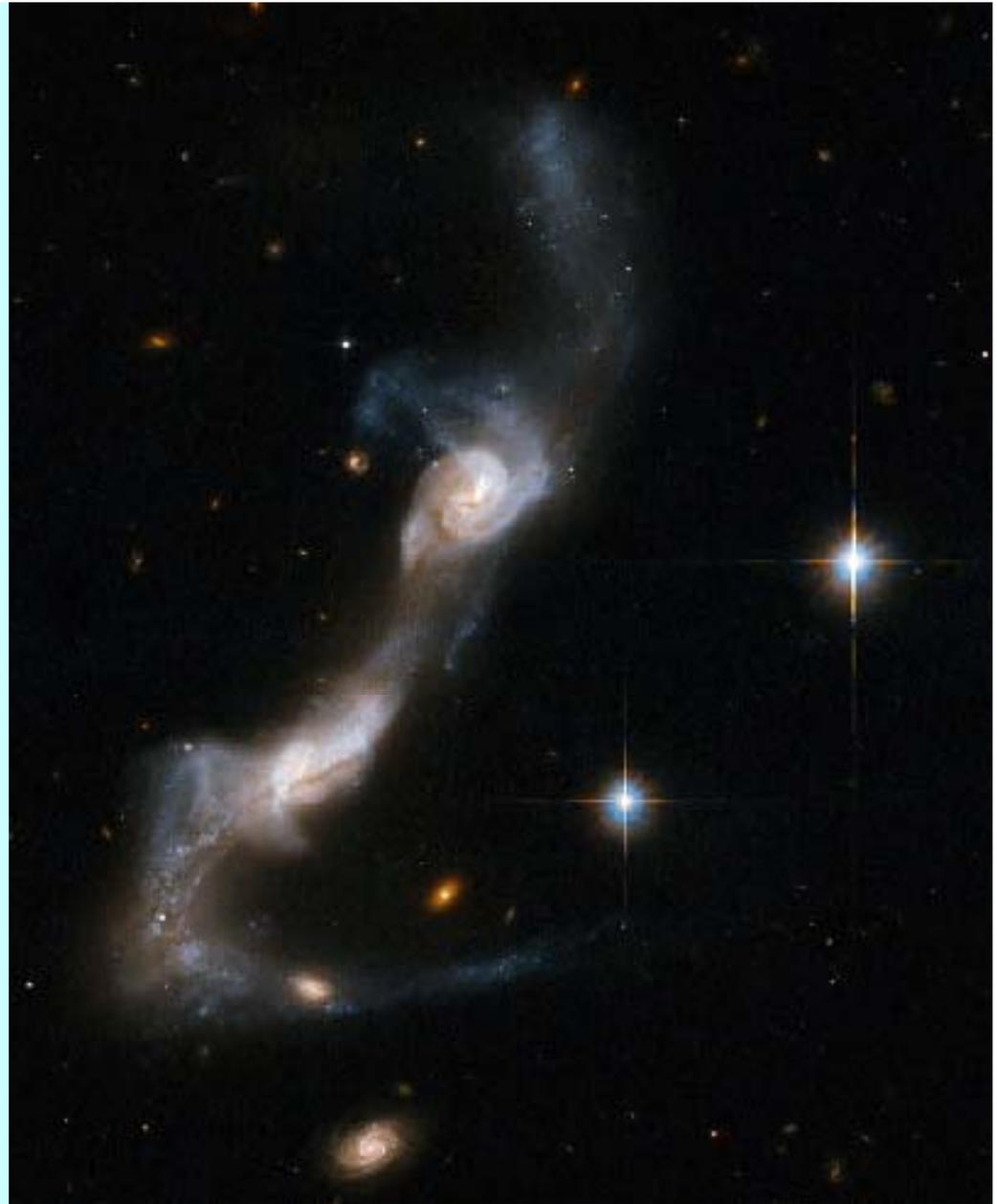


Naissance et vie des galaxies

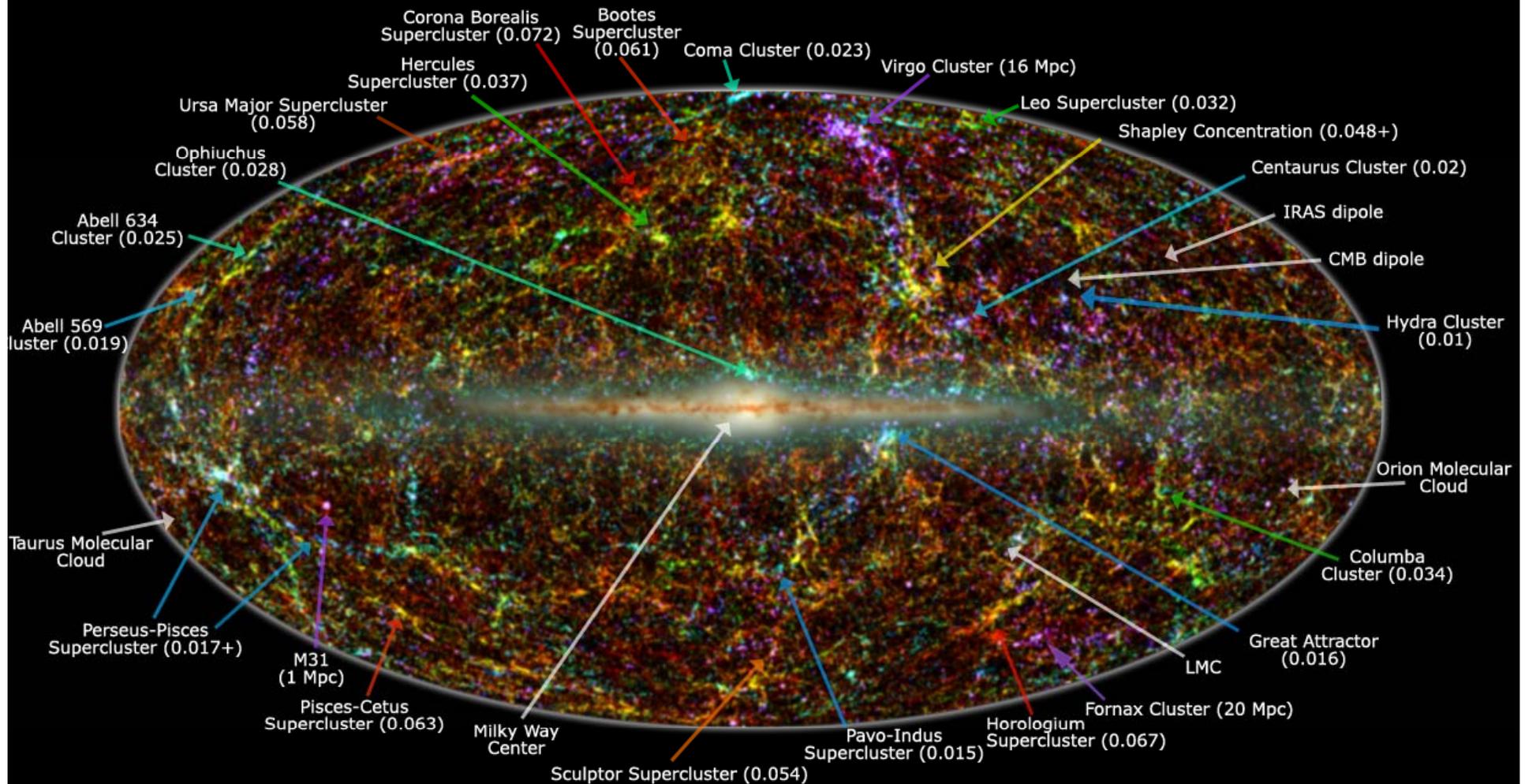
Françoise Combes
Observatoire de Paris
VV, 21 Janvier 2010



Les galaxies dans l'Univers

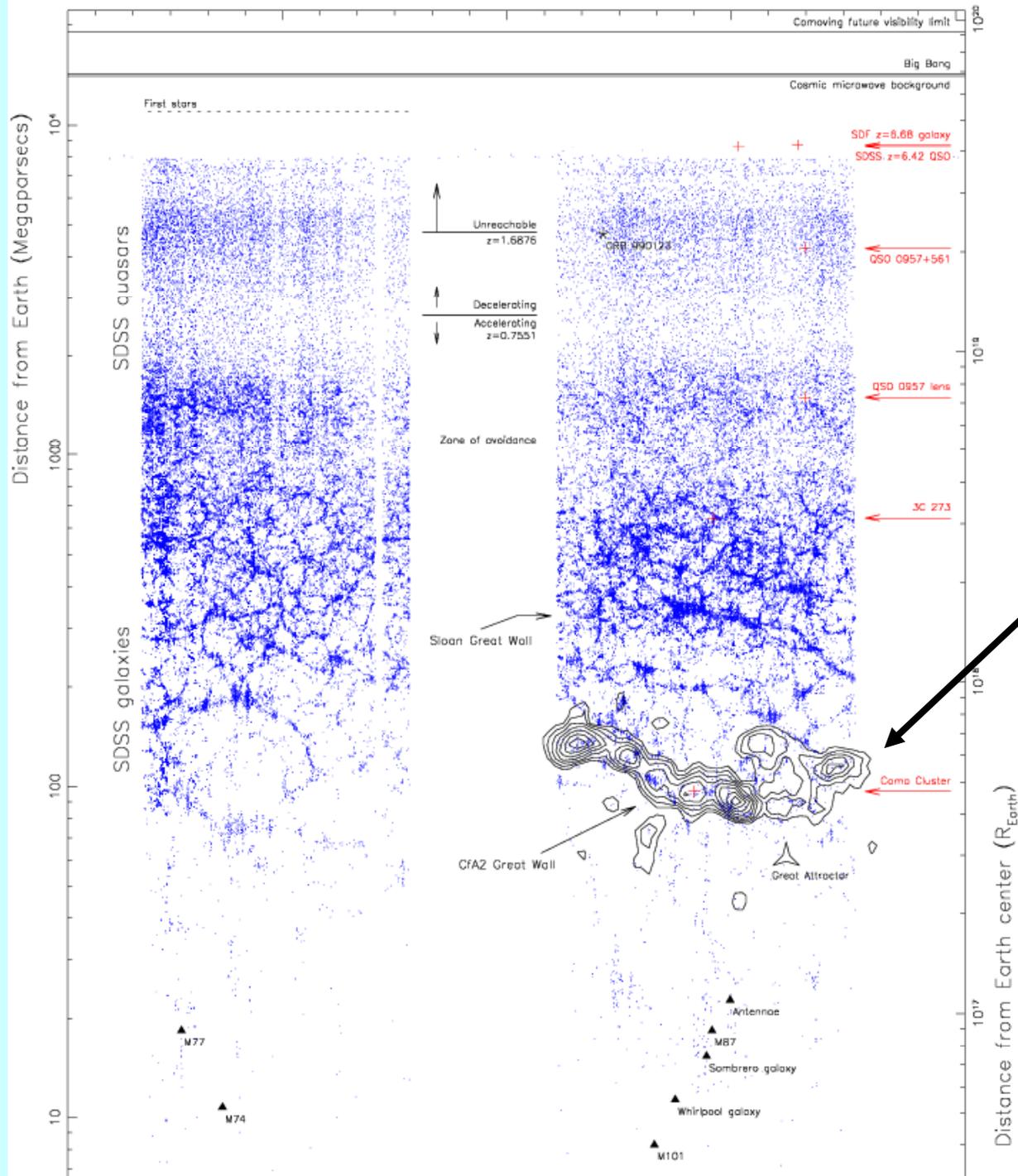
- Notre position dans l'Univers
- Distribution des galaxies en filaments
- Fond cosmologique à 3K
- Big-Bang, Inflation et expansion
- Formation des galaxies, fusions
- Simulations Numériques
- Matière Noire, Energie Noire

Grandes structures de l'Univers local



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

Amas et superamas proches



Carte Conforme
Logarithmique

"Grand Mur » de
1370 Mpc

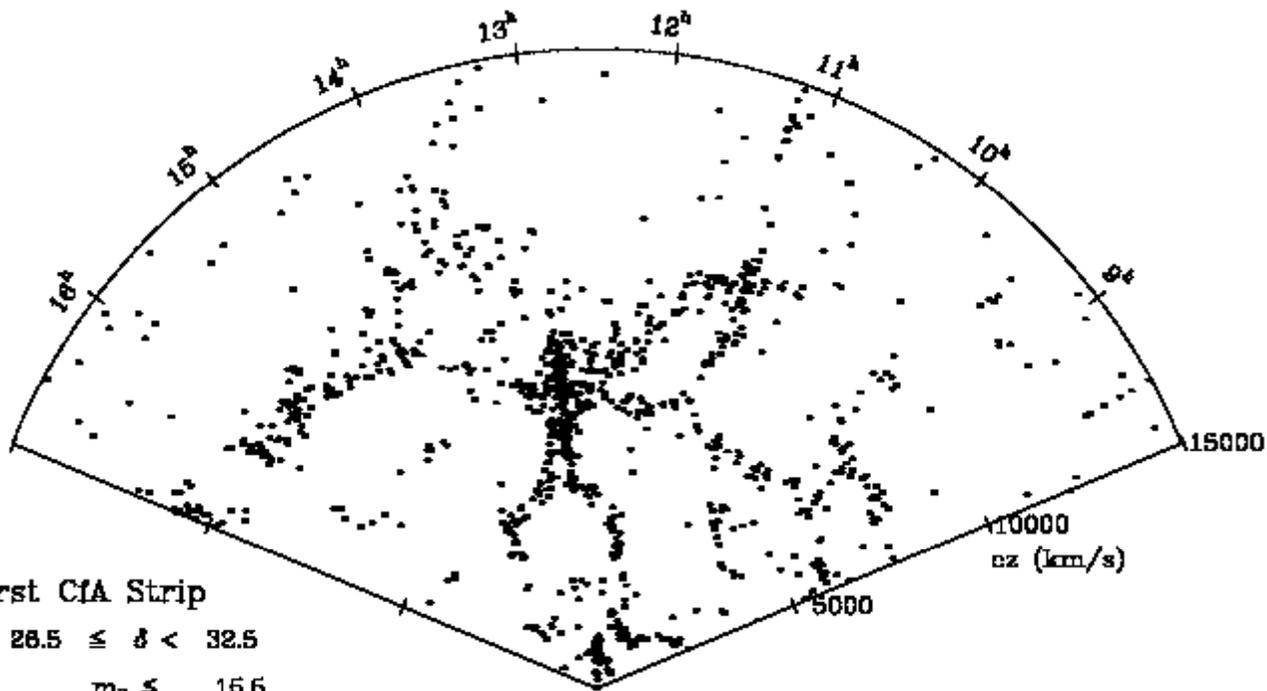
Deux hémisphères

Grands relevés de galaxies

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

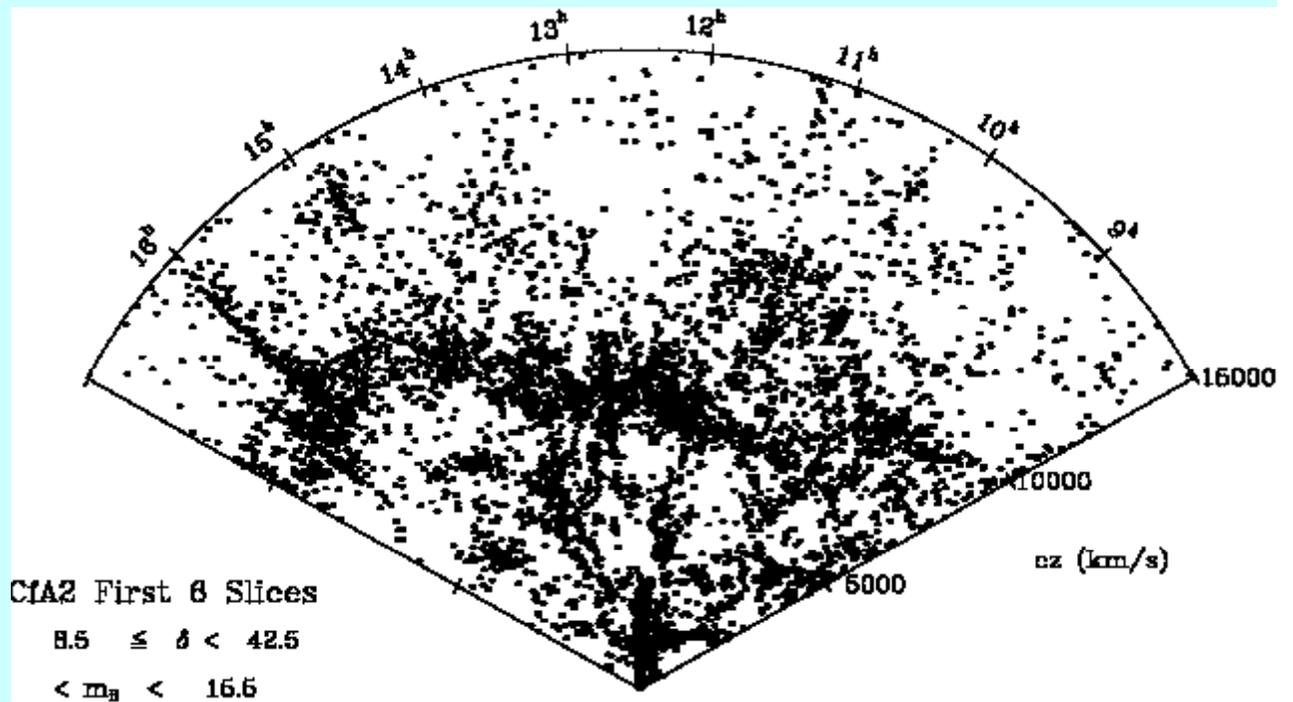
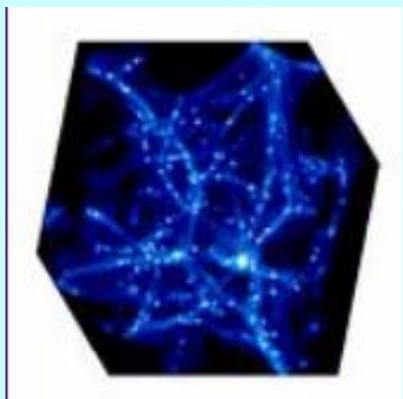
SDSS: Sloan Digital Sky Survey: 1 million de spectres de galaxies
images de 100 millions d'astres, 100 000 Quasars
1/4 de la surface du ciel (télescope de 2.5m)

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



First CfA Strip

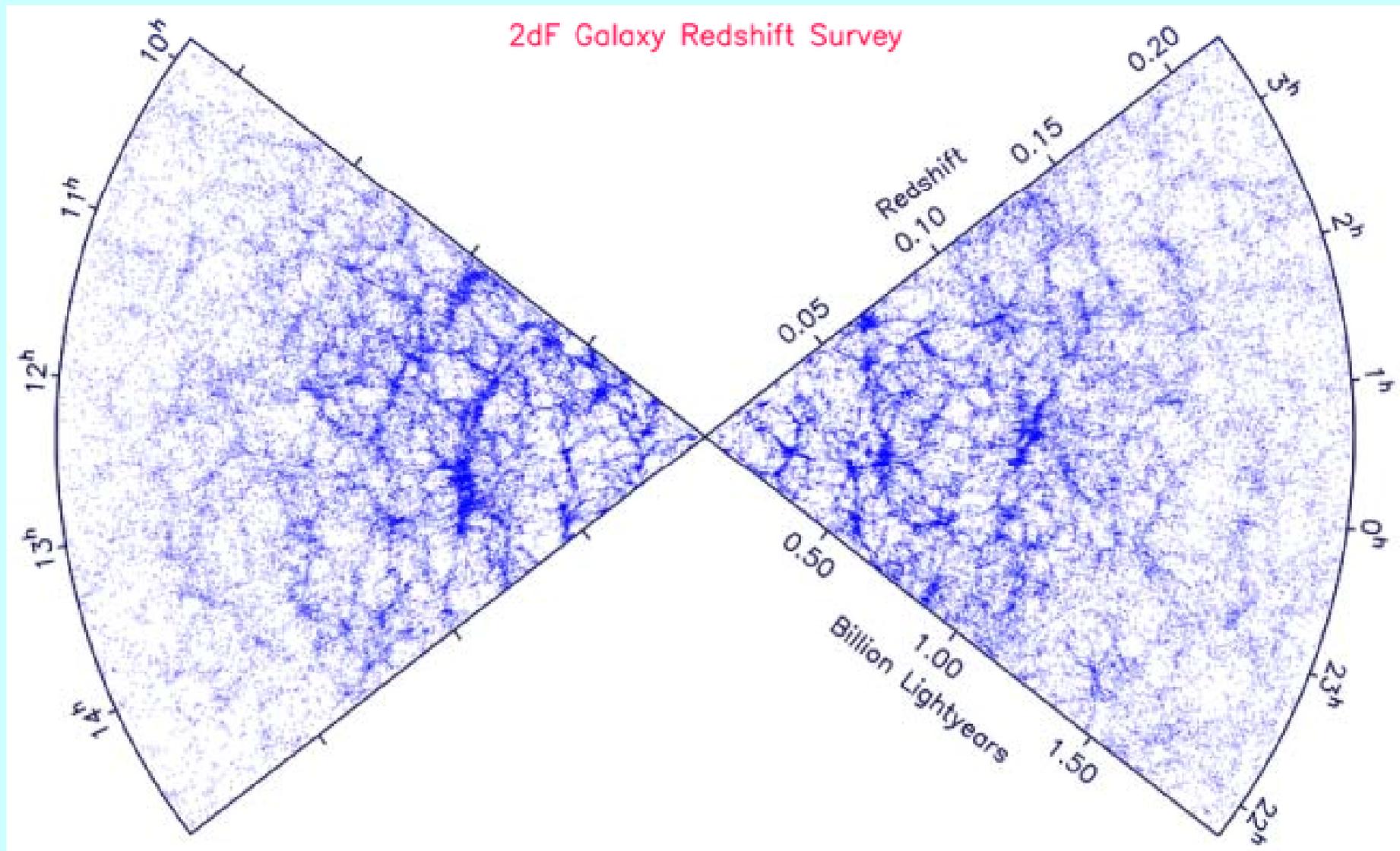
$26.5 \leq \delta < 32.5$
 $m_B \leq 15.6$



