



European Research Council

Established by the European Commission

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

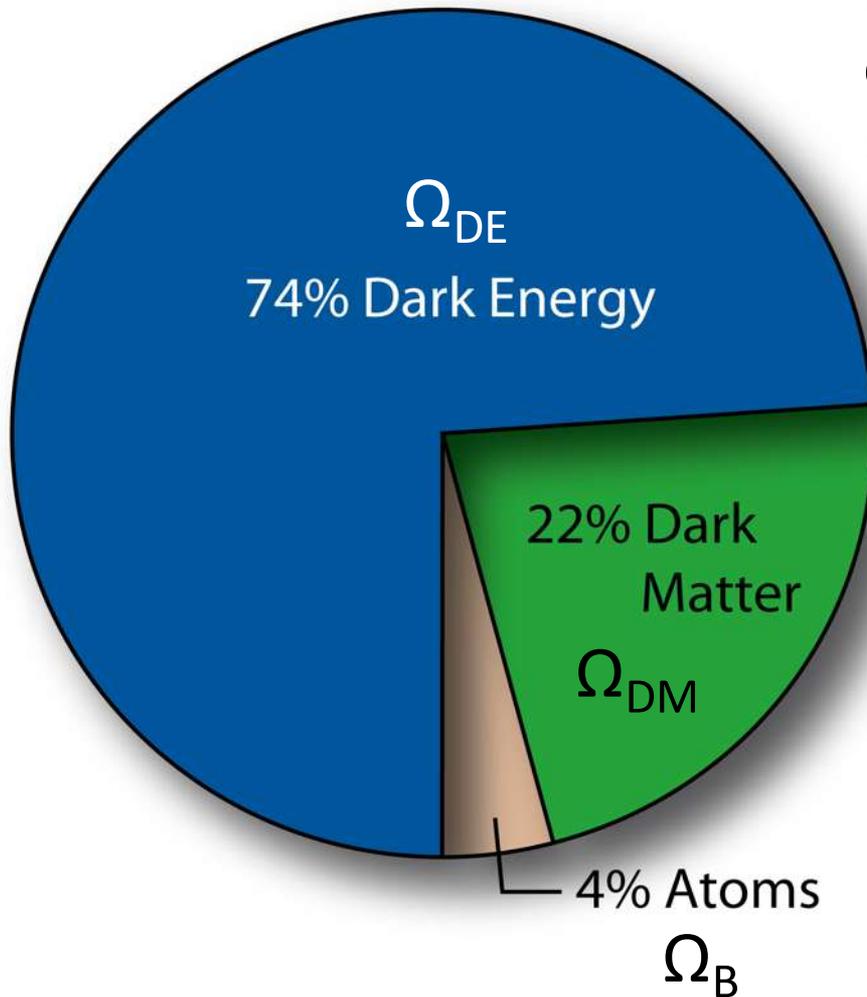
- Bref histoire des évidences observationnels de l'énergie noire dans l'univers
- Le problème de la nature de l'énergie noire (ou la naturalité des lois physiques)
- Les empreints de l'énergie noire sur la formation des structures

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

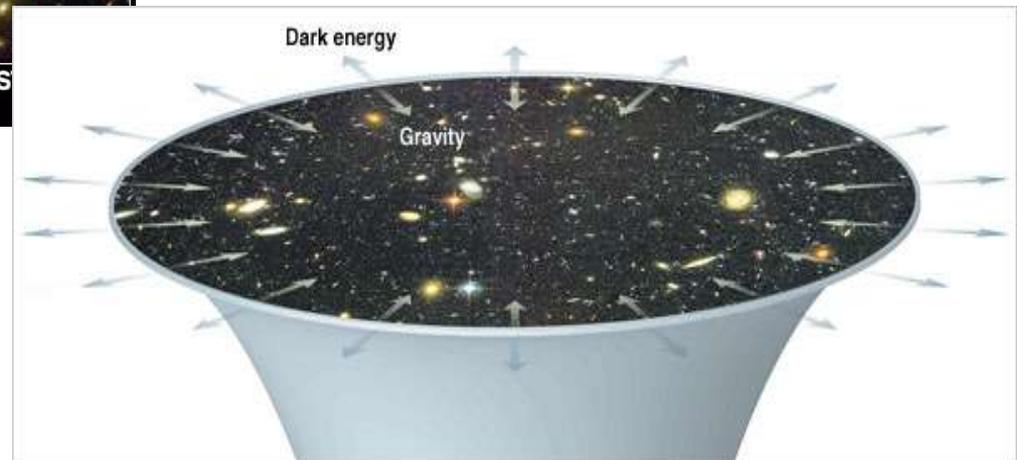


Composantes Noires



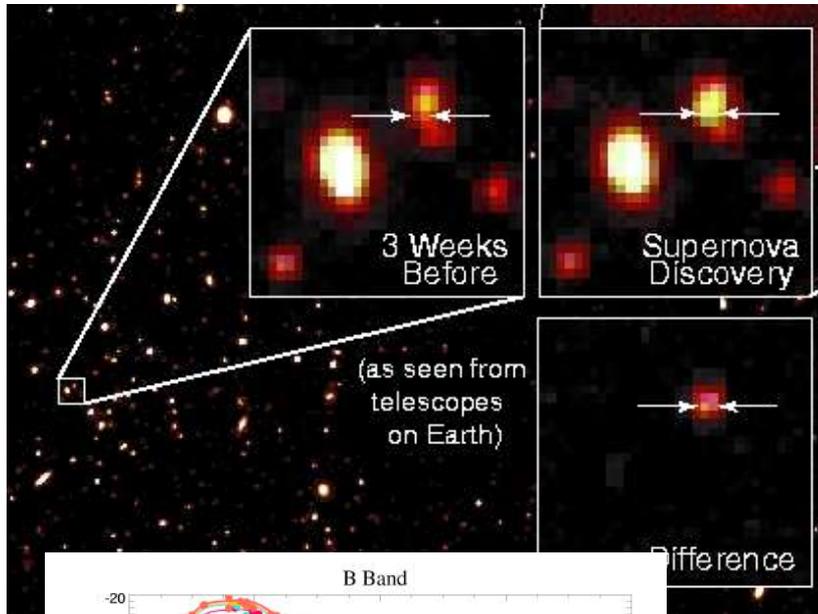
Matière Noire: *Collant
Gravitationnel, Opposant
Expansion Cosmique*

Energie Noire: *Répulsive,
Accélérant Expansion
Cosmique*



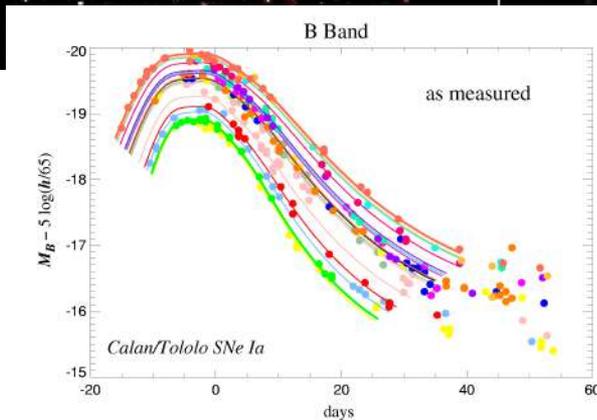
*“There are more things in heaven and earth, Horatio,
Than are dreamt of in your philosophy” - Hamlet*

