

EXOPLANETS



Лекция 10

ФФ НГУ, 2024

Множественность миров



«Существуют бесчисленные солнца, бесконечные земли, которые кружатся вокруг своих солнц, подобно тому, как наши семь планет кружатся вокруг нашего Солнца».

Джордано Бруно,
«О бесконечности, вселенной и мирах», 1584 г.

Что такое «экзопланета»?

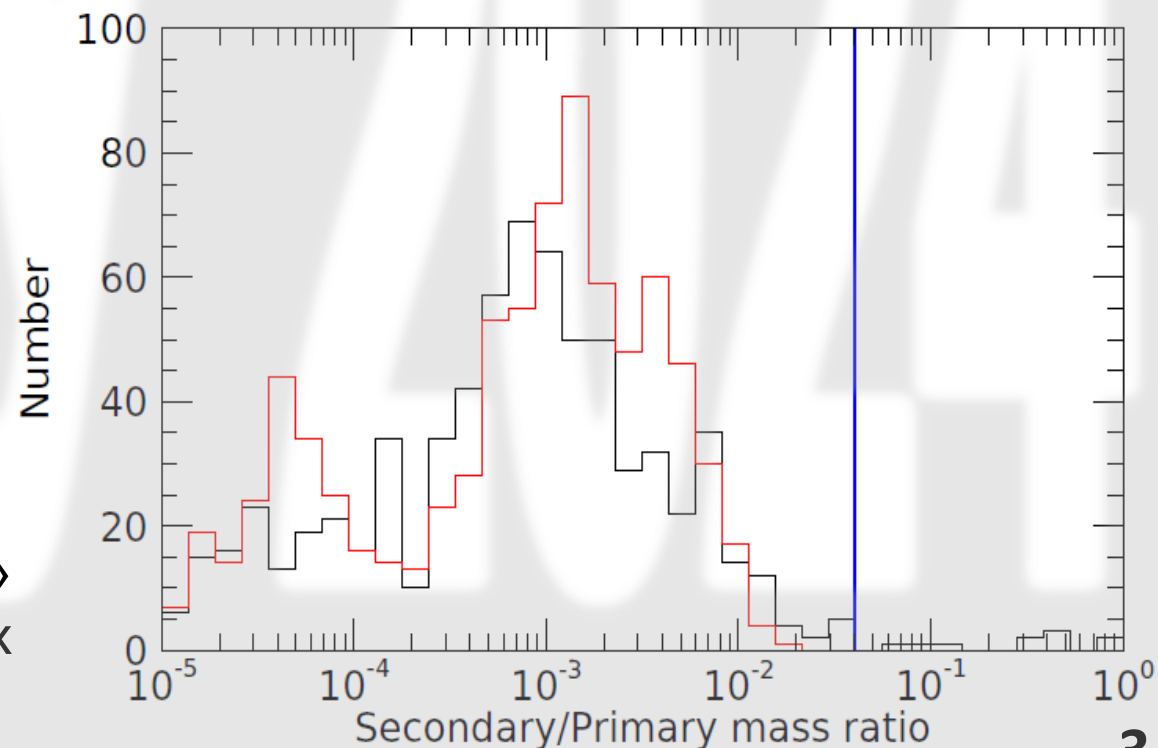
The IAU Working Definition of an Exoplanet

arXiv:2203.09520

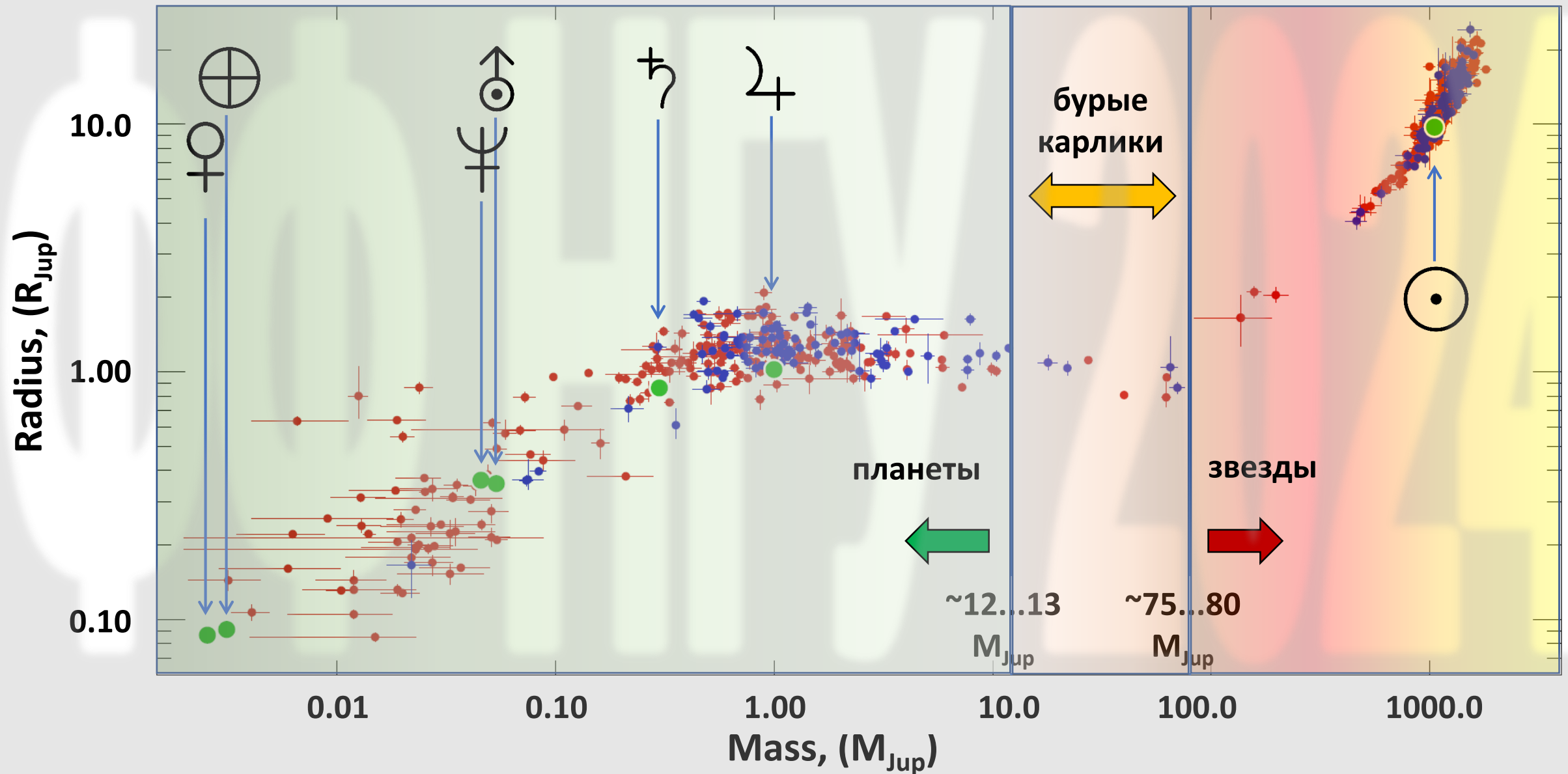
Объект с массой ниже предельного значения, необходимого для запуска термоядерного горения дейтерия (современное расчетное значение 13 масс Юпитера с химическим составом Солнца), который обращается вокруг звезды, бурого карлика или звездного остатка и имеет отношение масс с центральным объектом удовлетворяет порогу стабильности для точек Лагранжа L4 и L5, ($M_*/m > (25 + \sqrt{621})/2 \simeq 25$) – является планетой, независимо от способа ее образования.

Требование на минимальную массу объекта, рассматриваемого как планета, является тем же, что и для Солнечной системы – масса, достаточная для того, чтобы под действием собственной гравитации объект принял сферическую форму и «очистил» окружающее его пространство.

Плутон не удовлетворяет критерию «единственности» на своей орбите – существуют другие тела на близких орбитах. Плутон – **малая планета** (dwarf planet).



Звезда или планета?



Первая экзопланета

В 1988 году появилась работа Кэмпбелла и др., в которой говорилось о планетном кандидате, но надежно подтвердить его удалось только в 2003 году.

Наконец, в 1989 году Латам и др. открыли спутник одной из звезд, у которого до октября 2019 масса была оценена недостаточно точно, чтобы сказать, планета это или бурый карлик. Теперь мы знаем, что это бурый карлик (1910.07835).

В 1992 году надежное обнаружение планеты было сделано Вольцшаном и Фрейлом, но вращалась она вокруг... радио-пульсара!

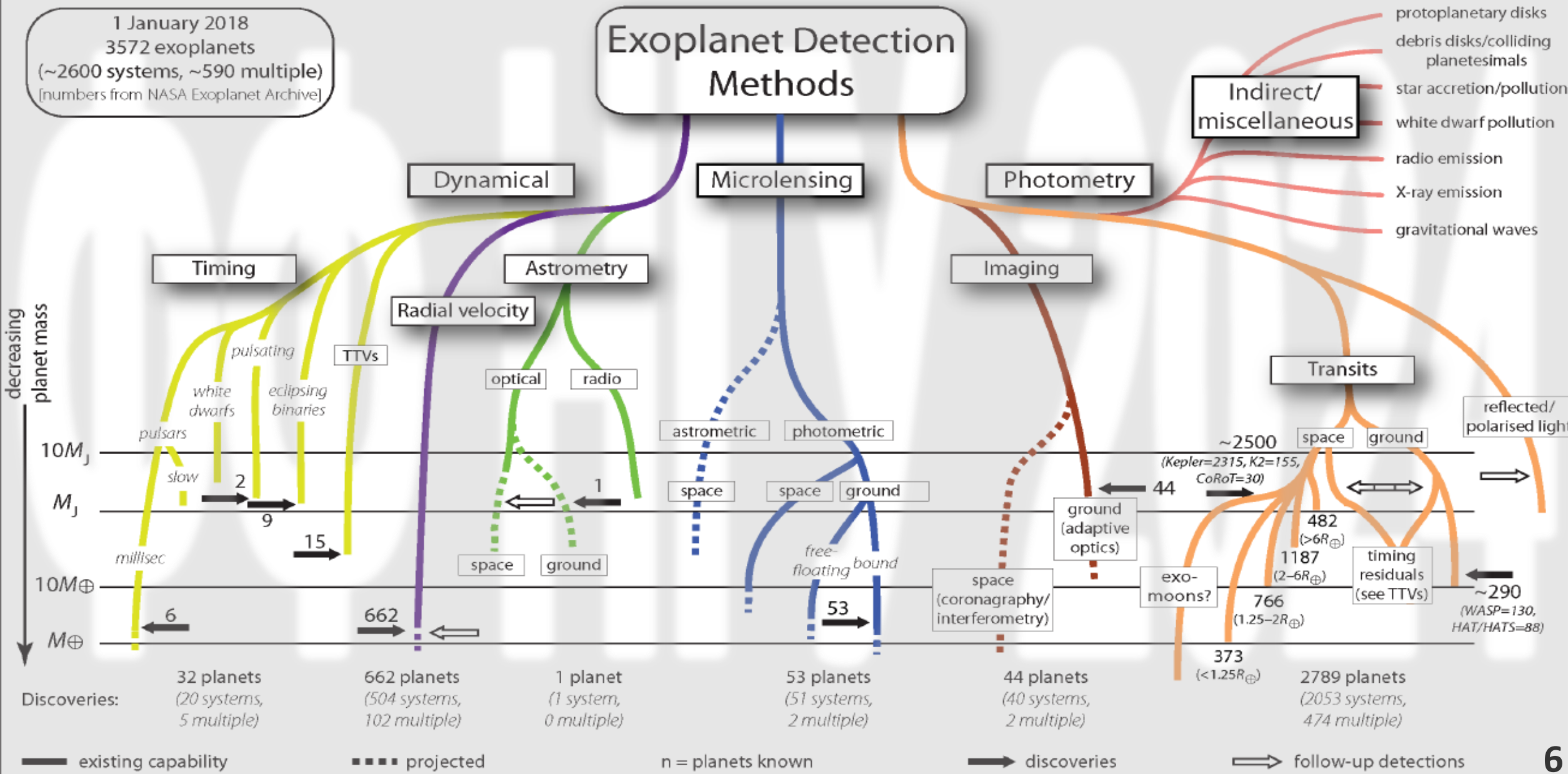
Первая надежно подтвержденная планета, вращающаяся вокруг «нормальной» звезды (51 Пегаса), была открыта в 1995 году М. Майором и Д. Кело.



Методы обнаружения экзопланет

1 January 2018
3572 exoplanets
(~2600 systems, ~590 multiple)
[numbers from NASA Exoplanet Archive]

Exoplanet Detection Methods



Основные методы обнаружения экзопланет

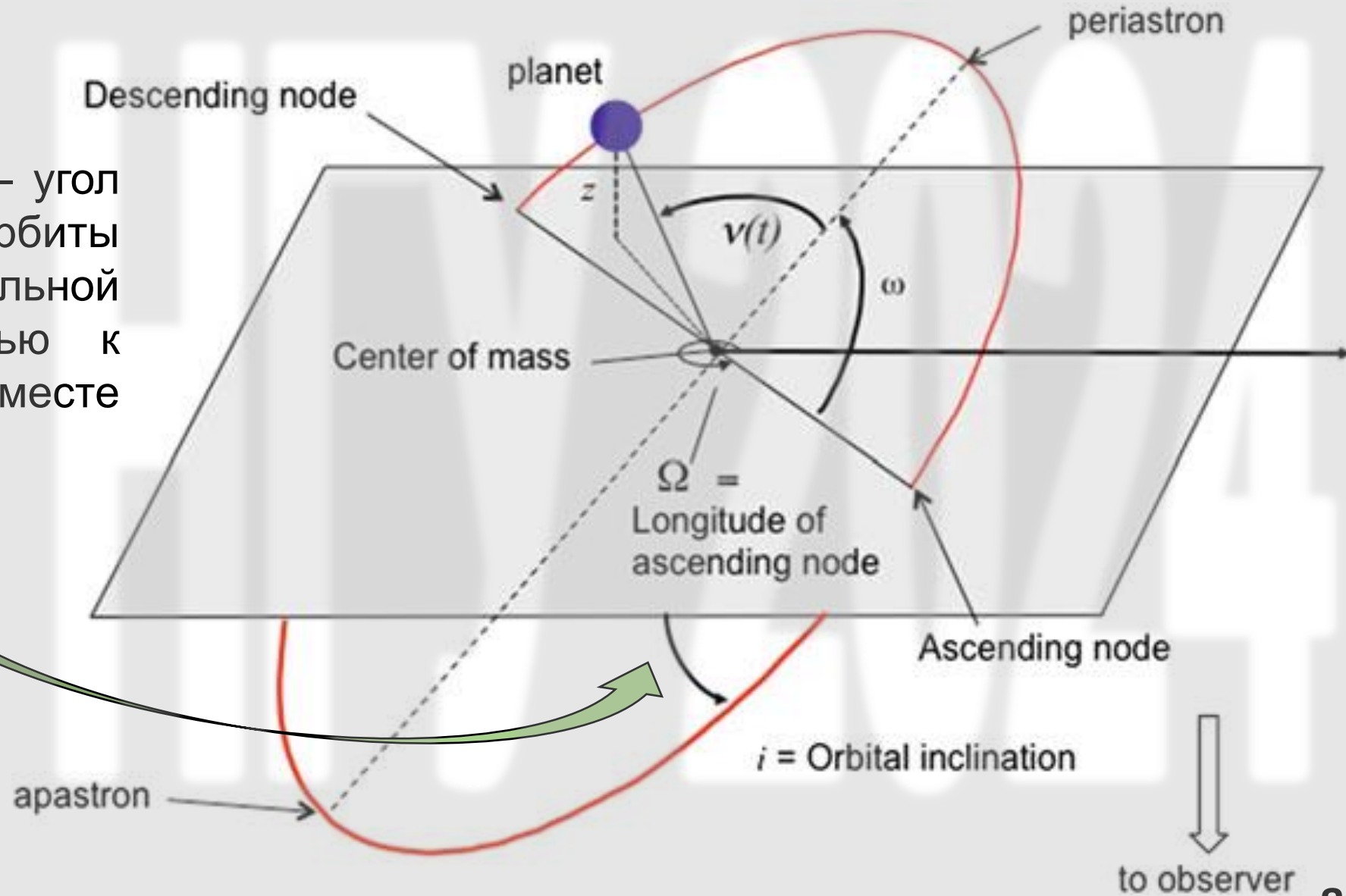
1. Изменение лучевой скорости звезды (вращение вокруг общего центра масс системы звезда-планета): ~1100 планет.
2. Прохождение планеты по диску звезды: ~3800 планет.
3. Астрометрия: ~20 планет.
4. Прямые изображения: ~200 планет.
5. Микролинзирование: ~260 планет.
6. По вариации периода (пульсары, белые карлики, двойные и планетные системы). ~50 планет.
7.
8.

Параметры орбиты

i – наклонение орбиты – угол между плоскостью орбиты экзопланеты и тангенциальной (касательной) плоскостью к небесной сфере в месте положения объекта.

$i = 90^\circ$ – орбита наблюдается с ребра.

$i = 0^\circ$ – орбита наблюдается «плашмя».



Метод радиальной скорости (Доплер эффект)

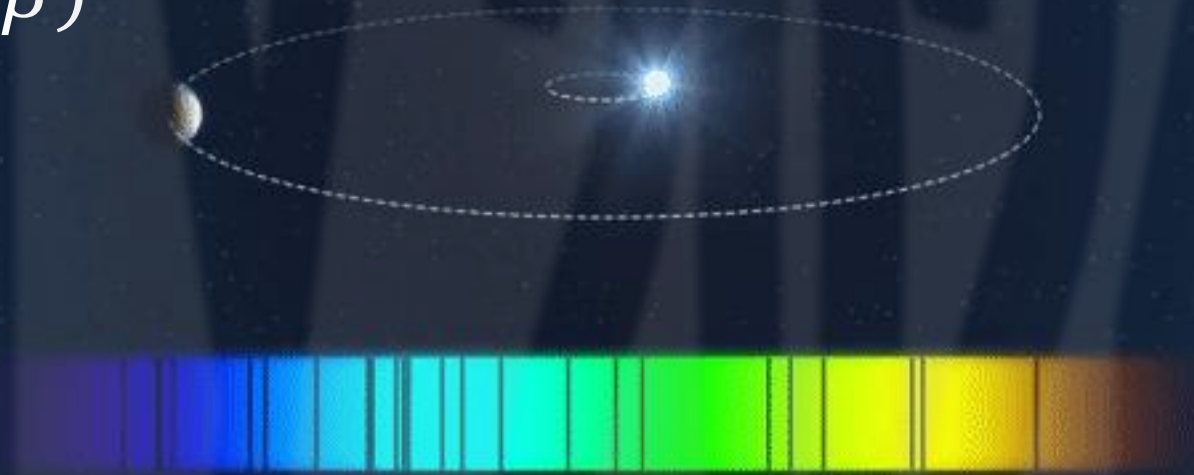
Продольный эффект Доплера:

$$\lambda_{\text{изм}} = \lambda_{\text{исп}} \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \simeq \lambda_{\text{исп}} (1 + \beta)$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \beta = \frac{v_*}{c}$$

Пусть $v_* = 10$ м/с, тогда:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{10}{3 \times 10^8} \simeq 3 \times 10^{-8}$$



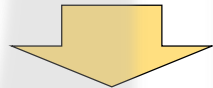
Метод радиальной скорости

В системе двух тел каждое из них движется по эллипсу вокруг общего центра масс.

Третий закон Кеплера

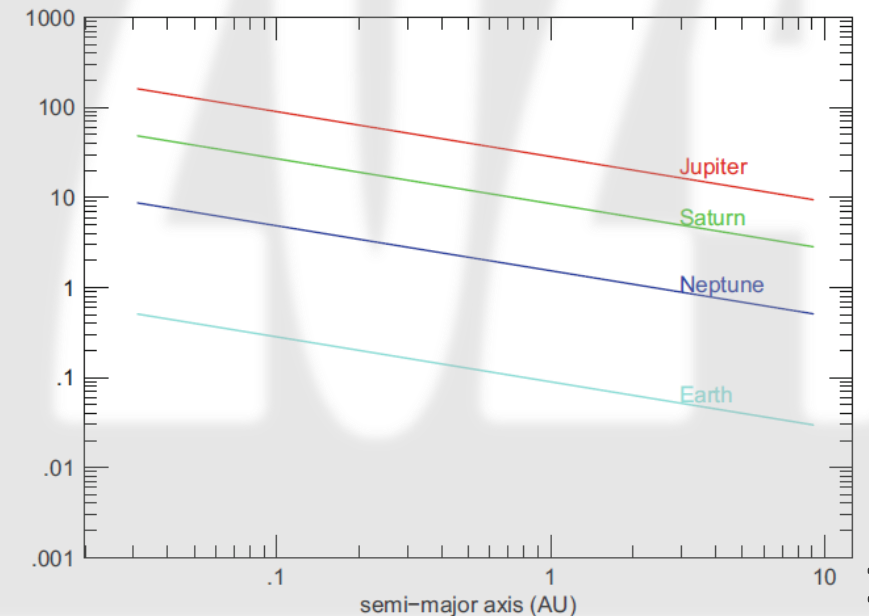
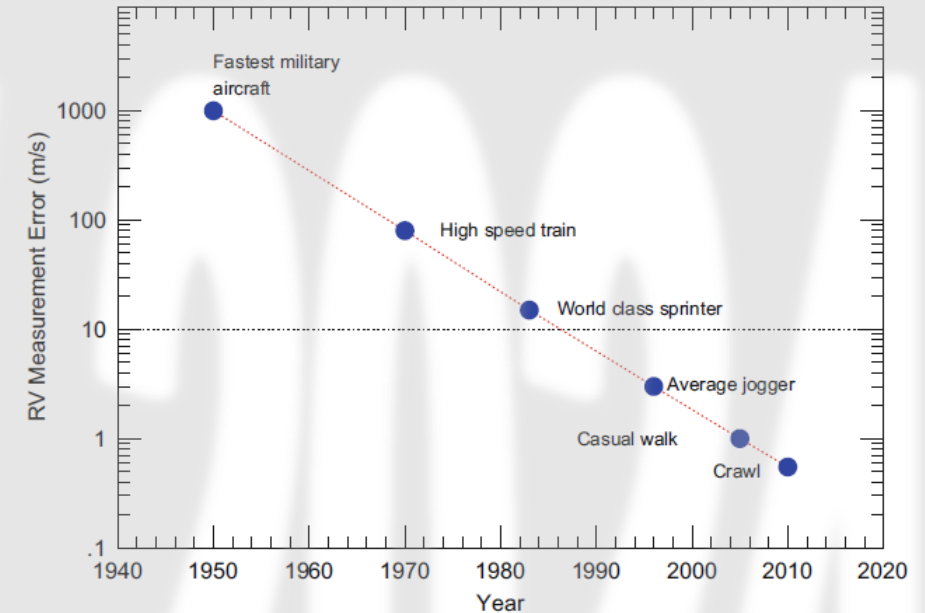
$$P^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(M + m)}$$

$$V_* = \frac{2\pi a}{P} \cdot \sin i$$



$$V_* [\text{м/с}] = 28.4 \left(\frac{1 \text{ год}}{P} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{m \sin i}{m_{\text{Jup}}} \right) \left(\frac{M_{\odot}}{M_*} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Для Юпитера ($P = 11.86$ лет) получаем: $V_{\odot} \approx 12$ м/с.



51 Peg b

PEGASE, LE PETIT CHEVAL, LE DAUPHIN.

12

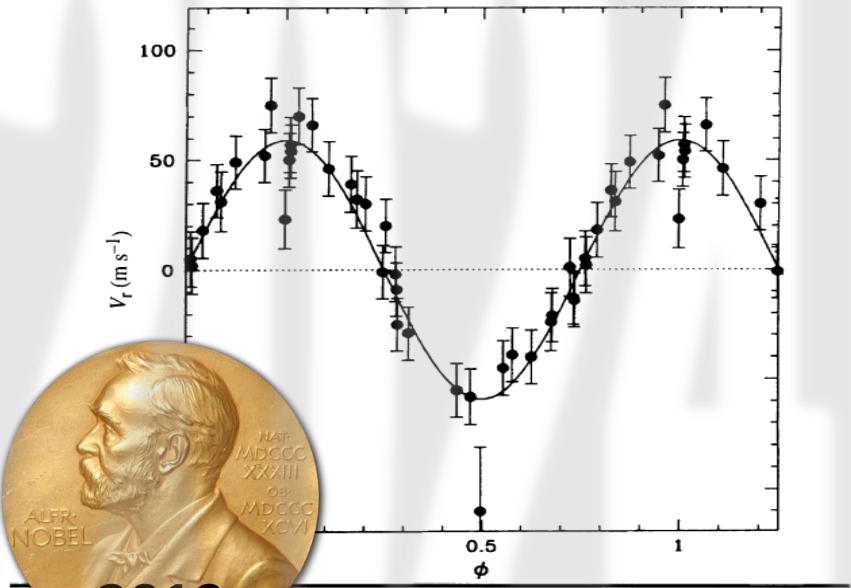


A Jupiter-mass companion to a solar-type star

Michel Mayor & Didier Queloz

Geneva Observatory, 51 Chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

The presence of a Jupiter-mass companion to the star 51 Pegasi is inferred from observations of periodic variations in the star's radial velocity. The companion lies only about eight million kilometres from the star, which would be well inside the orbit of Mercury in our Solar System. This object might be a gas-giant planet that has migrated to this location through orbital evolution, or from the radiative stripping of a brown dwarf.

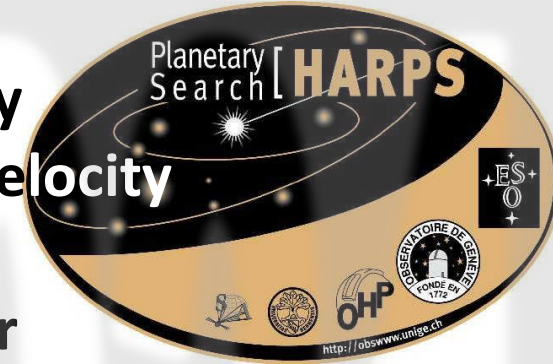


Orbital parameters of 51 Peg	
P	4.2293 ± 0.0011 d
T	$2,449,797.773 \pm 0.036$
e	0 (fixed)
K_1	0.059 ± 0.003 km s ⁻¹
$a_1 \sin i$	$(34 \pm 2) 10^5$ m
$f_1(m)$	$(0.91 \pm 0.15) 10^{-10} M_\odot$
N	35 measurements
(O - C)	13 m s ⁻¹

Метод радиальной скорости

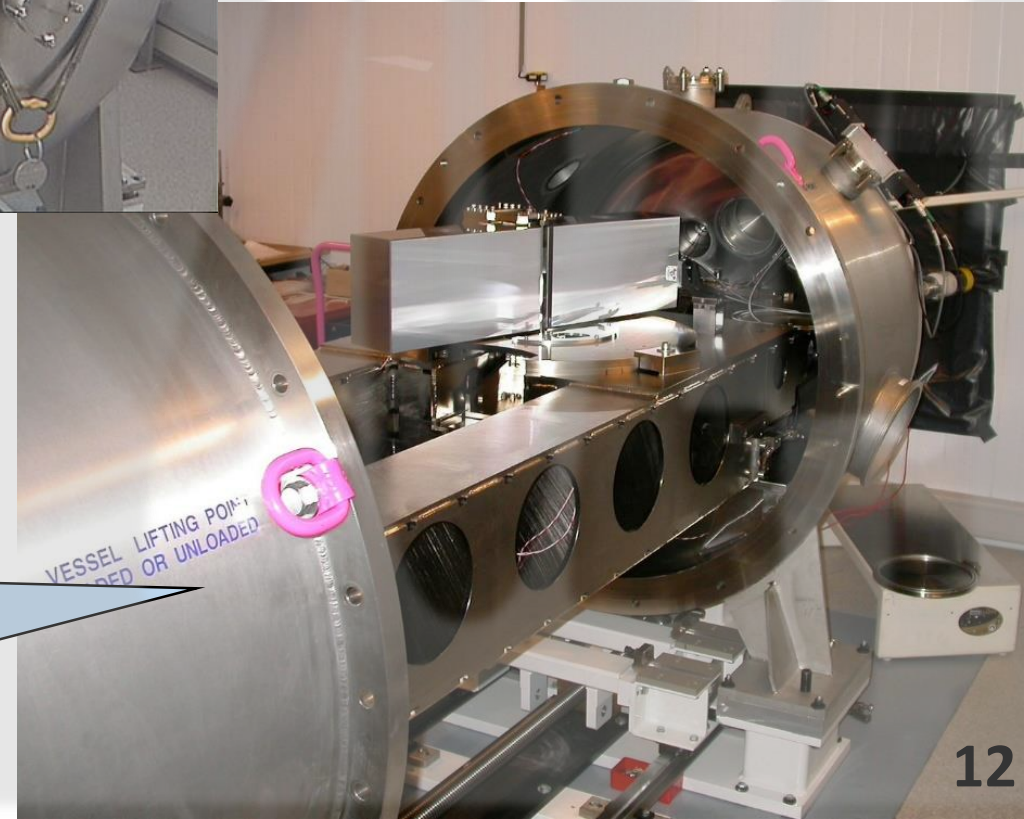


High
Accuracy
Radial velocity
Planet
Searcher

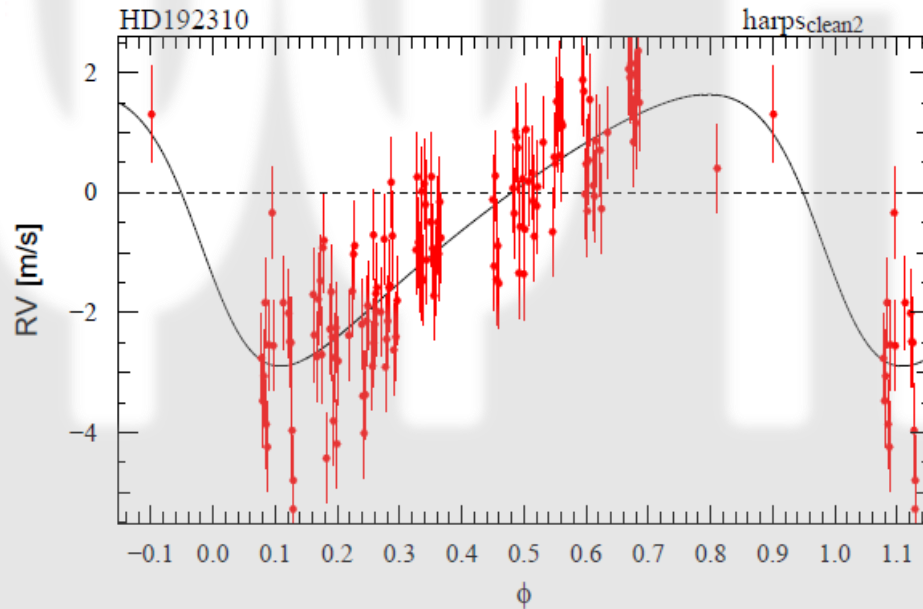
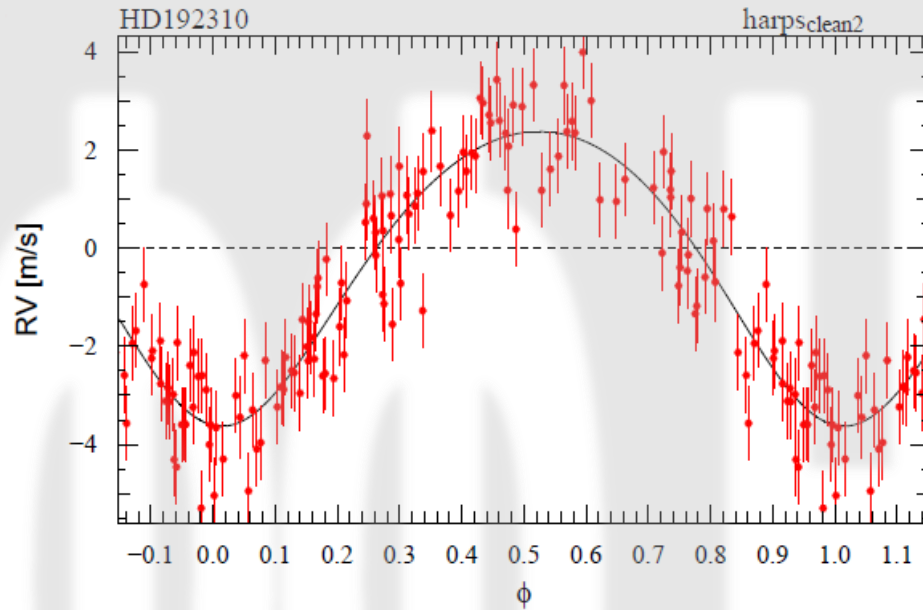


Телескоп 3.6 метра
Южной европейской
обсерватории, Чили.

