

Journée du LUTH

Gravitation et Univers sombre

Jean-Philippe Bruneton

Paris VII University

Paris-Meudon Observatory- LUTH

18 Décembre 2013

Introduction

Quelques mots de présentation

- **Doctorat à l'IAP avec Gilles Esposito Farèse (2004-2007)**
- **Thème principal:** théories alternatives de la gravitation (tenseur-scalaires, tenseur-vecteur-scalaires), lagrangiens de k-essence, couplages non-minimaux, etc.
- **But : formulation de théories relativistes de MOND**
+ aspects phénoménologiques de MOND (en particulier avec Benoit Famaey, CNRS/observatoire de Strasbourg)

Quelques mots de présentation

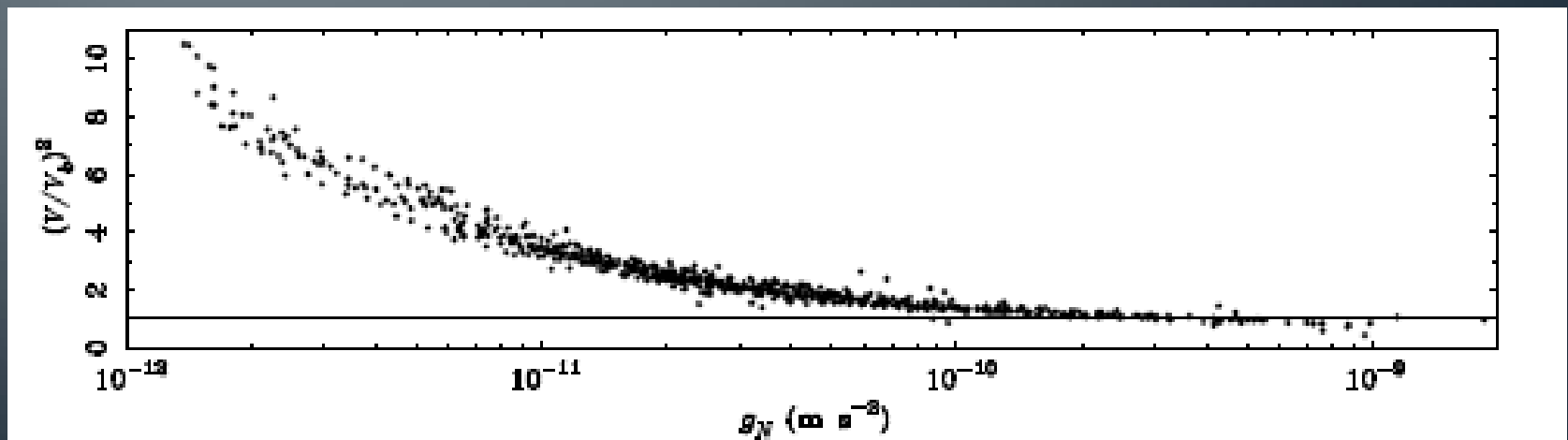
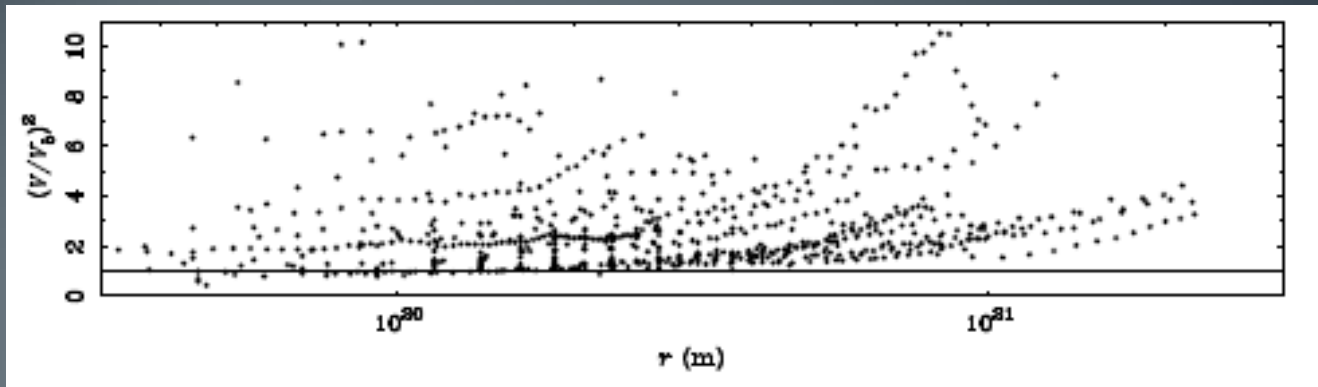
- **Post-doctorats** : Italie (SISSA) 2007-2009
- Puis Belgique (Namur) 2011-2013
- Entre-deux : passages dans le privé (enseignement / finance)
- **Développement de nouveaux thèmes** :
- Approches phénoménologiques à la gravité quantique, dont
 - Principe d'incertitude généralisé
 - Principe holographique/thermo des horizons/gravitation modifiée
 - Théorie d'accélération maximale ?

