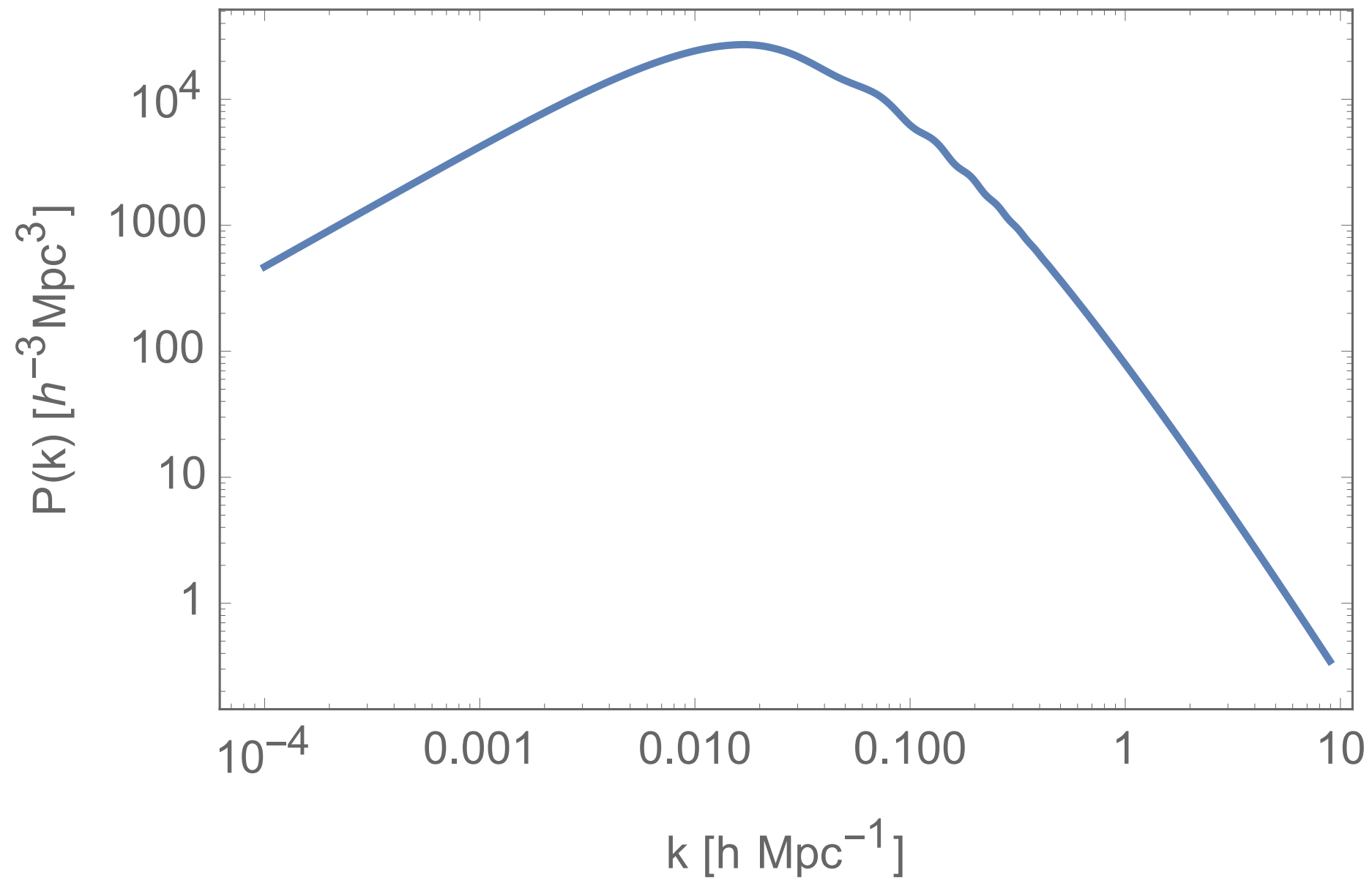


Espectro de potência da matéria

$$\langle \delta(\vec{k}) \delta(\vec{k}') \rangle = (2\pi)^3 \delta_D(\vec{k} + \vec{k}') P(k)$$



Evolução das perturbações de matéria

$$\text{Euler :} \quad \dot{\vec{v}} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} - \vec{\nabla} \Phi$$

$$\text{Continuidade :} \quad \dot{\rho} = -\rho \vec{\nabla} \cdot \vec{v}$$

$$\text{Poisson :} \quad \nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho$$

Aqui estamos utilizando as chamadas “coordenadas Eulerianas”, com distâncias e velocidades “físicas”:

$$\rho = \rho_0(t) + \delta\rho(t, \vec{x})$$

$$p = w\rho_0 + c_s^2 \delta\rho$$

$$\vec{v} = H\vec{x}_0 + \delta\vec{v}$$

Evolução das perturbações de matéria

Poderíamos utilizar coordenadas “do fluido”, ou Lagrangeanas, nas quais as posições de cada elemento do fluido estão fixas, no sentido de que uma dada coordenada é um índice associado a um certo elemento do fluido;



$\vec{x}_i$

Coordenadas comóveis são uma mistura dessas duas coordenadas: por um lado, temos um “fluido” com coordenadas fixas (comóveis); por outro lado, deixamos as partículas se moverem nessas coordenadas (pelas perturbações nos fluidos, ou velocidades peculiares).

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

$$\delta\vec{v}(t) = a(t)\vec{u}(t, \vec{r})$$

Evolução das perturbações de matéria

Em termos de coordenadas comóveis e da “velocidade peculiar” $\vec{u}$, as equações de Euler e da continuidade ficam:

$$\dot{\vec{u}} + 2H\vec{u} = \frac{1}{a}\vec{\nabla}\Phi - \frac{1}{a}\frac{\vec{\nabla}\delta p}{\rho_0}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\frac{\delta\rho}{\rho_0} = \dot{\delta} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{u}$$

Da Eq. de Euler no espaço de Fourier vemos que claramente a velocidade peculiar é proporcional a $\vec{k}$:

$$\dot{\vec{u}}_k + 2H\vec{u}_k = \frac{1}{a}(i\vec{k})\Phi_k - \frac{1}{a}(i\vec{k})\frac{\delta p_k}{\rho_0}$$

Assim, definimos o potencial de velocidade como:

$$\vec{u}_k = \frac{i\vec{k}}{a}k^{-2}\theta_k \qquad -\frac{\vec{\nabla}^2}{a^2}\vec{u}_k = \frac{\vec{\nabla}}{a}\theta_k$$

Evolução das perturbações de matéria

Assim, temos as equações:

$$\dot{\theta} + H\theta = k^2\Phi - k^2\frac{\delta p}{\rho_0}$$

$$\dot{\delta} = -\theta$$

Combinando essas duas equações e usando a Eq. de Poisson, temos:

$$\ddot{\delta} + 2H\dot{\delta} = \delta \left(4\pi G\rho_0 - \frac{k^2 c_s^2}{a^2} \right)$$

Evolução das perturbações de matéria

Num espaço-tempo estático teríamos soluções exponenciais / oscilatórias:

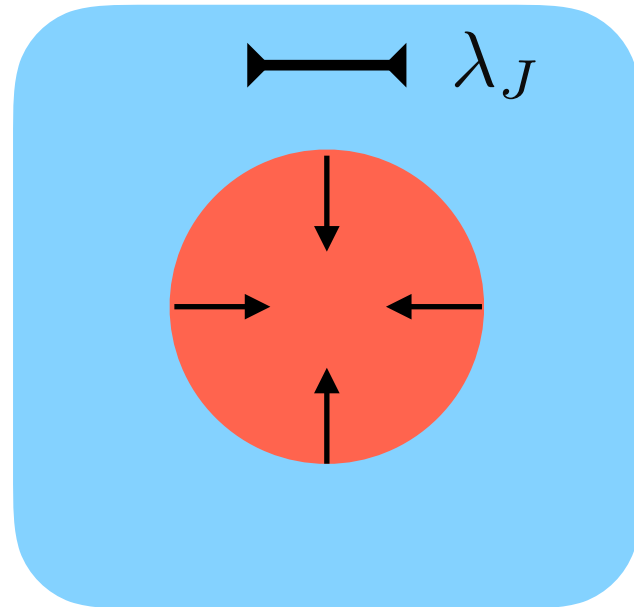
$$\ddot{\delta} = \delta (4\pi G \rho_0 - k^2 c_s^2) \quad \Rightarrow \quad \delta \sim \exp t \left[\sqrt{4\pi G \rho_0 - k^2 c_s^2} \right]$$

Quando o termo dentro da raiz quadrada é positivo, temos soluções que crescem / decaem exponencialmente; se ele é negativo, são soluções oscilatórias.

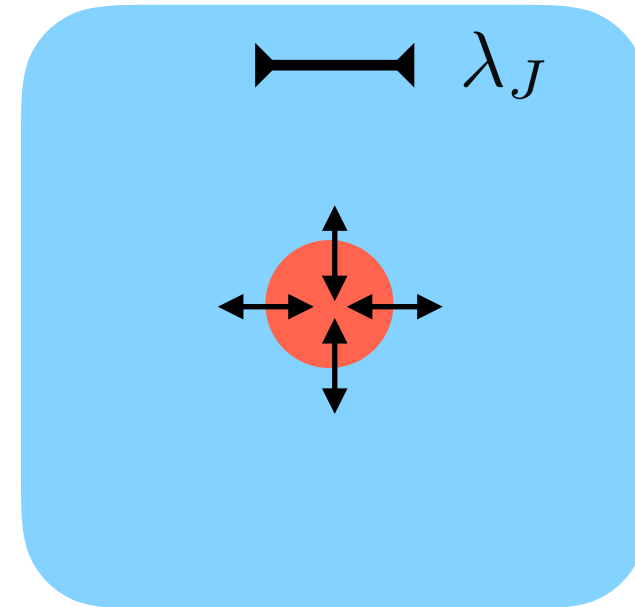
A transição do regime exponencial para o oscilatório se dá no *comprimento de onda de Jeans*:

$$4\pi G \rho_0 = k_J^2 c_s^2 \quad \Leftrightarrow \quad \lambda_J = c_s \sqrt{\frac{\pi}{G \rho_0}}$$

Evolução das perturbações de matéria



Colapso gravitacional
(exponencial)



Suporte de pressão
(oscilatório)

Para perturbações num universo de matéria ($c_s=0$), o comprimento de onda de Jeans é infinito: todas as escalas colapsam sob a força gravitacional.

Esse colapso seria exponencial num universo quase-homogêneo e estático; num universo quase-homogêneo em expansão, o colapso é uma lei de potência no tempo.

