

УДК 524.5:519.677

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СОУДАРЕНИЯ  
МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОБЛАКОВ НА ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ© 2023 Б. П. Рыбакин<sup>1а</sup>, В. Д. Горячев<sup>2б</sup><sup>1</sup>Научно-исследовательский институт системных исследований  
(ФНЦ НИИСИ РАН),

Нахимовский просп., 36, корп. 1, г. Москва 117218, Россия,

<sup>2</sup>Тверской государственный технический университет,  
набережн. А. Никитина, 22, г. Тверь 170026, РоссияE-mails: <sup>a</sup>rybakin@vip.niisi.ru, <sup>b</sup>gdv.vdg@yandex.ruПоступила в редакцию 21.08.2022 г.; после доработки 21.08.2022 г.;  
принята к публикации 29.09.2022 г.

Представлены результаты компьютерного моделирования процесса соударения вращающихся молекулярных облаков в межзвёздной среде. По мере сжатия вещества плотность газа в области их соударения увеличивается, что приводит к локальным изменениям формы и фрагментации облаков. Плотность газа в образующихся сгущениях увеличивается на много порядков, возникают гравитационно связанные области, где возможно образование звёздных скоплений. Процесс звездообразования сопровождается значительными пространственными и временными изменениями межзвёздного газа в этих областях, турбулентностью межзвёздной среды, гравитацией, резким изменением магнитных и радиационных полей на предзвёздном этапе эволюции новых образований. Большое влияние на протекающие процессы оказывает вращение сталкивающихся молекулярных облаков. Эволюция вещества протозвёздных областей с момента, когда они начинают формироваться, до момента, когда они достигают звёздной плотности, охватывает огромный диапазон масштабов. Моделирование таких астрофизических процессов на вычислительных сетках сверхбольшого разрешения требует значительного увеличения компьютерных мощностей, требуется оптимизация параллельных вычислений на гетерогенных вычислительных системах.

**Ключевые слова:** вычислительная астрофизика, столкновение молекулярных облаков, фрагментация новообразований, параллельное программирование.

DOI: 10.33048/SIBJIM.2023.26.114

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных механизмов формирования зон звездообразования является локальное уплотнение и пространственная фрагментация межзвёздного газа в турбулизованных областях галактик [1]. При взаимном столкновении и обоюдном проникновении газовых галактических струй и потоков, в том числе молекулярных облаков, формируются ограниченные области — сгустки сильно сжатого газа. В результате ударного сжатия плотность газа на фронтах соударения повышается на несколько порядков и изменяется от начальной плотности порядка  $\rho = 10^{-25}$  г/см<sup>3</sup> до величин порядка  $10^{-19}$  г/см<sup>3</sup>. Образуются гравитационно связанные сгустки молекулярного газа предзвёздной плотности, в которых, при возникновении гравитационного коллапса вещества и при отсутствии внешних воздействий, могут возникать новые

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-29-09070 mk).

звёздные системы. Протекающие процессы сжатия газа динамически ускоряются при вращении туманностей. Взаимодействующие молекулярные облачные образования в различных галактиках, как правило, представляют собой вращающиеся объекты. Можно отметить, что количество вычислительных экспериментов по моделированию столкновения «облако-облако» (cloud-cloud collision, CCC) с учётом вращения облаков не слишком велико по сравнению со сценариями столкновения без вращения [2].

Моделирование фрагментации газа молекулярных облаков при их соударении и образовании гравитационно связанных областей уплотнённого газа в деформируемых остатках выполняется, как правило, с использованием больших компьютерных мощностей. Сложность моделирования связана с существенными трудностями в создании параллельного программного обеспечения, значительными временными затратами на проведение расчётов на сетках сверхбольшого разрешения, трудоёмкой постобработкой гигантских объёмов полученной информации и интерпретацией результатов.

В последние годы резко увеличилось количество программных комплексов для решения задач гравитационной гидродинамики. В большинстве вычислительных программ используются алгоритмы частиц в ячейках (PIC), моделирование  $N$  тел, гидродинамика сглаженных частиц (SPH), совершенствуются методы на основе блочно-структурированных сеток, а также методы конечных объёмов. Подробный обзор программного обеспечения, используемого в этой области моделирования гигантских по пространственному и временному масштабу процессов во Вселенной, дан в работе [3]. Во многих программах используют технологию MPI для распараллеливания операций в алгоритмах численного решения дифференциальных уравнений в частных производных. В качестве примера решения крупномасштабных задач астрофизики можно отметить систему RAMSES [4], где используется адаптивное уточнение (AMR) расчётных сеток и применяется гибридный параллелизм MPI/OpenMP технологий. Использование AMR и SPH кодов с высокой степенью параллелизма вычислений является характерной особенностью современных программ для моделирования образования предзвездных зон в сильно сжатых гравитационно-связанных сгустках и филаментах, возникающих при столкновениях молекулярных облаков [5–7].

