

Каргальцева Наталья Сергеевна

**Влияние магнитного поля на образование и эволюцию
протозвездных дисков**

Специальность 1.3.1.
Физика космоса, астрономия

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Челябинский государственный университет».

Научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент
Хайбрахманов Сергей Александрович

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н.
Васильев Евгений Олегович,
ведущий научный сотрудник Физического
института им. П.Н.Лебедева Российской ака-
демии наук,

д.ф.-м.н., с.н.с.
Зинченко Игорь Иванович,
заведующий отделом ФГБНУ «Федеральный
исследовательский центр Институт приклад-
ной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Рос-
сийской академии наук»,

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное об-
разовательное учреждение высшего образо-
вания «Южный федеральный университет»,
г. Ростов-на-Дону

Защита состоится 20 декабря 2024 года в 14:00 на заседании диссертаци-
онного совета Д 24.1.032.01 при Федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук по
адресу: 119017 г. Москва ул. Пятницкая, д. 48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института астрономии
РАН и на сайте <http://www.inasan.ru>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учре-
ждения, просьба направлять по адресу: 119017 г. Москва ул. Пятницкая,
д. 48, ученому секретарю диссертационного совета Д 24.1.032.01.

Автореферат разослан 7 ноября 2024 года.
Телефон для справок: +7(495)951-54-61.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 24.1.032.01,
к.ф.-м.н.

Чупина Наталия Викторовна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Современные наблюдения в оптическом, инфракрасном (ИК) и субмиллиметровом диапазонах показывают, что звезды образуются в газопылевых самогравитирующих ядрах молекулярных облаков — протозвездных облаках (ПЗО). Внутри молекулярных облаков также наблюдают ИК-источники, которые называют молодыми звездными объектами (МЗО) и подразделяют на объекты от нулевого до третьего класса в зависимости от величины избытка потока в ИК-диапазоне [1]. Предполагается, что ПЗО эволюционируют в МЗО класса 0, которые ассоциируют с молодыми протозвездами, окруженными уплотненными газопылевыми оболочками радиусом 400 – 15000 а.е. Вблизи протозвезд различают небольшие протозвездные диски с возможно кеплеровским вращением и радиусом 30 – 300 а.е. (см. обзор [2]). Одним из признаков МЗО являются биполярные истечения. Оболочки МЗО пронизаны крупномасштабным квазирадиальным магнитным полем, в некоторых объектах наблюдаются признаки тороидального магнитного поля (см. обзор [3]). Распределение удельного углового момента меняется при переходе от внутреннего протозвездного диска к уплотненной оболочке МЗО [4].

Наблюдения перехода от ПЗО к МЗО класса 0 затруднены из-за поглощения излучения плотной газопылевой оболочкой, поэтому актуальной задачей является исследование данной эволюционной стадии аналитическими и численными методами.

Первые расчеты показали, что коллапс ПЗО имеет неоднородный характер и сопровождается образованием первого гидростатического ядра при характерной плотности 10^{-13} г см⁻³ [5]. Начальная изотермическая стадия коллапса происходит в автомодельном режиме. Магнитное вращающееся ПЗО в процессе коллапса принимает сплюснутую вдоль линий магнитного поля и оси вращения форму. В работе Галли и Шу [6] в процессе изотермического коллапса магнитной сингулярной сферы образуется псевдодиск (англ. «pseudodisk») — уплотненная неравновесная структура. Данный термин не имеет точного определения и не может использоваться для интерпретации наблюдений конкретных физических объектов в коллапсирующих облаках. Согласно работам Дудорова и Сазонова [7] и Томисаки [8] важную роль в динамике магнитных ПЗО играет образование магнитогазодинамических (МГД) ударных волн. В существующих работах рассматривается динамика облака как целого и не исследуются структуры, образующиеся внутри коллапсирующего облака на изотермической стадии. Поскольку характеристики образующихся первичных структур определяют условия образования протозвезд и протозвездных дисков, актуальной задачей является более детальное исследование изотермической стадии

коллапса магнитных вращающихся ПЗО и образующихся на этой стадии структур в большом диапазоне начальных энергий облака.

Современные расчеты в основном посвящены аккреционным стадиям коллапса ПЗО солнечной массы, когда в центре облака сформировалась протозвезда, окруженная аккреционным протозвездным диском (см. пр. [9]). Основными проблемами в численном моделировании процессов звездообразования являются проблемы углового момента и магнитного торможения. Данные проблемы являются тесно связанными и заключаются в том, что угловой момент и магнитный поток звезд главной последовательности много меньше, чем у ядер молекулярных облаков (см. обзор [10]). Известно, что основным механизмом перераспределения углового момента является магнитное торможение. В случае сильного магнитного поля возникает проблема катастрофического магнитного торможения, связанная с чрезмерным отводом углового момента из центральных частей облака, препятствующим образованию кеплеровских дисков [11]. При слабом магнитном поле перераспределение углового момента может быть неэффективным. Решением проблем магнитного потока и катастрофического магнитного торможения является ослабление магнитного потока диссипативными эффектами, турбулентностью и другими эффектами. Есть указания на то, что магнитное торможение наиболее эффективно на изотермической стадии коллапса, так как на данной стадии не работают диссипативные эффекты [12]. Поскольку магнитное поле играет принципиальную роль в эволюции ПЗО и в образовании протозвездных дисков, а относительная роль вышеописанных МГД-эффектов до сих пор не ясна, актуальной задачей является численное МГД-моделирование коллапса магнитных вращающихся ПЗО.

Цель и задачи. Целью работы является исследование влияния магнитного поля на образование и эволюцию протозвездных дисков в процессе коллапса протозвездных облаков. **Задачи** работы:

1. Выполнить численное моделирование изотермической стадии коллапса магнитных вращающихся протозвездных облаков с начальной массой $1 M_{\odot}$ и $10 M_{\odot}$ в широком диапазоне начальных тепловой, магнитной и вращательной энергий.
2. Проанализировать структуру коллапсирующего протозвездного облака и определить размеры, массы, угловые моменты и магнитные потоки первичных структур, образующихся на изотермической стадии коллапса.
3. Выполнить численное моделирование коллапса магнитных вращающихся протозвездных облаков с учетом формирования первого гидростатического ядра. Определить интенсивность и геометрию магнитного поля на разных уровнях иерархии протозвездного облака в процессе его эволюции. Оценить эффективность магнитного торможения и условия образования протозвездных дисков.

4. Выполнить численное моделирование коллапса неоднородных облаков и проанализировать иерархическую структуру коллапсирующих облаков с различной начальной степенью неоднородности. Выполнить анализ ионизационной структуры облака и эффективности магнитной амбиполярной диффузии на начальных этапах коллапса.

