

# Современные методы исследования экзопланет. Как найти экзопланету?



**ТРАЕКТОРИЯ**

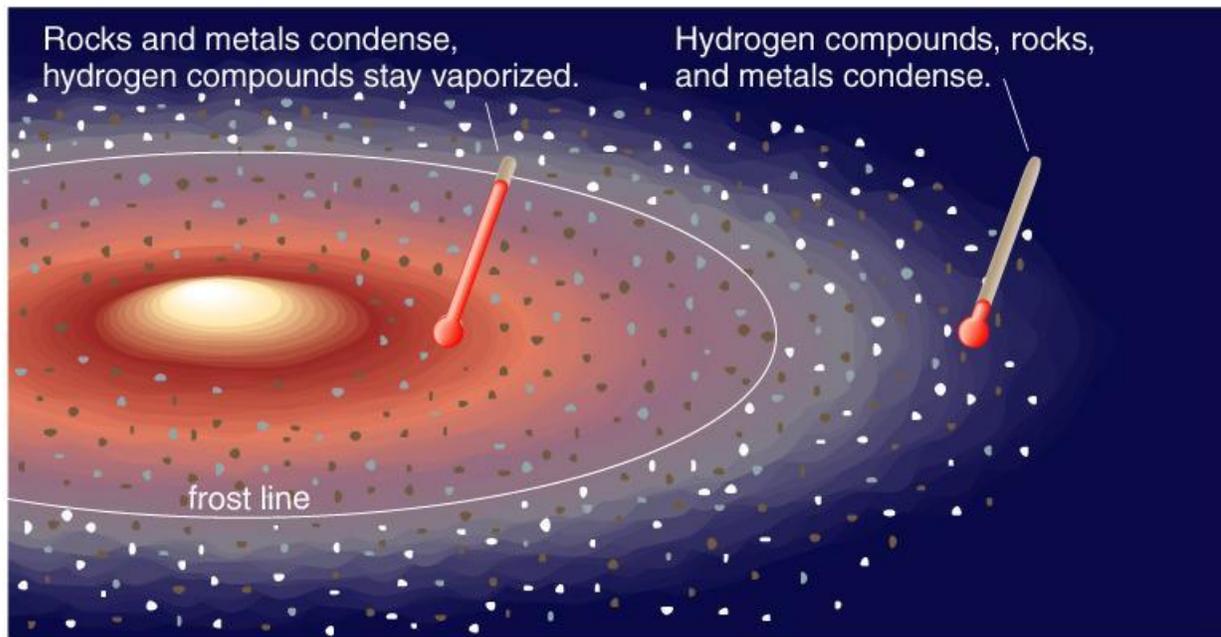
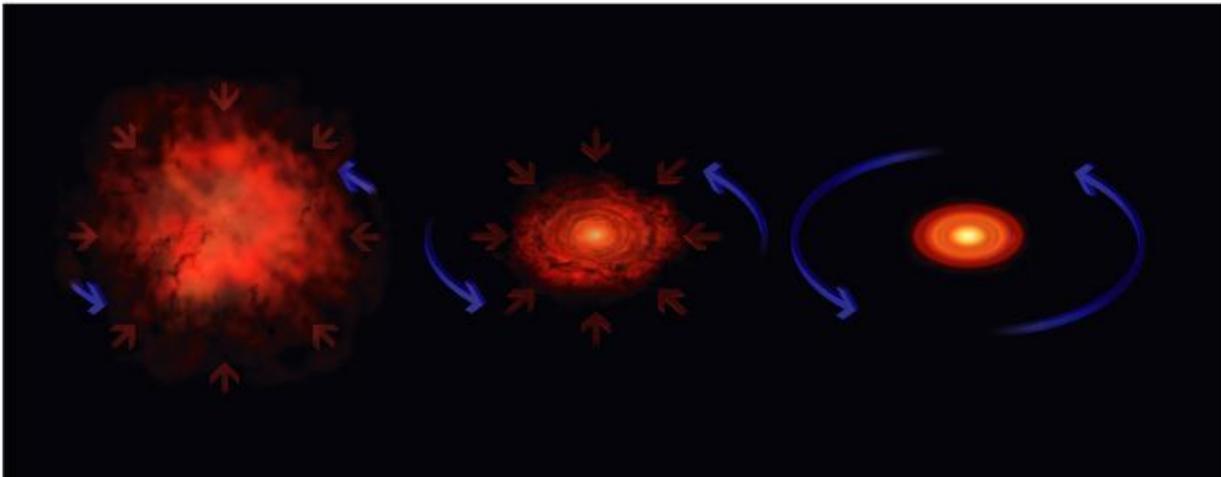
ФОНД ПОДДЕРЖКИ НАУЧНЫХ,  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ И КУЛЬТУРНЫХ  
ИНИЦИАТИВ

Вадим Крушинский  
научный сотрудник  
лаборатории  
астрохимических  
исследований Уральского  
федерального университета

Что такое экзопланета?

- **Экзопланета – любой объект планетарной массы, находящийся за пределами Солнечной системы**
- **Масса должна быть достаточно велика, чтобы объект принял форму близкую к шарообразной, но недостаточной для устойчивого поддержания термоядерных реакций в ядре**
- **Объекты меньшей массы – экзокометы и экзоастероиды**
- **Вокруг экзопланет вращаются экзолуны**

## Образование планет



© Addison-Wesley Longman

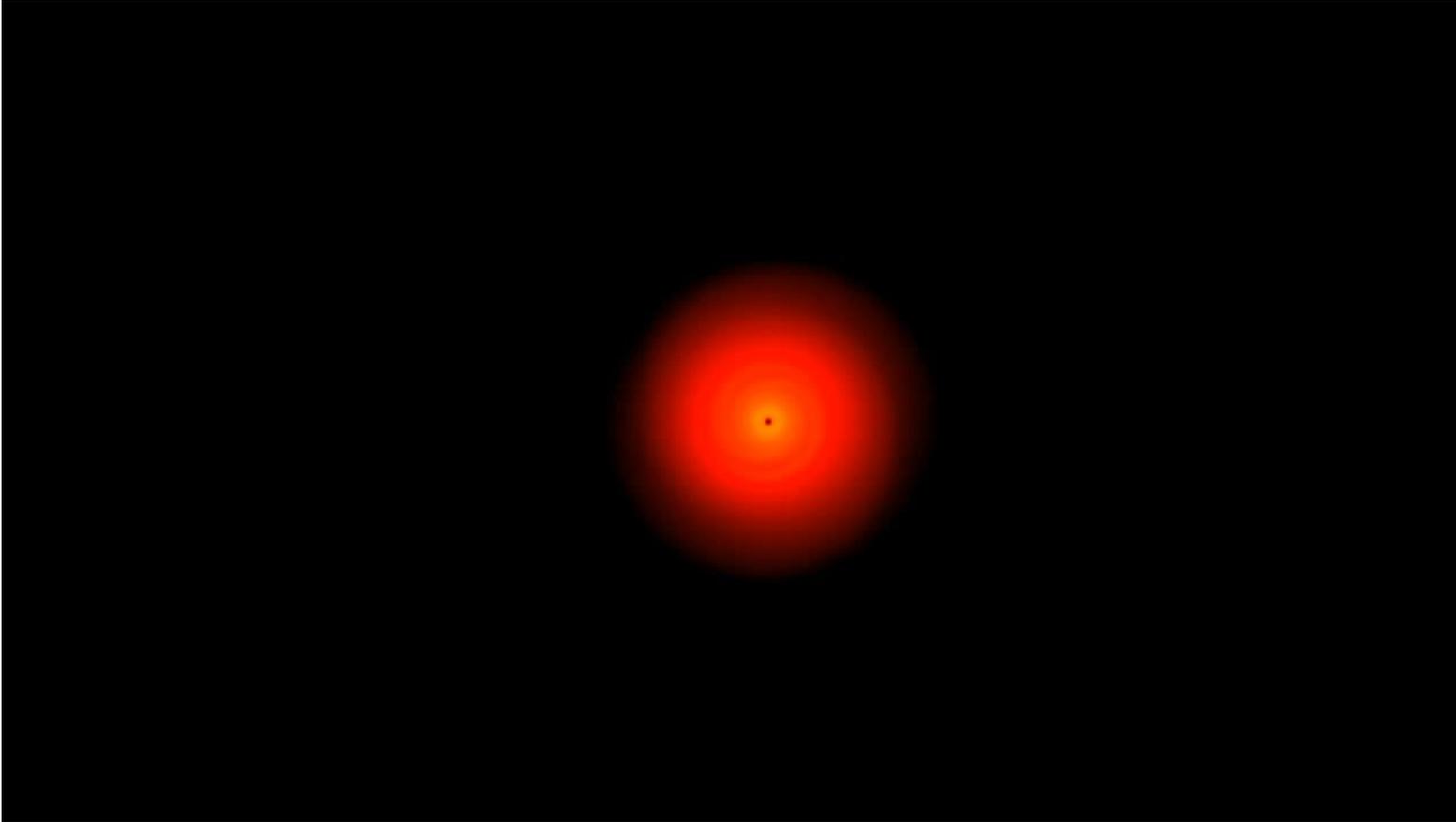
<https://faculty.ung.edu/jjones/astr1010home/solsysform.html>

Изначально протозвездное облако очень разреженное и медленно вращается. По мере сжатия повышается его плотность и температура. Момент количества движения облака остается неизменным, что приводит к увеличению угловой скорости вращения. Суммарное влияние силы тяжести и центробежной силы приводит к тому, что облако приобретает форму диска.

В центре протозвездного диска ледяные оболочки пылинок испарились и перешли в газообразное состояние. Ближе к краям диска почти все вещество находится в сконденсированном твердом состоянии. Условная граница между областями называется **снеговой линией**. Снеговая линия различна для каждого вещества. Так, для воды с температурой плавления 273К снеговая линия будет намного ближе к звезде, чем для метана, у которого температура плавления составляет 91К.

Во внутренней области образуются планеты земного типа, состоящие преимущественно из тяжелых химических элементов. Во внешней области диска, за снеговой линией, где в изобилии присутствуют лед и газ, из массивных планетезималей образуются газовые гиганты. Не все вещество протопланетных дисков используется для образования больших планет. Часть вещества остается в виде планетезималей которые в дальнейшем наблюдаются как кометы и астероиды.

## Устойчивость и эволюция планетных систем

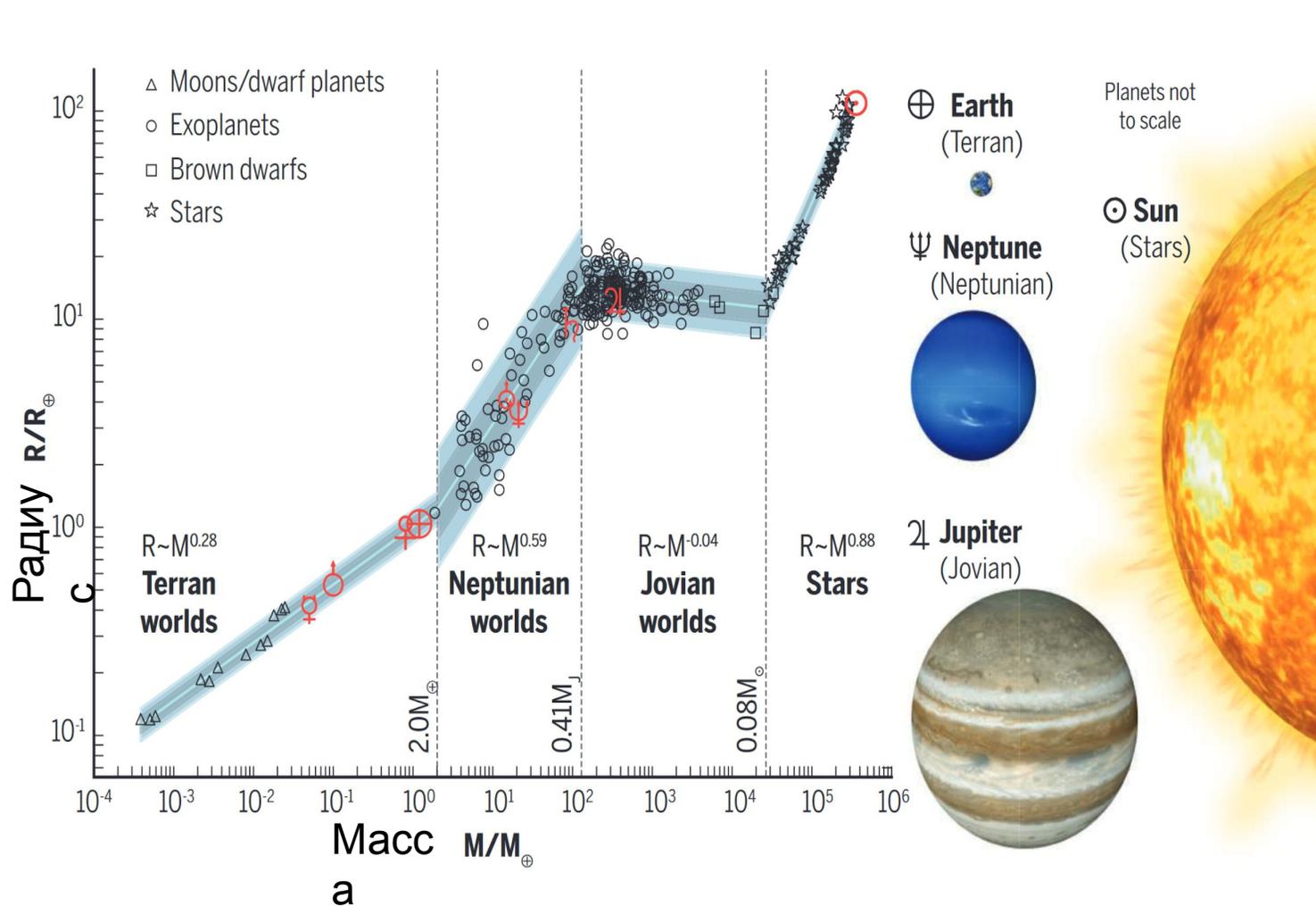


Экзопланеты не всегда находятся там, где родились. Сила притяжения массивных планет создаёт в диске приливные волны, таким образом кинетическая энергия движения планеты по своей орбите переходит в кинетическую и тепловую энергию вещества диска. Уменьшение кинетической энергии планеты приводит к уменьшению размеров её орбиты и миграции в направлении центральной звезды.

