

Параллельный алгоритм моделирования фрагментации и образования филаментных структур в молекулярных облаках*

Б.П. Рыбакин¹, Н.Н. Смирнов¹, В.Д. Горячев²

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова¹,
Тверской государственный технический университет²

Приводятся результаты численного моделирования процесса взаимодействия ударных волн средней интенсивности, порожденных взрывом сверхновой, с системой из двух молекулярных облаков (МО). Проведен анализ вихревой структуры МО, изменение границ которых инициировано неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца и Рихтмайера-Мешкова. Для решения использовались уравнения газовой динамики в консервативной форме. Построен параллельный алгоритм для ускорения расчетов с использованием технологий OpenMP и CUDA. Расчеты проводились на трехмерных сетках с более чем двумя миллиардами узлов на гибридных компьютерах. Моделировалось соударение ударной волны с числом Маха $M=7$ с двумя МО сферической формы и с различным распределением плотности. Проведен анализ процесса фрагментации облаков и зарождения волокнистых структур – филамент.

Ключевые слова: параллельные вычисления, сверхзвуковая турбулентность, ударные волны, остатки от взрыва сверхновой, молекулярные облака.

1. Введение

Создание параллельных алгоритмов, предназначенных для решения задач астрофизики на значительных пространственных и временных масштабах – необходимый шаг в подготовке будущих вычислений экзафлопсного уровня. В данной работе приведены результаты использования новых вычислительных кодов для моделирования взаимодействия ударных волн различной природы с молекулярными облаками (МО), неравномерно распределенными в галактиках. Существует много источников возникновения ударных волн. Они образуются при взрывах сверхновых звезд, при столкновениях гигантских молекулярных облаков [1]. Распространение и столкновение ударных волн, и их взаимодействие с молекулярными облаками играют важную роль в цепи событий, приводящих к образованию звезд путем самогравитации газа в динамически изменяемых МО.

На смену представлению о долгоживущих МО пришло понимание того, что молекулярные облака – это объекты, время жизни которых мало, по меркам возраста галактик. Такие облака достаточно быстро формируются из вещества межзвездной среды (МЗС), некоторая его часть проходит фазы сильного ударно-волнового сжатия в протяженных филаментных образованиях и глобулах, которые со временем коллапсируют и частично превращаются в звезды [2]. Вещество МЗС концентрируется и уплотняется в пространственной сети филамент (волокон). В процессе образования этих структур создаются подходящие условия, необходимые для начала действия сил гравитации. Молекулярные облака достаточно холодные и плотные, так что гравитационные силы являются основным фактором в появлении очень плотных областей. На достаточно малых масштабах внутри таких облаков (порядка одного парсека), силы тяжести начинают преобладать над динамическими, определяемыми сверхзвуковыми флуктуациями вещества, что приводит к появлению многочисленных, еще более уплотненных газовых вздутий, отдельных ядер протозвезд и их скоплений в кластерах. Моделирование таких астрофизических процессов на базе газодинамического описания турбулентных сред дает возможность с единой позиции описать процессы формоизменения вещества в галактиках [3].

* Исследования поддержаны грантами РФФИ № 14-29-06055, 14-07-00065.

Обработка изображений астрофизических объектов, полученных с использованием орбитальных и земных телескопов, показывает, что филаментные структуры наблюдаются повсеместно [4]. Принято считать, что звездообразование происходит в их пределах. Современные модели формирования молекулярных облаков связаны с влиянием на процесс гравитационной неустойчивости и турбулентности [5,6]. Межзвездная среда очень фрагментирована. Даже на самых больших масштабах, малые молекулярные облака (ММО) рассматриваются как фрагменты внутри гигантских молекулярных облаков (ГМО). Эти протяженные области создаются благодаря турбулентности и имеют сходную фрактальную структуру в более крупных образованиях [7].

В представляемой работе моделируется и анализируется влияние ударных волн и порождаемой турбулентности на формообразование первичной волокнистой структуры эволюционирующих ММО. Контрастность плотности газа в моделях $\chi = \rho_{cl} / \rho_{ism}$ изменяется в диапазоне 100 – 5000. Для формирования более плотных структур необходимо объединение малых МО в облака гигантских размеров, с более мощным гидродинамическим и магнитным воздействием. В определенном смысле наблюдаемые в расчетах вихревые преобразования уплотняемых слоев облаков являются стартовыми для зарождения будущих филаментных структур галактических масштабов. Анализ структурообразования зачатков волокнистых структур возможен уже на первичных этапах их формообразования. Данный подход распространен в ряде исследований при моделировании сверхзвуковых турбулентных течений в задачах астрофизики разных пространственных и временных масштабов, отличающихся на несколько порядков по величине [8].

В последнее время получила распространение концепция о том, что крупномасштабные магнитные неустойчивости инициируют образование молекулярных облаков, и время их жизни составляет $\sim 2 \times 10^7$ лет [9]. В качестве механизмов, вызывающих задержку начала формирования звезд в МО, предлагается амбиполярная диффузия магнитного потока [10] и турбулизация молекулярных облаков [11]. Последние исследования показали, что лишь малая доля МО имеет достаточную плотность, для того, чтобы быть источником протозвездных ядер. Поэтому наблюдаемая низкая скорость образования звезд является результатом малой объемной доли молекулярных облаков, которые являются достаточно плотными, чтобы иметь внутри себя протозвездные ядра [12].

Современные модели формирования молекулярных облаков связаны с влиянием на эти процессы гравитационной неустойчивости и турбулентности [5]. Гравитация может привести к коллапсу вещества МО достаточно быстро по галактическим масштабам $\sim 10^7$ лет. Тем не менее, турбулентные процессы, вызванные действием силы гравитации, воздействий ударных волн от взрывов сверхновых, столкновений с остатками оболочек сверхновых, волн перепадов плотности спиральных рукавов галактик, столкновений МО с другими облаками могут ускорить этот процесс. С этой точки зрения, молекулярные облака являются промежуточным проявлением перераспределения турбулентного каскада энергии при ее введении в МО в малых диссипативных масштабах [13].

