

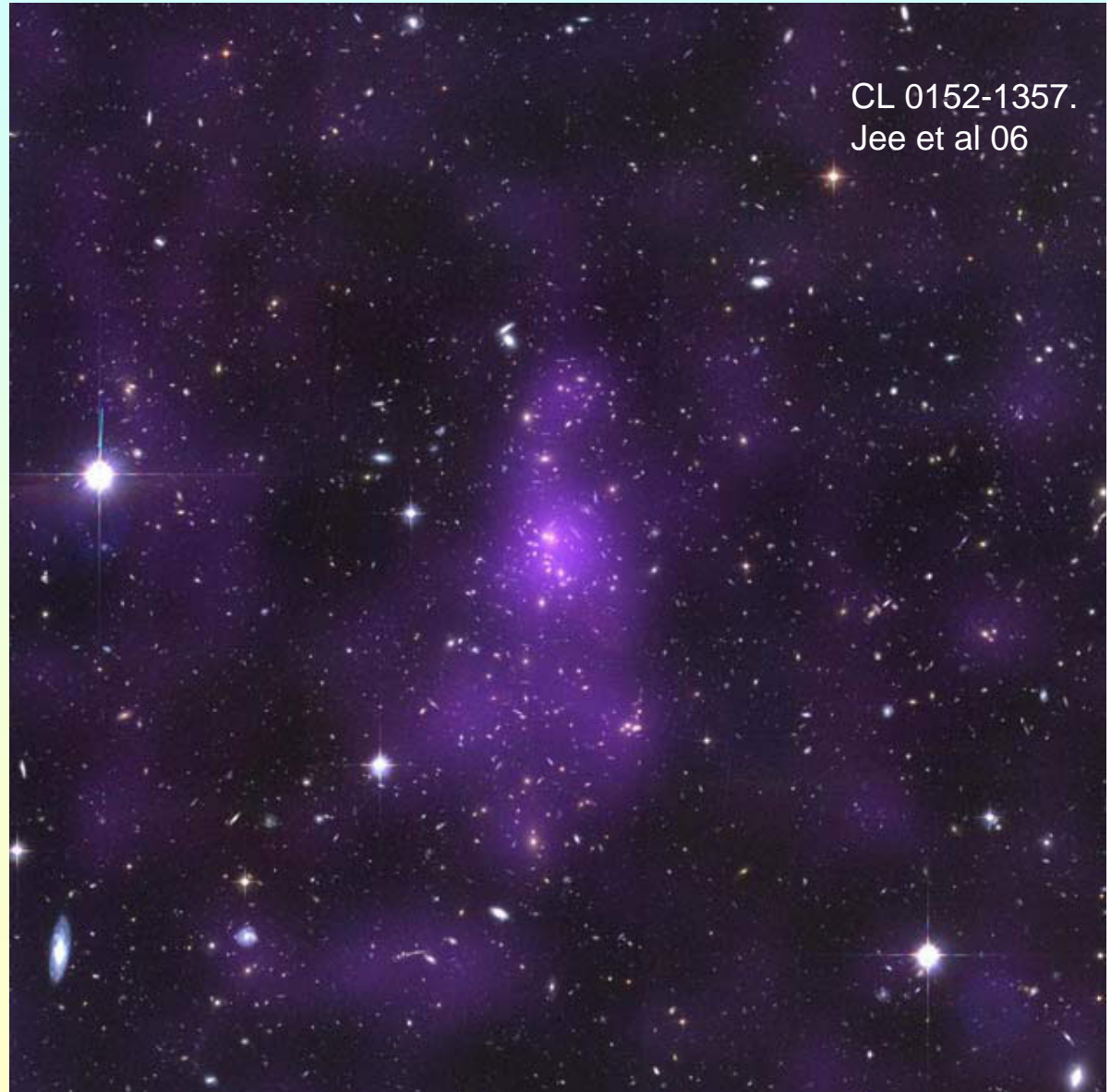
Le Défi de la Matière Noire dans l'Univers

Françoise Combes
Observatoire de Paris

Mardi 13 Février 2007



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



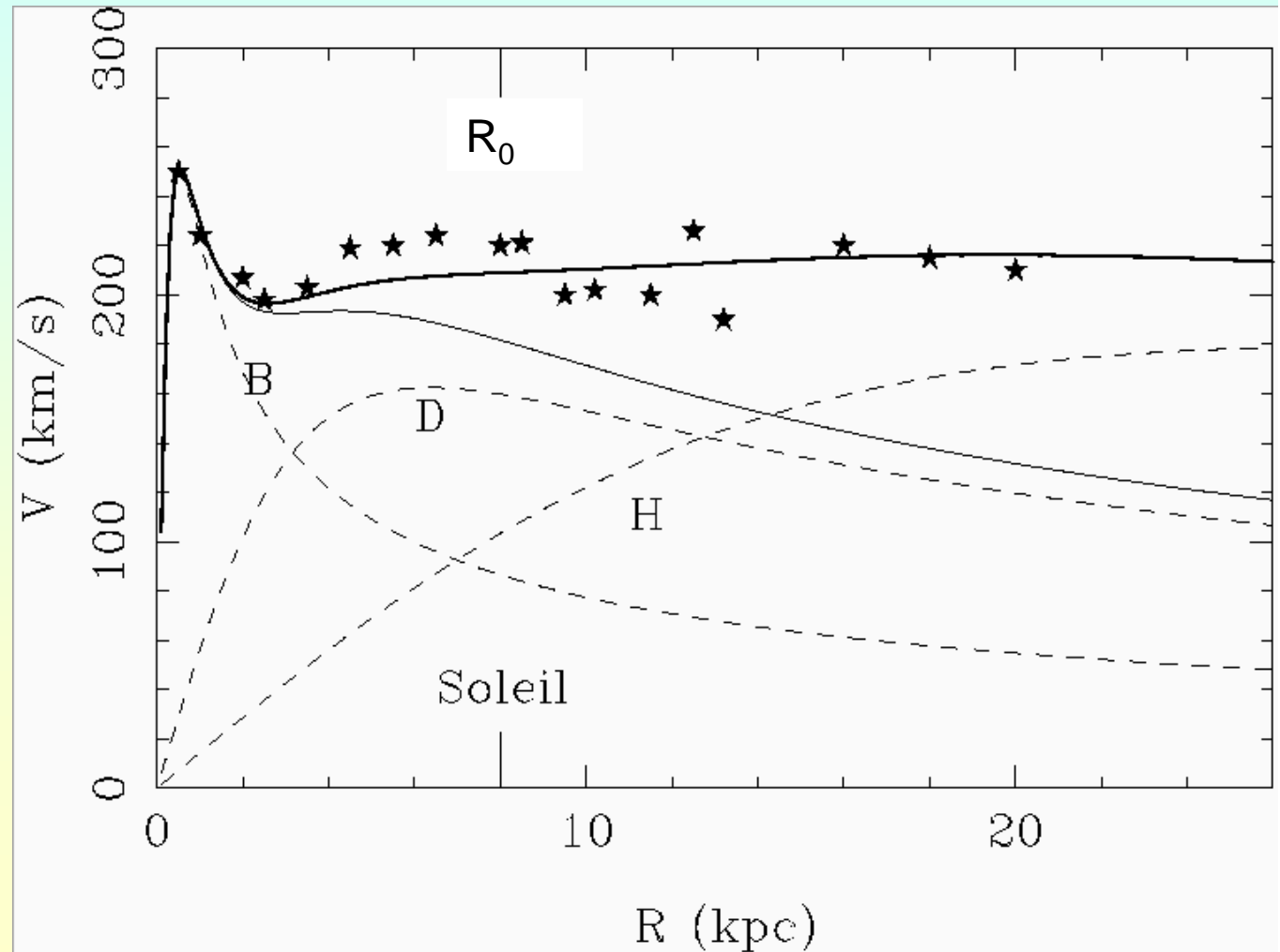
Evidences de la matière noire

→ Amas de galaxies, Masse viriel / masse visible ~ 100 (Zwicky 1937)

Amas de Coma: vitesses des galaxies entre elles

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

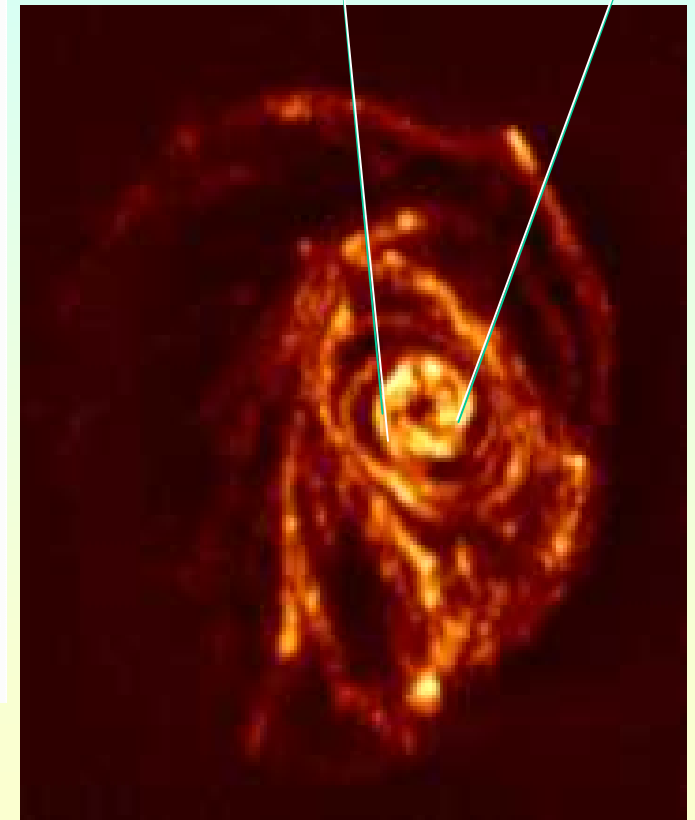
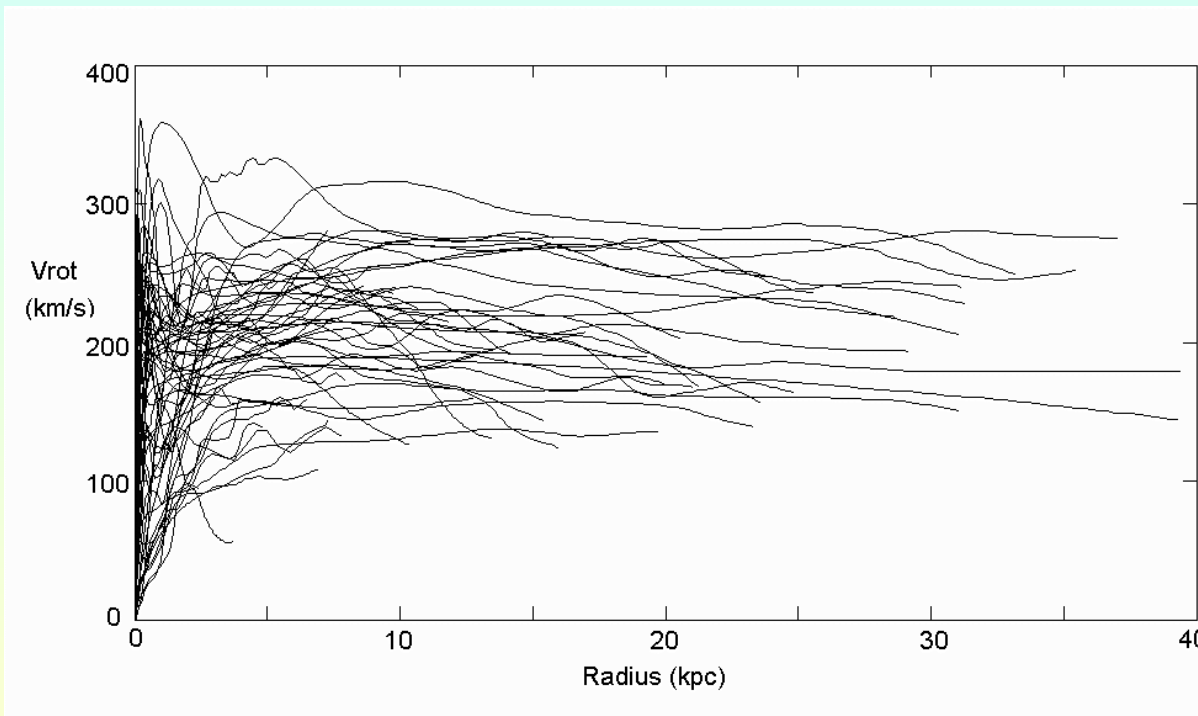
Bien au-delà de la masse visible, la vitesse reste grande, au lieu de $V^2 \sim GM/r$ (Képler)



Galaxies avec HI

M83: optique

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



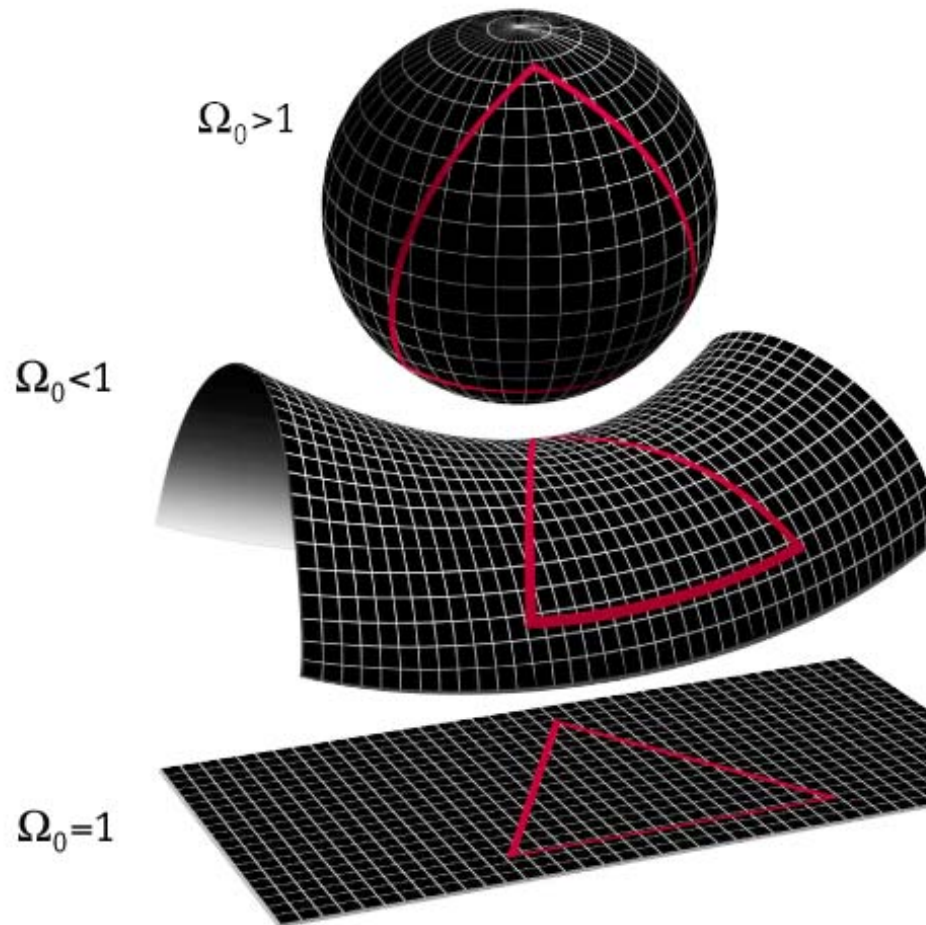
HI dans M83: une galaxie semblable à la Voie Lactée³

Densité de l'Univers

Années 1980'

$\Omega \sim 0.1$ pas loin de Ω_b

Requis par la nucléosynthèse
primordiale (D, Li, He)

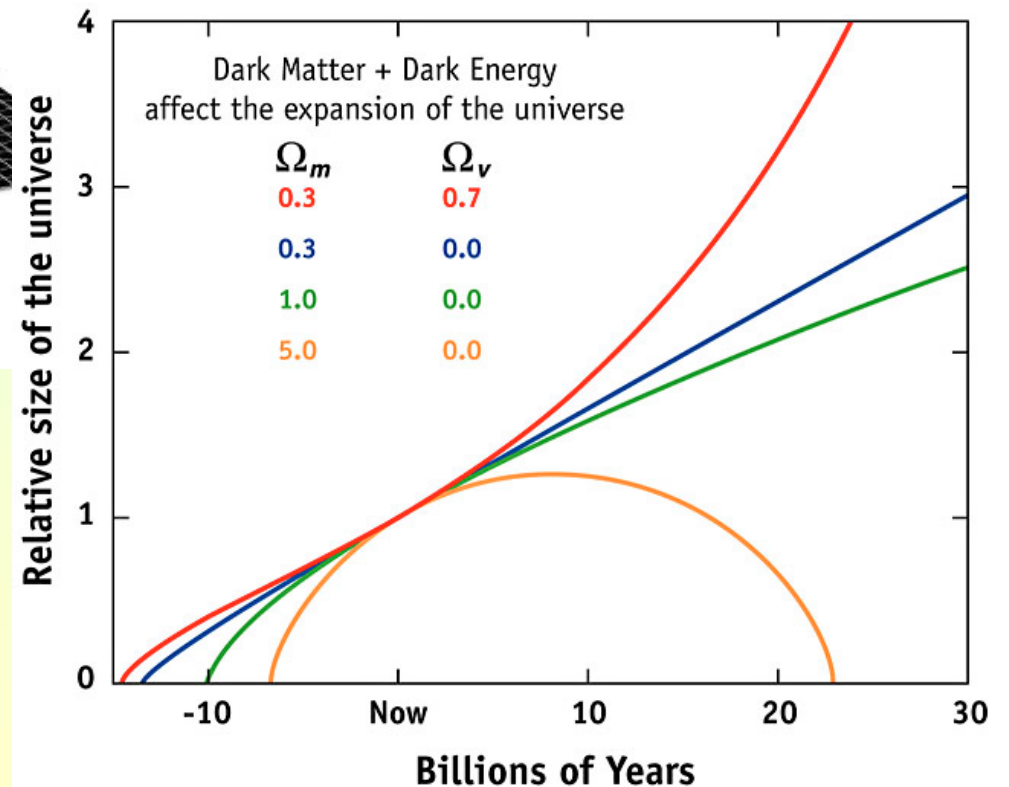


MAP990006

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

$$\rho_{\text{crit}} = 10^{-29} \text{g/cm}^3$$

EXPANSION OF THE UNIVERSE



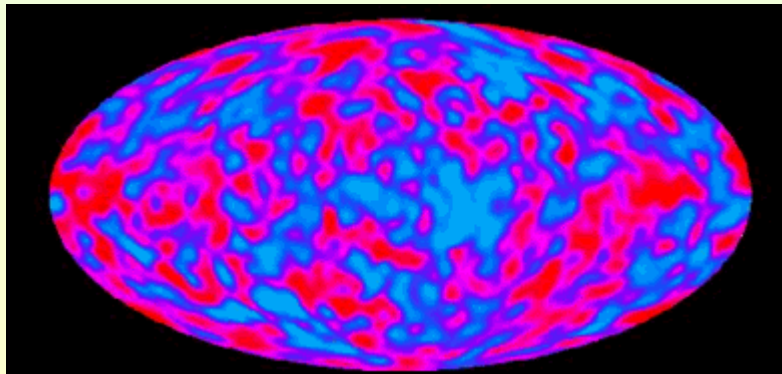
Détection d'anisotropies dans le fond cosmique

Dans les années 1990'