Les phares de l'Univers

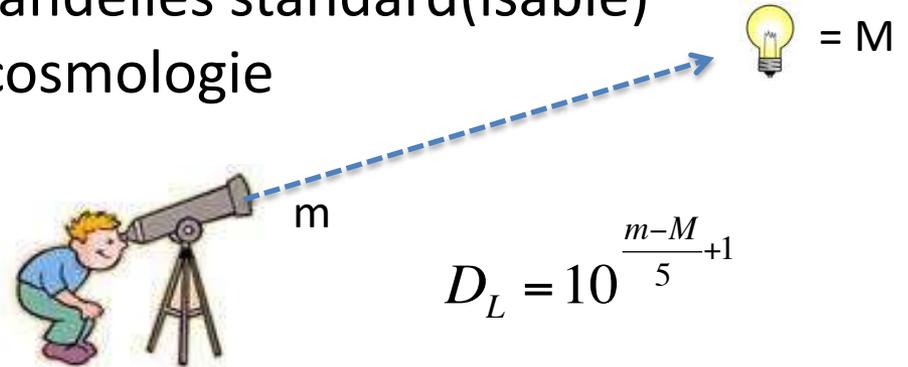


Les explosions de Supernova Ia (SN Ia) sont des événements très lumineux et visibles à des très grandes distances cosmiques

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



Les chandelles standard(isable) de la cosmologie

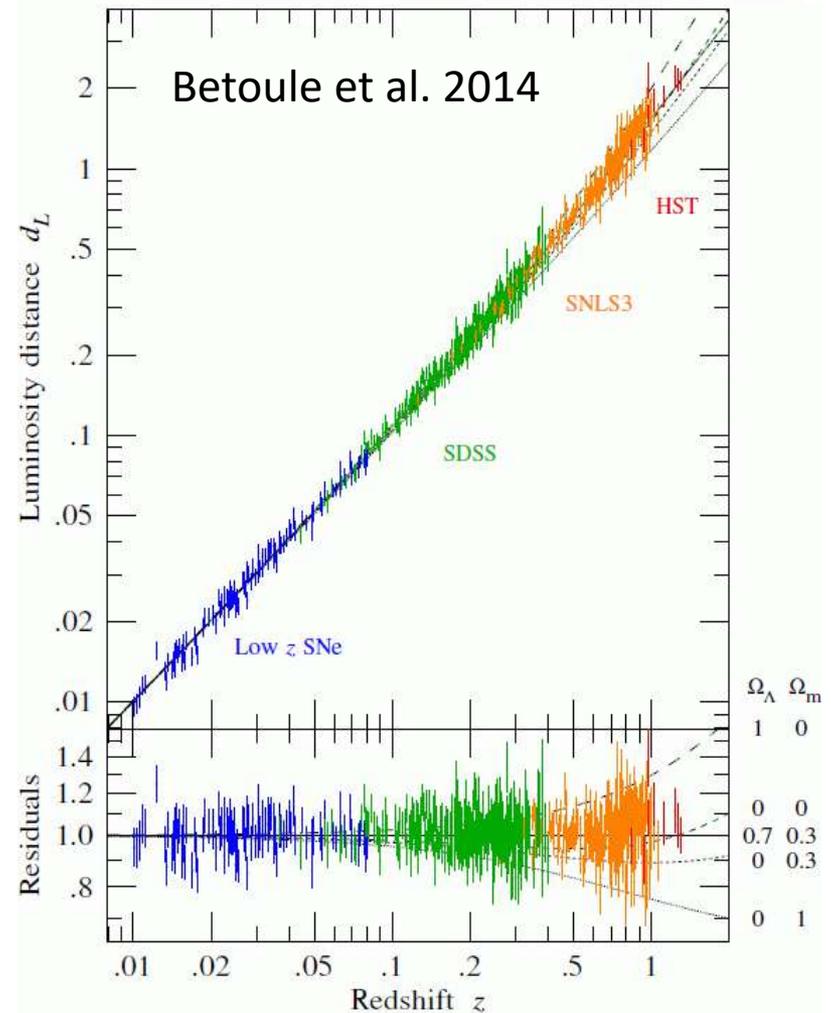


L'Univers Accélération

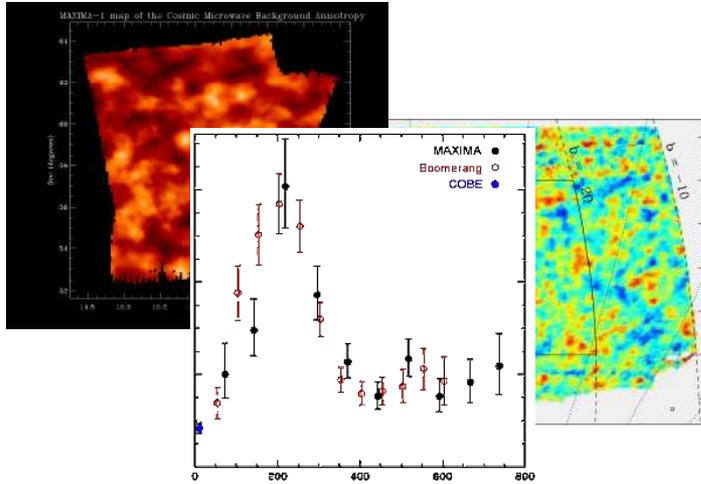
La mesure du diagramme de Hubble par le High-z Supernova Search Team et indépendamment par Supernova Cosmology Project indique que les distances des galaxies à haut décalage vers le rouge sont plus distantes que dans un univers décélérant

