



Солнечная система: Некоторые проблемы происхождения и эволюции

М.Я. Маров

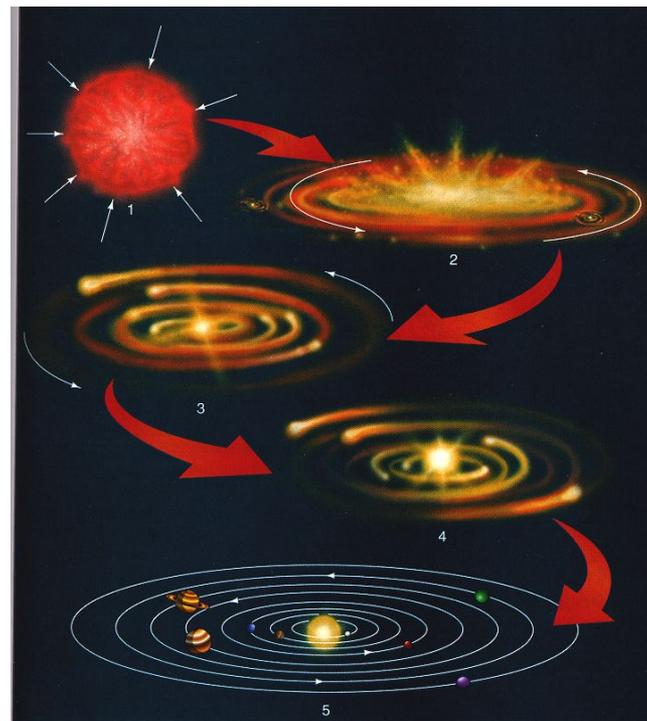
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН



«Астрономия 2006: традиции, настоящее и будущее»
Санкт-Петербург, 27 июня 2006 г.

Содержание

- Введение
- Солнечная система и внесолнечные планеты
- Новый подход к математическому моделированию: основные концепции
- Модель протосолнечной туманности и газопылевого турбулентного диска
- Модель формирования субдиска
- Модель возникновения гравитационной неустойчивости и фрагментации
- Моделирование эволюции двойной звёздной системы
- Ближайшие перспективы
- Заключение

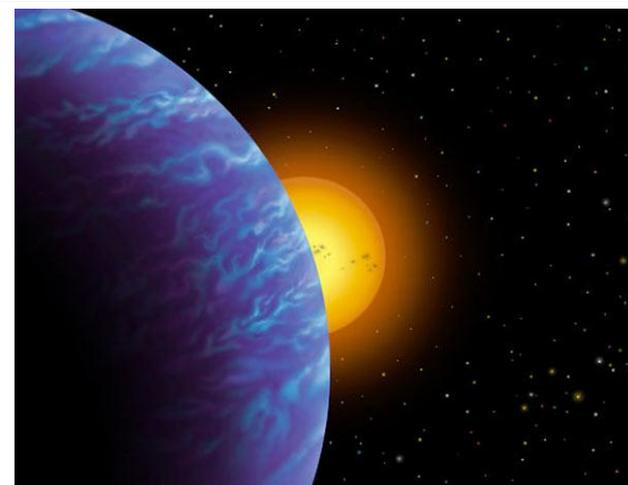
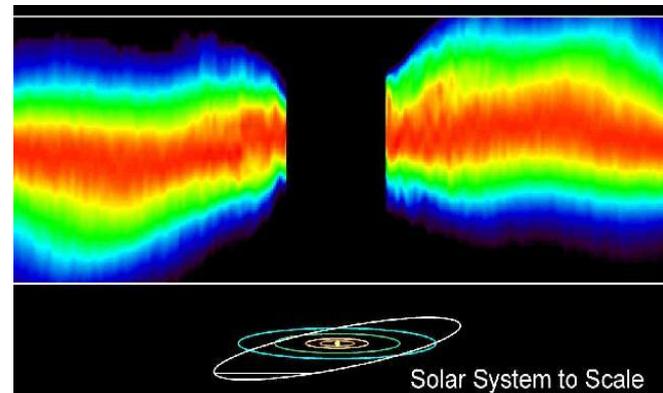


Основные концепции

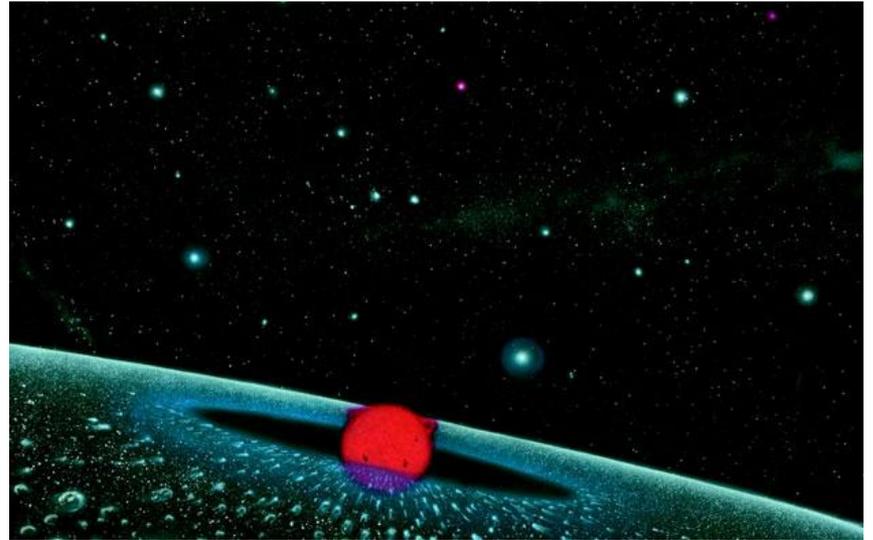
- Проблемы космогонии относятся к фундаментальным основам познания природы и закономерностей окружающего мира. Их научным базисом служат наблюдательные данные и удовлетворяющие им математические модели.
- Вопрос о происхождении и эволюции Солнечной системы является частным случаем общей проблемы возникновения планетных систем у звезд повышенной металличности в качестве «побочных продуктов» их рождения и эволюции
- Гипотезы И. Канта и П.-С. Лапласа об изначальном протопланетном облаке и формирующемся из него вращающемся диске вблизи экваториальной плоскости Солнца, распадающемся в дальнейшем на отдельные сгущения, лежат в основе современных моделей.
- Эта исходная концепция получила развитие в работах О.Ю. Шмидта и его школы в части образования зародышей планет из холодного вещества протосолнечной туманности.
- Вместе с тем, в существующих моделях основные физико-химические процессы, сопровождающие эволюцию аккреционного диска, учитываются приближенно; к ним, в первую очередь, относятся турбулентность в газопылевом диске, многофазность, взаимодействие газа и пыли с учётом процессов коагуляции в турбулентной среде, электродинамические эффекты, возникающие при взаимодействии электризованных частиц с магнитным полем протосолнца, и т.п.
- Наряду с накоплением экспериментальных данных, необходимо дальнейшее совершенствование моделей, чтобы приблизиться к решению фундаментальной проблемы происхождения и эволюции звёздно-планетных систем.

Солнечная система: Фундаментальные свойства

- Механические и космохимические свойства Солнечной системы налагают важные ограничения на существующие теории и строящиеся на их основе космогонические модели.
- Они свидетельствуют в пользу представлений о формировании планет из газопылевого вещества дисковой конфигурации в процессе конденсации в зависимости от температуры на разных расстояниях от Солнца.
- Существенный прогресс в космогонии достигнут за последние десятилетия благодаря открытию у многочисленных звёзд аккреционных протопланетных дисков и планетных систем.



Механические ограничения



- Все планеты и астероиды движутся вокруг Солнца в одном и том же (прямом) направлении, совпадающим с направлением солнечного вращения и плоскости их орбит лежат вблизи плоскости эклиптики.
- Кометы движутся вокруг Солнца в прямом и обратном направлениях.
- Все планеты (за исключением Венеры, Урана и Плутона) вращаются в прямом направлении.
- В то время как Солнце содержит 99.9% всей массы Солнечной системы, планеты содержат 99.7% её углового момента.
- Планеты-гиганты с системами их спутников служат подобием Солнечной системы в миниатюре.

Космохимические ограничения

- Содержание химических элементов на Солнца и в наиболее примитивных метеоритах (углистых хондритах типа C) соответствует космической распространённости элементов.
- Химический состав планет чётко коррелирует с их расстоянием от Солнца: силикатно-металлические (каменистые) породы планет земной группы в противоположность газо-жидко-ледяным планетам-гигантам.

Cosmic abundances of the major elements

Element	Atomic Number	Number of Atoms per Million Hydrogen Atoms
Hydrogen (H)	1	1,000,000
Helium (He)	2	68,000
Carbon (C)	6	420
Nitrogen (N)	7	87
Oxygen (O)	8	690
Silicon (Si)	14	38
Iron (Fe)	26	3,4
Nickel (Ni)	28	2

Planets and satellites: overview of composition

OBJECT	Distance from sun (AU)	Density (g/cm ³)	Composition
Mercury	0,4	5,4	Iron, nickel, silicates
Venus	0,7	5,3	Silicates, iron, nickel
Earth	1	5,5	Silicates, iron, nickel
Moon	1	3,3	Silicates
Mars	1,4	3,9	Silicates, iron, sulfur
Jupiter	5,2	1,3	<i>Hydrogen, helium</i>
Saturn	9,6	0,7	<i>Hydrogen, helium</i>
Uranus	19,2	1,2	<i>Ices, hydrogen, helium</i>
Neptune	30,1	1,7	<i>Ices, hydrogen, helium</i>
Pluto	39,4	1,7	<i>Water ice, silicates</i>

- Химический состав астероидов является промежуточным между планетами земной группы и планетами-гигантами.
- Твёрдые включения в примитивных каменных метеоритах свидетельствуют об их образовании в охлаждающемся газе солнечного состава в диапазоне температур от 2000 К до 100 К.
- Кометы состоят, в основном, из водяного льда и других захваченных замёрзших газов.

Образование первичных твёрдых тел а

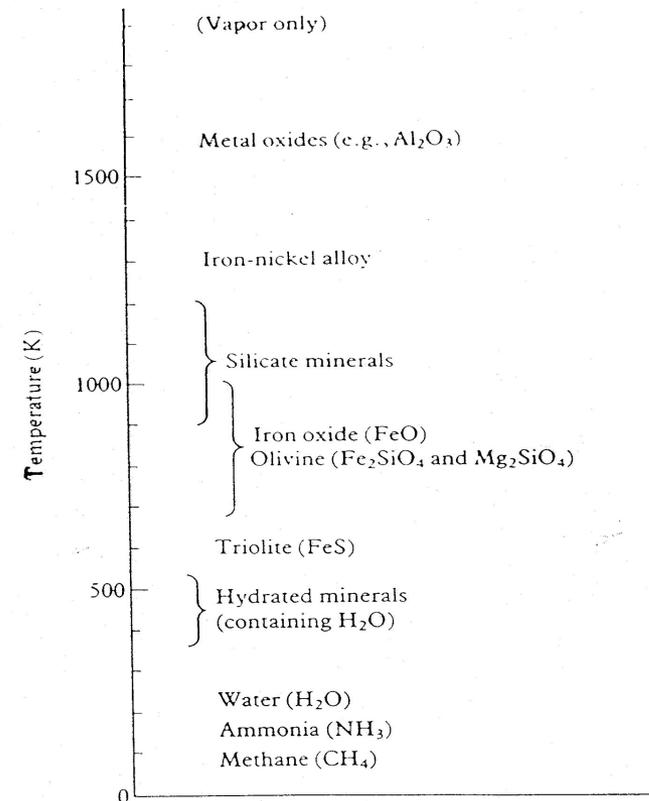
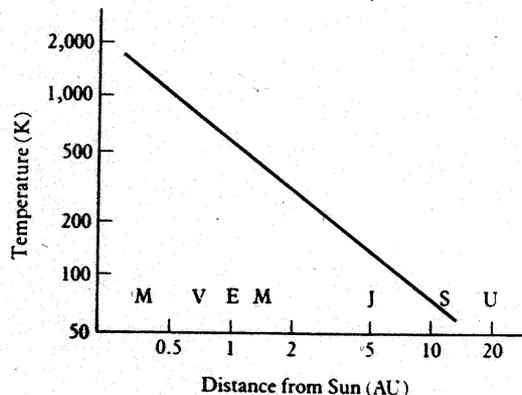
протопланетном диске путём конденсации

Chemical Condensation Sequence

- Температурное фракционирование элементов и соединений в протопланетном диске происходило обратно пропорционально квадрату расстояния от молодого Солнца.
- При расширении и охлаждении горячего газа из ближайших окрестностей Солнца происходили фазовые переходы с последовательным выделением высоко- и низкотемпературных конденсатов.

