

Matière Noire et dynamique des galaxies

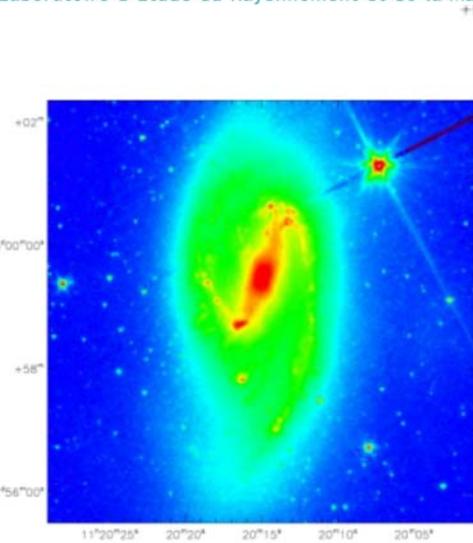
Françoise Combes
Lundi 15 Juin 2009



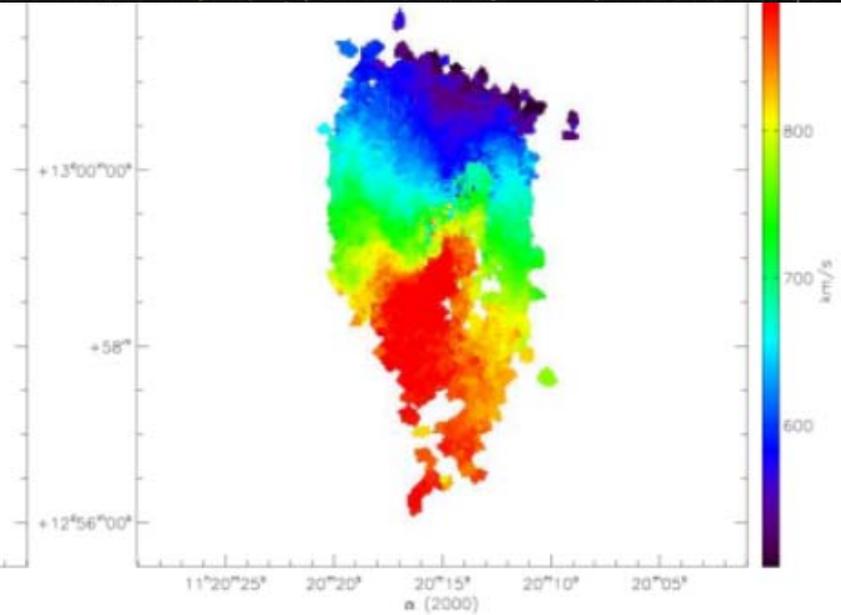
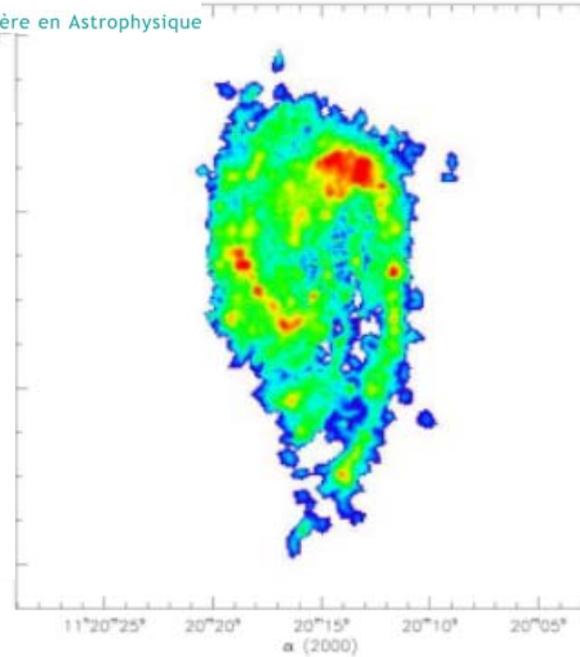
Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique



Amas de Galaxies
ABELL 1689



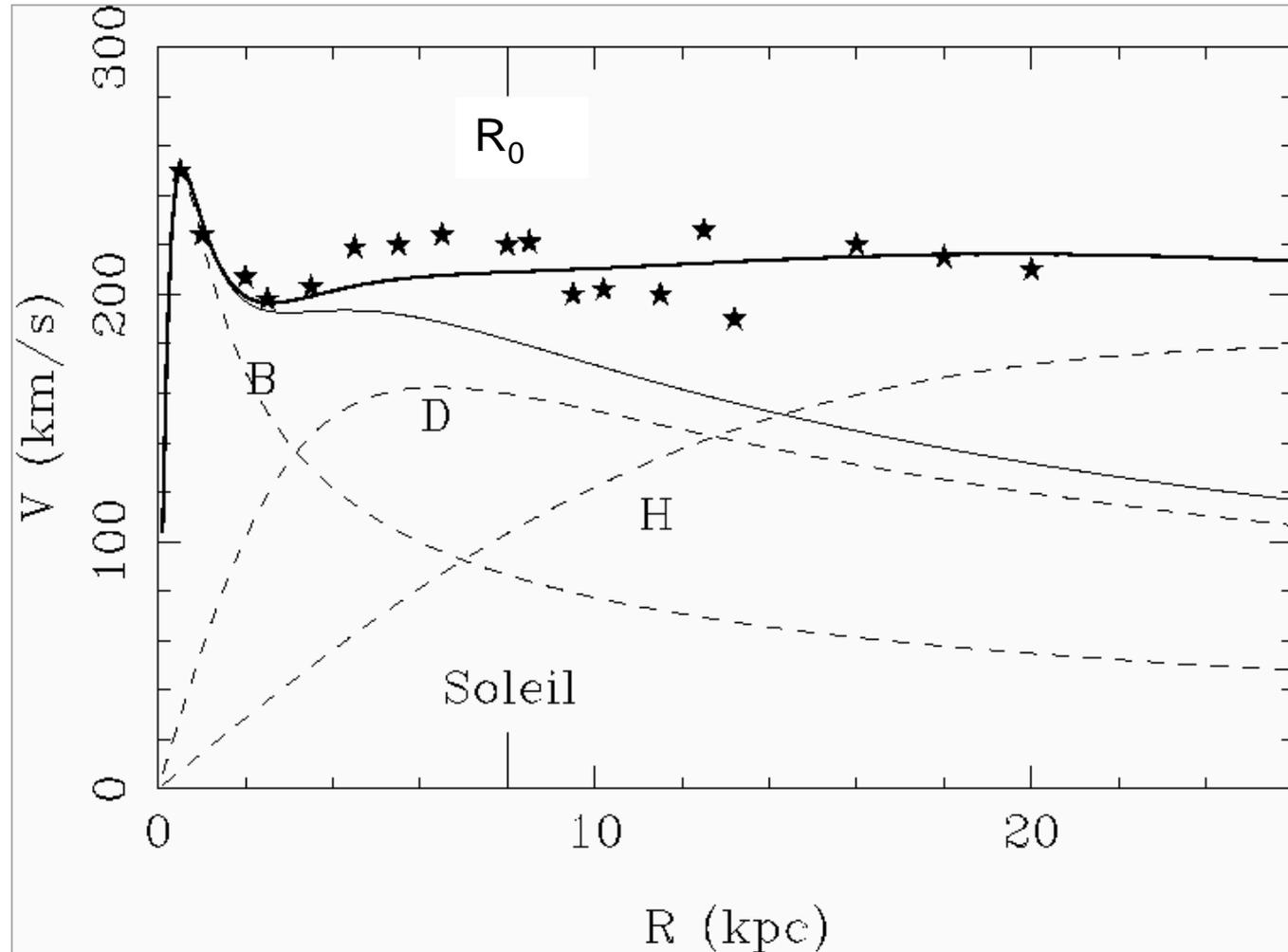
NGC 3627



Evidences de la matière noire

→ Courbes de rotation, par ex notre Galaxie, la Voie Lactée

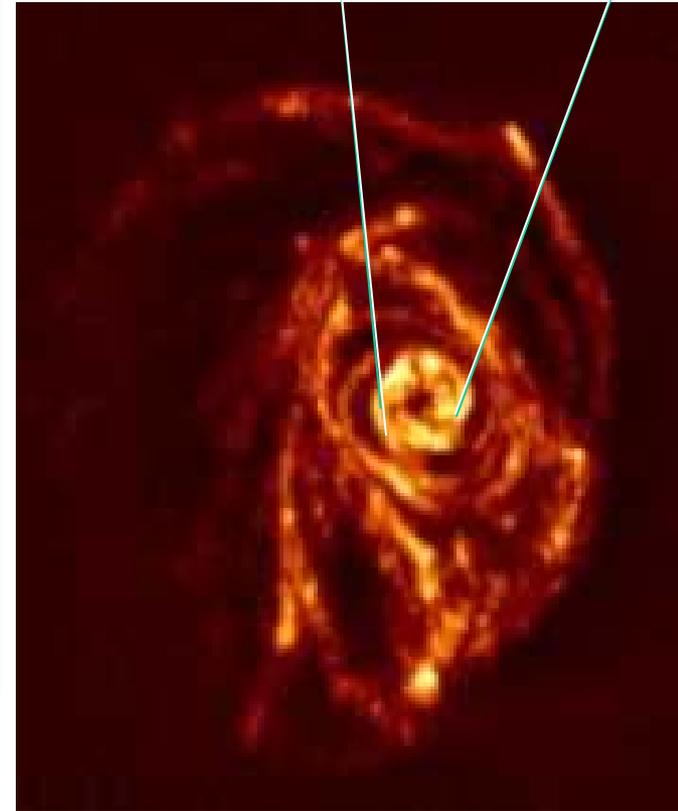
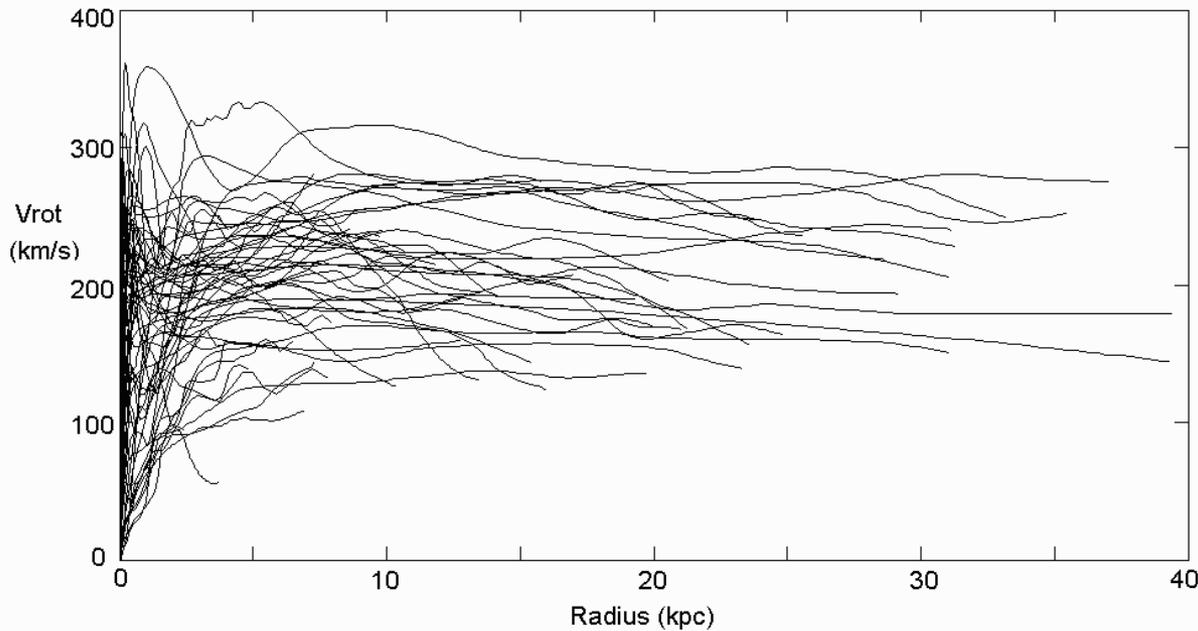
Bien au-delà de la masse visible, la vitesse reste grande, au lieu de $V^2 \sim GM/r$ (Képler)



Galaxies avec HI

M83: optique

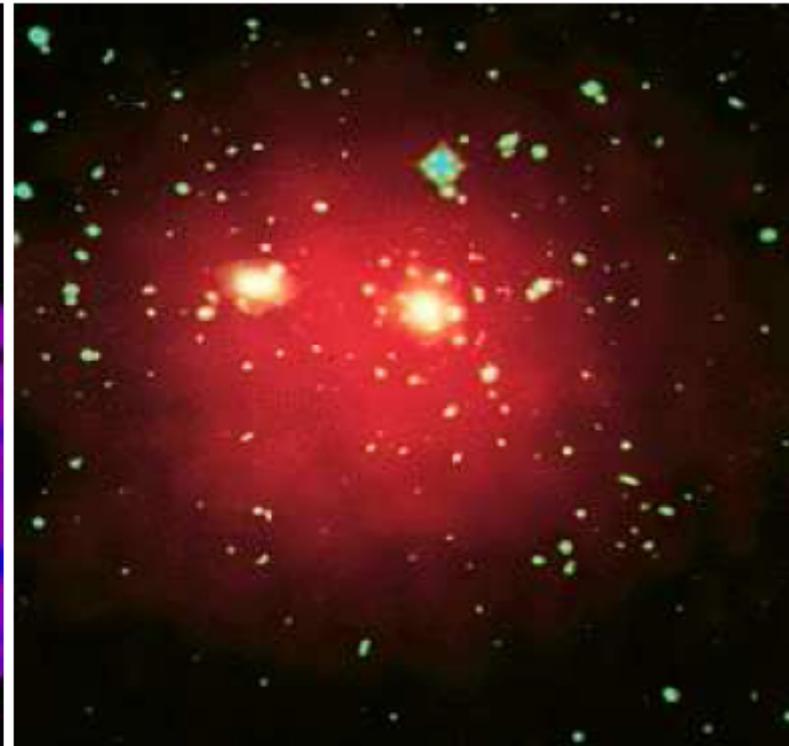
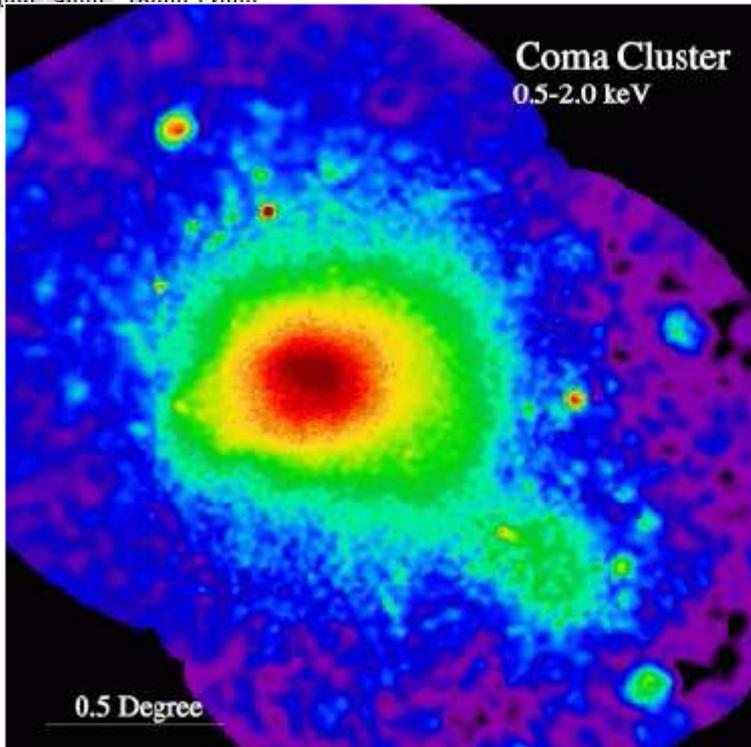
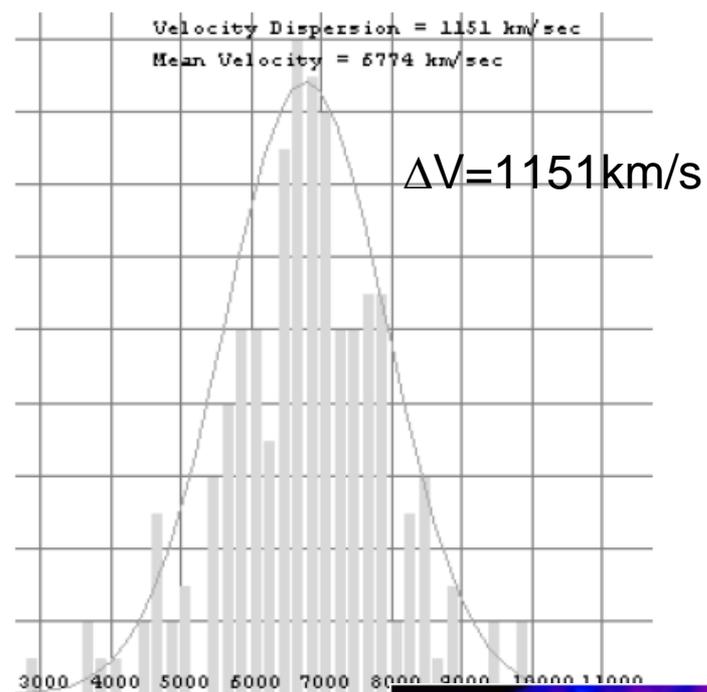
HI: cartographie de l'hydrogène atomique
Longueur d'onde 21cm



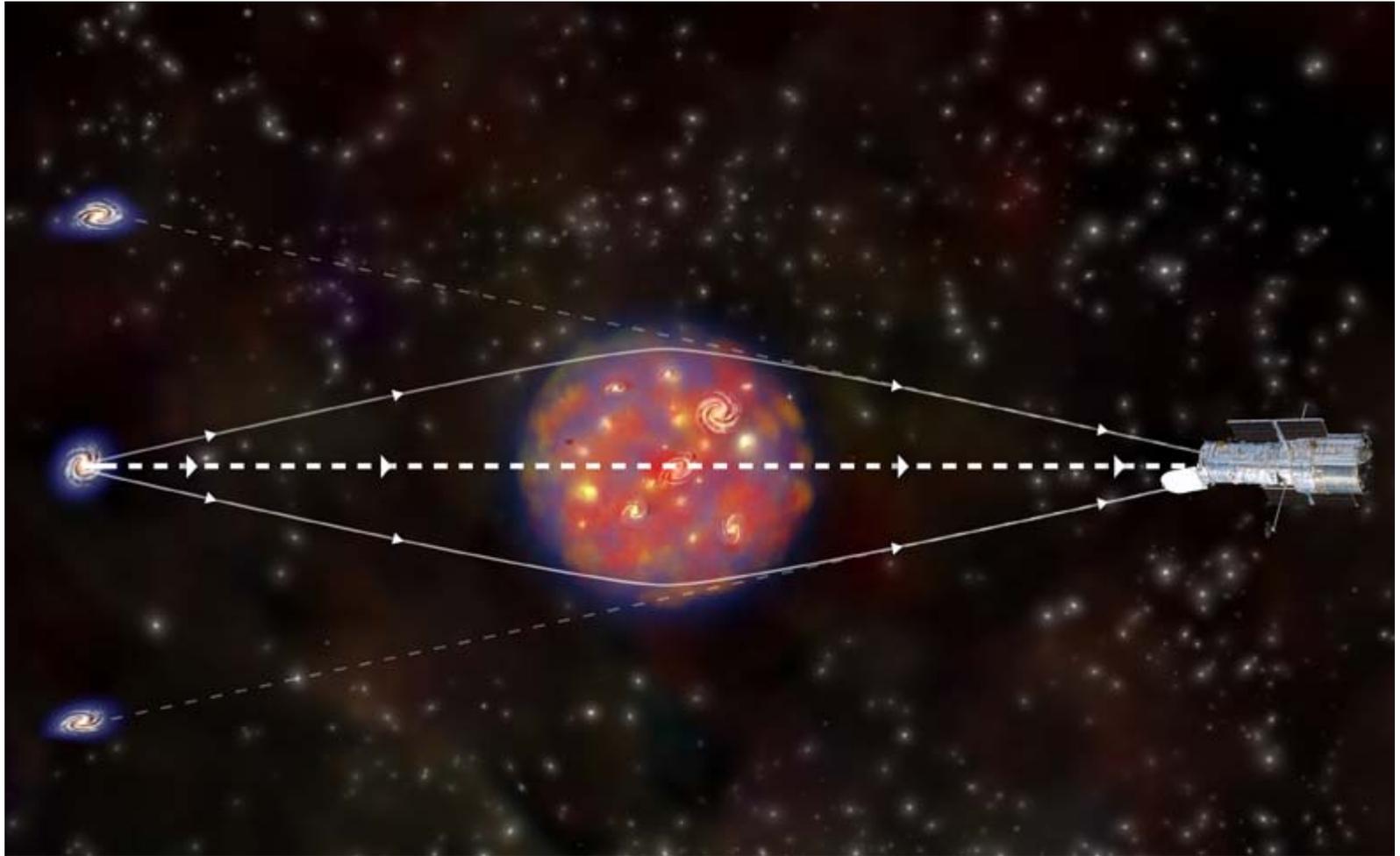
HI dans M83: une galaxie semblable à la Voie Lactée

Matière noire dans les amas

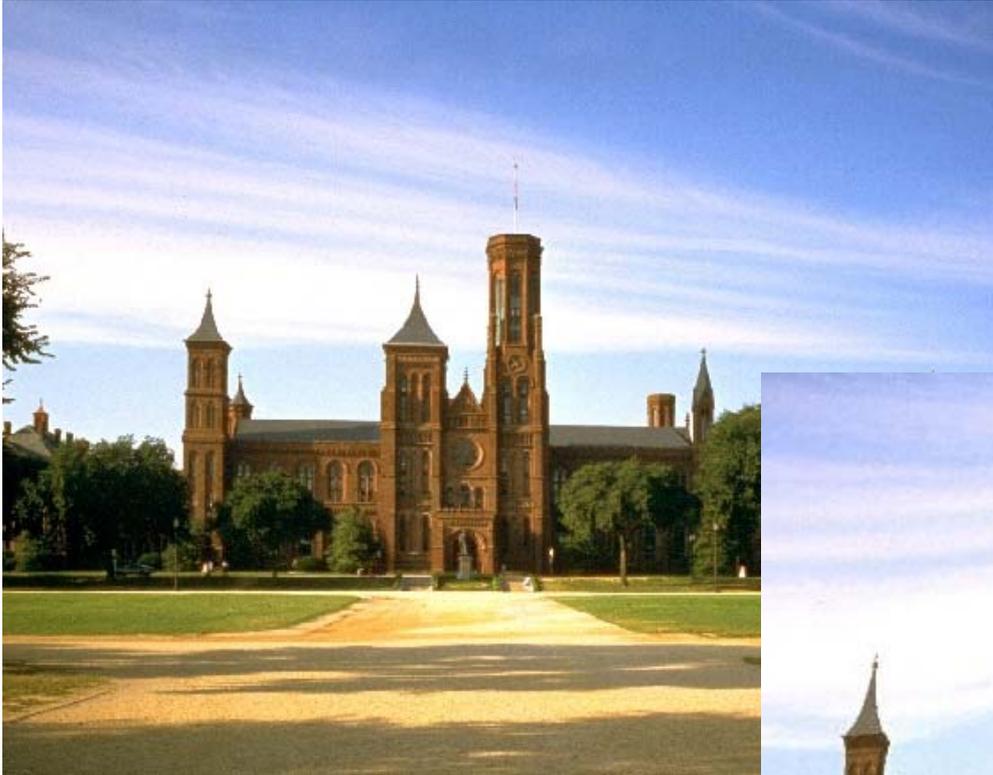
- Amas de galaxies,
Masse viriel / masse visible ~100 (Zwicky 1937)
Amas de Coma: vitesses des galaxies entre elles