Чувствительность
измерения лучевой
скорости ~ 1 м/с.

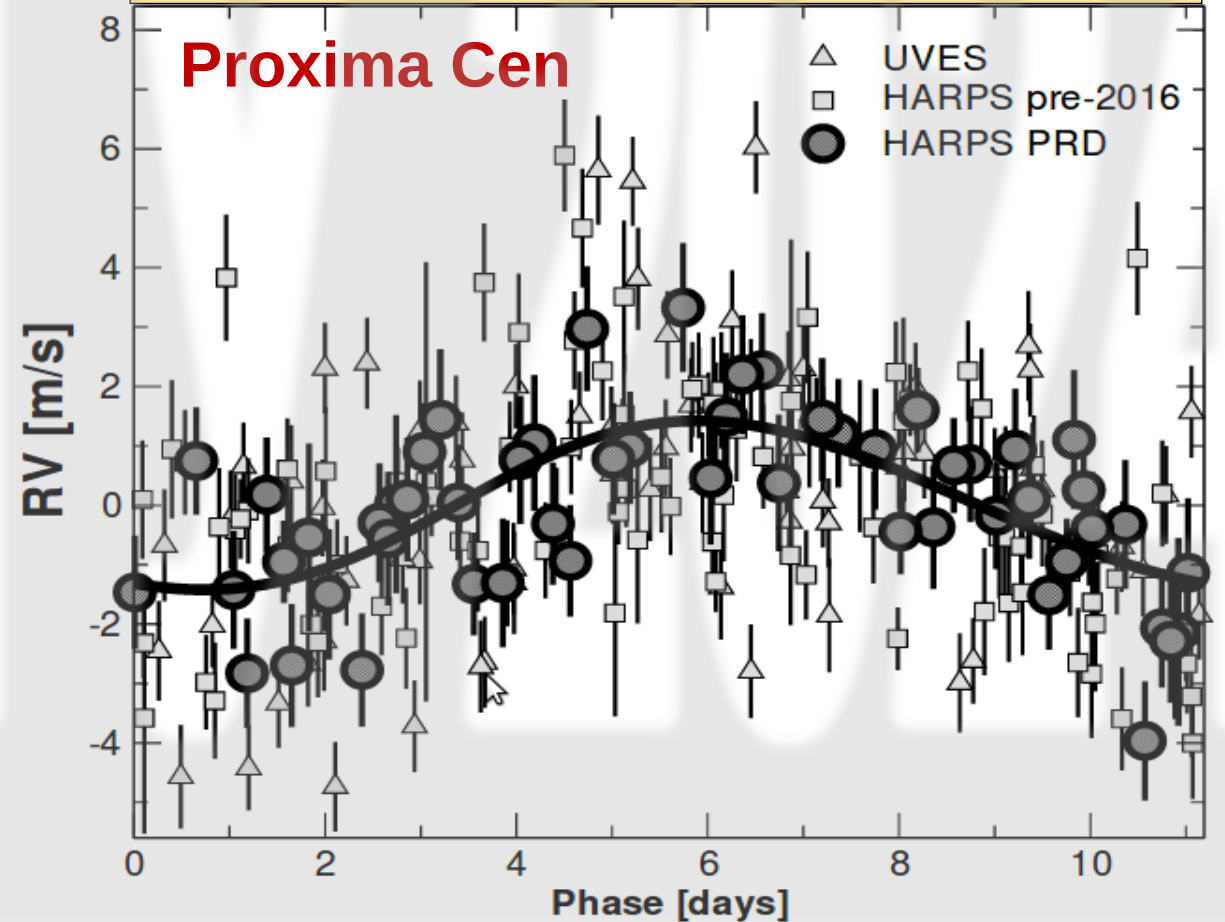


Метод радиальной скорости



$d = 1.3$ пк – ближайшая звезда к Солнцу!
 $M^* = 0.12$ солнечных. $m_p = 1.3$ земных.
 $a = 0.05$ а.е. $P = 11$ дней.

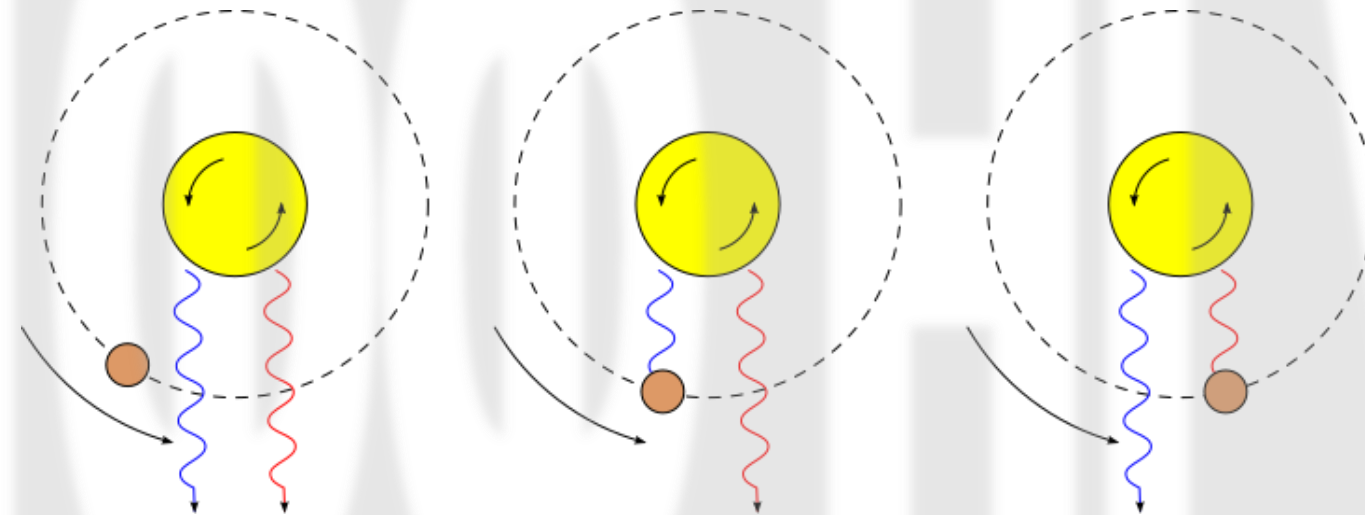
Температура поверхности позволяет
существовать жидкой воде!



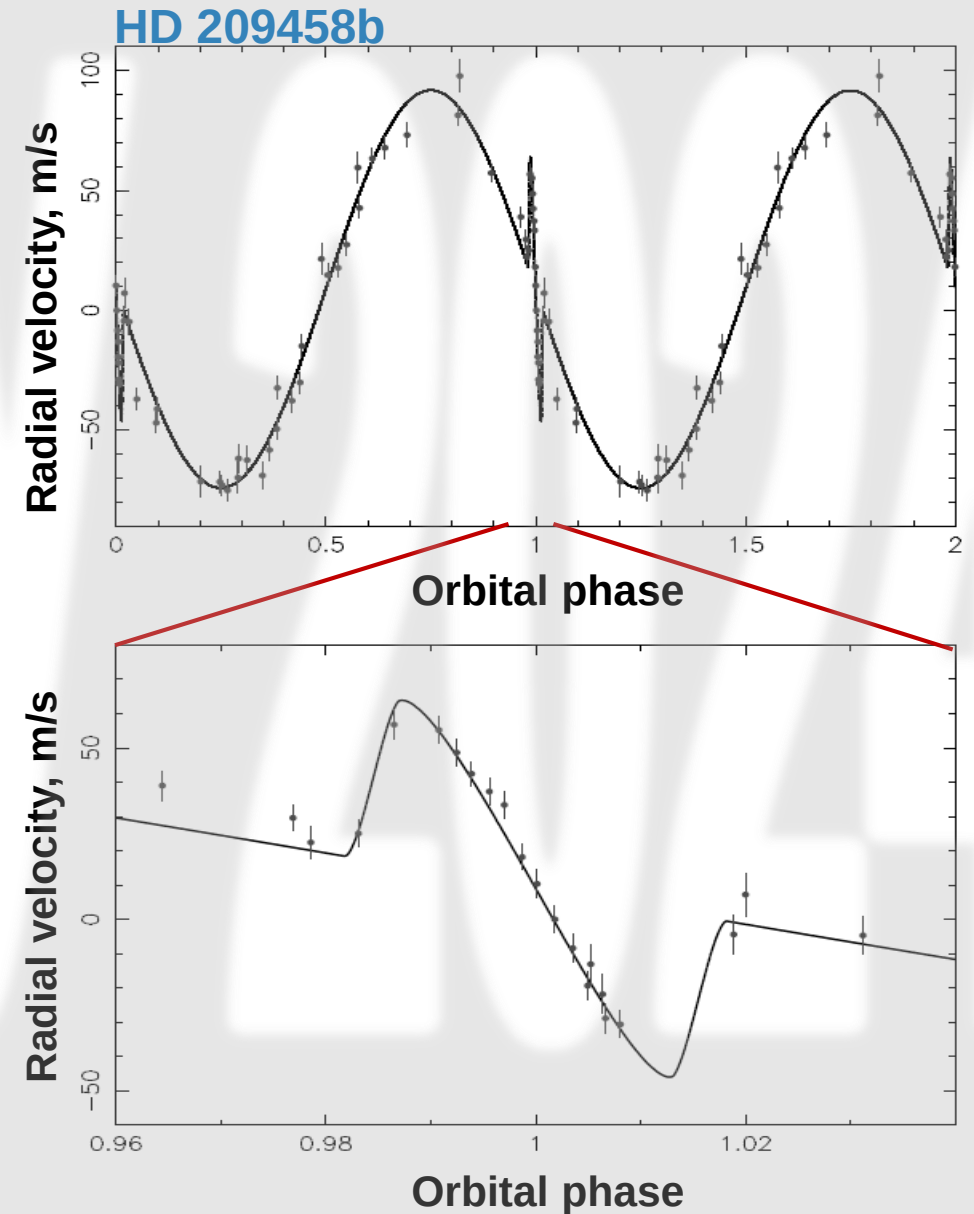
1609.03449

Метод радиальной скорости

Эффект Rossiter-McLaughlin, предсказанный J.R.Holt в 1893 году для затменно-двойных звезд.

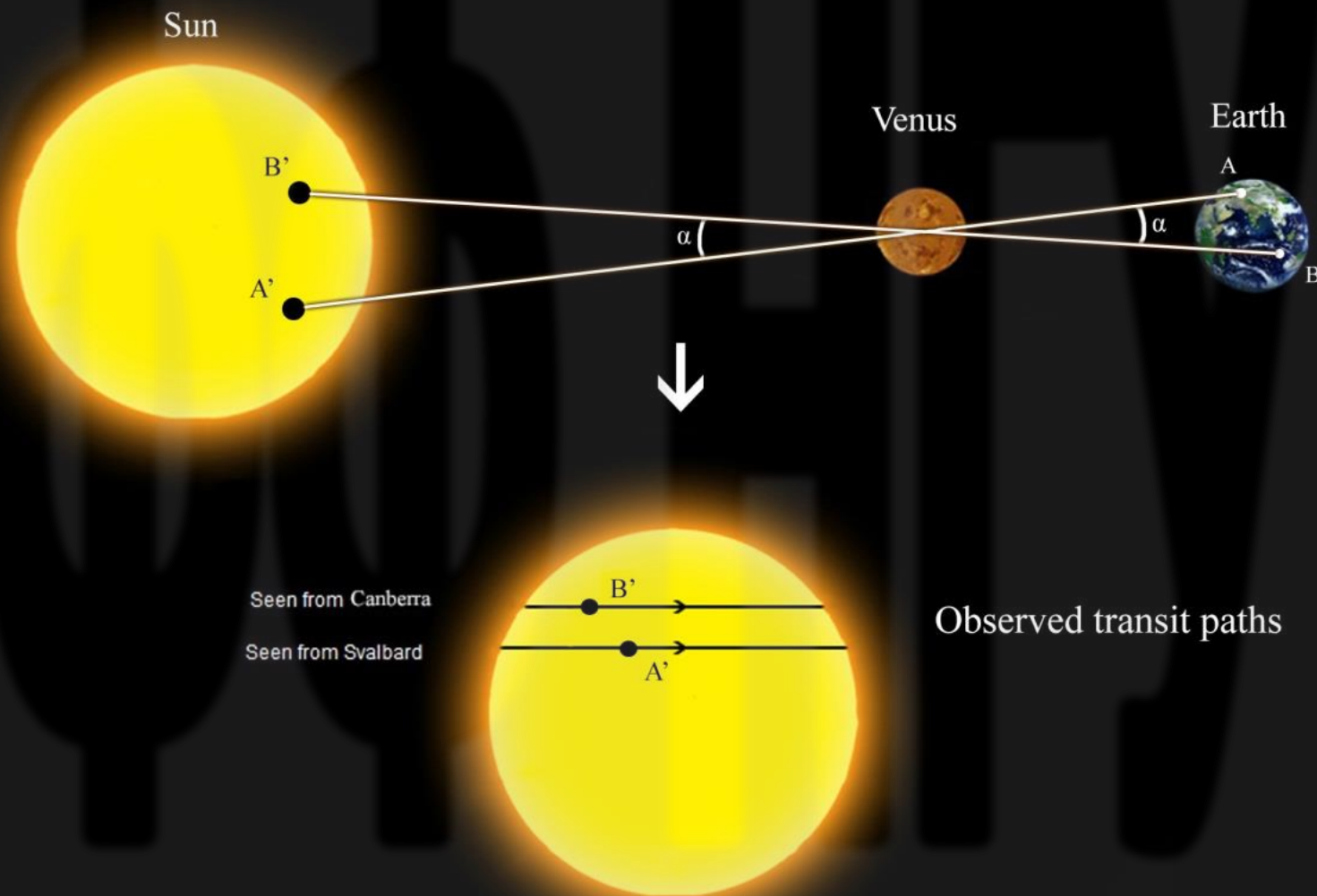


Позволяет измерить угол между плоскостью орбиты и осью вращения звезды. Оказалось, что около 25% горячих юпитеров имеют ретроградное вращение. (arXiv:1008.2353)



Транзитный метод

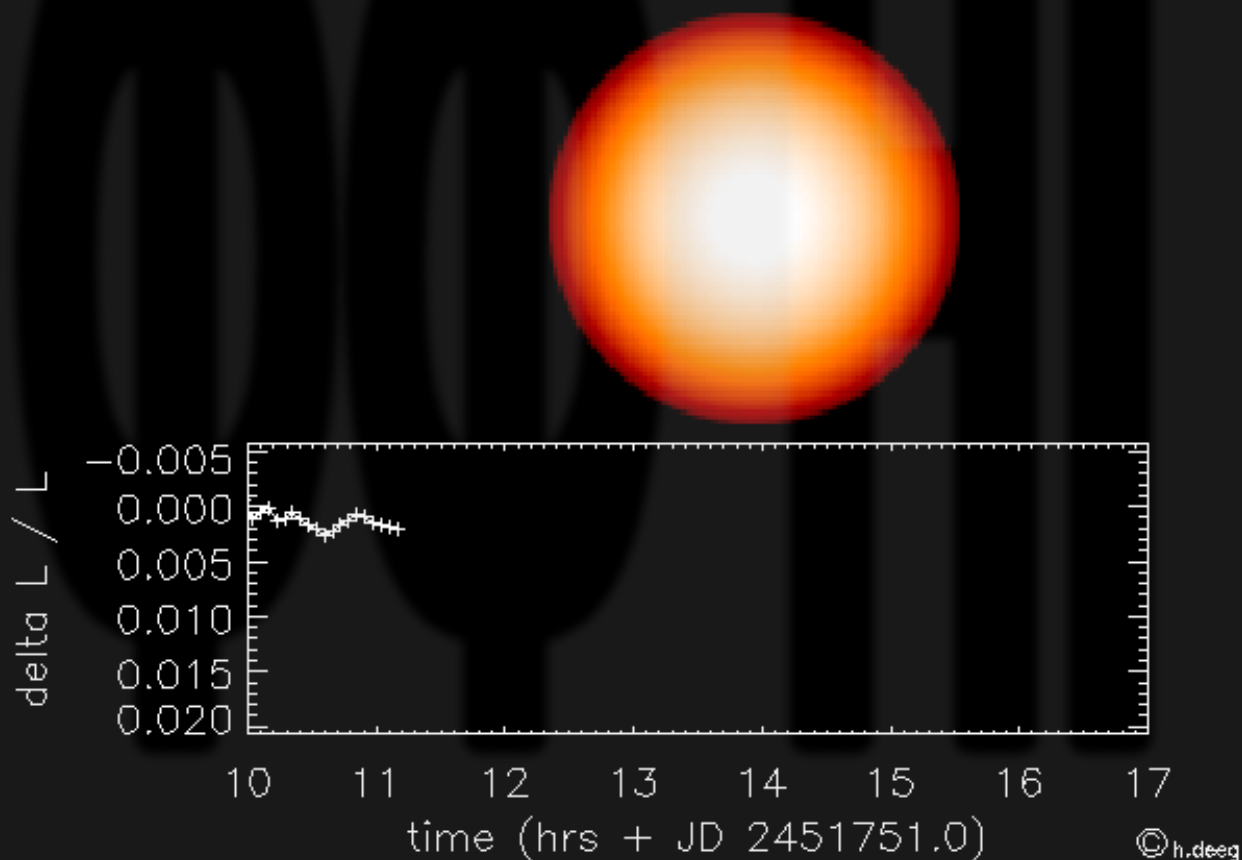
Транзит Венеры по диску Солнца



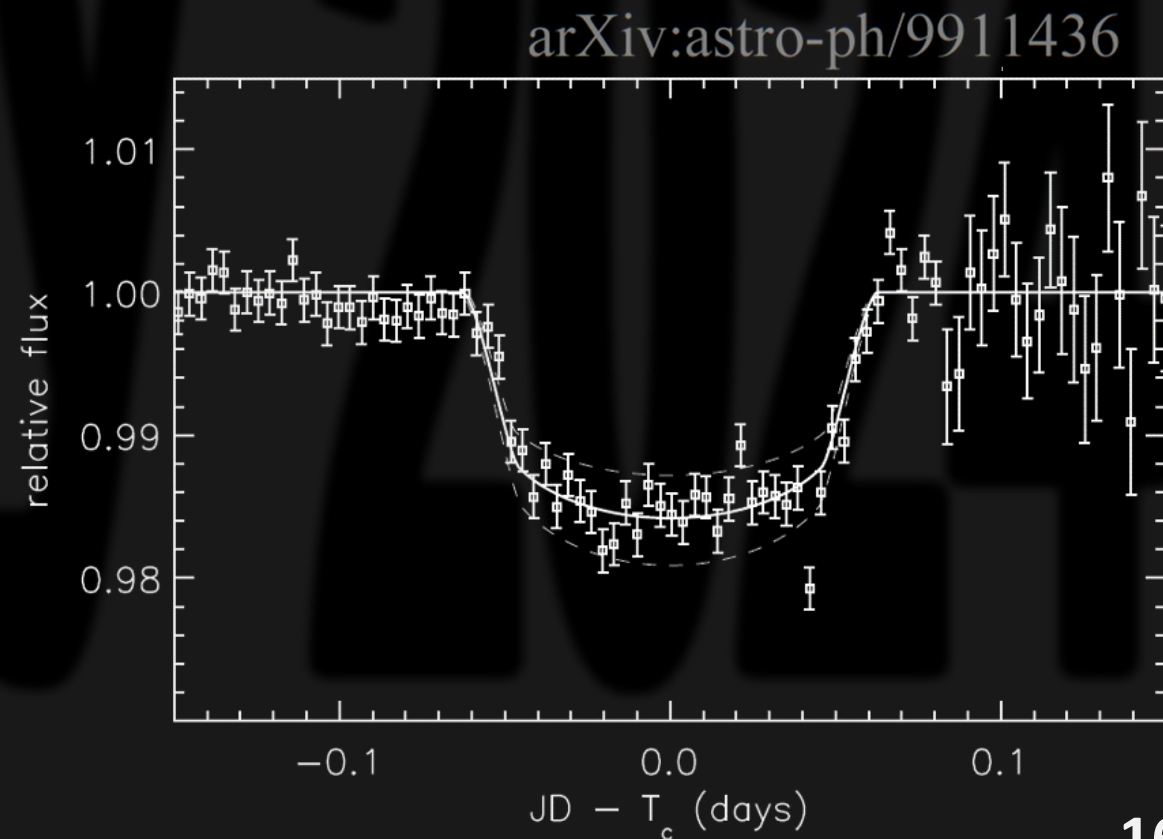
Наблюдался в 2004 и 2012 годах.
Следующие транзиты в 2117 и
2125 годах. Для Меркурия: 2032,
2039, 2049...

Транзитный метод

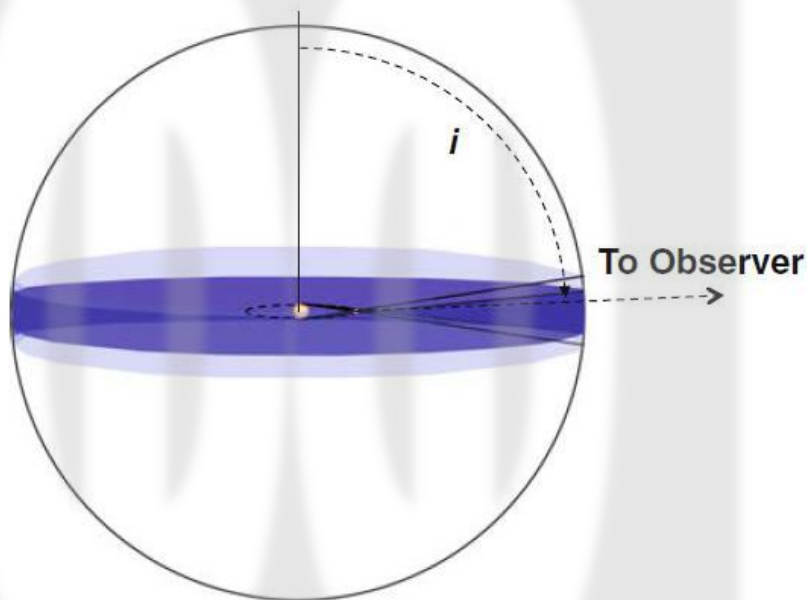
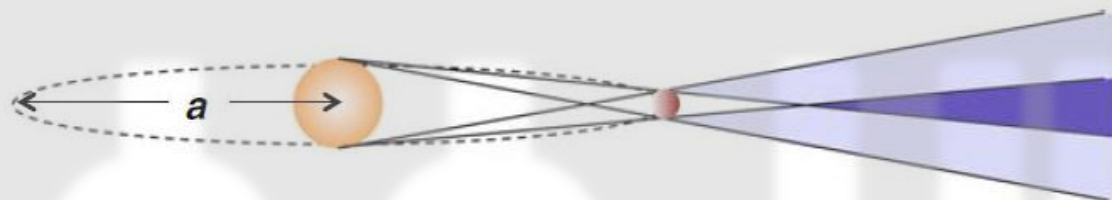
Однако возможно наблюдать транзиты экзопланет по диску своих звезд!



Первое наблюдение транзитным методом было выполнено для экзопланеты HD209458b, открытой ранее по RV.



Вероятность транзита



Andrew Cameron (in Bozza et al. 2016)

Для случайно ориентированных орбит:

$$\frac{d\Omega}{4\pi} = \frac{2\pi \sin i \, di}{4\pi} = \frac{d \cos i}{2}$$

$$\text{Prob} \left(\cos i < \frac{R_* + R_p}{a} \right) = \frac{1}{2} \int_{-(R_* + R_p)/a}^{+(R_* + R_p)/a} d \cos i = \frac{R_* + R_p}{a}$$

$$\text{Prob} \left(\cos i < \frac{R_*}{a} \right) \simeq 0.0047 \left(\frac{R_*}{R_{\odot}} \right) \left(\frac{1 \text{ au}}{a} \right)$$

Для планеты с параметрами Земли, вероятность наблюдения составляет 0.47%.

Глубина и форма транзита

Наивная оценка глубины – отношение площадей:

$$\frac{\delta f}{f} \simeq \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2 = 0.0105 \left(\frac{R_p}{R_{Jup}} \right)^2 \left(\frac{R_*}{R_{\odot}} \right)^2$$

Эта оценка завышает отношение площадей, поскольку не учитывает потемнение лимба – изменение видимой яркости звезды к краю ее диска:

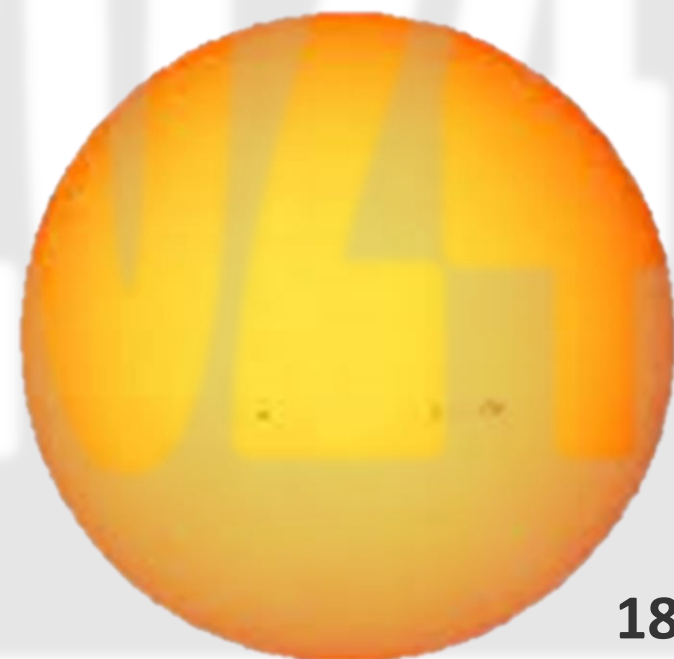
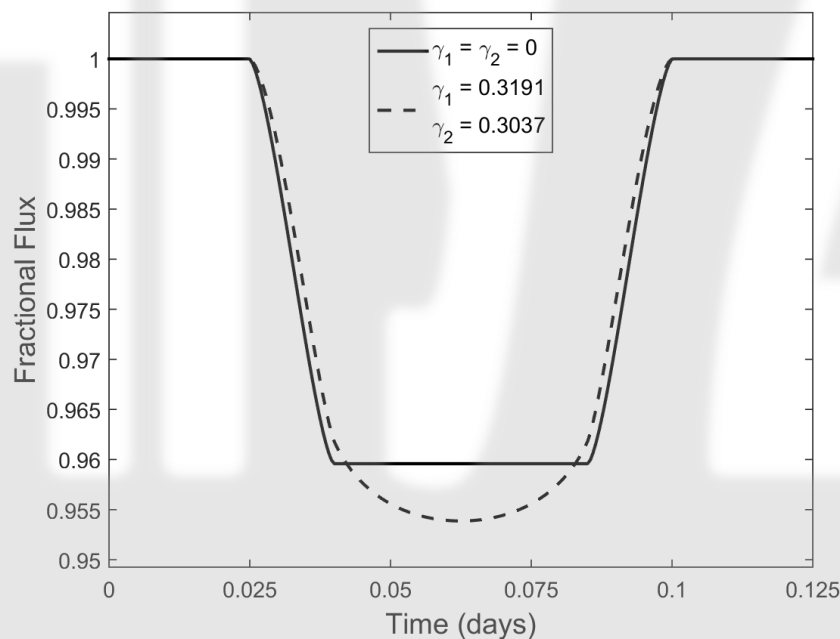
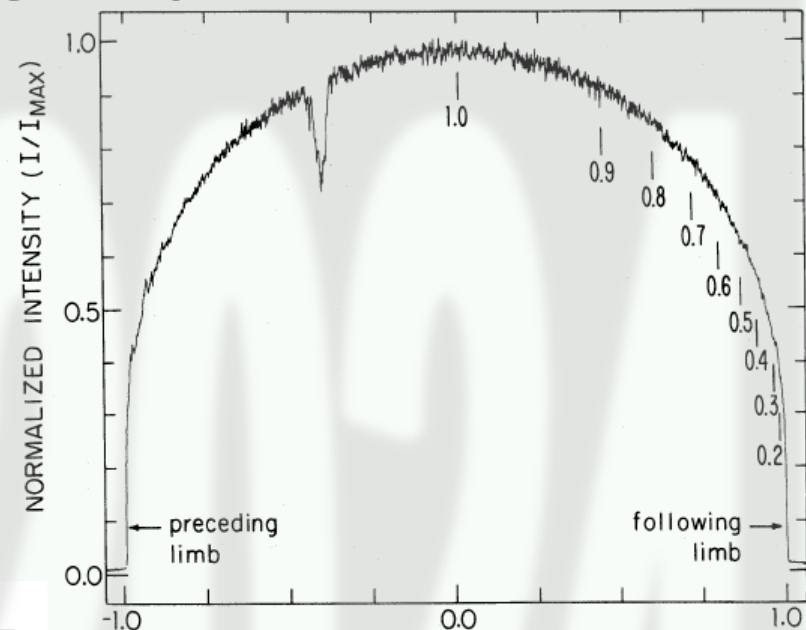
$$\frac{I(\theta)}{I_0} = 1 + \sum_{k=1}^N a_k (1 - \cos \theta)^k$$

$$I = I_0(1 - u(1 - \mu)); \quad \mu = \cos \theta$$

(линейное приближение)

Тогда:

$$\frac{\delta f}{f} = \frac{3(1 - u + u\sqrt{1 - b^2})}{3 - u} \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2$$



Продолжительность транзита

В предположении круговой орбиты и $i = 90^\circ$:

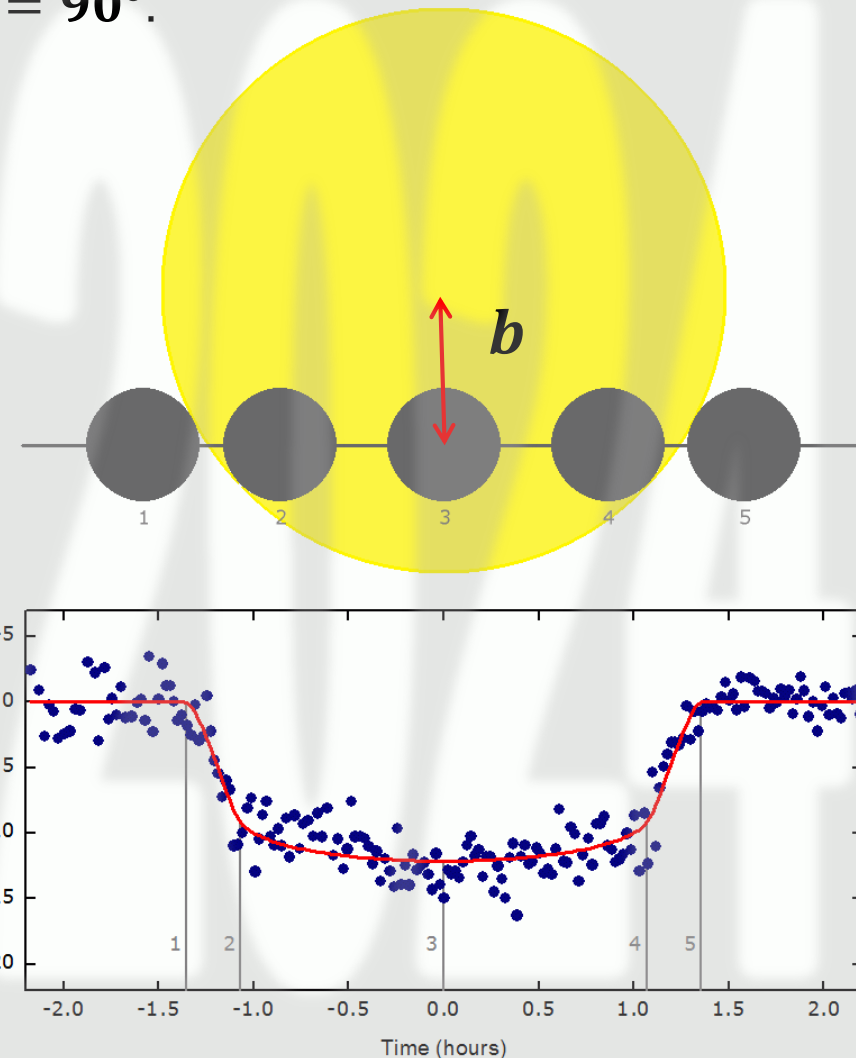
$$(1) \quad \frac{\tau}{P} = \frac{1}{\pi} \arcsin \left(\frac{R_*}{a} \right) \simeq \frac{R_*}{\pi a}$$

В чуть более общем случае интервал $t_5 - t_1$ (полное время транзита) равен:

$$\frac{\tau}{P} = \frac{R_*}{\pi a} \sqrt{\left(1 + \frac{R_p}{R_*}\right)^2 - b^2}$$

При условии $R_* \ll a$, из (1) и III закона Кеплера получаем:

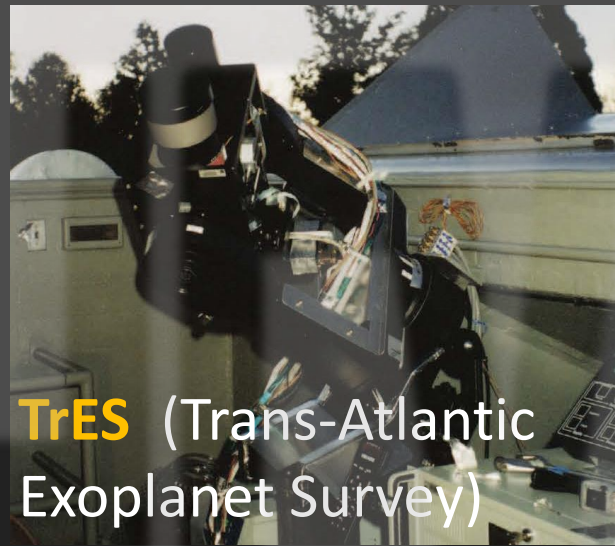
$$\tau = 3 \left(\frac{P}{4} \right)^{1/3} \left(\frac{\rho_\odot}{\rho_*} \right)^{1/3} \quad \rho_* \simeq \rho_\odot \frac{\tau^3}{6P} \quad \begin{array}{l} P - \text{в сутках} \\ \tau - \text{в часах} \end{array}$$



Транзитный метод: наземные обзоры



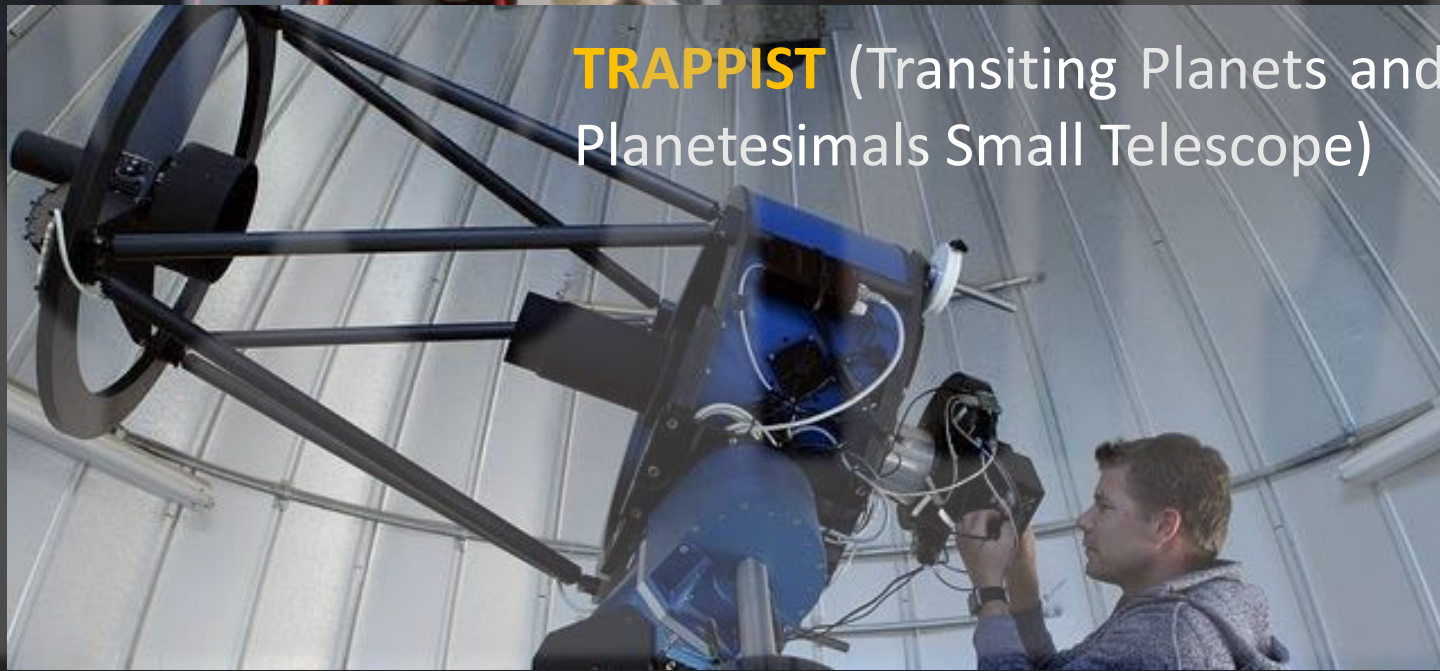
KELT (The Kilodegree
Extremely Little Telescope)



TrES (Trans-Atlantic
Exoplanet Survey)



WASP (Wide Angle Search for Planets)



TRAPPIST (Transiting Planets and
Planetesimals Small Telescope)



QES (Qatar Exoplanet Survey)

Вычислительный пример

Определите ускорение свободного падения на поверхности экзопланеты, если она наблюдается методом радиальной скорости с амплитудой K , а из транзитного метода измерена продолжительность τ и глубина транзита $\delta f/f$.

$$\frac{dv_r}{dt} = \dot{v}_r = \frac{2\pi K}{P}$$

– т.е. вектор скорости описывает окружность радиуса K за период P

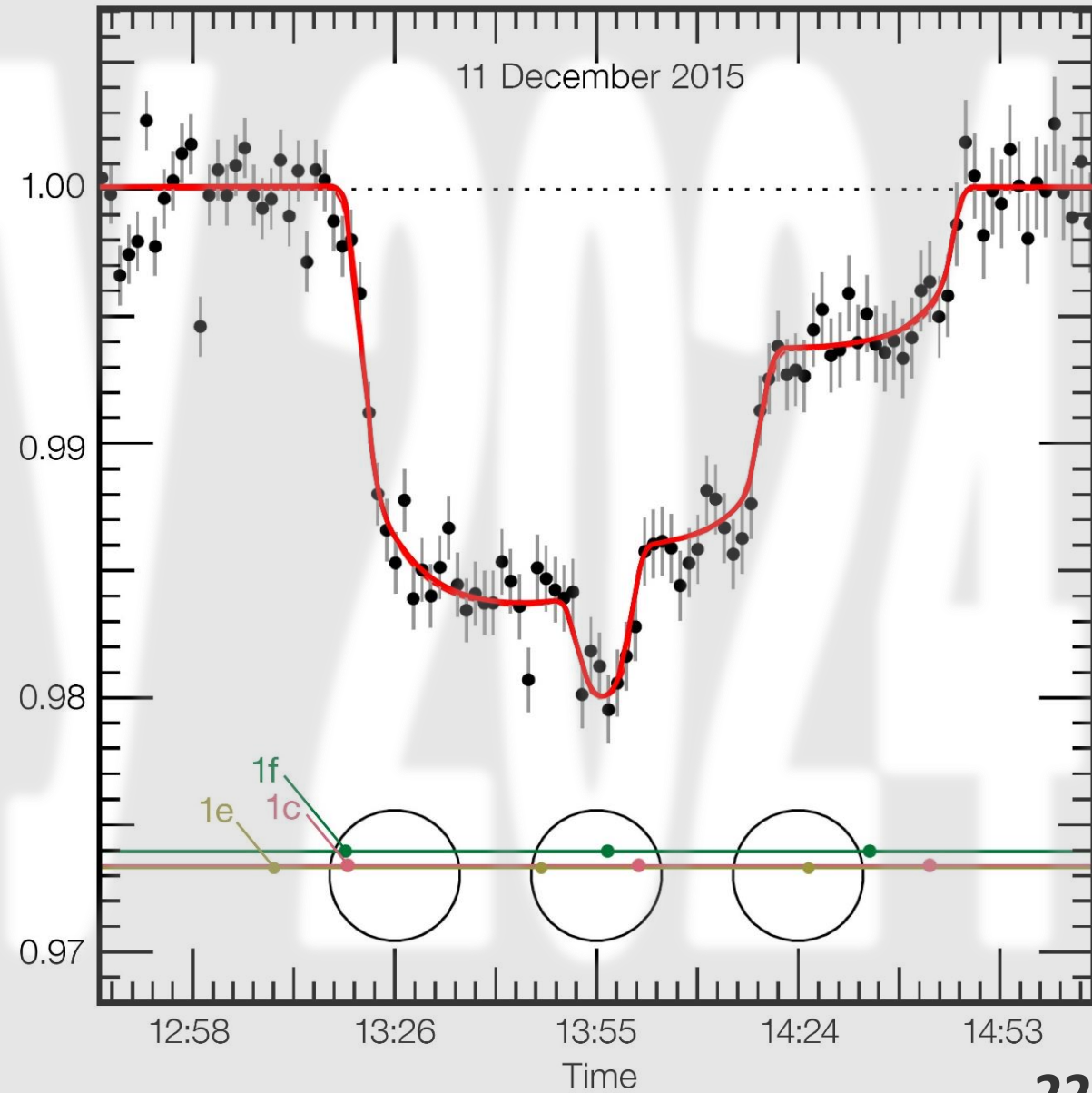
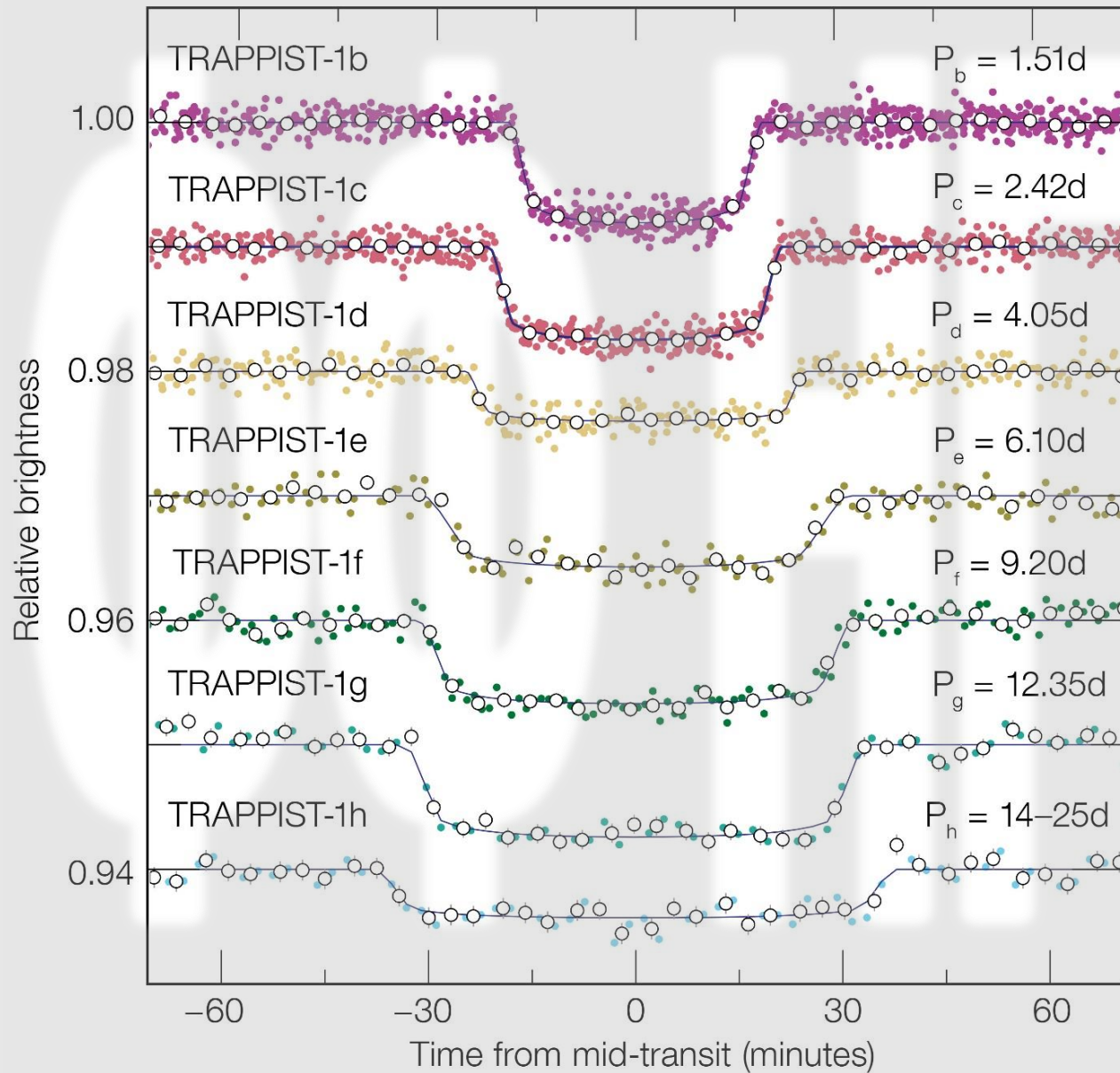
С другой стороны:

$$\dot{v}_r = \frac{GM_p}{a^2} = \frac{GM_p}{R_p^2} \cdot \frac{R_p^2}{a^2} = g_p \frac{R_p^2}{a^2}$$

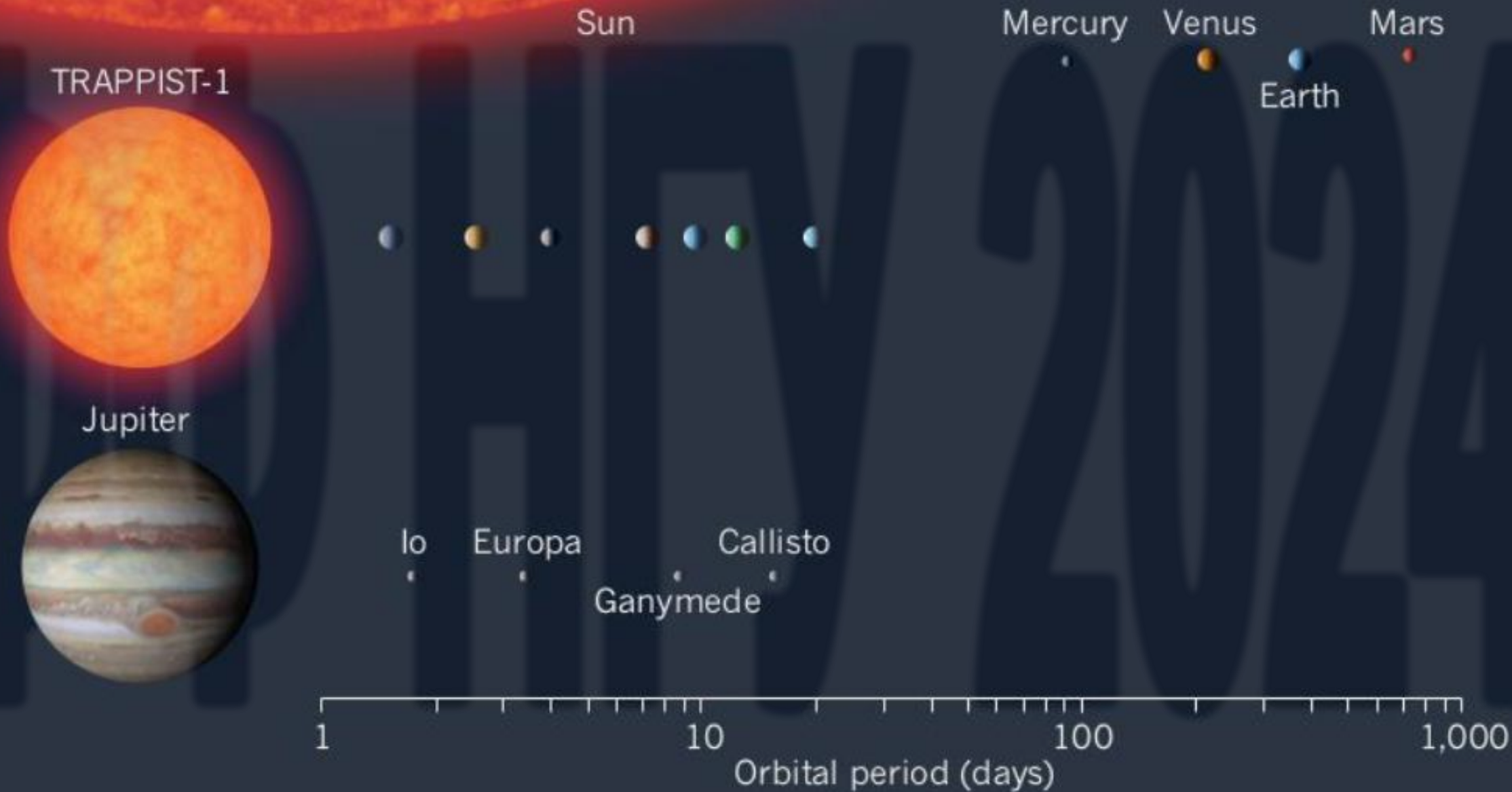
Приравнивая, получаем:

$$g_p = \frac{2\pi K}{P} \cdot \frac{a^2}{R_p^2} = \frac{2\pi K}{P} \cdot \left(\frac{R_*}{R_p}\right)^2 \left(\frac{a}{R_*}\right)^2 = \frac{2\pi K}{P} \cdot \frac{\delta f}{f} \cdot \left(\frac{P}{\pi\tau}\right)^2 = \frac{2KP}{\pi\tau^2} \cdot \frac{f}{\delta f}$$

Планетные системы

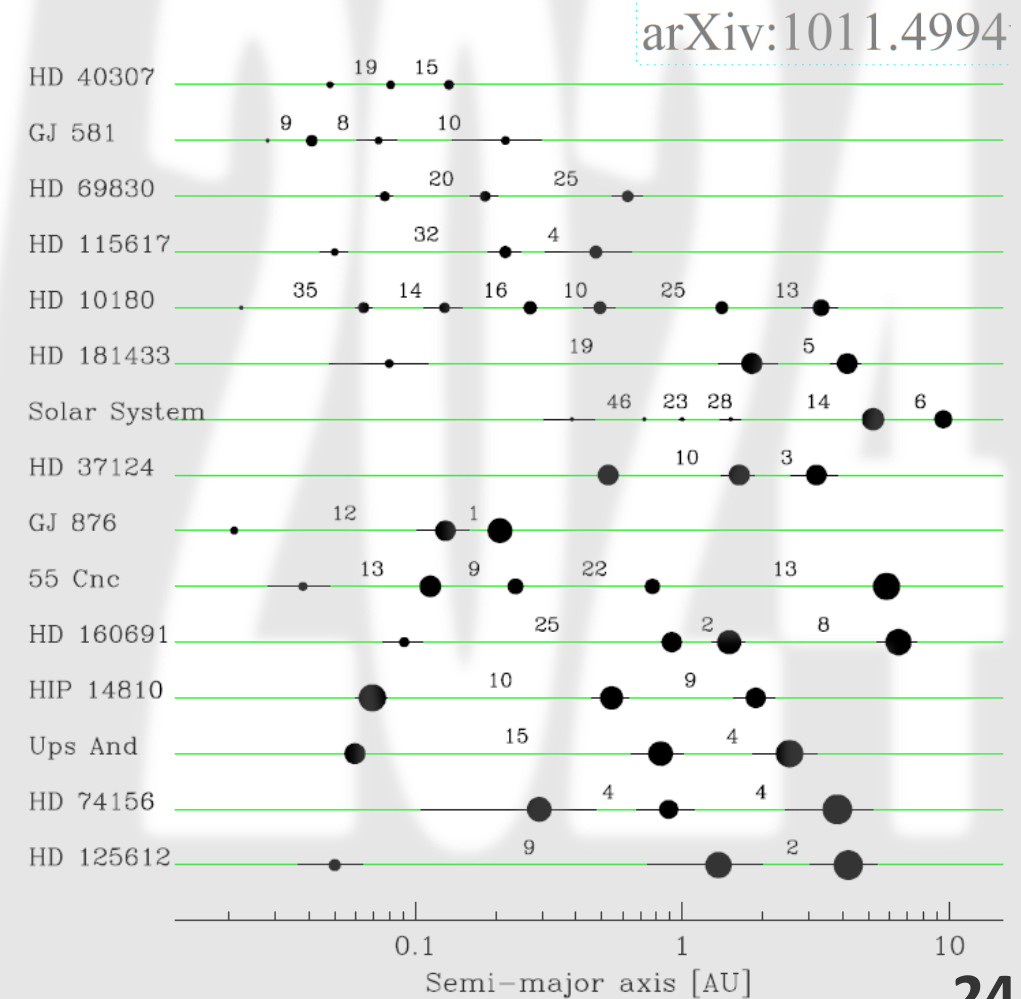
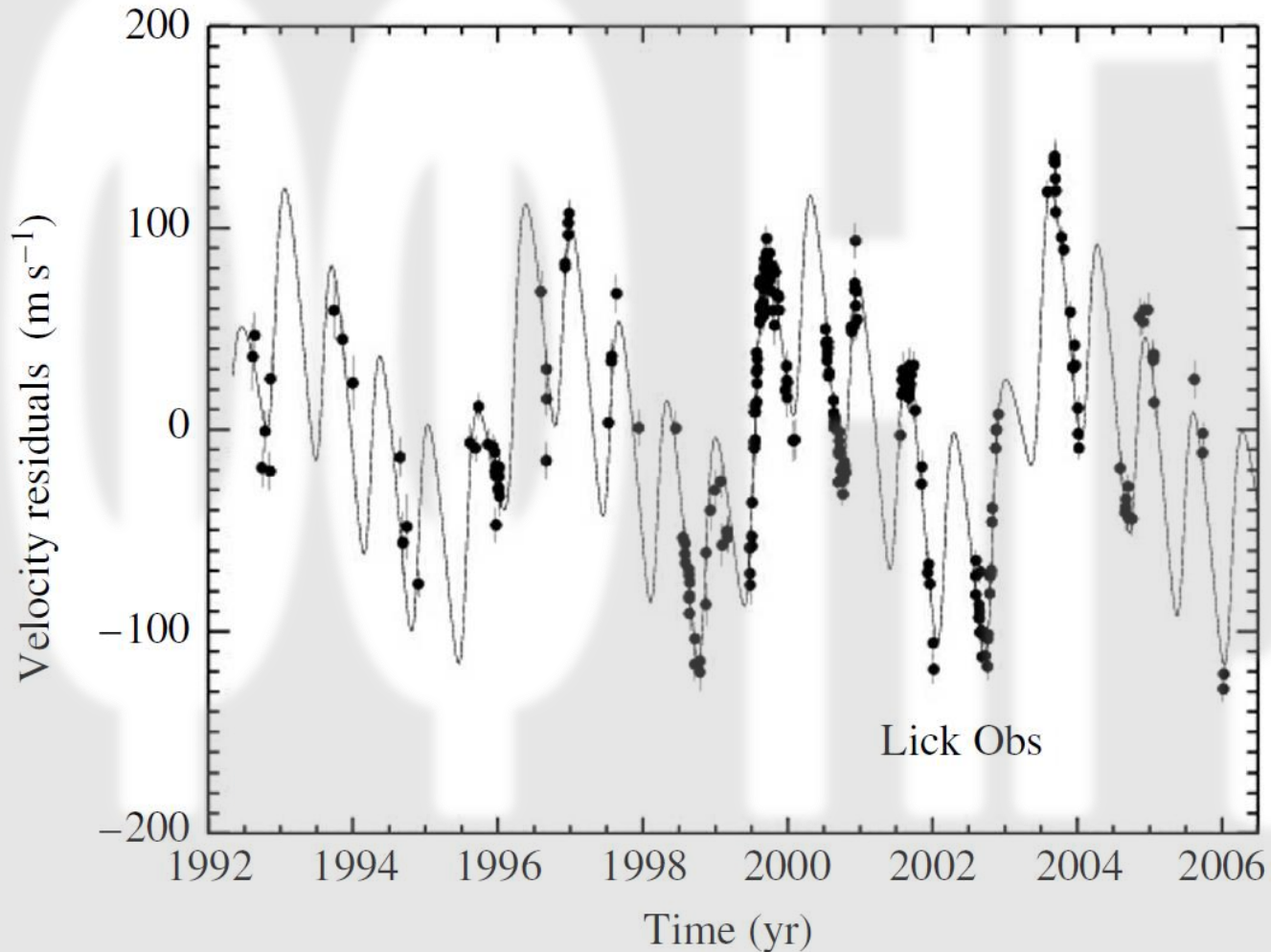


Планетные системы



Планетные системы

Метод радиальных скоростей также позволяет обнаруживать системы нескольких планет.



Планеты у кратных звезд

Устойчивые конфигурации в системах многих тел имеют иерархическую структуру. В двойной системе выделяют две устойчивые планетные конфигурации – S и P типы.

Подробный анализ областей устойчивости планетных орбит в тройной звездной системе проведен в работе 1811.0822.

Уже обнаружено несколько экзопланет в системах кратных звезд: Kepler-16, Kepler-34, Kepler-35... По некоторым оценкам, около 10% кратных систем могут иметь экзопланеты (1204.4833).



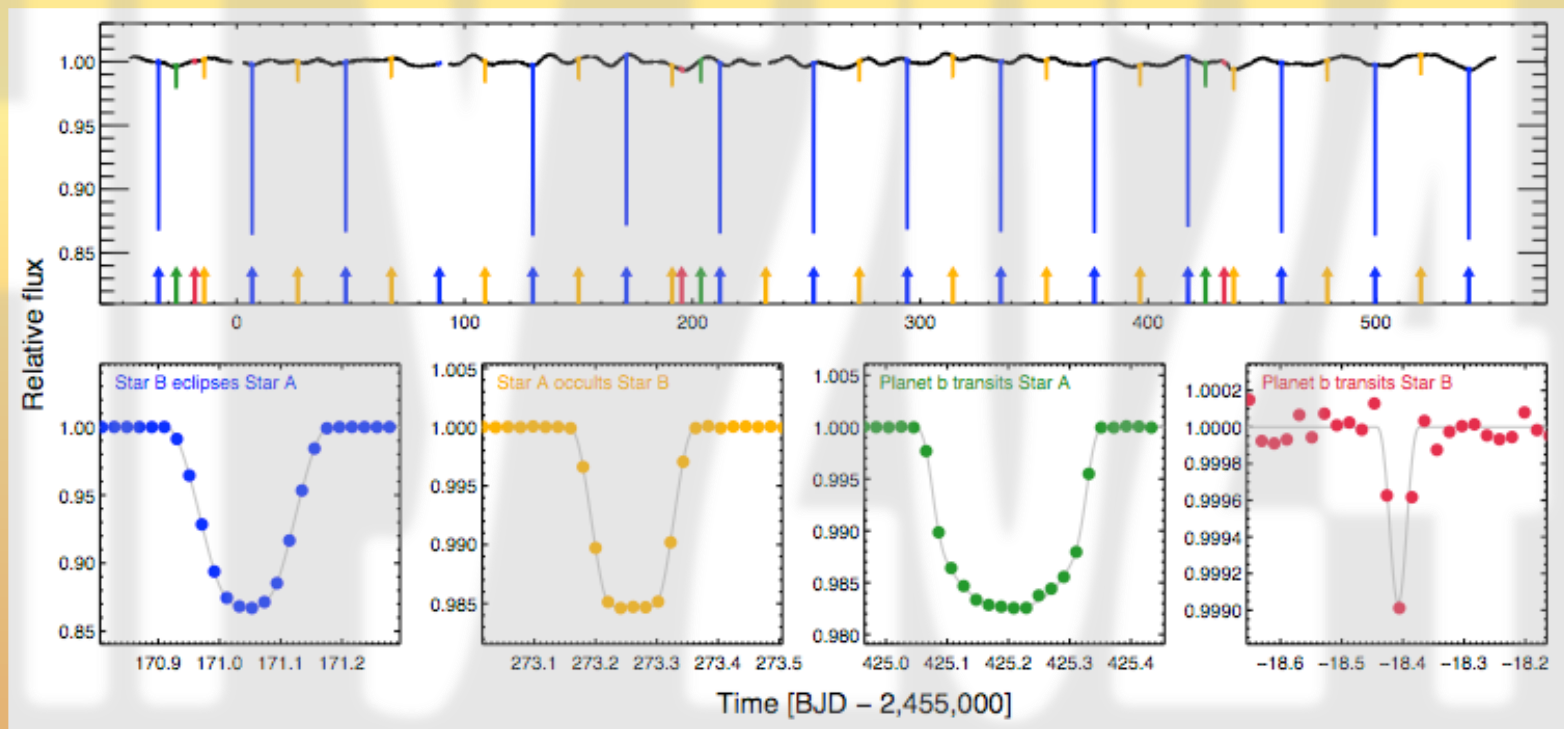
RELAX ON KEPLER-16b



Планеты у кратных звезд

Массы звезд $\sim 0.2M_{\odot}$ и $\sim 0.7 M_{\odot}$ с орбитальным периодом 41 суток и большой полуосью 0.22 а.е.