CfA2 First 6 Slices

$8.5 \leq \delta < 42.5$
 $< m_B < 16.6$

Relevé de galaxies 2dF



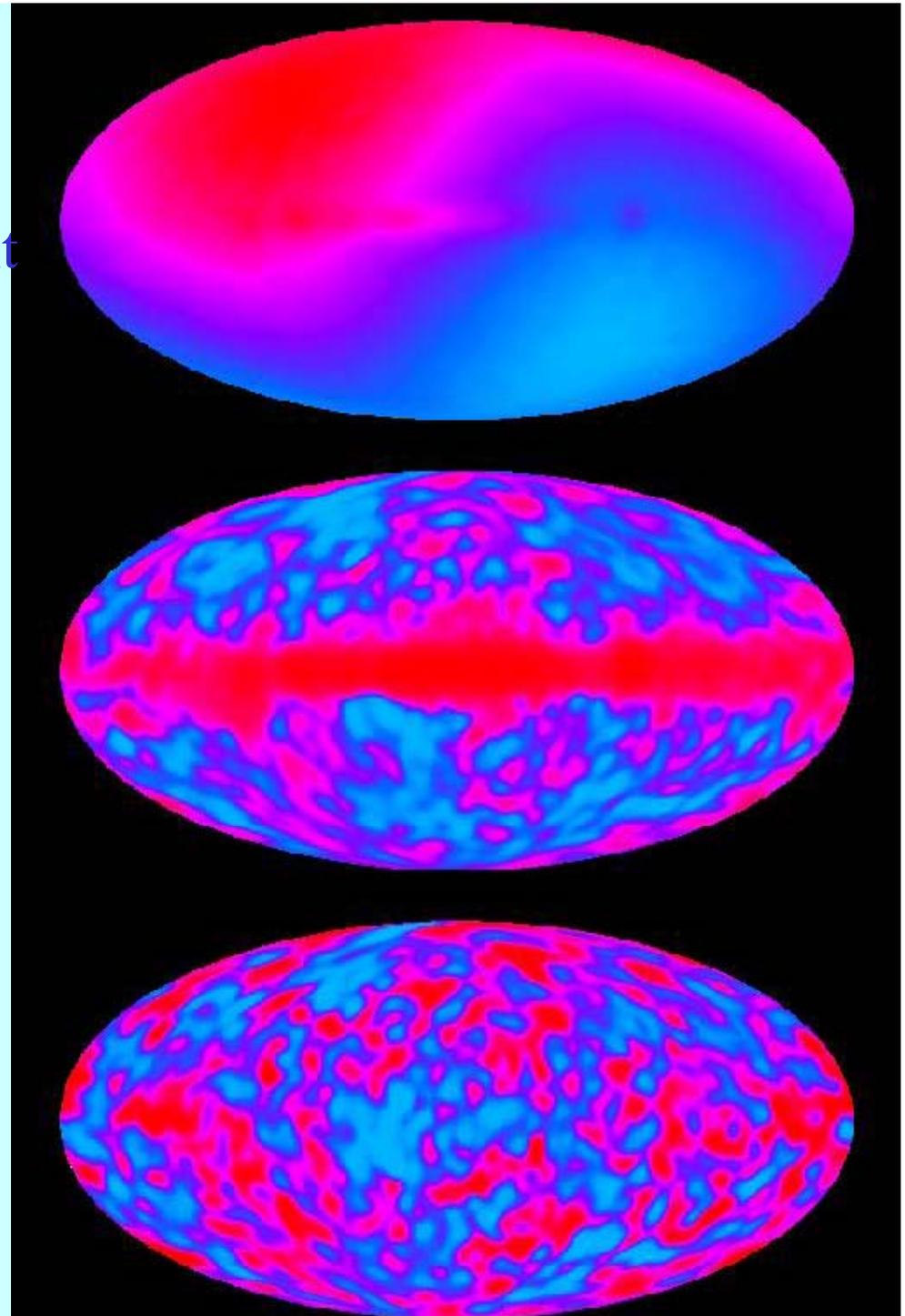
Le ciel est uniforme à $\lambda=3\text{mm}$

Une fois le niveau constant soustrait
→ **dipôle** ($V = 600\text{km/s}$)

Après soustraction du dipôle,
→ **la Voie Lactée**, émissions
de la poussière, synchrotron, etc..

Soustraction de la Voie Lactée
→ fluctuations aléatoires

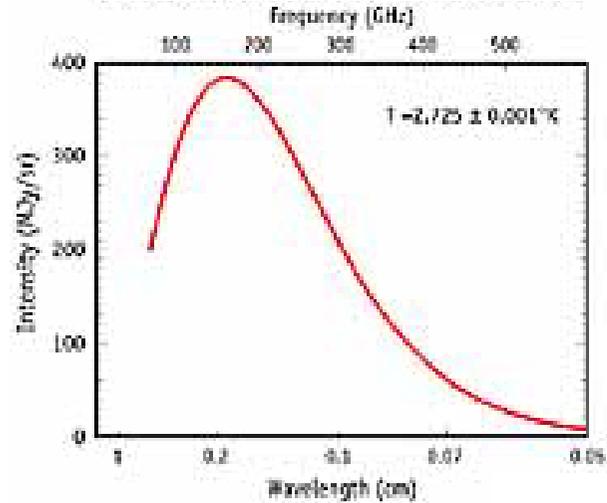
$$\Delta T/T \sim 10^{-5}$$



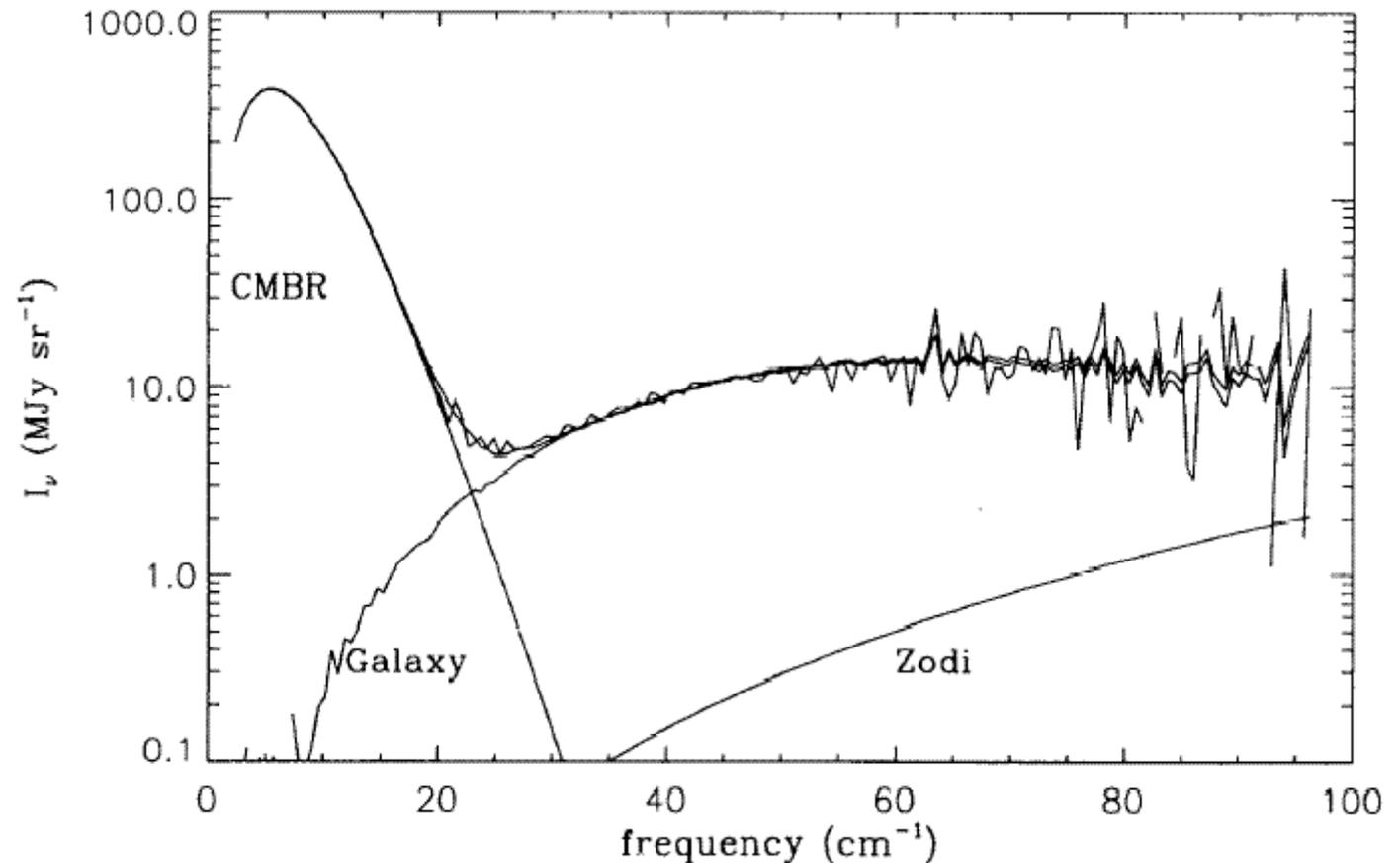
Fonds cosmologique à 3K

- 2.73K au-dessus de zéro ($\sim -270^\circ \text{C}$)
- longueurs d'onde **millimétriques/cm** (\sim four micro-onde)
- 400 photons/cm³ (10 000 milliards /s/cm²)
- 1% de la "neige" sur un poste TV
- Homogène et isotrope à **10^{-5} près**
- Ces anisotropies nous renseignent sur les fluctuations ayant donné naissance aux galaxies
- Dernière surface de diffusion (380 000 ans après le Big-Bang)

SPECTRUM OF THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND

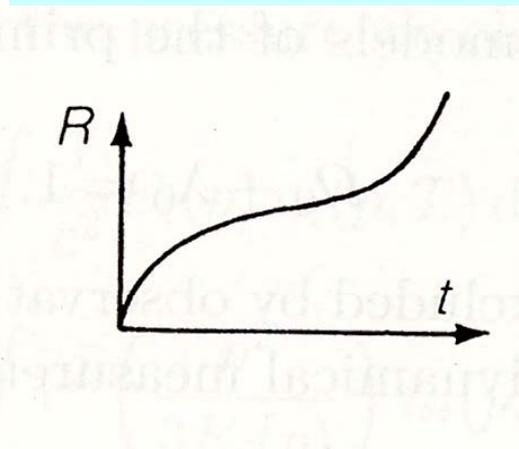
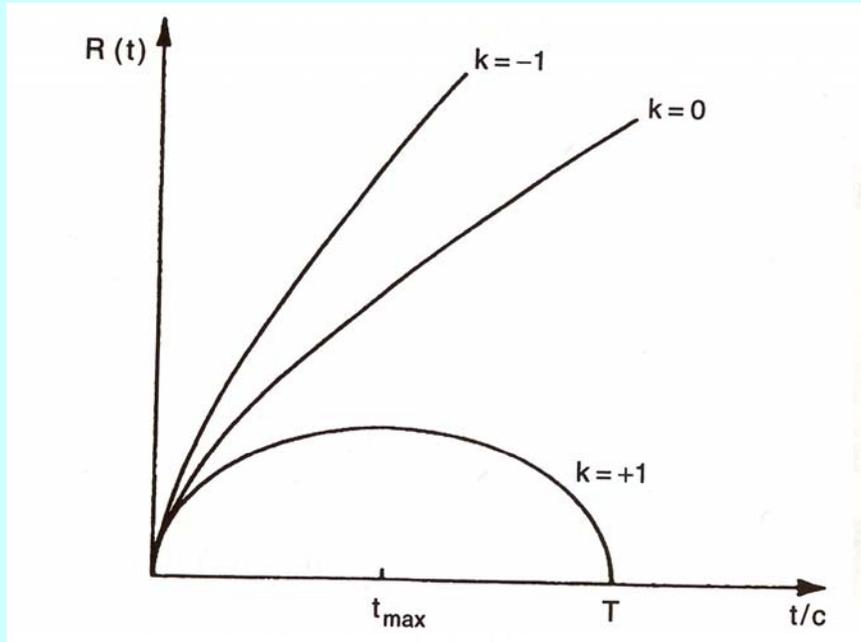


Spectre du fond à 3K
vestige du Big-Bang



Le Big-Bang

Expansion, loi de Hubble $V=HD$



Modèles classiques de Friedman

$k < 0$ Hyperbolique

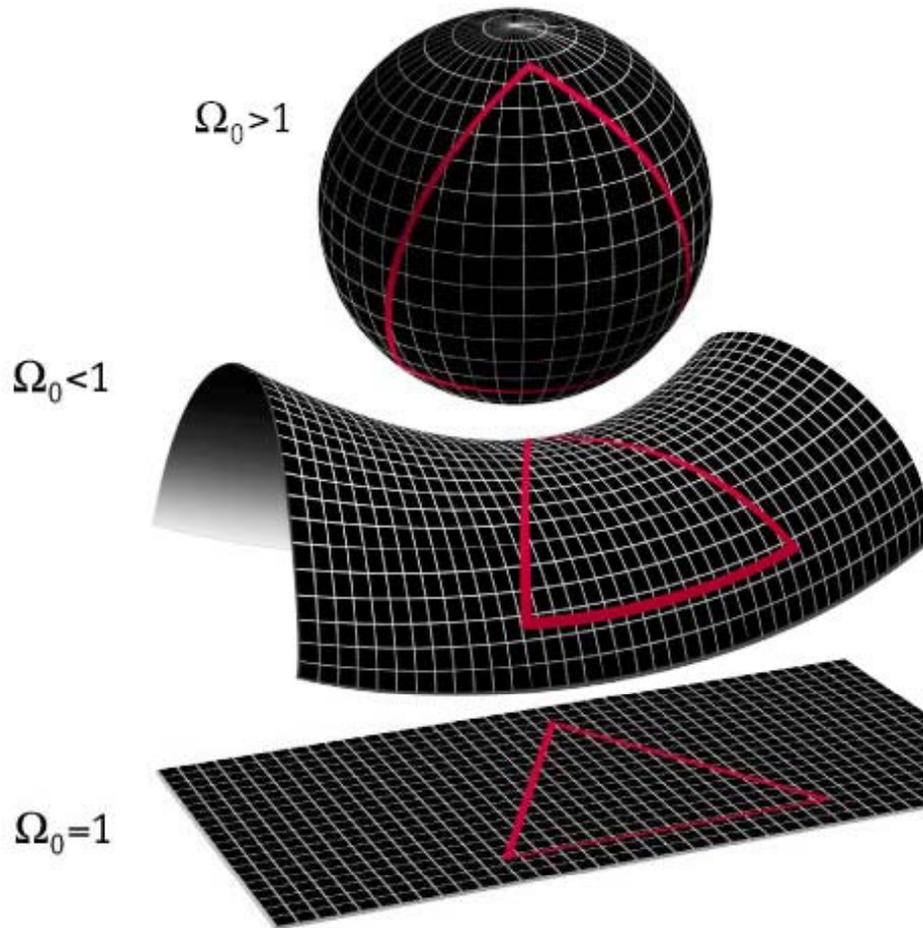
$k = 0$ Parabolique

$k > 0$ Elliptique, fermé

Avec constante
cosmologique Λ

$\Omega = \rho / \rho_{\text{crit}}$

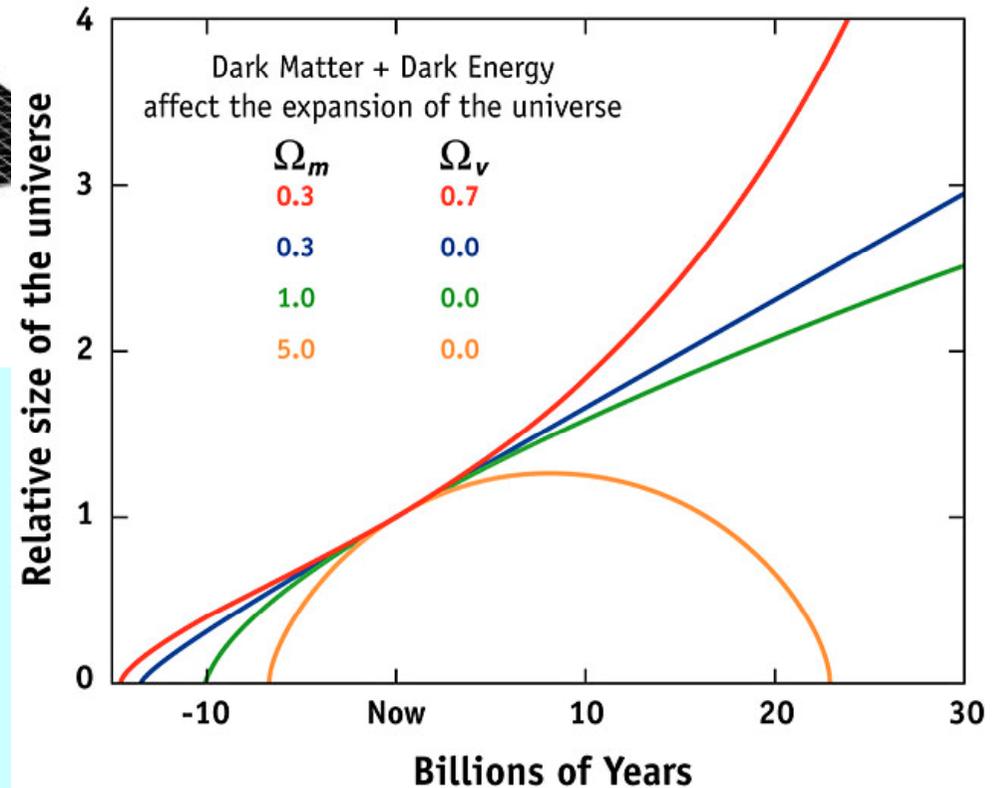
Paramètres de l'Univers



MAP990006

$$\Omega = \rho / \rho_{\text{crit}}$$

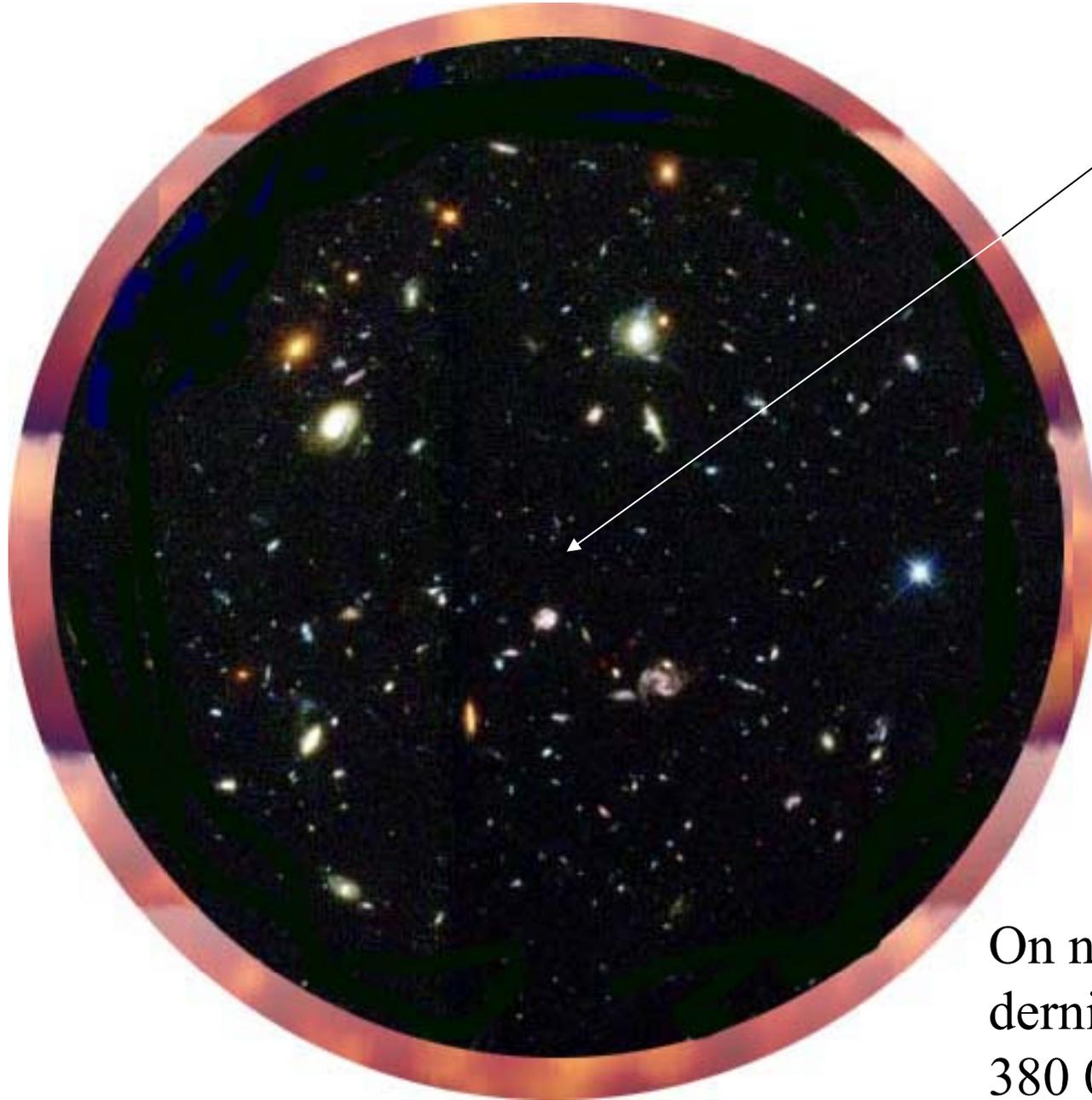
EXPANSION OF THE UNIVERSE



Expansion de l'Univers et redshift



Horizon de l'Univers



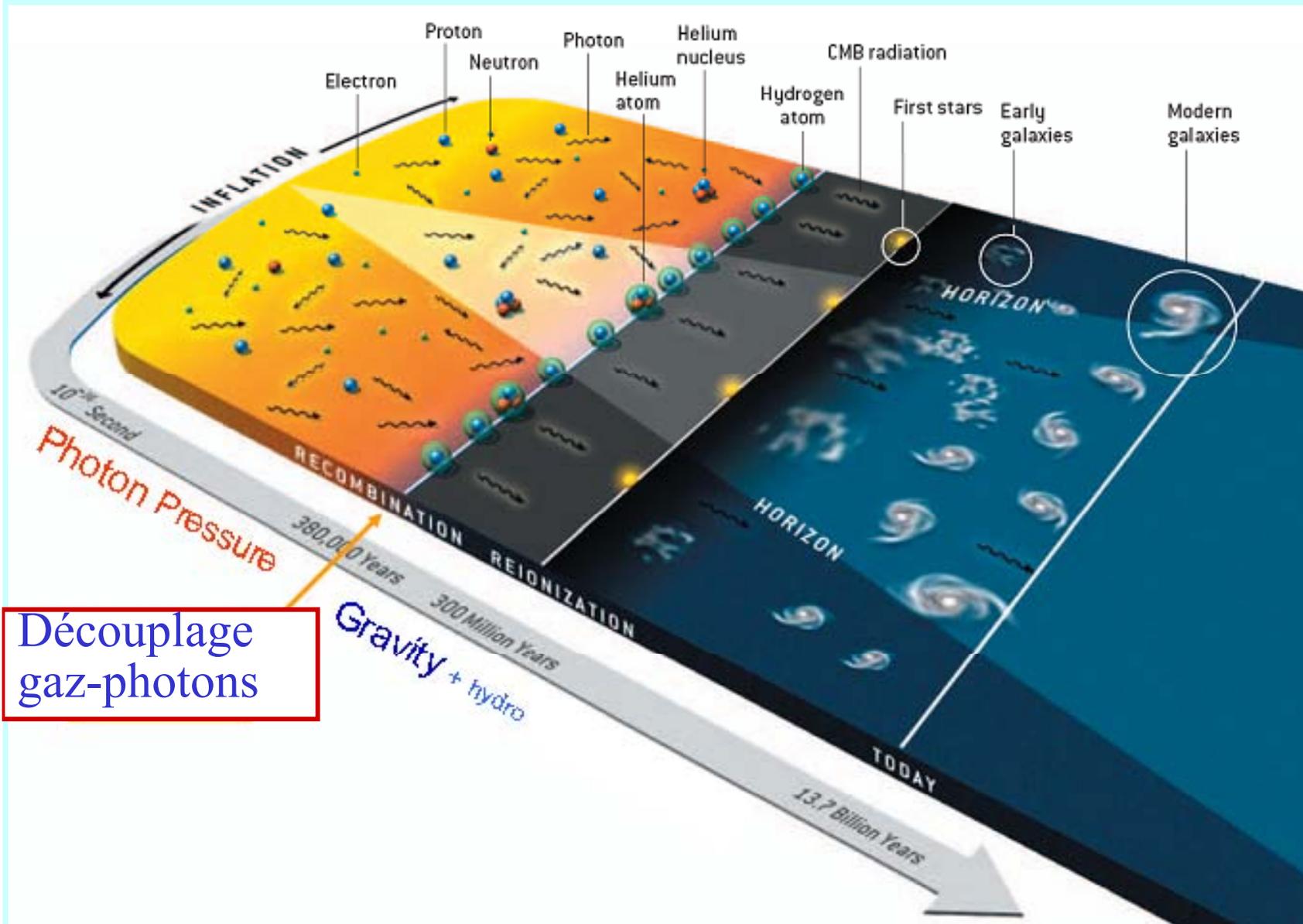
Vous êtes ICI
au centre de
l'Univers visible