Lentilles gravitationnelles

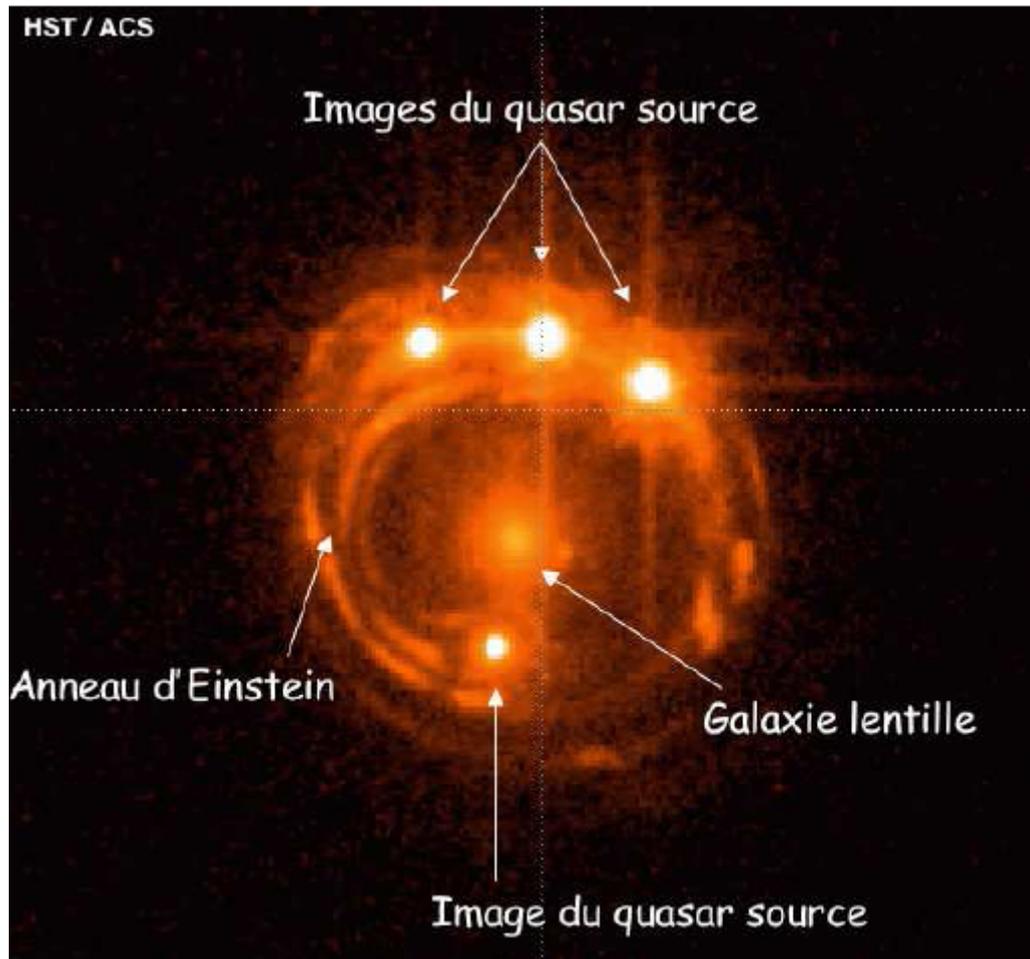


Spectaculaires déformations



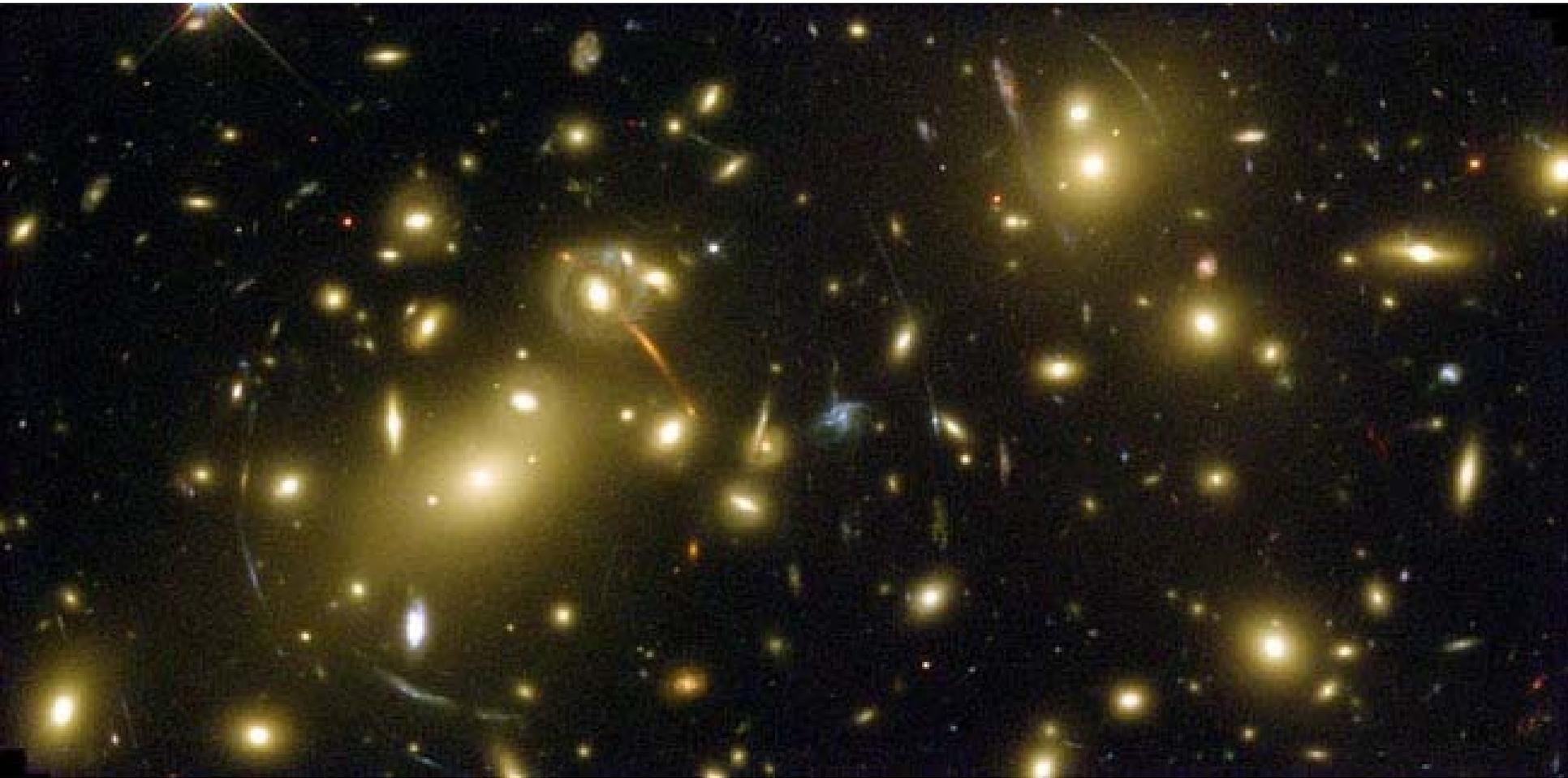
CASTLES= CfA-Arizona Space
Telescope LEns Survey

Images d'un quasar

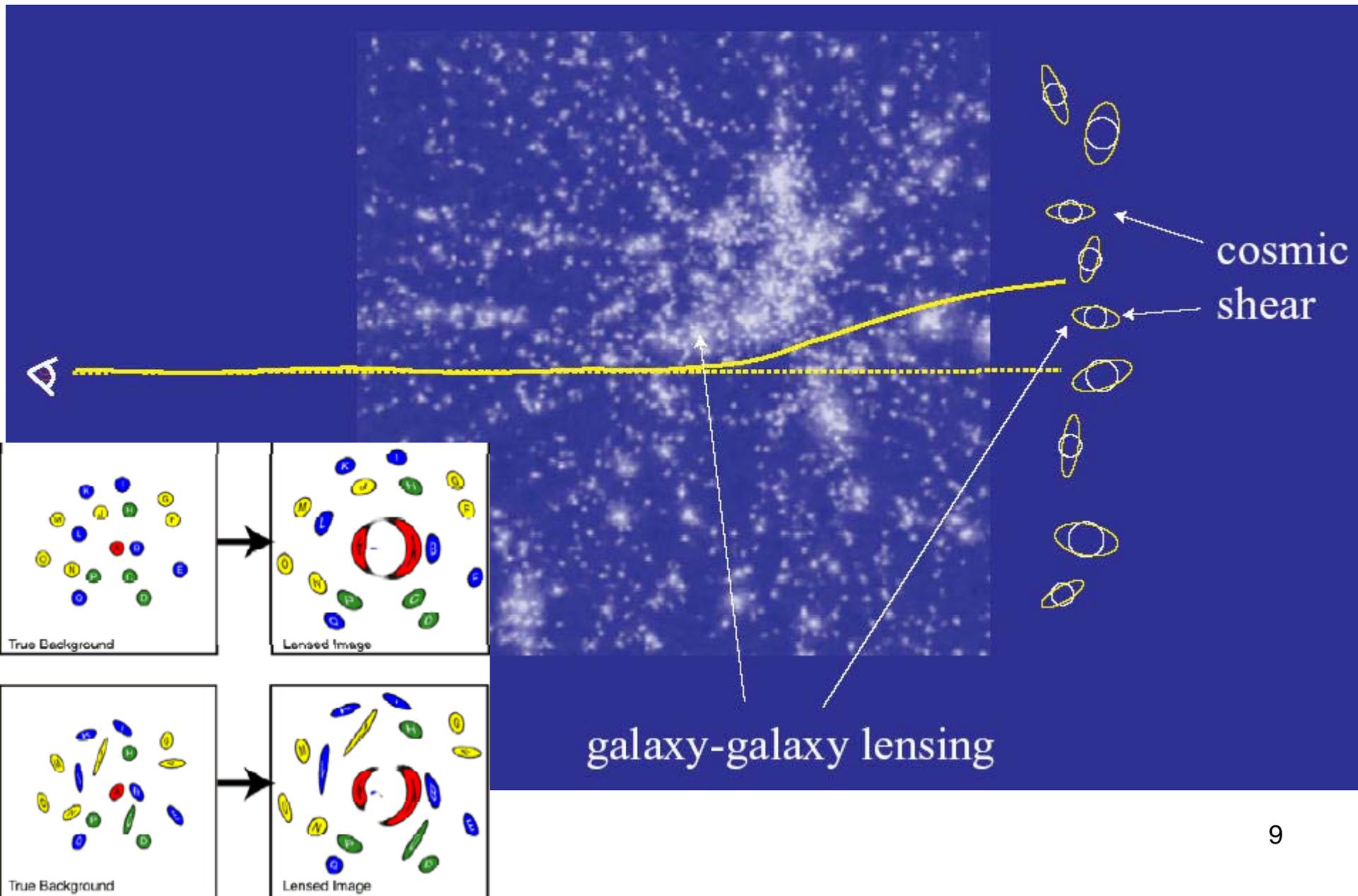


RXJ1131-1231

Lentilles gravitationnelles: régime fort



Lentilles gravitationnelles: régime faible

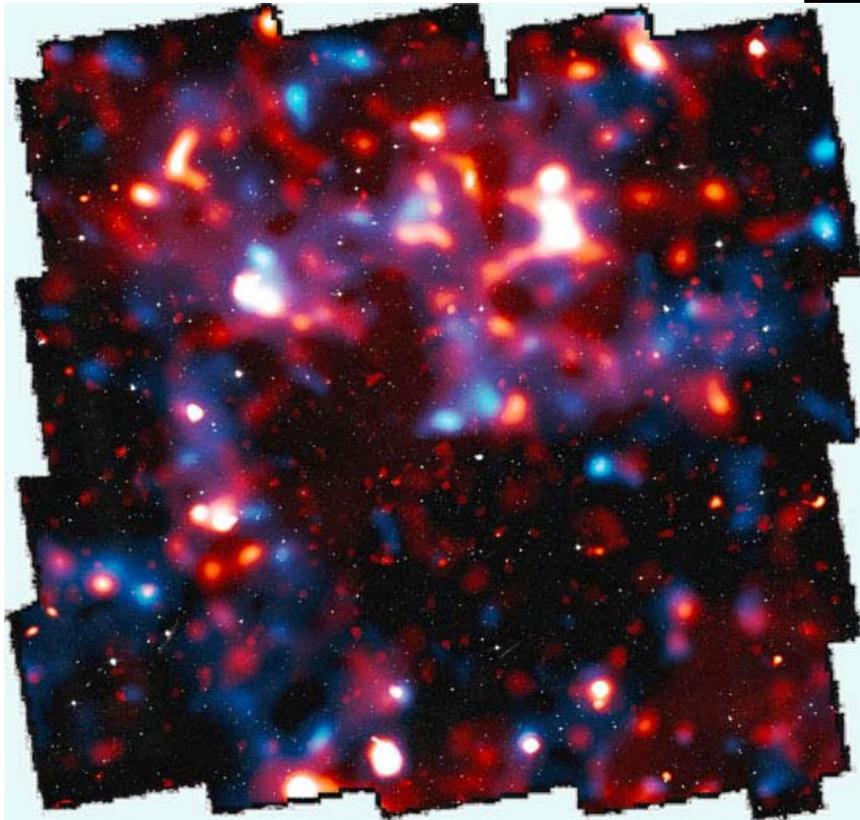
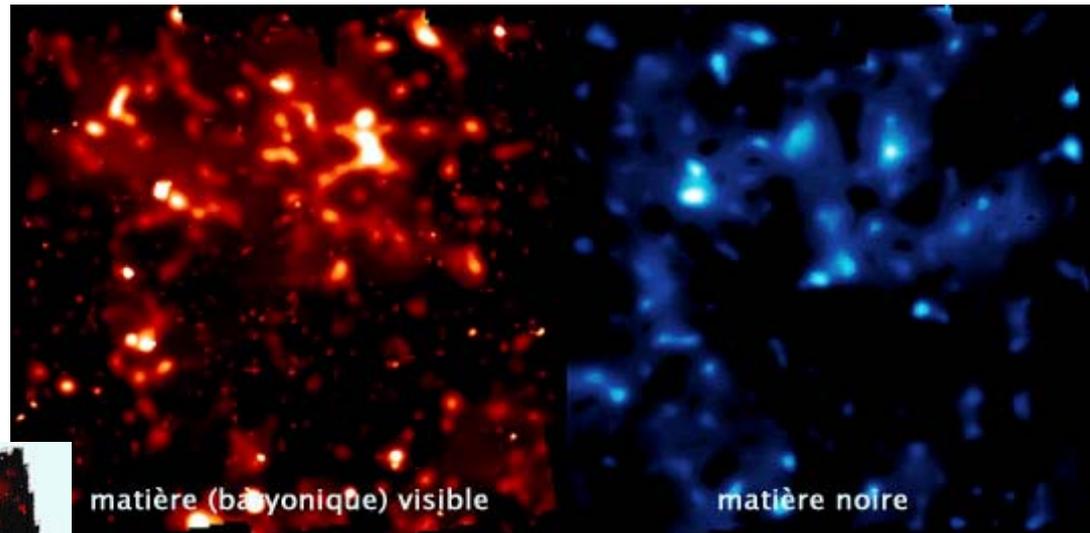


Cisaillement gravitationnel

Rouge: gaz X

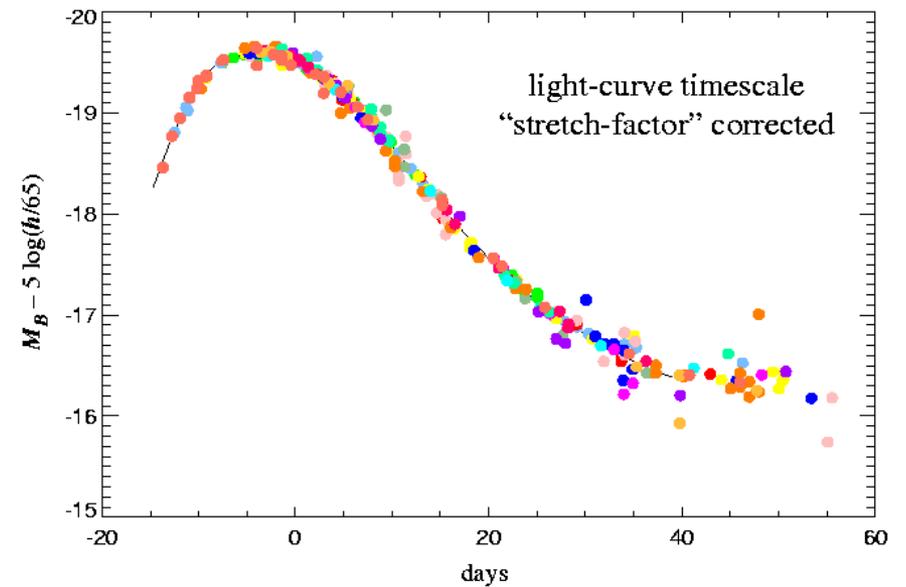
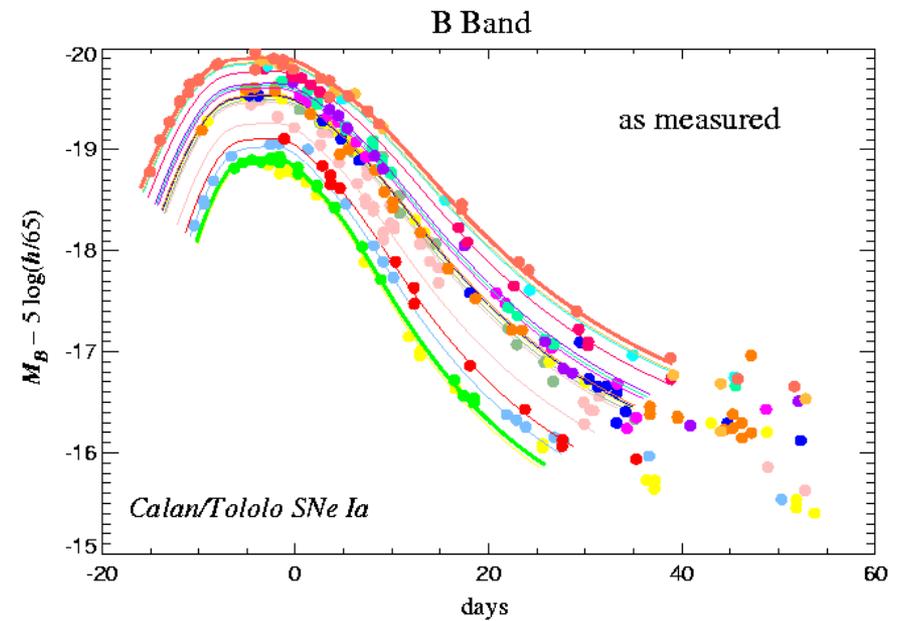
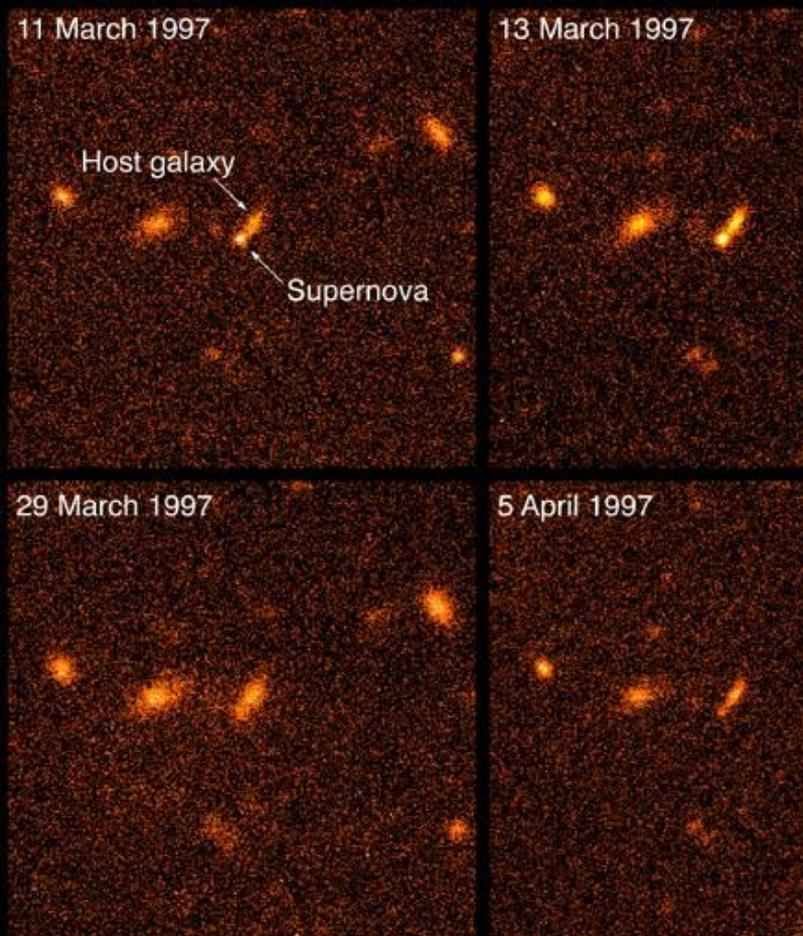
Bleu: matière totale

Champ Cosmos



**Contraintes sur la
Matière noire, et aussi
Énergie noire**

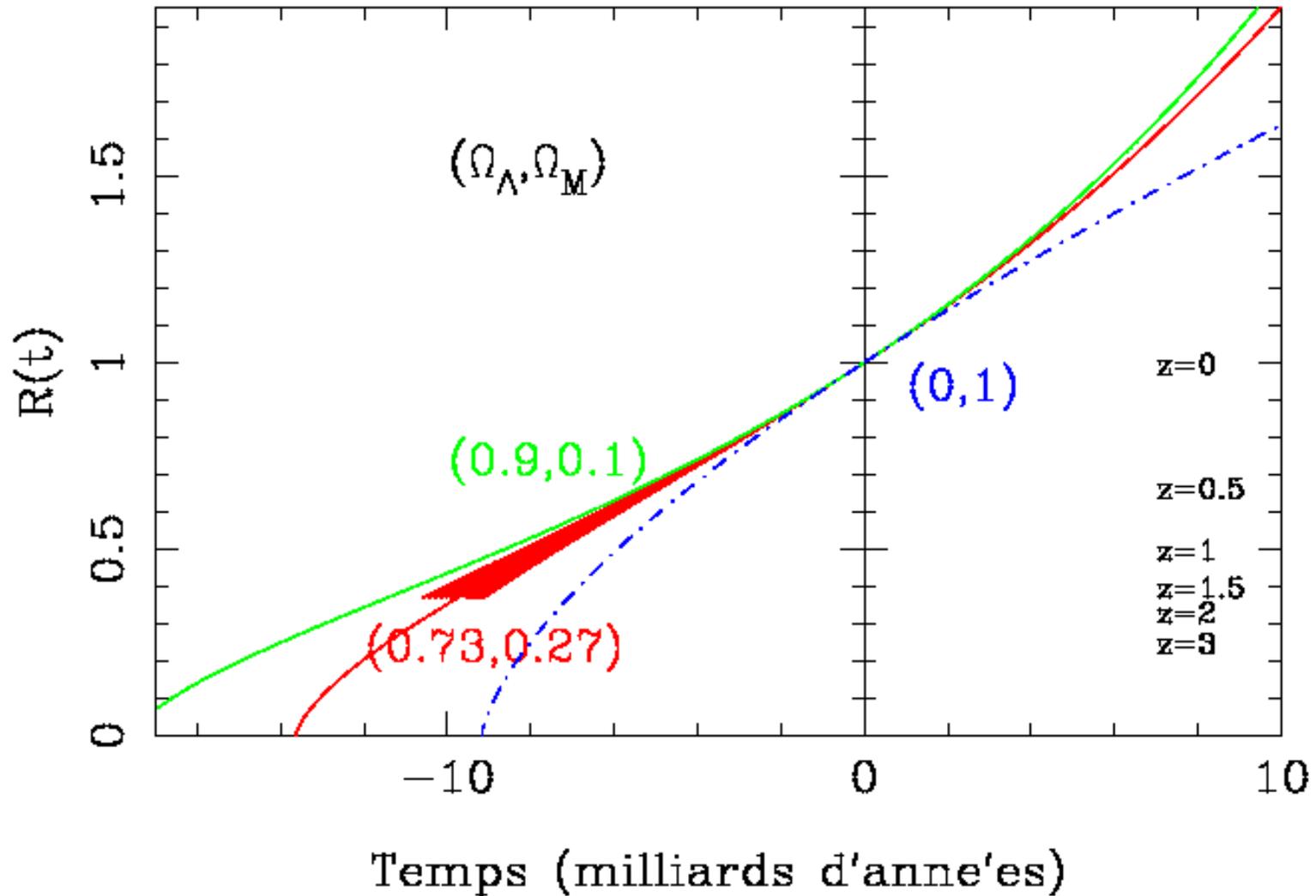
Massey et al 2007



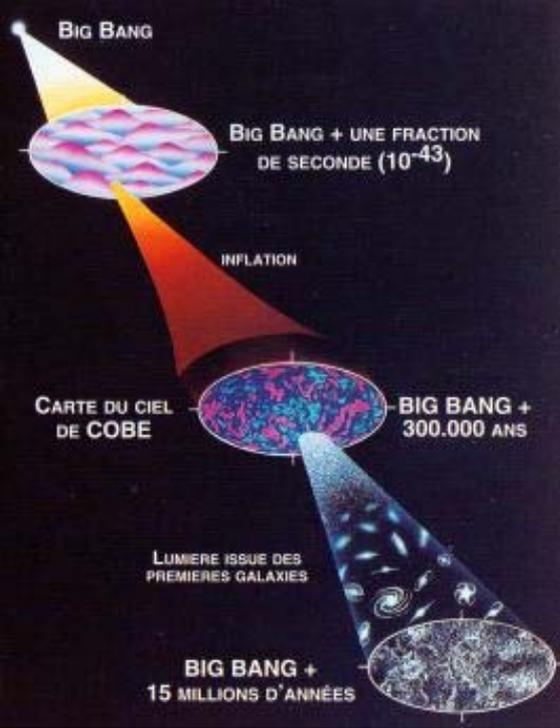
Kim, *et al.* (1997)

SNe Ia
chandelles
standard

Supernovae à grand redshift



Détection d'anisotropies dans le fond cosmique

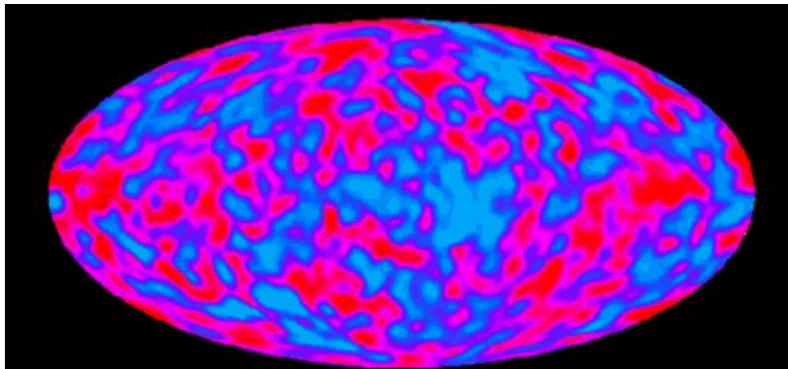


Dans les années 1990': COBE 7°

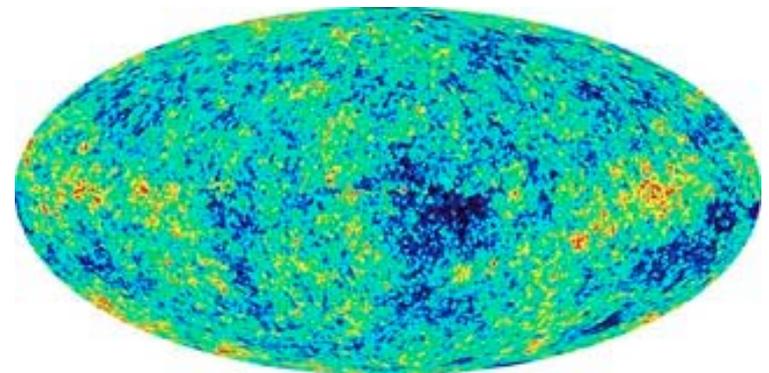
Années 2000': WMAP: 0.3° plus petite échelle

