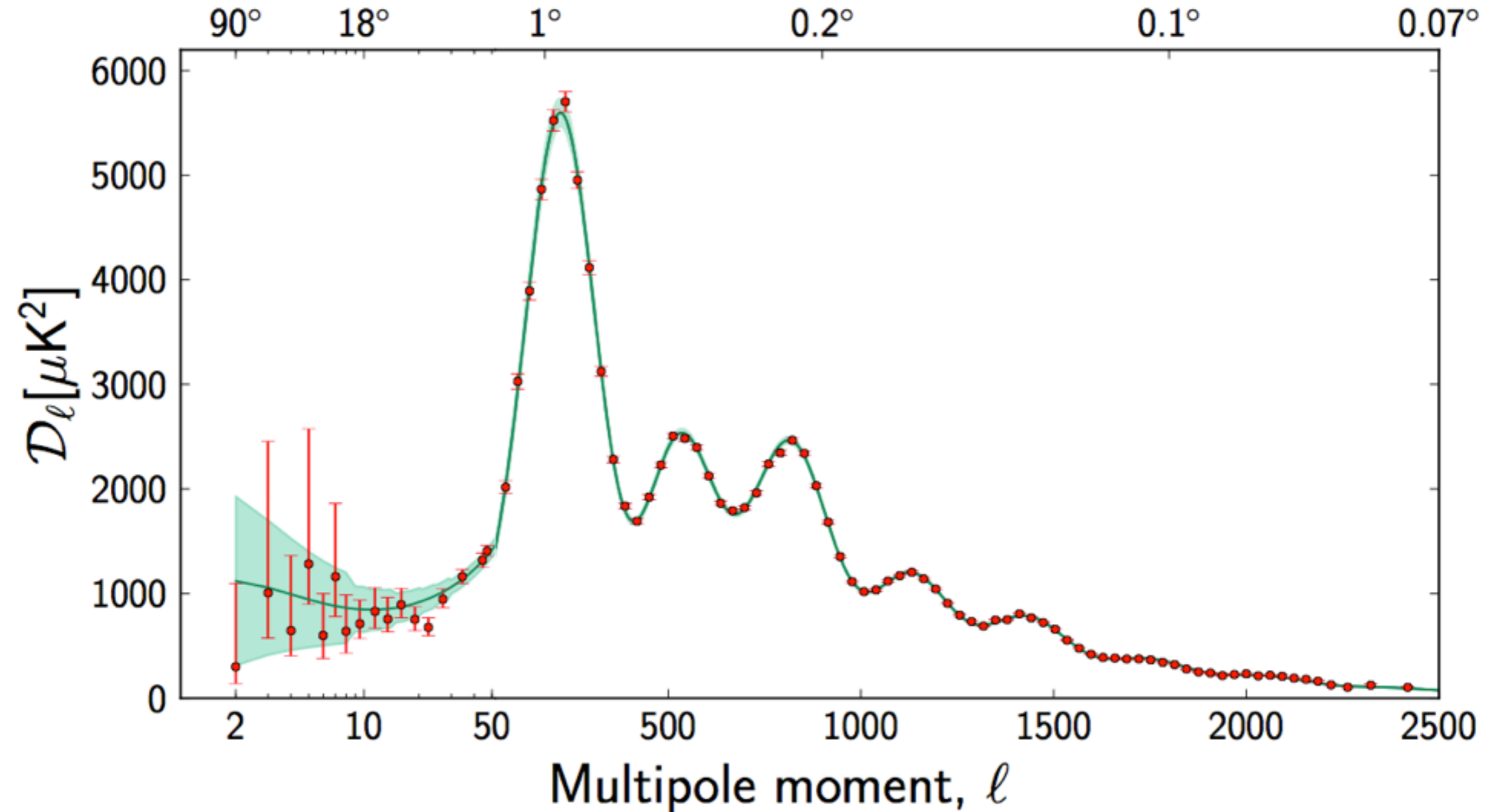


Anisotropias secundárias da radiação cósmica de fundo

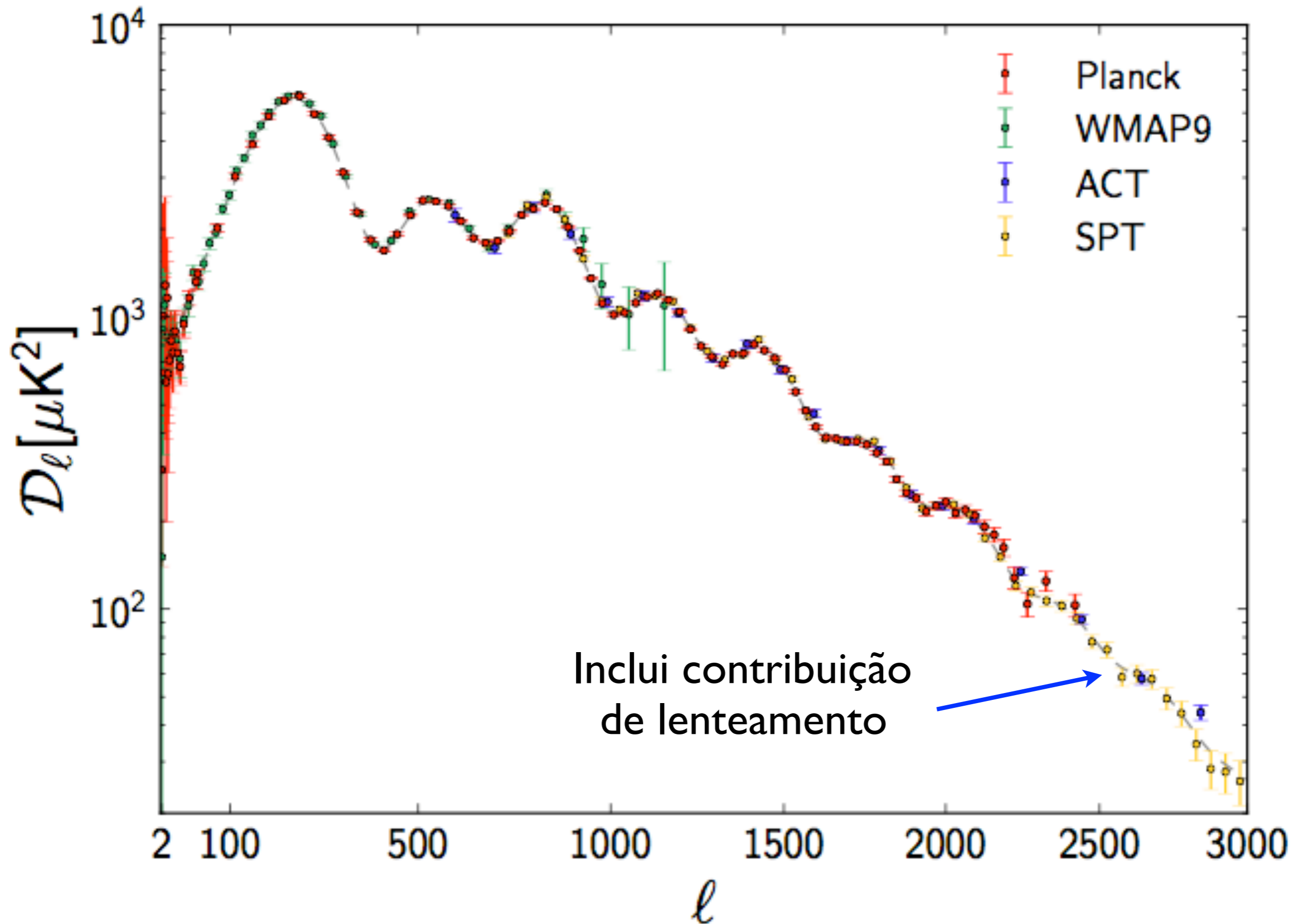
- Efeito Sachs-Wolfe integrado
- **Lenteamento gravitacional**
- Efeito Rees-Sciama
- Ondas gravitacionais
- Espalhamento: reionização e Sunyaev Zel'dovich