Научная новизна

1. В данной работе впервые детально исследована изотермическая стадия коллапса магнитных вращающихся протозвездных облаков в большом диапазоне начальных тепловой, магнитной и вращательной энергий. Показано, что коллапсирующее протозвездное облако приобретает иерархическую структуру, состоящую из уплотненной оболочки облака и первичного квазимагнитостатического диска. Определены условия формирования квазимагнитостатических первичных дисков.
2. Впервые продемонстрирована ключевая роль первичных дисков в эволюции углового момента в иерархической структуре коллапсирующего протозвездного облака. Определены размеры и массы первичных дисков в зависимости от начального значения магнитной энергии. Выполнено сравнение полученных результатов с наблюдательными данными о размерах и массах уплотненных оболочек МЗО класса 0. Определены интенсивность и геометрия магнитного поля на разных уровнях иерархии коллапсирующего протозвездного облака.
3. Исследована эволюция иерархии коллапсирующих протозвездных облаков, включающей первичные диски, вплоть до образования первого ядра и истечений. Впервые показано, что первичные диски являются долгоживущими структурами, являющимися основным резервуаром массы, углового момента и магнитного потока для дальнейшего формирования протозвезды с протозвездным диском.
4. На основе расчетов коллапса неоднородного облака в первые показано, что область низкой степени ионизации и эффективной амбиполярной диффузии («мертвая» зона) может образоваться до появления первого гидростатического ядра. Показано, что распределения углового момента и магнитного потока меняются в процессе эволюции коллапсирующего протозвездного облака. Высказана гипотеза о том, что анализ этих распределений может быть использован для идентификации оболочки и первичного диска в наблюдениях.

Теоретическая значимость диссертации заключается в развитии теории остаточного магнитного поля. Результаты, представленные в диссертации, вносят вклад в решение проблем углового момента и магнитного

потока. В частности, исследование начальных стадий коллапса магнитных вращающихся протозвездных облаков является ключевым для решения проблемы катастрофического магнитного торможения.

Практическая значимость диссертации заключается в возможности применения результатов расчетов для интерпретации наблюдательных данных о ядрах молекулярных облаков и молодых звездных объектах. Анализ геометрии магнитного поля и углового момента на разных уровнях иерархии может быть использован для определения эволюционной стадии коллапсирующего протозвездного облака. Разработанные численные модели могут быть развиты для исследования дальнейшей эволюции протозвезд с протозвездными дисками.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использован двумерный МГД-код Enlil на адаптивно подвижной сетке, основанный на TVD-схеме повышенного порядка точности и использующий технологию адаптивно подвижных сеток [13; 14]. Обработка, анализ и визуализация результатов расчетов выполняется с помощью средств языка программирования Python.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту

1. Показано, что в процессе изотермического коллапса магнитных вращающихся протозвездных облаков формируется иерархическая структура облака, состоящая из оптически тонкой и геометрически толстой сплюснутой оболочки, внутри которой находится оптически и геометрически тонкий квазимагнитостатический первичный диск. Геометрическая толщина первичного диска зависит от начальных тепловой, магнитной и вращательной энергий протозвездного облака. После образования первичного диска на его границе формируется быстрая МГД-ударная волна, которая распространяется к периферии облака. В центре первичного диска формируется первое гидростатическое ядро.
2. Обнаружено, что первичные диски образуются в магнитных протозвездных облаках, когда магнитная энергия облака составляет более 20% от его гравитационной энергии, $\epsilon_m \geq 0.2$. Размеры и массы первичных дисков сопоставимы с наблюдаемыми размерами уплощенных оболочек молодых звездных объектов класса 0. На изотермической стадии коллапса магнитное торможение отводит от 2% до 30% полного углового момента из облака в зависимости от ϵ_m в диапазоне от 0.01 до 0.6.
3. Продемонстрировано, что первичный диск является долгоживущей структурой и представляет собой резервуар массы, углового момента и магнитного потока для формирующихся в дальнейшем протозвезды и протозвездного диска. Истечение образуется вблизи первого гидростатического ядра и сопровождается нарушением квазимагнитостатического равновесия в этой области.

Внутри сплюснутой оболочки геометрия магнитного поля является квазирадiallyйной, внутри первичного диска – квазироднородной, за фронтом быстрой МГД-ударной волны и в области истечений – квазитороидальной. Угловой момент накапливается на границе первичного диска, а затем передается оболочке за счет магнитного торможения в области за фронтом быстрой МГД-ударной волны.

4. Показано, что облака с большей степенью неоднородности характеризуются большими размерами элементов иерархической структуры. Магнитное торможение эффективнее в процессе коллапса неоднородного облака, чем в случае однородного облака. Наклон радиального профиля удельного углового момента меняется в процессе коллапса и отражает переход от начального твердотельного вращения к дифференциальному. Высказана гипотеза, что разброс наблюдаемых значений данной величины может свидетельствовать о различных эволюционных стадиях наблюдаемых протозвездных облаков. «Мертвая» зона может образоваться на изотермической стадии коллапса.

Достоверность полученных результатов подтверждается тем, что в работе используются современные апробированные численные методы. Результаты расчетов в предельных случаях согласуются с предсказанием аналитических моделей и результатами других авторов. Основные результаты и выводы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях, и описаны в рецензируемых научных статьях.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: еженедельный астрофизический семинар кафедры общей и теоретической физики ФГБОУ ВО «ЧелГУ»; 48-я, 49-я и 50-я Международные студенческие научные конференции «Физика космоса» (Екатеринбург, УрФУ, Коуровская астрономическая обсерватория, 2019 — 2023 г.); Всероссийская конференция «VII Пулковская молодежная астрономическая конференция» (Санкт-Петербург, Пулковская астрономическая обсерватория РАН, 2018 г.); Всероссийская десятая конференция из цикла «Современная звездная астрономия» (Нижний Архыз, САО РАН, 2019 г.); Всероссийские 4-я и 5-я конференции «Звездообразование и планетообразование» (Москва, АКЦ ФИАН, 2020 – 2021 г.); XI Международная школа-конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании»: спутник Международной научной конференции «Уфимская осенняя математическая школа-2020» (Уфа, БашГУ, 2020 г.); Всероссийская с международным участием конференция «Астрономия и исследование космического пространства» (Екатеринбург, УрФУ, Коуровская астрономическая обсерватория, 2021 г.); Международная конференция «Submillimeter and Millimeter Astronomy: Objectives and

Instruments» (Москва, АКЦ ФИАН, 2021 г.); Всероссийская астрономическая конференция, ВАК-2021: «Астрономия в эпоху многоканальных исследований» (Москва, ГАИШ МГУ, 2021 г.); Всероссийская с международным участием конференция «Физика звёзд: теория и наблюдения» (Москва, ГАИШ МГУ, 2023 г.); Всероссийская астрономическая конференция, ВАК-2024: «Современная астрономия: от ранней вселенной до экзопланет и черных дыр» (Нижний Архыз, САО РАН, 2024 г.)

