



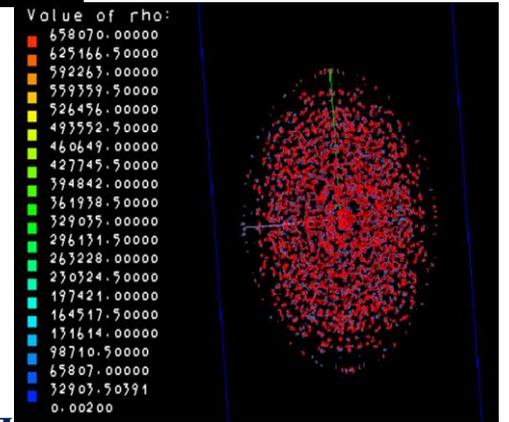
Компьютерное моделирование распространения нерелятивистских джетов на многопроцессорных ЭВМ

Б.П. Рыбакин, Г.В. Секриеру

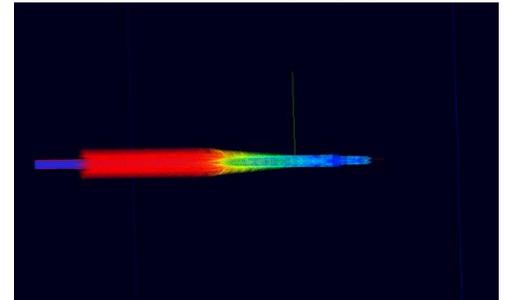
В работе представлены результаты моделирования формирования и распространения осесимметричных потоков, которые возникают около коллапсирующих астрофизических объектов - протозвезд и молодых звездных систем (YSO - Young Stellar Objects).



- При столкновениях МО возникают чрезвычайно плотные, гравитационно связанные области (clumps) [1]. Гравитационное сжатие таких объектов формирует протозвезды, в которых, при дальнейшем сжатии, могут начинаться термоядерные реакции и образоваться новые звезды.
- Моделирование показывает, что при формировании протозвезды внутри гравитационно нестабильного ядра аккрецирующий газ коллапсирующей оболочки приводит к образованию вращающегося околозвездного диска.
- В это же время, из протозвездного диска выбрасывается быстро движущееся коллимированное струи вещества - джеты. Наши расчеты показывают, что практически каждое ядро подвергается множественным взаимодействиям с другими ядрами на протяжении времени своего существования, до окончательного формирования YSO.
- Такой выброс вещества протозвезды в виде струй (джетов) является одним из недостаточно исследованных процессов.



Протоядра, возникающие при соударении МО



Поле скоростей джета, распространяющегося внутри МО

1. Boris Rybakin. Formation of prestellar regions in collisions of molecular clouds simulations on heterogeneous computers. *Acta Astronautica*, v. 204, pp 926-932, (2023)

