

Cosmologie Moderne

Cours 12



J.-Ch. Hamilton, APC
hamilton@apc.univ-paris7.fr



Plan du cours

- Vue d'ensemble de la cosmologie
 - ★ Échelles
 - ★ Les piliers de la cosmologie
 - ★ L'Univers de Friedman-Lemaître
 - ★ Histoire thermique de l'Univers
- La cosmologie observationnelle aujourd'hui
 - ★ Distances en cosmologie
 - ★ La formation des structures
 - ★ Tests cosmologiques (SNIa, CMB et les autres...)
 - ★ Arguments pour la matière et l'énergie noires
- Le futur de la cosmologie
 - ★ L'inflation
 - ★ Univers primordial
 - ★ Multivers ?



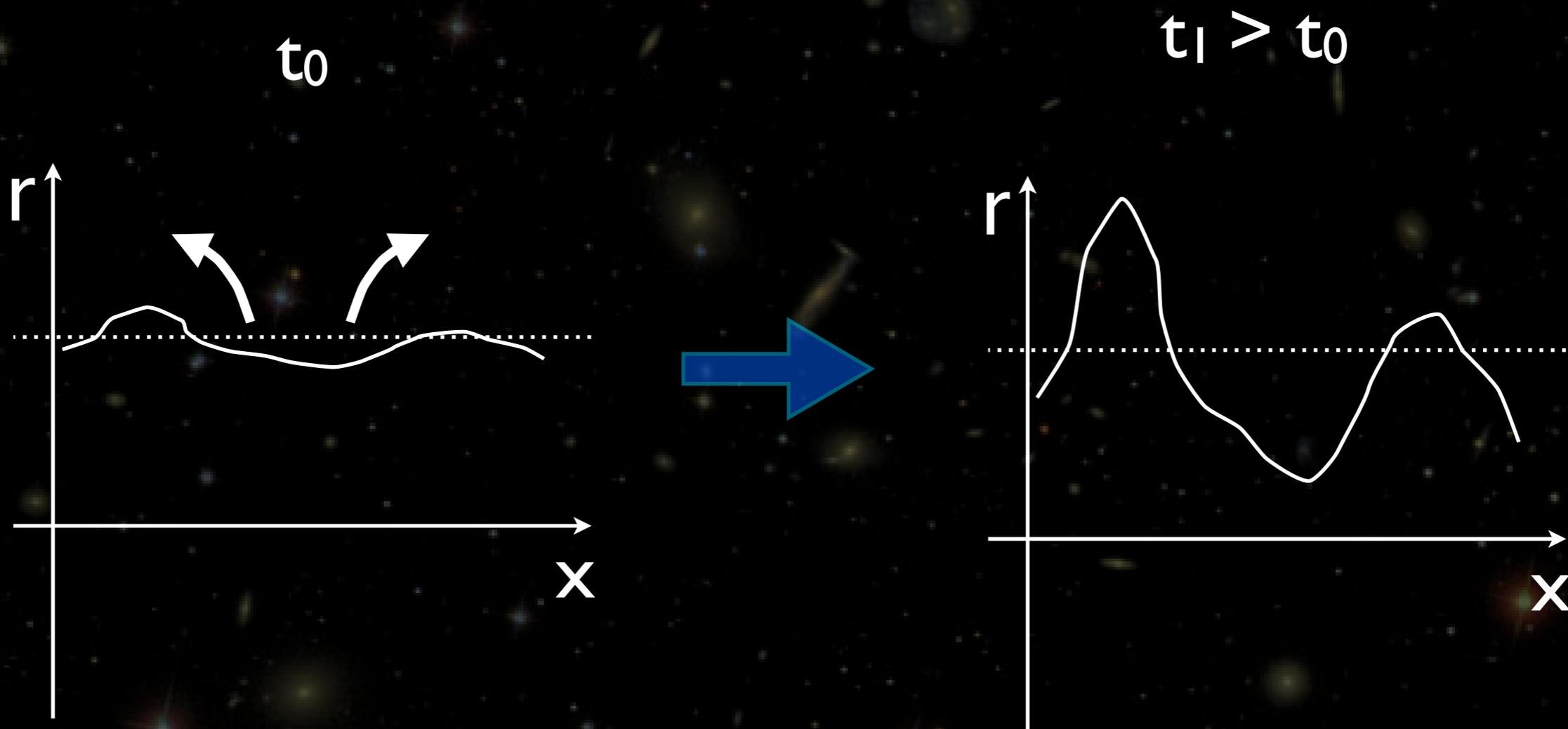
Plan du cours

- Vue d'ensemble de la cosmologie
 - ★ Échelles
 - ★ Les piliers de la cosmologie
 - ★ L'Univers de Friedman-Lemaître
 - ★ Histoire thermique de l'Univers
- La cosmologie observationnelle aujourd'hui
 - ★ Distances en cosmologie
 - ★ La formation des structures
 - ★ Tests cosmologiques (SNIa, CMB et les autres...)
 - ★ Arguments pour la matière et l'énergie noires
- Le futur de la cosmologie
 - ★ L'inflation
 - ★ Univers primordial
 - ★ Multivers ?



Formation des structures

- Idée générale



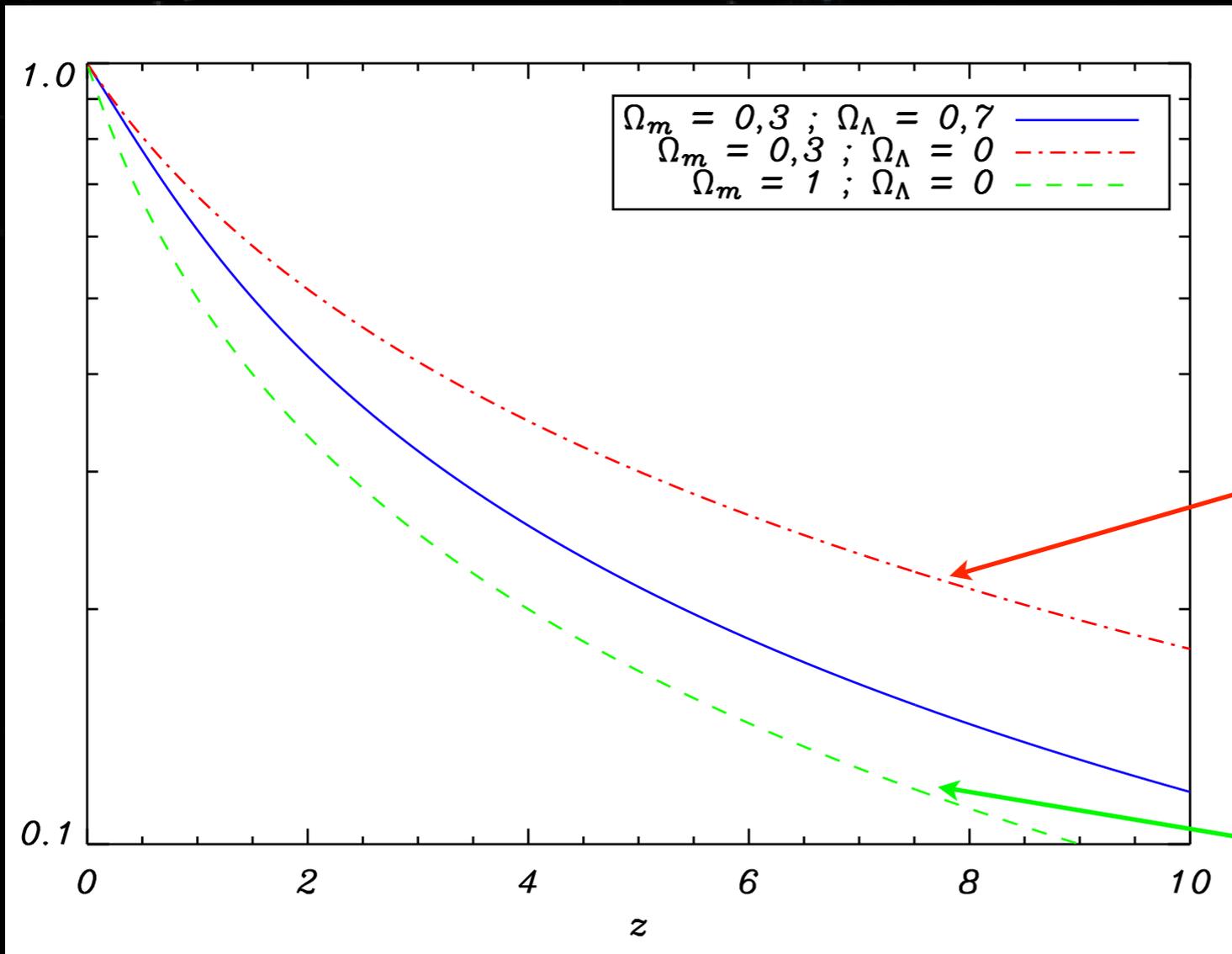
Difficulté: La gravitation n'est pas linéaire...
donc cette description va avoir ses limites



Évolution linéaire

- Cas général: facteur de croissance

$$D_g(z) = \frac{5\Omega_m}{2} E(z) \int_0^\infty \frac{1+z}{E(z)^3} dz \quad \text{avec} \quad E(z) = \frac{H(z)}{H_0}$$



Les structures observées aujourd'hui demanderaient un trop fort contraste à grand z (croissance lente)

Les structures observées aujourd'hui demanderaient un trop faible contraste à grand z (croissance rapide)



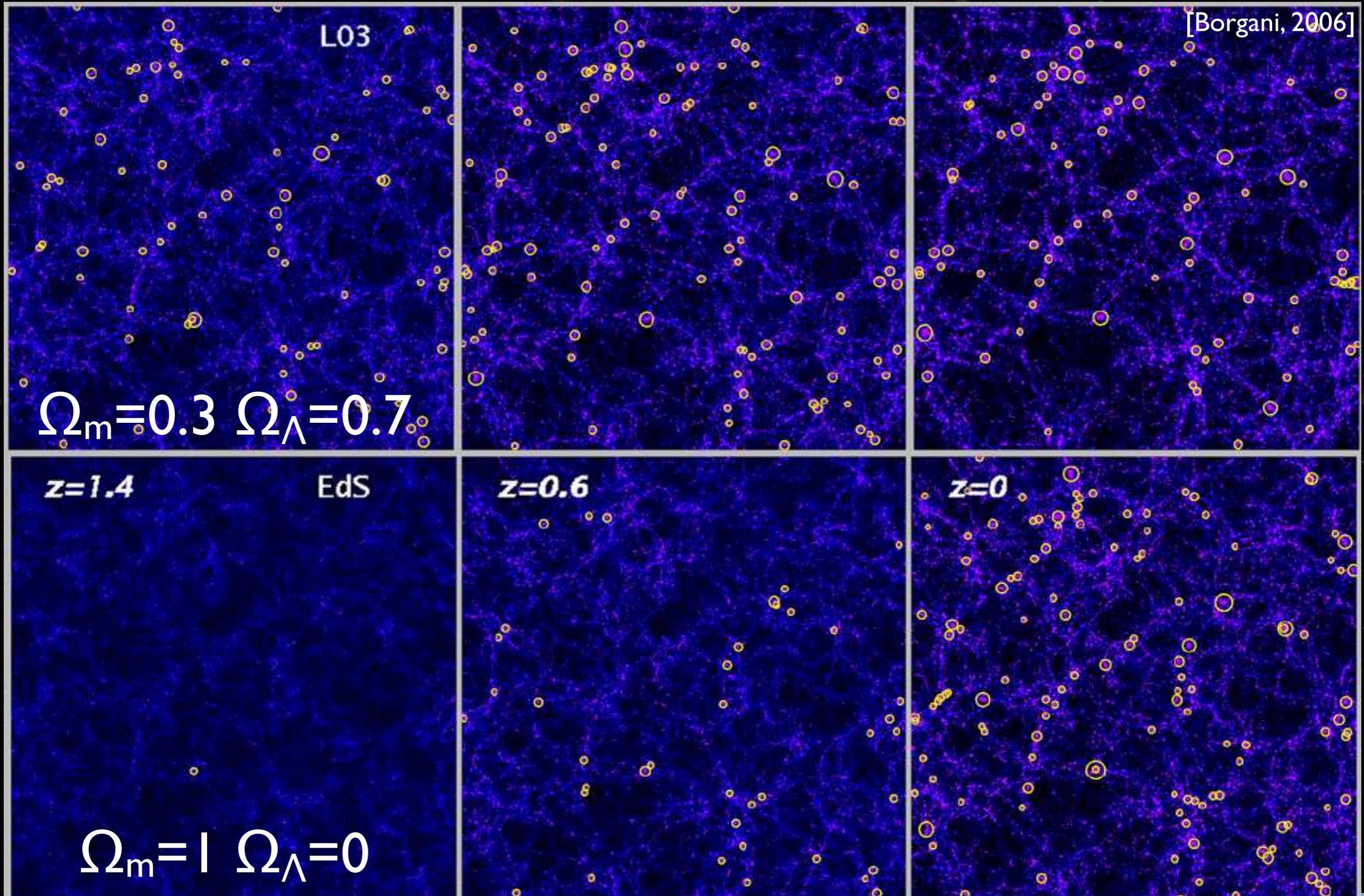
Évolution linéaire

Ère	$a(t)$	growing mode	decaying mode
Rayonnement	$a(t) \propto t^{1/2}$	$D_g(t) \propto t$ $D_g(t) \propto a^2$	$D_d(t) \propto \text{const}$
Matière	$a(t) \propto t^{2/3}$	$D_g(t) = t^{2/3}$ $D_g(t) \propto a$	$D_d(t) = t^{-1}$
Constante cosmologique	$a(t) \propto \exp(Ht)$	$D_g(t) \propto \text{const}$	$D_d(t) \propto \exp(-2Ht)$

Les structures ne croissent significativement que pendant la domination de la matière



Comparaison avec les simus. N-corps



Description statistique

- contraste de densité : $\delta(\vec{x}) = \frac{\rho(\vec{x}) - \rho_0}{\rho_0}$

- Fonction de corrélation à deux points:

$$\xi(\vec{r}) = \langle \delta(\vec{x}) \delta(\vec{x} - \vec{r}) \rangle$$

- Dans l'espace de Fourier:

$$\tilde{\delta}(\vec{k}) = \int \delta(\vec{x}) \exp(-i\vec{k} \cdot \vec{x}) d\vec{x}$$