Regarder loin
revient à remonter
dans le temps

Jusqu'au Big-Bang
il y a 13.7 milliards
d'années

On ne voit que jusqu'à la
dernière surface de diffusion
380 000 ans après le Big-Bang¹⁴

Histoire de l'univers



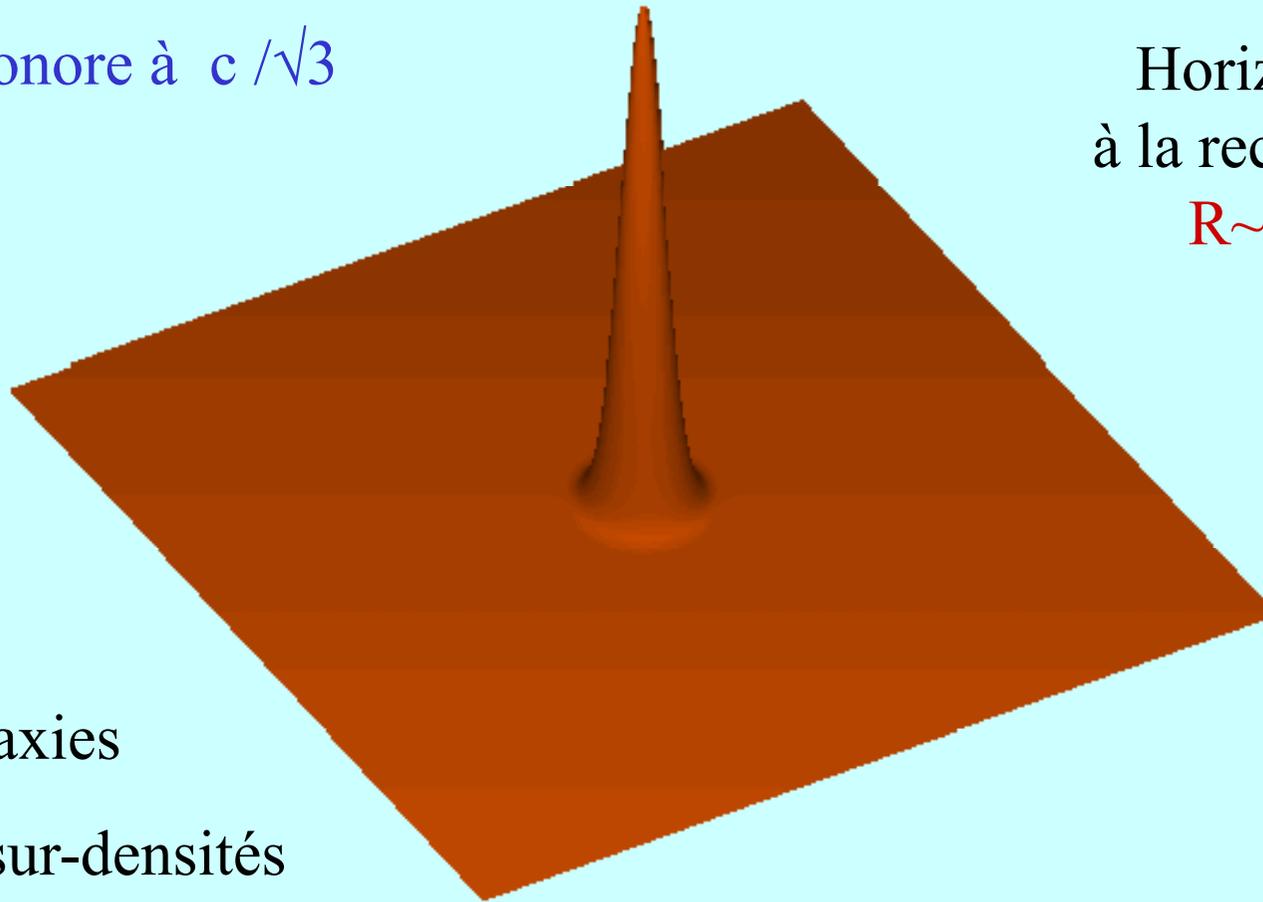
Découplage gaz-photons

Une simple perturbation

Crée une dépression

→ Onde sonore à $c/\sqrt{3}$

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

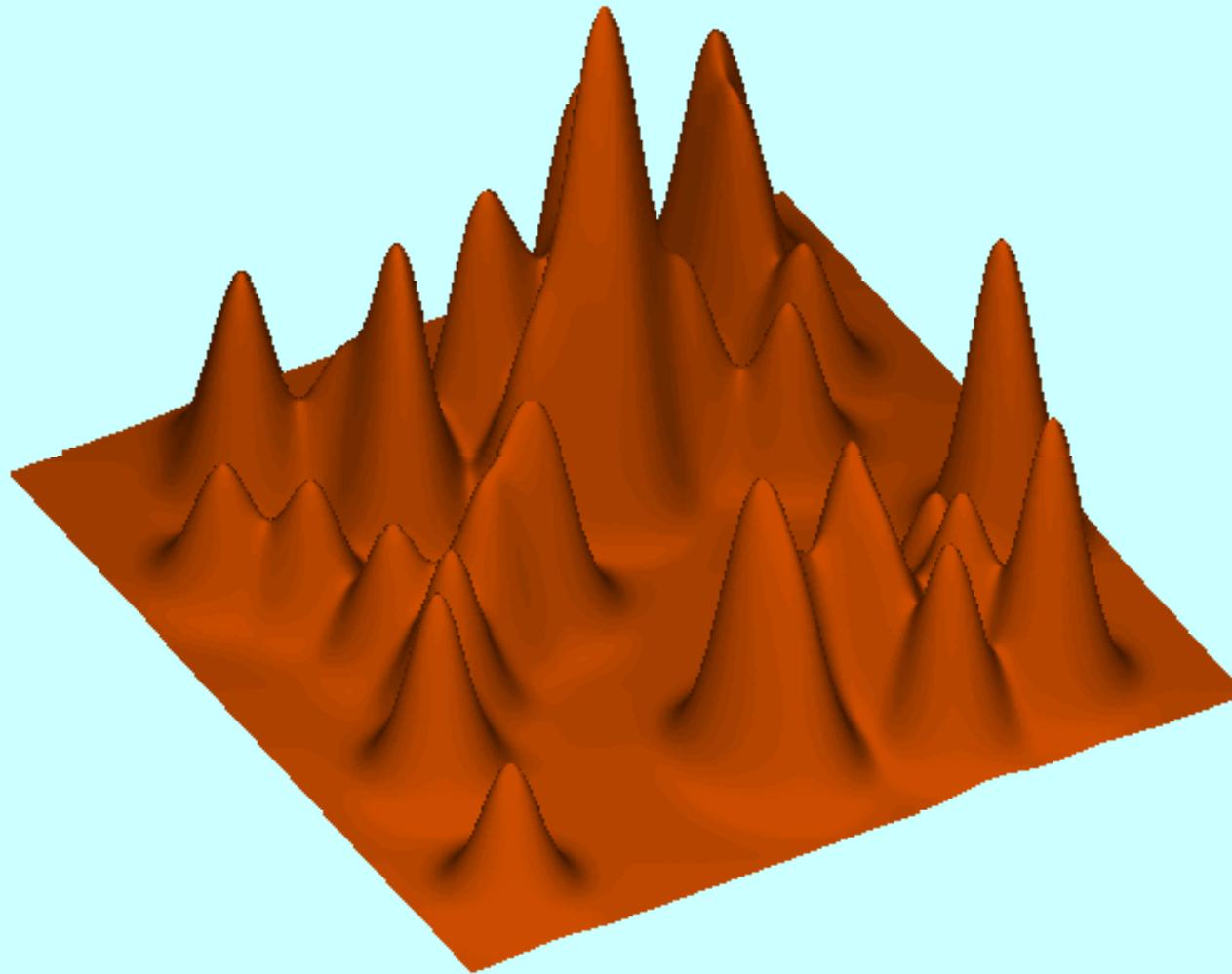


Galaxies

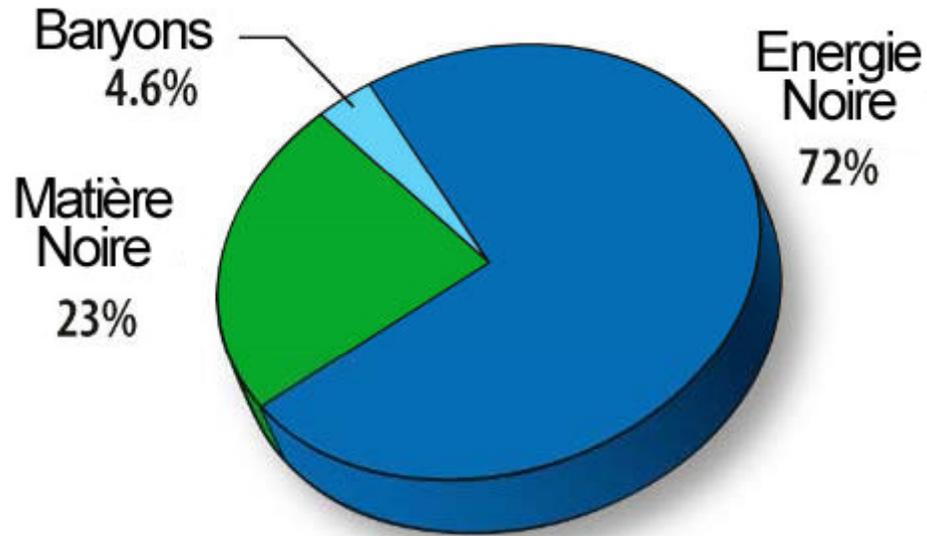
dans les sur-densités

→ Ondes acoustiques

Multiples perturbations



Résultats WMAP



$$\Omega_m = 0.28$$

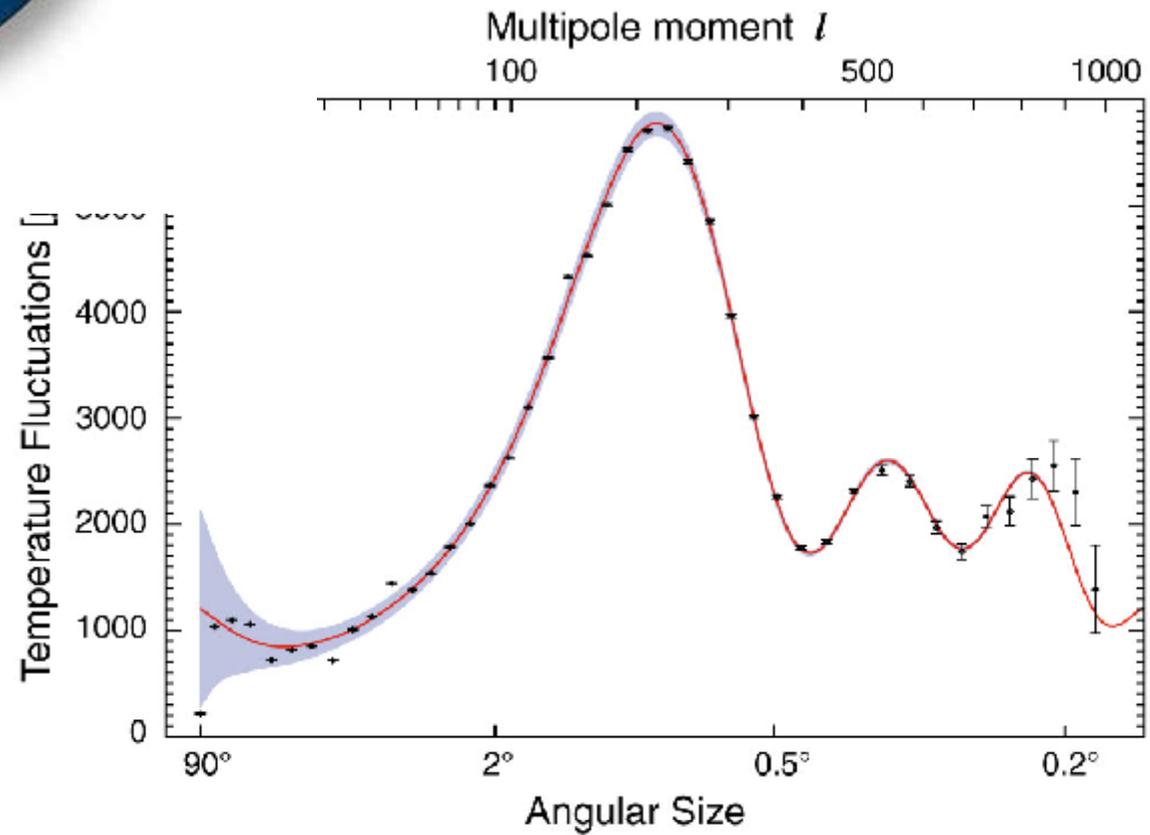
$$\Lambda = 0.72$$

$$\Omega_b = 0.05$$

$$H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc}$$

Age = 13.7 Gyr

Univers plat

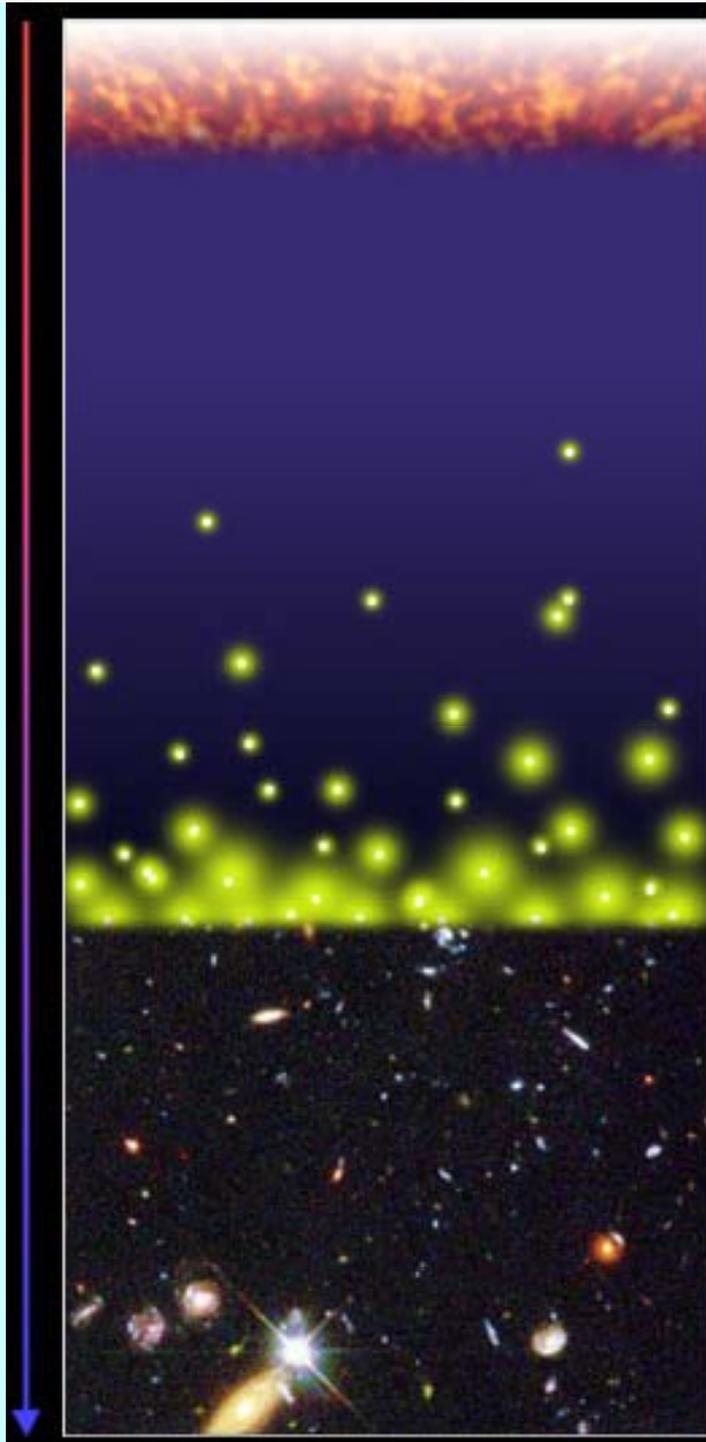


Résumé des Découvertes Récentes

2001 Quasar $z=6$.
absorption continue

2002-06 WMAP
paramètres de l'univers
Réionisation

2004: Champs profonds
Télescope Hubble-ACS



Big-Bang

Recombinaison $3 \cdot 10^5 \text{an}$

Age Sombre

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

Renaissance Cosmique

Fin de l'âge sombre

Fin de la reionisation 10^9a

Evolution des Galaxies

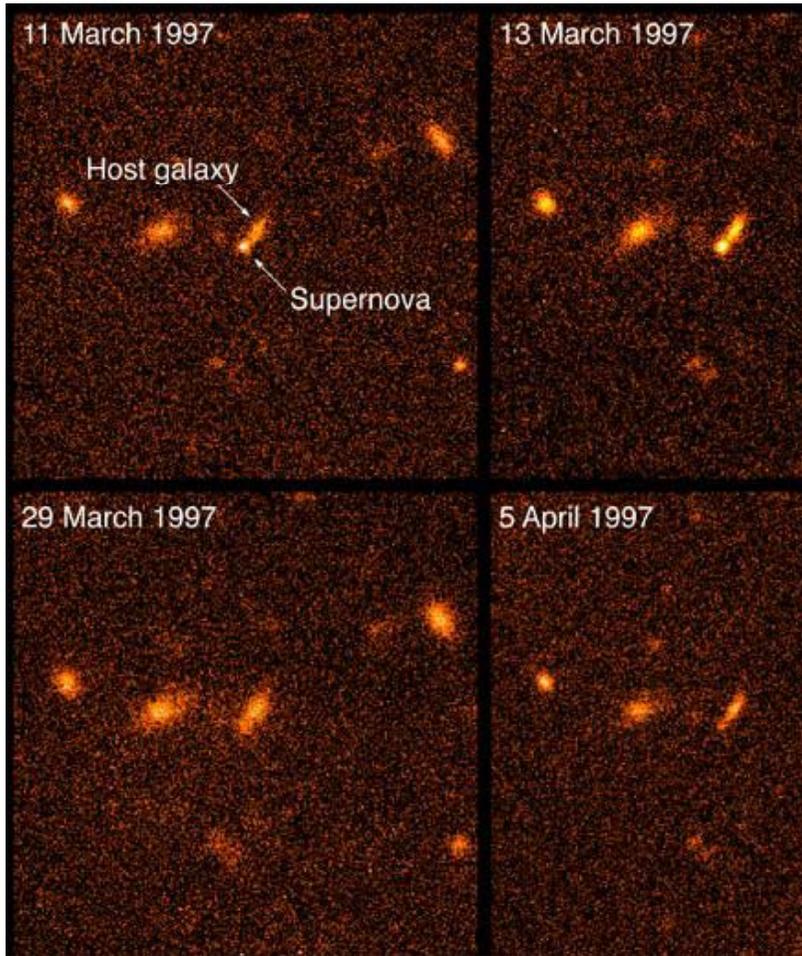
Système solaire $9 \cdot 10^9 \text{an}$

