

На правах рукописи

Султанов Ильяс Марсович

**Численное МГД-моделирование фрагментации
молекулярных волокон и образования протозвездных
облаков**

Специальность 1.3.3.
Теоретическая Физика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Челябинск — 2026

Работа выполнена на кафедре общей и теоретической физики ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет».

Научный руководитель: **Хайбрахманов Сергей Александрович**,
кандидат физ.-мат. наук, доцент, доцент
кафедры общей и теоретической физики
физического факультета Челябинского государственного университета

Официальные оппоненты: **Васильев Евгений Олегович**,
доктор физ.-мат. наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Павлюченков Ярослав Николаевич,
доктор физ.-мат. наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт астрономии Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»

Защита состоится 04 декабря 2026 года в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.431.01 при ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет» по адресу: 454001 г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Челябинского государственного университета. Электронная версия автореферата доступна по адресу: <http://www.csu.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.431.01,
кандидат физ.-мат. наук



Матюнина М. В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Наблюдения межзвездной среды, проведенные в субмиллиметровом и инфракрасном диапазонах, показывают, что процессы образования звезд происходят в межзвездных облаках, которые состоят преимущественно из молекулярного водорода и обладают вытянутой структурой [1]. Предполагается, что образование звезд происходит в результате процесса выделения самогравитирующих уплотнений внутри молекулярных облаков — гравитационной фрагментации. Данные самогравитирующие ядра молекулярных облаков называют протозвездными облаками [2]. Характеристики образующихся ядер молекулярных облаков, в частности, спектр их масс, до сих пор детально не изучены. В связи с этим исследование ранних этапов звездообразования и, в частности, фрагментации межзвездных молекулярных облаков являются актуальными задачами в теоретической астрофизике и астрономии.

Одним из механизмов формирования уплотнений внутри волокон является развитие гравитационной неустойчивости, вызванной малыми возмущениями плотности и формы волокна. Как и в классической постановке задачи Джинса, к неустойчивости внутри волокон приводят возмущения с длиной волны, превышающей критическое значение λ_{crit} [3]. Значение λ_{crit} зависит от типа задаваемого возмущения. В подходе Чандрасекара и Ферми (ЧФ) [4] рассматривается неустойчивость, вызванная возмущениями поверхности в цилиндрическом облаке с продольным магнитным полем. В подходе Стодолкевича (СТД) [5] в качестве возмущений задаются магнитогидродинамические (МГД) волны малой амплитуды. Гравитационная неустойчивость облаков может быть обусловлена воздействием внешней среды. Данный механизм формирования протозвездных облаков называется индуцированным звездообразованием. Одним из возможных сценариев воздействия внешней среды является обжатие молекулярных облаков межзвездными ударными волнами [6]. К формированию ударных волн в межзвездной среде могут приводить вспышки сверхновых, звездные истечения и соударения облаков.

В работах, посвященных моделированию гравитационного коллапса молекулярных волокон [7–10], преимущественно исследуется эволюция и фрагментация волокон в зависимости от размеров волокна, начальной линейной массы волокна, интенсивности и геометрии магнитного поля, внешнего давления. Однако остается неисследованной гравитационная связанность формируемых внутри волокон уплотнений, изучение которой позволит определить условия образования протозвездных облаков внутри молекулярных волокон. Наблюдательные данные говорят о наличии в молекулярных облаках магнитного поля [11; 12], влияние которого на

характеристики гравитационно-связанных ядер, образующихся в результате фрагментации, не исследовано. Для определения начальных условий формирования протозвездных облаков необходимо провести анализ зависимости характеристик гравитационно-связанных ядер молекулярных облаков от начальных тепловой, магнитной, гравитационной энергий волокна и от длины начального возмущения. В предыдущих работах [7–10], посвященных исследованию фрагментации, не исследовано распределение магнитного поля внутри ядер. При моделировании важно учитывать большой перепад плотности, образующийся в результате выделения уплотнений внутри волокна, поэтому для исследования эволюции молекулярных облаков вплоть до образования протозвездных ядер, необходимо использовать многомерные параллельные МГД-коды с иерархическими сетками.

Для решения указанных проблем в данной работе разрабатывается теоретическая модель гравитационной фрагментации молекулярных волокон с магнитным полем, и проводится серия численных расчетов с помощью численного кода FLASH [13]. Эволюция волокон впервые исследуется в широком диапазоне начальных линейных магнитной, тепловой и гравитационной энергий волокна. Определяются условия формирования гравитационно-связанных ядер и их параметры в сценарии «коллапса с конца». Определяется зависимость параметров ядер, формирующихся в результате роста малых возмущений, от длины задаваемого возмущения. Впервые исследуется геометрия, интенсивность и распределение магнитного поля внутри ядер.

Целью работы является теоретическое моделирование гравитационной фрагментации молекулярных волокон с магнитным полем. Для достижения цели были выделены следующие **задачи**:

1. Разработать теоретическую модель межзвездных молекулярных волокон с продольным магнитным полем.
2. С помощью разработанной модели исследовать роль магнитного поля в эволюции и фрагментации изначально равновесных и неравновесных волокон. Определить условия развития коллапса на концах волокна.
3. Исследовать фрагментацию волокон в сценарии индуцированного звездообразования, вызванного обжатием межзвездной ударной волной. Определить условия фрагментации волокон. Провести анализ поля скоростей, возникающего в результате турбулентного перемешивания после прохождения ударной волны.
4. Исследовать фрагментацию волокон в сценариях классической гравитационной неустойчивости и неустойчивости, вызванной возмущениями поверхности волокна. Определить гравитационную связанность уплотнений, образующихся внутри волокна. Найти

зависимость свойств выделяемых уплотнений от параметров возмущений. Проанализировать, как происходит фрагментация в облаках с различной начальной степенью неравновесности.

5. Определить, как меняются свойства магнитных полей ядер, образующихся в результате фрагментации волокон, в процессе их эволюции.

