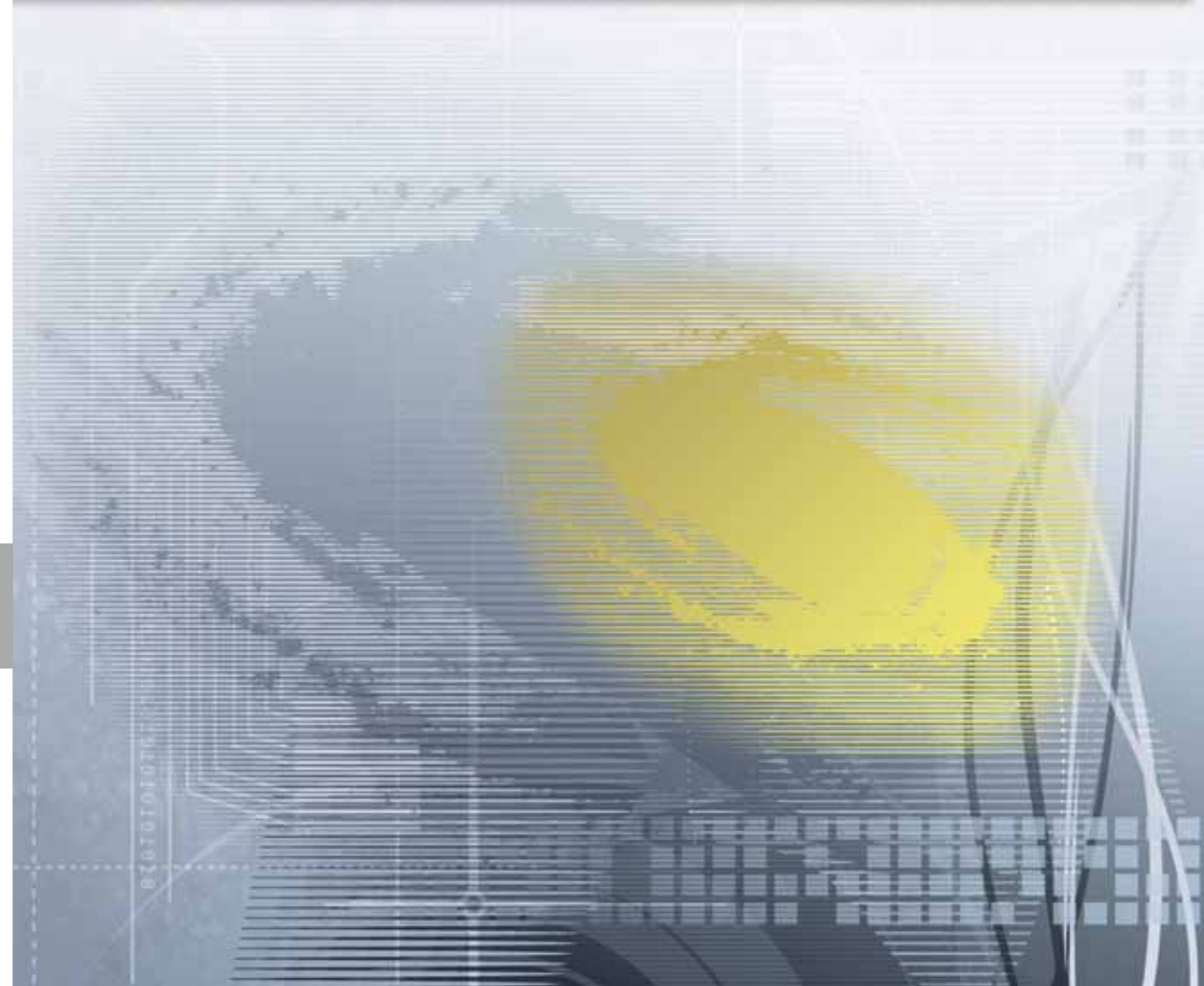


Научно-исследовательская работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, государственный контракт П1246 от 27 августа 2009 года, программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН «Протяженные объекты во Вселенной», программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Происхождение и эволюция объектов во Вселенной», грант РФФИ 08-01-00615.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вшивков В.А., Лазарева Г.Г., Куликов И.М.* Модификация метода крупных частиц для задач гравитационной газовой динамики // *Автометрия*. 2007. Т. 43, № 6. С. 56–65.
2. *Тутуков А.В.* Роль внешних факторов в эволюции галактик // *Астрономический журнал*. 2006. Т. 83, № 6. С. 496–508.
3. *Vshivkov V., Lazareva G., Snytnikov A., Kulikov I.* Supercomputer Simulation of an Astrophysical Object Collapse by the Fluids-in-Cell Method // *PaCT-2009 proceedings. LNCS. Vol. 5698*. 2009. P. 414–422.