19

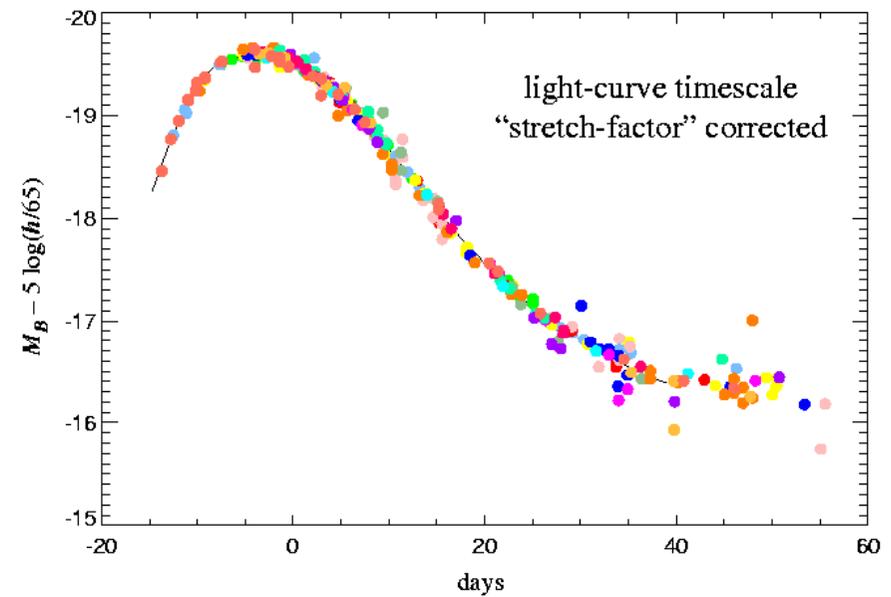
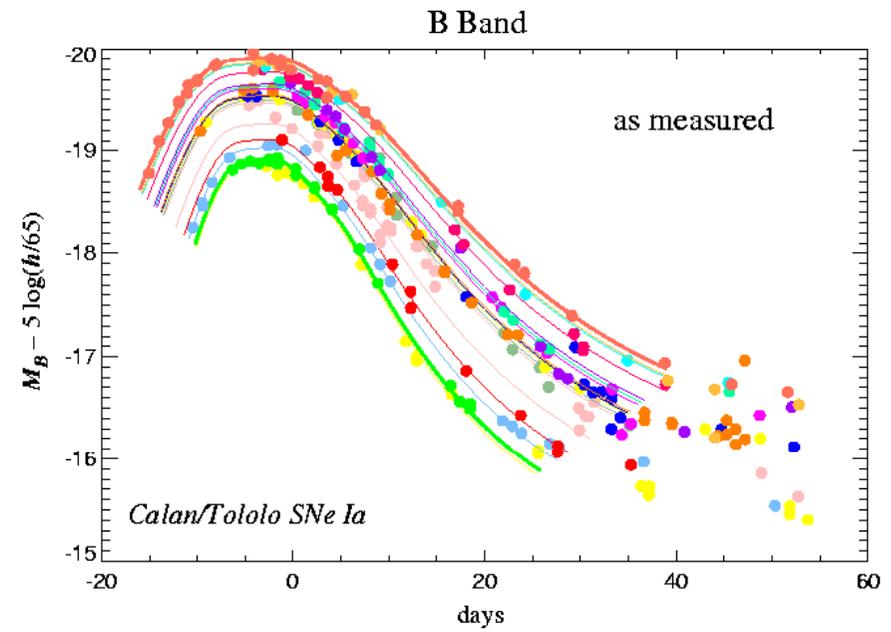
Aujourd'hui $13.7 \cdot 10^9 \text{an}$

Lentilles gravitationnelles



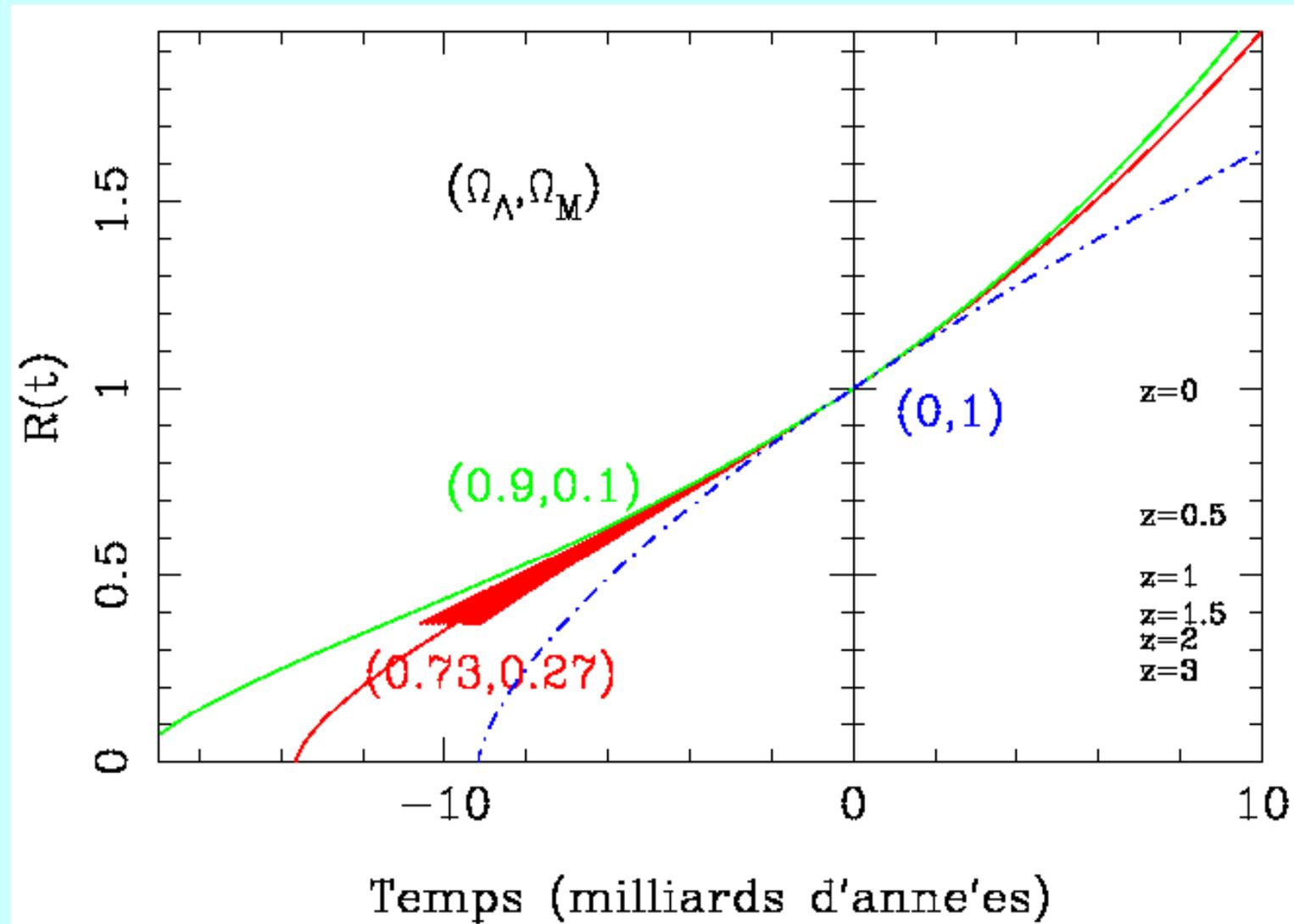


Supernovae Ia

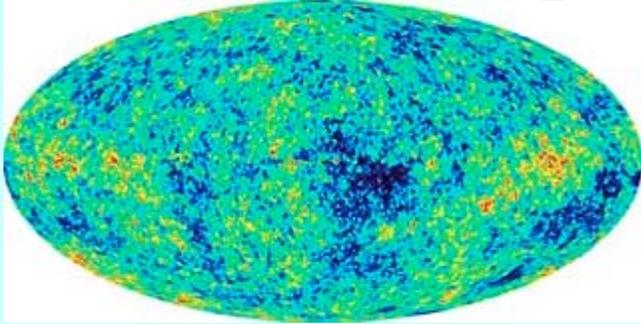


Kim, *et al.* (1997)

Supernovae à grand redshift



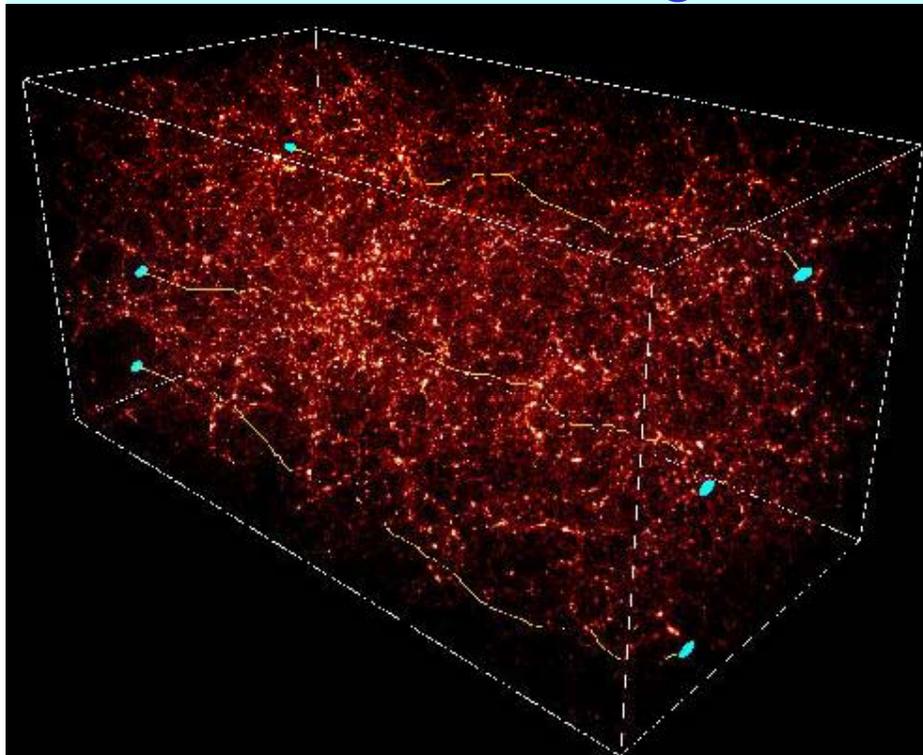
Les paramètres de l'Univers



Anisotropies du fonds cosmique (WMAP)
→ Univers plat

Observations des SN Ia

Lentilles gravitationnelles



$$\begin{aligned}\Omega_{\Lambda} &= 0.72 \\ \Omega_{\text{M}} &= 0.28 \\ \Omega_{\text{b}} &= 0.05\end{aligned}$$

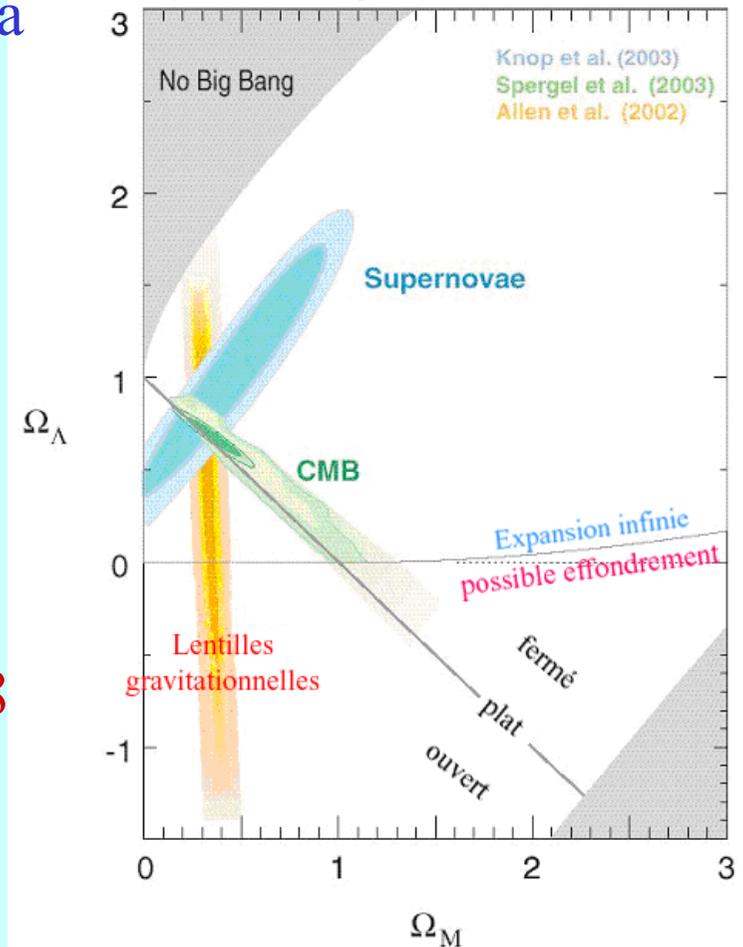
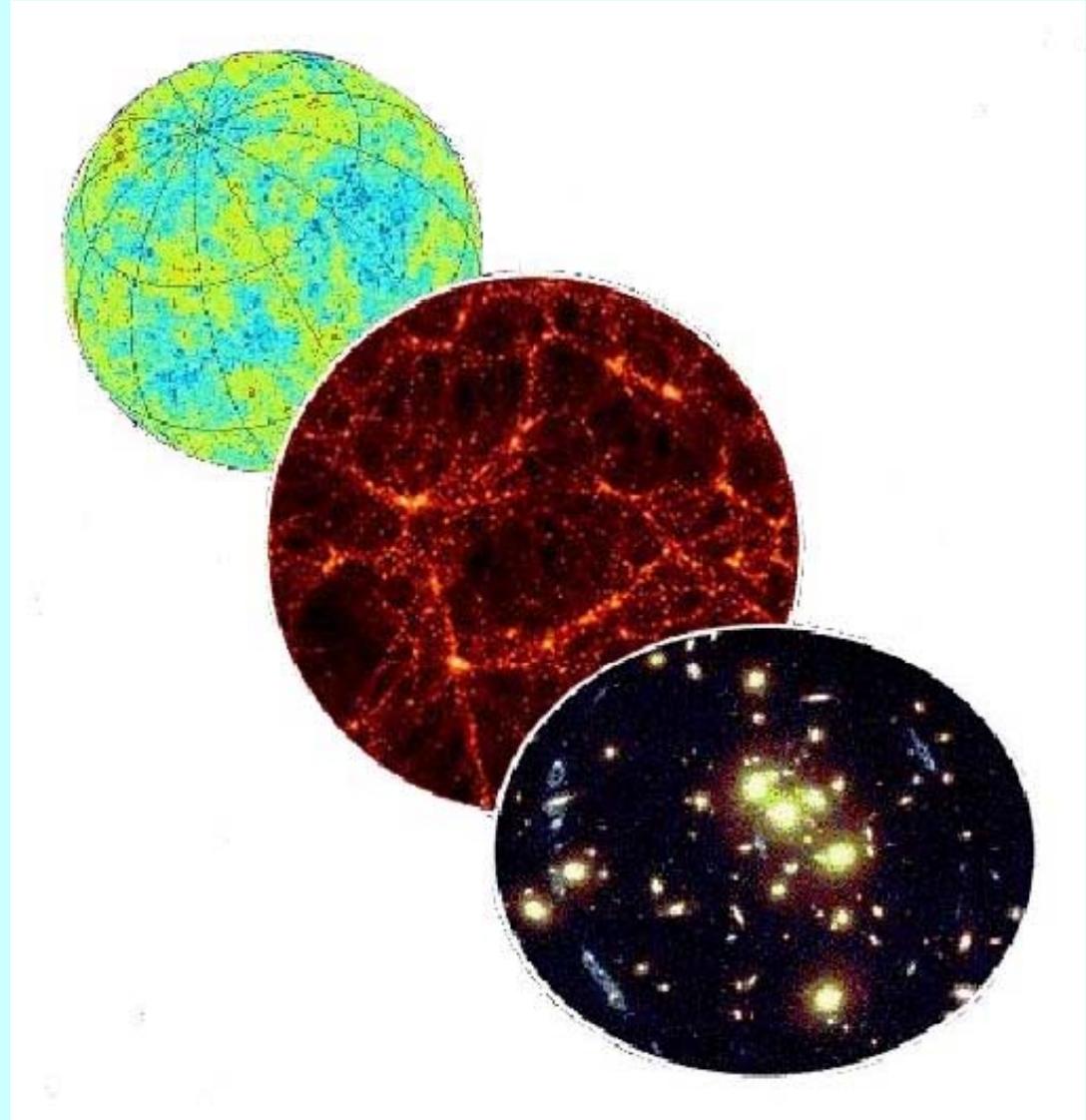


Schéma de formation des structures

Fluctuations primordiales
fond cosmologique

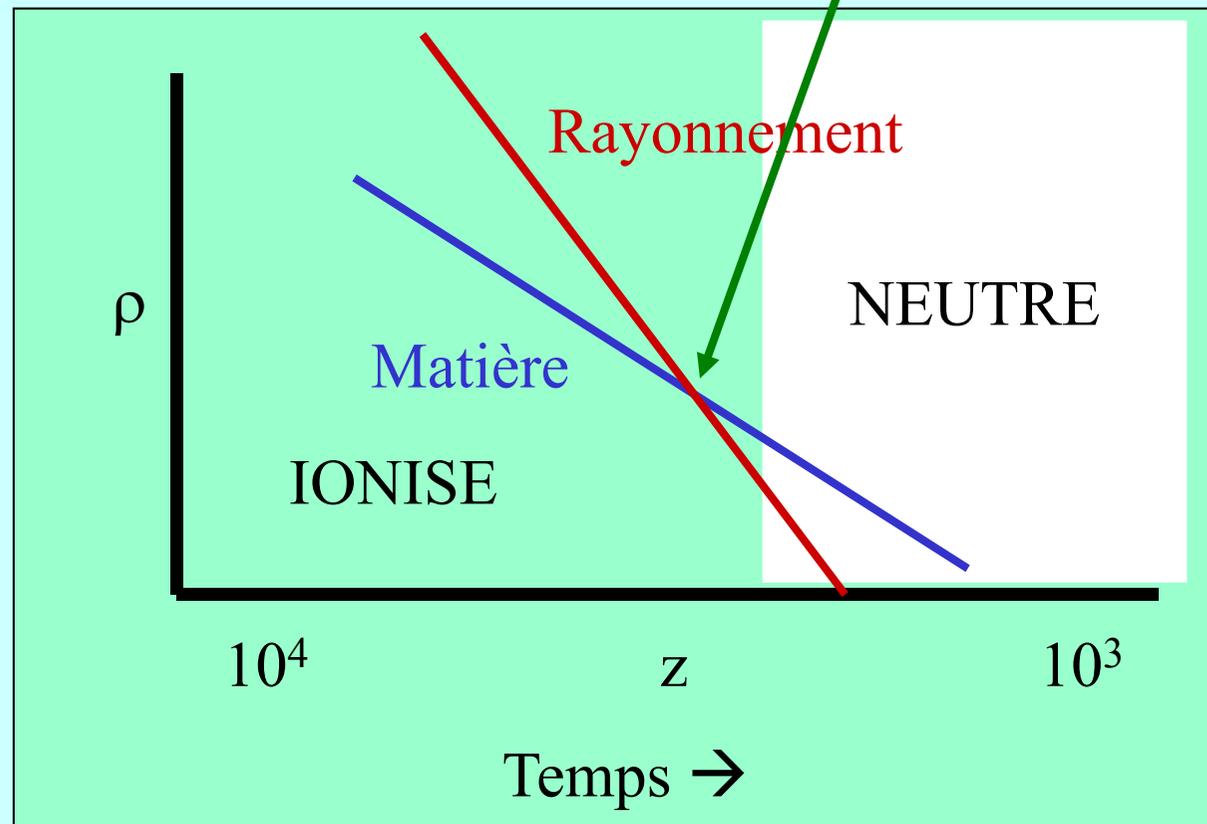
Structures filamenteuses
simulations cosmologiques

