



УДК 51-76:612
ББК 58

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЛКНОВЕНИЙ ОБЛАКОВ МЕЖЗВЕЗДНОГО ГАЗА, СОДЕРЖАЩИХ ПЫЛЕВУЮ КОМПОНЕНТУ

Хоружий Александр Николаевич

Магистрант кафедры теоретической физики и волновых процессов,
Волгоградский государственный университет
z0rgent@gmail.com
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Ключевые слова: межзвездная среда, облака межзвездного газа, межзвездная пыль, газодинамика, численное моделирование.

Межзвездная среда в современной астрофизике рассматривается как сложная многофазная и многокомпонентная среда. Основными ее компонентами являются межзвездные газы. Они, в свою очередь, состоят в основном из водорода (в молекулярной, атомарной или ионизованной форме), гелия и пыли (твердых микроскопических частиц). В среднем масса пыли оценивается в 1 % от общей массы газа. Размер частиц, составляющих пыль, колеблется от 1 нм до 0,3 мкм, причем распределение пылинок по размеру имеет вид $n(a) \sim a^{-3.5}$ [5]. При этом, несмотря на относительно малое содержание в межзвездной среде, космическая пыль играет важную роль в физико-химических процессах, протекающих в ней. В частности, благодаря адсорбции молекул из газовой фазы становятся возможными цепочки некоторых химических реакций, например, синтез молекулярного водорода. Кроме того, пылевая среда влияет на темп нагрева (охлаждения) газа и его динамические характеристики.

Важным обстоятельством является тот факт, что пространственное распределение пыли весьма неравномерно. Она имеет тенденцию к концентрации в спиральных рукавах галактик, где образует вытянутые или перистые облачные структуры в газовых облаках.

Каким бы ни был физический механизм образования облаков, в дальнейшем по достижении определенной плотности они становятся гравитационно неустойчивыми и начинают коллапсировать [1; 5]. В современной астрофизике сжатие облаков под воздействием самогравитации рассматривается как начальная стадия процесса звездообразования. Согласно наблюдениям, интенсивное звездообразование происходит в холодных богатых молекулярным водородом облаках с высокой плотностью вещества – гигантских молекулярных облаках. С другой же стороны разреженная фаза межзвездной среды содержит в основном водород в атомарном или ионизованном состояниях, температура которого составляет 10⁴К и выше. Это означает, что должен быть некий механизм перевода водорода в молекулярное состояние – скорее всего, это и есть синтез молекул на пылинках. Концентрация газа и пыли после первичного уплотнения облака резко возрастает, а значит возрастает как вероятность протекания химических реакций, так и их темп. В этой связи оказывается важным представлять себе пространственное распределение пыли и ее динамику в коллапсирующем облаке – от них зависит как химический состав, так и темп охлаждения облака.

Такой сценарий формирования газопылевых комплексов описывается сложной согласованной физико-химической моделью, одной из важных деталей которой является динамика газопылевой среды. Описание движения газа и пыли в самом широком диапазоне плотностей, температур и скоростей является сложной задачей, в редких случаях решаемой чисто аналитическими методами. В настоящее время численные методы и моделирование на вычислительных машинах представляется наиболее эффективными средствами для рассмотрения задач астрофизики, в которой в принципе невозможны натурные эксперименты.

Целью данной работы являлось построение и тестирование численной схемы для моделирования газопылевых течений на основе подхода, при котором используется модель сплошной среды для газа и модель частиц для пыли. При таком подходе требуется не только реализации двух разных численных схем, но и должна быть обеспечена корректная «сшивка» при передаче данных о взаимодействии пыли с газом. Несмотря на сложность реализации такой гибридной схемы, данный метод обладает и их достоинствами, в частности, корректно передавая особенности динамики пыли, так называемые мультипоточковые течения и требую небольших затрат системных ресурсов для расчета динамики газовой компоненты.