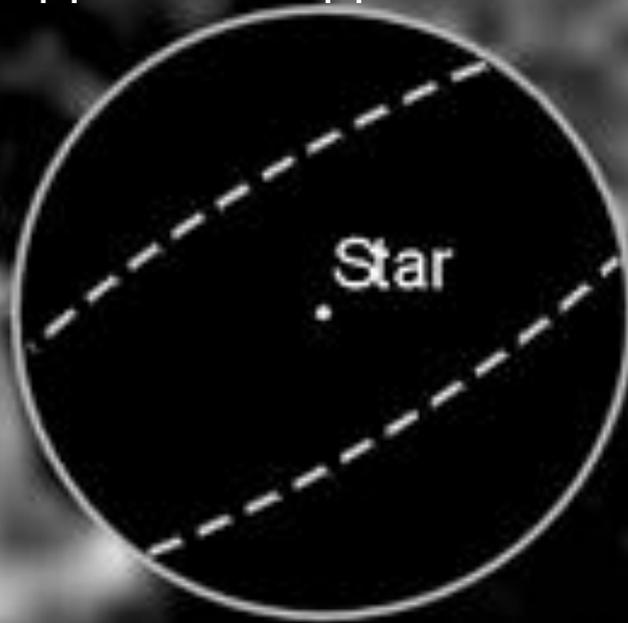
in the Solar Nebula

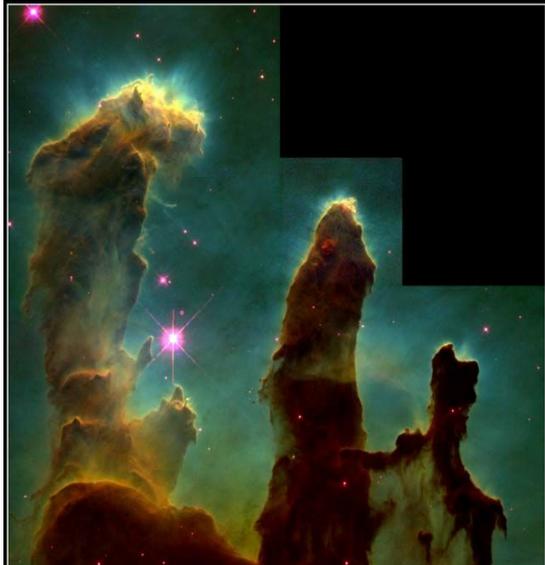
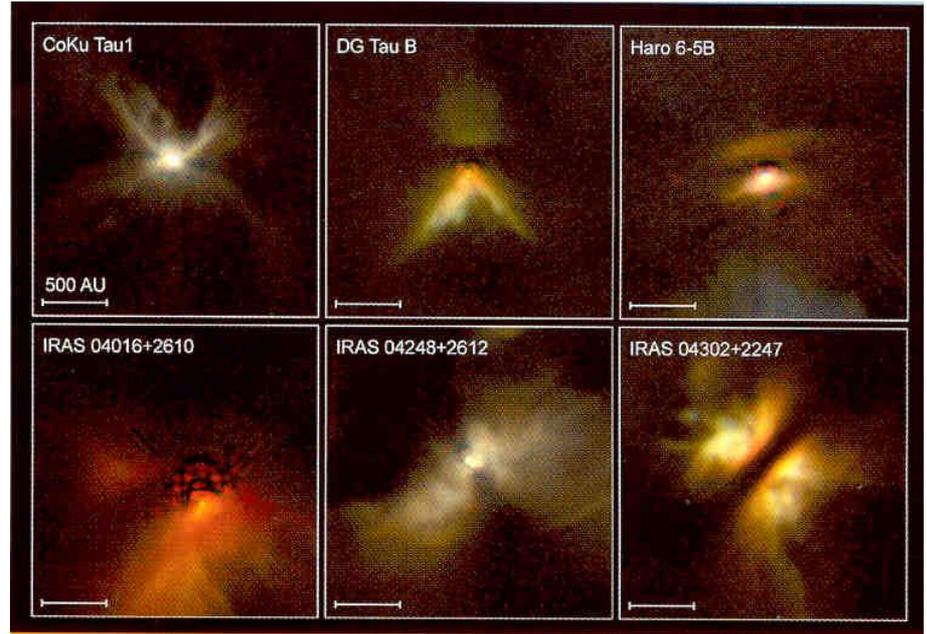
This graph illustrates current ideas about the decrease in temperature with increasing distance from the Sun. The positions at which the various planets formed are marked.



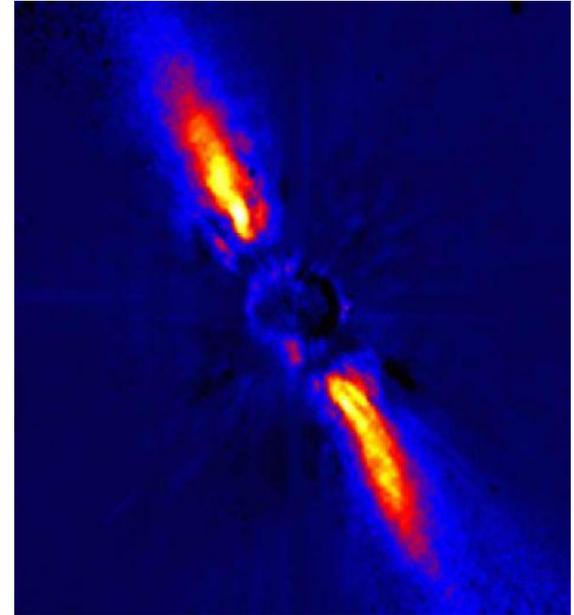
Формирование протопланетных ДИСКОВ

- Газопылевые диски формируются вместе с образованием звезд.
- Диски размером порядка нашей Солнечной системы обнаружены у соседних звезд.



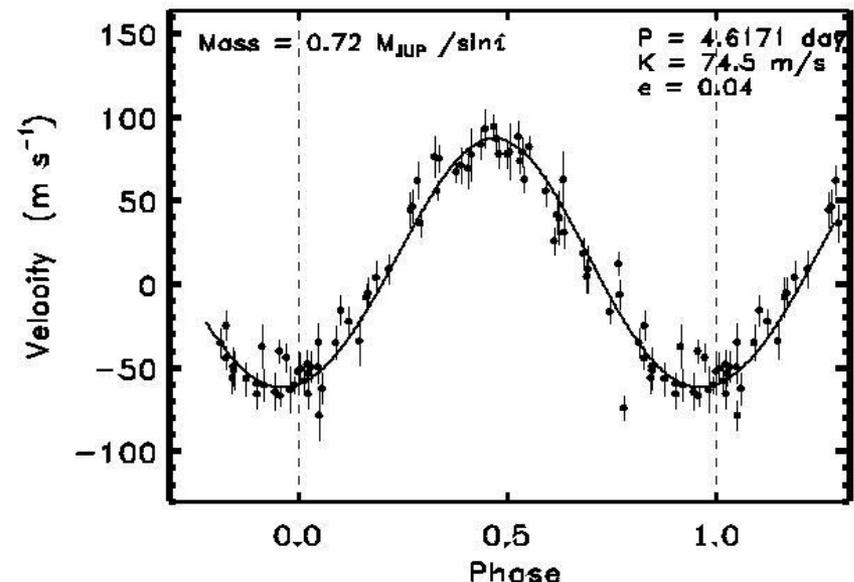
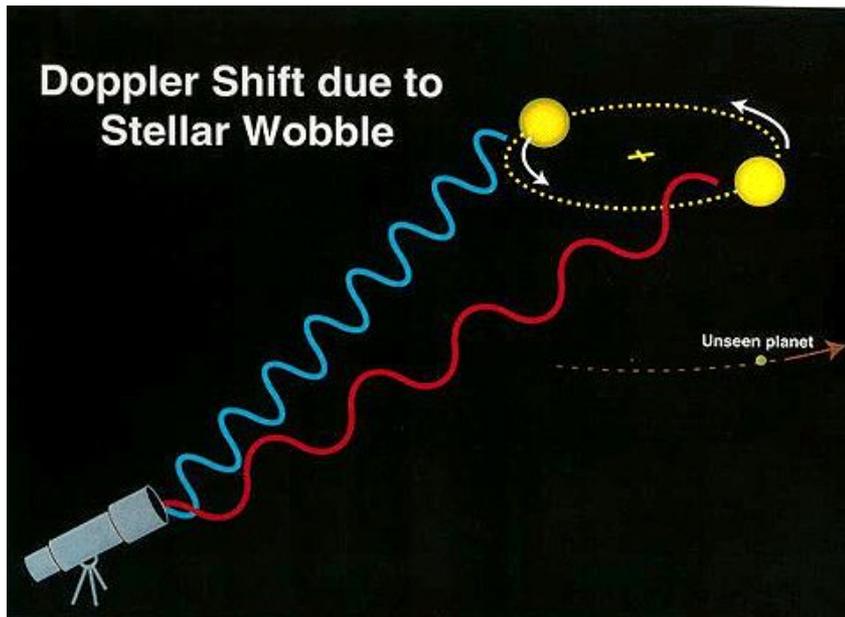


Gaseous Pillars • M16 HST • WFPC2
 PRC95-44a • ST ScI OPO • November 2, 1995
 J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA



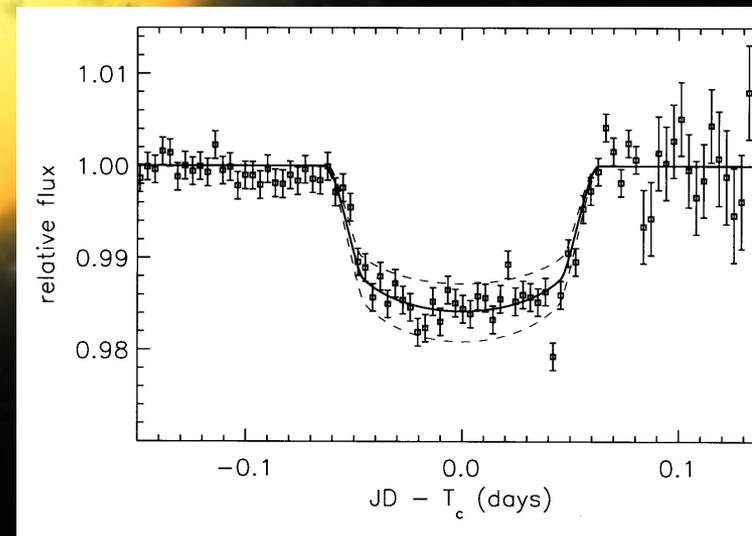
Внесолнечные планеты: Методы обнаружения

- Три основных метода обнаружения внесолнечных планет: доплеровская спектроскопия, фотометрия, астрометрия.
- Известные к настоящему времени 188 планет у других звезд в пределах ~ 70 pc открыты методом доплеровской спектроскопии.
- Достигнутая предельная точность метода ~ 2 м/с, что не позволяет обнаруживать планеты земного типа. Для сравнения, скорость смещения барицентра Солнце-планета под действием притяжения Юпитера, Сатурна и Земли, соответственно, составляет 12,5 м/с; 2,7 м/с и 0,02 м/с.



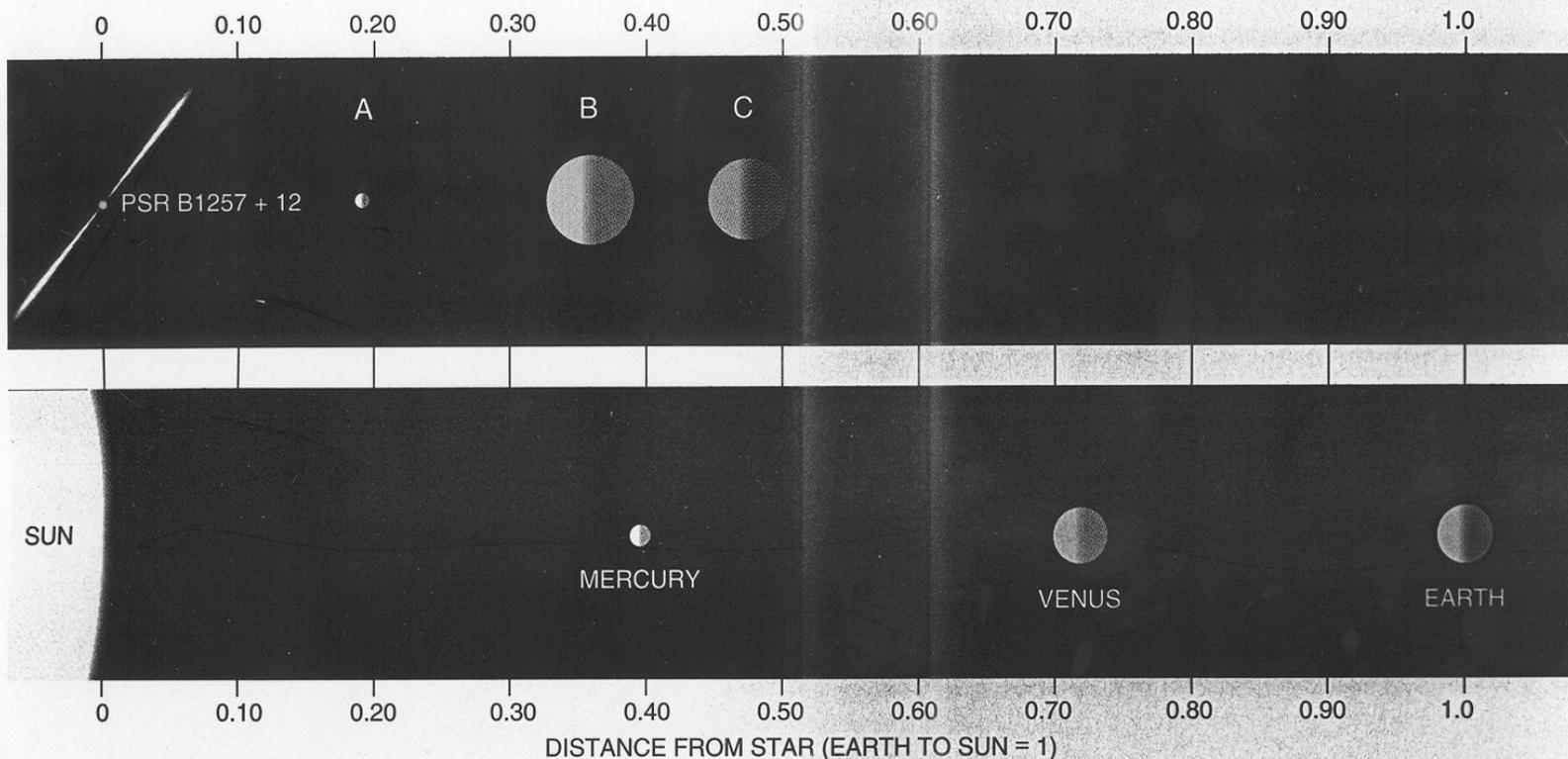
Обнаружение планет фотометрическим методом при прохождении по диску звезд

- Прохождение планеты ($i = 87.1^\circ$; $M = 0.63 M_{\text{jup}}$; $R = 1.27-1.6 R_{\text{jup}}$; $\rho = 0.27-0.38 \text{ g/cm}^3$) по диску звезды HD 209458
- Достигнутая точность фотометрии 10^{-5} (Kepler, USA; Eddington, ESA) - для объекта типа Земли.
- Прямая регистрация света проблематична:
 - Планета земного типа в пределах 1 а.е. излучает на $10 \mu\text{m}$ единицы фотонов/ sec/m^2 - в $10^6 - 10^9$ меньше родительской звезды
 - Пылевой фон в ~ 300 раз ярче планеты

