

## 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	Колесниченко А.В.
1.2	Проект 1.2: Космогонические проблемы исследований ГКЛ в ранней и современной Солнечной системе	ГЕОХИ РАН	Алексеев В.А., Устинова Г.К.
1.3	Проект 1.3: Газодинамические и приливные процессы в протопланетных системах	ФИАН	Иванов П.Б.
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.**

**Аннотация.** 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 четырем темам.

**Тема 1.1.1. Разработка в приближении турбулентной МГД модели тонкого некеплеровского диска, учитывающей и наличия аккреции из окружающего пространства, воздействие турбулентного  $\alpha\omega$  –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.

В приближении одножидкостной магнитной гидродинамики была получена замкнутая система МГД-уравнений масштаба среднего движения, предназначенная для моделирования сжимаемых турбулентных течений электропроводных сред в присутствии магнитного поля. С целью наглядного физического истолкования отдельных составляющих энергетического баланса плазмы и поля получены различные уравнения энергии, позволяющие проследить возможные переходы энергии из одной формы в другую, в частности, понять механизмы перекачки гравитационной и кинетической энергии среднего движения в магнитную энергию. Особое внимание было уделено методу получения в рамках расширенной необратимой термодинамики замыкающих соотношений для полного (с учётом магнитного поля) кинетического тензора турбулентных напряжений и так называемого магнитного тензора Рейнольдса, позволяющего, в частности, проанализировать ограничения, накладываемые условием возрастания энтропии на коэффициенты турбулентного переноса. Предложена методика моделирования коэффициентов турбулентного переноса (таких как коэффициент турбулентной вязкости), учитывающая влияние магнитного поля и обратного эффекта переноса тепла на развитие турбулентности в электропроводной среде.

В рамках основной проблемы космогонии, связанной с реконструированием протопланетного диска Солнца на самых ранних этапах его существования, на основе полученной замкнутой системы МГД-уравнений масштаба среднего движения (предназначенной для численного решения задач по взаимосогласованному моделированию структуры и эволюции аккреционного протопланетного диска и связанной с ним короны), построена модель тонкого (но оптически толстого) диска, учитывающая диссипацию турбулентности за счёт кинематической и магнитной вязкости, непрозрачность 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.

Проблема образования планет в системе солнечно-подобного диска напрямую связана с ранней стадией его формирования и эволюции. По современным представлениям планеты возникают после потери гравитационной устойчивости субдиском, образованным в результате дифференциального вращения газопылевого вещества протопланетного облака по орбите вокруг звезды и процессов аккреции при оседании его пылевой составляющей к экваториальной плоскости, перпендикулярной оси вращения диска. При сильном уплотнении пылевой составляющей образовавшегося субдиска, когда плотность вещества в слое достигает некоторого критического значения, субдиск становится гравитационно неустойчивым и распадается на многочисленные пылевые. В областях с высокой плотностью этих сгущений последующая эволюция приводит к возникновению локальных дискретных центров уплотнения, т.е. к образованию роя первичных уединённых газопылевых агломератов, служащих основой зародышей изначально рыхлых (fluffy) прото-планетезималей, из которых происходит образование твердотельных планетезималей с большой начальной массой, а затем, на заключительной стадии процесса эволюции вещества диска, путём объединения планетезималей происходит формирование планет. К сожалению, несмотря на колоссальный прогресс в изучении внеземного вещества, получении данных наблюдений околозвёздных аккреционных дисков, открытии экзопланет, совершенствовании методов математического моделирования, астрофизики все ещё далеки от решения многих ключевых проблем указанного выше сценария.

По-видимому, прогресс в объяснении известной изошрённости фактической реализации указанного сценария может быть достигнут на пути расширения арсенала теоретических подходов к моделированию различных проблем космогонии, в частности, эволюции

астрофизических дисков. Далее мы рассмотрим один из таких подходов, связанный с адекватным моделированием сильного гравитационного взаимодействия между отдельными частями дисковой среды, которое проявляется специфическим образом в результате длительного процесса эволюции. Как теперь стало понятно, астрофизические диски относятся в общем случае к числу так называемых аномальных систем, признаком которых является несводимость всей системы к простой сумме её частей. Именно сильное гравитационное взаимодействие является причиной термодинамической неэкстенсивности дисковой среды, когда, например, её энтропия не является аддитивной величиной. По этой причине моделирование эволюции дискового вещества на основе классической кинетики и статистики Гиббса-Больцмана не является в общем случае вполне адекватным. Другими словами, дисковая система относится к числу сложных систем, для которых характерна слабая хаотизация фазового пространства, когда экспоненциально быстрое перемешивание приобретает другой (степенной) характер. Такой теорией является интенсивно развиваемая в последнее время неэкстенсивная статистика (термодинамика) Тсаллиса, предназначенная для описания поведения аномальных систем с сильным силовым взаимодействием, фрактальным характером фазового пространства и сильными корреляциями между отдельными её частями.

Другая немаловажная корректировка моделей ранней эволюции протопланетного диска связана с более углублённым пониманием тех реальных процессов, которые сопровождают объединение частиц субмикронного и микронного размеров при взаимных столкновениях в твердотельные агрегаты. В связи с этим важно отметить, что до последнего времени в большинстве хорошо разработанных космогонических моделей протопланетного диска изначально принималась компактная структура растущих пылевых кластеров. Однако, как теперь стало ясно, подобные пылевые образования могут иметь весьма пушистую структуру и чрезвычайно низкую объёмную плотность. Для таких ворсистых агрегатов, имеющих по сравнению с плотными пылевыми частицами относительно большие геометрические поперечные сечения, меняется весь путь эволюции в исходной газопылевой среде, т.е. путь от пылевых частиц через пушистые агрегаты к компактным планетезималиям. Вполне очевидно, что для адекватного описания эволюции подобных астрофизических протопланетных дисков и, в конечном счёте, механизма образования прото- планетезималей в них, необходимо, в общем случае, привлекать к рассмотрению фрактальные свойства дисковых сред. При таком подходе гидродинамическое моделирование фрактальной дисковой среды, обладающей нецелой фрактальной (массовой) размерностью  $D_f$ , должно проводиться в рамках обобщённых

гидродинамических уравнений, которые являются в общем случае следствием модели в дробно-интегральной форме.