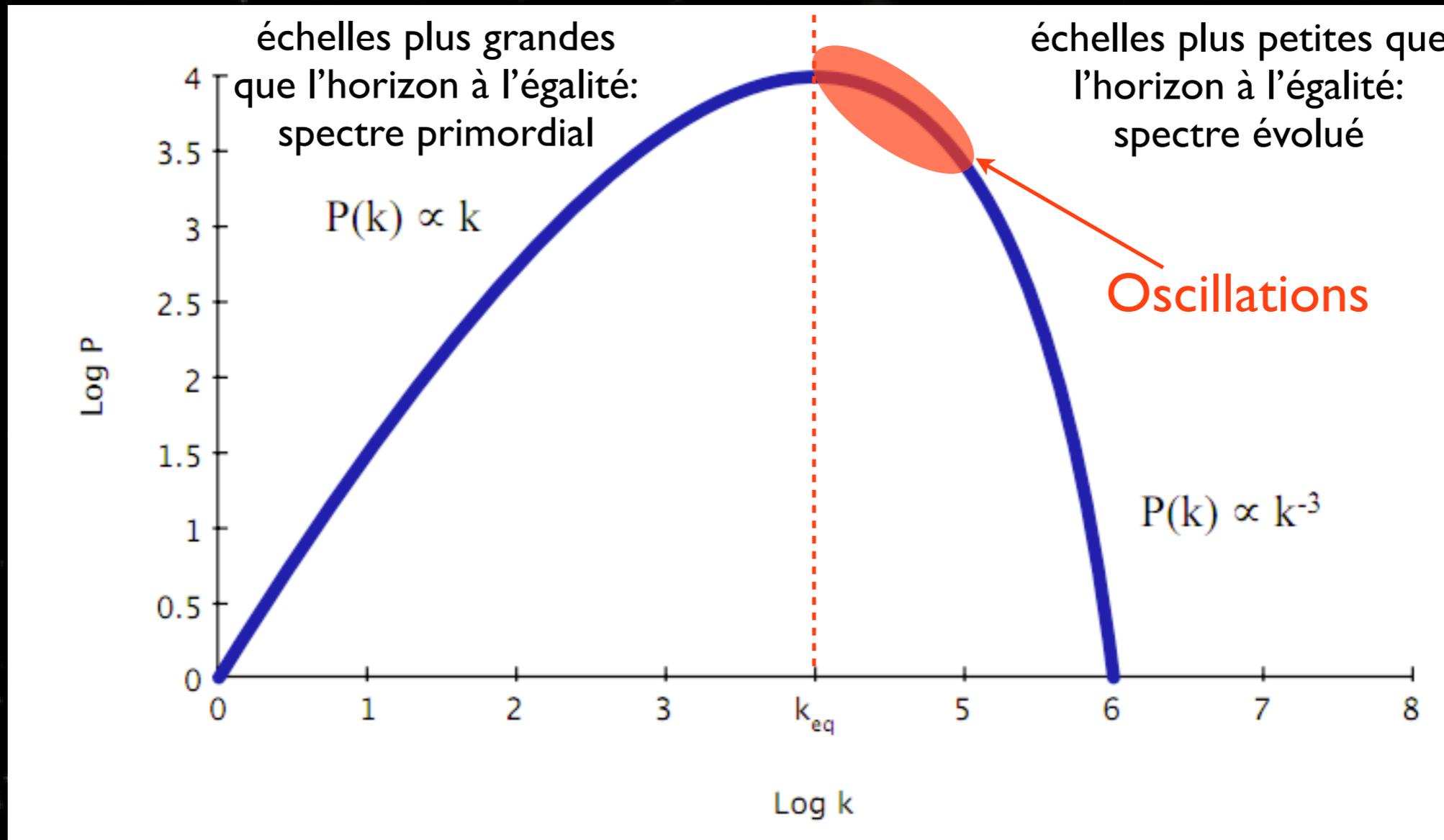
- ★ modes de moyenne nulle et de variance donnée par le spectre de puissance

$$\langle \tilde{\delta}(\vec{k}_1) \tilde{\delta}^*(\vec{k}_2) \rangle = (2\pi)^3 \delta_D(\vec{k}_1 - \vec{k}_2) P(\vec{k}_1)$$

$$P(\vec{k}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int \xi(\vec{x}) \exp(-i\vec{k} \cdot \vec{x}) d\vec{x}$$



Spectre de puissance évolué



Mesures de $P(k)$

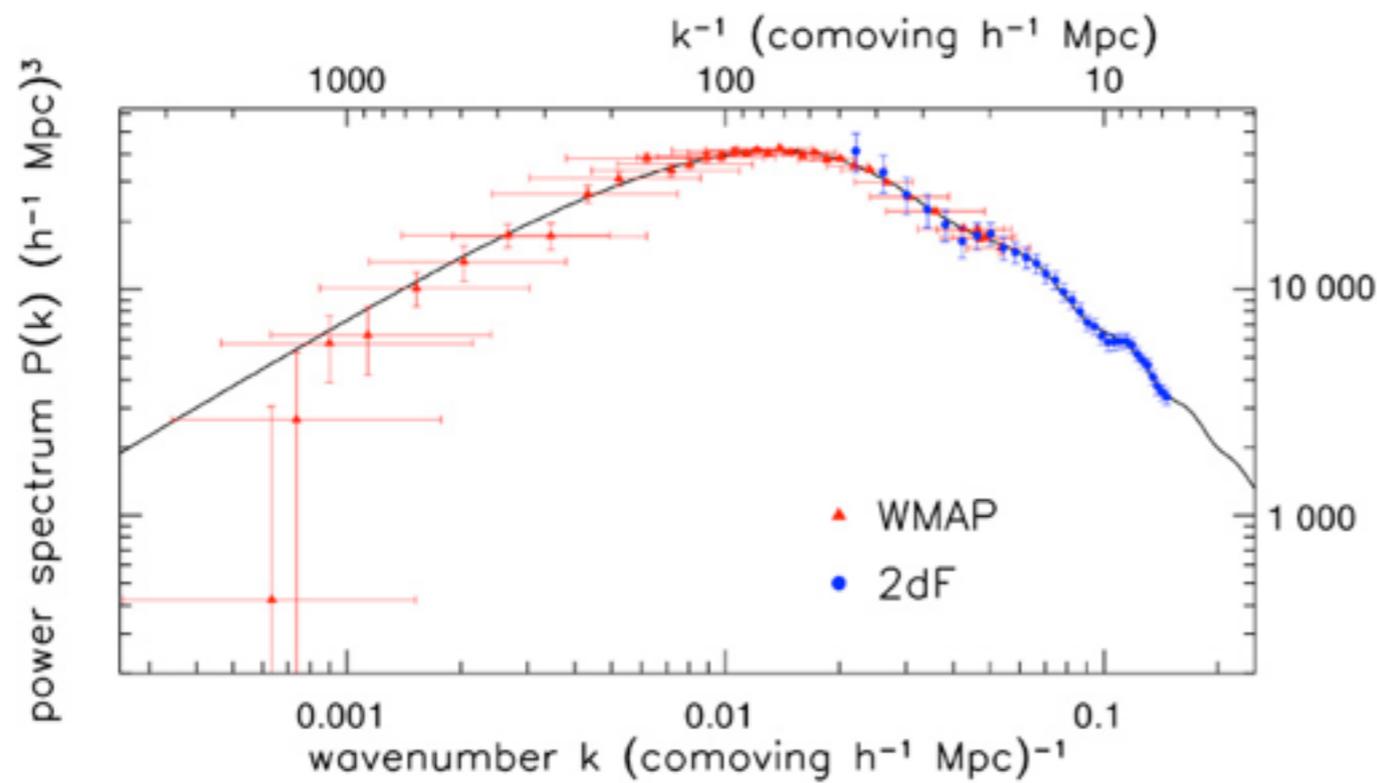
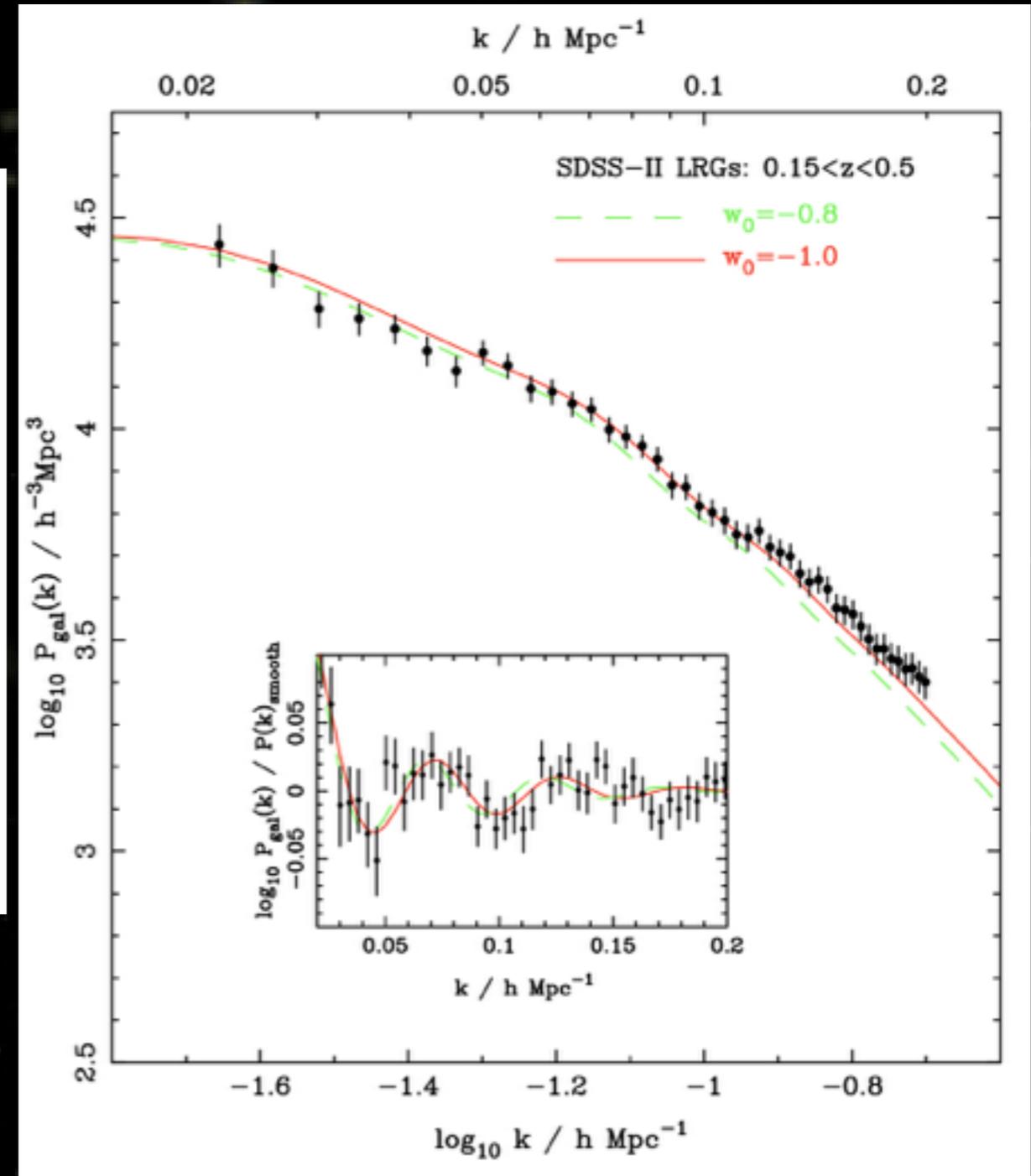


Fig 8.17 (A. Sanchez) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Plan du cours

- Vue d'ensemble de la cosmologie
 - ★ Échelles
 - ★ Les piliers de la cosmologie
 - ★ L'Univers de Friedman-Lemaître
 - ★ Histoire thermique de l'Univers
- La cosmologie observationnelle aujourd'hui
 - ★ Distances en cosmologie
 - ★ La formation des structures
 - ★ La matière noire
 - ★ Tests cosmologiques (SNIa, CMB et les autres...)
- Le futur de la cosmologie
 - ★ L'inflation
 - ★ Univers primordial
 - ★ Multivers ?



Matière noire

- Pourquoi ?

- ★ Dynamique des amas
- ★ Courbes de rotation des galaxies
- ★ Formation des structures et fond diffus

- Quels candidats ?

- ★ Objets compacts
- ★ Particules «exotiques»
- ★ Modification de la gravité



Le Bullet Cluster



Dynamique des amas

- Fritz Zwicky (1933)

- ★ Amas de Coma

- 2000 galaxies
- vitesse ~ 300 km/s
- rayon \sim qques Mpc

- ★ Mesure des vitesses

→ Énergie cinétique $E_c = \frac{1}{2}mv^2$

- ★ Mesure des distances entre galaxies

→ Énergie potentielle $E_p = -G\frac{m^2}{r}$

- ★ Équilibre dynamique (Viriel)

$$E_p = -2E_c$$

- ★ Estimation de la masse

$$m \propto r \times v^2$$

→ 100 à 500 fois la masse stellaire



Matière
noire !



Emission X des amas

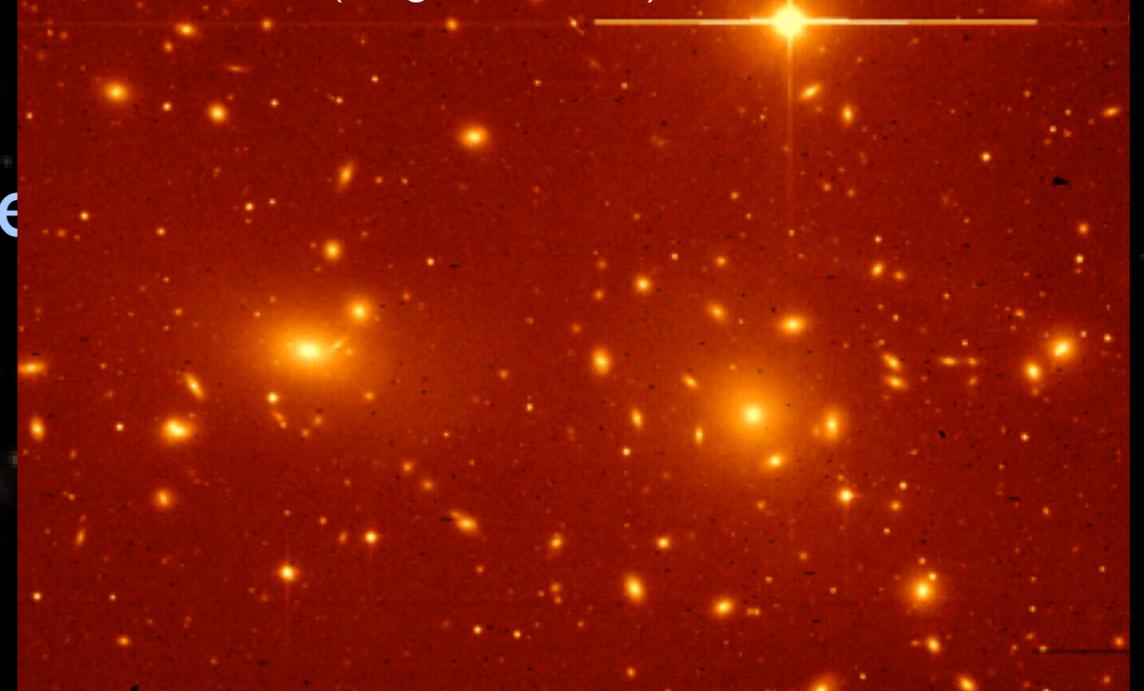
- Plus récent (80's)
- La matière visible s'étend beaucoup plus loin que les étoiles
- Gaz chaud ($\sim 10^7 - 10^8$ K)
 - ★ à l'équilibre hydrostatique dans le champ gravitationnel
 - ★ On peut déterminer la masse totale
- Gaz \sim le double de la matière visible en masse
- Il faut de la matière noire ($\sim 85\%$) pour chauffer suffisamment le gaz !