$\Delta T/T \sim 10^{-5}$! → matière noire non-baryonique

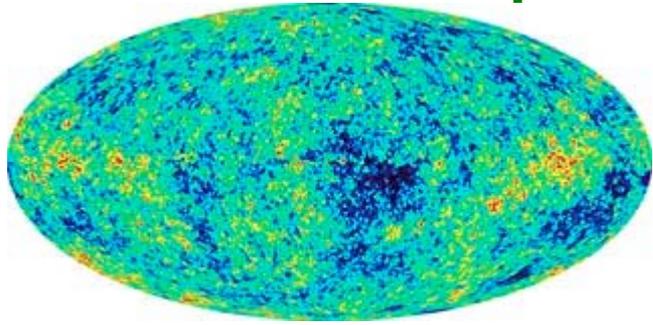
COBE



WMAP



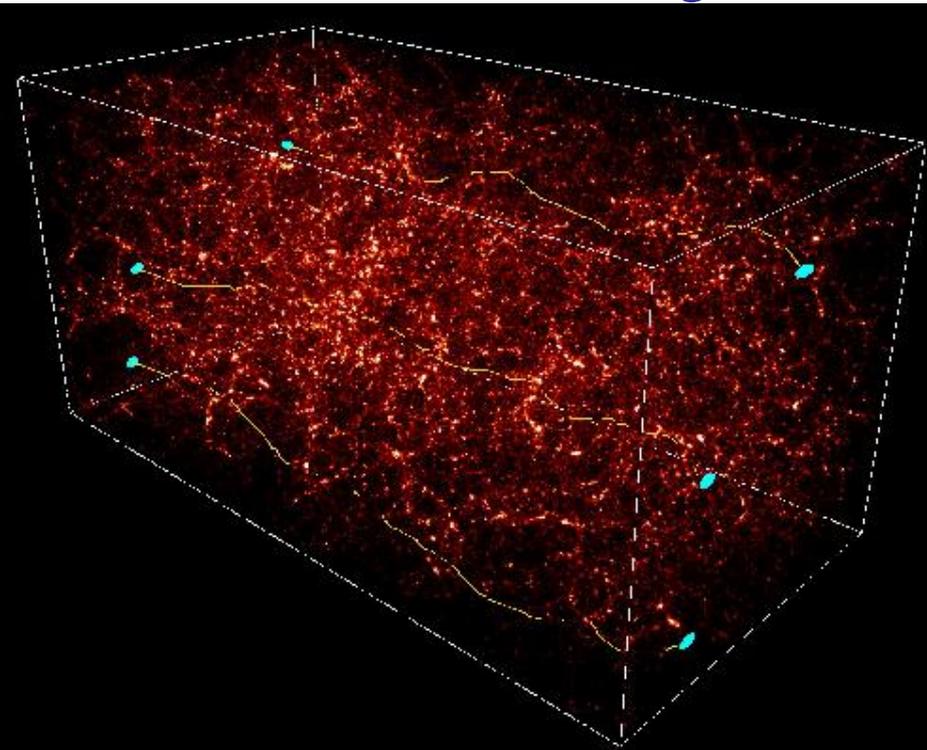
Les paramètres de l'Univers



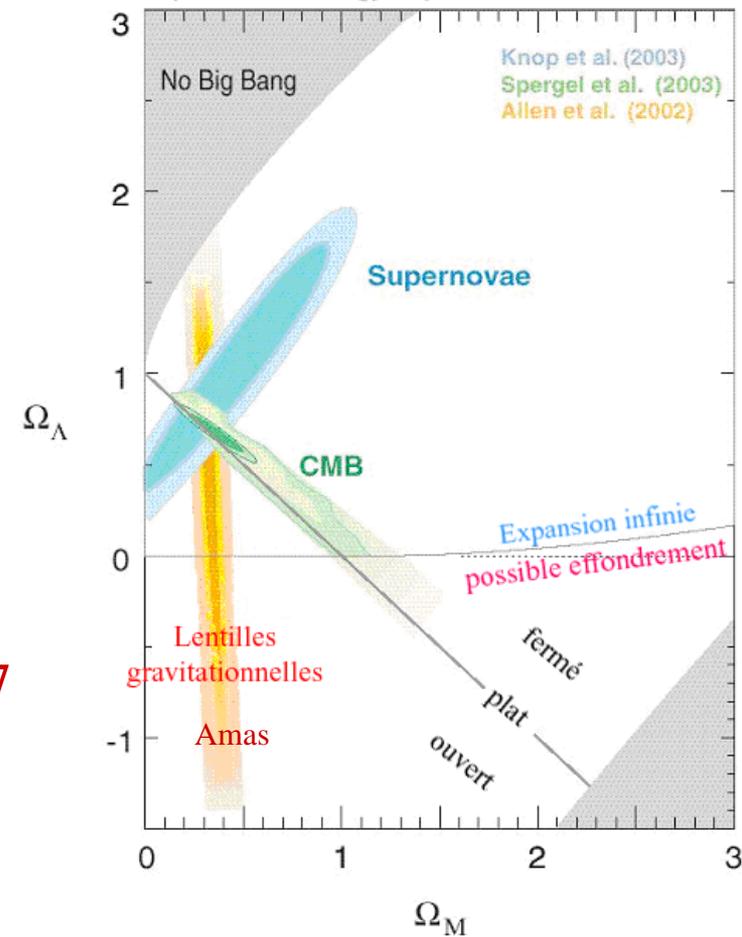
Anisotropies du fonds cosmique (WMAP)
→ Univers plat

Observations des SN Ia

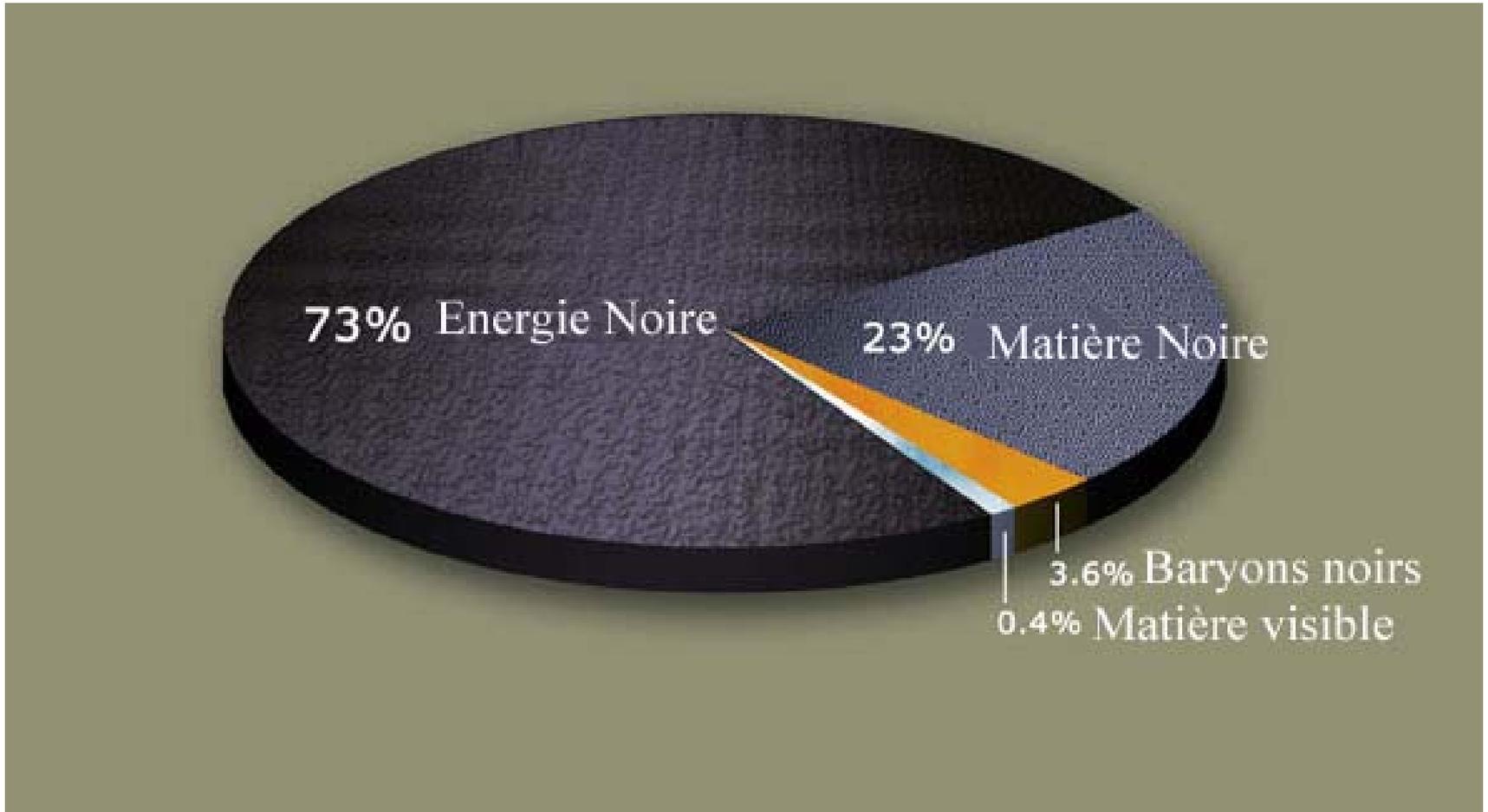
Amas, Lentilles gravitationnelles



$$\begin{aligned}\Omega_{\Lambda} &= 0.73 \\ \Omega_M &= 0.27 \\ \Omega_b &= 0.05\end{aligned}$$



Contenu de l'Univers



Hypothèses pour la Matière Noire

Particules qui au découplage ne sont plus relativistes

➔ Matière Froide CDM = "Cold Dark Matter"

Particules **WIMPS** ("weakly interactive massive particles")

Neutralinos: particule supersymétrique la plus légère LSP

Relique du Big-Bang, devrait se désintégrer en gamma

(40 Gev- 5Tev)

.....

Peut-être particules plus légères, ou avec plus d'interaction non-gravitationnelles?

Axions (solution au problème symétrie-CP, 10^{-4} eV)

Trous noirs primordiaux?

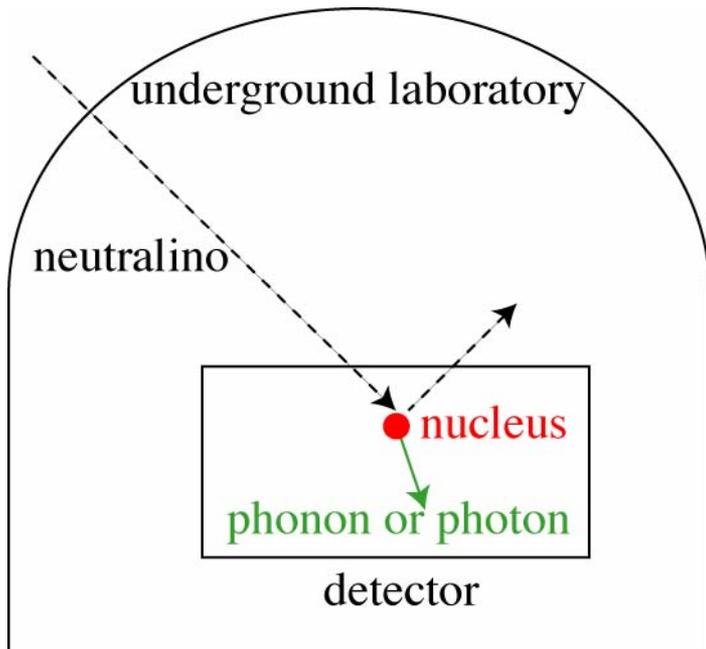
Recherches directes et indirectes

Pourraient être formées dans les prochains accélérateurs (LHC, 14TeV)

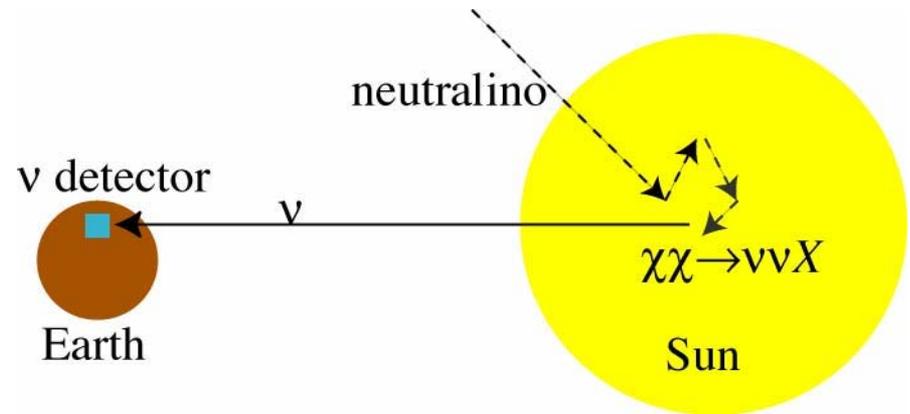
Recherche **directe**: CDMS-II, Edelweiss, DAMA, GENIUS, etc

Indirecte: rayons gamma de l'annihilation (Egret, GLAST, Magic)

Neutrinos (SuperK, AMANDA, ICECUBE, Antares, etc)



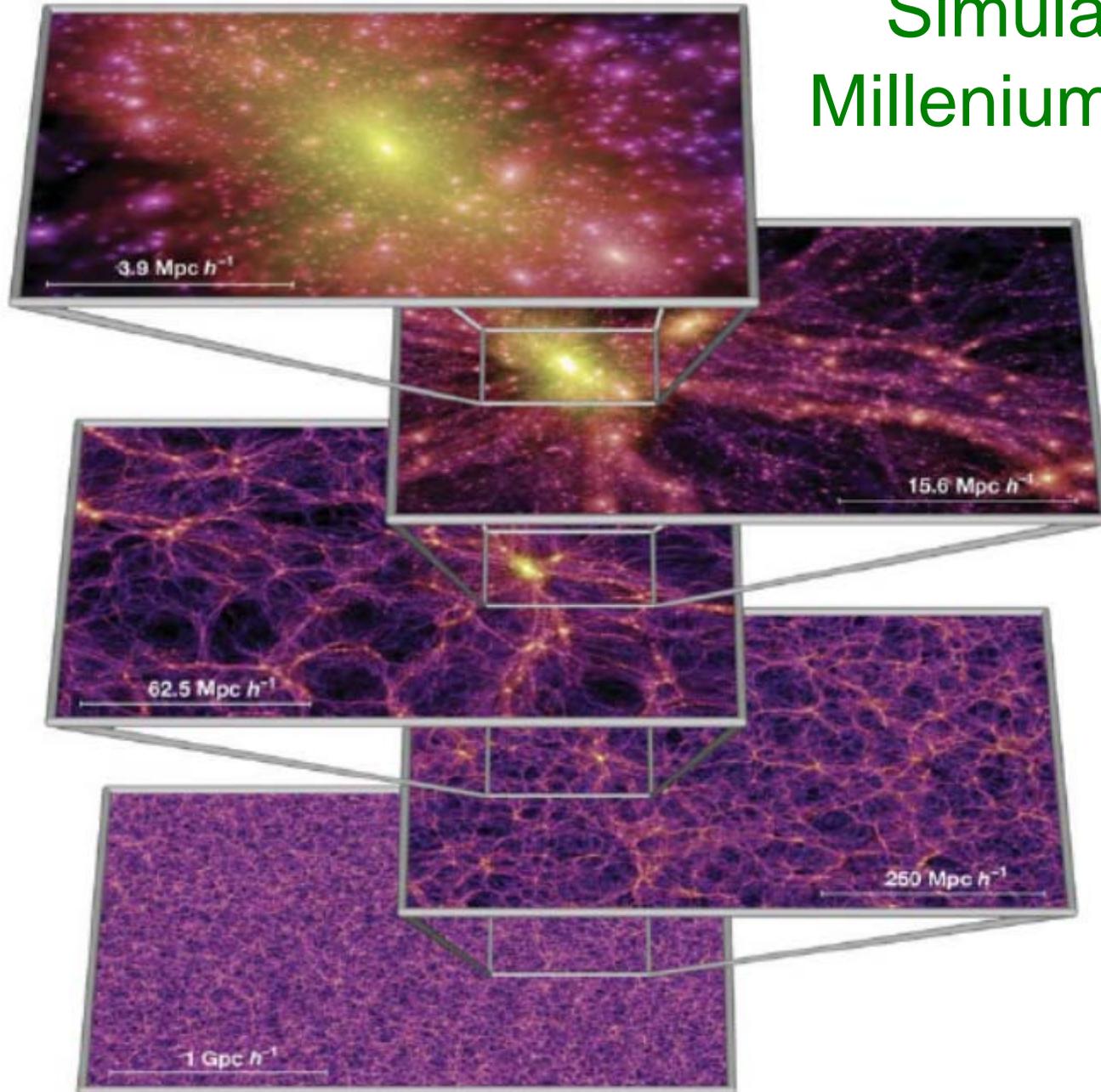
Direct



Indirect

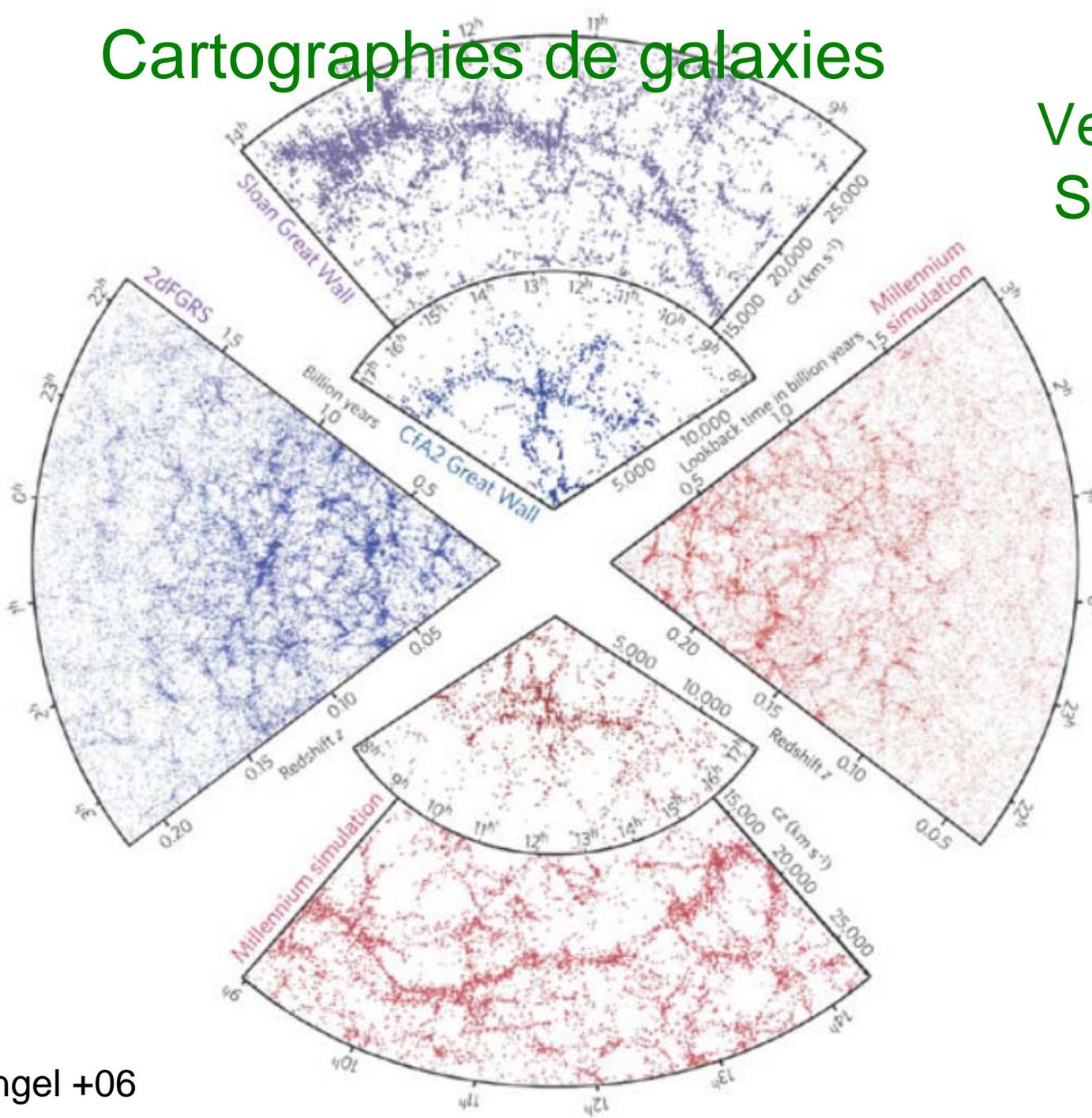
→ Pas de détection convaincante¹⁷

Simulation Millennium CDM



Cartographies de galaxies

Versus
Simulations
CDM



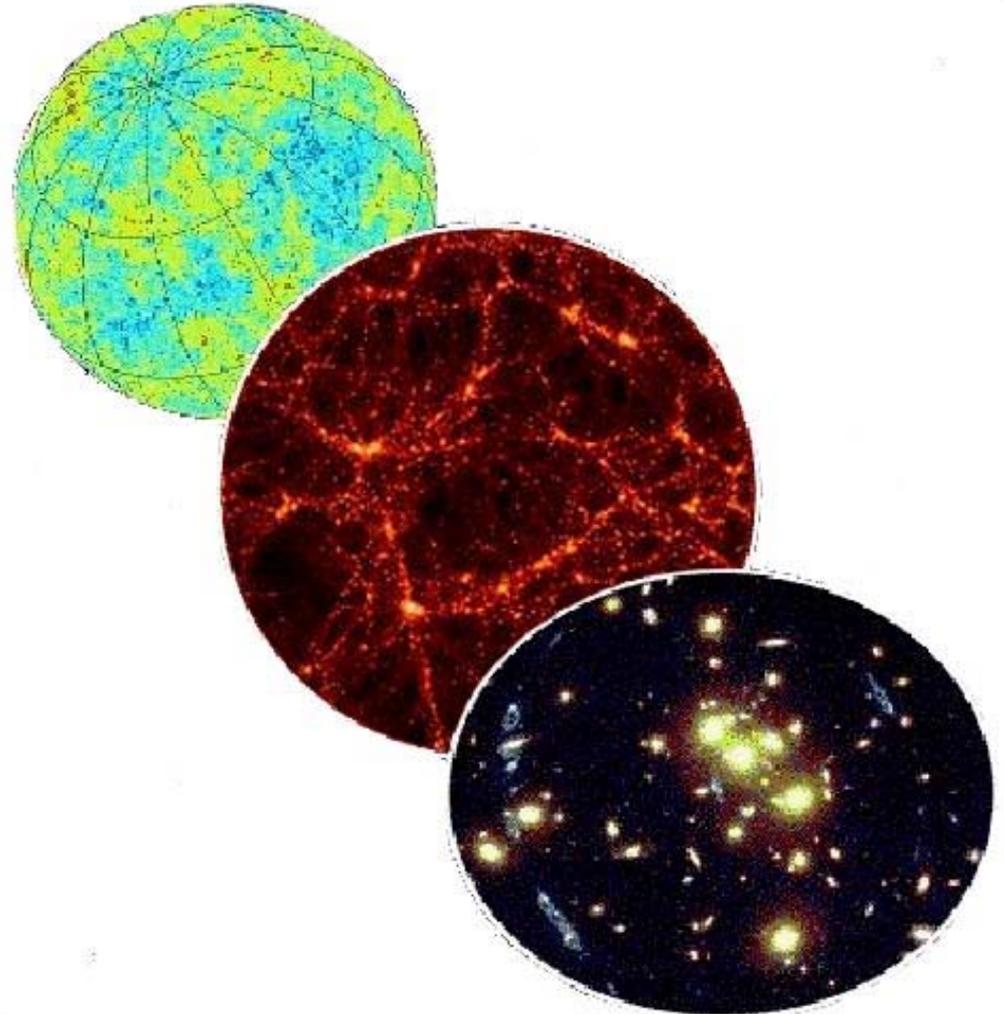
Formation des structures

Fluctuations primordiales
fond cosmologique

simulations cosmologiques:
Nombre de structures à une
échelle donnée

Contraintes sur la nature de
matière noire (neutrinos?)

→ **Matière noire froide:**
CDM (Cold Dark Matter)



Galaxies vues avec le HST

Hypothèses pour les baryons noirs

Baryons en **objets compacts** (naines brunes, naines blanches, trous noirs) sont soit éliminés par les expériences de micro-lensing ou souffrent de problèmes majeurs

MACHOS --> MACDOS (objets du disque)

→ Meilleure hypothèse, **c'est du gaz**,

Soit **du gaz chaud** dans le milieu intergalactique et inter-amas

Soit **du gaz froid** au voisinage des galaxies

Où sont les Baryons?