Период планеты (масса и размер $\sim$ Сатурн) 229 суток, большая полуось 0.7 а.е. (тип P).



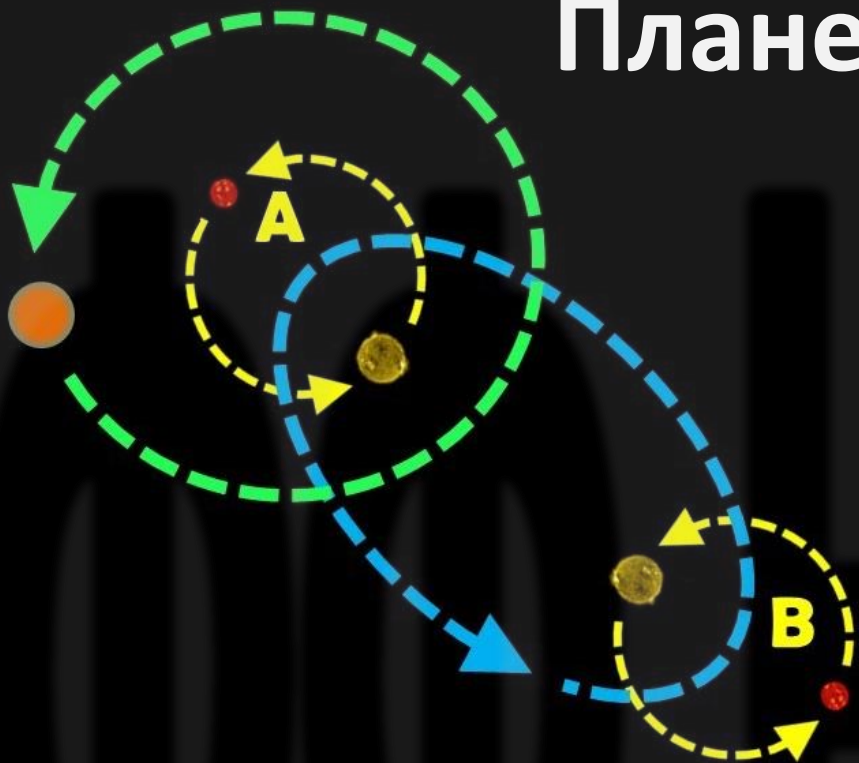
Звезда В
затмевает А

Звезда А
затмевает В

Транзит b
по звезде А

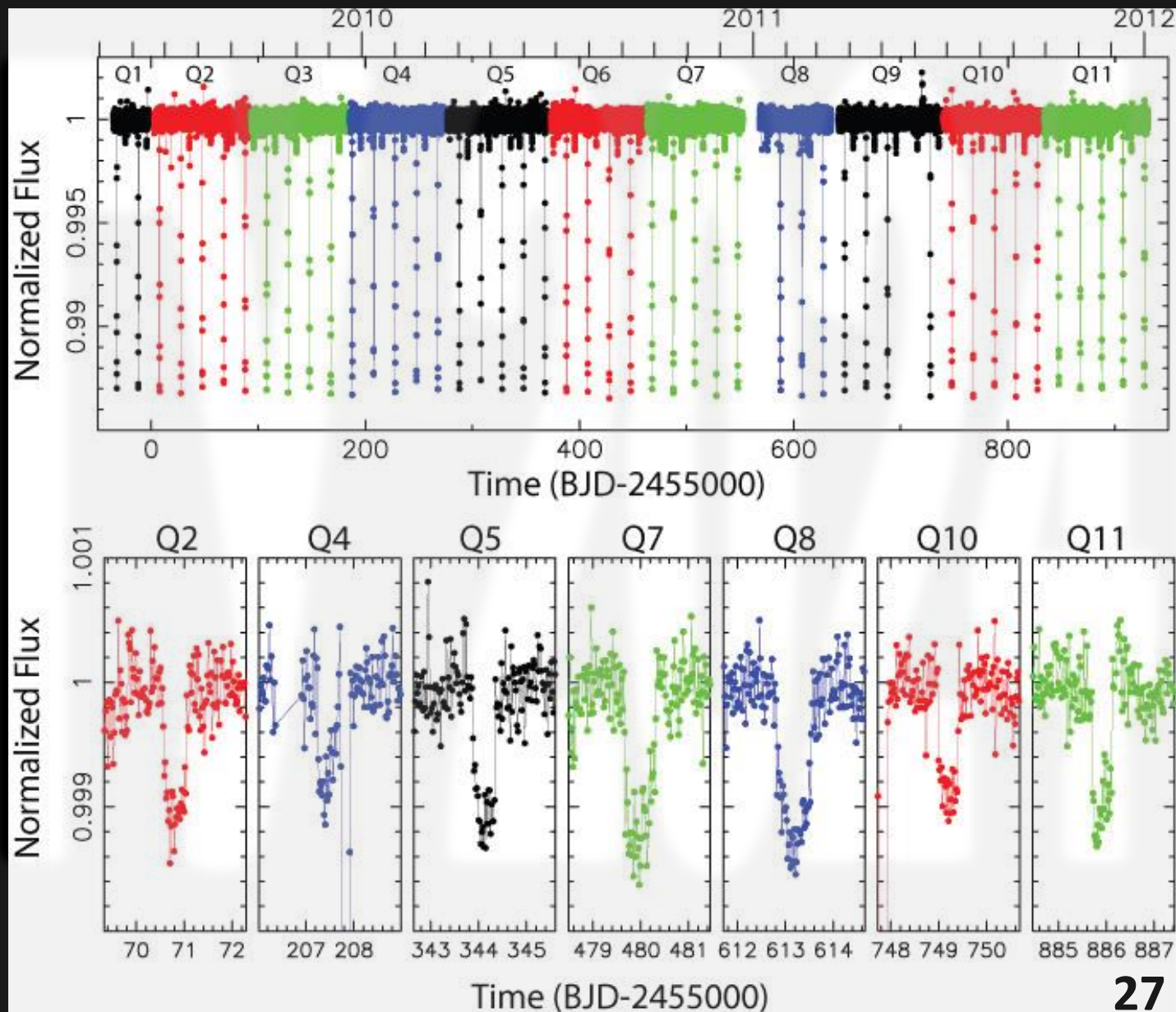
Транзит b
по звезде В

Планеты у кратных звезд



Система из четырех звезд в конфигурации 2+2. Двойная система А является тесной затменно-переменной.

Обнаруженная планета вращается вокруг системы А по внешней (тип Р) орбите.



Транзитный метод: орбитальные обзоры

Наземные обзоры ограничены по точности фотометрии флуктуациями атмосферы (~0.1%) и по продолжительности транзитов (5-6 часов).

$$\left(\frac{R_{\oplus}}{R_{\odot}}\right)^2 \simeq 10^{-5}$$



CoRoT (**C**onvection, **R**otation and planetary **T**ransits) работал на полярной орбите высотой 900 км. Создан Французским космическим агентством совместно с Европейским космическим агентством.

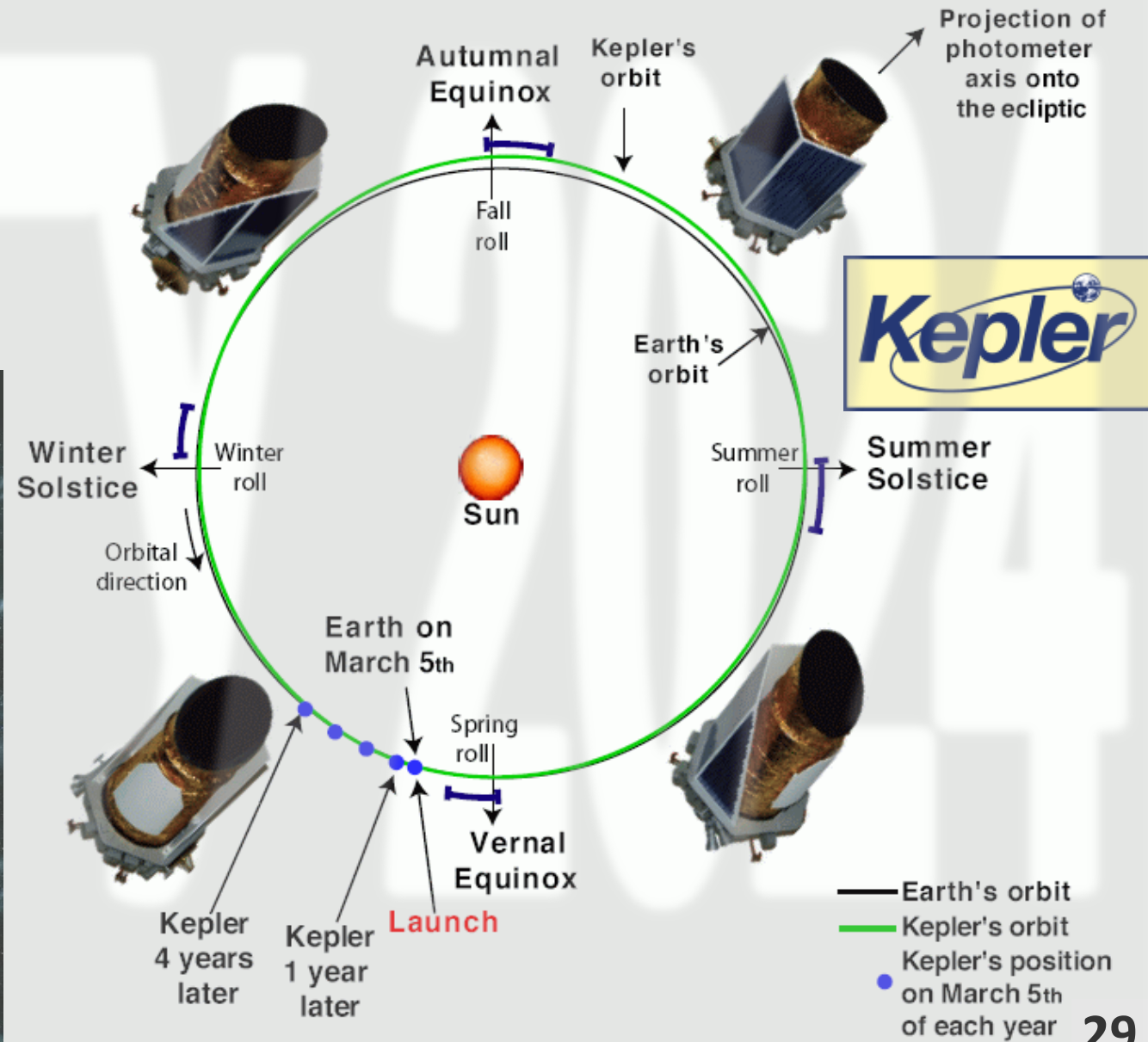
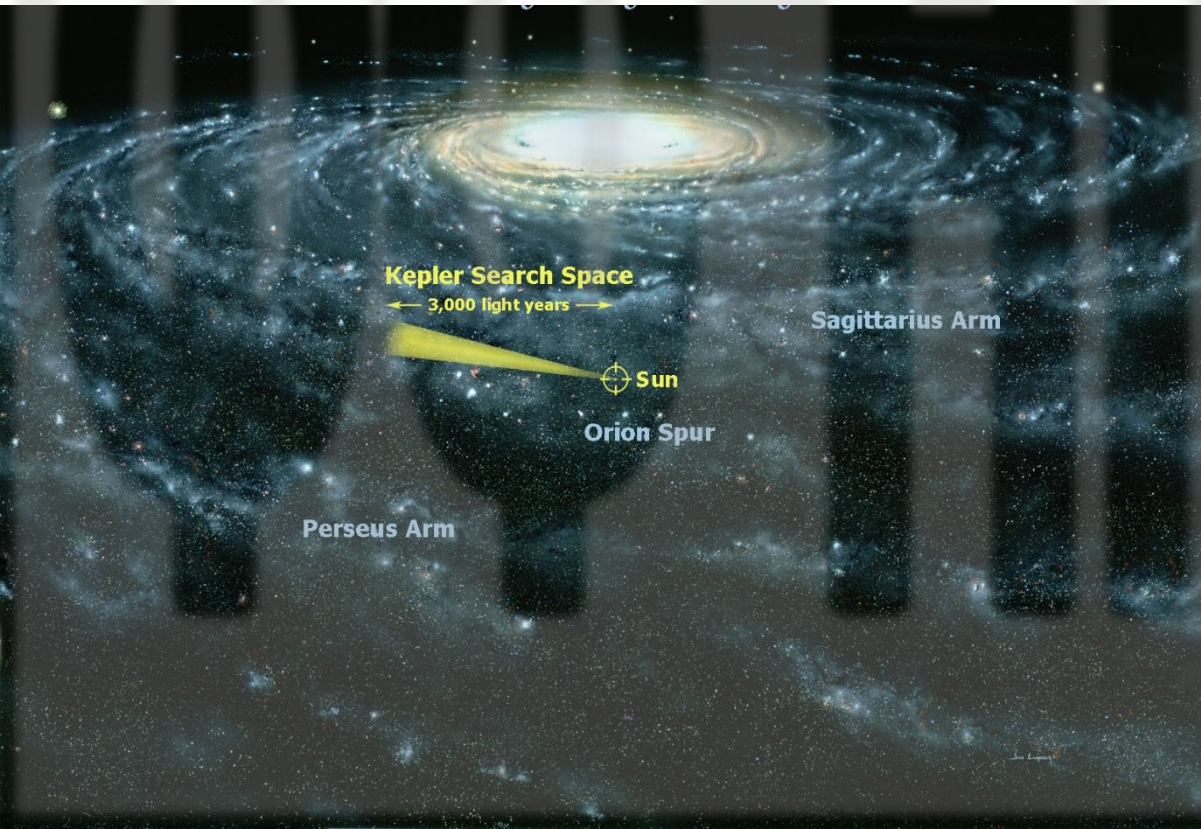
Запущен на ракете-носителе Союз 2.1б «Фрегат» 27 декабря 2006 г. Работал до ноября 2012 года. Телескоп $D=27$ см; CCD камера $4 \times 2048 \times 2048$, пиксел 13.5×13.5 мкм, разрешение 2.32 уг. сек./пиксел.

Первая экзопланета CoRoT-1b обнаружена в мае 2007 г.

Всего обнаружено **32** надежно установленных экзопланеты + множество результатов по физике звезд.

Транзитный метод: орбитальные обзоры

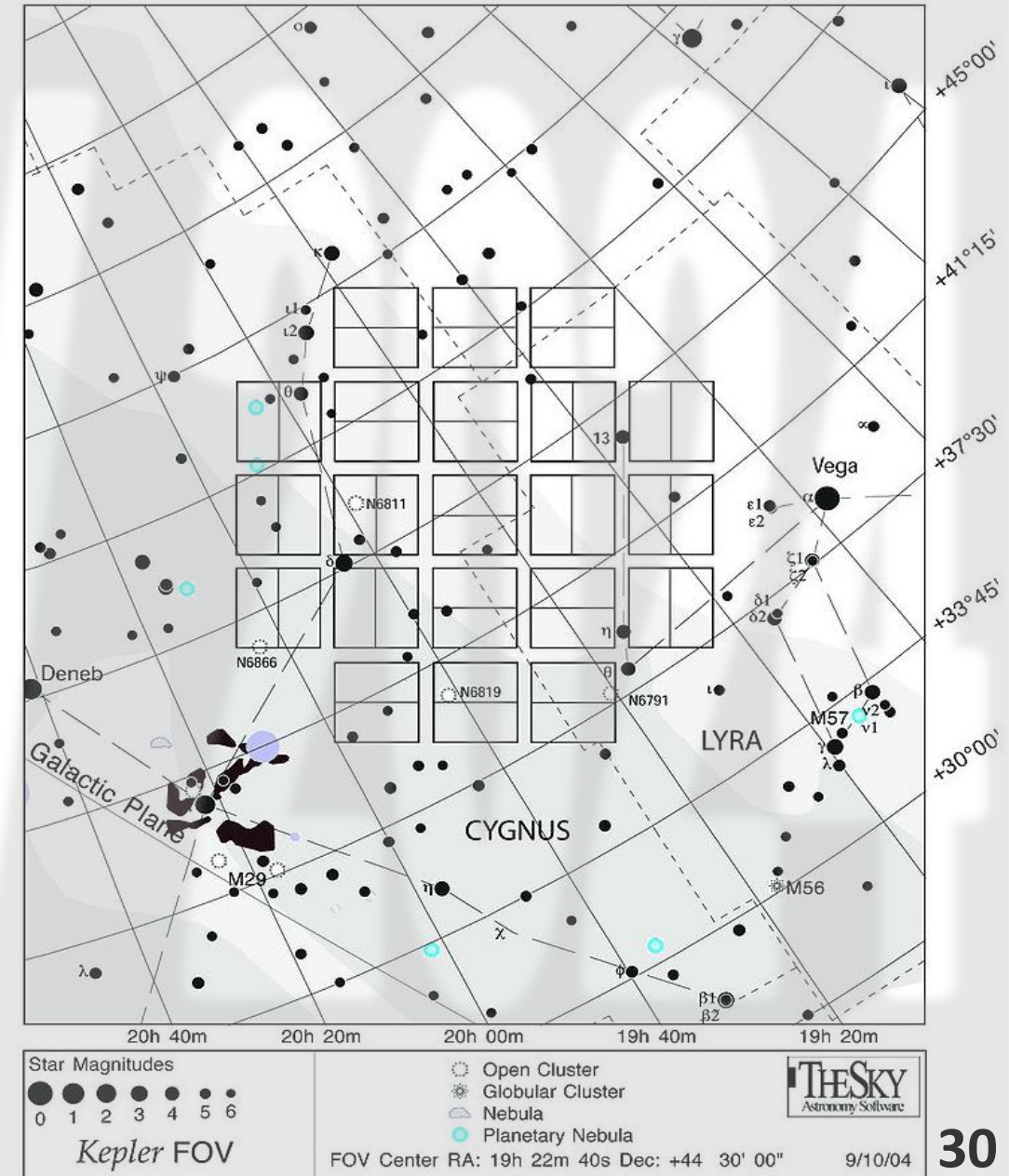
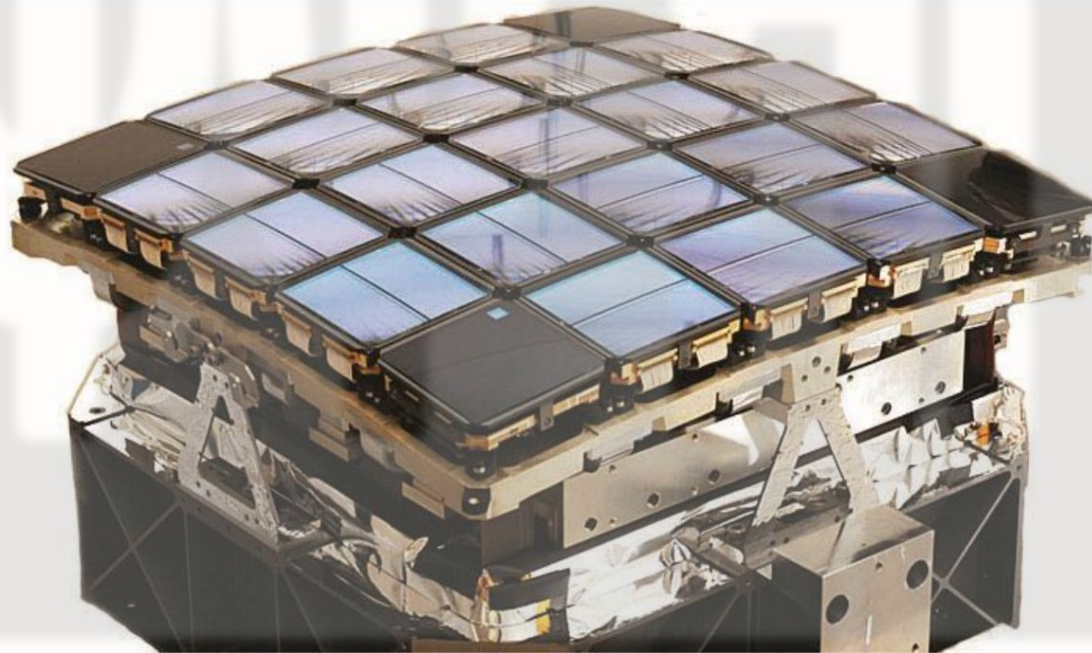
Kepler – орбитальный телескоп следующего поколения, целиком посвященный поиску экзопланет. Диаметр 0.95 м, с большим полем зрения (115 кв. град.). Запущен на около-солнечную орбиту (Earth - trailing) в 2009 году, следует за Землей, постепенно отдаляясь.



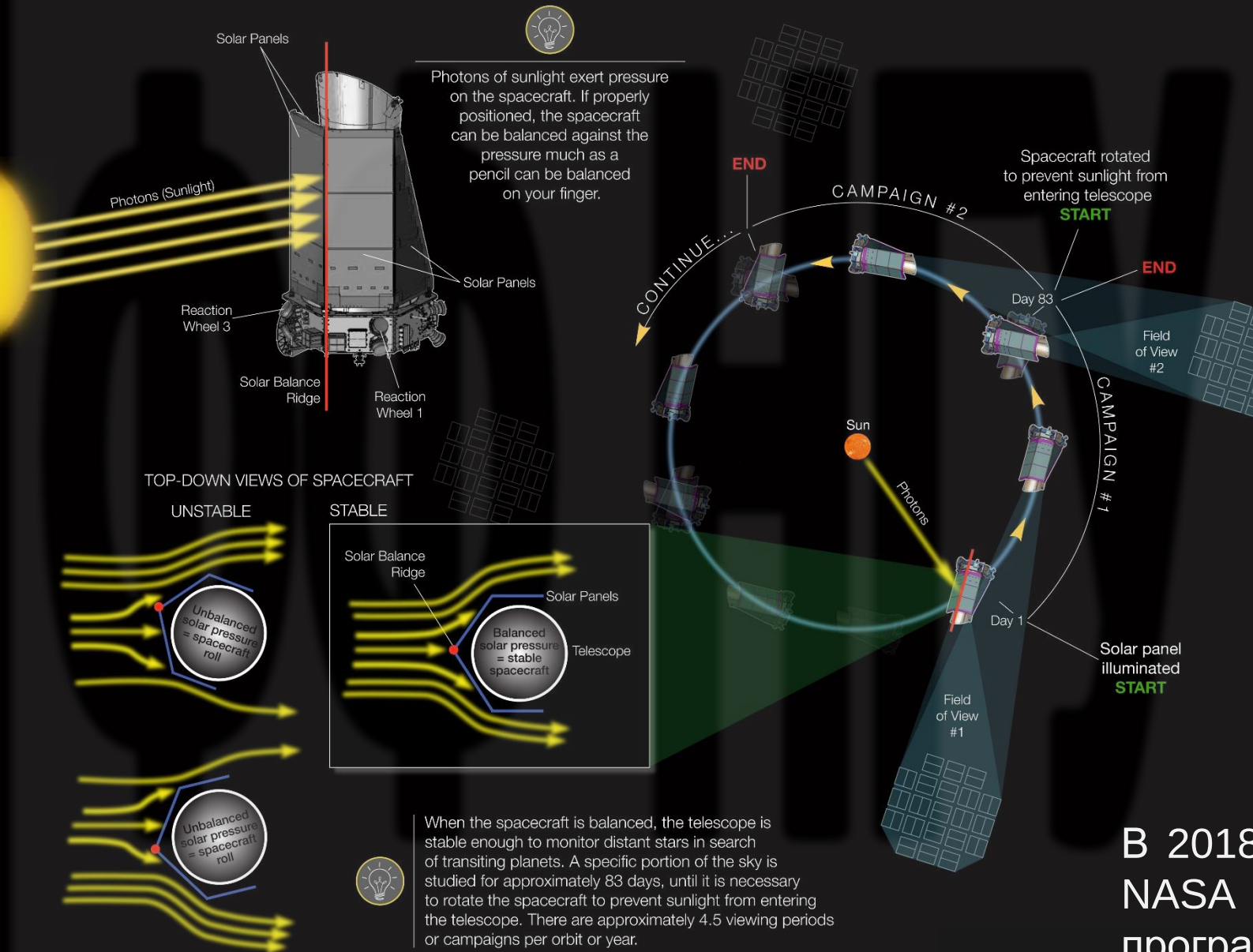
Транзитный метод: орбитальные обзоры

Предполагалось, что телескоп Kepler будет постоянно направлен на один и тот-же участок неба (Лебедь – Лира – Дракон) вблизи плоскости Галактики.

В 2012 году, после четырех лет работы (два гарантийных срока) у телескопа отказал один из четырех стабилизаторов. В 2013 году отказал второй – потеря устойчивой ориентации.



Транзитный метод: орбитальные обзоры



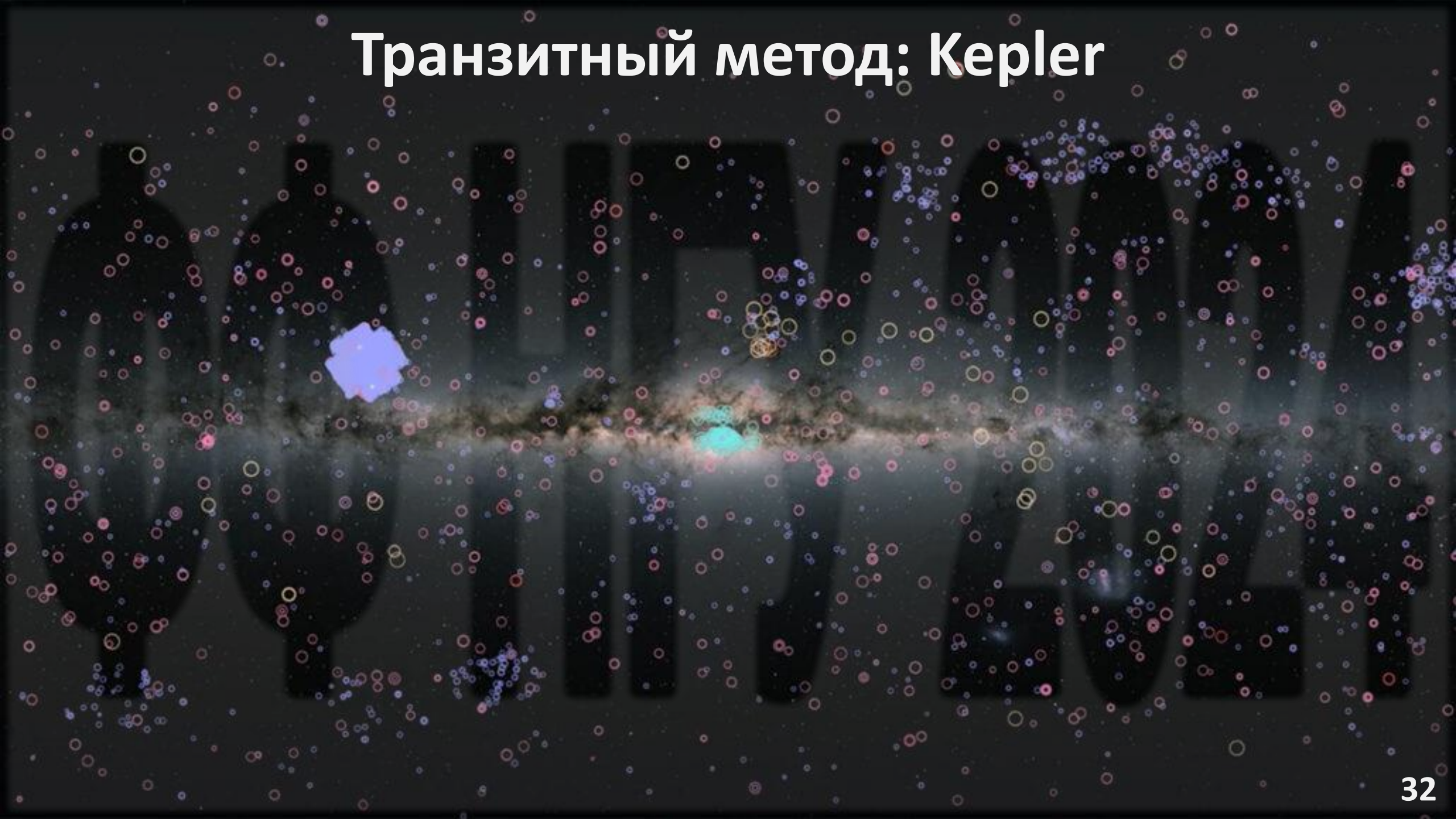
В 2014 году началась новая программа наблюдений K2 ("The second light").

В качестве стабилизатора относительно одной из осей использовалось... давление солнечного света!

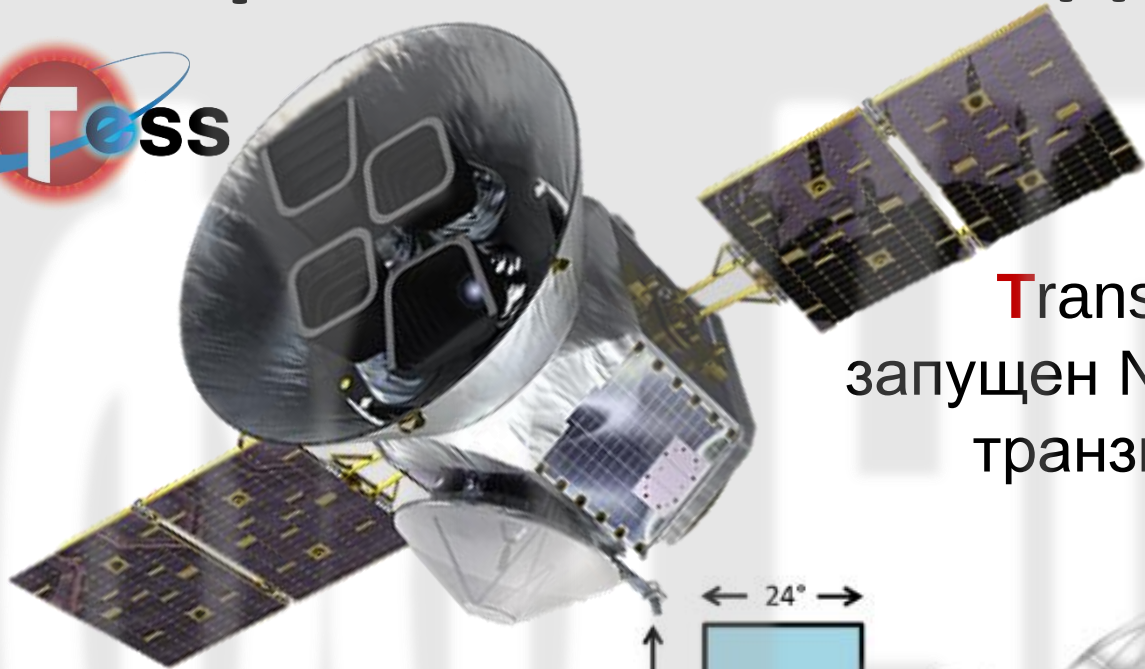
В результате телескоп мог наблюдать одну область неба в течение ~83 суток, а затем переориентировался на другую область.