Публикации и личный вклад

Основные результаты по теме диссертации изложены в 22-х печатных и электронных изданиях, 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК [A1 – A5], 17 — в трудах российских и международных конференций. Результаты излагались также в отчётах по проектам Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), Российского научного фонда (РНФ), Фонда поддержки молодых ученых (ФПМУ) и Фонда перспективных научных исследований (ФПНИ) ЧелГУ.

Автором получены все основные результаты, выносимые на защиту. С помощью двумерного МГД-кода Enlil [13; 14] выполнены численные расчеты коллапса магнитных вращающихся протозвездных облаков в большом диапазоне начальных параметров. Всего выполнено около 300 расчетов с разными начальными безразмерными параметрами, массами и температурами, без диффузии и с учетом омической и/или амбиполярной диффузии, с разным количеством ячеек сетки и скоростью сгущения сетки. На языке программирования Python написаны программы для обработки, анализа и визуализации данных, полученных с помощью МГД-кода Enlil. Выполнен анализ полученных результатов. Автор принимала активное участие в написании статей по результатам работ.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения, списка публикаций автора из 22 работ, списка литературы из 157 источников; изложена на 148 страницах; содержит 8 таблиц и 63 рисунка.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации и описана степень её разработанности; сформулированы цель и конкретные задачи; указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертации, методы исследования; представлены основные результаты и положения, выносимые на защиту; обосновывается достоверность полученных результатов; перечислены научные мероприятия, на которых прошла апробация работы; оценен личный вклад автора; описана структура и объем диссертации.

В **первой главе** описывается и анализируется современная картина звездообразования на основе анализа наблюдательных данных и

численного моделирования. В разделе 1.1 проведен анализ современных наблюдательных данных о ПЗО и МЗО. Приведены и систематизированы основные характеристики наблюдаемых ПЗО и МЗО класса 0, такие как размер, масса, температура, интенсивность и геометрия магнитного поля, скорость вращения и скорость турбуленции. Раздел 1.2 посвящен обзору теоретических и численных моделей коллапса ПЗО. Приводятся основные исследования, посвященные динамике коллапса ПЗО на начальных стадиях. Описываются проблемы углового момента, магнитного потока и катастрофического магнитного торможения. Анализ показывает, что основными сложностями в решении данных проблем является большой разброс возможных начальных характеристик облака, с одной стороны, и необходимость самосогласованного учета различных МГД-эффектов, с другой стороны. В разделе 1.3 описано современное представление об этапах формирования звезды из коллапсирующего ПЗО. Делается вывод о том, что для определения условий образований протозвездных дисков и исследования их эволюцией необходимо детальное численное МГД-моделирование начальных стадий коллапса в широком диапазоне начальных параметров.

Во второй главе исследована структура ПЗО в процессе изотермического коллапса. В разделе 2.1 сформулирована постановка задачи, основные уравнения и описан используемый численный код. В модели рассматривается однородное сферически-симметричное ПЗО с массой $M_0 = 1 - 10 M_\odot$, температурой $T_0 = 10 - 20$ К, плотностью $n_0 = 1.2 \cdot 10^3 - 2.0 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ и радиусом $R_0 = 0.014 - 0.3$ пк. Облако находится в однородном магнитном поле $B_0 = 7.7 \cdot 10^{-5} - 1.6 \cdot 10^{-4}$ Гс, и вращается твердотельно с угловой скоростью $\omega_0 = 6.7 \cdot 10^{-15} - 5.7 \cdot 10^{-13} \text{ сек}^{-1}$. Ось вращения параллельна линиям магнитного поля. Динамику коллапса определяют начальные безразмерные параметры: тепловой, $\varepsilon_t = 0.1 - 0.9$, магнитный, $\varepsilon_m = 0 - 0.7$, и вращательный, $\varepsilon_w = 0 - 0.05$, которые являются соответственно, отношением тепловой, магнитной и вращательной энергий к модулю гравитационной энергии [13].

Используется система уравнений гравитационной МГД в приближении замороженного магнитного поля. Численные расчеты осуществляются с помощью двумерного МГД-кода Enlil на адаптивной подвижной сетке [13; 14]. Используется осесимметричное приближение и цилиндрическая система координат. Расчет коллапса ПЗО выполняется до образования непрозрачной области в центре облака. Оптическая толщина по отношению к собственному тепловому излучению рассчитывается для постоянной средней непрозрачности пыли с характерным значением $\kappa = 0.1 \text{ см}^2 \text{ г}^{-1}$ (см., пр., [15]).

В разделе 2.2 анализируется динамика коллапса магнитного ПЗО и его структура на изотермической стадии. Рассматривается расчет с начальными параметрами $\varepsilon_t = 0.3$, $\varepsilon_m = 0.2$, $\varepsilon_w = 0$.

На рисунке 1 показаны профили плотности и компонент вектора полоидальной скорости вдоль осей r и z в разные моменты времени. Начальная динамика коллапсирующего магнитного облака характеризуется распространением быстрой МГД-волны разрежения от границы облака к его центру [16]. Фронт этой волны делит облако на однородную центральную область и неоднородную оболочку (см. линия 2 на рисунках 1а и б). Электромагнитная сила противодействует сжатию в r -направлении, а течение вдоль силовых линий магнитного поля в z -направлении практически свободно. Следовательно, $v_r < v_z$ (см. рисунки 1в и г) и размер центральной однородной области в z -направлении меньше, чем размер в r -направлении (линии 3 на рисунках 1а и б), то есть облако сплющивается вдоль направления начального магнитного поля. В отличие от монотонного уменьшения плотности вдоль r на периферии облака, по координате z происходит резкий переход от оболочки к центральной части облака при $z = Z_{\text{pd}} \approx 3 \cdot 10^{-3} R_0 \approx 60$ а.е. (линии 4 на рисунке 1). В центре облака $v_z \approx 0$, что соответствует квазимагнитостатическому равновесию. То есть этот скачок соответствует переходу от коллапсирующей оболочки к квазимагнитостатическому диску, который в дальнейшем будем называть **первичным диском**. Формирование первичного протозвездного диска происходит после фокусировки и отражения МГД-волны разрежения от центра облака. Граница первичного диска представляет собой ударный фронт. Позже, при $t > 0.9087 t_{\text{fmw}}$ (где t_{fmw} — характерное динамическое время), наблюдается еще один скачок в профилях $\rho(z)$ и v_z над первичным диском, $z \approx (0.01 - 0.03) R_0 \approx (200 - 600)$ а.е. (линии 5 – 7 на рисунке 1). Этот скачок соответствует фронту быстрой МГД-ударной волны, распространяющейся наружу от диска практически в направлении z . Эта волна формируется в результате отражения быстрой МГД-волны разрежения от центра облака, как было предсказано Дудоровым и Сазоновым [7]. Отраженная быстрая магнитозвуковая волна выходит из первичного диска в оболочку, укручается и превращается в ударную волну. Подобные ударные волны ранее также были обнаружены в работе Томисаки [8]. К концу изотермической стадии коллапса, $t = 0.9517 t_{\text{fmw}}$, плотность в центре облака вырастает почти на 5 порядков по сравнению с начальным значением.

