

У. Е. Возная

Моделирование аккреционного диска методом *DSMC*

Рассматривается численное моделирование аккреционных дисков. Описываются основные физические процессы в аккреционных дисках, рассматриваются различные методы численного моделирования. Рассматривается метод прямого статистического моделирования Монте-Карло в модели сдвигового ящика. Приводятся результаты решения учебной задачи по моделированию аксиально-симметричного течения газа.

Ключевые слова: разреженный газ, компьютерное моделирование, аккреция, аккреционный диск, методы Монте-Карло, метод прямого статистического моделирования Монте-Карло.

Об авторах

Возная Ульяна Евгеньевна — магистр 2-го года обучения кафедры теоретической физики Государственного университета «Дубна».

Аккреция — явление аккумуляции вещества на гравитирующем в центре. Оно встречается на многих космических объектах: развивающиеся звездные системы, черные дыры, двойные системы, активные ядра галактик. Существуют различные режимы аккреции: сферический, цилиндрический, дисковый и двухпоточковый, сочетающий в себе аккреционный диск и квазисферически симметричный поток. Одной из распространенных форм аккреции является аккреционный диск. По происхождению аккреционные диски можно разделить на протозвездные диски, диски в двойных системах, диски в активных ядрах галактик [2].

Главная проблема в физике аккреционных дисков на сегодняшний день — объяснение механизма дисковой аккреции, а именно механизма передачи углового момента для обеспечения падения вещества на гравитирующий центр. Частицы вещества падают на центр не по прямой, а вращаются вокруг него по кеплеровским орбитам. На частицы газа действуют сила гравитации, сила Кориолиса и центробежная сила. Аккреционный диск — это медленно сжимающееся вращающееся облако газа. В процессе его сжатия происходит выделение гравитационной энергии, которая частично переходит в кинетическую, а частично в излучение. Диск может образоваться, если его свети-

мость не больше определенной величины (Эддингтоновской светимости). Существует минимальный радиус, на который вещество может приблизиться к центру без потери углового момента, но для падения вещества на гравитирующий центр угловой момент должен передаваться от более близких к центру элементов газа к более далеким. Удельный угловой момент в более близких к центру областях диска больше, чем в более далеким. Процесс передачи углового момента за счет вязкости был рассмотрен Вайцеккером. Сдвиговая вязкость позволяет передавать угловой момент от одного элемента газа к другому, но такое объяснение не совпадает с численными расчетами. С другой стороны, в диске имеется турбулентность, поэтому эффективная вязкость может быть достаточной для того, чтобы обеспечить нужный темп аккреции.

Сложность заключается в объяснении причин и развития турбулентности. Аккреционный диск состоит из плазмы, частично или полностью ионизованного газа. В нем возникают сильные магнитные поля, что значительно усложняет происходящие в диске процессы.

Изучение аккреционных дисков началось в 1940-х гг. с работ Койпера, который изучал течение газа в тесных двойных системах. Его открытием стало то, что при перетекании газа от одной звезды к другой он формирует кольцо вокруг аккрецирующей звезды. В это же время появились работы Вайцеккера, посвященные аккрецион-

ной теории формирования звезд. Позднее Крафт и другие установили, что при вспышках новых тоже происходит аккреция газа с звезды главной последовательности на белый карлик. В 1960-х гг. Прендергаст исследовал движение газовых потоков в двойных системах в приближении невзаимодействующих частиц.

Основные сведения о природе аккреционных дисков получены теоретически. В 1973 г. была предложена альфа-модель Шакуры и Сюняева [5] (стандартная модель аккреционного диска). В стандартной модели диска рассматривается стационарный оптически толстый, но геометрически тонкий осесимметричный диск. Самогравитацией в нем можно пренебречь, вращение преобладает над радиальным движением, в вертикальном направлении диск находится в гидродинамическом равновесии. В параметр альфа включены все параметры турбулентности, что значительно упрощает задачу. С помощью этой модели можно описать общие свойства диска, такие как вращение, температура и энерговыделение, она хорошо описывает большинство дисков, но детально структуру диска представить с ее помощью нельзя. С ее помощью также трудно проанализировать устойчивость диска, а разные выражения для турбулентности приводят к разным условиям устойчивости. Далее была предложена модель с магниторотационной неустойчивостью Бальбуса и Хейли. Она описывает передачу углового момента с участием магнитного поля диска и объясняет возникновение турбулентности [2].

Наблюдение структуры аккреционных дисков напрямую представляет сложность из-за того, что это очень удаленные объекты. Для изучения их структуры используется численное моделирование. Для численного моделирования аккреционного диска можно реализовать один из нескольких подходов:

1) магнитная гидродинамика: диск рассматривается как сплошная среда, уравнения магнитной гидродинамики решаются численно;

2) методы частиц в ячейках: электроны и ионы в плазме представляются как отдельные частицы, и моделируется их движение;

3) гибридные методы: ионы считаются частицами, а электроны — безмассовой жидкостью.

