

ТЕОРИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ АККРЕЦИИ О ФОРМИРОВАНИИ ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

Л. В. Ксанфомалити

ГАИШ МГУ, 1 февраля 2010

«Обнаружение планет у других звезд по модуляции
лучевых скоростей навсегда останется за пределами
возможного».

Р.Г. Айткен, 1938 г.

Экзопланеты

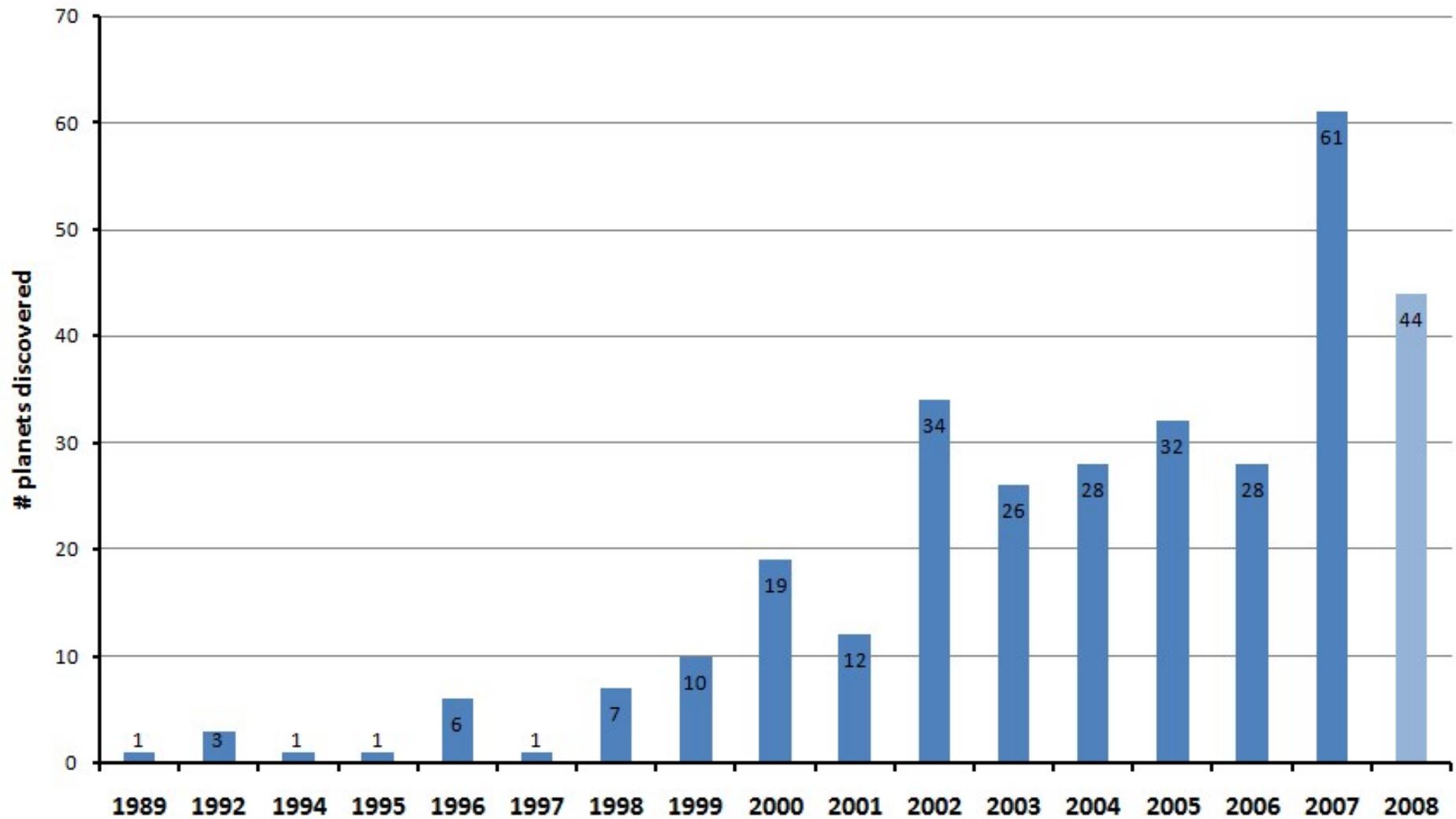
На начало 2010 г. известно

400 внесолнечных

планет с массой M

$\sin i < 15 M_{\text{жур}}$

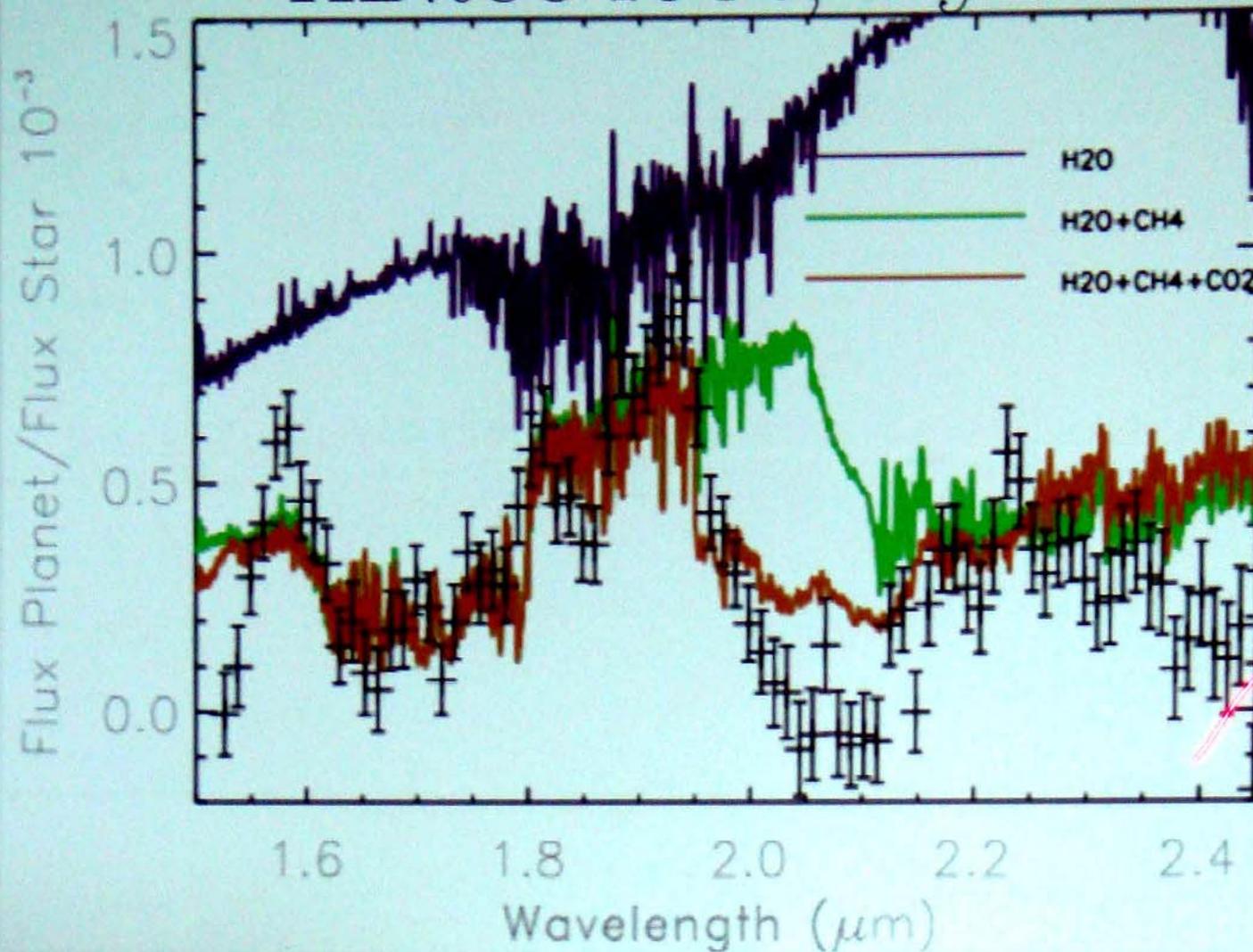
Extrasolar planet discoveries by year (1989-2008)



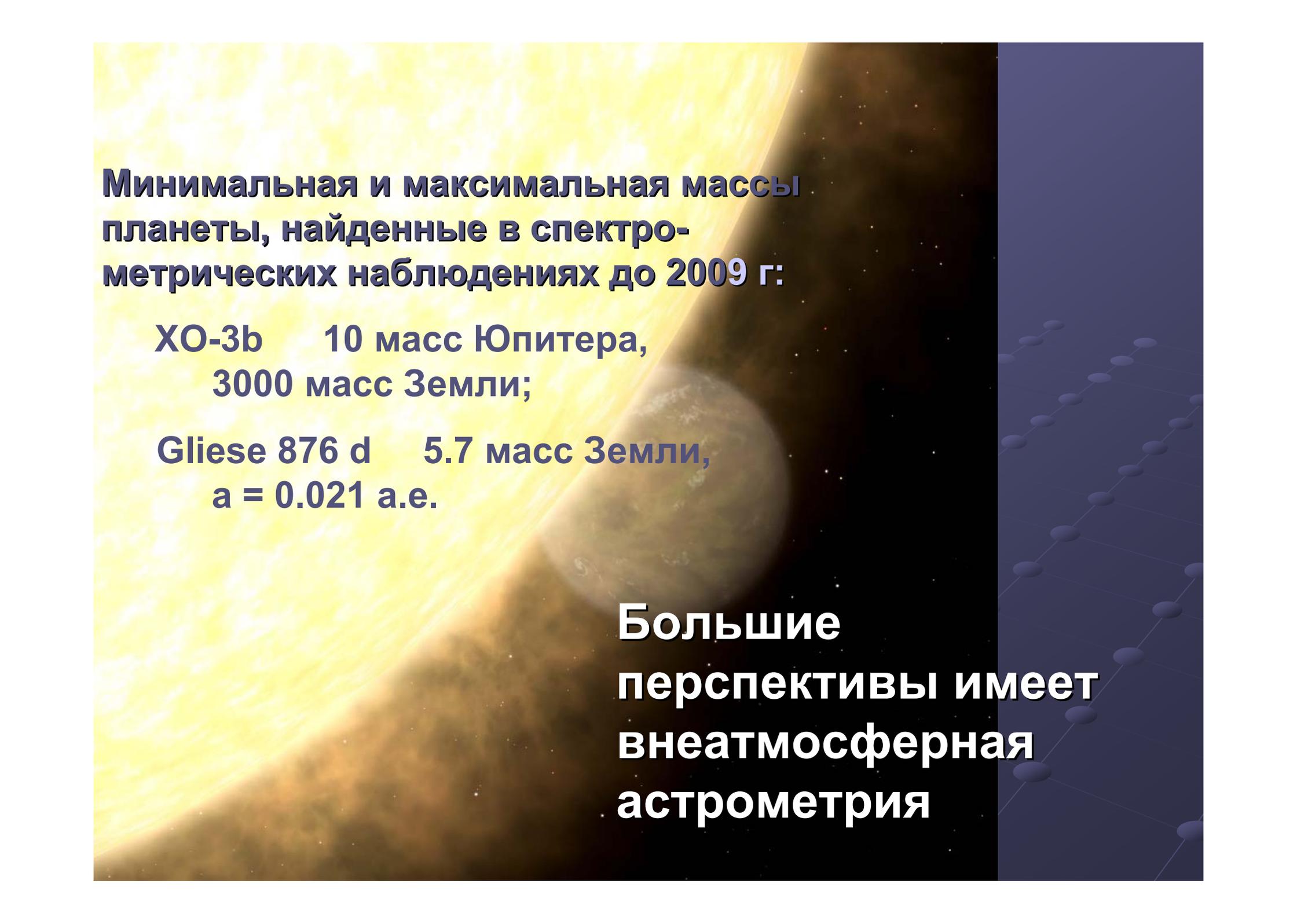
HD 209458b

«Родительская» звезда HD 209458, согласно каталогу Schneider, имеет спектральный класс G0V ($V = 7.65$). Удаленность 47 пк. Согласно (Cody, Sasselov, 2002), звезда старше Солнца (5.2 Глет), масса HD 209458 $M = 1.06M_s$, радиус $R = 1.18R_s$. Период транзитов определен с высокой точностью, 3.524738 сут. Большая полуось орбиты объекта HD 209458b составляет 0.045 а.е. Глубина модуляции яркости звезды, $(R_p / R_*)^2$, при транзитах достигает 1.5%. Широта прохождения планеты на диске звезды находится по длительности транзита.