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

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



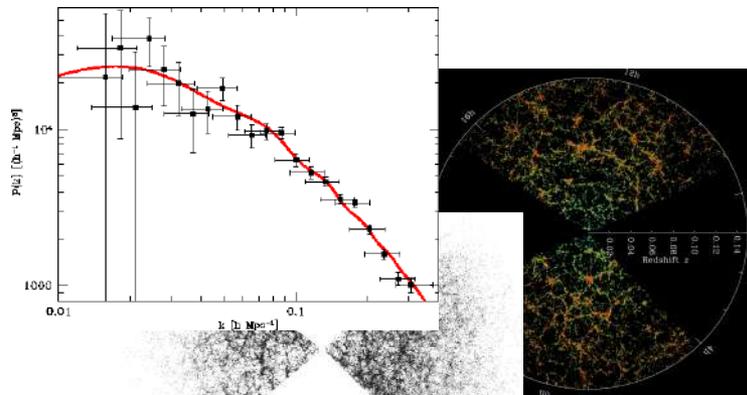
Une piste indirecte à la même époque



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

$$\sum_i \Omega_i = 1$$

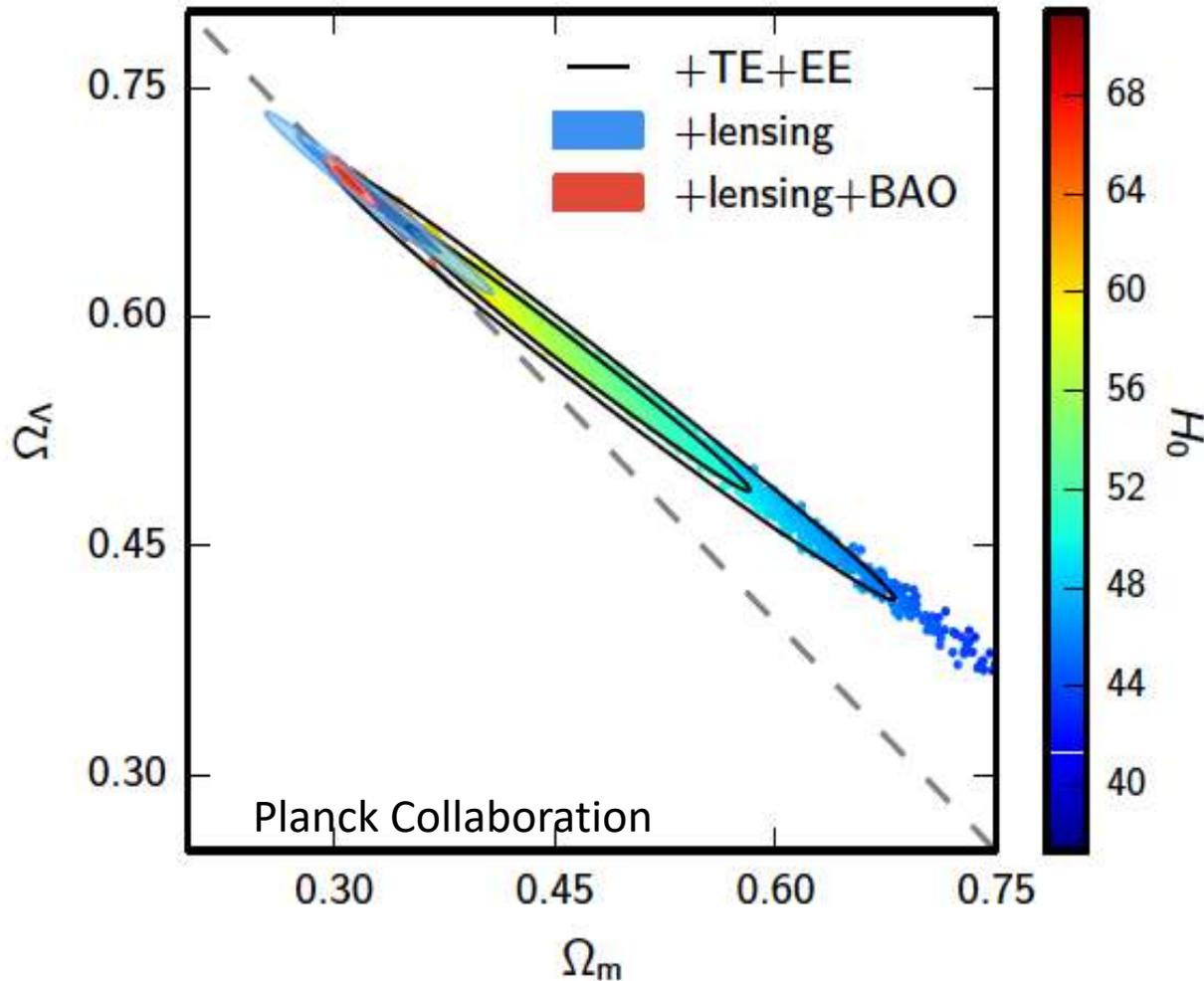
“Le camembert cosmique est entier!”



Les relevés 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!

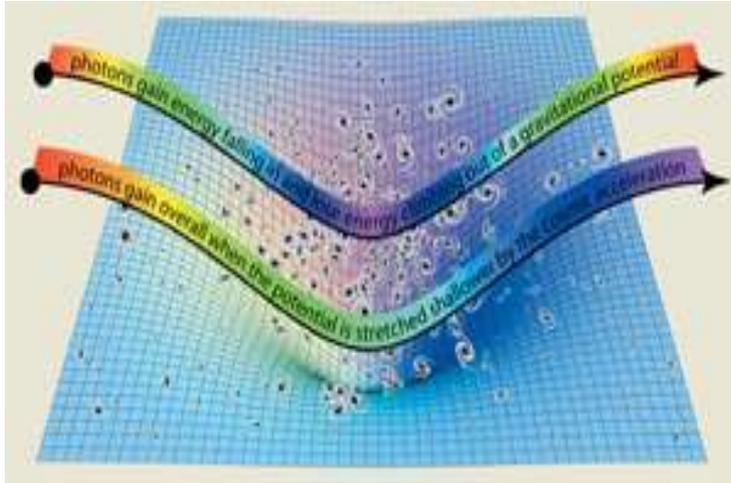


Dégénérescence
entre les
paramètres
cosmologiques

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

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

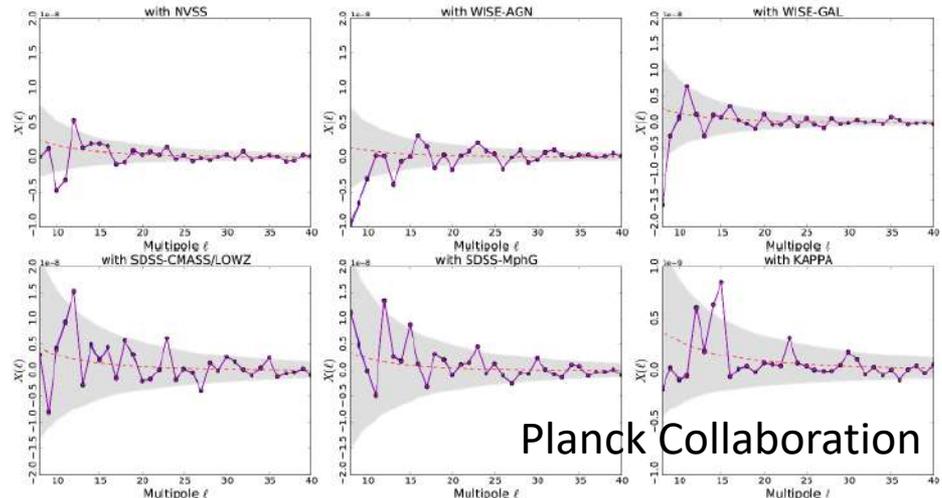
Traces directes dans le fond diffus



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

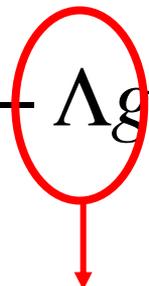


La cause de l'accélération?

