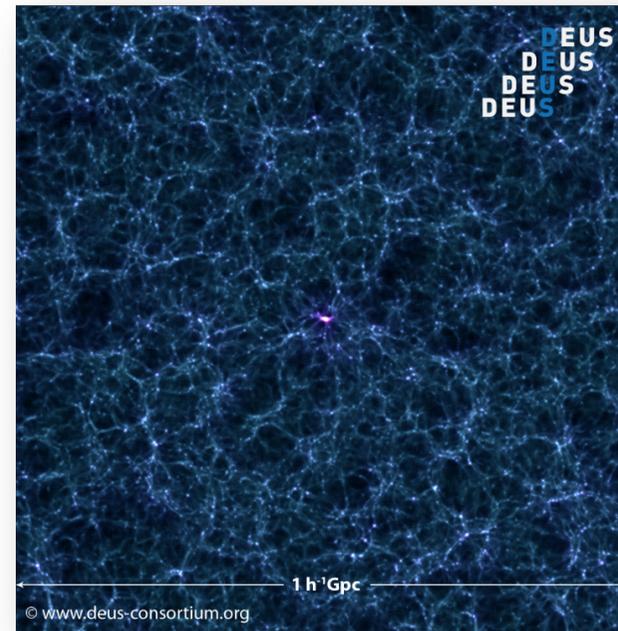
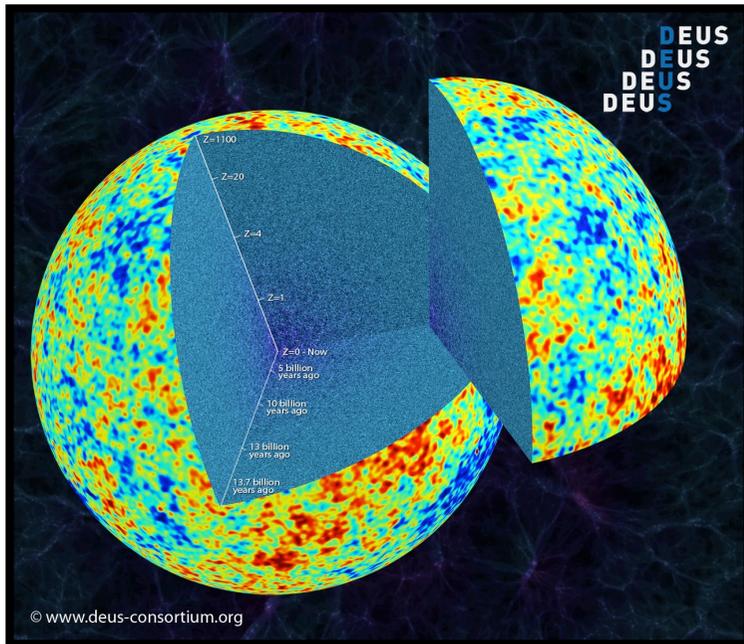


L'UNIVERS (INVISIBLE) UN « LABORATOIRE » POUR COMPRENDRE LA GRAVITATION



Jean-Michel Alimi

Laboratoire Univers et Théories – Observatoire de Paris

DEUS (Dark Energy Universe Simulation) Consortium

www.deus-consortium.org

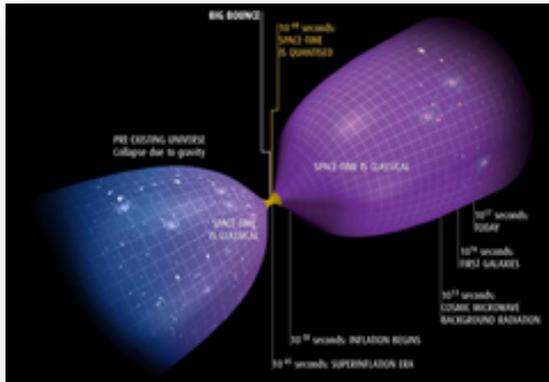
**Journée de l'action thématique
Gravitation et Physique Fondamentale: Gphys
27 Mai 2014, Observatoire de Meudon**

La cosmologie, une sonde privilégiée de la gravitation.