Galaxies baryoniques
vues avec le HST

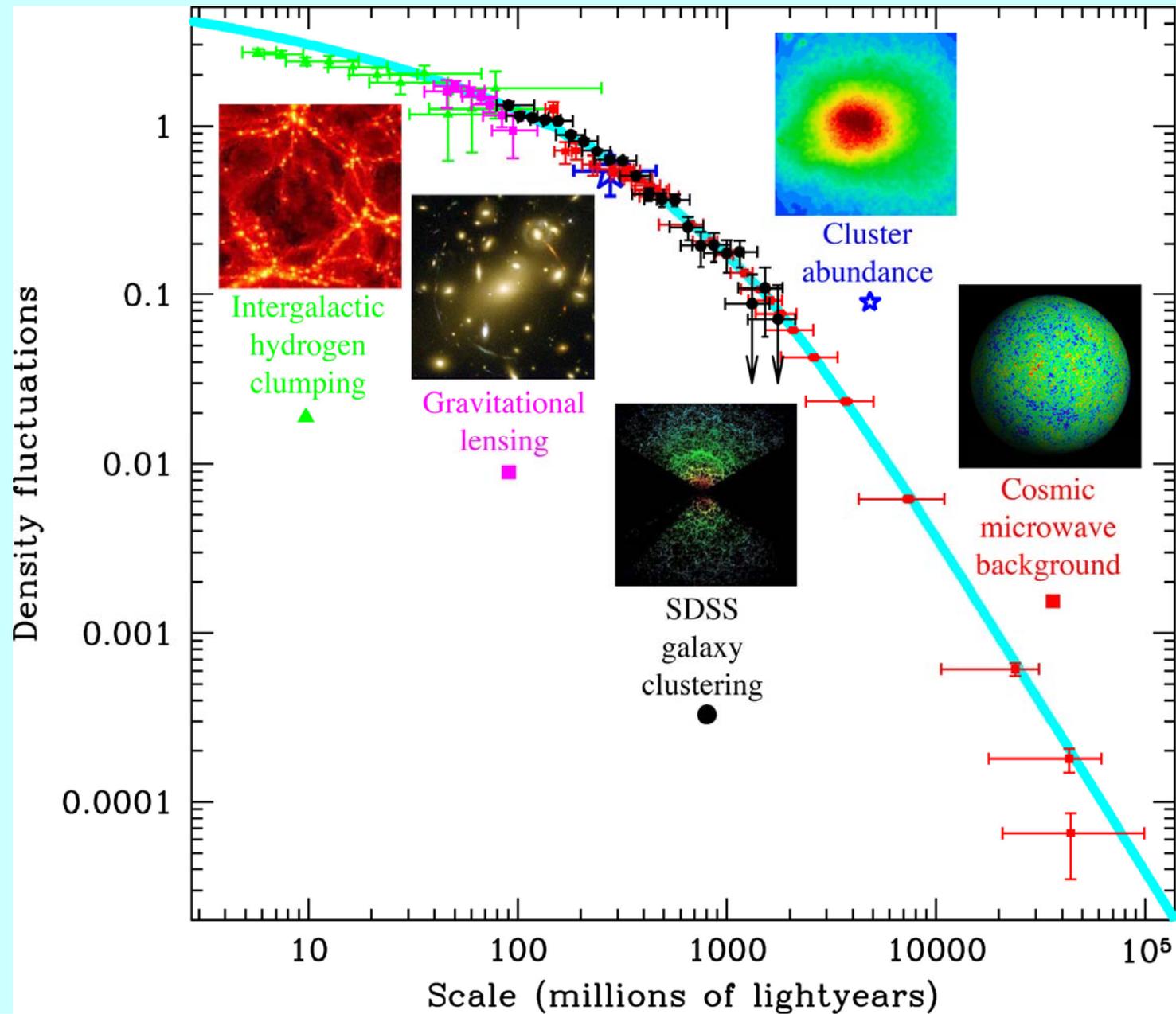


$\rho \sim R^{-3}$ matière
 $\rho \sim R^{-4}$ photons

Point d'Equivalence E



Fluctuations de densité

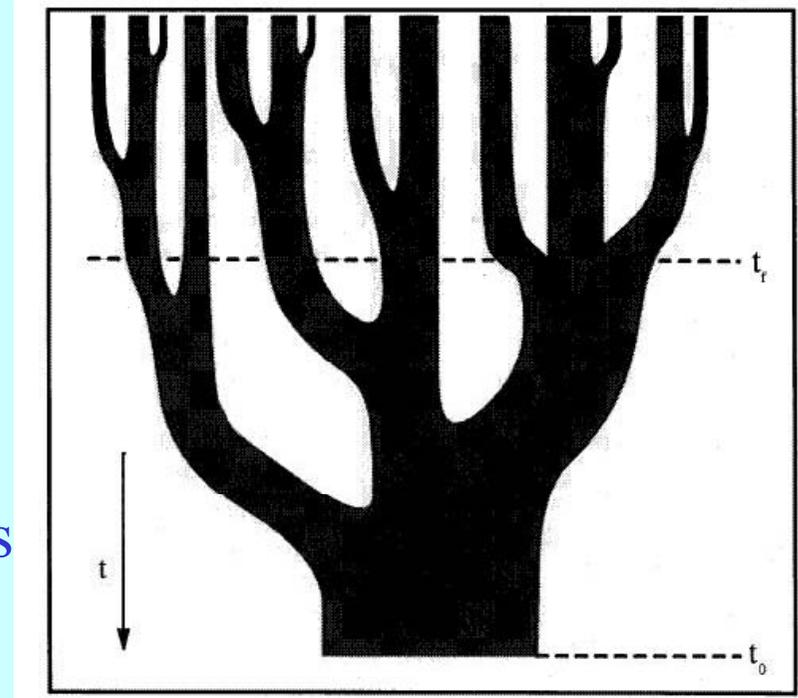


Formation hiérarchique des galaxies

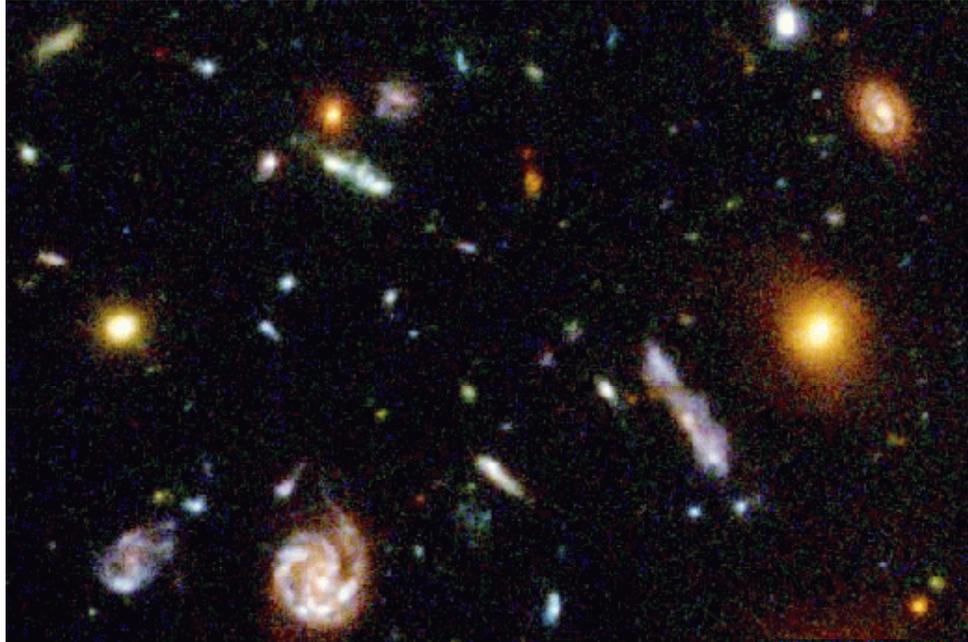
Les plus petites structures se forment en premier, de la taille de galaxies naines ou amas globulaires

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

Ils sont de moins en moins denses



Galaxies dans l'Univers jeune



Voir plus loin, et remonter
dans le temps

Aujourd'hui jusqu'à $z \sim 6$
(ou 95% de l'âge de l'Univers)

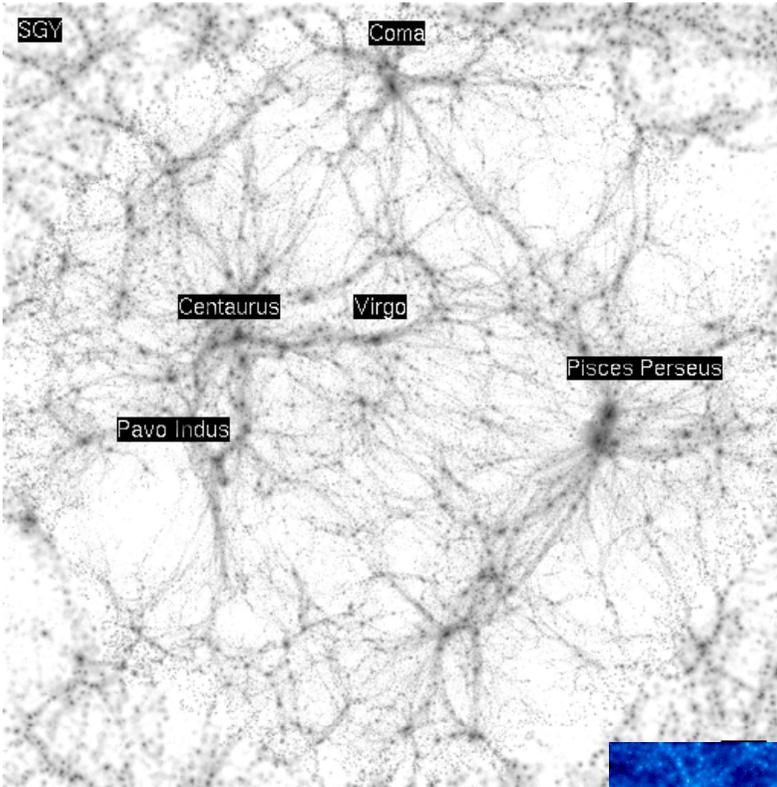
Galaxies plus nombreuses

Formation de plus
d'étoiles

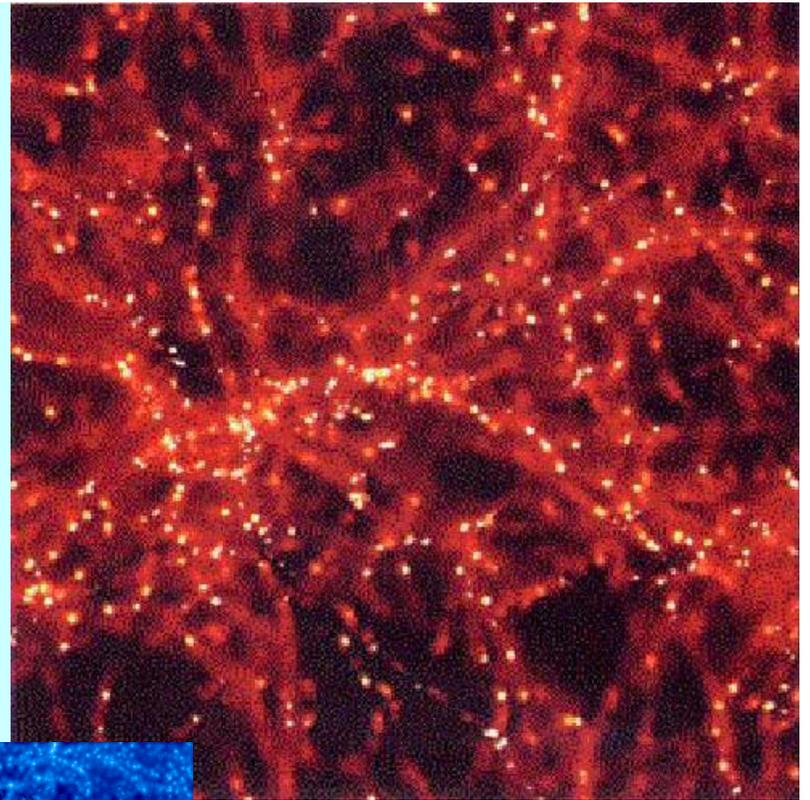
Noyaux plus actifs





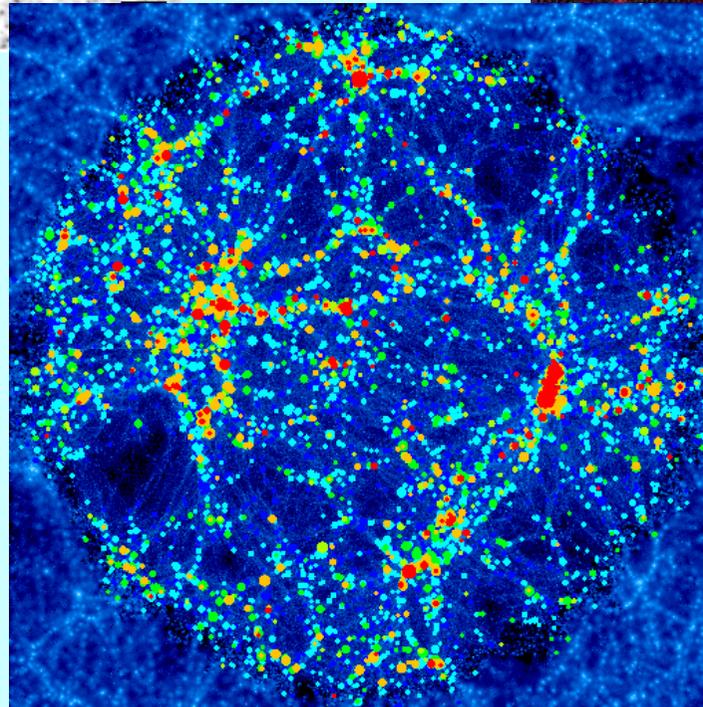


Gaz



Matière noire CDM

Simulations

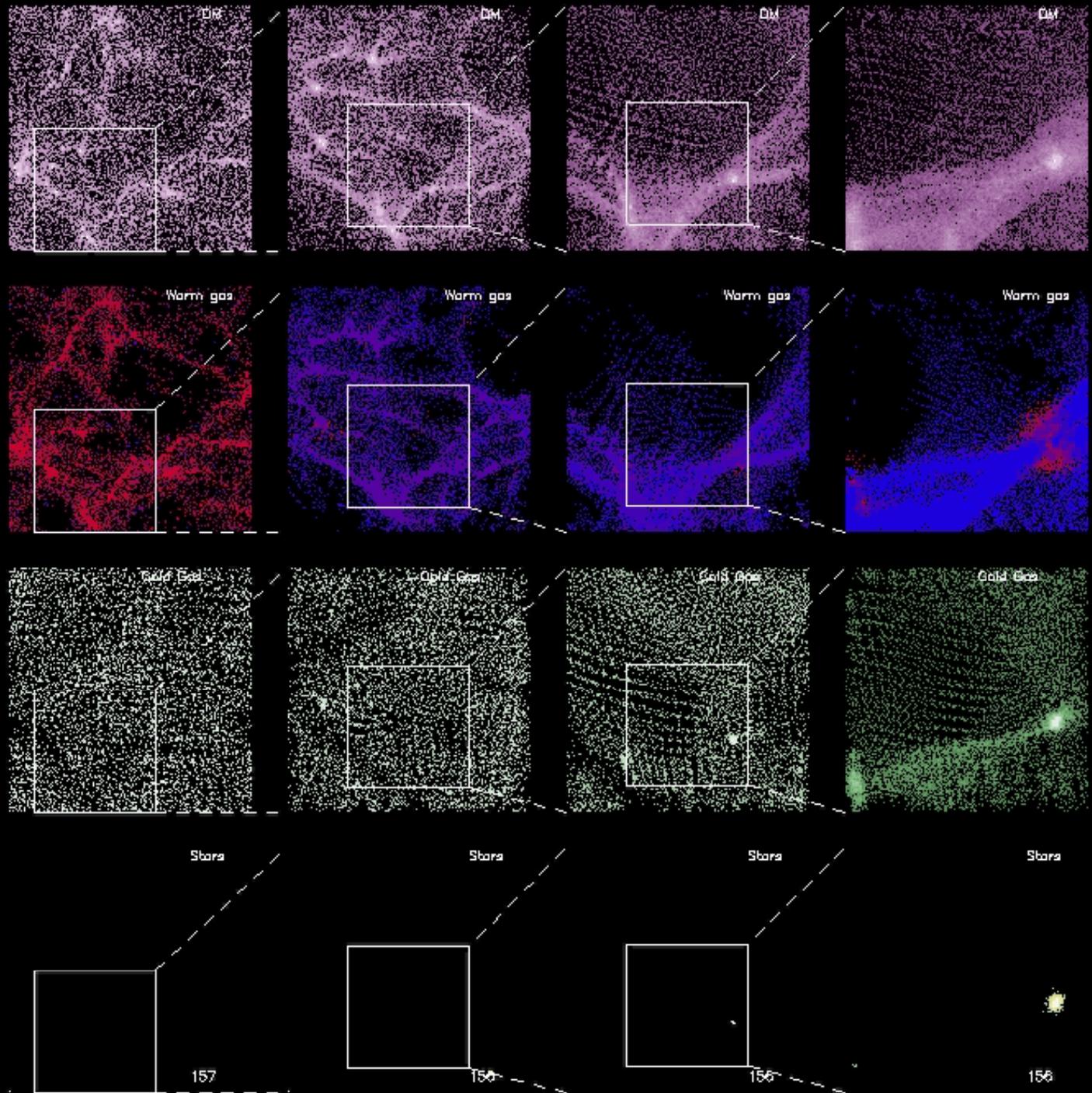


Galaxies

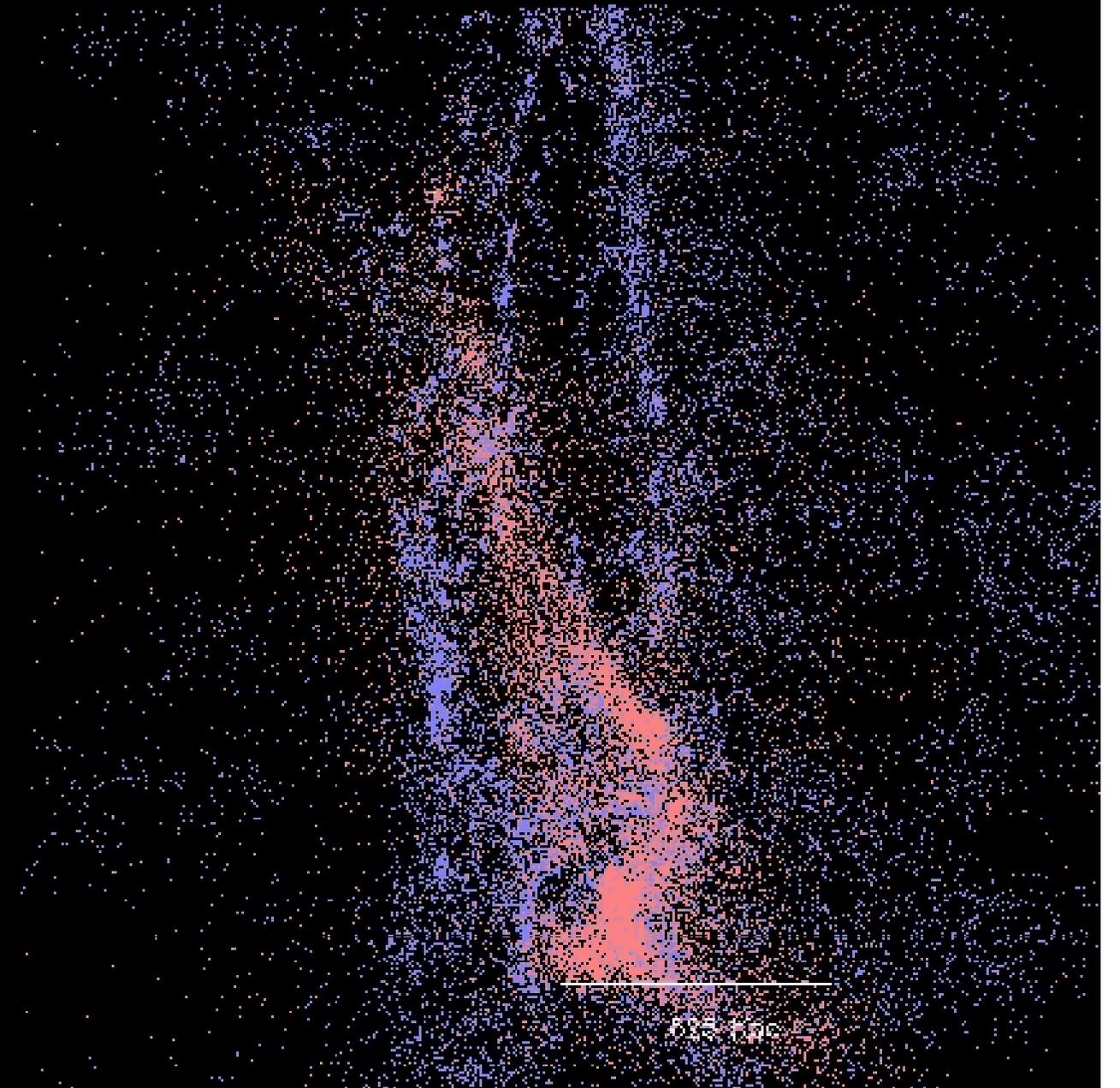
4 « phases »

4 Niveaux de zoom
de 20 à 2.5 Mpc.

$z = 3$. (partant $z=10$)



Galaxies et Filaments



Multi-zoom

100 kpc

Interactions entre galaxies

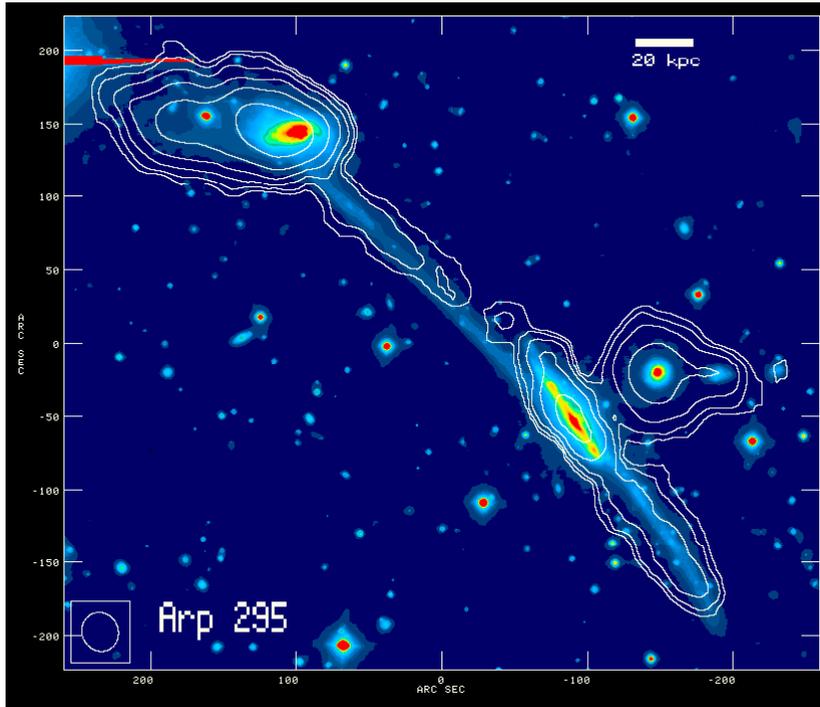
- Phénomènes de marée très fréquents
- Formation de ponts de matière entre les galaxies
- Fusion entre galaxies
- Formation hiérarchique des galaxies