Amas Abell 2029



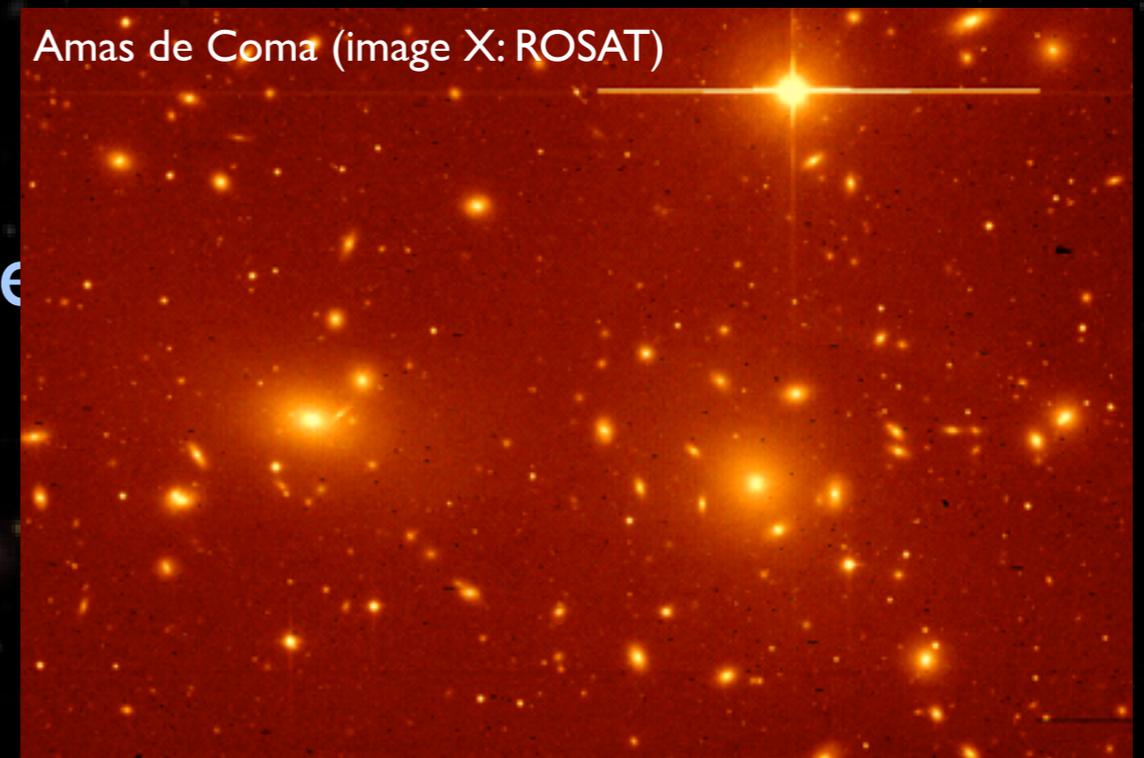
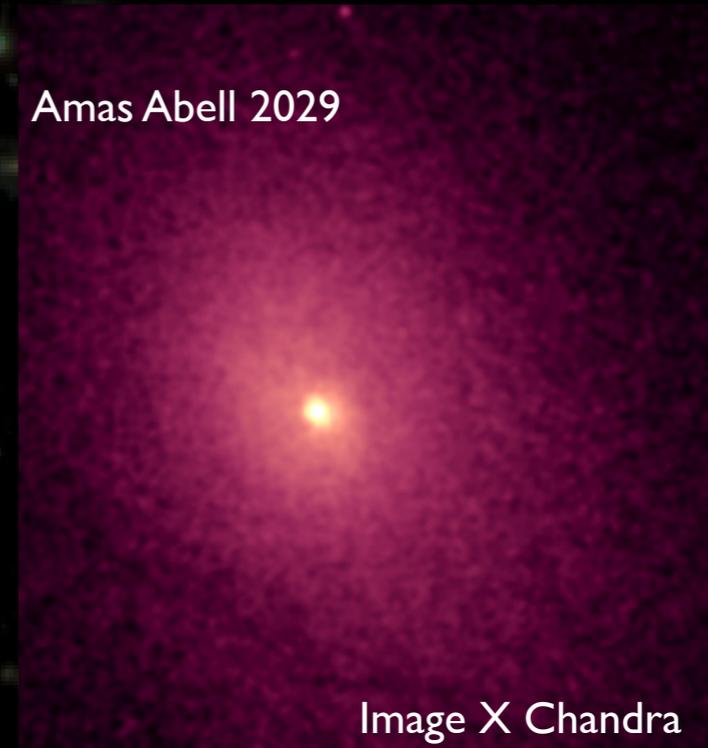
Image optique SDSS

Amas de Coma (image X: ROSAT)



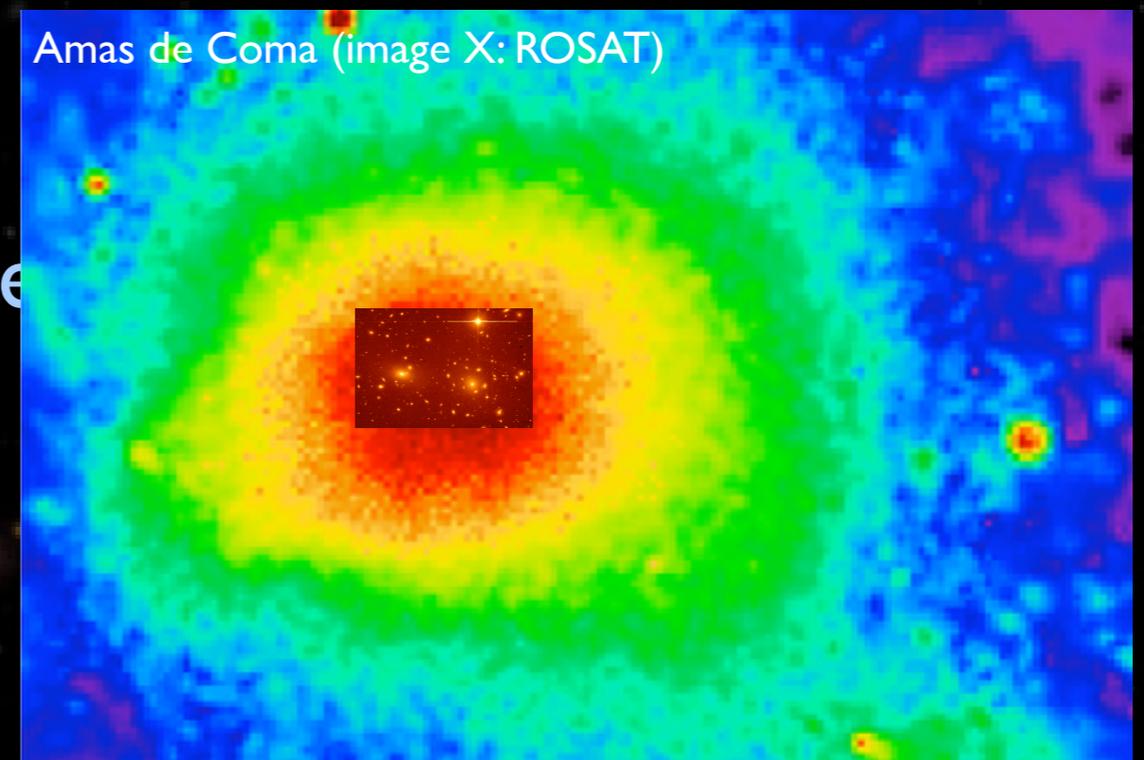
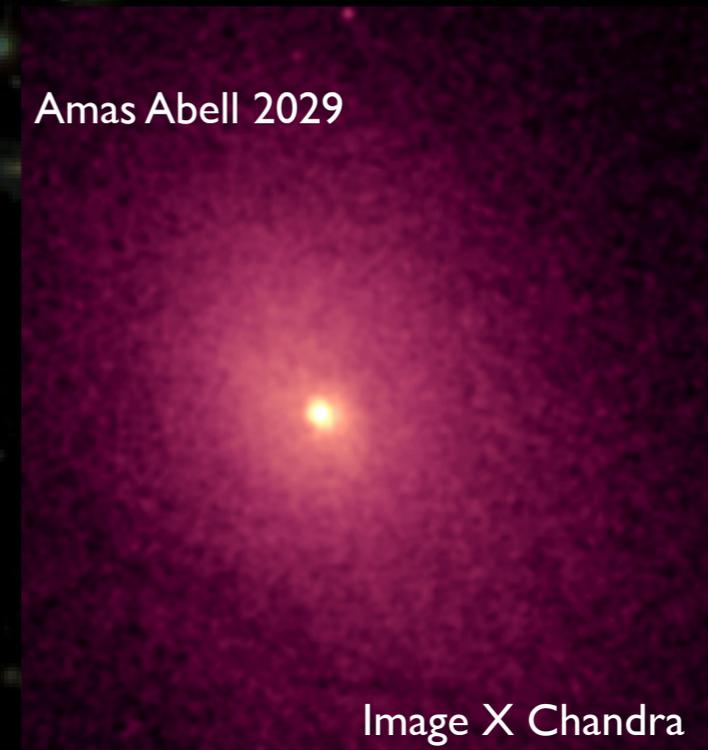
Emission X des amas

- Plus récent (80's)
- La matière visible s'étend beaucoup plus loin que les étoiles
- Gaz chaud ($\sim 10^7 - 10^8$ K)
 - ★ à l'équilibre hydrostatique dans le champ gravitationnel
 - ★ On peut déterminer la masse totale
- Gaz \sim le double de la matière visible en masse
- Il faut de la matière noire ($\sim 85\%$) pour chauffer suffisamment le gaz !



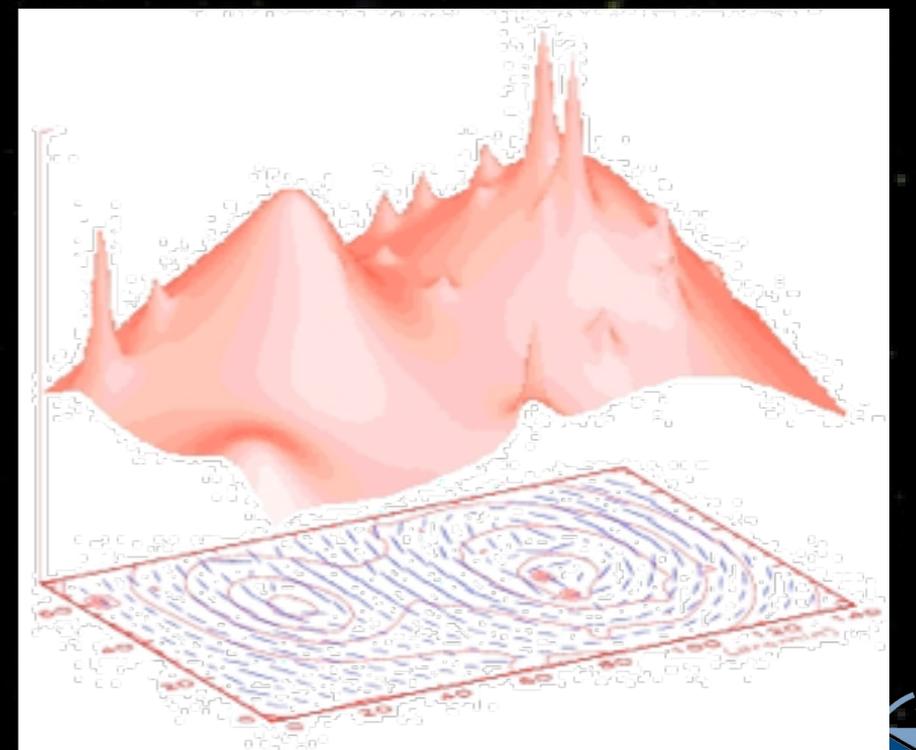
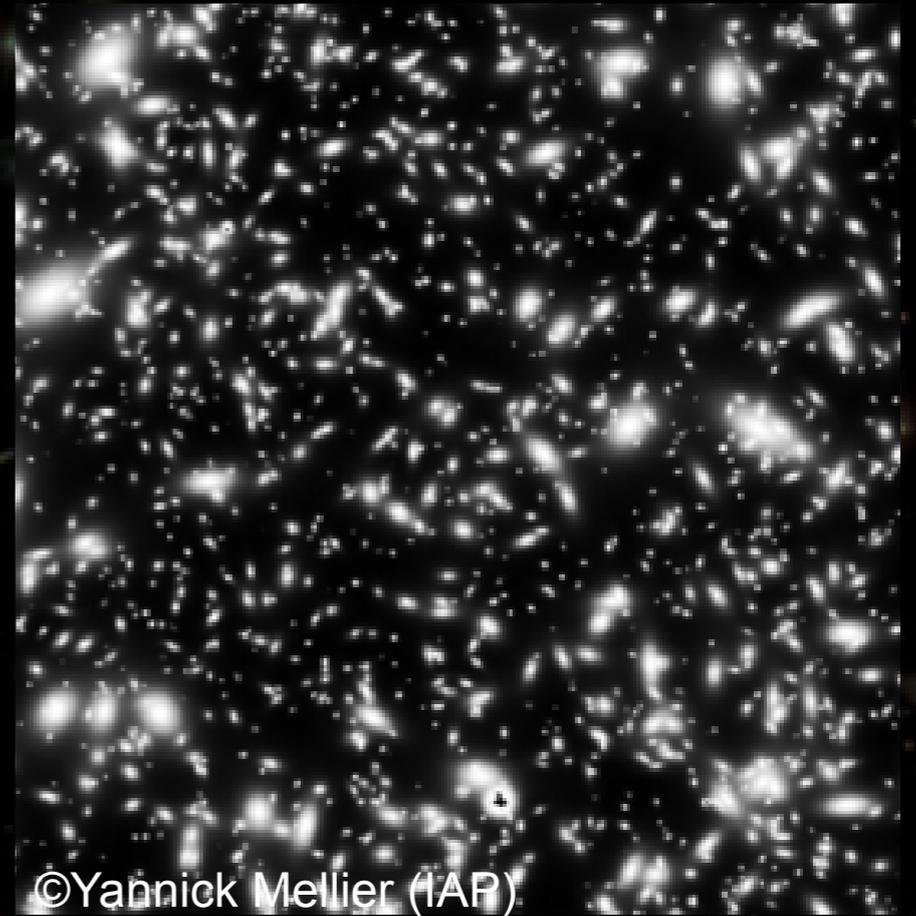
Emission X des amas

- Plus récent (80's)
- La matière visible s'étend beaucoup plus loin que les étoiles
- Gaz chaud ($\sim 10^7 - 10^8$ K)
 - ★ à l'équilibre hydrostatique dans le champ gravitationnel
 - ★ On peut déterminer la masse totale
- Gaz \sim le double de la matière visible en masse
- Il faut de la matière noire ($\sim 85\%$) pour chauffer suffisamment le gaz !



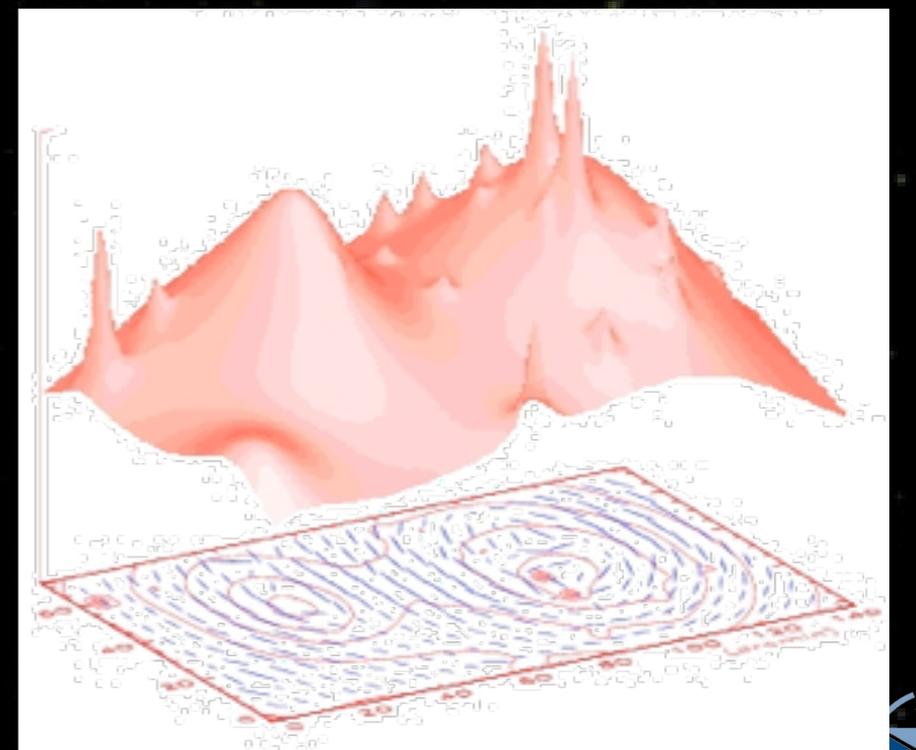
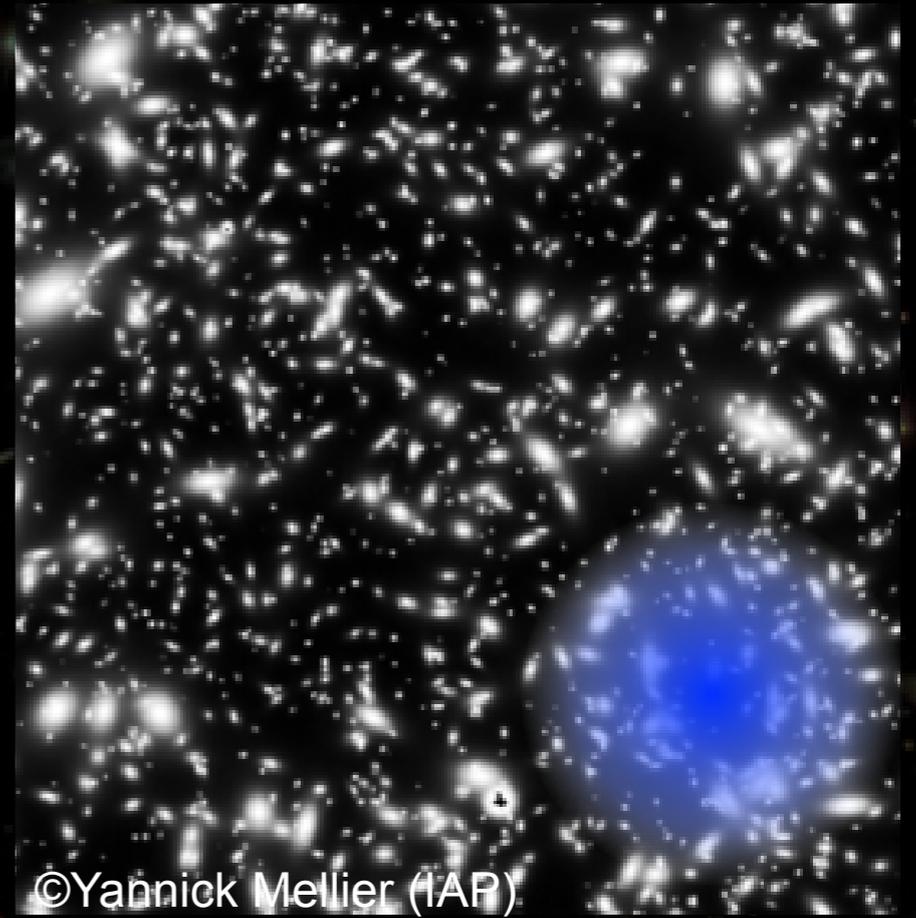
Lentillage gravitationnel