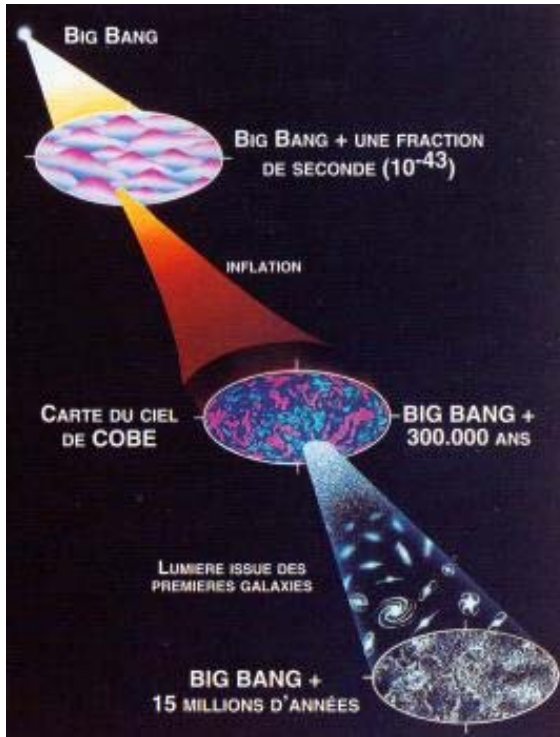
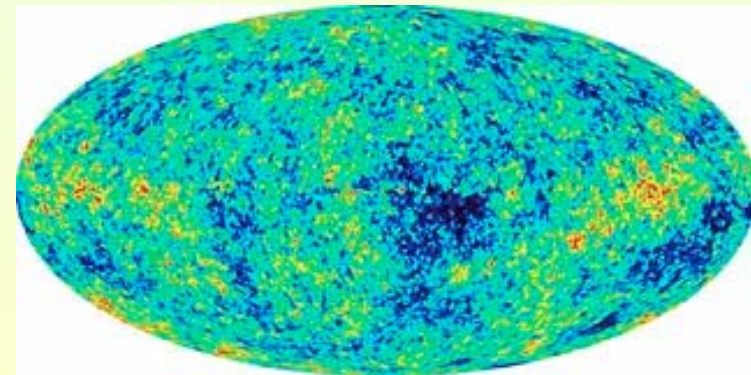
COBE: les irrégularités de température du fond de rayonnement sont très petites

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

COBE



WMAP



Formation des galaxies

→ instabilité gravitationnelle

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

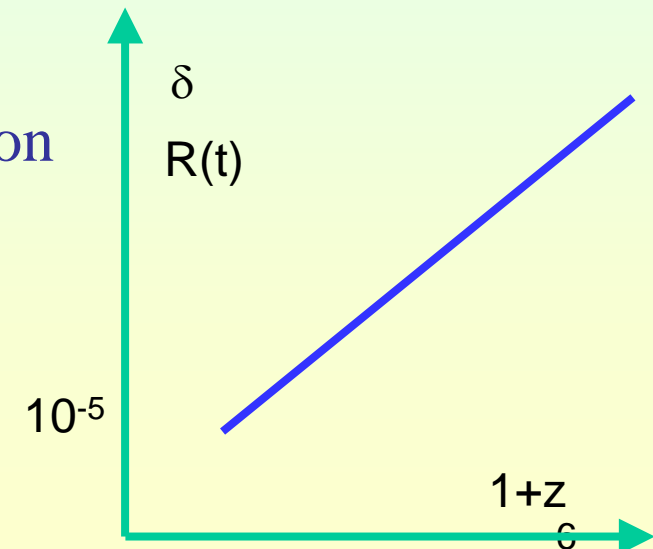
Fluctuations de densité au départ

$\delta\rho / \rho \ll 1$ définition $\delta\rho / \rho = \delta$

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

z décalage vers le rouge

$(1+z) \sim$ longueur d'onde des photons

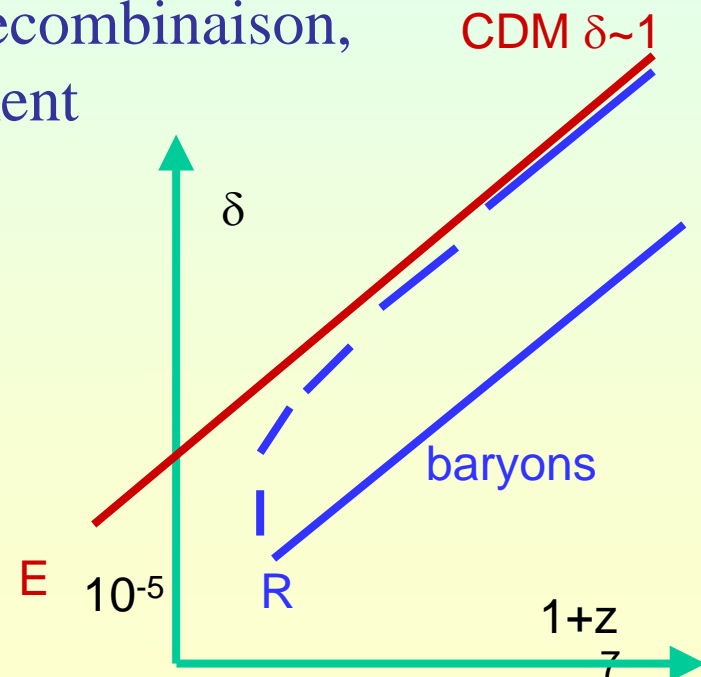


Pour les baryons, qui ne peuvent se développer qu'après la **recombinaison à $z \sim 1000$** $T \sim 2.76 (1+z) \text{ K}$

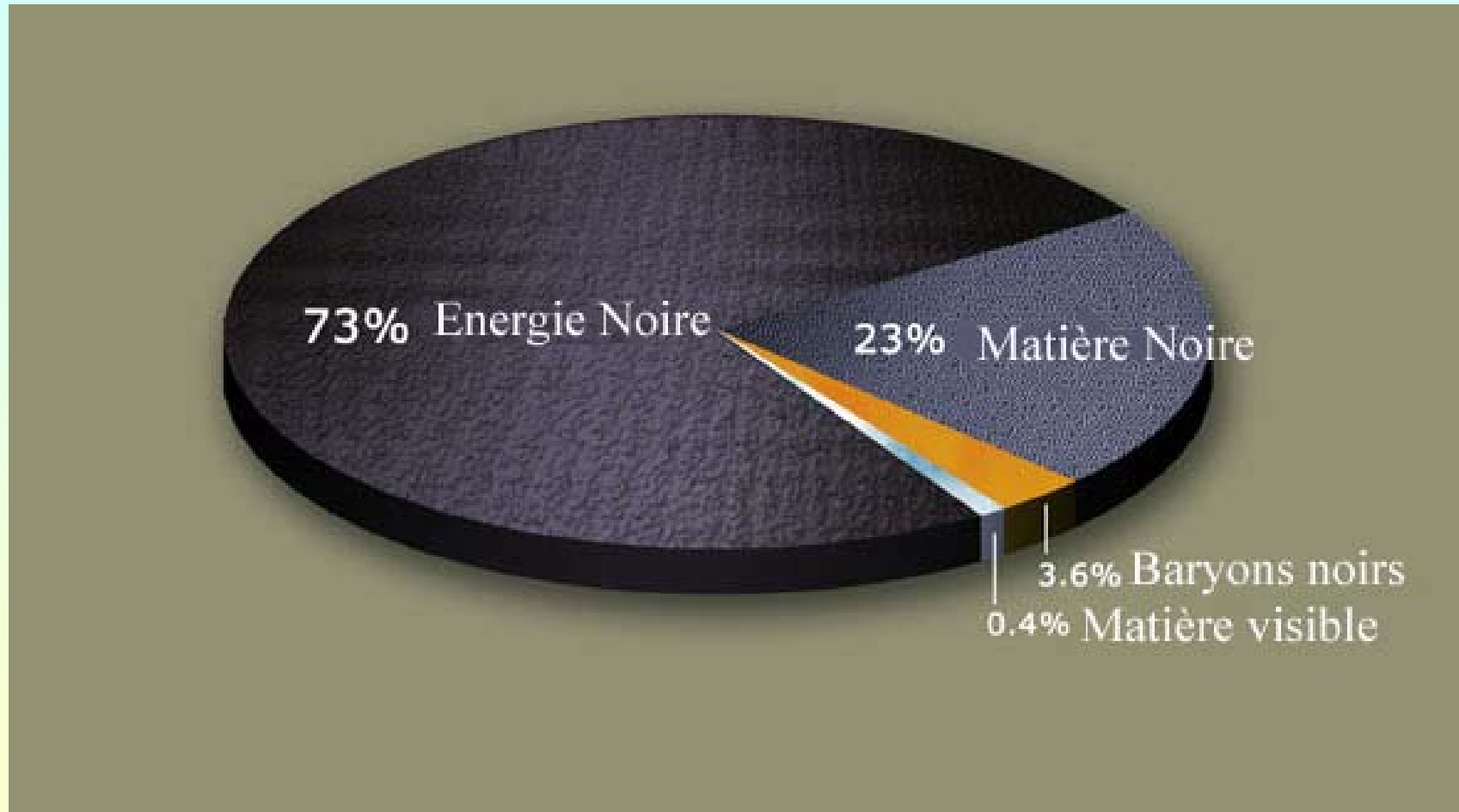
le facteur de croissance ne serait que de 10^3 ,
→ **insuffisant**, si les fluctuations à cette époque sont de 10^{-5}

Seule la **matière noire non-baryonique** (pas d'interaction avec les photons, seulement par la gravité) peut commencer de se développer avant la recombinaison, juste après **l'équivalence** matière-rayonnement

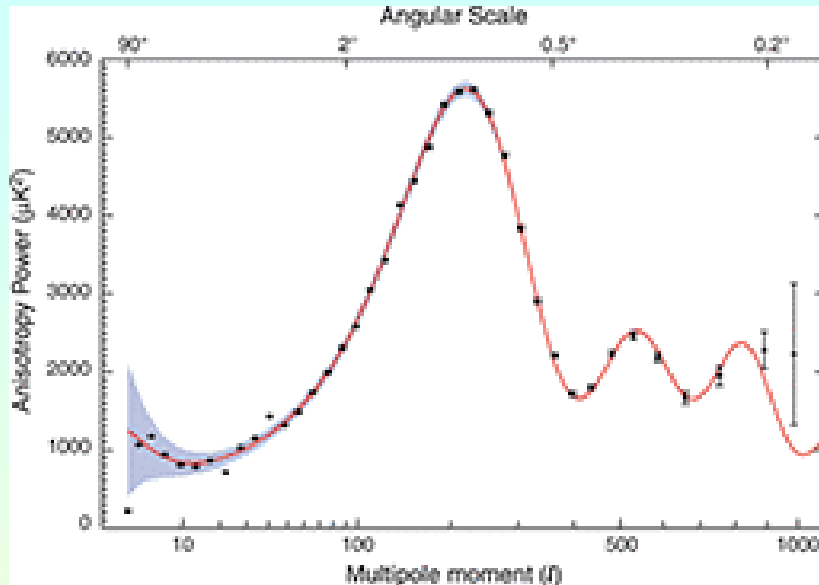
$$\rho \sim R^{-3} \text{ matière}$$
$$\rho \sim R^{-4} \text{ photons}$$



Contenu de l'Univers



Oscillations du plasma photons/baryons

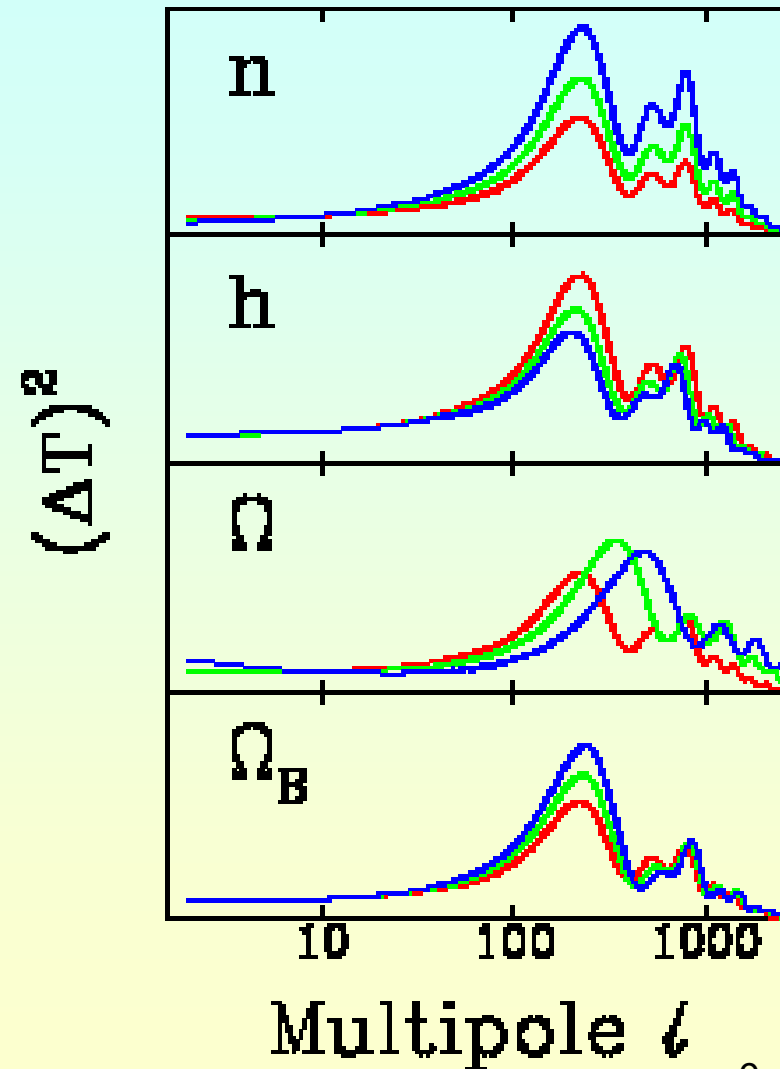


Position du premier pic: $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$

Amplitude 2^{ème} pic $\rightarrow \Omega_b$

$H_0 = 72 + 8 \text{ km/s/Mpc}$

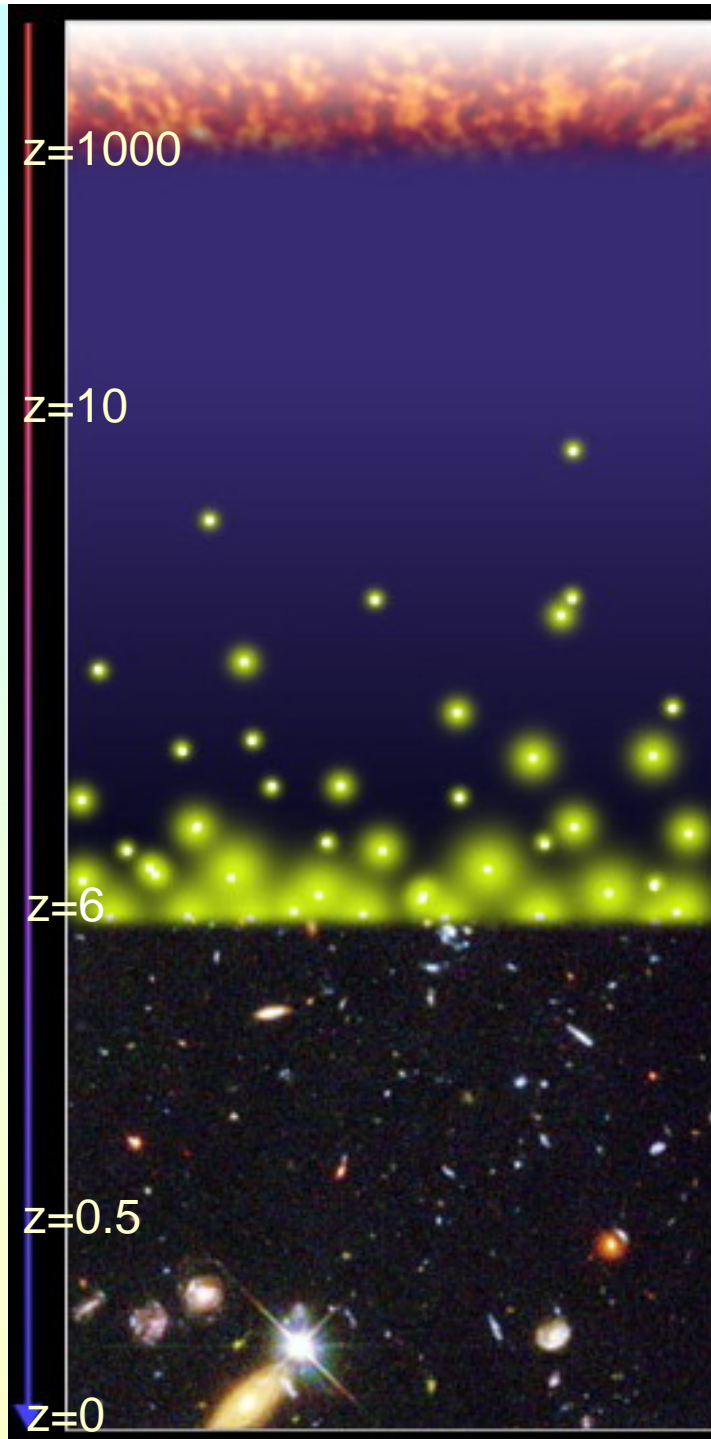
Age de l'univers = $14 \cdot 10^9 \text{ ans}$



Depuis le Big-Bang

Observer loin, à grand décalage vers le rouge (grand redshift z) revient à **remonter le temps**

Aujourd'hui, nous pouvons observer jusqu'à **95% de l'âge** de l'Univers, remonter jusqu'à notre horizon



