



COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

*Chaire Galaxies et Cosmologie*

# Couplage des structures et du secteur sombre



**Françoise Combes**



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

# Relation grandes structures– énergie noire

L'univers: homogène et isotrope au début

Les grandes structures aujourd'hui très contrastées

Effet sur la dynamique de l'espace-temps? → « **back-reaction** »

Densité moyenne pour calculer la métrique

Non commutativité, équations d'Einstein non-linéaires

Les amas de galaxies comme des tests cosmologiques

En plus des BAO, des lentilles gravitationnelles

Règle standard et mesure de la distance

Fraction universelle de baryons

Taux de croissance des structures, affectée par  
la domination progressive de l'énergie noire

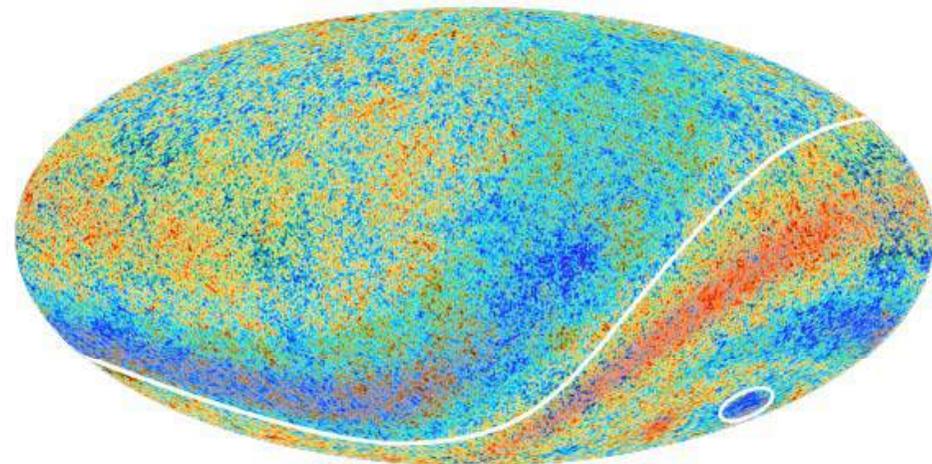
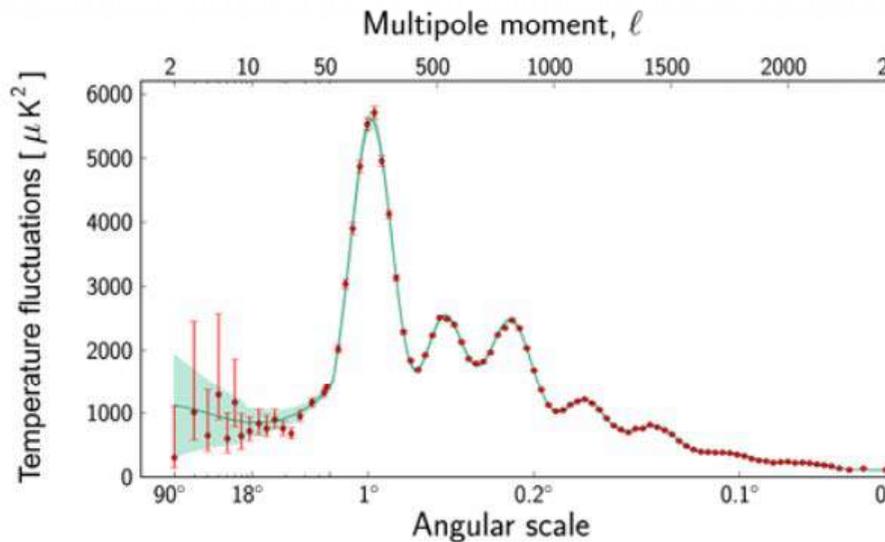
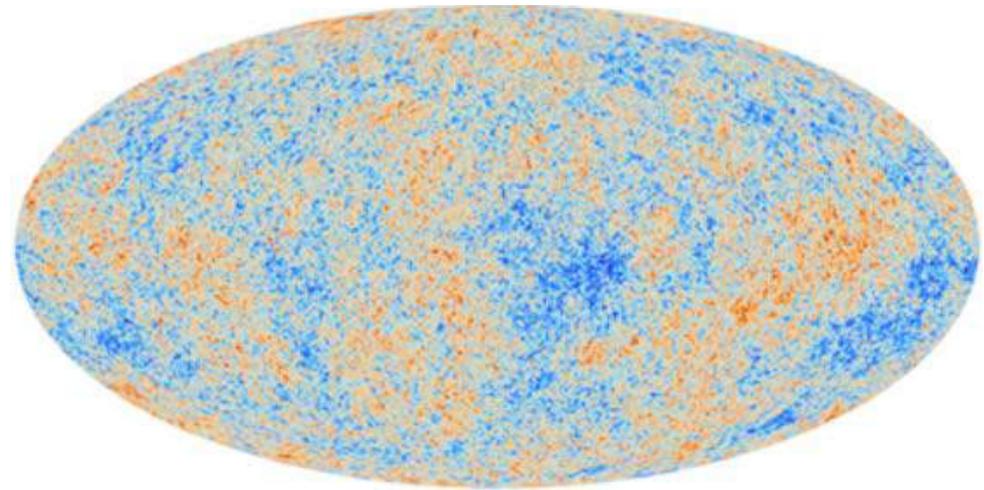
Test de gravité modifiée

# Principe de Copernic

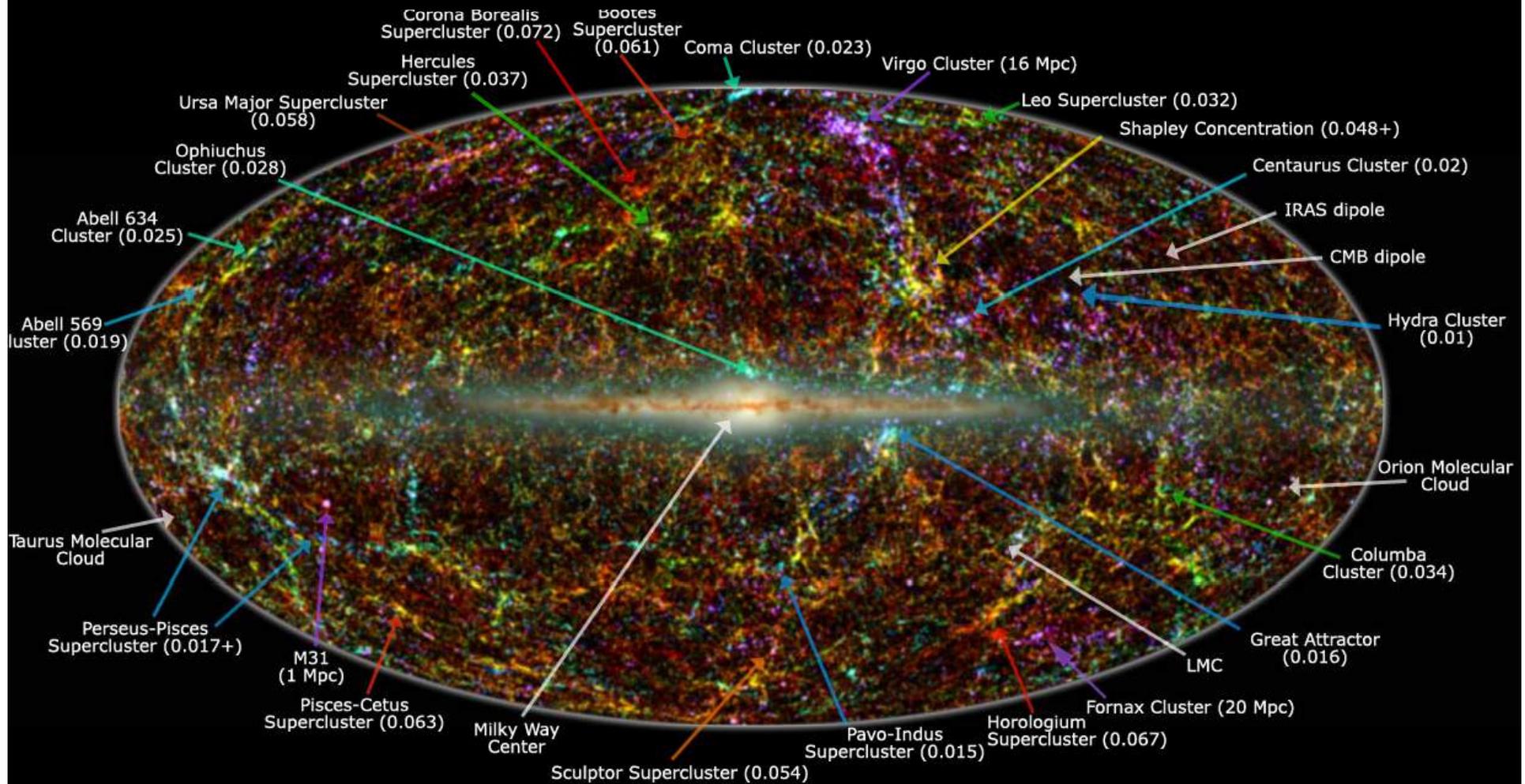
Hypothèse quasi philosophique que notre Univers est homogène et isotrope

Une des meilleures confirmations: le fond micro-onde

$$\delta\rho/\rho \sim 10^{-5}$$



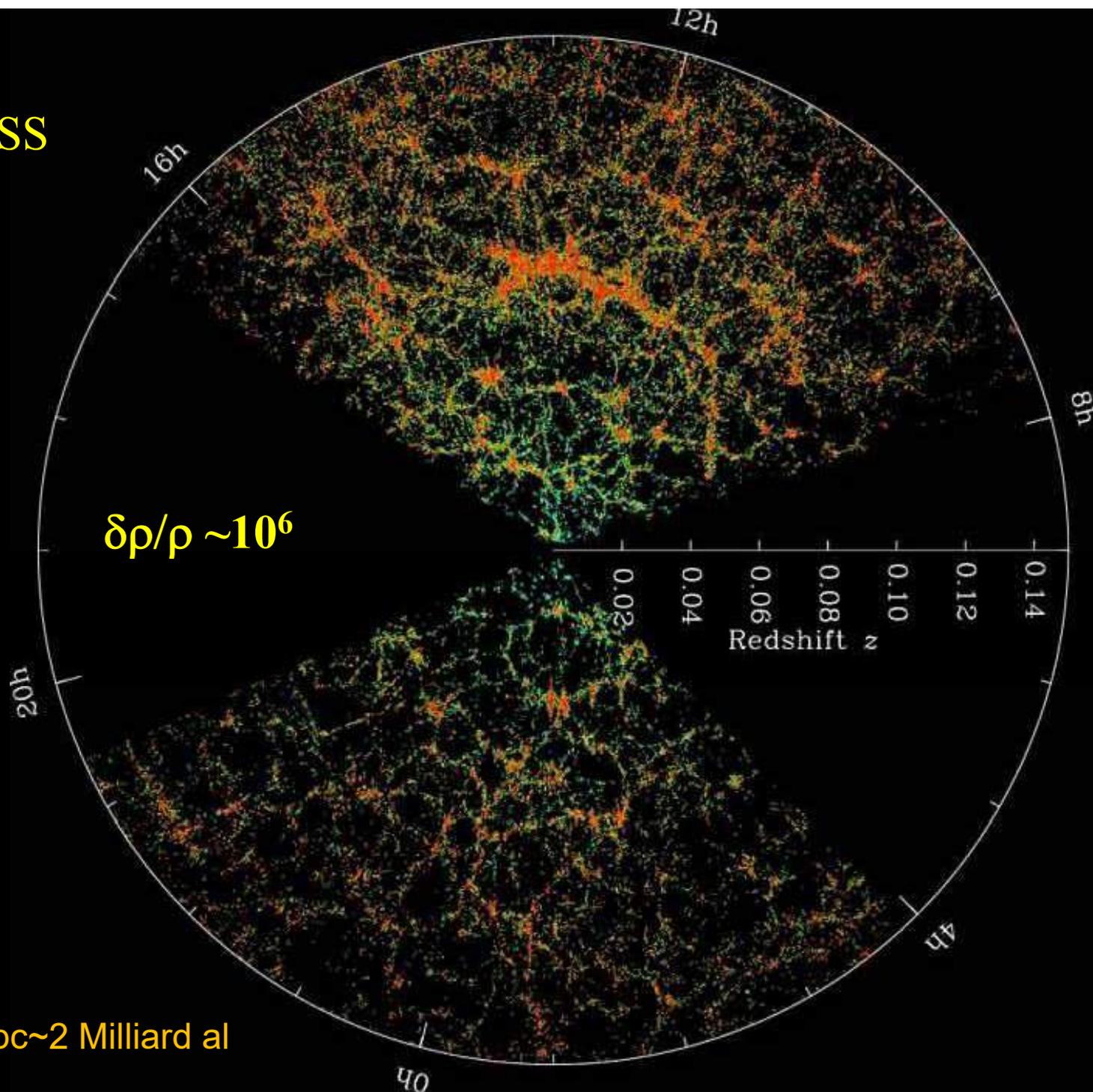
# Grandes structures de l'Univers local



**Legend:** image shows 2MASS galaxies color coded by redshift (Jarrett 2004); familiar galaxy clusters/superclusters are labeled (numbers in parenthesis represent redshift).  
Graphic created by T. Jarrett (IPAC/Caltech)

## Amas et superamas proches

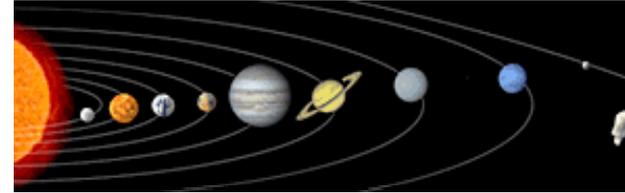
SDSS



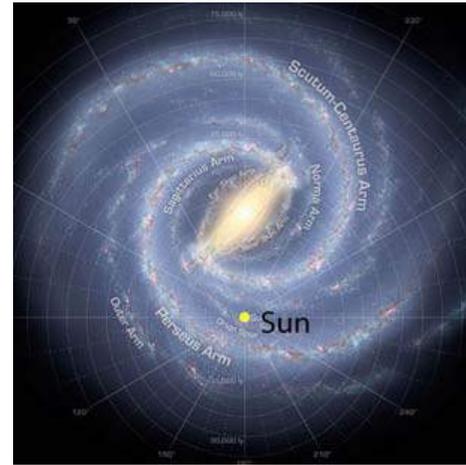
600Mpc~2 Milliard al

# Densité des structures dans l'Univers

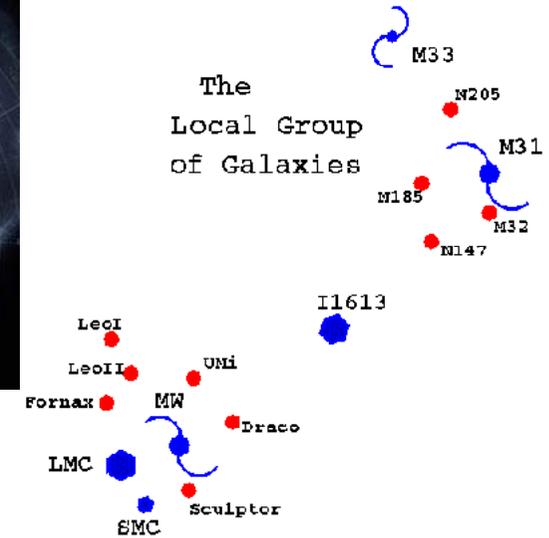
Système solaire  $10^{-12}$  g/cm<sup>3</sup>



Voie Lactée  $10^{-24}$  g/cm<sup>3</sup>



Groupe Local  $10^{-28}$  g/cm<sup>3</sup>



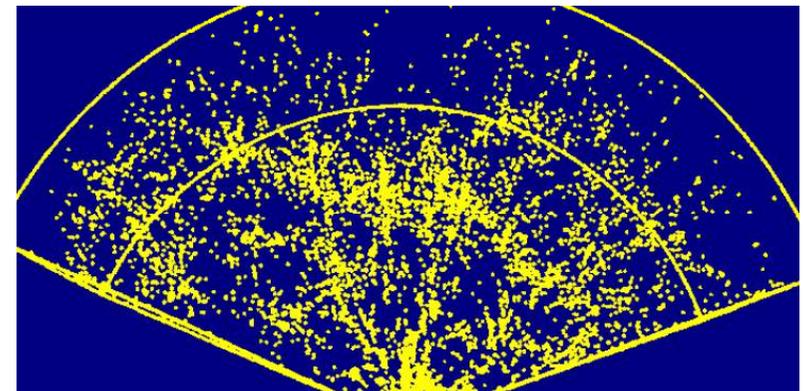
Amas de galaxies  $10^{-29}$  g/cm<sup>3</sup>

Superamas  $10^{-30}$  g/cm<sup>3</sup>

Densité des photons (3K)  $10^{-34}$  g/cm<sup>3</sup>

Densité des baryons ( $\Omega_b$ )  $5 \cdot 10^{-31}$  g/cm<sup>3</sup>

Densité critique ( $\Omega=1$ )  $10^{-29}$  g/cm<sup>3</sup>



$\delta\rho/\rho \sim 10^{30}$  sur Terre!

# Lissage des inhomogénéités

Le lissage des inhomogénéités modifie considérablement la structure des équations d'Einstein, qui sont non-linéaires

Les deux opérations ne commutent pas

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

**Résoudre les équations puis lisser,  $\neq$  lisser puis résoudre les équations**

Les inhomogénéités introduisent alors une réaction par rapport au lissage, un terme de **“back-reaction”** dans le côté droit de l'équation

Il n'y a pas de raison que le tenseur énergie-impulsion  $T_{\mu\nu}$  effectif avec la back-reaction, remplisse les conditions habituelles  $P > -\rho/3$ ,

*même si le  $T_{\mu\nu}$  originel les vérifient*

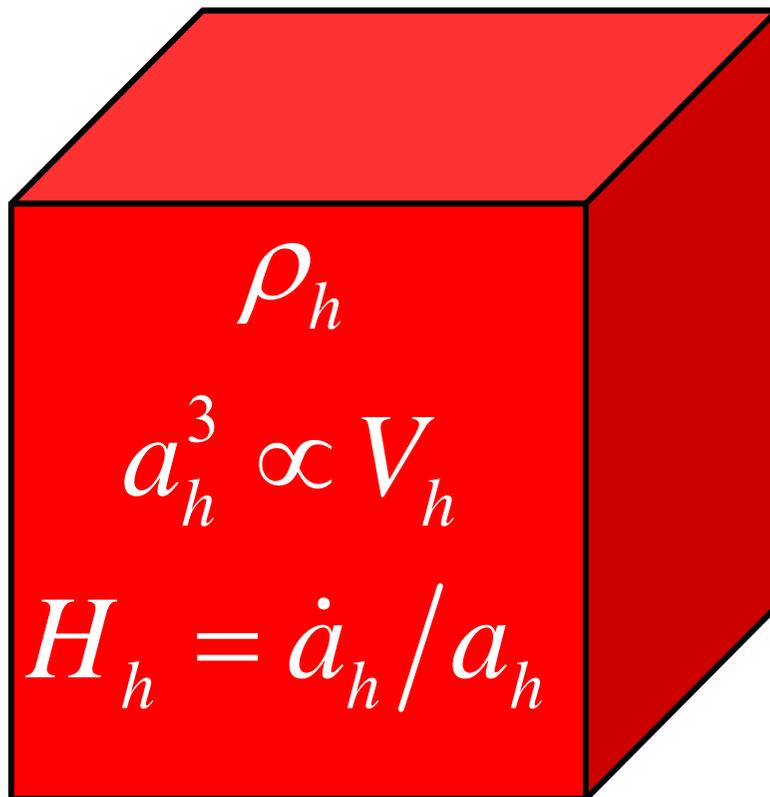
Le lissage est utile pour éviter les singularités.

Le terme de back-reaction pourrait conduire à une **expansion accélérée**  
Même à partir d'un fluide avec pression positive ou nulle

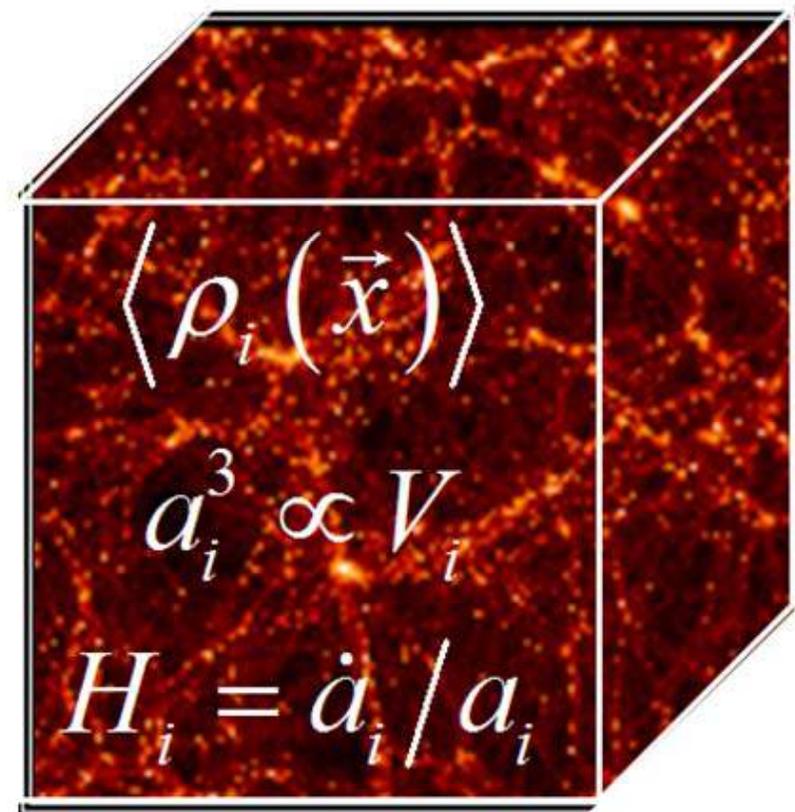
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + \frac{3p}{c^2} \right)$$

# Accélération due aux inhomogénéités

Modèle homogène



Modèle inhomogène



$$\rho_h = \langle \rho_i(\vec{x}) \rangle \Rightarrow H_h = H_i ?$$

**Peut-être, ou peut-être pas!**

# Le principe des inhomogénéités

- Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker  
Modèle inhomogène

$$G_{\mu\nu}(\vec{x}, t) = G_{\mu\nu}^{\text{FLRW}}(t) + \delta G_{\mu\nu}(\vec{x}, t)$$

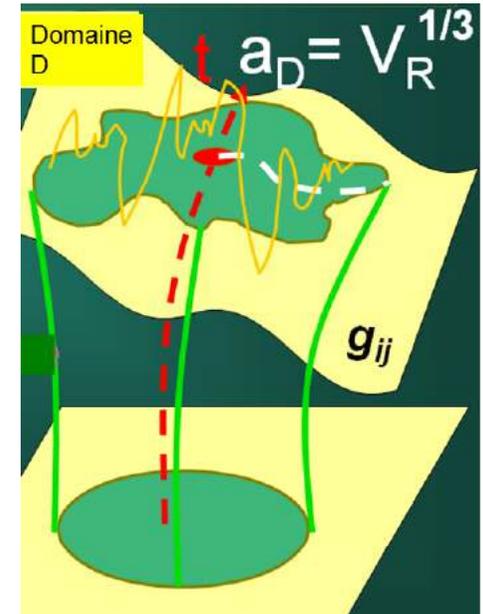
$$G_{00}^{\text{FLRW}}(t) + \delta G_{00}(\vec{x}, t) = 8\pi G T_{00}(\vec{x}, t)$$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \left[ \langle \rho \rangle - \frac{3}{8\pi G} \langle \delta G_{00} \rangle \right]$$

$$\left\langle \frac{\ddot{a}}{a} \right\rangle_{\text{domaine}} = -4\pi G/3 (\rho_{\text{eff}} + 3P_{\text{eff}})$$