Arp 188



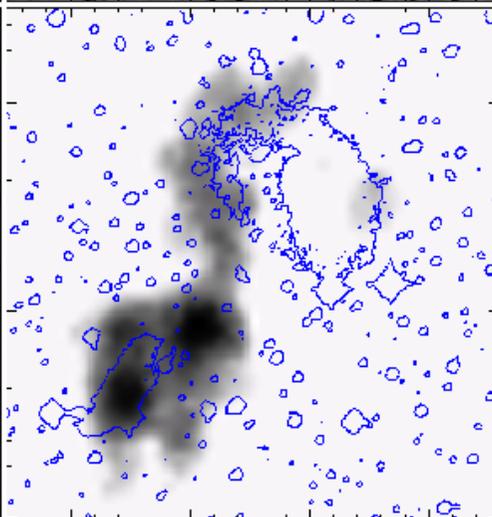
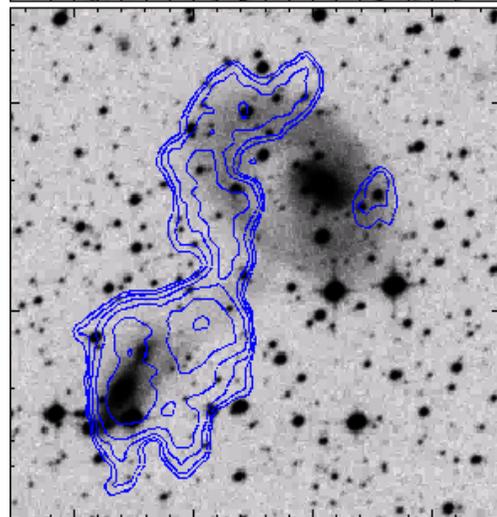
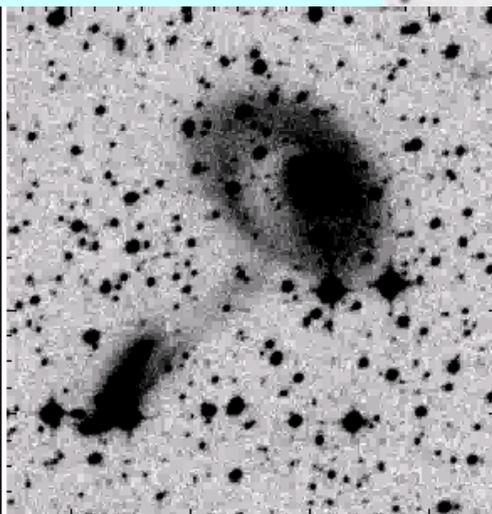
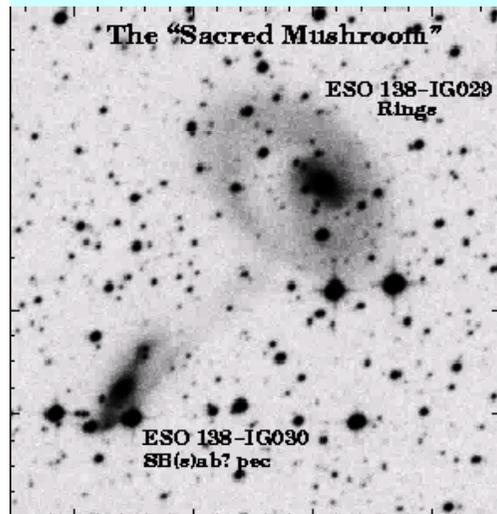
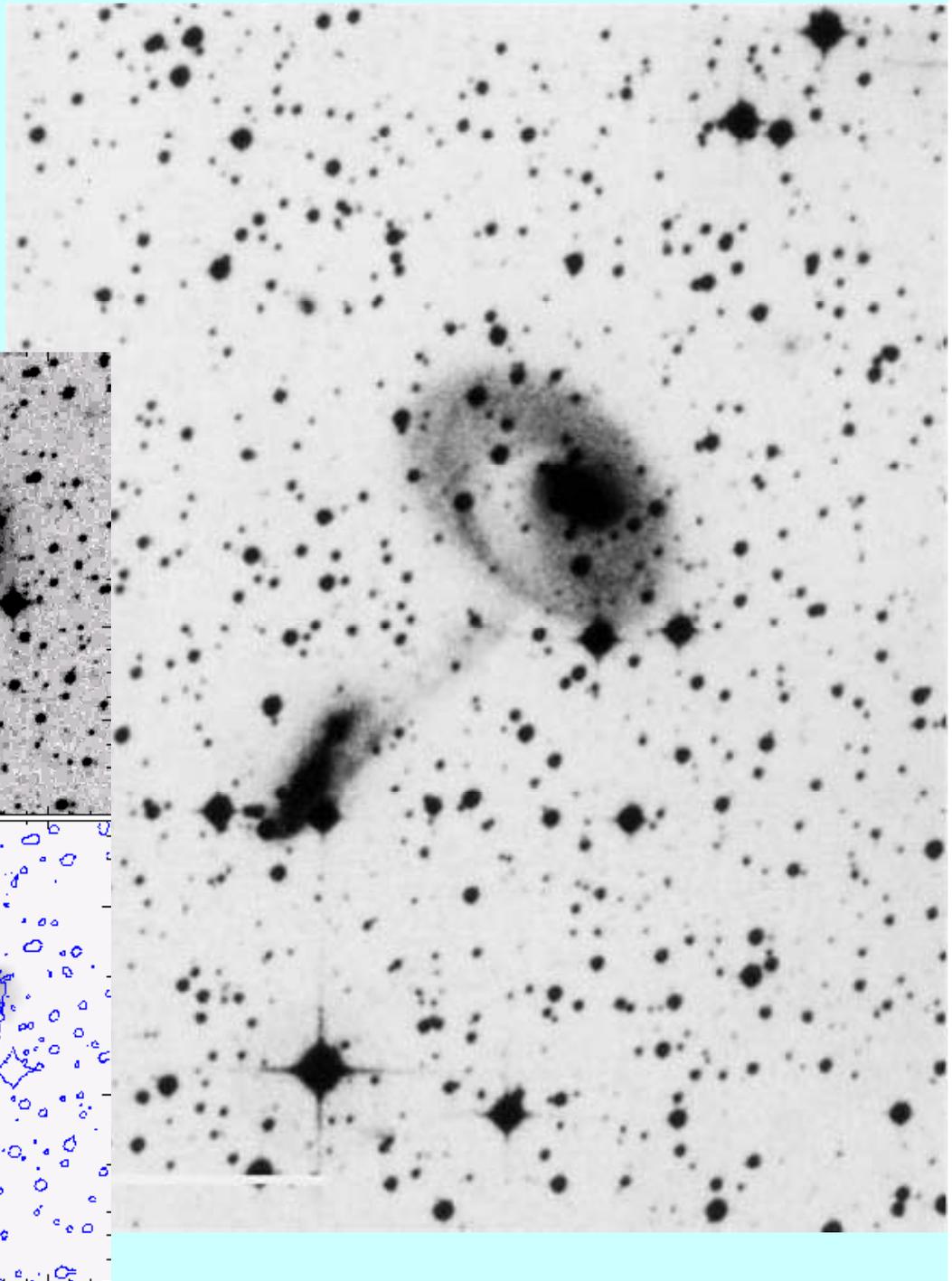
Arp 295



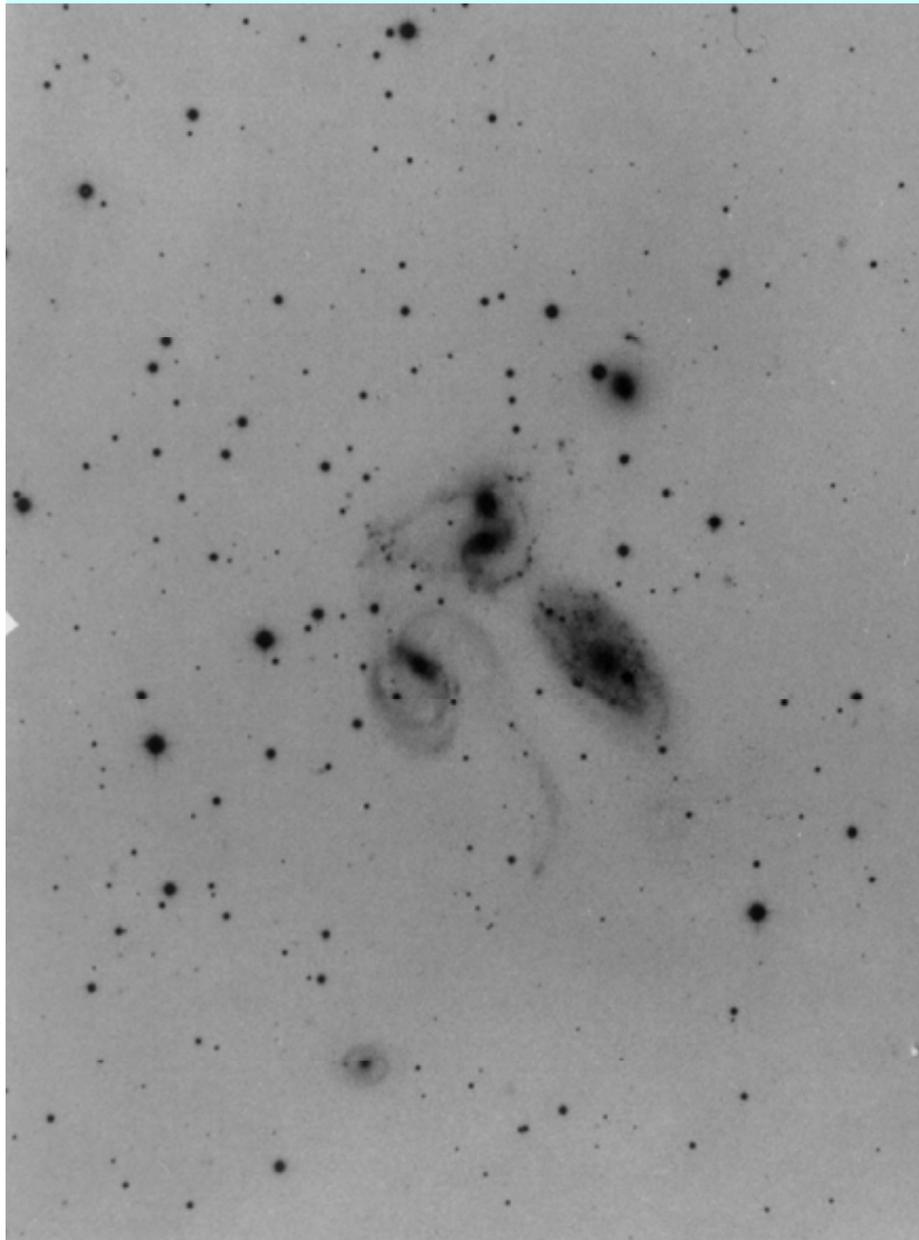
Contours en blanc:
Gaz d'hydrogène
atomique

