

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ГАЛАКТИК

Целью данного исследования является определение начальных конфигураций, которые могут эволюционировать в устойчивые галактические структуры. Говоря проще, я хочу найти условия, при которых облако межзвёздного газа может сформироваться в галактику, способную рождать звёзды. В статье рассказывается, как написать программу, которая сделает такое исследование возможным даже на обычных компьютерах с помощью CUDA.

SIMULATION OF THE FORMATION OF GALAXIES / M.M. Gadzhiev (E-mail: maxuta-jr@yandex.ru). The main goal of this research paper is finding the initial configurations which can transform into stable galactic structures. I am looking for the conditions (gas parameters) with which an interstellar cloud of gas can form into a galaxy able to born stars. The way of making a program that can do this research even on ordinary computers with CUDA is described in the paper.

1. Введение

Поиск подходящих условий происходит эмпирически и требует множественного запуска программы, так как многие начальные конфигурации облака газа разлетаются либо коллапсируют. И чтобы решить задачу за приемлемое время, необходимо написать быстро работающую программу, решающую уравнения газовой динамики. К счастью, на каждом этапе математические операции поддаются распараллеливанию, что сильно ускоряет процесс.

2. Математическая модель

Решим следующую систему уравнений, описывающую двумерное движение идеального сжимаемого самогравитирующего газа (выделенные члены ответственны за силы гравитации, возникающие между частицами газа).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{W}) = 0 \quad \text{– уравнение неразрывности;}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \vec{W}) + \frac{\partial p}{\partial x} + \rho \frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \vec{W}) + \frac{\partial p}{\partial y} + \rho \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \end{aligned} \right\} \text{– закон сохранения импульса;}$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho E \vec{W}) + \operatorname{div}(p \vec{W}) + \rho(\operatorname{grad} \Phi, \vec{W}) = 0 \quad \text{– закон сохранения энергии.}$$

$$\Delta \Phi = 4\pi G \rho, \quad \text{– уравнение гравитационного потенциала.}$$

где $\rho = \rho(x, y, t)$ – плотность газа
 $p = p(x, y, t)$ – давление
 $\vec{W} = \{u(x, y, t), v(x, y, t)\}$ – вектор скорости
 $E = E(x, y, t)$ – полная энергия
 $\Phi = \Phi(x, y, t)$ – гравитационный потенциал
 $G = const$ – гравитационная постоянная.

3. Способ решения и оптимизация

Заметим, что на каждом шаге по времени, перед нами стоит 2 независимые задачи: решить уравнения газовой динамики (первые 4 строчки системы) и нахождение гравитационного потенциала из уравнения Пуассона. При этом вторая часть программы при больших размерах сетки гораздо более трудоёмкая, чем первая (сложность первой оценивается как N^2 , а второй – как $N^2 \log N$). Поэтому задачи будем решать разными способами – первую на центральном процессоре, а вторую на графическом. Такой выбор обусловлен следующим соображением – не смотря на несравненно большую скорость работы видеокарты, передача информации на неё обходится весьма дорого, а для решения газодинамической задачи нам необходимо передавать в две стороны 6 массивов. При этом выигрыш будет не таким значительным, как при решении уравнения Пуассона, для которого нужно передавать лишь по одному массиву в каждую сторону.

Итак, первую задачу я решаю методом крупных частиц, для устойчивости которого добавлен в решение ещё один шаг коррекции потоков. Он позволяет выявить места, где возникают нефизичные осцилляции, и пересчитать в этих местах решение с первым порядком точности, при котором никаких осцилляций не появляется. Эта часть программы успешно распараллеливается, например, по строкам, для наилучшей оптимизации.

Для решения уравнения Пуассона применим дискретное преобразование Фурье с последующей прогонкой, так как этот метод наиболее быстрый. Для осуществления быстрого преобразования Фурье воспользуемся библиотекой CUFFT, которая поставляется вместе со стандартным средством разработки CUDA SDK. Прогонка также осуществляется на видеокарте, путём разбиения матрицы на блоки, так как передавать трансформированную матрицу на CPU, решать систему, а затем возвращать результат для обратного преобразования было бы слишком затратно.