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

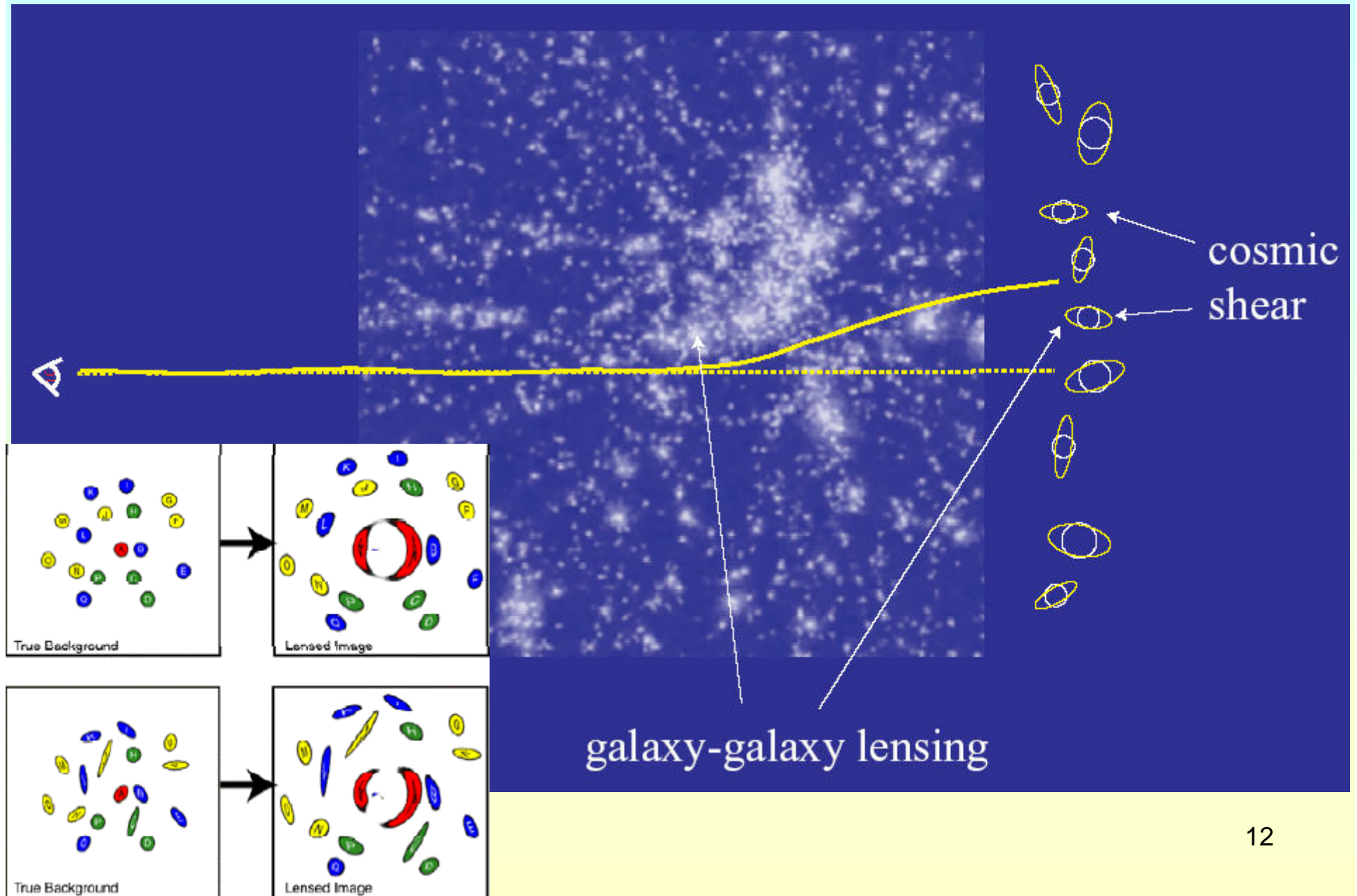
10

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

Lentilles gravitationnelles: régime fort



Lentilles gravitationnelles: régime faible

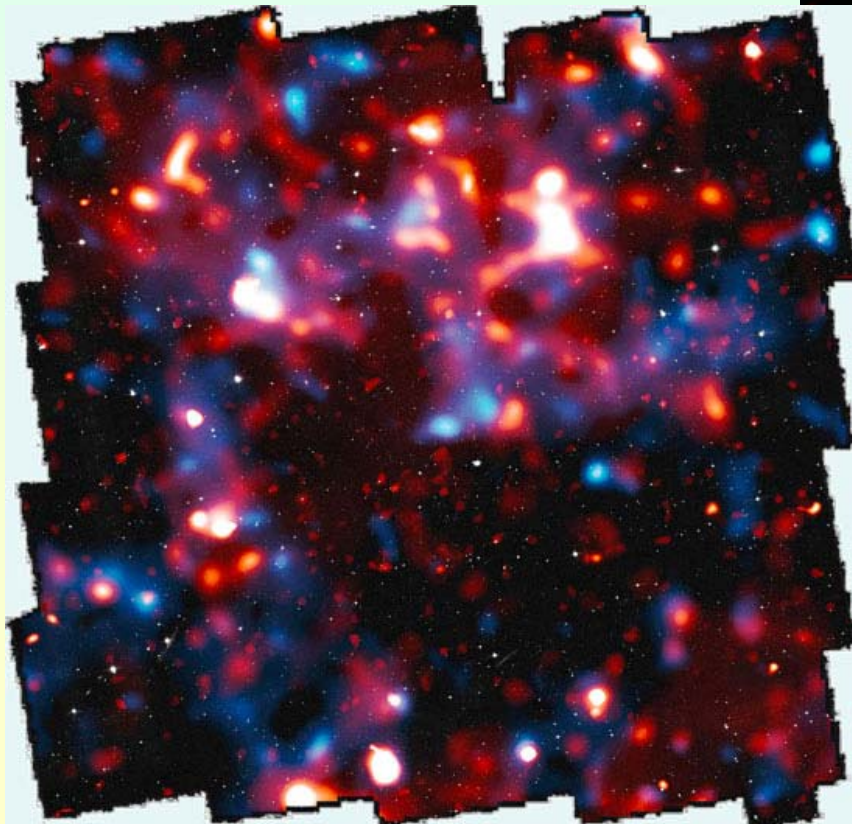
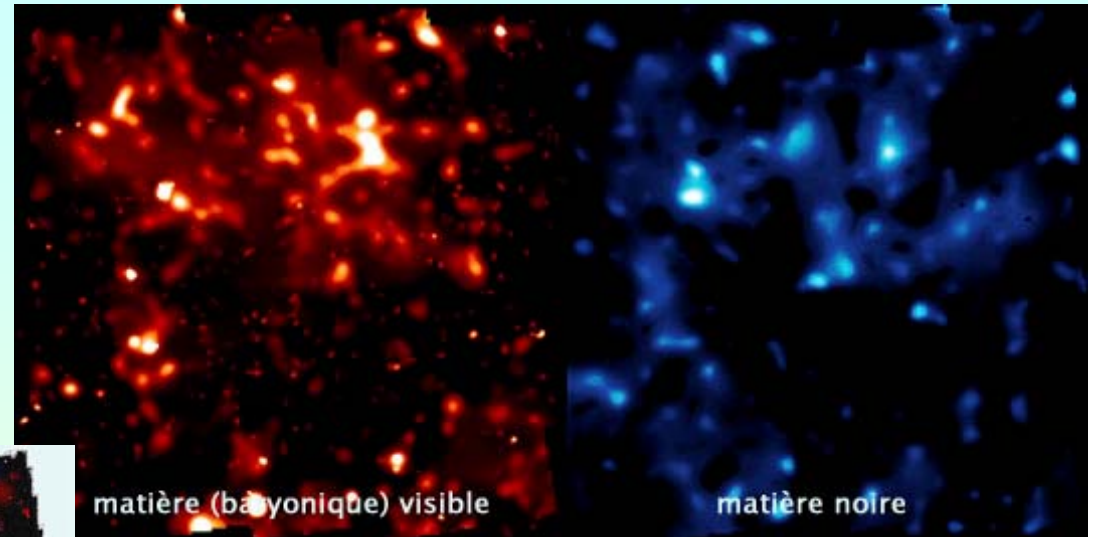


Cisaillement gravitationnel

Rouge: gaz X

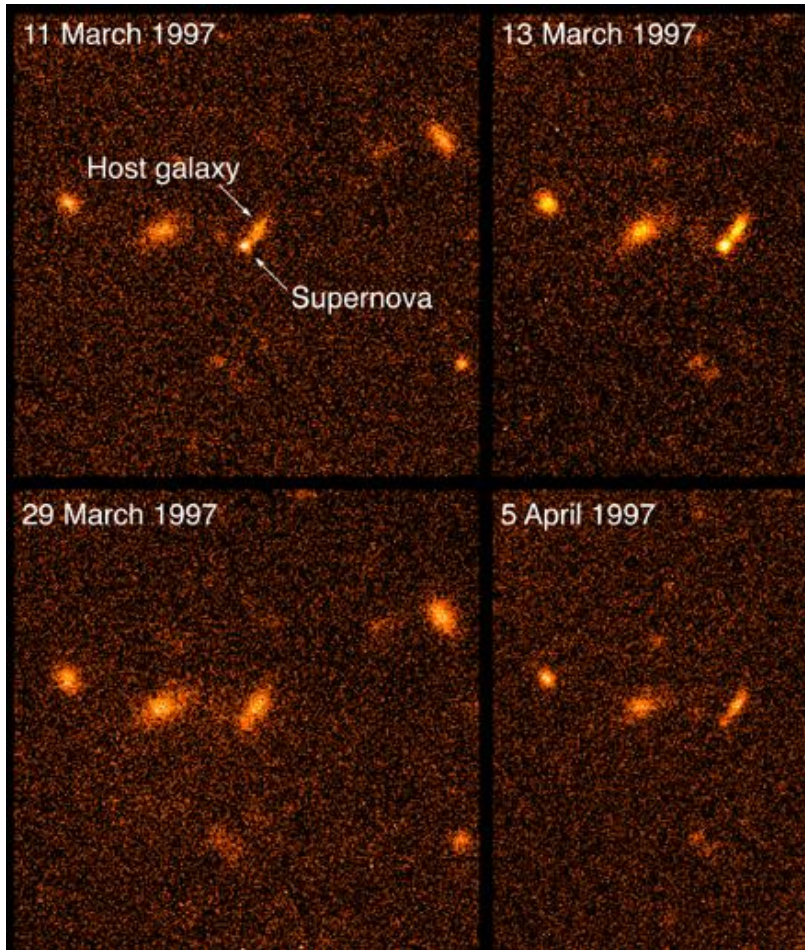
Bleu: matière totale

Champ Cosmos

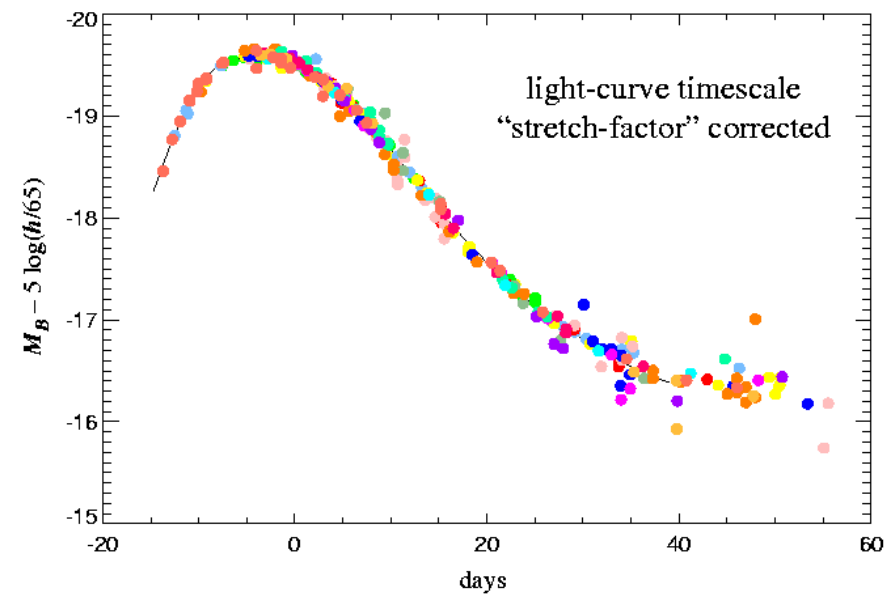
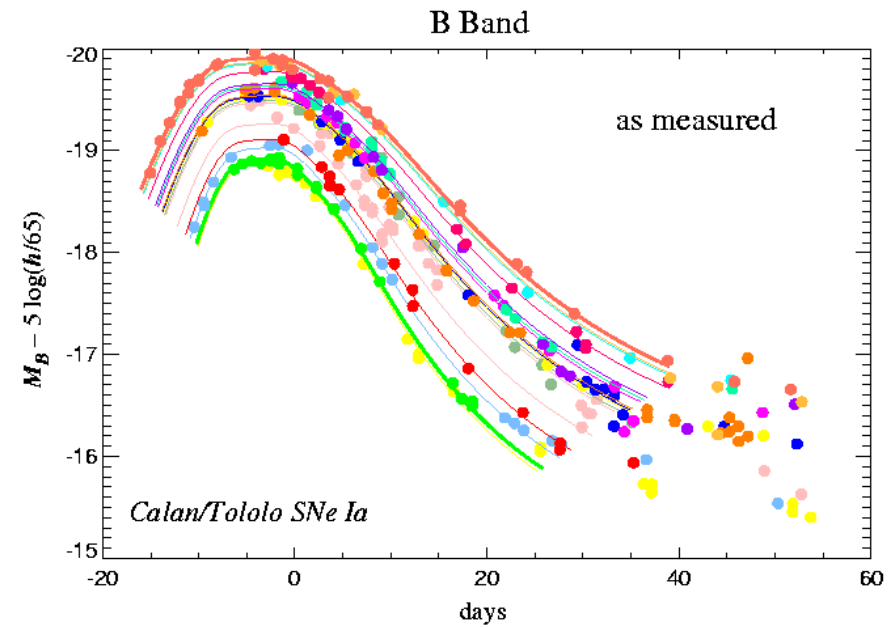


**Contraintes sur la
Matière noire, et aussi
Énergie noire**

Massey et al 2007

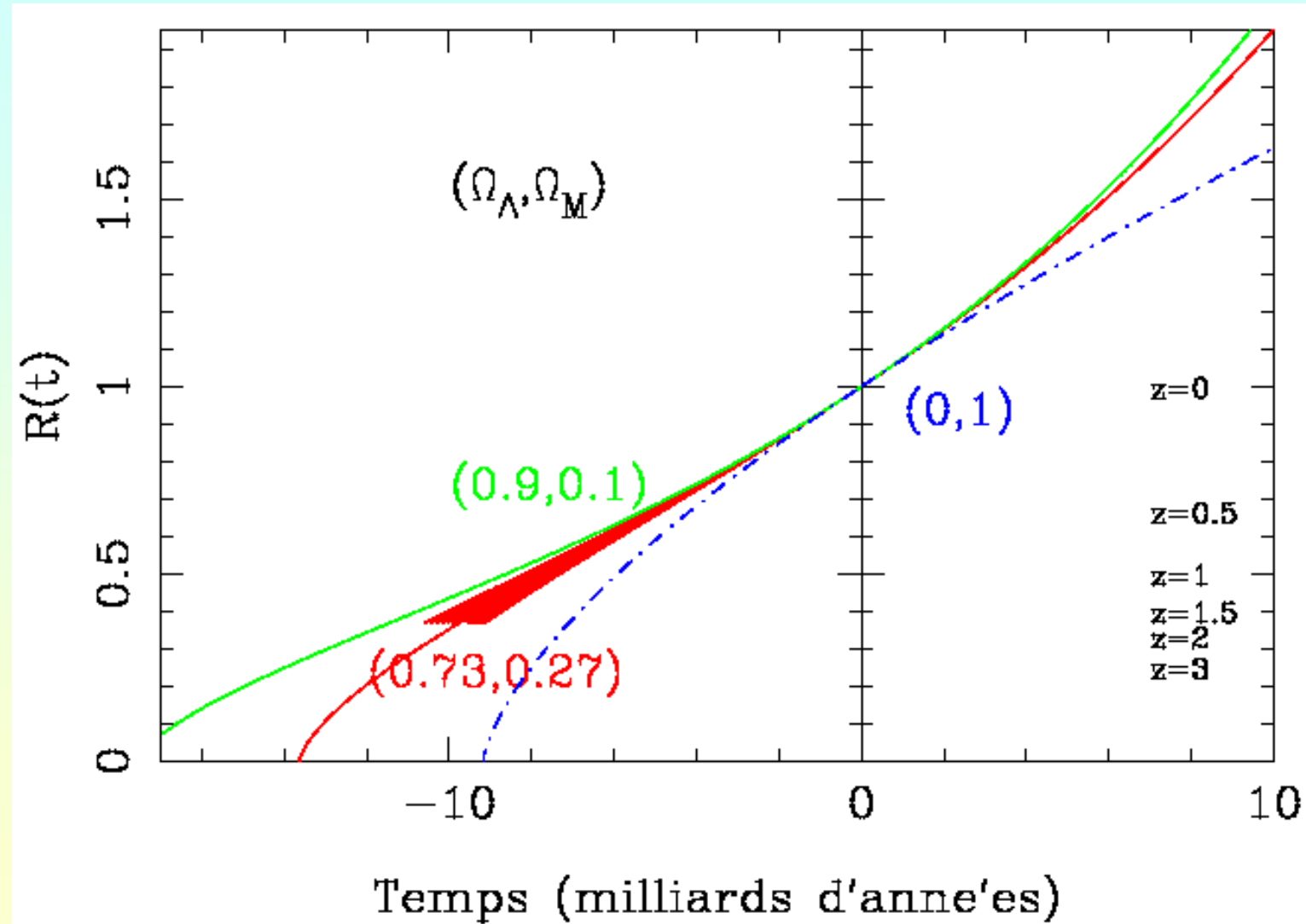


SNe Ia
chandelles
standard

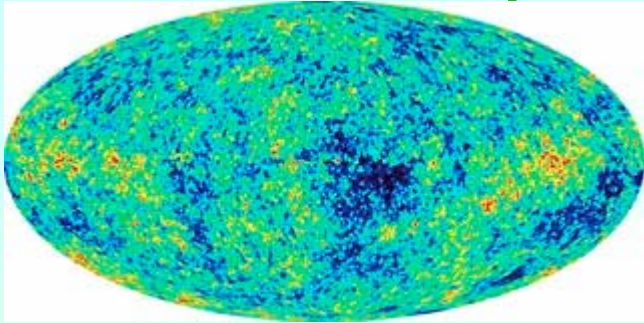


Kim, *et al.* (1997)

Supernovae à grand redshift



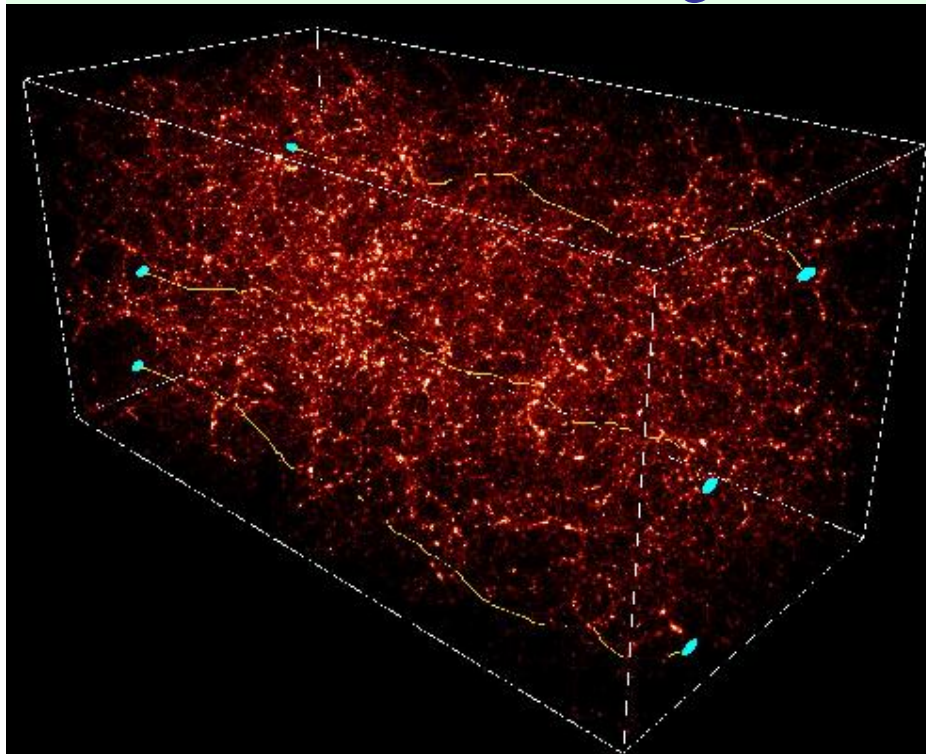
Les paramètres de l'Univers



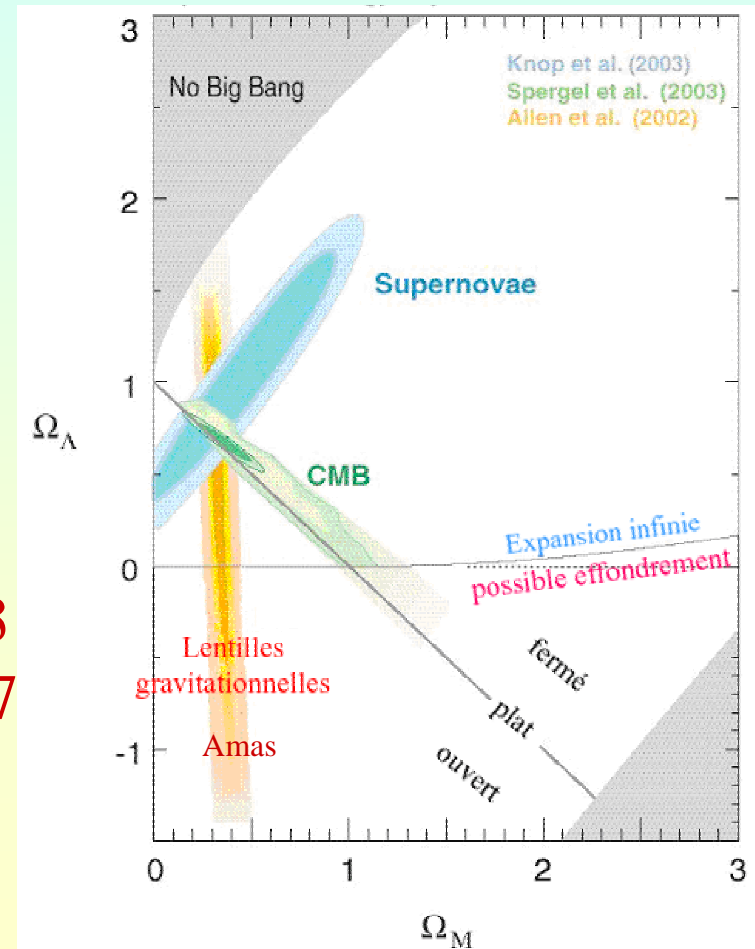
Anisotropies du fonds cosmique (WMAP)
→ Univers plat