В связи со сказанным, в выполненном исследовании вещество диска рассматривалось, как особый тип сплошной среды – фрактальной среды, для фазовом пространстве которой существуют точки и области, не заполненные её составляющими. В рамках формализма деформированной статистики Тсаллиса нами были получены обобщённые гидродинамические уравнения Навье-Стокса для фрактальной среды (так называемых уравнений  $q$ -гидродинамики). На основе этих уравнений получены при учёте диссипативных эффектов линеаризованные уравнения колебаний твёрдотельно-вращающегося диска и дан вывод дисперсионного уравнения в ВКБ-приближении. Проведён анализ осесимметричных колебаний астрофизического дифференциально вращающегося газопылевого диска и получены модифицированные критерии гравитационной неустойчивости Джинса и Тумре для вращающихся астрофизических космических объектов

### **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 формирования 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.

Выполнено моделирование процессов образования пылевых фрактальных кластеров как основы рыхлых прото-планетезималей в Солнечном допланетном облаке. В предпринятом исследовании, применительно к проблеме формирования планетезималей в Солнечном допланетном облаке, построена с учётом фрактальных представлений о свойствах пылевых кластеров в космической аэродисперсной среде эволюционная гидродинамическая модель образования и движения ворсистых пылевых агрегатов, являющихся основным структурообразующим элементом рыхлых прото-планетезималей. В отличие от ряда классических исследований, в которых моделирование эволюции допланетного облака проводилось в рамках «обычной» сплошной среды, предлагается рассматривать совокупность ажурных пылевых агрегатов, как особый тип среды – фрактальной среды, для которой существуют точки и области, не заполненные её частицами. Гидродинамическое моделирование подобной среды, обладающей нецелой

массовой размерностью, проведено в рамках дробно-интегральной модели (её дифференциальной формы), использующей для учёта фрактальности дробные интегралы, порядок которых определяется массовой размерностью пылевых кластеров.

**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.

В последнее время весьма интенсивно исследуются разнообразные когерентные (диссипативные) структуры в турбулентной несжимаемой жидкости, которые оказывают сильное влияние на различные динамические характеристики течения. С фактической точки зрения наиболее богата подобными структурами развитая турбулентность в термодинамически открытой системе, когда при очень больших числах Рейнольдса нарушаются различные симметрии (пространственные переносы, сдвиги по времени, вращения, галилеевы и масштабные преобразования и др.), допускаемые уравнениями Навье–Стокса и краевыми условиями. В этом случае в турбулентном течении самоорганизуются разнообразные пространственно-временные когерентные образования, такие, как вихревые нити, спирали и клубки, турбулентные пятна, берстинги и т. п. Однако в тех случаях, когда поток свободен от внешнего принуждения (связанного, например, с крупномасштабным сдвигом скорости при вращении космического объекта), развитая турбулентность в пределе бесконечно больших чисел Рейнольдса имеет, как известно, тенденцию восстанавливать (в статистическом смысле) нарушенные симметрии вдали от границ течения.

Вместе с тем существует турбулентность, которая и при очень больших числах Рейнольдса не восстанавливает нарушенную отражательную симметрию (закон чётности) поля пульсационных скоростей в случае преобразования  $\mathbf{x} \rightarrow -\mathbf{x}$  координат. Примером такой турбулентности является пульсирующее поле скоростей в конвективной зоне астрофизического аккреционного диска: средние свойства этого поля не остаются инвариантными при зеркальном отражении в его экваториальной плоскости. Подобная турбулентность, как известно, называется спиральной (или гиротропной) и возникает под влиянием массовых сил с псевдовекторными свойствами (например, силы Кориолиса,

магнитного поля и т.п.). В частности, реальная турбулентность во вращающемся солнечном протопланетном диске имеет спиральный характер. Это связано с тем, что мелкомасштабное пульсационное поле скоростей  $\mathbf{u}'$  при наличии вращения дискового вещества с постоянной угловой скоростью  $\mathbf{\Omega}_0$  (аксиальный вектор) и анизотропии, вызванной, например, воздействием поля силы тяжести  $\mathbf{g}$  (которое может быть полем интенсивности турбулентности или полем вертикального градиента температуры  $\nabla\theta$  (полярные векторы)), не обладает отражательной симметрией относительно экваториальной плоскости диска, т.е. относительно преобразования  $z \rightarrow -z$ . По этой причине в диске генерируется так называемая плотность спиральности  $\mathbf{u}' \cdot \boldsymbol{\omega}'$  (скалярное произведение полярного вектора скорости  $\mathbf{u}'$  и аксиального вектора завихренности  $\boldsymbol{\omega}' = \nabla \times \mathbf{u}'$ ), которая, в конечном счёте, и приводит к возникновению гиротропной турбулентности. Последнее означает, что в подобном анизотропном мелкомасштабном пульсационном поле скоростей вихревые левовращательные движения в совокупности могут быть более вероятными, чем правовращательные, или наоборот.

Для однородного бездивергентного (соленоидального) поля пульсационных скоростей  $\mathbf{u}'$  лишённая отражательной симметрии вихревая спиральность  $H = \langle \mathbf{u}' \cdot \boldsymbol{\omega}' \rangle$  сохраняется в инерционной области (в которой вязкие эффекты диссипации энергии несущественны) энергетического спектра, т.е. в этой области существует ещё один (при  $\nu \rightarrow 0$ ), помимо турбулентной энергии  $b \equiv \langle |\mathbf{u}'|^2 / 2 \rangle$ , дополнительный невязкий инвариант. Это обстоятельство приводит, вообще говоря, к полному изменению характера процесса передачи кинетической энергии по каскаду вихрей Ричардсона–Колмогорова в спиральной трёхмерной турбулентности, поскольку теперь уже две величины  $b$  и  $H$  одновременно могут переноситься по спектру турбулентных пульсаций от одних масштабов к другим. При этом каскадный процесс переноса энергии по иерархии турбулентных вихрей определяется уже двумя параметрами – скоростью диссипации турбулентной энергии  $\mathcal{E}$  и скоростью диссипации вихревой спиральности  $\mathcal{E}_H$ . Другими словами, если энергия и спиральность вносятся в поток на некоторых промежуточных масштабах волновых чисел  $k$  ( $k_0 \ll k \ll k_\nu$ ), далеких от диссипативного масштаба  $k_\nu$  и от масштаба энергоснабжения  $k_0$ , то обе величины  $\mathcal{E}$  и  $\mathcal{E}_H$  определяют процесс передачи энергии по спектру. По аналогии с двухмерной «обычной» зеркально-симметричной турбулентностью, когда при свободной эволюции потока возможен инверсный каскадный перенос энергии от мелкомасштабных к крупномасштабным вихрям (сопровождающийся