Один из методов частиц — метод *DSMC* (прямого статистического моделирования Монте-Карло) [1; 3]. Метод был предложен для моделирования процессов течения разреженного газа Г. Бердом. В этом методе моделируемая область делится на ячейки, а время — на дискретные шаги. Основная идея метода заключается в том, что движение частиц делится на два этапа: свободное движение частиц и бинарные столкновения. Эти два этапа повторяются в течение определенного числа временных шагов (итераций), а перед этим случайным образом задаются начальные скорости и координаты моделирующих частиц, каждая из которых заменяет собой определенное число (до 10^8) реальных. Скорости задаются в соответствии с определенным распределением (чаще всего с распределением Максвелла). Моделируемая область делится на ячейки для упрощения поиска партнеров для столкновений и расчета макроскопических параметров. Число столкновений в каждой ячейке рассчитывается в зависимости от сечения столкновений и числа частиц в ячейках. Метод Берда хорошо зарекомендовал себя для моделирования течений газов в задачах с различной геометрией и различным режимом течения: свободно-молекулярным, переходным, континуальным, т. е. с различным числом Кнудсена. Данный метод используется для моделирования газовых смесей с различным числом компонентов, газа, состоящего из молекул с вращательными степенями свободы, многоатомного газа.

В аккреционном диске происходит дифференциальное вращение — на разном удалении от центра скорость вращения различна. Для моделирования дифференциального вращения используется модель «сдвигового ящика» (*shearing box*) [6]. Моделируемая область представляет собой прямоугольник, в котором система координат связана с его центром. На границах области задаются периодические граничные условия со сдвигом, чтобы воспроизвести вращение соседних областей диска.

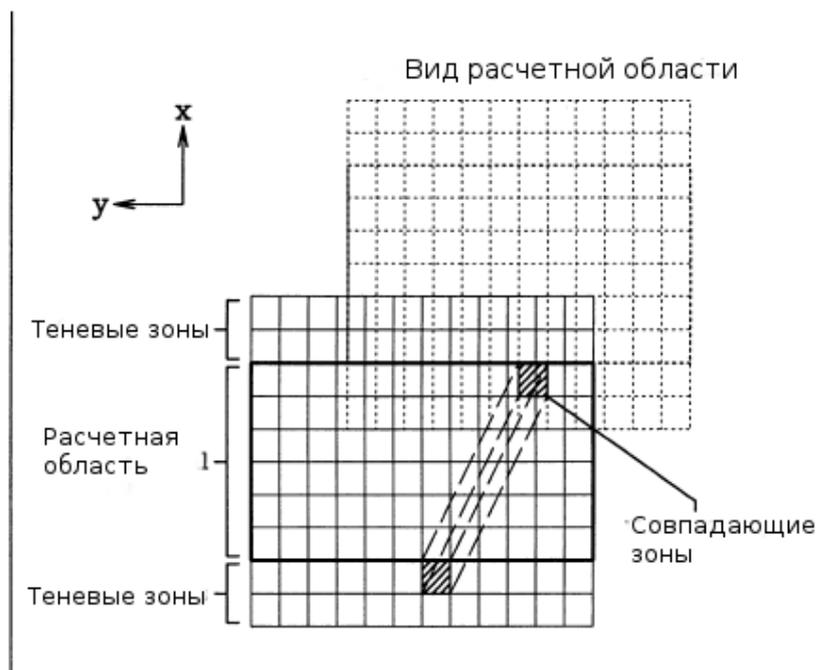


Рис. 1. Схема модели «сдвигового ящика»

Задача состоит в моделировании аккреционного диска методом прямого статистического моделирования Монте-Карло в модели «сдвигового ящика», получении профилей азимутальной и радиальной скорости, давления и температуры.

В ходе работы была решена учебная задача по моделированию аксиально-симметричного течения Куэтта под действием сил гравитации, силы Кориолиса и центробежной силы. Столкновения рассчитывались в соответствии с моделью твердых сфер. Начальные скорости частиц были заданы в соответствии с распределением Максвелла с вращением [4]:

$$f(x, v) = \left(\frac{m}{2\pi T} \right)^{3/2} \exp \left[v_x^2 + (v_y - q\Omega x)^2 + v_z^2 \right] \quad (1)$$

На границах моделируемой области были заданы зеркальные граничные условия.

В простейшем случае в локальном приближении без магнитного поля должен воспроизводиться кеплеровский профиль азимутальной скорости, а радиальная скорость должна быть равна нулю. Был рассмотрен тонкий диск без самогравитации. Результаты хорошо согласуются с теорией.

В настоящее время решается задача по реализации метода *DSMC* в модели «сдвигового ящика».

На следующем этапе работы планируется рассмотрение аккреционного диска с магнитным полем.