Toutes les questions cosmologiques posent la question de la nature de la gravitation.

Physique de l'Univers Primordial:

Big-Bang: Loop Quantum Cosmology (LQC)
Univers à rebond, Naturalité de l'Inflation, CMB



$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho \left(1 - \frac{\rho}{\rho_c} \right)$$

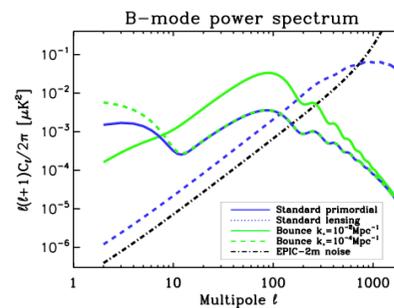
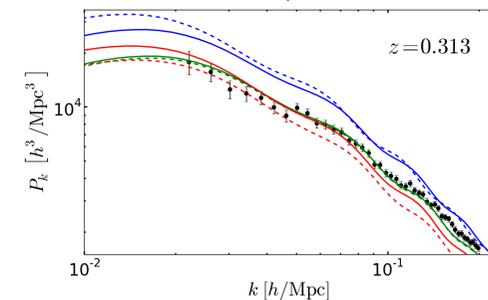
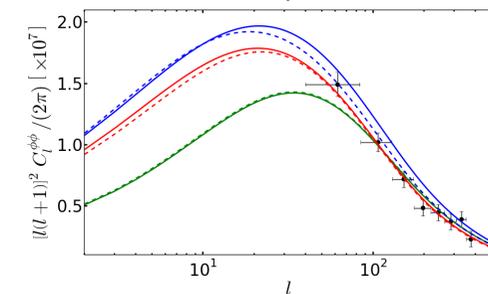
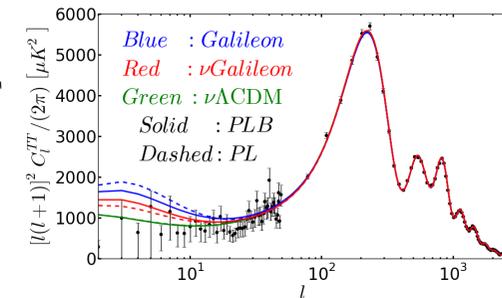


FIG. 1: Standard (blue curve) and typical bounce-modified (green curve) C_l^B spectra for two values of k_* . Other cosmological parameters are given by WMAP 7-yrs best fit plus $R = 10$, $n_T = -0.012$, $T/S = 0.05$ and $\tau = 0.087$.

Empreinte sur le CMB.
Mode B

Grain et al 2010

CMB Mode T



Barreira et al 2014

La cosmologie, une sonde privilégiée de la gravitation.

Dynamique de l'Univers

La Relativité Générale: cadre théorique privilégié dans lequel est décrit l'Univers

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R - \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Principe d'équivalence (PEf, PEF), Principe de Covariance généralisée

Principe Cosmologique : La dynamique de l'Univers est donné seulement à travers $a(t)$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G\rho}{3} + \frac{\Lambda}{3}, \quad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P) + \frac{\Lambda}{3}$$

