

Modèle jouet pour la formation de structures dans l'Univers

— — —

Journées Jeunes Chercheurs 2008

F. Sicard (LPNHE, Paris)

—

M. Joyce (LPNHE, Paris)

A. Gabrielli (ISC, Rome)

Groupe Supernova & Cosmologie
Laboratoire de Physique Nucléaire et des Hautes Énergies
Universités Paris 6 & Paris 7 - UMR 7585

3 Décembre 2008

- 1 Motivation: Formation de structures dans l'Univers
- 2 Approche du problème
- 3 Définition de la gravité en 1-d dans la limite de volume infini
- 4 Résultats
- 5 Conclusion

Observations:

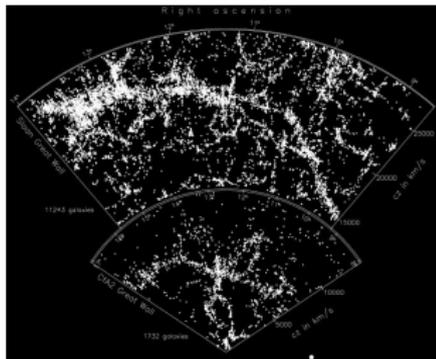
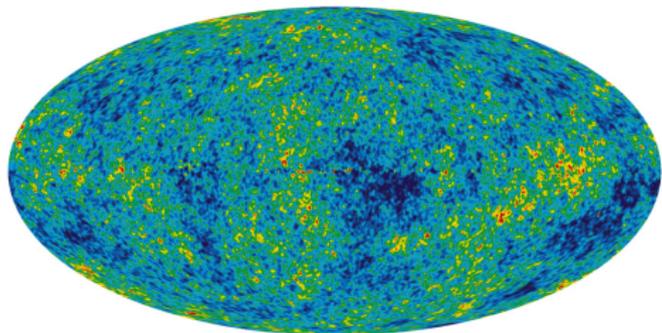
→ Distribution de matière très **inhomogene** (e.g. galaxies) dans l'univers "local"

→ Résultat d'une évolution partant d'une condition initiale très **uniforme**

→ Cette condition initiale est fortement contrainte par les observations des fluctuations du CMB

Motivation (2): Formation de structures dans l'Univers

“**WMAP**” (10^5 ans) : fluctuations de densité $\sim 10^{-5}$...



... et “**SDSS**” (10^{10} ans) : fluctuations de densité $\gg 10^{-5}$.

Motivation (3): Formation de structures dans l'Univers

Modèle considéré: **CDM**

→ Matière initialement "COLD": non-relativiste

→ Matière principalement "DARK": les interactions non-gravitationnelles sont négligées

→ Matière constituée de particules microscopiques

Négliger les effets de la Relativité Générale:

→ Problème **Newtonien** de particules auto-gravitantes dans un espace d'extension **infinie**

→ Condition initiale: petites perturbations au voisinage d'une solution homogène en expansion

Motivation (4): Formation de structure dans l'Univers

Avancements actuels:

- La communauté cosmologiste s'appuie principalement sur des simulations numériques
- La compréhension analytique du modèle est très limitée
- Des prédictions très précises sont maintenant nécessaires pour contraindre les observations (e.g. "weak lensing")
- Simulations à N-corps : le domaine de validité est mal compris

Perspectives de recherche:

- Une meilleure compréhension physique des résultats apportés par les simulations
- **Socle analytique** pour contrôler les résultats numériques

Etude simplifiée du problème étudié en Cosmologie

- Modèle jouet dans un univers en $1-d$ permettant une approche **analytique** solide et **numérique** plus simple
- Opportunité de sonder une gamme d'échelle plus large
- Classe particulière de condition initiale: le réseau perturbé sans vitesse initiale
- Différences avec les modèles en $3-d$

Comportements qualitativement similaires:

Formation hiérarchique de structures

Clustering auto-similaire

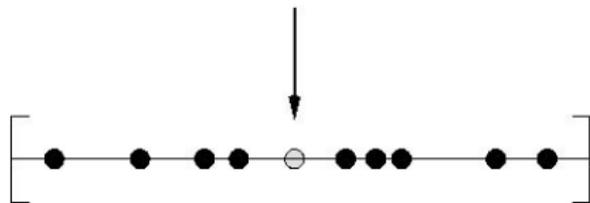
Du système fini (1) ...