HD209458b, day-side



Swain, Tinetti, Vasisht, Deroo, Griffith, et al., *submitted*



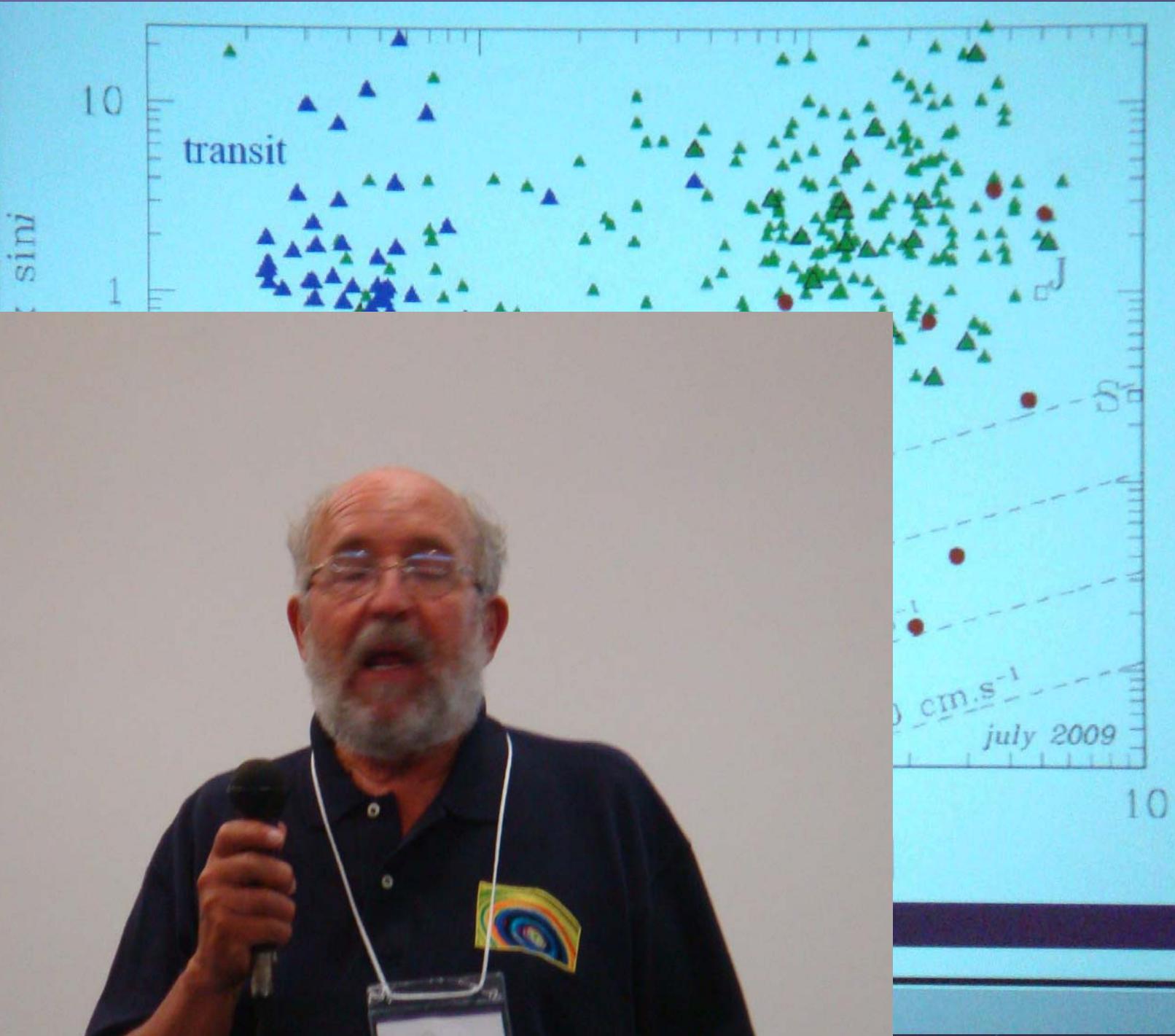
**Минимальная и максимальная массы
планеты, найденные в спектро-
метрических наблюдениях до 2009 г:**

**XO-3b 10 масс Юпитера,
3000 масс Земли;**

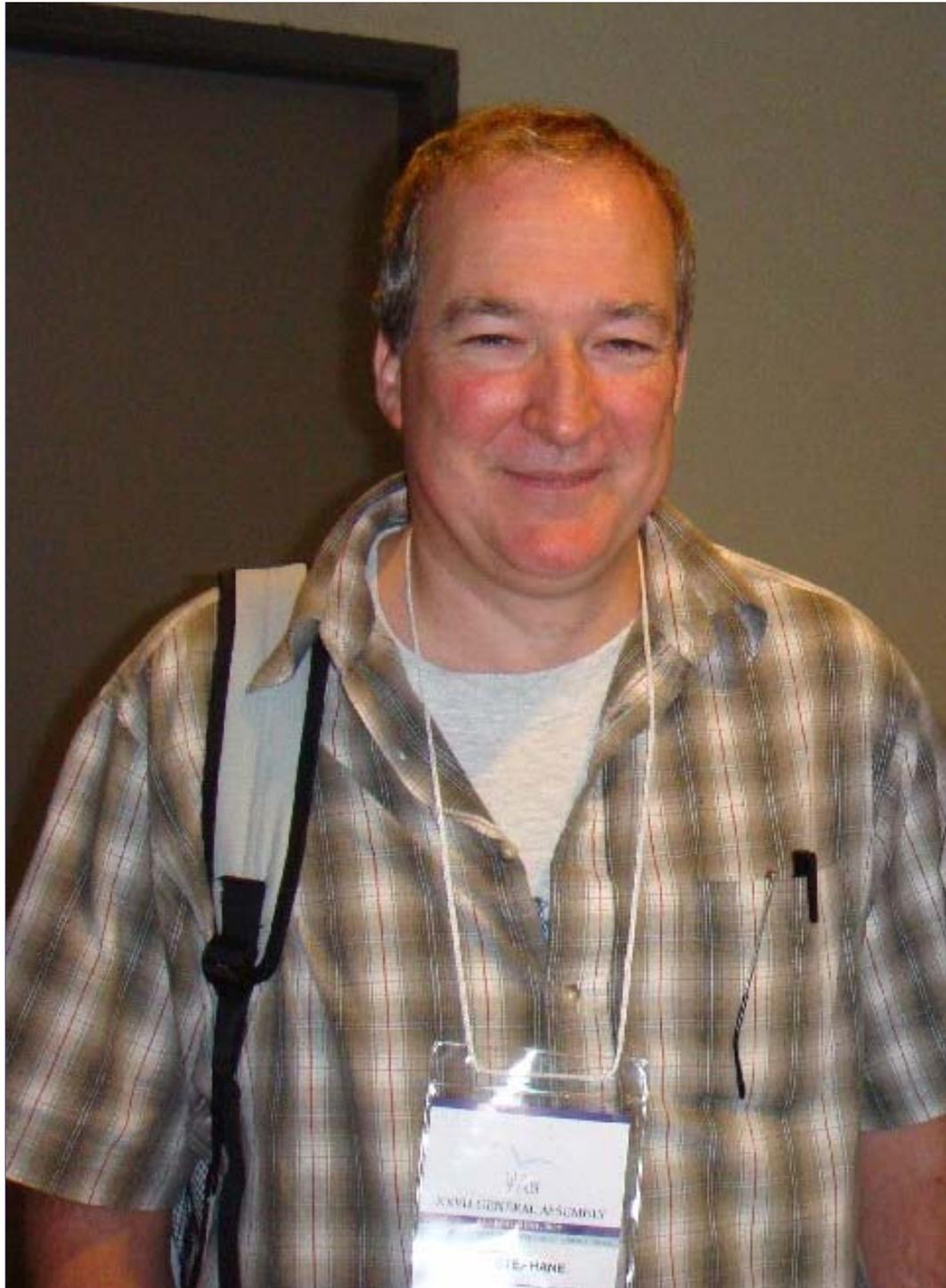
**Gliese 876 d 5.7 масс Земли,
a = 0.021 а.е.**

**Большие
перспективы имеет
внеатмосферная
астрометрия**

**2009: «Горячие суперземли»
- планеты малой массы на
низких орбитах у звезд
малой массы**



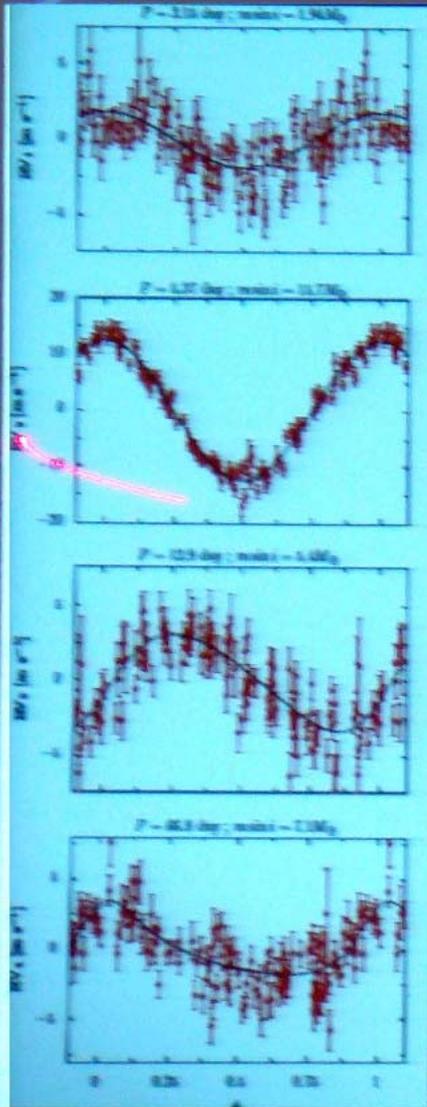




**Первые
«суперземли» -
экзопланеты
малой массы
на низких
орбитах:
Gl 581b**

Two super-Earth (5-7 M_{Earth}) in a 4-planet system
 + a very light planet of 1.94 M_{Earth}

