

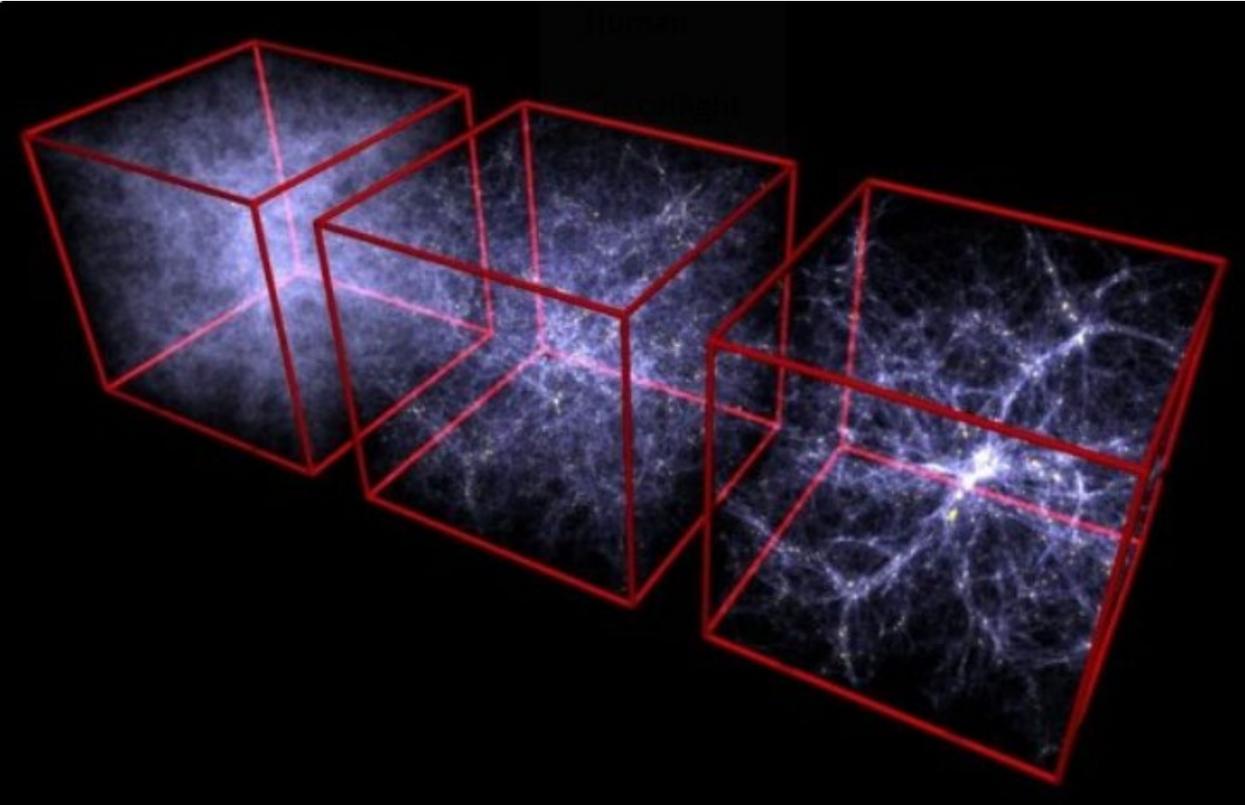


COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Contraintes sur l'énergie noire

Springel 2015



Françoise Combes



Observatoire
de Paris

| PSL 

Les divers diagnostics des grandes structures

L'univers: homogène et isotrope → structures contrastées

Perturbent la dynamique de l'espace-temps?

Non linéarité des équations d'Einstein

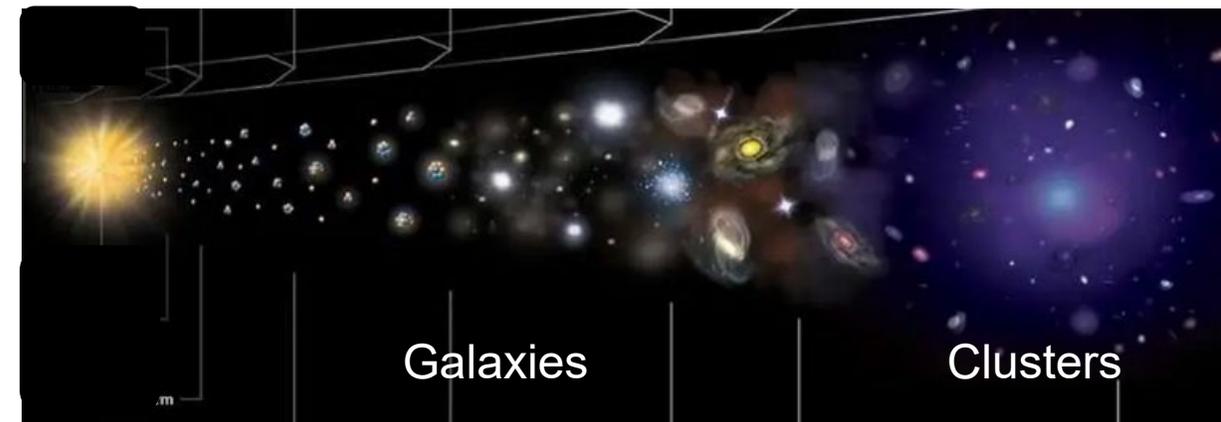
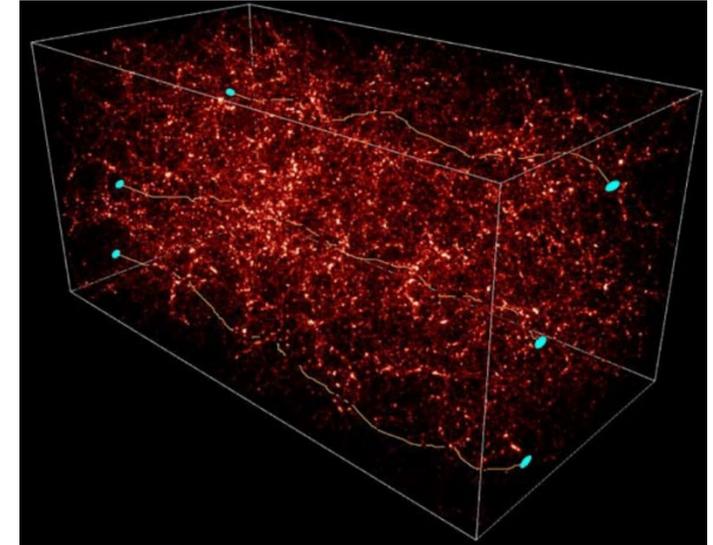
Tests cosmologiques : Amas de galaxies

Lentilles gravitationnelles faibles

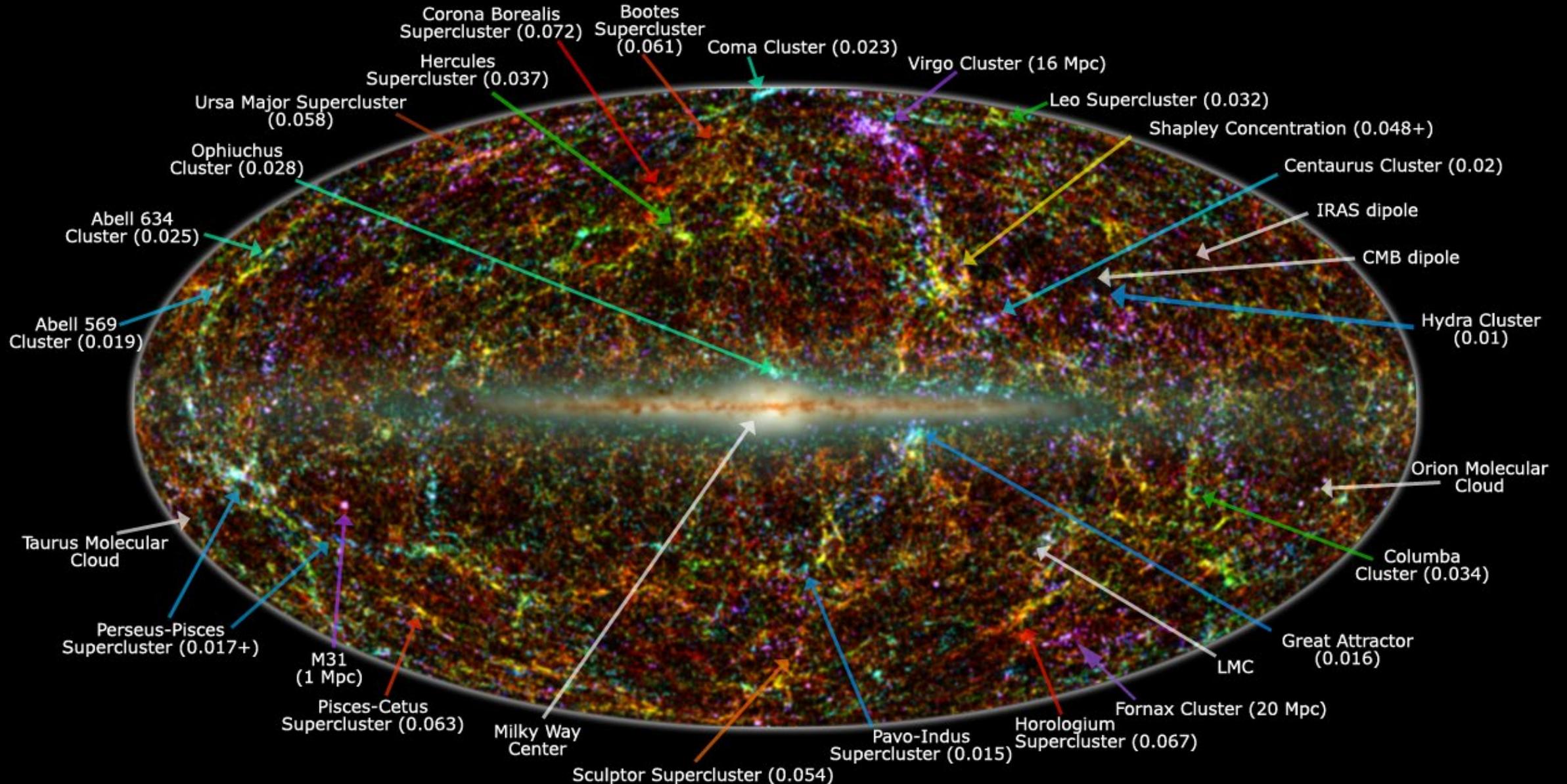
BAO: Règle standard et mesure de la distance

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

→ Test de **gravité modifiée**



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)

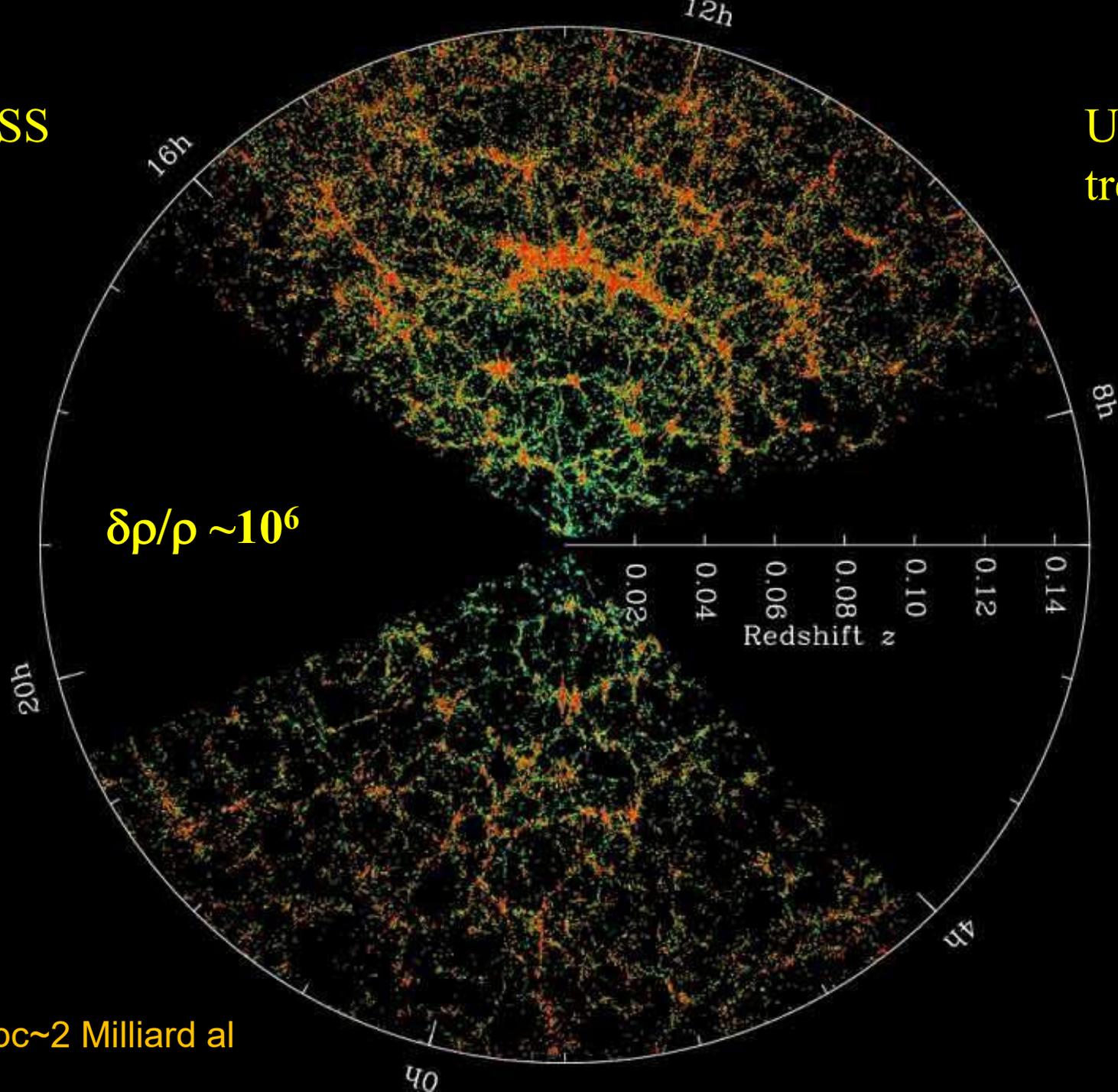
SDSS

Univers
très non-linéaire

$\delta\rho/\rho \sim 10^6$

$z=0.15 \sim 2 \text{ Gyr}$

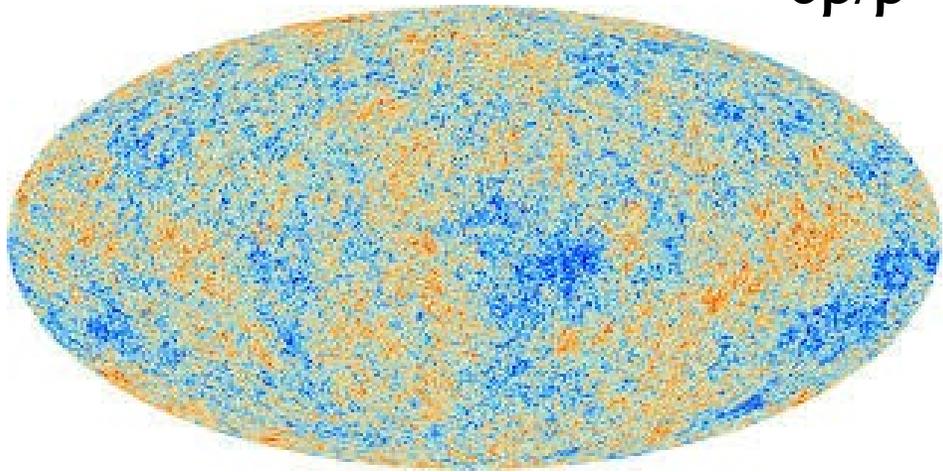
600Mpc \sim 2 Milliard al



Homogénéité à grande échelle

Assurée par le fond cosmologique micro-onde (CMB)

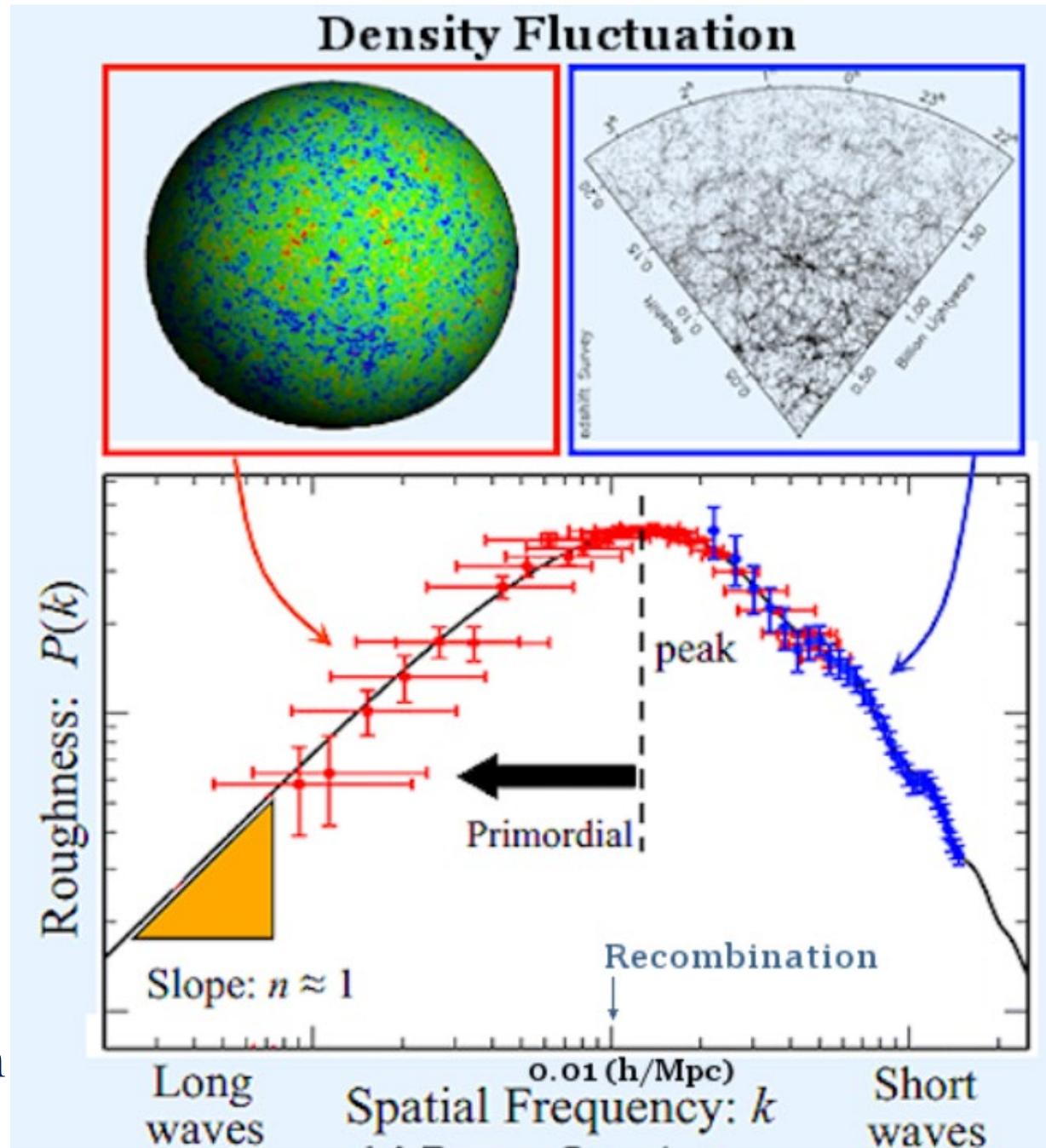
$$\delta\rho/\rho \sim 10^{-5}$$



Mais aussi les très grandes structures

Spectre de puissance $P(k) \propto k^n$

Indépendance d'échelle $n=1$ Harrison-Zeldovich



Les effets de la moyenne: univers inhomogène

Chaque domaine D pourrait avoir sa propre expansion, $R_D(t)$

Equations de Friedmann

$$\frac{2 \ddot{R}}{R} + \left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = - \frac{kc^2}{R^2} + \Lambda - \frac{8 \pi G}{c^2} P$$

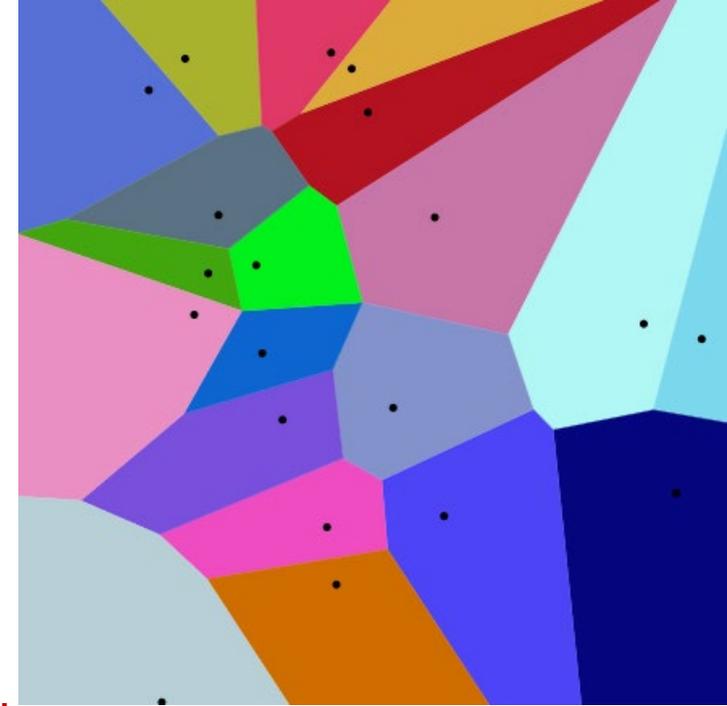
Courbure Pression

$$\left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = - \frac{kc^2}{R^2} + \frac{\Lambda}{3} + \frac{8 \pi G}{3} \rho$$

Densité

$$H = \frac{\dot{R}}{R}$$

Constante de
Hubble-Lemaître



Equations non linéaires: effet de lissage: densité, pression, courbure moyennes

La moyenne des diverses dérivées de variables locales très contrastées, n'a aucune raison d'être égale à ces dérivées de la densité moyenne

Est-ce que les contrastes locaux produiraient l'énergie noire?

*Kolb, et al 2006, 2011
Buchert, 2000, 05, 07*

Energie noire: composant à pression négative

- Equations de Friedmann combinées:

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

Soit $\Lambda = \text{cste}$
 Ou bien $\Lambda = 0$
 $P = w \rho$
 $w < -1/3$

Accélération si $3P + \rho < 0$

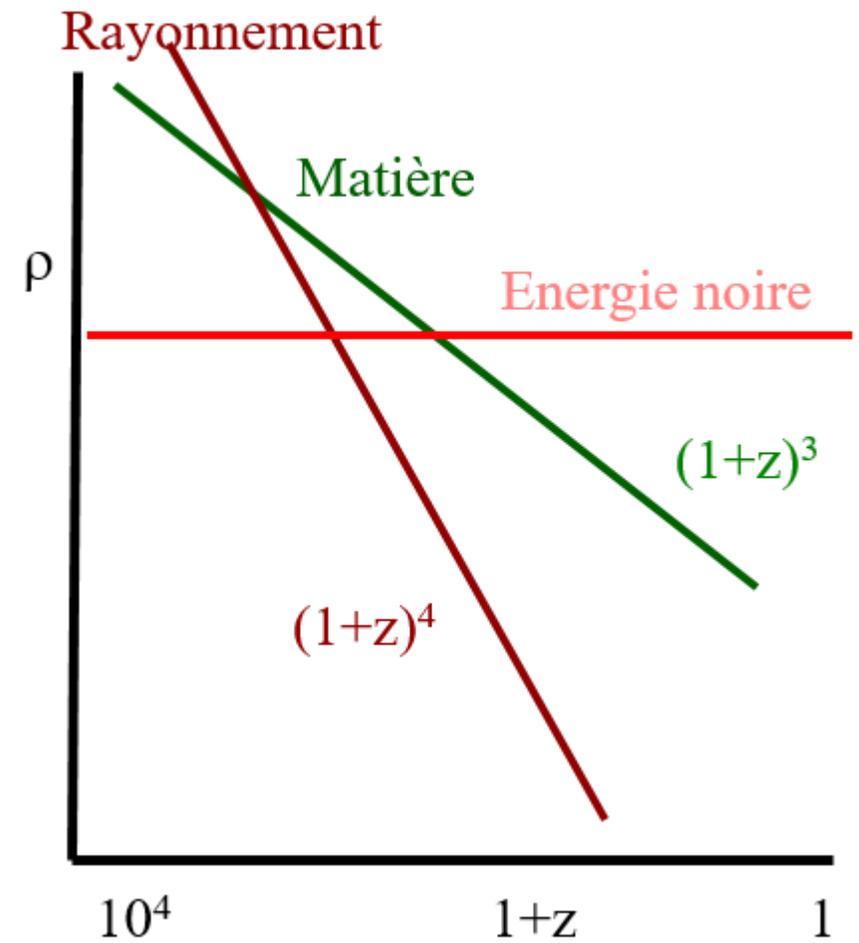
$$R(t) = 1/(1+z)$$

Problème de coïncidence

Pourquoi dès que le contraste des structures devient $\gg 1$ ($z \sim 0.5$) alors $\rho_m \sim \rho_{DE}$

Les quantités moyennes que nous considérons ne vérifient pas les équations d'Einstein

\rightarrow Rétro-action (backreaction):



Big bang

Estimation de Green & Wald

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

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

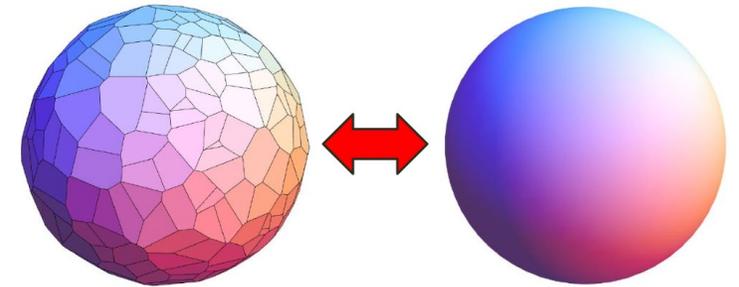
- Green & Wald, 2011, 13, 16: introduction d'une méthode de calcul
- Avec des hypothèses: $g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}^{(0)} + \gamma_{\mu\nu}$
 $\gamma_{\mu\nu} \ll 1$, mais pas les dérivées: $g_{\mu\nu}^{(0)}$ n'est pas solution des équations d'Einstein -- Courbure de $g_{\mu\nu}$ à l'échelle R de Hubble

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 leur métrique est « lissée »

Le calcul sans approximation: a_D moyenne sur un Horizon

$$a_D(t) \propto V_D(t)^{1/3} \quad \langle \rho \rangle_D = M_D/V_D$$

Montre un terme (grande échelle)

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

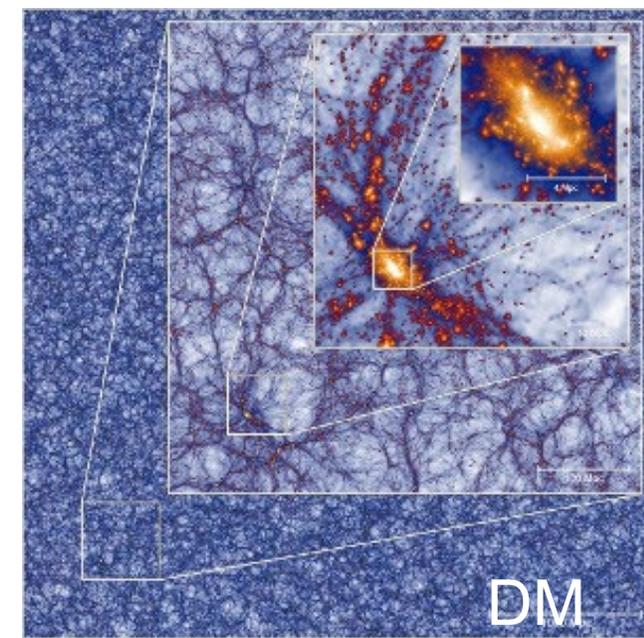
Les équations sont indéterminées. Quelle est la dépendance en temps de Q_D ?