2. Численное моделирование динамики соударения ударных волн с системой из двух МО

Объекты, исследуемые в работе, имеют очень большой диапазон размеров и плотностей. Межзвездная среда, которая заполняет нашу и другие галактики, имеет плотность порядка 10^{-25} г·см⁻³, молекулярные облака, которые формируются из межзвездного вещества, имеют плотность на два-три порядка больше. После взаимодействия ударной волны с МО их плотность повышается еще на несколько порядков. Такой большой диапазон значений для характерных расстояний и плотностей накладывает жесткие ограничения на размеры сетки, которые необходимы для достижения достаточного пространственного разрешения возникающих течений. Расчеты на сетках невысокой размерности приводят к потере разрешения быстрофлуктуирующих переменных и важных деталей. Как показано в [9], ускорение и перемешивание в молекулярных облаках происходит до 5 раз быстрее на сетках небольшого разрешения. В наших расчетах были использованы расчетные сетки с разрешением от $512 \times 256 \times 256$ до $2048 \times 1024 \times 1024$ узлов. Для проведения гидродинамических расчетов взаимодействия ударных

волн с молекулярными облаками в адиабатическом приближении необходимо использовать, как минимум, порядка 100 узлов сетки на радиус МО. Выбираемое разрешение сказывается и на визуализации зон образования филамент. Проведенные расчеты показывают, что на сетках небольшого разрешения трудно выделить детали процесса образования вихрей и деформации филаментных структур.

Численное моделирование проведено для случая взаимодействия ударной волны с числом Маха равным семи с двумя молекулярными облаками, которые находятся на разной стадии сжатия, и поэтому имеют различное радиальное распределение плотности по их объему. Основные характеристики газодинамического течения брались сопоставимыми с принятыми значениями в пионерской работе [3] и в недавно выполненных исследованиях [2,14,15,16], где моделировалось взаимодействие ударной волны с одиночными облаками.

2.1 Постановка расчета

Межзвездная среда до возмущения содержит вещество в плазменном состоянии ($T \sim 10000$ К). В этой среде неоднородно распределены холодные облака ($T \sim 100$ К) большей плотности. Изначально облака находятся в динамическом равновесии с фоновым газом. В модели используется уравнение состояния идеального газа с $\gamma=5/3$. Плотность межзвездной среды принималась равной $\rho_{ism}=2.15 \cdot 10^{-25}$ г·см⁻³, температура $T_{ism}=10^4$ К, $u_{ism}=0.0$. Плотность в облаке $\rho_{cl}=1.075 \cdot 10^{-22}$ г·см⁻³, температура $T_{cl}=100$ К, $u_{cl}=0.0$. Параметры газа за ударной волной определяются из уравнений Ренкина – Гюгонно. Число Маха ударной волны равно $M=7$, плотность $\rho_{sw}=8.6 \cdot 10^{-25}$ г·см⁻³, температура $T_{sw}=1.5 \cdot 10^5$ К, скорость $u_{sh}=104$ км/с. Толщина фронта ударной волны достаточно большая $\sim 2-5$ парсеков, что намного больше радиуса облака. Размеры облаков - величины порядка 0.1 парсека, время прохождения ударной волной расстояния диаметра верхнего облака t_{swoc} равно приблизительно 2000 лет (“swoc” – shock wave over cloud).

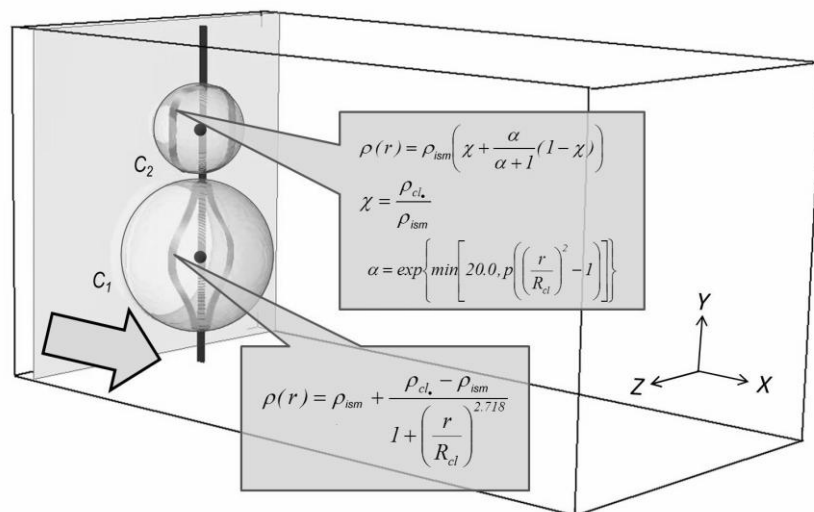


Рис. 1. Схема постановки расчета

Первичное местоположение облаков показано на рис. 1. В начальный момент времени ударная волна надвигается на молекулярные облака сферической формы, прикасаясь к условной границе верхнего облака. Для принятого на схеме расположения нижнего C_1 и верхнего C_2 облаков задаются различные законы распределения плотности, с подчеркиванием индивидуальности их гравитационных полей. Показанные на схеме профили распределения плотности заданы в соответствии с рекомендациями сглаживания граничных распределений плотности в работах [14, 17], где моделировались соударения ударных волн с одиночными МО. Начальная масса облаков C_1 и C_2 принималась $0.005M_{\odot}$ и $0.007M_{\odot}$, соответственно (в долях массы Солнца). Контрастное отношение плотностей в центрах шаровых образований принималось $\chi = \rho_{cl} / \rho_{ism} = 500$. Расчетная область представляла собой параллелепипед размерами $3.2 \times 1.6 \times 1.6$ пк. Условный радиус МО соответствовал 128 узлам сетки. Граничные условия для основных переменных на боковых границах расчетной области принимались как открытые.

