

## НАПРАВЛЕНИЕ 1. Формирование и эволюция Солнечной системы

Кураторы направления акад. М.Я. Маров (ГЕОХИ РАН), А.В. Колесниченко (ИПМ РАН)

1.1	Проект 1.1: Математическое моделирование структурированной турбулентности в немагнитных и магнитных космических средах применительно к проблеме образования и эволюции солнечного протопланетного диска, с учетом процессов объединения пылевых сгущений фрактальной природы в рыхлые прото-планетезимали	ИПМ РАН	А.В. Колесниченко
1.2	Проект 1.2: Космогонические проблемы исследований ГКЛ в ранней и современной Солнечной системе	ГЕОХИ РАН	В.А. Алексеев Г.К. Устинова
1.3	Проект 1.3: Газодинамические и приливные процессы в протопланетных системах	ФИАН	П.Б. Иванов
1.4	Проект 1.4. Моделирование эволюции разреженных сгущений и образования первичных твердых тел в протопланетном диске	ГЕОХИ РАН	М.Я. Маров

**Проект 1.1. Математическое моделирование структурированной турбулентности в немагнитных и магнитных космических средах применительно к проблеме образования и эволюции солнечного протопланетного диска, с учетом процессов объединения пылевых сгущений фрактальной природы в рыхлые прото-планетезимали.**

Исследована роль вихревой спиральности в появлении обратного энергетического каскада Ричардсона-Колмогорова в трёхмерной спиральной турбулентности вращающегося немагнитного астрофизического диска при больших числах Рейнольдса. Сделан вывод, что по мере всё более надёжного подтверждения в численных экспериментах концепции инверсного каскада энергии в спиральной турбулентности учёт этого эффекта приобретает важную роль при моделировании процессов образования и эволюции энергоёмких когерентных вихревых структур в астрофизическом диске.

Работа велась по четырём темам.

**Тема 1.1.1. Разработка в приближении турбулентной МГД модели тонкого некеплеровского диска, учитывающей и наличия аккреции из окружающего пространства, воздействие турбулентного  $\omega\omega$  –динамо на генерацию магнитного поля, магнитное силовое и энергетическое взаимодействие между диском и его короной.**

Построена модель тонкого аккреционного диска протозвезды, учитывающая диссипацию турбулентности за счёт кинематической и магнитной вязкости, непрозрачность космической среды, наличие аккреции из окружающего пространства, воздействие турбулентного  $\alpha\omega$ -динамо на генерацию магнитного поля, магнитное силовое и энергетическое взаимодействие между диском и его короной и т.п.

**Тема 1.1.2. Вывод модифицированных критериев гравитационной неустойчивости Джинса и Тумре для вращающихся астрофизических космических объектов с фрактальной структурой в рамках формализма неаддитивной статистики Тсаллиса (предназначенной для моделирования аномальных систем с сильным гравитационным взаимодействием отдельных её частей и фрактальным характером фазового пространства скоростей).**

В рамках формализма неаддитивной статистики Тсаллиса, предназначенной для моделирования аномальных систем с сильным гравитационным взаимодействием отдельных её частей и фрактальным характером фазового пространства, получены модифицированные критерии гравитационной неустойчивости Джинса и Тумре для астрофизических вращающихся газопылевых космических объектов с фрактальной структурой.

**Тема 1.1.3. Создание численной трёхмерной модели образования и эволюции газопылевого протопланетного диска вокруг звезды, учитывающей гравитацию центрального тела, самогравитацию диска, а также влияние на процессы фрагментации и сжатия дискового вещества скорости охлаждения.**

В рамках основной проблемы космогонии, связанной с формированием планетезималей в Солнечном протопланетном диске, построена с учётом фрактальных представлений о свойствах пылевых кластеров дробно-интегральная гидродинамическая модель образования и эволюции ажурных пылевых агрегатов в дисковой среде.

**Тема 1.1.4. Разработка концепции образования и энергетической подпитки когерентных вихревых структур в спиральной зеркально-несимметричной турбулентности немагнитного протопланетного диска, когда в результате обратного энергетического каскада Ричардсона-Колмогорова генерируется система мезомасштабных трёхмерных вихрей.**

Исследована роль вихревой спиральности в появлении обратного энергетического каскада Ричардсона-Колмогорова в трёхмерной спиральной турбулентности вращающегося немагнитного астрофизического диска при больших числах Рейнольдса.

**Руководитель проекта:** д. физ.-мат. н. проф. А. В. Колесниченко, [kolesn@keldysh.ru](mailto:kolesn@keldysh.ru)

**Публикации:** по данному проекту в 2015 г. опубликовано 8 статей и препринтов

### **Проект 1.2. Космогонические проблемы исследований ГКЛ в ранней и современной Солнечной системе.**

Выполнен расчёт изотопных аномалий D и N в реакциях расщепления в ранней Солнечной системе; найдены особенности солнечной модуляции галактических космических лучей (ГКЛ) за последние 55 лет; установлены долгопериодические вариации ГКЛ за последний миллиард лет.

1. Разработан количественный подход к анализу изотопной гетерогенности первичного вещества в условиях прохождения ударных волн. Сделан вывод, что наблюдаемые аномалии D/N в разных объектах Солнечной системы сформировались уже более поздними процессами, например, теми же реакциями расщепления на стадии жесткого облучения молодого Солнца, и главное, разнообразными многостадийными кинетическими процессами химического и физического фракционирования.

