

LENTES GRAVITACIONALES EN ASTROFÍSICA Y COSMOLOGÍA

SEMANA - 12

PARTE II: LENTES POR GALÁXIAS Y CÚMULOS DE GALÁXIAS

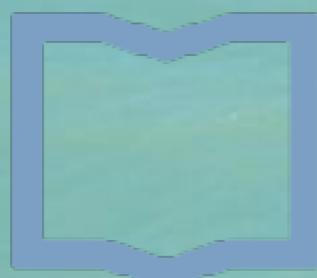
MARTÍN MAKLER

ICAS/IFI/CONICET & UNSAM Y CBPF

ICAS

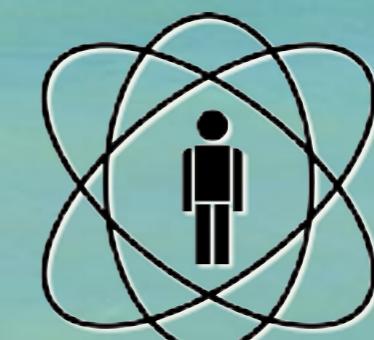


CONICET



Instituto de
Ciencias Físicas

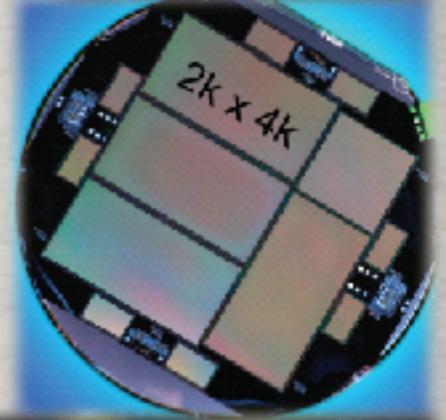
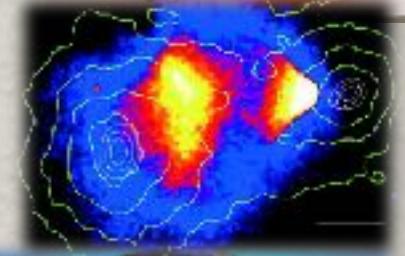
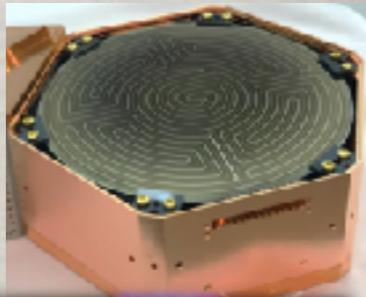
ICIFI-ECYT_UNSAM-CONICET



CBPF

PLAN DE LA PARTE II

- Redshift y expansión del Universo
- Dinámica y parámetros cosmológicos
- Métrica y distancias
- Energía oscura
- Propagación de la luz y ecuación de la lente
- Lentes extendidas
- Jacobiana de la transformación:
cáusticas y curvas críticas
- Modelos de lentes extendidas y aplicaciones
- Retraso temporal y aplicaciones
- Efecto débil de lentes



Efecto débil de lentes

- Cizalladura (shear): distortion en una dirección
- Definición de elipticidad y efecto débil

$$\epsilon = \epsilon_I = \epsilon_S + g$$

$$\langle \epsilon \rangle = g$$

$$|g| \ll |\epsilon|$$

- señal: shear, ruído: formas intrínsecas -> promedios
- medida de forma:
 - identificar estrellas, modelizar PSF
 - aplicar corrección en las galaxias
 - medidas de *redshift* (fotométricos)

Lo que se mide y cómo se modeliza

- galaxias y cúmulos
- Estructura en grandes escalas

2 Regimes and Methods

Lensing by galaxies and clusters

- Larger signal
- Center of reference
- Model/profile fitting
- Individual objects or *Stacking* of the signal

Large-scale structure

- Convergence maps (also in clusters)
- Correlations:
 - power spectrum, correlation function
 - among different probes, z-bins, CMB, etc.

Lensing by galaxies and clusters

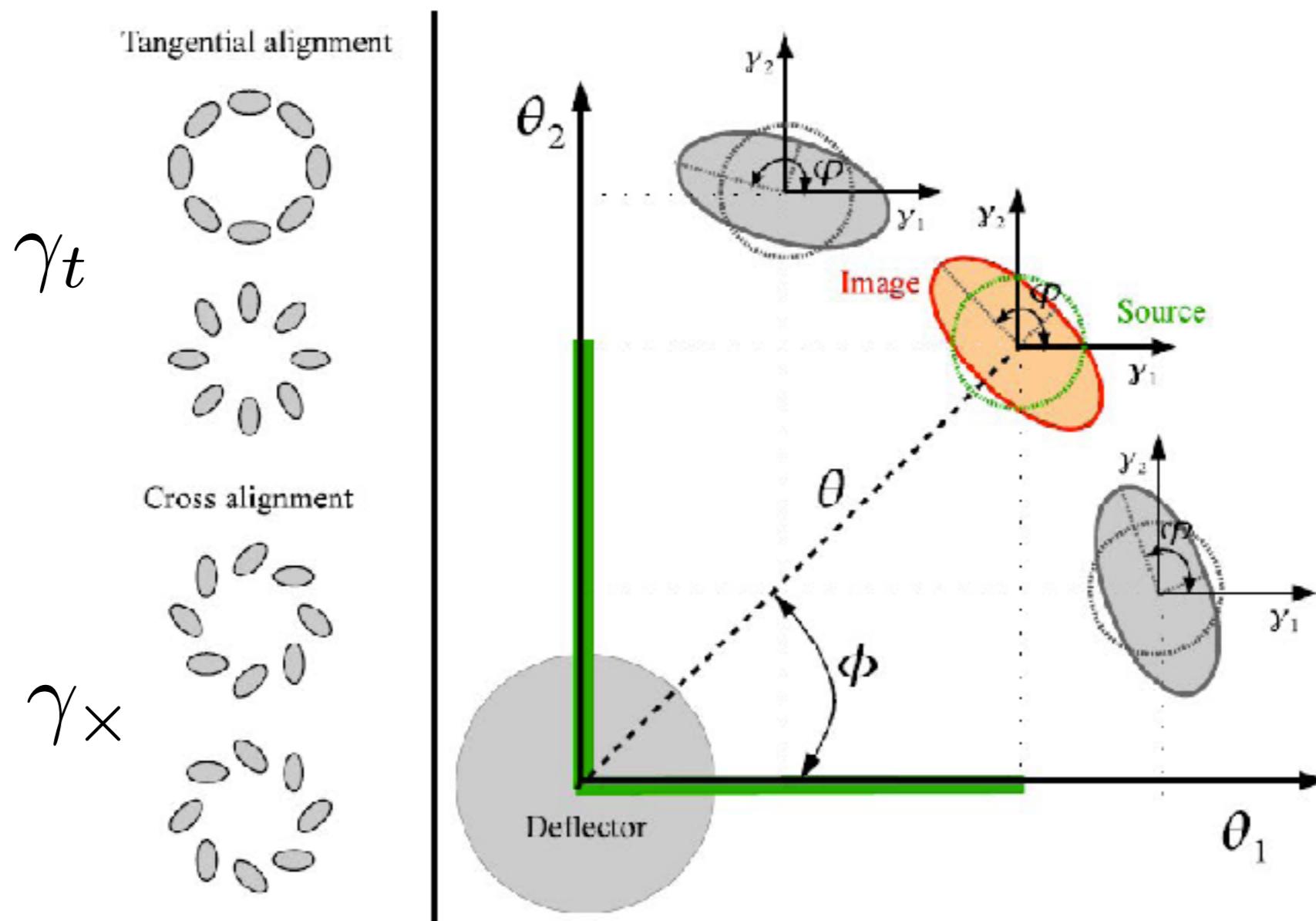
- Larger signal
- Center of reference
- Model/profile fitting
- Individual objects or Stacking of the signal

Applications

- Mass calibration for cosmology
- Radial profiles x models
- stellar mass/total mass relation
- etc.

Components of the Shear

Figueiró 2011



Mean shear in circles

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

Mean shear and radial profiles

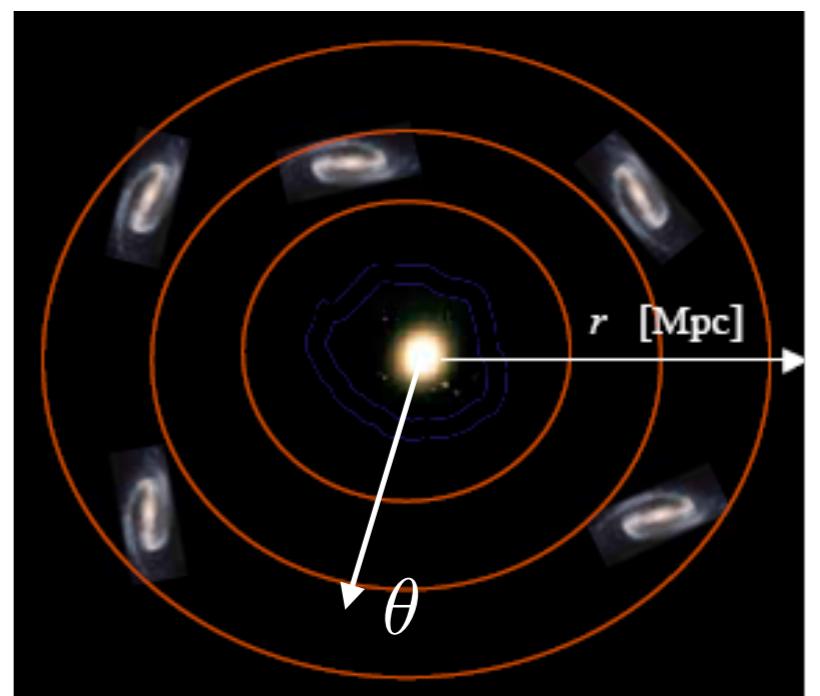
It is possible to show that

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

↑
mean along a circle of the tangential component of the shear
↑
mean within a disk of radius θ
↑
mean on the circle

In practice: mean on annuli
(radial bins)

Also: $\langle \gamma_x \rangle = 0$ ← test for systematics!