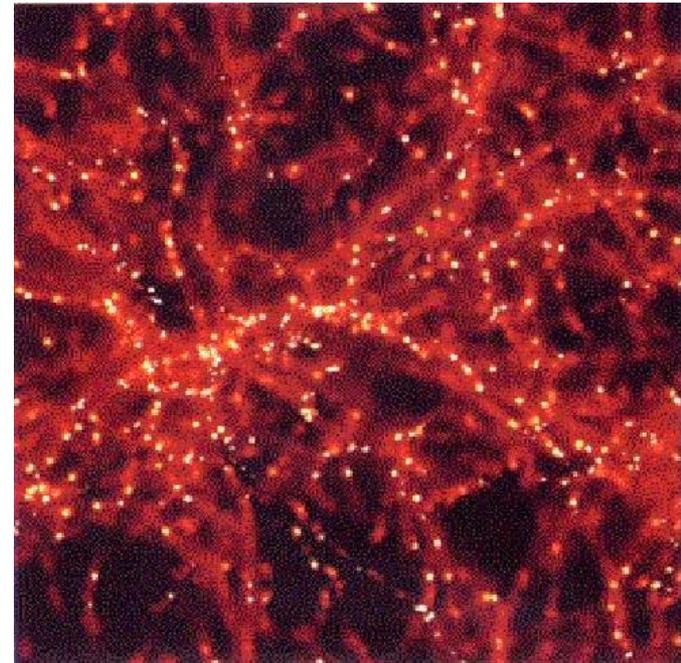
→ 6% dans les galaxies ; 3% dans les amas de galaxies gaz X

→ <18% dans la forêt Lyman-alpha (filaments cosmiques)

→ 5-10% dans le WHIM (Warm-Hot Intergalactic Medium) 10^5 - 10^6 K
Raies de OVI

→ 65% ne sont pas encore identifiés!

La majorité ne sont pas dans les galaxies



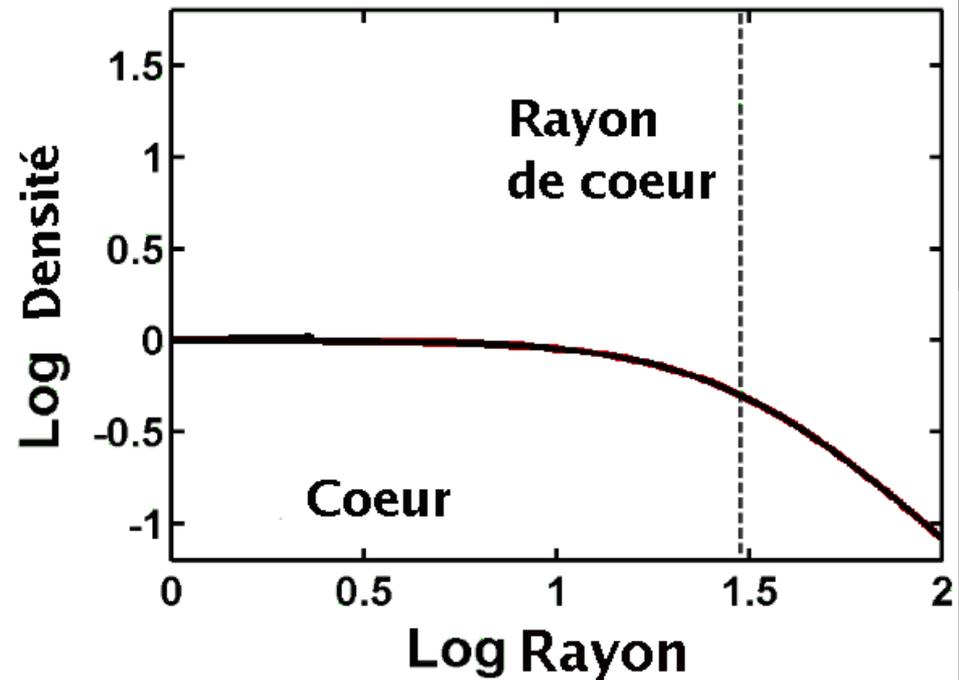
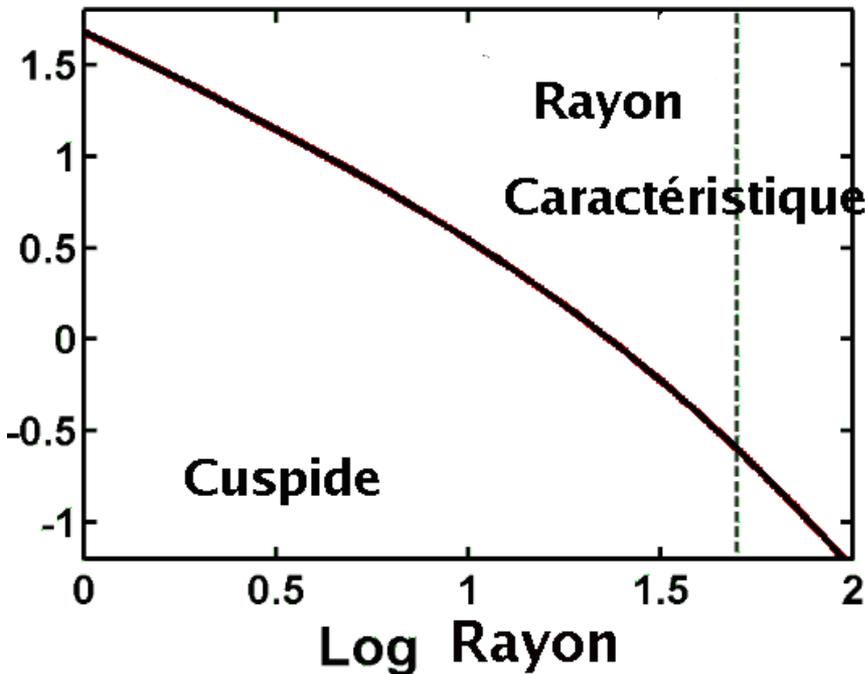
Problèmes dans la formation des galaxies (modèle standard Λ -CDM)

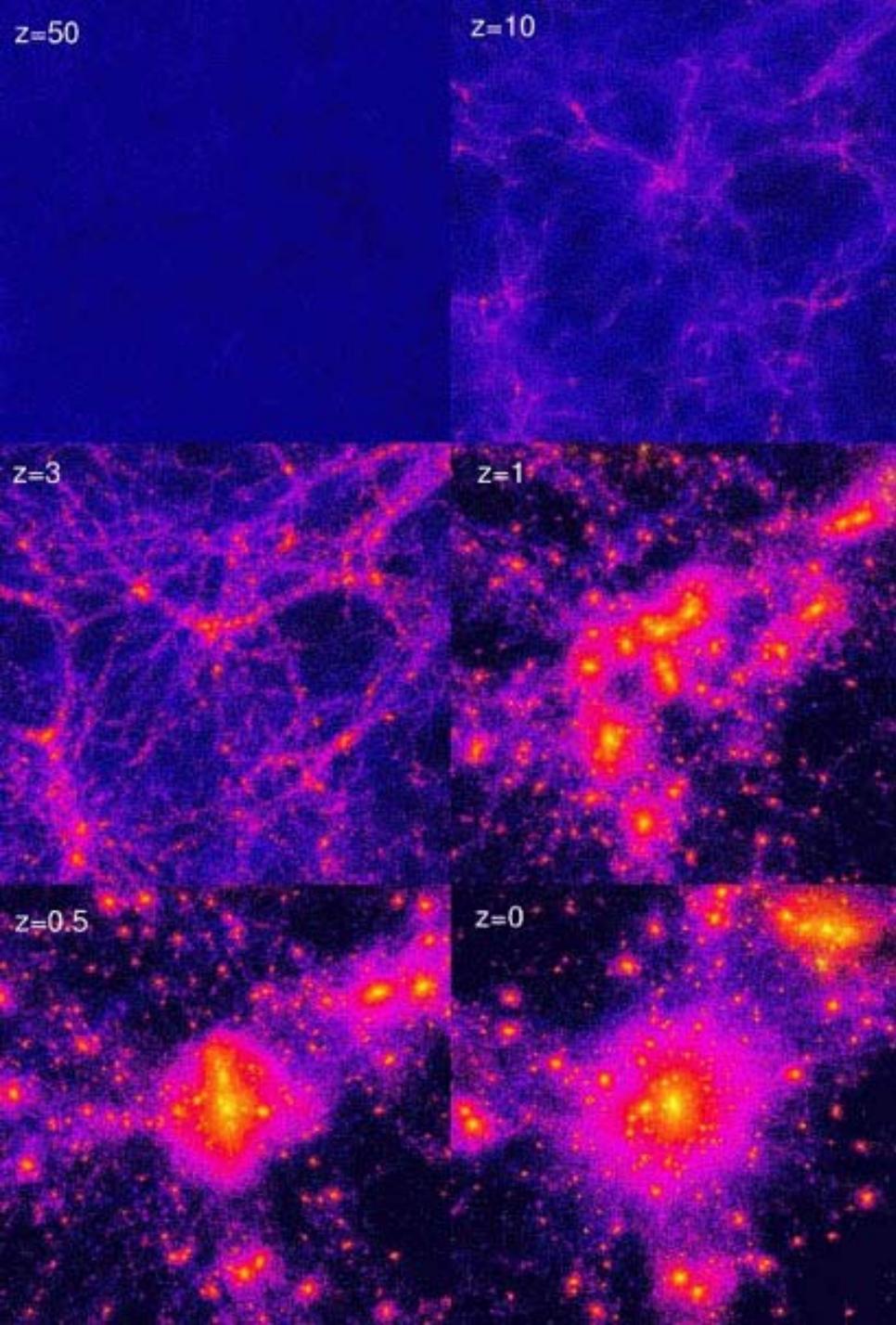
- Prédiction de "cuspidés" au centre des galaxies, absentes dans les observations
- Faible moment angulaire des baryons, et en conséquence formation de disques de galaxies 10 fois trop petits
- Prédiction d'un grand nombre de petits halos (400 autour de la Voie Lactée), non observés

Prédictions Λ CDM: 'cuspidé' ou 'cœur'

Distribution radiale de la densité de matière noire

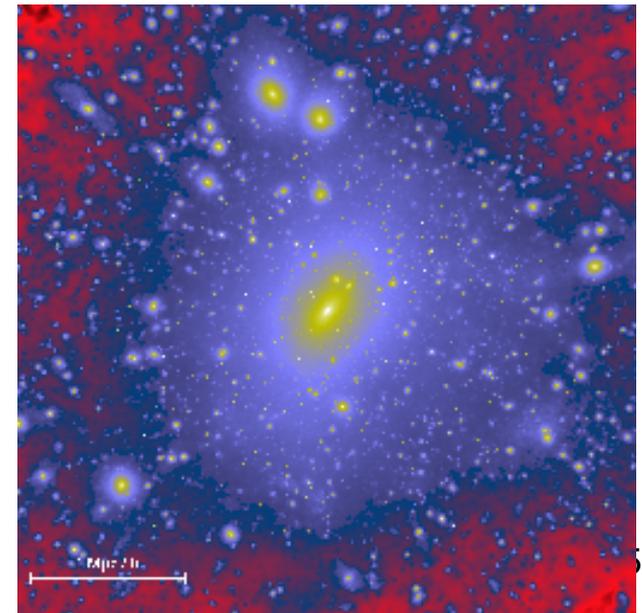
Loi de puissance de la densité $\alpha \sim -1$ - -1.5 , observations $\alpha \sim 0$

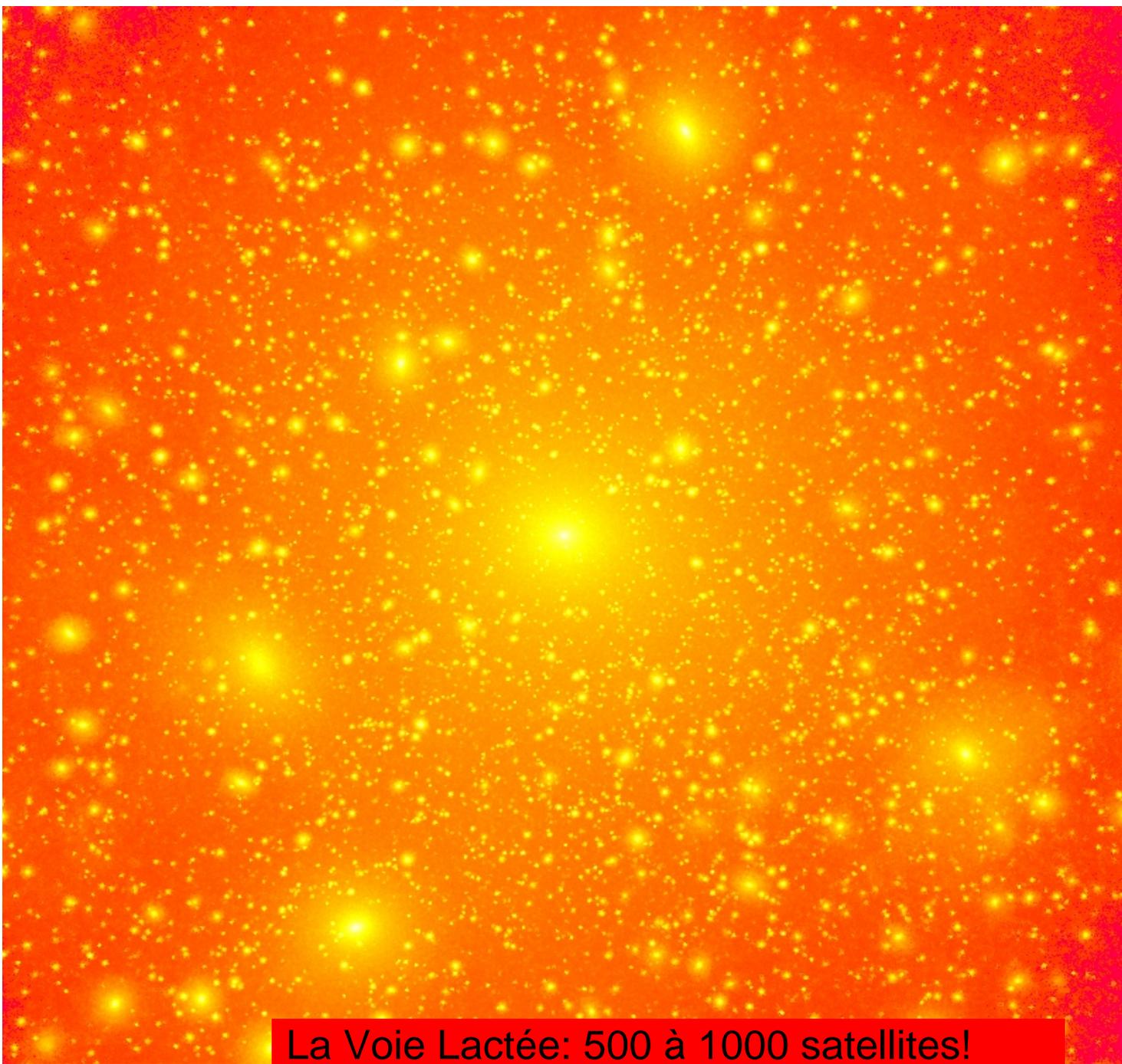




Trop de petites structures

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



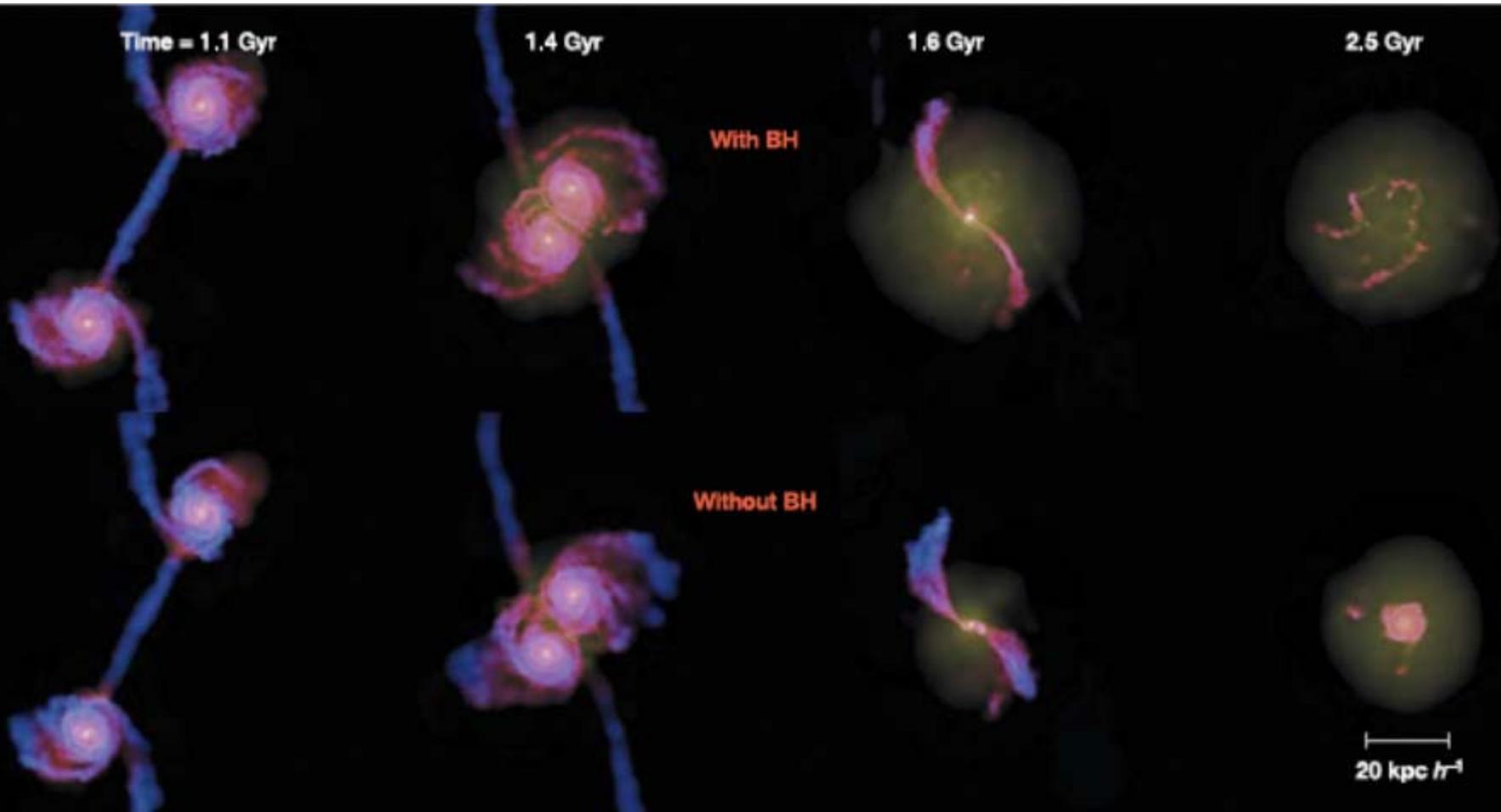


La Voie Lactée: 500 à 1000 satellites!

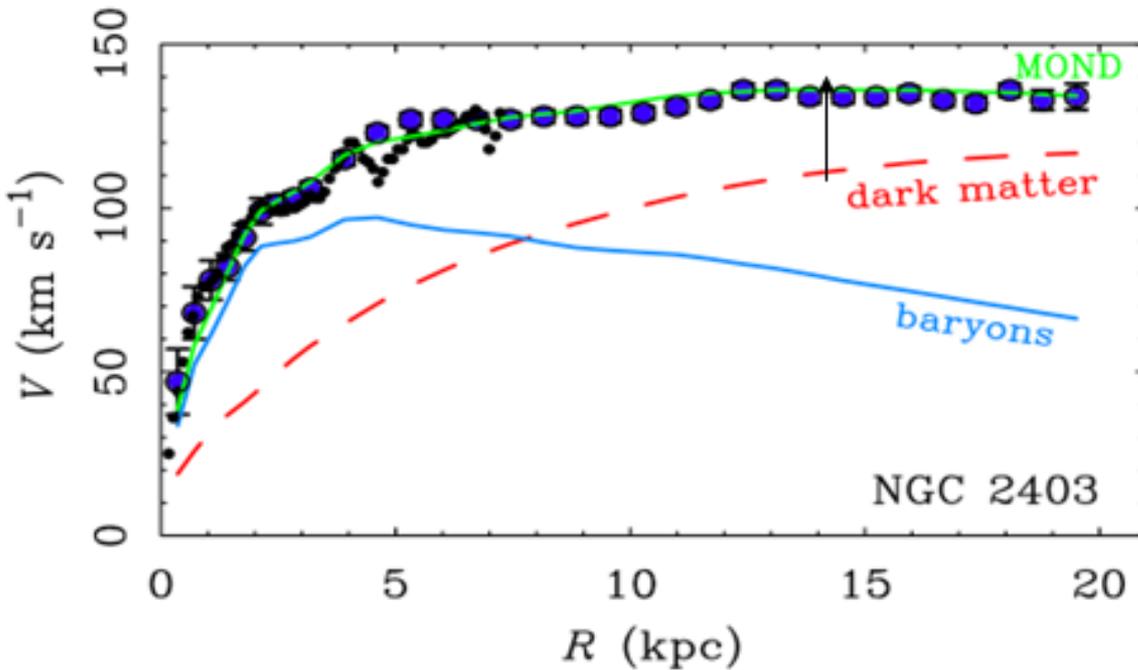
Solutions Astrophysiques

Flambées de formation d'étoiles

Noyaux actifs, et rétro-action



Autres solutions pour les courbes de rotation des galaxies



La matière noire peut résoudre le problème, mais aussi.....

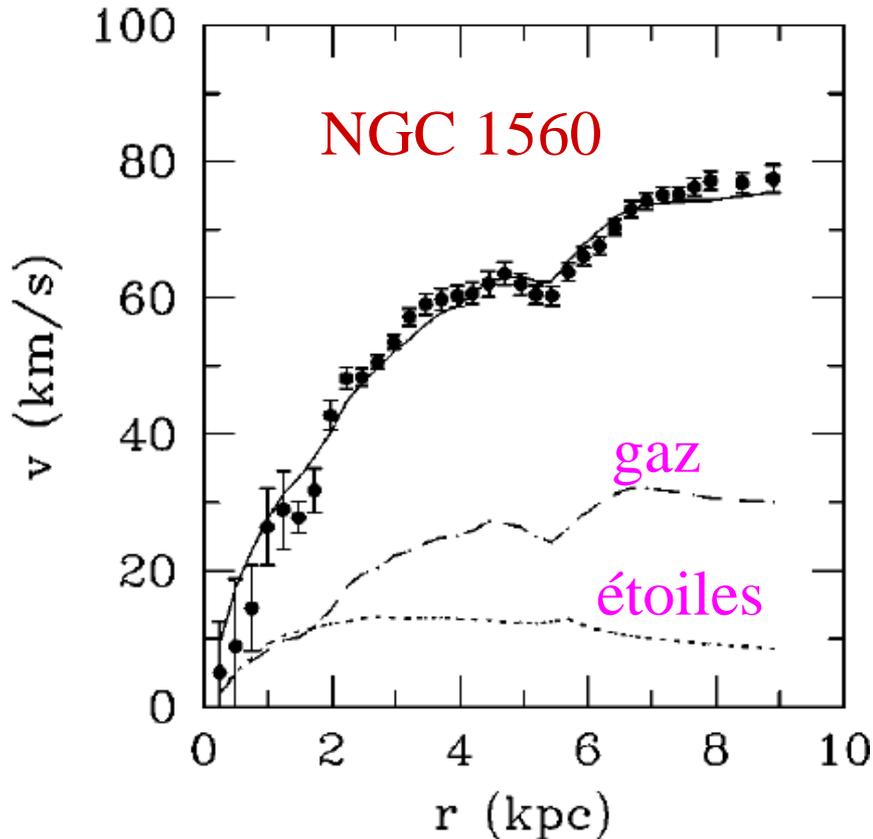
Une modification de la loi de Newton

MOND: MOdified Newtonian Dynamics

Milgrom (1983)