Gl 581,
 M3V star



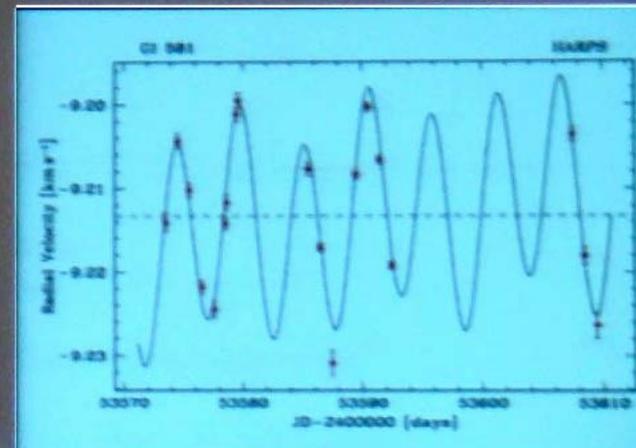
Mayor et al, in press

Bonfils et al.2005

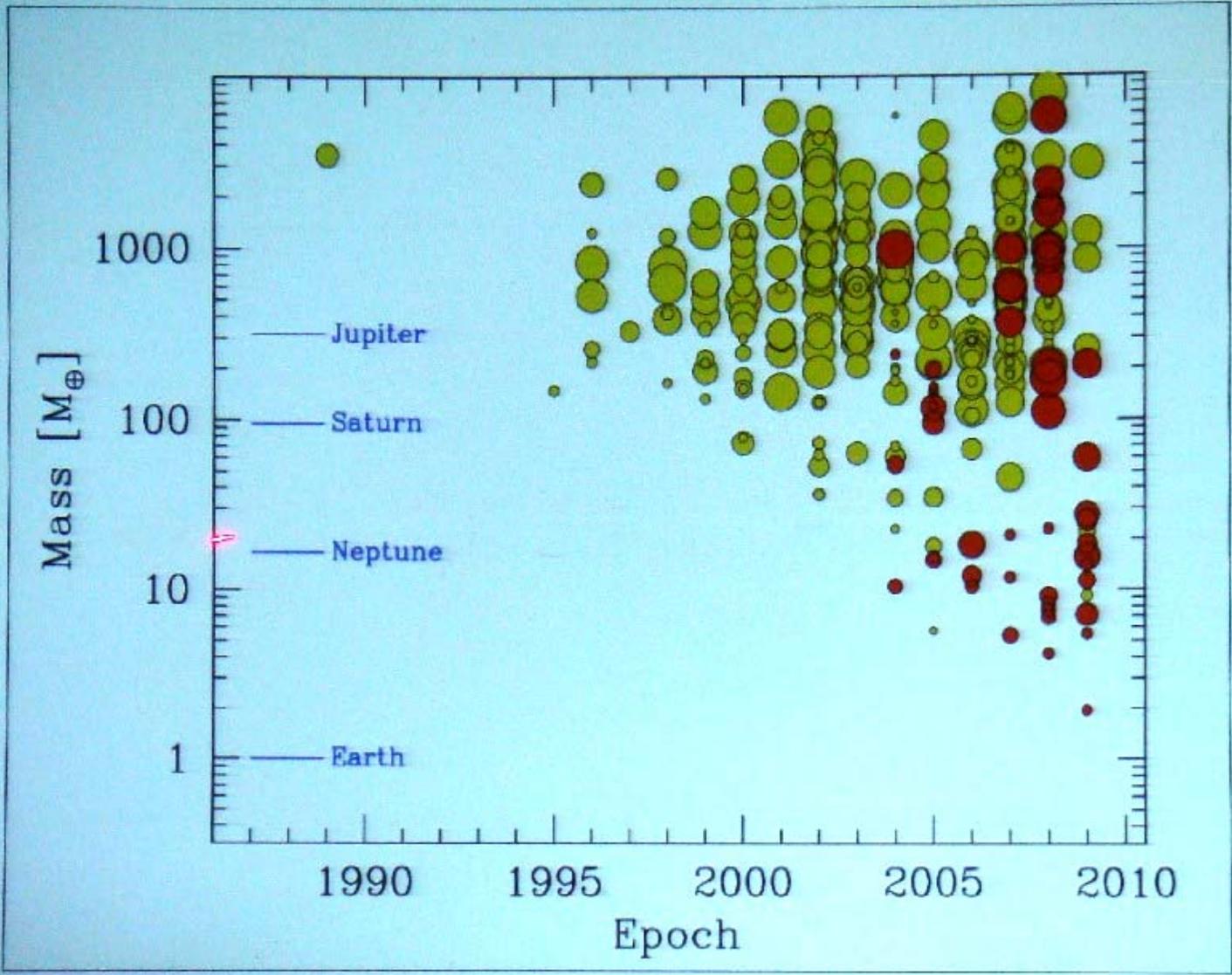
Udry et al.2007

Udry et al.2007
 revised in Mayor et al.

$P_1 = 3.15 \text{ d}$ $M_1 = 1.94 M_{\text{Earth}}$
 $P_2 = 5.37 \text{ d}$ $M_2 = 15.7 M_{\text{Earth}}$
 $P_3 = 12.9 \text{ d}$ $M_3 = 5.4 M_{\text{Earth}}$
 $P_4 = 66.8 \text{ d}$ $M_4 = 7.1 M_{\text{Earth}}$



RV detections (HARPS)

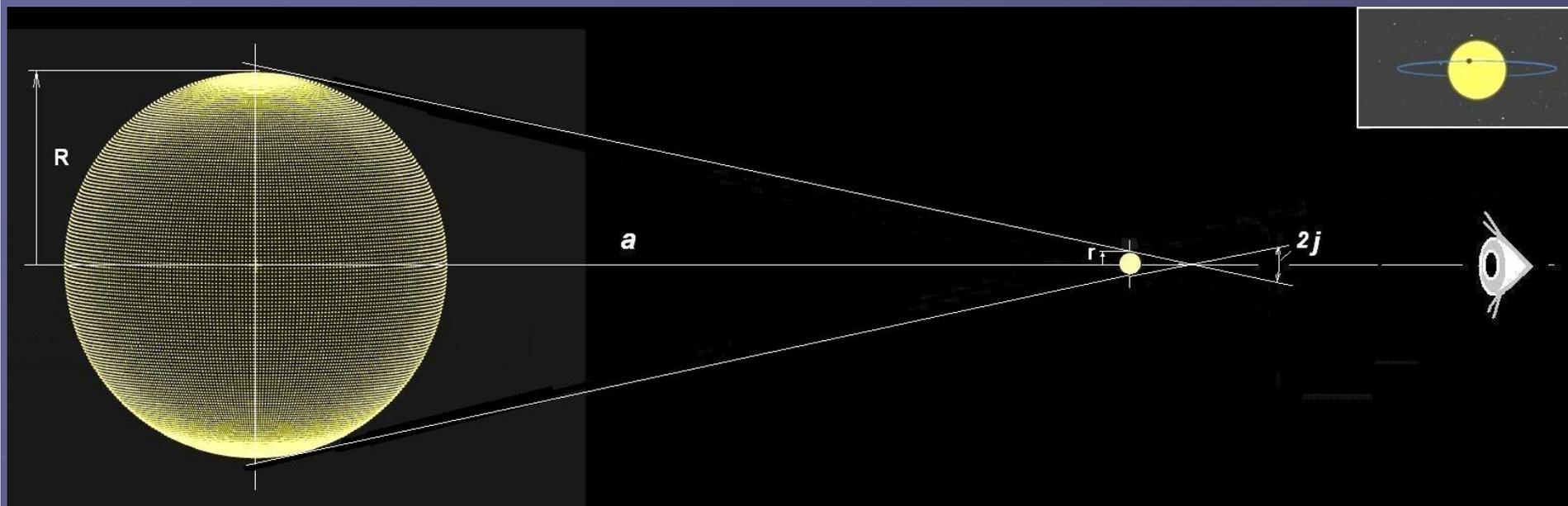


Типы «горячих экзопланет» с малым эксцентриситетом орбиты:

- *очень горячие юпитеры (массы от 0.2 до 13 масс Юпитера, период от 10 час до суток);
- *горячие юпитеры (массы от 0.2 до 13 масс Юпитера, период от 2-3 до 25 суток);
- *горячие нептуны (и еще неоткрытые очень горячие нептуны). Массы от 0.02-0.05 до 0.2 масс Юпитера, что то же от 6-15 до 60 масс Земли, период от 10 час до 25 суток);
- * экзопланеты типа «горячая земля».

Наряду с «горячими экзопланетами», около 2/3 экзопланет составляют массивные тела на высоких орбитах, с большими эксцентриситетами.

ТРАНЗИТЫ



Условие транзитов

Если R^* и r – радиусы звезды и планеты и a – большая полуось кеплеровской орбиты планеты, очевидное условие регистрации транзитов, исходя из геометрии наблюдения, формулируется как расположение наблюдателя в пределах угла $2j$ раскрыва кольцевого сектора:

$$\operatorname{tg} j = (R_* - r) / a$$

Аппаратом КОРОТ обнаружена экзопланета CoRoT-7b, первая планета малой массы с транзитами. Родительская звезда K0V, 0.93 массы Солнца, с эффективной температурой 5275 К. Масса CoRoT-7b в 4.8 раз, а радиус – в 1.7 раз больше массы и радиуса Земли, что дает среднюю плотность 5.6 г/см³, близкую к средней плотности Земли, 5.52 г/см³. Температура поверхности планеты достигает 2000 К. Орбитальный период менее суток, 20.4 час.

Еще раньше о другой «суперземле» сообщили М. Майор и его швейцарские коллеги (Udry et al., 2007). У звезды Gl 581 им удалось обнаружить 4 экзопланеты, с орбитальными периодами от 3.15 до 67 сут и с массами, соответственно, от 1.94 до 7 масс Земли. Главная особенность эксперимента заключается в малой массе звезды, благодаря которой кеплеровские орбита и скорость звезды значительно возрастают.

Температура «горячих юпитеров» должна быть очень высока. Для объекта 51 Peg b, с родительской звездой солнечного типа, с постоянной E_c , при сферическом альбедо $A_b = 0.5$ и большой полуоси орбиты $a = 0.047$ а.е., эффективная температура

$$T_э = [(1 - A_b) E_c / (4 \sigma a^2)]^{1/4} = 1080 \text{ K.}$$

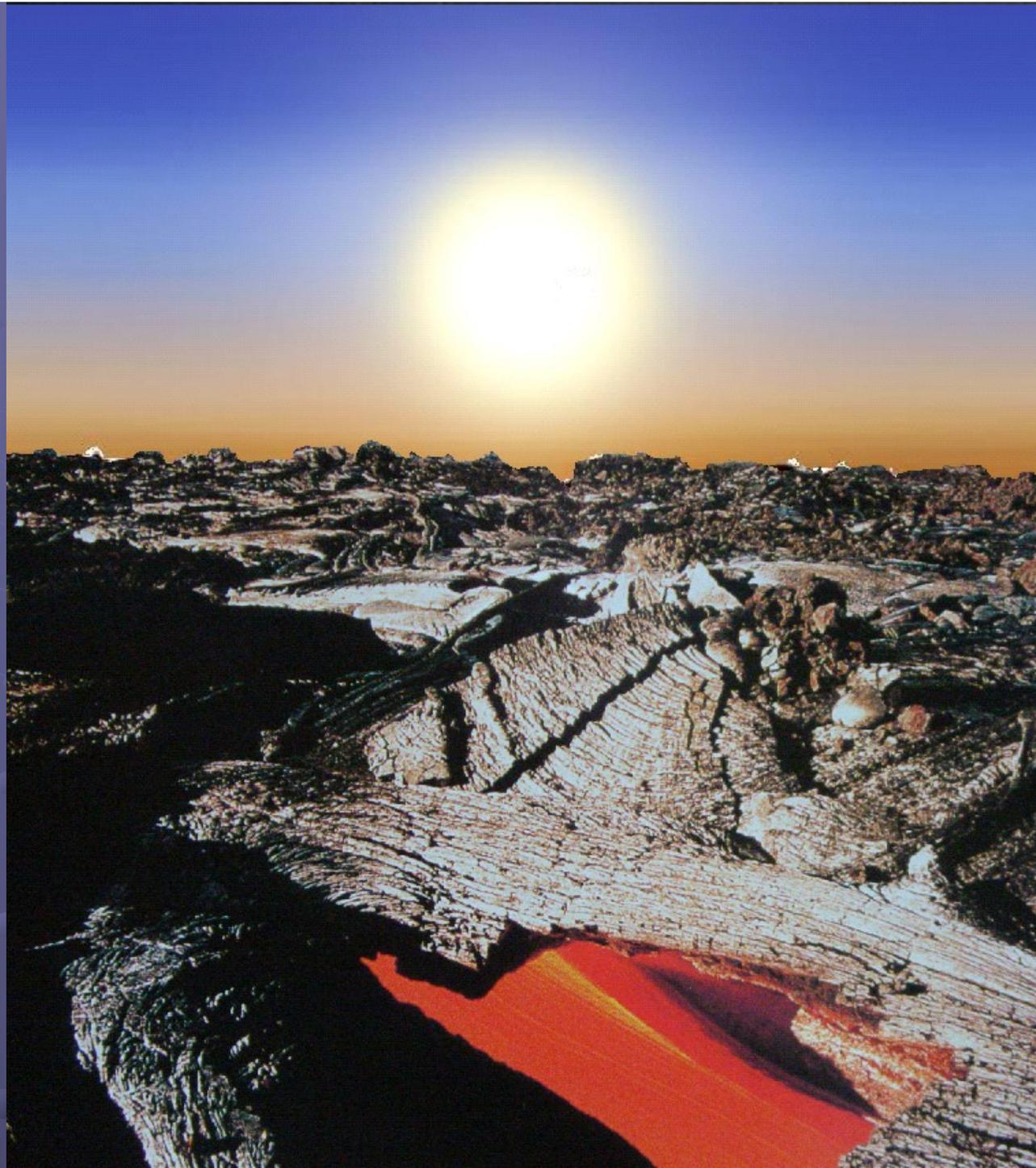
Были попытки измерить альбедо у некоторых объектов. Освещенность на Земле в оптическом диапазоне от планеты составляет:

$$E_{\text{опт}}(\varphi) = \rho_r E_3 r^2 f(\varphi) / d^2.$$

Здесь ρ_r – геометрическое альбедо планеты, E_3 – часть постоянной излучения звезды, приходящаяся на оптический диапазон, r – угловой размер планеты, $f(\varphi)$ – фазовая функция.