На рисунке 2 показана двумерная картина эволюции ПЗО в моменты времени, соответствующие линиям 1, 2 и 7 на рисунке 1. В начальный момент времени облако однородно (см. рисунок 2а). Граница облака определяется по контактному разрыву. В дальнейшем облако коллапсирует и линии магнитного поля стягиваются к центру облака (рисунок 2б). В конечный момент времени облако приобретает сплюснутую форму с малой полуосью, направленной вдоль начального магнитного поля \mathbf{B}_0 (рисунок 2в). Внутри сплюснутой оболочки образуется геометрически тонкий первичный диск (рисунок 2г). Фронт быстрой МГД-ударной волны различим по скачку плотности и изгибам линий магнитного поля при

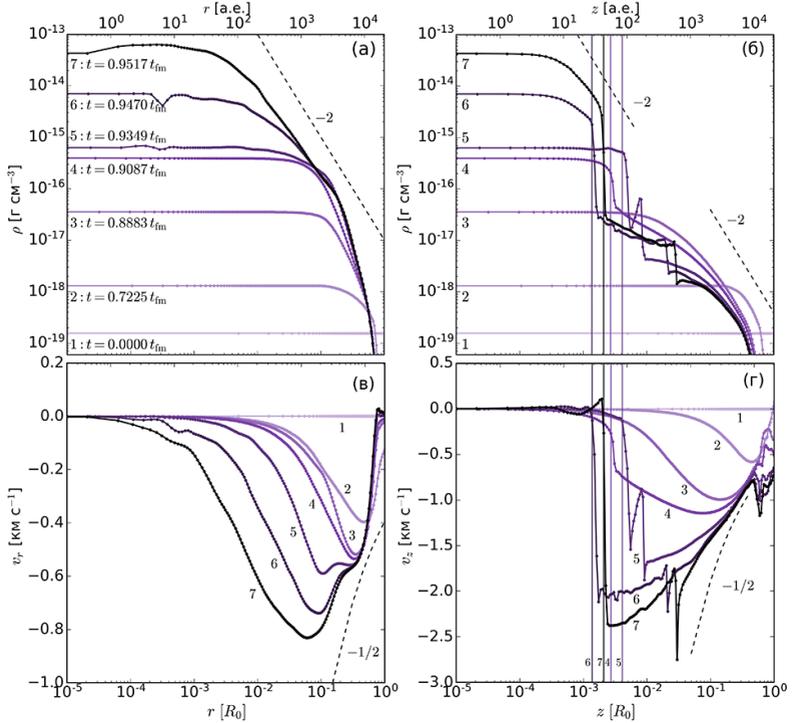


Рис. 1 — Профили плотности и радиальной скорости вдоль осей r (панели а и б) и z (панели в и г) в несколько моментов времени в расчете с $\varepsilon_t = 0.3$, $\varepsilon_m = 0.2$ и $\varepsilon_w = 0$. Штриховые линии с цифрами — характерные наклоны. Соответствующие вертикальные линии — полутолщина первичного диска.

$z \approx (0.02 - 0.04) R_0 \approx (400 - 800)$ а.е. Полутолщина первичного диска зависит от r . В центральной части диска она меньше, $r \approx 40 - 50$ а.е., чем на его периферии, $r \approx 200$ а.е. Это связано с тем, что магнитное поле остается практически однородным в центральной части облака, так что магнитное поле не вносит заметный вклад в баланс сил в вертикальном направлении в области $r < 200$ а.е. Таким образом, первичный диск состоит из квазигидростатической центральной части и квазимагнитостатической периферии. Плотность газа и интенсивность магнитного поля в центре диска увеличиваются со временем, отражая рост первичного диска из-за падения вещества из оболочки.

Расчеты показывают, что интенсивность B_z максимальна и увеличивается со временем внутри первичного диска от 6×10^{-4} Гс при $t = 0.9038 t_{\text{fmw}}$ до 1.5×10^{-3} Гс при $t = 0.9517 t_{\text{fmw}}$. Магнитное поле остается однородным, $B_z \sim \text{const}$, внутри первичного диска, $z < Z_{\text{pd}}$, поскольку

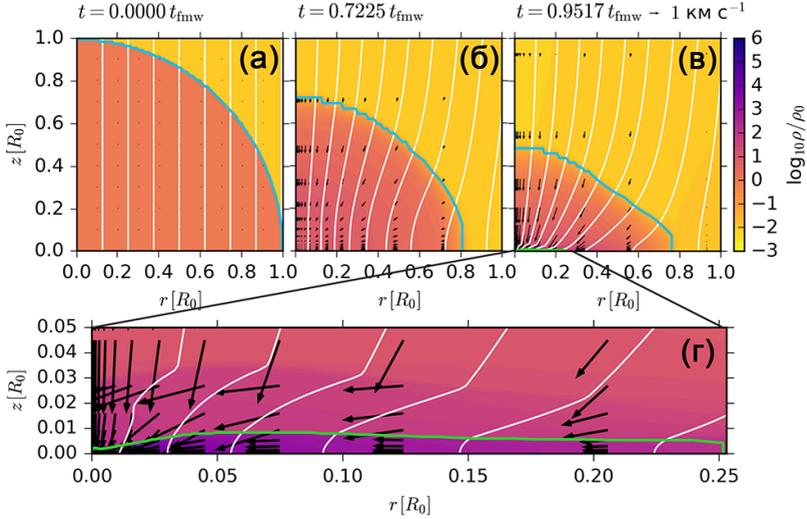


Рис. 2 — Двумерная структура коллапсирующего ПЗО при $t = 0.0$ (панель а), $t = 0.722 t_{\text{fmw}}$ (панель б) и $t = 0.957 t_{\text{fmw}}$ (панели в, г) для расчета с $\varepsilon_t = 0.3$, $\varepsilon_m = 0.2$. Цветовая заливка показывает распределение десятичного логарифма безразмерной плотности, стрелки — поле скоростей, белые линии — линии полоидального магнитного поля. Голубая линия — граница облака, зеленая линия — граница первичного диска.