Gravitation et matière noire

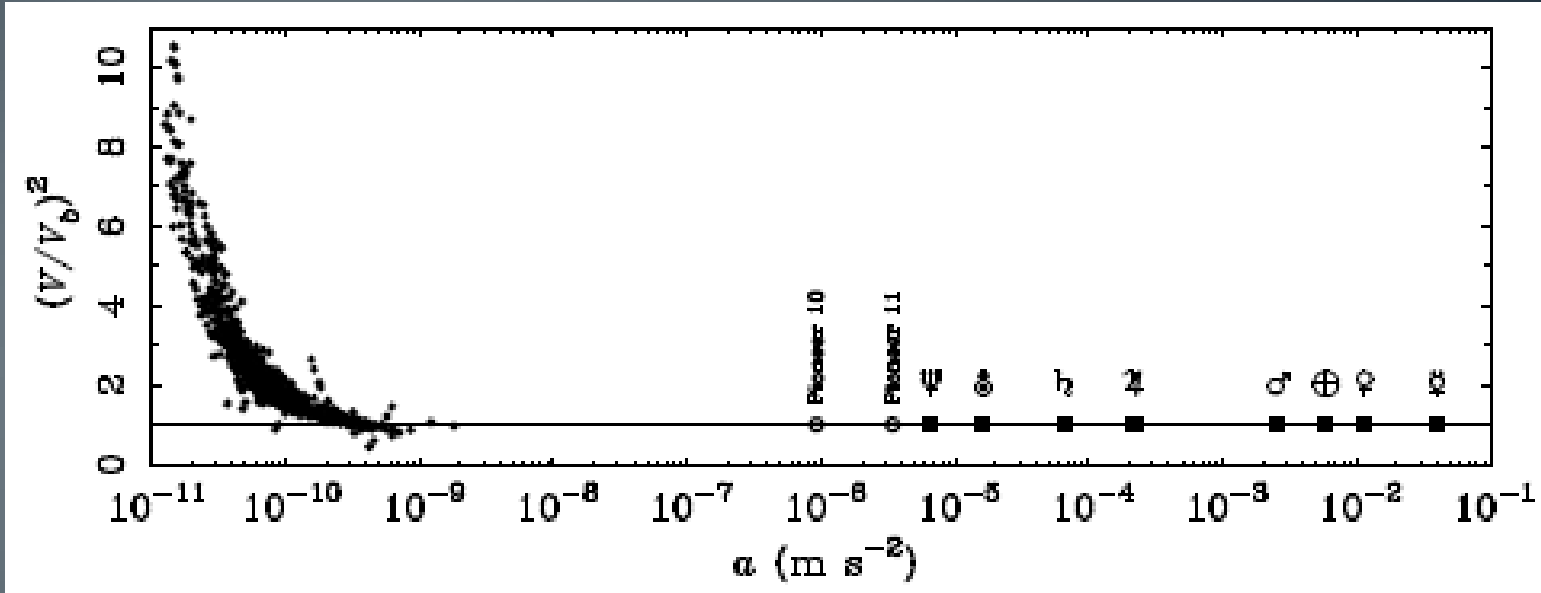
Le problème de la matière noire et MOND

- Premier constat **observationnel (Milgrom 1983)**:
- La quantité de masse manquante dans les galaxies spirale est fortement corrélée à l'accélération de pesanteur (Newtonnienne) due aux baryons
- **Il existe une accélération caractéristique, universelle, $a_0 \sim 10^{-10} \text{ s}^{-2}$**
sous laquelle il y a un clair besoin de DM, et au delà de laquelle Newton+baryon suffit.