Научная новизна

1. Разработана оригинальная теоретическая модель фрагментации межзвездного молекулярного волокна с продольным магнитным полем.
2. С помощью модели впервые детально исследованы эволюция и фрагментация волокон в широком диапазоне начальных тепловой, магнитной и гравитационной энергий. Показано, что размеры и массы ядер молекулярных волокон, образующихся в результате фрагментации волокон с продольным магнитным полем, превышают размеры и массы ядер, выделяющихся в волокнах без магнитного поля.
3. Впервые выявлено, что коллапс на краях равновесных межзвездных молекулярных волокон может быть значительно замедлен обжатием ударной волной. Внутри волокон формируются дозвуковые возмущения скорости, которые могут привести к развитию турбулентности.
4. Впервые выявлено, что фрагментация, вызванная ростом малых возмущений, в изначально неравновесных волокнах приводит к формированию уплотнений, в которых выделяется несколько гравитационно-связанных областей. В изначально равновесных волокнах каждому уплотнению соответствует одно гравитационно-связанное ядро.
5. Впервые продемонстрировано, что ядра, выделяющиеся в результате эффектов гравитационной фокусировки на краях волокна, и ядра, формирующиеся в результате роста малых возмущений внутри волокна, эволюционируют на разных временных масштабах. В результате данного эффекта, на краях и внутри волокна формируются ядра с разными характерными размерами, массами и интенсивностью магнитного поля.
6. Впервые показано, что направление преимущественного сжатия ядер молекулярных волокон по отношению к направлению магнитного поля волокна меняется со временем. На начальных стадиях в равновесных волокнах сжатие ядер происходит вдоль направления магнитного поля волокна. В неравновесных волокнах, наоборот, ядра изначально сжимаются поперек линий магнитного поля. Независимо от степени равновесности волокна, со временем

сжатие ядер приобретает анизотропный характер, который описывается степенной зависимостью интенсивности магнитного поля от плотности с показателем степени $1/3$.

Теоретическая значимость диссертации заключается в развитии теории ранних этапов звездообразования. Разработка теоретической модели для исследования эволюции волокон в широком диапазоне начальных параметров позволила определить ключевую роль магнитного поля в образовании уплотнений на краях волокон, а также определить и сравнить свойства ядер, формирующихся в результате разных механизмов фрагментации волокон. Разработанный подход в дальнейшем позволит исследовать распределение ядер молекулярных облаков по массам, размерам, магнитным потокам и угловым моментам.

Практическая значимость диссертации заключается в применении разработанных моделей для интерпретации наблюдательных данных о ядрах молекулярных облаков. Сравнение параметров ядер с наблюдательными данными позволит определить, за счет какого механизма фрагментации образовались ядра в наблюдаемых волокнах. Полученные в результате расчетов параметры гравитационно-связанных уплотнений могут быть использованы в качестве начальных условий при исследовании эволюции протозвездных облаков.

Методы исследования. Для решения поставленных задач была разработана теоретическая модель волокна, которая основана на численном решении уравнений магнитной газодинамики, позволяющих исследовать эволюцию неравновесных самогравитирующих структур в межзвездной среде. Теоретическая модель была реализована в виде нового модуля для численного кода FLASH4, который использует технологию адаптивно-встраиваемых сеток (AMR). Уравнения идеальной МГД в коде FLASH решаются с помощью схемы MUSCL годуновского типа. Гравитационный потенциал в коде FLASH находится с помощью древесного алгоритма Барнса-Хата. Обработка, анализ и визуализация результатов расчетов выполняется с помощью средств языка программирования Python.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту

1. Разработана оригинальная теоретическая МГД-модель эволюции межзвездного молекулярного волокна с продольным магнитным полем.
2. Впервые показано, что массы и размеры ядер молекулярных облаков, выделяющихся в результате эффектов гравитационной фокусировки на краях межзвездных молекулярных волокон с продольным магнитным полем, на порядок превышают массы и размеры ядер, формирующихся на краях равновесных волокон без магнитного поля. Уплотнения коллапсируют на шкале времени

- свободного падения и передвигаются к центру облака. В волокнах с продольным магнитным полем скорость ядер превышает скорость звука и составляет $\sim 5 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$.
3. Впервые обнаружено, что коллапс на краях межзвездных молекулярных волокон может быть замедлен изотермическим обжатием межзвездной ударной волной слабой интенсивности. Показано, что внутри молекулярных волокон могут формироваться крупномасштабные вихри с дозвуковой дисперсией скорости, которые в дальнейшей эволюции волокна могут привести к развитию турбулентности внутри волокна.
 4. Показано, что в неравновесных волокнах периодические возмущения поверхности приводят к формированию уплотнений, внутри которых выделяются несколько гравитационно-связанных областей. В равновесных волокнах уплотнения эволюционируют в ядра эллипсоидальной формы. Массы образующихся ядер находятся в диапазоне $0.2 - 4 M_{\odot}$, что согласуется с наблюдательными данными о ядрах волокон в областях звездообразования в молекулярном облаке Orion A.
 5. Впервые обнаружено, что гравитационная фокусировка на краях волокна приводит к образованию ядер на меньшей шкале времени, чем фрагментация, вызванная малыми возмущениями внутри молекулярного волокна. Данный эффект может обуславливать различия возраста ядер на краях и внутри наблюдаемых волокон, таких как ядра в волокне L1495-B218, и, соответственно, обуславливать различие возраста образующихся в них звезд.
 6. Обнаружено, что магнитное поле внутри ядер распределено симметрично в направлении вдоль радиуса волокна и асимметрично – вдоль оси волокна. На начальных этапах коллапса в неравновесных облаках ядра сжимаются поперек линиям магнитного поля, в равновесных облаках – вдоль. Впервые показано, что в ходе дальнейшего коллапса сжатие в обоих случаях приобретает анизотропный характер, который характеризуется степенной зависимостью магнитной индукции от плотности $B \sim \rho^{1/3}$. Полученные данные позволяют объяснить наблюдаемую эволюцию магнитных полей молекулярных облаков и их ядер, в частности ядер волокна SDC18.624-0.070.

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»; астрофизический семинар ИНАСАН; объединенный семинар научных подразделений ГАО РАН; астрофизический семинар АКЦ ФИАН; 50-я, 51-я и 52-я Международные студенческие научные конференции «Физика космоса» (Екатеринбург, УрФУ, Коуровская астрономическая обсерватория, 2023 — 2025 г.); Всероссийская с международным участием научная конференция «Современная звездная астрономия – 2023» (Волгоград, МГУ, ИНАСАН, ВолГУ); Международная конференция Challenges and Innovations in Computational Astrophysics V (IAU Commission B1: Computational Astrophysics, 2023 г.); Всероссийская астрономическая конференция, ВАК-2024: «Современная астрономия: от ранней вселенной до экзопланет и черных дыр» (Нижний Архыз, САО РАН, 2024 г.); Всероссийские 8-я и 9-я конференции «Звездообразование и планетообразование» (Москва, АКЦ ФИАН, ГАИШ МГУ, 2024 – 2025 г.); Вторая всероссийская школа-семинар по компьютерному моделированию «АтоМ:from atomistic to Macro» (Челябинск, ЧелГУ, 2025 г.)

