



Атмосферы планет в Солнечной и внесолнечных планетных системах

Валерий И. Шематович

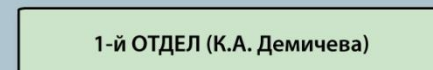
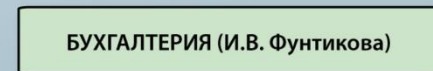
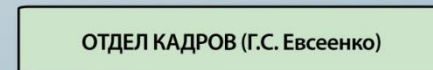
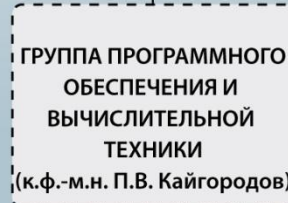
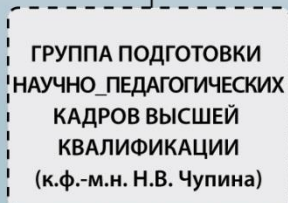
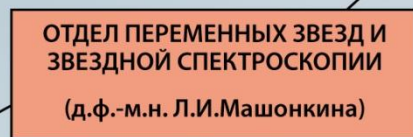
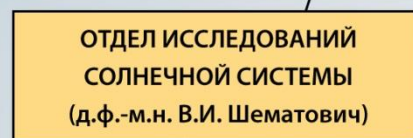
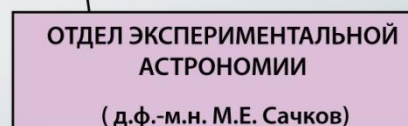
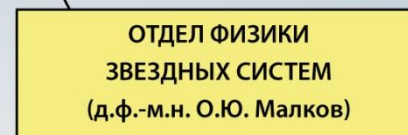
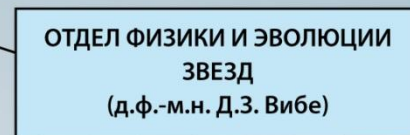
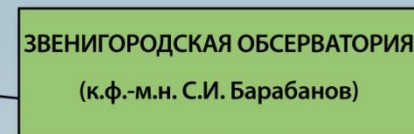
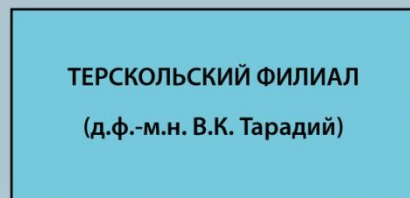
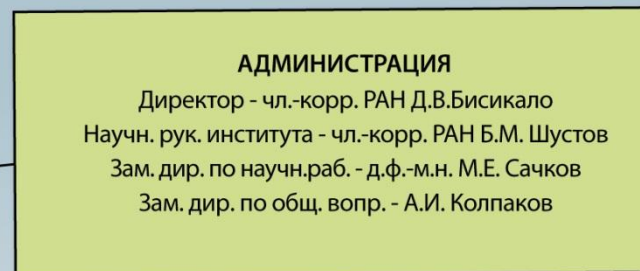
Институт астрономии РАН, Москва

**Астролицей МФТИ
23 марта 2017 г.**



Институт астрономии РАН (ИНАСАН)





Основные направления деятельности Института

- физика звездных атмосфер;
- теоретические проблемы физики и эволюции звезд, звездных систем и межзвездной среды;
- исследование нестационарных звезд;
- физика гравитирующих звездных и планетных систем;
- исследование экзопланет;
- информационное обеспечение астрономических исследований (банки астрономических данных);
- теоретические и прикладные проблемы астрометрии, геодинамики и геофизики;
- методы наблюдений искусственных и естественных небесных тел;
- космические исследования.

Общие сведения о сотрудниках

- Общая численность - 146
 - Москва - 92
 - Звенигородская обсерватория - 21
 - Терскольский филиал - 33
- Число научных сотрудников - 82
 - Из них: докторов наук - 27 (в т.ч., 2 – члена-корреспондента РАН)
 - кандидатов наук - 40
- Число аспирантов - 12
- Средний возраст научных сотрудников – 49 лет.

Научно- экспериментальная база



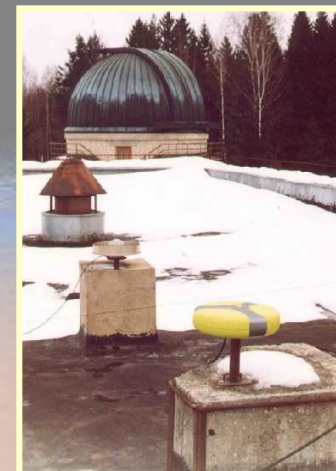
Камера БАУ



СБГ,
ЛД-3



Цейсс-600



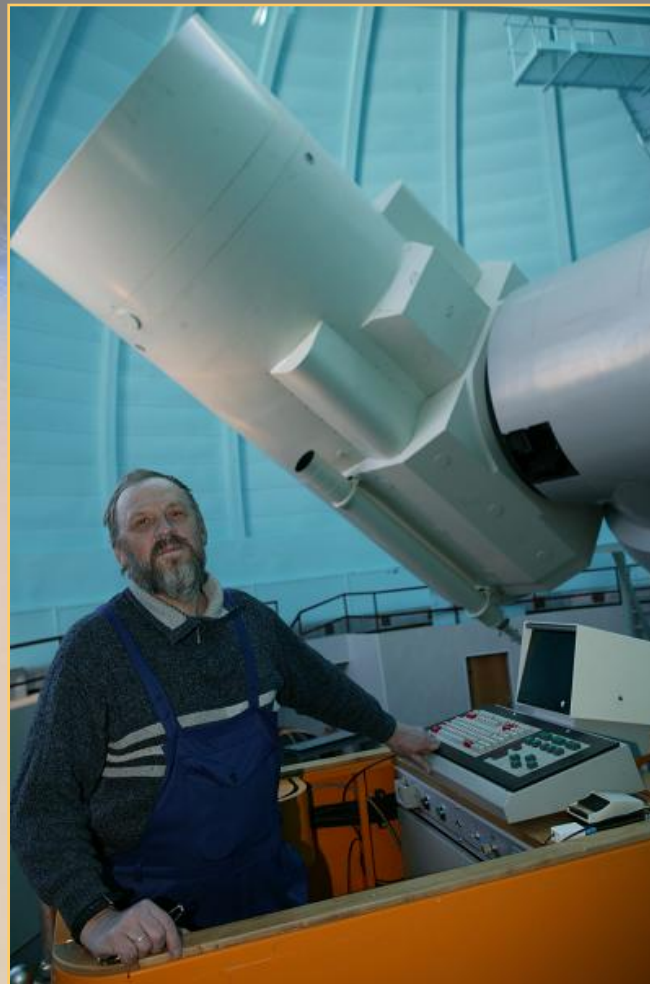
GPS



Meade 16" – главный инструмент
«народной обсерватории»



Терскол: Цейсс-2000

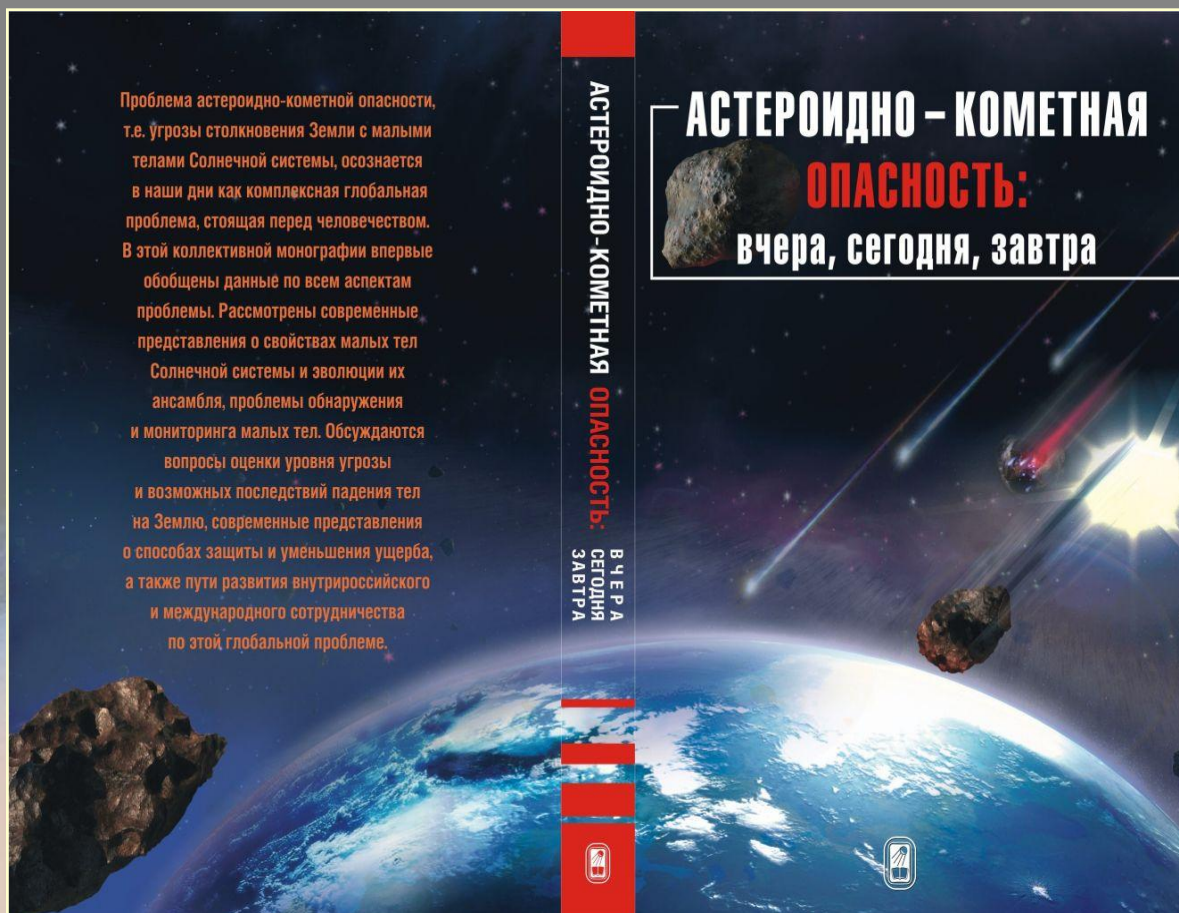


к.ф.м.н. А.В.Сергеев на
телескопе Цейсс-2000



Проекты

Разработка комплексного подхода к решению проблемы астероидно-кометной опасности



Б.М.Шустов,
Л.В.Рыхлова,
С.И.Барабанов,
В.В.Емельяненко,
Е.С.Баканас,
С.А.Нароенков,
*совместно с научными
сотрудниками ГАО
РАН, ИПА РАН, ИКИ
РАН, ИДГ РАН, ИСЗФ
СО РАН, ГАИШ МГУ и
экспертами
предприятий
космической отрасли*



Проект Спектр-УФ (Всемирная космическая обсерватория - УФ)

Телескоп: T-170M, 1.7 m, f/10, Россия.

Спектрографы: WUVS

(UVES + VUVES), $R \approx 5-6 \times 10^4$;

LSS, $R \approx 1000$, Россия

Камеры: ISSIS,

*$\lambda\lambda$ 110 - 340 нм, 2 УФ камеры (в УФ и в
видимом диапазонах), Испания.*

Платформа: «Навигатор», Россия.

Орбита: геосинхронная $i=51.4^\circ$

*Носитель, запуск: “ZENIT 2SB”, год запуска -
2021, Россия,*

Наземный сегмент: *Россия, Испания.*

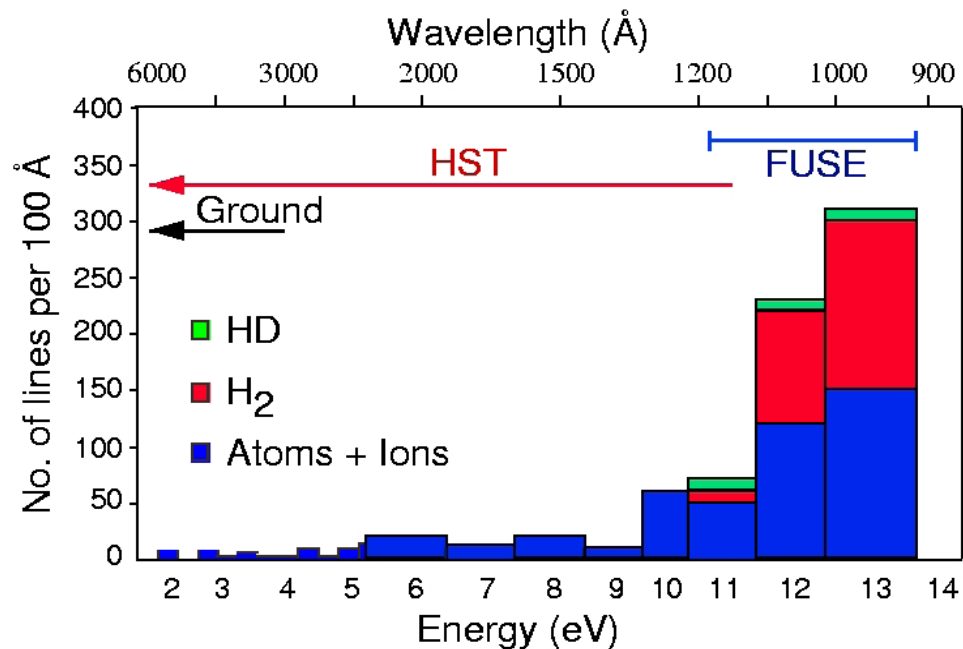


Макет для испытаний
телескопа T-170M



Почему так важны наблюдения в УФ?

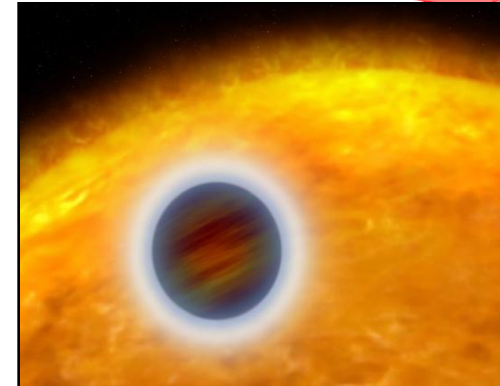
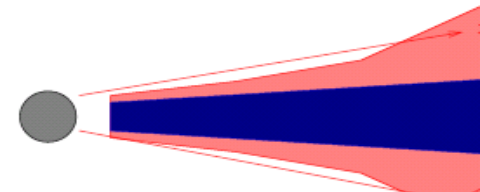
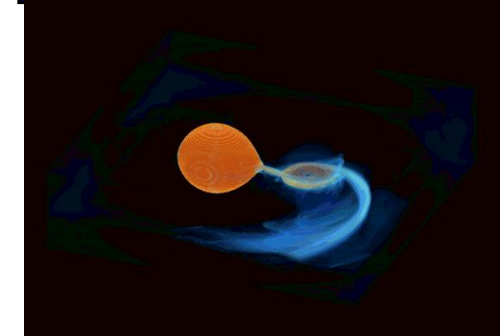
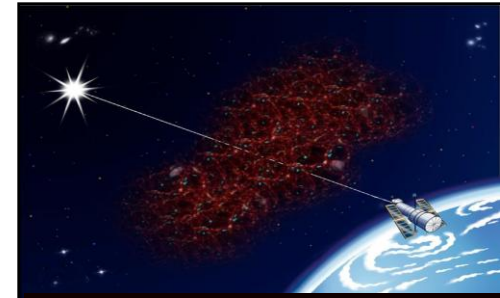
1. Большинство резонансных линий ионов, атомов и молекул (H_2 , OH, или CO: наиболее чувствительных к гигантским молекулярным облакам), важных для астрофизиков, находятся УФ участке спектра.
2. Исследование плазмы в широком диапазоне температур от $3,000K$ до $300,000K$.





Основные научные задачи ВКО-УФ

- @ Исследование эволюции Вселенной (в т.ч. истории реионизации Вселенной, изучение химической эволюции Вселенной, поиск скрытого диффузного барионного вещества);
- @ Физика аккреции и истечений (the astronomical engines);
- @ Изучение ранней эволюции звезд типа Солнца и протопланетных дисков;
- @ Изучение физико-химического состава планетных атмосфер и астрохимия в поле УФ излучения.



Резюме доклада:

На заре первого открытия экзопланет в середине 1990-х годов мало кто верил, что наблюдения атмосфер экзопланет когда-либо будут возможны. После открытия в 2002 году при помощи космического телескопа им. Хаббла атмосферы у транзитной экзопланеты, многие скептики оценили это лишь как одноразовый успех (один объект, один метод). Тем не менее, в настоящее время поле исследований атмосфер экзопланет твердо установлено, благодаря более чем нескольким десяткам наблюдений атмосфер экзопланет. Это позволило расширить наши представления об атмосферах экзопланет:

- состав атмосферы может изменяться в зависимости от того, где и когда образовалась планета, т.е., позволяет проследить историю образования планет;
- будущие наземные и космические телескопы позволят исследовать присутствие атмосферных биомаркеров в потенциально возможных обитаемых зонах вокруг других звезд, т.е., изучение атмосфер является также и инструментом для поиска внеземной жизни.



Конечная цель исследований атмосфер экзопланет состоит в том, чтобы ответить на загадочный и древний вопрос - одиноким ли мы во Вселенной?

Содержание доклада:

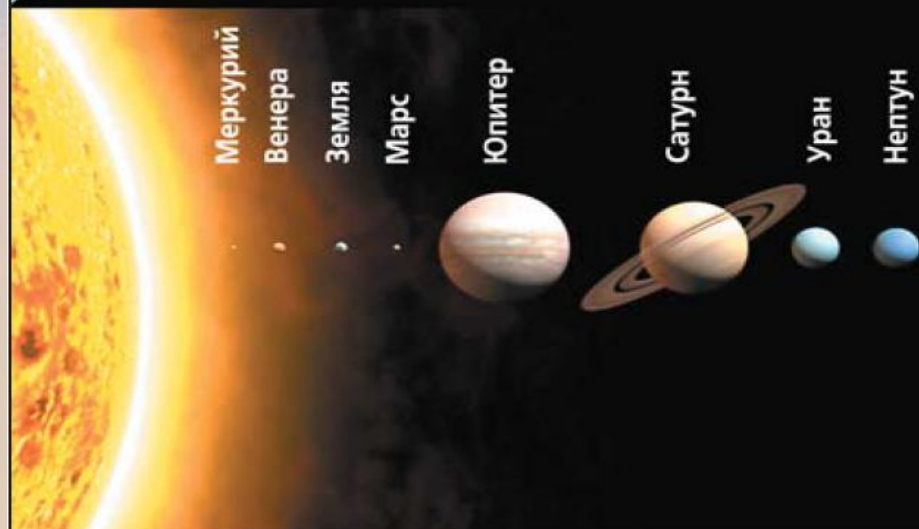
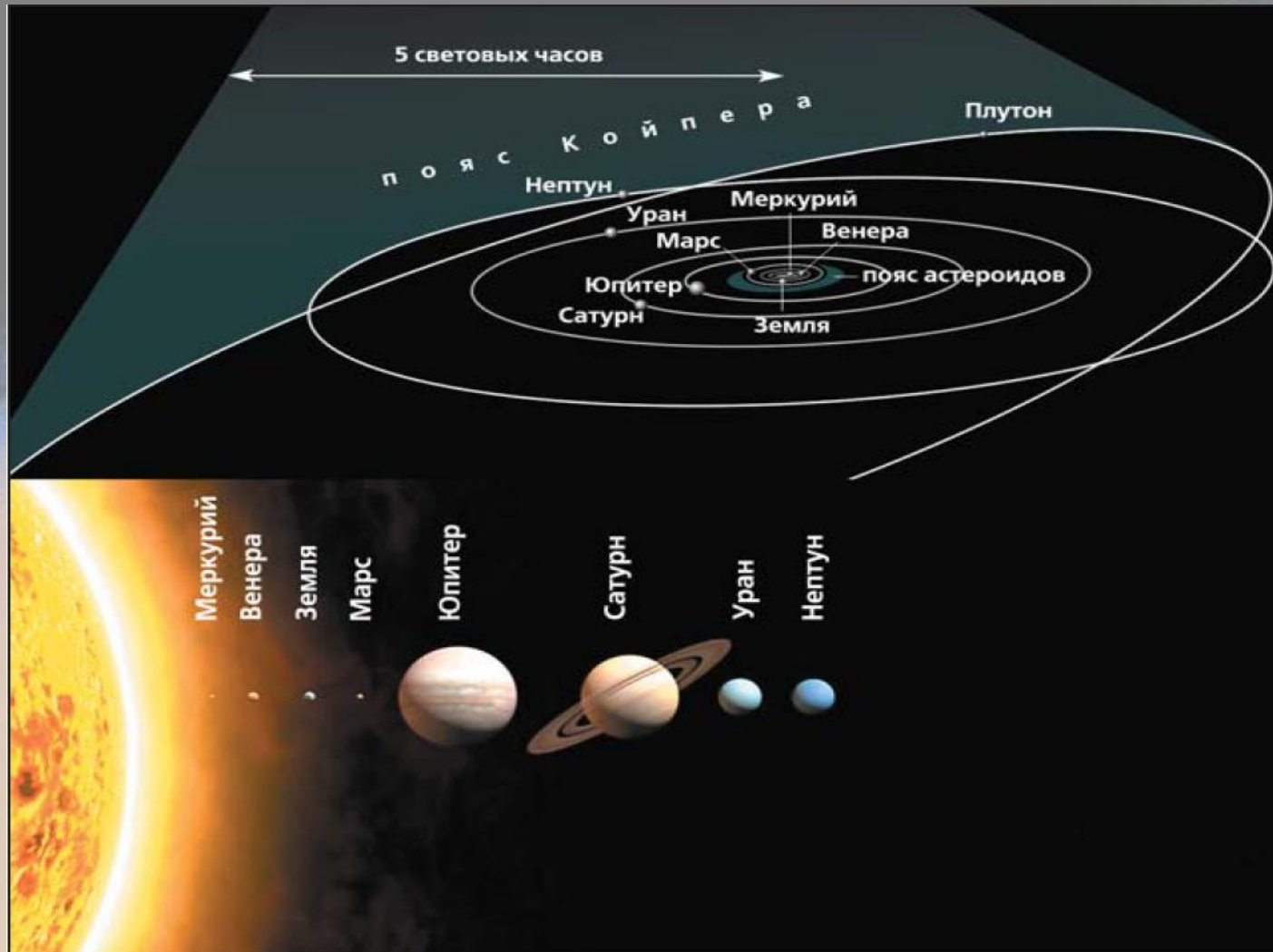
- **Планеты в Солнечной системе и во внесолнечных системах**
- **Атмосферы внесолнечных планет: методы наблюдений и статистика**
- **Атмосферы внесолнечных планет-гигантов - горячих юпитеров**
- **Атмосферы планет-океанов – горячих нептонов**
- **Атмосферы супер-земель**
- **Заключение**

Тема доклада неразрывно связана с решением важнейших фундаментальных задач физики космоса:

- **Как образовалась Солнечная система?**
- **Как возникла жизнь на Земле?**

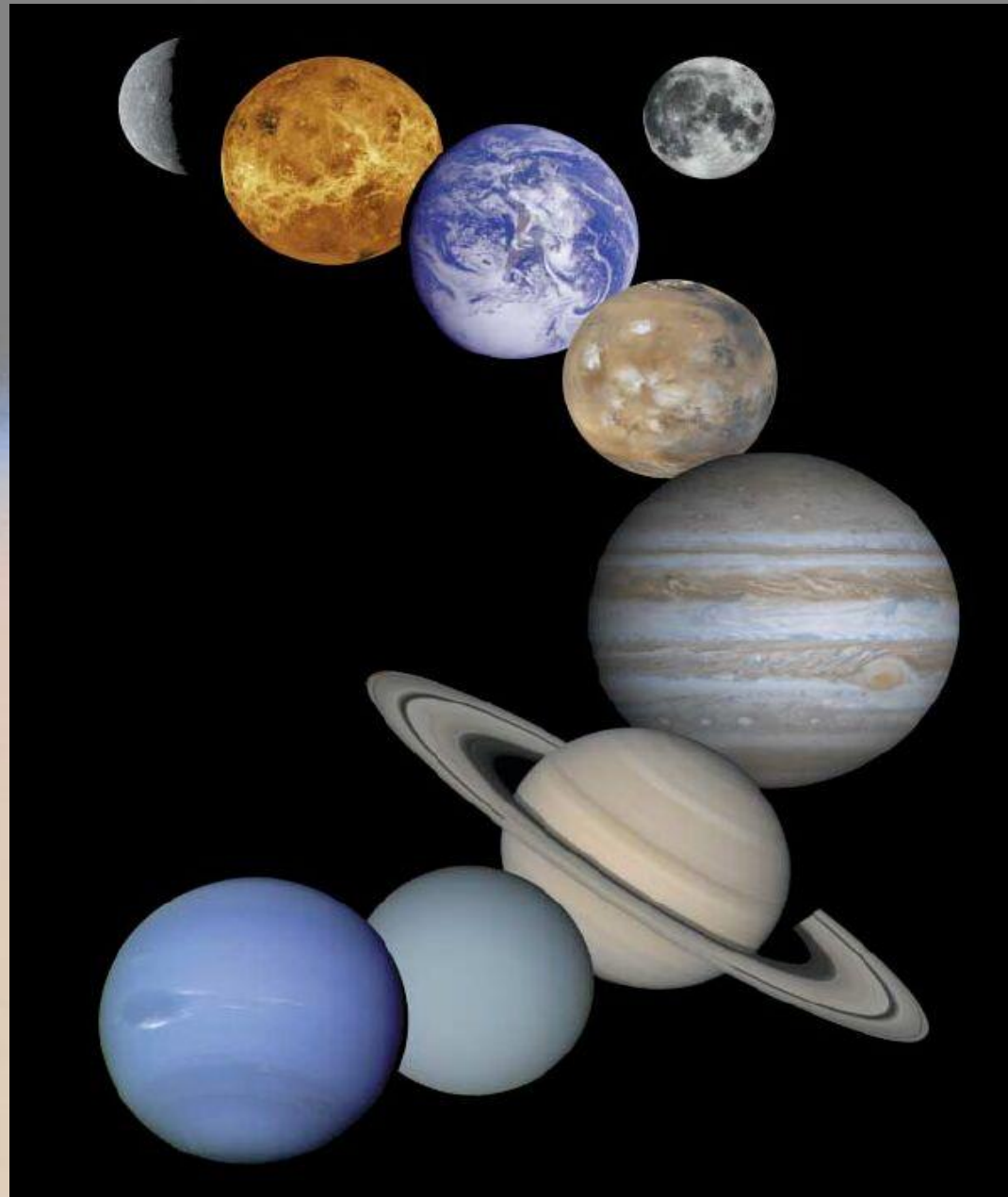
Раздел 1а:

Планеты в Солнечной системе и во внесолнечных планетных системах



Планеты в Солнечной системе

**Меркурий – BepiColombo,
MPO;
Венера – VEX;
Марс – MEX, MRO,
MAVEN, ЭкзоМарс;
Система Юпитера – JUNO,
...;
Система Сатурна –
CASSINI;
Плутон-Харон и
объекты пояса Койпера –
New Horizons;
Кометы - Rosetta**



Луны в Солнечной системе

Ио

Европа

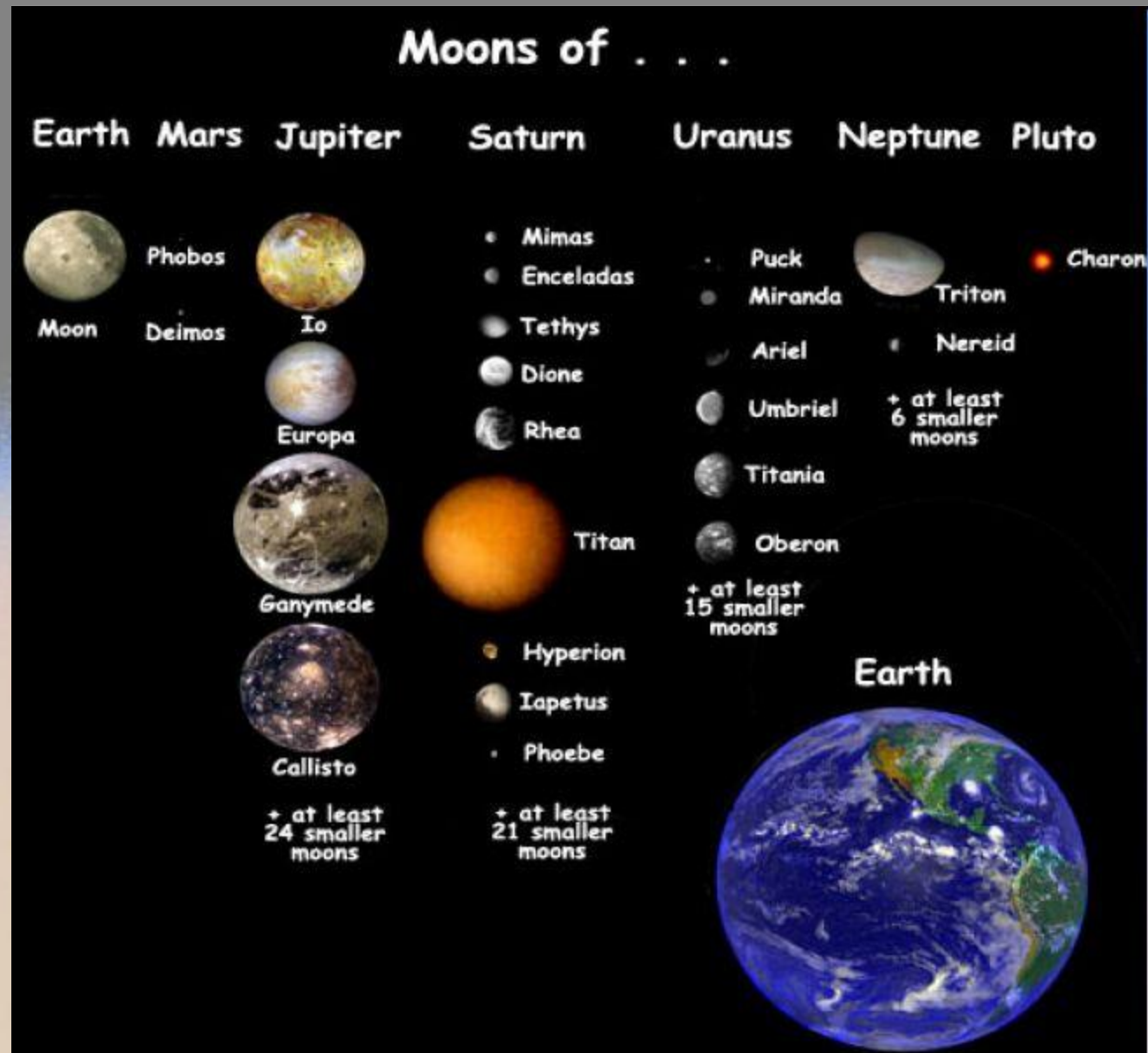
Ганимед

Энцелад

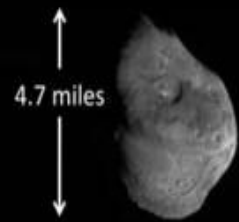
Титан

Харон

...



Малые тела в Солнечной системе



9P/Tempel 1

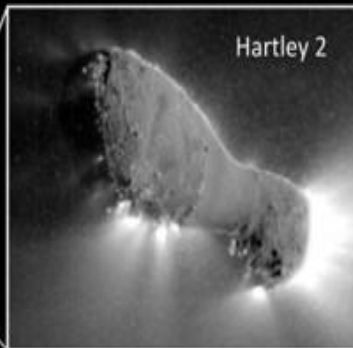


Borrelly

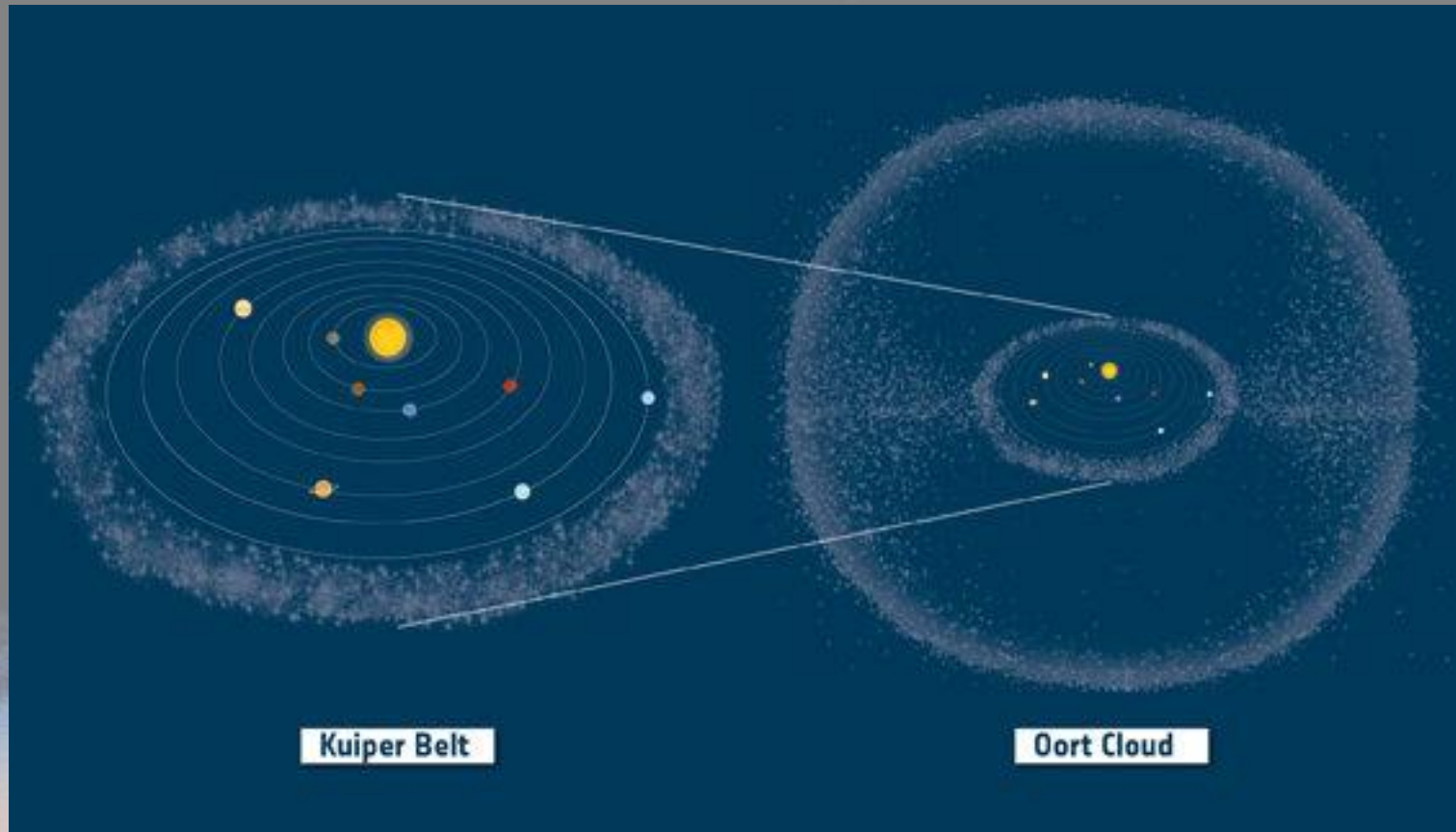


Wild 2

1.25 miles

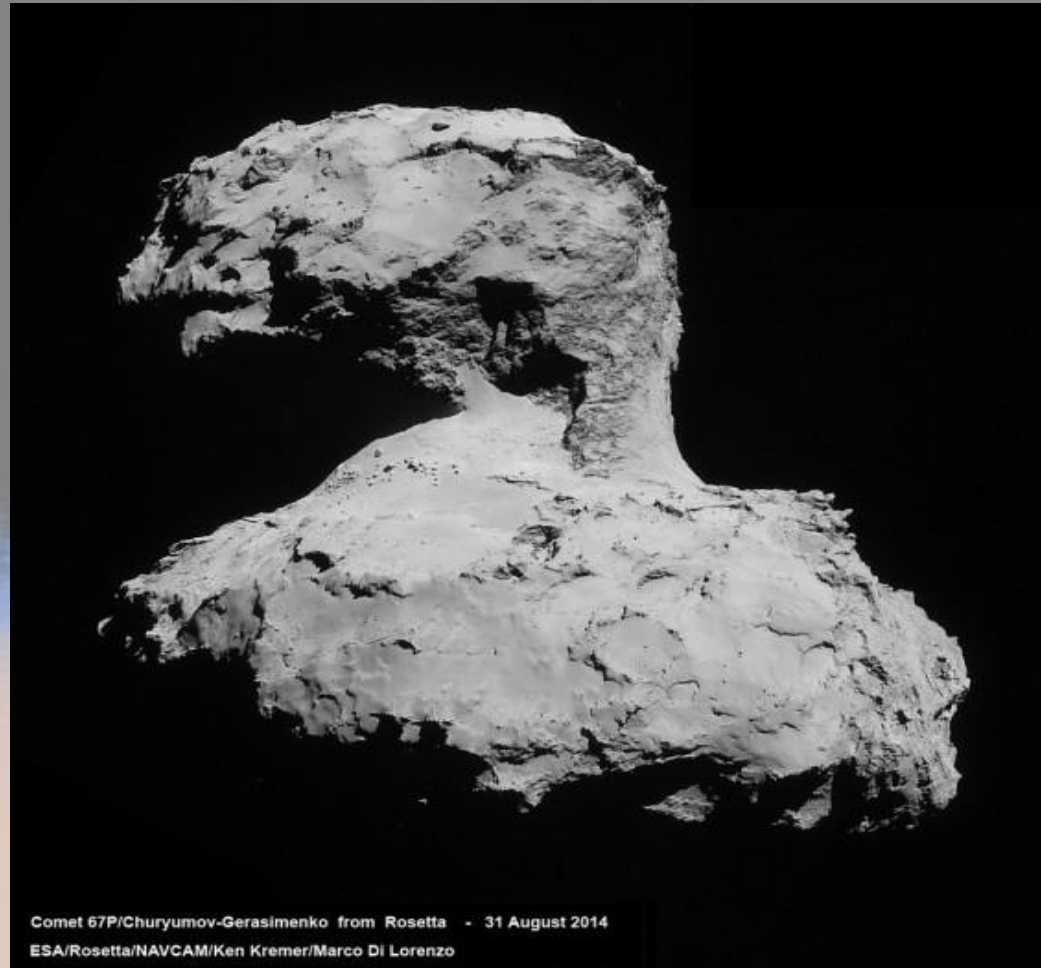


Области образования комет



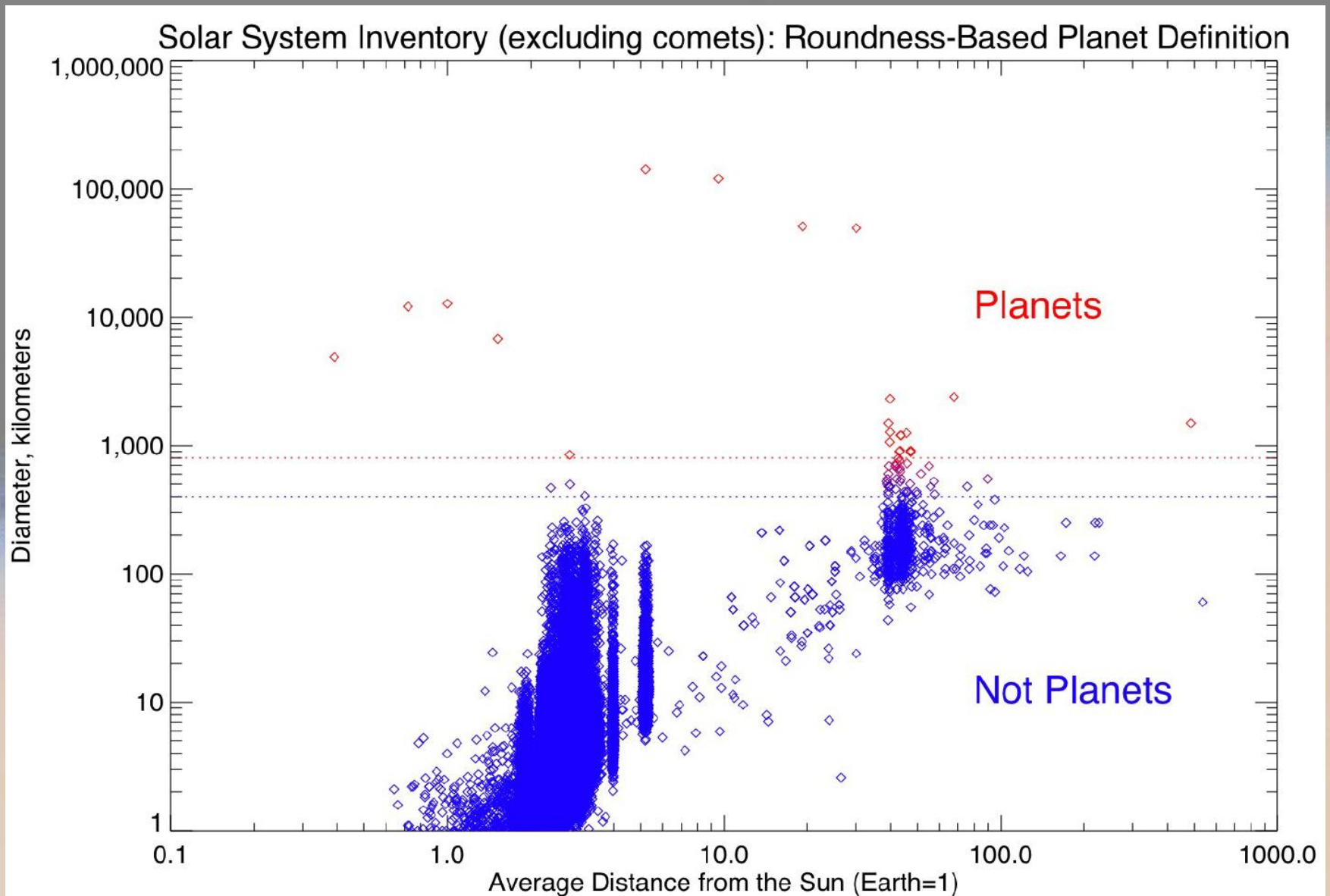
Резервуары кометных ядер – периферийные области:
облако Оорта ($> 50\,000$ а.е.), пояс Койпера (30 – 50 а.е.).
Комета 1P (Галлея) прибыла вероятно из облака Оорта, а
комета 67P (Чурюмова-Герасименко) – из пояса Койпера.

Первые результаты КА ESA ROSETTA



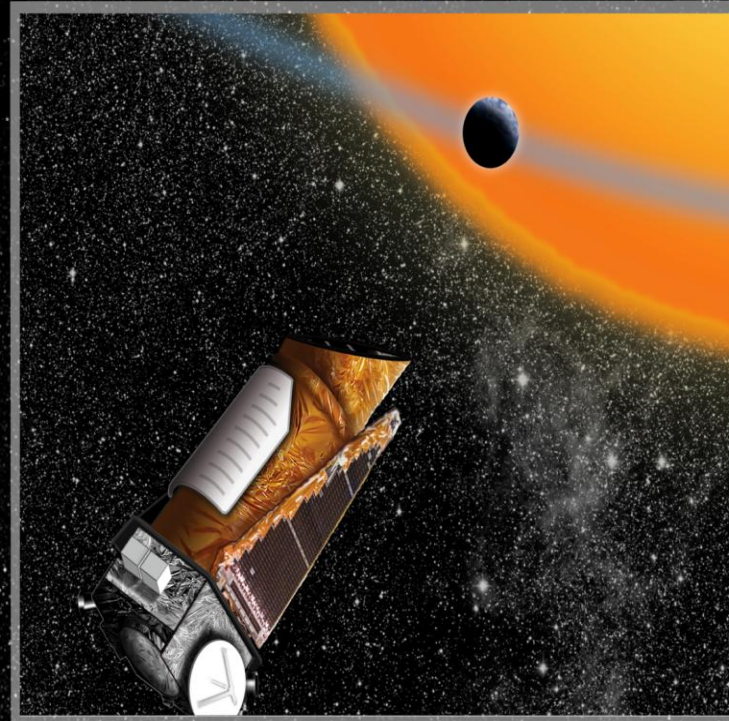
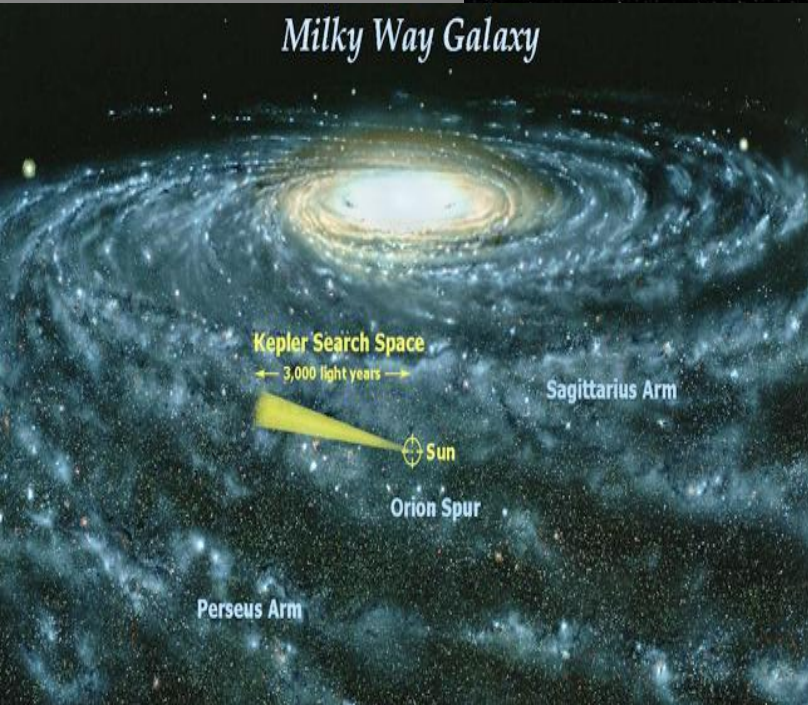
Мозаика из 4-х снимков навигационной камеры Navcam, полученная на расстоянии 61 км от ядра кометы 31 августа 2014 г. Поперечный размер ядра около 4 км.