Evolução das perturbações de matéria

Perturbações de matéria num universo com matéria: $\delta \sim t^{2/3} \sim a$

Note que, pela Eq. de Poisson: $\frac{k^2}{a^2} \Phi = -4\pi G \delta \rho$

Portanto, os potenciais permanecem aprox. constantes:

$$\Phi \sim a^2 \rho_0 \delta \sim a^2 a^{-1} a \sim \text{const.}$$

Evolução das perturbações de matéria

Perturbações de matéria num universo com matéria e radiação:

$$\ddot{\delta}_m + 2H\dot{\delta}_m = 4\pi G\rho_m\delta_m$$

Mas note que nesse caso a Eq. de Friedmann é:

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}(\rho_m + \rho_r) = \frac{8\pi G}{3}\rho_r \left(\frac{a}{a_{Eq}} + 1 \right)$$

Escrevendo a equação em termos de $y=a/a_{Eq}$, encontramos uma solução:

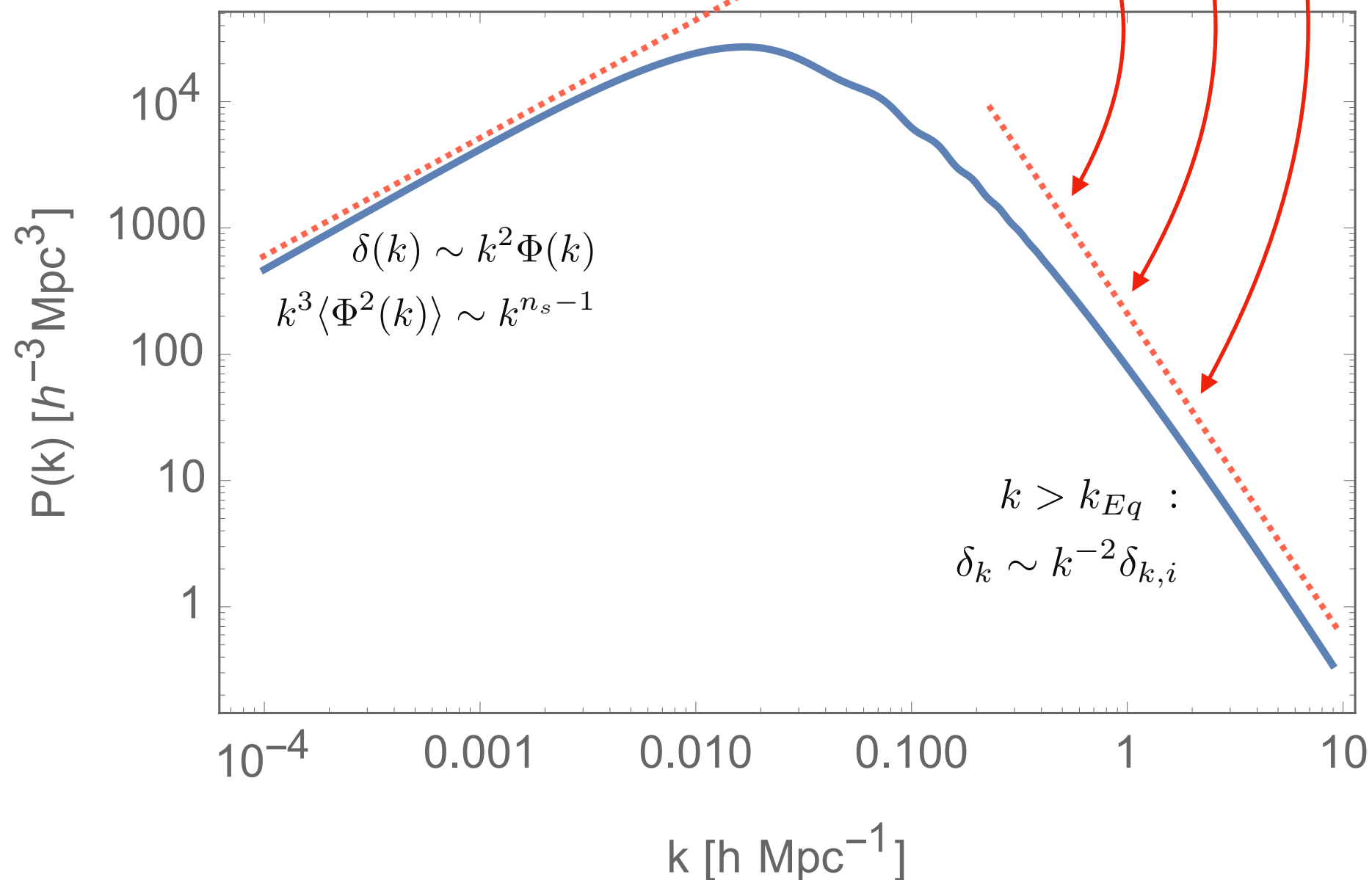
$$\delta = c_1 \left(\frac{a}{a_{Eq}} + \frac{2}{3} \right) + c_2 \ln \frac{a}{a_{Eq}}$$

Esse é o *efeito Meszaros*: durante a era da radiação as perturbações de matéria permanecem praticamente constantes; somente quando $a > a_{Eq}$ elas começam a crescer — mas aí já é a era da matéria!

Espectro de potência da matéria

Já vimos que:

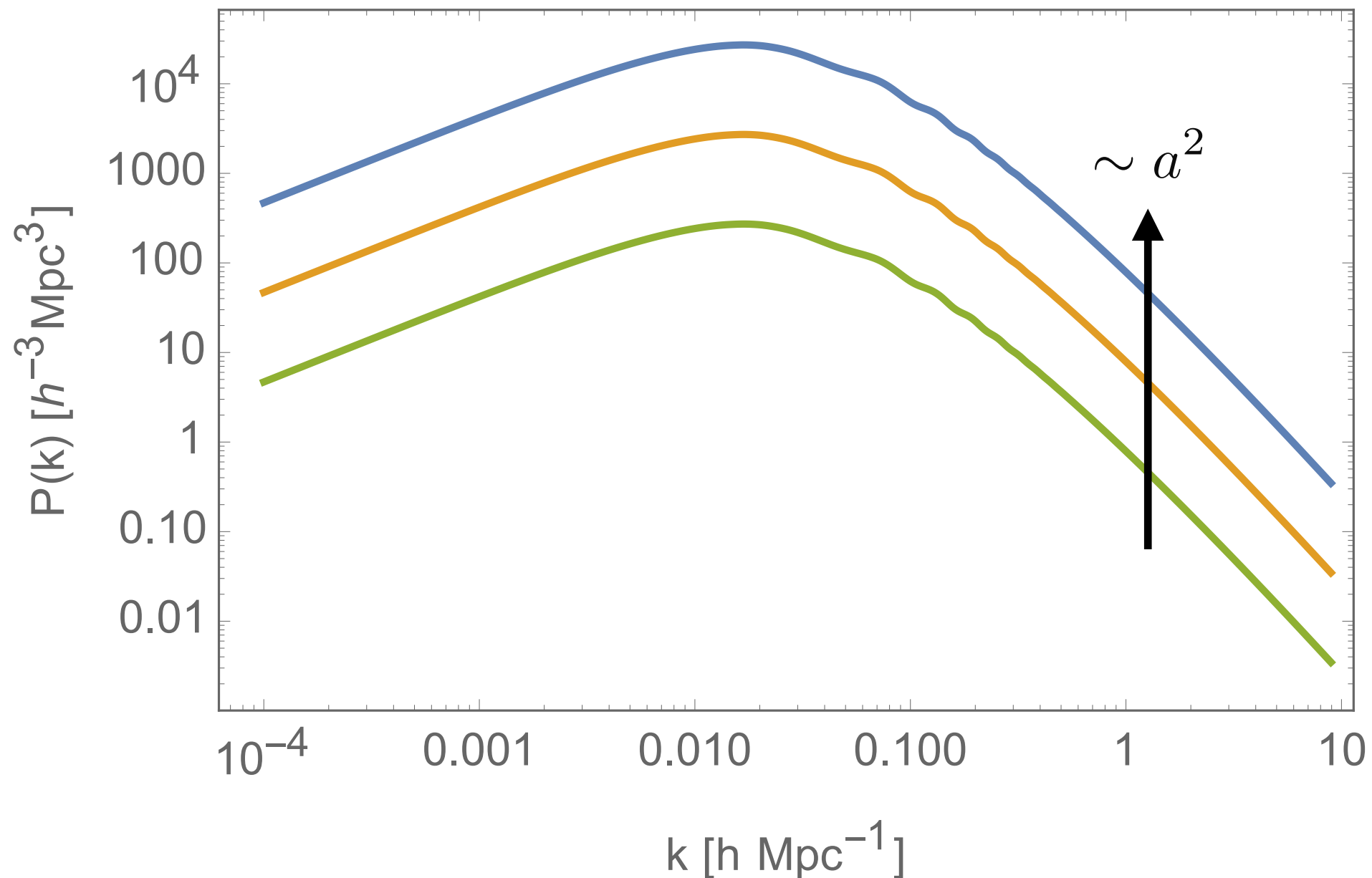
(a) durante a era da radiação as perturbações em pequenas escalas decaem devido à difusão das espécies relativísticas.



Espectro de potência da matéria

Já vimos que:

- (a) durante a era da radiação as perturbações em pequenas escalas decaem devido à difusão das espécies relativísticas.
- (b) na era da matéria o contraste de densidade cresce como o fator de escala.



BAOs

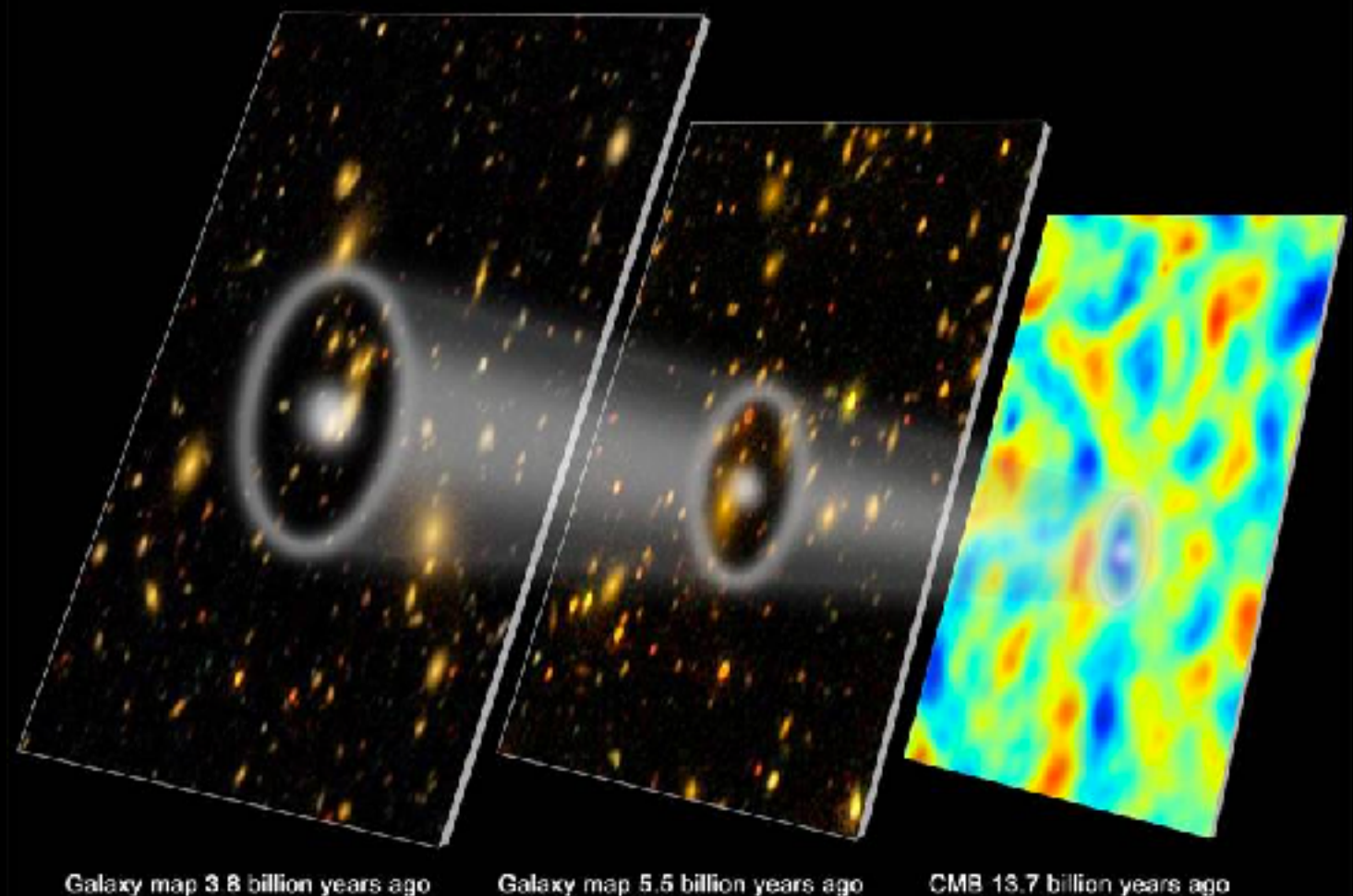
Oscilações acústicas de barions (BAOs)

