

ПЕРВИЧНЫЕ ДИСКИ И ИХ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ В КОЛЛАПСИРУЮЩИХ МАГНИТНЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКАХ

Н. С. Каргальцева^{1,2}, С. А. Хайбрахманов^{1,2},

А. Е. Дудоров^{1,2}, А. Г. Жилкин³

В работе численно исследуется коллапс магнитного вращающегося протозвездного облака массой $10M_{\odot}$. Начальные отношения тепловой, магнитной и вращательной энергии к модулю гравитационной энергии облака равны 0.3, 0.2 и 0.01 соответственно. Основное внимание уделяется эволюции и свойствам квазимагнитостатического первичного диска, образующегося на изотермической стадии коллапса. Расчеты показывают, что в процессе эволюции размер и масса первичного диска увеличиваются от 1500 а.е. до 7400 а.е. и от $0.3M_{\odot}$ до $5.2M_{\odot}$ соответственно. Магнитное поле является квазирадиальным в оболочке облака, квазиоднородным – внутри первичного диска. За фронтом быстрой ударной МГД-волны, распространяющейся от границы первичного диска, и в области истечения, образующейся вблизи первого гидростатического ядра, генерируется тороидальное магнитное поле. В наблюдениях иерархическая структура коллапсирующих протозвездных облаков может быть выявлена по геометрии магнитного поля и распределению углового момента.

Ключевые слова: магнитные поля, магнитная газодинамика (МГД), численное моделирование, звездообразование, межзвездная среда.

¹ Уральский Федеральный Университет, 620002 Россия, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; e-mail: kargaltsevs@mail.ru.

² Челябинский Государственный Университет, 454001 Россия, Челябинск, ул. Бр. Кашириных, д. 129.

³ Институт Астрономии Российской Академии Наук, 119017 Россия, Москва, ул. Пятницкая, д. 48.

Введение. Современное звездообразование происходит в магнитных вращающихся ядрах молекулярных облаков – протозвездных облаках (далее ПЗО). В процессе гравитационного коллапса ПЗО в его центре образуется протозвезда, которая наблюдается как инфракрасный источник (см. [1]). Молодая протозвезда, погруженная в протяженную оболочку, наблюдается в субмиллиметровом диапазоне как молодой звездный объект (далее МЗО) класса 0. Характерным признаком МЗО класса 0 являются истечения [2]. В МЗО класса 0 наблюдаются уплотненные оболочки радиусом 200–10000 а.е. и небольшие возможно кеплеровские диски с радиусом 5–50 а.е. [3, 4]. В оболочках МЗО обнаруживается крупномасштабное магнитное поле с геометрией типа “песочных часов”, внутри дисков наблюдается пинчевое магнитное поле и признаки тороидального магнитного поля (см. [5]). Распределение углового момента меняется при переходе от диска к оболочке [6].

Первые расчеты коллапса ПЗО показали, что коллапс имеет неоднородный характер с образованием в центре облака первого гидростатического ядра [7]. Магнитное вращающееся ПЗО в процессе коллапса принимает сплюснутую вдоль линий магнитного поля и/или оси вращения форму [8]. Эволюция магнитного потока ПЗО и свойства образующихся звезд определяются в значительной степени ионизационными, рекомбинационными и диффузионными МГД-эффектами, в частности, амбиполярной диффузией [9].

Основными проблемами в теории звездообразования являются проблемы углового момента и катастрофического магнитного торможения [8, 10]. Современные численные расчеты в основном посвящены аккреционной стадии коллапса ПЗО солнечной массы (см. [11, 12]). Для решения проблемы углового момента важно детально исследовать начальные стадии коллапса ПЗО, когда магнитное торможение наиболее эффективно.

Ранее Хайбрахманов и др. [13] исследовали изотермический коллапс магнитных ПЗО массой 1 и $10M_{\odot}$. Расчеты показали, что в процессе изотермического коллапса формируется иерархическая структура ПЗО, состоящая из геометрически толстой и оптически тонкой оболочки, внутри которой находится геометрически и оптически тонкий квазимагнитостатический первичный диск (далее ПД).