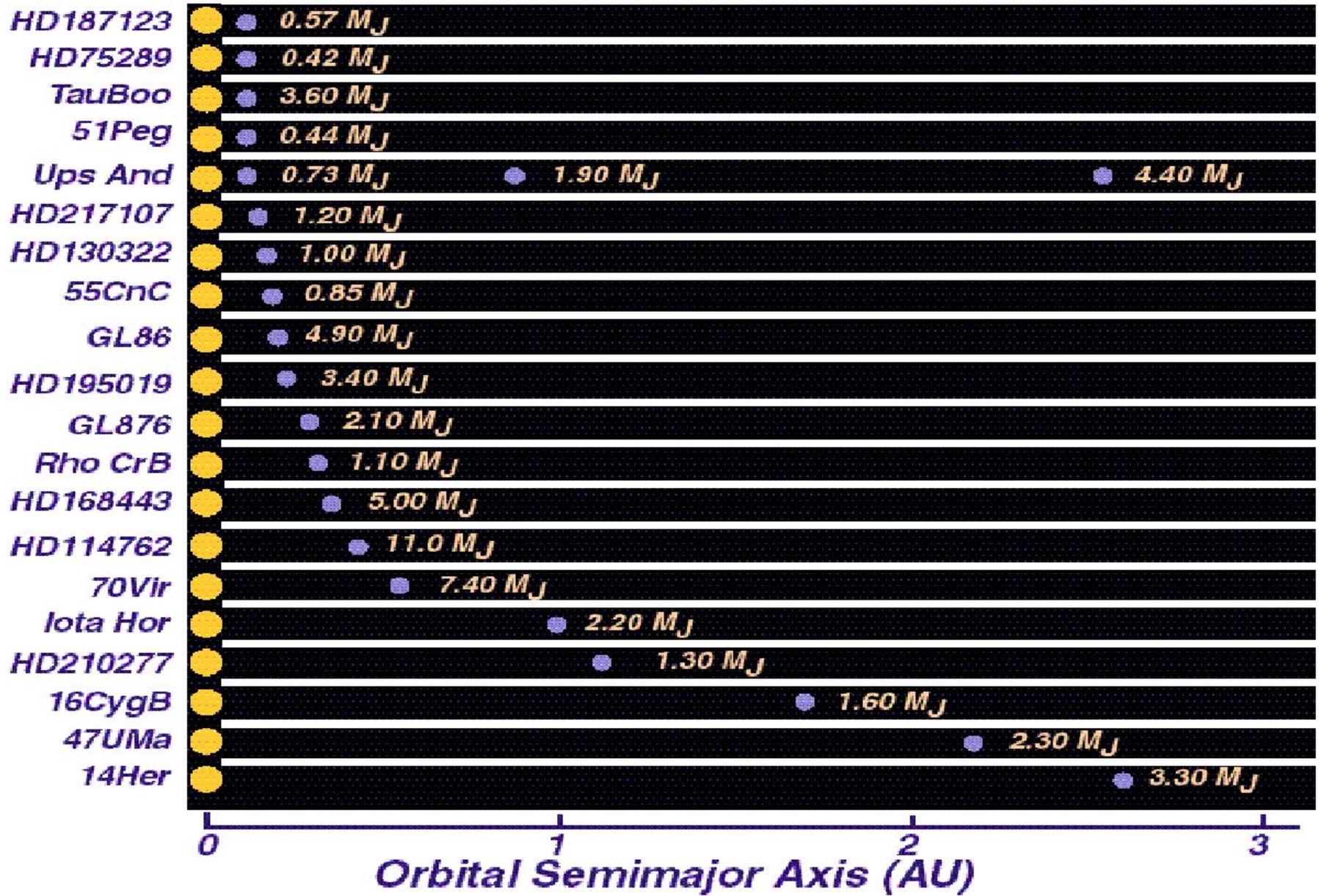


Внесолнечные планеты около пульсара

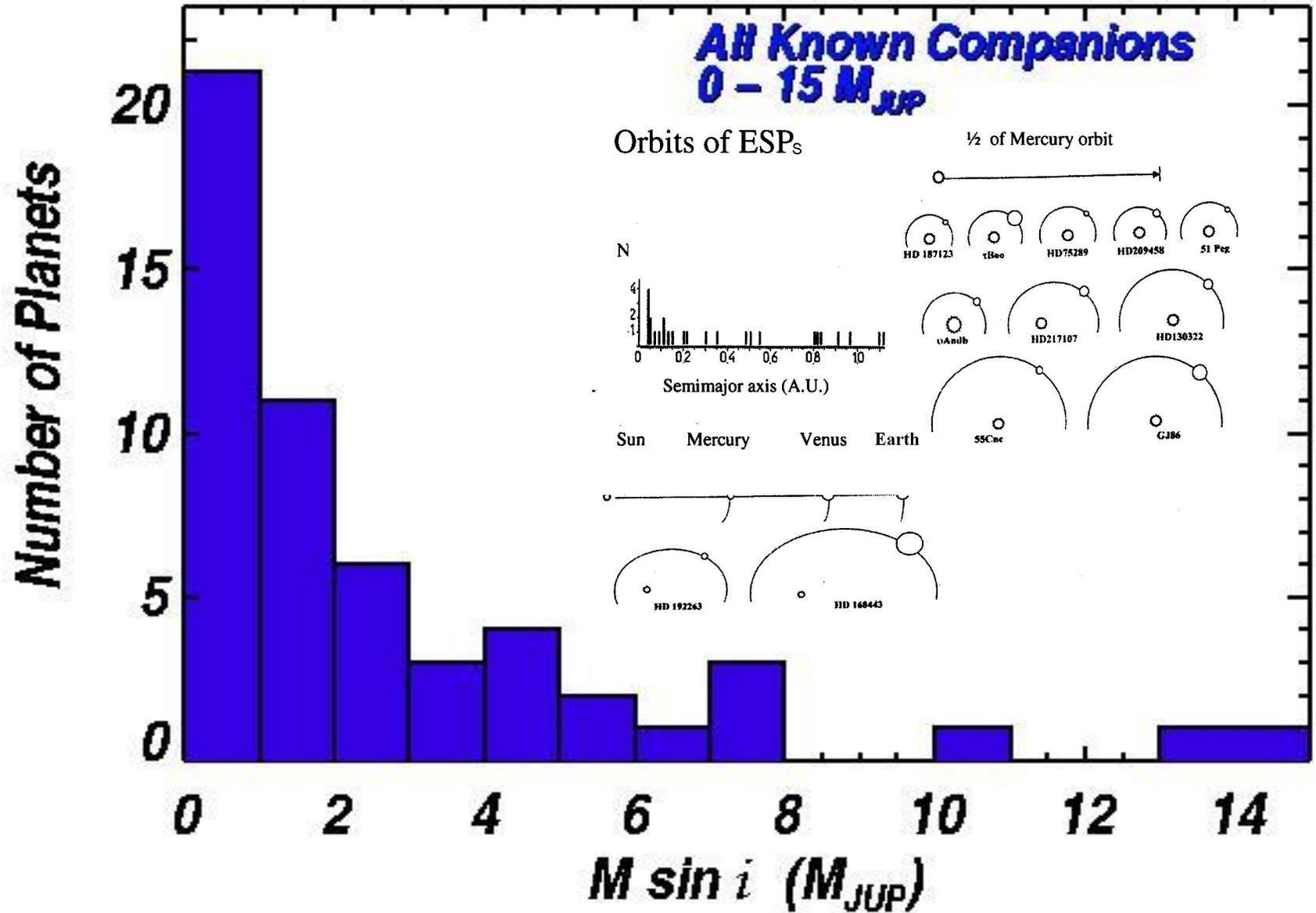
С наличием внесолнечных планет около пульсара PSR B1257-12 связывают вариации его периода вращения



Первые из открытых внесолнечных планет методом доплеровской спектроскопии (согласно Marcy et al.)



Внесолнечные планеты: Массы и орбиты



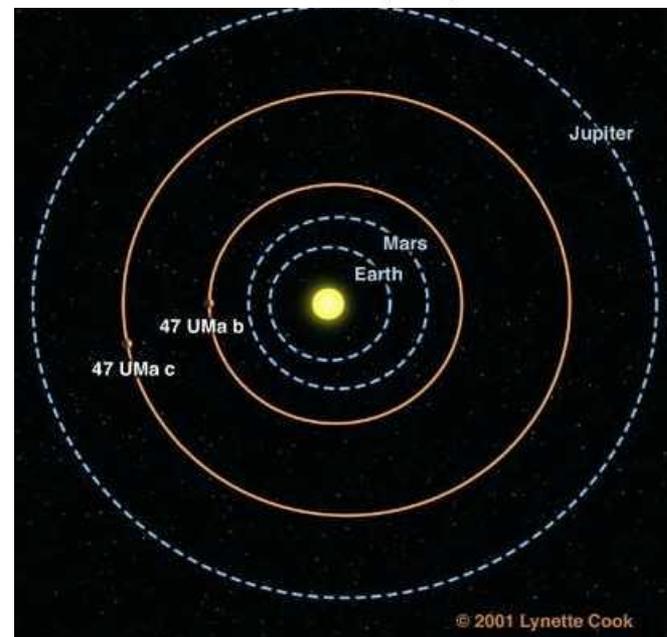
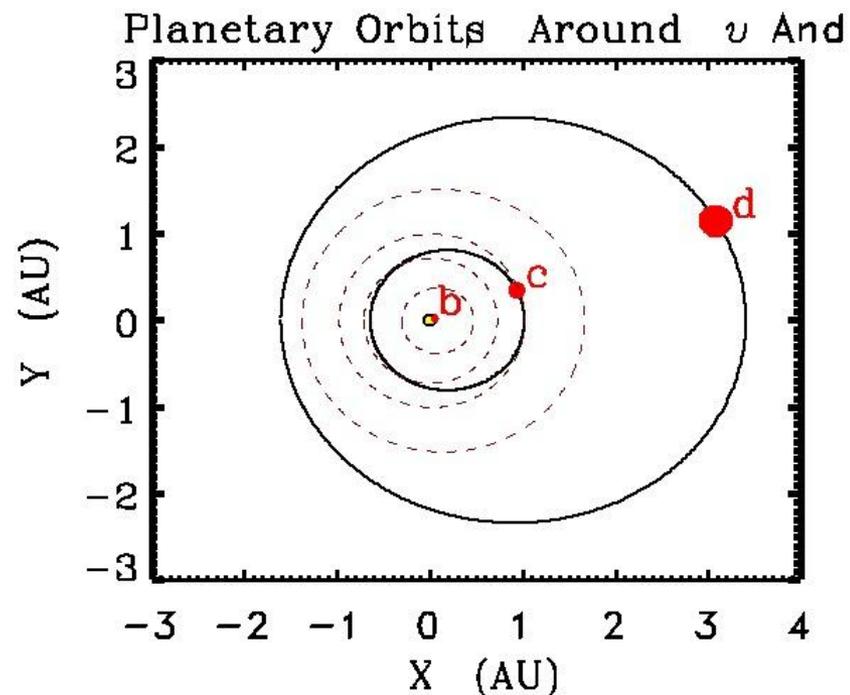
Планетная система около ν Andromedae:

Planet	Mass* M_{Jup}	Orbit (AU)	Temp (deg F)
B	0.73	0.06	1800
C	1.95	0.85	62 to 135
D	4.1	2.5	-113 to -182

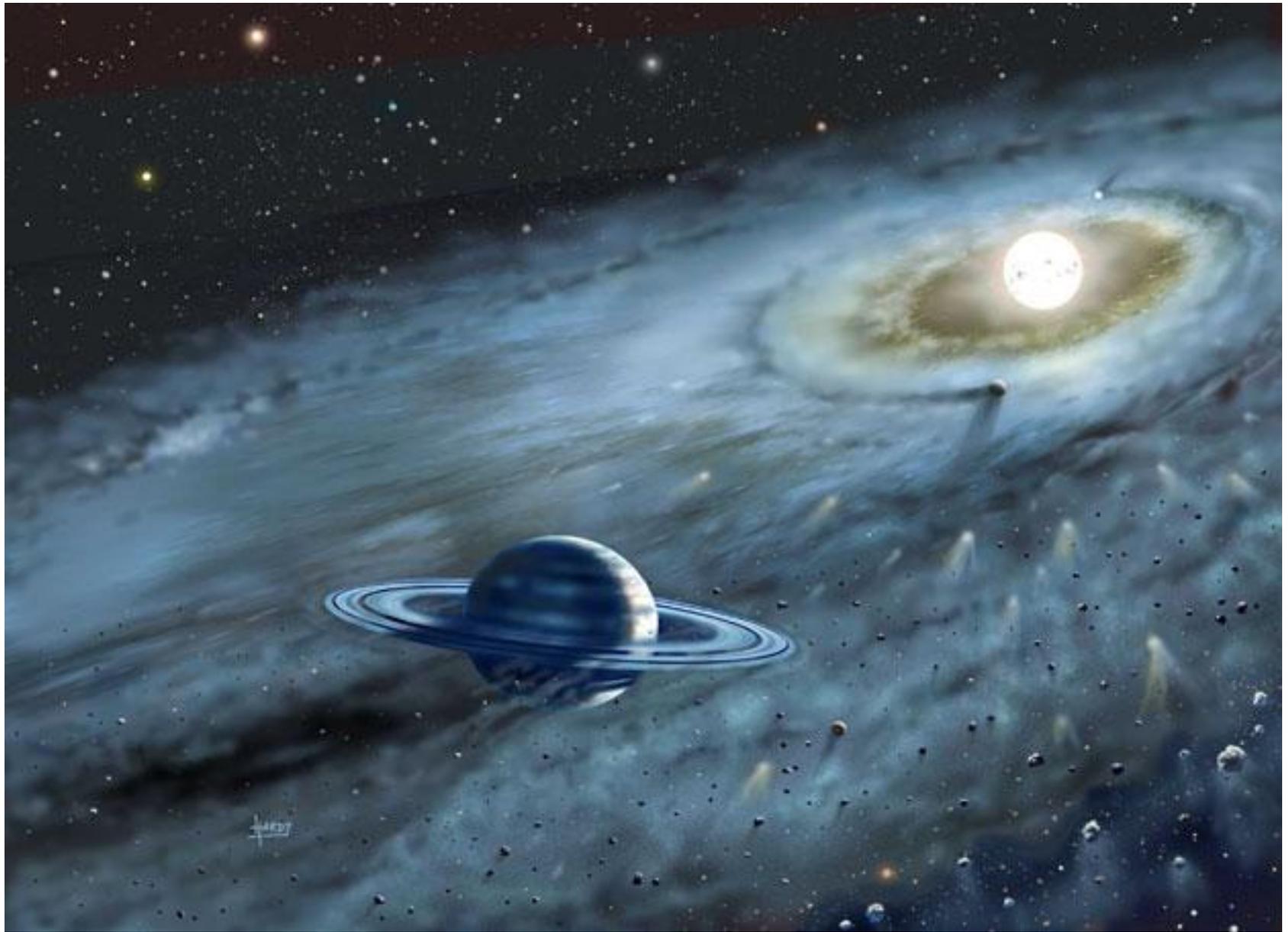
Планетная система около 47 U Ma:

Звезда G0V класса Солнца, на расстоянии 50 л.у.