Até ~300.000 anos depois do Big Bang, o fluido de fótons e barions era movido pela **gravitação** e pela **pressão** da radiação, o que causava a formação e propagação de **ondas acústicas** nesse fluido – ondas que **ficaram impressas** na radiação e na matéria

A distribuição de galáxias guarda a memória dessas ondas, na forma das **oscilações acústicas de barions (BAOs)**

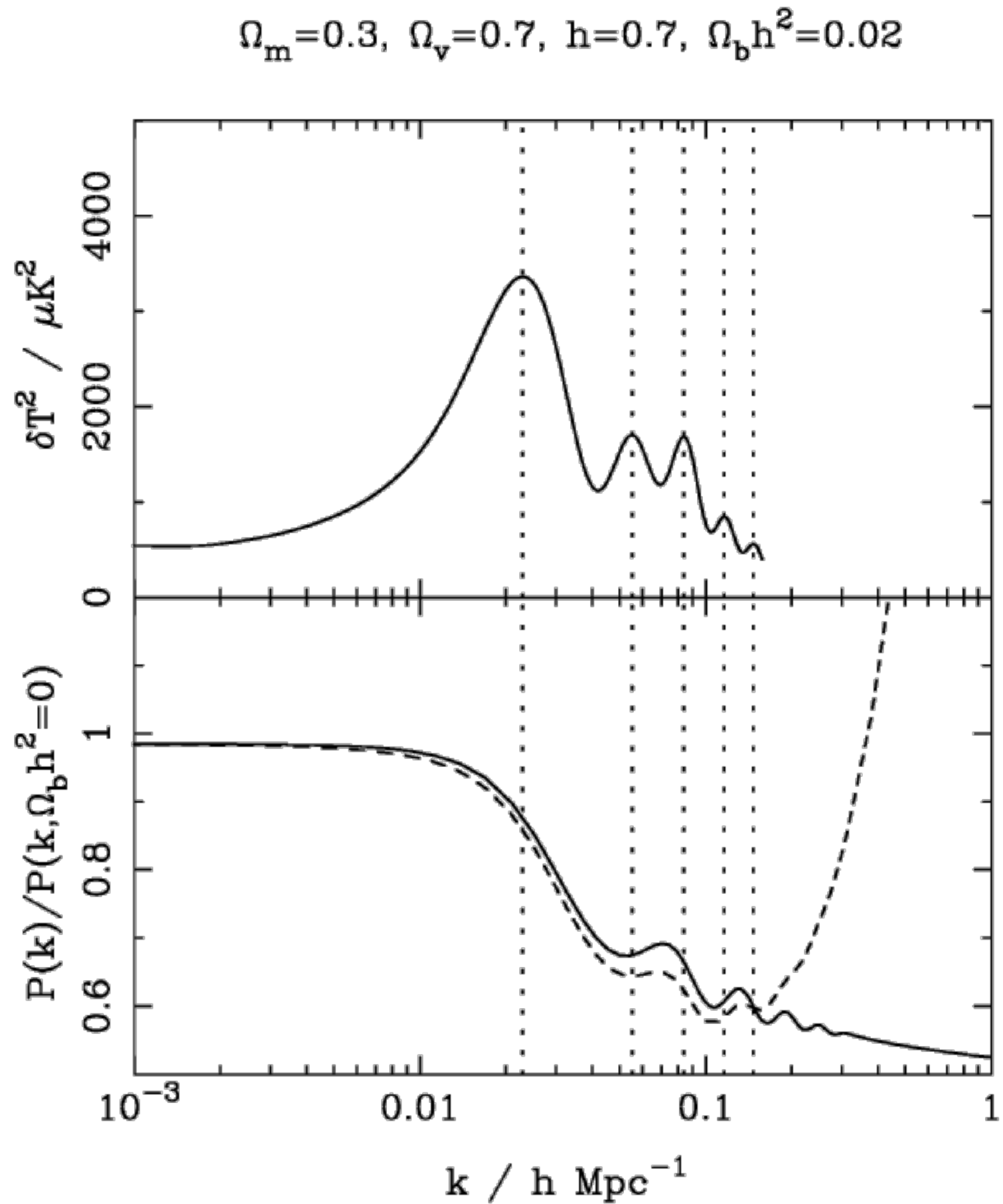
As BAOs têm uma escala característica de comprimento (o **horizonte sonoro** na época da recombinação) – hoje, ela é aproximadamente:

$$L_{\text{BAO}} \sim 147 \text{ Mpc}$$



BAOs

Em detalhe:



BAOs

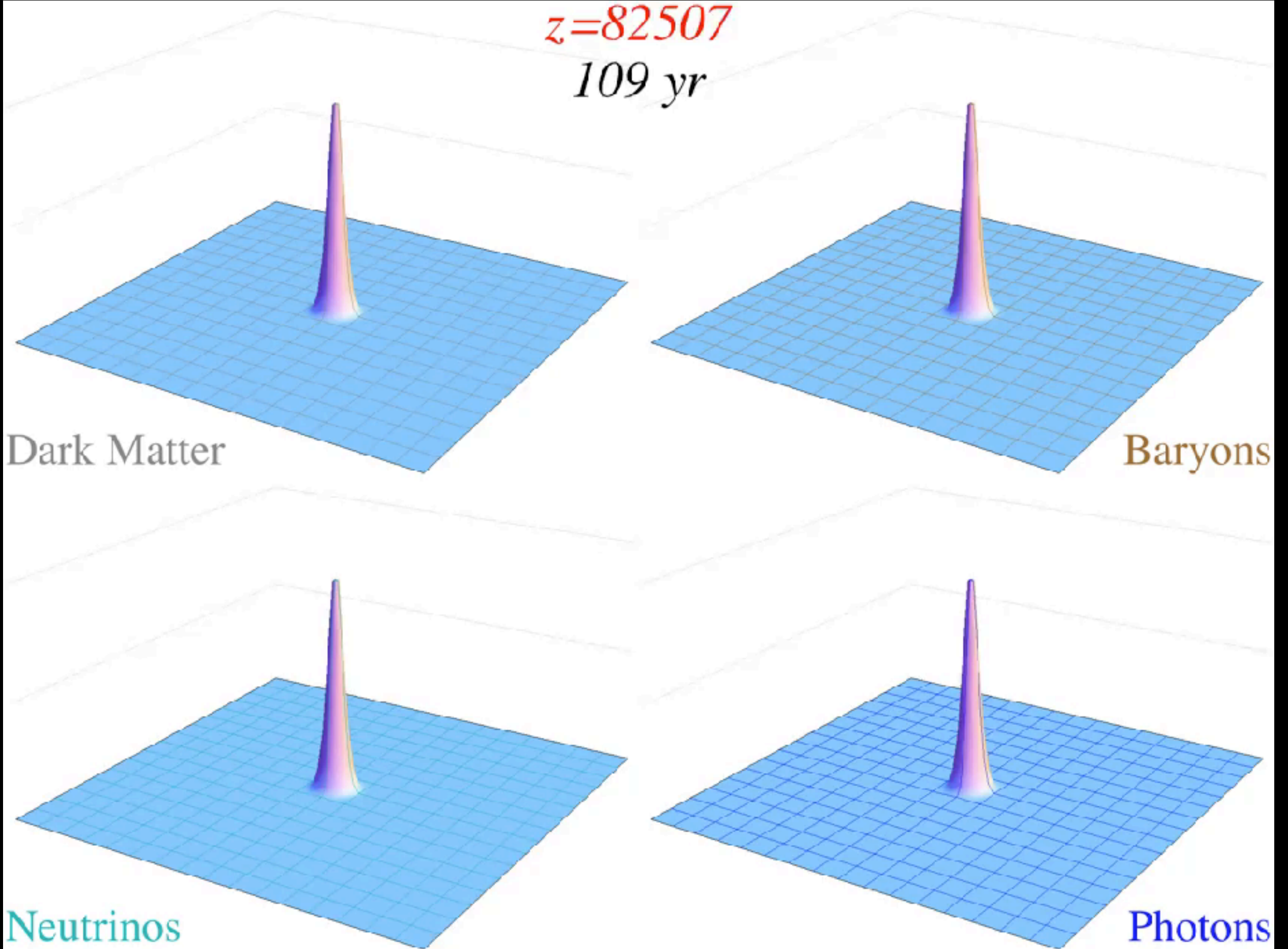
$z=82507$
109 yr

Dark Matter

Baryons

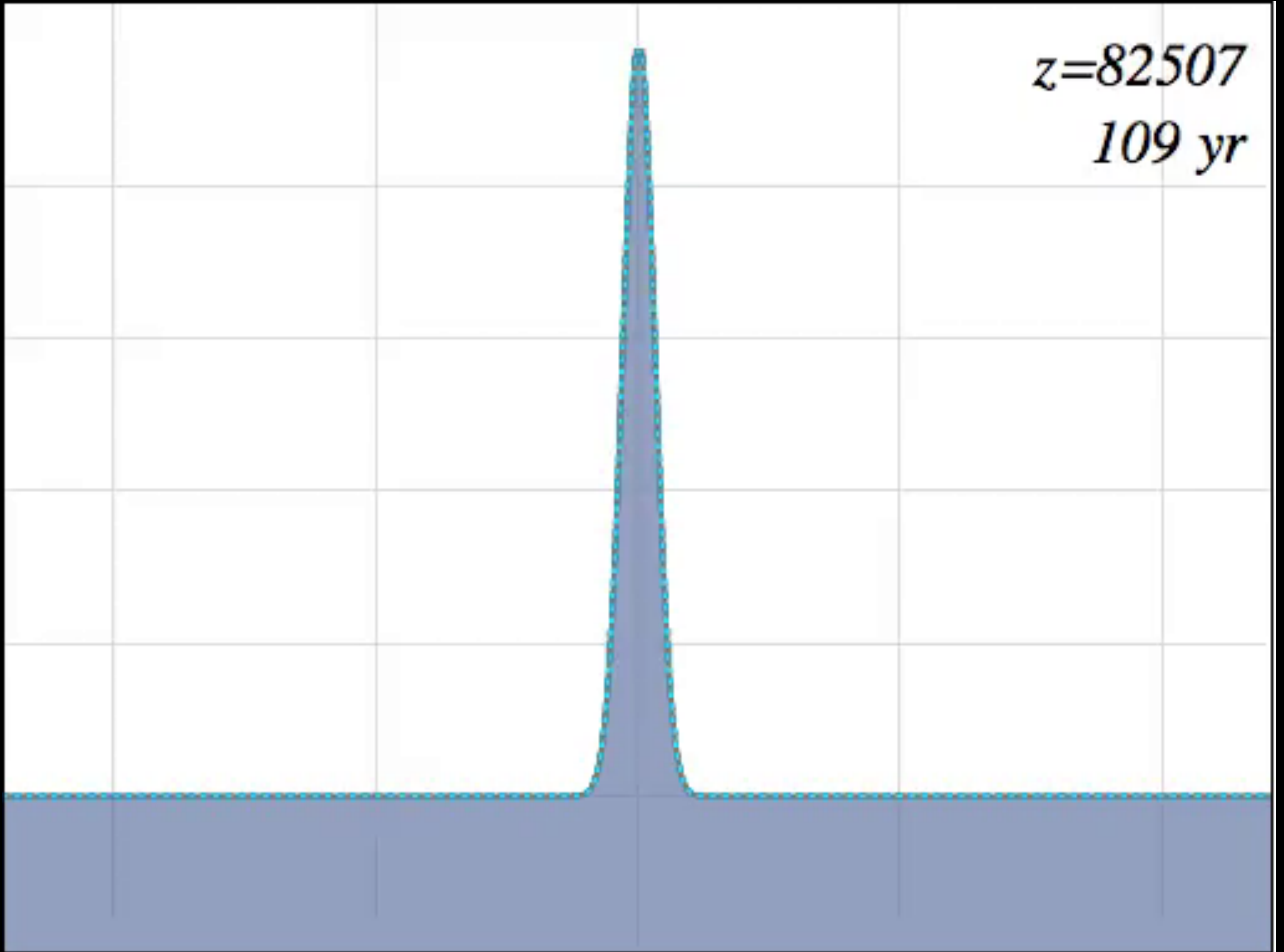
Neutrinos

Photons

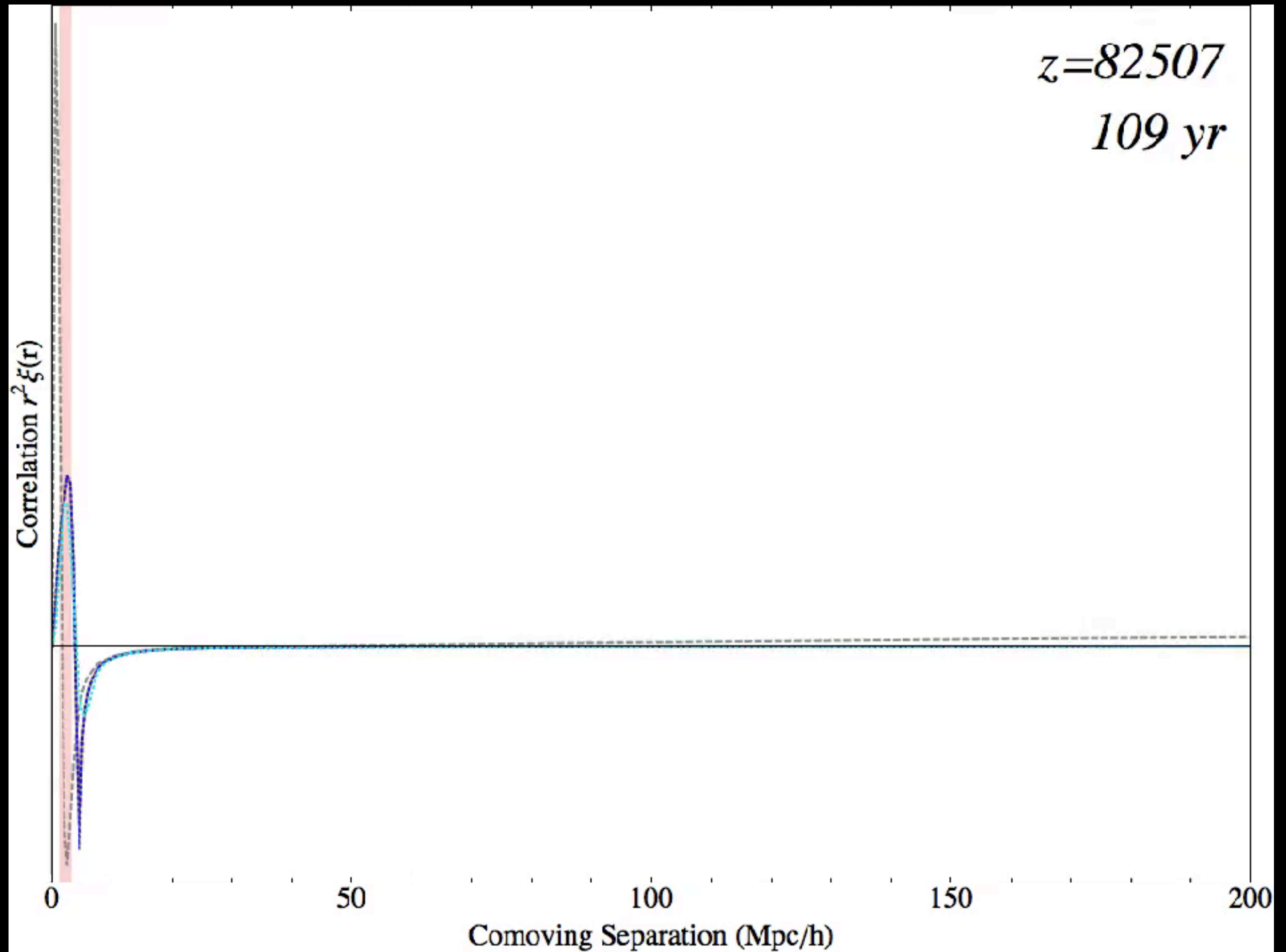


BAOs

$z=82507$
109 yr

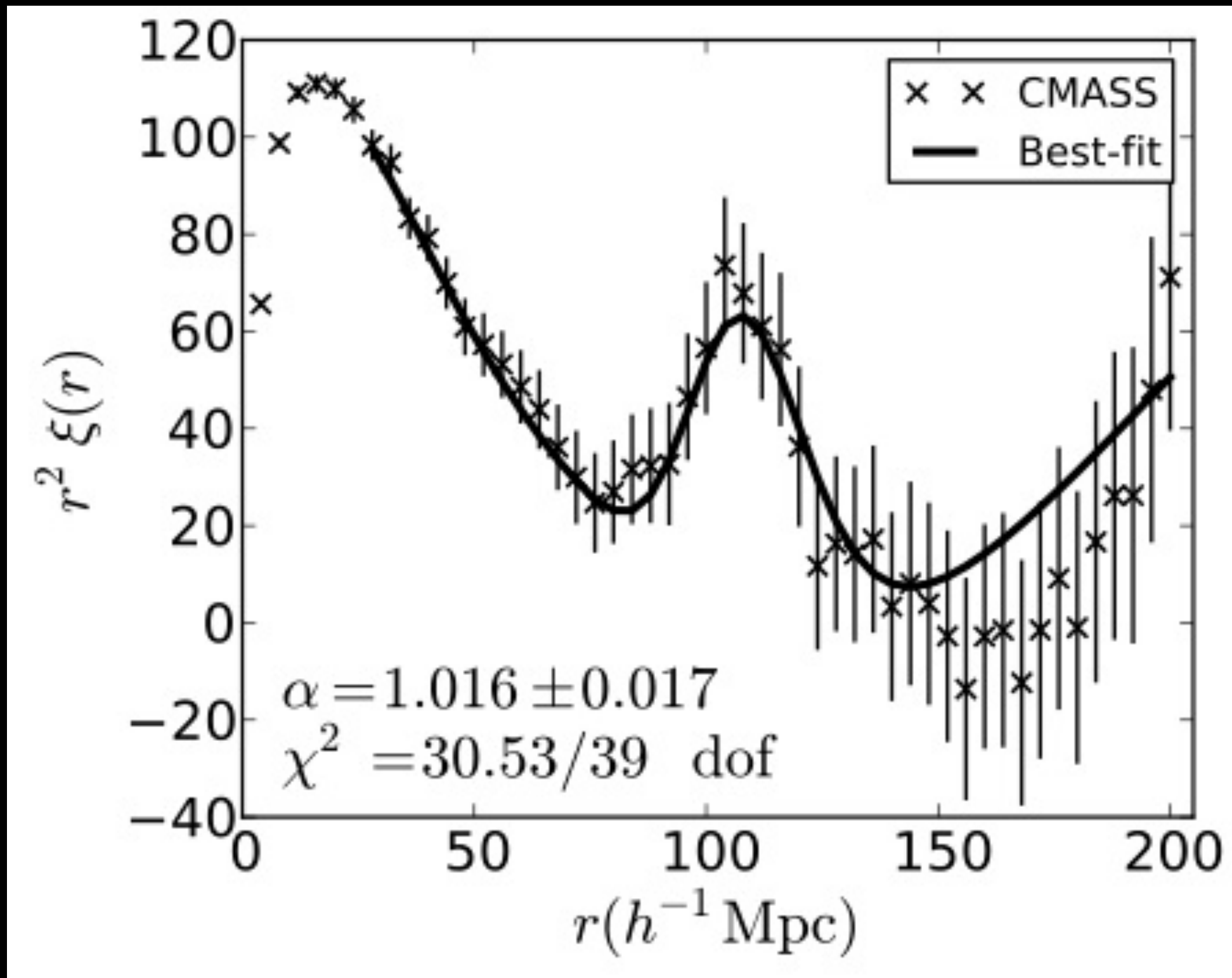


BAOs



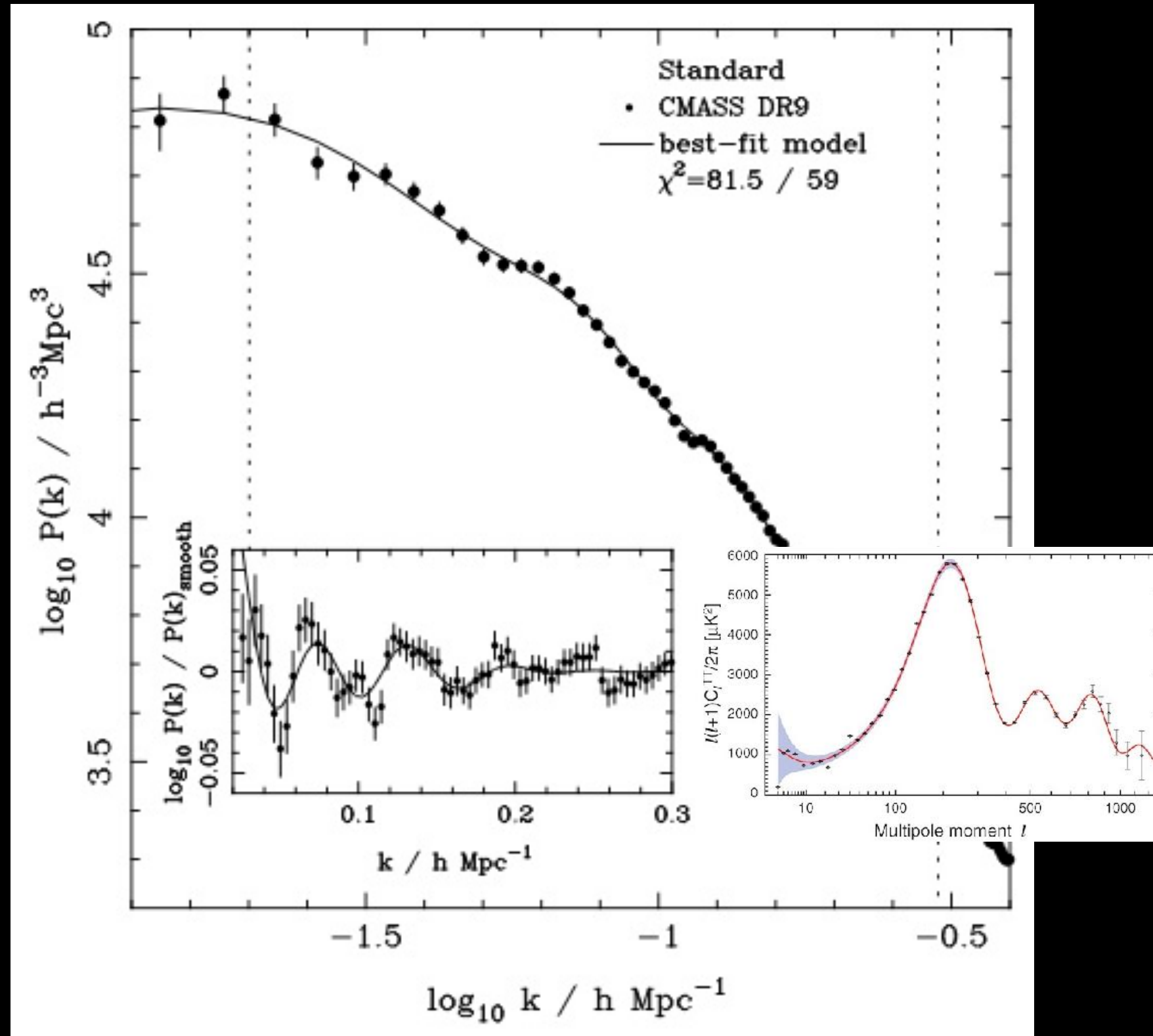
BAOs