Le problème de la matière noire et MOND



Le problème de la matière noire et MOND



- Et si cela indiquait au fond que $a = G M/r^2$ devient faux en champ ultra faible ?
- Cad : les courbes de rotation des galaxies SONT des tests (et les premiers jamais réalisés) de la gravité en champ ultra faible

Le problème de la matière noire et MOND

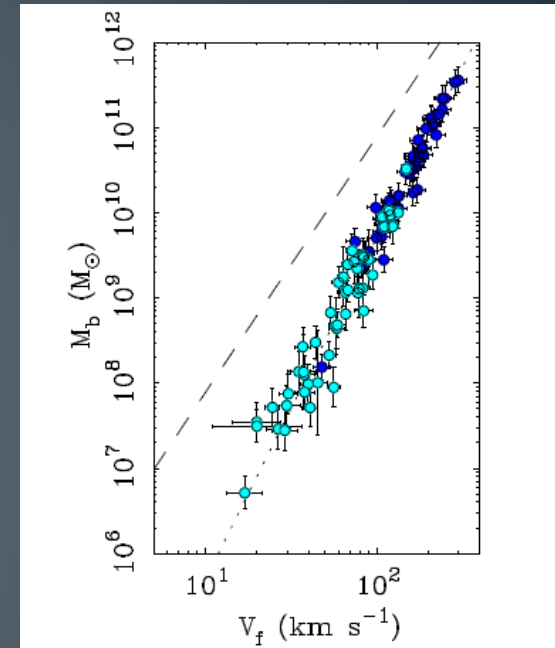
- Quelle loi relie M_{tot}/M_b ?

Loi de Tully-Fischer

$$V^4 \sim M_b$$

Cinématique : $a^2 \sim M_b / r^2$

Donc $a^2 = G M_b \mathbf{a}_0 / r^2$



Modification de la loi de Newton sous une échelle universelle d'accélération a_0

Le problème de la matière noire et MOND

- Modèles naifs :
- $F = m a$ devient $F = m a f(a/a_0)$ **modification de l'inertie** ou
- **Modification de la dynamique gravitationnelle en champ ultra faible** : l'eq de Poisson devient

$$\nabla \cdot \left[\mu \left(\frac{|\nabla\Phi|}{a_0} \right) \nabla\Phi \right] = 4\pi G\rho$$

- Ce faisant on va encore plus loin : on écrit que le champ gravitationnel est **complètement** déterminé par la distribution baryonique (au niveau Newtonien)
- Pour les effets relativistes de la DM (lensing), il existe des extensions relativistes de MOND
- Est-ce vrai ? → Succès phénoménologique impressionnant pour ces prédictions de 1983/1984

Le problème de la matière noire et MOND

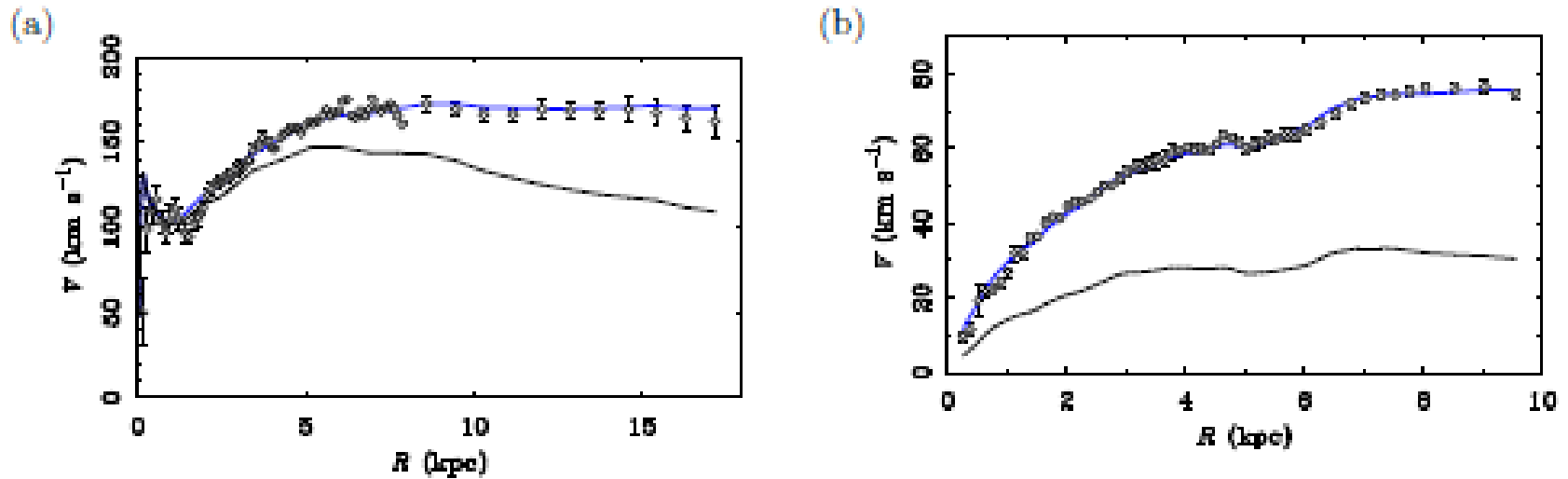


Figure 21: Examples of detailed MOND rotation curve fits of the HSB and LSB galaxies of Figure 13