Небесные тела в Солнечной системе

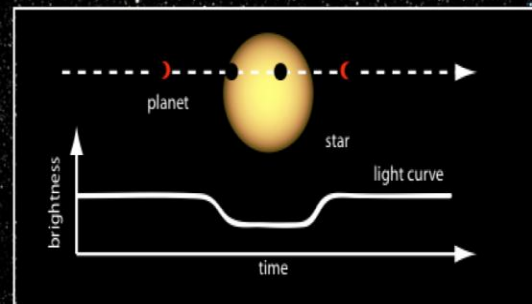


Kepler Mission

The determination of the frequency of Earth-size & larger planets in and near the habitable zone of solar-like stars

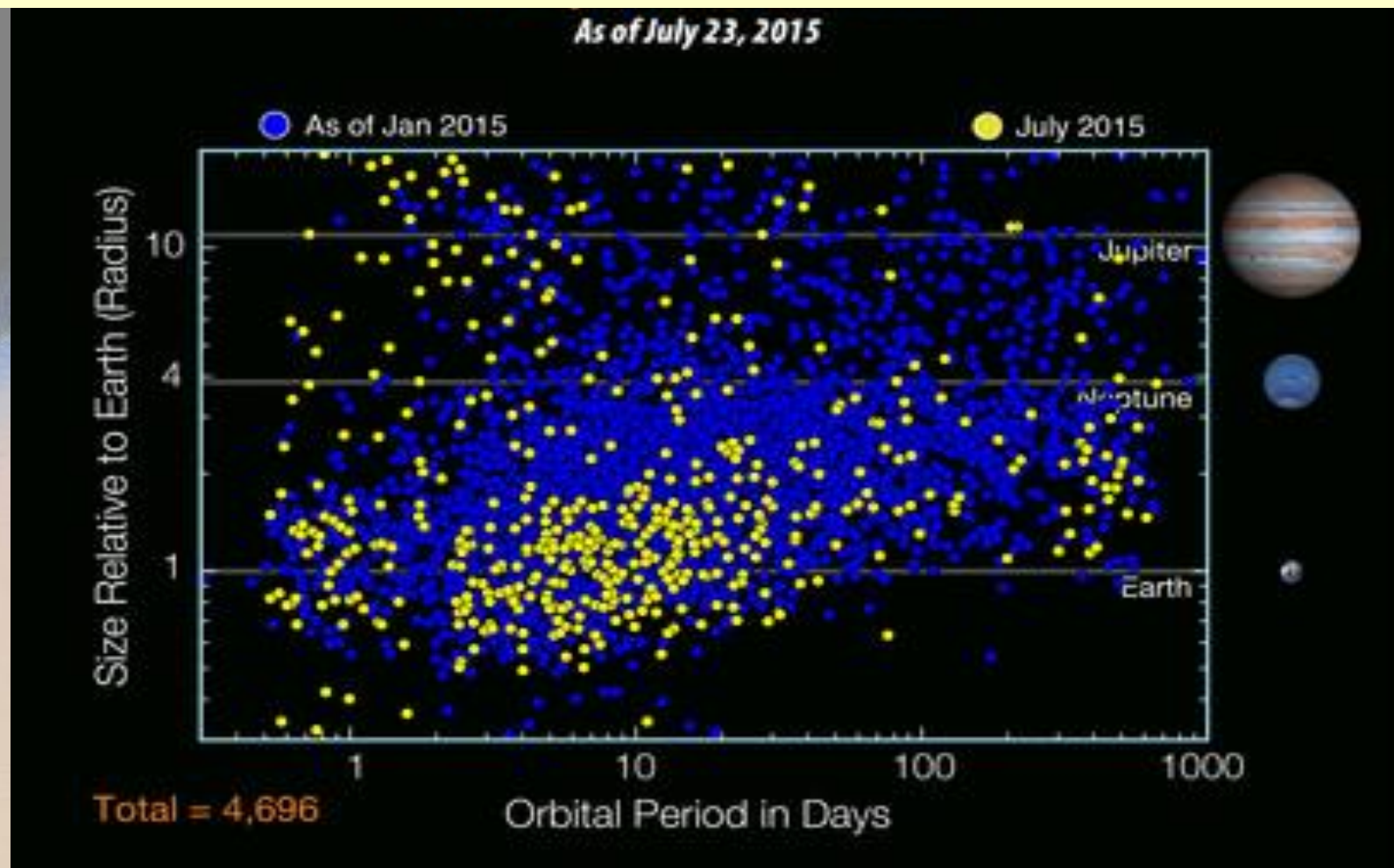


Launch: March 2009
End of normal mission - (3-wheels mode): May 2013
Extended mission: K2 (2014-2016)
Data: Q0-Q17 (~4 years), Target : ~150, 000



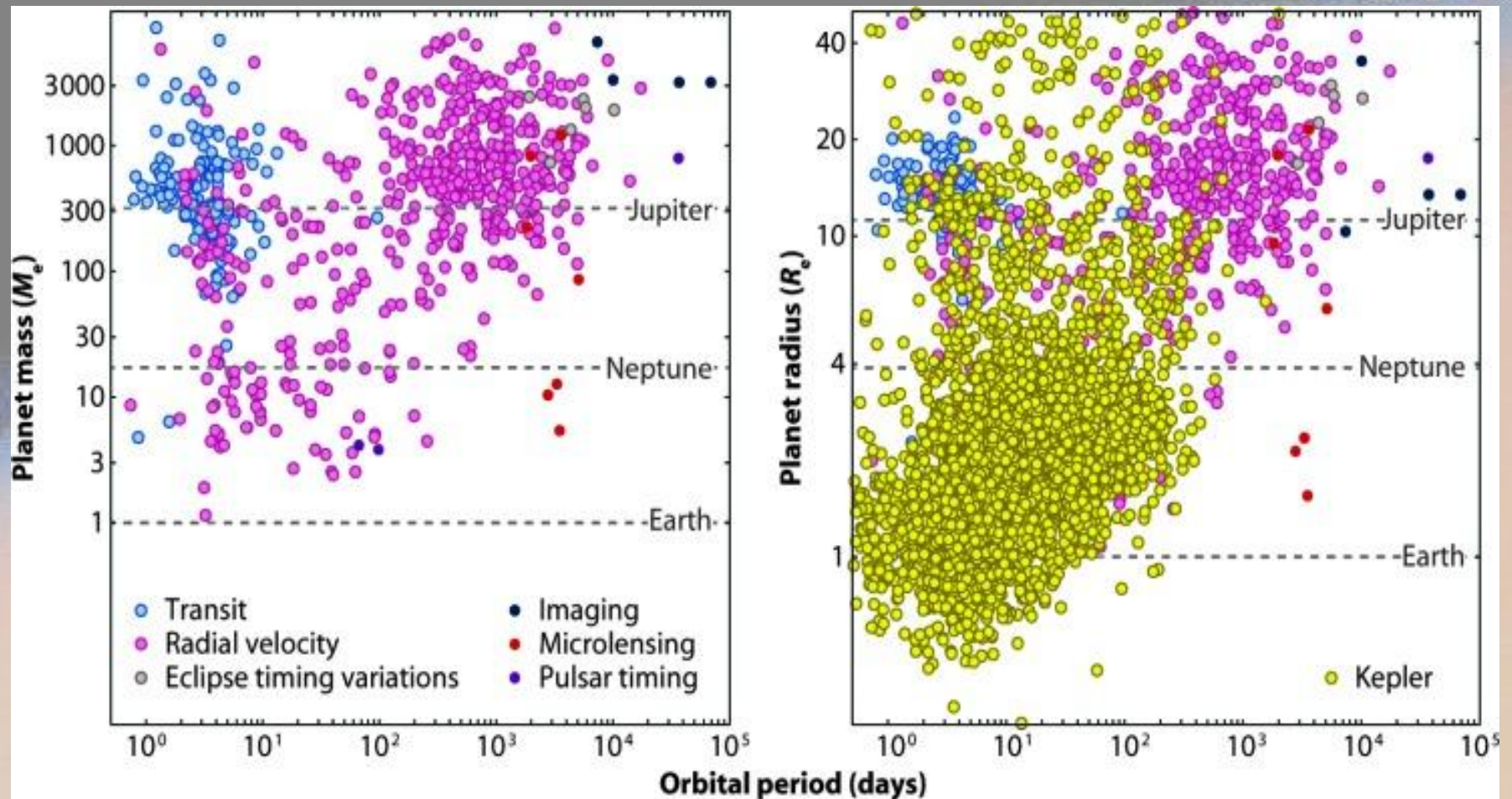
Внесолнечные планеты:

Распределение кандидатов в планеты по данным телескопа Kepler. Показаны орбитальный период в земных днях и размер планеты в радиусах Земли NASA. Сейчас около 3600 экзопланет из более 5 тыс. кандидатов в экзопланеты



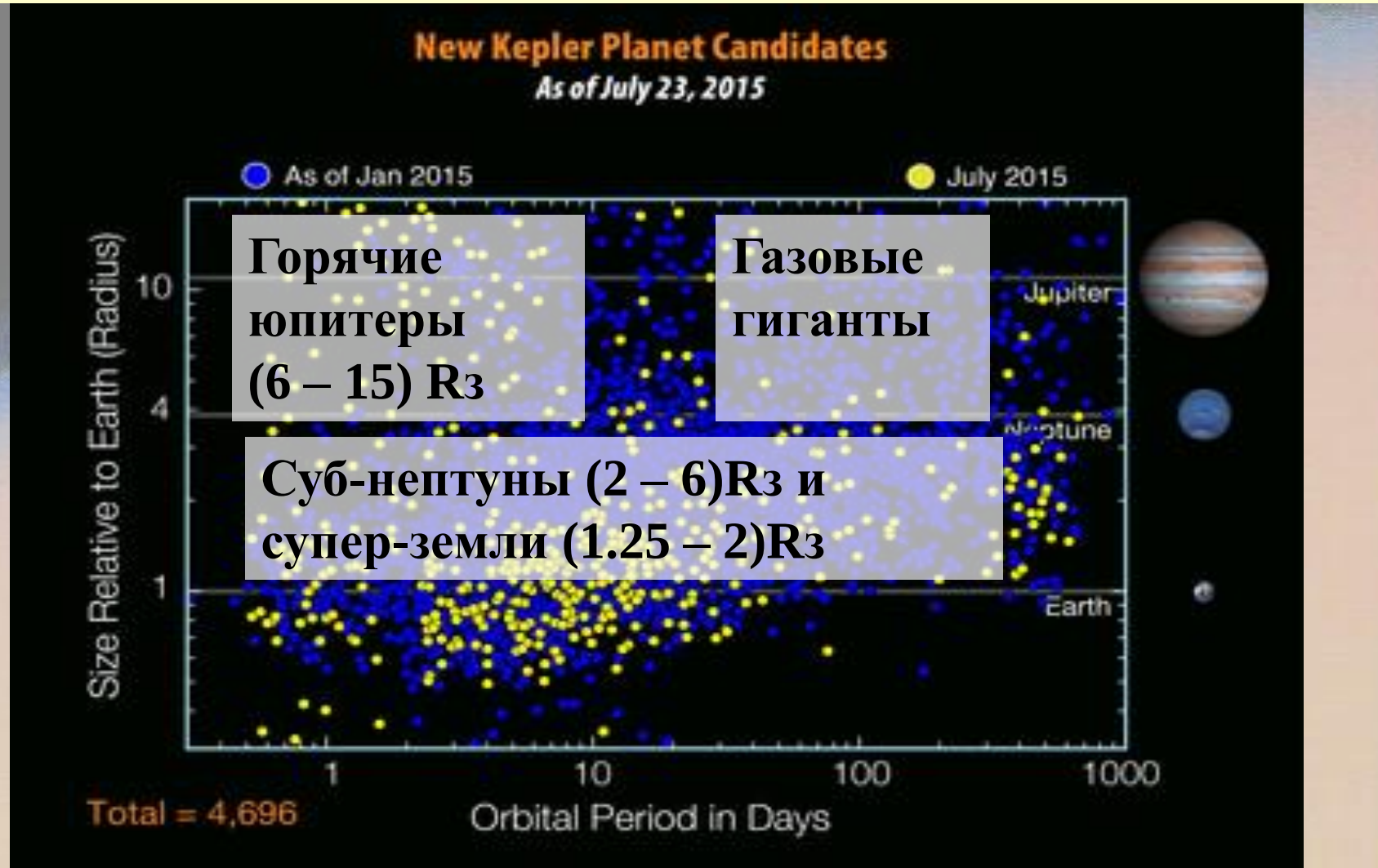
Внесолнечные планеты:

Распределение кандидатов в планеты по данным телескопа Кеплер. Показаны орбитальный период в земных днях и масса планеты относительно массы Земли (2014 г.)



Внесолнечные планеты:

Распределение кандидатов в планеты по данным телескопа Kepler. Показаны орбитальный период в земных днях и размер планеты в радиусах Земли NASA/W. Stenzel



Внесолнечные планеты: *группы планет*

Внесолнечные планеты занимают широкий диапазон значений по массе планеты и ее эффективной температуре. Можно выделить следующие группы:

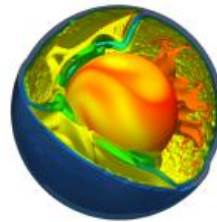
- Горячие (экстремально горячие) юпитеры ($T \sim 1300 - 3000 \text{ K}$) на близких к звезде орбитах;**
- Теплые газовые гиганты ($T \sim 500 - 1500 \text{ K}$), относительно удаленные от звезды;**
- Горячие Нептуны ($T \sim 700 - 1200 \text{ K}$);**
- Супер-земли ($T \sim 500 \text{ K}$).**

Хотя у некоторых из перечисленных объектов нет прямых аналогов в Солнечной системе, однако обилие первичных элементов (H, C и O) в атмосферах сравнимо с данными для планет Солнечной системы.

Внесолнечные планеты: Эпоха характеризации

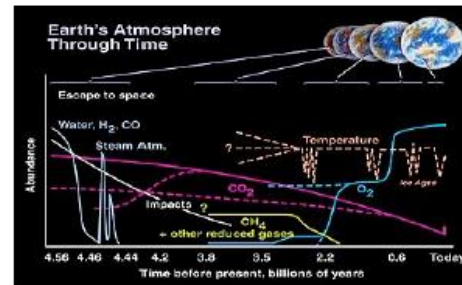
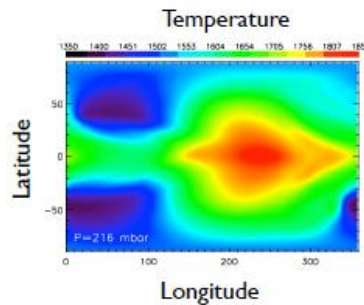
From a discovery to a characterisation era:
(from a collector's approach to a physicist's studies)

- Interior structure

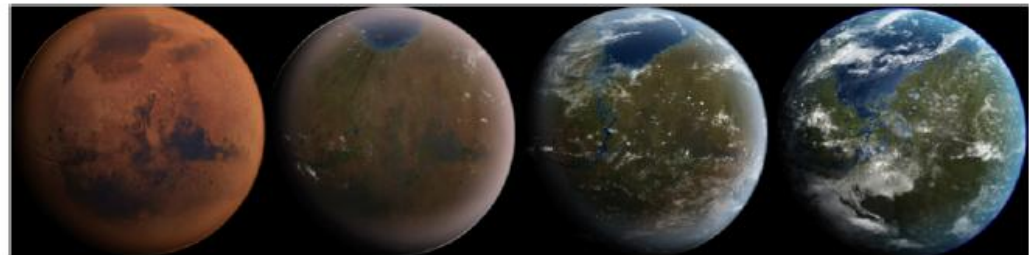


exchanges
over time

- Atmosphere

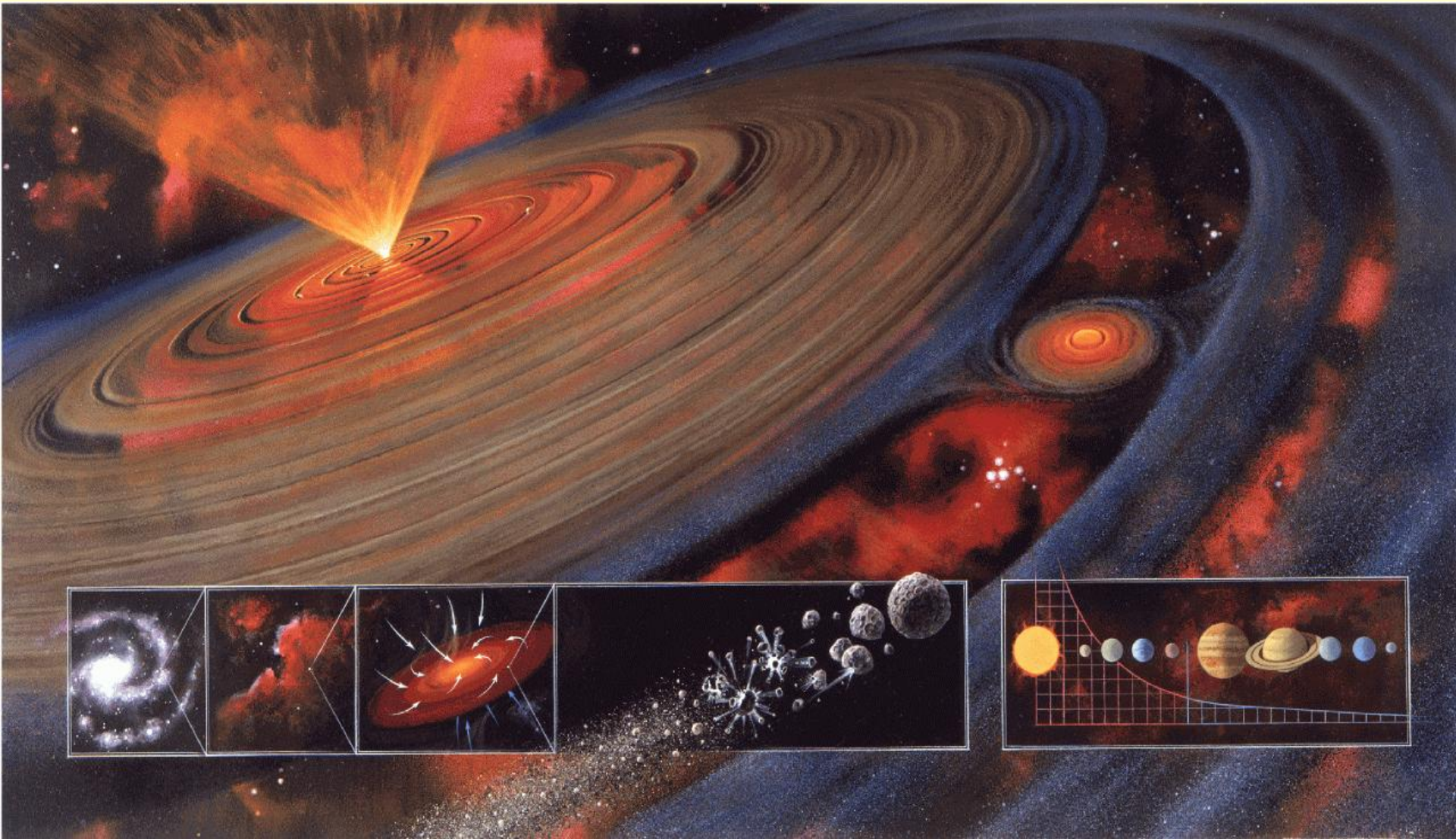


- Evolution over time

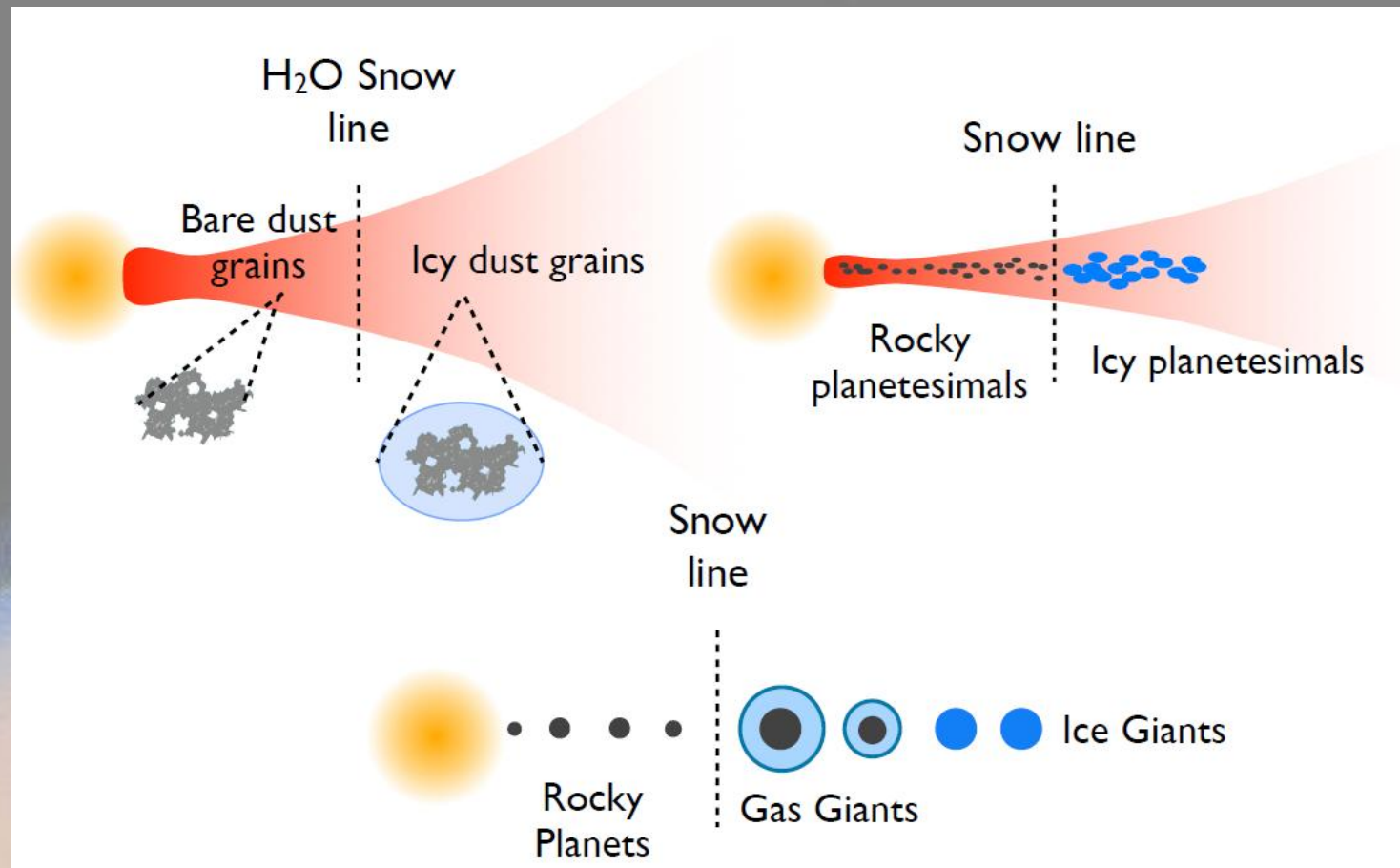


Раздел 1б:

Стандартный сценарий образования протозвезды и планетной системы

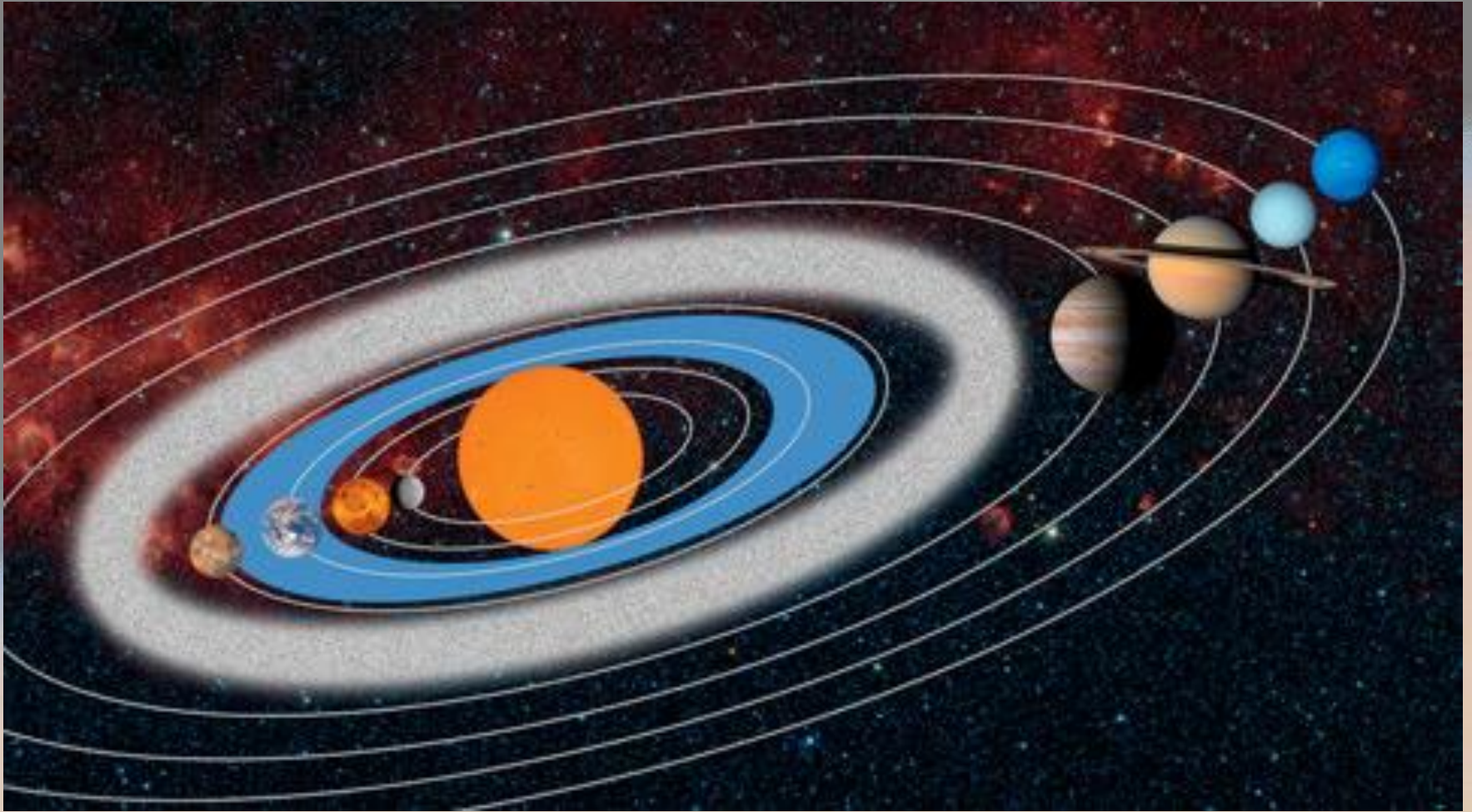


Протосолнечная туманность: *линия снега*



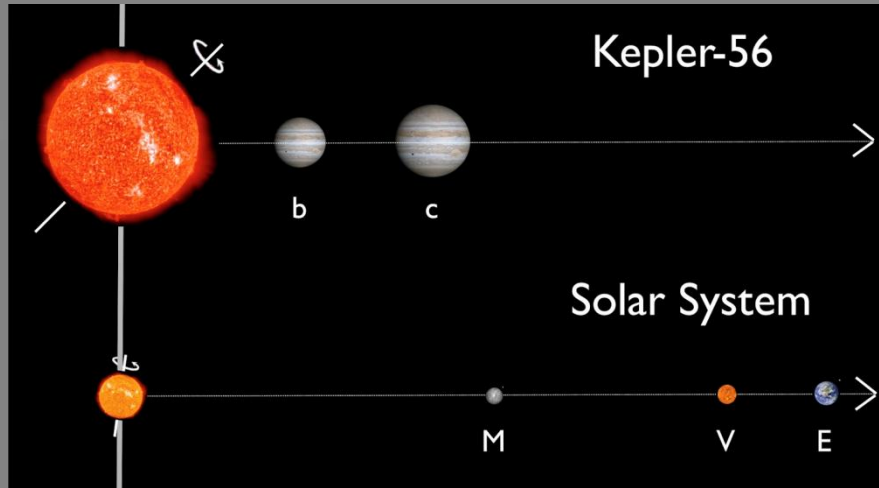
Разделяет области образования внешних газовых гигантов и внутренних каменных планет.