- La masse courbe l'espace-temps
 - ★ Le trajet des photons est défléchi par la masse
- Un amas très massif va déformer les images des objets d'arrière-plan
 - ★ Mirages gravitationnels (arcs, images multiples)
 - ★ Lentillage faible : déformation légère des galaxies d'arrière plan
 - Ellipticité et orientations systématiques
- Possibilité de reconstruire le potentiel gravitationnel de l'amas



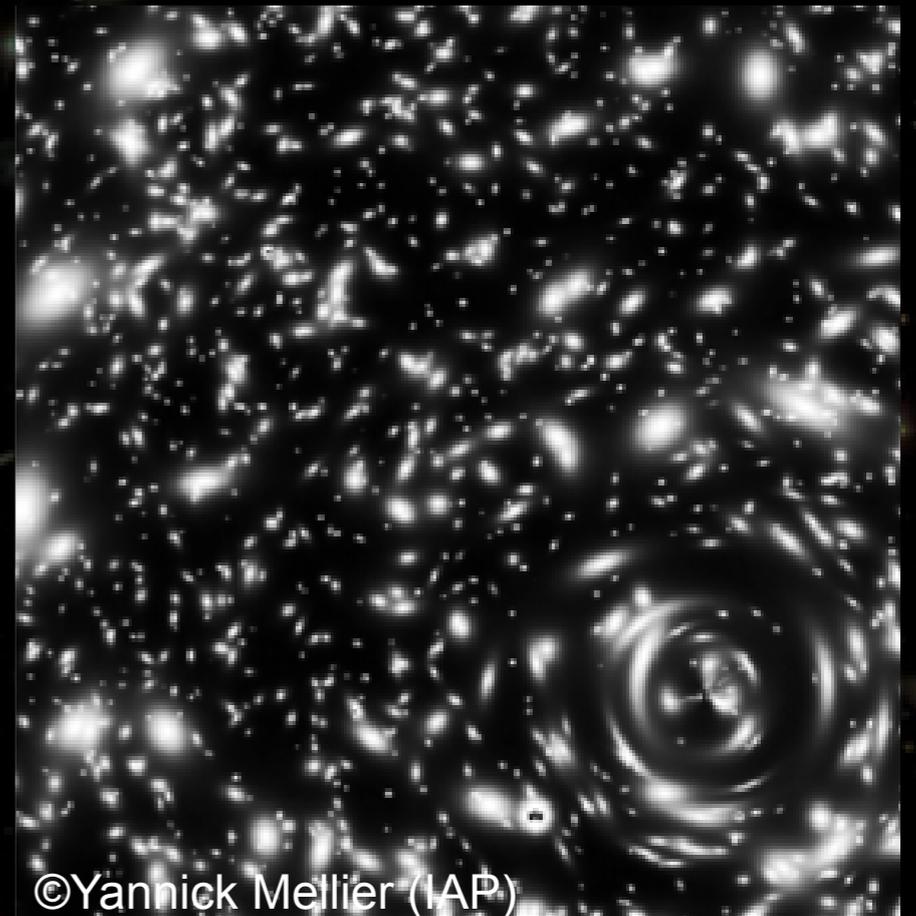
Lentillage gravitationnel

- La masse courbe l'espace-temps
 - ★ Le trajet des photons est défléchi par la masse
- Un amas très massif va déformer les images des objets d'arrière-plan
 - ★ Mirages gravitationnels (arcs, images multiples)
 - ★ Lentillage faible : déformation légère des galaxies d'arrière plan
 - Ellipticité et orientations systématiques
- Possibilité de reconstruire le potentiel gravitationnel de l'amas

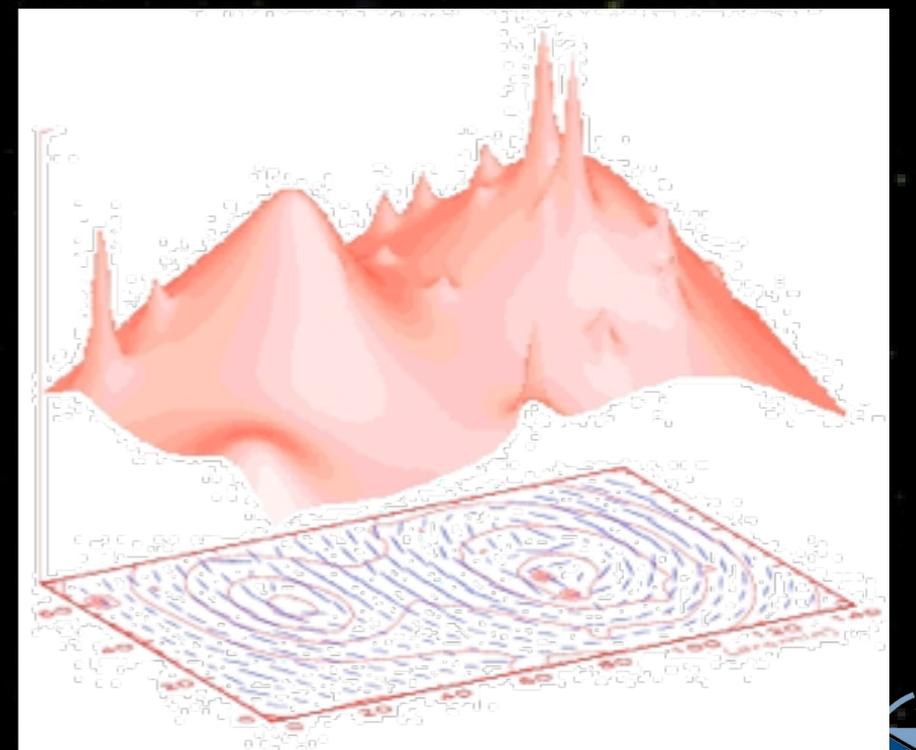
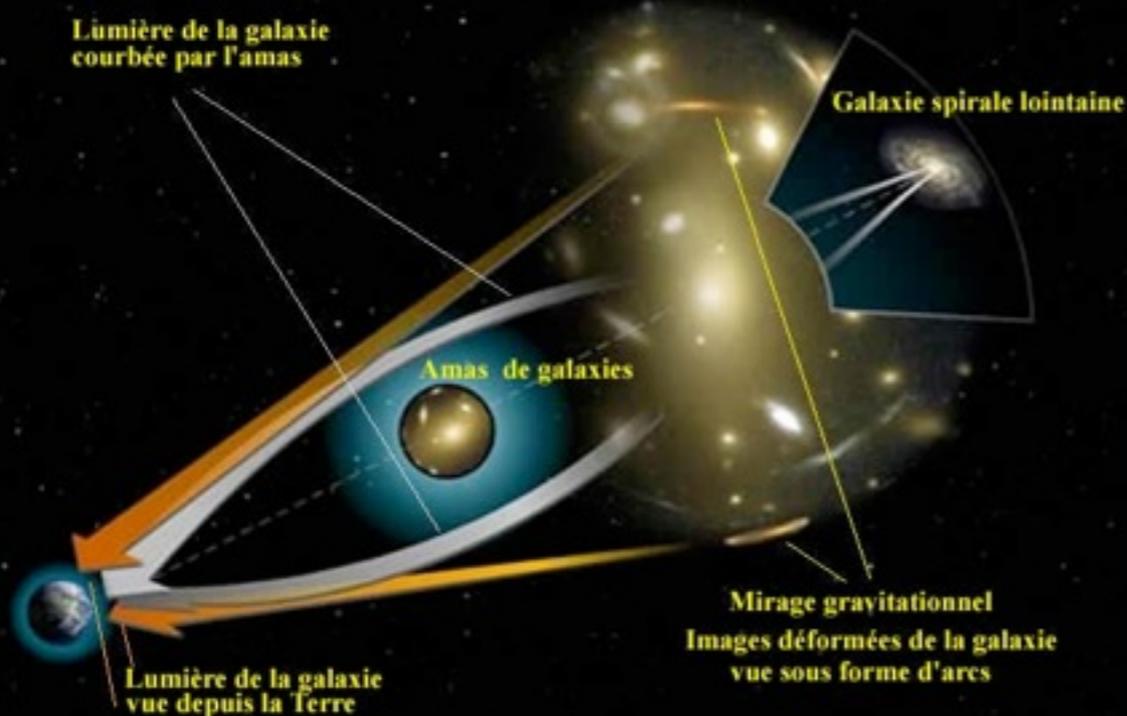


Lentillage gravitationnel

- La masse courbe l'espace-temps
 - ★ Le trajet des photons est défléchi par la masse
- Un amas très massif va déformer les images des objets d'arrière-plan
 - ★ Mirages gravitationnels (arcs, images multiples)
 - ★ Lentillage faible : déformation légère des galaxies d'arrière plan
 - Ellipticité et orientations systématiques
- Possibilité de reconstruire le potentiel gravitationnel de l'amas



©Yannick Mellier (IAP)



Amas de galaxies Abell 1689 (HST)



Reconstruction du potentiel gravitationnel

Mauve : masse noire reconstruite
par lentillage faible

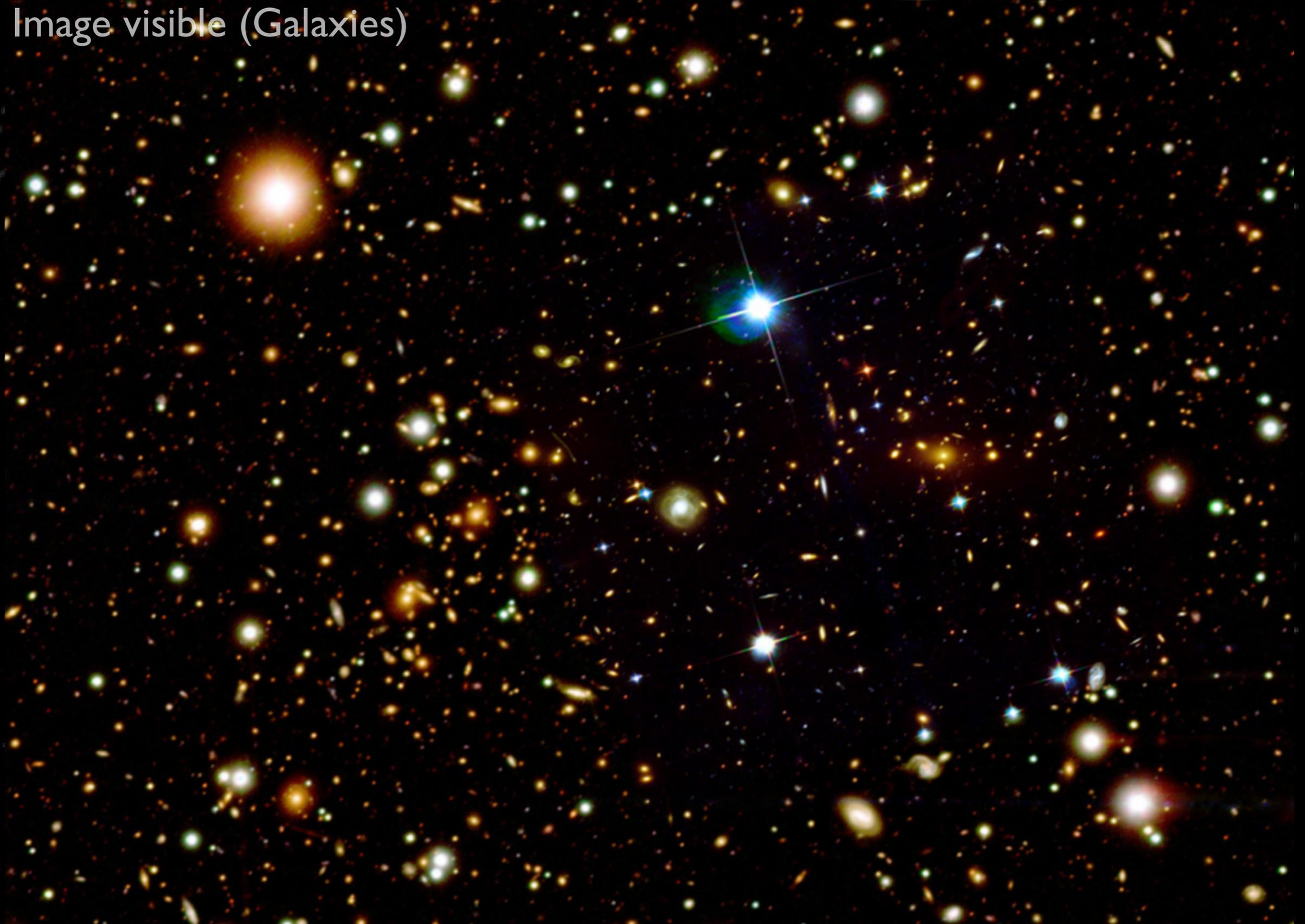


Résultat : matière noire systématiquement majoritaire !



