

Тема 1. Солнечная и внесолнечные планетные системы

В.И. Шематович

Институт астрономии РАН



Солнечная система: *содержание*

Лекция 1 (2 часа): Основные характеристики планет Солнечной системы.

Лекция 2 (2 часа): Малые тела Солнечной системы. Спутники и кольца планет.

Лекция 3 (2 часа): Кометы и астероиды.

Лекция 4 (2 часа): Атмосферы планет и малых небесных тел.

Лекция 5 (2 часа): Экзопланеты.

Лекция 6 (2 часа): Атмосферы экзопланет. Зона обитаемости.

Резюме лекции:

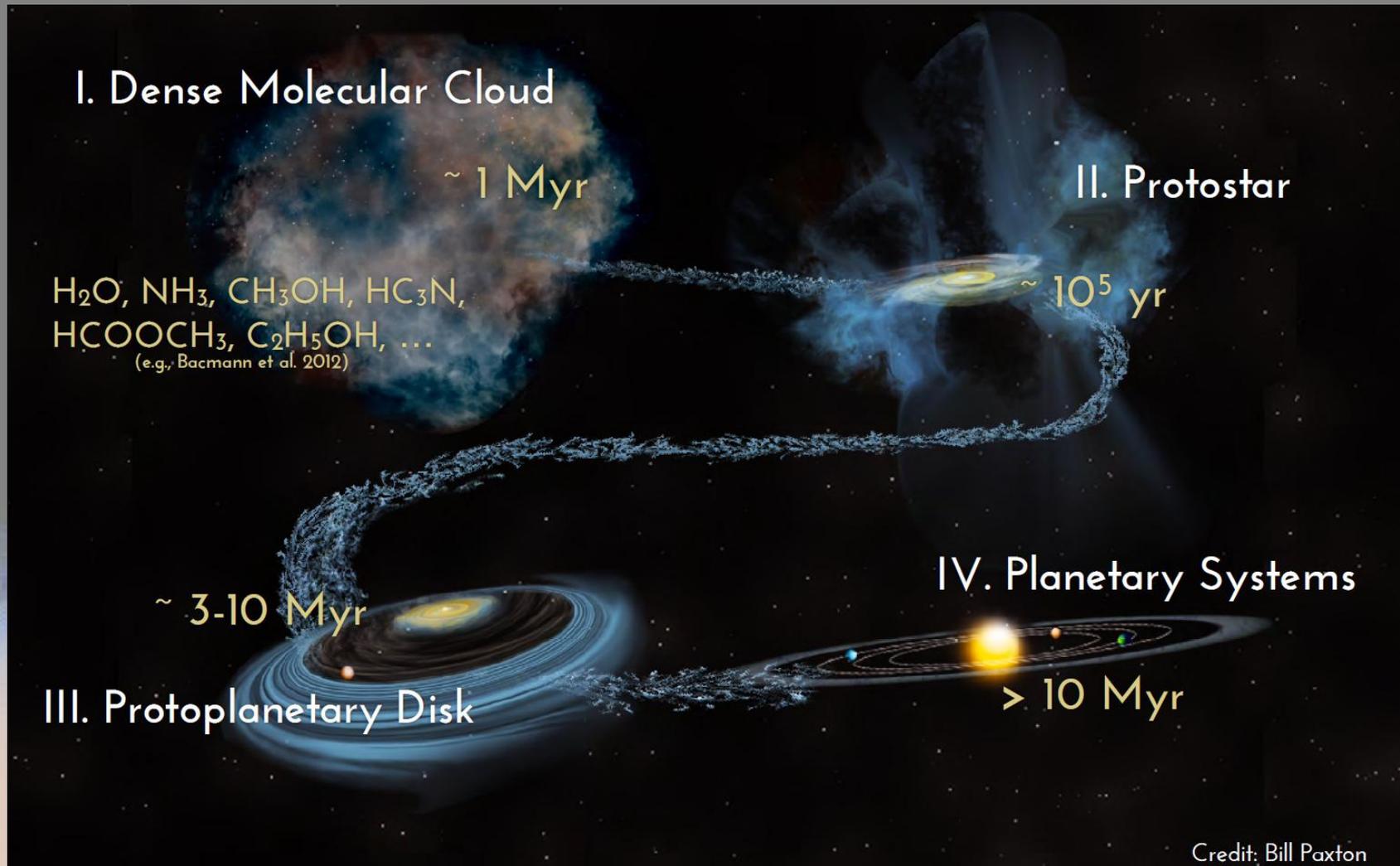
На заре первого открытия экзопланет в середине 1990-х годов мало кто верил, что наблюдения атмосфер экзопланет когда-либо будут возможны. После открытия в 2002 году при помощи космического телескопа им. Хаббла атмосферы у транзитной экзопланеты, многие скептики оценили это лишь как одноразовый успех (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.



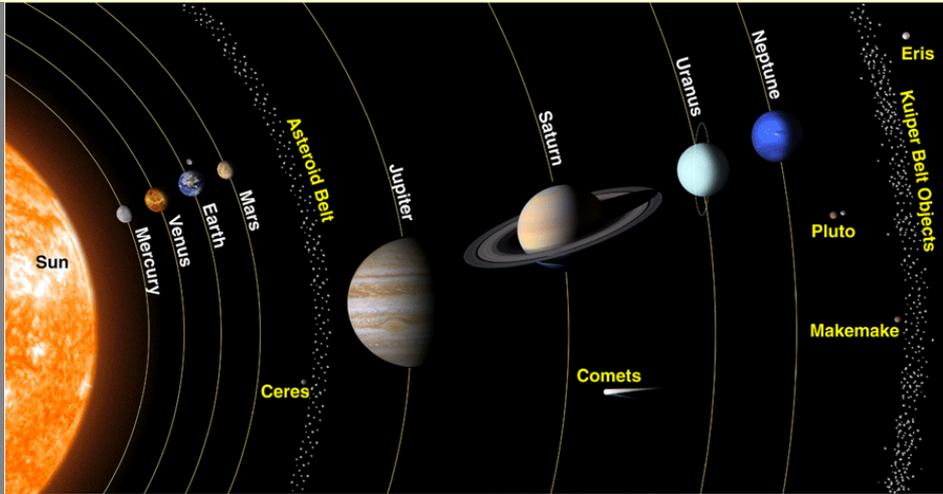
Конечная цель исследований атмосфер экзопланет состоит в том, чтобы ответить на загадочный и древний вопрос - одиноки ли мы во Вселенной?

Экзопланеты: *образование*



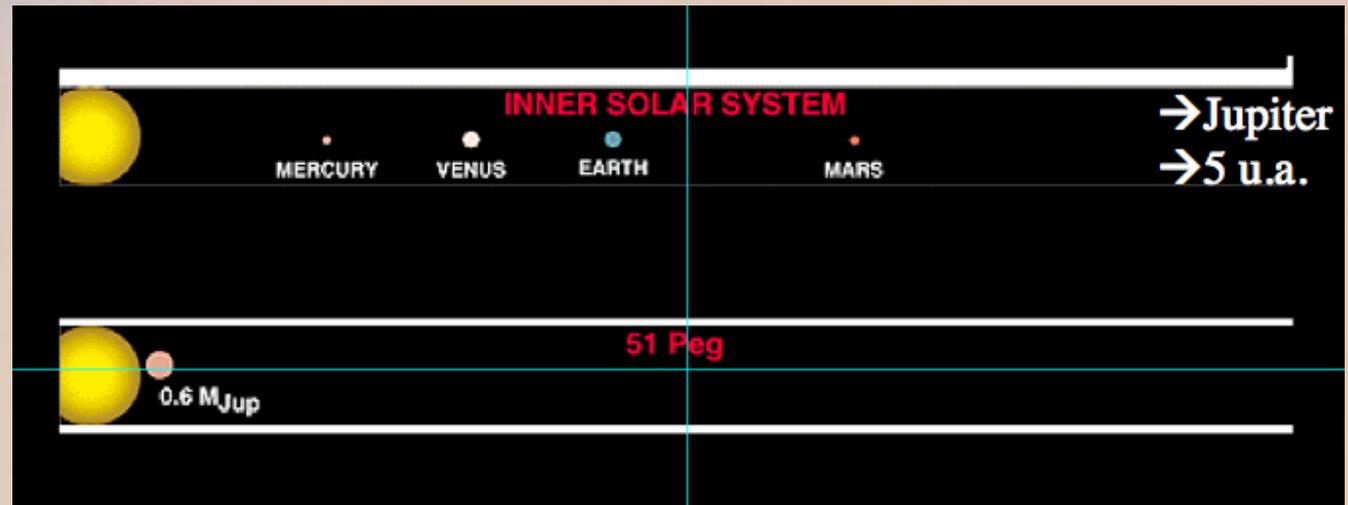
Жизненный цикл межзвездного вещества в нашей Галактике

Экзопланеты: образование и эволюция

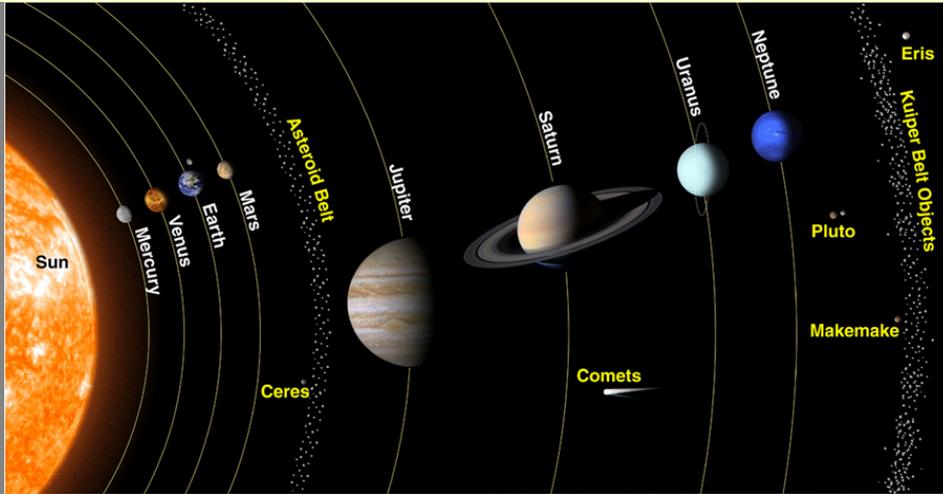


Наша Солнечная система

Первая экзопланета, открытая в 1995 г. у звезды солнечного типа:
- 51 Peg – $M=1.1 M_{\text{sun}}$
- Планета 51 Peg b со следующими характеристиками: $T=4.7$ дня, $a=0.005$ а.у., $M=0.47 M_{\text{Jupiter}}$



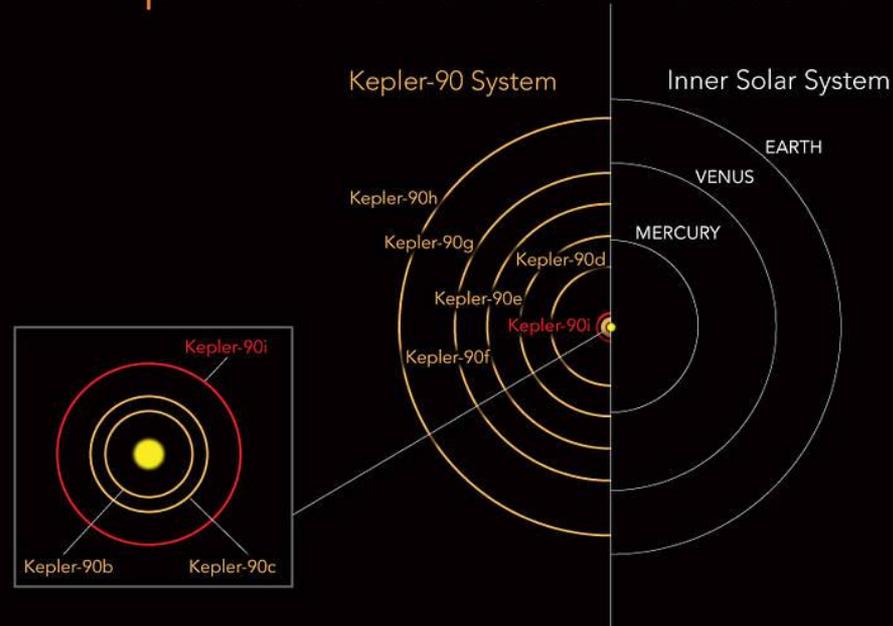
Экзопланеты: образование и эволюция



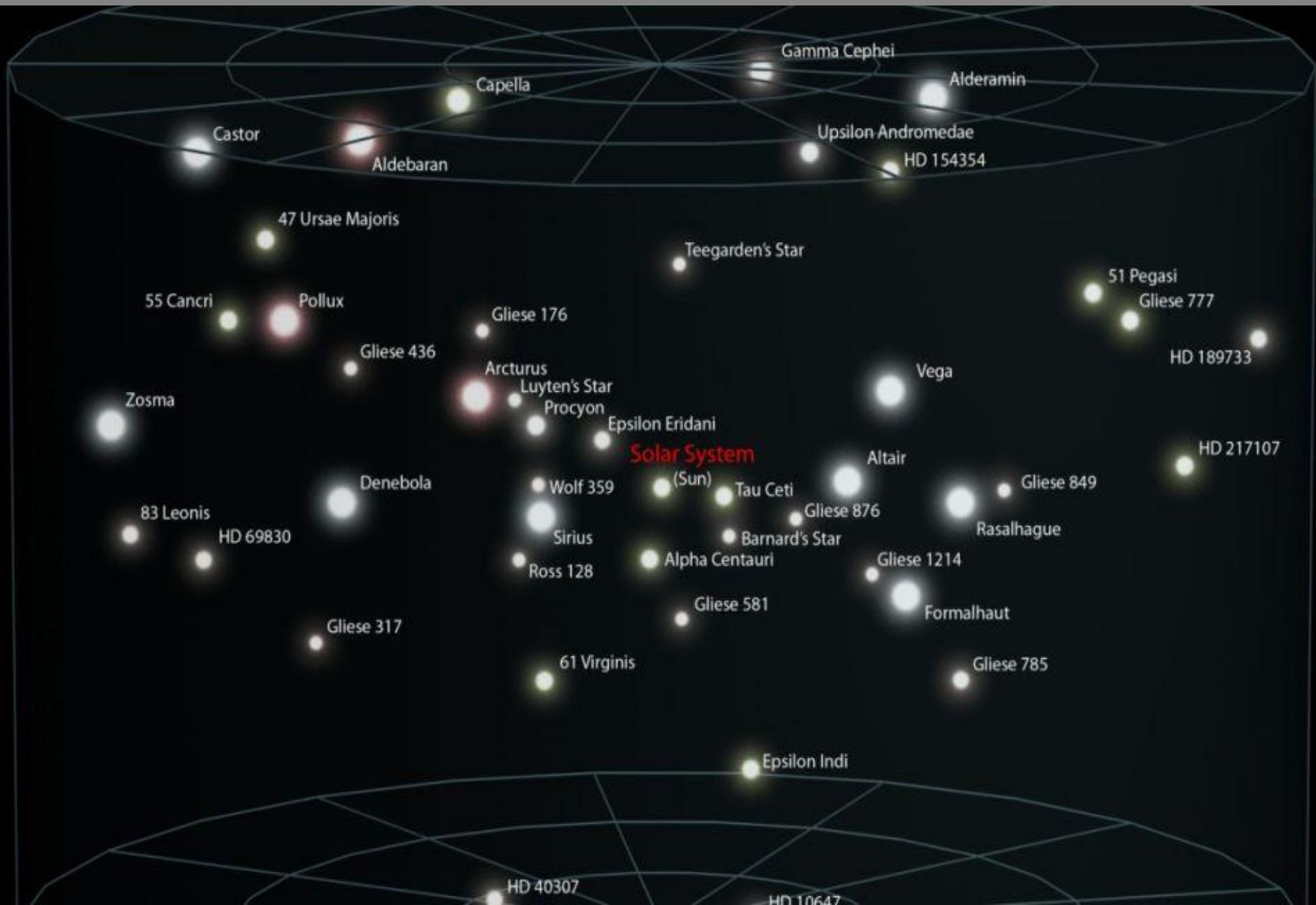
Система из 8 планет у подобной Солнцу звезды Kepler-90, расположенной на расстоянии в 2545 световых лет. Планета Kepler-90i открыта в декабре 2017 г.