Публикации и личный вклад. Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 печатных и электронных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 5 – в трудах российских и международных конференций.

Автором получены все основные результаты, выносимые на защиту. На основе уравнений МГД разработана теоретическая модель молекулярного волокна с магнитным полем. Алгоритм решения уравнений модели реализован в виде нового модуля для численного кода FLASH. Всего выполнено около 20 расчетов с разными начальными значениями линейной массы, температуры, интенсивности магнитного поля волокна и длиной волны начального возмущения. На языке программирования Python написаны программы для обработки, анализа и визуализации данных, полученных с помощью кода FLASH. Выполнен анализ полученных результатов. Автор принимал активное участие в написании статей по результатам работ.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения, списка публикаций автора из 9 работ, списка литературы из 85 источников; изложена на 123 страницах; содержит 12 таблиц и 72 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 и публикации, на которых прошла апробация работы; оценен личный вклад автора; описана структура и объем диссертации.

В первой главе описывается современная картина эволюции межзвездных облаков на основе анализа наблюдательных данных и теоретических моделей. Приводятся основные характеристики наблюдаемых волокон, такие как длина, характерная толщина, линейная масса, температура, интенсивность и геометрия магнитного поля. Анализ теоретических моделей эволюции молекулярных волокон и облаков позволяет выделить следующие режимы коллапса [4–10]: однородное сжатие цилиндрического облака, формирование уплотнений на торцах волокна (англ., end-dominated collapse) и индуцированное звездообразование, вызванное обжатием сферического облака ударной волной. В указанных работах остаются не исследованными зависимость параметров протозвездных облаков от параметров фрагментирующих волокон в различных сценариях коллапса, роль магнитного поля в формировании протозвездных облаков внутри волокон, а также свойства магнитных полей формирующихся протозвездных облаков. Формулируется вывод о том, что для исследования этой зависимости необходимо теоретическое моделирование формирования ядер в молекулярных волокнах

Во второй главе приводится разработанная теоретическая модель волокна и метод определения гравитационной связанности уплотнений, которые могут формироваться в волокне. Длина свободного пробега молекул при характерных температурах $T = 10$ К и концентрациях $n = 10^4$ см $^{-3}$ для облаков молекулярного водорода составляет порядка 10^4 км, что при характерных размерах облаков в несколько пк позволяет рассматривать их как сплошную среду. Рассматривается межзвездная среда с начальной плотностью, температурой и давлением ρ_1 , T_1 и P_1 , внутри которой находится цилиндрическое облако (далее: волокно) длиной H_0 и радиусом R_0 . Волокно является однородным с начальной плотностью ρ_0 , температурой T_0 и давлением P_0 . Волокно пронизано однородным магнитным полем интенсивностью B_0 . На рисунке 1 показана схематическая постановка задачи.

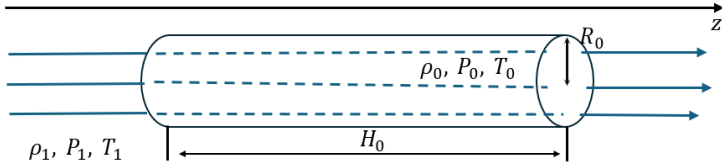


Рис. 1 — Схематическое представление волокна длиной H_0 , радиусом R_0 и концентрацией ρ_0 . Вдоль главной оси волокна направлено однородное магнитное поле B_0 .

В рассматриваемых диапазонах концентраций тепловая энергия эффективно уносится из облака излучением [14], а диссипацией магнитного потока можно пренебречь [15; 16], следовательно гравитационный коллапс волокна можно считать изотермическим и магнитное поле замороженным. Поэтому гравитационный коллапс молекулярного волокна можно исследовать с помощью системы уравнений идеальной МГД:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla P - \nabla \Phi - \frac{1}{4\pi\rho} \mathbf{B} \times (\nabla \times \mathbf{B}), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(\varepsilon + \frac{v^2}{2} + \Phi \right) + \frac{B^2}{8\pi} \right] = -\nabla q \quad (4)$$

$$\Delta \Phi = 4\pi G \rho, \quad (5)$$

$$P = (\gamma - 1)\rho\varepsilon, \quad (6)$$

где ρ , $\mathbf{v}$ и P — плотность, вектор скорости и давление газа, Φ — гравитационный потенциал, $\mathbf{B}$ — магнитная индукция, ε — внутренняя энергия газа, $q = \rho \mathbf{v} \left(\varepsilon + \frac{v^2}{2} + \frac{P}{\rho} + \Phi \right) + \frac{1}{4\pi} \mathbf{B} \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ — плотность потока энергии, γ — показатель адиабаты, который берется равным 1.001.

Соотношения между параметрами внутри волокна и снаружи, в соответствии с теорией фаз межзвездной среды, задаются исходя из условия равенства давлений на поверхности облака:

$$\rho_1 = \frac{\rho_0}{10}, T_1 = T_0 \cdot 10, P_1 = \frac{\mathcal{R}T_1\rho_1}{\mu}, P_0 = \frac{\mathcal{R}T_0\rho_0}{\mu}, \quad (7)$$

где $\mathcal{R} = 8.31 \cdot 10^7$ эрг·моль⁻¹·К⁻¹ — универсальная газовая постоянная, $\mu = 2.31$ — молекулярный вес газа, который соответствует химическому составу $X = 0.7$ — содержание водорода, $Y = 0.28$ — содержание гелия, $Z = 0.02$ — содержание тяжелых элементов. Для вектора переменных $u = \{\rho, \rho \mathbf{v}, \rho(\varepsilon + \frac{v^2}{2} + \Phi) + \frac{B^2}{8\pi}\}$ используются граничные условия Неймана:

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0. \quad (8)$$

Данные граничные условия означают, что вещество свободно перетекает через границы расчетной области.

Для исследования индуцированного звездообразования рассматривается изотермическое обжатие ударной волной слабой интенсивности. Фронт плоской ударной волны коллинеарен главной оси волокна. Ударная

волна характеризуется следующими параметрами за фронтом: плотностью ρ_s , температурой T_s и давлением P_s . Скорость фронта ударной волны составляет D . На рисунке 2 показана схематическая постановка задачи. Начальные условия за фронтом ударной волны определяются из условий Гюгонию и могут быть записаны как:

$$T_1 = T_s, \rho_s = \rho_1 \mathcal{M}^2, P_s = \rho_s c_T^2, D = \mathcal{M} c_T, \quad (9)$$

где $\mathcal{M} = \frac{D}{c_T}$ — число Маха.

