



# Les traces de l'Energie Noire dans la structure à grande échelle de l'univers

Pier-Stefano Corasaniti

*LUTH, CNRS & Observatoire de Paris*

# Plan de la présentation

## Part I

- Le modèle cosmologique et ses éléments constitutifs

## Part II

- Bref histoire des évidences observationnels de l'énergie noire dans l'univers
- Le problème de la nature de l'énergie noire (ou la naturalité de lois physiques)
- Les empreintes de l'énergie noire sur la formation des structures

# Avertissements

- *Equations*
- *Concepts Abstraits & Analogies*
- *Chiffres*
- *Histoire vs Logique*
- *Compte à Rebours*

# Cosmologie Physique

## Qu'est-ce que c'est?

L'étude de l'univers dans son ensemble, des composantes de matière et processus physiques qui en déterminent ses propriétés globales



Reconstituer un puzzle à partir d'observations divers couvrant des échelles d'énergie et de temps très différentes

Recherche intrinsèquement pluridisciplinaire

Physique de Particules    Gravitation  
Matière Condense    Physique des Plasmas  
Physique Statistique    Astrophysique

# D'ou on commence?



# Les Principes

Comment formuler une  
théorie physique de l'univers?

Gravité



Matière

Principe d'Equivalence



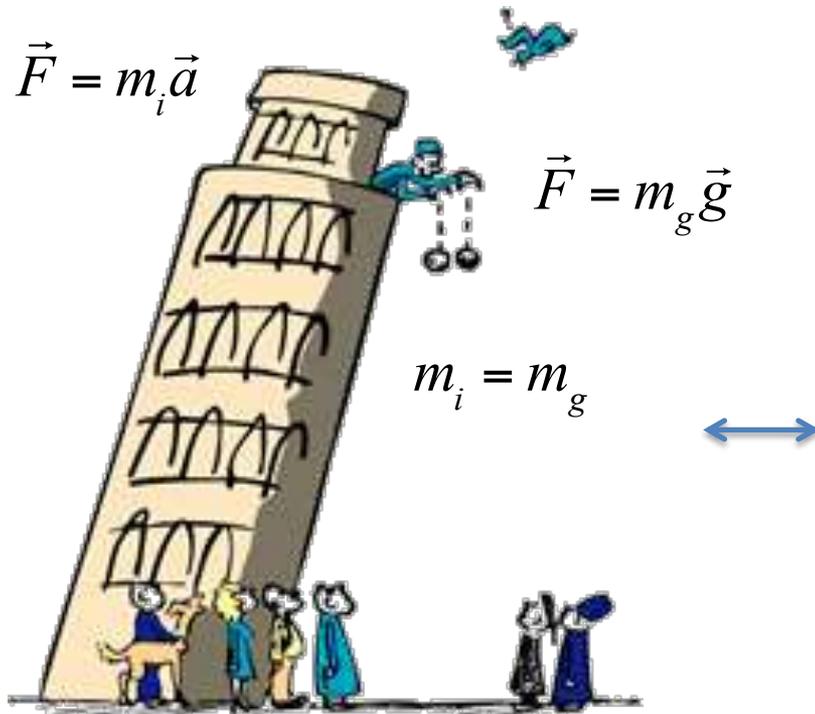
Théorie de la Relativité  
Générale et nature de  
la gravité

Principe Copernicien



Distribution de  
matière aux grandes  
échelles et géométrie  
de l'espace-temps

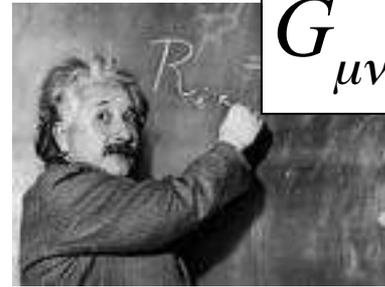
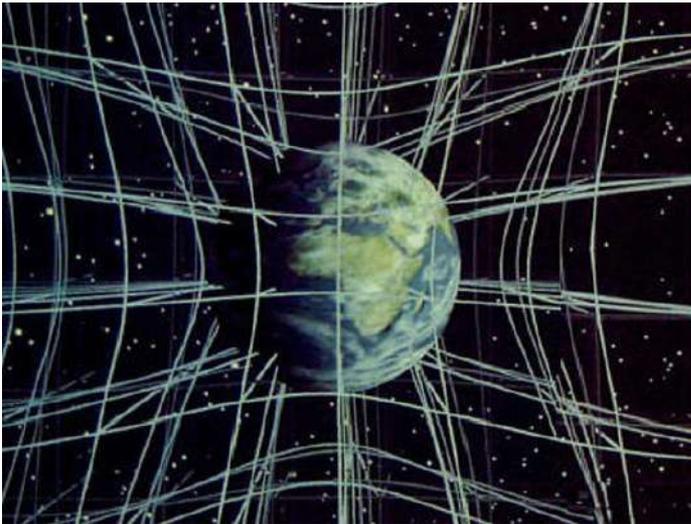
# Principe d'équivalence



# Nature de la Gravité

## Relativité Générale

La force de gravité n'est que la manifestation de la courbure de l'espace-temps



$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

La présence de matière modifie la géométrie de l'espace-temps

La métrique de l'espace-temps

$$ds^2 = -c^2 g_{00} dt^2 + 2g_{0i} dx_i dt + 2g_{ij} dx_i dx_j$$

Les équations d'Einstein en décrivent l'évolution

# Homogénéité et Isotropie

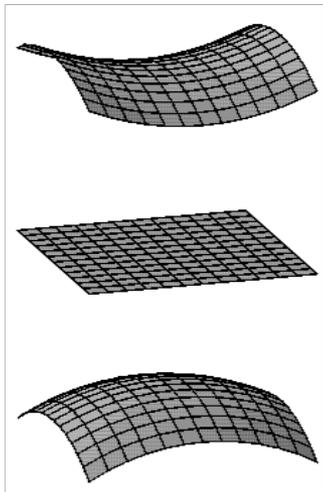
## Principe Copernicien

On n'est pas des observateurs privilégiés de l'Univers

Métrie de Friedmann-Lemaitre-Robertson-Walker

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \left[ \frac{dr^2}{1 - k r^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \right]$$

Espace-temps dans lequel on voit toujours les mêmes propriétés quel que soit le point d'observation



Univers ouvert  $k = -1$

Univers plat  $k = 0$

Univers fermé  $k = +1$

Espace-temps à selle de cheval, plat ou sphérique

# L'Univers en expansion

Equations d'Einstein d'un univers homogène et isotrope

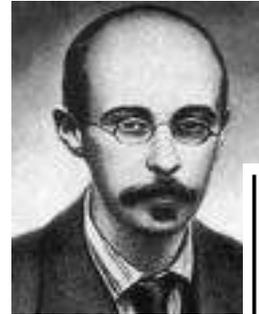
$$\begin{cases} H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} \\ \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) \end{cases}$$

Le vitesse d'expansion depend de la densité de matière et de la courbure globale de l'espace-temps

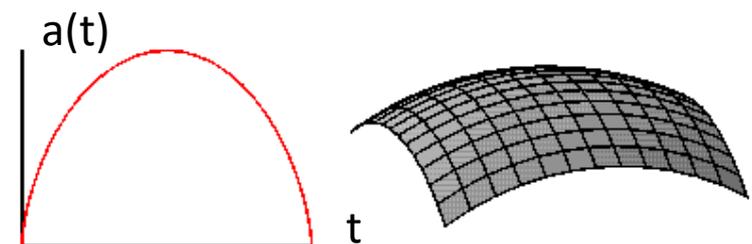
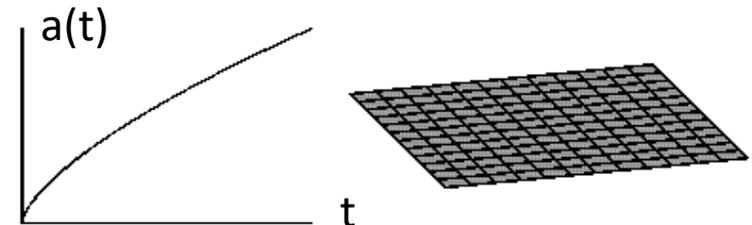
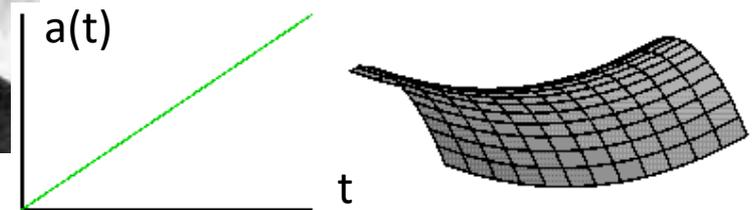
L'accélération d'expansion depend de la nature des composants de matière (équation d'état  $p = w \rho$ )

Densité critique  $\rho_c = \frac{3H_0}{8\pi G}$

## Modèles de Friedmann

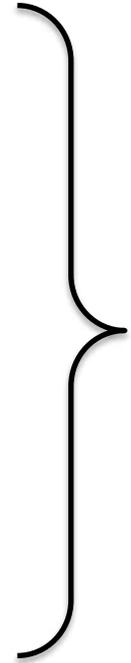


L'univers est dynamique!

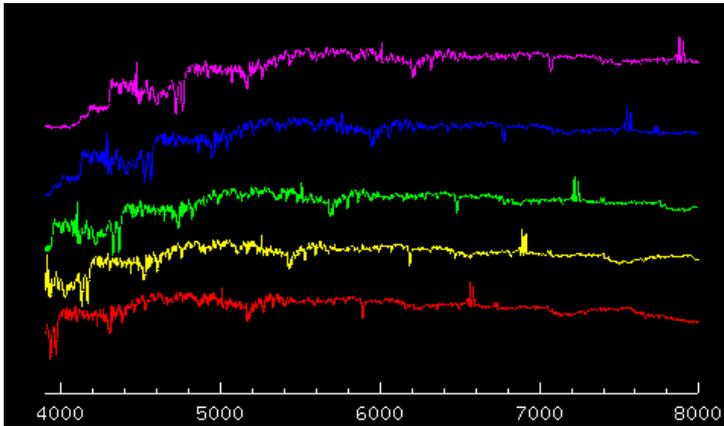


# Les fondements observationnels

- Décalage vers le rouge (red-shift)
- Isotropie et Homogénéité de la distribution de matière
- Loi d'Hubble
- Nucléosynthèse Primordiale
- Fond Diffus Cosmologique



# Les galaxies s'éloignent



La lumière des galaxies est décalé vers le rouge

$$z \equiv \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e} = \frac{a(t_o)}{a(t_e)} - 1$$