Солнечная система: *и ее зона обитаемости*



Состоит из восьми планет – 4 внешних газовых гигантов, 4 внутренних каменных планет. Зона обитаемости выделена голубым цветом.

Удивительные экзопланетные системы:



Crowded Alien Solar System

The Kepler space observatory has spotted a tightly packed, multiplanet system orbiting a star 1,100 light-years from Earth. This is the most crowded system found to date, with all five planets crammed into a region only 1/12 the distance from the Earth to the Sun.

The KOI-500 Star System

	1.0	3.1	4.6	7.1	9.5	EARTH TO SCALE
ORBIT PERIOD: (EARTH DAYS)	1.0	3.1	4.6	7.1	9.5	365.3
DIAMETER:	1.3	1.4	1.5	2.4	2.6	1.0

STAR KOI-500

MASS: ABOUT THAT OF THE SUN

DIAMETER: 0.74 THAT OF THE SUN

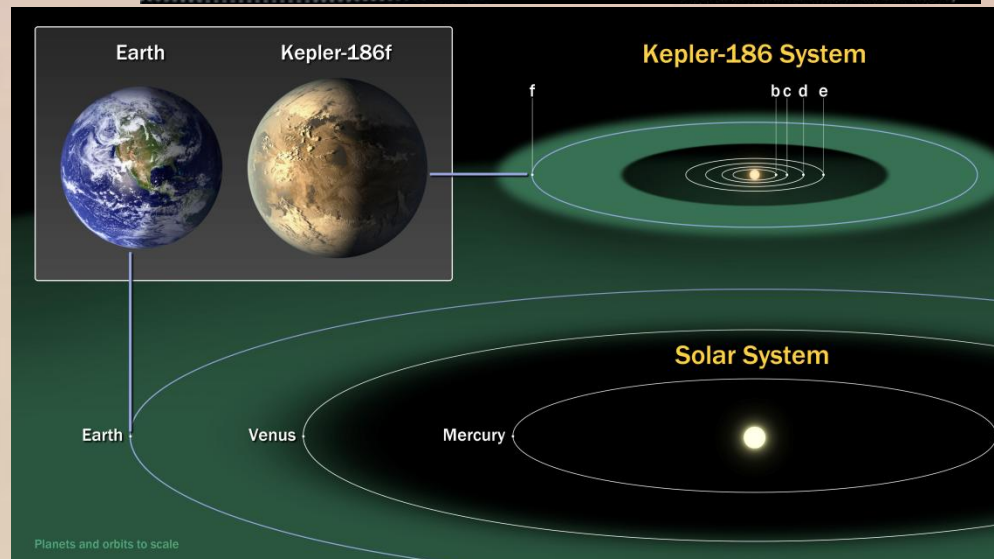
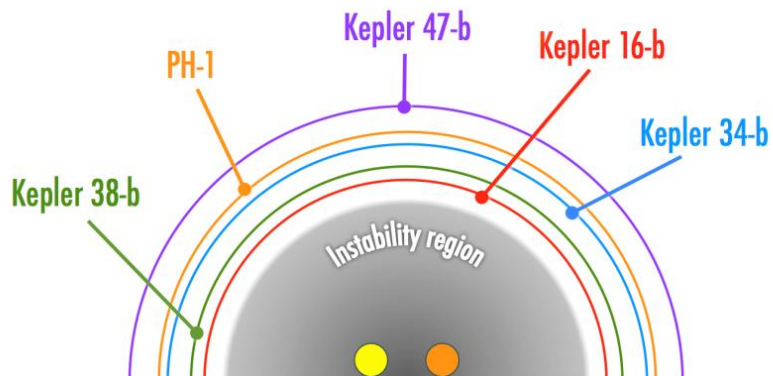
AGE: ABOUT 1 BILLION YEARS

LOCATION: APPROXIMATELY 1,100 LIGHT-YEARS FROM EARTH, IN THE CONSTELLATION LYRA

"KOI" = Kepler Object of Interest

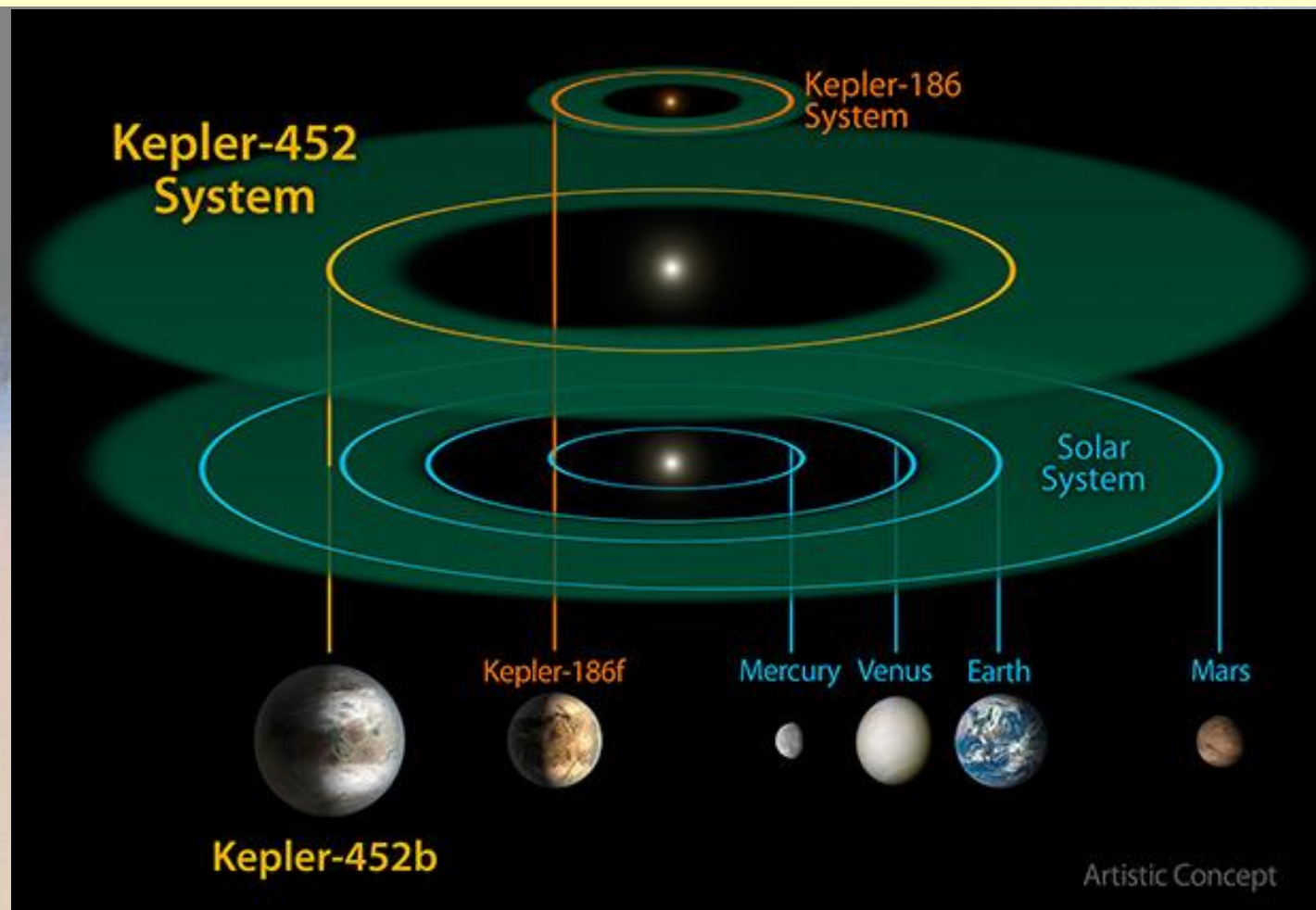


Observed circumbinary planets (orbits normalized to the instability region)



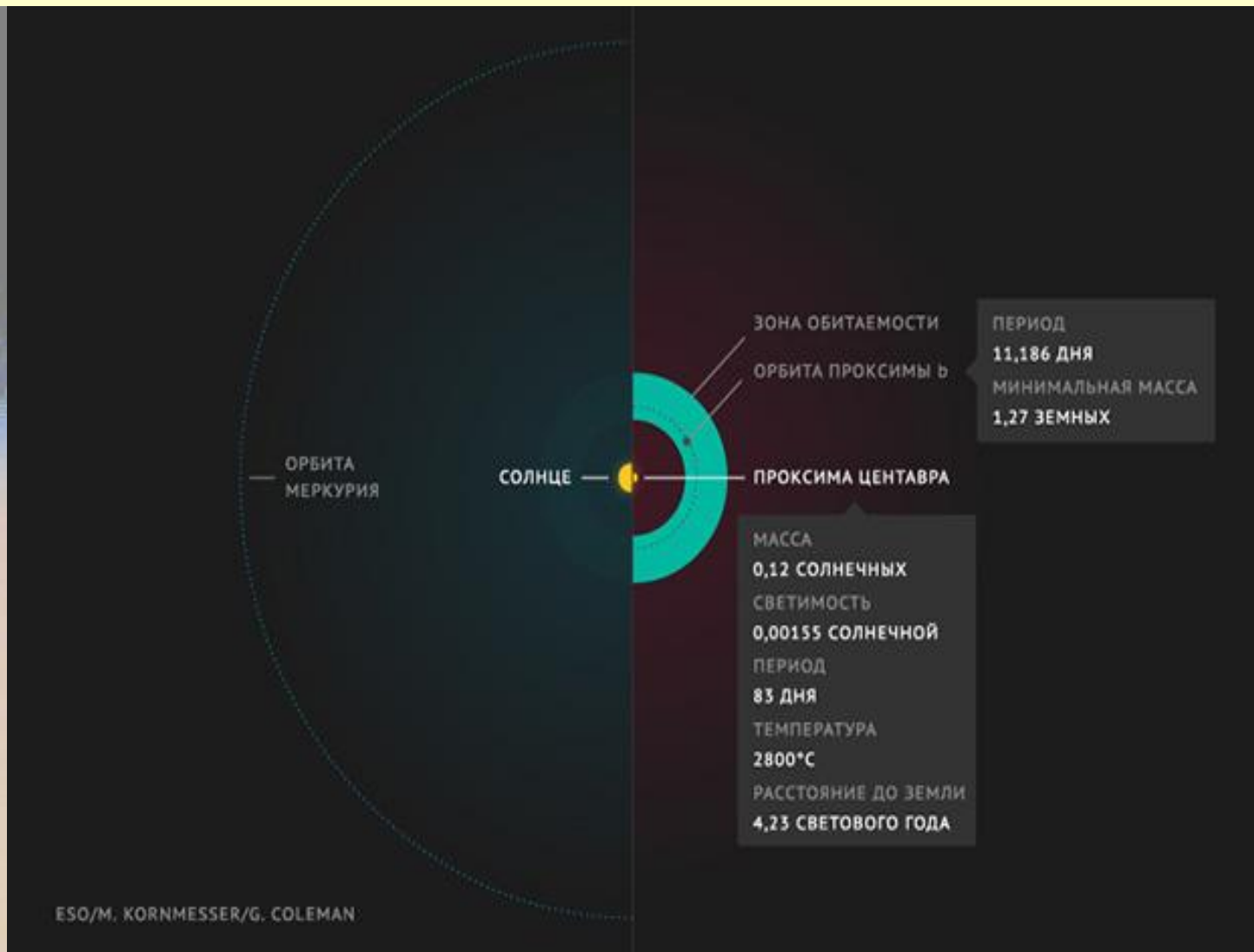
Внесолнечные планетные системы: *Kepler 452*

Открытая планета вращается вокруг звезды Kepler-452, находящейся в созвездии Лебедя, на расстоянии 1400 световых лет от Земли. Это светило относится к классу G2, как и Солнце.



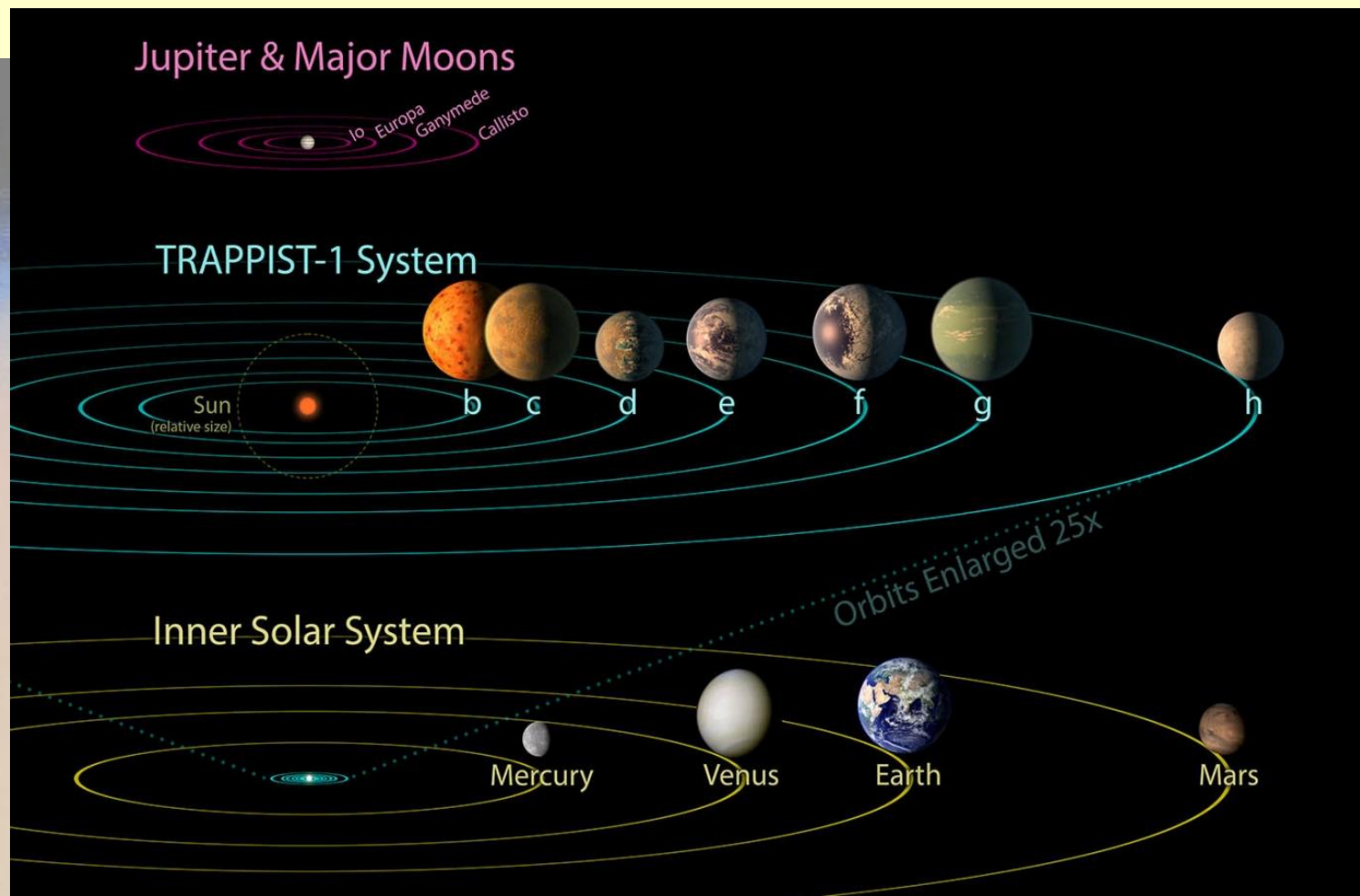
Внесолнечные планетные системы: *Proxima*

В этой системе планета Proxima b представлялась как Земля 2.0 но все оказалось не так (подробности во второй лекции).



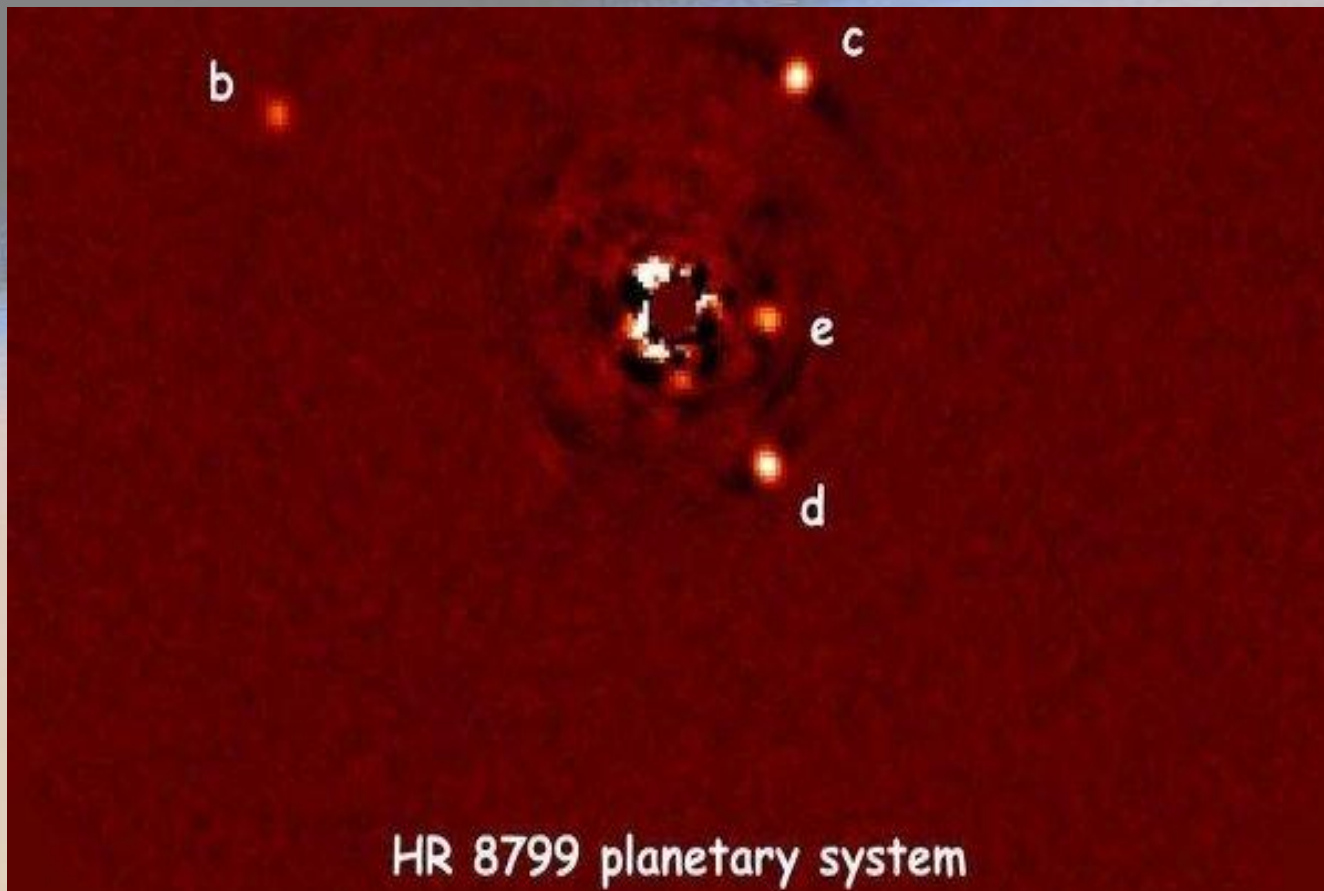
Внесолнечные планетные системы: *TRAPPIST-1*

TRAPPIST-1 ультрахолодный красный карлик, чья масса близка к пределу Кумара (0.08 солнечных масс), а радиус всего на ~14% превышает радиус Юпитера. Эффективная температура звезды оценивается в 2550K – ниже, чем у спирали лампочки накаливания. TRAPPIST-1 удалена от нас на 12.1 ± 0.4 пк.



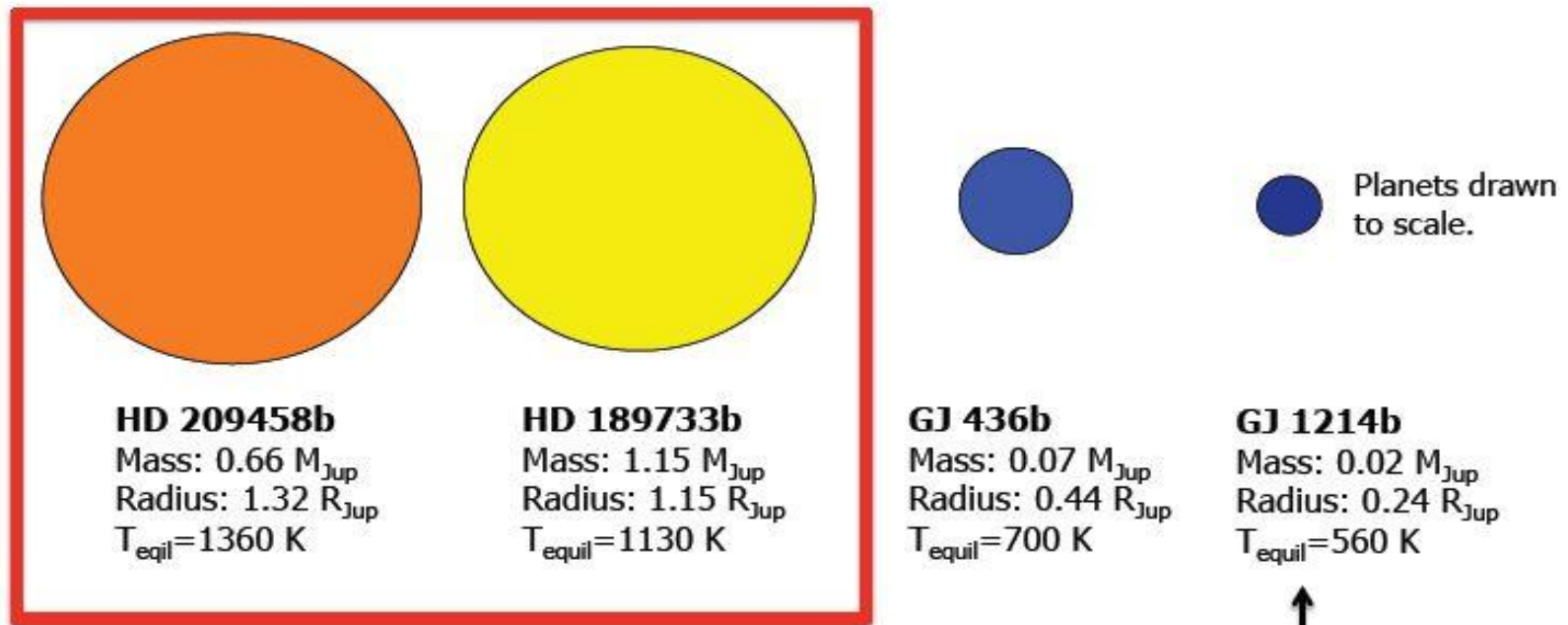
Внесолнечные планетные системы: *HR 8799*

HR 8799 в созвездии Пегаса, удаленном от нас на расстояние в 130 световых лет, - молодая звезда, прожившая всего 30 миллионов лет. Система HR 8799 устроена почти так же, как и Солнечная система, обладая четырьмя планетами-гигантами на дальних подступах, и потенциально несколькими каменистыми планетами во внутренней части, которые пока не открыты.