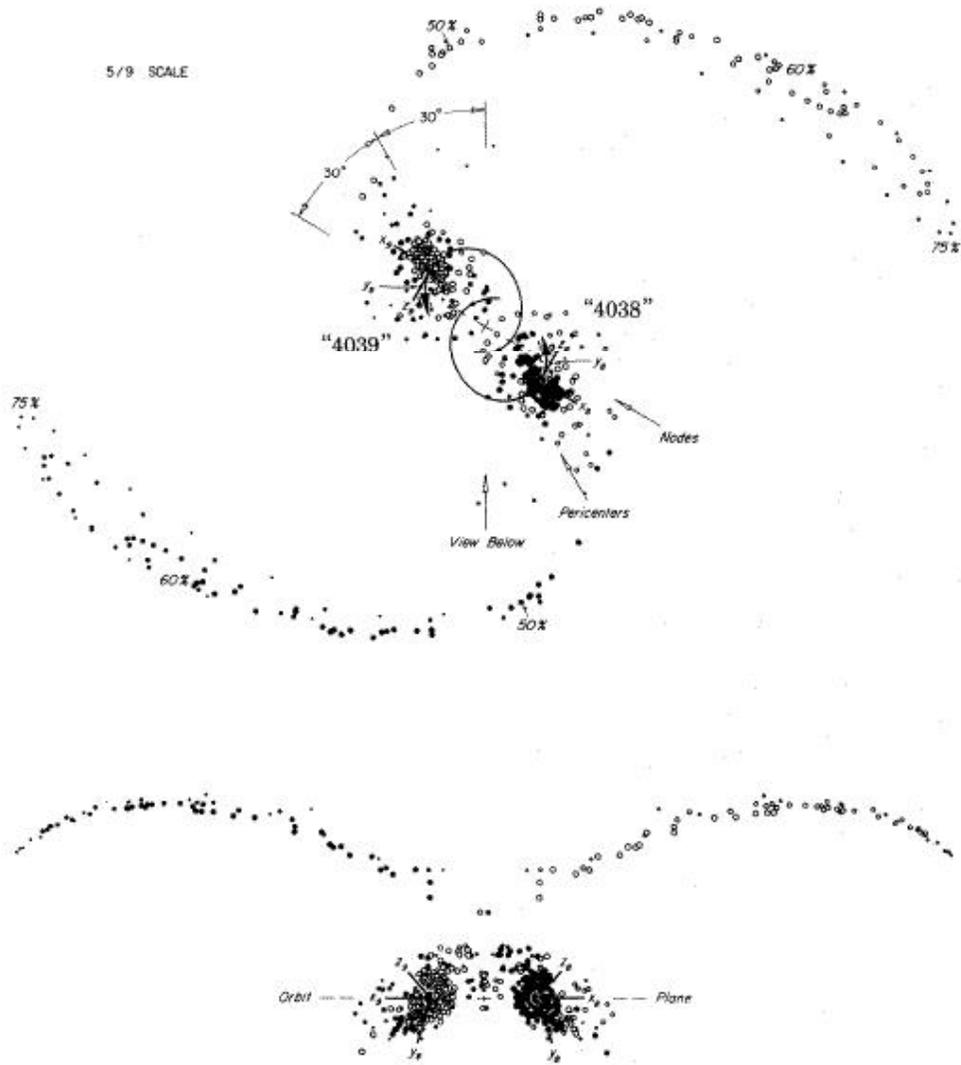


Le champignon

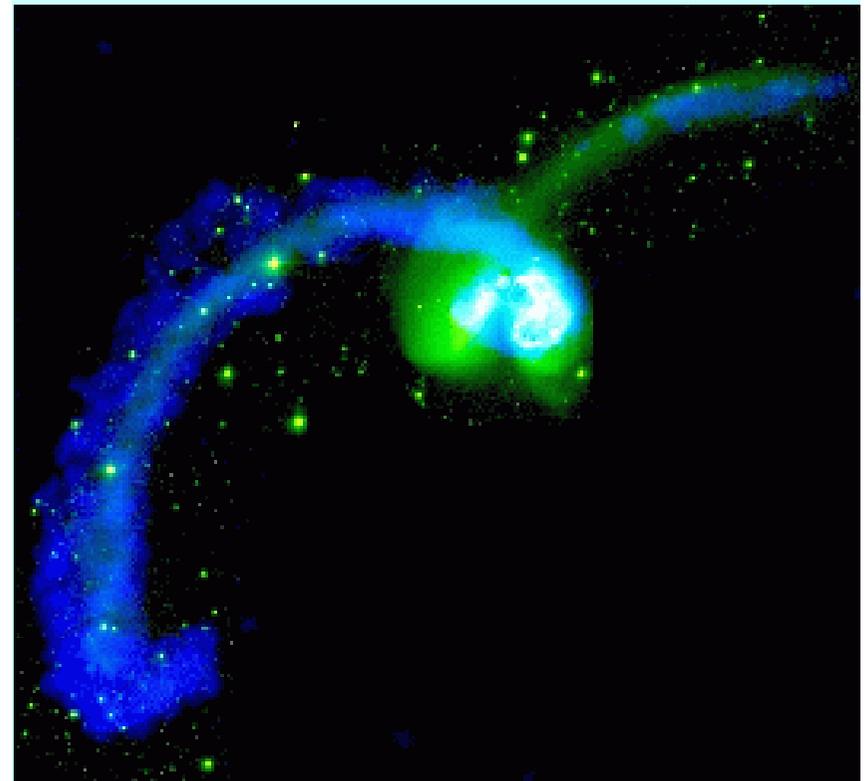


Quintette de Stefan

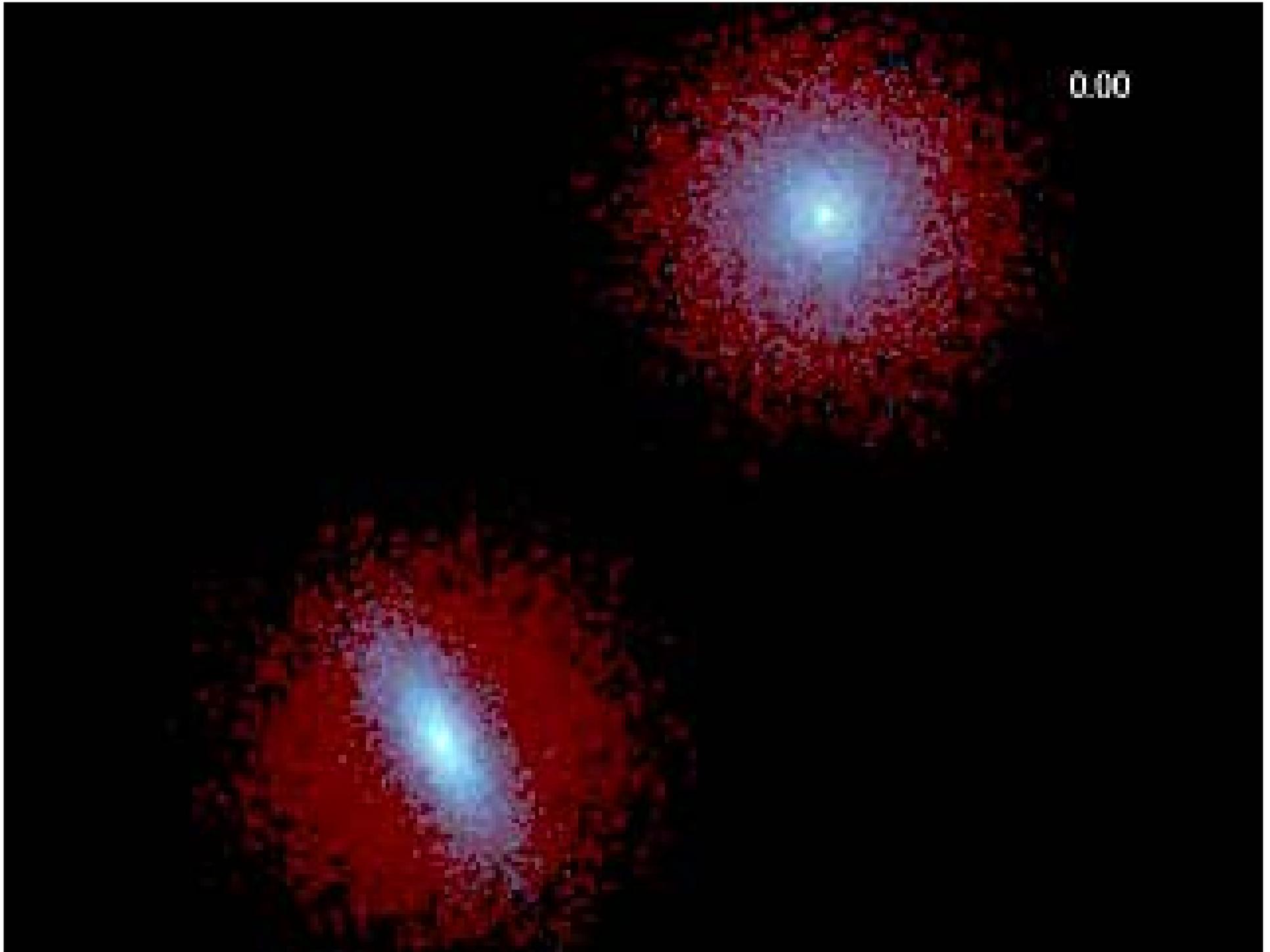




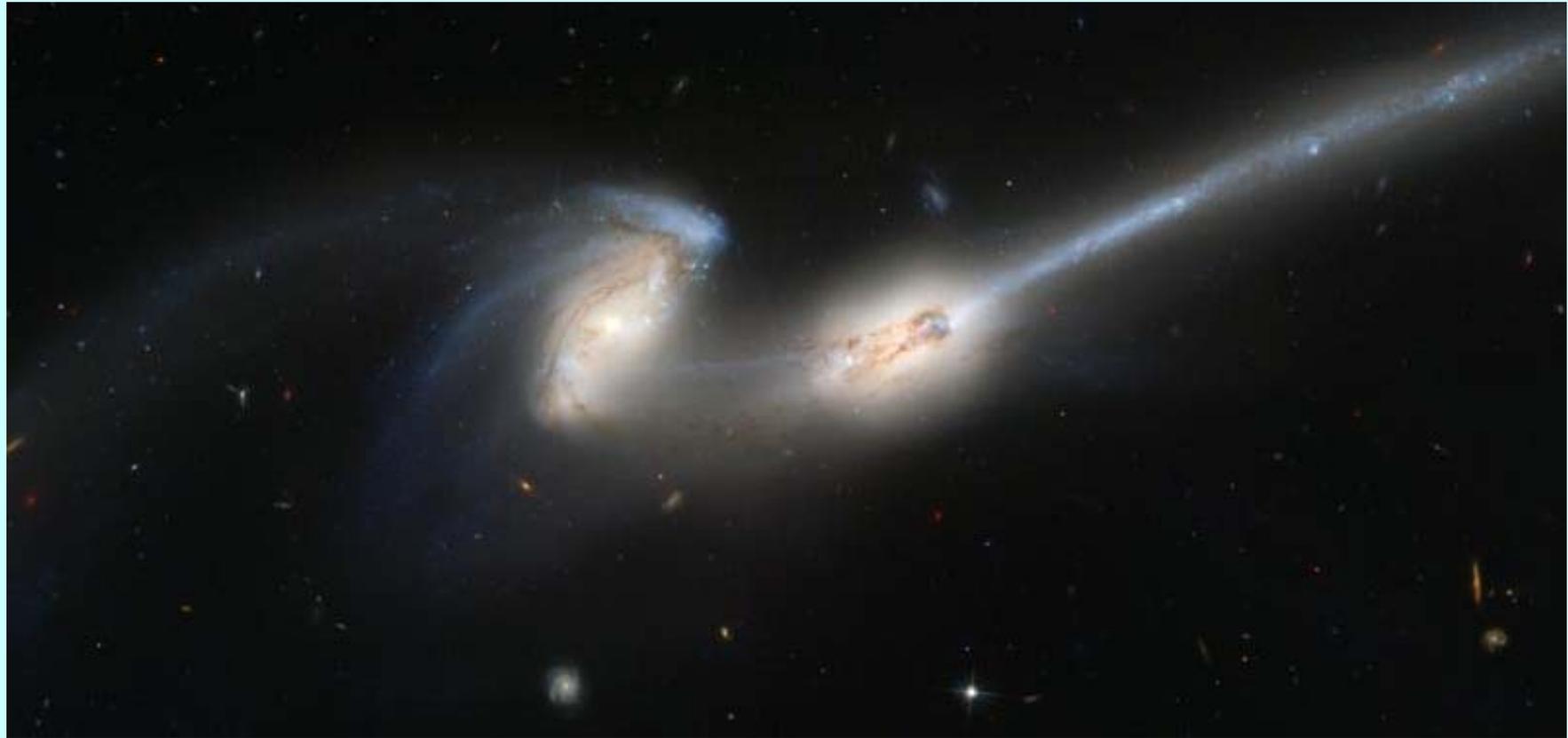
Les Antennes



0.00



Les Souris

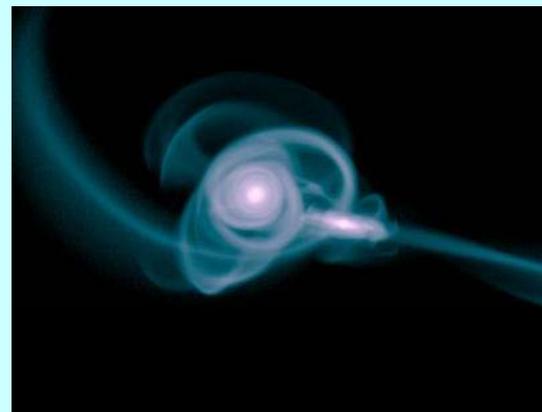


0.00



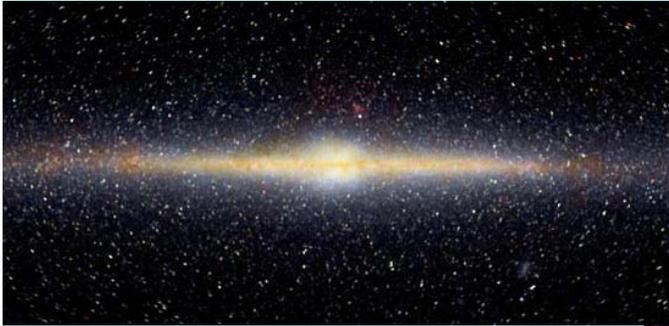


Simulations de la rencontre avec M31



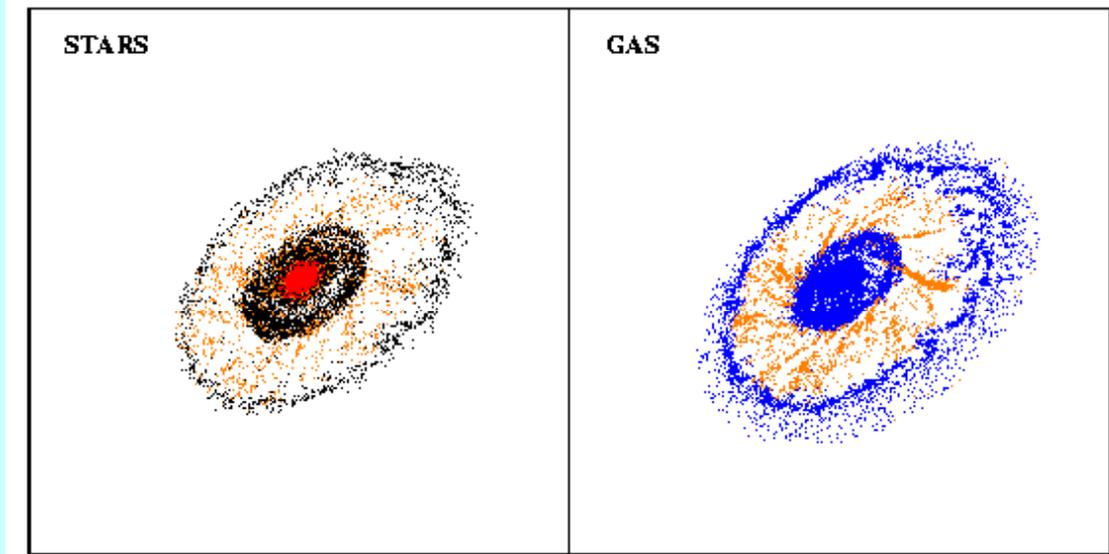
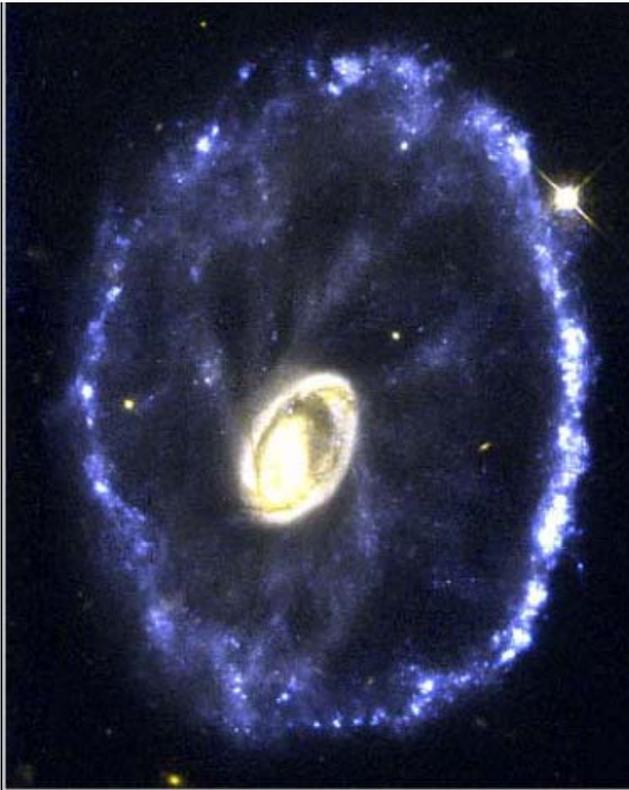


M31 et La Voie Lactée



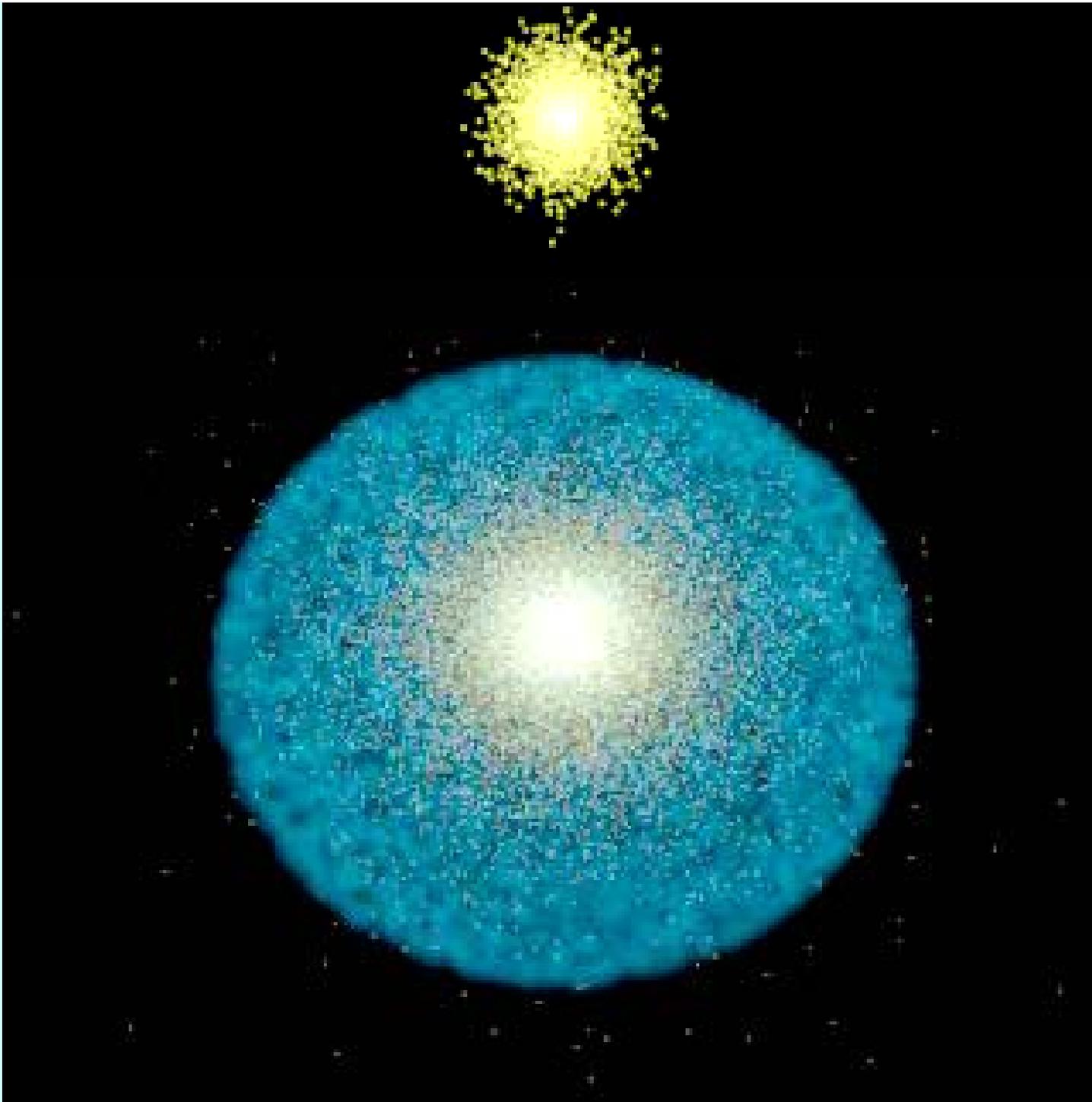
La Voie Lactée
en infra-rouge



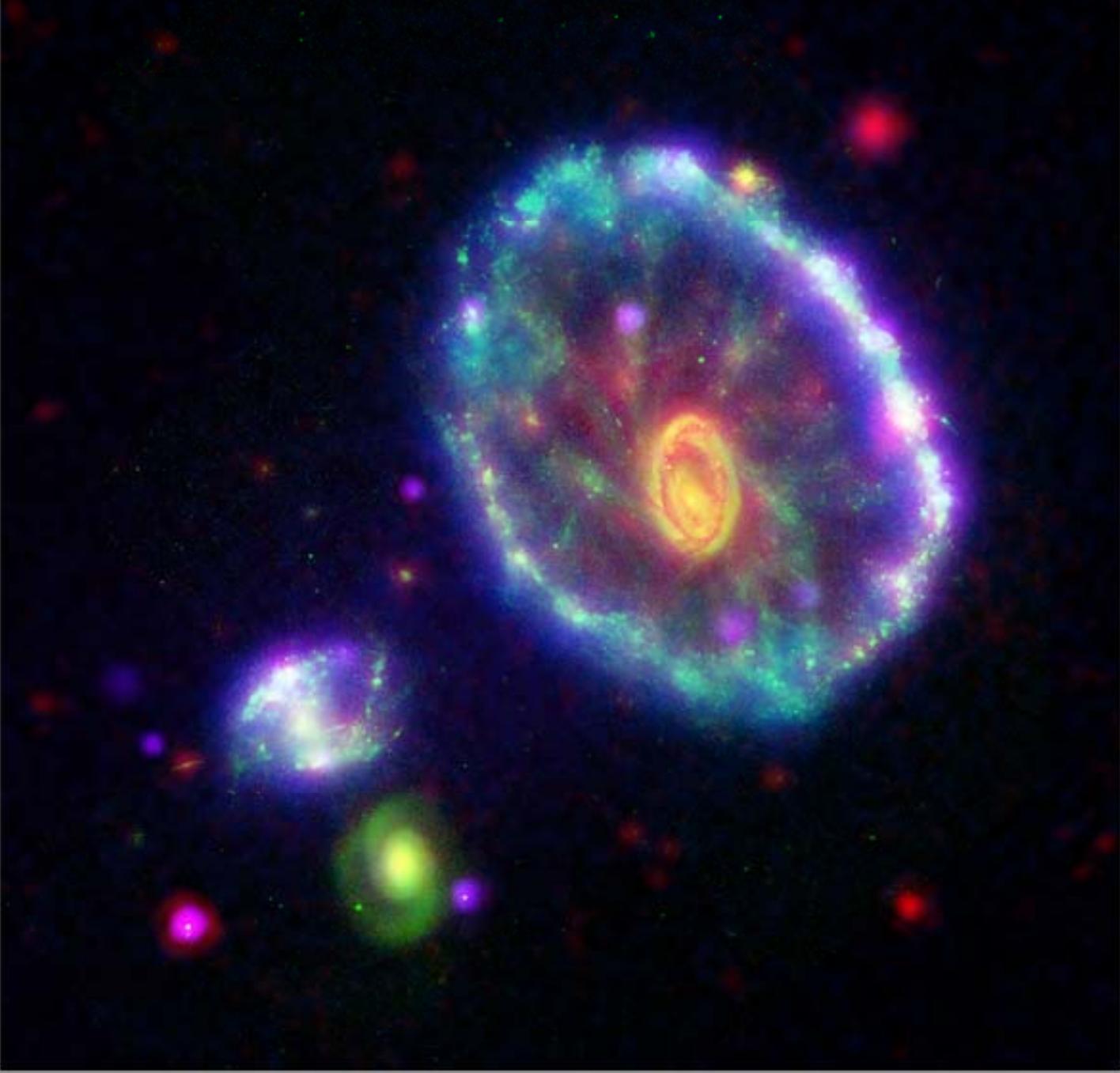


Les anneaux sont décentrés, et ne peuvent se confondre avec les anneaux résonants dans les galaxies barrées

De même, un autre phénomène: les **anneaux polaires** (une fois vus de face..)



CARTWHEEL GALAXY



CHANDRA X-RAY



GALEX ULTRAVIOLET



HUBBLE VISIBLE



SPITZER INFRARED

Formation des premières étoiles

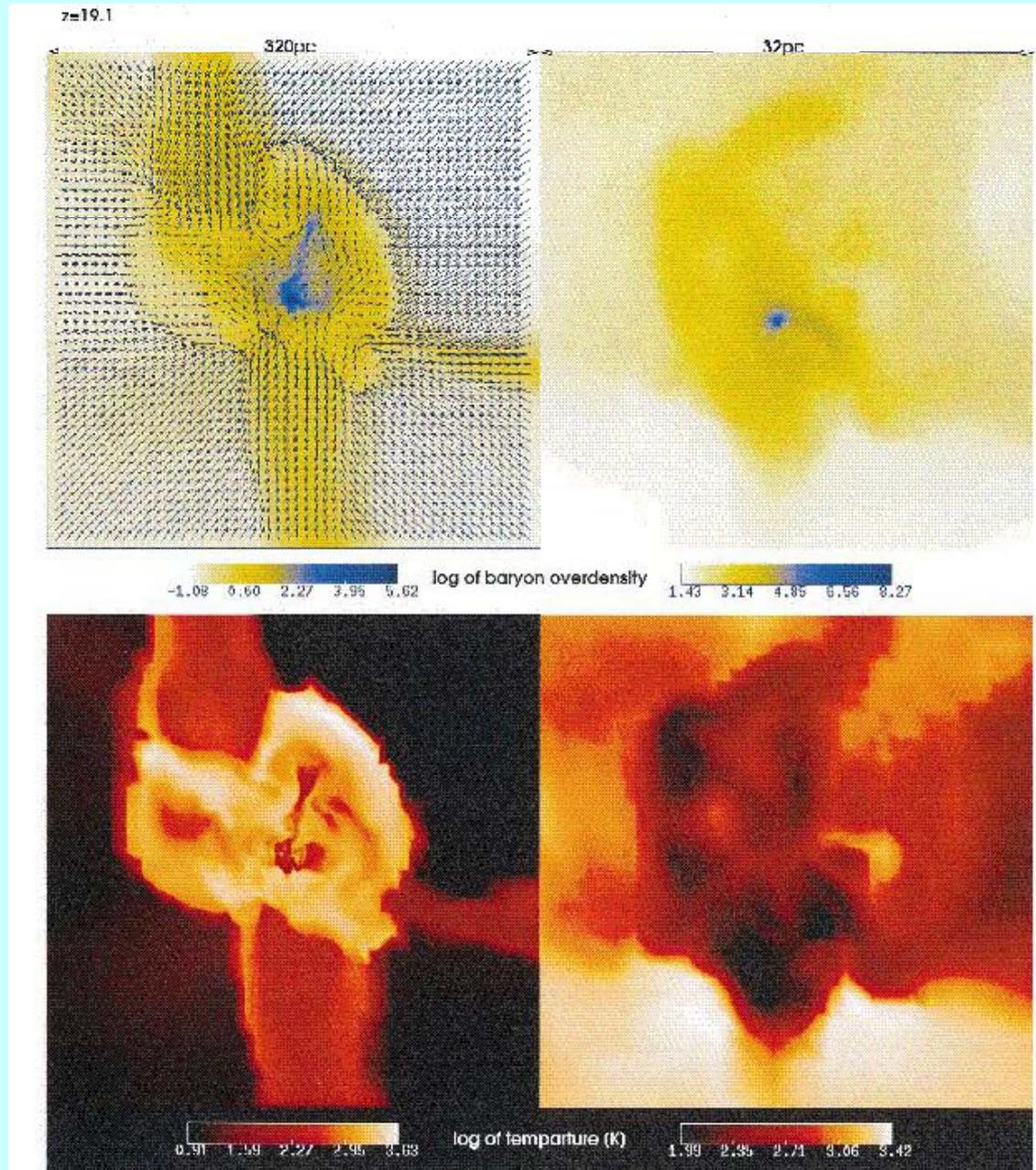
En Haut: sur-densité
coupe dans le pic
Principal

320pc, zoom 32pc

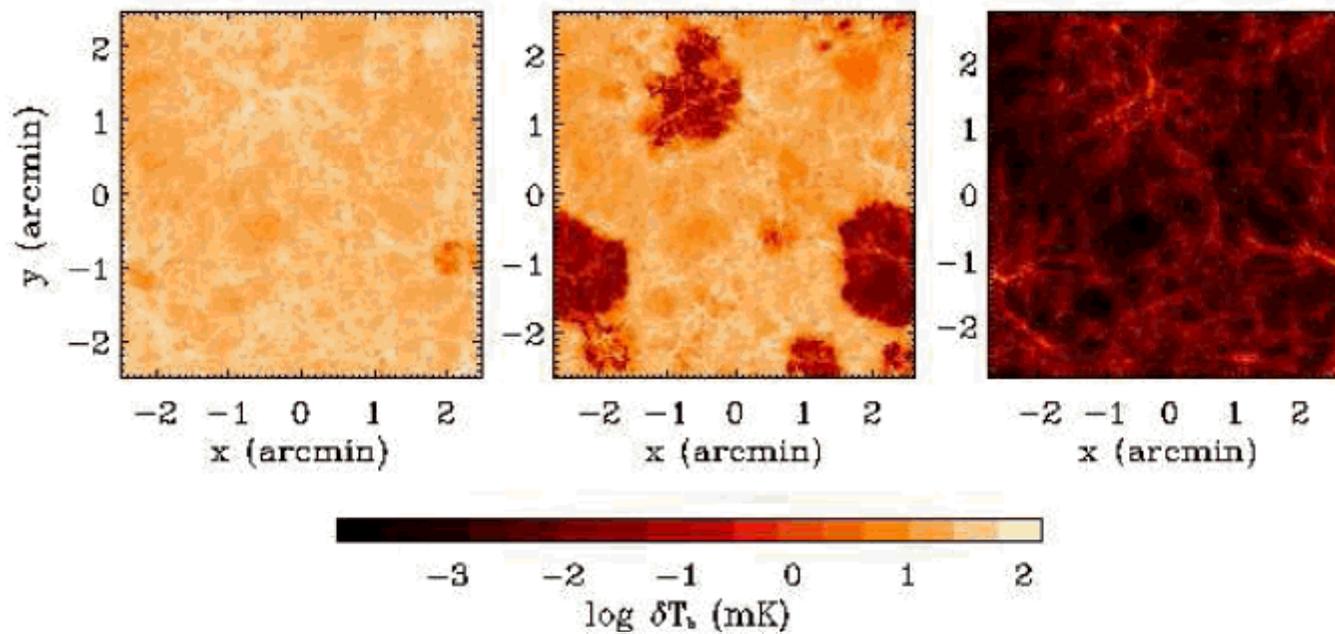
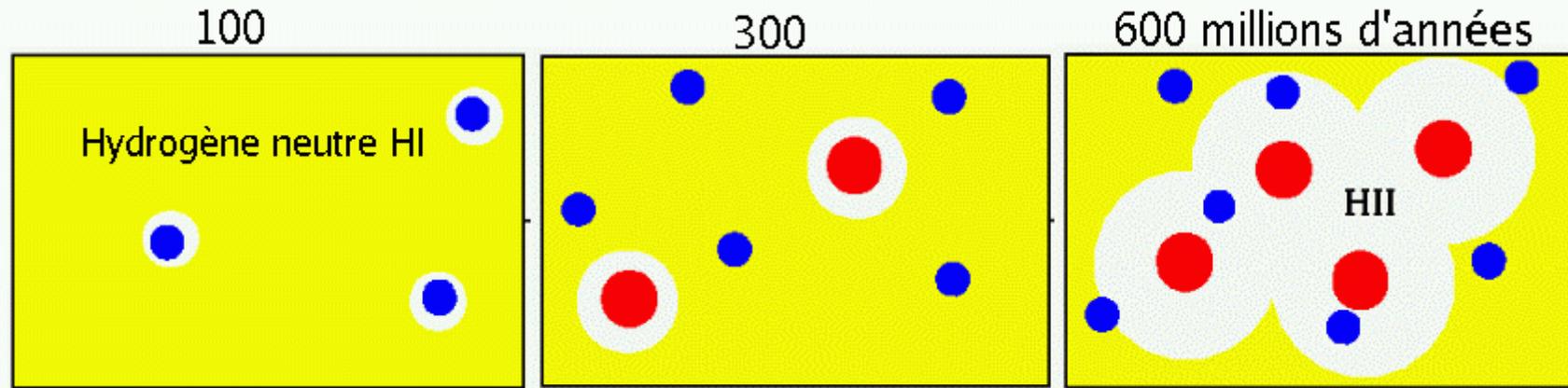
+ vitesses