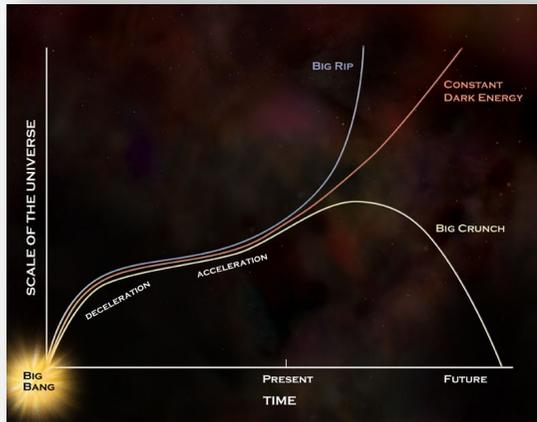
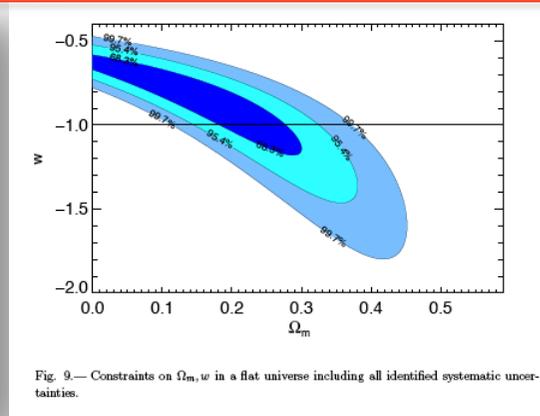
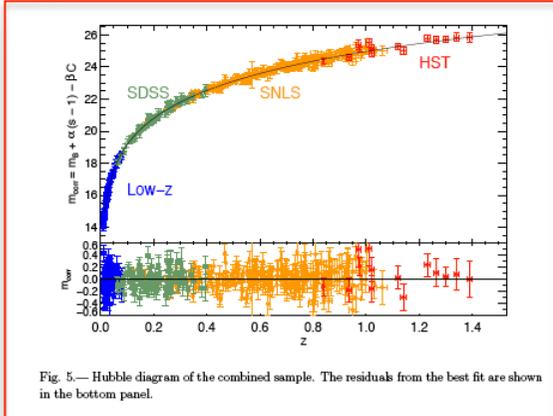
Mesures de distance combiner à des mesures de quantité d'énergie

$$D(z) = a(z) \int_0^z \frac{cdz}{a_0 H(z)} \approx \frac{c}{H_0} \left[z - \frac{1}{2} (q_0 - 1) z^2 + \dots \right]$$

q_0 paramètre de décélération

La cosmologie, une sonde privilégiée de la gravitation

Distances à partir des Supernovae (Chandelles Standards)

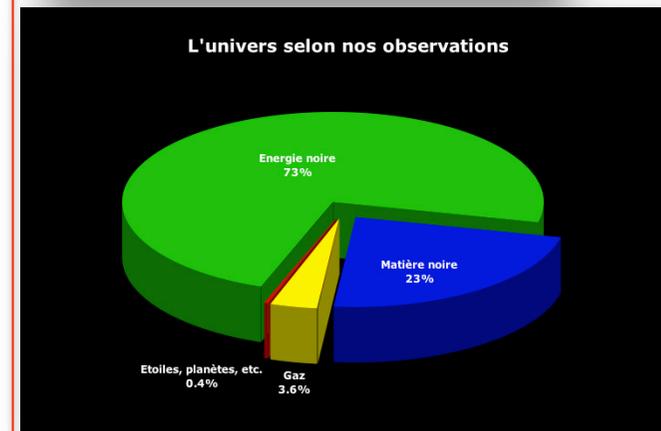
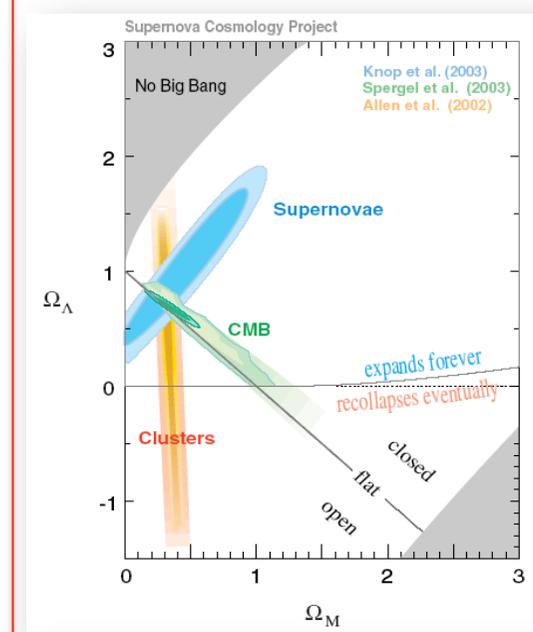


Conley et al 2011
 ($w=Cste, k=0, z < 1.4$)

« SN data alone require cosmic acceleration at > 99:999% confidence, including systematic effects. »

Quelle est l'origine de cette accélération cosmique,
 Quelle est la nature de l'énergie noire (matière noire) ?
 Quelle est l'équation d'état de l'énergie noire ?