Эти шаги позволили в десятки раз ускорить работу программы (без распараллеливания на процессоре Core 2 duo 2GHz расчёт одного шага занимал около 8 секунд, тогда как с использованием параллельных вычислений время сократилось до 0.3 – 0.4 секунд). Это привело к тому, что даже на слабом компьютере стало реально запускать программу несколько раз за день (в первоначальном варианте даже на маленьких сетках расчёт эволюции газопылевого облака занимал порядка 10 часов).

4. Выбор начальных данных

В качестве начальных данных для задачи были выбраны следующие:

$$\rho(r) = \begin{cases} \rho_0 \sqrt{1 - \left(\frac{r}{R_0}\right)^2}, & r \leq R_0 \\ 0, & r > R_0, \end{cases}$$

где R_0 – радиус галактического диска. ρ_0 находится из условия равенства массы всего диска M_0 , то есть $\rho_0 = \frac{3M_0}{2\pi R_0^2}$.

Облако газа вращается вокруг центра масс с угловой скоростью Ω_0 . Радиальная составляющая скорости отвечает нормальному распределению с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 . Случайный закон распределения скоростей приводит к возникновению неоднородностей в структуре диска, которые нарушают первоначальную однородную структуру диска.

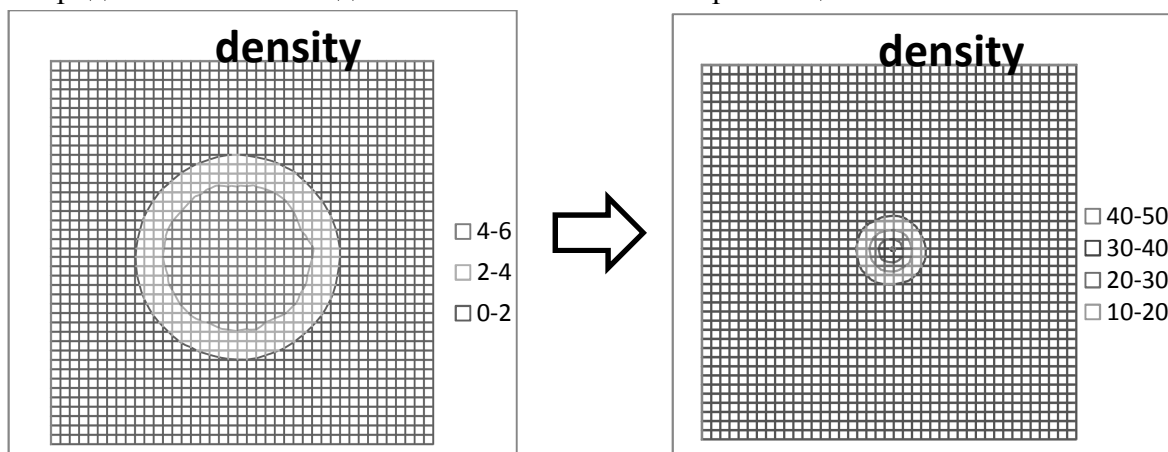
Такие начальные условия соответствуют вращению облака газа с массивным центром. Варьируя параметры, можно получать различные картины эволюции процесса.

Интерес представляют начальные условия, при которых не происходит коллапса или разлёта вещества в пространство, а сформировавшаяся структура переходит в стационарное состояние.