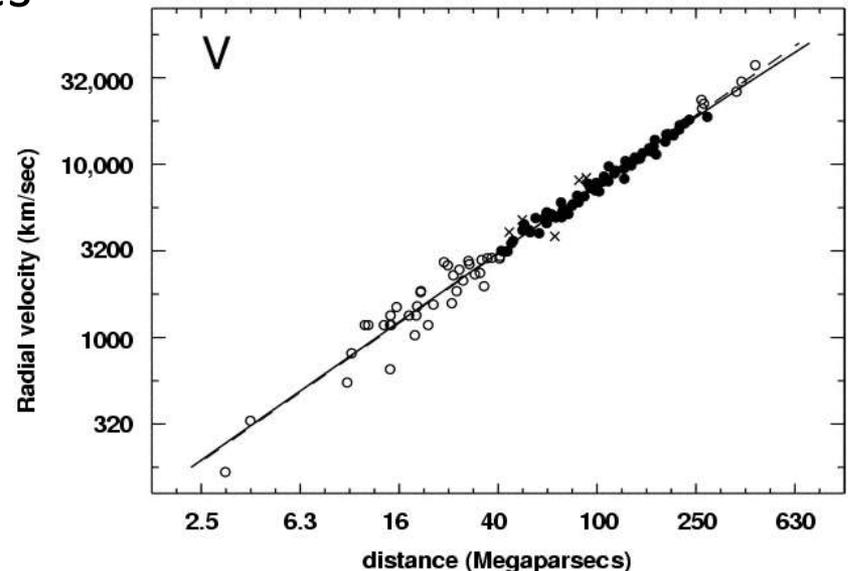
La vitesse de récession des galaxies est proportionnel à la distance

$$x = a(t) r \quad \longrightarrow \quad v = H r$$

L'espace se dilate au cours du temps



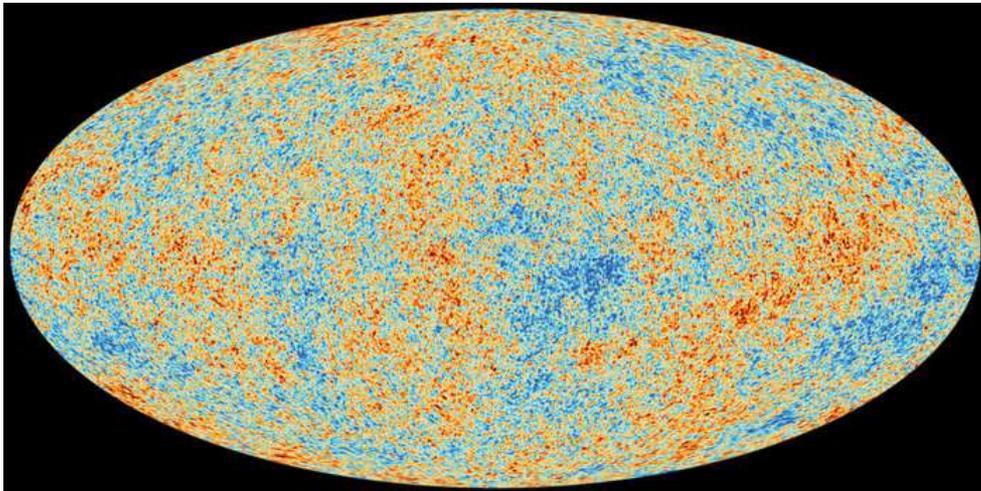
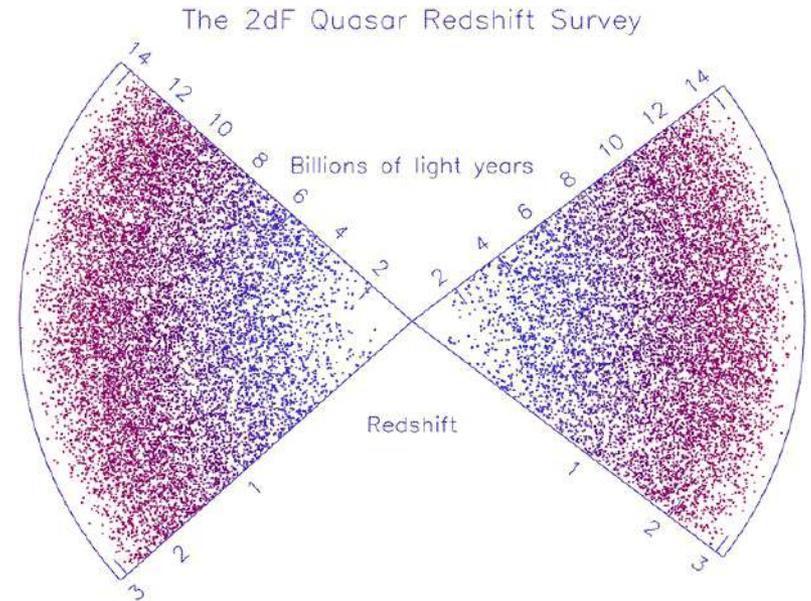
Hubble diagram for Type Ia SNe



# L'uniformité presque parfaite

La distribution spatiale des galaxies est homogène et isotrope aux grandes échelles cosmologiques

*Faibles inhomogénéités dans la distribution des galaxies sont indicatives de la présence de fluctuations de densité de matière*



La distribution de matière est de plus en plus homogène si on regard aux régions plus distantes qui se trouvent au bord de l'univers observable

# Nucléosynthèse primordiales

Comment expliquer les abondances des éléments les plus légers mesurées dans les nuages de gaz?

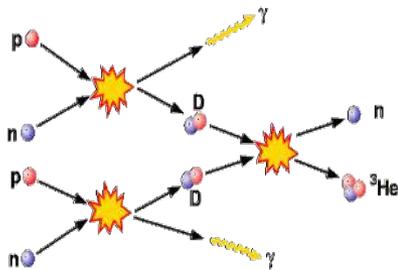


Dans le passé l'univers était plus petit, donc plus dense et plus chaud

$$T(t) = T_0 / a(t)$$

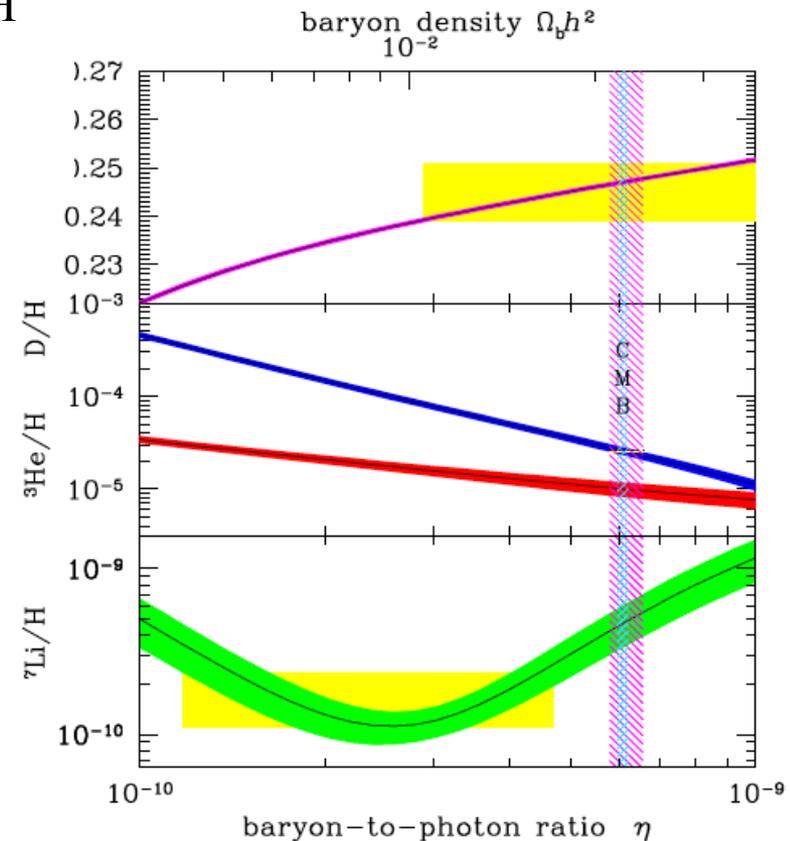
$$\frac{D}{H} \sim 2 \times 10^{-5} \quad \frac{He}{H} \sim 0.08 \quad \frac{Li}{H} \sim 10^{-10}$$

Quand  $T > 1$  MeV la matière était décomposée dans ses constituantes élémentaires, en interagissant par l'interaction électrofaible.



Quand  $T < 1$  MeV, l'équilibre est rompu donnant lieu à la fusion nucléaire de l'H avec la production de D, He et Li (les premières trois minutes)

Existence d'un fond de radiation!



# La radiation de fond

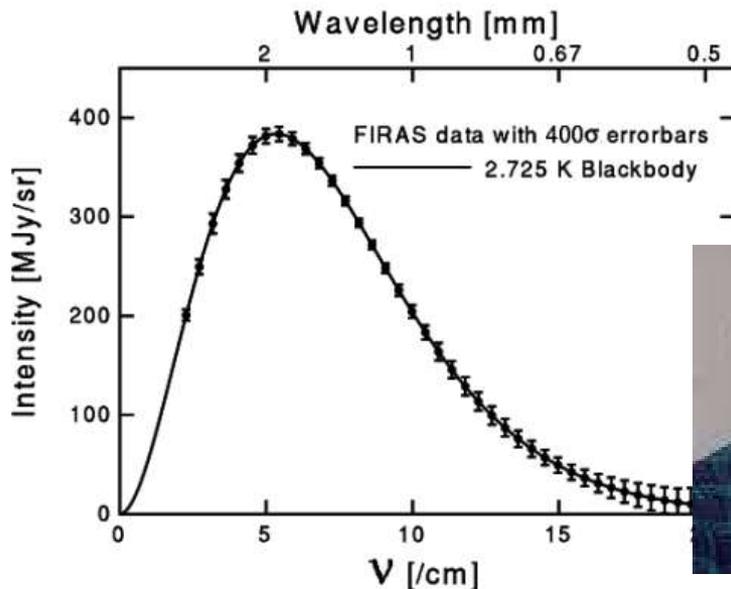
Les interactions électromagnétiques prennent le relais après la nucléosynthèse

Les photons collisions fortement avec les noyaux d'hydrogène et les électrons libres

La radiation est en équilibre (parfait) avec la matière, alors que la température diminue avec l'expansion



Prix Nobel en Physique 1978



$T < 3000$  K, les électrons libres se lient avec les noyaux d'hydrogène pour former les atomes neutres.

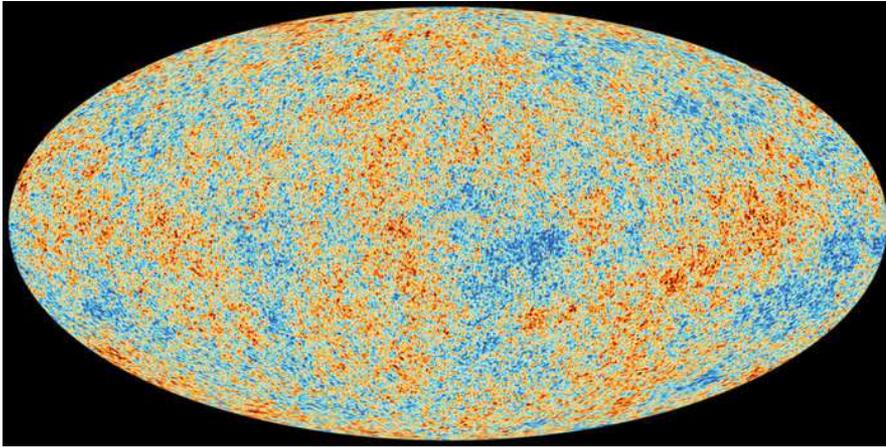


Prix Nobel en Physique 2006

Les photons sont enfin libres de s'échapper dans l'univers!