Principe Cosmologique

L'univers est
homogène et isotrope

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


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

Pousse l'expansion cosmique
dans un régime accéléré

Relativité Générale

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

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

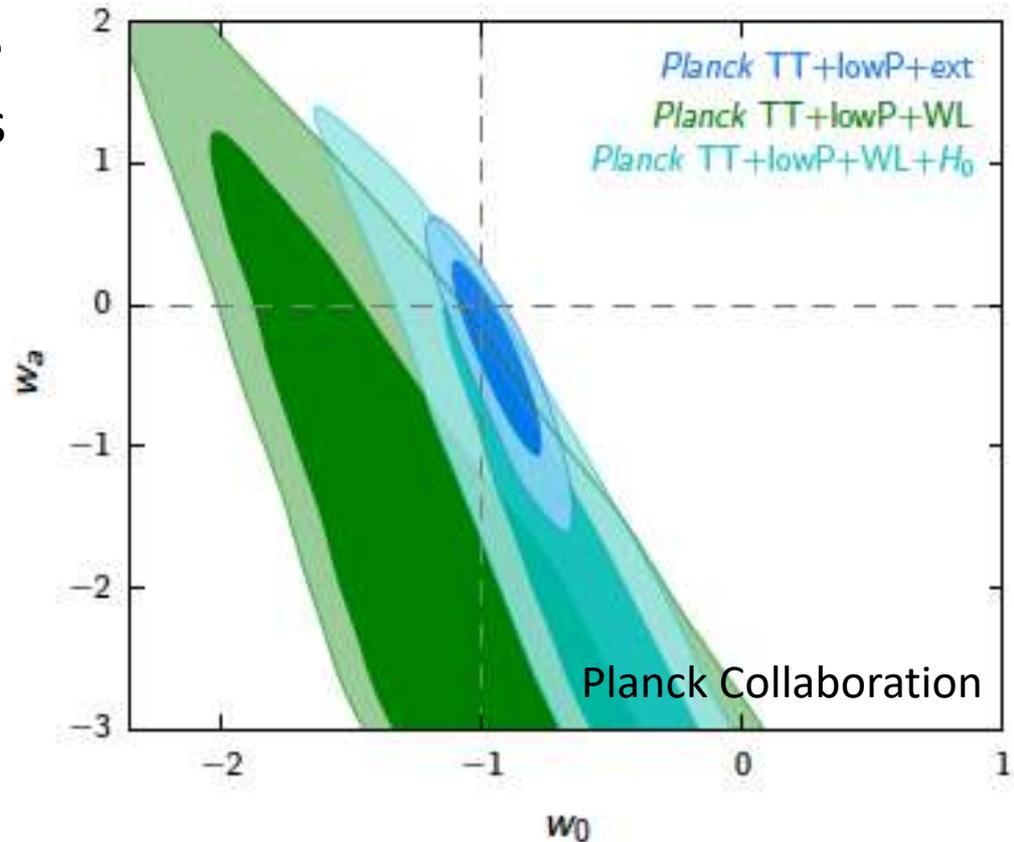
$$\frac{p}{\rho} = w(t)$$

Qu'est-ce nous disent les observations?

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

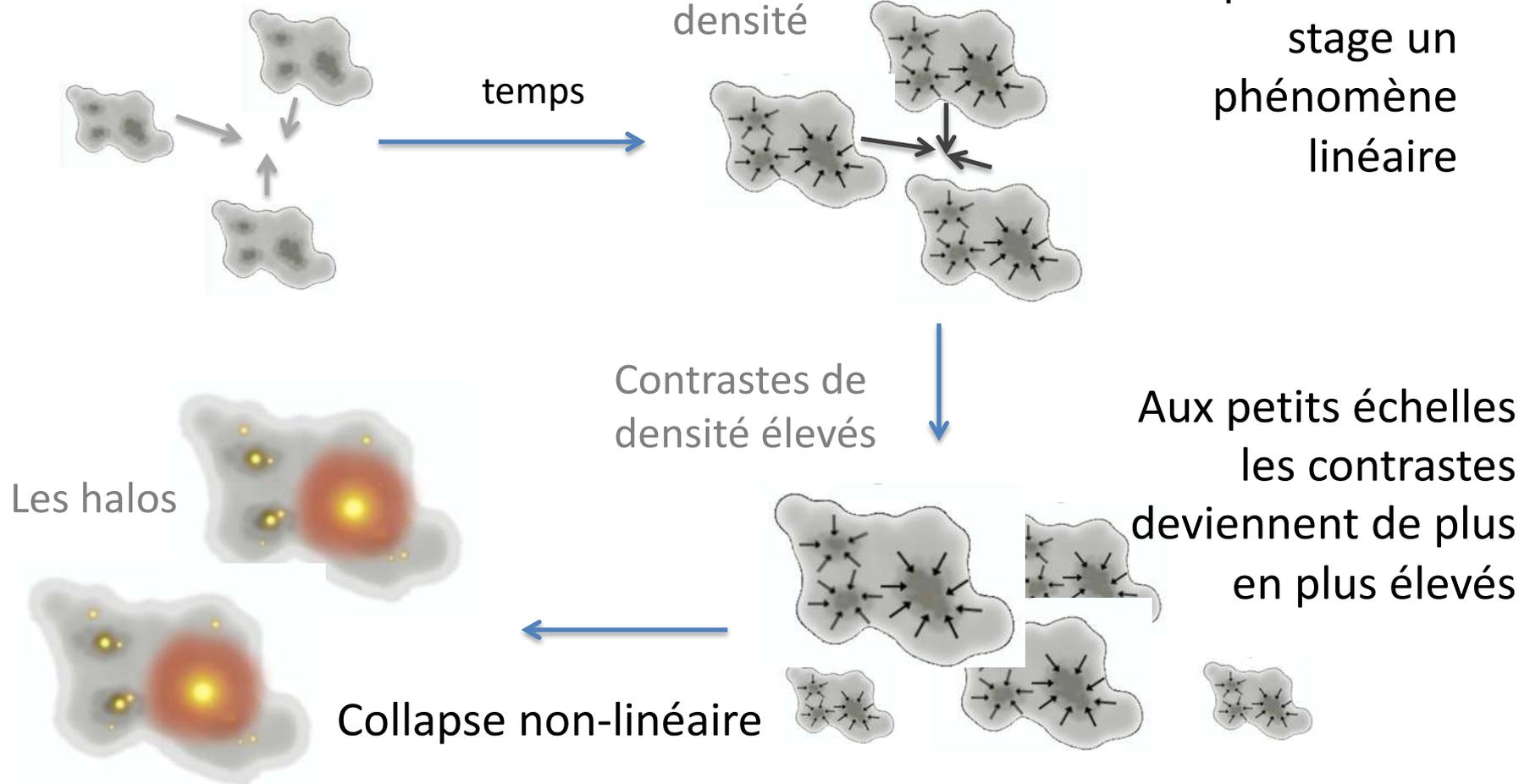
Constant Cosmologique en accord avec les données tel que les modèles dynamiques

Quels observables peuvent nous aider à distinguer les différents scénarios?

