

А. Ю. Луговский, В. М. Чечеткин

# Моделирование течений вещества в аккреционных звездных и галактических дисках на многопроцессорных вычислительных системах с использованием технологии MPI

**АННОТАЦИЯ.** Методы численного моделирования на многопроцессорных вычислительных комплексах являются практически единственным способом полноценного исследования тонкой структуры течения в таких астрофизических объектах, как аккреционные или галактические диски.

В работе приведены численный метод годуновского типа и алгоритм его распараллеливания на базе технологии MPI, основанный на принципе декомпозиции расчетной области, которые позволили провести моделирование исследуемых объектов за реальное время и получить новые важные результаты.

В работе приведены результаты моделирования структуры газодинамических течений в аккреционных дисках с учетом гравитации, и предложен новый механизм, определяющий и характеризующий аккрецию (падение) вещества на центральное тело.

Также на основе численного моделирования исследован новый возможный механизм возникновения и формирования в двухрукавной глобальной морфологии спиральных галактик ряда газодинамических элементов, подобных друг другу по форме и независимых по яркости.

*Ключевые слова и фразы:* Суперкомпьютерные вычисления, математическое моделирование, параллельные алгоритмы, аккреционные звездные диски, гидродинамическая неустойчивость, угловой момент, аккреция вещества, спиральные галактики, газодинамические структуры, ударные волны, контактные разрывы

## Введение

Оглядываясь на прошедшие 15 лет развития высокопроизводительных вычислительных систем в России, наряду с гигантским ростом вычислительных мощностей можно отметить такой важный аспект, как формирование научного сообщества, использующего в решении многих важнейших современных фундаментальных и прикладных проблем методы математического моделирования на

многопроцессорных вычислительных системах. В настоящее время исследователь, решающий сложные ресурсоемкие задачи в разных областях науки, уже не может обойтись без мощнейшего вычислительного инструмента, каким является суперкомпьютер. Одной из таких областей науки является гравитационная гидродинамика, в которой появилось множество численных методов и параллельных алгоритмов их реализации для различных задач.

В данной работе представлена одна из возможных параллельных реализаций алгоритма решения задач гравитационной гидродинамики на примере астрофизических задач моделирования структуры газодинамических течений в аккреционных звездных и галактических дисках. Предложен простой, но достаточно эффективный параллельный алгоритм расчета при использовании явной схемы третьего порядка аппроксимации по пространству и первого по времени Роу-Эйнфельдта-Ошера на основе декомпозиции расчетной области с использованием библиотеки функций MPI (Message Passing Interface).

На основе представленного алгоритма рассмотрена проблема возникновения и развития крупномасштабного вихревого движения в сдвиговом течении вещества аккреционного диска. Исследован новый механизм переноса углового момента возникающими в результате развития начальных малых возмущений крупными вихревыми структурами.

Также в работе на основе численного моделирования показано, что в галактическом диске в результате нелинейного сверхзвукового взаимодействия возникающих спиральных образований с потоком вещества появляются особенности, имеющие гидродинамическую природу, при этом результаты моделирования хорошо согласуются с наблюдениями.

## 1. Постановка задачи и метод решения

Рассматриваемые астрофизические задачи о возникновении и развитии крупномасштабных возмущений в сдвиговом течении оптически тонких аккреционных звездных дисков и о возникновении

и формировании в двухрукавной глобальной морфологии спиральных галактик особенностей, имеющих гидродинамическую природу, схожи с точки зрения физико-математической модели.

В рамках гидродинамического приближения рассматривается газовый диск, находящийся в гравитационном поле (для аккреционного диска – гравитационное поле центрального компактного объекта, для диска спиральной галактики – гравитационное поле, формируемое звездным диском, балджем и гало галактики), самогравитация вещества диска не учитывается.

Газ является сжимаемым, идеальным и его поведение описывается системой уравнений газовой динамики в переменных Эйлера в цилиндрических координатах  $(r, \varphi, z)$ . В качестве уравнения состояния берется уравнение состояния идеального газа.

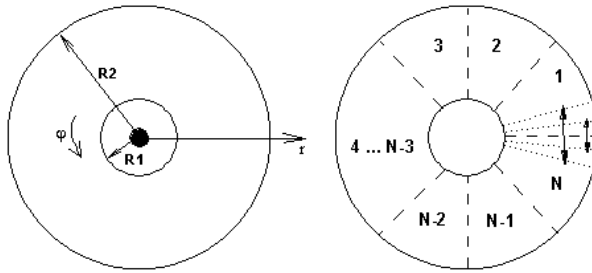


Рис. 1. Расчетная область и схема распараллеливания.