Stacking of the signal

Need (and possibility) to increase the S/N

Combine data on many galaxies or clusters: mean signal

Physical signal and models: $\Sigma(r) \rightarrow$ multiply by Σ_{crit}

$$\Sigma_{\text{crit}} \times \langle \gamma_t(\theta) \rangle = (\bar{\kappa}(\theta) - \langle k(\theta) \rangle) \times \Sigma_{\text{crit}}$$

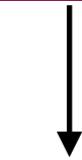
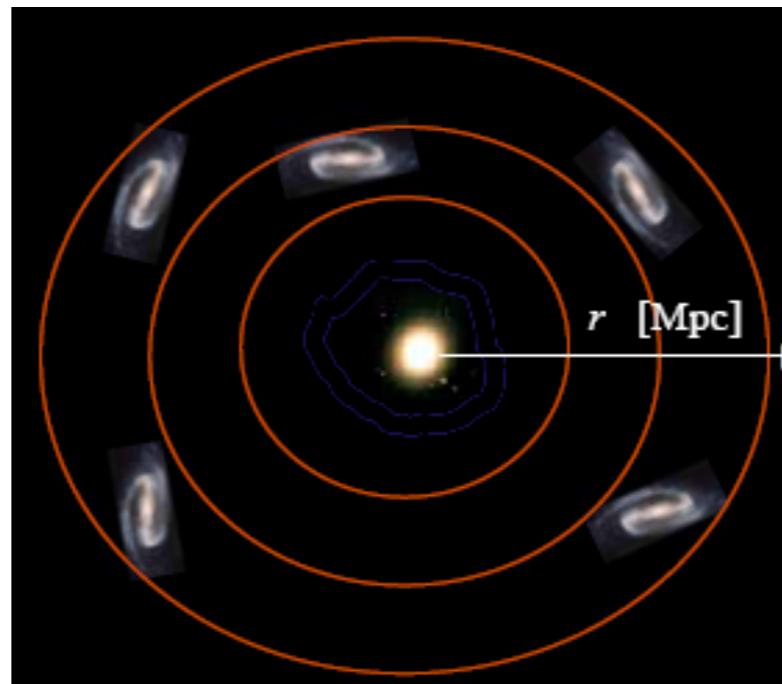
$$\Sigma_{\text{crit}} \times \langle \gamma_t(r) \rangle = \bar{\Sigma}(r) - \langle \Sigma(r) \rangle := \Delta\Sigma(r)$$



redshifts



shapes



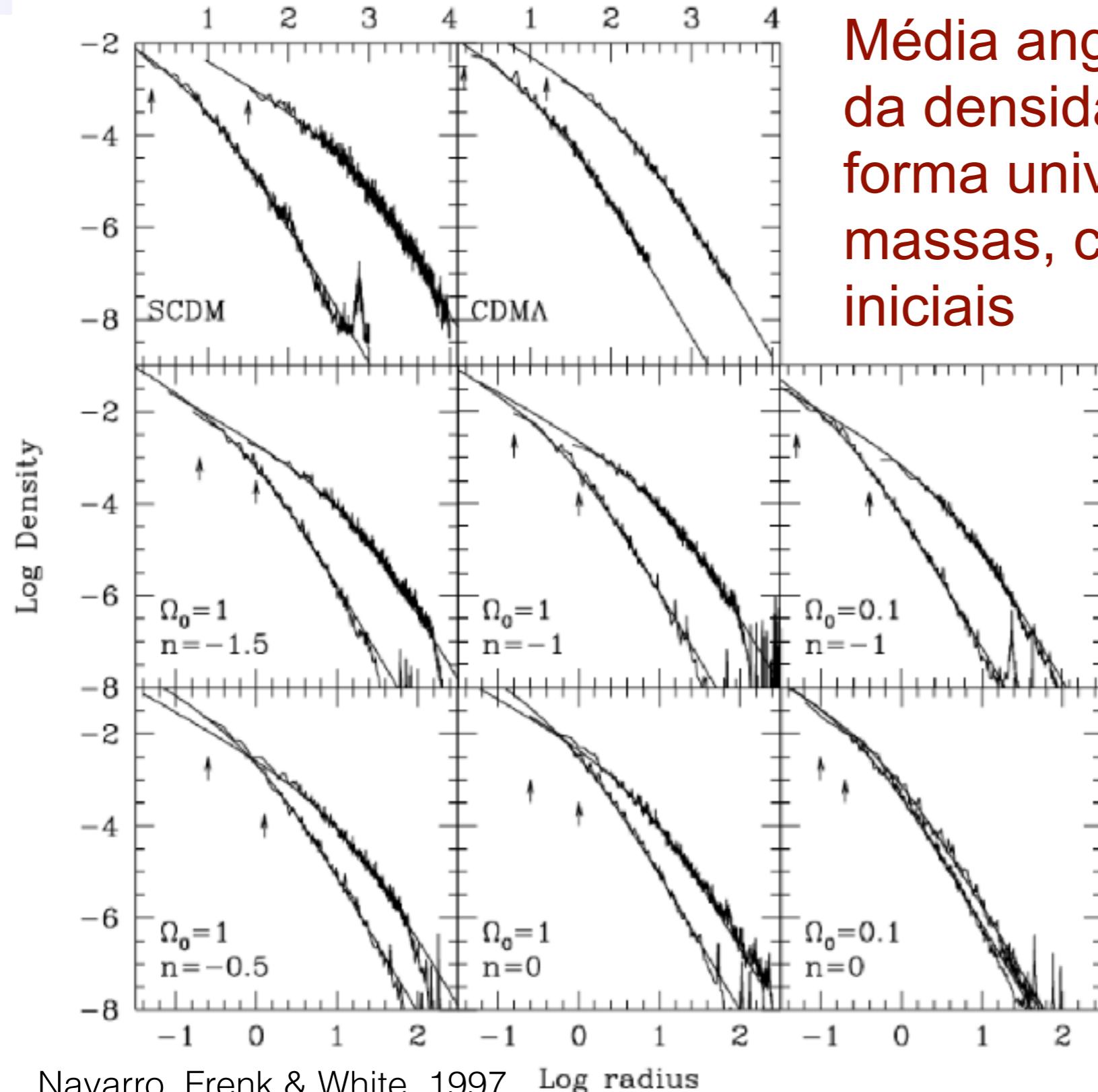
model

$$\Delta\Sigma_x = \Sigma_{\text{crit}} \langle \gamma_x \rangle$$

test for systematics!



Perfis (radiais) de densidade



Média angular (cascas esféricas) da densidade em halos possui uma forma universal para diferentes massas, cosmologias e condições iniciais

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{(r/r_s)(1+r/r_s)^2}$$

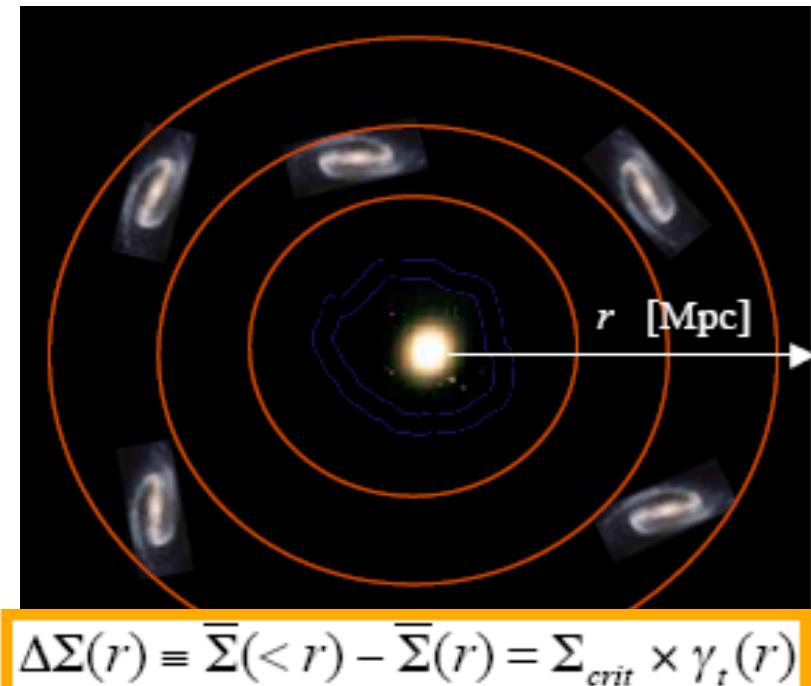
Pode ser expresso em termos da massa M_Δ e da concentração $c = r_\Delta/r_s$

Valores dos parâmetros dependem da massa e da história de formação dos halos

Exercício: relações entre parâmetros e outras quantidades físicas

Mass reconstruction in clusters (radial profile)