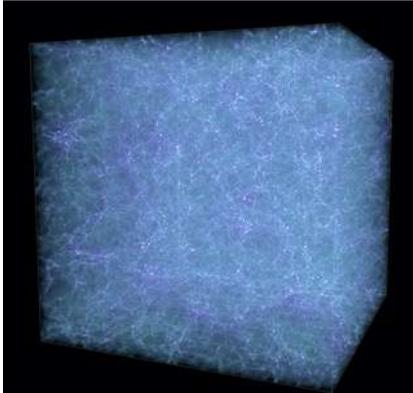


La Structuration de l'Univers

Effondrement gravitationnels
à grandes échelles

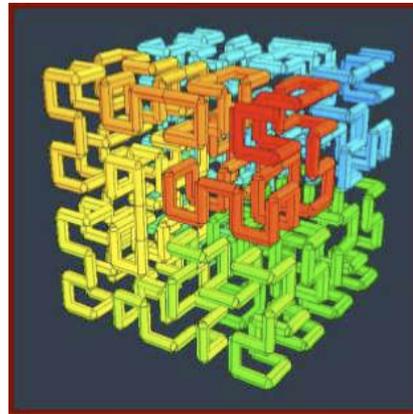


La simulation numérique

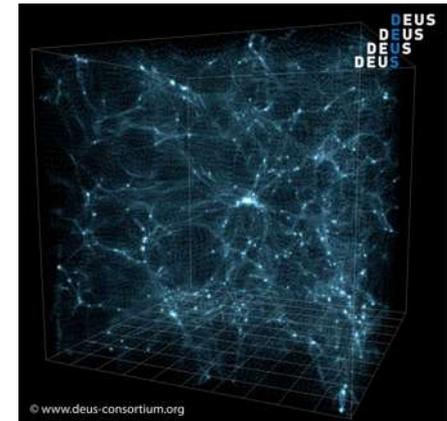


1) Génère distribution aléatoire initial de macro-particles statistiquement consistant avec les observations

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



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

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

Les traces dans l'Univers virtuel

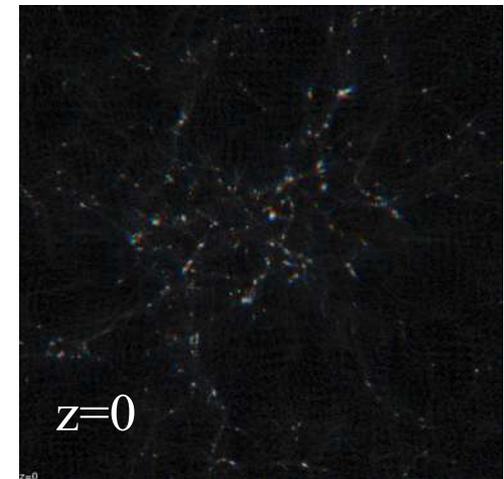
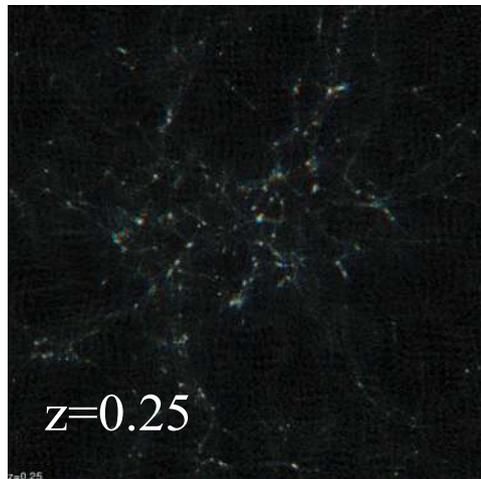
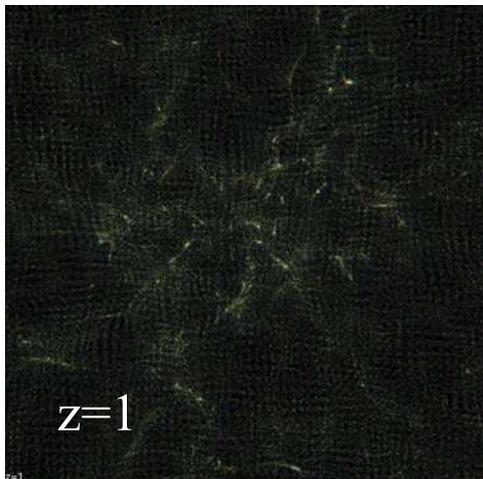
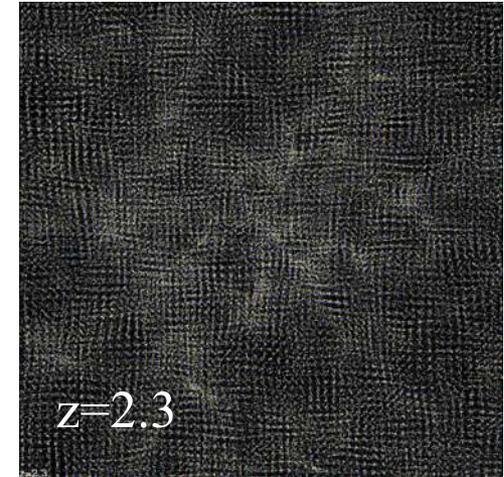
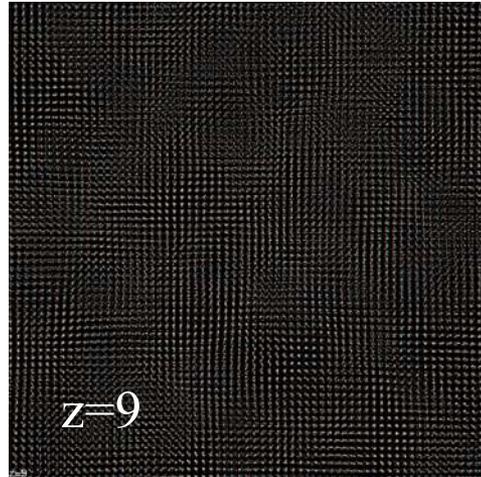
Dark Energy Universe Simulations