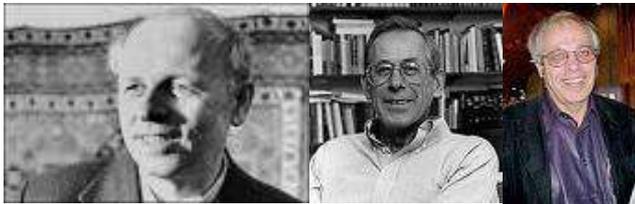
Fond diffus de radiation avec spectre de corps noir

# Les anisotropies du fond diffus



Fluctuations de densité  
dans la distribution  
primordiale de matière

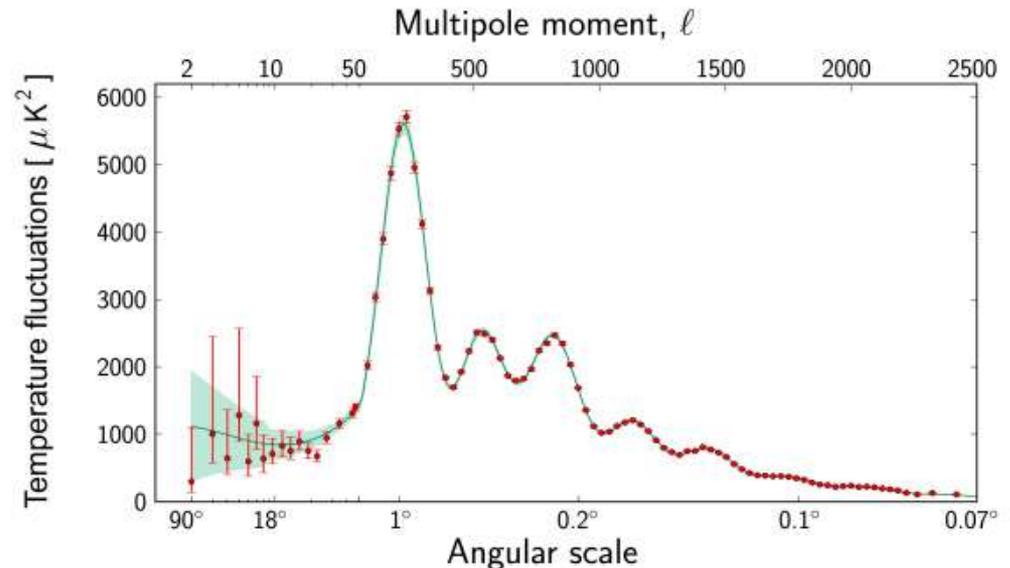
Croissance des fluctuations  
par instabilité gravitationnel



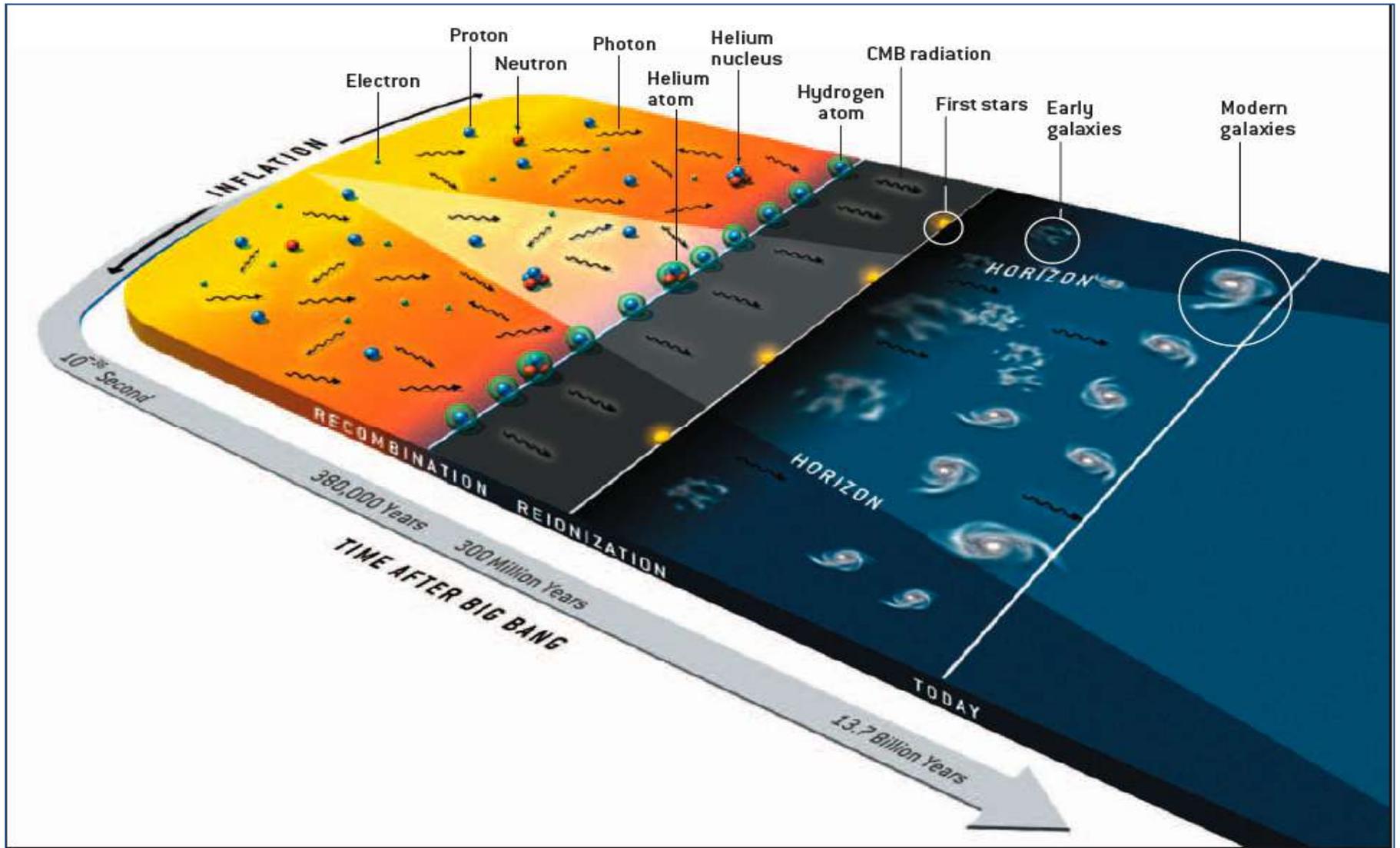
Propagation d'ondes acoustiques  
dans la soupe primordiale de  
photons et baryons

$$\ddot{\Theta}_0 + \frac{\dot{R}}{1+R}\dot{\Theta}_0 + k^2 c_s^2 \Theta_0 = F(\eta)$$

Observations par le satellite Planck vs Théorie



# L'histoire de notre univers

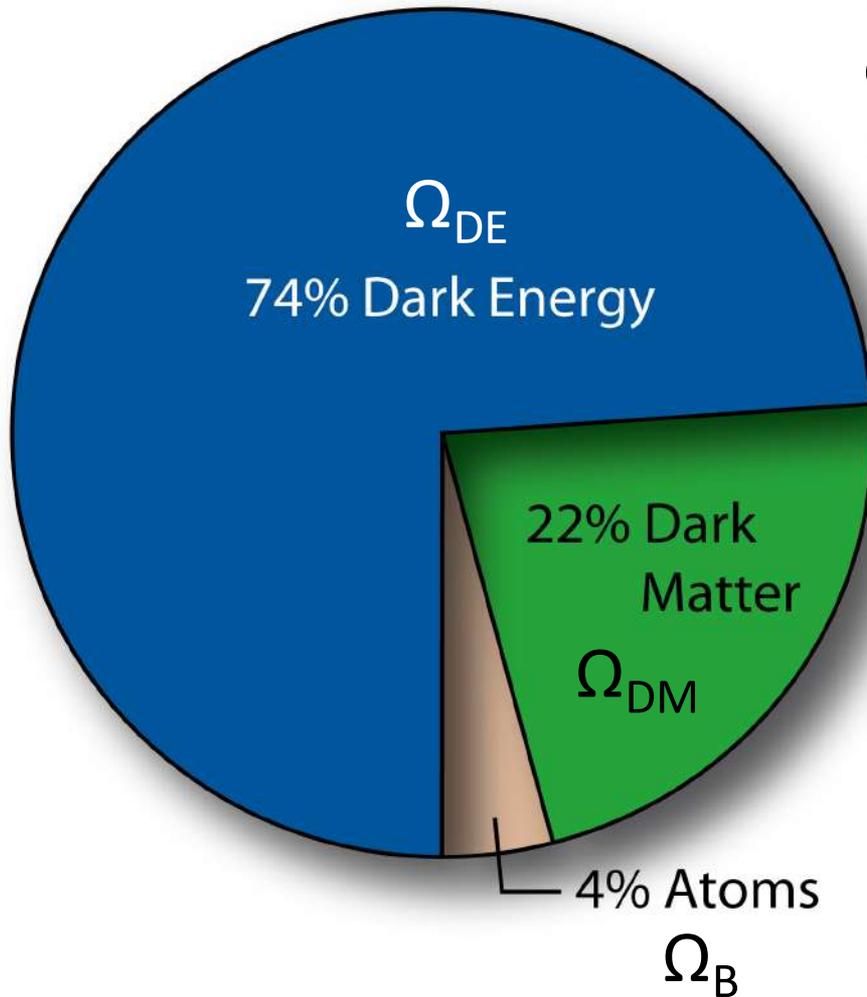


# Univers Invisible

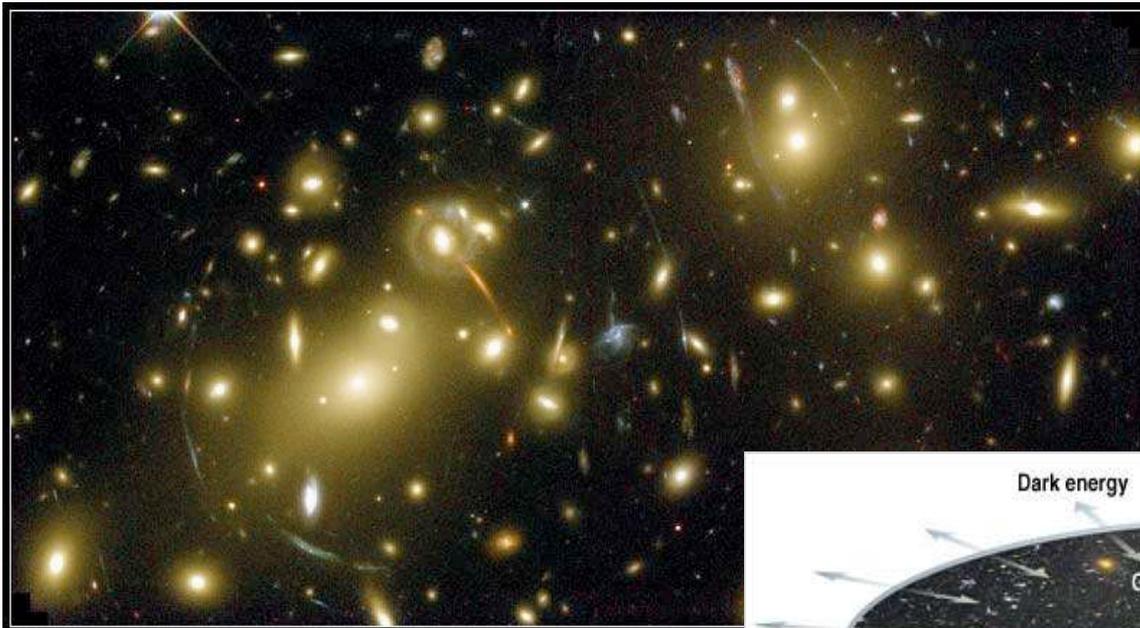
Il n'y a que quelque pour cent de matière ordinaire (baryonique) dans l'Univers

En cosmologie on appelle matière baryonique tous les composants décrites par le Model Standard de la physique de particules

Les composantes invisibles se manifestent que par leur action gravitationnel sur la matière visible