Наша Солнечная система

Kepler-90 Planets Orbit Close to Their Star

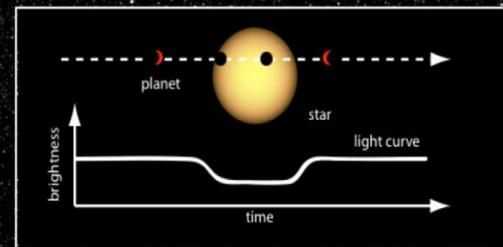
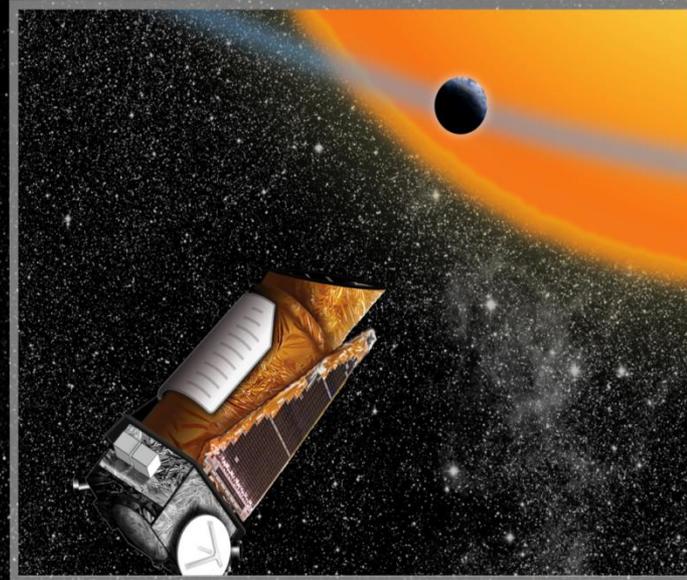


Солнце и ближайшие звезды



Kepler Mission

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



Milky Way Galaxy



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

Экзопланеты: КТ Кеплер

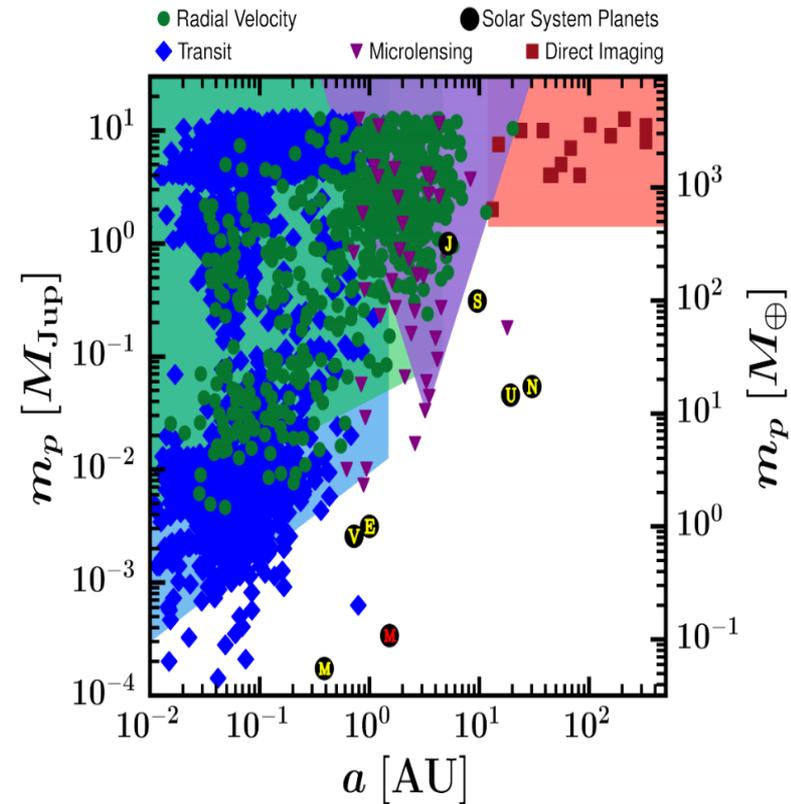
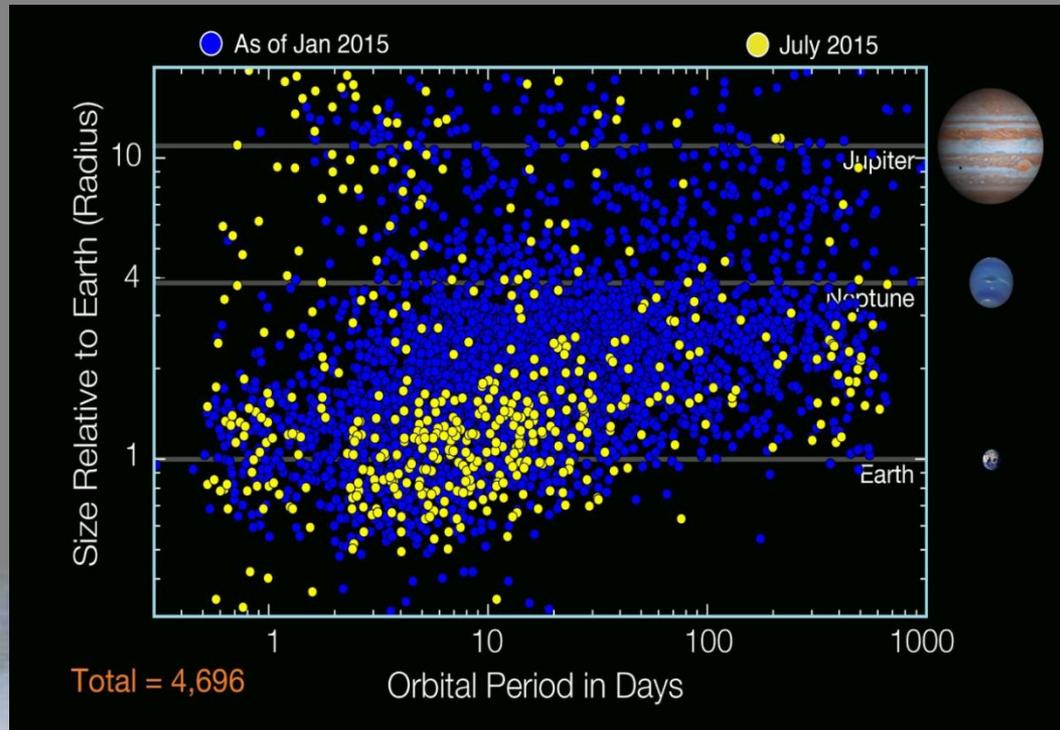


Расстояние от Солнца в

Космический телескоп Кеплер:

- Основная миссия наблюдений т
- Поле наблюдений ~150 000 звезд
- Открыто более 5000 кандидатов
- которых подтверждено другими
- Расширенная миссия К2 2014-20

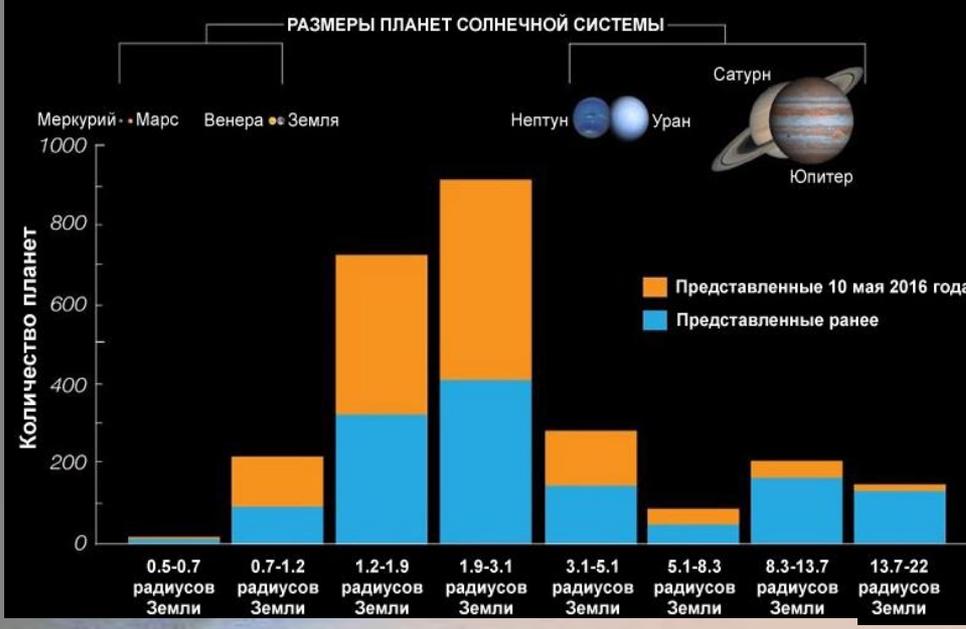
Экзопланеты: статистика



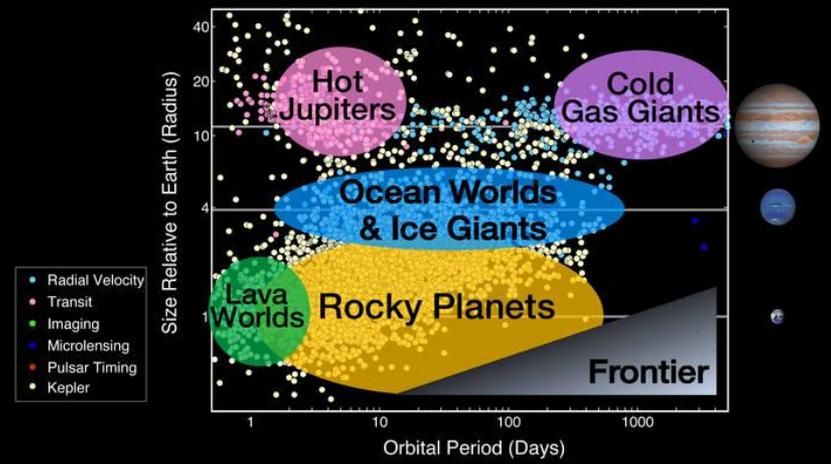
Слева: показаны орбитальный период в земных днях и размер планеты в радиусах Земли

Справа: показаны расстояние до звезды в а.е. и масса планеты в массах Земли

Экзопланеты: распределение планет по данным КТ Кеплер



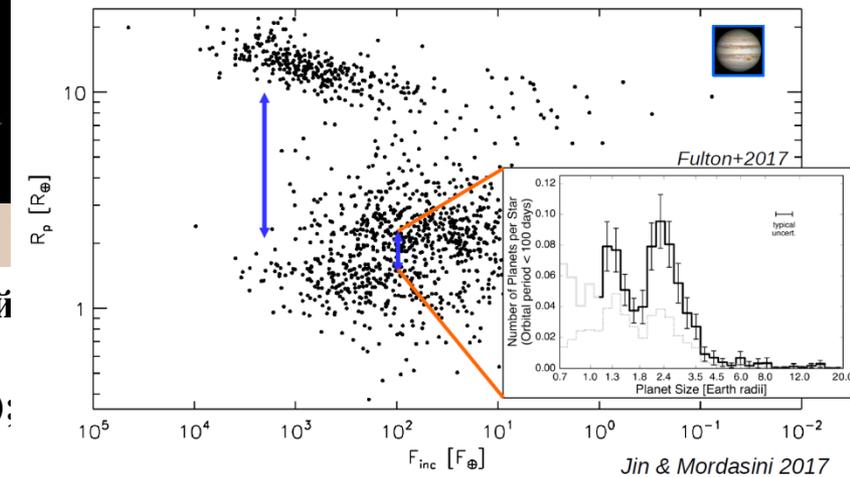
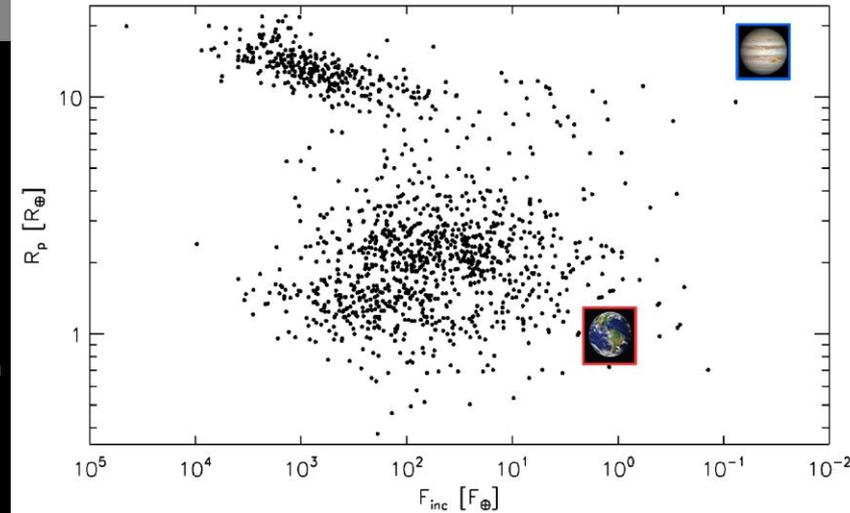
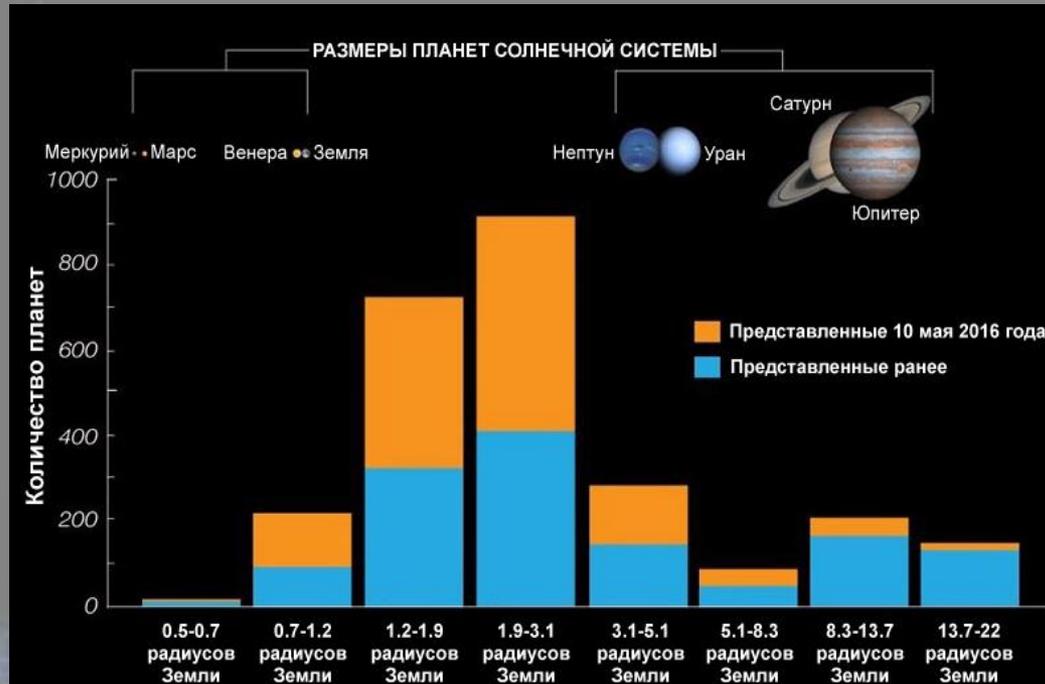
Exoplanet Populations



Экзопланеты занимают широкий диапазон значений по массе планеты и ее эффективной температуре:

- Экзоземли и суб-земли ($T \sim 300 \text{ K}$; $R < 1.25R_E$);
- Супер-земли ($T \sim 500 \text{ K}$; $R \sim (1.25 - 2.0)R_E$);
- Горячие нептуны и суб-нептуны (водные миры) ($T \sim 700 - 1200 \text{ K}$; $R \sim (2.0 - 6.0)R_E$);
- Горячие (экстремально горячие) юпитеры ($T \sim 1300 - 3000 \text{ K}$) на близких к звезде орбитах;
- Теплые и холодные газовые гиганты ($T \sim 500 - 1500 \text{ K}$; $R \sim (6.0 - 15.0)R_E$), относительно удаленные от звезды.

Экзопланеты: распределение планет по данным КТ Кеплер



Экзопланеты занимают широкий диапазон значений по массе планеты и ее эффективной температуре:

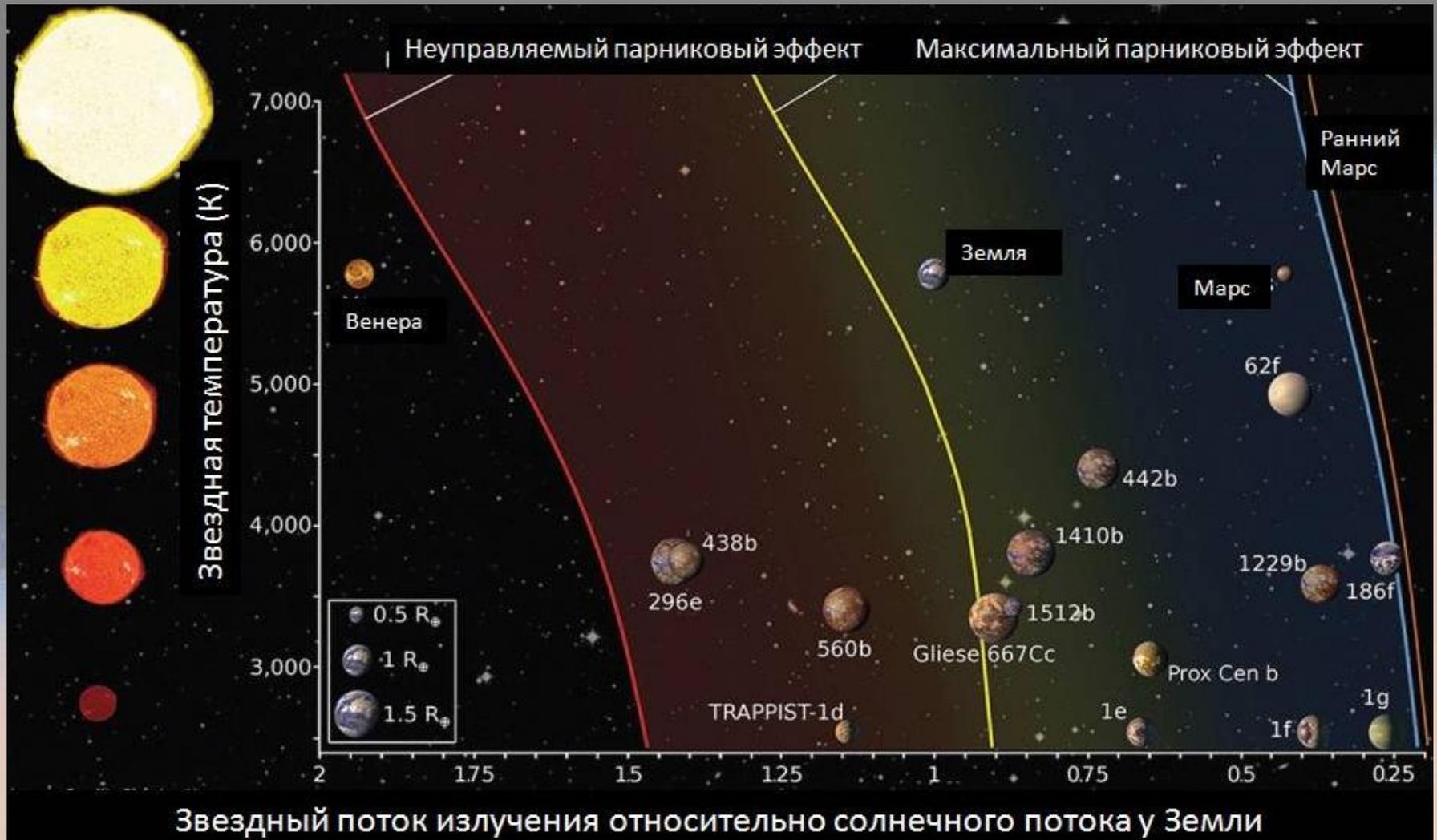
- Умеренные земли и суб-земли ($T \sim 300 \text{ K}$; $R < 1.25 R_E$);
- Супер-земли ($T \sim 500 \text{ K}$; $R \sim (1.25 - 2.0) R_E$);

- Горячие нептунуны и суб-нептунуны ($T \sim 700 - 1200 \text{ K}$; $R \sim (2.0 - 6.0) R_E$);

- Горячие (экстремально горячие) юпитеры ($T \sim 1300 - 3000 \text{ K}$) на близких к звезде орбитах;

- Теплые газовые гиганты ($T \sim 500 - 1500 \text{ K}$; $R \sim (6.0 - 15.0) R_E$), относительно удаленные от звезды.

