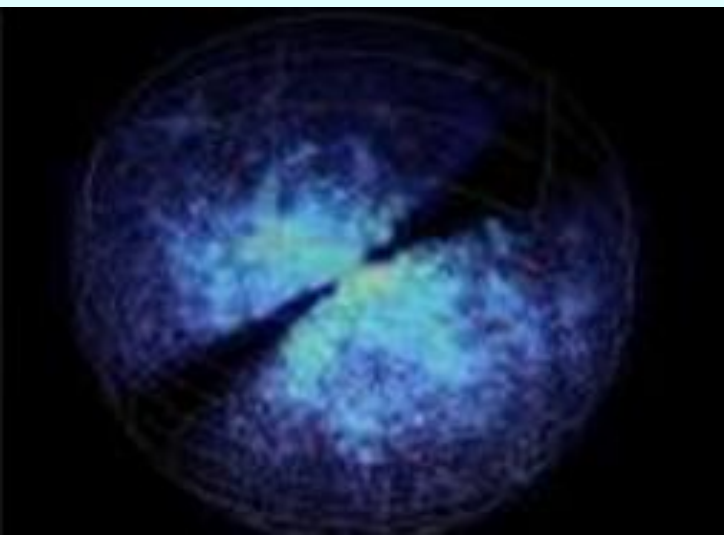




COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

La matière noire dans la formation des galaxies

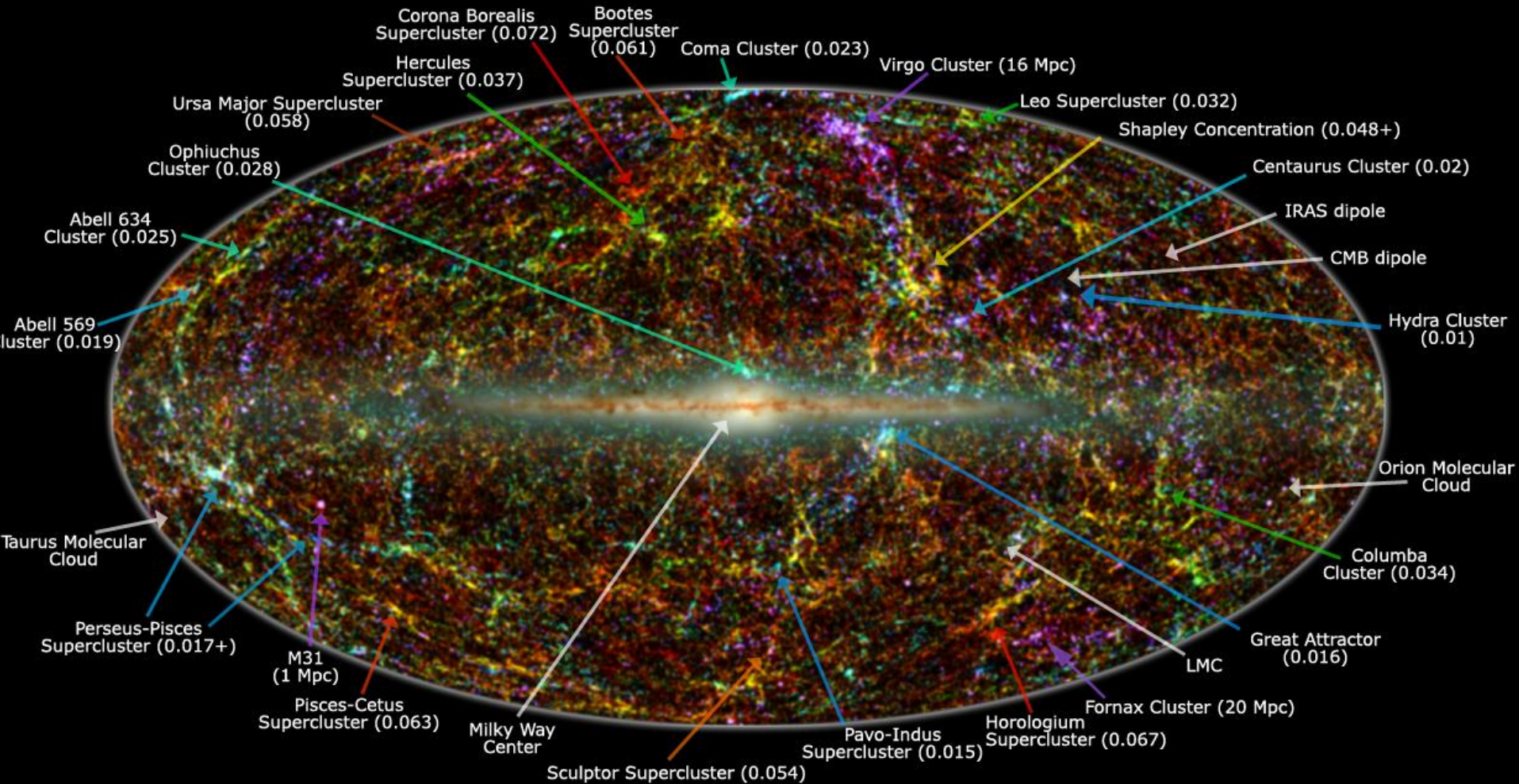


Françoise Combes



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

Structures à grande échelle dans l'Univers local

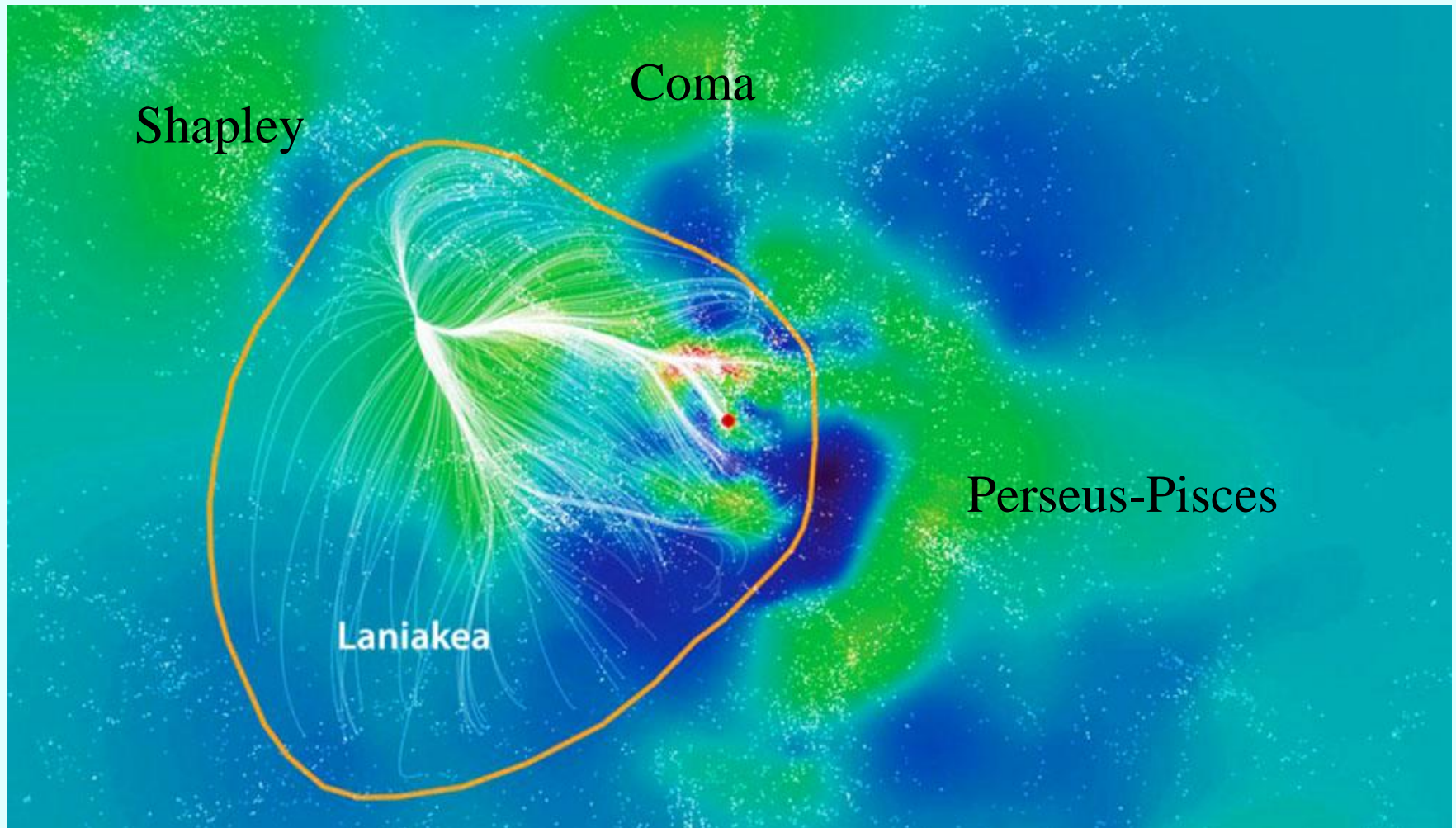


Legend: image shows 2MASS galaxies color coded by redshift (Jarrett 2004); familiar galaxy clusters/superclusters are labeled (numbers in parenthesis represent redshift).
Graphic created by T. Jarrett (IPAC/Caltech)

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, $10^{17}M_{\odot}$)

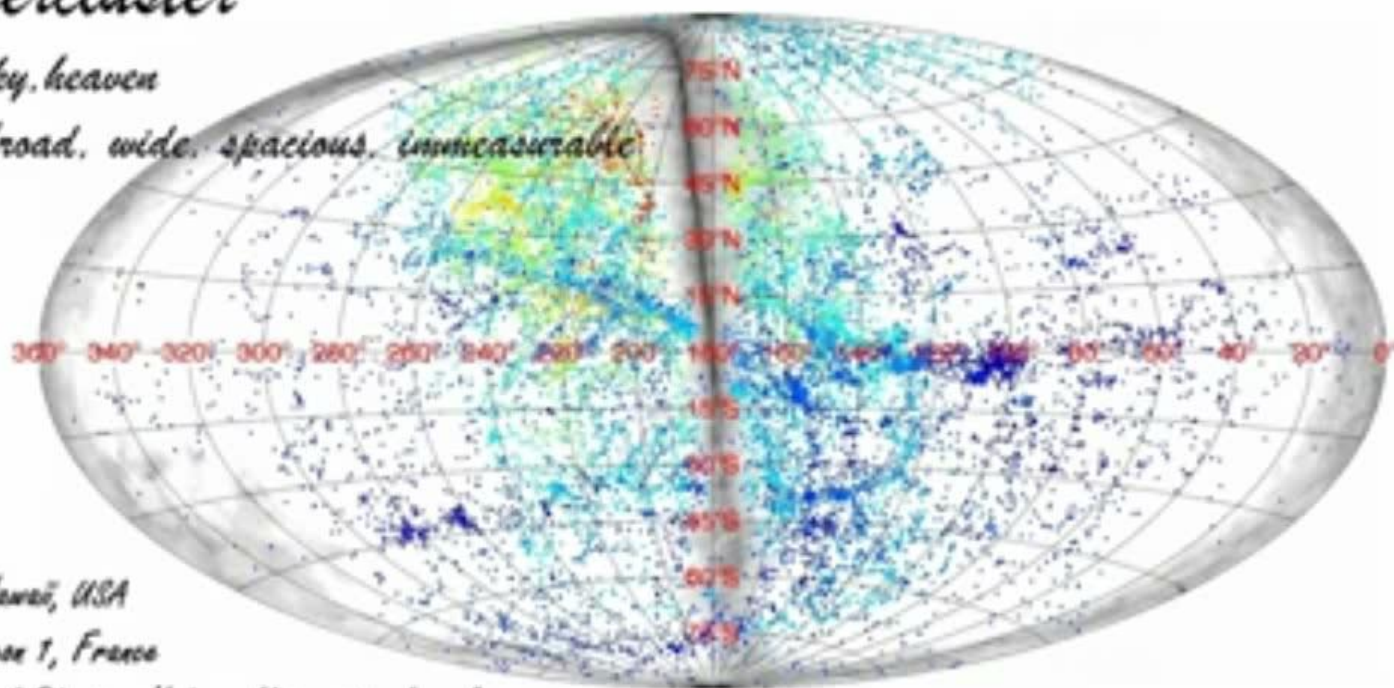


Tully et al 2014

Laniakea Supercluster

In Hawaiian: lani – sky, heaven

akea – broad, wide, spacious, immeasurable

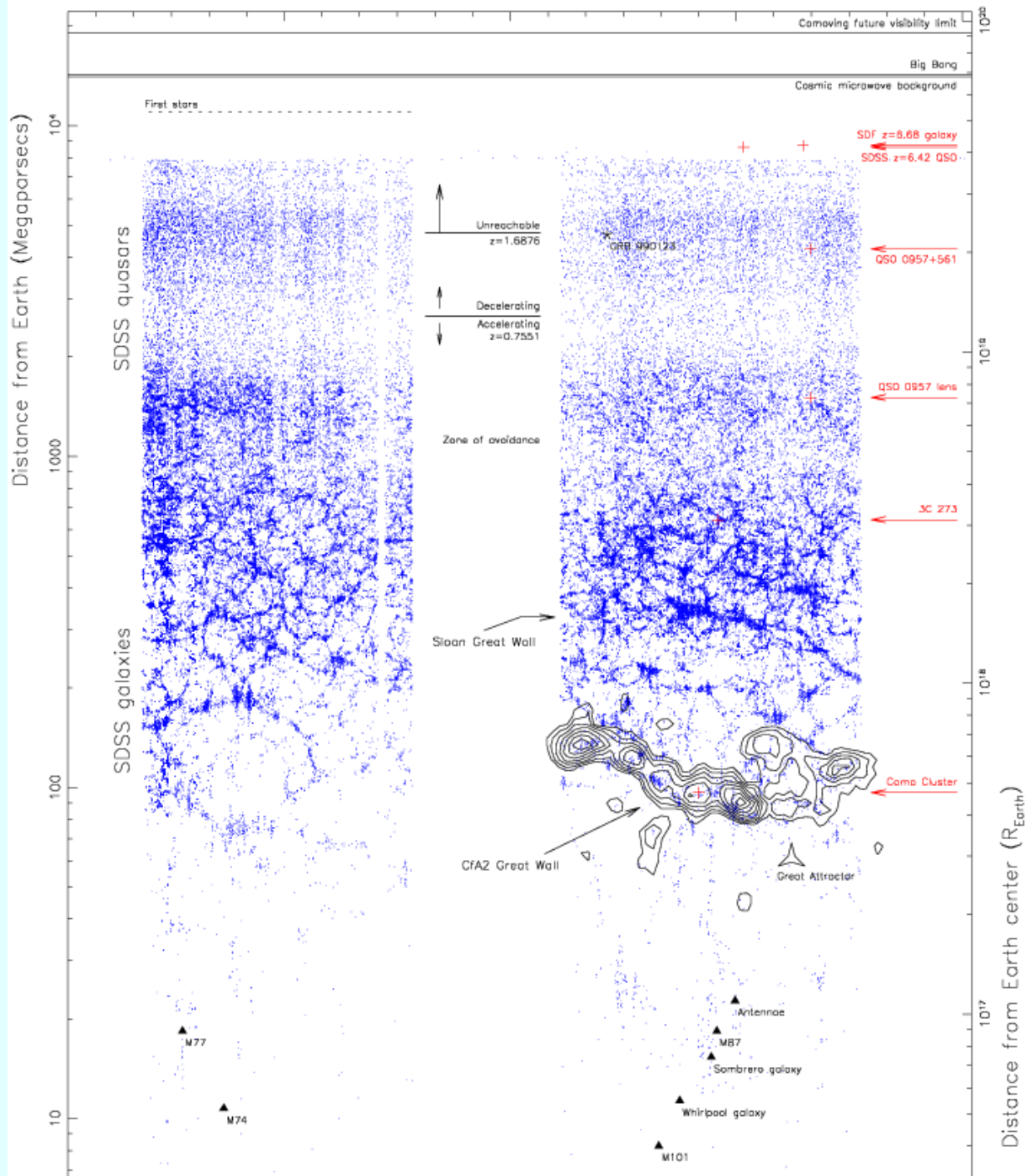


R. Brent Tully, University of Hawaii, USA

Hélène Courtais, 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



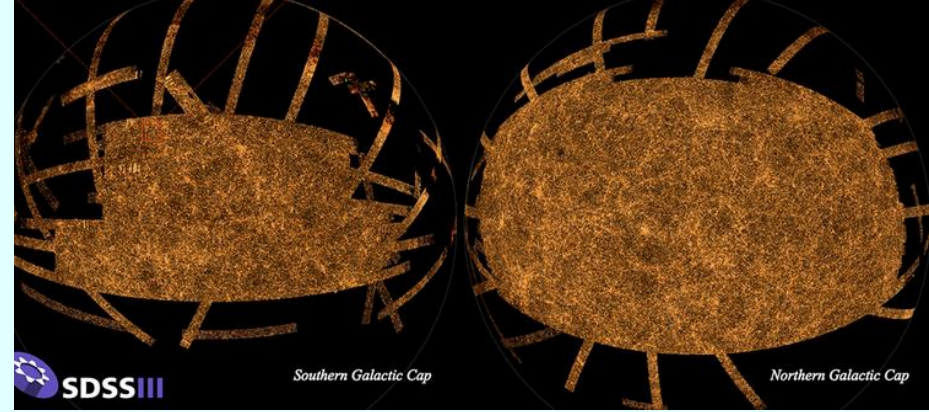
Gott et al (03)
 Carte Conforme
 Echelle
 Logarithmique

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..



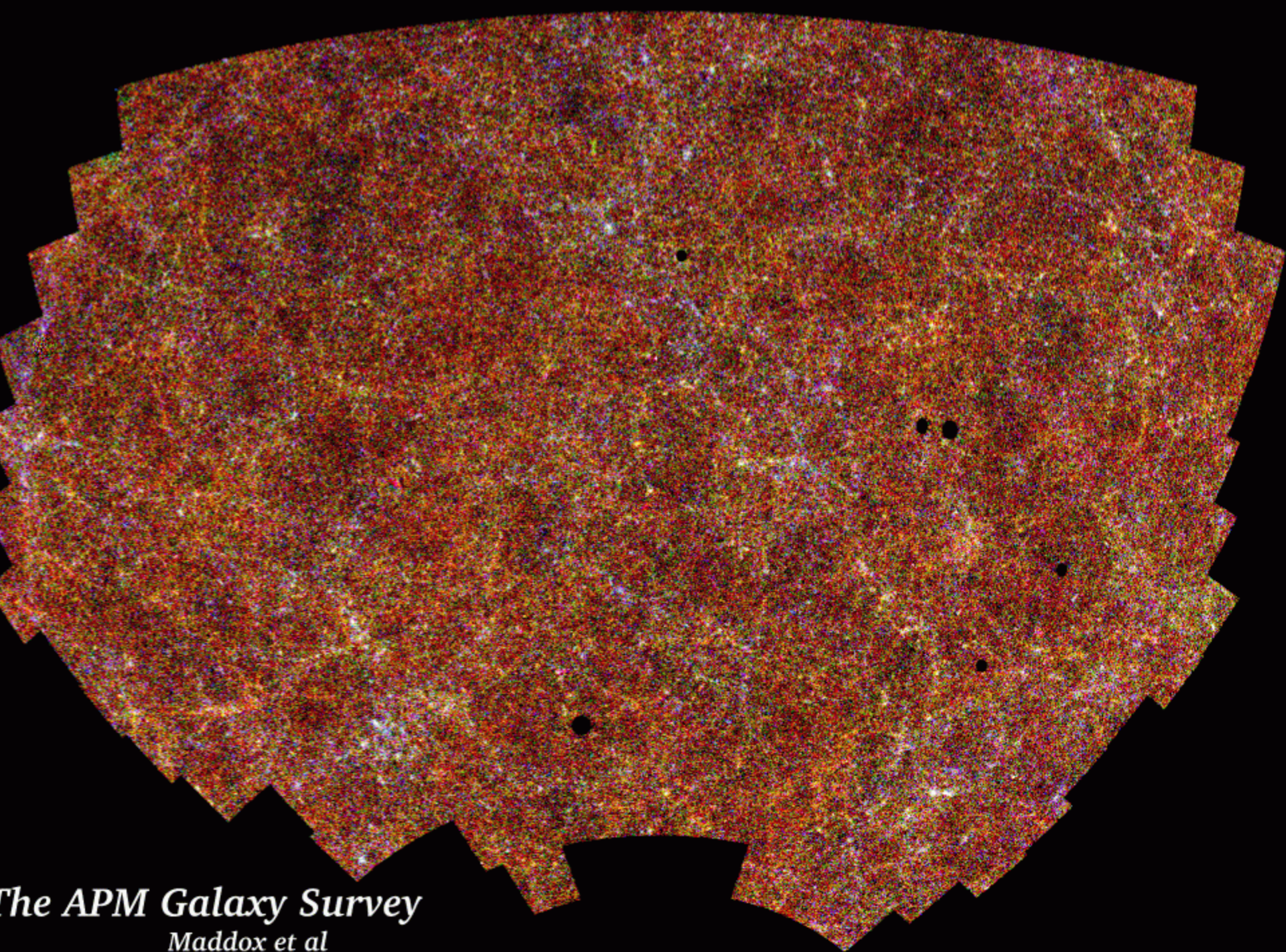
SDSS: Sloan Digital Sky Survey: 1 million de spectres de galaxies
images de 100 millions d'objets, 100 000 Quasars

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

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

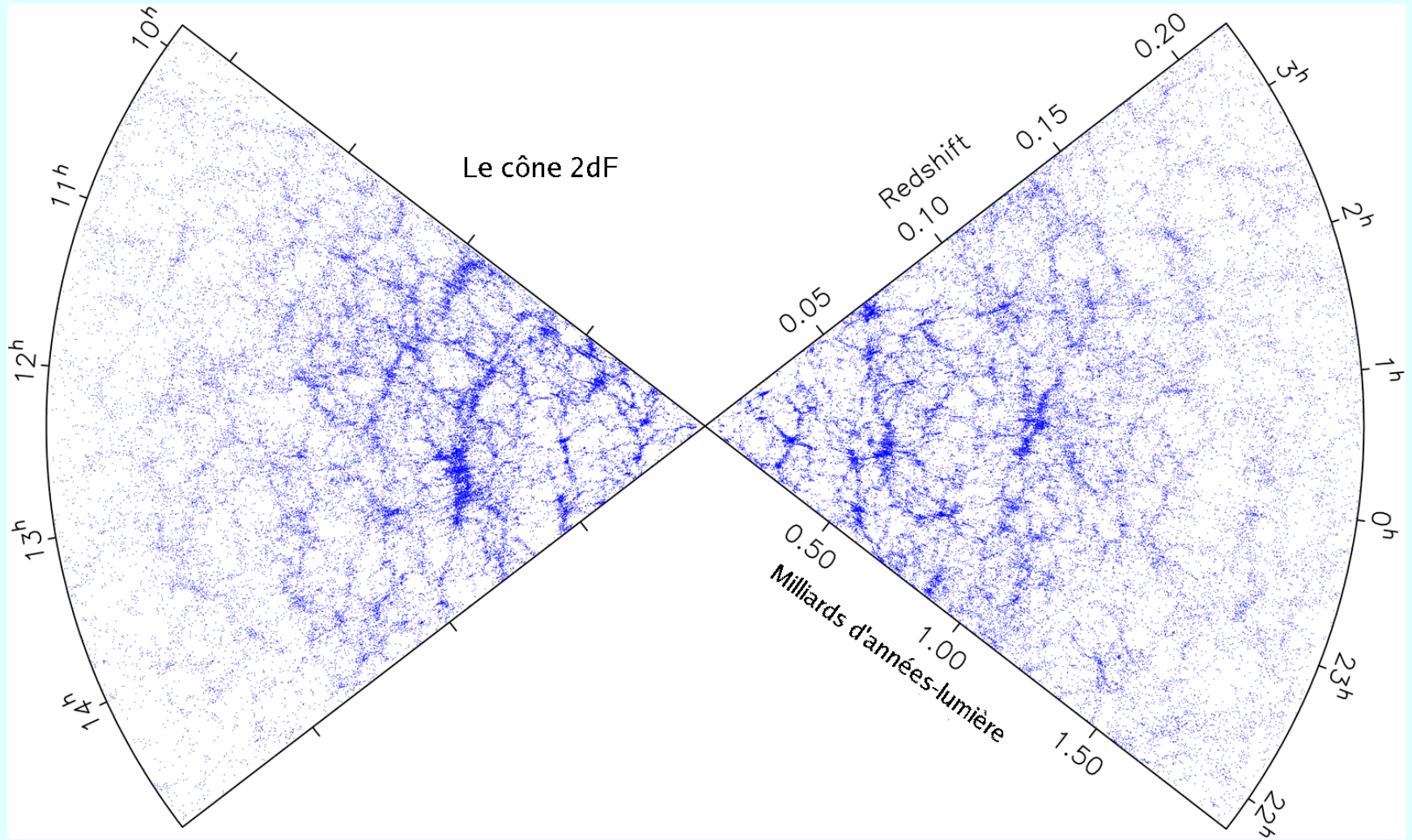
SEGUE (étoiles) SDSS-IV en 2014 plus profond, APOGEE (Voie lactée), eBOSS
Oscillations baryoniques, MANGA (galaxies proches), ...