- Measure the tangential shear to get $\Delta\Sigma$

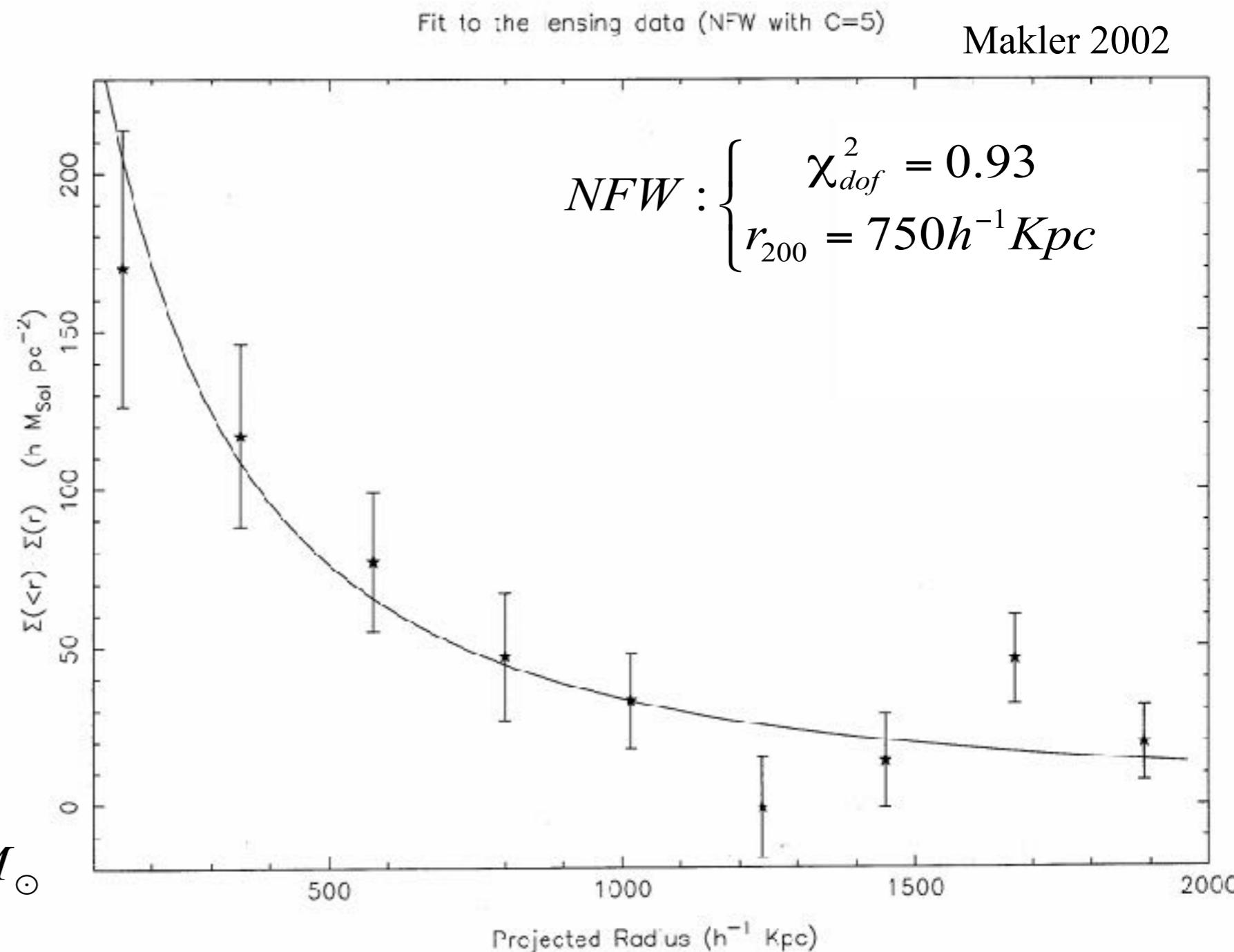


$$\Sigma_{crit} = \frac{c^2}{4\pi G} \frac{D_{OS}}{D_{OL} D_{LS}}$$

- Masses:

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

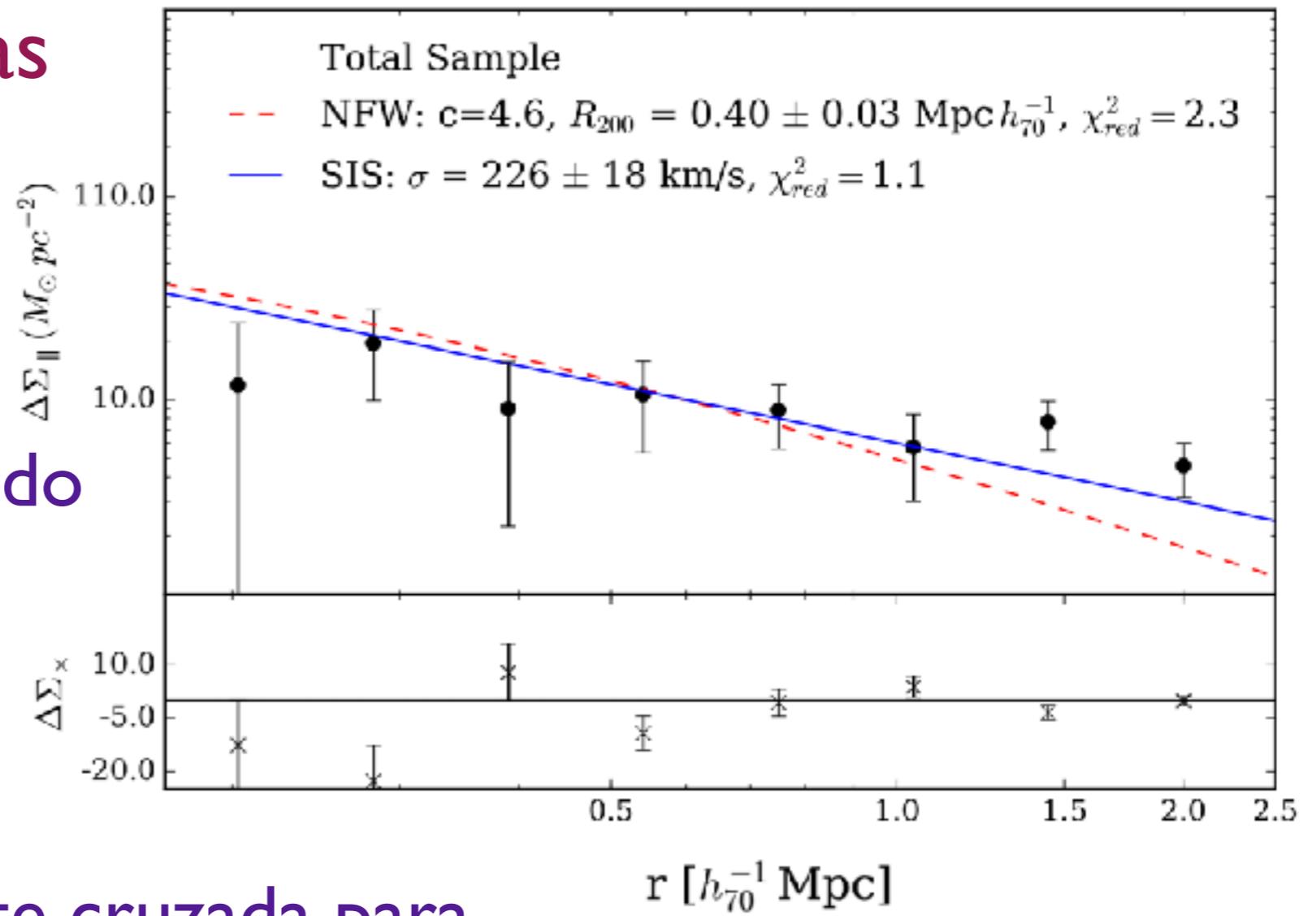
$$\frac{\Delta M_{200}}{M_{200}} \simeq 2.5\%$$



