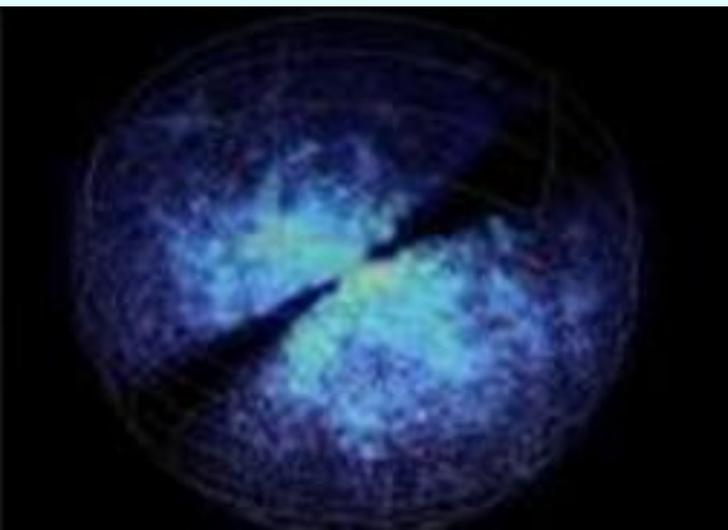




COLLÈGE  
DE FRANCE  
—1530—

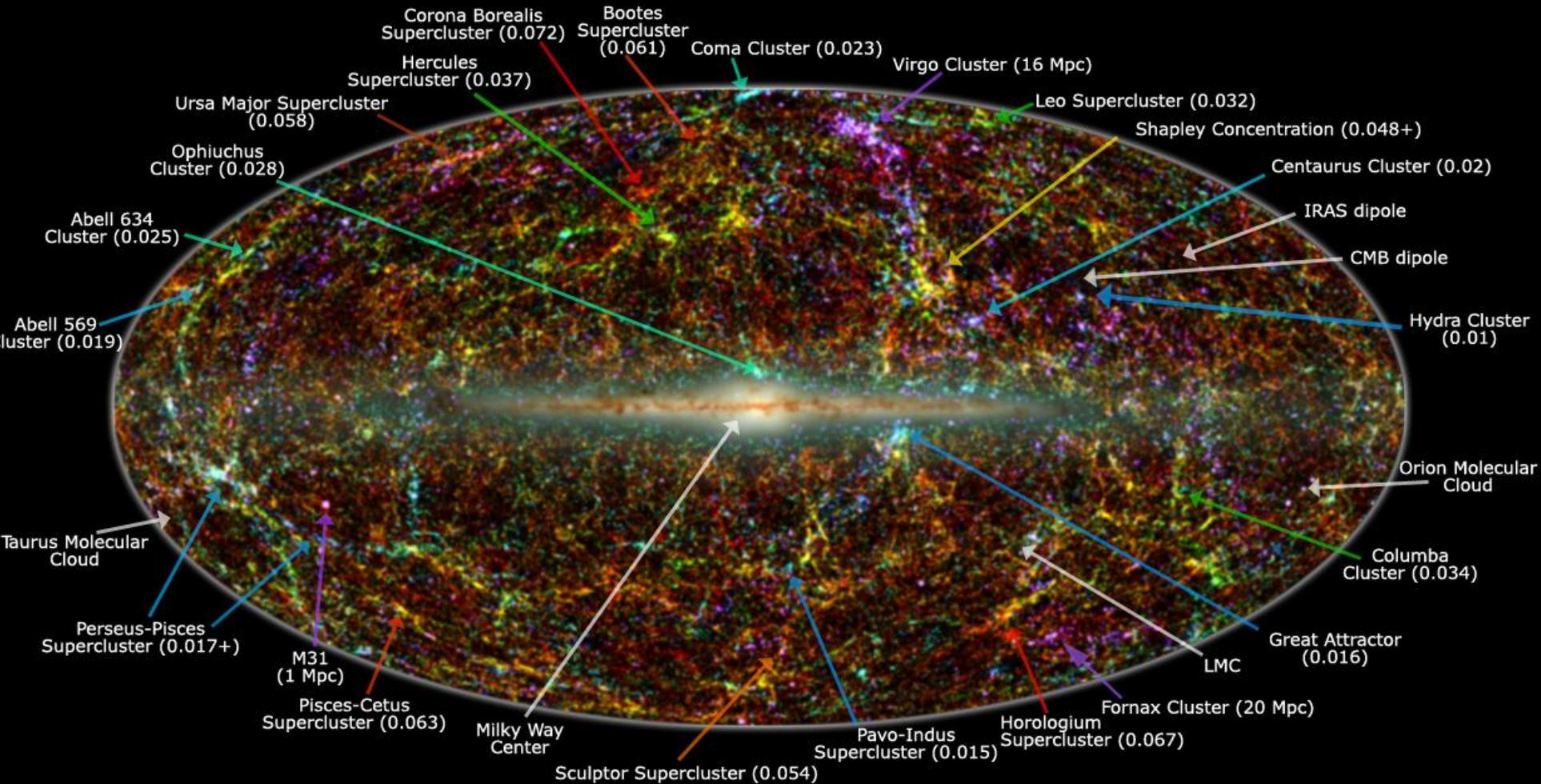
# La matière noire dans la formation des galaxies



Françoise Combes



# Structures à grande échelle dans l'Univers local

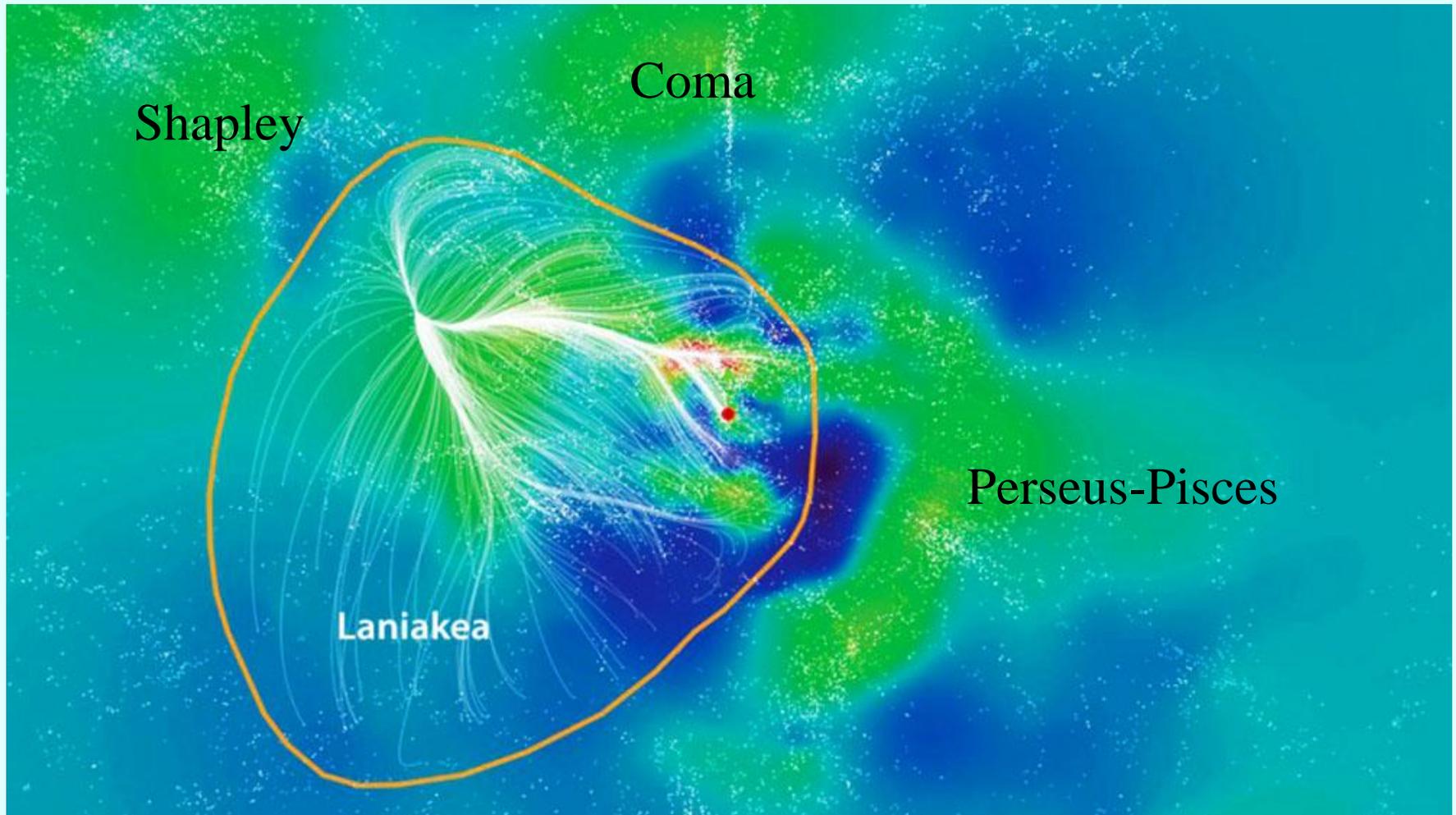


**Legend:** image shows 2MASS galaxies color coded by redshift (Jarrett 2004); familiar galaxy clusters/superclusters are labeled (numbers in parenthesis represent redshift).  
Graphic created by T. Jarrett (IPAC/Caltech)

## Amas et superamas proches

# Superamas, défini par les vitesses

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

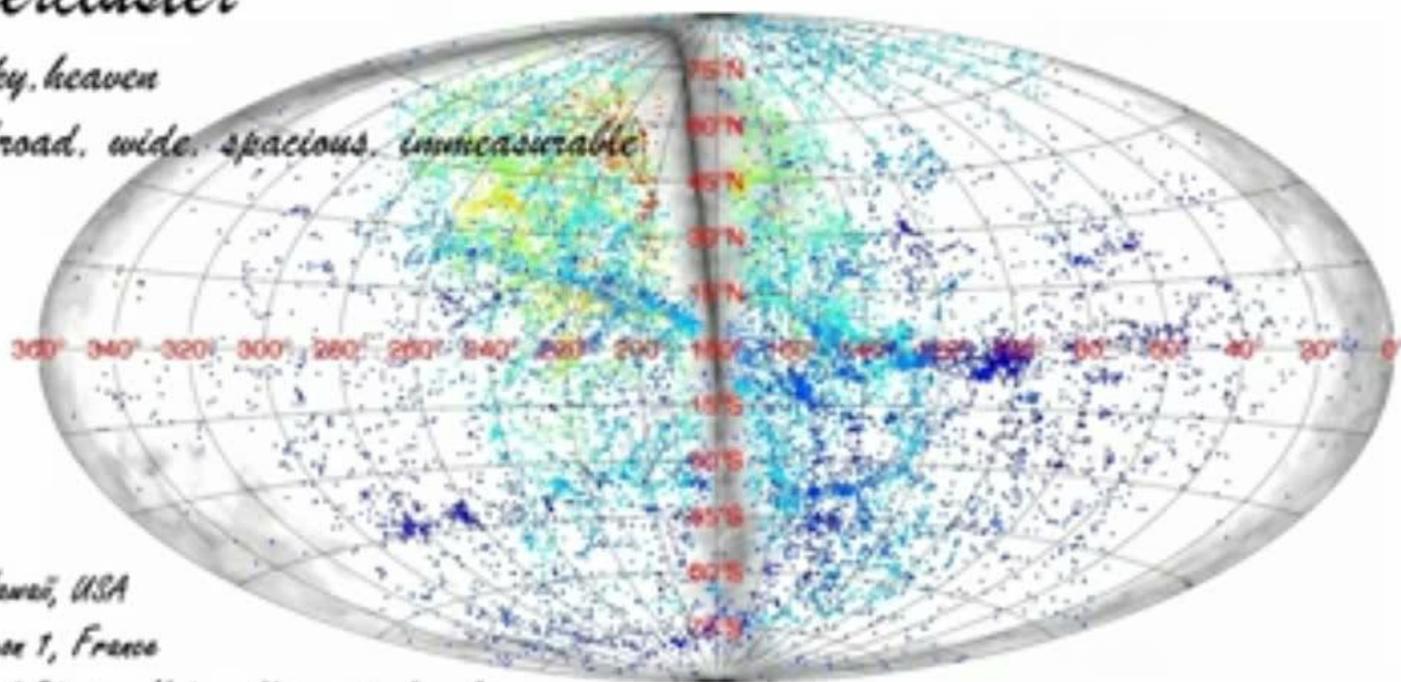


*Tully et al 2014*

# *Laniakea Supercluster*

*In Hawaiian: lani – sky, heaven*

*akea – broad, wide, spacious, immeasurable*

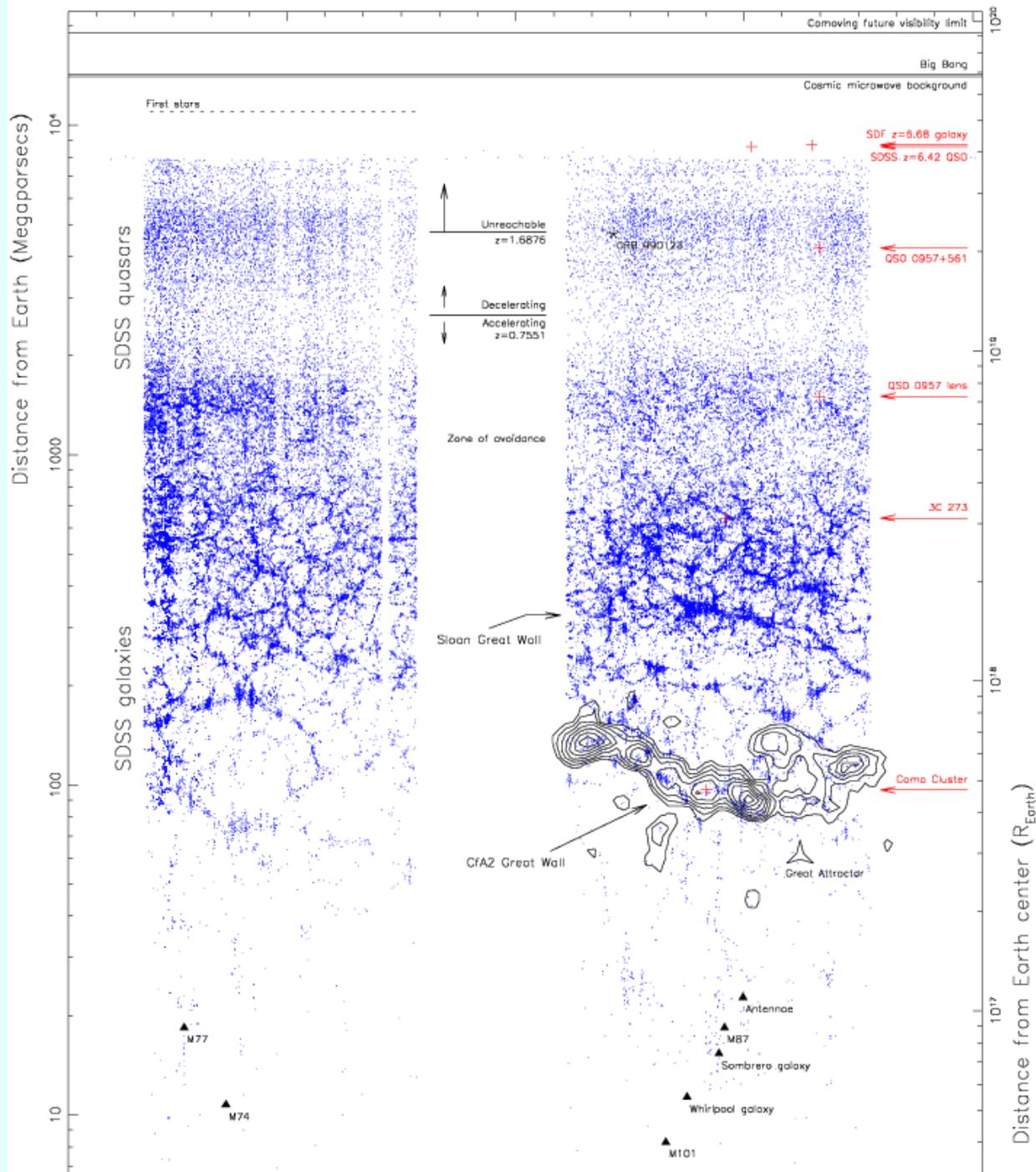


*R. Brent Tully, University of Hawaii, USA*

*Hélène Courtois, University of Lyon 1, France*

*Yehuda Hoffman, Racah Institute of Physics, Hebrew University, Israel*

*Daniel Pomarède, Institute of Research into the Fundamental Laws of the Universe, Saclay, France*



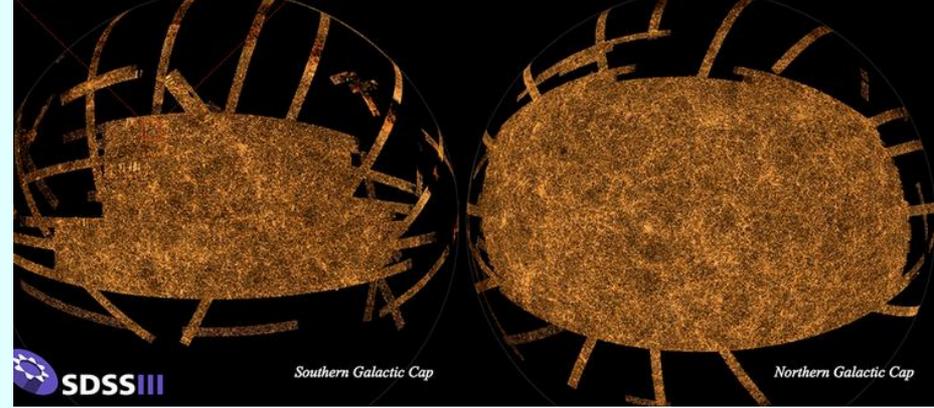
Gott et al (03)  
 Carte Conforme  
 Echelle  
 Logarithmique

Grand mur SDSS  
 1370 Mpc

80% plus grand que  
 Le grand mur CfA2

# Grands surveys de galaxies

**CfA-2 18 000 spectres de galaxies (1985-95) SSRS2, APM..**



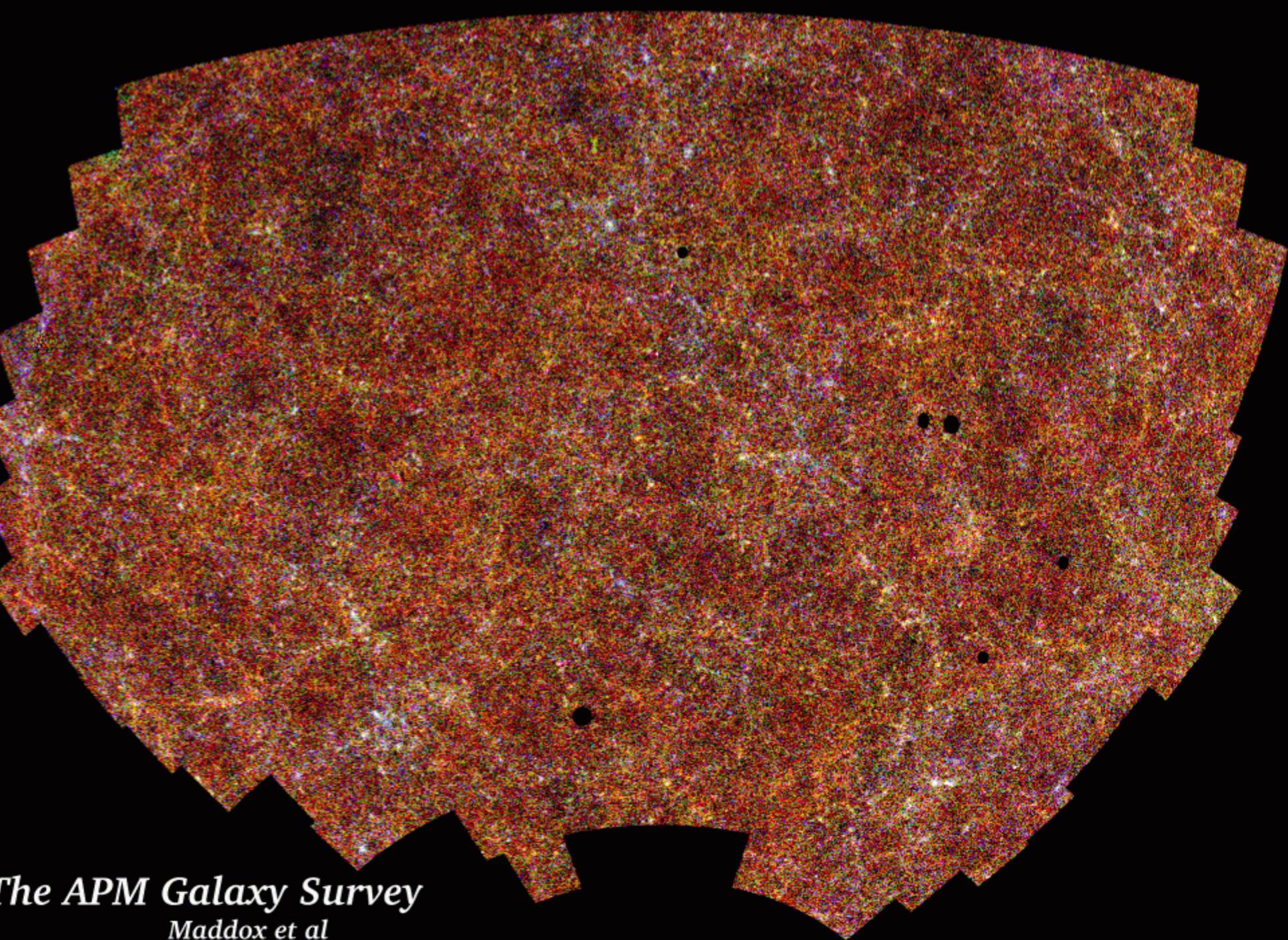
**SDSS: Sloan Digital Sky Survey: 1 million de spectres de galaxies**  
images de 100 millions d'objets, 100 000 Quasars

1/4 de la surface du ciel (2.5m telescope)

Apache Point Observatory (APO), Sunspot, New Mexico, USA

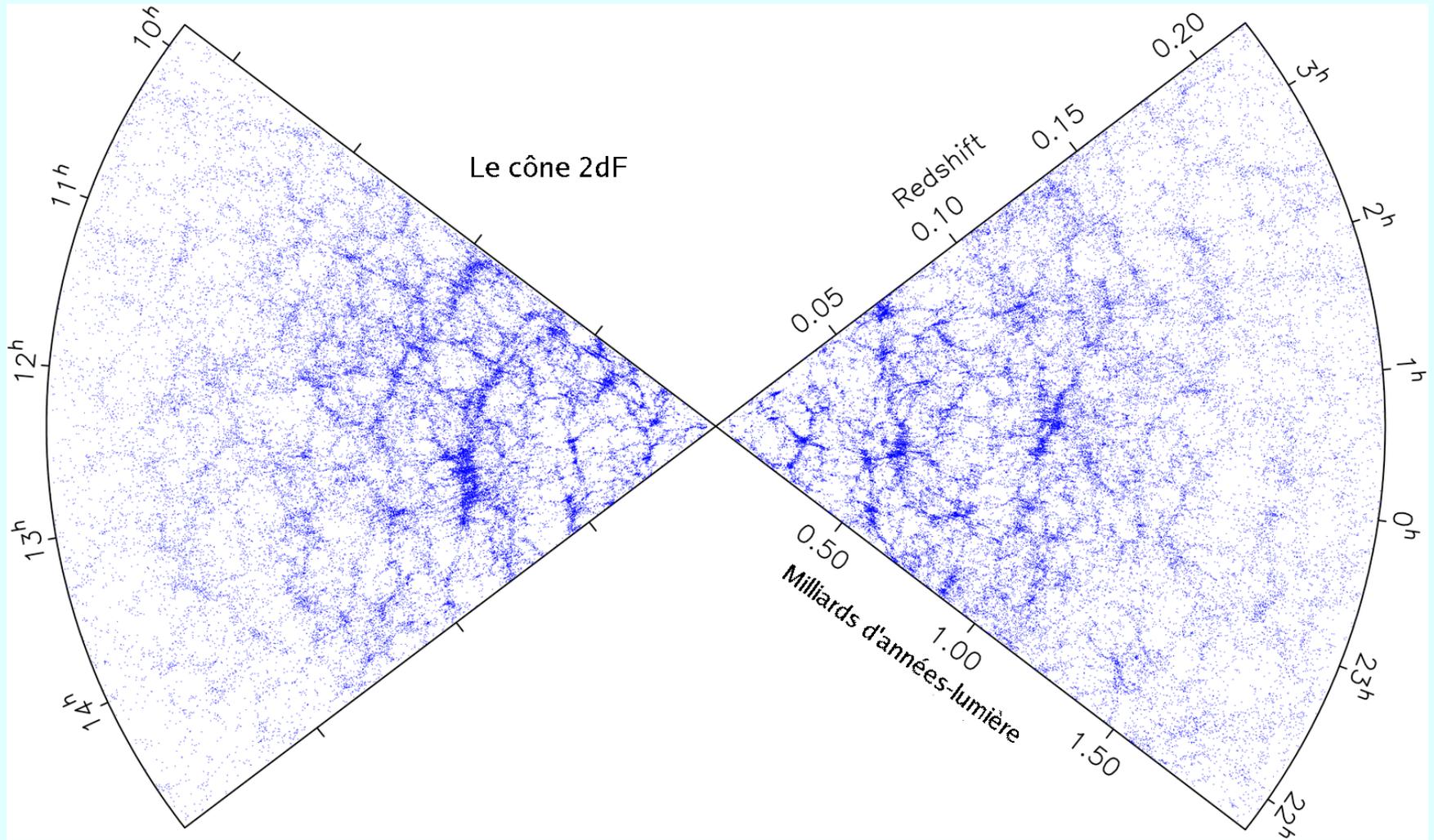
SEGUE (étoiles) SDSS-IV en 2014 plus profond, APOGEE (Voie lactée), eBOSS  
Oscillations baryoniques, MANGA (galaxies proches), ...

