



MAISON DE LA SIMULATION

Formulaire de proposition de sujet de thèse

Titre : (en français et en Anglais)

- Numerical simulations of the large-scale structure of the universe
- Simulations numériques de la structure à grande échelle de l'univers

Encadrants : (prénom, nom, grade, mél, laboratoire)

- Giovanni MANFREDI, DR2, Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg (IPCMS), UMR 7504, mél : giovanni.manfredi@ipcms.unistra.fr
- Jean-Louis ROUET, PR2, Institut des sciences de la terre d'Orléans (ISTO), UMR 7327, mél : jean-louis.rouet@univ-orleans.fr
-

Mots clés : (en français et en Anglais)

- Gravitational dynamics ; large-scale structures ; fractals ; N-body simulations ; Vlasov simulations.
- Dynamique gravitationnelle ; structures à grande échelle ; fractals ; simulations N-corps ; simulation vlasov.



Description du sujet :

Numerical simulations of the large-scale structure of the universe

The purpose of the proposed research is to apply novel methods of dynamical system theory and computation to understand the distribution of matter in cosmic voids, the largest known structures in the universe. Astronomers have found strong evidence of hierarchical – i.e., fractal – structures in the distribution of mass in clusters and super-clusters of galaxies. The observational evidence for fractal behavior of clusters over a finite range of scales is nowadays well documented [1]. Since the so-called voids are the largest structures known (some have diameters of about 500 light years), in forming a picture of how the universe evolves it is of paramount importance to determine whether self-similar behavior is also present within them.

Theoretical astrophysicists employ four-dimensional computer simulations (three space dimensions plus time) to model the evolution of large regions of the universe. However, because billions of particles are required to represent the matter distribution, they are forced to make significant approximations that leave the delicate issue of fractal structure largely unresolved. The proposed research will address the question of void geometry within the framework of a class of idealized, one-dimensional, models. By reducing the dimension we have demonstrated that it is possible to maintain high precision throughout the simulations and avoid the difficulties introduced by their higher-dimensional counterparts [2].

Most existing results rely on N-body simulations, whereby one solves the equations of motion of a large number of particles that interact through the gravitational force (in the Newtonian approximation, general relativistic corrections being ignored here). Starting from a uniform distribution of particles, N-body simulations show the formation of a hierarchical structure [3, 4]. The density power spectrum and correlation functions show that a scale-free range appears with time and becomes larger and larger. This hierarchical formation suggests a fractal distribution of the particles. This has been tested with different techniques with up to 500 000 particles. The analyses are robust for high density regions but give contrasted results for the low-density regions.

In order to have a better insight of the distribution of mass in the low-density region, we propose to use a Vlasov approach, which relies on a continuous probability distribution in the phase space [5]. This probability distribution evolves according to the Vlasov equation, a kinetic equation that is similar to Liouville's equation, well-known from non-equilibrium statistical mechanics.

In Vlasov simulations, the entire phase space is covered with a uniform mesh, so that regions of high and low density are sampled with equal precision. It is generally acknowledged that Vlasov simulations offer a better resolution and display a lower level of noise than their N-body counterparts. A long experience on Vlasov codes already exists in the plasma physics community, where similar equations are used to simulate the dynamics of charged particles interacting via the Coulomb force.



The Vlasov approach will allow us to validate older results obtained with N-body simulations and to extend them to low-density regions where existing numerical evidence is inconclusive. The computational approach that we propose is original in the field of gravitational simulations. The expected results will shed light on the large-scale structure of the universe and the fractal properties of its mass distribution.

This work will require an expertise both in (astro)physics and applied mathematics as well as a taste for computer simulations. It will involve two parts, one on the simulations themselves (initial conditions, choice of the numerical methods, data post-processing ...) and one on the parallelisation of the code. The latter will be a necessary step in order to reduce the computation time while keeping a sufficiently fine spatial mesh.