Рассматривая галактические и оптически тонкие аккреционные звездные диски, т.е. предполагая, что толщина диска много меньше его радиуса, будем рассматривать задачу в квазидвумерной геометрии, т.е. возьмем толщину расчетной области по  $z$  и шаг сетки равными единице, следовательно, число точек сетки по оси  $z$  внутри расчетной области также равно единице. Отметим, что схема имеет пятиточечный шаблон, т.е. для расчетов по  $z$  в соответствии с граничными условиями вводится четыре дополнительные точки, по две на верхней и нижней границах. Данное условие позволяет нам интерпретировать задачу как двумерную, но все расчеты при

этом являются трехмерными. Такая постановка в части алгоритма распараллеливания позволяет обобщить полученные результаты на любые трехмерные расчеты для тонких дисков, поскольку для них число точек сетки по оси  $z$  мало по сравнению с числом точек сетки по другим направлениям.

Рассмотрим течение газа в кольцевой расчетной области  $\Omega = (R_1 \leq r \leq R_2) \times (0 \leq \varphi \leq 2\pi) \times (0 \leq z \leq 1)$  (Рис. 1).

Наиболее универсальным методом распараллеливания рассматриваемого класса задач является метод декомпозиции области расчета на подобласти. Исходя из геометрии рассматриваемой задачи, естественным образом возникает следующая схема распараллеливания (Рис. 1):

- Пусть есть  $N$  процессоров, где  $N$  – любое натуральное число.
- Область разбивается на  $N$  частей, как показано на Рис. 1. Расчеты в образовавшихся подобластях осуществляются на  $N$  процессорах, каждому процессору соответствует своя область.
- На каждом шаге по времени происходит обмен граничными (2 ячейки сетки) данными между процессорами, соответствующими смежным областям.

Такая схема наиболее удобна и универсальна, так как мало зависит от организации коммуникационной сети между процессорами суперкомпьютера и проста в реализации.

Одной из основных проблем при разработке параллельных алгоритмов решения различных задач математического моделирования является выбор такой схемы расчета, при которой минимизируется время, затрачиваемое на обмен информацией между процессами. Использование явных схем позволяет минимизировать данное время, так как для расчета текущего значения в ячейке сетки используются уже известные величины с предыдущего шага по времени.

Для аппроксимации дифференциальной задачи используется явная схема Рунге-Энфельдта-Ошера [1-5] третьего порядка ап-

проксимации по  $h$  и первого по  $\tau$ . Схема третьего порядка используется для уменьшения схемной вязкости. Данная схема имеет пятиточечный шаблон.

Рассматриваемые задачи содержат большой объем вычислительной работы, т.к. помимо использования схемы третьего порядка аппроксимации, особенности задачи накладывают еще ряд условий на используемую схему: размер ячейки сетки должен позволять разрешать рассматриваемые мелкомасштабные особенности течения, т.е. сетка должна быть достаточно подробной. Шаг по времени, выбор которого обусловлен монотонностью схемы, пропорционален шагу по пространству и, соответственно, тоже мал. Расчеты проводятся на больших промежутках физического времени, соответствующих нескольким и даже нескольким десяткам оборотов системы. При этом шаг по времени на четыре-пять порядков меньше характерного времени одного оборота диска (количество шагов по времени в различных расчетах составляет от 30000 до 300000).

Использование параллельного алгоритма позволило провести подробное исследование рассматриваемых задач в конечные сроки. При реализации параллельного алгоритма используется коммуникационная библиотека MPI (The Message Passing Interface), которая обеспечивает взаимодействие параллельных процессов с помощью механизма передачи сообщений.

Реализация схемы Роу-Эйфельдта-Ошера без повторения одинаковых вычислений в течение одного шага по времени подразумевает выделение примерно 70 массивов для каждой точки расчетной сетки с учетом массивов для пересылки информации с границ подобластей соседним процессорам. Каждый вектор состоит из пяти элементов по числу неизвестных величин: плотность, три компоненты скорости и давление. Поскольку в настоящее время цена оперативной памяти достаточно низкая и производители не экономят на ее объеме, а стоимость использования суперкомпьютеров достаточно высокая, к тому же время всегда является определяющим фактором, то при реализации данной задачи внимание

уделялось именно уменьшению объема вычислений и скорости получения результата.

## 2. Моделирование аккреционных звездных дисков

С целью исследования устойчивости течения в равновесное состояние аккреционного диска вносится малое возмущение [6-8]. Отметим, что без внесения малых возмущений диск сохраняет свое состояние достаточно продолжительное время.

Показано, что малые возмущения, внесенные в равновесное состояние, развиваются, и со временем мы наблюдаем, как малые возмущения, заданные в малой области, превращаются в крупномасштабные спиральные вихревые структуры во всем диске (РИС. 2). Показано, что даже изначально заданные симметрично возмущения могут со временем терять симметрию. Также показано, что интенсивность полученных крупных вихревых спиральных структур не зависит от величины начального возмущения. Таким образом, картина образующегося крупновихревого движения определяется свойствами дискового течения вещества и не зависит от формы и размера начальных малых возмущений.