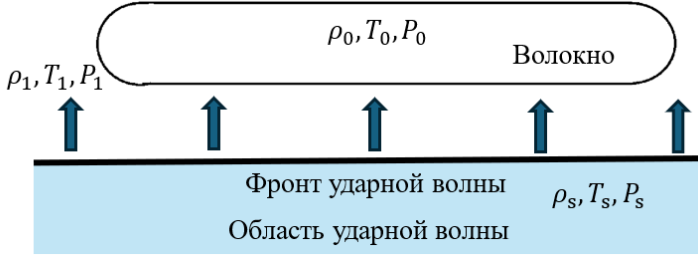


Рис. 2 — Схематическое представление волокна длиной H_0 , радиусом R_0 и концентрацией n_0 . Вдоль главной оси волокна направлено однородное магнитное поле B_0 .

Для анализа характера движения газа в задаче обжатия волокна ударной волной используется оценка дисперсии скоростей: $\delta v_i = (\langle v_i^2 \rangle - \langle v_i \rangle^2)^{1/2}$, где $i = \{x, y, z\}$, $\langle v_i \rangle$ и $\langle v_i^2 \rangle$ — моменты скорости [6; 17]:

$$\langle v_i \rangle = \frac{1}{M} \int_{V_0} \rho v_i dV, \quad (10)$$

$$\langle v_i^2 \rangle = \frac{1}{M} \int_{V_0} \rho v_i^2 dV, \quad (11)$$

где M — масса газа внутри рассматриваемого объема V_0 , ρ и v_i — плотность и скорость.

Для анализа гравитационной равновесности бесконечного цилиндра с продольным магнитным полем используется вириальное соотношение, выведенное Чандрасекаром и Ферми [4]:

$$2(\gamma - 1)U + 2M - |\Omega| = 0, \quad (12)$$

где $U = \frac{c_T^2 \rho_0 \pi R_0^2}{\gamma - 1}$, $M = \frac{B_0^2 R_0^2}{4}$ и $\Omega = G \rho_0^2 \pi^2 R_0^4$ — тепловая, магнитная и гравитационная энергия облака приходящиеся на единицу длины облака. Введем тепловой и магнитный параметры $\varepsilon_T = \frac{2c_T^2}{G \rho_0 \pi R_0^2}$ и $\varepsilon_M =$

$\frac{B_0^2 R_0^2}{4G\rho_0^2\pi^2 R_0^4}$, которые представляют собой отношение линейных (на единицу длины облака) тепловой энергии и энергии магнитного поля к модулю линейной гравитационной энергии соответственно. Тогда условие равновесности можно представить как:

$$\varepsilon_T + \varepsilon_M = \varepsilon. \quad (13)$$

При $\varepsilon < 1$ волокно является неравновесным и начинает коллапсировать вдоль радиуса.

В результате гравитационной фрагментации внутри волокон со временем будут выделяться уплотнения. Будем называть уплотнение ядром, если оно является гравитационно-связанным. Гравитационная связанность уплотнений определяется с помощью анализа энергетического равновесия облака. Рассматриваемая область внутри волокна считается гравитационно-связанной, если внутри нее выполняется условие:

$$(E_{\text{int}} + E_{\text{kin}} + E_{\text{mag}})/E_g \leq 1, \quad (14)$$

где E_{int} — тепловая энергия газа, E_{kin} — энергия крупномасштабных движений газа, E_{mag} — энергия магнитного поля и E_g — модуль гравитационной энергии.

Полагается, что уплотнения имеют форму эллипсоидов. Для определения больших и малых полуосей профили плотности вдоль оси волокна z вдоль его радиуса x ядра аппроксимируется функцией Пламмера [18]. Например, вдоль оси z :

$$\rho = \frac{\rho_0}{\left[1 + \left(\frac{z - z_c}{r_z}\right)^2\right]^{p/2}}, \quad (15)$$

где ρ_0 — плотность газа в центре уплотнения, z_c — координата центра уплотнения вдоль оси волокна (оси z), r_z — радиус центральной практически однородной части волокна вдоль оси z , p — показатель степенной зависимости плотности от радиуса на периферии уплотнения.

Энергии находятся путем суммирования по ячейкам внутри выбранной области: $E_{\text{int}} = \sum_i P_i V_i$, $E_{\text{kin}} = \sum_i \frac{1}{2} m_i v_i^2$, $E_{\text{mag}} = \sum_i \frac{B_i^2}{8\pi} V_i$, $E_{\text{grav}} = \sum_j^{N-1} \sum_{i=j+1}^N G \frac{m_j m_i}{r_{i,j}}$, где i, j — индексы ячеек внутри области, P_i , m_i , v_i , B_i — давление, масса газа, скорость и интенсивность магнитного поля в i -ой ячейке, V_i — ее объем, N — количество ячеек, G — постоянная гравитационного взаимодействия, $r_{i,j}$ — расстояние между i -ой и j -ой ячейками.

Если условие (14) внутри выбранной области не выполняется, то выполняется пересчет энергий для области большего размера, то есть большего значения r_0 в заданном направлении. Процедура повторяется до тех

пор, пока не будут найдены такие размеры эллипсоида, при которых выполняется условие связанности (14). Если в процессе итераций размеры эллипсоида выходит за пределы волокна или границы соседних в волокне ядер пересекаются, а при этом условие (14) все еще не достигнуто, то считается, что уплотнение не является гравитационно-связанным.

Для моделирования эволюции волокна теоретическая модель волокна, представленная в настоящей работе, реализована в виде нового модуля для численного кода FLASH 4 [13], в котором реализована технология адаптивно-встраиваемых сеток (AMR). В коде система уравнений решаются с помощью схемы MUSCL (Monotonic Upstream Centered Scheme for Conservation Laws) гоудновского типа. Схема обладает вторым порядком точности и используется для решения уравнений идеальной сжимаемой жидкости. Гравитационный потенциал находится с помощью древесного алгоритма Барнса-Хата, который составляет глобальное октодерево поверх расчетной области. Само древо является расширением дерева AMR вплоть до отдельных ячеек.

Третья глава посвящена теоретическому исследованию влияния продольного магнитного поля и ударных волн на эволюцию волокон. Для этого рассматривается гравитационный коллапс волокон без магнитного поля и с продольным магнитным полем. Расчеты проводятся с разными значениями числа Маха, теплового и магнитного параметров соответственно.