Использование суперкомпьютеров для моделирования внегалактических объектов



14 Использование суперкомпьютеров для моделирования внегалактических объектов

Астрономические наблюдения не позволяют нам проследить эволюцию галактик и их скоплений. К тому же эта картина всегда является проекцией, результатом интегрирования излучения вдоль луча зрения. Методы численного моделирования с использованием параллельных технологий приоткрывают нам возможность увидеть грандиозную трехмерную картину эволюции Вселенной в целом и ее отдельных кирпичиков — галактик.

Для внегалактической астрофизики численное моделирование динамики галактик, а также их групп и скоплений является практически единственным теоретическим инструментом исследований. Для космологии численные модели динамики Вселенной (так называемые CDM-модели), включающие помимо обычной барионной материи холодную темную материю и темную энергию, играют совершенно особую роль, выступая в качестве эксперимента. В основе таких моделей лежит задача N гравитационно взаимодействующих тел с учетом очень богатой физики.

Начав 30–40 лет назад с моделей со скромным числом $N \sim 1000$, в настоящее время создаются целые вычислительные консорциумы со специализированными суперкомпьютерами, например «Virgo Consortium», «Grand Challenge Computational Cosmology consortium». Такие структуры объединяют ведущие научные центры и университеты, в том числе специализированные

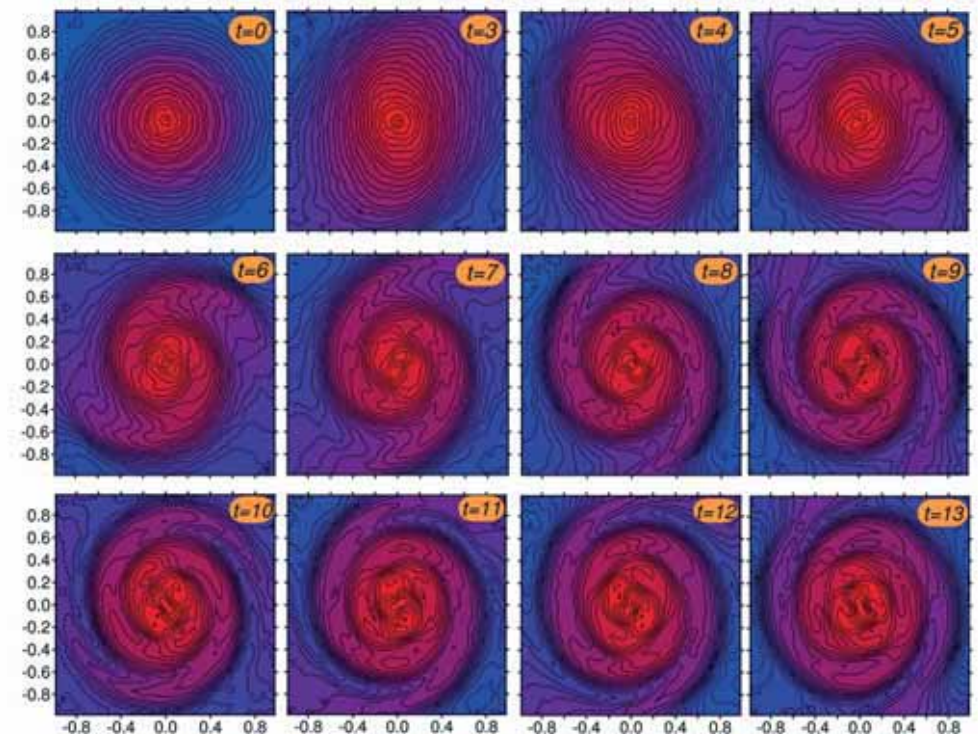


Рис. 1. Пример формирования мощного двухрукавного узора в модели звездного диска

АВТОРЫ:

А.В. Засов – докт. физ.-мат. наук, профессор, рук. отдела Внегалактической астрономии ГАИШ МГУ, Московский гос. университет;

e-mail: zasov@sai.msu.ru

А.В.. Хоперсков – докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой Информационных систем и компьютерного моделирования, Волгоградский гос. университет (ВолГУ);

e-mail: khoperskov@volsu.ru

Н.В. Тюрина – канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник, ГАИШ МГУ;

e-mail: tiurina@sai.msu.ru

М.А. Еремин – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры Теоретической физики и волновых процессов ВолГУ;

e-mail: ereminmikhail@gmail.com

С.А. Хоперсков – магистрант Волгоградский гос. университет (ВолГУ), лаборант;

e-mail: shoperskov@gmail.com



Рис. 2.
Изоповерхности объемной плотности газа
в диске со спиральной структурой

организации, такие, как Institute for Computational Cosmology (ICC, Великобритания), Max Planck Institute for Astrophysics (Garching, Германия), Heidelberg Institute for Theoretical Studies (HITS). Число частиц в таких моделях достигает 10 миллиардов и включают также гидродинамические коды (проекты Millenium Simulation, Via Lactea, Millennium-II Simulation, GADGET). Для реализации такого рода вычислительных программ часто используются суперкомпьютеры со специализированными процессорами, которые ориентированы на быстрое аппаратное вычисление гравитационной силы между двумя массами. Такие модели позволяют проследить эволюцию структуры темной материи от совсем молодой Вселенной возрастом 100 млн лет до наших дней на протяжении более 10 млрд лет.

