

Проблемы образования малых тел (планетезималей) в ранней Солнечной системе

А.Б. Макалкин, ИФЗ РАН

Тела (молодой) планетной системы и их характерные размеры

Пылевые частицы	0.01 – 1 мкм
Агрегаты частиц	0.001 – 100 см
Планетезимали	0.1 – 1000 км
Планеты	от ~ 10000 км

Мелкие тела (первые два типа) объединяются и удерживаются молекулярными силами, крупные (вторые два типа) – гравитацией.

Планетезималями называются тела, образованные агрегатами пылевых частиц, которые удерживаются от развала самогравитацией.

Между размерами 1 м и 100 м – зазор, который трудно (если возможно преодолеть) путем объединения (слипания) тел при столкновениях.

Еще один барьер на пути образования планетезималей – быстрый радиальный дрейф субметровых тел к Солнцу (для 60-сантиметровых тел характерное время дрейфа ~ за 500 лет с расстояния $r = 5$ а. е.

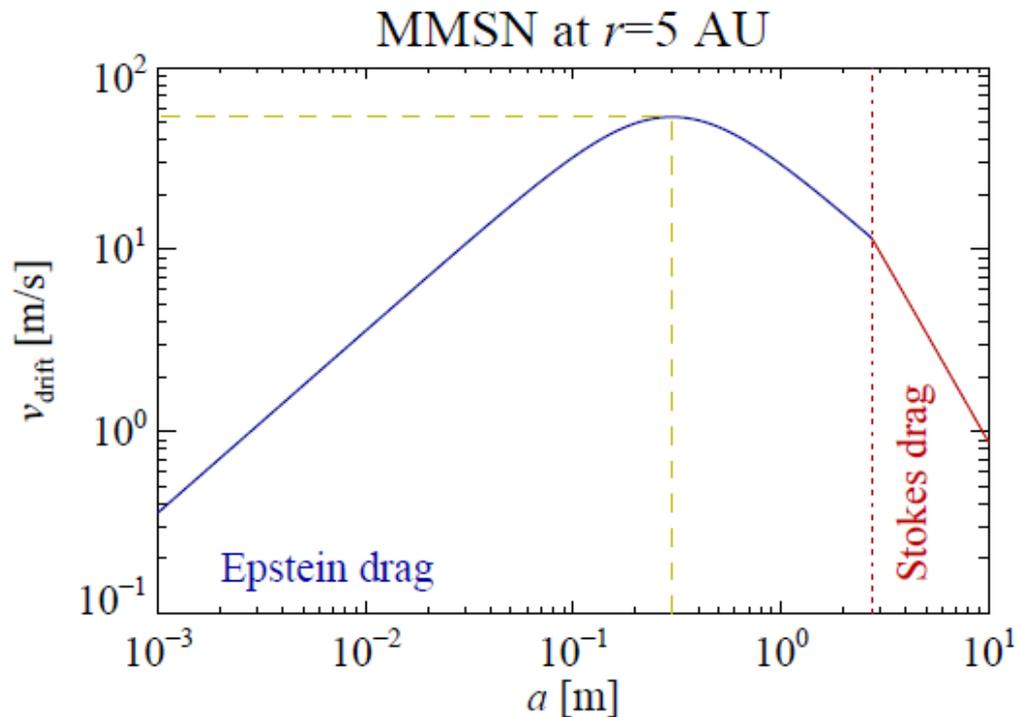
Радиальный дрейф тел

$$V_r = -\frac{2\Delta V}{St + St^{-1}} \quad \Delta V = -\frac{1}{2\rho_{g,0}\Omega} \frac{\partial P}{\partial r} \quad St \equiv t_s \Omega$$

$$V_\phi = V_K - \frac{\Delta V}{1 + St^2} \quad t_s = t_{Ep} = \frac{\rho_s a}{\rho_g c_s} = \frac{\sqrt{2\pi} \rho_s a}{\Sigma_g \Omega} \quad \text{при } a \leq (9/4)l_g,$$

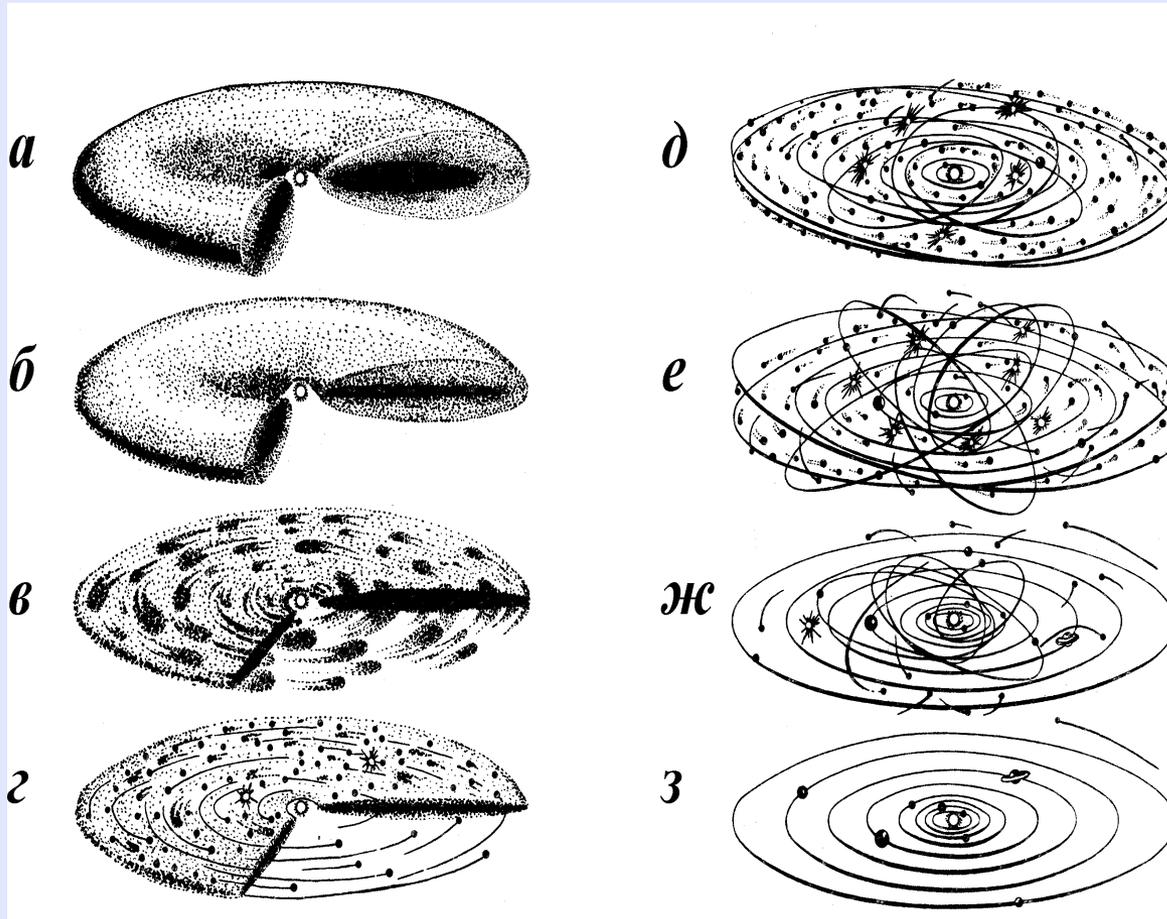
(Whipple, 1972; Weidenschilling, 1977)

$$t_s = t_{St} = t_{Ep} \frac{4a}{9l_g} \quad \text{при } a > (9/4)l_g.$$



Основные стадии эволюции протопланетного диска

Рисунок из книги (Левин, 1964)