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

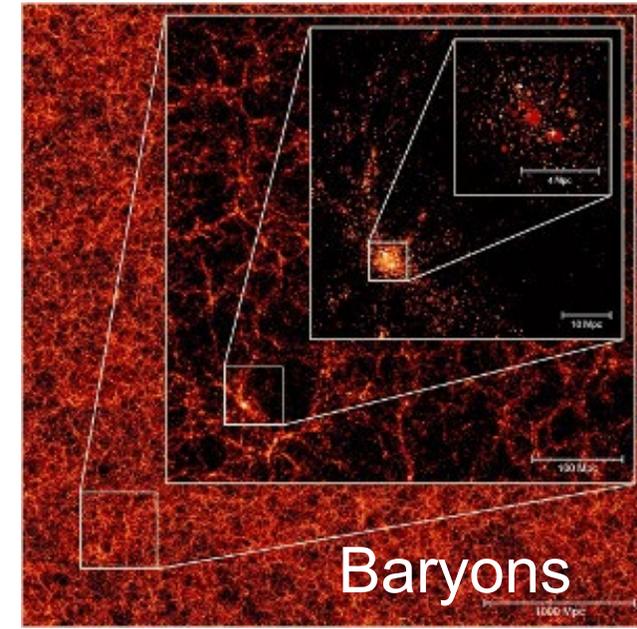
Problèmes dès que l'effondrement des structures forment des caustiques

Les vides sont importants et doivent être pris en compte

Buchert et al 2015, Kolb et al 2016

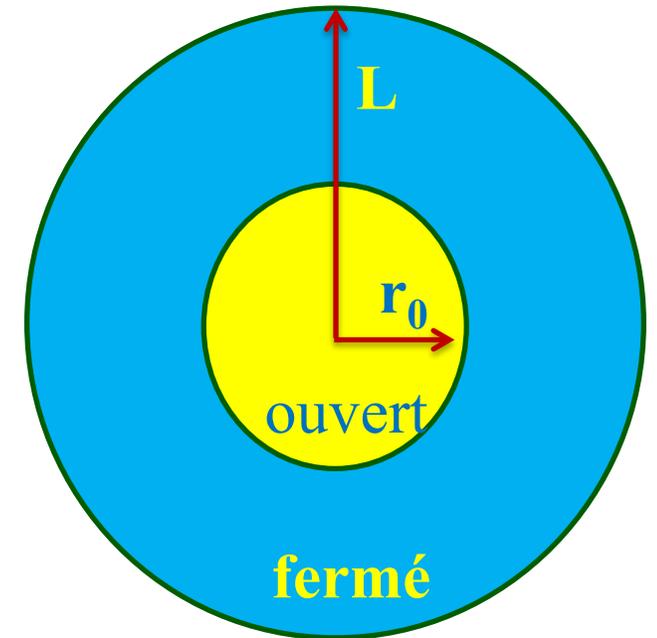
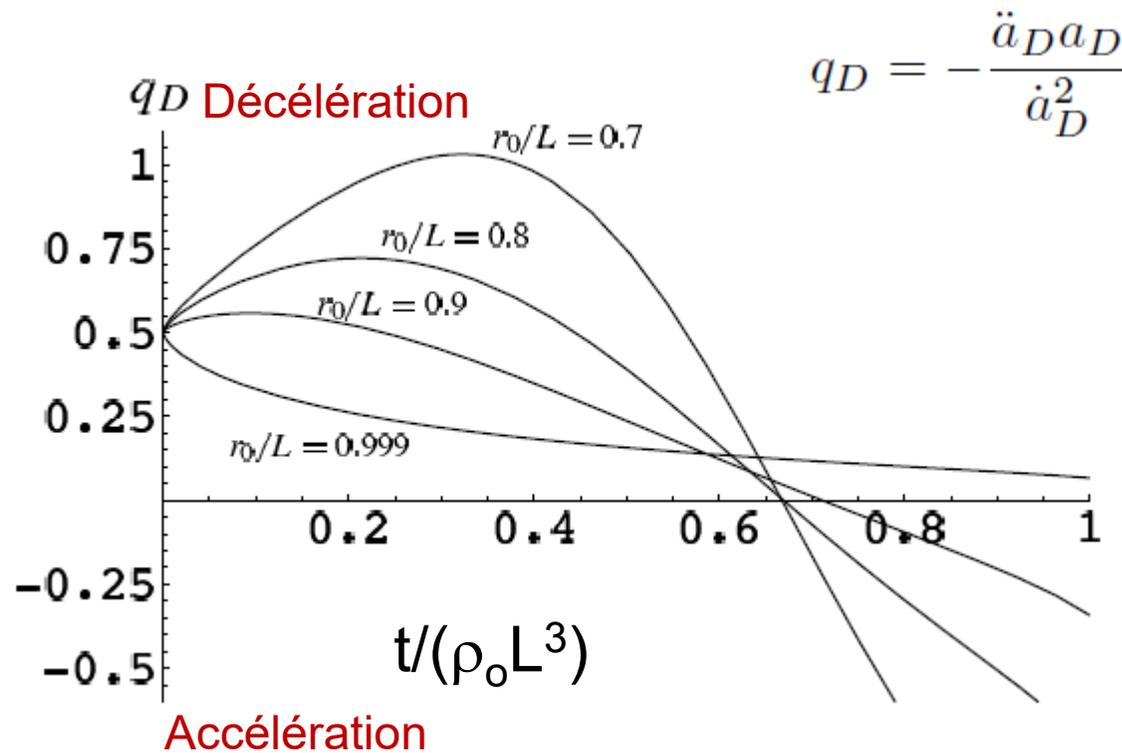


Vogelsberger et al 2020



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 au centre**
- Lorsque la région dense s'effondre, alors en moyenne l'expansion de l'ensemble s'accélère



Also Mansouri 2005, Alnes et al 2006

Est-ce une solution pour l'énergie noire?

Au-dessus de l'expansion du « fond » homogène H^f
se superposent une expansion due aux inhomogénéités

Pourrait être équivalent
à $\Omega_\Lambda = 70\%$

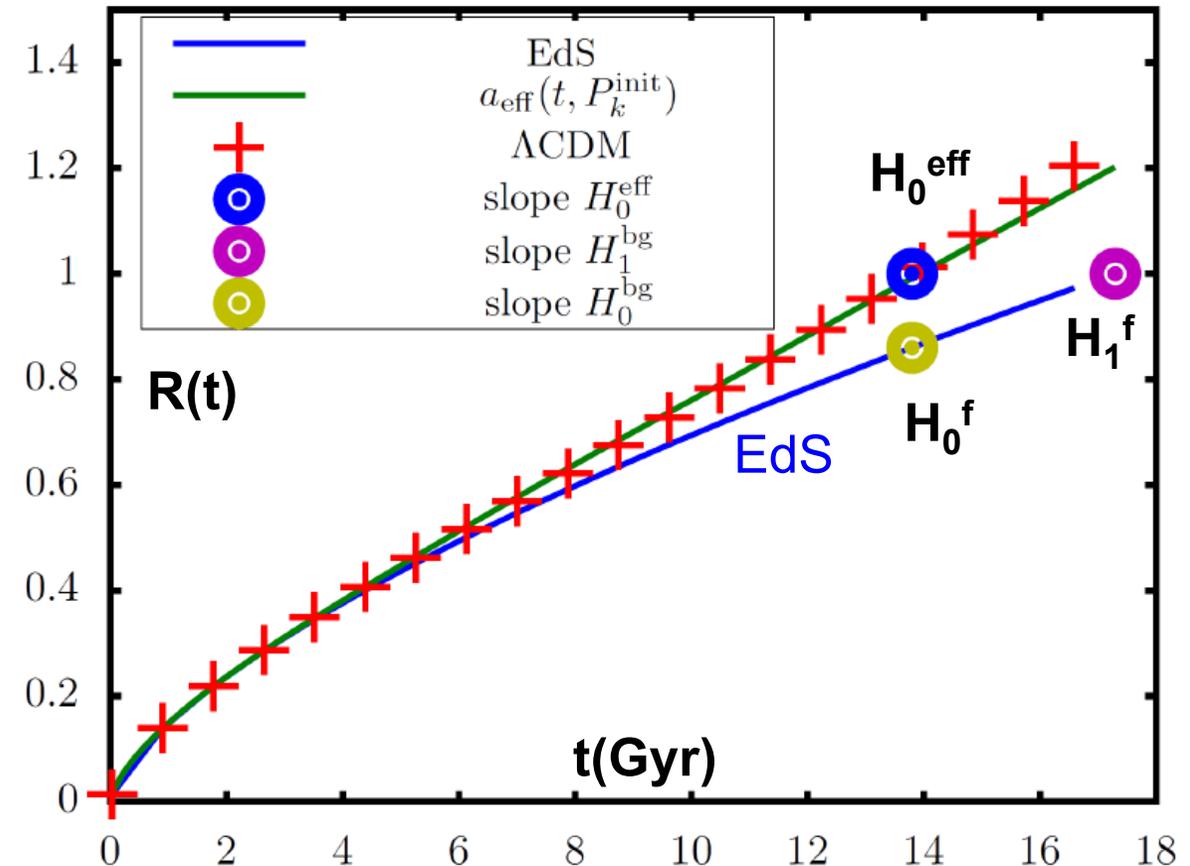
Considérant un modèle Einstein-deSitter dans

les premiers âges $H_1^f = (dR_f/dt)/R_f = 2/3t$

$$R_f = (3 H_1^f t / 2)^{2/3}$$

Aujourd'hui, l'expansion des vides
s'ajoute à l'expansion du fond moyen

$$H_0^{\text{eff}} = H_0^f + H_0^{\text{void}}$$



Gravité: Newton et Einstein

Dans une cosmologie Newtonienne, $R(t)$ ne peut être modifié par les structures: **GR, accélération et courbure nécessaires**

En gravité de Newton, pas de « back-reaction » *Kaiser 2017*

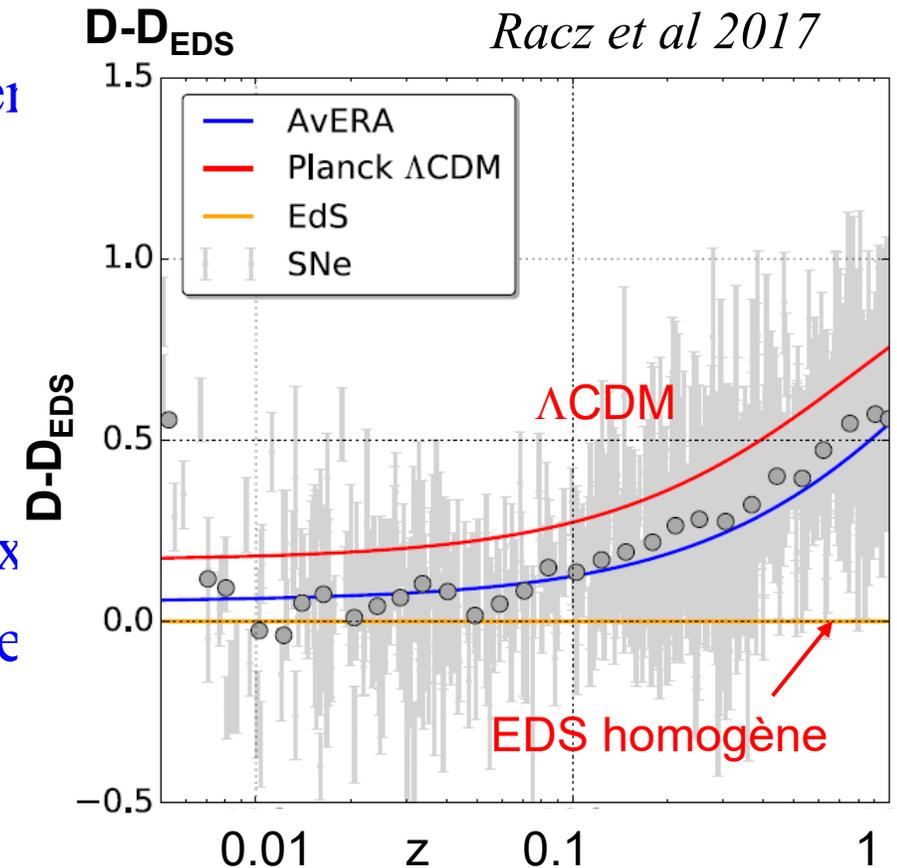
Question: le terme dû aux structures et aux vides tend-il vers zéro pour les grand volumes? *Buchert 2018*

Quelle que soit la cosmologie, les structures non linéaires sont loin d'être relativistes

Simulations AvERA Racz et al 2017, calcul des $R(t)$ locaux puis moyennent à grande échelle → back-reaction non nulle

$$\gamma_i = Gm \sum_{j \neq i} \frac{\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^3}$$

Mais accélération diverge



Approximation alternative en GR

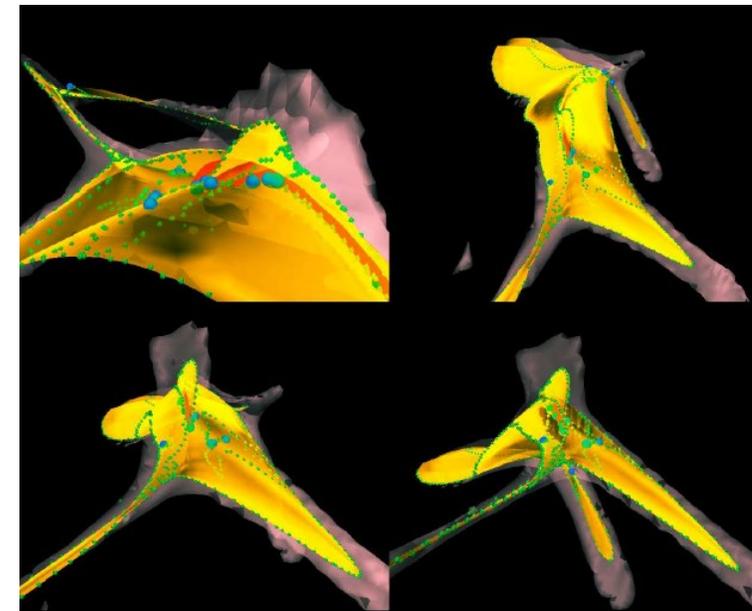
Au lieu de considérer un fond local lisse + écarts

Calcul de la « backreaction », moyennée à la meilleure résolution

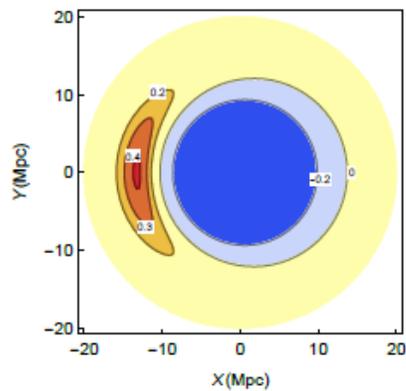
Puis faire tendre vers zéro cette résolution

Itérations multi-échelle, plutôt que perturbations

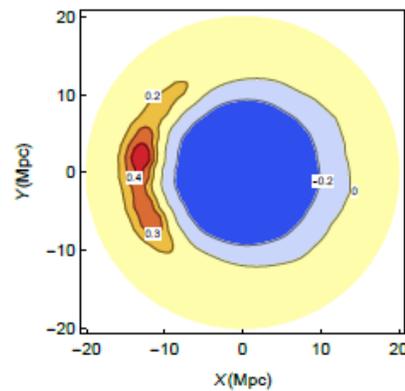
Buchert et al 2022



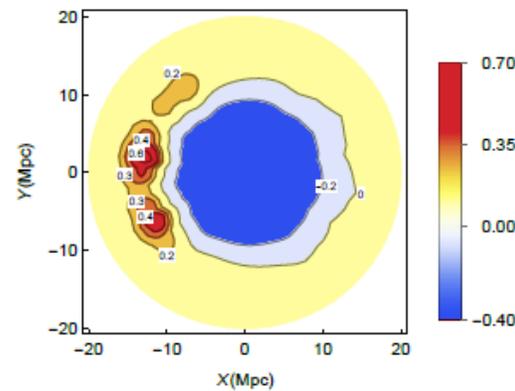
4 vues de la même Caustique
Singularités en vert



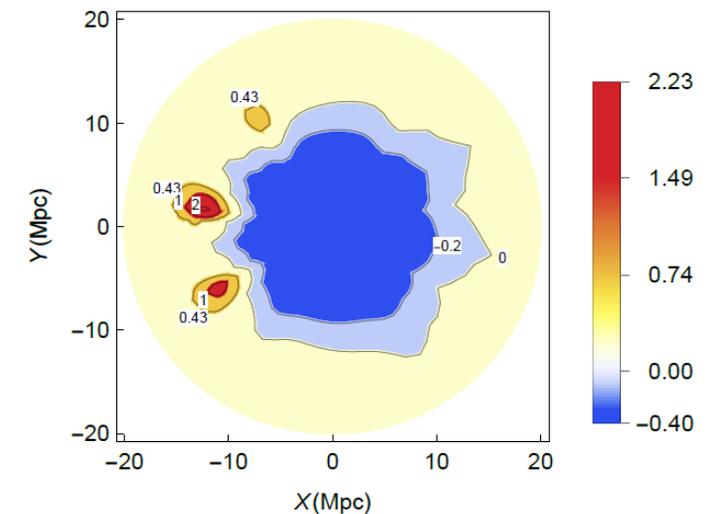
(a) $\alpha = 0$



(b) $\alpha = 8.9 \times 10^{-4}$



(c) $\alpha = 2.2 \times 10^{-3}$



Renaissance de la « back-reaction »

Green & Wald ont sous-estimé l'effet de cette rétro-action

Effet multi-échelle, et imbriqué → les méthodes de perturbation de marchent pas

Les moyennes ne sont pas justes

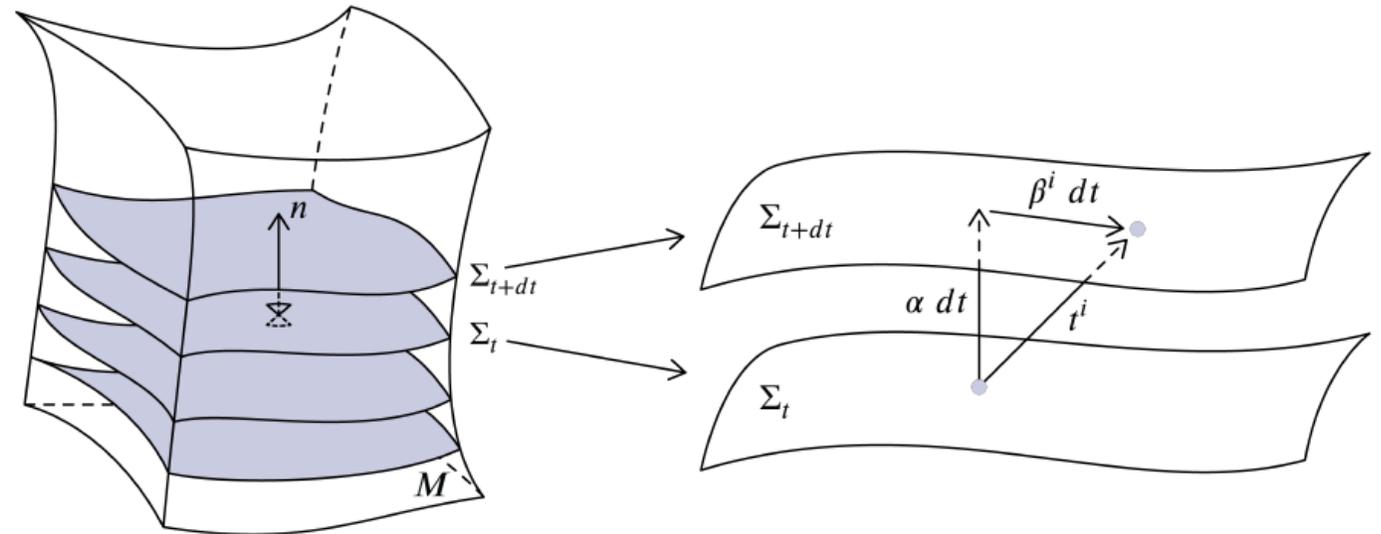
Traitement mathématique du découpage de l'espace-temps et de son rôle dans le moyennage pour la structure cosmique

Révèle que les moyennes ne sont pas invariantes sous les transformations de jauge de feuilletage

Différentes moyennes

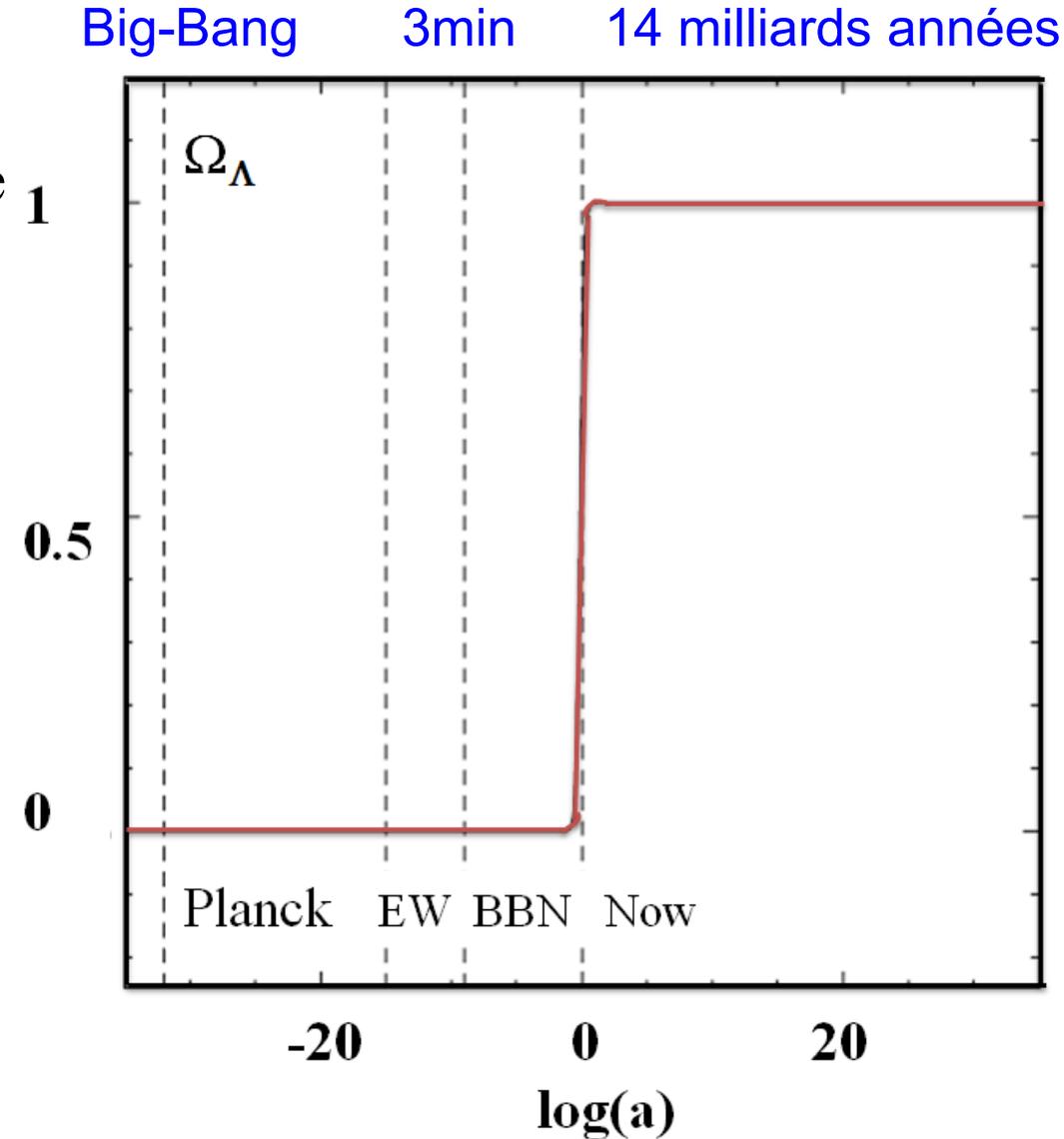
→ Différents résultats

→ artificiels



Solution 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 n'arrive que maintenant (5Gyr), le contraste des structures se développe avec le temps → Négligeable à $T \sim 400\,000$ ans
- **Encore faut-il une preuve que $\delta\rho/\rho$ soit suffisant**
- **→ Modifie le mode zéro, et le facteur d'échelle**



Effets de l'énergie noire sur les structures

RP Ratra-Peebles
quintessence
SU SUGRA

Simulations Λ CDM

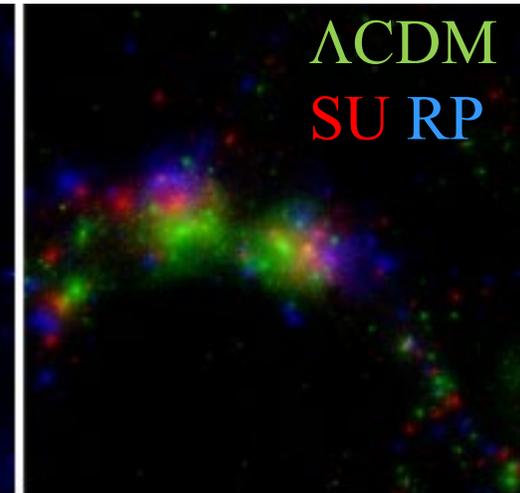
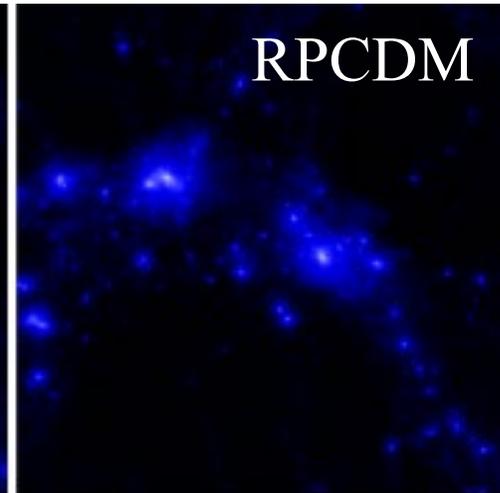
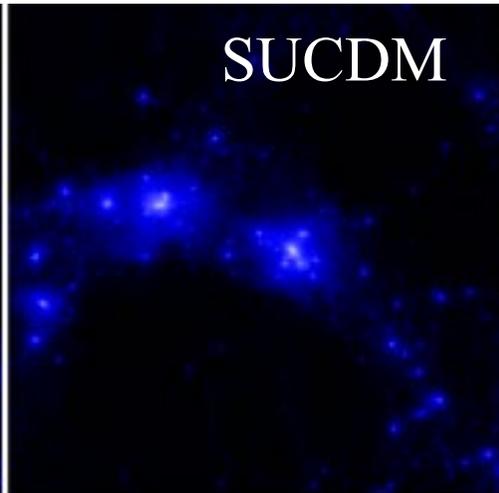
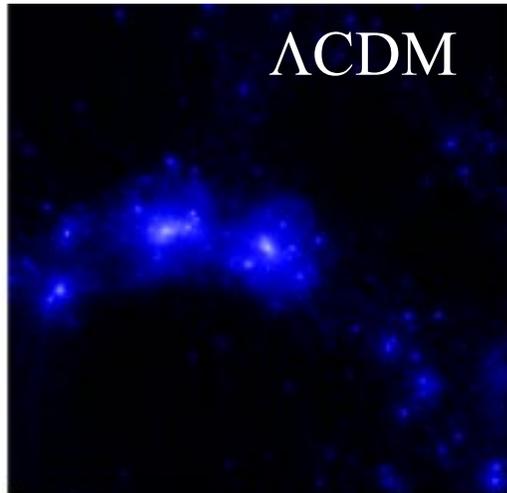
SUCDM

RPCDM

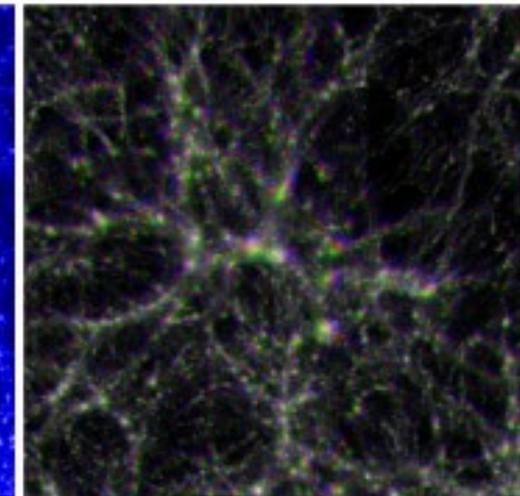
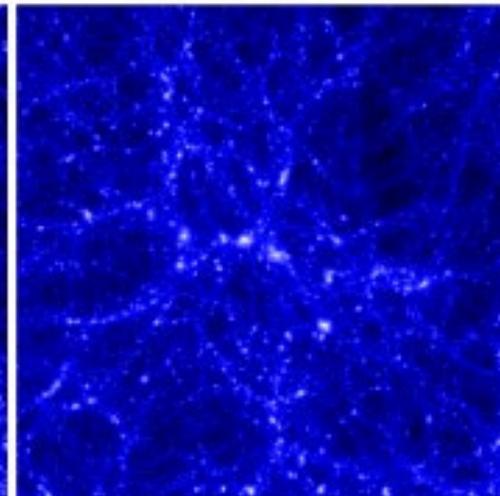
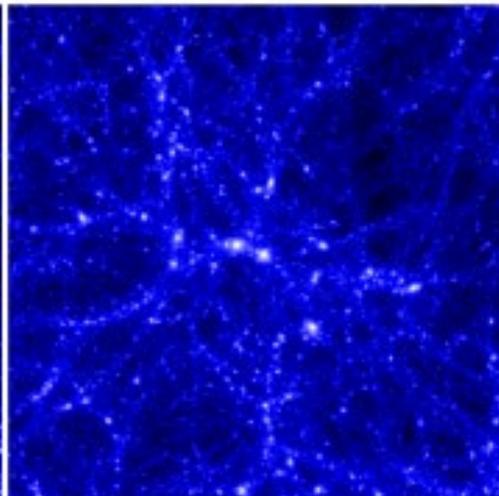
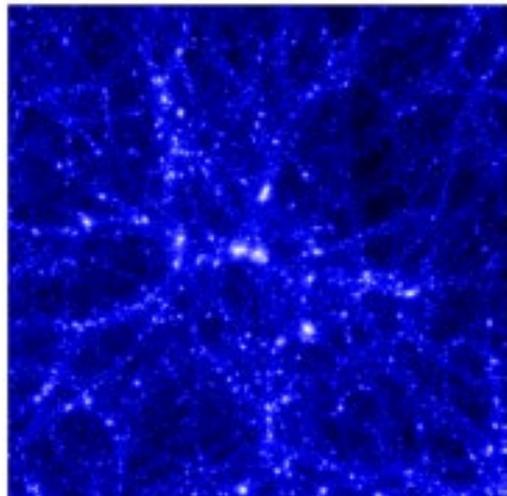
La différence est frappante à petite échelle seulement

Alimi et al 2010

Petites
échelles



Grandes
échelles



SUGRA CDM, RP quintessence

$$P = w \rho, \quad w(\mathbf{a}) = w_0 + w_1 (\mathbf{a}-1)$$

$$\text{RPCDM: } w_0 < -0.78 \quad w_1 < 0.11$$

$$\text{SUCDM } w_0 < -0.83 \quad w_1 < 0.39$$

$$V_{RP}(\varphi) = \frac{\lambda^{4+\alpha}}{m_{Pl}^\alpha \varphi^\alpha}$$

$$V_{SU}(\varphi) = \frac{\lambda^{4+\alpha}}{m_{Pl}^\alpha \varphi^\alpha} e^{4\pi\varphi^2}$$

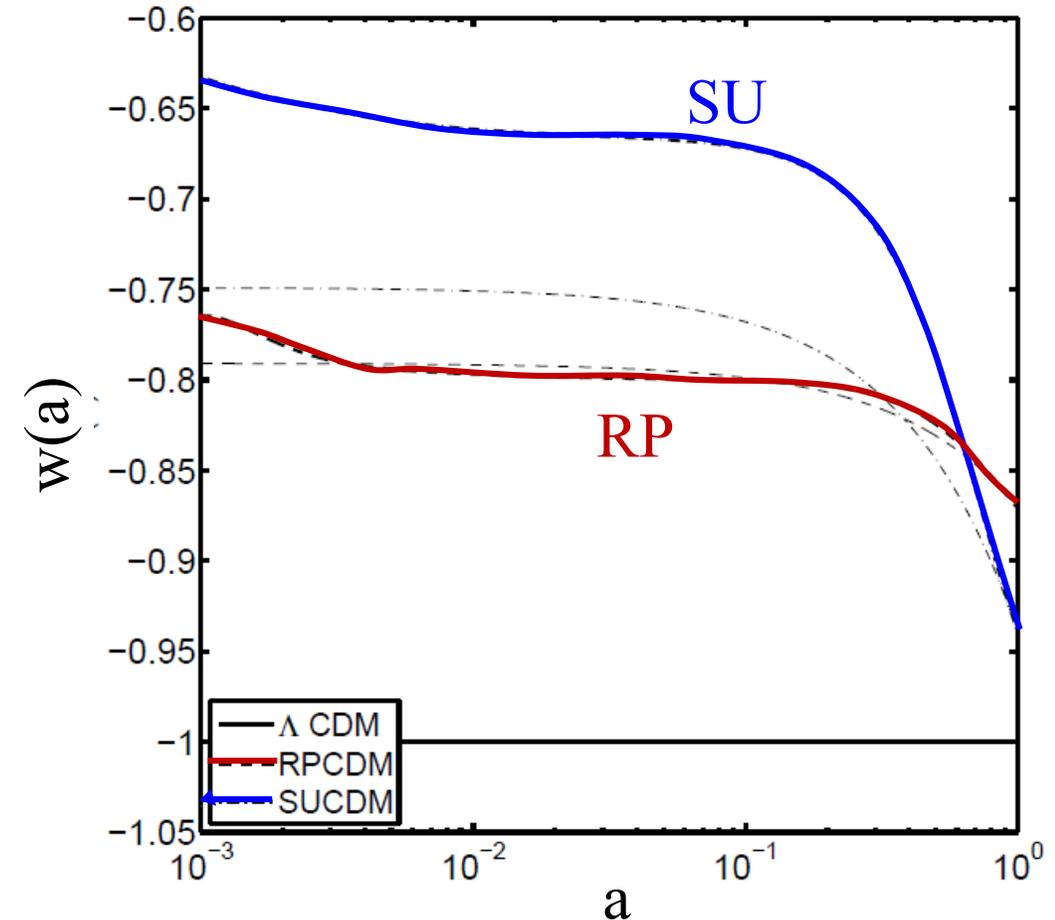
Dans certains modèles, l'énergie noire peut participer aux structures