Внесолнечные планеты: *группы планет*

Four Exoplanets: A Comparison

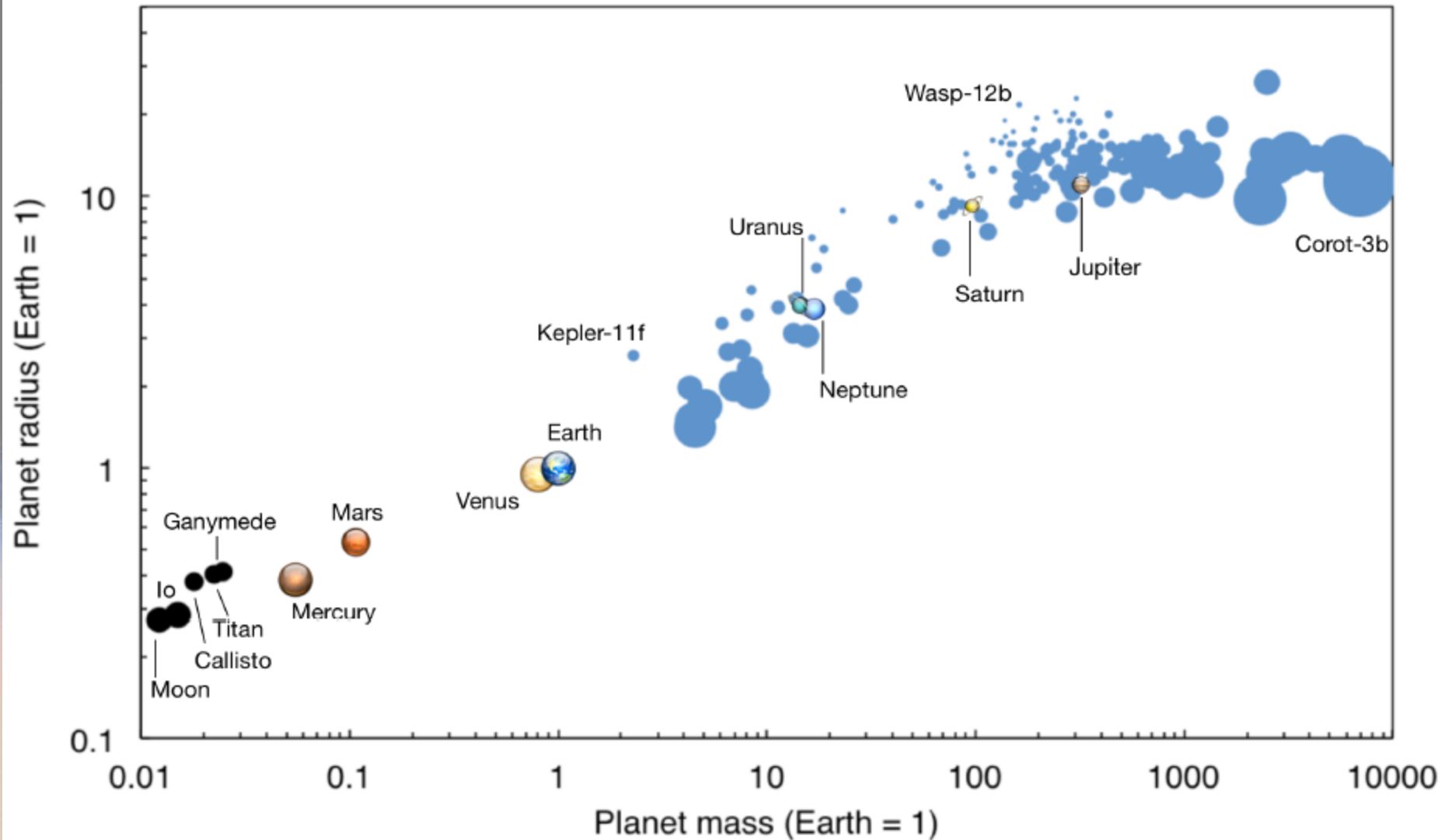


These are four of the **brightest** transiting planet systems known today.

Also some of the **best-studied**.

↑
Equilibrium temperature assumes planet absorbs all incident flux and re-radiates as a blackbody

Внесолнечные планеты: *планеты Солнечной системы являются одной из возможностей*



Планетные атмосферы в Солнечной системе:

Водородные атмосферы H/He планет-гигантов (H₂, He, CH₄, NH₃):

- Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун;
- Температура (K): 128, 98, 56, 57 K.

Атмосферы планет земной группы (CO₂, N₂, O₂, CH₄, H₂O):

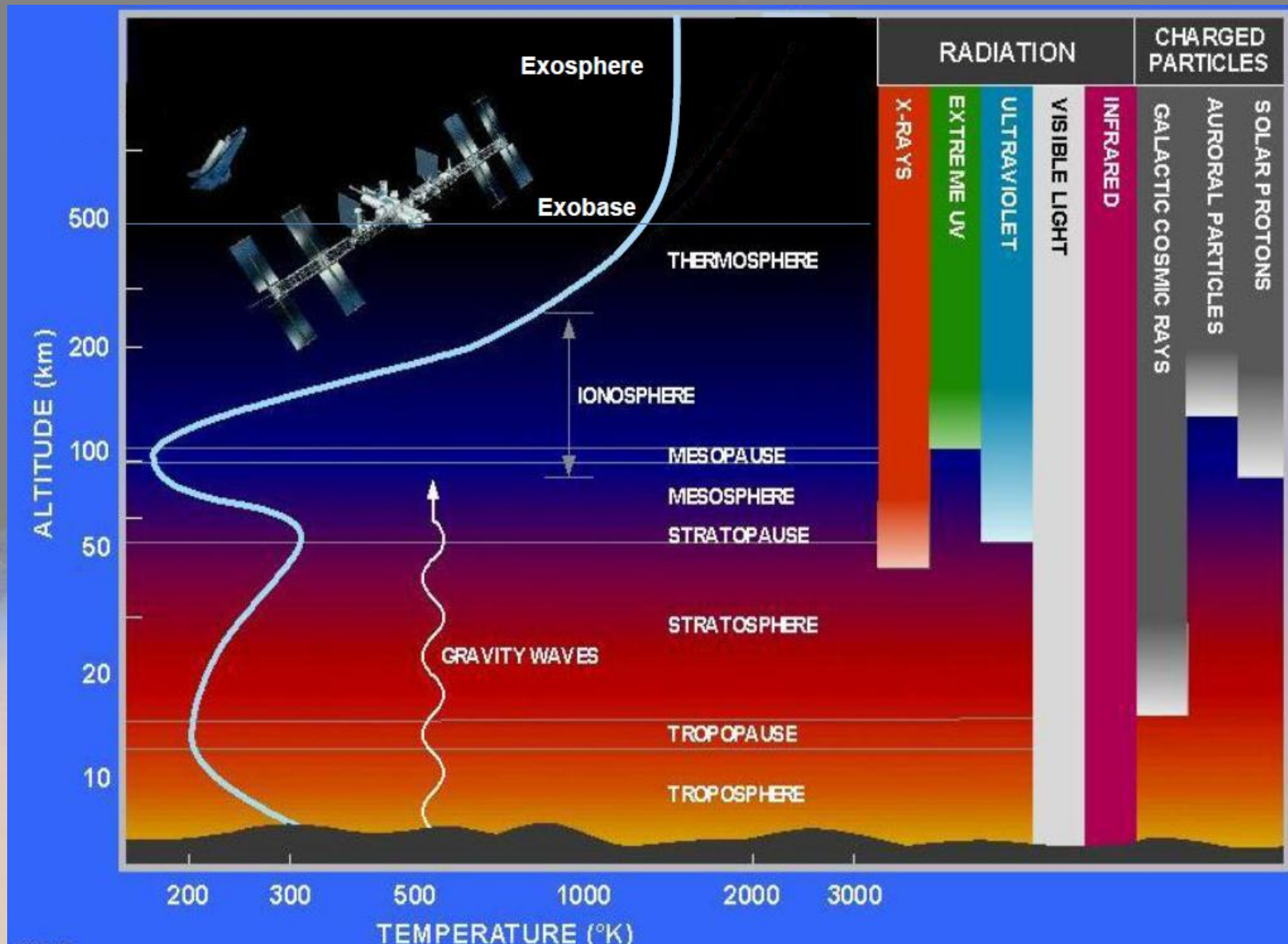
- Венера, Земля, Марс, Титан, Тритон;
- Температура (K): 750, 280, 240, 94, 38.

Убегающие атмосферы (CO₂, SO₂, N₂, NH₃, O₂, CH₄, H₂O):

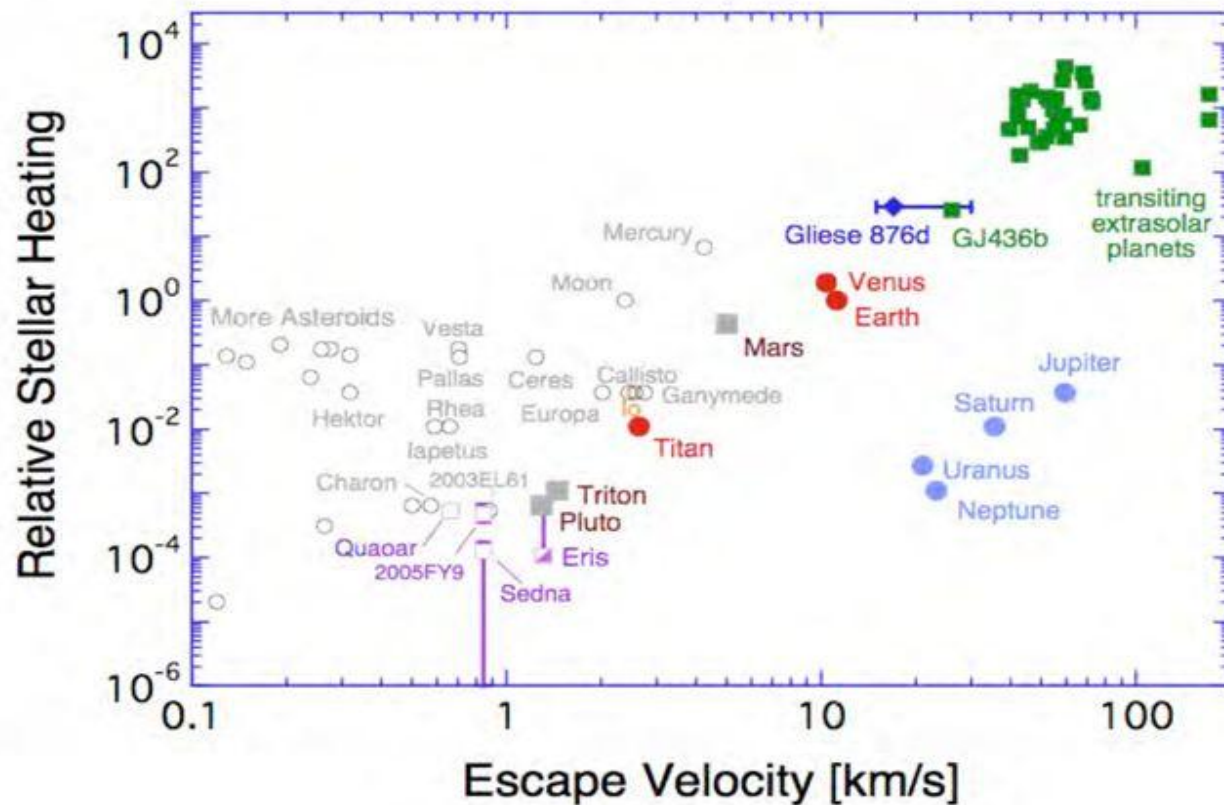
- Ио, Европа, Ганимед, Энцелад, Плутон, кометы, KBOs,....:
- Температура (K): 130, 120, 140, 150, 36,

Бесстолкновительные экзосферы: Меркурий, Луна, и другие спутники.

Атмосферы: *диссипация атмосферы*

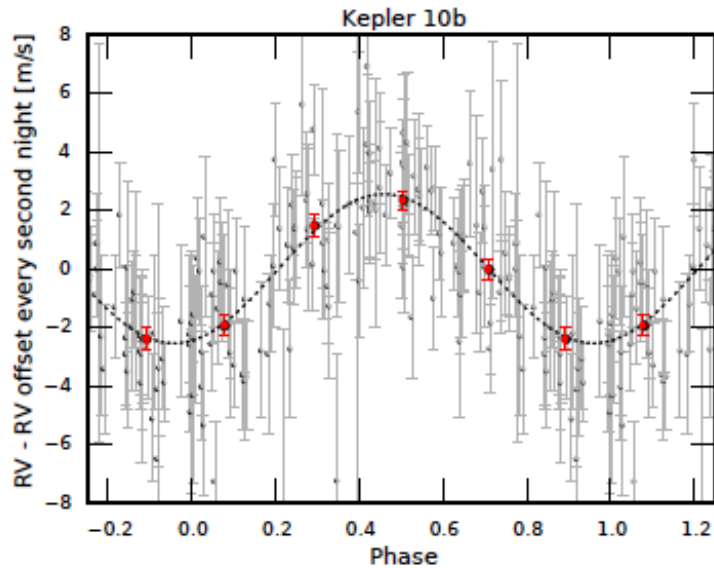


Атмосферы: *диссипация атмосферы*



Atmospheres are found where gravity is high and solar heating low. We show this here by plotting heating from the parent star versus escape velocity for solar system bodies and extrasolar planets. The presence or absence of an atmosphere is indicated by filled or open symbols, respectively. The graph demonstrates decreasing atmospheric stability from lower right to upper left. To the lower right of the plot are bodies with substantial atmospheres. Those lying close to a diagonal between upper left and lower right, such as Triton, have thin atmospheres.

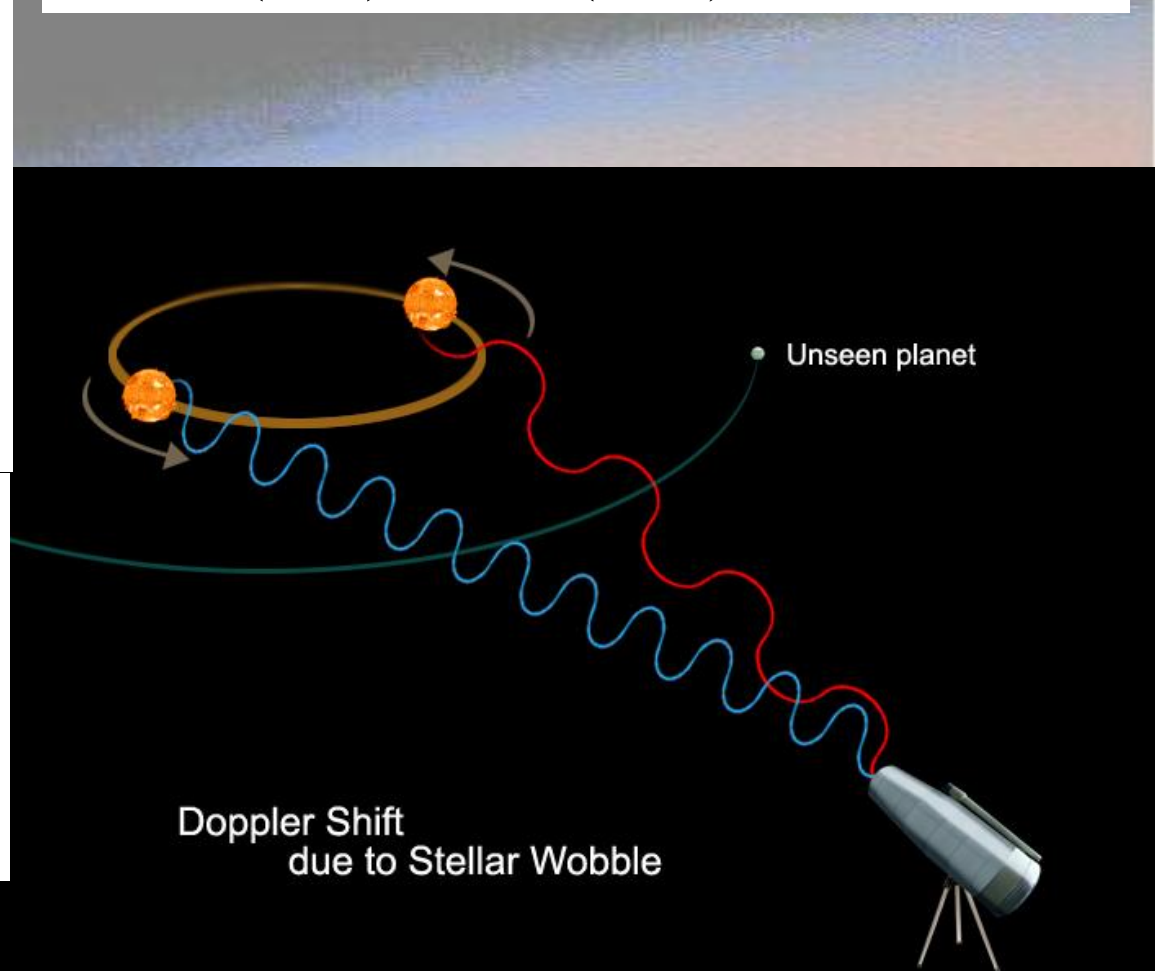
Раздел 2: Атмосферы экзопланет: *что известно из наблюдений*



HARPS (ESO), HIRES (Keck), ... $\rightarrow < 1 \text{ m s}^{-1}$

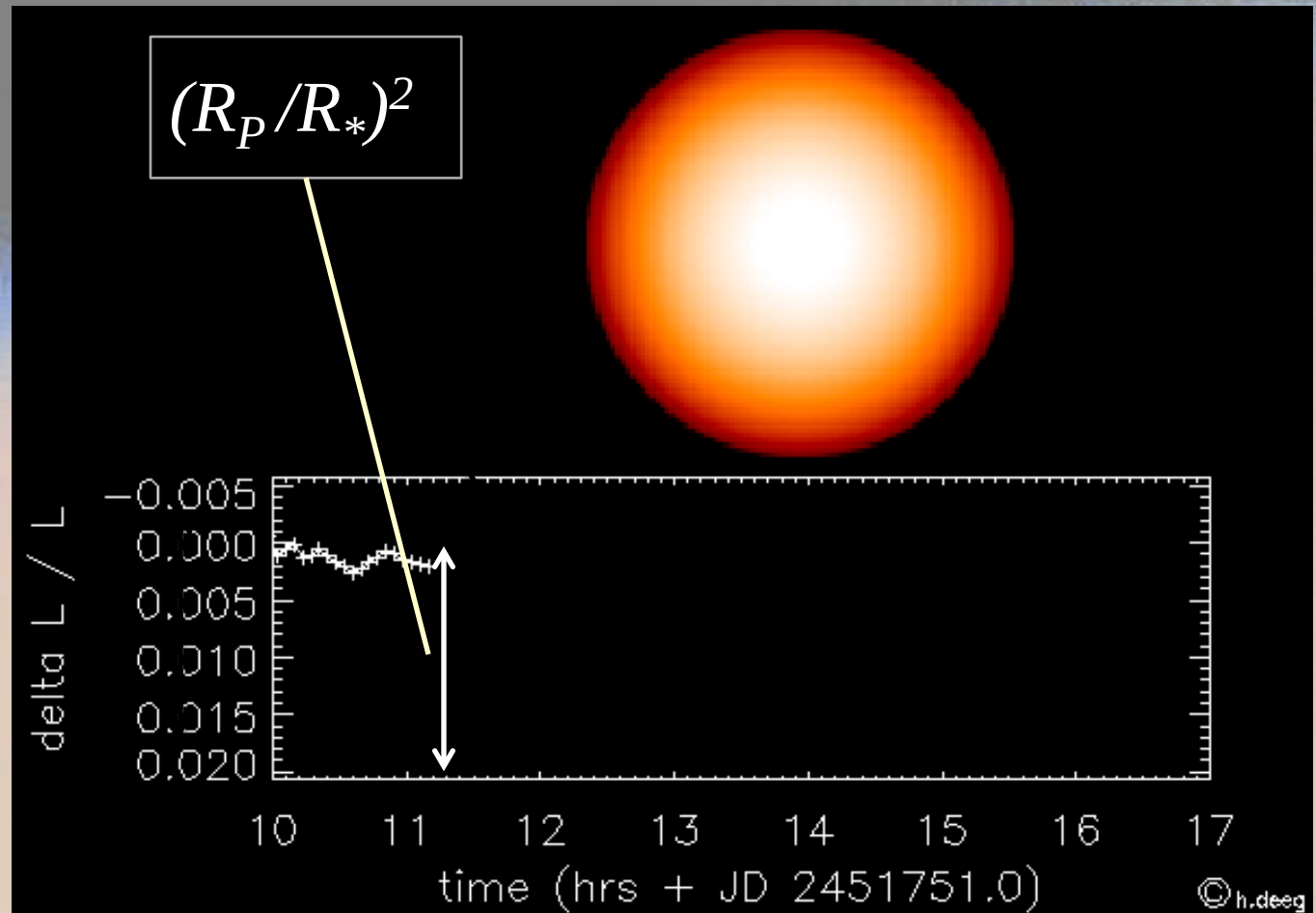
*Метод измерения
радиальной скорости
звезды позволяет
оценить минимальную
массу планеты*