а – образование газопылевого диска вокруг молодого Солнца;

б – оседание пыли сквозь газ к средней плоскости и образование там плотного пылевого субдиска;

в – распадение субдиска на пылевые сгущения;

г – формирование километровых самогравитирующих тел (планетезималей);

д и е – рост этих тел при взаимных соударениях и увеличение их относительных скоростей при взаимных сближениях;

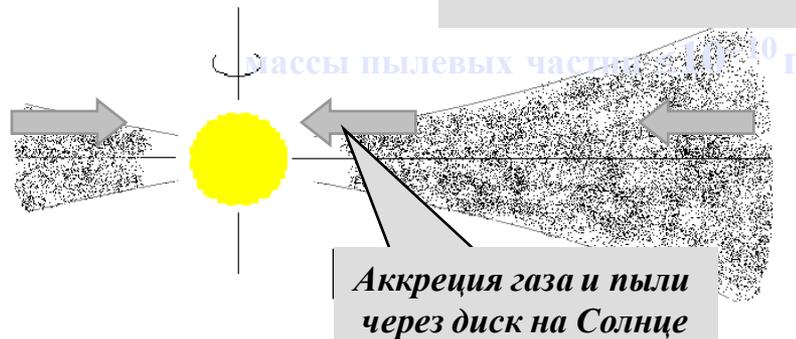
ж, з – превращение диска по мере удаления из него газа и роста планетезималей в рой крупных допланетных тел – зародышей планет(ж), а затем и в систему планет (з).

Эволюция твердого вещества протопланетного диска

На основании рисунка (Дорофеева, Макалкин, 2004)

~ 0.1–0.5 млн.лет

Образование диска



~ 1–1.5 млн.лет

Образование пылевых сгущений и планетезималей, начало диссипации газа



~ 0.5–1 млн.лет

Рост пылевых частиц, их оседание к средней плоскости диска и радиальный дрейф к Солнцу



~ 2-10 млн.лет

Аккумуляция зародышей и ядер планет, продолжение и завершение диссипации газа из диска



The multifaceted planetesimal formation process

Protostars and Planets VI, Heidelberg, 2013

Anders Johansen

Lund University

Jürgen Blum

Technical University at Braunschweig

Hidekazu Tanaka

Hokkaido University

Chris Ormel

University of California, Berkeley

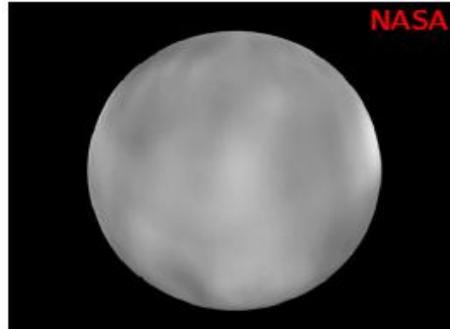
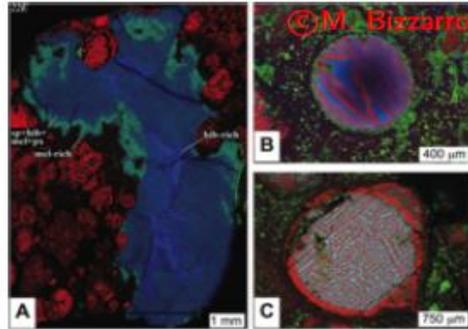
Martin Bizzarro

University of Copenhagen

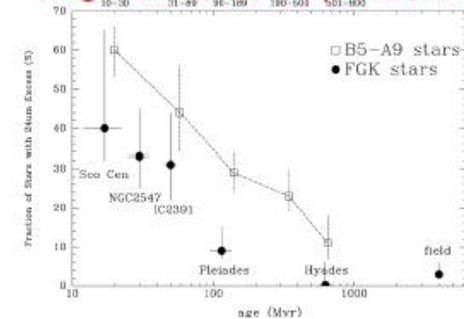
Hans Rickman

Uppsala University/SRC Warsaw

Properties of observed planetesimals



Siegler et al., 2007, ApJ 654, 580



- Oldest solar system condensations are CAIs with a narrow age range of 4567.30 ± 0.16 Myr (Connelly et al., 2012)
 - Primitive meteorite parent bodies contain a large fraction of 0.1-1-mm-sized chondrules (formed from 4567.32 ± 0.42 to 4564.71 ± 0.30 Myr ago) (Amelin et al., 2002; Connelly et al., 2012)
 - Some (large) parent bodies differentiated by decay of ^{26}Al less than 1.5 Myr after CAIs (Kleine et al., 2009; Baker et al., 2012) – primitive parent bodies formed later
 - At least 30% of young FGK stars have detectable debris belts (Siegler et al., 2007)
- ⇒ Planetesimal formation is universal and rapid

Альтернативные пути образования планетезималей

1. Гравитационная неустойчивость пылевого слоя (субдиска).
2. Поточковая неустойчивость (streaming instability) – гидродинамическая неустойчивость, учитывающая воздействие твердых частиц на газ в диске.
3. Рост тел при высокоскоростных столкновениях путем переноса массы от мелких частиц, дробящихся при столкновении, к крупным агрегатам.
4. Рост очень рыхлых агрегатов частиц, имеющих большие сечения столкновений, при столкновениях с другими агрегатами и частицами и последующим уплотнением агрегатов благодаря самогравитации.