*Kolb, et al 2006, 2011*

*Buchert, 2000, 05, 07*



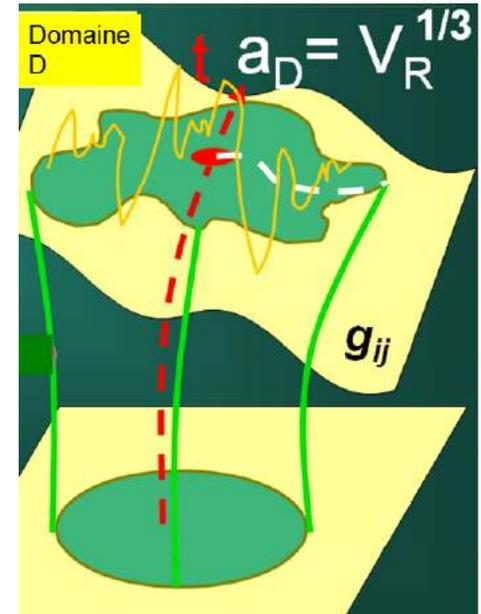
Modèle homogène,  
plat Einstein-deSitter  $P \sim 0$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \rho$$

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

$$\dot{\rho} = -3\frac{\dot{a}}{a} \rho$$

# Moyenne à grande échelle



- Moyenne sur un grand volume  $V_D$ :

$$a_D \equiv (V_D/V_{D0})^{1/3} \quad V_D = \int_D d^3x \sqrt{h}$$

- Constante de Hubble correspondante:

$$H_D = \frac{\dot{a}_D}{a_D} = \frac{1}{3} \langle \Theta \rangle_D$$

- Equations d'évolution effective:

$$\frac{\ddot{a}_D}{a_D} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho_{\text{eff}} + 3p_{\text{eff}}) \quad \rho_{\text{eff}} = \langle \rho \rangle_D - \frac{Q_D}{16\pi G} - \frac{\langle R \rangle_D}{16\pi G}$$

Différent de l'équation d'état  
 $p = w \rho$

$$\left( \frac{\dot{a}_D}{a_D} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_{\text{eff}} \quad 3p_{\text{eff}} = -\frac{3Q_D}{16\pi G} + \frac{\langle R \rangle_D}{16\pi G}$$

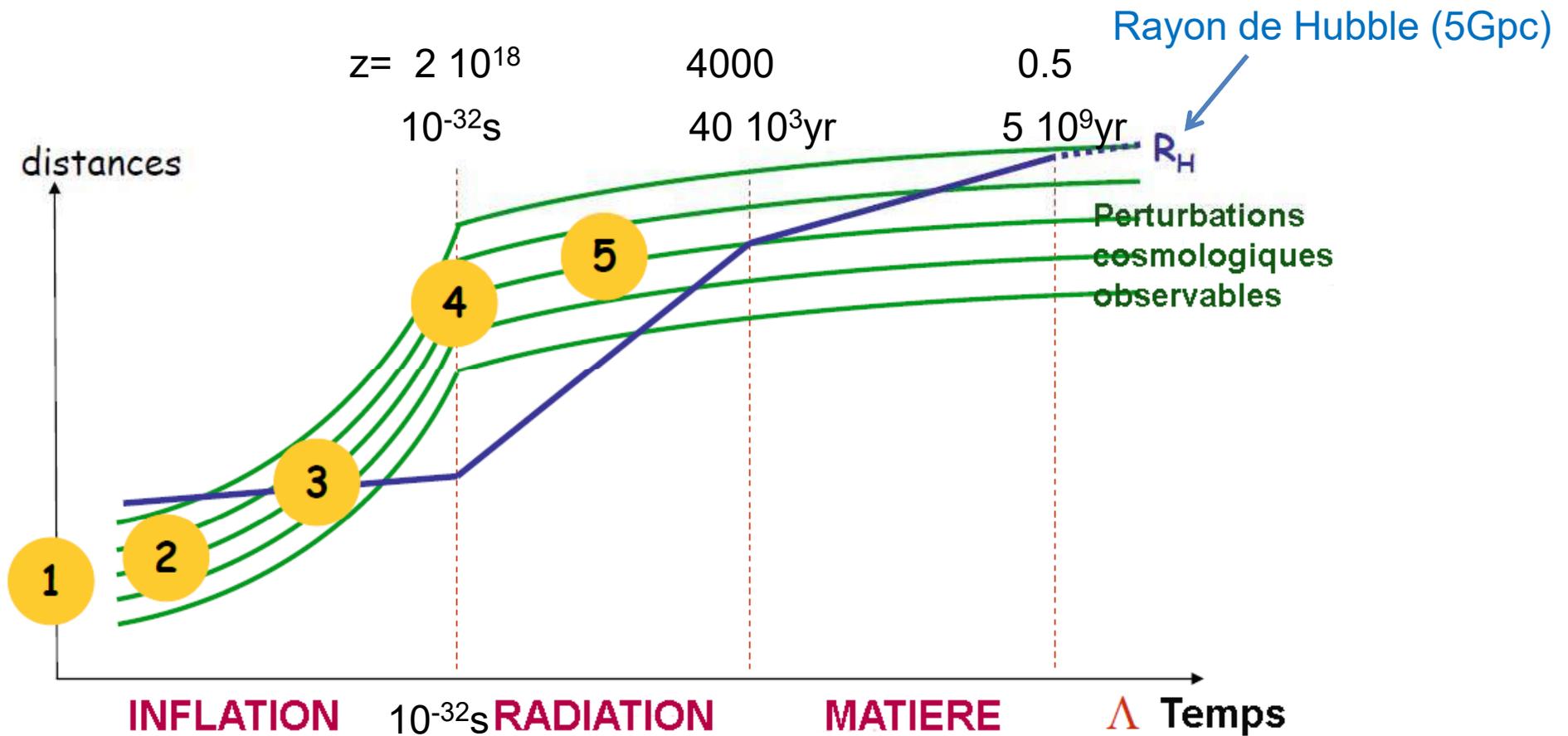
- **Rétro-action (backreaction):**  $Q_D = \frac{2}{3} \left( \langle \Theta^2 \rangle_D - \langle \Theta \rangle_D^2 \right) - 2 \langle \sigma^2 \rangle_D$

# Avantage des inhomogénéités

- Pas besoin de rajouter de 5ème force!
- Pas besoin de modifier la gravité, la relativité générale
- Pas besoin de dimensions supplémentaires
  
- Explique que l'énergie noire ne soit sensible que maintenant
- (5Gyr), car le contraste des structures se développe avec le temps
- → Négligeable à  $T \sim 400\,000$  ans
  
- **Magique? Encore faut-il une preuve que  $\delta\rho/\rho$  soit suffisant**
- **→ Modifie le mode zéro, et le facteur d'échelle**

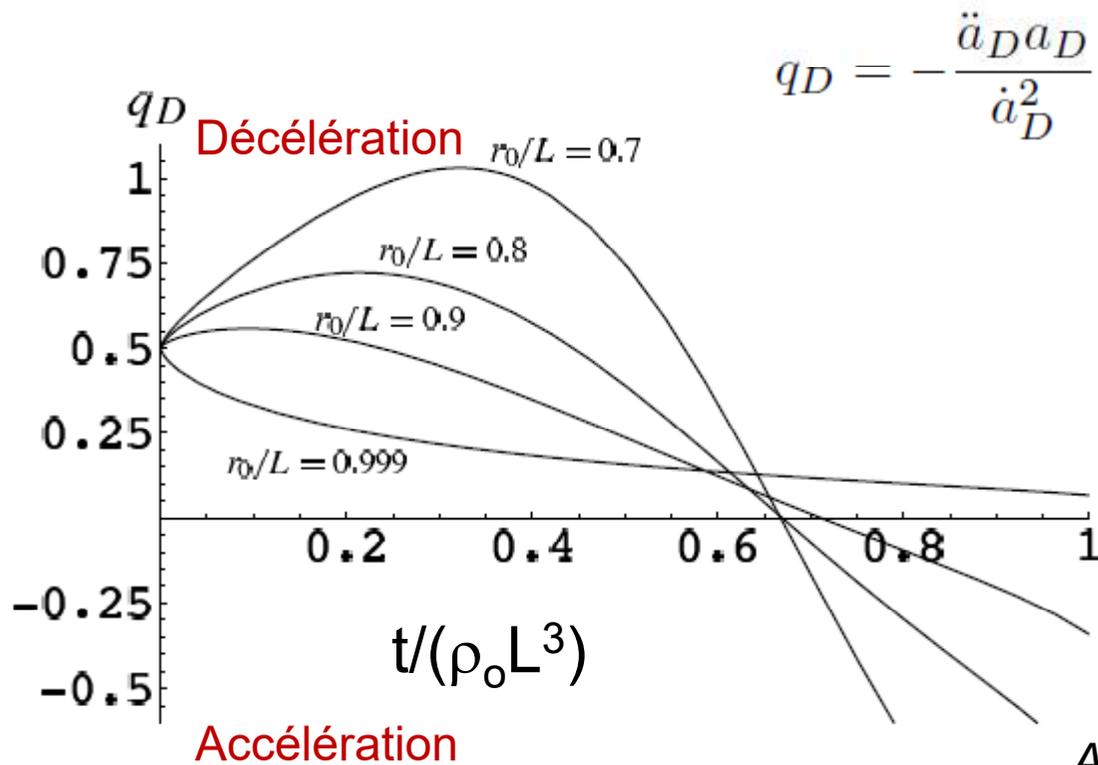
# Perturbations plus grandes que l'horizon

- La plus grande perturbation observable à l'échelle du rayon de Hubble aujourd'hui

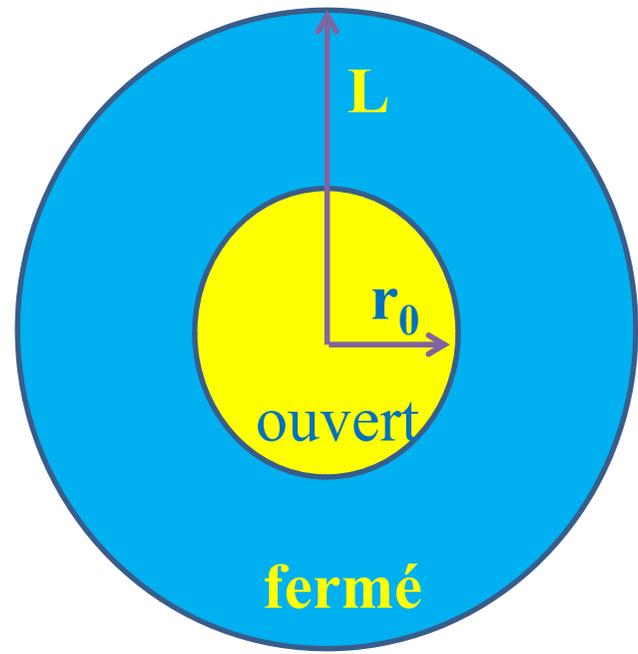


# Modèle « jouet » de Nambu-Tanimoto (2005)

- La base: univers plat de LTB Lemaître-Tolman-Bondi, solution des équations d'Einstein
- Contient une région de courbure positive ( $\rho > \rho_c$ ), et une négative
- Lorsque la région dense s'effondre, alors en moyenne l'expansion de l'ensemble s'accélère



$$q_D = -\frac{\ddot{a}_D a_D}{\dot{a}_D^2}$$



Also Mansouri 2005, Alnes et al 2006

# Estimation de Green & Wald

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R.$$

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G/c^4 T_{\mu\nu}$$

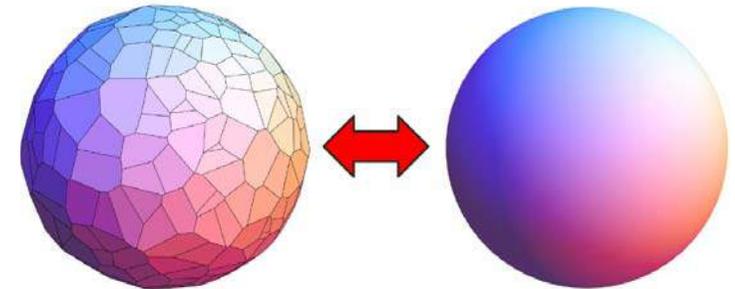
- Green & Wald, 2011, 13, 16: introduction d'une méthode de calcul
- Avec des hypothèses:  $g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}^{(0)} + \gamma_{\mu\nu}$   
 $\gamma_{\mu\nu} \ll 1$ , mais pas les dérivées  $g_{\mu\nu}^{(0)}$  n'est pas solution des équations d'Einstein -- Courbure de  $g_{\mu\nu}$  à l'échelle  $R$  de Hubble

Inhomogénéités sur  $L \ll R(\text{Hubble})$

Moyenne sur des échelles  $L \ll D \ll R$

→ back reaction: variations de l'ordre de 1%

Toujours positives, tenseur à trace nulle



**Justification:** les perturbations ne sont pas loin d'être Newtoniennes (v non relativistes), avec équations linéaires, sauf au voisinage de trous noirs. *Vrai pour Einstein, mais pas pour  $f(R)$*

## Mais une métrique de fond « lisse » ...

Le calcul sans approximation ( $\theta$  expansion  $\sigma$  cisaillement)

$$a_D(t) \propto V_D(t)^{1/3}, \quad \langle \rho \rangle_D = \frac{\langle \rho(t_1) \rangle}{a_D^3} = \frac{M_D}{V_D}, \quad Q_D \equiv \frac{2}{3} \langle (\theta - \langle \theta \rangle_D)^2 \rangle - 2 \langle \sigma^2 \rangle_D$$

Montre un terme à trace non-nulle

$$\frac{\ddot{a}_D}{a_D} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho_{\text{eff}} + 3p_{\text{eff}}) \quad \rho_{\text{eff}} = \langle \rho \rangle_D - \frac{Q_D}{16\pi G} - \frac{\langle R \rangle_D}{16\pi G}$$

Les équations sont indéterminées. Quelle est la dépendance en temps de  $Q_D$ ?

$Q_D$  peut-il devenir assez grand pour accélérer l'expansion?

Problèmes dès que l'effondrement des structures forment des caustiques

Les vides sont importants et doivent être pris en compte

*Buchert et al 2015, Kolb et al 2016*

# Calculs de Bardeen et al (2007)

Même dans le modèle « jouet » de Nambu-Tanimoto (2005)

Les contrastes de densité donnent lieu à des caustiques

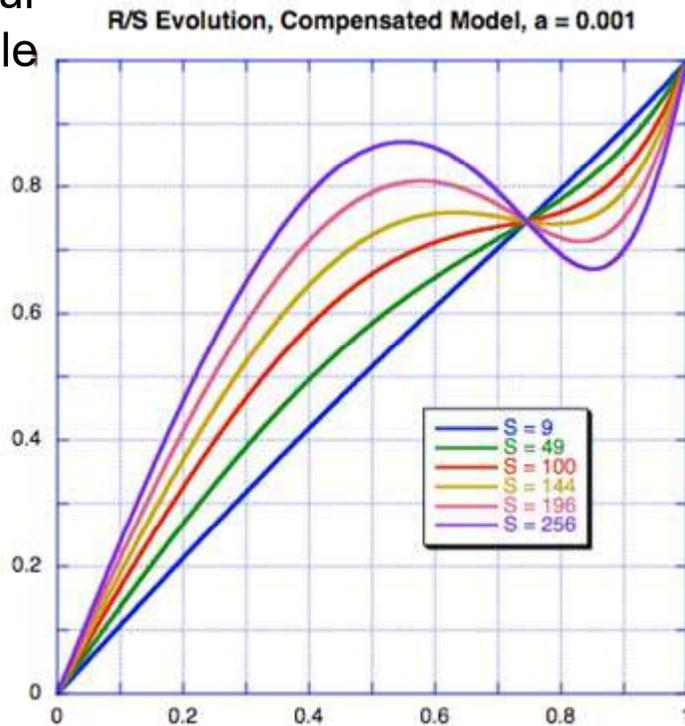
Toute la masse se retrouve dans une coquille (LTB non valide)

Décélération moindre, mais pas d'accélération

S facteur  
d'échelle

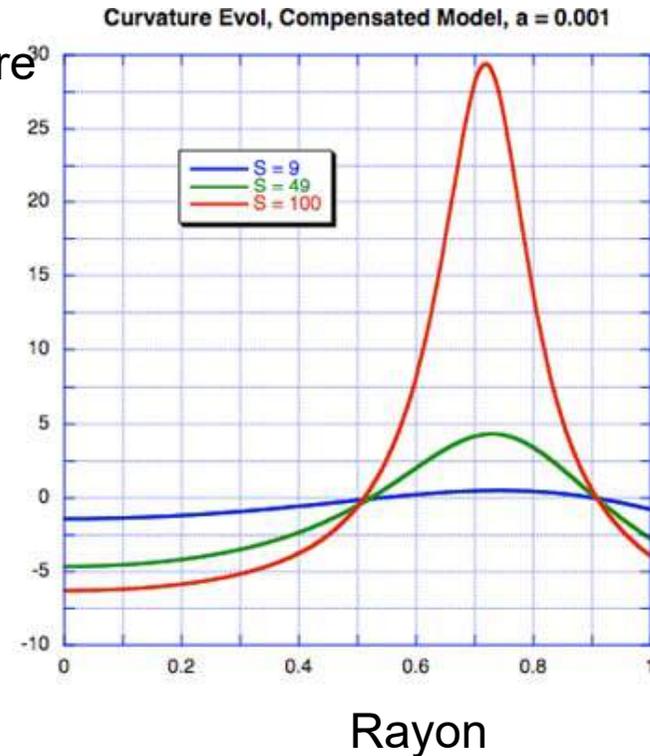
R/S

R/S



Courbure

${}^3R/(4\pi G\rho)$



→ La moyenne n'a plus de sens

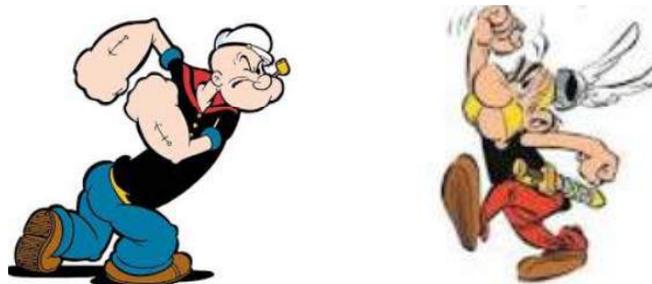
Approx Newtonienne valable, effets relativistes négligeables

# En résumé

- ▶ Les perturbations au-delà de l'horizon: pas d'accélération
- ▶ Les inhomogénéités à petite échelle pourrait “renormaliser” la grande échelle → accélération en moyenne ( $\rho+3P < 0$ )
- ▶ Le lissage des perturbations en dessous de l'horizon pose problème, et doit être effectué proprement
- ▶ Dans un référentiel comobile avec le flot de matière → sinon résultats non fiables
- ▶ Un effet qui doit être quantifié, même s'il n'explique pas l'énergie noire

→ Le débat reste ouvert !

*Clarkson et al 2011*



# Des tests sont possibles

Mesure des distances

$$d_L(z) = \frac{c(1+z)}{H_0 \sqrt{-\Omega_k}} \sin \left( \sqrt{-\Omega_k} \int_0^z dz' \frac{H_0}{H(z')} \right)$$

Courbure des géodésiques

Expansion

Courbure et distance couplées en standard, non en LTB

Aussi  $\Omega_k$  indépendant de  $z$

→ Tests sur les mesures de BAO, Supernovae, surveys SDSS

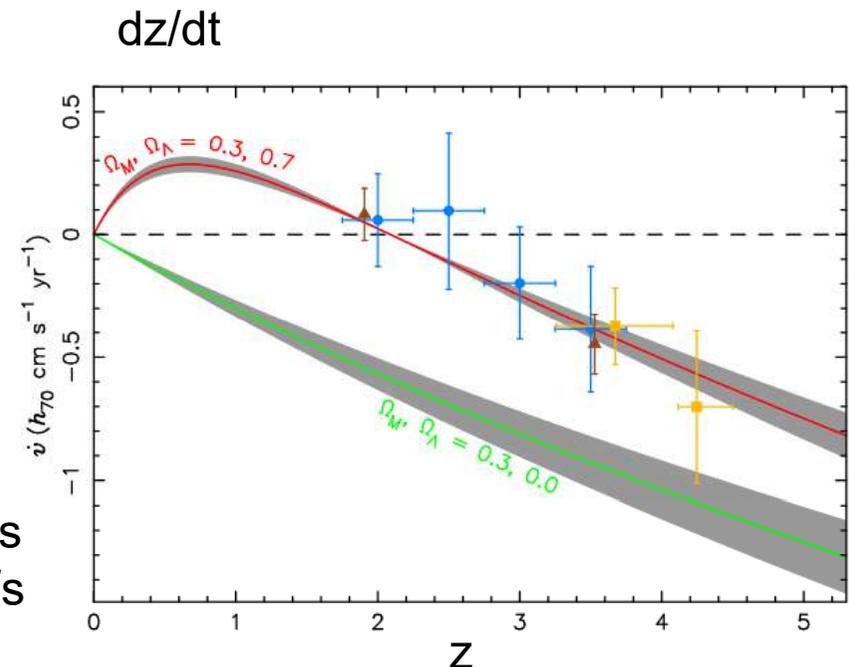
Mesure de l'évolution des redshifts

(Uzan et al 2008, Liske et al 2008)

$$\dot{z}(z) = H_0(1+z) - H(z)$$

Ou bien  $w(z)$ , requiert aussi  $H'(z)$

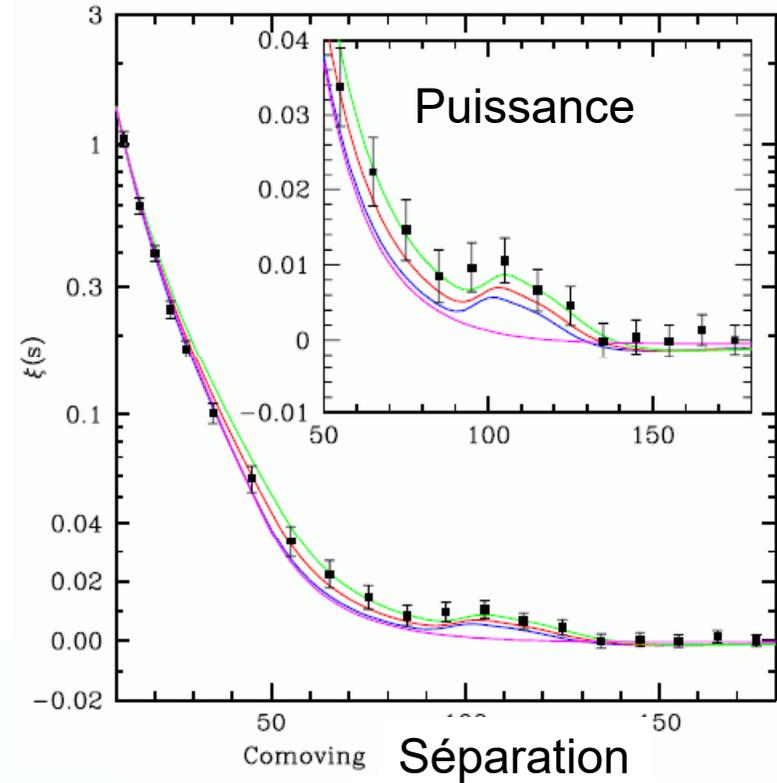
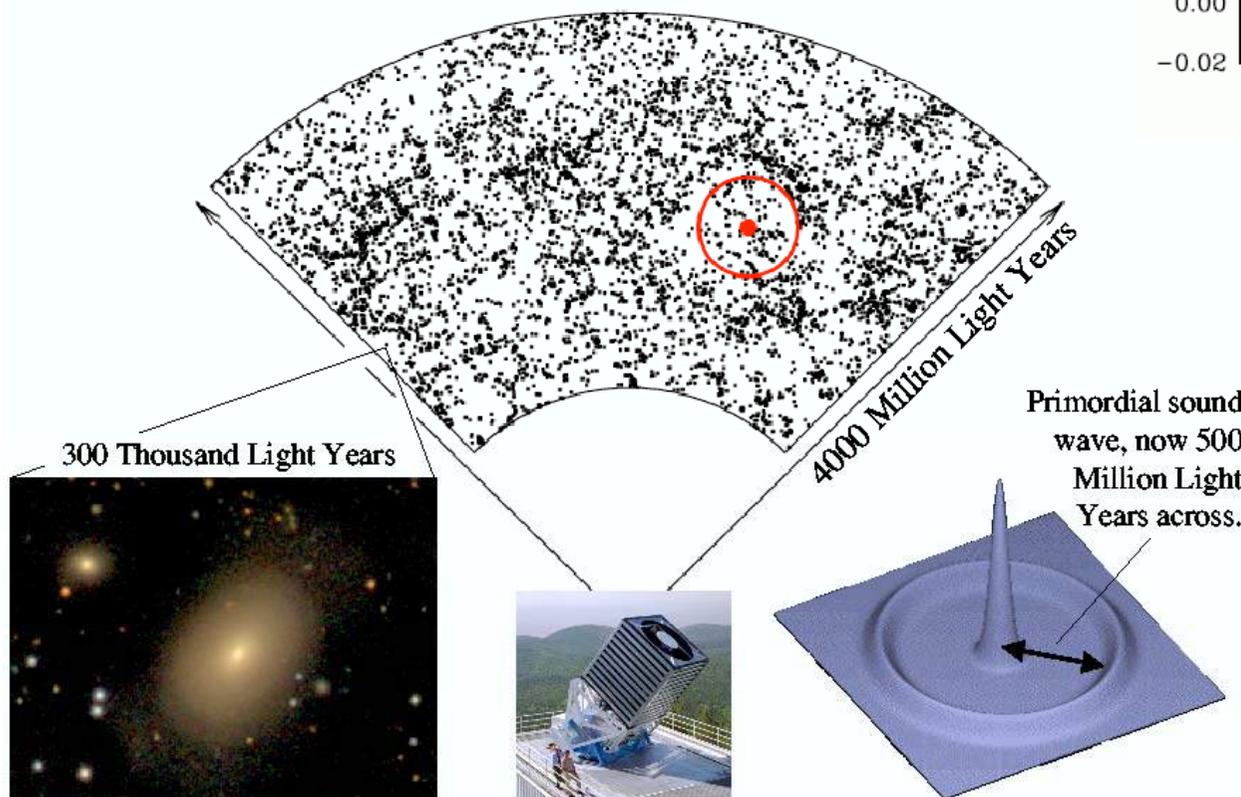
Simulations 20 ans observations  
de 10 QSO avec ELT,  $\Delta H=8\text{km/s}$