одновременным переносом энтропии  $\Omega \equiv \langle |\omega'|^2 / 2 \rangle$  в сторону малых вихрей, для гиротропной трёхмерной турбулентности также допустим режим, при котором реализуется обратный каскад турбулентной энергии. При его реализации инварианты  $b$  и  $H$  переносятся к противоположным концам инерционного спектра по волновым числам: спиральность – к мелким масштабам, а турбулентная энергия – к более крупным масштабам, что позволяет перекачать часть энергии мелкомасштабной турбулентности в энергию крупномасштабных вихревых структур. Таким образом, спиральная турбулентность имеет дополнительный канал сброса пульсационной энергии, которым и оказывается механизм генерации крупно- и мезомасштабных вихревых структур (обратный тому, что, как правило, имеет место в «обычной» турбулентности), приводящий к передаче части энергии мелкомасштабной турбулентности в область больших масштабов. По этой причине спиральная турбулентность может повышать устойчивость крупных энергетически ёмких турбулентных вихрей, увеличивая время их жизни. Этот механизм естественно трактовать как вихревое динамо.

Остановимся ещё на одной особенности спиральной турбулентности в астрофизическом немагнитном диске. Спиральная турбулентность в астрофизических объектах, в которых существуют и другие факторы нарушения симметрии движения космического вещества (связанные, например, с силой Кориолиса или с наличием градиента температуры), часто способна действовать как генератор крупно- и мезомасштабного вихревого поля, усиливая и укрупняя вихри и тем самым порождая разнообразные когерентные вихревые образования. К сожалению, вопрос о возможном влиянии эффекта вихревого динамо на синергетическое структурирование вещества в астрофизических объектах обсуждается в литературе крайне редко. В выполненном исследовании предполагалось рассмотреть эту проблему с учётом результатов численных экспериментов, доказывающих реальное существование обратного энергетического каскада в трёхмерной спиральной турбулентности. При этом изучена роль вихревой спиральности в появлении обратного энергетического каскада Ричардсона-Колмогорова в трёхмерной спиральной турбулентности вращающегося немагнитного астрофизического диска при больших числах Рейнольдса. Включение механизма вихревого динамо в эволюционную модель диска привела к модификации определяющих соотношений для турбулентного потока тепла и тензора турбулентных напряжений, а также к необходимости рассмотрения дополнительных уравнений переноса для осреднённой завихрённости и осреднённой вихревой спиральности. На основе проведённого исследования 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 разномасштабных когерентных вихревых структур в астрофизическом немагнитном диске.

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

**Состав группы** зав. отд., проф. Колесниченко А.В., вед. н.с., д.ф.-м.н. Зверьев Е.М., н.с., к.ф.-м.н., Олехова Л.А.

### **Публикации:**

1. Колесниченко А.В. Информационно-термодинамическая концепция формирования процессов самоорганизации в открытых системах под воздействием внешней среды// Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2015. №19.
2. Колесниченко А.В. Модификация в рамках статистики Тсаллиса критериев гравитационной неустойчивости астрофизических дисков с фрактальной структурой фазового пространства // *Mathematica montisnigri*. 2015. Vol XXXII. С. 93-118.
3. Колесниченко А.В. К магнитогидродинамическому моделированию структуры и эволюции турбулентного аккреционного диска протозвезды// *Механика, управление и информатика*. 2015. С. 311-348.
4. Колесниченко А.В. Модификация метода инвариантного моделирования Дональдсона для турбулентных сдвиговых течений реагирующих газовых смесей //Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2015. № 65.
5. Kolesnichenko A.V. Derivation by methods of thermodynamics irreversible processes of generalized Stefan–Maxwell relations for multicomponent diffusion flows in turbulent continuous medium//Препринты ИПМ им.М.В. Келдыша. 2015. № 2.
6. Колесниченко А. В., Маров М. Я. Моделированию процесса агрегации пылевых фрактальных кластеров в протопланетном ламинарном диске// *Механика, управление и информатика*. 2015. С. 349-385.
7. Колесниченко А.В., Маров М.Я. Моделирование процессов образования пылевых фрактальных кластеров как основы рыхлых прото-планетезималей в Солнечном допланетном облаке//Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. № 75. 44 с.
8. Ерохин С. В., Алероев Т. С., Колесниченко А. В., Фриштер Л. Ю. Параметрическая идентификация математической модели вязкоупругих материалов с использованием

производных дробного порядка// International Journal for Computational Civil and Structural Engineering . 2015. Vol. 11. Issue 3. с. 82-85.

9. Зверяев Е.М. Олехова Л.В. Итерационная трактовка полуобратного метода Сен-Венана при построении уравнений тонких объектов из композиционного материала // Труды МАИ. 2015. № 79. С. 1-27.

10. Колесниченко А.В. Модификация в рамках неэкстенсивной статистики критериев гравитационной неустойчивости Джинса и Тумре для астрофизических дисков// Математическое моделирование. 2016. Т.28. № 3 (в печати).

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

**Аннотация.** 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. Изотопные аномалии первичного вещества являются суммарным результатом множества процессов его эволюции, поэтому основной проблемой при разделении и изучении этих процессов является количественная оценка их вклада в изотопные аномалии. Выявленные нами фундаментальные свойства реакций расщепления в ударных волнах в ранней Солнечной системе позволяют выполнить количественный расчет изотопных аномалий, формируемых в этом процессе, и указать на его определяющую роль для изотопных аномалий вымерших радионуклидов, легких элементов и благородных газов. В то же время, расчет аномалии D/H при разной жесткости спектра первичных ускоренных частиц хотя и повышает величину этого отношения на три порядка величины, по сравнению с реакциями расщепления в современных условиях жесткости облучения, все же дотягивает лишь до его значения в эволюционирующих звездах FO Ib, что является пренебрежимо малым, в сравнении с наблюдаемым диапазоном D/H в Солнечной системе (рис. 1). Из этого следует, что наблюдаемые аномалии D/H 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.