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

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



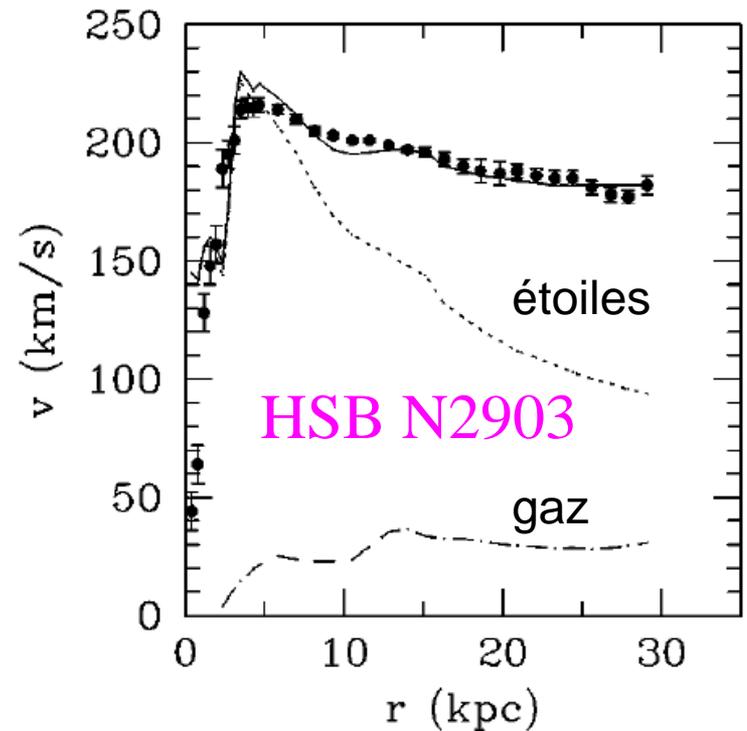
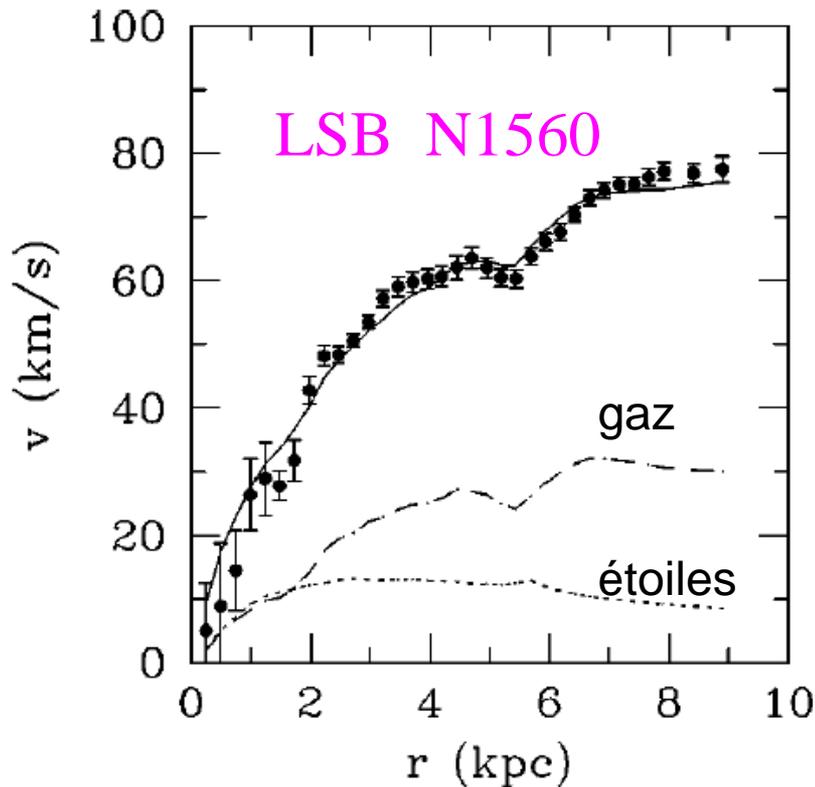
Quand l'accélération devient $< a_0$
 $a_0 \sim 2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$

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

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

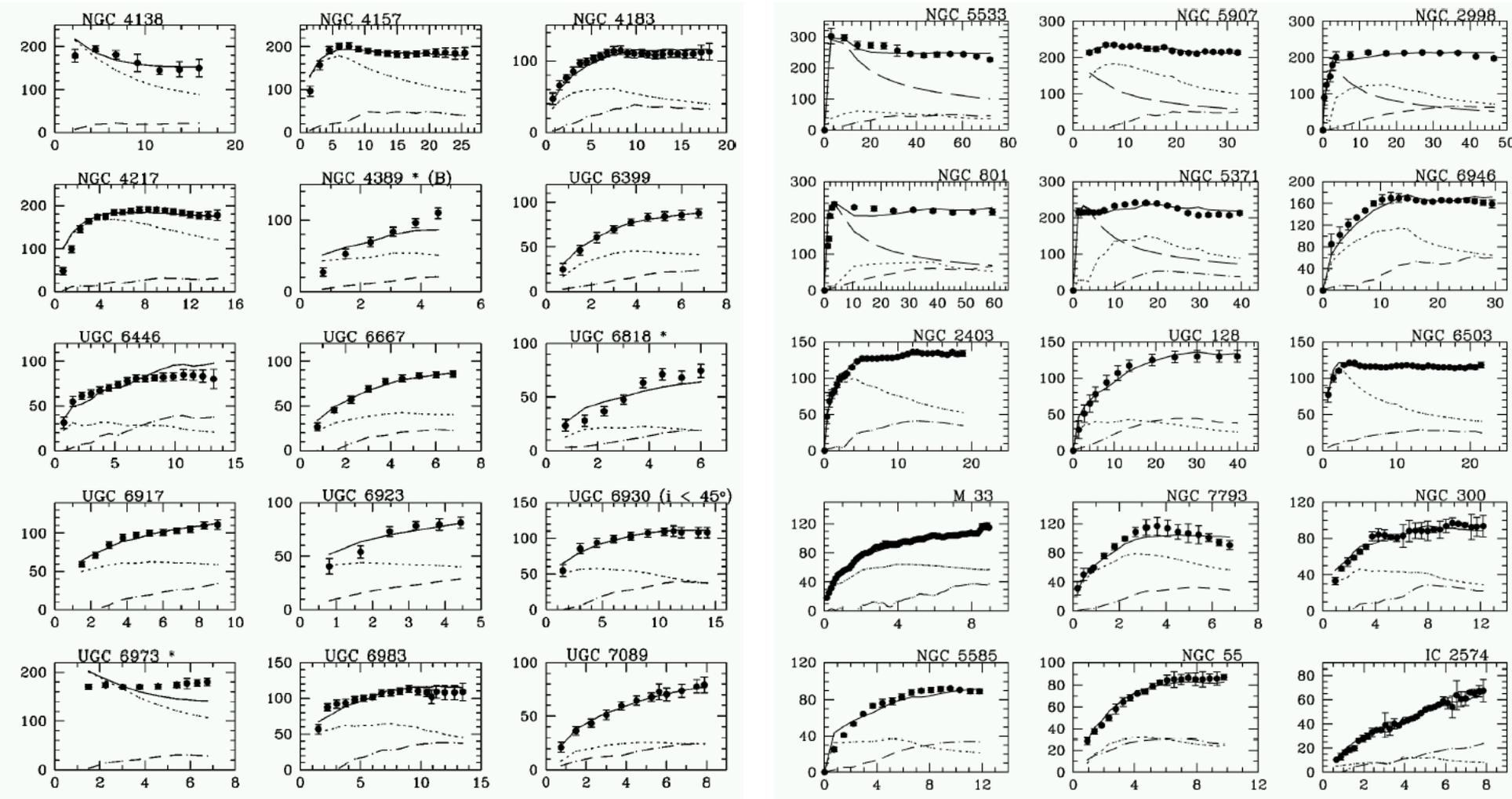
Ajustement selon la densité de surface

Les courbes de rotation sont ajustées parfaitement, quel que soit le type morphologique (naines LSB, géantes HSB)



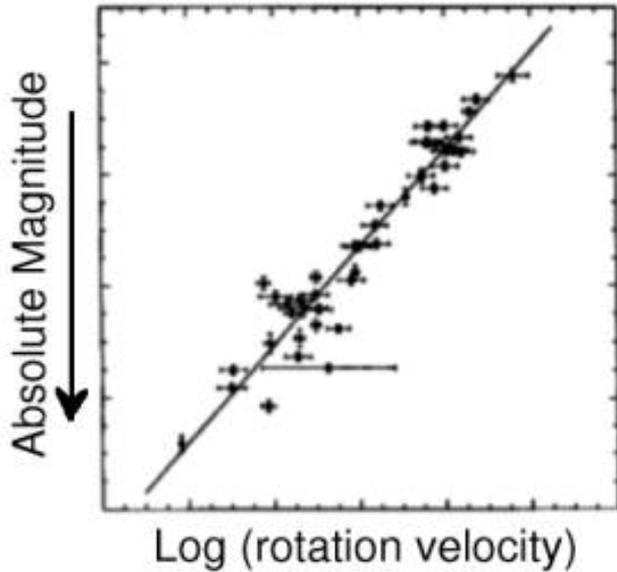
Courbes de rotation multiples

Une seule constante a_0 peut représenter toutes les galaxies



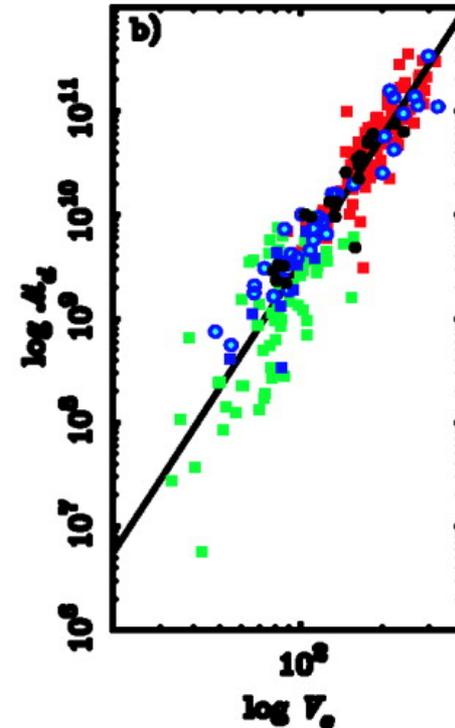
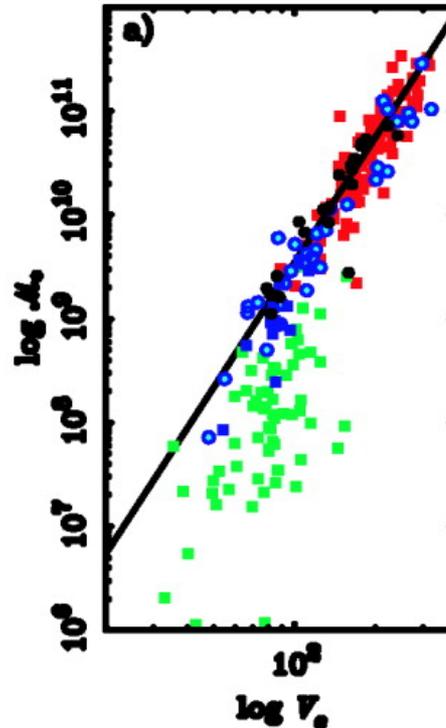
Loi de Tully-Fisher

$$\text{Luminosité} \sim \Delta V_{\text{rot}}^4$$



$$g_M^2 = a_0 g_N = a_0 GM/r^2 = V^4/r^2$$

$$\rightarrow V^4 = a_0 GM$$



Les galaxies naines, dominées par le gaz, vérifient aussi la relation, si l'on prend en compte la masse HI

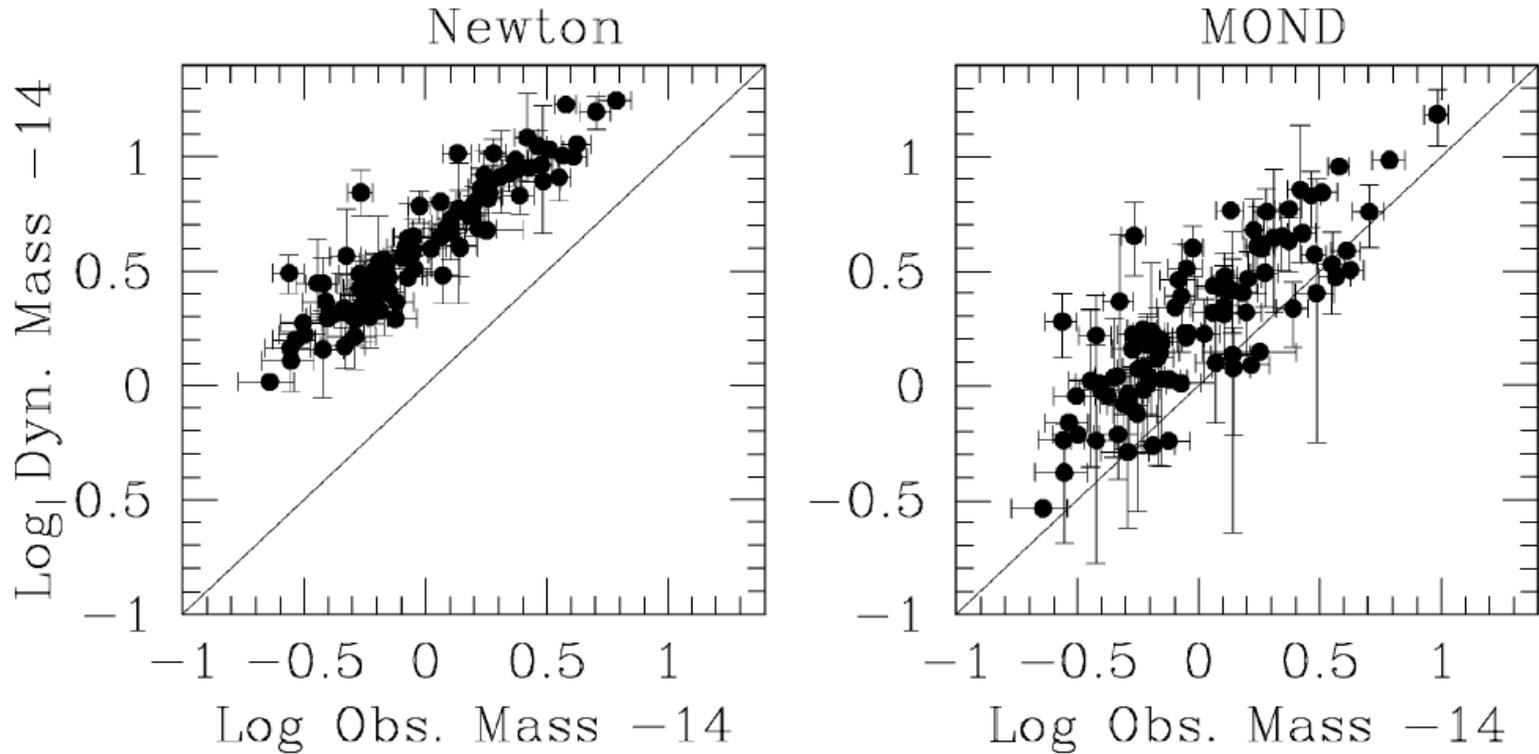
Problèmes de MOND dans les amas

A l'intérieur des amas de galaxies, il existe encore de la DM, qui ne peut pas être expliquée par MOND, car **le centre de l'amas** n'est que modérément dans le régime MOND ($0.5 a_0$)

MOND réduit d'un facteur 2 la masse manquante

➔ Il reste une autre composante, qui pourrait être des neutrinos....
(plus des baryons)

MOND et les amas



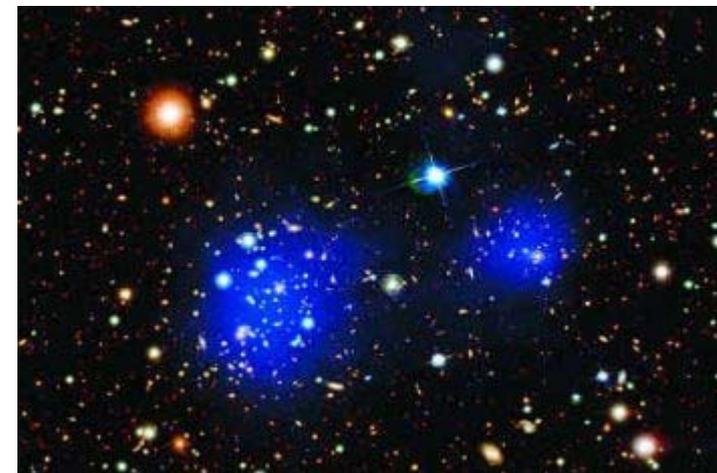
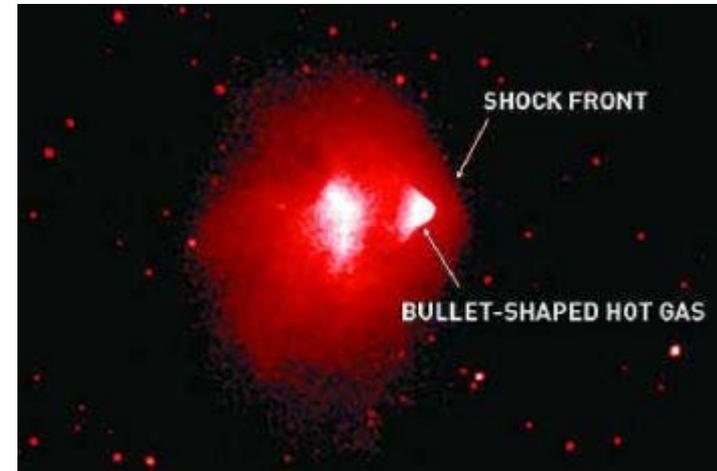
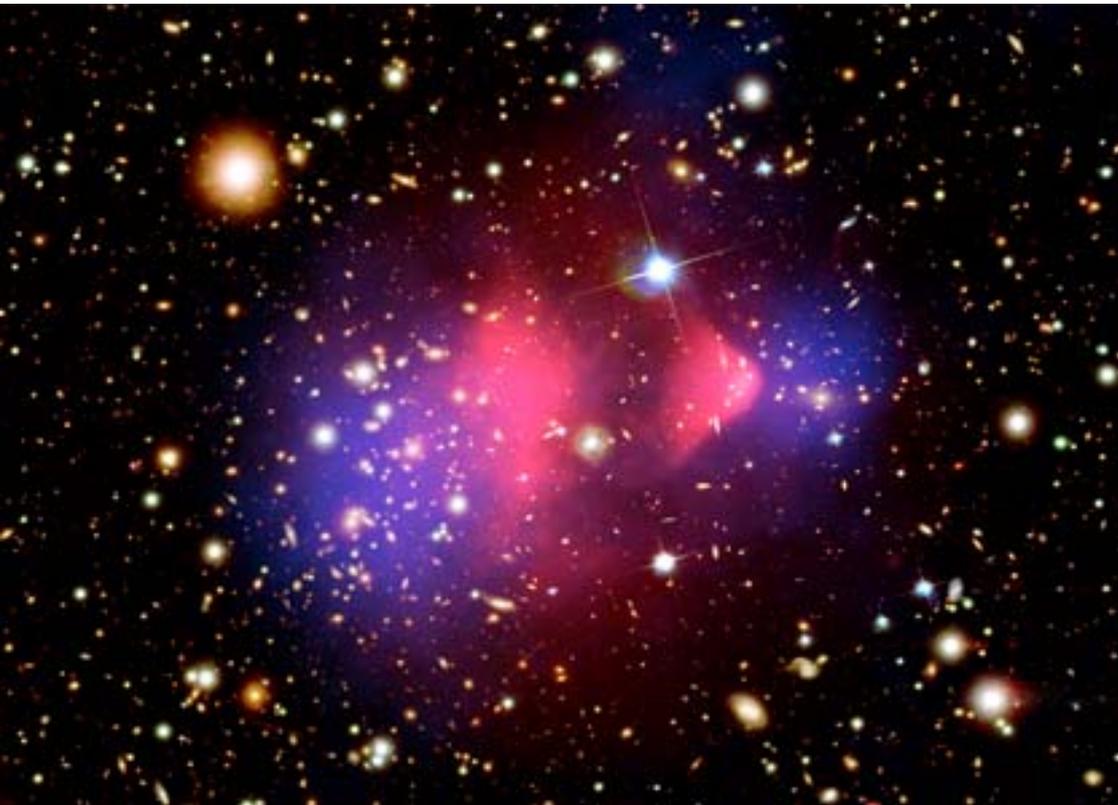
Du gaz froid pourrait se trouver au centre des amas

(flots de refroidissement)

D'autre part, les neutrinos pourraient représenter 2x plus de masse que les baryons

L'amas du boulet

Gaz X

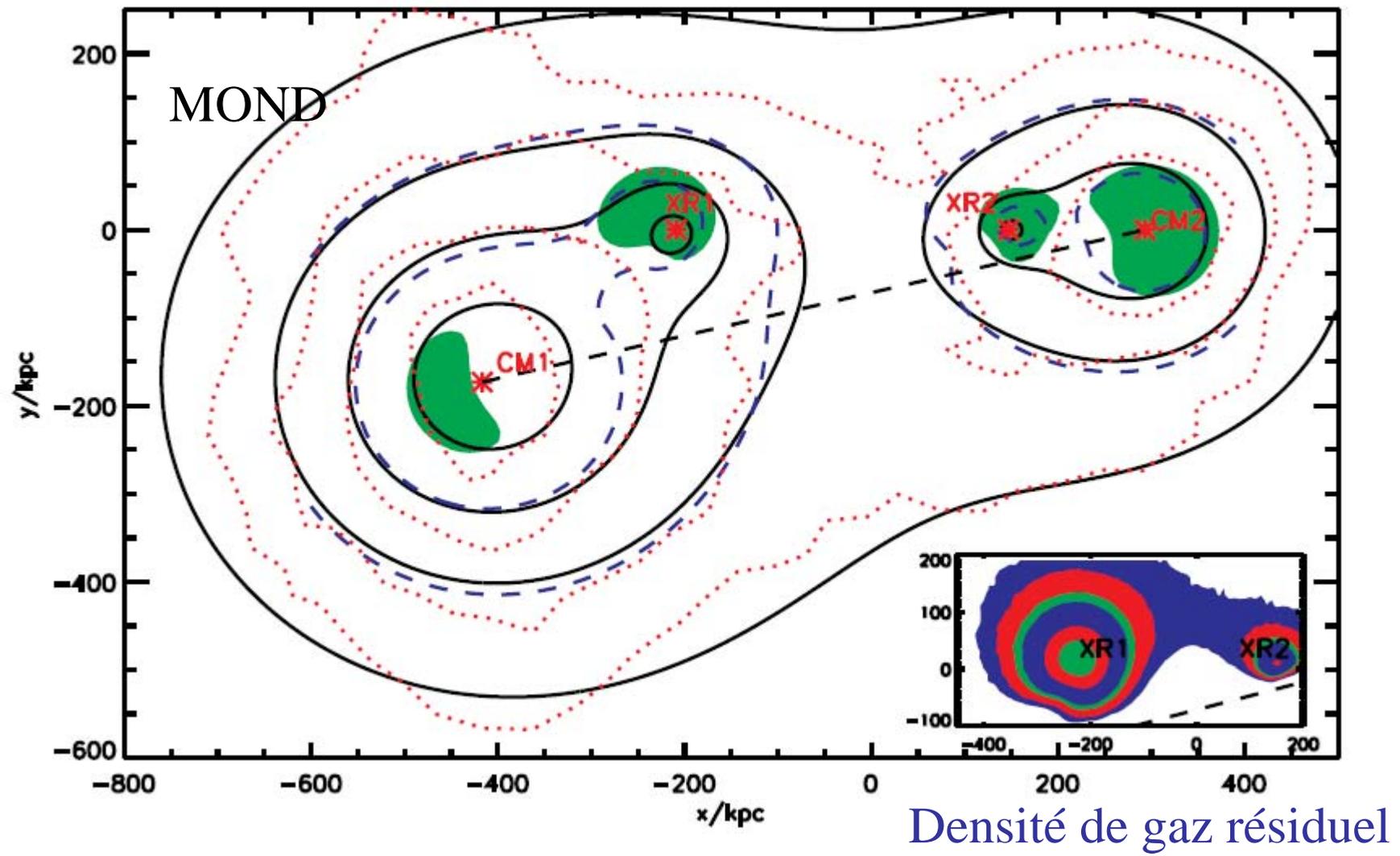


Masse totale

Est-ce la preuve de l'existence de matière non-baryonique?

Possible d'expliquer les observations avec MOND et les neutrinos, avec le pourcentage habituel (masse 1-2 eV)

Modèle de l'amas du boulet dans MOND

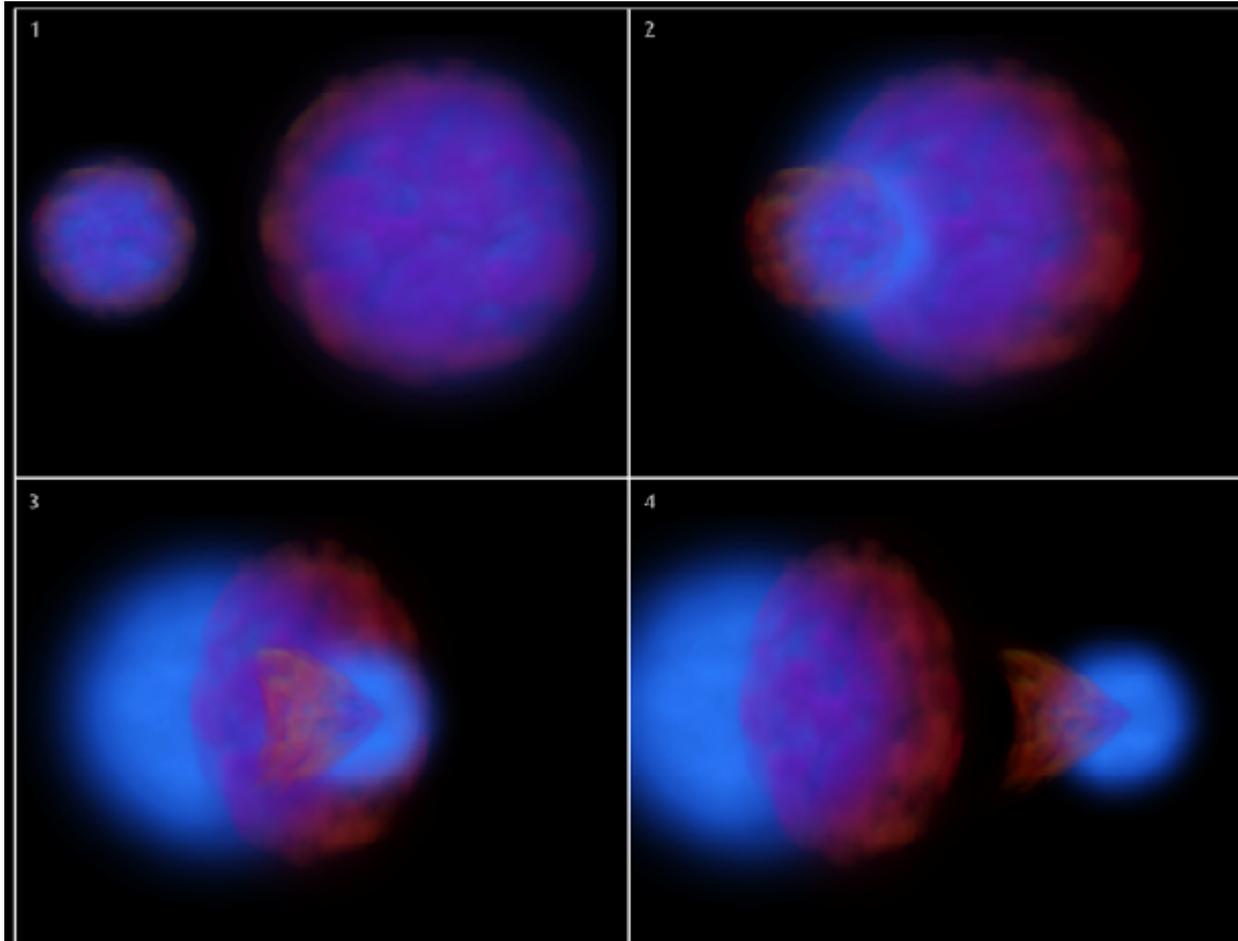


Simulation CDM

La vitesse de la collision est obtenue

à partir de la forme du choc = $4700_{\pm 500}$ km/s (Mach 3)

→ impossible de réconcilier avec CDM



CDM peut seulement

$V < 3500$ km/s

MOND > 4500 km/s

Collision à 16%

sur-estimée?