Так появляются газовые гиганты вблизи родительских звезд. Эффективность миграции сильно зависит от времени жизни протозвездного облака. Газовый гигант может и не успеть мигрировать в центр системы за время жизни диска.

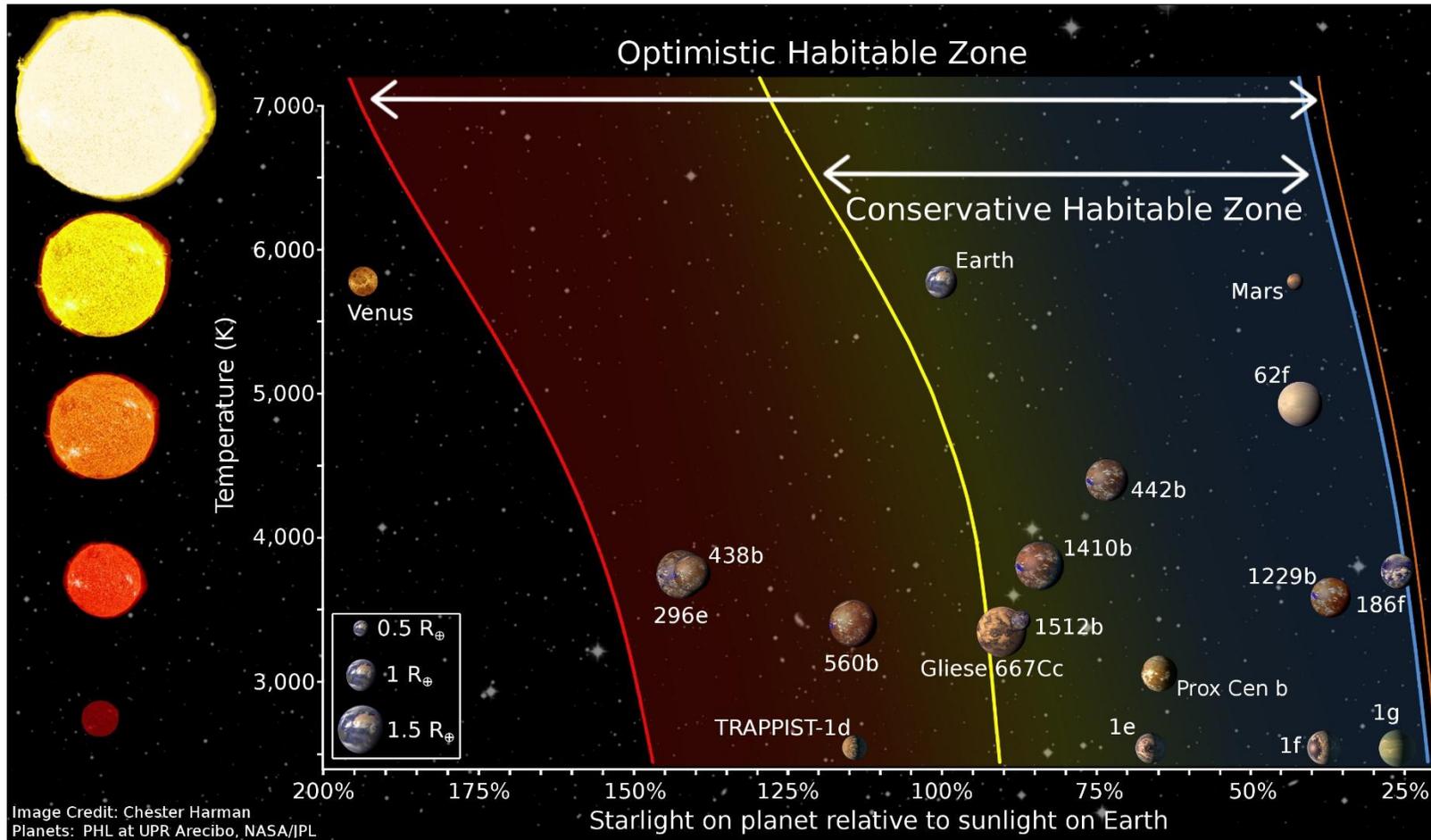
В некоторых случаях экзопланеты могут быть выброшены из системы.

# Классификация экзопланет на основе зависимости радиуса от массы



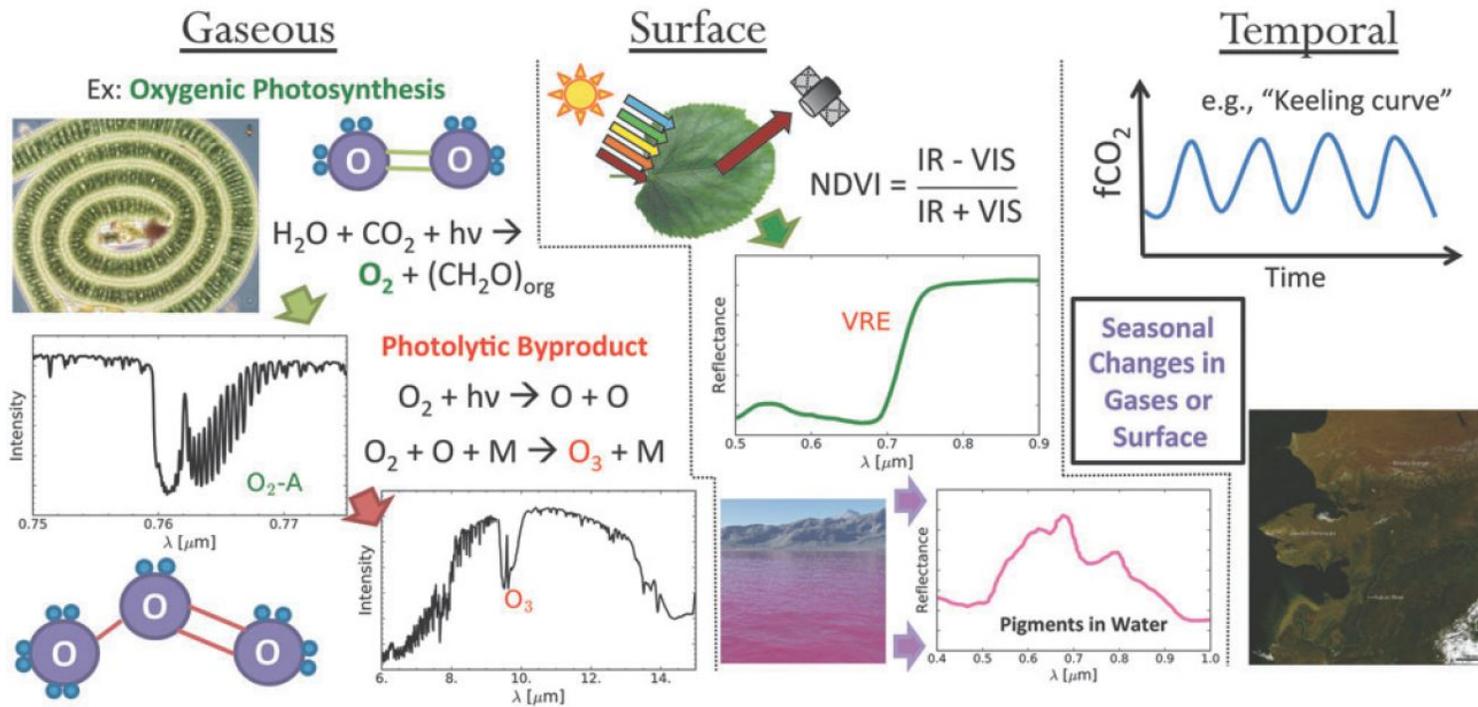
- Экзопланеты с массой до 2 масс Земли состоят преимущественно из тугоплавких элементов в твердом или жидком состоянии, имеют слабовыраженную атмосферу. Такие экзопланеты называют землеподобными, или просто «земли».
- Экзопланеты с массами 2-150 масс Земли имеют в составе много легкоплавких веществ и имеют выраженные атмосферы. Такие планеты называют нептунopodobными, или просто «нептунами».
- Если масса экзопланеты превышает 150 масс Земли, то гравитация становится настолько сильной, что давление газа не способно остановить медленное сжатие с выделением тепловой энергии. Для таких экзопланет радиус медленно уменьшается с ростом массы. Такие экзопланеты называются юпитерopodobными или просто «юпитерами».
- Наконец, если масса превышает 80 масс Юпитера (или примерно 30 000 масс Земли), то в ядре становятся возможны реакции термоядерного синтеза на ядрах водорода и объект можно назвать полноценной звездой.

# Планеты пригодные для жизни



Особый интерес представляют экзопланеты с температурой поверхности вблизи 273К. На таких экзопланетах могут быть условия пригодные для возникновения жизни. Для каждой звезды можно определить область, в которой условия на поверхности находящихся в ней планет будут близки к условиям на Земле, прежде всего существование воды в жидкой фазе. Эта область называется «зоной обитаемости». Иногда зону обитаемости называют зоной Златовласки (англ. Goldilocks zone).

# Биомаркеры и поиск жизни



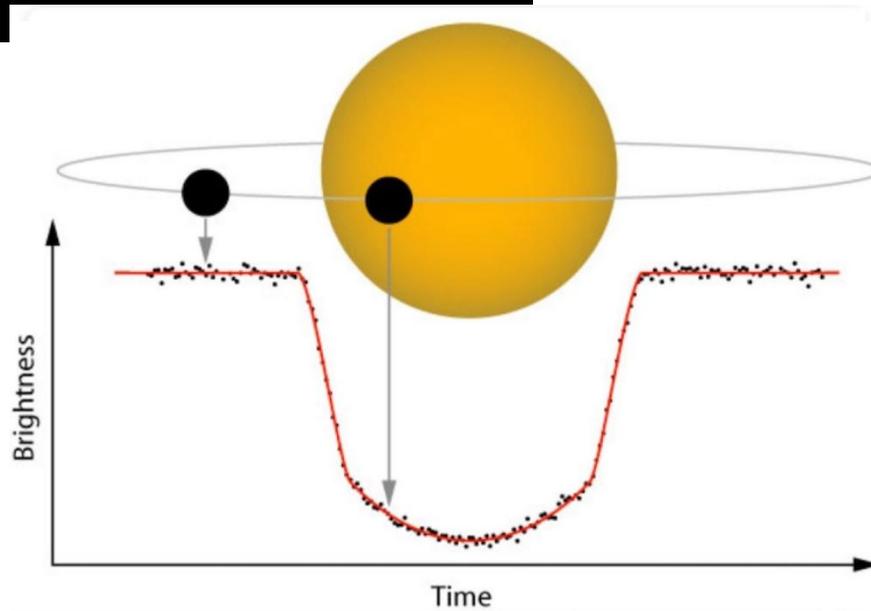
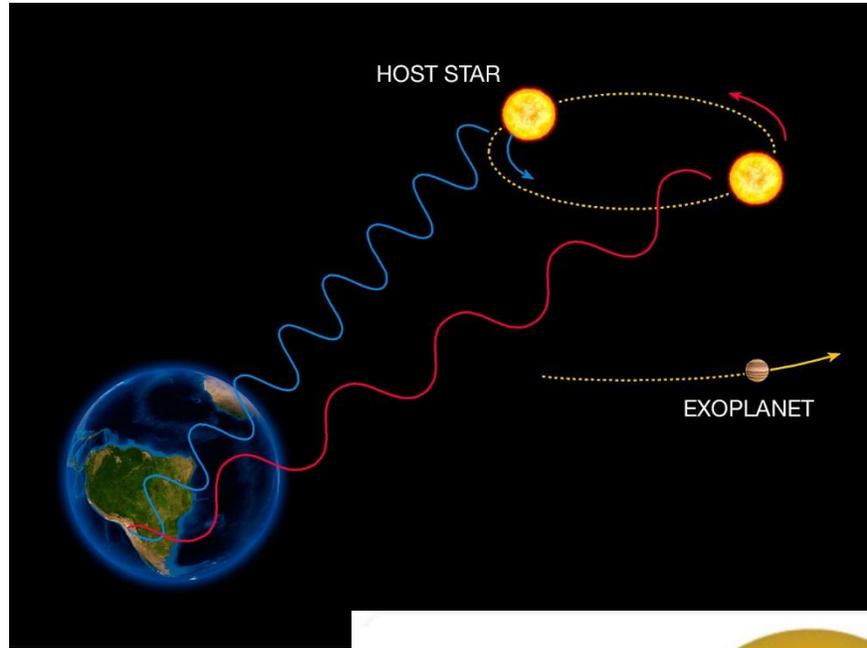
Расположение экзопланеты в зоне обитаемости не гарантирует возникновение жизни и делать вывод об обитаемости только на этом основании неправильно. Для однозначного доказательства обитаемости необходимы наблюдения признаков жизни — биомаркеров. Можно выделить три типа биомаркеров которые теоретически можно наблюдать на экзопланетах:

- Наличие жизни меняет состав атмосферы. Так, высокое содержание кислорода и озона в атмосфере Земли обусловлено наличием организмов способных к фотосинтезу.
- Растительность на поверхности и водоросли в океанах могут изменять их цвет. Например, значительная часть поверхности Земли покрыта зелеными лесами, а обилие водорослей Дуналиелла придает розовый цвет некоторым озерам.
- Периодические сезонные изменения некоторых параметров. Например, колебания содержания двуокиси углерода, вызванные периодами роста и увядания растительности.

## Основные вопросы экзопланетологии

- **Межзвездная среда и протопланетные диски**
- **Образование и динамическая эволюция планетных систем**
- **Внутреннее строение, поверхность и атмосферы экзопланет**
- **Экзопланеты пригодные для зарождения жизни**
- **Поиск биомаркеров**

## Первые открытия



Научный подход к задаче поиска и исследования экзопланет был заложен Отто Струве в 1952. Он указал на два потенциальных метода поиска доступных уже в то время:

- наблюдение доплеровского смещения спектра звезды, вызванного наличием близкой массивной планеты (**метод лучевых скоростей**)
- наблюдение падения блеска звезды, вызванного прохождением большой планеты между наблюдателем и звездой (**транзитный метод**)

Если исходить из предположения, что все экзопланетные системы похожи на Солнечную, то задача поиска сильно усложняется — транзиты планеты могут наблюдаться у очень малого количества экзопланетных систем и происходить раз в несколько лет, а доплеровские колебания спектра звезд малы и происходят очень медленно. В 60-70 годы 20-го века никто не мог позволить себе использовать оборудование обсерваторий для длительного эксперимента с неясными перспективами достижения успеха.