2.2 Параллелизация и оптимизация вычислений

Для расчета трехмерного движения и эволюции МО используется система уравнений Эйлера, записанная в консервативной форме. Для решения уравнений использовался численный метод с применением разностных схем высокого разрешения типа TVD. Разностная схема имеет второй порядок точности и позволяет вести расчеты с высоким разрешением для зон вблизи ударных волн и контактных разрывов, и предотвращать нефизические осцилляции. Задача решалась на эйлеровой сетке. Более подробно математическая постановка задачи и численного решения приведена в [18].

В работе используется вычислительная программа для расчетов на многопроцессорных гибридных ЭВМ с использованием технологий OpenMP и CUDA. Настройка OpenMP осуществлялась с помощью Intel VTune Amplifier XE. Этот инструментарий позволяет выполнять профилирование приложений непосредственно на узле кластера. Был использован тип анализа Lightweight Hotspots. Настройка осуществлялась для процессоров Xeon E2630 и Xeon E5 2650 Ivy Bridge.

Параллельная часть расчетов проводилась либо только на графических процессорах, либо на процессорах Intel Xeon. Вычисления осуществлялись на узлах кластера, которые имели 24- или 40-ядерные процессоры, с применением технологии OpenMP. При применении технологии CUDA использовался графический процессор NVIDIA GeForce 980 TI с 6 Gb памяти типа DDR5.

В проводимых расчетах более 70 процентов времени занимал расчет потоков гидродинамических величин на границах трехмерных ячеек. Для уменьшения времени вычислений был построен параллельный алгоритм, в котором расчет потоков велся на всех доступных ядрах процессоров CPU. В работе [15] приведено подробное описание предложенного алгоритма и тонкой настройки алгоритма с помощью программных средств. Для ускорения расчетов был построен алгоритм, который использовал технологию CUDA. В нем использовалась технология генерации CUF ядер, которую применяют к обычным циклам. Эти директивы указывают компилятору, как сгенерировать ядра для обычного вложенного цикла программы, которая располагается на хосте. Таким образом, генерации CUF ядер для циклов позволяет запустить расчет на графическом процессоре непосредственно из программы, которая располагается на хосте.

Сравнивать производительность вычислений, проводимых с использованием CPU и GPU не совсем корректно. Дело в том, что производительность использованных Fortran компиляторов фирм Intel и PGI довольно сильно различается. По этой причине в данной работе сравнение производительности с использованием CPU и GPU велось на достаточно оценочном уровне, так как разница в производительности одного и того же кода (OpenMP) на одних и тех же процессорах, отличается более чем на 30 процентов. Для не очень больших размеров сетки, до 1024x512x512 узлов, распараллеливание на GPU давало лучшие результаты по временным затратам, чем OpenMP. С увеличением размера сетки скорость расчета на GPU снижалась. Это связано с большим объемом пересылаемой информации по достаточно медленной шине PCI-E.

Расчеты, проведенные на разных расчетных сетках, показали качественно одинаковые результаты, но с разной степенью детализации. Выбираемое разрешение накладывает ограничение на выявление деталей неустойчивости течения, масштабов флуктуаций, отслеживание процесса сдвигания пограничных слоев оболочек и образования зарождающихся филамент. Проведенные расчеты показывают, что на сетках небольшого разрешения нефизично сглаживаются границы пространственных образований мелких вихрей и рудиментов волоконных структур.

3. Анализ формоизменения МО после ударного воздействия

Вычислительный эксперимент, проведенный на сетках разной размерности, позволил проследить стадии динамики формирования турбулентных вихревых структур в области взаимодействия ударной волны с молекулярными облаками.

В начальный момент времени, когда головная ударная волна огибает облака, за ее фронтом образуется волна, которая движется навстречу потоку и формирует первичное возмущение. За счет резкого изменения плотности газов на границах МО возникает неустойчивость Рихтмай-

ра-Мешкова. Одновременно между пограничными слоями облаков в области смешения с окружающим газом нарастает градиент изменения скоростей потоков – возникает неустойчивость Кельвина-Гельмгольца. Происходит конвективное ускорение и завихрение перемежаемых пограничных слоев условной границы между МО и окружающим веществом, зонами с большей и с меньшей плотностью. Смешение пространственных следов от облаков C_1 и C_2 внешне похоже на формирование вихревых дорожек Кармана.

Динамика процесса формообразования отражена на рис. 2, где изображены числовые шликеры в центральном сечении расчетной области, с показом морфологии облачного смешения и распределения градиентов плотности со следами ударных волн. На приведенных рисунках видно, как ударные волны внутри головных зон МО сжимают выделенные области газовых потоков, резко повышая их плотность. Интерференция отраженных ударных волн и интенсивные пульсации сверхзвуковых скоростных полей в градиентных зонах ведут к резкой дифференциации плотности газа, до контрастного отношения плотности $\chi \sim 2000$. Зоны уплотнения газа концентрируются вдоль пленочных оболочек условной цилиндрико-конической формы, вытягиваемых по направлению движения ударной волны.

