

HALOS, GRUPOS, AGLOMERADOS

A FUNÇÃO DE MASSA DOS
HALOS

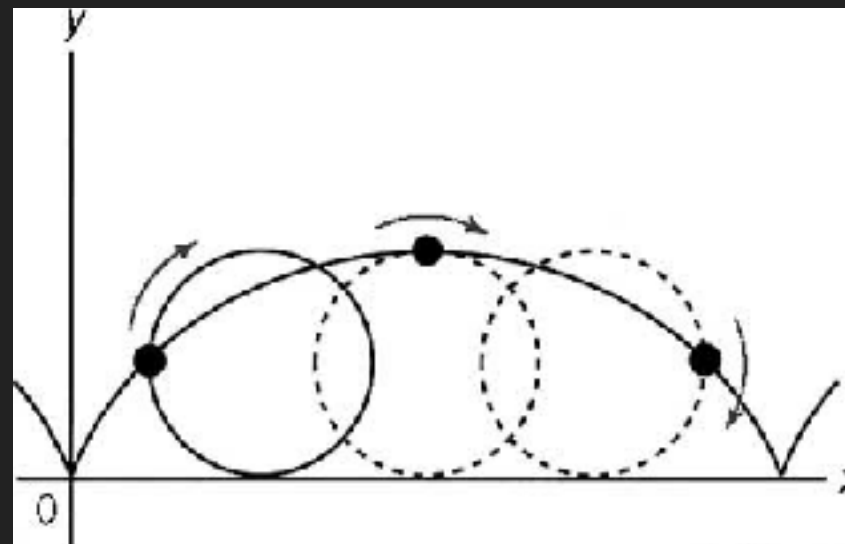
TEORIA NEWTONIANA

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} = E$$

$$\Rightarrow \frac{\ddot{r}}{r} = -\frac{4\pi GM}{3}\rho_m$$



- ▶ Teorema de Birkhoff
- ▶ Equiv. universo fechado: expansão, colapso



TEORIA RELATIVÍSTICA

- ▶ Eq. Euler

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + H\vec{u} + \frac{1}{a}(\vec{u} \cdot \vec{\nabla})\vec{u} = -\frac{1}{a}\vec{\nabla}\phi$$

- ▶ Eq. continuidade

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{1}{a}\vec{\nabla} \cdot (1 + \delta)\vec{u} = 0$$

- ▶ Top-hat: $\vec{u} \sim \vec{r}$

$$\Rightarrow \ddot{\delta} + 2H\dot{\delta} - \frac{4}{3} \frac{\dot{\delta}^2}{1 + \delta} = \frac{1 + \delta}{a^2} \nabla^2 \phi$$

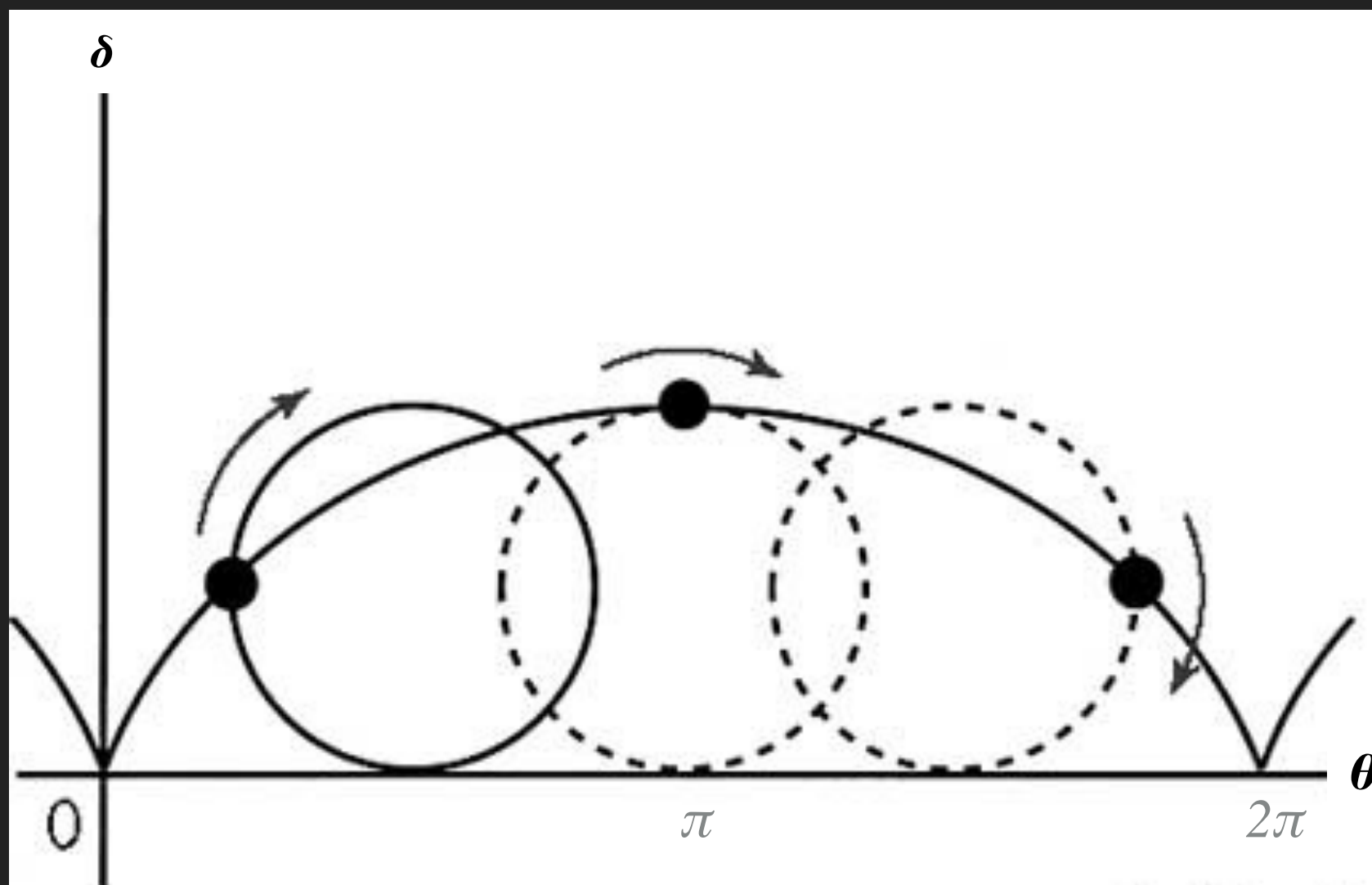
- ▶ Conservação de massa: $M = \frac{4\pi}{3}(1 + \delta)\rho_m r^3$

- ▶ Substituindo δ por r : $\Rightarrow \frac{\ddot{r}}{r} = -\frac{4\pi G M}{3}\rho_m$

IDÊNTICO À TEORIA
NEWTONIANA!

EXPANSÃO, TURNAROUND, CONTRAÇÃO, COLAPSO

- ▶ A solução para δ é uma cicloide:



$$r \sim 1 - \cos \theta$$

$$t \sim \theta - \sin \theta$$

- ▶ Máximo (turnaround):

$$\theta_{TA} = \pi$$

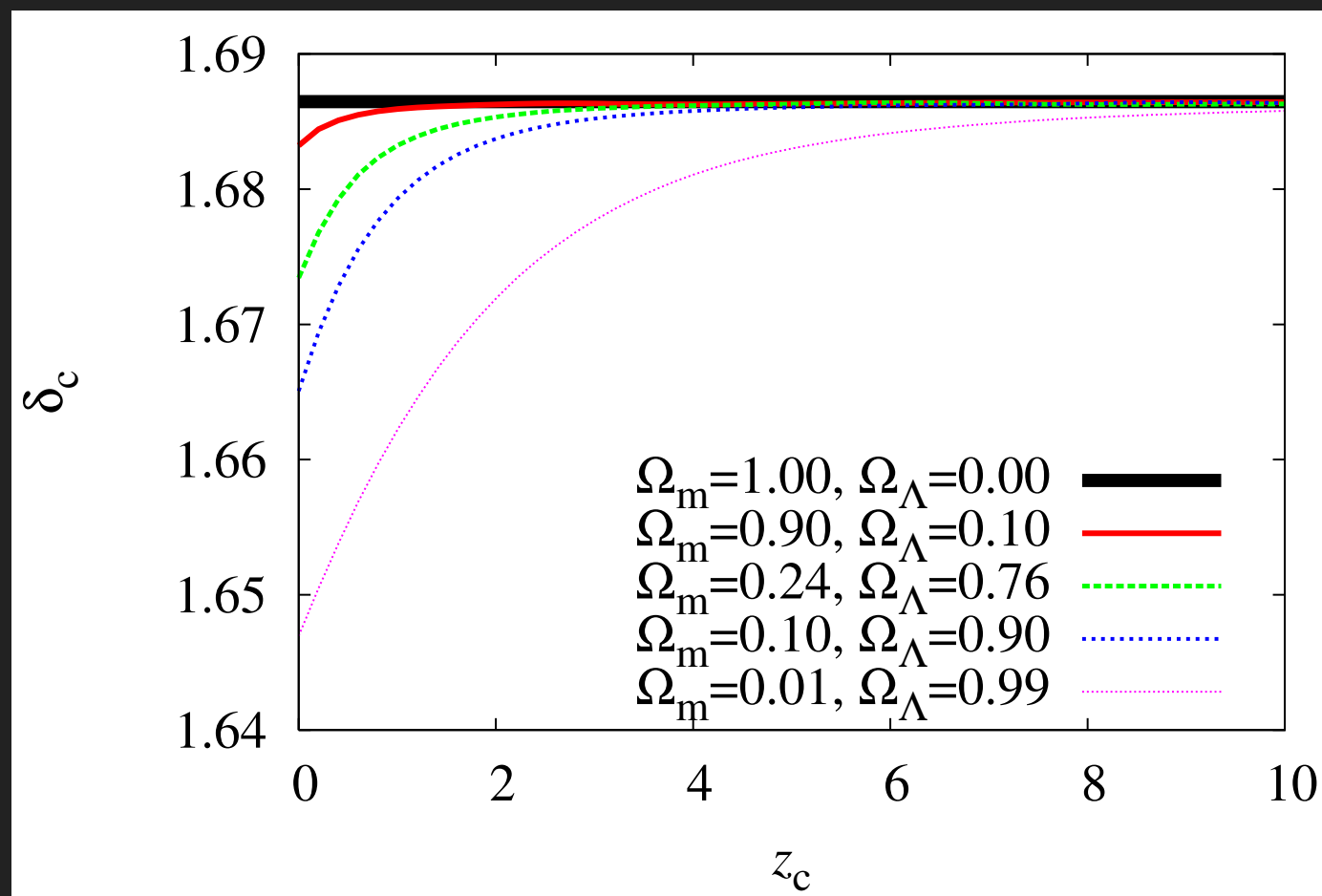
- ▶ Colapso:

$$\theta_c = 2\pi$$

EXPANSÃO, TURNAROUND, CONTRAÇÃO, COLAPSO

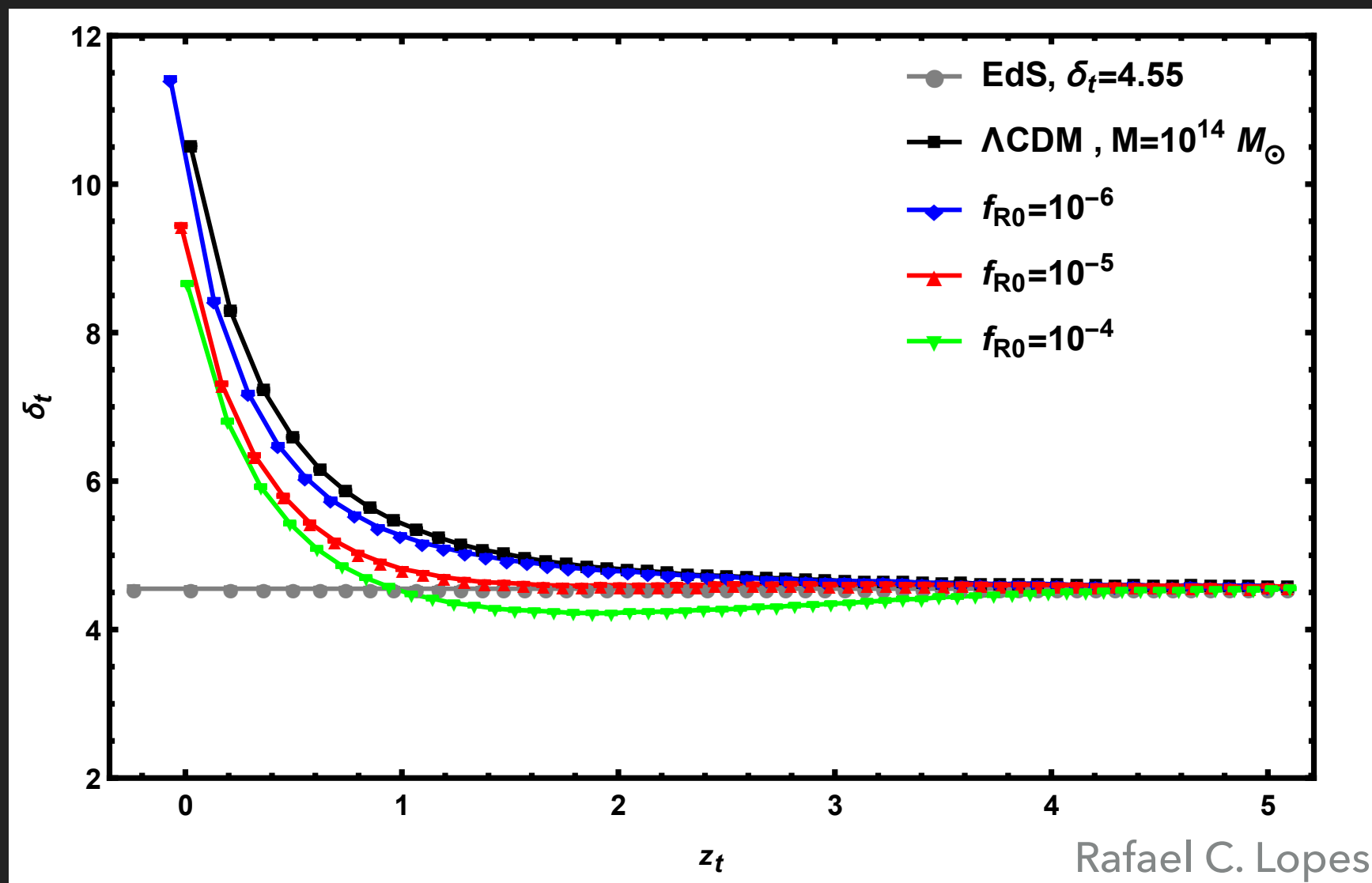
- Usando a teoria linear, no colapso temos:

$$\delta_c^{(lin)} = \frac{3}{5} \left(\frac{3\pi}{4} \right)^{2/3} \simeq 1.686$$



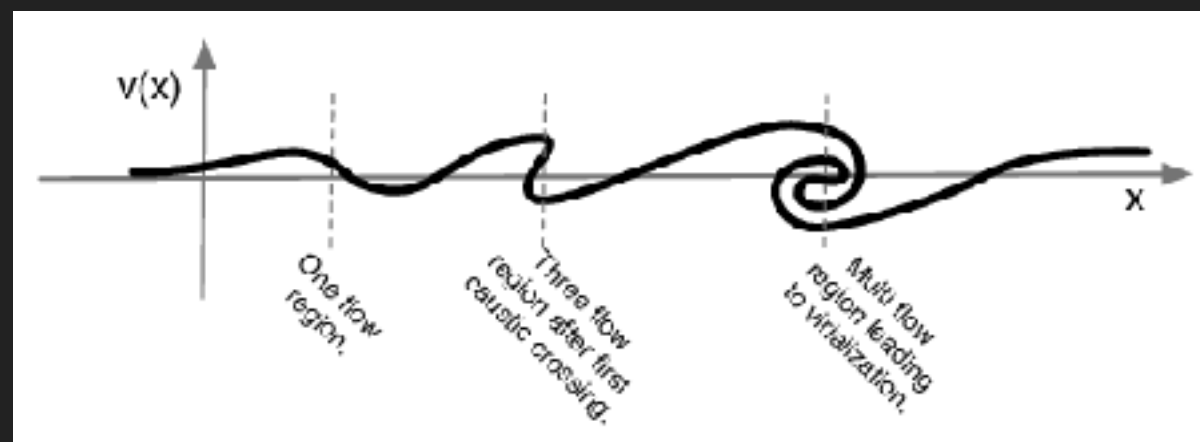
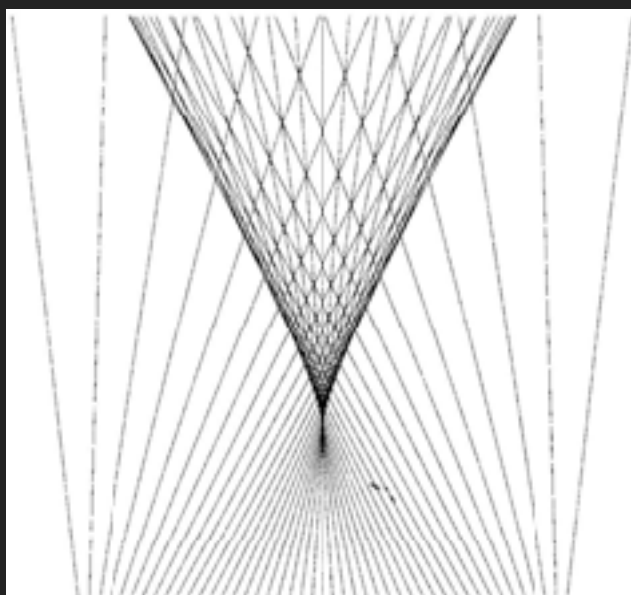
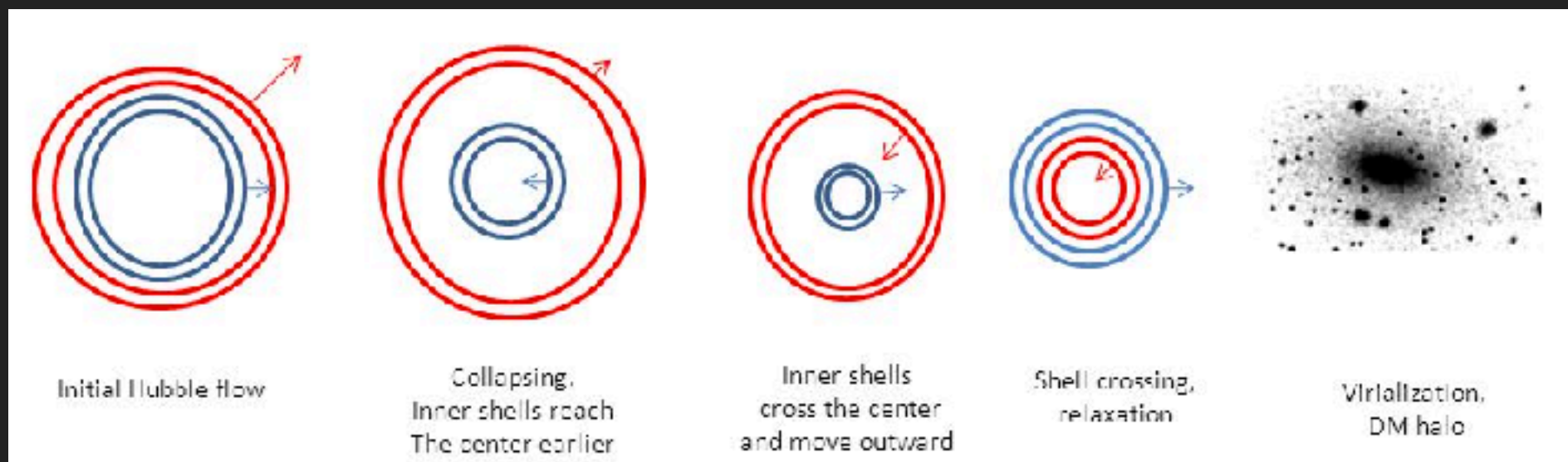
TURNAROUND EM TEORIAS DE GRAVIDADE MODIFICADA

► Modelos $f(R)$:



EXPANSÃO, TURNAROUND, CONTRAÇÃO, COLAPSO

- ▶ Perto do colapso: não-linearidades, "shell-crossing", virialização



EXPANSÃO, TURNAROUND, CONTRAÇÃO, COLAPSO

- ▶ **Virialização:** equipartição da energia

$$T. Virial : \quad U = -2K$$

$$E_{Tot} = U + K = \frac{1}{2}U_{Vir}$$

- ▶ Mas no turnaround: $K = 0 \Rightarrow U_{TA} = E \Rightarrow U_{TA} = \frac{1}{2}U_{Vir}$

