

SIMULATIONS GRAVITATIONNELLES A N CORPS

Michele Trenti, Space Telescope Science Institute, Baltimore, MD, 21210, U.S. AND Piet Hut Institute for Advanced Study, Princeton, NJ, 08540, U.S. publié dans Scholarpedia, 3(5):3930 — accepté le 20 mai 2008

Les simulations gravitationnelles à N corps sont les solutions numériques des équations de mouvement pour N particules en interaction gravitationnelle. Elles sont fréquemment utilisées en astrophysique. Les applications vont de quelques corps ou systèmes jusqu'aux échelles galactiques. Cet article est une revue qui présente les principales méthodes de simulations N-corps et les situations dans lesquelles elles sont appliquées en astrophysique.

La loi de Newton est la loi physique qui s'applique à un système de N particules qui gravitent les unes autour des autres, en ajoutant parfois un champ potentiel externe. Il faut donc résoudre un ensemble d'équations différentielles non linéaires du second, reliant l'accélération, non linéaire, à la position de toutes les particules du système. Le calcul de la solution numérique d'un système à N corps est complexe. En effet, l'évaluation de la force exercée sur chaque particule nécessite de prendre en compte les contributions de tous les autres membres du système. Cette complexité a conduit au développement d'un grand nombre de techniques numériques afin d'obtenir une solution numérique fiable avec le minimum de ressources informatiques.

Les différents contextes astrophysiques dans lesquels les simulations à N corps sont utilisées sont d'abord abordés. Ensuite est présenté l'état de l'art des techniques pour ces problèmes.

DOMAINES ASTROPHYSIQUES ET ECHELLES DU TEMPS

Echelles du temps, équilibre et « collisionnalité » :

La technique à utiliser dépend de chaque contexte, en particulier de l'échelle du temps et de la « collisionnalité » du problème. L'échelle du temps dépend du nombre de particules.

Un système de N particules en interaction gravitationnelle de masse totale M et de dimension de référence R (par exemple le rayon contenant la moitié de la masse totale) atteint un état d'équilibre dynamique. Les systèmes à N corps tels que les galaxies et les halos de matière noire ont un temps de relaxation beaucoup plus long que la durée de vie de l'univers, ils sont donc considérés comme des systèmes sans collision. Les systèmes plus petits, tels que les amas globulaires, sont collisionnels car leur temps de relaxation est plus court que leur âge. La relaxation à deux corps est également supprimée, comme dans le cas de la dynamique du système solaire.

Approche du champ moyen : l'équation de Boltzman

Un système de N particules en interaction gravitationnelle définit un espace de phase de $6N+1$ dimensions données par les N vecteurs position et vitesse associés à chaque particule à chaque instant t. La solution du problème à N corps définit une trajectoire 3 dans cet espace de phase. L'idée est de construire une description du champ moyen du système dynamique en termes de fonction de distribution d'une seule particule. Dans ce cadre simplifié, la connaissance de la fonction de distribution définit de manière unique toutes les propriétés du système. La dynamique est décrite par l'équation de Boltzmann sans collision, qui dérive essentiellement du théorème de Liouville.

Approche du champ moyen : analogies et différences avec la dynamique des fluides

Les moments de vitesse de l'équation de Boltzmann définissent un ensemble d'équations connues sous le nom d'équations de Jeans. La différence fondamentale entre les deux cas est que les équations de Jeans sont dérivées dans la limite d'un système sans collision, alors que les équations de Navier-Stokes supposent un système fortement collisionnel, avec le libre parcours moyen d'une particule proche de zéro.

Domaines astrophysiques

Sur la base des considérations précédentes sur la « collisionnalité » et les échelles de temps, on peut identifier quatre domaines astrophysiques principaux pour les simulations à N corps, chacun nécessitant une technique numérique différente pour garantir une performance et une précision maximales : la mécanique céleste (systèmes planétaires solaires et extrasolaires), les systèmes stellaires denses, la sphère d'influence d'un BH massif au centre d'un système stellaire, la dynamique des galaxies et cosmologie.

LA GRAVITE NEWTONIENNE : METHODES

Grâce aux progrès réalisés dans les années 90, les avancées des programmes algorithmiques et des matériels, ont permis des simulations à N corps avec un plus grand N de 10^5 pour les codes d'intégration directe sur une échelle de temps de relaxation à deux corps et avec un N de 10^{10} pour la dynamique sans collision.

Méthodes directes :

Les méthodes directes newtoniennes permettent de calculer précisément sans approximations en contrepartie du temps de calcul plus long à cause du nombre de N. Ces méthodes sont basées sur les transformations de Kustaanheimo-steifel. Mais pour 10^6 particules, avec un nombre de temps de relaxation similaires il faut 10^8 heures de calculs.

Les trois codes :

Pour les systèmes sans collisions lorsque les interactions des particules proches et les forces provenant des particules éloignées n'ont pas de contributions importantes, il est possible d'utiliser la méthode du code arborescent (réf) où ces paramètres sont approximés. Cette méthode permet une économie du temps de calcul important car il n'y a pas besoin de recalculé depuis zéro pour chaque temps. Mais ces approximations peuvent introduire des erreurs dans des configurations astrophysiques tels que la "galaxie en explosion" (réf) qui entraîne une violation de la conservation de la quantité de mouvement.

Cette méthode ne prend pas en compte que les particules proches sont soumises à une accélération similaire à cause des particules éloignés.

Méthodes multipôles rapides :

La méthode multipolaire rapide utilise ce point. Celle-ci permet de conserver la quantité de mouvement en traitant de façon symétrique la force des cellules sources distantes dans une cellule puit par rapport à l'expansion multipolaire.

Codes de maillage des particules & Méthode de raffinement de maillage adaptatif :

Pour évaluer les forces directes pour les systèmes sans collision, il est également possible d'utiliser les méthodes de code de maillage de particules et de raffinement du maillage adaptatif en résolvant l'équation de Poisson associée à la grille correspondant au potentiel gravitationnel du système construit à partir du champ de densité.

Pour améliorer la résolution de la force calculée par ces méthodes, il est proposé de coupler une description du champ moyen à grande échelle avec un traitement direct des interactions gravitationnelles sur des distances égales ou inférieures à celle-ci. Cependant ils nécessitent de longs calculs, donc une autre possibilité est de combiner l'évaluation de la force à courte portée par la méthode de code arborescent avec les précédentes méthodes.

Enfin des méthodes de mécanique célestes computationnelles pour étudier la dynamique de petits systèmes lors des vols spatiaux, les mouvements des satellites et des planètes et la rencontre entre les étoiles. Ces méthodes assurent une importante précision nécessaire pour ces événements.

MATERIEL INFORMATIQUE :

Une approche alternative pour augmenter l'efficacité de la solution numérique du problème à N corps est d'optimiser le matériel.

Un développement matériel récent et prometteur est la possibilité d'utiliser des cartes graphiques (GPU) pour effectuer l'évaluation de la force, qui nécessite beaucoup de ressources informatiques.

Cependant des progrès au niveau matériel sont encore nécessaires pour avancer dans ces calculs et pour un plus grand nombre N de corps.