**2dF GRS: Galaxy Redshift Surveys: 250 000 spectres de galaxies**  
AAT-4m, Australia et UK (400 spectres par pose)

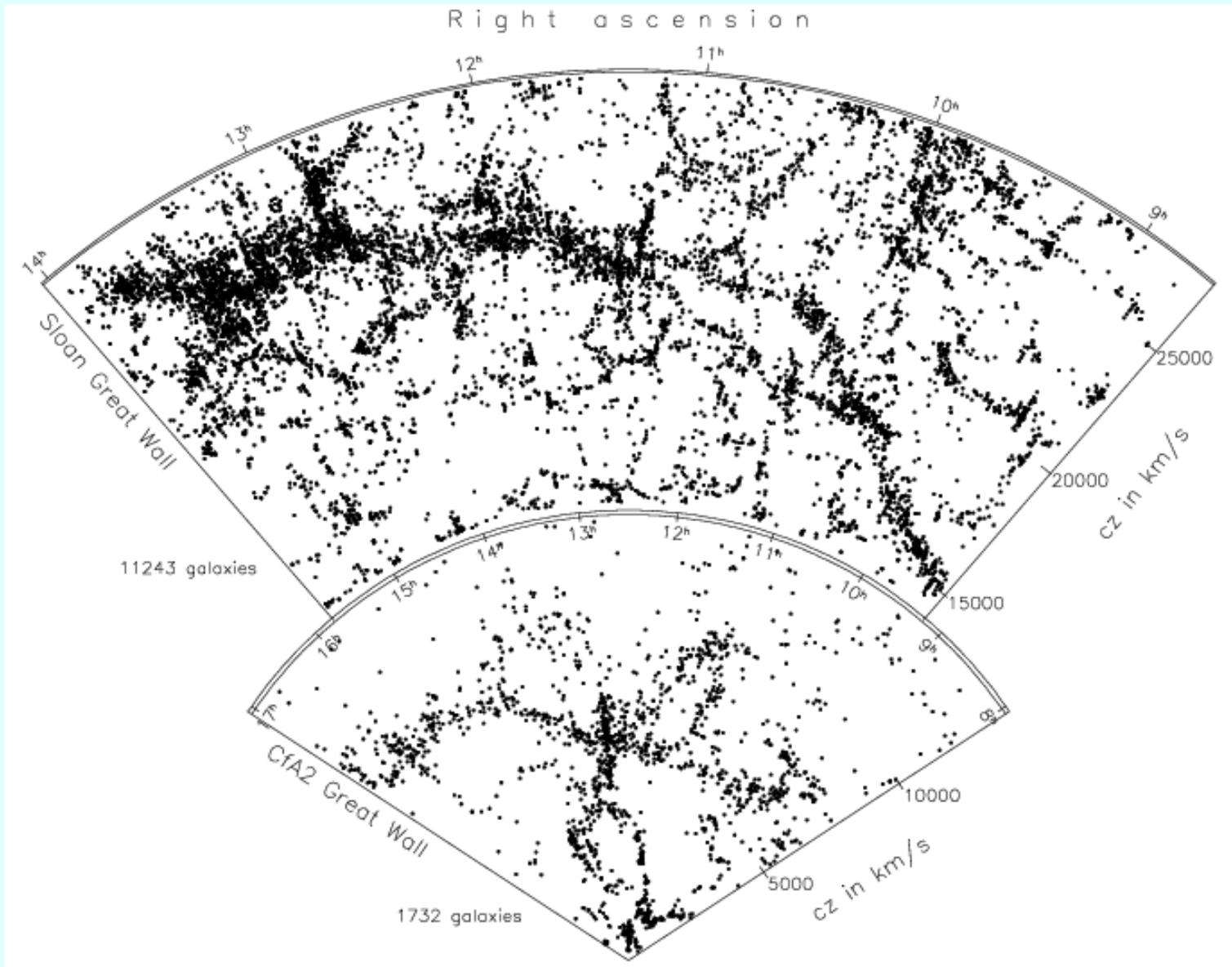


*The APM Galaxy Survey*  
*Maddox et al*

# 2dF Galaxy Redshift Survey



250 000 galaxies, Colless et al (2003)



Comparaison du CfA2 et SDSS (Gott 2003)

# Principes de Formation

Un problème encore non complètement résolu

Quelques idées **fondamentales**:

instabilité gravitationnelle, taille limite de Jeans

Dans un Univers en expansion, les structures ne collapsent pas de façon exponentielle, mais se développent **de façon linéaire**

**Vitesse dans le repère comobile  $\mathbf{v} \leftrightarrow \mathbf{u}$**

$$d\mathbf{u}/dt + (\mathbf{u} \text{ grad})\mathbf{u} = -\text{grad } \Phi - 1/\rho \text{ grad } p;$$

$$d\rho/dt + \text{div } \mathbf{u} = 0$$

$$\Delta\Phi = 4\pi G \rho \quad \rightarrow \text{mêmes équations avec } \delta \text{ au lieu de } \rho$$

Fluctuations de densité au départ

$$\delta\rho/\rho \ll 1 \quad \text{définition } \delta\rho/\rho = \delta$$

Temps de free-fall  $t_{\text{ff}} = (G \rho_1)^{-1/2}$

et temps d'expansion  $t_{\text{exp}} = (G \langle \rho \rangle)^{-1/2}$

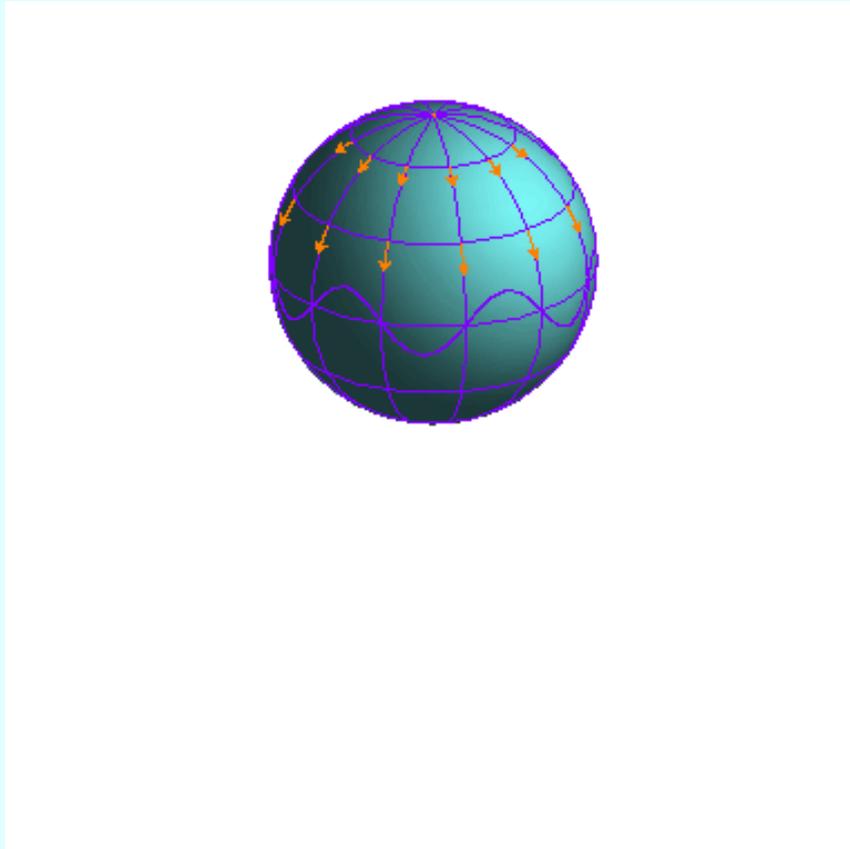
Les structures se développent comme le rayon caractéristique  $\delta \sim R(t) \sim (1+z)^{-1}$

Pour les baryons, qui ne peuvent se développer qu'après la recombinaison à  $z \sim 1000$

le facteur de croissance ne serait que de  $10^3$ ,  
 $\rightarrow$  **insuffisant**, si les fluctuations à cette époque sont de  $10^{-5}$

Dernière époque de diffusion (COBE, WMAP, Planck)  
 $\delta T/T \sim 10^{-5}$  à grande échelle

# Expansion de l'Univers & redshift



Le ciel est uniforme à  $\lambda=3\text{mm}$

Une fois le niveau constant soustrait

→ **dipole** ( $V = 600\text{km/s}$ ) à  $10^{-3}$

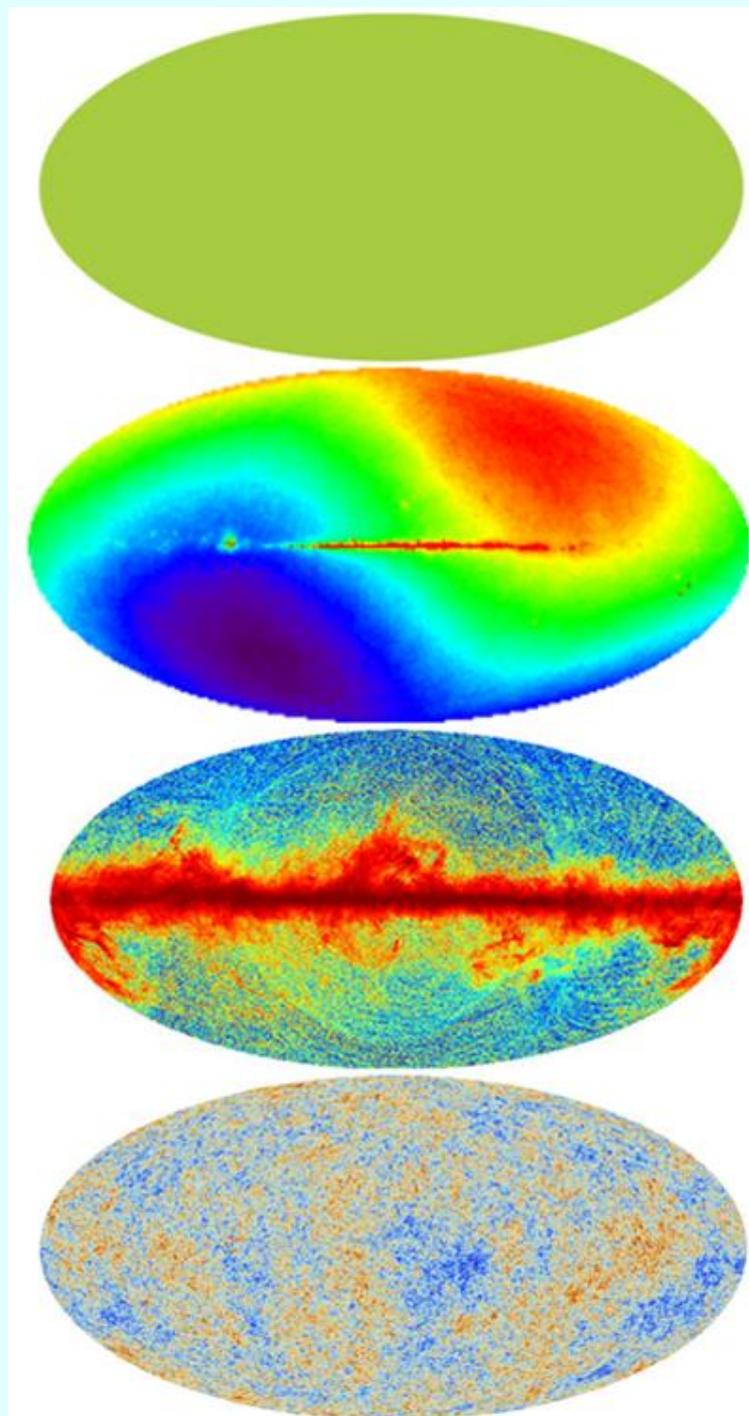
Après soustraction du dipole,

→ **la Voie Lactée**, émissions  
de la poussière, synchrotron, etc..

Soustraction de la Voie Lactée

→ **fluctuations aléatoires**

$\Delta T/T \sim 10^{-5}$

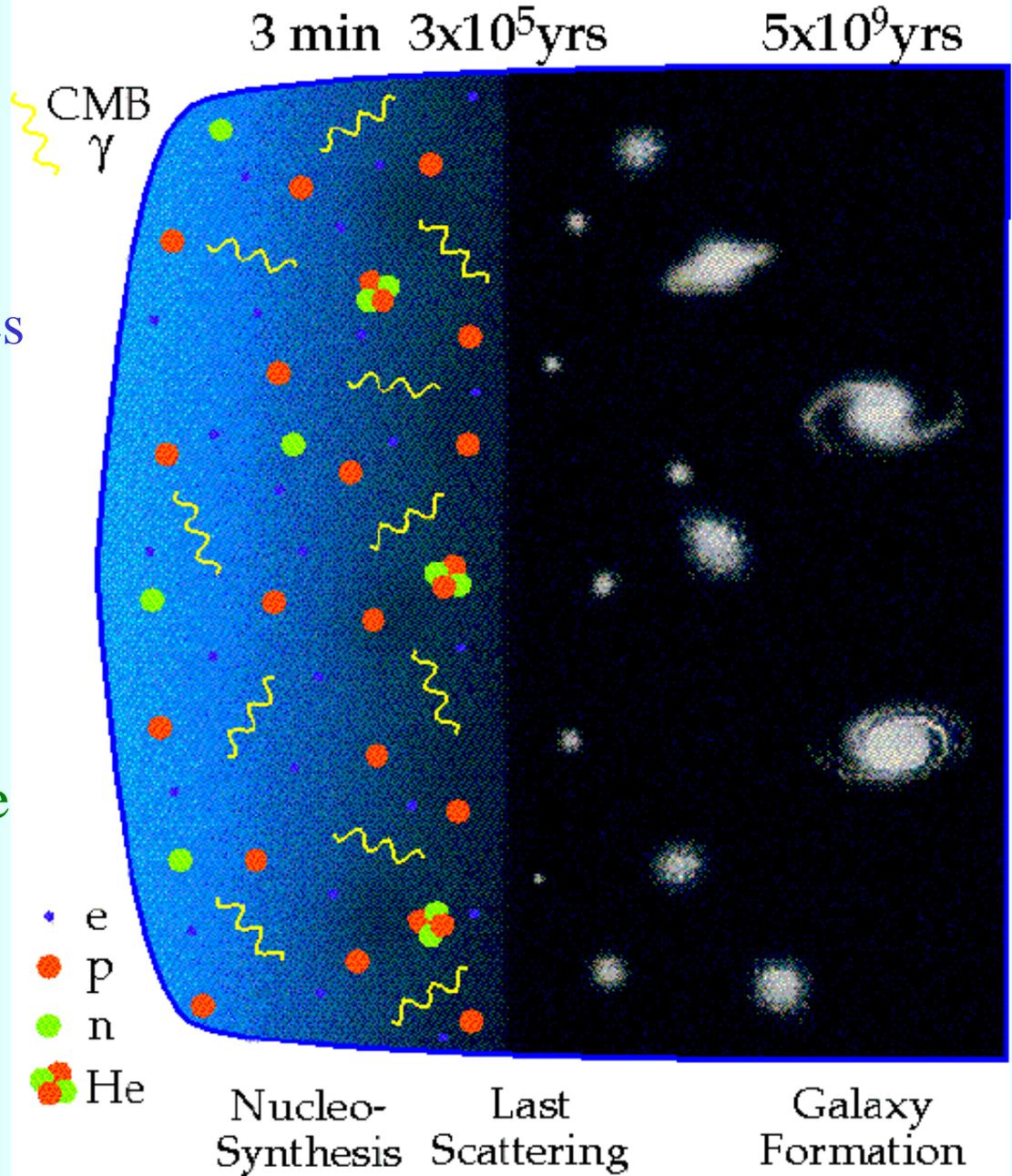


# (Very) Brief History

Univers homogène  
et isotrope jusqu'à  
la recombinaison et la  
condensation des structures

Dernière surface de  
diffusion à  $t=380\,000$  ans

Anisotropies mesurées  
dans le fond cosmologique



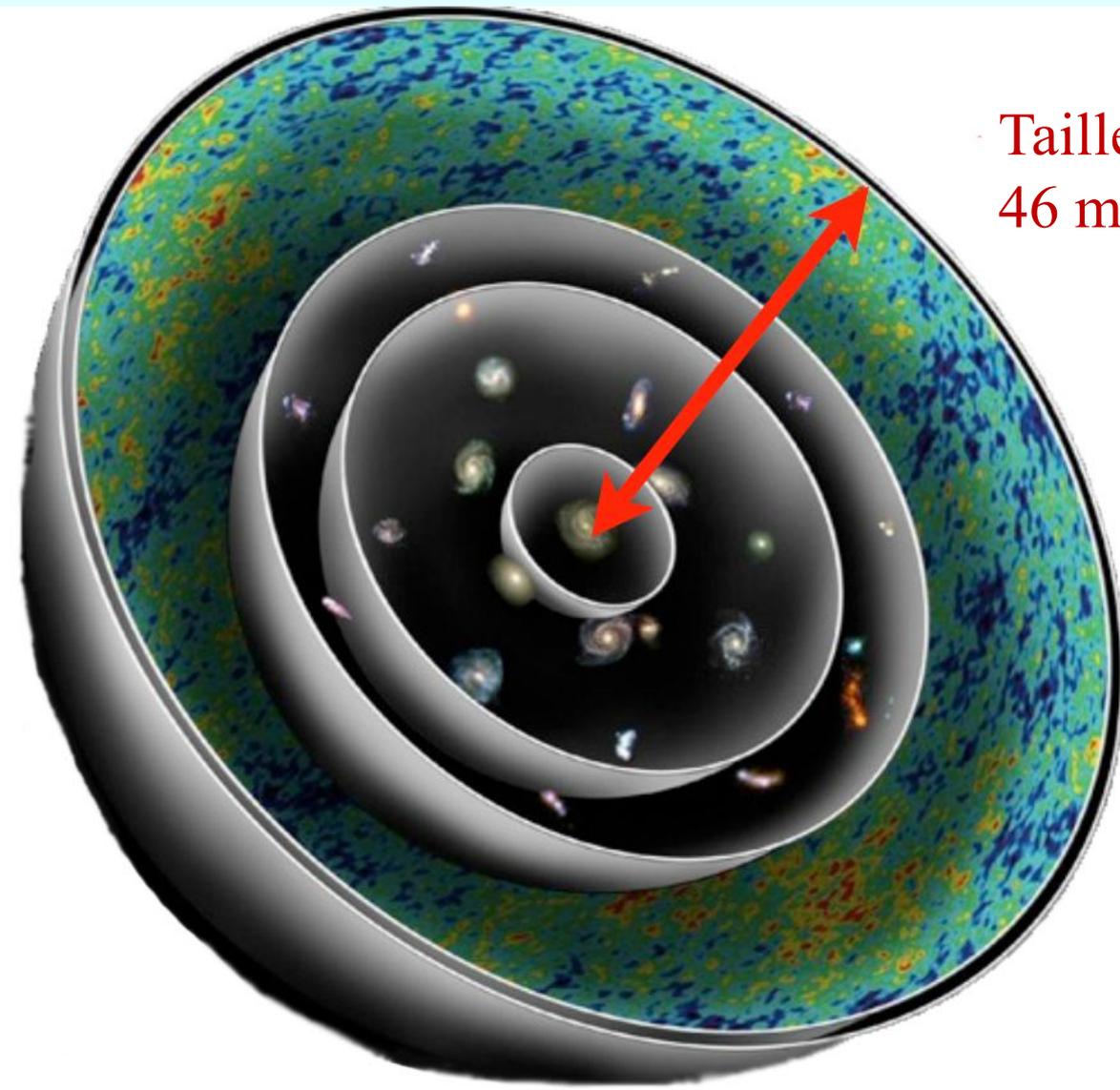
# Les sphères cosmiques

Observer très loin, revient à remonter le temps

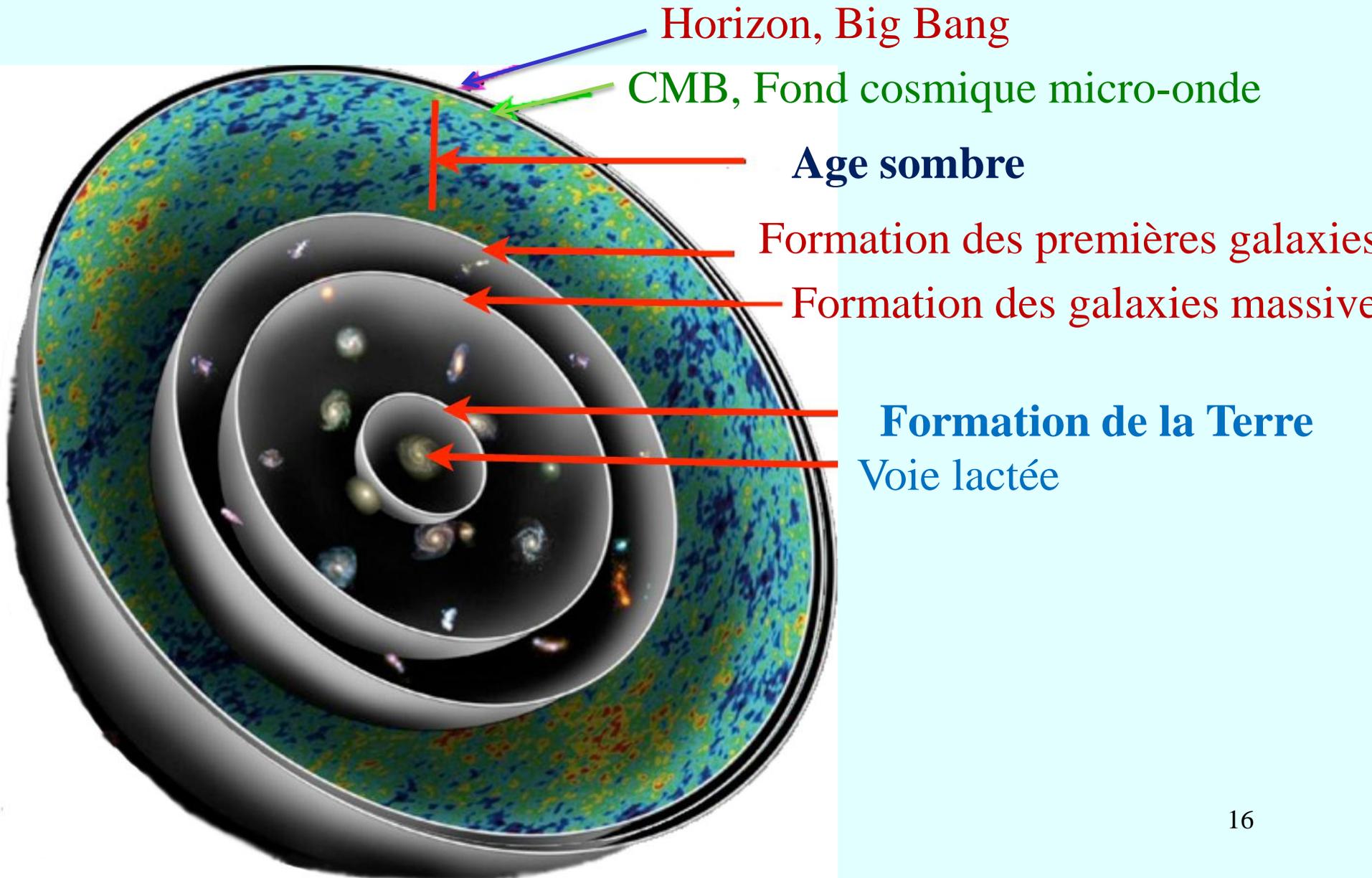
Taille aujourd'hui de l'horizon  
46 milliards d'années-lumière