L'évolution du spectre de puissance est alors différent et le destin de l'Univers aussi

Parfois, la structuration à petite échelle est empêchée ce qui serait plus compatible avec les observations

Déviations jusqu'à 40% dans le spectre

Alimi et al 2010



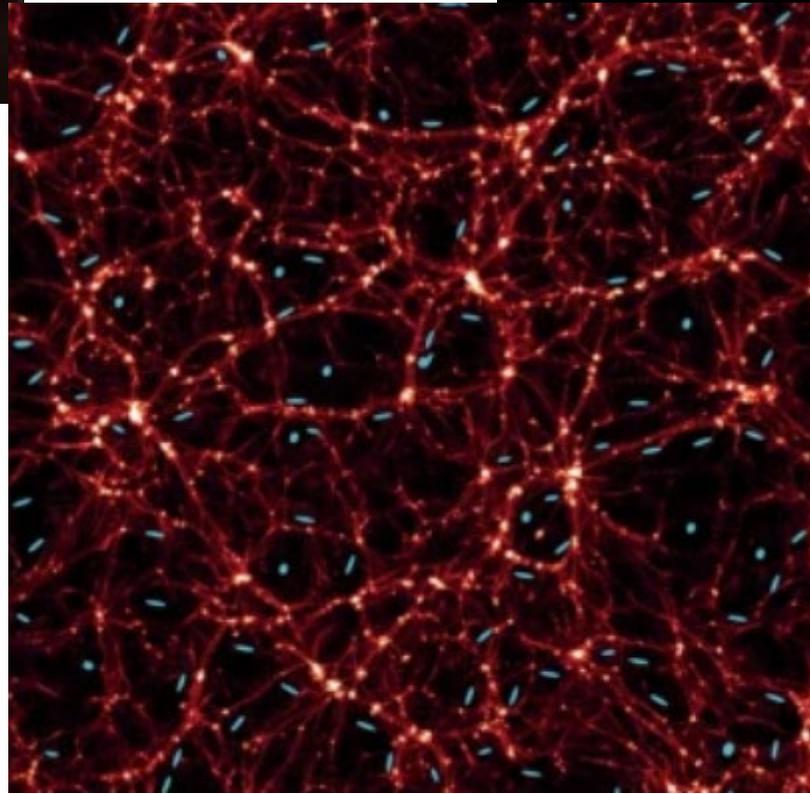
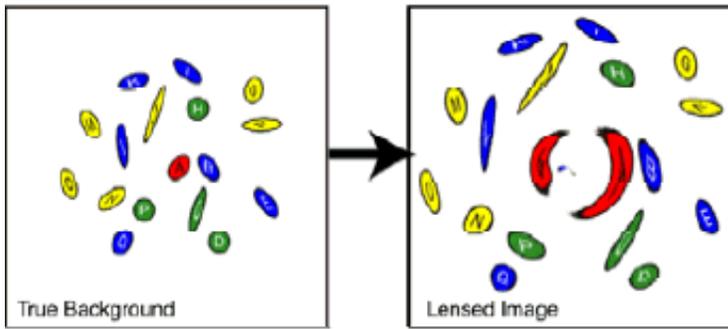
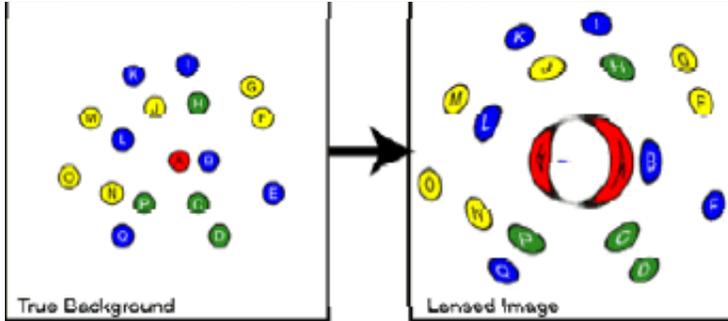
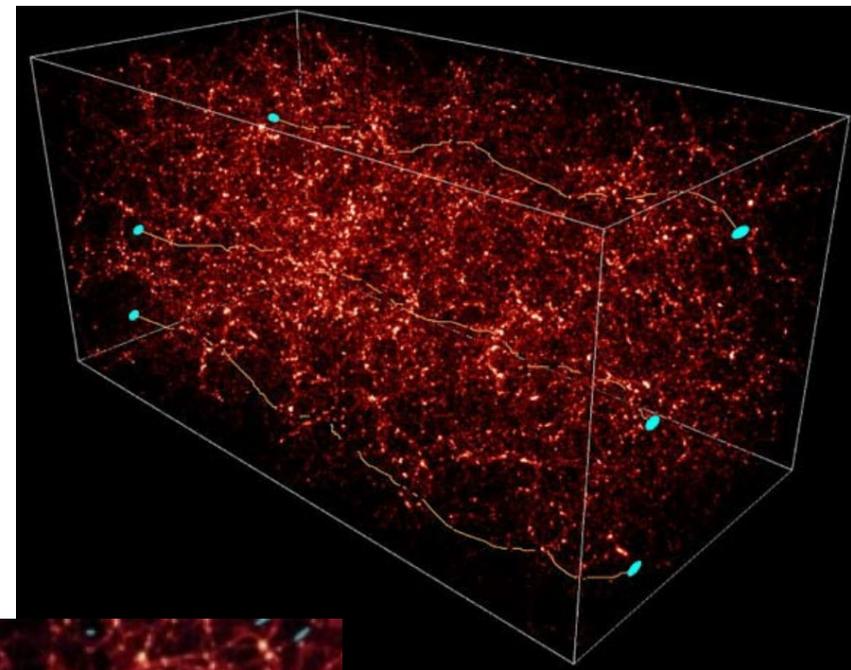
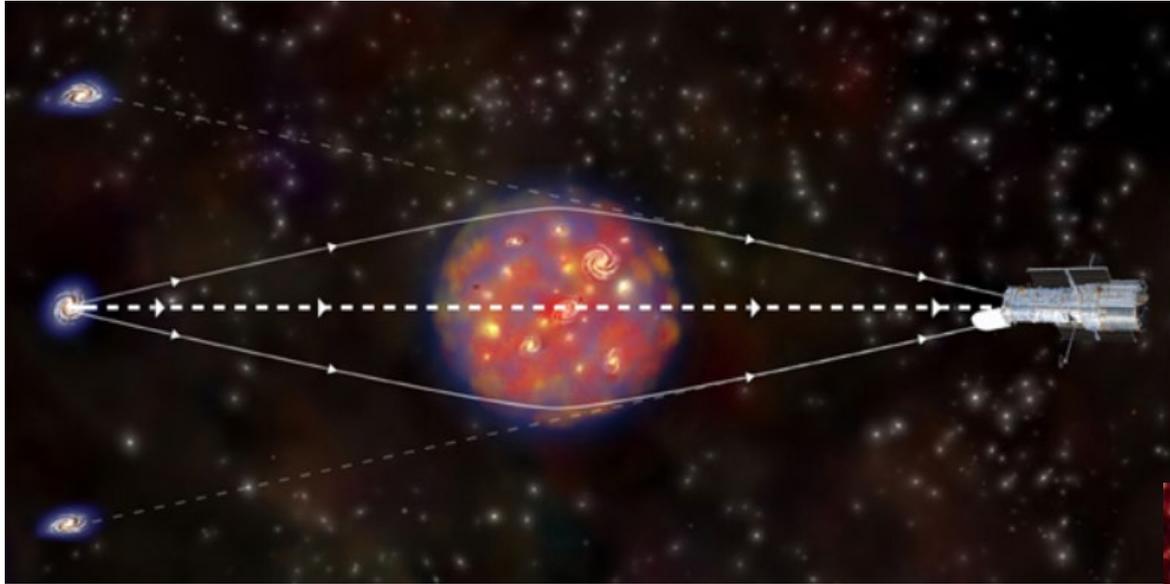
Cartographies de la matière noire

Lentilles gravitationnelles: régime fort



Le géographe
Vermeer

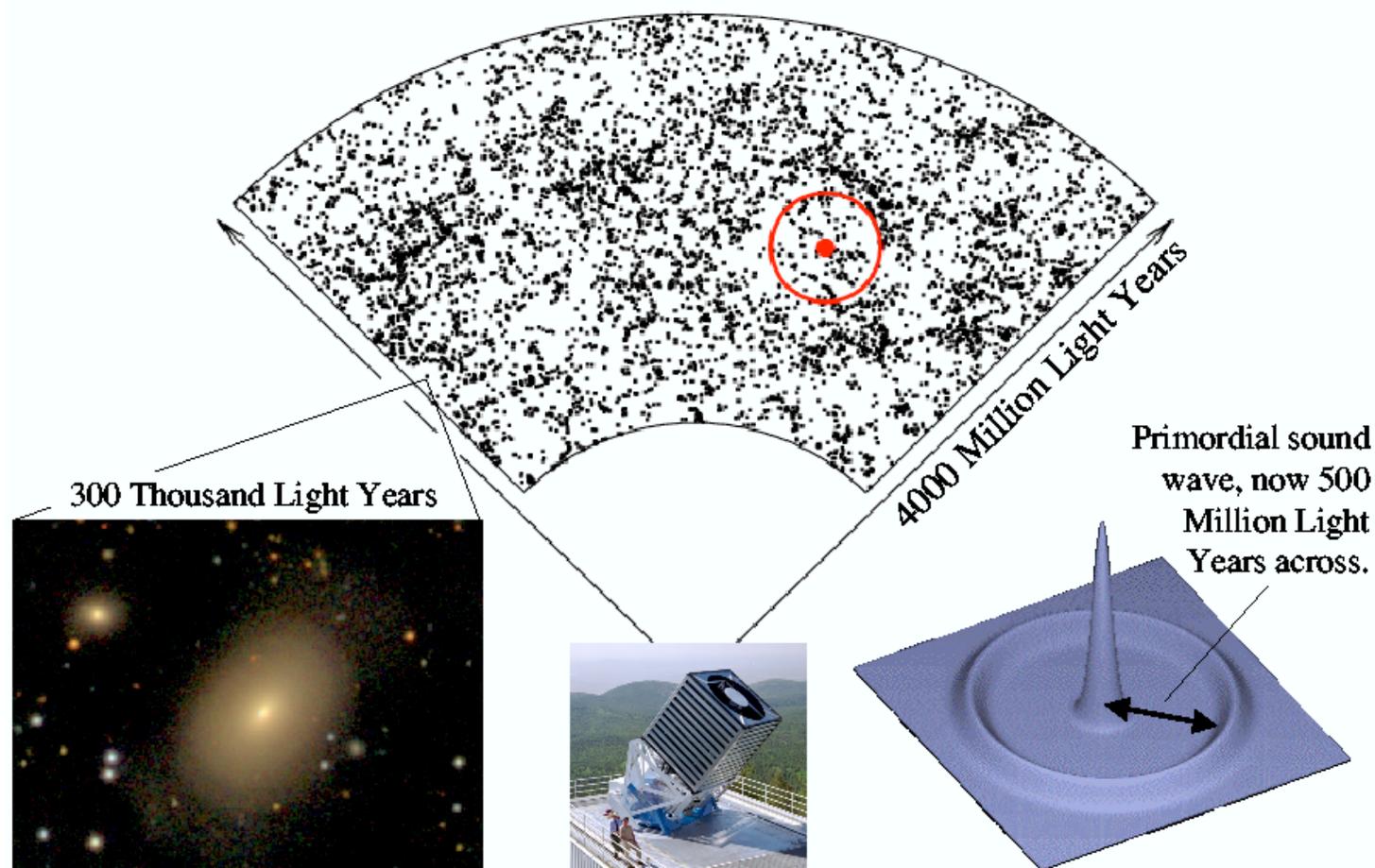
Lentilles gravitationnelles: régime faible



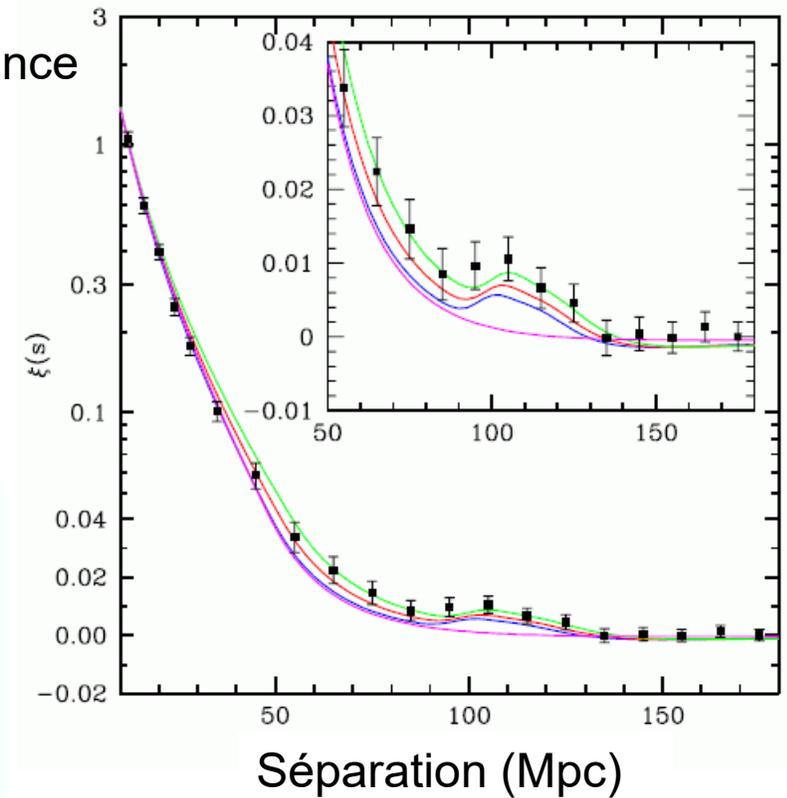
Cisaillement
cosmique

Pic acoustique baryonique

Ondes détectées aujourd'hui
dans la distribution des baryons
50 000 galaxies SDSS

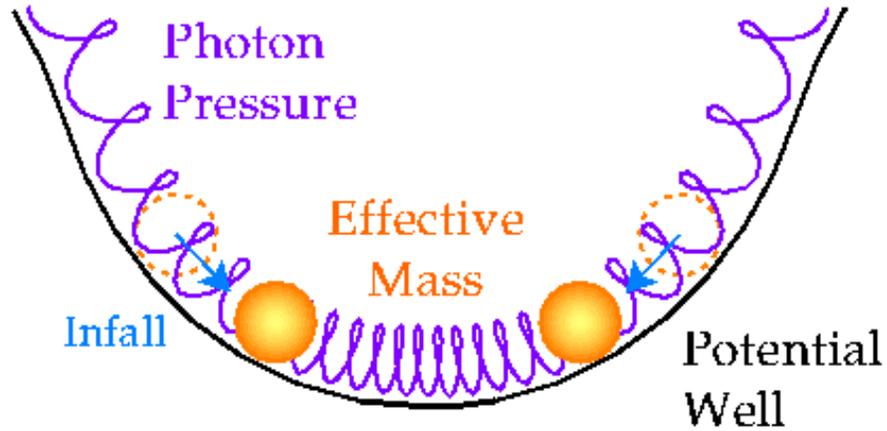


Puissance



Eisenstein et al 2005

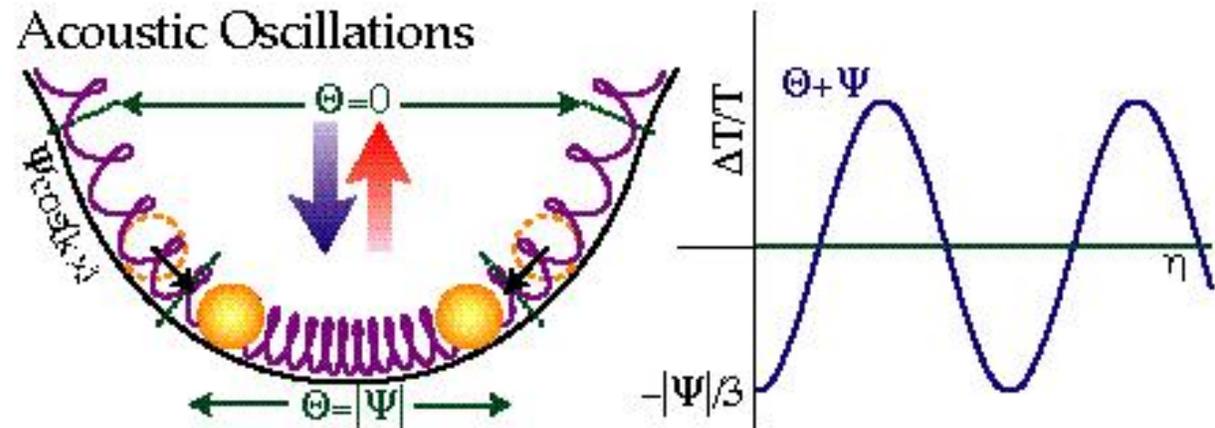
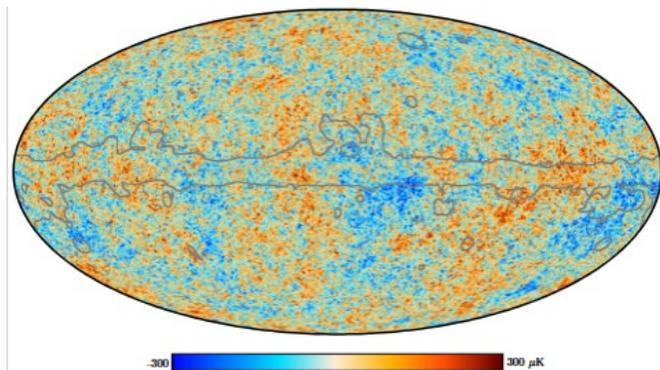
Oscillations acoustiques



Comment voir le son
Régions plus froides et régions plus chaudes

Couplage dû à la diffusion Compton

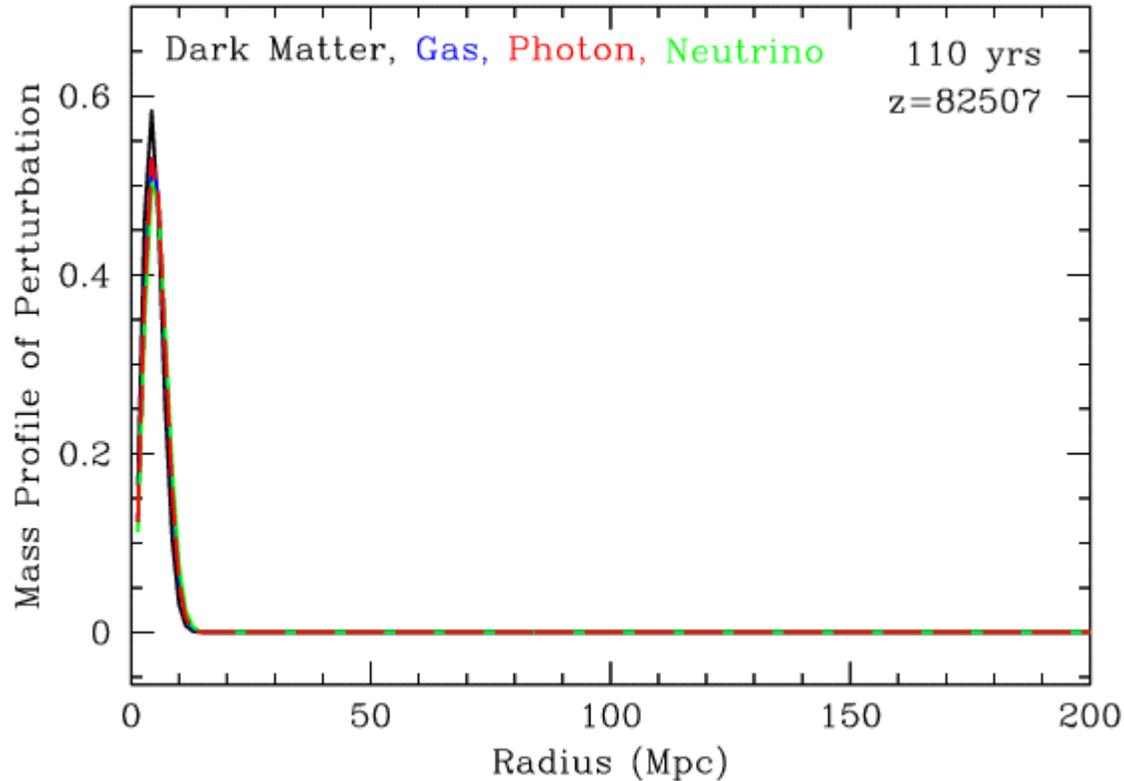
La matière noire n'oscille pas, mais reste au centre des fluctuations



Dessins de Wayne Hu

Développement de la perturbation (0)

Suivons une perturbation donnée



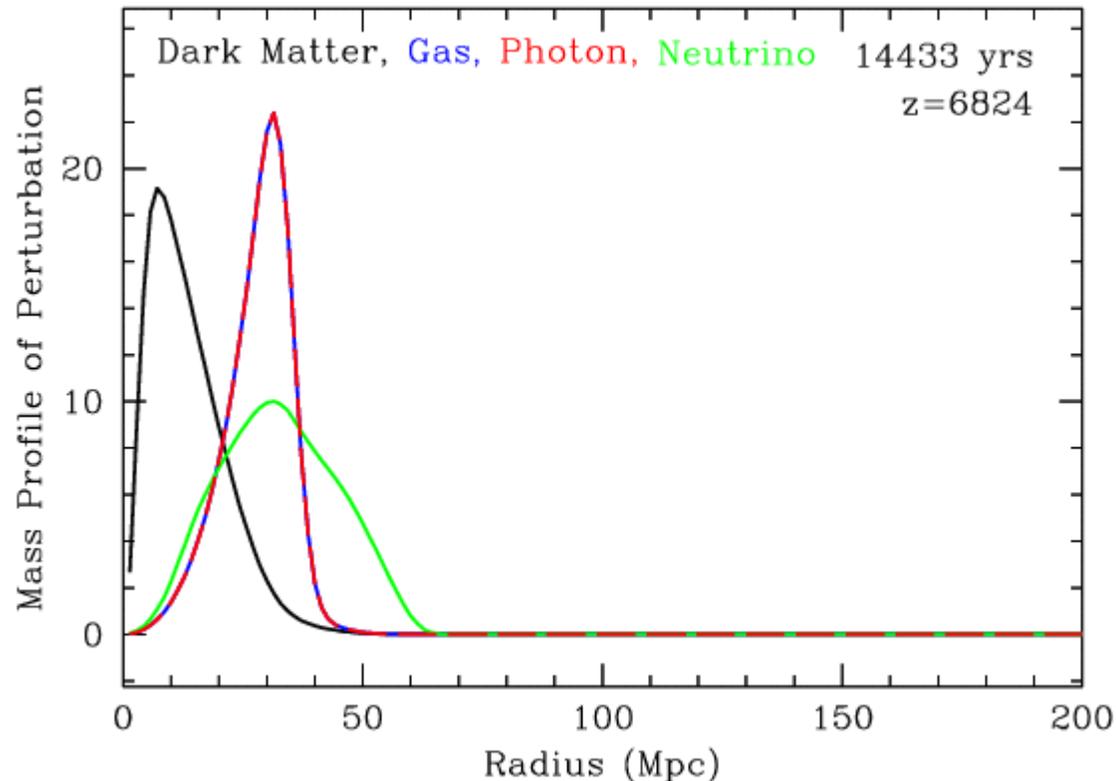
Théorie standard: adiabatique
tous les composants ont la
même amplitude

Excepté $4/3$ x pour les
particules relativistes:
Photons et neutrinos
(pas pris en compte ici)

Perturbations linéaires:
On peut toutes les sommer

D'après Eisenstein

Développement de la perturbation (1)



Les neutrinos se détachent

La matière noire continue sont effondrement lent
→ Reste au centre

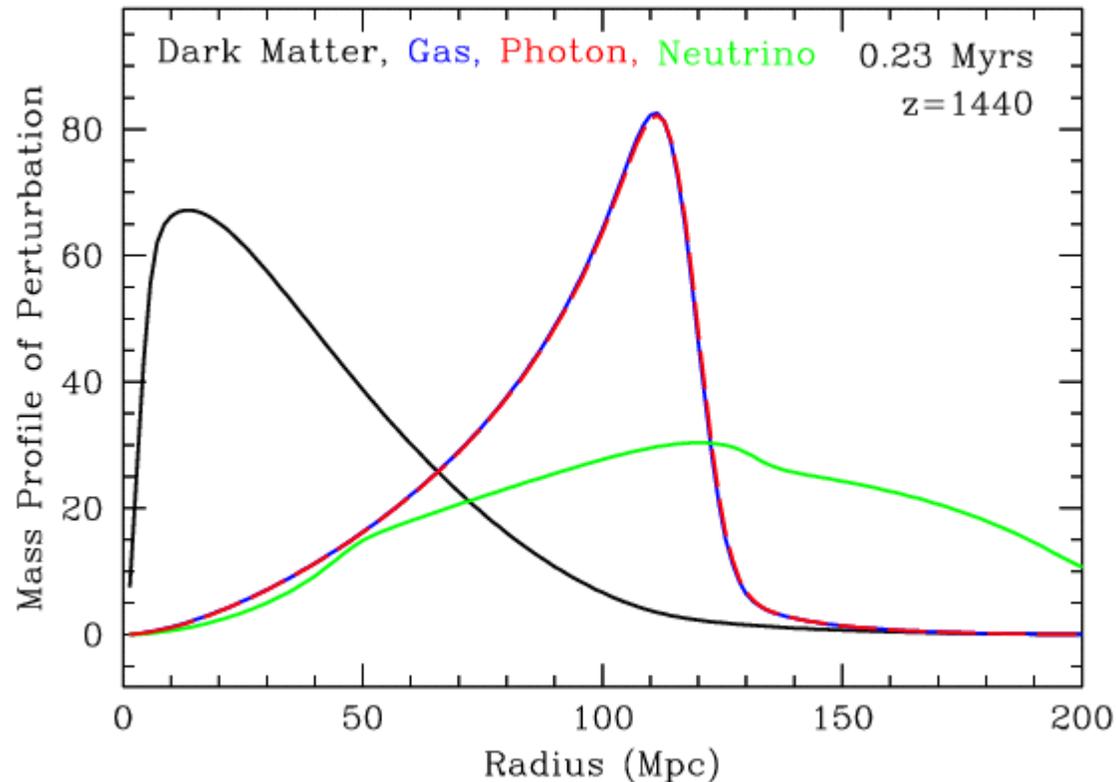
Le gaz et les photons:
Plasma oscillant

Couplés par diffusion, ils se comportent comme un fluide unique

Surpression,
Se propage à 57% c

D'après Eisenstein

Développement de la perturbation (2)



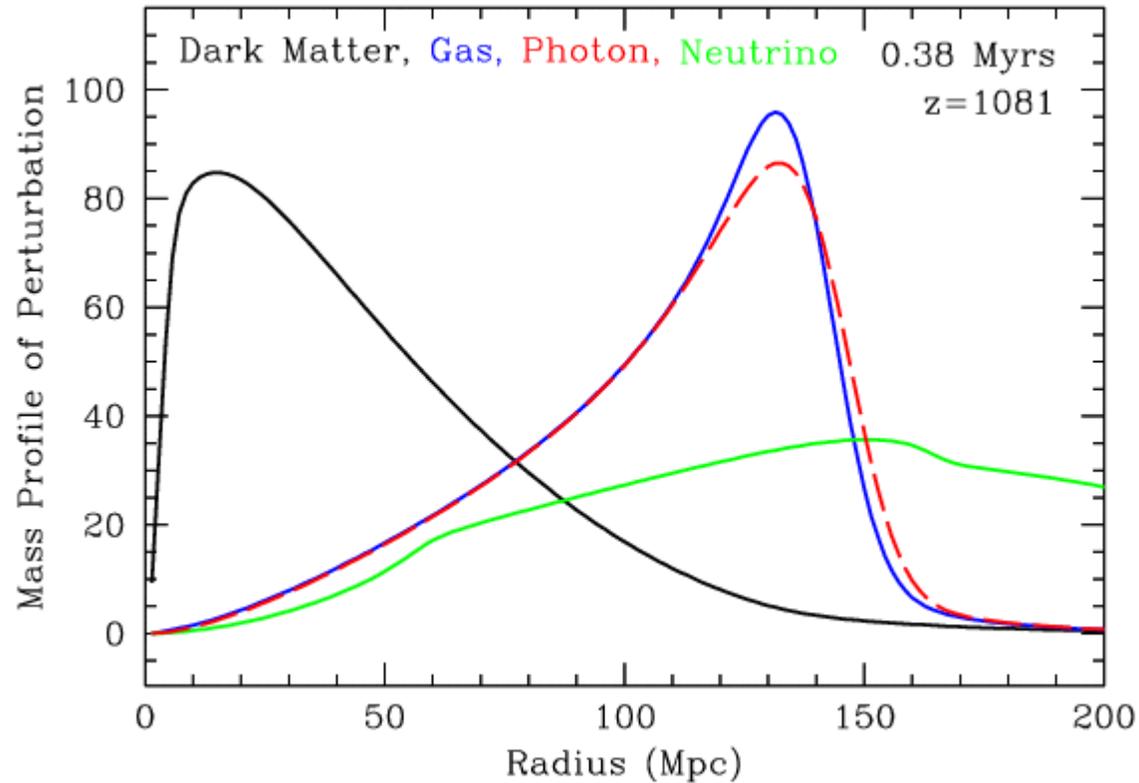
On dessine ici les dr/r relatifs
Les rapports de densité de la perturbation ne sont pas visibles

Cependant, rR^2 est dessiné
Masse= aire sous la courbe
La matière diffuse, et les pics
S'élargissent dans la DM

→ Le « free streaming » a supprimé les petites échelles

→ Tournant dans $P(k)$

Développement de la perturbation (3)