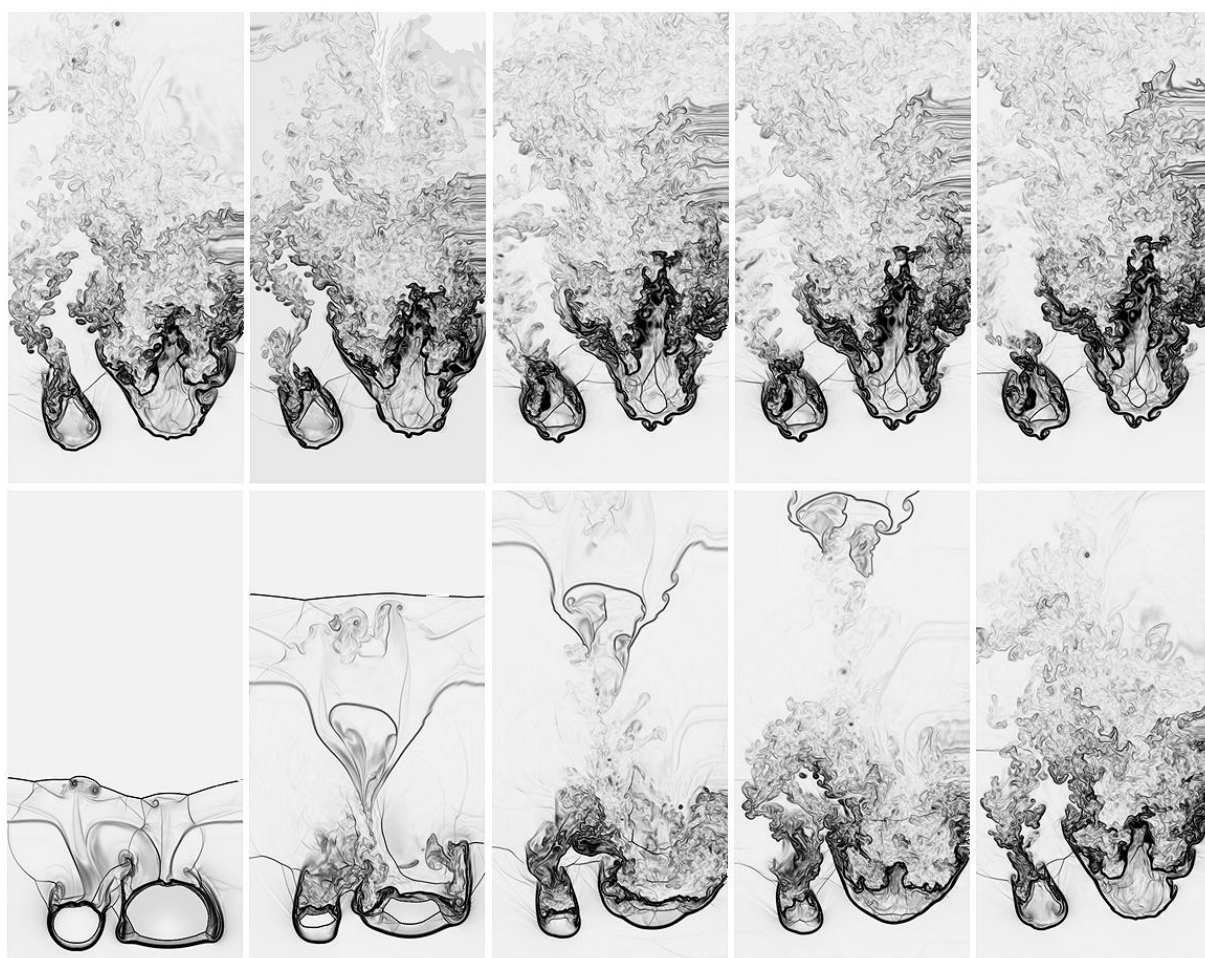


Рис. 2. Изменение плотностной структуры МО с момента времени $t = 40 \cdot t_{swoc}$ по $t = 600 \cdot t_{swoc}$

Глобальная циркуляция потока газа в области смешения начинает проявляться после обхода ударной волной облака C_1 и имеет источником две вихревые линии, зарождаемые внутри него, на тыльной стороне. Закручивание потоков происходит по схеме пространственного двойного вихря, как это показано на рис 3. Красным и синим цветом показано граничные, положительное и отрицательное, значения величины продольной компоненты ротации вихревого поля, распределение этой величины показано на изоповерхности поля Q - критерия. В начальный момент вихревой след струи от верхнего облака затягивается в кормовую зону нижнего, затем здесь происходит трансформация винтовых линий с противоположной закруткой и поворотом в сторону сноса облаков. Происходит смещение следов и их разворот вверх по потоку.

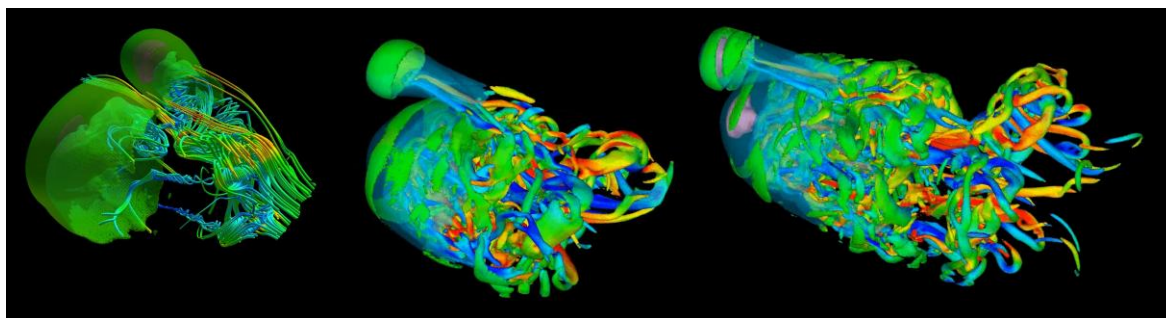


Рис. 3. Глобальная циркуляция в зоне смешения МО на начальных этапах

По мере развития течения вихревые линии вытягиваются, перекручиваются и принимают форму шпилек (hairpins) с расширением в области сгиба. На рис. 4 можно найти характерные вихреобразования - торообразные структуры, вытянутые петли и винтообразные деформации.