Grand ensemble de simulations numériques HPC

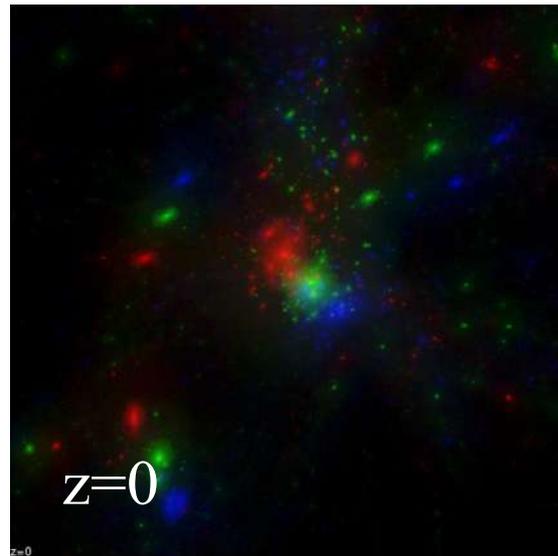
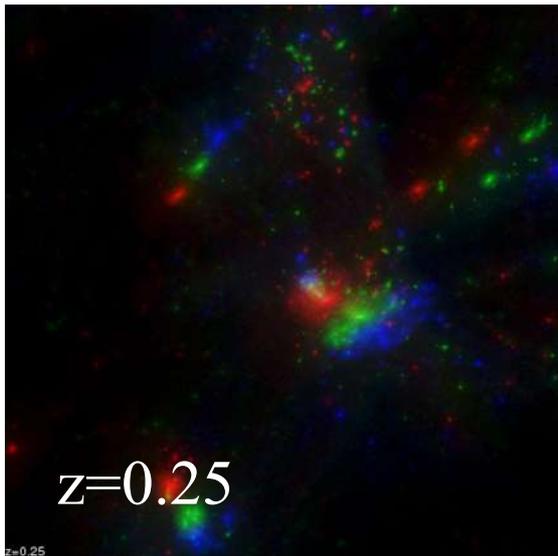
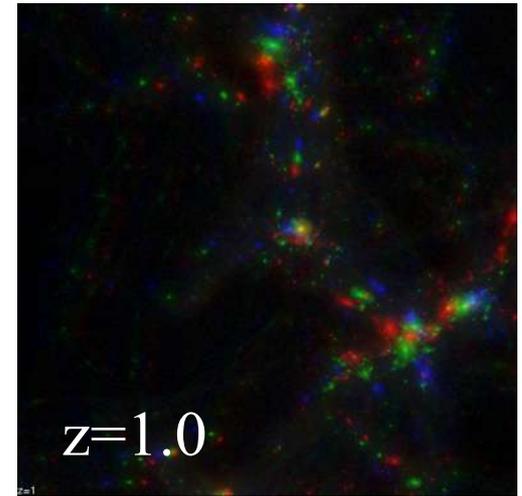
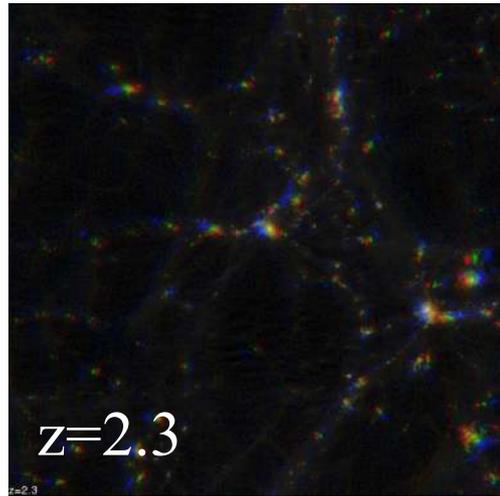
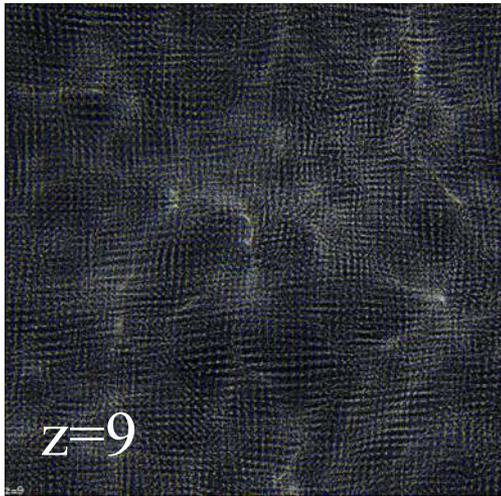
J.M. Alimi