Параллельный алгоритм

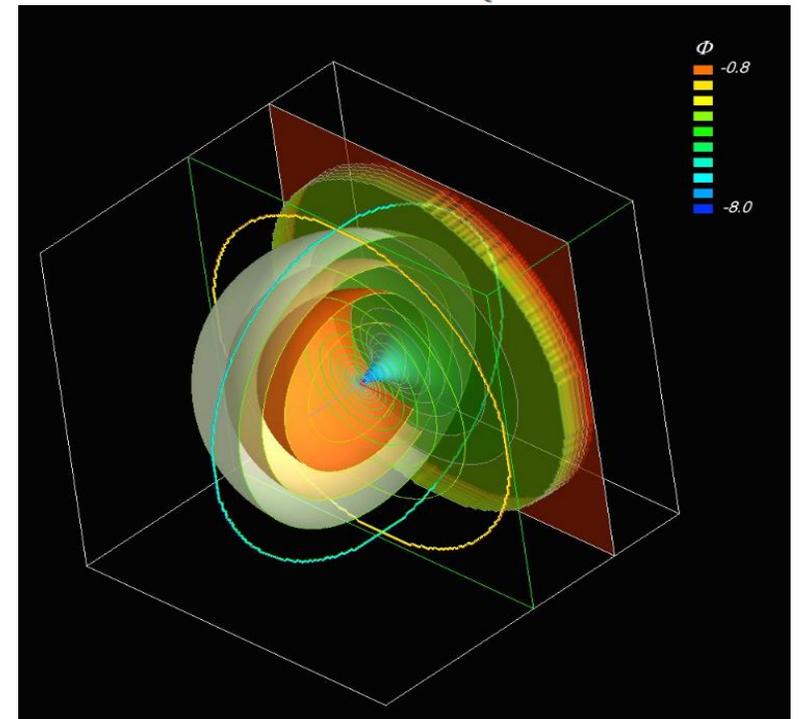
Для моделирования таких задач были построены параллельные алгоритмы распараллеливания на CPU и GPU [2]. С помощью этих алгоритмов было проведено численное моделирование астрофизических процессов в трехмерной постановке. Для решения уравнений Эйлера и Пуассона использовался метод адаптивного уточнения сетки (AMR). Для проверки кода было проведено тестирование, в котором было промоделировано гравитационное сжатие и проведено сравнение с аналитическими решениями. Использовались данные о распределении плотности вещества в трехмерном шаре радиуса R , в котором плотность распределена следующим образом: $\rho(r) = \begin{cases} \frac{\rho_c}{1 + (r/r_c)^2}, & \text{if } r \leq R, \\ 0 & \text{if } r > R. \end{cases}$ Было проведено сравнение численного [2] и аналитического [3] решений уравнения Пуассона.

$$\Phi(r) = \begin{cases} 4\pi G\rho_c r_c^2 \left[\frac{\arctan(r/r_c)}{r/r_c} + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1 + (r/r_c)^2}{1 + (R/r_c)^2}\right) - 1 \right] & \text{if } r \leq R, \\ -4\pi G\rho_c (r_c^3/r) [R/r_c - \arctan(R/r_c)] & \text{if } r > R. \end{cases}$$

$$\nabla\Phi(r) = \frac{GM(r)}{r^2} = \begin{cases} 4\pi G\rho_c (r_c^3/r^2) [r/r_c - \arctan(r/r_c)] & \text{if } r \leq R, \\ 4\pi G\rho_c (r_c^3/r^2) [R/r_c - \arctan(R/r_c)] & \text{if } r > R. \end{cases}$$

2. Rybakin B.P., Goryachev V.D. *Heterogeneous Computing Systems in Problems of Modeling Filaments Formation and Pre-stellar Objects*. *Journal of Supercomputing* (2022), Springer, pp.127-139

3. Stone J.M., Norman M.L. *A Radiation Magnetohydrodynamics Code for Astrophysical Flows in Two Space Dimensions. I: The Hydrodynamic Algorithms and Tests*. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 80, 753-790 (1992).



Постановка задачи

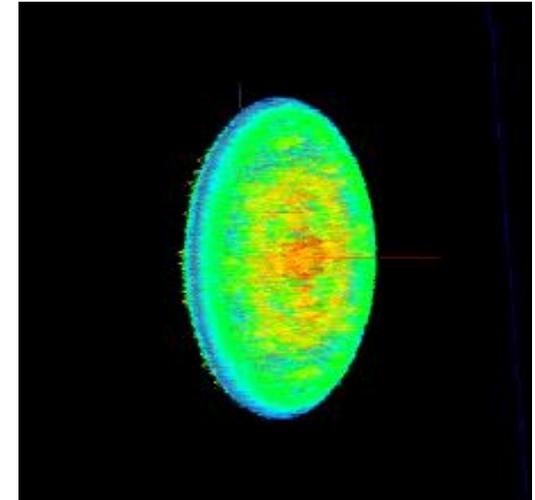
Возникающее движение описывается системой уравнений идеальной магнитной гидродинамики, которая описывает движение сжимаемой проводящей жидкости под действием сил гравитации и магнитных полей. В данной системе уравнений не учитываются диссипативные процессы, то есть принимается, что жидкость не обладает вязкостью.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \rho \mathbf{v} - \mathbf{b} \mathbf{b} + \nabla P_{\text{tot}}) = -\rho \nabla \Phi$$