- ▶ Top-hat: $U = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{r}$

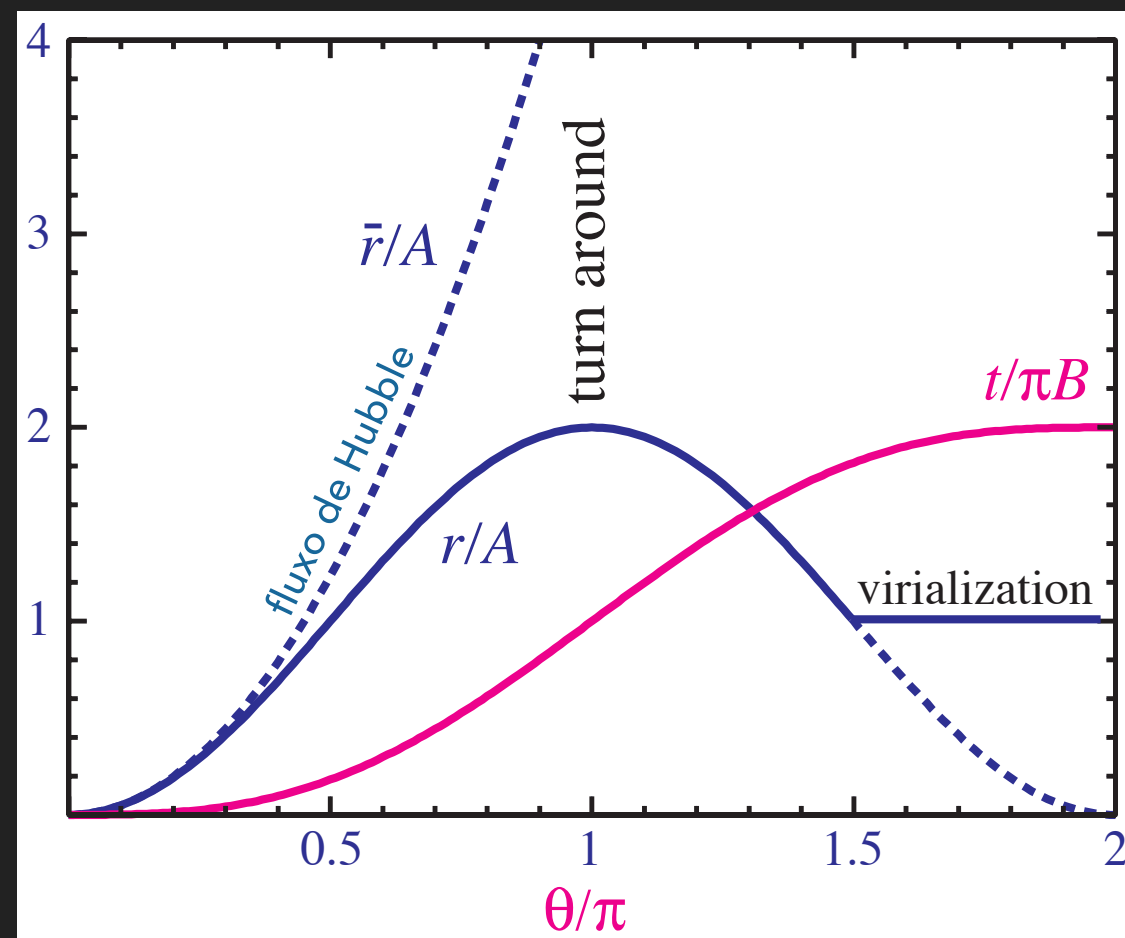
- ▶ Raio na virialização: $r_{Vir} = \frac{1}{2}r_{TA}$

- ▶ "Ângulo" na virialização: $\theta_{Vir} = \frac{3}{2}\pi$

EXPANSÃO, TURNAROUND, CONTRAÇÃO, COLAPSO

- ▶ Virialização: $\theta_{Vir} = \frac{3}{2}\pi$
- ▶ Sobre-densidade na virialização: $\frac{\rho(t_{Vir})}{\bar{\rho}(t_c)} = 18\pi^2 \simeq 178$
- ▶ Barreira (threshold):

$$\Delta_v = 178$$



A FUNÇÃO DE MASSA DOS HALOS: TEORIA DE PRESS-SCHECHTER

- ▶ Campo de densidade inicial **Gaussiano**
- ▶ Barreira para colapso: $\delta_c = 1.686$
- ▶ Quantas regiões no universo têm um contraste de densidade acima da barreira? Esses serão os **halos de matéria**.
- ▶ Densidade (em número) de halos como função da massa: **função de massa**

A FUNÇÃO DE MASSA DOS HALOS: TEORIA DE PRESS-SCHECHTER

- ▶ Densidade cte, raio R e massa M : $R = \left(\frac{3M}{4\pi} \right)^{1/3}$
- ▶ Para campo Gaussiano com espectro $P(k)$, a variância da massa numa esfera de raio R é:

$$\sigma_R^2 = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \tilde{W}^2(k; R) P(k)$$

- ▶ Espectro lei de potência $P(k) \sim k^p$:

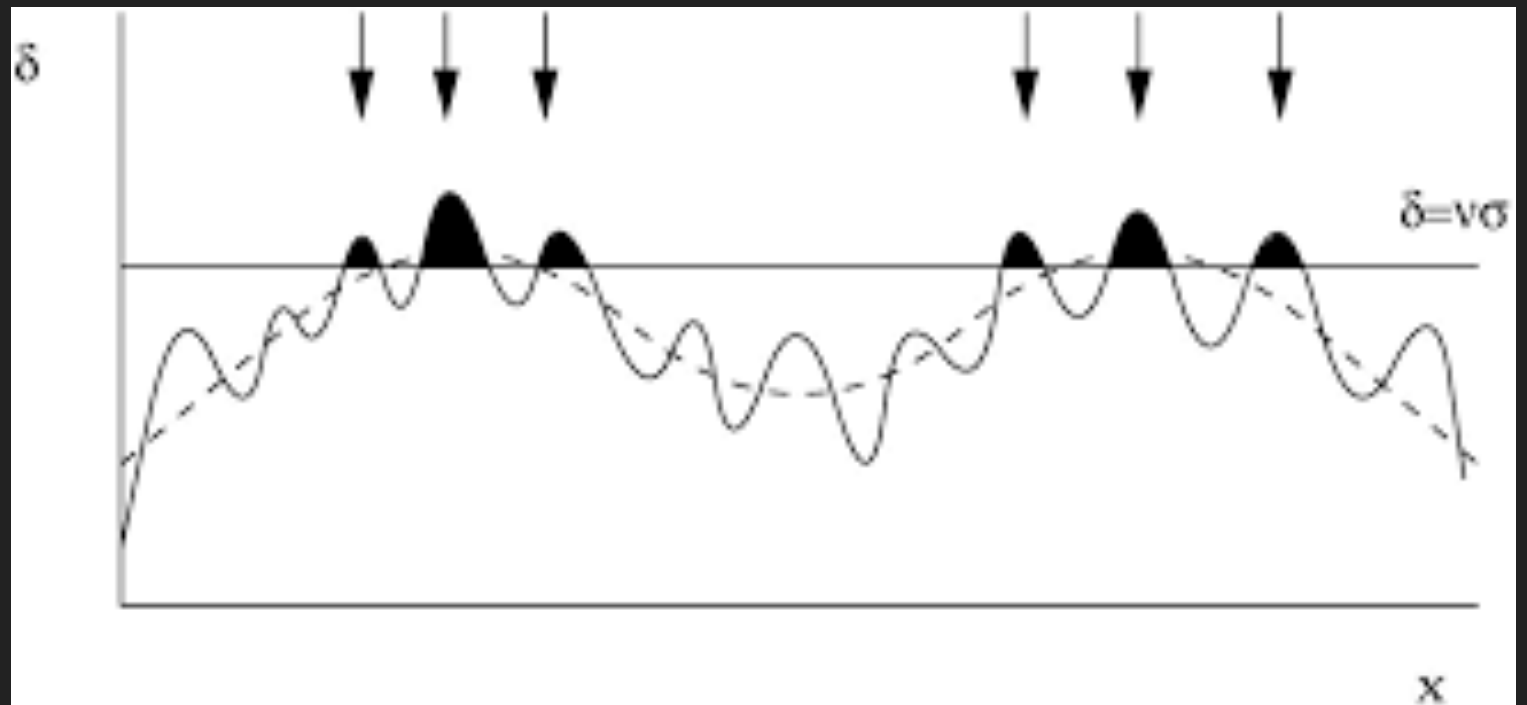
$$\sigma_R^2 \simeq \int_0^{1/R} dk k^2 k^p \sim R^{-p-3} \sim M^{-(p+3)/3}$$

A FUNÇÃO DE MASSA DOS HALOS: TEORIA DE PRESS-SCHECHTER

- Picos: $\delta^{(lin)} > \delta_c$

$$\delta^{(lin)}(z) = \frac{D(z)}{D(z_i)} \delta_i^{(lin)}$$

$$\nu \equiv \frac{\delta_c}{\sigma(M)}$$



$$z = 0 : \quad \nu = 1 \quad p/M \simeq 10^{13} h^{-1} M_{\odot}$$

- Probabilidade da região esférica em torno do pico ter massa M :

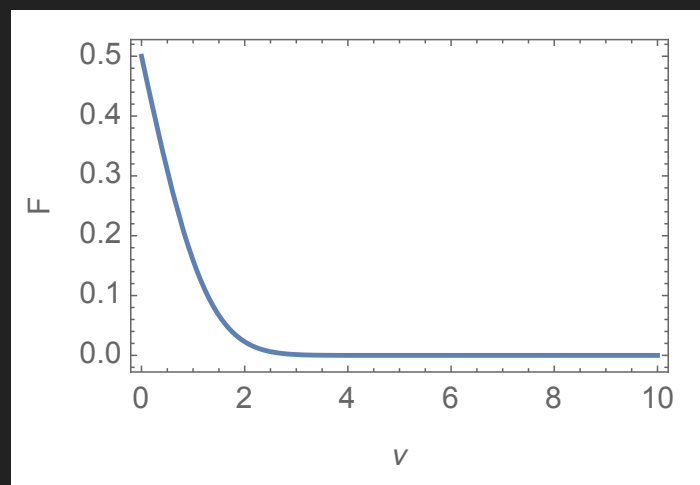
$$P(\delta|M) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2(M)}} \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{\delta^2}{\sigma^2(M)} \right]$$

A FUNÇÃO DE MASSA DOS HALOS: TEORIA DE PRESS-SCHECHTER

- Probabilidade desses “halos” terem massas $> M$:

$$\begin{aligned} F(> M) &= \int_{\delta_c}^{\infty} d\delta P(\delta|M) \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{1}{2} \frac{\delta_c^2}{\sigma^2(M)}} \right] = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\nu}{\sqrt{2}} \right] \quad \nu \equiv \frac{\delta_c}{\sigma(M)} \end{aligned}$$