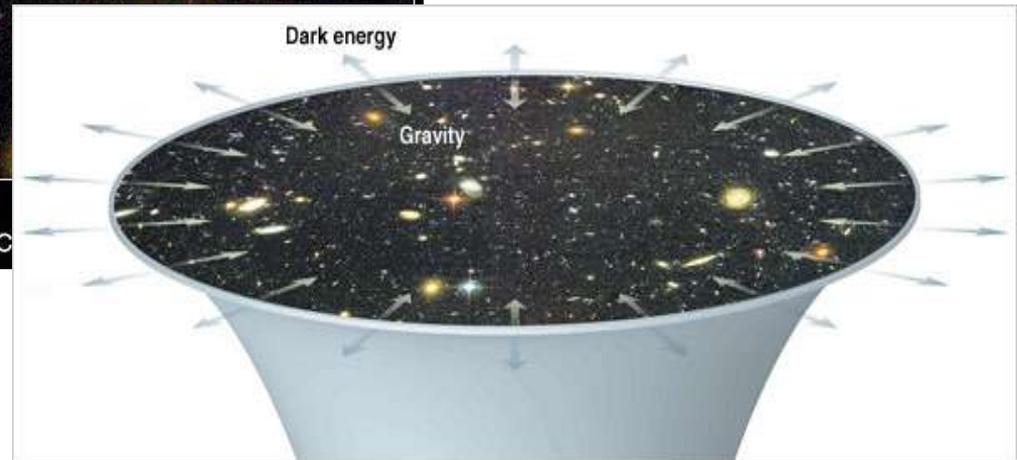
# Composantes Noires



**Galaxy Cluster Abell 2218**

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, STECF) • STScI-PRC

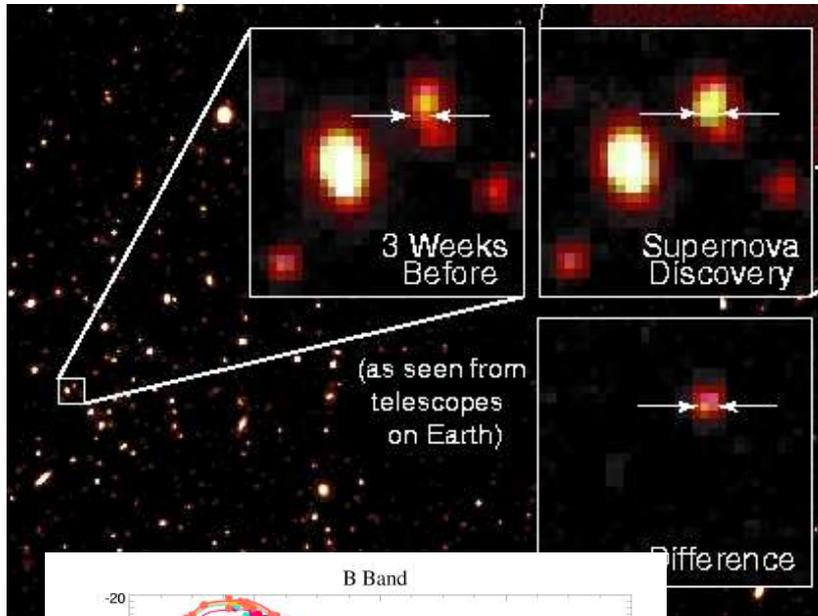
Matière Noire: *Collant Gravitationnel, Opposant Expansion Cosmique*



Energie Noire: *Répulsive, Accélérant Expansion Cosmique*

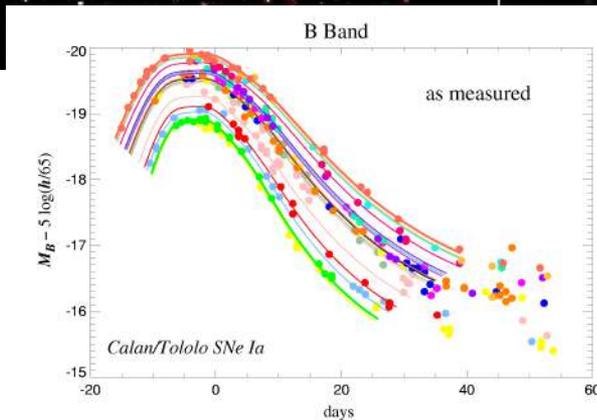
*“There are more things in heaven and earth, Horatio,  
Than are dreamt of in your philosophy” - Hamlet*

# Les phares de l'Univers

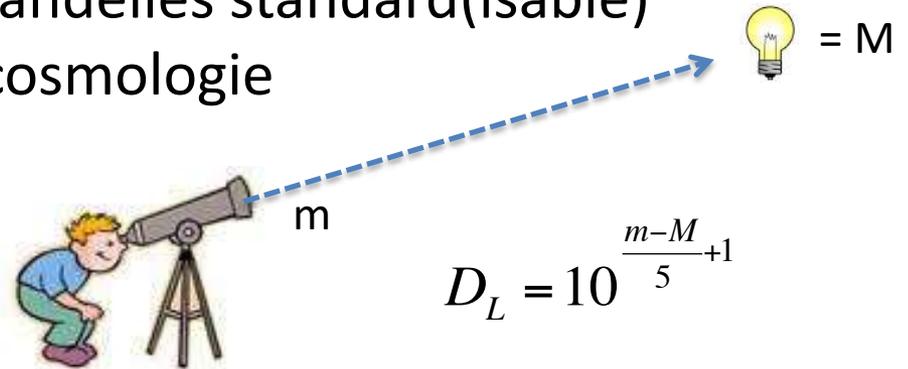


Les explosions de Supernova Ia (SN Ia) sont des événements très lumineux et visibles à des très grandes distances cosmiques

Plus la supernova est lumineuse, plus long la durée de sa visibilité (Phillips relation)



Les chandelles standard(isable) de la cosmologie

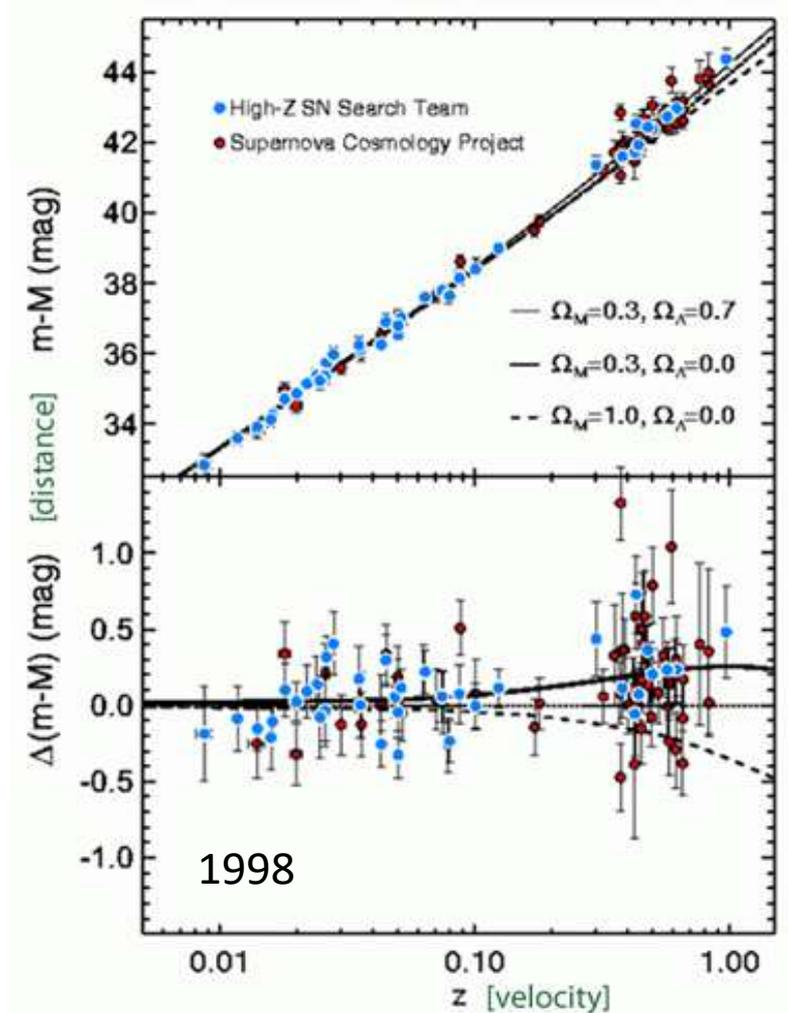


# L'Univers Accélération

La mesure du diagramme de Hubble par le High-z Supernova Search Team et indépendamment par Supernova Cosmology Project indique que les distances des galaxies à haut décalage vers le rouge sont plus grandes que dans un univers décélérant



Prix Nobel en Physique 2011

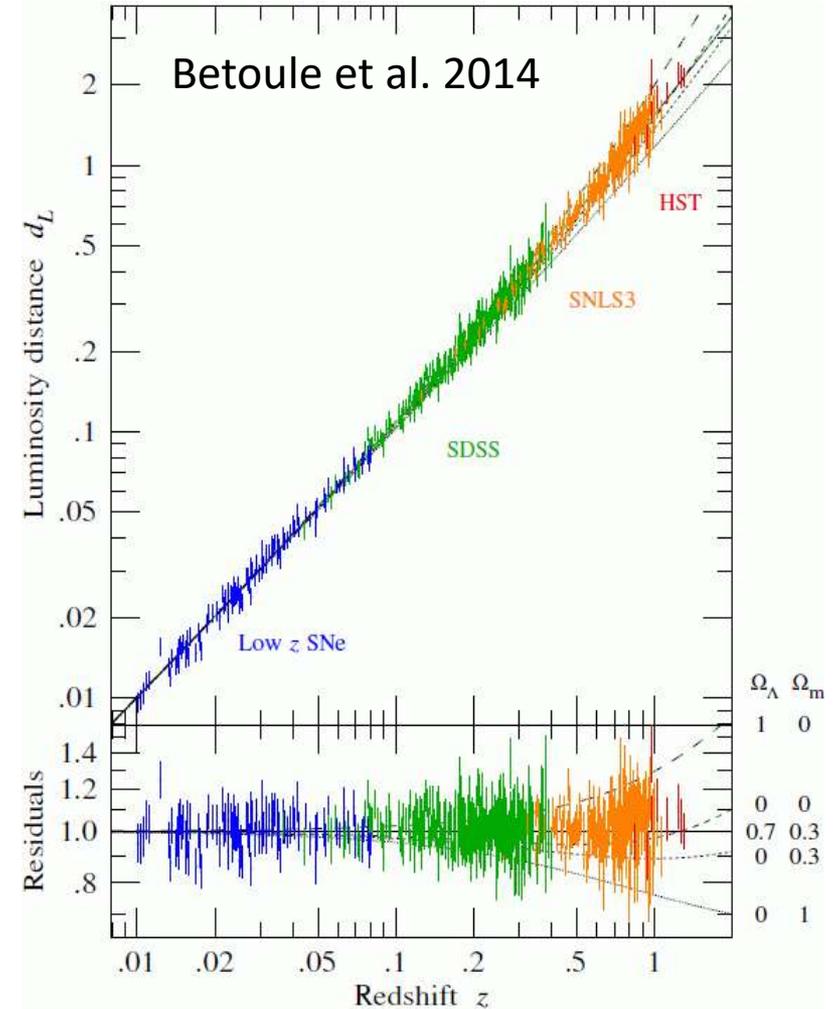


# L'Univers Accélération

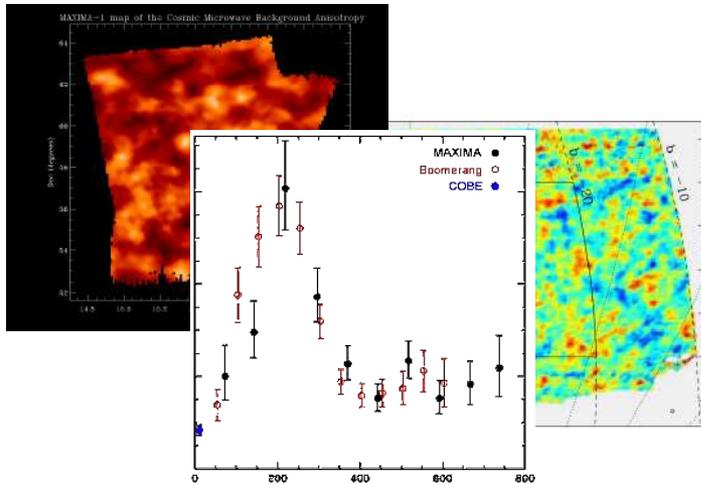
La mesure du diagramme de Hubble par le High-z Supernova Search Team et indépendamment par Supernova Cosmology Project indique que les distances des galaxies à haut décalage vers le rouge sont plus distantes que dans un univers décélérant