Граница ПД характеризуется резким скачком в профилях скорости, когда практически свободное падение газа от оболочки облака к его центру превращается в медленное почти радиальное движение. На границе ПД образуется быстрая ударная магнитогазодинамическая (далее МГД) волна,двигающаяся к периферии облака.

В данной работе подход Хайбрахманова и др. [13] развивается, и проводится численное моделирование коллапса магнитного вращающегося ПЗО массой $10M_{\odot}$ с учетом

образования первого ядра. Исследуется эволюция ПД, определяются его масса, размер, угловой момент, магнитный поток и время жизни. Обсуждаются возможные наблюдательные проявления ПД.

Постановка задачи и численный метод. Рассматривается однородное сферически-симметричное вращающееся ПЗО массой $10M_{\odot}$ и температурой 20 К, находящееся в однородном магнитном поле. Начальная плотность облака составляет $4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$, начальный радиус облака – 0.1 пк. Основными параметрами, определяющими динамику коллапса, являются отношение тепловой ε_t , магнитной ε_m и вращательной ε_w энергий к модулю гравитационной энергии. В данной статье рассматривается расчет с $\varepsilon_t = 0.3$, $\varepsilon_m = 0.2$ и $\varepsilon_w = 0.01$.

Для исследования коллапса ПЗО используются уравнения гравитационной МГД. Численное моделирование осуществляется с помощью двумерного МГД-кода Enlil [14, 15]. Для моделирования тепловой эволюции ПЗО используется уравнение состояния газа с зависящим от плотности эффективным показателем адиабаты, γ_{eff} [16]. Для изотермического коллапса принимается $\gamma_{\text{eff}} = 1.001$. При плотности $\rho \geq 10^{-13} \text{ г/см}^3$, когда происходит формирование первого гидростатического ядра [7], $\gamma_{\text{eff}} = 5/3$. Данный подход позволяет рассчитать коллапс ПЗО с учетом образования первого ядра.

Эволюция первичного диска в процессе коллапса протозвездного облака. Проведенные расчеты подтверждают выводы Хайбрахманова и др. [13]. На изотермической стадии коллапса облако приобретает иерархическую структуру: оболочка принимает сплюснутую вдоль линий магнитного поля и оси вращения форму, внутри неё формируется квазимагнитостатический ПД. Рассмотрим общую картину эволюции ПД, уделяя основное внимание распределению углового момента.

На рис. 1 показана четверть центральной части коллапсирующего ПЗО в разные моменты времени. Время t измеряется в единицах характерного времени коллапса с учетом влияния электромагнитной и центробежной сил: $t_{\text{fmw}} = t_{\text{ff}}(1 - \varepsilon_m - \varepsilon_w)^{-1/2}$, где t_{ff} – время свободного падения [10]. В момент образования ПД, $t = 0.9081t_{\text{fmw}}$ (рис. 1(а)), его радиус равен $R_{\text{pd}} \approx 0.07R_0 \approx 1500 \text{ а.е.}$, а отношение его максимальной полутолщины к радиусу равно $Z_{\text{pd}}/R_{\text{pd}} = 0.039$. В момент времени $t = 0.9268t_{\text{fmw}}$ (рис. 1(б)), радиус ПД составляет $\approx 0.22R_0 \approx 4500 \text{ а.е.}$ На границе ПД образуется быстрая МГД-ударная волна, которая распространяется в оболочку облака (см. [13]). Первое ядро образуется в момент времени $t = 0.9645t_{\text{fmw}}$ (рис. 1(в)). Вблизи ядра в области $r < 0.04R_0 \approx 800 \text{ а.е.}$ толщина ПД резко уменьшается, т. е. в данной области нарушается квазимагнитостатическое равновесие. Далее в этой области газ начинает двигаться от ядра к периферии