# Pic acoustique baryonique

Ondes détectées aujourd'hui  
dans la distribution des baryons

50 000 galaxies SDSS



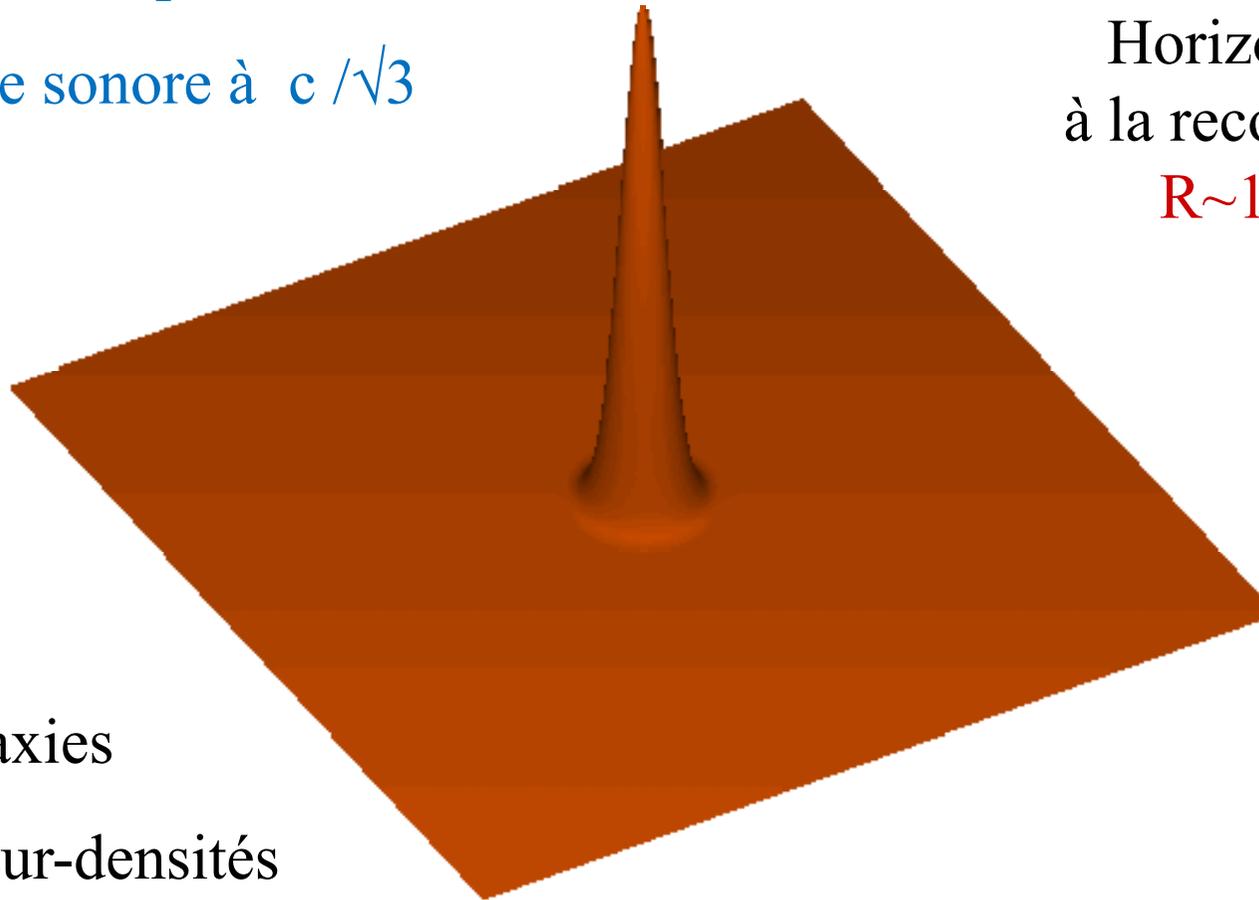
*Eisenstein et al 2005*

# Une perturbation simple

Crée une dépression

→ Onde sonore à  $c/\sqrt{3}$

Horizon sonore  
à la recombinaison  
 $R \sim 150 \text{ Mpc}$



Galaxies

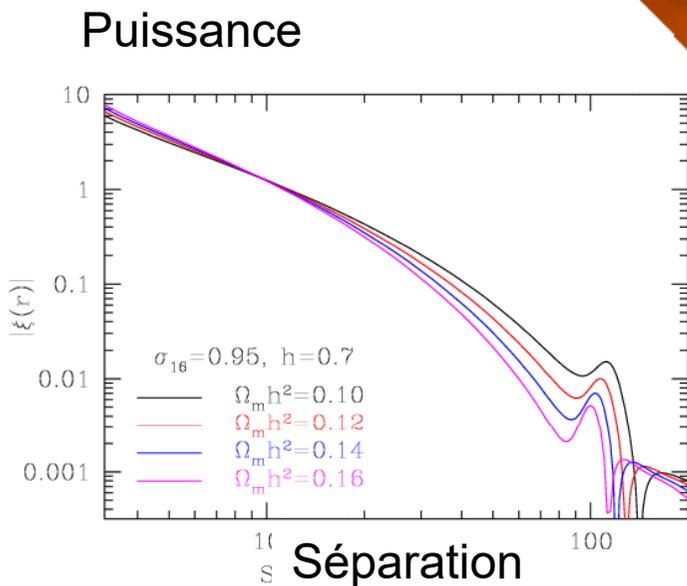
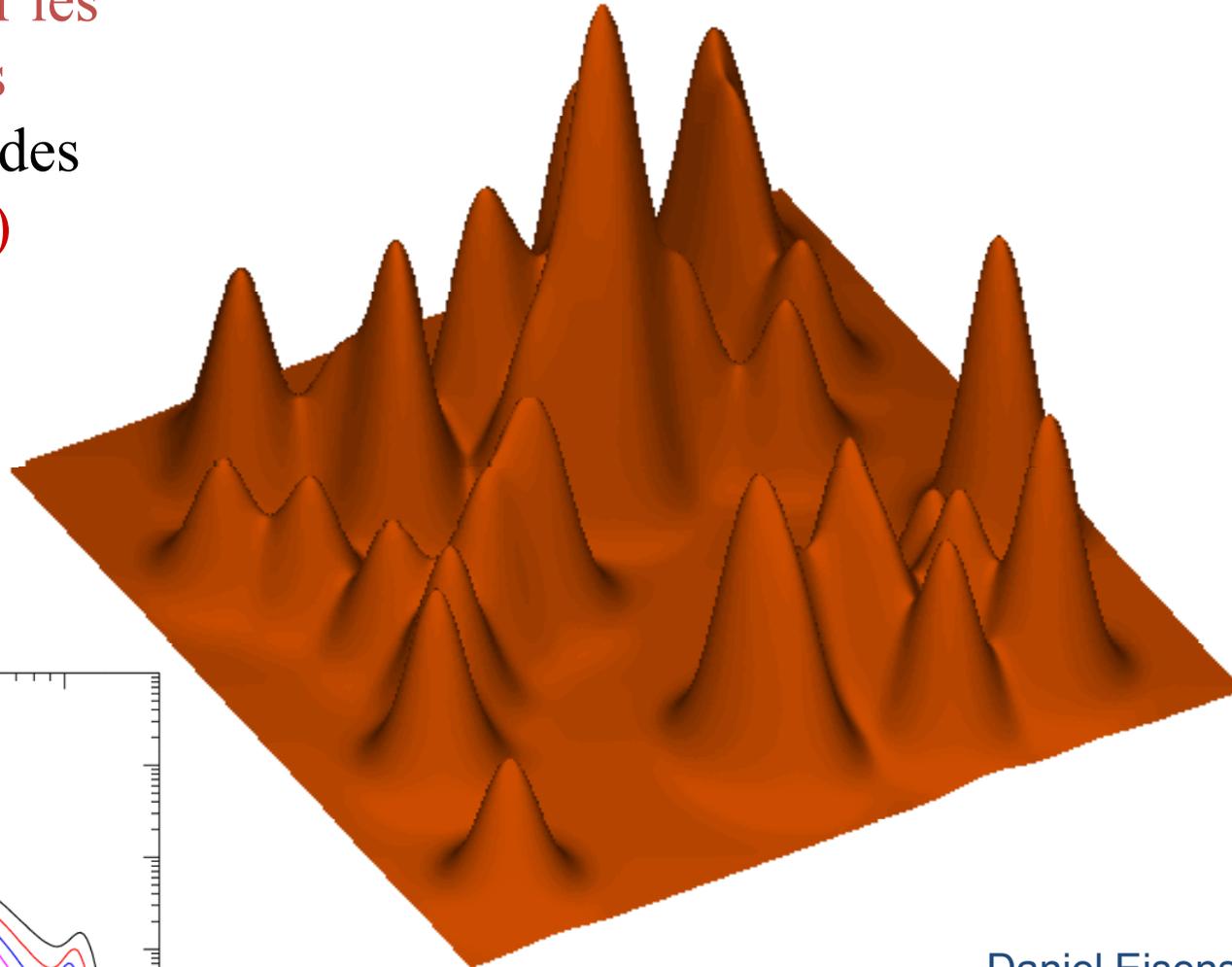
dans les sur-densités

→ Ondes acoustiques

Daniel Eisenstein

# Perturbations multiples

Signal réduit par les  
Phases aléatoires  
De multiples ondes  
1 1% dans le  $P(k)$



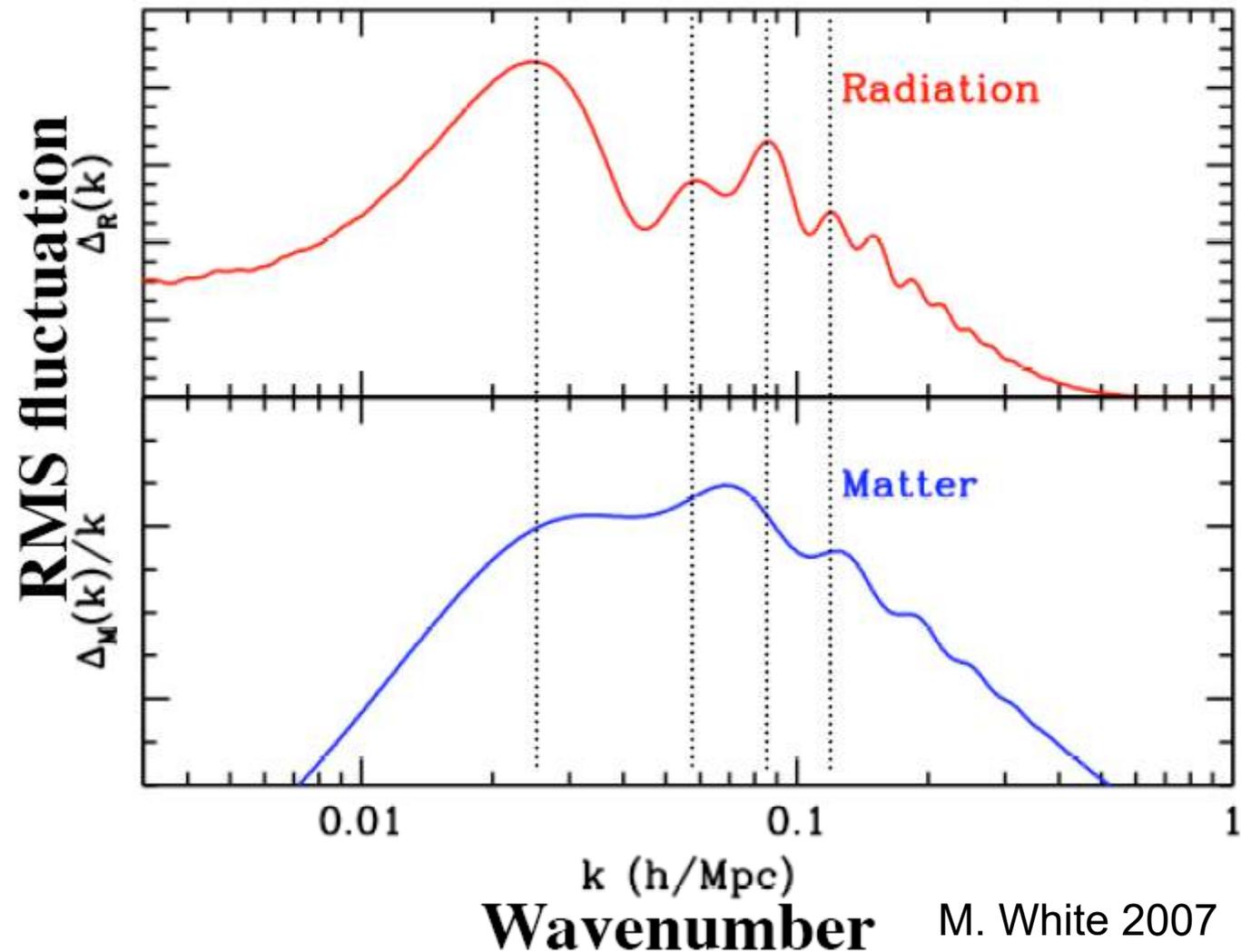
Daniel Eisenstein

# Oscillations attendues

Pas en phase  
aux petites  
échelles  
(vitesses)

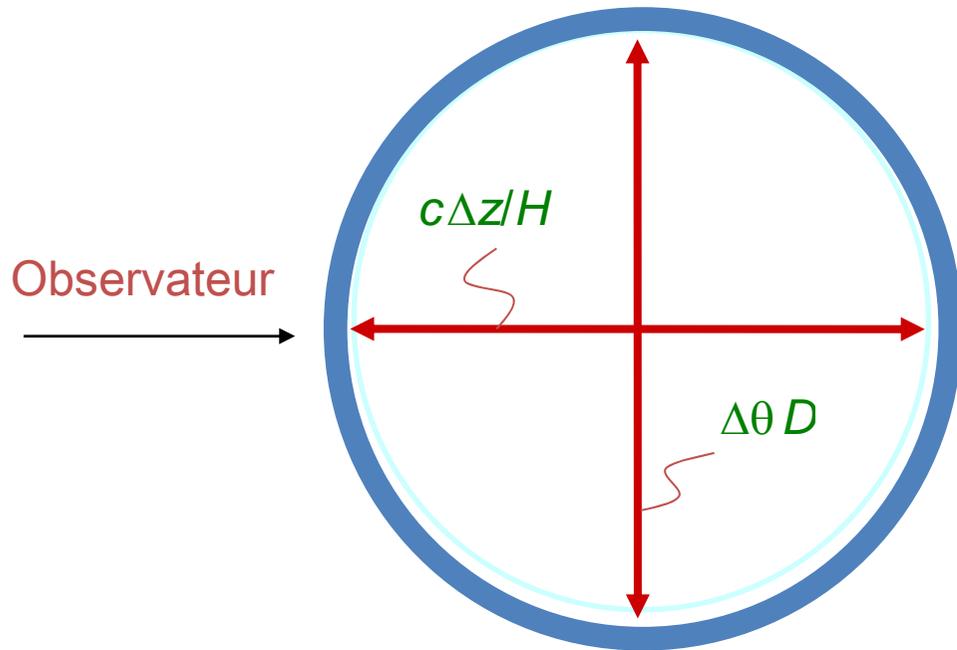
Et 2x longueur  
d'onde

Hütsi 2005



M. White 2007

# BAO: oscillations baryoniques



$$c \Delta z/H = \Delta \theta D$$

→ Possibilité de déterminer  $H(z)$

BAO radiales:  $dr = (c/H)dz$   
Dans le plan du ciel:  $dr = D_A d\theta$

Mieux que le fonds micro-onde  
3D au lieu de 2D!

$$\varepsilon = \frac{\Delta x_{\parallel}}{\Delta x_{\perp}} \propto \frac{1}{D_A(z)H(z)}$$

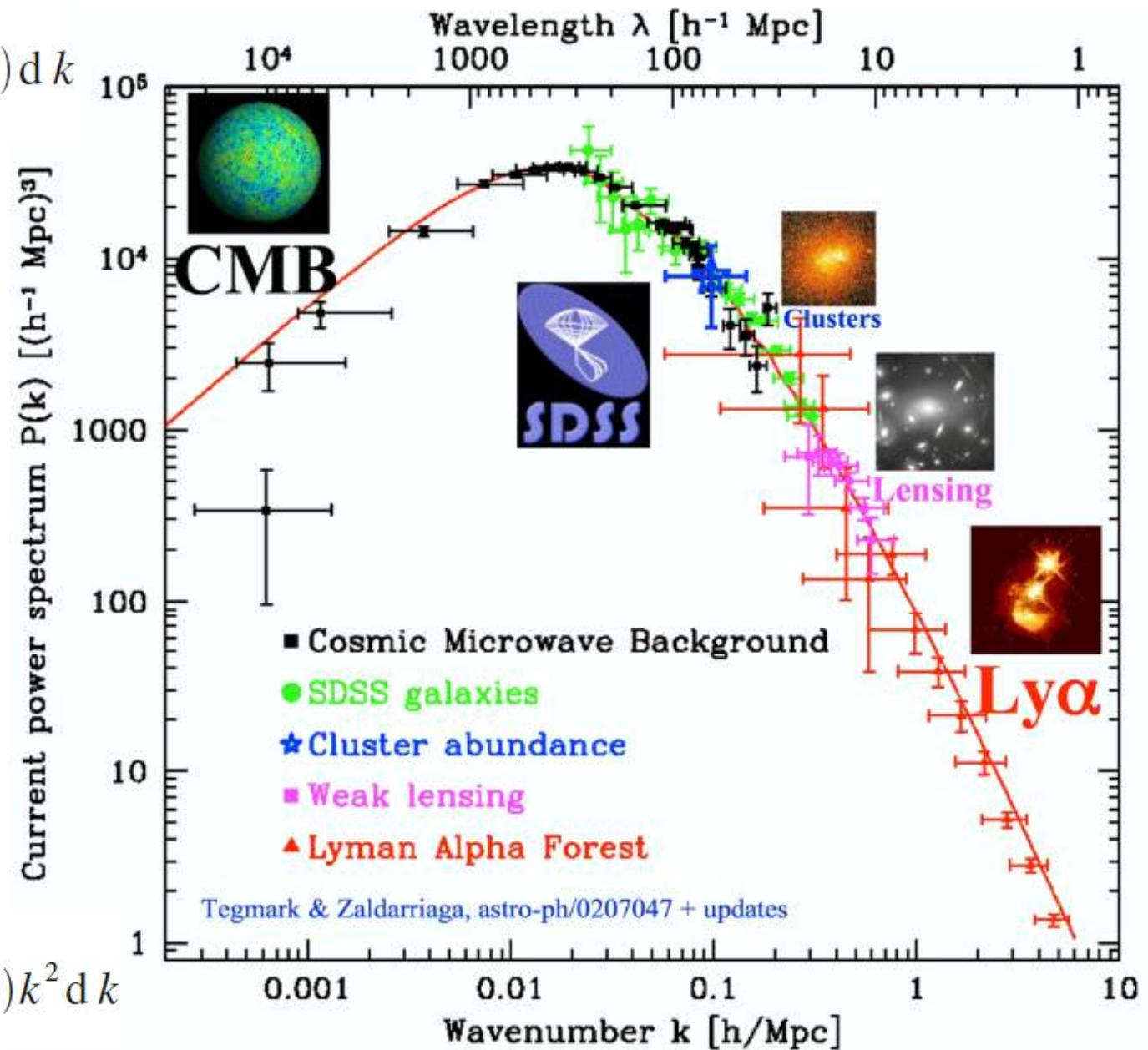
Alcock & Paczynski (1979)  
Test de la **cste cosmologique**

Peut tester le biais  $b$

$$\text{Ou } \beta = \Omega_m^{5/9}/b$$

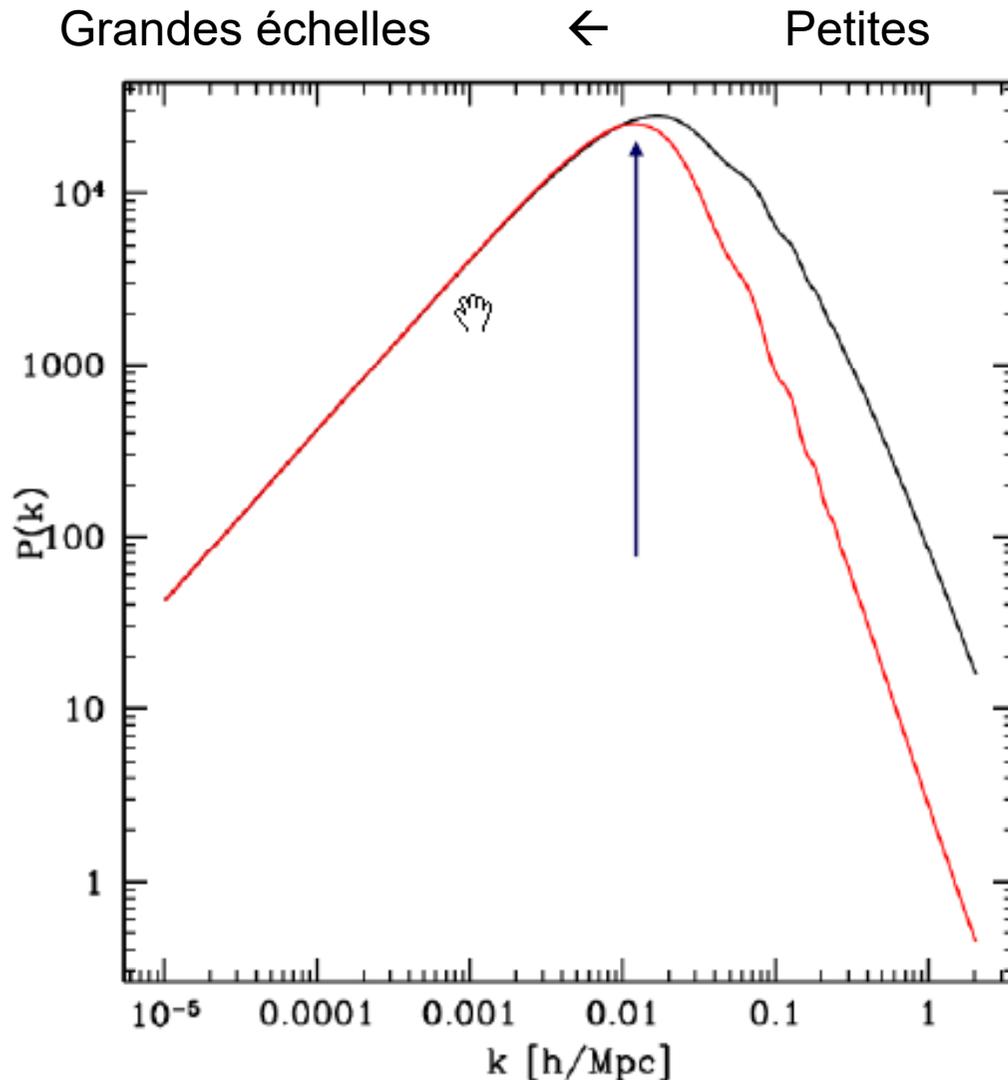
# Spectre de puissance des fluctuations de matière

$$\left\langle \left( \frac{\delta v}{v} \right)^2 \right\rangle \propto \int_k P(k) dk$$



$$\left\langle \left( \frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2 \right\rangle \propto \int_k P(k) k^2 dk$$