$$\Omega_{\text{DE}} \approx 0.7$$

$$p_{\text{DE}} < -1/3$$



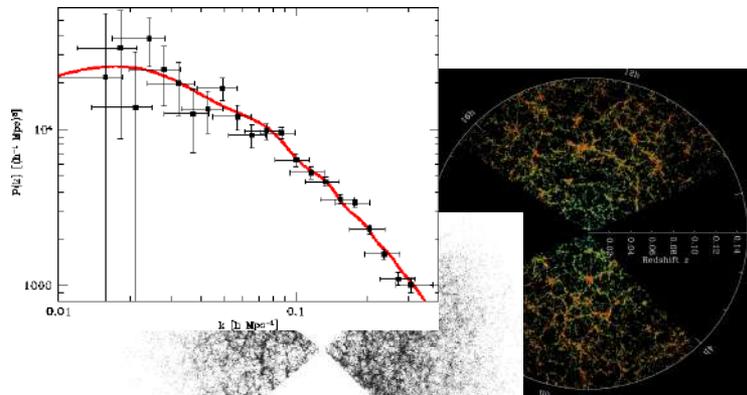
# Une piste indirecte à la même époque



Les premières mesures capables de résoudre les oscillations acoustiques dans les anisotropies du fond diffus cosmologique indiquaient un univers à géométrie plat

$$\sum_i \Omega_i = 1$$

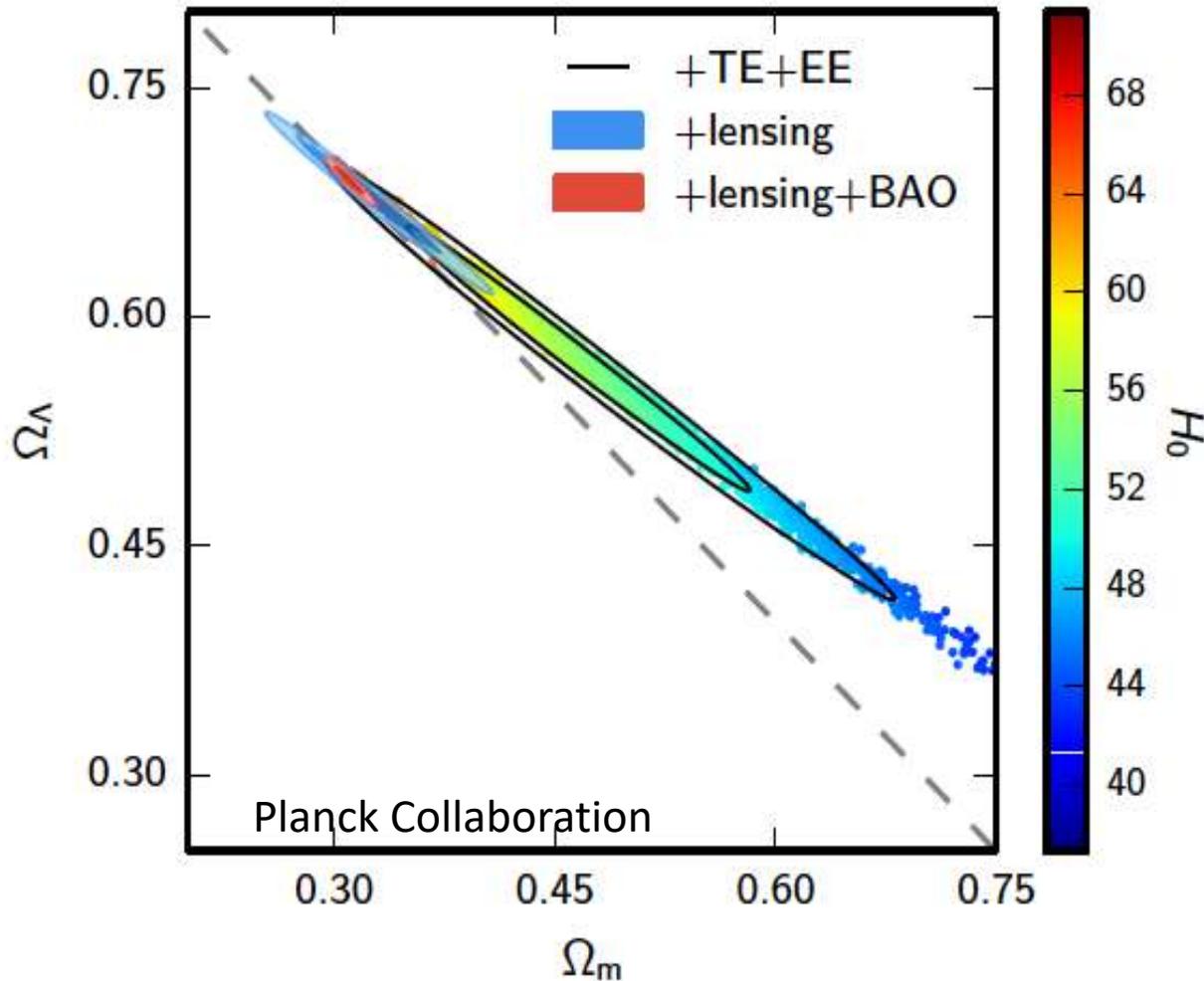
*“Le camembert cosmique est entier!”*



Les relevées de galaxies indiquaient un univers à bas contenu de composant de matière (noire et baryonique)

$$\Omega_X = 1 - \Omega_m - \Omega_b \neq 0$$

# Indépendamment de SN Ia, Planck!

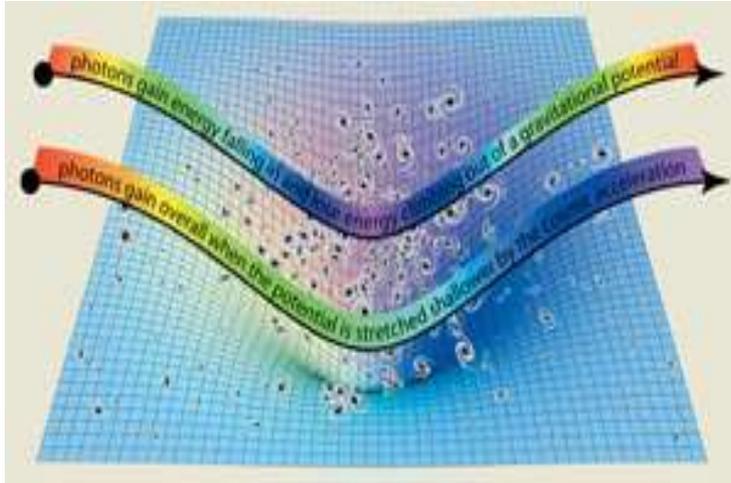


Dégénérescence  
entre les  
paramètres  
cosmologiques

*Abondance énergie  
noire, taux d'expansion  
et géométrie*

Les cisaillements  
gravitationnels des  
anisotropies  
depend de  
l'abondance de  
matière dans  
l'univers

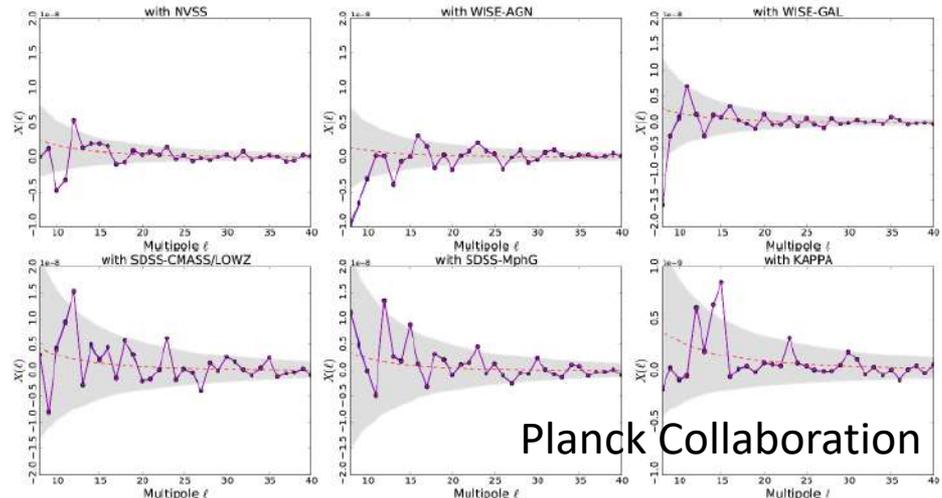
# Traces directes dans le fond diffus



Les potentiels gravitationnels des structures cosmiques diminuent au cours du temps lorsque l'univers accélère

L'énergie des photons du fond diffus qui les traversent est altérée (Effet Sachs-Wolfe Intégré)

Corrélation angulaire entre carte du fond diffus et distribution des structures



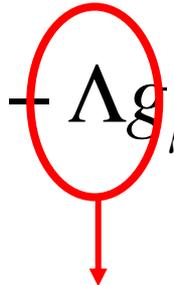
Planck Collaboration

# La cause de l'accélération?

## Relativité Générale

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

$$G_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$


$$p_{\Lambda} = -\rho_{\Lambda}$$

Pousse l'expansion cosmique dans un régime accéléré

## Principe Cosmologique

L'univers est homogène et isotrope

### Constant Cosmologique

Equivalent à un fluide exotique avec pression négative

$$q \equiv -\frac{\ddot{a}a}{\dot{a}^2} = \frac{1}{2}(1 - 3\Omega_{\Lambda})$$

# Mais alors, c'est quoi le problème?

Une constant  
géométrique pas  
du tout naturel

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[ \frac{c^4}{16\pi G} (R - 2\Lambda) + L_M \right]$$

*“Einstein was soon aware of these new possibilities and completely rejected the cosmological term as superfluous and no longer justified. I fully accept this new standpoint of Einstein’s”*

Pauli’s note to 1958 translation of *Die Relativitätstheorie* (1921)

*“The introduction of such a constant implies a considerable renunciation of the logical simplicity of the theory... Since I introduced this term, I had always a bad conscience... I am unable to believe that such an ugly thing should be realized in nature.”*

Einstein’s letter to Lemaitre (1947)

# L'énergie du vide, pourquoi pas?

Tous les formes d'énergie  
contribuent à la courbure  
de l'espace temps

1562

V. Sahni, A. Krasinski

---

*THE COSMOLOGICAL CONSTANT AND THE THEORY  
OF ELEMENTARY PARTICLES*

Ya. B. ZEL'DOVICH

Institute of Applied Mathematics, USSR Academy of Sciences  
Usp. Fiz. Nauk **95**, 209–230 (May, 1968)

Let us take the expression for the energy density of the vacuum of scalar particles, obtained with allowance for the zero-point oscillations:

$$\rho_{\text{vac}} = \hbar k_{\text{max}}^4$$

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{1}{2} \frac{1}{(2\pi\hbar)^3} \int_0^\infty c\sqrt{p^2 + \mu^2} 4\pi p^2 dp = \\ &= K \int_0^\infty \sqrt{p^2 + \mu^2} p^2 dp = KI(\mu), \end{aligned} \quad \text{(VIII.1)}$$

...mais

$$\rho_{\Lambda}^{\text{obs}} = (10^{-12} \text{ GeV})^4$$

# Dynamique ou Constante

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[ \frac{c^4}{16\pi G} R + L_M + L_\phi \right]$$

Nouvelle forme de matière?

Modification de la gravité aux échelles cosmologiques?

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[ \frac{c^4}{16\pi G} f(R) + L_M \right]$$

En termes phénoménologiques..