На рисунке 3 приведены срезы плотностей в плоскости $x - z$ для расчетов ГД-1 ($\varepsilon_T = 0.025$ и $\varepsilon_M = 0$) и ГД-2 ($\varepsilon_T = 2$ и $\varepsilon_M = 0$) в моменты времени 0, 1.01 и 1.59 t_{ff} , где $t_{\text{ff}} = \frac{1}{2\sqrt{G\rho}}$ — время свободного сжатия цилиндра вдоль своего радиуса. В обоих расчетах наблюдается сжатие волокна вдоль своего радиуса, однако в расчете с тепловым параметром меньше единицы сжатие происходит интенсивнее, и за характерное время свободного падения t_{ff} плотность в центре волокна вырастает на несколько порядков. В свою очередь в расчете с тепловым параметром больше единицы волокно сжимается дольше и плотность увеличивается примерно на один порядок. К моменту времени 1.59 t_{ff} на краях облака формируются уплотнения с концентрацией $7 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$, которые передвигаются к центру волокна со сверхзвуковой скоростью $1.15 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$. Таким образом, формирование уплотнений в волокне зависит от степени неравновесности облака.

На рисунке 4 приведены срезы плотностей в плоскости $x - z$ для расчетов УВ-1 ($\varepsilon_T = 1$ и $M = 4$) и УВ-2 ($\varepsilon_T = 1$ и $M = 6$) в моменты времени 1.48 и 0.28 и t_{ff} соответственно. Рисунок показывают, что при $M = 4$ в результате обжатия ударной волной радиальное сжатие волокна значительно замедляется из-за перемешивания вещества. К моменту времени 1.48 t_{ff} плотность волокна вырастает примерно на порядок. На краях волокна со

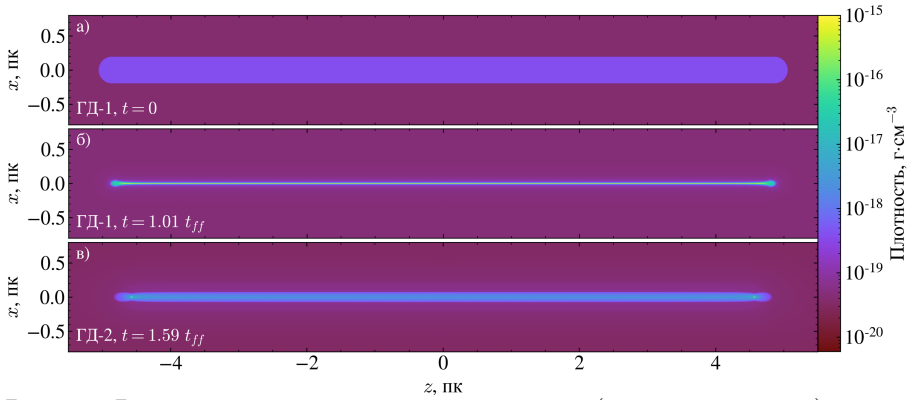


Рис. 3 — Распределение плотности газа волокна (цветовая заливка) в плоскости $x - z$. Панель а: в момент времени $t = 0$ в расчете ГД-1. Панель б: в момент времени $t = 1.01 t_{ff}$ в расчете ГД-1. Панель в: в момент времени $t = 1.59 t_{ff}$ в расчете ГД-2

временем возникают мелкомасштабные уплотнения. Концентрация формируемых уплотнений к моменту времени $1.48 t_{ff}$ достигает порядка 10^5 см^{-3} . Из рисунка видно, что при числе Маха равным 6, обжатие ударной волной приводит к рассеиванию волокна без явных признаков фрагментации.

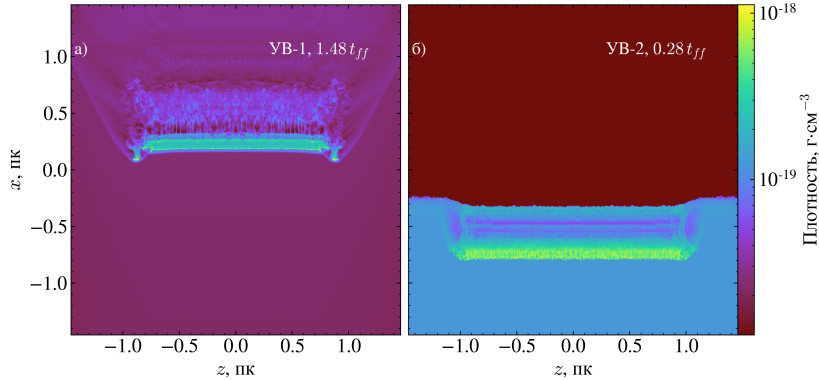


Рис. 4 — Распределение плотности газа волокна (цветовая заливка) в плоскости $x - z$ в расчете обжатия волокна без магнитного поля. Панель а: в момент времени $t = 1.48 t_{ff}$ в расчете УВ-1 (число Маха равно 4). Панель б: в момент времени $t = 0.28 t_{ff}$ в расчете УВ-2 (число Маха равно 6).

Подробная картина распределения плотности и поля скоростей в центре волокна в плоскости $y - x$ в моменты времени 0.17, 0.78 и $1.48 t_{ff}$ представлена на рисунке 5. Рисунок показывают, что в результате

взаимодействий ударной и отраженной волн внутри волокна происходит интенсивное перемешивание вещества и генерируются возмущения плотности и скорости, которые могут служить затравкой для последующего развития турбулентности. Дисперсии скоростей внутри волокна в момент времени $1.48 t_{\text{ff}}$ составляют $\sigma_{v_x} \approx 0.7$, $\sigma_{v_y} \approx 0.3$ и $\sigma_{v_z} \approx 0.1$ от усредненного значения скорости звука.

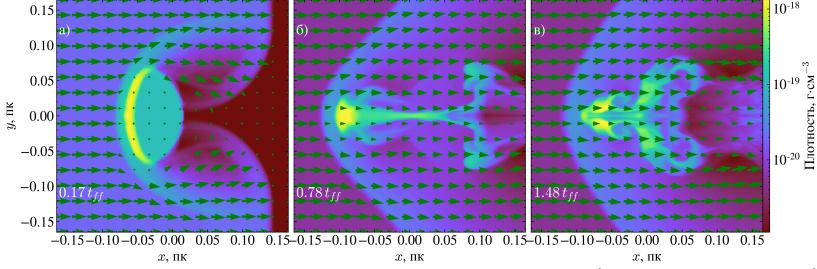


Рис. 5 — Распределение плотности газа волокна (цветовая заливка) и поля скоростей (зеленые стрелки) в плоскости $y - x$ на краю волокна в расчете УВ-1 (обжатие волокна ударной волной с числом Маха 4) в момент времени $t = 0.17 t_{\text{ff}}$ (панель а), $t = 0.78 t_{\text{ff}}$ (панель б), $t = 1.46 t_{\text{ff}}$ (панель в)

На рисунке 6 приведены срезы плотностей в плоскости $x - z$ для расчетов МГД-1 ($\varepsilon_T = 0.025$ и $\varepsilon_M = 0.25$) и МГД-2 ($\varepsilon_T = 0.025$ и $\varepsilon_M = 2.5$) в моменты времени 0, 1.23 и $1.77 t_{\text{ff}}$. В отличие от расчета ГД-1, в расчетах с продольным магнитным полем радиальное сжатие волокна останавливается. В обоих расчетах продольное магнитное не влияет на сжатие вдоль оси волокна, что позволяет сформироваться уплотнениям на торцах волокна. Плотности сгущений уменьшаются с увеличением магнитного параметра, что связано с более эффективным торможением радиального сжатия.