К настоящему времени появляются всё более подробные трёхмерные модели, которые учитывают эффекты взаимодействия вещества набегающих газовых потоков с взаимным проникновением гравитационно-связанных пространственных образований друг в друга. Изменение формы газовой-пылевой образований при столкновениях сопровождается значительным вихреобразованием на границах деформируемых облаков. Во многих исследованиях турбулизация зон взаимодействия объясняется с привлечением эффектов влияния неустойчивостей Рихтмайера — Мешкова, Кельвина — Гельмгольца и NTSI, которые инициируются резкими изменениями скоростного поля и плотности газа в ядре столкновения облаков [8–11]. Результаты, полученные в цитируемых работах, использовались при анализе проведённого моделирования и динамики изменения форм дозвездных образований при динамическом взаимодействии гиперзвуковых ударных потоков материи.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

### 1.1. Определяющие уравнения

Для моделирования соударения в данной работе используется система уравнений Эйлера, которая описывает законы сохранения плотности, количества движения и энергии:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

здесь  $\mathbf{U} = (\rho, \rho_i, E)^T$  — вектор переменных;  $\mathbf{F}(\mathbf{U})_i = (\rho u_i, \rho u^i u_j + P \delta_{ij}, u_i E + P \delta_{ij})^T$  — потоки основных переменных,  $E = \rho \left( \frac{1}{2} u^i u_j + \frac{P}{(\gamma - 1)\rho} \right)$  — полная энергия.

Расчёты столкновения облаков первоначально сферической формы велись по разным сценариям. В этих расчётах облака имели различные массы и размеры, разное начальное распределение плотности газа. Облака сталкивались на встречной скорости в интервале от 5.32 до 11.77 км/с. Столкновение и взаимное проникновение молекулярных облаков со сверхзвуковыми скоростями предполагалось в пространственном объёме  $40 \times 40 \times 40$  парсек. В расчётах с вращением облаков в разных направлениях угловая скорость  $\Omega = 2.6 \times 10^{-15} \text{ с}^{-1}$ . Оси вращения облаков совпадали с линией их соударения.

Приведённые ниже результаты соответствуют сценариям соударения облаков с начальными диаметрами МО: 13.44 и 13.76 парсек. Соответствующие массы были равны 693 и 675  $M_{\odot}$  масс Солнца соответственно, эти значения характерны для нижней границы масс гигантских молекулярных облаков (ГМО). В расчётах использовалась безразмерная величина  $\chi = \rho_{\text{cl}}/\rho_{\text{ism}}$ , которая характеризует отношение плотностей газа в среде облаков и фрагментов к плотности межзвёздного пространства  $\rho_{\text{ism}} = 2.15 \times 10^{-25} \text{ г/см}^3$ . В начальный момент соударения облаков эта величина принималась  $\chi = \rho_{\text{cl}}/\rho_{\text{ism}} = 500$ .

## 1.2. Реализация параллельного алгоритма

Компьютерное моделирование крупномасштабных процессов формирования филамент и сверхплотных гравитационно-связанных сгустков при соударении молекулярных облаков велось на параллельных вычислительных кластерах с гибридной архитектурой. Для вычислений использовалась авторская программа DarkMatter, созданная с использованием гетерогенных технологий Coarray Fortran и OpenACC для GPU, в которых реализована эффективная параллелизация вычислений при решении систем уравнений Эйлера на регулярных вычислительных сетках большого объёма, с автоматически регулируемым блочным адаптивным уточнением AMR в областях с высокими градиентами изменения переменных.

В программе применяется гетерогенное распараллеливание вычислений на CPU и GPU. Для работы на графических процессорах используется технология OpenACC, на процессорах Intel Xeon — технология Coarray, что позволяет существенно сократить время выполнения команд программы. Расчёт газодинамических процессов осуществляется на CPU. Вычисление гравитационного потенциала может проводиться параллельно на GPU. С учётом возможностей современных процессоров CPU и графических процессоров GPU, в программу были внесены изменения для повышения производительности и уменьшения времени реализации команд. Эта модификация позволила сгладить проблему влияния размера кэша памяти в вычислительных потоках. Это целесообразно при реализации многосеточных алгоритмов, которые широко используются при решении задач гравитационной газовой динамики.