Parcours de la lumière  
13.8 milliards d'années

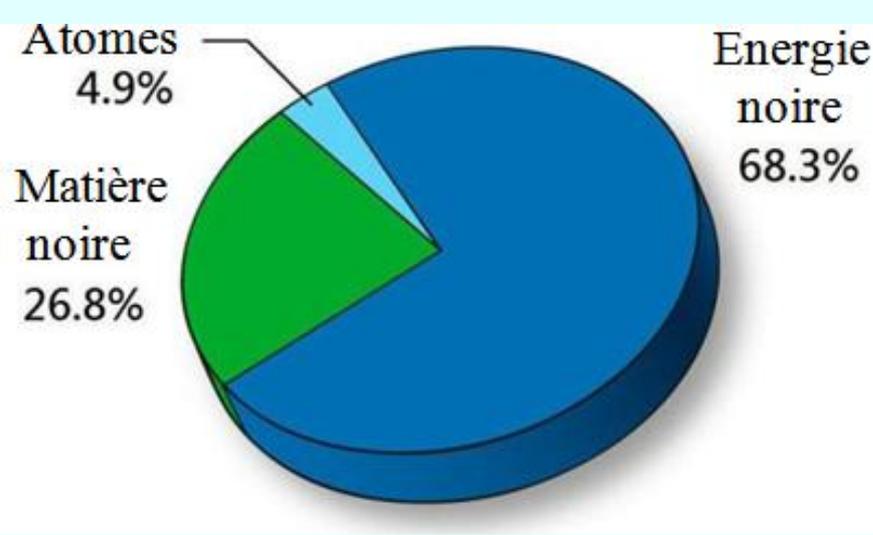
On remonte de  
~13 milliards d'années



# Les diverses époques



# Résultats Planck (après COBE et WMAP)



$$\Omega_m = 0.27$$

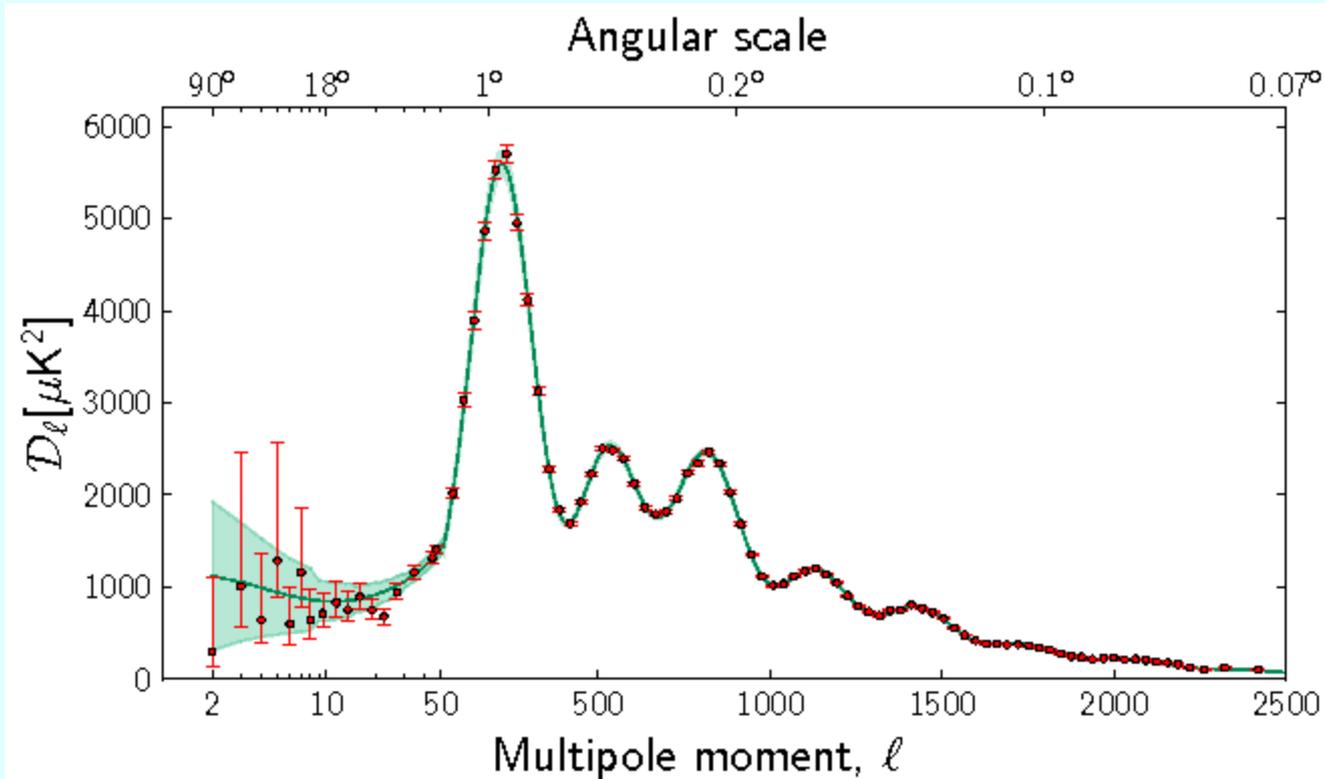
$$\Lambda = 0.68$$

$$\Omega_b = 0.05$$

$$H_0 = 68 \text{ km/s/Mpc}$$

$$\text{Age} = 13.8 \text{ Gyr}$$

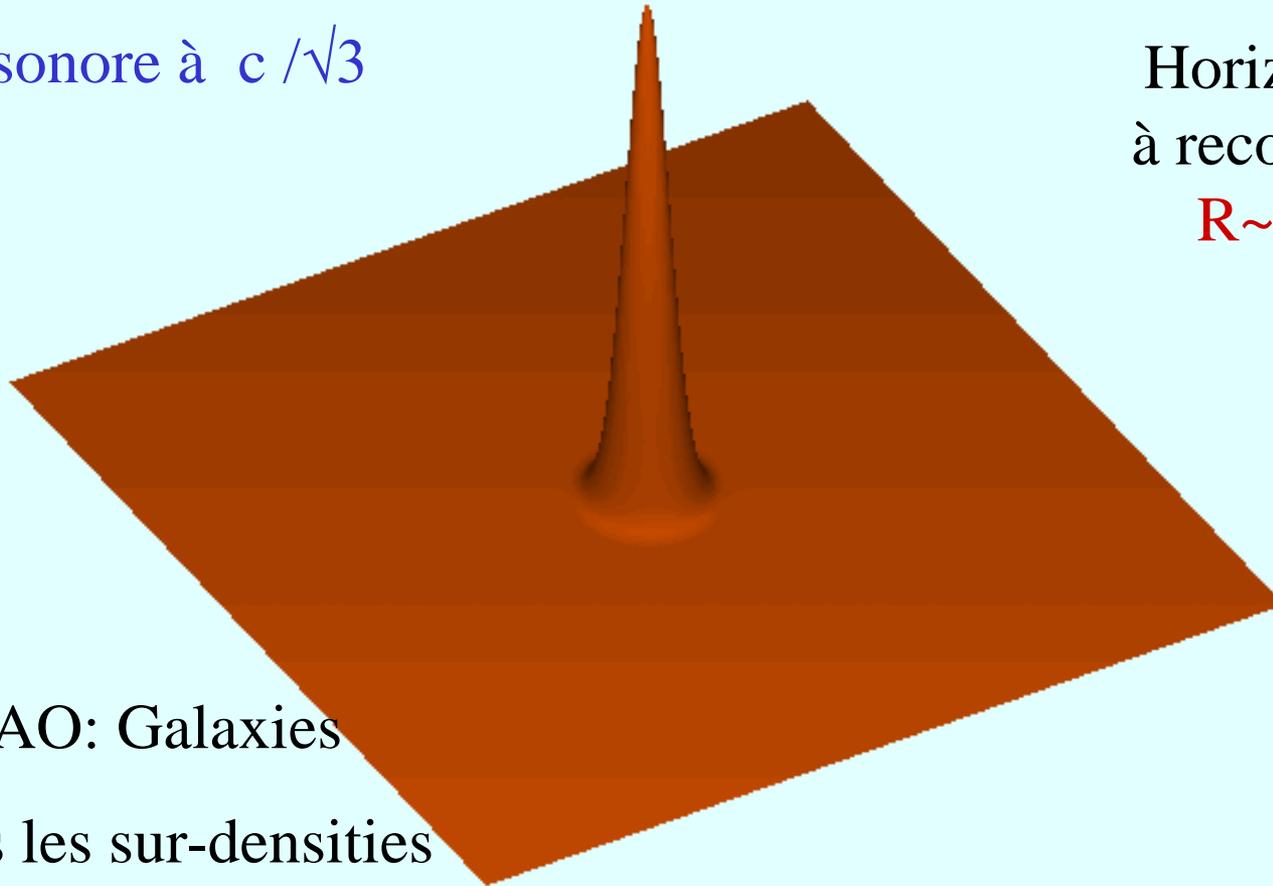
Univers plat



# Une perturbation simple

Création d'une dépression

→ Onde sonore à  $c/\sqrt{3}$



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

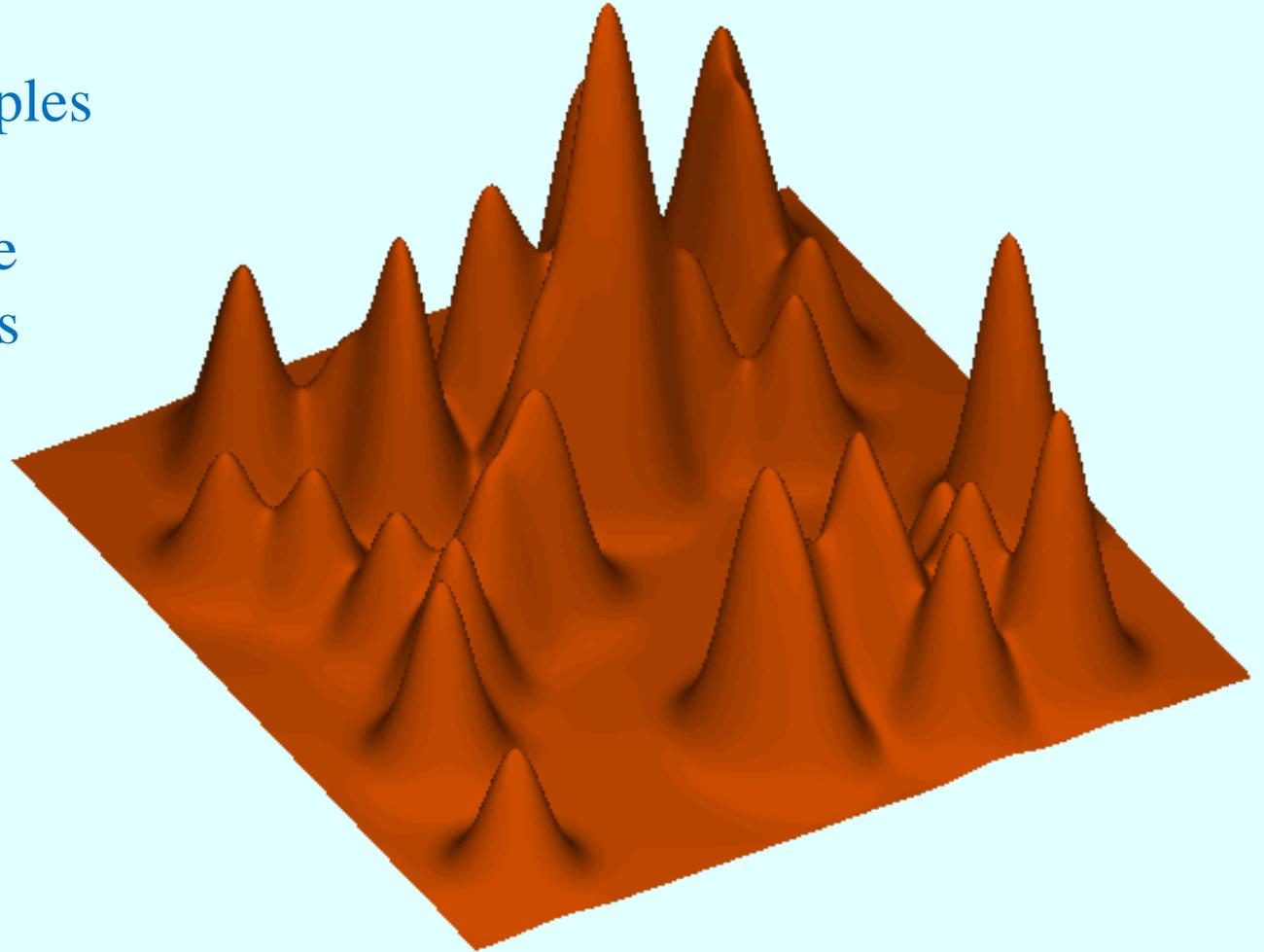
BAO: Galaxies  
dans les sur-densities

→ Ondes acoustiques baryoniques

# Perturbations multiples

Superposition de  
plusieurs ondes simples

Signal réduit à cause  
des phases aléatoires



Seule la **matière noire non-baryonique**, dont les particules n'interagissent pas avec les photons, mais seulement par la gravité peuvent commencer de se développer avant la recombinaison, juste après l'équivalence matière-radiation

La matière noire peut donc croître en densité avant les baryons, à toute échelle **après l'égalité**, mais seulement les perturbations plus grandes que l'horizon **avant égalité** (free streaming)

$$z > z_{\text{eq}}$$

**Rayonnement**

$$\lambda > ct \quad \delta \sim (1+z)^{-2}$$

$$\lambda < ct \quad \delta \sim \text{cste}$$

$$z < z_{\text{eq}}$$

**Matière**

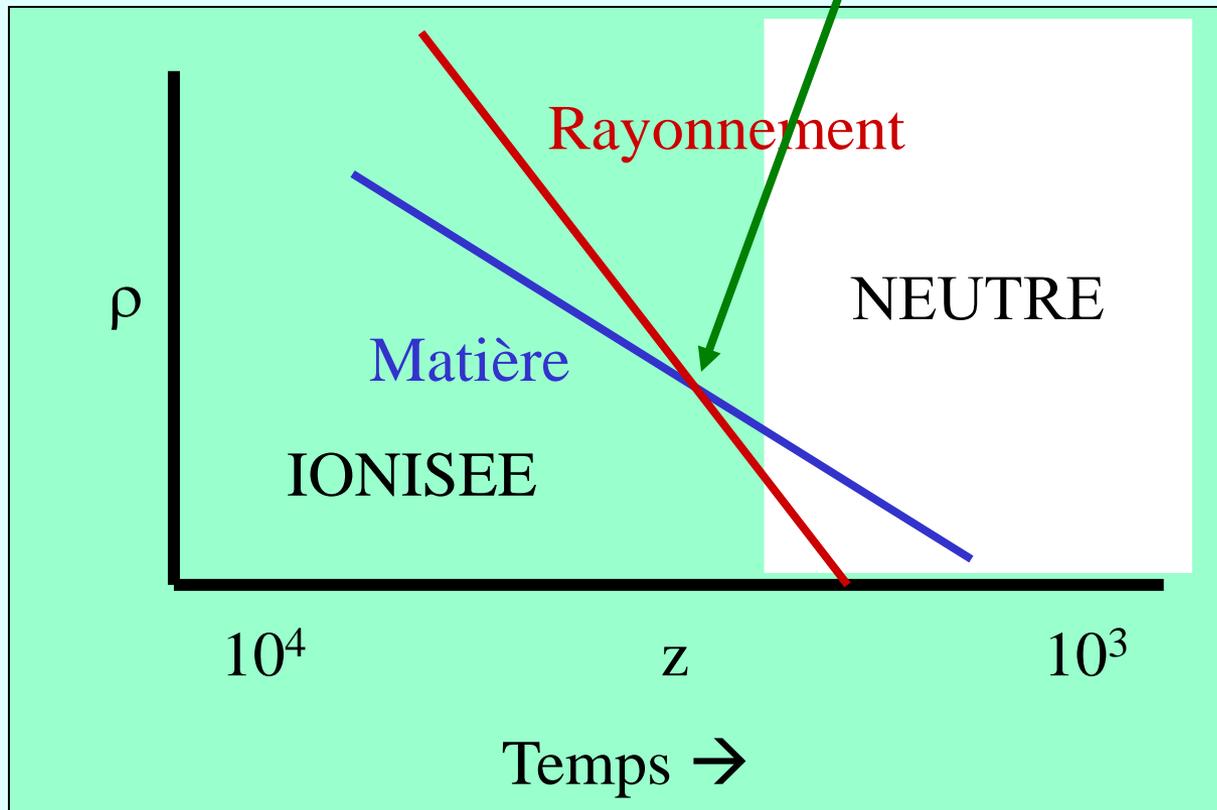
$$\delta \sim (1+z)^{-1}$$

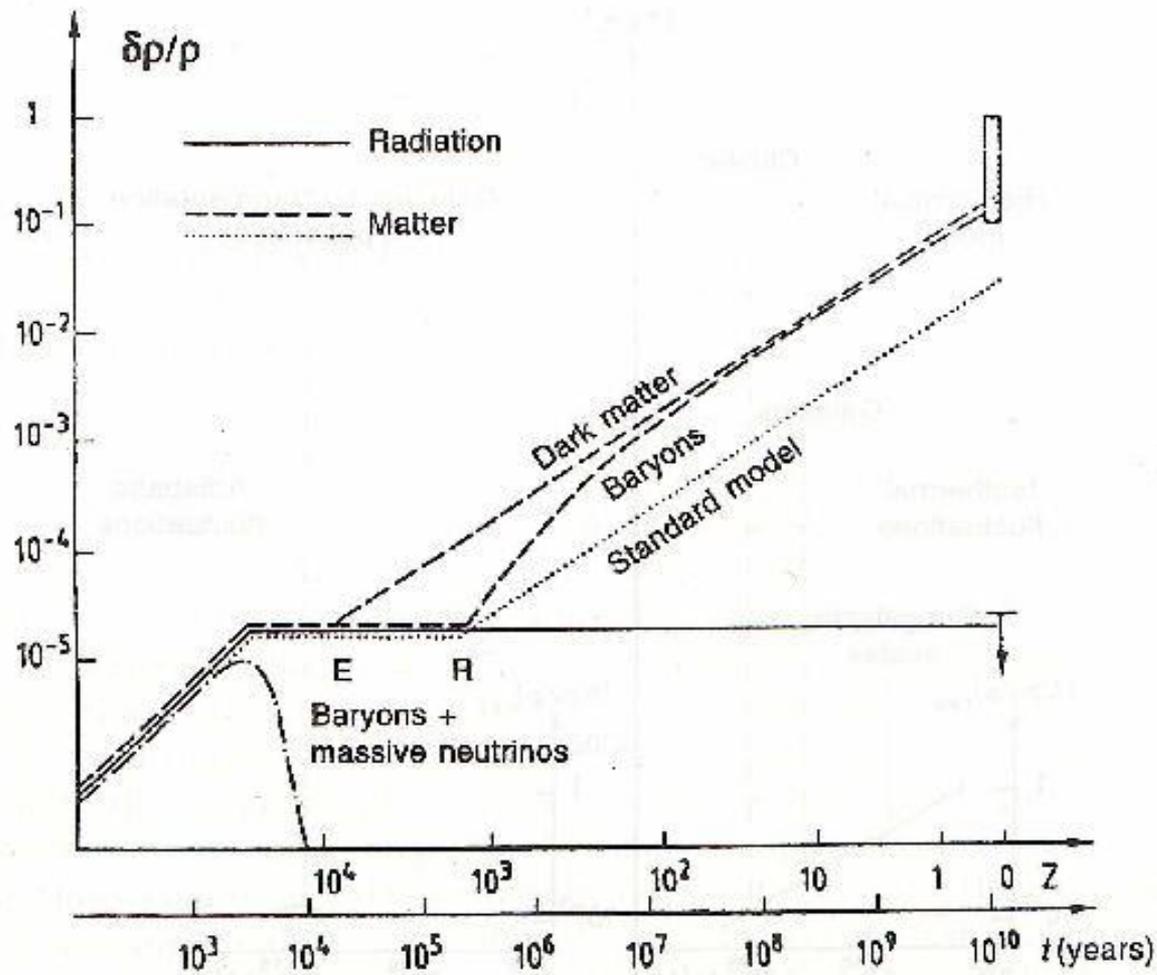
$$\delta \sim (1+z)^{-1}$$

$\rho \sim R^{-3}$  matière

$\rho \sim R^{-4}$  photons

Point d'Equivalence E





Croissance des fluctuations adiabatiques aux échelles de  $10^{14} \text{Mo}$  (8 Mpc)