Observations des SN Ia

Amas, Lentilles gravitationnelles



$$\begin{aligned}\Omega_{\Lambda} &= 0.73 \\ \Omega_{\text{M}} &= 0.27 \\ \Omega_{\text{b}} &= 0.05\end{aligned}$$

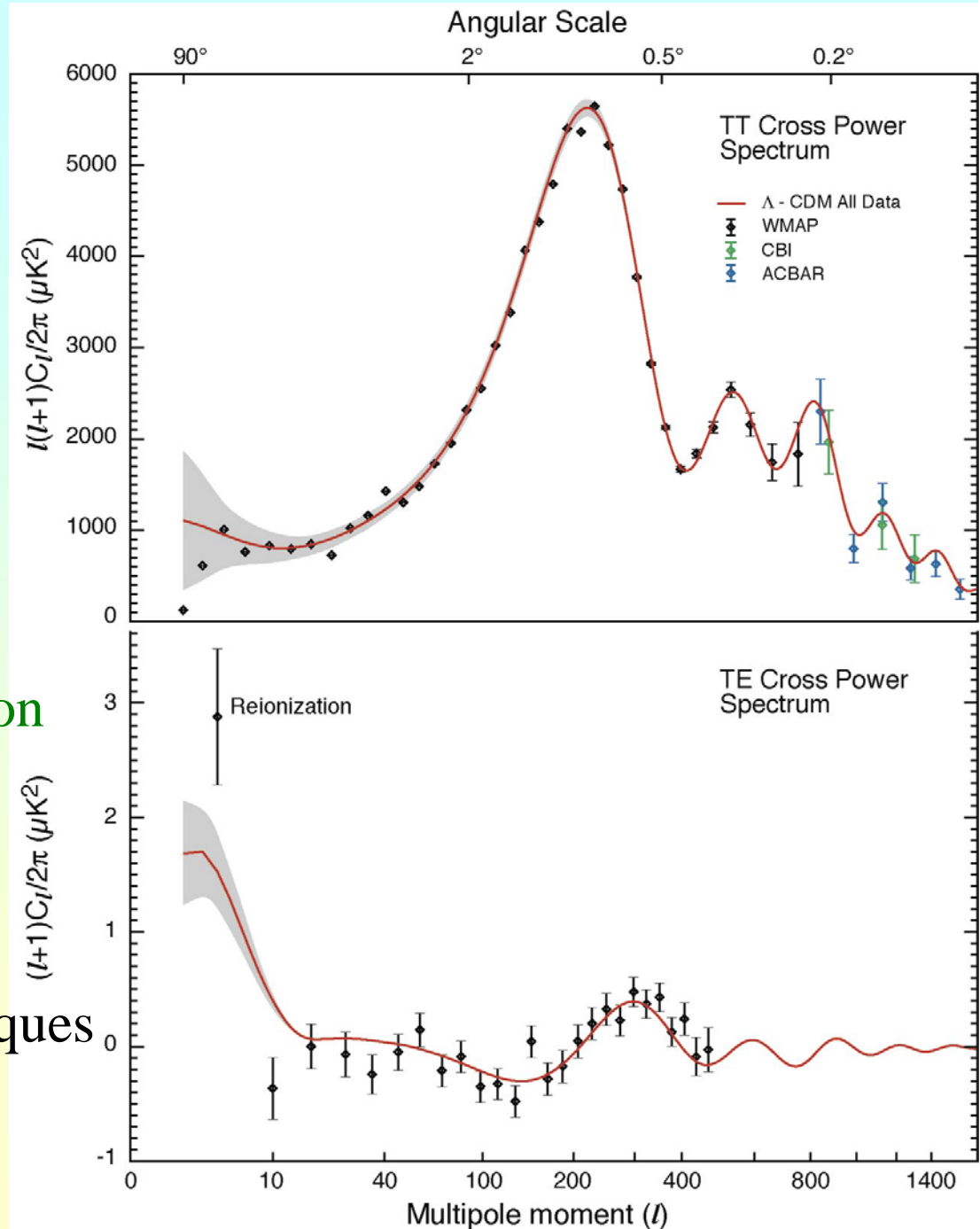


Pics acoustiques WMAP3

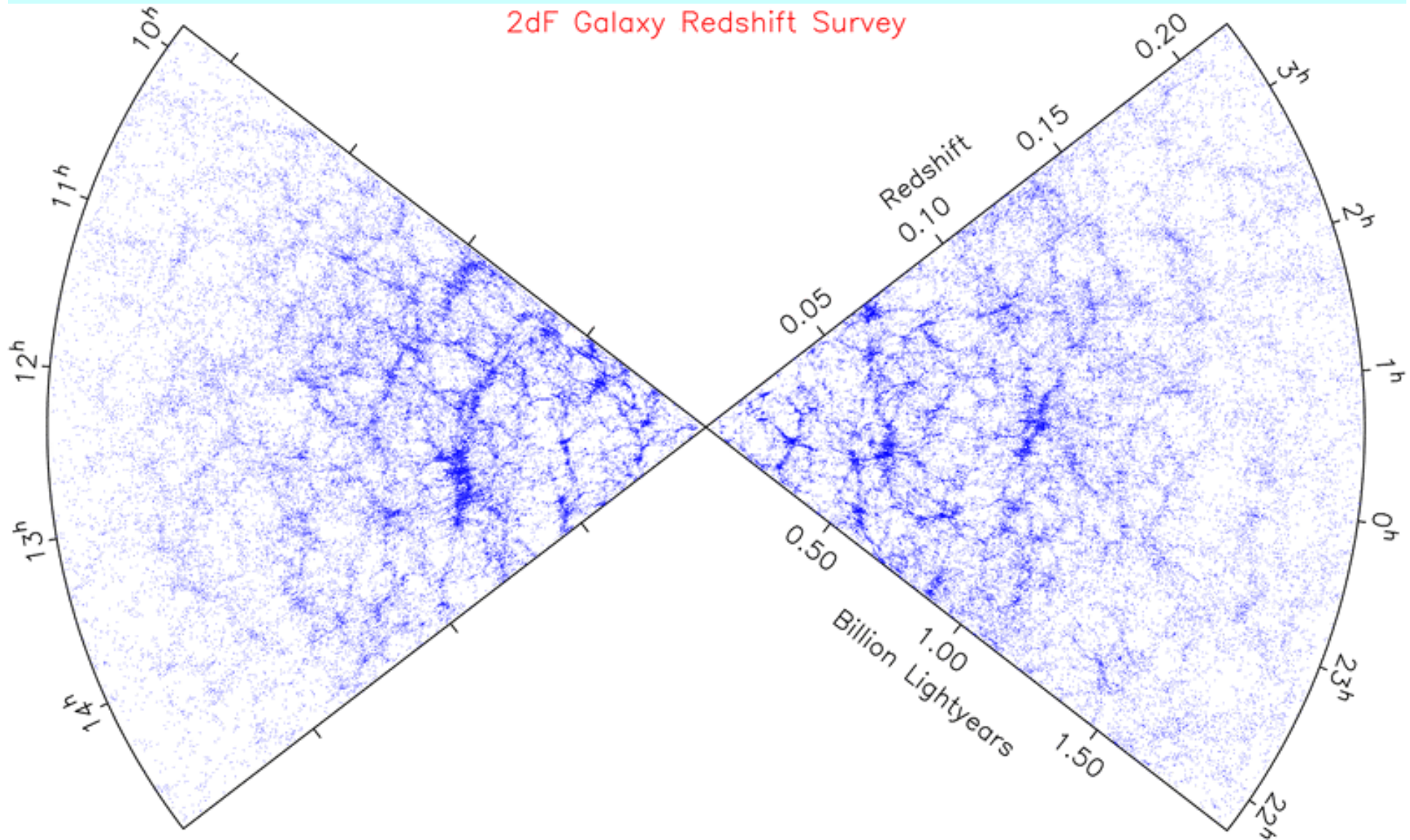
Réionisation (τ_{es})
commence plus tard
 $z=17$ WMAP1
→ $z=11$ WMAP3

<TE> Température-polarisation
Spectre de puissance

Anticorrélation $50 < l < 150$
→ Élimine les défauts topologiques
Confortent les fluctuations
adiabatiques



2dF Galaxy Redshift Survey



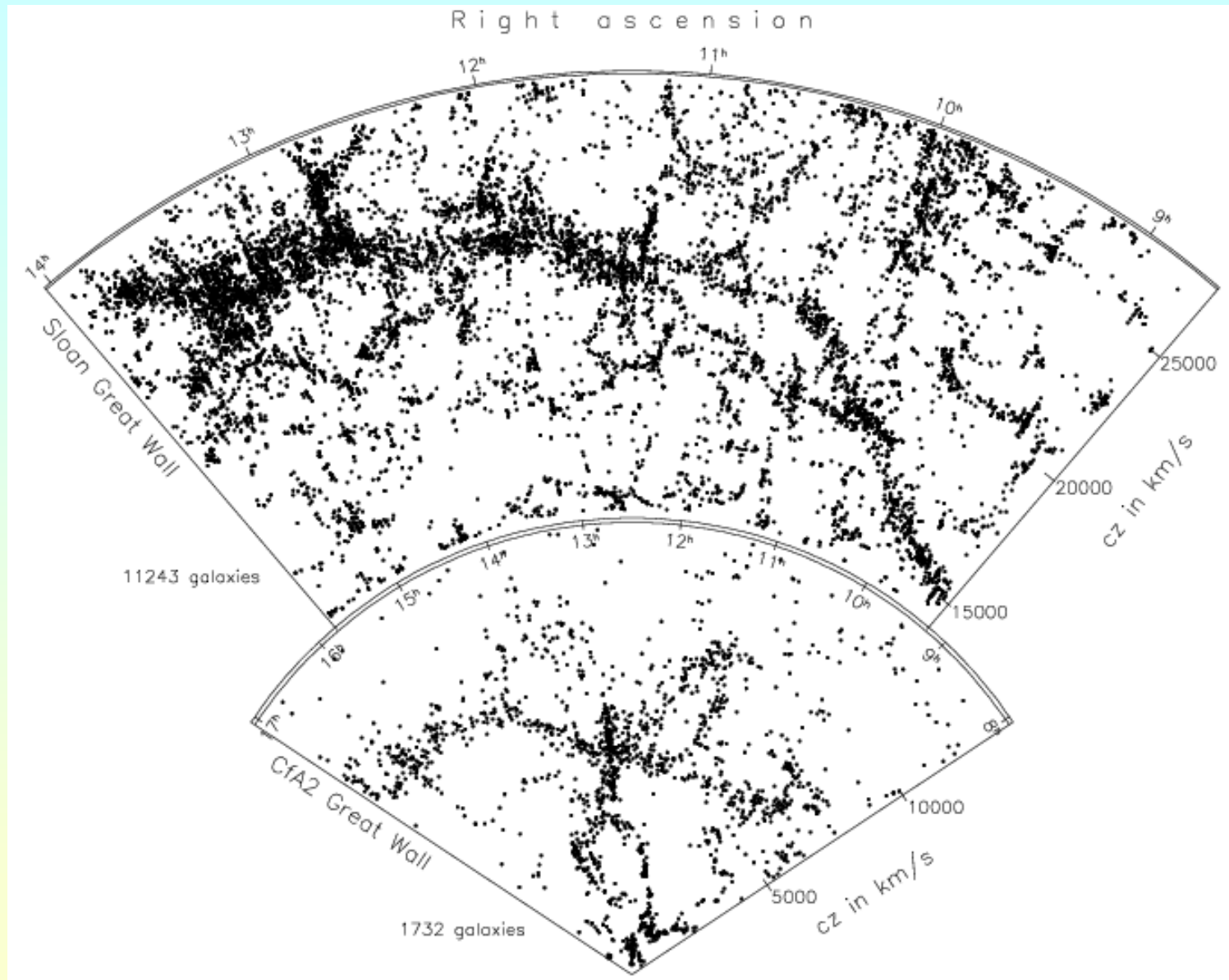
Cartographie de l'univers

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'astres, 100 000 Quasars
1/4 de la surface du ciel (2.5m telescope) **En cours de finition**
Apache Point Observatory (APO), Sunspot, New Mexico, USA

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

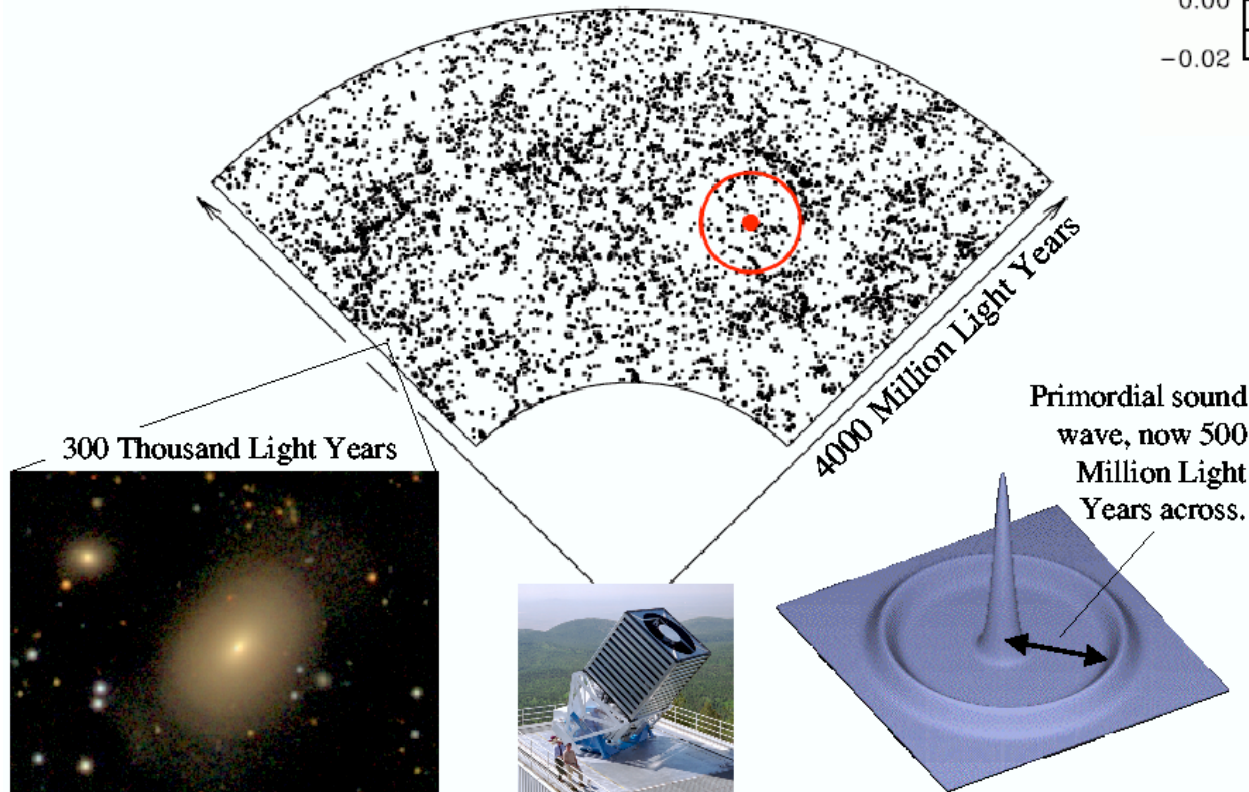
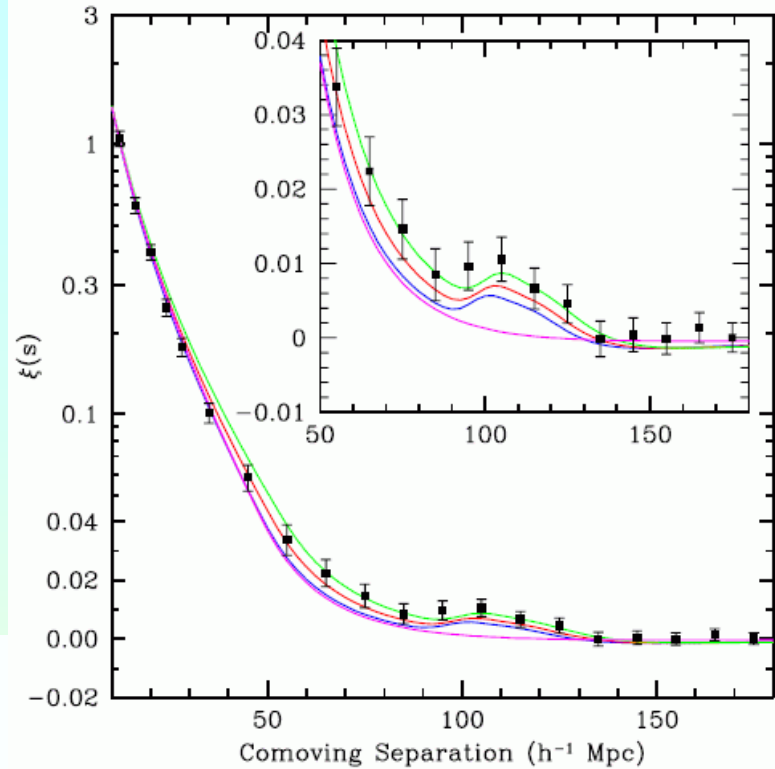


Comparaison du CfA2 et SDSS (Gott 2003)

Pic acoustique baryonique

Ondes détectées aujourd'hui
dans la distribution des baryons

50 000 galaxies SDSS

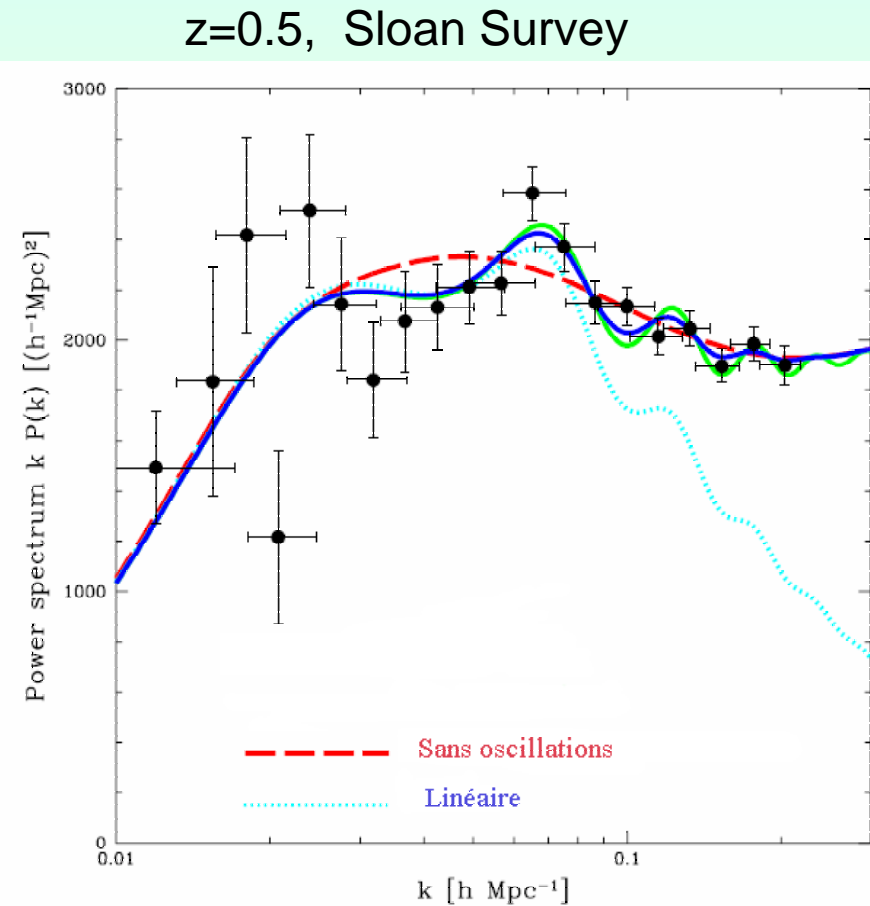
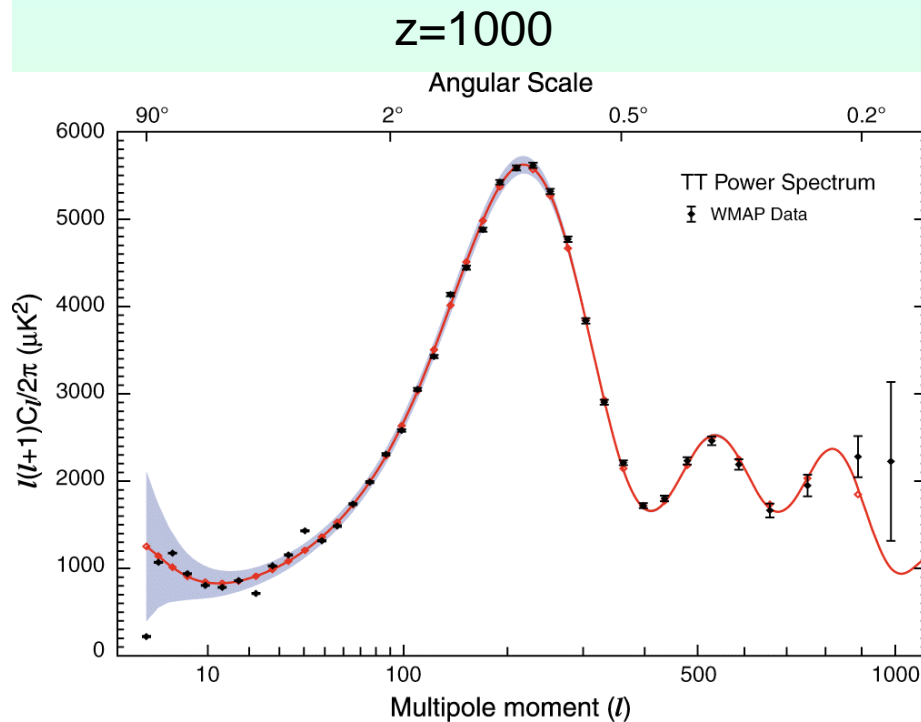