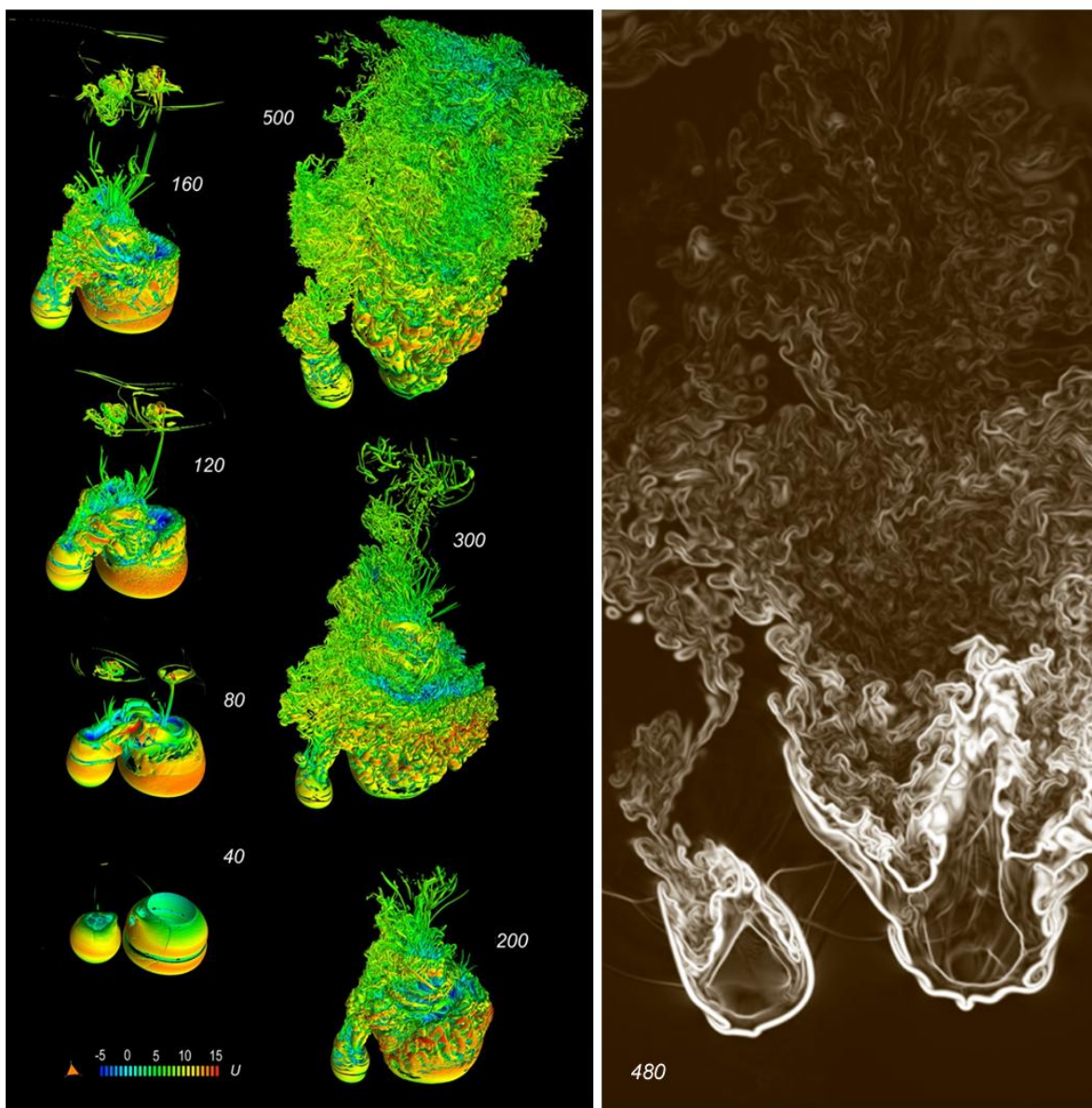


Рис. 4. Изменение Q-критерия ($Q = 100 \text{ s}^{-1}$) – индикатора завихренности поля, с выделением цветом скоростного режима в зоне смешения МО для разных моментов времени t / t_{swoc} , справа приведен фрагмент числового шпирена для градиента плотности газа на момент $t = 480 \cdot t_{\text{swoc}}$

Для выделения особенностей вихревой структуры потока рассчитывались поля Q-критерия – второго инварианта тензора градиента скорости, он используется для выявления областей концентрации мелкомасштабных вихрей. Показанные на поверхностях Q-критерия цветные карты локальной скорости дают представление о перемежаемости течения газа. Внутри области смешения вихри имеют меньшую плотность распределения, на границах и поверхностях вытягиваемых пленок - рудиментов филамент, плотность распределения вихрей значительно возрастает, отражая локальный скоростной сдвиг в различных областях МО.

Течение газов в области смешения характеризуется высокой турбулентностью. Интенсивность пульсаций в пограничных зонах возрастает на порядок, а сами пульсации принимают значения, по величине превышающие более чем на треть локальную сверхзвуковую скорость в точках измерения. Поля распределения этих характеристик показаны на рис. 5 для одного из моментов времени эволюции МО.