*L'équation d'état*

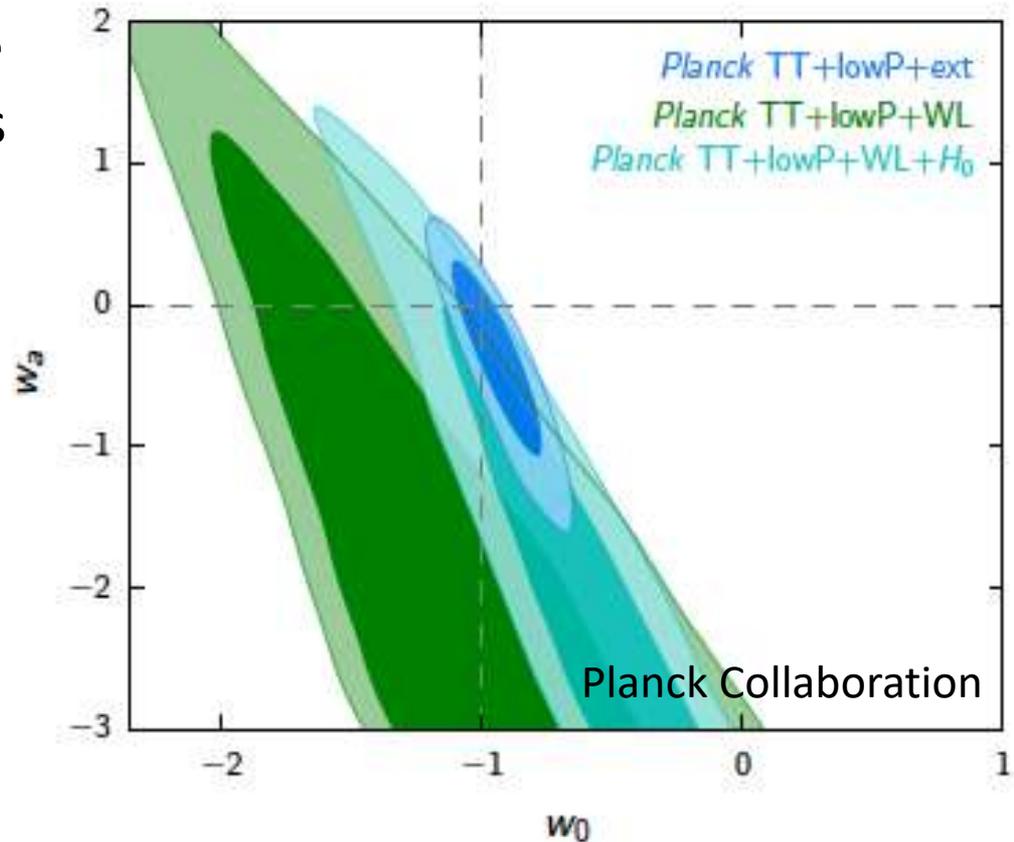
$$\frac{p}{\rho} = w(t)$$

# Qu'est-ce nous disent les observations?

Contraintes restent encore faibles sur les paramètres de l'énergie noire

$$w(t) = w_0 + w_a [1 - a(t)]$$

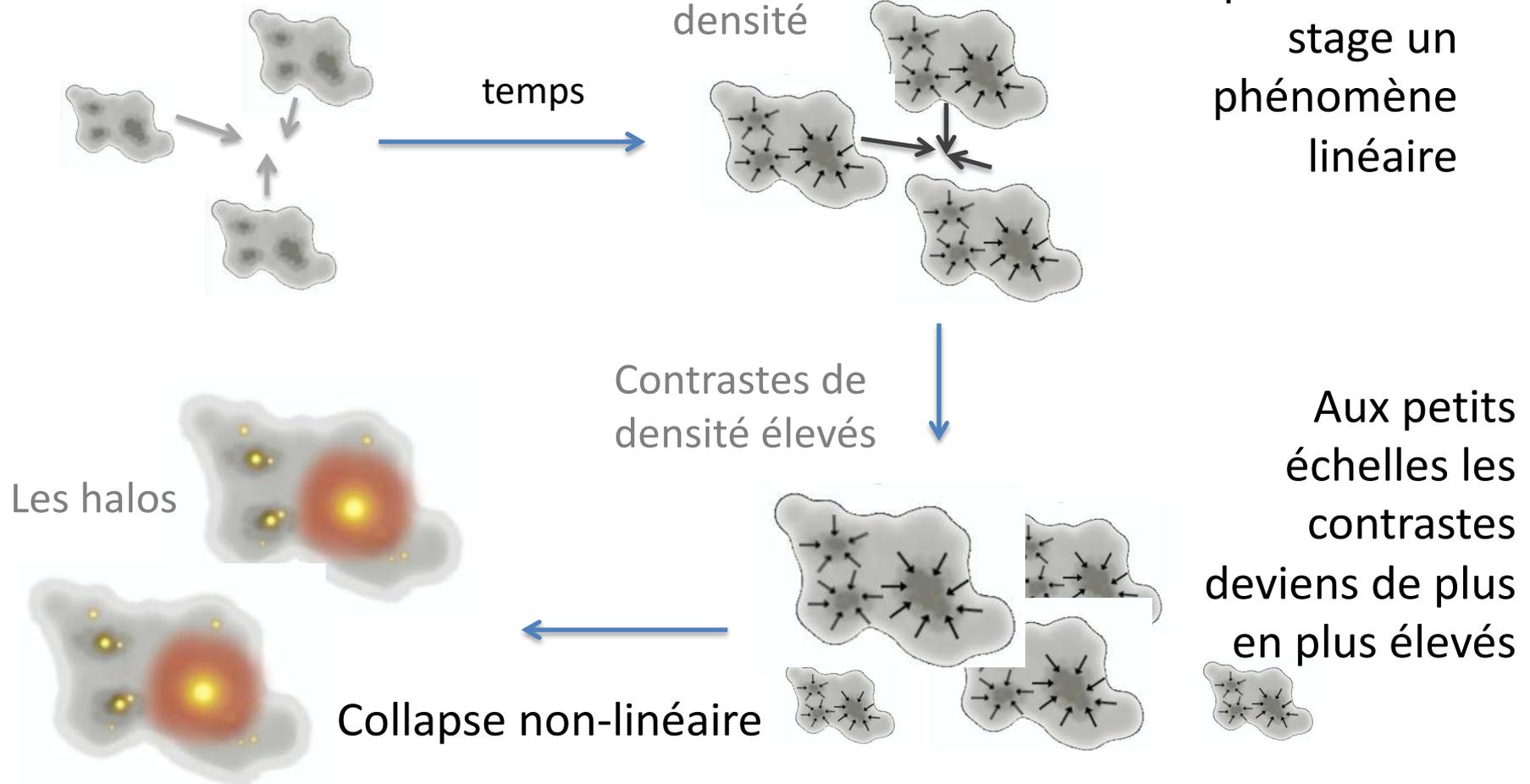
Constant Cosmologique en accord avec les données tel que les modèles dynamiques



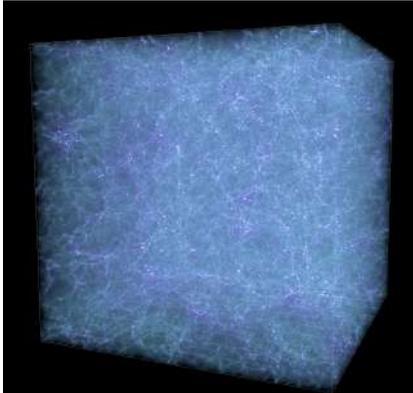
Quels observables peuvent nous aider à distinguer les différents scénarios?

# La Structuration de l'Univers

Effondrement gravitationnels  
à grandes échelles

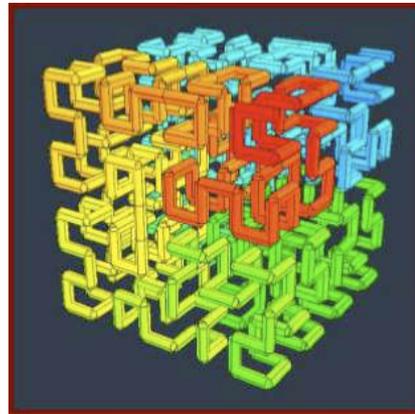


# La simulation numérique

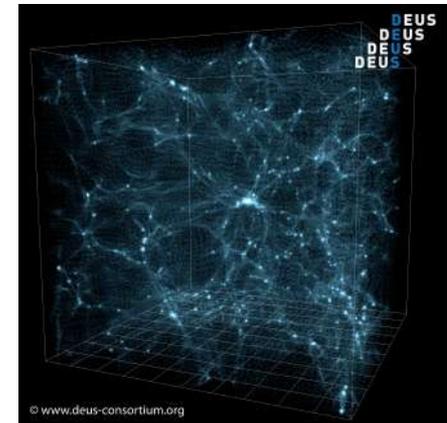


1) Génère distribution aléatoire initial de macro-particles statistiquement consistant avec les observations

2) Intégration numérique des équations de la dynamique des macro-particles



3) Analyse de la distribution finale des macro-particles dans la région d'univers simulée



$$\frac{d\vec{p}_i}{da} = -\frac{\nabla\Phi}{\dot{a}}, \quad \frac{d\vec{x}_i}{da} = \frac{\vec{p}_i}{\dot{a}^2}, \quad i = 1, N$$

$$\nabla^2\Phi = 4\pi G a^2 \bar{\rho}_m \delta_m$$

# Les traces dans l'Univers virtuel

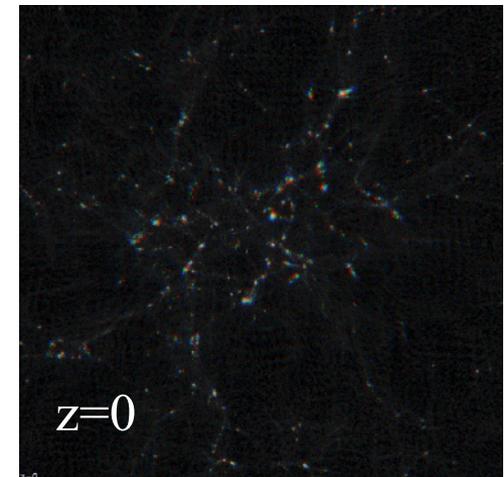
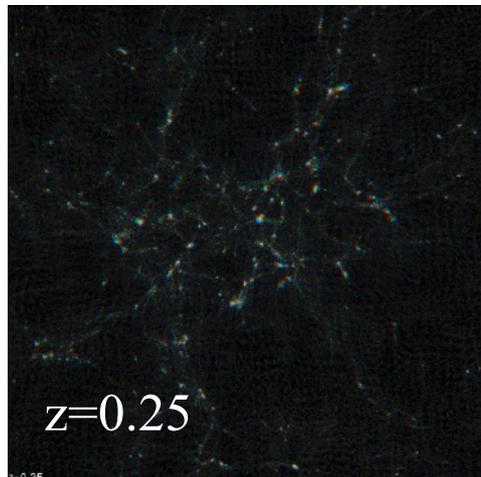
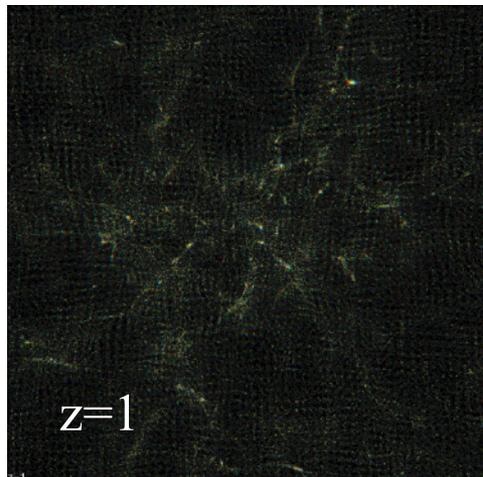
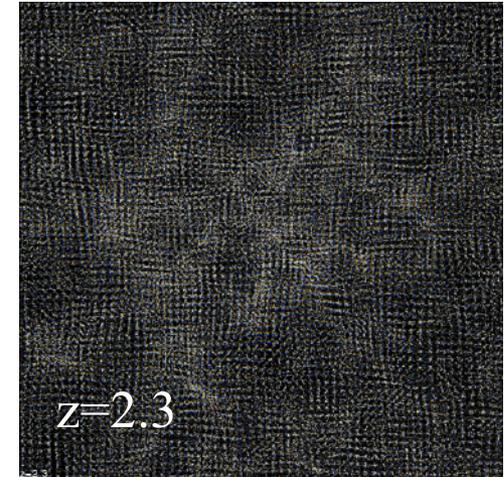
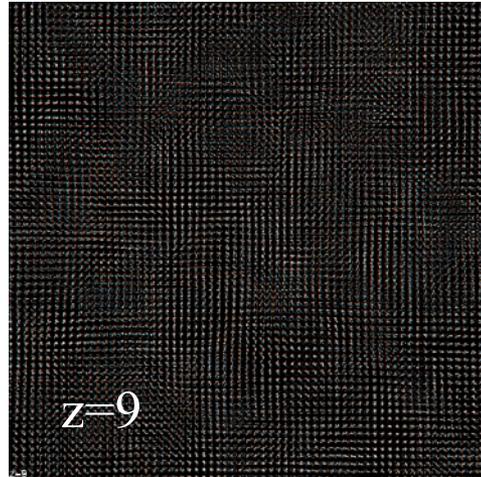
## Dark Energy Universe Simulations

