

МГД-МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ВОЛОКОН

И. М. Султанов¹, С. А. Хайбрахманов^{1,2}

¹Челябинский государственный университет, ²Уральский федеральный университет

В работе выполняется численное магнитогазодинамическое (МГД) моделирование гравитационного коллапса цилиндрического молекулярного облака с помощью кода FLASH. В расчетах с магнитным полем и без магнитного поля на концах облака формируются ядра с концентрациями $n \approx 1.3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ и $3.7 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ соответственно. Ядра передвигаются к центру со скоростью $v \approx 5.5 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$, их размеры вдоль радиуса и оси волокна составляют соответственно 0.16 и 0.05 пк для случая с магнитным полем, 0.06 и 0.05 пк для случая без магнитного поля. Скорости ядер в обоих случаях совпадают, так как магнитное поле является продольным и не влияет на сжатие вдоль цилиндра. Получаемые скорости ядер согласуются с наблюдаемыми значениями в волокнах.

MHD MODELING OF THE MOLECULAR FILAMENT EVOLUTION

I. M. Sultanov¹, S. A. Khaibrakhmanov²

¹Chelyabinsk State University, ²Ural Federal University

We perform numerical magnetohydrodynamic (MHD) simulations of gravitational collapse of cylindrical molecular cloud with the help of the code FLASH. In simulations with magnetic field and without it, cores are formed at the edges of cloud with densities $n \approx 1.3 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ and $3.7 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ respectively. Cores are moving toward cloud center with velocity $v \approx 5.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, in simulations with magnetic field core sizes along radius and filament axis are 0.16 and 0.05 pc respectively, while in simulations without magnetic field core sizes are 0.06, 0.05 pc. Cores velocities are coincide in both cases, because of magnetic field that is parallel and has no effect on collapse alongside of cylinder. Core velocities are correlated with observational data in filaments.

Введение

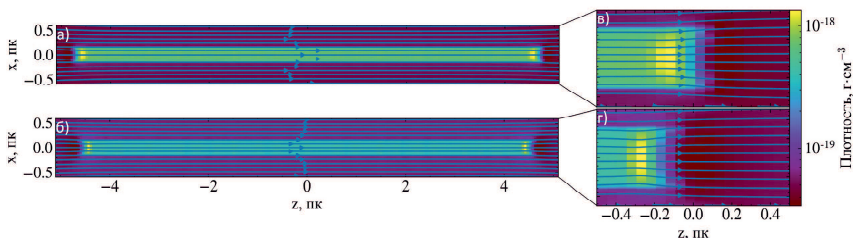
Согласно современным представлениям, образование звезд происходит в ядрах молекулярных облаков. На картах излучения молекулярные облака зачастую проявляются как вытянутые структуры — волокна. Наблюдения показывают, что характерная ширина волокон составляет порядка 10^{-1} пк, а длина варьируется от нескольких парсек до нескольких сотен парсек. Температура в волокнах составляет 10–25 K. Молекулярные волокна обладают крупномасштабным упорядоченным магнитным полем интенсивностью 10^{-4} Гс [1]. В облаках с лучевой концентрацией $N_{H_2} < 9.3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ геометрия магнитного поля является продольной, тогда как при $N_{H_2} \geq 4.6 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ геометрия магнитного поля является перпендикулярной волокну [2].

Выделяют разные механизмы образования ядер в облаках: гравитационная неустойчивость в цилиндрах [3] и коллапс с конца (*end-dominated collapse* в англоязычной литературе), когда на концах изолированного цилиндра образуются движущиеся плотные сгустки [4]. Характеристики образующихся ядер до сих пор детально не изучены, поэтому численное магнитогазодинамическое (МГД) моделирование гравитационной фрагментации молекулярных облаков до сих пор является актуальным.

Модель

В работе моделируется гравитационный коллапс цилиндрического молекулярного облака (волокна), длиной $h_0 = 10$ пк и радиусом $r_0 = 0.2$ пк. Молекулярный вес газа $\mu = 2.31$, температура $T = 10$ K, показатель адиабаты $\gamma = 5/3$, концентрация $n = 10^5$ см $^{-3}$. Магнитное поле направлено вдоль цилиндра и имеет интенсивность $B = 1.9 \cdot 10^{-4}$ Гс, что соответствует отношению энергии магнитного поля к модулю гравитационной энергии $\epsilon_m = 0.03$. Волокно находится в равновесии по давлению с внешней средой с концентрацией и температурой $n = 10^4$ см $^{-3}$ и $T = 100$ K. Характерное время свободного падения для выбранной плотности составляет $t_{ff} \approx 1.1 \cdot 10^5$ лет.