Début de la recombinaison

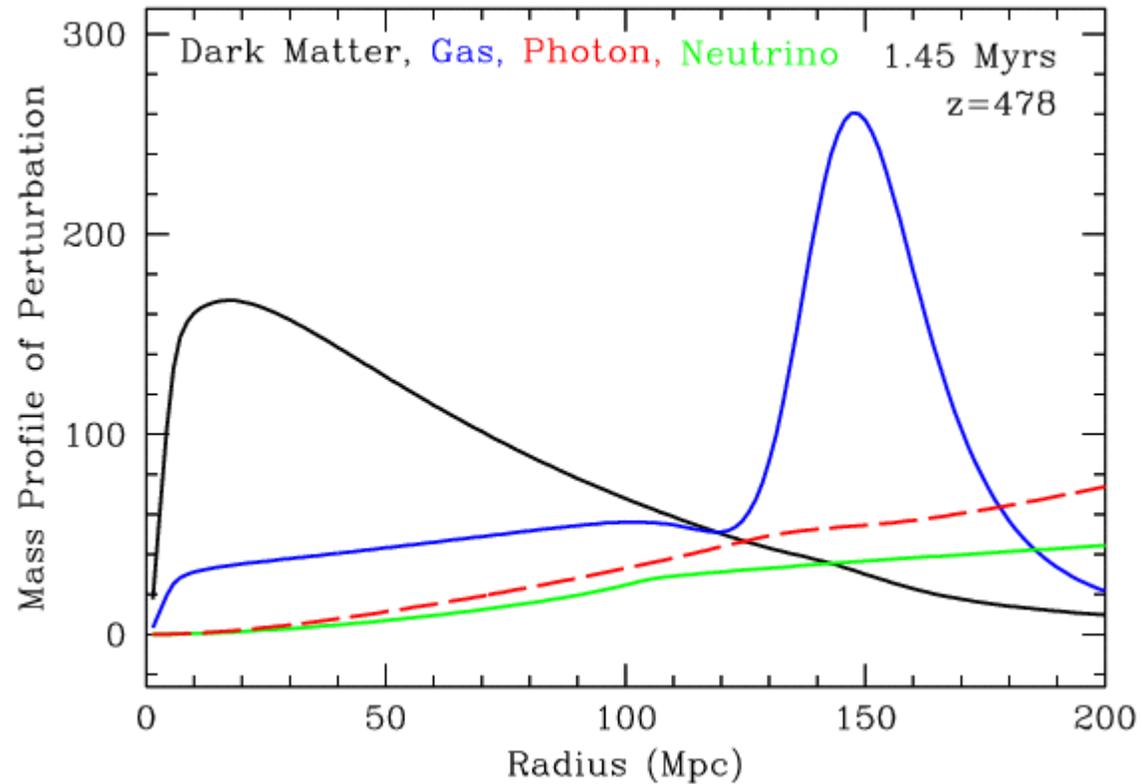
Les photons se découplent du gaz

Les petites échelles sont floutées
(« Silk damping »)

La vitesse du son chute

Et les ondes acoustiques se gèlent

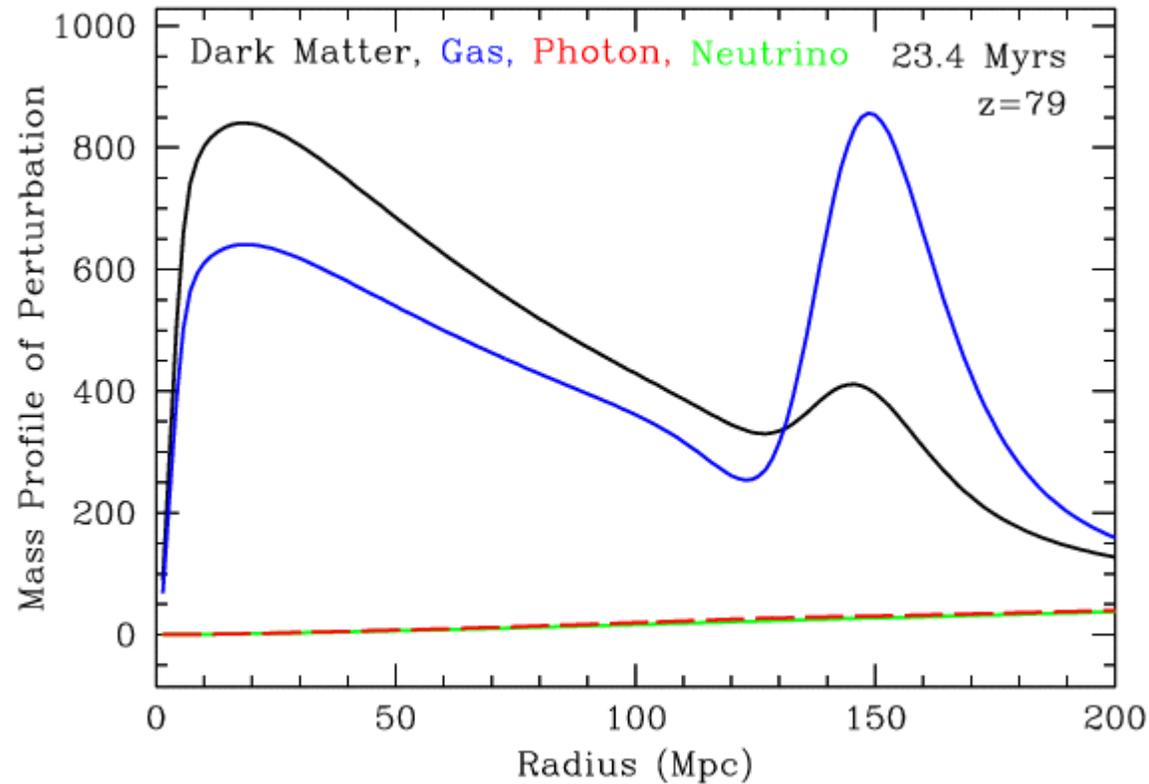
Développement de la perturbation (fin)



Les photons et neutrinos
ont partis au loin

Reste une concentration de
matière noire au
centre + anneau de gaz
de 150 Mpc

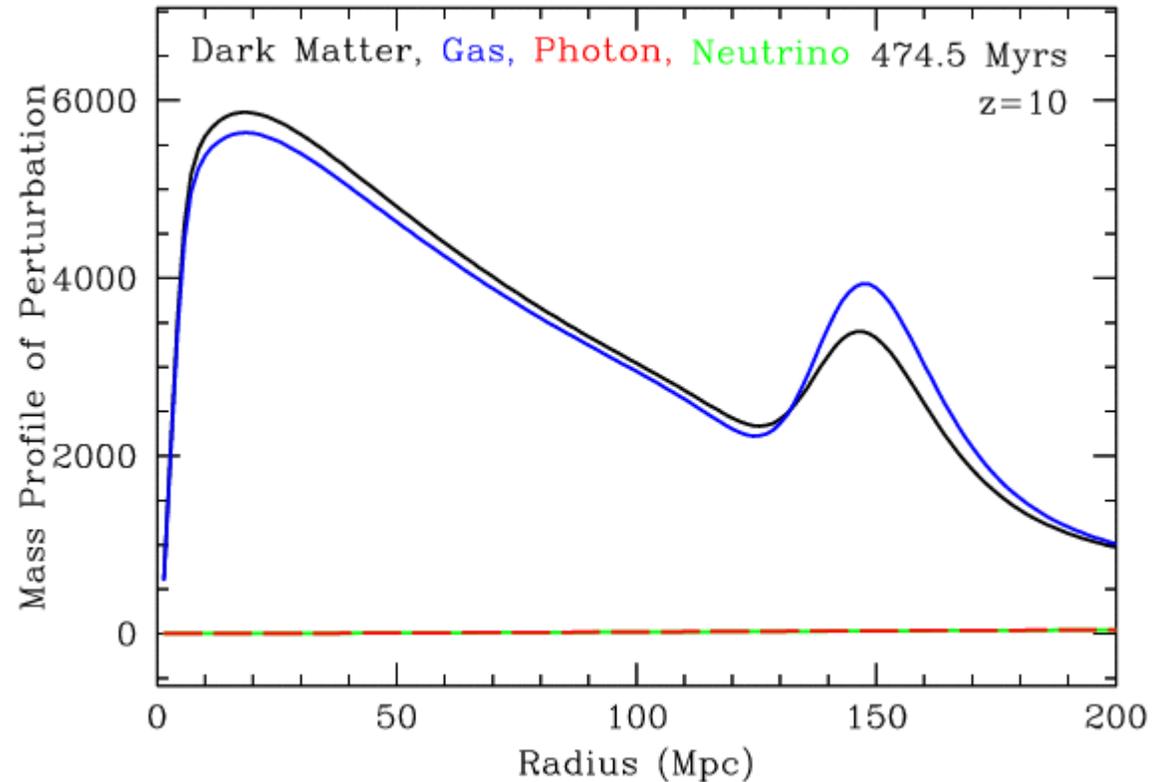
Après recombinaison (1)



DM et baryons
s'attirent par leur gravité

La gravité homogénéise
les fluctuations

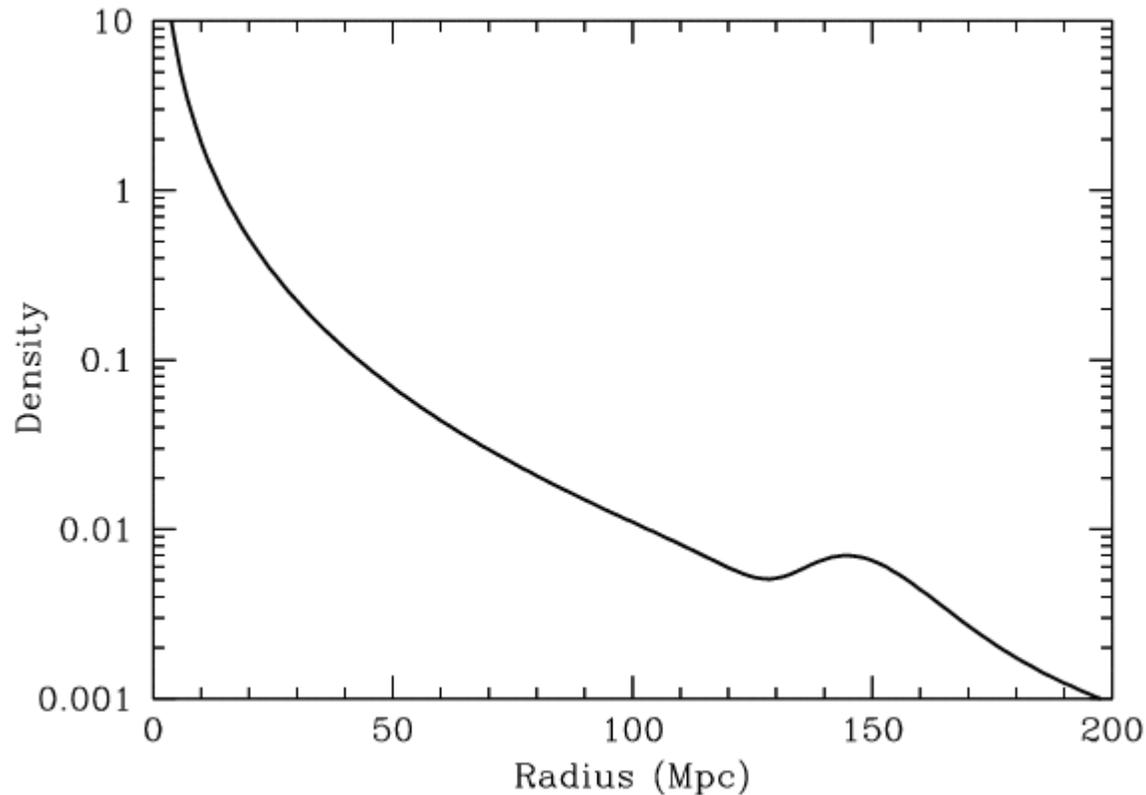
Après recombinaison (2)



Finally, like dark matter is 5-6 times more massive she imposes a central peak, then when there was no baryonic mass at the start

Ce sont les pics acoustiques qui vont être observés

Après recombinaison (3)



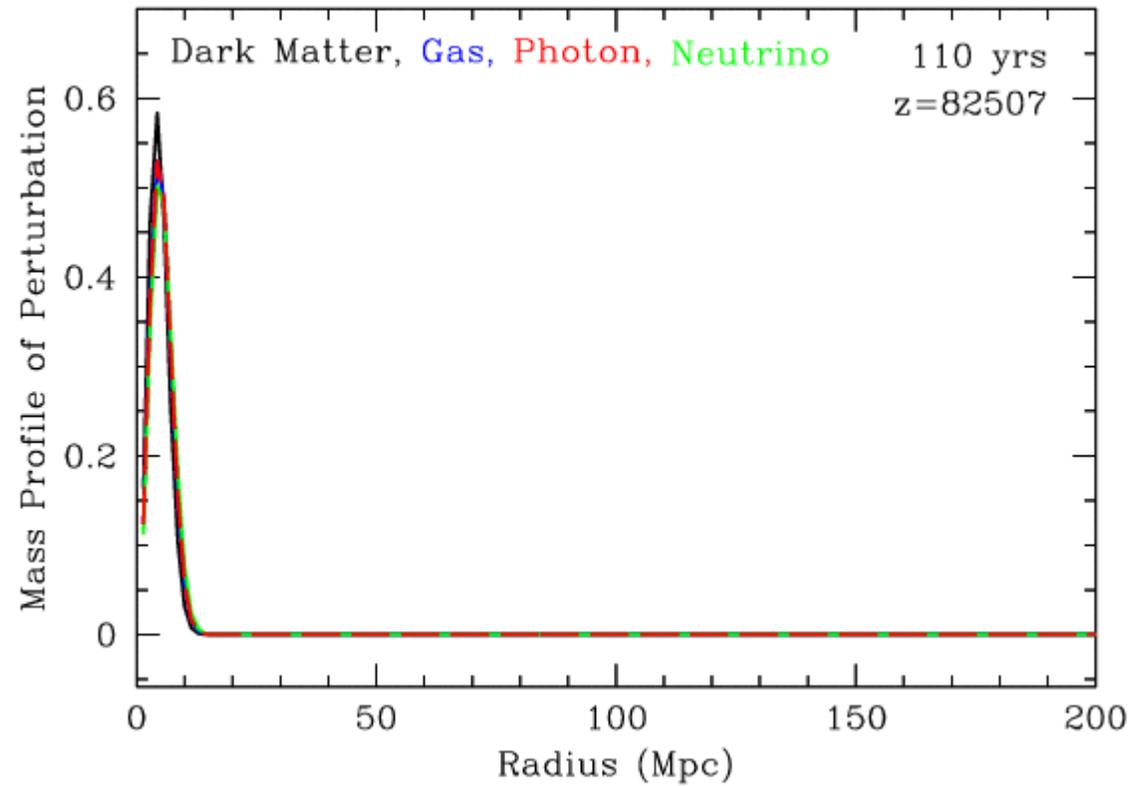
Maintenant en densité, le pic est de l'ordre de 1%

Ce n'est plus rR^2

On attend: une concentration centrale à la même place que la fluctuation initiale + un deuxième pic de densité à 153Mpc du premier

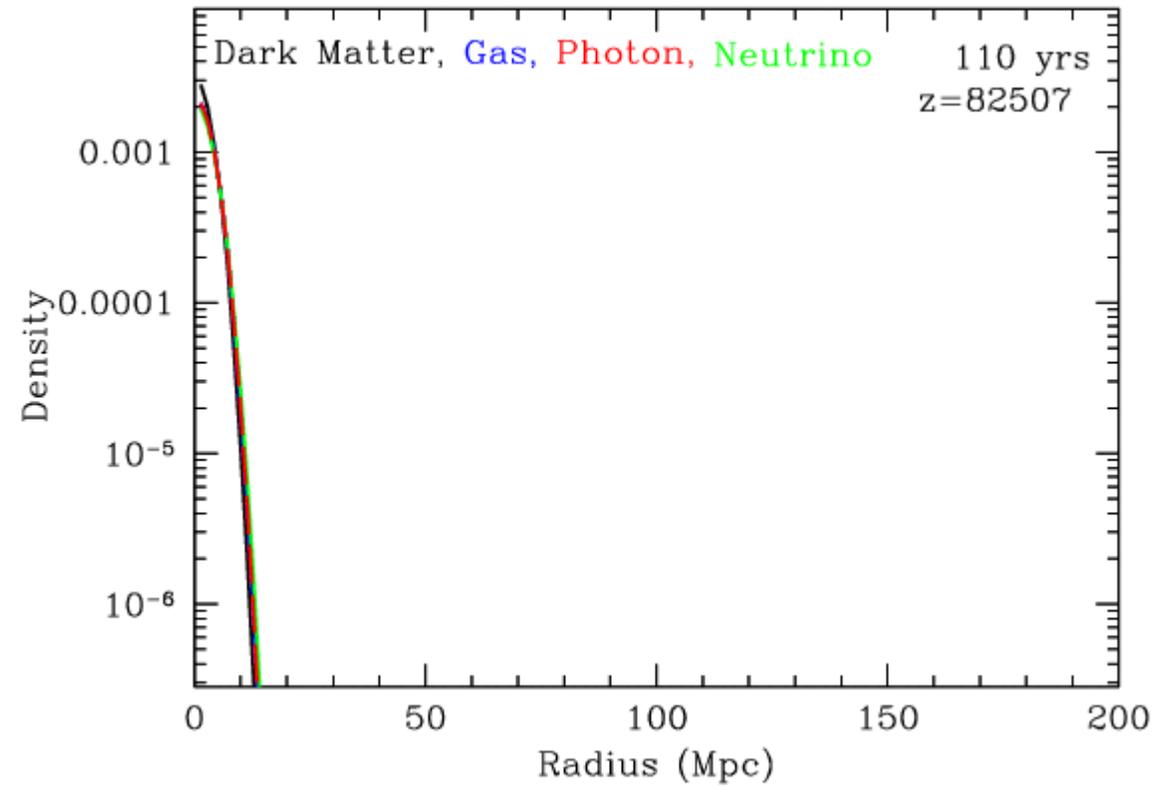
Premières prédictions: Peebles & Yu (1970), Sunyaev & Zeldovich (1970)

Version animée: masse



D'après Eisenstein, & CMBFAST

Version animée: densité



D'après Eisenstein, & CMBFAST

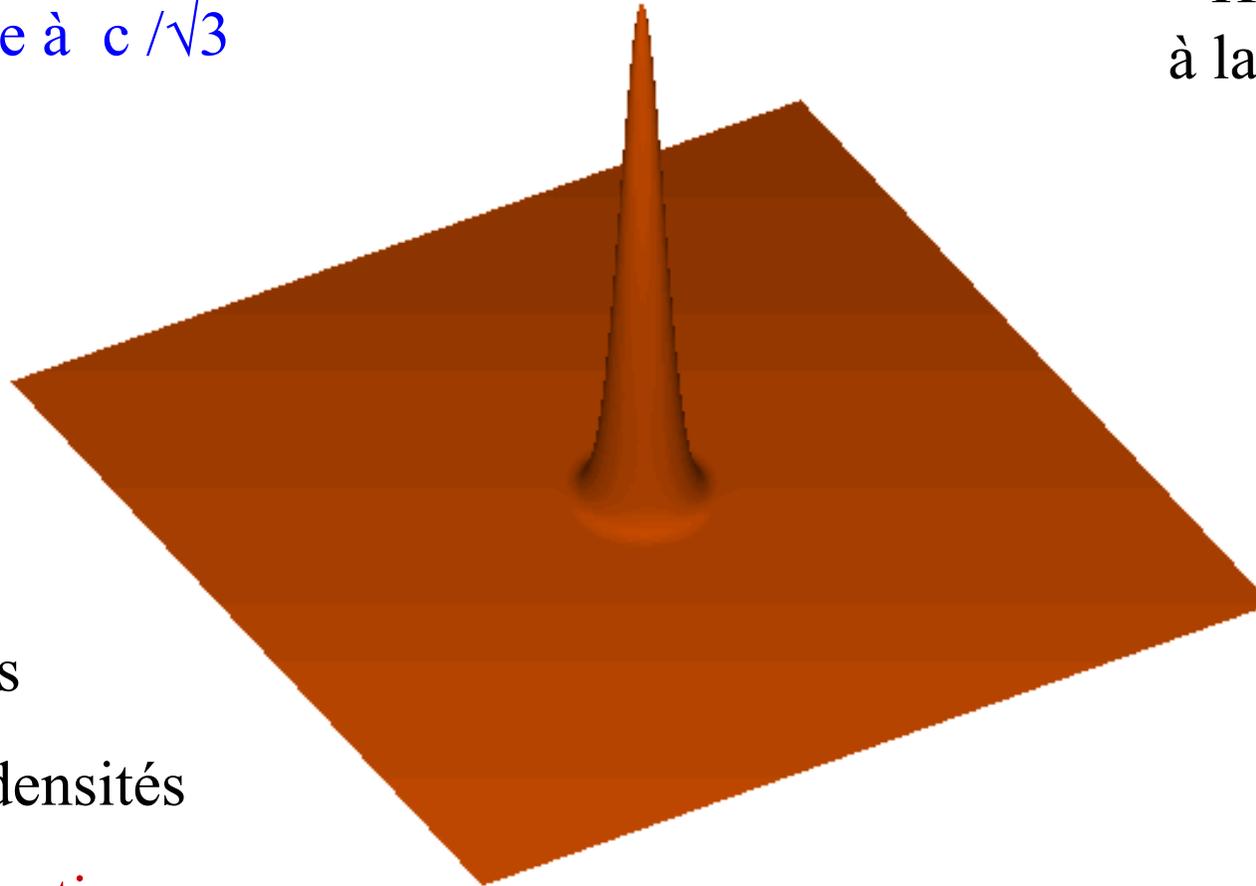
Une perturbation simple

Crée une dépression

→ Onde sonore à $c/\sqrt{3}$

Horizon sonore
à la recombinaison

$R \sim 150 \text{kpc}$



Galaxies

dans les sur-densités

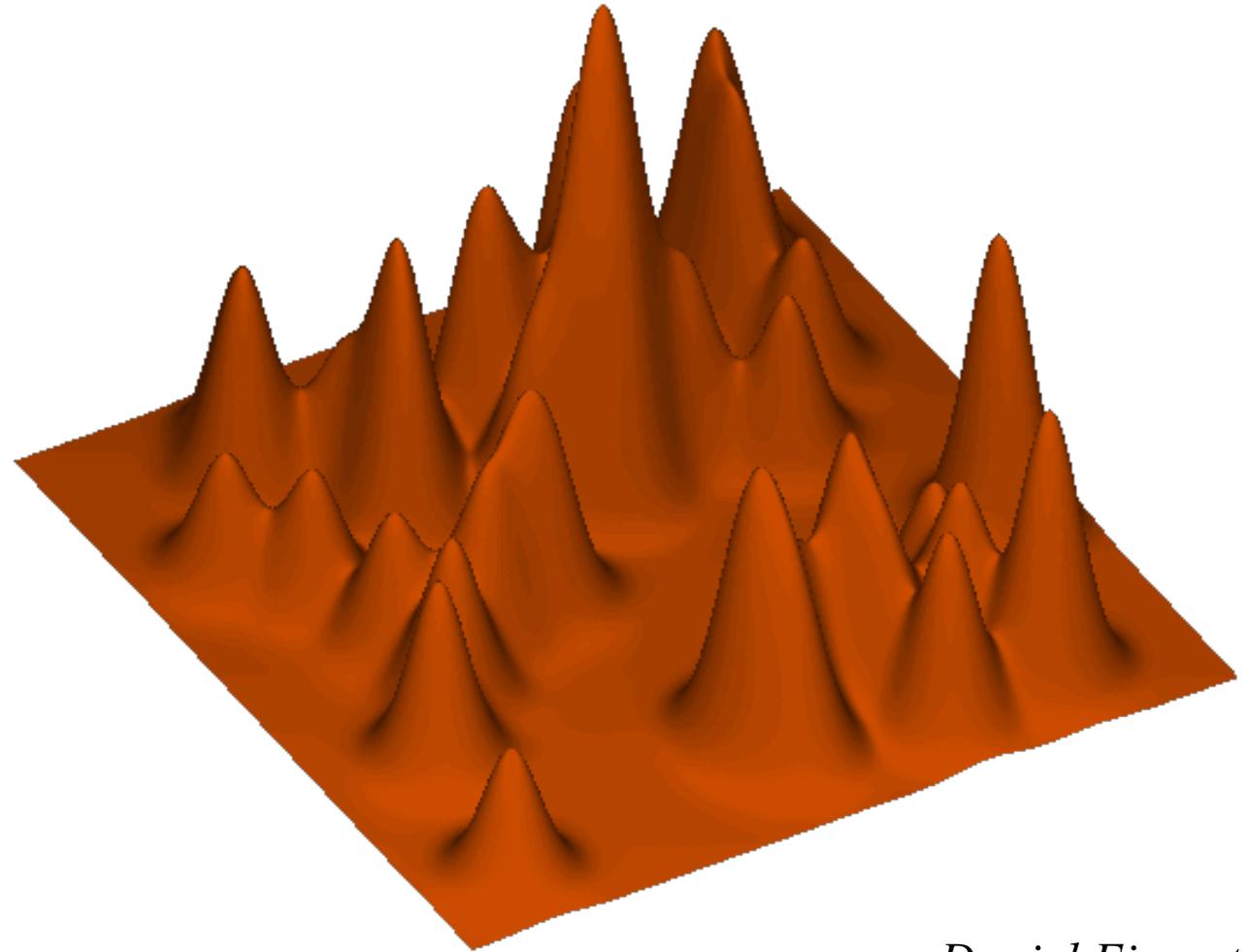
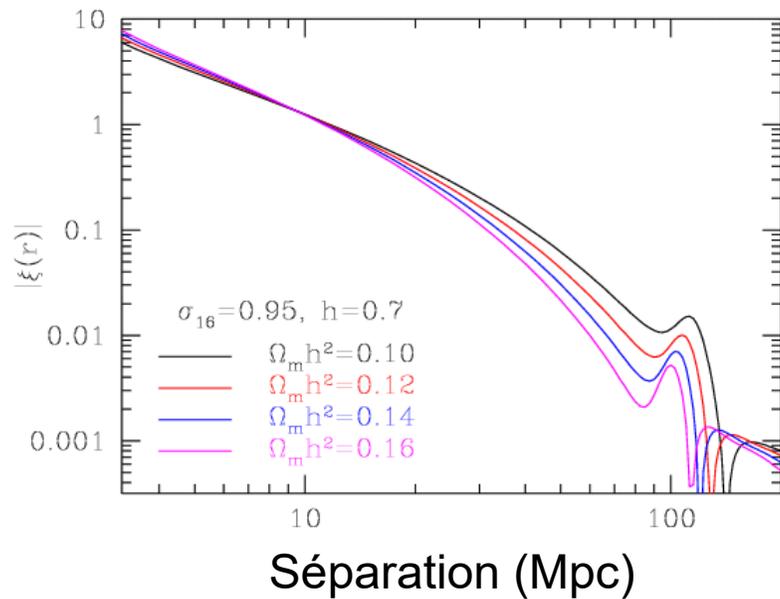
→ Ondes acoustiques

Daniel Eisenstein

Perturbations multiples

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

Puissance



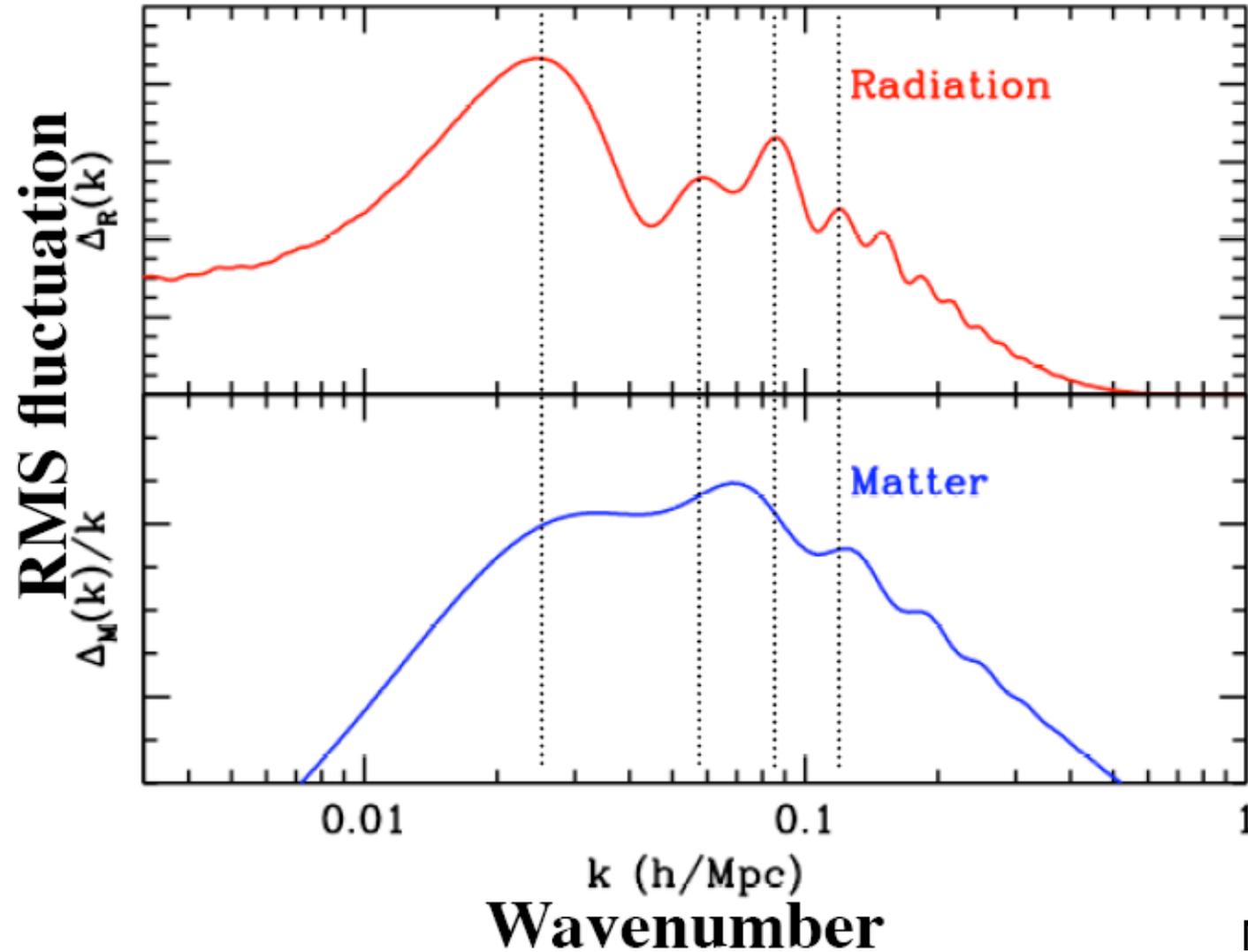
Daniel Eisenstein

Oscillations attendues (BAO) *Baryonic Acoustic Oscillations*

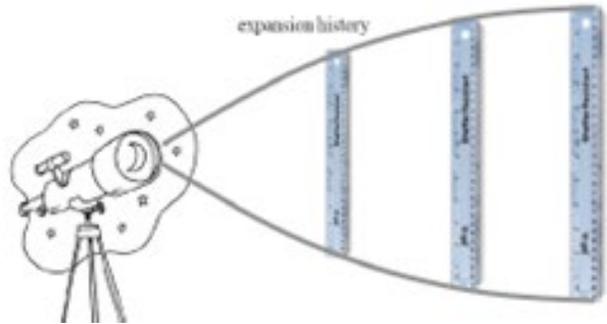
Pas en phase
aux petites
échelles
(vitesses)