The multifaceted planetesimal formation process

Protostars and Planets VI, Heidelberg, 2013

Anders Johansen
Lund University

Jürgen Blum

Technical University at Braunschweig

Hidekazu Tanaka
Hokkaido University

Chris Ormel

University of California, Berkeley

Martin Bizzarro

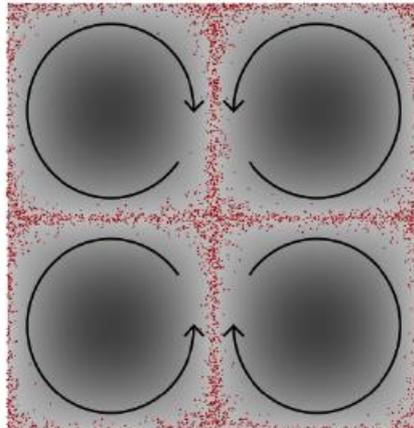
University of Copenhagen

Hans Rickman

Uppsala University/SRC Warsaw

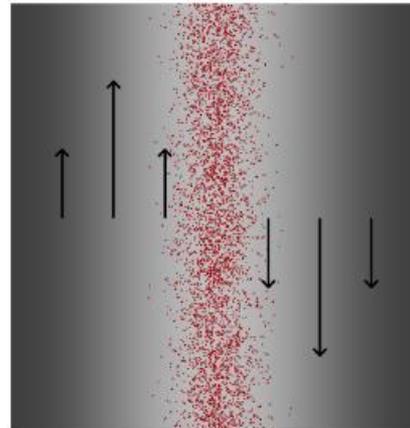
Particle concentration

Eddies



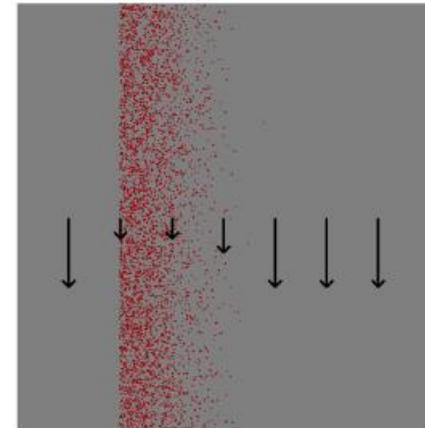
$l \sim \eta \sim 1 \text{ km}, \text{St} \sim 10^{-5} - 10^{-4}$

Pressure bumps / vortices



$l \sim 1 - 10 H, \text{St} \sim 0.1 - 10$

Streaming instabilities



$l \sim 0.1 H, \text{St} \sim 0.01 - 1$

Three ways to concentrate particles:

- Between small-scale low-pressure eddies

(Cuzzi *et al.*, 2001, 2008; Pan *et al.*, 2011)

- In pressure bumps and vortices

(Whipple, 1972; Barge & Sommeria, 1995; Klahr & Bodenheimer, 2003; Johansen *et al.*, 2009a)

- By streaming instabilities

(Youdin & Goodman, 2005; Johansen & Youdin, 2007; Johansen *et al.*, 2009b, 2012; Bai & Stone, 2010a,b,c)

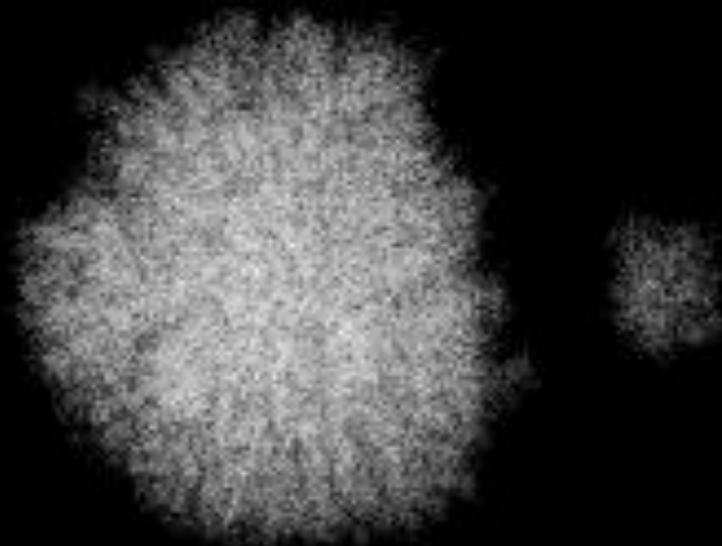
В последние годы ряд исследователей считают более вероятной при формировании планетезималей **потокую неустойчивость** (streaming instability), которая может наступать раньше, чем гравитационная неустойчивость, замещая ее (Johansen и др., 2014).

Потоковая неустойчивость вызвана тем, что пылевые частицы, движущиеся по орбите быстрее, чем газ, ускоряют его, замедляясь сами, благодаря лобовому сопротивлению. Из-за сохранения углового момента происходит дрейф частиц по радиусу внутрь, а газа наружу. Линейное возмущение этих двух противоположно направленных радиальных движений (потоков) имеет одну растущую моду, соответствующую уплотнению пылевой фазы (Youdin, Goodman. 2005).

Численное моделирование показывает, что для крупных пылевых агрегатов с числом Стокса $St \sim 0.3$ в диске с массовым содержанием твердого вещества $Z=0.02$ (выше протосолнечного, равного $Z=0.015$) и с учетом взаимных столкновений плотность пылевой фазы может превысить в 100–300 раз плотность газа в средней плоскости (Johansen и др., 2012). В таком случае плотность превышает критическое значение для гравитационной неустойчивости, и дальше идет гравитационный коллапс сгустков.

Однако, есть ряд проблем. В частности, уравнения не содержат турбулентной вязкости (в уравнении движения газа) и турбулентной диффузии (в уравнениях неразрывности обеих фаз), тогда как даже небольшая турбулентность может размещать частицы, предотвращая их собирание в плотные сгустки (Bai, Stone, 2010). Это должно относиться не только к турбулентности, генерируемой внешними источниками, но и к турбулентности, создаваемой самой потоковой неустойчивостью.

©H. Tanaka



К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА АГРЕГАЦИИ ПЫЛЕВЫХ ФРАКТАЛЬНЫХ КЛАСТЕРОВ В ПРОТОПЛАНЕТНОМ ЛАМИНАРНОМ ДИСКЕ

© 2013 г. А.В. Колесниченко*), М.Я.Маров**)

**)Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва*

***)Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва*

В работе, применительно к проблеме формирования планетезималей в Солнечном протопланетном облаке, развита с учетом фрактальных представлений о свойствах пылевых кластеров эволюционная гидродинамическая модель образования и роста рыхлых пылевых агрегатов в аэродисперсной среде ламинарного диска, которая изначально состояла из газа и твёрдых частиц (суб)микронных размеров. Показано, как в процессе кластер-кластерной коагуляции происходит частичное их слияние с образованием крупных фрактальных агрегатов, являющихся основным структурообразующим элементом рыхлых прото-планетезималей, возникающих в результате протекания физико-химических и гидродинамических процессов, сходных с процессами роста фрактальных кластеров. В отличие от ряда классических исследований, в которых моделирование проводилось в рамках «обычной» сплошной среды и зачастую не принимались во внимание многофракционность пылевой составляющей протопланетного облака, а также фрактальная природа формирующихся в процессе его эволюции пылевых кластеров, предлагается рассматривать совокупность рыхлых пылевых агрегатов, как особый тип сплошной среды – фрактальной среды, для которой существуют точки и области, не заполненные ее частицами. Гидродинамическое моделирование подобной среды, обладающей нецелой массовой размерностью, предлагается проводить в рамках мелко-интегральной модели (ее дифференциальной формы), использующей для учёта фрактальности дробные интегралы, порядок которых определяется фрактальной размерностью дисковой среды.