Таким образом, продольное магнитное поле способно поддерживать практически постоянную толщину волокна и приводить к формированию ядер на краях волокон. Этот результат можно объяснить с помощью следующих оценок сил, влияющих на сжатие волокна. В случае однородного изотермического сжатия плотность будет зависеть от радиуса как $\rho \sim r^{-2}$, тогда соответствующее изменение в ускорении, вызванное гравитацией, будет $\nabla\Phi \sim r^{-1}$. Противодействует силе гравитации сила, вызванная градиентом внутреннего давления и давлением магнитного поля: в случае однородного изотермического сжатия $\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} \sim r^{-1}$ и $\frac{1}{8\pi\rho} \frac{\partial B^2}{\partial r} \sim r^{-3}$. Гравитационная сила и градиент давления растут одинаково при сжатии, тогда как электромагнитная сила растет быстрее, таким образом магнитное поле замедляет радиальный коллапс эффективнее, чем внутреннее давление. При этом фрагментация становится возможной даже для неустойчивых

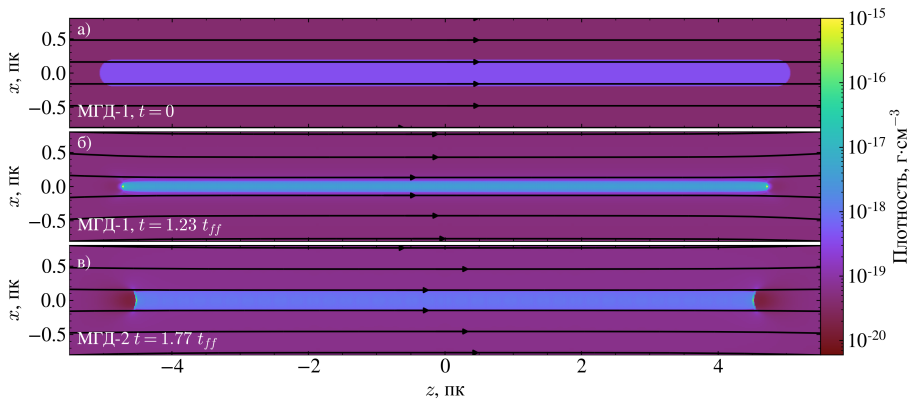


Рис. 6 — Распределение плотности газа волокна (цветовая заливка) в плоскости $x - z$. Панель а: в момент времени $t = 0$ в расчете МГД-1. Панель б: в момент времени $t = 1.23 t_{\text{ff}}$ в расчете МГД-1. Панель в: в момент времени $t = 1.77 t_{\text{ff}}$ в расчете МГД-2

волокон, что согласуется с результатами работ Сейфрида и Уолша [8], а также Дудорова и Хайбрахманова [9].

Анализ условия энергетического равновесия для уплотнений, формируемых на краях волокон, показал, что размеры гравитационно-связанных областей или ядер составляют порядка $10^3 - 10^4$ а.е. (см. рис 7). В расчете ГД-2 образуются ядра массой $< 1 M_{\odot}$, тогда как в МГД-расчетах масса ядер составляет порядка $20 - 50 M_{\odot}$. В случае коллапса волокон без магнитного поля или с меньшей начальной интенсивностью магнитного поля выделяются ядра квазисферической формы. С большей начальной интенсивностью магнитного поля образуются эллипсоидальные ядра большего радиуса. Это связано с тем, что в случае большей начальной интенсивности магнитного поля усиливается влияние градиента магнитного давления на динамику волокна.

На рисунке 8 представлены зависимости интенсивности магнитного поля от плотности $B_z(\rho)$ в центре ядер для расчетов МГД-1 и МГД-2. Зависимости построены для интервалов времени от 0.65 до $1.22 t_{\text{ff}}$ для расчета МГД-1 и от 0.96 до $1.78 t_{\text{ff}}$ для расчета МГД-2. Рисунок показывает, что в обоих случаях наблюдается степенная зависимость $B_z \sim \rho^{k_b}$, наклон которой изменяется со временем. Для расчетов МГД-1 и МГД-2 показатель степени k_b изначально равен 0.85 и 0.06 соответственно. После того как плотность в центре ядра возрастает и становится больше $10^{-17} \text{ г·см}^{-3}$, показатель степени меняется на 0.31 и 0.35 в расчетах МГД-1 и МГД-2 соответственно.

В четвертой главе исследуется фрагментация волокон, вызванная начальными возмущениями. Определяются условия фрагментации облака

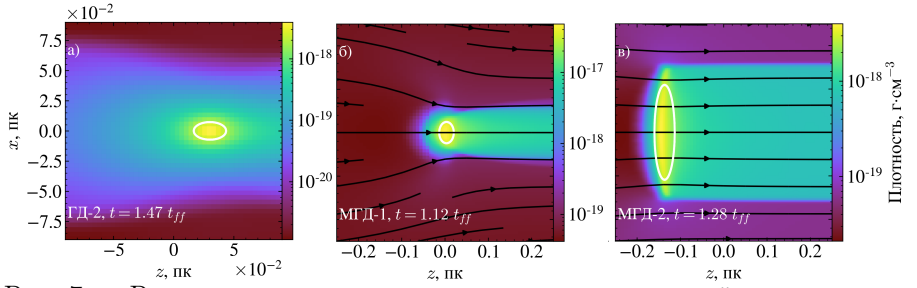


Рис. 7 — Распределение плотности газа волокна и линий магнитного в области формирования ядер в расчетах ГД-2, МГД-1 и МГД-2 в моменты времени $t = 1.47 t_{ff}$ (панель а), $t = 1.12 t_{ff}$ (панель б) и $t = 1.28 t_{ff}$ (панель в). Белой линией показана граница гравитационно-связанной области.