Elles croissent jusqu'à contenir la masse de l'horizon

Puis restent constantes (calibration  $t=0$ , flèche)

- Les fluctuations de la matière (...) "standard model" suivent le rayonnement, et ne croissent qu'après la Recombinaison R
  - les fluctuations de CDM croissent à partir du point E
- équivalence matière -rayonnement

# Spectre de puissance

**Théorie de l'inflation:** On suppose le spectre indépendant d'échelle, et la loi de puissance est telle que les perturbations entrent toujours dans l'horizon avec une égale amplitude

$$\delta\rho/\rho \sim \delta M/M = A M^{-a}$$

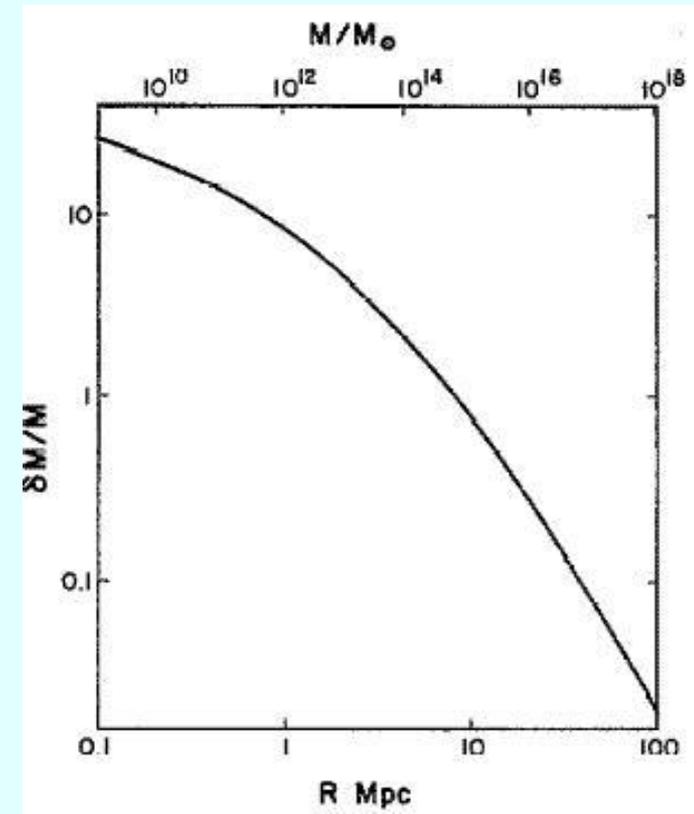
$$a = 2/3, \text{ ou } \delta(k)^2 = P(k) = k^n \text{ avec } n \sim 1$$

$P(k) \sim k$  à grande échelle

mais  $P(k)$  tilted  $k^{-3}$

À petite échelle (Peebles 82)

Vient de l'effet de streaming en-dessous de l'horizon



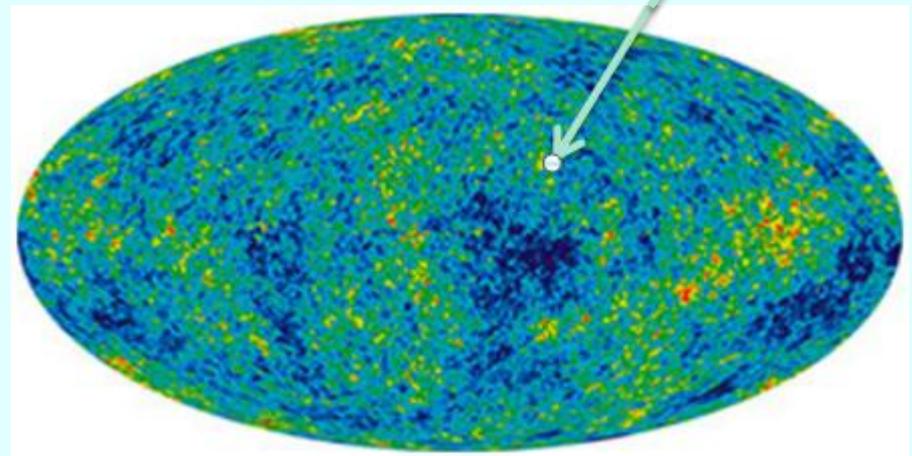
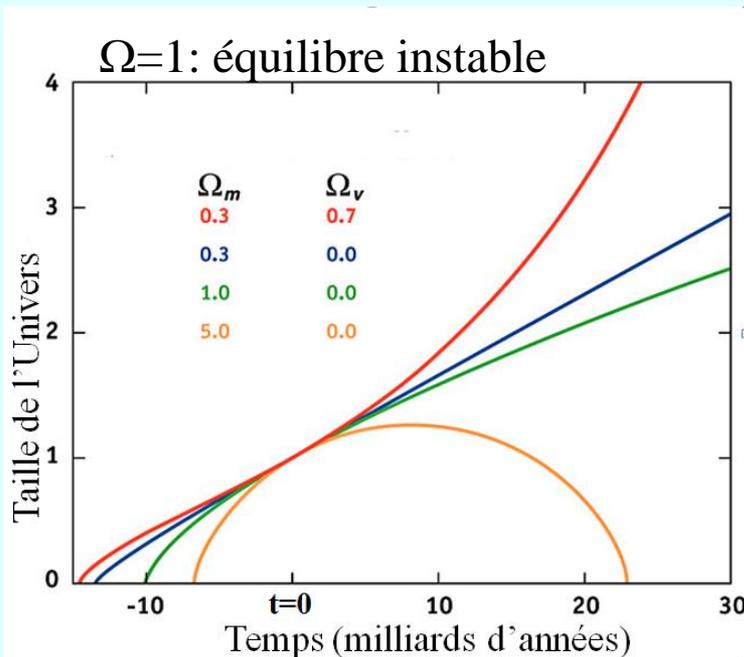
# Inflation: problèmes Horizon, platitude

**Coincidence:** pourquoi  $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$  – La courbure de l'Univers croît très vite avec le temps, il faudrait un réglage fin ( $10^{-25}$ ) au départ?

$$\frac{d\Omega}{d \log a} = (1 + 3w)\Omega (\Omega - 1)$$

**Horizon:** les régions non causalement reliées, en dehors de l'horizon à l'époque de la recombinaison ( $t=380\,000$  ans) ont le même flux  
Taille de l'horizon à cette époque  $\sim 1$  degré, vu d'aujourd'hui

Horizon



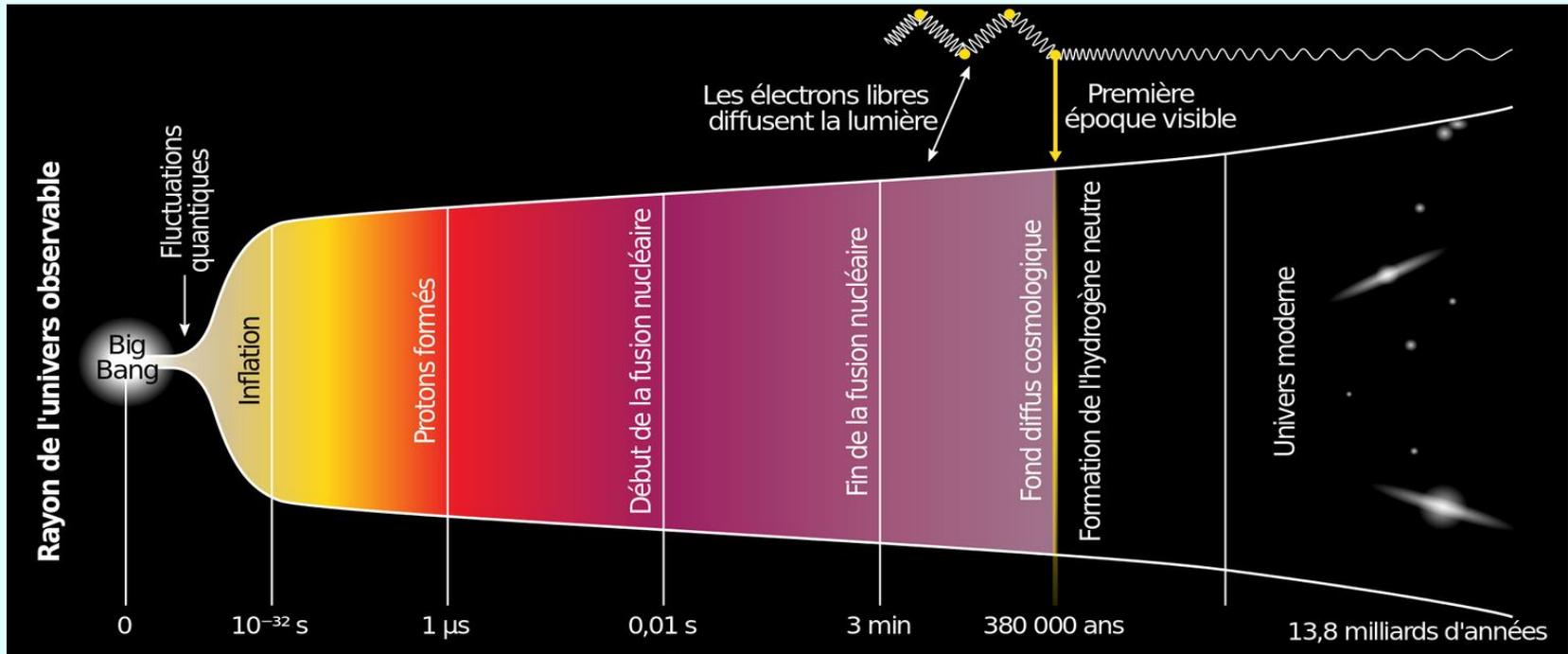
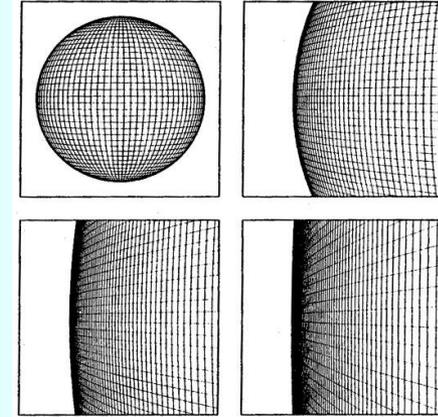
# Inflation: la solution

$$(\Omega^{-1} - 1)\rho a^2 = \frac{-3kc^2}{8\pi G}$$

**Courbure:**  $(\Omega - 1)$  croît comme  $a(t)$

Une inflation de  $e^{60} = 10^{26}$  est nécessaire

**Horizon:** Toute la carte du ciel en CMB provient du même horizon



# Mécanisme de l'inflation

Champ scalaire  $\Phi$  (inflaton?), avec **faux vide**, métastable, en  $\Phi = 0$   
Roule vers le **vrai vide** en  $\Phi_0$ . Relache beaucoup d'énergie

Compensée par l'énergie gravitationnelle négative

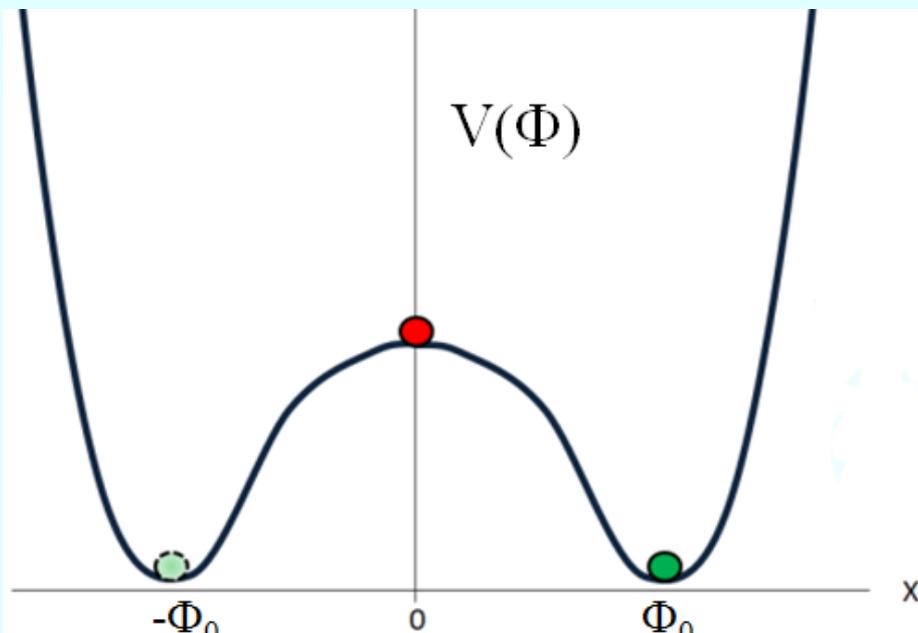
$a(t) \sim \exp(Ht)$  expansion exponentielle, durant  $10^{-35}$  sec

$dV(\Phi)/dt \sim 0$ , roulement lent

Création de WIMPZILLA?  
( $M \sim 10^{13}$  GeV, non-thermique)

Energie du vide quantique:  
Même mécanisme pour  
l'accélération de l'expansion  
aujourd'hui?

→ Energie noire



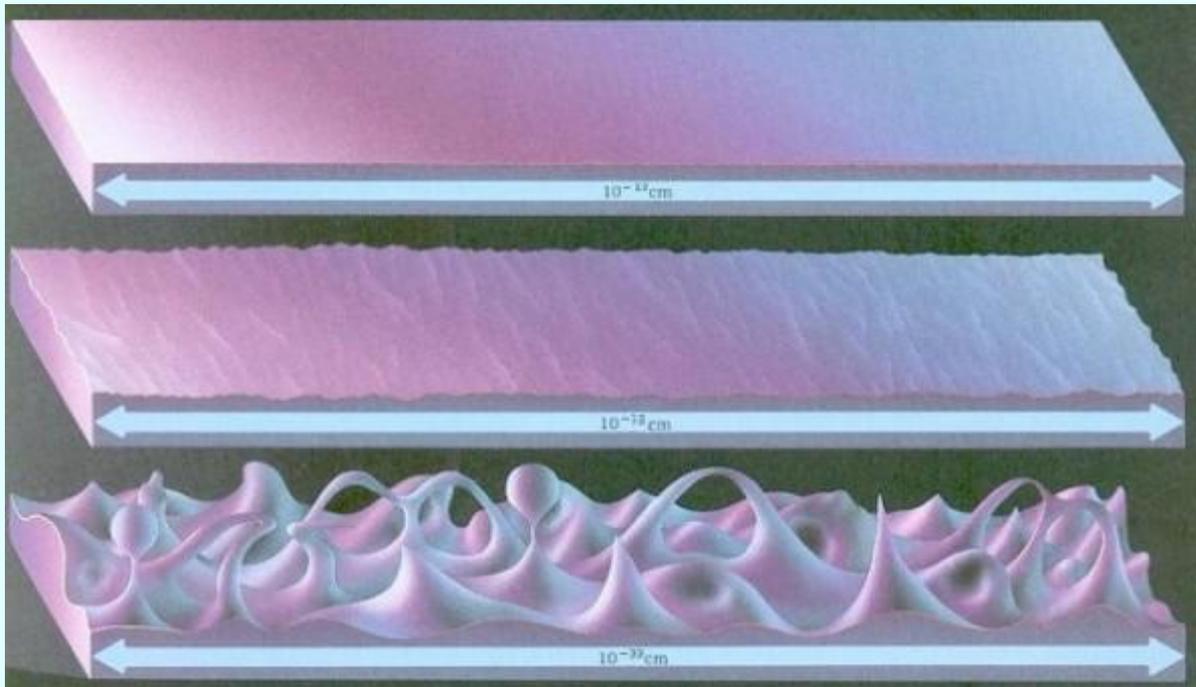
L'inflation s'arrête à  $\Phi_0$

# Fluctuations quantiques

D'après le principe d'incertitude d'Heisenberg, le champ est sans arrêt incertain  $\delta\Phi$

Le temps de l'arrêt à  $10^{-35}$  sec aussi  $\delta t = d\Phi / (d\Phi/dt)$

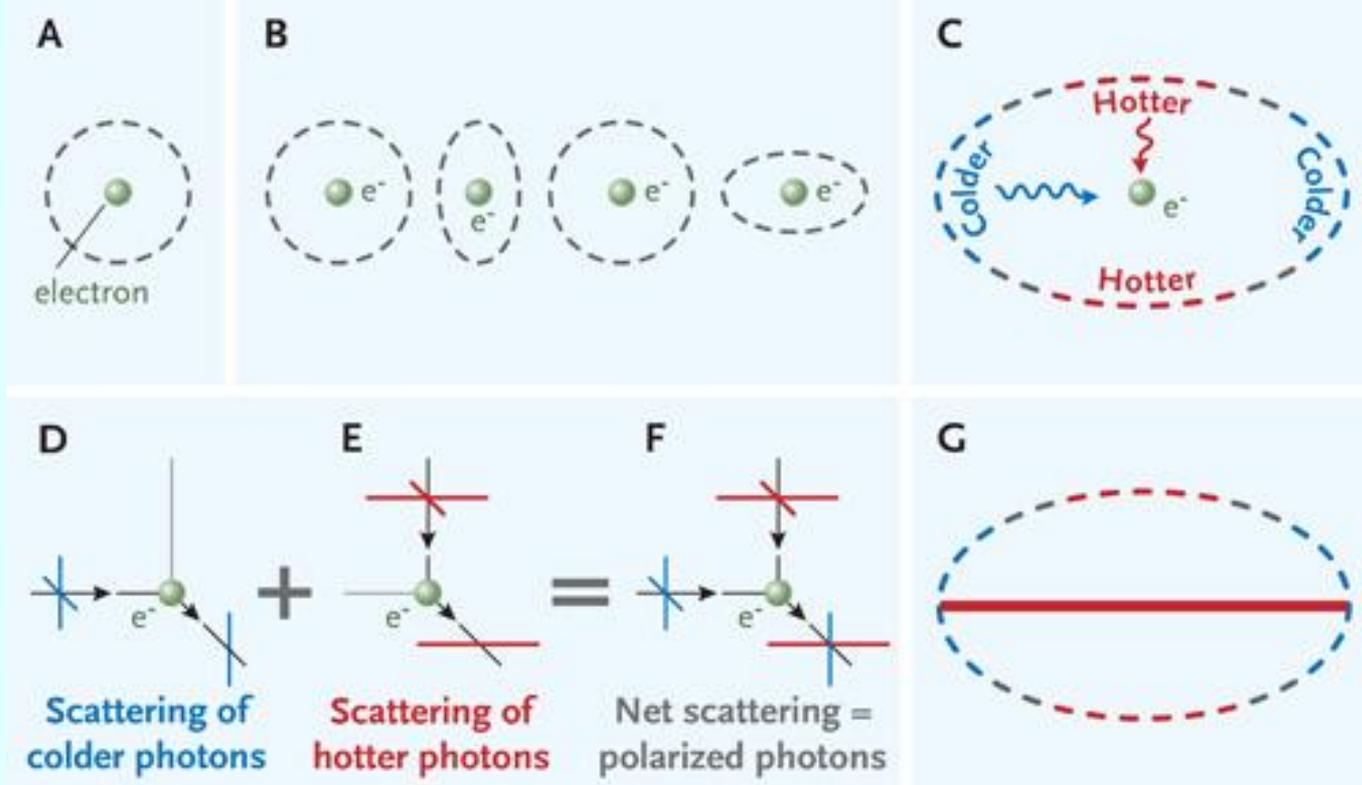
**La courbure** de l'Univers de même, et entraîne des fluctuations de **densité et de température**



→ Ondes gravitationnelles



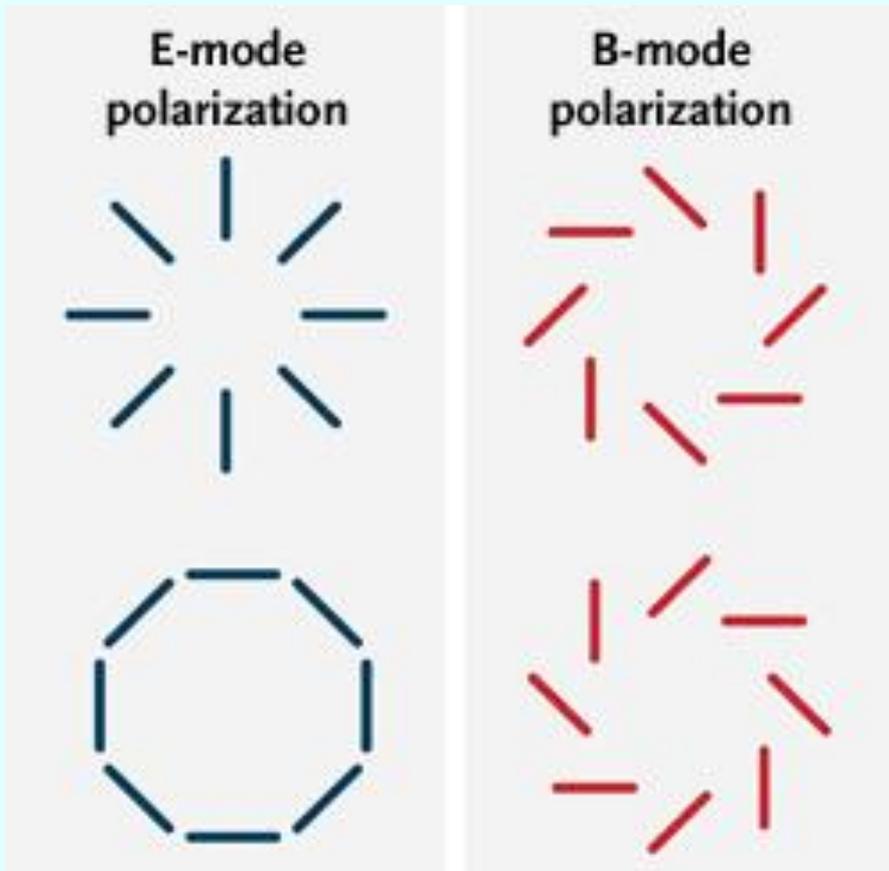
Experience BICEP-2 au Pole Sud (télescope à droite).  
A gauche le “South Pole Telescope” (SPT)  
Tous deux opèrent dans les longueurs d’ondes mm-submm  
**Mars 2014: Annonce de BICEP-2**



*Leah  
Tiscione*

Les ondes gravitationnelles créent de la polarisation dans le CMB  
 En déformant l'espace, et donc le plasma primordial (p, e<sup>-</sup>)  
 (A) Avant l'onde. (B) un électron voit les déformations, et l'univers est plus chaud selon la compression C. L'onde non polarisée est diffusée par les e<sup>-</sup> (chaud ou froid) et devient polarisée  
 La somme (F) n'est plus symétrique. Le chaud (+ énergétique) gagne (G)

## Géométrie des modes-E et modes-B:



Symétries très différentes

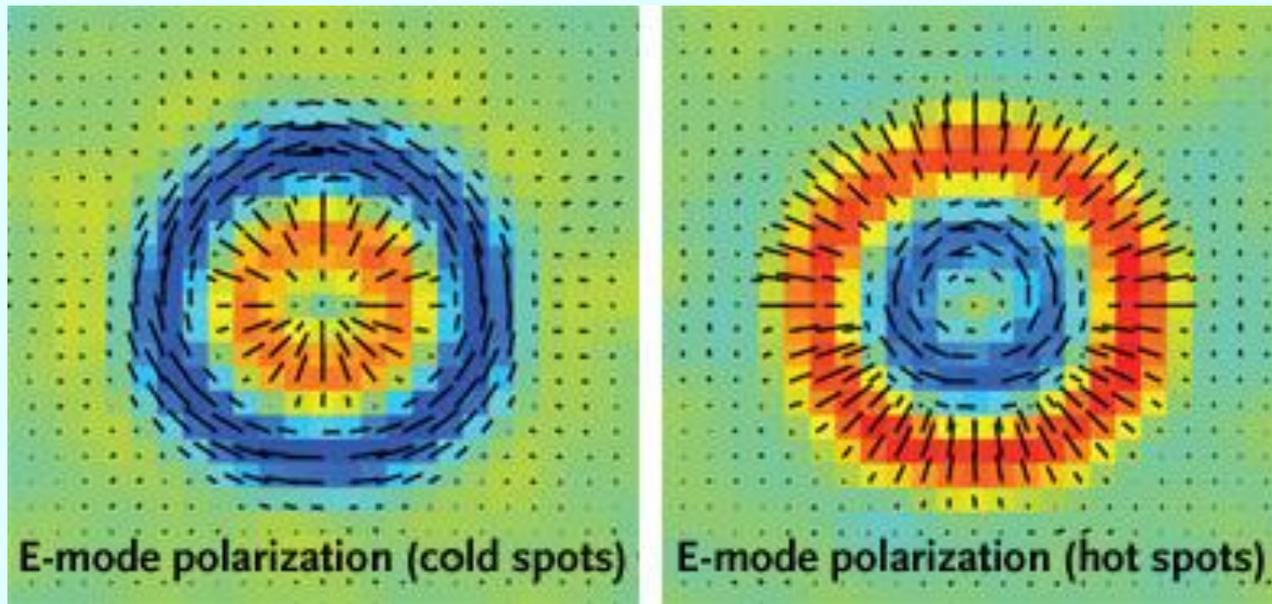
$$\text{Rot } \mathbf{E} = 0 \quad \text{div } \mathbf{B} = 0$$

Les ondes gravitationnelles peuvent créer les deux, et les modes-E peuvent ensuite être diffusés en B

Mais les modes-B primordiaux sont les signatures d'ondes primordiales

.