Развитие методов астрономических наблюдений, прежде всего цифровых технологий получения и обработки изображений, позволило в 1980-х годах начать регулярный поиск экзопланет методом лучевых скоростей.

## Первые открытия

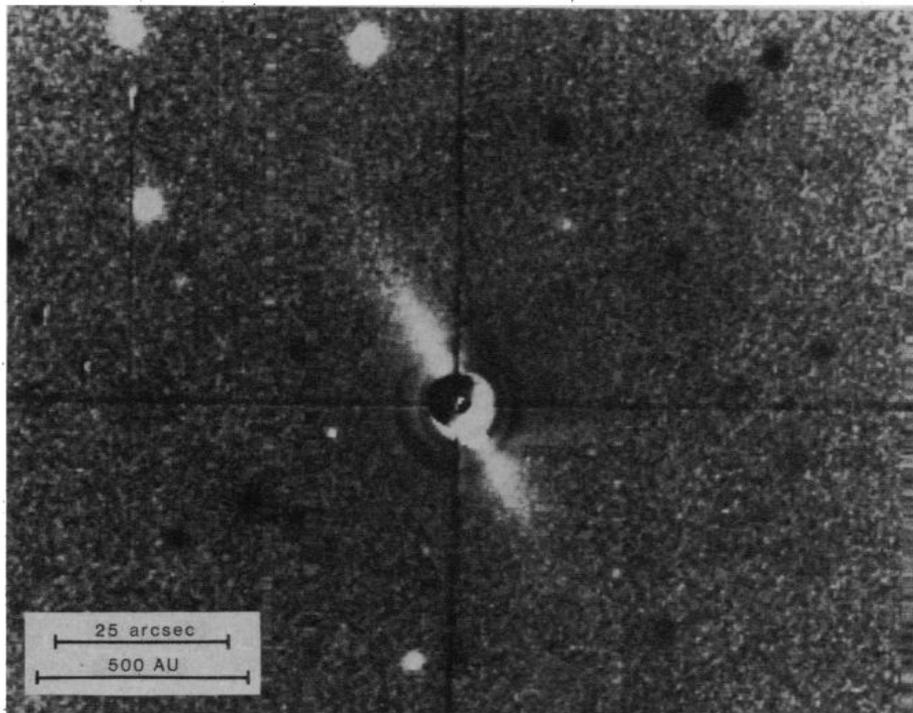


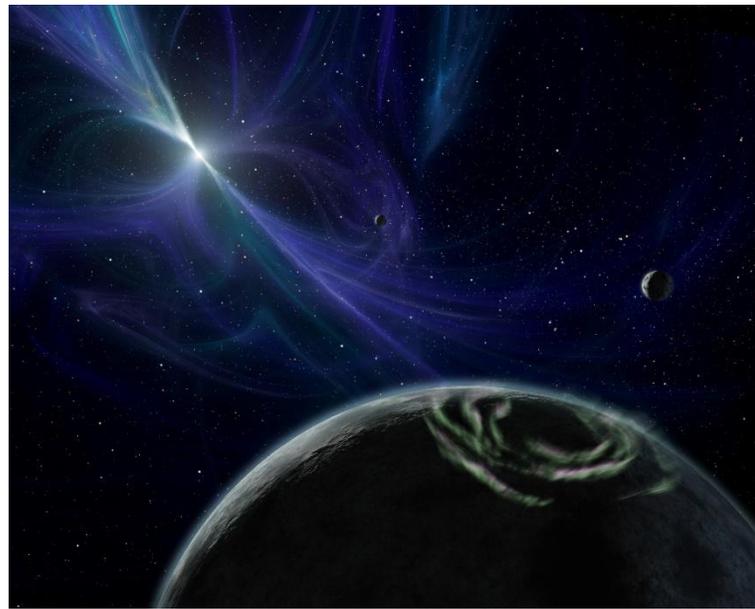
Fig. 1. Ratio image ( $\beta$  Pictoris divided by  $\alpha$  Pictoris) showing the edge-on circumstellar disk extending 25 arcsec (400 AU) to the northeast and southwest of the star, which is situated behind an obscuring mask. North is at the top. The dark halo surrounding the mask is caused by imperfect balance in the ratioing process. For further explanation, see text.

Первые доказательства, что Солнечная система не единственная во Вселенной, были получены в 1984 году. Брэдфорд Смит и Ричард Террил обнаружили плоский диск вокруг звезды Бета Живописца. Они предположили, что система молода и находится в стадии формирования планетной системы.

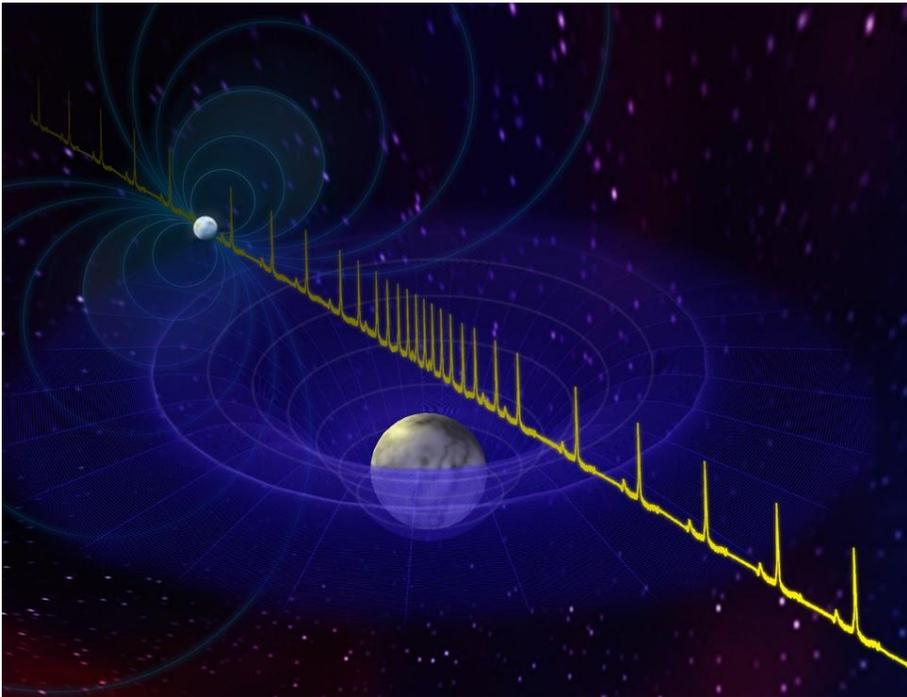


2.5-метровый телескоп Irene du Pont, Las Campanas, Chile. Именно на нем было получено первое изображение протопланетного диска.

## Первые открытия



Первая экзопланета была открыта совершенно неожиданно радиоастрономом Александром Вольщаном в 1992 году. Планета вращается вокруг пульсара PSR 1257+12 и вызывает небольшие периодические изменения частоты его пульсаций. Чуть позже было доказано, что в системе присутствует еще две планеты. Вероятнее всего планеты сформировались уже после образования пульсара, но окончательно это не подтверждено.



*Пульсары — это быстро вращающиеся нейтронные звезды с сильным магнитным полем и излучающие короткие импульсы в радиодиапазоне. Частота импульсов достигает нескольких сотен в секунду и остается очень стабильной на протяжении долгого времени. Если вокруг пульсара вращается массивное тело, например, экзопланета, то пульсар движется вокруг общего центра масс системы, расстояние между пульсаром и наблюдателем периодически изменяется. Изменение расстояния приводит к тому, что импульсы приходят к наблюдателю то чуть раньше, то с задержкой. Измерив величину задержки можно определить положение центра масс системы относительно пульсара и вычислить массу и параметры орбит экзопланет в системе.*

*Изменение времени прихода импульсов можно рассматривать как изменение частоты пульсара. При таком подходе метод можно рассматривать как метод лучевых скоростей, когда длина волны излучения смещается благодаря эффекту Доплера вследствие*

## Первые открытия

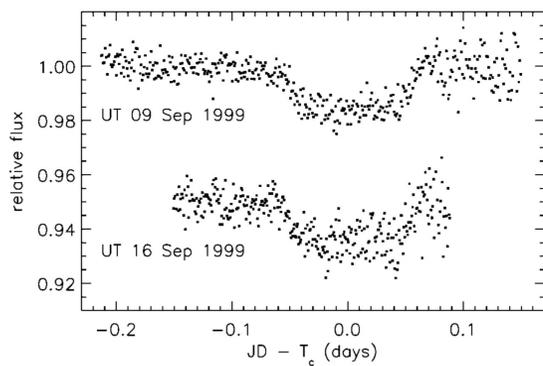
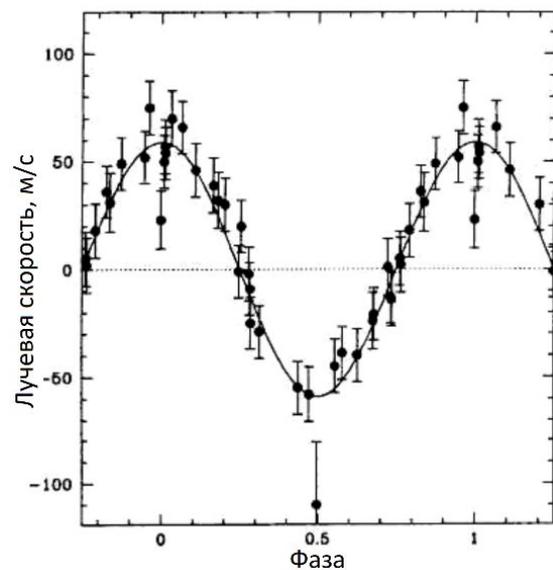
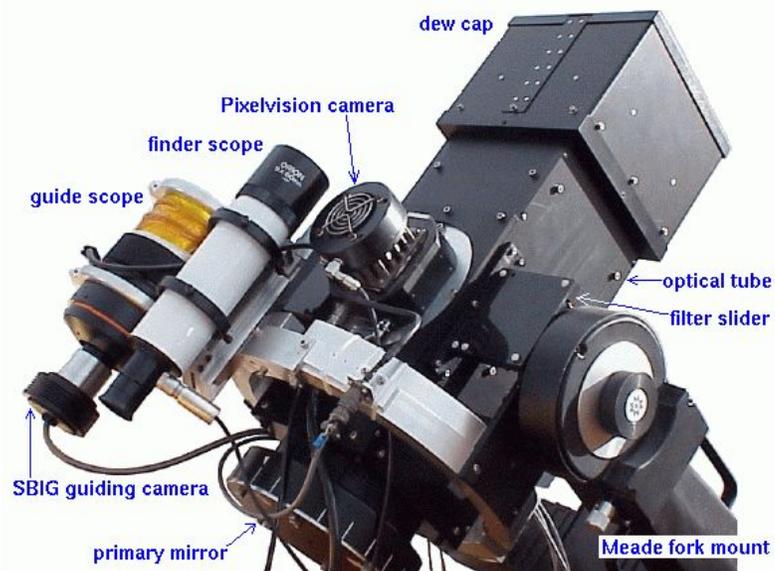


FIG. 1.—Shown are the photometric time series, corrected for gray and color-dependent extinction, for 1999 September 9 and 16 plotted as a function of time from  $T_c$ . The rms of the time series at the beginning of the night on September 9 is roughly 4 mmag. The increased scatter in the September 16 data relative to the September 9 data is due to the shorter exposure times. The data from September 16 are offset by  $-0.05$  relative to those from September 9.

