

Суперкомпьютерное моделирование образования и взаимодействия галактик в космологическом контексте на гибридных суперЭВМ, оснащенных ускорителями Intel Xeon Phi

Куликов И.М.^{1,2,3}, Черных И.Г.^{1,2}, Протасов В.А.^{1,3}, Серенко А.А.³, Ненашев В.Е.³,
Вшивков В.А.^{1,2}, Глинский Б.М.^{1,2}

¹*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН*

²*Новосибирский государственный университет*

³*Новосибирский государственный технический университет*

Движение галактик в плотных скоплениях превращает столкновения между ними в важный эволюционный фактор. Так рядовая галактика испытывает до десяти столкновений за Хаббловское время. В силу невозможности наблюдения за такими процессами в течение длительного времени математическое моделирование играет ключевую роль в их изучении. Необходимость высокой детализации моделирования заставляет нас использовать наиболее производительные суперкомпьютеры. Первые два суперкомпьютера из списка Top500 и четыре из Top10 построены на основе гибридной архитектуры с помощью графических ускорителей и ускорителей Intel Xeon Phi. Наиболее вероятно, что и первый эксафлопсный суперкомпьютер будет создан на основе гибридной архитектуры. Разработка прикладного программного обеспечения для таких систем является самостоятельной научной задачей и требует со-дизайна на каждом этапе разработки – от физической постановки задачи до используемых средств разработки.

Столкновение и дальнейшая эволюция галактик как отдельная задача рассматривается достаточно давно и благодаря вычислительным экспериментам получена часть возможных сценариев их столкновения и эволюции [1,2]. Однако в последнее время всё больший интерес представляет эволюция галактик в контексте моделирования более крупных структур – скоплений галактик и общей картины космологического моделирования. В связи с этим в докладе будут рассмотрены следующие задачи:

1. Глобальное космологическое моделирование части Вселенной – куба с линейным размером порядка 100 мегапарсек – с образованием основных космологических структур: волосков (filaments в зарубежной литературе), блинов (pancakes, walls, sheets в зарубежной литературе), скоплений (clusters в зарубежной литературе) и пустот (voids в зарубежной литературе).
2. Космологическое моделирование скопления галактик, полученных в результате глобального космологического моделирования с помощью технологий zoom-in.
3. Космологическое моделирование столкновения двух скоплений галактик, полученных в результате глобального космологического моделирования с помощью технологий zoom-in.
4. Столкновение галактик с одинаковыми и различными массами. Моделирование областей активного звездообразования и образования молекулярного водорода, а также образование неустойчивостей, развивающихся за более массивной в результате механизма набегающего давления (ram-pressure в зарубежной литературе).

5. Развитие спиральных рукавов галактик. Моделирование устойчивой вращающейся конфигурации, а также развитие двух, четырёх и семи рукавных галактик.

Космологическая модель включает в себя эволюцию темной и барионной (газ и звездная компонента) материи с учетом темной энергии и расширения Вселенной. Модель дополнена основными химическими реакциями для водорода и гелия в рамках первозданной (primordial в зарубежной литературе) химии, процессом звездообразования и взрыва сверхновых, а также связанные с ними функциями охлаждения и нагревания. Модель столкновения галактик основана на моделировании газовой и звездной компоненты с учетом процесса образования молекулярного водорода на пыли, звездообразования и взрыва сверхновых, а также связанные с ними функциями охлаждения и нагревания. Модель развития спиральных рукавов галактик основана на модели изотермической гравитационной газовой динамики. Начальные данные для такой модели строятся на основе равновесного вращающегося профиля плотности с учетом гало.

