

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ СВЕРХНОВОЙ ЗВЕЗДЫ С МОЛЕКУЛЯРНЫМИ ОБЛАКАМИ МЕЖЗВЁЗДНОГО ГАЗА

С.М. Соковнич

Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко

3300 г. Тирасполь, 25 Октября 128

E-mail: s_sokovnich@rambler.ru

Межзвёздные молекулярные облака (МО) неустойчивые объекты. За время одного оборота вокруг центра Галактики они успевают образоваться и распаться. Но именно в МО происходит рождение звёзд. Значит образование облака и сгустков в нём - протозвёзд начинается почти одновременно. Рождение протозвёзд происходит путём каскада фрагментаций вещества облака, обусловленных неустойчивостями Джинса. Причиной начальной фрагментации могут быть ударные волны от взрыва сверхновой звезды.

В работе моделируется взаимодействие ударной волны, образовавшейся при взрыве сверхновой с системой из двух гравитационно связанных МО. Периоды вращения облаков 100 и 80 млн. лет, радиусы 0.05 и 0.1 парсек. Температура межзвёздной среды 10000 К, температура в центрах облаков 100 К, плотность среды $2.15 \cdot 10^{-25}$ г·см⁻³, плотность в центрах облаков $1.075 \cdot 10^{-22}$ г·см⁻³. Характеристики ударной волны определялись из уравнений Гюгонио-Ренкина. Число Маха принималось равным семи. В работе [1] при схожей постановке, задача решалась без учёта вращения облаков, без учёта гравитации и с помощью другой численной схемы.

Численная модель строилась на основе уравнений Эйлера для гравитационной газовой динамики. Гравитационный потенциал находился из решения уравнения Пуассона. Использовались неотражательные граничные условия. Численный метод решения полученной системы уравнений основан на решении задачи Римана о распаде произвольного разрыва. При решении необходимо добиться консервативности, т.е. в каждой расчётной ячейке должны выполняться законы сохранения, присущие данной задаче. Это означает, что потоки массы, импульса и энергии через границы ячейки должны соответствовать этим законам сохранения. Системы уравнений, подобные рассматриваемым, требуют как можно большего порядка аппроксимации на гладких решениях, но, как известно, обеспечивающие устойчивость решения, линейные схемы не могут быть выше первого порядка. Таким образом выбираемая схема должна быть консервативна и нелинейна. В исследуемой задаче имеются разрывы значений плотности, давления и других величин на фронте ударной волны, а при таких разрывах в численном решении могут возникнуть нефизические осцилляции. Поэтому выбираемая схема должна перестраиваться на разрывах так, чтобы осцилляции не возникали. В данной работе применялась схема WENO5 [2], где несколько шаблонов комбинируются нелинейным образом так, чтобы добиться пятого порядка точности на гладких участках. На разрывных участках схема самоперестраивается, чтобы не использовать узлы, лежащие на разрывах. Для шага по времени использовалась схема Рунге-Кутты 3 порядка. Все этапы численного расчёта были распараллелены с использованием среды CUDA компании NVIDIA. Уравнение Пуассона решалось на 27-точечном шаблоне с помощью быстрого преобразования Фурье.

Использовались трёхмерные сетки с разрешением 1024×512×512 узлов. Параллельная часть расчетов проводилась на графических процессорах, благодаря этому производительность вычислений оказалась примерно в семь раз выше, чем в случае использования центрального процессора.

В результате численного моделирования получено следующее. При прохождении ударной волной через облака, образуется встречная волна. Эти волны взаимодействуют между собой, и на границах облаков появляются различные неустойчивости (Рихтмаейра-Мешкова, Кельвина-Гельмгольца), завихрения, которые могут отрываться от облаков, передвигаться. Образуется сложная картина из завихрений и уплотнений. В некоторых участках облаков происходит резкое увеличение плотности. Движение газа в ряде областей существенно турбулентно. Наличие гравитации не успевает существенно изменить процесс, так как он проходит очень быстро (примерно за 3000 лет волна проходит облака). Значения величин, полученные на конечном этапе взаимодействия ударной волны с молекулярными облаками можно взять в качестве начальных для дальнейшего моделирования процессов, проходящих в облаках. Вращение облаков вносит некоторую асимметрию в исследуемый процесс.

1. Rybakin B.P., Goryachev V.D., Stamov L.I., Michalchenko E.V. Parallel algorithm for mathematical modeling of interaction of a strong shock wave with a molecular cloud // Proc. of the 1st Russian Conf. on Supercomputing (RuSCDays 2015), Moscow, 28-29, 2015
2. Jiang G. S., Shu C. W., "Efficient implementation of weighted ENO scheme," Journal of Computational Physics, Vol. 126, 1996, pp. 202-228.