Eisenstein et al 2005

Oscillations baryoniques

Règle standard en fonction du redshift:

Mesurer la taille de l'horizon sonore



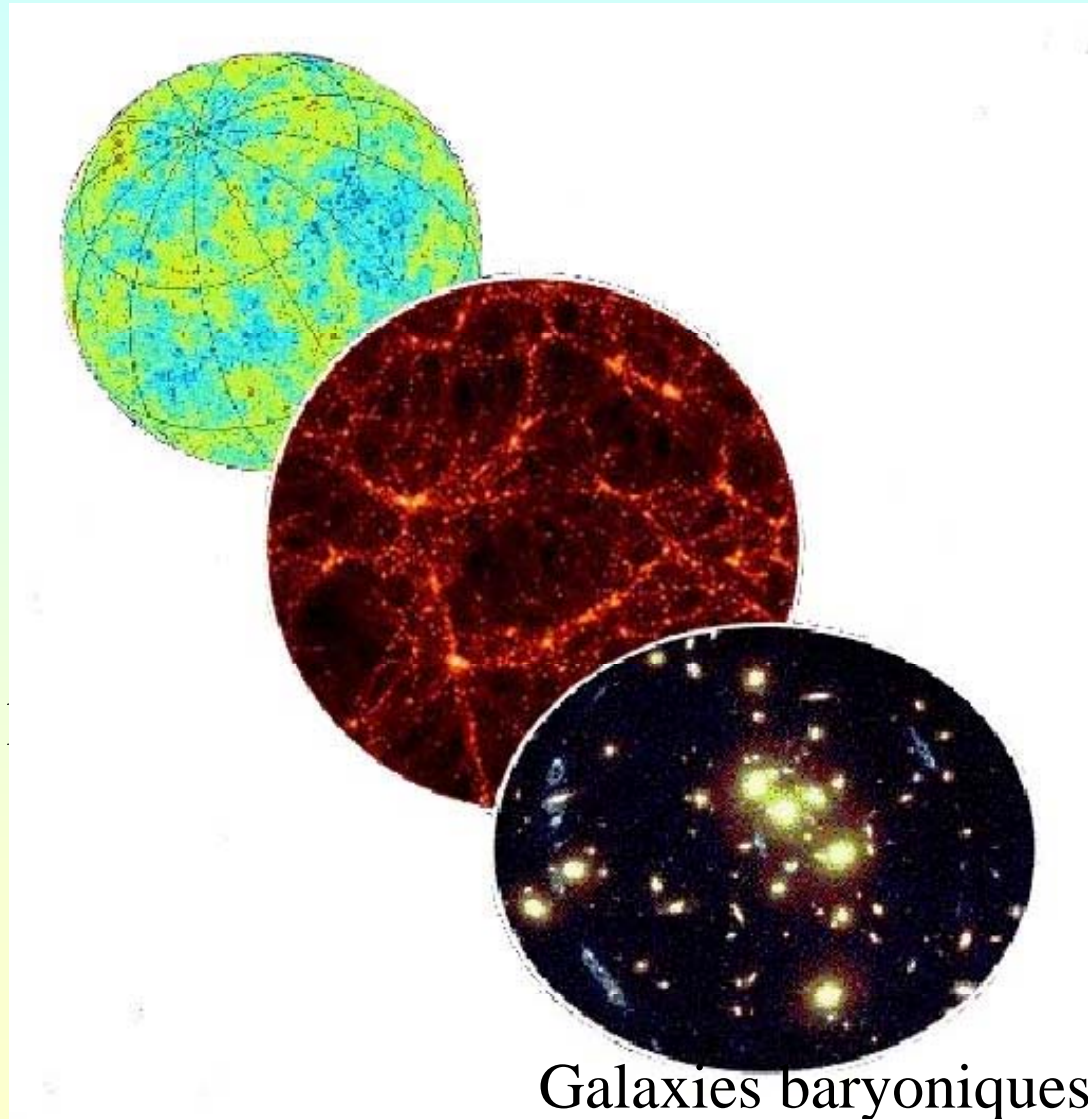
Formation des structures

Fluctuations primordiales
fond cosmologique

simulations cosmologiques:
Nombre de structures à une
échelle donnée

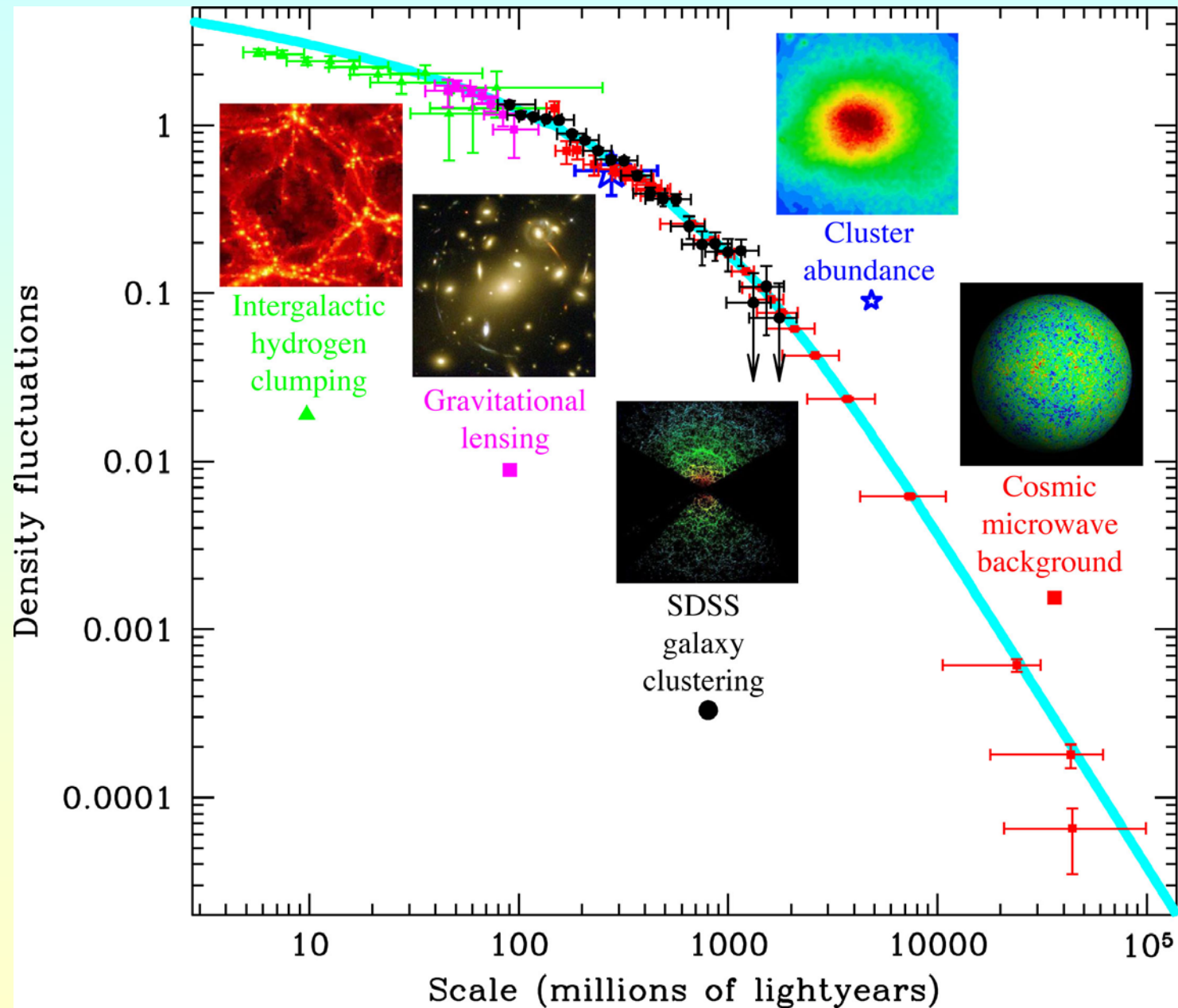
Contraintes sur la nature de
matière noire (neutrinos?)

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



Galaxies baryoniques
vues avec le HST

Fluctuations de densité



Tegmark
et al 2004

Hypothèses pour la CDM

Particules qui au découplage ne sont plus relativistes

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? (Boehm, Fayet, Silk 04, 511kev INTEGRAL)

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

Trous noirs primordiaux? (réionisation plus tôt, plateau en $P(k)$)

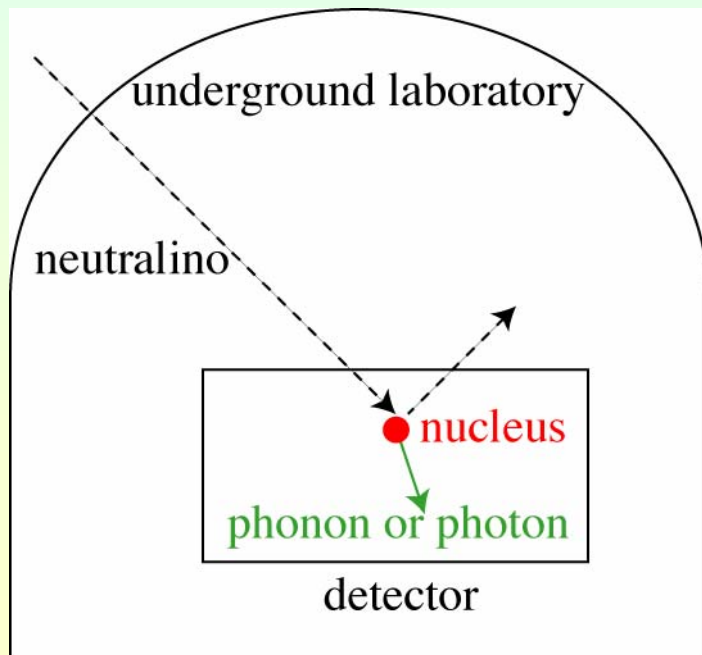
Recherches directes et indirectes

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

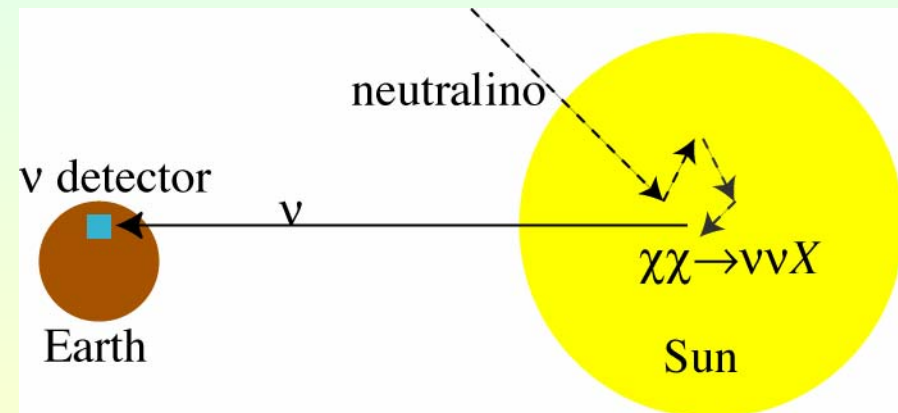
Recherche **directe**: CDMS-II, Edelweiss, DAMA, GENIUS, etc

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

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



Direct



Indirect

→ Pas de détection convaincante ²⁶

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)

(Alcock et al 2001, Lasserre et al 2000, Tisserand et al 2004)

→ 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

(Pfenniger & Combes 94)

Où sont les Baryons?

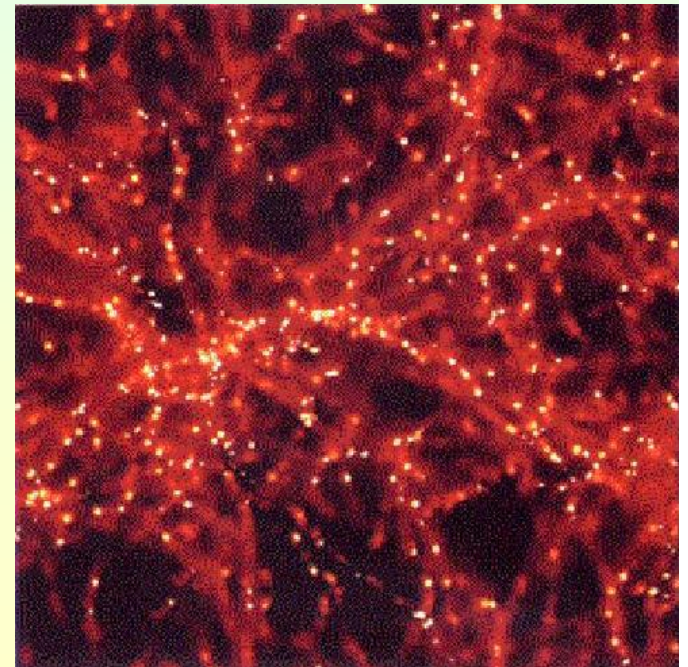
→ 6% dans les galaxies ; 3% dans les amas de galaxies gaz X

→ <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



Nicastro et al 2005

3 raies simultanément
FUSE OVI $z=0$

$z=0.011$

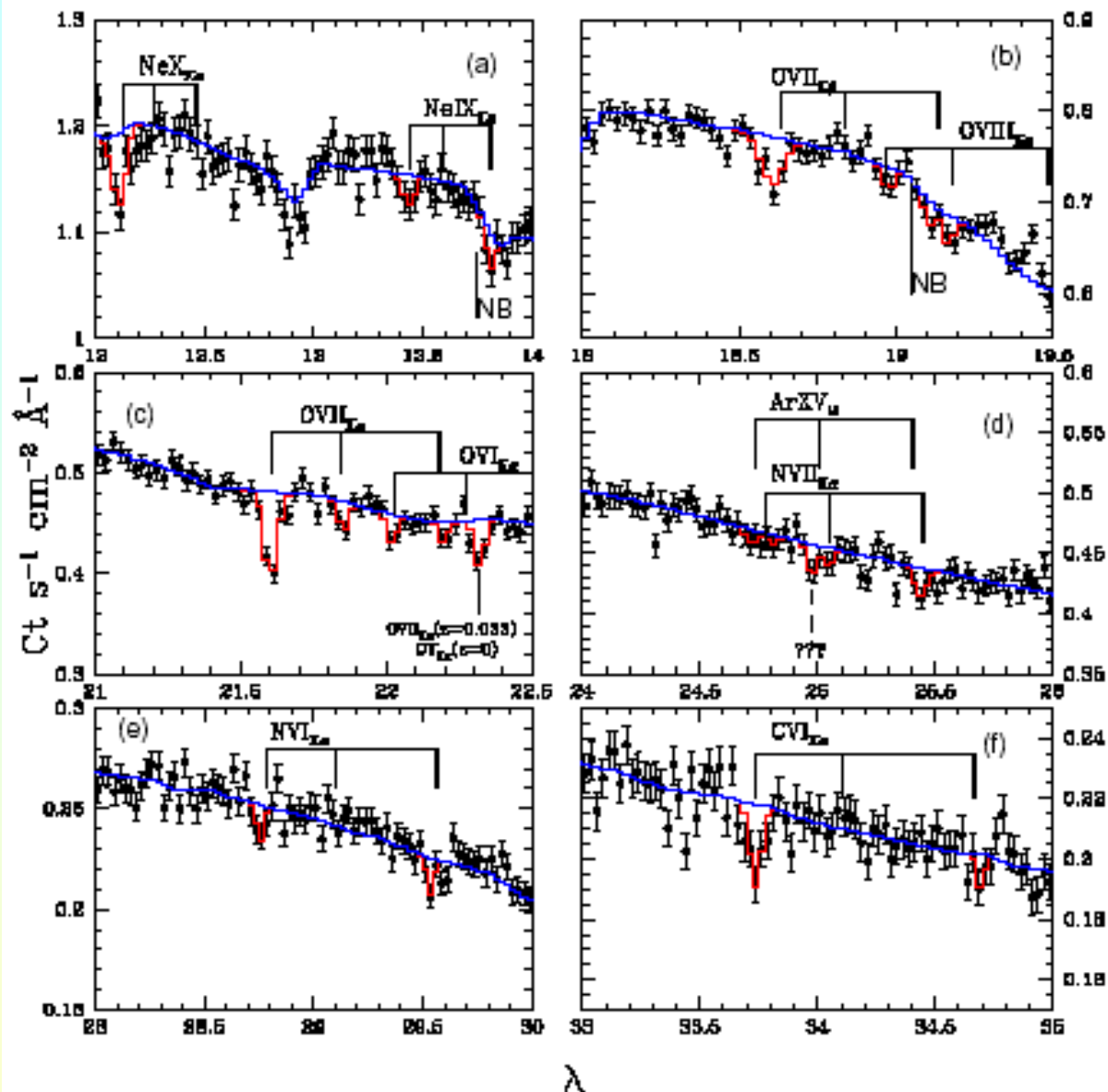
$z=0.027$

$v=3300\text{km/s}$

$v=8090\text{km/s}$

Mk421 blazar, détecté par
Chandra pendant un burst
OVII, NVII

Non confirmé par XMM
(Williams et al 2006)