Et 2x longueur
d'onde

Hütsi 2005



Baryon features as a standard ruler

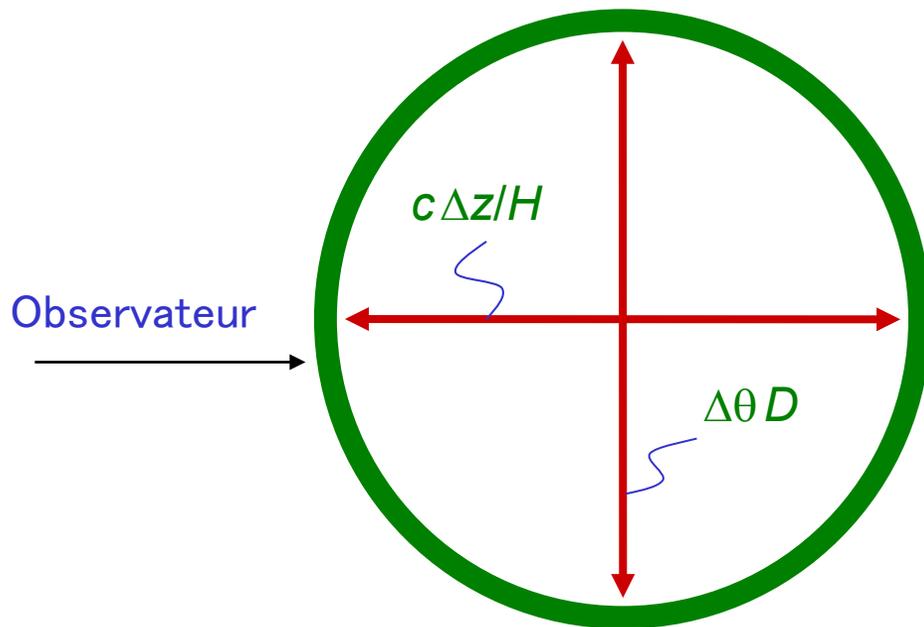


BAO: Règle standard

BAO dans la forêt Ly α à $z=2.3$

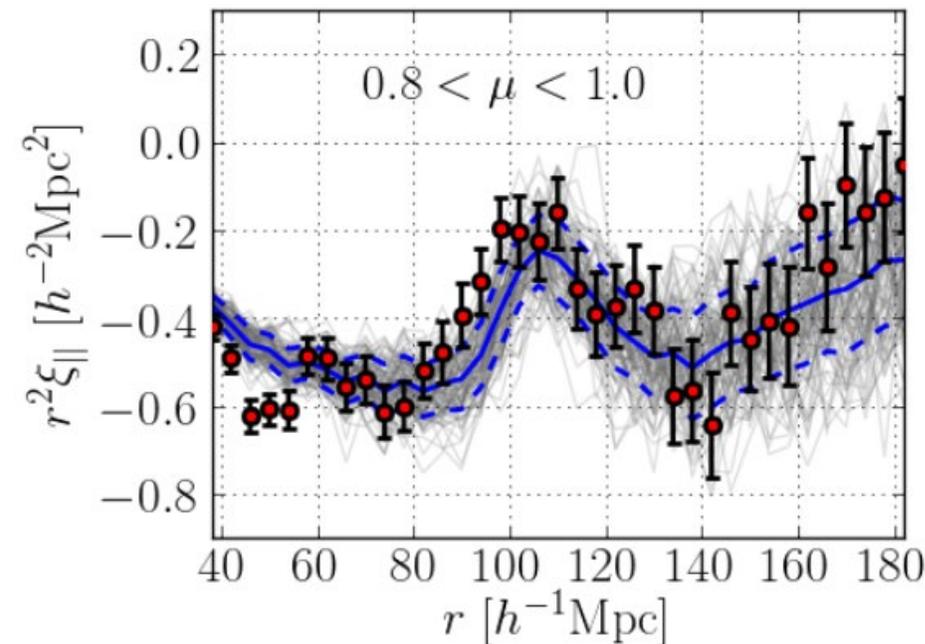
Delubac et al 2014

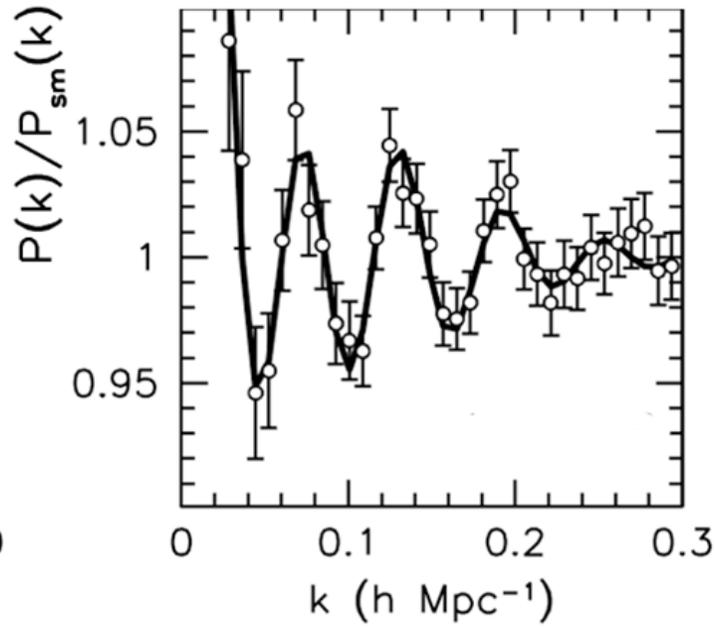
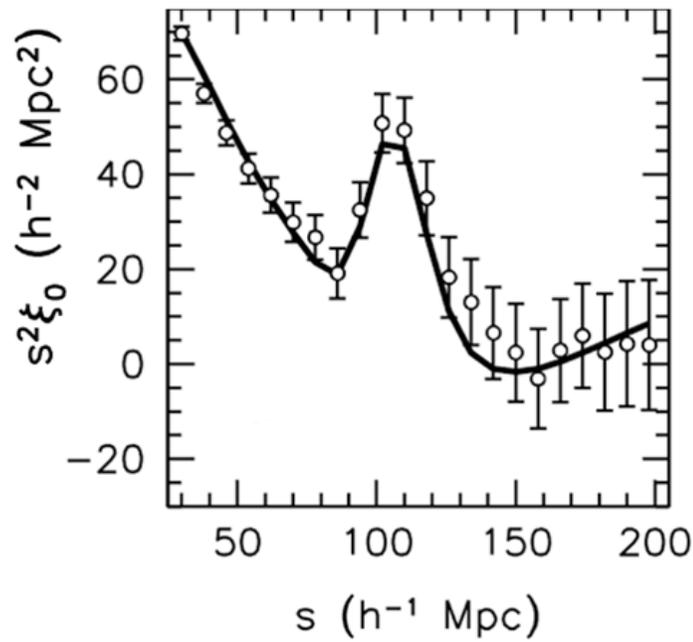
Points rouges comparés à la simulations des quasars (gris)
 r_d horizon sonore à l'époque
 D_A dist. angulaire, $D_H = c/H$
 Tension avec Planck à 2.5σ



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

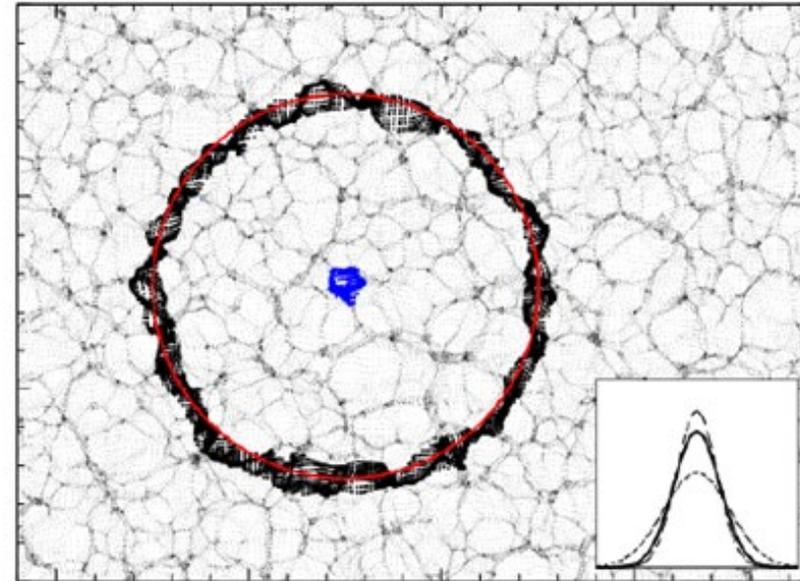
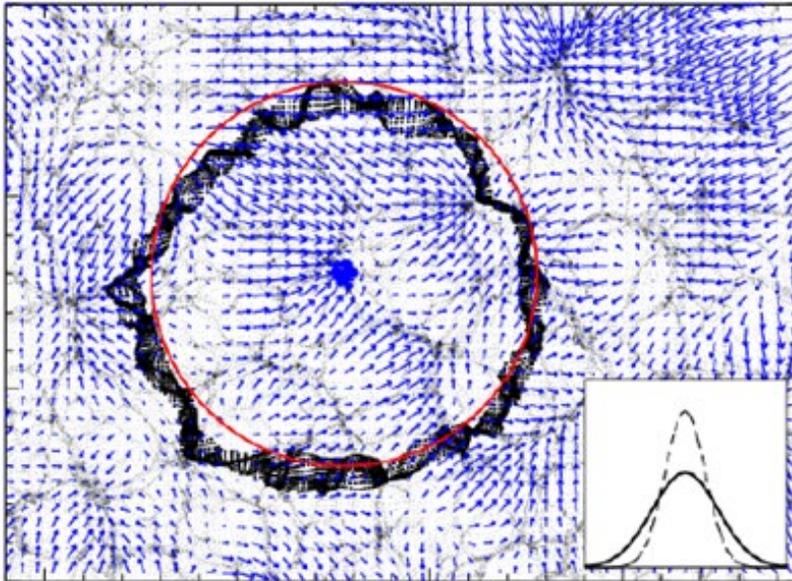
→ Possibilité de déterminer $H(z)$





Une onde spatiale
($100/h \text{ Mpc}$)
→ Oscillations dans
 $P(k)$, autour de
 $k=0.1 \text{ h/Mpc}$
Anderson et al 2014

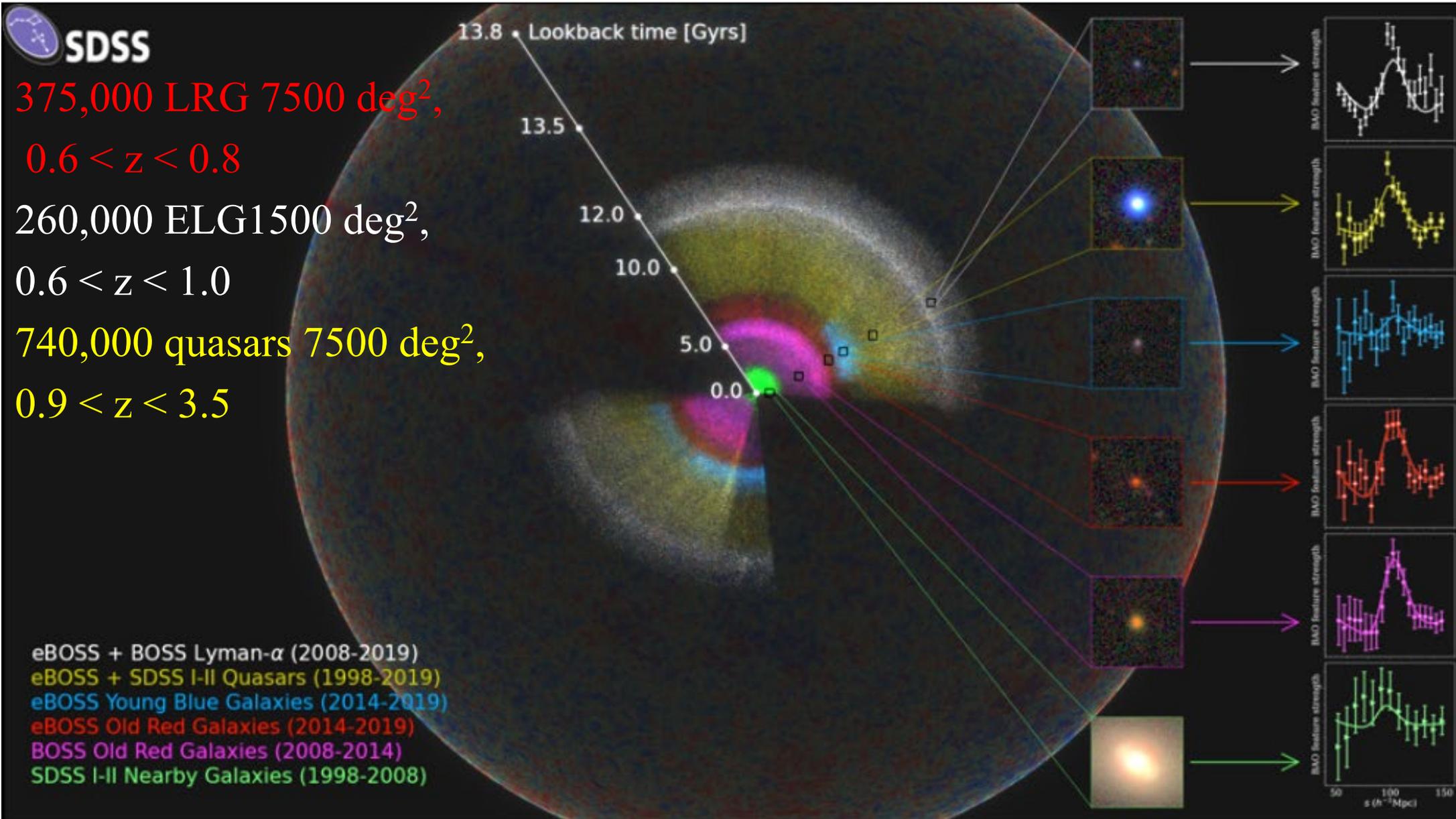
Reconstruction par simulation



Corrections des vitesses particulières *Padmanabhan, N et al 2012*

Collaboration eBOSS

Détection dans plusieurs échantillons



Résultats finaux de eBOSS (SDSS)

Les résultats sont compatibles avec les prédictions Λ CDM

Sauf pour $f\sigma_8$ à $z > 2$

Les BAO seules prouvent l'existence de l'énergie noire

Avec les autres: CMB, RSD, SN

$$w_0 = -0.909 \pm 0.081$$

$$w_a = -0.49 \pm 0.35$$

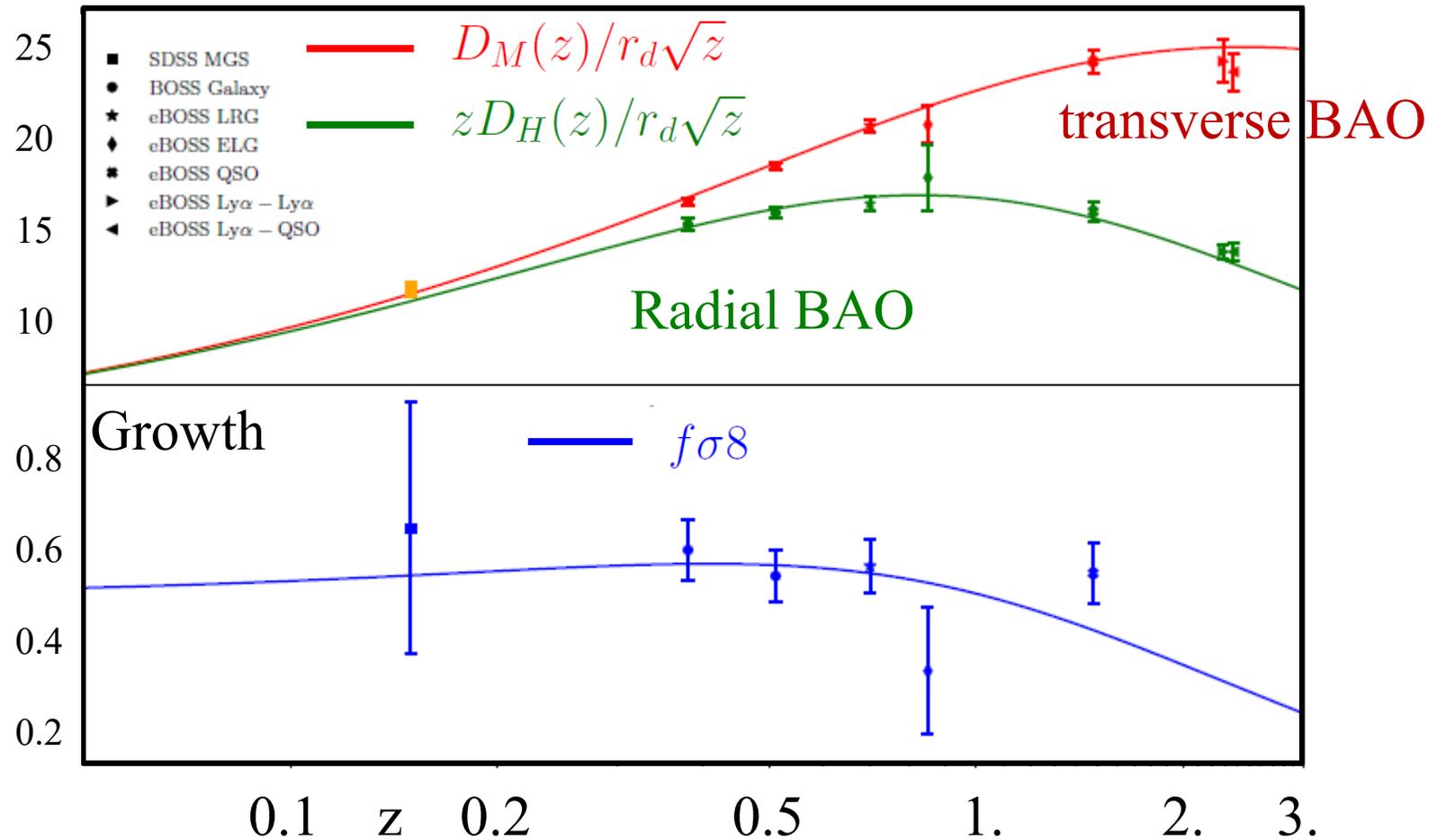
Alam et al 2024

$$w = w_0 + w_a a(t)$$

D_M distance angulaire
 r_d = horizon sonore
 D_H Distance de Hubble

Expansion history

Courbes = Λ CDM



$$\ddot{\delta} + 2H(t)\dot{\delta} = 4\pi G\langle\rho\rangle\delta$$

**Taux de croissance $\delta = \delta\rho/\rho$
comme test de la gravité**

Taux de croissance $f = d\log(\delta) / d\log(a)$

La croissance produit des vitesses particulières

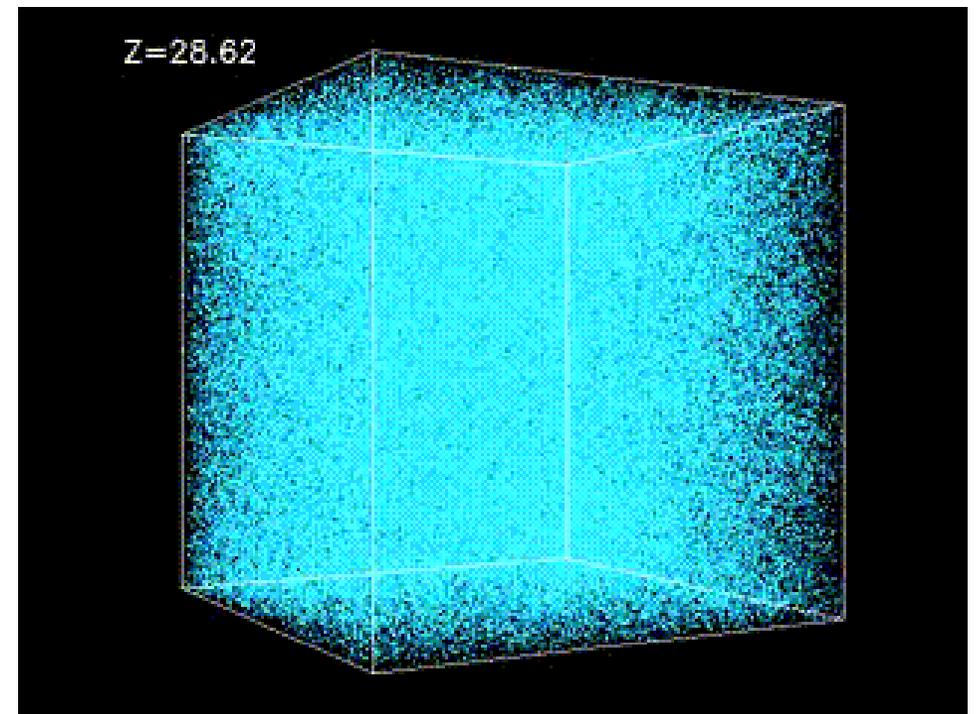
Contraintes sur le produit $f\sigma_8$,

σ_8 amplitude de fluctuation de masse sur une taille $8/h$ Mpc

Le taux de croissance est mesuré par

1- lentilles faibles (**WL**) et tomographie

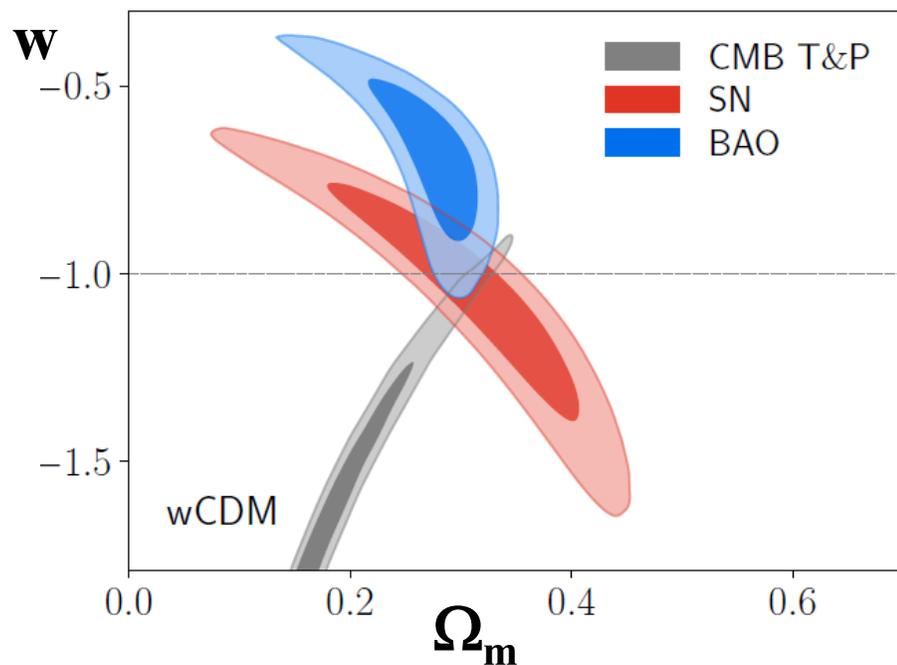
2- **Amas de galaxies** et « redshift-space distortions » (**RSD**)



Comparaison BAO/CMB/SN

Confirmation, et compatibilité du terme Ω_Λ avec une constante

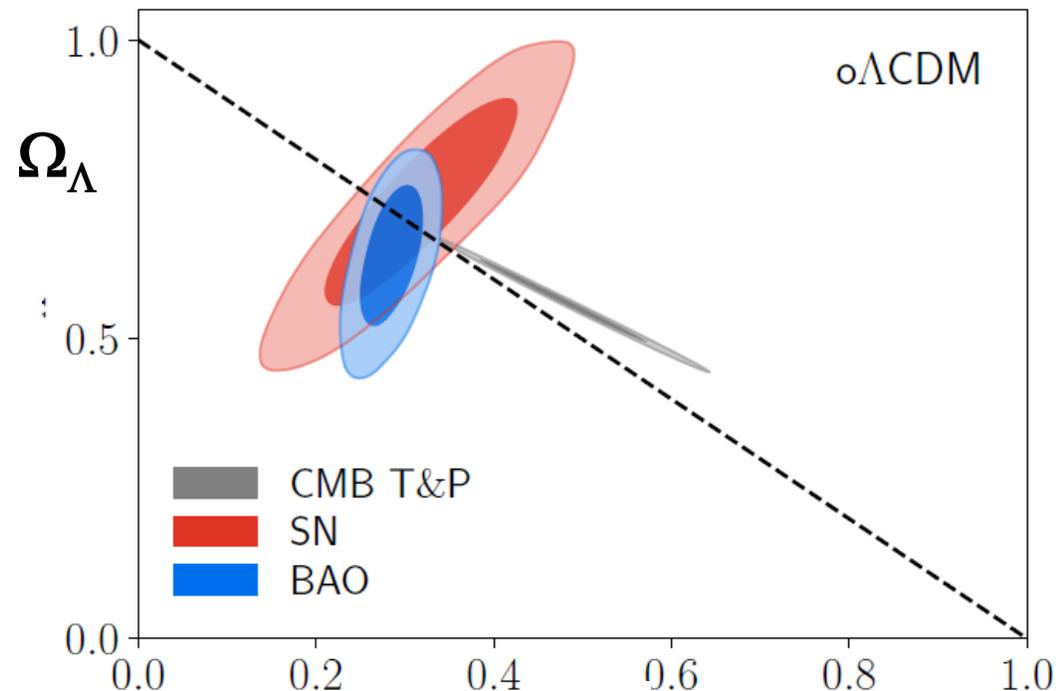
Planck (2020), eBOSS 2024, Pantheon SN



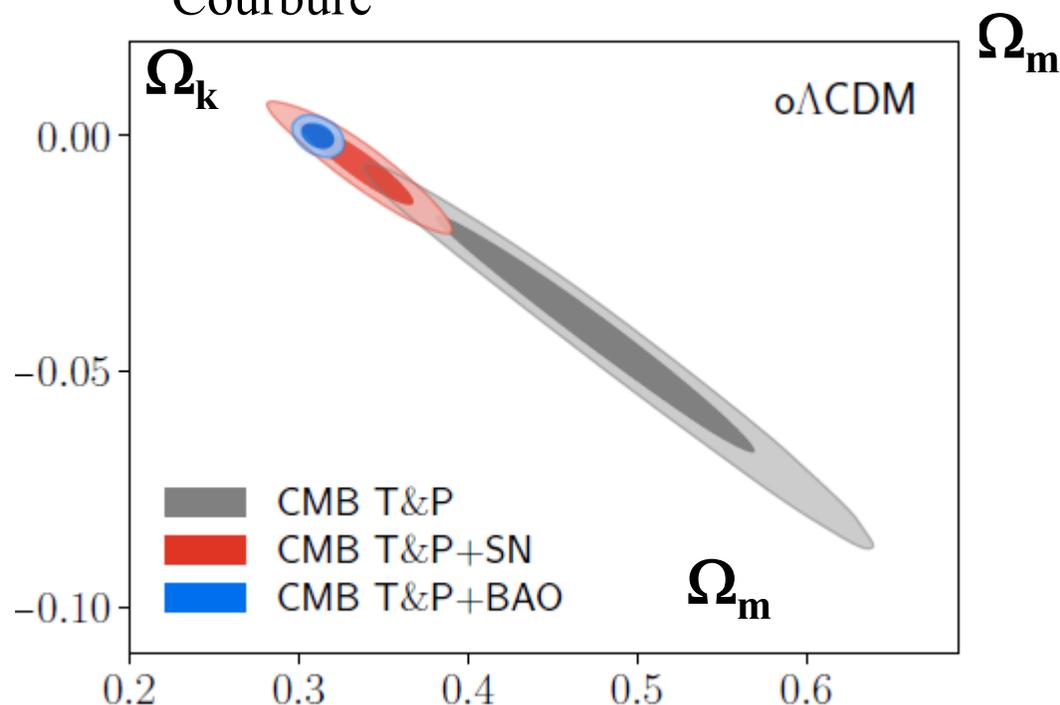
Equation d'Etat (EoS)

$$P = w \rho \text{ avec } w < -1/3$$

CMB
SNe
BAO



Courbure



Alam et al 2024

Tension avec les contraintes du CMB

Equation d'état $P = w \rho$ $w = -1$ attendu pour une constante

Quintessence: dynamique

$$w = w_0 + w_a a(t)$$

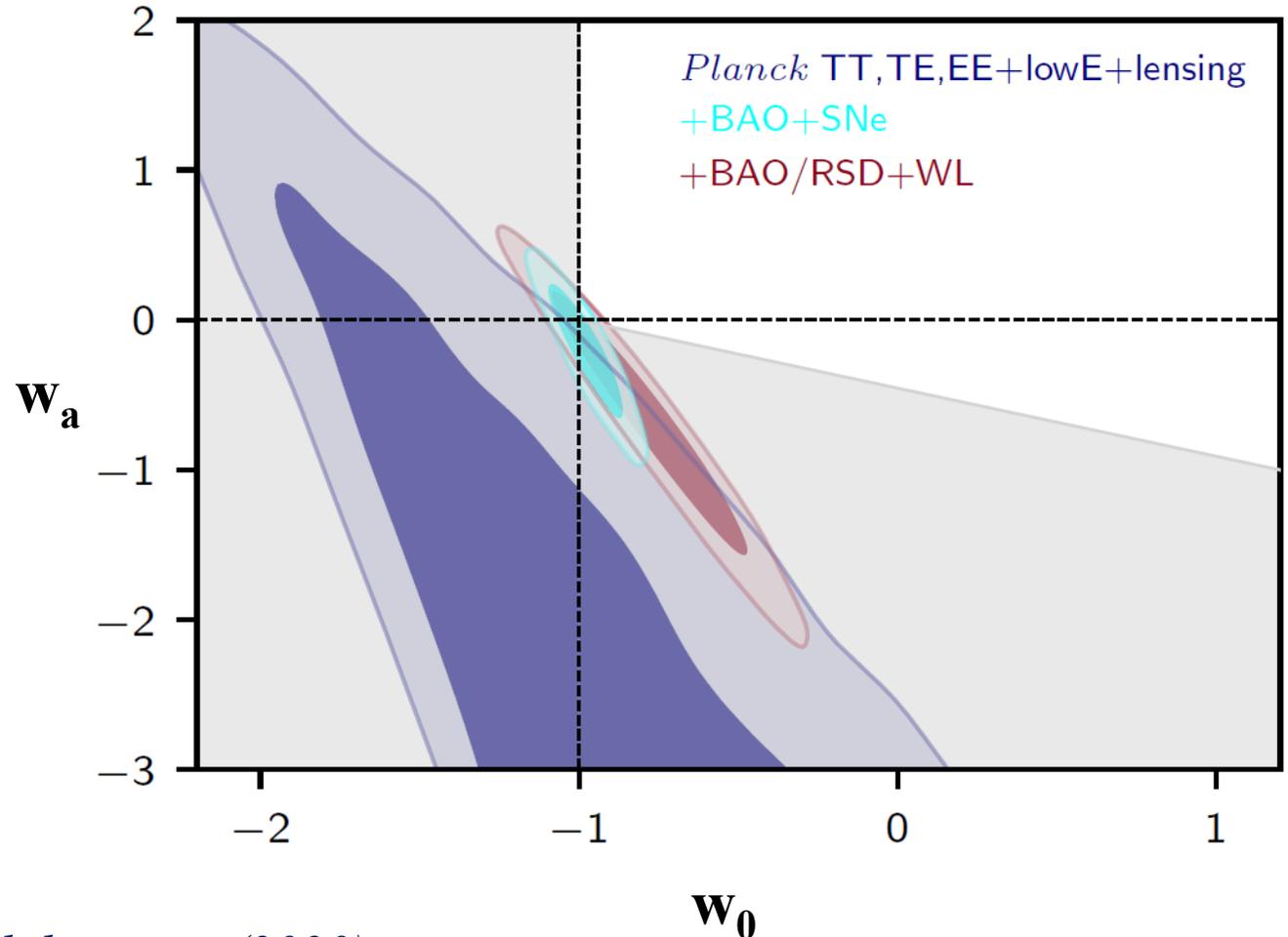
Sauf énergie « phantom »