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

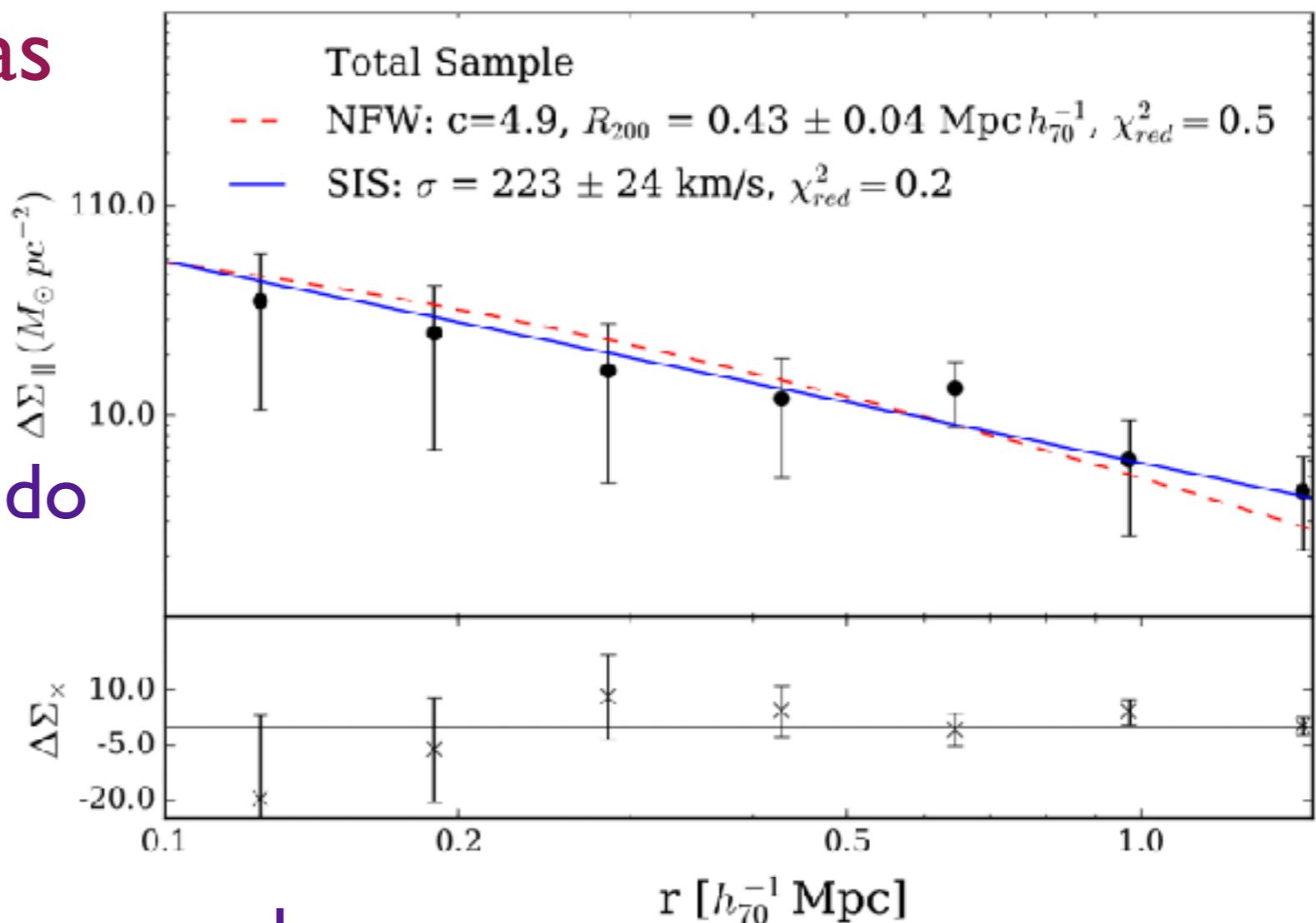
Ajustes de perfiles

- Se pueden hacer en un amplio rango de masas y tipos de lentes, desde galaxias individuales hasta cúmulos de galaxias
- Requieren “solo”:
 - Estadística suficiente de galaxias de fondo
 - Un centro bien definido (incluso con voids!)
- ejemplo: grupos compactos
- Uso de la componente cruzada para control de los sistemáticos



Ajustes de perfiles

- Se pueden hacer en un amplio rango de masas y tipos de lentes, desde galaxias individuales hasta cúmulos de galaxias
- Requieren “solo”:
 - Estadística suficiente de galaxias de fondo
 - Un centro bien definido (incluso con voids!)
- ejemplo: pares de galaxias
- Uso de la componente cruzada para control de los sistemáticos



Modeling the mass profile

Interpretation with the halo model: halos x galaxies correlation

- 1-halo term: matter density in the halo

Exemple: NFW $\rho(r) = \frac{\rho_0}{(r/r_s)(1+r/r_s)^2}$ compute $\Sigma(r)$

- 2-halo term: correlation with other halos
(large scale structure) $\rho(r) = b\bar{\rho}_m\xi(r)$ where

$$\xi(r) = \frac{1}{2\pi^2} \int dk k^2 P(k) \frac{\sin(kr)}{kr} \quad b(\nu) = 1 - A \frac{\nu^a}{\nu^a + \delta_c^a} + B\nu^b + C\nu^c$$

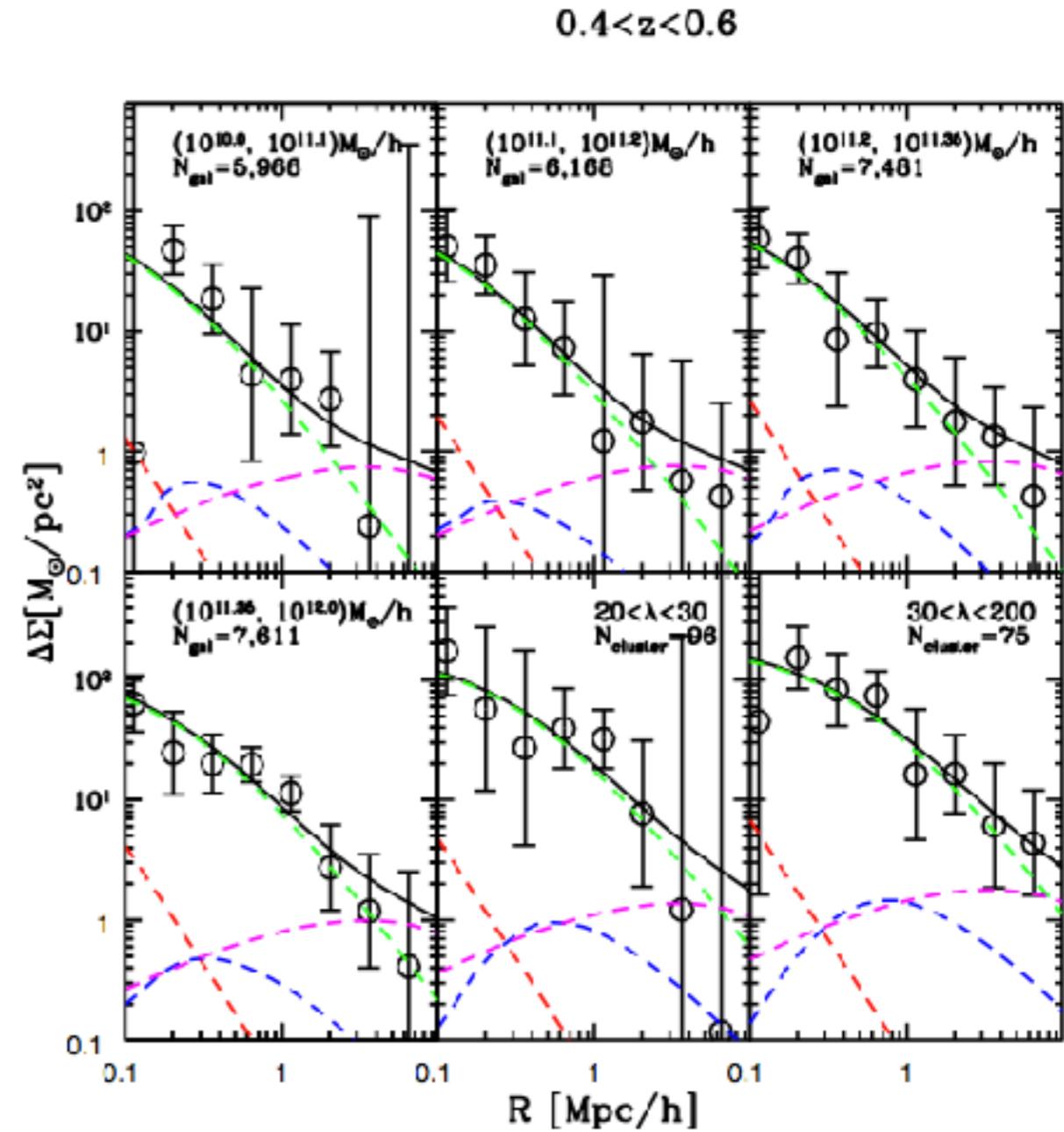
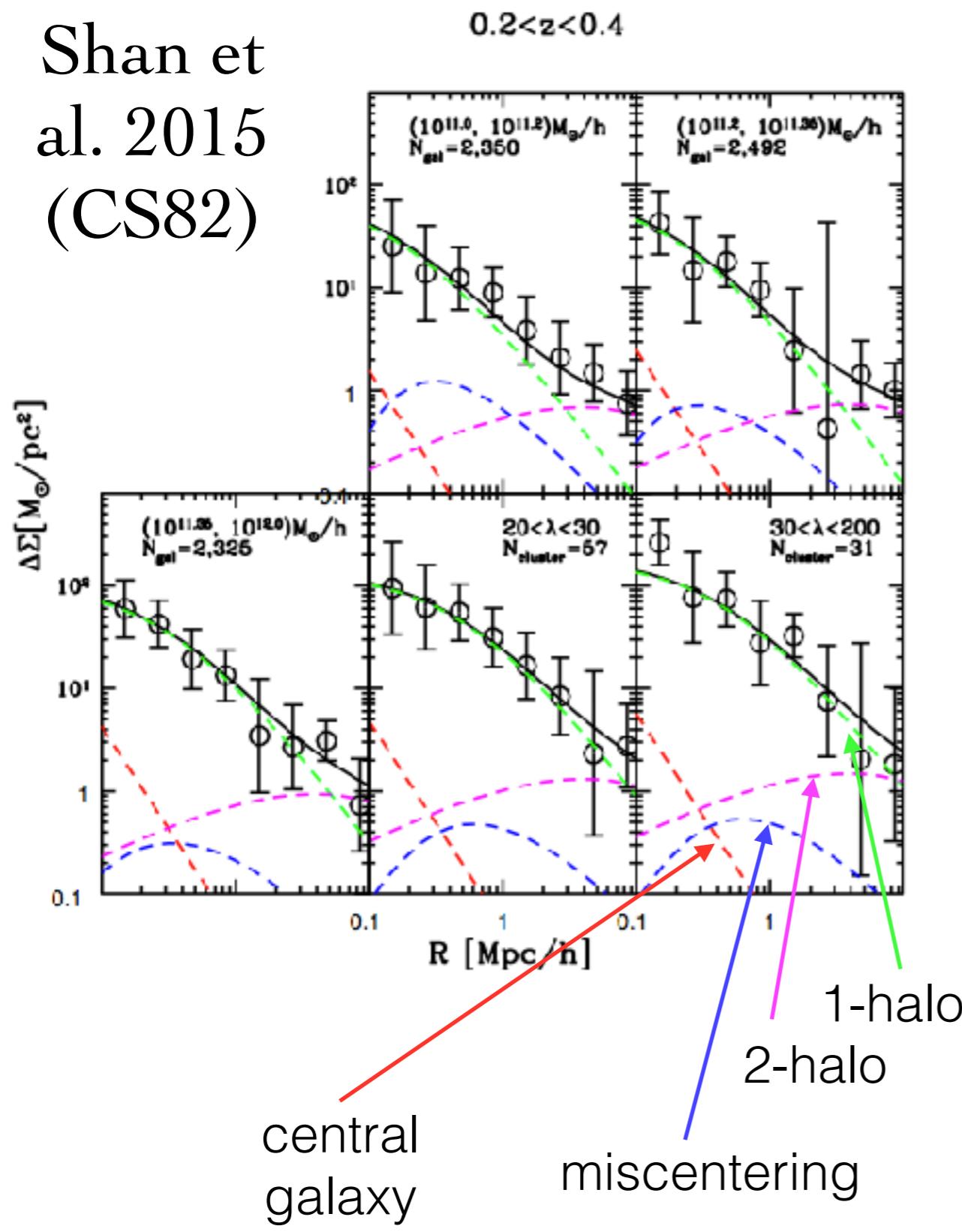
$$\nu = \delta_c/\sigma(M) = 1.686/\sigma(M) \quad \sigma(R) = \frac{1}{2\pi^2} \int dk k^2 P(k, z) \hat{W}^2(k, R)$$