- Планеты на почти круговой орбите:
2.1 а.е., $2.5 M_J$ (P = 3 года)
3.7 а.е., $0.75 M_J$ (P = 7 лет)



Внесолнечные планеты (рисунок)



Внесолнечная планетная система (рисунок)



Равновесная температура внесолнечной близкой планеты

- $T_e = T^* (R/2a)^{1/2} (1-A)^{1/4}$

T^* - эффективная температура звезды;

R – радиус звезды;

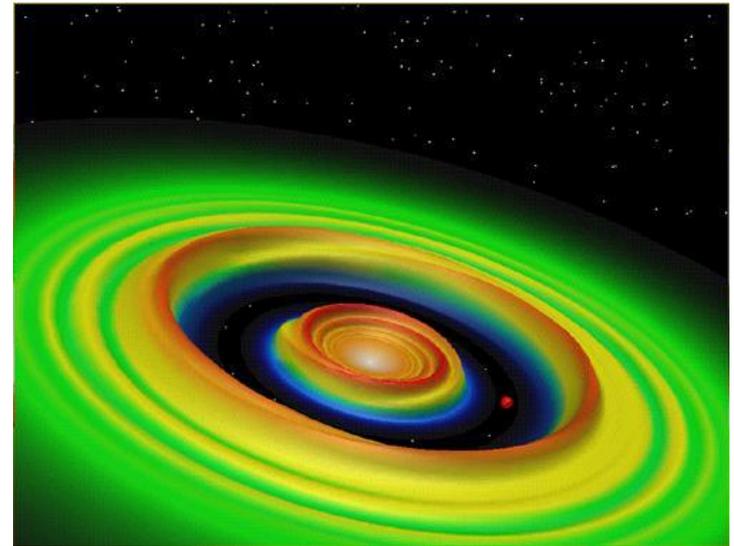
A - альбедо

a – орбитальное расстояние.

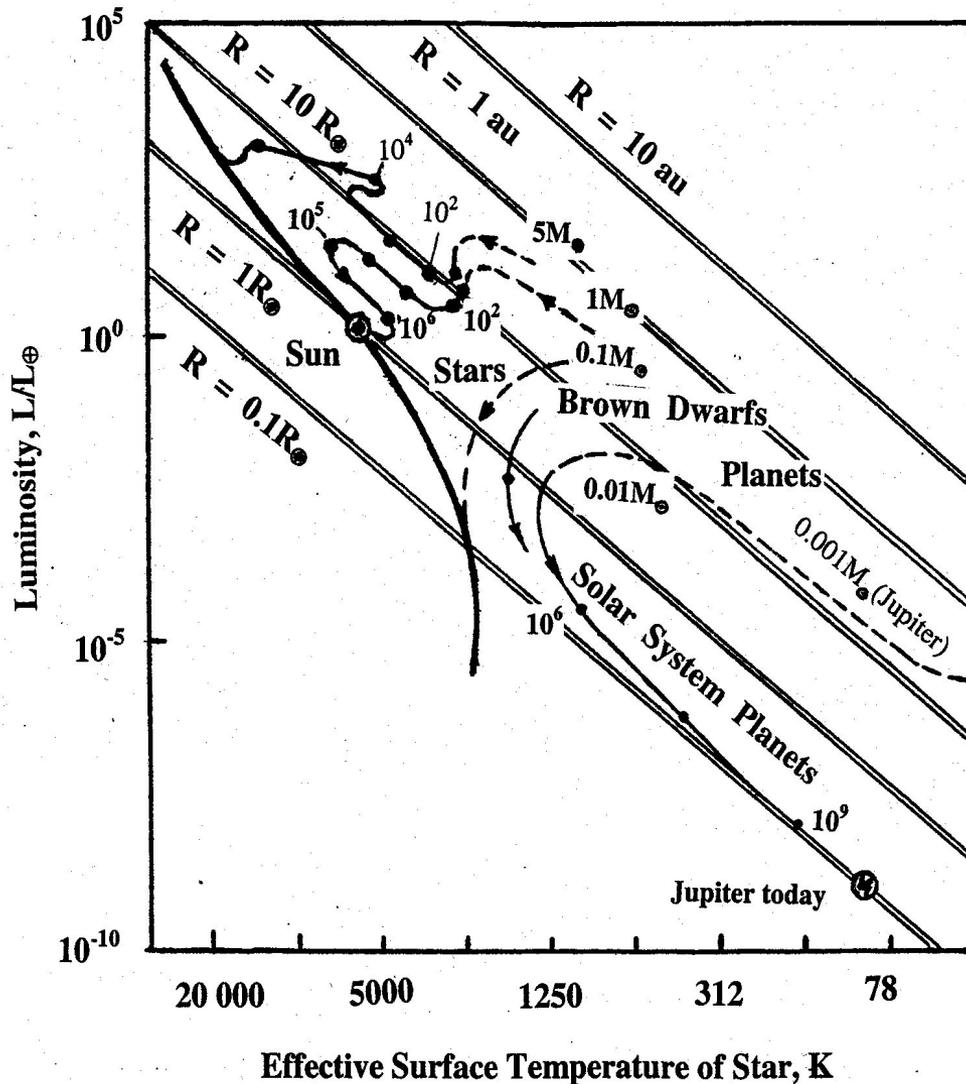
- Эта формула аналогична формуле для околосолнечной планеты

$$\sigma T_e^4 = S (1-A)/4a$$

- T_e близкой планеты оказывается **1000-1500K!**
- Только некоторые тугоплавкие элементы могут конденсироваться при таких температурах («кремниевая» атмосфера?).



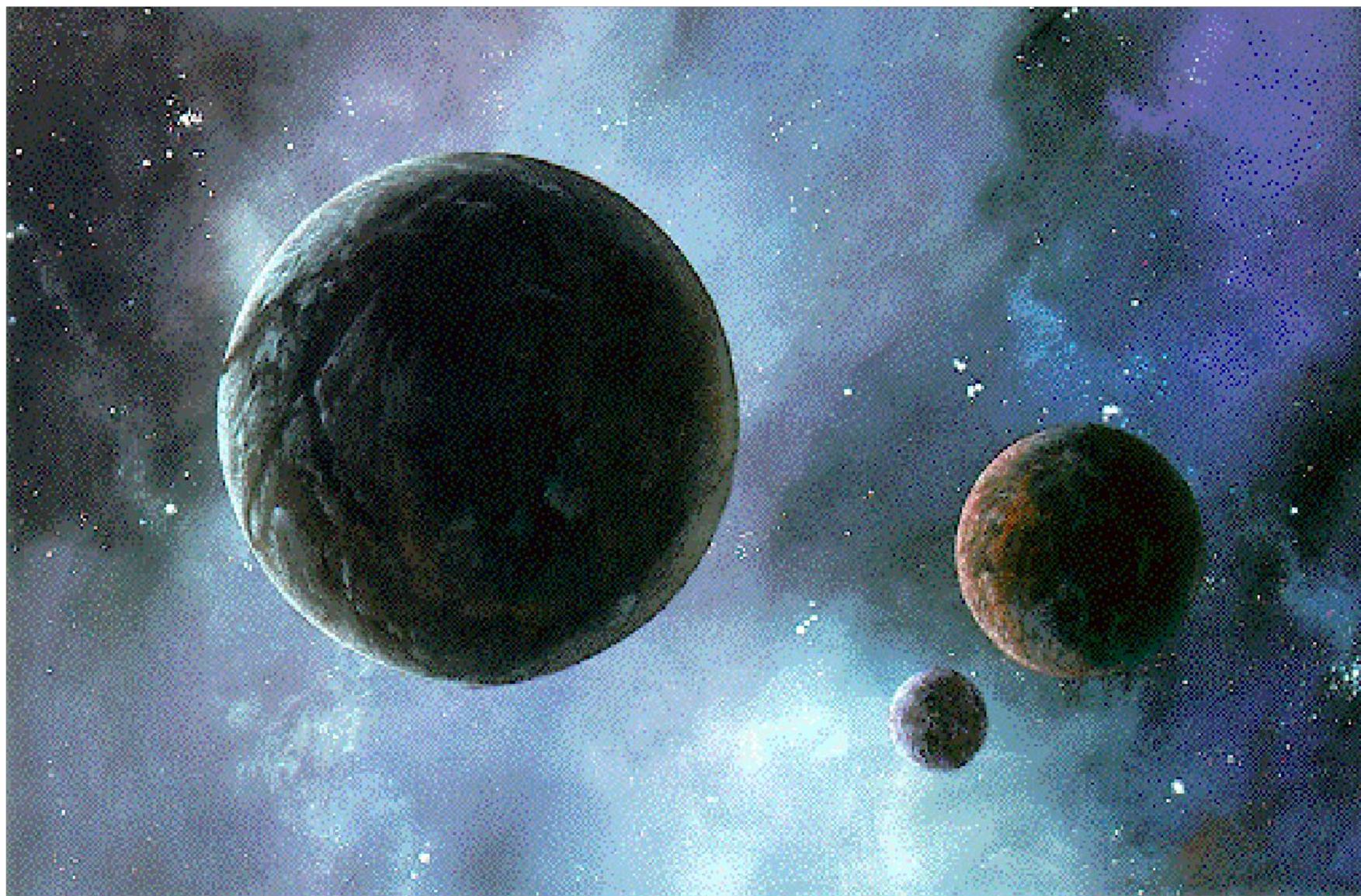
Эволюционные треки на H-R диаграмме



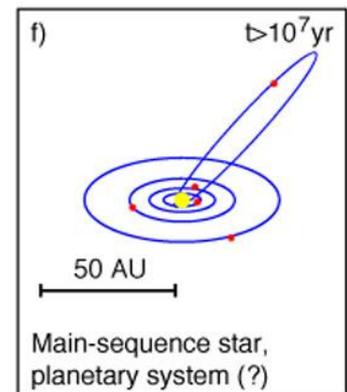
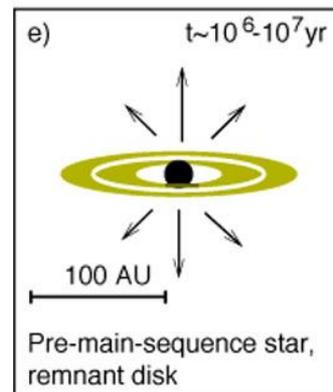
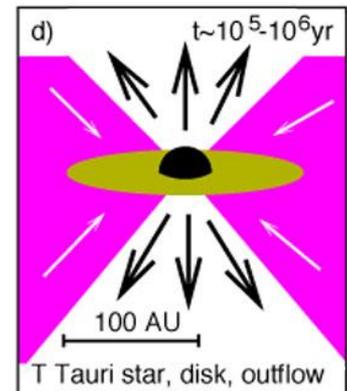
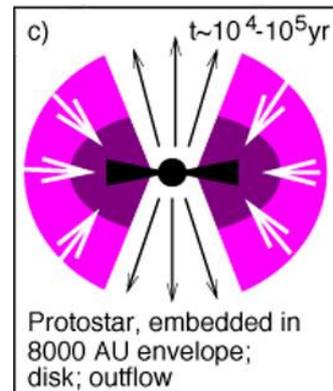
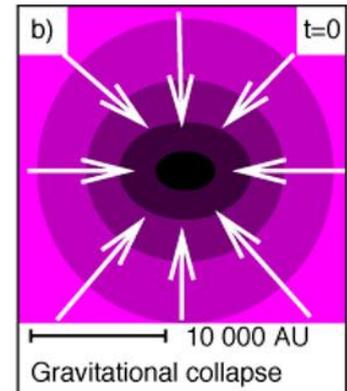
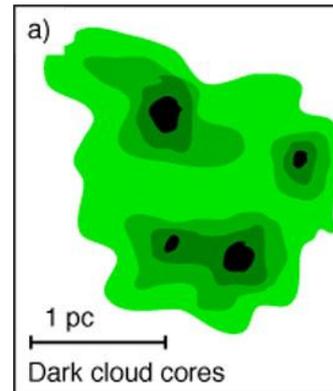
- Минимальная масса объекта для термоядерного водородного синтеза $M \geq 0.08 M_{\text{sun}}$.
- В диапазоне масс $M \leq 0.01 M_{\text{sun}}$ образуются планеты ($M_J \approx 0.001 M_{\text{sun}}$).
- Объекты в промежуточном диапазоне масс $M = (0.01-0.08) M_{\text{sun}}$ – коричневые карлики.
- Порог массы $0.013 M_{\text{sun}}$ отвечает возможности протекания дейтериевой ядерной реакции.



