ЧИСЛЕННОЕ МГД-МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ВОЛОКОН

И. М. Султанов¹, С. А. Хайбрахманов^{2,1} ¹ Челябинский государственный университет, ² Санкт-Петербургский государственный университет

В работе исследуется эволюция цилиндрических молекулярных облаков (волокон). Рассматриваются волокна без магнитного поля и с продольным магнитным полем. Моделирование выполняется с помощью численного кода FLASH. В расчетах без магнитного поля облако, линейная масса которого больше или равна критической, быстро сжимается вдоль радиуса и фрагментации не происходит. В расчетах с линейной массой волокна меньше критической коллапс останавливается градиентом давления и на концах волокна образуются ядра с повышенной плотностью. В волокнах с продольным магнитным полем также происходит образование ядер на концах. Согласно полученным результатам ядра, наблюдаемые на концах молекулярных волокон, могут быть естественным результатом эволюции волокон с линейной массой, меньшей критической, или эволюции волокон с продольным магнитным полем.

NUMERICAL MHD SIMULATIONS OF THE MOLECULAR FILAMENT EVOLUTION

I. M. Sultanov¹, S. A. Khaibrakhmanov^{2,1} ¹Chelyabinsk State University, ²Saint-Petersburg State University

We study evolution of cylindrical molecular clouds (filaments). We consider clouds without magnetic field and with parallel magnetic field. The cloud rapidly collapses along it's radius without fragmentation in simulations with mass per unit length equal or great than the critical one. The radial collapse of the cloud is stopped by the pressure gradient in the simulations with linear mass that is less than the critical, and cores with high density form at the cloud's edges during further evolution. Cores also form in simulations with parallel magnetic field. According to our results, the cores observed at the edges of molecular filaments can be a result of the evolution of the filament with linear mass less than critical or with parallel magnetic field.

Введение

Согласно современным представлениям образование звезд происходит в ядрах молекулярных облаков. На картах излучения молекулярные облака проявляются как вытянутые структуры — волокна. Подобные волокна могут представлять собой либо цилиндрические облака, либо плоские слои молекулярного газа, видимые с ребра [1]. Наблюдения показывают, что характерная ширина волокон составляет порядка 10⁻¹ пк, а длина варьируется от нескольких пк до нескольких сотен пк. Температура волокон лежит в диапазоне от 10 до 25 K, а концентрация газа — от 10⁴ до 10⁵ см⁻³ [1].

Поляризационное картирование молекулярных облаков указывает на то, что они пронизаны крупномасштабным магнитным полем [2]. В разреженных облаках магнитное поле,

[©] Султанов И. М., Хайбрахманов С. А., 2024

как правило, направлено вдоль главной оси волокна, в плотных облаках — поперек. Согласно измерениям зеемановского расщепления линий ОН и оценкам с помощью метода Чандрасекара — Ферми установлено, что интенсивность магнитного поля волокон увеличивается с лучевой концентрацией N и лежит в диапазоне от 10^{-5} Гс для разреженных облаков с $N = 10^{19}$ см⁻² до 10^{-3} Гс для наиболее плотных волокон с $N = 10^{23}$ см⁻².

Звездообразование наблюдается в волокне S242, на концах которого находятся ядра плотностью порядка 10⁵ см⁻³ и размерами 1 пк [3]. Другим примером объекта, в котором наблюдаются признаки образования ядер, является волокно NGC 2024S/Orion B. Ядра в этом волокне имеют размер порядка 10⁻² пк и массы ~ 1 M_{\odot} [4]. Профиль скорости вдоль волокна имеет периодический характер с длиной волны $\lambda \sim 0.2$ пк.

Выделяют разные механизмы образования ядер в облаках: гравитационная неустойчивость в цилиндрах [5], коллапс с конца (end-dominated collapse в англоязычной литературе), когда на концах конечного изолированного цилиндра образуются движущиеся плотные сгустки [6].

Характеристики образующихся ядер до сих пор детально не изучены, поэтому численное магнитогазодинамическое (МГД) моделирование гравитационной фрагментации молекулярных облаков является актуальной задачей. Условия фрагментации волокон в значительной степени зависят от начальных характеристик облака [7]

Ранее Султанов и Хайбрахманов [8] исследовали влияние начальной интенсивности продольного магнитного поля на эволюцию волокна и характеристики образующихся ядер. Из проведенных расчетов было установлено, что продольное магнитное поле сдерживает коллапс волокна вдоль радиуса и приводит к образованию ядер на торцах облака. В данной работе исследуется влияние начальной линейной массы облака на динамику коллапса.

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 равен $\mu = 2.31$, температура газа T = 10 К, показатель адиабаты $\gamma = 1.001$. Соответствующая скорость звука $c_s = 0.19$ км/с. Волокно находится в равновесии по давлению с внешней средой, имеющей температуру T = 100 К.

Динамика волокон с точки зрения коллапса и фрагментации определяется значением линейной массы. Если линейная масса волокна, $M_L \equiv M/L$, превышает критическое значение $(M_L)_{crit} = \frac{2c_s^2}{G}$, то волокно начинает сжиматься вдоль радиуса [9]. Критическое значение линейной массы для выбранных параметров составляет $(M_L)_{crit} \approx 16.8 \ M_{\odot}/пк.$

Для исследования динамики волокна проведены серии расчетов с магнитным полем (МГД) и без магнитного поля (ГД). Начальная концентрация варьируется от $1.2 \cdot 10^3$ см⁻³

Расчет	n, cm^{-3}	m_L	$t_{ff},10^5$ лет	Магнитное поле	$B, \Gamma c$
ГД-1	10^{5}	40	1	Нет	0
ГД-2	$2.4\cdot 10^3$	1	8.9	Her	0
ГД-3	$1.2 \cdot 10^3$	0.5	6.3	Her	0
МГД-1	10^{5}	40	1	Параллельное	$2\cdot 10^4$
МГД-2	10^{5}	40	1	Параллельное	$6\cdot 10^4$

Начальные параметры расчетов

до 10^5 см⁻³, что соответствует отношению линейной массы к критической, m_L , в диалазоне от 0.5 до 40, интенсивность магнитного поля варьируется от 0 до $6 \cdot 10^4$ Гс (см. таблицу).