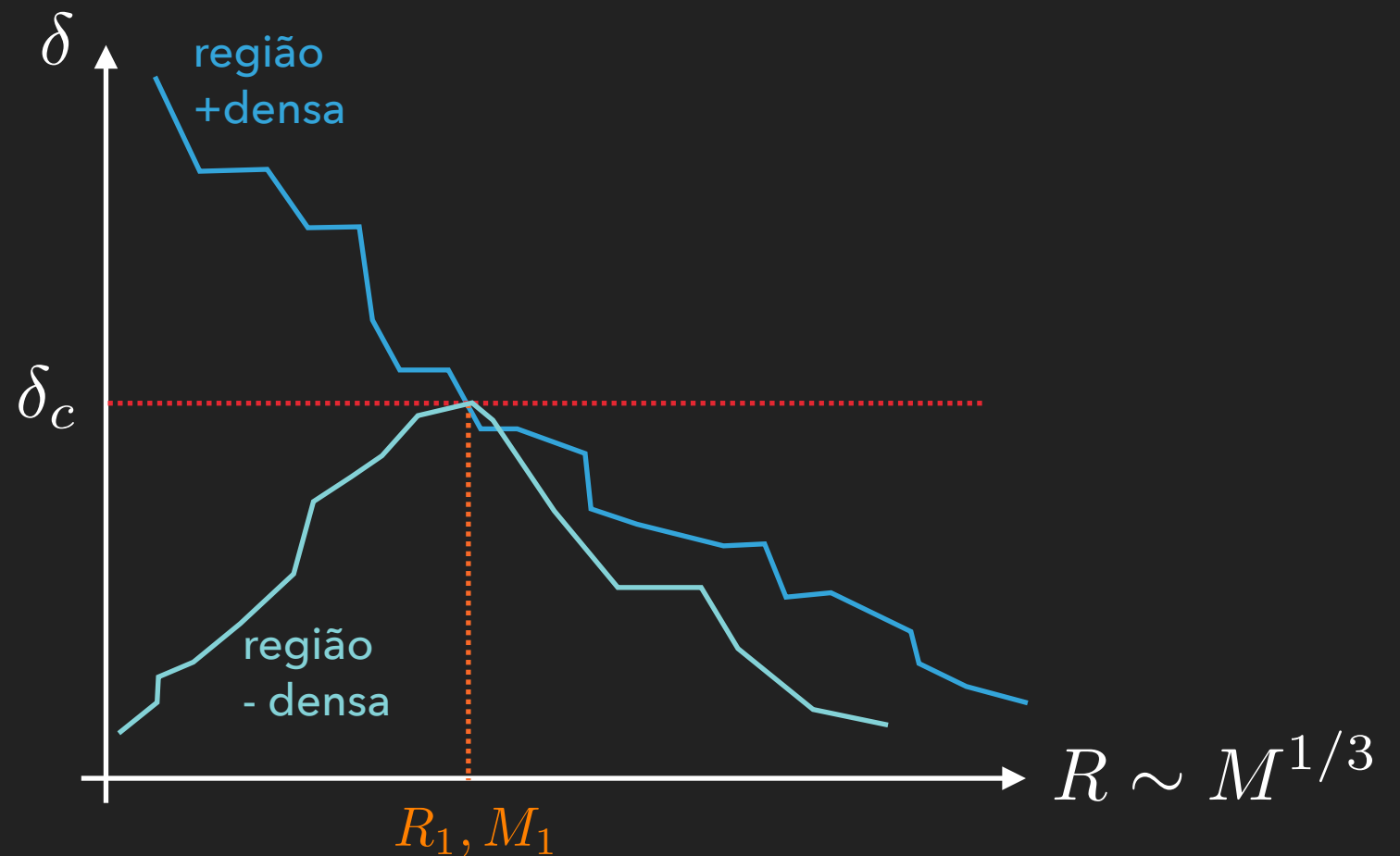
- Problema!



$$\begin{aligned} \nu &\rightarrow 0 \quad , \quad F \rightarrow 1/2 \\ \sigma(M) &\rightarrow \infty \quad , \quad F \rightarrow 1/2 \end{aligned}$$

A FUNÇÃO DE MASSA DOS HALOS: TEORIA DE PRESS-SCHECHTER

- Um passo além de Press-Schechter



- Incluindo todas as regiões $\Rightarrow$ fator de 2

A FUNÇÃO DE MASSA DOS HALOS: TEORIA DE PRESS-SCHECHTER

- Número de halos por unidade de massa:

$$\begin{aligned}\frac{d \bar{n}_h}{d \ln M} &= \bar{n}_M \times \frac{d}{d \ln M} \operatorname{erfc} \left(\frac{\nu}{\sqrt{2}} \right) \\ &= \frac{\bar{\rho}_m}{M} \times \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{d \ln \sigma^{-1}}{d \ln M} \nu \exp(-\nu^2/2)\end{aligned}$$

- Limites: $M \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{d \bar{n}_h}{d \ln M} \sim \exp(-\nu^2/2) \sim \exp \left[-M^{2(p+3)/3} \right]$
 $M \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{d \bar{n}_h}{d \ln M} \sim M^{-(p+3)/3} \sim M^{-1}$

A FUNÇÃO DE MASSA DOS HALOS: GENERALIZAÇÕES

- ▶ O "colapso esférico" é apenas uma descrição aproximada; a natureza pode escolher muitos caminhos distintos

- ▶ Métodos mais realísticos: $\frac{2}{\pi} \nu \exp(-\nu^2/2) \longrightarrow f(\nu)$

- ▶ Colapso "elisoidal" (Sheth-Tormen):

$$f_{ST} = A \left[1 + (a\nu^2)^{-p} \right] \sqrt{a\nu^2} \exp \left[-a \frac{\nu^2}{2} \right]$$

$PS : a = 1.0, p = 0.0$
 $ST : a = 0.75, p = 0.3$

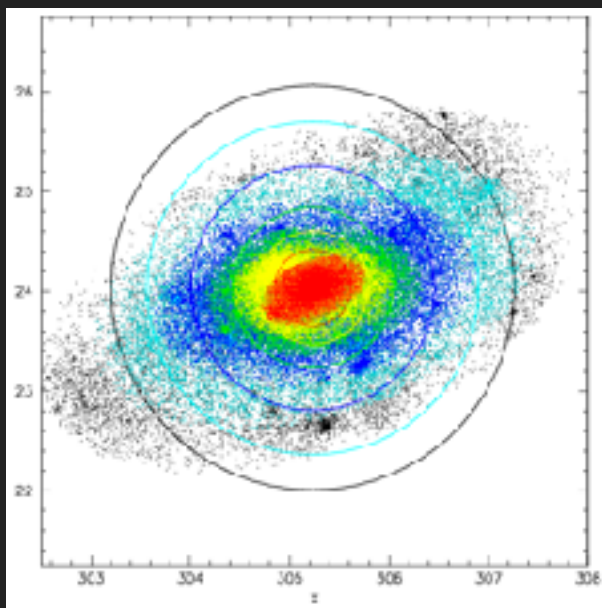
- ▶ Fits de simulações numéricas: e.g., Jenkins et al. 2001

$$f(\sigma) = 0.316 \exp \left[- \left| 0.67 + \ln \sigma^{-1} \right|^{3.82} \right]$$

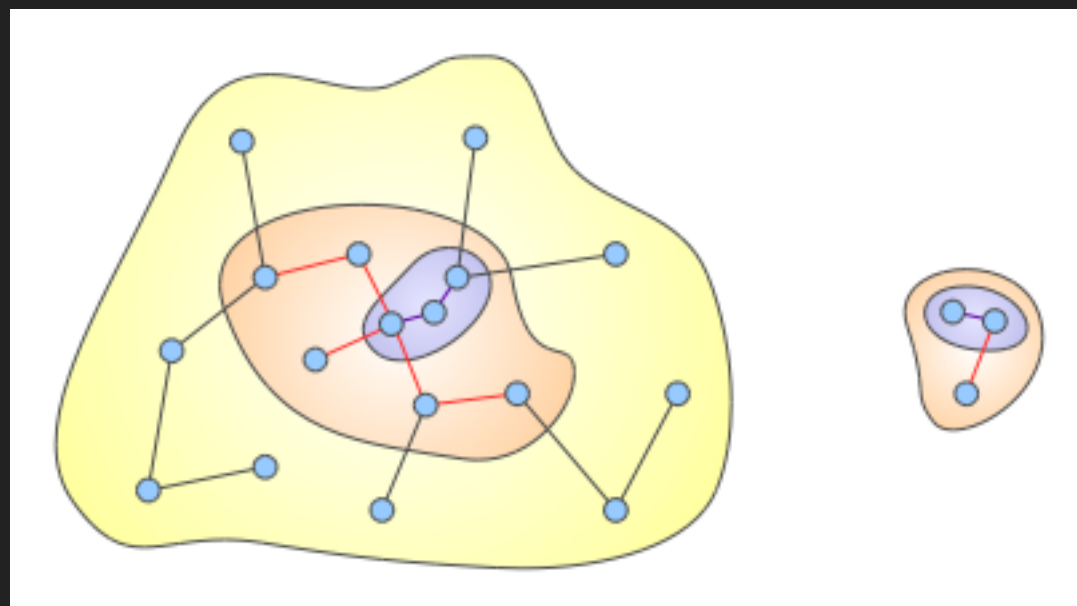
A FUNÇÃO DE MASSA DOS HALOS: FIT DE TINKER ET AL. 2008

- ▶ Muitas simulações de N-corpos; Tinker identificou os halos através da técnica de *Spherical Overdensity*:

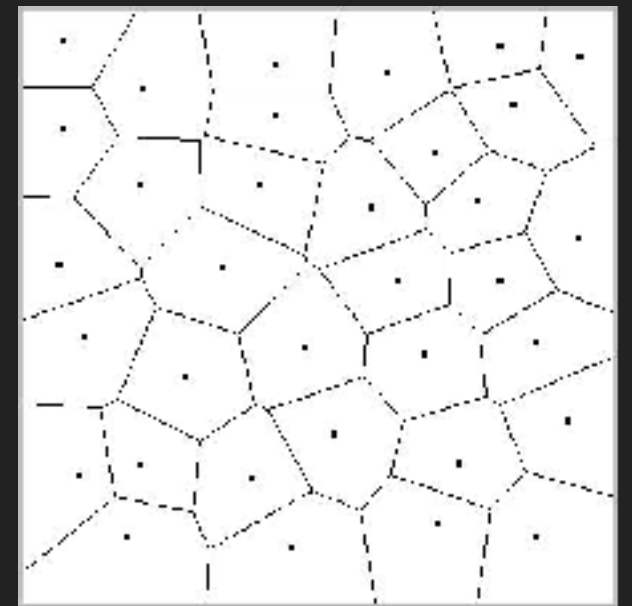
Spherical overdensity



Friends-of-friends



Voronoi tessellation

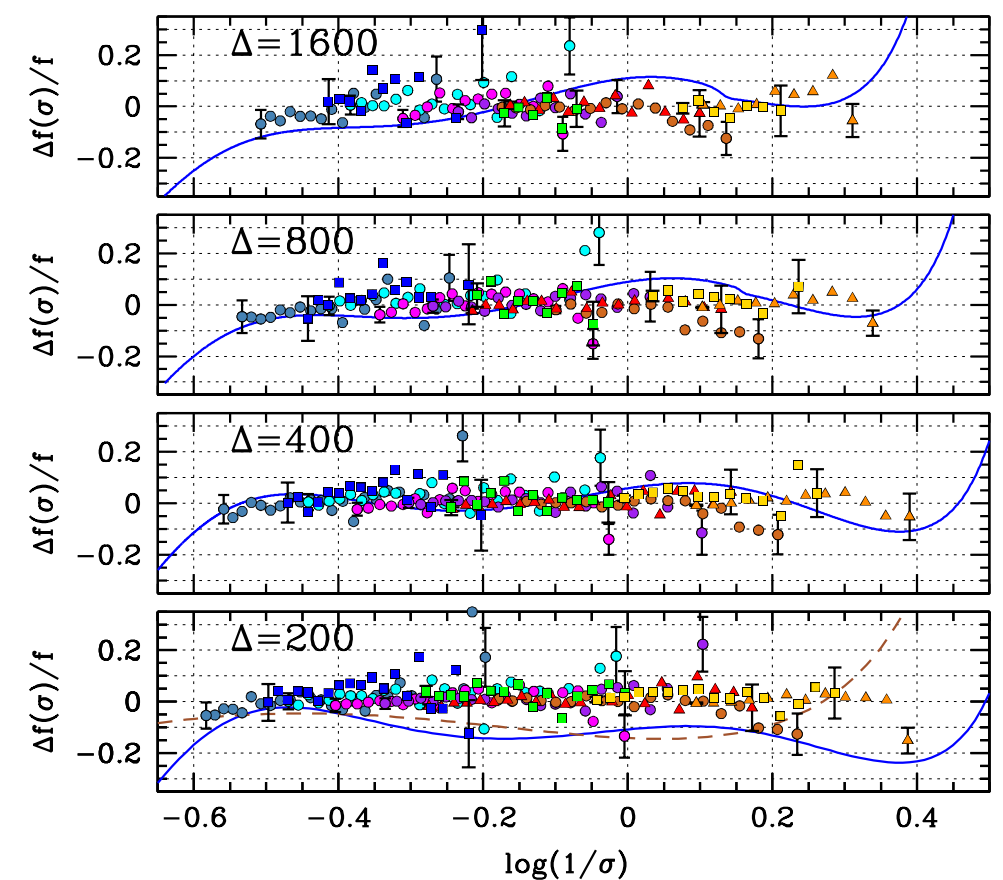
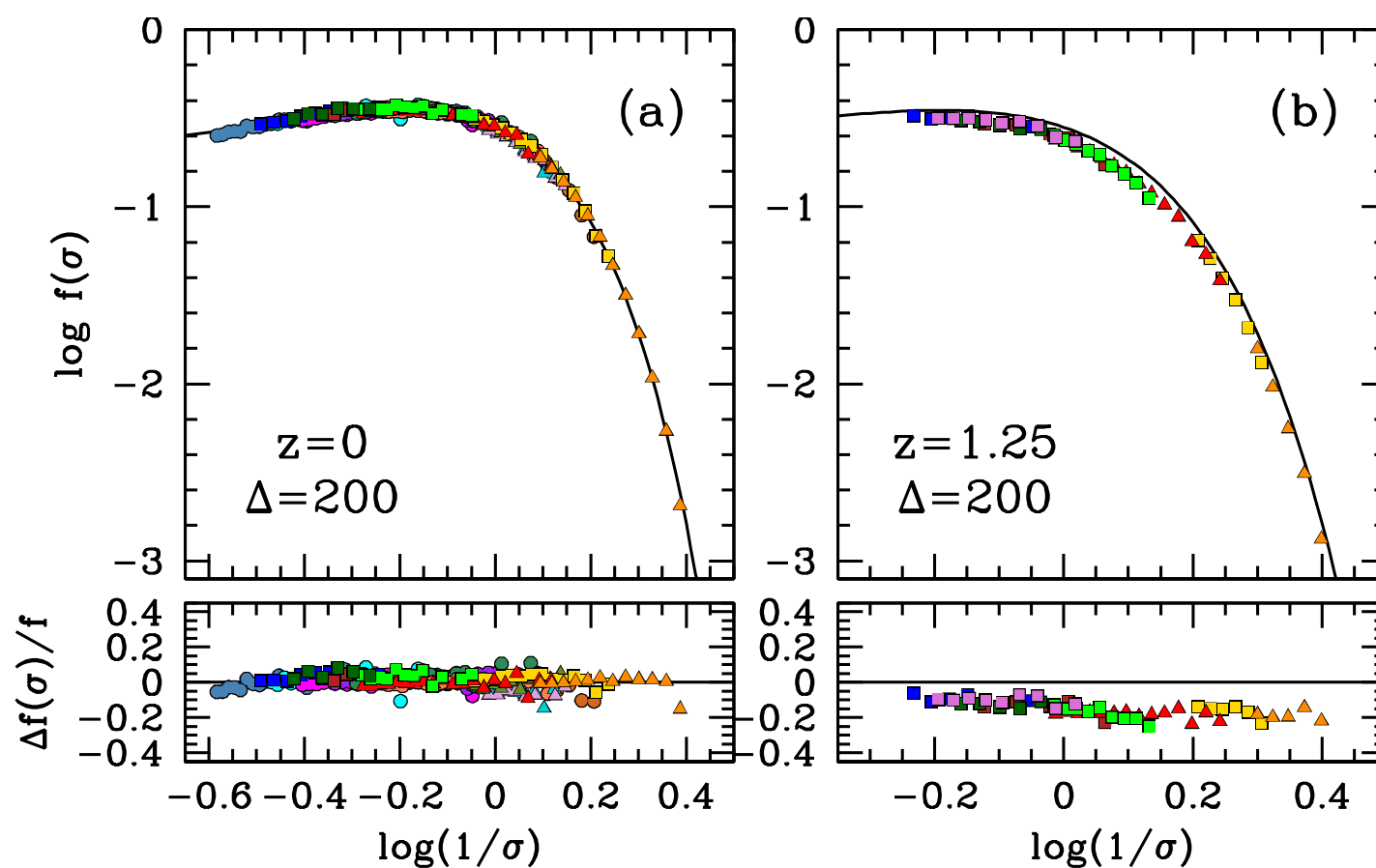


- ▶ Fit de Tinker et al.:

$$f(\sigma) = A \left[1 + \left(\frac{\sigma}{b} \right)^{-a} \right] \exp \left[-\frac{c}{\sigma^2} \right]$$

A FUNÇÃO DE MASSA DOS HALOS: FIT DE TINKER ET AL. 2008

- ▶ Parâmetros dependem do redshift, e do *threshold* Δ :



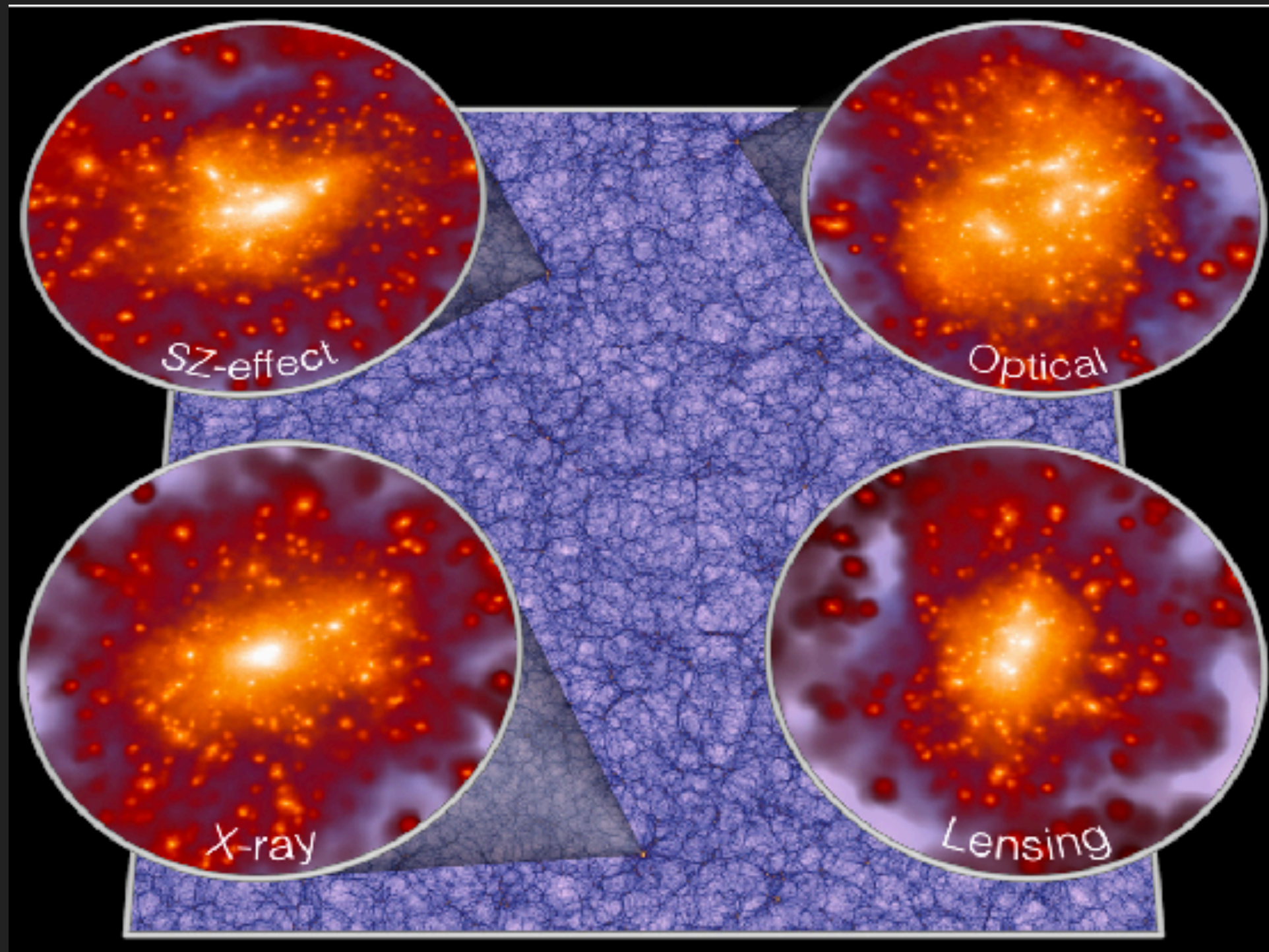
ABUNDÂNCIA DE GRUPOS E AGLOMERADOS DE GALÁXIAS

- ▶ Queremos prever o número de "halos" (i.e., galáxias isoladas, grupos, aglomerados, etc.), como função da massa e do redshift

$$\frac{d \bar{n}(M, z)}{d \ln M} = f(\sigma) \frac{\rho_m}{M} \frac{d \ln \sigma^{-1}}{d \ln M}$$

- ▶ Mas não observamos os "halos" diretamente, e sim galáxias, grupos, aglomerados, etc.