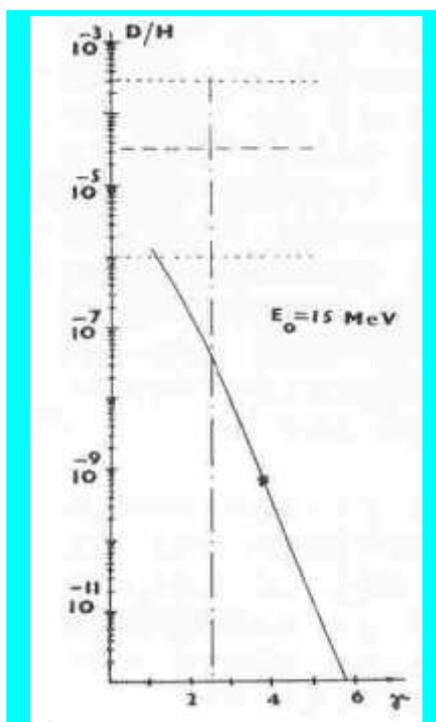


Рис. 1. Формирование соотношений D/H в реакциях расщепления при разной жесткости спектра первичных космических лучей. Отмечен наблюдаемый диапазон (звезды FO Ib и комета P/Halley) и средний уровень для Солнечной системы.

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 (рис. 2). Этот ряд предоставляет уникальную, единственную на данный момент информацию о динамике изменения интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) во внутренней гелиосфере (до  $\sim 5$  а.е.) на длительной временной шкале. Он позволил выявить: (1) Интегральные градиенты ГКЛ во внутренней гелиосфере сильно зависят от фазы солнечного цикла; (2) Средние значения градиентов в современных солнечных циклах соответствуют средним градиентам за последний миллион лет ( $\sim 20\text{--}30\%/a.e.$  для скоростей образования  $^{26}\text{Al}$ ), что свидетельствует о постоянстве механизма солнечной модуляции, по крайней мере, в течение последнего  $\sim 1$  млн. лет.

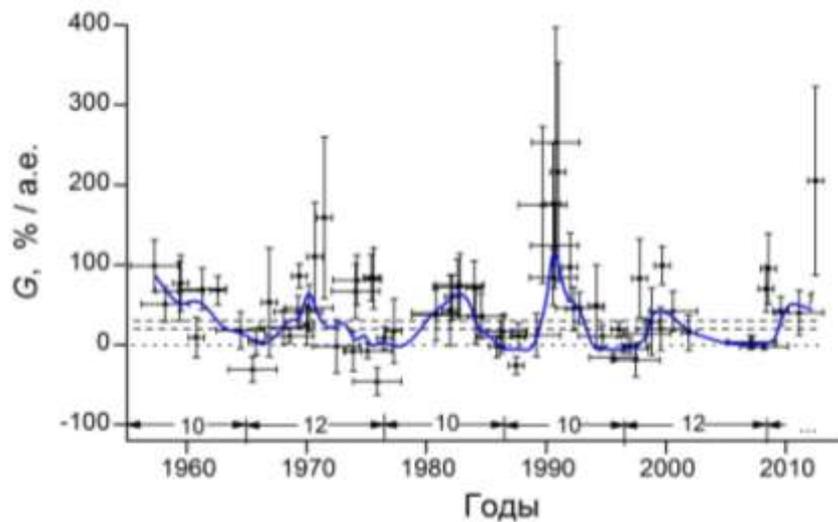


Рис. 2. Градиенты скоростей образования космогенных радионуклидов в 39 хондритах, выпавших в 1959-2013 гг. Полиномиальная сглаживающая кривая 1 выявляет наиболее важные закономерности. Числа над осью абсцисс – длительность солнечных циклов (в годах).

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. Подobie модельного распределения радиационных возрастов железных метеоритов в предположении вариаций интенсивности ГКЛ с периодом 450 млн. лет и реального распределения возрастов (рис. 3) свидетельствует о корректности предполагаемого периода вариаций интенсивности ГКЛ. Вариации могут быть обусловлены периодическим пересечением Солнечной системой спиральных рукавов Галактики.

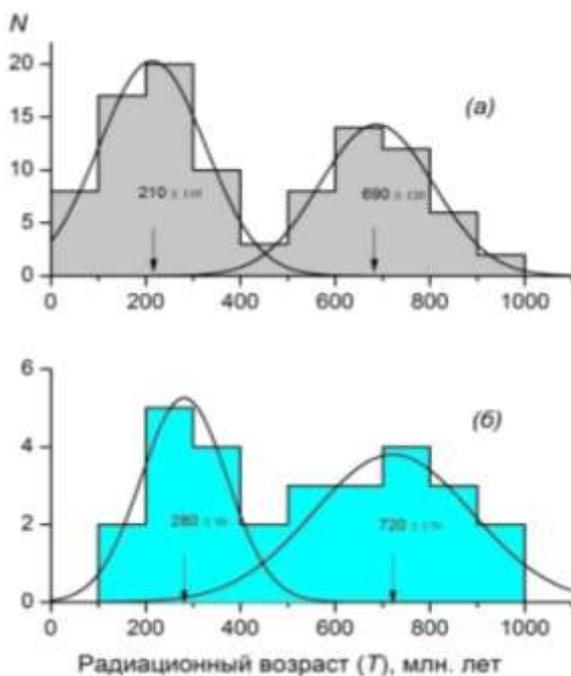


Рис. 3. Сопоставление (а) модельного распределения радиационных возрастов железных метеоритов в предположении вариаций интенсивности ГКЛ с периодом 450 млн лет и (б) реального распределения возрастов.

### **Руководители проекта:**

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

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

### **Состав группы:**

Алексеев В.А., Устинова Г.К., Калинина Г.К., Павлова Т.А.