динамика газа в этой области практически одномерна, $v_z \ll v_r$. Радиальное магнитное поле имеет локальный максимум около границы первичного диска до того, как из диска выйдет быстрая МГД-волна. Компонента B_r максимальна вблизи поверхности диска потому, что эта область характеризуется максимальной скоростью радиального движения и, следовательно, наиболее эффективной генерацией B_r . МГД-ударная волна формируется на границе первичного диска при $t \approx 0.9087 t_{\text{fmw}}$. За фронтом волны происходит одновременный рост плотности газа и интенсивности тангенциальной компоненты магнитного поля, то есть эта волна является быстрой МГД-ударной волной. Таким образом, магнитное поле приобретает квазирадиальную геометрию, $B_r \sim B_z$, в области между поверхностью диска и фронтом ударной волны в процессе ее распространения в оболочке диска $z > (50 - 200)$ а.е. Эта область со временем увеличивается в размерах.

В разделе 2.3 представлен анализ эволюции углового момента в иерархической структуре магнитного ПЗО. Выполняется сравнение расчетов вращающихся ПЗО с начальными параметрами $\varepsilon_t = 0.3$ и $\varepsilon_w = 0.01$ в случаях без магнитного поля, $\varepsilon_m = 0$, и с магнитным полем, $\varepsilon_m = 0.2$. В

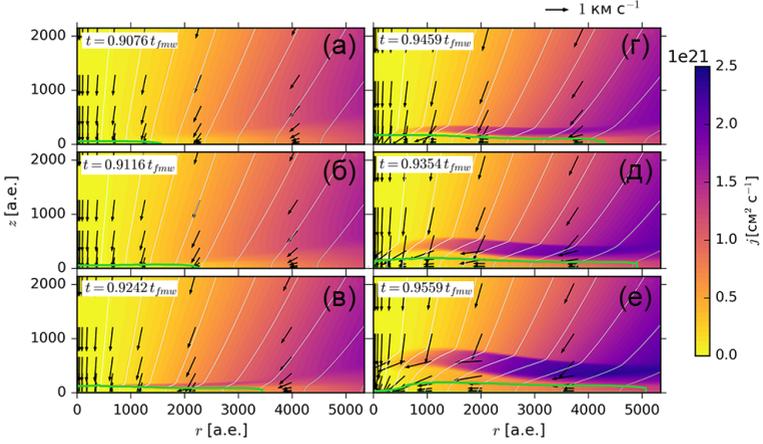


Рис. 3 — Двумерное распределение углового момента вблизи первичного диска в процессе коллапса магнитного ПЗО.

работе показано, что в случае коллапса вращающегося ПЗО без магнитного поля образуется небольшой первичный диск радиусом ≈ 400 а.е., внутри которого происходит накопление удельного углового момента.

На рисунке 3 изображено двумерное распределение удельного углового момента вблизи первичного диска для случая магнитного вращающегося ПЗО. После образования первичного диска, $t > 0.9076 t_{fmw}$, удельный угловой момент накапливается вблизи границы первичного диска (панели в и г), а не внутри него как в расчете без магнитного поля. В последующие моменты положение области максимума j отдаляется от экваториальной плоскости ПЗО, следуя за фронтом быстрой МГД-ударной волны (панели д и е). Сравнение расчетов без магнитного поля и с магнитным полем показало, что квазимагнитоэстатический первичный диск в 12 раз больше, чем гидростатический первичный диск, при этом они имеют одинаковую геометрическую толщину. Расчеты показывают, что в процессе коллапса ПЗО начальное твердотельное вращение становится дифференциальным, $j \propto r^1$ и $\Omega \propto r^{-1}$.

Анализ профилей компонент магнитного поля в процессе коллапса магнитного вращающегося ПЗО показал, что в области между фронтом быстрой МГД-ударной волны и границей первичного диска возникает и увеличивается со временем тороидальная компонента магнитного поля. Это связано с дифференциальным вращением в данной области. К концу изотермической стадии в области между границей первичного диска и фронтом МГД-ударной волны имеет место следующее соотношение компонент магнитного поля: $(B_\varphi \sim B_z) \ll B_r$, что соответствует квазитороидальному магнитному полю. Внутри первичного диска геометрия магнитного поля остается квазиоднородной, $(B_r, B_\varphi) \ll B_z = const.$ В

оболочке при $z \approx 0.04 - 0.5 R_0 \approx 200 - 2000$ а.е. геометрия магнитного поля является квазирадиальной, $B_r > B_z$. Интенсивность B_z максимальна внутри первичного диска и монотонно увеличивается в процессе коллапса внутри однородной части облака от $\approx 5.0 \cdot 10^{-4}$ Гс до $\approx 6.2 \cdot 10^{-4}$ Гс.

Наличие области тороидального магнитного поля указывает на потерю углового момента за счет магнитного торможения. В расчете без магнитного поля полный угловой момент сохраняется в облаке. В расчете с магнитным полем в процессе изотермического происходит уменьшение полного углового момента ПЗО на 14%.

Раздел 2.4. посвящен анализу коллапса ПЗО в широком диапазоне начальных безразмерных параметров. Анализ расчетов показывает, что в процессе коллапса магнитного ПЗО без вращения первичный диск образуется при $\varepsilon_m \geq 0.2$, а в процессе коллапса магнитного вращающегося ПЗО — при $\varepsilon_m \geq 0.01$ и $\varepsilon_w \geq 0.01$. При увеличении ε_m от 0.2 до 0.7 радиусы первичных дисков и оболочек увеличиваются от $0.20 R_0$ до $0.68 R_0$ и от $0.60 R_0$ до $1.02 R_0$, соответственно. Масса первичного диска увеличивается от $0.33 M_\odot$ до $0.77 M_\odot$, а масса оболочки соответственно уменьшается от $0.53 M_\odot$ до $0.17 M_\odot$. Коллапс ПЗО с сильным магнитным полем ($\varepsilon_m \geq 0.5$) приводит к образованию массивных первичных дисков, масса которых больше массы оболочки, то есть облако в целом эволюционирует в состояние квазимагнитостатического равновесия, как было предсказано Дудоровым и Сазоновым [7]. Степень сплюснутости оболочки зависит от начального магнитного параметра как $\varepsilon_{\text{env}} \propto \varepsilon_m^{-1/2}$, в соответствии с результатом Дудорова и др. [17]. Степень сплюснутости первичного диска меняется как $\varepsilon_{\text{pd}} \propto \varepsilon_m^{1/2}$. При увеличении ε_m от 0.01 до 0.6 полный угловой момент облака уменьшается на 3%–30% к концу изотермической стадии. При увеличении ε_w увеличивается степень сплюснутости оболочки и первичного диска.

Основным выводом по данной главе является вывод о формировании иерархической структуры ПЗО. Образование квазимагнитостатического первичного диска на изотермической стадии является естественным и неизбежным следствием коллапса магнитного ПЗО.