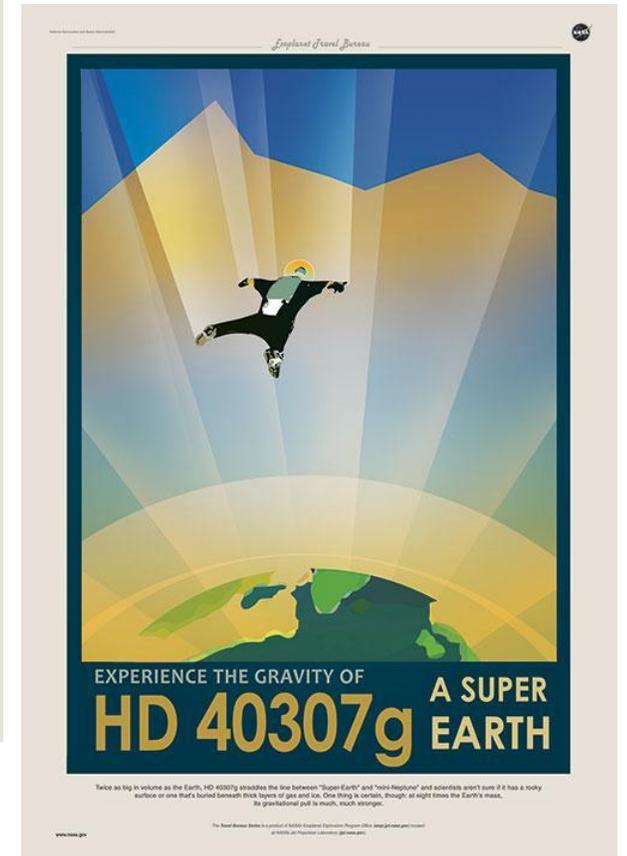
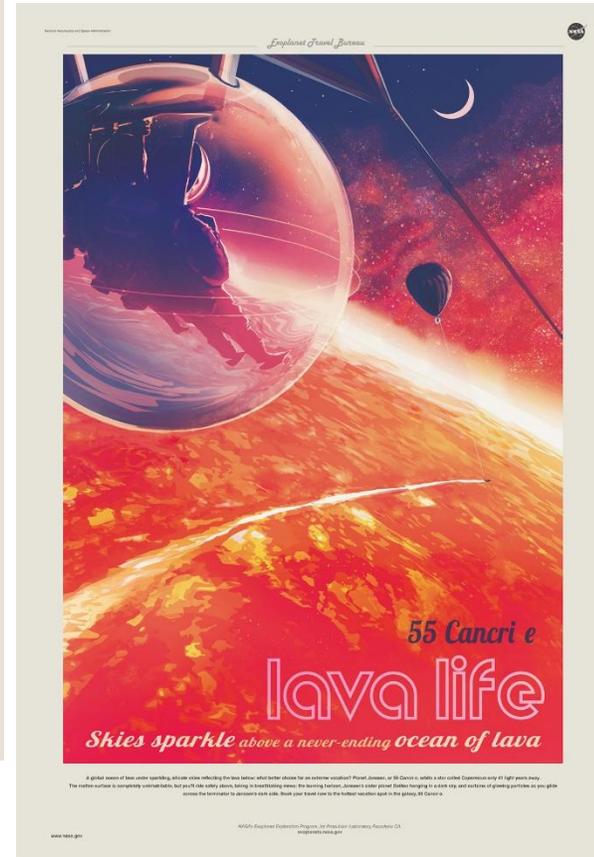
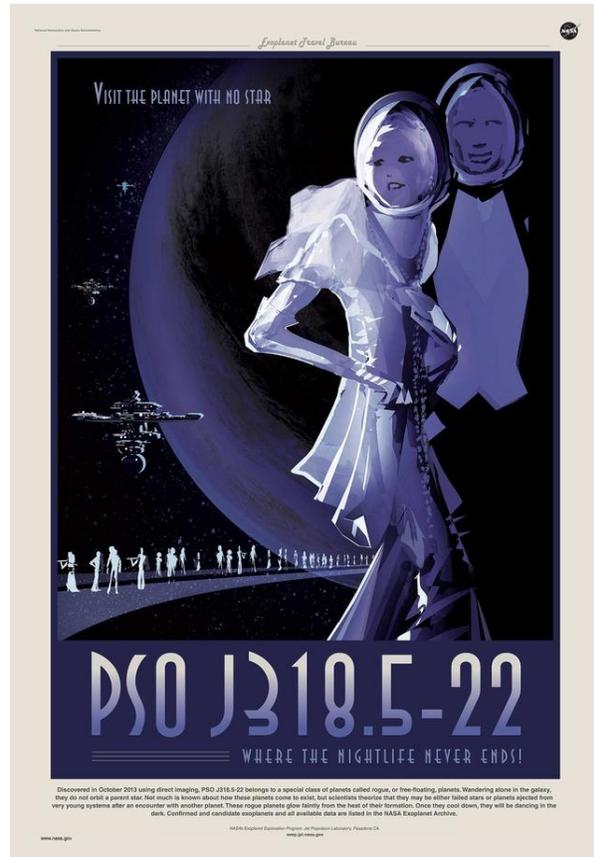


В 1995 году методом лучевых скоростей на спектрографе ELODIE была открыта первая экзопланета у обычной звезды — 51 Пегаса b. Спустя 24 года авторы этого открытия Мишель Майор и Дидье Кело получили Нобелевскую премию по физике.



В конце 1999 года впервые наблюдался транзит ранее известной экзопланеты в системе HD 209458. Для этого использовался телескоп диаметром всего 99 мм.

Первые открытия показали, что экзопланетные системы могут быть очень не похожими на нашу Солнечную, их много, а методы поиска оказались достаточно эффективными. Следующий шаг – не искать



## Метод лучевых скоростей



Метод лучевых скоростей позволяет **измерять массы и параметры орбит экзопланет**. Наиболее полные и точные исследования получаются для систем, в которых можно использовать совместно с методом транзитов. Это возможно не для всех звезд с наблюдаемыми транзитами экзопланет, а только для достаточно ярких ( $<14^m$ ), доступных спектрографам высокого разрешения. Еще одно важное ограничение метода – зависимость результата от параметров родительской звезды.

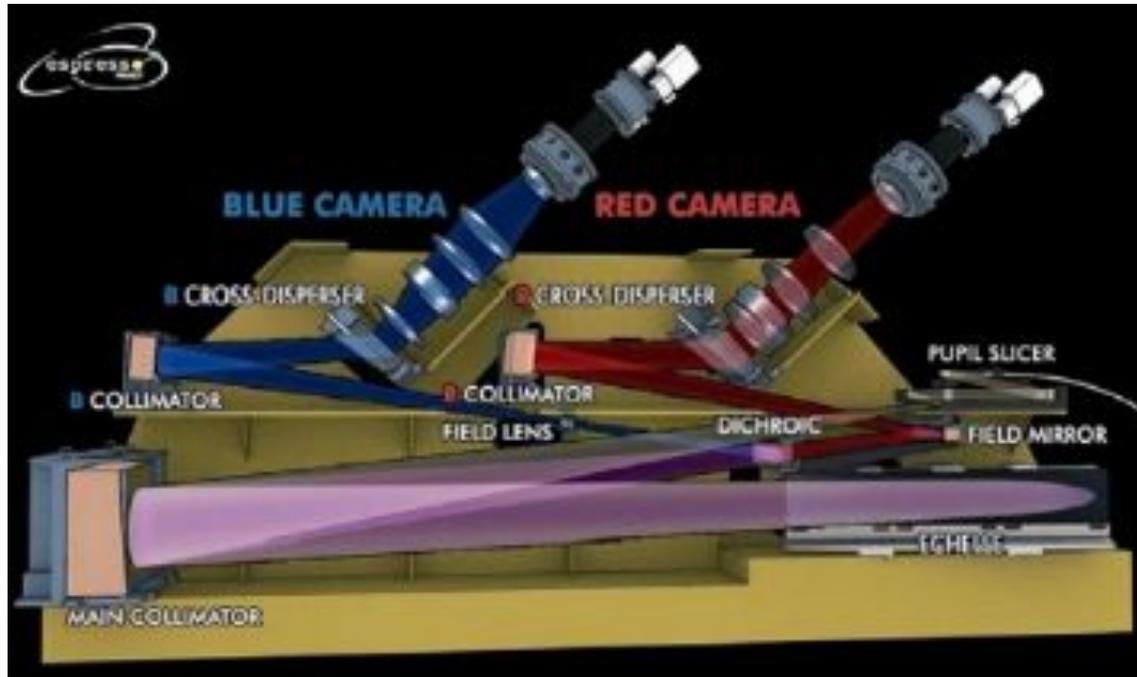
Важным преимуществом метода лучевых скоростей является возможность искать и изучать экзопланеты на больших расстояниях от родительской звезды и со значительным наклоном плоскости орбиты к лучу зрения, для которых мала геометрическая вероятность наблюдения транзитов.

## Будущее метода лучевых скоростей

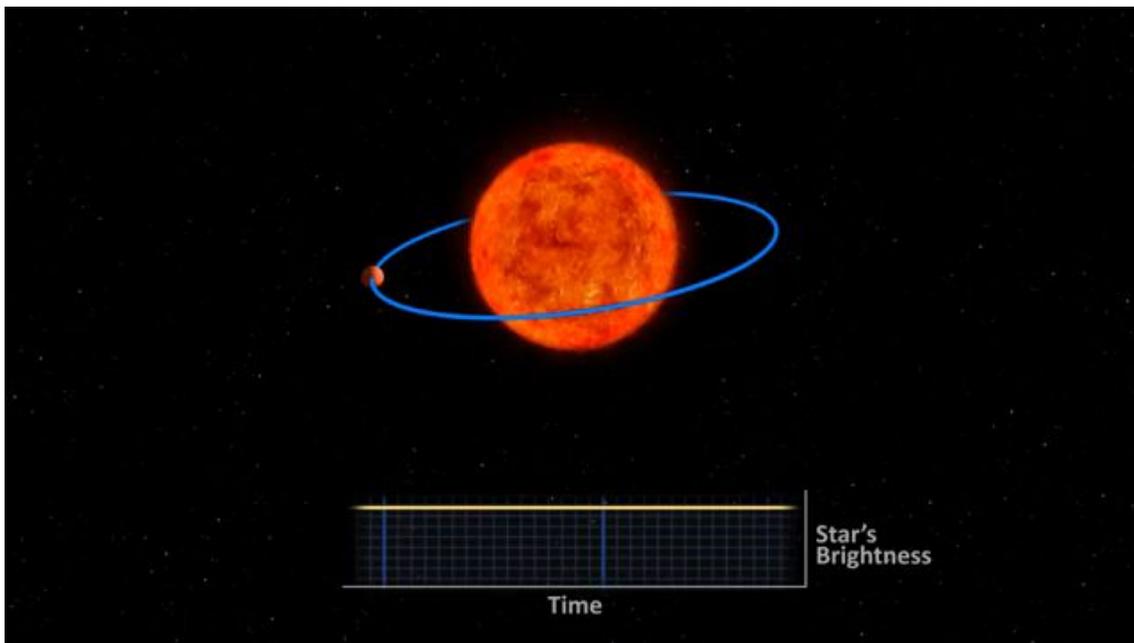
Планета	Масса планеты в массах Земли	Большая полуось орбиты (А.Е.)	Период изменения лучевой скорости (лет)	Амплитуда изменения лучевой скорости (м/с)
Меркурий	0,06	0,4	0,241	0,08
Венера	0,82	0,7	0,615	0,09
Земля	1,000	1,0	1,000	0,09
Марс	0,11	1,5	1,880	0,008
Юпитер	318	5,2	11,86	12,46
Сатурн	95	9,5	29,5	2,75
Уран	14	19,2	84,0	0,29
Нептун	17	30,1	164,8	0,28
51 Пегаса b	150	0,05	0,01158	57,0

Лучшие современные спектрографы позволяют измерять лучевые скорости с точностью около **0,1 м/с**. В ближайшем будущем появятся приборы с еще большей точностью — до **0,02 м/с**. Это значит, что скоро для метода лучевых скоростей будут доступны исследования планет похожих на Землю и вращающихся вокруг солнцеподобных звезд с периодами около года — двойники Земли.

Метод позволяет исследовать экзопланетные системы и их динамическую эволюцию. Определять освещенность и температуру поверхности экзопланет. Искать экзопланеты в зоне обитаемости. В сочетании с методом транзитов позволяет определить плотность, и сделать выводы о составе и внутреннем строении (каменистые, водные или газовые планеты).



## Метод фотометрии транзитов

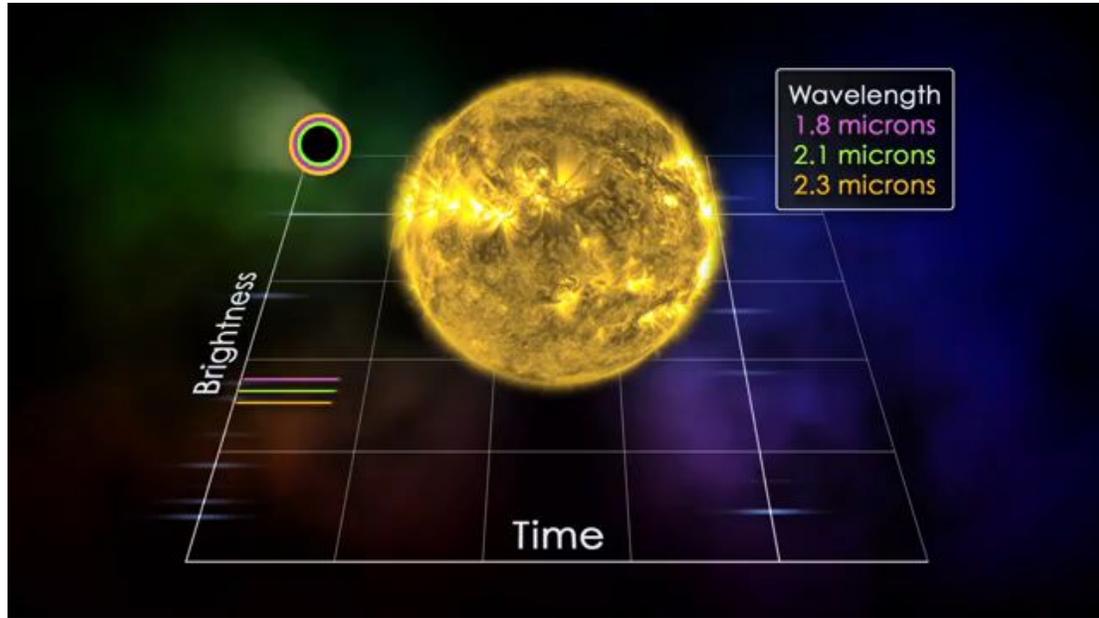


Наблюдаемые параметры транзита — глубина, продолжительность, частота и форма — зависят от свойств экзопланетной системы. Если у нас есть достоверные оценки массы и размеров родительской звезды, полученные, например, из спектральных наблюдений и наших представлений о строении и эволюции звёзд, то мы можем определить некоторые параметры экзопланеты: **её размер, радиус и наклон орбиты, оценить массу, освещенность и температуру поверхности**. В сочетании с методом лучевых скоростей – получить надежные оценки массы и плотности.

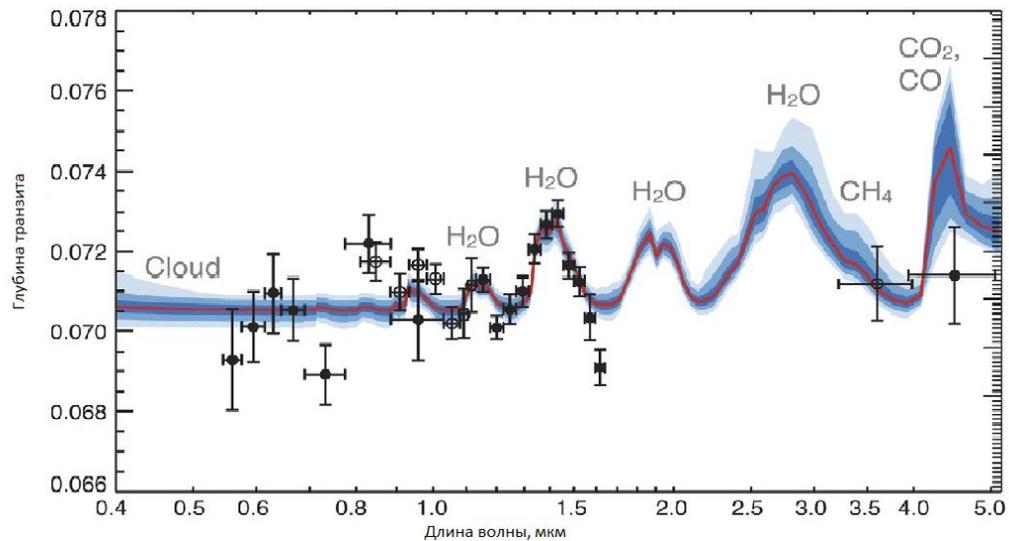
Метод наиболее эффективен для больших экзопланет расположенных близко к своей звезде. Космические обсерватории имеют более высокую точность и позволяют исследовать планеты похожие на Землю.