Оптимизация работы программы проводилась при решении уравнения Пуассона и систем уравнений Эйлера при моделировании гравитационного коллапса вещества в ограниченном объёме газа с использованием технологии и компиляторов [12, 13]. Моделирование столкновений облаков с вращением и без вращения выполнено с оптимизацией параллельного ускорения расчёта на компьютерах с многоядерными процессорами и графическими ускорителями. Серийные расчёты велись на кластере с процессорами Xeon E2630 и Xeon E5 2650 Ivy Bridge с разным количеством ядер. Эффективность распараллеливания анализировалась с помощью программы Intel VTune Amplifier XE. Для обработки результатов и создания иллюстраций использовалась авторизованная система постобработки HDVIS с распараллеливанием серийных операций анализа большого объёма выходных данных.

## 2. АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОУДАРЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОБЛАКОВ

Численное моделирование процесса соударения молекулярных облаков является продолжением исследований, отражённых в работах [14, 15]. В них анализировалось изменение формы и вихревой структуры ядра соударения молекулярных облаков в межзвёздном пространстве,

где они сталкивались при лобовом ударе или взаимодействовали друг с другом в ситуации со смещением удара. Учёт вращения туманностей вокруг общей оси позволил выявить дополнительные эффекты роста фрагментации фрагментации остатков и образованных сгущений гигантских молекулярных облаков при столкновениях.

Можно выделить четыре основных временных этапа соударения молекулярных облаков: начальное сжатие газа в зоне удара; формирование линзообразного диска из сжатых газовых слоёв ядра; фрагментирование газовых образований в виде пространственно замкнутых уплотнённых сгустков; распад и затухание процесса взаимодействия вещества остаточных фрагментов. Основные моменты соударения облаков с появлением вихревых структур и турбулизацией встречных потоков газа показаны на рис. 1 и 2.

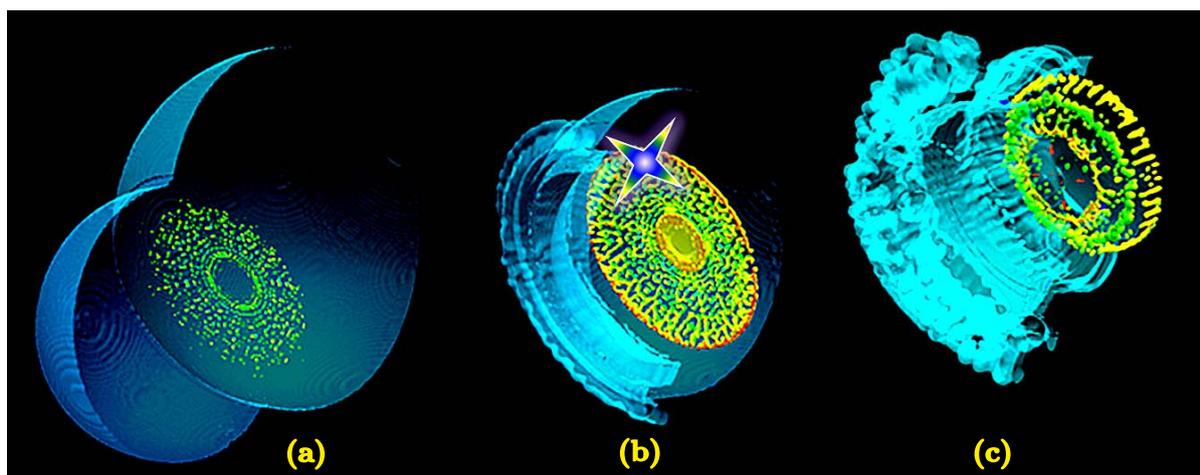


Рис. 1. Этапы процесса соударения молекулярных облаков: (а) начало взаимного проникновения облаков; (б) формирование сжатых слоёв и их фрагментирование в виде уплотнённых сгустков газа; (с) формирование возможных гравитационно-замкнутых предзвездных областей