Les modes-E sont créés par diffusion des électrons avant la recombinaison (380 000 ans) mais bien après l'inflation

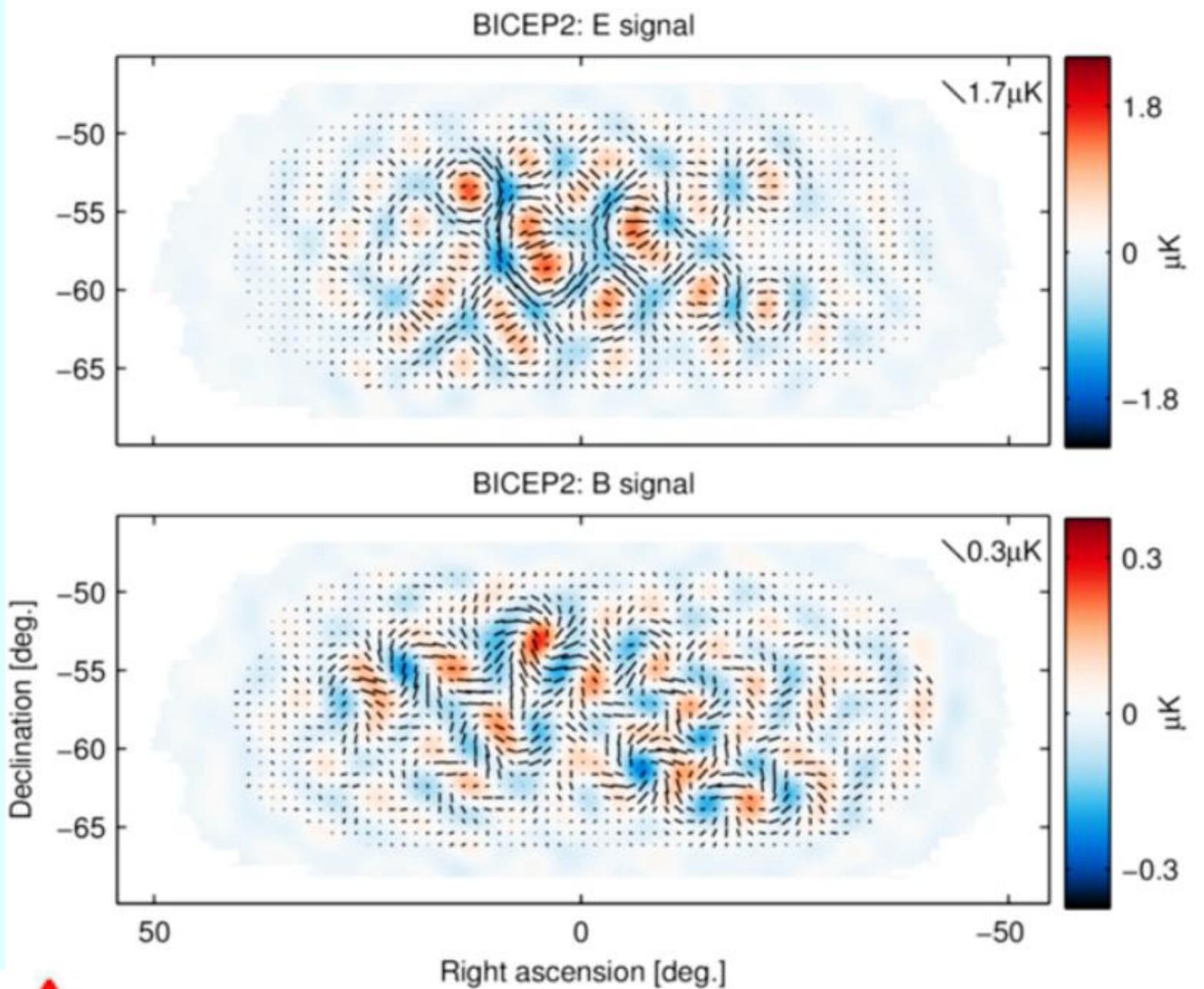


Stacking  $\sim 10\,000$  points froids (gauche) et chauds (droite) dans Planck  
L'effet n'est que de 0.8 microkelvin.

Ces modes-E pourraient donner par diffusion un peu des modes-B

A distinguer des modes-B primordiaux, générés par l'inflation

*ESA / Planck Collaboration*



Une partie pourrait être due à la polarisation de la poussière

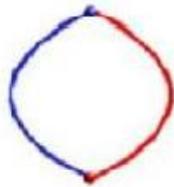
# Apparition des fluctuations

**Mécanique quantique (MQ):** particules virtuelles dans le vide

**Dans l'inflation,** des régions connectées causalement, se trouvent soudain déconnectées: **les particules ne peuvent plus s'annihiler**

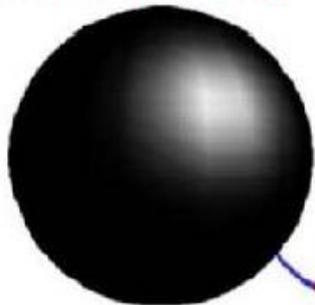
Inflation + MQ = Fluctuations

Paire **particule/antiparticule**

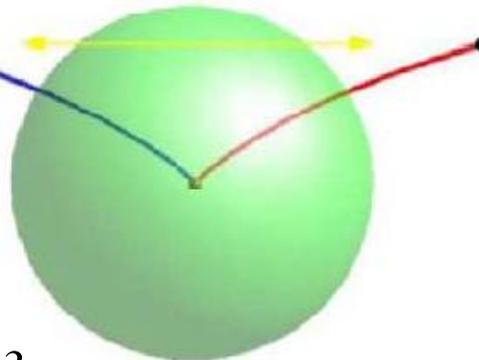


Trou noir :

**Rayonnement Hawking**



Inflation: **expansion**



*Kinney 2003*

Longueur d'onde (mode) quantique  $\lambda \sim a \sim \exp(Ht)$

Horizon =  $c/H \sim \text{cste}$

Ondes gelées > horizon

**Création d'ondes gravit (mode tenseur)**

Température  $\sim 1/H$

$$\left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)_{k=aH} = \frac{H^2}{4\pi^{3/2}\dot{\phi}}$$

$$P_S(k) \propto k^n$$

# Modification de $P(k)$

$$P_S(k) \propto k^n$$

Fluctuations en température  $P_{\text{rad}} \propto k^n \rightarrow$  Matière  $P_{\text{mat}} \propto k^n$

Pendant les premiers instants de l'Univers,  $P(k)$  est modifié

Pour CDM: **toutes les échelles croissent de même dans l'époque dominée par la matière**

Mais la pression joue un rôle dans l'époque dominée par la radiation

Échelles qui rentrent dans l'horizon à cette époque croissent moins vite  
**échelles < horizon pénalisées par  $k^{-4}$**

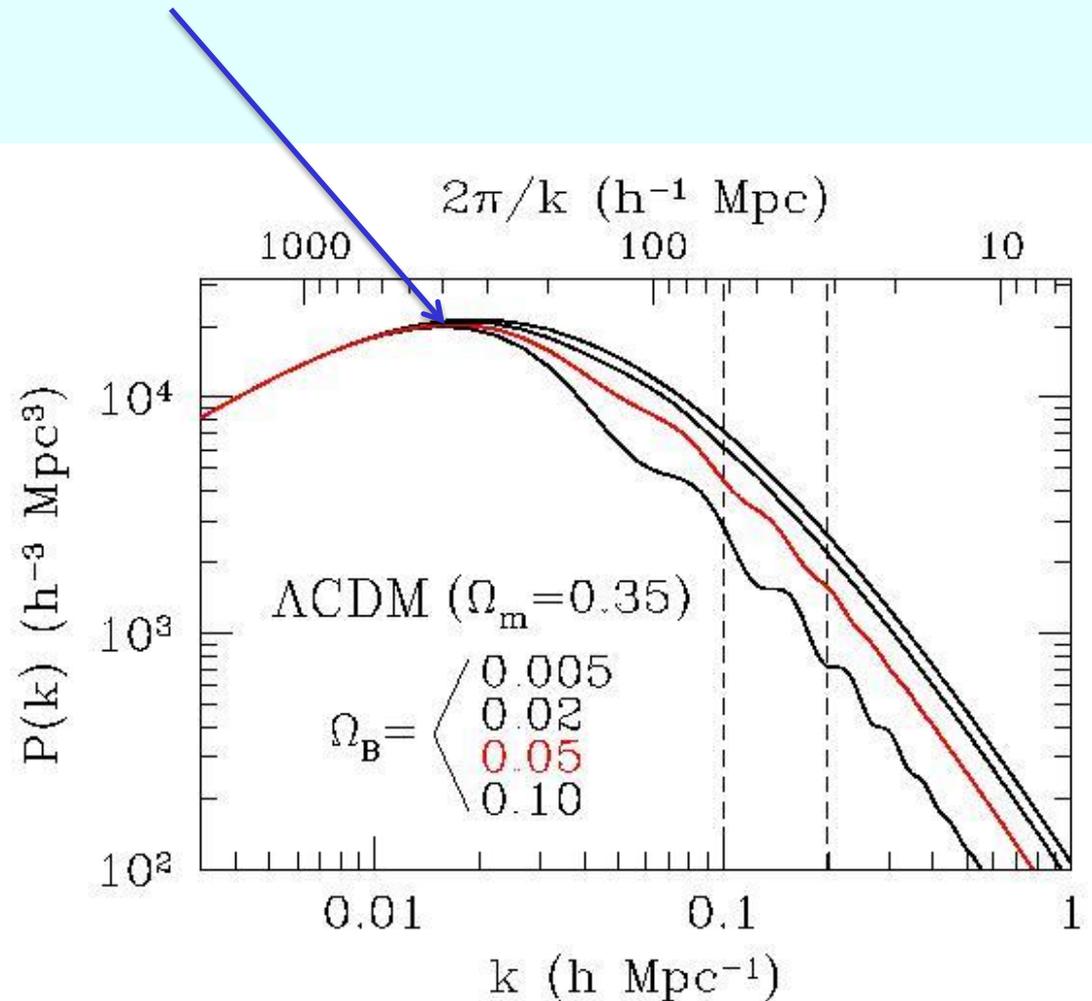
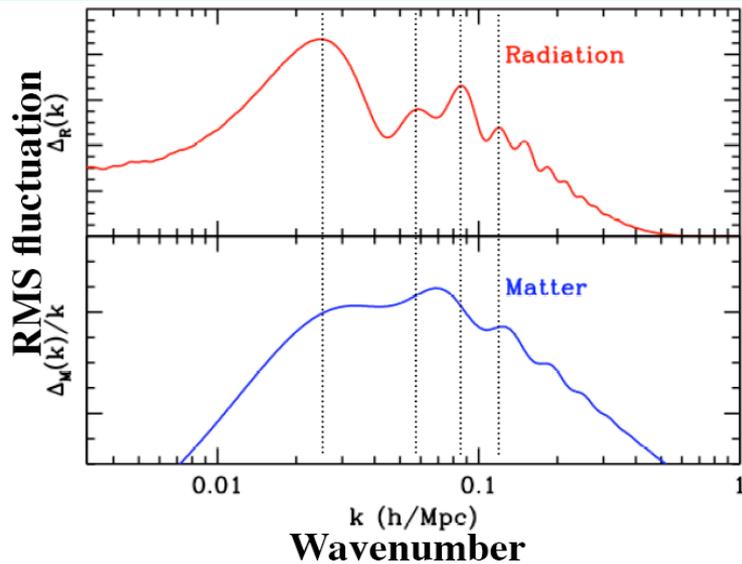
Les échelles  $>$  horizon continuent à s'effondrer

Cette modification des petites échelles est le « tilt »

# Empreintes des oscillations

Echelle du retournement: taille de l'horizon à l'époque d'équivalence matière-rayonnement  
60 000 ans après le Big Bang

Oscillations des baryons  
longueur d'onde x2

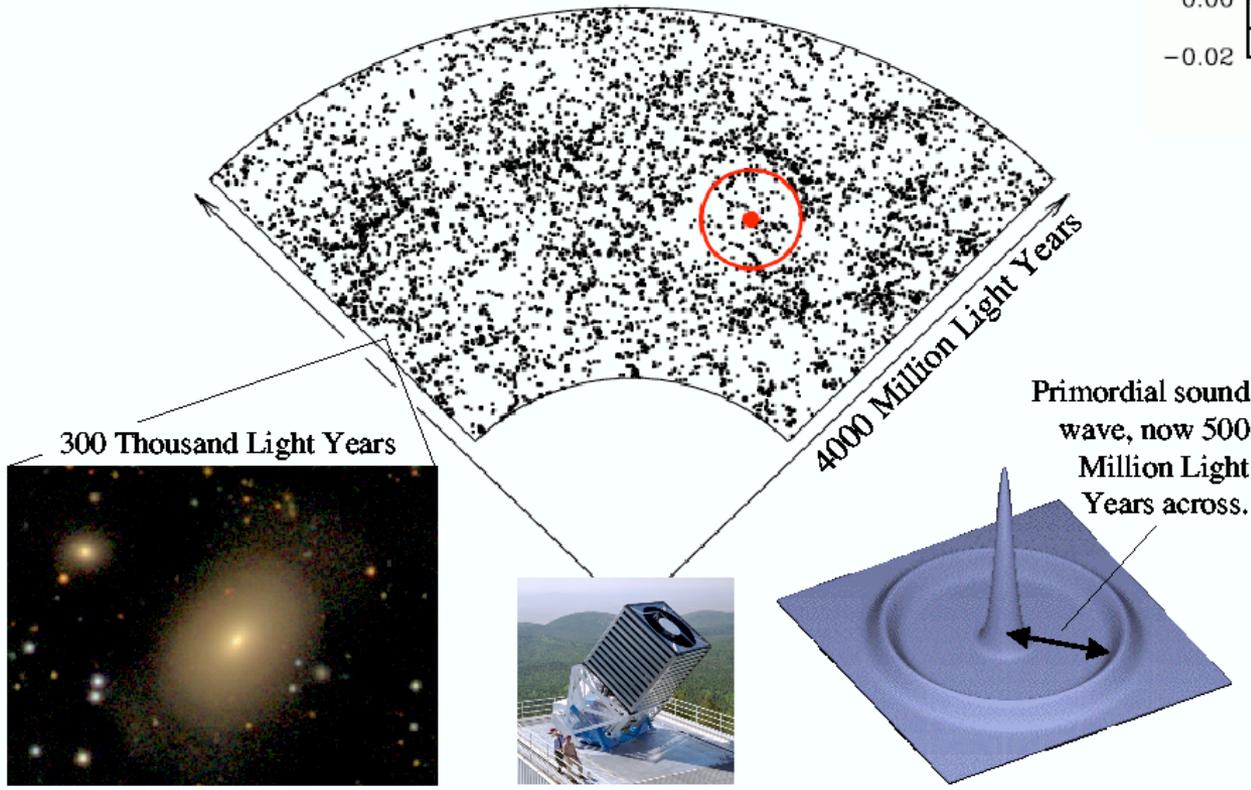
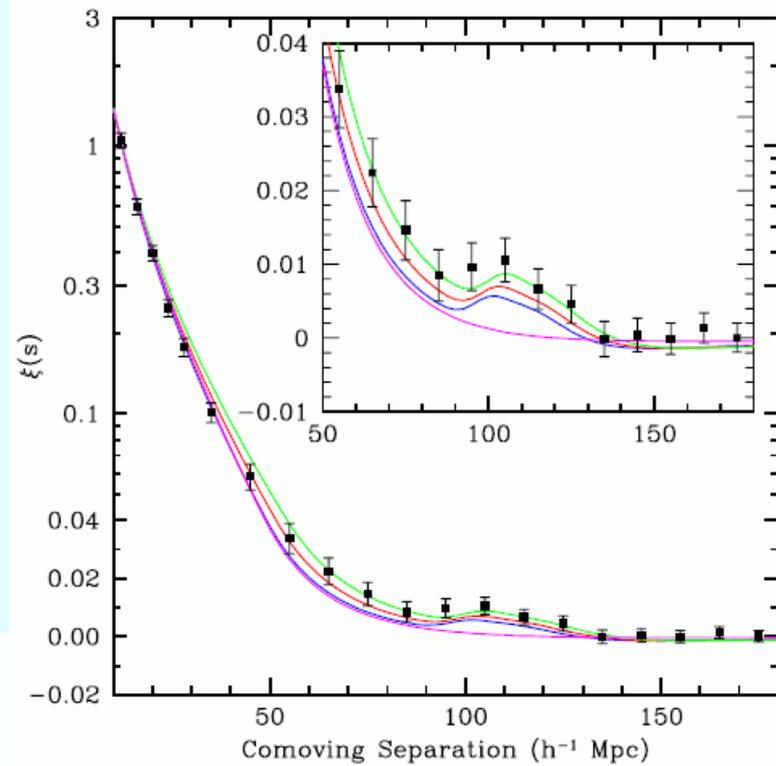


*Eisenstein et al 1998*

# Pic acoustique baryonique

Ondes détectées aujourd'hui  
dans la distribution des baryons

50 000 galaxies SDSS

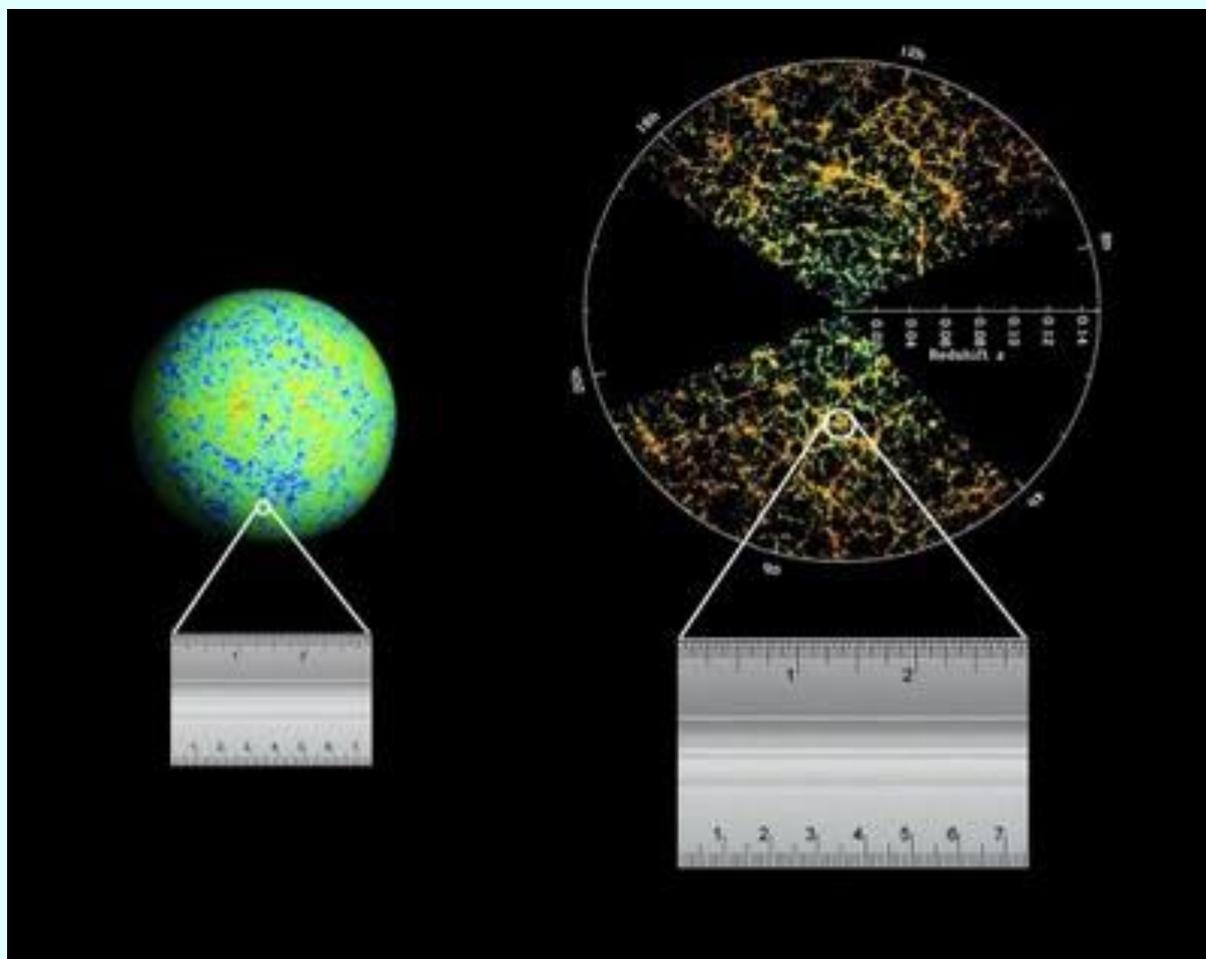


Eisenstein et al 2005

# La mesure des oscillations baryoniques sert de règle pour l'évolution de l'expansion de l'Univers

Mesure de milliards de galaxies  
Avec leurs vitesses (redshifts)