Экзопланеты: в зонах обитаемости

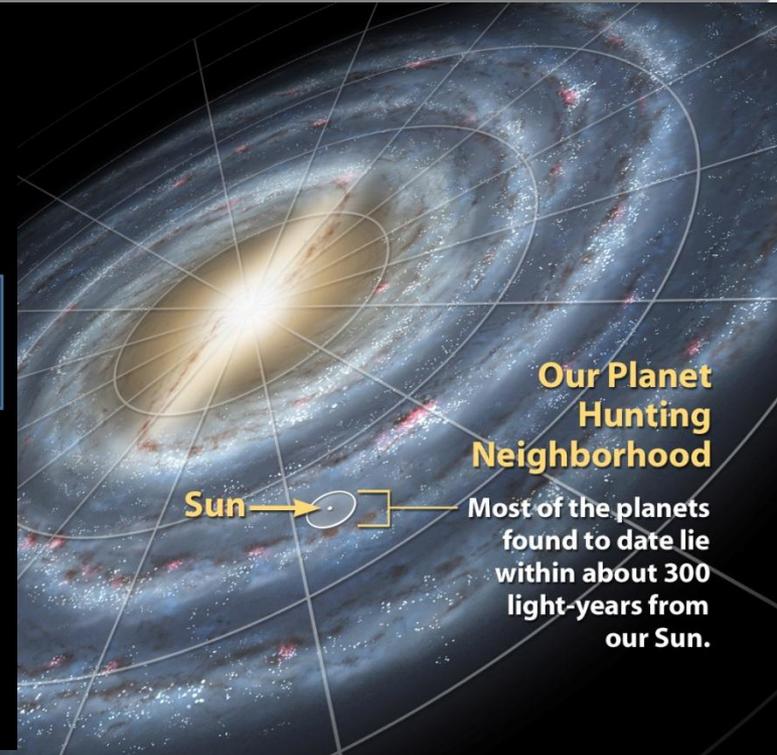
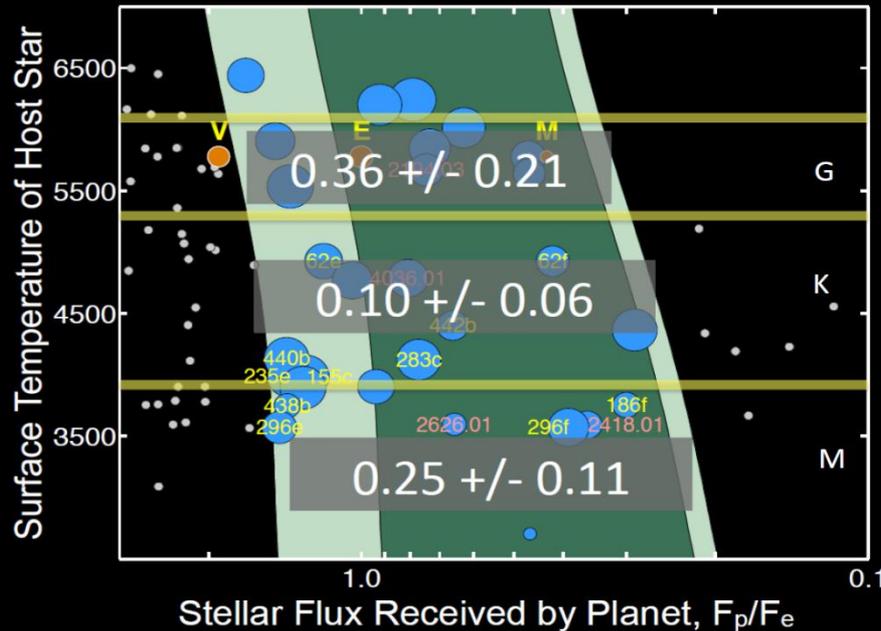


Текущая статистика экзопланет, находящихся в потенциальных зонах обитаемости своих родительских звезд

Экзопланеты: сколько планет?

Small ($< 2 R_e$) Planets in the HZ: 4 yr

■ Empirical HZ ■ Narrow HZ ● In HZ, symbol scaled to size of Earth



Общие выводы из текущей статистики экзопланет на основе наблюдений КТ Кеплер:

- планеты разных типов, начиная от планет с лавой или магмой на поверхности, и до планет-океанов и ледяных планет;
- в среднем встречается одна планета почти у каждой звезды в нашей Галактике;
- планеты с размером Земли достаточно обычны и, более того, часто расположены в зоне потенциальной обитаемости родительской звезды!

Экзопланеты: статистика

The new normal

Astronomers thought they knew how planets form by studying one system: our own (top). But in the past 20 years, they have discovered seemingly impossible exoplanets (bottom), turning theories on their heads.

Snowline
Outside this boundary, water ice helps solid cores form quickly.

Ice giants
Move slowly and form slowly, ending up smaller.

Gas giants
Form a solid core quickly, pulling in a thick gas envelope.

Rocky planets
Form slowly and remain small, missing out on a thick atmosphere.

Distant super-Jupiters
Did they form a solid core first, or condense straight from the gas disk?

Detection gap
Telescopes cannot yet identify planets in middle-distance orbits.

Super-Earth
A rocky leviathan, but how did it avoid becoming a gas giant?

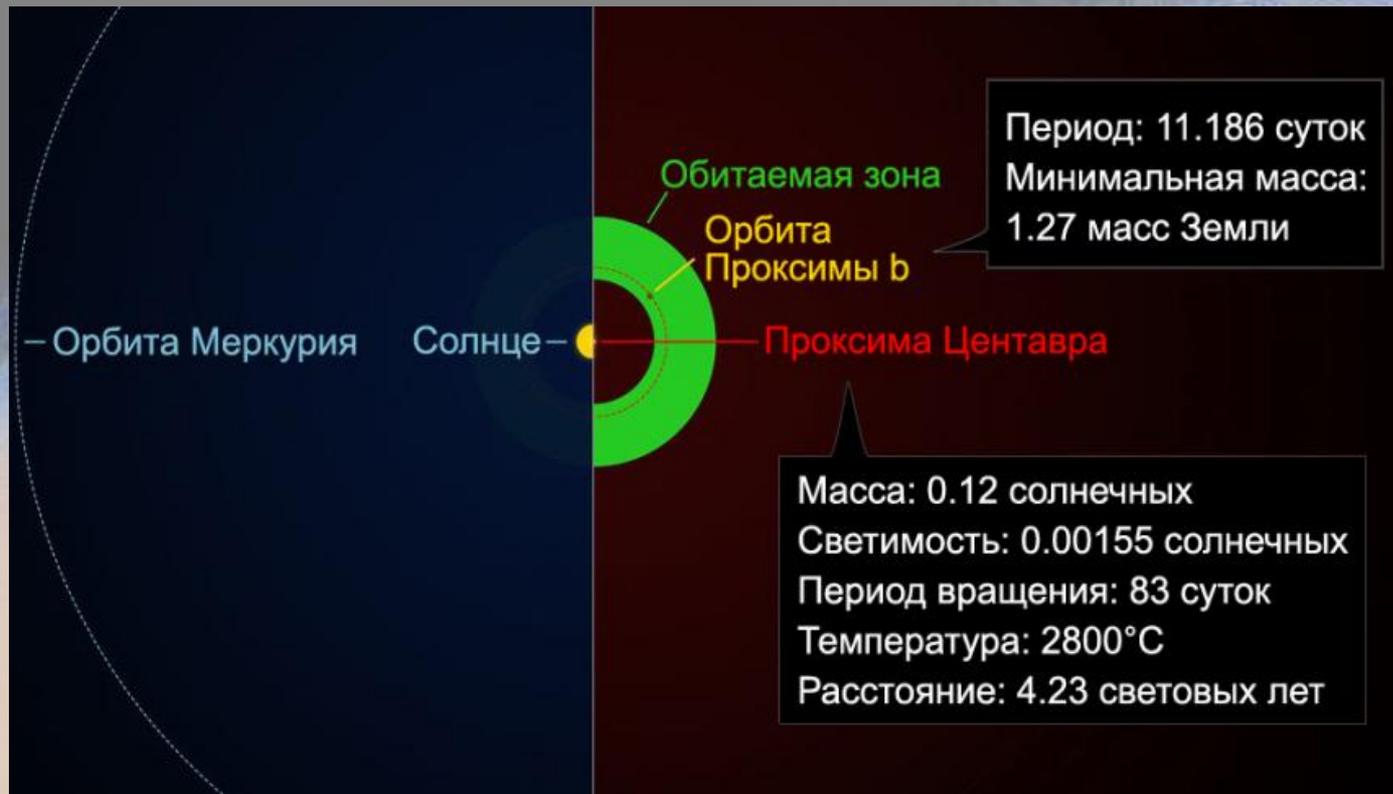
Superpuff
A small core with an infeasibly big atmosphere.

Hot Jupiter
Unlikely to have formed in this scorching region.

Weird orbits
A sign that something disrupted the system in the past.

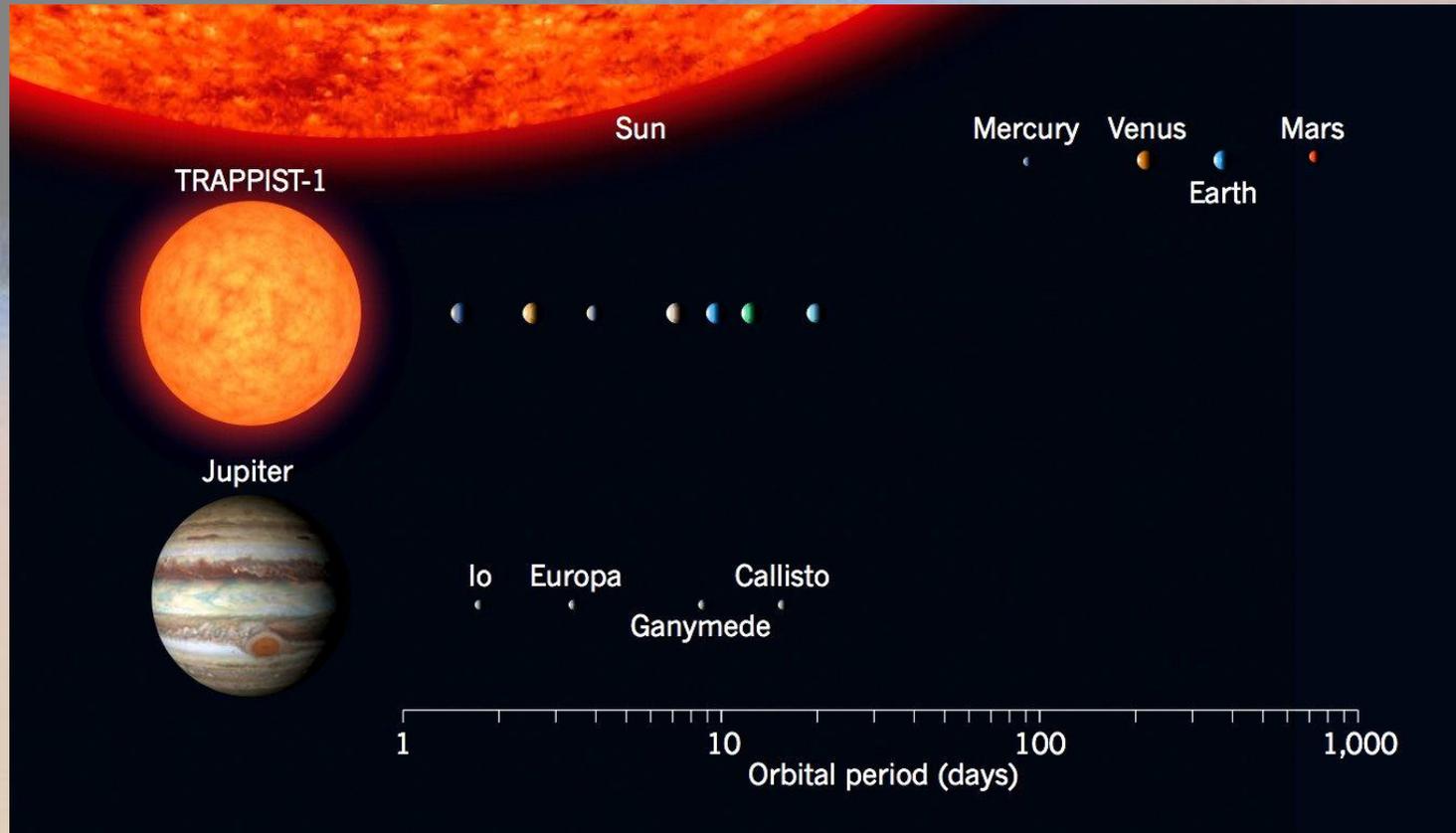
Внесолнечные планетные системы: *Proxima*