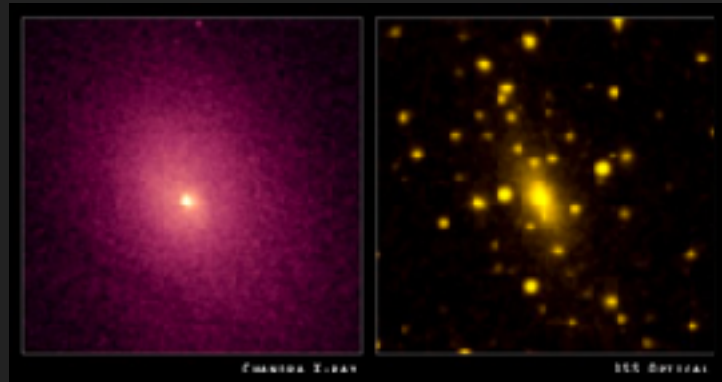
ABUNDÂNCIA DE GRUPOS E AGLOMERADOS DE GALÁXIAS



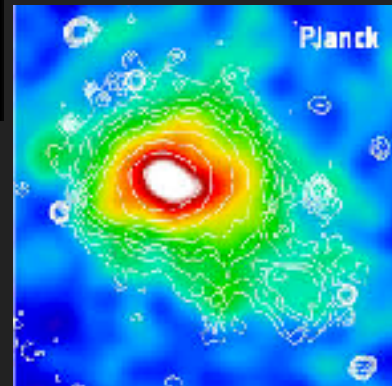
ABUNDÂNCIA DE GRUPOS E AGLOMERADOS DE GALÁXIAS

- Diferentes observáveis levam a diferentes massas:

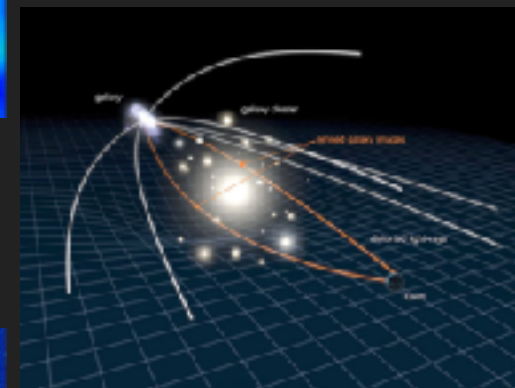
★ Raios-X



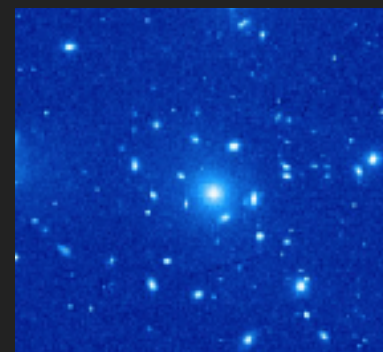
★ Efeito Sunyaev-Zel'dovich



★ Lentes gravitacionais

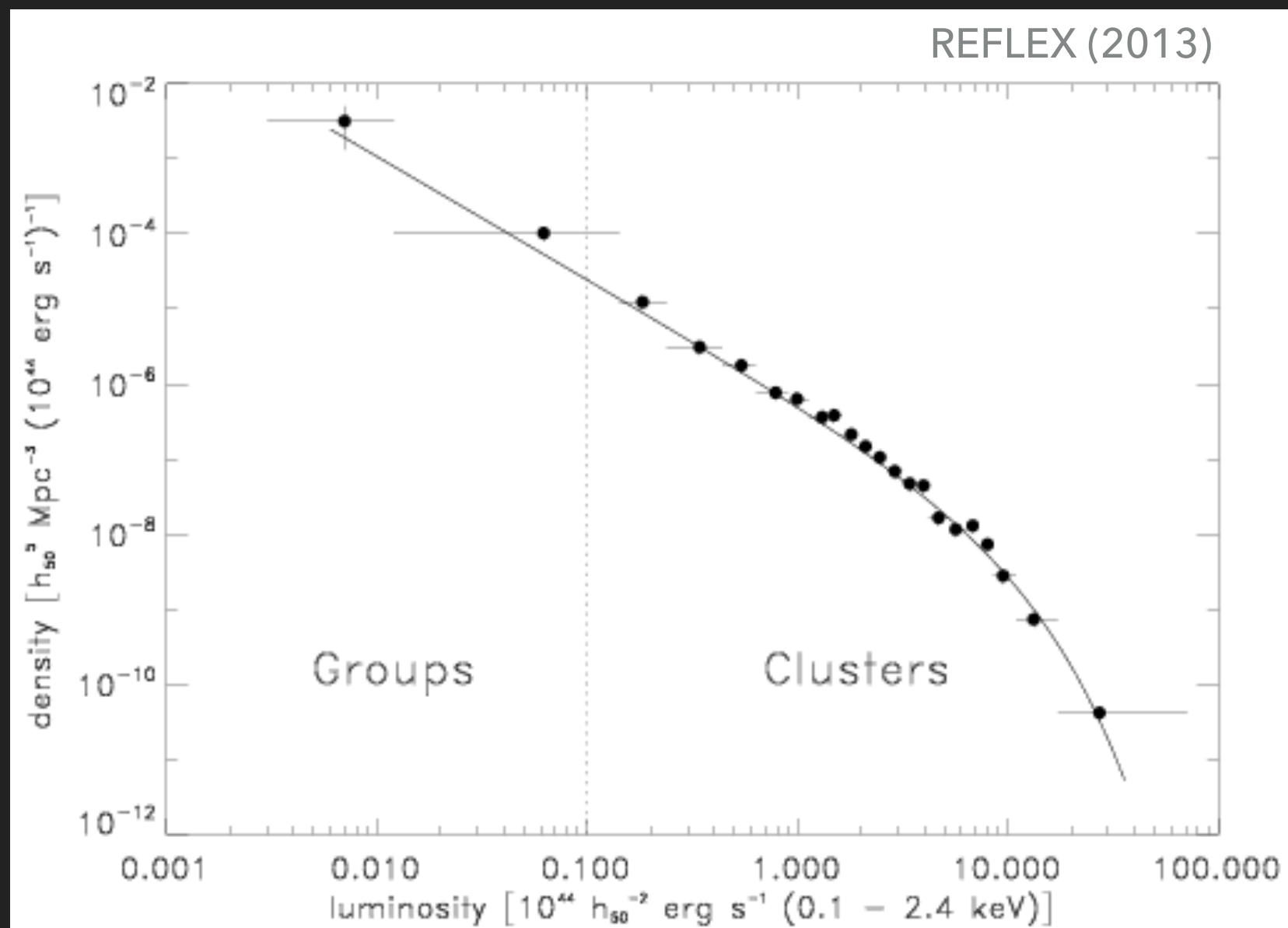
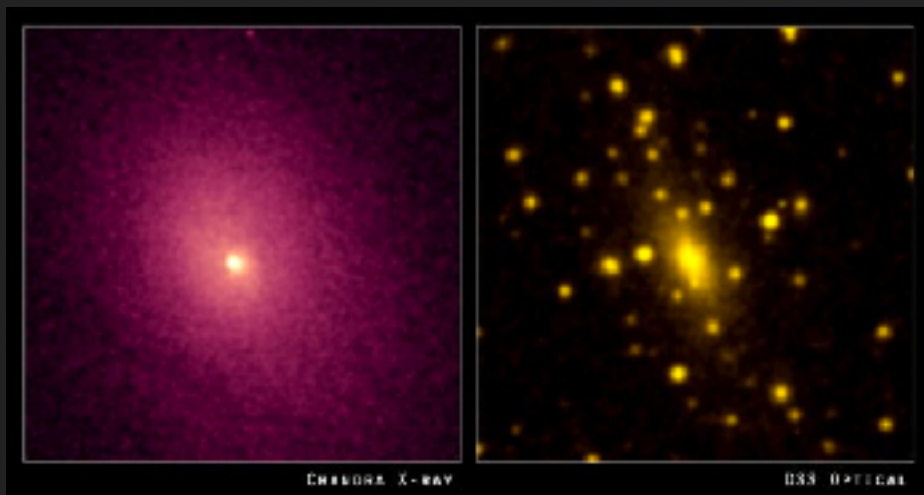


★ Óptico ("richness")