# Spectre de puissance linéaire



Echelle du maximum  $P(k)$   
= taille de l'horizon lors  
de l'équivalence matière  
rayonnement

50 000 ans après le Big-Bang

$$f_\nu = \Omega_\nu / \Omega_m = 1/3$$

$$\Sigma m_\nu = 3.7 \text{ eV}$$

Les neutrinos relativistes  
réduisent les petites structures

# Univers dominé par les vides

Amas de galaxies, 3- 15 Mpc, + réseau de filaments et surfaces comme des “murs” qui entourent les vides

L'Univers est dominé par les vides (60–80%) en volume, avec une distribution et une échelle caractéristique (40% du volume total)

Vides  $\sim 40$  Mpc, contraste de densité  $\delta\rho/\rho \sim -0.94$

L'échelle d'homogénéité statistique est de 100 -150 Mpc

Aux échelles supérieures, le contraste  $\delta\rho/\rho < 0.4$

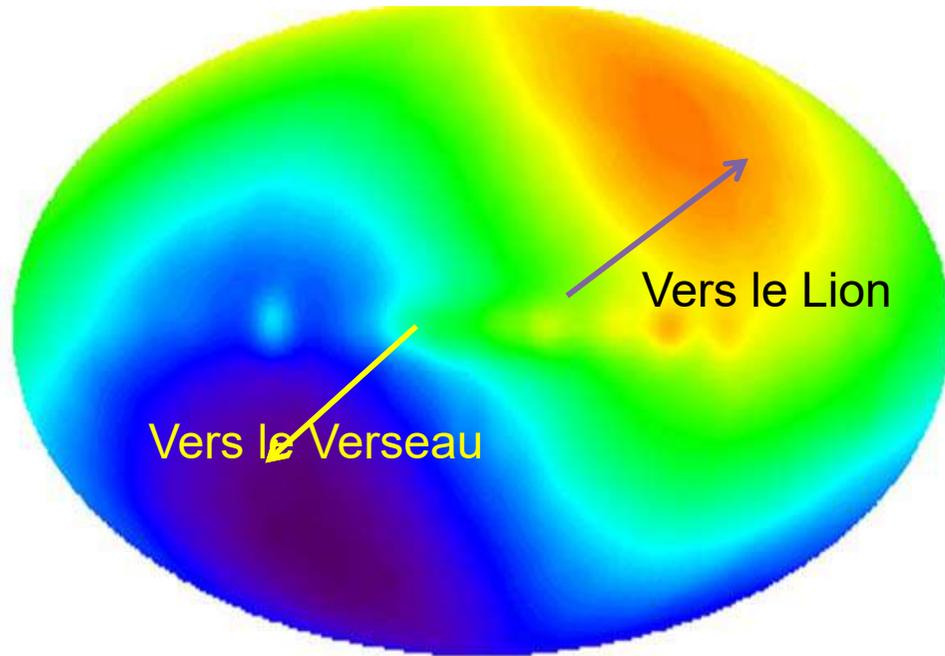
Les perturbations initiales sont amplifiées par les ondes acoustiques

L'échelle d'homogénéité statistique est proche de celle des BAO

**→ Les BAO peuvent être traitées dans le régime linéaire**

# Tests des modèles de backreaction

En dessous de cette échelle, il peut y avoir des expansions différentielles dues aux inhomogénéités



$$T' = \frac{T_0}{\gamma(1 - (v/c) \cos \theta')}$$

Vitesse du Groupe Local-CMB  
= 645 km/s

Vsoleil-LG= 318km/s

➔ Dipole de 3.31 mK

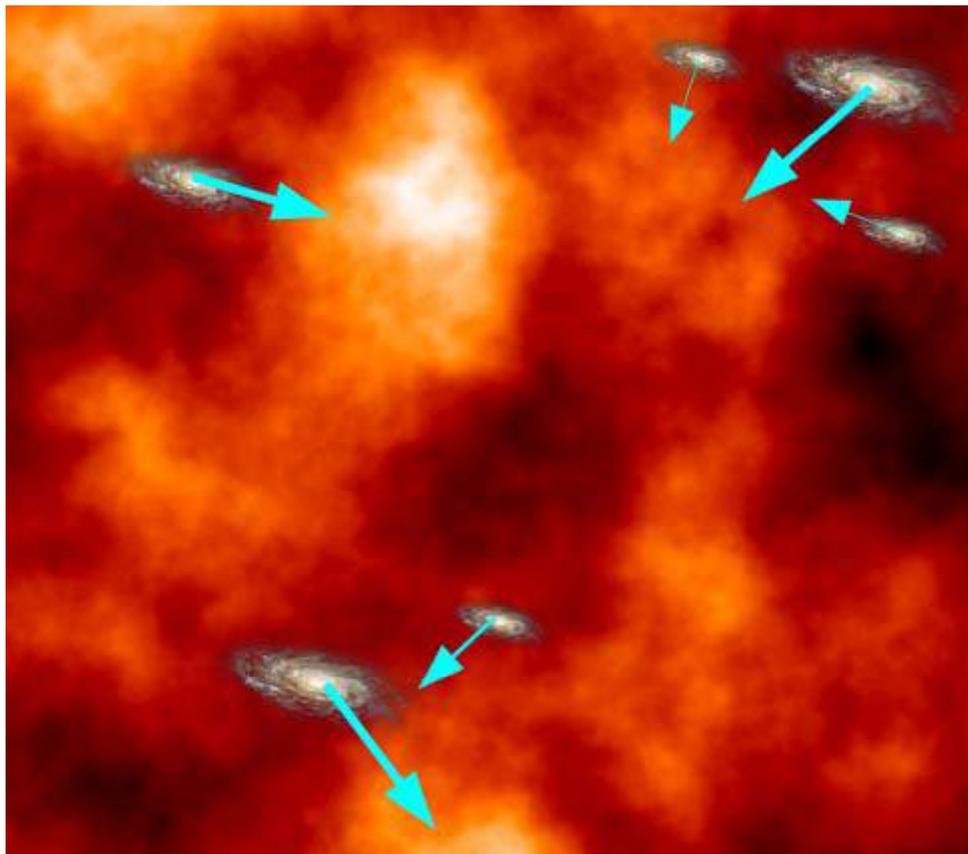
Détermination des vitesses particulières

$$V_{pec} = cz - H_0 r$$

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}) = \frac{H_0 \Omega_{M0}^{0.55}}{4\pi} \int d^3 \mathbf{r}' \delta_m(\mathbf{r}') \frac{(\mathbf{r}' - \mathbf{r})}{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|^3}$$

# Flots cosmiques locaux

Vitesses particulières: atteindre le potentiel sous-jacent  $V_{pec} = cz - H_0 r$   
 $\Omega_b, \Omega_{DM}, \Lambda$

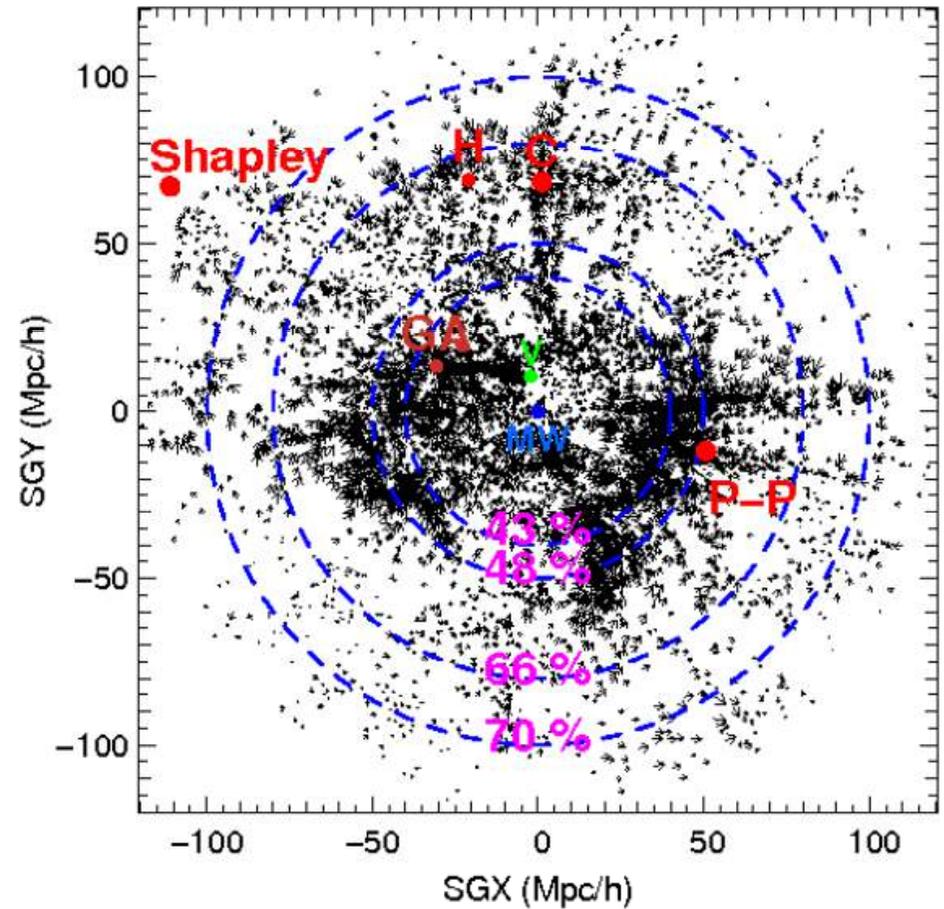
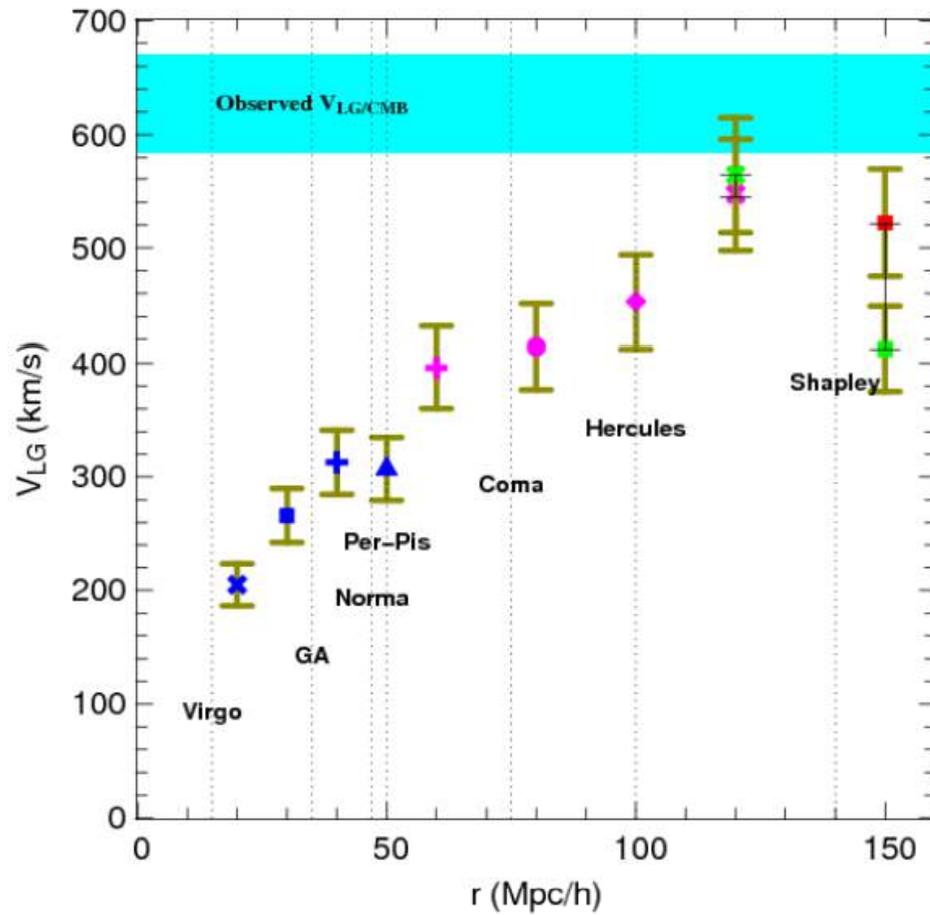


## Indicateurs de Distance

- Tully-Fisher
- Branche des géantes rouges (Tip)
- Fluctuations de la brillance de surface
- Plan Fondamental
- Cepheides

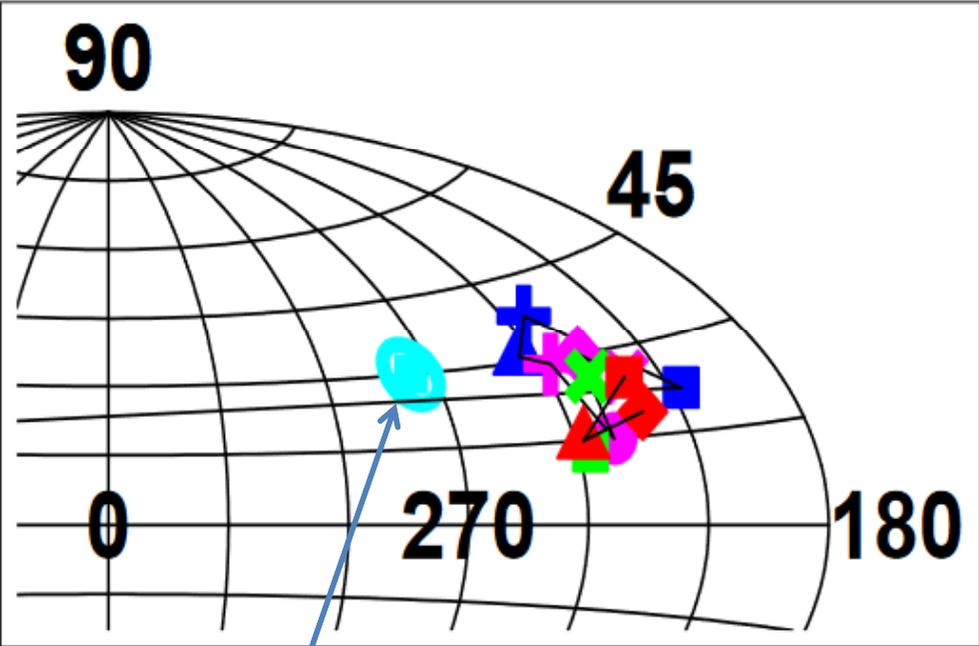
# La cause du dipôle

Pas encore complètement élucidée



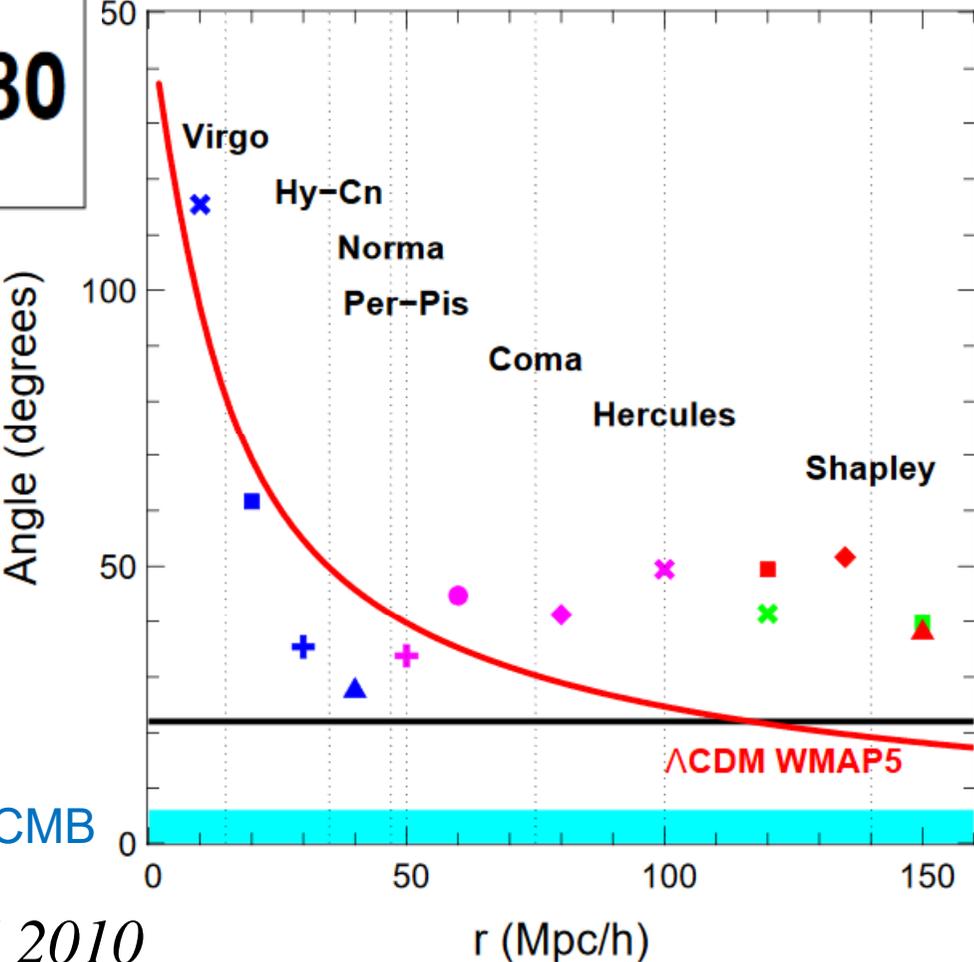
*Lavaux et al 2010*

# Dans quelle direction?



Dipole CMB

Selon les volumes considérés

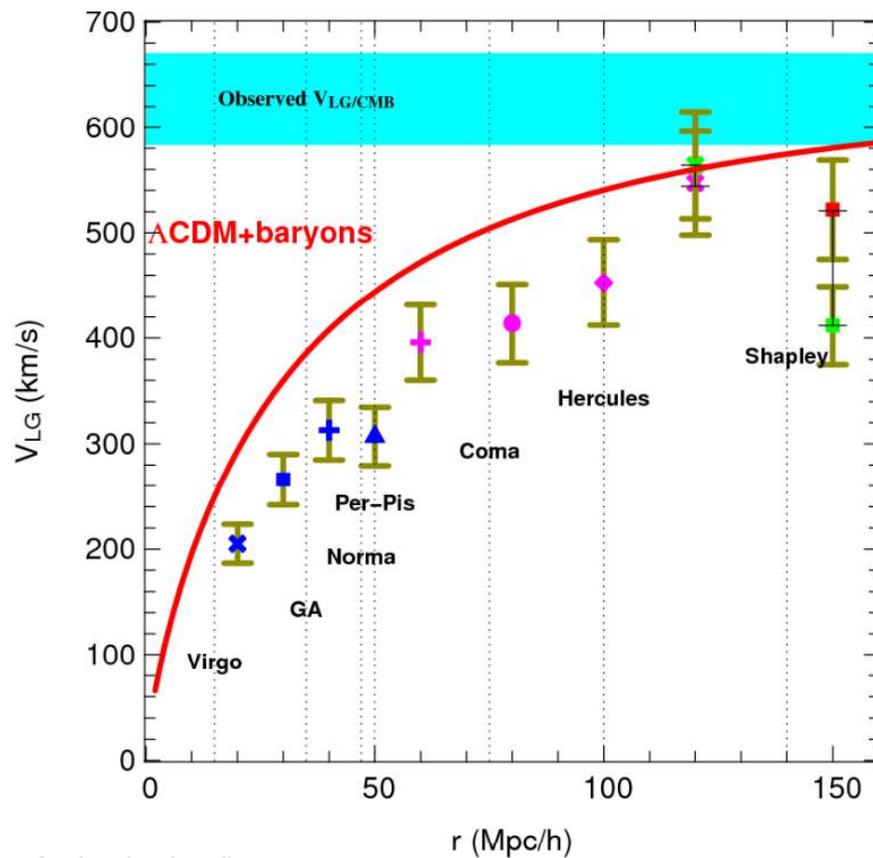


Dipole CMB

*Lavaux et al 2010*

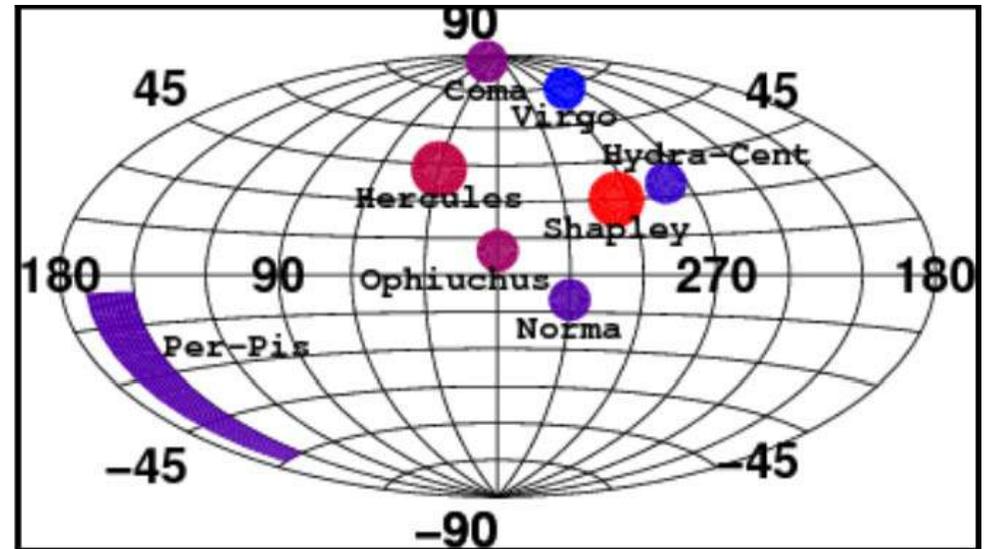
# Reste encore une inconnue

$$H(z) = H_0 \sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_k(1+z)^2 + \Omega_\Lambda}$$