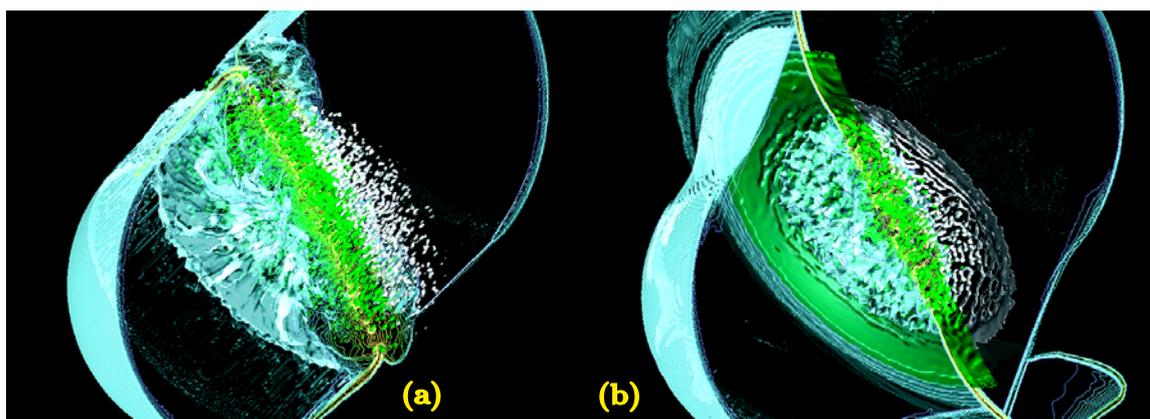


Рис. 2. Распределение контрастности плотности газа (изоповерхности  $\chi = 2$  и  $70000$ ) в области контактной поверхности торможения ( $|U| = 0$ ): (а) прямое соударение молекулярных облаков; (б) соударение вращающихся облаков. Время эволюции — порядка полутора миллионов лет

На третьем этапе столкновения происходит формирование качественно новой структуры уплотнённого вихреобразования, с появлением в центральной зоне линзообразного ядра основного сжатия газа и большого количества сгустков и вытянутых филамент — газовых образований с наибольшей плотностью, достигаемой в процессе эволюции.

На этом этапе возникают наиболее уплотнённые зоны с потенциально возможным предзвездным состоянием вещества, с появлением наиболее плотных сгустков газа. В этих образованиях возможен непредсказуемый гравитационный коллапс газа — молекулярного водорода, с возможным зарождением звёзд. Временной промежуток третьего этапа составляет (оценочно) одну пятую от общего времени эволюции возникающих и изменяемых в пространстве вихревых газовых структур. На заключительном этапе идёт динамичное уменьшение плотности газа в остатках фрагментов облаков, которые уносятся расходящимися после удара потоками газа.

Возникающую структуру сгущений в ядре удара для критического момента третьего этапа можно увидеть на рис. 2, где приводится иллюстрация распределения полей плотности для случаев лобового удара молекулярных облаков без закрутки и с закруткой. Влияние вращения облаков на картину их соударения на разных этапах коллизии, при разных условиях, разнится в деталях. Общим является то, что крутка ведёт к увеличению диаметров условных внешних границ сталкивающихся облаков. В центре столкновительной зоны ядра уплотнённых образований формируются сгустки газа эллиптической формы. На некотором удалении от оси вращения возникают кольцеобразные зоны с филаментами, вытянутая форма которых повторяет формируемые спиралеобразные траектории потоков газа на поверхностях ядра столкновения. Сгущения и филаменты имеют противоположное направление движения при набегании встречных потоков, отражающее распределение тангенциальной компоненты скорости потоков газа вокруг оси вращения.

Характерным является различное распределение сгущений газа и филамент в линзоподобной области между набегающими туманностями. При вращении облаков эта зона более компактна. Величина газового уплотнения в сгустках, получивших вращательное движение, характеризуется несколько более высокими значениями плотности, чем в случае прямого соударения. Основной причиной локального повышения плотности в сгустках является осциллирующий характер изменения скоростных полей в зоне ударного контакта облаков. При внедрении вещества облаков друг в друга газовые потоки здесь получают скоростное и плотностное пространственное распределение волнообразного вида. На рис. 3 это характерное движение газа иллюстрируется показом локального обтекания возникающих сгустков газа в радиально расширяемых кольцевых областях.