Espectro e parâmetros cosmológicos segundo o Planck



Espectro de potência em 2013

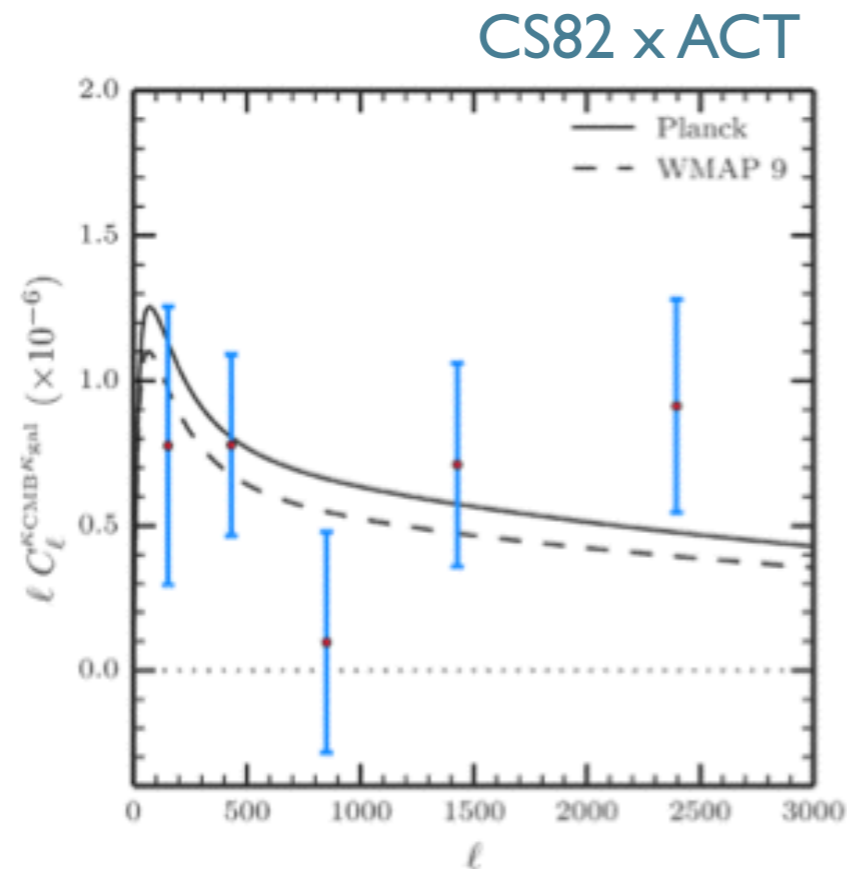


Correlação do lenteamento da CMB com da LSS no CS82

Hand et al. 2015, Phys. Rev. D, 91, 062001

EDITORS' SUGGESTION

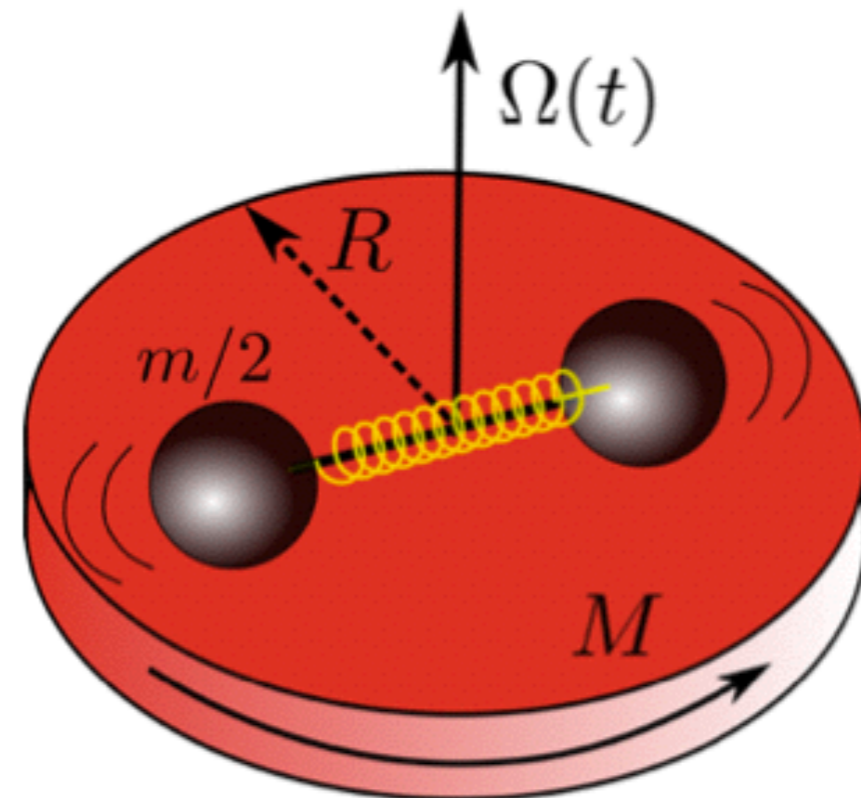
First measurement of the cross-correlation of CMB lensing and galaxy lensing



The authors measure for the first time the cross-correlation between CMB lensing and galaxy lensing. This provides a robust test of the Λ CDM model on the largest cosmic scales, and offers powerful constraints on the evolution and nature of dark energy, the amplitude of matter

EDITORS' SUGGESTION

Spectral properties of the post-merger gravitational-wave signal from binary neutron stars

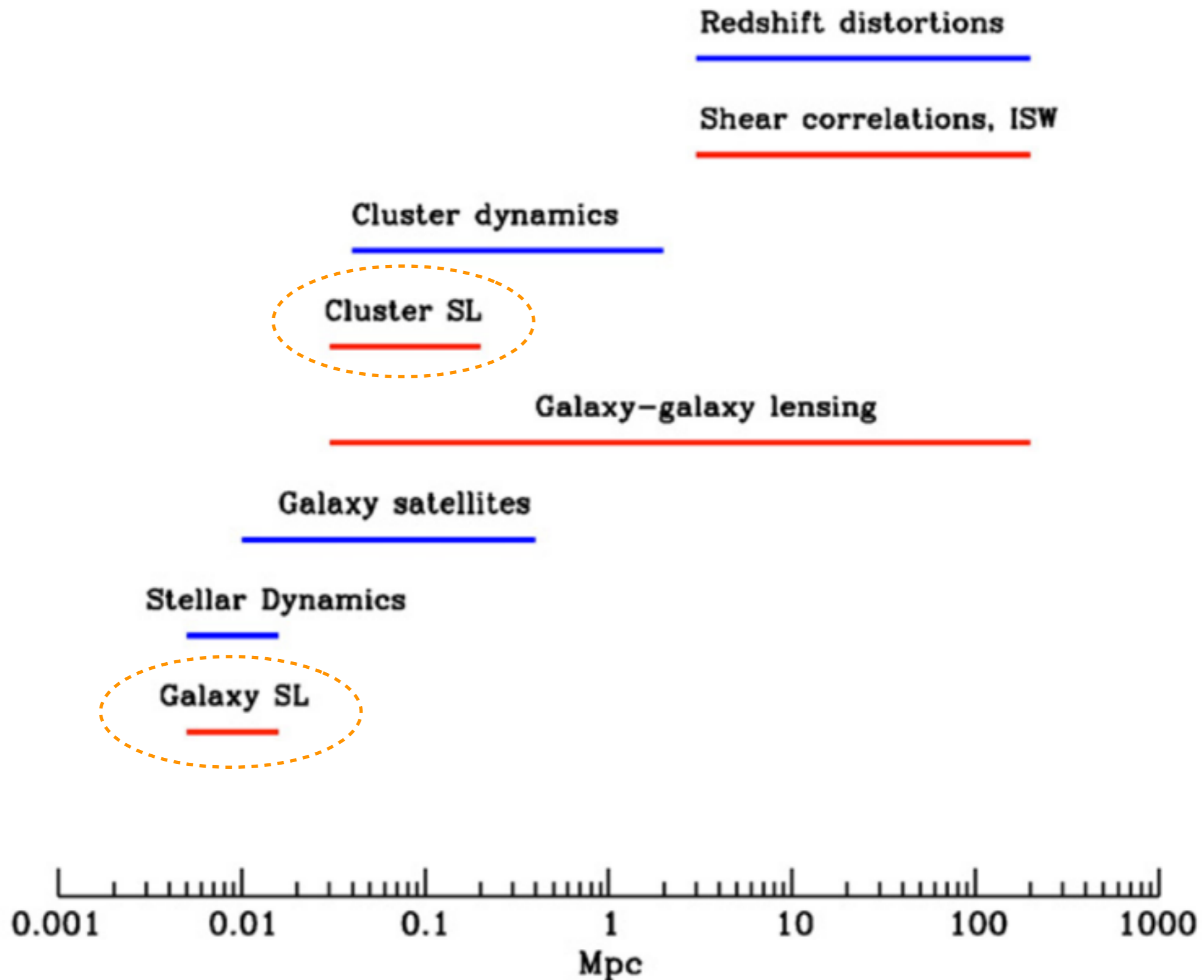


Can gravitational waves from merging neutron star binaries be used to determine characteristics of neutron stars? Extensive numerical relativity simulations reported here show that these signals can be used to set