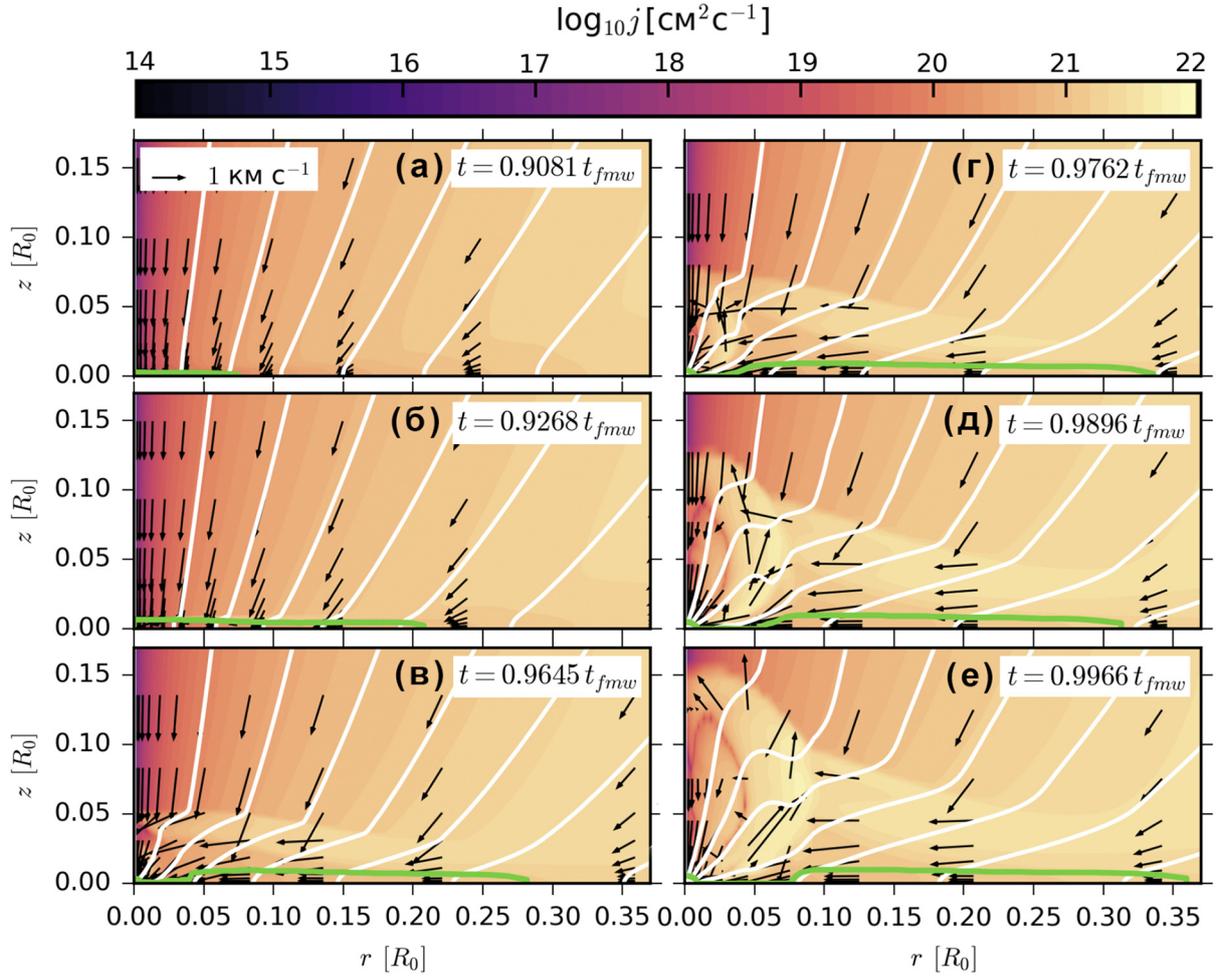


Рис. 1: Распределение углового момента (цветовая заливка), поля скорости (стрелки) и магнитного поля (белые линии) вблизи первичного диска в моменты времени: (а) $t = 0.9081 t_{fmw}$; (б) $t = 0.9268 t_{fmw}$; (в) $t = 0.9645 t_{fmw}$; (г) $t = 0.9762 t_{fmw}$; (д) $t = 0.9896 t_{fmw}$; (е) $t = 0.9966 t_{fmw}$. Зеленая линия показывает границу первичного диска.