Le problème de la matière noire et MOND

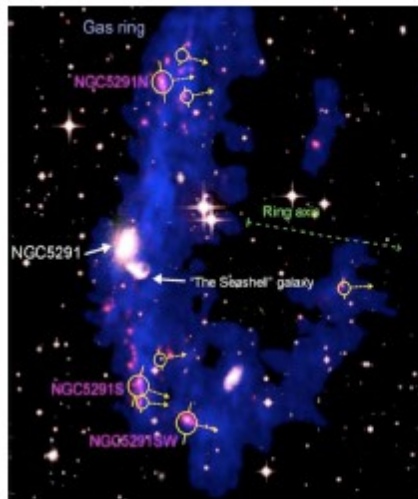
- Le constat observationnel va donc au delà de la simple corrélation masse manquante/champ gravitationnel :
- La gravité dans les galaxies est **entièrement** déterminée par le contenu baryonique : il existe une relation biunivoque entre les deux, et **aucun** besoin de matière noire **à cette échelle**
...mais cette relation **n'est pas** la loi de Newton
- Signifie aussi que sans MOND, il existe une **conspiration** baryon/CDM pour que CDM n'apparaisse que comme une modif de la gravité à cette échelle !

Mais... Le puzzle MOND vs CDM

- **Problème majeur** : MOND n'élimine pas complètement le besoin de matière noire à l'échelle des amas et cosmologiques
- **MOND aux petites échelles est favorisé, mais CDM l'est aux grandes.**
- C'est le puzzle MOND : trouver une théorie bien posée de MOND ne serait de toute façon pas suffisant..

Separating baryons from particle DM

Small rotationally supported gas-dense objects ($> 10^{-21} \text{ kg/m}^3$)



Tidal dwarf galaxies in NGC 5291

Bournaud et al. (2007)

Milgrom (2007)

Gentile, Famaey et al. (2007)

~~CDM~~

MOND

Large pressure-supported not very gas-dense objects

CDM

~~MOND~~

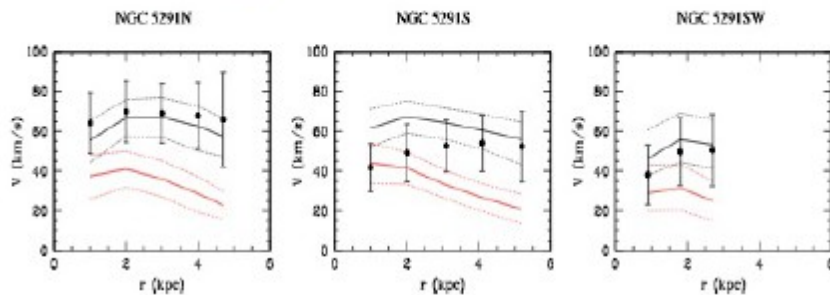
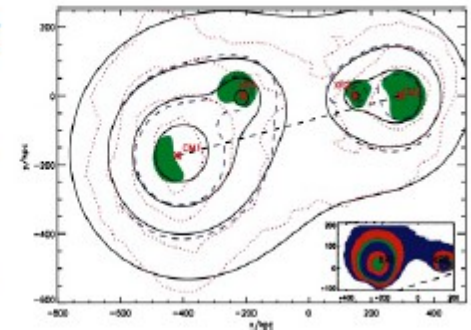


The Bullet Cluster

Clowe et al. (2006)

Angus, Shan, Zhao & Famaey (2007)

But speed 3000 km/s?