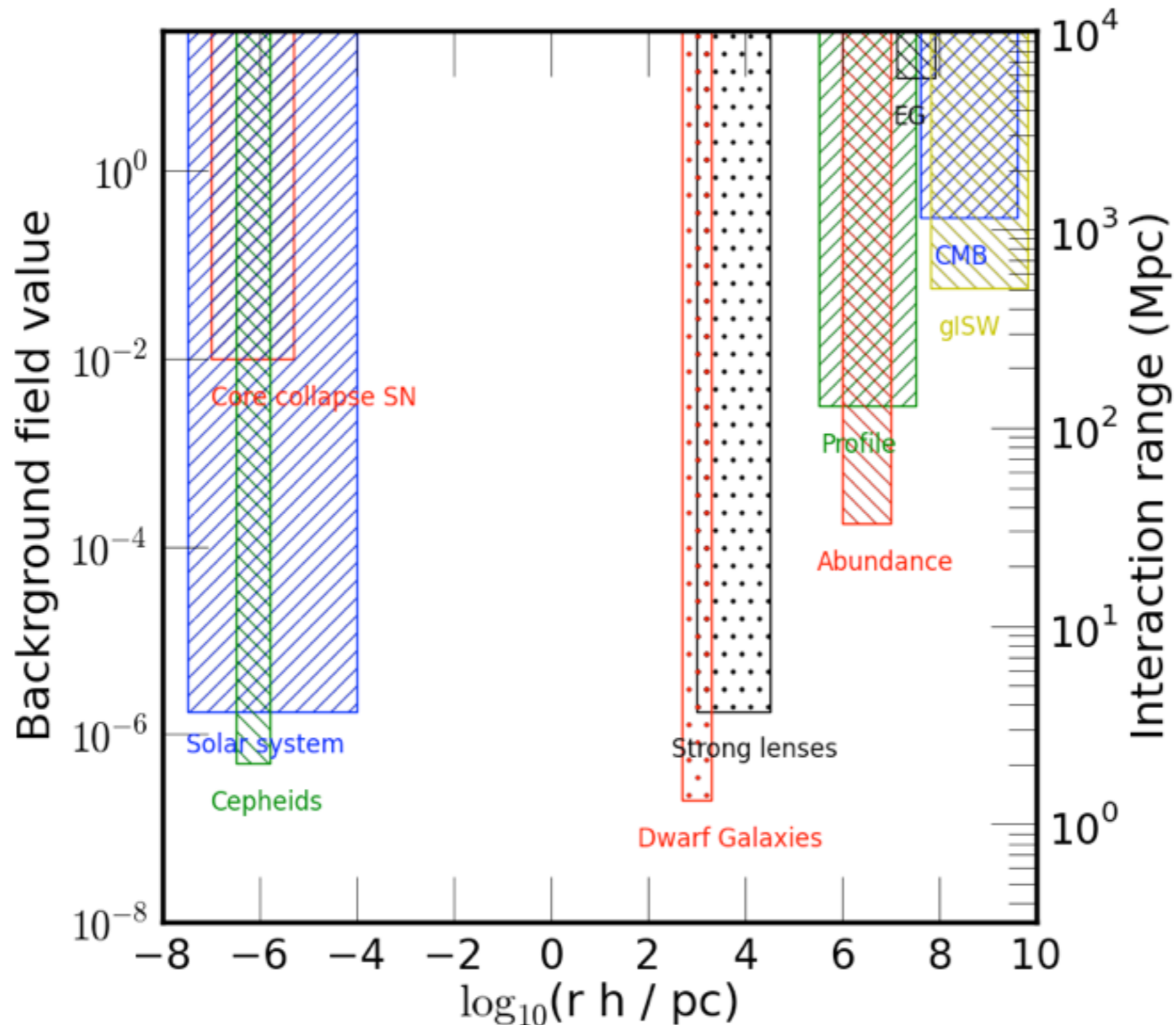
A scenic view of a beach with turquoise water and a clear blue sky. The text is overlaid on the image.

LENTESS GRAVITACIONAIS E TEORIAS ALTERNATIVAS DA GRAVIDADE

Testing Gravity at Different Scales



Testing Gravity at Different Scales



Modifications of GR

Weak-field metric in the conformal Newtonian gauge

$$ds^2 = \left(1 + \frac{2\psi}{c^2}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{2\phi}{c^2}\right) d\sigma^2$$

peculiar gravitational potentials
(in GR $\psi = \phi$)

homogeneous and isotropic line element

Conditions:

- Light follows null geodesics (*valid even for nonmetric theories of gravity*)
- Metric can be split into a homogeneous part and linear scalar perturbations

Can be extended for inhomogeneous models, such as LTB

Strong Lensing is a probe of:

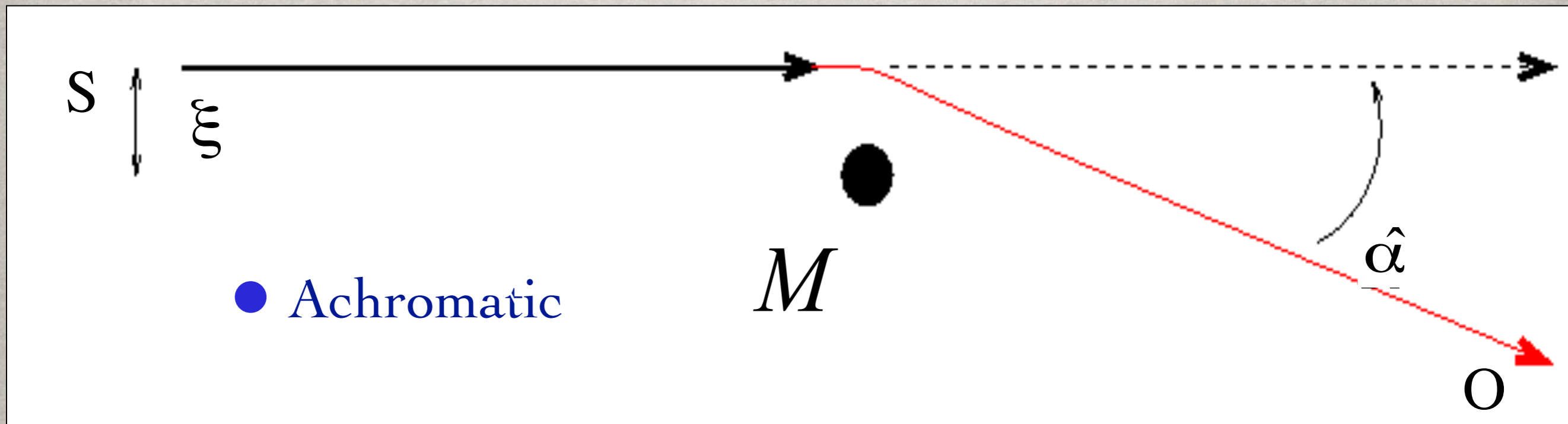
- Small scales: testing gravity on kiloparsec scales
- Cosmological distances: large-scale modifications of gravity

BENDING OF LIGHT BY GRAVITY

Null geodesic,
Fermat principle

$$ds^2 = \left(1 + \frac{2\phi}{c^2}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{2\phi}{c^2}\right) d\sigma^2$$

$$\frac{d\sigma}{dt} := c' = \sqrt{\frac{1 + 2\phi/c^2}{1 - 2\phi/c^2}} \simeq c(1 + 2\phi/c^2)$$