Função de correlação de galáxias medida pelo BOSS

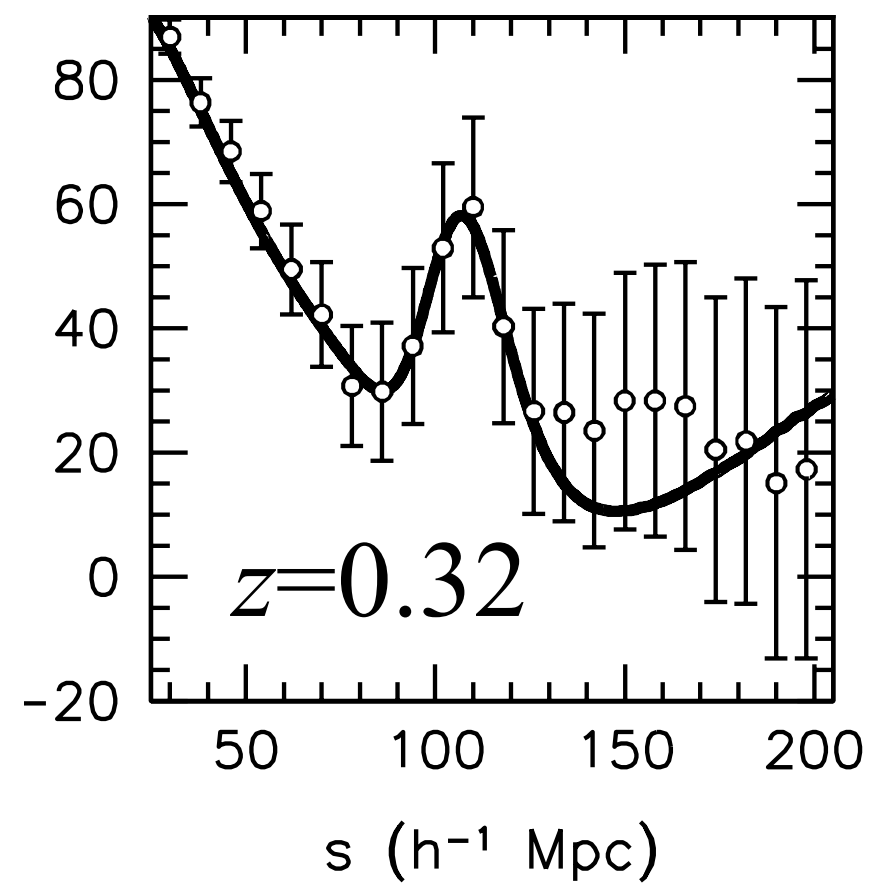
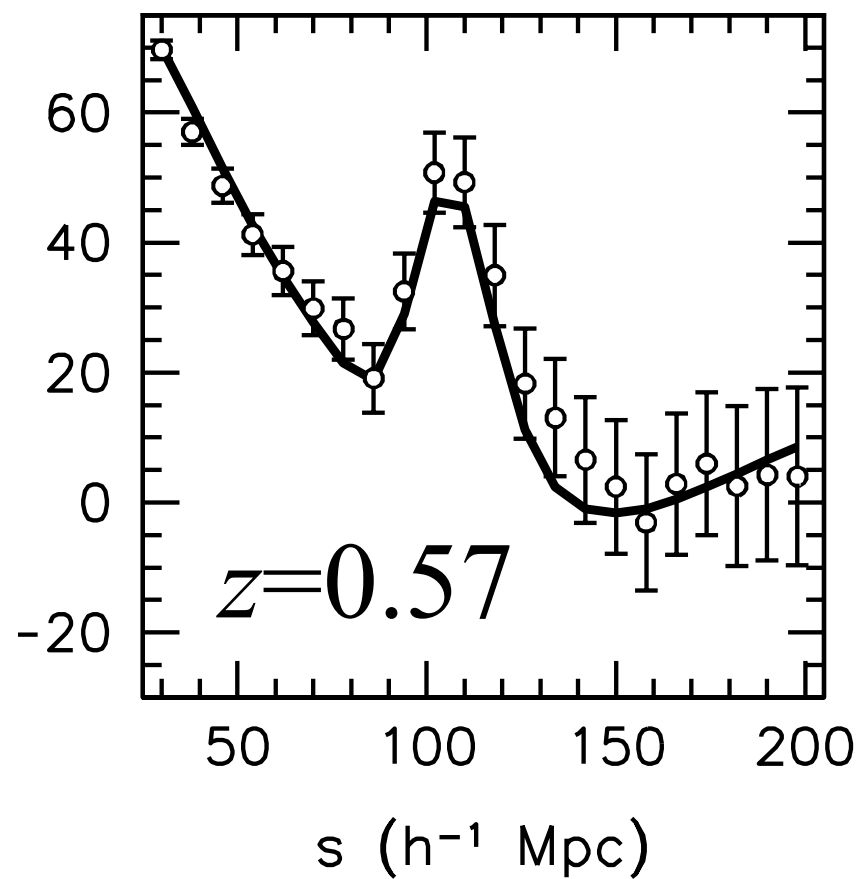
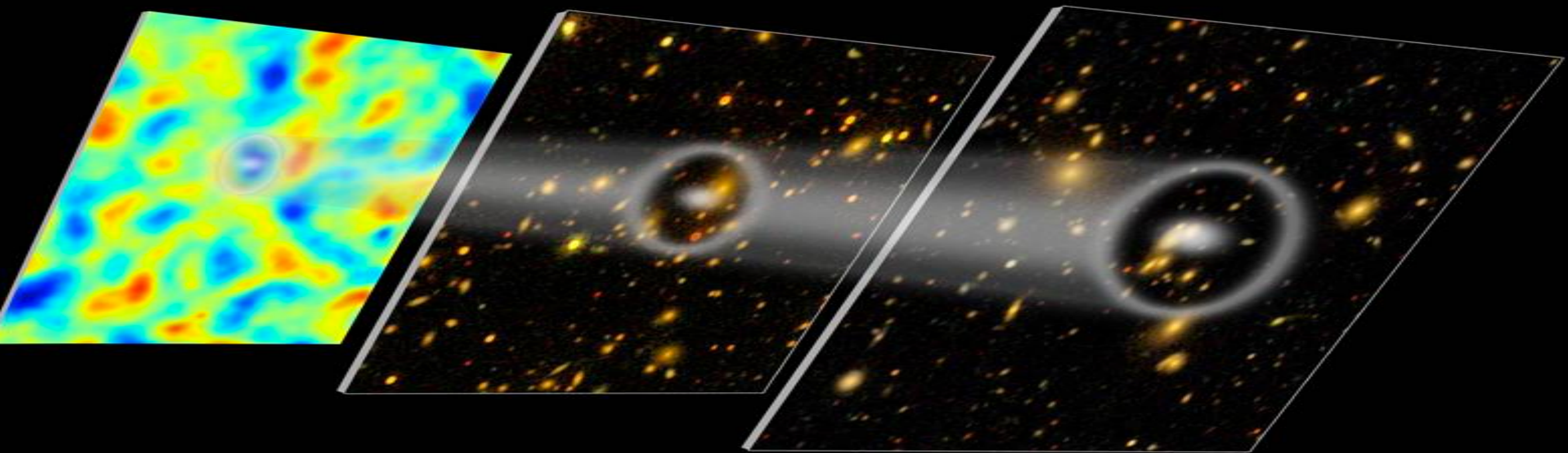


BAOs

Espectro de potência das galáxias medida pelo BOSS



BAOs

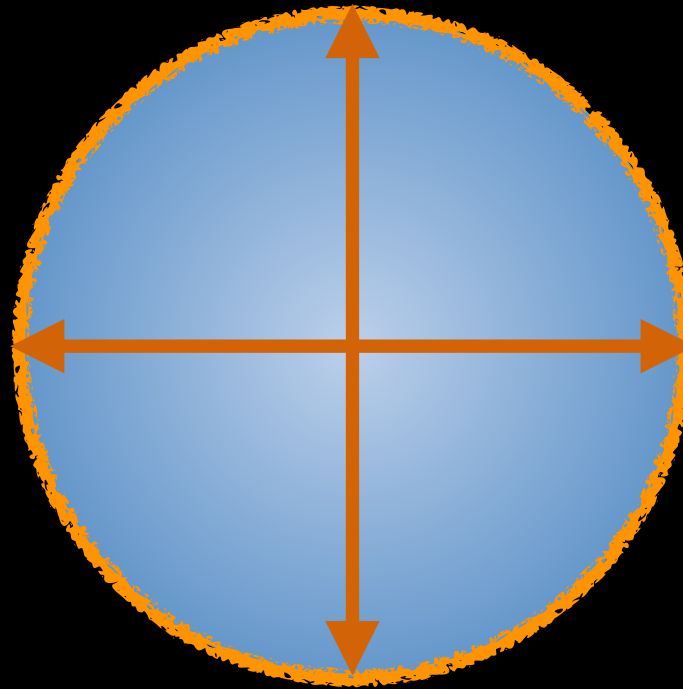


Anderson et al. (2014); Tojeiro et al. (2014)

