



# Солнечная система: Некоторые проблемы происхождения и эволюции

**М.Я. Маров**

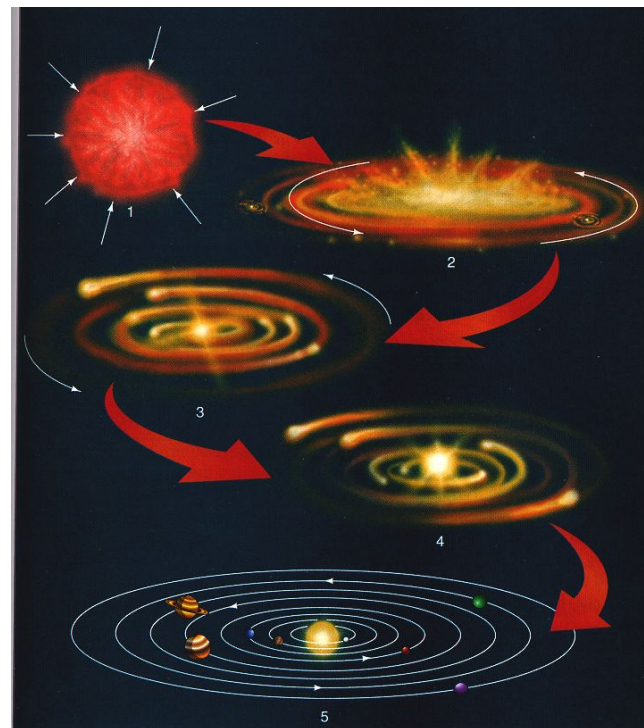
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН



«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



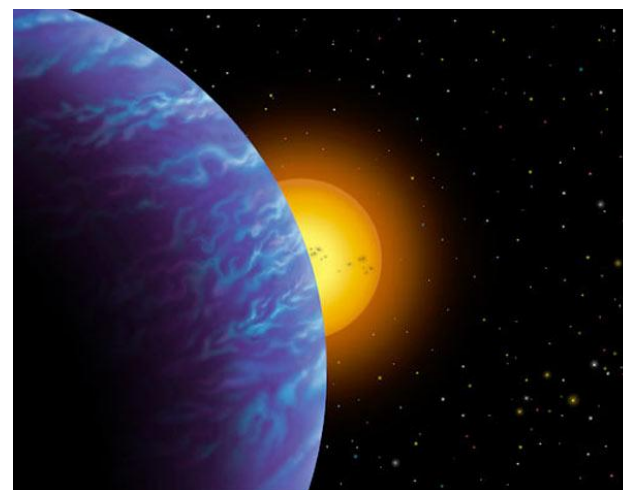
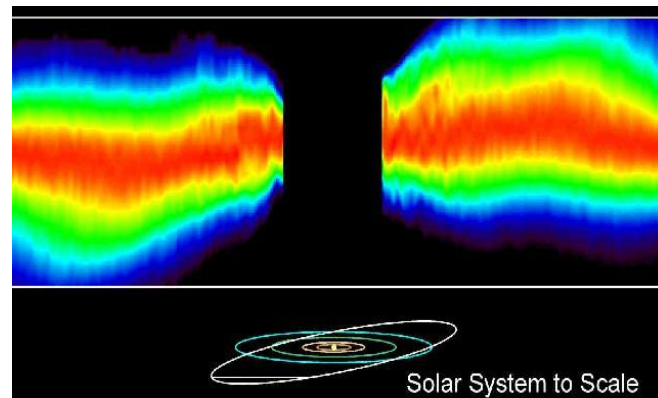
# Основные концепции

- 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.

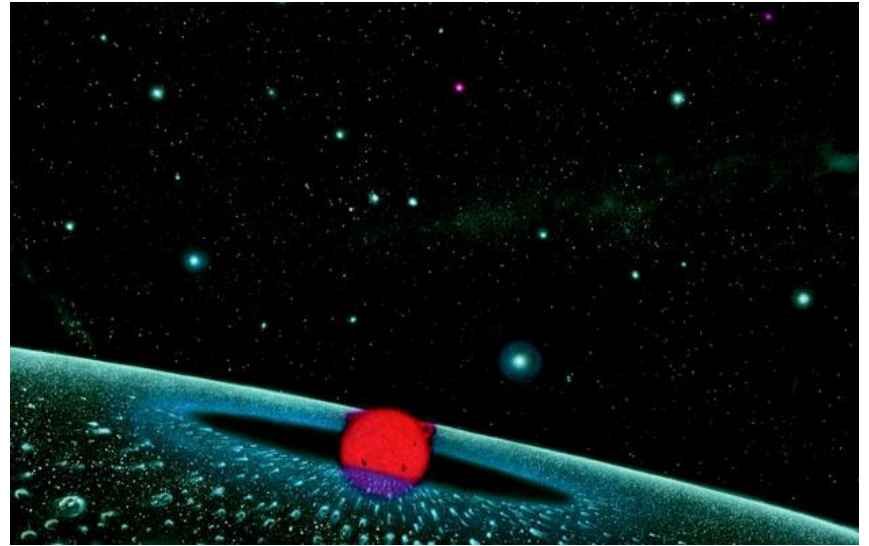


# Солнечная система: Фундаментальные свойства

- 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 <sup>3</sup> )	Composition
<b>Mercury</b>	0,4	5,4	Iron, nickel, silicates
<b>Venus</b>	0,7	5,3	Silicates, iron, nickel
<b>Earth</b>	1	5,5	Silicates, iron, nickel
<b>Moon</b>	1	3,3	Silicates
<b>Mars</b>	1,4	3,9	Silicates, iron, sulfur
<b>Jupiter</b>	5,2	1,3	<i>Hydrogen, helium</i>
<b>Saturn</b>	9,6	0,7	<i>Hydrogen, helium</i>
<b>Uranus</b>	19,2	1,2	<i>Ices, hydrogen, helium</i>
<b>Neptune</b>	30,1	1,7	<i>Ices, hydrogen, helium</i>
<b>Pluto</b>	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

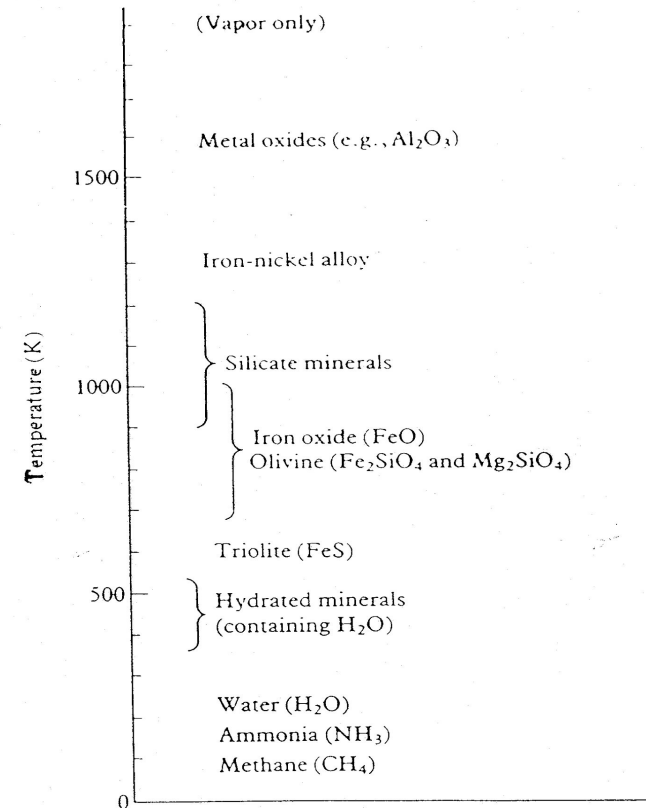
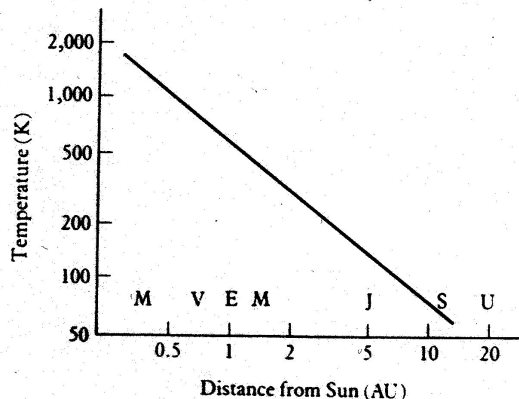
## протопланетном диске путём конденсации

### 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.

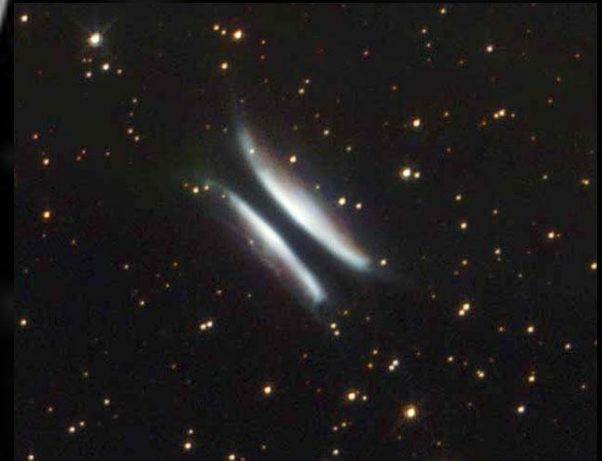
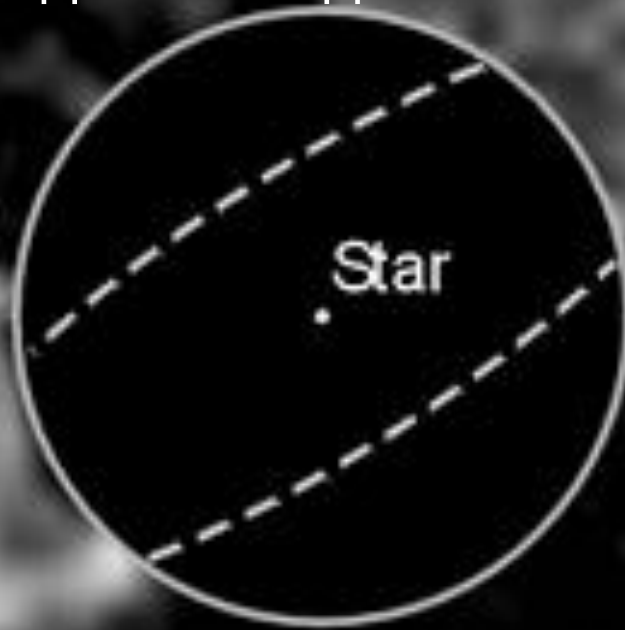
### in the Solar Nebula

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.