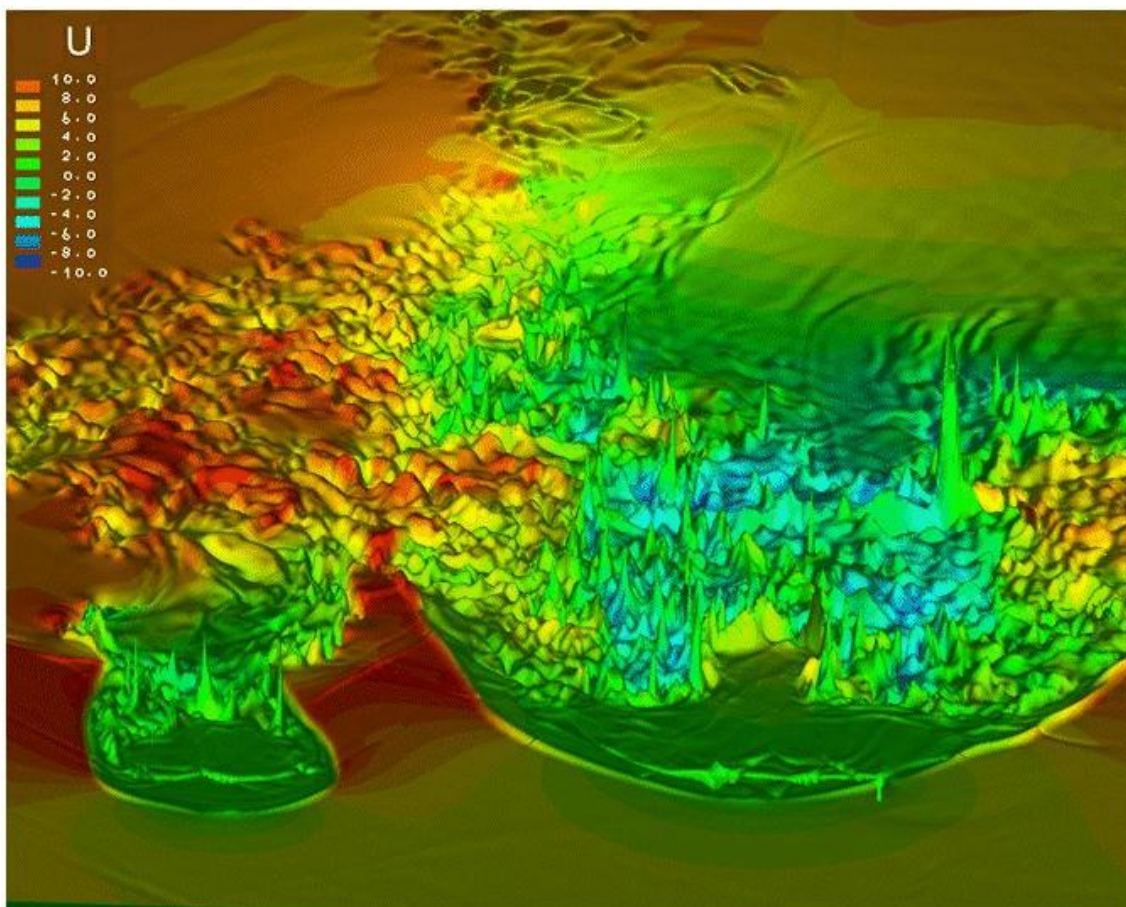


Рис. 5. Поле распределения интенсивности турбулентных пульсаций скорости с нанесенной на поверхность горельефа для $u'/|U|$ картой распределения скорости газа, построенного в центральной плоскости области смешения МО, при $t = 300 \cdot t_{swoc}$

Анализ пространственного расположения интенсивных пульсаций показывает, что зоны их резкого изменения коррелировано повторяют условные границы филаментных образований.

Иллюстрация процесса фрагментации МО дана на Рис. 6. Для удобства визуального представления показана только половина пространственного изображения изоповерхностей контрастности плотности ($\chi = 10; 100; 500$), замкнутые χ – поверхности изображены полупрозрачными ($\chi = 1000; 2000$). В правой части рисунка показана фрагментация разрушаемых облаков, с пространственным разделением областей формируемых филамент с $\chi = 600$, уплотнений, достигаемых при больших временах развития процесса.

Анализ формоизменения вытягиваемых ударно-волновыми силами “пленочных” филаментных структур показал, что фрагментация системы двух облаков во времени в основном повторяет временные диаграммы разрушения, полученные в работах [2, 14-17] для одиночных

МО. В условиях моделирования более общего вида, для взаимодействия ударных волн с первоначально разделенными в пространстве облаками и с различным распределением гравитационных полей, это проявляется более наглядно и более естественно. Продолжение моделирования коллизий для систем молекулярных облаков позволило выявить промежуточные образования рудиментов филамент [19].