BAOs

BAOs: distâncias radiais e angulares

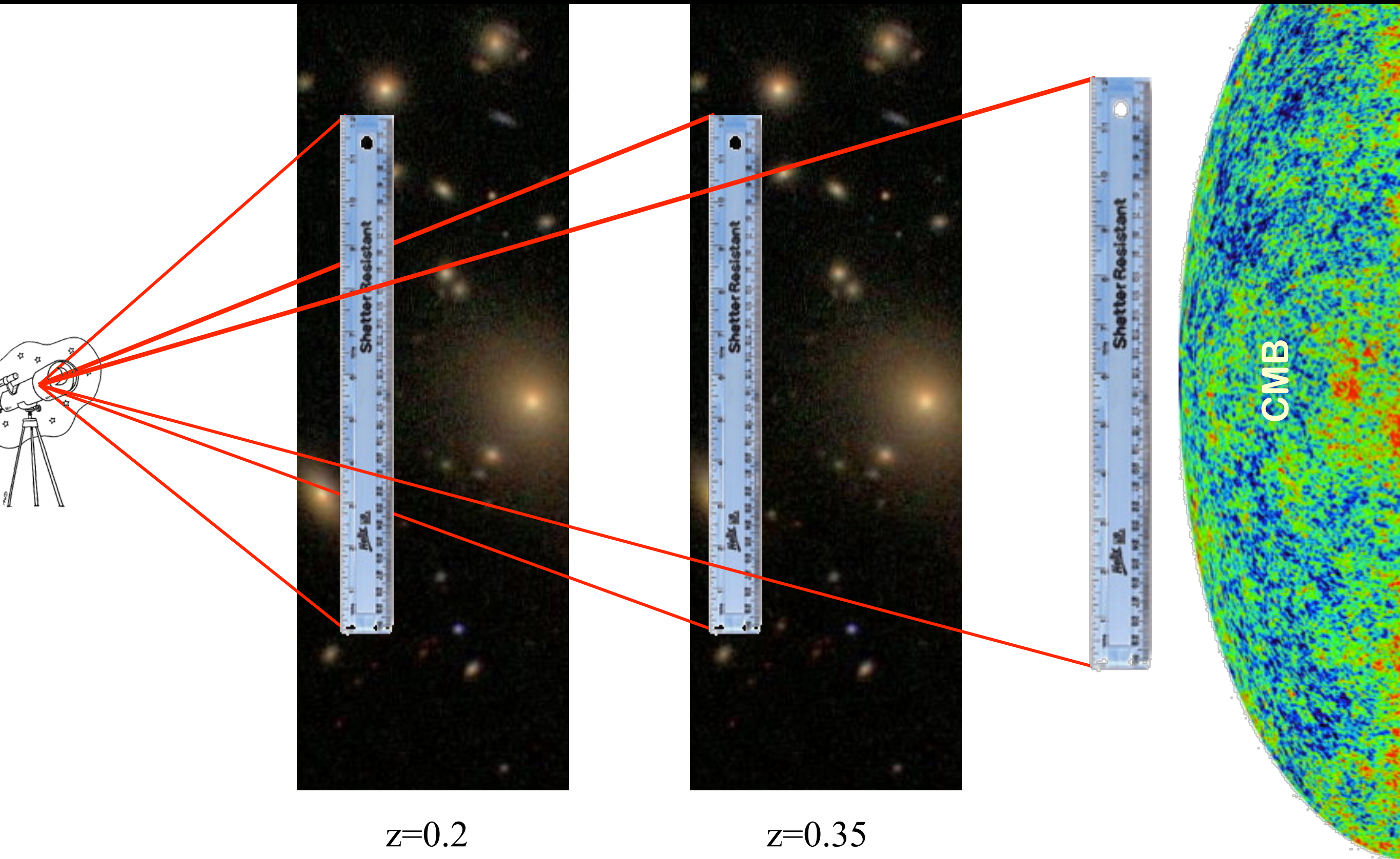
$$\Delta r = \frac{c}{H(z)} \Delta z$$



$$\Delta r = d_A \Delta \theta$$

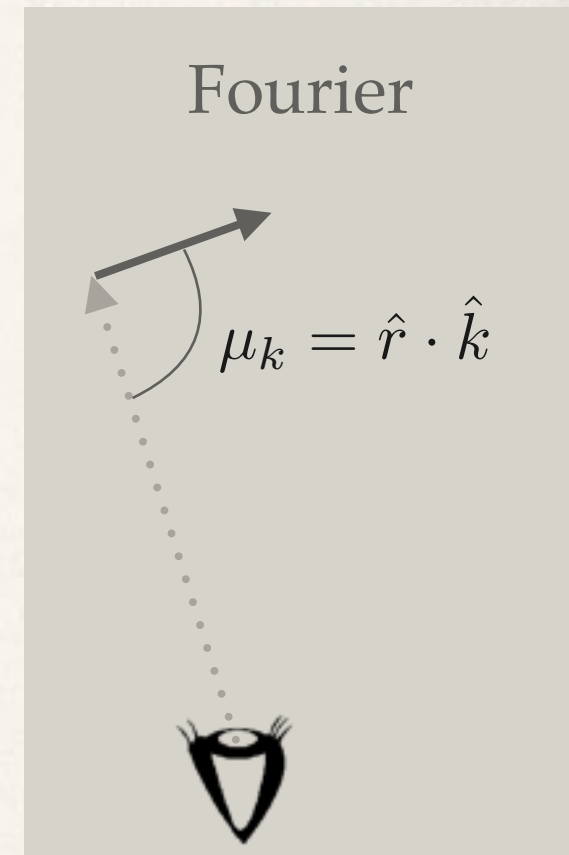
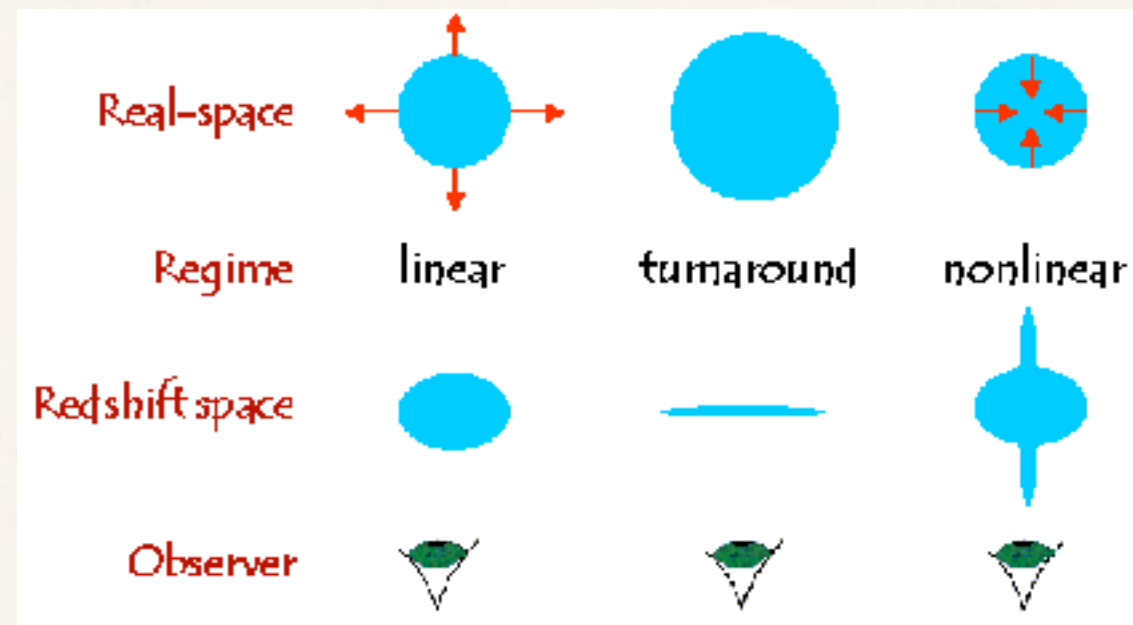
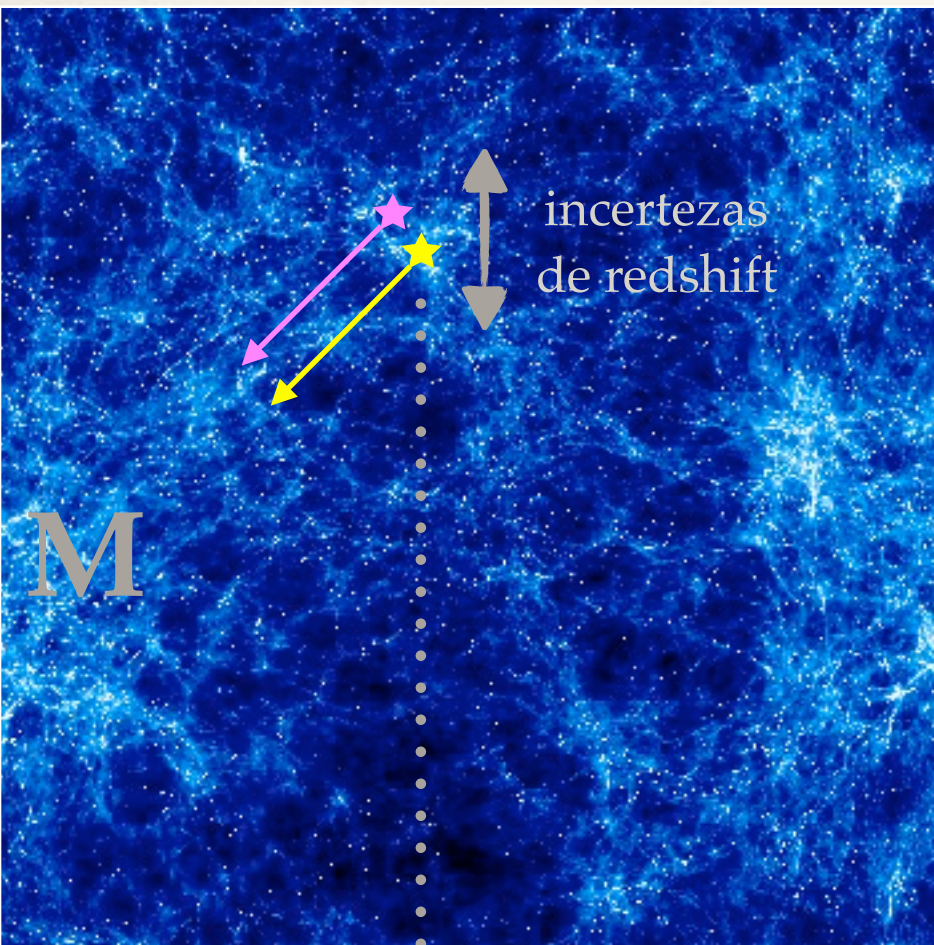


BAOs



A escala de BAOS é uma "régua-padrão estatística"!!!