Появление крупномасштабного вихревого движения приводит к переносу углового момента крупными вихревыми структурами, образующимися в сдвиговом течении аккреционного диска, а также к отводу вещества и углового момента через внешнюю границу, что, в свою очередь, вызывает аккрецию (падение) вещества диска на центральный гравитирующий объект. При перераспределении углового момента за счет крупных вихревых структур не происходит заметного нагрева вещества. В таком процессе оказывается возможным получить необходимую скорость аккреции при достаточно низкой температуре вещества аккреционного диска.

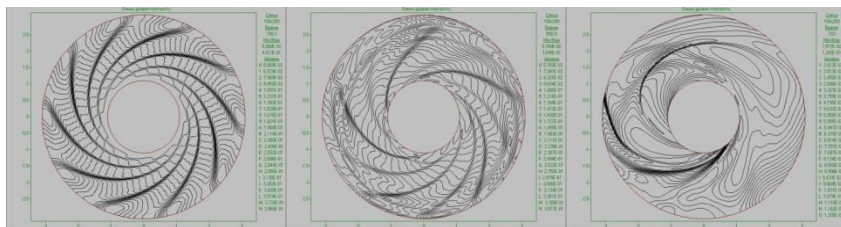


Рис. 2. Картины течения в виде линий уровня плотности для аккреционного звездного диска в различные моменты времени.

### 3. Моделирование спиральных галактик

Результаты численного моделирования позволяют выделить несколько стадий эволюции газового диска, в процессе которой наблюдается явление формирования нестационарной транзитной конфигурации в глобальном двухрукавном спиральном узоре, включающей серию гидродинамических разрывов, таких как ударные волны и контактные разрывы между ними.

Общая структура полученного решения для идеального газового потока, эволюционирующего в течение 6 характерных времен (одна единица времени в наших модельных расчетах соответствует физическому времени в 68 миллионов лет), представлена на Рис. 3. На этом рисунке изображены распределения давления газа в экваториальной плоскости системы, иллюстрирующие динамику потока и его состояния в различные равноотстоящие моменты времени. Ударные волны, образующиеся в диске, видны на рисунках как сгущения изолиний давления.

Численное моделирование показывает образование в двухрукавной глобальной спиральной морфологии галактики ряда спиральных элементов, подобных друг другу по форме и независимых по яркости. Такая серия сильных ударноволновых возмущений, взаимодействуя между собой, создает новые мелкомасштабные нерегулярные вторичные ударные волны, перерастающие со временем в различного рода неоднородности на мелких и средних пространственных масштабах, которые способствуют генерации полигональных структур в газовом диске.

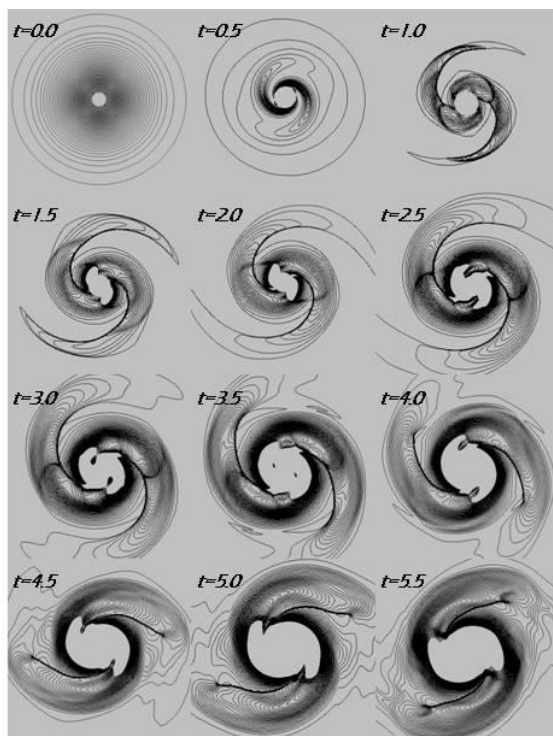


Рис. 3. Последовательные стадии формирования спирального узора. Изолинии давления газа в различные моменты времени.

$t=0$  – равновесная конфигурация

$t=0.5$  – возникновение гладких спиральных у.в.\*

$t=1.0$  – мелкомасштабные вторичные у.в.

$t=1.5$  – увеличение размеров спиральных структур

$t=2.0$  – размытые головные у.в.

$t=2.5$  – внутрирукавные шпурь-отроги

$t=3.0$  –  $3.5$  – транзитный характер шпуров, начало полигонализации (спрямление участков фронта у.в.)

$t=4.0$  – дугообразные спиральные у.в.