Complémentarité Cosmique



La cosmologie, une sonde privilégiée de la gravitation

$$G_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G\rho}{3} + \frac{\Lambda}{3}, \quad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P) + \frac{\Lambda}{3}$$

Nature de l'Énergie Noire ? Interprétations Théoriques

Nouvelle Composante énergétique (ρ) qui s'ajoute à la ML et à la MN:

$$G_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} [T_{\mu\nu}^{SM} + T_{\mu\nu}^{DM} + T_{\mu\nu}^{DE}]$$

Violation de la condition forte d'énergie

$$\ddot{a} > 0 \text{ si } P < -\frac{\rho}{3}$$

$$w = \frac{P}{\rho} < -\frac{1}{3}$$

Au delà du Modèle Standard de l'infiniment petit

Extensions de la RG, au delà du principe d'équivalence

$$\tilde{G}_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}^{Matter}$$

Une extension à la RG peut être réécrite comme un modèle effectif de type « Friedmann ».

$$w(z) = \frac{\tilde{P}}{\tilde{\rho}}$$

Seule une correction à la RG peut conduire à

$$w(z) < -1$$

Interprétation Géométrodynamique de l'énergie noire

L'hypothèse "Théorie De la Relativité Générale d'Einstein" est conservée

Au delà du principe cosmologique (Energie noire comme un effet des inhomogénéités)

Nouveau statut de l'Observateur

La cosmologie, une sonde privilégiée de la gravitation

Λ Quintessence $-1 \leq w < -1/3$ Chaplygin gaz Cardassian	Coupled quintessence K-essence Tachyon Extended quintessence Chameleon Galileon AWE F(R) DGP Multigravity Rastal space-time... $w < -1/3$ $w < -1$	Lemaitre-Tolman Backreaction / Morphon
--	---	---

Nature de l'Énergie Noire ? Nature de la Gravitation !

La cosmologie, une sonde privilégiée de la gravitation

Théories Tenseur-scalaire de la gravitation* : Violation du PEF, couplage universel => Pef)
 Dicke-Jordan « Frame » (Système de référence observationnel)

$$S = S_G + S_M = \frac{1}{2} \int d^4x \sqrt{-\tilde{g}} \left\{ \Phi R - \frac{\omega(\Phi)}{\Phi} \tilde{g}^{\mu\nu} \partial_\mu \Phi \partial_\nu \Phi \right\} + S_M [\Psi_M, \tilde{g}_{\mu\nu}]$$

Le champ ϕ et le scalaire de courbure R sont fortement couplés, La théorie est définie par la fonction $\omega(\phi)$

Le tenseur énergie-impulsion physique (mesuré) $T_{\mu\nu}$ de la matière est conservé

La théorie satisfait le PE faible mais G n'est plus constante ($G \sim 1/\phi$), la théorie viole le PE Fort,

Les théories scalaire-tenseurs ainsi définies peuvent également s'envisager comme une

- Nouvelle Formulation des théories de Kaluza-Klein, des Théories à dimensions supplémentaires
- Approximation basse-énergie du secteur gravitationnelle de la théorie des supercordes (Unification des Interactions)...