$$R = (3M/4\pi\bar{\rho}_m)^{1/3} \quad (\text{mass function, peak-background split})$$

- Term for the offset of the profile with respect to other center
- Central potential (central galaxy, e.g. SIS)

Example: Cluster mass calibration

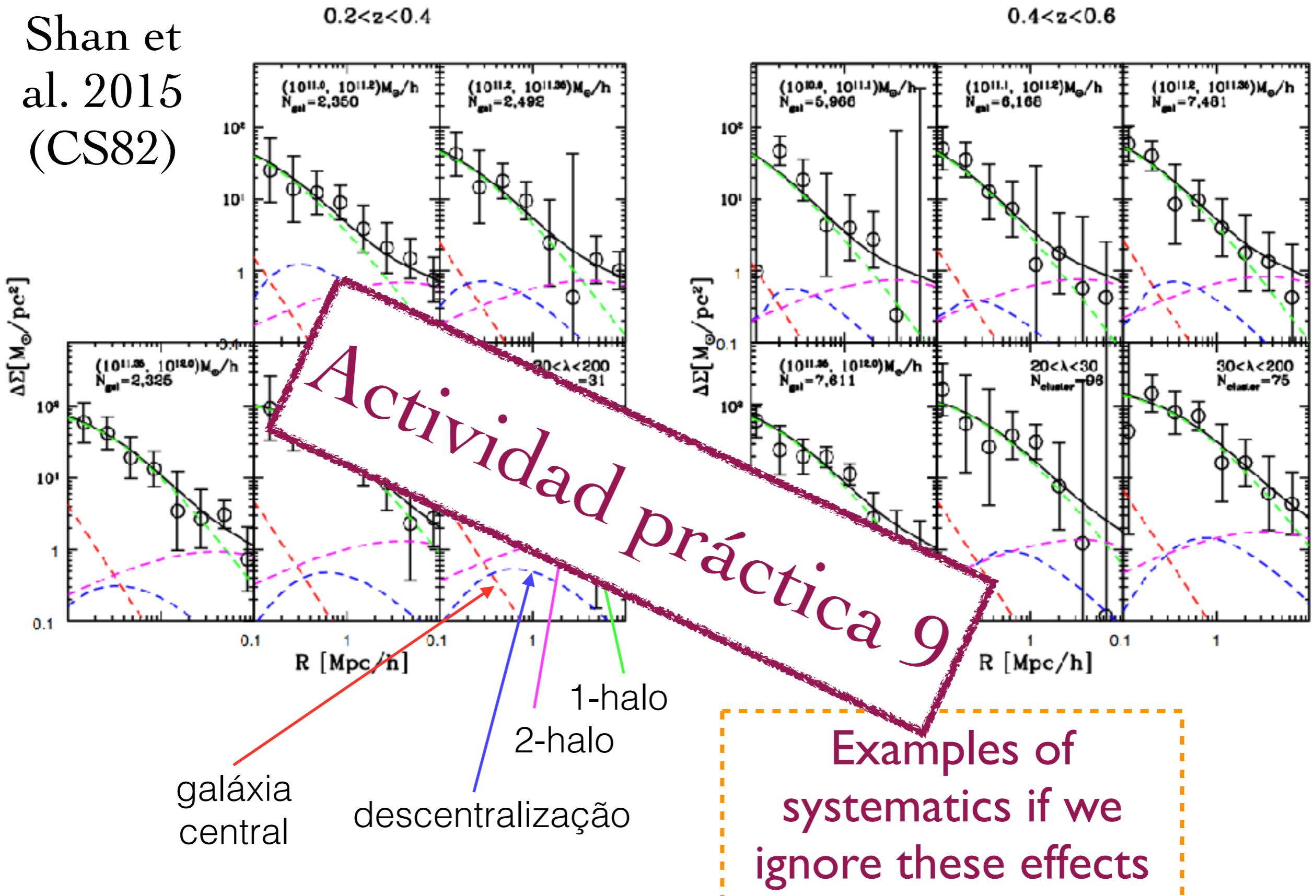
Shan et
al. 2015
(CS82)



Examples of
systematics if we
ignore these effects

Mass calibration

Shan et
al. 2015
(CS82)



Examples of
systematics if we
ignore these effects

2D Mass reconstruction

Projected potential

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

Lensing potential

$$\Psi \equiv \frac{2}{c^2} \frac{D_{\text{LS}}}{D_{\text{OS}} D_{\text{OL}}} \psi$$

Critical surface density

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

Convergence

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

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

2D Mass reconstruction

Lens potential

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

Shear

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

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

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

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

2D Mass reconstruction

Convolution of convergence

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

Kernel

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

Fourier space

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

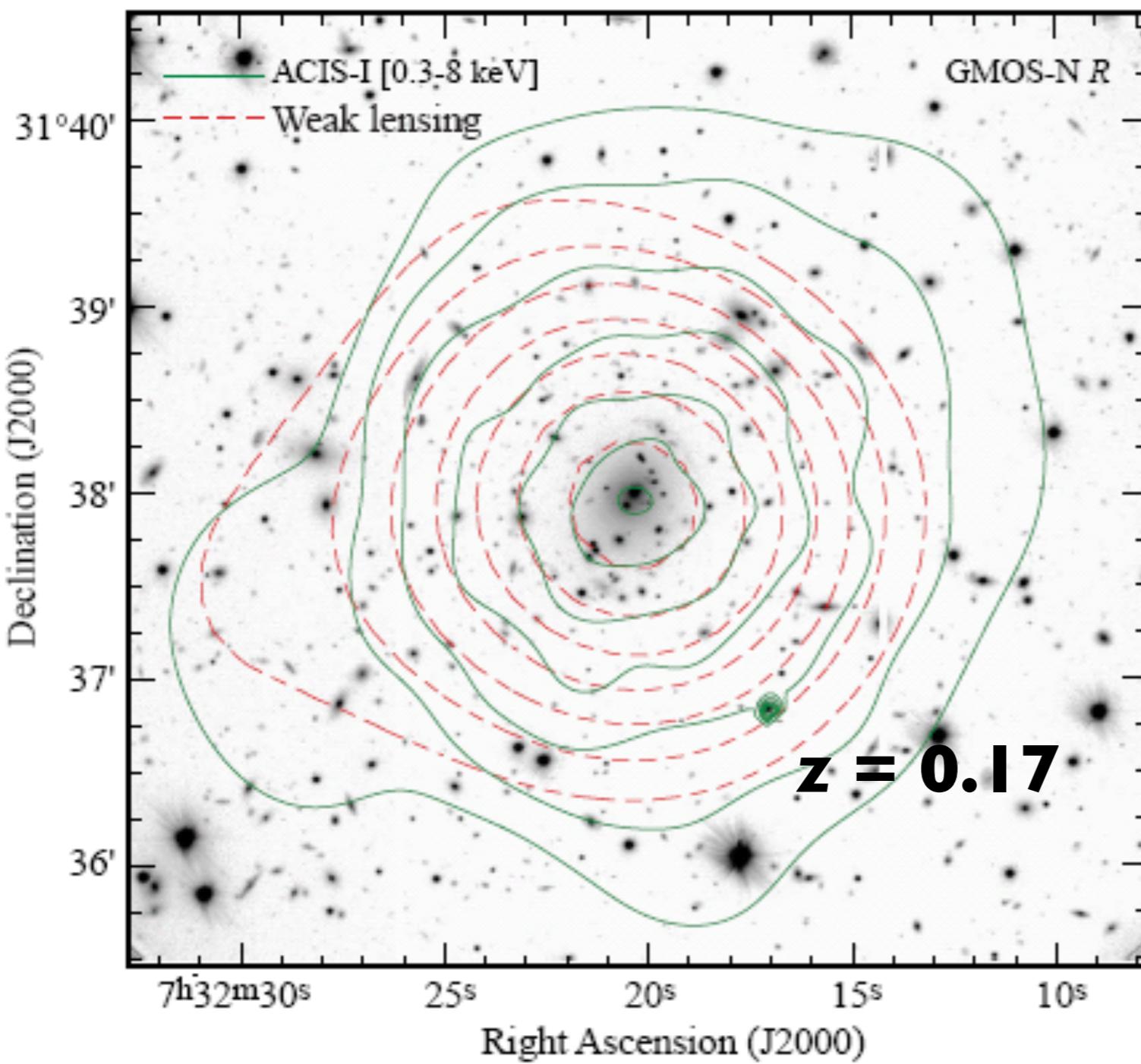
Since $D(\vec{\ell})D^*(\vec{\ell}) = \pi^2$ as $\Gamma(\vec{\ell}) = D(\vec{\ell})\kappa(\vec{\ell})/\pi$