Двухкомпонентное газопылевое течение при отсутствии внешних сил, теплопроводности и тепло- и массообмена между пылью и газом может быть описано в рамках модели сплошной среды следующим образом. Для газовой компоненты имеем:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \text{div}(\rho_g \vec{u}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho_g \vec{u}}{\partial t} + \text{div}(\rho_g \vec{u} \otimes \vec{u}) = -\nabla p + K$$

$$\frac{\partial \rho_g E}{\partial t} + \text{div}(\vec{u}(E + p)) = \Gamma n - \Lambda n^2$$

где ρ_g – плотность, u – скорость, p – давление, E – плотность полной энергии газа, Γ – функция объемного нагрева, $\Lambda(T)$ – функция объемного охлаждения газа, зависящая от его температуры T [7]. Отметим, что в данной модели не учитывается воз-

действие пыли на газ ввиду малого содержания пыли. Динамика пылевых частиц описывается следующей системой:

$$\frac{d\vec{r}_d}{dt} = \vec{v}_d$$

$$\frac{dv_d}{dt} = -n_g a^2 \Delta \vec{v} \sqrt{\frac{128\pi}{9} k_B T m_g + \pi^2 m_g (\Delta v)^2} \cdot \frac{1}{Sk}$$

где Sk – отношение между временем релаксации для частиц пыли и характерным динамическим временем (число Стокса), v_d – скорость частиц пыли, a – их радиус, Δv – скорость пылинки относительно газа, m_g – масса частицы газа, n_g – концентрация газа.

Для решения уравнений газовой подсистемы использовалась явная консервативная численная схема типа MUSCL 2-го порядка точности по времени и 3-го по пространству [2; 3]. Уравнения динамики пылинок интегрировались по схеме Рунге-Кутты 4-го порядка точности [6].

В рассматриваемой тестовой задаче процесс столкновения облаков происходит в «теплой» среде ($T = 9 \cdot 10^3$ К), содержащих два «холодных» облака ($T = 70$ К) радиуса 2.5 пк, которые находятся в тепловом и динамическом равновесии с окружающей средой. Концентрация межоблачного газа принята равной характерному значению 0.1 см^{-3} , концентрация газа в облаках $\sim 13 \text{ см}^{-3}$. Одно из облаков неподвижно, скорость второго варьируется в пределах 5–20 км/с, характерных для облаков межзвездной среды. Скорости пылинок в начальный момент принимаются равными скорости облака, количество «пылинок» в каждом облаке в разных тестах принималось равным 10^3 , 10^4 , 10^5 и 10^6 , то есть каждой модельной пылевой частице в этих моделях соответствует разное количество реальных пылинок, определяемое отношением их содержания (характерная концентрация пыли в облаках 0.001 см^{-3}) к числу модельных частиц.

При выполнении работы был написан код, реализующий численные схемы, проведены его тесты и проведена его оптимизация. Пробные расчеты показали хорошую производительность кода и устойчивость численной схемы в условиях, рассматриваемых в тестах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочкарев, Н. Г. Основы физики межзвездной среды / Н. Г. Бочкарев. – М. : Изд-во МГУ, 1991. – 352 с.
2. Калиткин, Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – СПб. : БХВ-Петербург, 2011. – 586 с.
3. Куликовский, А. Г. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений / А. Г. Куликовский, Н. В. Погорелов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 608 с.
4. Спитцер, Л. Физические процессы в межзвездной среде / Л. Спитцер. – М. : Мир, 1981. – 350 с.
5. Krugel, E. The physics of interstellar dust / E. Krugel. – IOP Publishing, 2003.
6. Toro, E. F. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics / E. F. Toro. – Springer, 1999.
7. Wolfire, M. G. The neutral atomic phases of the interstellar medium / M. G. Wolfire, E. L. Bakes // *Astrophysical Journal*. – 1995. – Vol. 443. – P. 152–168.

**SIMULATION OF COLLISION OF INTERSTELLAR CLOUDS
INCLUDING DUST COMPONENT**

Khoruzhiy Aleksander Nikolaevich

Master Student, Department of Theoretical Physics and Wave Processes,
Volgograd State University
z0rgent@gmail.com
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Key words: interstellar media, interstellar clouds, interstellar dust, gas dynamics, numerical simulations.