$$\underline{M_p \sin i}$$

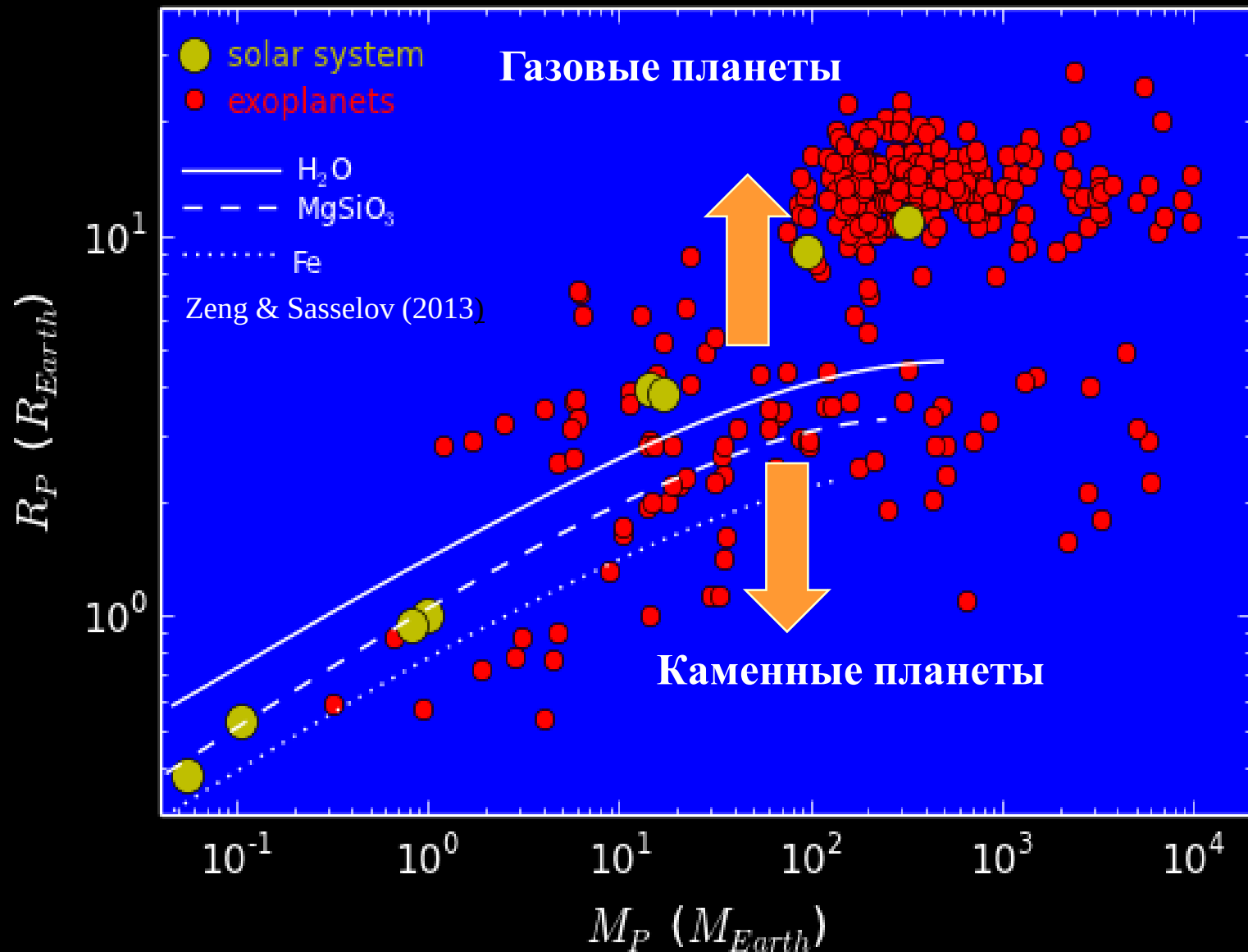


Атмосферы экзопланет: *что известно из наблюдений*

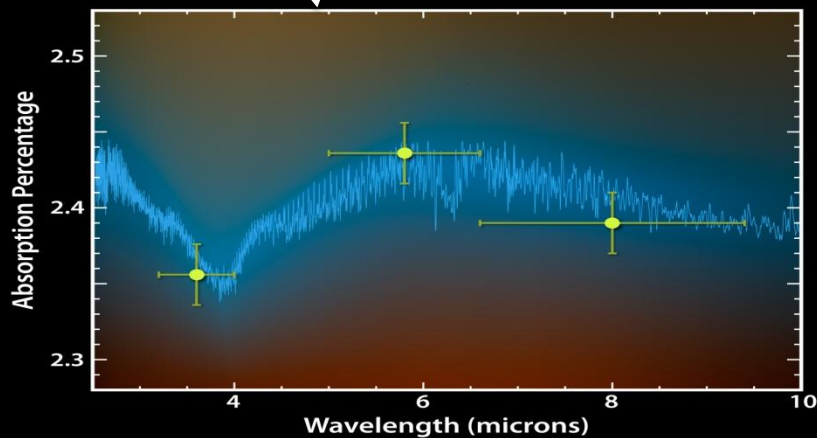
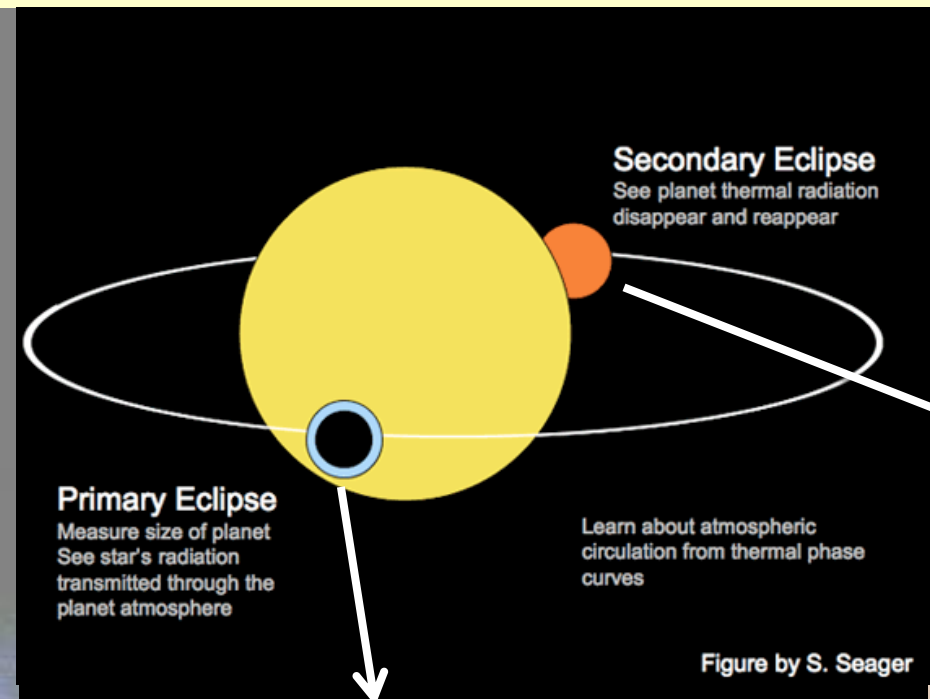
Наблюдения транзитов позволяют оценить радиус планеты



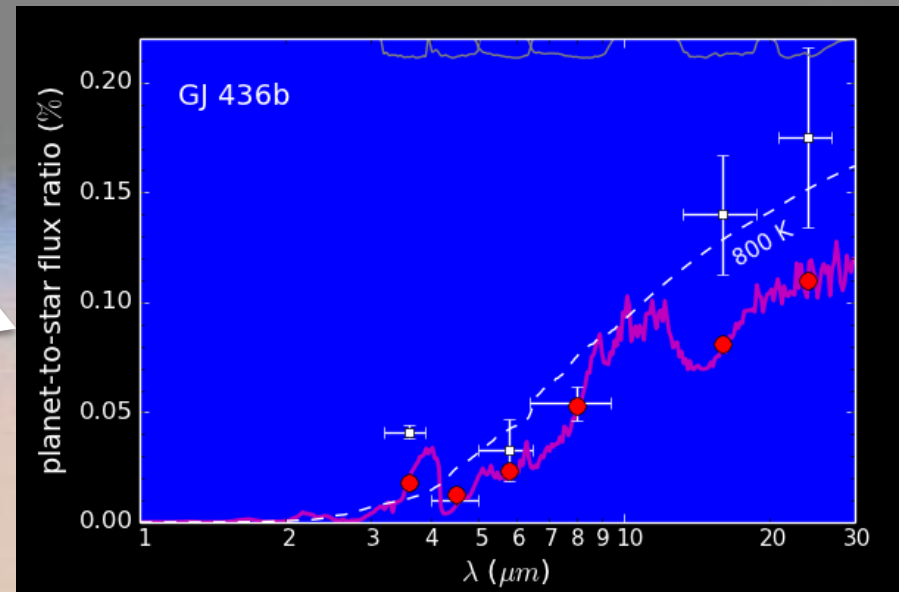
Атмосферы экзопланет: *диаграмма масса-радиус определяет массовую плотность*



Атмосферы экзопланет: *химический состав из наблюдений*



Water Signatures in Exoplanet HD189733b Spitzer Space Telescope • IRAC
NASA / JPL-Caltech / G. Tinetti (Institute d'Astrophysique de Paris) ssc2007-12a



Дневное свечение

Спектр пропускания

Атмосферы экзопланет: *из чего состоят?*

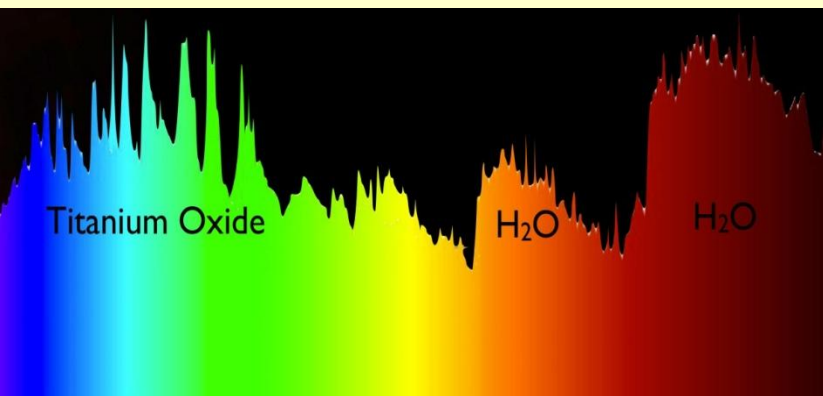
В настоящее время спектры поглощения и свечения получены лишь для нескольких экзопланет, преимущественно из группы горячих юпитеров и нептунунов.

Например, для горячих юпитеров HD 209458b и HD 189733b идентифицированы следующие:

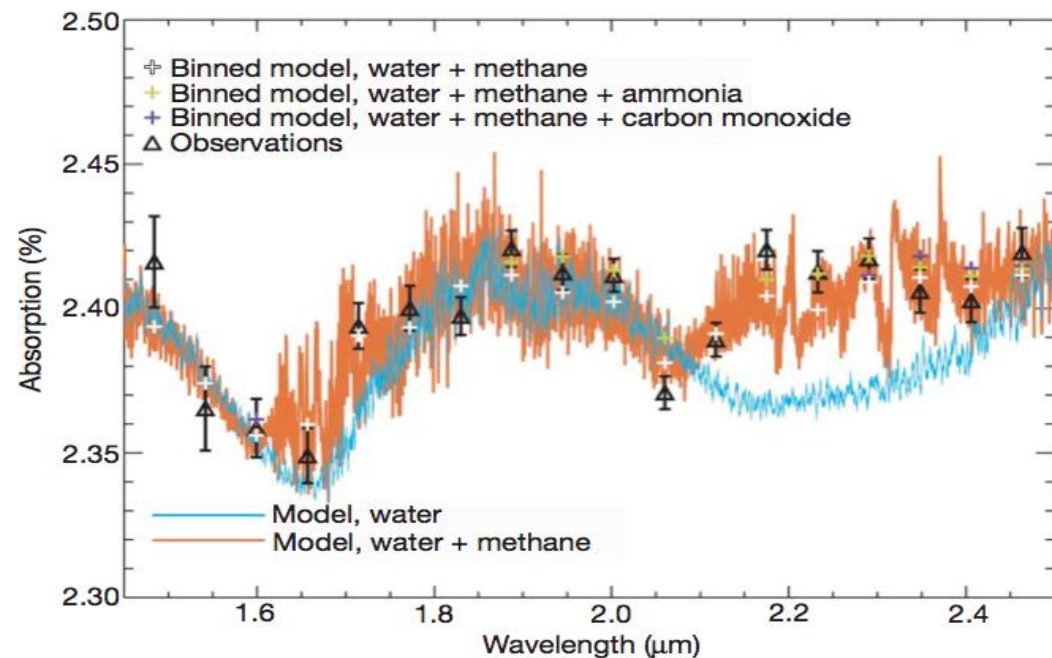
атомы – H, He, C, O, Mg, Si, Na, K, ...

молекулы – H₂, H₂O, CH₄, CO, CO₂, ...

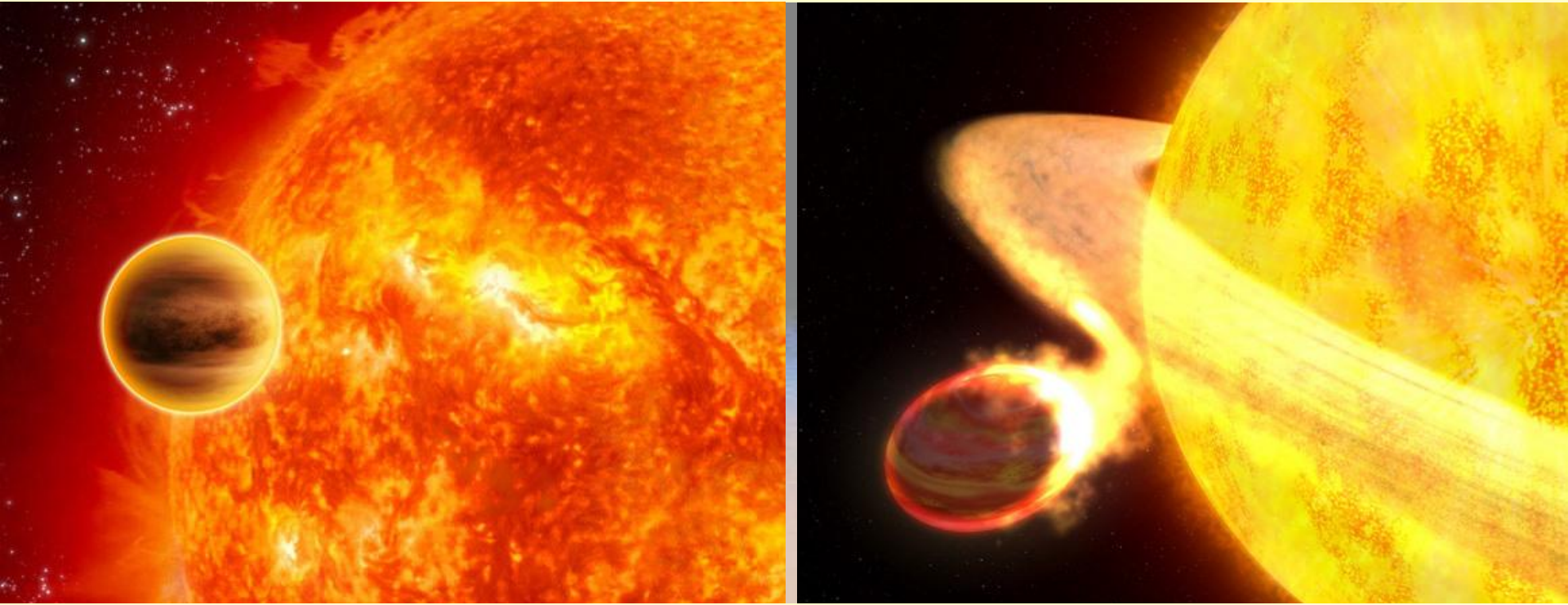
облака и дымки из силикатов и окислов металлов ...



Спектр пропускания
HD 189733b (Swain et al., 2008)



Раздел 3: *Горячие юпитеры*



HD 209458b ($a=0.045$ au, $T_{\text{eff}}=1300$ K):

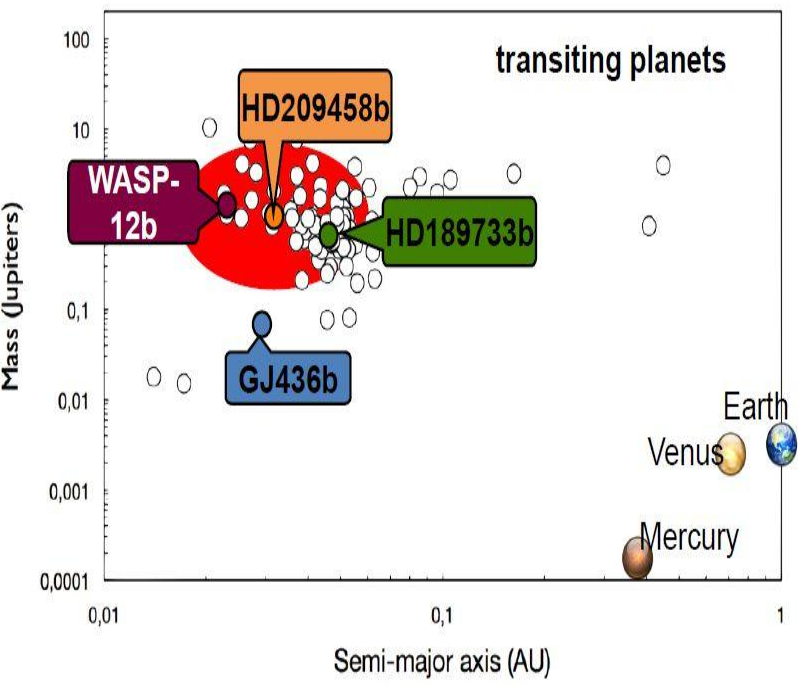
- Горячая водородная корона (Шематович, Астрон. Вестн. 2010;
- Химия ионизации (Ионов и др., Астрон. Вестн., 2013;
- Газодинамические структуры (Бисикало и др., Астрон. Ж., 2013).

WASP-12b ($a=0.023$ au, $T_{\text{eff}}=2900$ K):

- Объяснение раннего затмения (Bisikalo et al., ApJ, 2013)

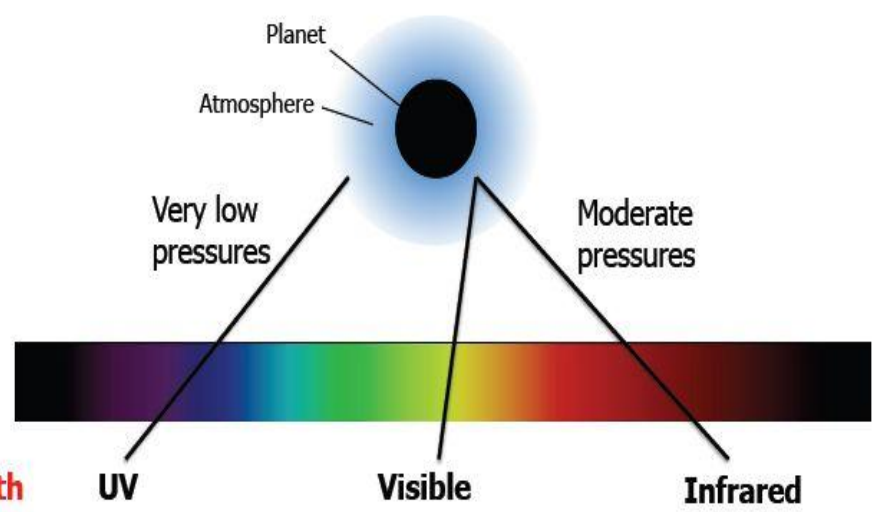
Атмосферы горячих юпитеров: наблюдения

Hot exoplanets in transit



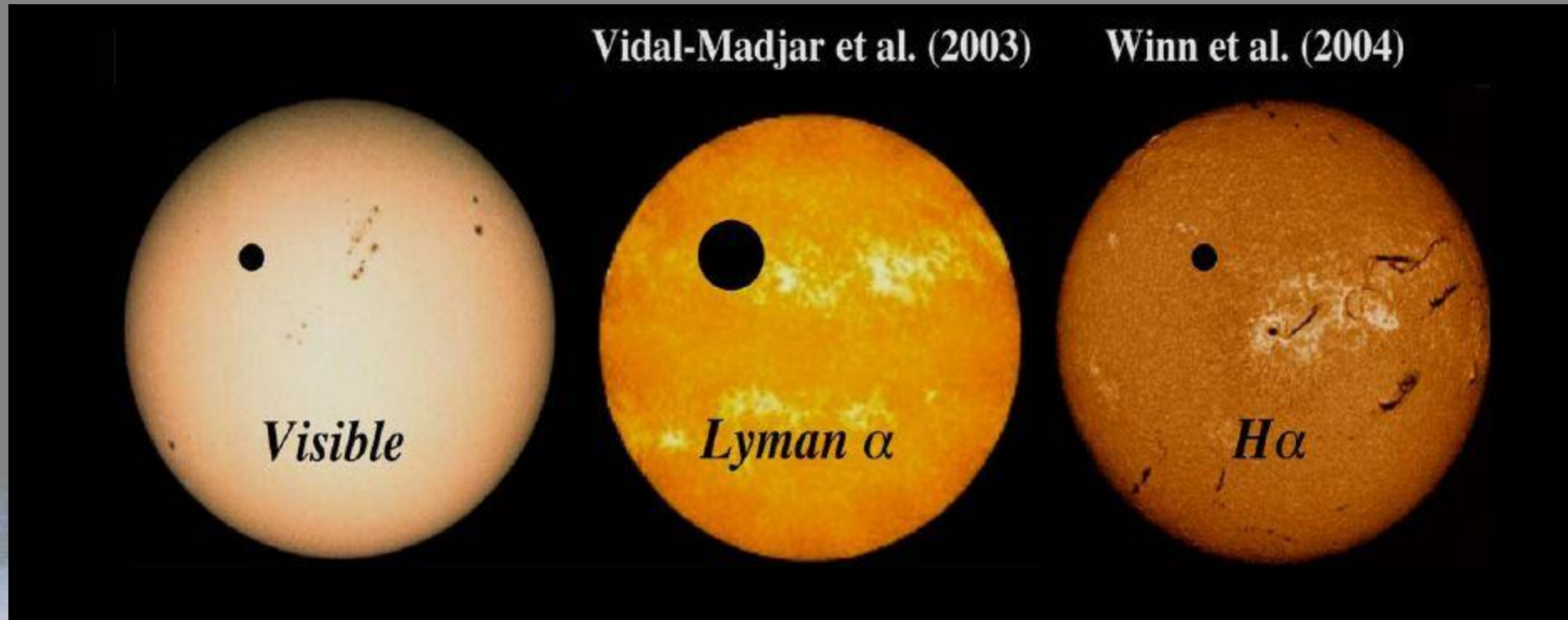
У ~ 1% звезд наблюдаются горячие Юпитеры, планеты-гиганты на тесных орбитах ~ 0.05 а.е. ~ 10 Rstar.

Hot Jupiters from the UV to the IR



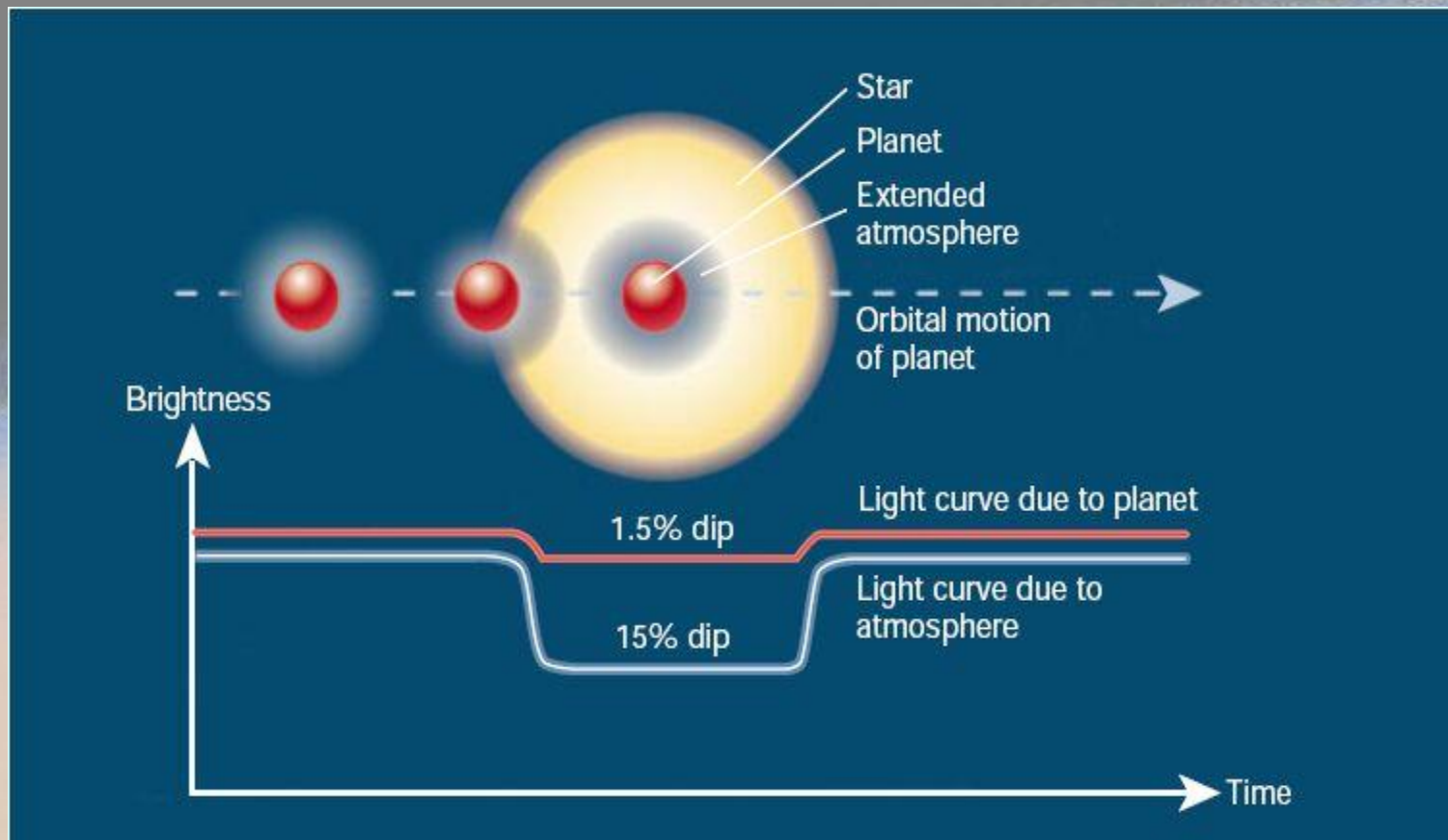
Wavelength	UV	Visible	Infrared
What do we measure?	Lyman alpha, ionized metals	Sodium, potassium, TiO(?)	Water, methane, CO, CO ₂
What do we learn?	Atmospheric mass loss	Clouds/hazes or transparent? Other absorbers?	Is the chemistry in equilibrium?