Если задать $\rho_r = 0.4$ и радиус планеты равным радиусу Юпитера, величина $\delta E_{\text{опт}}$ получается значительно меньше 1%. По измерениям SPITZER, альбедо HD 209458 b <0.25, Tau Boo b <39%, HD 75289 b <0.12.

ΔT день-ночь у разных экзопланет от 0 до 1400 К.



Д. Шарбонэ с международным коллективом выбрал в окрестностях Солнца 2000 карликовых звезд (с массами от 0.10 до 0.35 солнечной), которые систематически наблюдались автоматизированной системой из 8 небольших телескопов, в поисках транзитов. У старой карликовой звезды GJ 1214 с диаметром 0.21 солнечного, обнаружены транзиты длительностью 52 мин, повторяющиеся каждые 1.58 сут. Масса планеты 6.55 масс Земли, радиус – 2.68 радиусов Земли, что дает среднюю плотность всего 1.87 г/см³. Ускорение свободного падения на поверхности 91% земного. Родительская звезда холодная, 3030 К, эффективная температура планеты GJ 1214b оценивается, в зависимости от альбедо, от 393 К (при сферическом альбедо 0.75) до 541 К (при более вероятном альбедо 0.10), несмотря на то, что орбита планеты проходит всего в 2 млн км над поверхностью звезды.

Характеристики GJ 1214b ложатся где-то между планетой-океаном (состоящей на 75% из H₂O, 22% Si и на 3% из железа, сосредоточенного в ядре планеты) и планетой типа Земли (67.5% Si в мантии и 32.5% Fe, в ядре планеты). GJ 1214b, по-видимому, имеет глубочайший океан над метало-силикатами ядром и мантией.

Интеграл численной плотности потока Φ_H тепловой диссипации атмосферы с критического уровня (экзобазы), при температуре 10000 К и распределении скоростей по Максвеллу:

$$\Phi_H = \frac{N(r_c) U}{2\sqrt{\pi}} e^{- (V_{\text{diss}}^2 / U^2)} (V_{\text{diss}}^2 / U^2 + 1)$$

Здесь $N(r_c)$ – плотность на критическом уровне r_c , V_{diss} и U – соответственно скорость диссипации и наиболее вероятная скорость в распределении Максвелла. Считая, что водород диссоциирован, плотность n_H водорода H на критическом уровне планеты с массой Юпитера:

$$n_H = \frac{g m_H}{kT \sqrt{2} \pi \sigma^2}$$

равна $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$. (Здесь $g = 300 \text{ см} \cdot \text{с}^{-2}$ -- ускорение свободного падения на уровне a_R , m_H – масса атома водорода, k - постоянная Больцмана, T – температура и σ – сечение атома). Вероятная скорость в распределении Максвелла

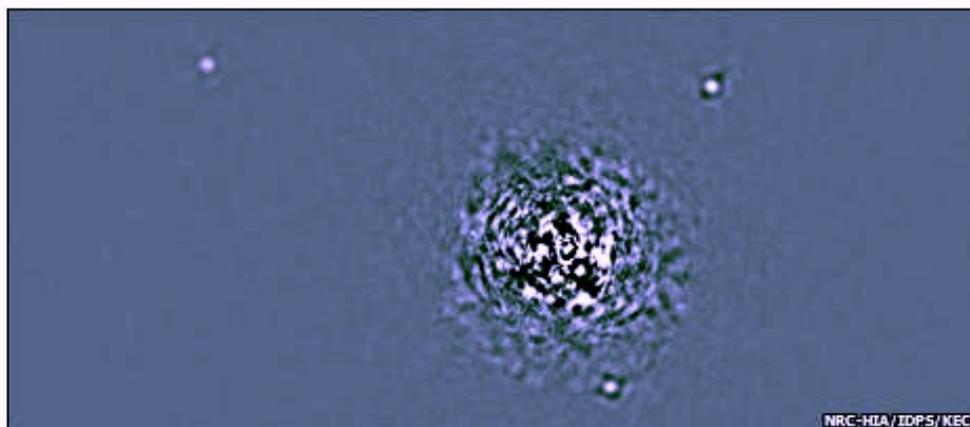
$$U = (2 kT / m_H)^{1/2}$$

составляет $12.9 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$, а скорость диссипации на критическом уровне, благодаря большой массе планеты

$$V_{\text{diss}} = (2 \gamma M_{pl} / r_c)^{1/2}$$

равна $32 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$, то-есть намного выше вероятной тепловой скорости. γ и M_{pl} – гравитационная постоянная и масса планеты.

При темпах потерь, многократно превышающих расчет, даже $10\,000 \text{ тонн} \cdot \text{с}^{-1}$ ($10^{10} \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$) и массе Юпитера (10^{30} г), для потерь 10% массы планеты потребуется время $T = 10^{29} / (10^{10} \cdot 3.2 \cdot 10^7) = 3 \cdot 10^{11}$ лет, что в 20 раз превышает возраст Вселенной.



Three exoplanets orbiting a young star (HR 8799) 129 light years away are captured using Keck Observatory near-infrared adaptive optics.

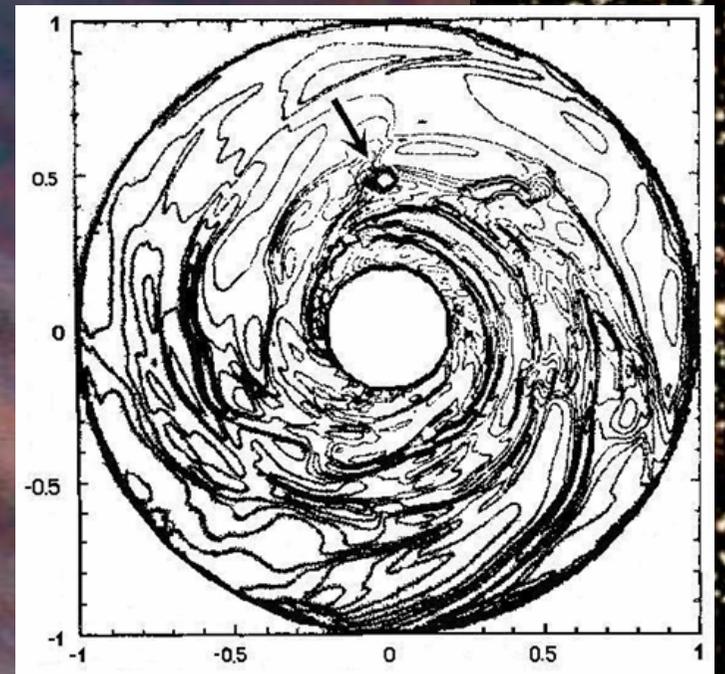
HR 8799 (39 pc)				
Companion (in order from star)	<u>Mass</u>	<u>Semimajor axis</u> (AU)	<u>Orbital period</u> (years)	<u>Eccentricity</u>
<u>d</u>	$10 \pm 3 M_J$	~ 24	~ 100	>0.04 ^[16] ^[note 2]
<u>c</u>	$10 \pm 3 M_J$	~ 38	~ 190	?
<u>b</u>	$7^{+4}_{-2} M_J$	~ 68	~ 460	?
Dust disk	75 AU			

«Когда мы открыли экзопланеты, мы перестали понимать Солнечную систему»

Две конкурирующие идеи формирования планет продолжают развиваться:

Классическая парадигма – аккреционная теория

Гипотеза гравитационной неустойчивости



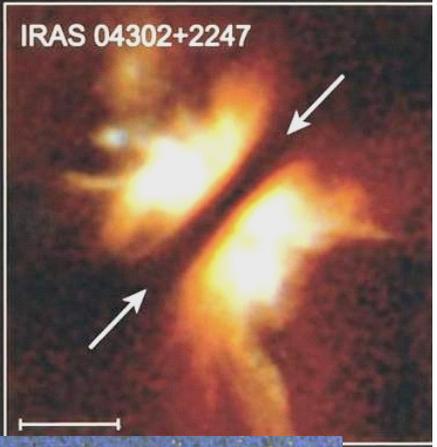
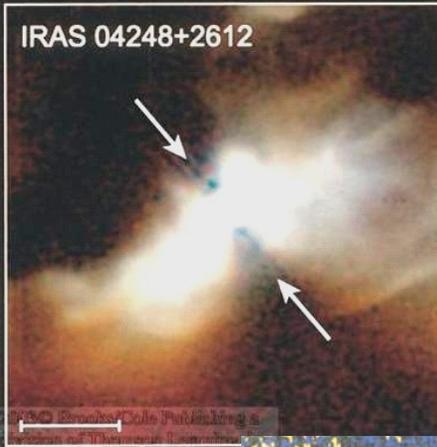
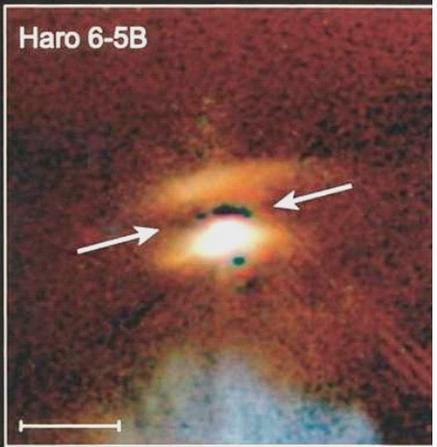
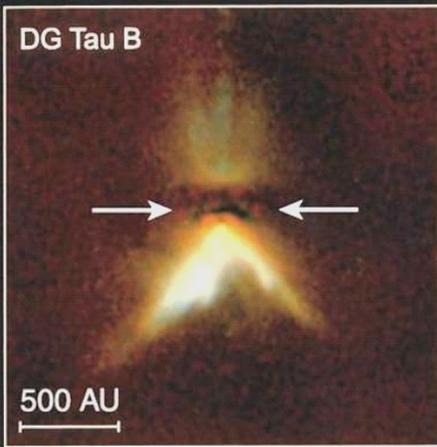
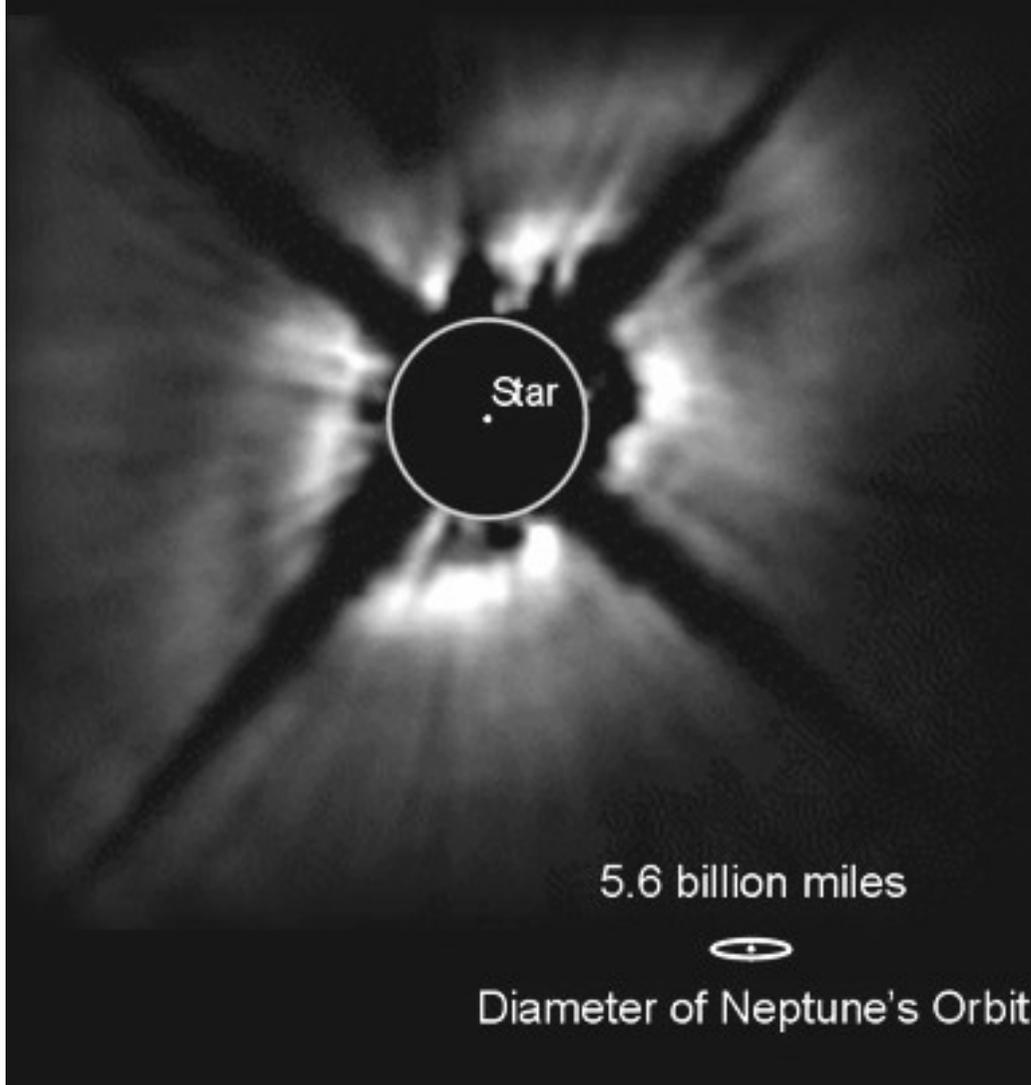
**Процесс сложен,
а результат
непредсказуем**