La «preuve» : le «Bullet Cluster» (2006)

Image visible (Galaxies)



La «preuve» : le «Bullet Cluster» (2006)

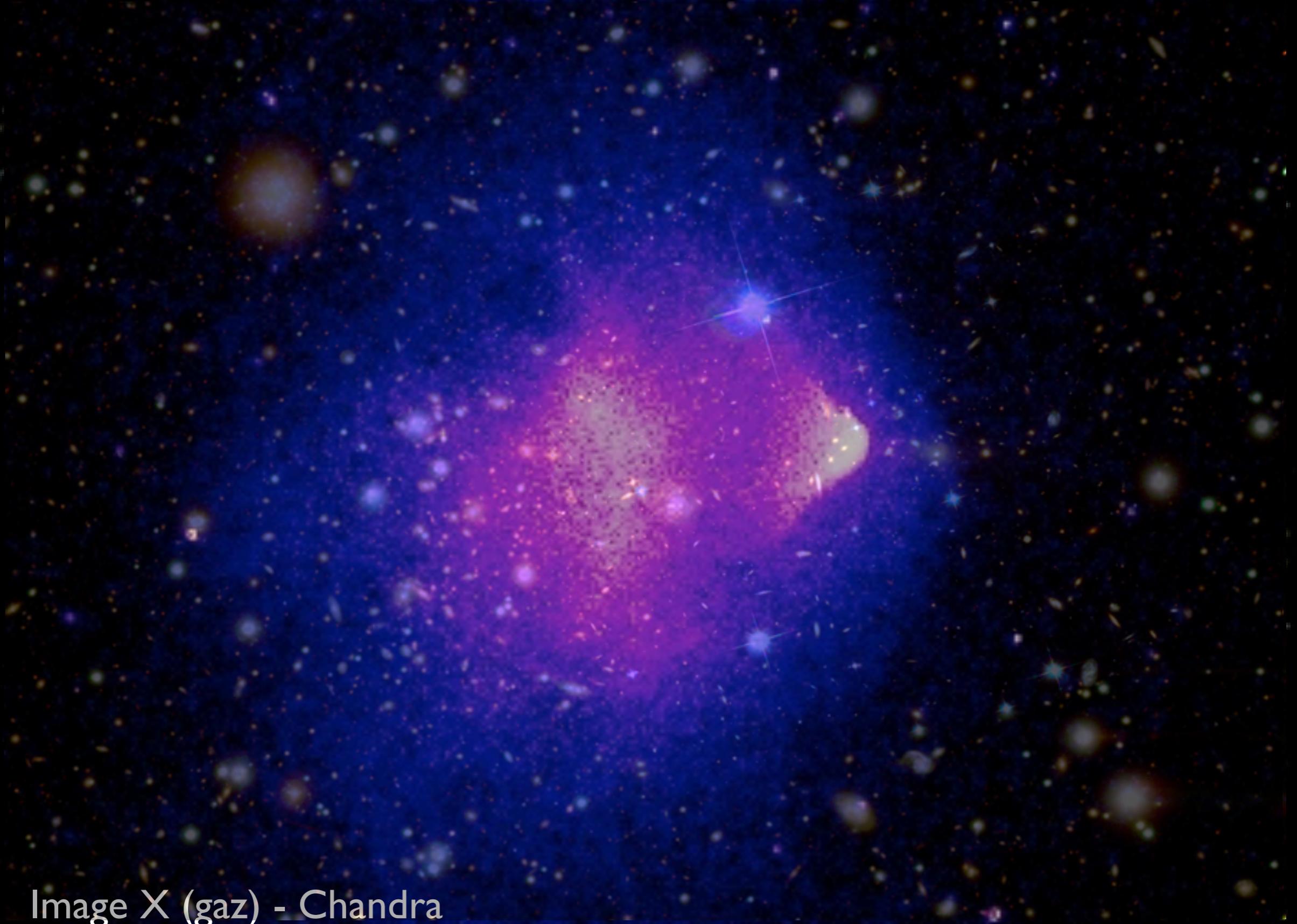


Image X (gaz) - Chandra



La «preuve» : le «Bullet Cluster» (2006)

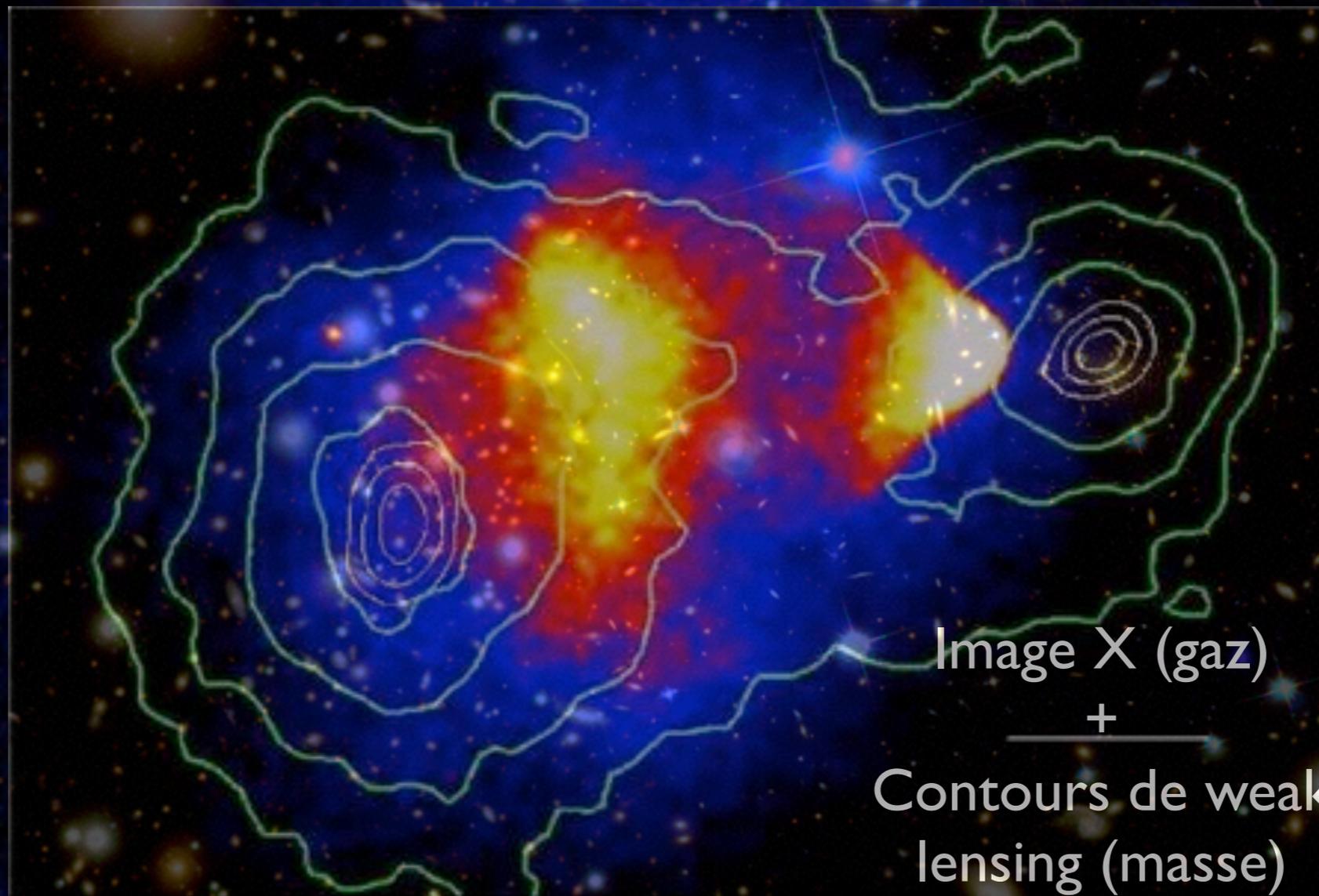


Image X (gaz) - Chandra

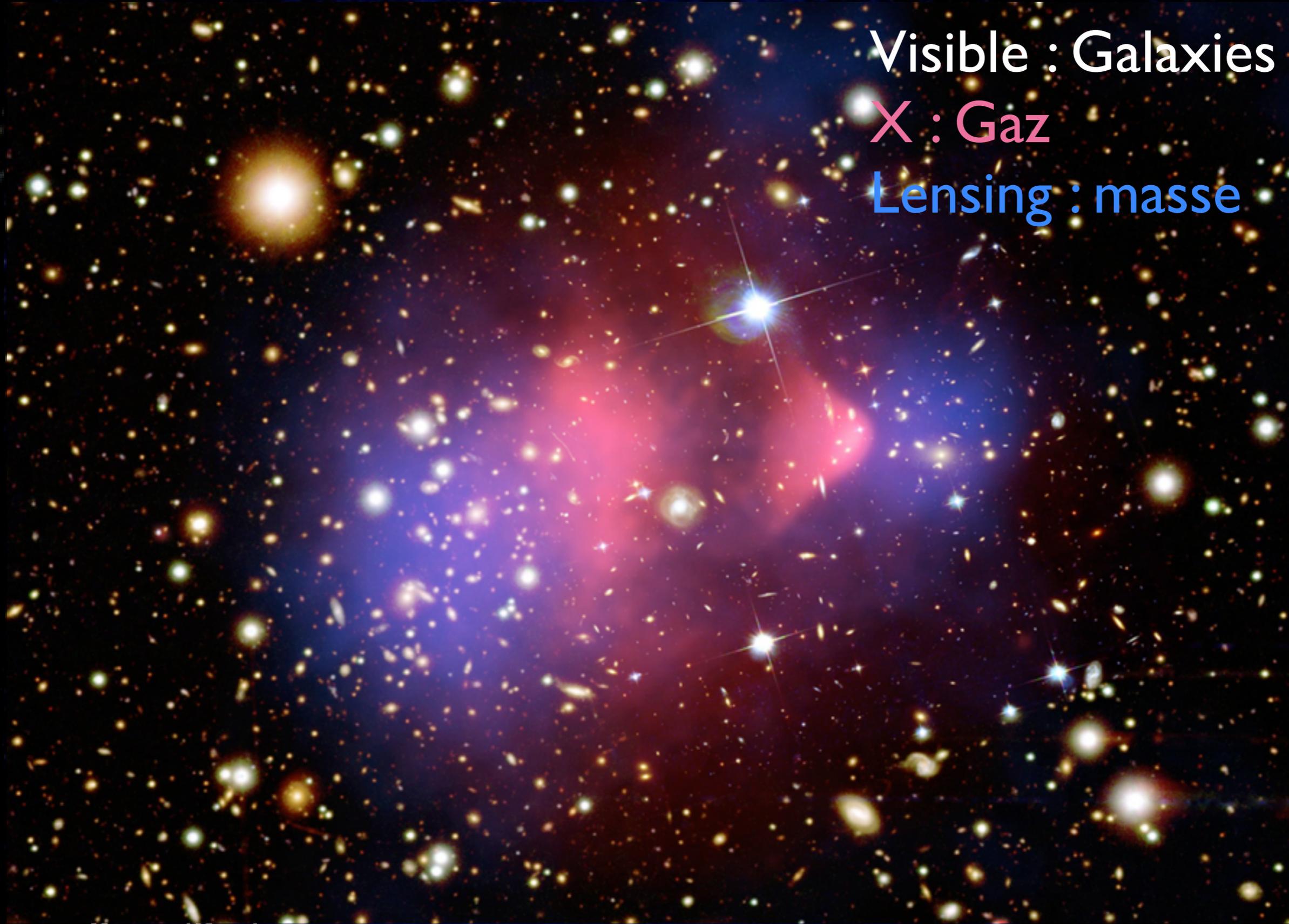


La «preuve» : le «Bullet Cluster» (2006)

Visible : Galaxies

X : Gaz

Lensing : masse



«Bullet Cluster»

- collision de deux amas
- Les galaxies et la matière noire sont non collisionnelles
 - ★ Elles passent «sans se voir»
- Le gaz est collisionnel
 - ★ Il reste au centre, s'échauffe et des ondes de choc apparaissent
- C'est l'argument le plus fort en faveur de la matière noire



Simulation Chandra



«Bullet Cluster»

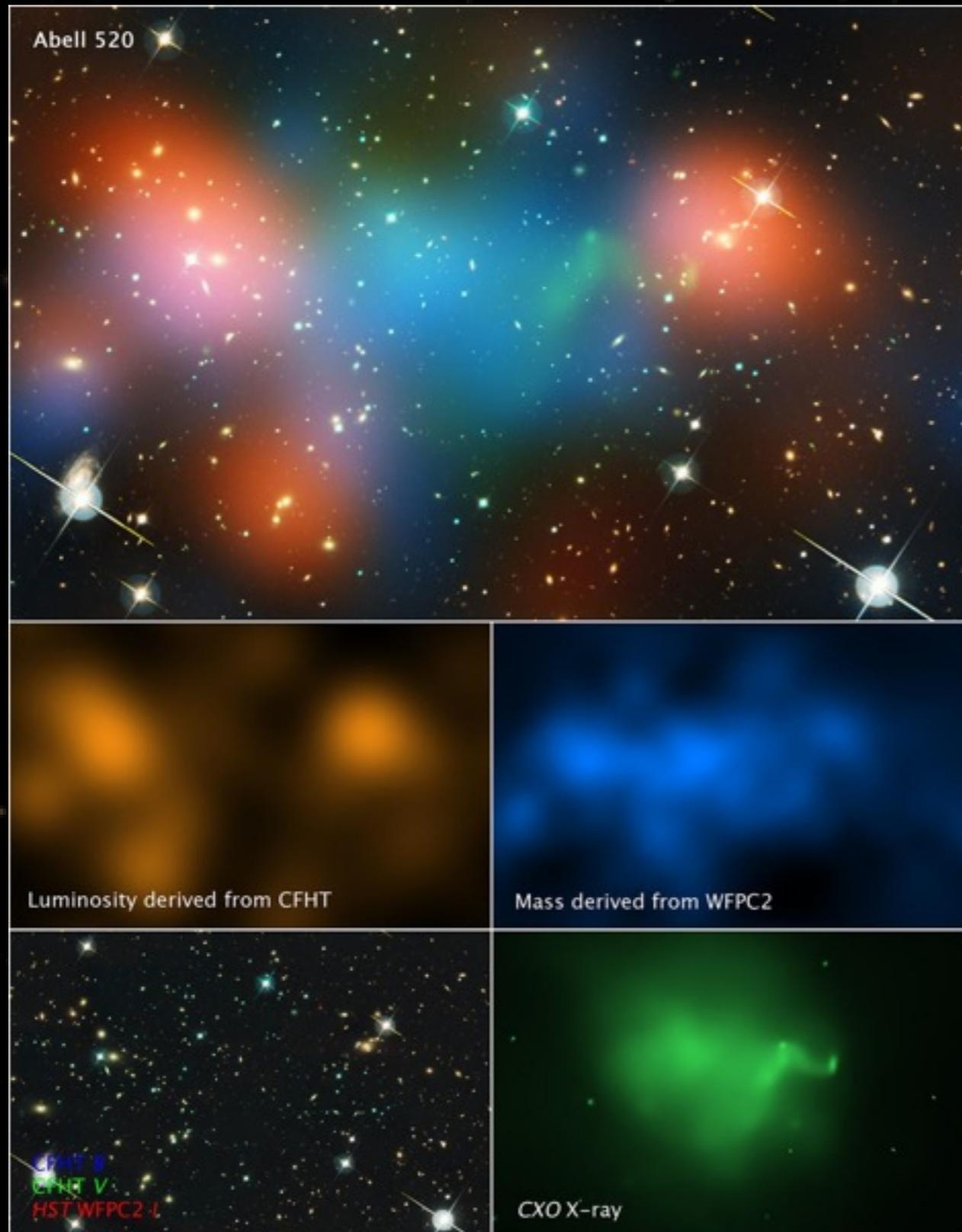
- collision de deux amas
- Les galaxies et la matière noire sont non collisionnelles
 - ★ Elles passent «sans se voir»
- Le gaz est collisionnel
 - ★ Il reste au centre, s'échauffe et des ondes de choc apparaissent
- C'est l'argument le plus fort en faveur de la matière noire



Simulation Chandra



Mais ! il existe un contre-exemple...



Abell 520
 $z=0.02$
[Mahdavi et al. 2007]

Le coeur de matière
noire coïncide avec le gaz,
pas avec les galaxies...