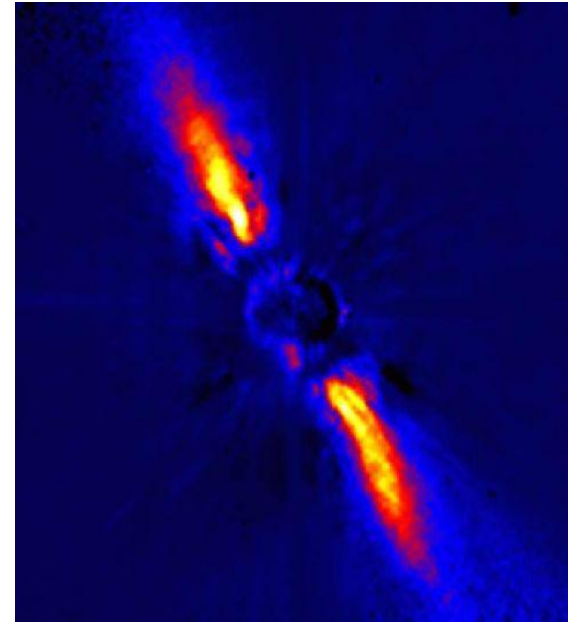
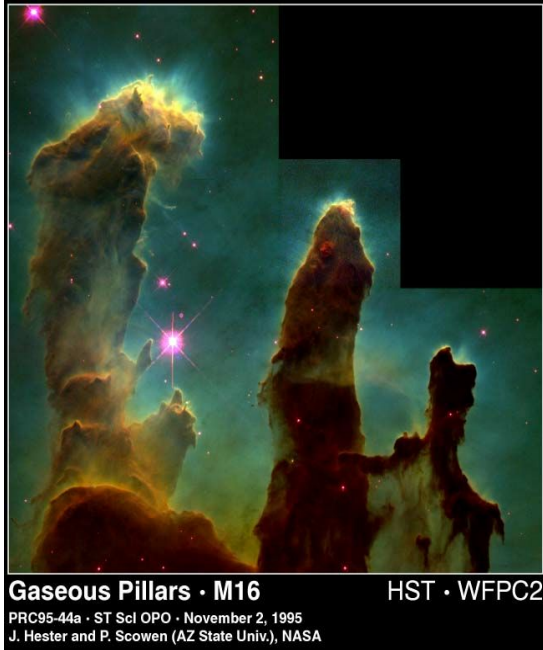
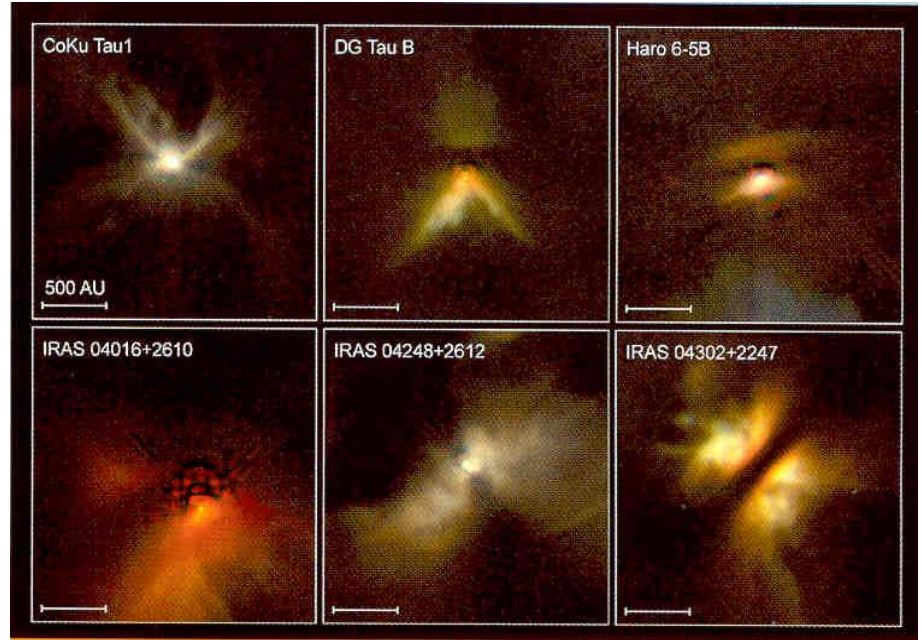


# Формирование протопланетных ДИСКОВ

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

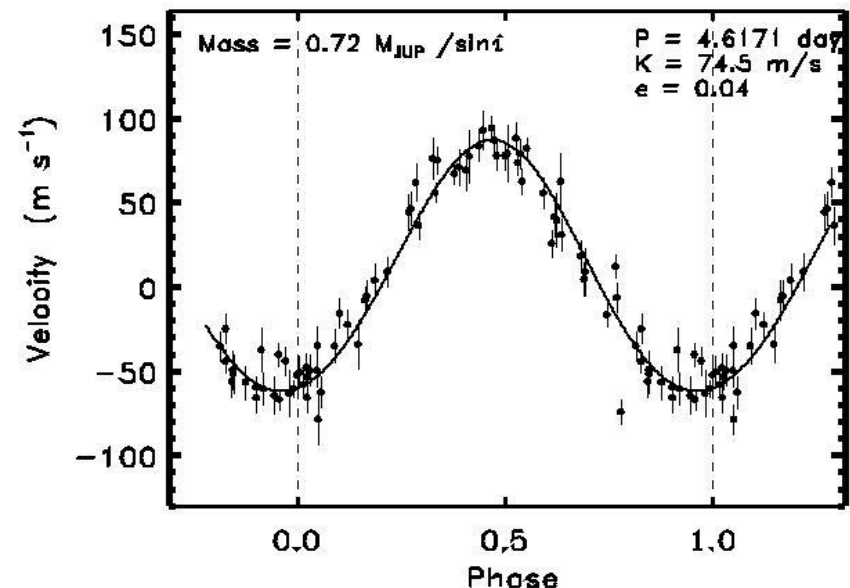
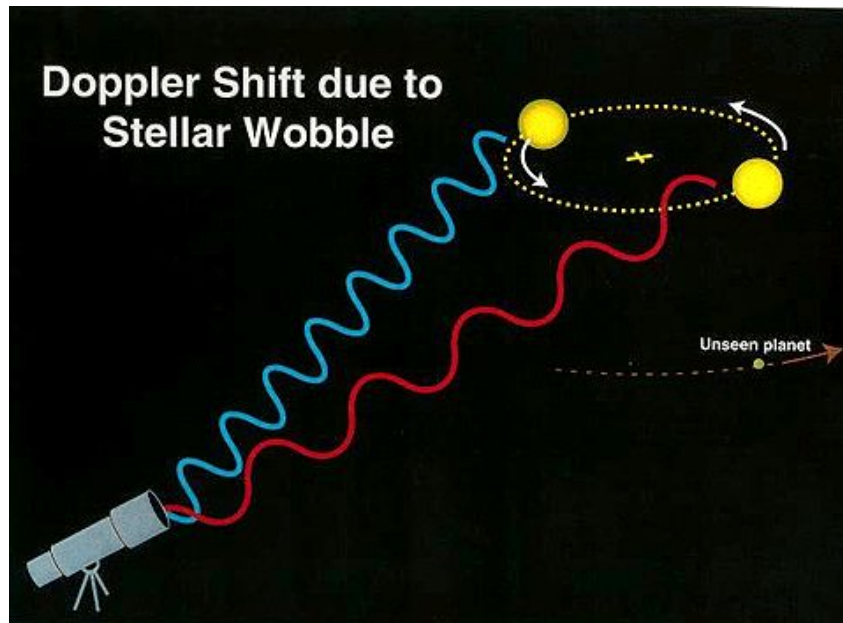






# Внесолнечные планеты: Методы обнаружения

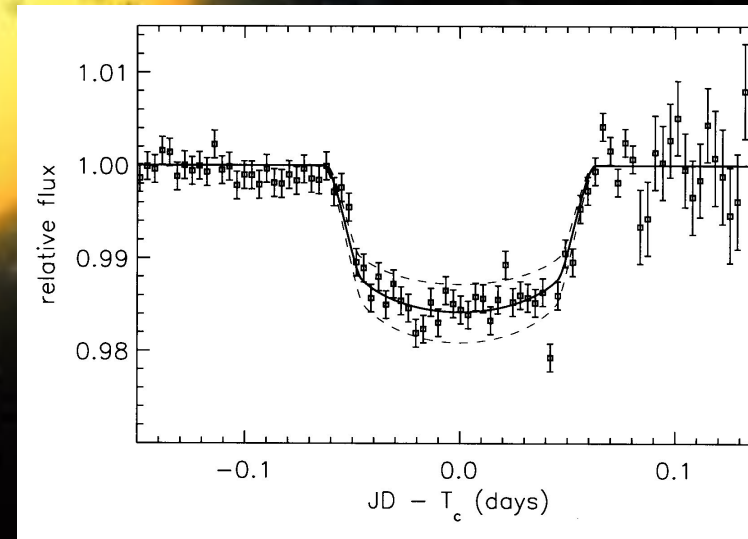
- Три основных метода обнаружения внесолнечных планет: доплеровская спектроскопия, фотометрия, астрометрия.
- Известные к настоящему времени 188 планет у других звезд в пределах  $\sim 70$  pc открыты методом доплеровской спектроскопии.
- Достигнутая предельная точность метода  $\sim 2$  м/с, что не 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.





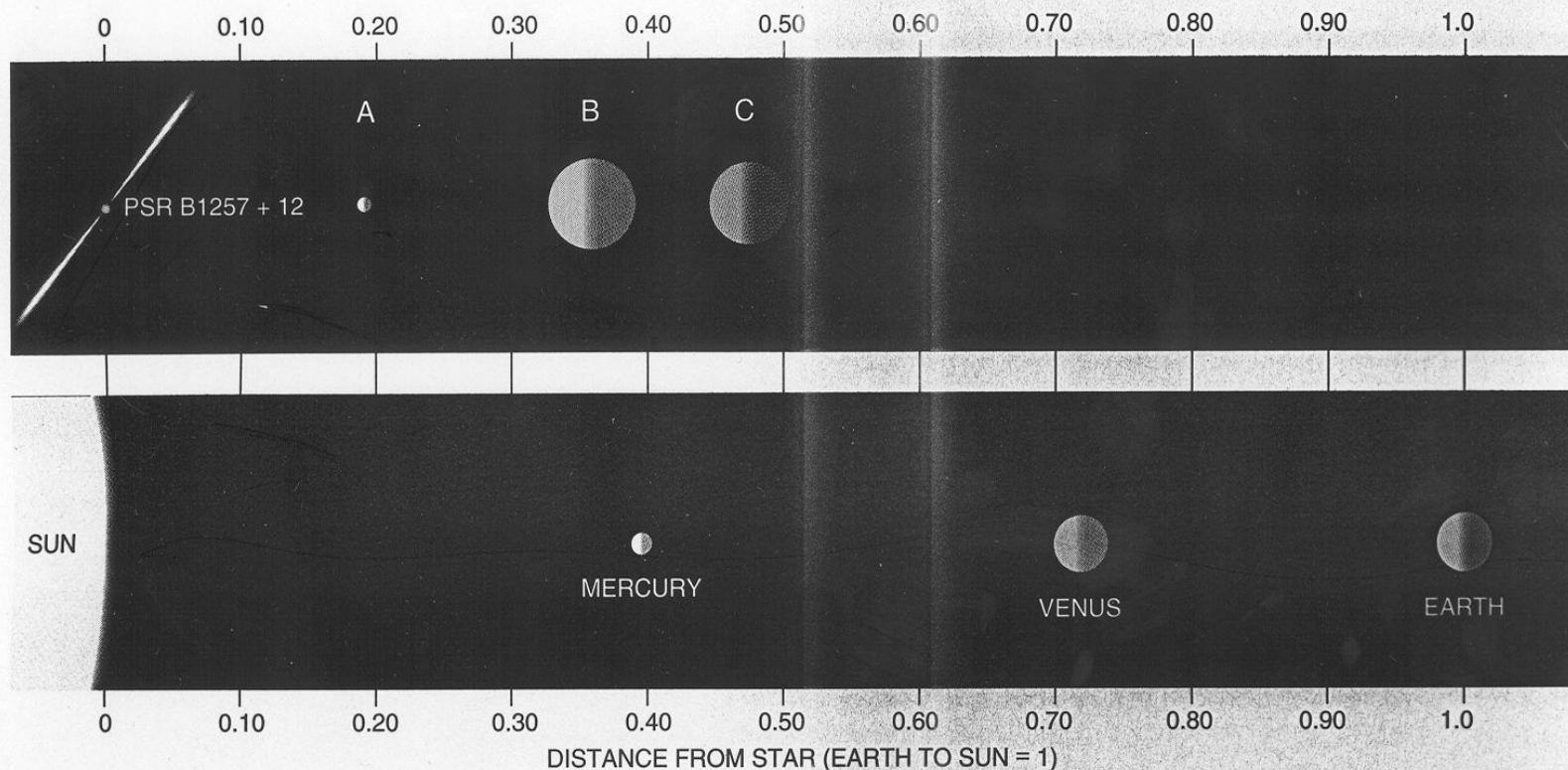
# Обнаружение планет фотометрическим методом при прохождении по диску звезд

- 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/ $\text{sec}/\text{m}^2$  - в  $10^6 - 10^9$  меньше родительской звезды
  - Пылевой фон в  $\sim 300$  раз ярче планеты