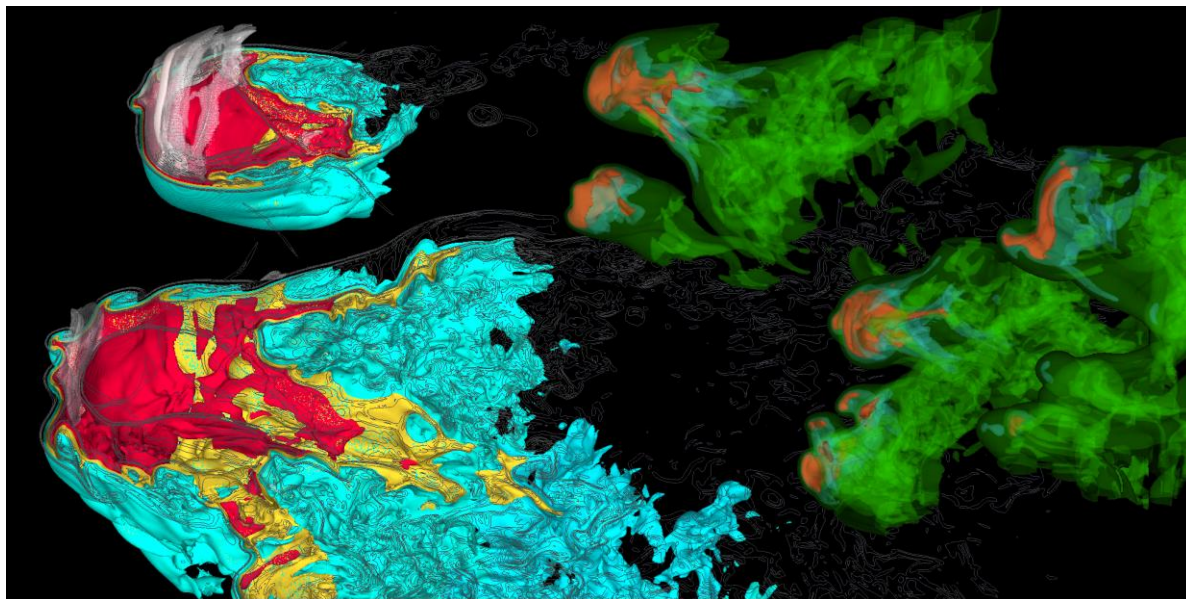


Рис. 6. Фрагментация по плотности газа при $t = 500 \cdot t_{\text{swoc}}$ и эволюция волокнистых структур

Прослеживание изменения фракционного состава газа за фактически достигнутое время в численных экспериментах показало, что с увеличением времени дрейфа деформируемых облаков медиана распределения фракций плотности МО сдвигается в сторону увеличения контрастности их плотности χ до величин порядка 700. Для выяснения возможных изменений значений этого показателя, вероятно осциллирующего во времени, требуется дополнительное численное исследование, прогнозируемое до расчетного времени порядка $10000 \cdot t_{\text{swoc}}$, с введением в модель действия магнитных полей в объемах с расчетными сетками в два-три раза большей размерности, чем принятой в настоящей работе.

Литература

1. Elmegreen B. G. Gravitational collapse in dust lanes and the appearance of spiral structure in galaxies. *Astrophys. J.*, 231, 1979. P. 372–383.
2. Banda-Barragan W. E., Parkin E. R., Federrath C., Crocker R. M., and Bicknell G. V. Filament formation in wind-cloud interactions. I. Spherical clouds in uniform magnetic fields. *MNRAS*, Vol. 455, 2016. P. 1309-1333.
3. Klein, R.I., McKee, Ch. F., Collela, Ph. On the hydrodynamical interaction of the shock waves with interstellar clouds. *The Astrophysical J.*, No. 420, 1994. P. 213–236.
4. Schneider S, Elmegreen B.G. A catalog of dark globular filaments. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 41, 1979. P. 87–95.
5. Vázquez-Semadeni E., Ostriker E. C., Passot T., Gammie C. F., and Stone J. M. Compressible MHD turbulence: Implications for molecular cloud and star formation. In *Protostars and Planets IV*, Editors: V. Mannings et al., Univ. of Arizona, Tucson, 2000. P. 3–28.
6. Wooden D. H., Charnley S. B., and Ehrenfreund P. *Composition and Evolution of Interstellar Clouds: Comets II*, University of Arizona Press, Tucson, 2005.
7. Falgarone E., Phillips T. G., and Walker C. K. The edges of molecular clouds: Fractal boundaries and density structure. *Astrophys. J.*, Vol. 378, 1991. P. 186–201.

8. Kritsuk A.G., Wagner R., Norman M. L., and Padoan P. High resolution simulations of supersonic turbulence in molecular clouds. In “Numerical Modeling of Space Plasma Flows”, ASP Conference Series, Vol. XXX, Eds. N. Pogorelov, J. Raeder, H.C. Yee, & G. Zank, 2006. P.7.
9. Blitz L. and Shu F. H. The origin and lifetime of giant molecular cloud complexes. *Astrophys. J.*, Vol. 238, 1980. P. 148–157.
10. Shu F. H., Adams F. C., and Lizano S. Star formation in molecular clouds - Observation and theory. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, No. 25, 1987. P. 23–81.
11. Nakano T. Star formation in magnetic clouds. *Astrophys. J.*, Vol. 494, 1998. P. 587–604.
12. Boss A. P. From molecular clouds to circumstellar disks. In *Comets II*, Editors: M. C. Festou et al., Univ. of Arizona, Tucson, 2004. P. 745.
13. Vázquez-Semadeni E. The turbulent star formation model. Outline and tests. In *IAU Symposium 221: Star Formation at High Angular Resolution*, Editors: M. Burton et al., San Francisco Publishing of Astronomical Society of the Pacific, 2004. P. 512.
14. Pittard, J.M., Falle, S.A.E.G., Hartquist, T.W. & Dyson, J.E. The turbulent destruction of clouds. *MNRAS*, Vol. 394, 2009. P. 1351–1378.
15. 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, Russia, 09, 28-29, 2015., Ed. V. Voevodin, CEUR Workshop Proceedings, Vol-1482, Published on CEUR-WS.org, URN: urn:nbn:de:0074-1482-7, <http://ceur-ws.org/Vol-1482>, ISSN 1613-0073, P. 324-331.
16. Rybakin B., Goryachev V. Treatment and visual analysis of numerical simulation of supersonic flows with extensive output after parallel calculation, PSFVIP 10-121 // *E-Book Proceedings of the 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing*, Naples, Italy, 15-18 June, 2015, ISBN 978-88-906484-3-4, 2015. P. 1-8.
17. Johansson E.P.G. & Ziegler U. Radiative interaction of shocks with small interstellar clouds as a pre-stage to star formation. *Astrophys. J.*, Vol. 766, 2011. P. 1–20.
18. Rybakin B.P., Stamov L.I., Egorova E.V. Accelerated solution of problems of combustion gas dynamics on GPUs // *Computers & Fluids*, Vol. 90, 2014. P. 164–171.
19. Rybakin B., Goryachev V. Coherent instabilities leading to fragmentation of molecular clouds interacted with shock wave of supernova blast remnants. In *Turbulence, Waves and Mixing: In Honour of Lord Julian Hunt's 75th Birthday*, Edited by S.G. Sajjadi and H.J.S. Fernando, King's College, Cambridge, Institute of Mathematics & its applications, British Library Cataloguing in Publication Data, ISBN 976-0-905091-35-8, Printed in Great Britain by Modern Graphic Art Limited, 2016. PP. 45-48.