we have $\kappa(\vec{\ell}) = D^*(\vec{\ell})\Gamma(\vec{\ell})/\pi$

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

Mass reconstruction in clusters

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



Mass distribution

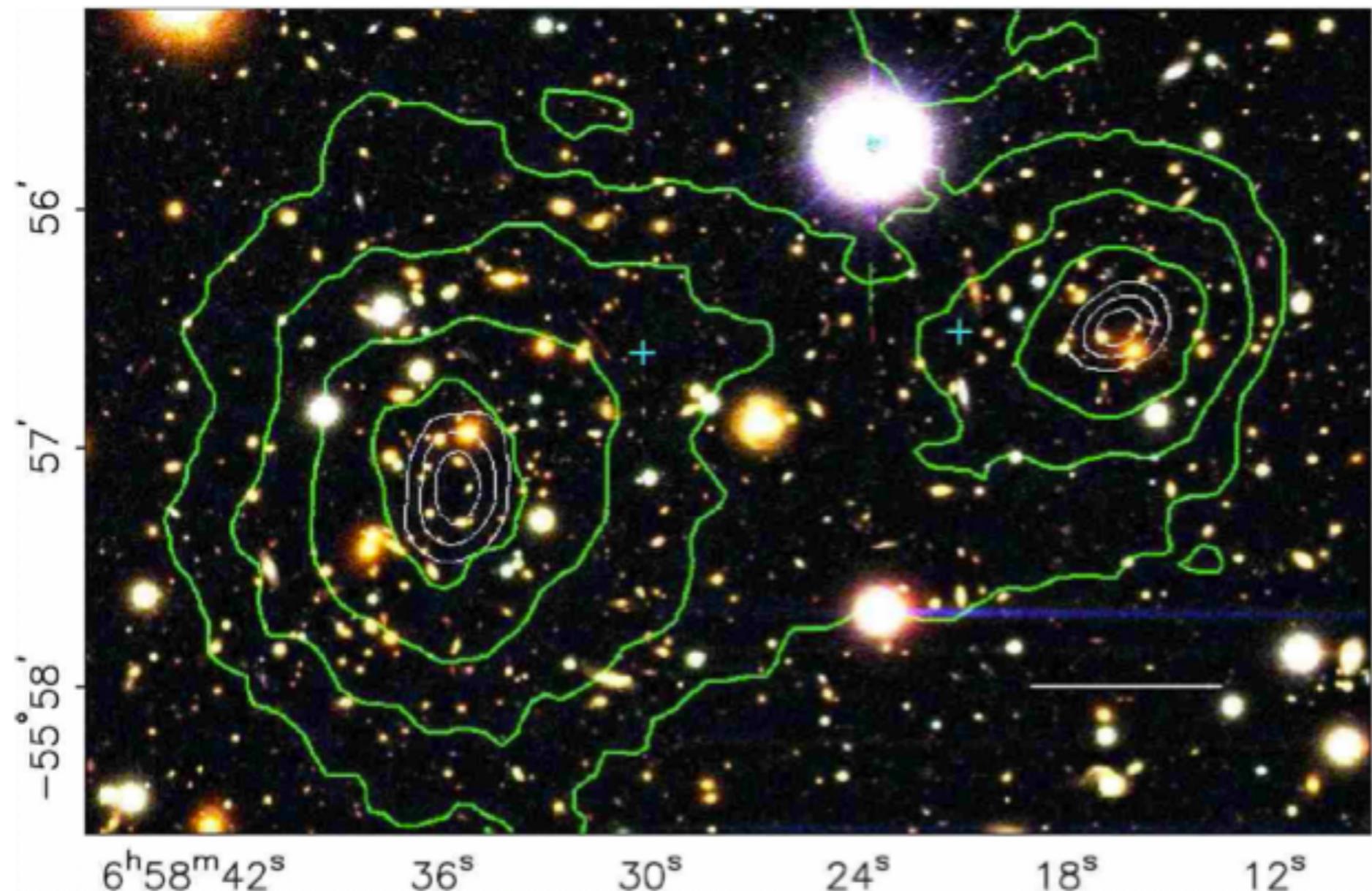
- Weak Lensing
- x-ray emission
- Velocity dispersion

20% agreement
(in general, for relaxed clusters)

Dark Matter dominates

Evidência “direta” da matéria escura

- Aglomerado da bala (I E0657-558)