Планета	Период обращения (лет)	Максимальная продолжительность транзита (часов)	Глубина транзита (%)	Геометрическая вероятность (%)
Меркурий	0,241	8,1	0,0012	1,19
Венера	0,615	11,0	0,0076	0,65
Земля	1,000	13,0	0,0084	0,47
Марс	1,880	16,0	0,0024	0,31
Юпитер	11,86	29,6	1,01	0,089
Сатурн	29,5	40,1	0,75	0,049
Уран	84,0	57,0	0,135	0,024
Нептун	164,8	71,3	0,127	0,015
51 Пегаса b	0,0096	3,1	1,5	11,7

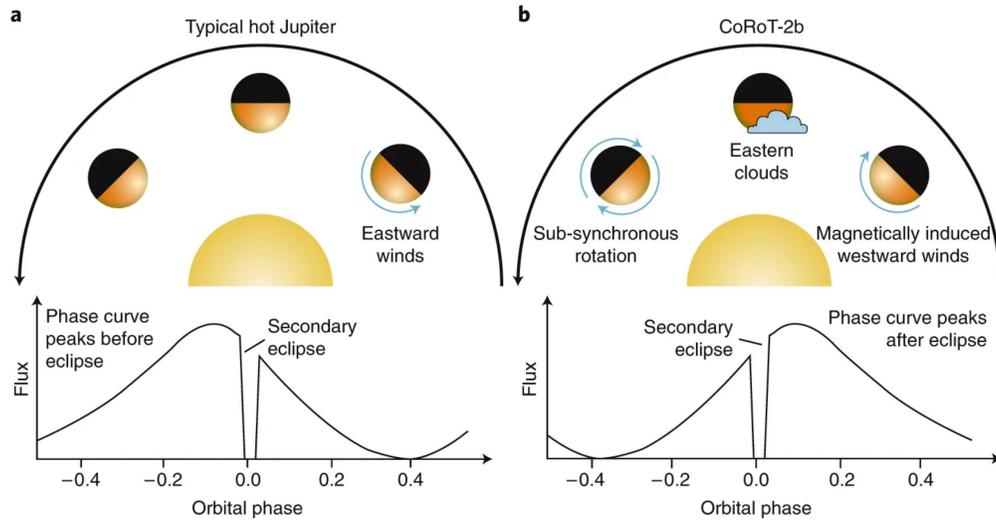
# Трансмиссионная спектроскопия



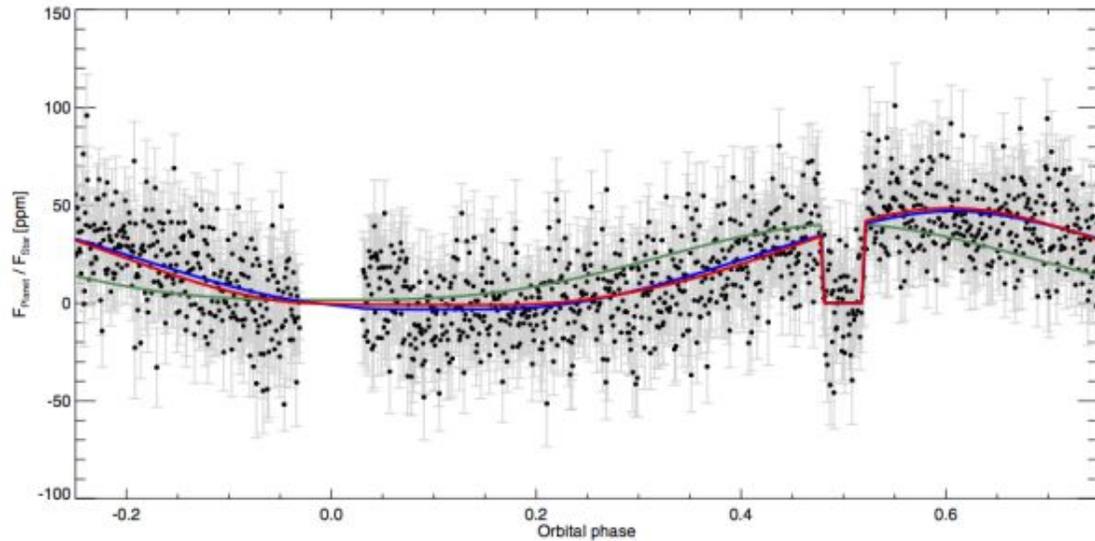
Атмосферы планет по-разному пропускают излучение разных длин волн. Например, наличие паров воды приводит к тому, что атмосфера становится менее прозрачной при наблюдениях вблизи 1,4, 2,0 и 2,9 мкм, что приводит к увеличению глубины транзита на этих длинах волн. Этот метод исследования *атмосфер экзопланет* называется трансмиссионной спектроскопией.



# Фотометрия фаз



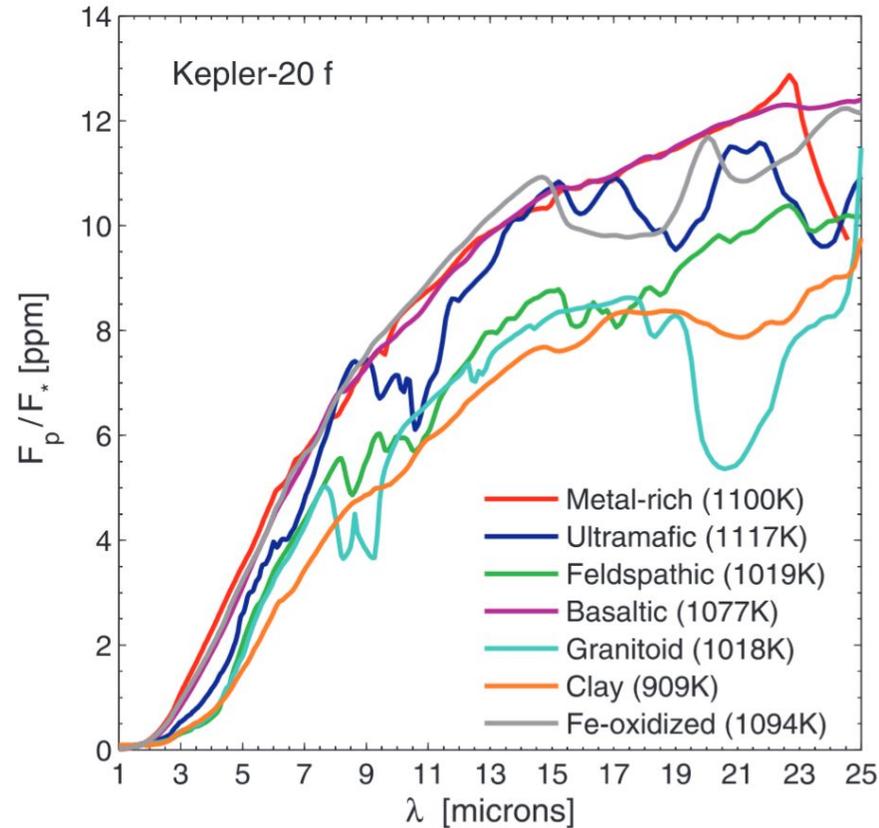
a. A typical hot Jupiter phase curve with the peak occurring prior to secondary eclipse. This is explained by eastward (synchronous) rotation of the planet and super-rotating winds shifting the hottest region to the east. b. A similar phase curve but with the peak occurring after secondary eclipse, similar to that observed for CoRoT-2b. Scenarios that could explain this include sub-synchronous rotation, magnetically induced westward winds, or clouds in the eastern hemisphere.



При движении планеты вокруг родительской звезды наблюдается смена фаз, при этом экзопланета не обязательно должна быть транзитной. И хотя яркость отраженного экзопланетой света мала, она все же вносит небольшой вклад в суммарный наблюдаемый блеск системы. Особенно это выражено в инфракрасном диапазоне длин волн.

Амплитуда изменения блеска определяется размерами экзопланеты и её способностью отражать свет — чем больше коэффициент отражения, тем выше амплитуда изменения блеска, вызванная сменой фаз. Например, планеты с **облаками** из водяного пара имеют более высокий коэффициент отражения, а изменение коэффициента отражения указывает на изменения облачного покрова экзопланет, несимметричная форма кривой блеска и ее переменчивость интерпретируются как **наличие ветров** в атмосферах экзопланет.

## Фотометрия и спектроскопия затмений



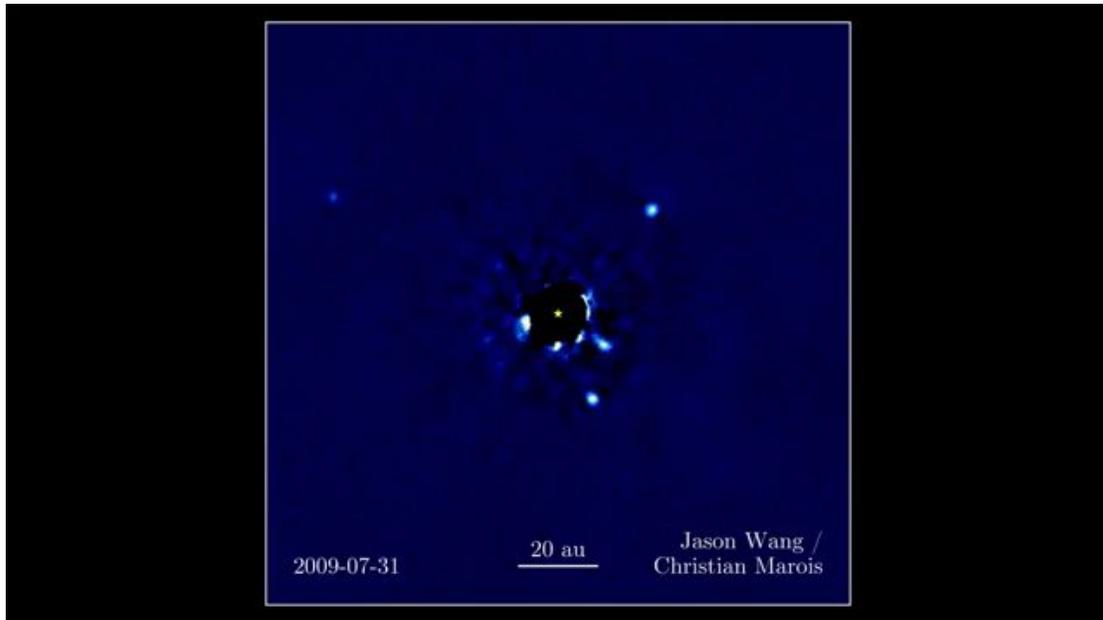
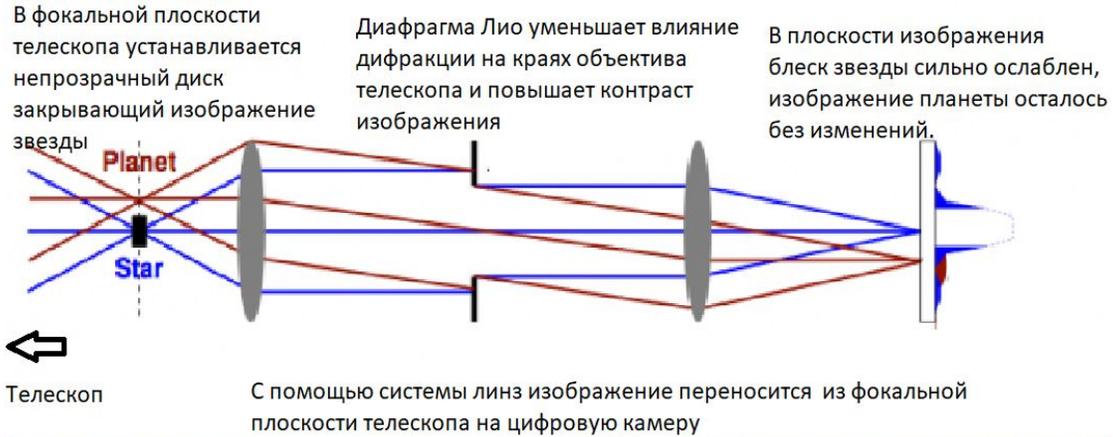
**Figure 7.** Modeled transit depth of the secondary eclipse of Kepler-20f, if the planet's surface is covered by particulate materials as listed in Table 2. We use the planetary parameters of Fressin et al. (2012) and find that in the Kepler's bandpass the secondary transit depth is less than 1 part per million (ppm). Sub-stellar temperatures listed in the figure are self-consistently computed in the model, and we verify that except for the granitoid and clay the surfaces are solid anywhere on the planet. We note that the Si–O features lead to variations in secondary transit depth as large as 2 ppm in both the 7–13  $\mu\text{m}$  band and the 15–25  $\mu\text{m}$  band, for ultramafic and granitoid surfaces. The iron-oxide feature in the 15–25  $\mu\text{m}$  band and the pyrite feature at  $> 22 \mu\text{m}$  are also evident.

Вклад отраженного от поверхности экзопланеты света в общий блеск системы невелик, но его можно наблюдать, особенно в ИК диапазоне. Спектр отраженного света будет определяться свойствами как **атмосферы**, так и **поверхности** планеты, что позволяет использовать метод фотометрии затмений для их исследования.

Сейчас все с нетерпением ждут начала работы космической обсерватории JWST, которая позволит проводить фотометрию затмений в ИК диапазоне с достаточной точностью.