Наблюдения протяженной водородной атмосферы планеты-транзита HD209458b



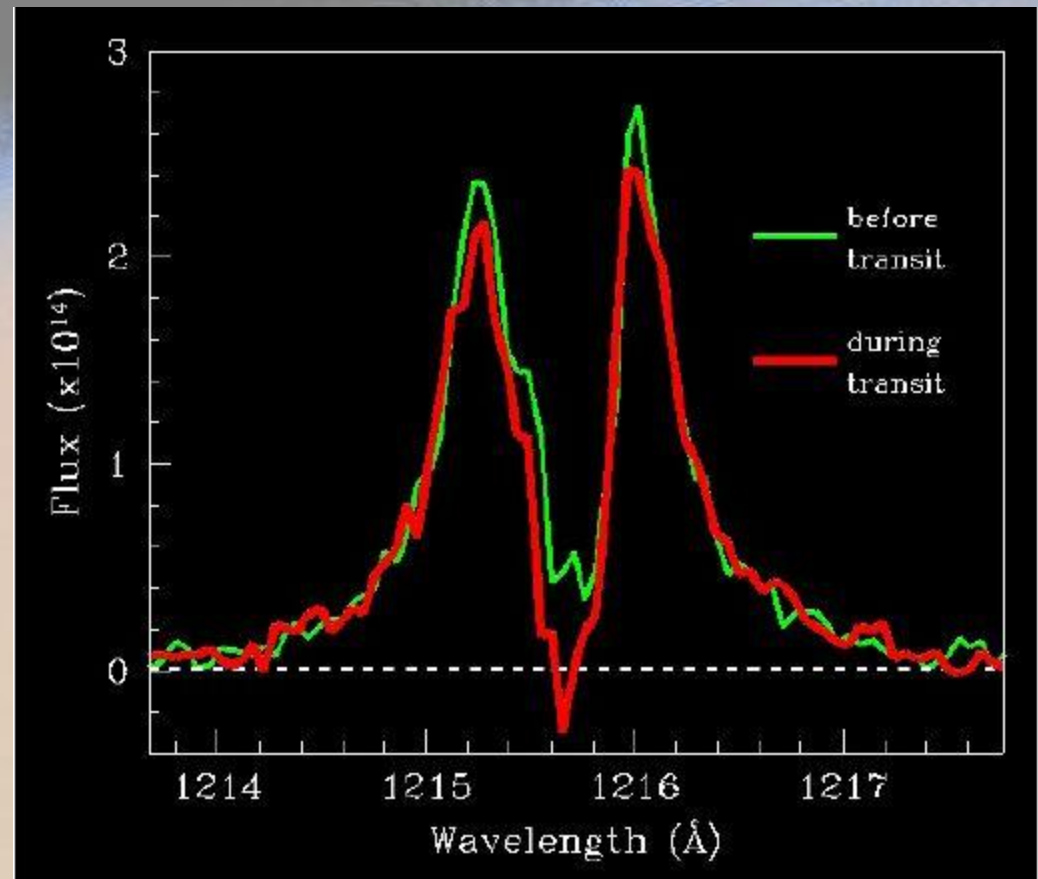
- Vidal-Madjar et al., Nature, 2003, “An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD209458b”
- Linsky et al., ApJ, 2010, “Observations of mass loss from the transiting exoplanet HD 209458b”

Протяженная водородная корона планеты-транзита HD 458209b



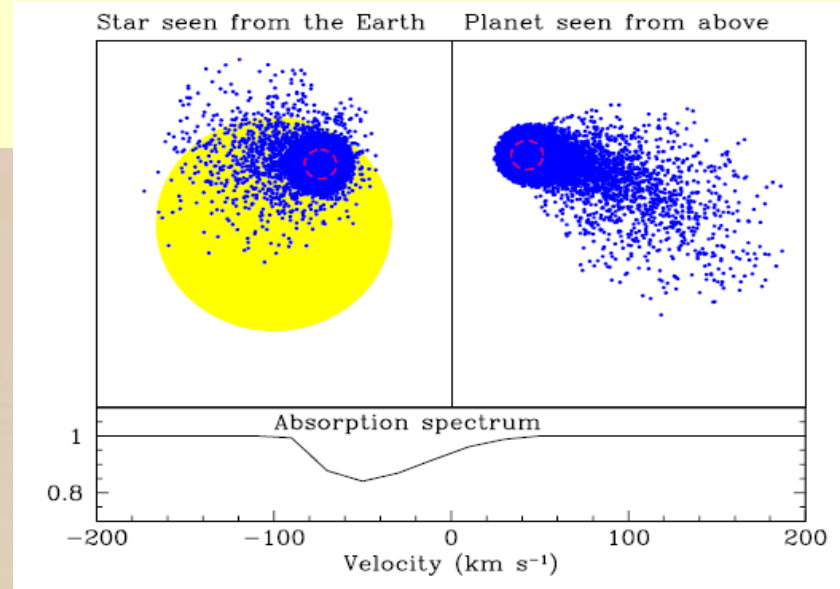
Протяженная водородная корона планеты HD 458209b – открыта в наблюдениях на КТХ (STIS G140M)

Vidal-Madjar et al.,
Nature, 2003
“An extended upper
atmosphere
around the
extrasolar planet
HD209458b”



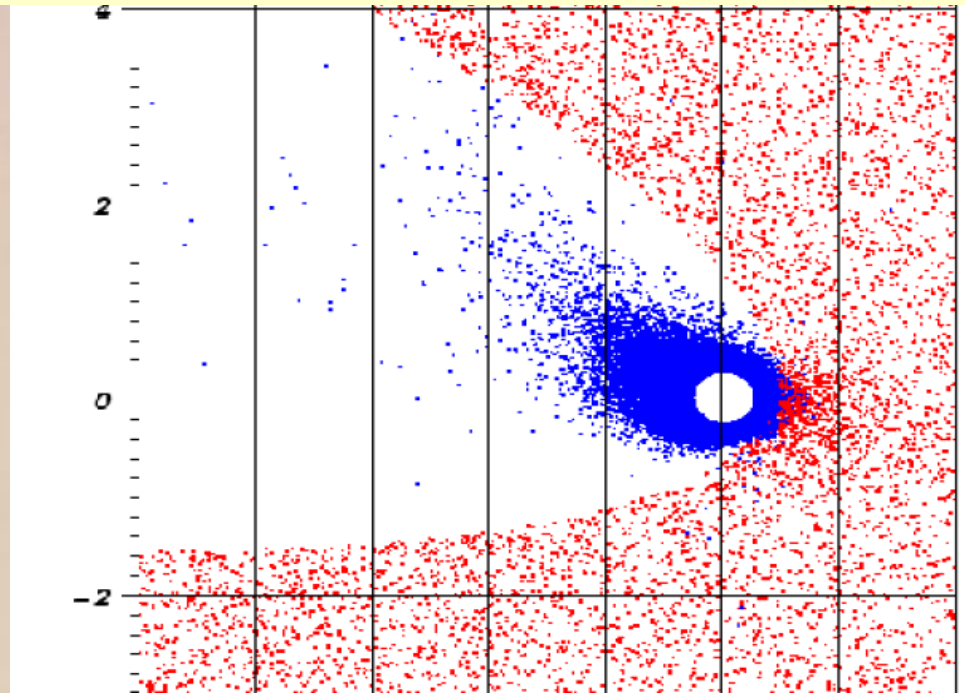
Интерпретации наблюдений на КТХ протяженной водородной атмосферы планеты- транзита HD209458b

Evaporating atmosphere: The proximity of HD209458b to its star (0.045 a.u.) makes the gaseous planet receiving a colossal amount of EUV irradiation. Such an energetic input heats the hydrogen upper atmosphere to $\sim 10^4$ K and inflates it to the Roche limit: the atmosphere is evaporating and its spatial extent produces the large absorption observed in the Ly α stellar emission line (Vidal-Madjar et al. 2003). Estimated loss rates up to 10^{10} g/s (Ehrenreich et al., A&A, 2008).



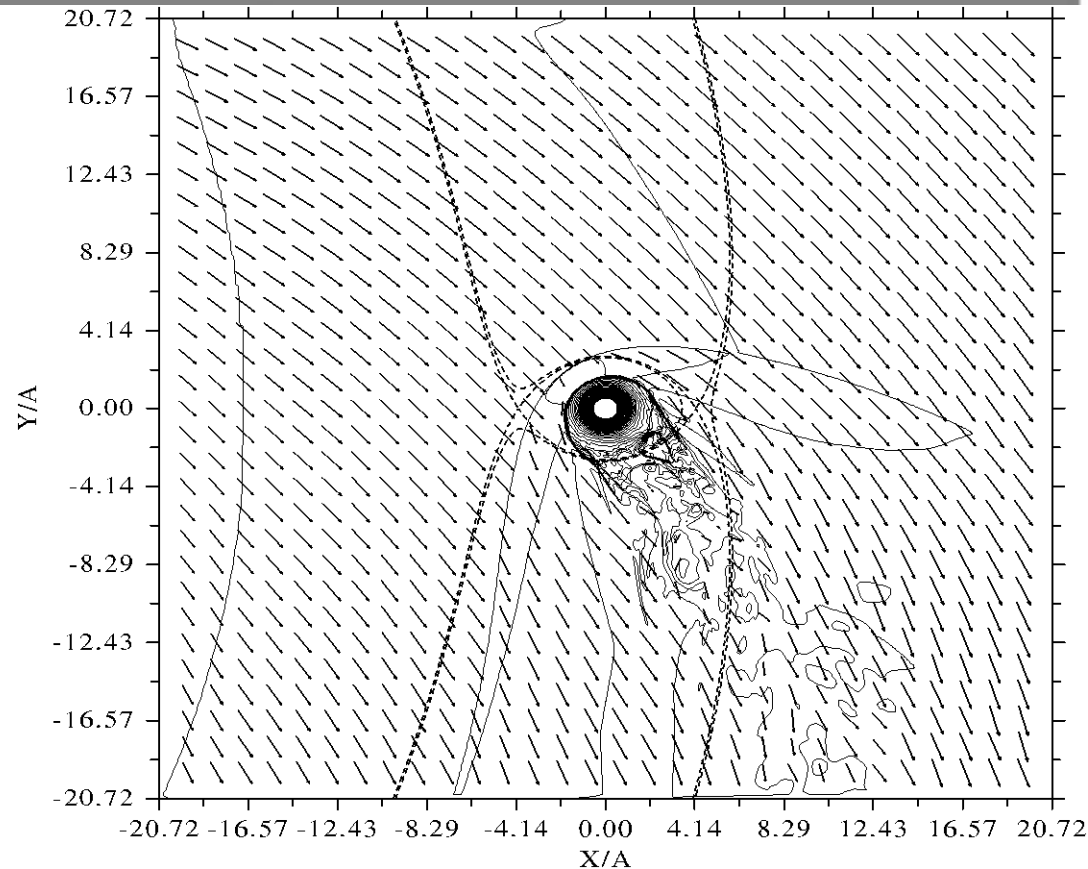
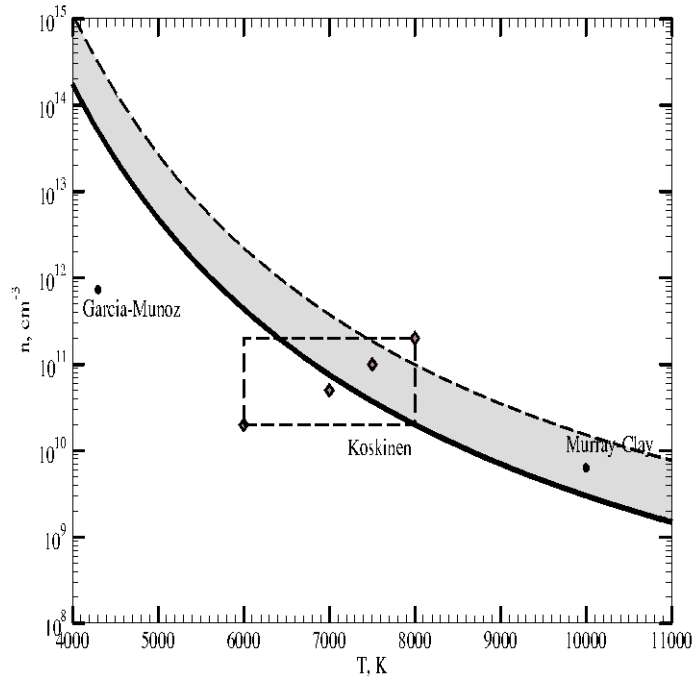
Интерпретации наблюдений на КТХ протяженной водородной атмосферы планеты- транзита HD209458b

Charge exchange with the stellar wind in the corona: Measured transit-associated Ly α absorption can be explained by the interaction between the exosphere of HD 209458b and the stellar wind, and the stellar wind protons are the source of the observed energetic neutral atoms... (Holmstrom et al., Nature, 2008; Eckenback et al., ApJ, 2009)).



Интерпретации наблюдений на КТХ протяженной водородной атмосферы HD209458b

$T_3 = 6000 \text{ K}$

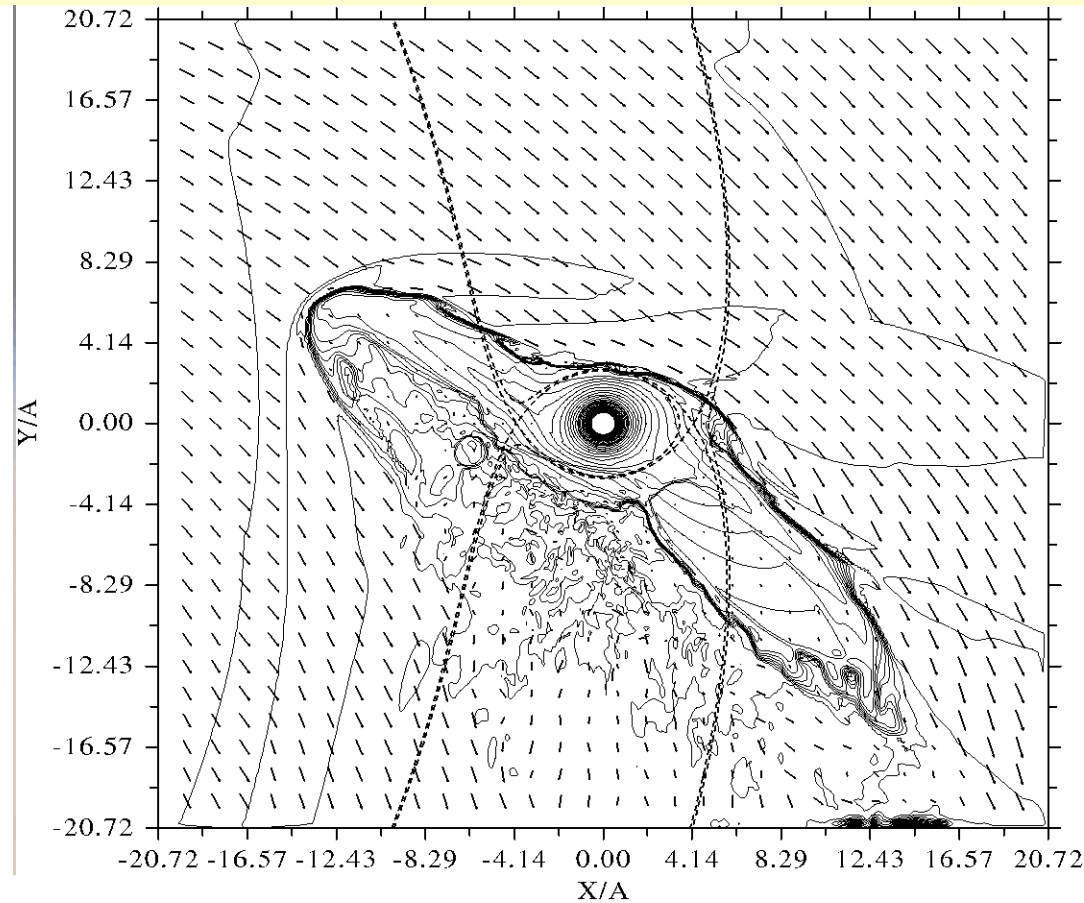
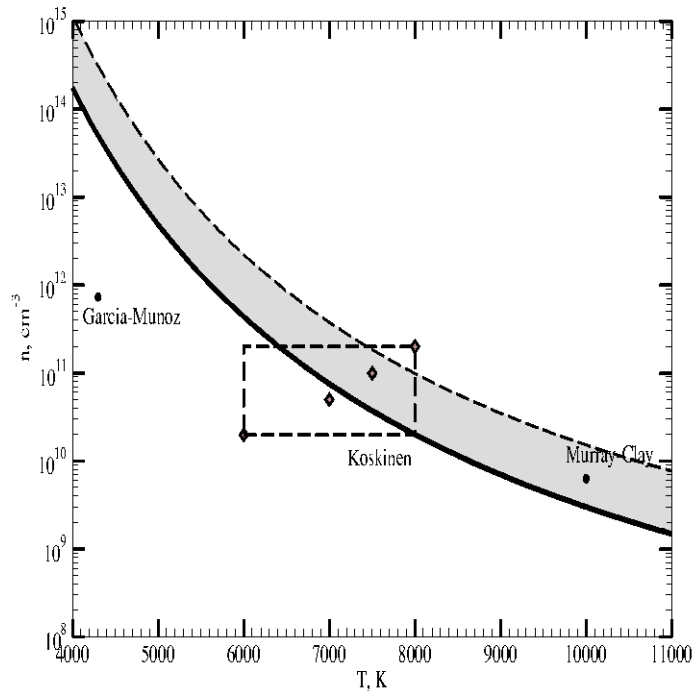


В зависимости от положения точки лобового столкновения все газовые оболочки вокруг горячих юпитеров можно разделить на два класса (Бисикало и др., 2013):

(а) если точка лобового столкновения лежит внутри полости Роша планеты, то оболочки имеют почти сферическую форму

Интерпретации наблюдений на КТХ протяженной водородной атмосферы HD209458b

$$T_3 = 8000 \text{ K}$$



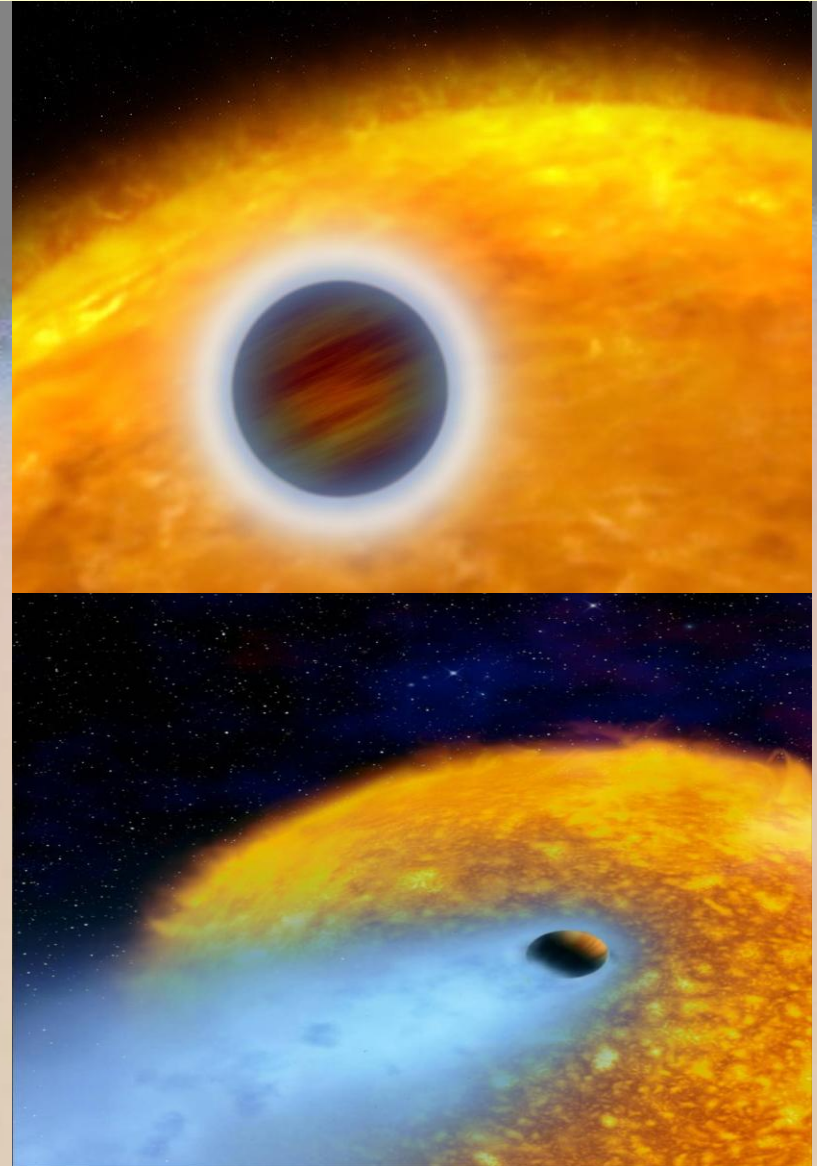
(б) если точка лобового столкновения находится за пределами полости Роша, то начинается истечение через окрестности точек Лагранжа L_1 и L_2 , и оболочка становится либо замкнутой, либо незамкнутой, и существенно несимметричной.

Протяженная корона HD209458b

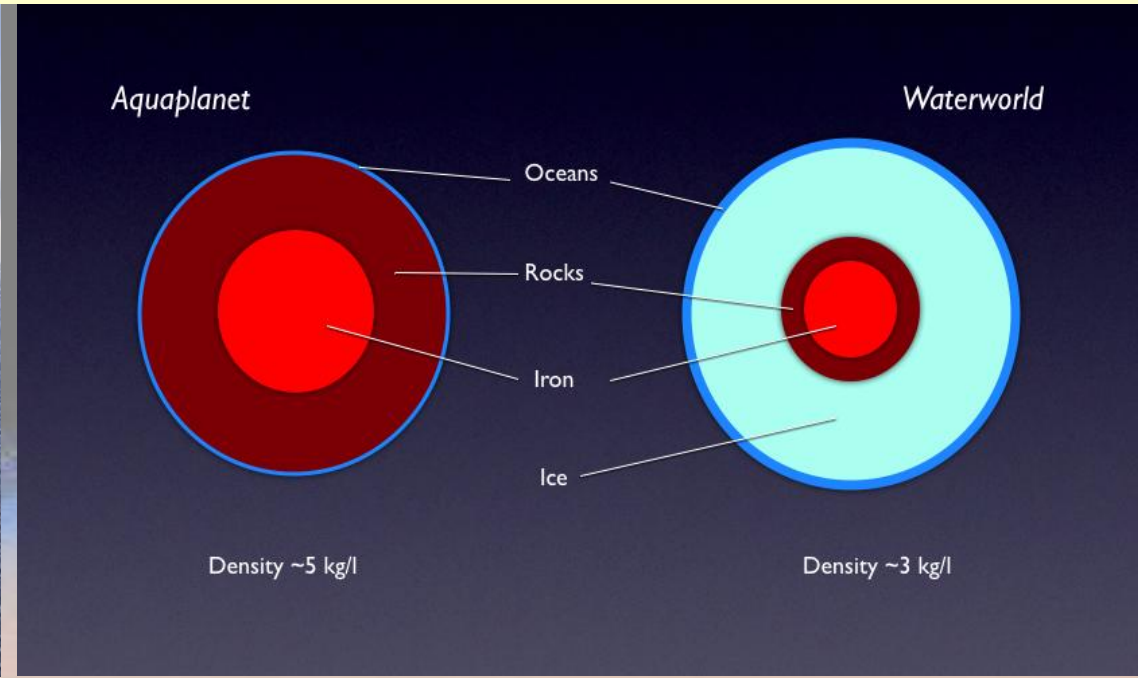
Атмосфера устойчива?

Ben-Jaffel, 2007; Holmstrom et al., 2008; Koskinen et al., 2007; Bisikalo et al., 2013.

Или атмосфера испаряется со скоростью диссипации $\sim > 10^{10}$ g/s?
Lammer et al., 2003; Lecavelier des Etangs, 2007; Vidal-Madjar et al., 2008; Murray-Clay et al., 2008; Bourrier & L. des Etangs, 2013; Bisikalo et al., 2013.



Раздел 4: Супер-земли и суб-нептуны



Супер-земли - водный мир или планета-океан?

- Водный мир – когда вода в форме льда является основной составляющей планеты;
- Планета-океан – каменная планета, покрытая глобальным водным океаном;
- Планета-океан более пригодна для возникновения жизни.