Наиболее впечатляющей особенностью дисковых галактик является их спиральная структура, поражающая своим морфологическим и кинематическим богатством. Успехи в изучении механизмов образования и поддержания галактических спиральных узоров в существенной мере обусловлены возможностями организации параллельных вычислений при использовании численного моделирования звездно-газовых галактических подсистем, находящихся в гравитационном потенциале массивного темного вещества, сконцентрированного в виде так называемого темного гало. Вычисления проводились в суперкомпьютерном комплексе МГУ на суперкомпьютере СКИФ МГУ «Чебышев».

Эволюционные трехмерные модели галактик включают газовую компоненту (молекулярный, атомарный и ионизованный водород и более тяжелые элементы, а также пыль), которая описывается уравнениями газодинамики с учетом различных тепловых процессов и химических превращений. Звездная компонента (звездный диск и галактический балдж) является бесстолкновительной, поскольку вероятность прямого столкновения звезд очень мала. Для моделирования звездной подсистемы решается задача N-тел с числом частиц $N \sim 10$ млн. Вычисление гравитационных сил требует быстрого алгорит-

ма TreeCode, который был адаптирован для ЭВМ с массивно-параллельной архитектурой.

Для трехмерного динамического моделирования течений газа в галактическом диске размером до 30 кпк был реализован и использован сеточный подход типа TVD MUSCL в цилиндрической системе координат. Для адекватного описания мелкомасштабных структур у спирального узора (до 1 пк) требуется высокое пространственное разрешение, возможное только с применением параллельных технологий на суперкомпьютере. Распараллеливание численного кода выполнялось с помощью совместного использования стандартов MPI и OpenMP. Заданная расчетная область распределялась между процессорами. Декомпозиция на подобласти проводилась вдоль всех трех координатных осей: вдоль радиуса, вдоль угла и вдоль вертикального направления. При таком подходе распараллеливание оказывается наиболее эффективным, если число процессоров $n > 100$.

Отличительной особенностью таких астрофизических задач является большое число свободных параметров и неопределенность начальных условий, что требует проведения больших серий численных экспериментов. На рисунках показаны результаты моделирования глобального спирального узора (рис.1, 2) и его тонкой структуры (рис. 3, 4) (так называемых шпуров, оперения, молекулярных облаков и др.).

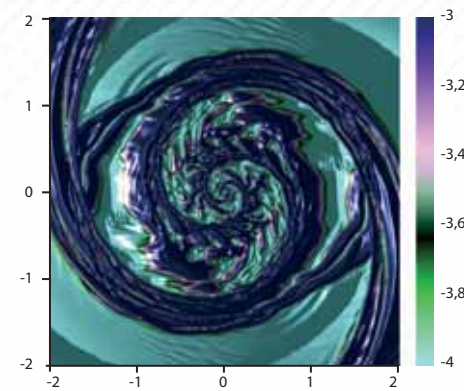


Рис. 3.
Тонкая структура спирального узора
с высоким пространственным разрешением

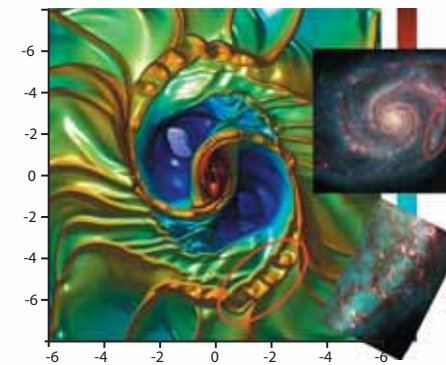


Рис. 4.
Справа – изображения NGC 5194 (Hubble Space Telescope). Модель галактики с развитой системой шпуров и оперением – мелкомасштабными отростками от глобального узора в виде системы слабых ударных волн. Хорошо воспроизводится ящикообразная структура одной из ветвей галактики NGC 5194

нами предложен и в численных экспериментах изучен новый механизм

формирования долгоживущего глобального двухрукавного спирального узора в галактиках при наличии триаксиального темного гало.

Работа частично поддержана РФФИ (09-02-97021) и ФЦП 2009НК-21(7).

Фемтосекундные лазерные филаменты