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

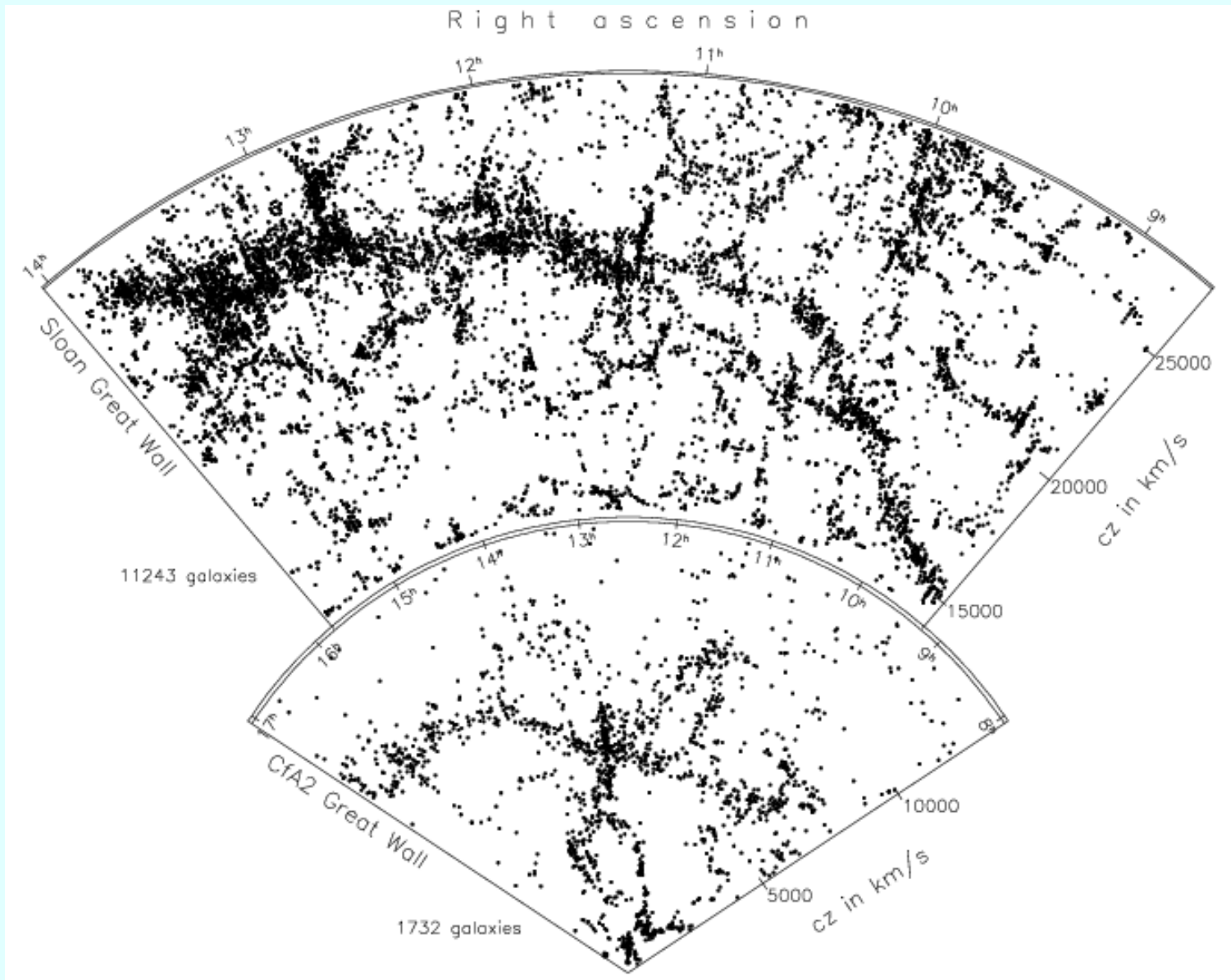


The APM Galaxy Survey
Maddox et al

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 $\mathbf{v} \leftrightarrow \mathbf{u}$

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

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

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

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 $t_{\text{exp}} = (G \langle \rho \rangle)^{-1/2}$

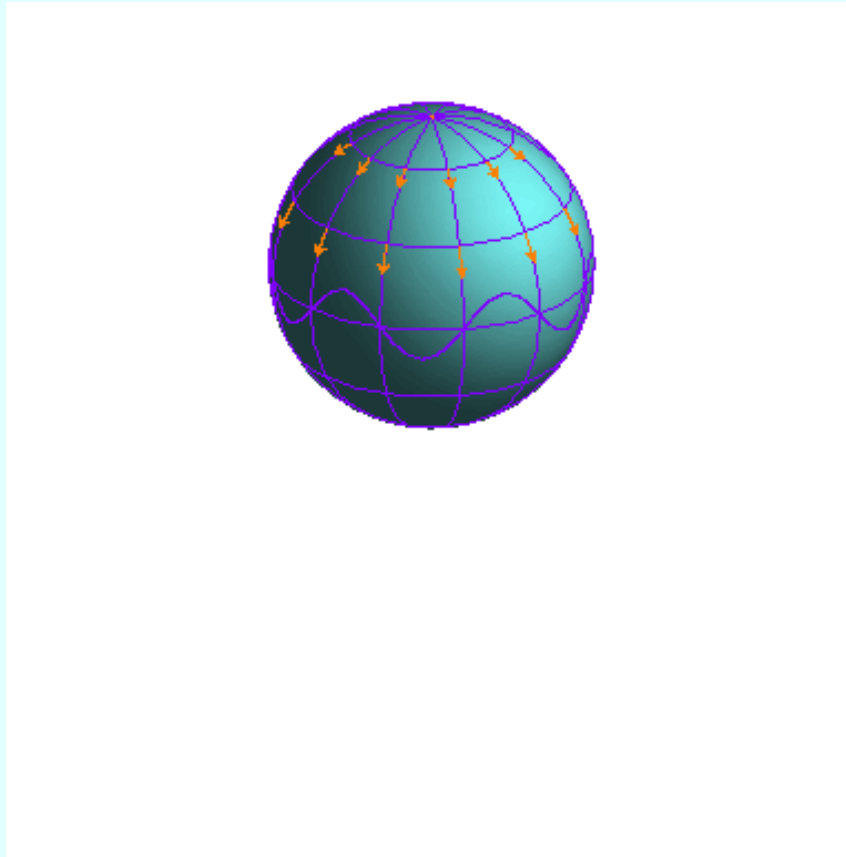
Les structures se développent comme le rayon caractéristique $\delta \sim R(t) \sim (1+z)^{-1}$

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}

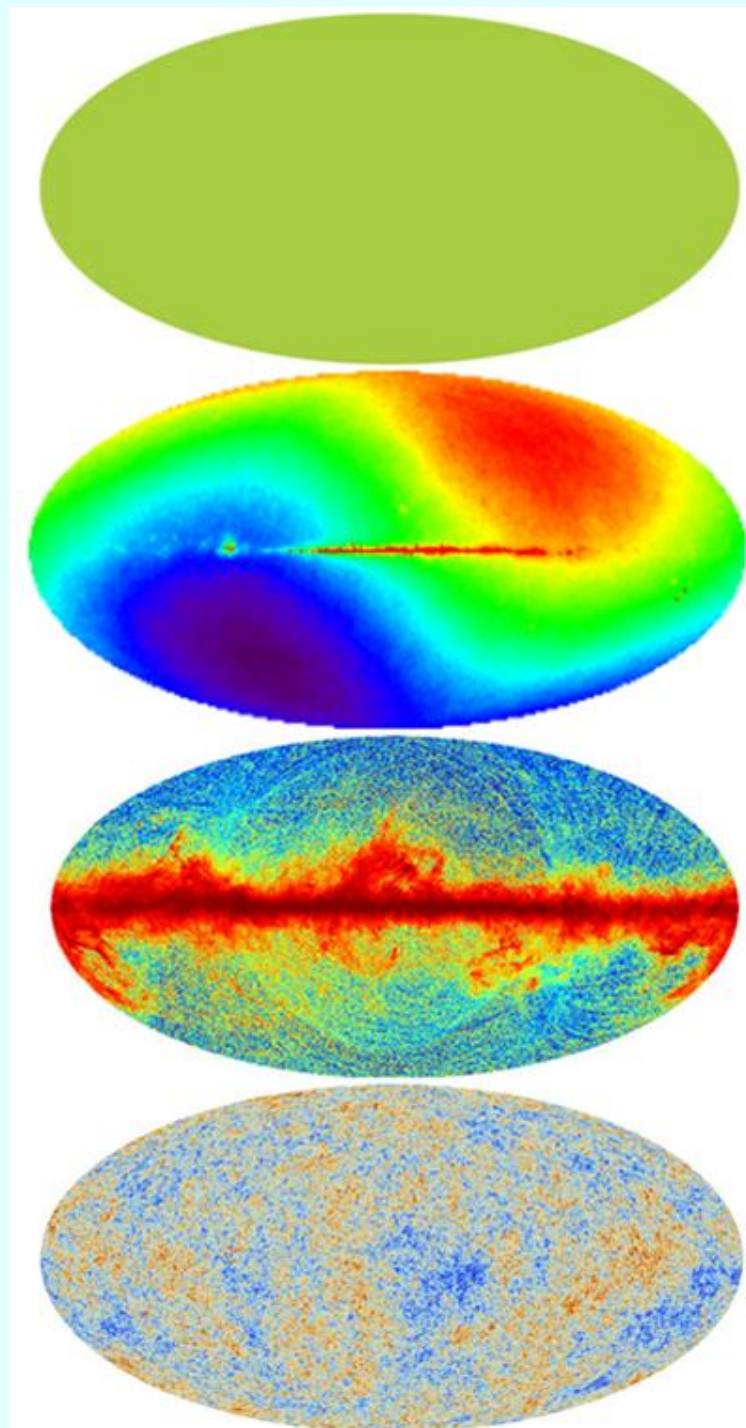
Après soustraction du dipole,

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

Soustraction de la Voie Lactée

→ **fluctuations aléatoires**

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

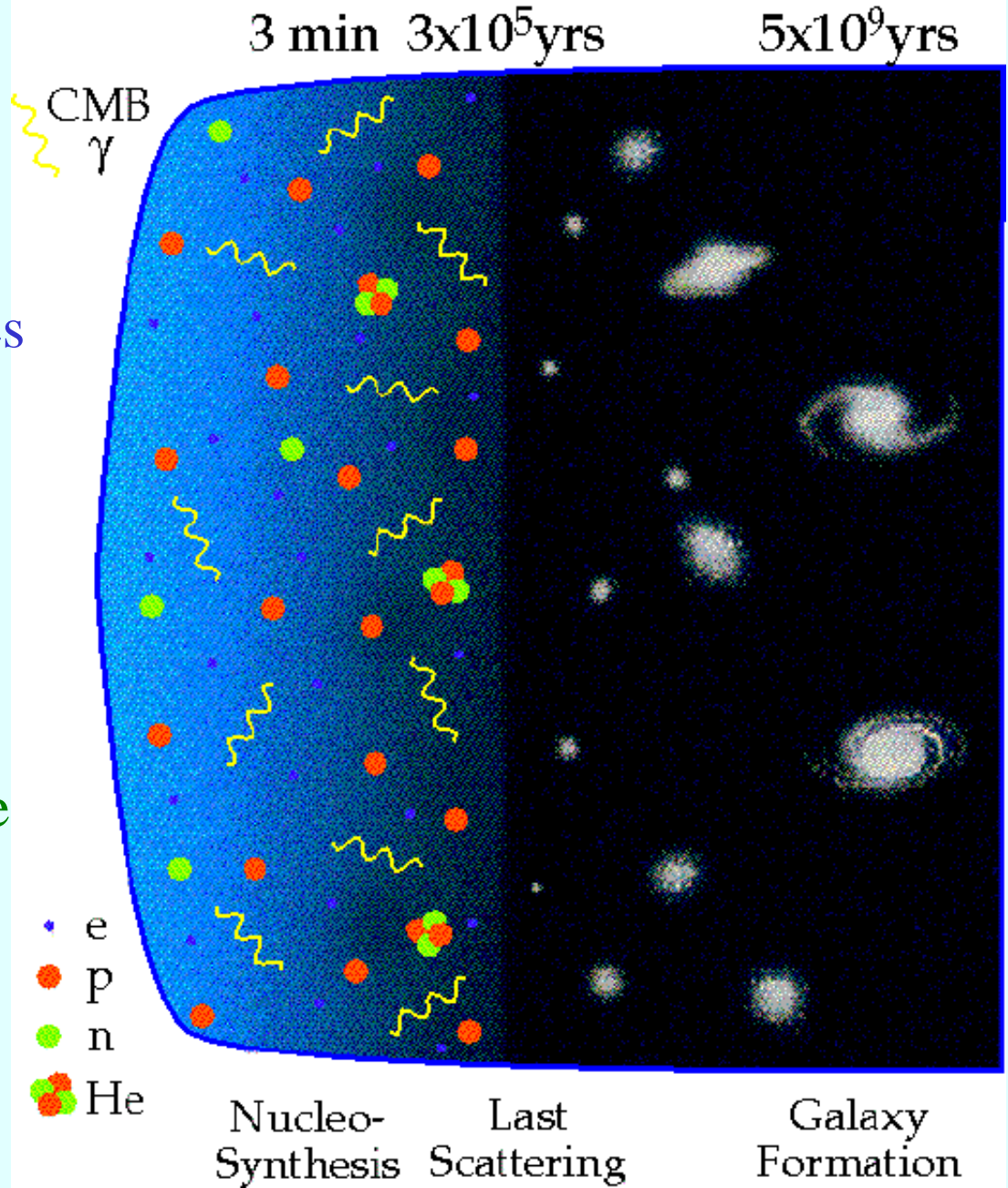


(Very) Brief History

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



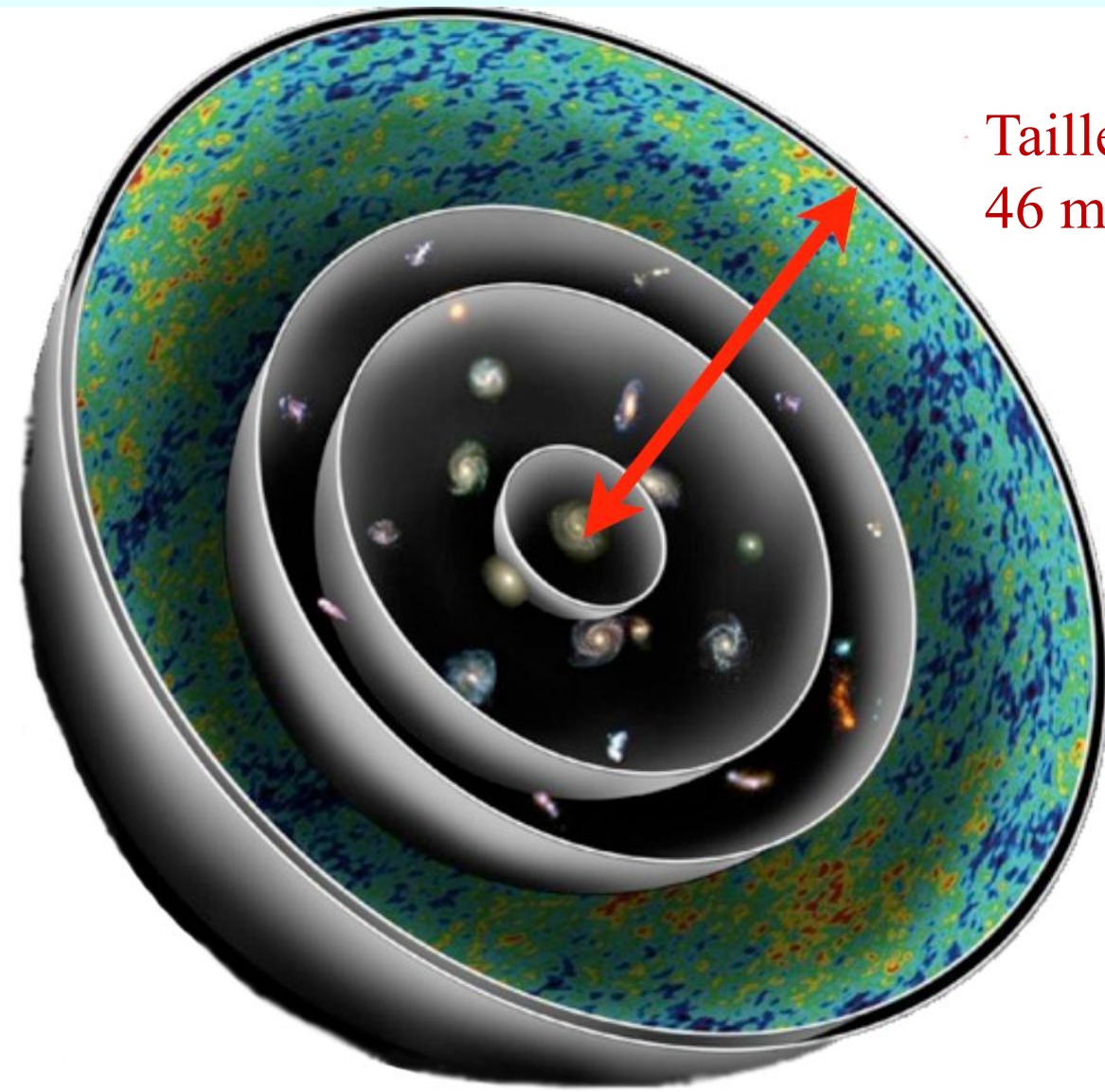
Les sphères cosmiques

Observer très loin, revient à remonter le temps

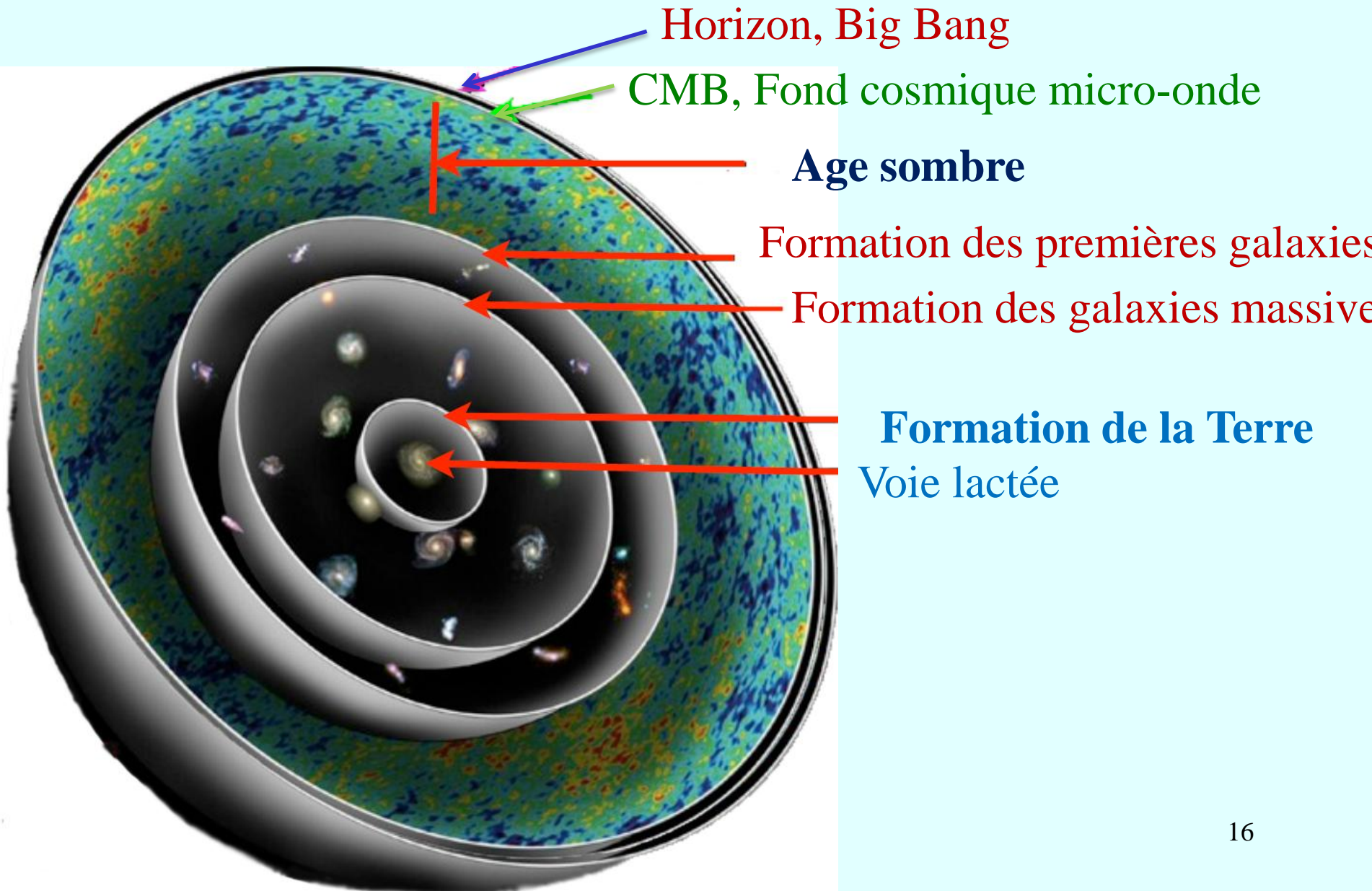
Taille aujourd'hui de l'horizon
46 milliards d'années-lumière