### **Публикации:**

1. Alexeev V.A., Laubenstein M., Povinec P.P., Ustinova G.K. Variations of cosmogenic radionuclide production rates along the meteorite orbit // *Advances in Space Research*. 2015. V. 56. P.766-771.
2. Alexeev V.A., Laubenstein M., Povinec P.P., Ustinova G.K. Cosmogenic radionuclides in Chelyabinsk and Kosice chondrites and features of solar cycles 23 and 24 // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*. 2015. V. 79, No. 5. P. 596–599.
3. Ustinova G.K. Two Approaches to Studying Cosmogenic Radionuclides in Chondrites // *Proc. 78th Annual Meeting Meteorite Society, July 27-31, 2015, Berkeley, USA. #5022.pdf*.
4. Alexeev V.A. On the variations of galactic cosmic rays during the last billion years // *In: Lunar and Planetary Science XLVI, Houston. March 16-20, 2015. # 1003.pdf*
5. Алексеев В.А. К вопросу о временных вариациях интенсивности галактических космических лучей за последний миллиард лет по данным о радиационных возрастах железных метеоритов // *Астрономический вестник*. 2015, №6, с.1-10.
6. Алексеев В. А., Лаубенштейн М., Повинец П. П., Устинова Г. К. Космогенные радионуклиды в хондритах Chelyabinsk и Kosice и особенности 23 и 24 солнечных циклов // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2015. Т. 79, № 5. С. 650-653.
7. Алексеев В.А. Временные вариации интенсивности галактических космических лучей за последний миллиард лет // *Материалы XVI Межд. конф. «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», 28 сент. - 1 окт. 2015 г., Москва, 2015. С. 19-22*

### **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. Основной сложностью применения разработанного нами общего метода к конкретным моделям звезд является

сложность вычисления так называемым «интегралов перекрытия», характеризующих величину возбуждения конкретных мод колебаний звезды (внутренних гравитационных волн, в нашем случае) приливным полем. Интегралы перекрытия являются быстро осциллирующими функциями радиуса, причем их величина на поверхности звезды на много порядков меньше, чем амплитуда осцилляций, см. рис. 1 ниже. Особенно сложным оказалось вычисление этих величин для достаточно массивных моделей звезд, в которых отсутствует протяженная конвективная оболочка, но может присутствовать конвективное ядро. В этом году нам удалось продвинуться в этом направлении и надежно вычислить интегралы перекрытия для нескольких моделей звезда с массами 1.5-2 массы Солнца и разными возрастами, за счет применения различных численных методов, основанных на очень аккуратной и самосогласованной интерполяции величин, характеризующих модели звезд и специальном подборе интегрируемых переменных. Критерием правильности вычисления интегралов перекрытия было совпадение результатов их вычисления, основанных на разных выражениях, совпадающих друг с другом в силу уравнений, описывающих колебания звезд в приближении Каулинга, см. рис. 2. Мы вычислили характерное время приливной эволюции экзопланеты, находящейся на круговой орбите вокруг невращающейся звезды с массой 2 массы Солнца и возрастом 844 миллиона лет. Результат представлен на рис. 3. Как видно из этого рисунка, наш формализм дает времена эволюции, существенно, на несколько порядков меньше, чем те, которые получаются из теории Зана. Отметим, однако, что этот результат нуждается в дополнительной проверке, так как при достаточно малых орбитальных периодах возможно отклонение от некоторых приближений, используемых в нашей теории. В случае, если результат окажется правильным, он, по нашему мнению, может представлять очень важное значение как для теории формирования систем экзопланет, так и для теории двойных звездных систем, так как в обоих случаях имеются сложности, связанные со слабостью приливной эволюции в рамках существующих представлений, основанных на теории Зана. Планируется публикация по этой теме в следующем году.

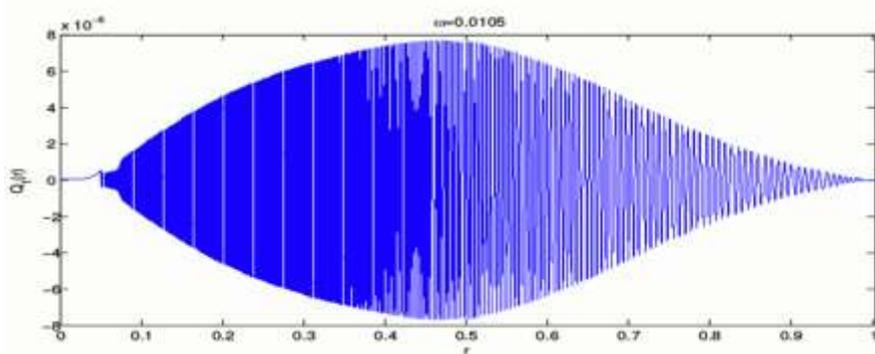


Рис. 1. Зависимость интеграла перекрытия от радиуса, для низкочастотной  $g$ -моды колебаний звезды.

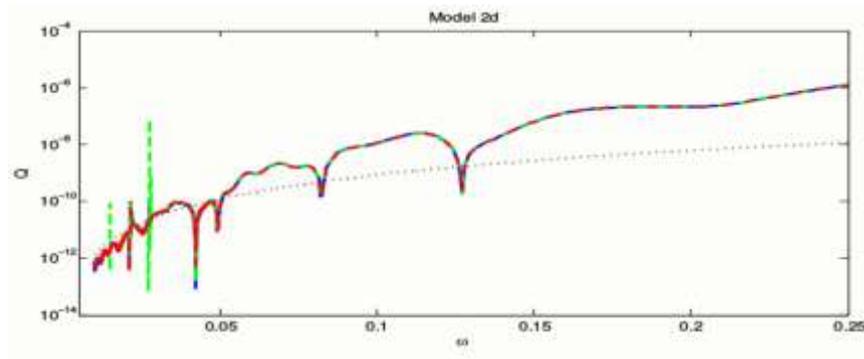


Рис. 2. Величины интегралов перекрытия, как функции собственной частоты. Красная, синяя и зеленая линия соответствуют различным выражениям в нашей теории, а черная линия следует из теории Зана.