V_{gas} pourrait être

$> V_{\text{CDM}}$

Abell 520

$z=0.201$

Rouge= gaz X

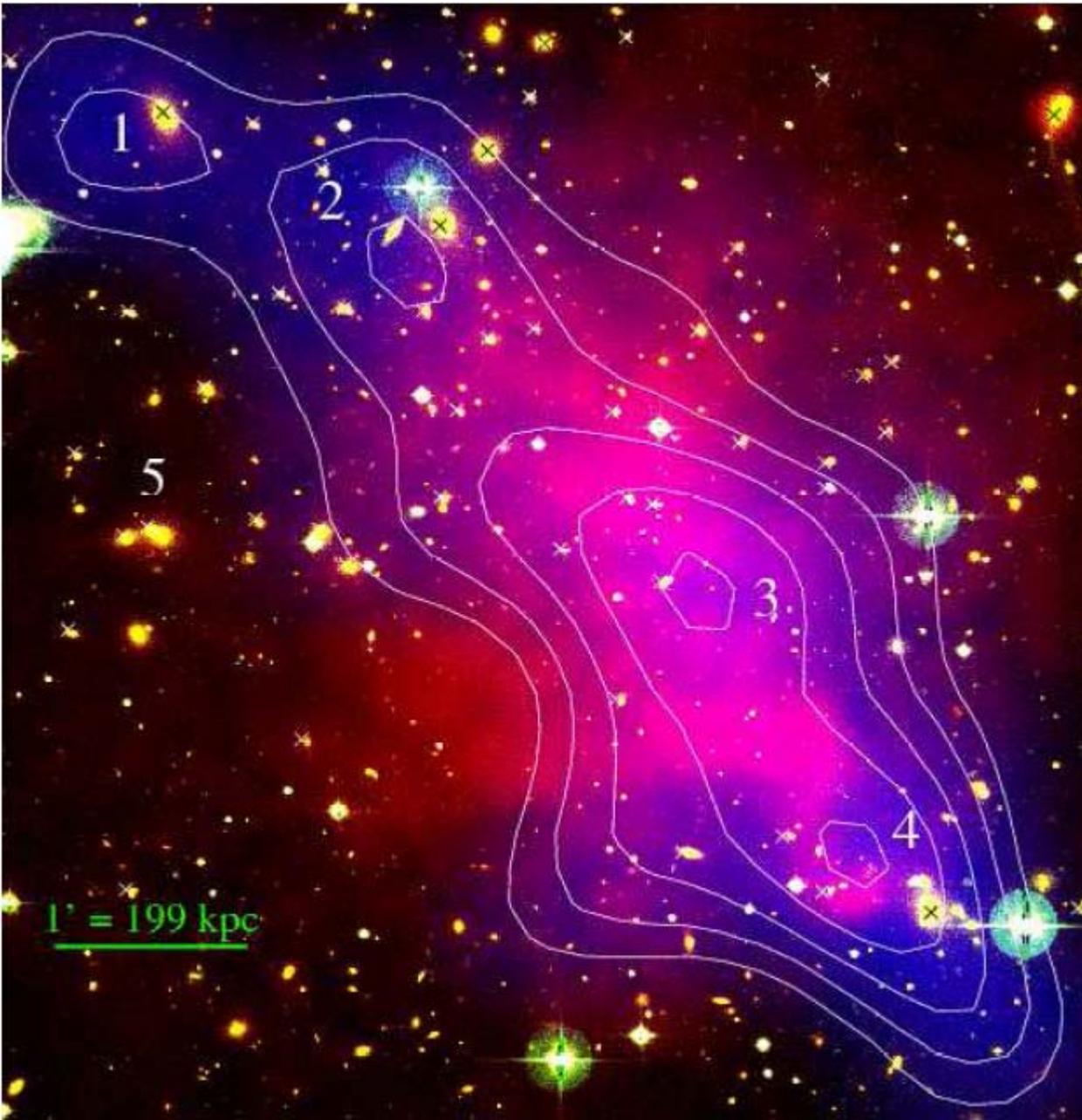
Contours= lentilles

→ Matière noire

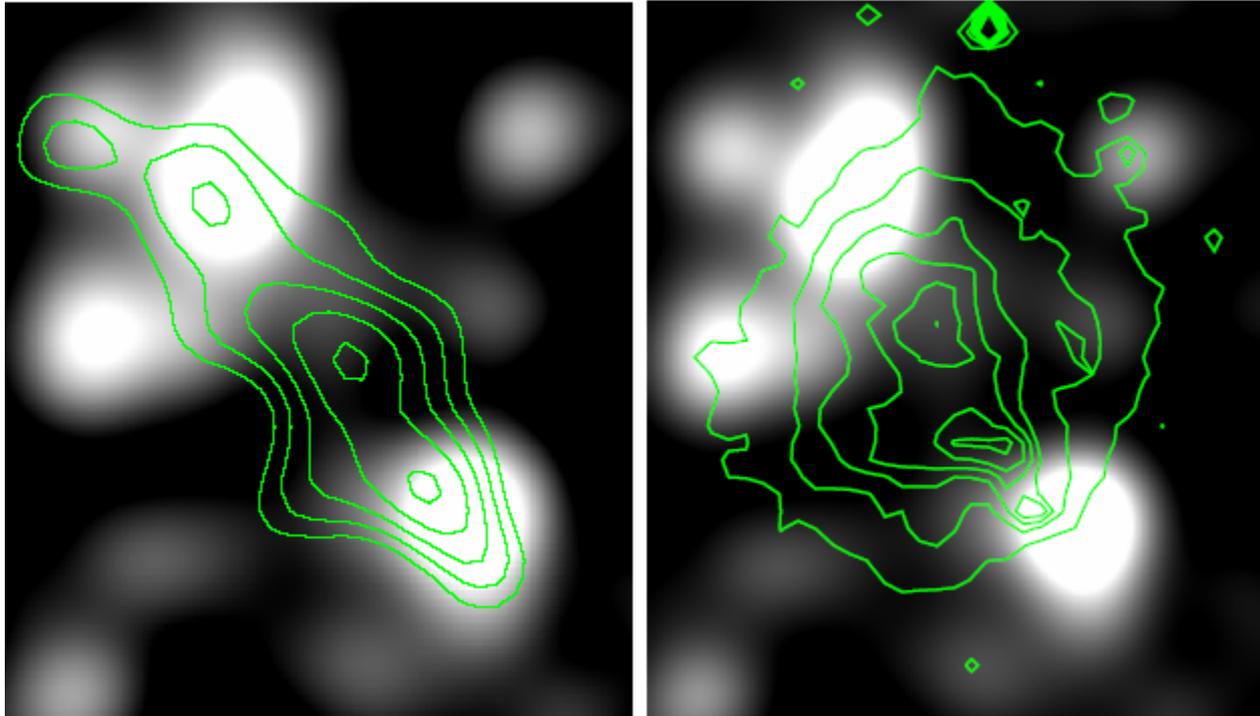
coincide avec le gaz X

Mais vide de galaxies

Cas opposé!



Abell 520: amas en collision



Contours=masse totale

Contours = gaz X

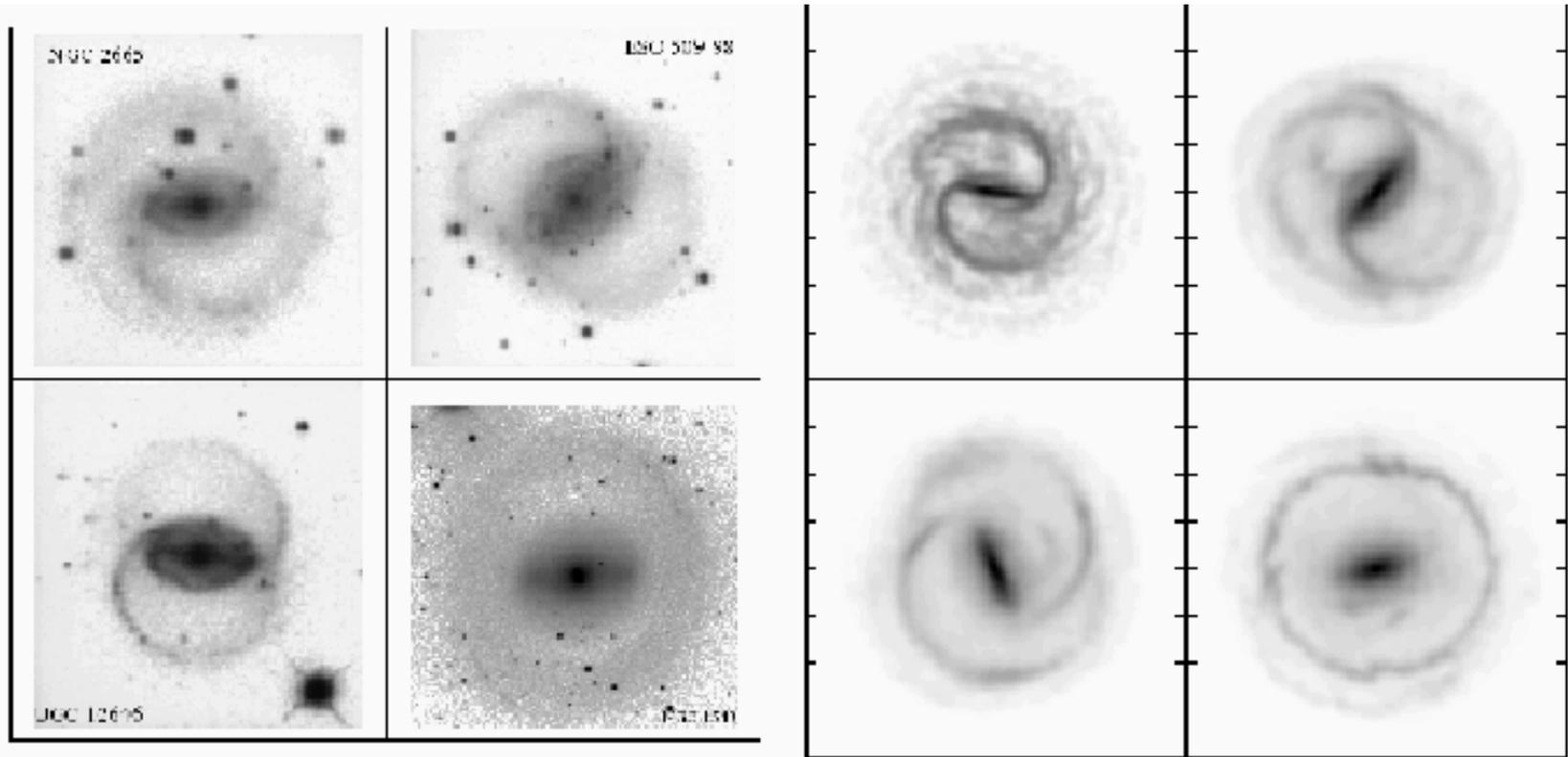
Comment les galaxies peuvent elles être éjectées
du pic de matière noire??

Dynamique des galaxies avec MOND

Barres et anneaux

Observations

MOND



Test crucial de MOND: interactions de galaxies, friction dynamique



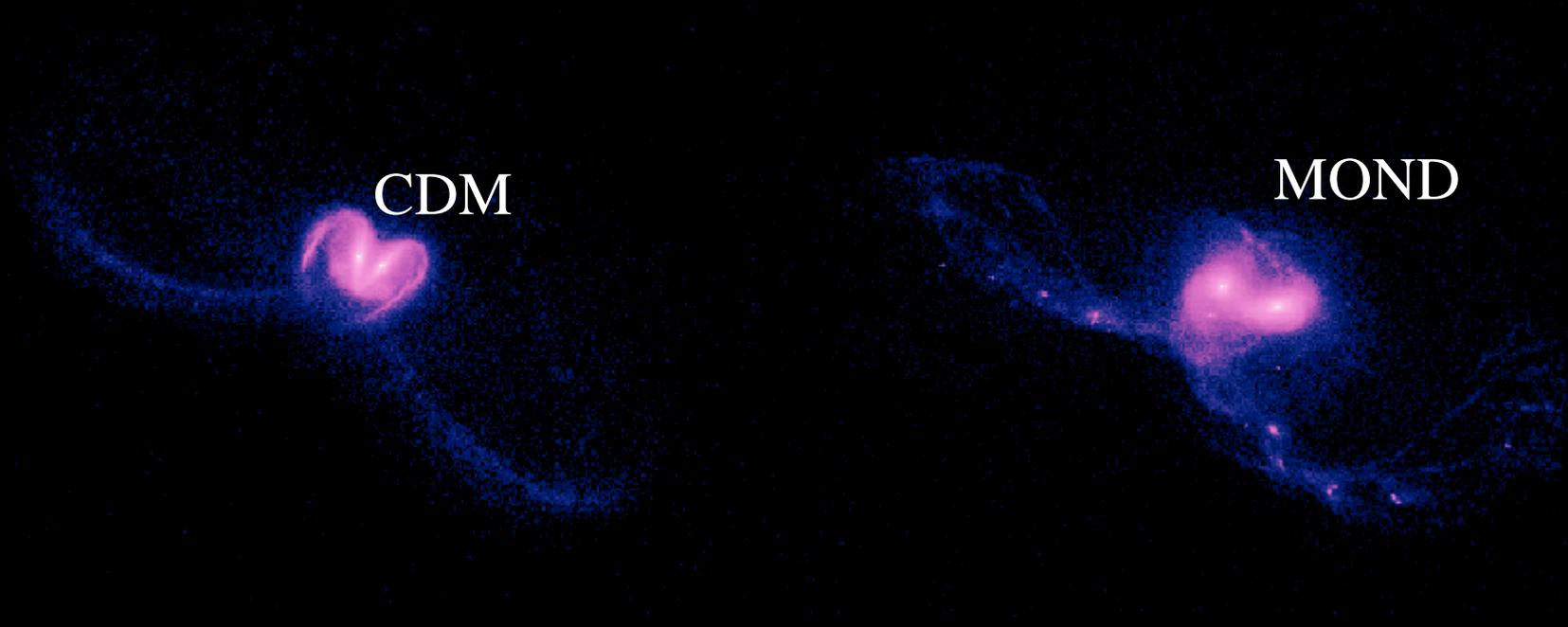
Les Antennes
Prototype
de fusion

0.00

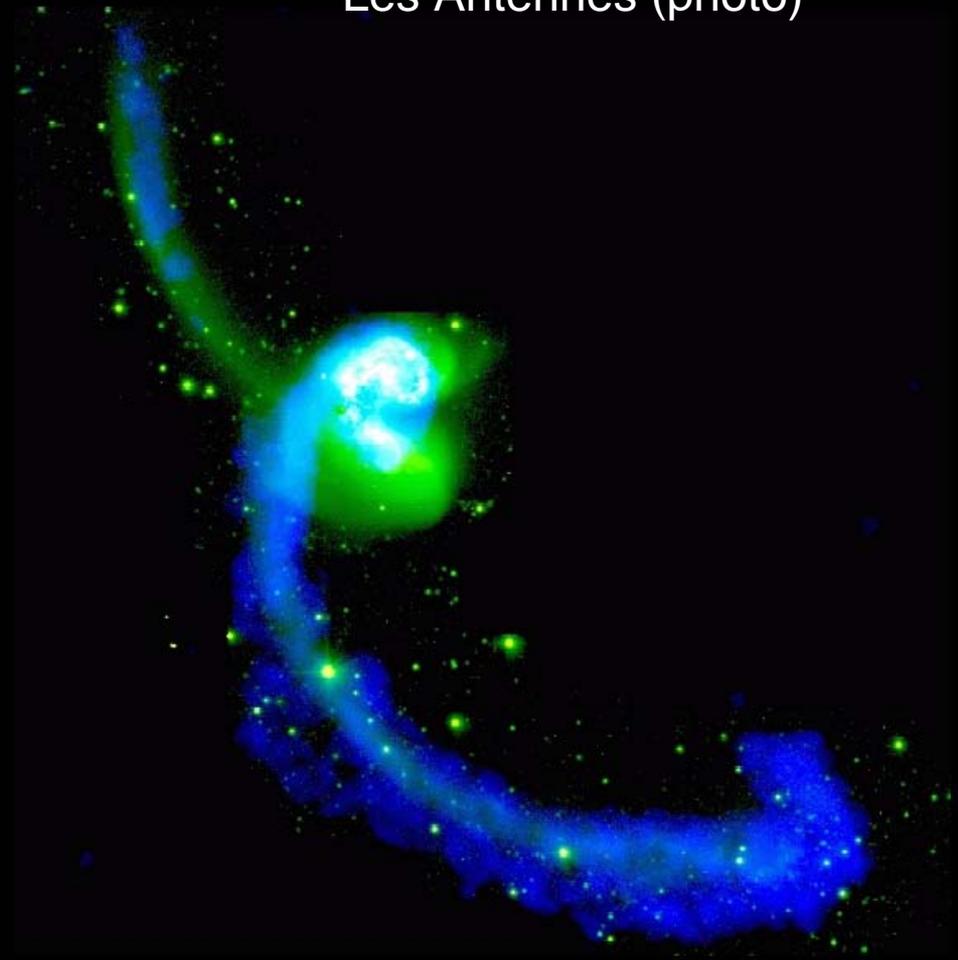


Interactions de galaxies: les Antennes: MOND versus CDM

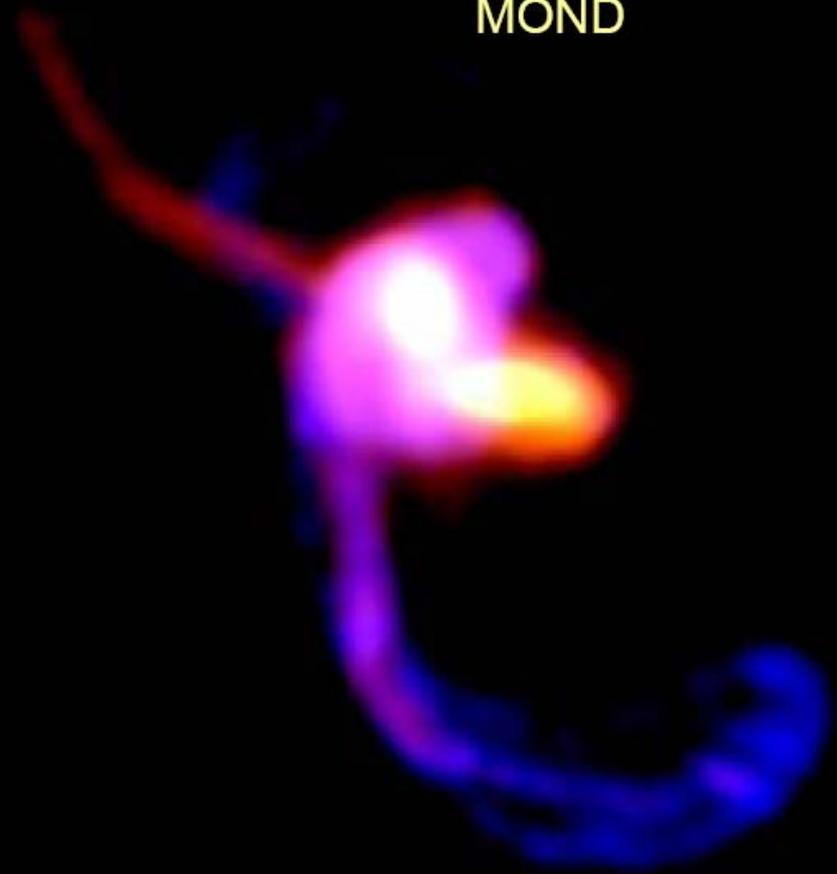
La friction dynamique est bien plus faible avec MOND:
Les fusions durent plus longtemps

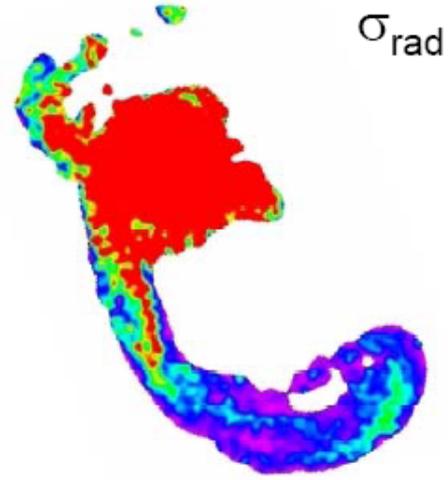
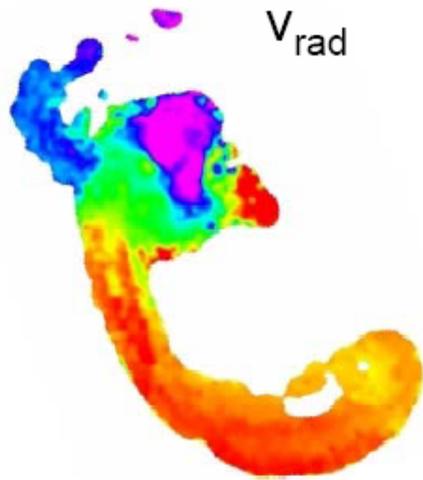


Les Antennes (photo)