Parcours de la lumière
13.8 milliards d'années

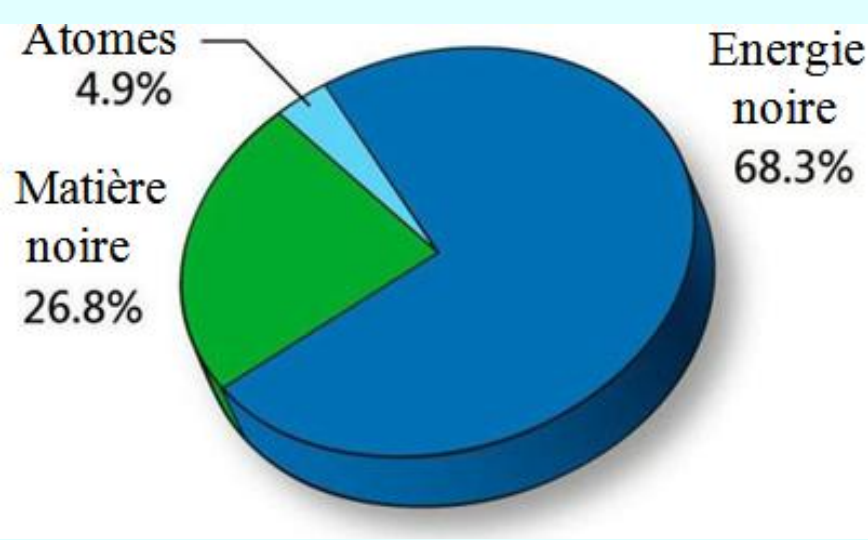
On remonte de
~13 milliards d'années



Les diverses époques



Résultats Planck (après COBE et WMAP)



$$\Omega_m = 0.27$$

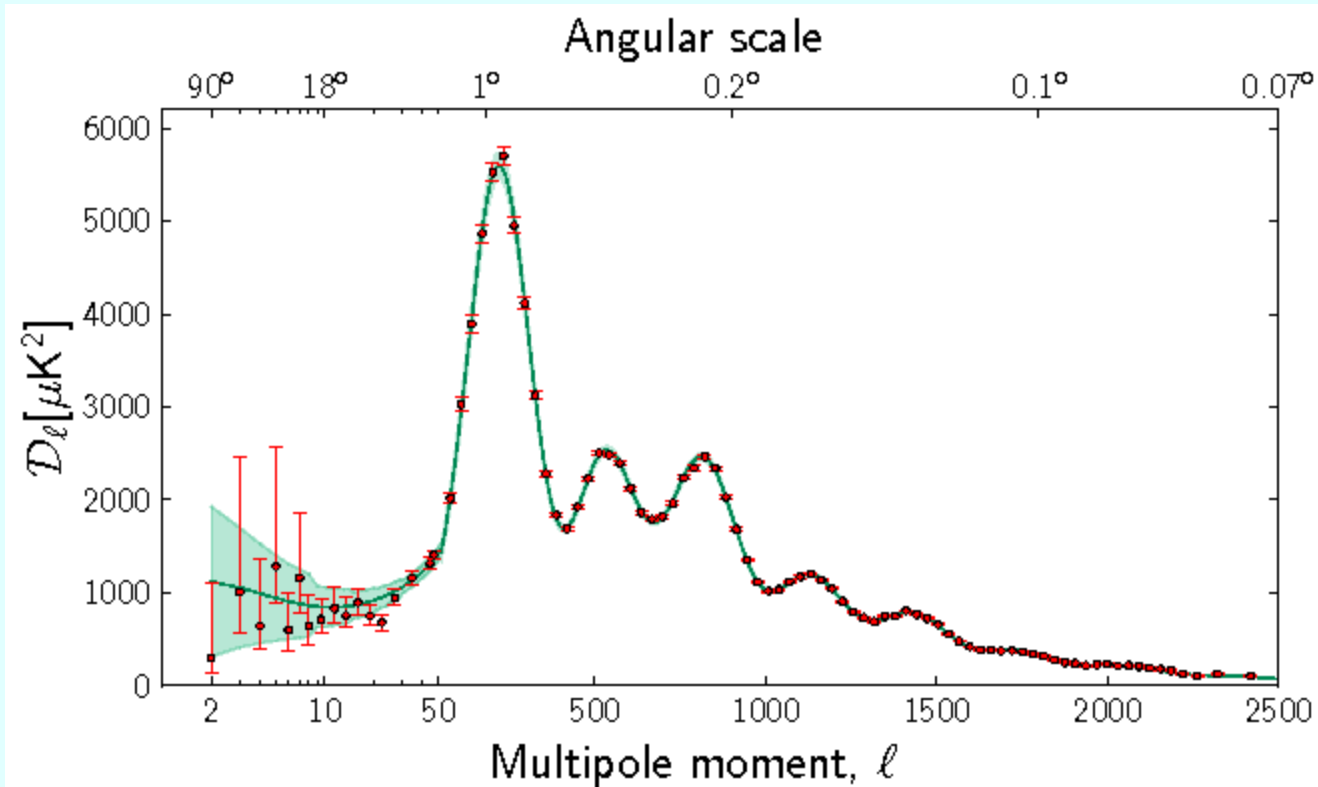
$$\Lambda = 0.68$$

$$\Omega_b = 0.05$$

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

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

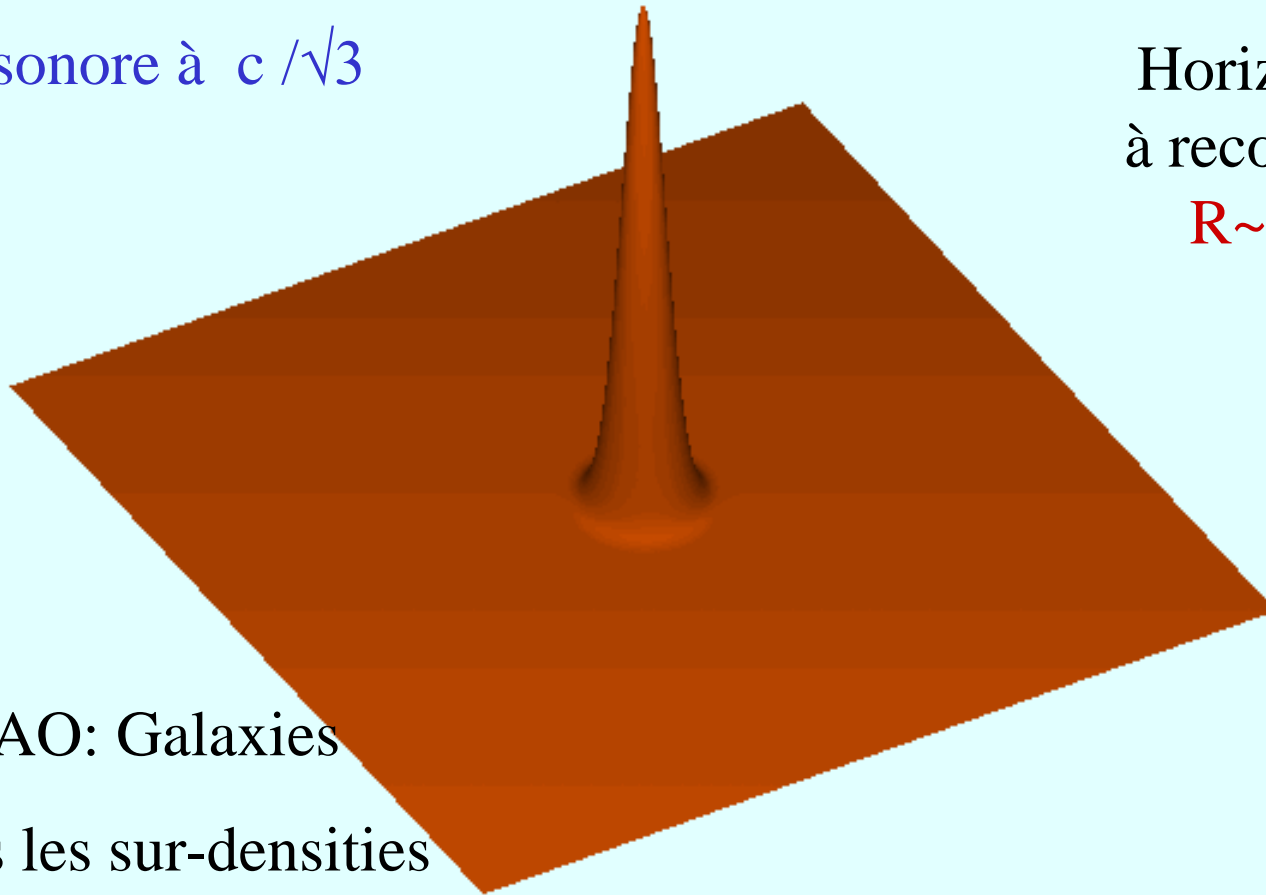
Univers plat



Une perturbation simple

Création d'une dépression

→ Onde sonore à $c/\sqrt{3}$



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

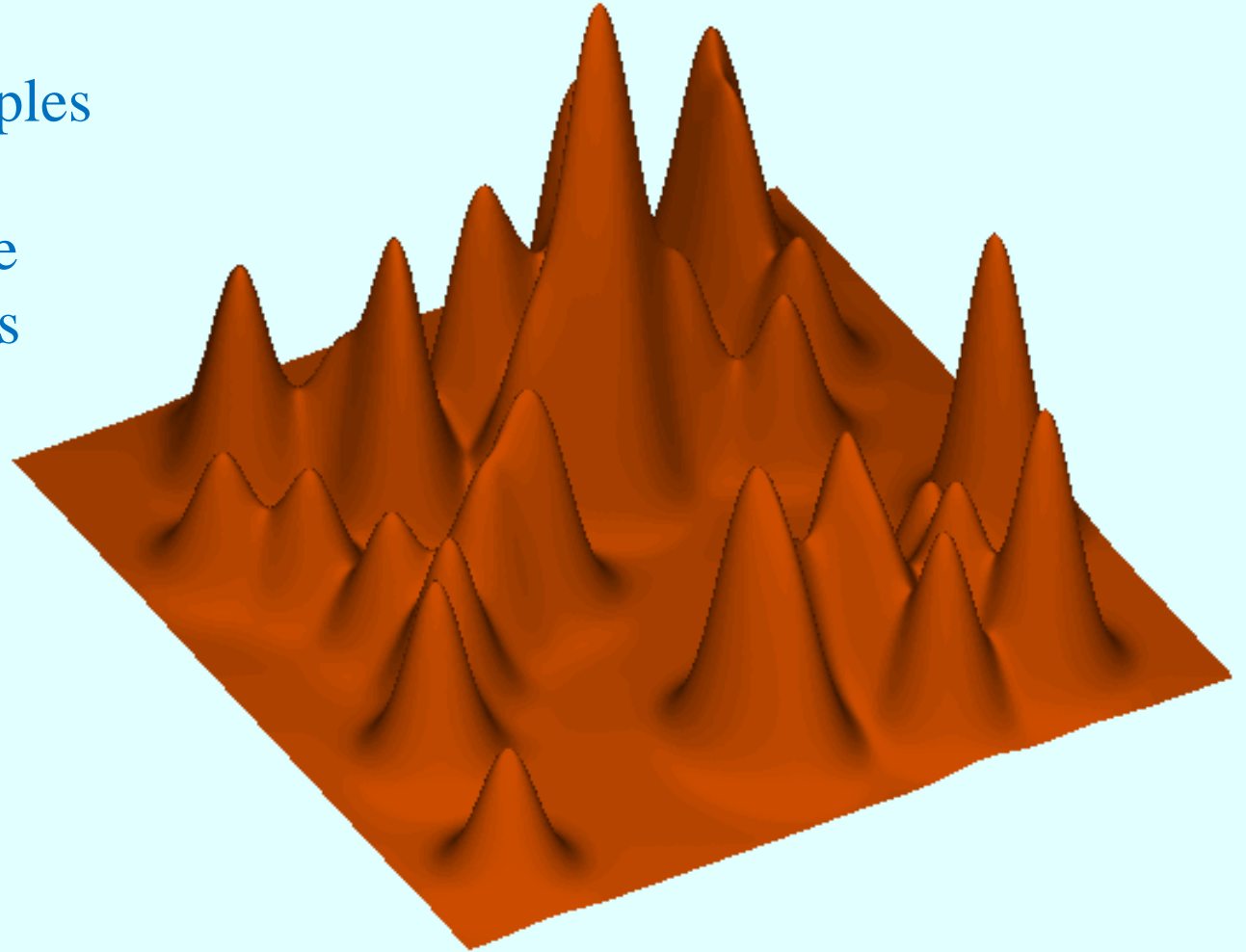
BAO: Galaxies
dans les sur-densities

→ 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

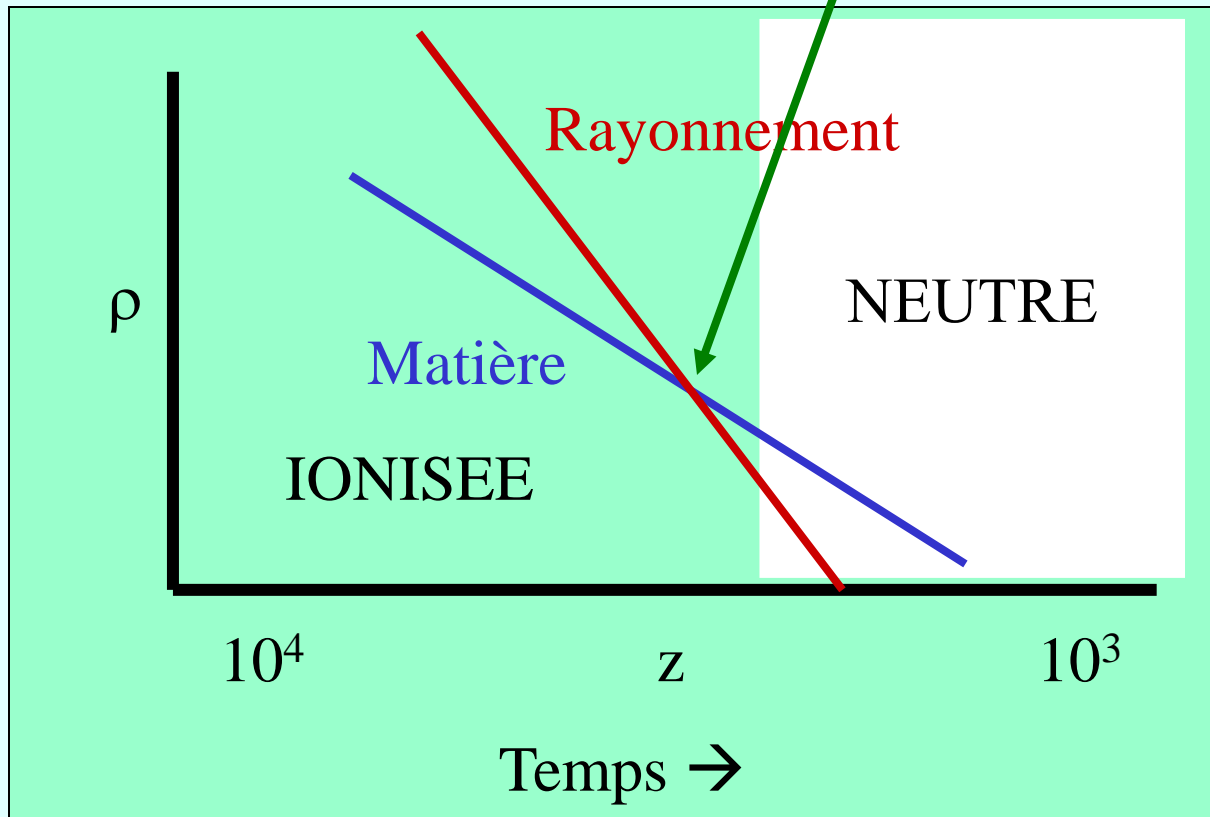
$$\delta \sim (1+z)^{-1}$$

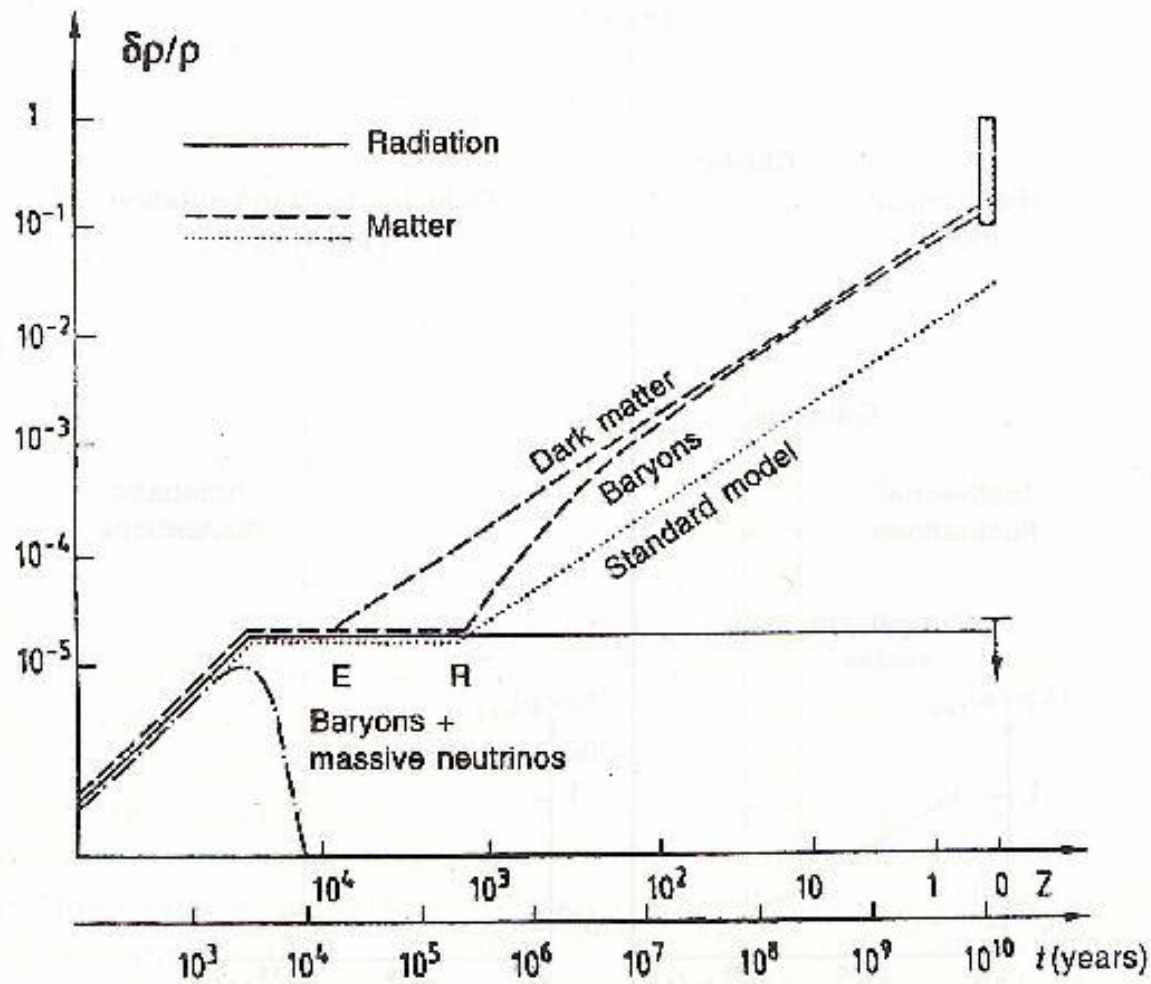
$$\delta \sim (1+z)^{-1}$$

$\rho \sim R^{-3}$ matière

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

Point d'Equivalence E





Croissance des fluctuations adiabatiques aux échelles de 10^{14}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 equivalence 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