La force d'interaction gravitationnelle ...

... derive formellement du potentiel gravitationel $\phi(x) = g|x|$

$$f(x) = -g \frac{x}{|x|} = -g \operatorname{sign}(x)$$

... consiste en une force attractive indépendante de la séparation



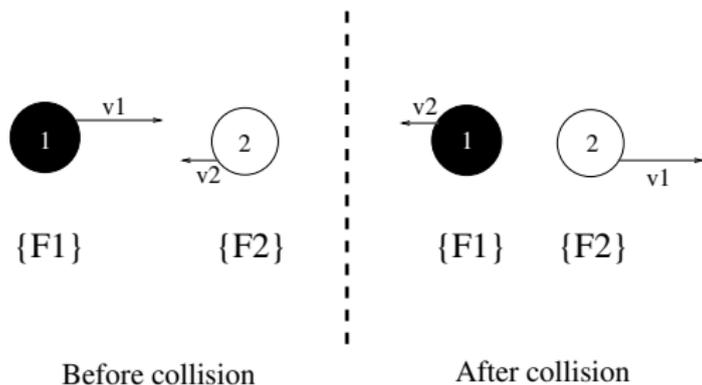
Particule \leftrightarrow **Plan infini** se déplaçant perpendiculairement à l'axe

$$F(x) \propto N_R(x) - N_L(x)$$

Analyse d'un point de vue **macroscopique** de notre système:

→ nous ne suivons pas le trajet d'une particule en particulier

Particules se traversant librement ↔ **collisions élastiques**



La condition de **non-croisement** est indispensable pour notre approche.

... au système infini (1)

Contexte cosmologique:

Limite “thermodynamique” des systèmes infinis

$$N \rightarrow +\infty, L \rightarrow +\infty, N/L > 0$$

Univers avec/sans expansion en 3-d:

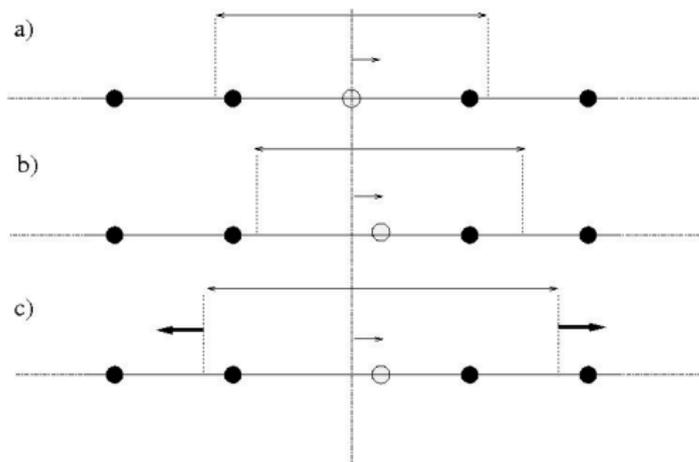
La force n'est pas définie de façon unique \rightarrow ajout du fond négatif
 \equiv soustraction de la densité moyenne

Seules les fluctuations du champ de densité génèrent la force gravitationnelle \iff **sommation symétrique autour de la particule**

$$F(x) = \lim_{L \rightarrow +\infty} \left[N_R(x, L) - N_L(x, L) \right]$$

Configuration simple:

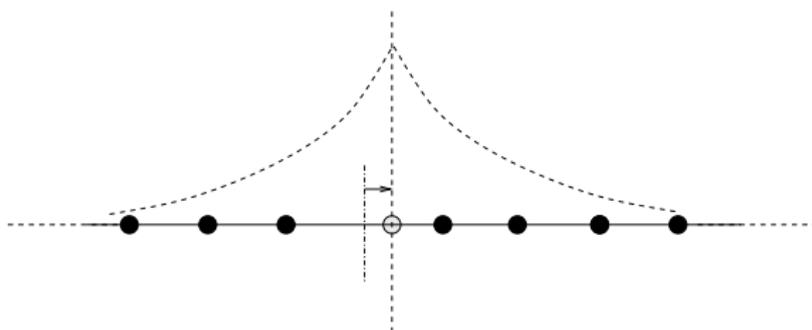
Considérons une particule initialement située sur le réseau parfait et déplaçons la



Les fluctuations de surface empêchent la convergence de la force

Nouvelle procédure de limite:

"Écrantage" symétrique dans un espace infini \leftrightarrow Limite symétrique



Tant qu'il n'y a pas de croisement:

$$f_{\mu}(x) = -g \frac{x}{|x|} e^{-\mu|x|} \rightarrow F_0 = 2gn_0 u_0$$

Particule se déplaçant dans un potentiel de type "**oscillateur harmonique inversé**" centré sur la position d'équilibre

Extension au réseau perturbé infini

Généralisation: Distribution infinie de particules déplacées →
Processus stochastiques de points → La force agissant sur une
particule devient une **variable stochastique**

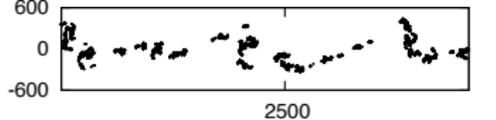
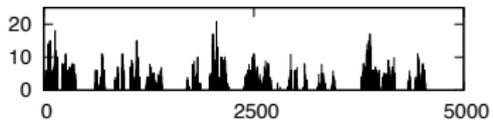
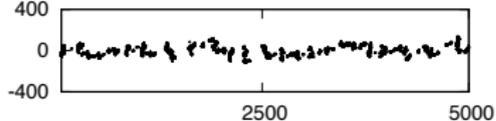
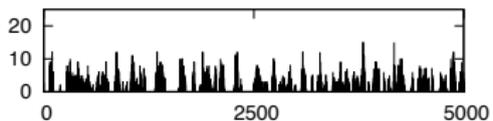
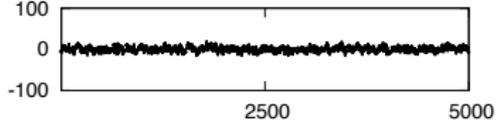
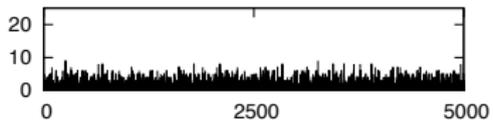
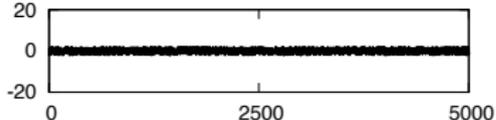
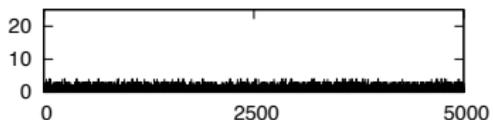
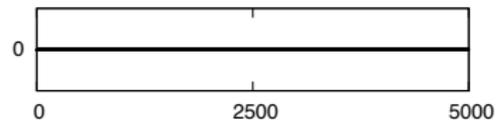
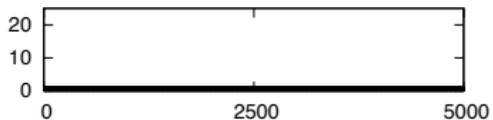
Résultat exact: Particules ne pouvant pas se traverser ↔ collisions
élastiques