Третья глава посвящена исследованию эволюции иерархической структуры ПЗО. В разделе 3.1. описана постановка задачи и начальные параметры для расчетов дальнейшего коллапса ПЗО с учетом первого гидростатического ядра. Для моделирования тепловой эволюции ПЗО используется уравнение состояния газа с зависящим от плотности эффективным показателем адиабаты, γ_{eff} [18]. Для изотермического коллапса принимается $\gamma_{\text{eff}} = 1.001$. При плотности $\rho \geq 10^{-13}$ г/см⁻³, когда происходит формирование первого гидростатического ядра [5], $\gamma_{\text{eff}} = 5/3$. Коэффициент омической и амбиполярной диффузии рассчитываются следуя работе Жилкина и др. [14]. Степень ионизации определяется с помощью подхода Дудорова и Сазонова [19]. Расчеты выполняются для облаков с одинаковыми $\varepsilon_t = 0.3$ и $\varepsilon_w = 0.01$, но разным $\varepsilon_m = 0 - 0.6$.

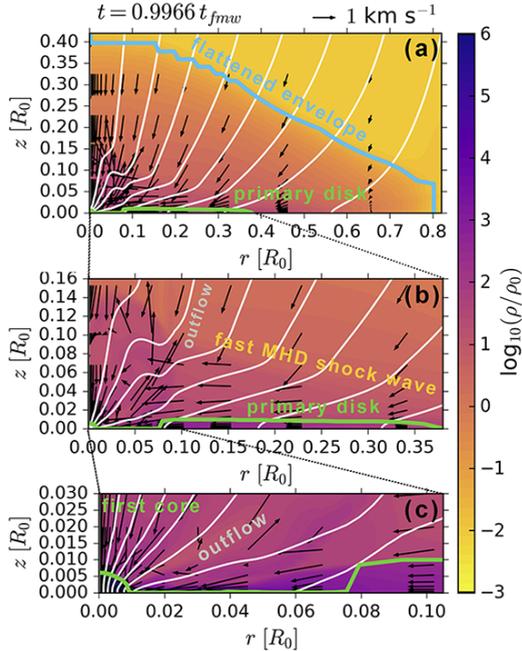


Рис. 4 — Двумерная структура ПЗО массой $10 M_\odot$ с начальным радиусом $R_0 = 0.1$ пк и с $\varepsilon_t = 0.3$, $\varepsilon_m = 0.2$ и $\varepsilon_w = 0.01$ при $t \approx 1.0 t_{fmw}$. Зелёная линия — граница первичного диска и первого ядра.

Раздел 3.2 посвящен анализу динамики коллапса ПЗО с учетом образования первого гидростатического ядра. Расчеты показывают, что иерархическая структура, сформировавшаяся на изотермической стадии, сохраняется (см. рисунок 4). В центре первичного диска формируется оптически толстое первое гидростатическое ядро (рисунок 4c). В области $0.01 R_0 \leq r \leq 0.075 R_0$ вблизи первого ядра магнитоэлектрическое равновесие нарушается и возникает истечение, распространяющееся вдоль линий магнитного поля. Генерация истечения происходит за счет действия градиента магнитного давления (механизма Учиды и Шибаты). Максимальная скорость истечения $\approx 2 \text{ км/с}$, что согласуется с наблюдательными данными о медленных истечениях в областях звездообразования.

В разделе 3.3. исследована структура коллапсирующего вращающегося ПЗО при различной начальной магнитной энергии. Приведены двумерные карты распределения удельного углового момента для расчетов с $\varepsilon_m = 0.01; 0.2; 0.6$ (рисунок 5). Показывается, что иерархическая структура коллапсирующего ПЗО формируется во всех расчетах. Во время коллапса первичные диски увеличиваются в размерах. Во всех случаях угловой момент сначала накапливается вблизи поверхности первичного

диска, а затем передается оболочке из-за магнитного торможения в области за фронтом быстрой МГД-ударной волны. Общей чертой всех расчетов является возникновение истечений из области вблизи первого ядра. Радиус и типичная полутолщина первичного диска увеличиваются с ε_m . Это отражает возрастающую роль электромагнитной силы в установлении магнитостатического равновесия внутри центральной части облака. Облако с сильным магнитным полем практически целиком переходит в состояние магнитостатического равновесия. Радиусы первичных дисков согласуются с наблюдаемыми размерами сплюснутых оболочек МЗО класса 0 (см. обзор [2]).

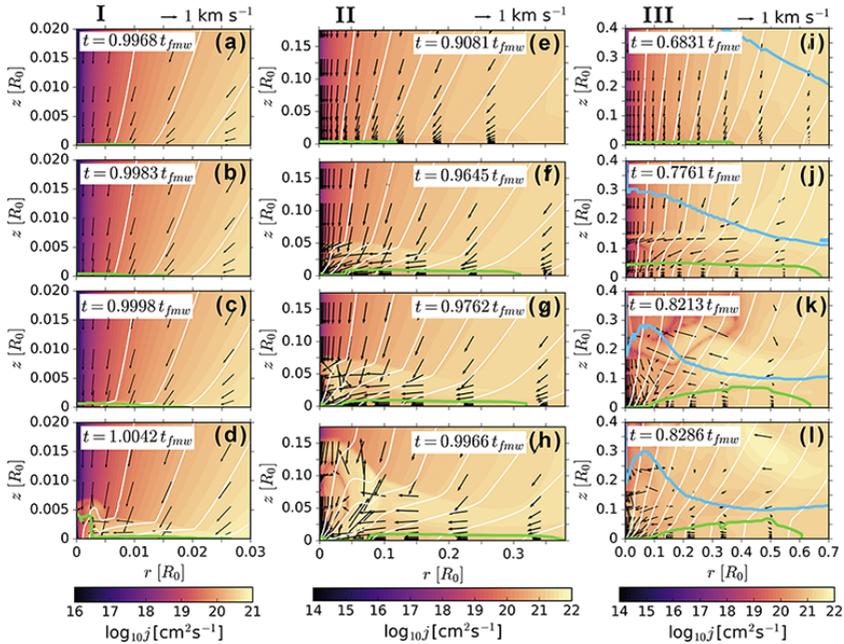


Рис. 5 — Двумерное распределение удельного углового момента вблизи первичного диска в расчетах с $\varepsilon_m = 0.01$ (I, левые панели), $\varepsilon_m = 0.2$ (II, средние панели), $\varepsilon_m = 0.6$ (III, правые панели) в разные моменты времени после формирования первичного диска (панели сверху вниз).

Размер области эффективного магнитного торможения, ограниченной фронтом быстрой МГД-ударной волны, увеличивается с ε_m . Это объясняется тем, что скорость быстрой МГД-ударной волны увеличивается с начальной напряженностью магнитного поля облака. Размер области истечения к концу динамического коллапса также увеличивается с увеличением ε_m , поскольку в случае большей интенсивности магнитного поля

крутильные альвеновские волны, образующиеся в области дифференциального вращения, распространяются с большей скоростью.

