

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Челябинский
государственный университет»,
кандидат химических наук,
доцент
Бирюков Александр Игоревич



«03» 07 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Челябинский государственный университет»**

Диссертация «Численное МГД-моделирование фрагментации молекулярных волокон и образования протозвездных облаков» выполнена на кафедре общей и теоретической физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Челябинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ЧелГУ»).

В период подготовки диссертации соискатель Султанов Ильяс Марсович работал в должности ассистента кафедры общей и теоретической физики и по совместительству инженера лаборатории общей и вычислительной физики и лаборанта исследователя кафедры общей и теоретической физики. В 2019 г. соискатель окончил ФГБОУ ВО «ЧелГУ» по направлению подготовки «03.03.02 Физика» с присвоением квалификации «Бакалавр», в 2021 г. – ФГБОУ ВО «ЧелГУ» по направлению подготовки «03.04.02 Физика» с присвоением квалификации «Магистр». С 01.10.2021 по настоящий момент Султанов Ильяс Марсович проходит обучение в аспирантуре ФГБОУ ВО «ЧелГУ» по научной специальности 03.06.01. Физика и астрономия. Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана 17.06.2026 № 07-26 федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Челябинский государственный университет».

Тема кандидатской диссертации «Численное МГД-моделирование фрагментации молекулярных волокон и образования протозвездных облаков» утверждена приказом по ФГБОУ ВО «ЧелГУ» от 29.06.2026 г. № 27.

Научный руководитель – Хайбрахманов Сергей Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей и теоретической физики ФГБОУ ВО «ЧелГУ».

По итогам обсуждения принято следующее заключение: диссертационная работа И.М. Султанова посвящена разработке теоретической модели эволюции межзвездных молекулярных волокон с продольным магнитным полем; изучению турбулентного перемешивания вещества волокна при взаимодействии с межзвездной ударной волной; анализу условий фрагментации равновесных и неравновесных волокон; определению масс и размеров гравитационно-связанных уплотнений (протозвездных облаков), формирующихся в волокнах, а также изучению распределения магнитного поля в этих уплотнениях. Диссертационная работа соответствует специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

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

Теоретическая значимость диссертации заключается в развитии теории ранних этапов звездообразования. 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.

Практическая значимость заключается в применении разработанных моделей для интерпретации наблюдательных данных о расположении и массах ядер в волокнистых молекулярных облаках, а также данных об их магнитных полях. 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.

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 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 $1/3$.

Личный вклад автора. В ходе выполнения научно-квалификационной работы автор самостоятельно занимался решением поставленных задач, а именно: проводил разработку теоретической модели межзвездного молекулярного волокна с продольным магнитным полем и ее реализацию в численном коде FLASH. На языке программирования Python автором написаны программы для обработки, анализа и визуализации данных. По всем результатам, представленным в диссертации, вклад автора является существенным и достаточным для того, чтобы выносить их на защиту. Автор участвовал в подготовке результатов исследования к публикации и представлял их на научных конференциях.

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

– 50-я, 51-я, 52-я Международные студенческие научные конференции «Физика космоса» (Екатеринбург, УрФУ, Коуровская астрономическая обсерватория, 2023, 2024, 2025 г.);

– Всероссийская с международным участием научная конференция «Современная звездная астрономия – 2023» (Волгоград, МГУ, ИНАСАН, ВолГУ, 2023 г.);

– 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, CAO РАН, 2024 г.);

– 8-я и 9-я Всероссийские конференции «Звездообразование и планетообразование» (Москва, АКЦ ФИАН, ГАИШ МГУ, 2024 и 2025 г.)

– Вторая всероссийская школа-семинар по компьютерному моделированию «АтоМ: from atomistic to Macro» (Челябинск, ЧелГУ, 2025 г.)

Положения и результаты исследования, выносимые на защиту, достаточно полно отражены автором по теме диссертации в **4 статьях**, опубликованных в журналах, индексируемых **Web of Science / Scopus и приравненных к рекомендованным ВАК РФ**. Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 37 страниц. В изданиях, опубликованных в соавторстве, личный вклад соискателя составляет 60 %.

Список публикаций автора по теме диссертационной работы:

1. 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.
2. Khaibrakhmanov S.A., Sultanov I.M., Evolution of the magnetic field in the cores of interstellar molecular filaments // Astronomy Reports. – 2026. – Vol. – 70. – №. – 1. – pp. 101–109.
3. 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.

4. Султанов И.М., Хайбрахманов С.А. МГД-моделирование эволюции молекулярных волокон // Астрон. Ж. – 2024. – Т. 101. – № 1. – С. 34-41

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности

1.3.3 – Теоретическая физика:

п. 2 «Свойства материи и пространства-времени во Вселенной. Классическая и квантовая космология и гравитация. Свойства вакуума, темная энергия. Общая теория относительности и ее расширения», поскольку в работе исследуются свойства материи молекулярных облаков в межзвездной среде в Галактике, а именно: определяются характерные плотности материи формирующихся в облаках уплотнений (ядер), размеры и массы ядер, а также распределение магнитного поля внутри ядер.

п. 10 «Теория неравновесных систем. Теория хаоса и турбулентности», поскольку в работе исследуется коллапс и гравитационная фрагментация молекулярных волокон межзвездных облаков, характеризующихся различной начальной степенью гравитационной неравновесности, а также исследуется дисперсия турбулентного поля скоростей газа в равновесных молекулярных волокнах после их взаимодействия с межзвездной ударной волной;

В соответствии с пунктом 14 Положения о присуждении ученых степеней в диссертации отсутствует заимствованный материал без ссылки на автора и (или) источник заимствования, результаты научных работ, выполненных соискателем ученой степени в соавторстве, без ссылок на соавторов.

Диссертационная работа И.М. Султанова на тему «Численное МГД-моделирование фрагментации молекулярных волокон и образования протозвездных облаков» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствующую требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям пп. 9-11 и пп. 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней. Диссертация «Численное МГД-моделирование фрагментации молекулярных волокон и образования протозвездных облаков» Султанова Ильеса Марсовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – Теоретическая физика.

Майер А.Е.,
доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий кафедрой общей и теоретической
физики физического факультета ФГБОУ ВО ЧелГУ»

Подпись: *Майер А.Б.*
удостоверяю: *Алекс. Антимонов*
ведущий специалист