$$\frac{\partial(E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{v}(E + P_{\text{tot}}) - \mathbf{b}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{b})] = -\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \Phi$$

$$\frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{b}) = 0$$



Уравнения представляют собой законы сохранения массы, количества движения, энергии и магнитного поля соответственно. Здесь ρ – плотность, \mathbf{v} – вектор скорости, $E = \rho e + \rho v^2/2 + b^2/2$ – полная энергия, которая представляет собой сумму внутренней, кинетической и магнитной энергии. Давление $P_{\text{tot}} = p + b^2/2$ – сумма давлений газа и магнитного поля.

Часто наблюдаемым признаком рождения новой звезды является образование биполярного потока молекулярного газа (jets). Это явление начинается на ранней протозвездной фазе накопления звездной массы.



Протозвездные джеты характеризуются высокими числами Маха, имеют большую плотность по сравнению с окружающей средой и сильно охлаждаются радиационным путем. Численные модели можно использовать для интерпретации наблюдений протозвездных струй с высоким разрешением. В таких процессах преобладает сверхзвуковая турбулентность [4].

В данной работе используется собственный адаптивный магнитогидродинамический код, основанный на методах Годунова высокого порядка точности. Возникающее движение описывается системой трехмерных уравнений Эйлера с учетом гравитации. Начальная масса молекулярного облака $M = 15,214 M_{\odot}$, радиус $R = 1,73$ парсек.

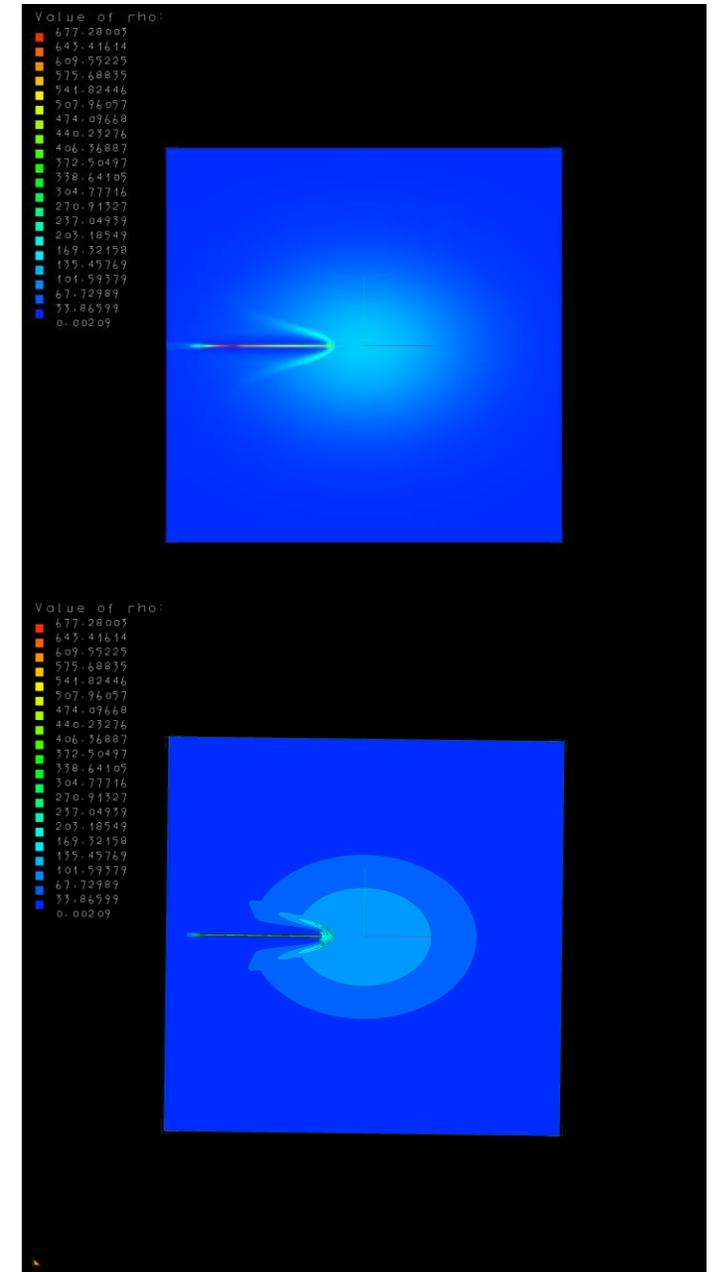
[4] Ralf S. Klessen, J. Ballesteros-Paredes. Graviturbulent Fragmentation. (2004), arXiv:astro-ph/0402038, <https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/0402038>