Einstein « Frame », physique mais non-observable. $\tilde{g}_{\mu\nu} = A_M^2(\varphi) g^*_{\mu\nu}$

$$S = S_G + S_M = \frac{1}{4\pi G^*} \int \left(\frac{R^*}{4} - \frac{1}{2} \varphi_{,\mu} \varphi^{,\mu} - V(\varphi) \right) \sqrt{-g^*} d^4x + S_M [\psi_M, A^2(\varphi) g^*_{\mu\nu}]$$

$$A^2(\varphi) = \frac{1}{\phi}, \alpha(\varphi) = \frac{d \ln A(\varphi)}{d\varphi}, |2\omega(\phi) + 3| = \frac{1}{\alpha^2(\varphi)}$$

Dans cette représentation, S_M dépend explicitement du champ φ , et par conséquent $T^*_{\mu\nu}$ n'est plus conservé,

Ré-échelonnage $m^* = A(\varphi_0)m$, $l^* = A^{-1}(\varphi_0)l$, $t^* = A^{-1}(\varphi_0)t$

*Jordan 1949, Fierz 1956, Brans & Dicke 1961

La cosmologie, une sonde privilégiée de la gravitation

Violation du Principe d'Équivalence Faible:

Einstein « Frame »

$$S = \frac{1}{2\kappa} \int d^4x \sqrt{-g^*} \left\{ R - 2\partial_\mu \varphi \partial^\mu \varphi \right\} + S_M \left[\psi_M, A_M^2(\varphi) g^*_{\mu\nu} \right] + S_{AWE} \left[\psi_{AWE}, A_{AWE}^2(\varphi) g^*_{\mu\nu} \right]$$

FLRW

$$H_*^2 = \left(\frac{\dot{a}_*}{a_*} \right)^2 + \frac{\dot{\varphi}^2}{3} + \frac{8\pi G_*}{3} (\rho_{*M} + \rho_{*AWE}), \quad \frac{\ddot{a}_*}{a_*} = -\frac{2}{3} \dot{\varphi}^2 - \frac{8\pi G_*}{6} (\rho_{*M} + \cancel{3\rho_{*M}} + \rho_{*AWE} + \cancel{3\rho_{*AWE}})$$

$$\ddot{\varphi} + 3 \frac{\dot{a}_*}{a_*} \dot{\varphi} + 4\pi G_* \alpha_M(\varphi) (\rho_{*M} - \cancel{3\rho_{*M}}) + 4\pi G_* \alpha_{AWE}(\varphi) (\rho_{*AWE} - \cancel{3\rho_{*AWE}}) = 0$$

Considérons que le secteur AWE soit un fluide sans pression et intéressons nous à l'ère dominé par la matière dans l'histoire de l'Univers.

$$\frac{2}{3 - \varphi'} \varphi'' + \varphi' + \mathfrak{K}(\varphi) = 0$$

$$\mathfrak{K}(\varphi) = \frac{d(\text{Log}(\Lambda(\varphi)))}{d\varphi} = \alpha_M(\varphi) + \frac{\alpha_{AWE}(\varphi) - \alpha_M(\varphi)}{1 + R_i \frac{A_M(\varphi)}{A_{AWE}(\varphi)}}$$

NO PEF

NO PEF

Si $\alpha_M(\varphi) = \alpha_{AWE}(\varphi) = \mathfrak{K}(\varphi)$ et/ou $\rho_{*M} \gg \rho_{*AWE}$

$$R_i \frac{A_M(\varphi)}{A_{AWE}(\varphi)} = \frac{\rho_{*M}}{\rho_{*AWE}}$$

On retrouve une TST « classique » sans violation du PEF

**Comment tester une telle généralisation ?
(Diagramme de Hubble issu des SN1a)**

$$\Lambda(\varphi) = A_M(\varphi) + \frac{A_{AWE}(\varphi)}{R_i}$$

La cosmologie, une sonde privilégiée de la gravitation

Nature de l'énergie Noire: Nombreuses extensions de la RG.