Grand ensemble de simulations numériques HPC

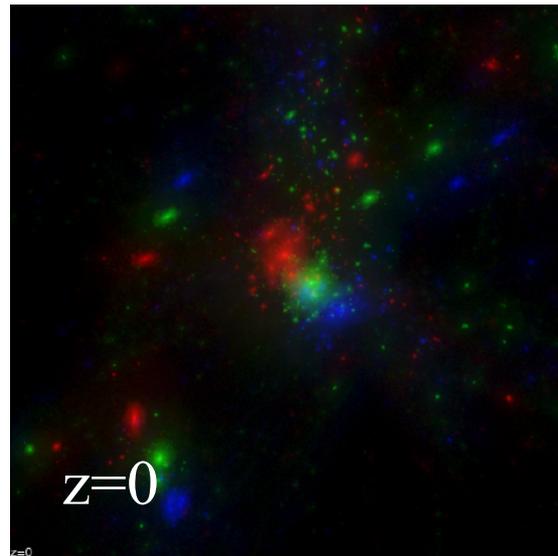
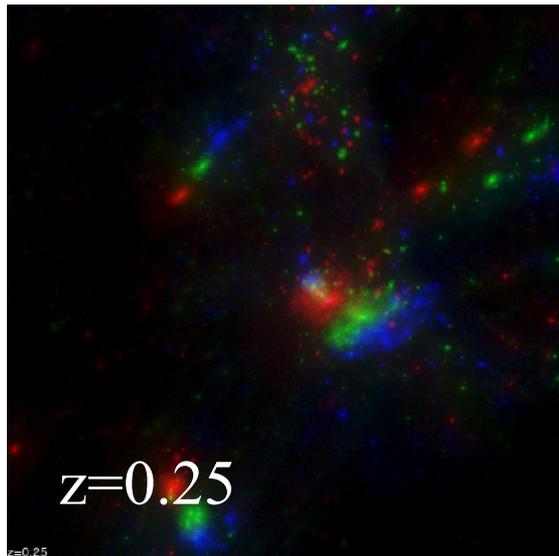
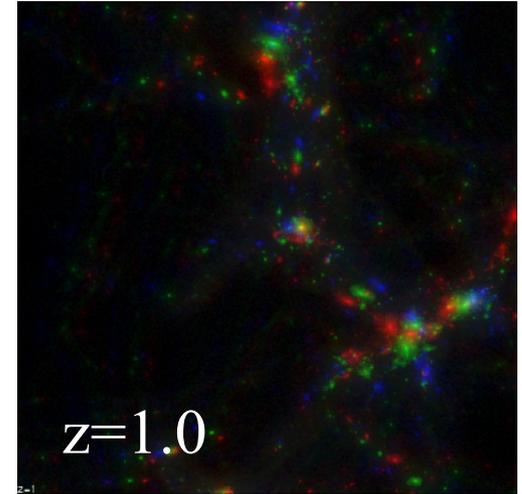
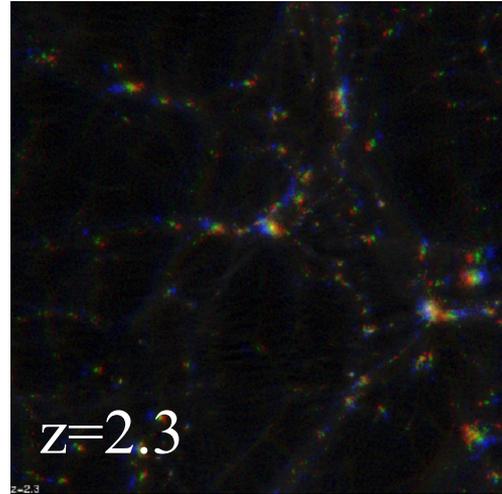
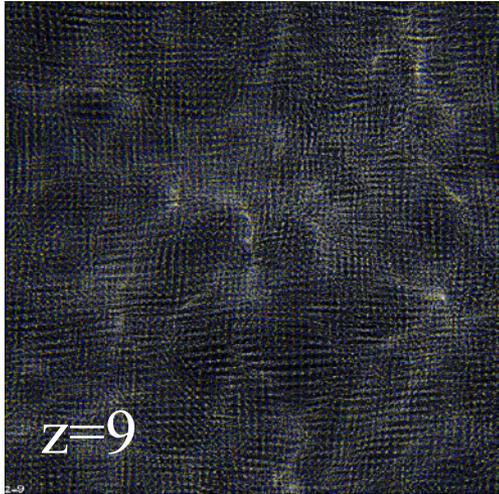
J.M. Alimi

P.S. Corasaniti

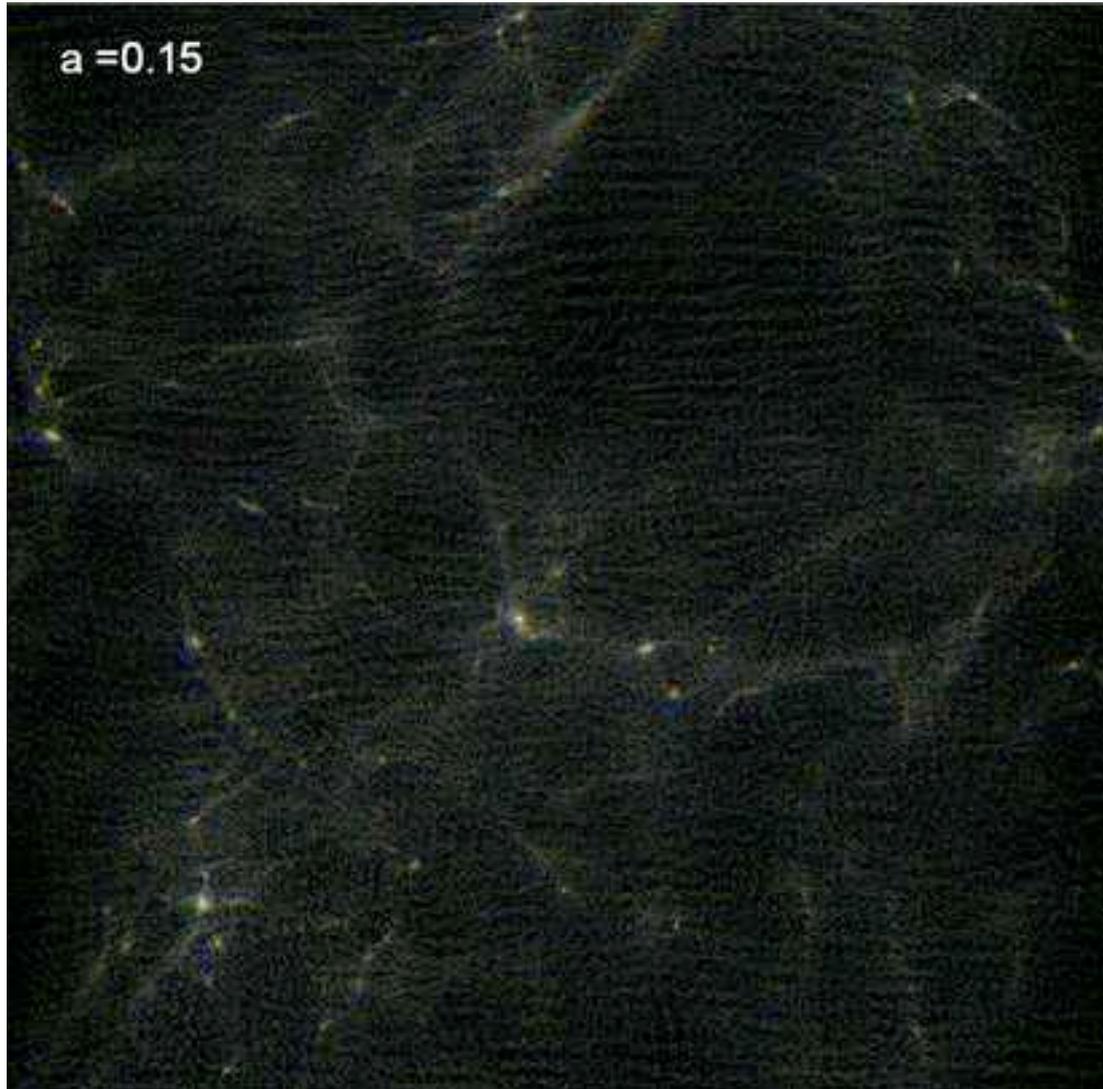
Y. Rasera



# Zoom aux petites échelles



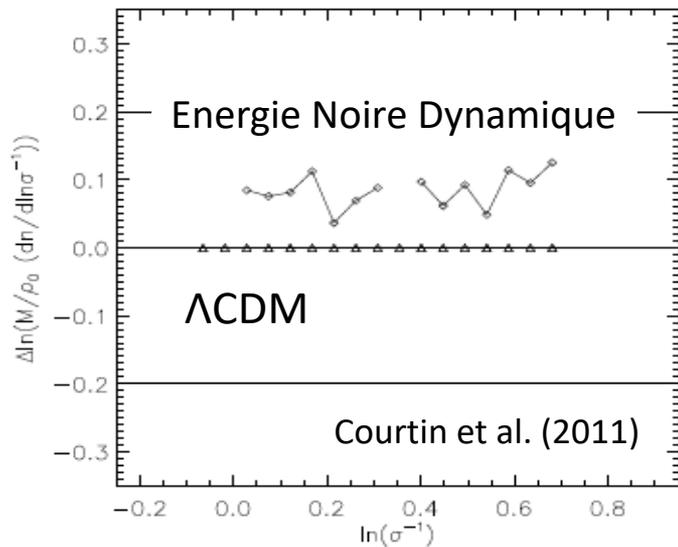
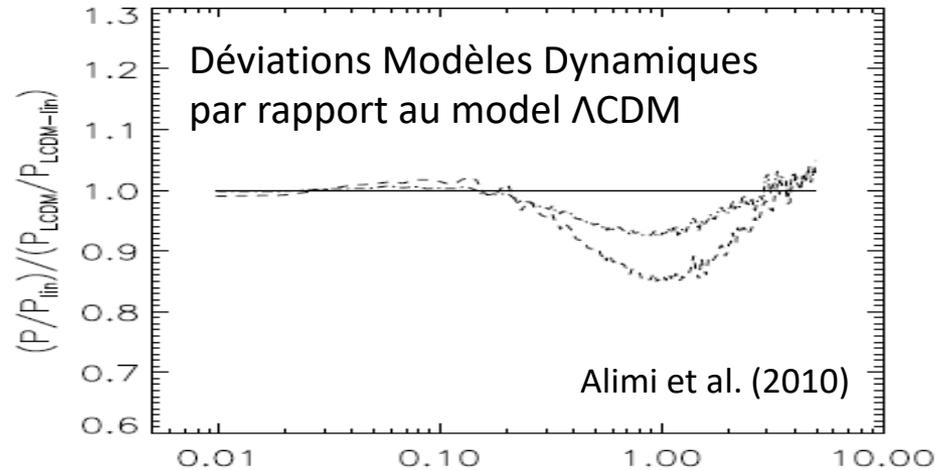
# Un vidéo pour mieux comprendre