Атмосфера супер-земли GJ1214b: *наблюдения*

$$M=6.6M_E$$

$$R=2.7R_E$$

$$T_{\text{eff}}=400 - 575 \text{ K}$$

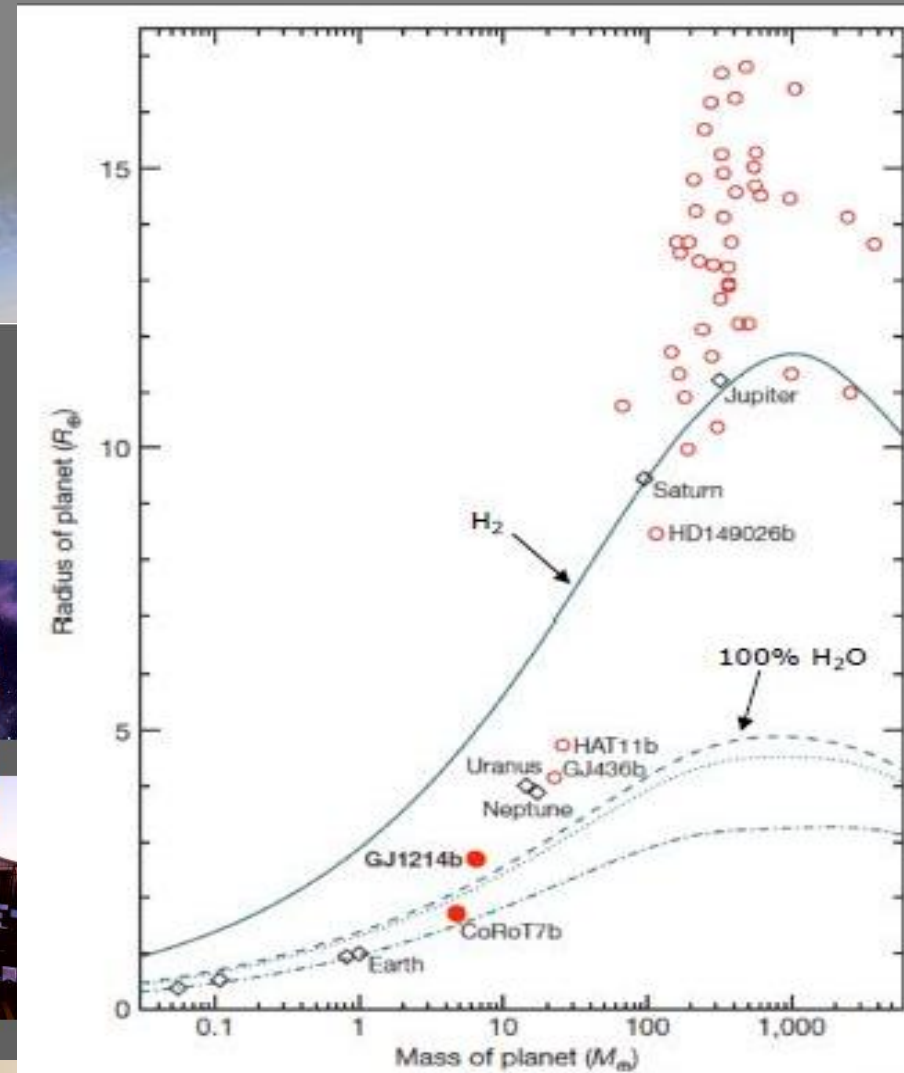
$$\rho=1.6 \text{ g/cm}^3$$

The M-Dwarf Opportunity

GJ 1214b

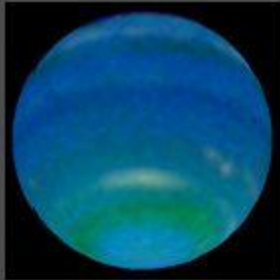
1.4% transit depth

GJ 1214 system
to scale.



Атмосфера супер-земли GJ1214b: *модели*

3 Possible Compositions of GJ 1214b



- 1) Accretion Scenario:
Rock / Ice + Accreted gas (mostly H_2)



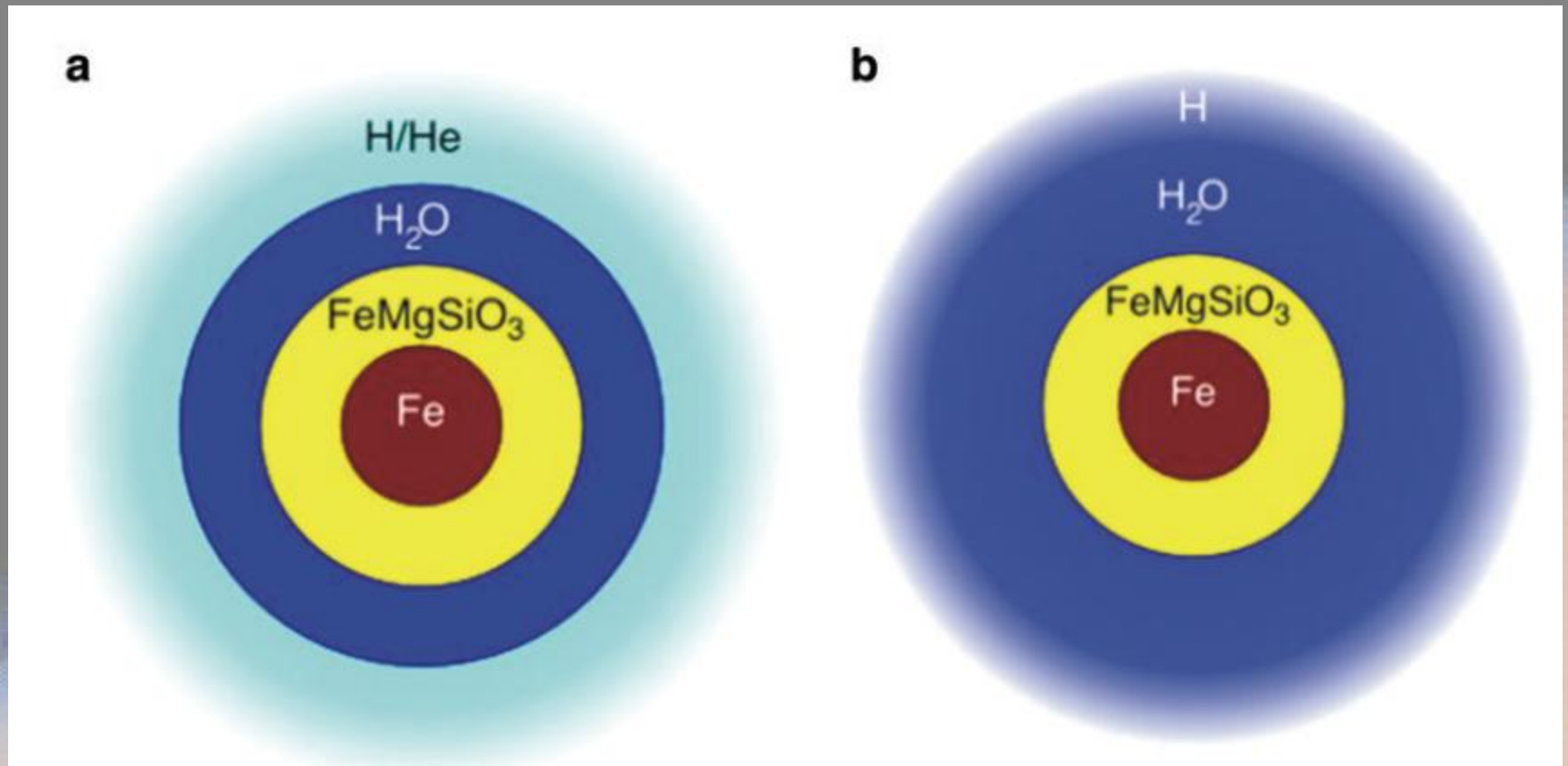
- 2) Outgassing Scenario:
Rock / Ice + Outgassed material (mostly H_2 but with no He)



- 3) Water World Scenario:
Mostly H_2O

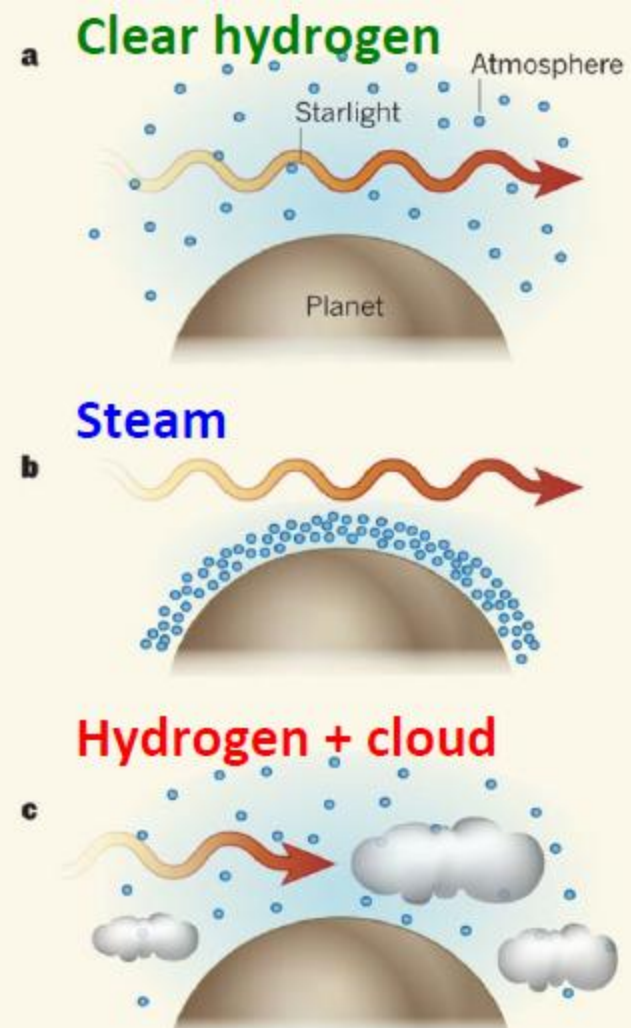
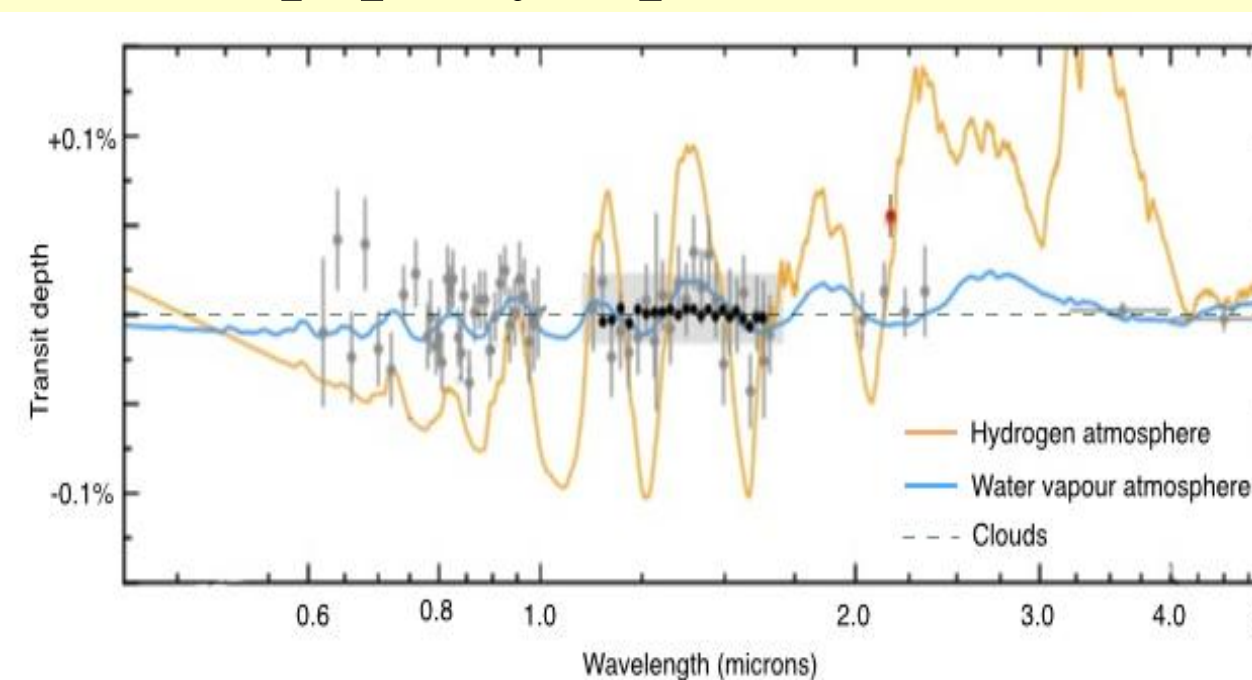
(Rogers & Seager 2010)

Атмосфера супер-земли GJ1214b: модели



Возможные модели атмосферы: (а) мини-Нептун с плотным ядром, окруженным протяженной водородной короной; (б) ядро низкой плотности, окруженное глобальным водным океаном и тонкой водородной оболочкой (Charbonneau et al., 2013).

Атмосфера супер-земли GJ1214b: наблюдения

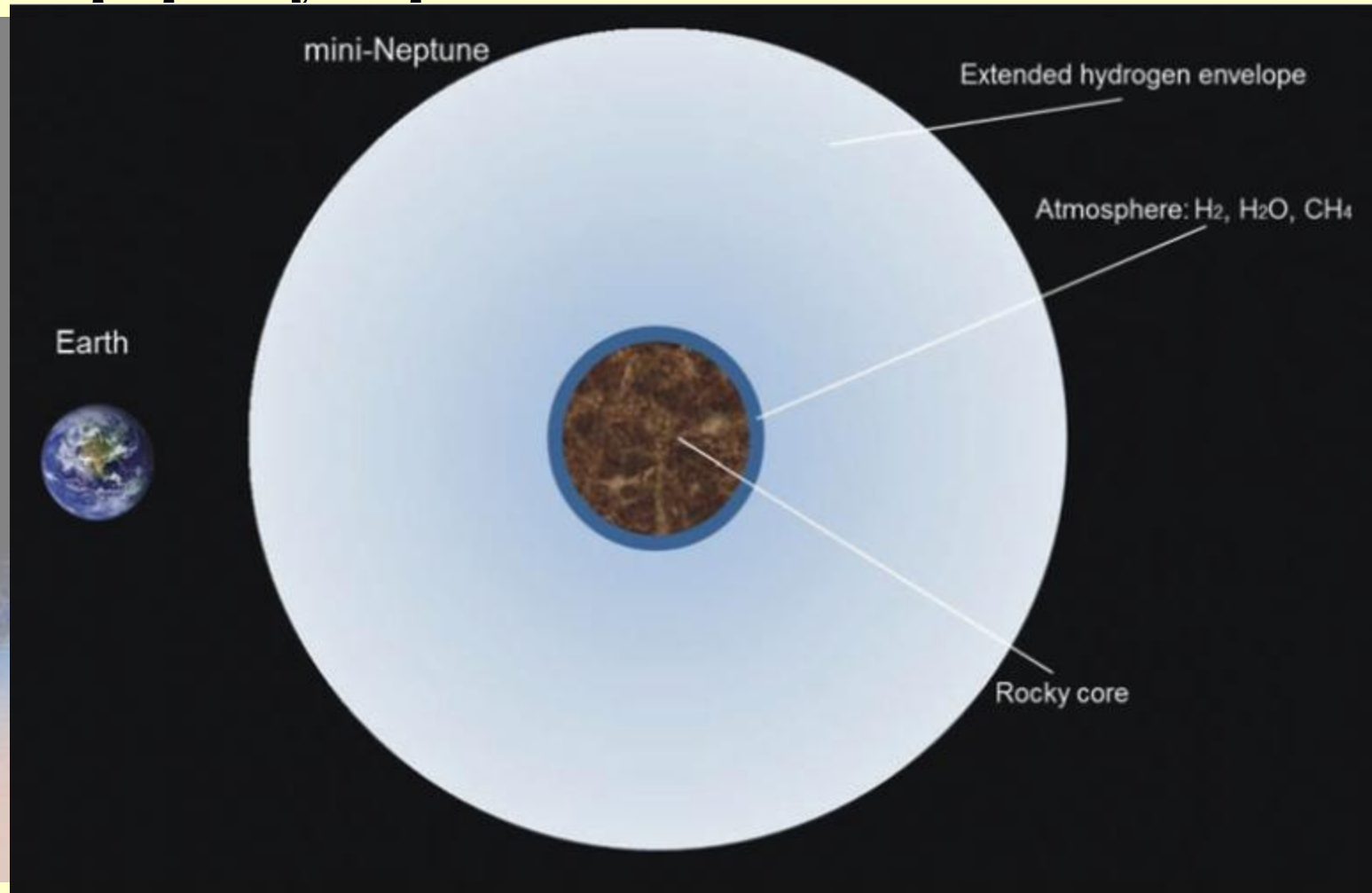


Спектр пропускания для GJ1214b:

- Черный цвет - недавние данные КТХ;
- Желтый – модель водородной атмосферы
- Синий – модель атмосферы из паров воды.

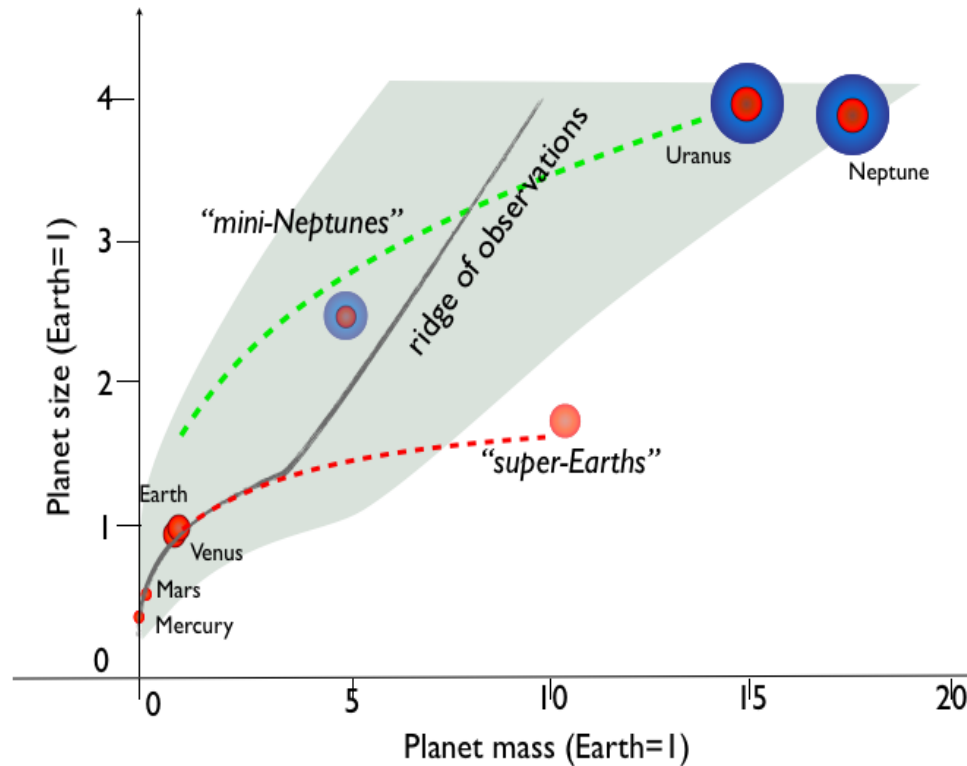
Анализ указывает на присутствие облаков и дымки в атмосфере. Возможно дымка образуется за счет фотохимии метана, сходно с атмосферой Титана, спутника Сатурна.

Атмосфера супер-земли GJ1214b:



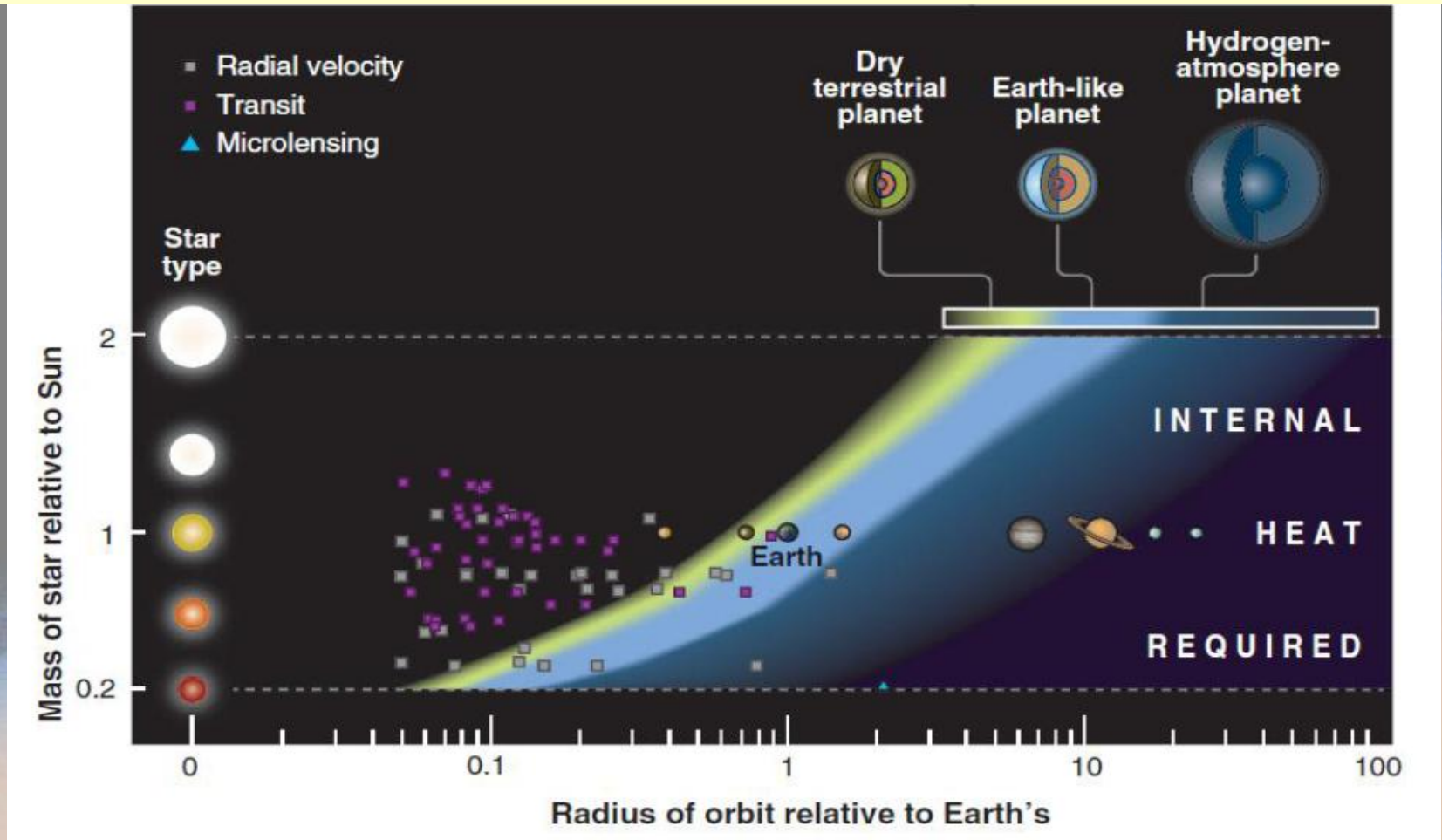
Супер-земли возможно эволюционно связаны с мини-нептунами, сохранившими в атмосфере первичный водород, захваченный из протопланетной туманности.

Супер-земли - каменные планеты или суб-нептуны?



Данные анализа наблюдений КТ Kepler (Wiess and Marcy, 2014). Серая зона – показывает возможное распределение открытых супер-земель. Зеленая и красная линии – возможные типы супер-земель – суб-нептуны или каменные планеты земного типа. Скорее – суб-нептуны!

Раздел 5: Зоны обитаемости



Голубым выделена стандартная зона для каменных планет с N_2 - CO_2 - H_2O атмосферами;

Темно-голубым – расширенная зона для планет в переходной области от каменных к мини-нептунам.

Заключение: Атмосферы экзопланет сильно различаются:

- а) H и He доминантные – газовые и ледяные планеты-гиганты;**
- б) водородные атмосферы суб-нептунов и супер-земель. Водород, а также H_2O , CH_4 и CO, наполняют атмосферу за счет дегазации и фотохимии;**
- в) CO_2 -доминантные атмосферы. Водород и гелий были потеряны. Возможно планеты с океанами воды;**
- г) атмосферы горячих супер-земель без летучих;**
- д)**

Спасибо за внимание!