В разделе 3.4 проведена оценка влияния омической и амбиполярной диффузии на магнитное поле в процессе коллапса ПЗО. Расчеты показали, что внутри первого ядра, в области со степенью ионизации $x \sim 10^{-11}$, омическая и амбиполярная диффузия приводят к небольшому уменьшению радиальной компоненты магнитного поля.

По результатам полученным в главе 3 делается вывод о том, что формирование иерархической структуры ПЗО является универсальным свойством коллапсирующих магнитных вращающихся ПЗО. Первичные диски являются долгоживущими структурами и представляют собой резервуар массы, углового момента и магнитного потока для дальнейшего формирования протозвезды и протозвездного диска.

В четвертой главе приведено описание коллапса неоднородного протозвездного облака. В разделе 4.1. описана модель неоднородного облака. Облако характеризуется начальными массой $M_0 = 1 M_\odot$ и температурой $T_0 = 10$ К. Начальное вращение облака задается твердотельным. Распределение плотности соответствует распределению Пламмера [20]. Распределение начального полоидального магнитного поля рассчитывается в предположении образования ПЗО в процессе сферически симметричного сжатия однородной среды с плотностью ρ_0 , пронизанной однородным магнитным полем \mathbf{B}_0 [A5]. Для исследования влияния магнитного поля на структуру коллапсирующего ПЗО и свойства образующихся протозвездных дисков выполнены расчеты коллапса ПЗО с начальными параметрами: $\varepsilon_t = 0.3$, $\varepsilon_m = [0, 0.2, 0.4, 0.6]$ и $\varepsilon_w = 0 - 0.1$. В соответствии с ε_t начальная центральная плотность $n_c = 9.00 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, характерный радиус, $R_c = 0.015$ пк, начальный радиус $R_0 = 0.021$ пк, и время свободного сжатия $t_{\text{ff}} = 3.58 \cdot 10^4$ лет. Выполнены расчеты с различной степенью неоднородности и с учетом амбиполярной диффузии.

Раздел 4.2 посвящен исследованию динамики коллапса неоднородного ПЗО с $\varepsilon_t = 0.3$, $\varepsilon_m = 0.2$ и $\varepsilon_w = 0.01$. Изотермический коллапс неоднородного ПЗО длится дольше, чем коллапс однородного ПЗО, так как при фиксированной полной магнитной энергии облака магнитное поле динамически сильнее на периферии неоднородного облака. Исследование эволюции углового момента в коллапсирующем ПЗО показало, что степень неоднородности облака слабо влияет на количество полного углового момента, отведенного из облака в межзвездную среду. Облака с большей степенью неоднородности характеризуются большими размерами оболочки ПЗО, полутолщины первичного диска и размерами области магнитного торможения.

Наклон радиального профиля удельного углового момента, j , меняется в процессе коллапса от начального твердотельного вращения к дифференциальному (см. рисунок 6). После изотермической стадии до

конечного момента времени наклон профилей j в оболочке уменьшился от 1.8 – 1.6 до 0.5 – 0.3. Следовательно, в процессе коллапса ПЗО твердотельное вращение оболочки сменяется (суб)кеплеровским. Разброс наблюдаемых значений данной величины может свидетельствовать о различных эволюционных стадиях наблюдаемых ПЗО.

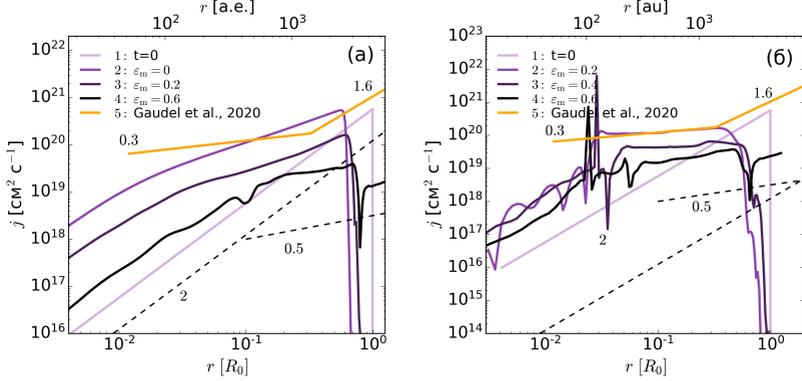


Рис. 6 — Профили удельного углового момента, $j(r)$. Линия 1 — начальный момент времени. Панель (а): в конце изотермической стадии коллапса (линия 2: $\varepsilon_m = 0$, линия 3: $\varepsilon_m = 0.2$, линия 4: $\varepsilon_m = 0.6$). Панель (б): в конечный момент расчета с учетом эволюции первого ядра (линия 2: $\varepsilon_m = 0.2$, линия 3: $\varepsilon_m = 0.4$, линия 4: $\varepsilon_m = 0.6$). Линия 5 — наблюдаемые профили $j_{\text{obs}}(R)$ в МЗО класса 0 [21]. Штриховые линии — наклоны при твердотельном (2) и кеплеровском (0.5) вращении.

Увеличение ε_m ведет к более эффективному магнитному торможению. В расчете с сильным начальным магнитным полем, $\varepsilon_m = 0.6$, полный угловой момент уменьшился на 90%. К концу изотермического коллапса неоднородного ПЗО доля отведенного полного углового момента облака, J/J_0 , превышает соответствующее значение для однородного ПЗО в 2 – 3 раза. При этом J/J_0 слабо зависит от ε_w .

В разделе 4.3 исследована ионизационная структура облака и проведена оценка влияния амбиполярной диффузии на магнитное поле в процессе коллапса неоднородного ПЗО. Анализ расчетов показывает, что к концу изотермической стадии коллапса неоднородного ПЗО формируется «мертвая» зона (область низкой степени ионизации), в отличие от случая однородного облака. В этой области амбиполярная диффузия ослабляет радиальную компоненту магнитного поля на изотермической стадии. Согласно оценкам характерных диффузионного и динамического времен, в течение 1 – 10 тыс. лет амбиполярная диффузия внутри «мертвой» зоны

первичного диска приведет к отводу части магнитного потока на периферию облака и ослаблению магнитного торможения.

В **заключении** кратко описаны результаты, полученные в главах 2 – 4, соответствующие основным положениям, выносимым на защиту. Отмечается, что разработанные численные модели могут в будущем быть применены для: а) интерпретации распределения углового момента в ядрах молекулярных облаков; б) интерпретации наблюдательных данных о магнитном поле протозвездных облаков; в) проведения астрохимических расчетов и анализа молекулярного состава ядер молекулярных облаков. В силу автономности задачи о коллапсе протозвездного облака, использованный подход может быть применен для изучения процессов звездообразования массивных звезд. Для дальнейшего развития модели и исследования долговременной эволюции протозвездных дисков необходимо детальное рассмотрение процессов переноса излучения. С точки зрения анализов наблюдательных данных важно также включить в модель и проанализировать роль мелкомасштабной турбулентности в протозвездных облаках.