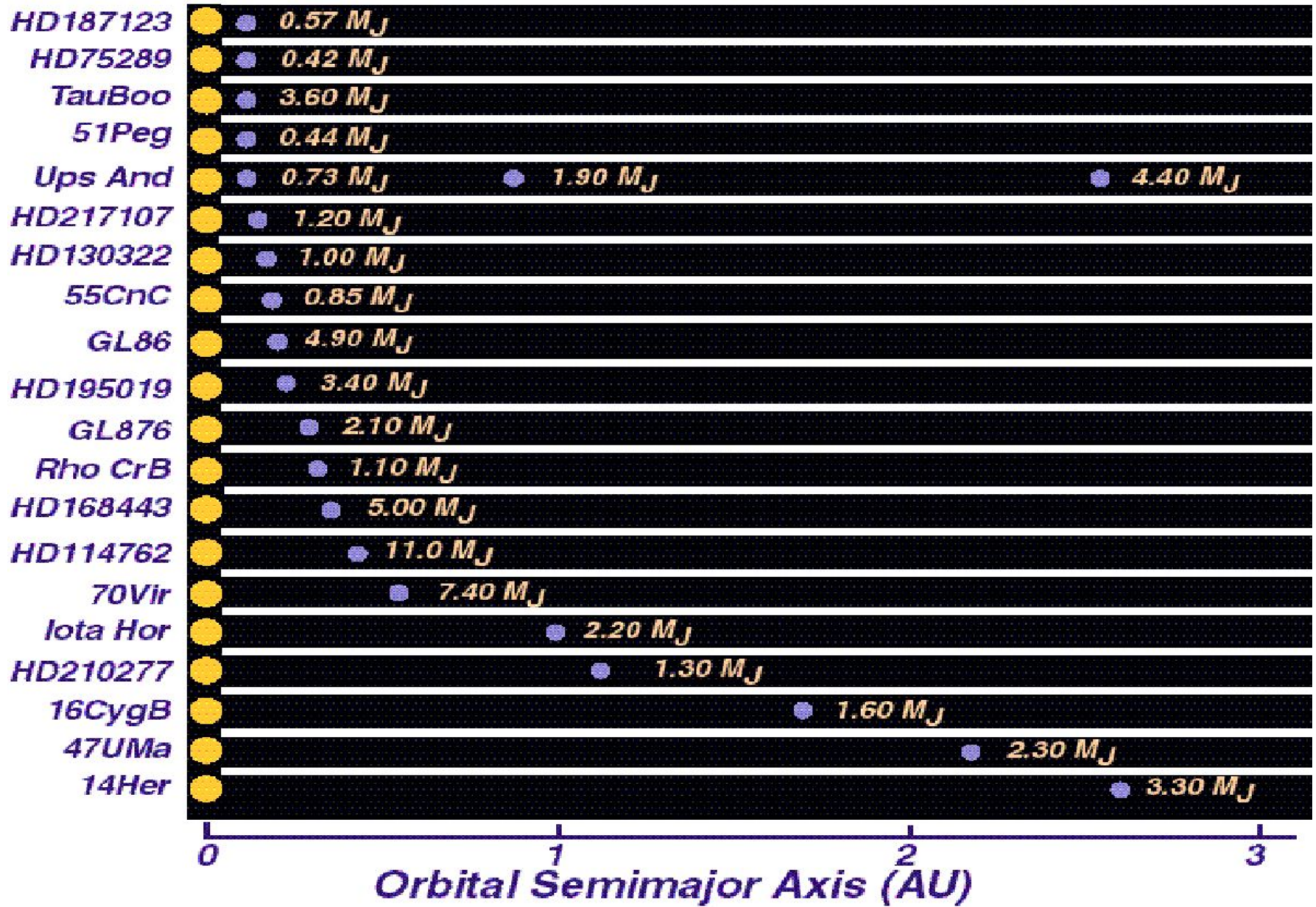
# Внесолнечные планеты около пульсара

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

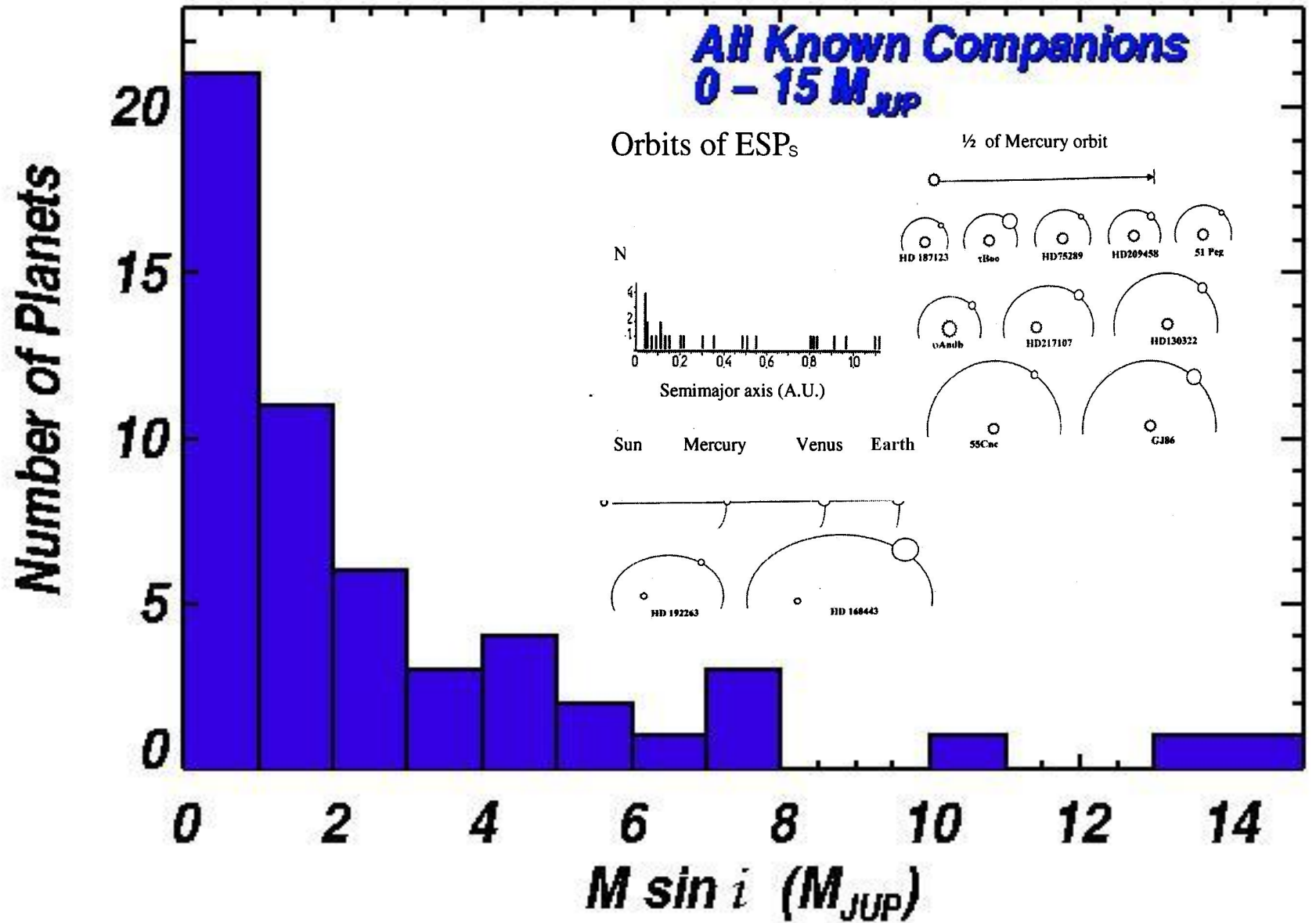




# Первые из открытых внесолнечных планет методом доплеровской спектроскопии (согласно Marcy et al.)

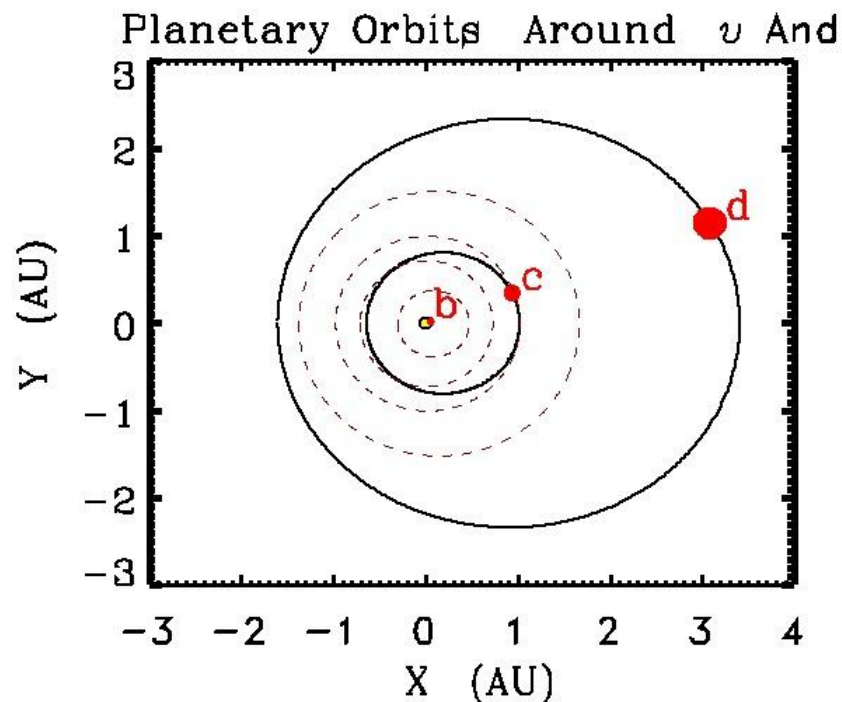


# Внесолнечные планеты: Массы и орбиты



## Планетная система около $\nu$ Andromedae:

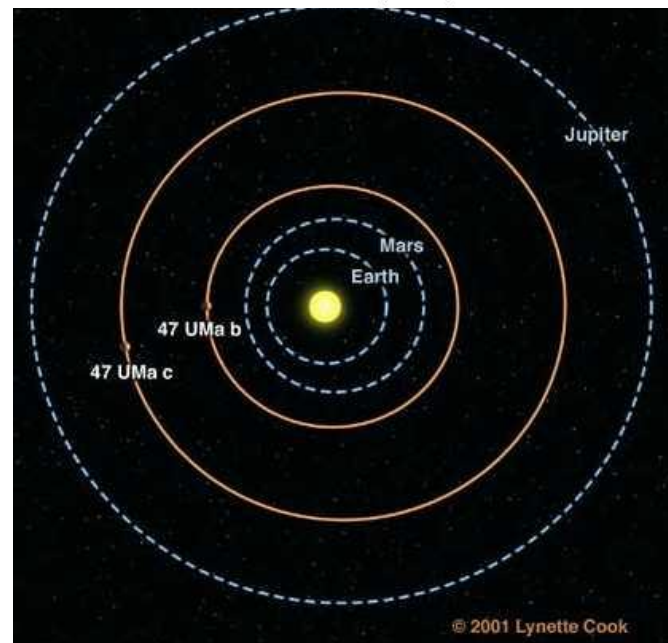
Planet	Mass* $M_{Jup}$	Orbit (AU)	Temp (deg F)
<b>B</b>	<b>0.73</b>	<b>0.06</b>	<b>1800</b>
<b>C</b>	<b>1.95</b>	<b>0.85</b>	<b>62 to 135</b>
<b>D</b>	<b>4.1</b>	<b>2.5</b>	<b>-113 to -182</b>