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

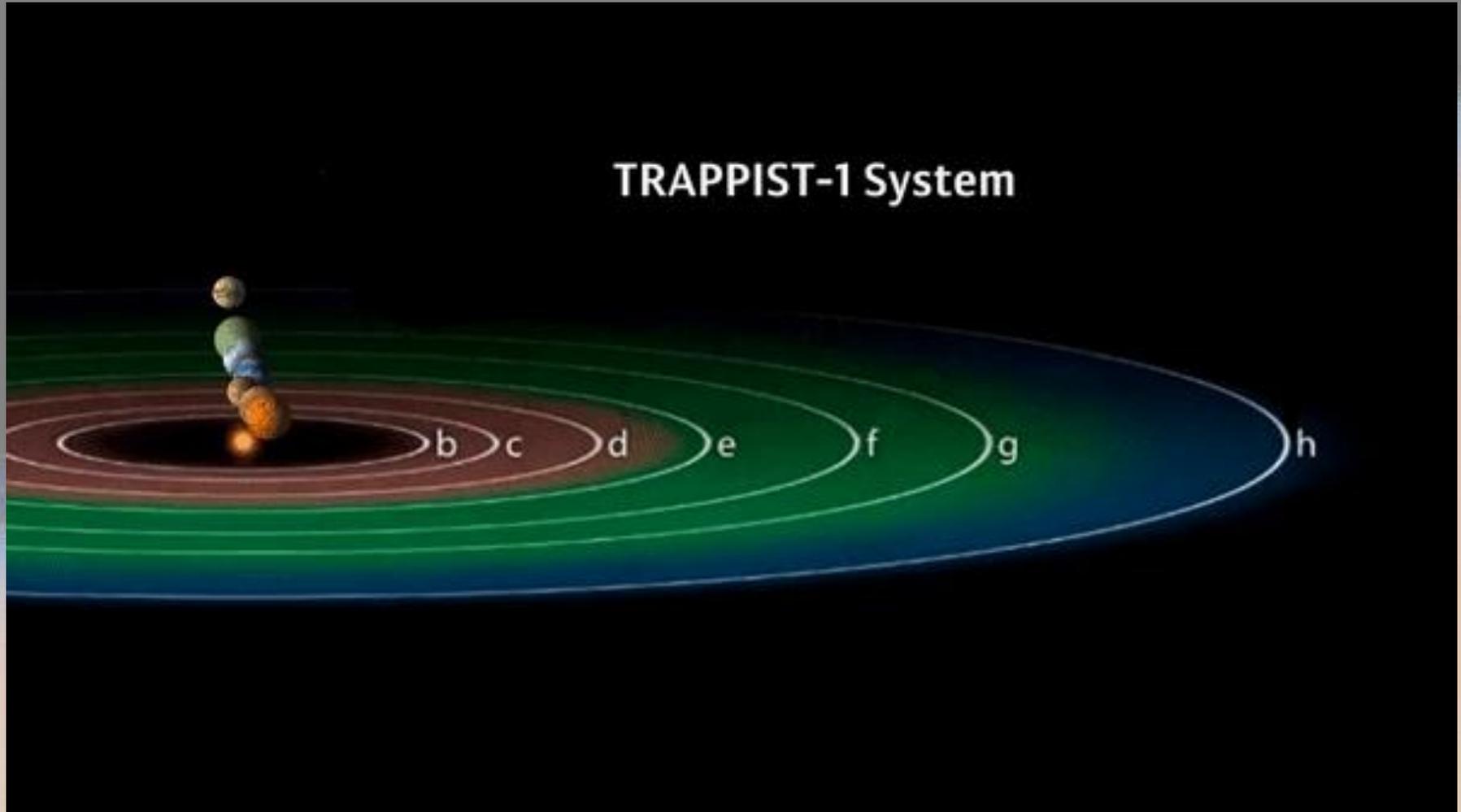


Внесолнечные планетные системы: *TRAPPIST-1*

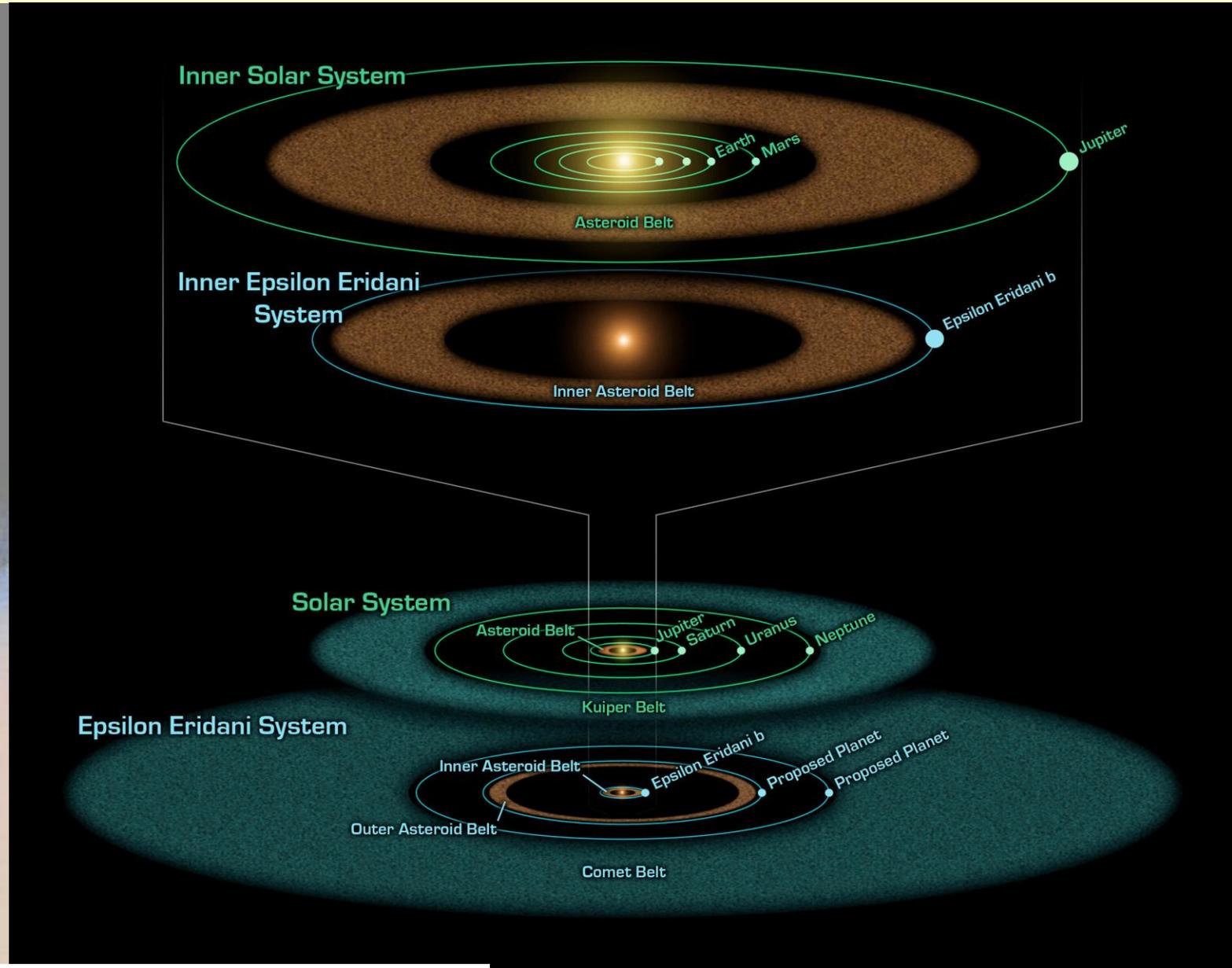
TRAPPIST-1 ультрахолодный красный карлик, чья масса близка к пределу Кумара (0.08 солнечных масс), а радиус всего на ~14% превышает радиус Юпитера. Эффективная температура звезды оценивается в 2550К – ниже, чем у спирали лампочки накаливания. **TRAPPIST-1** удалена от нас на 12.1 ± 0.4 пк.



Внесолнечные планетные системы: *TRAPPIST-1*

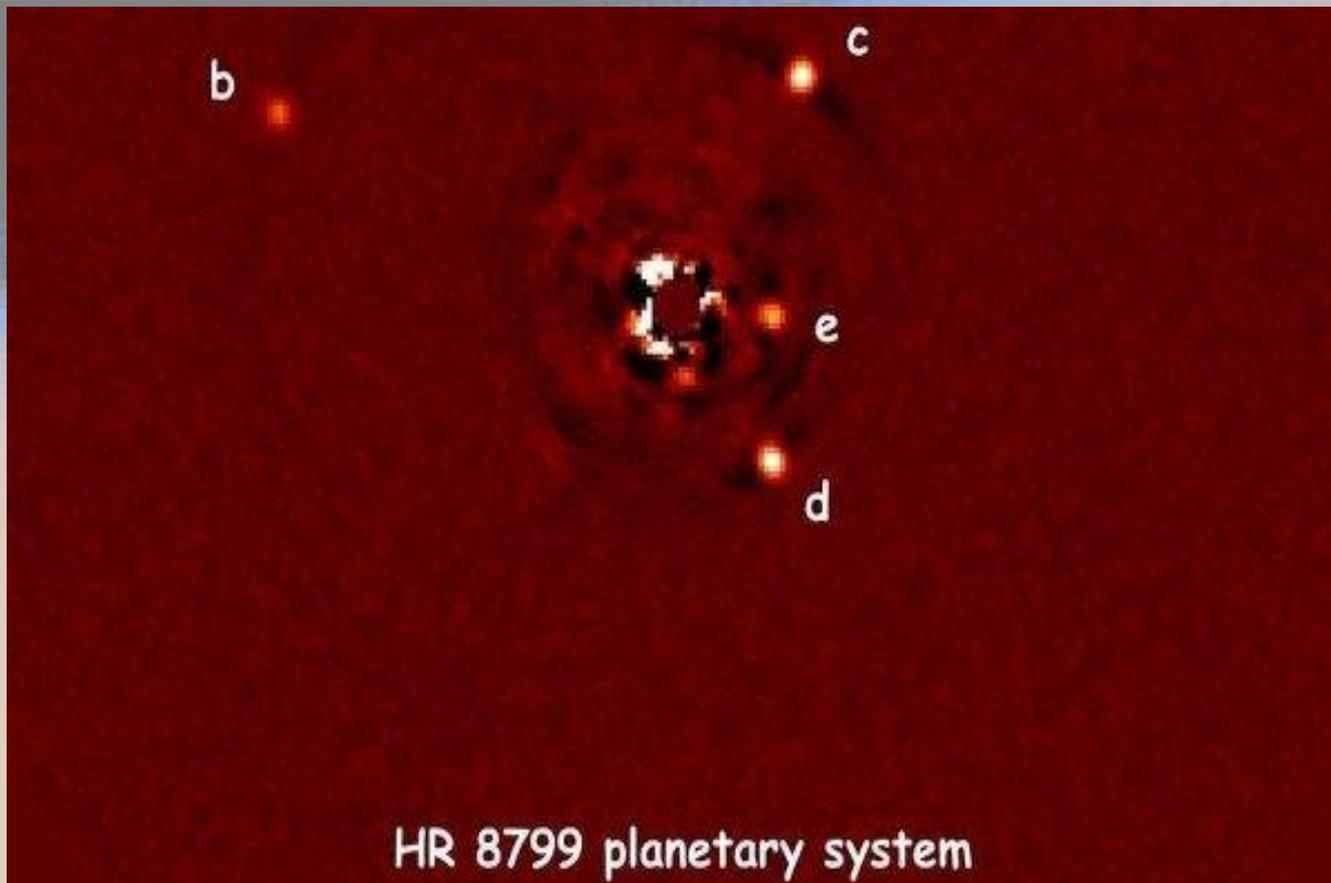


Внесолнечные планетные системы: *Eps Eri*

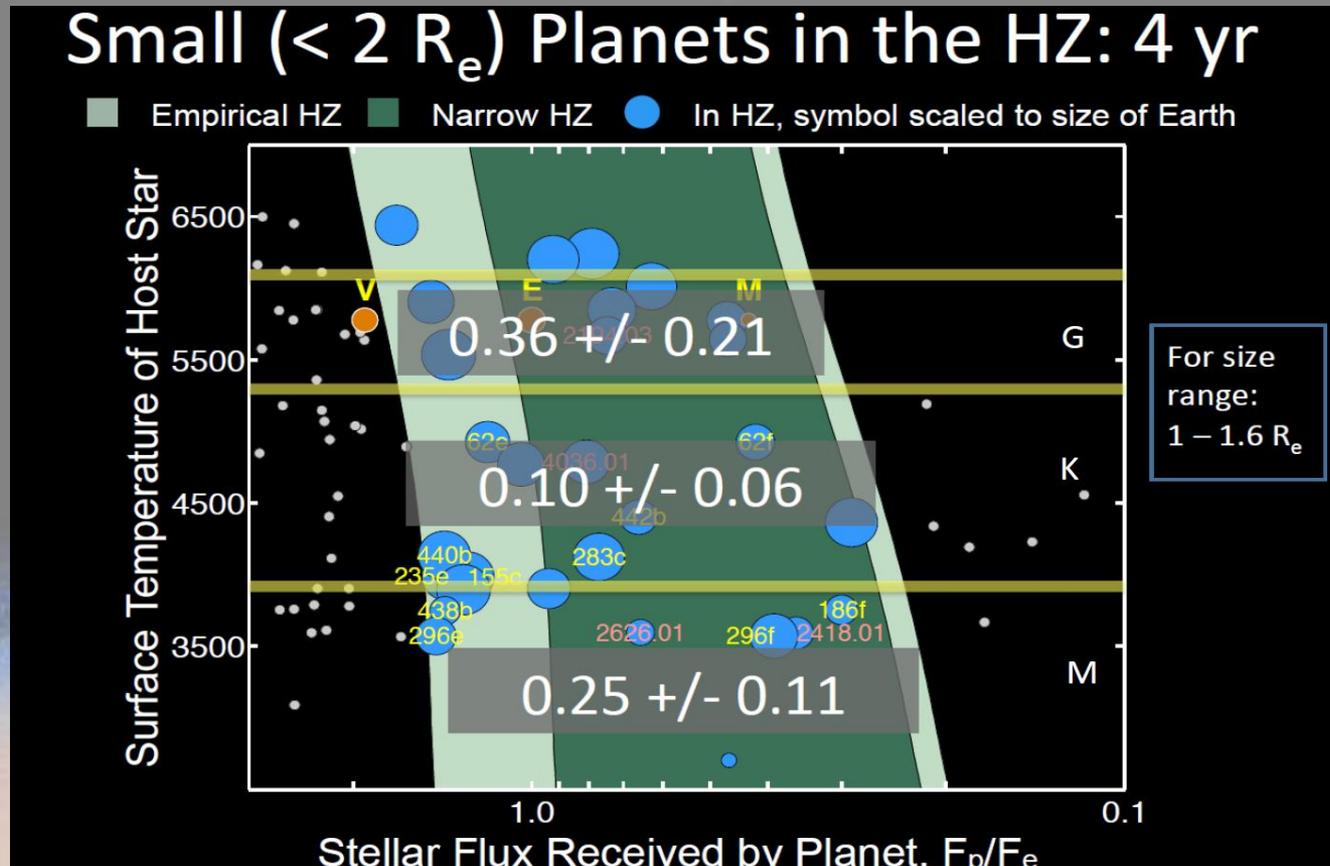


Внесолнечные планетные системы: *HR 8799*

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.



Экзопланеты: сколько планет?



Общие выводы из текущей статистики экзопланет на основе наблюдений КТ Кеплер:

- Планеты разных типов, начиная от планет с лавой или магмой на поверхности, и до планет-океанов и ледяных планет;
- в среднем встречается одна планета почти у каждой звезды в нашей Галактике;
- планеты с размером Земли достаточно обычны и, более того, часто расположены в зоне потенциальной обитаемости родительской звезды!

Экзопланеты: эпоха характеристики

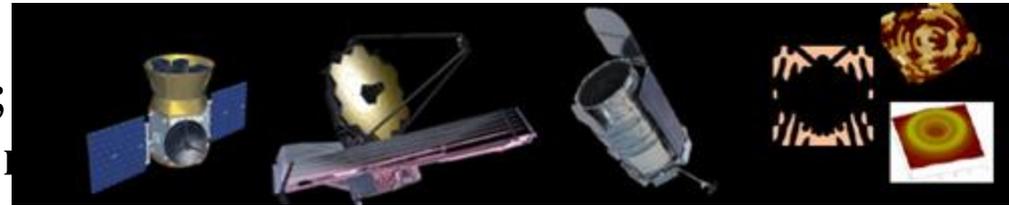
1. Открытия планет: как много планет в нашей галактике?

- измерения радиальных скоростей;
- фотометрия транзитов.



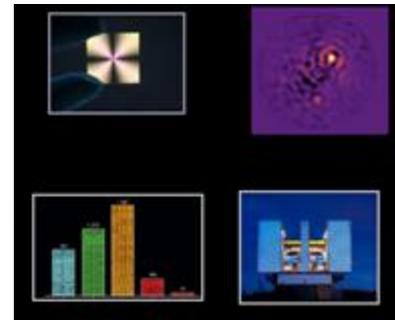
2. Характеристики планет: на что похожи экзопланеты?

- спектроскопия транзитов;
- прямые изображения планет;
- внутреннее строение планет и атмосферы.



3. «Тусклые голубые точки»: Обитаемы ли экзопланеты? Есть ли признаки жизни?

- спектроскопия транзитов;
- прямые изображения планет;
- эволюция планетных атмосфер;
- биомаркеры.