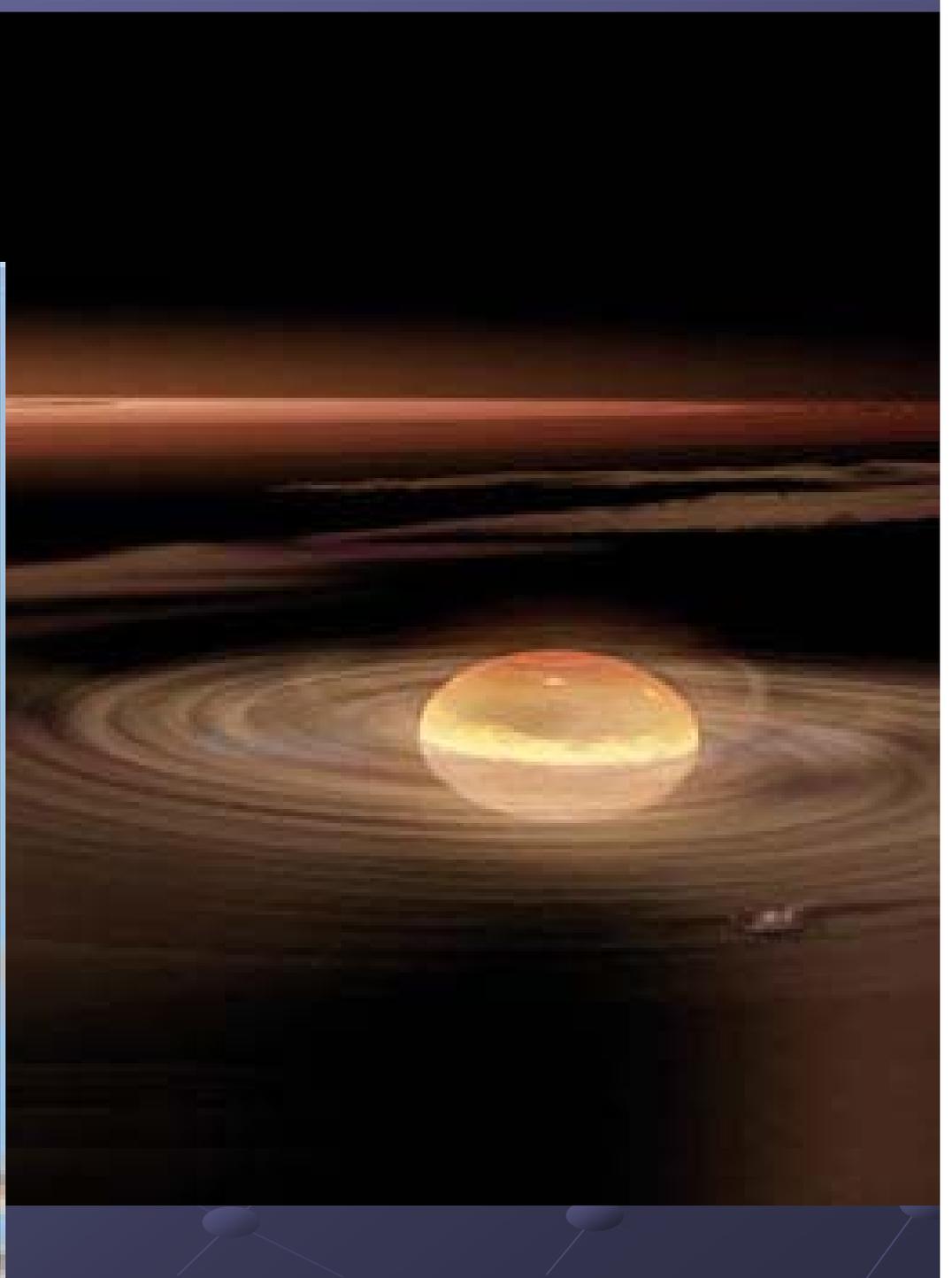


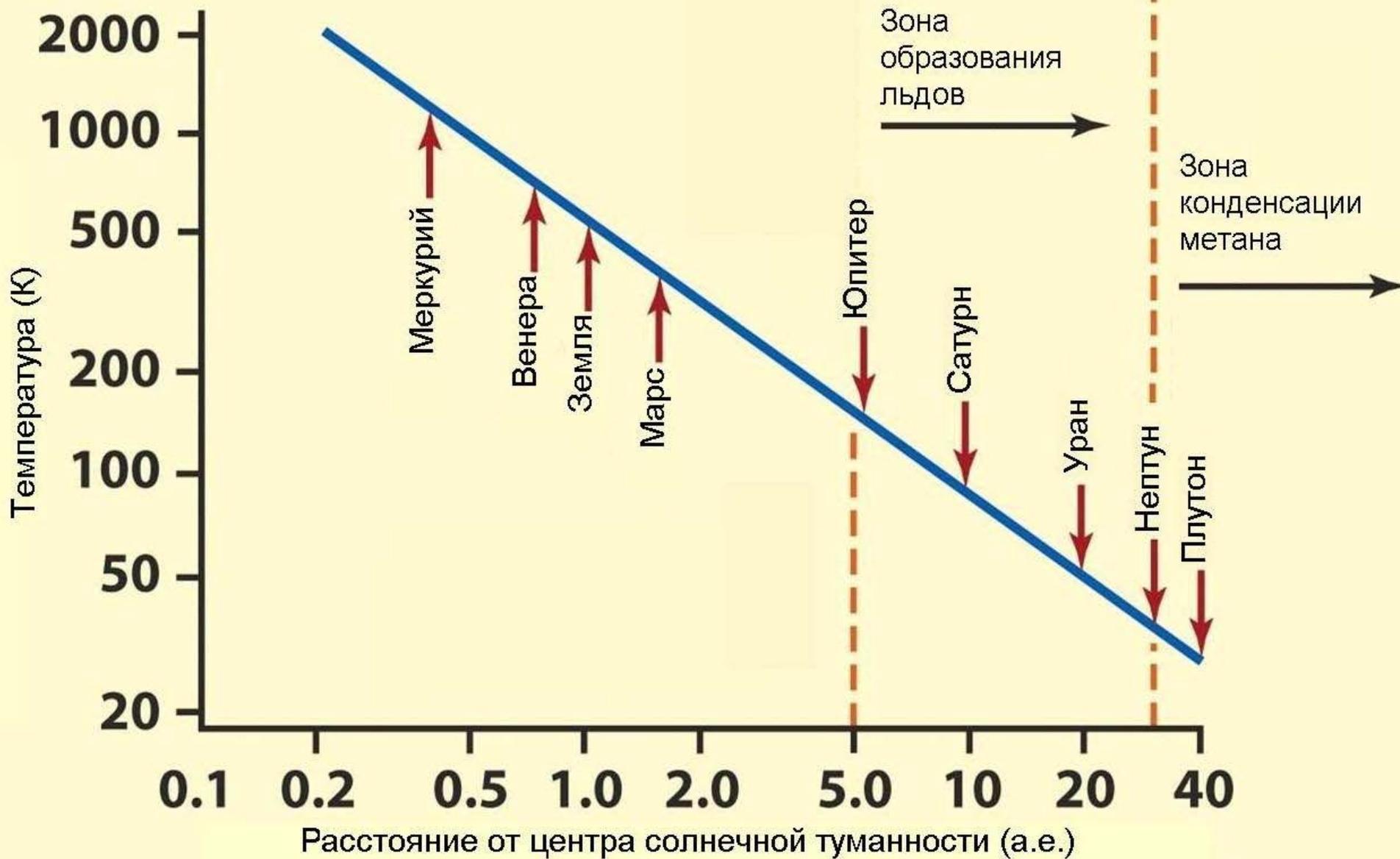


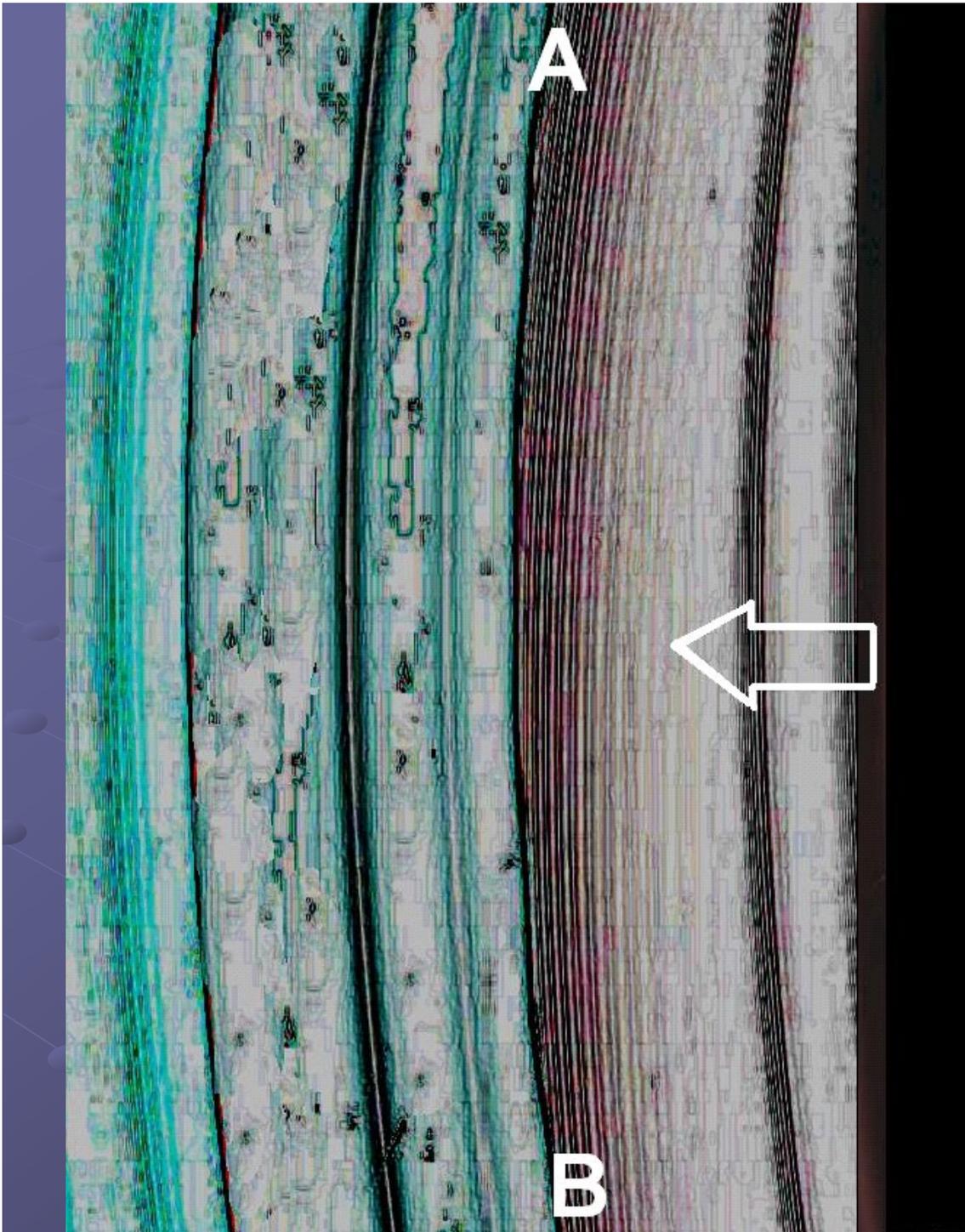
**ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНЕТНЫХ
СИСТЕМ СОГЛАСНО ТЕОРИИ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ
АККРЕЦИИ**

HD 141569









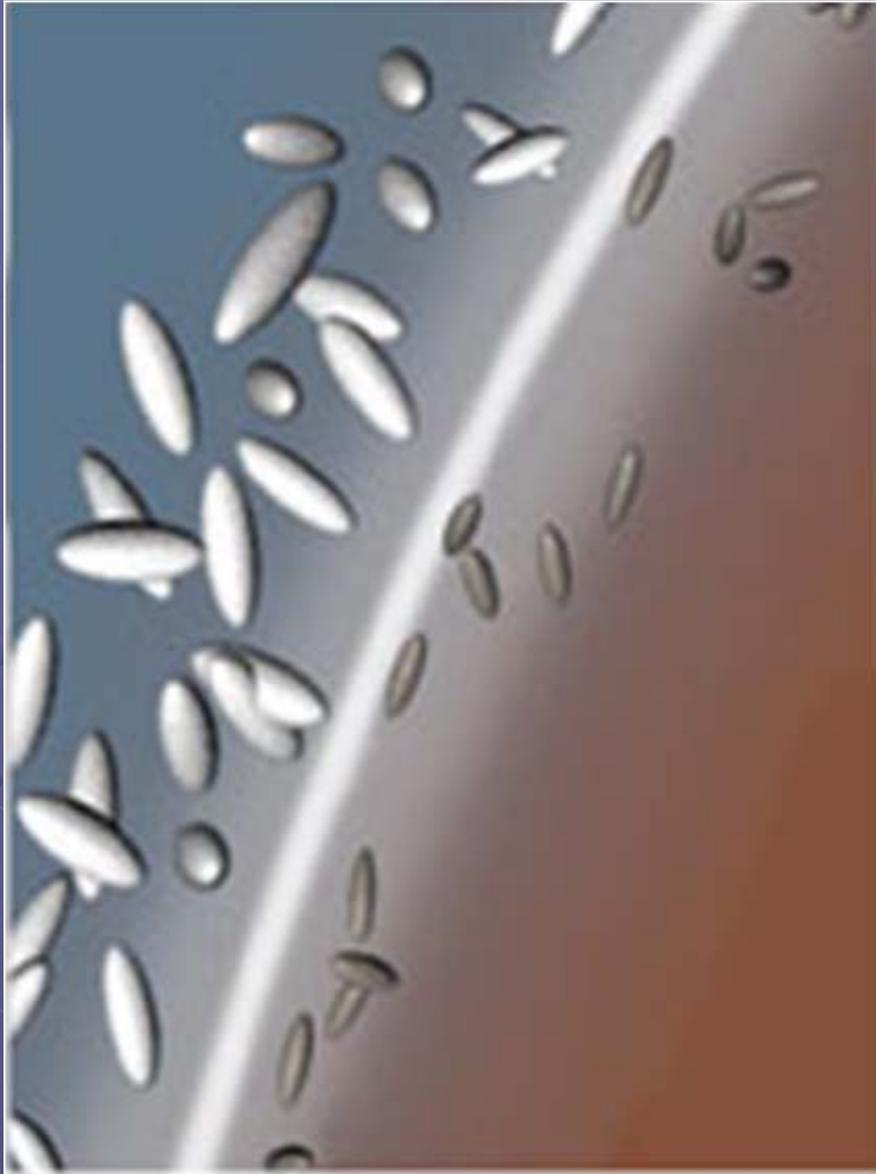
**Отгонка
летучих**



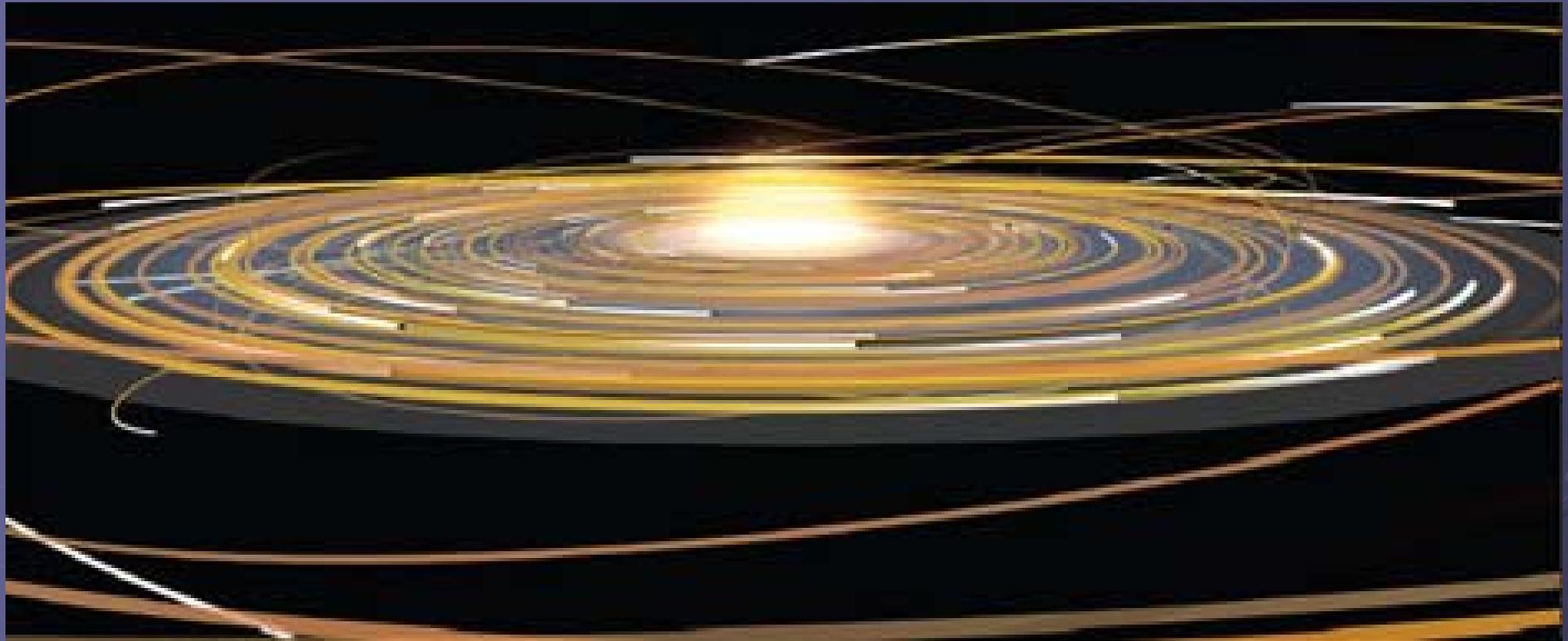
**За линией льдов
летучие
конденсируются
на пылинках,
размеры и масса
которых
увеличиваются.**

**Мелкие частицы движутся с газом,
крупные, более миллиметра, тормозятся
газом и по спирали движутся к звезде.
Орбиты метровых комьев за 1000 лет
сокращаются вдвое.**

Линия льдов



У линии льдов накапливаются летучие. Из-за баланса давления, гравитации и центробежных сил орбитальные скорости меньше кеплеровских, крупные частицы пересекают линию льдов. Здесь возникает разрыв в параметрах газа, после чего торможение частиц прекращается.



**Значительная масса частиц проникает
внутри линии льдов, покрывается влагой или
грязью и слипается, образуя миллиарды
километровых планетезималей. Сталкиваясь
на бесчисленных орбитах, они образуют
зародыши планет с размерами Луны и Земли.**