Modification of the jeans instability criterion for fractal-structure astrophysical objects
in the framework of nonextensive statistics

[Kolesnichenko, A. V.](#); [Marov, M. Ya.](#) (2014)

ГРАВИТАЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ПЫЛЕВОМ СЛОЕ ПРОТОПЛАНЕТНОГО ДИСКА: ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ С ТУРБУЛЕНТНЫМ ГАЗОМ В СЛОЕ

(Зиглина, Макалкин, 2016)

Выведен приближенный критерий гравитационной неустойчивости, **учитывающий время торможения частицы (агрегата) в газе, зависящее от ее размера.**

Рассчитаны параметры неустойчивости слоя: интервал длин волн, в котором она происходит, и ее инкремент в зависимости от длины волны возмущения в околосолнечном диске на радиальных расстояниях 1 а. е. и 10 а. е.

Характерное время торможения частицы в газе

$$t_s = t_{\text{Ep}} = \frac{\rho_s a}{\rho_g c_s} = \frac{\sqrt{2\pi} \rho_s a}{\Sigma_g \Omega} \quad \text{при } a \leq (9/4)l_g,$$

$$t_s = t_{\text{St}} = t_{\text{Ep}} \frac{4a}{9l_g} \quad \text{при } a > (9/4)l_g.$$

Число Стокса частицы $St \equiv t_s \Omega$

ГРАВИТАЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПЫЛЕГАЗОВОМ СЛОЕ (продолжение)

(точнее слой называть пылегазовым)

- Решается линеаризованная система гидродинамических уравнений для возмущений скоростей и поверхностных плотностей пылевой (монодисперсной) и газовой фаз в слое.
- Учитываются:
 - торможение частицы газом,
 - турбулентность газа (включая турбулентность в диске (глобальную) и турбулентность в слое,
 - турбулентная диффузия агрегатов частиц,
 - дисперсия скоростей частиц в турбулентном газе,
 - ненулевая толщина слоя.

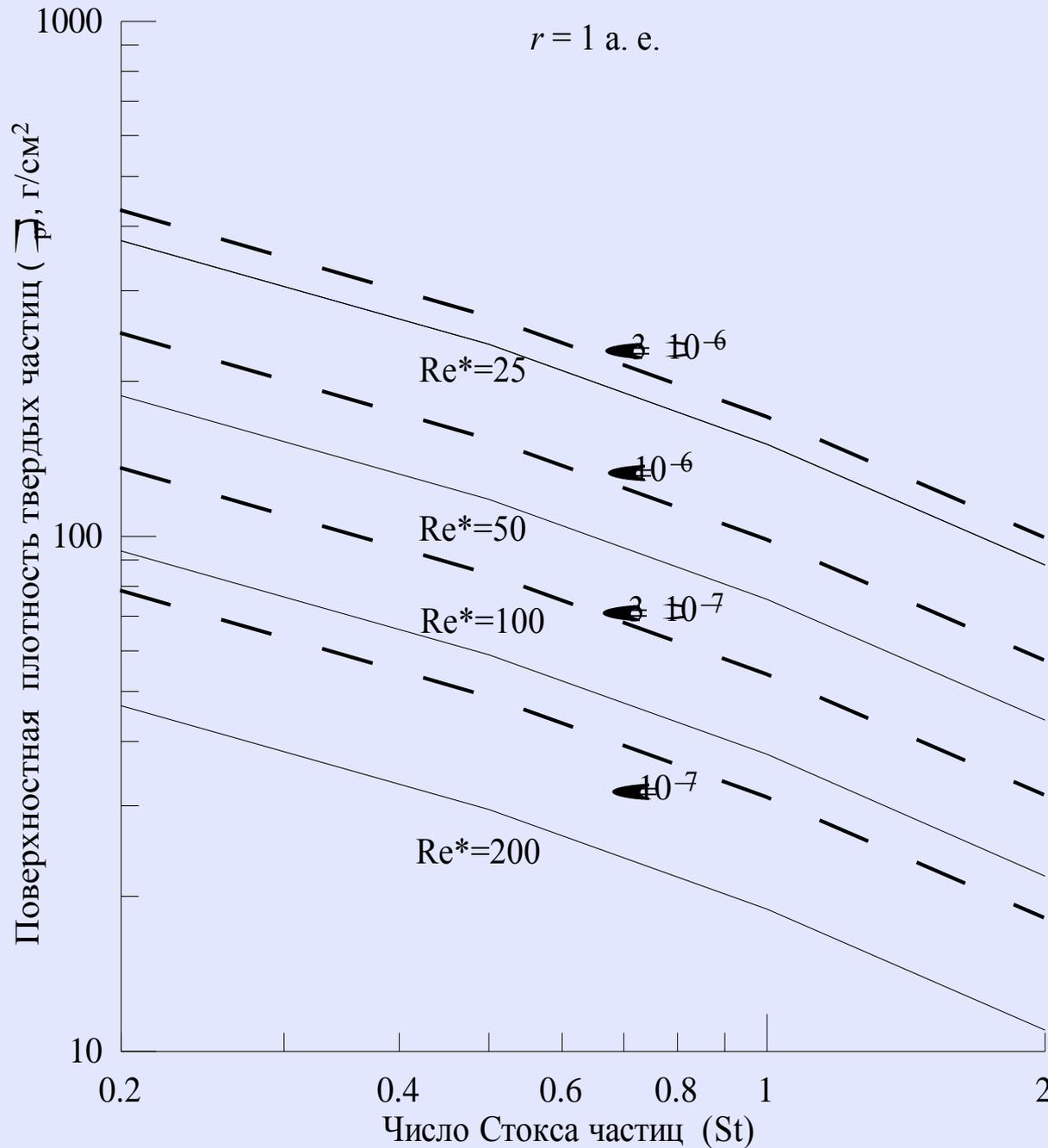
$$\frac{\partial v_r}{\partial t} - 2\Omega v_\varphi = -\frac{V_p^2}{\Sigma_p} \frac{\partial \sigma_p}{\partial r} - \frac{\partial \Phi_1}{\partial r} - \frac{v_r}{t_s},$$

$$\frac{\partial v_\varphi}{\partial t} + \frac{1}{2}\Omega v_r = \frac{u_\varphi - v_\varphi}{t_s},$$

$$\frac{\partial u_\varphi}{\partial t} = \frac{\varepsilon(v_\varphi - u_\varphi)}{t_s} + \nu \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial r^2},$$