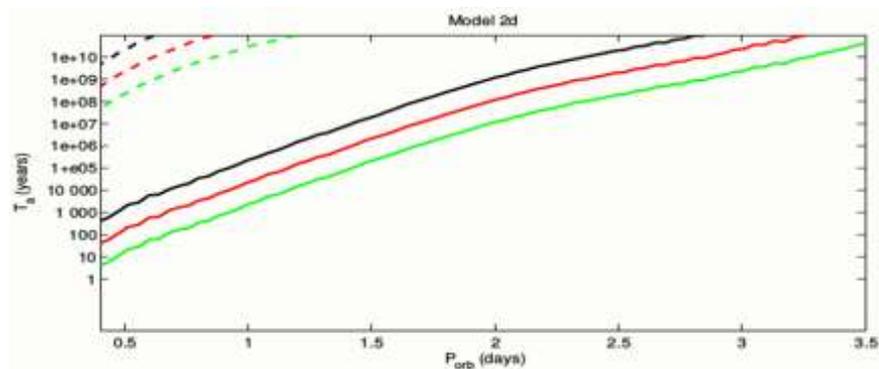


Рис. 3. Характерные времена приливной эволюции как функции орбитального периода (в днях). Зеленая, красная и черная сплошные линии соответствуют характерным временам, рассчитанным в нашей теории для экзопланеты с массой 10, 1, 0.1 масс Юпитера, тогда как аналогичные штрихованные линии получены в теории Зана.

### 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. В качестве первого приближения рассматривается случай звезды, чьё вращение можно представить как твёрдотельное с малой по амплитуде не твёрдотельной добавкой к угловой скорости. Получены поправки в линеаризованное

уравнение движения за счёт малой нетвёрдотельности для произвольного вида добавки. Решение полученного уравнения движения сведено к задаче на собственные функции оператора, аналогично работе Ivanov & Papaloizou, 2007.

Несмотря на то, что при не твёрдом вращении собственные функции линеаризованной задачи могут не являться ортогональными, поправку к собственной частоте можно искать в рамках теории возмущений. 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. При этом необходимо рассматривать в качестве невозмущённой конфигурации покоящуюся звезду, а в качестве возмущения вращение в целом.

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)

**Состав группы:** Иванов П. Б., д. ф.-м. н., в.н.с., АКЦ ФИАН, Чернов С. В., к. ф.-м. н., с.н.с., АКЦ ФИАН, Журавлев, В. В., к.ф.-м.н, н.с., ГАИШ МГУ, Раздобурдин Д. Н., аспирант МГУ.

#### **Публикации:**

1. Ivanov, P. B., Papaloizou, J. C. B., Chernov, S. V., 2014, *Astronomical & Astrophysical Transactions*, 28, 355-366.
2. Д.Н. Раздобурдин, В.В. Журавлёв, 2015, УФН 185 1129–1161.

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

**Аннотация.** 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. Модели, исходящие из представлений о постепенном укрупнении пылевых частиц в процессе соударений, являются крайне упрощенными и не подкрепляются результатами лабораторных экспериментов. Физически более обоснована модель ударного взаимодействия частиц или тел при столкновении первичных пылевых сгустков, образующихся вследствие фрагментации плотного газопылевого субдиска за счет механизма гравитационной неустойчивости, а рост частиц в сгустках приводит к образованию более крупных тел.

**Модель взаимодействия частиц в методе проникаемых частиц.** По способу учета контакта существующие методы моделирования динамического поведения частиц могут быть классифицированы как методы, оперирующие либо упругими частицами, контактирующими при столкновениях в одной точке (метод частиц молекулярной динамики), либо частицами, при контакте которых происходит осреднение их свойств (метод гидродинамики сглаженных частиц).

Моделируемые тела представлялись одной или несколькими совокупностями  $N$  частиц. Математическая реализация модели, потребовала существенной модификации известного метода частиц, не учитывающего эффектов внутреннего строения и перераспределения энергии в зоне контакта частиц. Предложенный нами метод проникаемых частиц позволил учесть внутреннюю структуру объектов и сложный характер их взаимодействия. Суть предлагаемого подхода заключается в том, что при формировании начальных конфигураций, а также при постоянном шаге по времени частицы при взаимодействии могут образовывать пересечения. Исходя из физических свойств частиц, а также относительных скоростей, вычисляется коэффициент восстановления для моделирования процесса столкновений. Были построены аппроксимирующие зависимости для коэффициента восстановления, которые позволяют учесть достаточное число физико-механических эффектов в зоне контакта. За основу принята модель столкновений Ньютона. В отличие от классической модели Ньютона, был введен коэффициент

восстановления  $k$ , зависящий от расстояния между центрами частиц и от скорости столкновения и учитывающий физическую природу частиц.

Интегрирование уравнений движения в задаче соударений  $N$  тел проведено с использованием разработанного алгоритма вычисления сил, скоростей и перемещений, который является модификацией алгоритма Верле. Это позволило получать на каждом временном шаге данные о быстротекущих процессах, происходящих в зоне контакта. Этот метод обеспечивает требуемую точность расчетов на коротких, а не на больших временных интервалах, а выбор шага по времени обеспечивает физическую непротиворечивость получаемых результатов. Критерий выбора величины шага по времени зависит от размеров наименьших частиц, входящих в модель, и диапазона скоростей решаемой задачи.

**Результаты и обсуждение.** Задача исследования процессов, происходящих в протопланетном газопылевом диске на стадии образования «рыхлых» пылевых структур и фрактальных пылевых кластеров может быть разделена на несколько отдельных этапов: исследование формирования начальных фрактальных кластеров с характерным размером от 5 до 500 нм; исследование влияния внутренней структуры и относительных скоростей столкновений начальных фрактальных кластеров на процессы их эволюции и образования фрактальных кластеров с характерным размером 500 нм и более; исследование динамики скопления крупных фрактальных кластеров.

Пространственные масштабы, в которых протекают рассматриваемые процессы, отличаются от 100 до 10 000 раз и более. Это потребовало построения несколько различающихся моделей описания характера взаимодействий модельных частиц, в рамках метода проницаемых частиц. Имеющиеся у авторов проекта вычислительные возможности позволили перейти к рассмотрению внутреннего строения пылевых фрактальных кластеров, состоящих из частиц пыли содержащих всего несколько молекул, другими словами, к рассмотрению не только механических свойств и внутренней структуры пылевых фрактальных кластеров, но и физико-химической эволюции вещества твердотельной компоненты протопланетного диска.

При рассмотрении процессов формирования начальных фрактальных кластеров необходимо рассматривать частицы пыли с характерными размерами около 1 – 2 нм. В таких пространственных объемах могут быть размещены всего несколько молекул. Это приводит к тому, что на большом расстоянии частицы являются электрически нейтральными, а на расстояниях столкновений необходимо проводить учет пространственной неоднородности их электрического поля. Такая неоднородность поля

связана с динамическими процессами в пространственном распределении заряда в молекулярных объектах, составляющих частицы пыли.