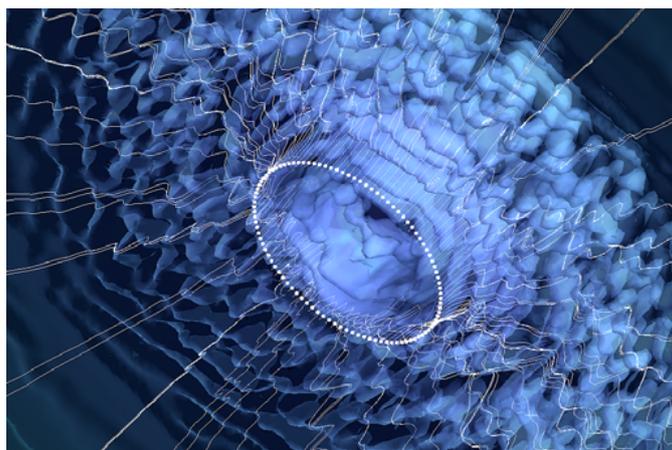


Рис. 3. Волнообразная структура распределения плотности газа и линии отмеченных частиц струйного течения внутри ядра соударения для вращающихся облаков на момент  $t = 1.2$  миллиона лет

Характерно спиральное распространение газовых струй от облаков, набегающих слева и справа. В ядре столкновения возникает сложная ударно-волновая структура замкнутых сгущений газа, что в итоге приводит к возникновению резкого локального возрастания плотности

молекулярного газа в зонах встречного течения в точках с максимальным локальным стоком газа.

Анализ полученных результатов моделирования показал, что в основном они хорошо коррелируют с результатами других работ в этой области вычислительной астрофизики. В частности, подобная схема начала формирования протозвёздных областей, как результата коллизии галактических объектов, обсуждалась в работах [16, 17], где дано детальное гидродинамическое описание этого процесса в двухмерном приближении, при других размерных значениях параметров. Эволюция и преобразование формы облаков в этих работах качественно совпадают с проведёнными исследованиями.

Вращение молекулярных облаков приводит к выносу газа на границы новых формообразований и одновременно к частичному радиальному смещению более уплотнённых сгустков в центральной зоне столкновения. Закрутка отражается в спиралевидном распределении новых уплотнённых фрагментов, формировании гофрированной структуры ядра и появлении стохастически распределённых колебаний плотности на внешних границах новообразований.

В расчётах соударений облаков по разным сценариям столкновения (с круткой и без неё) с центральным ударом и со смещением взаимодействия были выявлены различные вихревые и волнообразные образования во внутренних и внешних областях взаимопроникающих облаков. Эти особенности течений возникают при появлении неустойчивости Кельвина — Гельмгольца (КНГ) у внешних слоёв облаков при смещении пограничных слоёв газовых струй и в ядре столкновения облаков от возникающей нелинейной неустойчивости тонкой оболочки (NTSI) [9–11] в слоях с ударно-волновым разрывным изменением плотности газовых сгущений на внутренних границах.

На рис. 4 представлено одно из таких волновых вихреобразований, выявленное в одном из вариантов сценария центрального соударения облаков различного диаметра. Существование подобных волн на границах молекулярных облаков было проанализировано при обработке явлений галактического масштаба в [18, 19]. Авторы этих работ предполагают, что гидродинамическая неустойчивость является причиной мелкомасштабной (порядка 0.1 парсека) турбулентности и хаотического перемешивания вещества в межзвёздной среде. Эти наблюдения волнообразной структуры в туманности Ориона были интерпретированы как признак КНГ неустойчивости, возникающей во время расширения туманности, когда газ в облаке, нагретый и ионизированный массивными звёздами, обдувается ранее возникшим молекулярным газом.

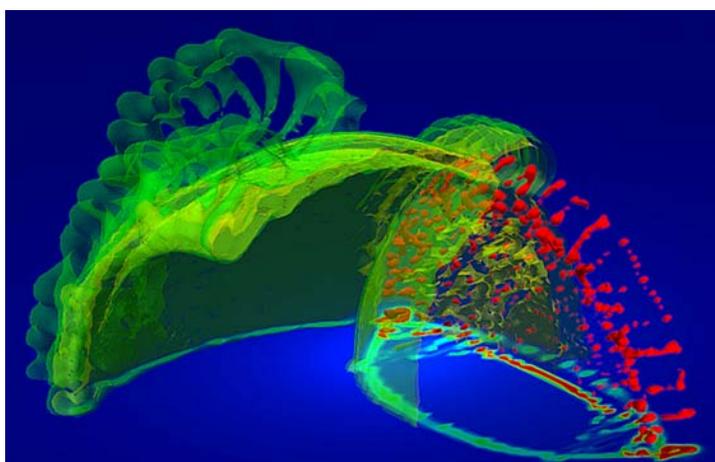


Рис. 4. Формирование волновых вихреобразований при изменении плотности и скорости газа сталкивающихся облаков на их границе с межзвёздным пространством; проявление КНГ неустойчивости

Признаки NTSI неустойчивости в линзовидных ядрах соударения облаков наблюдались во всех расчётах проведённого вычислительного эксперимента. Наиболее ярко они проявлялись в расчётах соударения вращающихся молекулярных облаков.