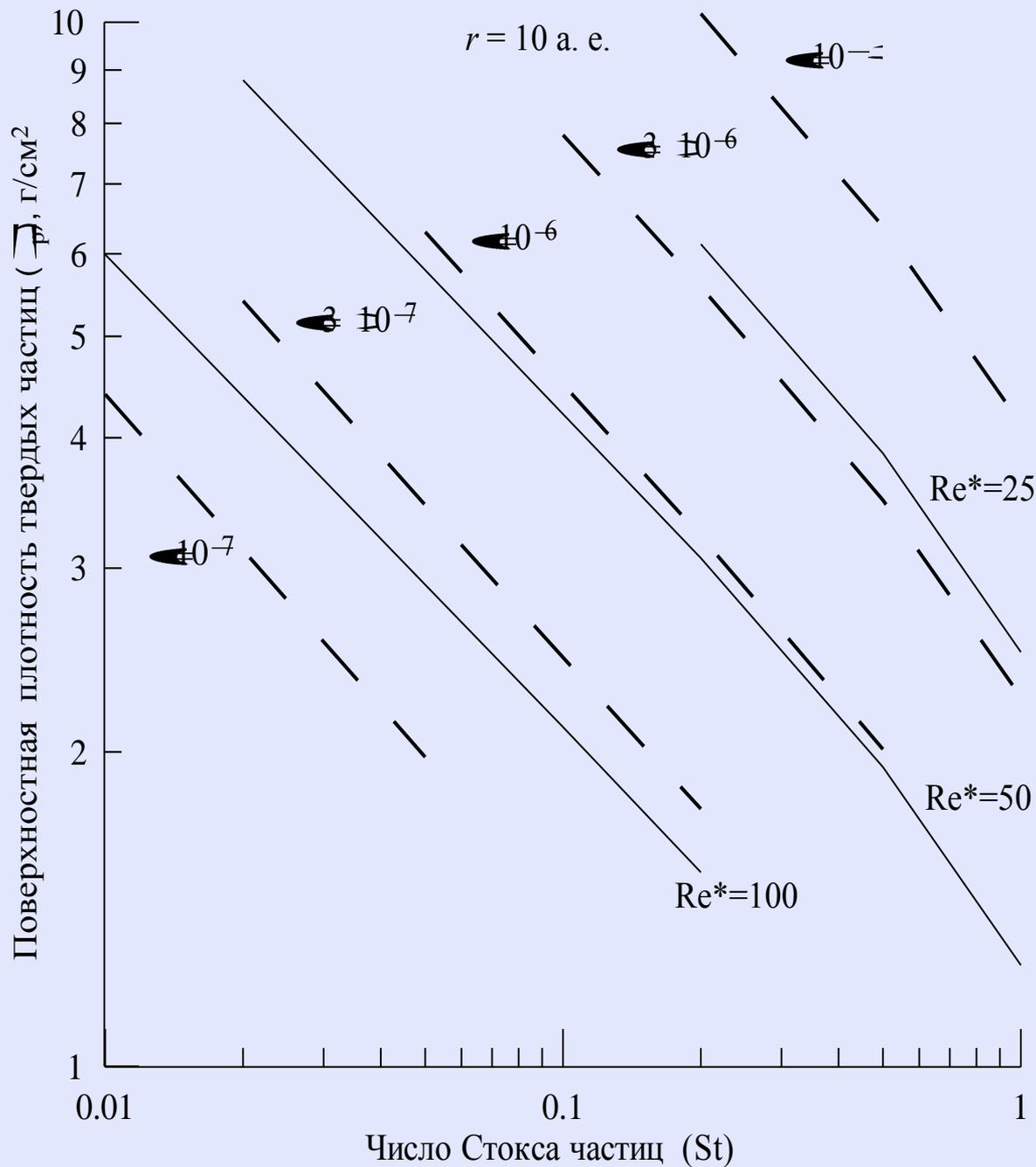
$$\frac{\partial \sigma_p}{\partial t} + \Sigma_p \frac{\partial v_r}{\partial r} = D \frac{\partial^2 \sigma_p}{\partial r^2}.$$

$$\Delta \Phi_1 = 4\pi G \sigma_p \delta(z).$$



Соотношение между критическими значениями параметров пылевого слоя: поверхностной плотности Σ_p и числа Стокса частиц St на расстоянии $r = 1 \text{ а. е.}$