Parallel algorithm for simulation of fragmentation and formation of filamentous structures in molecular clouds

B.P. Rybakin¹, N.N. Smirnov¹, V.D. Goryachev²

Moscow State University¹, Tver State Technical University²

The report is devoted to numerical simulation of interaction between the post-shock wave frontal of supernova blast remnants and the gas of two molecular clouds (MC). The dynamical formation of MC structures associated with Kelvin-Helmholtz and Richtmyer-Meshkov instabilities occurring in the cloud and interstellar medium interaction zone is simulated. The MC gas flow evolution is derived from the time dependent equations of mass, momentum, and energy conservation. High resolution computational meshes (more than two billion nodes) were used in parallel computing on multiprocessor hybrid computers. In the model two initially spatially separated clouds with different gas density distribution fields interact with the post-shock medium. The peculiarities of clump and shell fragmentation of clouds and formation of filamentous rudiment structures are considered.

Key words: parallel calculations, supersonic turbulence, shock waves, supernova blast remnants, molecular clouds.

References

1. Elmegreen B. G. Gravitational collapse in dust lanes and the appearance of spiral structure in galaxies. *Astrophys. J.*, 231, 1979. P. 372–383.
2. Banda-Barragan W. E., Parkin E. R., Federrath C., Crocker R. M., and Bicknell G. V. Filament formation in wind-cloud interactions. I. Spherical clouds in uniform magnetic fields. *MNRAS*, Vol. 455, 2016. P. 1309-1333.
3. Klein, R.I., McKee, Ch. F., Collela, Ph. On the hydrodynamical interaction of the shock waves with interstellar clouds. *The Astrophysical J.*, No. 420, 1994. P. 213–236.
4. Schneider S, Elmegreen B.G. A catalog of dark globular filaments. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 41, 1979. P. 87–95.
5. Vázquez-Semadeni E., Ostriker E. C., Passot T., Gammie C. F., and Stone J. M. Compressible MHD turbulence: Implications for molecular cloud and star formation. In *Protostars and Planets IV*, Editors: V. Mannings et al., Univ. of Arizona, Tucson, 2000. P. 3–28.
6. Wooden D. H., Charnley S. B., and Ehrenfreund P. *Composition and Evolution of Interstellar Clouds: Comets II*, University of Arizona Press, Tucson, 2005.
7. Falgarone E., Phillips T. G., and Walker C. K. The edges of molecular clouds: Fractal boundaries and density structure. *Astrophys. J.*, Vol. 378, 1991. P. 186–201.
8. Kritsuk A.G., Wagner R., Norman M. L., and Padoan P. High resolution simulations of supersonic turbulence in molecular clouds. In “Numerical Modeling of Space Plasma Flows”, ASP Conference Series, Vol. XXX, Eds. N. Pogorelov, J. Raeder, H.C. Yee, & G. Zank, 2006. P.7.
9. Blitz L. and Shu F. H. The origin and lifetime of giant molecular cloud complexes. *Astrophys. J.*, Vol. 238, 1980. P. 148–157.
10. Shu F. H., Adams F. C., and Lizano S. Star formation in molecular clouds - Observation and theory. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, No. 25, 1987. P. 23–81.
11. Nakano T. Star formation in magnetic clouds. *Astrophys. J.*, Vol. 494, 1998. P. 587–604.
12. Boss A. P. From molecular clouds to circumstellar disks. In *Comets II*, Editors: M. C. Festou et al., Univ. of Arizona, Tucson, 2004. P. 745.

13. Vázquez-Semadeni E. The turbulent star formation model. Outline and tests. In IAU Symposium 221: Star Formation at High Angular Resolution, Editors: M. Burton et al., San Francisco Publishing of Astronomical Society of the Pacific, 2004. P. 512.
14. Pittard, J.M., Falle, S.A.E.G., Hartquist, T.W. & Dyson, J.E. The turbulent destruction of clouds. MNRAS, Vol. 394, 2009. P. 1351–1378.
15. 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, Russia, 09, 28-29, 2015., Ed. V. Voevodin, CEUR Workshop Proceedings, Vol-1482, Published on CEUR-WS.org, URN: urn:nbn:de:0074-1482-7, <http://ceur-ws.org/Vol-1482>, ISSN 1613-0073, P. 324-331.
16. Rybakin B., Goryachev V. Treatment and visual analysis of numerical simulation of supersonic flows with extensive output after parallel calculation, PSFVIP 10-121 // E-Book Proceedings of the 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, Naples, Italy, 15-18 June, 2015, ISBN 978-88-906484-3-4, 2015. P. 1-8.
17. Johansson E.P.G. & Ziegler U. Radiative interaction of shocks with small interstellar clouds as a pre-stage to star formation. Astrophys. J., Vol. 766, 2011. P. 1–20.
18. Rybakin B.P., Stamov L.I., Egorova E.V. Accelerated solution of problems of combustion gas dynamics on GPUs // Computers & Fluids, Vol. 90, 2014. P. 164–171.
19. Rybakin B., Goryachev V. Coherent instabilities leading to fragmentation of molecular clouds interacted with shock wave of supernova blast remnants. In Turbulence, Waves and Mixing: *In Honour of Lord Julian Hunt's 75th Birthday*, Edited by S.G. Sajjadi and H.J.S. Fernando, King's College, Cambridge, Institute of Mathematics & its applications, British Library Cataloguing in Publication Data, ISBN 976-0-905091-35-8, Printed in Great Britain by Modern Graphic Art Limited, 2016. PP. 45-48.