облака параллельно оси вращения, т. е. формируется истечение (рис. 1(г)). Радиус ПД продолжает увеличиваться и к моменту времени $t = 0.9966 t_{fmw}$ (рис. 1(е)) достигает $R_{pd} \approx 0.36 R_0 \approx 7400$ а.е. В процессе эволюции ПД становится более геометрически тонким $Z_{pd}/R_{pd} = 0.028$, а область истечения увеличивается в размерах.

В момент образования ПД (рис. 1(а)) магнитное поле является квазирадiallyм, $B_r \sim B_z$, в оболочке и квазиоднородным, $B_r \ll B_z$, внутри ПД. В следующие моменты времени за фронтом быстрой ударной МГД-волны и в области истечения магнитное поле приобретает тороидальную геометрию.

После образования ПД на его границе происходит накопление удельного углового момента (рис. 1(б)), который в дальнейшем отводится от границы ПД в оболочку ПЗО быстрой ударной МГД-волной (рис. 1(в)). От первого ядра угловой момент отводится истечением (рис. 1(г)–(е)).

Анализ расчета показывает, что масса ПД со временем увеличивается от $0.3M_{\odot}$ до $5.2M_{\odot}$. Масса оболочки ПЗО, наоборот, уменьшается с момента образования ПД. Полный угловой момент ПЗО уменьшается на 15% относительно начального значения J_0 .

Выводы и обсуждение. В настоящей статье выполнено развитие работы [13], в которой исследована изотермическая стадия коллапса ПЗО. Проведено двумерное численное МГД-моделирование коллапса магнитного вращающегося ПЗО с массой $10M_{\odot}$ с учетом образования первого гидростатического ядра.

Расчеты показывают, что иерархическая структура ПЗО, формирующаяся на изотермической стадии коллапса [13], сохраняется в процессе дальнейшей эволюции. В центре квазимагнитостатического ПД образуется первое гидростатическое ядро. Вблизи ядра, $r < 0.04R_0 \approx 800$ а.е., квазимагнитостатическое равновесие нарушается, и впоследствии возникает истечение. Размер и масса ПД увеличиваются от 1500 а.е. до 7400 а.е. и от $0.3M_{\odot}$ до $5.2M_{\odot}$ соответственно. Данные значения близки к характеристикам наблюдаемых оболочек МЗО класса 0 [3, 4]. Поэтому можно предположить, что наблюдаемые крупномасштабные сплюснутые оболочки МЗО класса 0 являются ПД.

Полученные результаты работы подтверждают выводы Хайбрахманова и др. [13] относительно времени жизни ПД и геометрии магнитного поля в коллапсирующем ПЗО. ПД является долгоживущей структурой, которая продолжает эволюционировать после образования первого ядра. Геометрия магнитного поля различна в иерархической структуре ПЗО. Внутри оболочки магнитное поле является квазирадиальным, за фронтом быстрой МГД-волны, выходящей из ПД вскоре после его образования, и в области истечения – тороидальным, внутри ПД – квазиоднородным. ПД играет важную роль в эволюции удельного углового момента в облаке. Угловой момент переносится фронтом быстрой ударной МГД-волны, идущей от границы ПД в оболочку облака, а также истечением, формирующимся вблизи первого ядра. Полный угловой момент облака к моменту времени $t = 0.9645t_{\text{fmw}} = 0.1936$ млн лет, когда сформировалась типичная иерархическая структура ПЗО с истечениями, уменьшился на 15% относительно начального значения.