Deflection angle (point source)

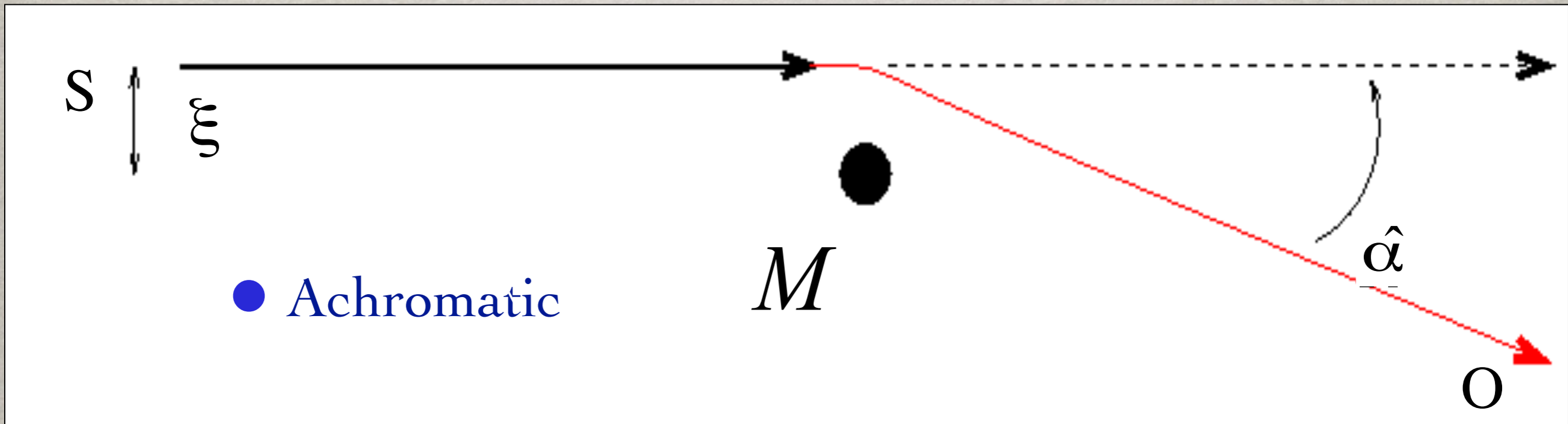
$$\hat{\alpha} = \frac{4GM}{c^2} \frac{1}{\xi}$$

BENDING OF LIGHT BY (MODIFIED) GRAVITY

Null geodesic,
Fermat principle

$$ds^2 = \left(1 + \frac{2\psi}{c^2}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{2\phi}{c^2}\right) d\sigma^2$$

peculiar gravitational potentials
(in GR $\psi = \phi$)

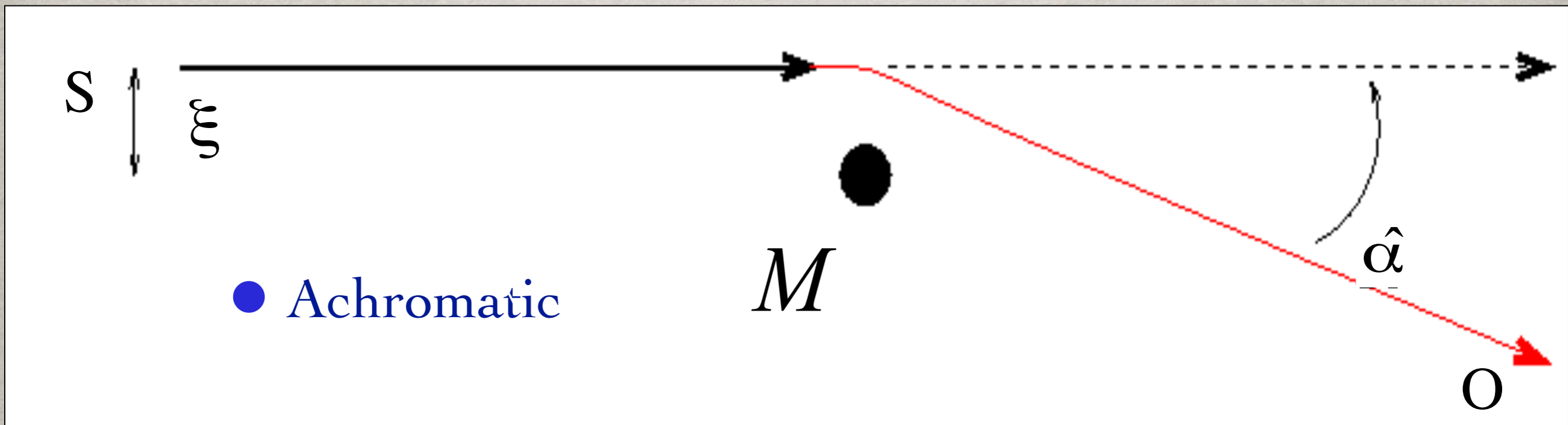


BENDING OF LIGHT BY (MODIFIED) GRAVITY

Null geodesic,
Fermat principle

$$ds^2 = \left(1 + \frac{2\psi}{c^2}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{2\phi}{c^2}\right) d\sigma^2$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = c' = c \sqrt{\frac{1 + \frac{2\psi}{c^2}}{1 - \frac{2\phi}{c^2}}} \simeq c \left(1 + \frac{\psi + \phi}{c^2}\right) \quad \frac{\phi}{\psi} = \gamma$$



Dynamical mass obtained from

$$\nabla^2 \psi = 4\pi G \rho$$

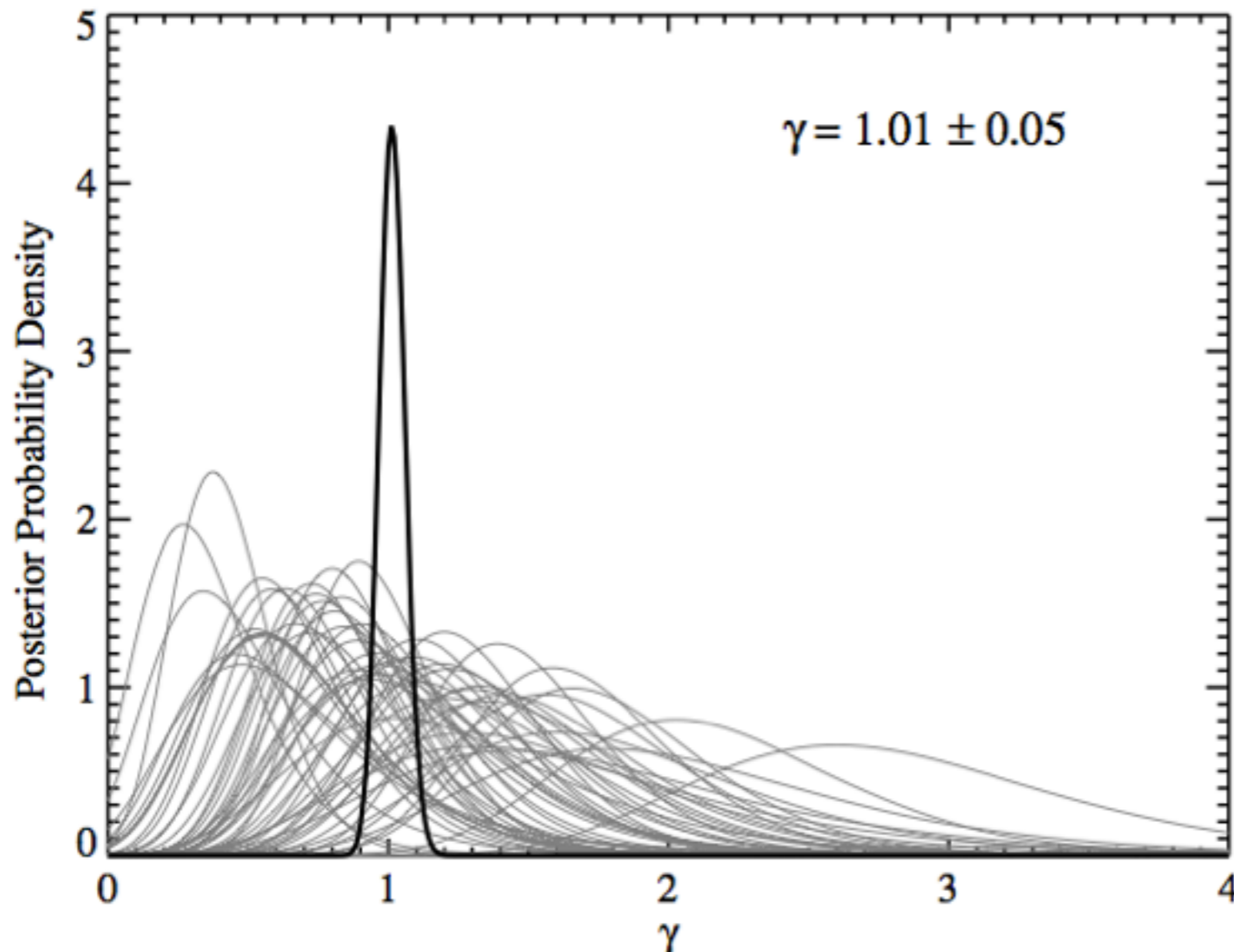
Use combination of lensing +
dynamics to test gravity