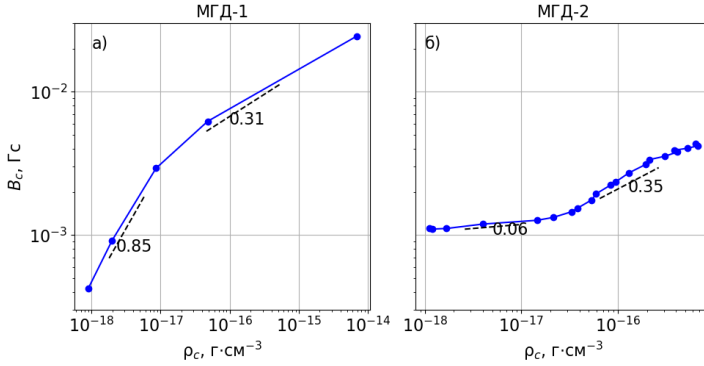


Рис. 8 — Зависимость индукции магнитного поля B_z от плотности газа ρ в центре ядер на краю волокна в расчетах МГД-1 (панель а) и МГД-2 (панель б). Штриховые отрезки с числами указывают характерные тангенсы угла наклона степенных профилей.

и зависимость характеристик образующихся ядер от начальных параметров облака и параметров начального возмущения.

На рисунке 9 приведены срезы плотностей в плоскости $x - z$ для расчета ЧФ-1 ($\varepsilon_T = 0.38$ и $\varepsilon_M = 0.04$) в моменты времени $t = 0$ и $1.14 t_{ff}$. Расчет показывает, что в волокнах формируются уплотнения как внутри, так и на краях. Вдоль волокна уплотнения выделяются в местах максимума начального синусоидального возмущения поверхности. Количество формируемых уплотнений зависит от соотношения длины волны и длины волокна. Как и в расчетах без возмущений, на краях волокон формируются отдельные уплотнения.

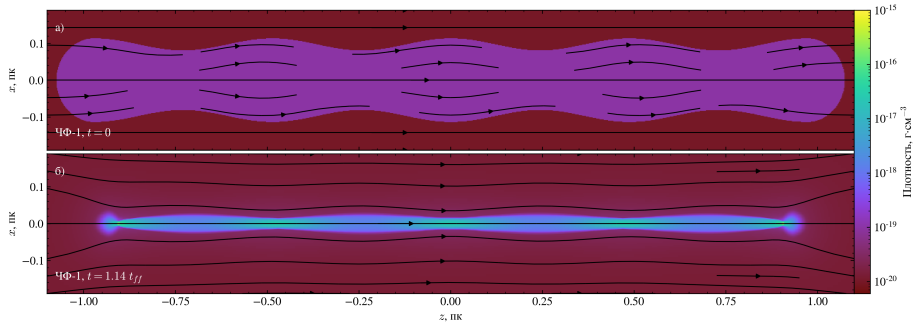


Рис. 9 — Распределение плотности газа волокна (цветовая заливка) и линий магнитного поля (линии со стрелками) волокна в плоскости $x - z$ в расчете ЧФ-1 при $t = 0$ и $1.14 t_{\text{ff}}$ (панель а, б).

На рисунке 10 приведено распределение плотности и линий магнитного поля в местах формирования уплотнений для расчетов ЧФ-1 и ЧФ-4 ($\varepsilon_T = 0.38$ и $\varepsilon_M = 1.94$) в моменты времени $1.14 t_{\text{ff}}$. На рисунке выделена граница гравитационно-связанных областей. Для расчета ЧФ-1 в одном уплотнении можно выделить несколько гравитационно-связанных областей. Образующиеся ядра имеют сферической форму, размеры и массы ядер составляют 10^3 а.е. и $\sim 0.5 M_{\odot}$ соответственно. В расчете ЧФ-4 ядра обладают эллипсоидальной формой и имеют размеры и массы $1.4 \cdot 10^4$ а.е. и $3.8 M_{\odot}$ соответственно.

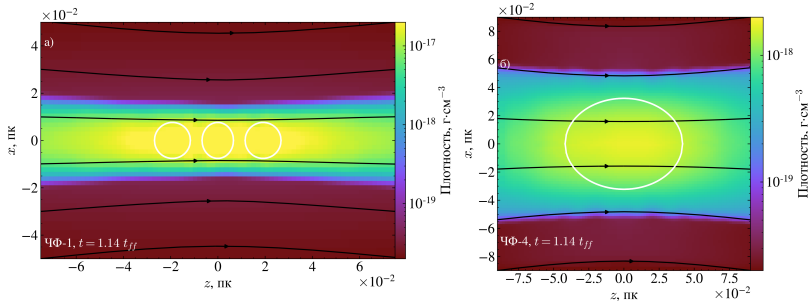


Рис. 10 — Распределение плотности газа и линий магнитного поля волокна в плоскости $x - z$ в области формирования ядер в расчетах ЧФ-1 (панель а) и ЧФ-4 (панель б) в момент времени $1.14 t_{\text{ff}}$.

Фрагментация в рамках Стодолкевича приводит к картине, схожей с картиной фрагментации в рамках Чандраскара и Ферми (см. рис. 11). Внутри волокон со временем формируются уплотнения, которые равноудалены друг от друга на расстояние, равное длине волны начального возмущения. В неравновесных волокнах формируются ядра размерами $\sim$

10^3 а.е. и массой $\sim 0.2 M_\odot$, тогда как фрагментация равновесных волокон приводит к формированию эллипсоидальных ядер размерами $\sim 10^4$ а.е. и массой $\sim 2 M_\odot$.

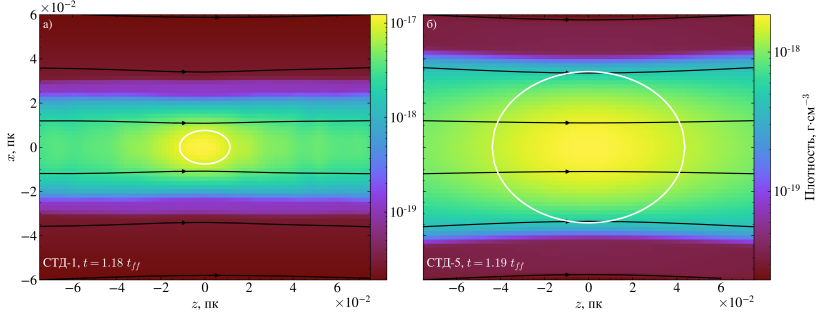


Рис. 11 — Распределение плотности газа и линий магнитного поля волокна в плоскости $x - z$ в области формирования ядер расчетах СТД-1 в момент времени $1.18 t_{ff}$ (панель а) и СТД-5 в момент времени $1.19 t_{ff}$ (панель б).