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

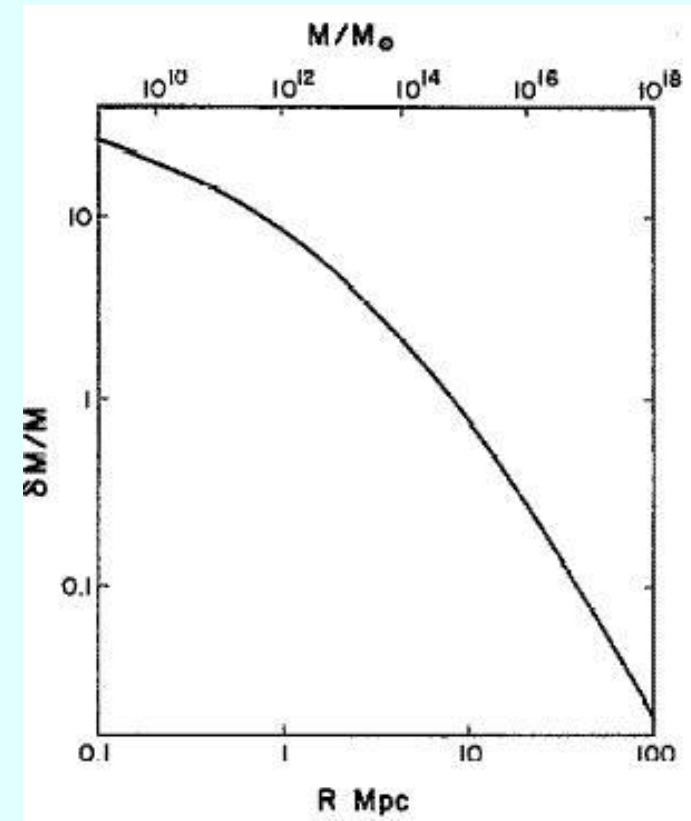
$$a = 2/3, \text{ ou } \delta(k)^2 = P(k) = k^n \text{ avec } n \sim 1$$

$P(k) \sim k$ 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



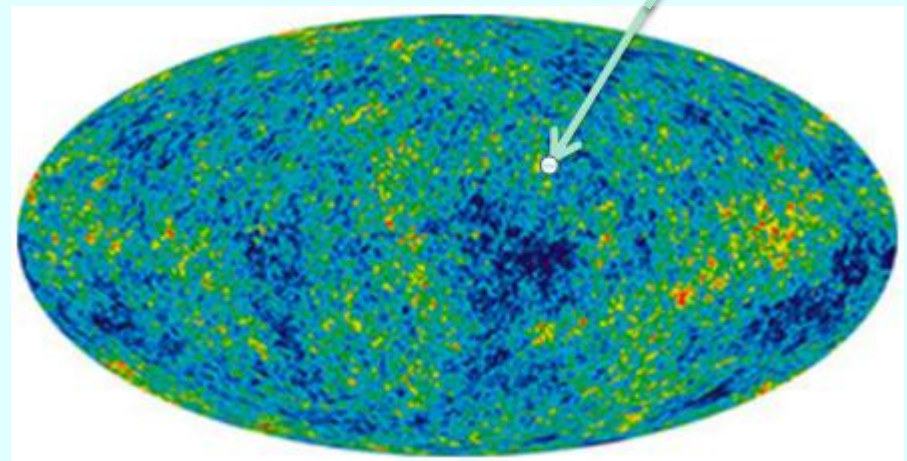
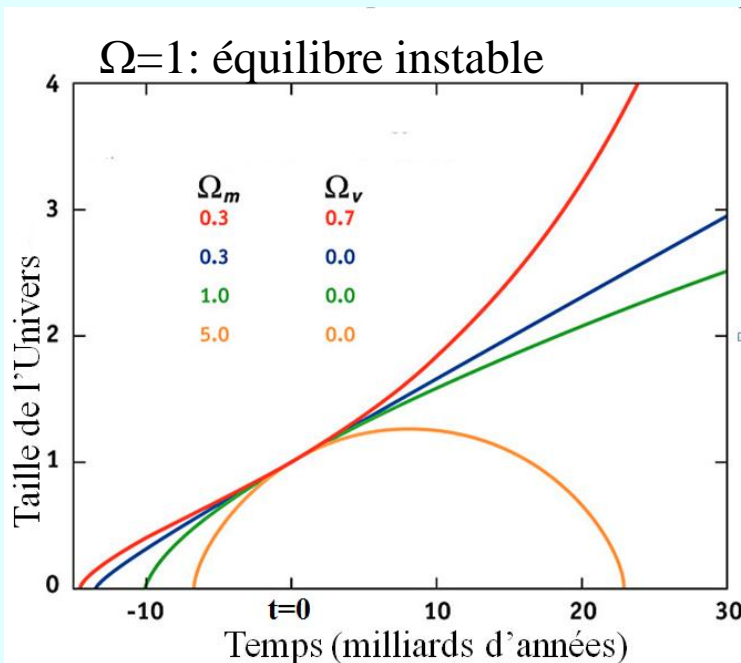
Inflation: problèmes Horizon, platitude

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 ~ 1 degré, vu d'aujourd'hui

Horizon



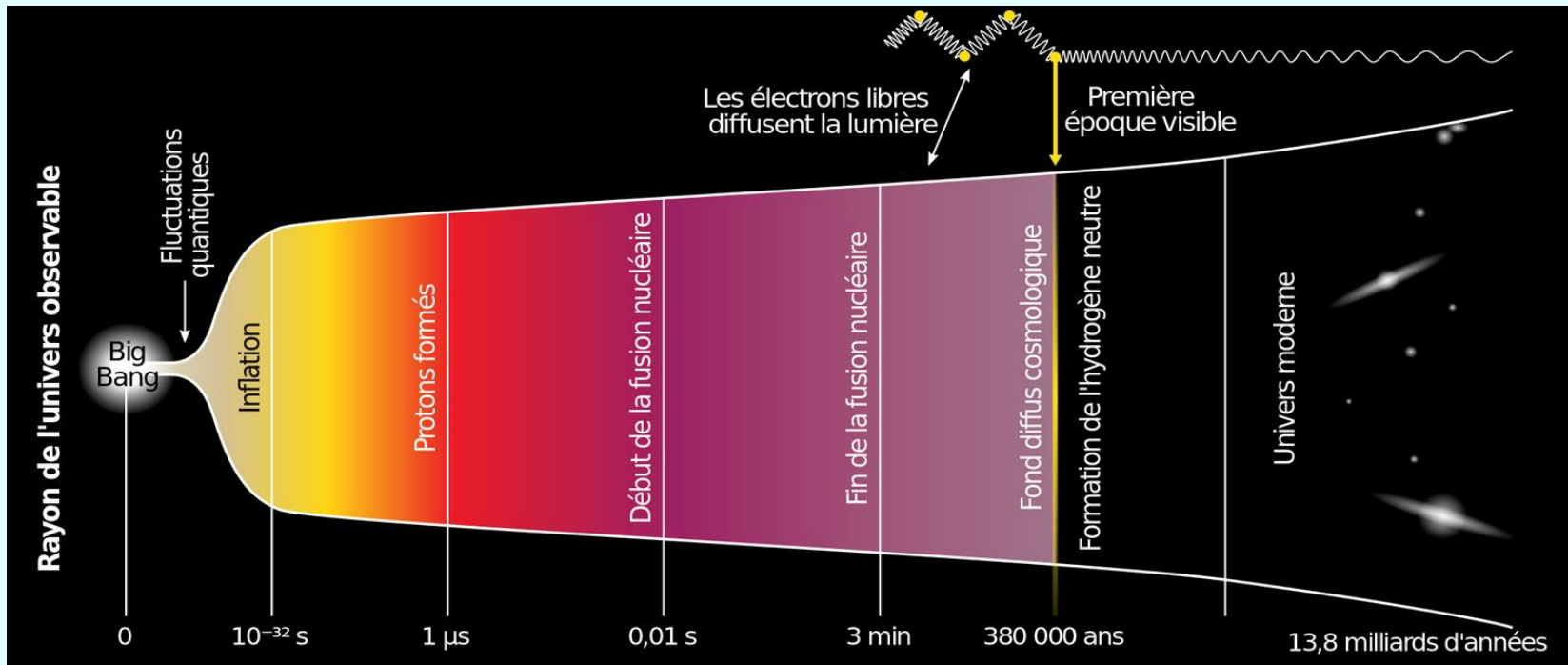
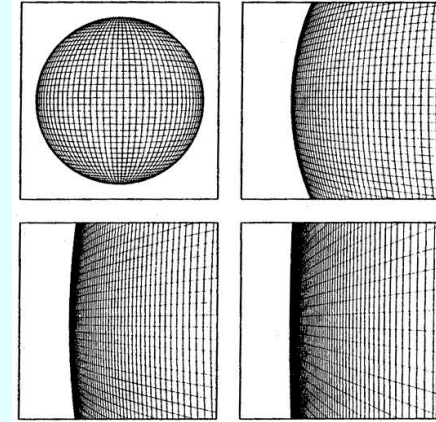
Inflation: la solution

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

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 Φ (inflaton?), avec **faux vide**, métastable, en $\Phi = 0$
Roule vers le **vrai vide** en Φ_0 . Relache beaucoup d'énergie

Compensée par l'énergie gravitationnelle négative

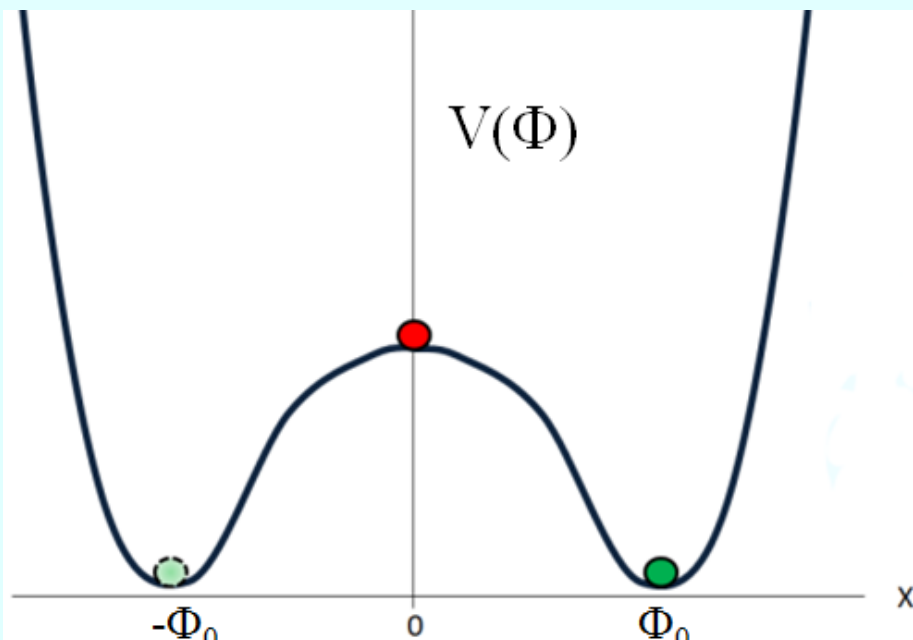
$a(t) \sim \exp(Ht)$ expansion exponentielle, durant 10^{-35} sec

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



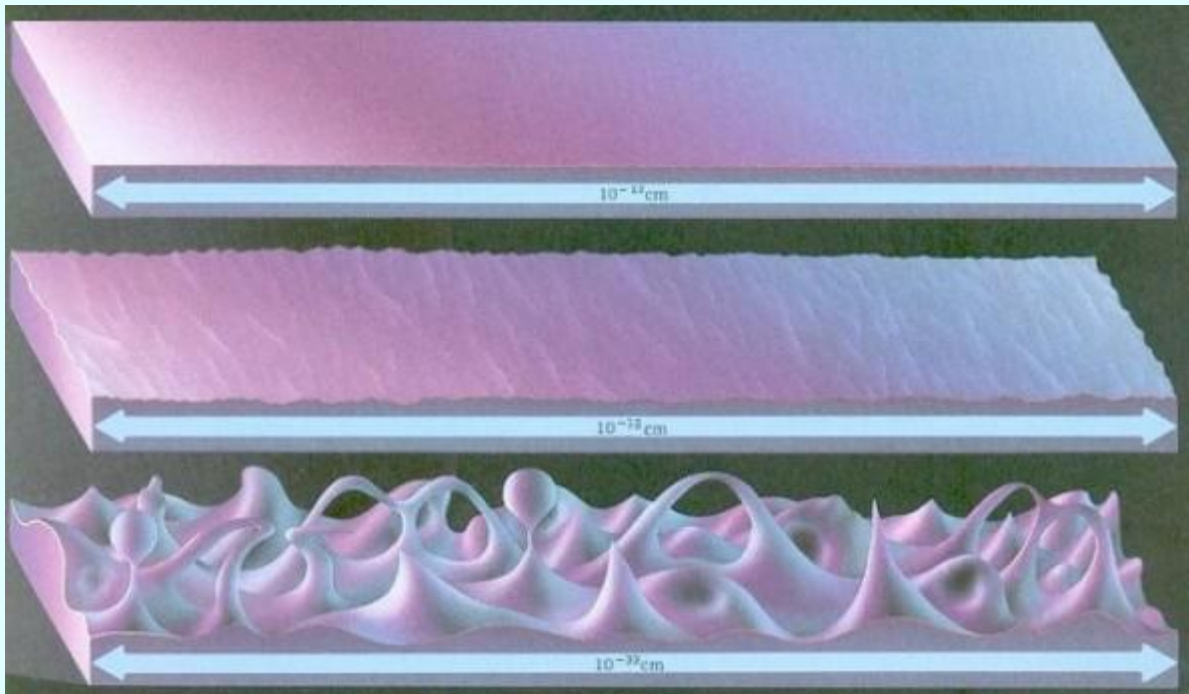
L'inflation s'arrête à Φ_0

Fluctuations quantiques

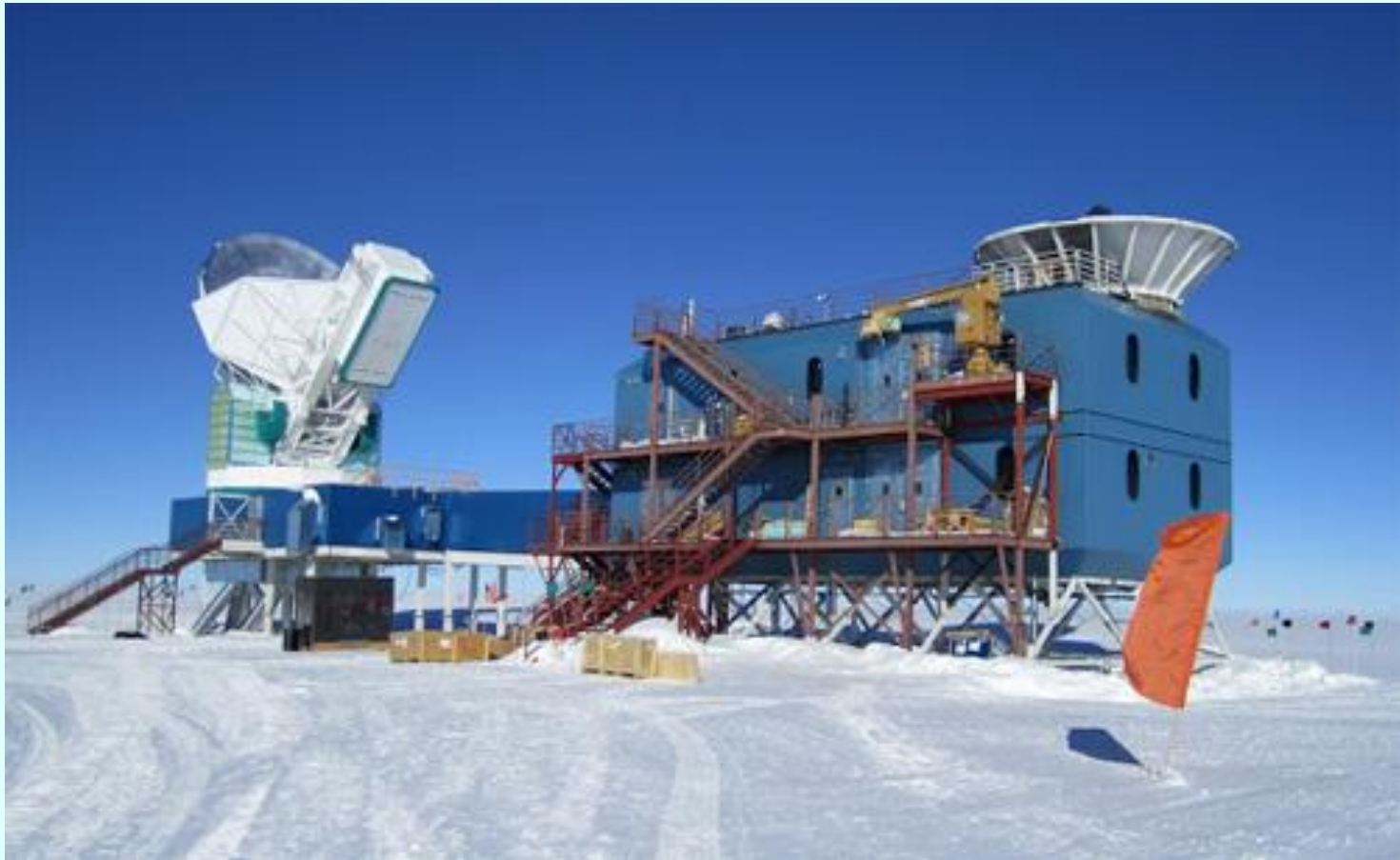
D'après le principe d'incertitude d'Heisenberg, le champ est sans arrêt incertain $\delta\Phi$

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

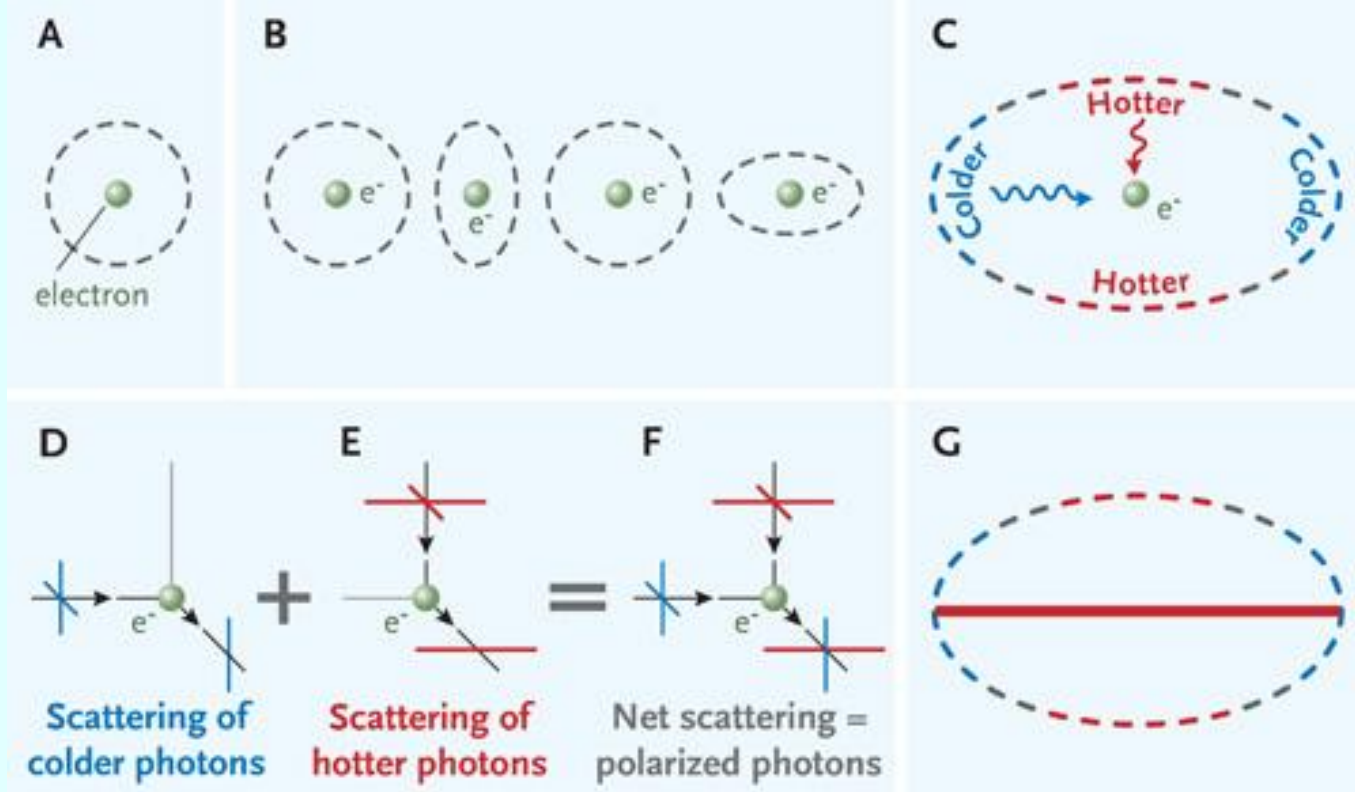
La courbure de l'Univers de même, et entraîne des fluctuations de **densité et de température**



→ Ondes gravitationnelles



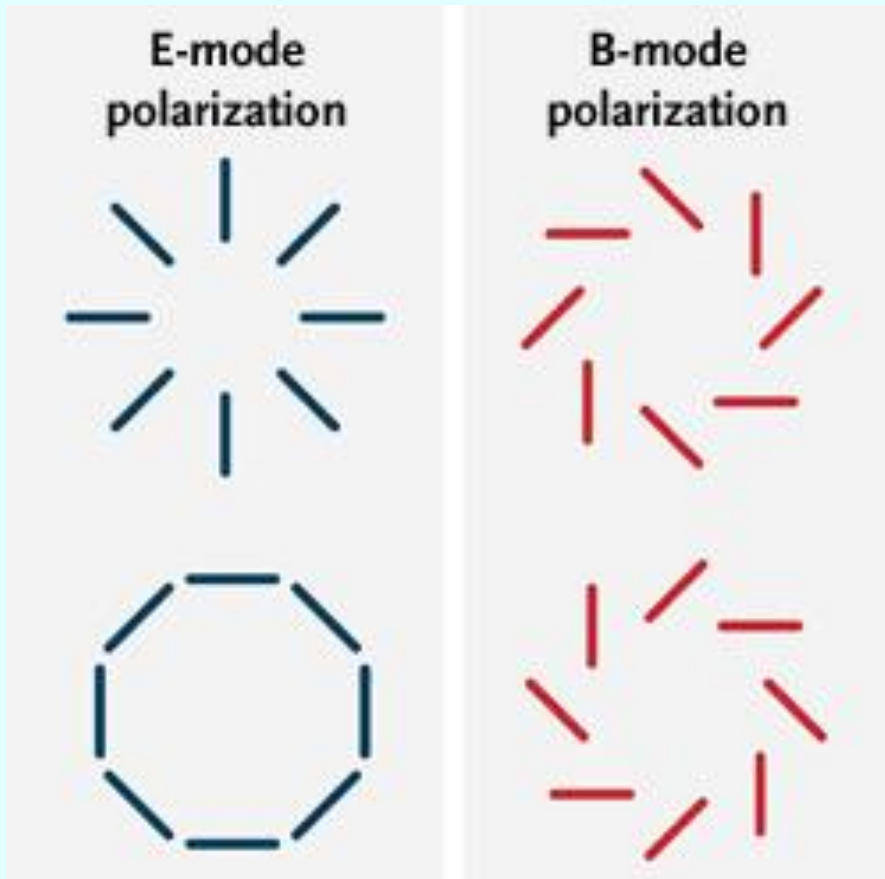
Experience BICEP-2 au Pole Sud (télescope à droite).
A gauche le “South Pole Telescope” (SPT)
Tous deux opèrent dans les longueurs d’ondes mm-submm
Mars 2014: Annonce de BICEP-2