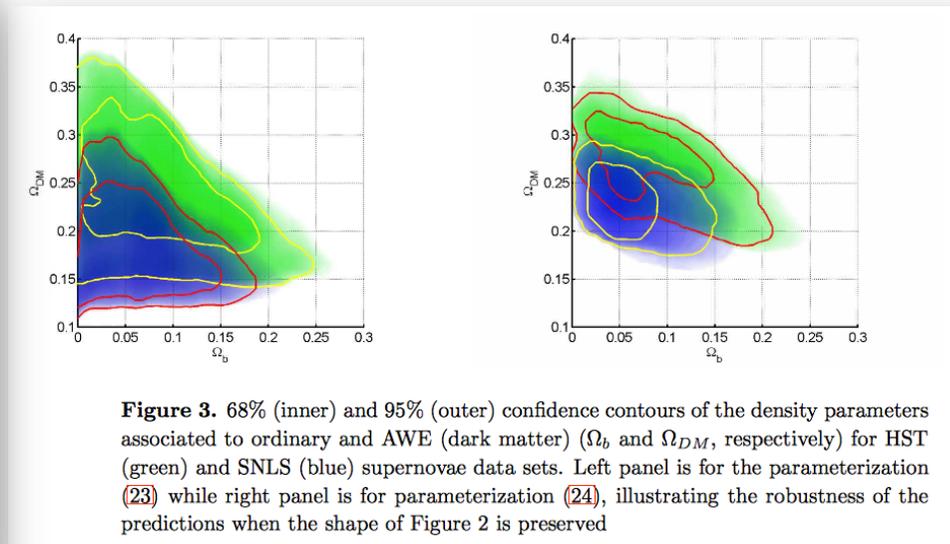
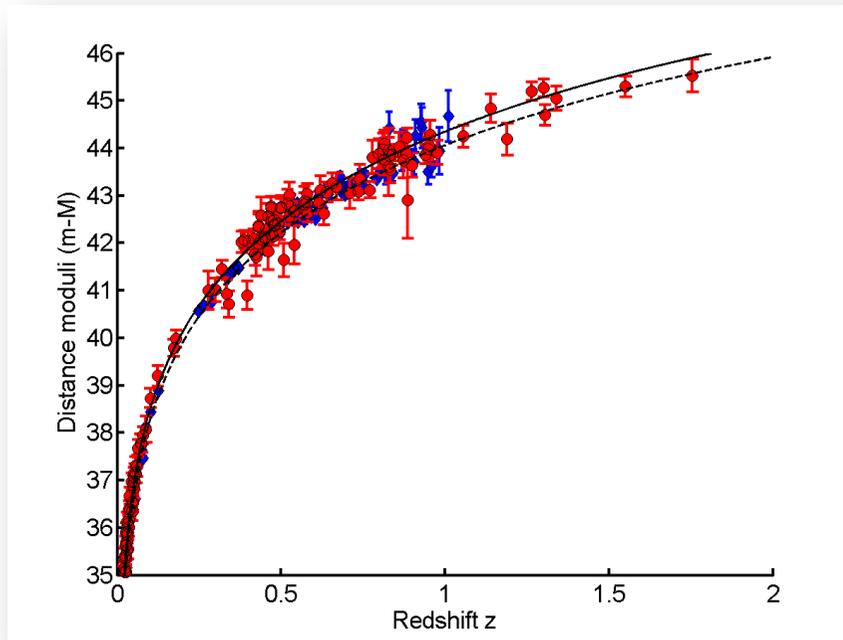


Figure 3. 68% (inner) and 95% (outer) confidence contours of the density parameters associated to ordinary and AWE (dark matter) (Ω_b and Ω_{DM} , respectively) for HST (green) and SNLS (blue) supernovae data sets. Left panel is for the parameterization (23) while right panel is for parameterization (24), illustrating the robustness of the predictions when the shape of Figure 2 is preserved

Alimi & Fuzfa 2008

- Faible dépendance en fonction de la forme du couplage
- Faible dépendance en fonction de l'amplitude des couplages respectifs,
- Le couplage à la métrique différent pour chaque composante matérielle permet d'accéder à la densité de ces composantes (Baryonique Matter, Dark Matter)

....

La cosmologie, une sonde privilégiée de la gravitation

Structuration de l'Univers.