Einstein Rings

Einstein Ring $R_E = 4\pi\sigma_{\text{obs}}^2 \left(\frac{1 + \gamma_{\text{PPN}}}{2} \right) \frac{D_L D_{LS}}{D_S}$

Measure velocity dispersion → Limit on gravity

Einstein rings in the SLACS sample



Smith, arXiv:0907.4829;
Schwab, Bolton, Rappaport, arXiv:0907.4992

Next:

- **study systematics (ellipticity, profiles, substructures...)**
- **Increase sample size**
- **Increase mass and distance range**

The results are in agreement with GR



DARK MATTER

Strong Lensing and Dark Matter

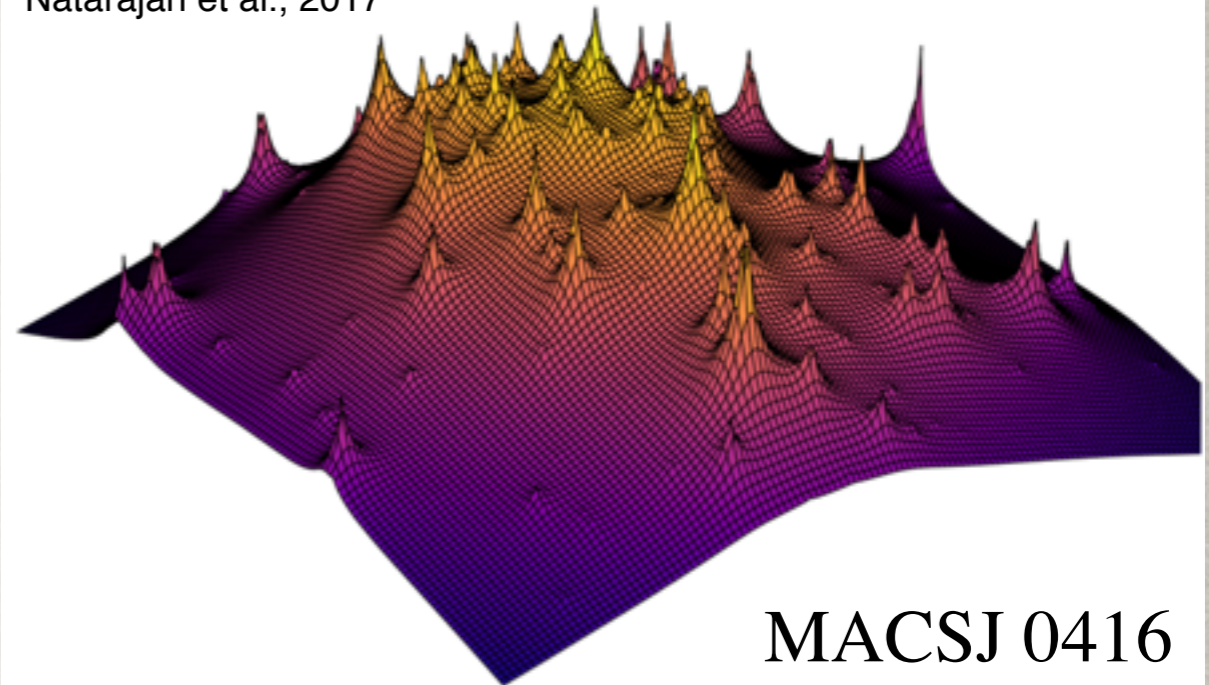
- Large-scale Geometry
 - Background cosmology: Ω_M
- Lens potential: Mass distribution
 - Dark Matter abundance and distribution
 - Primordial spectrum (mass)
 - Self-interaction
- Gravitational telescope
 - $z \sim 2$ – details of highly magnified galaxies (resolved!)
 - $z \sim 6$ – galaxy abundance at high- z
- Challenges:
 - High-resolution, deep imaging; spectroscopy (including IFU)
 - Finding Strong Lenses (specially “golden lenses”)
 - Systematics

Direct detection of substructure in clusters

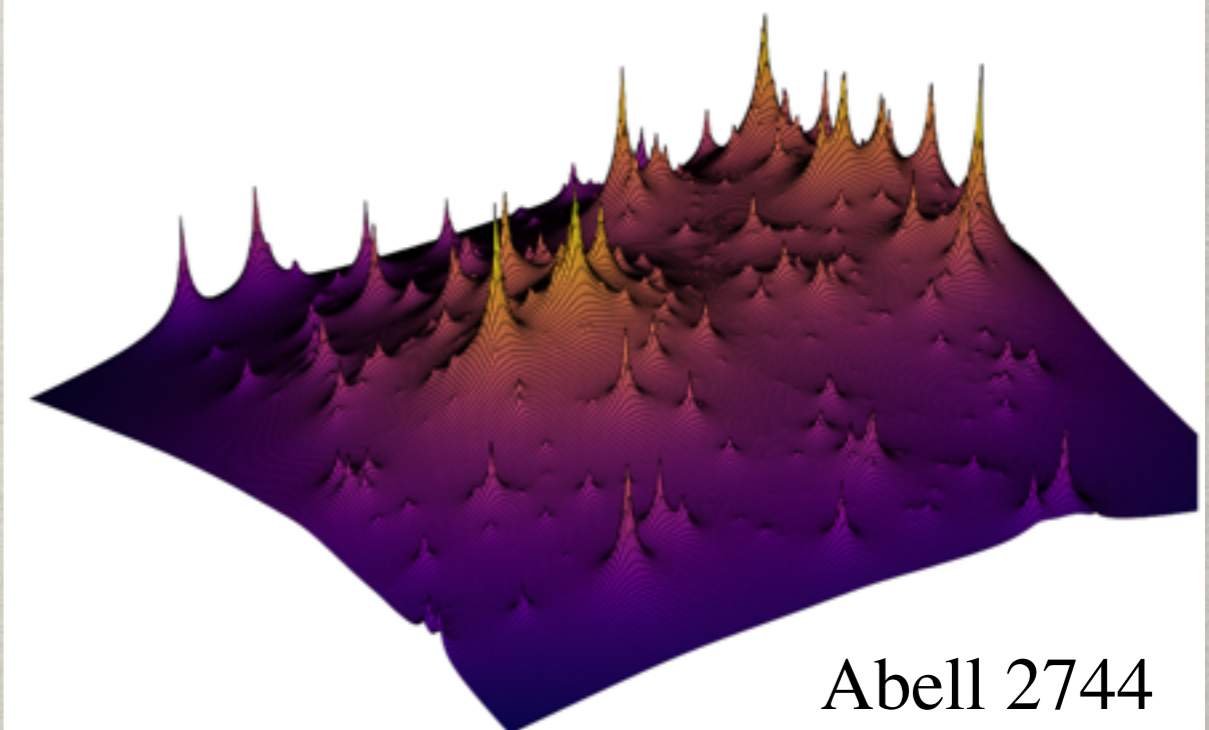
Sub-halo power spectrum:

- Quantifying substructures in HFF

Natarajan et al., 2017



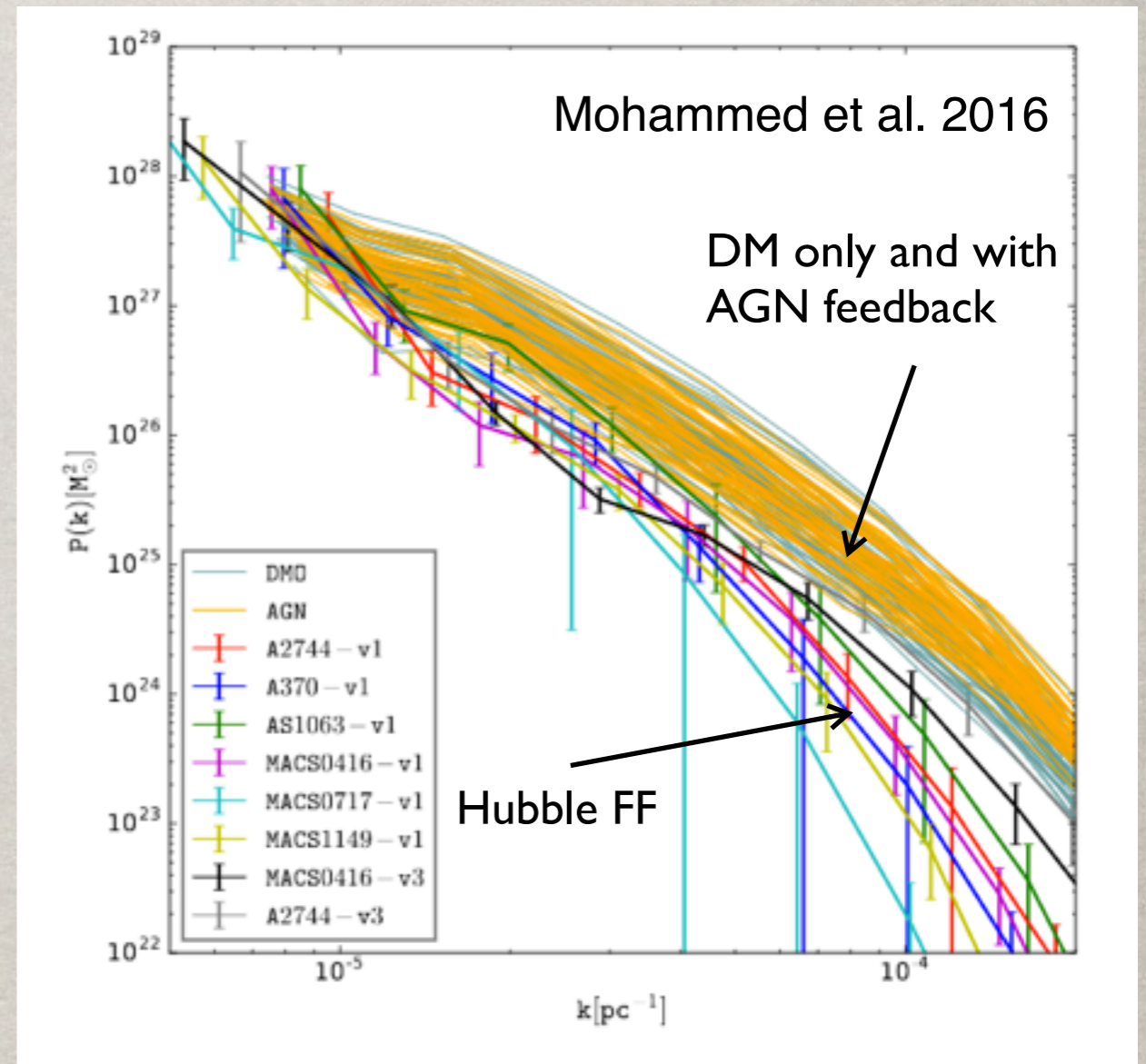
Natarajan et al., 2017



Direct detection of substructure in clusters

Sub-halo power spectrum:

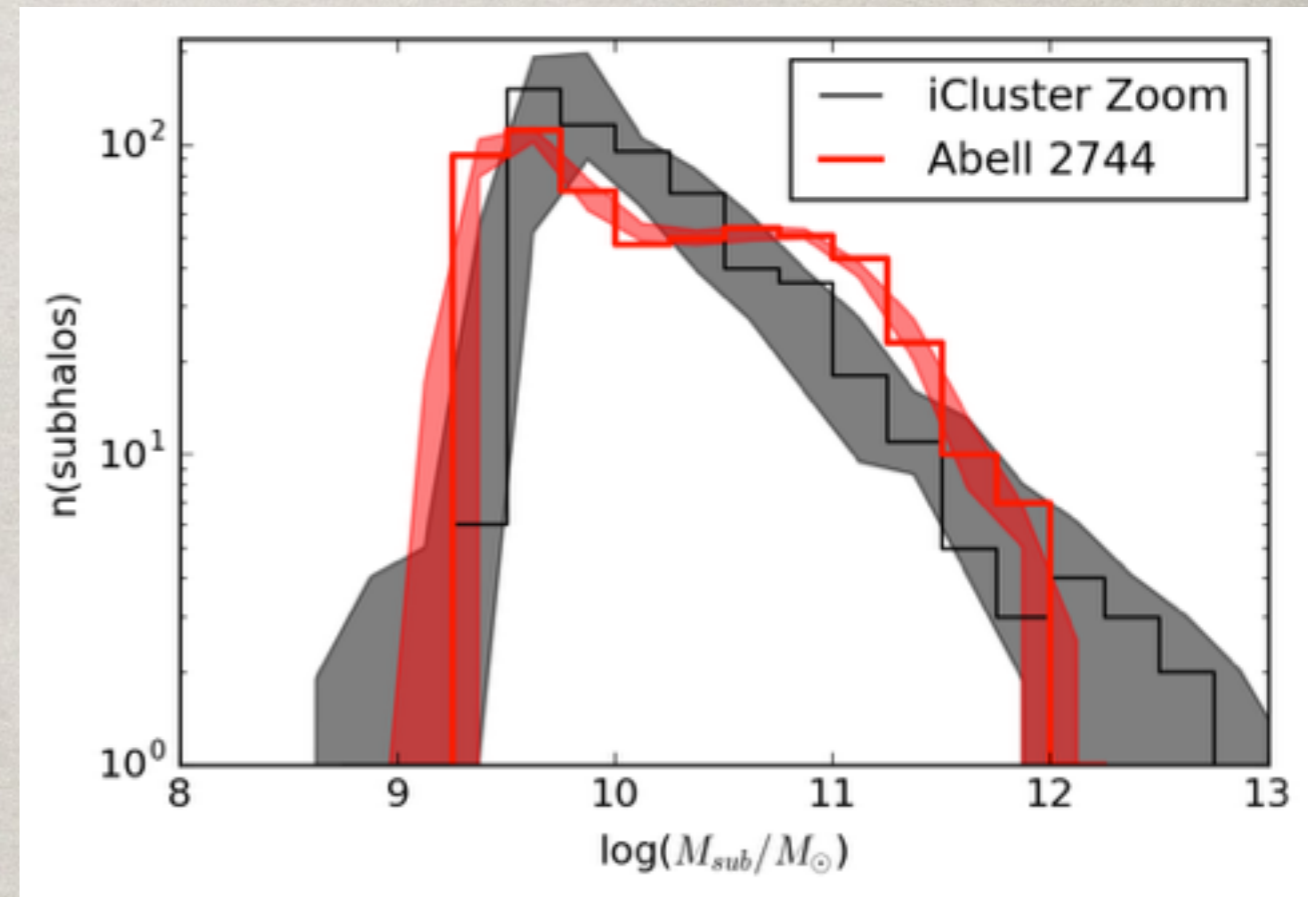
- Quantifying substructures in HFF
- Free form modelling: smaller power
- Evidence for WDM (Mohammed et al. 2016)
- Parametric (LTM) finds excess power: upper limit on self-interaction (Jauzac, M., et al., 2016)
- Free form agrees with LTM up to ~ 10 kpc (Sebesta et al. 2016) [139 lensed images]



Direct detection of substructure in clusters

Sub-halo mass function:

- Quantifying substructures in HFF
- Uses parametric modelling (LTM)
- Resolve DM haloes down to $M \sim 10^{9.5} M_{\text{Sun}}$
- Find agreement with LCDM
- Li et al. 2016: deviations occur for $M < 10^9 M_{\text{Sun}}$ for $m_{\text{WDM}} = 3.3 \text{ keV}$



Jauzac et al. 1702.04348

Move to lower masses: Einstein Rings!