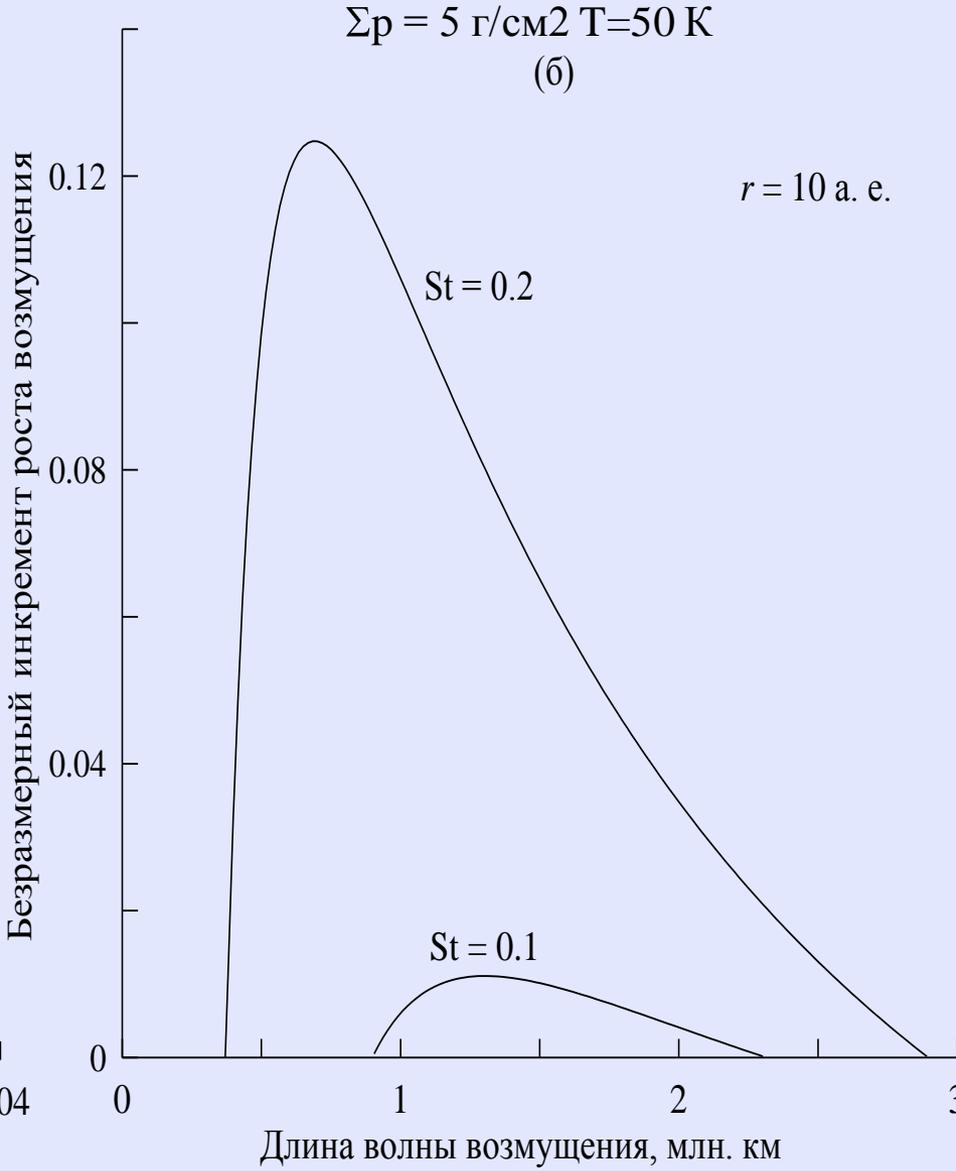
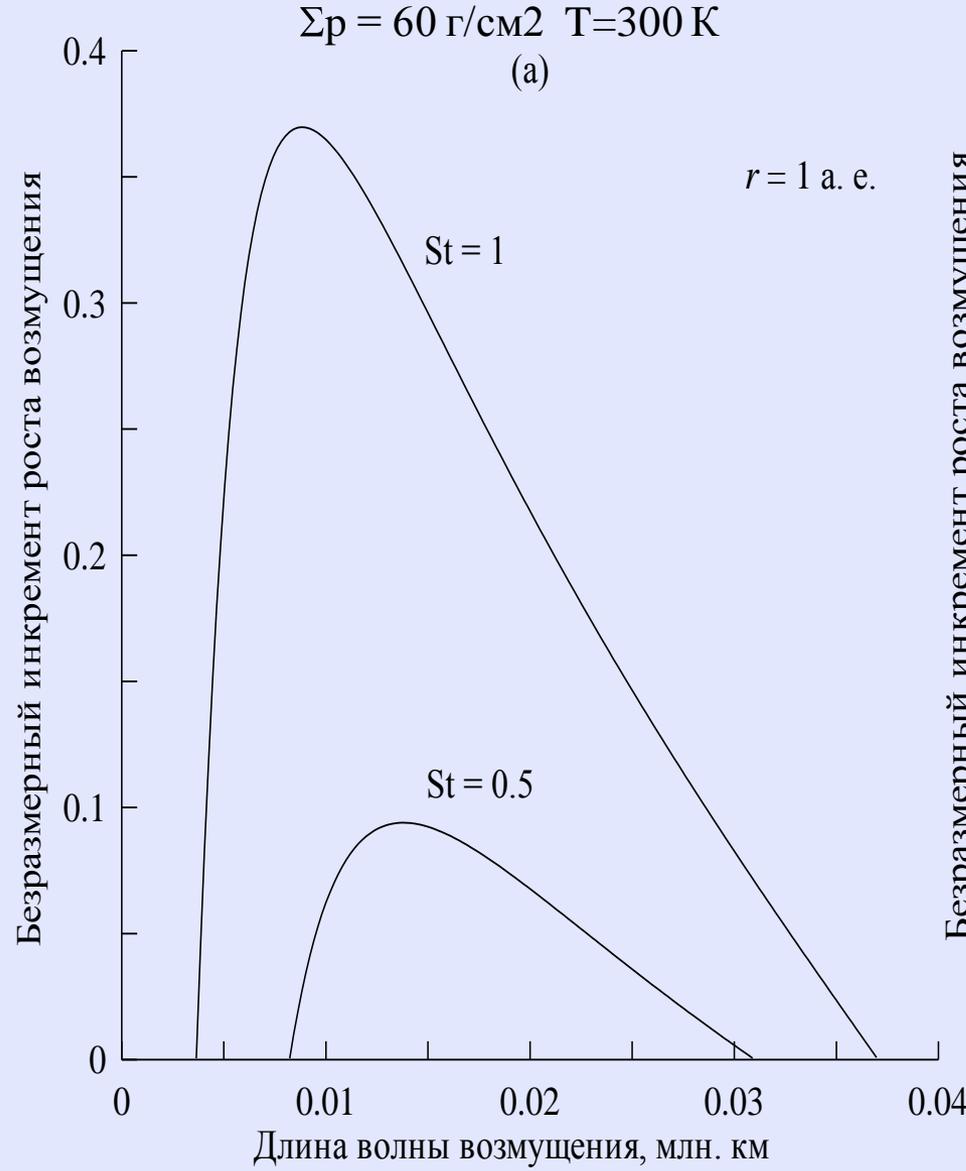
Каждой точке на кривых соответствует пара значений Σ_p и St , при которых начинается гравитационная неустойчивость в слое. Штриховые кривые соответствуют различным значениям параметра α в коэффициенте турбулентной вязкости. Сплошные кривые соответствуют турбулентной вязкости, выражаемой через критическое число Рейнольдса Re^* при различных значениях Re^* . (Зиглина, Макалкин, 2016)



Соотношение между критическими значениями параметров пылевого слоя: поверхностной плотности Σ_p и числа Стокса частиц St на расстоянии $r = 1 \text{ а. е.}$

Каждой точке на кривых соответствует пара значений Σ_p и St, при которых начинается гравитационная неустойчивость в слое. Штриховые кривые соответствуют различным значениям параметра α в коэффициенте турбулентной вязкости. Сплошные кривые соответствуют турбулентной вязкости, выражаемой через критическое число Рейнольдса Re^* при различных значениях Re^* (Зиглина, Макалкин, 2016).

Зависимость скорости роста возмущений поверхностной плотности и скорости пылевой фазы от длины волны возмущения на радиальном расстоянии 1 а. е. (а) и 10 а. е. (б). На каждой панели показаны результаты расчетов для двух значений числа Стокса частиц (St), отличающихся в 2 раза (Зиглина, Макалкин, 2016).



ГРАВИТАЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПЫЛЕГАЗОВОМ СЛОЕ ПРОТОПЛАНЕТНОГО ДИСКА (результаты расчетов)

- Расчеты показали, что на расстоянии 1 а. е. для неустойчивости в слое при существующих моделях турбулентности необходимо обогащение твердым веществом в диске в 5-10 раз по сравнению с его первичным содержанием, а также рост агрегатов частиц до размеров не менее ~ 30 см. На расстоянии 10 а. е. такого значительного обогащения твердым веществом не требуется, и достаточно достижения частицами размеров 10 см.
- Кольцевые уплотнения распадаются на самогравитирующие сгущения. Их начальная плотность в области формирования планет земной группы (~ 1 а. е.) составляет $10^{-6} - 10^{-5} \text{ г/см}^3$.
- Такие сгущения представляют собой начальное состояние планетезималей. Это сверхразреженные планетезимали с низкой фрактальной размерностью.

Из полученных результатов следует, что начальные массы сгущений (первичных планетезималей) составляют $10^{18} - 10^{20}$ г на 1 а. е. и $10^{21} - 10^{23}$ г на 10 а. е. (0.001-0.1 массы Цереры).

Как могла быть достигнута высокая поверхностная плотность твердого вещества (пылевой фазы) в области образования планет, необходимая для гравитационной неустойчивости?

Радиальное сжатие пылевого слоя в диске может приводить к его уплотнению (Makalkin, 1996; Youdin, Shu, 2002; Youdin, Chiang, 2004, Макалкин, Зиглина, 2004).

Проведено численное моделирование радиального сжатия слоя, взаимодействующего с окружающим газом протопланетного диска. Из-за трения о газ частицы в слое дрейфуют в сторону Солнца. В модели учтено испарение льда при $T=150$ К на фронте испарения водяного льда (линии льда). Скачок поверхностной плотности твердой фазы при испарении льда не учитывался в предыдущих моделях радиального сжатия пылевого слоя.