Croissance des perturbations.

$$ds^2 = a^2 \left[-(1 + 2\Psi)d\eta^2 + (1 - 2\Phi)dx_i dx^i \right]$$

Perturbations de matière (variable invariante de jauge)

$$\Delta_M = \delta_M + 3aH\theta_M / k^2$$

En Λ CDM (RG), sur des échelles « sub-horizon » $k \gg aH$ dans l'ère dominé par la matière

$$-k^2\Phi = 4\pi G a^2 \rho_M \Delta_M, \quad \Phi = \Psi$$

$$\Delta_M'' + [2 + (\ln H)']\Delta_M' = \frac{3}{2}\Omega_M(a)\Delta_M$$

Le taux de croissance définit par $\Delta = \Delta_0 G(a)$

$$f_g = \frac{d \log G(a)}{d \log a} \approx \Omega_M(a)^\gamma$$

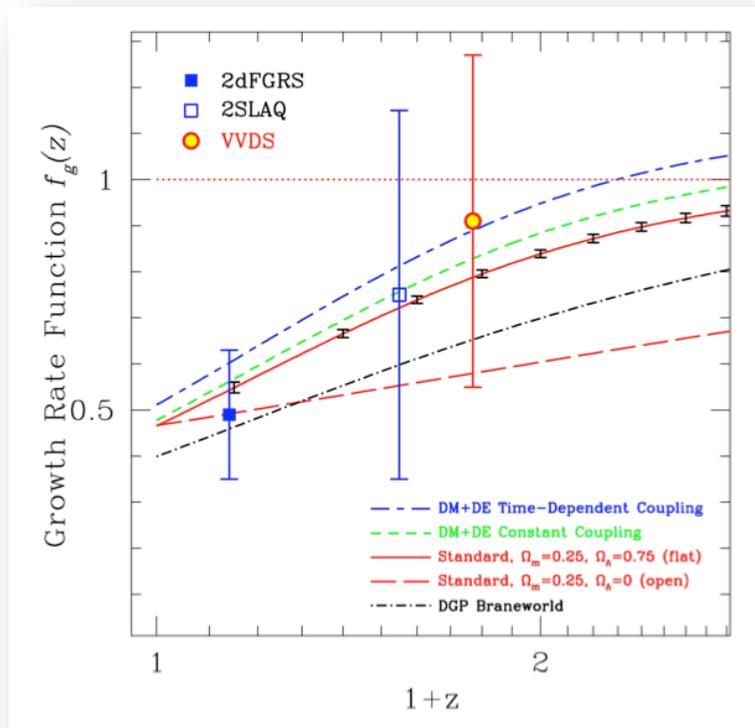
$$\gamma \approx 0.545 \quad (\Lambda\text{CDM, RG})$$

γ est caractéristique de la théorie de la gravitation

La cosmologie, une sonde privilégiée de la gravitation

Structuration de l'Univers.

γ , le taux de croissance linéaire est caractéristique de la théorie de la gravitation