В 2018 у телескопа закончилось топливо и NASA официально объявило об окончании программы.

Транзитный метод: Kepler



Транзитный метод: орбитальные обзоры



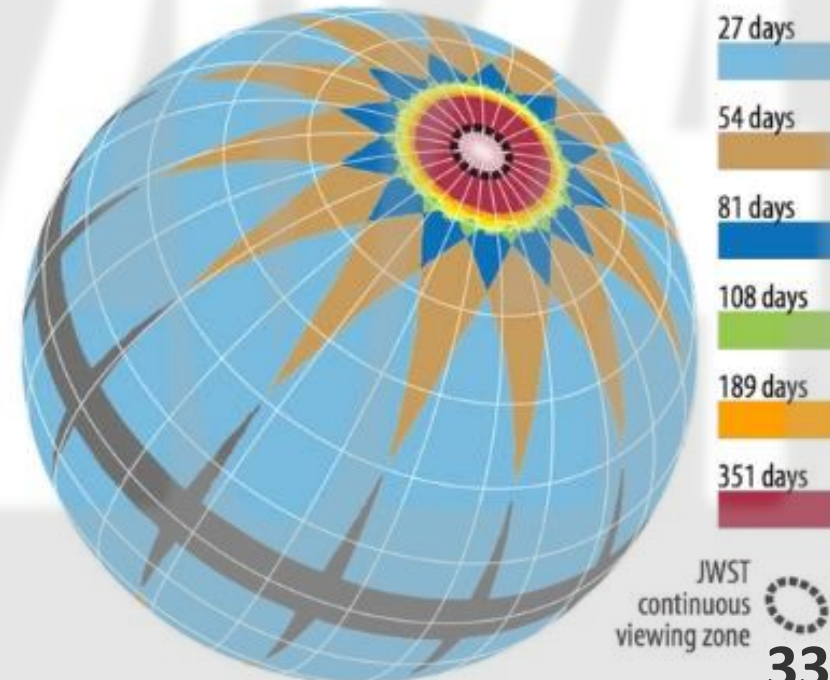
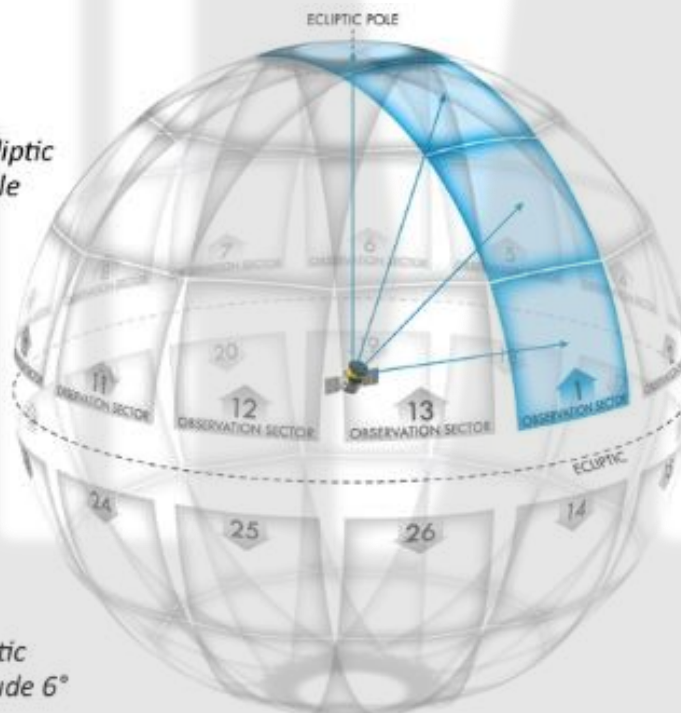
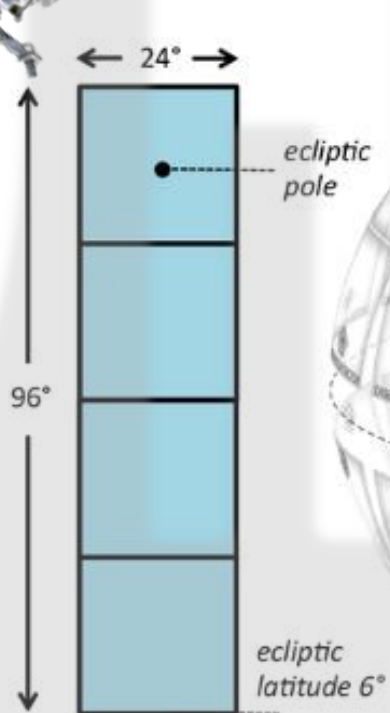
Transiting **E**xoplanet **S**urvey **S**atellite (**TESS**) –
запущен NASA 18 апреля 2018 года. Поиск экзопланет
транзитным методом с покрытием всего неба!

Поле зрения – $24^\circ \times 96^\circ$

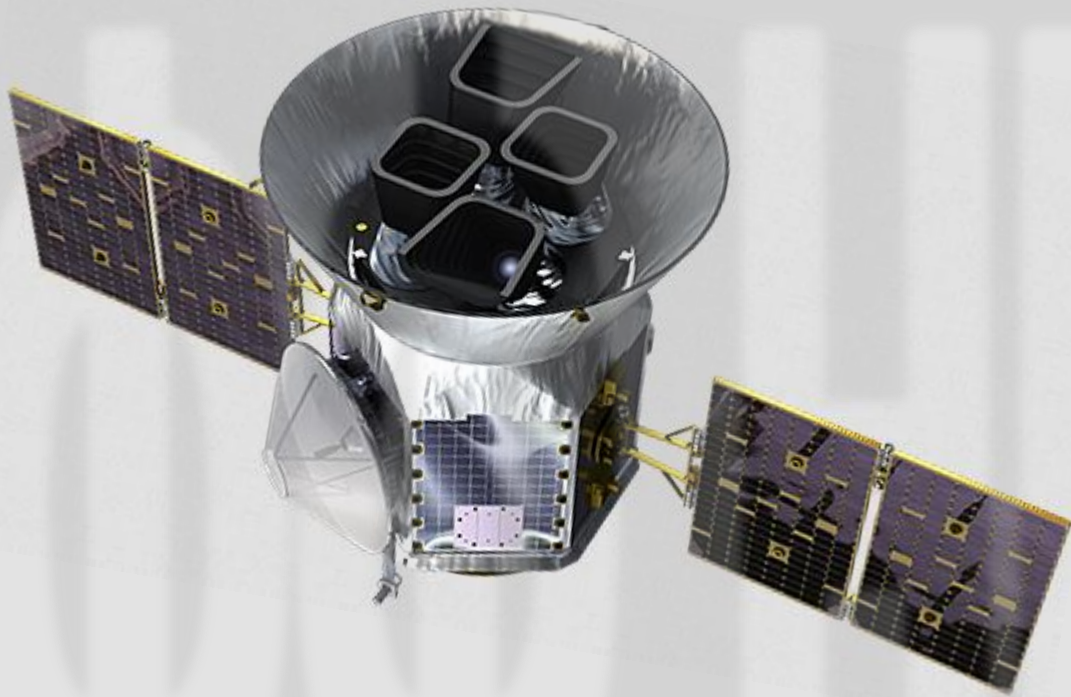
Однако...

Камера: 100 мм!

Разрешение:
 $21''/\text{пиксел}$!



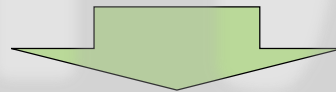
Транзитный метод: орбитальные обзоры



К ноябрю 2022 года TESS обнаружил свыше 6000 **кандидатов**. Надежно установлено 273 экзопланеты. Выявлено 1720 ложных сигналов. (Миссия продлена до 2025 года!)

Из-за низкого углового разрешения, доля реальных экзопланет среди кандидатов составляет лишь ~15%.

Требуется **огромный объем дополнительных наблюдений** для подтверждения и классификации обнаруженных кандидатов...



TESS/K2 Follow up Program

Астрометрия

В системе двух тел каждое из них движется по эллипсу вокруг общего центра масс. Большие полуоси эллипсов относятся как:

$$M_1 a_1 = M_2 a_2$$

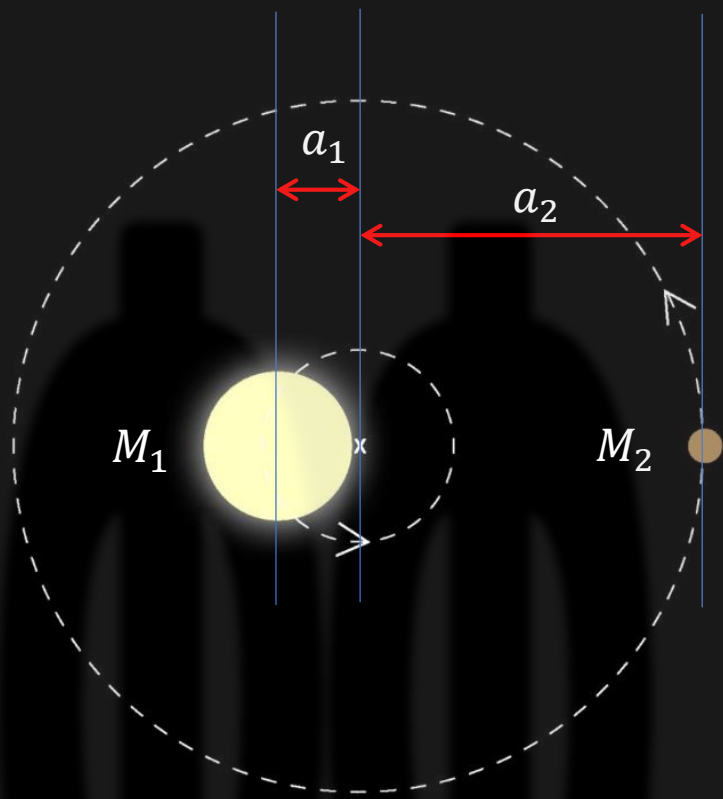
Для системы звезда-планета:

$$a_* = a_p \frac{M_p}{M_*} \ll a_p$$

Для системы Солнце-Юпитер:

$$a_{\odot} = a_{Jup} \frac{M_{Jup}}{M_{\odot}} \simeq 5 \cdot 10^{-3} \text{ а. е.} = 0.75 \cdot 10^6 \text{ км}$$

то есть масштаба радиуса Солнца.



Видимое положение на небе

Вычислительный пример

Оцените, на каком максимальном расстоянии до звезды типа Солнца, возможно определить наличие у нее экзопланеты с массой $M_p = 8M_{Jup}$, вращающейся по круговой орбите с периодом $P = 2$ года по результатам астрометрических измерений спутника GAIA.

1) Третий закон Кеплера:

$$P^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(M_* + M_p)} \quad \Rightarrow \quad a(\text{а. е.}) \simeq \left(\frac{M_*}{M_\odot} P^2(\text{год}) \right)^{1/3} \simeq 2 \text{ а. е.}$$

2) Большая полуось орбиты звезды:

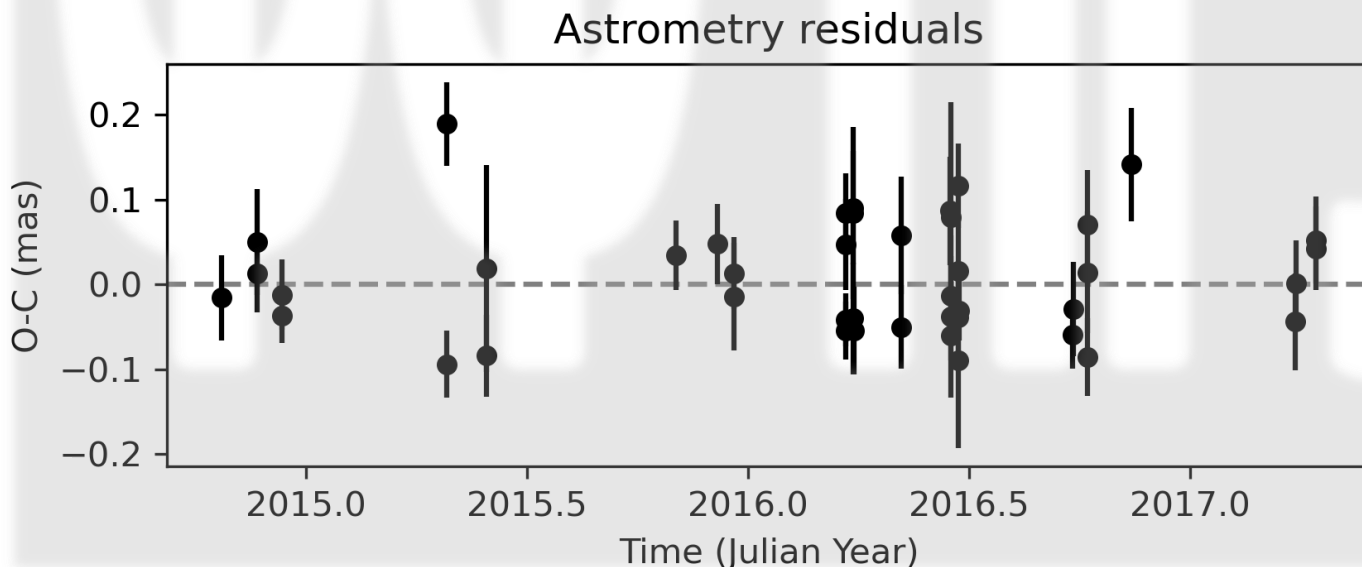
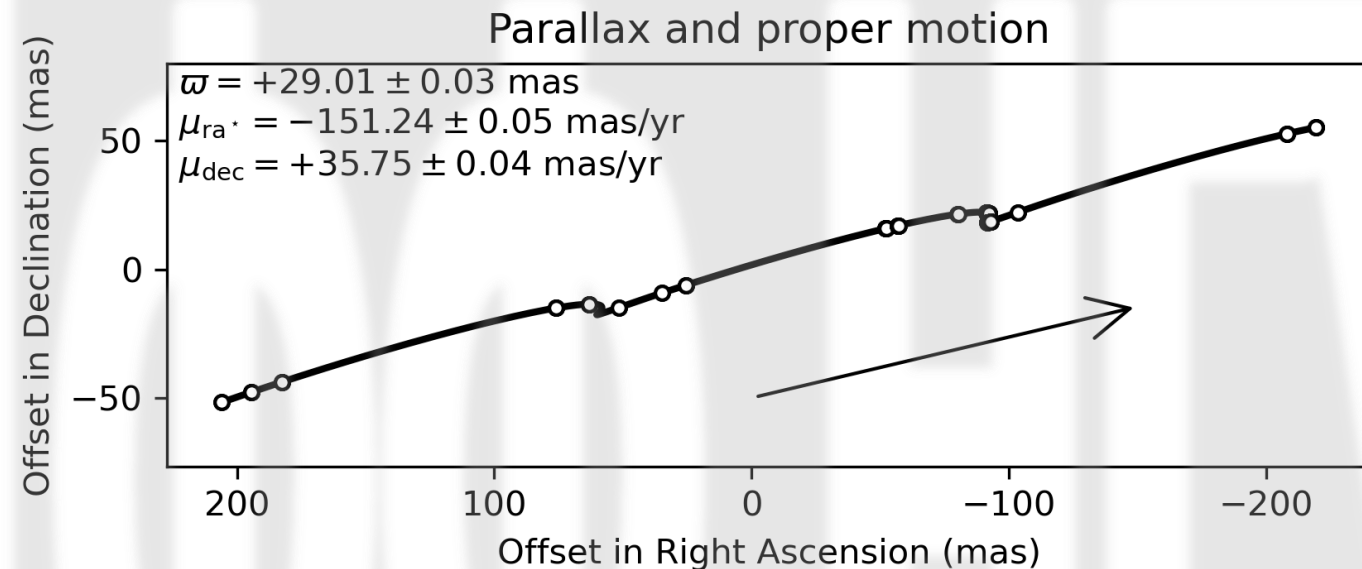
$$a_* = a \cdot \frac{M_p}{M_*} \simeq 16 \times 10^{-3} \text{ а. е.}$$

3) Видимое смещение положения звезды, связанное с ее вращением по орбите:

$$\alpha'' = \frac{2a_*(\text{а. е.})}{d(\text{пк})} \quad \Rightarrow \quad d_{\max} \simeq \frac{2a_*(\text{а. е.})}{3\alpha''_{\min}} \simeq \frac{32 \times 10^{-3}}{3 \cdot 100 \times 10^{-6}} = 100 \text{ пк}$$

Астрометрия

Первые результаты по поиску экзопланет спутником GAIA



GAIA data release 3 (DR3), 2022.

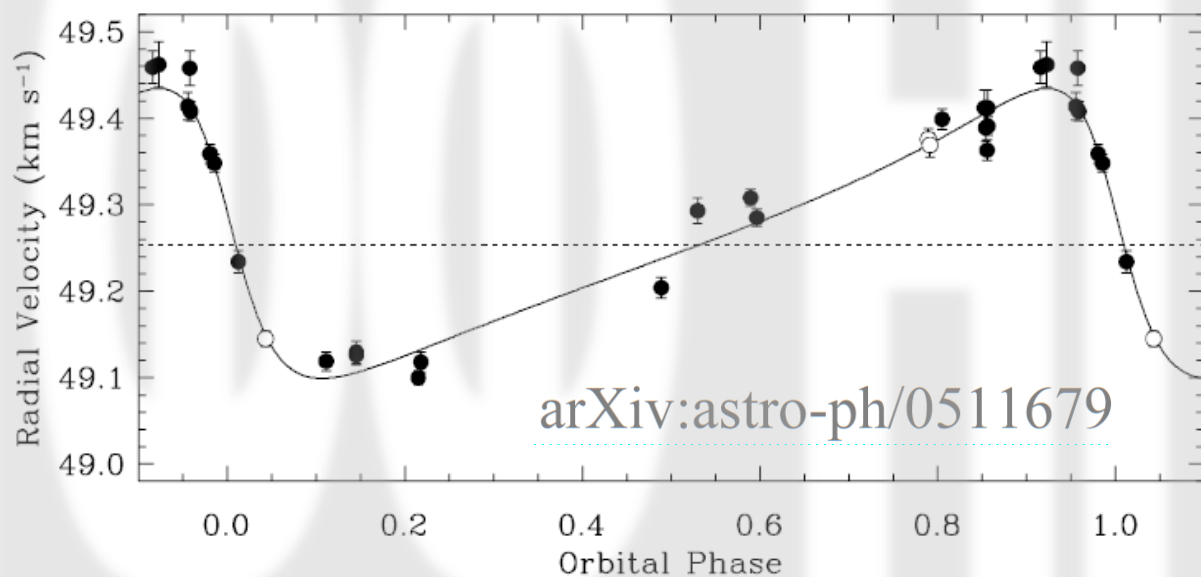
Видимое движение звезды HD 81040, вызванное собственным движением (относительно Солнца) и параллаксом (движением Земли вокруг Солнца).

После вычета собственного движения и параллакса => разброс точек всё еще существенно превышает точность измерений => неучтенный эффект!?

Астрометрия

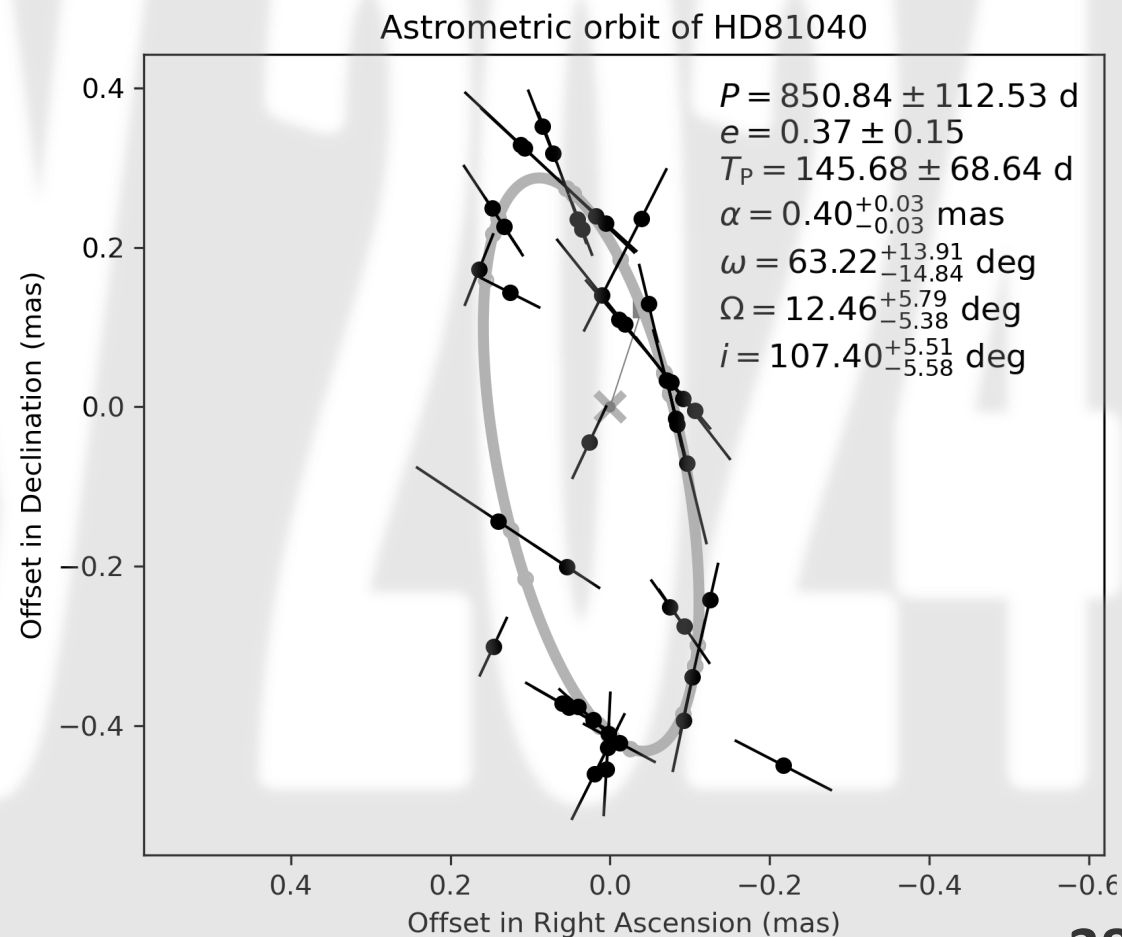
Первые результаты по поиску экзопланет спутником GAIA

У звезды HD 81040 ранее уже был обнаружен спутник планетной массы методом RV с массой $m \sin i \simeq 7 M_{Jup}$.



Parameter	Value
P (days)	1001.7 ± 7.0
T (BJD)	2452504.0 ± 12.0
e	0.526 ± 0.042

Параметры, измеренные по данным GAIA, согласуются с результатами RV!



Гравитационные линзы

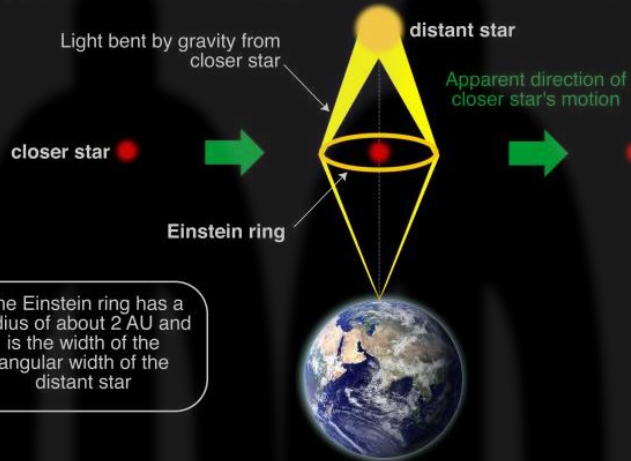
Гравитационное линзирование широко применяется в космологии для наблюдения самых удаленных объектов — первых галактик и квазаров. При этом могут наблюдаться множественные изображения одного и того же далекого объекта.

При микролинзировании изображения объекта не разрешаются, в результате происходит лишь увеличение яркости объекта.



Микролинзирование

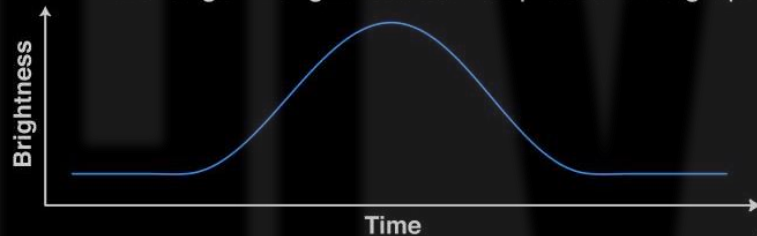
The Earth, a close star, and a brighter, more distant star, happen to come into alignment for a few weeks or months



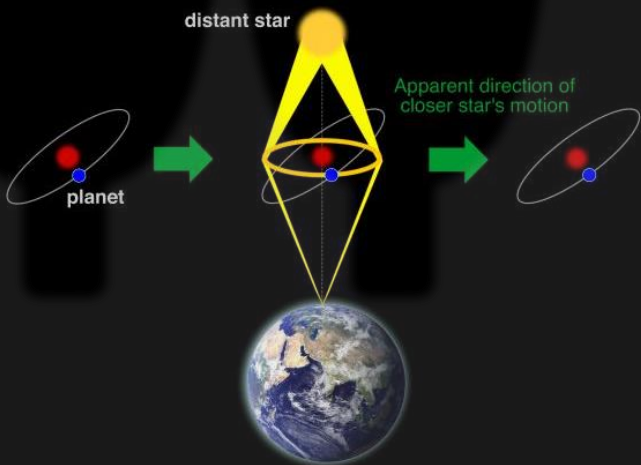
Gravity from the closer star acts as a lens and magnifies the distant star over the course of the transit.



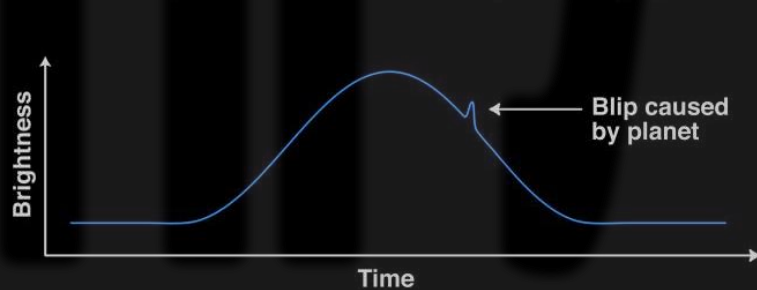
The change in brightness can be plotted on a graph



If there is a planet orbiting the closer star, and it happens to align with the Einstein ring, its mass will enhance the lens effect and increase the magnification for a short time



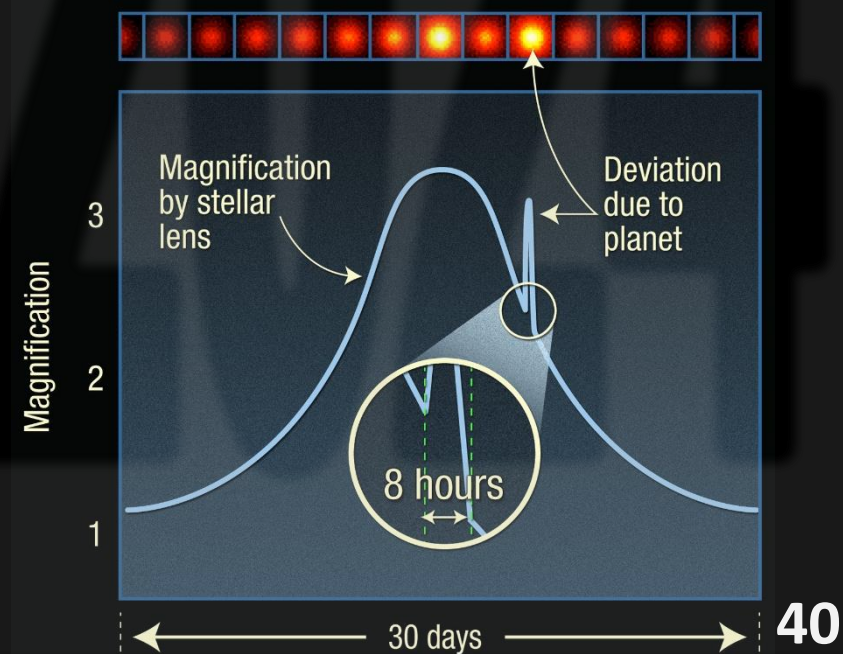
The planet causes a small blip on the graph



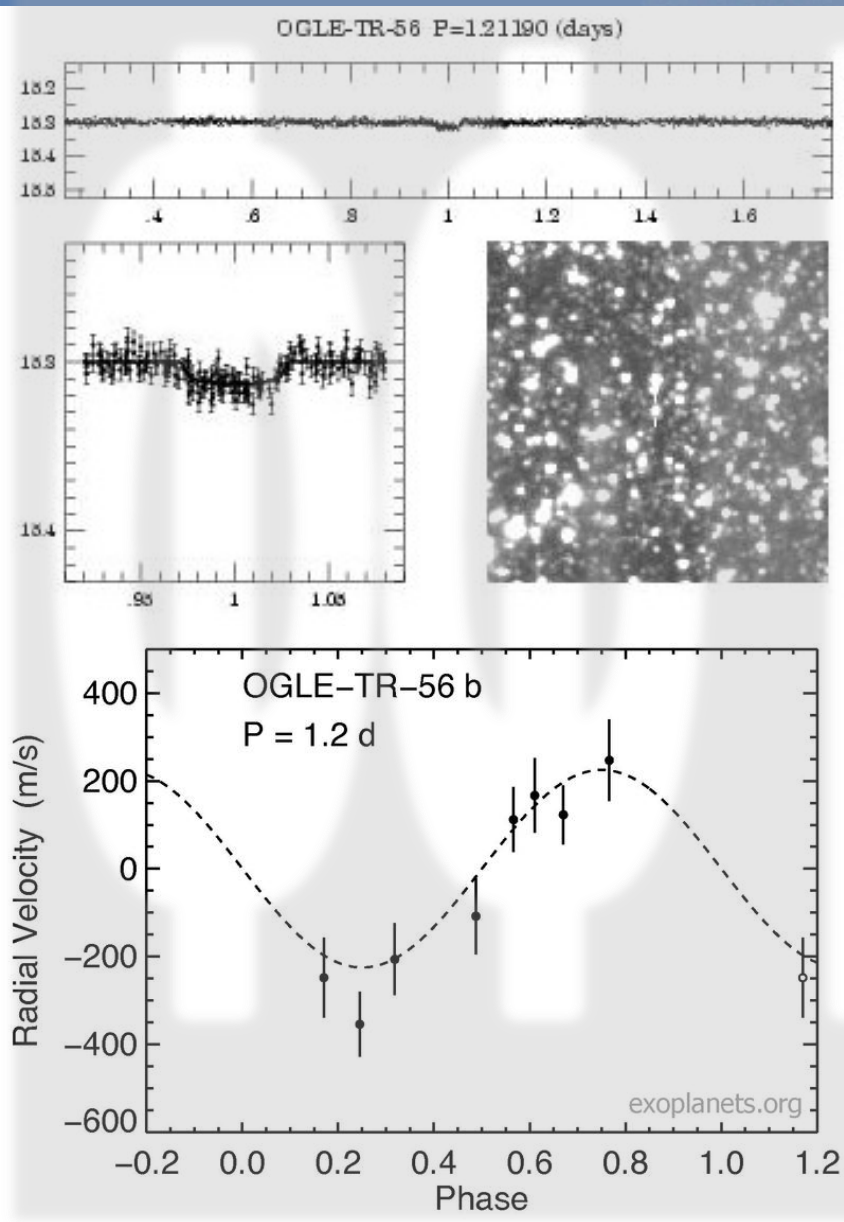
**Увеличение видимой яркости
звезды может составлять
несколько звездных величин!**

Процесс такого транзита может продолжаться несколько недель!