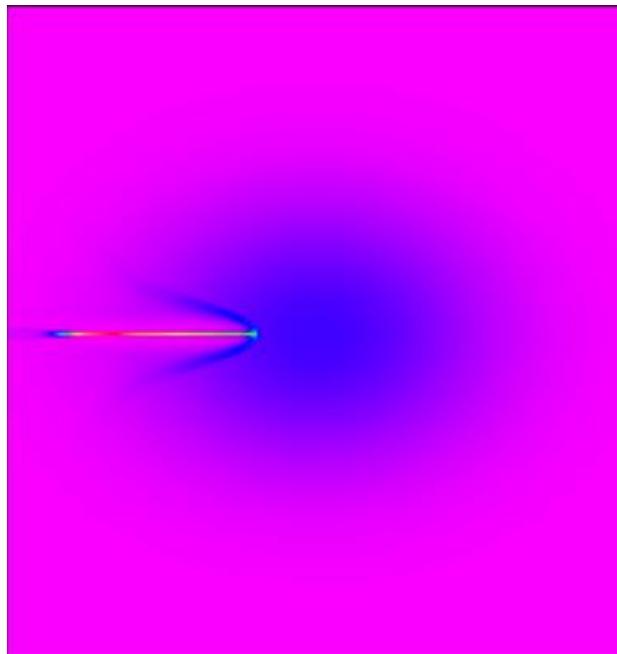
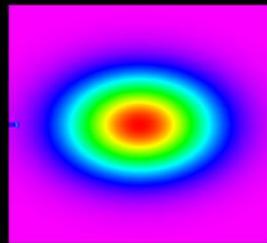
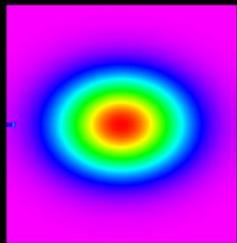
Взаимодействие джета с эллиптическим МО

В работе моделируется идеально коллимированная струя. Возникающее движение описывается системой уравнений идеальной магнитной гидродинамики, которая описывает движение сжимаемой проводящей жидкости под действием сил гравитации и магнитных полей. В системе уравнений не учитываются диссипативные процессы, то есть принимается, что жидкость не обладает вязкостью. Численно исследуется взаимодействие джета со сферическим и эллиптическим молекулярными облаками, у которых плотность распределена по радиусу по заданным законам.