Calcul du spectre de puissance

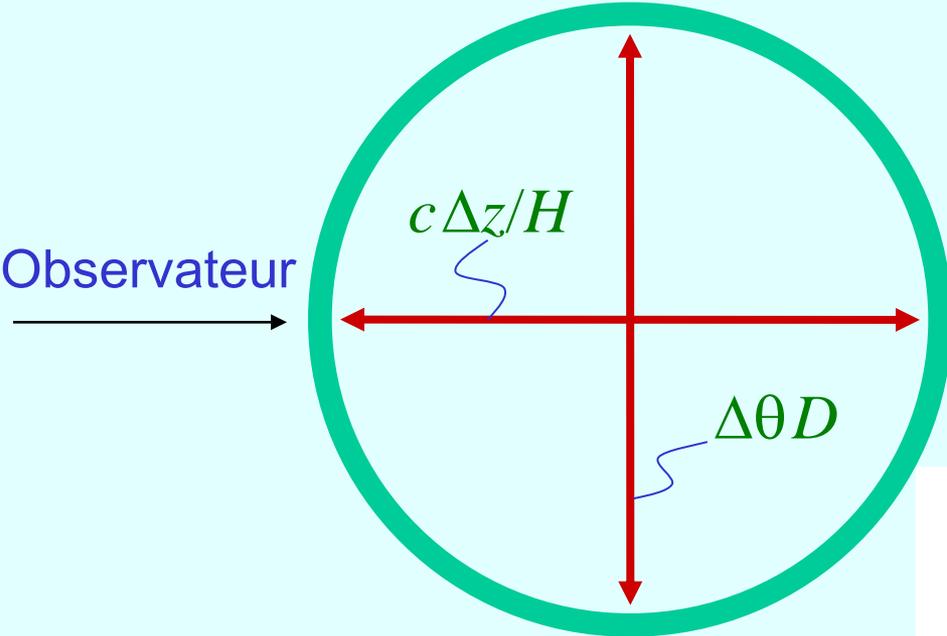


# Oscillations baryoniques: règles standard

Alcock & Paczynski (1979)  
Test de la constante cosmologique

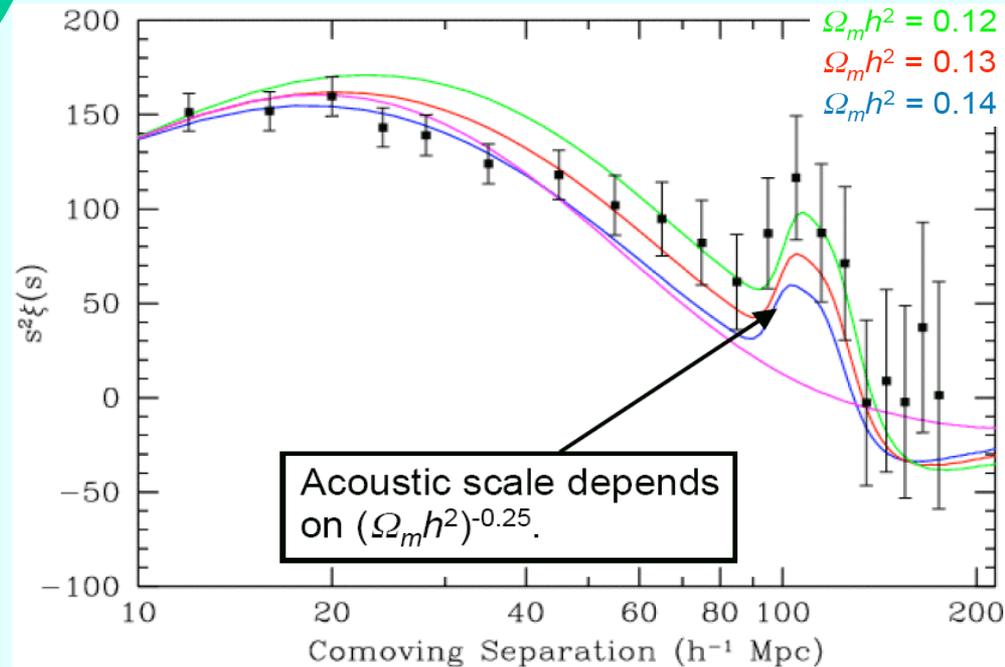
Peut tester le biais  $b$   
Galaxies/matière noire

Eisenstein et al. (2005)  
50 000 galaxies SDSS



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

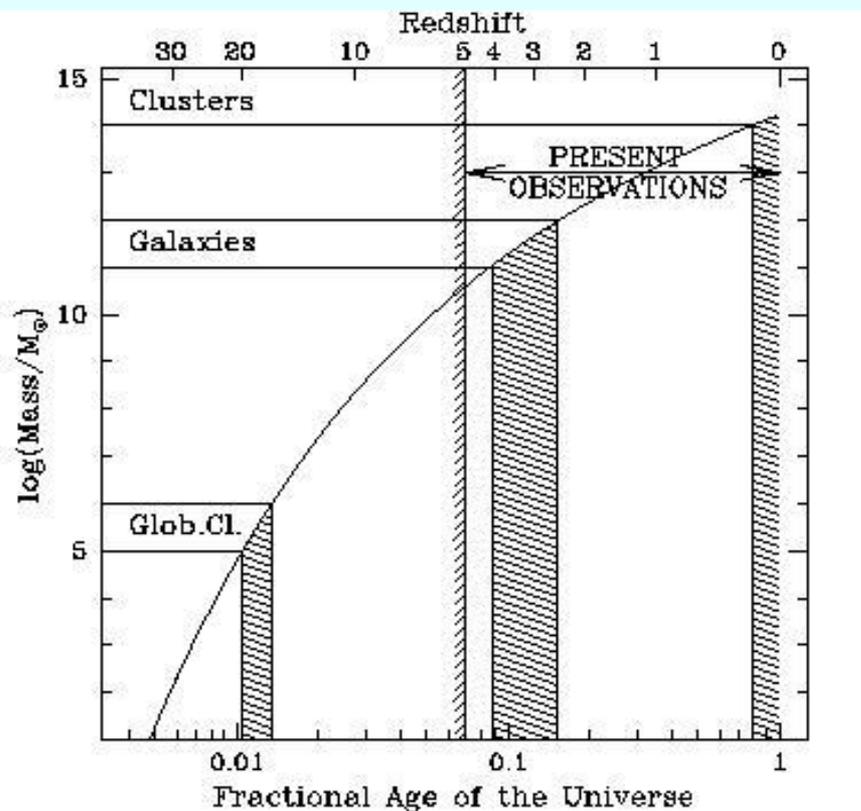
→ Possibilité de déterminer  $H(z)$



# Formation hiérarchique

Dans le modèle le plus adapté aujourd'hui aux observations

CDM (cold dark matter), les premières structures à se former sont les plus petites, puis par fusion se forment les plus grandes (bottom-up)



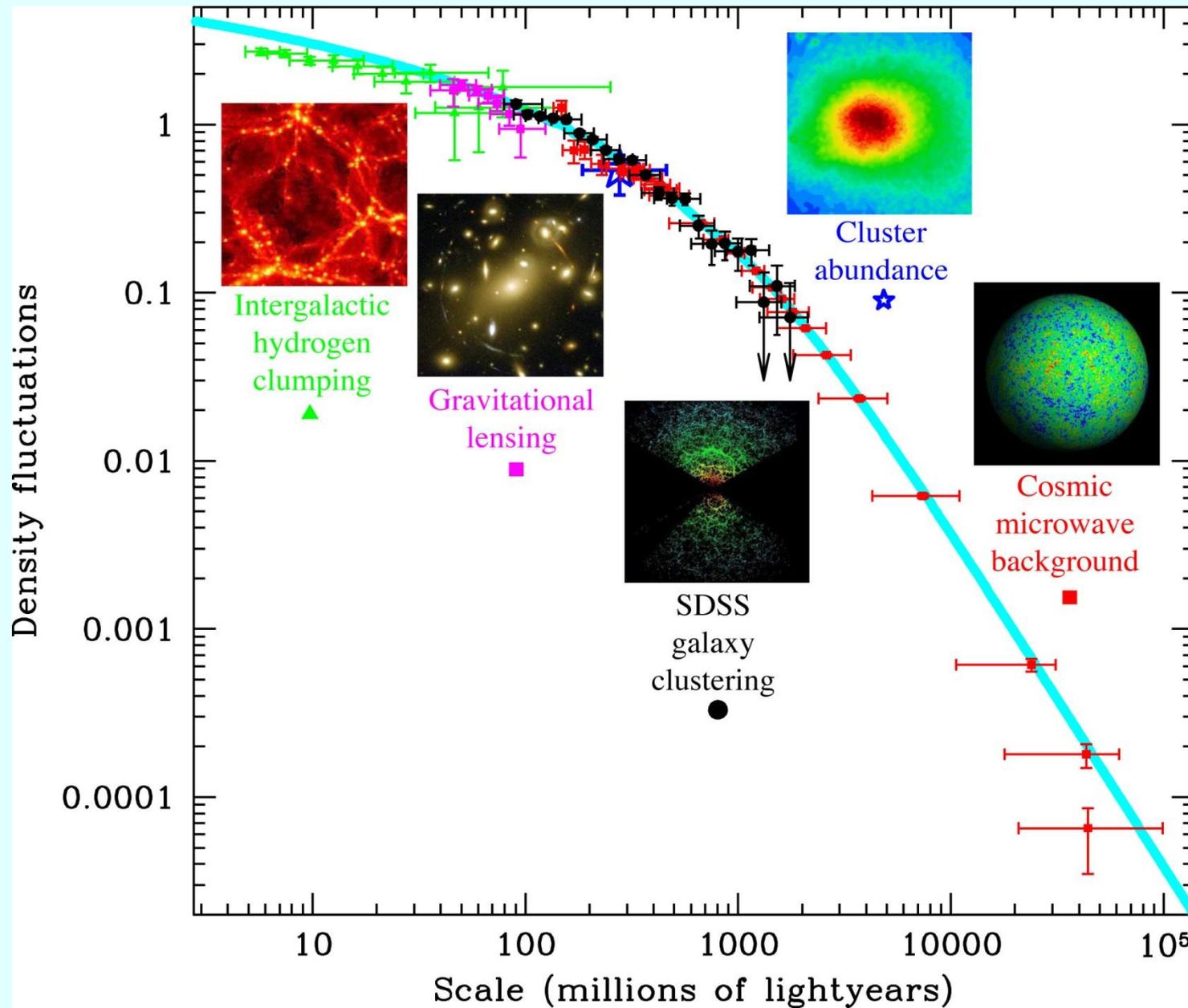
$|\delta k|^2 = P(k) \sim k^n$ , avec  $n=0.91$   
 aux grandes échelles  
 $k^{-3}$  aux petites échelles  
 tilt quand  $\rho_r \sim \rho_m$   
 à l'échelle de l'horizon

$$\delta M/M \sim M^{-1/2 - n/6}$$

quand  $n > -3$ , formation  
 Hiérarchique ( $\delta M/M \downarrow$ )

Abel & Haiman 00

# Fluctuations de densité



Tegmark  
et al 2004

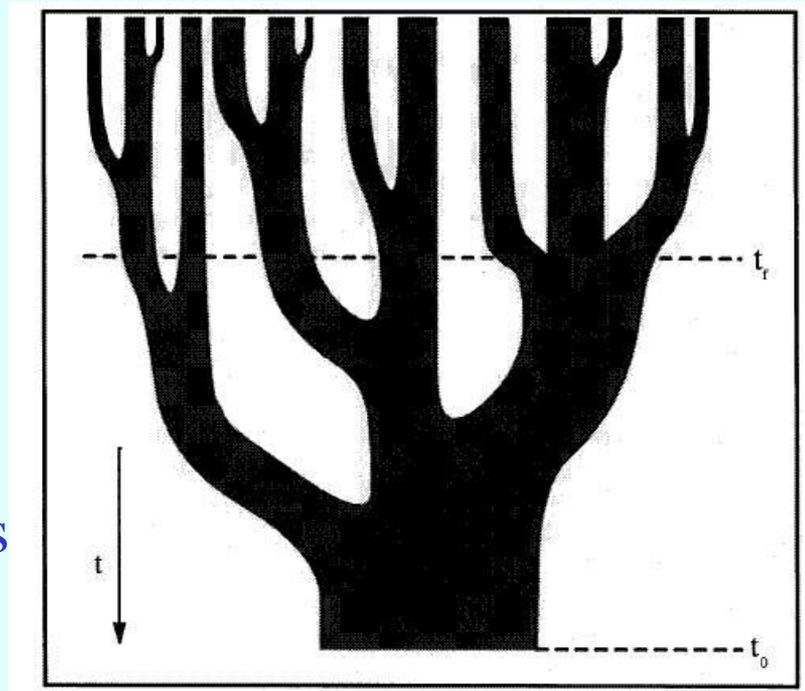
# Formation hiérarchique des galaxies

Les plus petites structures se forment en premier, de la taille de galaxies naines ou amas globulaires

Par **fusion successive et accrétion** les systèmes de plus en plus massifs se forment

Ils sont de moins en moins denses

$$M \propto R^2 \quad \text{et} \quad \rho \propto 1/R$$



# Fractales et Structure de l'Univers

Les galaxies ne sont pas distribuées de façon homogène  
mais suivent une **hiérarchie**

Les galaxies se rassemblent en groupes, puis en **amas** de galaxies  
eux-mêmes inclus dans des **superamas** (Charlier 1908, 1922,  
Shapley 1934, Abell 1958).

En 1970, de Vaucouleurs met en évidence une loi universelle

$$\text{Densité} \propto \text{taille}^{-\alpha} \quad \text{avec } \alpha = 1.7$$

Benoît Mandelbrot en 1975: nom de « fractal »

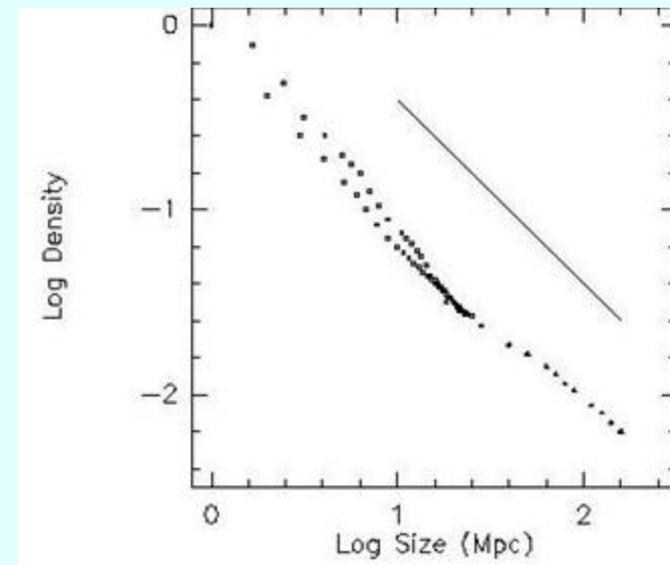
S'applique à l'Univers

Densité autour d'un point occupé

$$\Gamma(r) \propto r^{-\gamma}$$

Pente  $\gamma = -1$ , correspondant à  $D = 2$

$$M(r) \sim r^2$$

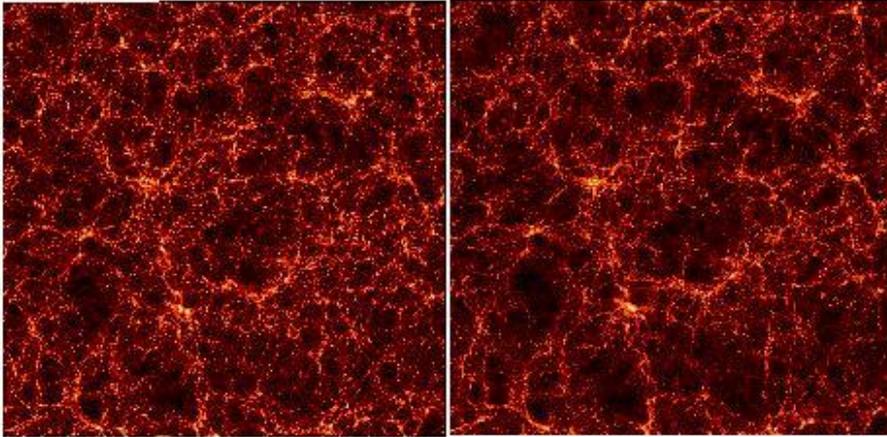


# Simulations numériques

$z=0$

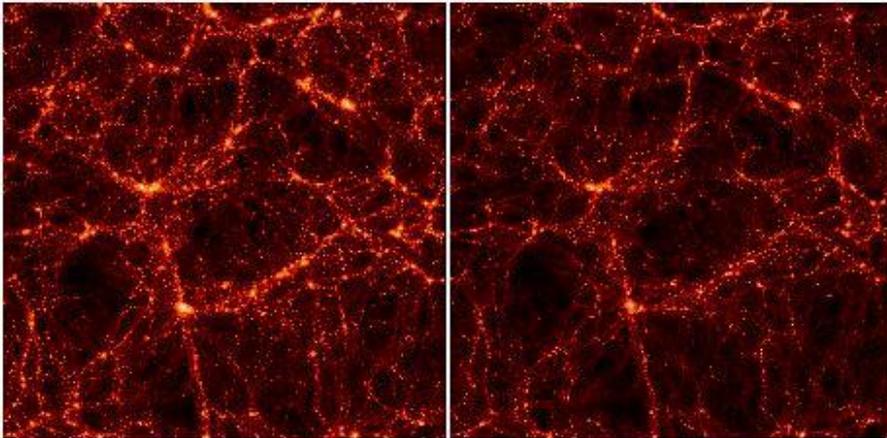
SCDM

$\tau$ CDM



$\Lambda$ CDM

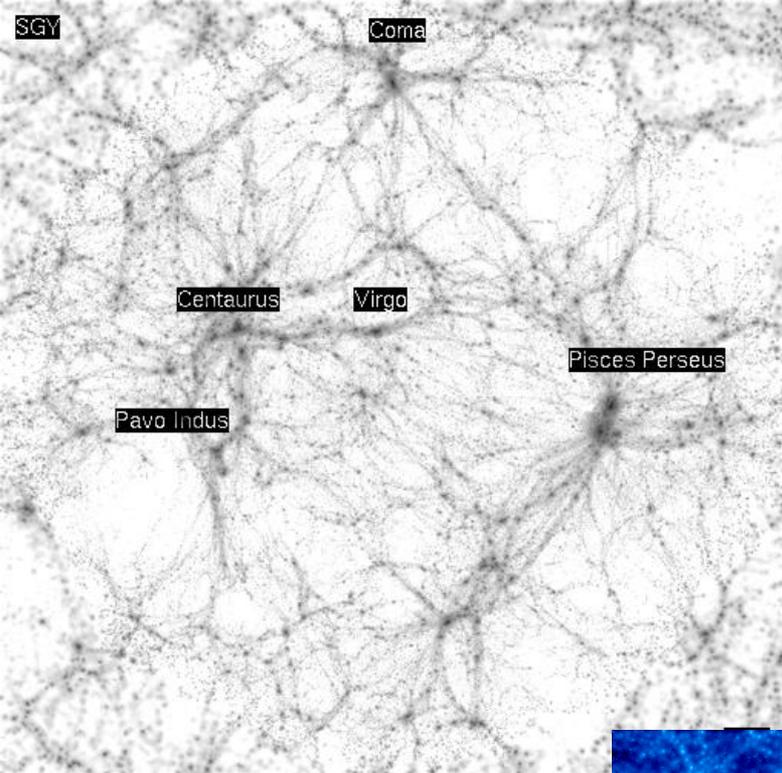
$\Omega$ CDM



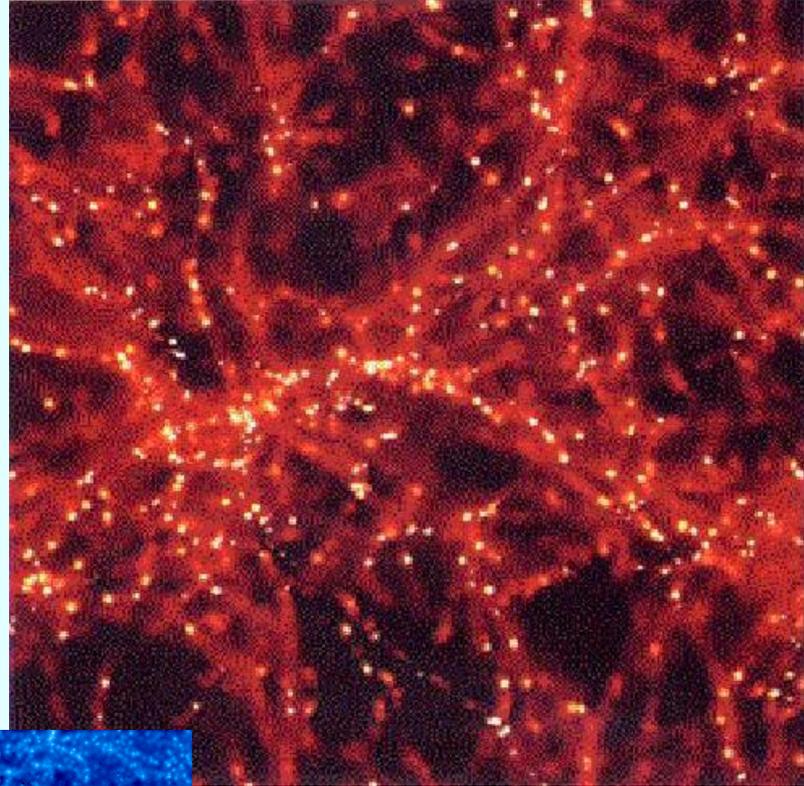
Avec des fluctuations postulées au départ, gaussiennes, le régime **non-linéaire** peut-être suivi

Surtout pour le gaz et les baryons (CDM facilement prise en compte par des modèles semi-analytiques, à la Press-Schechter)



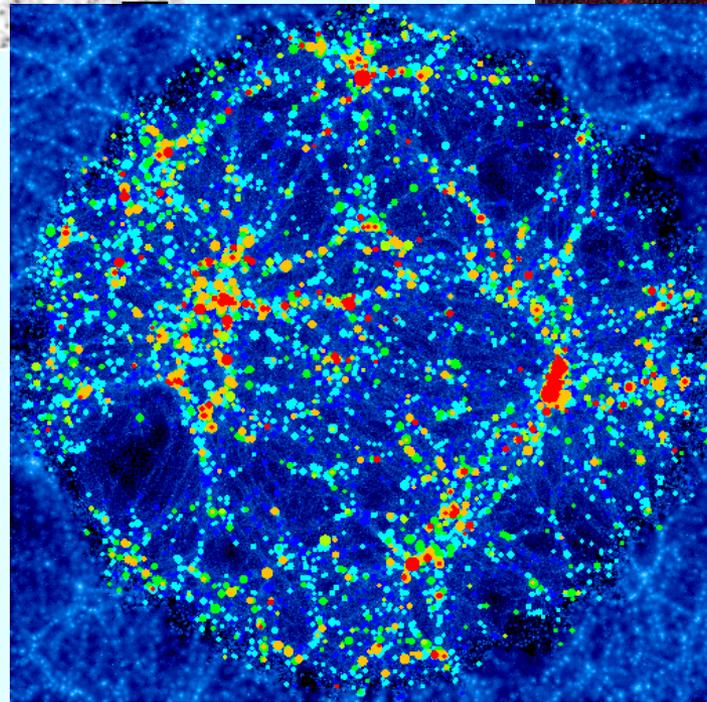


Gaz



Matière noire CDM

Simulations  
(Kauffmann et al)