Distorções de redshift e o princípio da equivalência



redshift $\Rightarrow$ velocidades peculiares

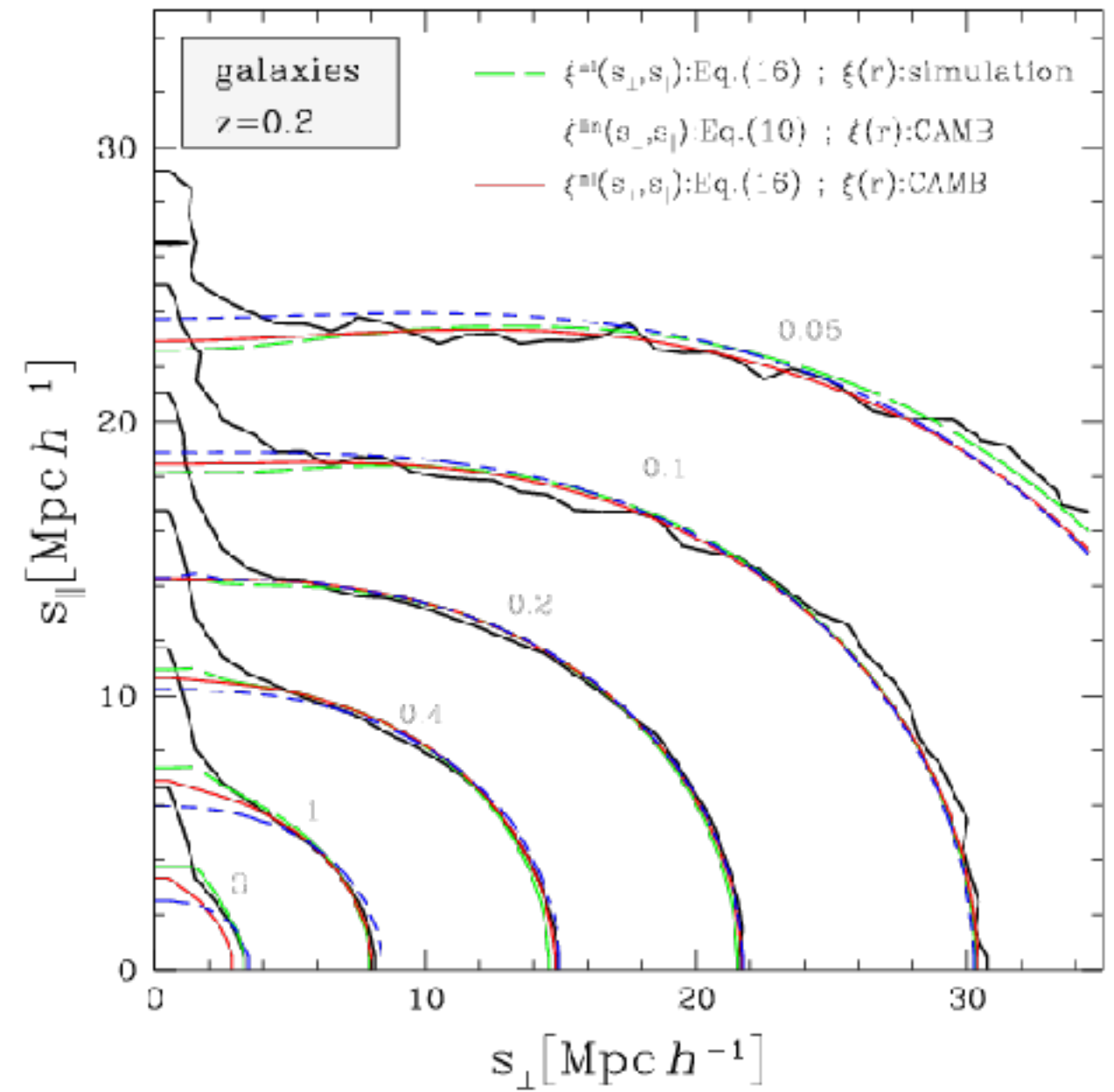
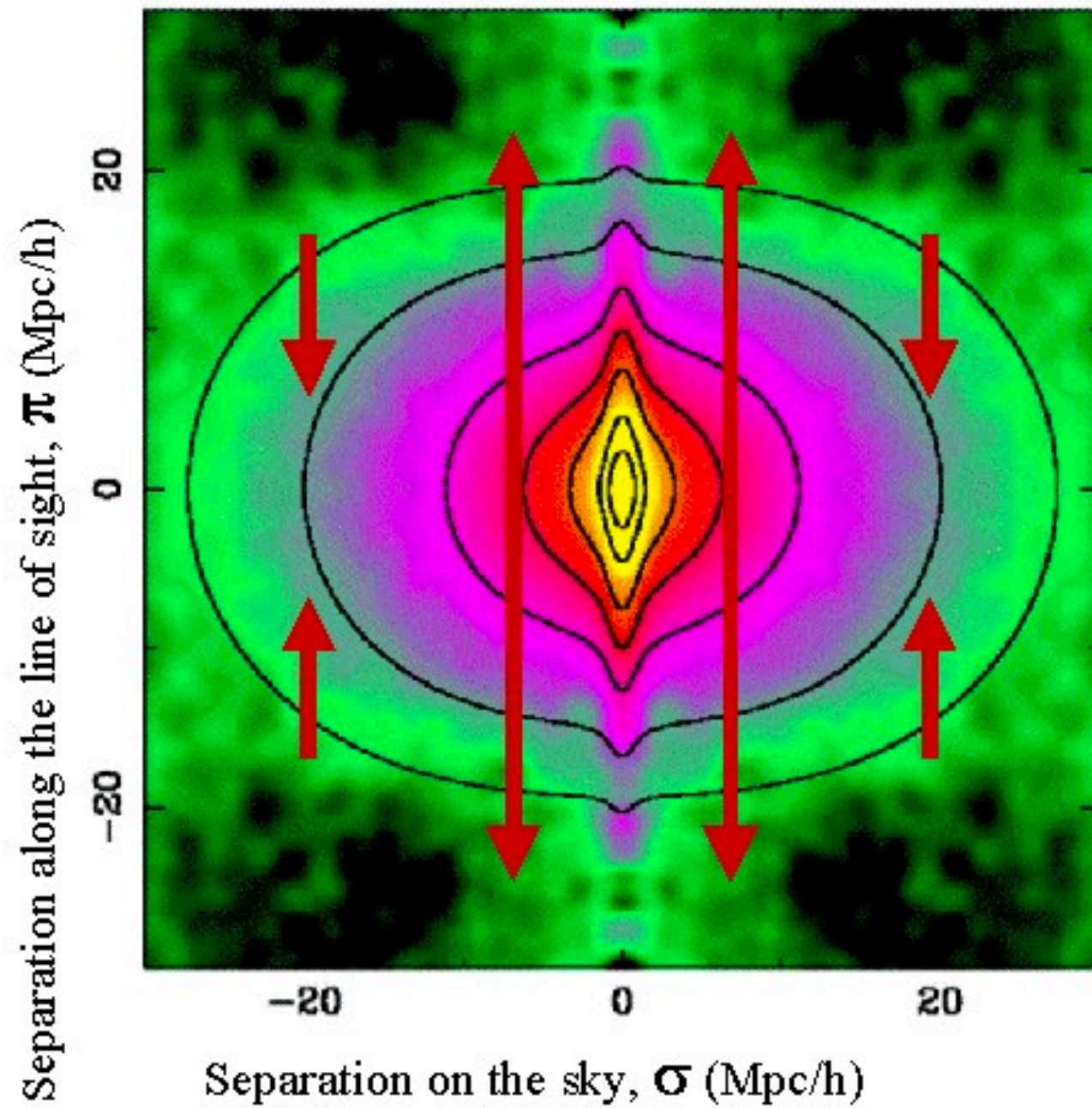
In linear regime, $\nabla v = -\nabla^2 \Phi$

Gravidade modificada?

$\Rightarrow$ O campo de velocidade reflete a força gravitacional sem nenhum bias

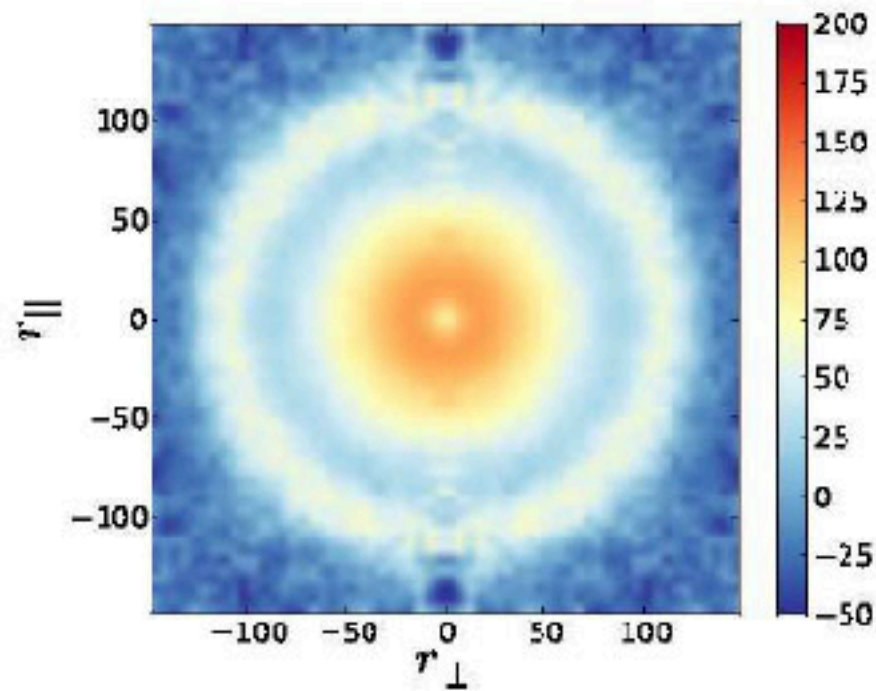
$$P_g(k) \simeq (b_g + f \mu_k^2)^2 P_m(k) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{monopole} \\ \text{quadrupole} \\ \dots \end{array} \right.$$

