

Образование планетных систем

Результаты проекта

Тимофеева Е. Н. Оширова Ю. Н. Сидорова Н. А. Пронякова О. М.

2 мая 2025

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Информация

Студенты группы НФИбд-01-22

- Тимофеева Екатерина Николаевна
- Оширова Юлия Николаевна
- Пронякова Ольга Максимовна
- Сидорова Наталья Андреевна



Вводная часть

Формирование планетных систем — один из фундаментальных процессов, определяющих структуру Вселенной. Нас интересует вопрос: как из хаотичного облака газа и пыли возникает упорядоченная система с центральной звездой и вращающимися вокруг неё планетами?

В рамках нашего проекта мы стремились не только изучить теоретические аспекты этой задачи, но и реализовать численную модель, способную имитировать процессы, происходящие на ранних стадиях формирования планетных систем.

Процесс образования планет — это сложная система взаимодействий между газом, пылью и развивающимися телами в протопланетном диске. Основные механизмы, которые мы моделировали:

1. Гравитационное взаимодействие между телами (модель N-тел).
2. Гидродинамика газа в диске вокруг центрального объекта.
3. Слияние частиц при столкновениях с учётом физических критериев.

Каждый из этих процессов важен для формирования структуры системы, устойчивых орбит и образования протопланет.

В проекте была построена многокомпонентная численная модель, включающая три ключевых алгоритма. Каждый из них моделирует важный физический аспект формирования планетных систем:

1. Алгоритм гравитационного N-тел

Цель: смоделировать гравитационное взаимодействие между множеством тел (частиц, планетезималей и т.д.).

Математическая основа:

- Используется закон всемирного тяготения Ньютона:

$$F = G \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

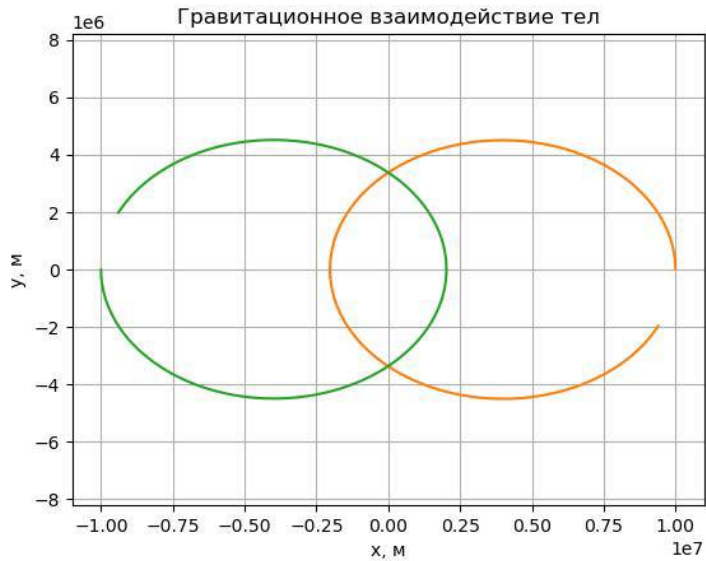
- Движение тел определяется вторым законом Ньютона:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Численные методы:

- Применены численные интеграторы (метод Эйлера, метод Верле или Рунге-Кутта 4-го порядка).
- Расчёт парных взаимодействий между телами — $O(N^2)$ по сложности.

Результат: тела начинают двигаться по орбитам вокруг общего центра масс. При правильной настройке можно наблюдать устойчивые орбитальные конфигурации, аналогичные системам звезда–планеты или двойным звёздам.



Цель: смоделировать поведение газового протопланетного диска под действием внутренних сил, включая турбулентность и вязкость.

Подход:

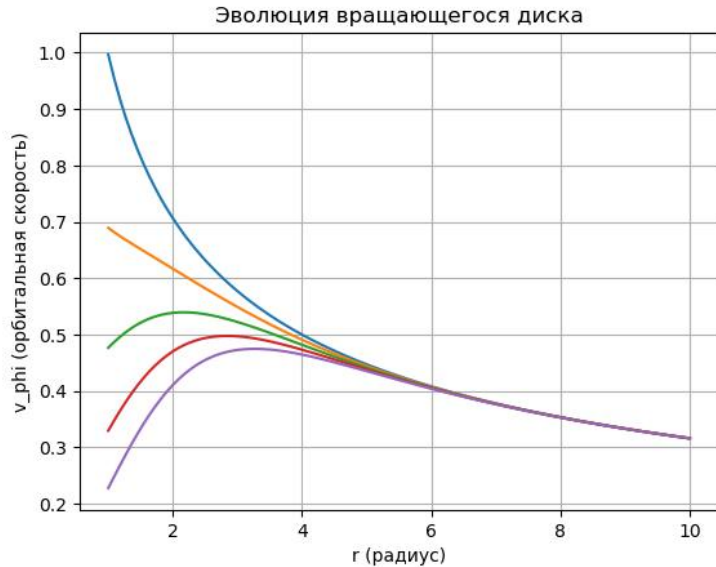
- Диск разбит на кольца или ячейки, каждая из которых описывается своими параметрами: плотность, скорость, давление.
- Используется упрощённая версия уравнений Навье–Стокса в осесимметричном приближении.
- Основное внимание уделяется распределению скорости по радиусу и её изменению во времени.