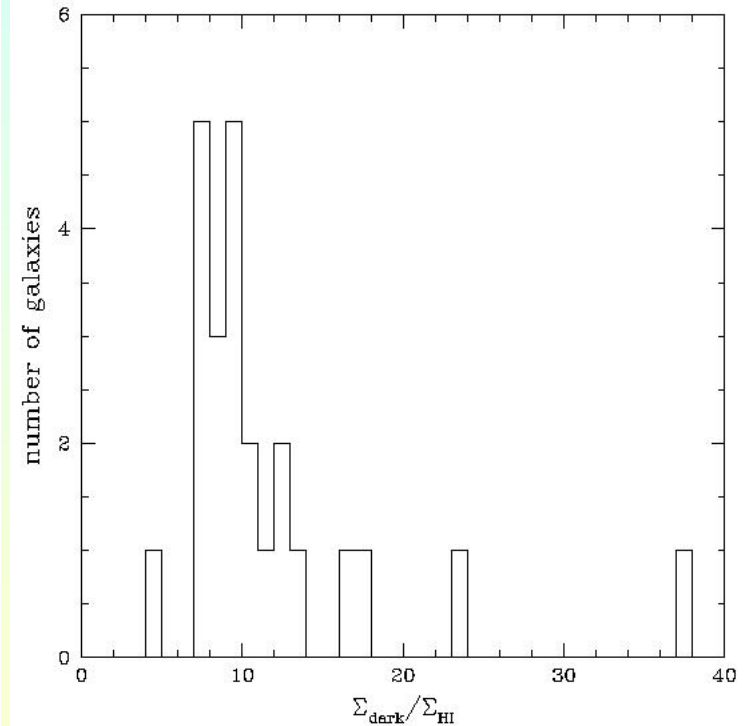
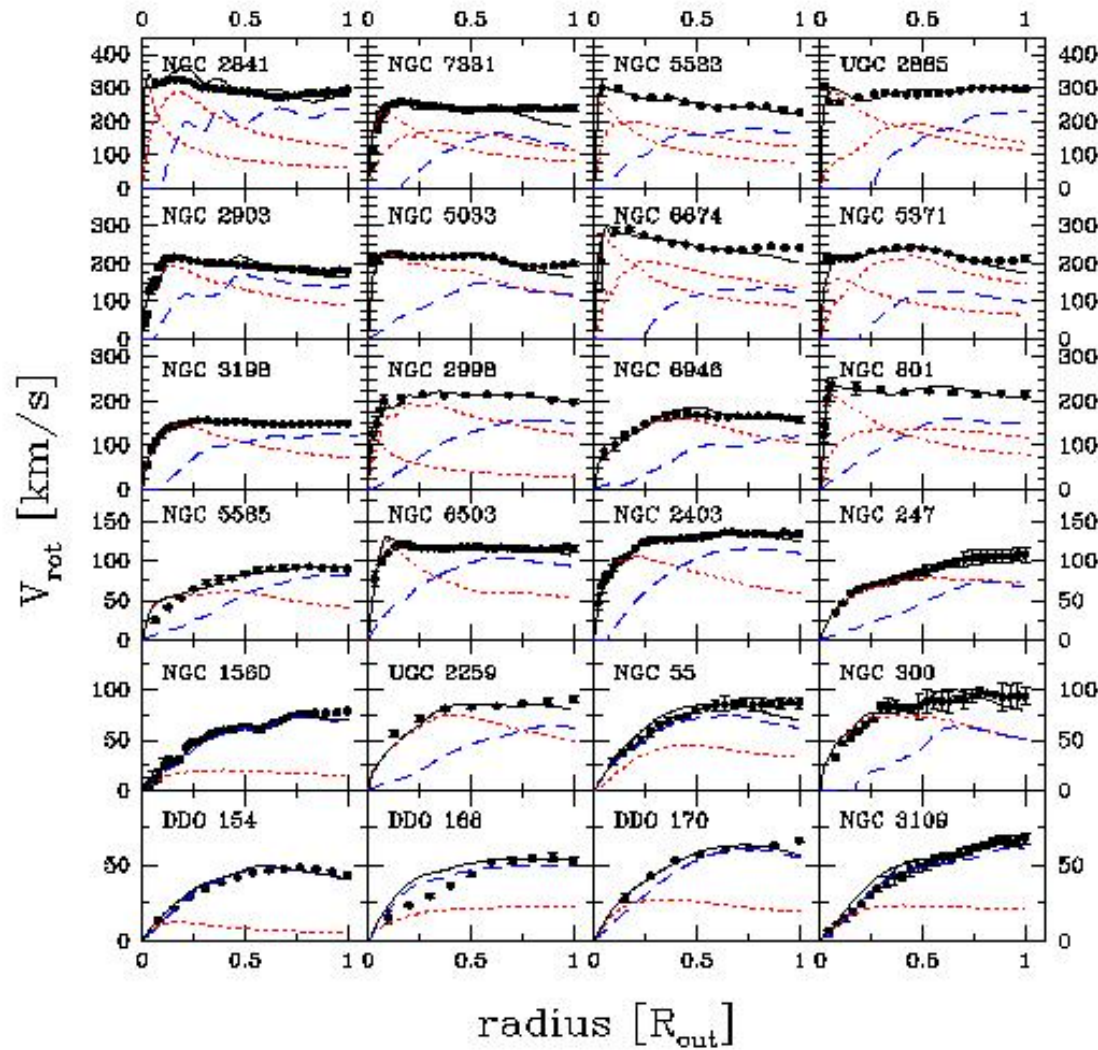


Hoekstra et al (2001)

Rapport des densités de surface

$$\Sigma_{\text{DM}}/\Sigma_{\text{HI}}$$

En moyenne ~ 10



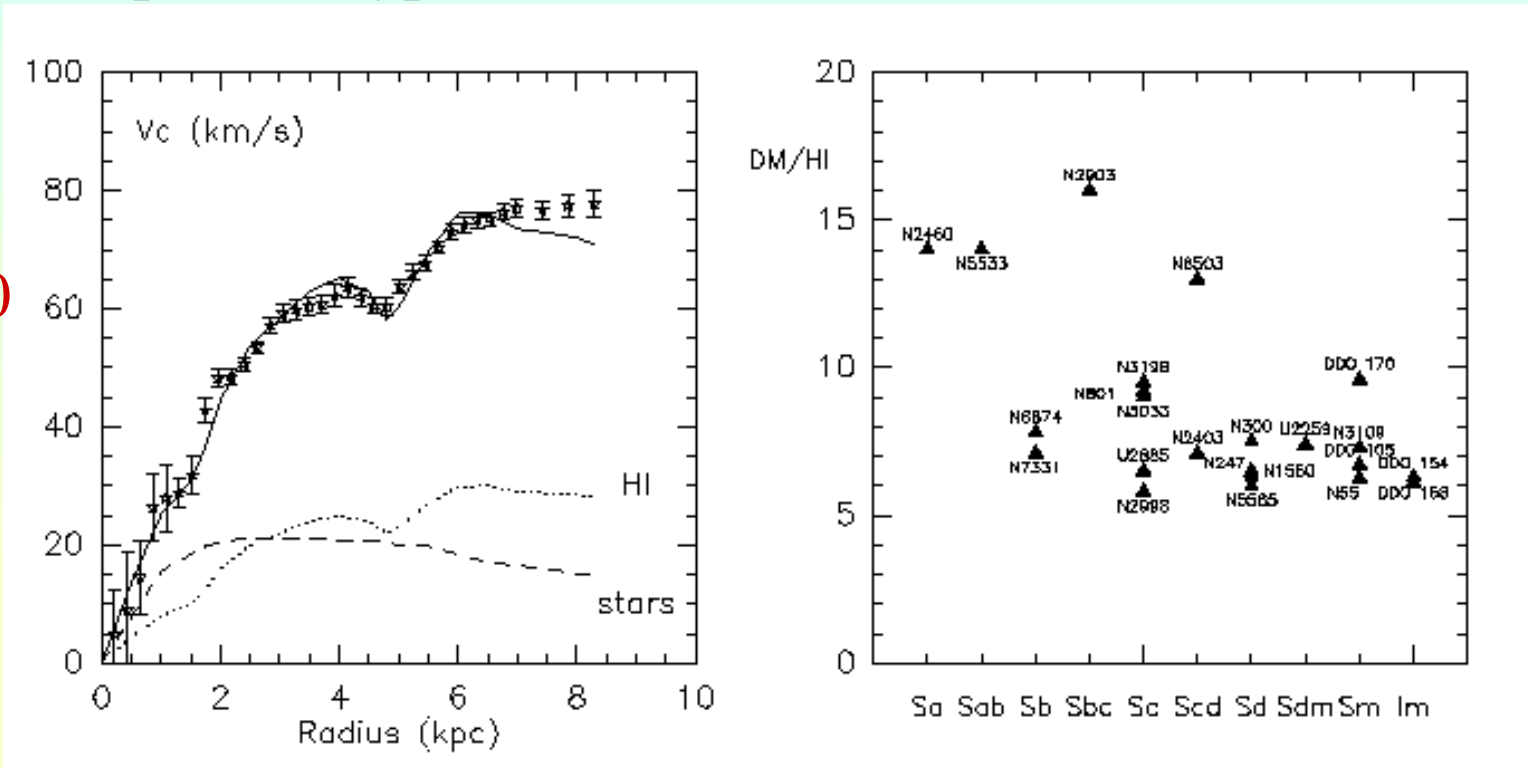
Courbes de rotation des galaxies naines

Distribution radiale de la DM identique à celle du gaz HI

Le rapport DM/HI dépend légèrement du type morphologique (plus grand pour les types Sa, Sab)

NGC1560

HI x 6.2



Origine des structures de gaz

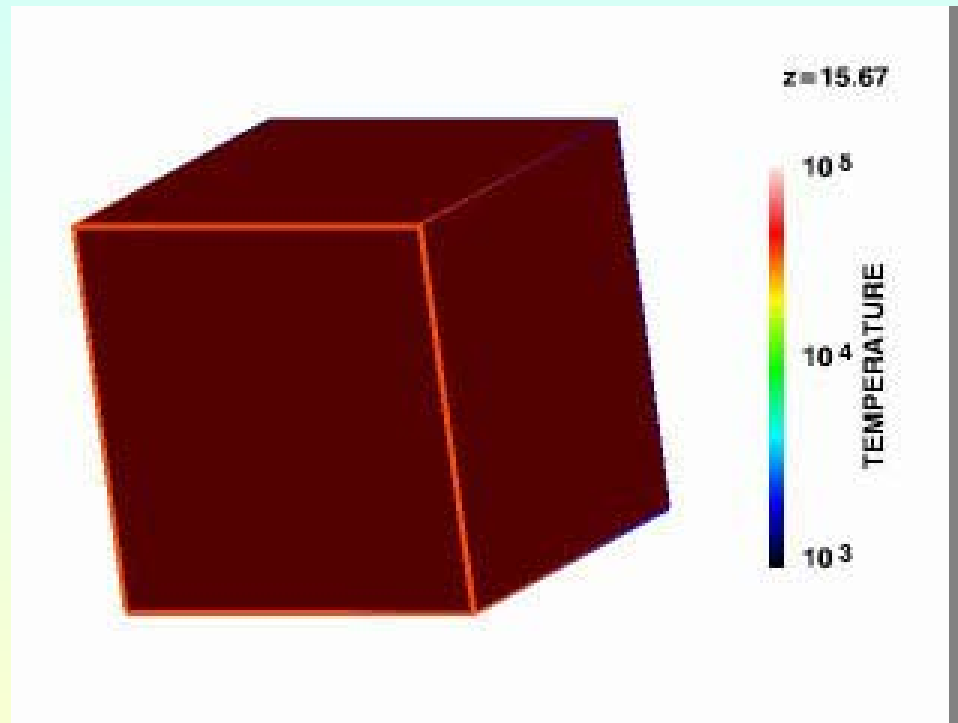
Après recombinaison, les nuages de 10^{5-6} Mo s'effondrent et fragmentent jusqu'à 10^{-3} Mo , **H₂ refroidissant efficace**

→ après les premières étoiles, **Ré-ionisation**

Le gaz froid survit et sera assemblé dans des structures à plus grande échelle pour former les galaxies

Une façon de résoudre la "**catastrophe de refroidissement**"
Régule la consommation du gaz en étoiles (réservoir)

Sortie de l'âge sombre



Ré-ionisation de l'Univers

Problèmes dans la formation des galaxies (paradigme Λ -CDM)

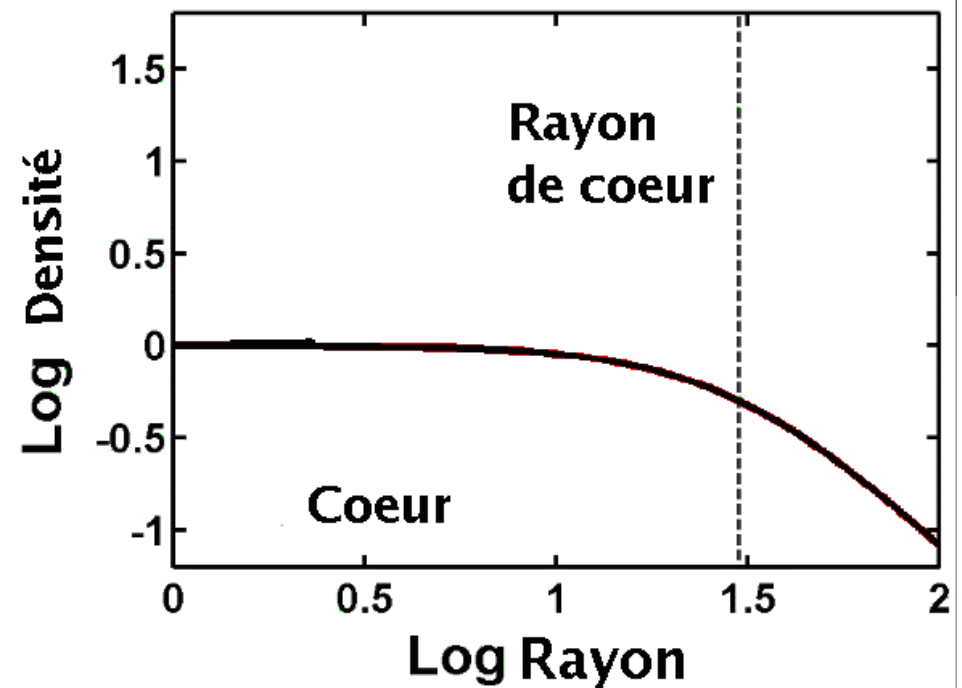
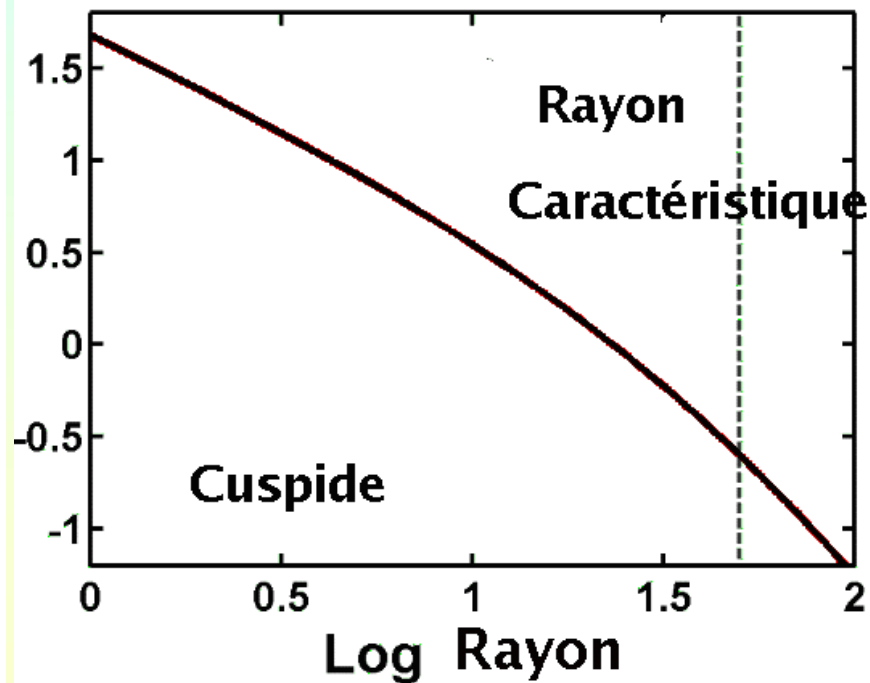
- Prédiction de "cuspides" au centre des galaxies, en particulier absentes dans les naines Irr, dominées par la matière noire
- Faible moment angulaire des baryons, et en conséquence formation de disques de galaxies 10 fois trop petits
- Prédiction d'un grand nombre de petits halos (400 autour de la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

La solution à ces problèmes viendrait-elle du manque de réalisme des processus physiques (SF, feedback?), du manque de résolution des simulations, ou de la nature de la matière noire?

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 $\alpha \sim 0$



Moment angulaire et formation des disques

Les baryons perdent leur moment angulaire (AM) au profit de la CDM

Paradigme: baryons initialement → même AM spécifique que DM

Le gaz est chaud, chauffé par les chocs à la température Viriel du halo

→ Une autre façon d'assembler la masse est l'accrétion de gaz froid

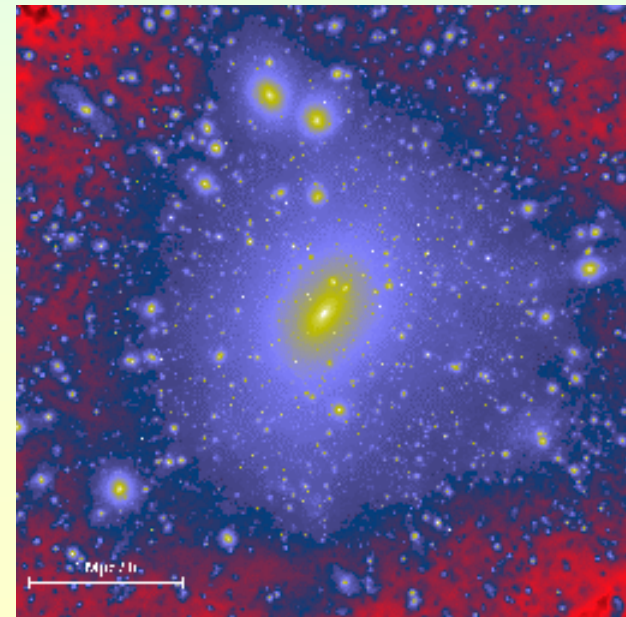
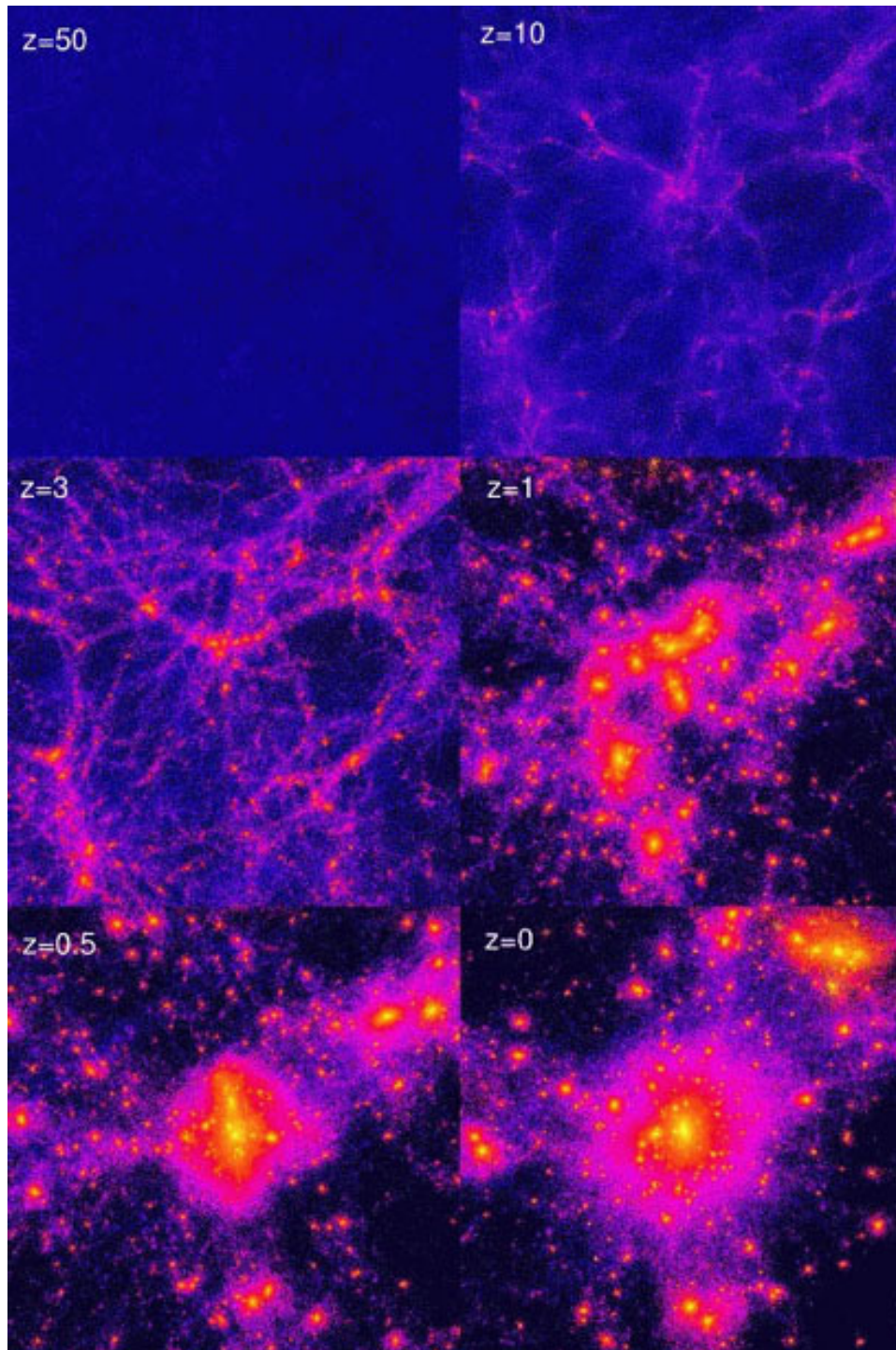
Le gaz est canalisé le long des filaments, modérément chauffé par des chocs faibles, et rayonne rapidement