Коричневые карлики (рисунок)



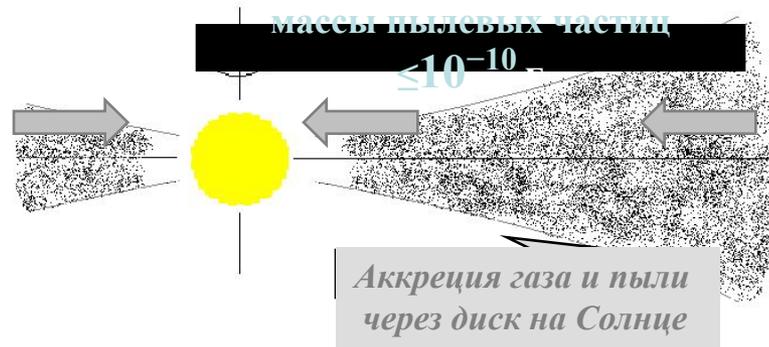
Усовершенствованный подход к моделированию допланетной туманности и газопылевого аккреционного диска



Схематическое изображение сценария формирования протопланетного диска и развития механизма гравитационной неустойчивости в пыле-газовом субдиске при достижении в нём критической плотности вследствие оседания частиц к средней плоскости, уплотнения субдиска и возникновения флуктуаций, с образованием первичных пылевых сгущений (кластеров)

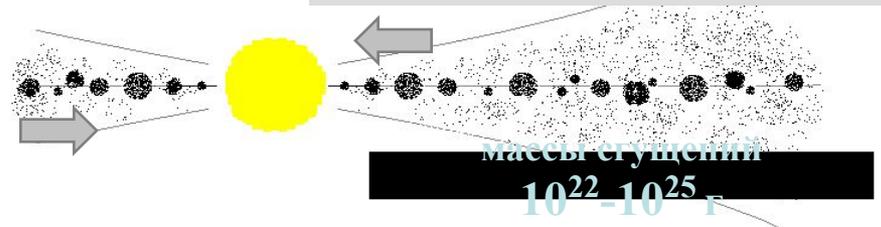
~ 0.1-0.5 млн.лет

Образование диска



~ 0.5 -1 млн.лет

Возникновение гравитационной неустойчивости, образование пылевых сгущений



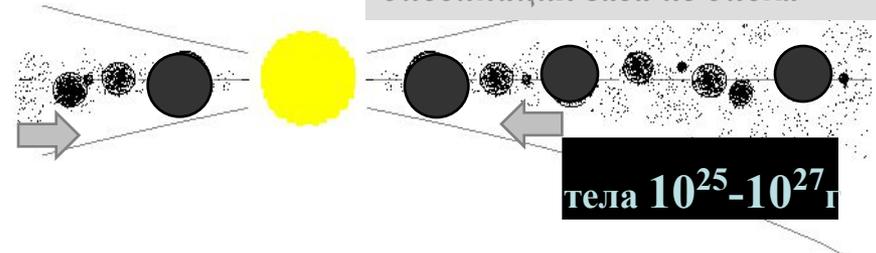
~ 0.4-0.9 млн.лет

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



~ 1-10 млн.лет

Аккумуляция допланетных сгущений, образование допланетных тел и диссипация газа из диска



Модель газопылевого диска: Исходные предпосылки



- В основу взаимосогласованного моделирования структуры, динамики и теплового режима **аккреционного газопылевого турбулентного диска** положена система уравнений двухфазной многокомпонентной механики континуальной среды с усложненными физико-химическими свойствами с учетом относительного движения фаз, процессов коагуляции, фазовых переходов и излучения;
- С целью феноменологического описания **турбулентного режима течения** дискового вещества проведено **теоретико-вероятностное осреднение** стохастических уравнений гетерогенной механики и дан вывод определяющих соотношений для турбулентных потоков, необходимых для **замыкания уравнений масштаба среднего движения**;
- Разработан **полуэмпирический способ моделирования коэффициента турбулентной вязкости** в двухфазной дисковой среде с учетом обратного влияния диспергированной фазы;
- Дано математическое описание **влияния инерционных эффектов пылевых частиц на характеристики турбулентности** в диске, в частности, на дополнительную генерацию турбулентной энергии крупными частицами;
- Развита параметрический метод моментов решения интегро-дифференциального **уравнения коагуляции** (уравнения Смолуховского) для ряда параметрических классов функции распределения частиц по размерам;
- Рассмотрен “режим предельного насыщения” мелкодисперсными частицами пыли окрестности субдиска с целью оценки **эффективности оседания частиц к центральной плоскости**.

Система уравнений гетерогенной механики (опорный базис модели)

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad \left(\frac{d}{dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \right), \\
 \\
 \rho \frac{d}{dt} \left(\frac{s\rho_d}{\rho} \right) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_d + \sum_{\rho=1}^r v_{d,\rho} \xi_{\rho}, \quad \left(\mathbf{J}_d = \rho C_d C_g \mathbf{w}, \quad C_g = 1 - \frac{s\rho_d}{\rho}, \quad \rho_d = const \right), \\
 \\
 \rho \frac{d}{dt} \left(\frac{N_d}{\rho} \right) = -\nabla \cdot (N_d C_g \mathbf{w}) - \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} K(W, U) f(W) f(U) dW dU + \sum_k \sum_{\rho=1}^r v_{d(k),\rho} \xi_{\rho}, \\
 \\
 \rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\nabla (p + p_{ra_d}) + \nabla \cdot (\mathbf{\Pi}_{su_m} - \mathbf{J}_d \mathbf{w}) + \rho \frac{G M_D}{|\mathbf{r}|^3} \mathbf{r}, \\
 \\
 (\rho c_{Vg} + 4a T^3 / 3) \frac{dT}{dt} = -\nabla \cdot (\mathbf{J}_q + \mathbf{q}_{ra_d}) - (p + 4p_{ra_d}) \nabla \cdot \mathbf{u} + \Phi_u + \\
 \\
 + s\rho_d C_g \frac{d}{dt} \left(\frac{\mathbf{w}^2}{2} \right) - \sum_{\rho=1}^r q_{\rho} \xi_{\rho}, \quad (\rho_g \equiv \rho - s\rho_d), \\
 \\
 p = p_g = \rho_g \mathfrak{R}_g T, \quad p_{ra_d} = a T^4 / 3.
 \end{array} \right.$$

Базовая система уравнений (продолжение)

- Система гидродинамических уравнений движения двухфазной полидисперсной среды должна быть дополнена соответствующими выражениями для **скоростей фазовых переходов** и **определяющими соотношениями** для термодинамических потоков, а также выражениями для **коэффициентов коагуляции, молекулярного переноса и лучистой теплопроводности**.

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{P}_{sum} = (\mu_g + \mu_{rad}) [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^{transp}] + (\xi_g - \frac{2}{3} \mu_g + \mu_{rad}) (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I}, \\ \mathbf{w} \cong \frac{1}{\rho \theta_{dg}} \left(-\frac{d\mathbf{w}}{dt} - (\mathbf{w} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \frac{1}{\rho_g} \nabla p_g \right), \\ \mathbf{J}_q = -\chi_g \nabla T, \quad \mathbf{q}_{rad} = -\chi_{rad} \nabla T, \end{array} \right.$$

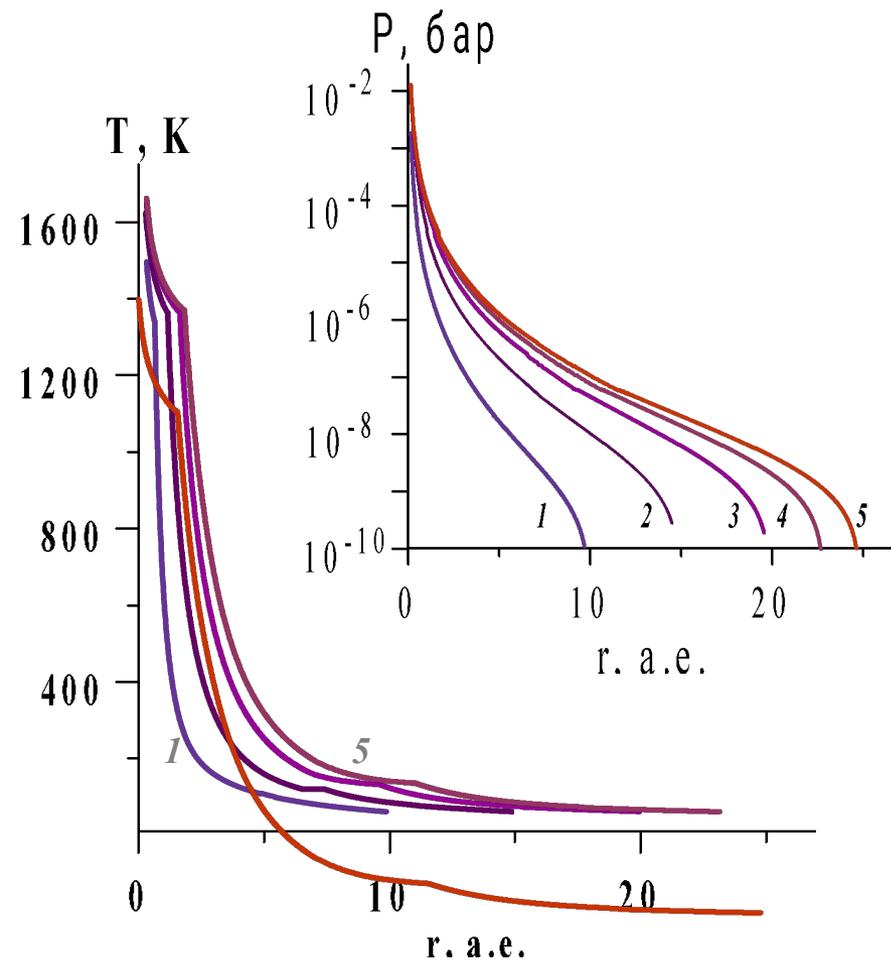
- Данная система описывает относительное движение фаз, процессы коагуляции, фазовые переходы и различные физико-химические и радиативные процессы. Она положена в основу численного моделирования пространственно-временной эволюции состава, динамики и теплового режима допланетного диска в зонах субдиска на **ламинарной стадии эволюции**.
- При описании мгновенного состояния **турбулизованного** протопланетного диска эти уравнения используются для моделирования осредненного движения.
- В этом случае, при феноменологическом описании гидродинамических и физико-химических процессов, необходимо **теоретико-вероятностное осреднение** данных стохастических уравнений.

Численная модель формирования протопланетного газопылевого диска вокруг протосолнца

- Рассчитана гидродинамическая модель **ранней стадии** эволюции диска (98% газа и 2% пыли) после коллапса протозвездного облака с образованием одиночной протозвезды и диска. Исследована **стадия аккреции вещества** на формирующийся диск из окружающей его коллапсирующей аккреционной оболочки.
- Принято: угловой момент коллапсирующей протосолнечной туманности $J = 4 \times 10^{52} \text{ г см}^2 \text{ с}^{-1}$; диск турбулентный, пылевые частицы ($< 1 \text{ см}$) равномерно распределены по толщине диска; основные источники нагрева диска – излучение протосолнца, диссипация турбулентности и торможение вещества на ударном фронте на поверхности диска.
- Основные входные параметры модели: угловой момент и масса протосолнечной туманности M , масса протосолнца M_* , полное время аккреции t_a и связанный с ним полный аккреционный поток массы на диск и протосолнце $\dot{M} = M / t_a$.
- Выполнены расчеты внутренней структуры формирующегося вязкого аккреционного диска с учетом его взаимодействия с окружающей аккреционной оболочкой.
- Для ряда моментов времени $t/t_a = 0.25, 0.5, 0.75, 0.9, 1$ рассчитано :
 - **радиальное распределение поверхностной плотности и массы диска;**
 - **распределение температуры, плотности, давления по радиусу и толщине.**
- Полученные достаточно высокие температуры ($\sim 1000 \text{ К}$ на расстоянии земных планет) хорошо согласуются с **геохимическими ограничениями**:
 - обеднением всех групп недифференцированных метеоритов умеренно летучими элементами в 2-5 раз по отношению к CI хондритам и солнечной фотосфере;
 - их обеднением углеродом на порядок по сравнению с кометами.

Эволюция температур и давлений в средней плоскости околосолнечного диска на стадии аккреции (Результаты численного моделирования)

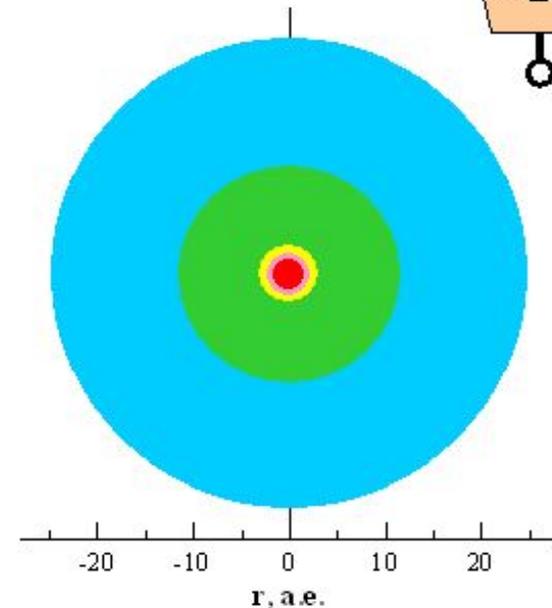
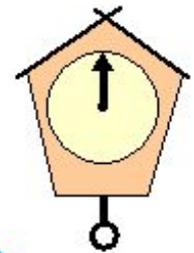
- Рассчитана гидродинамическая модель ранней стадии эволюции диска (98% газа и 2% пыли) после коллапса протозвездного облака с образованием одиночной протозвезды и диска;
- Угловой момент коллапсирующего облака принят $J = 4 \times 10^{52} \text{ г см}^2 \text{ с}^{-1}$; диск турбулентный, пылевые частицы ($< 1 \text{ см}$) равномерно распределены по толщине диска;
- Основные источники нагрева диска – излучение протосолнца, диссипация турбулентности и торможение вещества на ударном фронте на поверхности диска;
- Исследована стадия аккреции вещества на формирующийся диск из окружающей его коллапсирующей аккреционной оболочки.
- Получено полное время аккреции диска $t = 0.5 \text{ млн. лет}$; кривые 1, 2, 3, 4, 5 - $t^a / t_a = 0.25, 0.5, 0.75, 0.9$ и 1.
- Модельные расчёты хорошо согласуются с геохимическими ограничениями.



Изменение границ фазовых переходов основных компонентов протопланетного вещества за первые 0.5 млн. лет эволюции диска (численная модель)

- Граница, соответствующая началу испарения железа и магнезиальных силикатов на стадии формирования протосолнечного диска охватывает область от 0.6 до 2.2 а.е. (область планет земной группы).
- Граница испарения льда H_2O движется от 4.6 а.е. до 11.6 а.е., т.е. приблизительно от орбиты Юпитера до орбиты Сатурна.