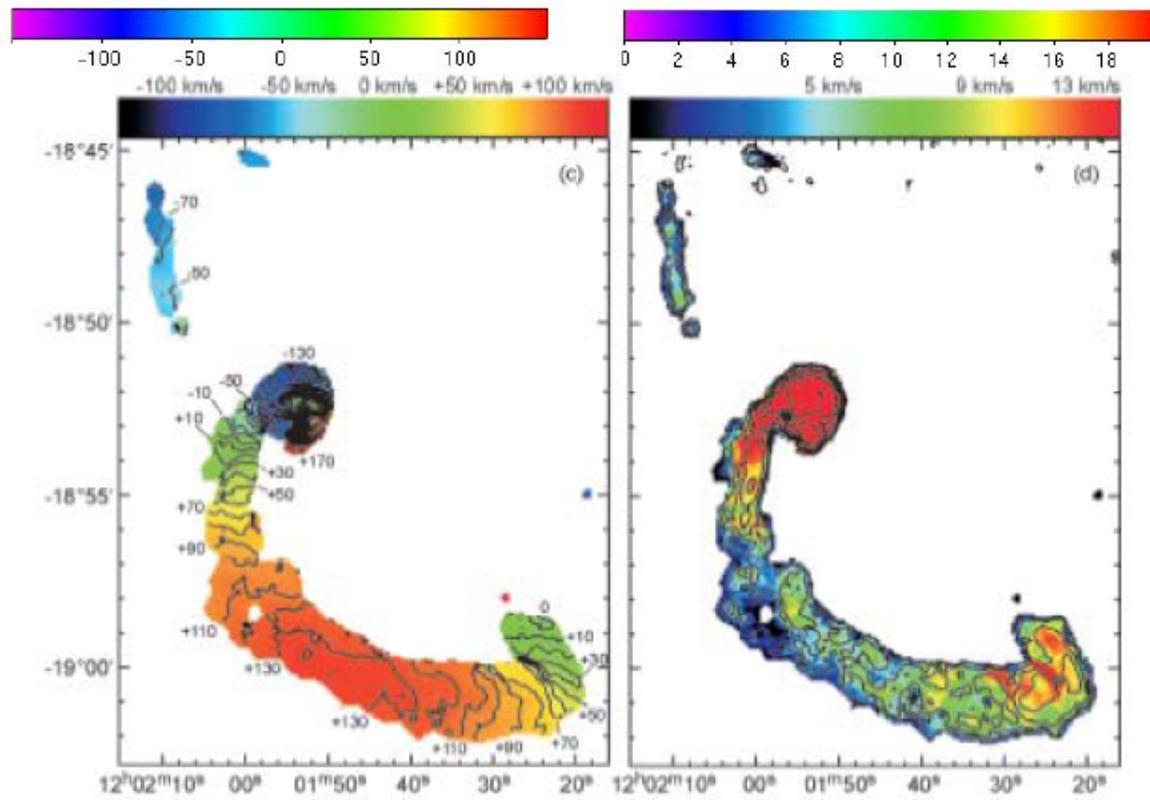


MOND





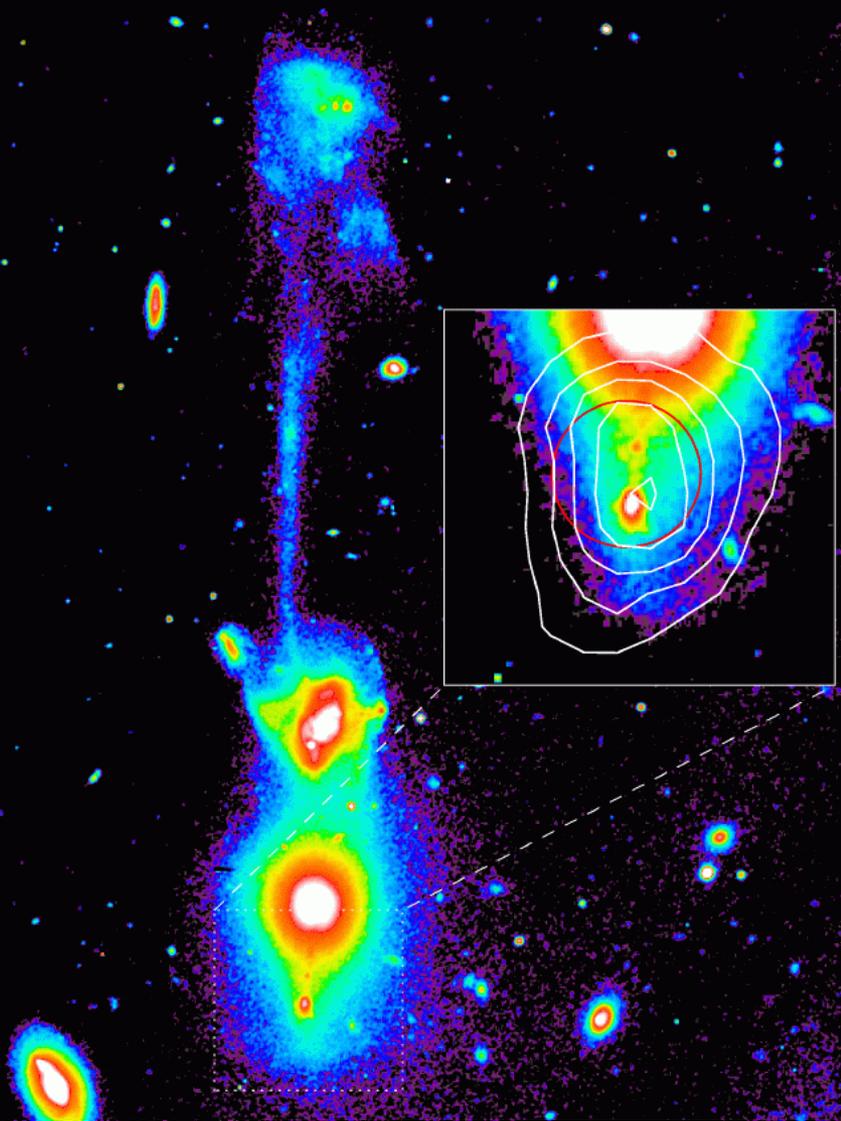
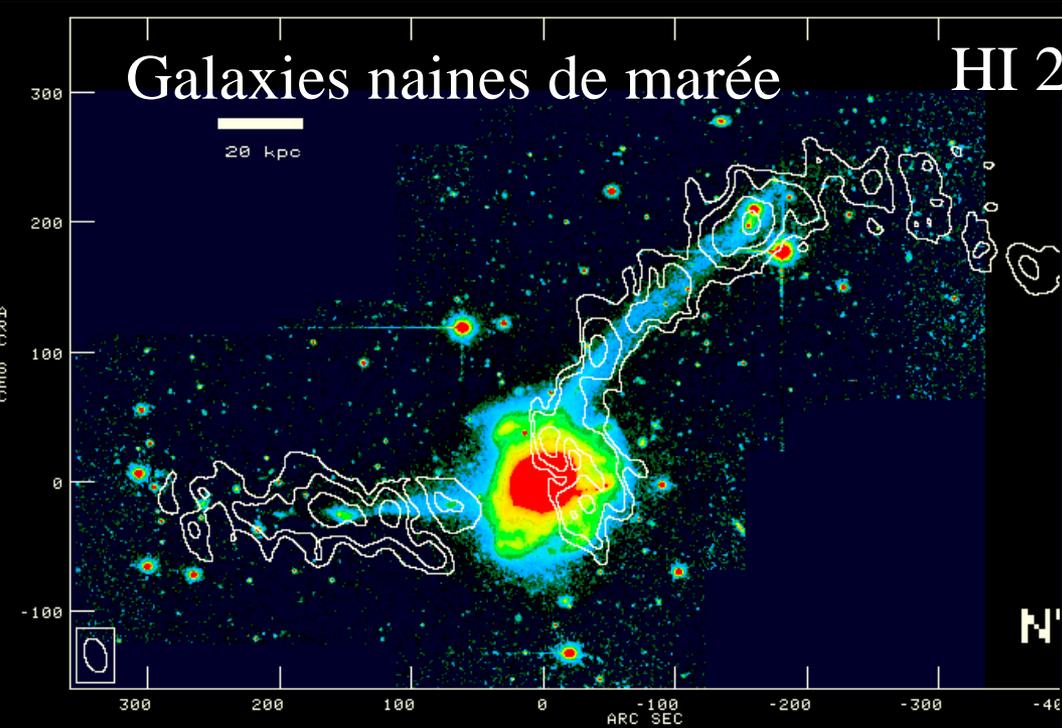
MOND



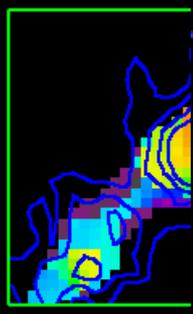
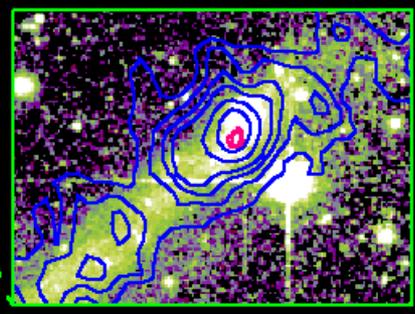
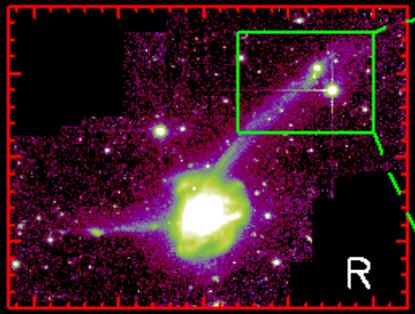
Observations

Galaxies naines de marée

HI 21cm



NGC 7252 Tidal Dwarf



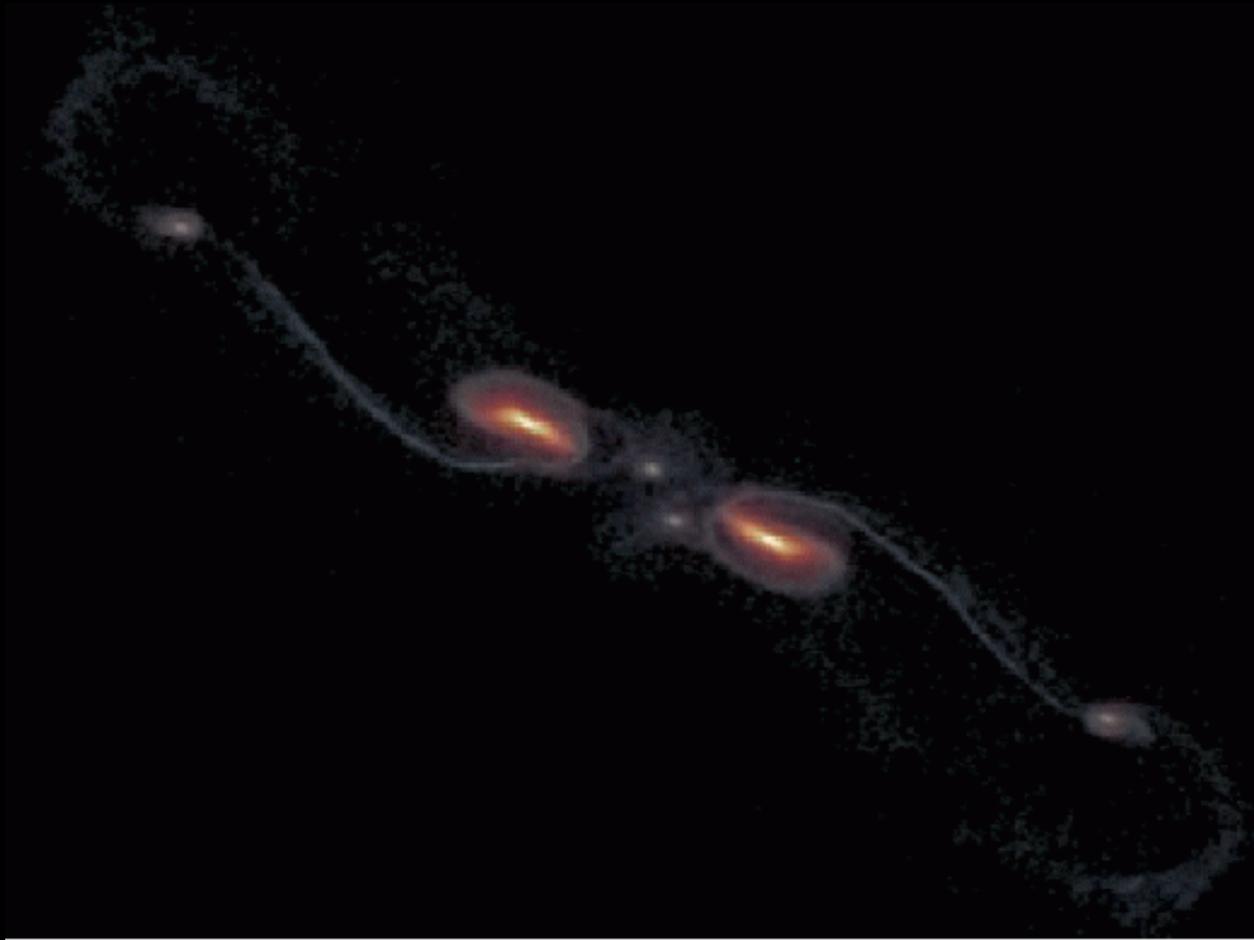
R+Ha+HI mom0

HI mom0

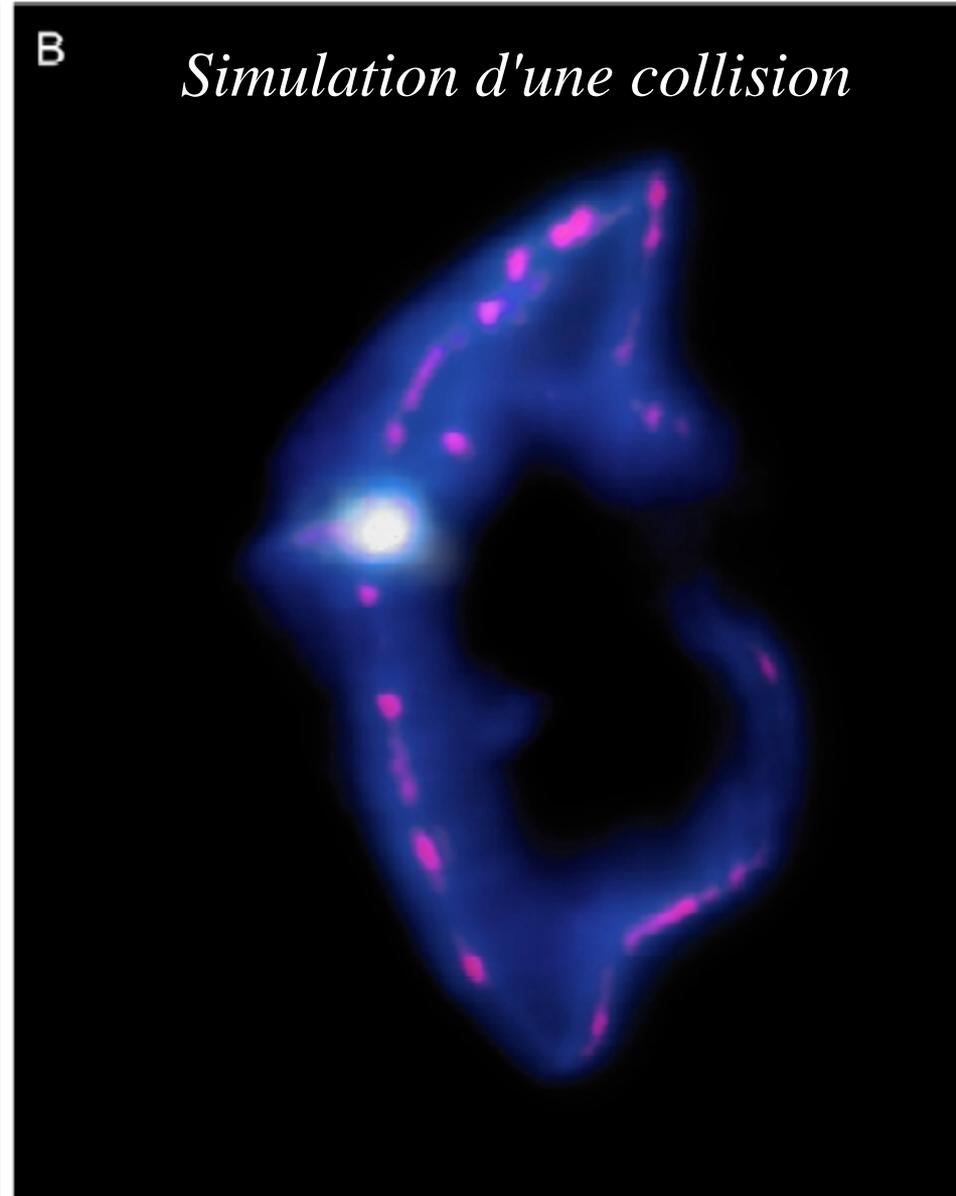
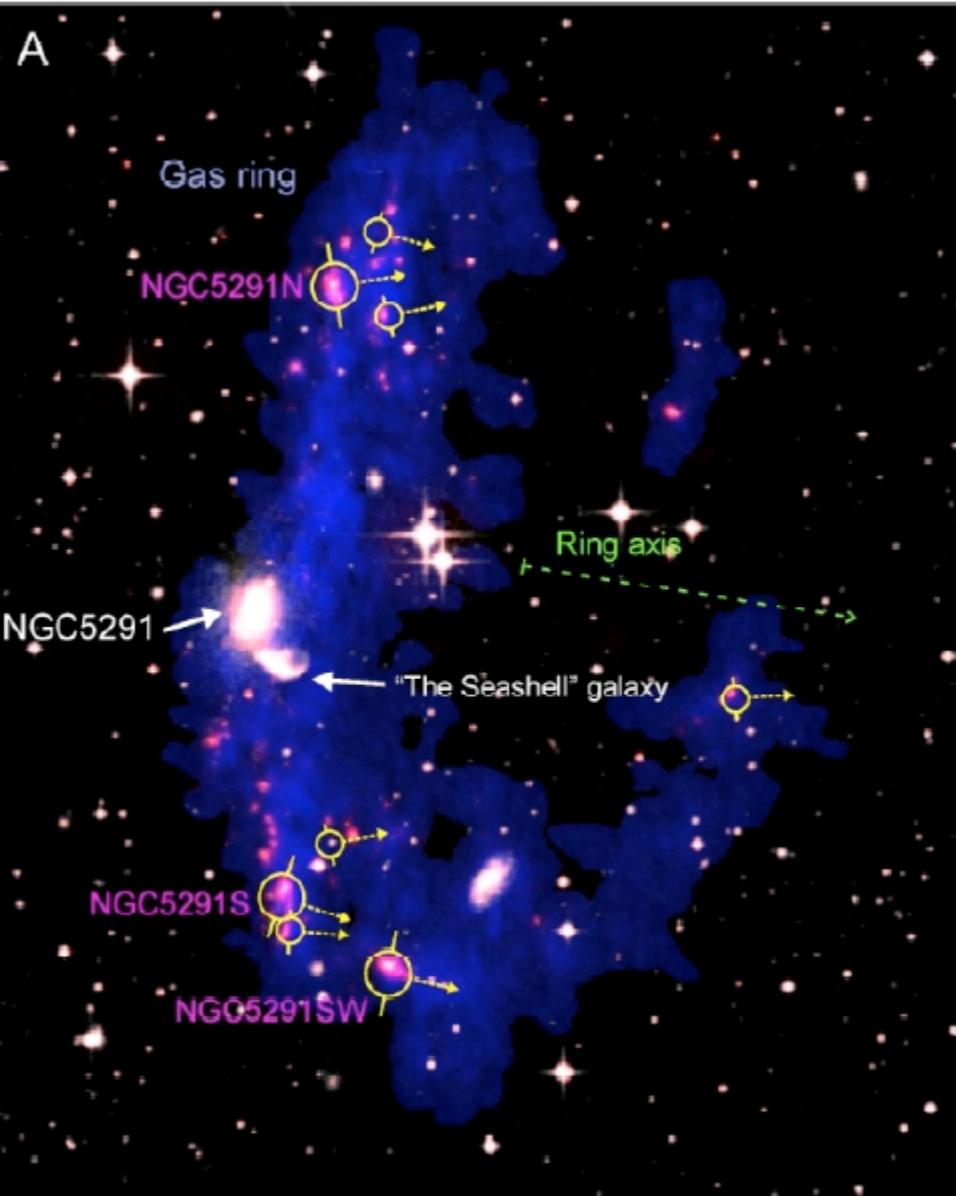
Formation de naines de marées

Formation des naines de marée

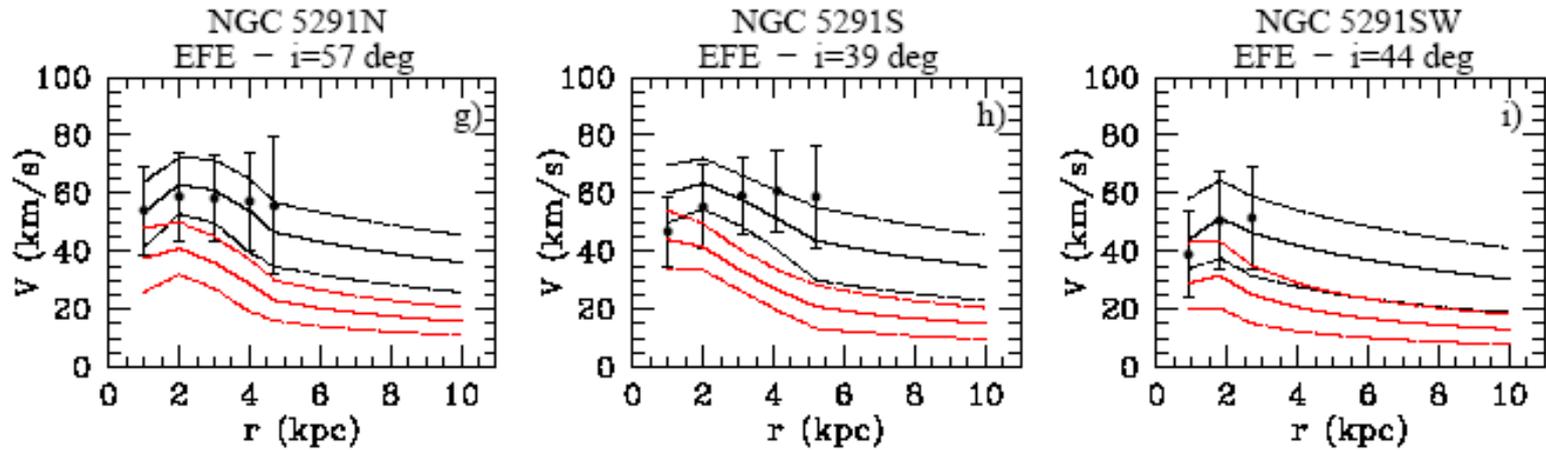
Disque plus auto-gravitant: → plus facile dans MOND
de former ces petites galaxies



Naines de marée dans N5291= anneau HI

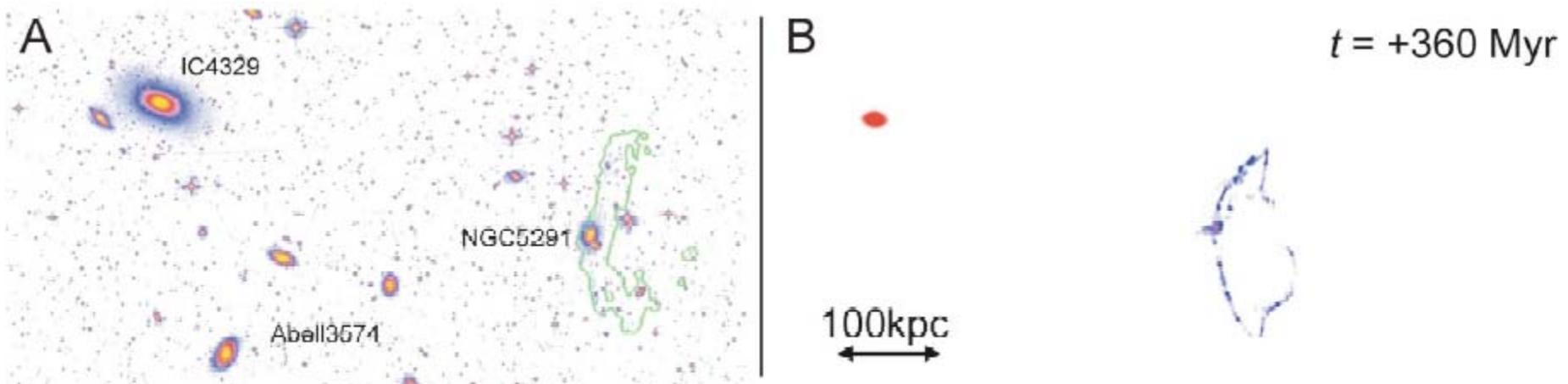


Dynamique des naines de marée



Avec MOND

Ou alors, pas de CDM \rightarrow Baryons noirs, comme le gaz H_2 ?