Univers plat,  $\Omega_k = 0$   
 $\Omega_m = 0.3$ ,  $\Lambda$ CDM

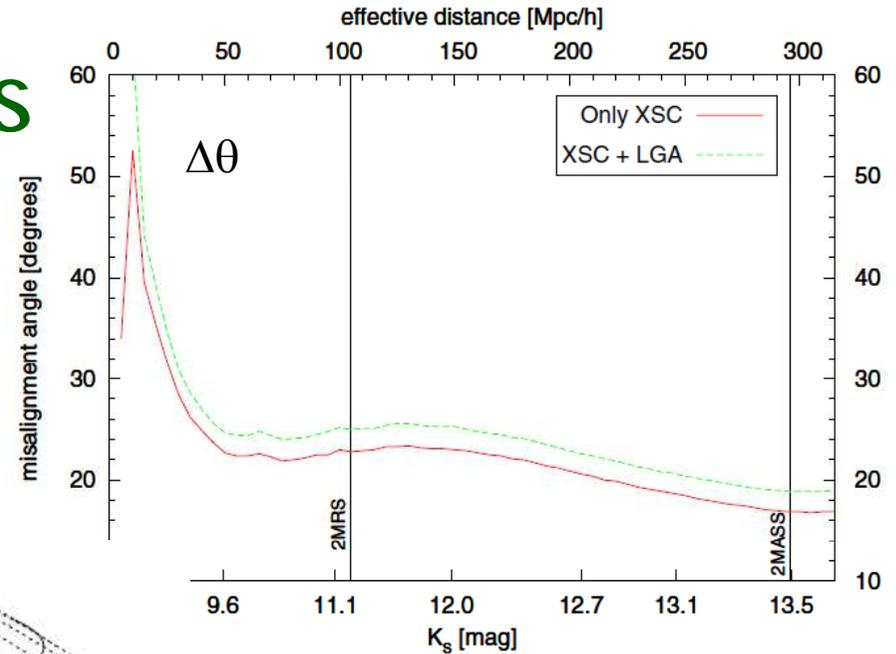
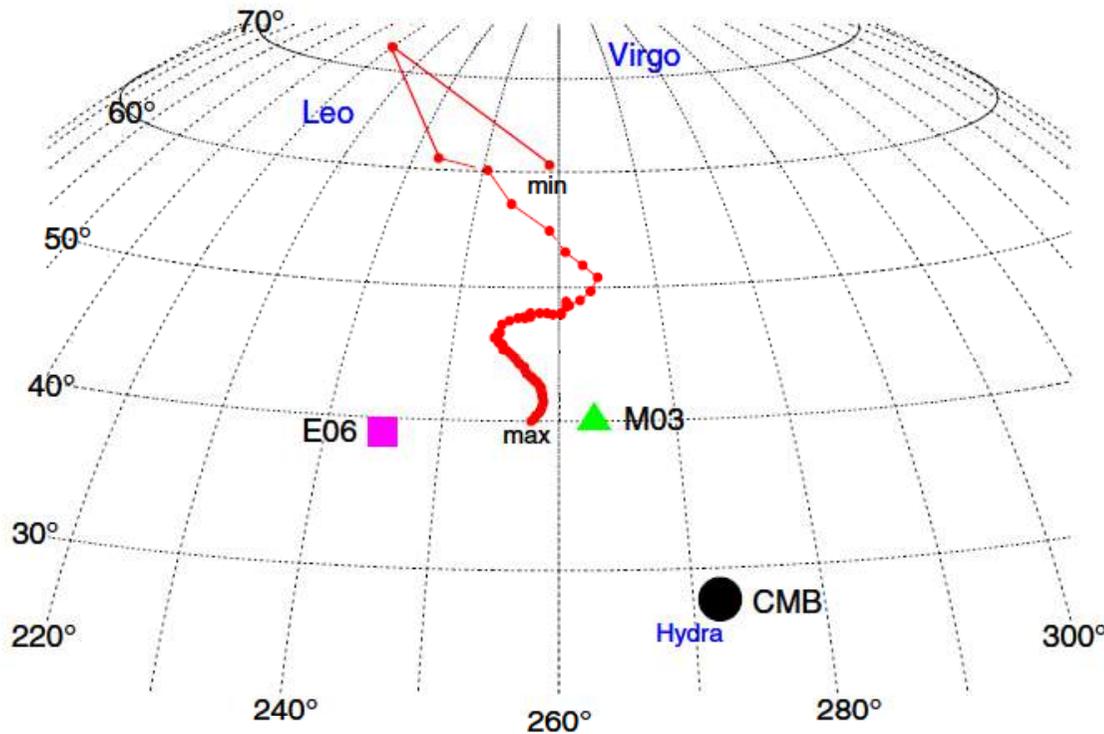
Obs  $\Omega_m = 0.15-0.2$



*Lavaux et al 2008*

# Le dipole ne converge pas

2MASS galaxies en NIR, profondeurs  
 min et max 7 et 400 Mpc  
 (Virgo 17Mpc, Hydra 47 Mpc,  
 Leo > 120 Mpc)



L'analyse des données  
 donne une valeur de  
 $\Omega_m = 0.20$

$$\beta = \Omega_m^{0.55}/b = 0.38$$

M03: Maller et al 2003

E06 Erdogdu et al 2006

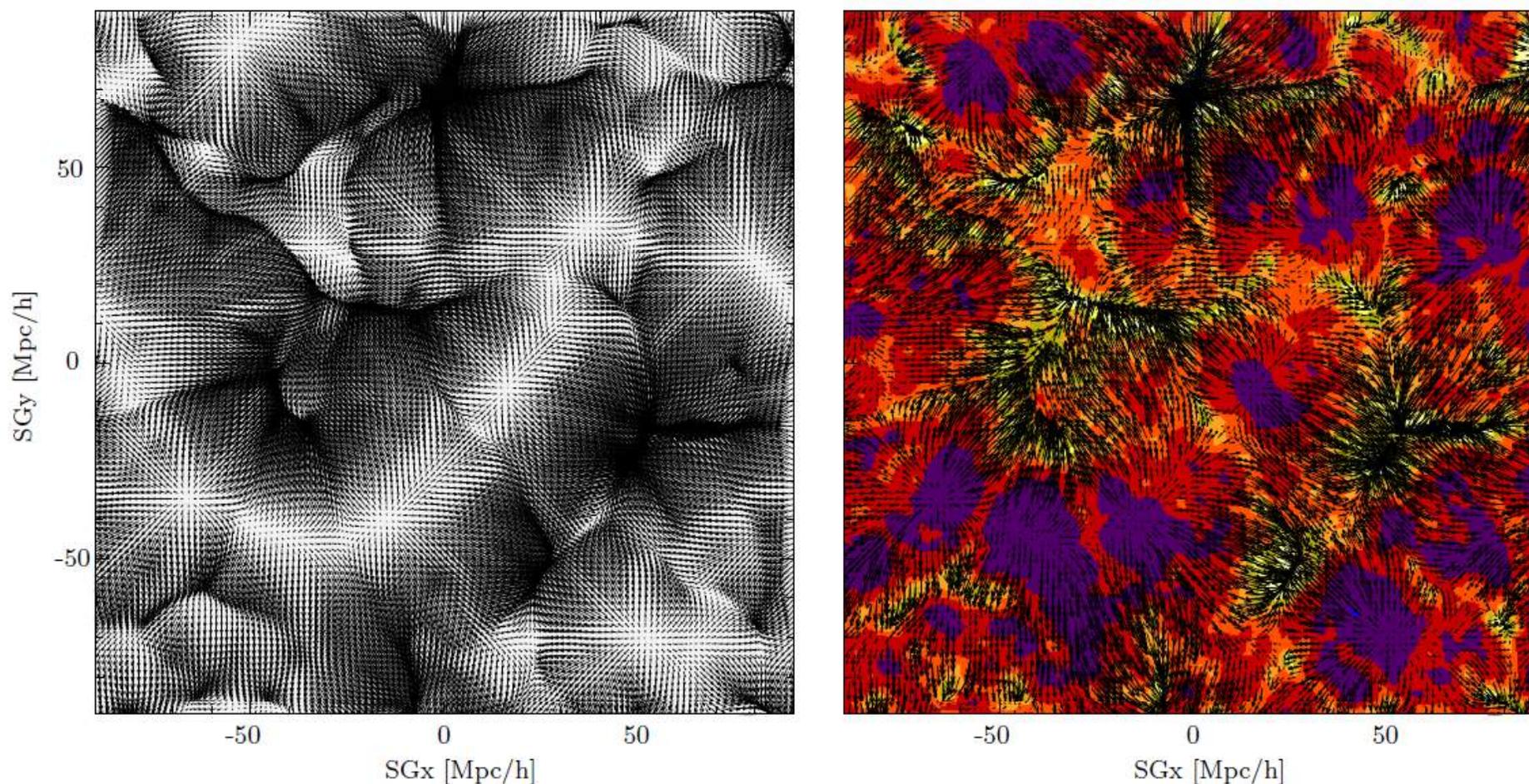
*Bilicki et al 2011*

# Simulations de l'Univers proche

Les SNIa proches donnent une valeur de  $H_0$  différente

Elles suivent le dipôle, et sont donc biaisées+

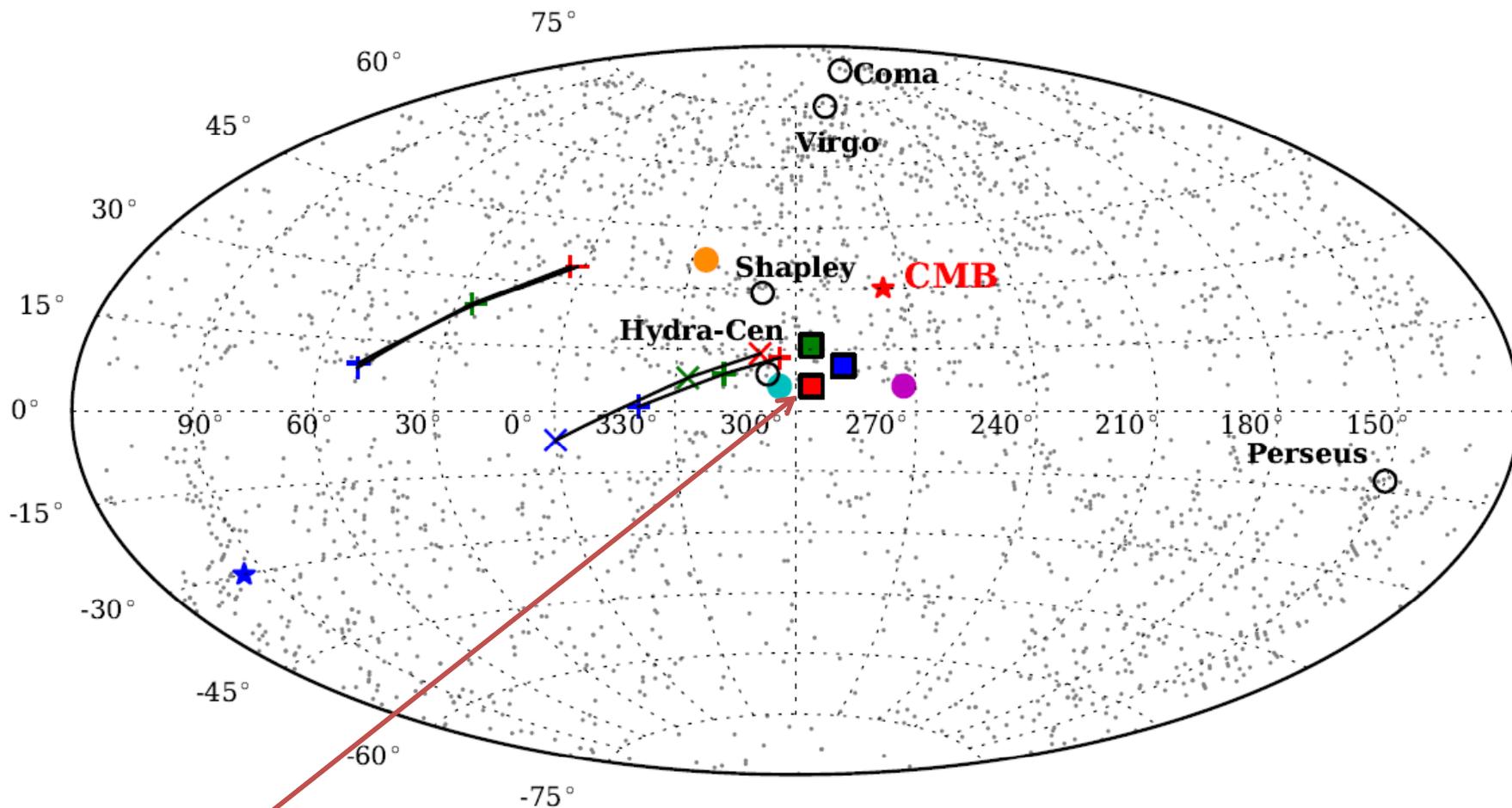
Vitesses divergentes autour de Virgo, boost  $H_0 \rightarrow \Delta H_0 = 1.76 \text{ km/s/Mpc}$



*Hess & Kitaura 2016*

# Flot cosmique résiduel ~200km/s

Malgré l'augmentation du nombre de galaxies, vitesse résiduelle toujours inexpliquée

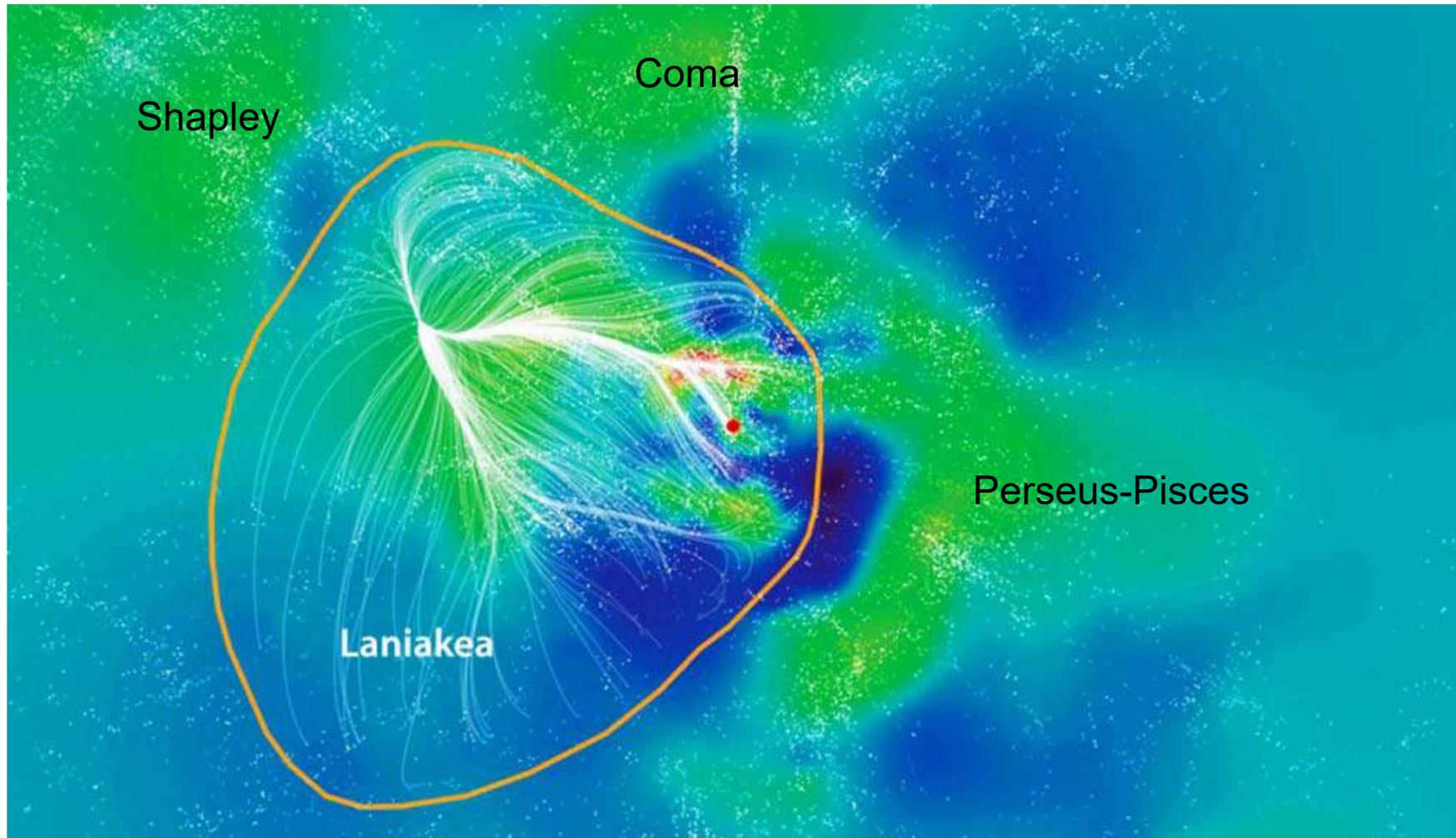


Bleu, vert, rouge  
Volume croissant

*Springob et al 2016*

# Nous sommes au bord d'un superamas

Contient les super-amas de la Vierge, de Hydre-Centaure, Paon-Indien  
Structure en train de se diluer (160Mpc,  $10^{17}M_{\odot}$ )



*Tully et al 2014*

# Effet Rees -Sciama

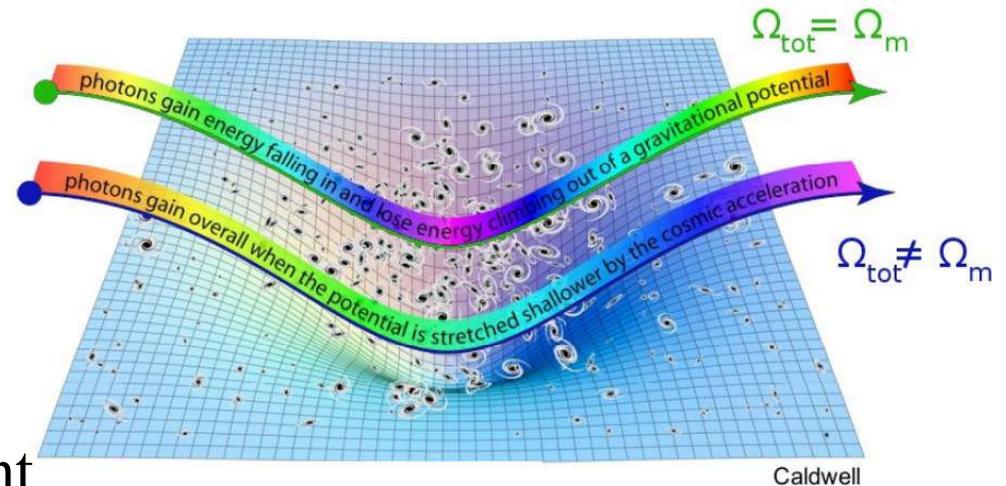
L'effet ISW tardif (dans l'Univers proche), quand il devient non-linéaire est appelé **Rees-Sciama**

En présence de  $\Lambda$ , les super-amas et vides voient leur contraste de densité diminuer

→ Les photons micro-onde sortent plus bleus (plus énergiques) des super-amas (et le contraire des vides)

Pour connaître l'effet, il faut effectuer des simulations du parcours de la lumière dans le régime non linéaire relativiste

Algorithme de ray-tracing



# Simulations expansion différentielle relativiste

L'effet des inhomogénéités est simulé exactement, sans faire l'approximation d'homogénéité

Impossible de rendre compte des observations, sans un effet non-cinématique

$$(1+z)_{\text{obs}} = (1+z)_{\text{expHo}}(1+z)_{\text{pec}}$$

Ce qui n'entre pas dans les vitesses particulières  $v_{\text{pec}}$ , est appelé effet **non-cinématique**

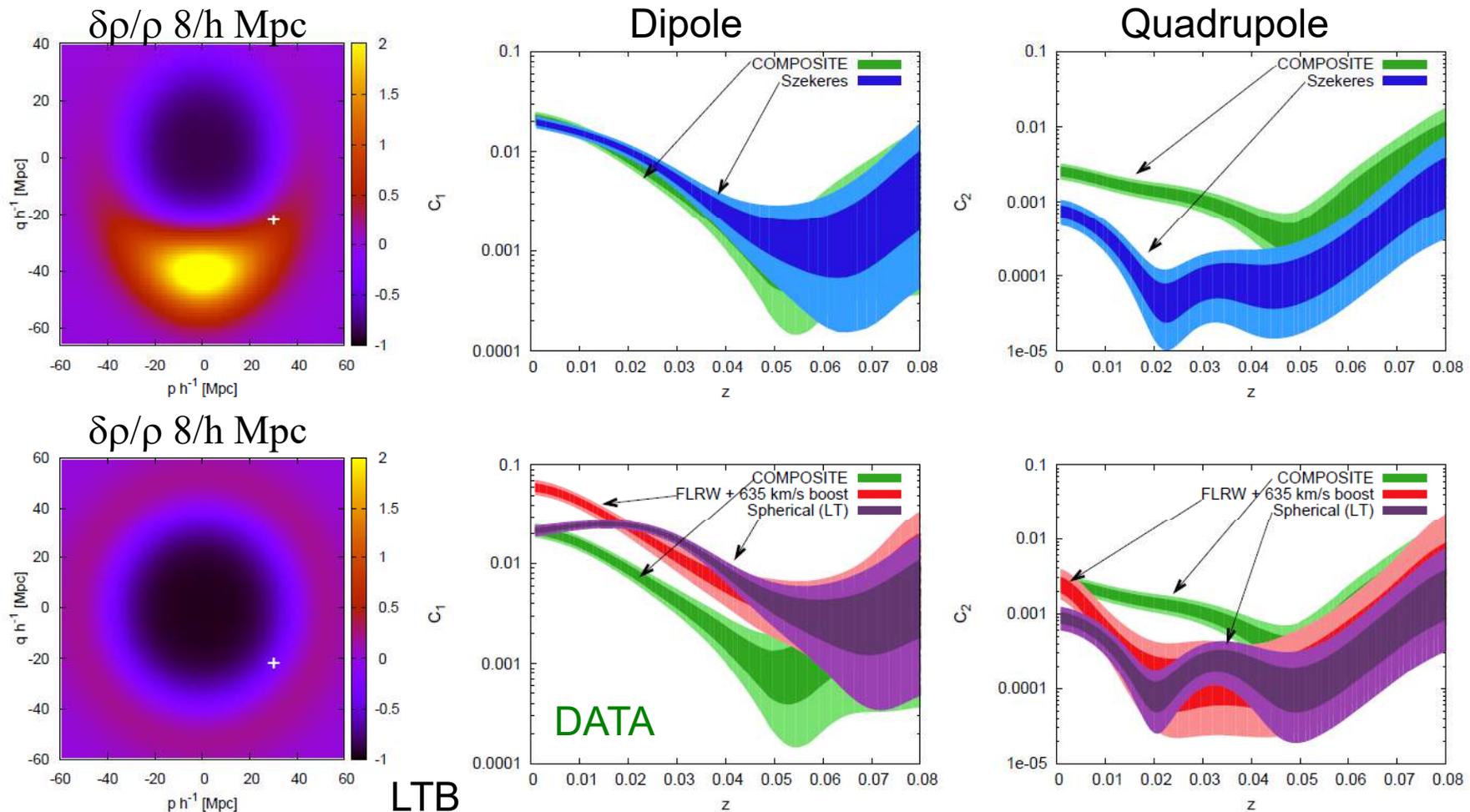
L'expansion sous-jacente est supposée venir du modèle isotrope local, doté d'une métrique FLRW moyenne

Le dipôle dans le CMB correspond à  $\Delta T/T = 1.23 \cdot 10^{-3}$ , du même ordre de grandeur de  $\beta = v/c = 2.1 \cdot 10^{-3}$ , mais il reste des résidus