Внесолнечные планеты: эпоха характеризации

Planets, planetary systems and their host stars evolve

→ Need to derive accurate planetary system age → asteroseismology

Formation in proto-planetary disk, migration

Loss of primary, atmosphere

Stellar radiation, wind and magnetic field

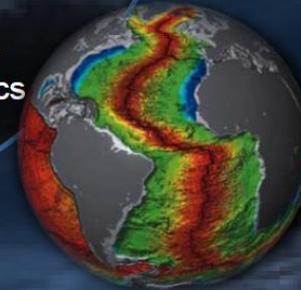
Cooling, differentiation

Cooling, differentiation

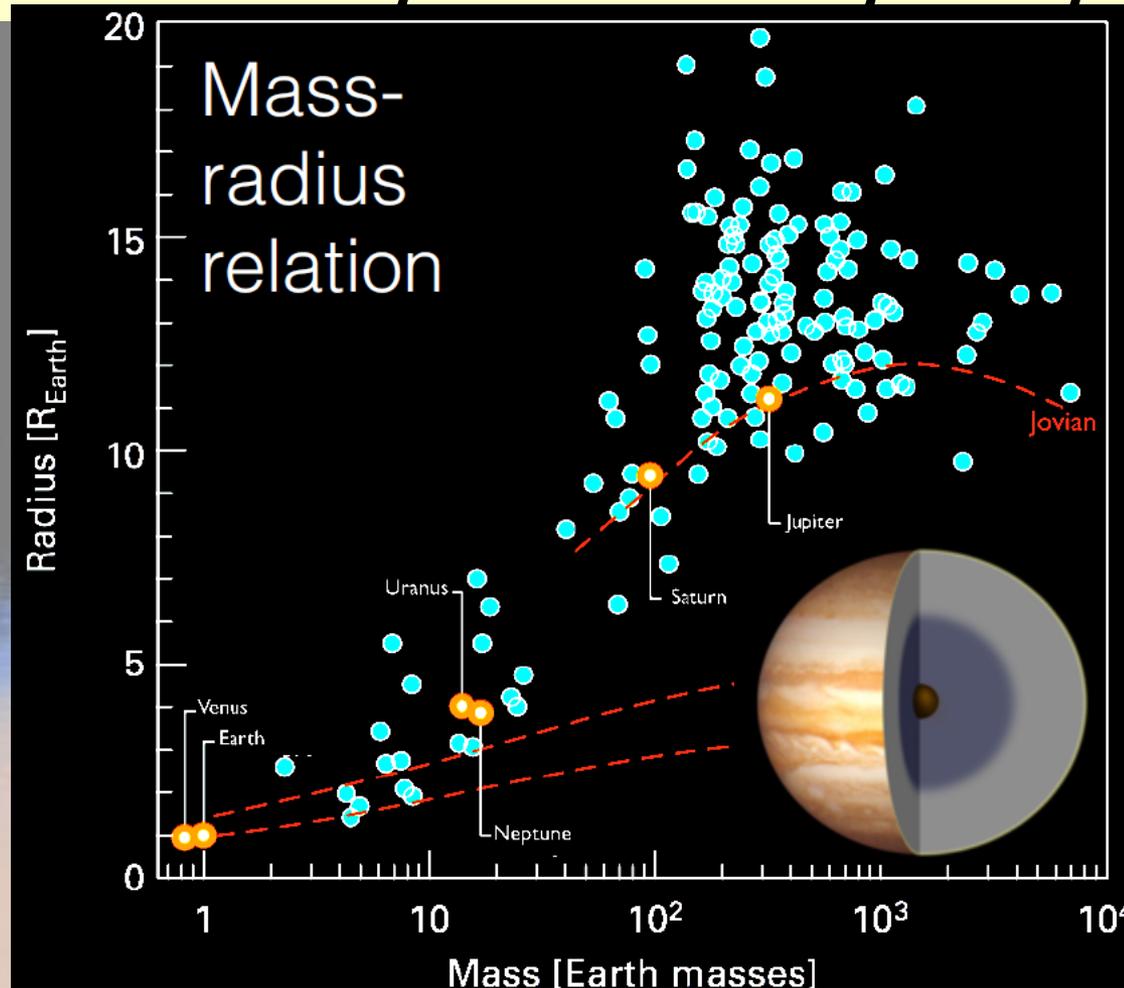
life

Secondary atmosphere

(plate)-tectonics



Экзопланеты: эпоха геофизической характеристики

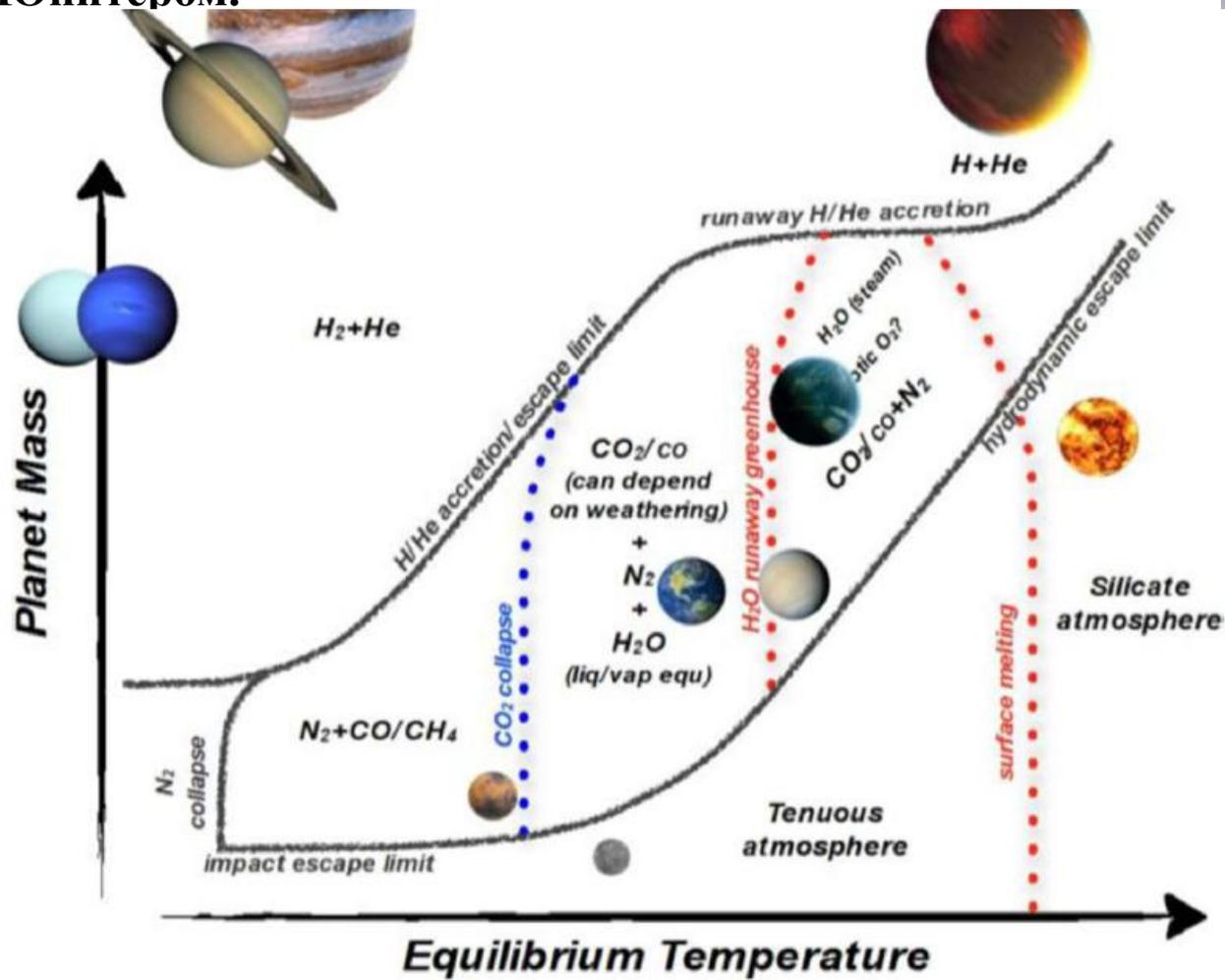


Первичная геофизическая характеристика экзопланет по диаграмме масса-радиус. Позволяет определить среднюю плотность планеты - каменные, ледяные или газовые планеты!

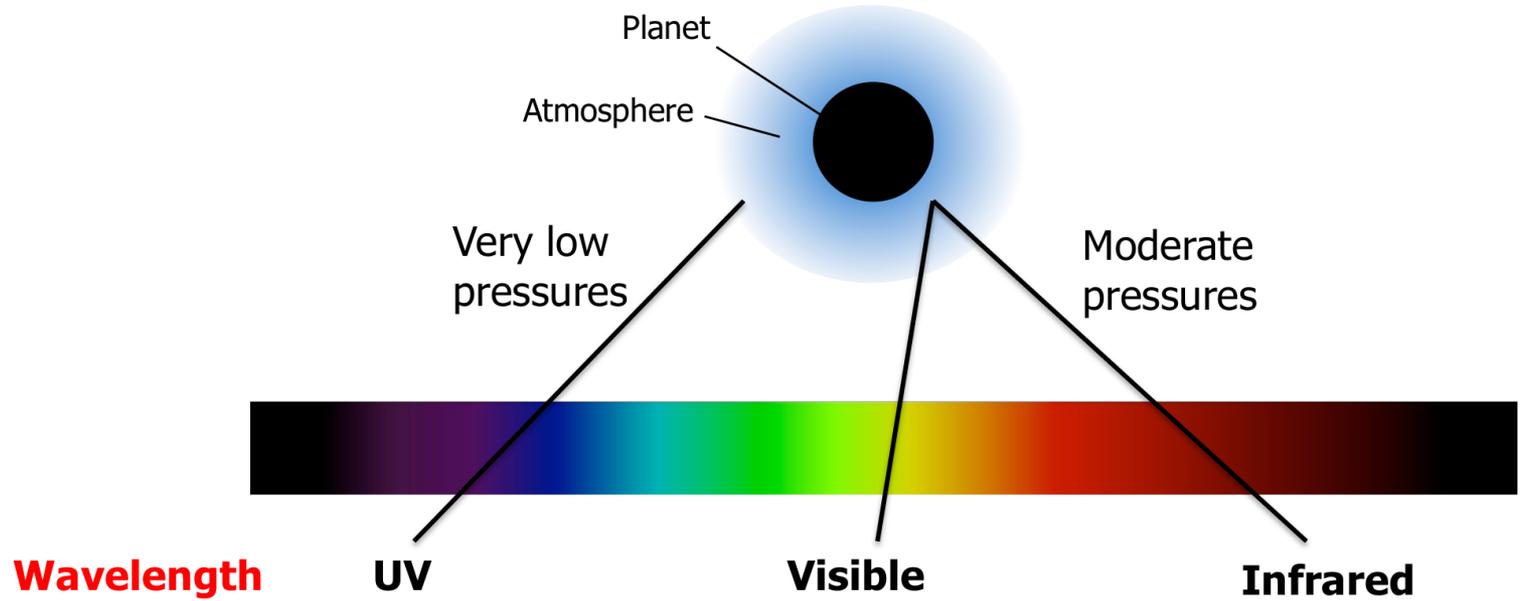
Общие тенденции: большое разнообразие планет по сравнению с Солнечной системой; горячие планеты-гиганты, «раздутые» планеты-гиганты, выборочности наблюдений и т.д.

Экзопланеты: эпоха геофизической характеристики

Схематическое представление различных классов атмосфер (Forget & Leconte, 2014). Показаны только ожидаемые основные газы, другие (примесные) газы также могут присутствовать. Каждая линия представляет собой переход от одного режима к другому, но эти «переходы» нуждаются в жесткой калибровке по наблюдениям. Планеты Солнечной системы показаны вместе с планетой с океаном лавы, планетой-океаном и горячим Юпитером.



Экзопланеты: характеристики химии атмосфер



Wavelength

UV

Visible

Infrared

What do we measure?

Lyman alpha, ionized metals

Sodium, potassium, TiO(?)

Water, methane, CO, CO₂

What do we learn?

Atmospheric mass loss

Clouds/hazes or transparent? Other absorbers?

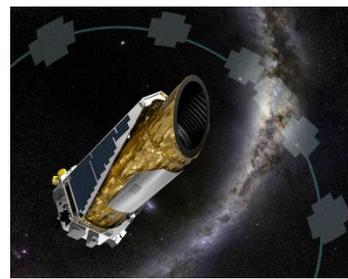
Is the chemistry in equilibrium?

0.1—0.2 μm

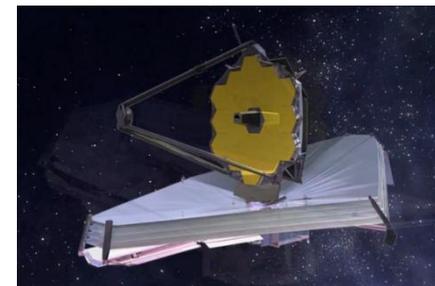
0.3—1.7 μm

3.0—24 μm

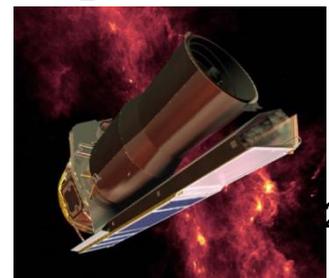
HST



JWST

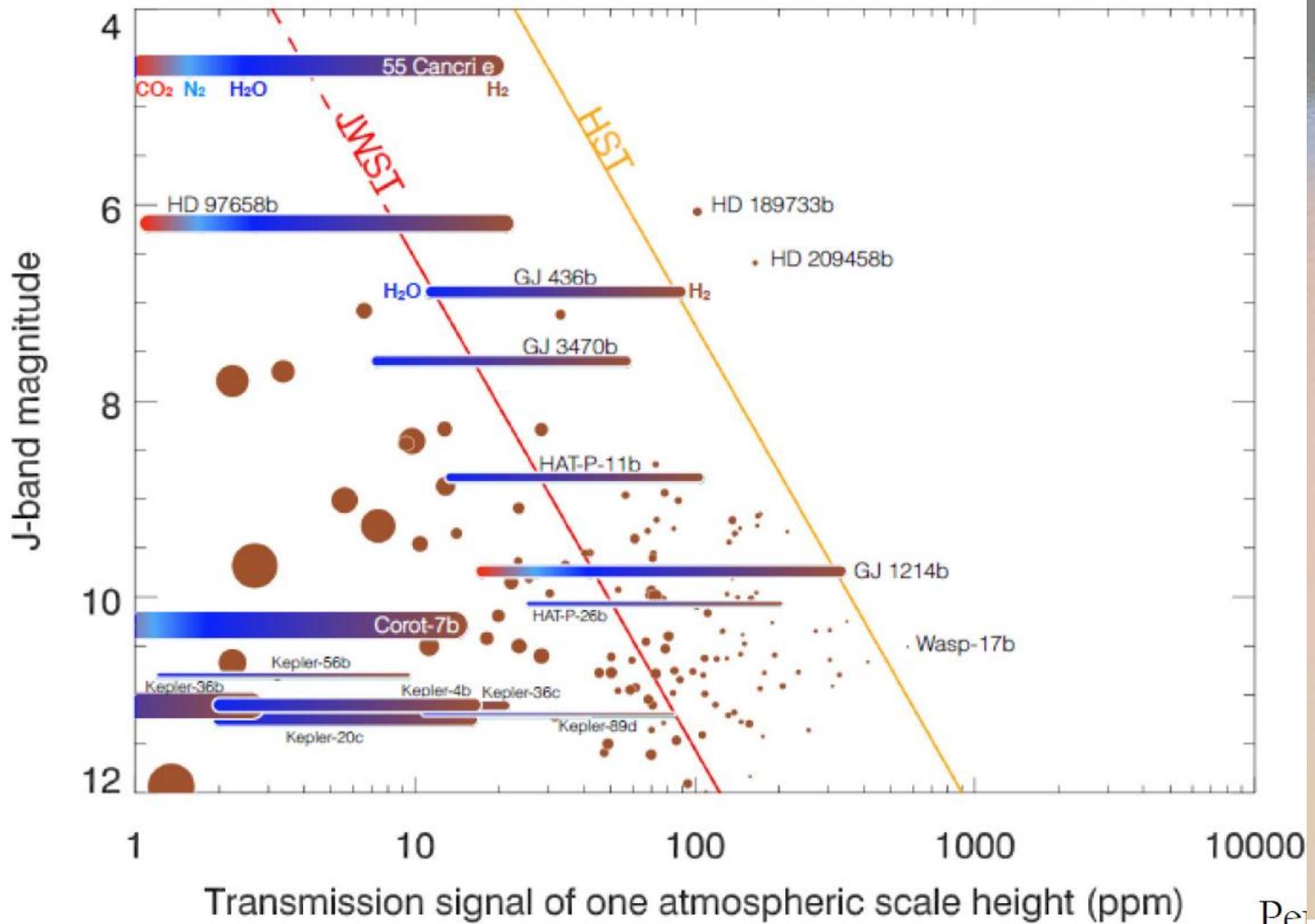


Spitzer IR ST



Внесолнечные планеты: эпоха характеризации

Detection of a planetary atmosphere during transit (transmission) with HST and JWST