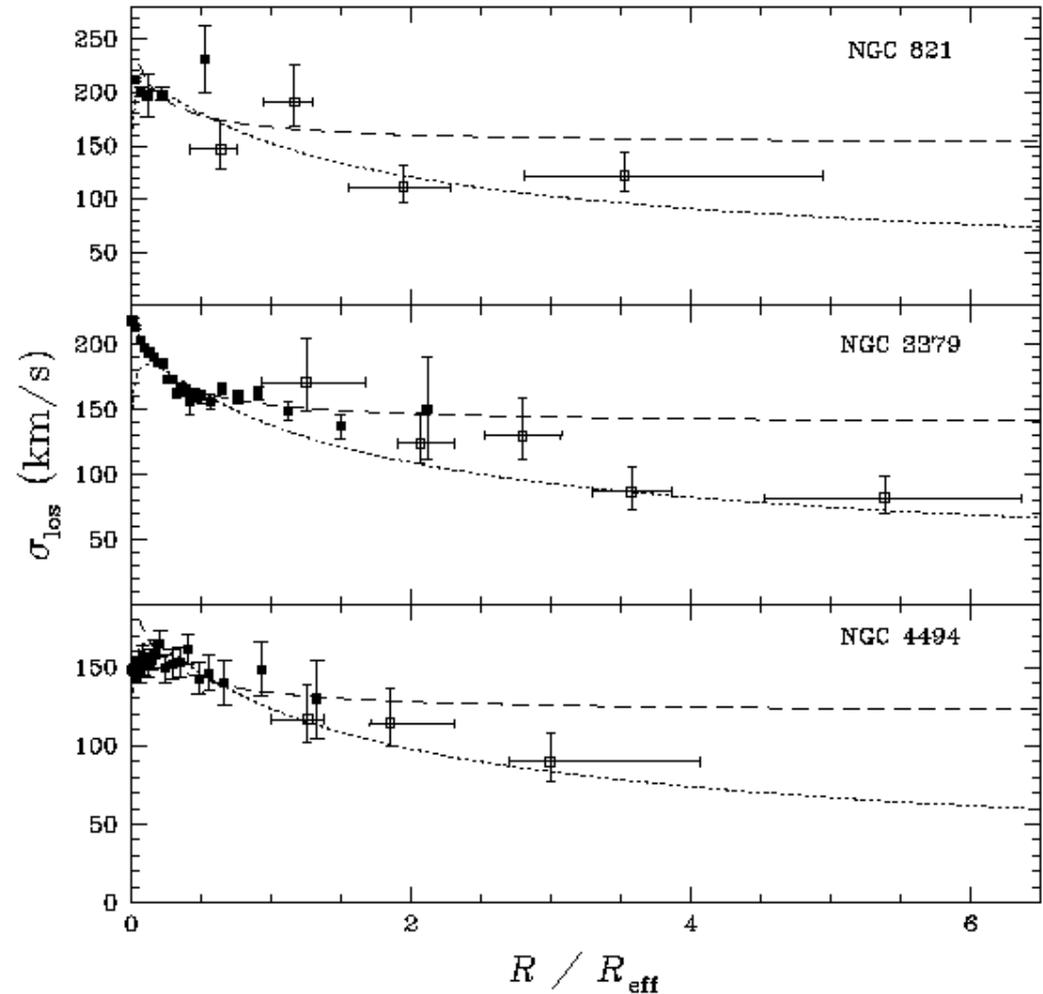
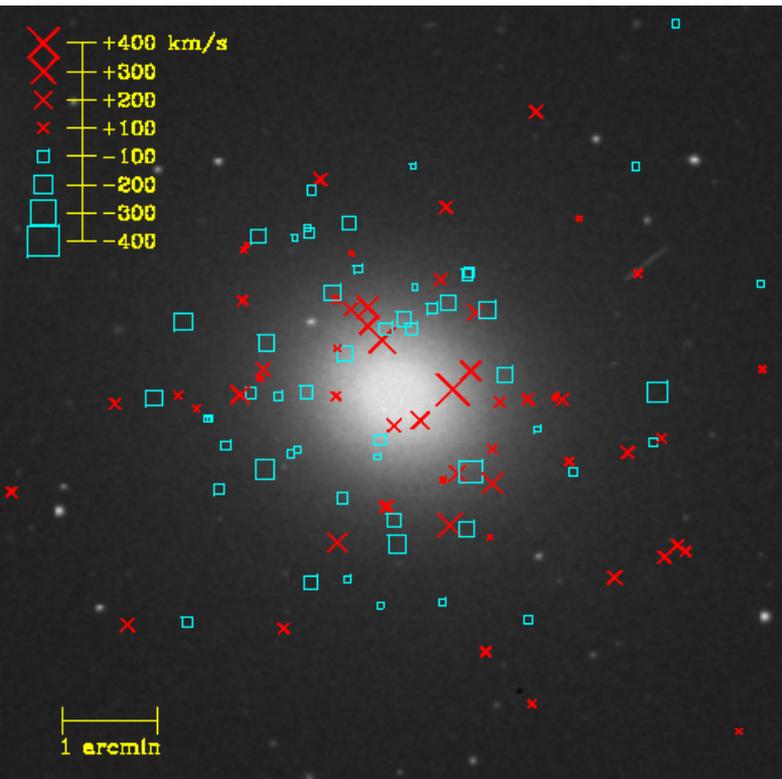
Matière noire (MN) dans les Elliptiques

Nébuleuses planétaires

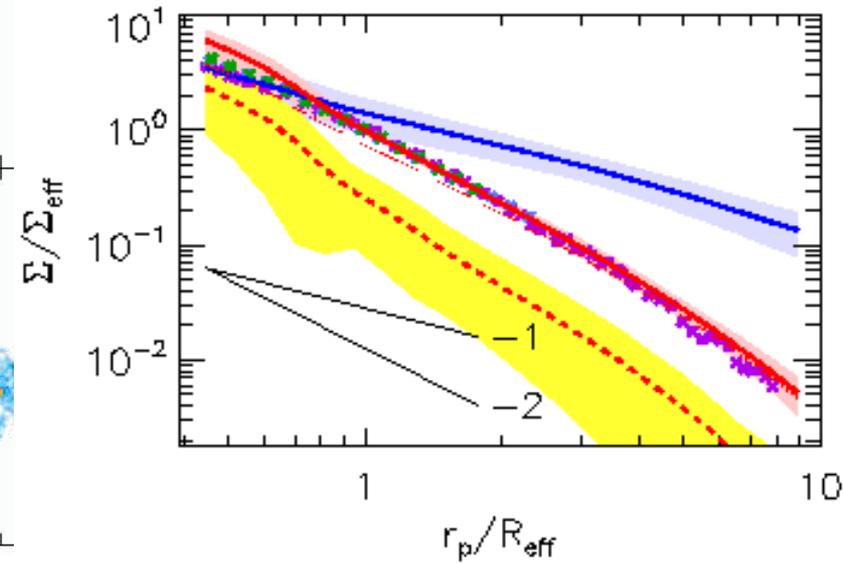
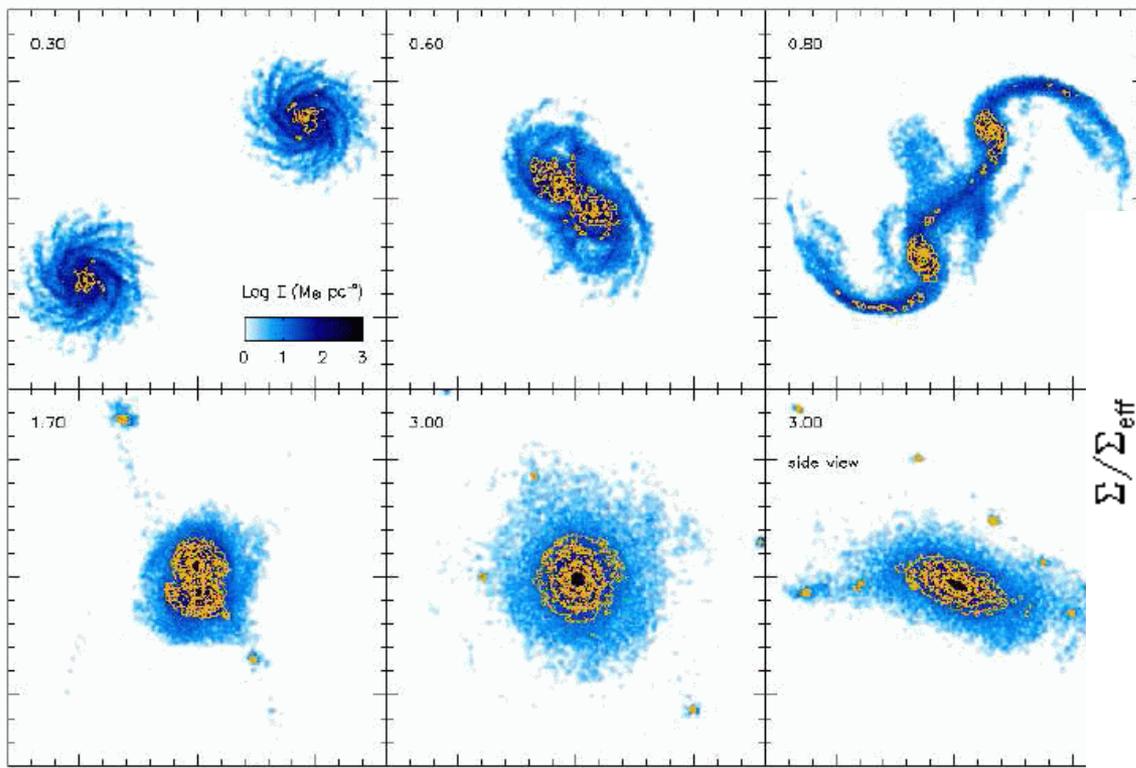
Manque de MN??

..... Matière visible (isotrope)

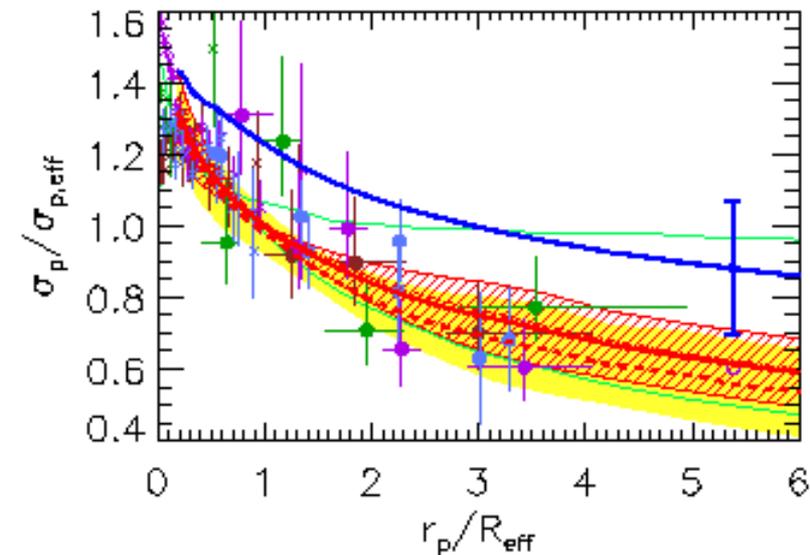
- - - isotherme (isotrope)



Etoiles jeunes en jaune



Comparaison avec les données
N821 (vert), N3379(violet)
N4494 (brun), N4697 (bleu)

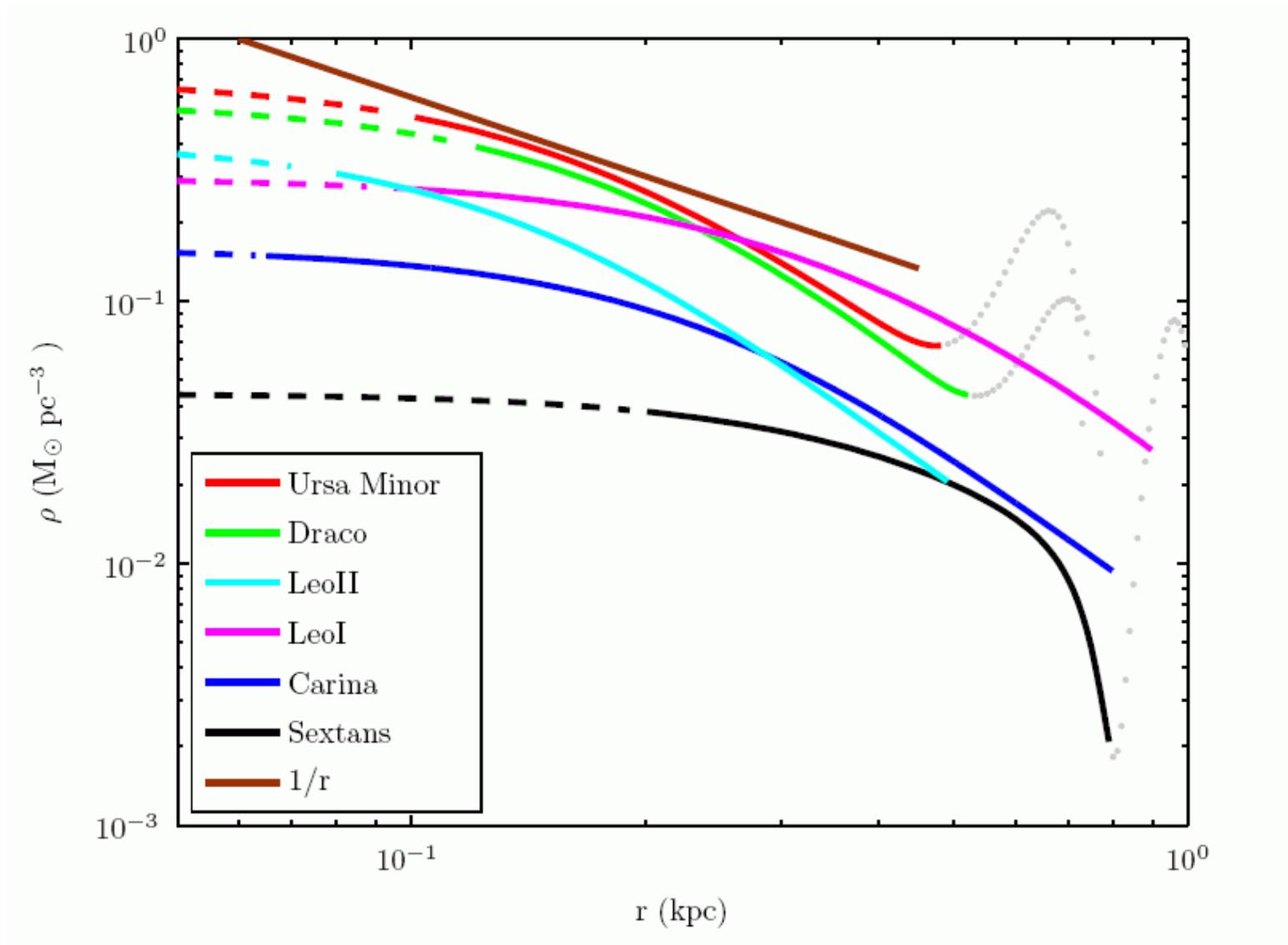


Draco
Galaxie
Naine

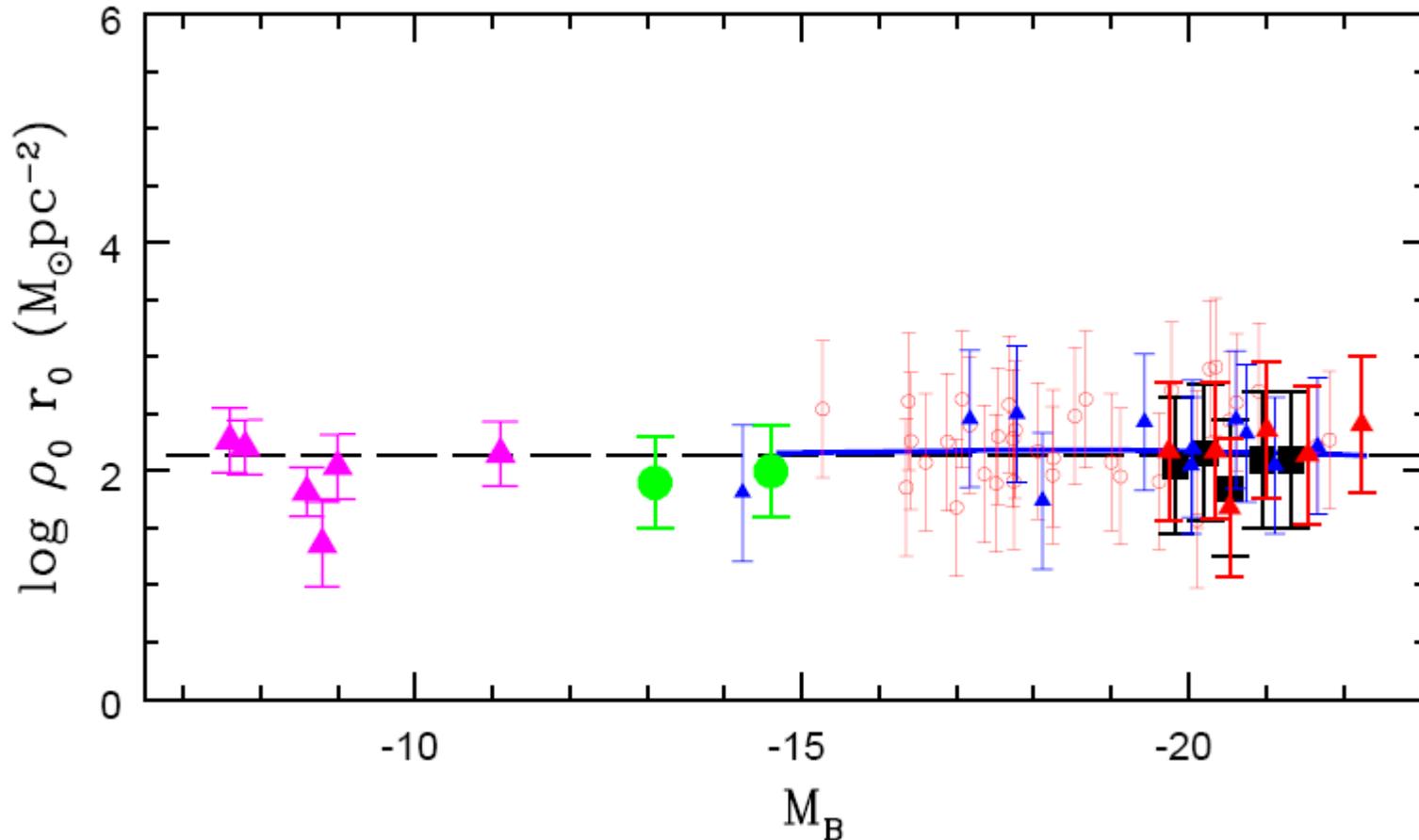
(image
SDSS)



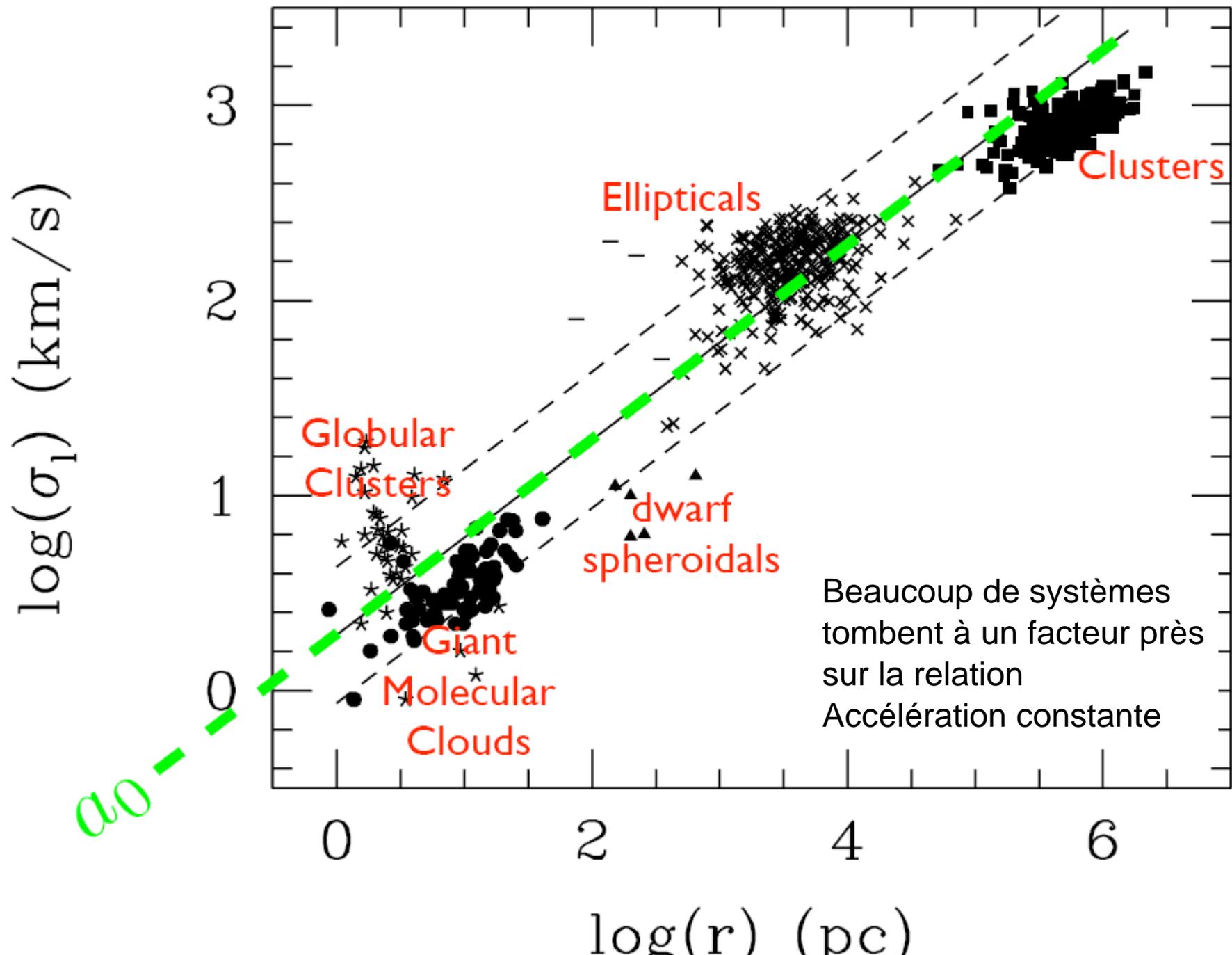
Plateaux de densité, et non cuspides



Densité de surface constante



1000 courbes de rotations, spirales, naines dSph, dlrr..



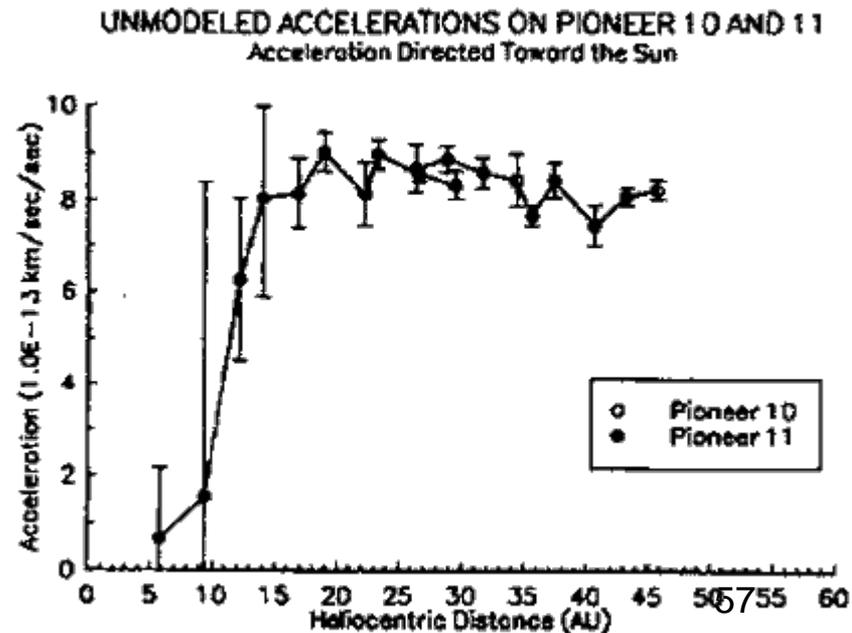
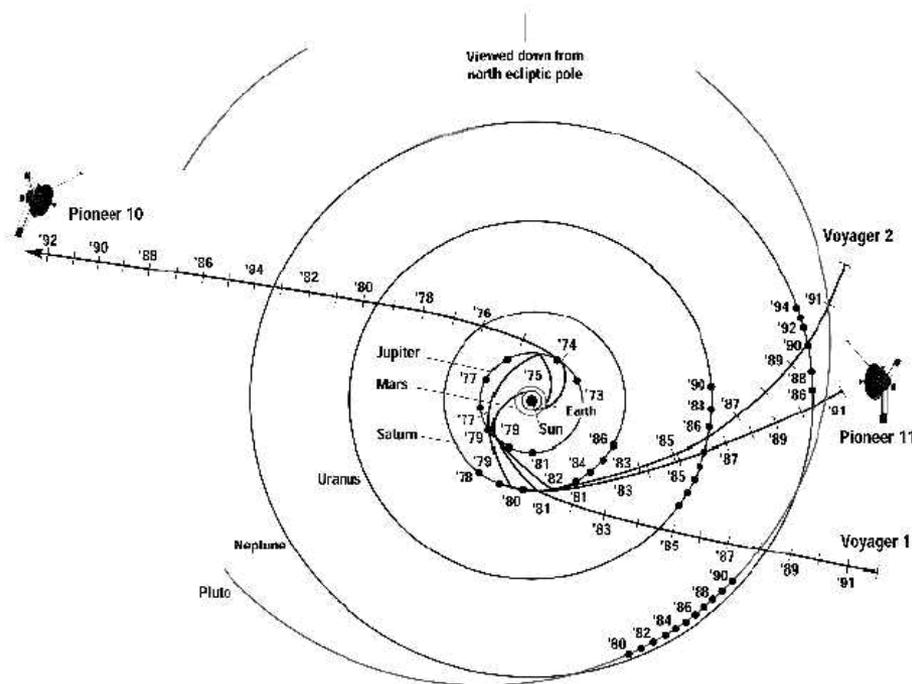
Développements théoriques pour MOND

- **Théorie covariante de Lorentz TeVeS**, qui tend vers MOND à la limite (J. Bekenstein, 2004) → permet de considérer MOND ou CMB, pour les structures à grande échelle
- Théorie qui remplace GR, et tend vers Newton, ou MOND selon la valeur de l'accélération, permet d'expliquer les lentilles gravitationnelles

Anomalie de Pioneer

Les sondes Pioneer 10 et 11, ont mesuré une accélération anormale après 10 AU dans le système solaire, du même ordre que a_0

Autres explications?

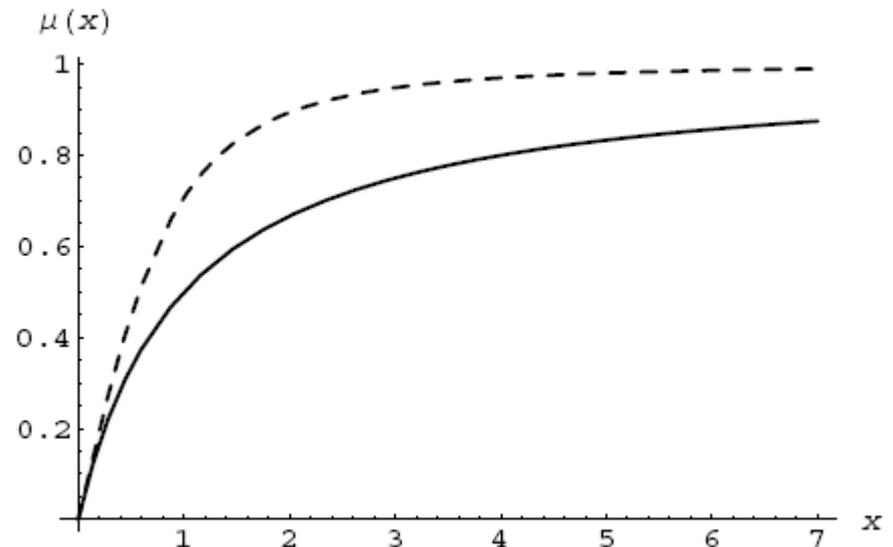


Implications de MOND

- champ scalaire = 5^{ème} force
 - Le champ permet aussi de rendre compte en une seule fois de l'énergie noire (μ -essence, Zhao 06)
 - $a_0 \sim 1 \text{ Angström/s}^2$
- $\Lambda \sim a_0^2$

Matière et énergie noire sont deux facettes du changement de la gravité aux faibles courbures

$\mu = x/(1+x)$ trait plein
 $\mu = x/(1+x^2)^{1/2}$ pointillé



Matière noire + Energie noire

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

L'expansion de l'univers s'accélère, Solutions:

- Univers dominé par un composant $w = P/\rho < -1/3$ (quintessence)
- Constante cosmologique Λ positive
- Les équations de relativité Générale sont à changer...

Parmi les modèles TeVeS, il est possible de rendre compte de matière noire et énergie noire

A suivre