Некоторые тела растут быстрее других. Они возмущают орбиты прочих тел

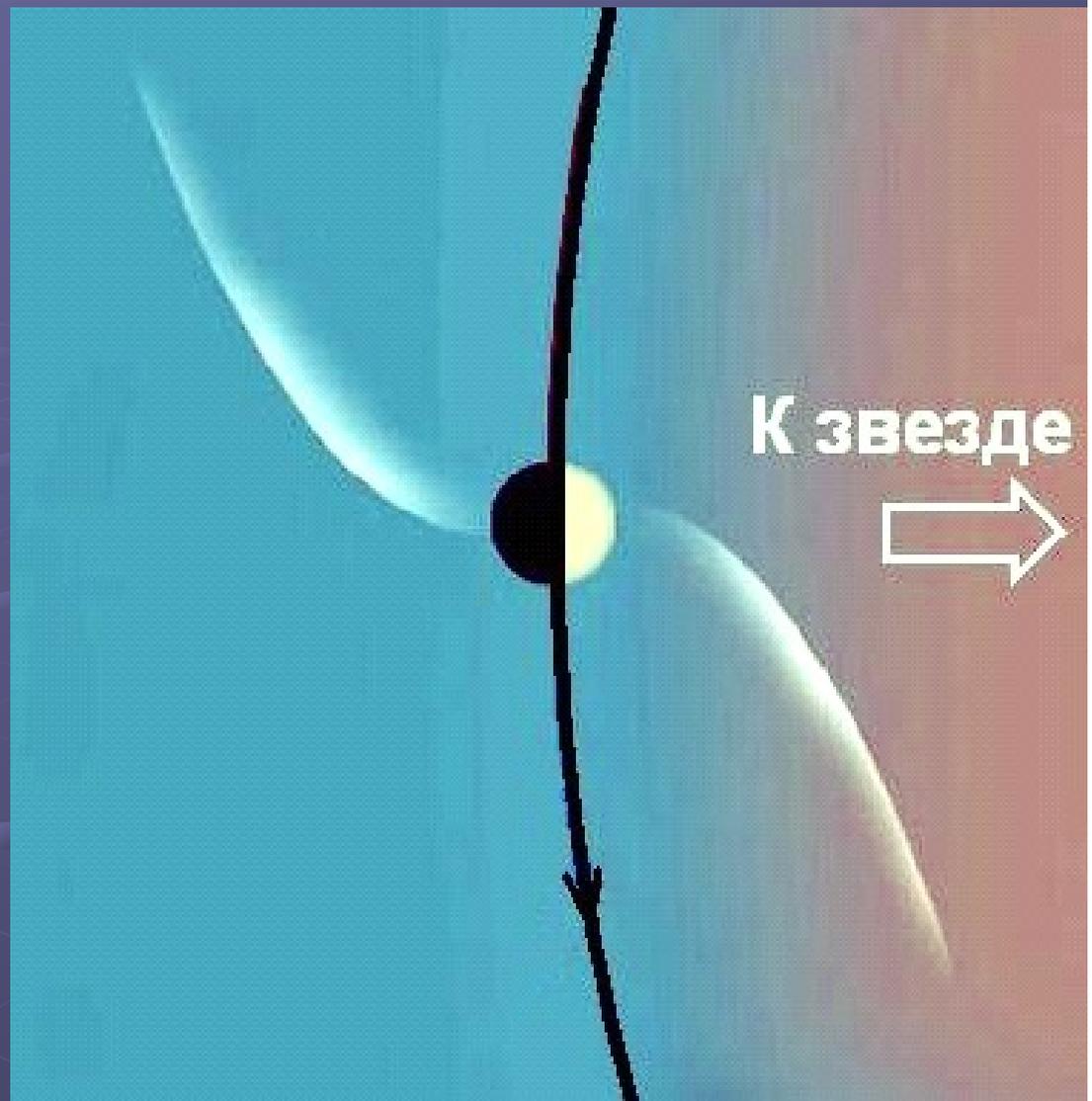


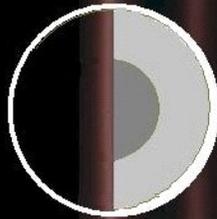
Зародыши вычерпывают строительный материал и перестают расти

Зародыши с орбитой 1 а.е. за 100 тысяч лет достигают своего предела : 0.1 массы Земли. На орбите Юпитера (5 а.е.) 4 массы Земли накапливается за несколько миллионов лет.

Миграция 1 типа

Волны в диске, образованные зародышем, нескомпенсированы и вызывают постепенное понижение его орбиты, вплоть до звезды. Лишь очень немногие тела способны «выжить».





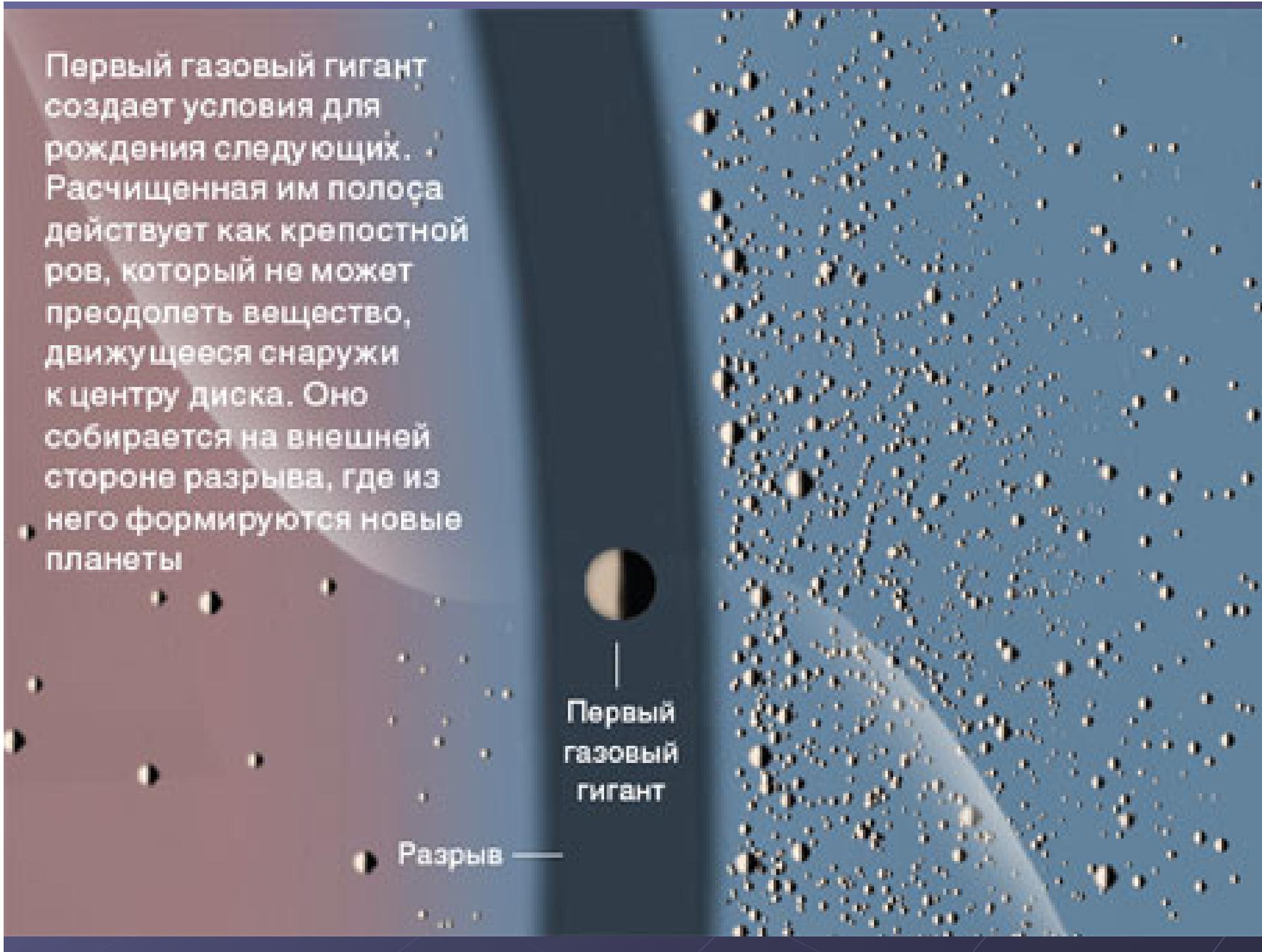
V_{out}

V_{pl}

V_{in}

**Механизм ограничения
роста массивной
планеты-гиганта.**

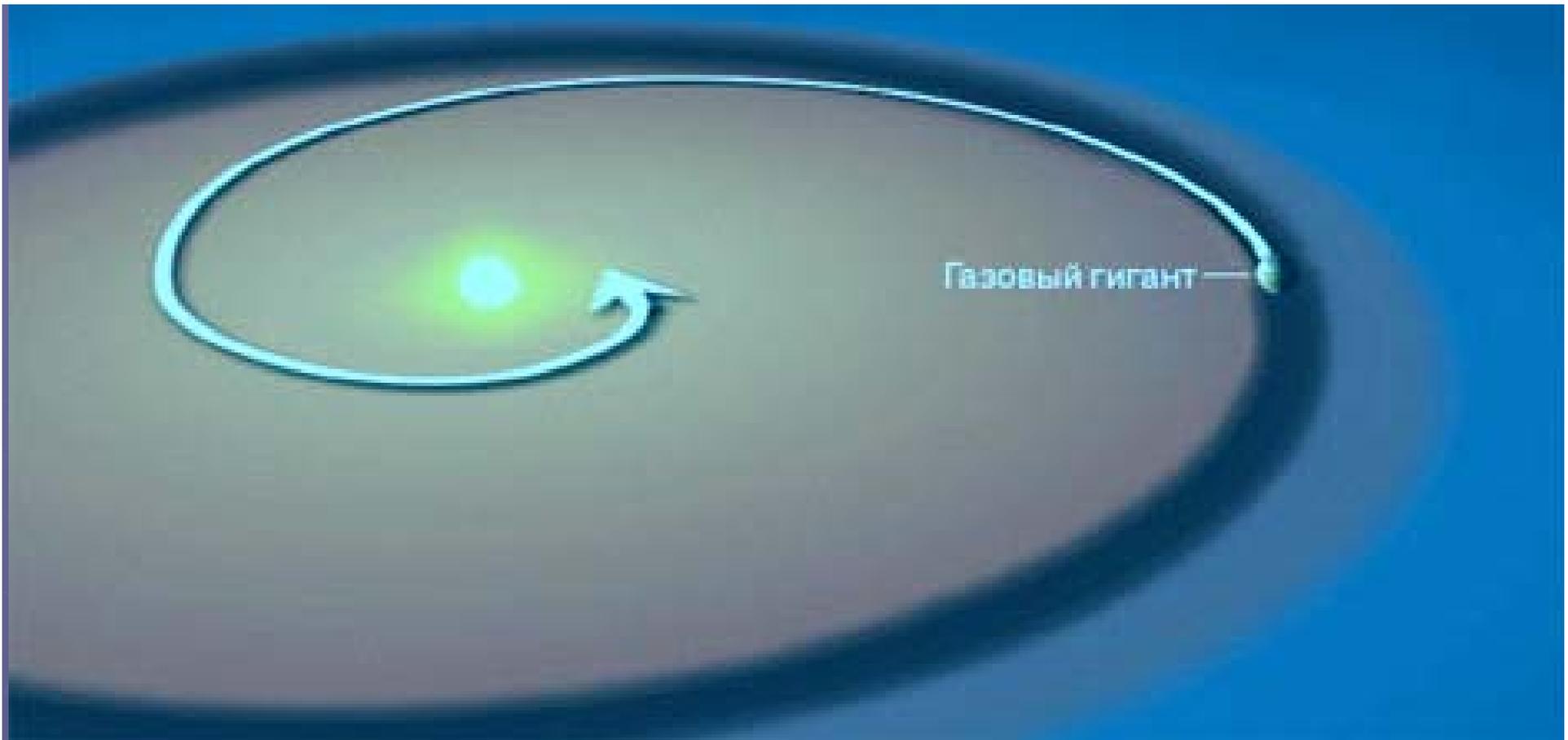
Первый газовый гигант создает условия для рождения следующих. Расчищенная им полоса действует как крепостной ров, который не может преодолеть вещество, движущееся снаружи к центру диска. Оно собирается на внешней стороне разрыва, где из него формируются новые планеты



Первый газовый гигант

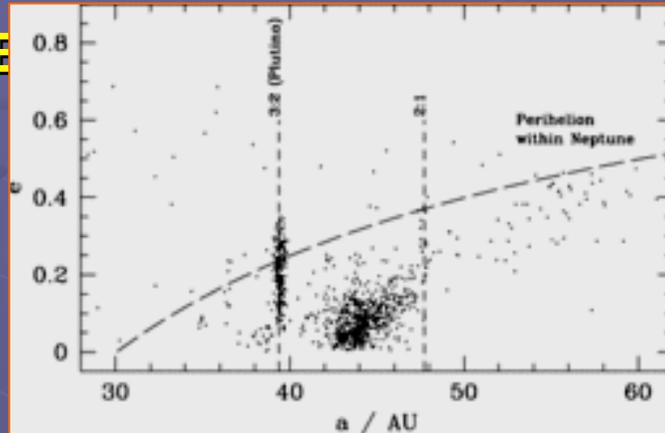
The diagram shows a cross-section of a protoplanetary disk. A vertical gap, labeled 'Разрыв', separates the inner disk from the outer disk. A large planet, labeled 'Первый газовый гигант', is positioned at the inner edge of this gap. The outer disk is filled with numerous small particles, representing the material that is being trapped at the gap's edge. The background is a dark blue space with scattered stars.