# Коронаграфы и прямые изображения



Главная проблема при исследовании экзопланет – выделить слабый сигнал на фоне яркой родительской звезды. Коронаграф позволяет ослабить свет звезды, закрыв ее непрозрачным экраном. Ранее такие приборы применялись для наблюдения Солнечной короны вне затмений.

Высококонтрастная коронаграфия позволяют непосредственно увидеть экзопланету. Сейчас это наиболее перспективный метод исследования экзопланет как для наземных, так и для космических телескопов будущего. Также метод позволяет проводить спектральные и поляризметрические исследования экзопланет.

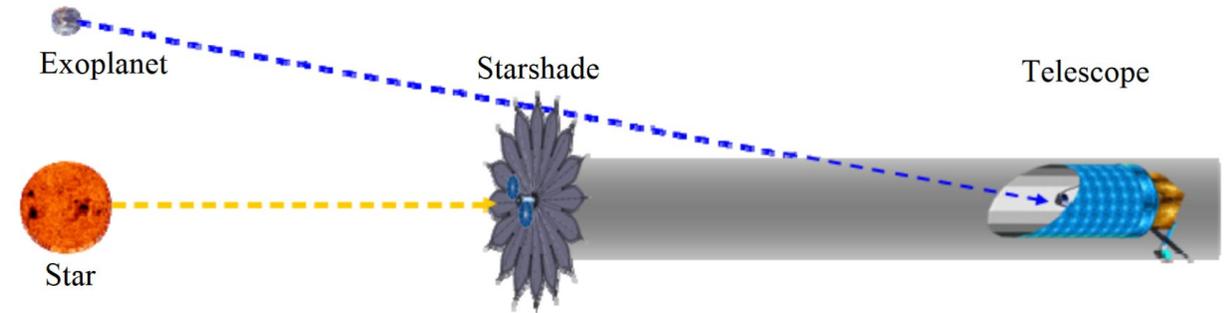


Figure 1: The basic architecture of a starshade mission. The starshade blocks light from a target star from entering the telescope. The light from a planet can then be seen around the edge of the starshade.

## Космические телескопы ближайшего будущего



Космический телескоп «Джеймс Уэбб», JWST.

Прямо сейчас происходит разворачивание систем телескопа. Ожидается, что научные наблюдения начнутся в ближайшие месяцы.

Телескоп оптимизирован для работы в инфракрасном диапазоне.

- Трансмиссионная спектроскопия
- Фотометрия фаз
- Фотометрия и спектроскопия затмений

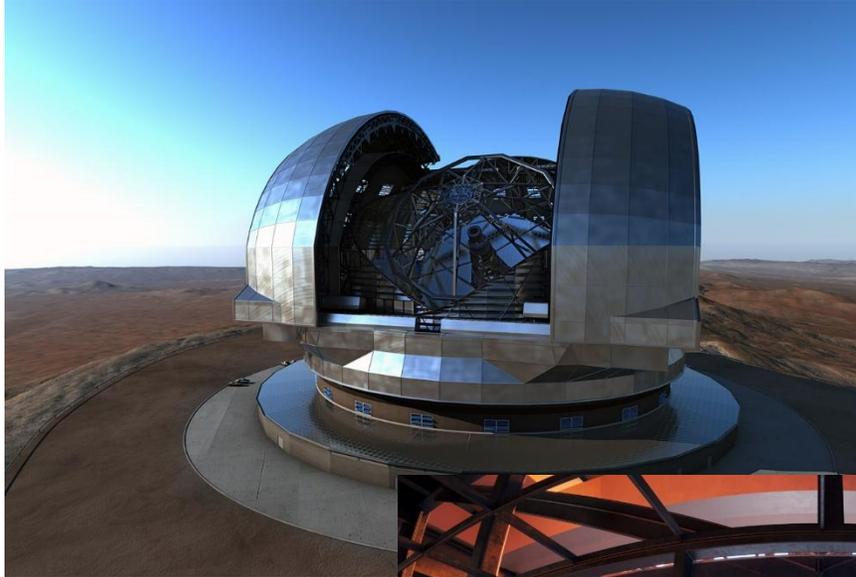


Roman Space Telescope, RST.

Планируется запуск до 2027 года.

- Высоконтрастный коронограф видимого диапазона
- Прямые изображения экзопланет на расстоянии до  $0.15''$  от родительской звезды
- Поляриметрия и спектроскопия экзопланет

## Наземные телескопы ближайшего будущего



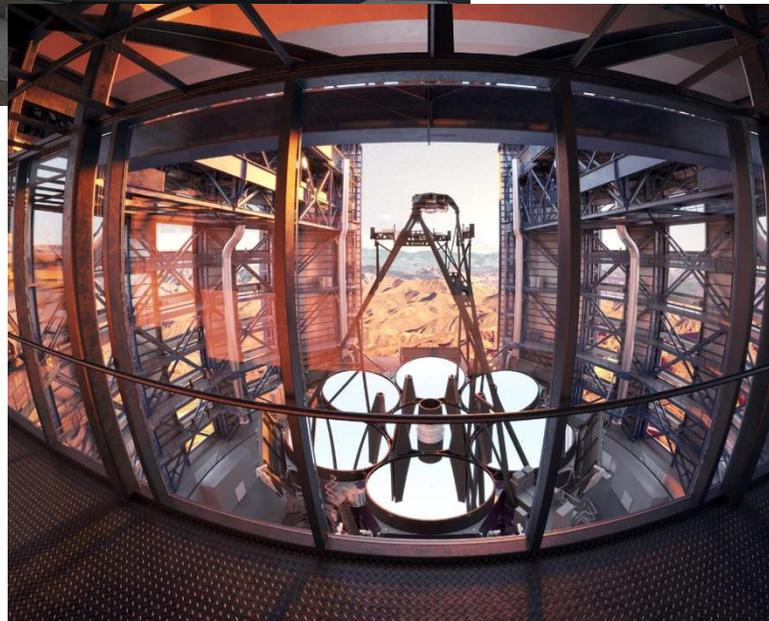
Чрезвычайно большой телескоп (E-ELT), Гигантский Магелланов телескоп (GMT), Тридцатиметровый телескоп (TMT)

Коронаграфия и методы высокого углового разрешения

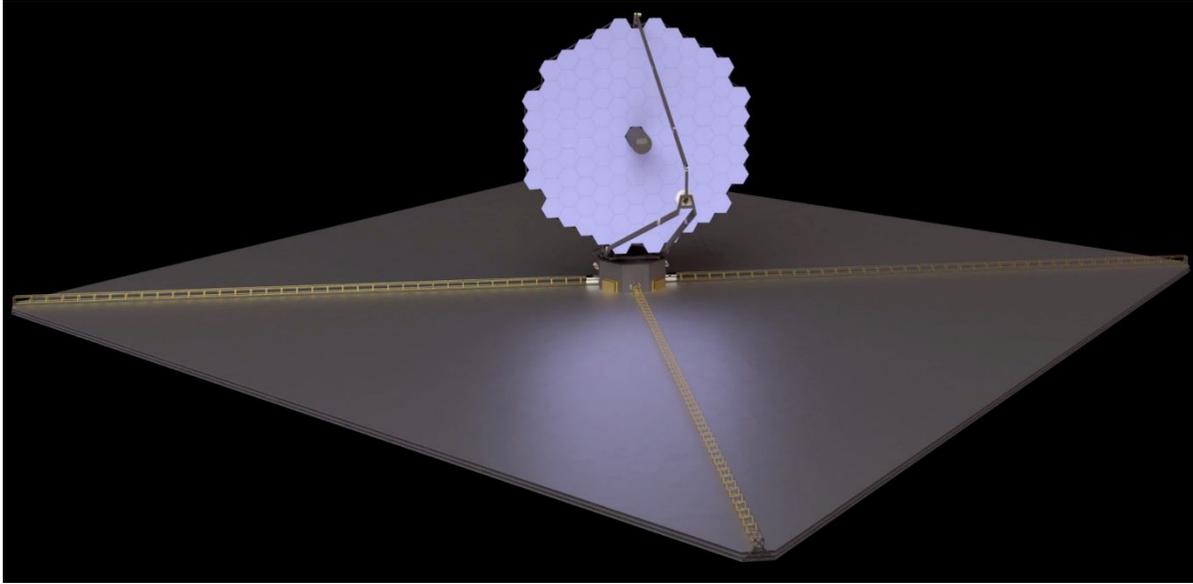
Метод лучевых скоростей

Высокоточная фотометрия видимого и ближнего ИК диапазонов

Трансмиссионная спектроскопия



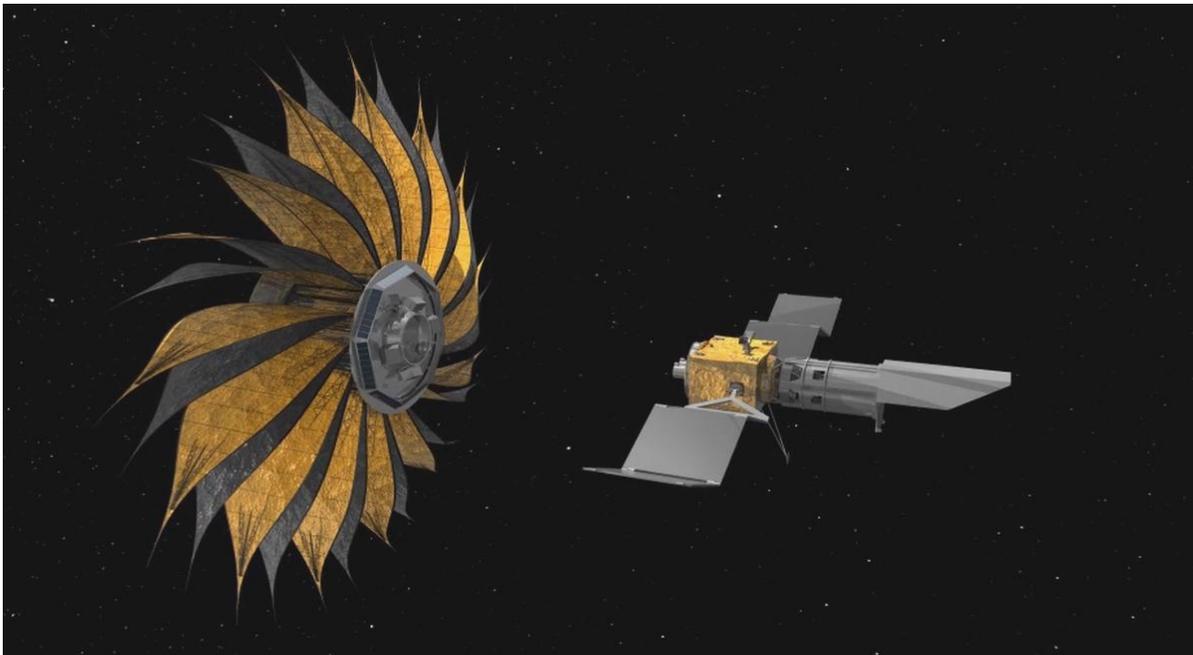
## Космические инструменты в стадии проработки проектов



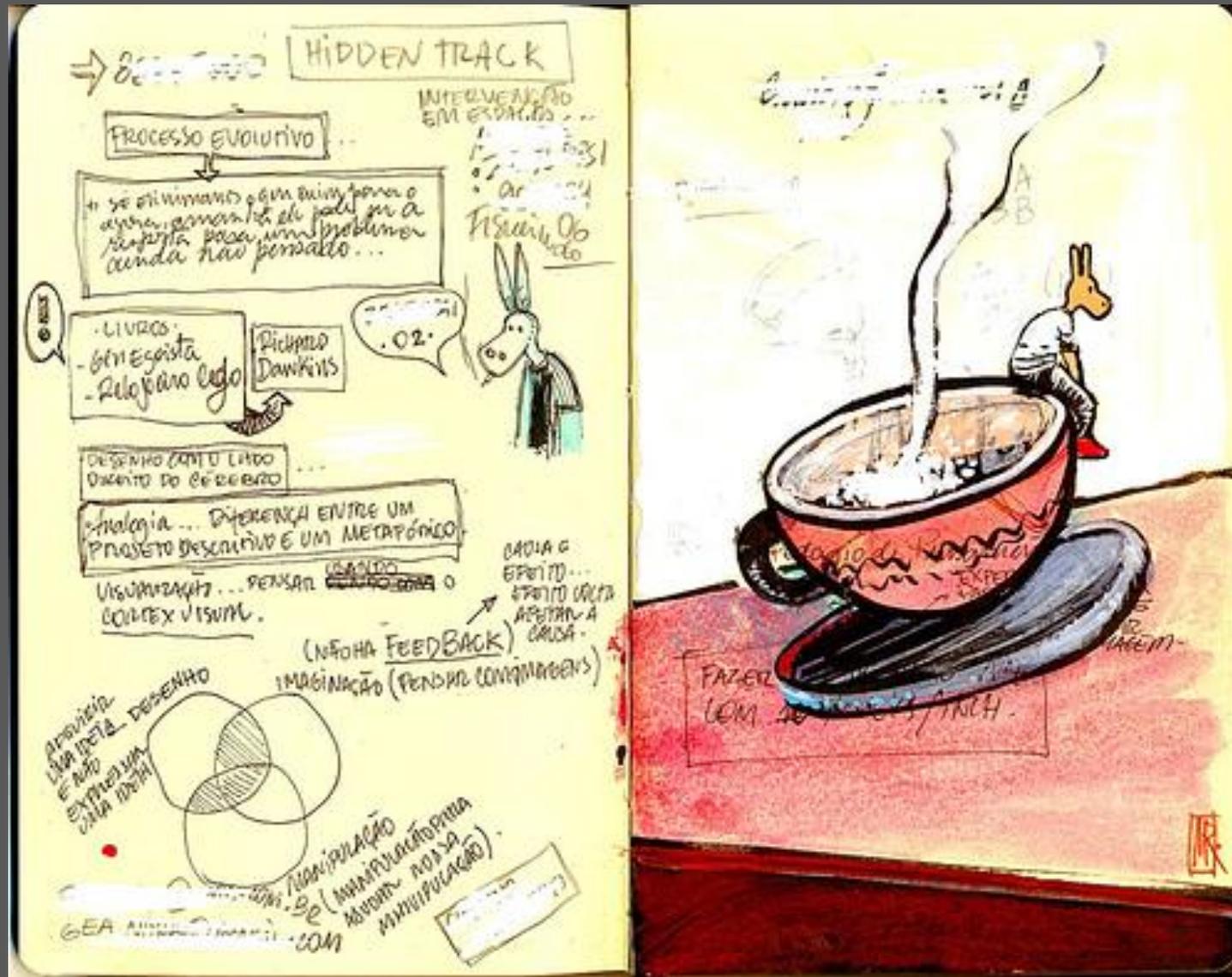
Large Ultraviolet Optical Infrared Surveyor (LUVOIR)