$$w < -1$$

$$w_q = \frac{\frac{1}{2}\dot{Q}^2 - V(Q)}{\frac{1}{2}\dot{Q}^2 + V(Q)}$$

Accélération $\sim -(3P + \rho)$

$$w < -1/3$$



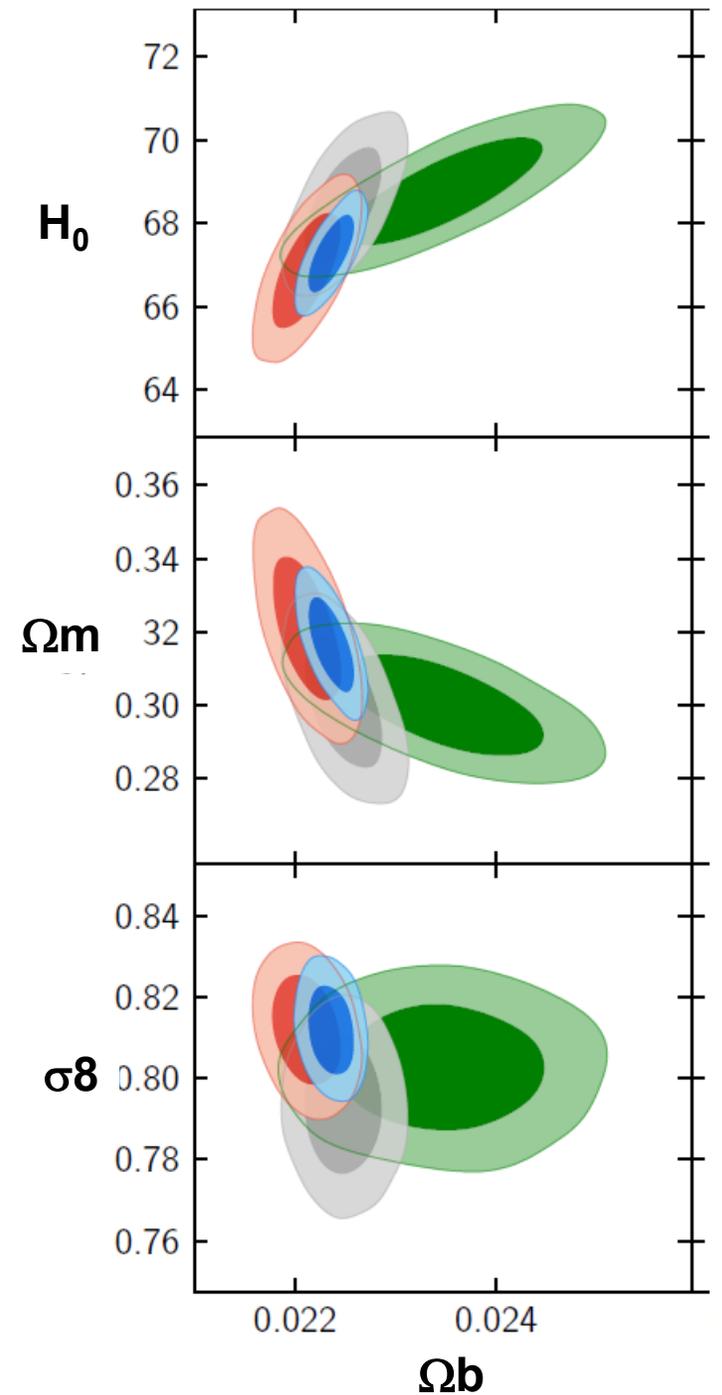
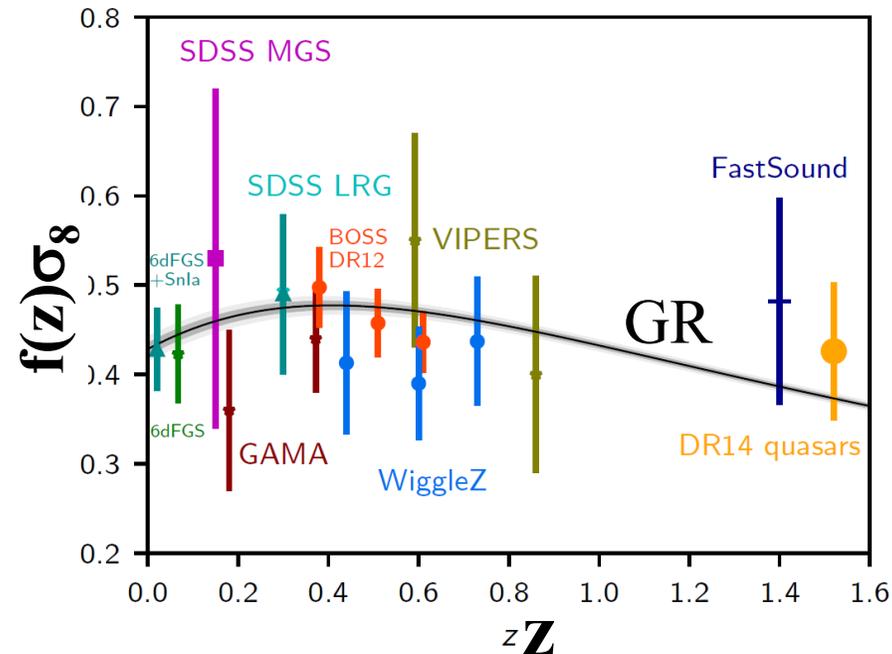
• *Planck Collaboration (2020)*

Contraintes cumulées avec CMB

Tension pour H_0 et σ_8 ,

Croissance des structures $f(z)$

-  *Planck* EE+lowE+BAO
-  *Planck* TE+lowE
-  *Planck* TT+lowE
-  *Planck* TT,TE,EE+lowE



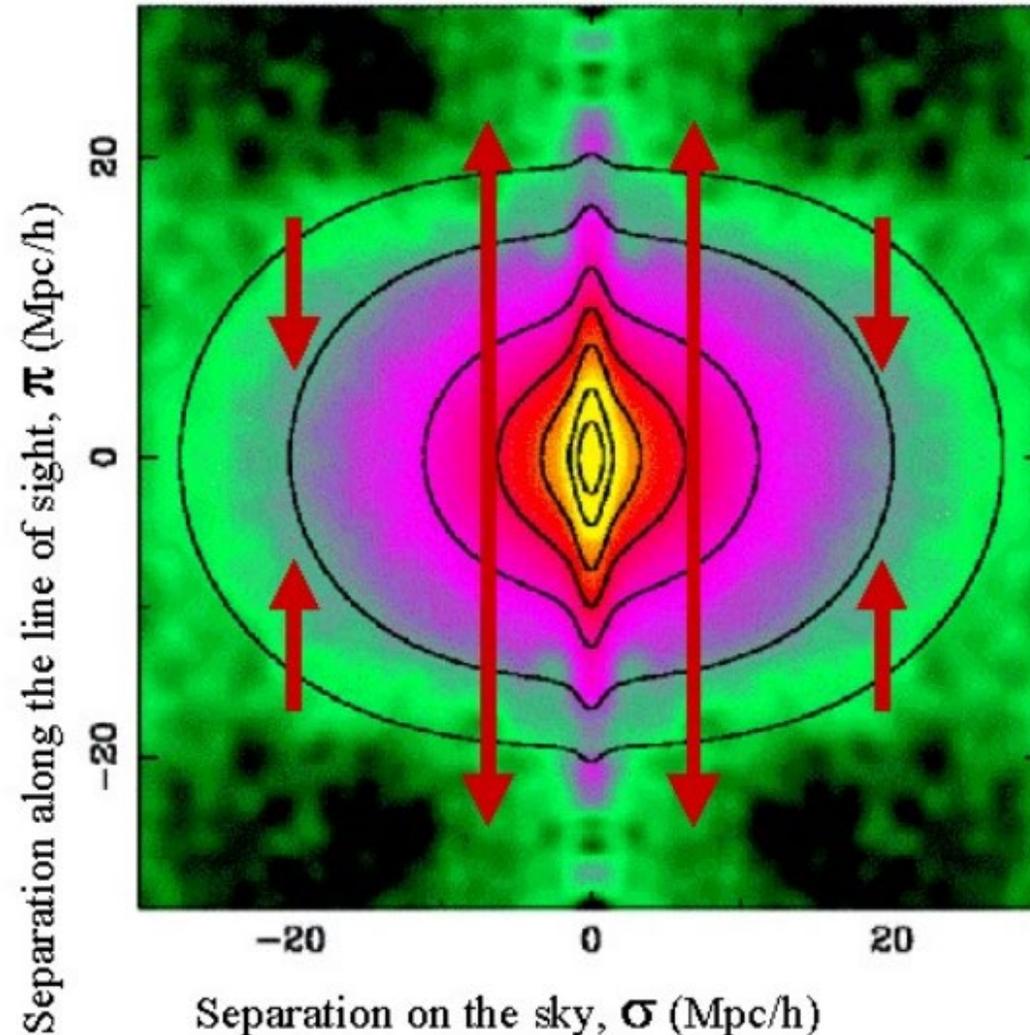
RSD « Redshift space distortions »

(1) Distortions dues aux vitesses particulières sur la ligne de visée (doigts de Dieu!)

(2) Effet Kaiser dans les amas: accrétion systématique

Non aléatoire; permet de déterminer

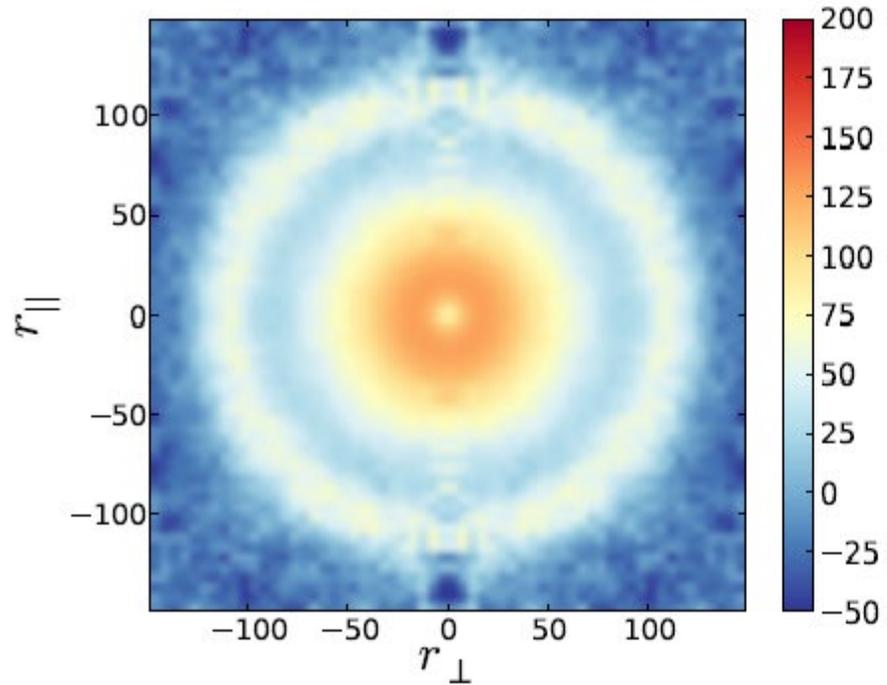
$\beta = \Omega_m^{0.6}/b$
biais $\delta_{\text{galaxies}} = b (\delta_{\text{mass}})$
et σ_{gal}



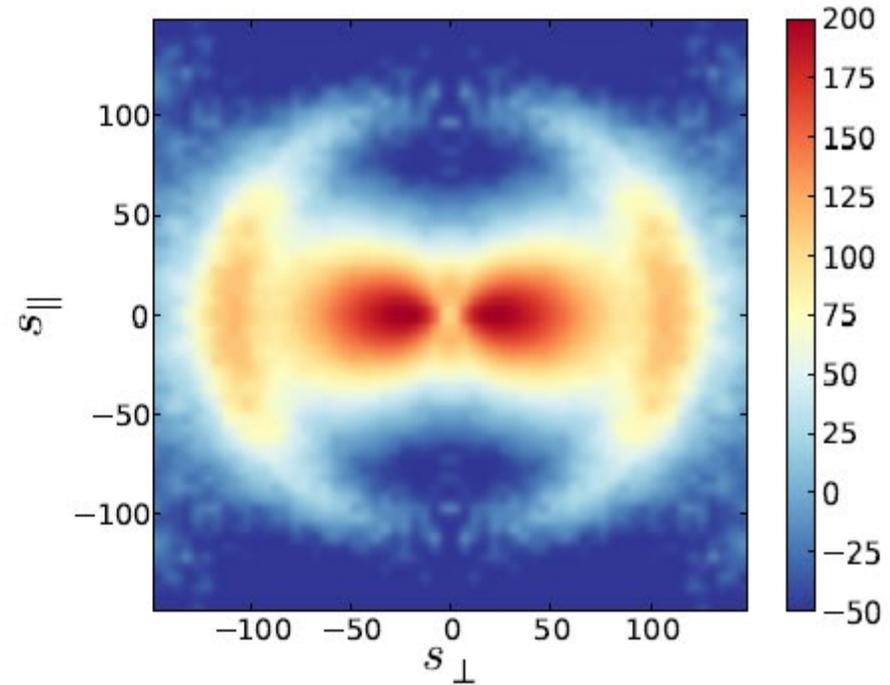
The 2dF Galaxy Redshift Survey Team (2001)

Simulation des corrélations

Espace réel

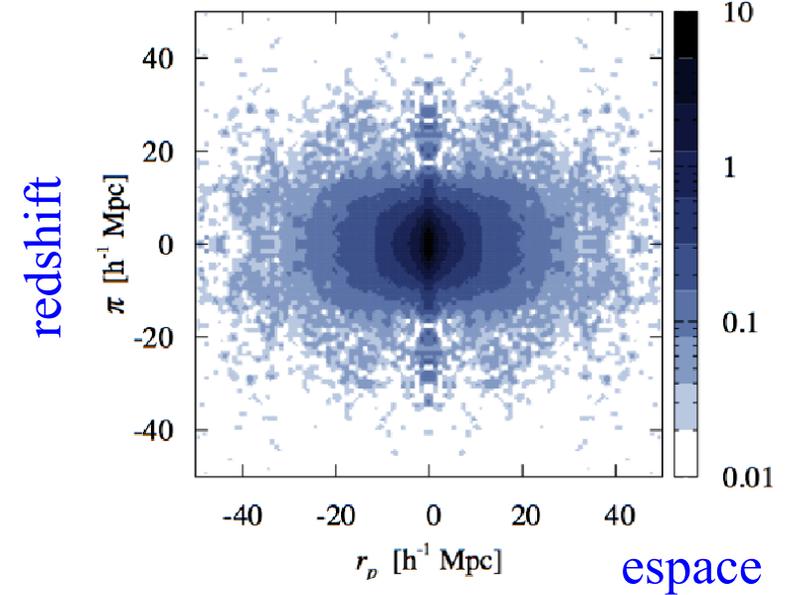


Espace des redshifts



Fonction de corrélation des galaxies dans 160 simulations
Perpendiculaire (\perp) et parallèle (\parallel) à la ligne de visée

Statut des mesures RSD



Courbe: Gravité Relativité Générale

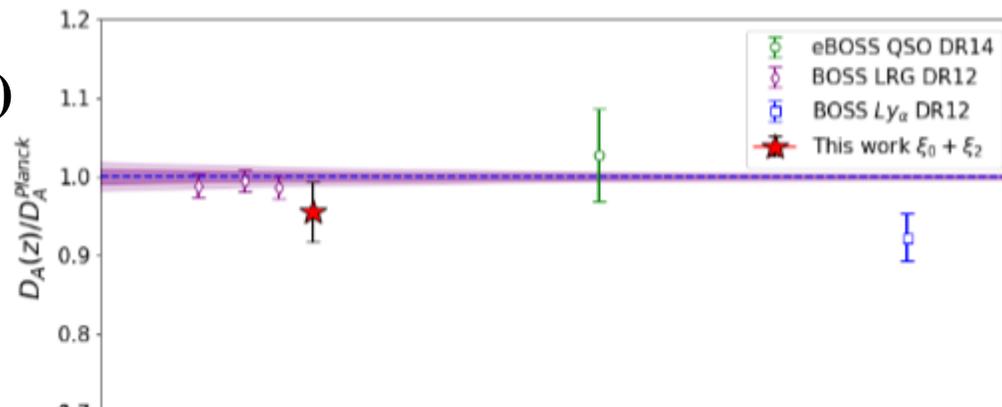
Courbes pointillées

Gravité modifiée

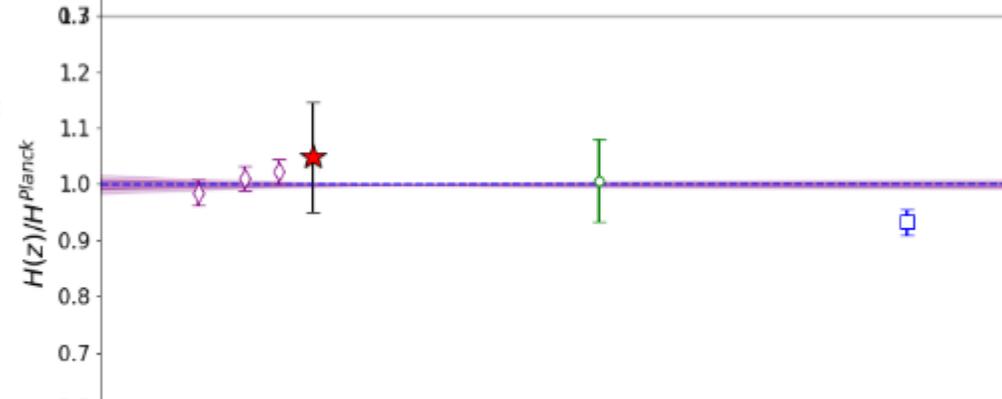
DGP (Dvali et al 2010)

Modèles $f(R)$, etc..

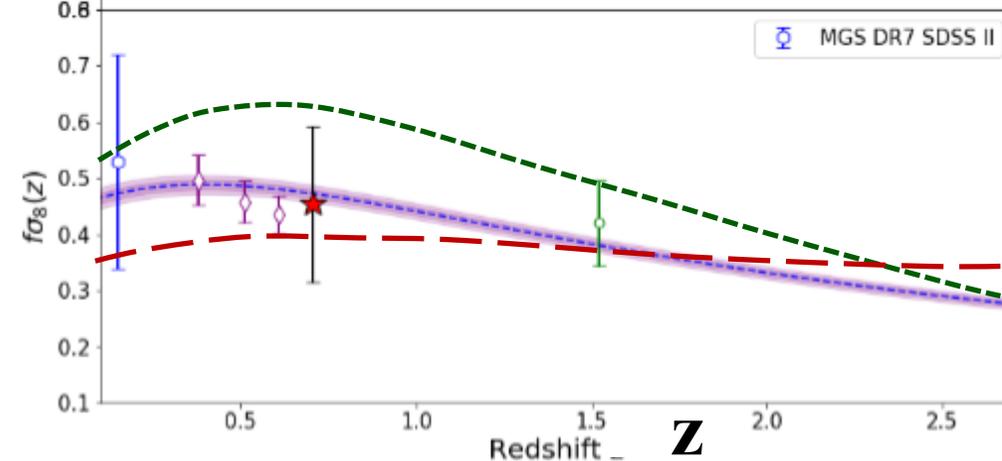
$D_A(z)$
 $/D_A(\text{Planck})$



$H(z)$
 $H(\text{Planck})$



$f(z)\sigma_8$



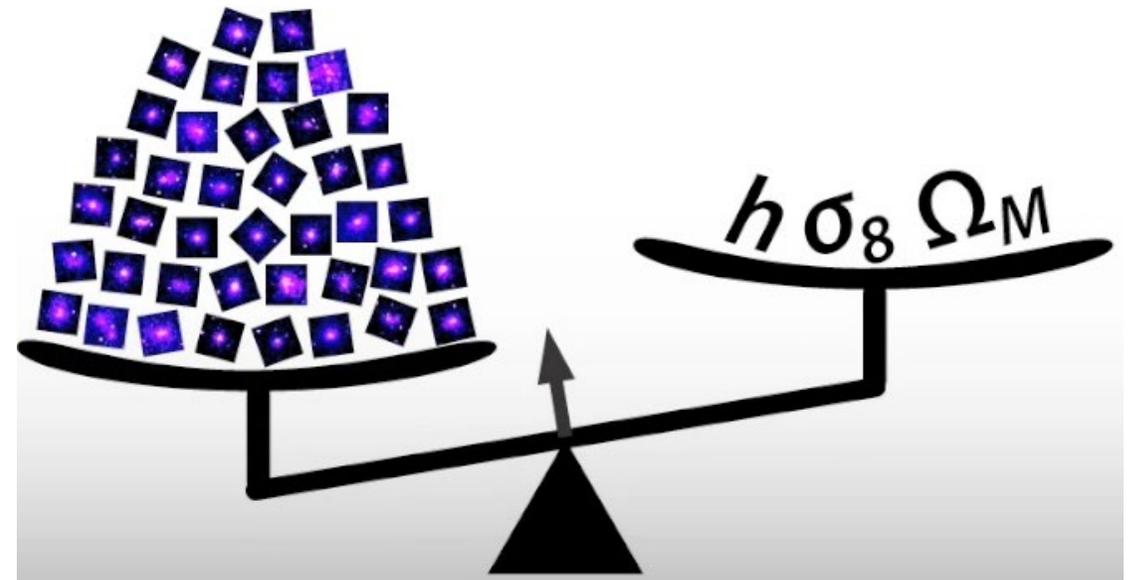
Amas de galaxies et énergie noire

Les amas apportent des tests différents et complémentaires

→ Sur ces grandes distances, f_{baryons} 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



T= -5 Gyr: Equivalence matière et énergie noire



Avec SKA

Avec EUCLID

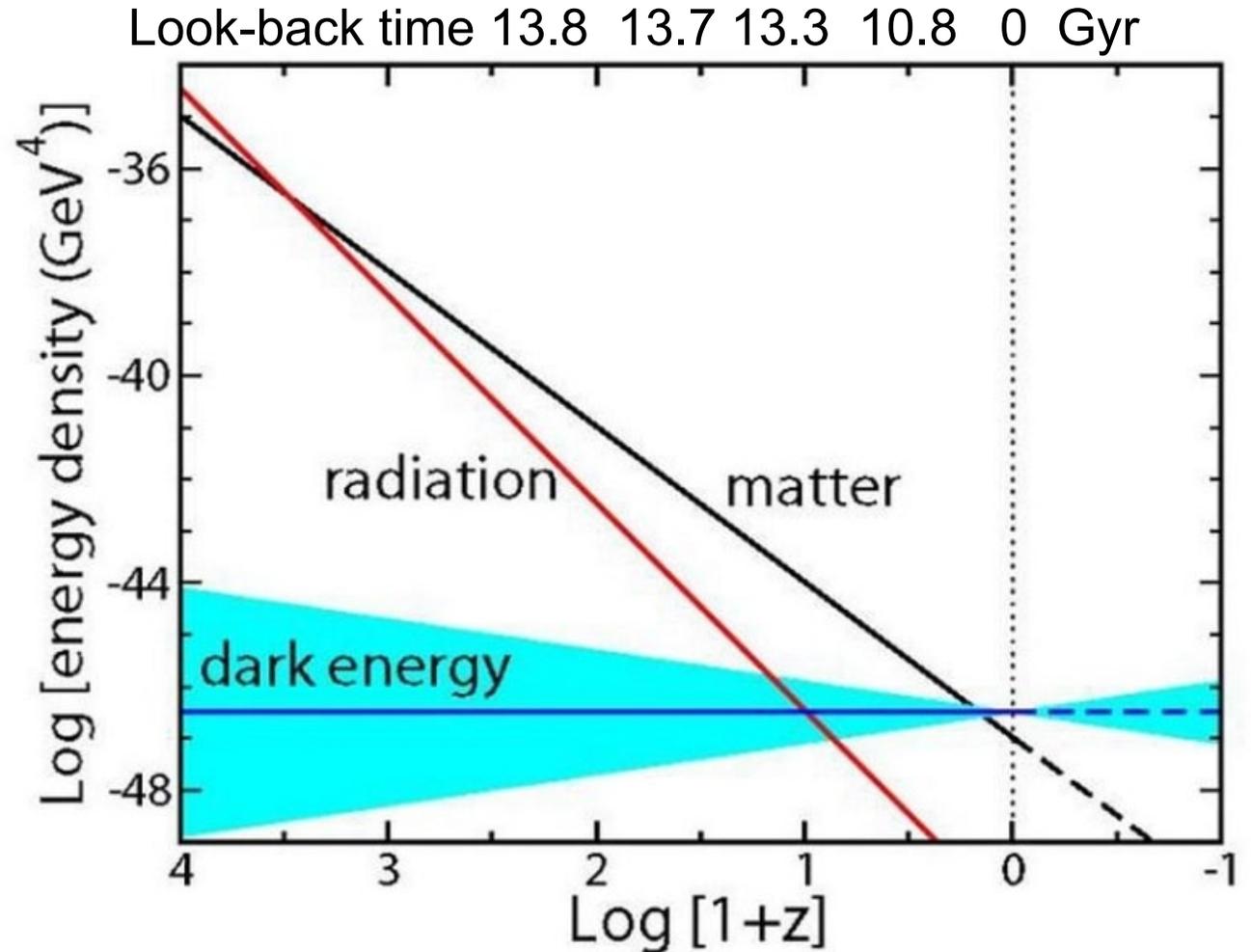
L'énergie sombre ne devient significative que récemment $z \sim 0.5$ ($t = -5$ Gyr)

La transition est très proche et on peut la voir en optique (VIS) et proche infrarouge (NIR)

→ **Domaine de Euclid**

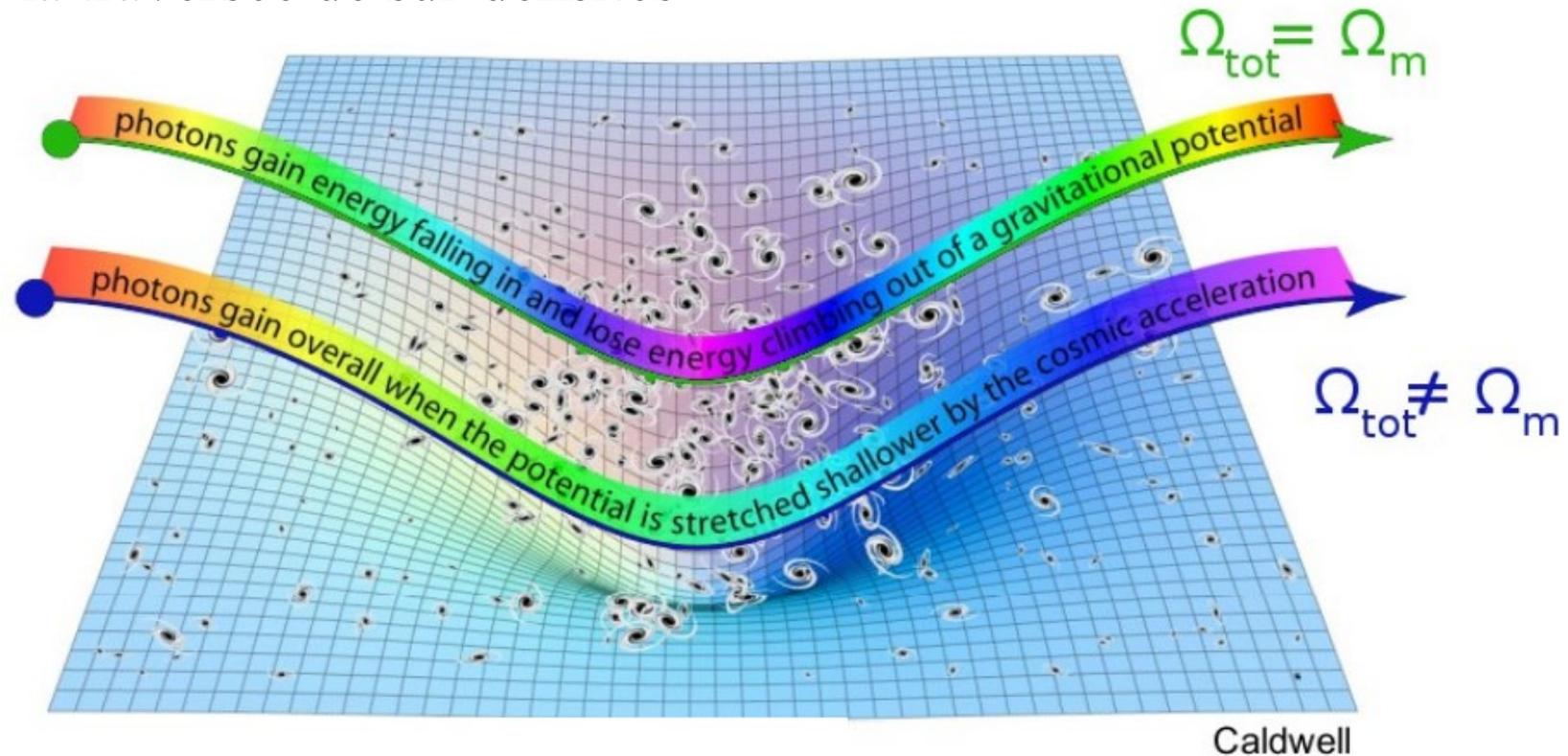
Aussi SKA avec le HI et continuum dans les galaxies