Серия вычислений взаимного столкновения молекулярных облаков, как без вращения, так и с вращением, позволила определить условия достижения максимальной плотности газа в отдельных точках распадающегося ядра столкновения на этапе условного «разрыва» оболочки облака, приходящего справа, согласно приведённой на рис. 1 схемы. Эти сгущения могут находиться в разных местах, большая их часть находится в концентрических кольцевых образованиях в линзоподобном ядре столкновения.

Для выявления потенциальных областей с предзвездной высокой плотностью газа использовались предположения, что в этих зонах отрицательное значение дивергенции скоростного поля может быть связано с пространственным распределением массы газа и предельными значениями контраста плотности в ограниченных объёмах сгустков газа. В модификации вычислительной программы предусмотрено выделение таких областей и включённых сгущений в отдельные кластеры с проверкой, являются ли они гравитационно-связанными областями. Вычисляются масса, энергия и поле скоростей в окрестности выделенных сгущений. Проверяется выполнение критерия устойчивости Jeans и условий теорема вириала. При отсутствии достаточно сильных внешних воздействий полученные данные позволяют определить, смогут ли силы гравитации сжать эти газовые объекты и превратить их в звезду. Примером использования данного метода является вычислительный код SEREN [20], где для моделирования коллизий астрономических объектов, с учётом гравитационного взаимодействия, используется метод частиц SPH.

В настоящей работе методика определения потенциальных предзвездных зон проверялась на эмпирическом уровне при обработке данных в системе визуализации HDVIS. Иллюстрация обработки данных для одного из моментов развития коллизии сталкивающихся облаков с противоположной закруткой приводится на рис. 5. Границы образования возможной предзвездной зоны отмечены пунктиром. Проведённый расчёт данного варианта соударения молекулярных облаков показал, что в результате этой коллизии возможно образование зон с плотностью газа порядка  $\rho = 10^{-20} - 10^{-19} \text{ г/см}^3$ , что соответствует условиям начала образования протозвёздных зон.

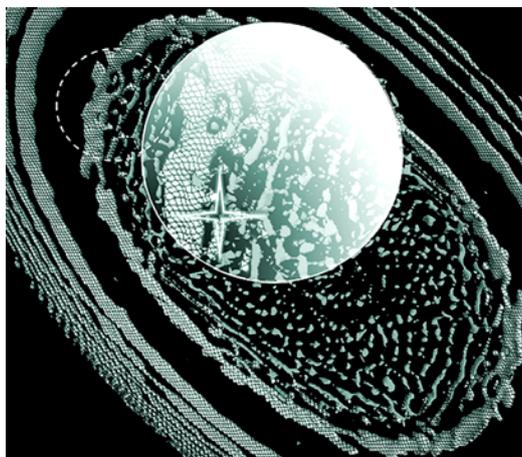


Рис. 5. Поиск расположения стоков течений газа по значениям дивергенции скоростного поля пространственных областей, содержащих сгущения газа с максимально наблюдаемой плотностью