## Планетная система около 47 U Ma:

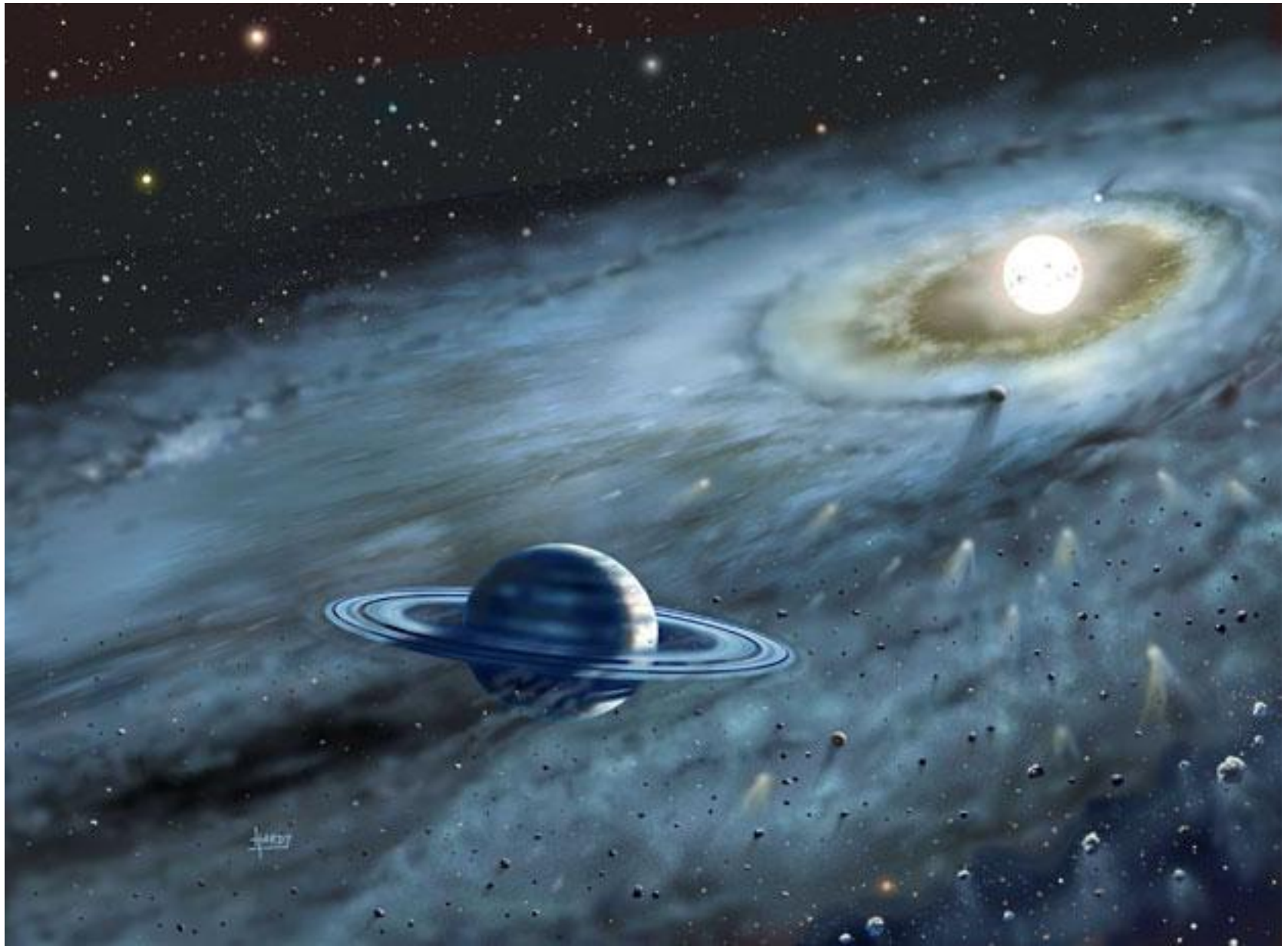
Звезда G0V класса Солнца, на расстоянии 50 л.у.

- 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;

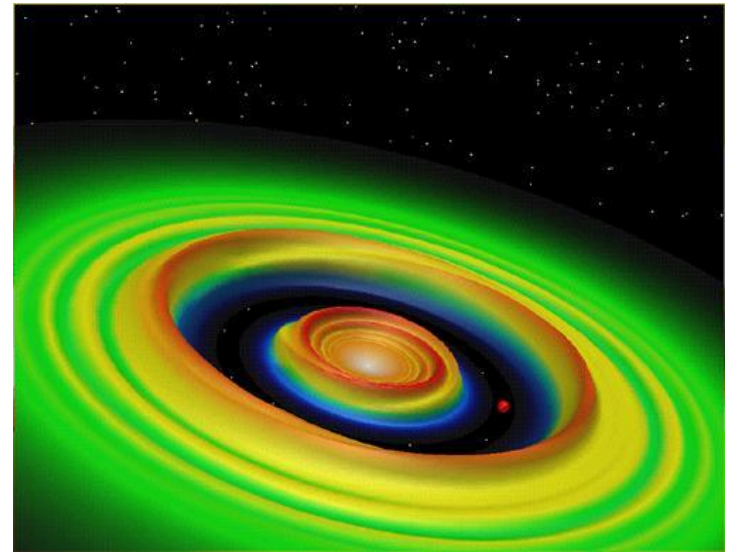
$A$  - альбедо

$a$  – орбитальное расстояние.

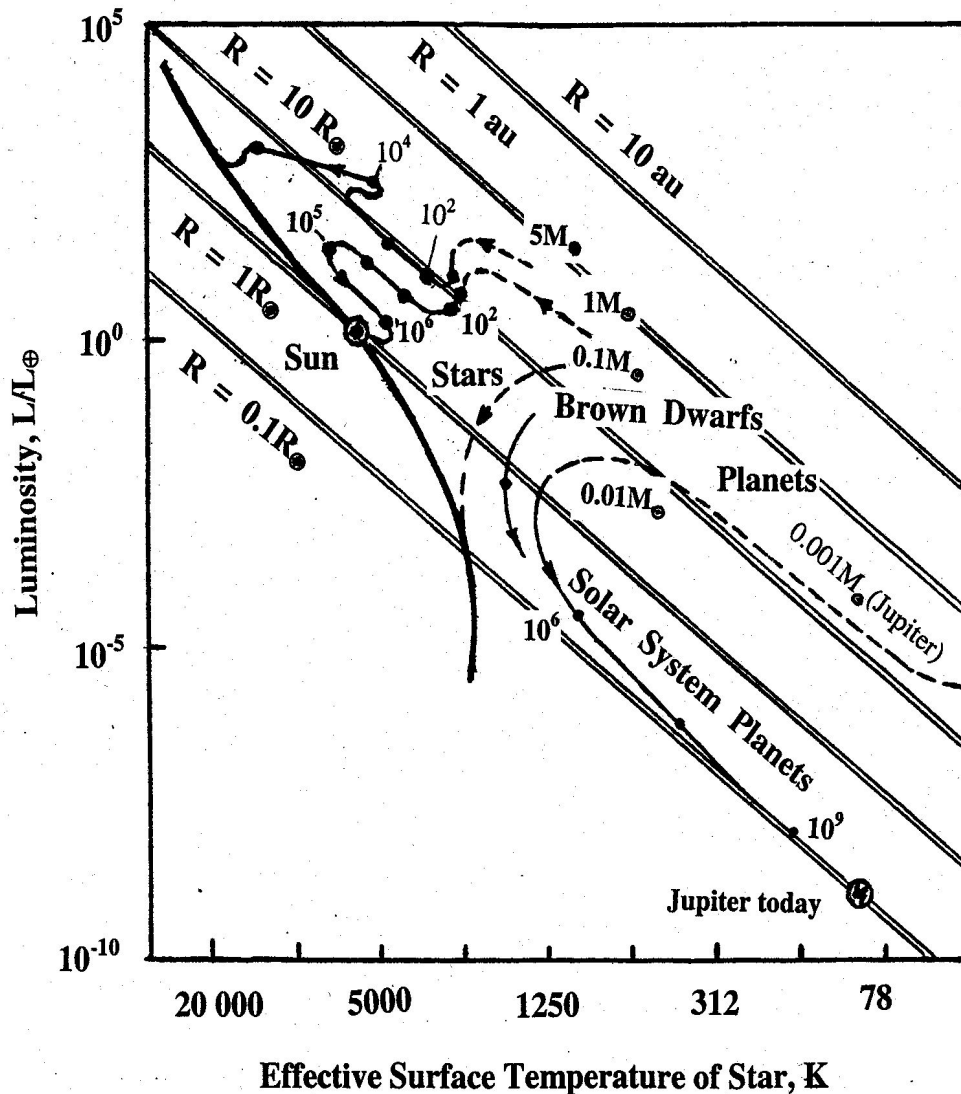
- Эта формула аналогична формуле для околосолнечной планеты

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

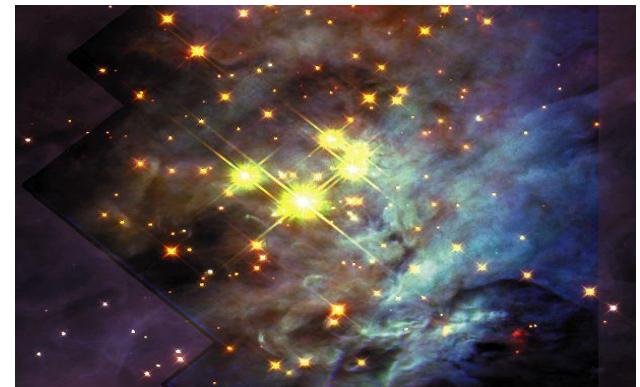
- $T_e$  близкой планеты оказывается **1000-1500K!**
- Только некоторые тугоплавкие элементы могут конденсироваться при таких температурах («кремниевая» атмосфера?).



# Эволюционные треки на H-R диаграмме

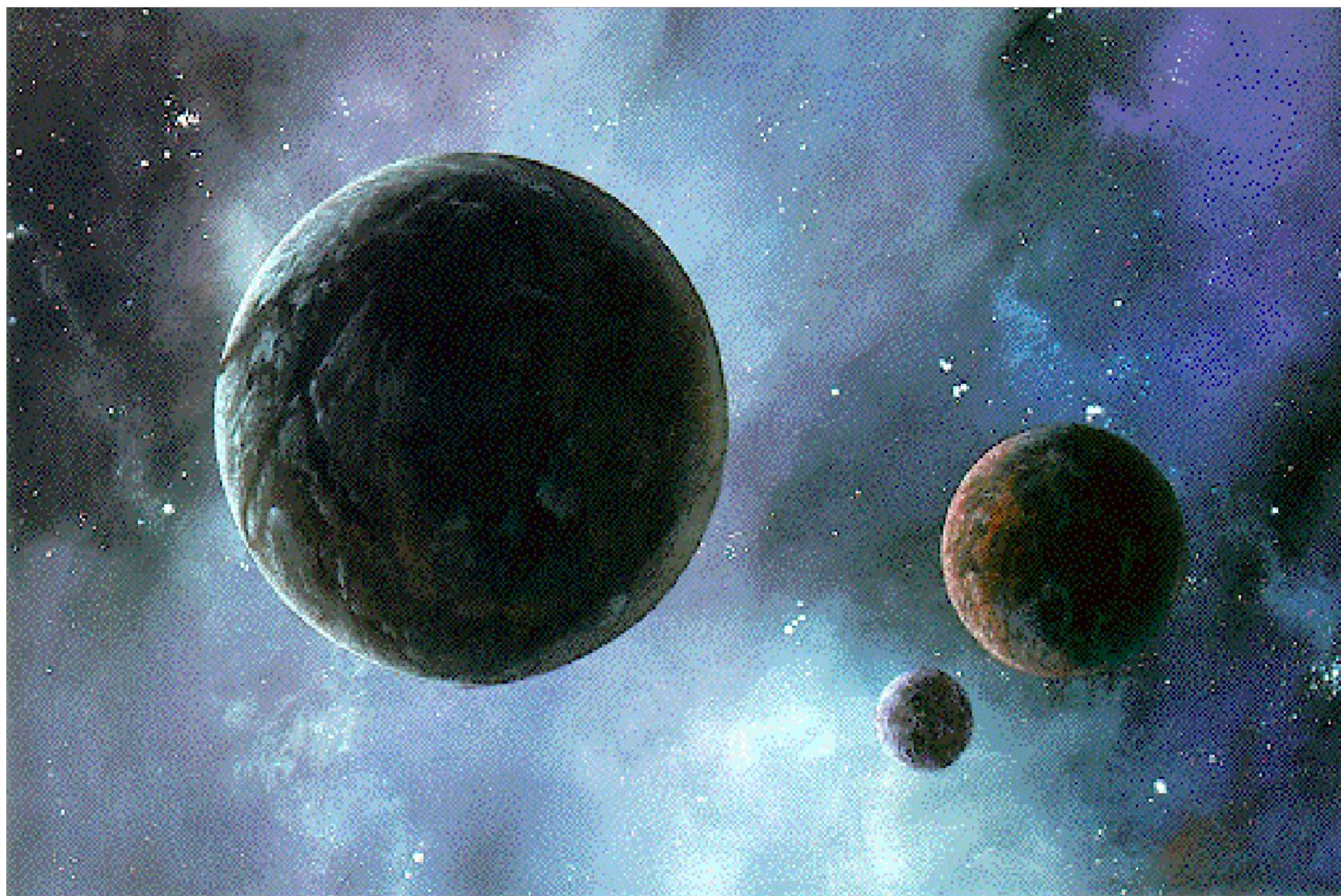


- Минимальная масса объекта для термоядерного водородного синтеза  $M \geq 0.08 M_{\text{sun}}$ .
- В диапазоне масс  $M \leq 0.01 M_{\text{sun}}$  образуются планеты ( $M_J \approx 0.001 M_{\text{sun}}$ ).
- Объекты в промежуточном диапазоне масс  $M = (0.01-0.08) M_{\text{sun}}$  – коричневые карлики.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