P.S. Corasaniti

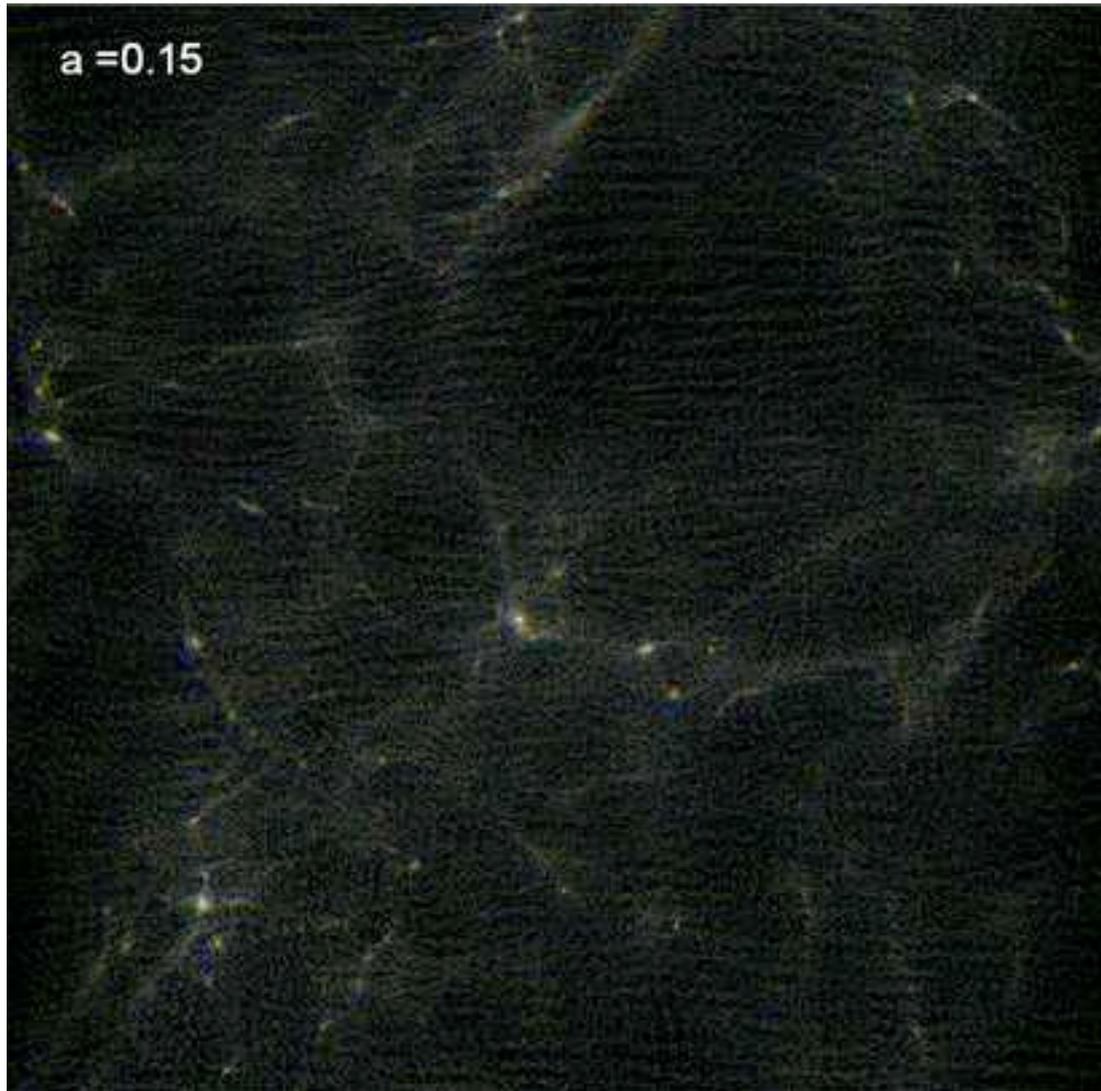
Y. Rasera



Zoom aux petites échelles



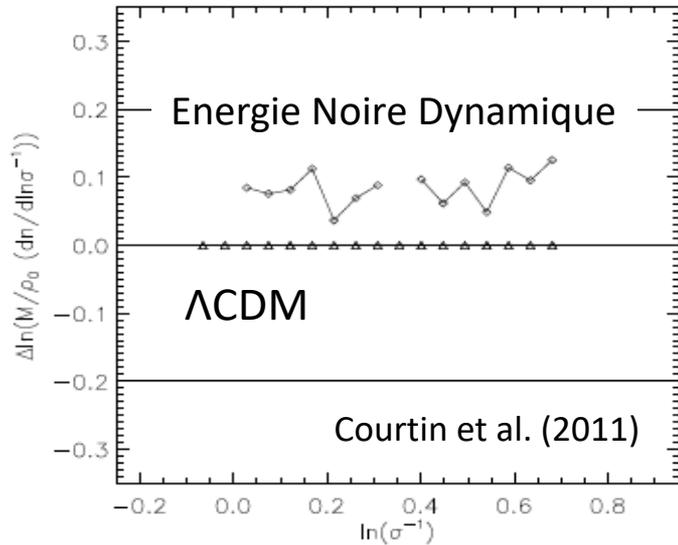
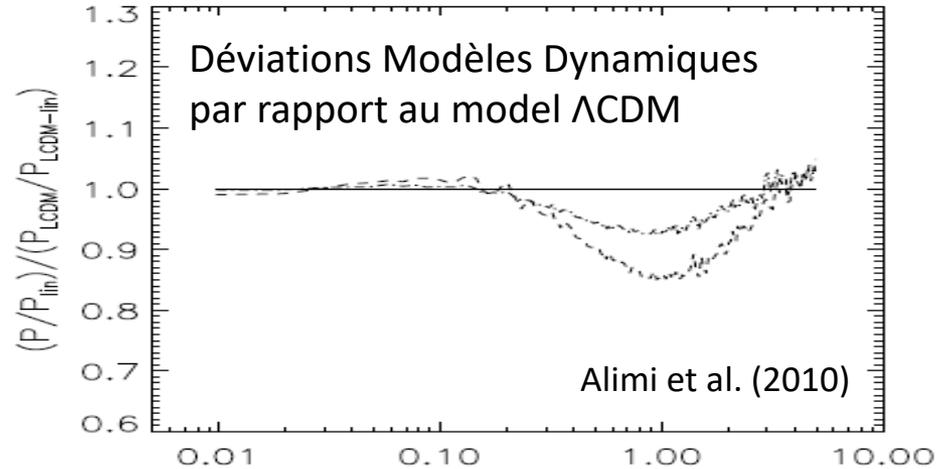
Un vidéo plus mieux comprendre