# Simulations avec le modèle de Szekeres

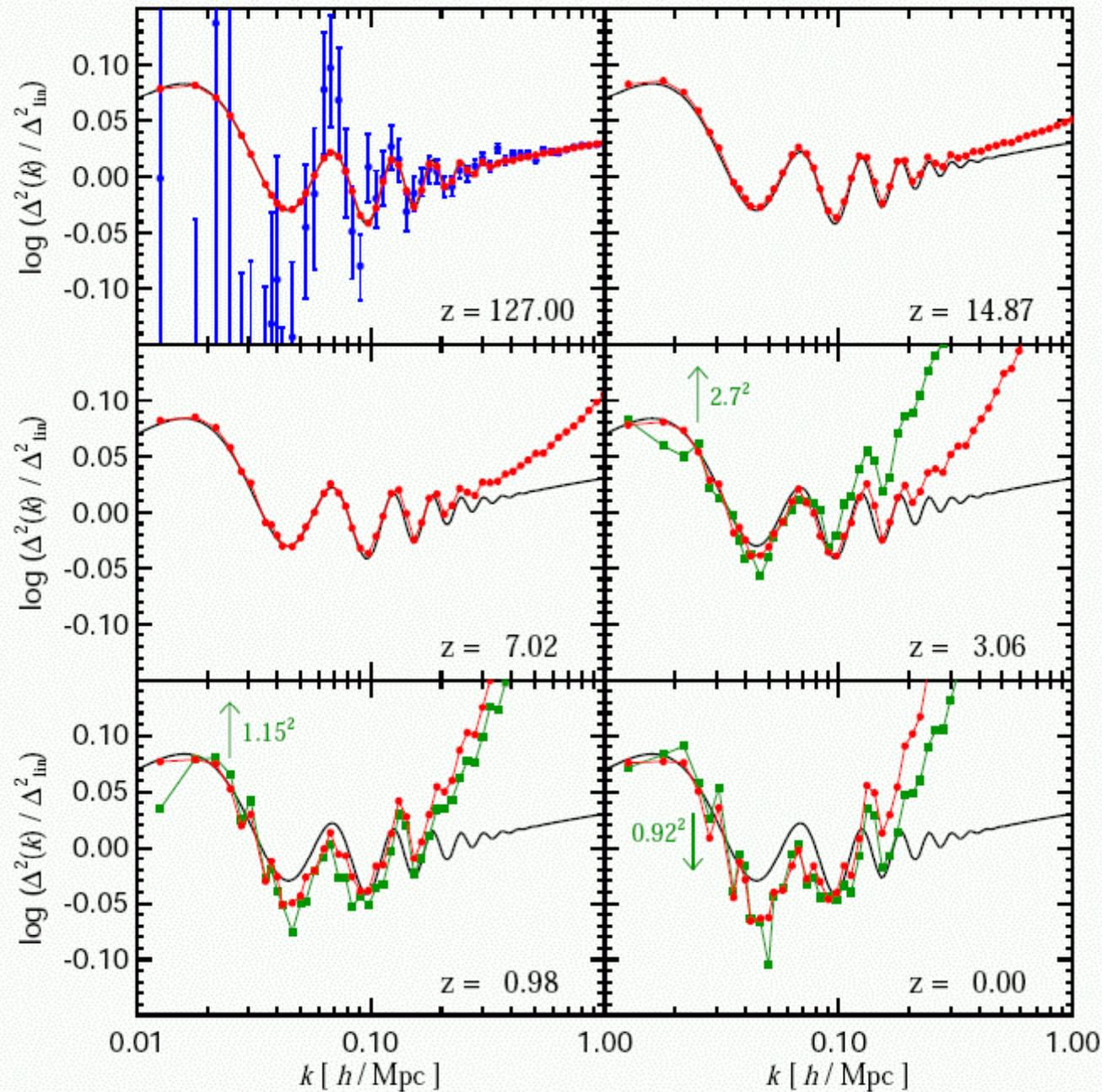
L'effet des inhomogénéités (vide local, Grand attracteur) est simulé exactement, en résolvant numériquement les équations d'Einstein sur le chemin du photon → effet des anisotropies sur l'expansion

*Bolejko et al 2016*



# Simulations des BAO

Springel et al 2005

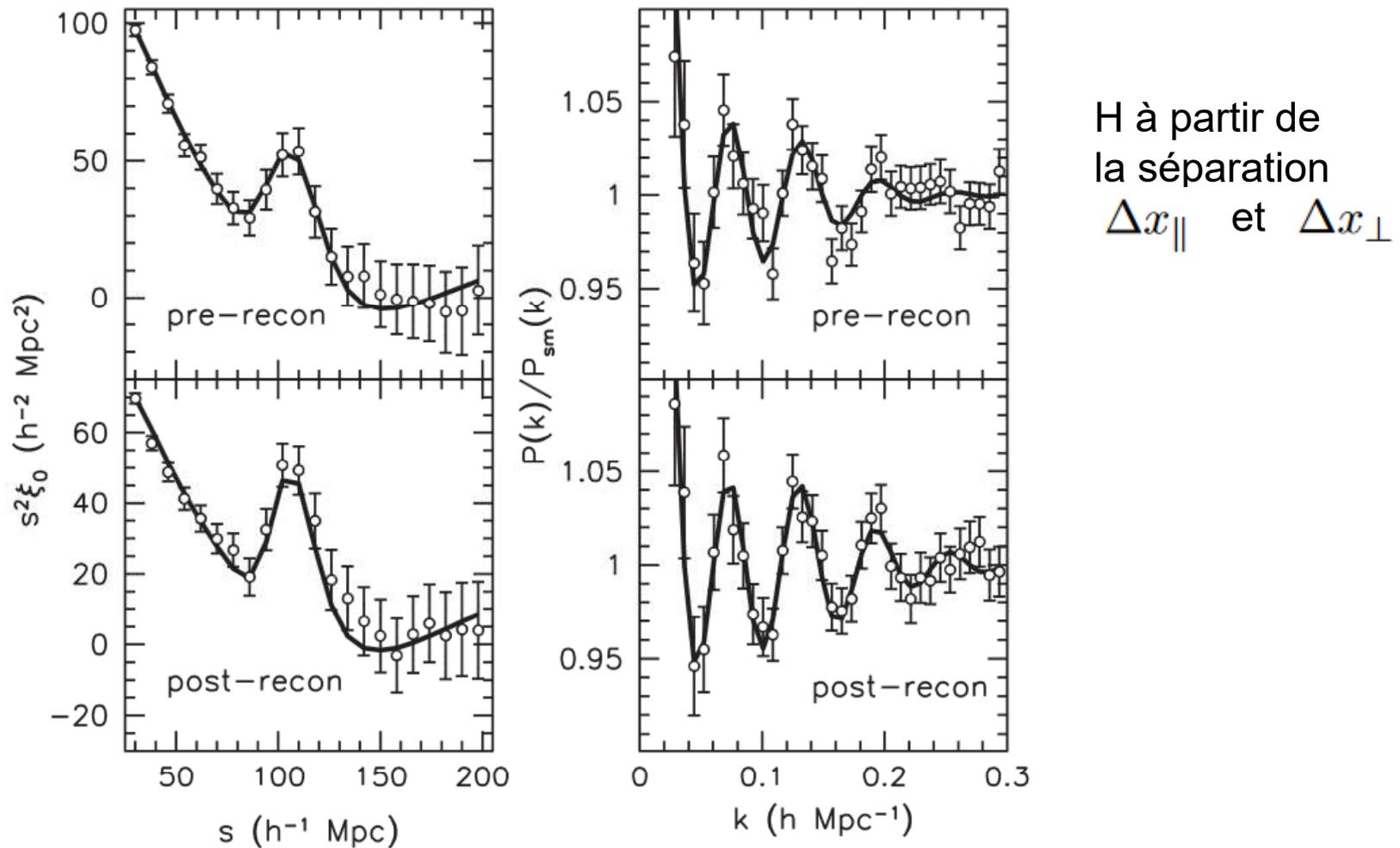


Spectre de puissance  
DM et galaxies  
dans la région BAO  
(après division du  
spectre lineaire CDM)

Bleu: tous les points  
Noir: moyenne

# Etat des mesures de BAO

Avec les galaxies du SDSS,  $8500^{+2}$ ,  $0.2 < z < 0.7$ , horizon sonore  $rd$   
 $H=96.8 \pm 3.4$  km/s/Mpc Distances/ $rd$  compatibles avec  $\Lambda$ CDM



# BAO avec la forêt Ly $\alpha$

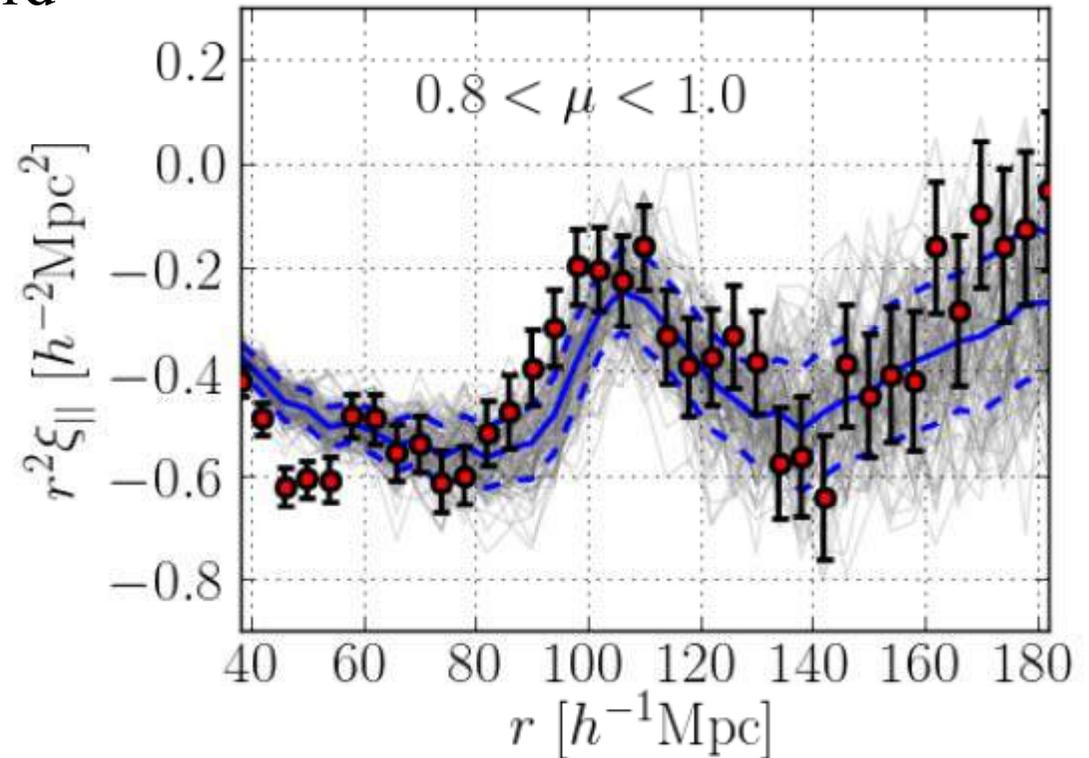
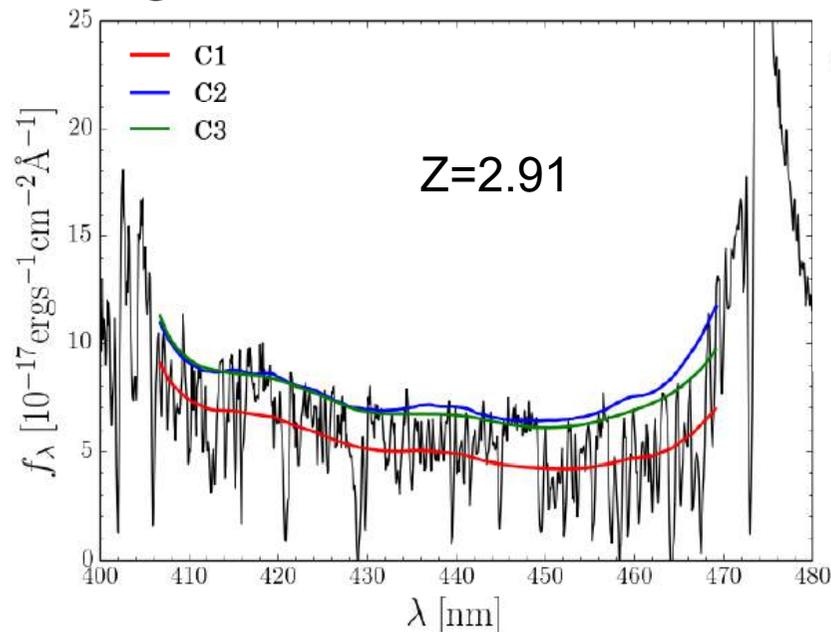
Absorbants de gaz ionisé dans les filaments cosmiques  
devant les quasars lointains 137 000 quasars  $2.1 < z < 3.5$

Horizon sonore à  $z=2.34$  : rd

DA/rd 7% plus petit

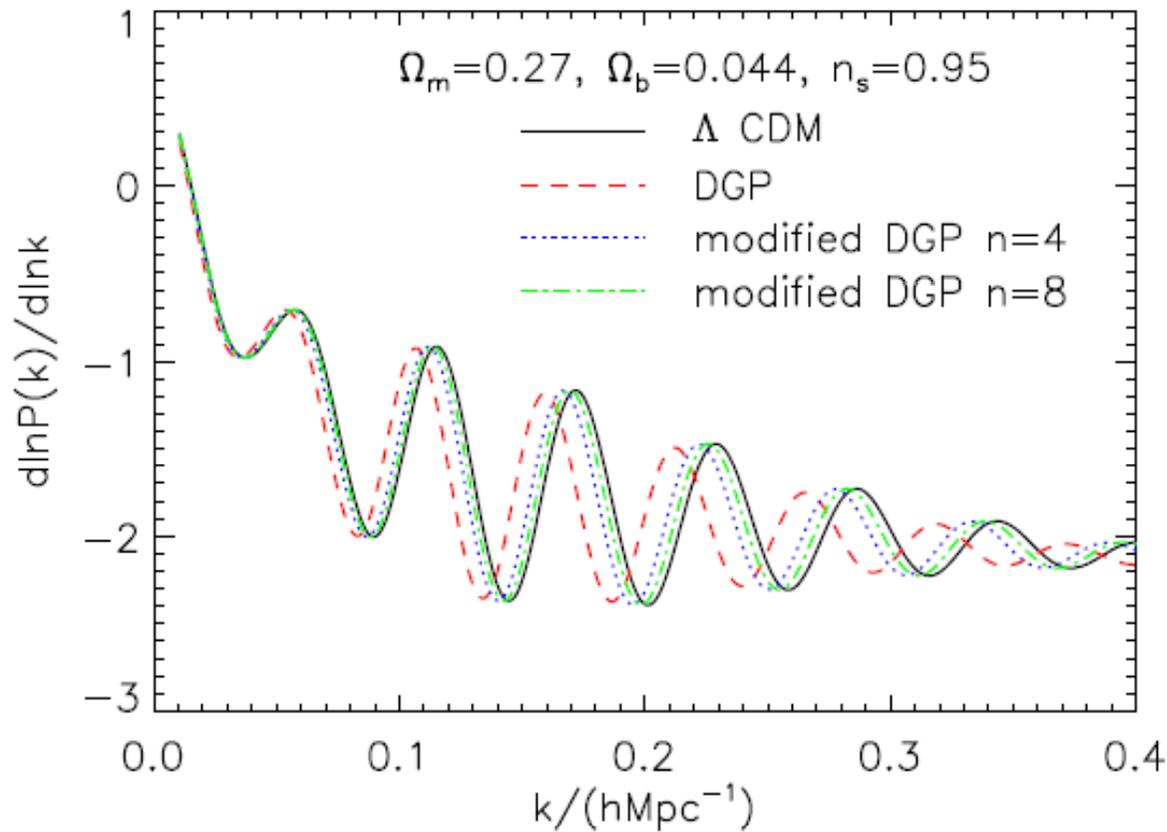
DH/rd 7% plus grand  
que LCDM

Significatif à  $2.5\sigma$



*Delubac et al 2015*

# Test des modèles de gravité modifiée



*Yamamoto et al 2006*

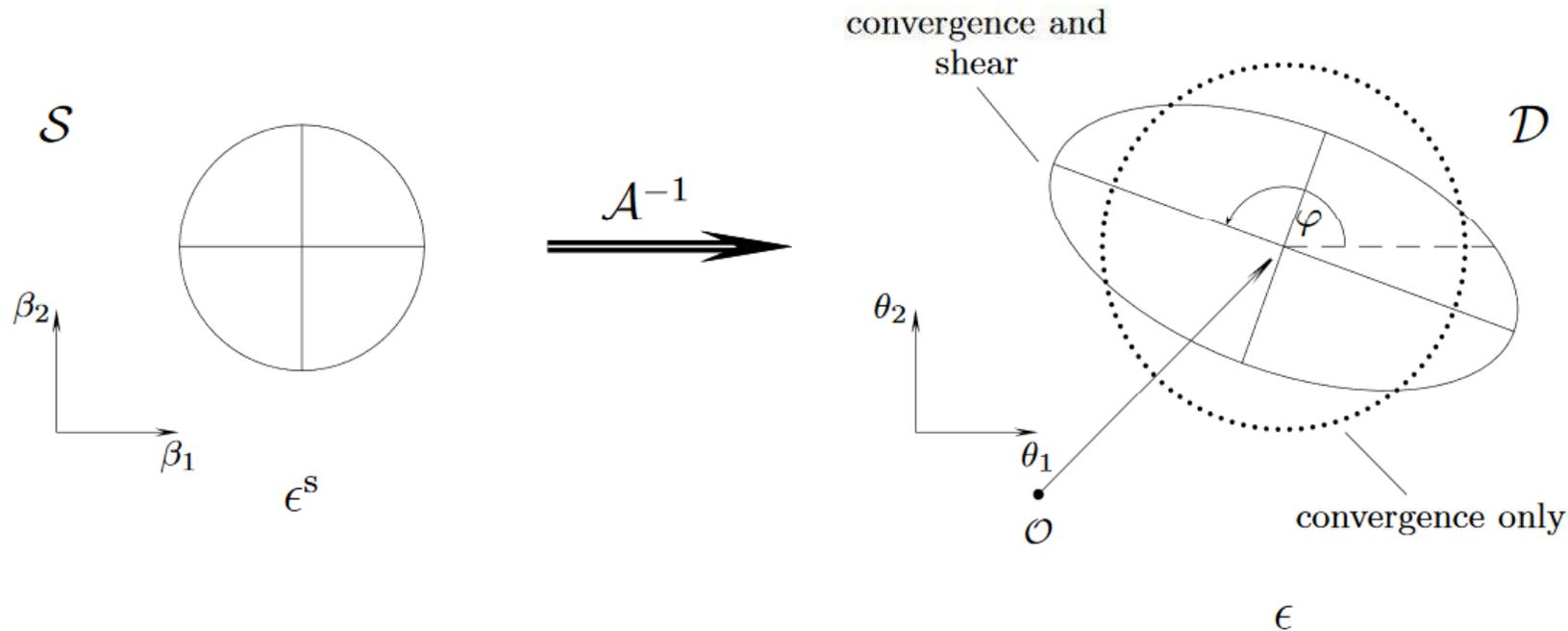
**Dvali-Gabadadze-Porrati « DGP model »**

# Lentilles gravitationnelles

→ La distance en fonction du redshift dépend de  $\Lambda$

$$d_p \equiv \chi(z) = \frac{c}{H_0} \int_{a'=1/(1+z)}^{a'=1} \frac{da}{a \sqrt{\Omega_m/a - (\Omega_m + \Omega_\Lambda - 1) + \Omega_\Lambda a^{-(1+3w)}}$$

→ Croissance des structures, dépend de  $\Lambda$

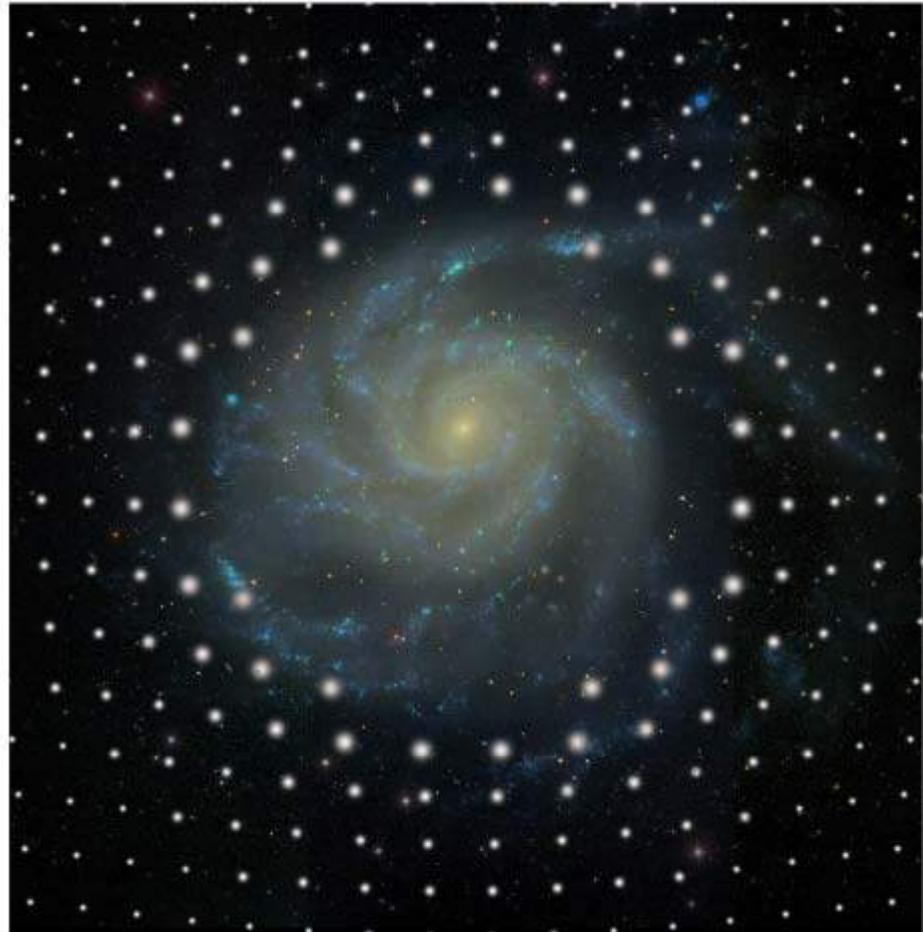
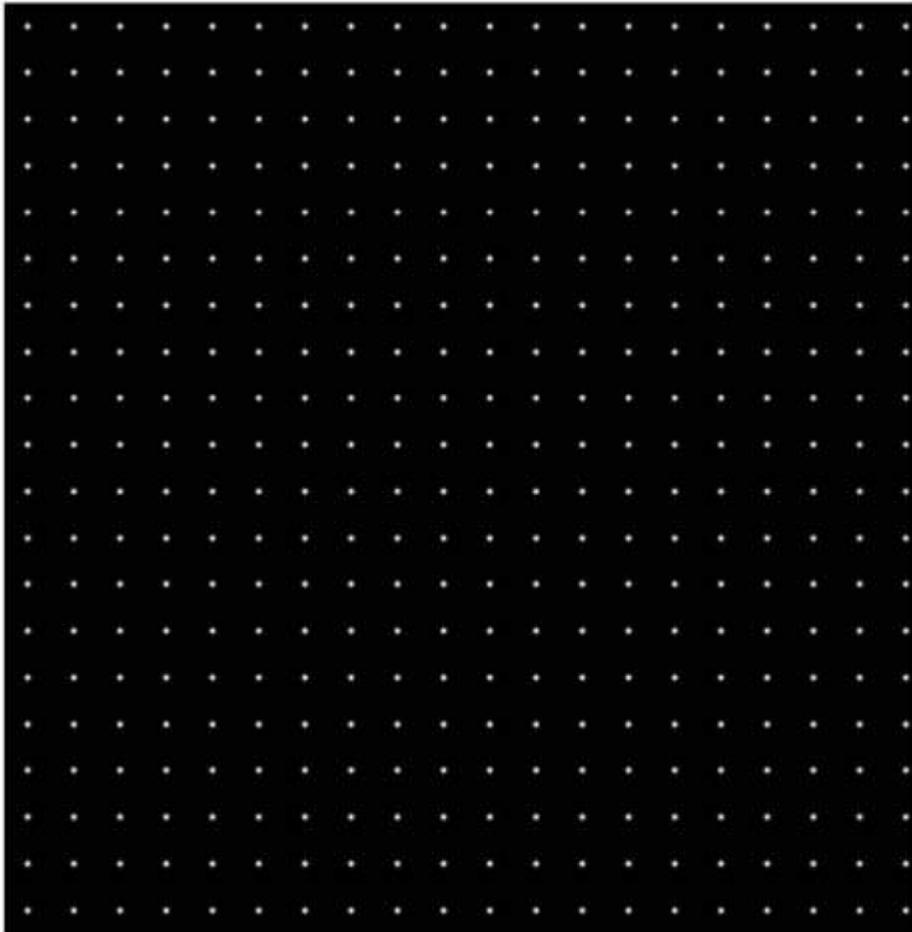