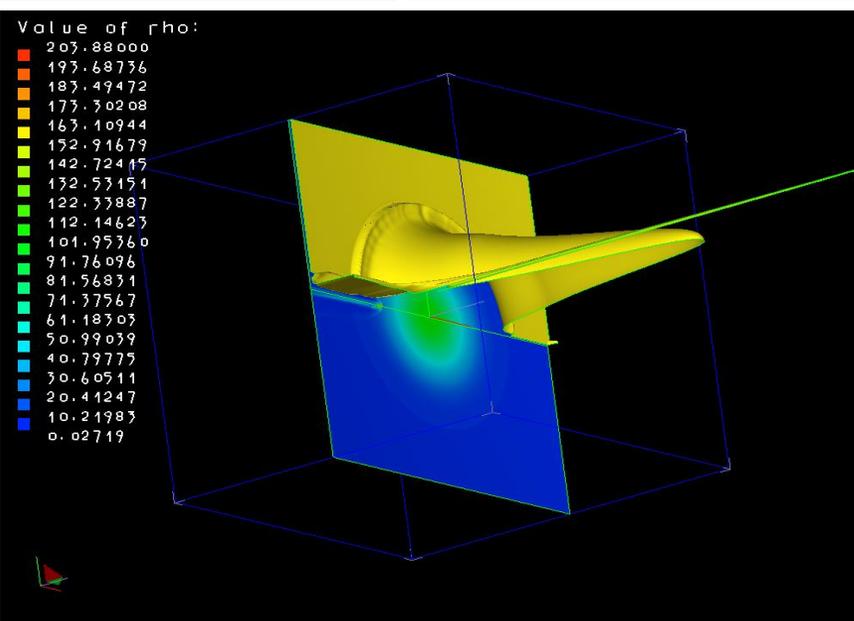
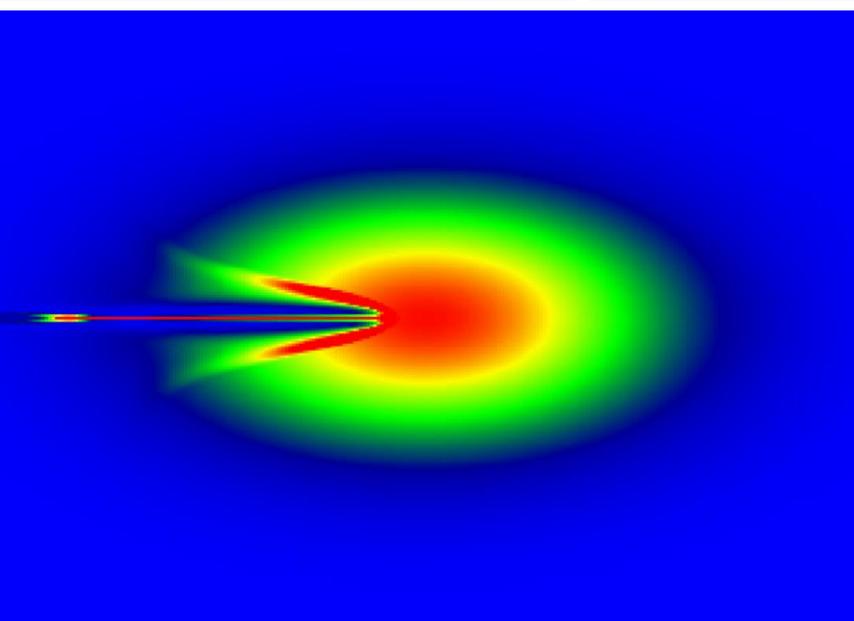
Были проведены расчеты образования и выброса нерелятивистского джета из протозвезды, а также взаимодействие джета с молекулярным облаком [5]. На рисунке справа начальная стадия проникновения джета в эллиптическое молекулярное облако. Плотность в зоне соударения на этот момент времени повышается более чем на порядок.

5. Rybakin B. Dynamic evolution and morphological analysis of supersonic turbulence arising during the collision of prolate and spherical clouds. *Acta Astronautica*, Pergamon Press Ltd. (2024), V.215, pp. 325-332





На графиках представлены последовательные стадии взаимодействия джета с МО. Нижний правый рисунок – протозвездный джет в Carina Nebula и его взаимодействие с окружающим МО и формирующимися протозвездами (Spitzer Space Telescope).



Выводы

1. Проведенные расчеты показали, что в результате соударения МО формируются плотные, гравитационно связанные области, плотность в которых повышается на 6 порядков и достигает предзвездной плотности.

Спасибо за внимание

2. Эти объекты начинают коллапсировать и на последних стадиях формирования протозвезды образуются джеты, которые уносят до 10% массы протозвезды.

3. За фронтом ударной волны возникает неустойчивость Рихтмайера-Мешкова, и начинает развиваться неустойчивость Кельвина-Гельмгольца.