Возможности детектирования атмосфер экзопланет во время наблюдений транзитов

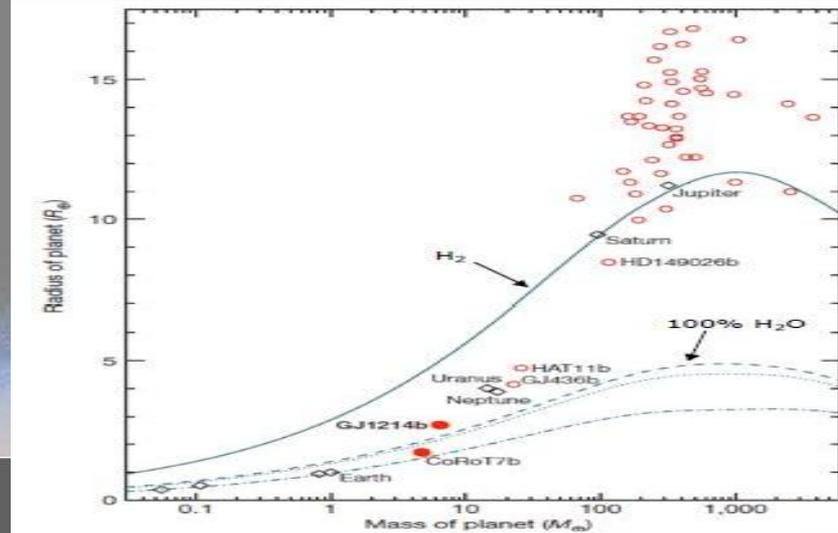
Атмосфера суб-нептуна GJ1214b: наблюдения

$$M=6.6M_E$$

$$R=2.7R_E$$

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

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

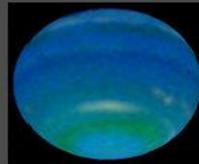


The M-Dwarf Opportunity

GJ 1214b

1.4% transit depth

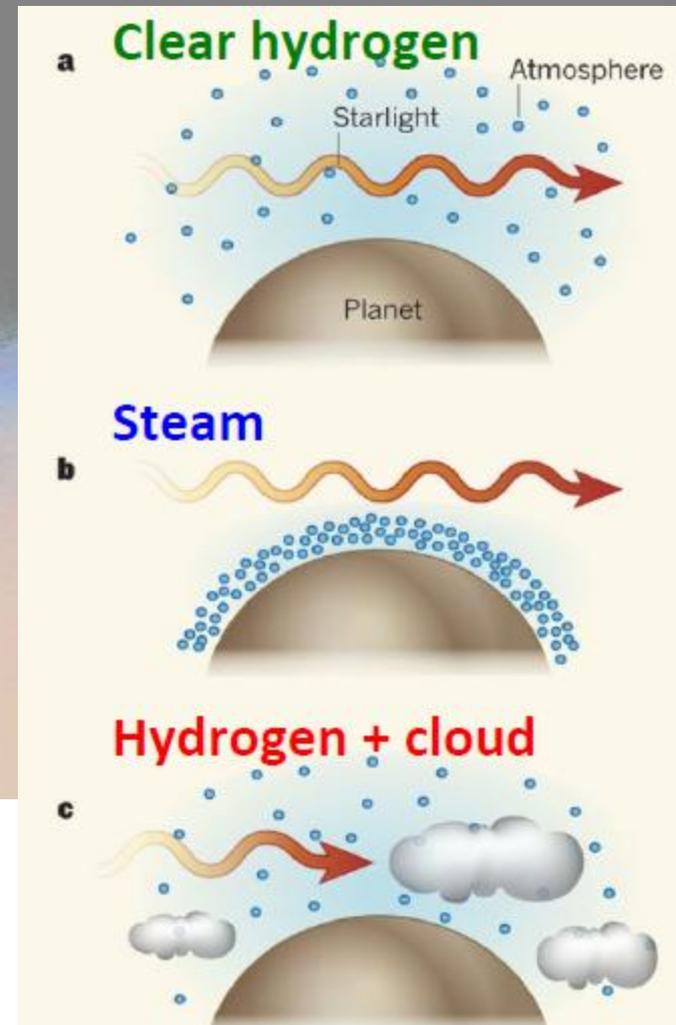
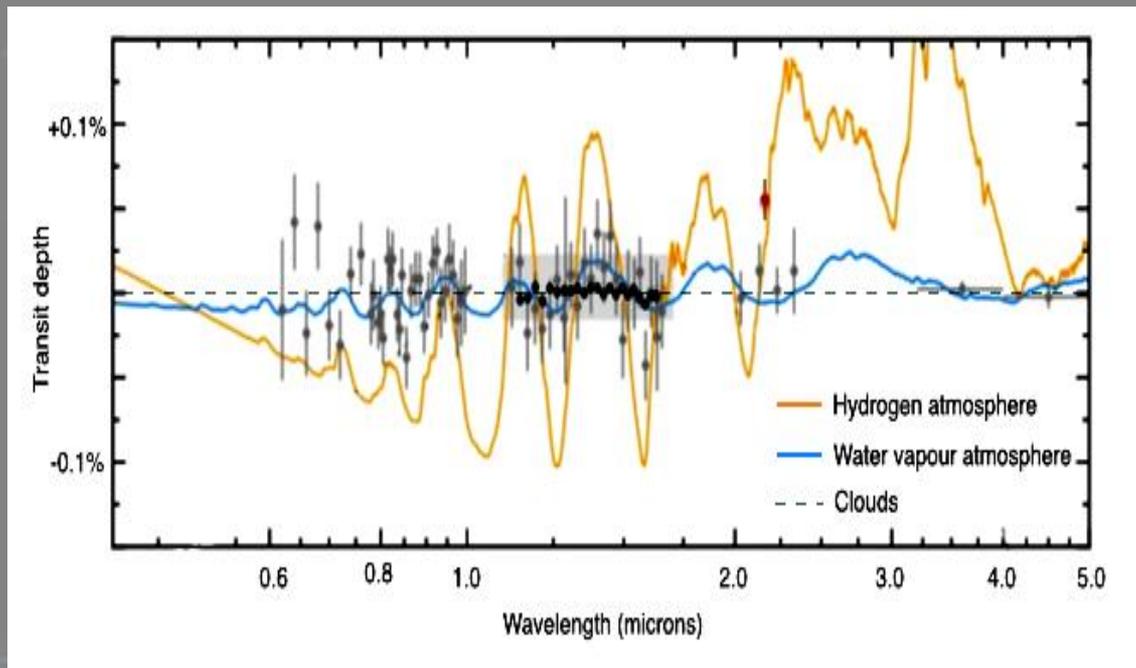
GJ 1214 system
to scale.



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

Экзопланеты: характеристики химии атмосфер

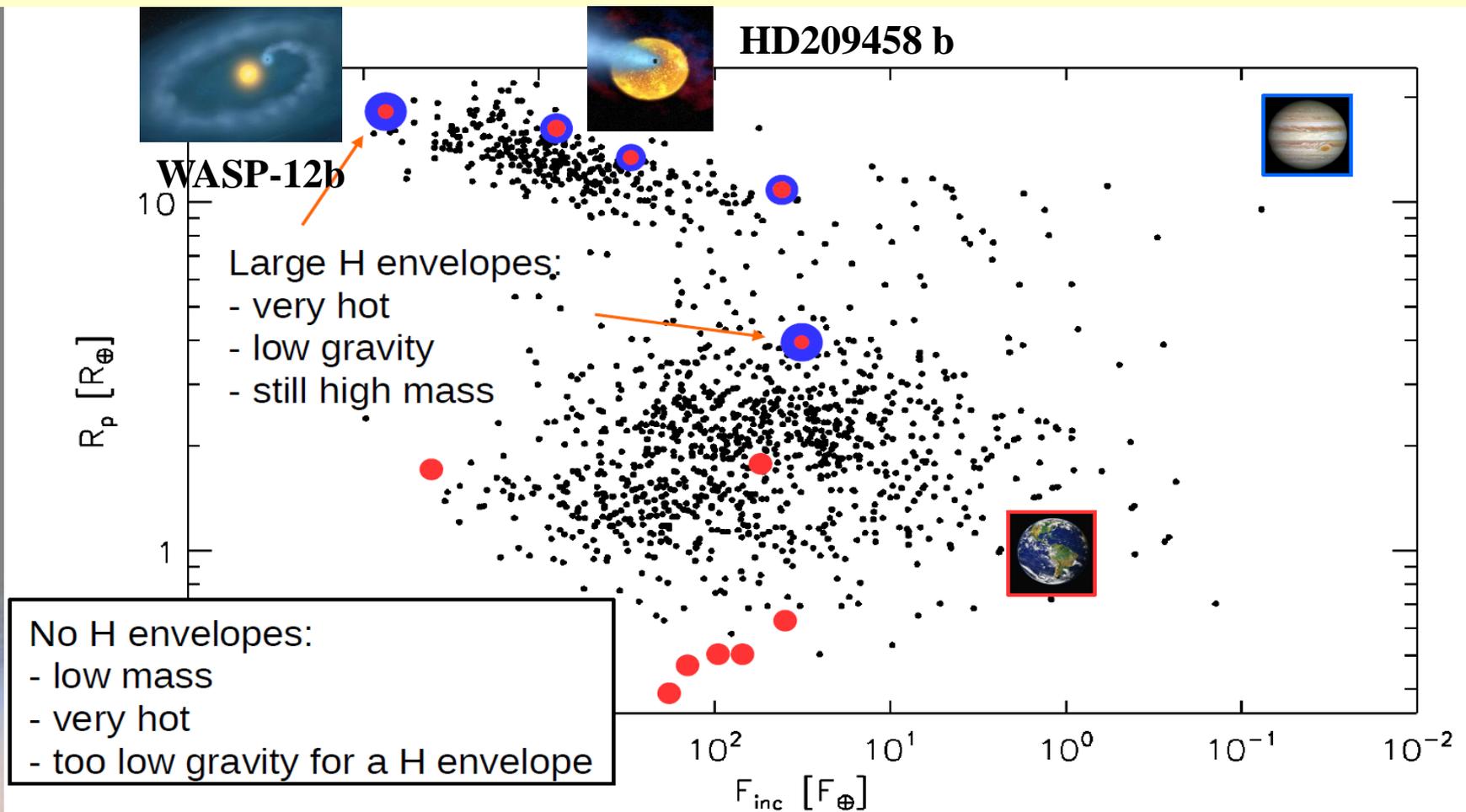


Спектр пропускания для суб-нептуна GJ1214b:

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

Анализ указывает на присутствие облаков и дымки в атмосфере. Возможно дымка образуется за счет фотохимии метана, сходной с атмосферой Титана, спутника Сатурна. Но почему так высоко в атмосфере?

Экзопланеты: характеристики химии атмосфер

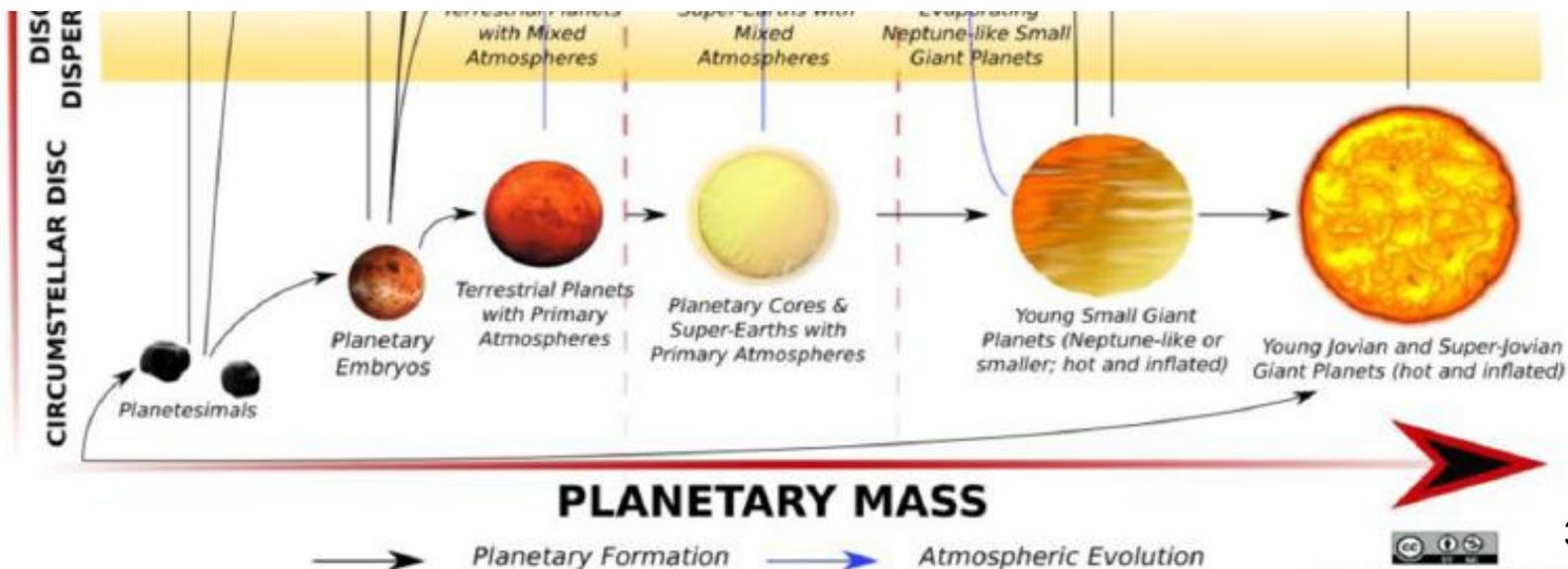


Образование горячих водородных оболочек и потери атмосферы по наблюдениям на КТХ в УФ диапазоне (L. Fossati, D. Bisikalo,...) :

- Протяженные оболочки образуются у горячих юпитеров и нептунгов (синие символы – WASP-12b, HD209458 b, HD189733 b, 55 Cnc b, GJ436 b)
- Не наблюдаются у супер-земель (красные символы – Kepler 44b-f, 55 Cnc e, HD97658b,...)

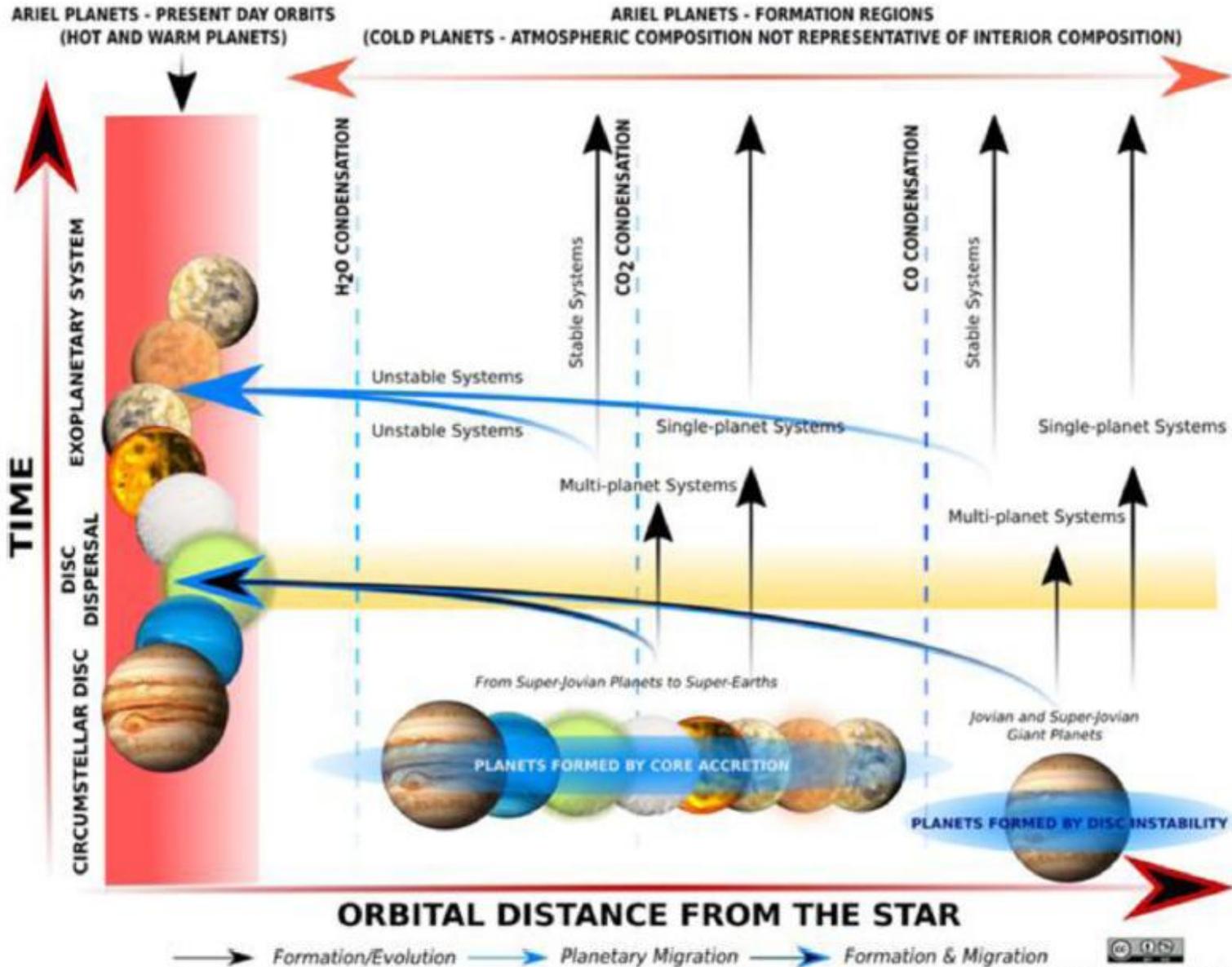
Экзопланеты: эволюция атмосфер

Схематическое представление путей образования и эволюции планет, посредством которых, начиная с газо-пылевой фракции в околозвездных дисках, образуются различные виды планет. *Черные стрелки* указывают пути, связанные с процессами образования (например, неустойчивость диска, аккреция пыли, захват газа), а *синие стрелки* указывают пути, задаваемые атмосферной эволюцией (например, атмосферное убегание, эрозия атмосферы, дегазация). Планеты делятся на три широкие категории: скальные/ледяные планеты (в основном состоящие из Si, Mg, Fe, C, O), газовые планеты-гиганты (для которых H и He представляют значительную часть их массы) и переходные планеты (охватывающие переход между крупнейшими скалистыми и ледяными планетами и самыми маленькими богатыми газом планетами). Солнечная система предлагает нам примеры скалистых и ледяных планет и газовых гигантов, но в ней нет переходных планет.