# Réduit le nombre de galaxies

Amplification des sources de fond

Par augmentation de leur rayon, Conservation de la brillance de surface

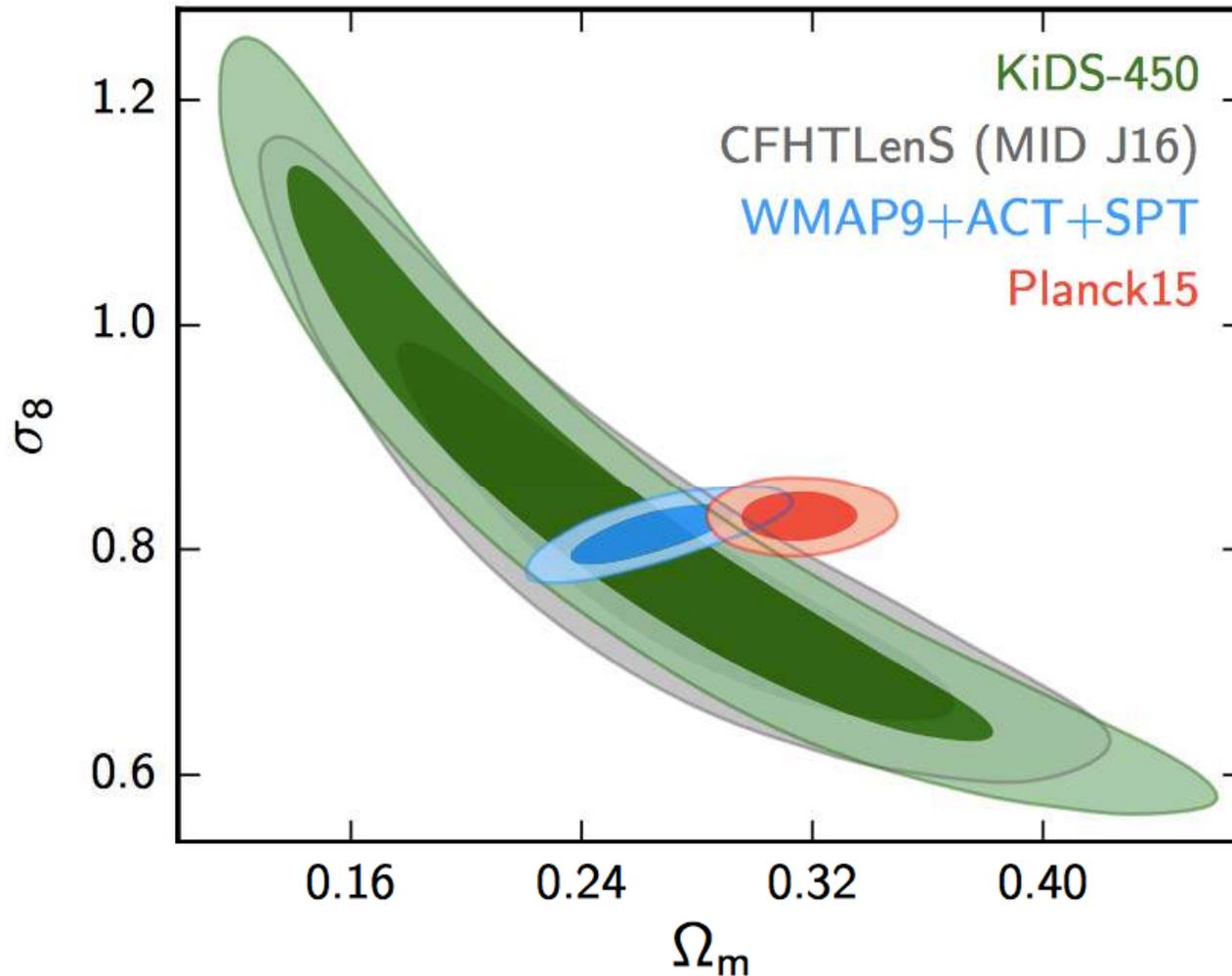
Reduction de la densité de sources



# Récents résultats discordants?

Hildebrandt et al 2016 KIDS: 450<sup>o2</sup> cisaillement gravitationnel

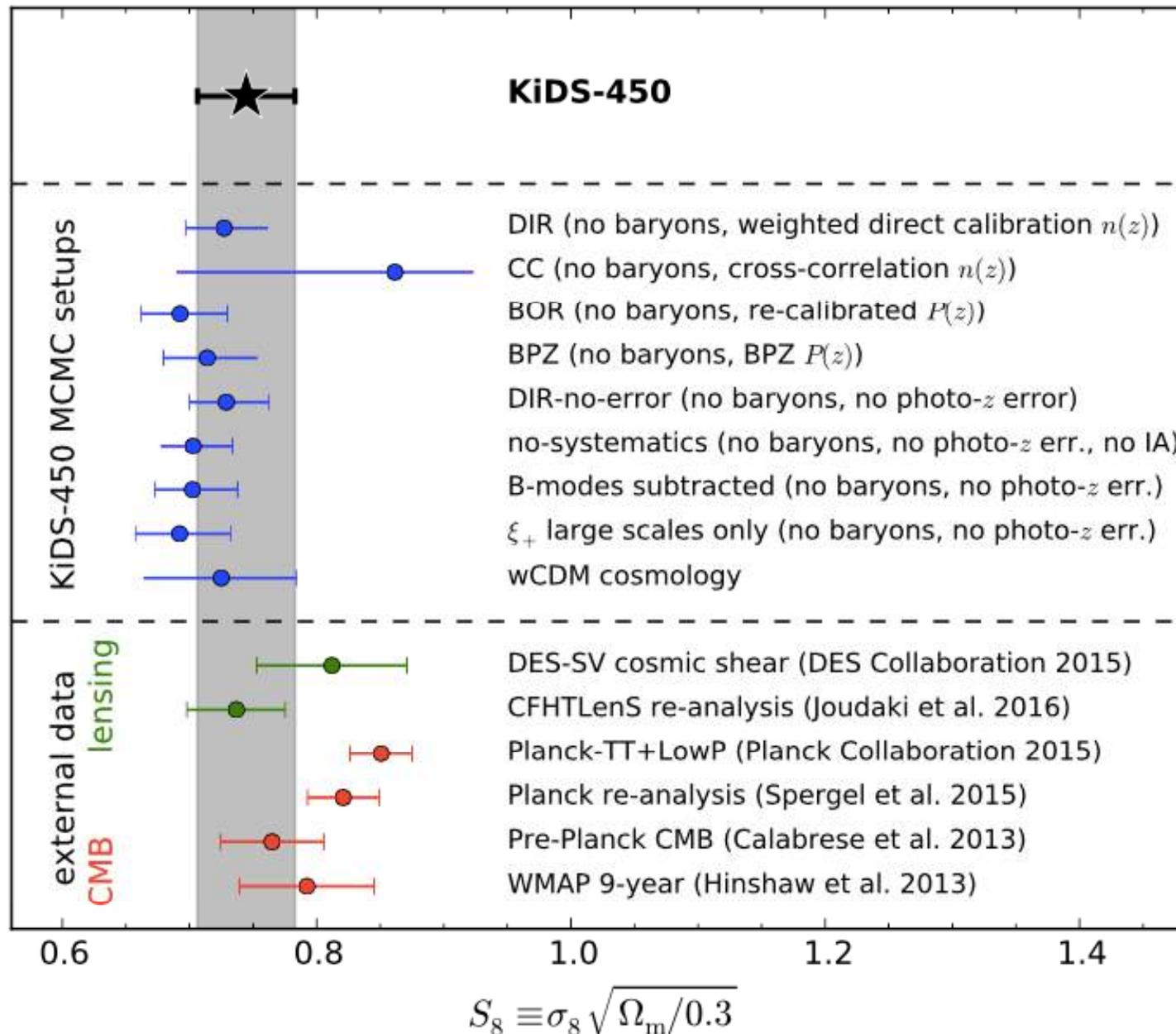
$$S_8 \equiv \sigma_8 \sqrt{\Omega_m/0.3} = 0.745 \pm 0.039.$$



15 millions  
de galaxies

Discordance  
avec Planck-2015

# Comparaison de plusieurs données



# Amas de galaxies et énergie noire

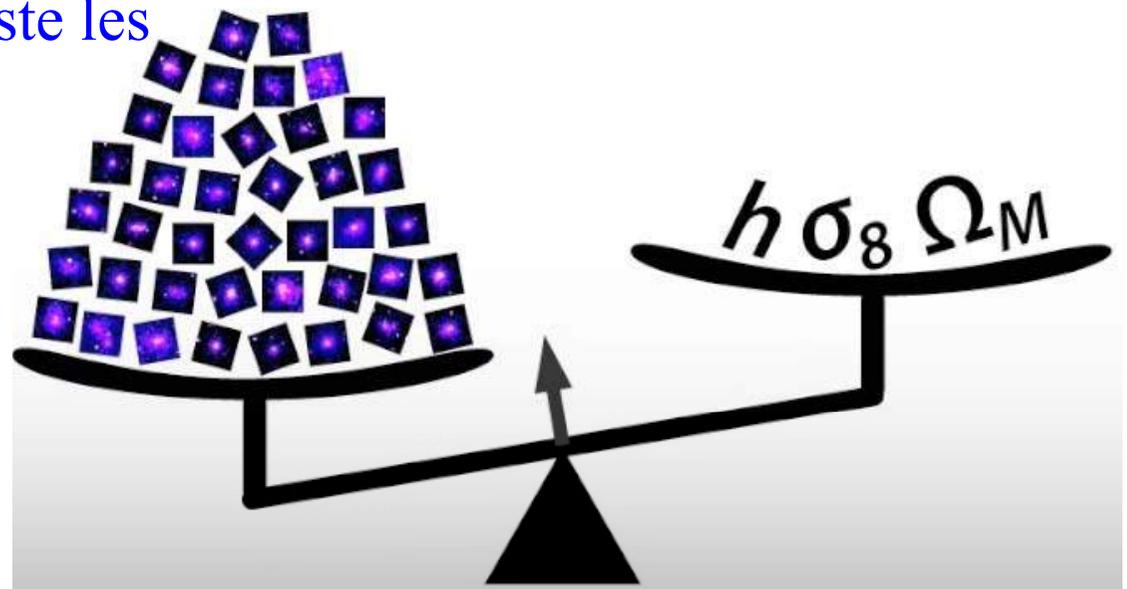
Les amas apportent des tests différents et complémentaires

→ Sur les distances,  $f_{\text{gas}} \sim f_{\text{bar}}$  supposé universel (17%)

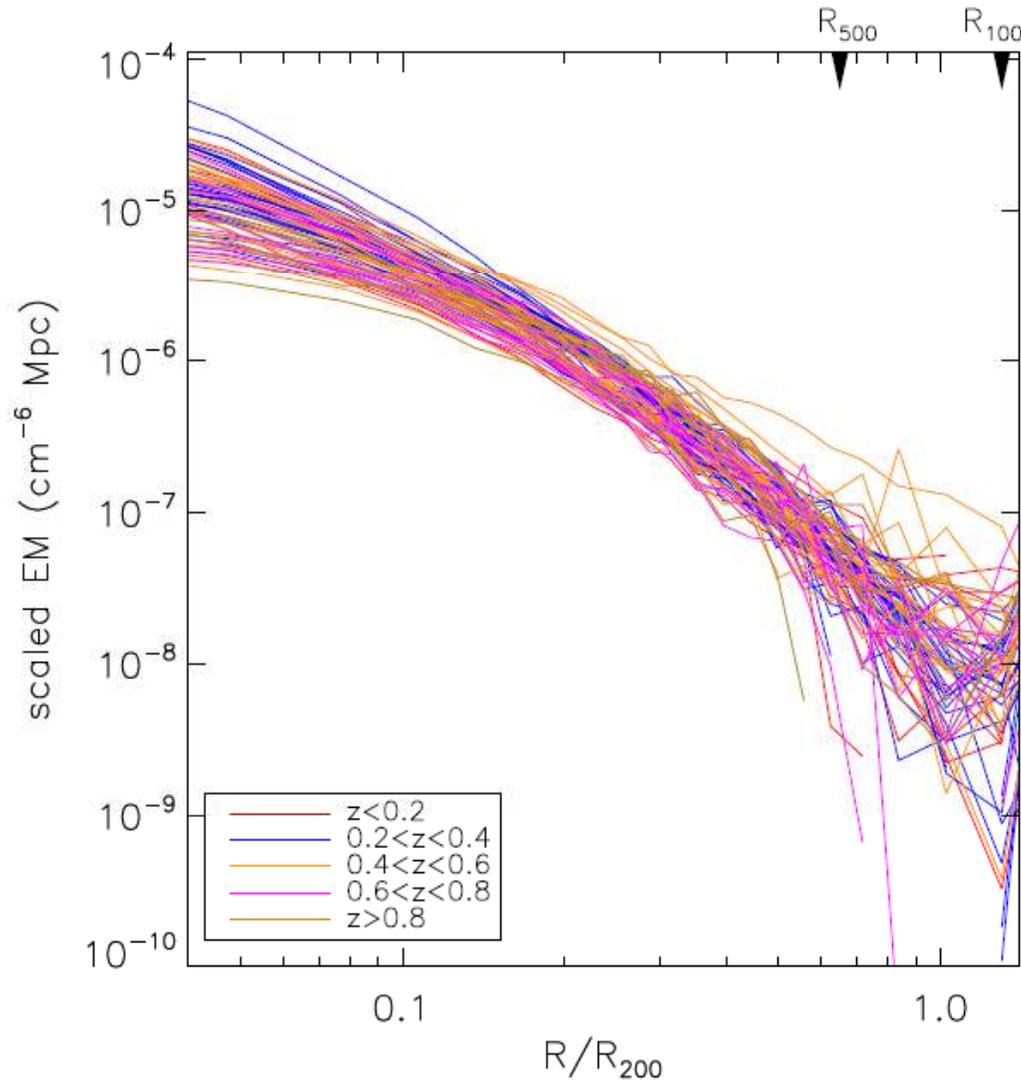
→ Sur la croissance des structures: l'énergie noire s'oppose à la gravité, et limite leur formation

Etude en fonction de  $z$

→ La vitesse de croissance teste les modèles de gravité modifiée, aux très grandes échelles



# Distribution self-similaire



Au centre, ce n'est plus vrai,  
à cause des phénomènes de  
flots de refroidissement



*Morandi & Sun 2016*

# Constance du rapport baryons/total

$$f_{gas} = \frac{M_{gas}}{M_{tot}}$$

$M_{gas}$  masse de gaz X  
 $M_{tot}$  masse totale de l'amas de galaxies

Le gaz chaud est l'essentiel des baryons  $f_{gal} = 0.19h^{0.5} f_{gas}$

**La fraction de baryons des amas = fraction universelle de baryons**

$$f_{gas} + f_{gal} = f_{baryon} = b \frac{\Omega_b}{\Omega_m}$$

$$\Omega_m = \frac{b\Omega_b}{f_{gas}(1 + 0.19h^{0.5})}$$

**b est le facteur de biais**, rend compte du gaz éjecté lors de la formation de l'amas

Distances mesurées pour  $0.06 < z < 1.2$  320 amas

$$f_{gas}(z) = \frac{b\Omega_b}{\Omega_m(1 + 0.19\sqrt{h})} \left[ \frac{d_A^{ref}(z)}{d_A^{mod}(z)} \right]^{1.5}$$

$$M_{gas} \propto d_A(z)^{2.5}$$

$$M_{tot} \propto d_A(z) \propto V^2 R$$

test combiné avec +HST+BBNS priors

# Test des amas de galaxies

Emission en rayons-X de 320 amas de galaxies

$0.056 < z < 1.24$ ,  $\langle kT \rangle > 3$  keV avec le satellite-X Chandra

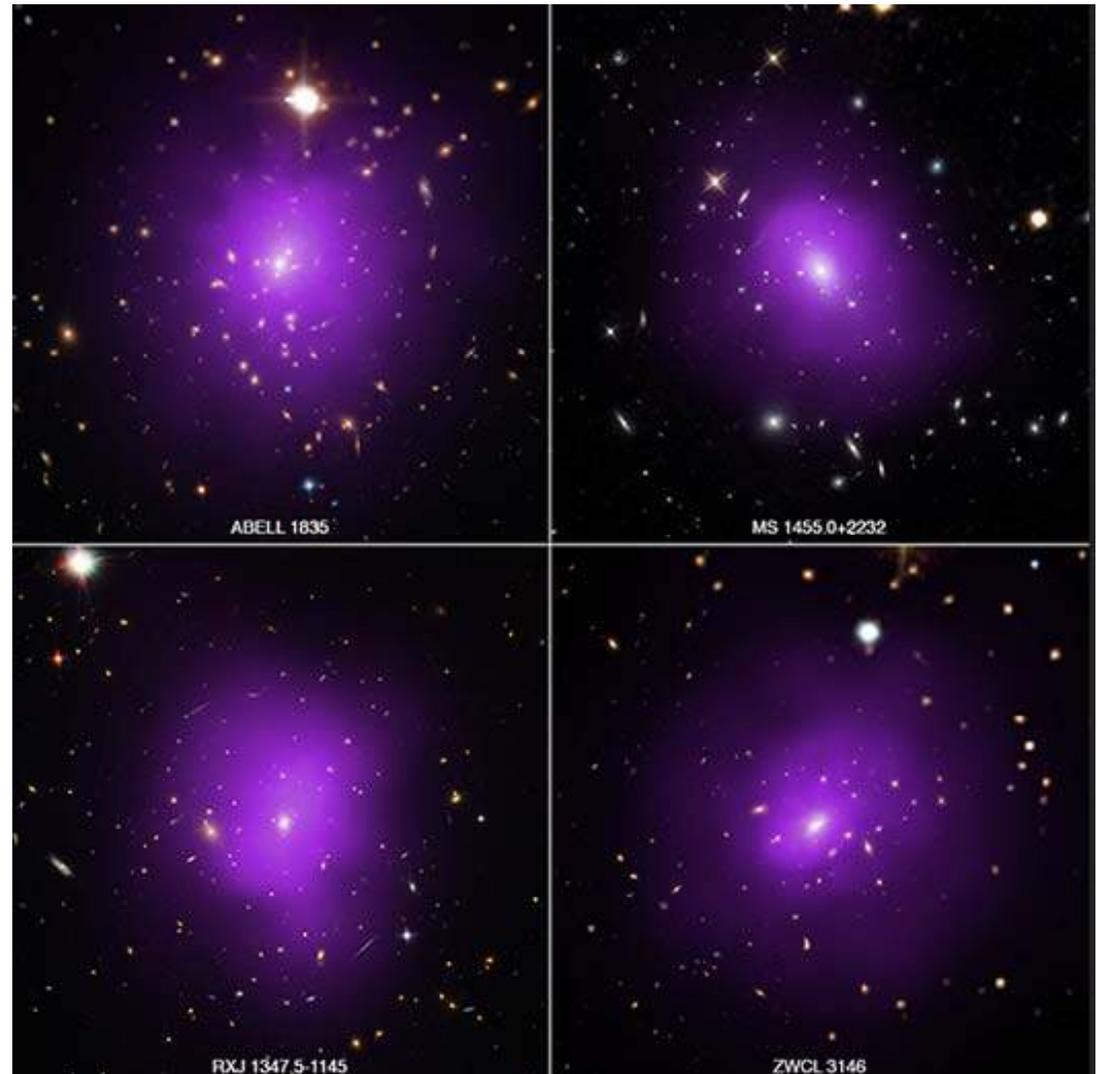
Les amas sont self-similaires  
Surtout les parties externes

Equation d'état de  
l'énergie noire  $P = w \rho$

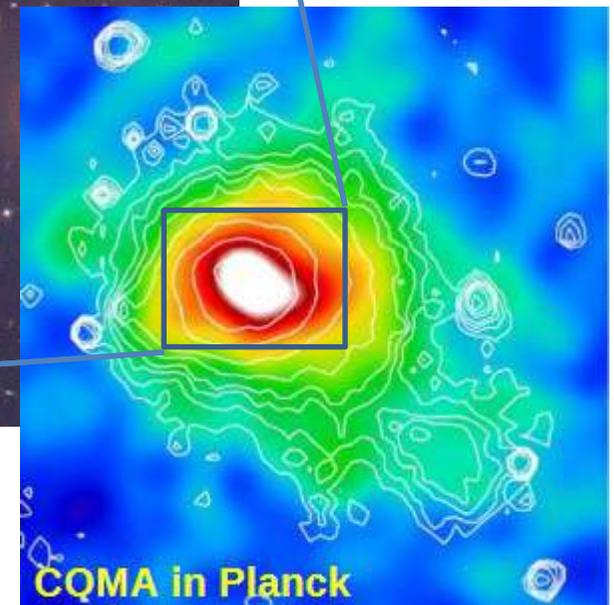
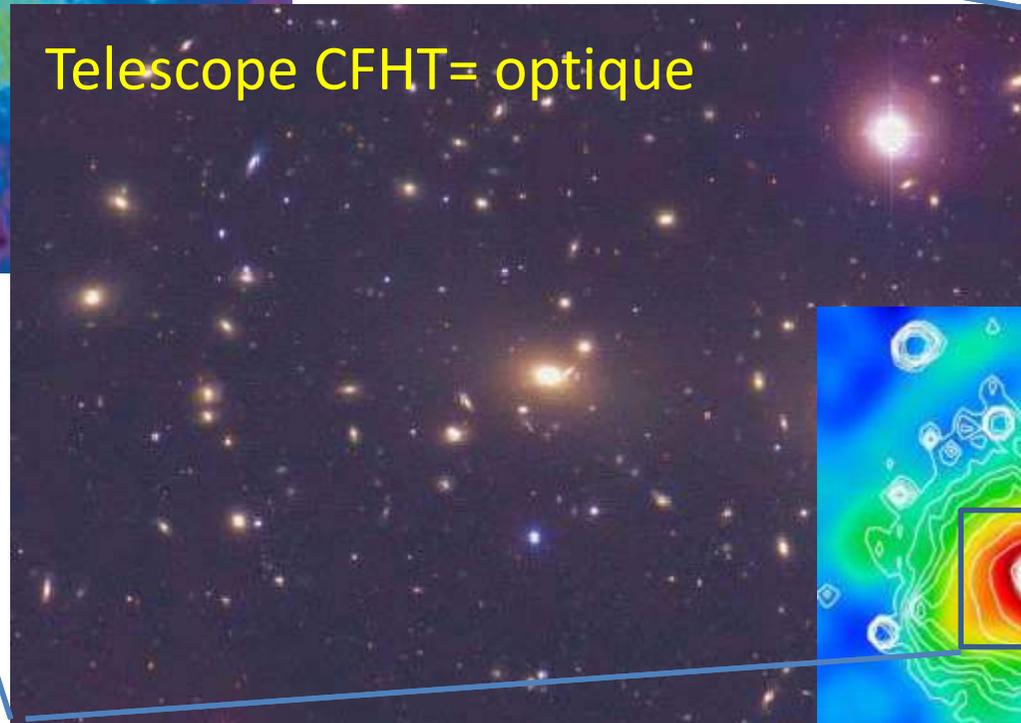
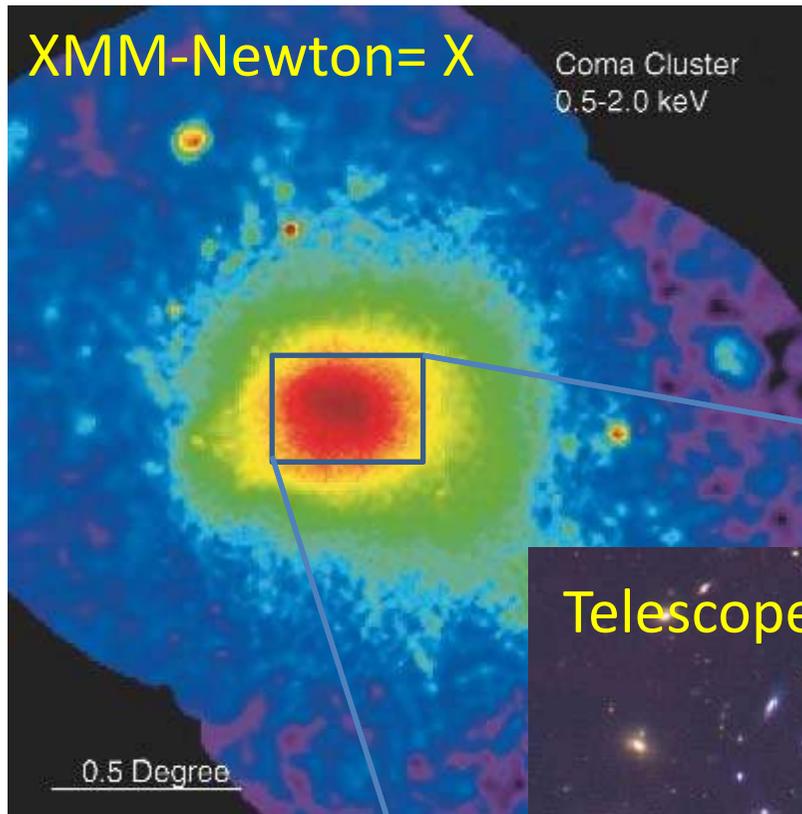
$w = -1.010 \pm 0.030$