Matière noire et gravitation: conclusions

- **CDM** : absence de supersymétrie au LHC, absence de détection directe (exp. LUX)
- **Pas de besoin de DM au niveau galactique**
- Pire : fine tuning très clairement établi entre la distrib de DM (si elle existe) et la matière baryonique à l'échelle galactique
- **Besoin de CDM aux grandes échelles** : clusters et cosmo, dont cosmo primordiale (CMB!)
- **Solution ?** existence d'un « fluide » se comportant comme un fluide CDM aux grandes échelles, mais comme une modification de la gravité aux petites ?
(→ Alexandre)
- **Triple problème de coïncidence !** $a_0 \sim c H_0 \sim c^2 \sqrt{\Lambda}$

Gravitation et énergie noire

Gravitation et énergie noire

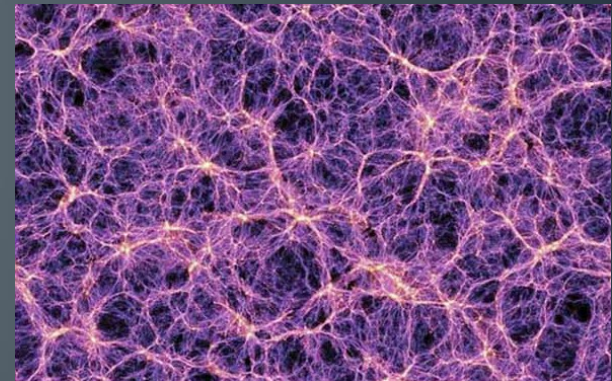
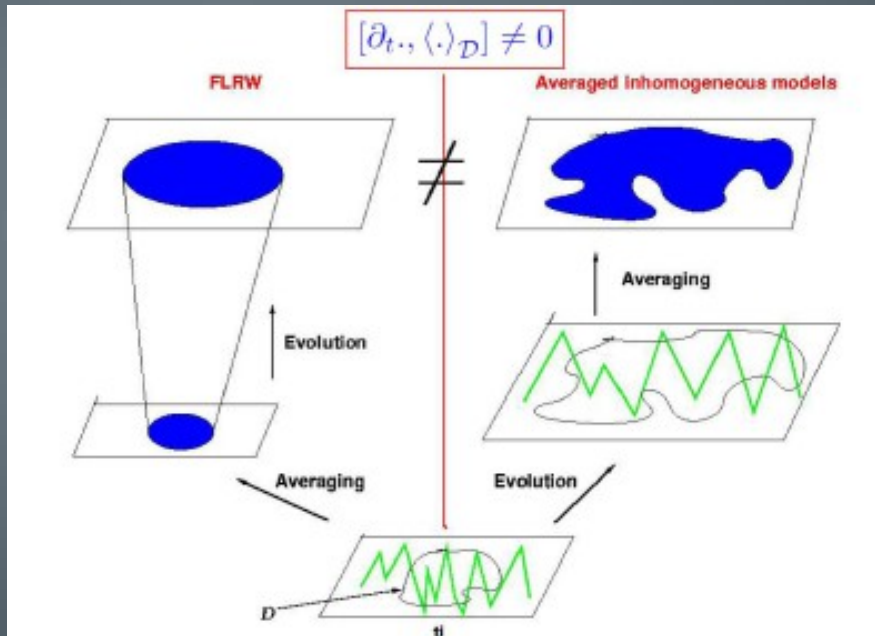
- La constante cosmologique pose elle aussi un grand nombre de problèmes conceptuels fondamentaux
- En particulier du point de vue de la question de savoir si l'énergie du vide gravite, et si oui comment (et que vaut-elle)
- Cette question est je crois essentiellement un problème de gravité quantique
- Indépendamment, le triple problème de coïncidence suggère aussi que la question de l'énergie noire n'est pas forcément découplé de celle de la matière noire (→ modèles de gravitation modifiée couplée DE/DM ou DE/MOND)
- Enfin, il est naturel de tenter d'expliquer la valeur observée par de la physique déjà comprise et existante. C'est la problématique de la cosmologie inhomogène

Energie noire et cosmologie inhomogène?

- Quels sont les effets des inhomogénéités de l'Univers tardif ?
 - **Dynamiques** : la dynamique moyennée de l'Univers est elle différente de la dynamique d'un Univers moyenné (cad, Friedman) (strong back reaction) (ex : J M Alimi/J Larena)
 - **Observables** : modifient-elles suffisamment la trajectoire des photons de telle sorte que l'Univers semble accéléré alors qu'il ne l'est pas ? (= effet d'optique, ou weak back reactions)
 - **Cette question est intéressante en soi dans une ère de « cosmologie de précision »** (indépendamment de la motivation originale, cad savoir si les inhomogénéités peuvent à elles seules expliquer l'accélération observée de l'expansion)

Dynamique des cosmologie inhomogènes?