Habitable Exoplanet Observatory (HabEx)

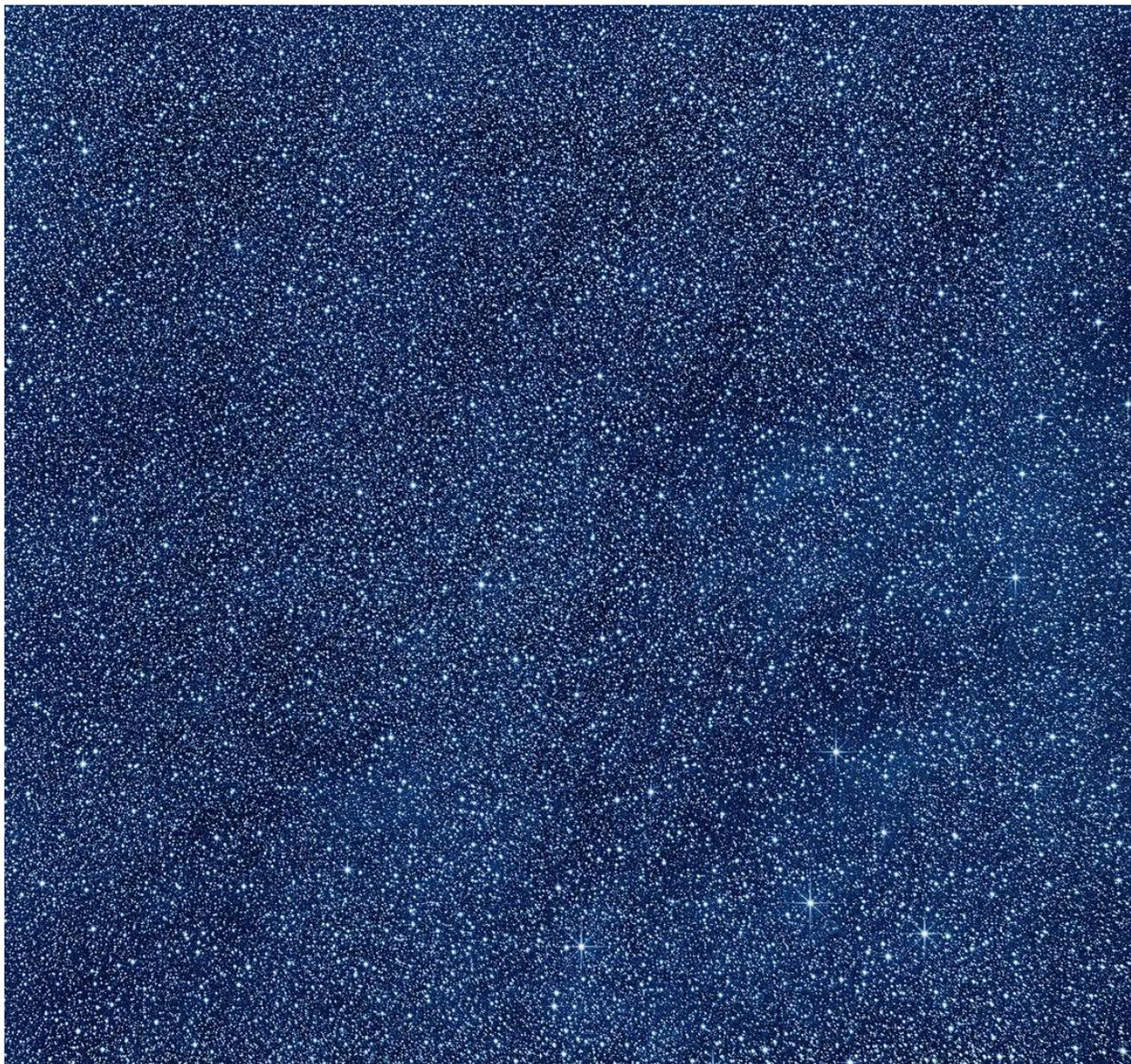
Обе обсерватории проектируются для получения прямых изображений и спектроскопии потенциально обитаемых миров и поиска биомаркеров.



# Короткие вопросы?



## Как открыть свою экзопланету? Kourovka Planet Search (KPS)

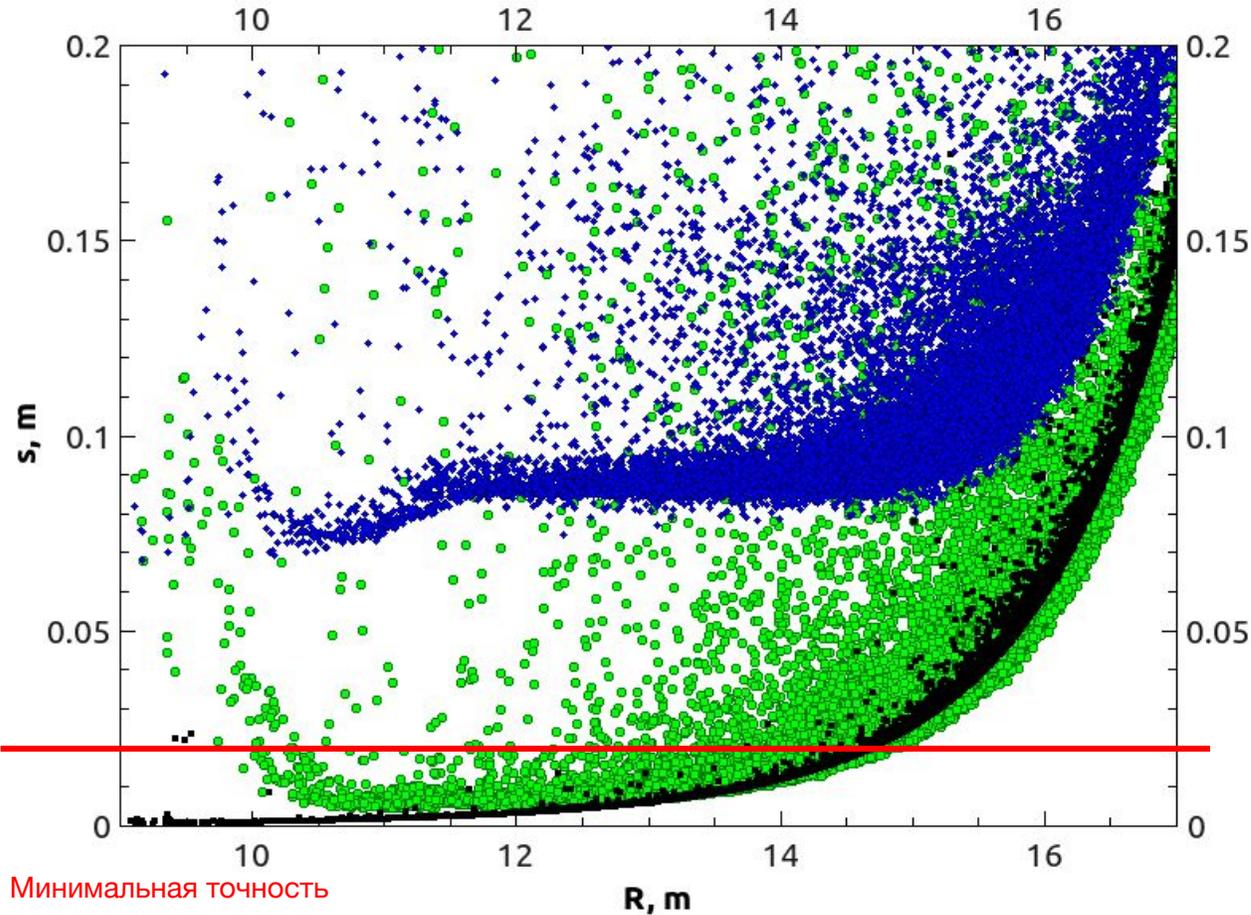


Чтобы обнаружить хотя бы один транзит необходимо получить большое количество данных. В 2012 году мы выбрали площадку с большой плотностью звезд, на одном нашем кадре их около 20 000.

Телескоп МАСТЕР-Урал позволяет наблюдать в автоматическом режиме и получать изображения звездного неба каждую ясную ночь. На первой стадии проекта было получено около 5000 кадров за 7 месяцев наблюдений.



## Как открыть свою экзопланету? Kourovka Planet Search (KPS)



Минимальная точность  
для регистрации  
экзопланет

Необходимо провести  $5000 \times 20\,000 = 100$  миллионов измерений и обработать их с нужной точностью! Руками это невозможно!

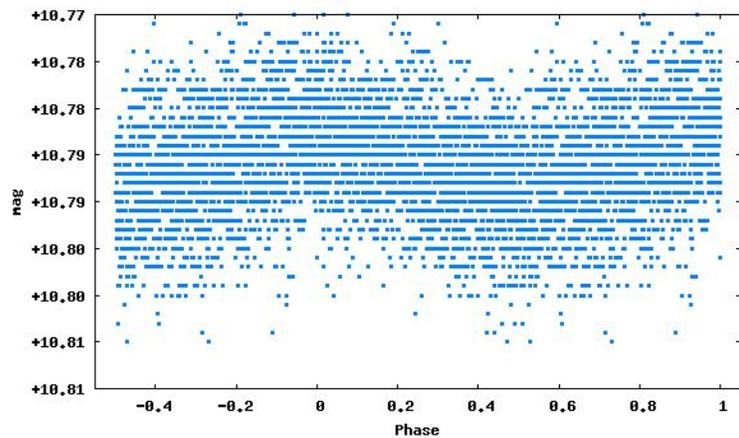
На основе готовых решений (Astrometry.net+IRAF) мы пишем скрипт для фотометрии наших 20 000 звезд. Вся обработка идет в автоматическом режиме и для всего объема данных занимает около 3 суток на неплохом компьютере.

Полученные измерения (синие точки) нас разочаровали. С такой точностью экзопланету не найти. Мы пишем собственную программу, позволяющую во много раз снизить уровень шума и повысить точность (зеленые точки). Программа обрабатывает 100 млн измерений и ищет среди звезд все переменные объекты.

На последнем этапе все же приходится просматривать большое количество кандидатов и принимать решение об их судьбе.

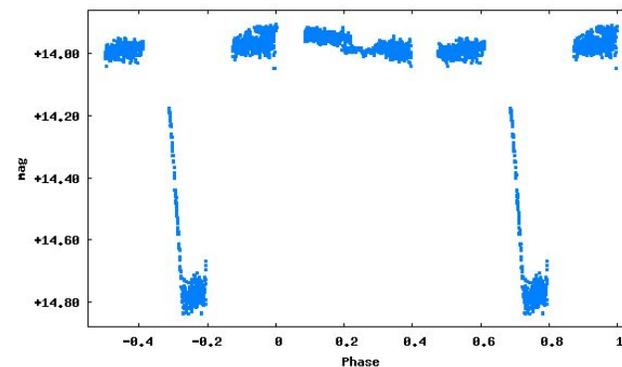
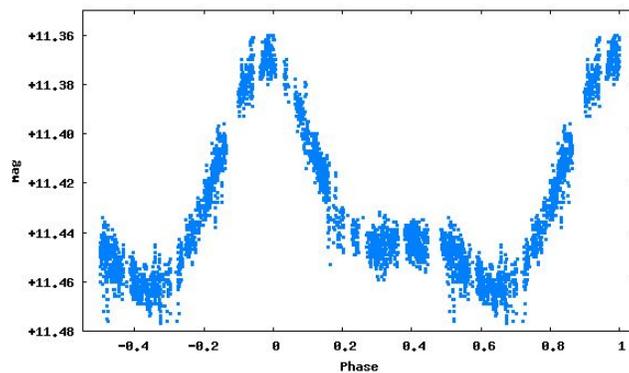
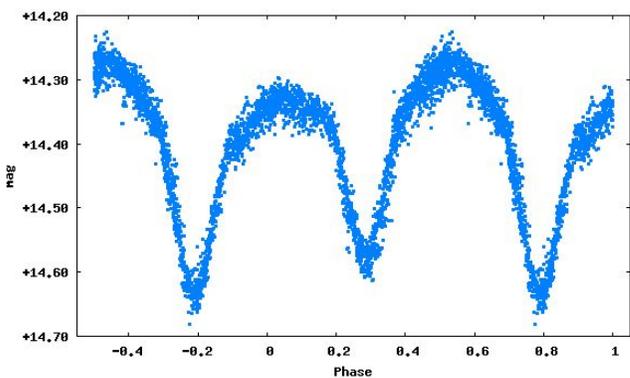
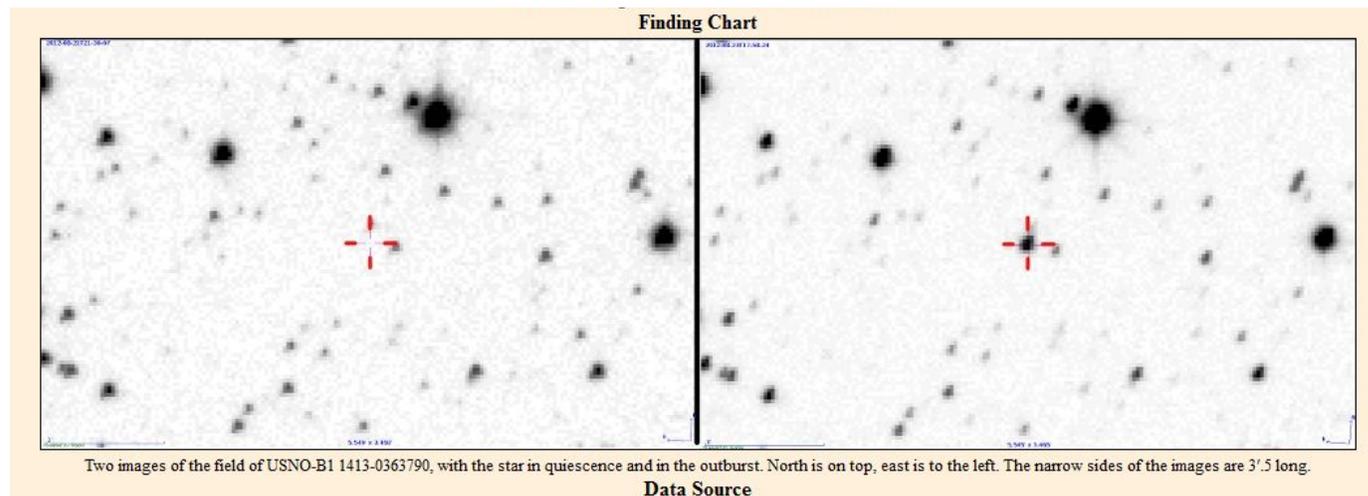
Первые кадры – май 2012 года. Последние кадры – декабрь. Уже в конце декабря нами открыто около 400 новых переменных звезд и первый кандидат в экзопланеты.