$t=4.5$  – прямолинейные сегменты у.в. (длина пропорциональна расстоянию от центра)

$t=5.0$  – развитие структурной неустойчивости у.в., взаимодействие с к.р.\*

$t=5.5$  – формирование шпура-отрога в спиральном узоре; развитие полигонального рисунка спирального рукава

\*у.в. – ударная волна, к.р. – контактный разрыв



Выяснено, что поведение и геометрические свойства возникающих в численном моделировании транзиентных образований в построенной модели хорошо согласуются с поведением и основными свойствами глобальной картины наблюдаемых спиральных узоров (РИС. 4).

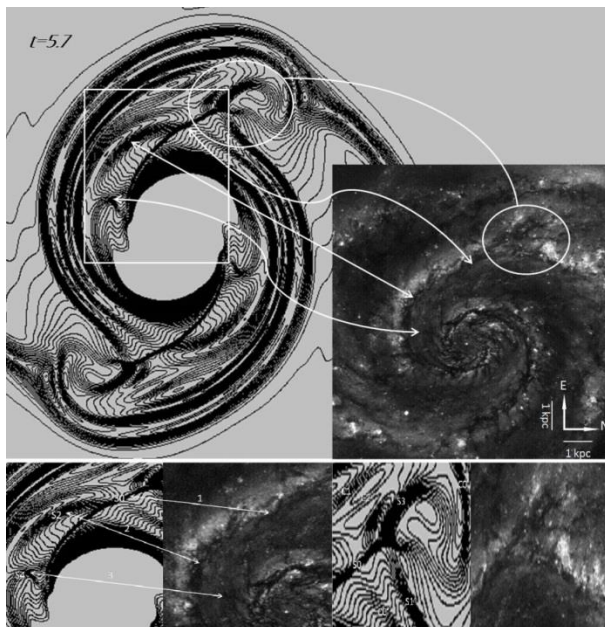


РИС. 4. Вверху: нелинейный этап формирования спирального узора, показаны изолинии плотности газа в момент времени  $t = 5.7$ . На вставке - изображение спиральной галактики NGC 5194 (M 51).

Внизу слева: слева - увеличенное изображение фрагмента спирального рукава, окаймленного прямоугольником на верхнем рисунке; справа - фрагмент фото галактики M 51.

Внизу справа: слева - увеличенное изображение фрагмента спирального рукава, окаймленного эллипсом на верхнем рисунке; справа - фото: Северо-западный фрагмент галактики M 51, окаймленный эллипсом на верхнем рисунке.

## Заключение

Использование многопроцессорных вычислительных комплексов позволяет провести за реальное время моделирование и исследование возникающих в аккреционном звездном или галактическом диске структур течения. Это, в свою очередь, позволяет получать новые важные результаты, такие как предложенный принципиально новый механизм перераспределения углового момента образующимися в аккреционном диске крупными вихревыми структурами без заметного нагрева вещества и подтверждение теоретически предсказанной возможности формирования нестационарной транзитной газовой конфигурации в глобальном двухрукавном спиральном гравитационном потенциале.

## Список литературы

- [1] Roe P.L. *Characteristic-based schemes for the Euler equations* // Annual review of fluid mechanics. 1986. V. 18, p. 337–365.
- [2] Osher S., Solomon F. *Upwind difference schemes for hyperbolic systems of conservation laws* // Mathematics of computation. 1982. V. 38, p. 339–374.
- [3] Chakravarthy S., Osher S. *A new class of high accuracy TVD schemes for hyperbolic conservation laws* // AIAA Paper. 1985. V. 85-0363, p. 1–11.
- [4] Einfeld B. *On Godunov-type methods for gas dynamics* // SIAM Journal on numerical analysis. 1988. V. 25, p. 294–318.
- [5] Кузнецов О.А. *Численное исследование схемы Рунге с модификацией Эйнфельдта для уравнений газовой динамики* // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 1998. № 43.
- [6] Велихов Е.П., Луговский А.Ю., Мухин С.И., Попов Ю.П., Четкин В.М. *Роль крупномасштабной турбулентности в перераспределении углового момента в аккреционных звездных дисках* // *Астрономический журнал*. 2007. Т. 84, № 2, с. 177–184.
- [7] Луговский А.Ю., Мухин С.И., Попов Ю.П., Четкин В.М. *Развитие крупномасштабной неустойчивости в аккреционных звездных дисках и ее влияние на перераспределение углового момента* // *Астрономический журнал*. 2008. Т. 85, № 10, с. 901–905.

- [8] Луговский А.Ю., Чечеткин В.М. *Развитие крупномасштабной неустойчивости в кеплеровских аккреционных звездных дисках* // *Астрономический журнал*. 2012. Т. 89, № 2, с. 120–127.