- Effets dynamiques



- Problème : comment moyenner ?

Observables et cosmologies inhomogènes?

- Observables : distance angulaire, shear, tenseur de Ricci et de Weyl
- Eqs de Sachs

$$\frac{1}{r_A} \frac{d^2 r_A}{d\lambda^2} + \bar{\sigma}\sigma = -\frac{1}{2} R_{\mu\nu} k^\mu k^\nu$$

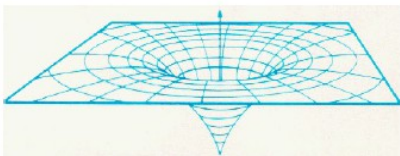
$$\frac{d\sigma}{d\lambda} + \frac{2\sigma}{r_A} \frac{dr_A}{d\lambda} = C_{\mu\nu\rho\lambda} \bar{m}^\mu k^\nu \bar{m}^\rho k^\lambda.$$

Spherical symmetry + in vacuum $T_{\mu\nu} = 0$:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = - \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) c^2 dt^2 + \frac{dr^2}{\left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)} + r^2 d^2\Omega$$

Here Ricci tensor is zero : $R_{\mu\nu} = 0$

But Weyl curvature is not $C_{\mu\nu\rho\lambda} \propto 1/r^6$.



Homogeneous and isotropic source : the model of homogeneous cosmology ! Source is

$$T_{\mu\nu} = (p + \rho c^2) u_\mu u_\nu + p g_{\mu\nu}$$

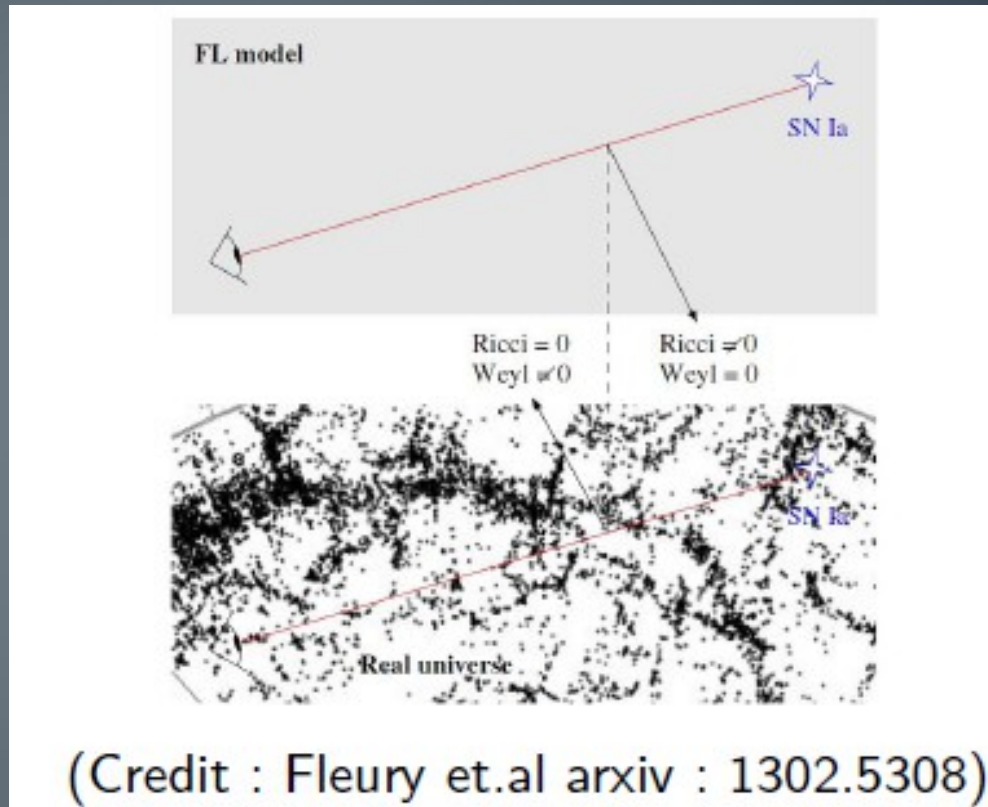
and solution are Friedmann-Lemaitre-Robertson-Walker spacetimes