Guzzo et al 2008

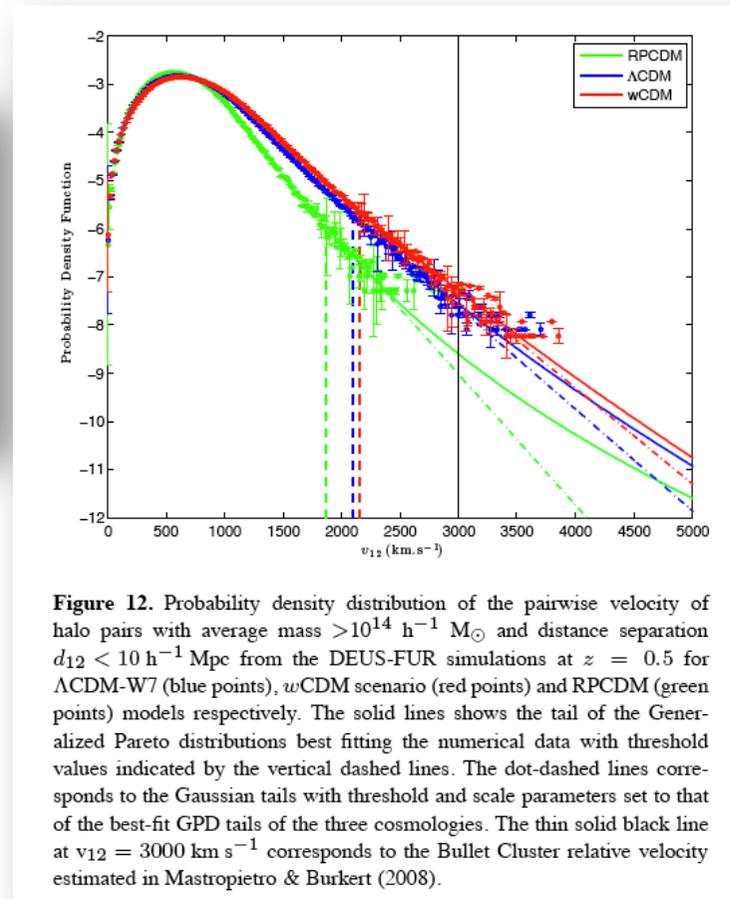
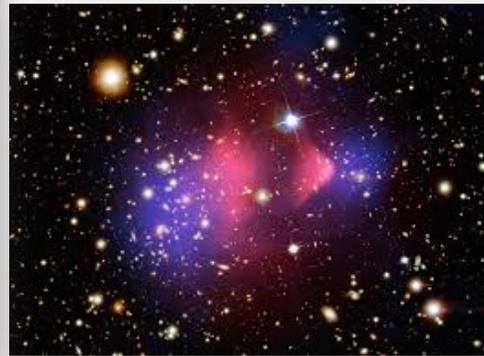
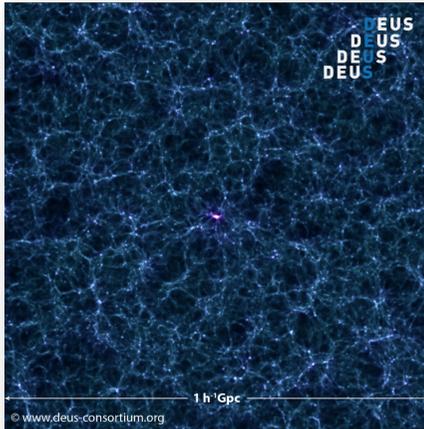
Quelque fois cela peut être un peu plus compliqué:
Un taux de croissance dépendant de l'échelle et du temps avec un coefficient d'anisotropie

$$-k^2\Phi = 4\pi GQ(a,k)a^2\rho_M\Delta_M$$
$$\Phi = \eta(a,k)\Psi$$

La cosmologie, une sonde privilégiée de la gravitation

Structuration de l'Univers: Evolution Nonlinéaire (Simulation Numérique HPC)

Evènements rares aux valeurs extrêmes, la vitesses des paires: Applications au Bullet Cluster



Queue de distribution Fortement Non

Gaussien:

$$P_{\Lambda\text{CDM}} = 6.4 \cdot 10^{-6}$$

Sous estimé par 2 ordres de grandeurs par

Thompson & Nagamine 2012

$$P_{w\text{CDM}} = 1.7 \cdot 10^{-5}$$

$$P_{\text{RPCDM}} = 9.7 \cdot 10^{-8}$$

Deus 2014

Réelles difficultés pour $-1 < w < -1/3$, $w < -1$! (Extension de la RG)

La cosmologie, une sonde privilégiée de la gravitation

Conclusion.

• **Toutes les questions de la Cosmologie sont des questions sur la nature de la gravitation.**

de la nature de la singularité initiale, à la structuration de l'Univers et au delà ... la dynamique des amas et des galaxies.

• **La nécessité (quelque soit sa nature) d'une extension de la théorie de la gravitation d'Einstein en cosmologie est testable sur l'équation d'état de l'énergie noire: $w < -1$!**

Chaque prédiction spécifique à chaque modèle est testable sur la dynamique de l'univers ou sur le processus de structuration.

L'Univers (Invisible) est un laboratoire privilégié de la Théorie de la Gravitation