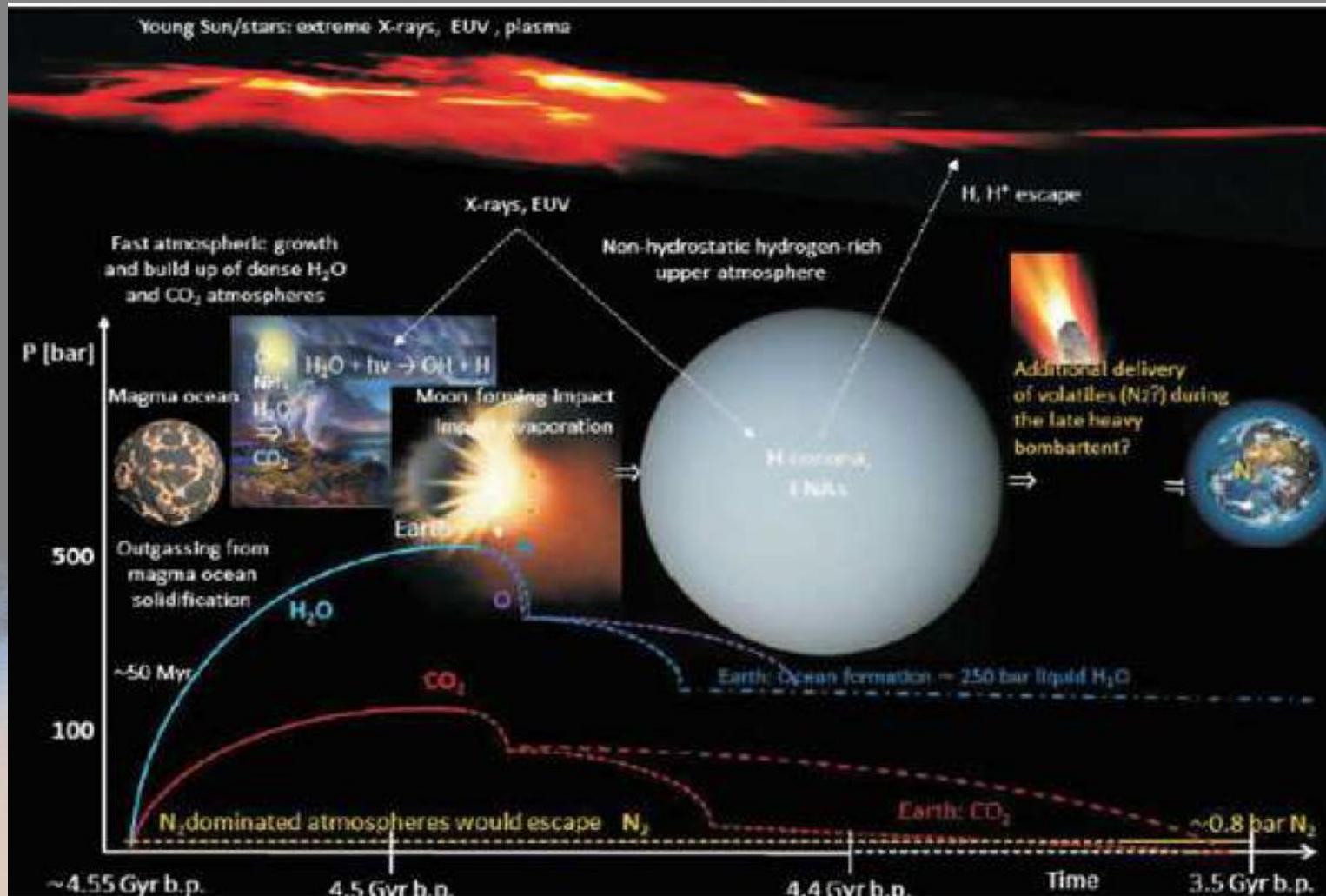


Экзопланеты: эволюция атмосфер

Планеты-гиганты, а также большинство малых планет образуют во внешних, более холодных областях околозвездных дисков, где присутствует большая часть газа, пыли и льдов. Миграция доставляет значительную часть планет ближе к звезде.



Экзоатмосферы: эволюция - Земля



Сходный сценарий изменения атмосферы для ранней Земли после образования плотной паровой атмосферы в течение процесса затвердевания океана магмы.

Экзопланеты: перспективы исследований в России

А) ГАО РАН, астрономические обсерватории и любители астрономии принимают участие в сетях по поиску экзопланет.

Б) Исследования атмосфер и газовых оболочек: работают научные группы в Институте астрономии РАН, в Институте космических исследований РАН, а также небольшие группы в Институте лазерной физики СО РАН (Новосибирск) и Институте математического моделирования СО РАН (Красноярск).

В) Мы традиционно сильны в теоретических моделях, много статей, и участия в научных группах заявок на наблюдения КТХ.

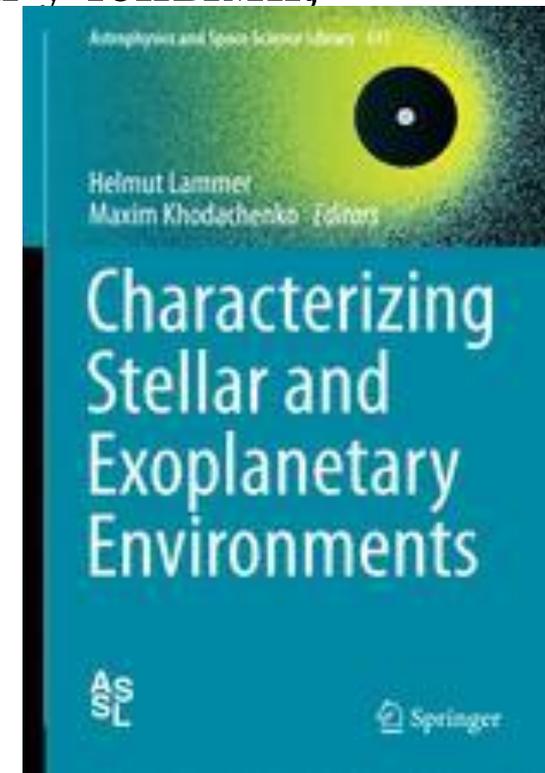
Г) В 2014 г. проведен Всероссийский семинар по экзопланетам в ИКИ РАН, а в 2016-2019 гг. в ИНАСАН проведены международные школы по экзопланетам для молодых ученых.³⁵

Экзопланеты: перспективы исследований в России

Д) В 2015 г. издана коллективная монография "Characterizing stellar and exoplanetary environments" (Eds. H. Lammer and M. Khodachenko). Springer, Astrophysics and Space Science Library, V. 411, (2015), в которой 6 глав из 15 написаны российскими учеными, главным образом из ИНАСАН.

- 5. Types of Hot Jupiter Atmospheres - *Dmitry V. Bisikalo, Pavel V. Kaygorodov, Dmitry E. Ionov, and Valery I. Shematovich*
- 6. Suprathermal Particles in XUV-Heated and Extended Exoplanetary Upper Atmospheres - *Valery I. Shematovich, Dmitry V. Bisikalo, and Dmitry E. Ionov*
- 8. Interpretations of WASP-12b Near-UV Observations - *Aline A. Vidotto, Dmitry V. Bisikalo, Luca Fossati, and Joe Llama*
- 10. Magnetosphere Environment from Solar System Planets/Moons to Exoplanets - *Igor I. Alexeev, Maria S. Grygoryan, Elena S. Belenkaya, Vladimir V. Kalegaev, and Maxim Khodachenko*
- 12. Alfvén Radius - A Key Parameter for Astrophysical Magnetospheres 249 - *Elena S. Belenkaya, Maxim L. Khodachenko, and Igor I. Alexeev*
- 14 The World Space Observatory–UV Project as a Tool for Exoplanet Science - *Boris M. Shustov, Mikhail E. Sachkov, Dmitry V. Bisikalo, and Ana-Ines Gomez de Castro*

В 2017 г. издана монография М.Я. Марова и И.И. Шевченко «Экзопланетология».



Экзопланеты: перспективы исследований в России

А) ГАО РАН, астрономические обсерватории и любители астрономии принимают участие в сетях по поиску экзопланет.

Б) Исследования атмосфер и газовых оболочек: работают научные группы в Институте астрономии РАН, в Институте космических исследований РАН, а также небольшие группы в Институте лазерной физики СО РАН (Новосибирск) и Институте математического моделирования СО РАН (Красноярск).

В) Мы традиционно сильны в теоретических моделях, много статей, и участия в научных группах заявок на наблюдения КТХ.

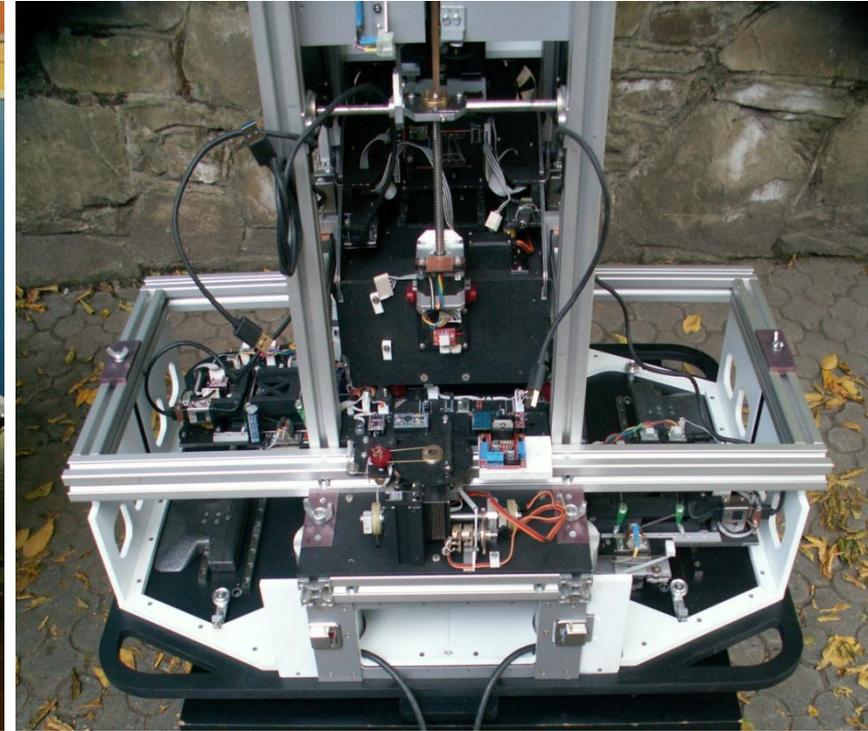
Г) В 2014 г. проведен Всероссийский семинар по экзопланетам в ИКИ РАН, а в 2016-- 2018 гг. в ИНАСАН проведены международные школы по экзопланетам для молодых ученых.

В 2019 г. Молодежная школа по экзопланетам – 11-13 октября в ИНАСАН.

Экзопланеты: перспективы исследований в России

Наземные телескопы:

- В САО РАН строят специализированный спектрограф высокого разрешения ($R \sim 10^5$, $\lambda=400 - 750$ нм, до 0.5 м/с) на БТА (Г.Г. Валявин и др.).



- Разрабатывается с участием ГАО РАН, САО РАН, ИНАСАН, УрФУ,... сеть малых телескопов для наблюдений экзопланет.

Экзопланеты: перспективы исследований в России

Что делается в космосе:

- к сожалению, нет специализированных космических миссий, нацеленных на исследование экзопланет;**
- ведутся работы по космическому телескопу СПЕКТР-УФ, который идеально подходит для исследований экзопланет. Руководство проекта это понимает и в основной программе проекта заявлена треть задач по исследованиям экзопланет;**
- отметим большой интерес западных и китайских ученых к данному проекту и к интеграции в рамках совместных исследований;**
- ведущая организация ИНАСАН, запуск перенесен на 2024 г;**
- в случае дальнейшего переноса срока запуска КТ, может быть потерян приоритет в УФ исследованиях планетных атмосфер.**

Экзопланеты: перспективы исследований –Россия

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 диапазоне),
Испания.

Платформа: «Навигатор»,
Россия.

Наземный сегмент: Россия,
Испания.



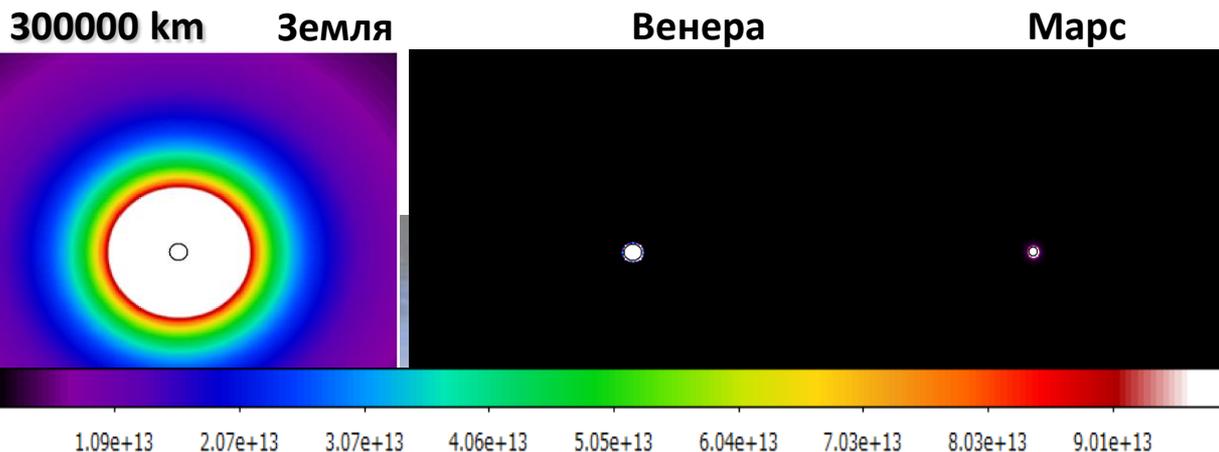
Одна из основных задач СПЕКТР-УФ:

Изучение физико-химического состава атмосфер планет в Солнечной и внесолнечных системах и астрохимия в поле УФ излучения

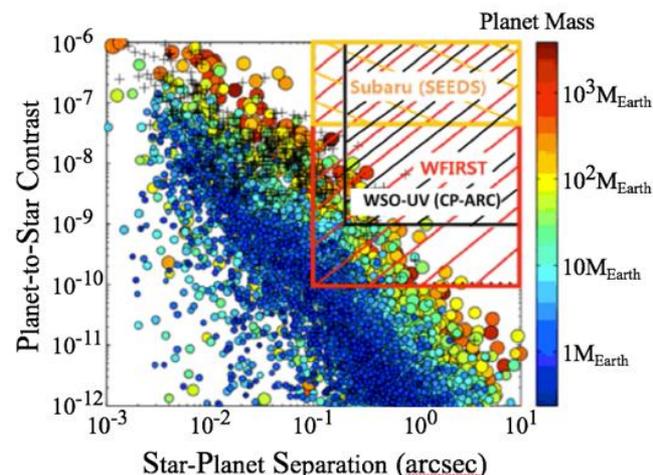
Спектрометр экзосферного транзита и Звездный коронограф – инструменты для исследования экзопланет в проекте Спектр-УФ

Наблюдение экзопланет в УФ диапазоне увеличивает вероятность транзитной конфигурации, особенно у М звезд:

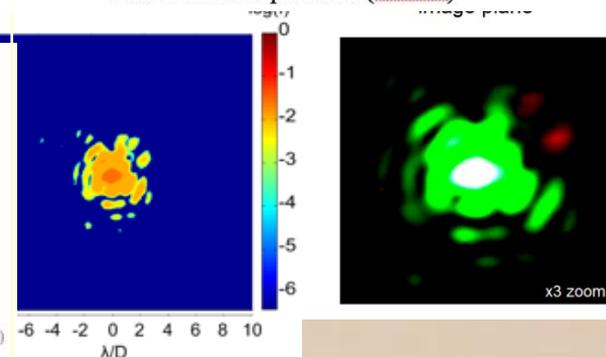
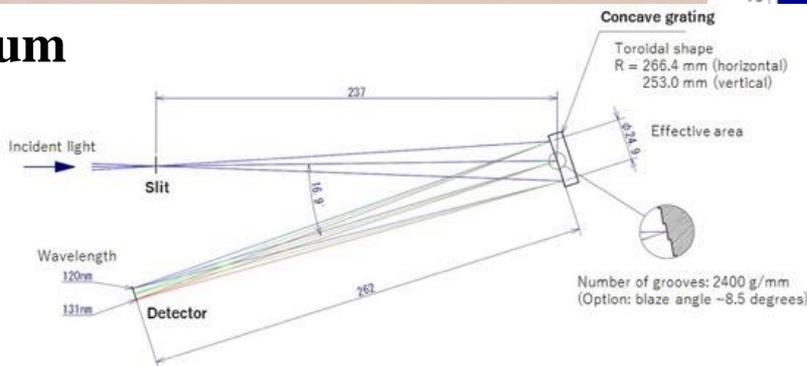
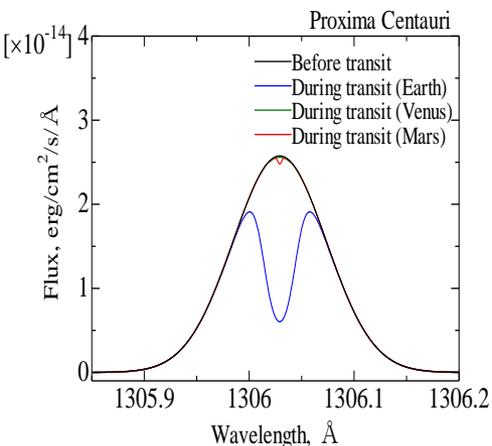
1. Экзосфера в линии кислорода O-I планет земной группы
2. Экзосфера в линии $L\alpha$ водорода