Planck a déjà donné des contraintes



ISW: Effet Sachs-Wolf intégré

Perte d'énergie des photons du fonds micro-ondes
à la traversée de sur-densités



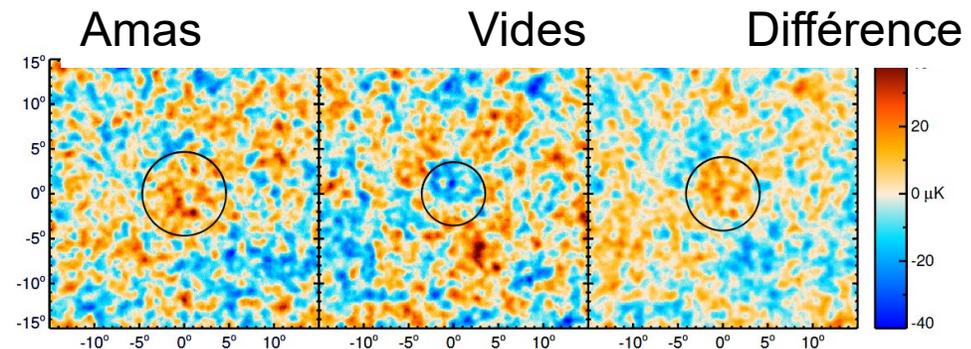
Amplitude de l'effet: information sur la quantité d'énergie noire
Sur la croissance des structures, et la gravité modifiée

Corrélation fonds CMB + grandes structures (ISW)

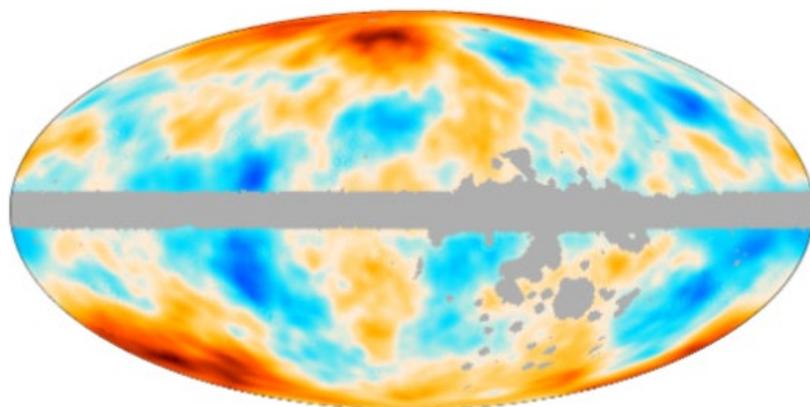
Détectée à 2.5σ avec Planck

50 vides empilés,

50 super-amas de galaxies



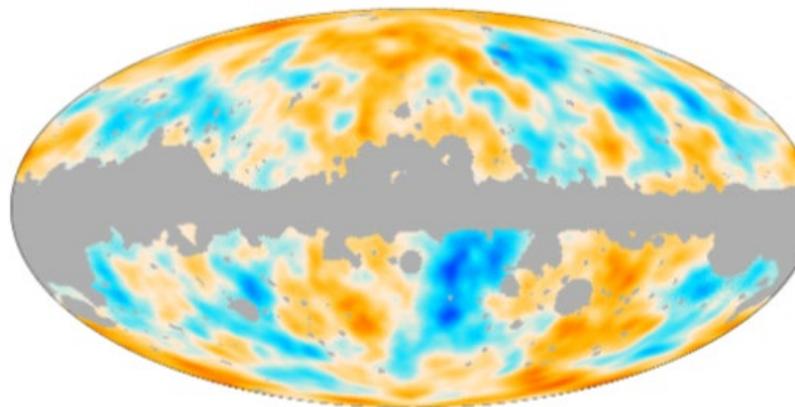
Sources radio NVSS +CMB



-2.7e-5

2.7e-5

lentilles +CMB



-2.7e-5

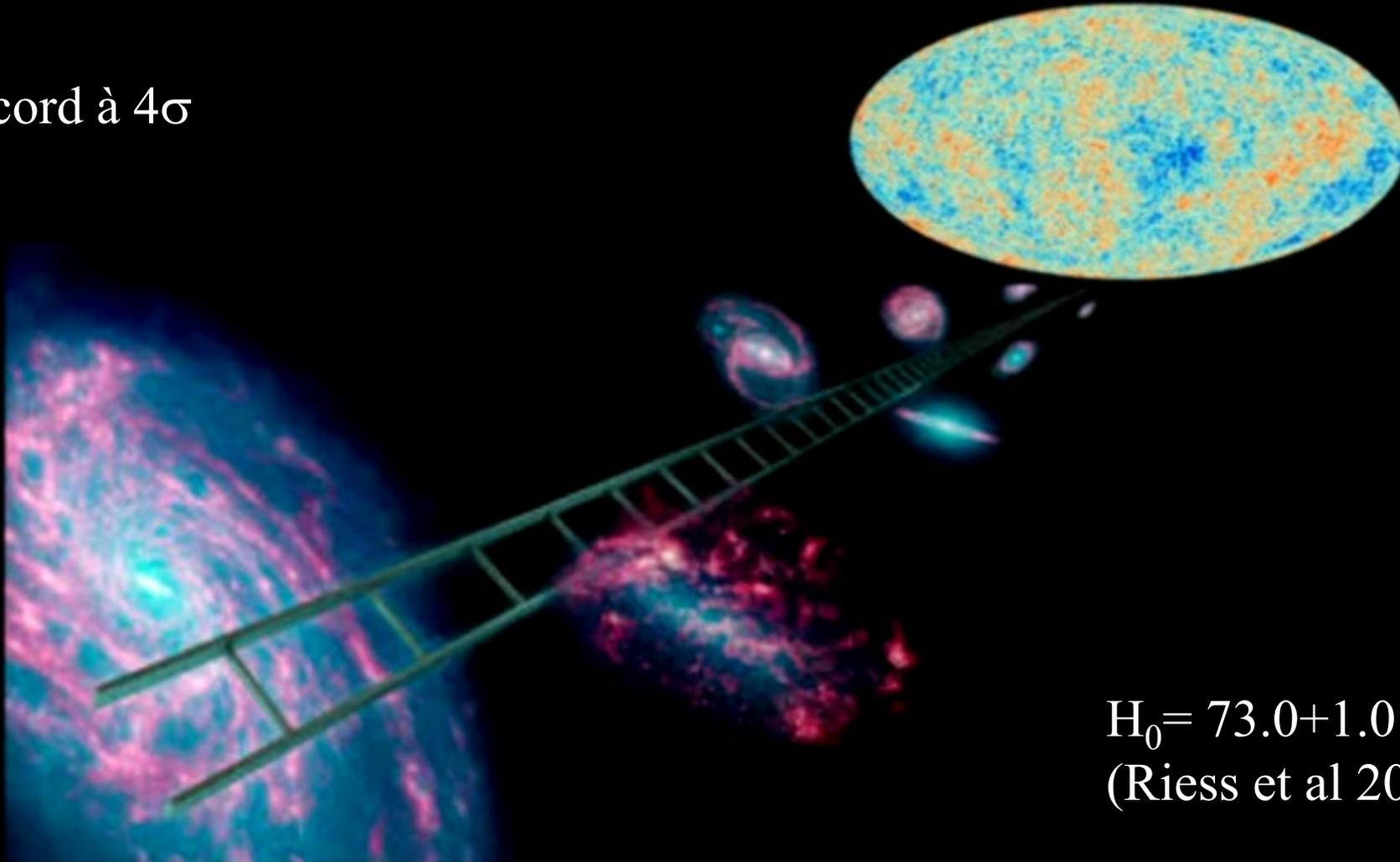
2.7e-5

Cartes de l'effet ISW: **Bleu**= sur-densités
Rouge= sous-densités

Le défi de H_0

$H_0 = 67.8 \pm 0.9$ km/s/Mpc (Planck coll 2020)

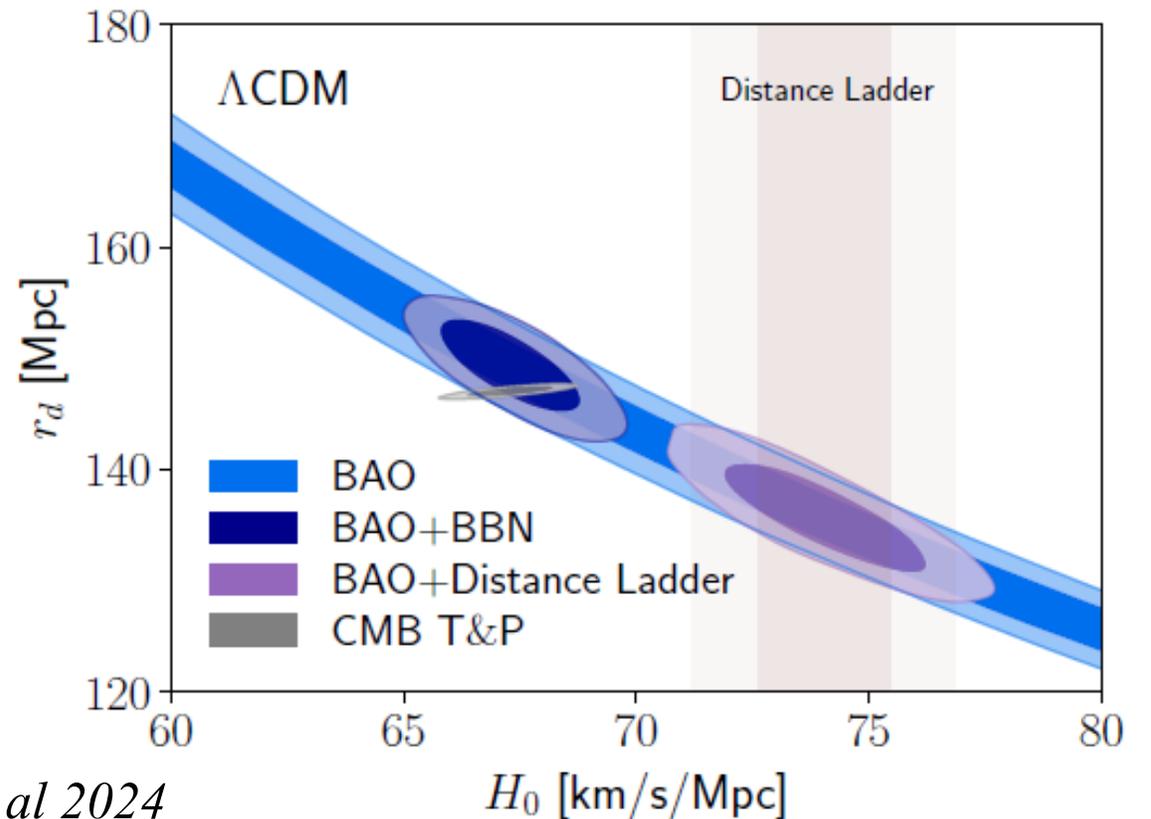
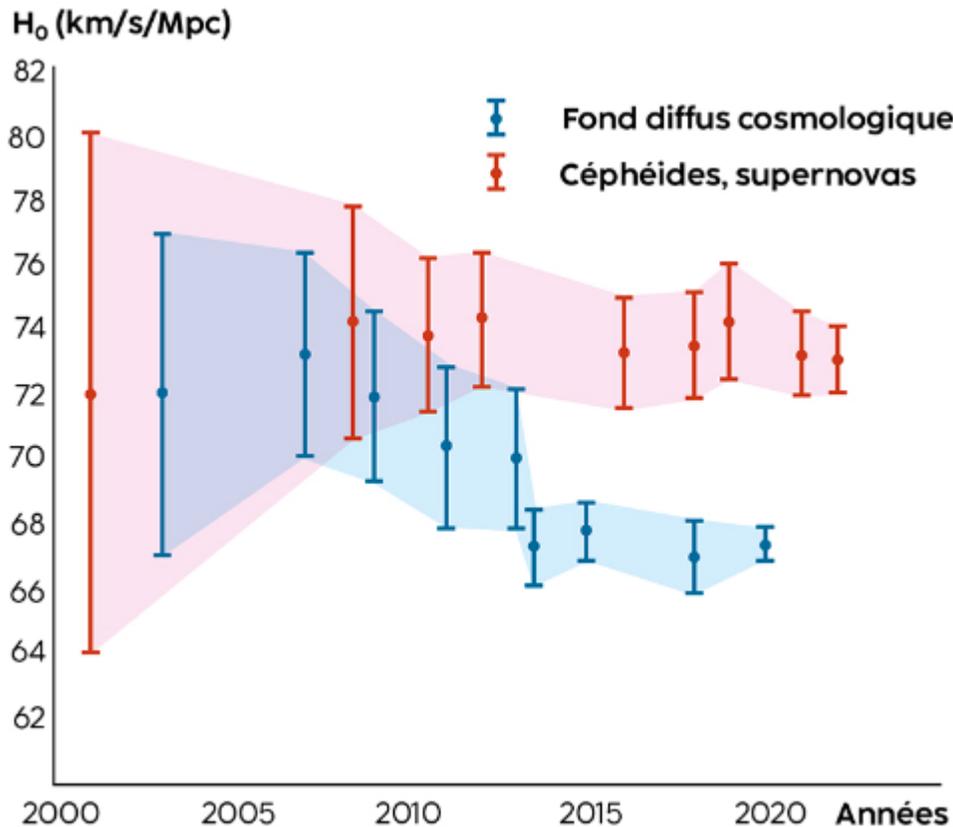
Désaccord à 4σ



$H_0 = 73.0 \pm 1.0$ km/s/Mpc
(Riess et al 2022)

Tension sur H_0 , constante de Hubble-Lemaître

Nombreuses explications: écart à Λ CDM, masse des neutrinos, inflation et réchauffement, quintessence (au lieu d'une constante cosmologique), etc...



Alam et al 2024

Modification de la gravité

Modification en $f(R)$ du Ricci ou bien théorie DGP (Dvali et al 2000)

DGP: modèle à 4+1 dimensions, ajoute une action à longue distance (5D)

Petites échelles, 4D standard, à grande échelle, la gravité fuit dans la 5^e D

→ Moins de gravité et accélération de l'expansion

A petite échelle écrantage

de Vainshtein

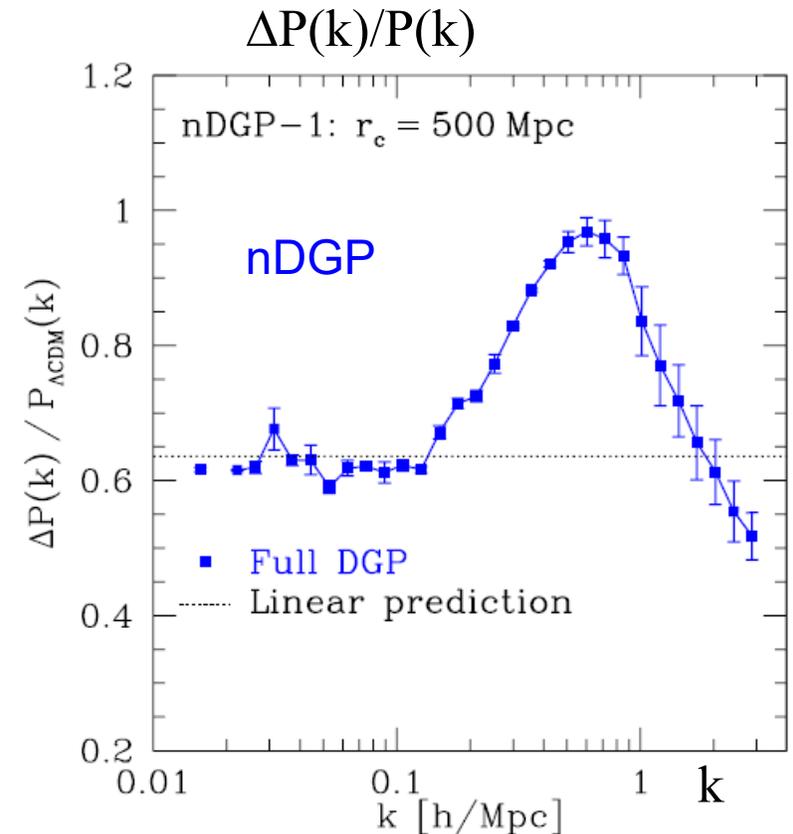
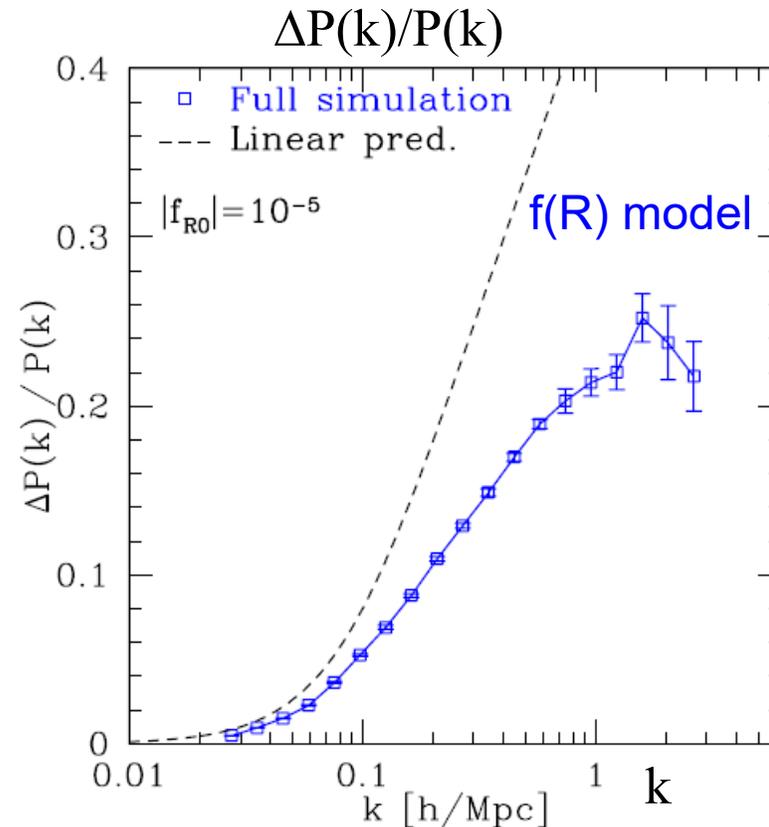
Bhuvnesh & Khoury 2010

2 branches selon l'imbrication
de la brane dans les 5D

Self-accéléré sDGP (instable)

Normal nDGP (stable +DE)

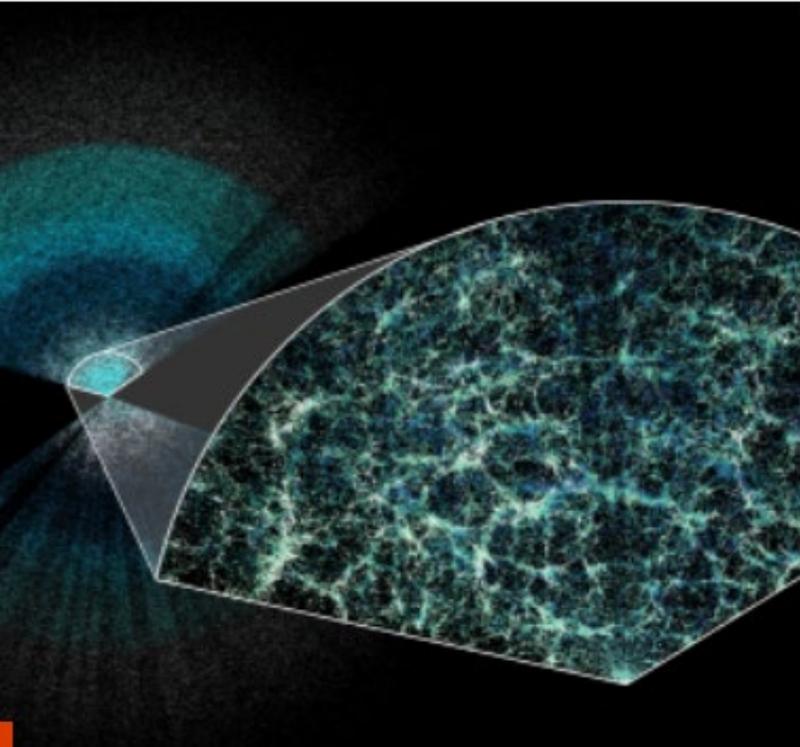
Song et al 2024



Premiers résultats du survey DESI

- Compatibles avec une constante cosmologique
- et avec la gravité d'Einstein à grande échelle, pas de « dégravité »

- La plus grande carte 3D de l'Univers,
- Jusqu'à 11 Millions d'années
- **40 millions** de spectres de galaxies (2021-26)
- Expansion connue à 1%



Telescope Victor Blanco
4m Cerro-Tololo, Chili



DESI: Les cibles 2021-2026

- Le plus important: $z < 2$ Egalité entre matière et énergie noire survient à $z=0.326$

$$z=1 \quad \Omega_{\Lambda} = 0.2$$

$$z=2 \quad \Omega_{\Lambda} = 0.08$$

40 millions de spectres en 5 ans

3 million QSOs

Lya $z > 2.1$

Tracers $0.9 < z < 2.1$

16 million ELGs

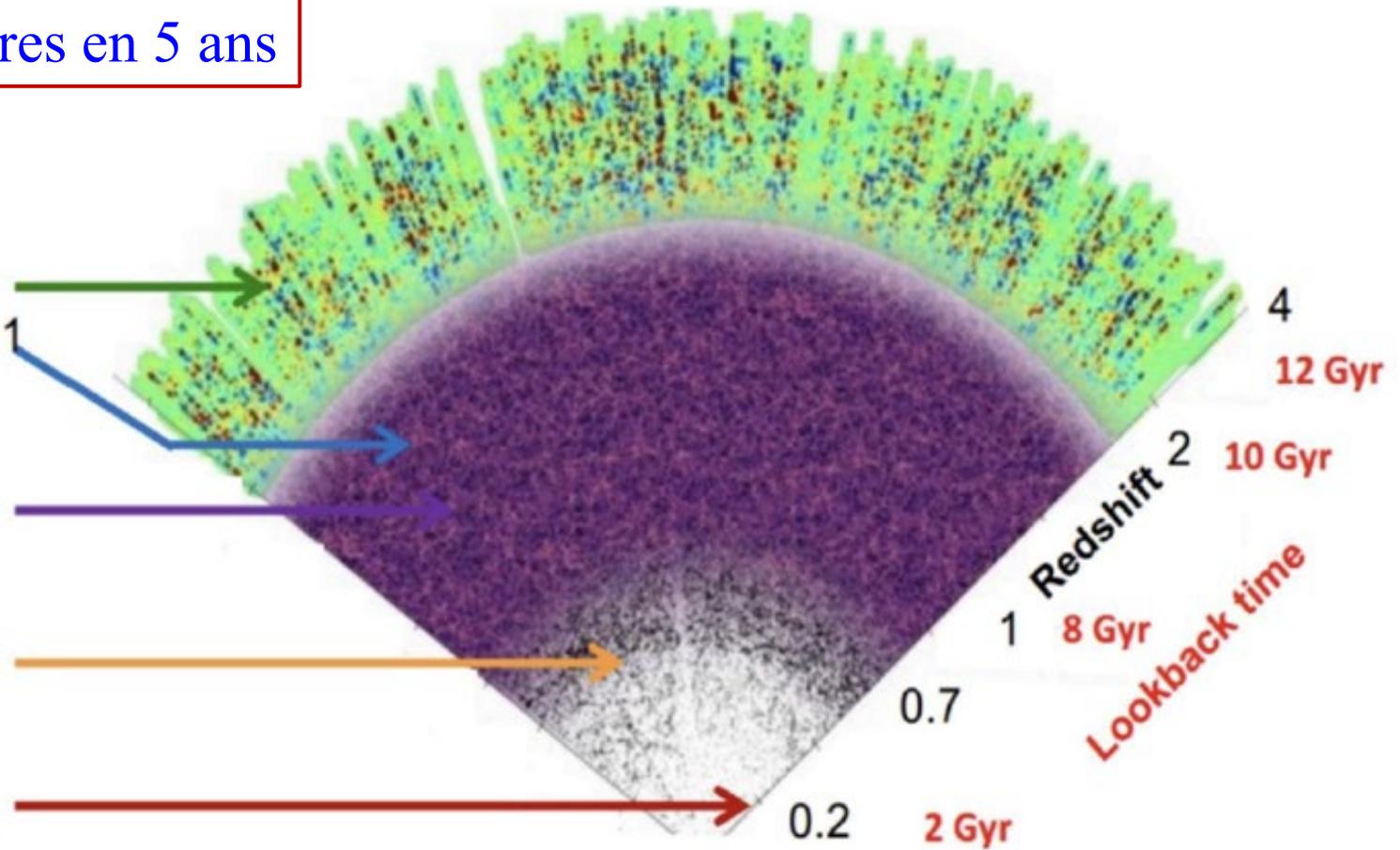
$0.6 < z < 1.6$

8 million LRGs

$0.4 < z < 1.0$

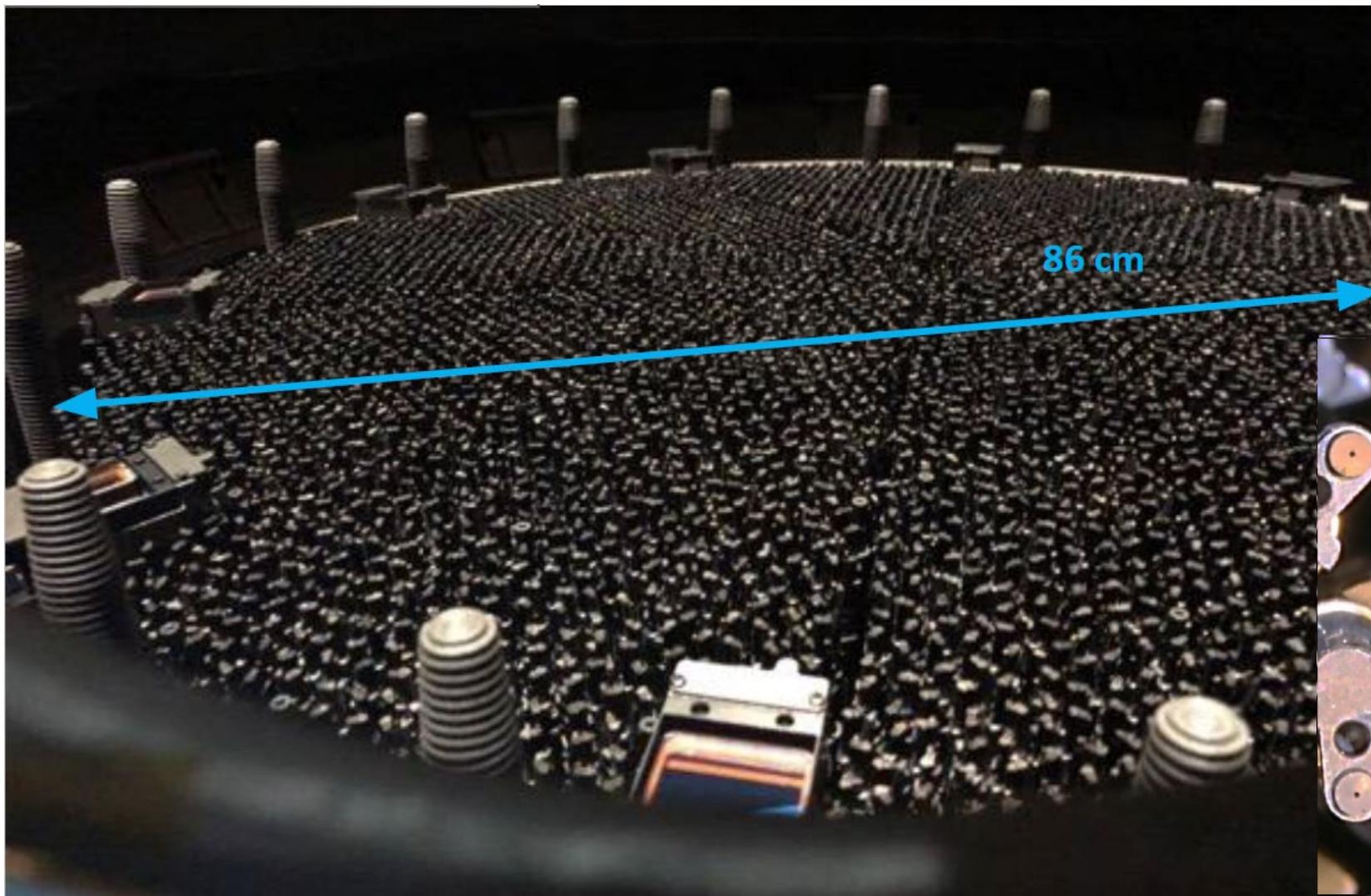
13.5 million
Brightest galaxies

$0.0 < z < 0.4$

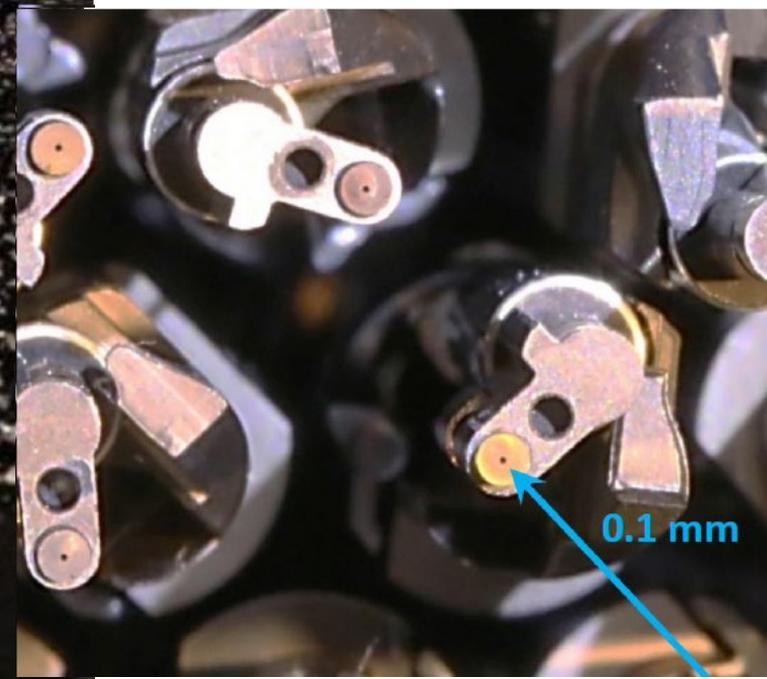


DESI: l'instrument aux 5000 robots

- Peut observer jusqu'à 5000 spectres (fibres optiques) par pose



Chaque pose fait 1000sec
Pour configurer le plan
focal, lire les CCD et
écrire sur disque,
Overhead de 140sec