Разрыв



**Попытка объяснить миграцию 2 типа:
Остаточный газ постепенно теряет угловой момент и оседает к звезде, увлекая планету. Но почему миграция останавливается на орбитальных расстояниях 0.05-0.15 а.е.?**

По-видимому, **МИГРАЦИЯ** ответственна за появление «горячих юпитеров». Миграция является универсальным механизмом экзопланетных систем, но она отсутствует у планет Солнечной системы. Существовала ли миграция в ранние эпохи?

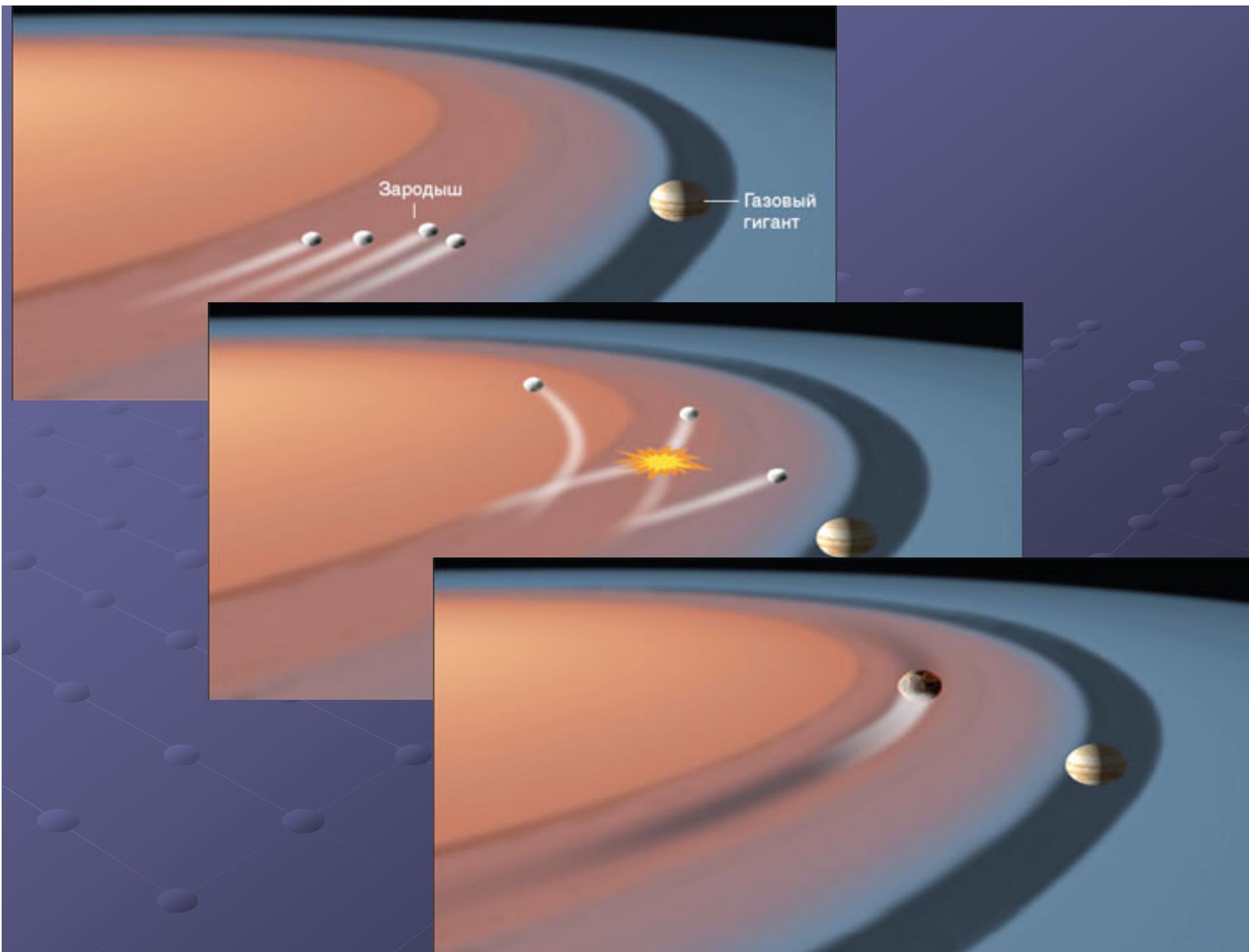


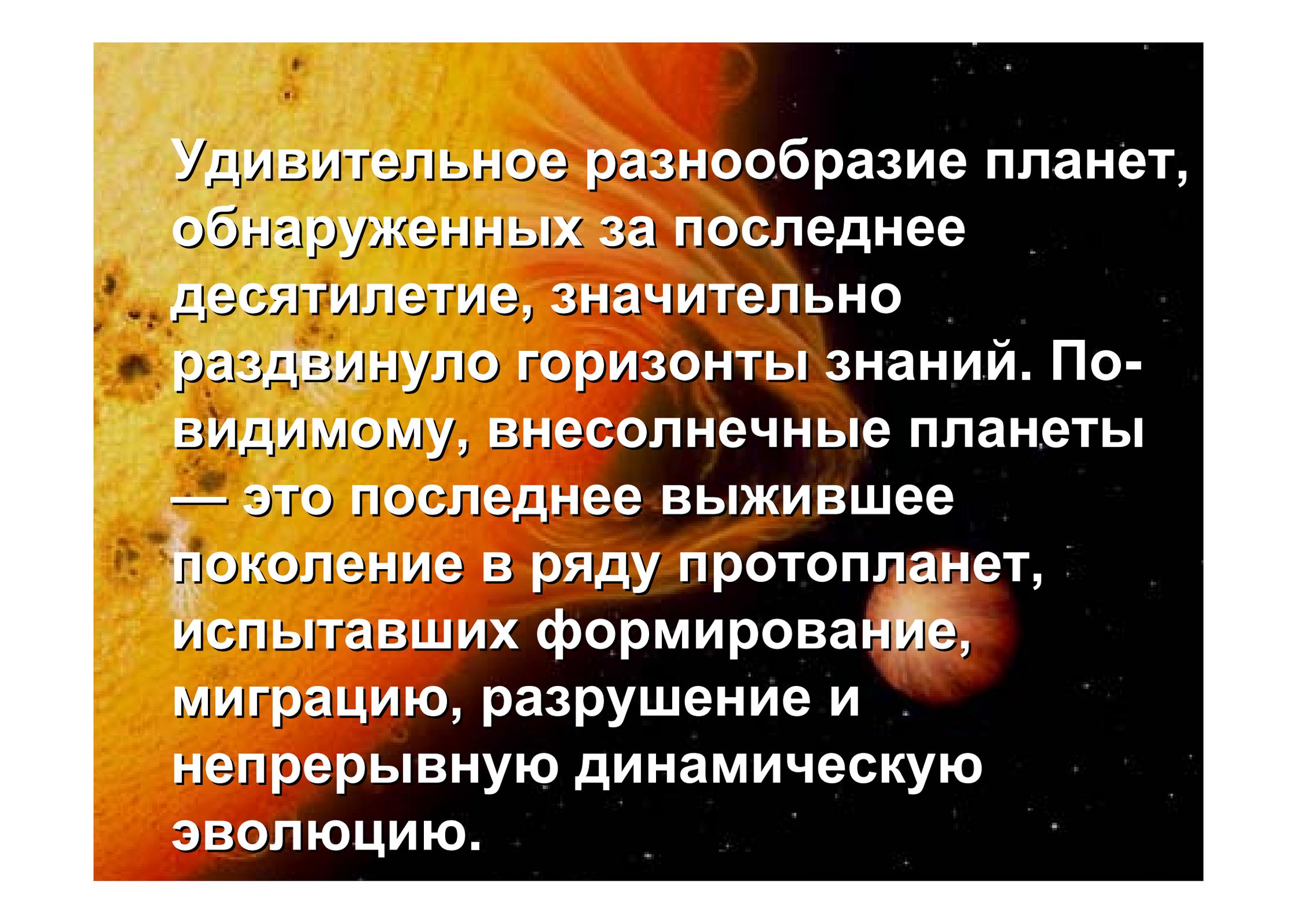
Планеты-гиганты, медленно мигрирующие к звезде по спиральным орбитам с высоким эксцентриситетом



Зона крупных планетезималей и формирующихся небольших планет земного типа, испытывающих катастрофические соударения с мигрирующими гигантами







Удивительное разнообразие планет, обнаруженных за последнее десятилетие, значительно раздвинуло горизонты знаний. По-видимому, внесолнечные планеты — это последнее выжившее поколение в ряду протопланет, испытавших формирование, миграцию, разрушение и непрерывную динамическую эволюцию.

РОЖДЕНИЕ ПЛАНЕТНОЙ СИСТЕМЫ

Основанные на радиоизотопной датировке метеоритов и наблюдениях околозвездных дисков, вехи формирования планетных систем таковы:

- ** от 0 до 100 тыс. лет — в центре диска формируется звезда, и в ней начинается ядерный синтез;**
- ** от 100 тыс. до 2 млн лет — пылинки слипаются в планетные зародыши с массами от лунной до земной;**
- ** 2 млн лет — формируется первый газовый гигант и выметает астероиды первого поколения;**
- ** 3-10 млн лет — газовый гигант стимулирует формирование других гигантов и планет земного типа (к этому времени газа почти не осталось);**
- ** 800 млн лет — перегруппировка планет продолжается около 1 миллиарда лет после своего начала.**

Planet Formation: Theory, Observation, and Experiments. Edited by Hubert Klahr and Wolfgang Brandner. Cambridge University Press, 2006.

ВНЕСОЛНЕЧНЫЕ ПЛАНЕТНЫЕ СИСТЕМЫ Л.Ксанфомалити
Астрономический Вестник 2000, т.34, №6, с. 529-544

**О ПРИРОДЕ ОБЪЕКТА 209458b: ВЫВОДЫ ИЗ СРАВНЕНИЯ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

Л.Ксанфомалити Астрономический Вестник 2004, т.38, №4, с. 344-353

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ И
РОЛЬ МЕТАЛЛИЧНОСТИ ЗВЕЗД В ОБРАЗОВАНИИ ПЛАНЕТ**

Л.Ксанфомалити Астрономический Вестник 2004, т.38, №5, с. 428-439

ТРАНЗИТЫ ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТ

Л.Ксанфомалити. Астрономический вестник 2007, т.41, №6, с. 500-520

ПОИСК ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Л.Ксанфомалити. Астрономический вестник 2007, т.41, №4, с. 330-336

**ВНЕСОЛНЕЧНЫЕ НИЗКООРБИТАЛЬНЫЕ ПЛАНЕТЫ. ДИССИПАЦИЯ ИХ
АТМОСФЕР И ВЕРОЯТНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ.**

Л.Ксанфомалити. Письма в АЖ, 2007. т. 33, №7, с. 550-560.

РАЗМЕРЫ ГИГАНТСКИХ ЭКЗОПЛАНЕТ, ПОДОБНЫХ HD 209458b определяют, в основном, три различных процесса:

В случае высоких давлений, освобождающиеся электроны образуют вырожденный газ. Его давление зависит от плотности как

$$p \propto \rho^{5/3}; \quad \text{а давление идеального газа} \quad p \propto \rho T.$$

В случае коричневых карликов (на границе термоядерной реакции дейтерия) давление вырожденного газа превосходит давление идеального газа; зависимость гравитационного потенциала от радиуса:

$$\gamma M_p^2/R_p \propto R_p^3 \rho^{5/3}, \quad \text{а радиус планеты} \quad R_p \propto 1/M_p^{1/3},$$

С ростом массы планеты-гиганта ее радиус будет уменьшаться, а не расти. У коричневых карликов (и даже у звезд малой массы) радиус может быть даже меньшим, чем у менее массивной планеты-гиганта.

У более горячих звезд малой массы, исходя из примерного равновесия между гравитационным потенциалом и тепловой энергией:

$$\gamma M_s^2/R_s \sim (M_s/m_n) k T_n, \quad \text{радиус} \quad R_s \propto M_s \quad \text{и ср. плотность} \quad \rho_s \propto 1/M_s^2.$$