Прямая регистрация нетранзитных экзопланет и дисков

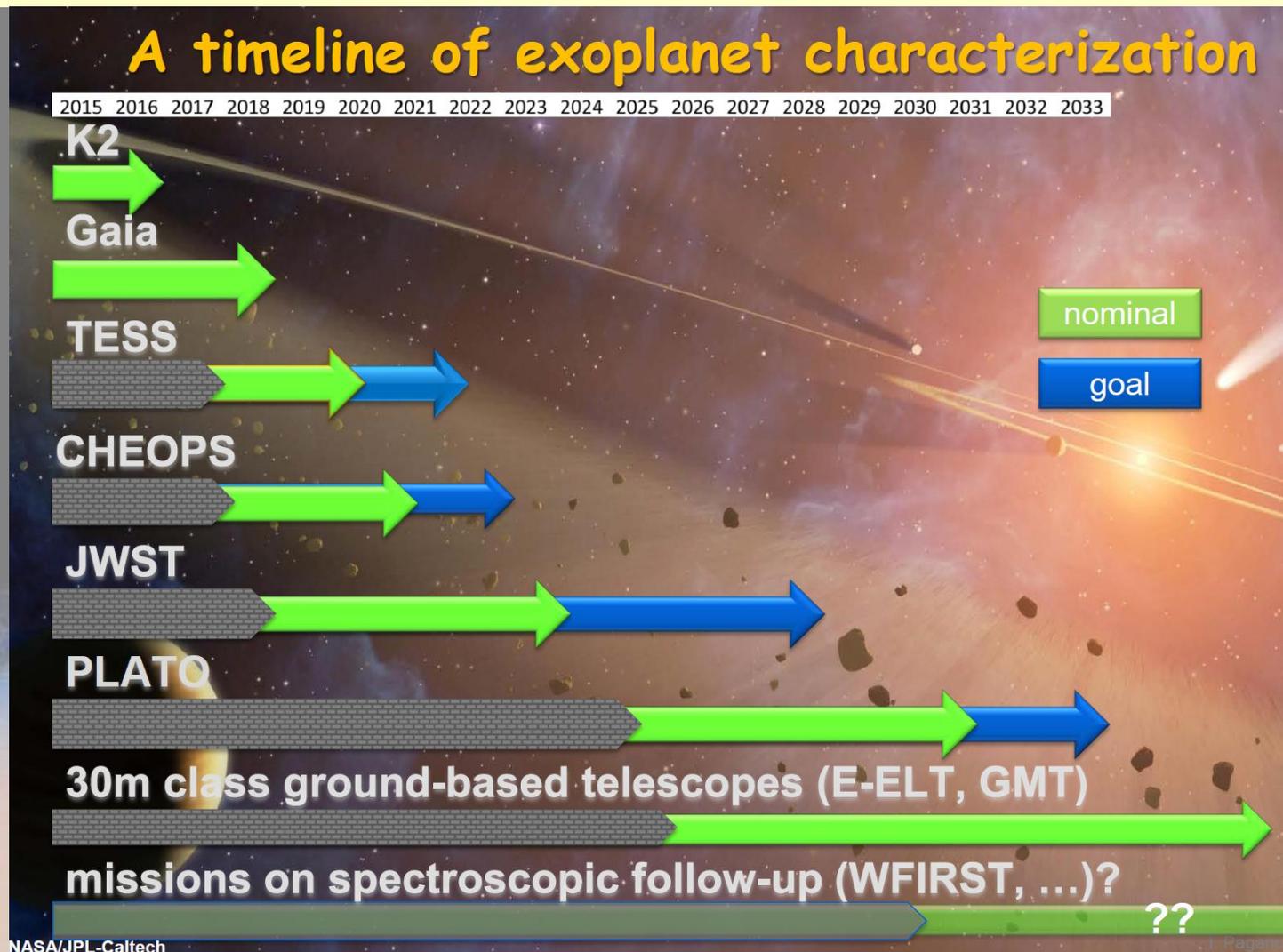


Transit depth spectrum

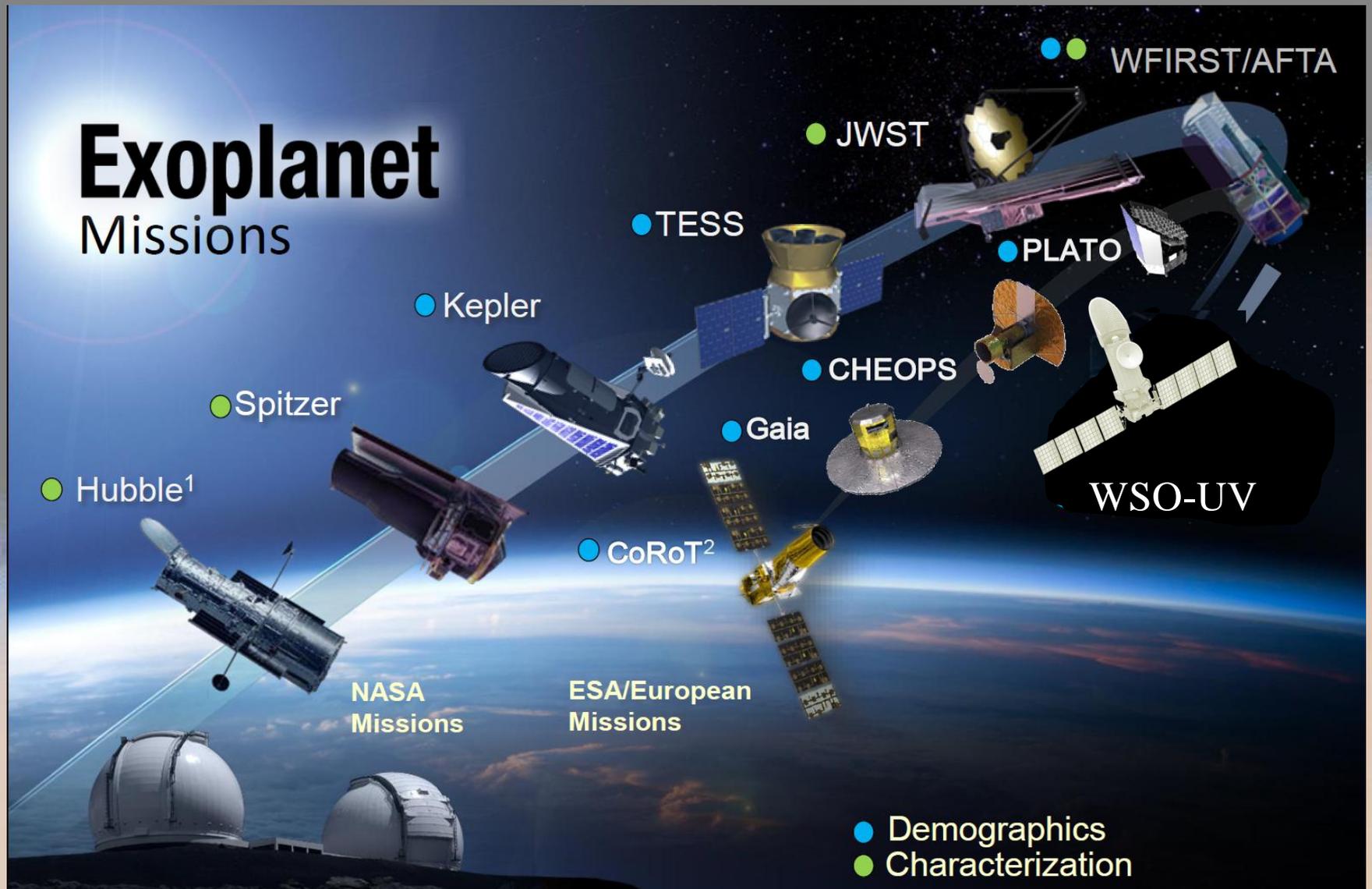


ИКИ РАН & NAOJ National Astronomical Observatory of Japan

Экзопланеты: перспективы исследований



СПЕКТР-УФ → 2024 - основная программа Проекта включает наблюдения атмосфер планет в Солнечной и внесолнечных планетных системах!



TESS Transiting Exoplanet Survey Satellite, NASA (<https://tess.gsfc.nasa.gov/>)

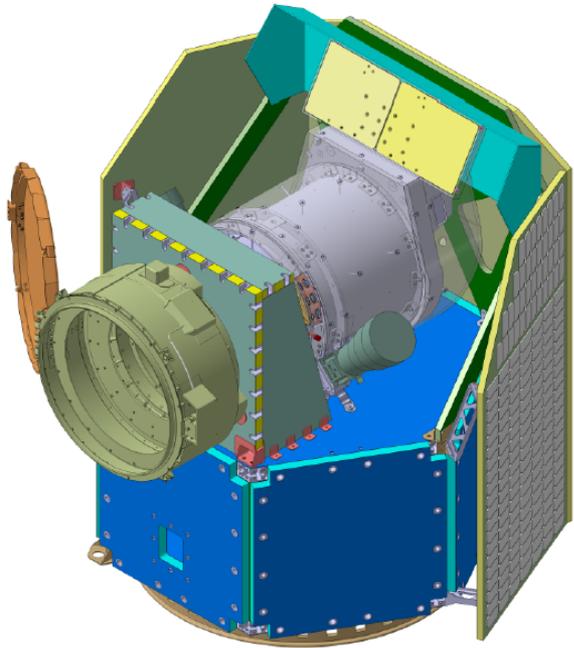


Запуск – в марте 2018 года.
Орбита – эллиптическая
околоземная с резонансом 2:1 с
Луной. Высота перигея – 108 тыс.
км, апогея – 373 тыс. км,
орбитальный период – 13.7 суток.

4 камеры, d – 12 см,
поле зрения каждой – $23 \times 23^\circ$.

Поля зрения всех четырех камер
выстроены в одну линию, формируя одну
наблюдательную площадку общей
площадью $24 \times 96^\circ$ (всего 26 площадок).
На каждой наблюдательной площадке
телескоп будет снимать фотометрию
звезд от +4 до +12 звездной величины в
течение 27 суток (2 витка вокруг Земли).
В первый год будет наблюдаться южная
полусфера, во второй год – северная
полусфера. Области вблизи полюсов
эклиптики будут наблюдаться дольше.

CHEOPS CHaracterising ExOPlanets Satellite, ESA <http://cheops.unibe.ch/>

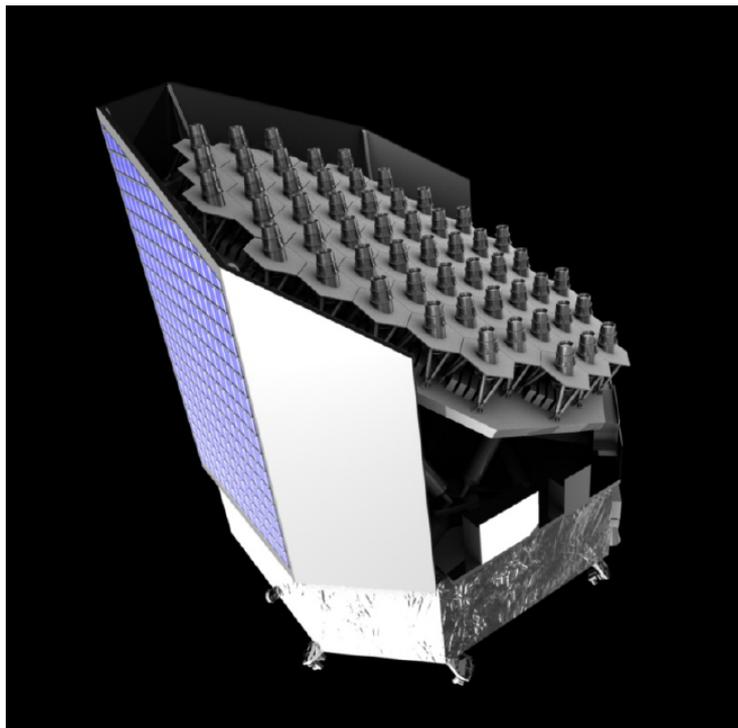


Телескоп d – 32 см.
Диапазон 400-1100 нм.
Планируемая продолжительность наблюдений одной звезды – 48 часов.
Ожидаемая точность фотометрии – 150 ppm за минуту для звезды 9 зв. в.
Телескоп сможет фиксировать транзиты планеты размером с Землю у звезды радиусом 0.9 солнечных с S/N ~ 10.

Недорогая миссия, стоимость € 50 млн.
Продолжительность 3.5 года.

Запуск планируется на 2018 год.
Орбита – околоземная солнечно-синхронная. Высота перигея – 650 км, апогея – 800 км.

PLATO PLAnetary Transits and Oscillations of stars, ESA <http://sci.esa.int/plato/>



Запуск планируется на 2024 год.
Орбита вокруг второй точки
Лагранжа системы Солнце-Земля.

Несет 24 «нормальных» камеры, снабженных линзами диаметром 12 см и полем зрения 1100 кв. градусов. Каждый телескоп будет оснащен CCD-детектором с матрицей 4510x4510 пикселей (размер одного пикселя 18 мкм). Фотометрия снимается каждые 25 сек., наблюдаются звезды 8-11 зв. вел.

+ 2 дополнительные «быстрые» камеры для звезд 4-8 зв. вел., которые снимают фотометрию каждые 2.5 сек.

Планируемое время основной миссии – 6.5 лет, возможно продление до 8 лет. Наблюдательная стратегия еще не выбрана

Экзопланеты: перспективы исследований

SPIRou – спектрополяриметр ближнего ИК диапазона, установленный на 3.6-метровом Франко-Канадско-Гавайском телескопе (CFHT), оптимизированный под поиск землеподобных планет в обитаемой зоне близких красных карликов.

Рабочий диапазон 0.98-2.35 мкм, инструментальная точность – **1 м/с**.
Первый свет – в конце 2017 года.

ESPRESSO – эшелле-спектрограф для Очень большого телескопа (**VLT**), установленного на Южно-Европейской обсерватории.

Инструмент способен работать в 1-UT моде (с использованием одного телескопа) и в 4-UT моде. В 4-UT моде четыре 8.2-метровых телескопа когерентно связаны в 16-метровый телескоп.

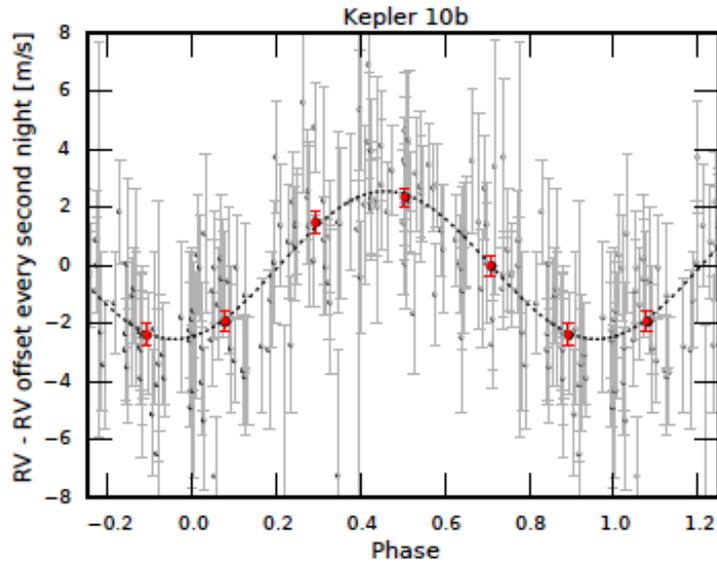
Инструментальная точность – **0.1 м/с**, рабочий диапазон – 380-780 нм.

CODEX – спектрограф для 39.3-метрового **European Extremely Large Telescope (E-ELT)**.

Первый свет – предположительно в 2024 году.

Инструментальная точность – **0.02 м/с**, рабочий диапазон – 380-680 нм.

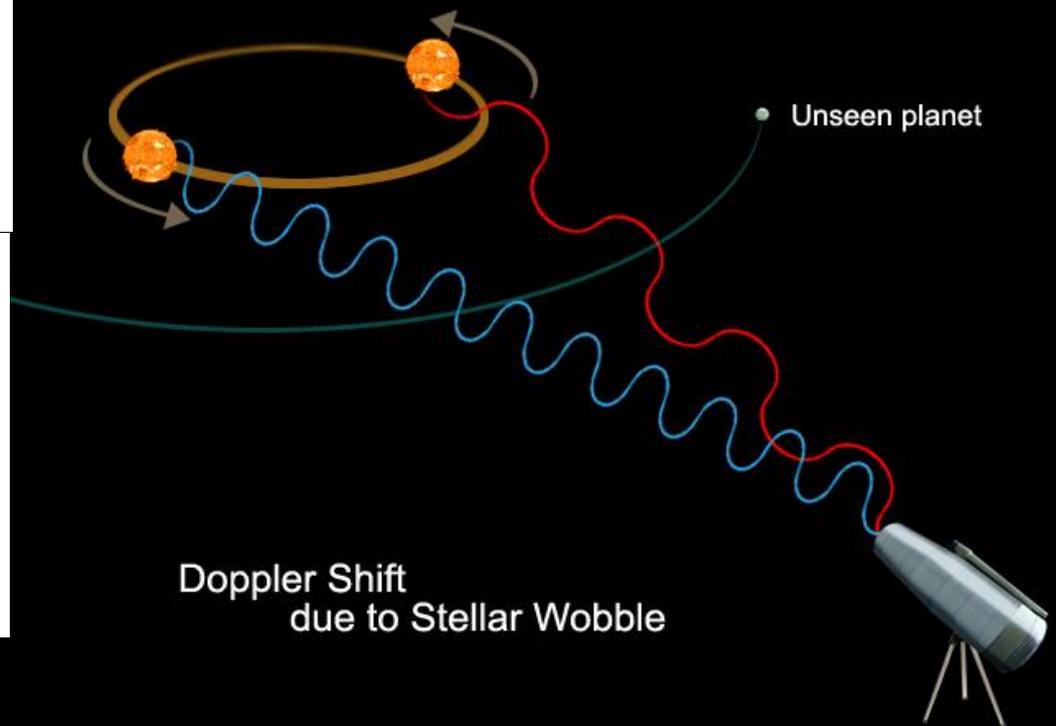
Раздел 2: Атмосферы экзопланет: что известно из наблюдений



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