Было проведено численное моделирование для следующих характеристик частиц: диаметр – 1 нм; плотность –  $1.5 \cdot 10^{-21}$  г/нм<sup>3</sup>; заряд – 1 элементарный заряд (половина частиц отрицательно заряжены, половина – положительно). Взаимодействия между частицами определяется электростатической силой и силой, описываемой модифицированными потенциалами, в то время как гравитационное взаимодействие для таких объектов асимптотически мало и может быть исключено из рассмотрения до тех пор, пока совокупная масса частиц в укрупняющихся кластерах не достигнет значений, при которых гравитация начинает оказывать на них значимое воздействие.

В серии вычислительных экспериментов проведено моделирование для кубической области объемом  $10^6$  нм (сторона куба 100 нм), содержащей 10 000 частиц с описанными выше характеристиками. Флуктуации пыли такой плотности могут образовываться как в результате различных вихревых движений несущего пыль газа, так и под воздействием неоднородных электромагнитных полей протопланетного диска. Общая длительность модельного времени составила  $2 \cdot 10^5$  сек, по истечению которого процесс формирования существенно замедлился. В качестве примера на рис. 1 представлен результат визуализации расчетов формирования структур в пылевой компоненте газопылевого облака.

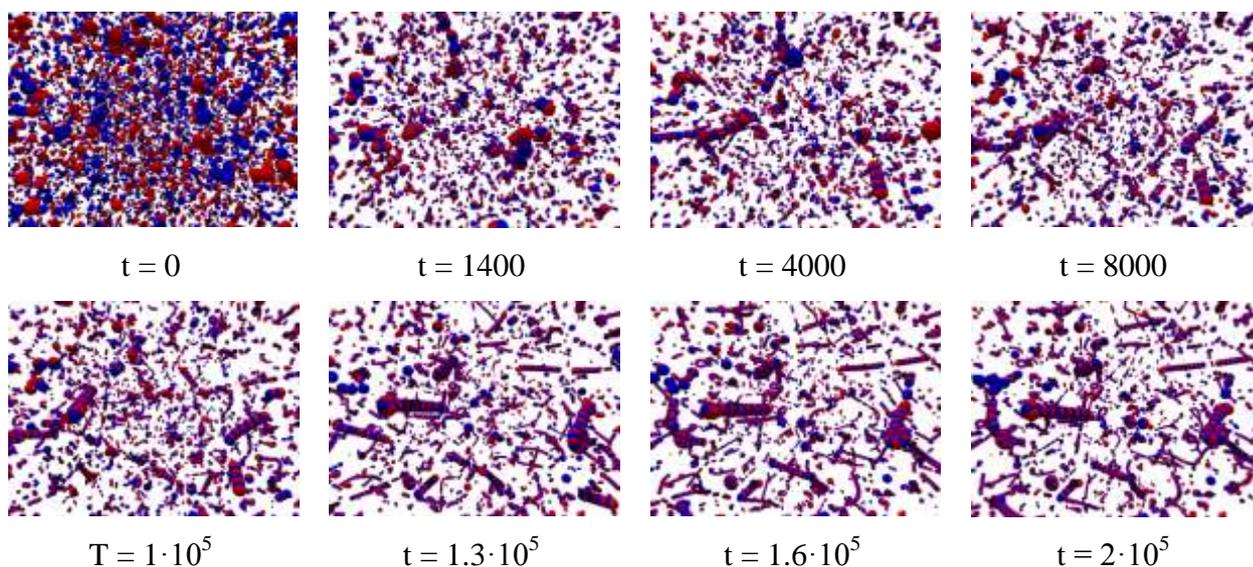


Рис. 1. Формирование структур в пылевой компоненте.

Скорость изменения структуры формирующихся пылевых кластеров экспоненциально убывает по мере «вычерпывания» свободных частиц и дальнейших рост происходит при

сближении отдельных кластеров. На рис. 2 представлены примеры отдельных структур образовавшихся на момент остановки процесса моделирования.

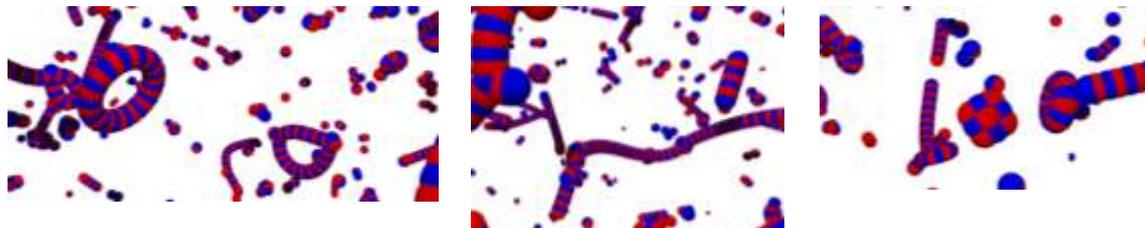


Рис. 2. Структуры сформировавшиеся в пылевой компоненте.

Численное моделирование, начинающееся с более плотных конфигурацию приводит к формированию укрупненных фрактальных пылевых кластеров. Характеристики частиц такие же, как и в предыдущих моделях. Итоговый кластер имеет характерный размер порядка 20 нм. На рисунке 3 приведен пример результатов вычислений для различных чисел одиночных частиц.