Simulations numériques de la structure à grande échelle de l'univers

L'objectif des recherches proposées dans ce projet est d'utiliser des méthodes théoriques et numériques originales pour étudier la répartition de la matière dans les « cosmic voids » (vides cosmiques : régions de l'univers à basse densité de matière), qui sont les plus grandes structures connues de l'univers. Les astronomes ont montré que les amas et super-amas galactiques possèdent une structure hiérarchique (fractale) sur une certaine gamme d'échelles. Ces observations sont aujourd'hui bien établies [1]. Comme ces « vides » sont les plus grandes structures connues de l'univers (certains ont des diamètres d'environ 500 années-lumière), il est important d'établir s'ils possèdent eux-aussi une structure hiérarchique avec dimension fractale

Les astrophysiciens utilisent des simulations numériques à quatre dimensions (trois dimensions spatiales plus le temps) pour modéliser l'évolution à grande échelle de l'univers. Cependant, en raison des milliards de particules qui sont nécessaires pour représenter la distribution de la matière, la précision de ces simulations est encore imparfaite. La question de la structure fractale reste donc encore ouverte et loin d'être résolue. La recherche proposée portera sur la question de la géométrie des « vides » dans le cadre d'une classe de modèles idéalisés à une dimension spatiale. En réduisant le nombre de dimensions spatiales, nous avons en effet montré qu'il est possible de maintenir une précision très satisfaisante tout au long des simulations [2].

La plupart des résultats numériques existants ont été obtenus à l'aide de simulations à N-corps, qui résolvent les équations du mouvement d'un grand nombre de particules interagissant par la force gravitationnelle dans l'approximation newtonienne (les effets de la relativité générale seront ignorés ici). À partir d'une distribution uniforme de particules, ces simulations à N-corps montrent la formation d'une structure hiérarchique avec dimension fractale [3, 4], qui suggère une distribution fractale des particules. Cela a été testé avec des techniques différentes et un maximum de 500 000 particules. Les résultats sont robustes pour les régions à forte densité, mais restent plus contrastés pour les régions à faible densité.

Afin de mieux comprendre la répartition de la masse dans la région de faible densité, nous proposons d'utiliser une approche de type « Vlasov », qui s'appuie sur une distribution de



probabilité continue dans l'espace des phases [5]. Cette distribution de probabilité évolue selon l'équation dite de Vlasov, une équation cinétique qui est similaire à l'équation de Liouville, bien connue de la mécanique statistique hors équilibre.

Dans les simulations Vlasov, l'espace de phase est entièrement maillé par une grille uniforme, de sorte que les régions de haute et basse densité sont échantillonnées avec la même précision. Il est généralement admis que les simulations de Vlasov offrent une meilleure résolution et affichent un niveau de bruit moins important que les simulations à N-corps. Une longue expérience sur les codes Vlasov existe déjà dans la communauté de la physique des plasmas, où des équations similaires sont utilisées pour simuler la dynamique des particules chargées interagissant via la force de Coulomb.

L'approche de Vlasov va nous permettre de valider les résultats déjà obtenus avec des simulations à N-corps et de les étendre aux régions à faible densité, pour lesquelles les données numériques actuelles sont peu concluantes. Les méthodes numériques que nous proposons sont originales dans le domaine des simulations gravitationnelles. Les résultats attendus vont améliorer nos connaissances sur la structure à grande échelle de l'univers et sur les propriétés fractales de la distribution de la masse dans celui-ci.

Ce travail demande des compétences à la fois en physique et en mathématiques appliquées, ainsi qu'un goût pour la simulation numérique. Il comporte deux parties, l'une sur les simulations elles-mêmes (conditions initiales, choix des méthodes d'intégration, analyse des données etc...) l'autre sur la parallélisation du code. En effet, elle sera nécessaire si l'on veut garder des temps de calculs raisonnables avec un maillage suffisamment fin.

Références

1. Baryshev Y and Teerikorpi P, 2002 *Discovery of Cosmic Fractals* (Singapore: World Scientific).
2. J.-L. Rouet, M.R. Feix, and M. Navet, *One-dimensional numerical simulation and homogeneity of the expanding universe*, *Vistas in Astronomy* **33**, 357–370 (1990).
3. B. N. Miller and J.-L. Rouet, *Cosmology in one-dimension: fractal geometry, power spectra and correlation*. *J. Stat. Mech.* P12028 (2010).
4. B. N. Miller and J.-L. Rouet, *Ewald sums for one dimension*, *Phys. Rev. E* **82**, 066203 (2010).
5. G. Manfredi et al., *The numerical integration of the Vlasov equation possessing an invariant*, *J. Comput. Phys.* **121**, 298 (1995).