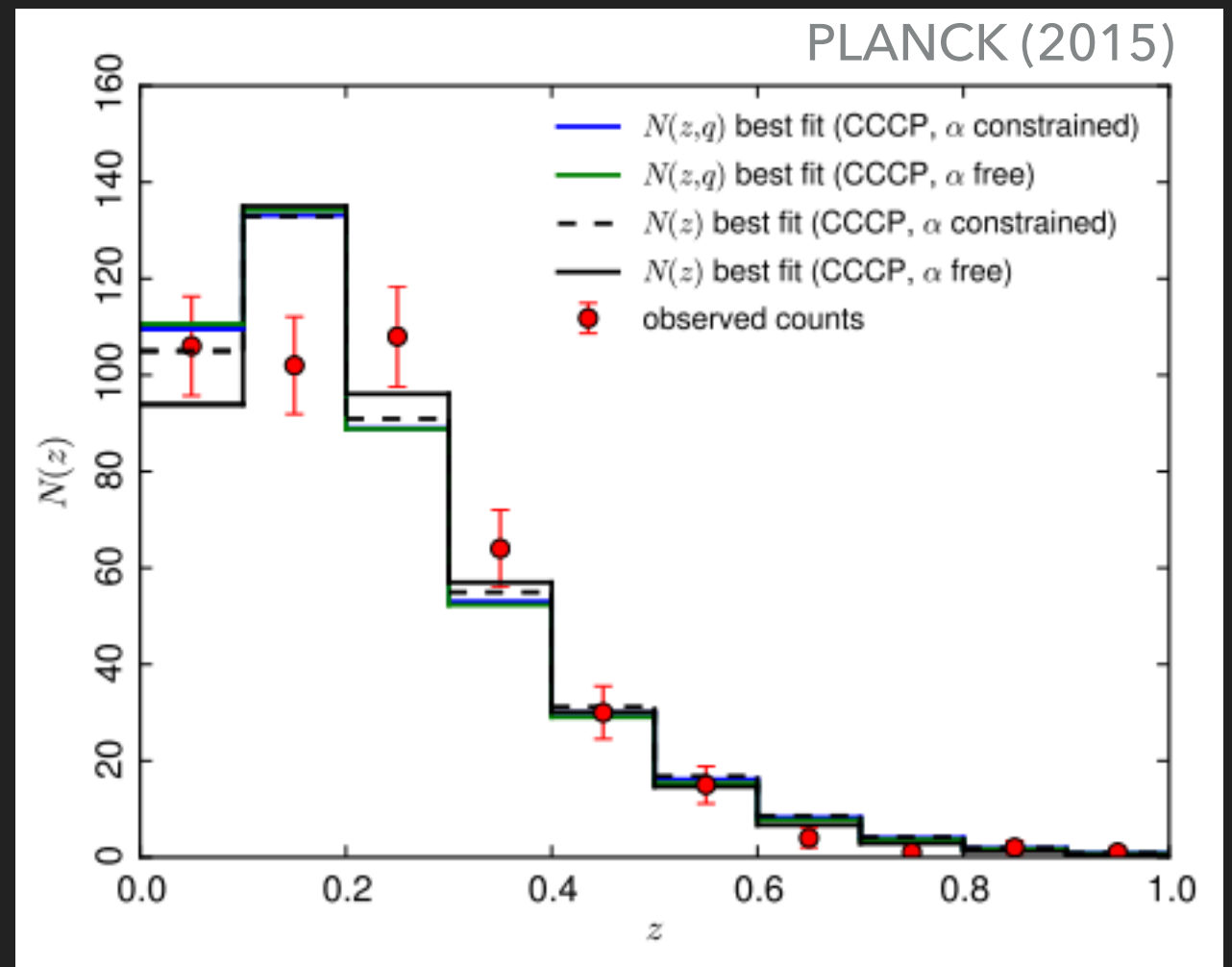
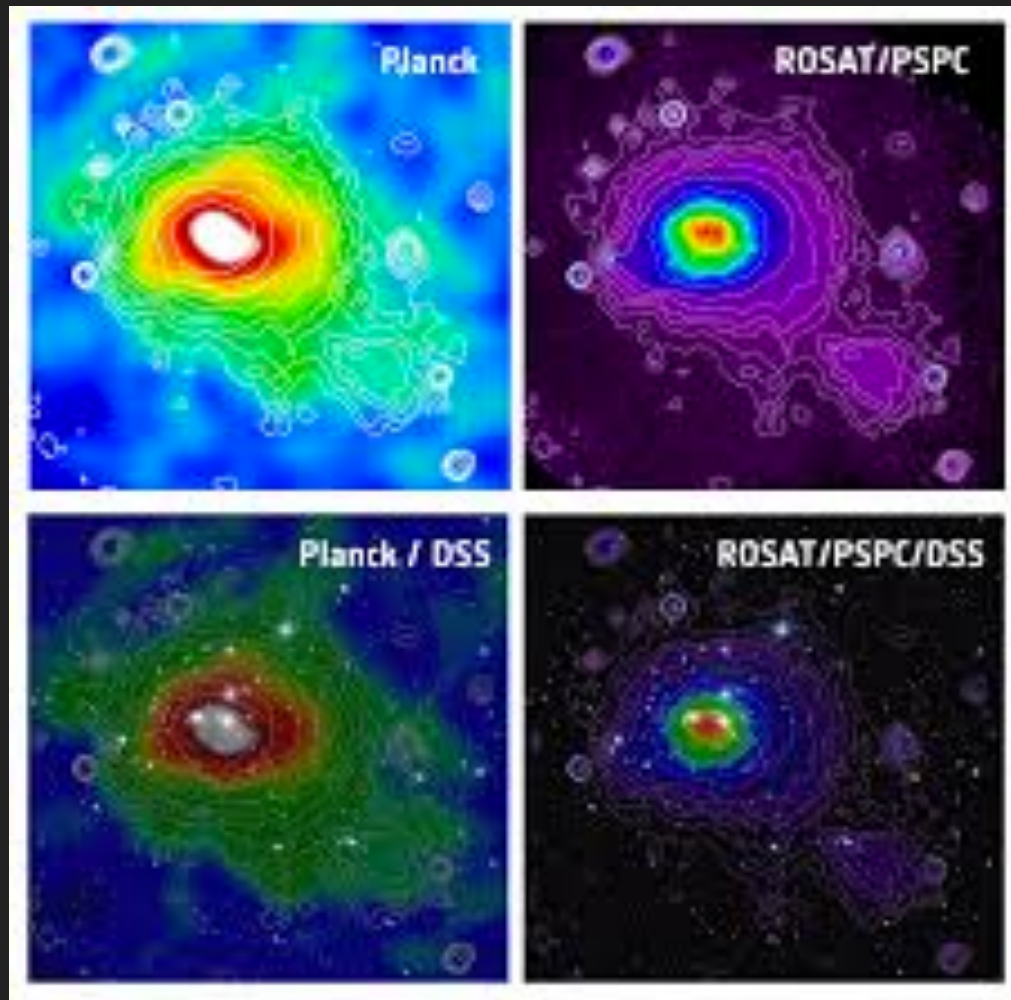
ABUNDÂNCIA DE GRUPOS E AGLOMERADOS DE GALÁXIAS

- Raios-X: equilíbrio hidrostático, $T \sim \frac{GM(r)}{r}$



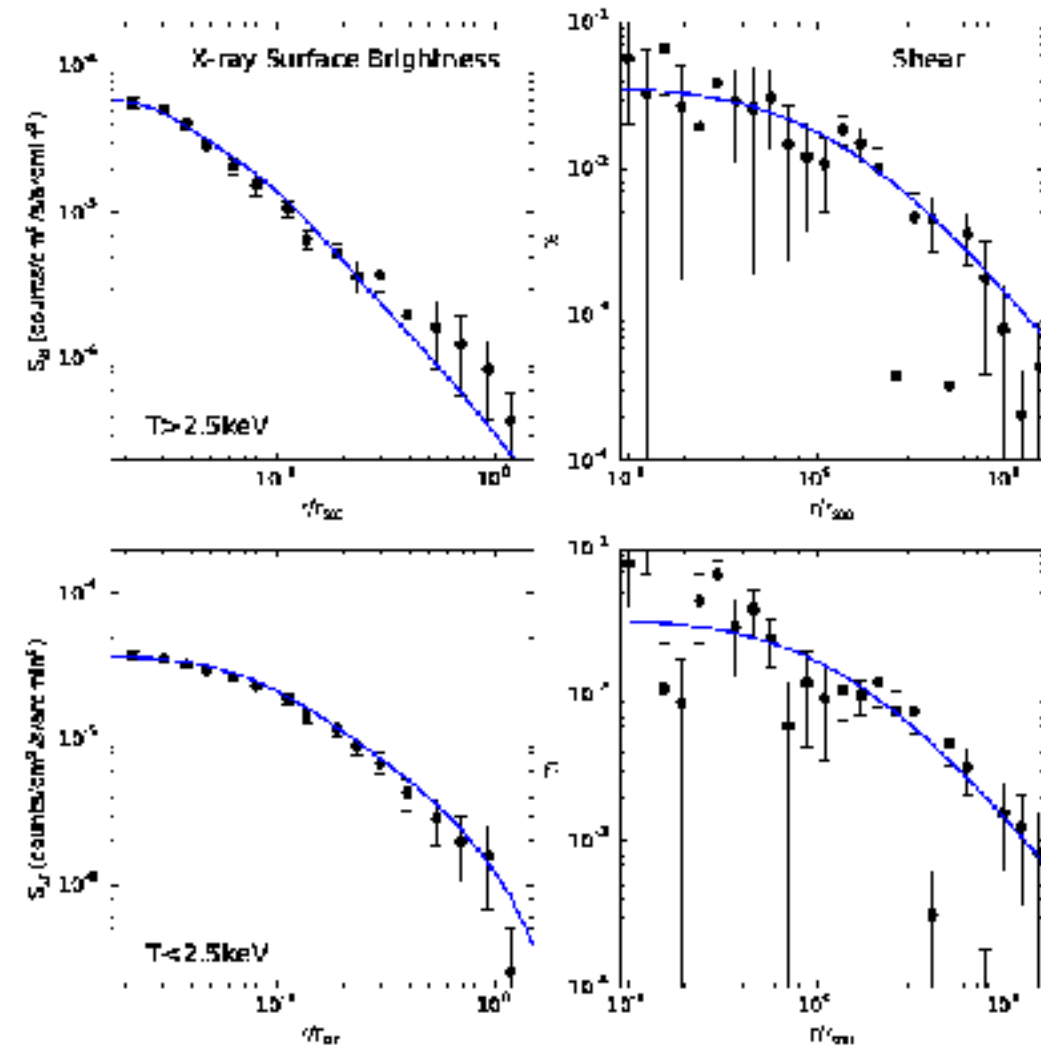
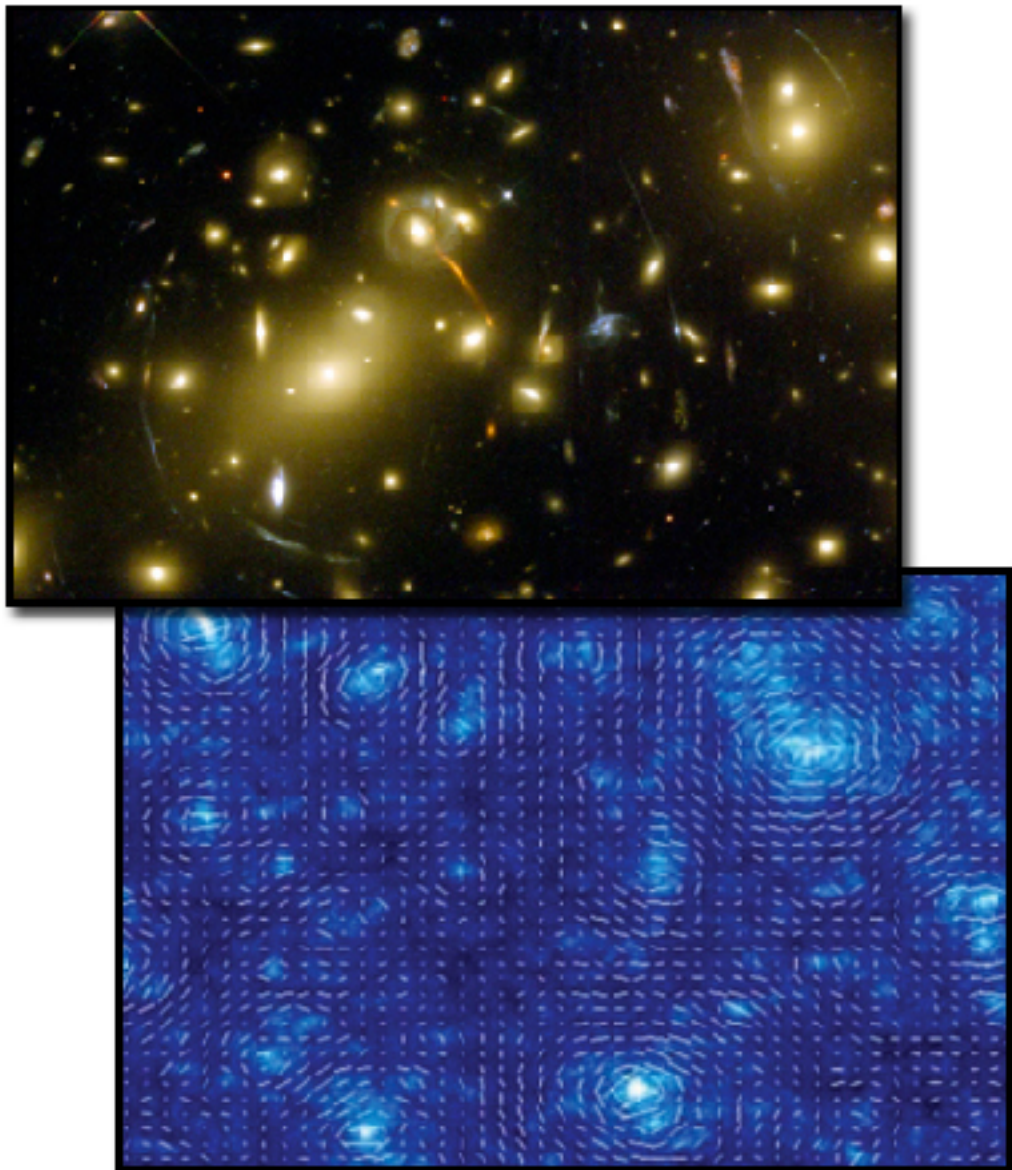
ABUNDÂNCIA DE GRUPOS E AGLOMERADOS DE GALÁXIAS