*Leah
Tiscione*

Les ondes gravitationnelles créent de la polarisation dans le CMB
 En déformant l'espace, et donc le plasma primordial (p, e-)
 (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- (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

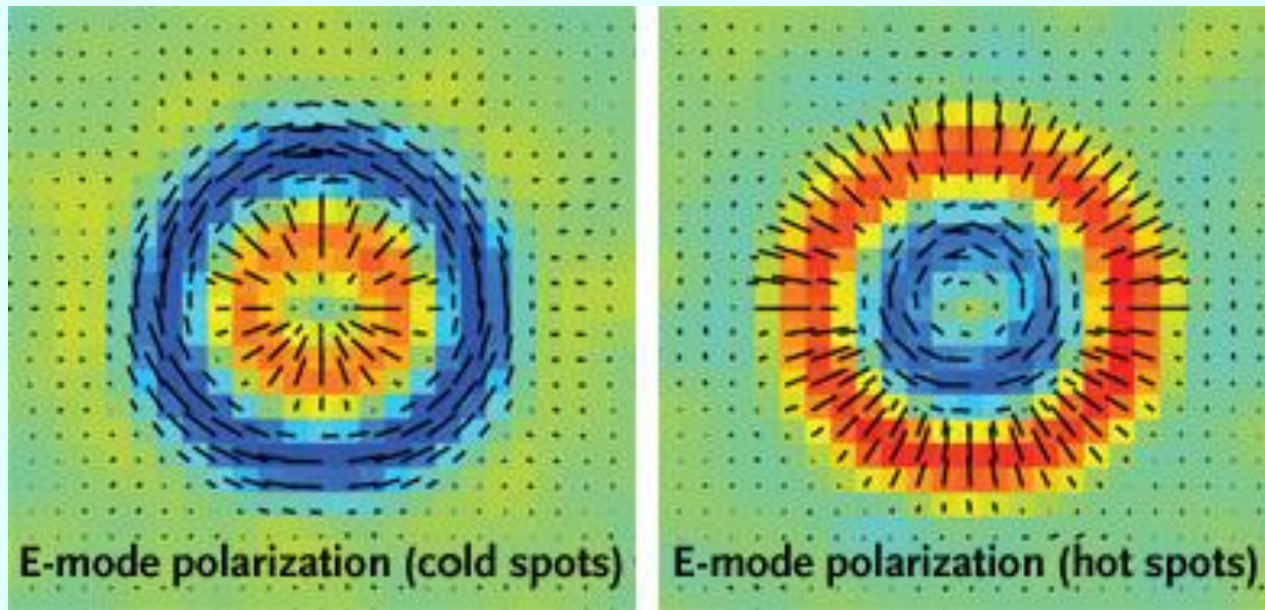
$$\text{Rot } \mathbf{E} = 0 \quad \text{div } \mathbf{B} = 0$$

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

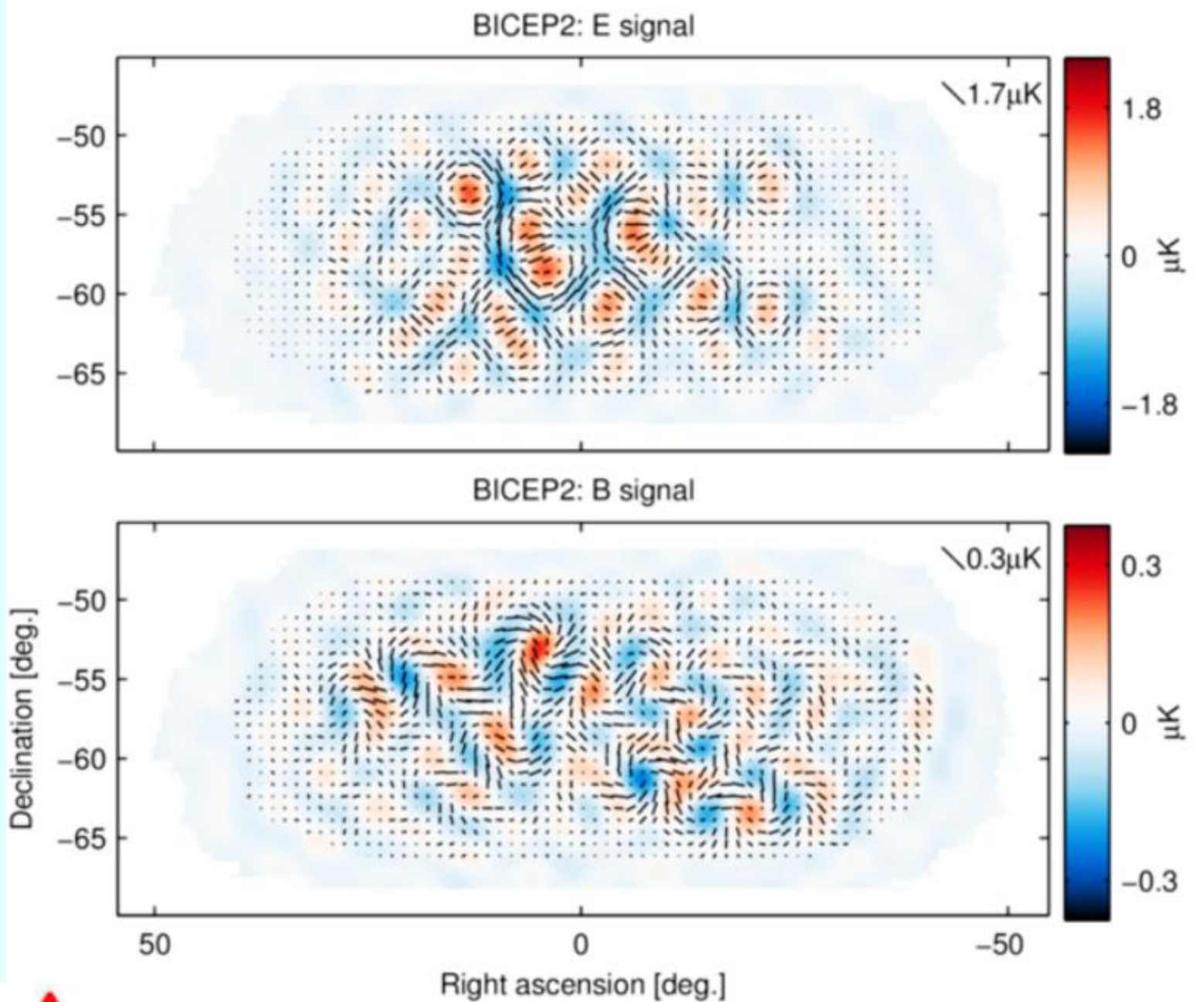


Stacking $\sim 10\,000$ points froids (gauche) et chauds (droite) dans Planck
L'effet n'est que de 0.8 microkelvin.

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**

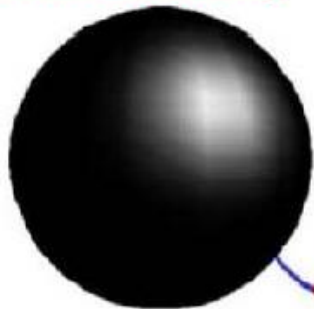
Inflation + MQ = Fluctuations

Paire **particule/antiparticule**

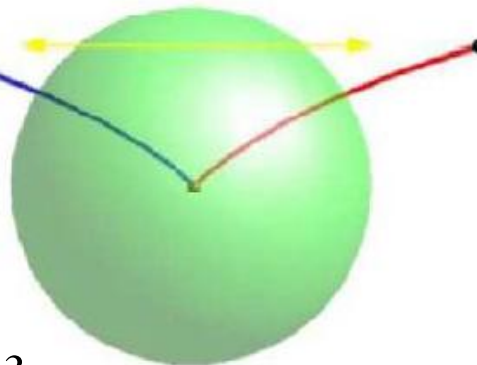


Trou noir :

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}

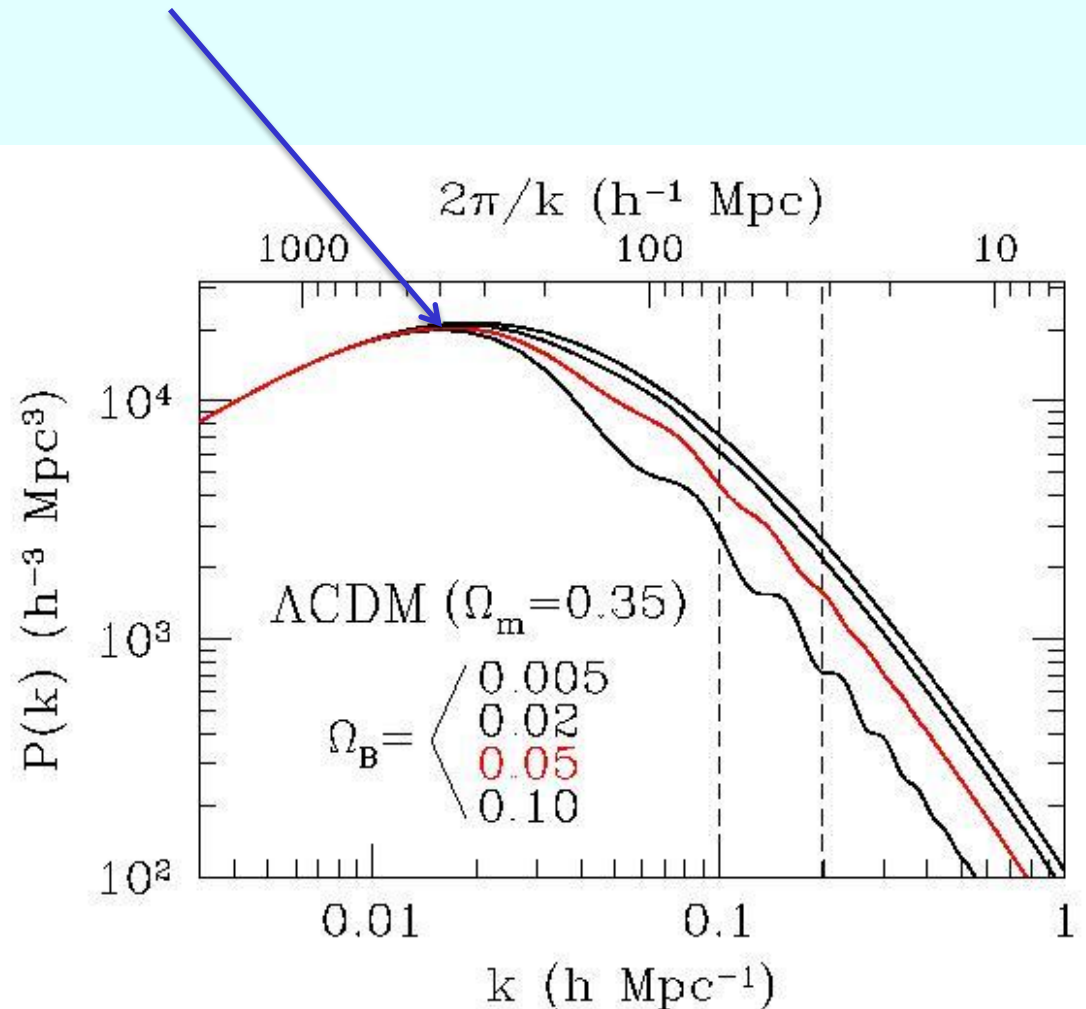
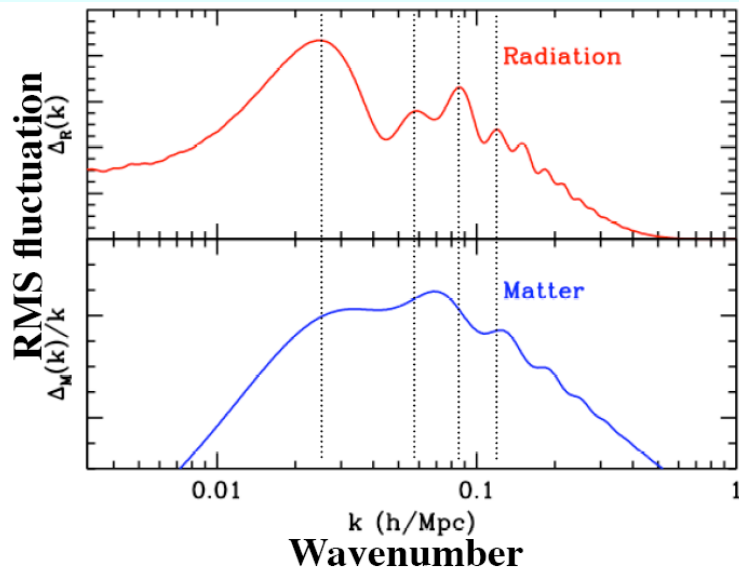
Les échelles $>$ horizon continuent à s'effondrer

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

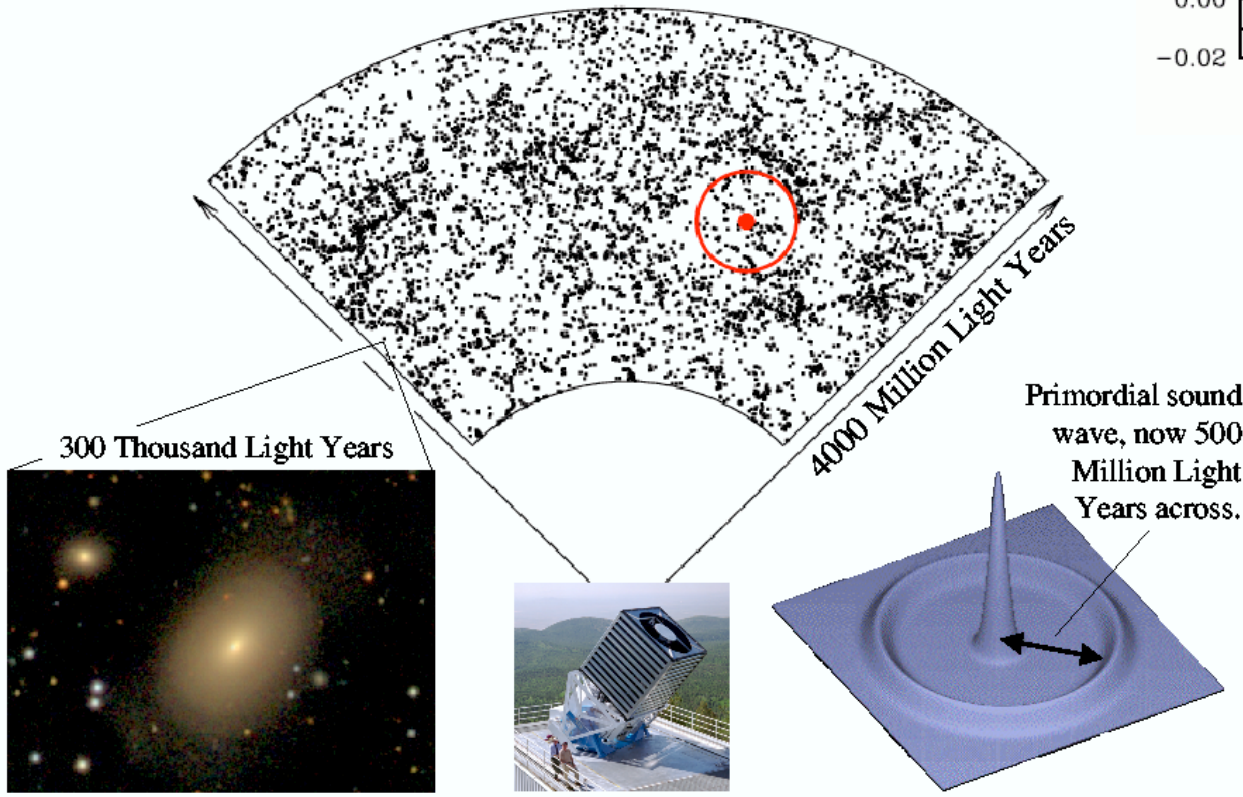
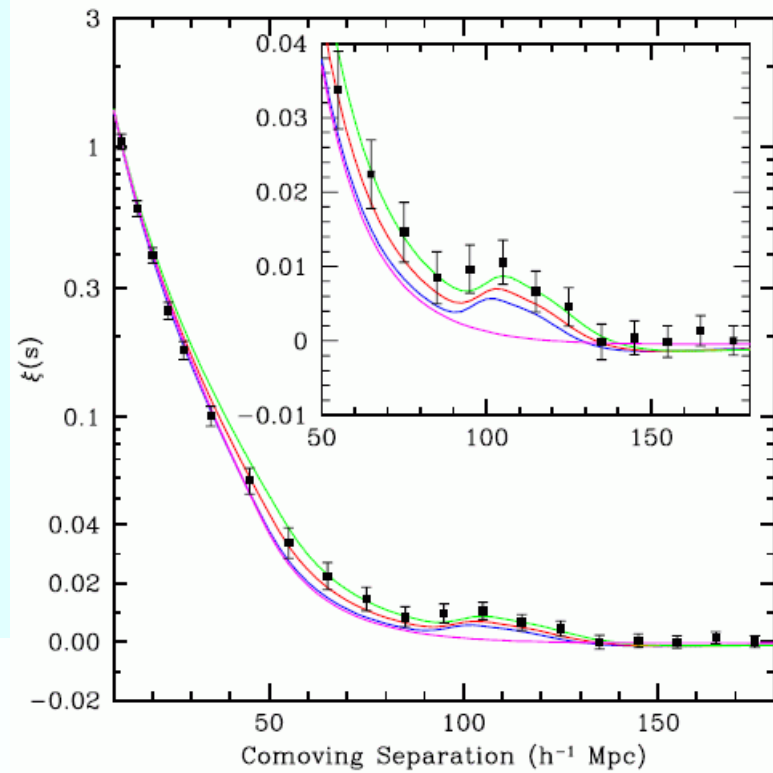
Oscillations des baryons
longueur d'onde x2