→ Compatible avec une  
constante cosmologique

*Morandi & Sun 2016*



# Amas de Coma rayons X, optique, Effet Sunyaev-Zeldovich (SZ)



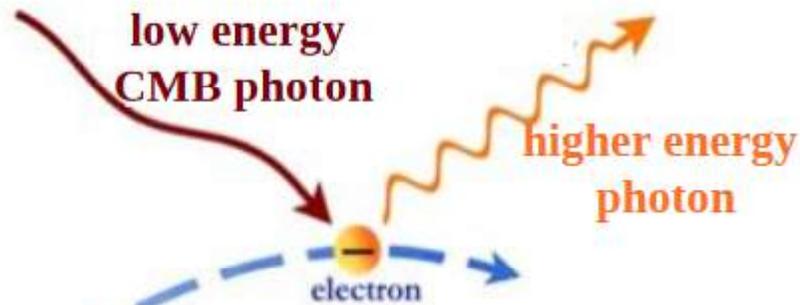
Gaz diffus chaud  
 $10^7\text{K}$ , 13%

Galaxies: 2%

Matière noire: 85%

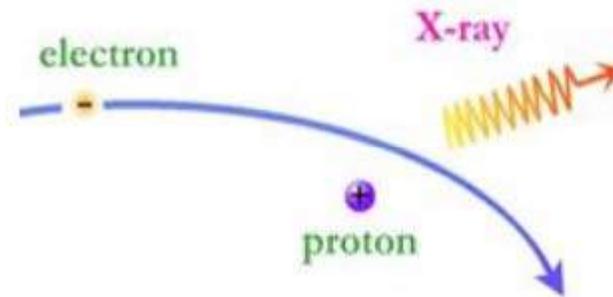
# Deux traceurs du gaz chaud

Inverse Compton  
→ SZ effect



$$F_\nu \propto \int_{\Omega} (P = n_e T) d\Omega$$

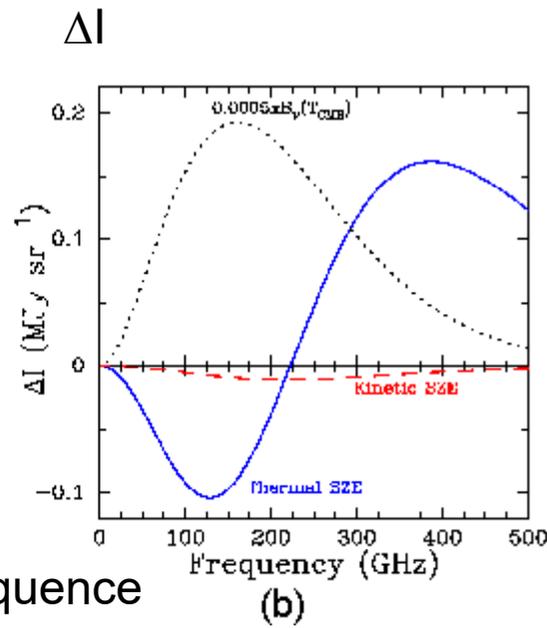
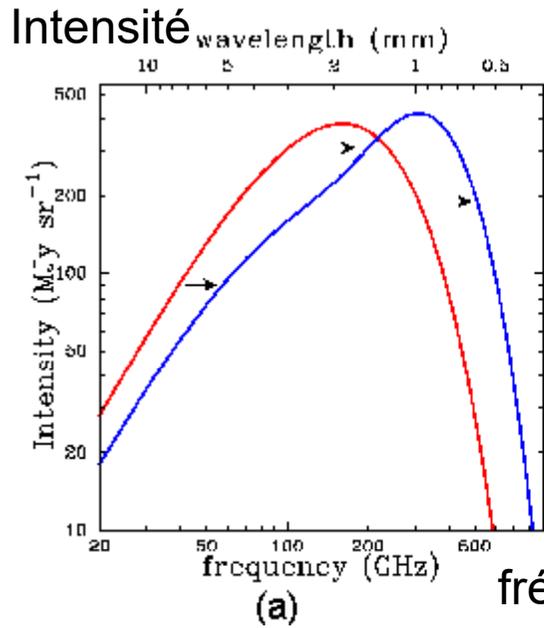
Rayonnement de freinage  
→ X-ray emission



$$E_X \propto \int_V n_e^2 \Lambda(T) dV$$

Flux total SZ, proportionnel  $M_{\text{gas}}/D_A(z)^2$

# Effet SZ détecté par Planck



$$y = \int \frac{k_B T_e}{m_e c^2} n_e \sigma_T dl$$

$$y \propto \int n_e T dl$$

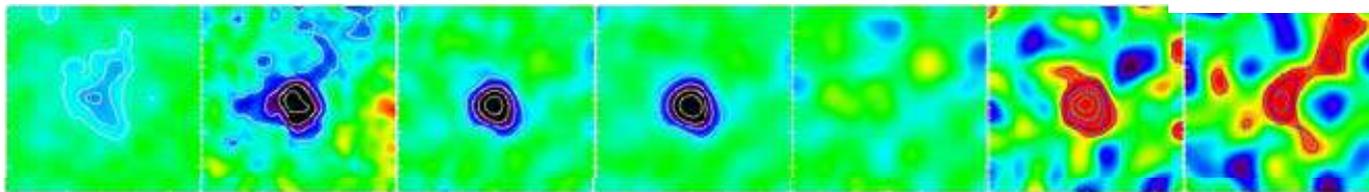
SPT 244 SZ détectés (1.1')

ACT 91 détectés (1.4')

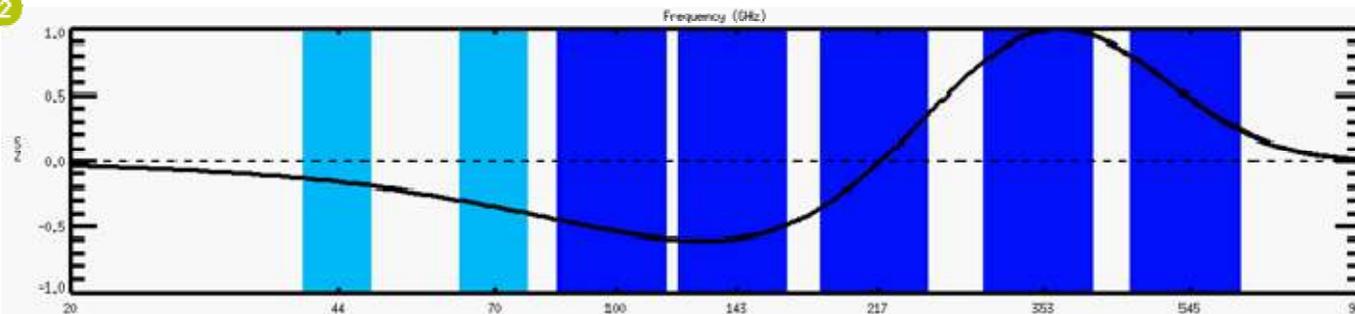
Planck 1653 sources (5')

1200 amas de galaxies

1



2



$$d = d^{ref} \left( \frac{y_{obs}}{y_{ref}} \right)^2$$

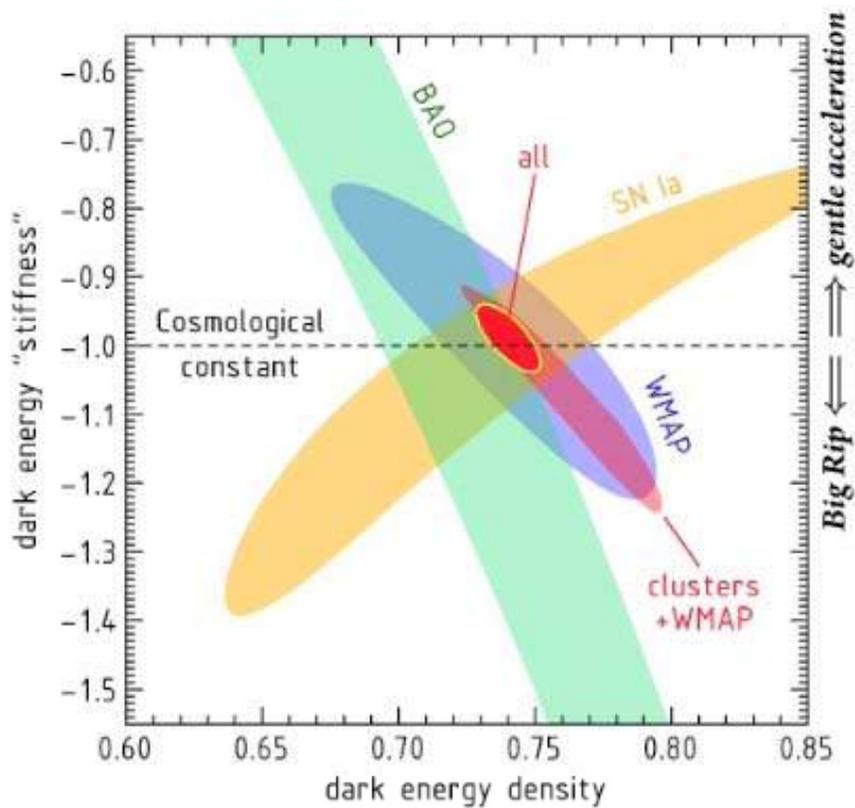
# Avantages des amas

- Règle standard, mesure des distances avec X et SZ: **précision semblable aux SNIa et BAO avec des avantages**
- ➔ Physique simple, modèles et simulations
- ➔ L'émission X s'améliore en S/N
- ➔  $f_{\text{gas}}$  : **contrainte supplémentaire sur  $\Omega_m$**
- ➔  $f_{\text{gas}}$  + CMB lève des dégénérescences
- ➔ Peu de dispersion systématique dans  $f_{\text{gas}}(z)$
- ➔ X+SZ indépendants du biais  $b$  et de l'équilibre hydrostatique

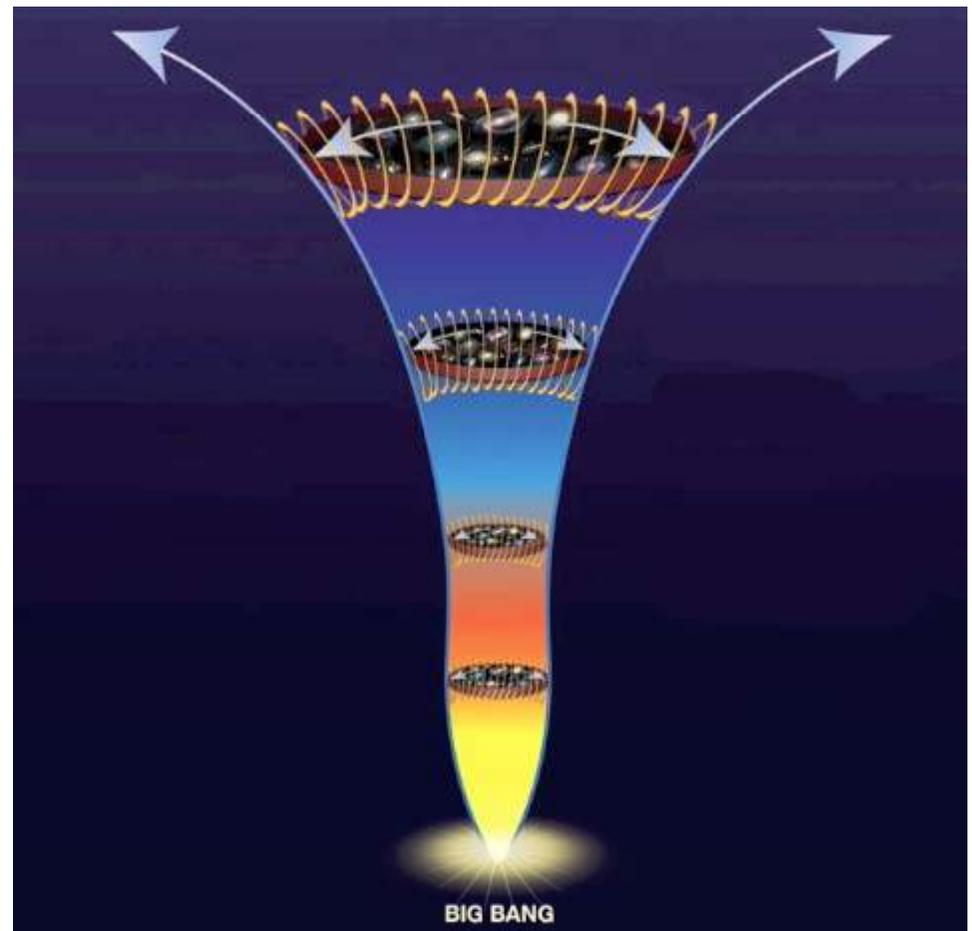
# Résistance à la gravité

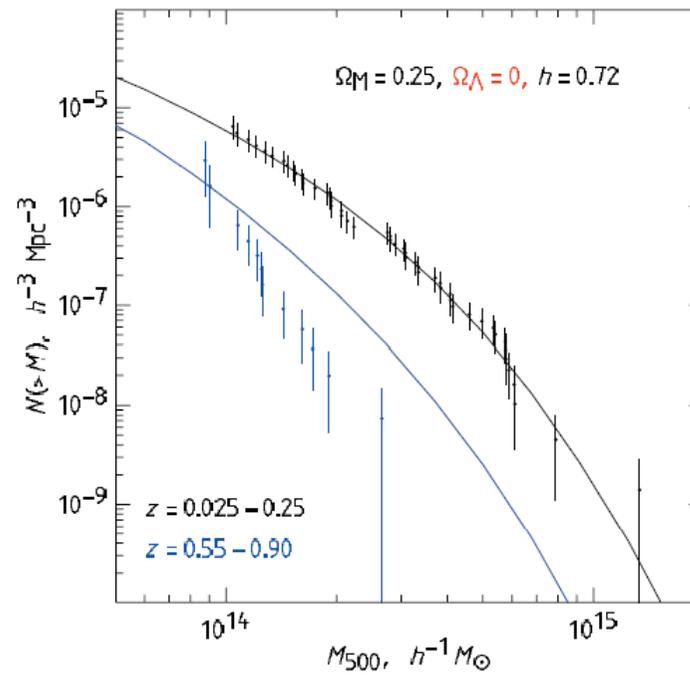
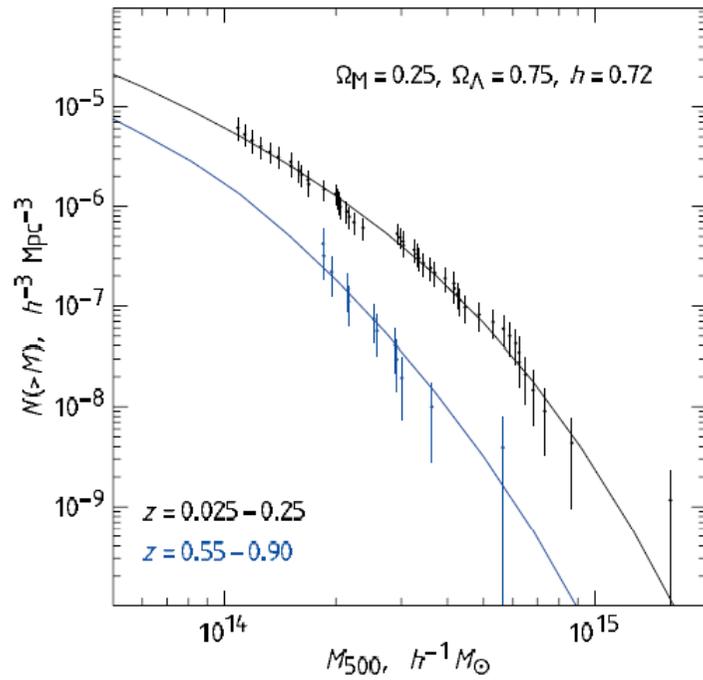
L'énergie noire réduit le nombre et la masse des amas

W



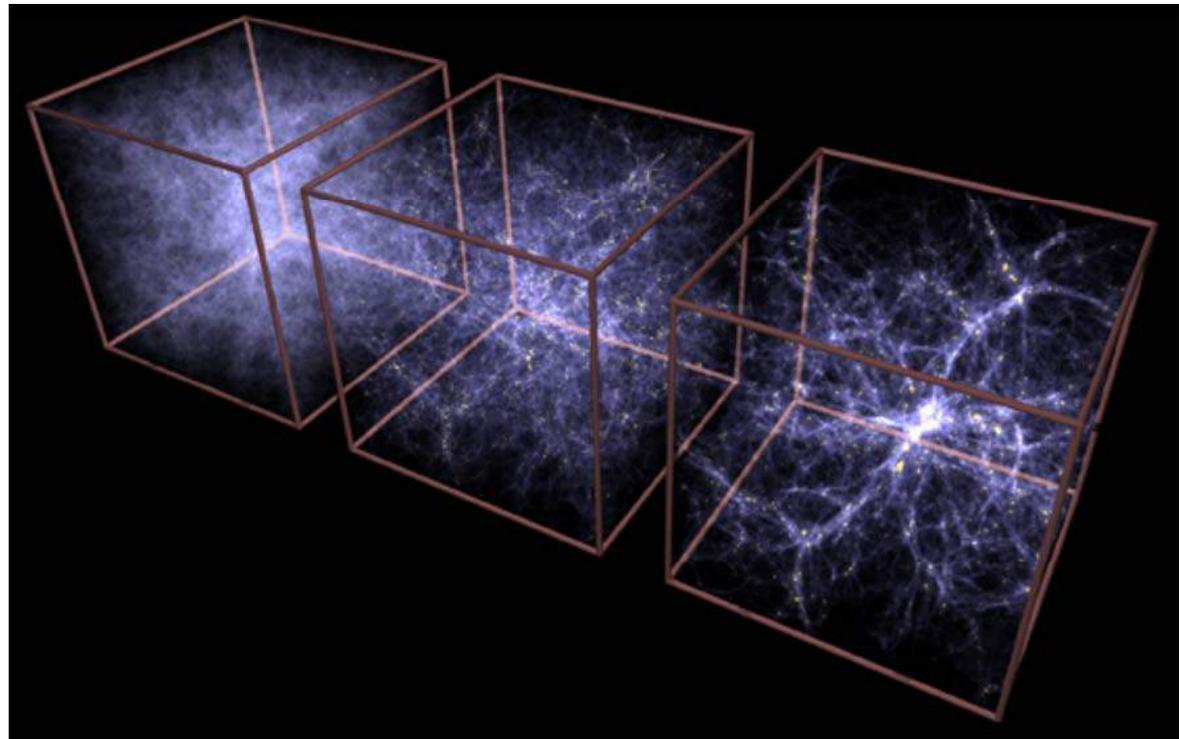
$\Omega_{\Lambda}$



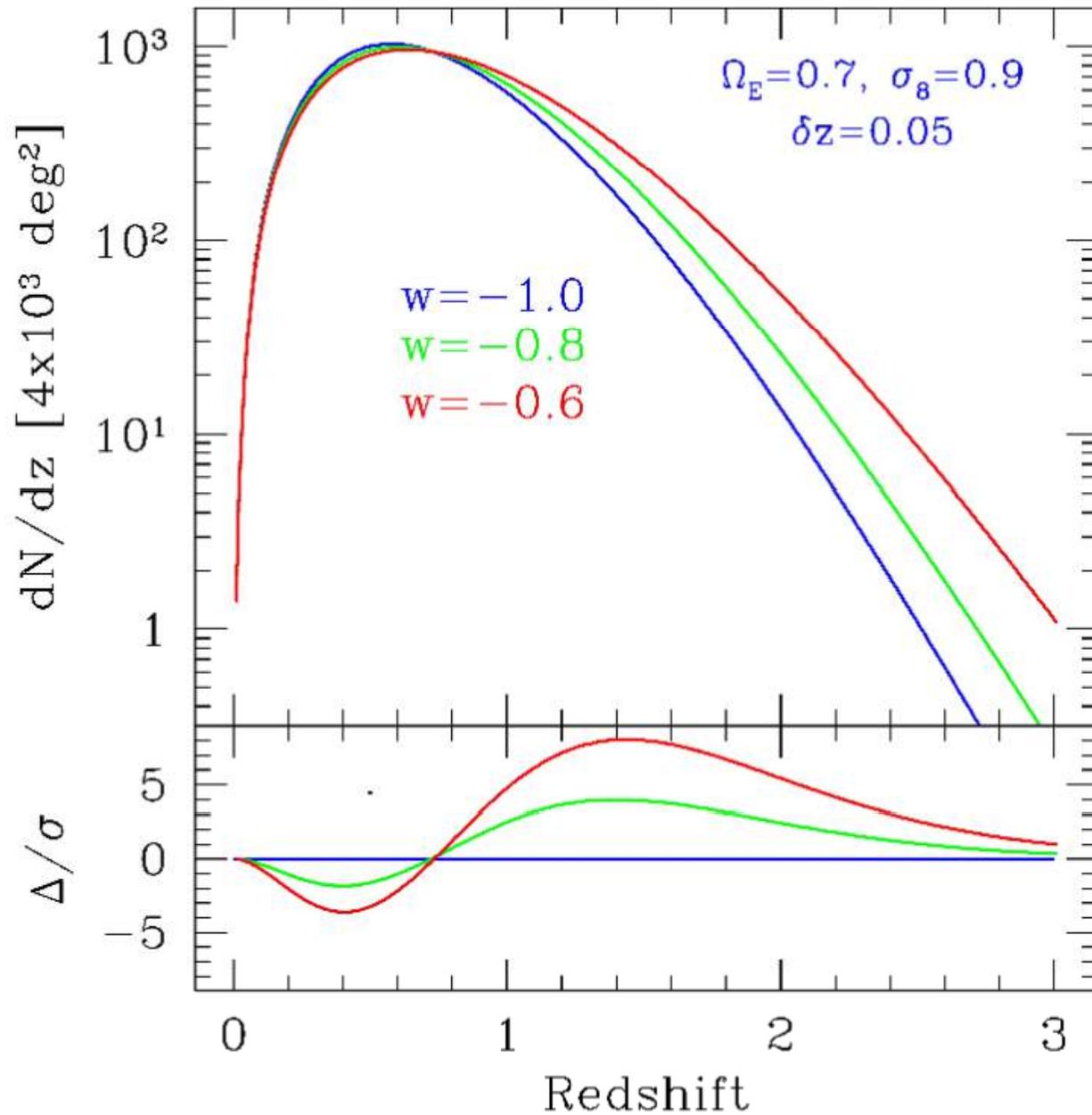


*Vikhlinin et al 09*

Croissance des structures

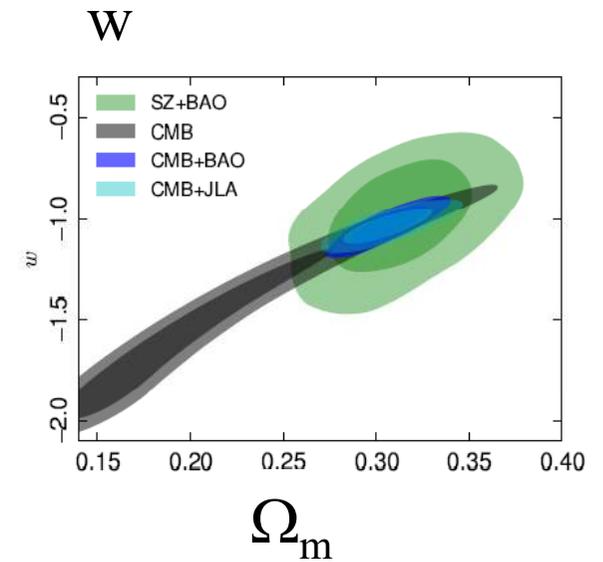


# Nombre d'amas en fonction du redshift



Test de l'équation  
d'état de l'énergie noire

$$P = w\rho$$



# Résumé

Les grandes structures pourraient-elles contribuer à l'énergie noire? A partir de quelle échelle, l'isotropie domine et la « **back-reaction** » est négligeable?

Plusieurs tests complémentaires de l'énergie noire

→ Les BAO

→ Les lentilles faibles

→ Les amas de galaxies

Comme règle standard et mesure de la distance

Et se servant de la fraction universelle de baryons

→ Taux de croissance des structures, perturbée par la domination progressive de l'énergie noire, tests de gravité modifiée