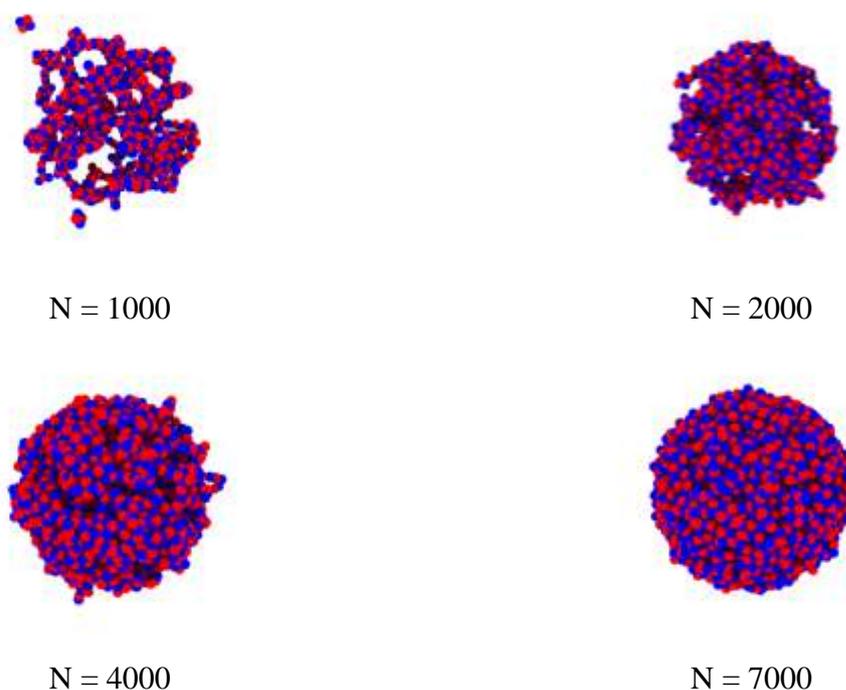


Рис. 3. Фрактальные пылевые кластеры.

**Заключение.** Проведенное численное моделирование различных процессов локальной эволюции твердотельной составляющей газопылевого протопланетного диска показало, что при взаимодействии пылевых сгущений составляющие их пылевые кластеры участвуют в двух разнонаправленных процессах, зависящих от их динамических и плотностных характеристик. При низких относительных скоростях вращения пылевых

сгущений процессы укрупнения кластеров имеют низкую интенсивность, а при высоких – основную роль начинает играть разрушение кластеров при столкновениях. При наиболее вероятных условиях протекания происходит интенсивный рост пылевых кластеров, составляющих пылевые сгущения.

Развитая модель процессов локальной эволюции твердотельной составляющей газопылевого протопланетного диска вносит существенный вклад в решение проблемы ранней эволюции протопланетного диска. Она сохраняет основу наиболее вероятного сценария, при котором реально происходит интенсивный рост пылевых кластеров, составляющих пылевые сгущения с учетом их фрактальной структуры. В процессе роста кластеров возрастающая роль оказывает влияние гравитации на дальнейшую эволюцию сгущений в целом.

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). В отличие от известного критерия Тумре (Toomre), полученного для гомогенной (однофазной) среды, новый (модифицированный) критерий выведен в результате решения гидродинамических уравнений для двухфазной газопылевой среды и поэтому включает в себя дополнительные параметры, не входящие в критерий Тумре. Таких параметров три: характерное время торможения пылевой частицы (точнее, агрегата частиц) в газе, отношение плотностей пылевой и газовой компонент газопылевого континуума, а также параметр (меньший единицы), характеризующий уменьшение коэффициента турбулентной диффузии в насыщенном пылью диске (субдиске) по отношению к его

величине в газовом диске. 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. Это приближение применимо для исследования гравитационной неустойчивости пылевой фазы в диске или субдиске, так как скорости твердых частиц малы по сравнению со скоростью звука в газе, а также характерное время торможения частицы в газе мало по сравнению с характерным временем развития гравитационной неустойчивости диска (субдиска). При рассмотрении возмущений (как принято в литературе) диск считался плоским тонким (т.е. длина волны возмущений больше толщины диска), однако конечная толщина диска учитывалась.

Получено, что гравитационная неустойчивость в субдиске (и его распад на допланетные сгущения) даже при слабой турбулентности может быть достигнута только в случае, если агрегаты частиц в субдиске выросли в достаточной степени. В частности, если турбулентность в субдиске генерируется различием скоростей вращения газа в субдиске и вне его (такая турбулентность в рамках “стандартной” модели соответствует значению параметра  $\alpha \sim 10^{-6}$ ), то в области образования Земли и планет земной группы ( $r \sim 1$  а. е.) минимальные значения характерных размеров агрегатов, необходимые для достижения неустойчивости субдиска, составляют  $\sim 1$  м. (При этом характерное время торможения агрегатов достигает величины  $\tau_d \sim \Omega^{-1}$ ). Однако, если турбулентные скорости уменьшить всего лишь в 2 раза, то гравитационная неустойчивость становится возможной и в случае, если субдиск состоит из дециметровых агрегатов. Для зоны образования Юпитера ( $r \sim 5$  а. е.) достижение гравитационной неустойчивости возможно при минимальных размерах агрегатов частиц  $d \leq 10$  см. В данных расчетах было учтено уменьшение коэффициента турбулентной диффузии в насыщенной пылью среде субдиска (Колесниченко, Маров, 2006). Фрактальность агрегатов не учитывалась.

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

**Состав группы:** д.физ-мат.н. Маров М.Я., к.т.н. Русол А.В., к.ф-мат.н. Макалкин А.Б., к.ф-мат.н. Зиглина И.Н., к.х.н. Девина О.А.

#### **Публикации:**

1. M. Ya. Marov, A. V. Rusol. Gas-Dust Protoplanetary Disc: Modeling Collisional Interaction of Primordial Bodies. Journal of Modern Physics, 2015, 6, 181-193.

<http://dx.doi.org/10.4236/jmp.2015.63024>

2. Marov M.Ya. , Rusol A.V. Gas-Dust Protoplanetary Disc: Modeling Primordial Dusty Clusters Evolution // Pure and Applied Physics, 2015, Volume 3, Issue 2.
3. Макалкин А.Б., Дорофеева В.А. Условия образования регулярных спутников в аккреционных дисках Юпитера и Сатурна // Исследования Солнечной системы: космические вехи / Под ред. А.В. Захарова. М.: ИКИ РАН, 2015. С. 425–455.
4. Макалкин А.Б., Артюшкова М.Е., Зиглина И.Н. Образование пылевых сгущений: влияние радиального дрейфа пылевого вещества и его сублимации на фронте испарения водяного льда в пылевом слое протопланетного диска // Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии, Москва, 21–22 апреля 2015 года. / Отв. редактор А.А. Кадик, - М: ГЕОХИ РАН, 2015. Отв. редактор А.А.Кадик, - М: ГЕОХИ РАН, 2015; 426 с. С. 307–311.