Li et al. 2016: “measurements of approximately 100 strong lens systems with a detection limit of $M_{\text{low}} = 10^7 h^{-1} M_{\odot}$ would clearly distinguish CDM from WDM in the case where this consists of 7 keV sterile neutrinos”

Light-Matter Offsets

- Self-Interacting Dark-Matter predicts offsets between luminous and dark matter in dense regions: Smoking gun for SIDM
- Williams and Saha (2011): kpc -scale offsets in Abell 3827 from Free form modeling \rightarrow lower limit in cross section
- Mohamed et al. (2014): Abell 3827 and also Abell 2218, no LoS
- Schaller (2015): tension with CDM
- Harvey et al. (2015), 347, 1462; arXiv:1503.07675, upper limit on SIDM
- Kahlhoefer, et al. (2015), Wittman et al. (2017): constraints overestimated
$$\sigma_{DM}/m_{DM} \lesssim 2 \text{ cm}^2/\text{g}$$
- Monteiro-Oliveira, et al. 2017: simulations (CDM + gas + galaxies)
- Interacting systems. Not seen in field galaxies and relaxed clusters

Light-Matter Offsets

Smoking gun for self-interacting dark matter

- Williams and Saha (2011): kpc offsets in Abell 3827 from Free form modeling [Can also do “blobology” using parametric models (Jauzac)]
- If interpreted solely as evidence for self-interacting dark matter:
$$\sigma/m \gtrsim 8 \times 10^{-31} (t/10^{10} \text{yr})^{-2} \text{cm}^2 \text{GeV}^{-1}$$
- Schaller (2015): tension with CDM, Kahlhoefer (2015) different value
- Mohamed et al. (2014): Abell 3827 and also Abell 2218, no LoS
- Interacting systems. Not seen in field galaxies and relaxed clusters
- Not seen in MACS-J0416.1-2403 but not enough resolution (Sebesta et al. 2016)
- Not in contradiction with small offsets in Bullet Cluster (Robertson et al. 2017), using sims with self interaction.
- Alternative explanations: dynamical friction...

GALAXY SCALE LENSES

- Self-Interacting Dark-Matter predicts offsets between luminous and dark matter in dense regions
- Seen in clusters, e.g., Harvey et al., 2015, *The nongravitational interactions of dark matter in colliding galaxy clusters*, Science, 347, 1462 (2015); arXiv: 1503.07675

- offsets found in a galaxy scale system

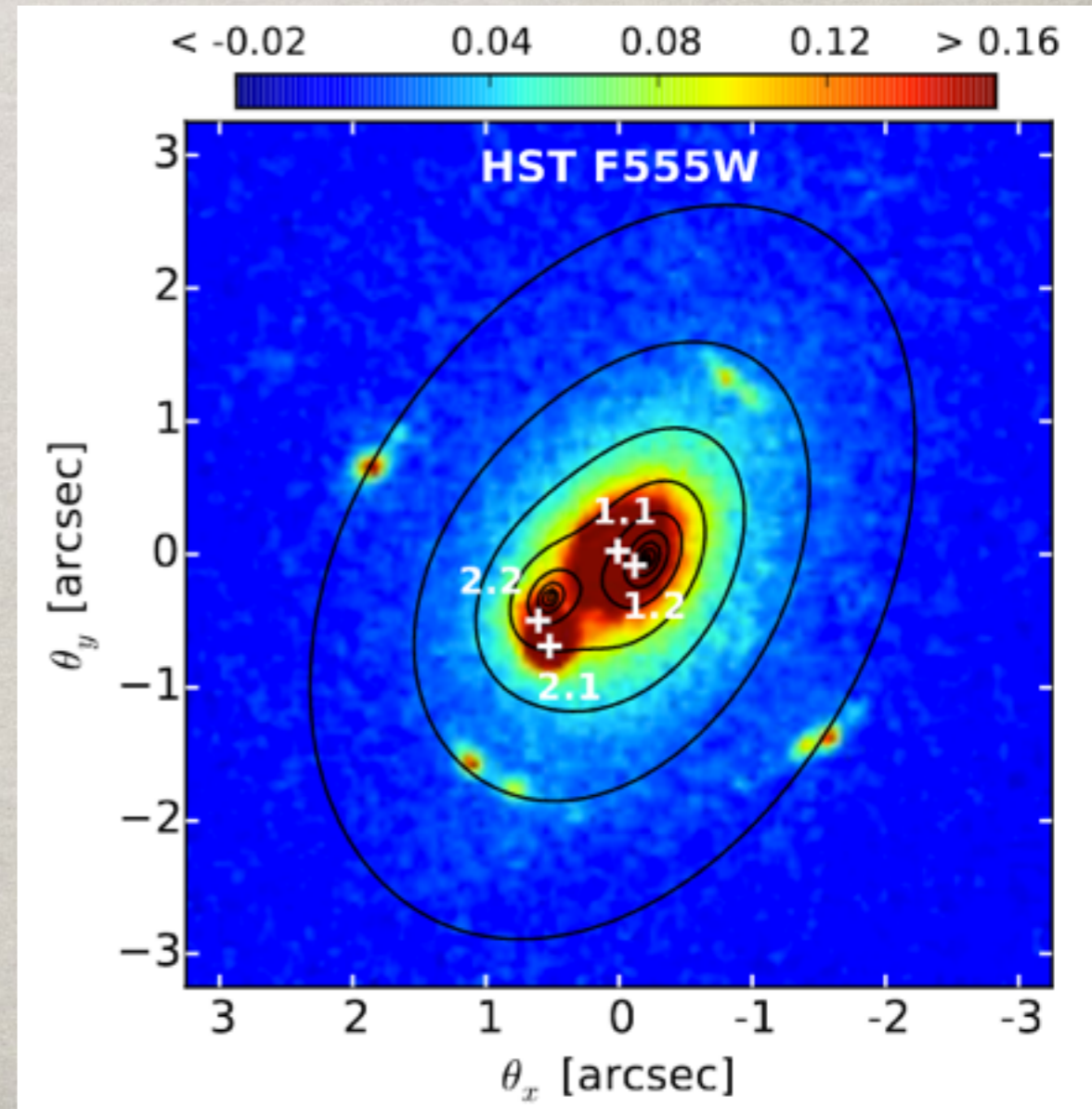
- Interacting systems
- kpc offsets in SDSS J1011+0143

(Shu et al. 2015)

- If interpreted solely as evidence for self-interacting dark matter:

$$\sigma_{\text{DM}}/m \sim (1.7 \pm 0.7) \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1} \times (t_{\text{infall}}/10^9 \text{ yr})^{-2}$$