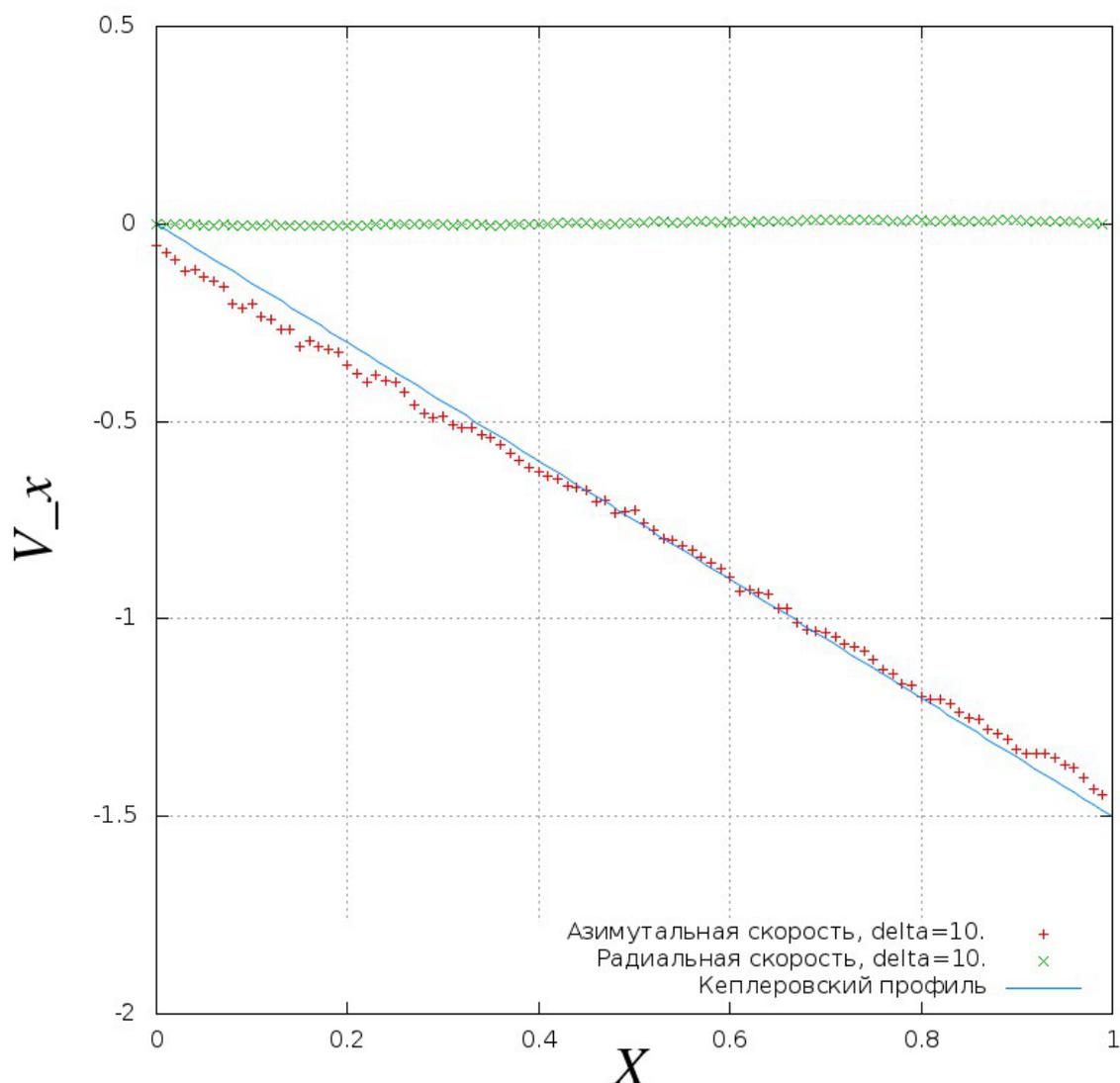


Рис. 2. График азимутальной и радиальной скорости частиц

Основная работа была выполнена в ГАИШ МГУ под руководством Н.И. Шакуры и В.В. Журавлева.

Библиографический список

1. Берд, Г. Молекулярная газовая динамика / Г. Берд. — Москва : Мир, 1981. — 412 с.
2. Balbus, A. S. Instability, Turbulence, and Enhanced Transport in Accretion Disk / A.S. Balbus, J.H. Hawley // *Reviews of Modern Physics*. — 1998. — V. 70, No. 1.
3. Bird, G. *Molecular Gas Dynamics* / G. Bird. — Oxford : Clarendon Press, 1994. — 423 p.
4. Hawley, J. W. Local Three Dimensional Simulations of Accretion Disks / J.W. Hawley, C.F. Gammie, S.A. Balbus // *The Astrophysical Journal*. — 1995. — V. 440. — P. 742—763.
5. Shakura, N. I. Black Holes in Binary Systems / N.I. Shakura, R.A. Sunyaev // *Astron. & Astrophys.* — 1973. — V. 24. — P. 337—355.
6. Shirakawa, K. Asymmetric Evolution of Magnetic Reconnection in Collisionless Accretion Disk / K. Shirakawa, M. Hoshino. — 2014.

*Поступила в редакцию
22.12.15*