2. Алгоритм гидродинамики вращающегося диска

Особенности:

- Турбулентность моделируется как потеря углового момента.
- Эволюция происходит с перераспределением массы: внутренняя часть диска теряет импульс быстрее, чем внешняя.

Результат: на графиках видно, как изменяется орбитальная скорость вещества со временем, особенно в центральной части — что характерно для реальных протопланетных дисков.



3. Алгоритм слияния частиц

Цель: смоделировать процесс столкновений и слипания частиц, приводящий к образованию планетезималей.

Принцип работы:

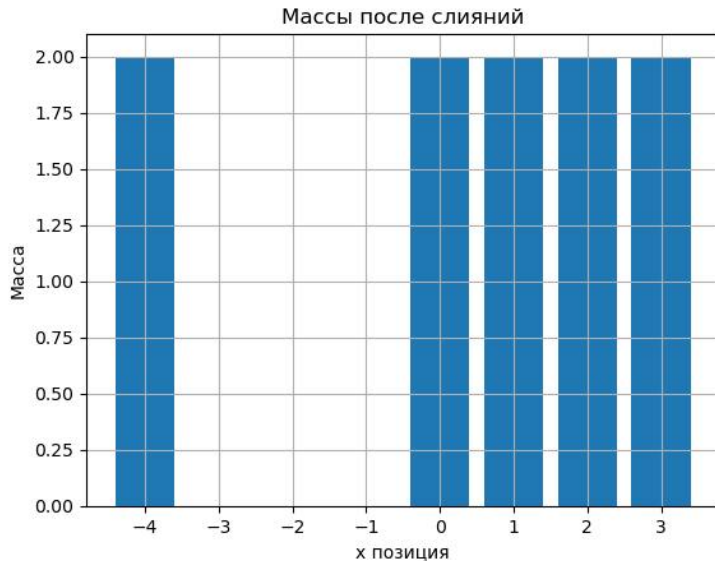
- Частицы обладают положением, скоростью и массой.
- При сближении двух частиц на расстояние менее заданного порога проверяется их относительная скорость.
- Если скорость меньше критического значения (имитируя мягкое столкновение), частицы сливаются в одну:
 - Новая масса — сумма масс.
 - Новая скорость и позиция — средневзвешенные значения.

3. Алгоритм слияния частиц

Физическая интерпретация:

- Модель учитывает, что при больших скоростях столкновение приведёт к разрушению, а не слиянию.
- Центральные частицы чаще сталкиваются, образуя более массивные тела.

Результат: визуально наблюдается формирование крупных тел в центре — аналог зарождения планет в области максимальной плотности диска.



Реализация модели выполнена на языке Python. Этот язык выбран за его простоту, большое сообщество и наличие библиотек для научных вычислений и визуализации.

Использованные технологии: * NumPy — для высокопроизводительных операций с массивами и векторными вычислениями. * matplotlib — для построения графиков и анимации процессов. * Собственные модули — реализующие каждый из трёх алгоритмов отдельно.

Реализованные функции:

1. Гравитационная симуляция:

- Расчёт всех парных сил между телами.
- Поддержка изменения параметров симуляции (количество тел, начальные скорости).
- Визуализация орбит.

2. Гидродинамика:

- Моделирование эволюции орбитальной скорости.
- Отображение изменения диска во времени.
- Гибкая настройка параметров вязкости и начального распределения.

3. Слияние частиц:

- Простая визуализация столкновений.
- График распределения масс после симуляции.
- Подсчёт количества образовавшихся крупных тел.

Что особенно важно:

- Код написан модульно и может быть расширен.
- Простота кода позволяет другим исследователям или студентам легко адаптировать его под собственные задачи.
- Отдельные симуляции можно использовать для анимаций, что делает проект подходящим даже для образовательных целей.

Мы добились следующих ключевых результатов:

- Построили и реализовали численную модель, охватывающую физику формирования планетных систем.
- Проверили корректность работы каждого алгоритма на тестовых примерах и визуально убедились в правдоподобии поведения модели.
- Получили первые качественные результаты: устойчивые орбиты, перераспределение вещества в диске и образование массивных тел в центральных областях.
- Подготовили код, который легко адаптируется и может быть использован для последующих исследований.

Работа над проектом позволила нам объединить знания из физики, математики и программирования. Мы:

- Научились применять численные методы к реальным задачам.
- Освоили реализацию алгоритмов, работающих в динамике.
- Улучшили навыки визуализации и анализа результатов.
- Работали как команда, дополняя друг друга в теоретической и практической частях проекта.

Мы считаем проект успешным, так как он дал не только научное, но и практическое представление о том, как можно моделировать сложные астрофизические процессы с помощью современных вычислительных инструментов.