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гетерогенные технологии OpenACC и Coarray Fortran, реализованные на вычислительных системах с CPU и GPU процессорами, были протестированы и проверены в вычислительном эксперименте при решении задач гравитационного коллапса и образования гравитационно связанных фрагментированных областей молекулярного газа, возникающих при столкновениях вращающихся молекулярных облаков в межзвёздной среде. Моделирование позволило уточнить динамику процессов турбулизации сталкивающихся туманностей и структурного изменения остатков сгустков вещества и филамент. Выявлены последствия влияния гидродинамической неустойчивости NTSI и Кельвина — Гельмгольца на изменение формы и распределение сгустков и филамент на разных этапах эволюции облачных структур. Моделирование позволило проверить выполнение газодинамических условий достижения критической плотности газа во фрагментированных скоплениях, соответствующих уровню начала потенциальной дозвёздной консолидации межзвёздного вещества.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Dobbs C.L., Krumholz M.R., et al.* Formation of molecular clouds and global conditions for star formation // *Protostars & Planets VI*. 2014. P. 3–26.
2. *Li G.X., Wyrowski F., Menten K.* Revealing a spiral-shaped molecular cloud in our galaxy: Cloud fragmentation under rotation and gravity // *Astronomy & Astrophysics*. 2017. V. 598. Article 96.
3. *Skinner M.A., et al.* FORNAX: A flexible code for multiphysics astrophysical simulations *astrophys J. Suppl. Ser.* 2019. N 241. P. 7.
4. RAMSES; <https://www.ics.uzh.ch/teyssier/ramses/RAMSES.html>
5. *Vazquez-Semadeni E., et al.* Molecular cloud evolution. II. From cloud formation to the early stages of star formation in decaying conditions // *Astrophys. J.* 2007. N 657. P. 870–883.
6. Star Formation Triggering by Cloud-Cloud Collision // *Publ. Astronom. Soc. Japan*. 2018. V. 70, N SP2.
7. *Parkin E.R., Pittard J.M.* Numerical heat conduction in hydrodynamical models of colliding hypersonic flows // *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* 2010. N 406. P. 2373–2385.
8. *Folini D., Walder R.* Supersonic turbulence in shock-bound interaction zones I. Symmetric settings // *Astronomy & Astrophysics*. 2006. N 459. P. 1–19.
9. *McLeod A.D., Whitworth A.P.* Simulations of the non-linear thin shell instability // *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* 2013. N 431. P. 710–721.
10. *Calderon D. et al.* Three-dimensional simulations of clump formation in stellar wind collision // *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* 2020. N 493. P. 447–467.
11. *Vishniac E.T.* Nonlinear instabilities in shock-bounded slabs // *Astrophys. J.* 1994. N 428. P. 186–208.
12. *Wolfe M.* The OpenACC applications programming interface. Version 2.0., PGInsider. Technical News from PGI, 2013.
13. Coarray FORTRAN documentation: <https://software.intel.com/content/www/us/en/develop/documentation/fortran-compiler-coarray-tutorial/top.html>
14. *Rybakin B., Goryachev V.* Modeling of density stratification and filamentous structure formation in molecular clouds after shock wave collision // *Computers and Fluids*. 2018. N 173. P. 189–194.
15. *Rybakin B., Goryachev V.* Parallel algorithms for astrophysics problems // *Lobachevskii J. Math.* 2018. V. 39, N 4. P. 562–570.
16. *Habe A., Ohta K.* Gravitational instability induced by a cloud-cloud collision: the case of head-on collision between clouds with different sizes and densities // *Publ. Astronom. Soc. Japan*. 1992. V. 44. P. 203–226.
17. *Kimura T., Tosa M.* Collision of clumpy molecular clouds // *Astronomy & Astrophysics*. 1996. N 308. P. 979–987.

18. *Berne O, Marcelino N., Cernicharo J.* Waves on the surface of the Orion molecular cloud // *Nature Lett.* 2010. V. 466, N 7309. P. 947–949.
19. *Berne O., Matsumoto Y.* The Kelvin–Helmholtz instability in Orion: A source of turbulence and chemical mixing // *Astrophys. J. Lett.* 2012. V. 761, N L4. P. 1–5.
20. *Hubber D., Batty C., McLeod A., Whitworth A.* SEREN — a new SPH code for star and planet formation simulations. Algorithms and test // *Astronomy & Astrophysics.* 2011. N 529. P. 1–27.

UDC 524.5:519.677

**SIMULATION OF THE COLLISION DYNAMICS OF MOLECULAR CLOUDS USING HETEROGENEOUS SYSTEMS**© 2023 B. P. Rybakin<sup>1a</sup>, V. D. Goryachev<sup>2b</sup><sup>1</sup>*Scientific Research Institute for System Analysis (SRISA RAS),  
pr. Nachimovskij 36, Moscow 117218, Russia,*<sup>2</sup>*Tver State Technical University,  
naberezhn. A. Nikitina 22, Tver 170026, Russia*E-mails: <sup>a</sup>rybakin@vip.niisi.ru, <sup>b</sup>gdv.vdg@yandex.ru