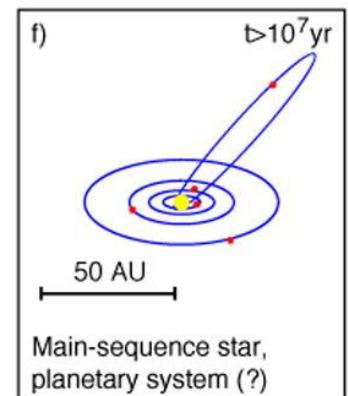
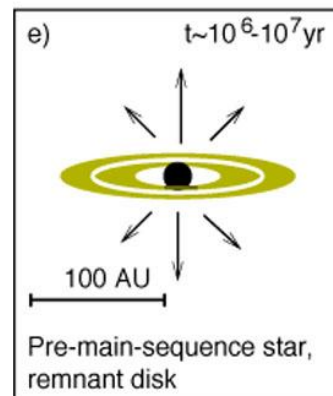
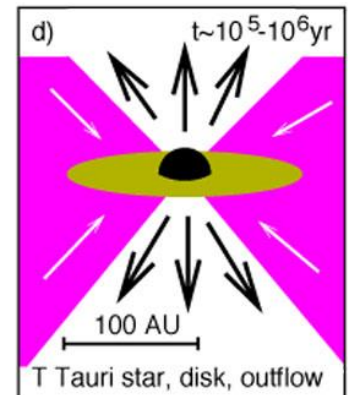
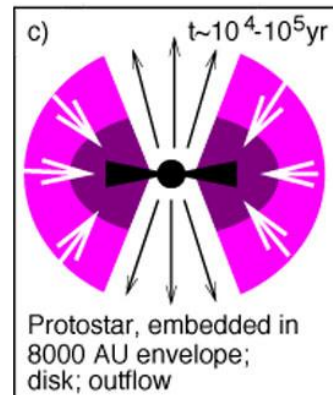
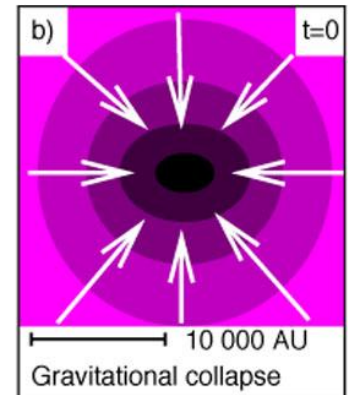
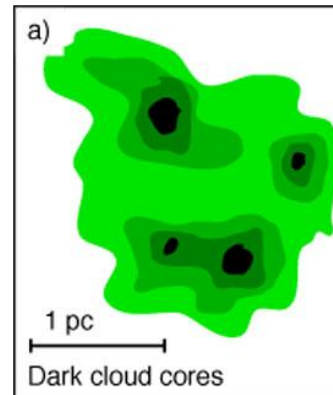


# Коричневые карлики (рисунок)





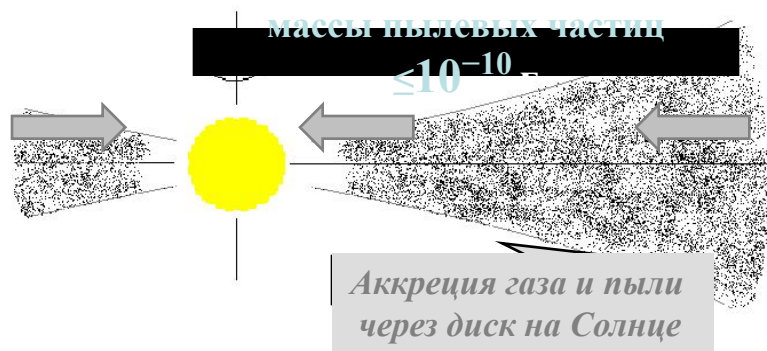
**Усовершенствованный  
подход к моделированию  
допланетной туманности и  
газопылевого  
аккреционного диска**



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)

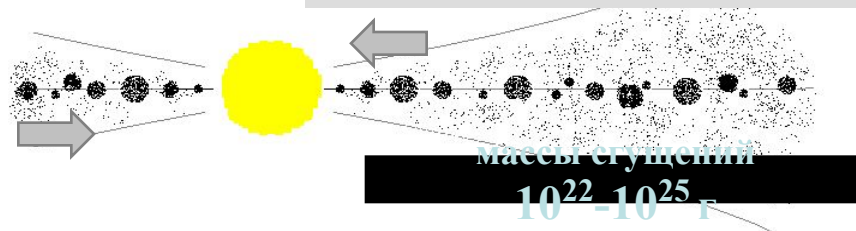
~ 0.1-0.5 млн.лет

Образование диска



~ 0.5 -1 млн.лет

Возникновение гравитационной неустойчивости, образование пылевых сгущений



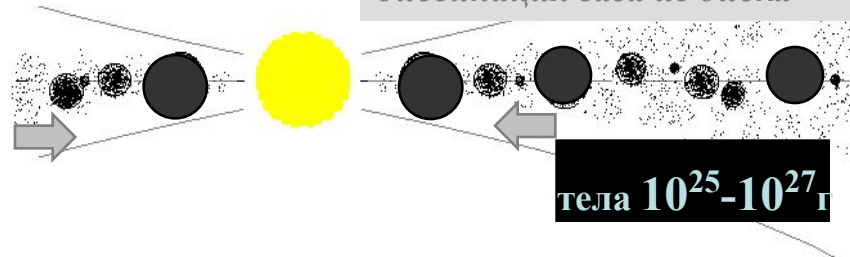
~ 0.4-0.9 млн.лет

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)

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

# 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**.

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

- 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.

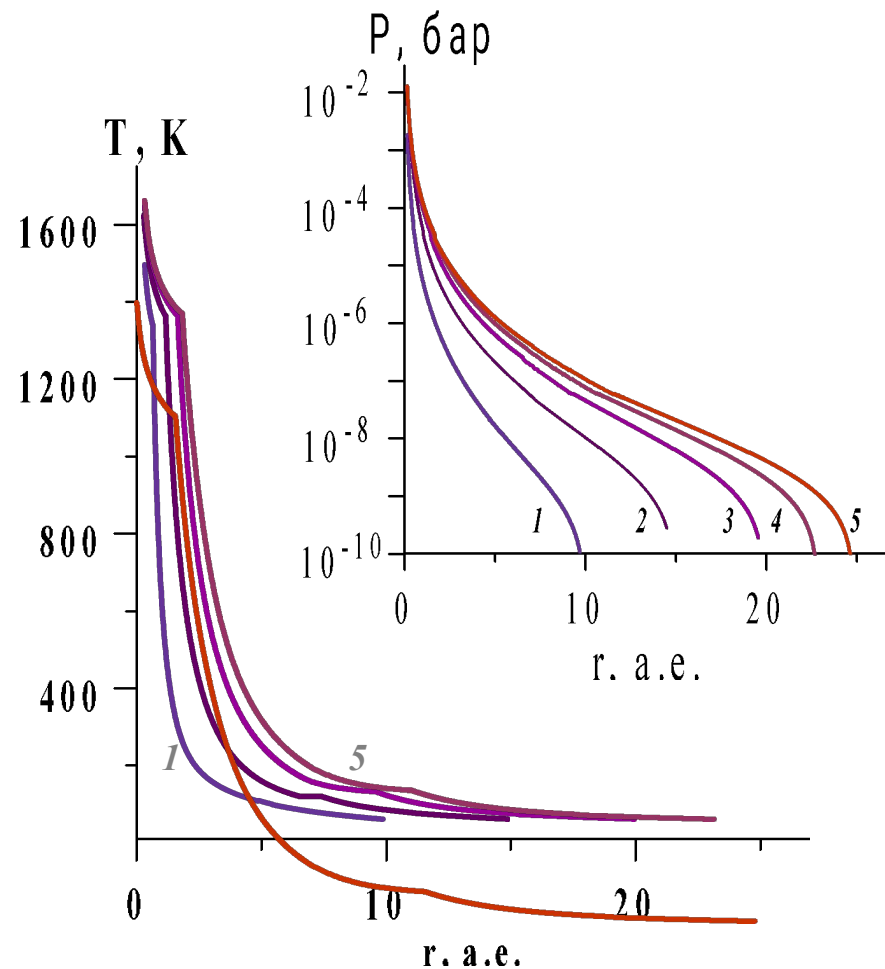
# Численная модель формирования протопланетного газопылевого диска вокруг протосолнца

- 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)

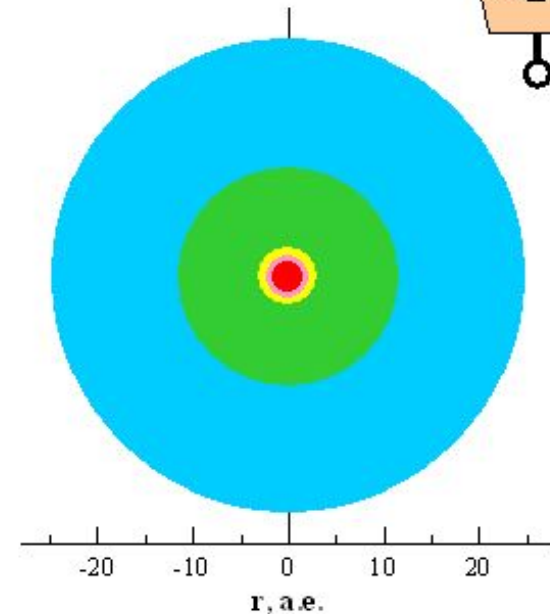
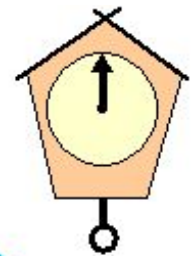
- Рассчитана гидродинамическая модель ранней стадии эволюции диска (98% газа и 2% пыли) после коллапса протозвездного облака с образованием одиночной протозвезды и диска;
- Угловой момент коллапсирующего облака принят  $J = 4 \times 10^{52} \text{ г см}^2 \text{ с}^{-1}$ ; диск турбулентный, пылевые 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 магниальных 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.

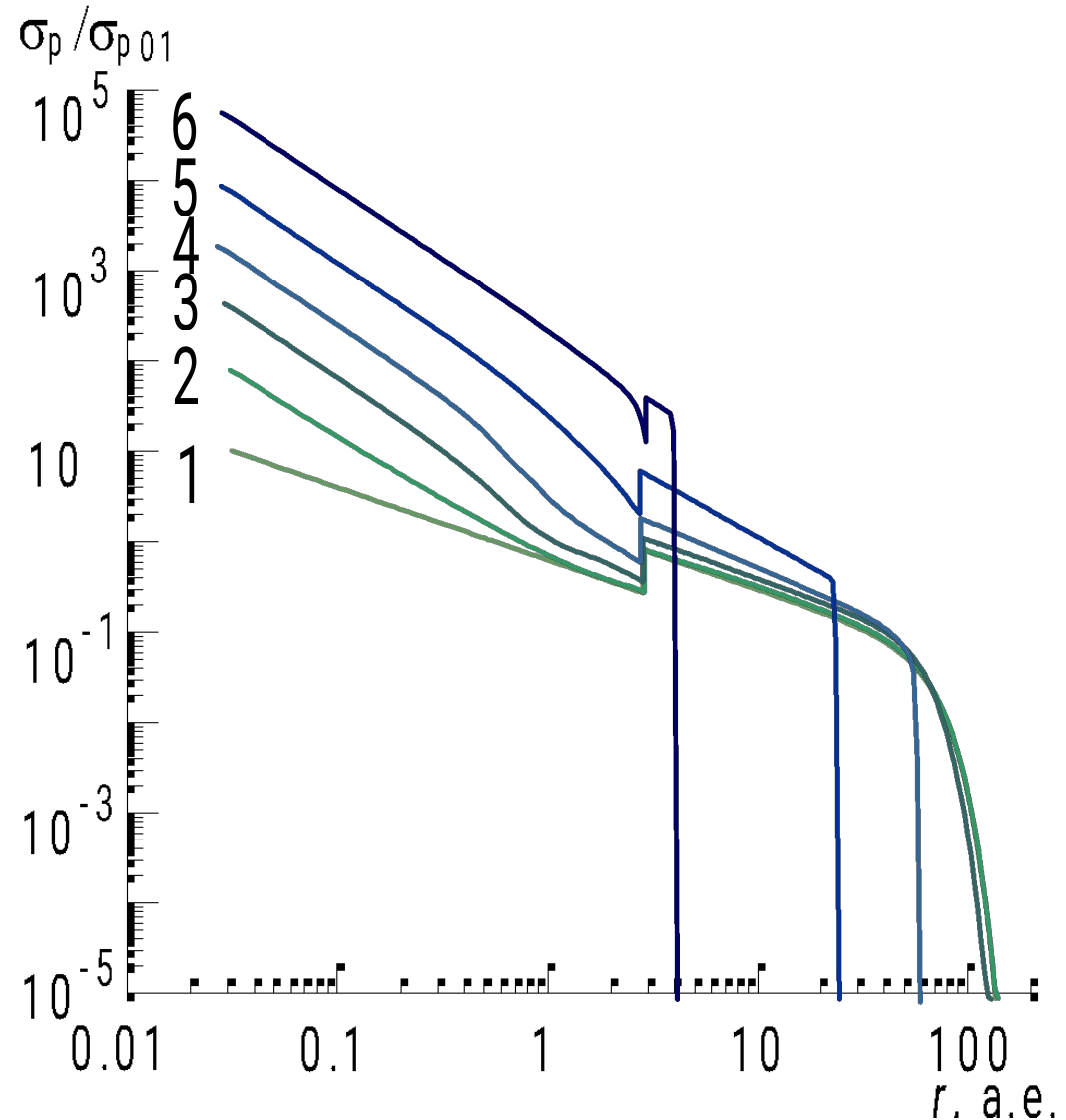
Полное время аккреции протопланетного диска 0.5 млн лет