Для моделирования эволюции волокна используется численный код FLASH 4, в котором реализована технология адаптивно-встраиваемых сеток (AMR) [10]. В коде уравнения идеальной МГД решаются с помощью схемы MUSCL годуновского типа. Рассматривается трехмерная постановка задачи в декартовых координатах. Ось z соответствует оси симметрии волокна. Размеры расчетной области в направлениях $x \times y \times z$ составляют $1.93 \times 1.93 \times 12.9$ пк³, используется семь уровней вложенности AMR-сетки. Гравитационный потенциал находится с помощью древесного алгоритма Барнса — Хата.

Результаты

В расчетах ГД-1 и ГД-2 волокно свободно сжимается вдоль радиуса и к моментам времени t = 1.0 и $1.19 t_{\rm ff}$ соответственно плотность в центре волокон вырастает на три порядка, толщина волокна вдоль радиуса составляет 0.004 пк. Фрагментации волокна не происходит. В расчетах ГД-3, МГД-1, МГД-2 коллапс вдоль радиуса останавливается и на краях облака со временем выделяются плотные сгустки. Плотности образующихся на торцах волокна ядер в моменты времени t = 1.5, 1.28 и $1.9 t_{ff}$ равны $n = 8.5 \cdot 10^6, 1.7 \cdot 10^8$ и $2 \cdot 10^7$ см⁻³ соответственно. В указанных расчетах ядра передвигаются к центру облака со сверхзвуковыми скоростями $v_z = 0.57, 3.6$ и 5.3 км/с.

На рисунке приведено распределение плотности, линий магнитного поля и поля скоростей для расчетов ГД-3, МГД-1 и МГД-2 в области формирования ядер в моменты времени t = 1.5, 1.28 и 1.9 t_{ff} в плоскости x - z. В силу симметрии для примера показаны только ядра находящиеся на «левом» торце волокна. Наличие магнитного поля приводит к тому, что ядра сплющиваются вдоль направления магнитного поля.



Распределение плотности (цветовая заливка), поля скоростей (зеленые стрелки) и линий магнитного поля (черные линии со стрелками) в области формирования ядер для ГД и МГД расчетов

Заключение и обсуждение

В работе исследована эволюция молекулярных волокон с различной линейной массой. Определены условия фрагментации волокон и характеристики образующихся ядер.

В облаках без магнитного поля, в которых линейная масса больше или равна критической, фрагментации волокна и образования ядер не происходит. Если линейная масса меньше критической, коллапс вдоль радиуса сдерживается градиентом давления и к моменту времени $1.5 t_{ff}$ на концах волокна образуются плотные сгустки (ядра), которые передвигаются к центру облака. Выделение ядер происходит на концах волокна потому, что в этих областях гравитационный потенциал ближе к сферическому, чем вдали от концов, и соответственно сила тяжести при сжатии газа растет быстрее. Радиальное сжатие цилиндра всегда будет остановлено градиентом газового давления при $\gamma > 1$ (см. [1]).

В МГД-расчетах градиент магнитного давления препятствует коллапсу и приводит к затухающим колебаниям волокна вдоль радиуса. В ходе эволюции на концах волокна также образуются плотные ядра, которые передвигаются к центру облака. В МГД-расчетах ядра сплющиваются вдоль направления магнитного поля.

Проведенные расчеты указывают на то, что коллапс с конца может быть результатом эволюции волокна с линейной массой, меньшей критической. Для волокон, с линейной массой больше критической, коллапс с конца возможен при наличии продольного магнитного поля, градиент которого противодействует сжатию вдоль радиуса.

Авторы благодарны рецензенту за полезные комментарии.

Библиографические ссылки

- 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] Ward-Thompson D., Pattle K., Bastien P. et al. First Results from BISTRO: A SCUBA-2 Polarimeter Survey of the Gould Belt // Astrophys. J. - 2017. - Vol. 842. - P. 10.
- [3] Dewangan L. K., Pirogov L. E., Ryabukhina O. L. et al. Observational Signatures of End-dominated Collapse in the S242 Filamentary Structure // Astrophys. J. - 2019. - Vol. 887. - P. 1-15.
- [4] Shimajiri Y., Andre Ph., Peretto et al. Witnessing the fragmentation of a filament into prestellar cores in Orion B/NGC 2024 // Astron. Astrophys. - 2023. - Vol. 672. - P. 24.
- [5] Chandrasekhar S., Fermi E. Problems of Gravitational Stability in the Presence of a Magnetic Field // Astrophys. J. - 1953. - Vol. 118. - P. 116-141.
- [6] 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.
- [7] Seifried D., Walch S. The impact of turbulence and magnetic field prientation on star-forming filaments // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 2015. - Vol. 452. - P. 2410-2422.
- [8] Султанов И. М., Хайбрахманов С. А. МГД-моделирование эволюции молекулярных волокон // (принято к печати в Астрон. журн. 2024).
- [10] Fryxell B., Olson K., Ricker P. et al. FLASH: An Adaptive Mesh Hydrodynamics Code for Modeling Astrophysical Thermonuclear Flashes // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 2000. – Vol. 131. – P. 273–334.