Semble pouvoir
s'expliquer par la
présence d'un filament
de matière noire dans la
ligne de visée
[Girardi et al., arXiv:
0809.3139]



Matière noire Galactique



Matière noire Galactique

Vitesse de rotation typique
des étoiles : 200 km/s



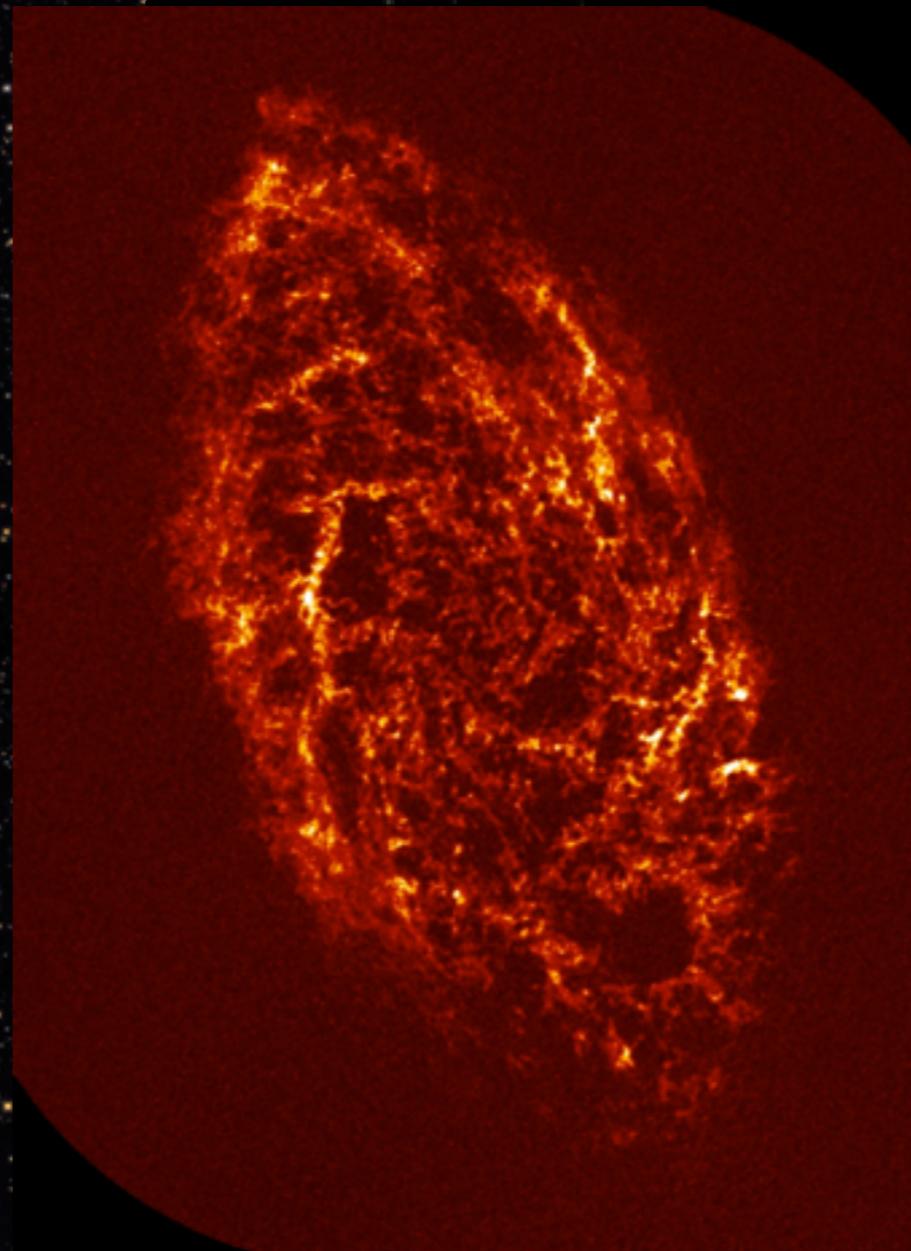
Le profil de vitesse permet
de reconstruire la masse !

$$v = \sqrt{\frac{Gm_{\text{interne}}}{r}}$$

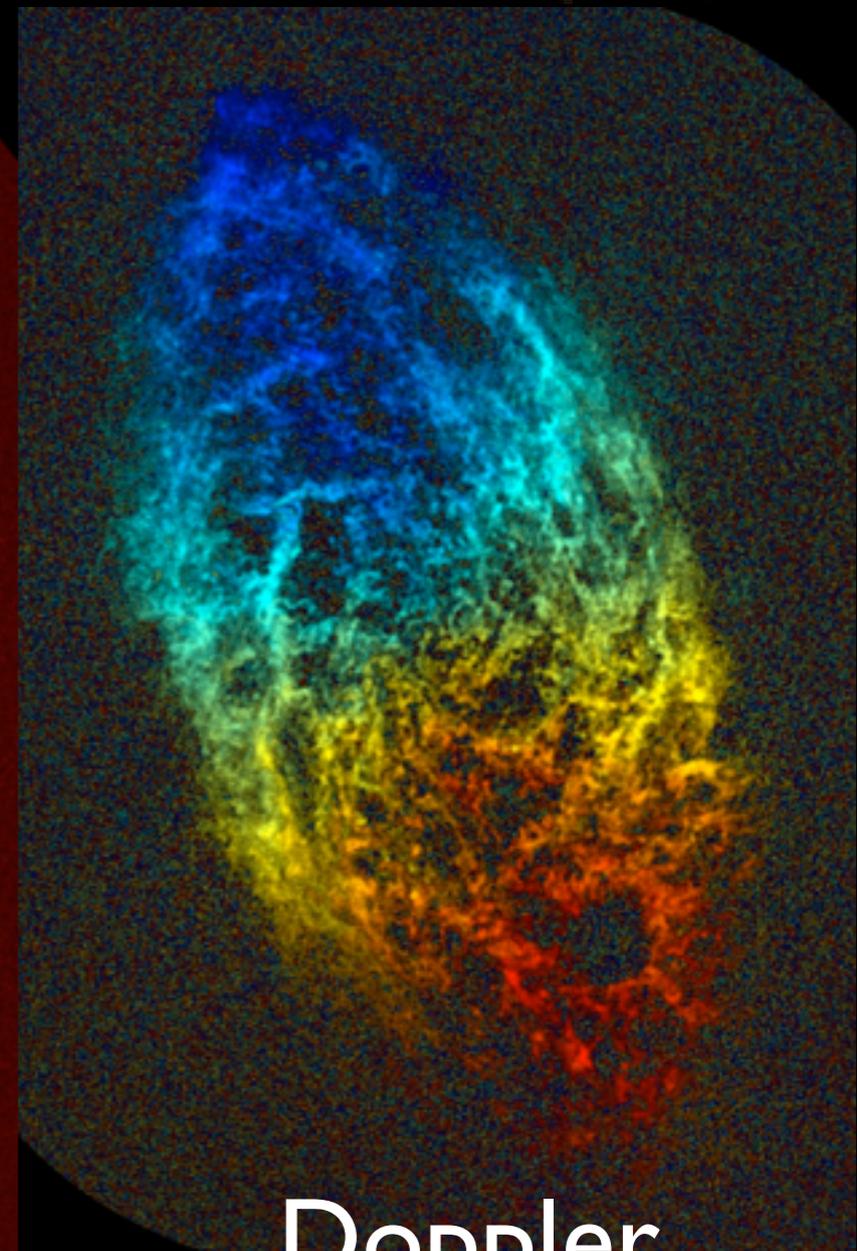
mesure de vitesses dans la Galaxie M33 (galaxie du triangle)



Visible



Radio



Doppler
Hydrogène



Profil de vitesse et masse interne

- Principe fondamental de la dynamique:

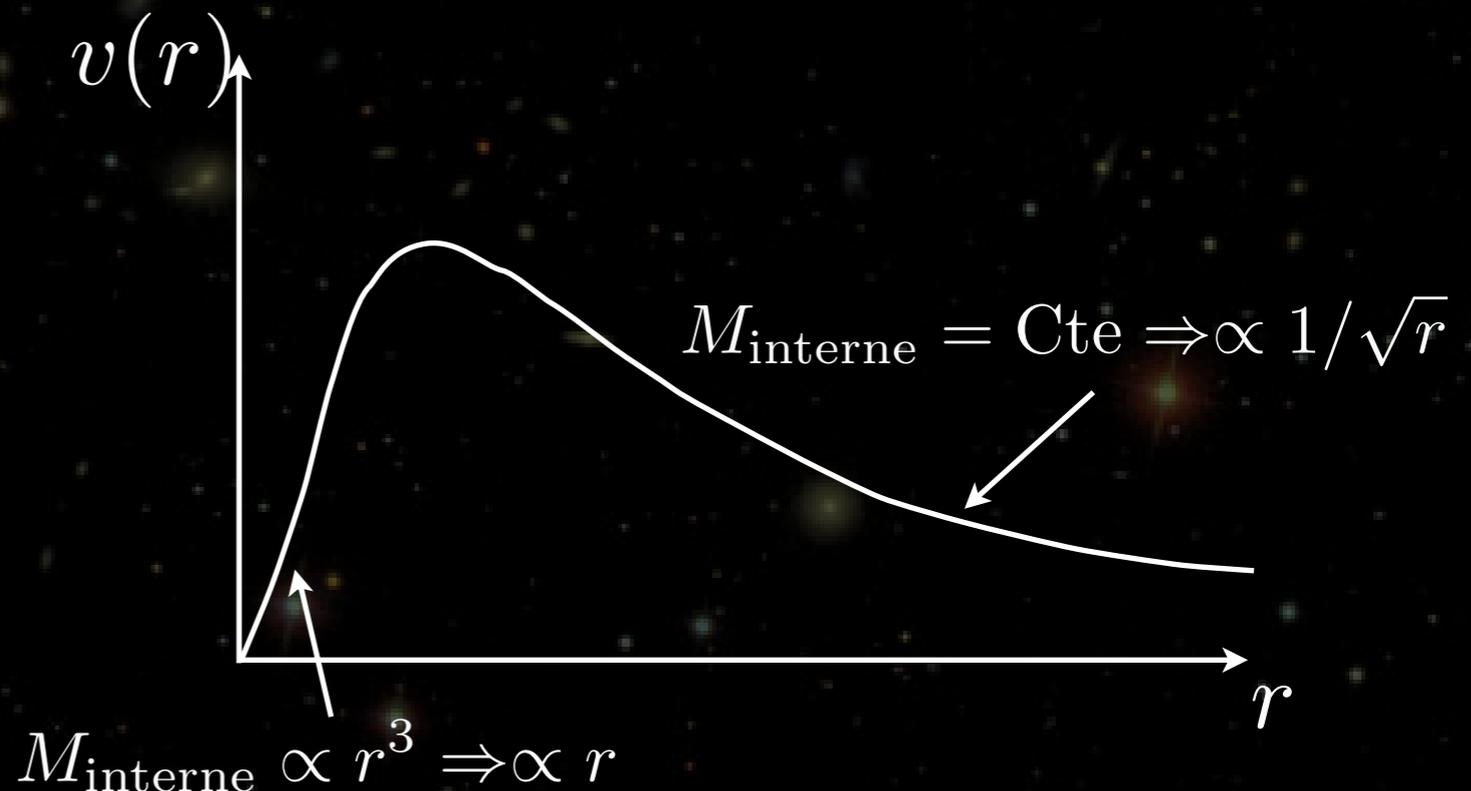
$$F = \frac{GMm}{r^2}$$

- Orbite circulaire: $a = \frac{v^2}{r}$

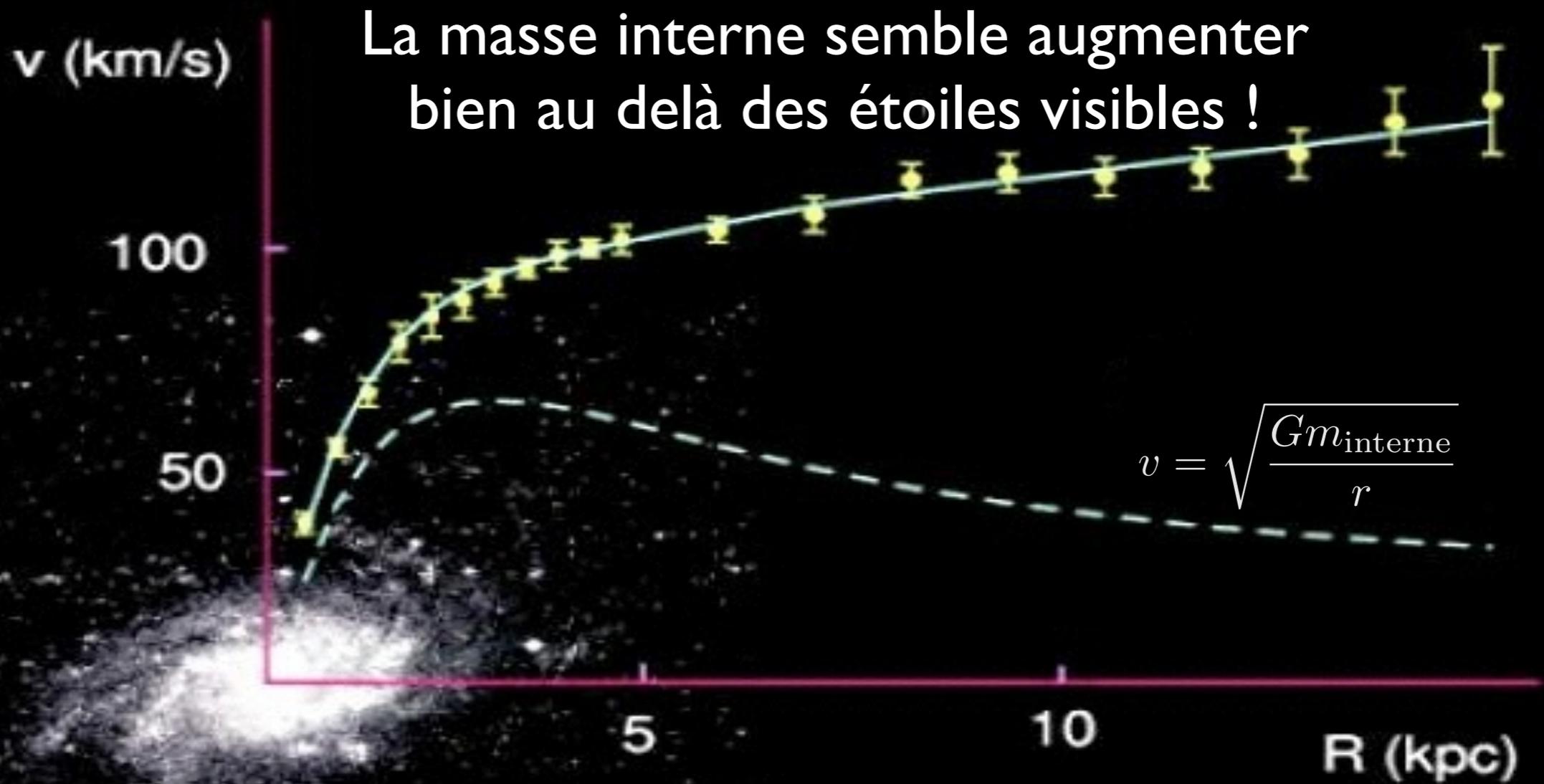
$$\Rightarrow \frac{GM}{r^2} = a$$

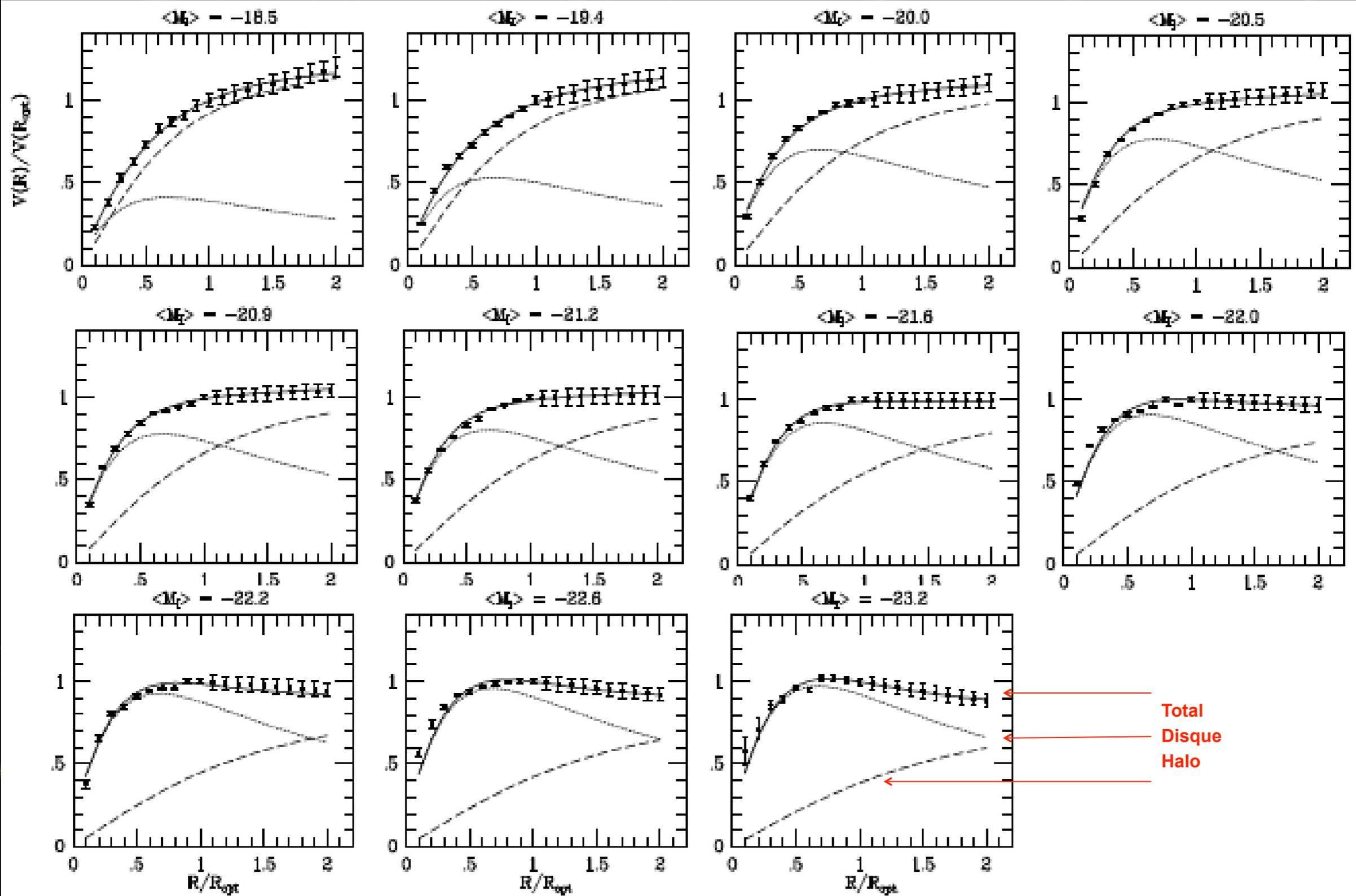
$$\Rightarrow \frac{v^2}{r} = \frac{GM}{r^2}$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$



M33





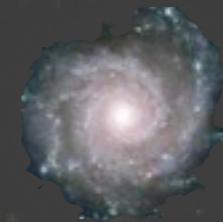
Halo de matière noire

- La masse d'une galaxie s'étend bien plus loin que sa masse stellaire visible
- Il existe un halo de matière noire autour
 - ★ Jusqu'à ~ 200 kpc
 - ★ rapport Masse/Luminosité ~ 200



Halo de matière noire

- La masse d'une galaxie s'étend bien plus loin que sa masse stellaire visible
- Il existe un halo de matière noire autour
 - ★ Jusqu'à ~ 200 kpc
 - ★ rapport Masse/Luminosité ~ 200



Formation des structures et matière noire

- Les anisotropies initiales sont très faibles

- ★ Fond diffus cosmologique : 3 K et fluctuations ~ 30 mK
- ★ Fluctuations primordiales $\sim 1/100\,000$

- Effondrement de la matière ordinaire

- ★ commence à l'égalité matière-rayonnement
- ★ Ensuite l'expansion freine la contraction

- Pour que cela fonctionne il faut:

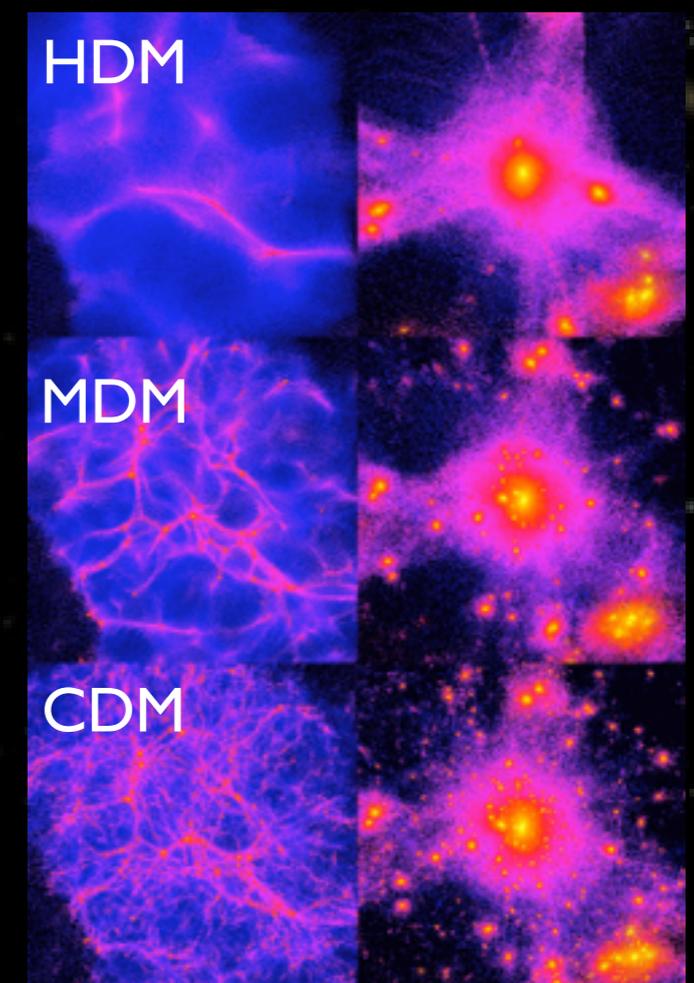
- ★ Plus de matière pour expliquer tant d'effondrement
- ★ Une matière qui ait commencé à s'effondrer avant l'égalité matière-rayonnement
- ★ Des particules assez peu rapides (donc lourdes) pour ne pas s'échapper trop vite (et gommer les structures effondrées)

➔ Il faut de la matière noire
«froide» (CDM)

$R = 6,0 \text{ Mpc}$ $z = 10,155$



$a = 0,050$ $t_{\text{matter}} 2003$



Formation des structures et matière noire

- Les anisotropies initiales sont très faibles
 - ★ Fond diffus cosmologique : 3 K et fluctuations ~ 30 mK
 - ★ Fluctuations primordiales $\sim 1/100\,000$
- Effondrement de la matière ordinaire
 - ★ commence à l'égalité matière-rayonnement
 - ★ Ensuite l'expansion freine la contraction
- Pour que cela fonctionne il faut:
 - ★ Plus de matière pour expliquer tant d'effondrement
 - ★ Une matière qui ait commencé à s'effondrer avant l'égalité matière-rayonnement
 - ★ Des particules assez peu rapides (donc lourdes) pour ne pas s'échapper trop vite (et gommer les structures effondrées)

➔ Il faut de la matière noire
«froide» (CDM)

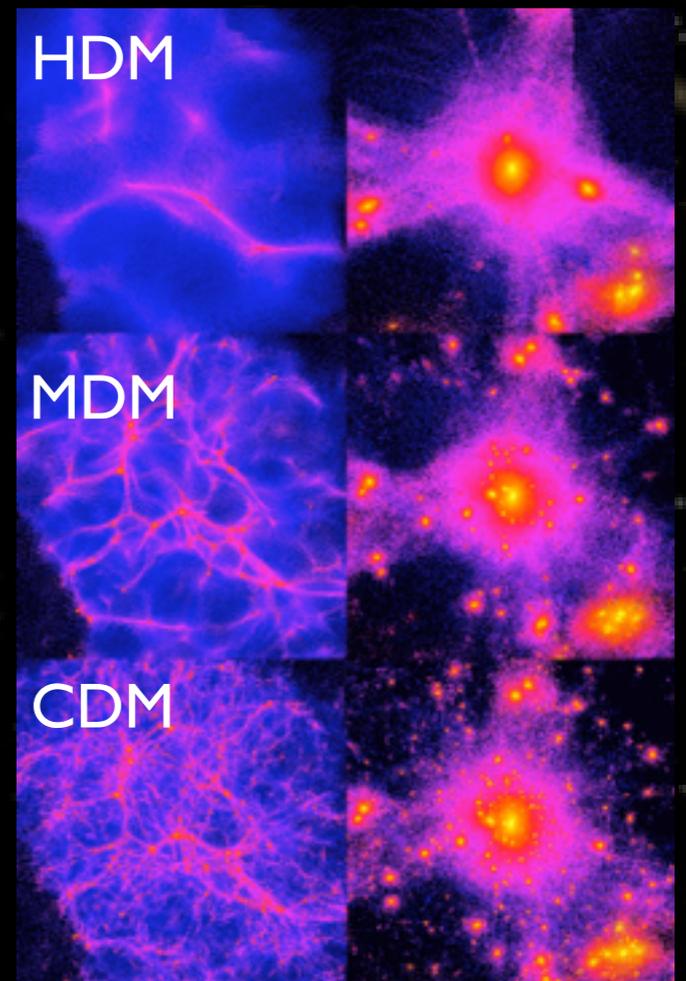
$R = 6,0 \text{ Mpc}$

$z = 10,155$



$a = 0,050$

diemand 2003



Oscillations acoustiques de baryons

- **BAO:**

- ★ **Oscillations acoustiques:**

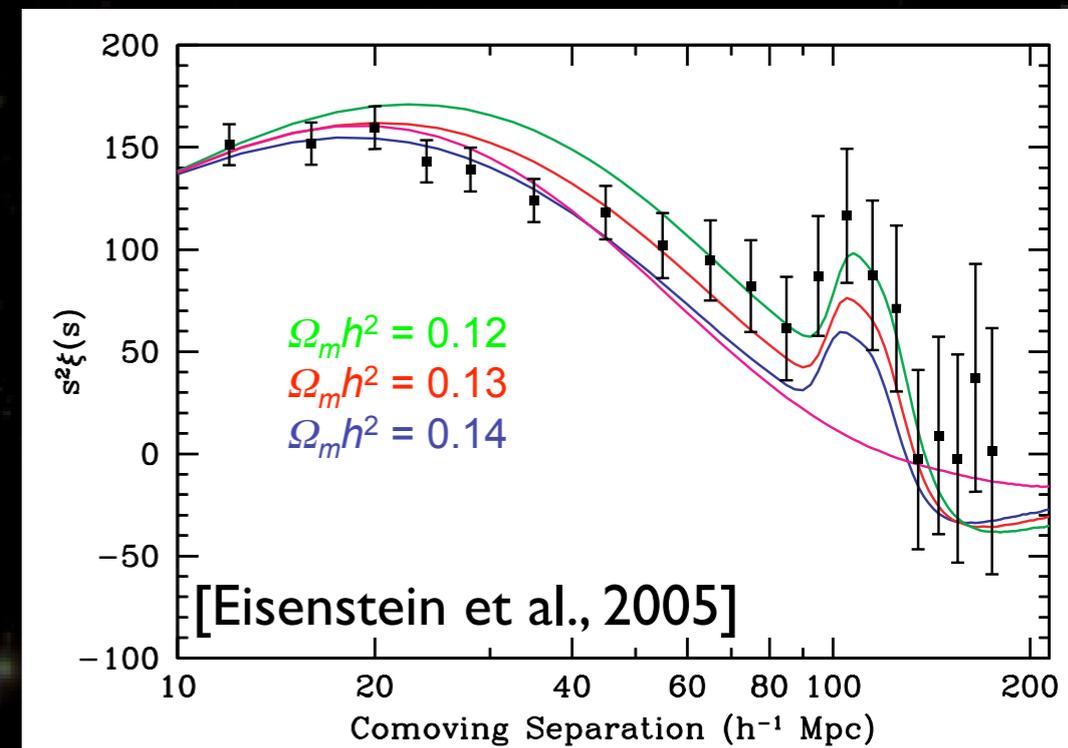
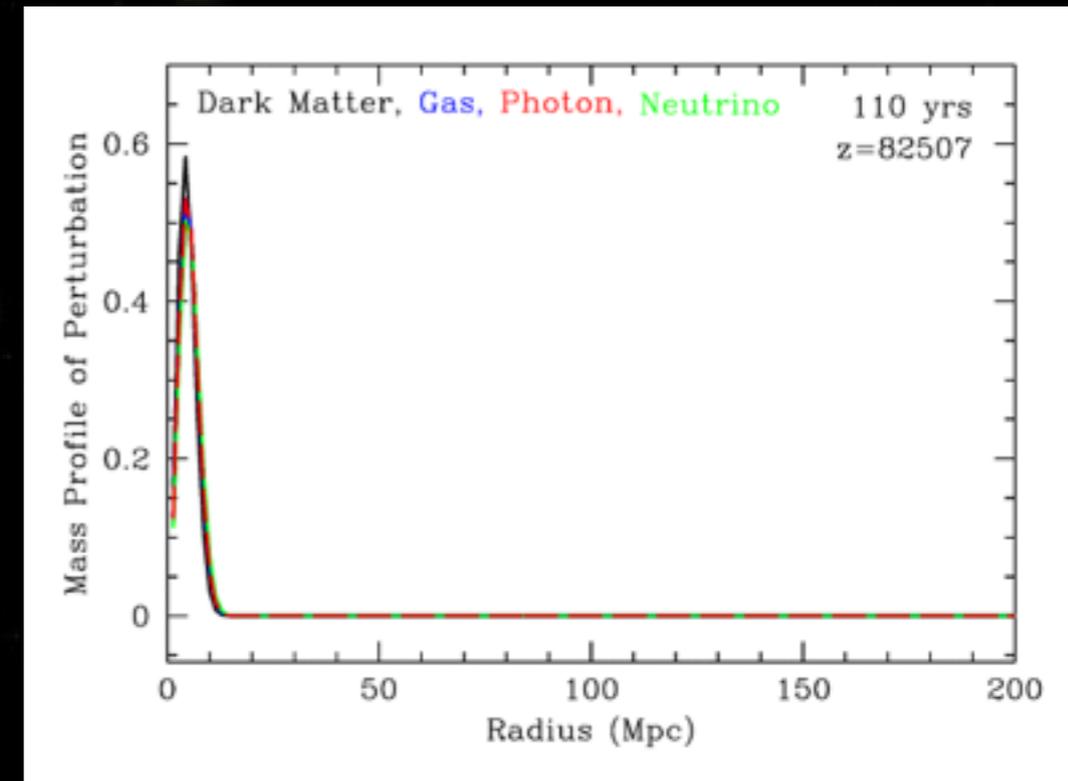
- entre l'égalité matière-rayonnement et le découplage
- Propagation d'une onde sonore
- s'arrête au découplage
- ➔ Observé dans le CMB

- ★ **Aujourd'hui:**

- Chaque excès de matière est entouré d'un excès sphérique à 150 Mpc ($110 h^{-1}$ Mpc)
- ➔ Les galaxies se forment là de préférence
- Pic dans la fonction de corrélation à deux points de la matière
- étalon standard pour les mesures de distances

- ★ **Signification:**

- Prediction confirmée ! juste là où il fallait !
- Une des preuves les plus convaincantes pour $\Omega_m=0.3$ et pour la présence de matière noire