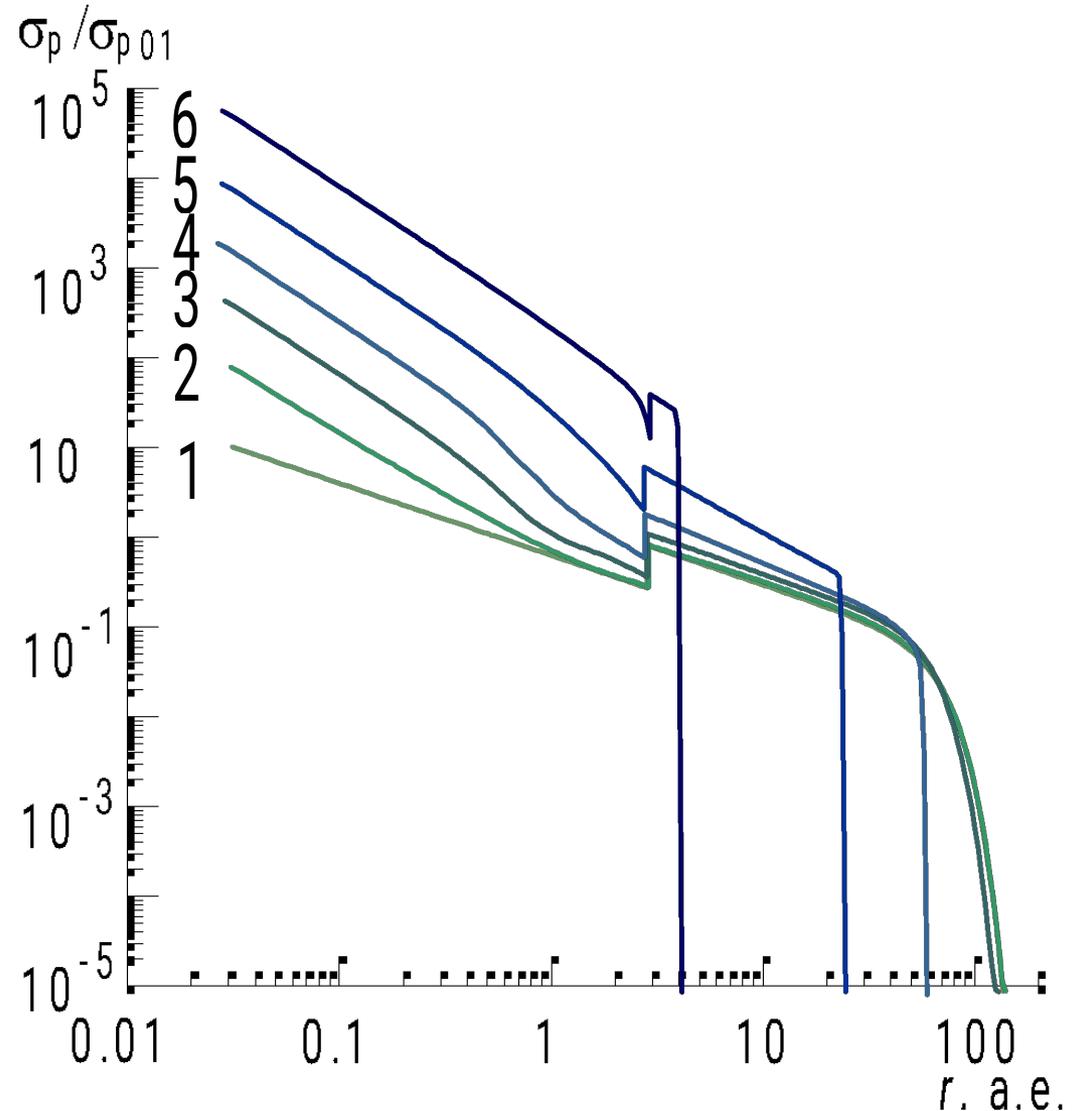
Полное время аккреции протопланетного диска 0.5 млн лет



Состав пыли:	Al, Ca, W, Ti	+ Fe, Mg, SiO ₂	+ Na, K	+ FeS	+ H ₂ O-лед
--------------	---------------	----------------------------	---------	-------	------------------------

Двухфазная гидродинамика газопылевого субдиска (численная модель гравитационной неустойчивости)

- Разработана модель уплотнения субдиска до состояния гравитационной неустойчивости при наличии сопротивления газа на частицы пыли, касательных сдвиговых напряжений на поверхностях диска в турбулентном погранслое и турбулентной диффузии твердых частиц.
- Рассчитано изменение поверхностной и объёмной плотности субдиска при оседании частиц к средней плоскости и показано, что вследствие возникновения неустойчивости Кельвина-Гельмгольца критерий гравитационной неустойчивости достигается при радиальном сжатии субдиска уже через $(1-3) \times 10^4$ лет на 0.04 а.е.
- Кривые 1–6 - моменты времени: 0; 1×10^3 ; 5×10^3 ; 2×10^4 ; 1×10^5 и 5×10^5 лет; вертикальные отрезки – внешняя граница субдиска.



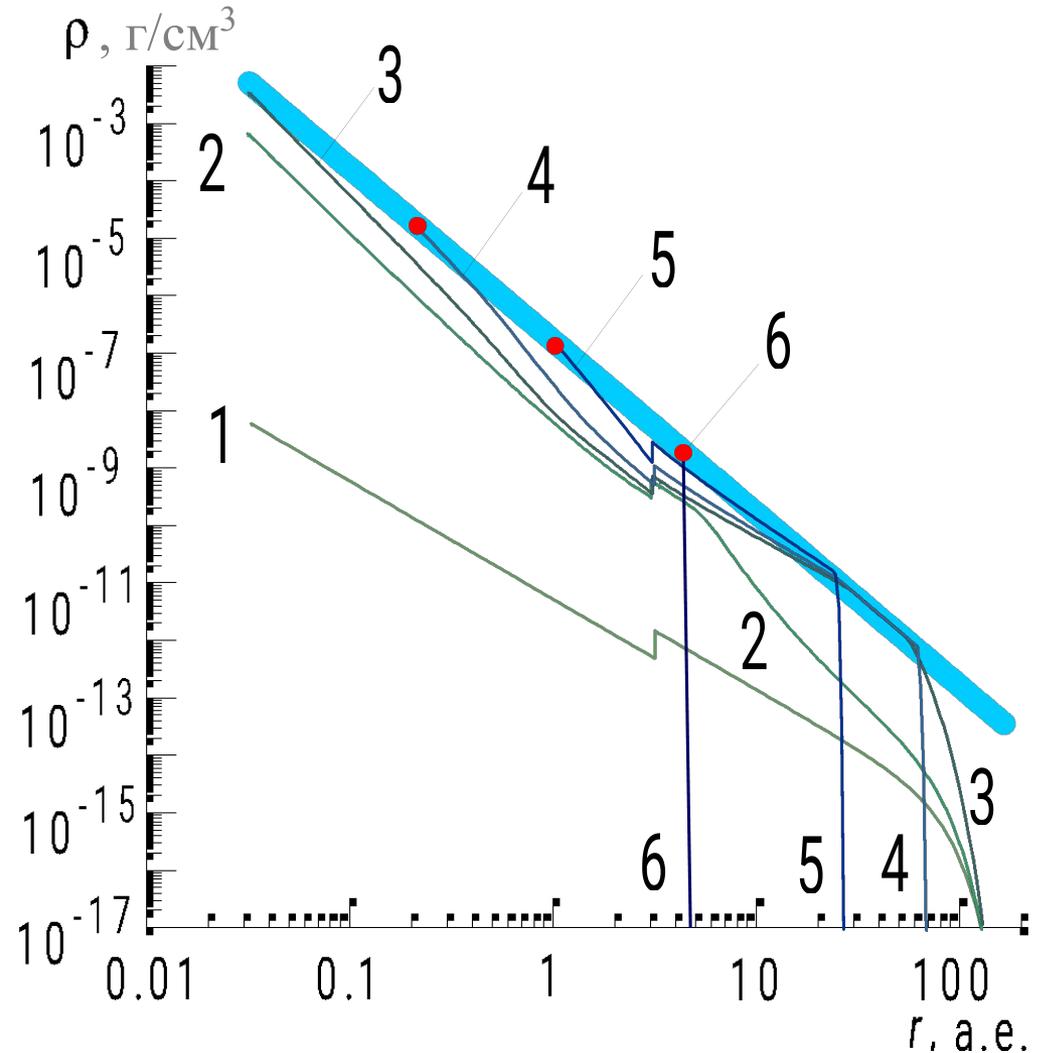
Эволюция плотности пыли в газопылевом субдиске, усредненная по его толщине

- Объемная плотность пылевой компоненты газопылевого субдиска, усредненная по толщине, в моменты времени: 0; 1×10^3 ; 5×10^3 ; 2×10^4 ; 1×10^5 и 5×10^5 лет (кривые 1-6).

- Голубая полоса – диапазон значений критической плотности для возникновения гравитационной неустойчивости - критерий Томре

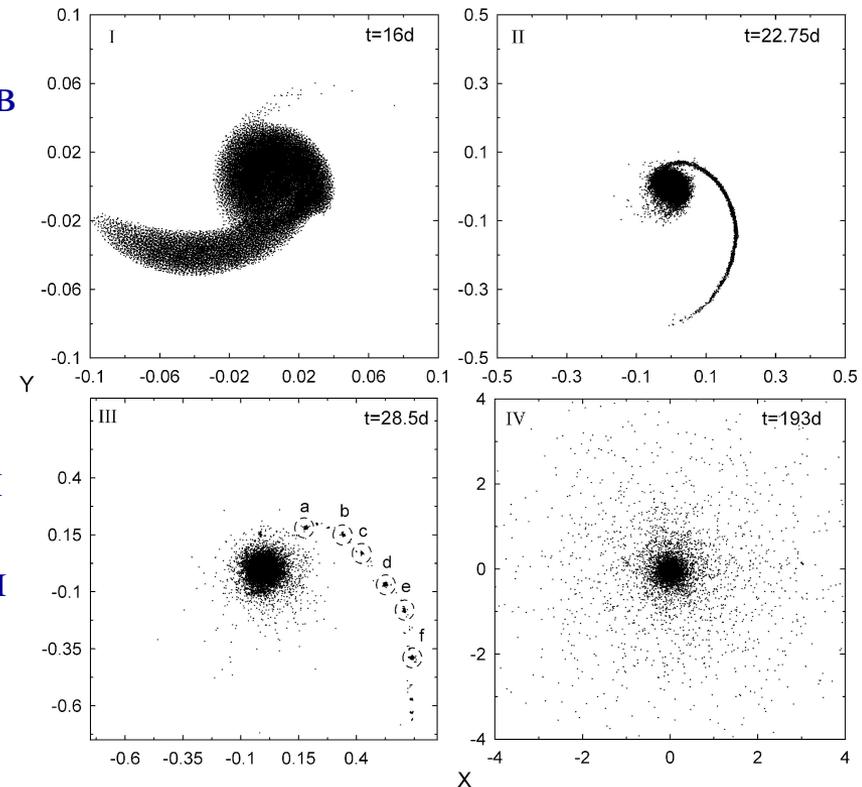
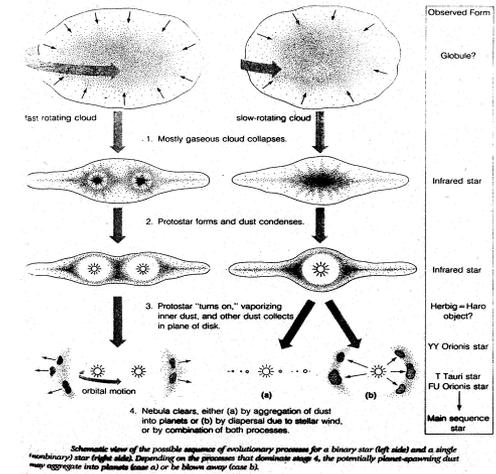
$$Q = \frac{c\Omega}{k_1 G \Sigma} < 1$$

- Красные кружки - места, где плотность становится больше критической.
- Скачок плотности на 4 а.е. соответствует фронту испарения льда.