$$F_n = 2gn_0 u_n$$

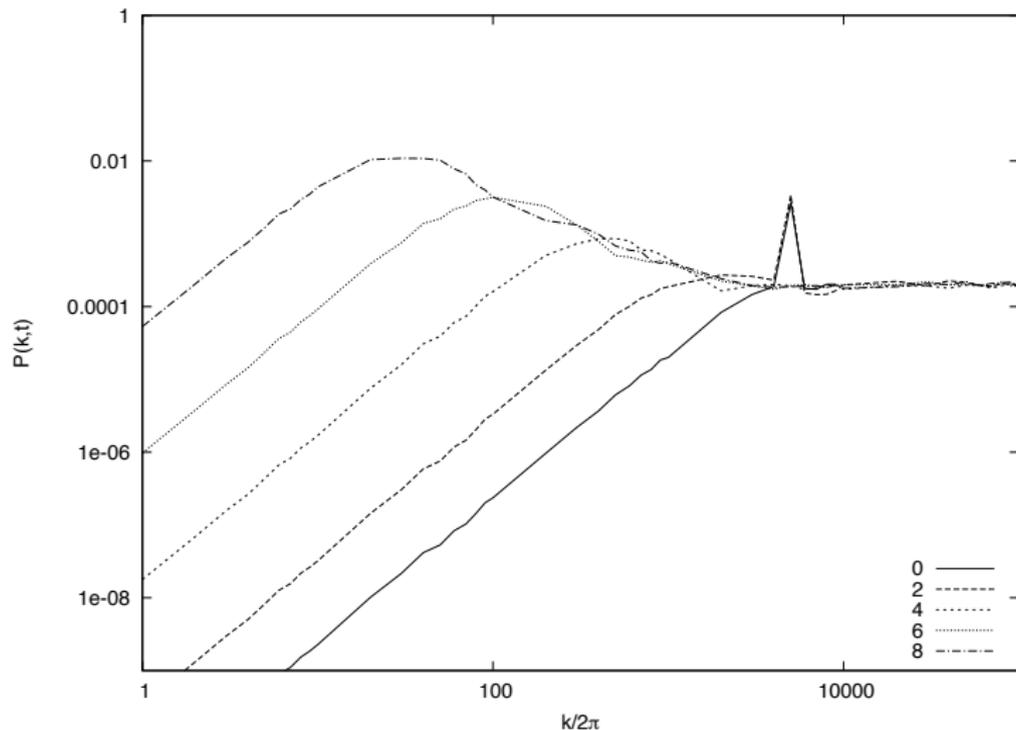
Particules se déplaçant dans un ensemble de potentiels de type
“**oscillateurs harmoniques inversés**”

Résultats (1)

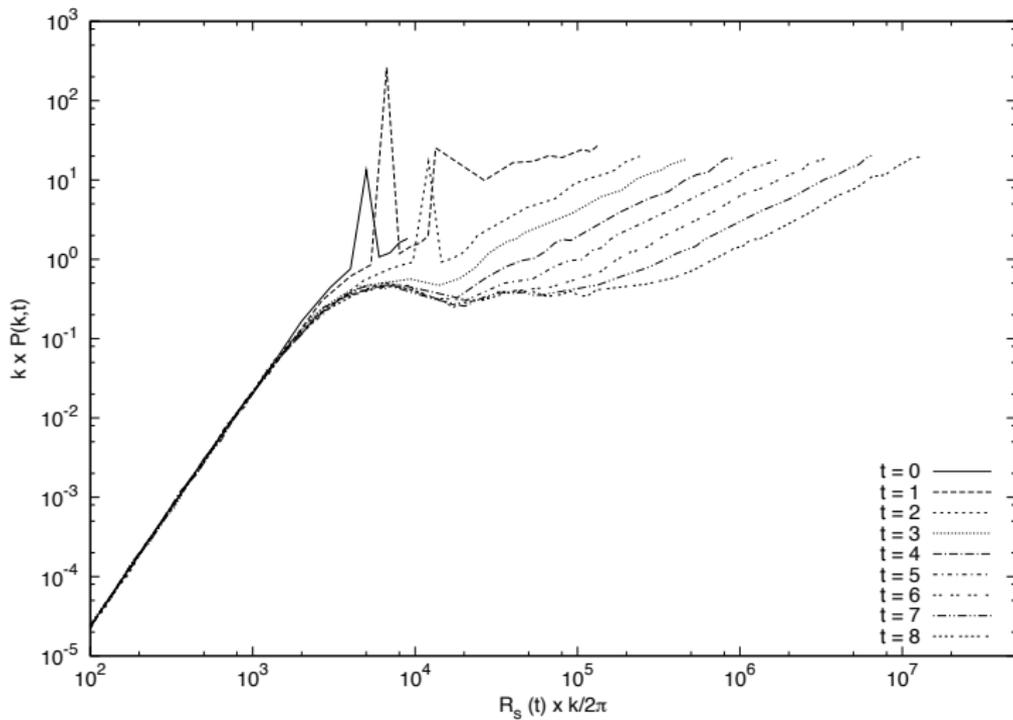
Evolution de notre système 1-d



Evolution du Spectre de puissance



Mise en évidence du caractère auto-similaire



RÉSULTATS

- Nous avons bien défini la Force de Gravitation en $1-d$ dans un espace de volume infini
- Nous avons vu (pour une classe de conditions initiales particulières) un comportement similaire aux systèmes $3-d$

PERSPECTIVES

- Élargir notre gamme de conditions initiales
- Considérer le cas d'un Univers en expansion
- Analyser la structure des Halos
- Étudier les effets de discrétisation