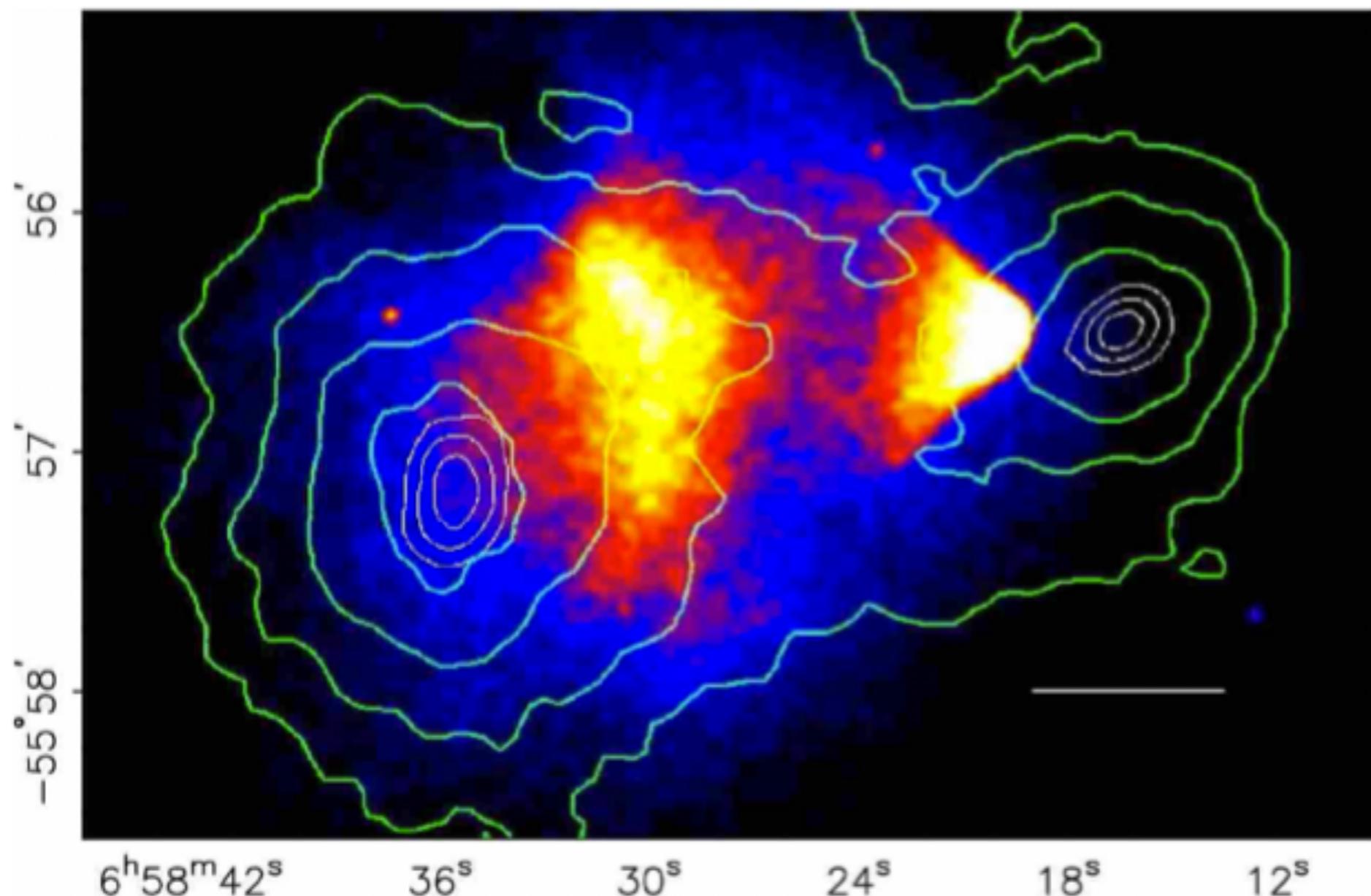


astro-ph/0608407

Reconstrução da massa pelo efeito fraco de lente gravitacional

Evidência “direta” da matéria escura

- Distribuição do gás



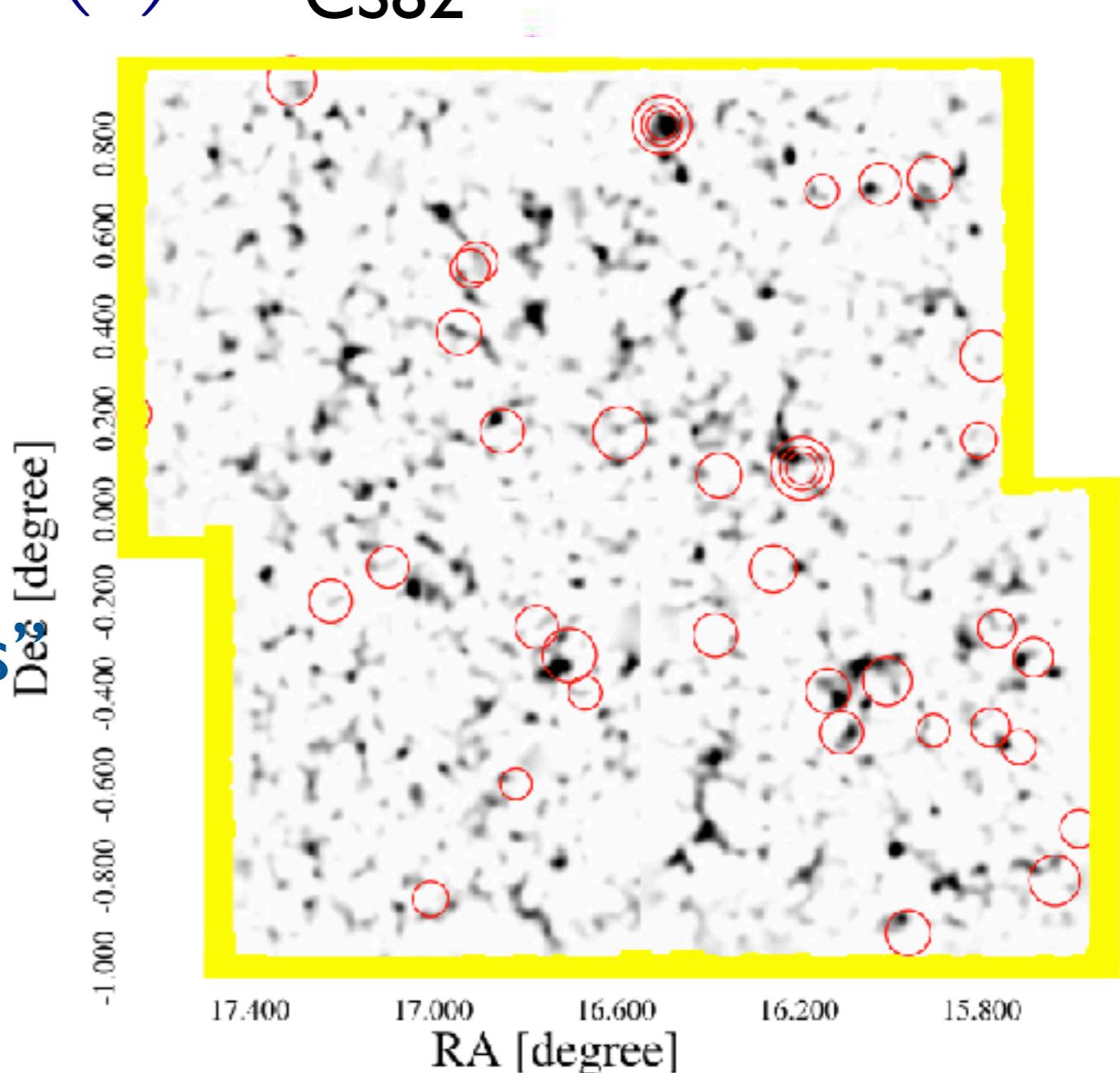
astro-ph/0608407

Desvio de 8σ nos centros de massa!

Convergence Maps

Invertendo para obter $\kappa(\vec{\theta})$

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



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 Martín 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

Galáxias se mantêm coesas pela força da gravidade da matéria escura

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.

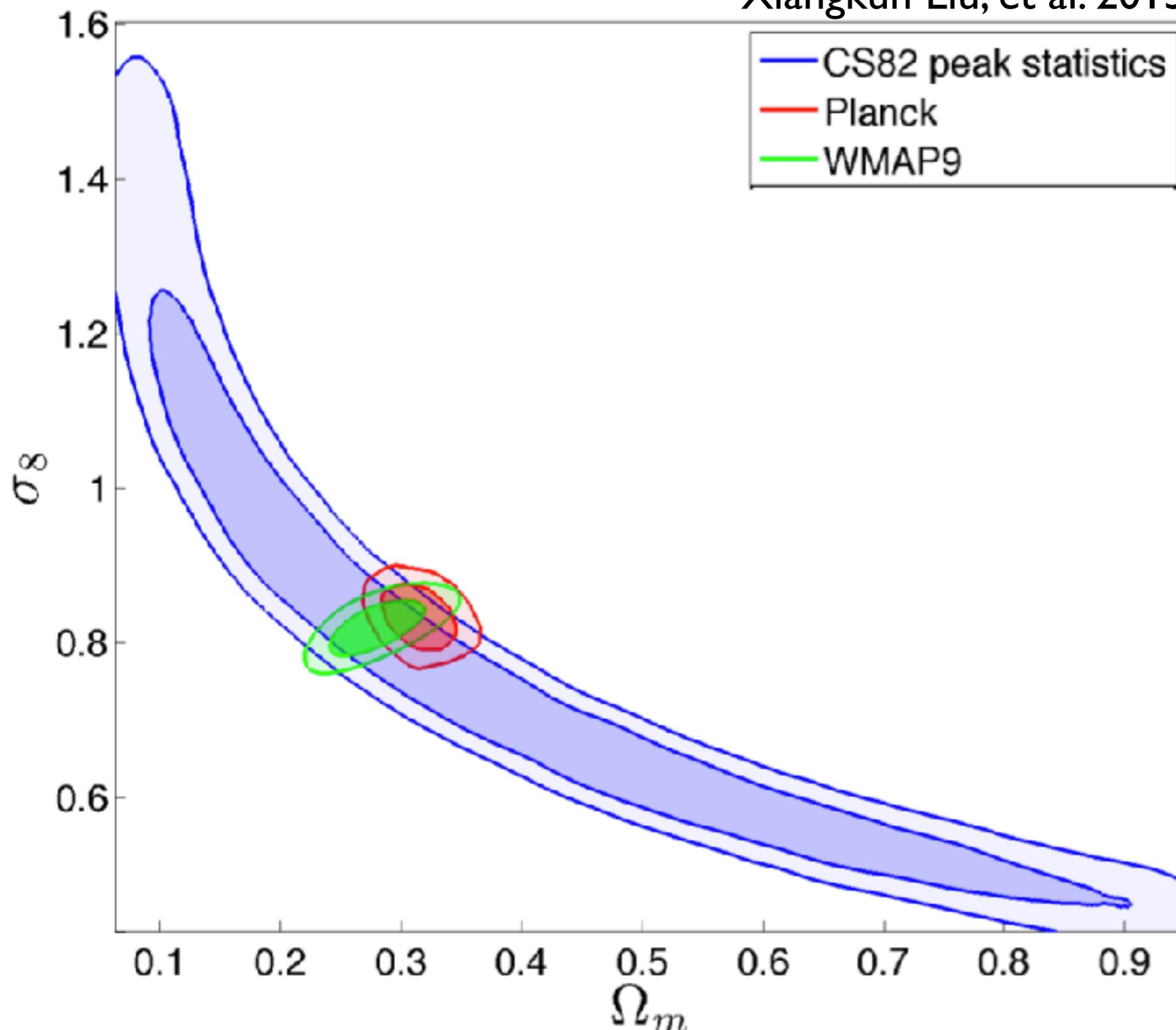
O resultado do esforço, feito com o Telescópio Canadá-França-Havaí, é um mapa bidimensional — sem profundidade — da distribuição da matéria escura, que cobre uma faixa do céu com 170 graus quadrados de área.