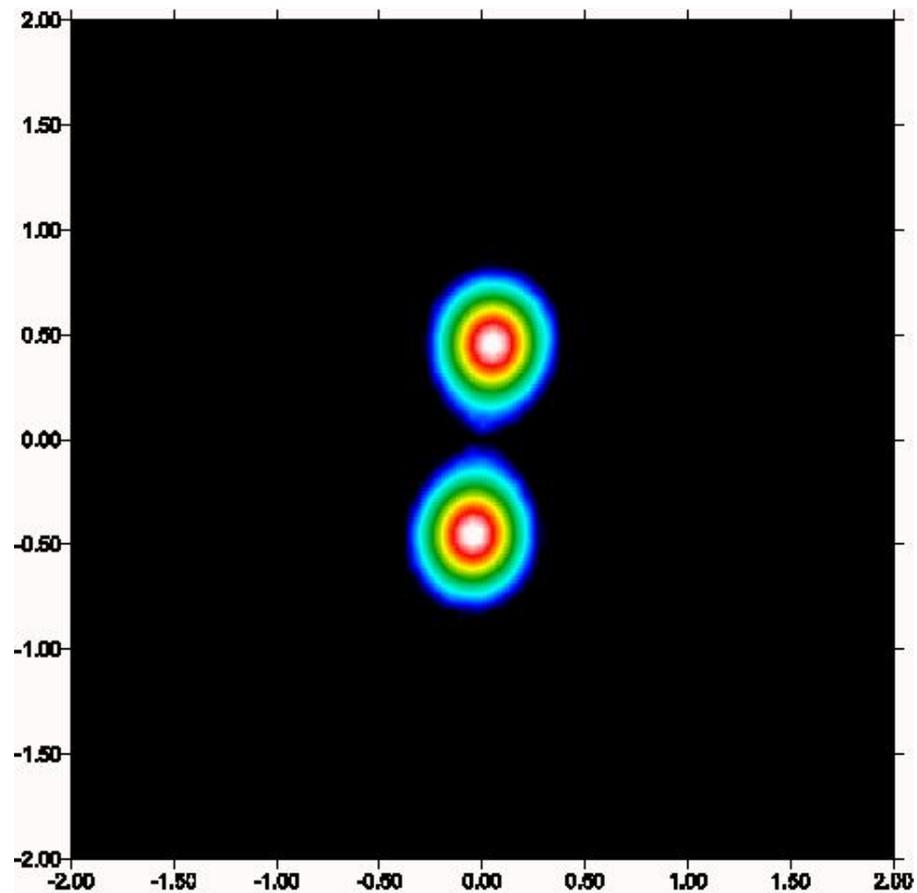
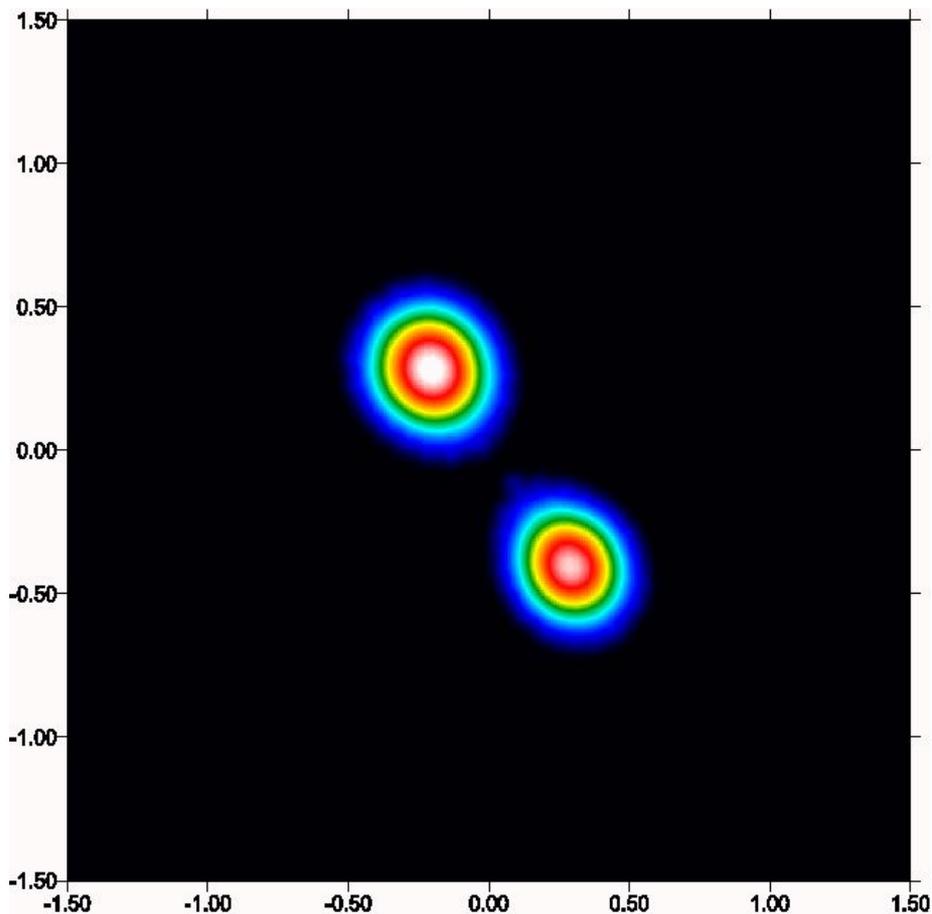


Численное моделирование образования диска в двойной звездной системе

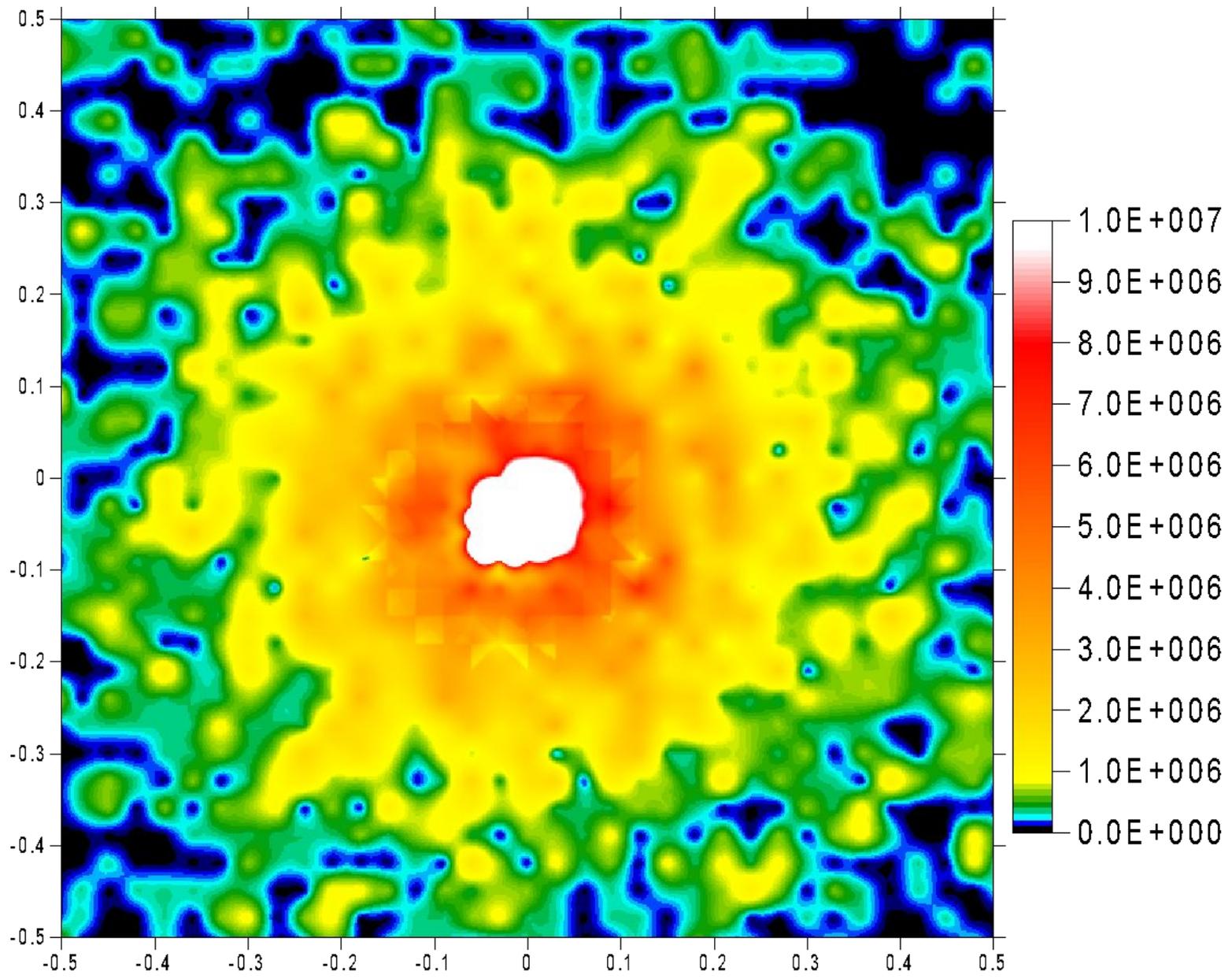
- Процесс рождения Солнца как одиночной звезды не очевиден: большинство звёзд являются двойными или кратными системами
- Рассчитана модель эволюции тесной двойной системы, согласно которой происходит слияние компонентов с формированием экскреционного газового диска и/или протяжённого газового рукава в виде спирали.
- Показано, что рукава в процессе движения вокруг центральной звёзды фрагментируют в облака с массами \sim масс планет-гигантов.
- Наиболее массивные облака находятся на орбитах с большими полуосями в диапазоне $1 \text{ a.e.} < a < 3 \text{ a.e.}$ и могут уменьшаться за счёт приливной диссипации и трения при взаимодействии с диском.
- Время формирования диска и фрагментации облаков - порядка сотен орбитальных периодов исходной двойной системы.



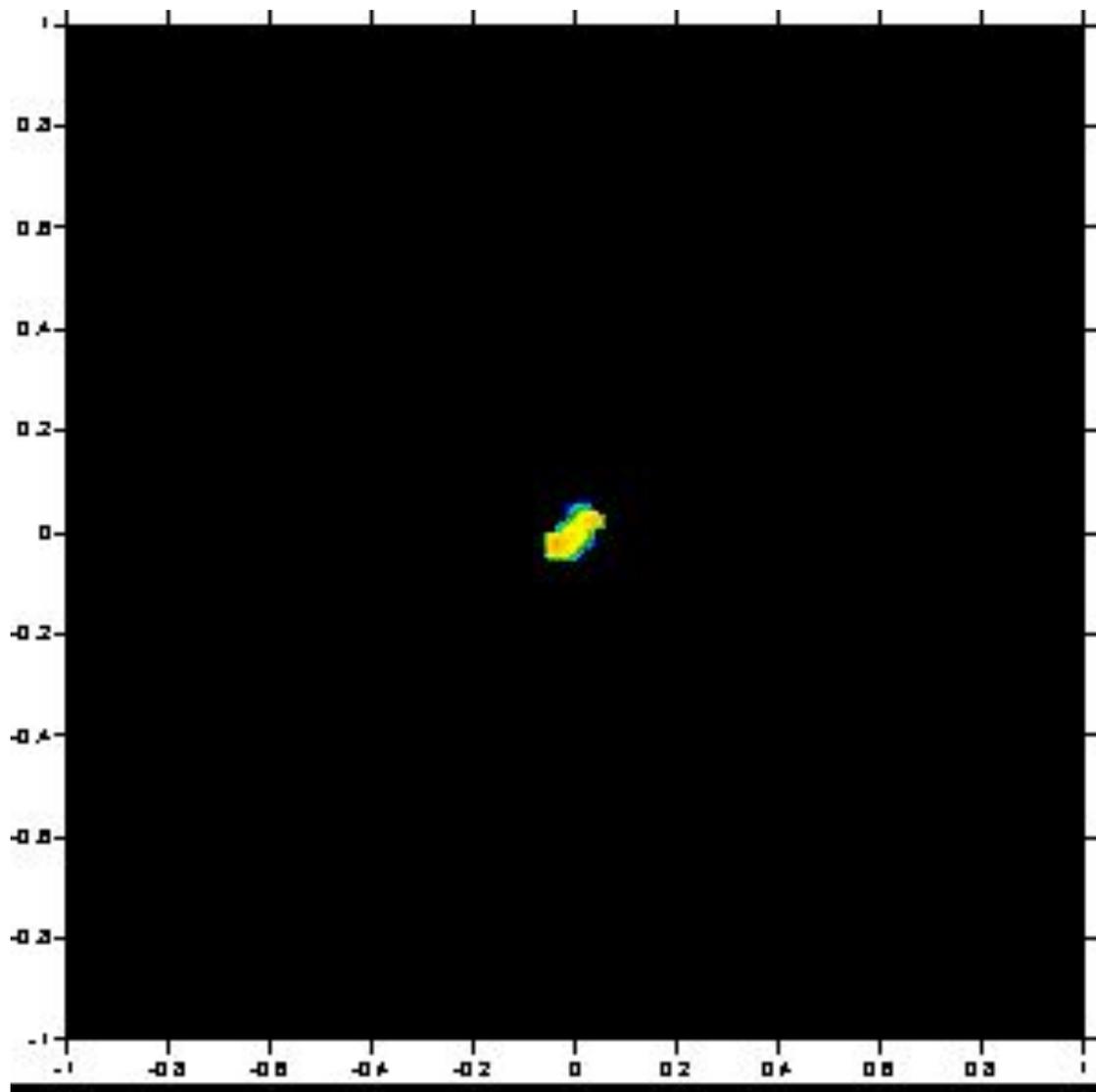
**Пример вычислений эволюции при разном отношении масс
компонентов и коэффициентов заполнения полости Роша
(большая полуось и масса системы неизменны)**



Распределение поверхностной плотности

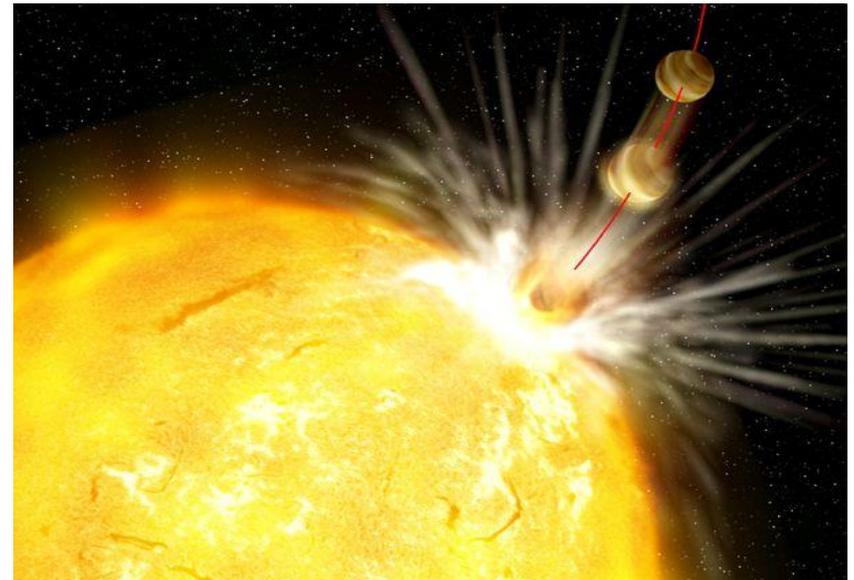
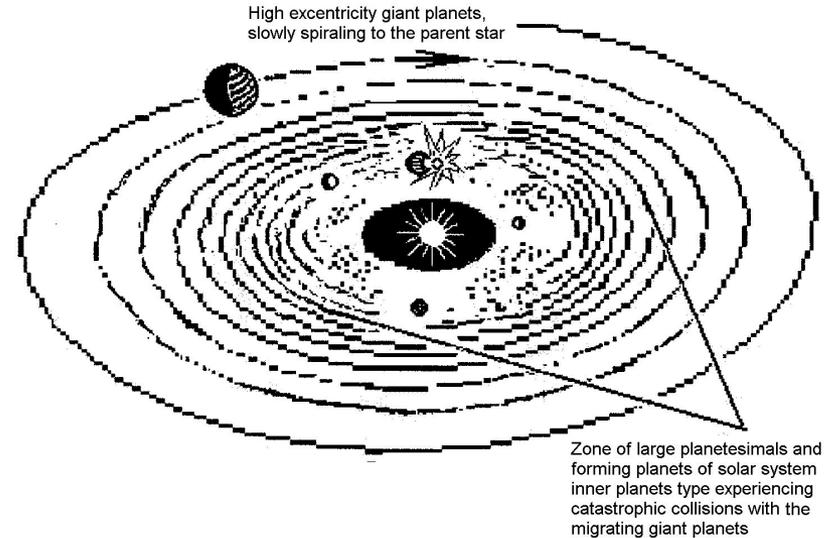
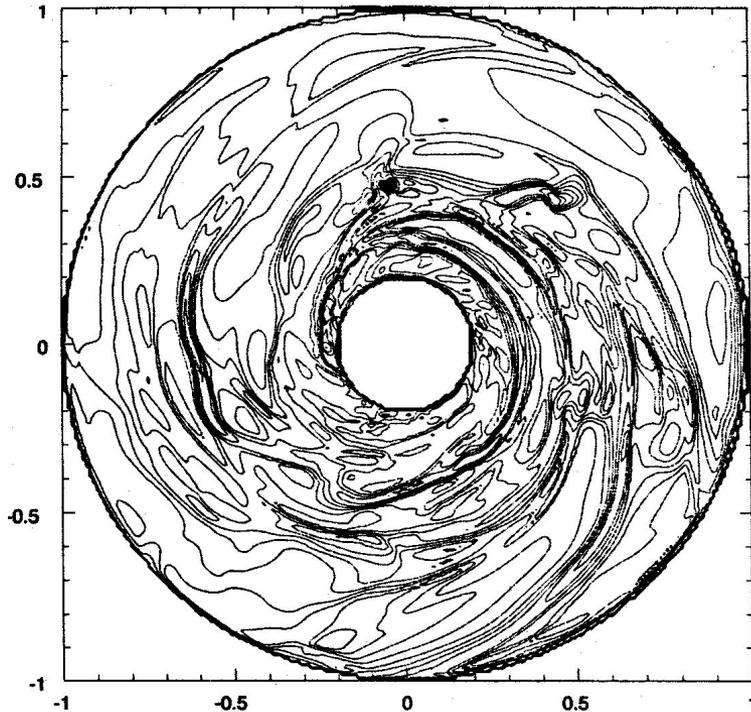