Состав пыли:	Al, Ca, W, Ti	+ Fe, Mg, SiO <sub>2</sub>	+ Na, K	+ FeS	+ H <sub>2</sub> 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;  $1 \times 10^3$ ;  $5 \times 10^3$ ;  $2 \times 10^4$ ;  $1 \times 10^5$  и  $5 \times 10^5$  лет; вертикальные отрезки – внешняя граница субдиска.





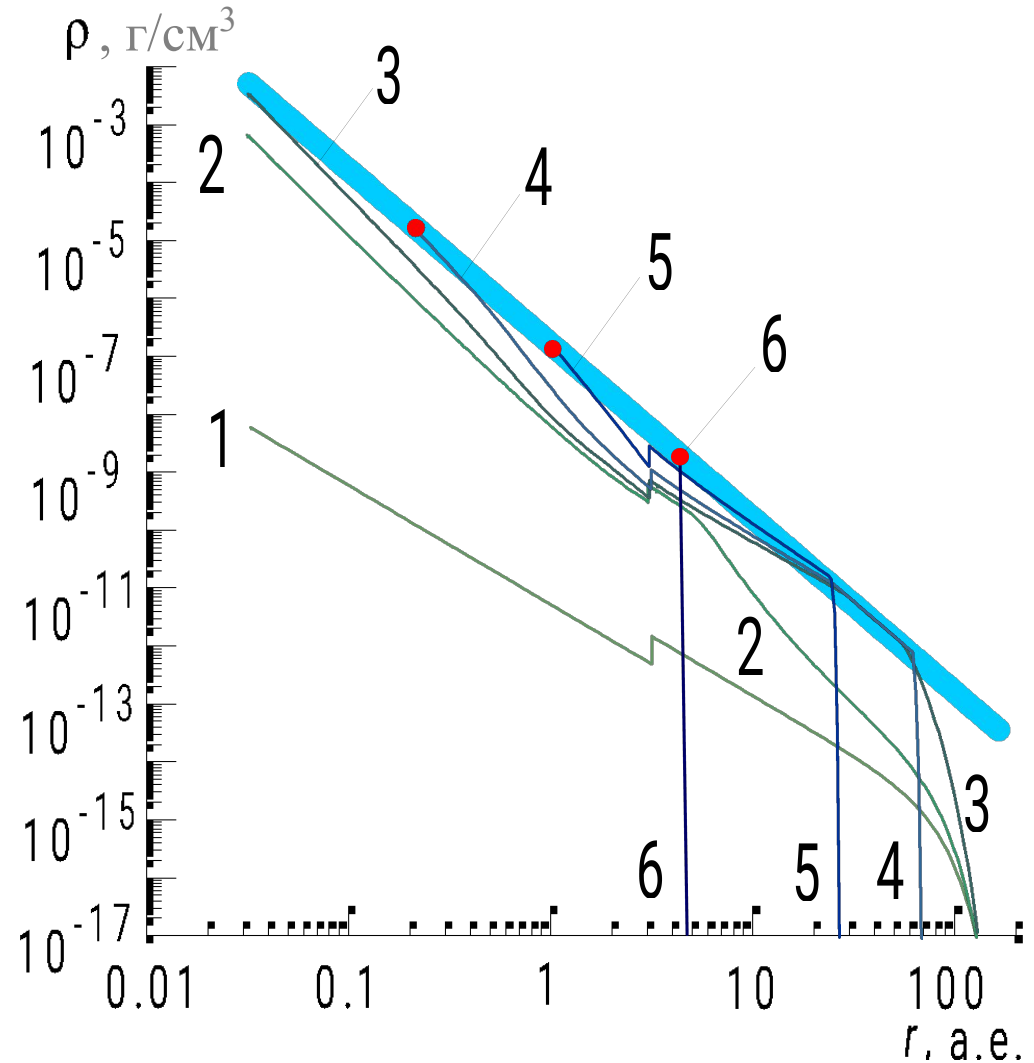
# Эволюция плотности пыли в газопылевом субдиске, усредненная по его толщине

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

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

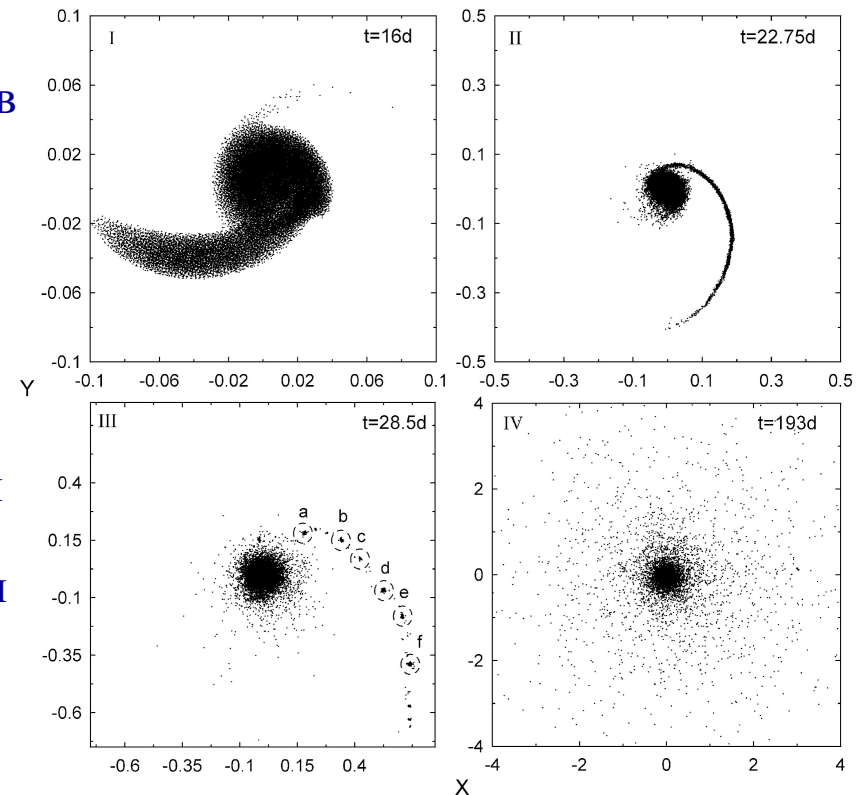
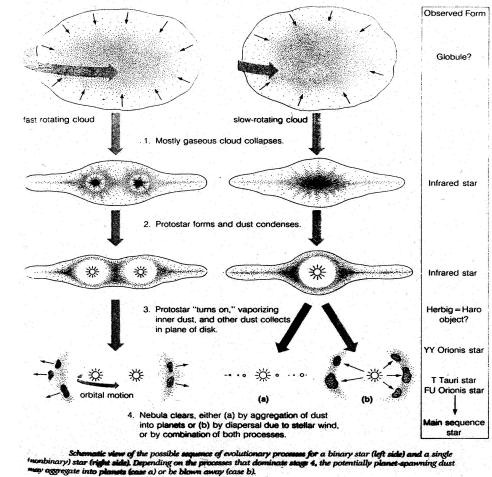
$$Q = \frac{c\Omega}{k_1 G \Sigma} < 1$$

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

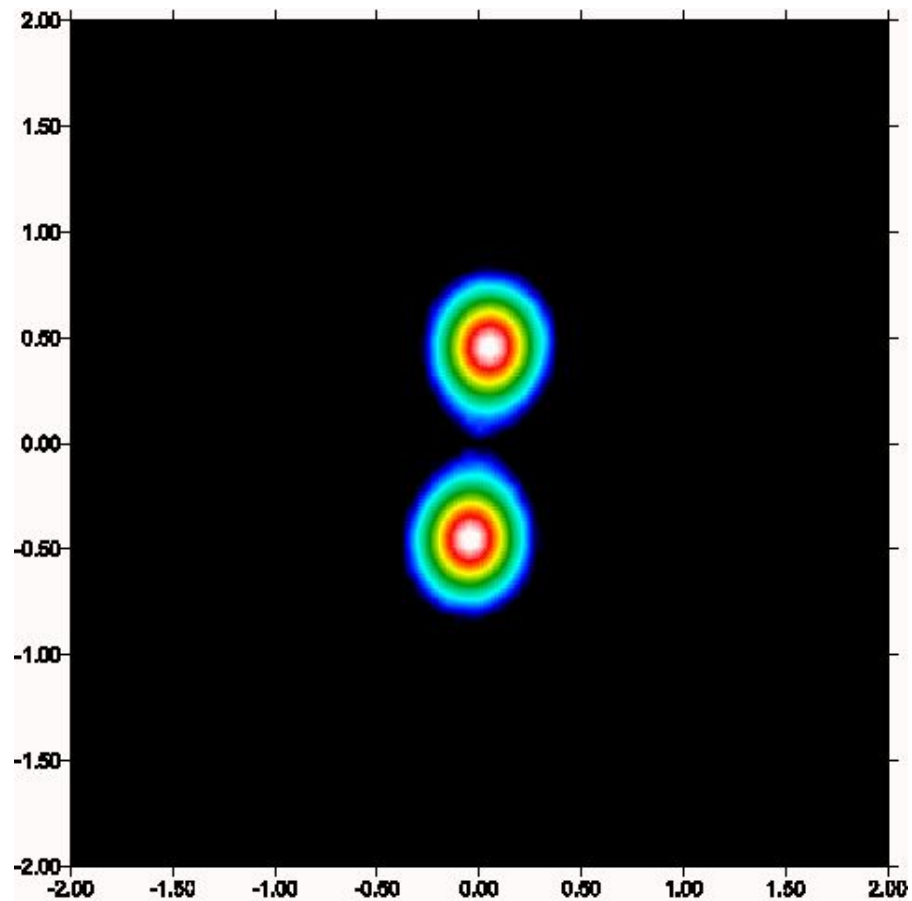
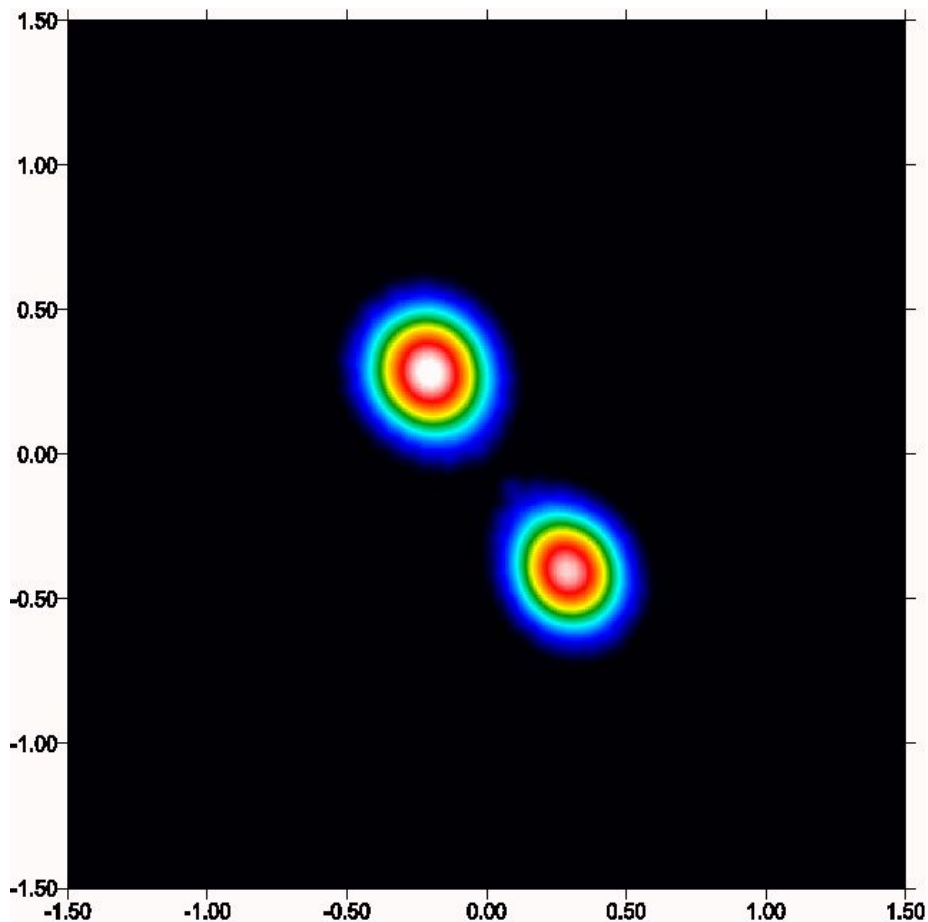