Публикации автора по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

- A1. Zamozdra S.N., **Kargaltseva N.S.** Toward the birth of very wide binary stars // *Astronomical and Astrophysical Transactions*. — 2017. — Т. 30. — №2. — С. 241-248.
- A2. Моделирование изотермического коллапса магнитных протозвездных облаков / С.А. Хайбрахманов, А.Е. Дудоров, **Н.С. Каргальцева**, А.Г. Жилкин // *Астрономический Журнал* — 2021. — Т. 98. — №8. — С. 681-693.
- A3. Первичные диски и их наблюдательные проявления в коллапсирующих магнитных вращающихся облаках / **Н.С. Каргальцева**, С.А. Хайбрахманов, А.Е. Дудоров, А.Г. Жилкин // *Краткие сообщения по физике, ФИАН*. — 2021. — Т. 48. — №9. — С. 19-25.
- A4. Influence of the magnetic field on the formation of protostellar disks / **N.S. Kargaltseva**, S.A. Khaibrahmanov, A.E. Dudorov et al. // *Open Astronomy*. — 2022. — V. 31. — 1. — P. 172-180.
- A5. Numerical 2D MHD simulations of the collapse of magnetic rotating protostellar clouds with the Enlil code / S. Khaibrakhmanov, S. Zamozdra, **N. Kargaltseva** et al. // *The Predictive Power of Computational Astrophysics as a Discovery Tool: Proceedings of the International Astronomical Union*. — 2023. — Vol. 16 (362). — P. 273-278.

Литература

1. *Andre Philippe, Ward-Thompson Derek, Barsony Mary.* Submillimeter Continuum Observations of rho Ophiuchi A: The Candidate Protostar VLA 1623 and Prestellar Clumps // *The Astrophysical Journal*. — 1993. — Vol. 406. — P. 122.
2. *Maury Anaëlle, Hennebelle Patrick, Girart Josep Miquel.* Recent progress with observations and models to characterize the magnetic fields from star-forming cores to protostellar disks // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. — 2022. — Vol. 9. — P. 949223.
3. A Pseudodisk Threaded with a Toroidal and Pinched Poloidal Magnetic Field Morphology in the HH 211 Protostellar System / Chin-Fei Lee, Woojin Kwon, Kai-Syun Jhan et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2019. — Vol. 879, no. 2. — P. 101.
4. Dense Cores in Dark Clouds. XIV. N_2H^+ (1-0) Maps of Dense Cloud Cores / Paola Caselli, Priscilla J. Benson, Philip C. Myers, Mario Tafalla // *The Astrophysical Journal*. — 2002. — Vol. 572, no. 1. — Pp. 238–263.
5. *Larson Richard B.* Numerical calculations of the dynamics of collapsing proto-star // *Monthly Notices of the R.A.S.* — 1969. — Vol. 145. — P. 271.
6. *Galli Daniele, Shu Frank H.* Collapse of Magnetized Molecular Cloud Cores. I. Semianalytical Solution // *The Astrophysical Journal*. — 1993. — Vol. 417. — P. 220.
7. *Дудоров А. Е., Сазонов Ю. В.* Гидродинамика коллапса межзвездных облаков. 2. Роль магнитного поля. // *Научные информации*. — 1982. — no. 50. — Pp. 98–112.
8. *Tomisaka Kohji.* Collapse of Rotating Magnetized Molecular Cloud Cores and Mass Outflows // *The Astrophysical Journal*. — 2002. — Vol. 575, no. 1. — Pp. 306–326.
9. Formation and Evolution of Disks Around Young Stellar Objects / Bo Zhao, Kengo Tomida, Patrick Hennebelle et al. // *Space Science Reviews*. — 2020. — Vol. 216, no. 3. — P. 43.
10. *Inutsuka Shu-ichiro.* Present-day star formation: From molecular cloud cores to protostars and protoplanetary disks // *Progress of Theoretical and Experimental Physics*. — 2012. — Vol. 2012, no. 1. — P. 01A307.
11. *Allen Anthony, Li Zhi-Yun, Shu Frank H.* Collapse of Magnetized Singular Isothermal Toroids. II. Rotation and Magnetic Braking // *The Astrophysical Journal*. — 2003. — Vol. 599, no. 1. — Pp. 363–379.

12. The impact of the Hall effect during cloud core collapse: Implications for circumstellar disk evolution / Yusuke Tsukamoto, Satoshi Okuzumi, Kazunari Iwasaki et al. // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 2017. — Vol. 69, no. 6. — P. 95.
13. *Dudorov A. E., Zhilkin A. G., Kuznetsov O. A.* Numerical Simulations of the Astrophysical MHD Flows // *Numerical Astrophysics* / Ed. by Shoken M. Miyama, Kohji Tomisaka, Tomoyuki Hanawa. — Vol. 240 of *Astrophysics and Space Science Library*. — 1999. — P. 389.
14. *Zhilkin A. G., Pavlyuchenkov Ya. N., Zamozdra S. N.* Modeling of protostellar clouds and their observational properties // *Astronomy Reports*. — 2009. — Vol. 53, no. 7. — Pp. 590–604.
15. Rosseland and Planck mean opacities for protoplanetary discs / D. Semenov, Th. Henning, Ch. Helling et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2003. — Vol. 410. — Pp. 611–621.
16. *Dudorov A. E., Zhilkin A. G.* Nonself-similar regimes of isothermal collapse of protostellar clouds // *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*. — 2003. — Vol. 96, no. 2. — Pp. 165–171.
17. *Dudorov A. E., Zhilkin A. G., Kuznetsov O. A.* Two-dimensional numerical code for axially symmetrical and self-gravitational MHD flows // *Matem. Modelir.* — 1999. — Vol. 11, no. 11. — Pp. 110–127.
18. *Masunaga Hirohiko, Inutsuka Shu-ichiro.* A Radiation Hydrodynamic Model for Protostellar Collapse. II. The Second Collapse and the Birth of a Protostar // *The Astrophysical Journal*. — 2000. — Vol. 531, no. 1. — Pp. 350–365.
19. *Дудоров А. Е., Сазонов Ю. В.* Гидродинамика коллапса межзвездных облаков. IV. Степень ионизации и амбиполярная диффузия // *Научные информации*. — 1987. — no. 63. — P. 68.
20. *Whitworth A. P., Ward-Thompson D.* An Empirical Model for Protostellar Collapse // *The Astrophysical Journal*. — 2001. — Vol. 547, no. 1. — Pp. 317–322.
21. Angular momentum profiles of Class 0 protostellar envelopes / M. Gaudel, A. J. Maury, A. Belloche et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2020. — Vol. 637. — P. A92.