- only SDSS spectroscopy

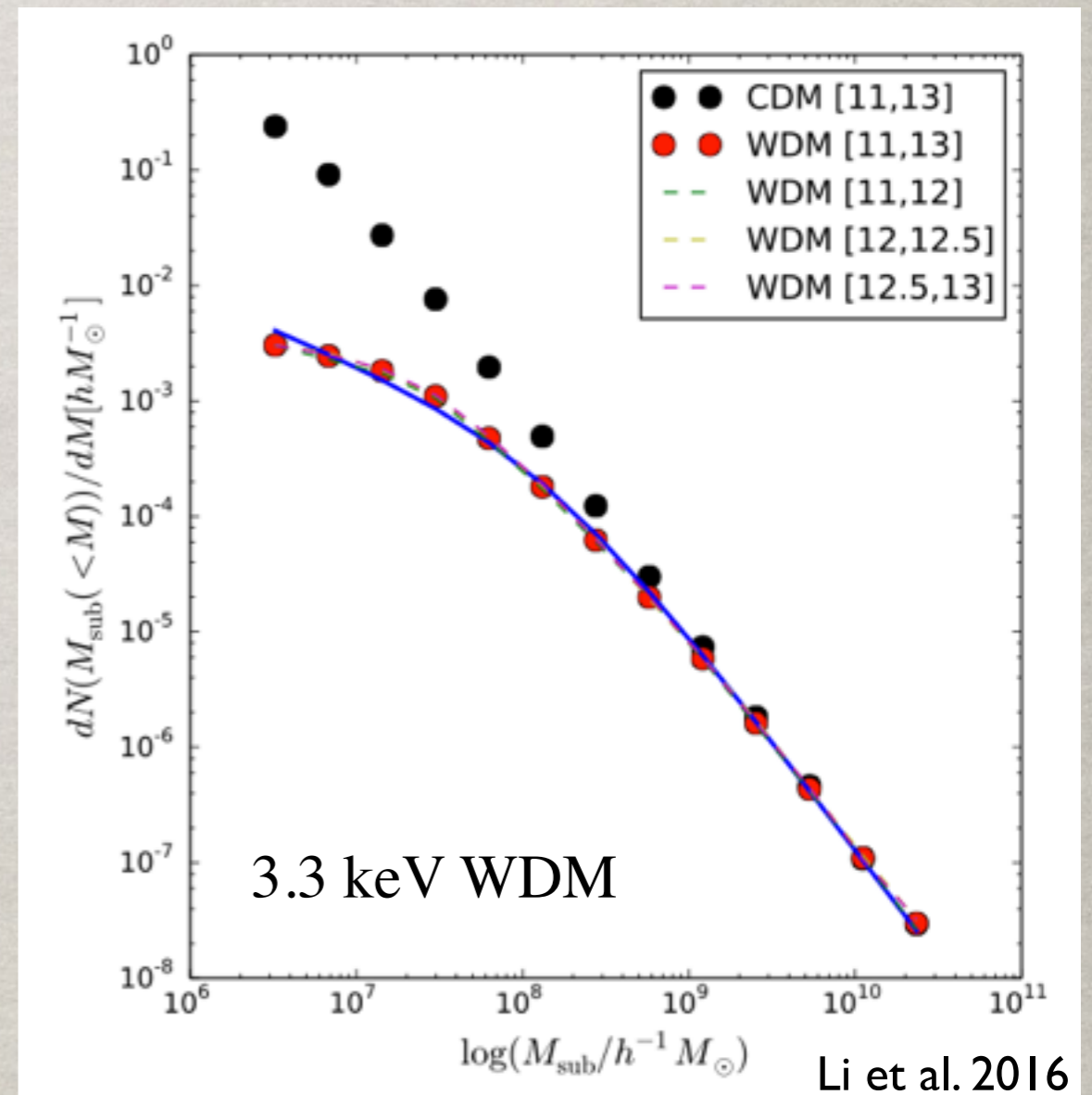


Substructures and WDM

- WDM produces a cutoff in the matter power spectrum (Bode et al. 2001), which leads to a break on the (sub-halo) mass function

Perturbations of Einstein rings and arcs:

- “Aside from direct or indirect detection of the dark matter particles themselves, Einstein ring systems currently offer the best astrophysical test of the nature of the dark matter” (Li et al. 2016)
- measurements of approximately 100 strong lens systems with a detection limit of $M_{\text{low}} = 10^7 h^{-1} M_{\odot}$ would clearly distinguish CDM from WDM in the case where this consists of 7 keV sterile neutrinos



Gravitational telescopes: luminosity function of ultra-faint UV galaxies at high-redshift

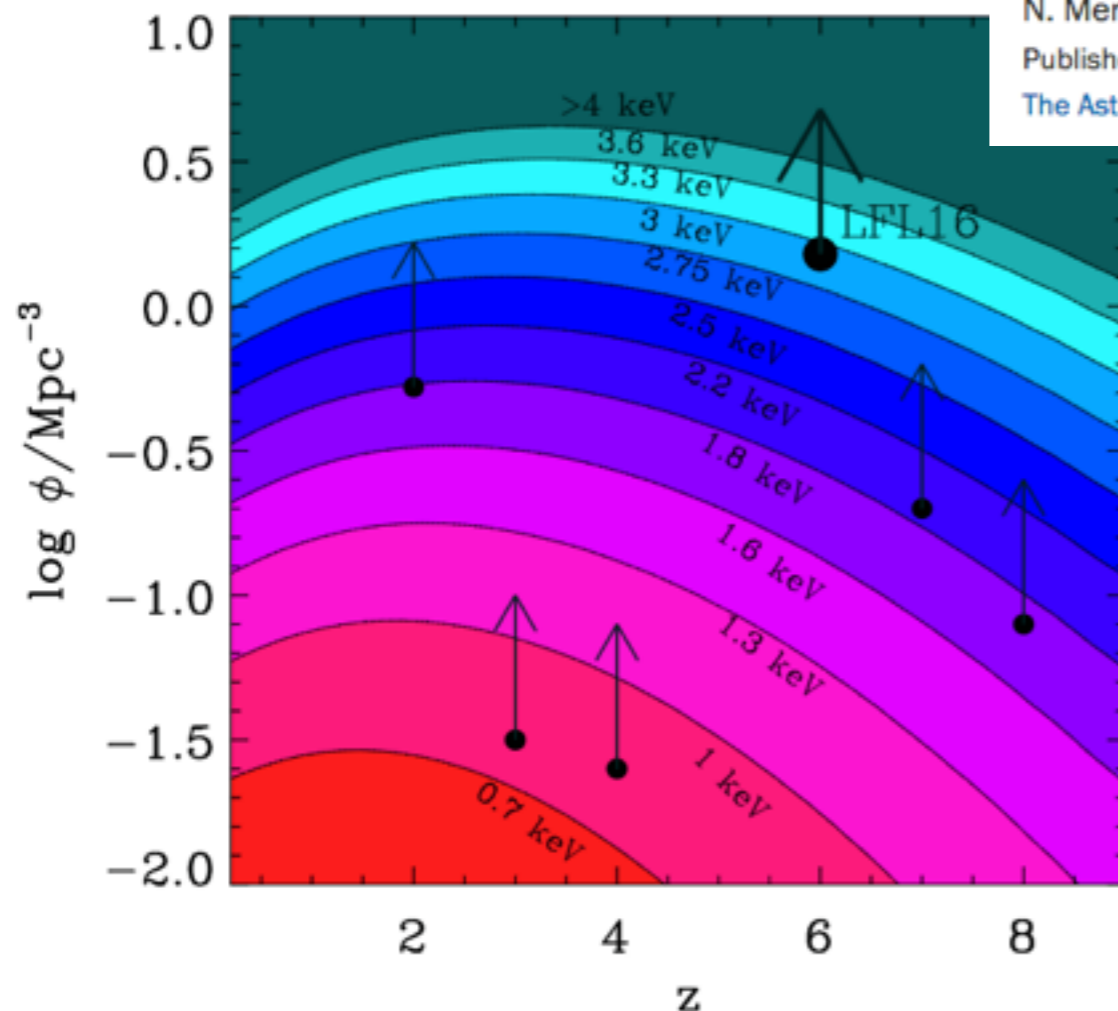
- Warm Dark Matter produces a cutoff in the matter power spectrum (Bode et al. 2001) and thus on the halo mass function

A STRINGENT LIMIT ON THE WARM DARK MATTER PARTICLE MASSES FROM THE ABUNDANCE OF $z=6$ GALAXIES IN THE HUBBLE FRONTIER FIELDS

N. Menci¹, A. Grazian^{1,2}, M. Castellano¹, and N. G. Sanchez³

Published 2016 June 23 • © 2016. The American Astronomical Society. All rights reserved.

The Astrophysical Journal Letters, Volume 825, Number 1



Mass of thermal relic WDM particles $m_{\chi} \geq 2.1 \text{ keV}$ at 3σ .

- Need to take into account uncertainties and systematics in the magnification
- Priewe, et al. 2017, Bouwens, et al. 2017

Considerações finais

- Em poucas décadas o lenteamento gravitacional transformou-se de uma curiosidade em uma área de estudo
- e de uma área de estudo a uma ferramenta importante com aplicações e implicações em quase todos os domínios da cosmologia e astrofísica extragaláctica
- Muitos resultados e novas áreas e regimes na última década
- Novos instrumentos e *surveys* irão continuar revolucionando a área na próxima década
- Inúmeros desafios e oportunidades desde questões teóricas e de fundamentos a problemas estatísticos e computacionais e análise de dados