Касательное напряжение, действующее на поверхность слоя (S):

$$S = \rho_g \nu \frac{dV_\varphi}{dz} \approx -\rho_g \nu \frac{\Delta V_g}{h_t} \quad \Delta V_g = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 1} \frac{\Delta V}{1 + C^2} \quad \Delta V = -\frac{1}{2\rho_{g,0}\Omega} \frac{\partial P}{\partial r}$$

$$C = \frac{St}{\varepsilon + 1} \quad St \equiv t_s \Omega \quad \varepsilon = \rho_{p,0} / \rho_{g,0}$$

h_t – характерная полутолщина турбулентного слоя, (высота однородной атмосферы), на которой скорость вращения газа изменяется на величину ΔV_g .
 ν – кинематический коэффициент турбулентной вязкости.

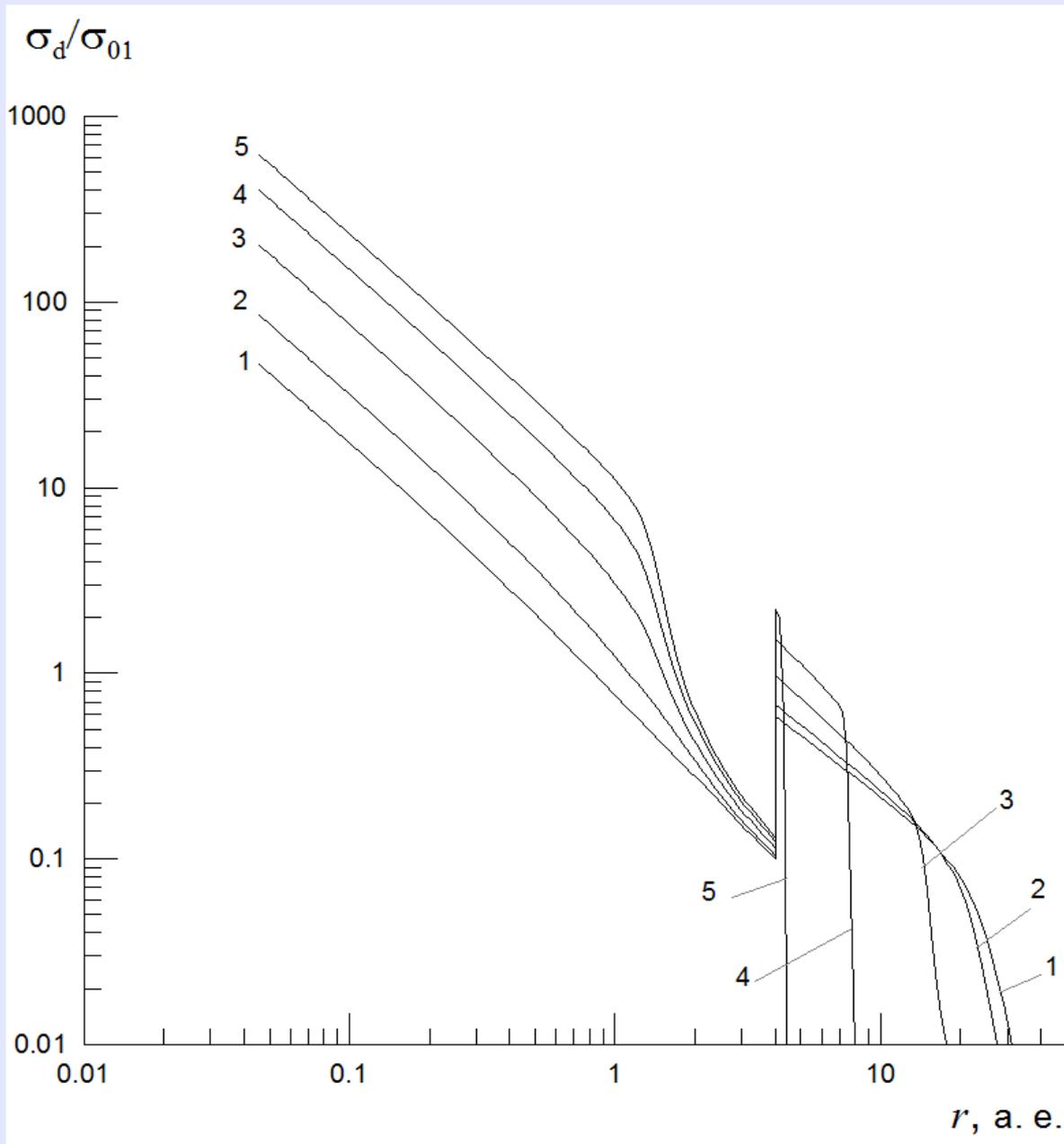
$$\nu = \nu_1 + \nu_2$$

$$\nu_1 = \theta \alpha c_i^2 / \Omega = \theta \Omega \alpha h_g^2 \quad \nu_2 = \frac{\theta_1 \Delta V_g^2}{\Omega \text{Re}^{*2}} = \theta_1 \Omega h_E^2$$

Решается уравнение неразрывности для твердой фазы пылевого слоя:

$$\frac{\partial \sigma_p}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r \sigma_p (V_{rc} + V_{ri})] = 0$$