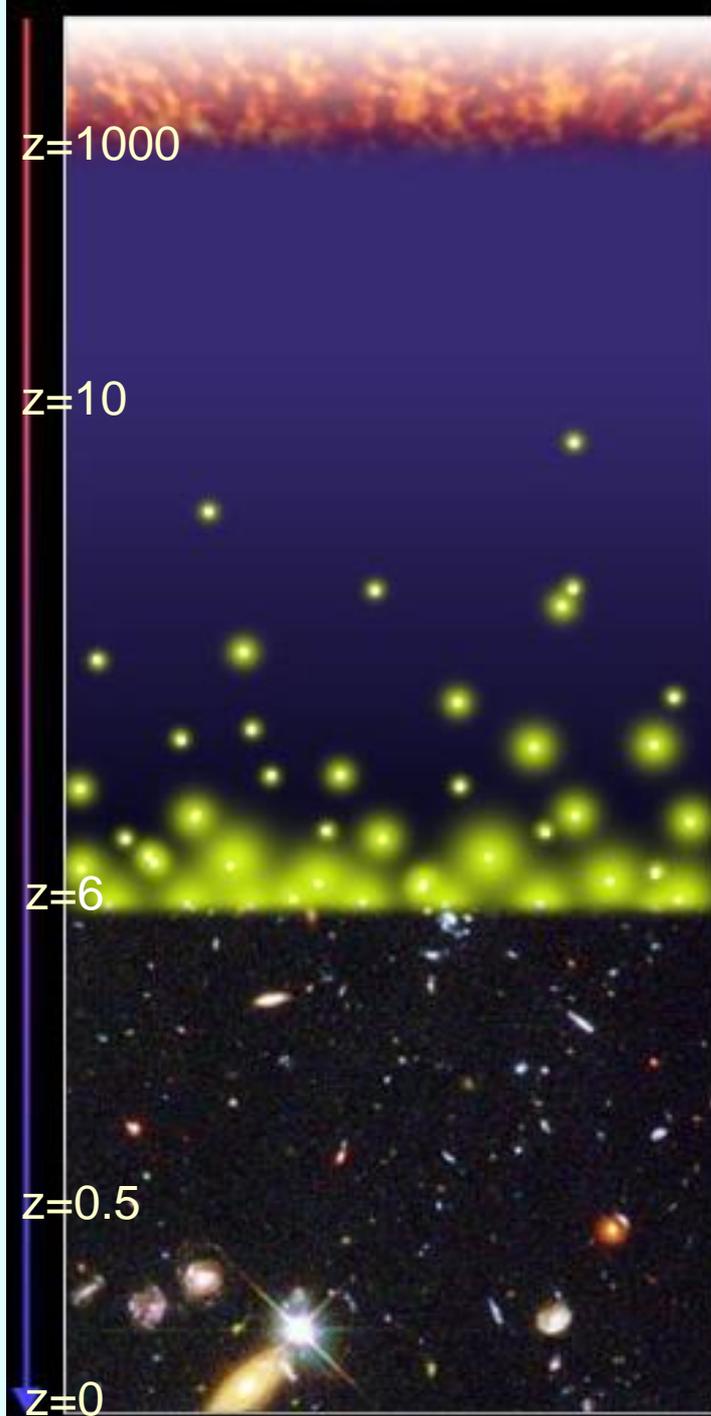
Galaxies

# Depuis le Big-Bang

Les observations remontent le temps

jusqu'à **95%** de l'âge de l'Univers

→ jusqu'à notre horizon



Big-Bang

Recombinaison  $3 \cdot 10^5$ an

Age Sombre

1<sup>ères</sup> étoiles, QSO  $0.5 \cdot 10^9$ an

Aube Cosmique

Fin de l'âge sombre

Fin de la reionisation  $10^9$ an

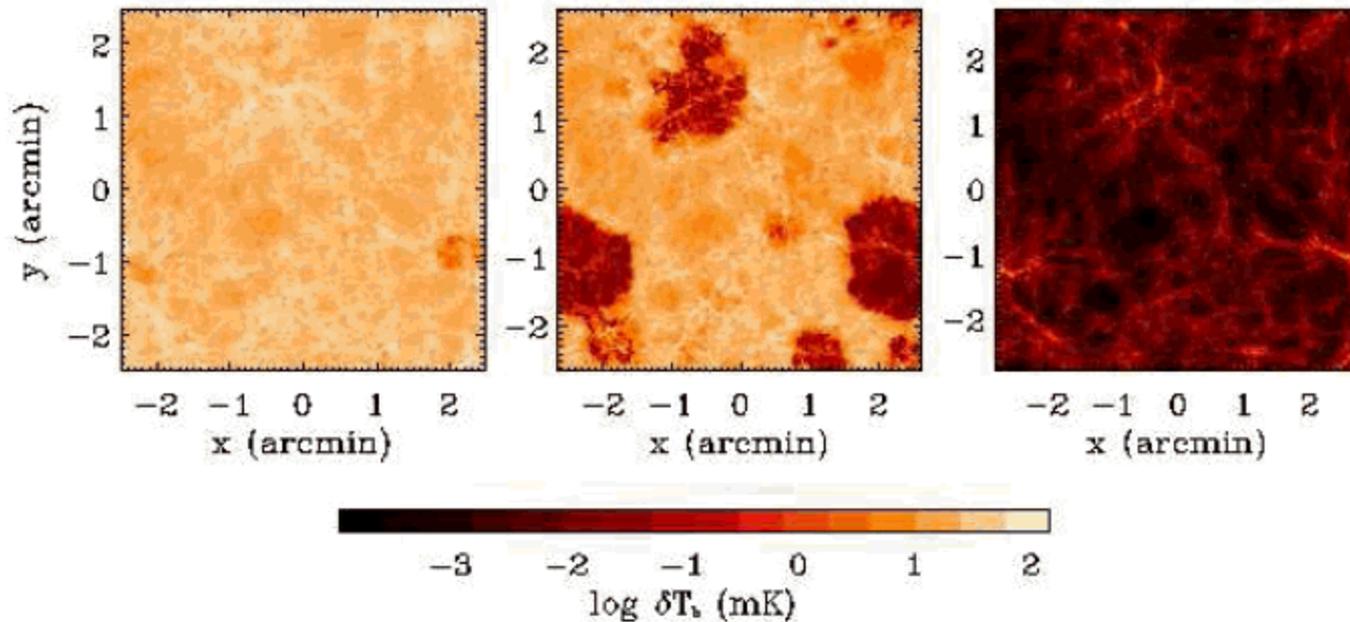
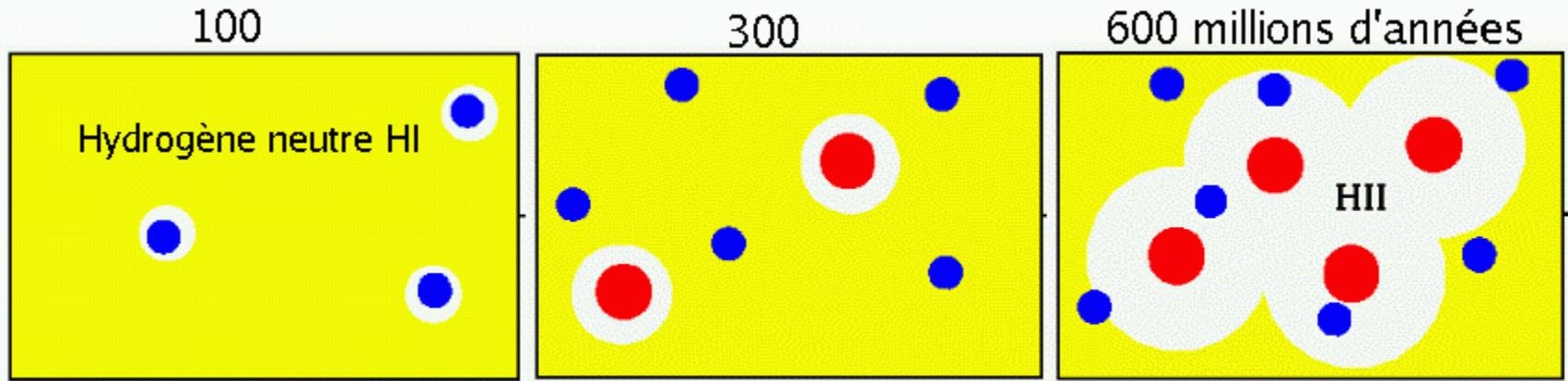
Evolution des Galaxies

Système solaire  $9 \cdot 10^9$ an

46

Aujourd'hui  $13.7 \cdot 10^9$ an

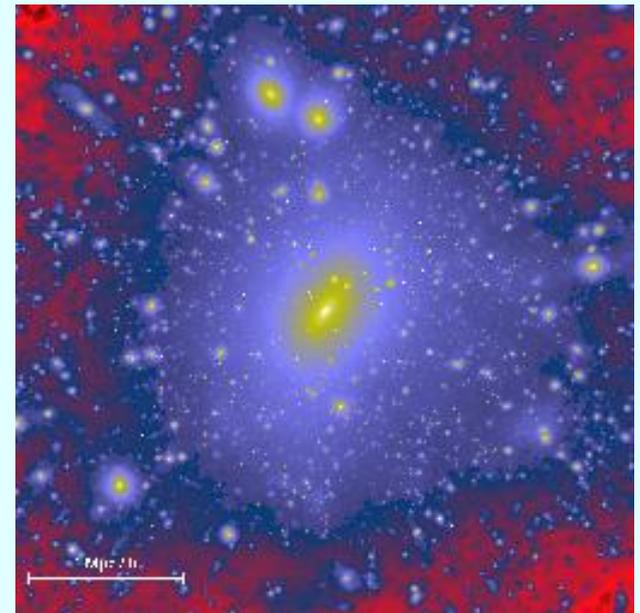
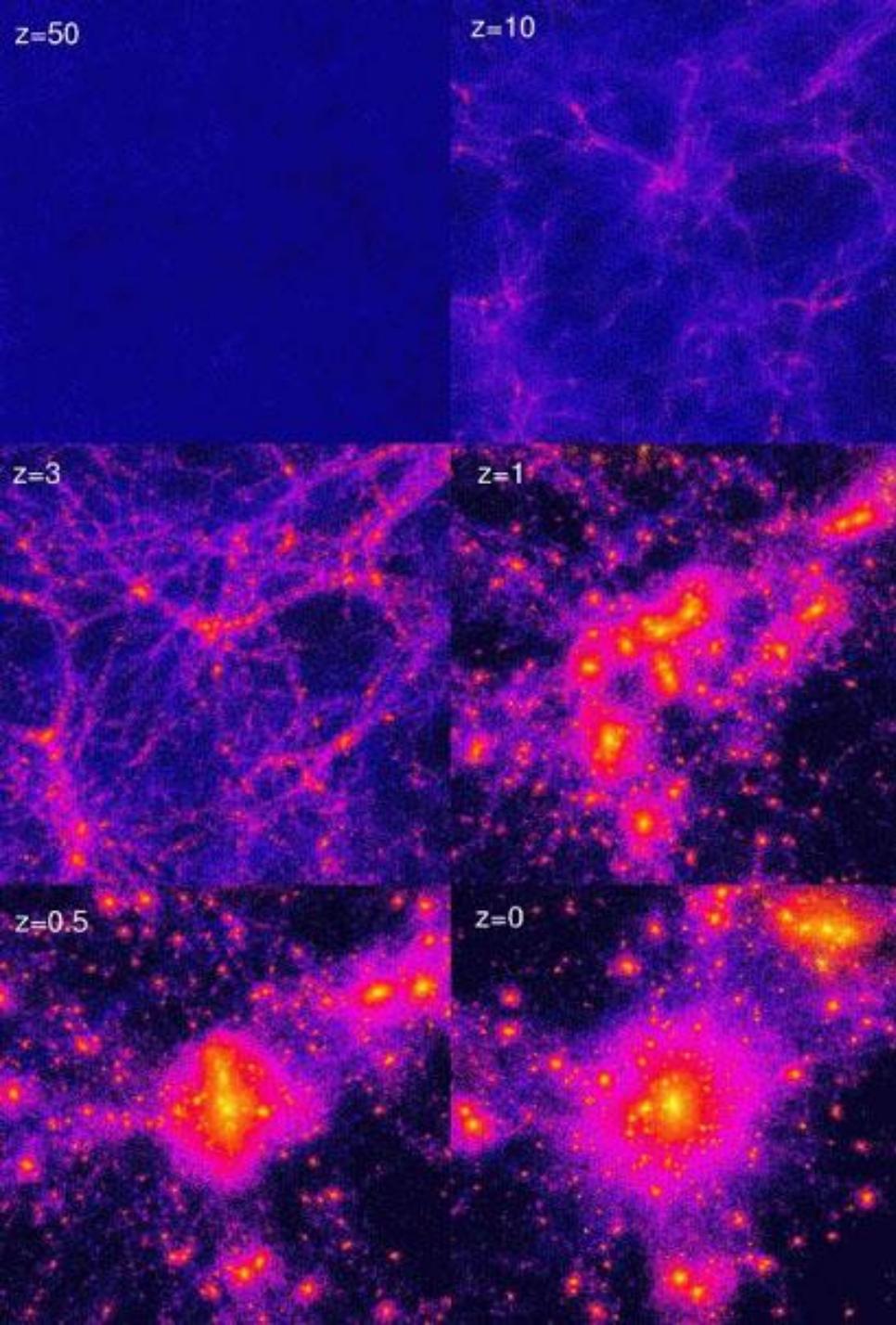
# Réionisation



Percolation progressive des zones ionisées

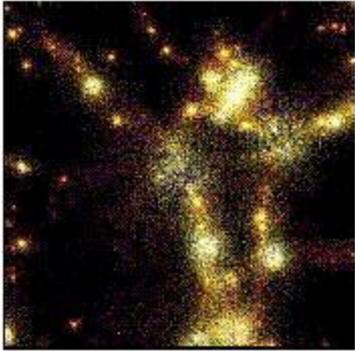
# Trop de petites structures

Aujourd'hui, les simulations CDM prédisent 100 fois trop de petits halos autour des galaxies comme la Voie Lactée



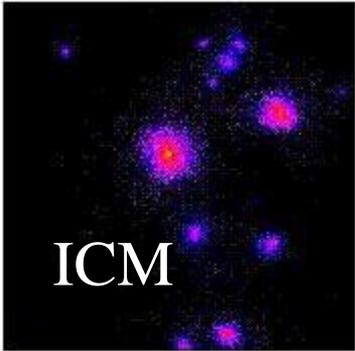
# Où sont les baryons?

WHIM



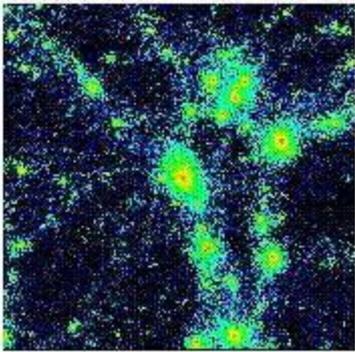
→ 6% dans les galaxies; 3% dans les amas (gas X)

→ ~20% forêt Lyman-alpha des filaments cosmiques  
*Shull et al 05, Lehner et al 06*



ICM

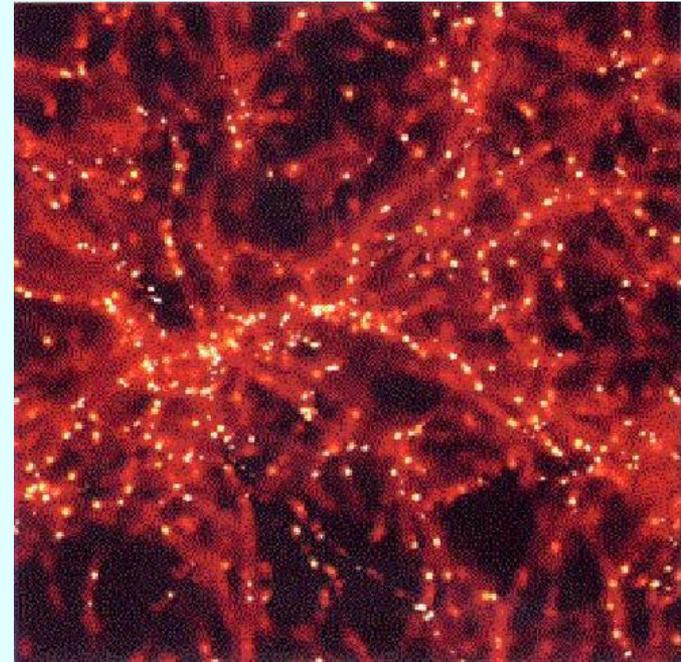
→ 5-10% dans le « Warm-Hot » WHIM  $10^5$ - $10^6$ K  
*Nicastro et al 05, Danforth et al 06*



DM

→ ~60% pas encore identifiés!

La majorité des baryons ne sont pas dans les galaxies



# Matière noire dans les amas de galaxies

Dans les amas, le gaz chaud domine la masse visible  
La plupart des baryons sont devenus visibles!

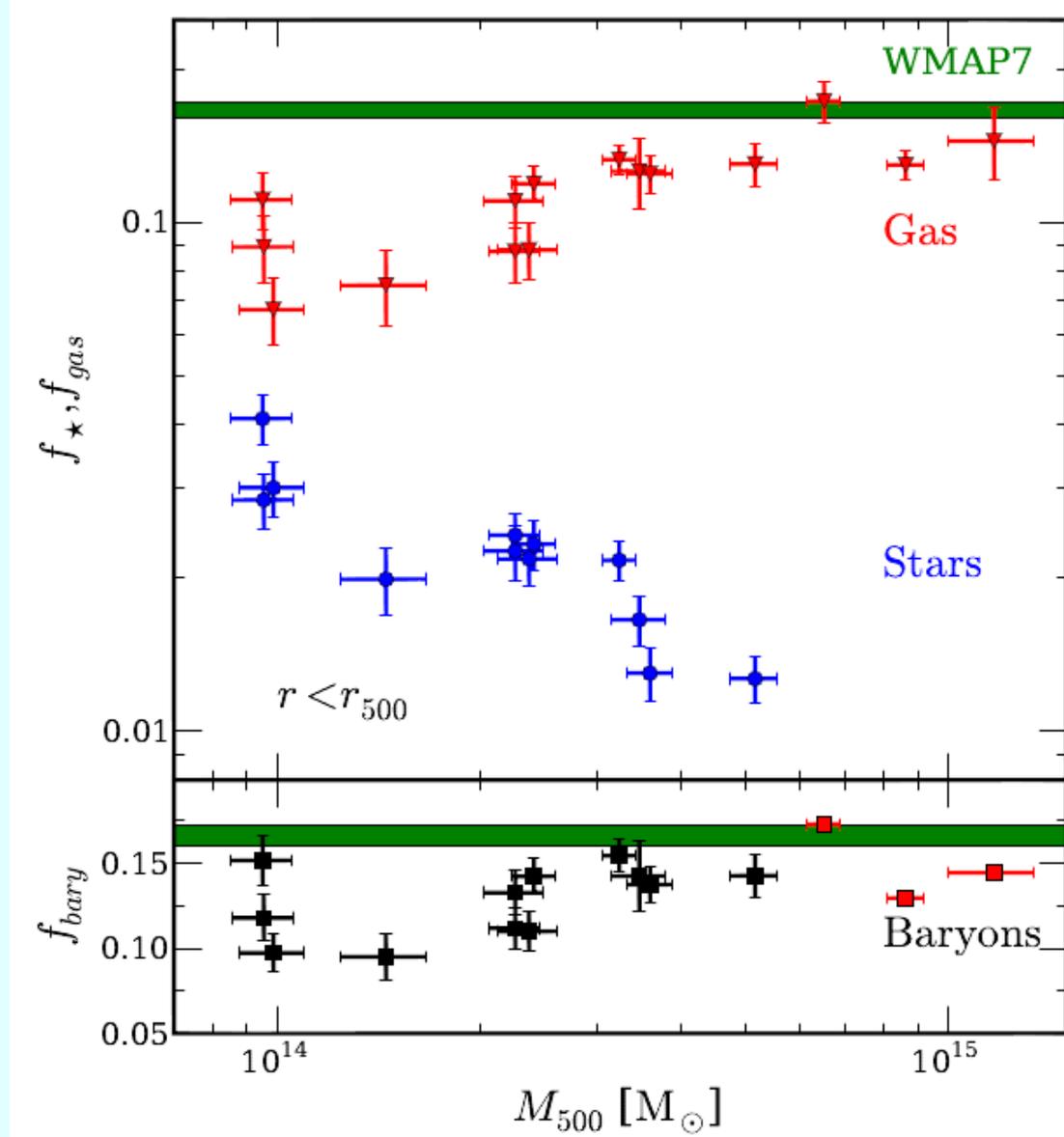
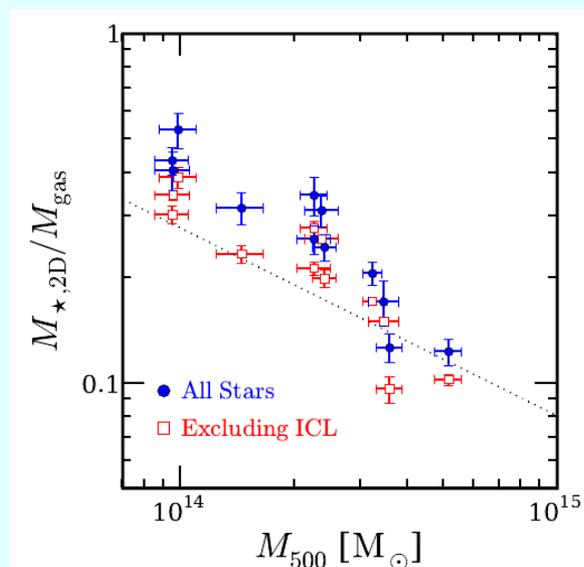
$$f_b = \Omega_b / \Omega_m \sim 0.15$$

La distribution radiale matière noire/visible est renversée  
*La masse devient de plus en plus visible avec le rayon*  
(David et al 95, Ettori & Fabian 99, Sadat & Blanchard 01)

La fraction de baryons varie de **60 à 90%**  $f_b$  selon les amas  
(Gonzalez et al 2013, Dvorkin et al 2014)

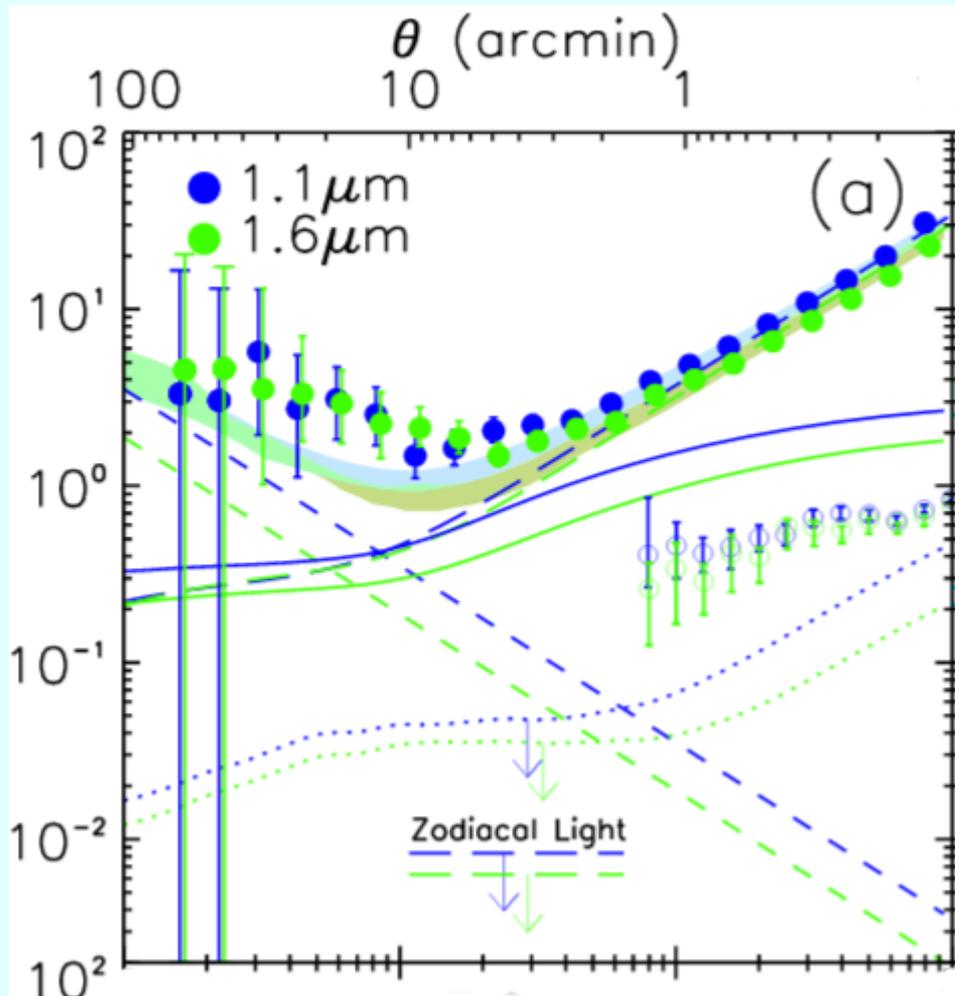
Distribution de la fraction de gaz chaud  $f_{\text{gas}}$ , d'étoiles  $f_*$ , et de baryons  $f_{\text{bary}}$  versus  $M_{500}$   
*(Gonzalez et al 2013)*

Les étoiles comprennent ICL  
 (intra-cluster light,  $\sim 10\%$ )



# Lumière des étoiles vagabondes

Pourrait être comparable aux étoiles des galaxies?