Oscillations acoustiques de baryons

- **BAO:**

- ★ **Oscillations acoustiques:**

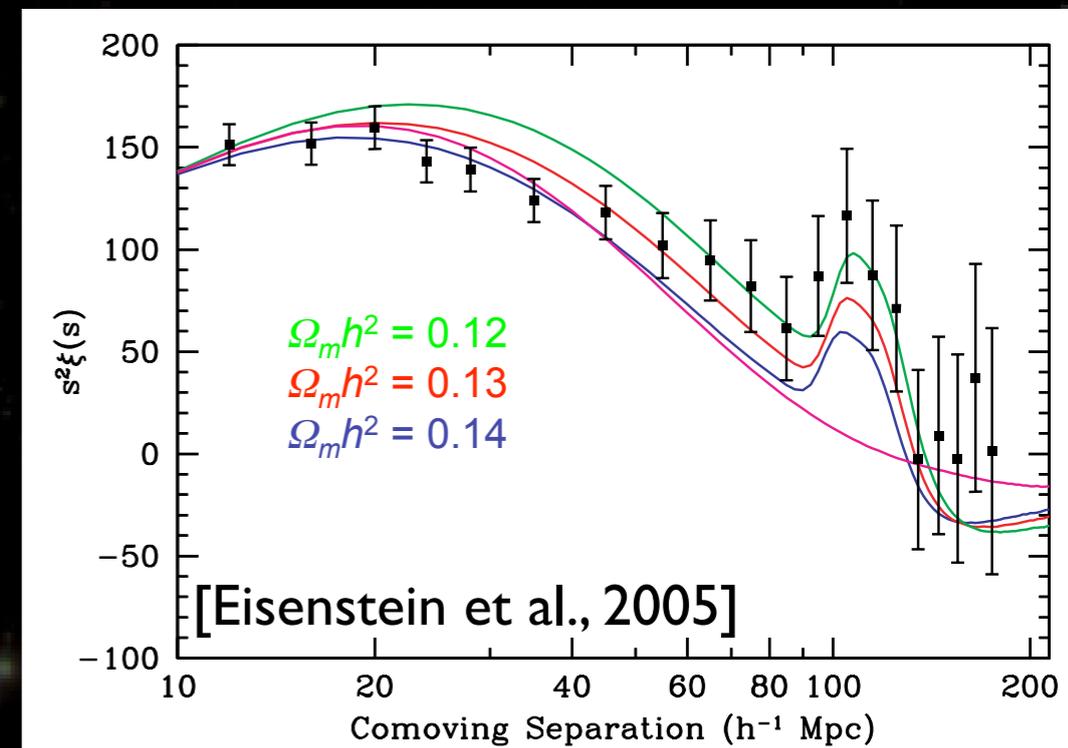
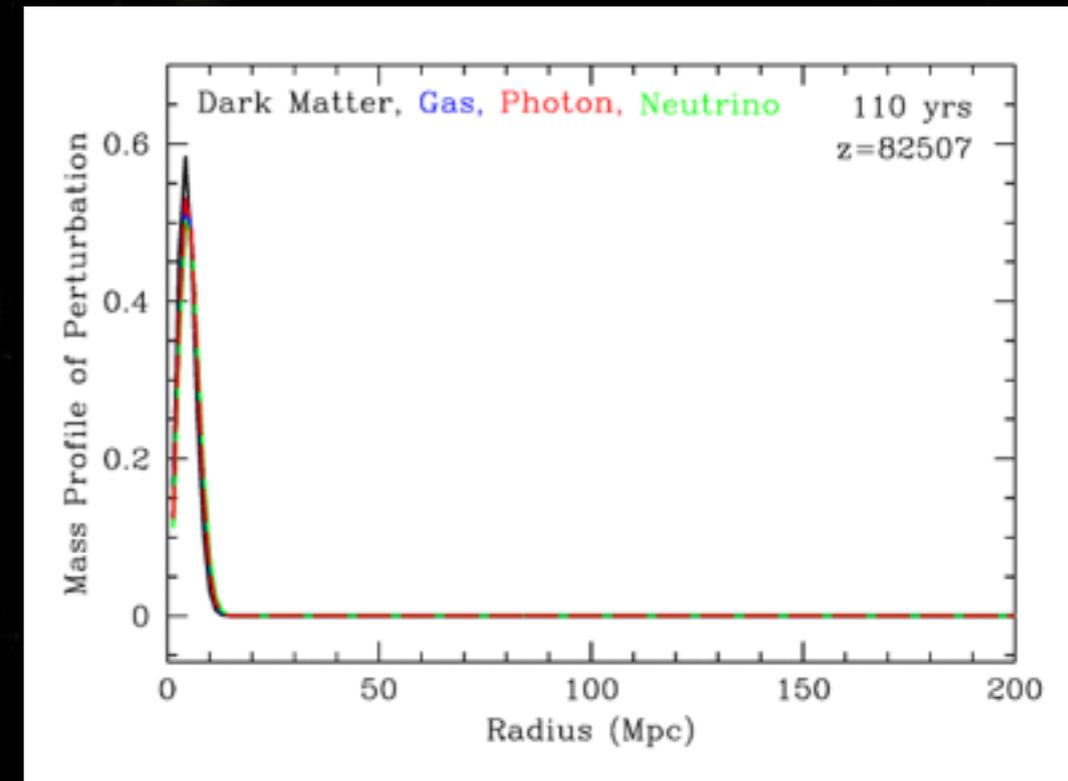
- entre l'égalité matière-rayonnement et le découplage
- Propagation d'une onde sonore
- s'arrête au découplage
- ➔ Observé dans le CMB

- ★ **Aujourd'hui:**

- Chaque excès de matière est entouré d'un excès sphérique à 150 Mpc ($110 h^{-1}$ Mpc)
- ➔ Les galaxies se forment là de préférence
- Pic dans la fonction de corrélation à deux points de la matière
- étalon standard pour les mesures de distances

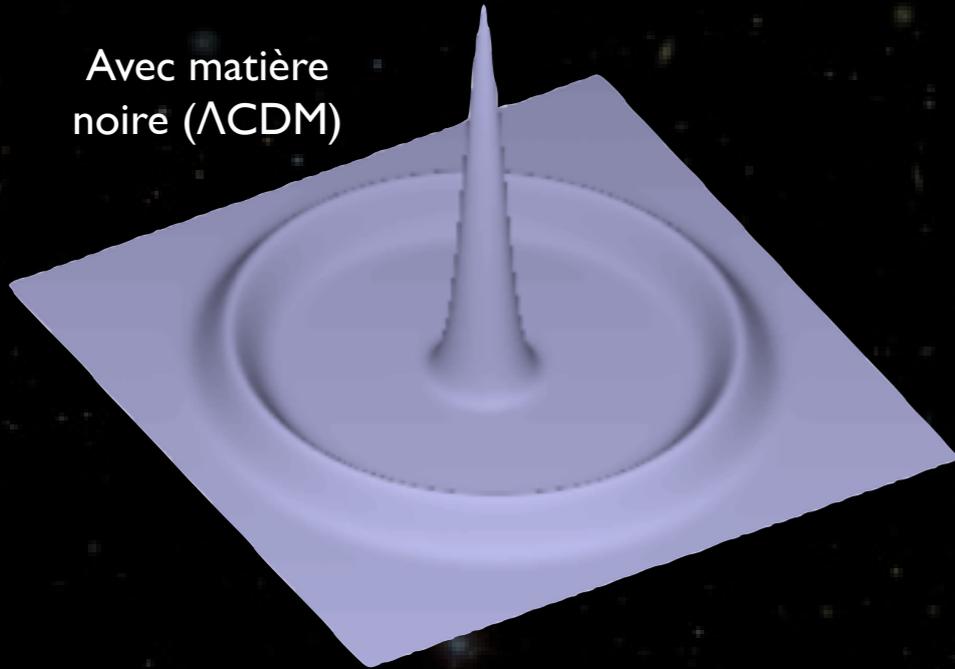
- ★ **Signification:**

- Prediction confirmée ! juste là où il fallait !
- Une des preuves les plus convaincantes pour $\Omega_m=0.3$ et pour la présence de matière noire

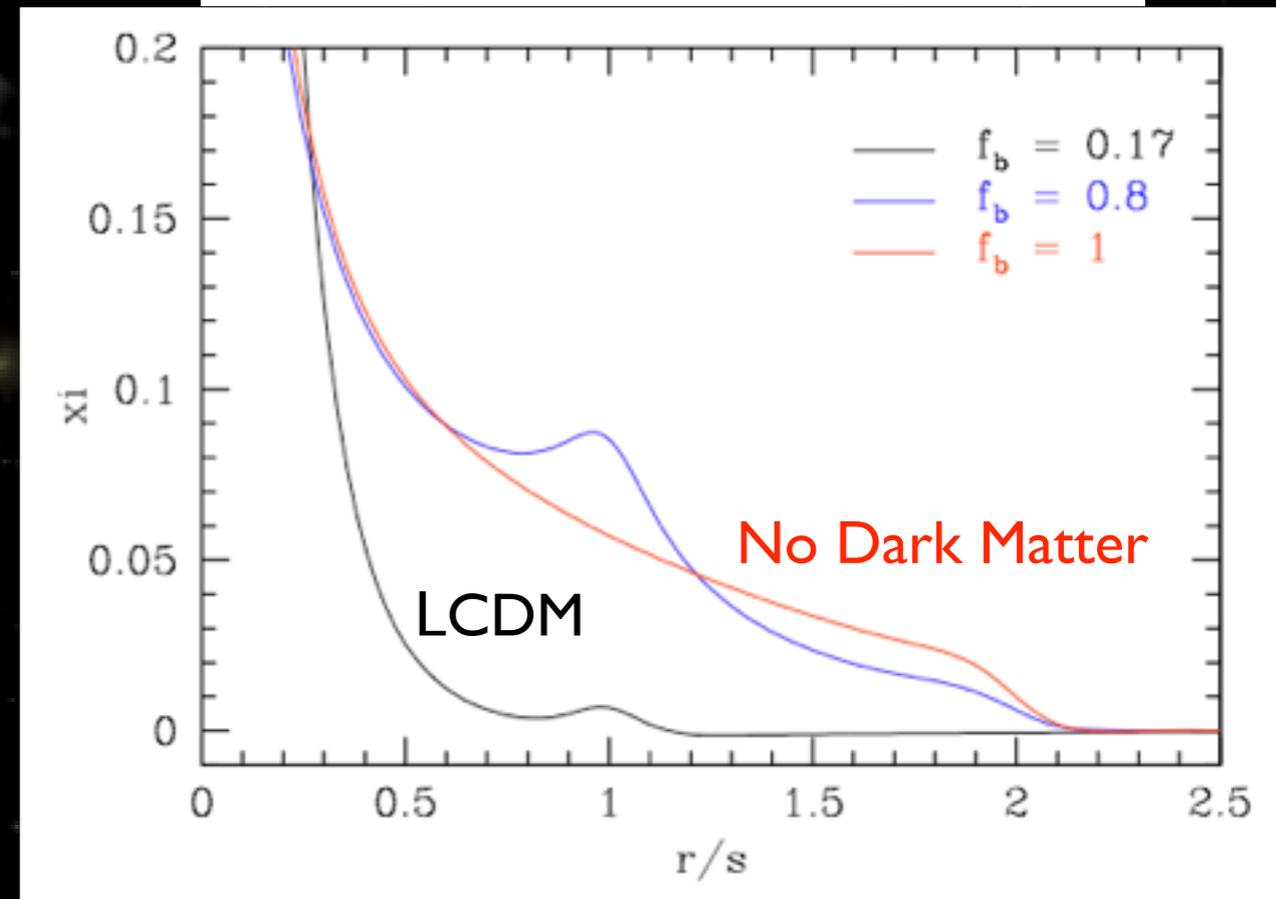
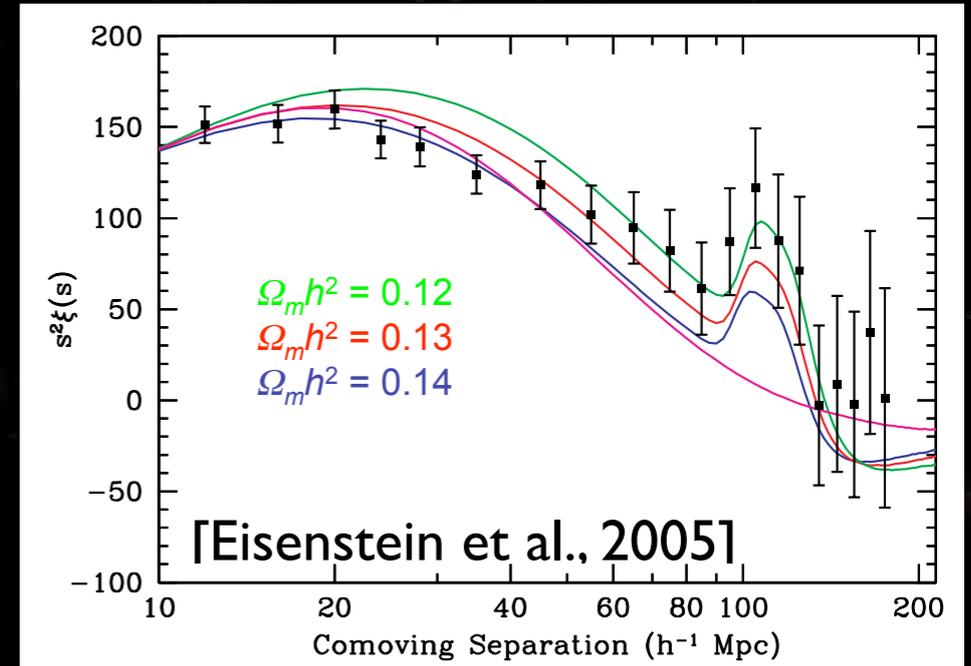
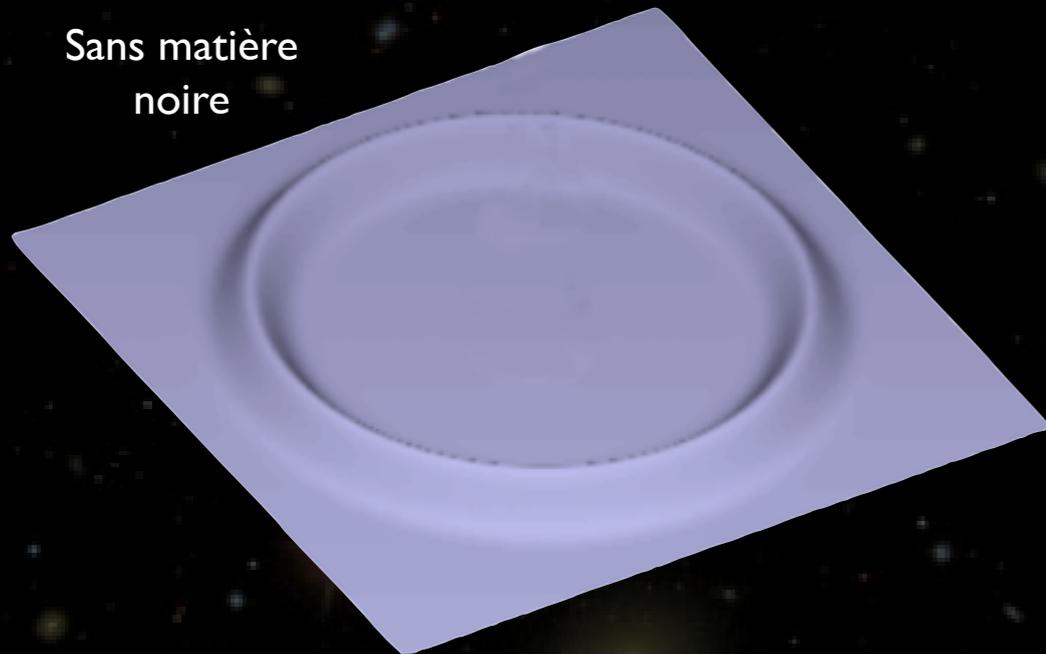


BAO et matière noire

Avec matière
noire (Λ CDM)



Sans matière
noire



C'est à mon sens la plus forte indication de l'existence de matière noire