Продолжительность сигнала от планеты – несколько часов.



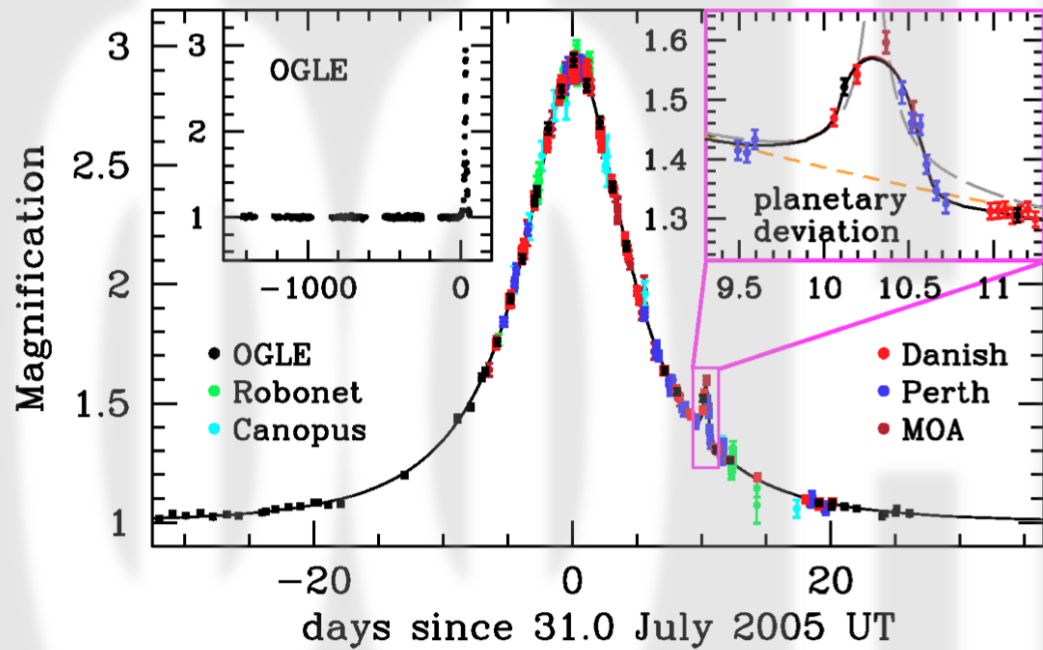
Optical Gravitational Lensing Experiment



OGLE-TR-56b. Первая экзопланета, обнаруженная транзитным методом 5 июля, 2002 года. В 2003 году получено подтверждение методом лучевой скорости.

Optical Gravitational Lensing Experiment

OGLE-2005-BLG-390Lb

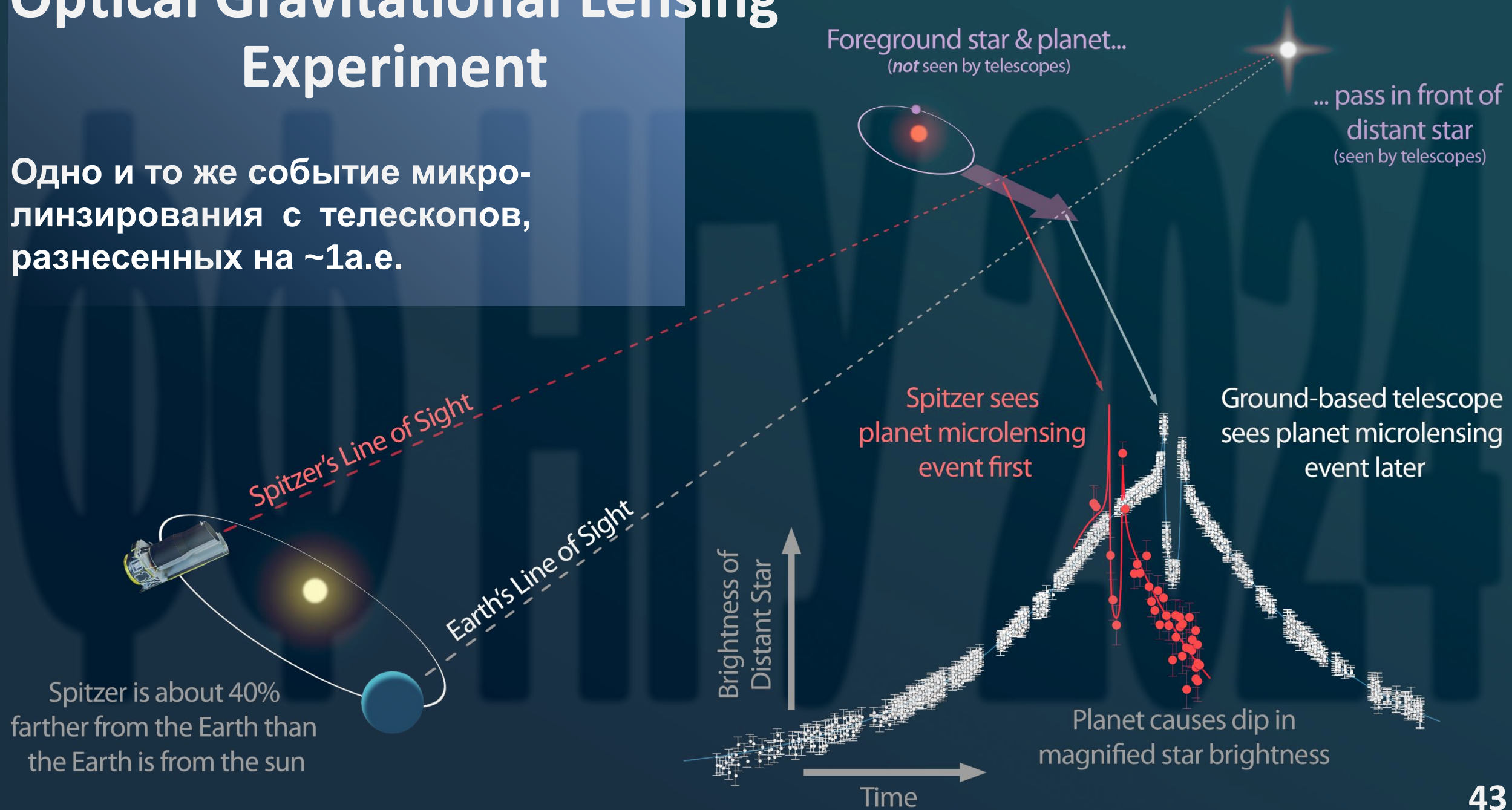


Открытие планеты с
массой 5.5 массы
Земли методом
микролинзирования



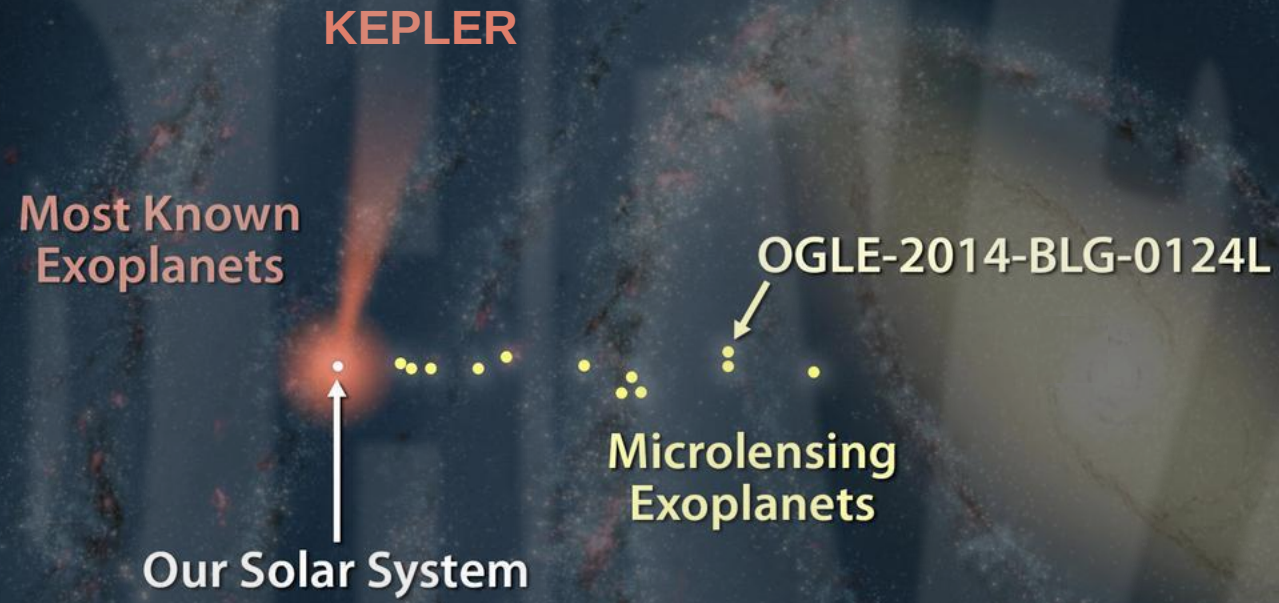
Optical Gravitational Lensing Experiment

Одно и то же событие микролинзирования с телескопов, разнесенных на ~1а.е.



Optical Gravitational Lensing Experiment

Milky Way Galaxy



Будущие миссии: WFIRST (NGRST)

Диаметр 2.4 м

Поиск экзопланет
методом микролинзирования

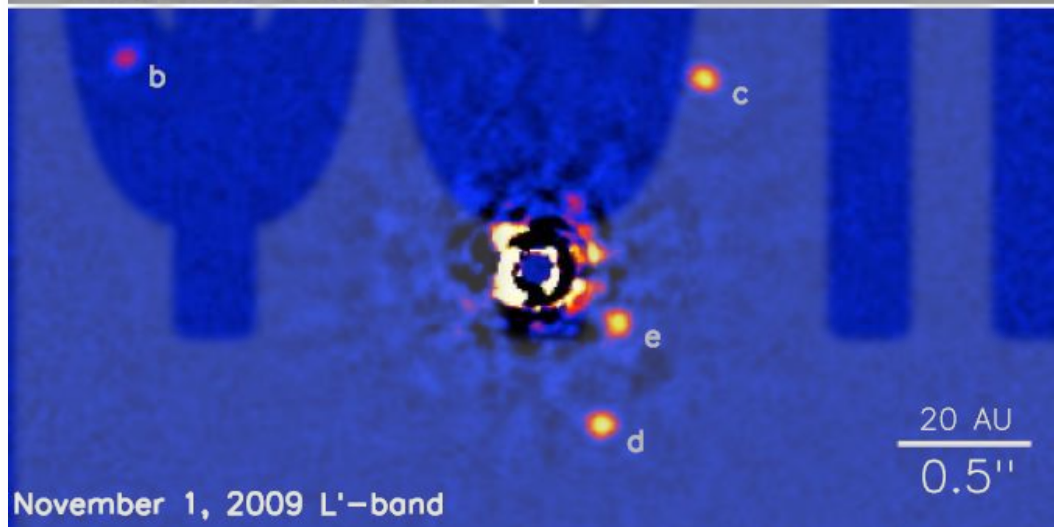
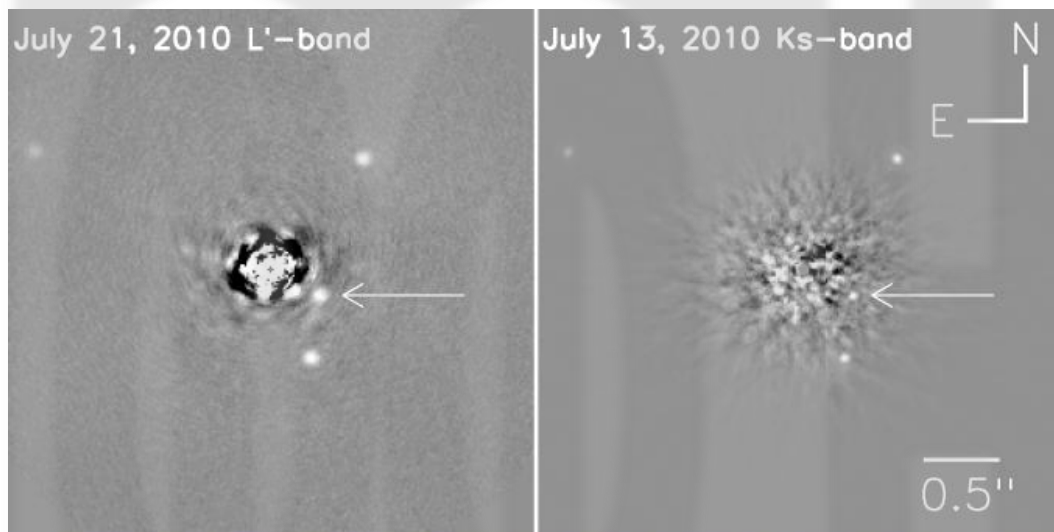
Коронограф для прямого
наблюдения

Обширная
программа по
космологии

Прямое наблюдение: HR 8799

Прямое наблюдение молодой планетной системы HR 8799 телескопом КЕСК II

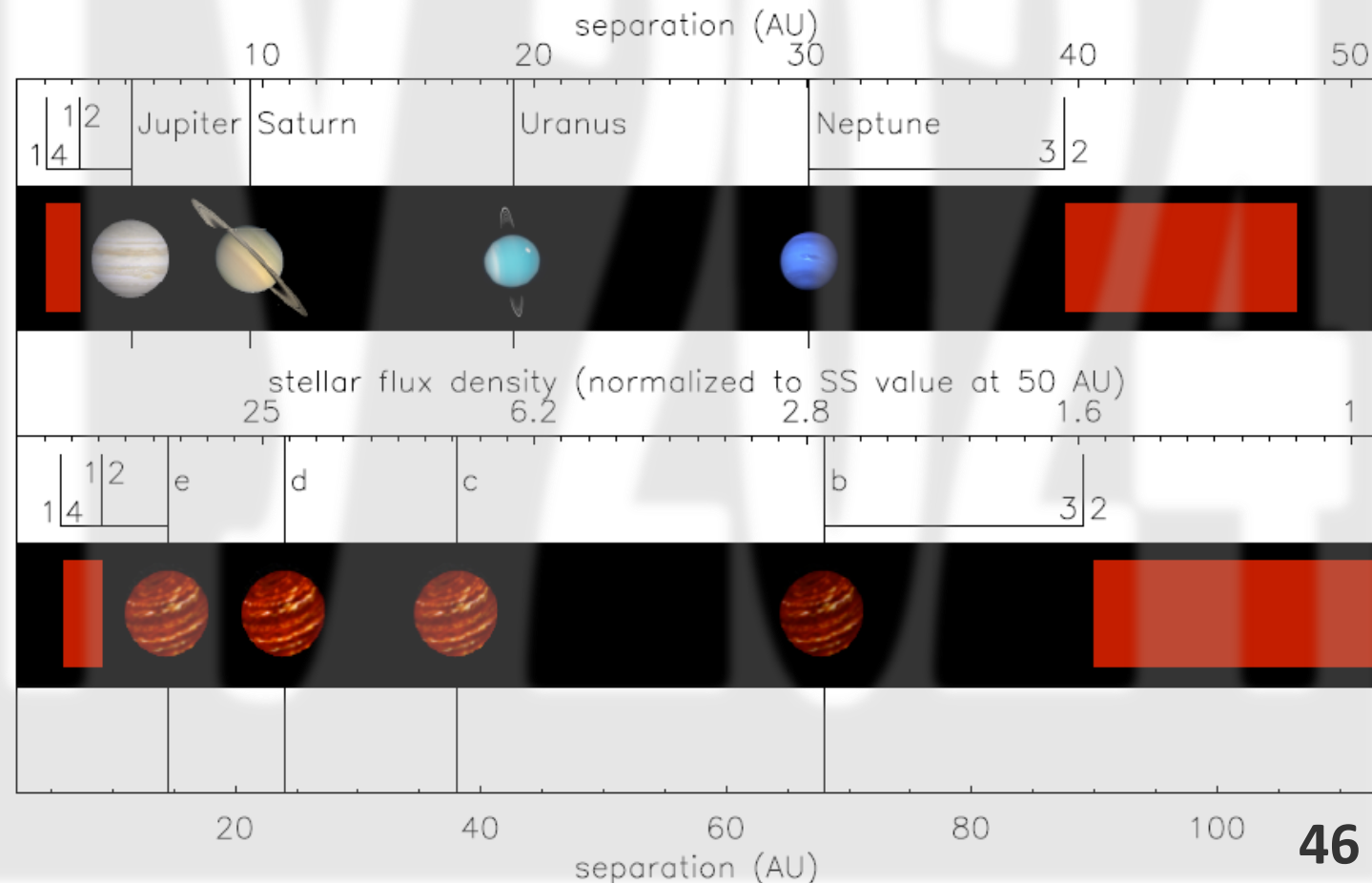
arXiv > astro-ph > arXiv:1011.4918



Расстояние ~41 пк

Возраст звезды ~100 Myr

Возраст планетной системы ~30 Myr



Прямое наблюдение: HR 8799



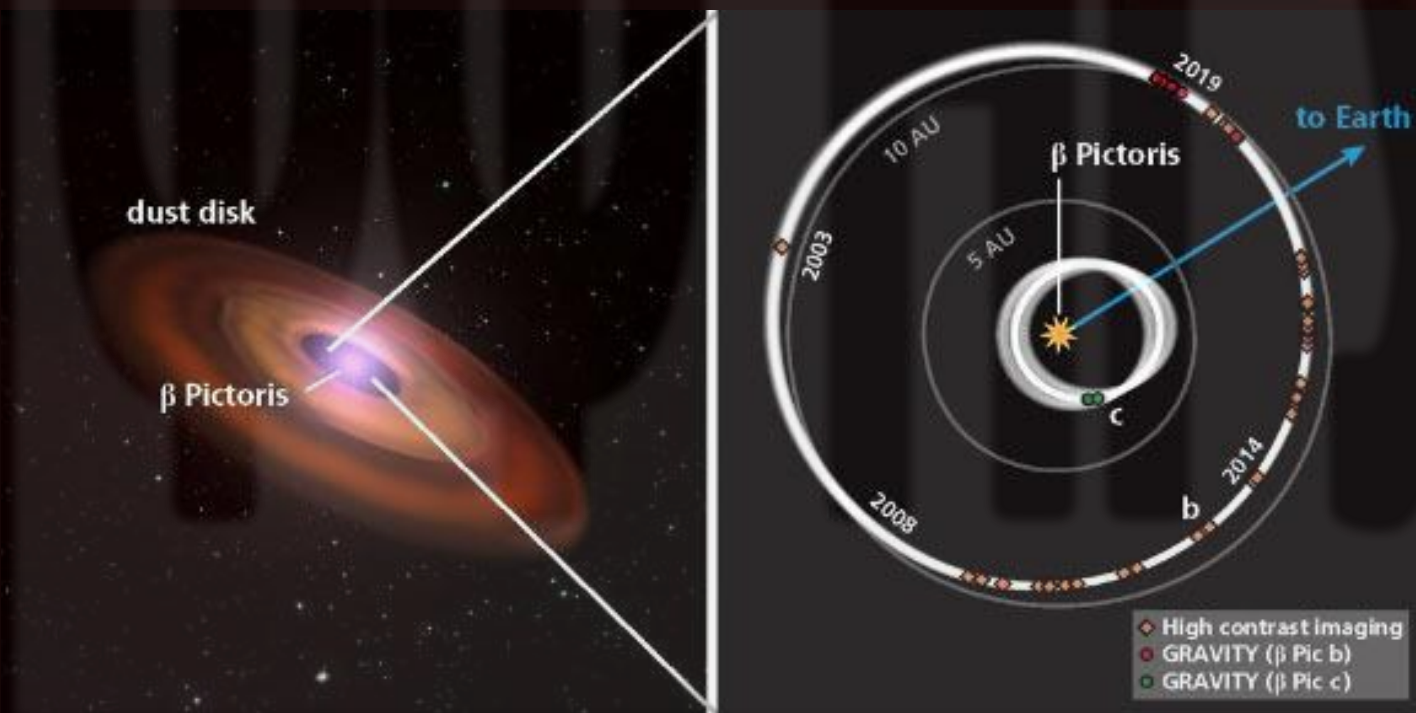
2009-07-31

20 au

Прямое наблюдение

Планеты в системе бета Живописца (β Pic)

Возраст звезды всего около 10 М лет, то есть планеты гиганты могут образовываться очень быстро.

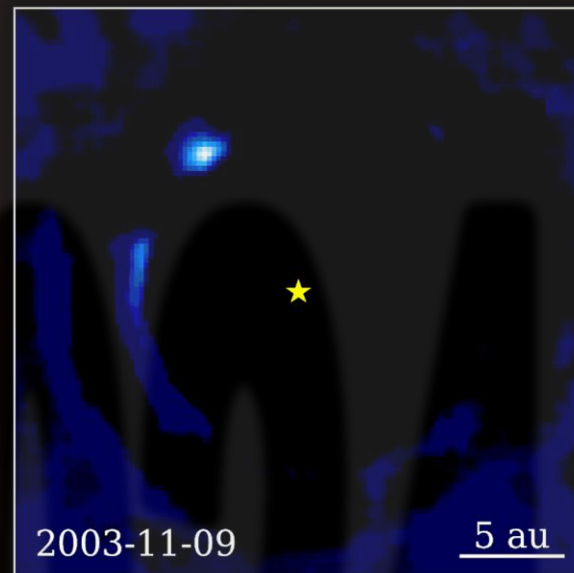


dust disk

β Pictoris

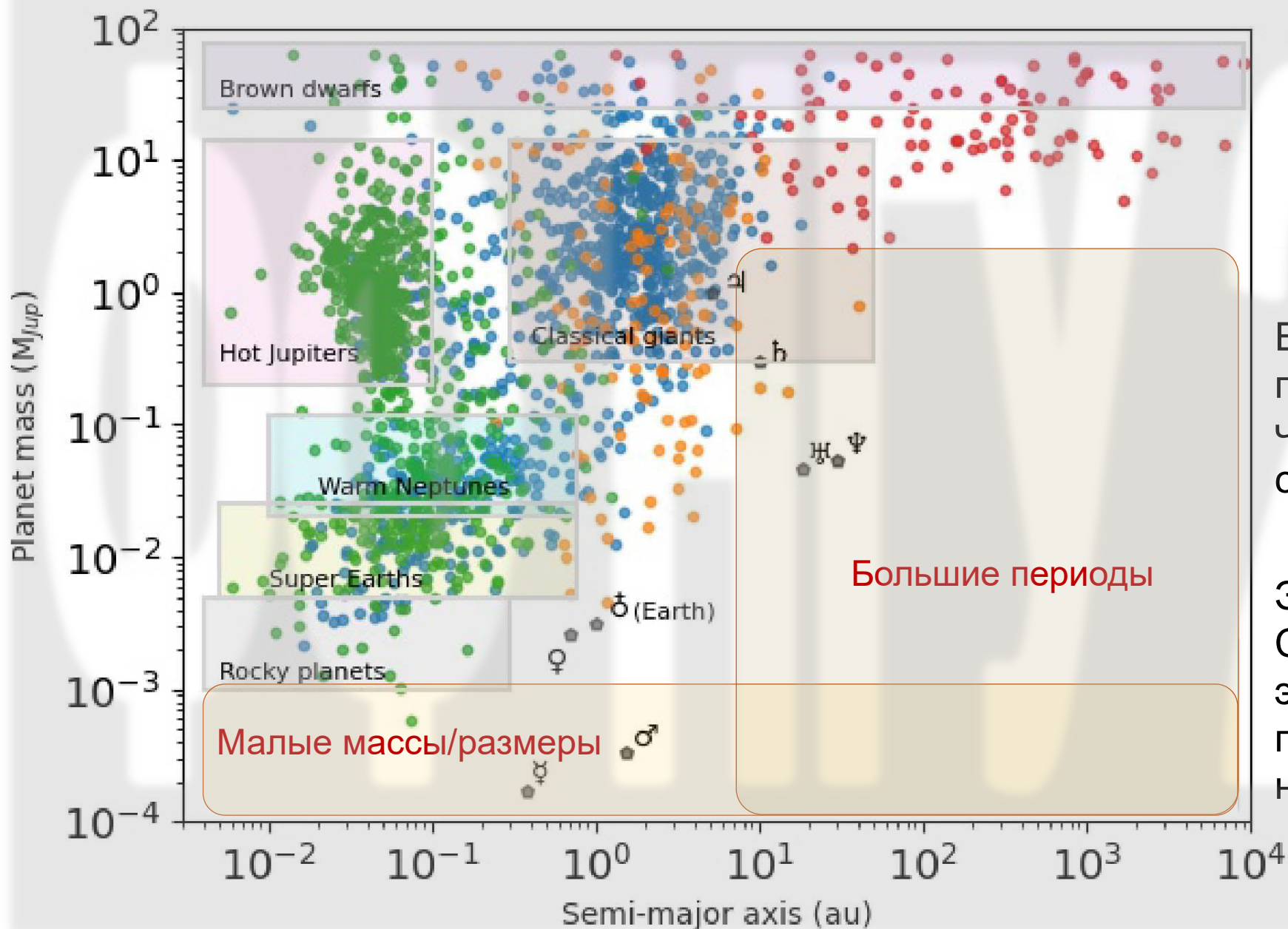
b c

dust disk



1006.3314

Сравнение методов



Большинство открытых экзопланет совсем не похожи на те, что мы имеем в Солнечной системе.

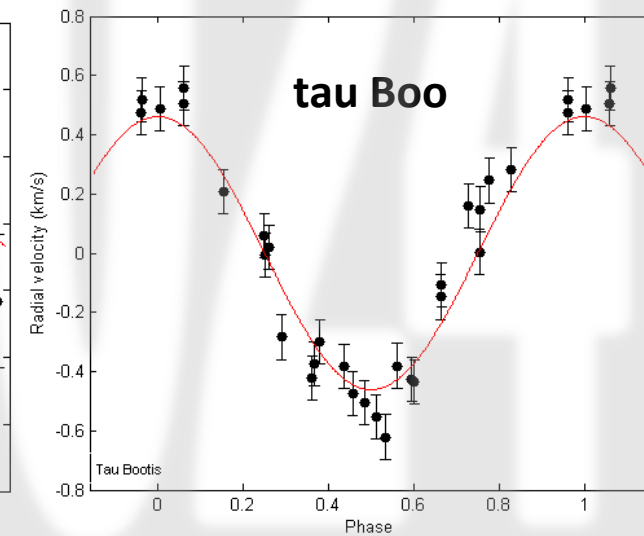
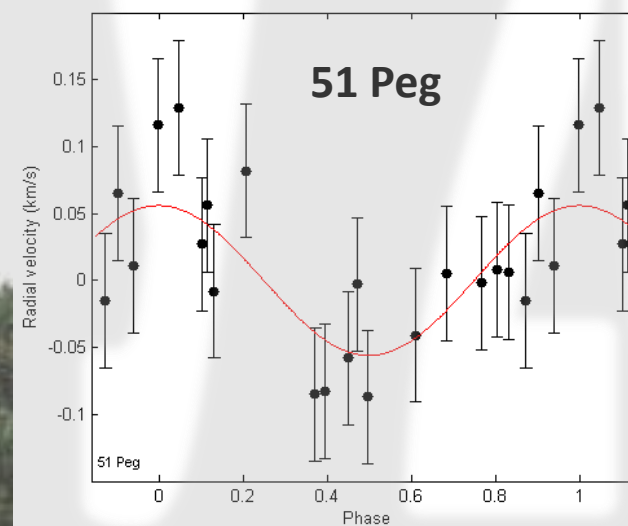
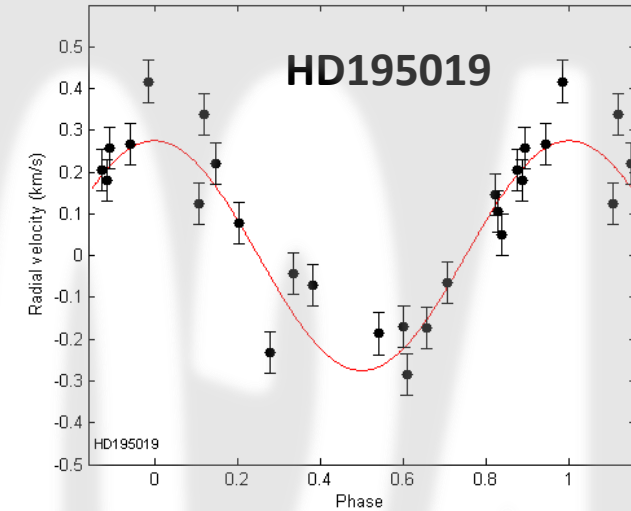
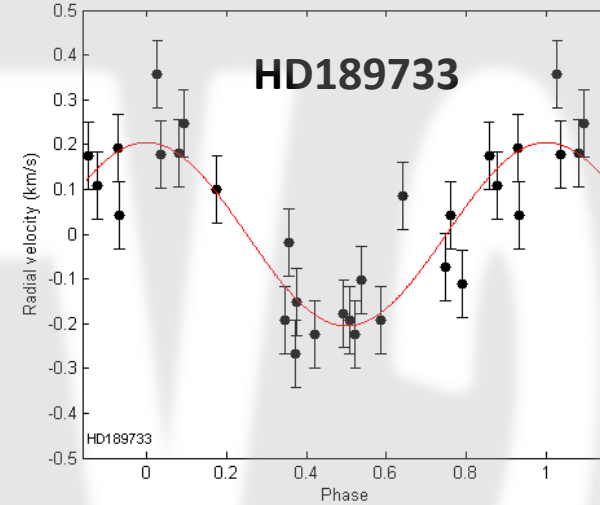
Это не означает уникальность Солнечной системы, скорее это эффект выборки – массивные планеты на коротких периодах наблюдать проще!

Citizen Science: Метод радиальной скорости

Всего 20 лет спустя, колебания радиальной скорости звезд, вызванные планетами, стало возможным измерить уже даже с «любительским» оборудованием!