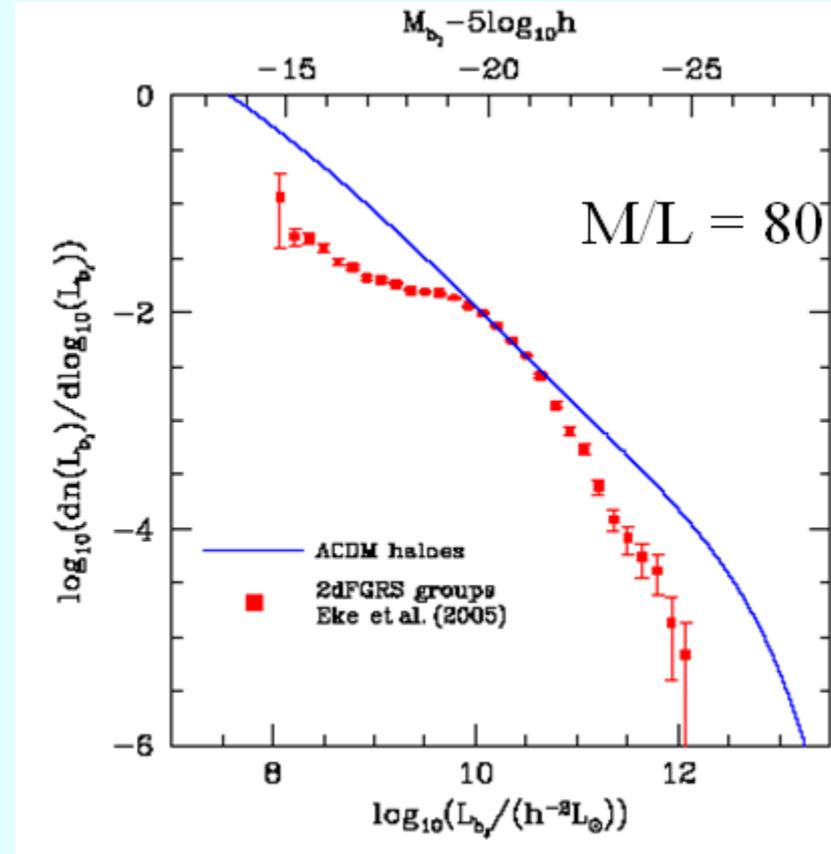
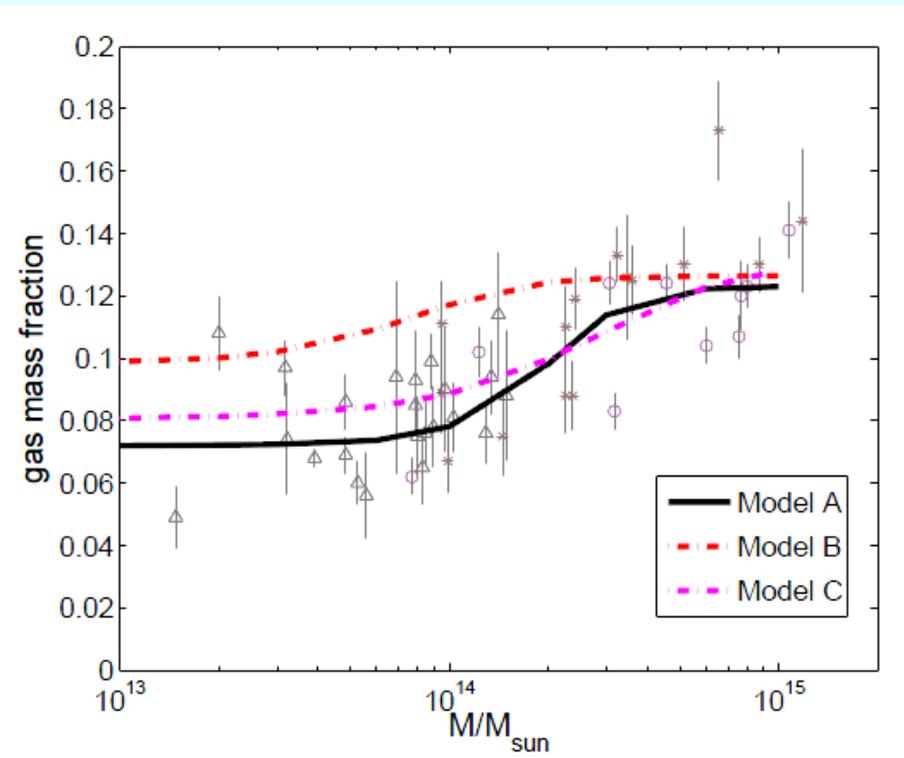
--- Low-z Galaxies  
— IHL Intra-halo light  
- - - DGL Diffuse Galaxy light  
..... Reionization  
█ Total

CIBER: manip ballon  
pour détecter le rayonnement  
de fond en infrarouge  
CIB

Zemcov et al 2014

# Modèles versus observations

Modèles semi-analytiques  
Difficulté à reproduire les observations



*Baugh 2006, Eke et al 2006*

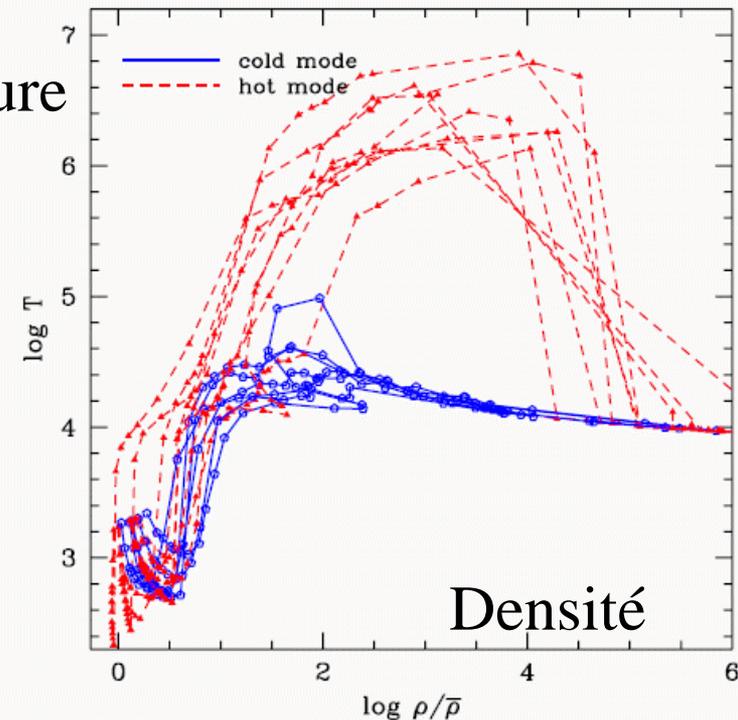
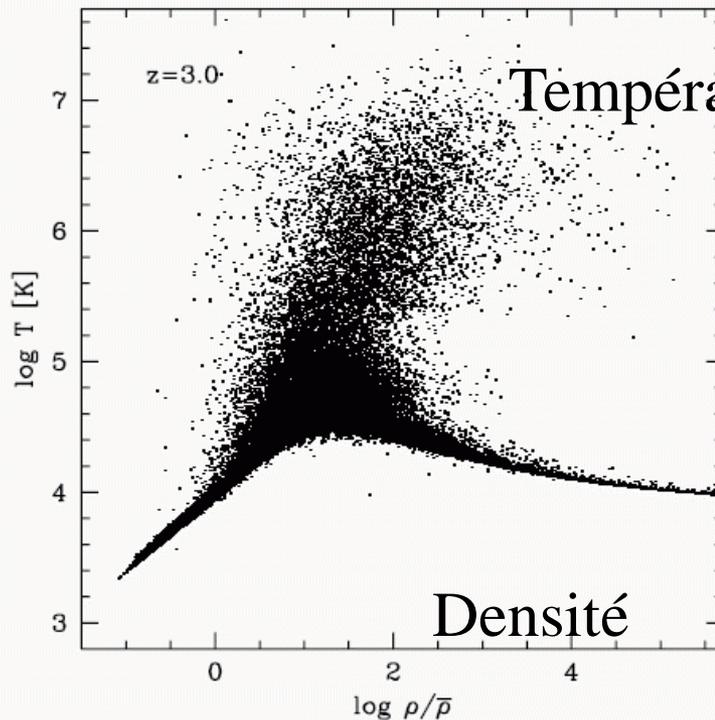
# Accrétion de gaz froid dans les galaxies

Scénario conventionnel: chauffage par chocs à la température Viriel ( $10^6$  K pour une galaxie de type MW)

Les simulations avec plus de résolution: 2 modes d'accrétion

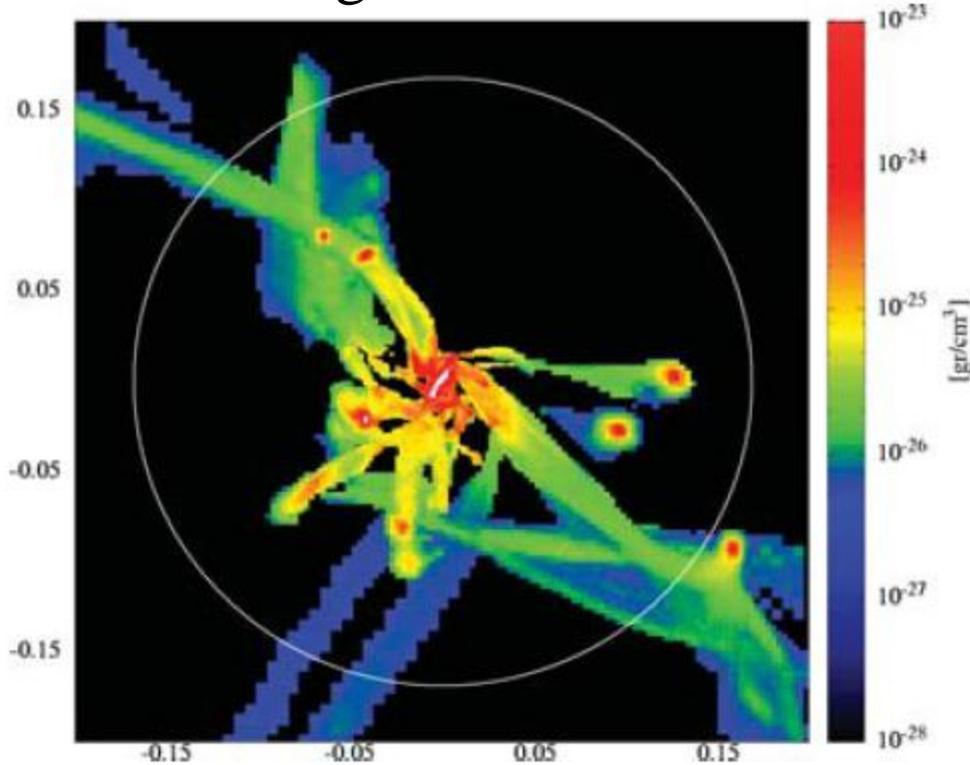
**Le gaz froid** coule le long des filaments, la fraction de gaz froid est plus grande dans les petits halos ( $M_{\text{CDM}} < 3 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ )

Keres et al  
2005

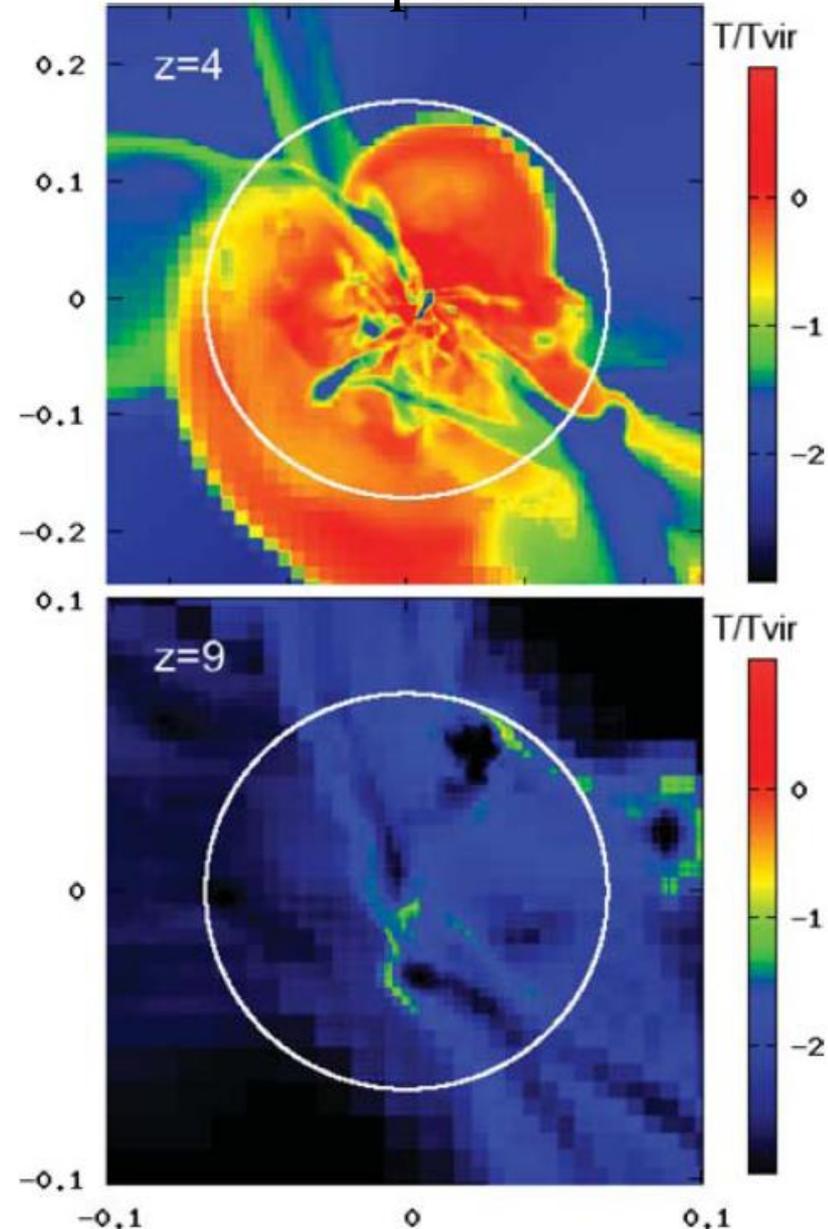


# Accrétion froide dans les filaments

Densité du gaz froid



Température

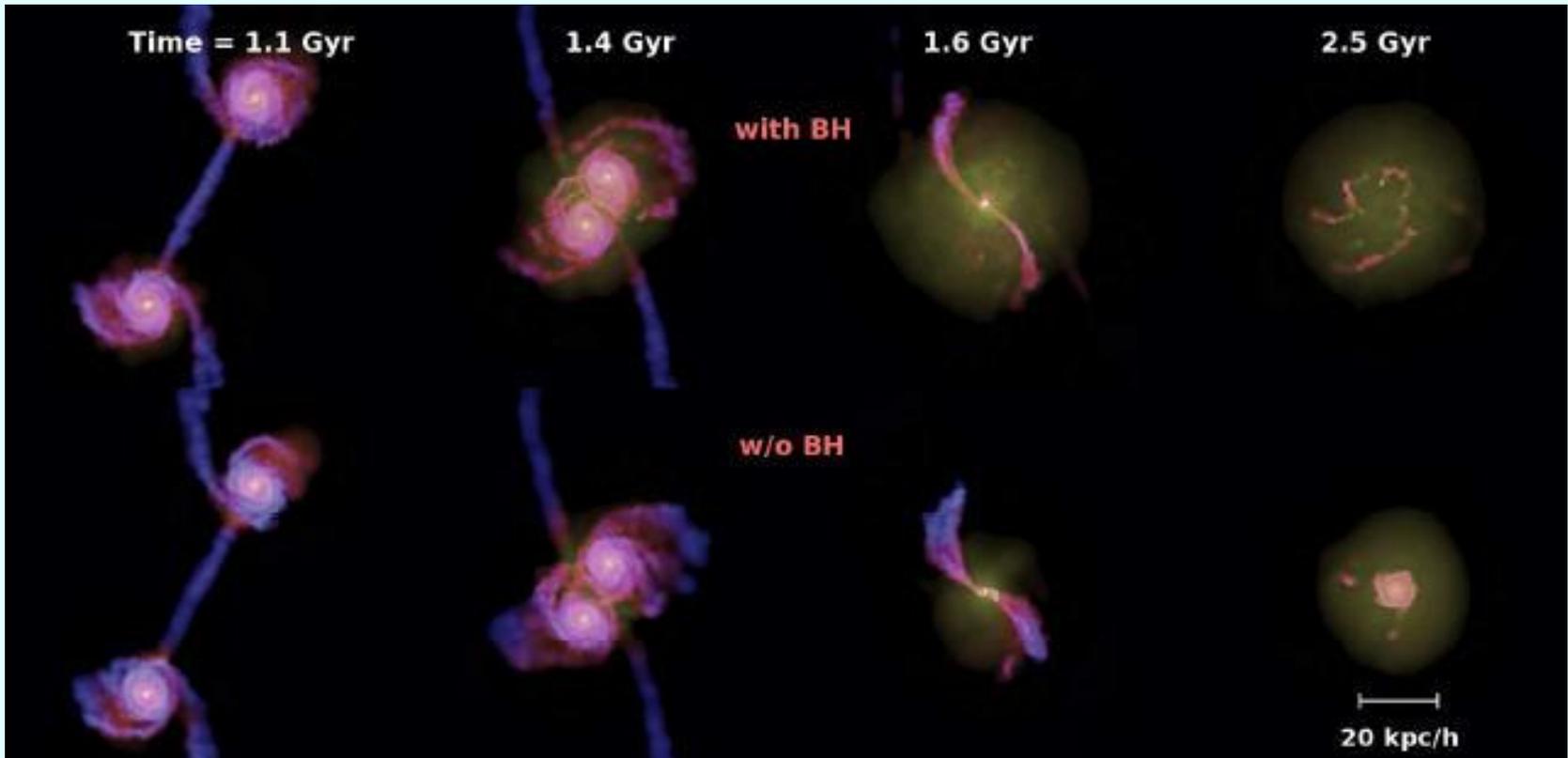
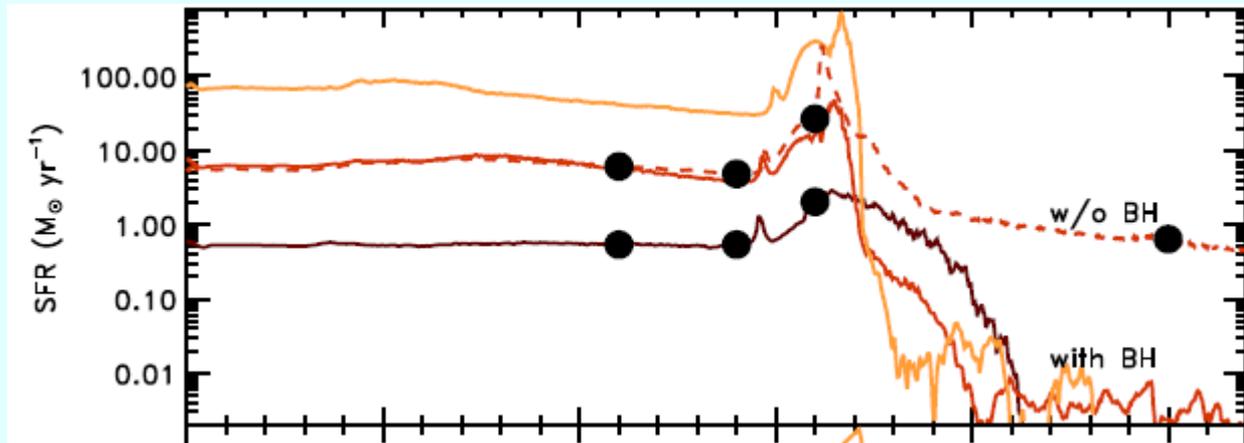


Arrêt de la formation d'étoiles  
Origine de la bimodalité?

*Dekel & Birnboim (2006)*

# Feedback: Starburst ou AGN

Di Matteo et al 2005



# Conclusion: MN et formation des galaxies

L'expansion limite les effets de la gravitation, les structures sont lentes à s'effondrer

Nécessité de **matière noire**, n'interagissant pas avec les photons

→ Formation de galaxies noires

Lors de la recombinaison,  $z \sim 1000$ ,  $T \sim 3000\text{K}$ , les atomes tombent dans les galaxies noires pour former des étoiles

Fluctuations de densité: créées naturellement **par l'inflation**

→ Formation **hiérarchique** des structures (index de la loi de puissance)

→ Prédiction d'une multitude de petits halos, non observés

Processus de feedback (rétro-action) dus à la formation d'étoiles et AGN et notamment l'accrétion de gaz froid