L'accrétion n'est pas sphérique, le gaz garde son moment angulaire

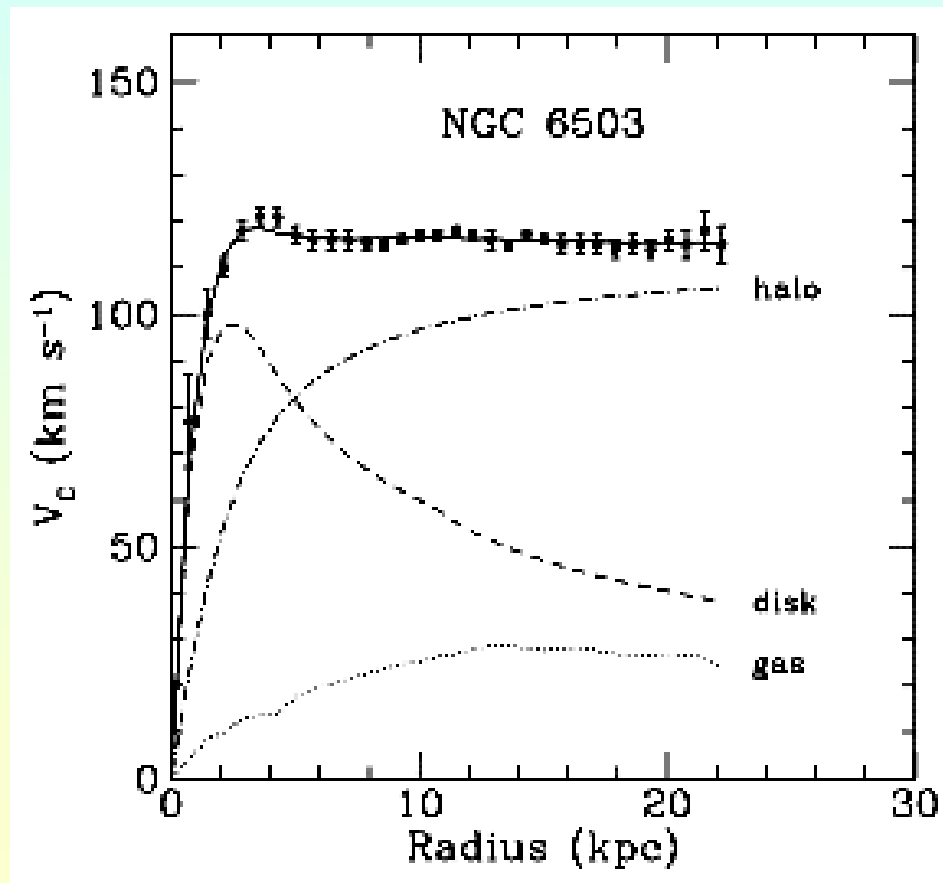
Gaz en rotation autour des galaxies, **plus facile de former des disques**

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



La matière noire peut résoudre le problème,

mais aussi.....

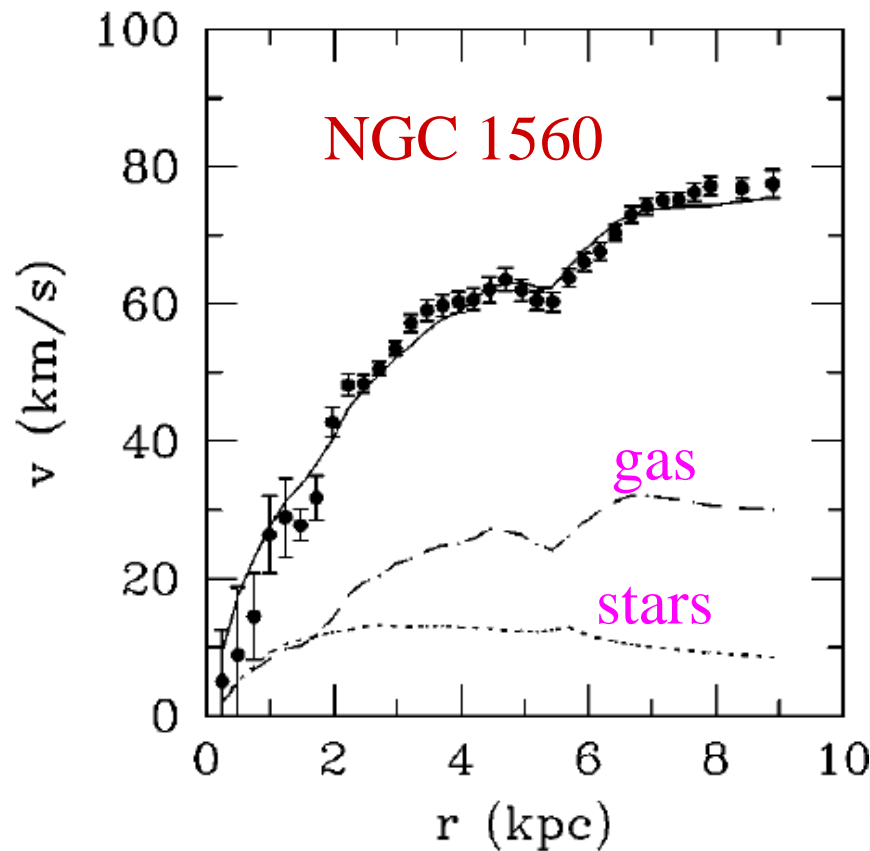
Une modification de la loi de Newton

MOND: MOdified Newtonian Dynamics

Loi de la gravité modifiée, ou loi de l'inertie? (Milgrom 1983)

AQUAL

$$L = - \int \left[\frac{a_0^2}{8\pi G} F\left(\frac{|\nabla\Phi|^2}{a_0^2}\right) + \rho\Phi \right] d^3x.$$



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

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

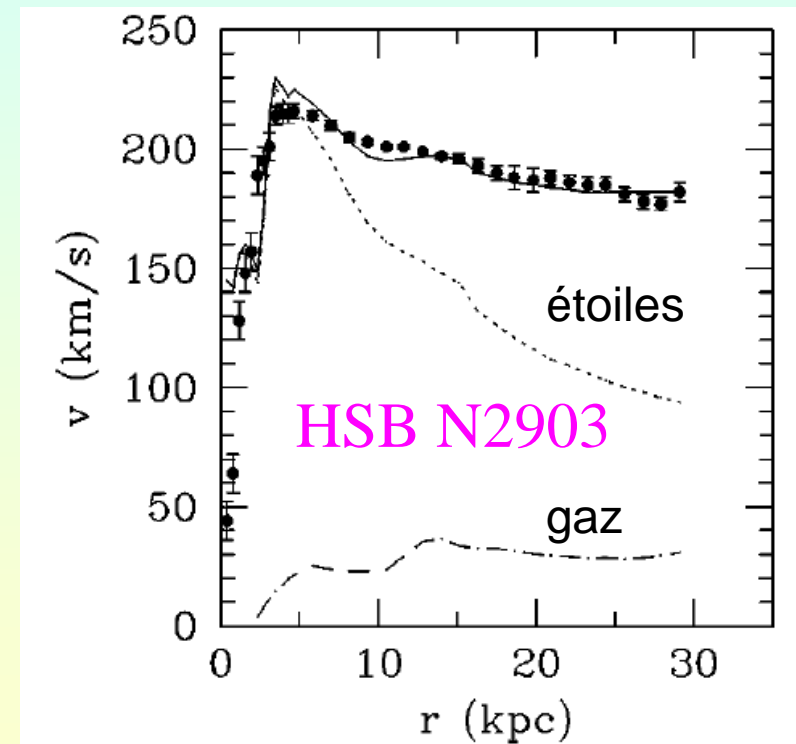
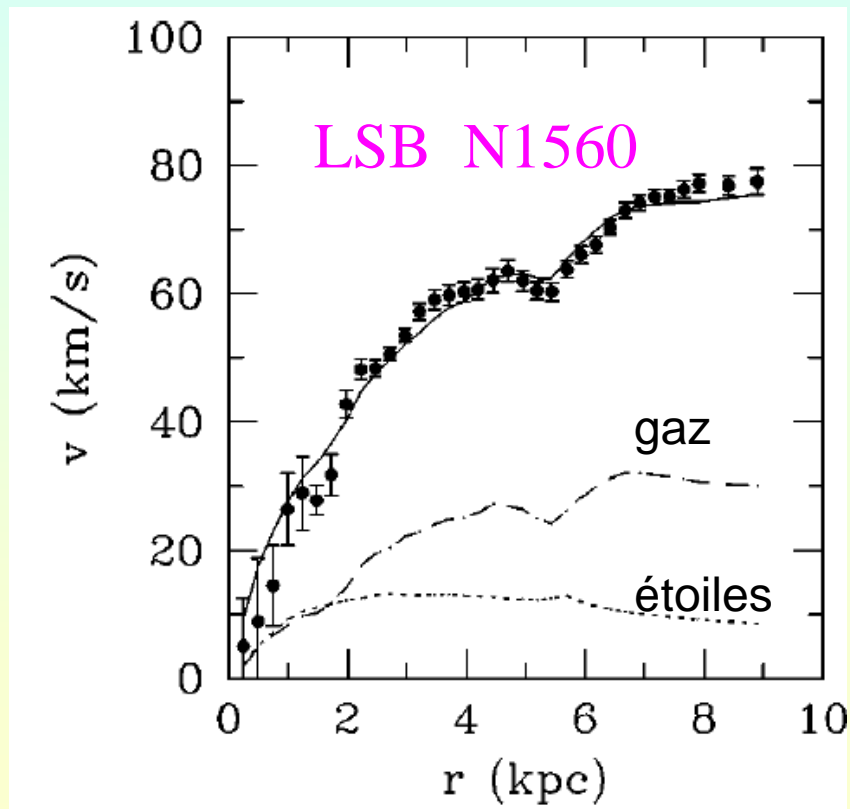
Quand l'accélération devient $< a_0$
 $a_0 \sim 2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^{-2}$

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

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

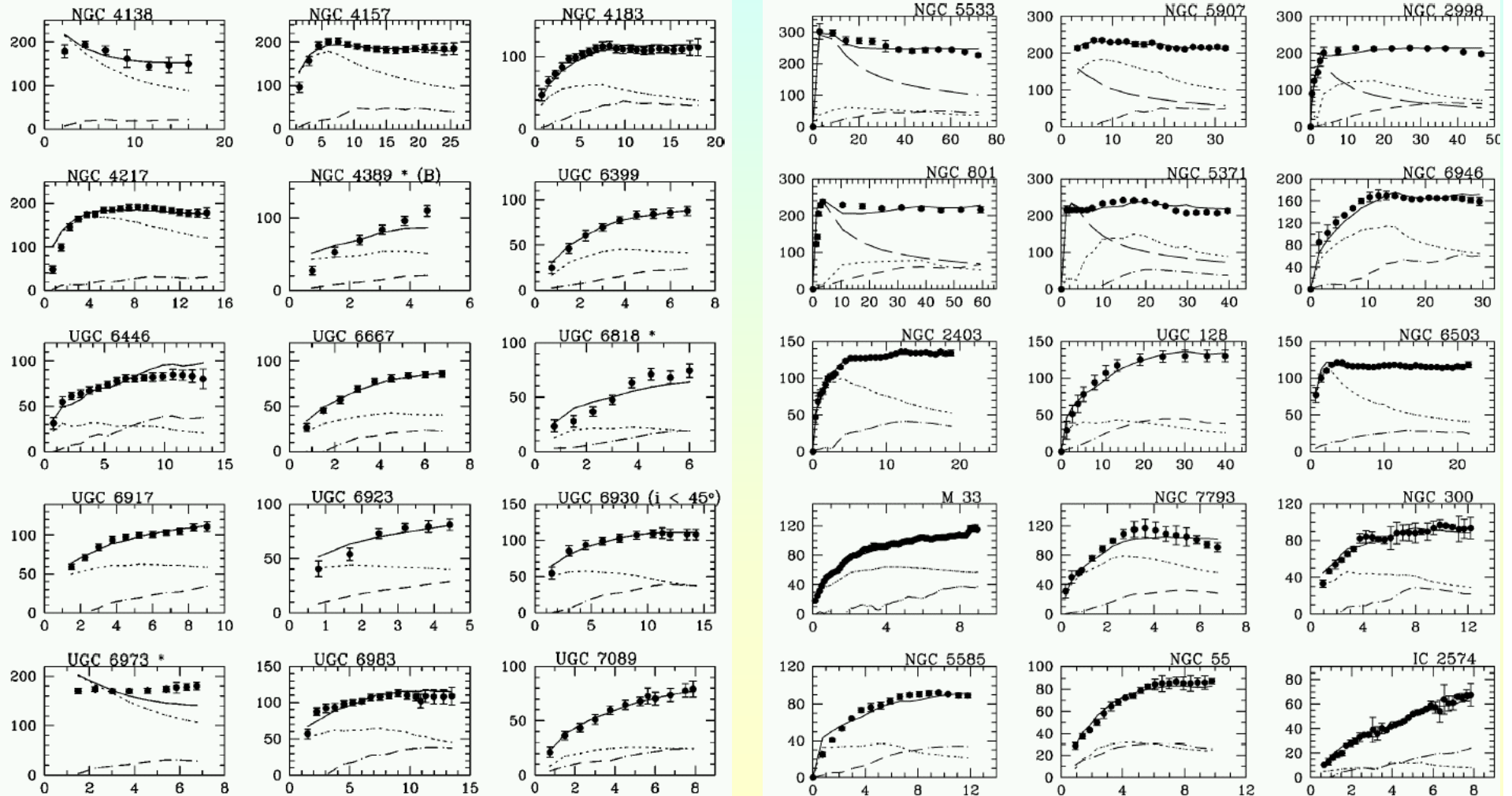
Ajustement selon la densité de surface

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



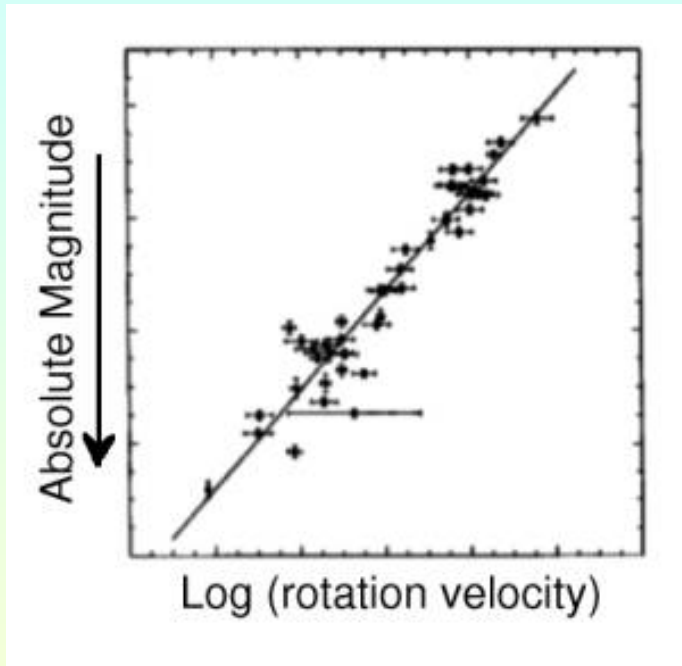
Courbes de rotation multiples

Une seule constante a_0 peut représenter toutes les galaxies



Loi de Tully-Fisher

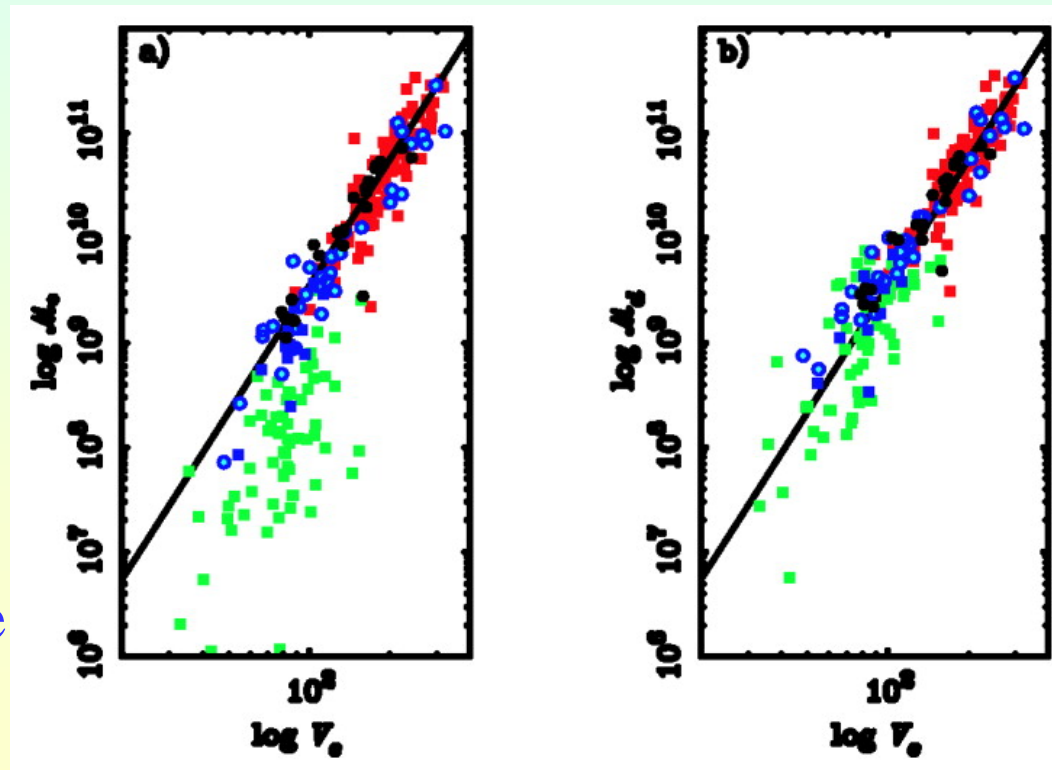
$$\text{Luminosité} \sim \Delta V_{\text{rot}}^4$$