<http://www.astrosurf.com/buil/index.html>

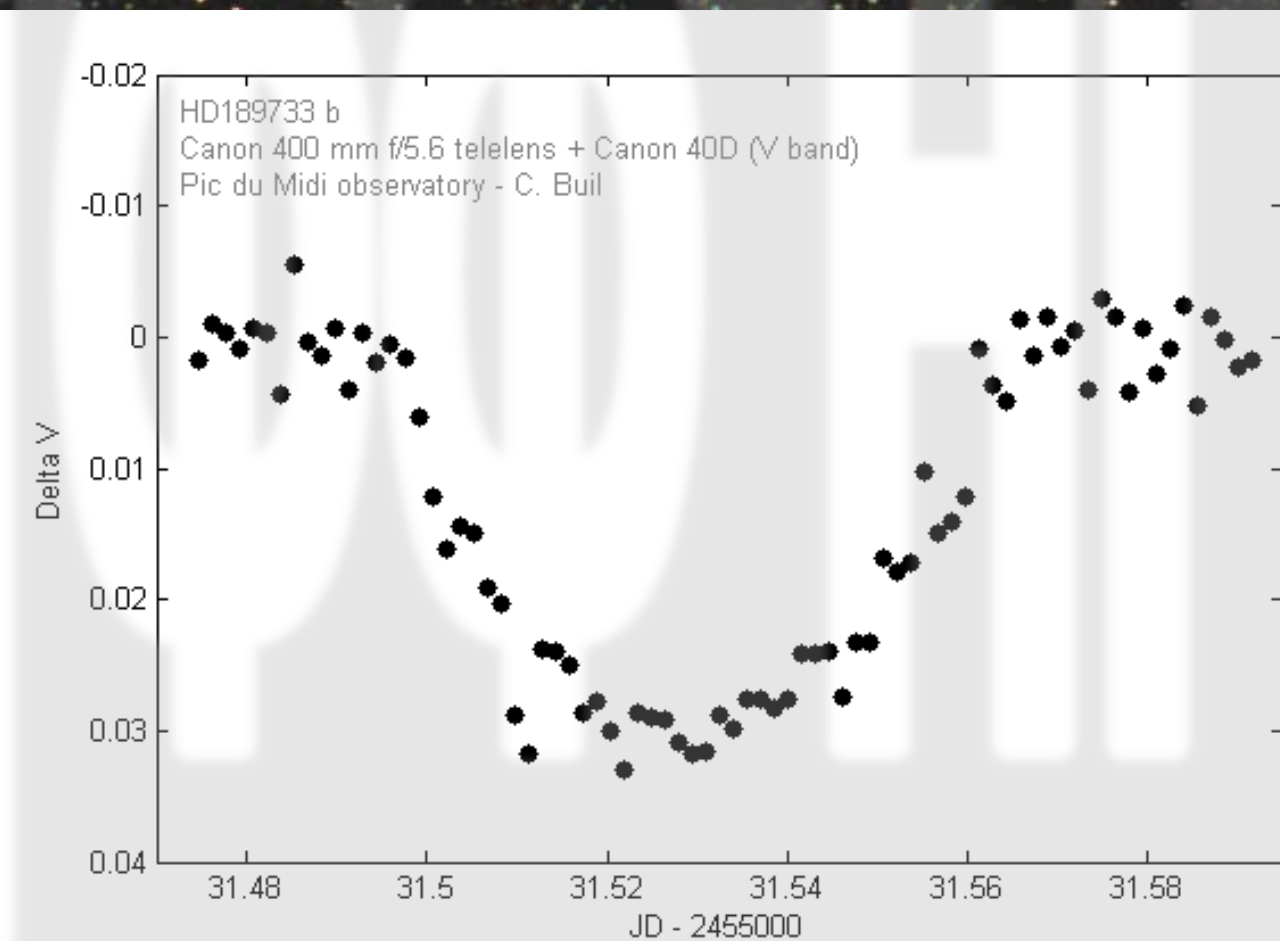
Christian Buil



The 11-inch telescope from Castanet-Tolosan (close to Toulouse city) with eShel spectrograph.

Citizen Science: Транзитный метод

HD189733



400 mm Canon lens + 40D DSLR



Транзитный метод: миссия TESS



К ноябрю 2022 года спутник TESS обнаружил свыше 6000 **кандидатов**. Надежно установлено 273 экзопланеты. Выявлено 1720 ложных сигналов. (Миссия продлена до 2025 года!)

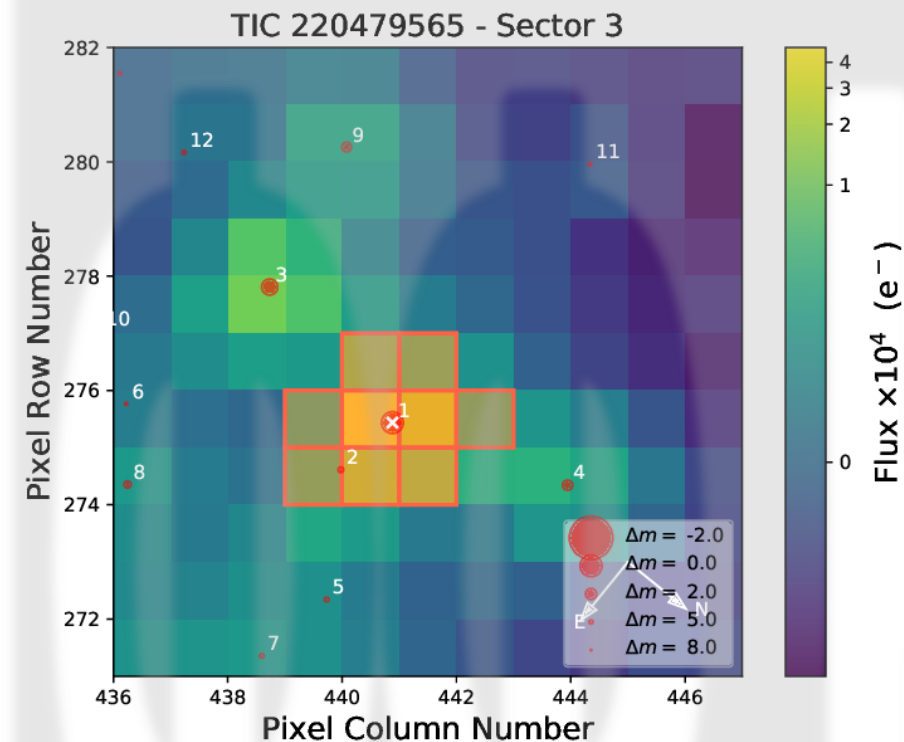
Из-за низкого углового разрешения ($21''/\text{px}$), доля реальных экзопланет среди кандидатов составляет лишь $\sim 15\%$.

Требуется **огромный объем дополнительных наблюдений** для подтверждения и классификации обнаруженных кандидатов...



TESS/K2 Follow Up Program

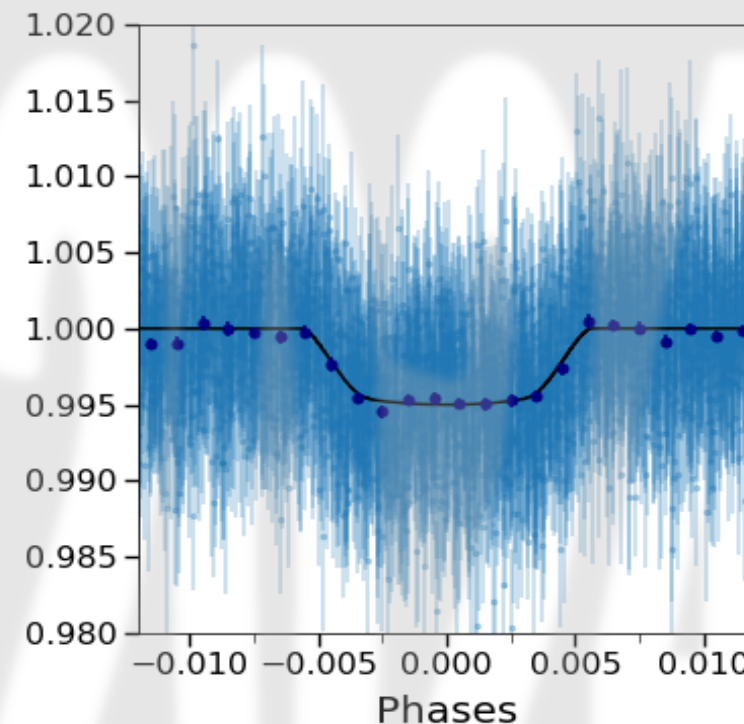
Транзитный метод: миссия TESS



Кадр TESS



Наземный телескоп



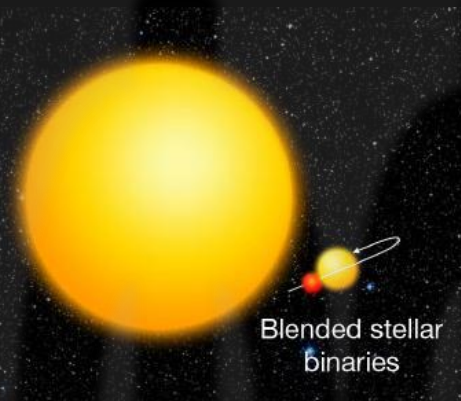
Измерение TESS

Из-за низкого углового разрешения камер TESS ($21''/\text{px}$), идентификация источника и определение его типа может быть неоднозначной.

Сигналы TESS рассматриваются только как возможные кандидаты, и для окончательного подтверждения необходимы дополнительные измерения.

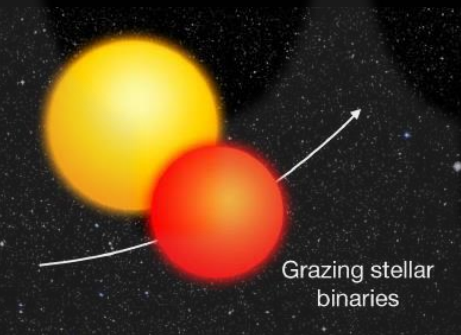
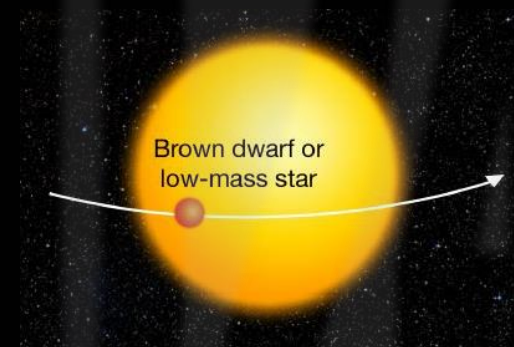
TESS/K2 Follow Up Program (TFOP)

Возможные причины ложно-положительных сигналов



1) Сигнал создан системой затменно-переменной двойной звезды, глубина которого сильно уменьшена близкой (по углу) фоновой звездой.

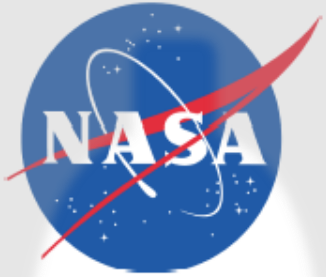
2) Вторая звезда в двойной системе – бурый карлик.



3) Сигнал создан системой затменно-переменной двойной звезды, глубина которого мала из-за касательного затмения.

4) И так далее...

TESS/K2 Follow Up Program (TFOP)



The *Kepler* Certified False Positive Table

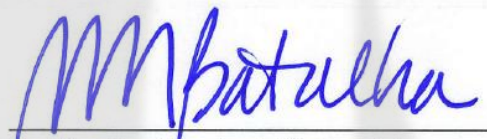
KSCI-19093-003

The *Kepler* False Positive Working Group
June 13, 2017

NASA Ames Research Center
Moffett Field, CA 94035

Prepared by:  Date: June 13, 2017
Stephen T. Bryson, Kepler Science Office

Approved by:  Date: June 13, 2017
Michael R. Haas, Kepler Science Office Director

Approved by:  Date: June 13, 2017
Natalie Batalha, Kepler Project Scientist

TESS/K2 Follow Up Program (TFOP)

Наиболее частая причина –
затменно-переменные звезды.

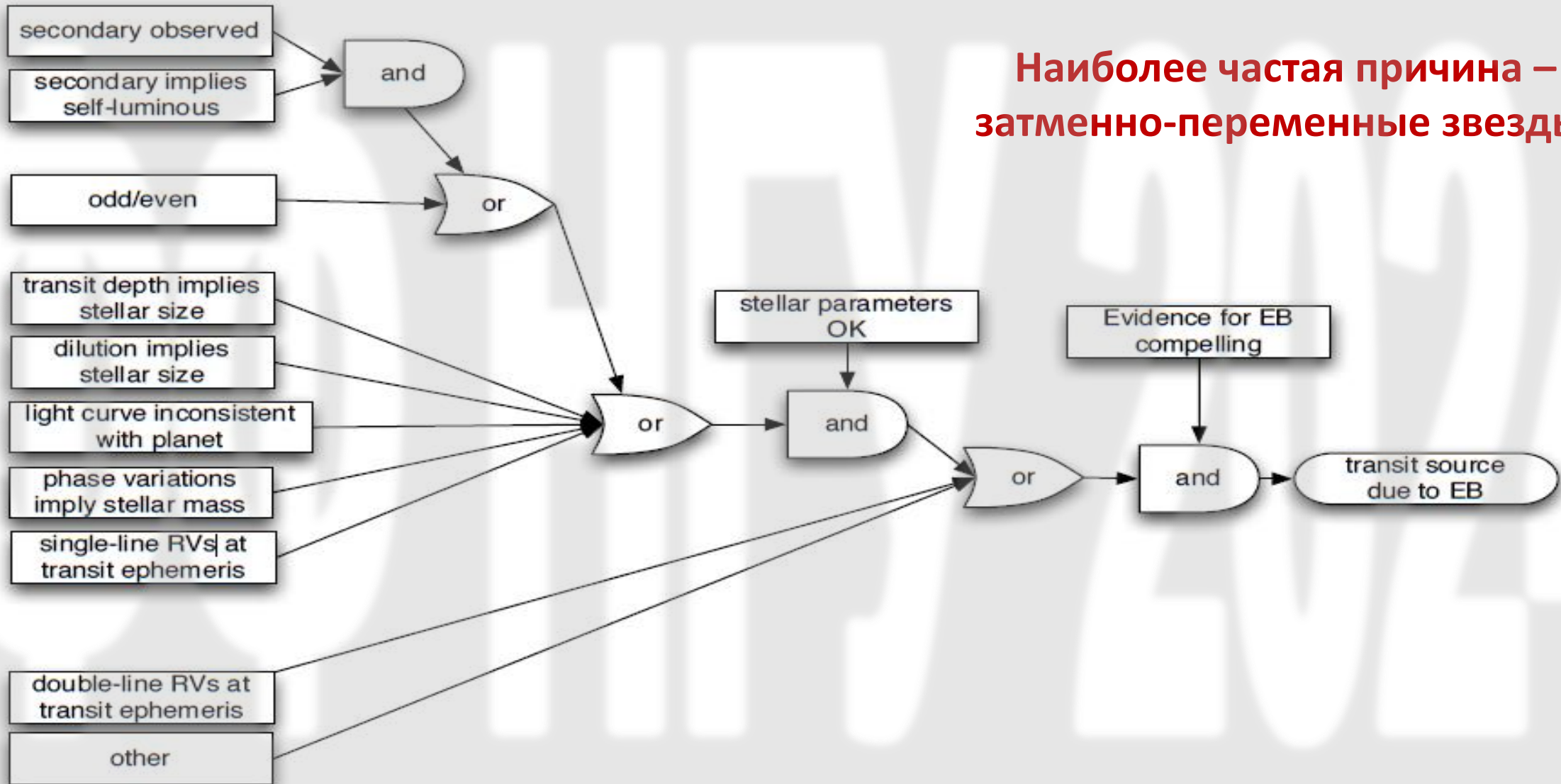


Figure 1: The logical analysis leading to the certification of an EB false positive

TESS/K2 Follow Up Program (TFOP)

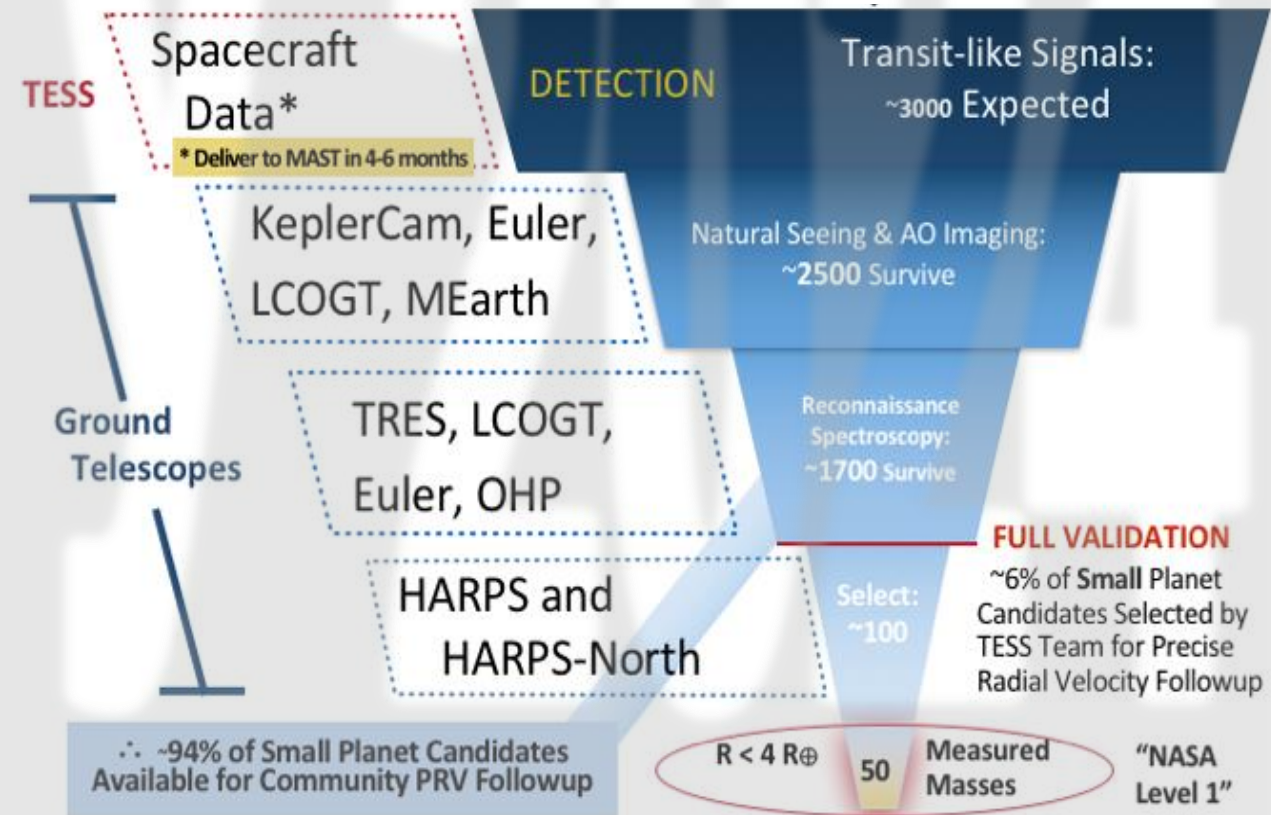
Миссия TESS обнаружит ~10000 кандидатов в экзопланеты. Требуется **огромный объем дополнительных наблюдений** для подтверждения и классификации обнаруженных кандидатов... У профессиональных астрономов не хватает мощностей для оперативного проведения такого объема наблюдений.

В 2020 году стартовала программа TFOP, рассчитанная, в том числе, и на участие непрофессиональных наблюдателей (в основном учебных заведений).

Верификация состоит из нескольких этапов (фильтров). На каждом этапе происходит отбраковка ложных сигналов. Сложность анализа на каждом этапе повышается.

Программа координируется MIT:

<https://tess.mit.edu/followup/>



TESS/K2 Follow Up Program (TFOP)

На базе обсерватории Лицея 130 мы вступили в программу TFOP в 2022 году.

PC spoc-s58-b0A Sectors:[18, 58]: [P=2.6405742]
found in faint-star QLP search; KeplerCam observed
a full (e-390/i+350; +/-~1.5 σ) on **2021-09-18** in ip and
ruled out a 10 ppt event in the T1/T2 pair.

Транзит не
зарегистрирован

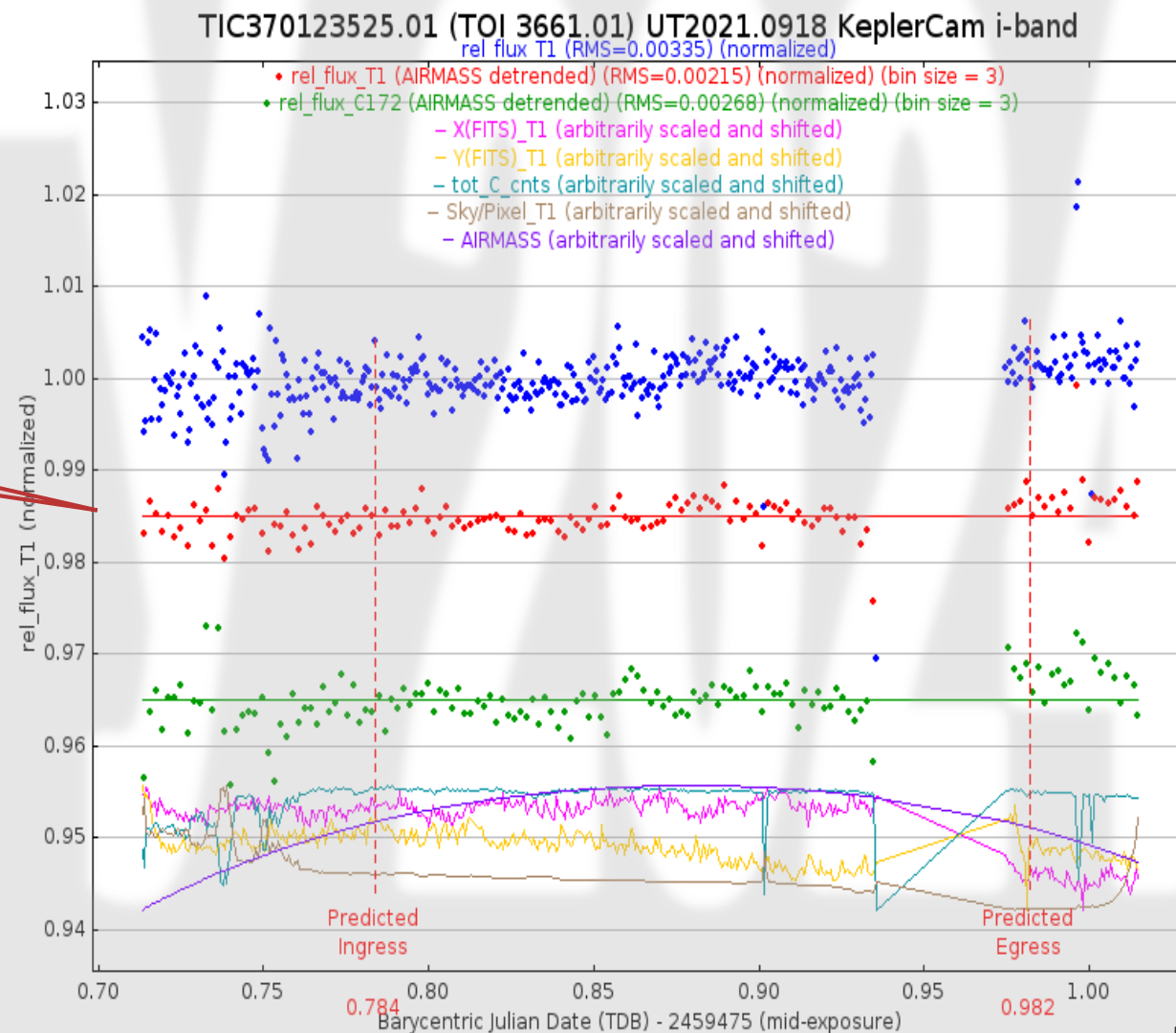


Пересмотр возможного периода
обращения экзопланеты

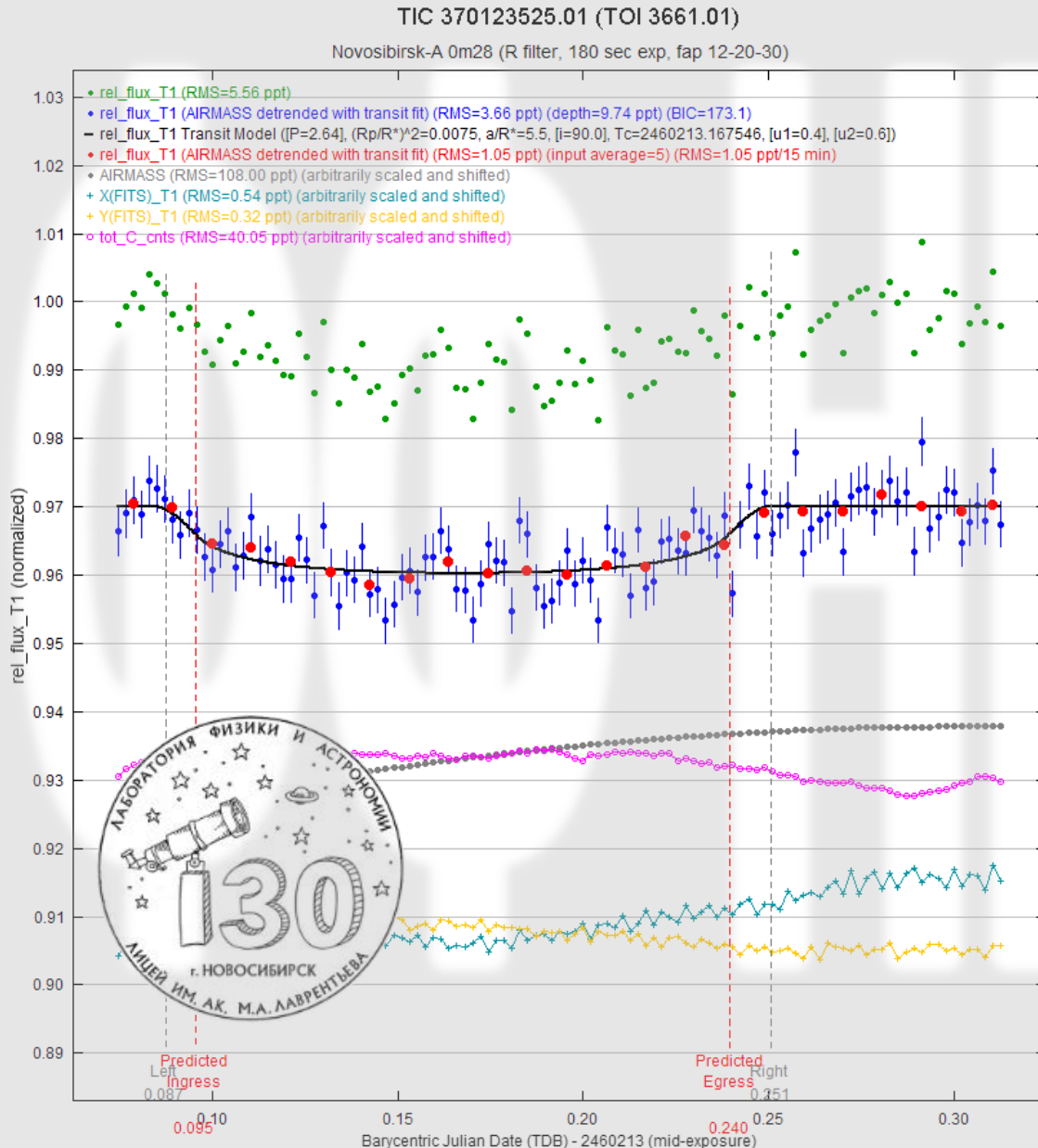
Update from AIJ-s58. [P=2.64169]



Запрос на повторное наблюдение

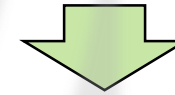


TESS/K2 Follow Up Program (TFOP)



NovosibirskA-0m28 observed a full on **2023-09-25** in R and detected an ~on-time 10 ppt, 32 min (0.9sigma) longer, event using an uncontaminated 3.3" target aperture and did not see an obvious NEB over the window.

С новыми эфемеридами
транзит зарегистрирован!



Planet Candidate => Verified Planet Candidate

Переход к следующему этапу верификации:
проверка хроматичности

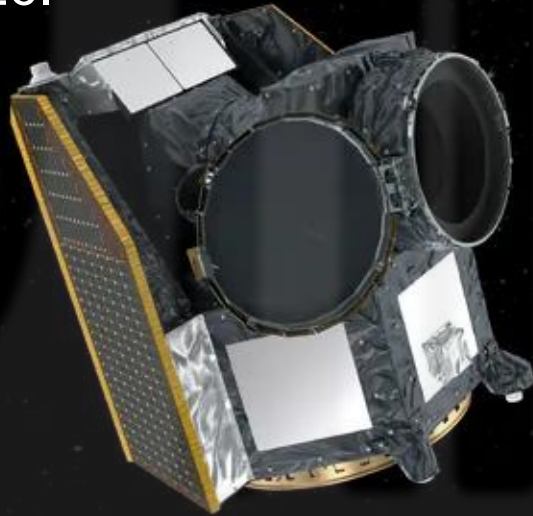
No more observations needed, except for a high precision (<1.0 ppt/10 min) full transit in a blue (U, u', B, g') and/or red (i', I, z, Y) filter to check chromaticity. High-precision (<1.0 ppt/10 min) multi-band observations even better.

Текущие миссии: CHEOPS



Characterising
ExOplanets
Satellite

Запуск: 18 декабря 2019, Союз-СТ-А, Куру.
Начало наблюдений – январь 2020.
Миссия продлена до 2026.

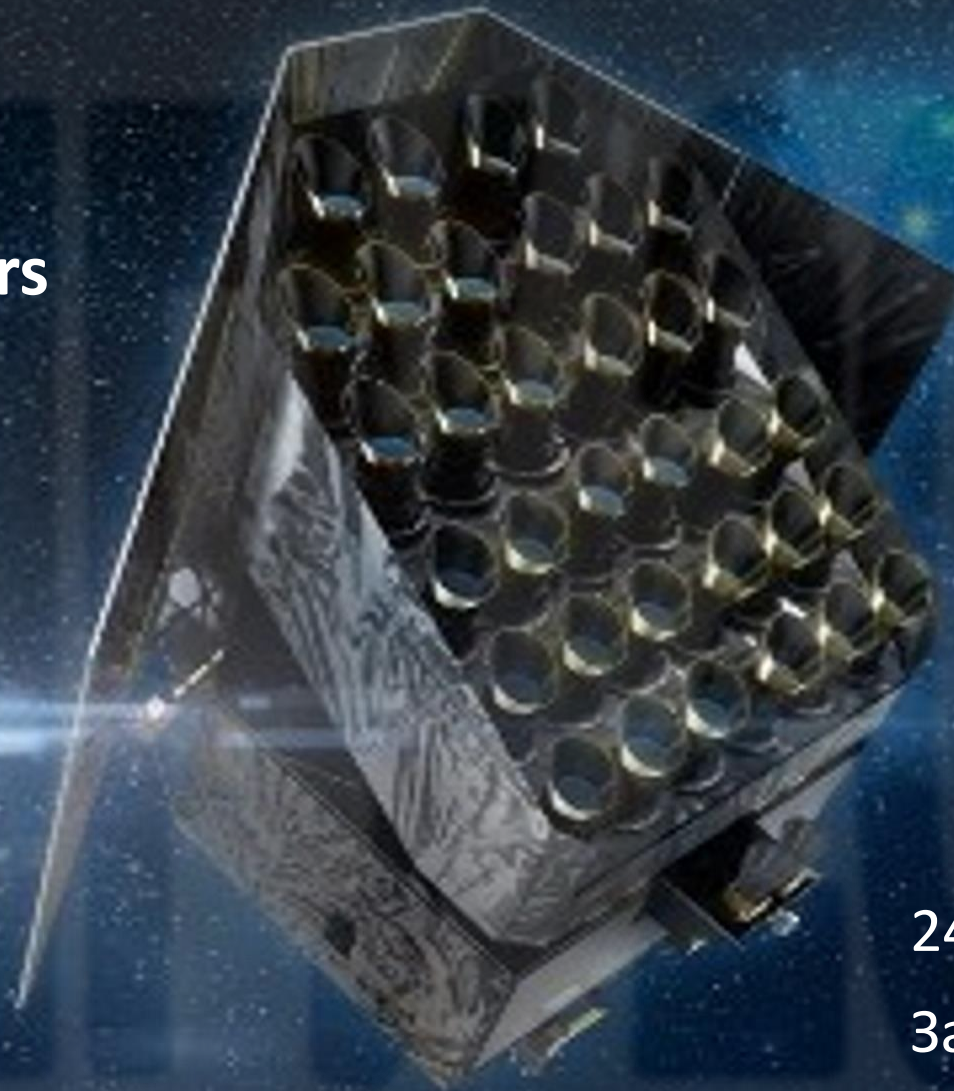


Небольшой спутник ($m=58$ кг, $D=30$ см) для определения радиусов экзопланет у близких звезд, для которых с помощью наземных телескопов уже есть оценка массы.