Pic acoustique baryonique

Ondes détectées aujourd'hui
dans la distribution des baryons

50 000 galaxies SDSS

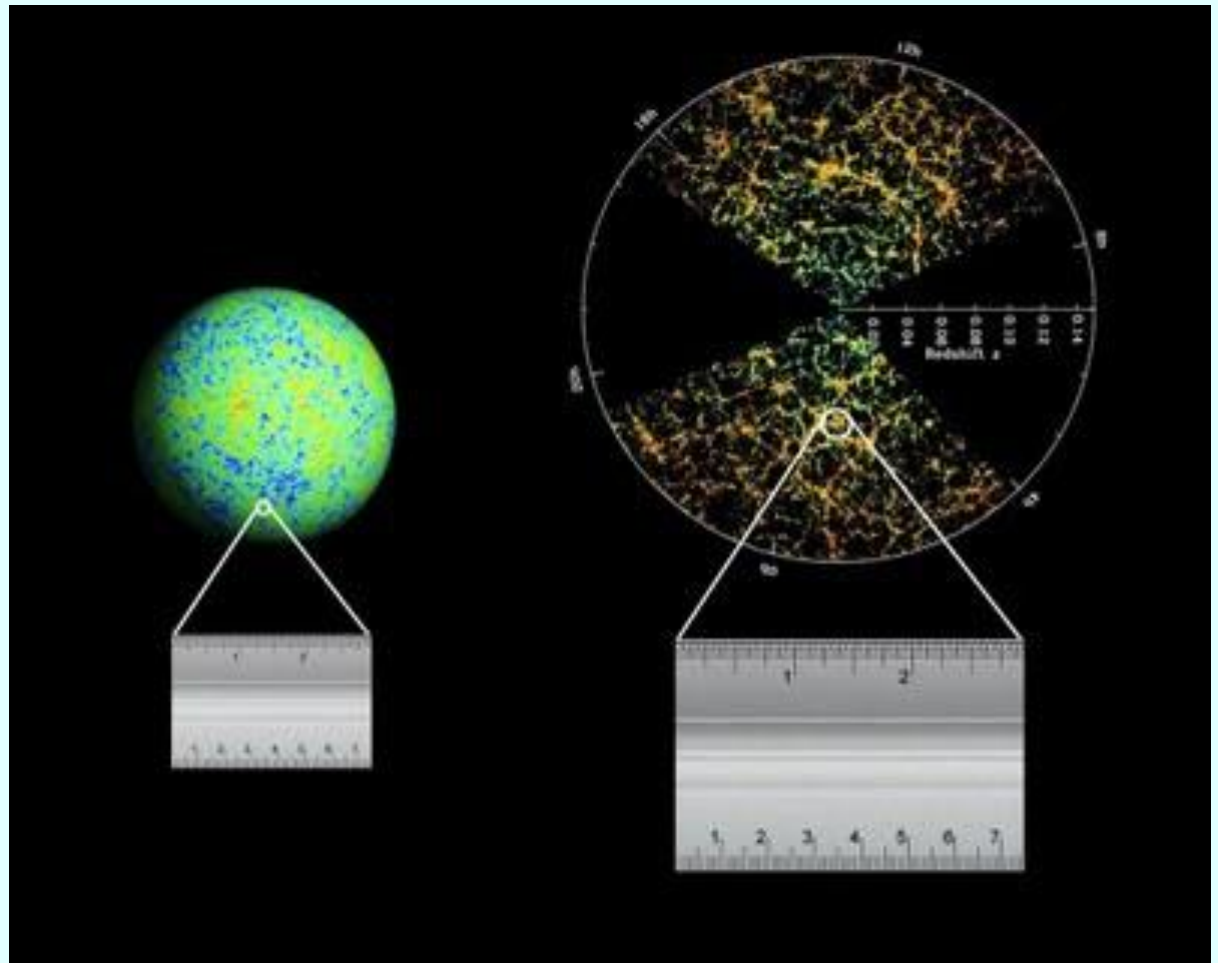


Eisenstein et al 2005

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

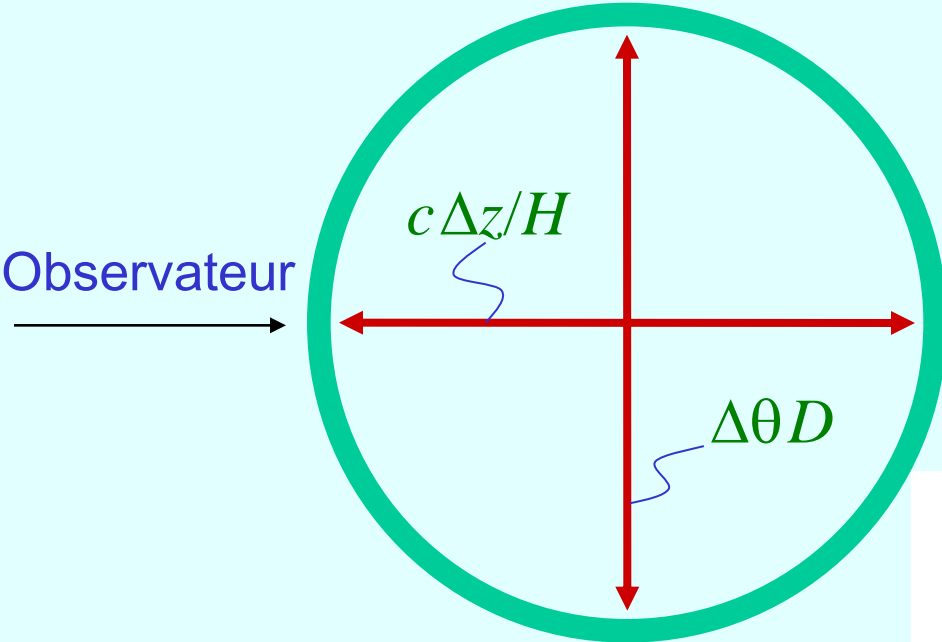


Oscillations baryoniques: règles standard

Alcock & Paczynski (1979)
Test de la constante cosmologique

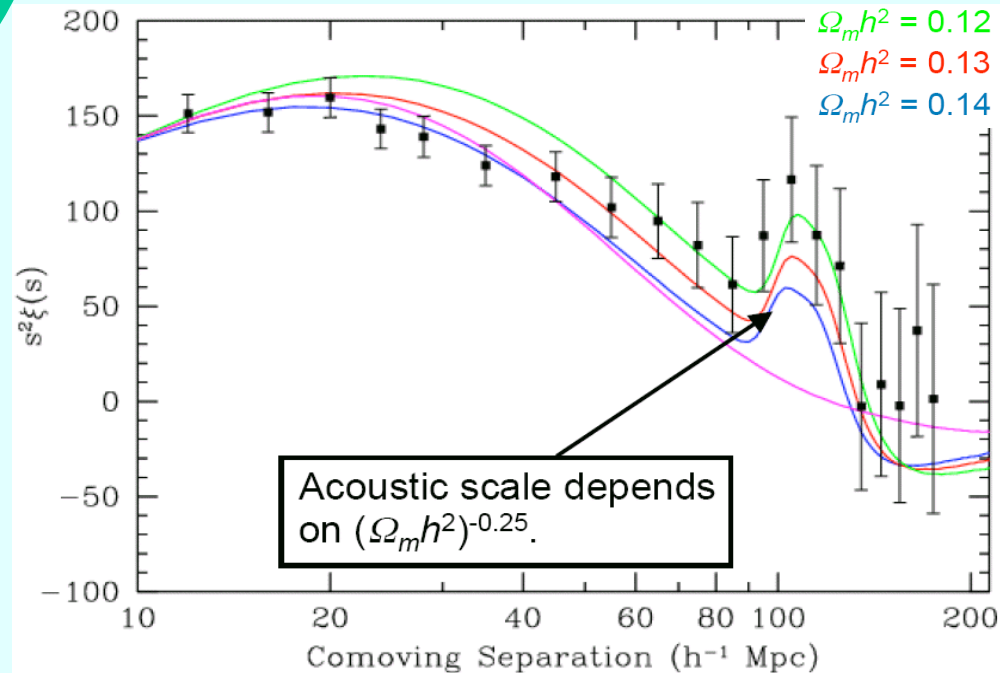
Peut tester le biais b
Galaxies/matière noire

Eisenstein et al. (2005)
50 000 galaxies SDSS



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

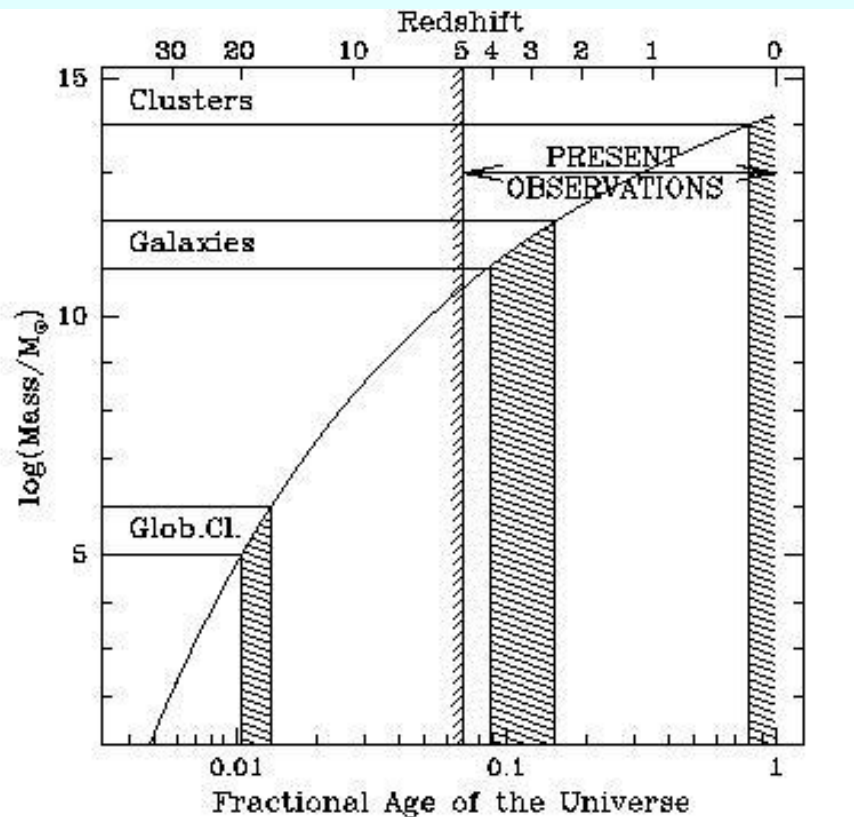
→ Possibilité de déterminer $H(z)$



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)



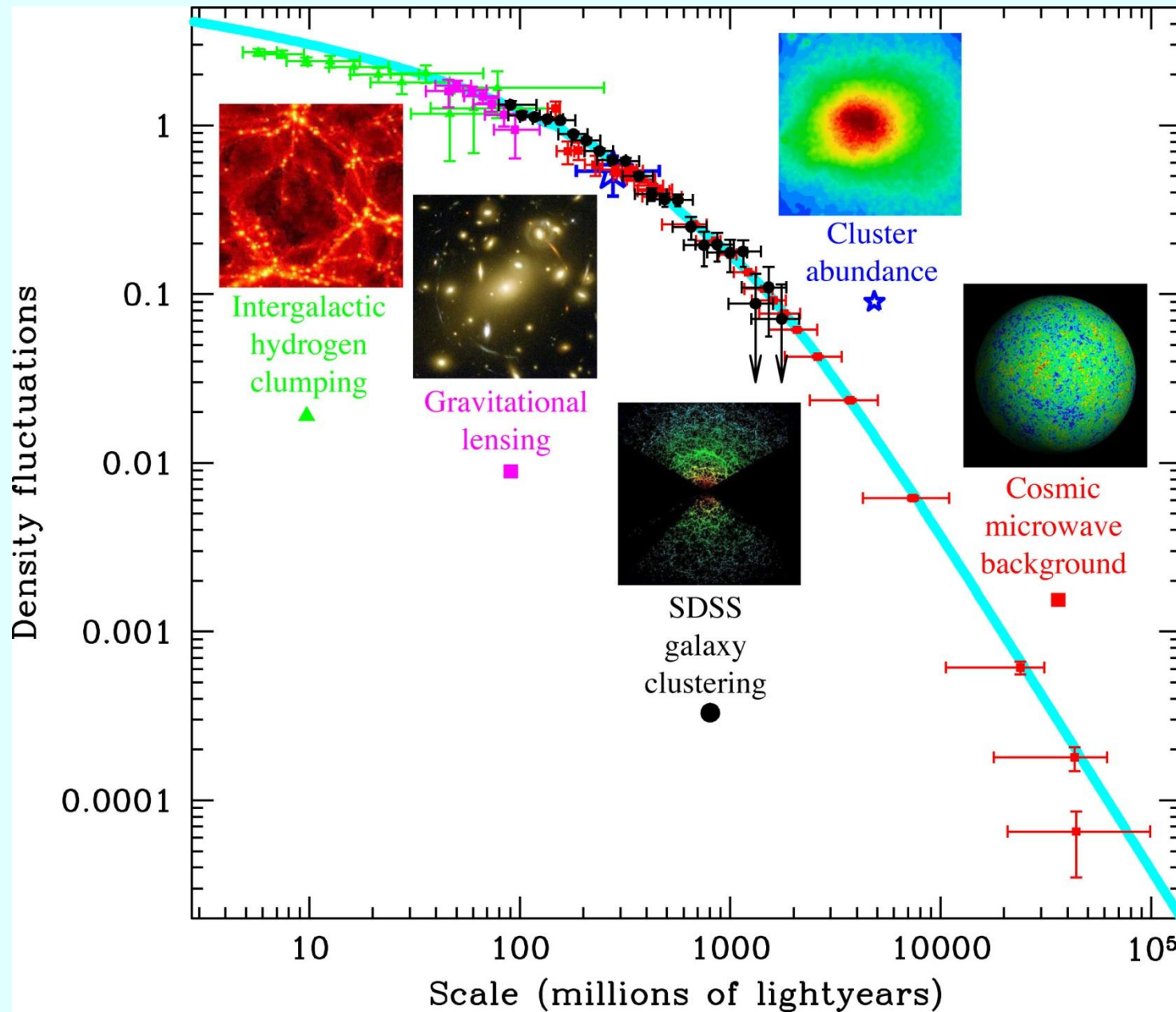
$|\delta k|^2 = P(k) \sim k^n$, avec $n=0.91$
 aux grandes échelles
 k^{-3} aux petites échelles
 tilt quand $\rho_r \sim \rho_m$
 à l'échelle de l'horizon

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

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

Abel & Haiman 00

Fluctuations de densité



Tegmark
et al 2004

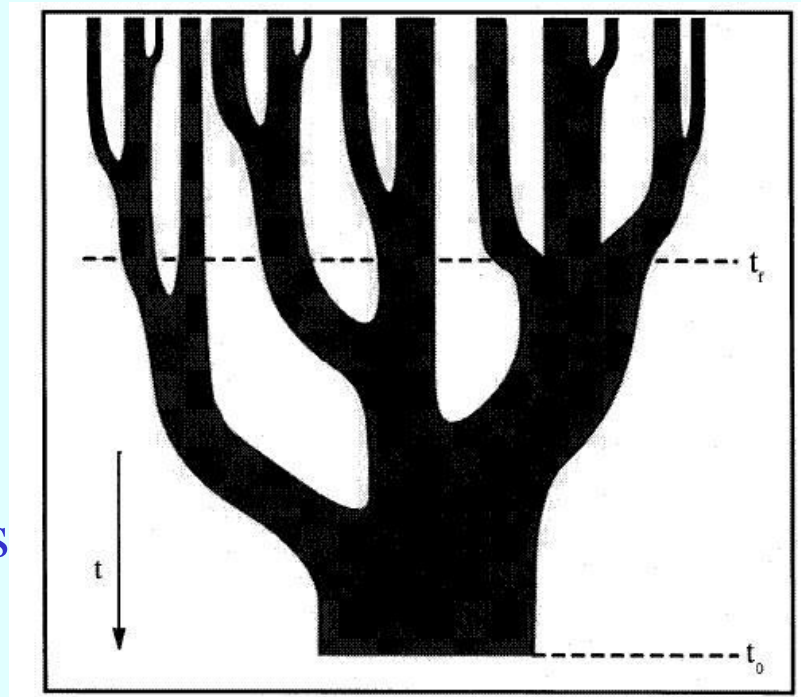
Formation hiérarchique des galaxies

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 »

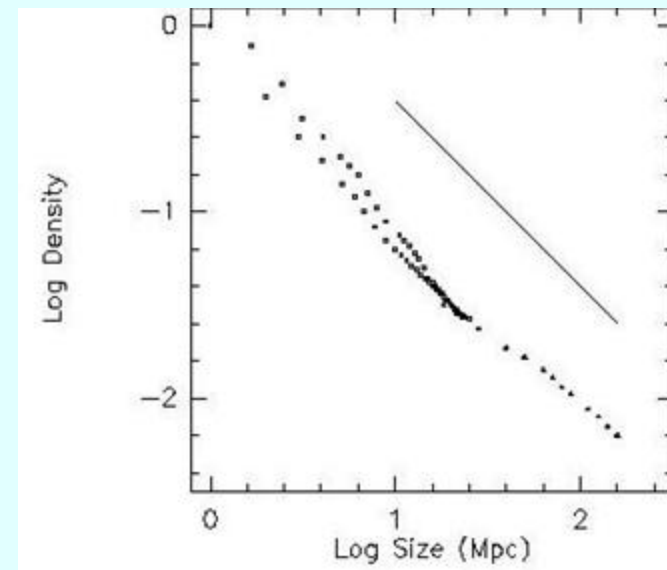
S'applique à l'Univers

Densité autour d'un point occupé

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

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

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

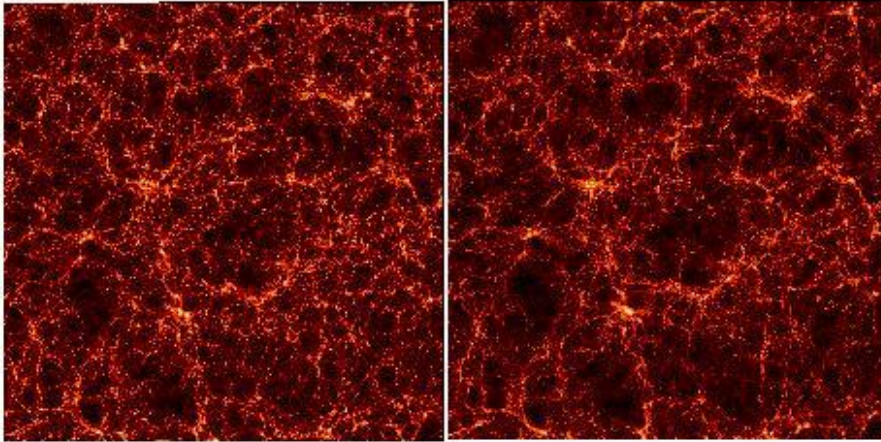


Simulations numériques

$z=0$

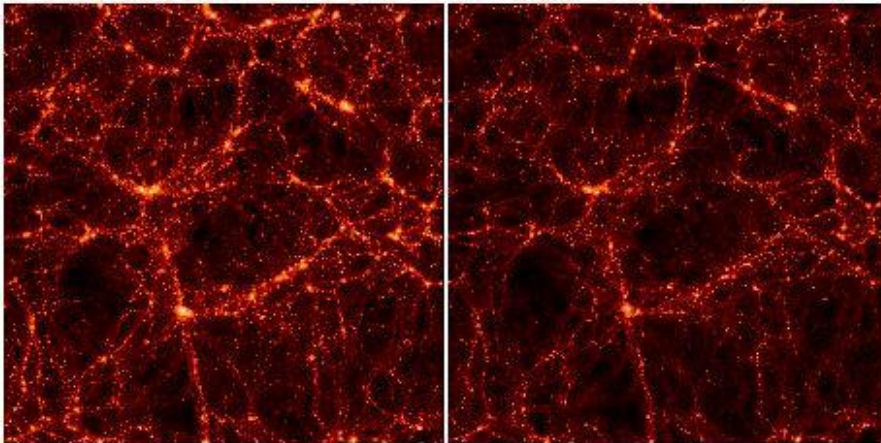
SCDM

τ CDM



Λ CDM

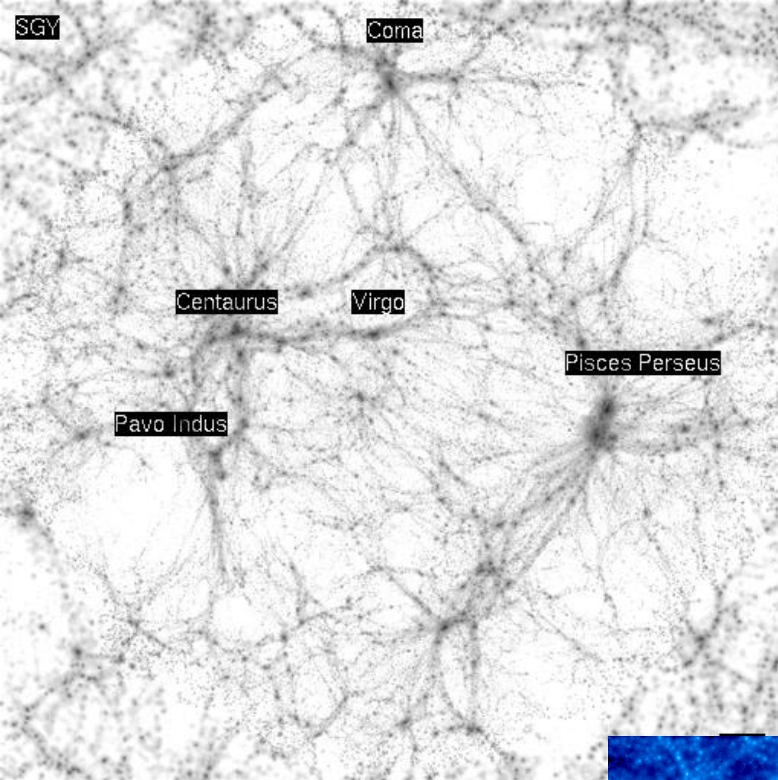
Ω CDM



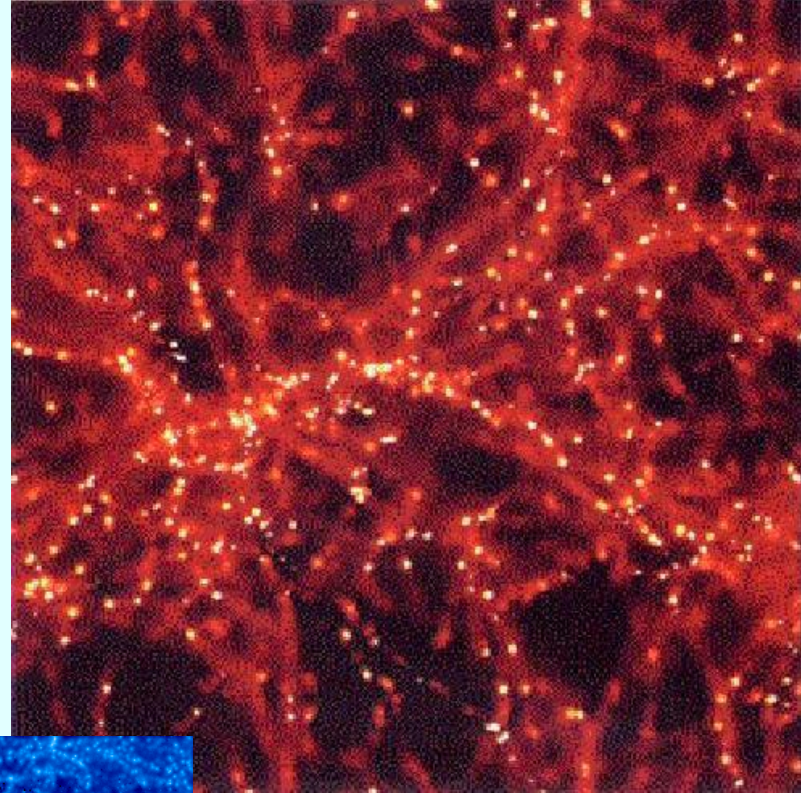
Avec des fluctuations postulées au départ, gaussiennes, le régime **non-linéaire** peut-être suivi

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



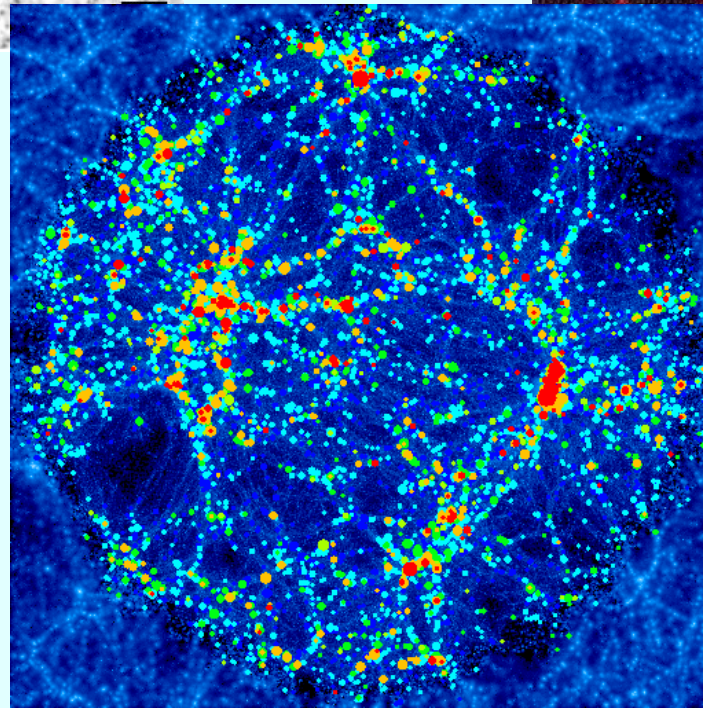


Gaz



Matière noire CDM

Simulations
(Kauffmann et al)