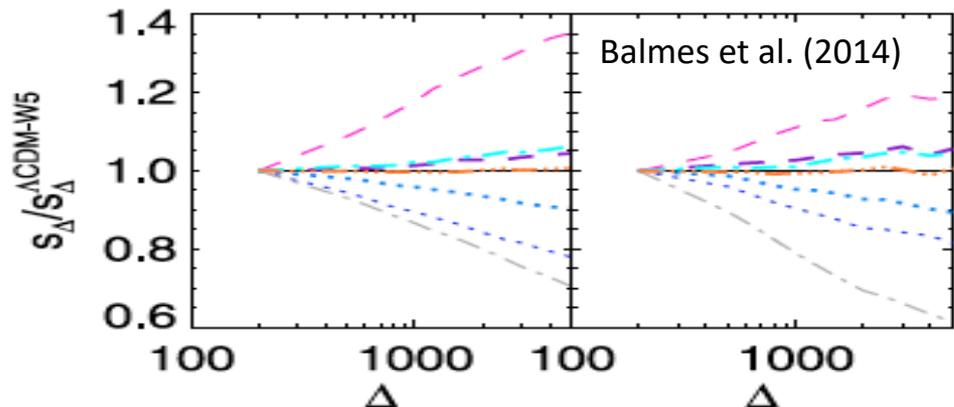
Empreints sur les observables

Spectre de la distribution spatiale de matière

Abondance des halos massives contenant les amas et les groupes de galaxies



La structure interne des halos de matière noire



Au delà de l'Énergie 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*

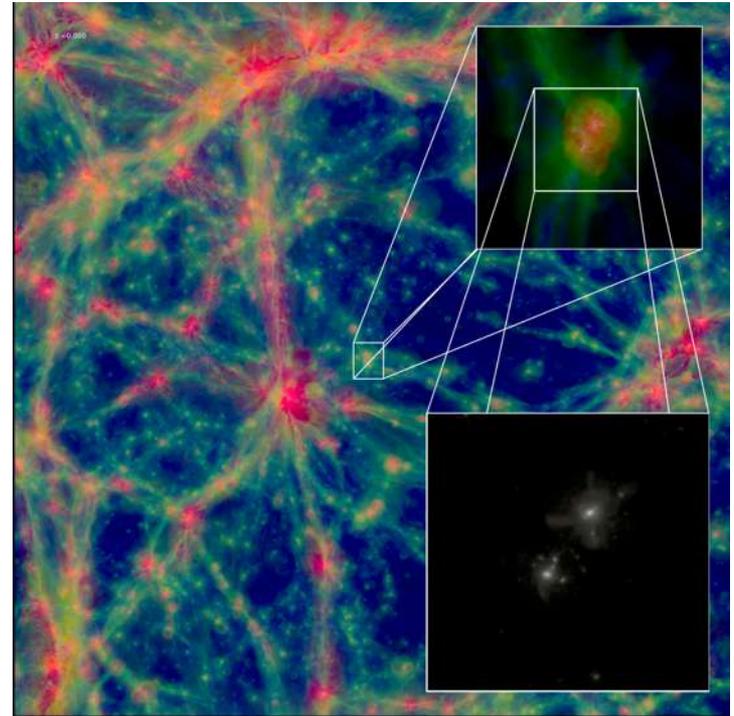
La formation des galaxies

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

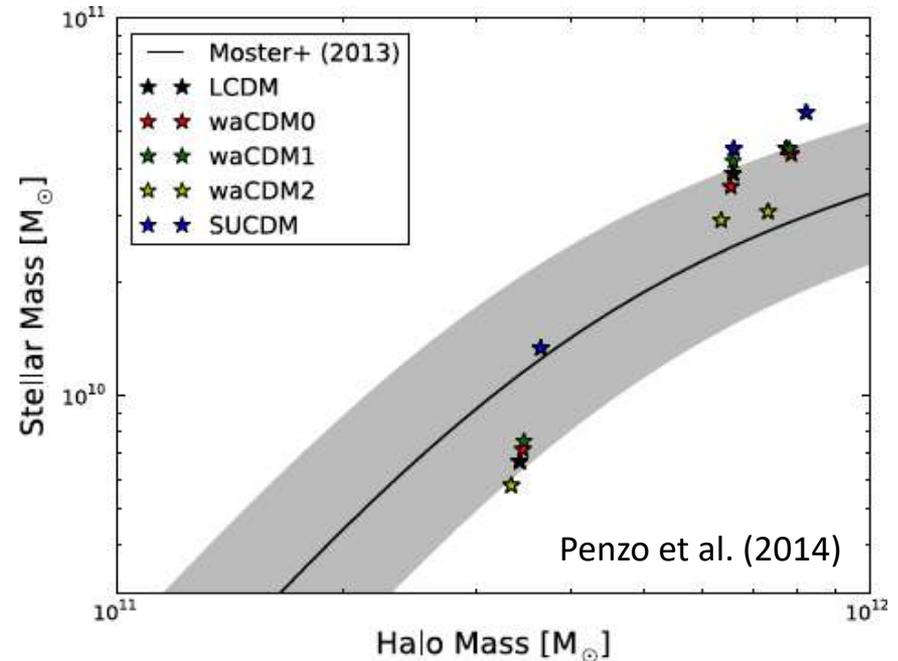
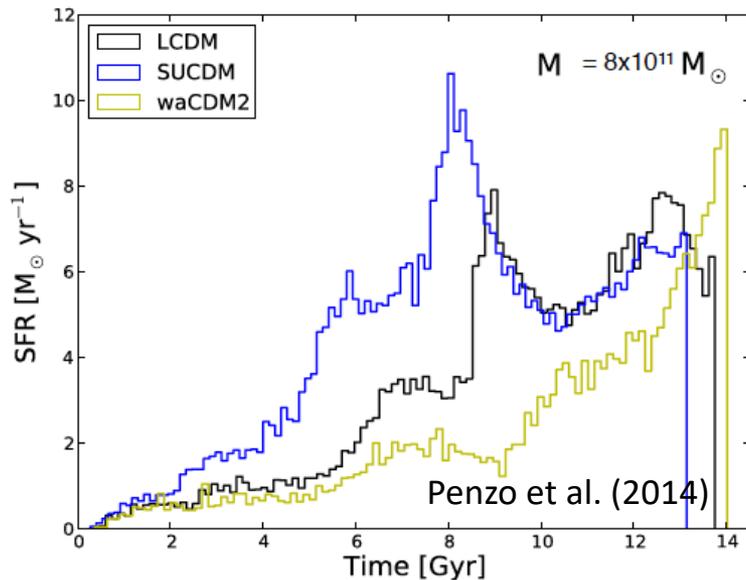


Aucun rôle pour la cosmologie?

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

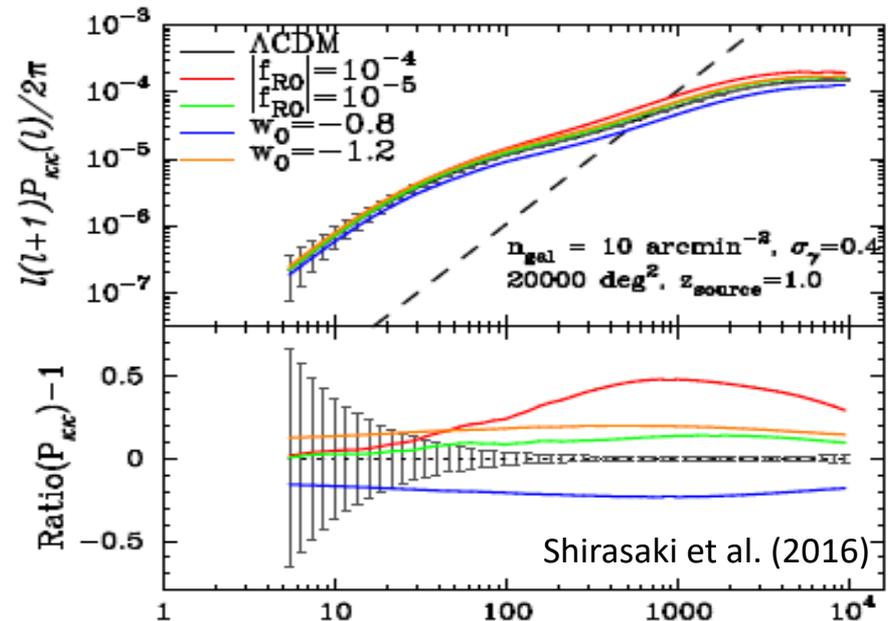
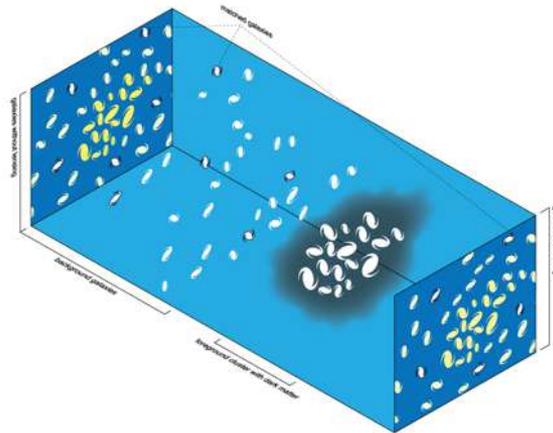
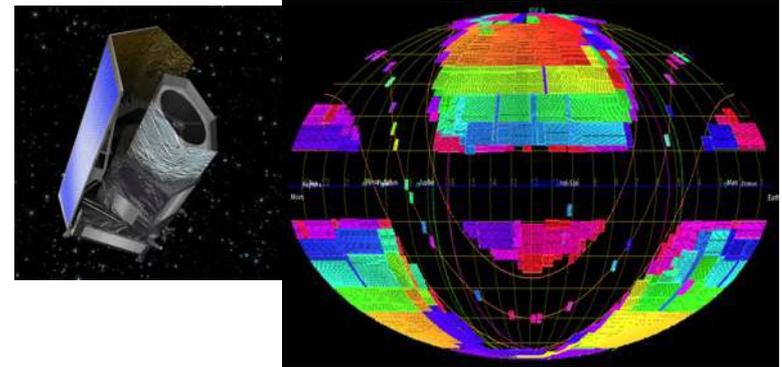
Empreints sont dégénérées avec celles produites par les modèles de formation stellaires

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