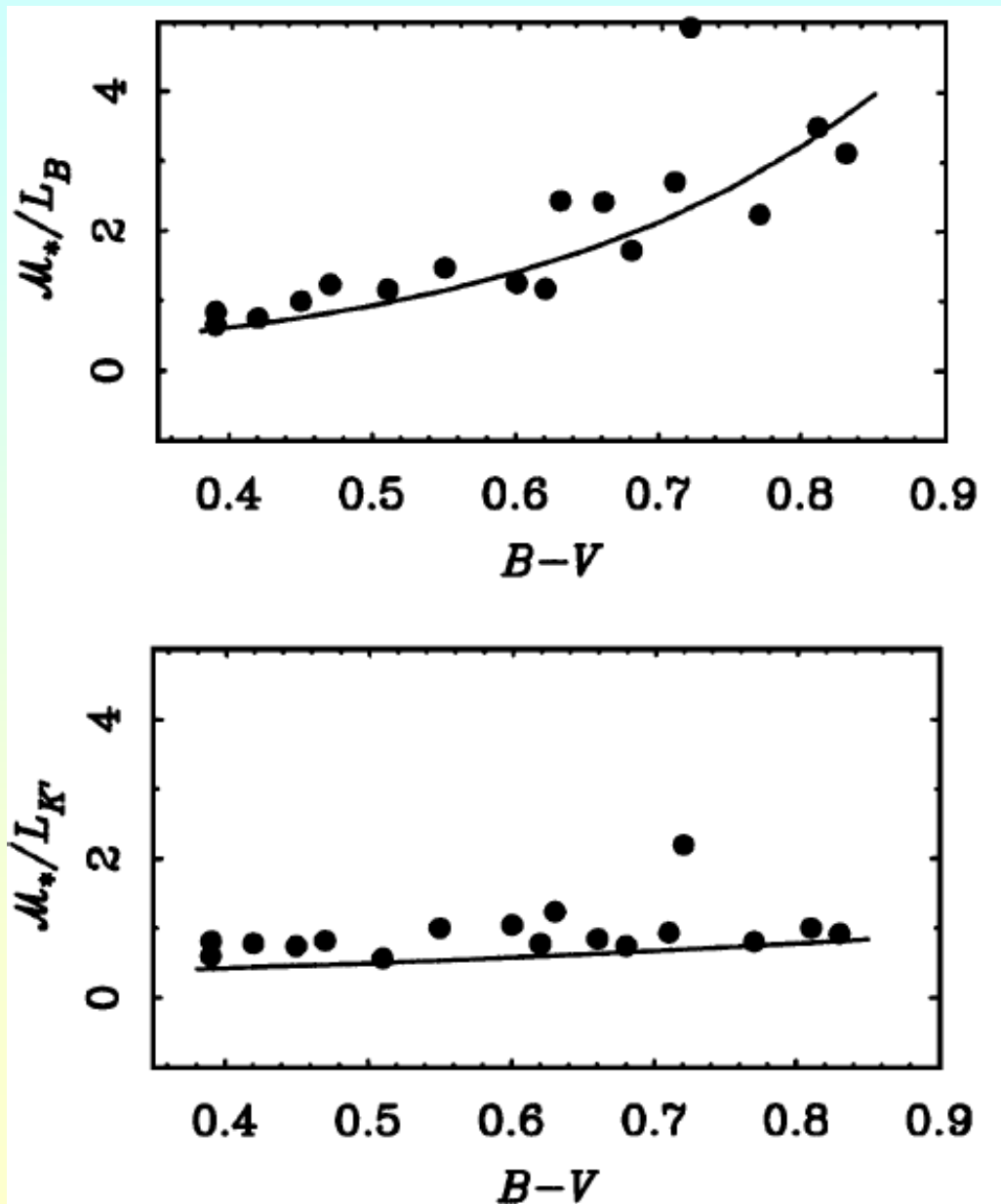
$$g_M^2 = a_0 g_N = a_0 GM/r^2 = V^4/r^2$$

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

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



Rapports Masse-Luminosité



Les M/L obtenus sont en quelque sorte une prédiction de MOND, et correspondent à ce qui est attendu des populations stellaires

Spirales dans Uma
Sanders & Verheijen 98

Le trait plein est la prédiction des populations stellaires
Bell & de Jong (2001)

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 ($0.5 a_0$)

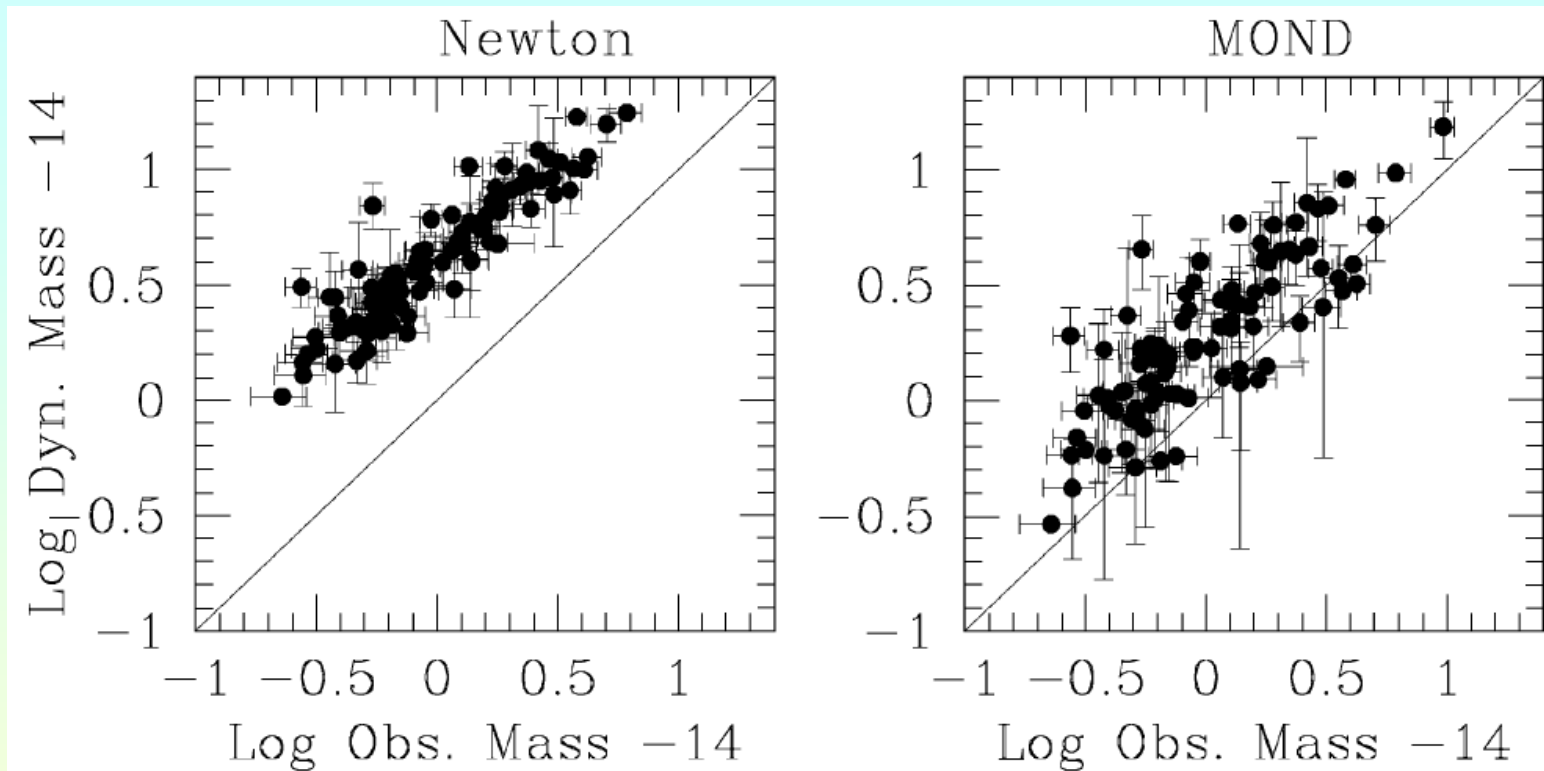
Données en rayons-X: gaz chaud en équilibre hydrostatique, et les lentilles gravitationnelles faibles (cisaillement)

MOND réduit d'un facteur 2 la masse manquante

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

La fraction baryonique observée n'est pas totalement la fraction universelle (15%) attendue

MOND et les amas

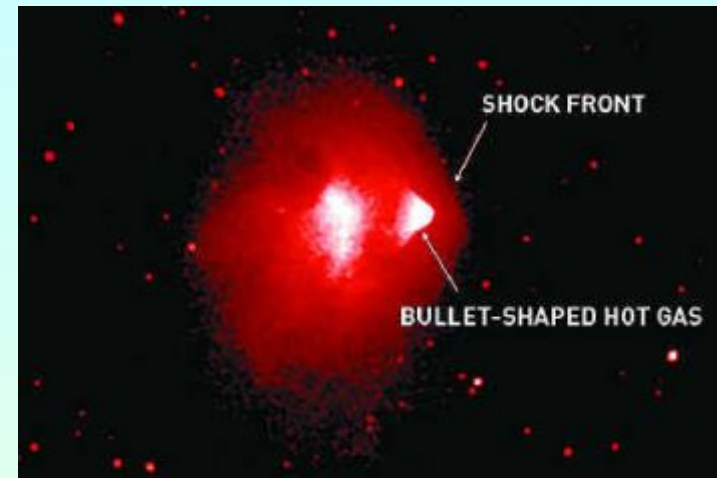


Selon la physique des baryons, du gaz froid pourrait se trouver au centre des amas (flots de refroidissement)

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

L'amas du boulet

Gaz X



Masse totale

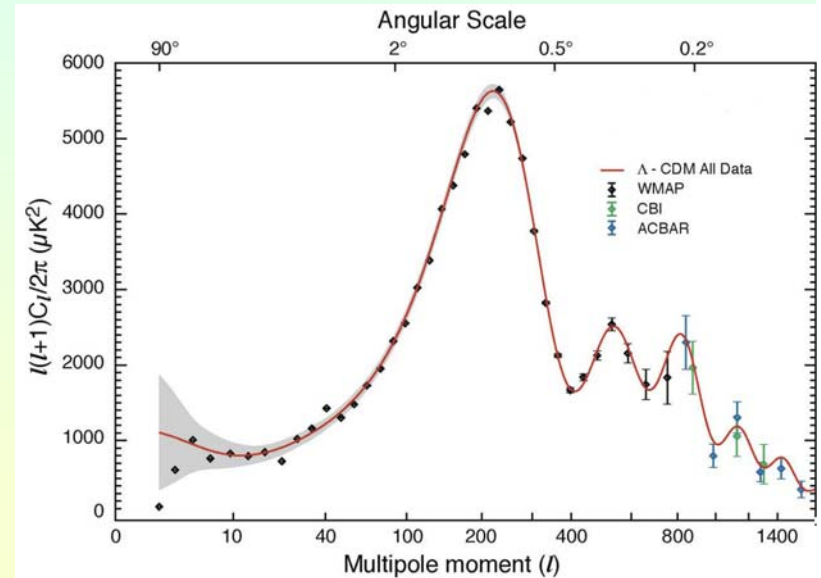
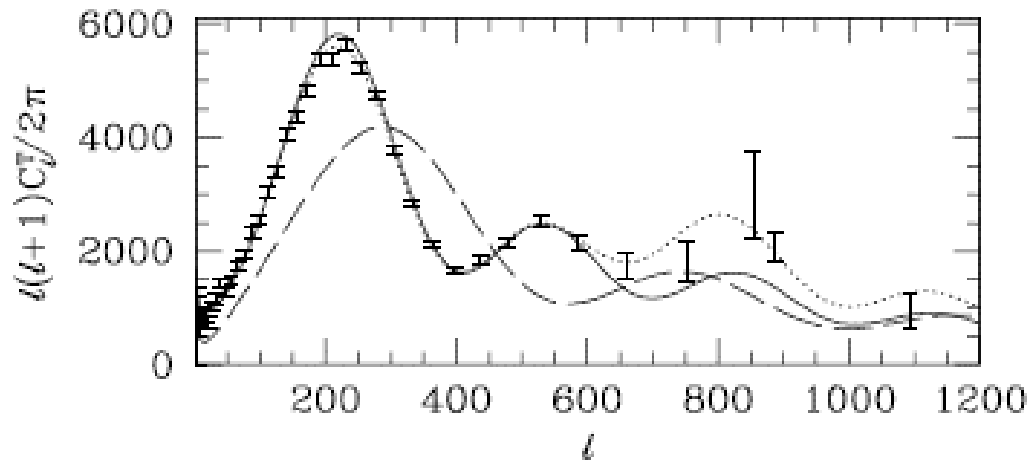
Est-ce la preuve de l'existence de matière non-baryonique?

Possible d'expliquer les observations avec MOND et les neutrinos, avec le pourcentage habituel (masse 1-2 eV) Angus et al (2006)

MOND: fit des data WMAP

Inclut les neutrinos massifs 1-2 eV

Fit par MOND
(avec aucune-CDM) des
pics acoustiques
(Skordis et al 06)



—: $\Omega_{\Lambda}=78\%$ $\Omega_{\nu}=17\%$ $\Omega_b=5\%$ MOND

- - : $\Omega_{\Lambda}=95\%$ $\Omega_b=5\%$

.....: Λ CDM

Développements récents 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 a , permet d'expliquer les lentilles gravitationnelles
- Etend la théorie AQUAL, qui résolvait la conservation du moment (formulation lagrangienne), sans propagation superluminique

Conséquences de MOND relativiste

- Principe d'équivalence faible vérifié (masse gravit et inertie)

Mais pas le principe d'équivalence fort

(invariance en fonction de l'espace-temps)

➔ Métrique de l'espace différente de la métrique gravitationnelle

TeVéS a trois paramètres libres

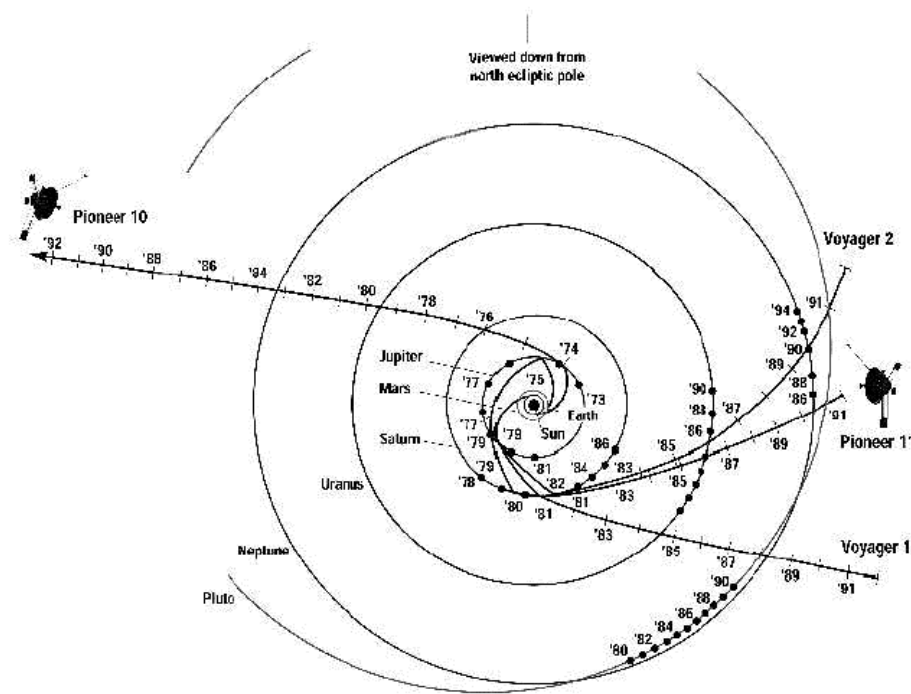
[$a_0 \sim c H_0$ aujourd'hui, mais ne varie pas dans le temps]

➔ Traite les lentilles gravitationnelles, conformément aux observations (comme GR +DM), lentilles fortes ou faibles

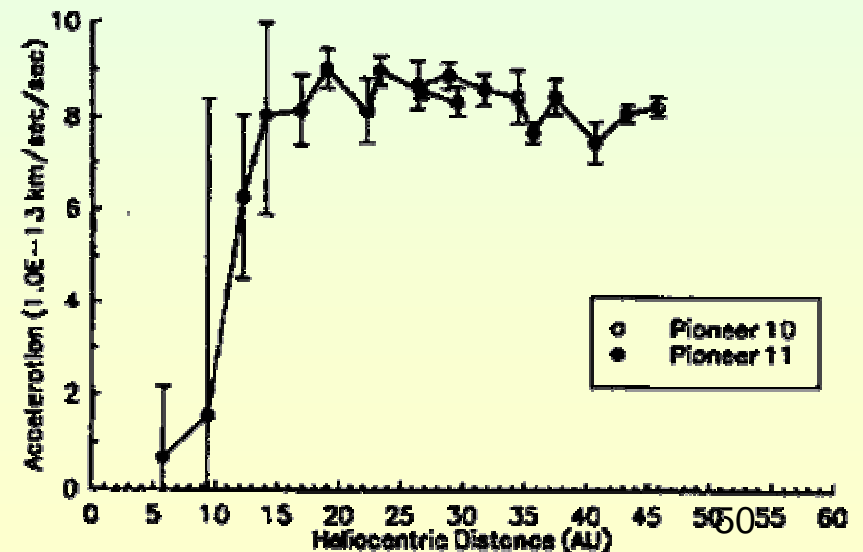
Anomalie de Pioneer

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?



UNMODELED ACCELERATIONS ON PIONEER 10 AND 11
Acceleration Directed Toward the Sun



Implications de MOND

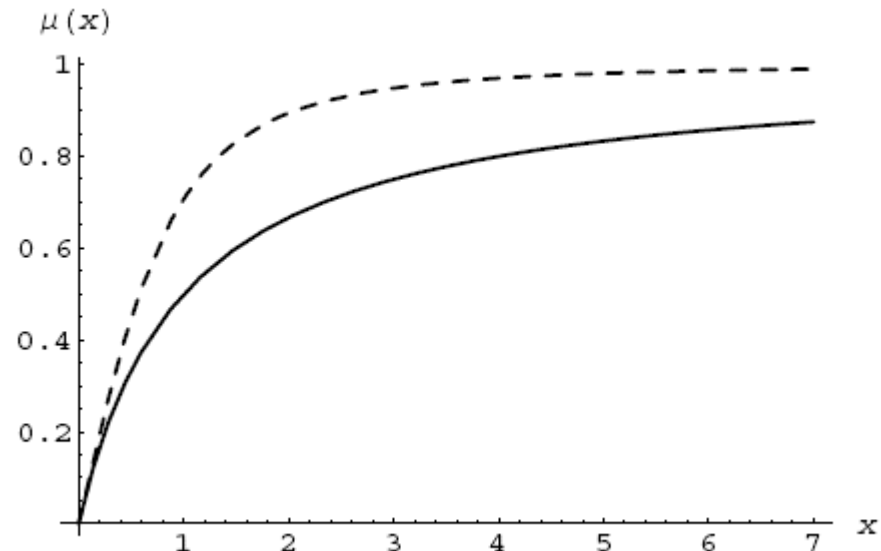
- champ scalaire = 5^{ème} force
- Le champ permet aussi de rendre compte en une seule fois de l'énergie noire (μ -essence, Zhao 06)
- $a_0 \sim 1 \text{ Angström/s}^2$

$$\Lambda \sim a_0^2$$

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

$$\mu = x/(1+x) \text{ trait plein}$$

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



Interprétation de MOND?

Analogie avec l'électromagnétisme

$$GM/r^2 = g_N = \mu (g_N + g_s) = \mu/(1-\mu) g_s$$

$$E = (D - P)/\epsilon_0 \rightarrow -Q/r^2 = d = \mu (d + p) = \mu/(1-\mu) p$$

ϵ_0 perméabilité du vide, μ perméabilité relative

$$d = D/\epsilon_0, p = -P/\epsilon_0$$

Analogie entre la charge $-Q$ et la masse M , créant un champ en $1/r^2$ en l'absence de « diélectrique »

Le champ scalaire g_s de la 5^{ème} force joue le rôle de la polarisation p et l'accélération totale $\mathbf{g} = \mathbf{g}_N + \mathbf{g}_s$ celle du champ $\mathbf{E} = \mathbf{d} + \mathbf{p}$

Origine quantique, le vide étant polarisé par les baryons et leur gravité?

Perspectives pour la matière noire

Paramètres de l'Univers: $\Omega_m=0.27$, dont 15% baryons

Le modèle de matière noire CDM, avec $\Lambda = 0.73$ est celui qui correspond le mieux aux observations, surtout pour les grandes structures

Attendre la détection au LHC?

Encore des problèmes non résolus:

- CDM devrait dominer au centre des galaxies avec une cuspidé
- Problème du moment angulaire des baryons, perdu au profit de la CDM, et formation des disques
- 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 MOND??

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

Energie noire, quintessence

Energie quantique du vide?

Prédictions 120 ordres de grandeur de plus à l'échelle de Planck

56 ordres de grandeur à l'échelle EW (Electro-weak)

Ne domine que très récemment (principe anthropique?)

$$P = w E \quad w \sim -1 \quad w = w_0 + w_1 z$$

Constante cosmologique $\Lambda = \text{constante}$

ou bien $\rho(t)$ densité dépendant du temps?

→ 5ème élément ou "Quintessence"

Les 4 autres sont: Photons, Neutrinos (Leptons), Baryons, CDM

Serait-il possible que le 4ème (inconnu) et le 5ème, l'énergie noire soient la même chose?

Gas de Chaplygin → Quartessence