En bas: température

Moins de 1% du gaz
forme des étoiles



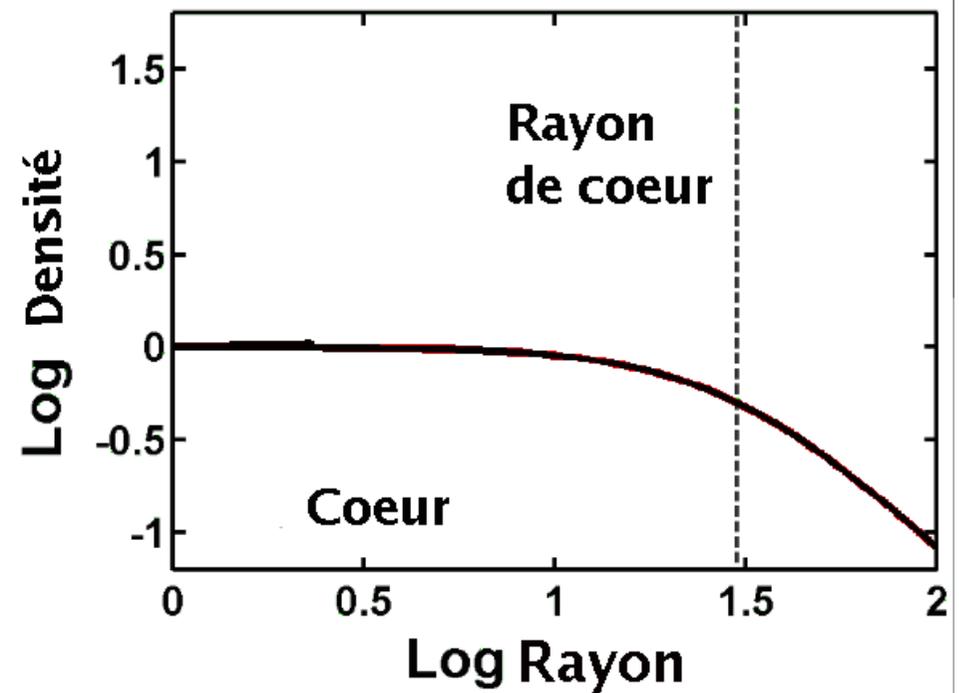
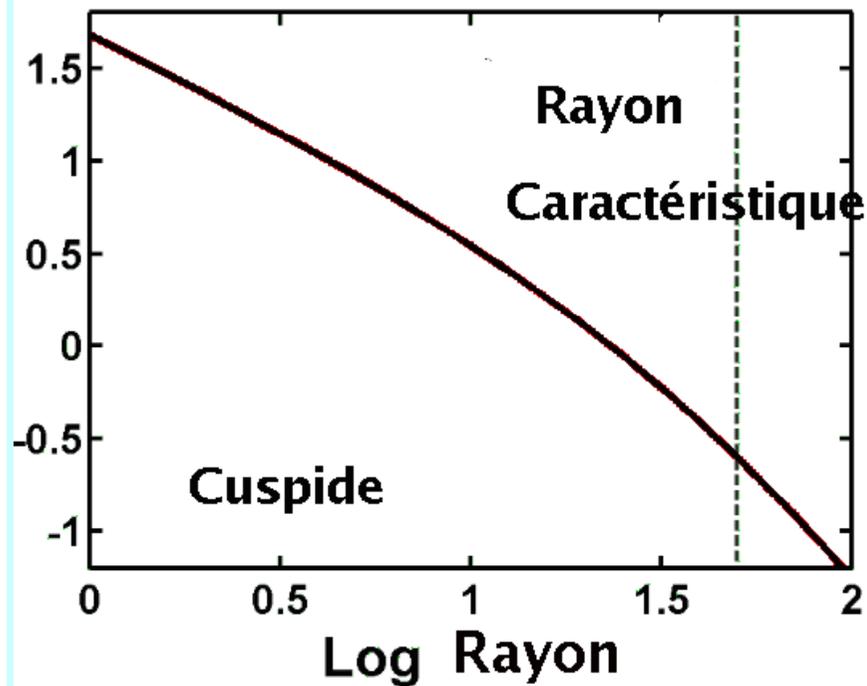
Réionisation



Percolation progressive des zones ionisées

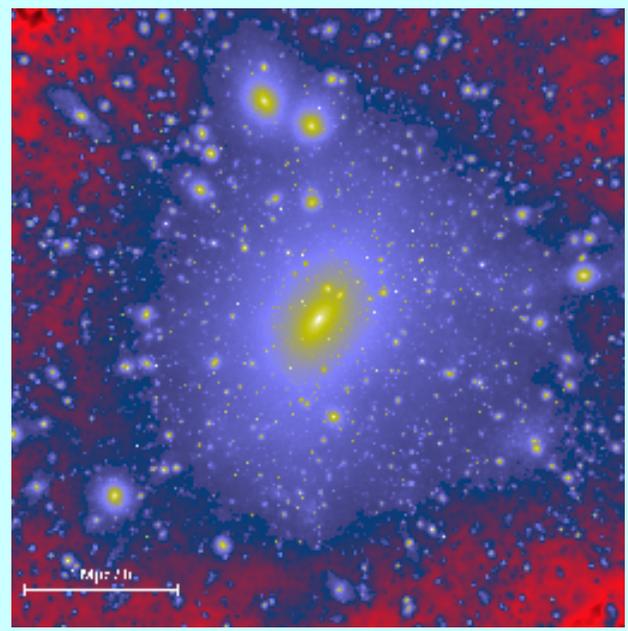
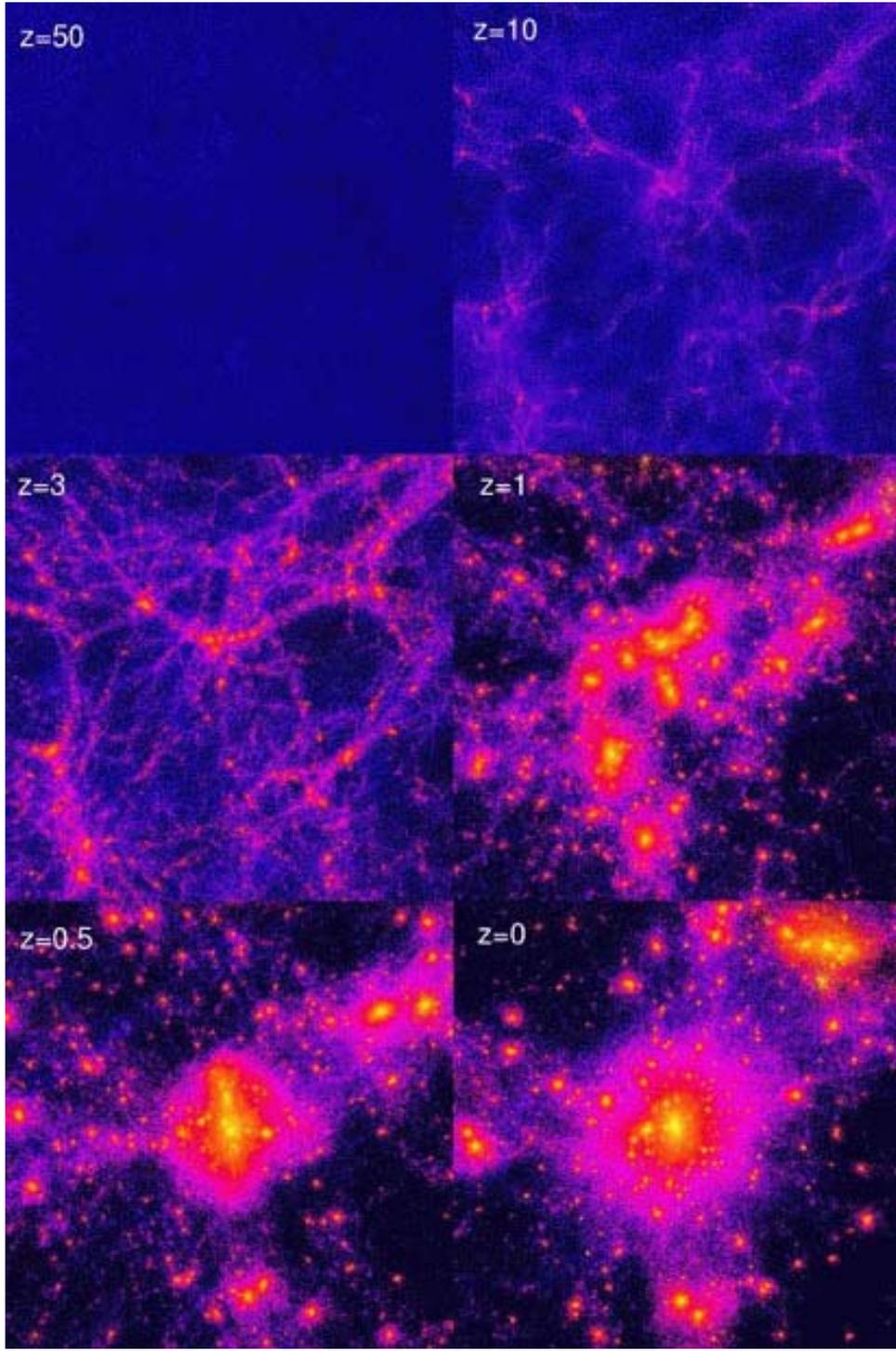
Prédictions matière noire: « cuspidale » ou « cœur »

Loi de puissance de la densité $\alpha \sim -1-1.5$, observations $\alpha \sim 0$



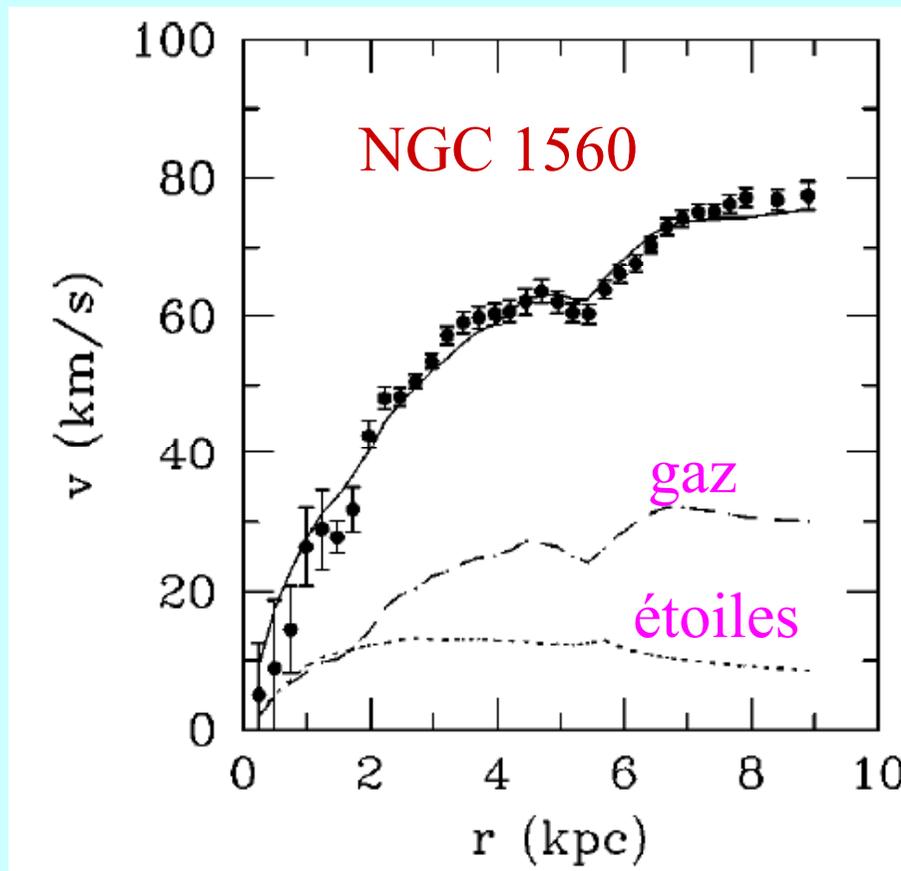
Trop de petites structures

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



Autres solutions pour les courbes de rotation des galaxies

Loi de la gravité modifiée (MOND, Milgrom 1983)



$$\nabla \cdot [\mu(|\nabla\phi|/a_0)\nabla\phi] = 4\pi G\rho$$

$$\mu(x) = x \quad \text{si } x \ll 1$$
$$= 1 \quad \text{si } x \gg 1$$

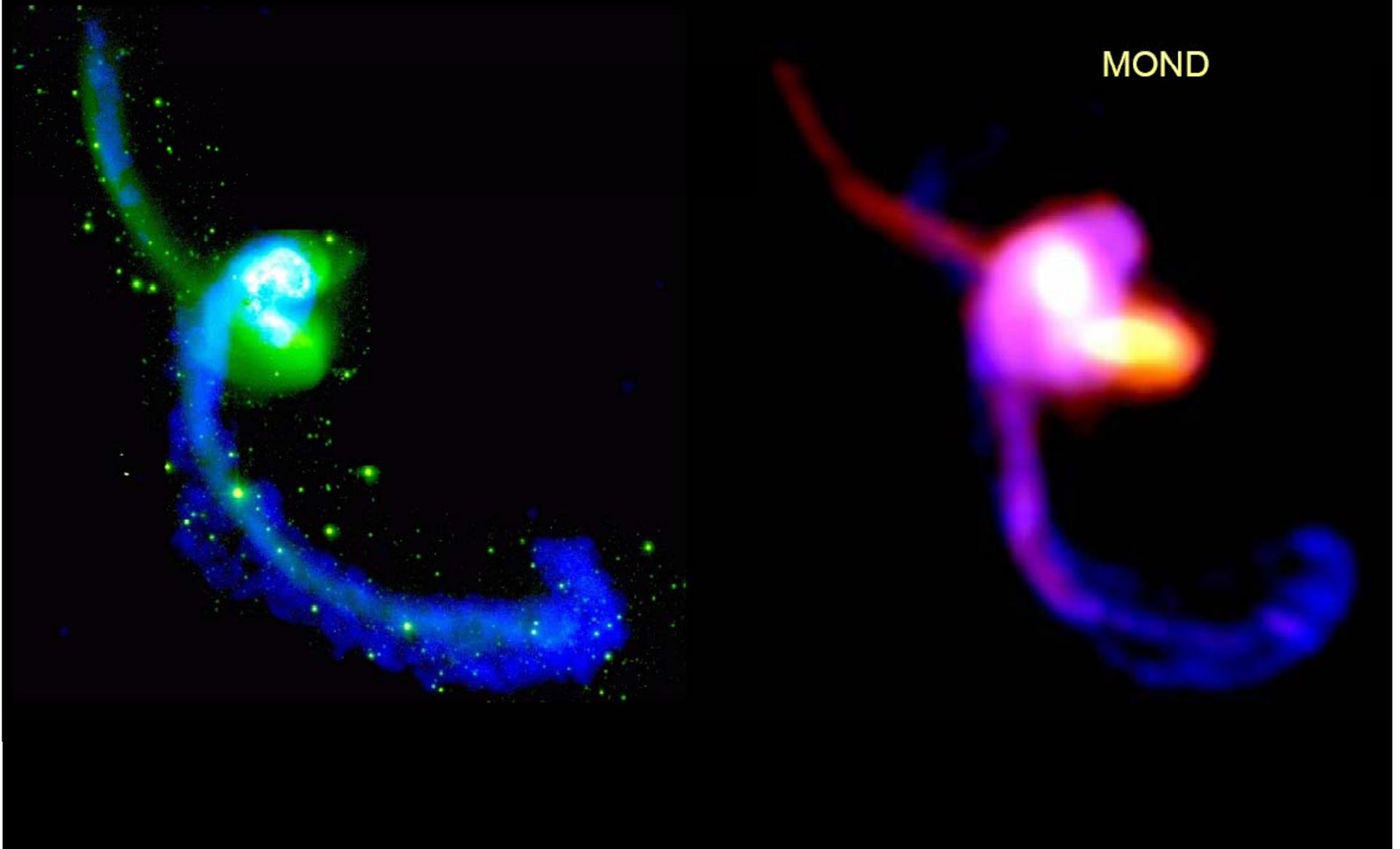
Quand l'accélération devient $< a_0$
 $a_0 \sim 2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$

$$g_M = (a_0 g_N)^{1/2}$$

Potentiel logarithmique
 $V \sim \log r$, au lieu de $1/r$

Simulations des Antennes (fusion de galaxies)

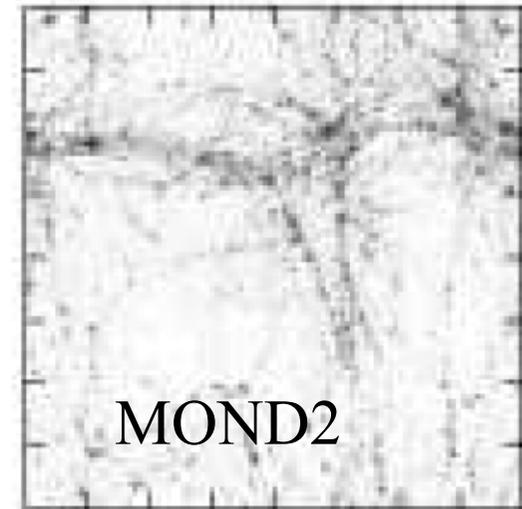
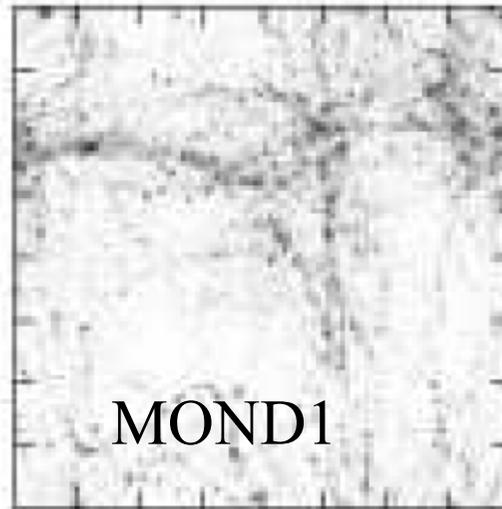
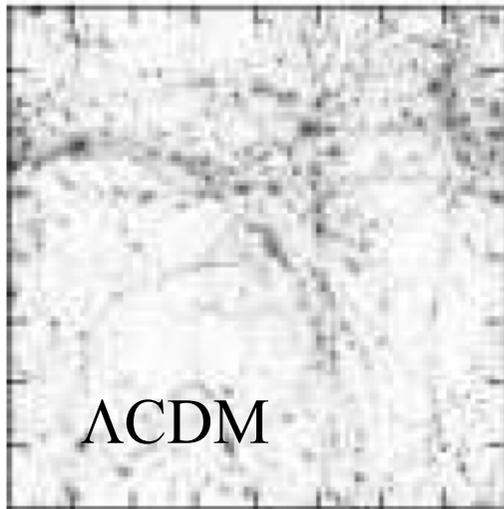
MOND



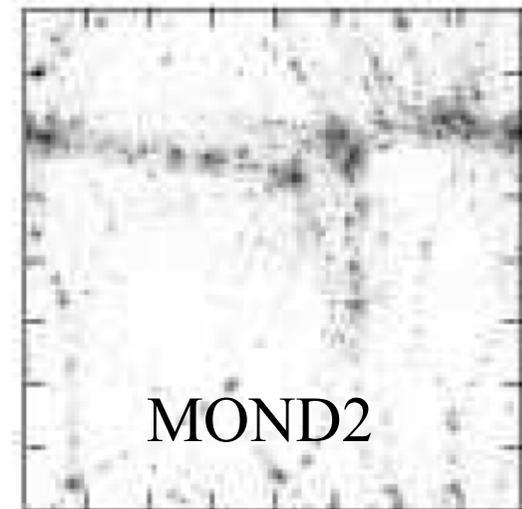
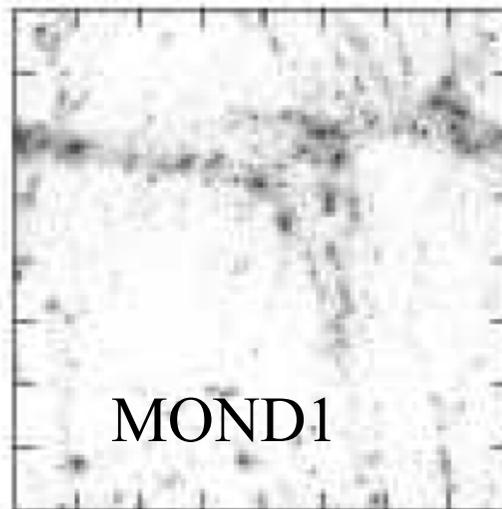
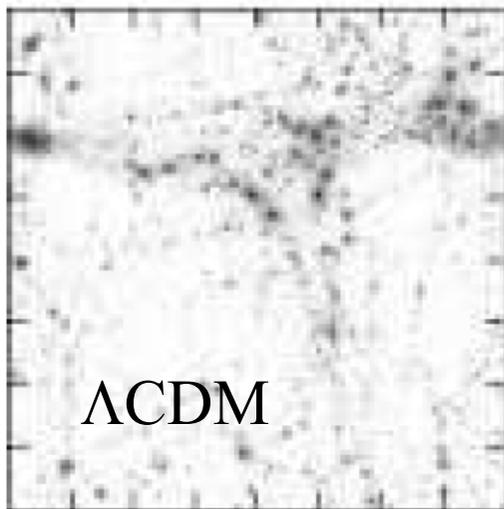
MOND simulations cosmologiques

Départ à $z=50$, sans dissipation, MOND + Λ CDM

$z=2$



$z=5$



Conclusion

Paramètres de l'Univers: $\Omega_m=0.28$, dont 15% baryons, 85% ??

Le modèle de matière noire, avec énergie noire $\Lambda = 0.72$ est celui qui correspond le mieux aux observations, y compris les grandes structures

Encore des problèmes non résolus:

- Matière noire domine au centre des galaxies avec une cuspide
- Problème de la taille des disques de galaxies
- Prédiction d'une multitude de petits halos, non observés

La physique des baryons pourrait résoudre une partie des problèmes et notamment l'accrétion de gaz froid

Ou bien, connaissance de la gravité insuffisante?