$$V_{rc} = -\frac{\varepsilon}{\varepsilon + 1} \frac{4S}{\sigma_p \Omega}$$



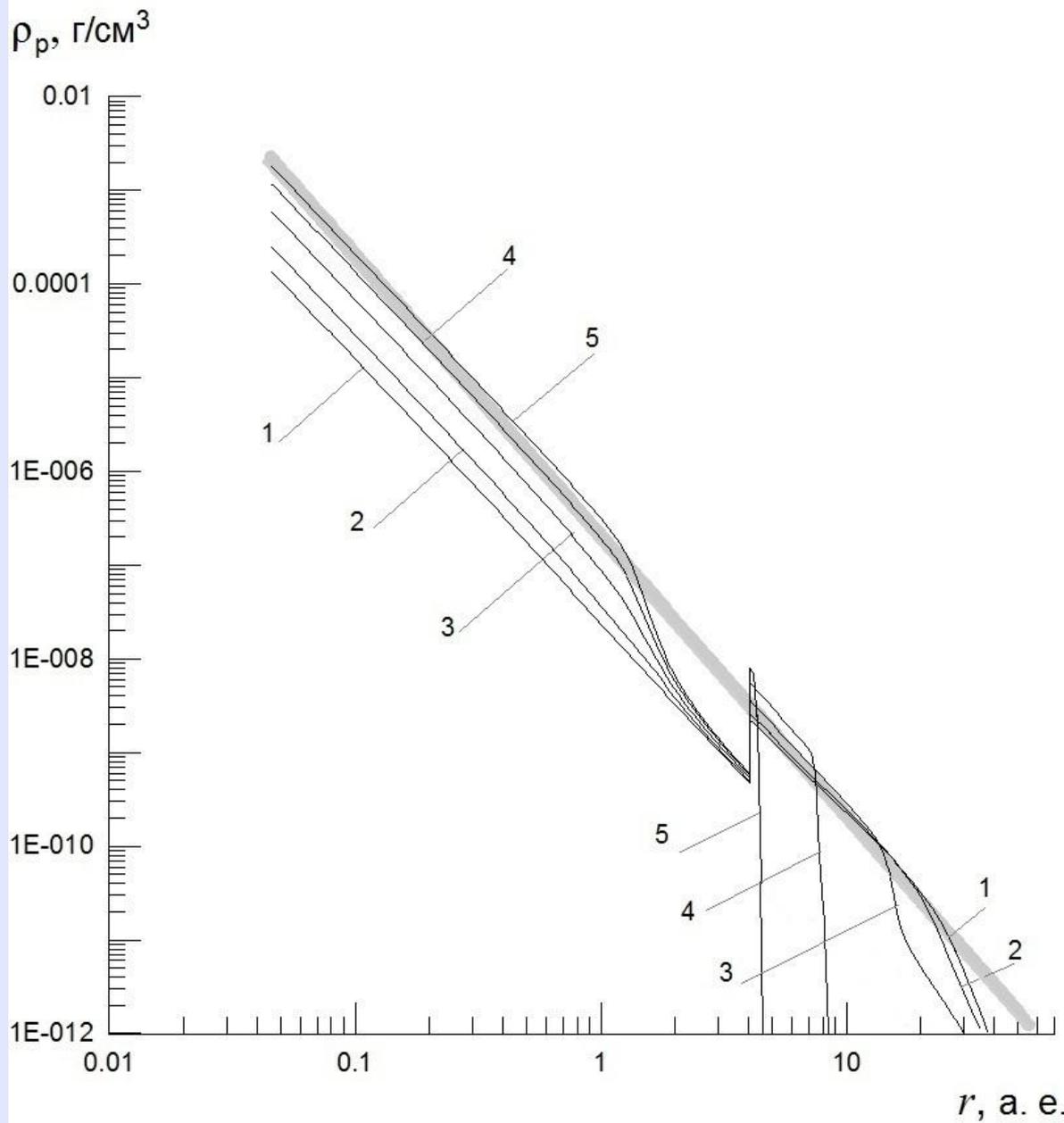
Эволюция поверхностной плотности твердого вещества в протопланетном диске, имеющем первичный (протосолнечный) состав
 (Макалкин, Артюшкова, Зиглина, 2015)

Поверхностная плотность нормирована на ее начальное значение на расстоянии $r = 1$ а. е.

Кривые 1 – 5 соответствуют следующим моментам времени от начала эволюции пылевого слоя (в тыс. лет): 1, 2, 5, 10, 16.

Время эволюции зависит от размеров пылевых агрегатов. При увеличении радиусов агрегатов во внутренней части от 20 до 50 см, время эволюции уменьшается от 50 до 10 тысяч лет.

Еще сильнее время эволюции зависит от содержания газа в диске. При уменьшении в 5 раз (до $X+Y \approx 0.2$) время увеличивается также \sim в 5 раз до 100 – 500 тысяч лет.



Эволюция объемной (распределенной) плотности твердого вещества в средней плоскости пылевого слоя.

(Макалкин, Артющкова, Зиглина, 2015)

Номера кривых соответствуют временам 1, 2, 5, 10, 16 тысяч лет от начала эволюции слоя.

Серая диагональная полоса соответствует вероятному интервалу значений критической плотности для начала гравитационной неустойчивости слоя: (1–2) ρ^* .

$$\rho^* = 3M_* / 4\pi r^3$$

Результаты моделирования радиального сжатия пылевого слоя

- Уплотнение слоя происходит только при достаточно пологом убывании поверхностной плотности протопланетного газопылевого диска с радиальным расстоянием: обратно пропорционально квадрату расстояния. При более крутом убывании уплотнения нет.
- Уплотнение слоя происходит при слабой глобальной турбулентности, характеризуемой параметром $\alpha \leq 10^{-6}$. При этом основную роль в уплотнении слоя играет локальная турбулентность, генерируемая разностью скоростей вращения слоя и диска.
- Время эволюции слоя зависит от размеров пылевых агрегатов. При увеличении радиусов агрегатов во внутренней части от 20 до 50 см, время эволюции уменьшается от 50 до 10 тысяч лет.
- Еще сильнее время эволюции зависит от содержания газа в диске. При уменьшении в 5 раз (до $X+Y \approx 0.2$) время увеличивается также ~ в 5 раз до 100 – 500 тысяч лет.
- В результате численного моделирования эволюции пылевого слоя (субдиска) получено, что пониженное значение поверхностной плотности твердого (пылевого) вещества сохраняется в широкой зоне радиальных гелиоцентрических расстояний r от 1.5 а. е. до 4 а. е. в течение всего времени эволюции пылевого слоя. При этом во внутренней зоне $r \leq 1$ а. е. плотность со временем растет и за время эволюции увеличивается до критической плотности для начала гравитационной неустойчивости ($\sim 2-2.5 \rho^*$).

Выводы

- Несмотря на ряд условий, необходимых для достижения гравитационной неустойчивости пылевого слоя, эта неустойчивость остается одним из основных вероятных механизмов образования планетезималей.
- Механизм уплотнения пылевого слоя и образования планетезималей при радиальном сжатии слоя может быть перспективным, поскольку его следствием является дефицит массы твердого вещества в протопланетном диске в зоне современного астероидного пояса.

Нерешенные вопросы

- Способ образования планетезималей не вполне ясен. До какой степени может идти рост агрегатов пылевых частиц благодаря переносу массы с мелких дробящихся агрегатов на крупные? Этот процесс медленный, поэтому может быть неэффективным.
- Характерное время сжатия и уплотнения разреженных, рыхлых пылевых агрегатов может быть слишком малым для того, чтобы в результате их объединения при столкновениях успела образоваться планетезималь. Плотные агрегаты плохо слипаются.
- Не изучено, в какой степени отрицательное влияние диффузии пылевых агрегатов и дисперсии их скоростей в турбулентном газе препятствует их концентрации (аккумуляции) при потоковой неустойчивости.
- Не исследована вероятность реализации условий, необходимых для достижения гравитационной неустойчивости пылевого слоя (субдиска).
- Характерное время уплотнения разреженных планетезималей (пылевых сгущений), ограниченное сверху данными наблюдений (~1 млн. лет), остается не определенным.

Перспективы исследований образования планетезималей

- Для разработки физически реальной единой модели образования планетезималей необходимо дальнейшее экспериментальное и теоретическое исследование всех известных механизмов взаимодействия агрегатов пылевых частиц при столкновениях, а также численное моделирование гидродинамической и гравитационной неустойчивости пылевой фазы в газопылевой среде протопланетного диска.
- Большой вклад в теорию должны дать новые экспериментальные данные по метеоритам, астероидам и кометам, в частности данные миссии ROSETTA по комете 67P/Чурюмова–Герасименко.
- Большие перспективы имеет продолжение исследований пылевых фрактальных кластеров и агрегатов, их взаимодействия и роста в условиях, характерных для протопланетного диска.



*Благодарю за
внимание!*