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d^2\Omega \right)$$

Here Ricci tensor is non-zero : roughly $R_{\mu\nu} \propto \rho$

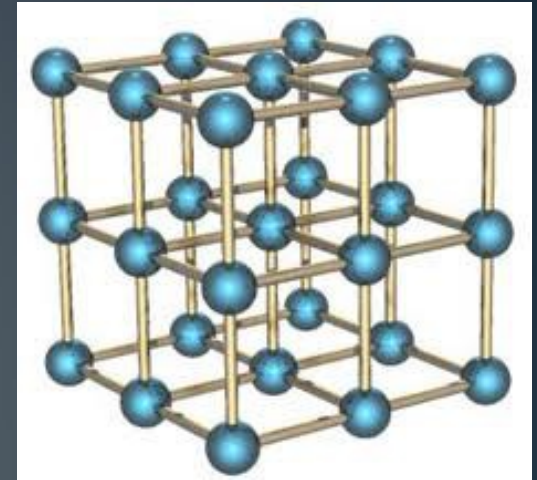
But Weyl curvature vanishes $C_{\mu\nu\rho\lambda} = 0$

Energie noire et cosmologie inhomogène?



- Comment se fait-il que tout se passe comme si l'Univers était homogène ? Oug des déviations au cas Friedmannien ?

Toy model d'Univers inhomogène



- Idée : cosmologie inhomogène sans moyennisation = solution « exacte »
- Réseau cubique infini de masses
- Périodicité : étude dans l'espace de Fourier
- Petit paramètre $G M/Lc^2 \ll 1$

- Nouvelle solution (perturbative) de la RG jusqu'à l'ordre $M/L \sim 3/2$
- Solution « cosmologique » (réseau qui s'étend ou se contracte de façon homogène)
- Etude extensive de la dynamique et des observables

Toy model d'Univers inhomogène

- Solution :

Solution at order $(M/L)^{3/2}$: $g_{0i} = 0$ and :

$$g_{ij} = \delta_{ij} \left[1 + 2\epsilon \sqrt{\frac{GM}{Lc^2}} \sqrt{\frac{8\pi}{3}} \frac{ct}{L} + \frac{2GM}{Lc^2} \left(f_\eta(\mathbf{x}) + \frac{2\pi c^2 t^2}{3L^2} \right) \right. \\ \left. + 2 \left(\frac{GM}{Lc^2} \right)^{3/2} \left(2\epsilon \frac{ct}{L} \sqrt{\frac{8\pi}{3}} f_\eta(\mathbf{x}) - \frac{2\pi\epsilon}{9} \sqrt{\frac{8\pi}{3}} \frac{c^3 t^3}{L^3} \right) \right] \\ + \frac{GM}{Lc^2} c^2 t^2 \partial_{ij}^2 f_\eta(\mathbf{x}) + \left(\frac{GM}{Lc^2} \right)^{3/2} \epsilon \sqrt{\frac{8\pi}{3}} \frac{c^3 t^3}{3L} \partial_{ij} f_\eta(\mathbf{x}),$$

where :

$$f_\eta(\mathbf{x}) = \frac{8}{\pi} \sum_{(n,p,q) \in \mathbb{N}_*^3} \frac{e^{-\frac{\pi^2(n^2+p^2+q^2)\eta^2}{L^2}} \cos\left(\frac{2\pi}{L}nx\right) \cos\left(\frac{2\pi}{L}py\right) \cos\left(\frac{2\pi}{L}qz\right)}{n^2 + p^2 + q^2}$$

Toy model d'Univers inhomogène

- Résultat : pas d'effets dynamiques sur le facteur d'échelle moyens

Hubble flow after averaging out the periodic inhomogeneities :

$$H(t) = H_0 - \frac{3}{2}H_0^2 t + \frac{9}{4}H_0^3 t^2 + \mathcal{O}(H_0^4).$$

with

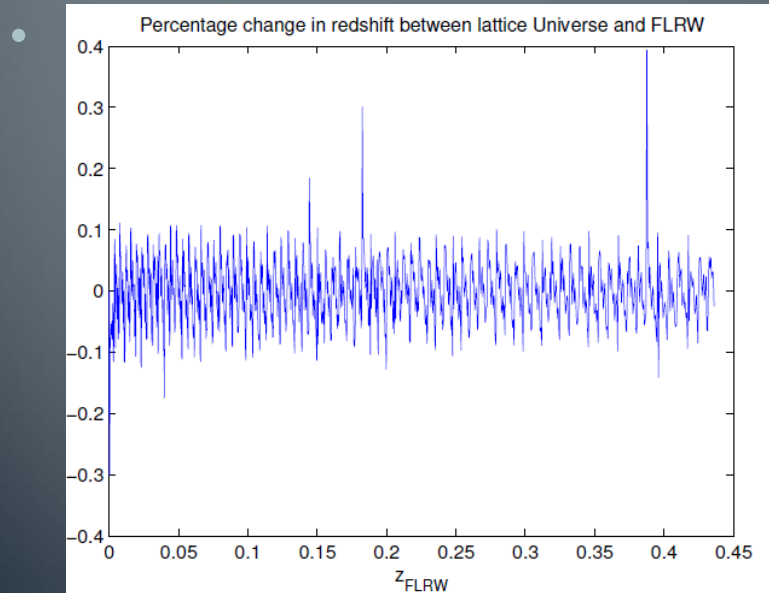
$$H_0 = \varepsilon \sqrt{\frac{8\pi}{3}} \sqrt{\frac{GM}{L^3}}$$