Для описания звездной компоненты и темной материи используется модель, основанная на первых моментах бесстолкновительного уравнения Больцмана. Такая модель была успешно верифицирована на задачах эволюции [3] и столкновения галактик [4]. Такая модель для бесстолкновительной компоненты описывается гиперболической системой уравнений и позволяет сформулировать единый численный метод, как для нее, так и для газовой компоненты. Численный метод решения основан на комбинации метода крупных частиц (FIS или operator splitting approach в зарубежной литературе), метода Годунова, специальной модификации способа осреднения Roe, а также кусочно-параболического метода на локальном шаблоне [5,6] для повышения порядка точности в областях гладкости решения и малой диссипации решения на разрывах. Переопределенная система уравнений используется для обеспечения неубывания энтропии в основной области решения [7] и для коррекции длины вектора скорости около границы газ-вакуум [8]. Уравнение Пуассона решается с помощью быстрого преобразования Фурье. Подробное описание численного метода и его верификация приведена в работе [9].

Использование единого численного метода решения позволило сформулировать и реализовать единый параллельный алгоритм, который удалось эффективно реализовать на гибридных суперЭВМ, оснащенных графическими ускорителями [4] и ускорителями Intel Xeon Phi [10]. Использование гибридного суперкомпьютера RSC PetaStream позволило получить 134-кратное ускорение в рамках одного ускорителя Intel Xeon Phi и 92% эффективность при использовании 64 ускорителей. Имитационное моделирование показало, что высокая эффективность (не менее 80%) может быть достигнута на количестве ускорителей порядка одного миллиона, что соответствует эксафлопсному уровню вычислений [11].

Работа поддержана грантами РФФИ 15-31-20150 мол-а-вед, 15-01-00508, 13-07-00589, 14-01-31199 и 14-01-00392, грантом Президента РФ МК – 6648.2015.9.

- [1] Tutukov A., Lazareva G., Kulikov I. Gas Dynamics of a Central Collision of Two Galaxies: Merger, Disruption, Passage, and the Formation of a New Galaxy // *Astronomy Reports*. – 2011. – V. 55, I. 9. – P. 770-783.
- [2] Vshivkov V., Lazareva G., Snytnikov A., Kulikov I., Tutukov A. Hydrodynamical code for numerical simulation of the gas components of colliding galaxies // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. – 2011. – V. 194, I. 47. – P. 1-12.
- [3] Mitchell N., Vorobyov E., Hensler G. Collisionless Stellar Hydrodynamics as an Efficient Alternative to N-body Methods // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2013. – V. 428. – P. 2674-2687.
- [4] Kulikov I. GPUPEGAS: A New GPU-accelerated Hydrodynamic Code for Numerical Simulations of Interacting Galaxies // *The Astrophysical Journal Supplements Series*. – 2014. – V. 214, I. 12. – P. 1-12.
- [5] Popov M., Ustyugov S. Piecewise parabolic method on local stencil for gasdynamic simulations // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. – 2007. – V. 47, I. 12. – P. 1970-1989.
- [6] Popov M., Ustyugov S. Piecewise parabolic method on a local stencil for ideal magnetohydrodynamics // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. – 2008. – V. 48, I. 3. – P. 477-499.
- [7] Godunov S., Kulikov I. Computation of Discontinuous Solutions of Fluid Dynamics Equations with Entropy Nondecrease Guarantee // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. – 2014. – V. 54, I. 6. – P. 1012-1024.
- [8] Vshivkov V., Lazareva G., Snytnikov A., Kulikov I., Tutukov A. Computational methods for ill-posed problems of gravitational gasodynamics // *Journal of Inverse and Ill-posed Problems*. – 2011. – V. 19, I. 1. – P. 151-166.
- [9] Kulikov I., Vorobyov E. Using the PPML approach for constructing a low-dissipation, operator-splitting scheme for numerical simulations of hydrodynamic flows // *New Astronomy*. – 2016. (submitted)
- [10] Kulikov I.M., Chernykh I.G., Snytnikov A.V., Glinskiy B.M., Tutukov A.V. AstroPhi: A code for complex simulation of dynamics of astrophysical objects using hybrid supercomputers // *Computer Physics Communications*. – 2015. – V. 186. P. 71-80.
- [11] Kulikov I., Chernykh I., Glinsky B., Weins D., Shmelev A. Astrophysics simulation on RSC massively parallel architecture // *Proceedings - 2015 IEEE/ACM 15th International Symposium on Cluster, Cloud, and Grid Computing, CCGrid 2015*. – 2015. – P. 1131-1134.