Эволюция поверхностной плотности



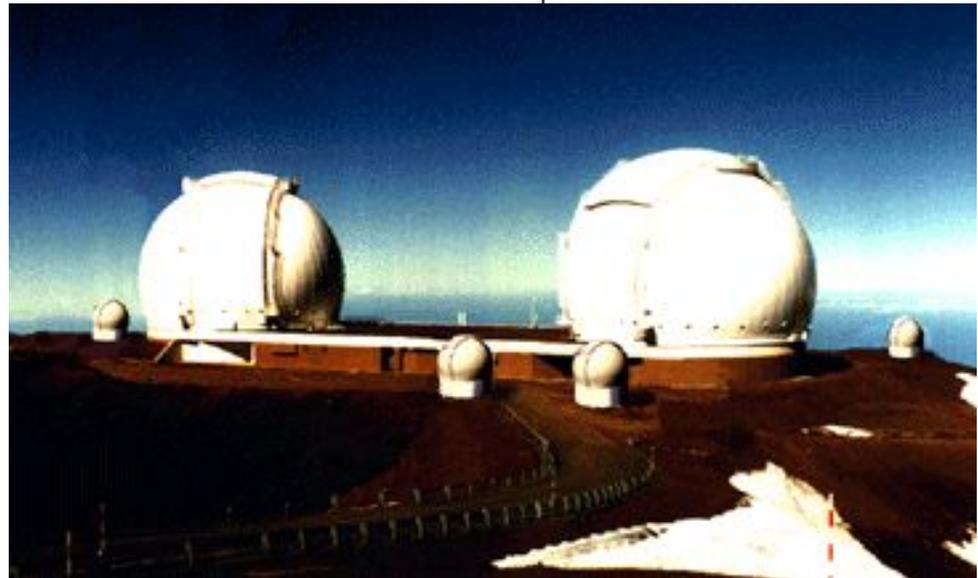
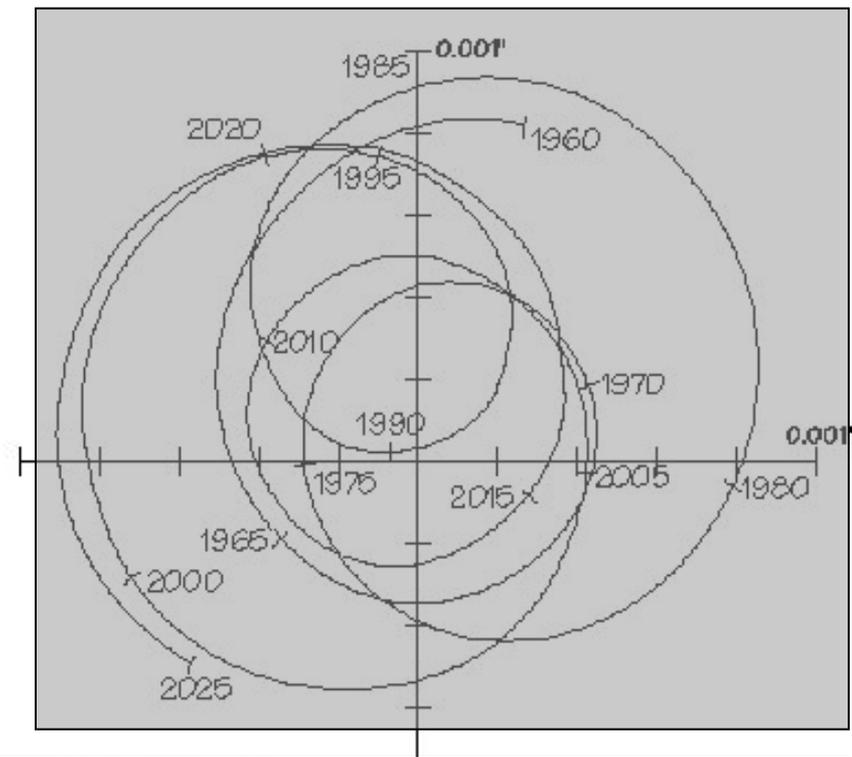
Сценарии гравитационной нестабильности и столкновительной эволюции

- Предположительно важная роль хаотической динамики в создании конфигураций планетных систем.
- Вероятный сценарий формирования планеты вдали от звезды, с последующей миграцией к ней и поглощением.



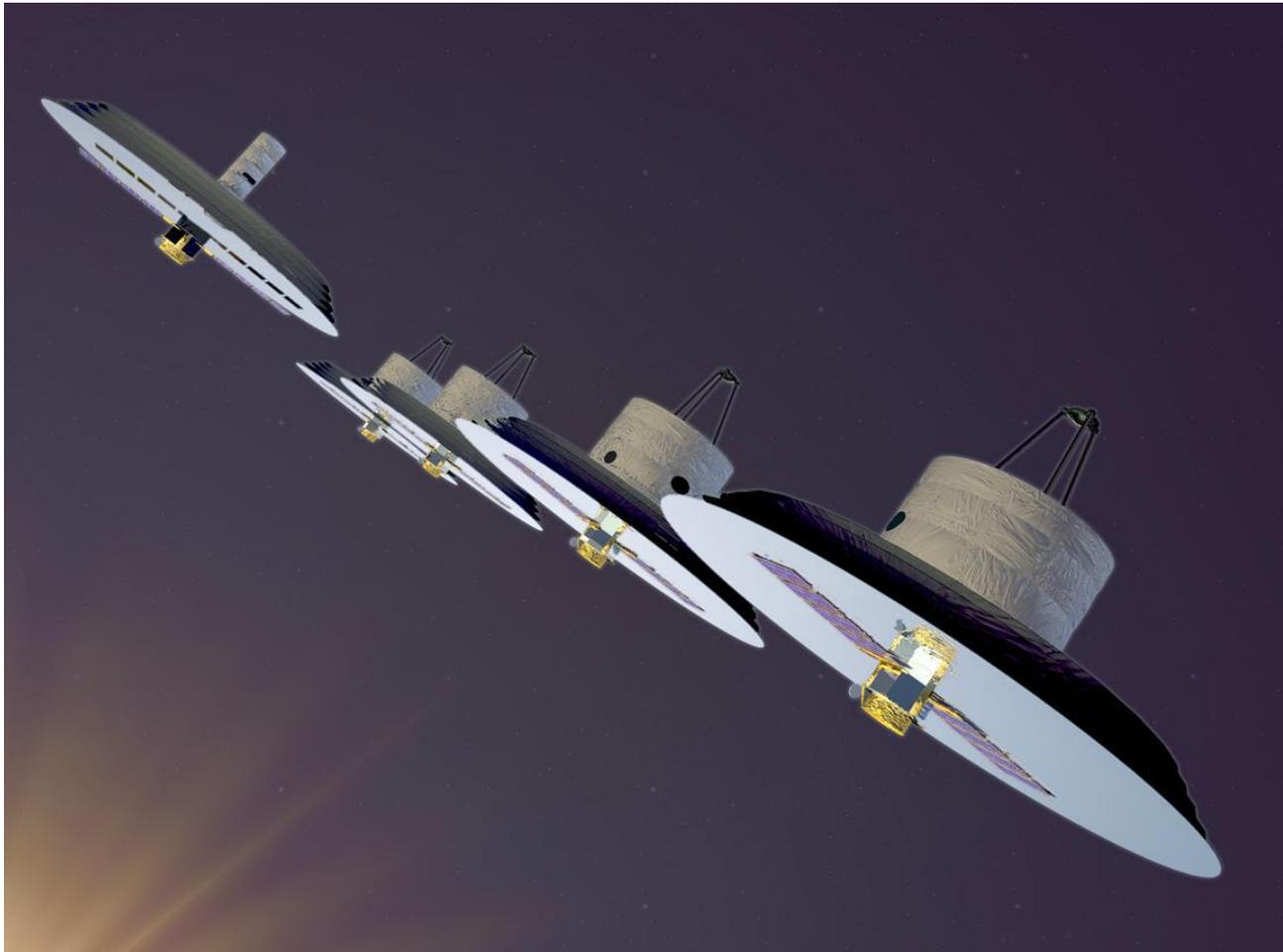
Астрометрический метод

- Измеряется периодическое изменение положения барицентра при наличии планеты.
- Интерферометрический метод позволяет достигнуть точности порядка одной микросекунды дуги (Земля на 10 pc создает амплитуду $0.3 \mu\text{as}$)
- Программа NASA обнаружения планет массой $\sim M_{\text{earth}}$ и общей архитектуры планетных систем (~ 2000 звезд классов F, G, K в пределах ~ 25 pc) рассчитана на 10-20 лет.
- Задача - изучить распределение планетных масс и наличие планет $\sim M_{\text{earth}}$ в зоне "обитания"



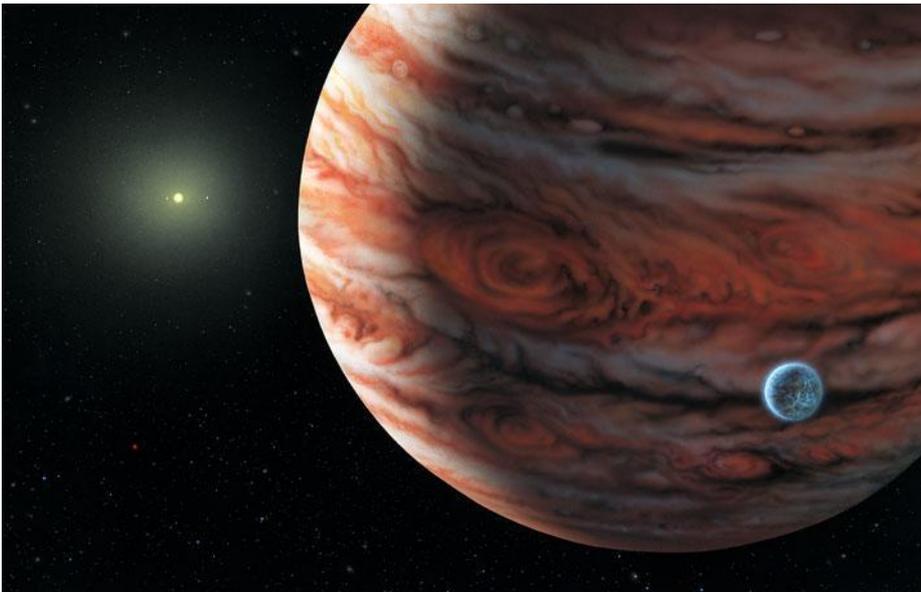
Космический проект обнаружения внесолнечных планет типа Земли

(На уровне разрешения ~ 1 мсек предполагается обнаружить свыше 1000 новых планет типа Юпитера-Сатурна и свыше 100 планет типа Земли)



Образуются ли планеты хаотически?

- Компьютерное моделирование свидетельствует о важной роли приливной и столкновительной эволюции при формировании планетной системы.
- Хаотическая динамика проявляет себя через крайнюю чувствительность начальной конфигурации к начальным условиям, включая гравитационную неустойчивость.
- Такой подход делает уязвимым предположение о рождении устойчивых планетных конфигураций типа нашей Солнечной системы и ставит вопрос, является ли она уникальной.



***Making New
Worlds With a
Throw of the Dice???***

Заключение



- За последние годы достигнут громадный прогресс в подходе к решению фундаментальных проблем космогонии что обусловлено данными об аккреционных дисках, внесолнечных планетах и совершенствованием методов математического моделирования.
- Нами с использованием методов механики гетерогенных сред разработана континуальная модель протопланетного газопылевого дифференциально вращающегося диска, с учётом влияния турбулентности на динамику и процессы тепломассопереноса, инерционных свойств твердых частиц, внутрифазных и межфазных взаимодействий, процессов коагуляции и излучения.
- Проведено численное моделирование газопылевого диска на ранней стадии его формирования и последующей эволюции вокруг одиночной протозвезды (протосолнца) и получены значения термодинамических параметров с учётом ограничений, накладываемых космохимическими данными.
- Проведено численное моделирование более поздней стадии эволюции протопланетного диска с образованием пыле-газового субдиска за счёт оседания крупных частиц к средней плоскости и изучена проблема возникновения его гравитационной неустойчивости, приводящая к образованию пылевых сгущений.
- Проведена серия численных расчётов для трёхмерной гидродинамической модели тесной двойной системы и показано, что в процессе её эволюции происходит слияние звёзд с формированием протяжённого диска и рукавов, при последующей фрагментации которых образуются компактные сгустки вещества протопланетных масс.

Благодарность

Выражаю признательность своим коллегам А.В. Колесниченко, А.Б. Макалкину и Ф.С. Сироткину, вместе с которыми получены доложенные здесь результаты моделирования