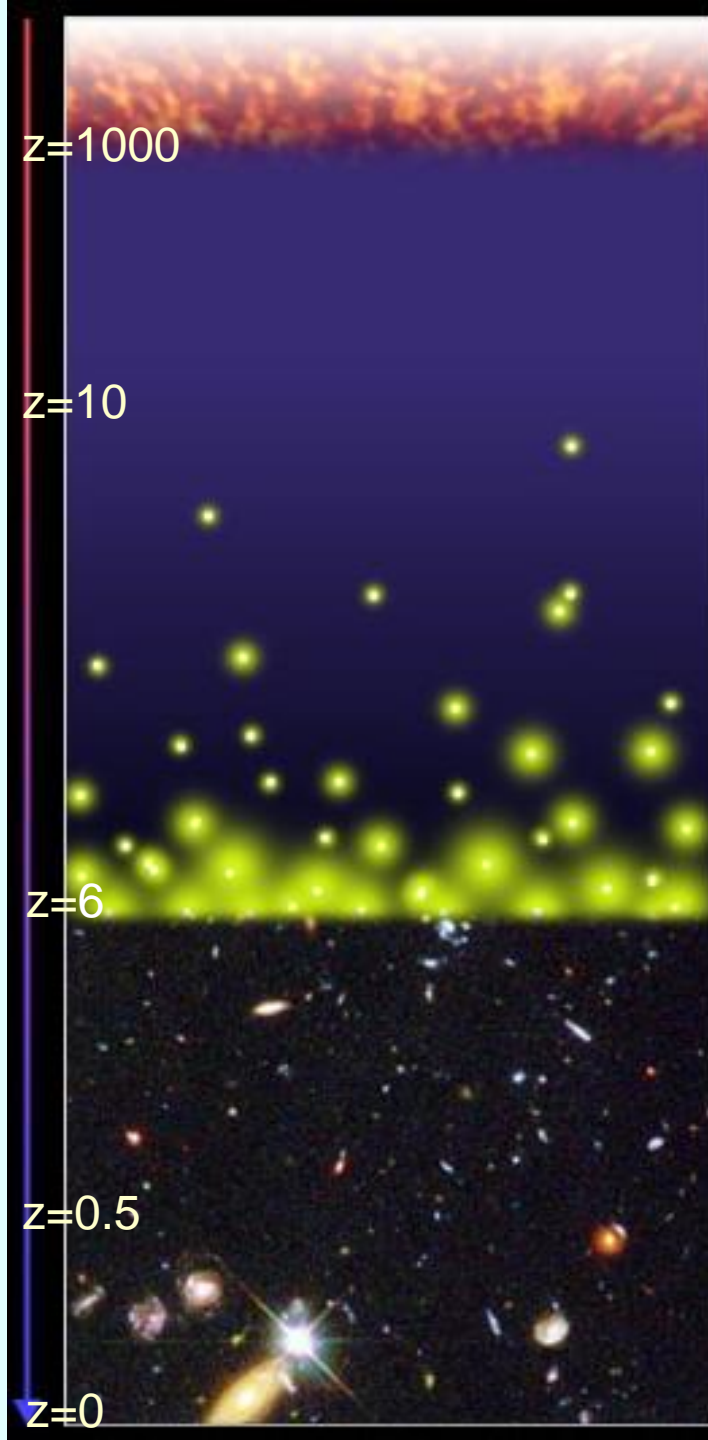
Galaxies

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^{ères} étoiles, QSO $0.5 \cdot 10^9$ an

Aube Cosmique

Fin de l'âge sombre

Fin de la reionisation 10^9 an

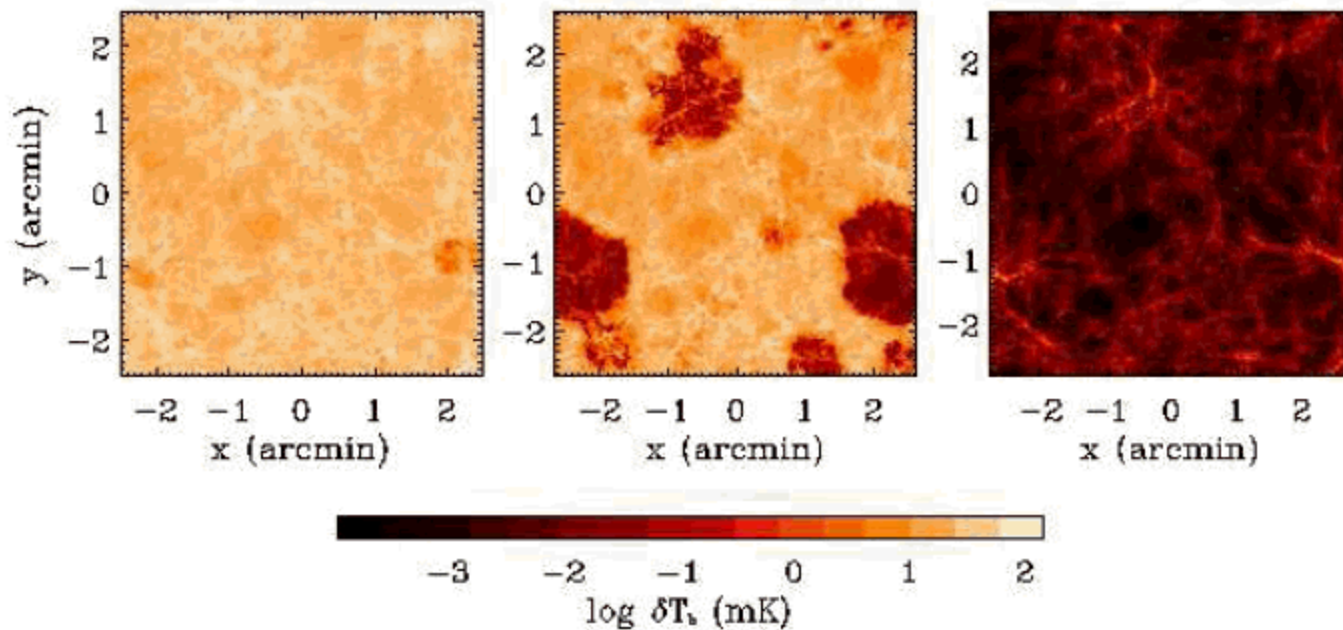
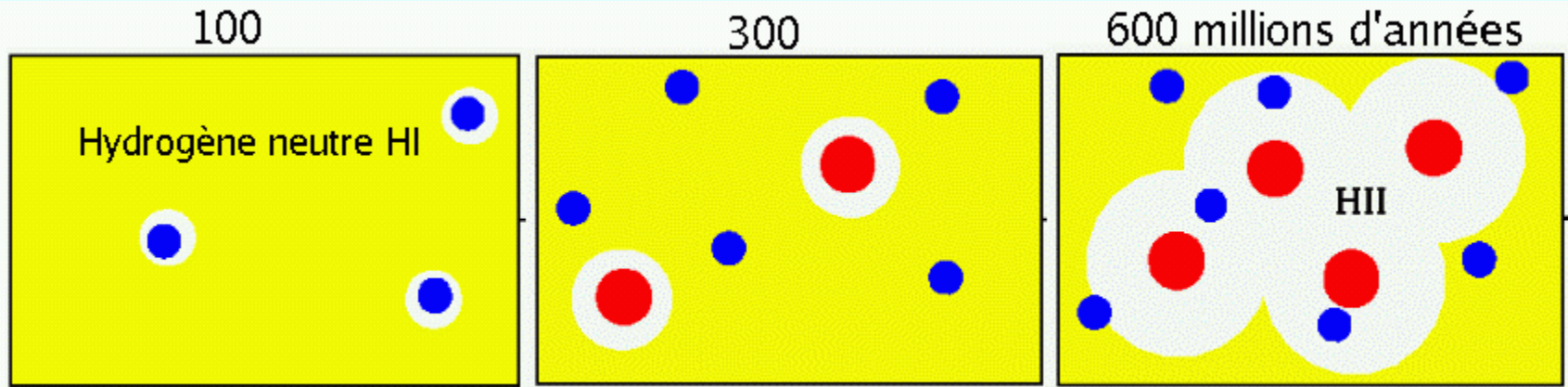
Evolution des Galaxies

Système solaire $9 \cdot 10^9$ an

46

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

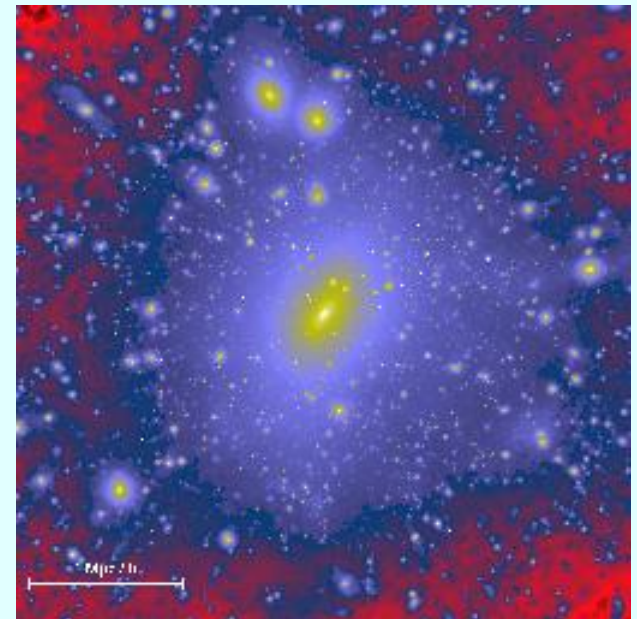
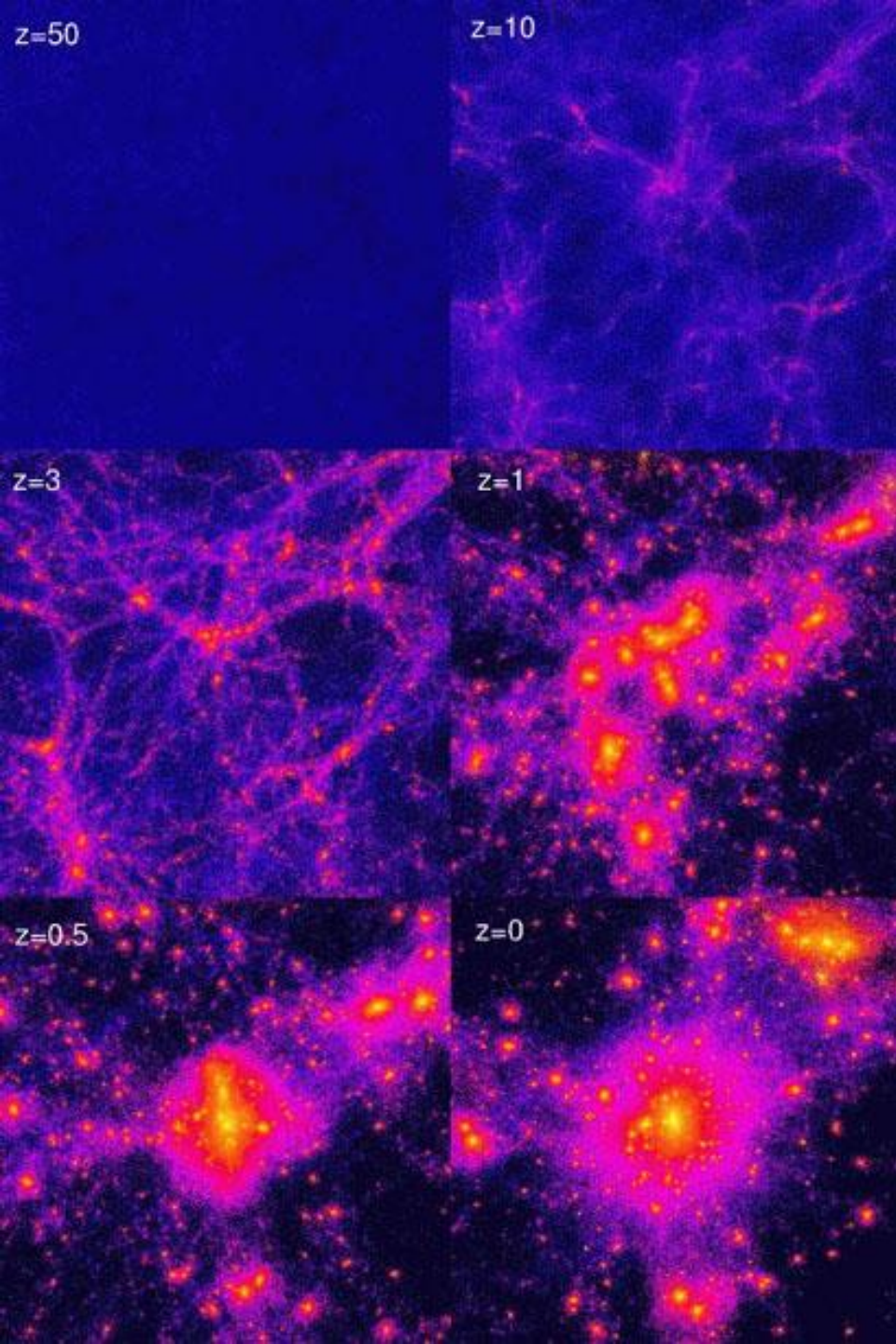
Réionisation



Percolation progressive des zones ionisées

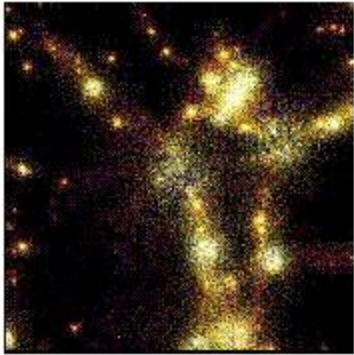
Trop de petites structures

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



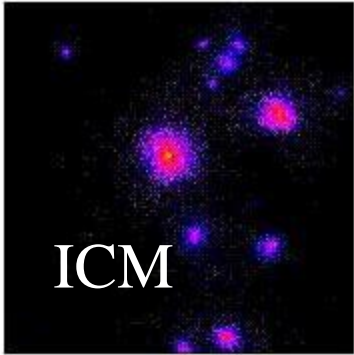
Où sont les baryons?

WHIM



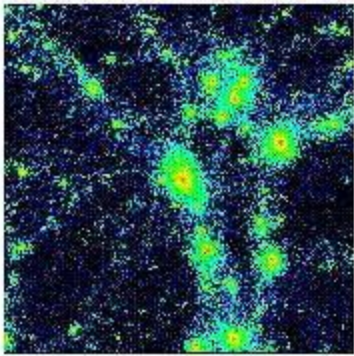
→ 6% dans les galaxies; 3% dans les amas (gas X)

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



ICM

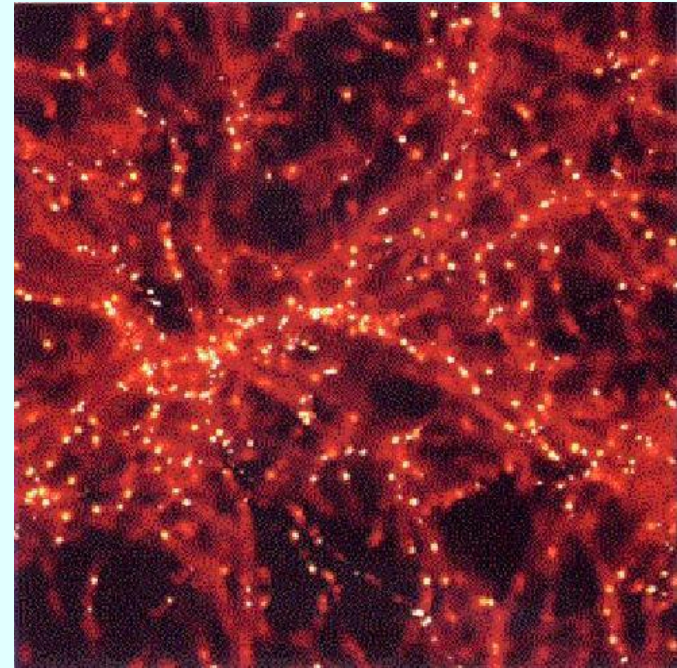
→ 5-10% dans le « Warm-Hot » WHIM 10^5 - 10^6 K
Nicastro et al 05, Danforth et al 06



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!

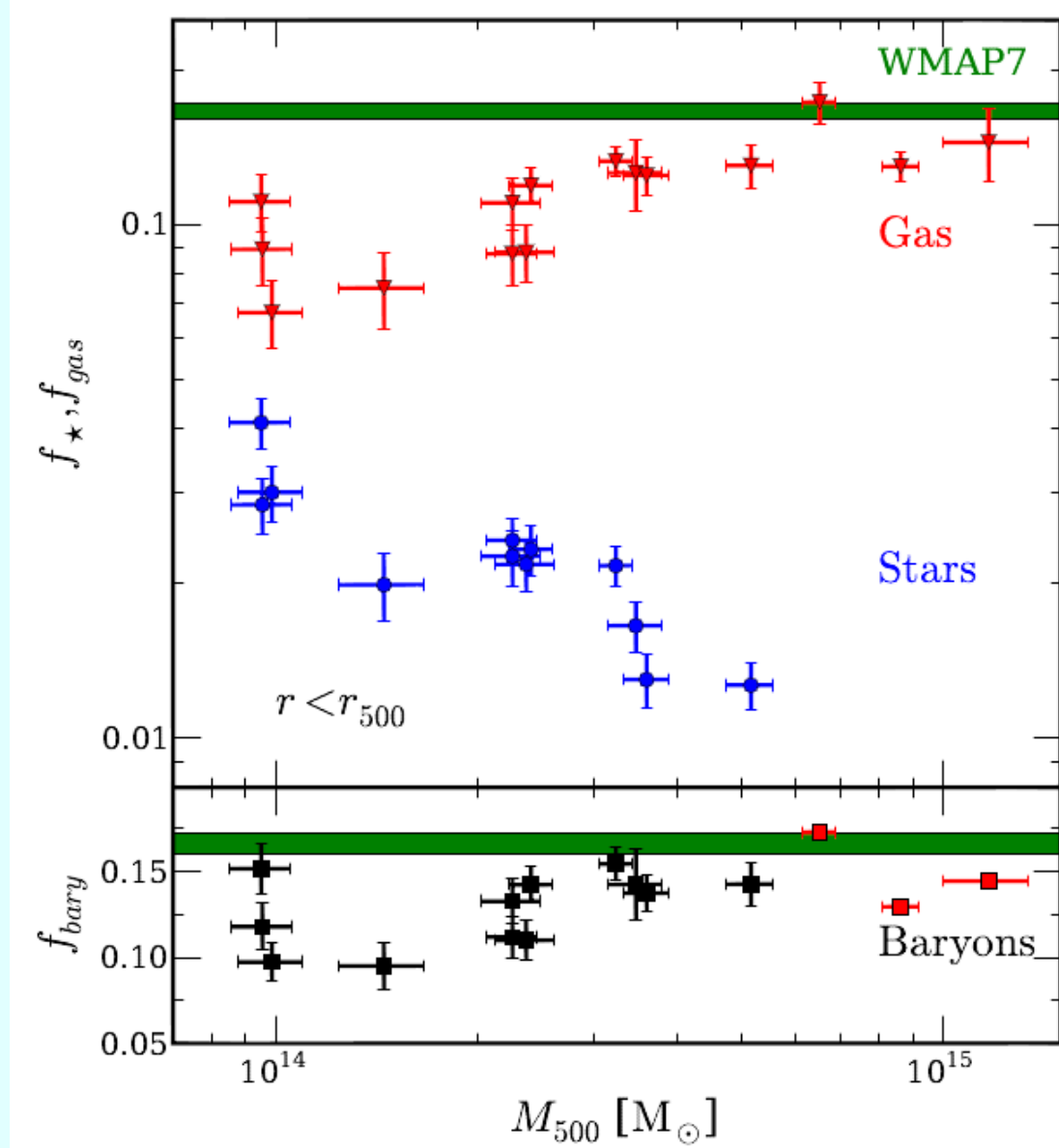
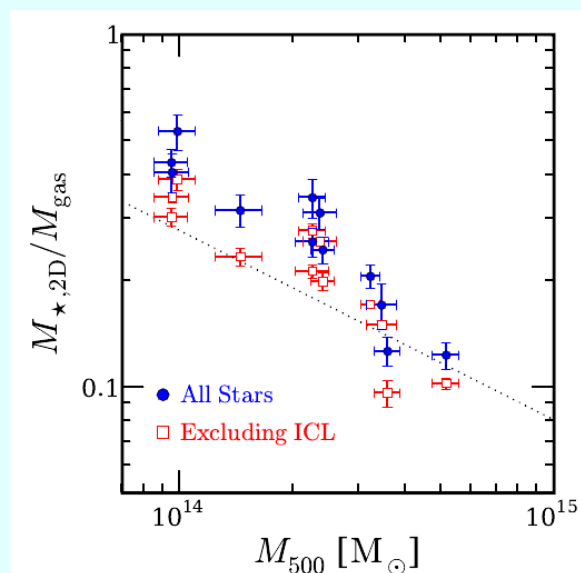
$$f_b = \Omega_b / \Omega_m \sim 0.15$$

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)

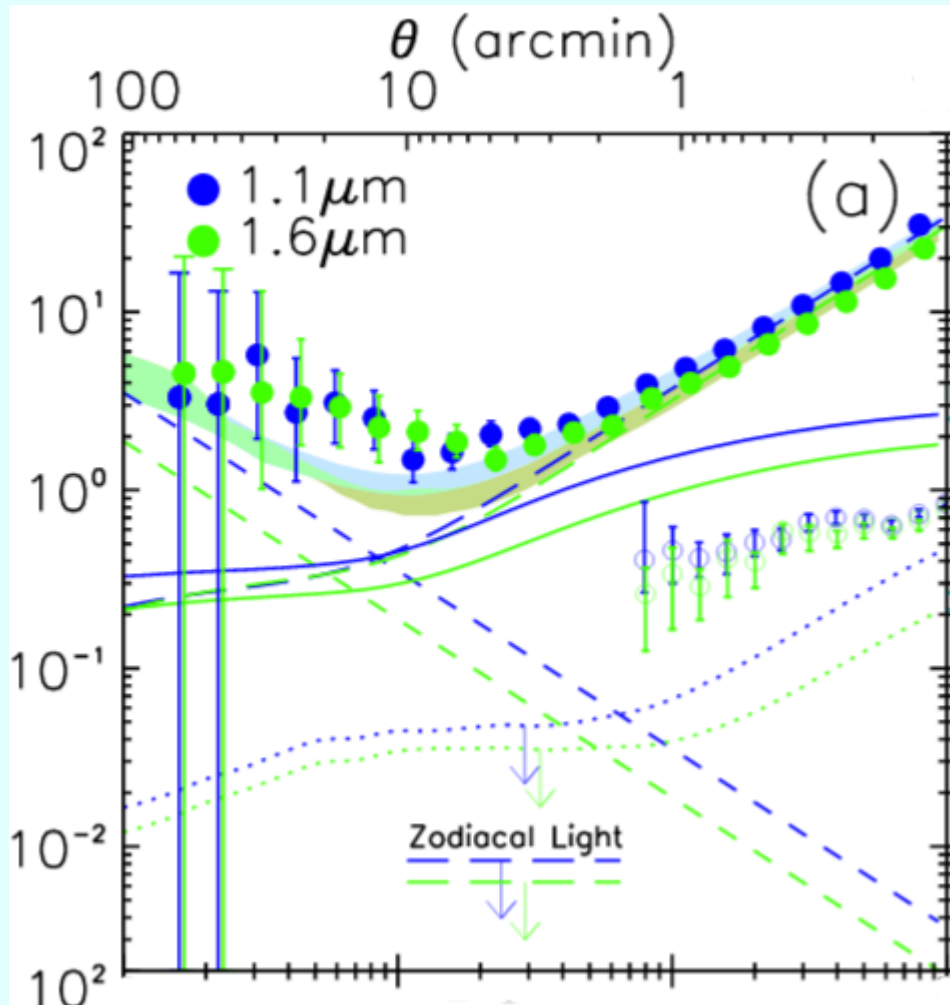
Distribution de la fraction de gaz chaud f_{gas} , d'étoiles f_* , et de baryons f_{bary} versus M_{500}
(Gonzalez et al 2013)

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



Lumière des étoiles vagabondes

Pourrait être comparable aux étoiles des galaxies?