Гравитационный коллапс моделируется с помощью численного кода FLASH 4 [5], использующего технологию адаптивно-встраиваемых сеток (AMR). В коде уравнения идеальной МГД решаются кусочно-параболическим методом гудуновского типа. Рассматривается трехмерная постановка задачи. Гравитационный потенциал находится с помощью древесного алгоритма Барнса — Хата.



Распределение плотности и линий магнитного поля волокна в плоскости $x - z$ в МГД-расчете в момент времени $t = 1.1 t_{ff}$ (панель а), $t = 1.6 t_{ff}$ (панель б). На панелях в и г показаны увеличенные участки волокна в области формирующихся ядер

Результаты

Для исследования роли магнитного поля в эволюции волокон проведены два расчета: без магнитного поля (ГД) и с магнитным полем (МГД).

На рисунке представлены срезы плотности газа в плоскости $x - z$ в моменты времени $t = 1.1 t_{ff}$ (панель а) и $t = 1.6 t_{ff}$ (панель б) для МГД-расчета. Рисунок показывает, что на краях цилиндра выделяются плотные ядра, которые с течением времени перемещаются к центру облака со скоростью $v_z \approx 5.2$ км·с $^{-1}$. В ГД-расчете ядра перемещаются к центру облака со скоростью $v_z \approx 5.7$ км·с $^{-1}$.

Размеры ядер вдоль осей x и z , концентрация n и скорость v_z вдоль оси z для МГД и ГД расчетов приведены в таблице. Таблица показывает, что в случае магнитного поля ядра сплюснуты вдоль направления магнитного поля, то есть представляют собой диски, тогда как в случае без магнитного поля ядра имеют почти сферическую форму.

Заключение и обсуждение

Расчеты показывают, что сжатие волокон вдоль оси естественным образом приводит к образованию плотных сгустков на концах волокна, которые с течением времени передвигаются к центру облака.

Характеристики формирующихся ядер

t , t_{ff}	Название расчета	d_x , пк	d_z , пк	n см ⁻³	v_z км·с ⁻¹
1.12	МГД	0.14	0.05	$5.8 \cdot 10^5$	3.6
	ГД	0.03	0.1	$2.1 \cdot 10^7$	3.3
1.6	МГД	0.16	0.05	$1.3 \cdot 10^6$	5.2
	ГД	0.06	0.05	$3.7 \cdot 10^6$	5.7

Скорости ядер вдоль волокна являются почти идентичными для расчетов с магнитным полем и без. Однако размеры и плотности ядер не совпадают. В расчетах с магнитным полем ядра являются сплюснутыми вдоль направления магнитного поля, и их плотность примерно на порядок меньше плотностей в расчетах без магнитного поля. Указанные свойства ядер обусловлены тем, что магнитное поле параллельно волокну и поэтому не оказывает сильного влияния на сжатие вдоль цилиндра, однако оно препятствует сжатию вдоль радиуса цилиндра.

Скорости согласуются с наблюдаемыми значениями $v = [1, 5]$ км·с⁻¹ в волокне S242, в котором происходит аналогичный коллапс с конца. Для детального количественного сравнения характеристик образующихся ядер с наблюдаемыми необходимо проведение серии расчетов в широком диапазоне начальных параметров волокна

Работа С. А. Хайбрахманова выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2023-0019. Авторы благодарят рецензента за полезные комментарии.

Библиографические ссылки

- [1] *Dudorov A. E., Khaibrakhmanov S. A.* Hierarchical structure of the interstellar molecular clouds and star formation // *Open Astron.* — 2017. — Vol. 26. — P. 285–292.
- [2] *Woojin K., Pattle K., Sadavoy S., Hull C. L. H.* B-fields in Star-forming Region Observations (BISTRO): Magnetic Fields in the Filamentary Structures of Serpens Main // *Astrophys. J.* — 2022. — Vol. 926. — P. 1–13.
- [3] *Chandrasekhar S., Fermi E.* Problems of Gravitational Stability in the Presence of a Magnetic Field // *Astrophysical journal.* — 1953. — Vol. 118. — P. 116–141.
- [4] *Clarke S. D., Whitworth A. P.* Investigating the global collapse of filaments using smoothed particle hydrodynamics // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 449. — P. 1819–1825.
- [5] *Fryxell B., Olson K., Ricker P. et al.* FLASH: An Adaptive Mesh Hydrodynamics Code for Modeling Astrophysical Thermonuclear Flashes // *Astrophysical journal Supplement Series.* — 2000. — Vol. 131. — P. 273–334.