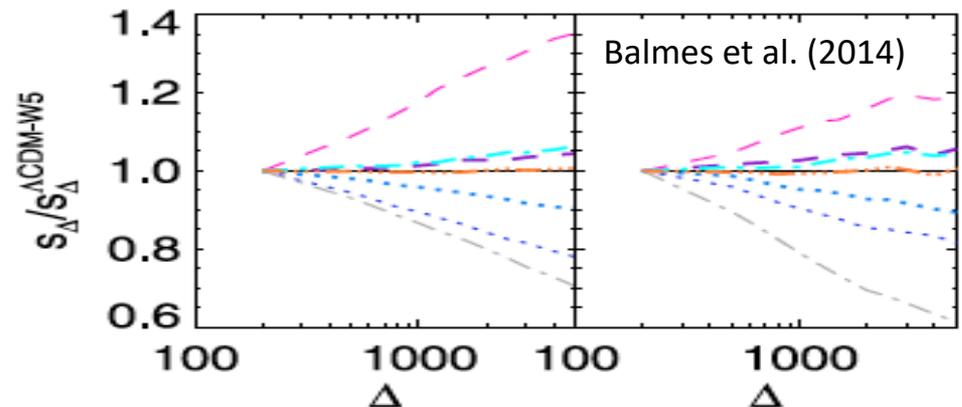
# Empreints sur les observables

Spectre de la distribution spatiale de matière

Abondance halo massives contenant les amas et les groupes de galaxies



La structure interne des halo de matière noire



# Au delà de l'Energie Noire

Un débat de longue date:

*La formation des structures  
cosmiques est universelle*

contre

*La formation des structures  
cosmiques depends de  
l'histoire évolutive de l'univers*

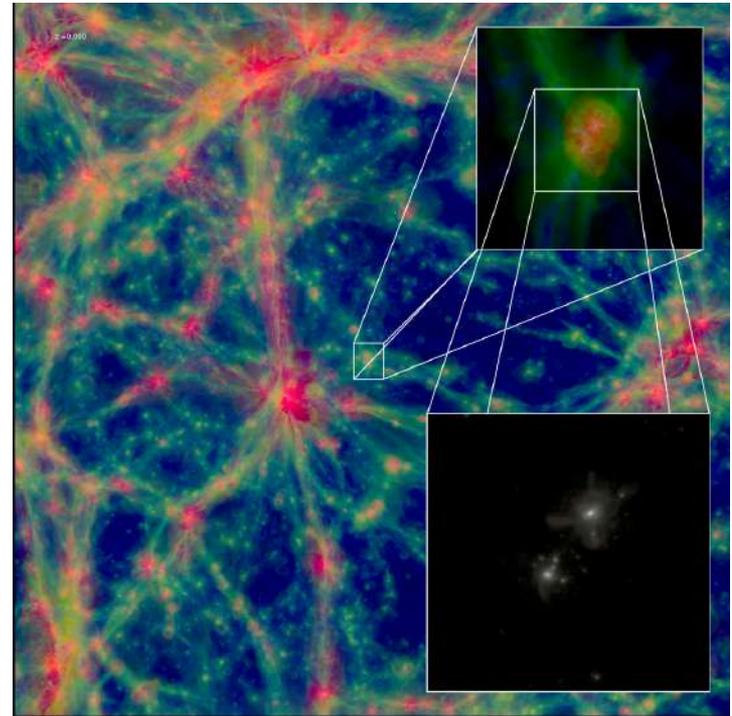
# La formation des galaxies

Les halos de matière noire sont les briques fondamentales de la formation des structures

Le gaz baryonique effondre au sein des halos pour former les étoiles et les galaxies que nous observons aujourd'hui

Les mécanismes physiques de formation d'étoiles restent très incertains

La formation des galaxies devrait être complètement réglée par ces mécanismes

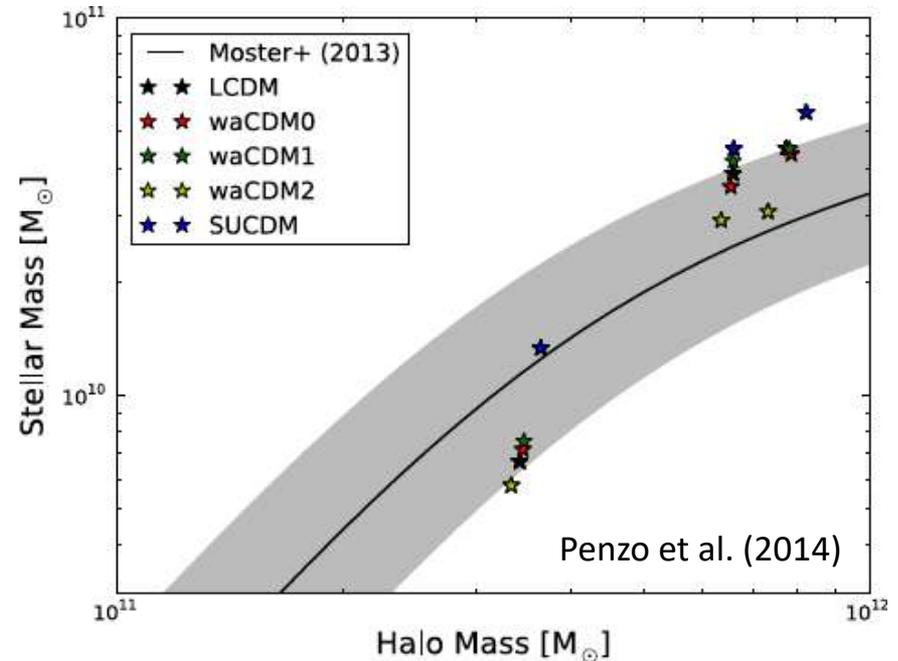
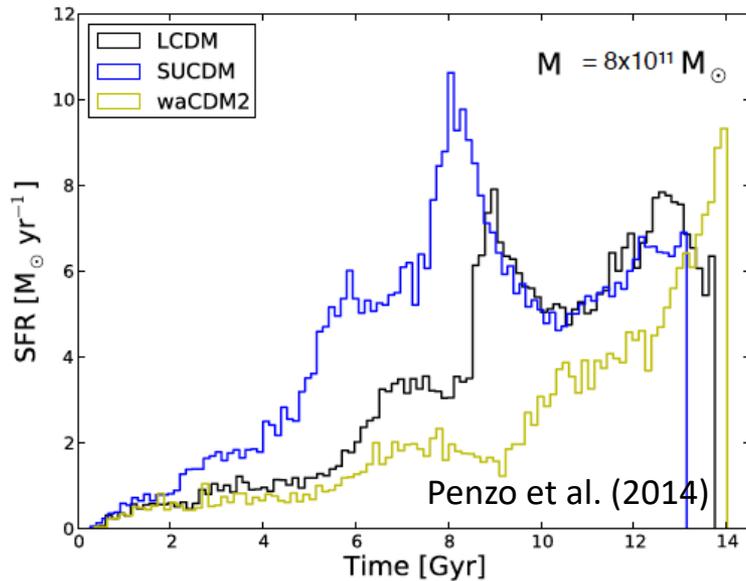


*Aucun rôle pour la cosmologie?*

# Effets de l'énergie noire

Mots clés: *Instabilité de Jeans, Collisions and fusions halos*

Simulation hydrodynamique de modèles dynamique d'énergie noire



Formation des étoiles dépend du modèle d'énergie noire

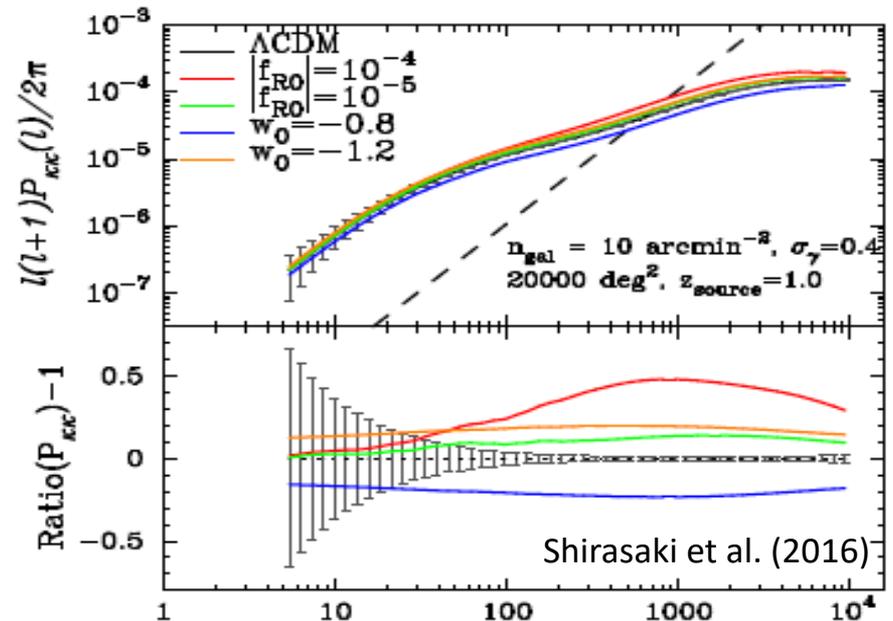
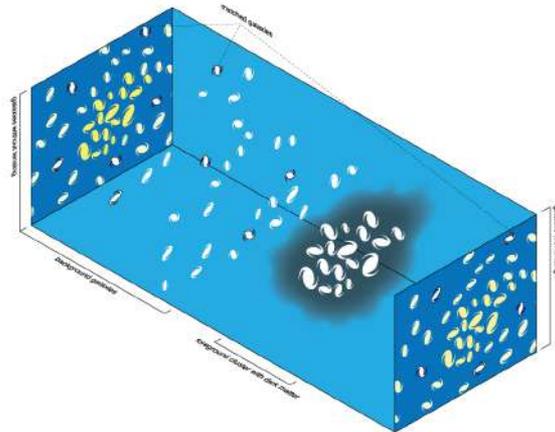
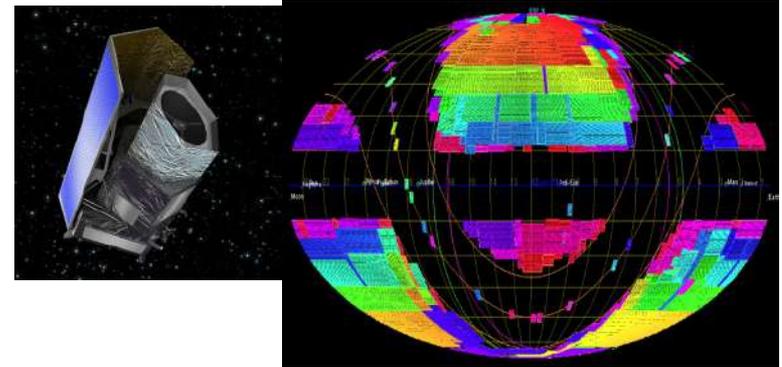
Empreints sont dégénérées avec celles produites par les modèles de formation stellaires

# Les sondes futures: la mission Euclid

Les relevées de galaxies pour sonder la structuration de la matière de petites aux grandes échelles

Plusieurs observables: distribution de galaxies, leur vitesses propres, détection des amas

La mesure du cisaillement gravitationnels pour sonder la distribution de matière noire



Shirasaki et al. (2016)

# Conclusions

- L'énergie noire n'est pas un phénomène reclus aux très grandes échelles
- Comprendre la nature de l'énergie noire est un problème strictement lié au concept de naturalité des lois physiques
- L'énergie noire impact l'effondrement gravitationnel tardive de la matière noire et du gaz jusque aux échelles galactiques
- Le future est lumineux