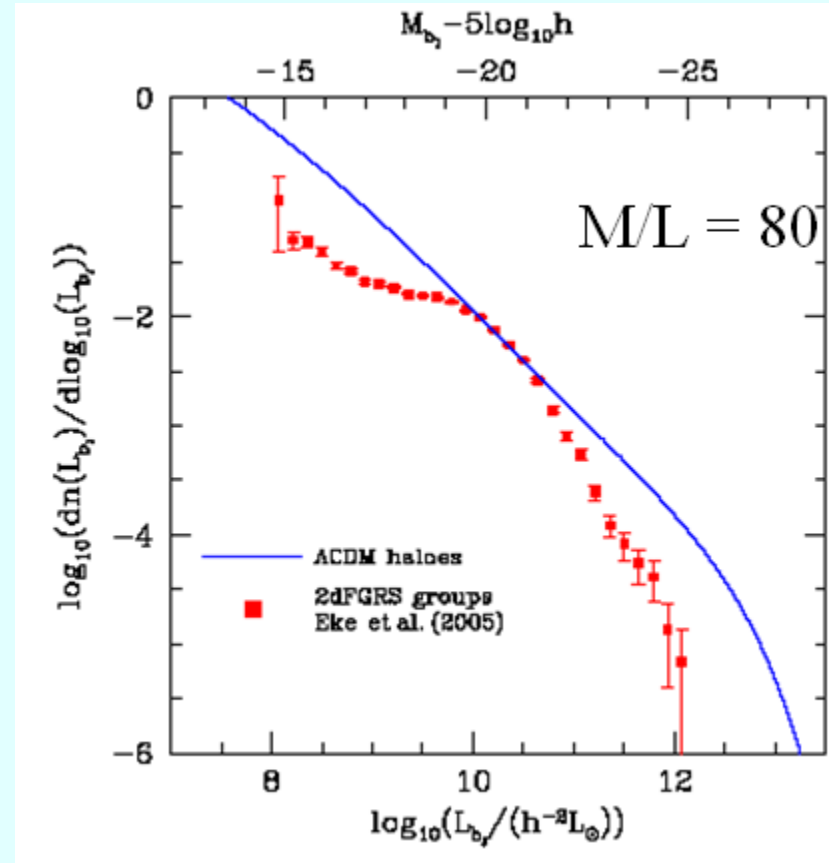
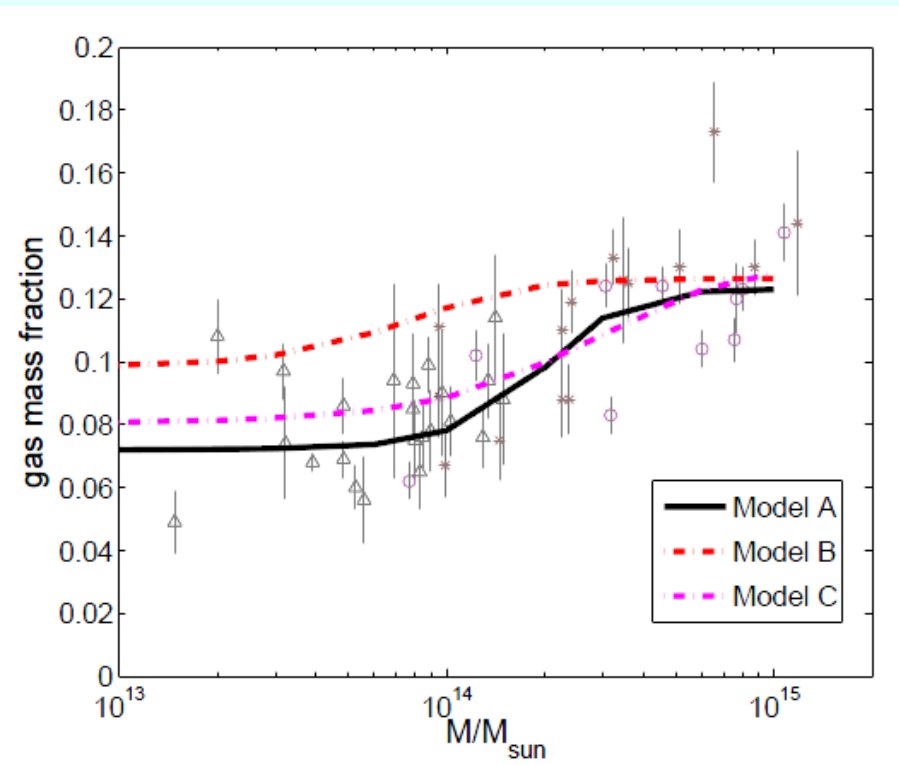
- Low-z Galaxies
- IHL Intra-halo light
- - - DGL Diffuse Galaxy light
- Reionization
- █ Total

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

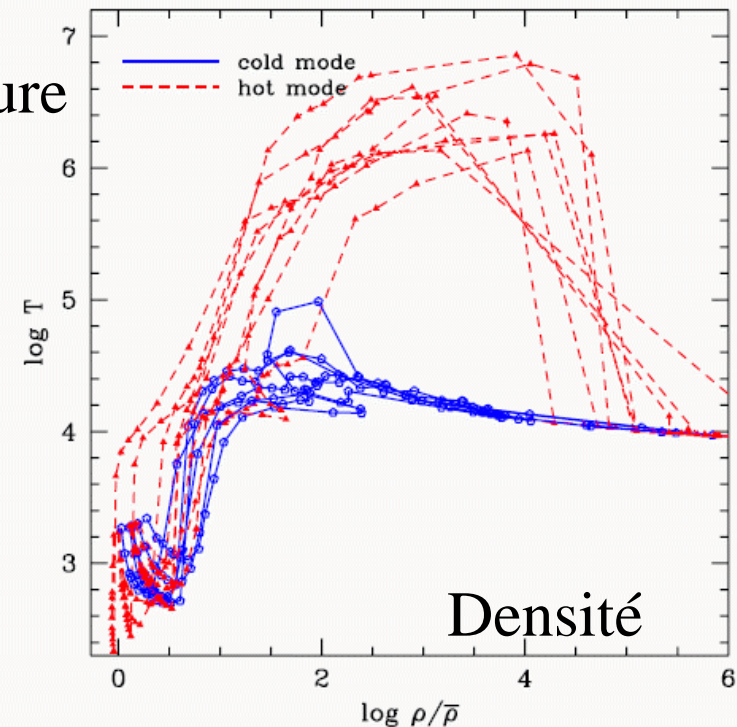
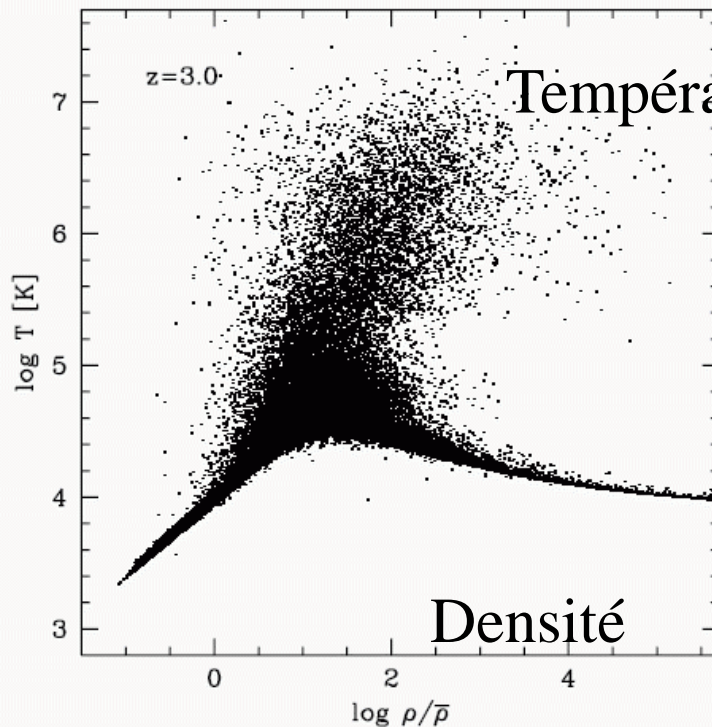
Accrétion de gaz froid dans les galaxies

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

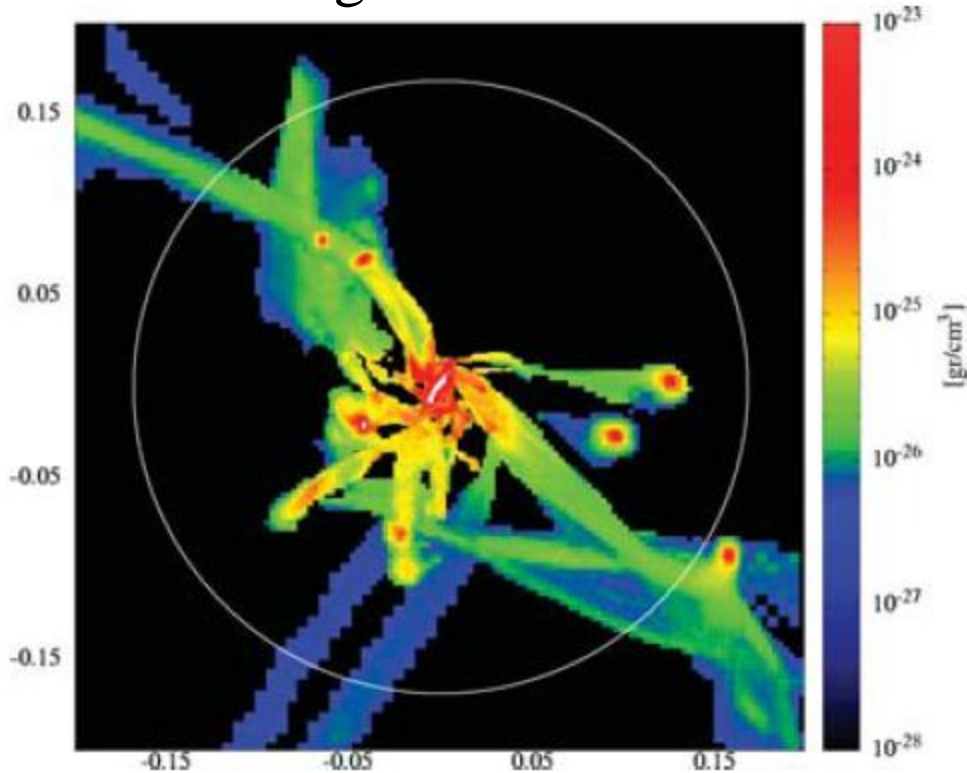
Le gaz froid coule le long des filaments, la fraction de gaz froid est plus grande dans les petits halos ($M_{\text{CDM}} < 3 \cdot 10^{11} M_{\odot}$)

Keres et al
2005

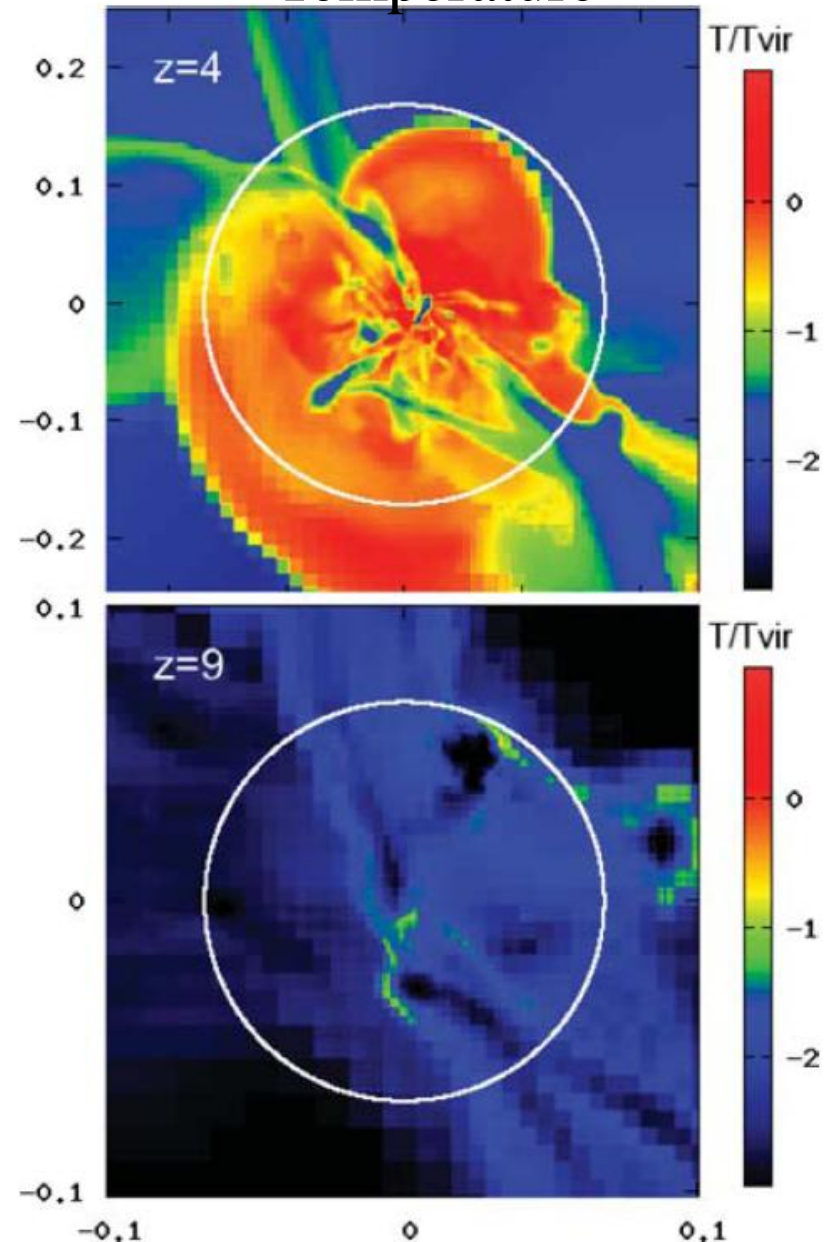


Accrétion froide dans les filaments

Densité du gaz froid



Température

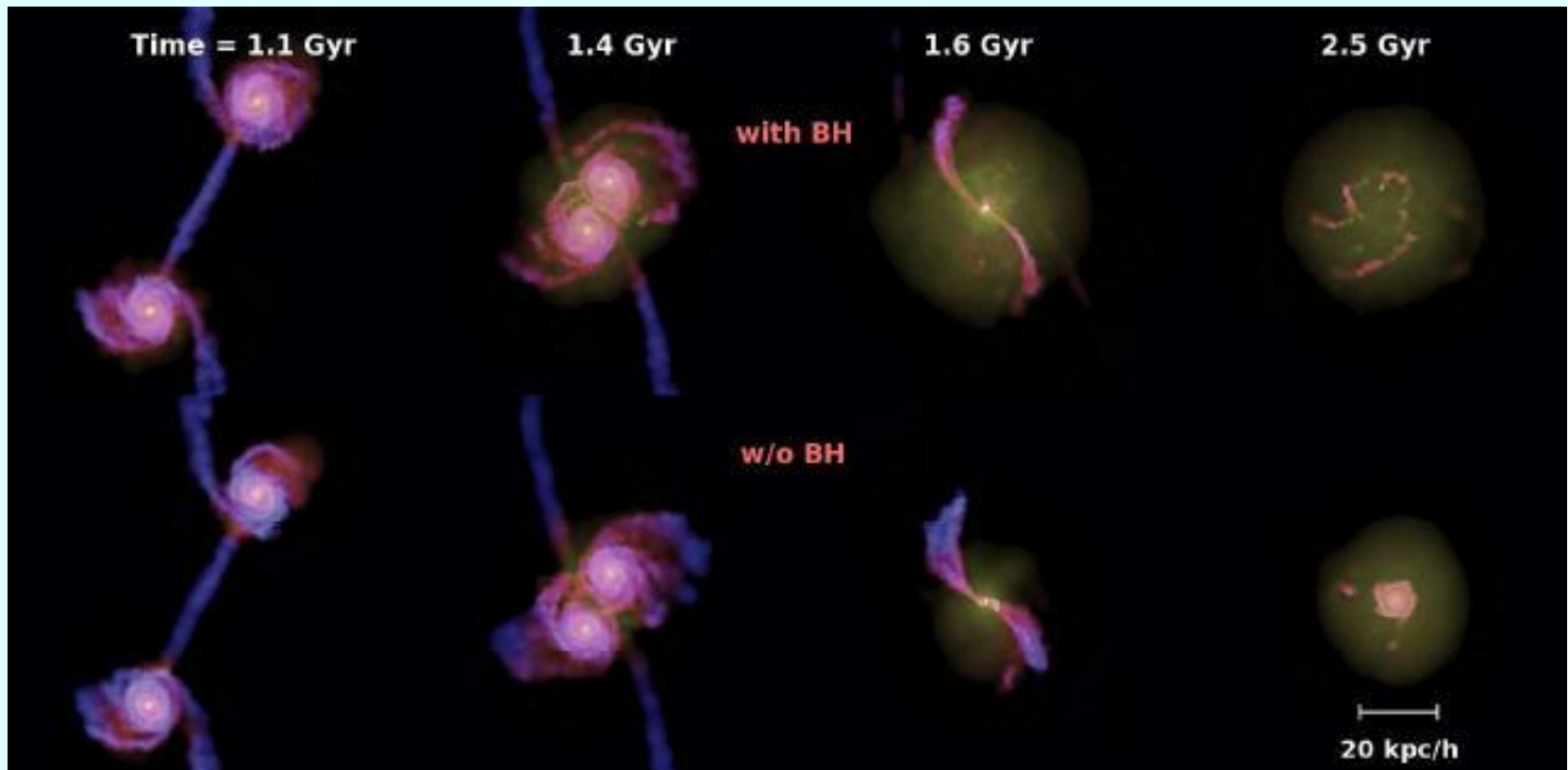
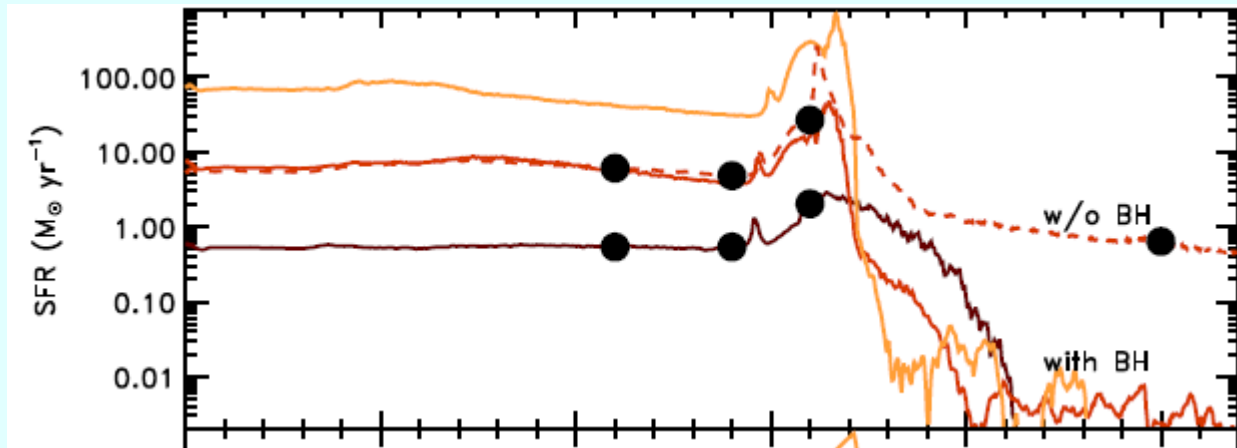


Arrêt de la formation d'étoiles
Origine de la bimodalité?

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