Исходя из полученных результатов можно предположить, что в наблюдениях иерархическая структура коллапсирующих ПЗО может быть выявлена по распределению

геометрии магнитного поля и углового момента. Для определения геометрии магнитного поля на различных уровнях иерархии необходимо построение поляризационных карт МЗО класса 0 в субмиллиметровом диапазоне с высоким пространственным разрешением.

Дальнейшее исследование будет направлено на определение массы, размера, полного углового момента, магнитного потока ПД и первого гидростатического ядра в процессе коллапса магнитных вращающихся ПЗО с разными начальными параметрами облака и с учетом диффузии магнитного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российским научным фондом (проект 19-72-10012). Авторы благодарят рецензента Е. О. Васильева за полезные комментарии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] G-Y. Zhang, Ph. André, A. Men'shchikov, et al., *Astron. Astrophys.* **642**(A76), 14 (2020). DOI: 10.1051/0004-6361/202037721.
- [2] Ph. André, D. Ward-Thompson, M. Barsony, *Astrophys. J.* **406**, 122 (1993). DOI: 10.1086/172425.
- [3] N. Ohashi, M. Hayashi, P. T. P. Ho, M. Momose, *Astrophys. J.* **475**, 211 (1997). DOI: 10.1086/303533.
- [4] J. Wiseman, A. Wootten, H. Zinnecker, M. McCaughrean, *Astrophys. J.* **550**, L87 (2001). DOI: 10.1086/319474.
- [5] C.-F. Lee, W. Kwon, K.-S. Jhan, et al., *Astrophys. J.* **879**(101), 12 (2019). DOI: 10.3847/1538-4357/ab2458.
- [6] P. Caselli, P. J. Benson, P. C. Myers, M. Tafalla, *Astrophys. J.* **572**, 238 (2002). DOI: 10.1086/340195.
- [7] R. B. Larson, *Astron. Soc.* **145**, 271 (1969). DOI: 10.1093/mnras/145.3.271.
- [8] E. H. Scott, D. C. Black, *Astrophys. J.* **239**, 166 (1980). DOI: 10.1086/158098.
- [9] А. Е. Дудоров, Ю. В. Сазонов, *Научные информации*, № 63, 68 (1987).
- [10] А. Е. Дудоров, Ю. В. Сазонов, *Научные информации*, № 50, 98 (1982).
- [11] P. Hennebelle, S. Fromang, *Astron. Astrophys.* **477**, 9 (2008). DOI: 10.1051/0004-6361:20078309.
- [12] B. Zhao, K. Tomida, P. Hennebelle, et al., *Solar System Research* **216**, 43 (2020). DOI: 10.1007/s11214-020-00664-z.
- [13] С. А. Хайбрахманов, А. Е. Дудоров, Н. С. Каргальцева, *Астрон. Ж.* № 9, (2021) [принято к печати].
- [14] А. Е. Dudorov, A. G. Zhilkin, O. A. Kuznetsov, *Numerical Simulations of the Astrophysical MHD Flows*. in *Astrophysics and Space Science Library*. Numerical

- Astrophysics, ed. S. M. Miyama, K. Tomisaka, & T. Hanawa **240**, 389 (1999). DOI: 10.1007/978-94-011-4780-4_116.
- [15] А. Г. Жилкин, Я. Н. Павлюченков, С. Н. Замоздра, *Астрономический журнал* **86**(7), 638 (2009).
- [16] H. Masunaga, Sh-i. Inutsuka, *Astrophys. J.* **531**, 350 (2000). DOI: 10.1086/308439.

Поступила в редакцию 12 июля 2021 г.

После доработки 27 июля 2021 г.

Принята к публикации 28 июля 2021 г.

Публикуется по рекомендации оргкомитета 1-ой “Московской Международной конференции по миллиметровой и субмиллиметровой астрономии”, 12–16 апреля 2021, АКЦ ФИАН.