2. Для изучения динамики процессов в гелиосфере на длительной временной шкале составлен длинный ряд однородных данных по скоростям образования космогенных радионуклидов с разными периодами полураспада вдоль метеоритных орбит путем измерения и анализа радиоактивности  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{22}\text{Na}$  и  $^{26}\text{Al}$  в 39 хондритах, последовательно выпадавших в период с 1959 г. по настоящее время. Сделано предположение о постоянстве механизма солнечной модуляции, по крайней мере, в течение последнего ~ 1 млн. лет.

3. Разработан метод анализа распределения радиационных возрастов железных метеоритов с целью установления вариаций интенсивности ГКЛ за последний миллиард лет. Применение этого метода позволило найти вариации ГКЛ с периодом ~400-500 млн. лет. Вариации могут быть обусловлены периодическим пересечением Солнечной системой спиральных рукавов Галактики.

**Руководители проекта:**

Алексеев Виктор Алексеевич, ГЕОХИ РАН, e-mail: AVAL37@mail.ru

Устинова Галина Константиновна, ГЕОХИ РАН, e-mail: ustinova@dubna.net.ru

**Публикации:** по данному проекту в 2015 году было опубликовано 7 статей.

### **Проект 1.3. Газодинамические и приливные процессы в протопланетных системах.**

#### **Тема 1.3.1. Динамические приливные взаимодействия.**

В 2013 году мы предложили новый общий подход к вычислению передачи энергии и углового момента за счет динамических приливных взаимодействий, призванный обобщить и уточнить широко используемую теорию Зана. В этом году нам удалось продвинуться в этом направлении и надежно вычислить интегралы перекрытия для нескольких моделей звезд с массами 1.5-2 массы Солнца и разными возрастами. Мы вычислили характерное время приливной эволюции экзопланеты, находящейся на круговой орбите вокруг невращающейся звезды с массой 2 массы Солнца и возрастом 844 миллиона лет. Планируется публикация по этой теме в следующем году.

#### **Тема 1.3.2. Транзиентный рост крупномасштабных вихрей в аккреционных и протопланетных дисках.**

В этом году мы закончили часть работы по этой теме, посвященную поиску оптимальных ненормальных возмущений в тонких газовых дисках и написали обзорную статью по этой тематике.

#### **Тема 1.3.3. Динамические приливы в нетвёрдотельно вращающихся звёздах.**

Идёт работа по рассмотрению реакции нетвёрдотельно вращающейся звезды на внешнее воздействие от звезды компаньона.

Было получено общее выражение, не зависящее от конкретного профиля вращения, для поправки к собственной частоте. Полученные выражения могут быть использованы и в случае сравнимых по амплитуде твердотельной и нетвёрдотельной частей вращения. В следующем году мы собираемся применить полученные результаты к конкретным типам мод колебаний вращающихся звезд и планет гигантов, таких как внутренние гравитационные волны и инерциальные моды и оценить влияние нетвердотельности вращения на приливную передачу энергии и углового момента. Планируется публикация по этой теме в следующем году.

**Руководитель проекта:** Иванов П. Б., д. ф.-м. н., в.н.с., АКЦ ФИАН [pbi20@cam.ac.uk](mailto:pbi20@cam.ac.uk)

**Публикации:** по данному проекту в 2015 году было опубликовано 2 статьи.

#### **Проект 1.4. Моделирование эволюции разреженных сгущений и образования первичных твердых тел в протопланетном диске.**

Проведены исследования процессов эволюции пылевых сгущений в газопылевом протопланетном диске на основе численного моделирования взаимодействия наноразмерных частиц. Получен критерий развития гравитационной неустойчивости пылевой фазы для разных регионов газопылевого протопланетного диска в зависимости от размера частиц.

Работа велась по двум темам.

##### **Тема 1.4.1. Моделирование эволюции разреженных сгущений.**

Изучение процессов зарождения и эволюции Солнечной системы относится к фундаментальным проблемам современного естествознания. Эта проблема является междисциплинарной и требует разработки математических моделей физической структуры и эволюции газопылевого аккреционного диска от начальных этапов его образования до формирования планетной системы. Одной из ключевых является проблема образования и роста тел в протопланетном диске, в основе которой лежит изучение столкновительных процессов твердотельной компоненты.

Математическая реализация модели основана на методе проницаемых частиц, который позволил учесть внутреннюю структуру объектов и сложный характер их взаимодействия. В результате численных экспериментов найдены условия, при которых может происходить полное или частичное разрушение одного или обоих объектов с последующим рассеиванием фрагментов или обратной частичной аккумуляцией.

Рассмотренная модель для различных исходных данных позволяет сделать вывод о том, что предложенное феноменологическое описание динамических процессов в зоне контакта тел при соударениях адекватно описывает перераспределение энергии между процессами различной природы и может эффективно применяться при построении моделей столкновительной эволюции пылевых фрактальных кластеров и тел в допланетном диске.

##### **Тема 1.4.2. Образование первичных твердых тел в протопланетном диске.**

Получен критерий (необходимое и достаточное условие) гравитационной неустойчивости (ГН) пылевой фазы газопылевого протопланетного диска или пылегазового субдиска

(образовавшегося при оседании пыли к средней плоскости диска). Для получения модифицированного критерия решалась линейная система уравнений для малых радиальных возмущений скоростей и плотностей пылевой и газовой фаз диска (субдиска) в приближении несжимаемого газа. При рассмотрении возмущений диск считался плоским тонким (т.е. длина волны возмущений больше толщины диска), однако конечная толщина диска учитывалась.

**Руководитель темы:** д. физ.-мат. н., зав. отд. ГЕОХИ РАН, академик Маров Михаил Яковлевич, [marovmail@yandex.ru](mailto:marovmail@yandex.ru)

**Публикации:** по данному проекту в 20015 году было опубликовано 4 статьи.