# Численное моделирование образования диска в двойной звездной системе

- 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.

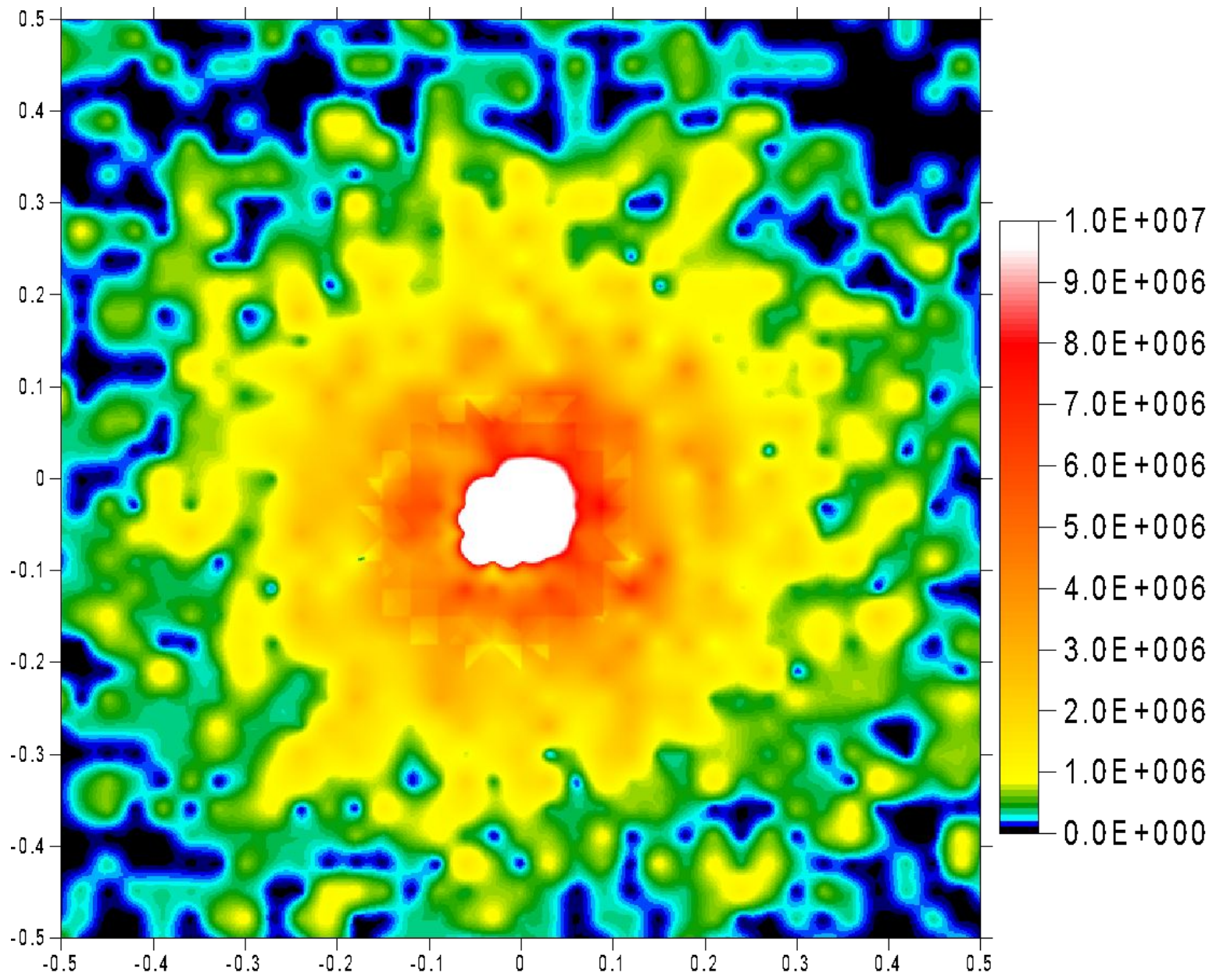


**Пример вычислений эволюции при разном отношении масс  
компонентов и коэффициентов заполнения полости Роша  
(большая полуось и масса системы неизменны)**

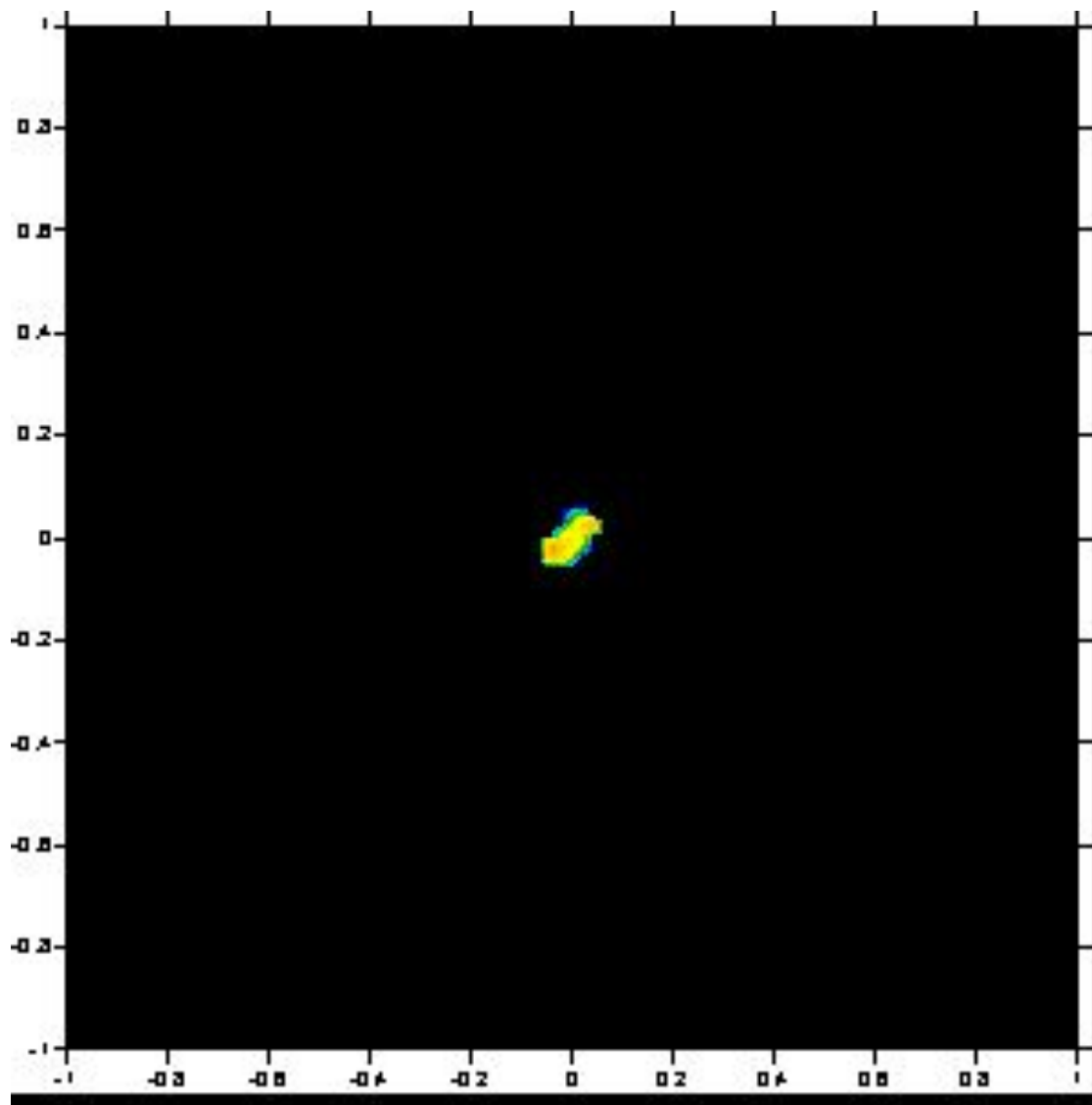




# Распределение поверхностной плотности

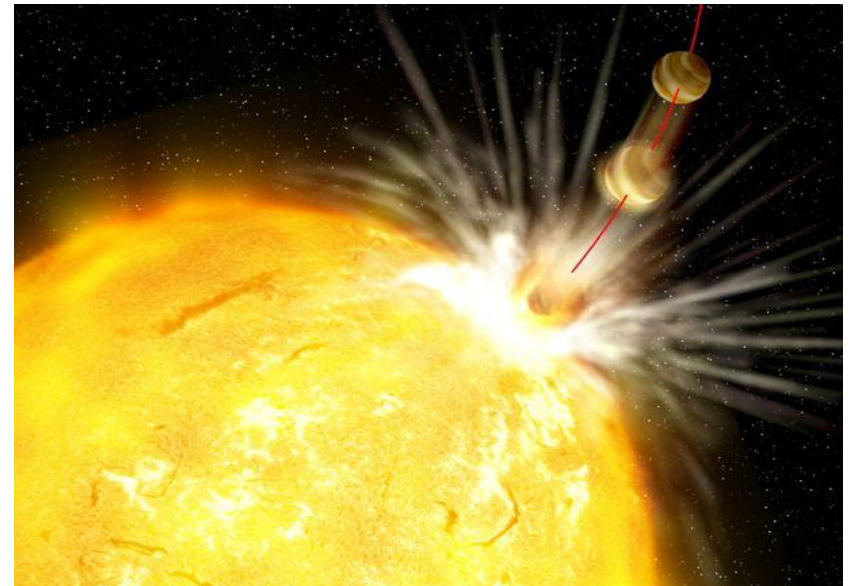
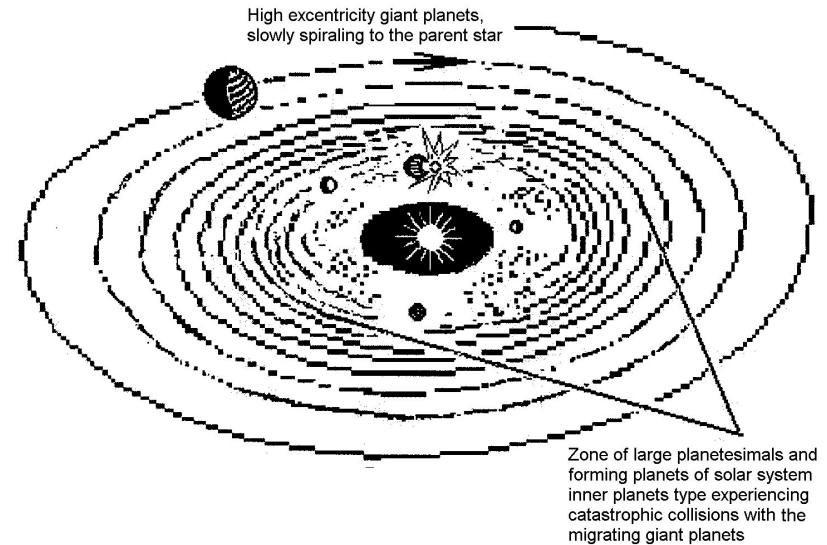
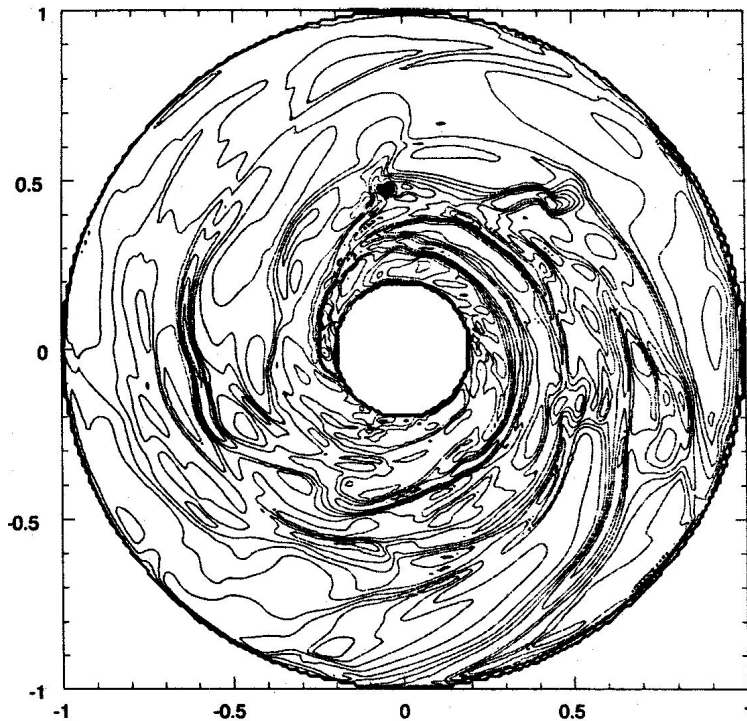