DESI: BAO

Déjà aujourd'hui, les plus précises

$D_M(z)$ distance angulaire

$H(z)$ cstante Hubble-Lemaître

$D_H(z) = cz/H(z)$

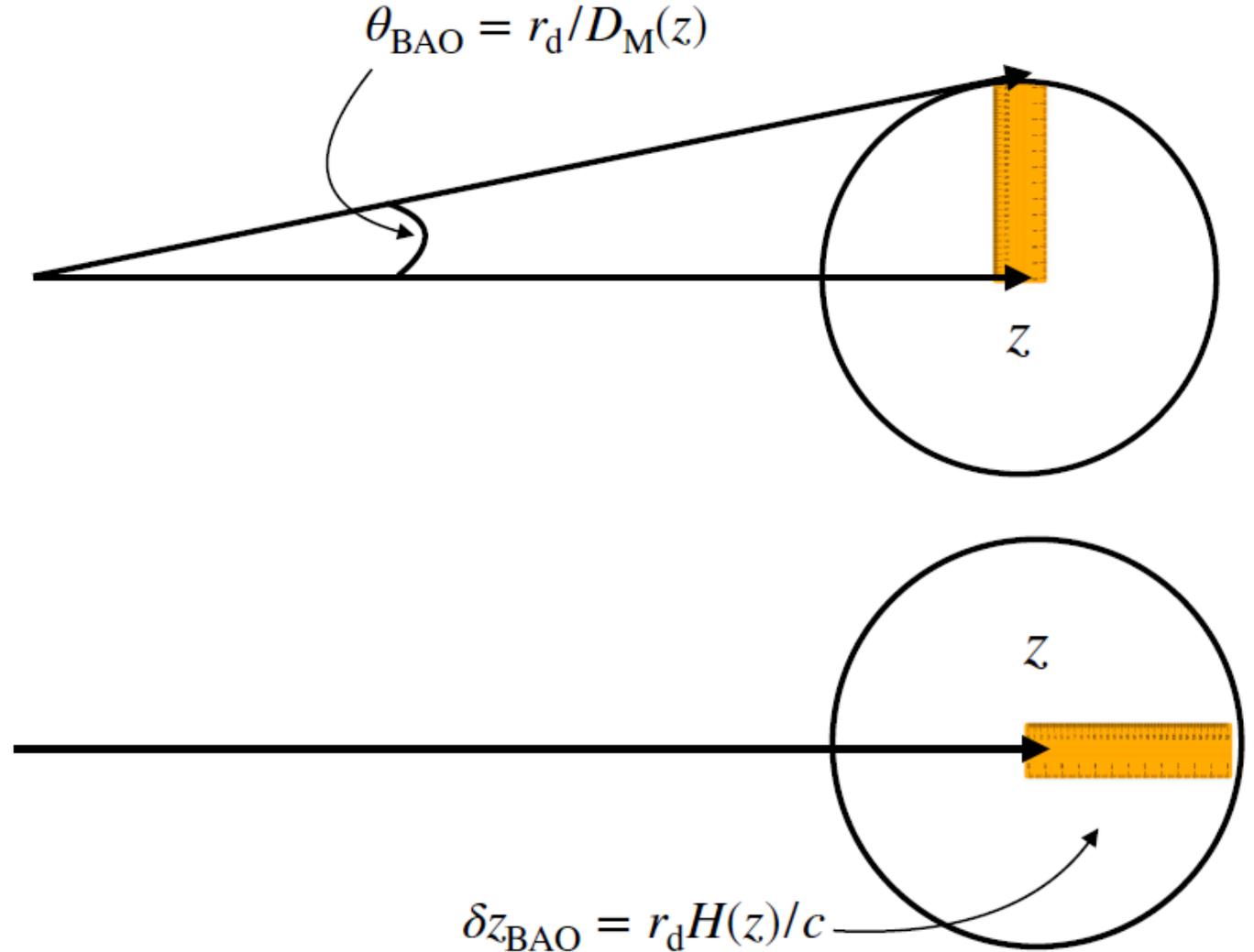
Dimension de l'onde acoustique

gelée dans la matière

à plusieurs époques, radiale

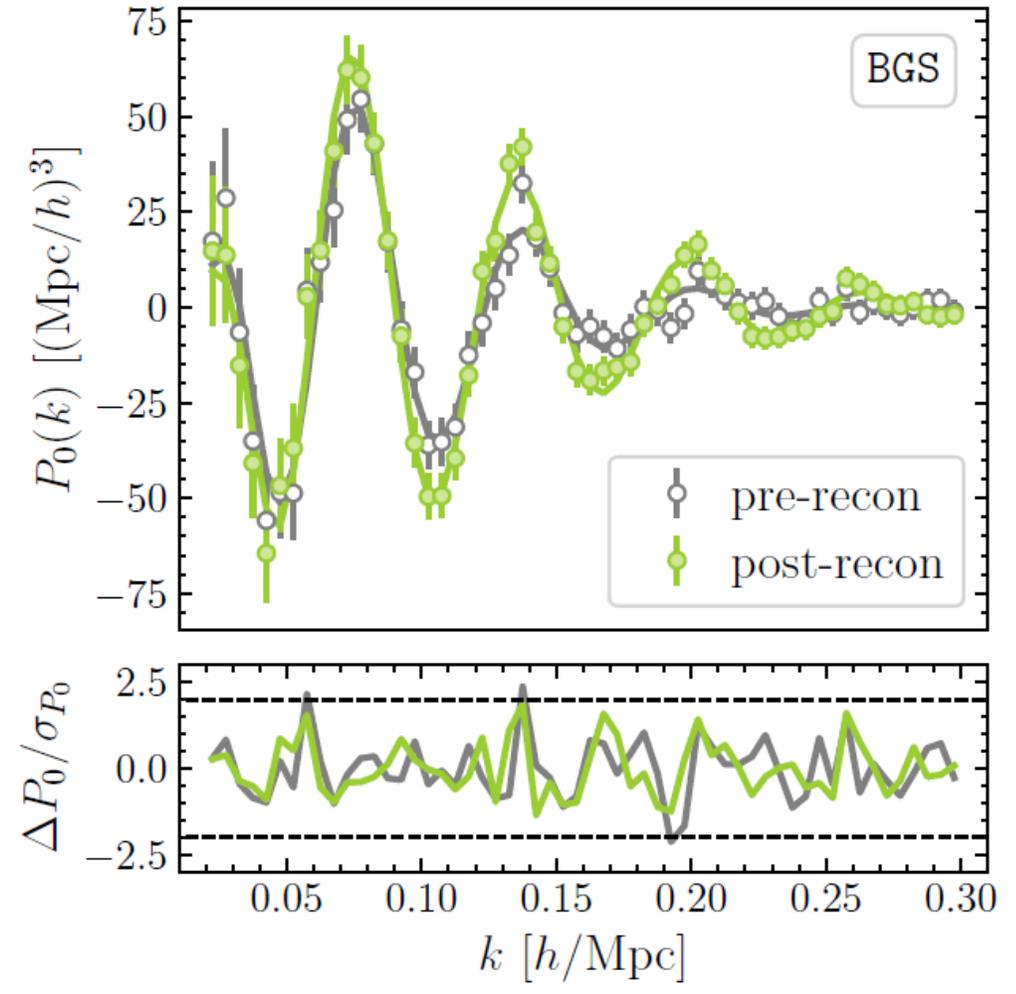
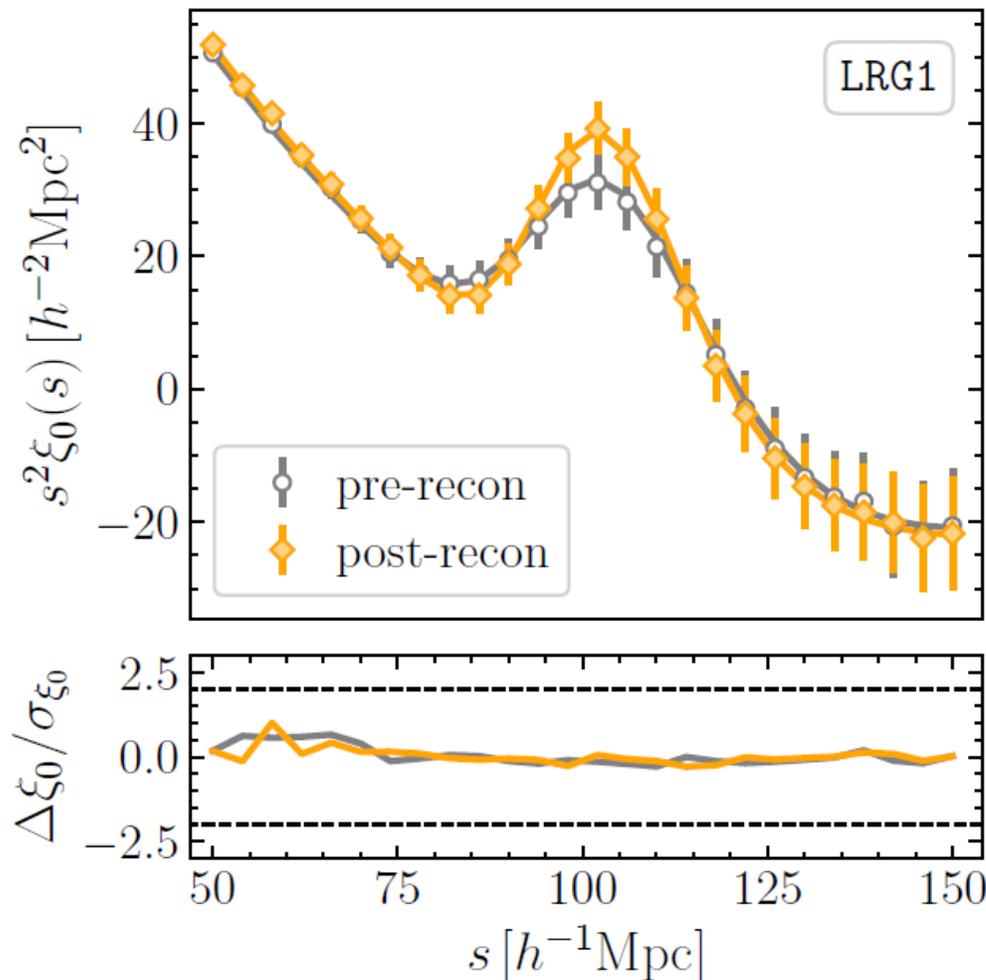
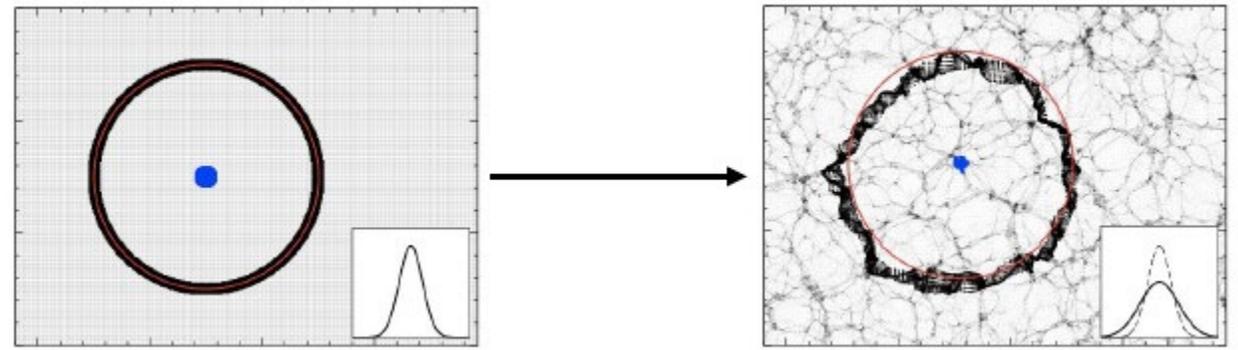
et transversale

→ Expansion de l'Univers



DESI: reconstruction

Reconstruction de non-linéarité des BAO



DESI: Anisotropie des BAO

Taille de l'onde dans la profondeur compatible avec la taille angulaire?

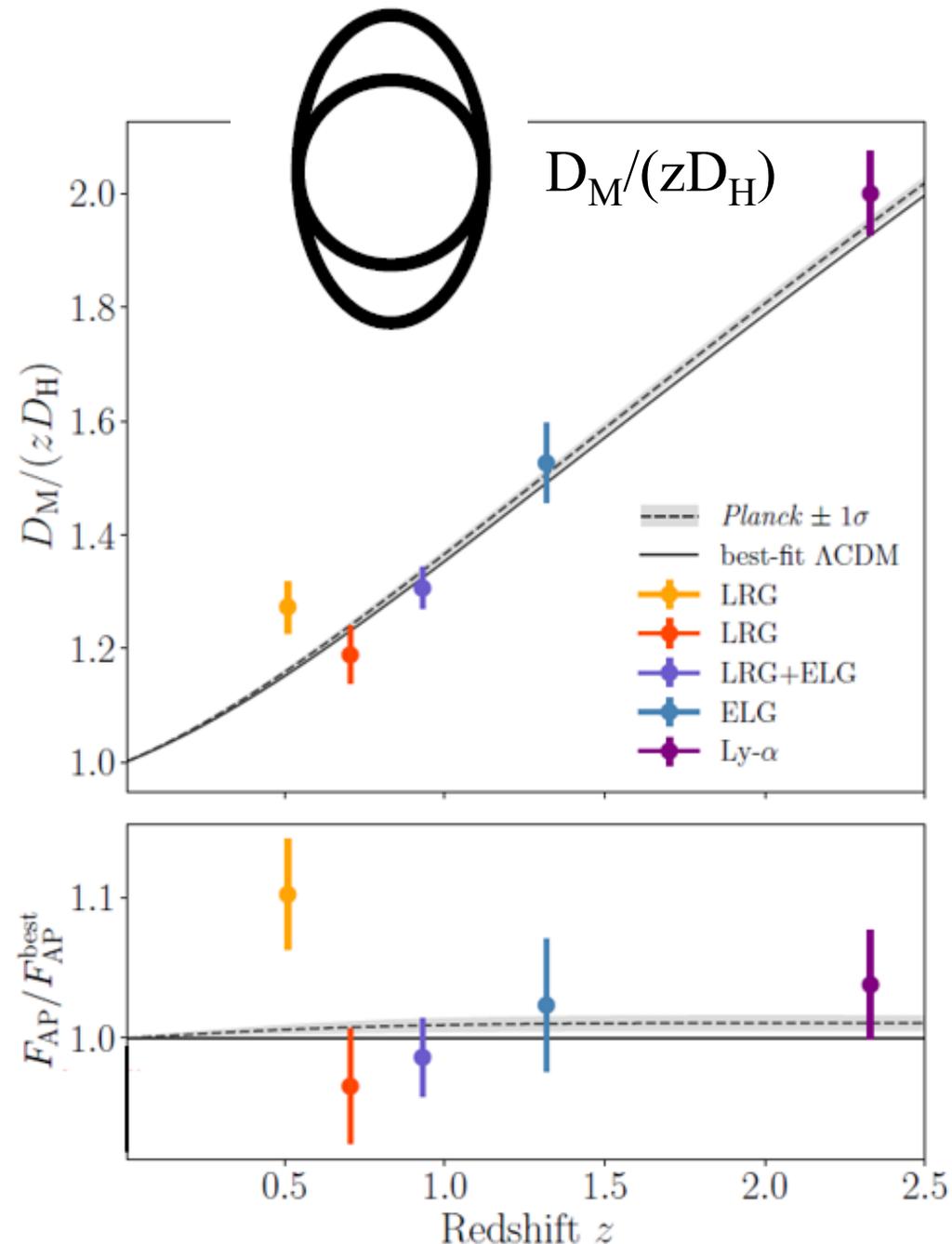
$$\alpha_{\perp} = \frac{D_M r_d^{\text{fid}}}{r_d D_M^{\text{fid}}}$$

$$\alpha_{\parallel} = \frac{D_H r_d^{\text{fid}}}{r_d D_H^{\text{fid}}}$$

$$\alpha_{\text{iso}} = \left(\alpha_{\perp}^2 \alpha_{\parallel} \right)^{1/3}$$

$$\alpha_{\text{AP}} = \frac{D_H D_M^{\text{fid}}}{D_M D_H^{\text{fid}}}$$

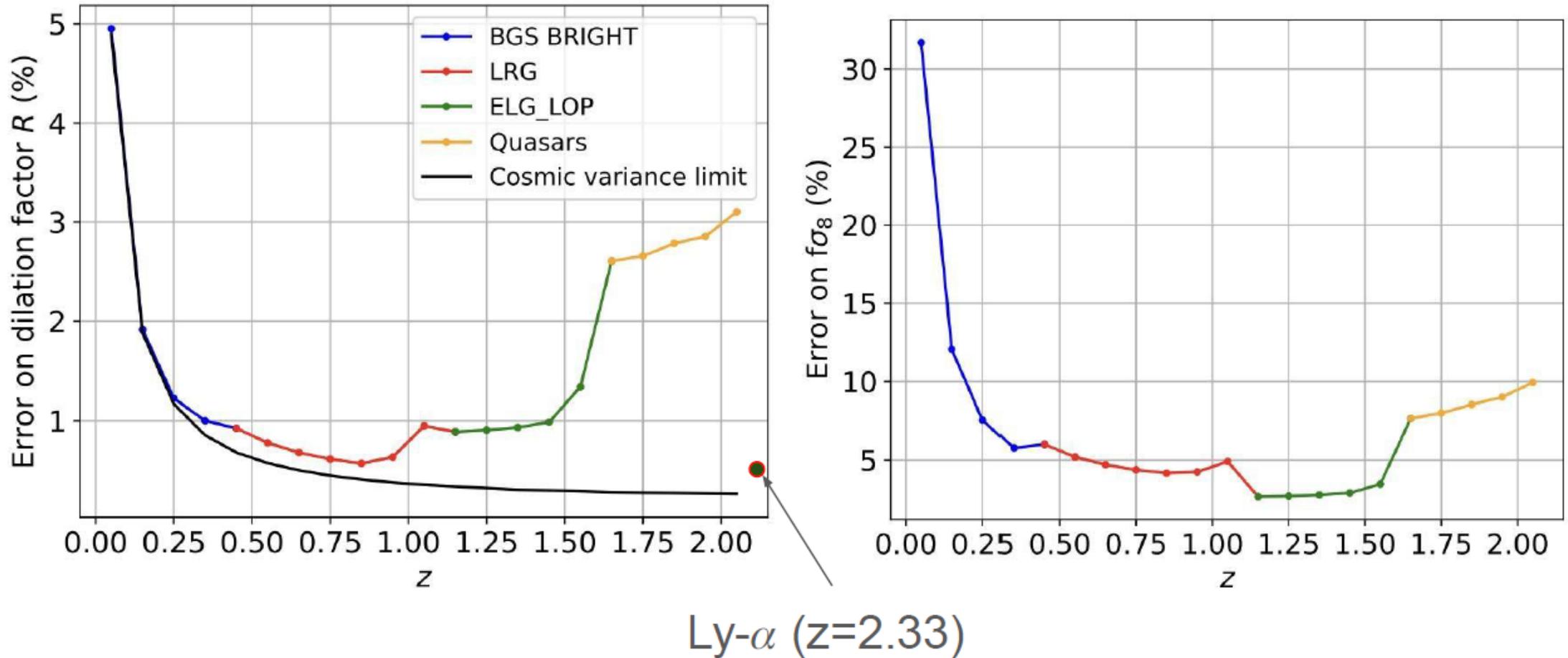
→ Contraintes sur Ω_m , Ω_{Λ} , Ω_k , et H_0



DESI: objectif après 5 ans

Aujourd'hui, une année de données analysée ~6 millions de galaxies

BAO and RSD constraints at the end of the survey



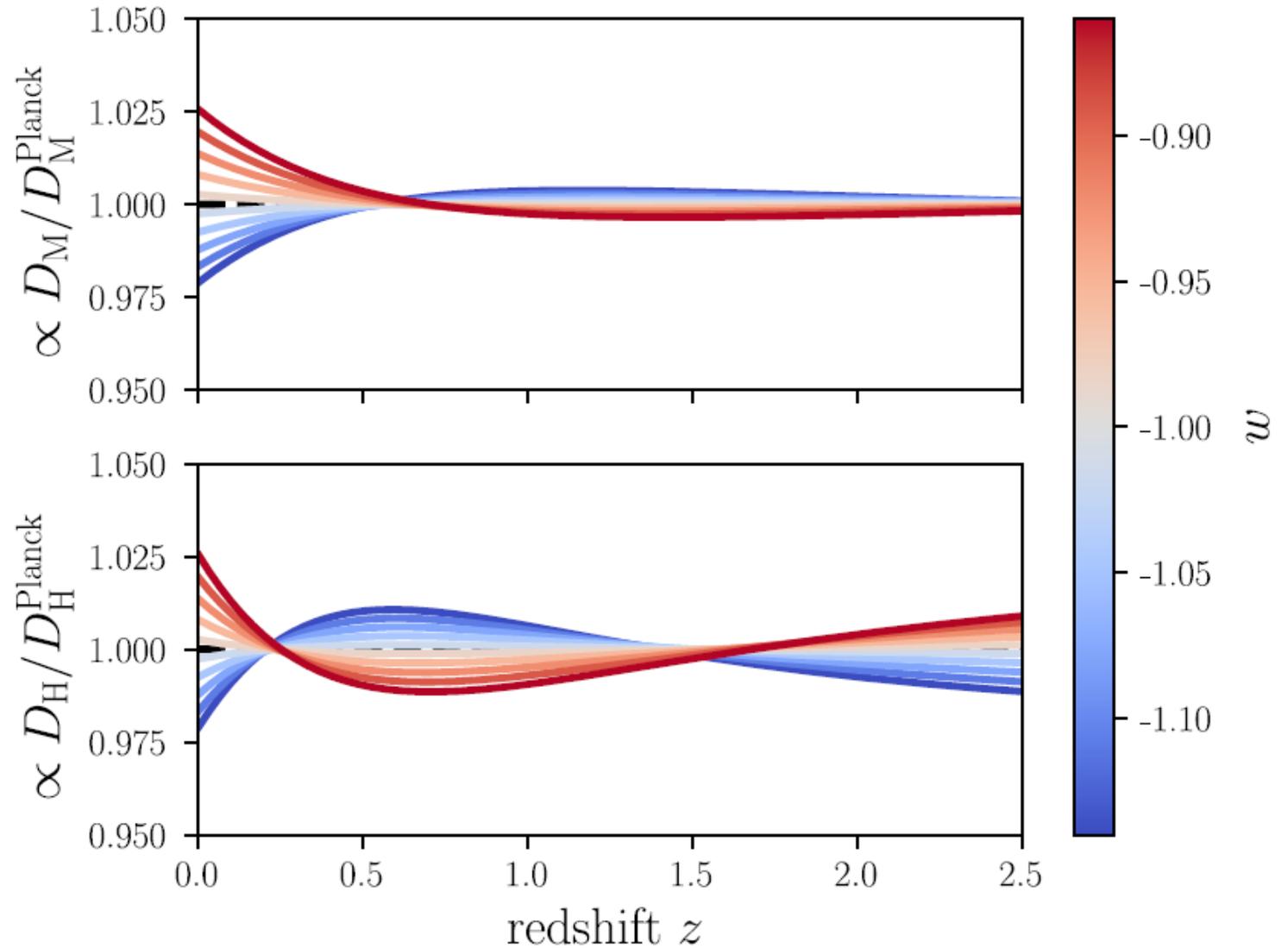
Contraintes sur l'énergie noire

Equation d'état

$$P = w \rho$$

Supposant $w = \text{constante}$

→ $w = -1$



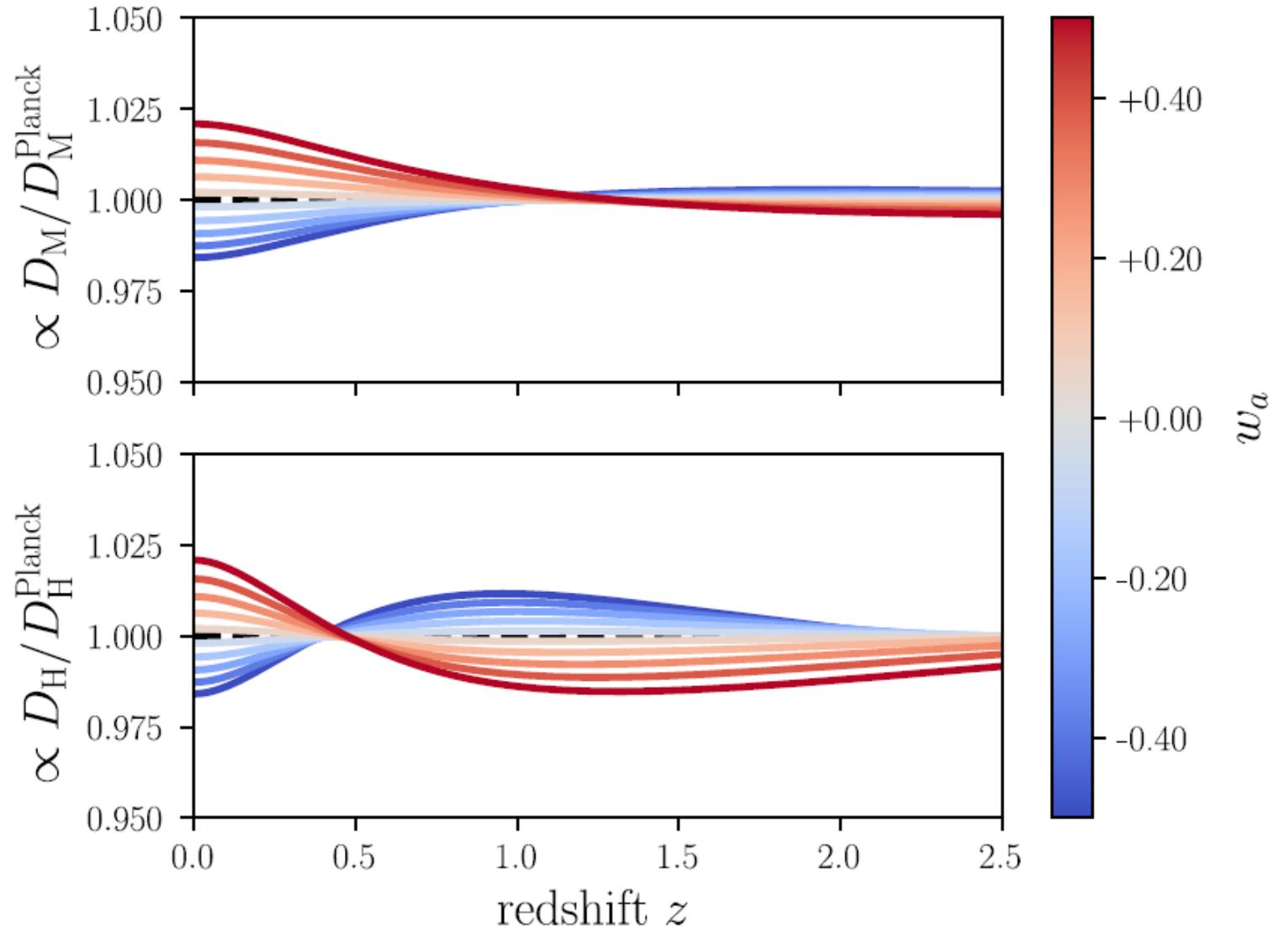
Contraintes sur la dynamique de l'énergie noire

Equation d'état

$$P = w \rho$$

$$w(a) = w_0 + (1-a) w_a$$

→ $w_0 = -1, w_a = 0$



Test de la gravité

Taux de croissance f Ce qui est prédit après 5 ans de DESI

Il restera de grandes incertitudes à $z < 0.5$

Dû au faible volume de l'univers

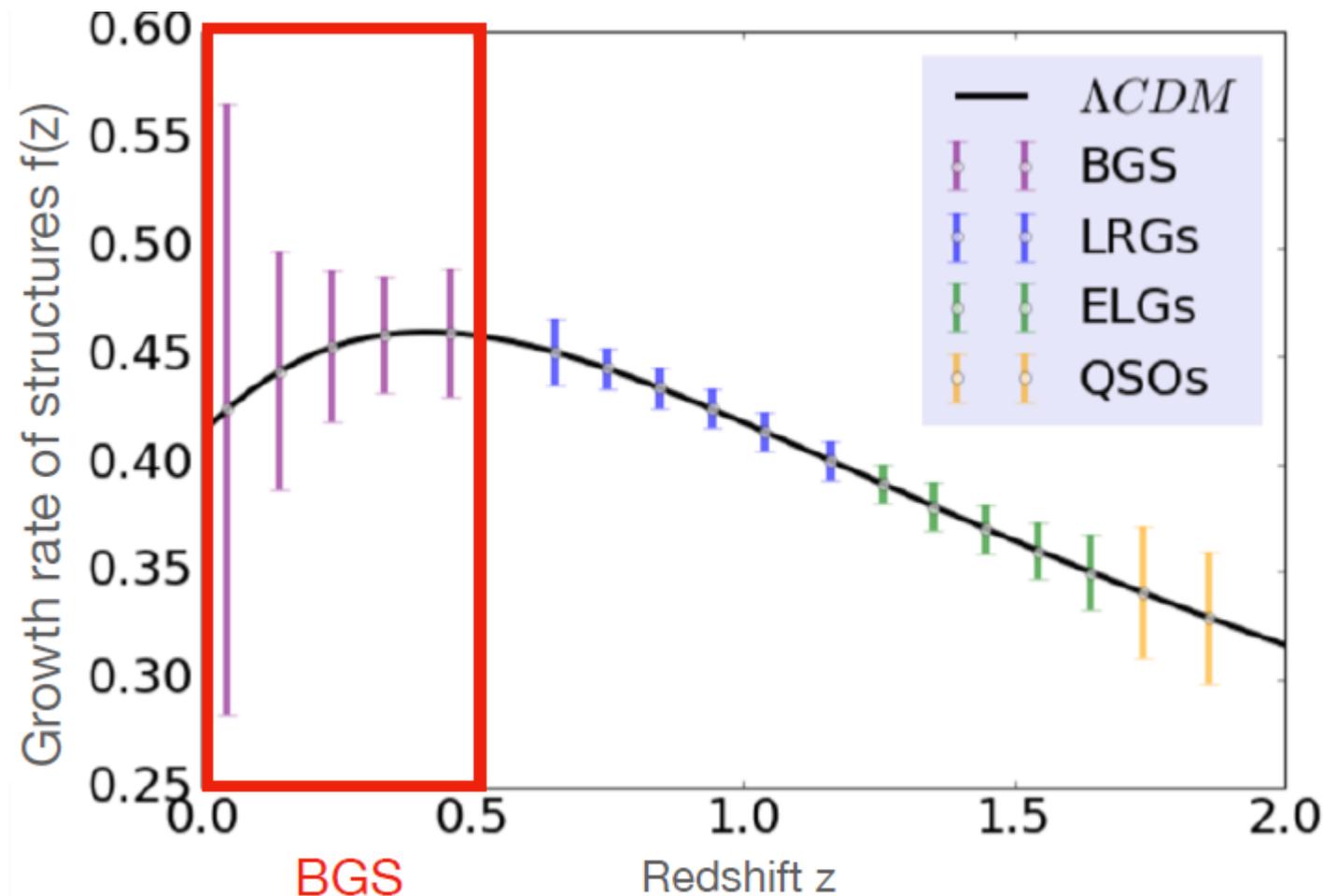
Proche → variance cosmique

$$f \sim \Omega_m^{\frac{3(1-w_{DE})}{5-6w_{DE}}}$$

Echantillon BGS

Modèle standard $w_{DE} = -1$

$$f \sim \Omega_m^{0.55}$$



Conclusion

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**