Будущие миссии: PLATO



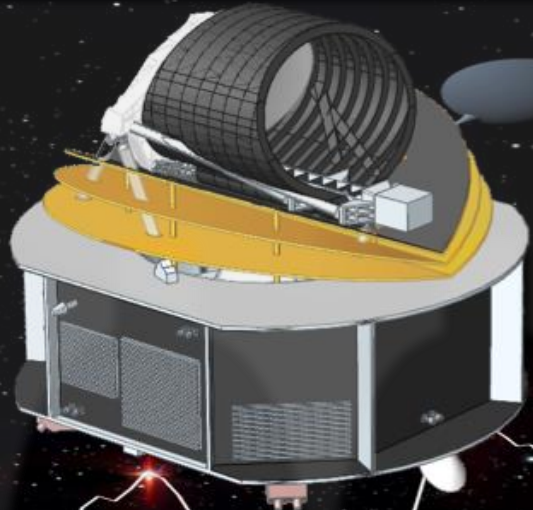
PLAnetary
Transits and
Oscillations of stars



24+2 камеры $D=12$ см.

Запуск: 2026 год.

Будет проведен поиск планет типа Земли у миллиона ярких звезд.



ARIEL



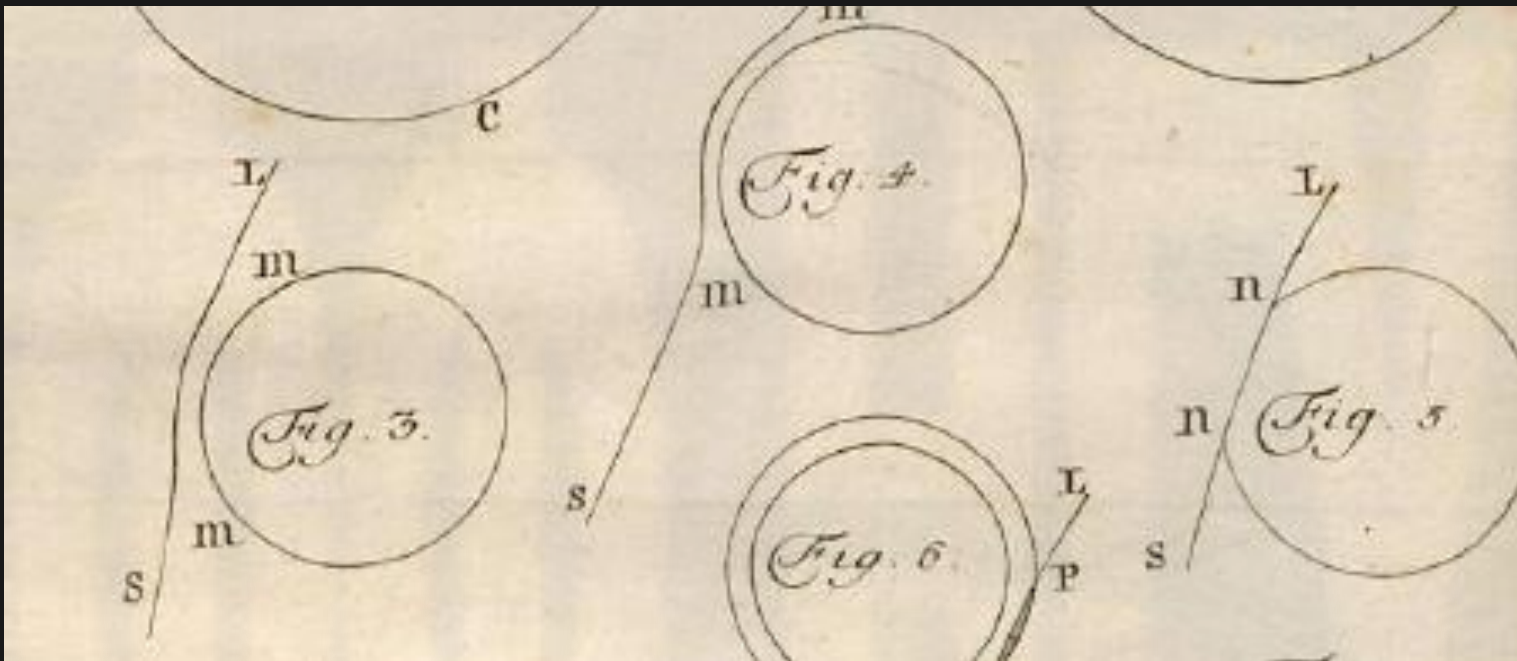
Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey

Диаметр телескопа $D = 1$ м.

Основная цель — изучение атмосфер горячих планет типа супер-Земля и горячих гигантов.

Предполагается, что ARIEL измерит химический состав атмосфер около 1000 экзопланет в процессе транзита планеты, измеряя зависимость глубины затмения от спектрального диапазона с точностью 10–100 ppm (parts per million), то есть от 0.010 – 0.001% !

Атмосферы экзопланет



«При выступлении Венеры из Солнца, когда передний ее край стал приближаться к солнечному краю и был (как просто глазом видеть можно) около десятой доли Венерина диаметра, тогда появился на краю Солнца пупырь, который тем явственнее учинился, чем ближе Венера к выступлению приходила (смотри фиг. 3 и 4). Вскоре оный пупырь потерялся, и Венера оказалась вдруг без края (смотри фигуру 5).»

М.В. Ломоносов, 1761 г.

Lorenzo Comolli, 20 cm SCT

Атмосферы экзопланет

Измеряя глубину транзита в разных спектральных диапазонах, можно определить наличие атмосферы и получить информацию о её возможном химическом составе.

Кроме того, аналогичный анализ можно провести для света, отраженного верхними слоями атмосферы экзопланеты вблизи вторичного транзита – перед заходом планеты за диск звезды.

Большинство распространенных молекулярных соединений (CH_4 , H_2O , CO , CO_2 , и т.д.) имеют характерные широкие полосы поглощения в ИК диапазоне.

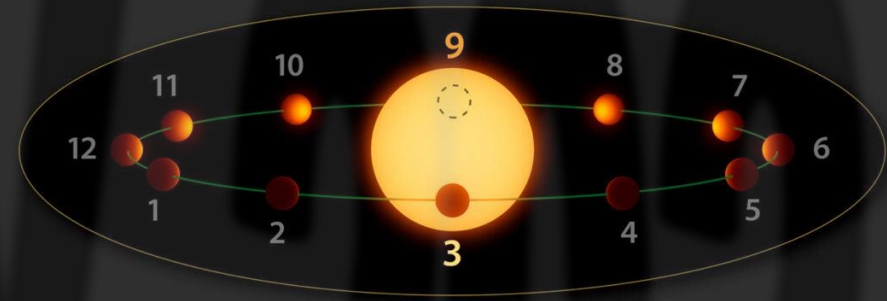


Орбитальные (большие) телескопы.

Первые попытки анализа состава атмосфер экзопланет типа горячих юпитеров были выполнены с помощью телескопов HST и Spitzer.

Detecting Light from Exoplanet LHS 3844b

Diagram of planet orbiting its star

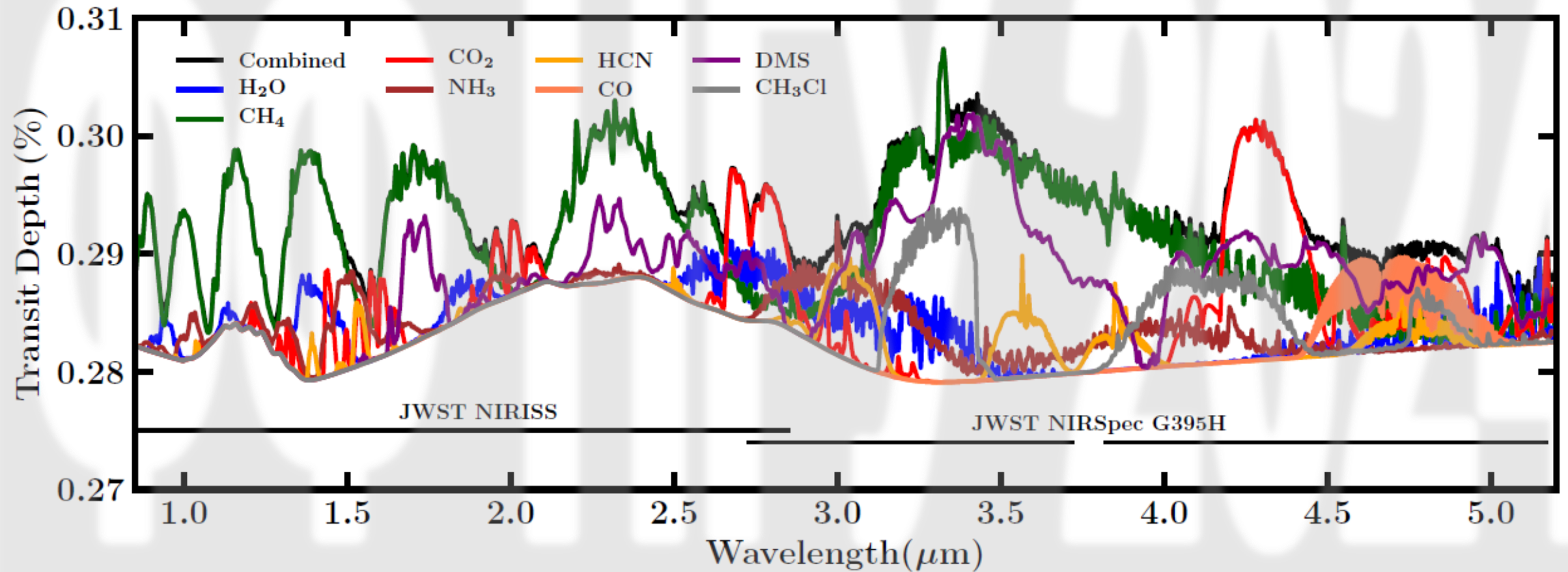


NASA's Spitzer Space Telescope measures *combined* infrared light of **star + planet**

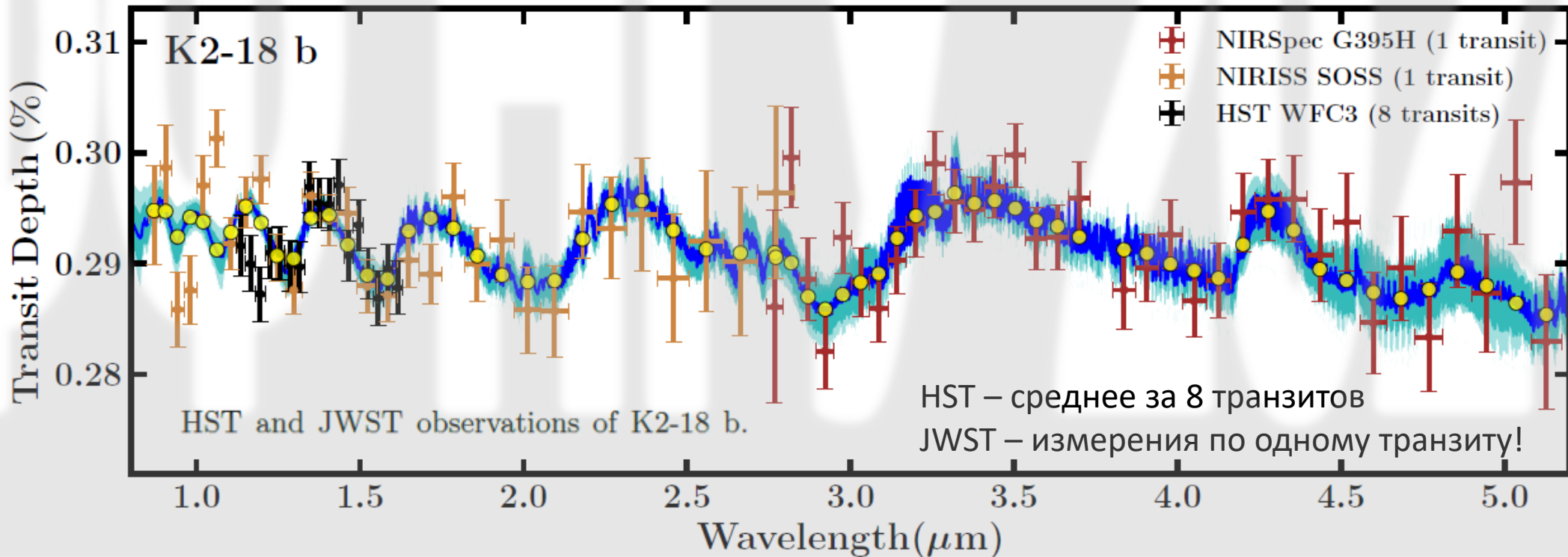
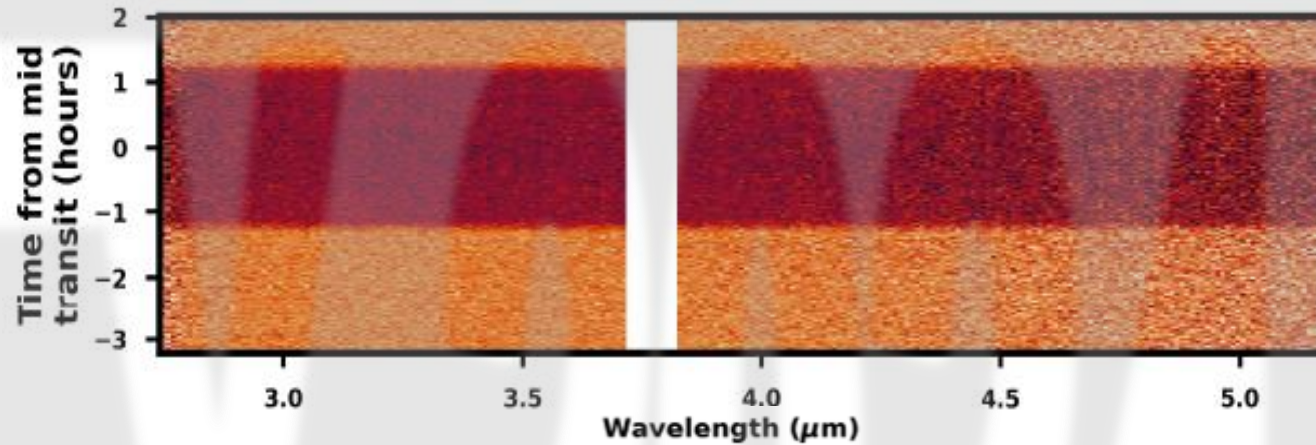
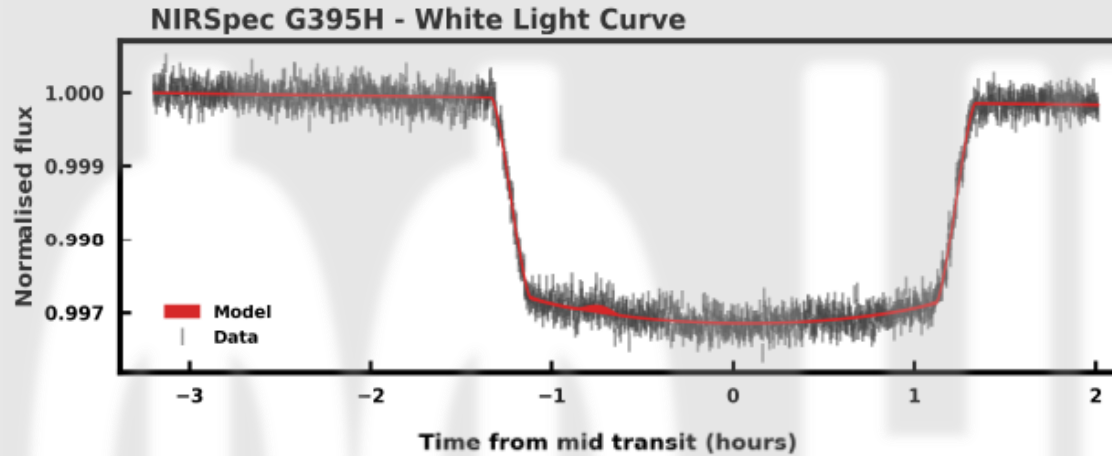


Атмосферы экзопланет

Области поглощения в ИК диапазоне для некоторых распространенных молекулярных соединений.



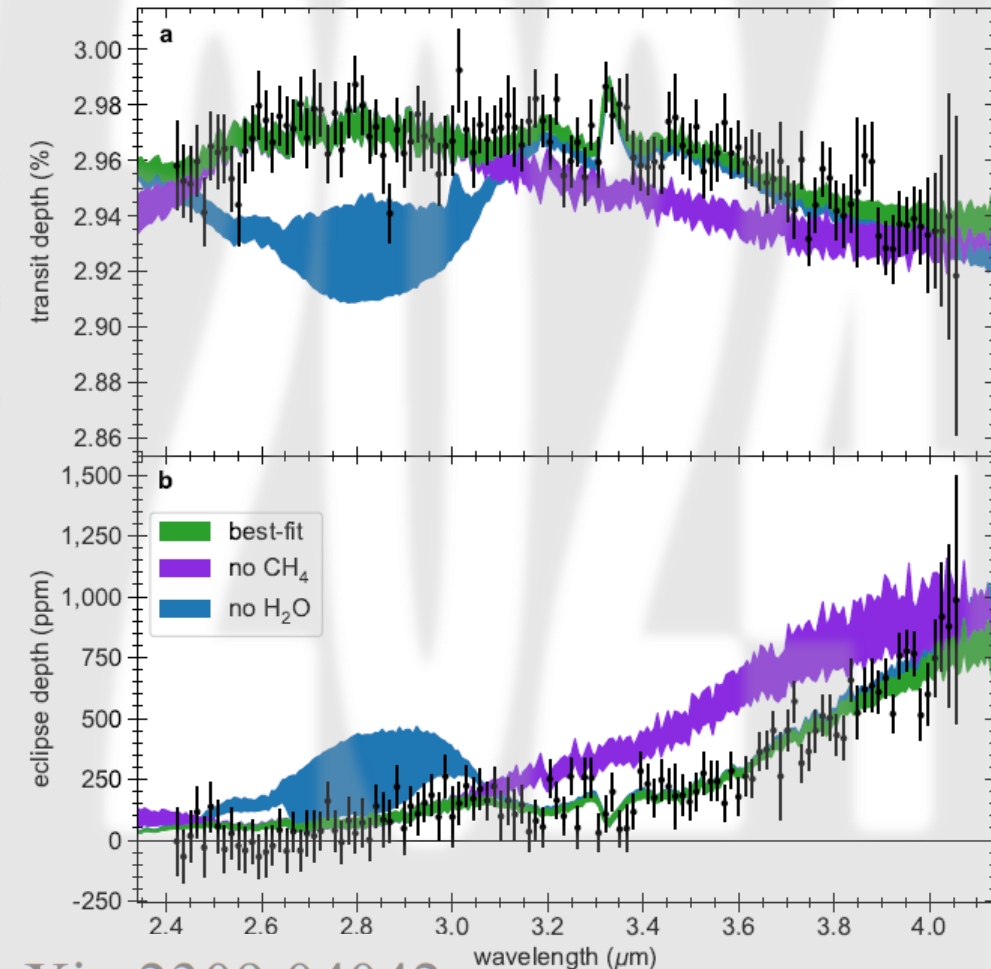
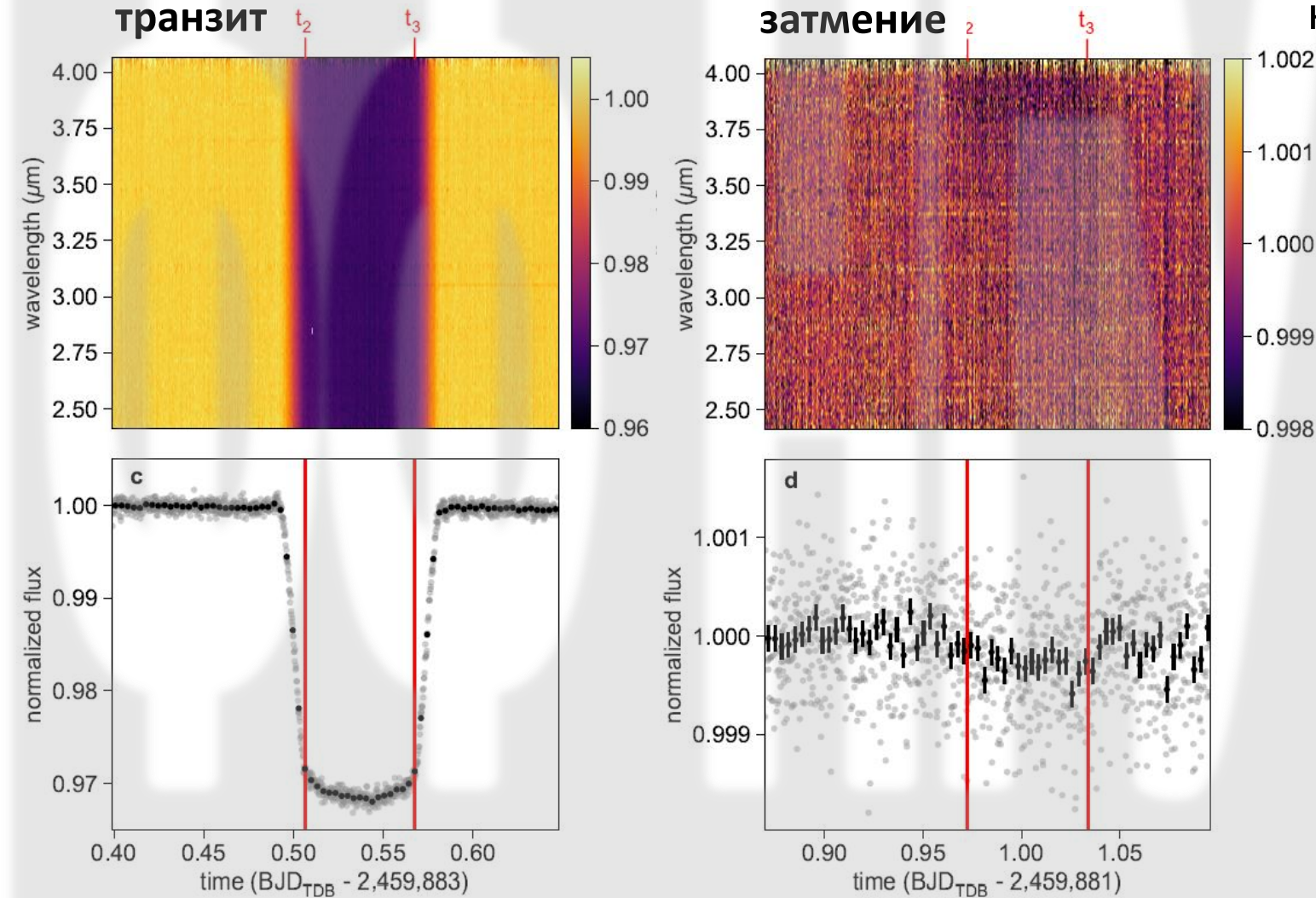
Атмосферы экзопланет: JWST



Атмосферы экзопланет: JWST

Наблюдение JWST планеты WASP-80b

Сравнение разных моделей атмосферы с результатами измерений. Надежно наблюдается присутствие H_2O и CH_4 .



arXiv:2309.04042

Программа ExoClock



Для подготовки списка наиболее перспективных кандидатов для детального изучения миссией Ariel, в 2020 году стартовала программа ExoClock.

Основная цель программы – регулярное наблюдение транзитов экзопланет из предварительного списка для уточнения и актуализации их эфемерид (период, продолжительность).

Наблюдательное время больших телескопов (особенно орбитальных) стоит очень дорого. Для более эффективного использования, необходимо с высокой точностью (лучше 5 минут) знать ожидаемые моменты начала и конца транзита.

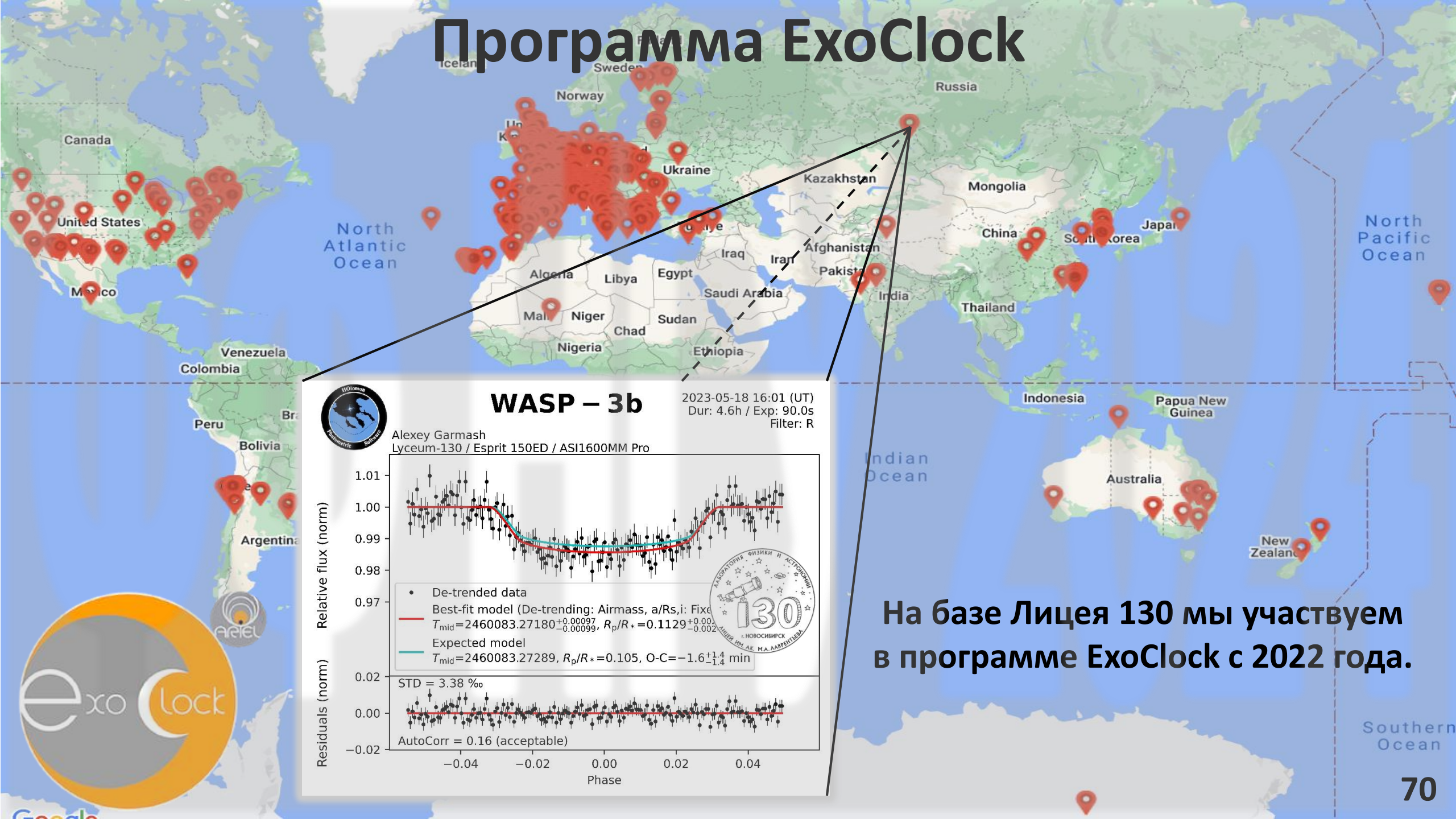
Для участия в программе приглашаются обсерватории учебных заведений.

Программа ExoClock



Около 300 учебных заведений по всему миру.

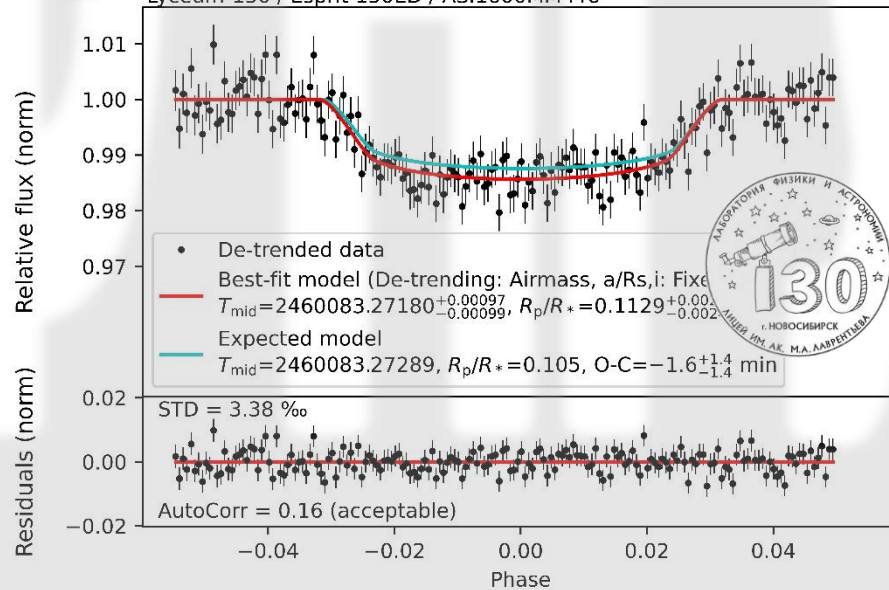
Программа ExoClock



WASP – 3b

2023-05-18 16:01 (UT)
Dur: 4.6h / Exp: 90.0s
Filter: R

Alexey Garmash
Lyceum-130 / Esprit 150ED / ASI1600MM Pro



На базе Лицея 130 мы участвуем
в программе ExoClock с 2022 года.



Exoplanet Missions

- ¹ NASA/ESA Partnership
- ² NASA/ESA/CSA Partnership
- ³ CNES/ESA
- ⁴ ESA/Swiss Space Office
- ⁵ NSF Partnership (NN-EXPLORE)