В **заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы. Показано, что в равновесных волокнах формируются ядра массой и размерами на порядок больше, чем в неравновесных волокнах. Фрагментация на краях волокон происходит на меньшей шкале времени. В результате чего плотности и массы ядер выделяемых на краях превышают на несколько порядков плотности и массы ядер, выделяемых внутри волокна. Данный эффект может обуславливать различия возраста ядер на краях и внутри наблюдаемых волокон [19]. Независимо от степени неравновесности, зависимость индукции магнитного поля ядер на краях волокон от плотности приобретает степенной характер с показателем степени близким к $1/3$, что согласуется с наблюдаемой степенной зависимостью в современных исследованиях молекулярных волокон [12]. Обжатие молекулярных волокон межзвездной ударной волной приводит к замедлению радиального сжатия и к формированию крупномасштабных хаотических возмущений скорости.

Разработка теоретической модели для исследования эволюции волокон в широком диапазоне начальных параметров позволило определить ключевую роль магнитного поля в образовании уплотнений на краях волокон, а также определить и сравнить свойства ядер, формирующихся в результате разных механизмов фрагментации волокон. Разработанный подход в дальнейшем позволит исследовать распределение ядер молекулярных облаков по массам, размерам, магнитным потокам и угловым моментам.

Публикации автора по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

- A1. **Султанов И.М.**, Хайбрахманов С.А. Численная МГД-модель гравитационно-неустойчивых цилиндрических молекулярных облаков // Челябинский физико-математический журнал. – 2026. – Т. – 11. – Вып. – 1. – С. 159–169.
- A2. Хайбрахманов С.А., **Султанов И.М.**, Эволюция магнитного поля в ядрах межзвёздных молекулярных волокон // Астрон. Ж. – 2026. – Т. – 103. – №. 4. – С. 625-633.
- A3. **Султанов И.М.**, Хайбрахманов С.А. Гравитационная фрагментация молекулярных волокон с продольным магнитным полем // Научные труды Института астрономии РАН. — 2025. — Т. — 10. — Вып. — 1. — С. 1-9.
- A4. **Султанов И.М.**, Хайбрахманов С.А. МГД-моделирование эволюции молекулярных волокон // Астрон. Ж. — 2024. — Т. 101. — № 1. — С. 34-41

Литература

1. Characterizing the properties of nearby molecular filaments observed with Herschel / D. Arzoumanian, Ph. Andre, V. Konyves et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2019. — Vol. 621. — P. 31.
2. Properties of the dense core population in Orion B as seen by the Herschel Gould Belt survey / V. Konyves, Ph. Andre, D. Arzoumanian et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2020. — Vol. 635. — P. 29.
3. *Jeans J. H.* The Stability of a Spherical Nebula // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*. — 1902. — Vol. 199. — Pp. 1–53.
4. *Chandrasekhar S., Fermi E.* Problems of Gravitational Stability in the Presence of a Magnetic Field // *The Astrophysical Journal*. — 1953. — Vol. 118. — P. 116.
5. *Stodolkiewicz J. S.* On the Gravitational Instability of Some Magneto-Hydrodynamical Systems of Astrophysical Interest. Part III. // *Acta Astron.* — 1963. — Vol. 13. — Pp. 30–54.
6. *Klein R. I., McKee C. F., Colella P.* On the Hydrodynamic Interaction of Shock Waves with Interstellar Clouds. I. Nonradiative Shocks in Small Clouds // *The Astrophysical Journal*. — 1994. — Vol. 42. — Pp. 213–236.
7. *Bastien P.* Gravitational collapse and fragmentation of isothermal, non-rotating, cylindrical clouds // *Astronomy & Astrophysics*. — 1983. — Vol. 119, no. 1. — Pp. 109–116.
8. *Seifried D., Walch S.* The impact of turbulence and magnetic field orientation on star-forming filaments // *Monthly Notices of the RAS*. — 2015. — Vol. 453, no. 3. — Pp. 2410–2422.
9. *Dudorov A. E., Khaibrakhmanov S. A.* Hierarchical structure of the interstellar molecular clouds and star formation // *Open Astronomy*. — 2017. — Vol. 26, no. 1. — Pp. 285–292.
10. *Anathpindikar S. V., Di Francesco J.* On the formation of cores in accreting filaments and the impact of ambient environment on it // *Publications of the Astronomical Society of Australia*. — 2024. — Vol. 41. — P. 21.
11. Planck intermediate results. XXXV. Probing the role of the magnetic field in the formation of structure in molecular clouds / P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. I. R. Alves et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — Vol. 586. — P. 29.

12. From filament to clumps and cores: A multiscale study of fragmentation and the role of the magnetic field and gas velocity in the infrared dark cloud SDC18.624-0.070 / H.-T. Lee, Y.-W. Tang, P. M. Koch et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2025. — Vol. 696. — P. 19.
13. FLASH: An Adaptive Mesh Hydrodynamics Code for Modeling Astrophysical Thermonuclear Flash / B. Fryxell, K. Olson, P. Ricker et al. // *Astrophysical Journal, Supplement*. — 2000. — Vol. 131. — Pp. 273–334.
14. Masunaga H., Inutsuka S. 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. 350–356.
15. Дудоров А. Е., Сазонов Ю. В. Гидродинамика коллапса межзвездных облаков. IV. Степень ионизации и амбиполярная диффузия // *Научные информации*. — 1987. — no. 63. — P. 68.
16. Dudorov A. E., Khaibrakhmanov S. A. Fossil magnetic field of accretion disks of young stars // . — 2014. — Vol. 352, no. 1. — Pp. 103–121.
17. Shock Interactions with Magnetized Interstellar Clouds. I. Steady Shocks Hitting Nonradiative Clouds / M.-M. Mac Low, C. F. McKee, R. I. Klein et al. // *The Astrophysical Journal*. — 1994. — Vol. 433. — Pp. 757–777.
18. Plummer H. C. On the problem of distribution in globular star clusters // *Monthly Notices of the RAS*. — 1911. — Vol. 71. — Pp. 460–470.
19. Scibelli Samantha, Shirley Yancy. Prevalence of Complex Organic Molecules in Starless and Prestellar Cores within the Taurus Molecular Cloud // *The Astrophysical Journal*. — 2020. — Vol. 891, no. 1. — P. 17.

Султанов Ильяс Марсович

Численное МГД-моделирование фрагментации молекулярных волокон и
образования протозвездных облаков

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____ Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 80 экз.

Типография _____