Received 21.08.2022, revised 21.08.2022, accepted 29.09.2022

**Abstract.** The paper presents the results of computer simulation of the collision of rotating molecular clouds in the interstellar medium. As the matter is compressed in the cloud collision region, the gas density increases here, the Jeans wavelength decreases, which leads to a change in the shape and fragmentation of clouds and their remnants. The density of gas in these clumps increases by many orders of magnitude, gravitationally bound regions arise with the possible formation of star clusters in these zones. The process of star origination is accompanied by complex spatial and temporal transformations of interstellar gas, determined by the nonlinear interaction of the turbulence of the medium, gravity, changes in the distribution of the magnetic field and radiation at the prestellar stage of evolution. The rotation of molecular clouds has a great influence on the ongoing processes. The effects of rotation in the modeling of collision processes began to be taken into account in simulation relatively recently. The evolution of pre-stellar regions, from the time they originate in high energy streams to the time they reach protostellar density, spans a huge range of scales, leading to a major computational problem in numerical simulation. Modeling of such astrophysical processes on ultra-high-resolution computational grids requires a significant increase in computer power with the organization of parallel computing on heterogeneous systems.

**Keywords:** computational astrophysics, molecular cloud collision, fragmentation of new formations, parallel programming.

DOI: 10.33048/SIBJIM.2023.26.114

## REFERENCES

1. Dobbs C.L., Krumholz M.R., et al. Formation of molecular clouds and global conditions for star formation. *Protostars & Planets VI*, 2014, pp. 3–26.
2. Li G.X., Wyrowski F., Menten K. Revealing a spiral-shaped molecular cloud in our galaxy: Cloud fragmentation under rotation and gravity. *Astronomy & Astrophysics*, 2017, Vol. 598, article 96.
3. Skinner M.A., et al. FORNAX: A flexible code for multiphysics astrophysical simulations. *astrophys. J. Suppl. Ser.*, 2019, No. 241, pp. 7.
4. RAMSES; <https://www.ics.uzh.ch/teyssier/ramses/RAMSES.html>
5. Vazquez-Semadeni E., et al. Molecular cloud evolution. II. From cloud formation to the early stages of star formation in decaying conditions. *Astrophys. J.*, 2007, No. 657, pp. 870–883.
6. Star Formation Triggering by Cloud-Cloud Collision. *Publ. Astronom. Soc. Japan*, 2018, Vol. 70, No. SP2.
7. Parkin E.R., Pittard J.M. Numerical heat conduction in hydrodynamical models of colliding hypersonic flows. *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.*, 2010, No. 406, pp. 2373–2385.

8. Folini D., Walder R. Supersonic turbulence in shock-bound interaction zones I. Symmetric settings. *Astronomy & Astrophysics*, 2006, No. 459, pp. 1–19.
9. McLeod A.D., Whitworth A.P. Simulations of the non-linear thin shell instability. *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.*, 2013, No. 431, pp. 710–721.
10. Calderon D. et al. Three-dimensional simulations of clump formation in stellar wind collision. *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.*, 2020, No. 493, pp. 447–467.
11. Vishniac E.T. Nonlinear instabilities in shock-bounded slabs. *Astrophys. J.*, 1994, No. 428, pp. 186–208.
12. Wolfe M. The OpenACC applications programming interface. Version 2.0., PGInsider. Technical News from PGI, 2013.
13. Coarray FORTRAN documentation:  
<https://software.intel.com/content/www/us/en/develop/documentation/fortran-compiler-coarray-tutorial/top.html>
14. Rybakin B., Goryachev V. Modeling of density stratification and filamentous structure formation in molecular clouds after shock wave collision. *Computers and Fluids*, 2018, No. 173, pp. 189–194.
15. Rybakin B., Goryachev V. Parallel algorithms for astrophysics problems. *Lobachevskii J. Math.*, 2018, Vol. 39, No. 4, pp. 562–570.
16. Habe A., Ohta K. Gravitational instability induced by a cloud-cloud collision: the case of head-on collision between clouds with different sizes and densities. *Publ. Astronom. Soc. Japan*, 1992, Vol. 44, pp. 203–226.
17. Kimura T., Tosa M. Collision of clumpy molecular clouds. *Astronomy & Astrophysics*, 1996, No. 308, pp. 979–987.
18. Berne O, Marcelino N., Cernicharo J. Waves on the surface of the Orion molecular cloud. *Nature Lett.*, 2010, Vol. 466, No. 7309, pp. 947–949.
19. Berne O., Matsumoto Y. The Kelvin–Helmholtz instability in Orion: A source of turbulence and chemical mixing. *Astrophys. J. Lett.*, 2012, Vol. 761, No. L4, pp. 1–5.
20. Hubber D., Batty C., McLeod A., Whitworth A. SEREN — a new SPH code for star and planet formation simulations. Algorithms and test. *Astronomy & Astrophysics*, 2011, No. 529, pp. 1–27.