► Sunyaev-Zeldovich: $\frac{\Delta T(\hat{r}, \nu)}{T} \simeq f_c(\nu) \Delta \tau_T(\hat{r})$



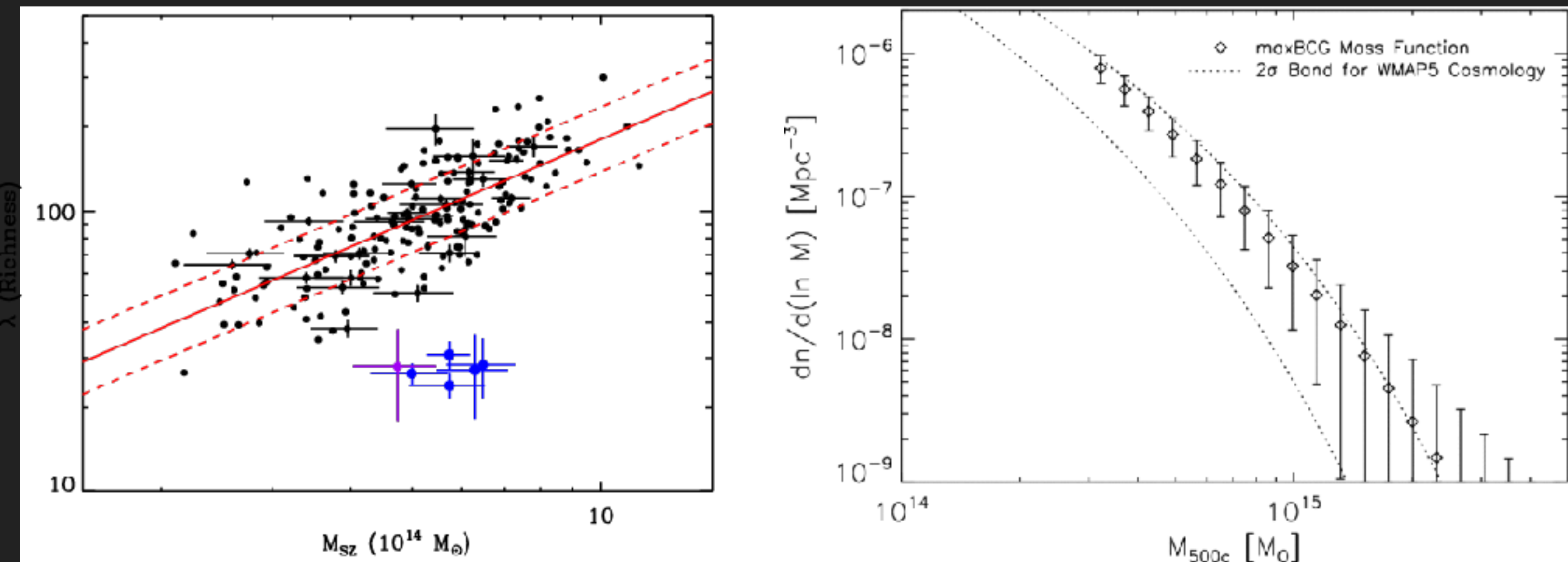
ABUNDÂNCIA DE GRUPOS E AGLOMERADOS DE GALÁXIAS

► Lentes gravitacionais ("shear")



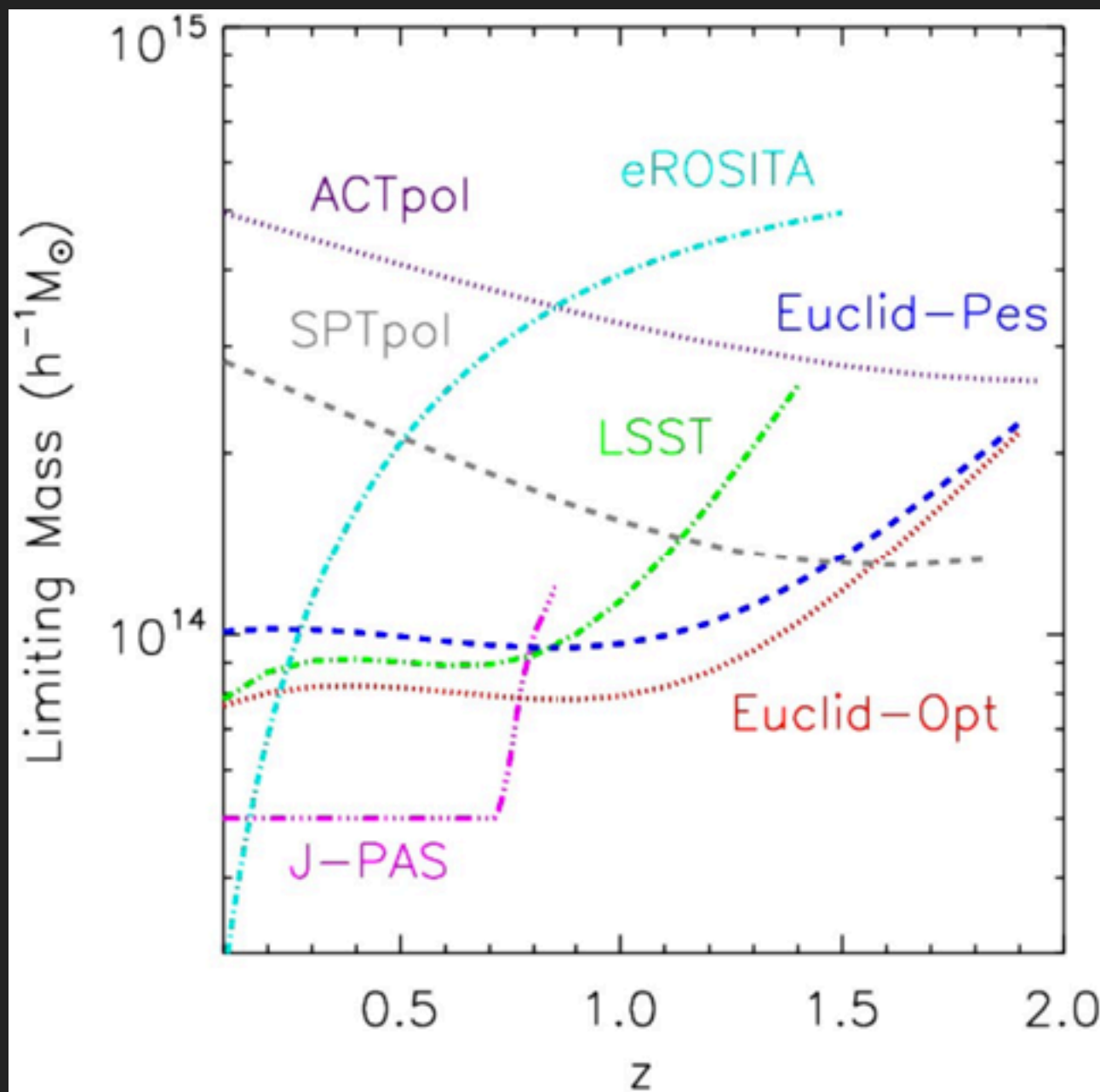
ABUNDÂNCIA DE GRUPOS E AGLOMERADOS DE GALÁXIAS

- Riqueza (contagem de galáxias no óptico)



ABUNDÂNCIA DE GRUPOS E AGLOMERADOS DE GALÁXIAS

- ▶ Comparando diferentes técnicas e experimentos futuros



ACTpol, SPTpol: **SZ**

eROSITA: **raios-X**

Euclid-PES: **lentes**

Euclid-Opt, J-PAS: **óptico**

LSST: **óptico + lentes**

VÍNCULOS SOBRE A COSMOLOGIA DE CONTAGEM DE AGLOMERADOS

- Discordância: calibração das massas...?