Identical to FLRW filled with pressureless matter (dust).

Toy model d'Univers inhomogène

- Observables : plus délicat.
- Résolution exacte de l'eq des géodésiques

$$z(\lambda) = -\sqrt{\frac{GM}{Lc^2}} \sqrt{\frac{8\pi}{3}} \frac{\lambda}{L} + \frac{GM}{Lc^2} \left(\frac{14\pi\lambda^2}{3L^2} + [f_\eta(\mathbf{x}(\lambda)) - \lambda\partial_i f_\eta(\mathbf{x}(\lambda))v^i]_0^\lambda \right) + \mathcal{O}\left(\frac{M^{3/2}}{L^{3/2}}\right)$$



Toy model d'Univers inhomogène

- Observables : DL perturbatif des eqs de Sachs, et solution -> distance angulaire

$$\begin{aligned}
 r_A(\lambda) = & -\lambda + \frac{2\pi GM}{3} \frac{\lambda^3}{Lc^2 L^2} \left[1 + \sum_{(n,p,q) \in \mathcal{D}_v} e^{-\frac{\pi^2(n^2+p^2+q^2)\eta^2}{L^2}} \right] \\
 & + \frac{2GM}{\pi Lc^2} \sum_{\mathbf{n} \in \mathbb{N}_*^3 \setminus \mathcal{D}_v} e^{-\frac{\pi^2(n^2+p^2+q^2)\eta^2}{L^2}} \times \\
 & \sum_{l=1}^{l=4} \left[-\lambda \frac{\cos\left(\frac{2\pi\lambda\mathbf{v}\cdot\mathbf{u}_l}{L}\right)}{(\mathbf{v}\cdot\mathbf{u}_l)^2} + \frac{L \sin\left(\frac{2\pi\lambda\mathbf{v}\cdot\mathbf{u}_l}{L}\right)}{\pi (\mathbf{v}\cdot\mathbf{u}_l)^3} \right]
 \end{aligned}$$

$\mathbf{u}_1 = (n, p, q), \mathbf{u}_2 = (n, -p, -q), \mathbf{u}_3 = (n, p, -q), \mathbf{u}_4 = (n, -p, q),$
 and $\mathcal{D}_v = \{(n, p, q) \in \mathbb{N}_*^3 : \exists l \in \{1, 2, 3, 4\} / \mathbf{u}_l \cdot \mathbf{v} = 0\}.$

- Etude analytique : dist. ang. essentiellement Friedmannien ssi les masses ne sont pas trop compactes par rapport à leur séparation

$$\frac{M}{L} \ll \mathcal{O}(1) \left(\frac{\eta}{L}\right)^4$$

Toy model d'Univers inhomogène

- Travail restant : étudier numériquement les eqs. de Sachs complètes (non perturbées), et faire des statistiques détaillées sur le ray tracing dans cet « univers réseau »
- Etendre si possible à un Univers de volume fini ?
- Ajouter une constante cosmologique ?

Conclusions et perspectives

Gravitation et Univers sombre

- Le problème de la DM est fondamental, et indique probablement une modification partielle des lois gravitationnelles.
- Un lien avec le problème de la DE est probable
-> L'univers sombre est très certainement plus subtil que LCDM
- Développement de modèles. Et : comment tester des modèles réalistes qui interpolent entre CDM (large scales) et MOND (small scales) ? -> La formation des structures est cruciale
- Pb majeur : cruel manque de principe physiques ! Les modèles scalaires par exemple ne sont pas assez contraints en soi.
- Nouvelles pistes ? Exemple : holographic dark energy, holographic MOND. Théories modifiées de la grav mais qui cependant respecte la correspondance profonde entre thermodynamique et gravité, ...