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 e Cosmologia no CS82

Xiangkun Liu, et al. 2015



ESTRUCTURA GENERAL DE LA MATERIA

Parte III: lensing a nivel cosmológico

[perturbaciones, week lensing]

- ❑ Revisión de cosmología: formación y distribución de las estructuras en el Universo
- ❑ Mas allá del plano único: lentes y estructura en gran escala
- ❑ Estadísticas de *lensing*
- ❑ *Lensing* de la radiación cósmica de fondo

El Universo heterogéneo: Fluctuaciones en todas las escalas

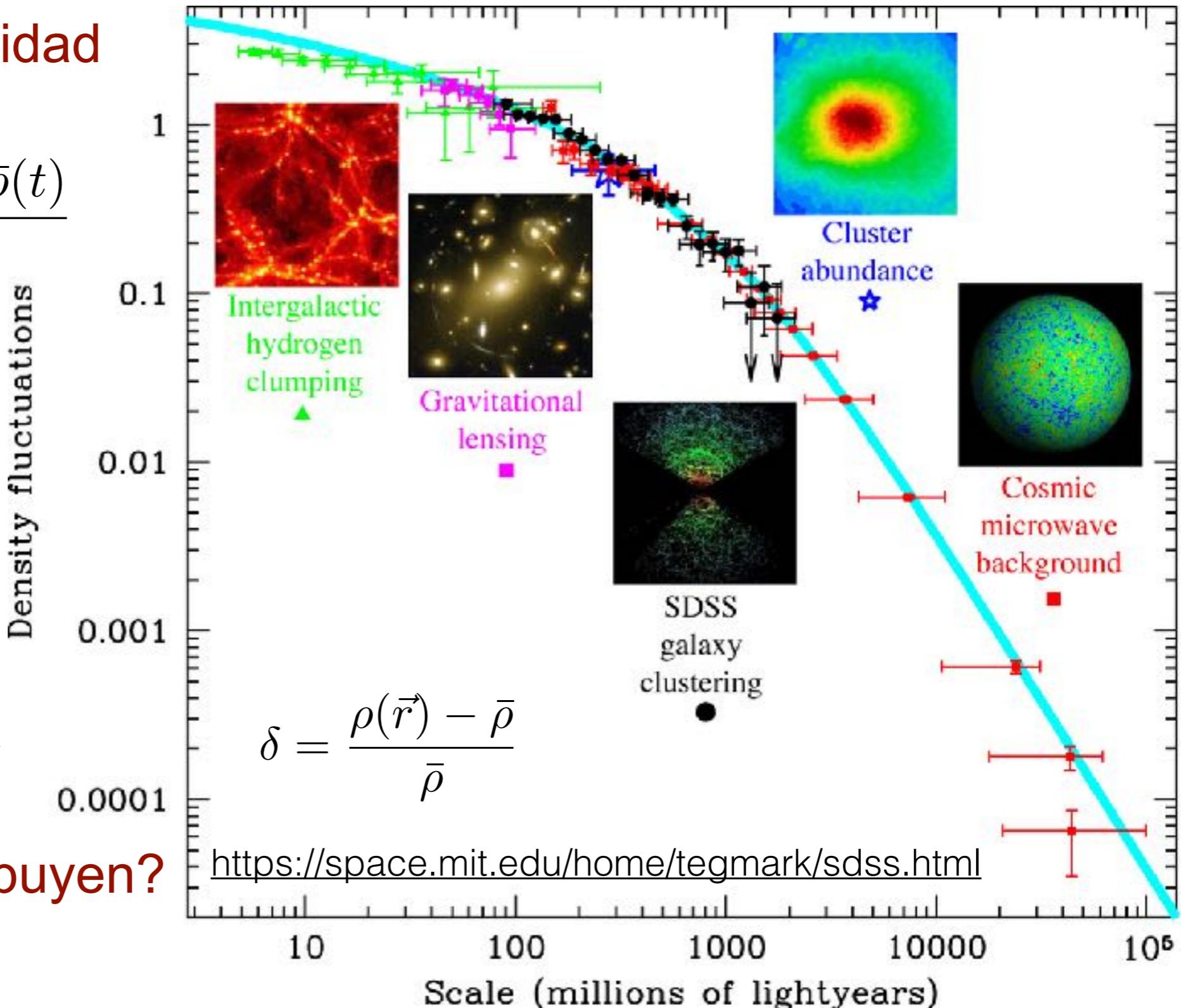
- contraste de densidad de la materia

$$\delta(\vec{r}, t) = \frac{\rho(\vec{r}, t) - \bar{\rho}(t)}{\bar{\rho}(t)}$$

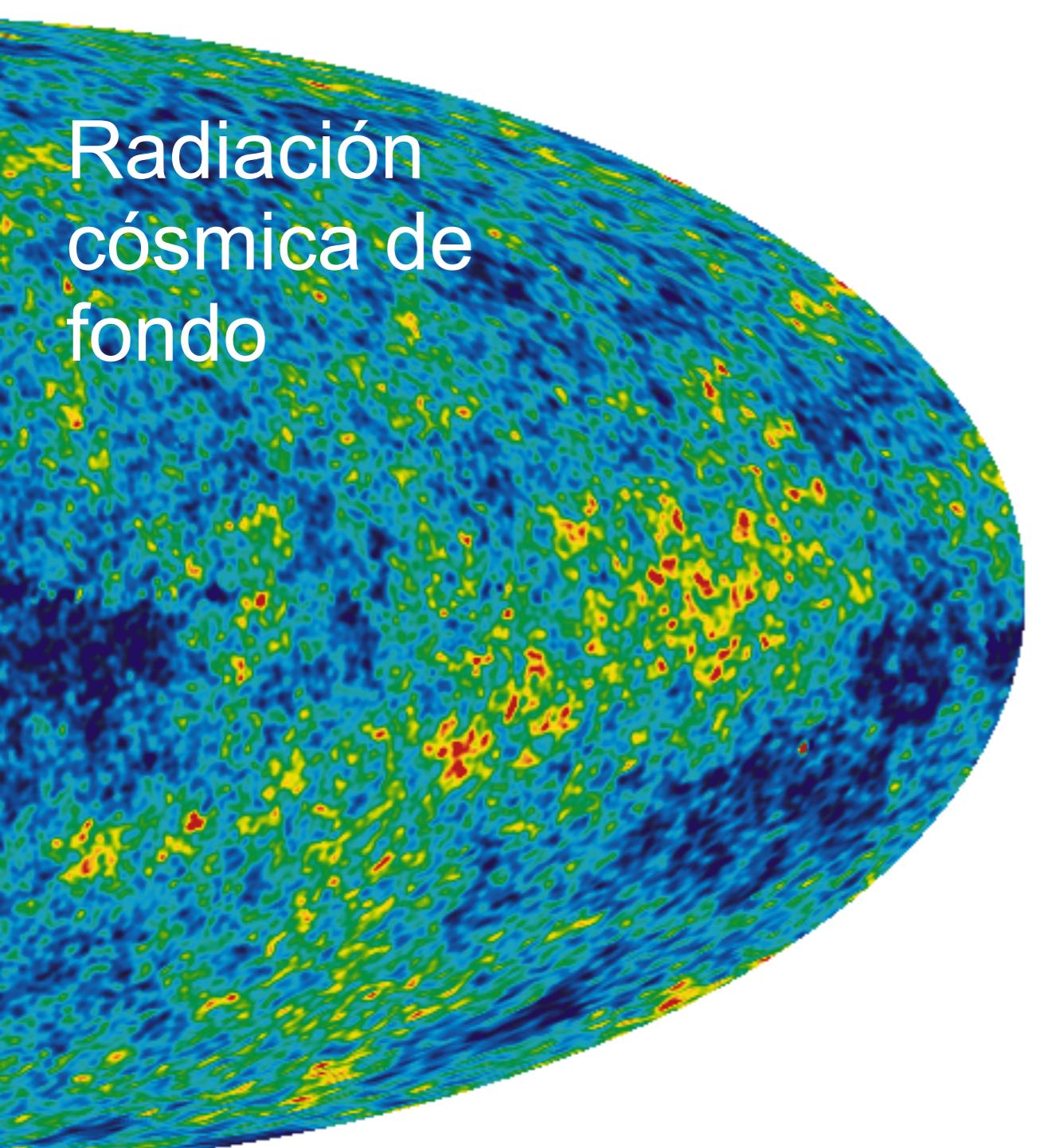
- En el mundo real: contraste de densidad numérica

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

- ¿Cómo se distribuyen?
¡Estadística!



¿Cómo se formaron las estructuras?



Fluctuaciones $\sim 10^{-4}$

Fluctuaciones $\sim 10^3$

Límite newtoniano y teoria de perturbación relativista

- Teoria de perturbación cosmológica: métrica de Robertson-Walker perturbada

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

- Modos tensoriales, vectoriales y escalares
- Desacople entre los modos en el regimen lineal
- Perturbaciones escalares están asociadas a fluctuaciones de densidad:

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

(para um fluido perfecto $\Phi = \Psi$)

- Nuevamente, límite newtoniano para $\frac{\phi}{c^2} \ll 1$ $\left(\frac{v}{c}\right)^2 \ll 1$
- Fluctuaciones de densidad:

$$\rho(\vec{x}, \tau) = \bar{\rho}(\tau) + \delta\rho(\vec{x}, \tau)$$

Ecuaciones cosmológicas “de fluidos”

- Perturbaciones lineales (en la densidad!): $\delta = \frac{\rho(z, \vec{x}) - \bar{\rho}(z)}{\bar{\rho}(z)}$
- Conservación de la masa (continuidad):

$$\frac{\partial \delta}{\partial \tau} + \vec{\nabla}_x \cdot [(1 + \delta) \vec{v}] \ll 1$$

- Conservación del momentum (Euler):

$$\frac{d\vec{v}}{d\tau} + \frac{\dot{a}}{a} \vec{v} = -\vec{\nabla}_x \tilde{\phi} - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla}_x p$$

- Ecuación de Poisson cosmológica:

$$\nabla_x^2 \tilde{\phi} = 4\pi G a^2 \bar{\rho}(\tau) \delta(\vec{x}, \tau)$$

Perturbación total de densidad: $\bar{\rho}_{\text{tot}} \delta_{\text{tot}} = \sum_B \bar{\rho}_B \delta_B$