# Эволюция поверхностной плотности



# Сценарии гравитационной нестабильности и СТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

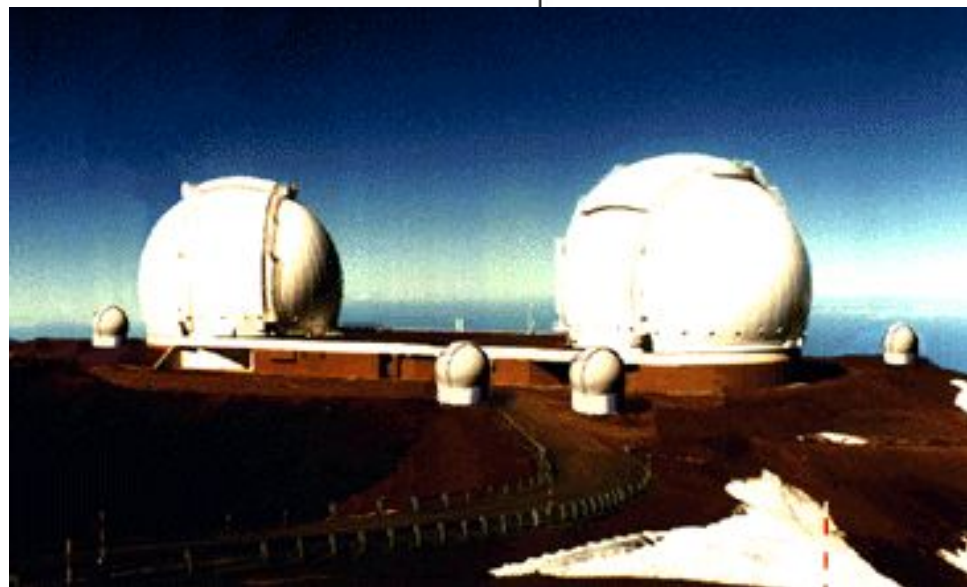
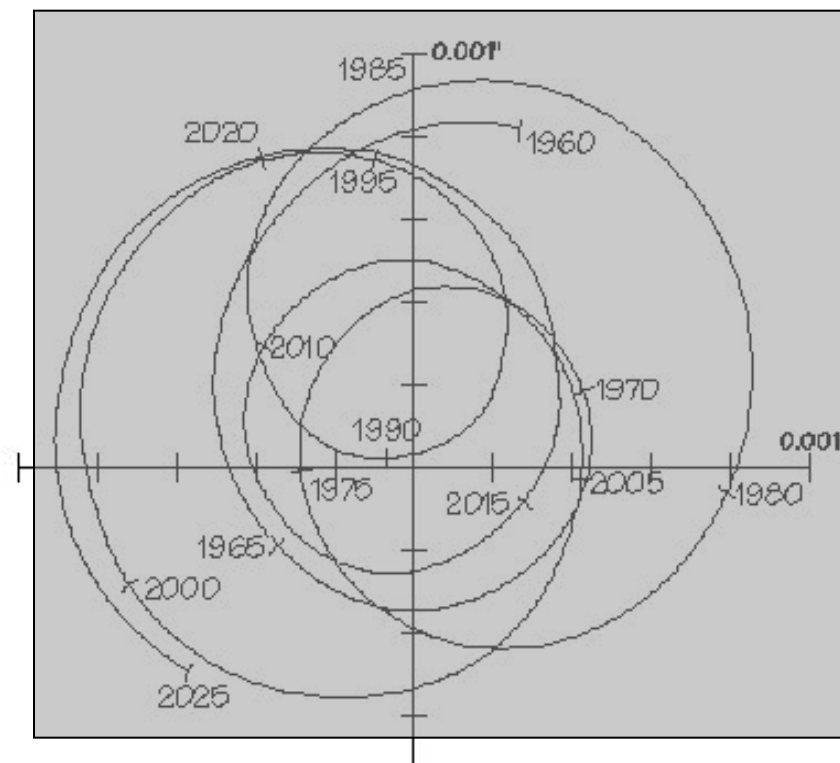
- Предположительно важная роль хаотической динамики в создании конфигураций планетных систем.
- Вероятный сценарий формирования планеты вдали от звезды, с последующей миграцией к ней и поглощением.





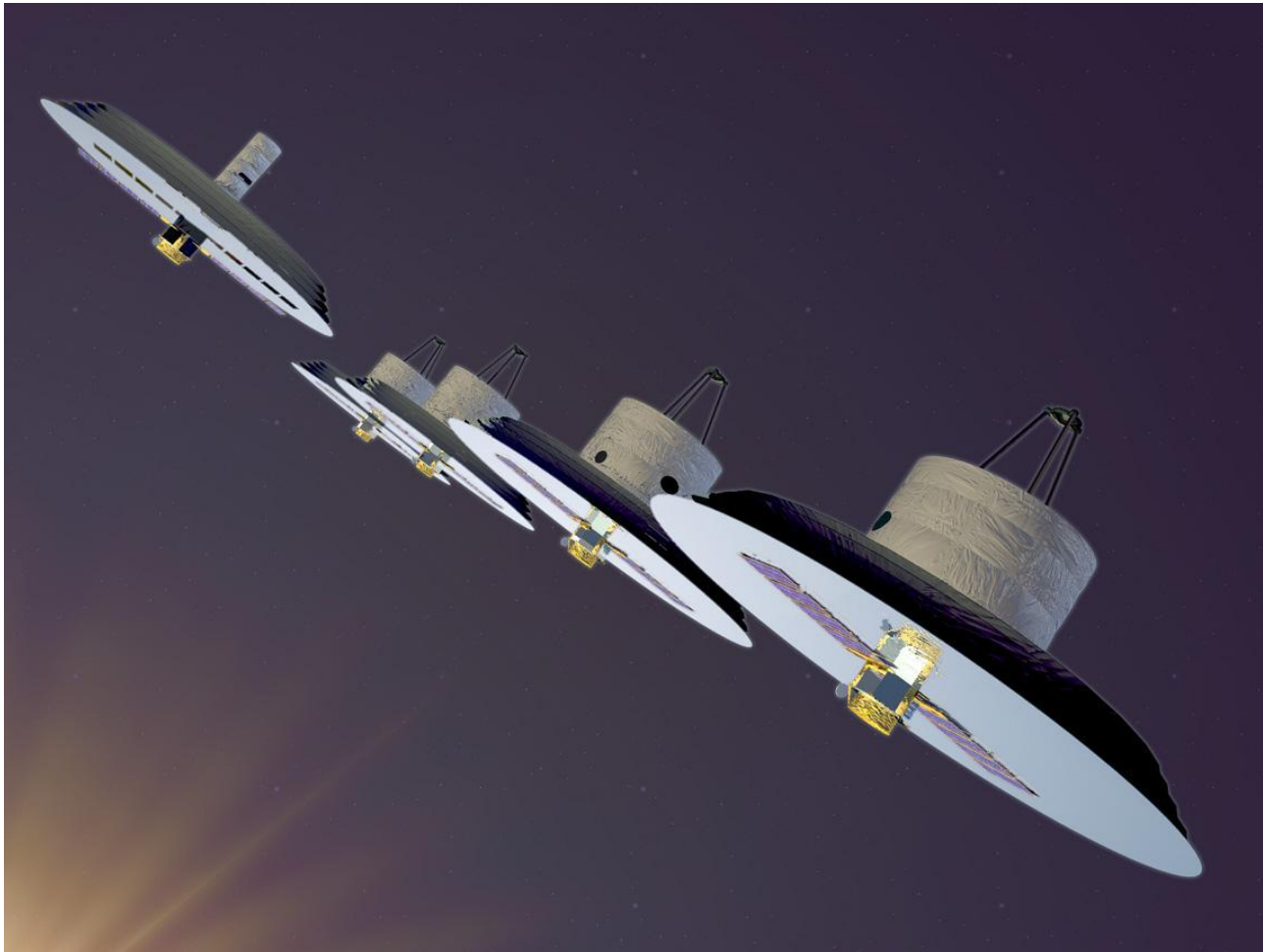
# Астрометрический метод

- 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 ( $\sim 2000$  звезд классов F, G, K в пределах  $\sim 25$  pc) рассчитана на 10-20 лет.
- Задача - изучить распределение планетных масс и наличие планет  $\sim M_{\text{earth}}$  в зоне "обитания"



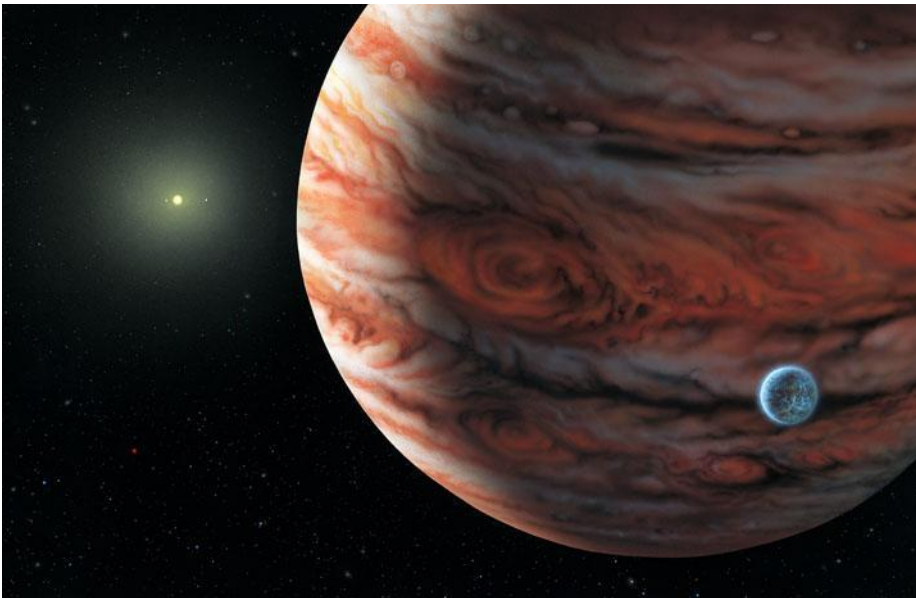
# Космический проект обнаружения внесолнечных планет типа Земли

(На уровне разрешения  $\sim 1$  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