Distorções de redshift

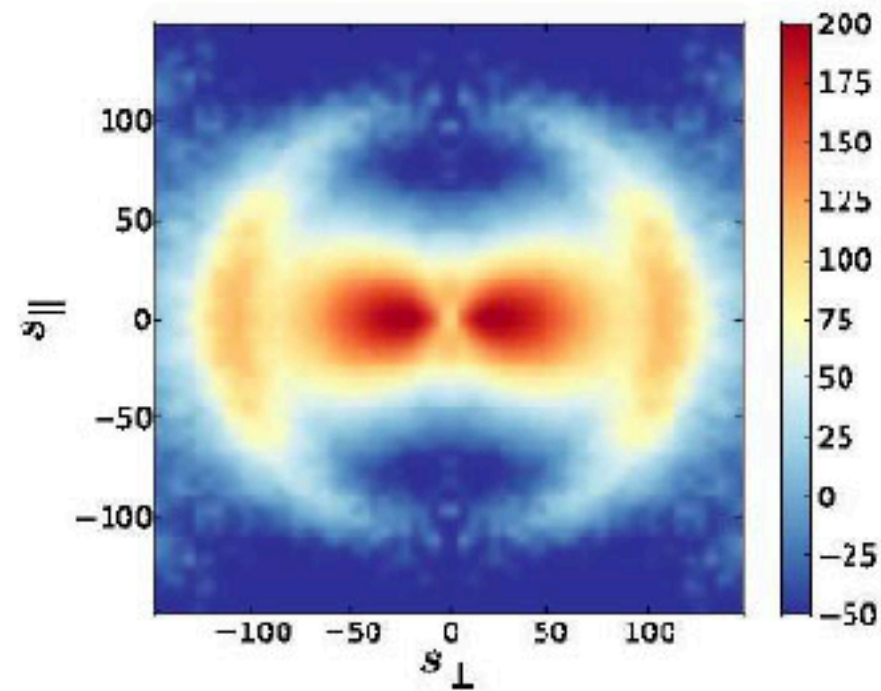


Distorções de redshift

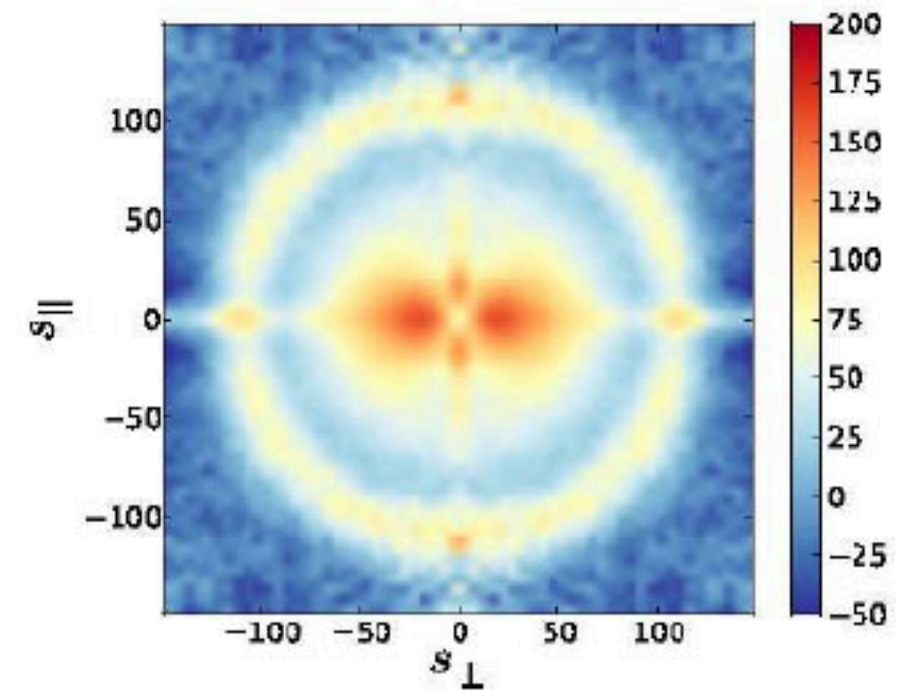
Espaço real



Espaço de redshift



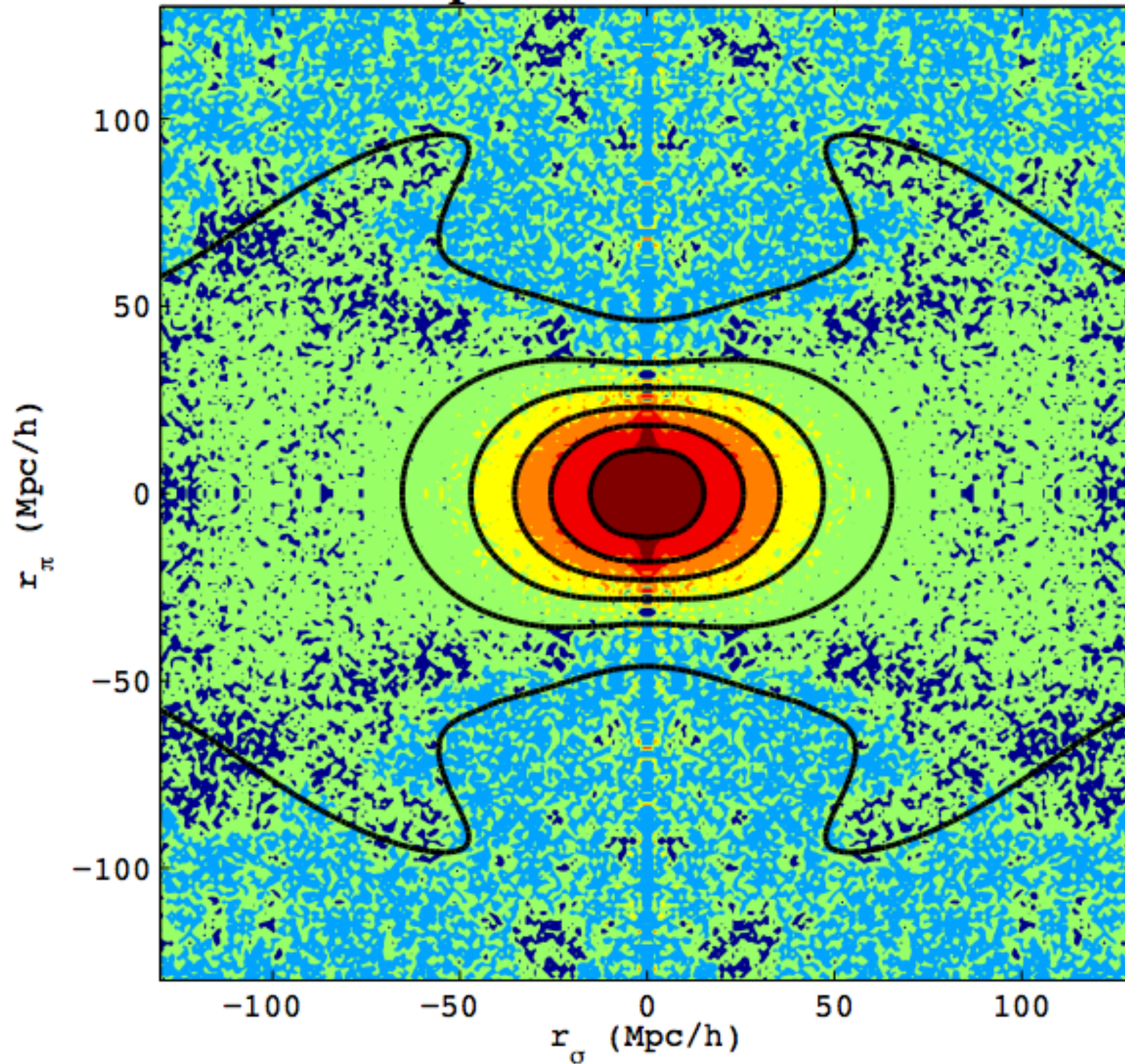
Espaço de redshift corrigido ("reconstrução")



Distorções de redshift: medidas

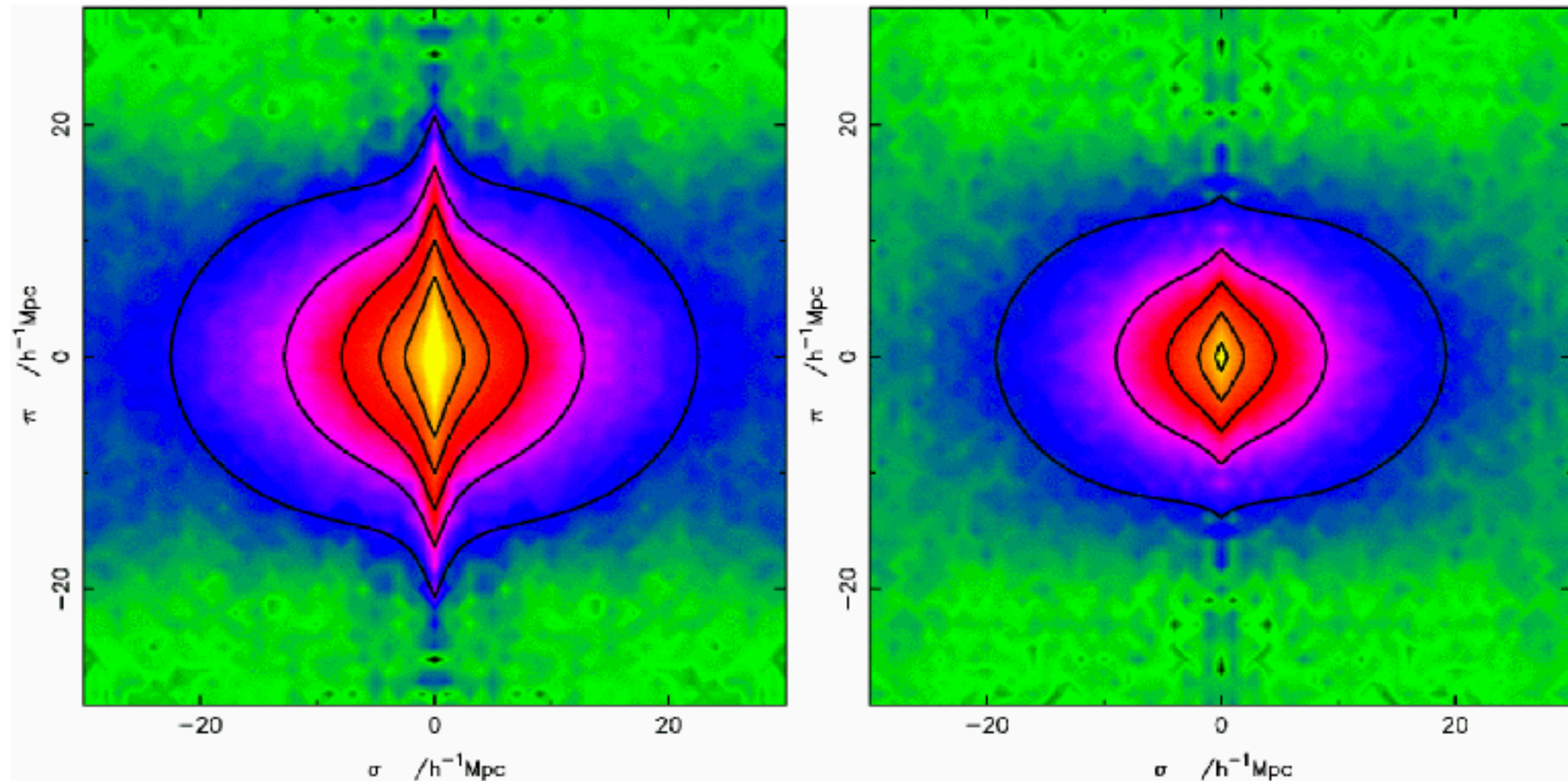
Anisotropic correlation function

BOSS: Reid et al. (2012)



Distorções de redshift: galáxias diferentes

Redshift-space distortions and galaxy type



Passive:

$$\beta = \Omega^{0.6}/b = 0.46 \pm 0.13$$

$$\sigma_p = 618 \pm 50 \text{ km s}^{-1}$$

Active:

$$\beta = \Omega^{0.6}/b = 0.54 \pm 0.15$$

$$\sigma_p = 418 \pm 50 \text{ km s}^{-1}$$

Observações: estado-da-arte