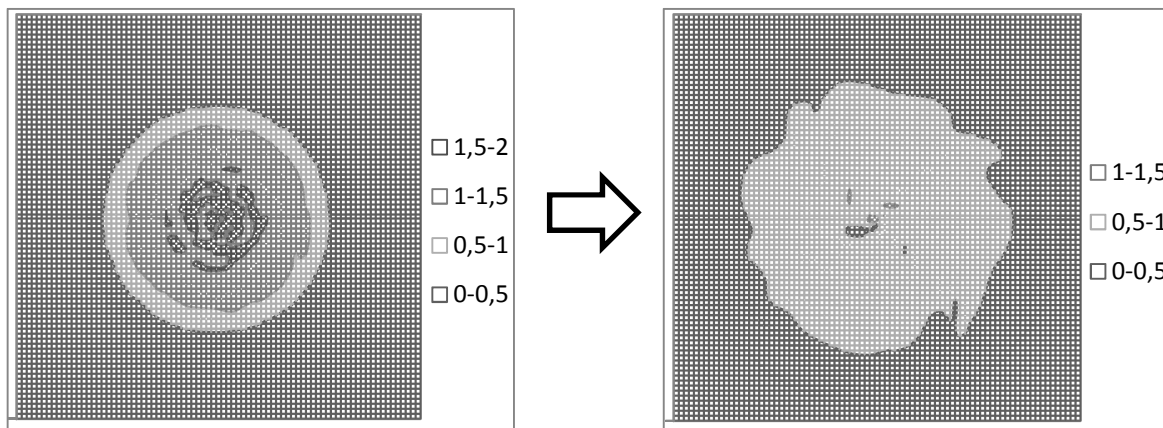
5. Результаты

Получившиеся результаты можно разделить на три основных группы:

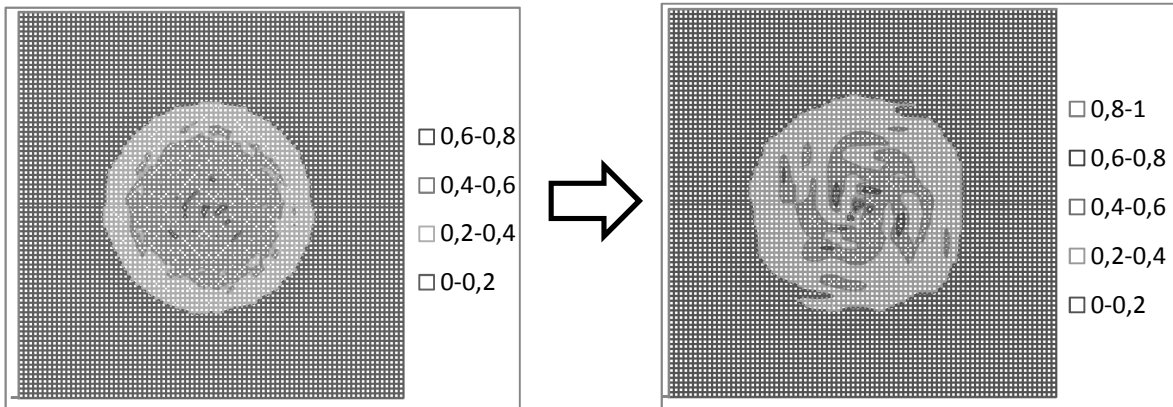
- 1) Коллапс вещества к центру. Большая масса, маленькая угловая скорость. Плотность в центре увеличивается в десятки раз и продолжает расти. Никаких неоднородностей не наблюдается из-за больших сил гравитации.



- 2) Разлёт вещества. Большая угловая скорость, большая дисперсия радиальной скорости. Плотность падает, а масса равномерно распределяется по области.



- 3) Переход в квазистационарное состояние. График плотности справа напоминает структуру спиральной галактики с рукавами. Через некоторое время неизбежен либо разлёт вещества, либо его коллапс, но, тем не менее, можно выделить некое временное стабильное состояние.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вшивков В. А.* Моделирование трёхмерной динамики вещества в гравитационном поле на многопроцессорных ЭВМ.
2. *Снытников В. Н., Вшивков В. А., Дудникова Г. И. и др.* Численное моделирование гравитационных систем многих тел с газом.
3. *Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М.* Метод крупных частиц в газовой динамике.