# Как открыть свою экзопланету? Kourovka Planet Search (KPS)



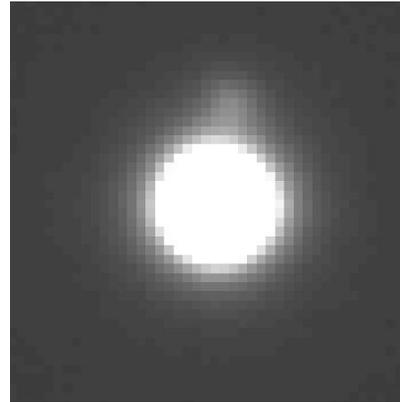
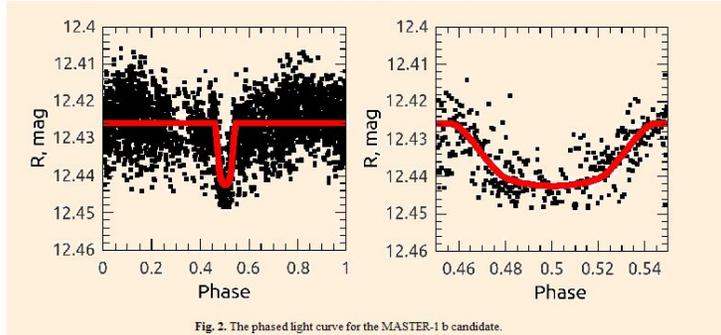
Переменная типа  
Дельты Щита с  
амплитудой изменения  
блеска 0.0055<sup>m</sup>

Вспышка карликовой Новой



# Как открыть свою экзопланету?

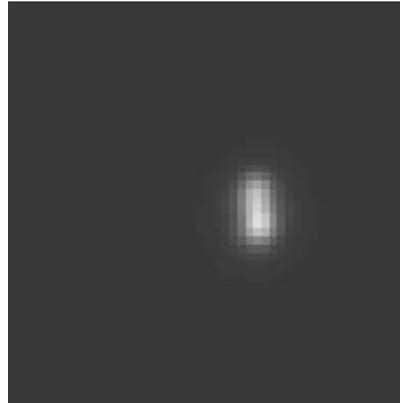
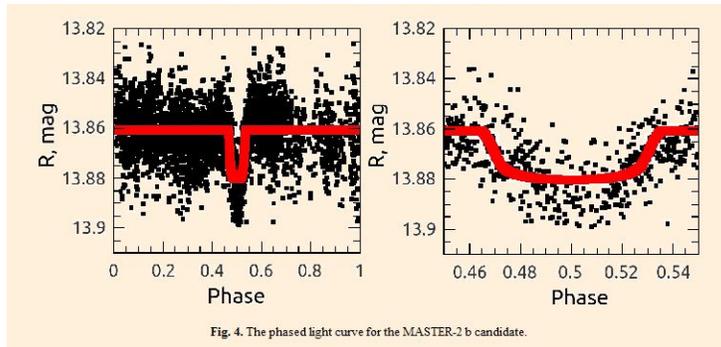
## Kourovka Planet Search (KPS)



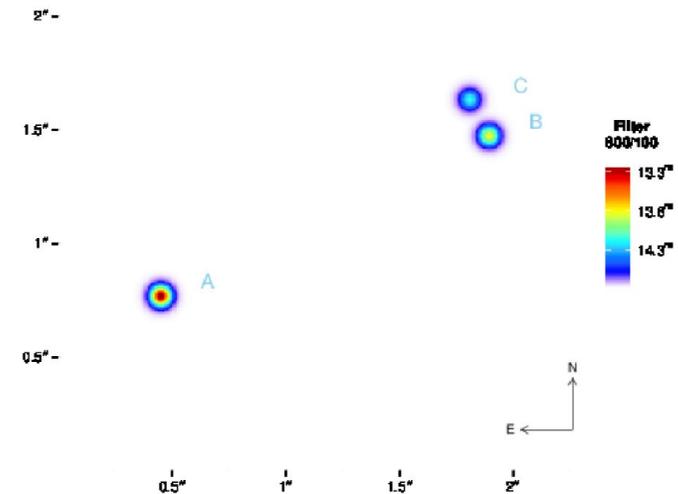
К началу 2013 года мы находим два кандидата в экзопланеты. Переменные имеют характерные амплитуды и кривые блеска.

На этом этапе возникает проблема верификации результата. Надо проверить самих себя. Для этого мы просим помочь наших коллег из CAO (6-метровый телескоп на Кавказе).

Оказалось, что наши кандидаты не одиночные звезды, а визуально-двойные и одна из звезд в системах переменная. Более того, одна из систем оказалась тройной звездой.

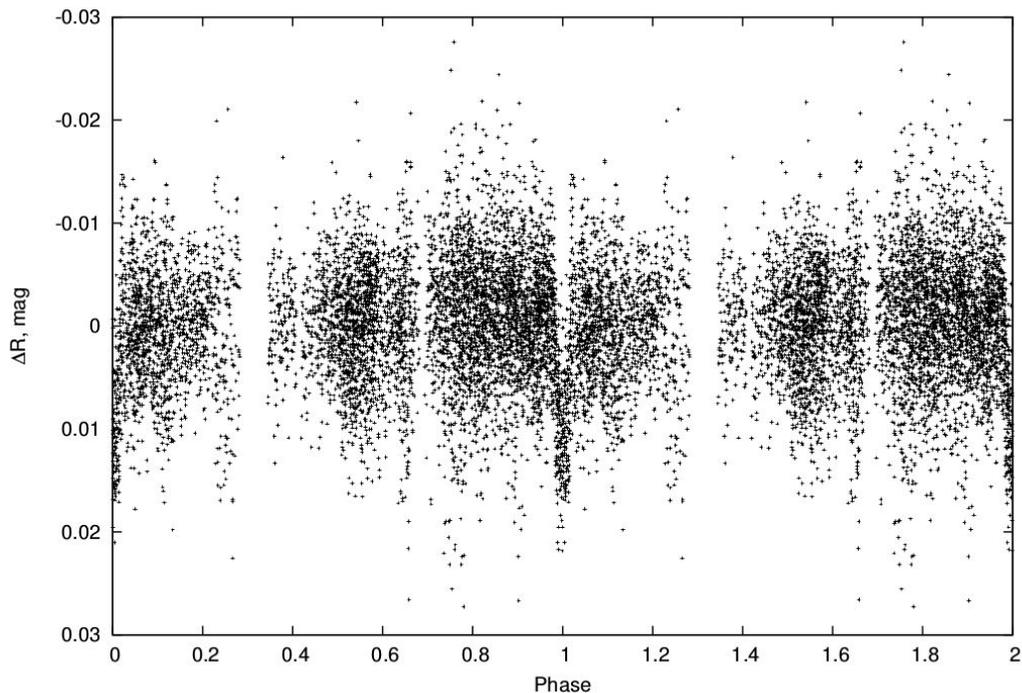


Мы открыли и закрыли два кандидата в экзопланеты. С одной стороны это неудача. С другой стороны у нас теперь есть машина стиральный!



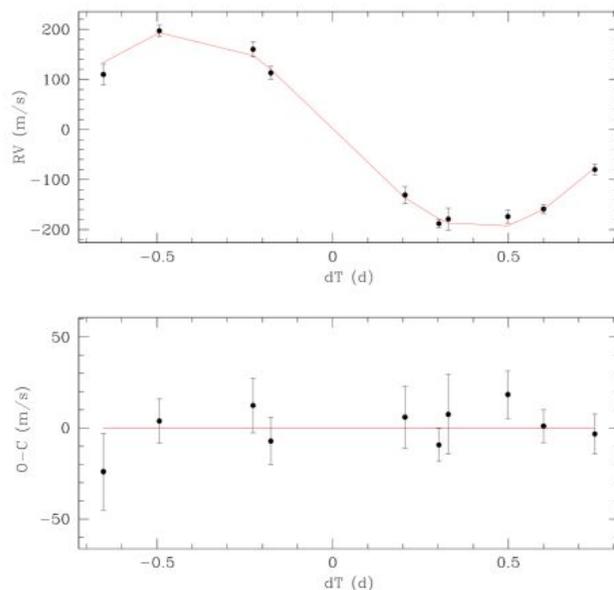
# Как открыть свою экзопланету?

## Kourovka Planet Search (KPS)



Кроме 6-метрового телескопа для проверки мы привлекли любителя астрономии Пола Бенни из города Актон, Массачусетс. Пол заинтересовался поиском экзопланет и получил еще несколько тысяч кадров. В новых данных обнаружился еще один кандидат.

Наблюдения на нескольких разных телескопах показали, что с высокой вероятностью это транзитная экзопланета. Окончательное доказательство этого было получено методом лучевых скоростей на спектрографе SOPHIE



**Figure 5.** SOPHIE RV measurements phase-folded on the orbital period with the imposed Keplerian model.

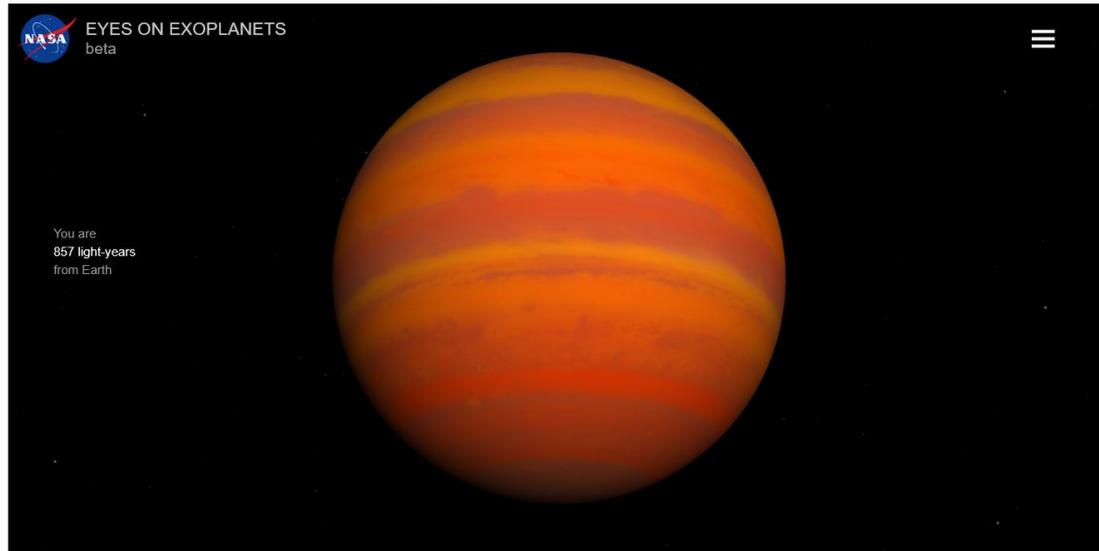


# Как открыть свою экзопланету?

## Kourovka Planet Search (KPS)

EXOPLANET CATALOG

### KPS-1 b



KPS-1 b is a gas giant exoplanet that orbits a K-type star. Its mass is 1.09 Jupiters, it takes 1.7 days to complete one orbit of its star, and is 0.0269 AU from its star. Its discovery was announced in 2018.

[Back to list](#)

<b>PLANET TYPE</b> Gas Giant	<b>DISCOVERY DATE</b> 2018
<b>MASS</b> 1.09 Jupiters	<b>PLANET RADIUS</b> 1.03 x Jupiter
<b>ORBITAL RADIUS</b> 0.0269 AU	<b>ORBITAL PERIOD</b> 1.7 days
<b>ECCENTRICITY</b> 0.0	<b>DETECTION METHOD</b> Transit

### KPS-1B: THE FIRST TRANSITING EXOPLANET DISCOVERED USING AMATEUR ASTRONOMER'S WIDE-FIELD CCD DATA

ARTEM BURDANOV,<sup>1</sup> PAUL BENNI,<sup>2</sup> EUGENE SOKOV,<sup>3,4</sup> VADIM KRUSHINSKY,<sup>5</sup> ALEXANDER POPOV,<sup>5</sup> LAETTITIA DELREZ,<sup>6</sup> MICHAEL GILLON,<sup>1</sup> GUILLAUME HÉBRARD,<sup>7,8</sup> MAGALI DELEUIL,<sup>9</sup> PAUL A. WILSON,<sup>7</sup> OLIVIER DEMANGEON,<sup>10</sup> ÖZGÜR BAŞTÜRK,<sup>11</sup> ERIKA PAKŠTIENE,<sup>12</sup> IRAIDA SOKOVA,<sup>3</sup> SERGEI A. RUSOV,<sup>3</sup> VLADIMIR V. DYACHENKO,<sup>4</sup> DENIS A. RASTEGAEV,<sup>4</sup> ANATOLIY BESKAKOTOV,<sup>4</sup> ALESSANDRO MARCHINI,<sup>13</sup> MARC BRETTON,<sup>14</sup> STAN SHADICK,<sup>15</sup> AND KIRILL IVANOV<sup>16</sup>

<sup>1</sup>Space sciences, Technologies and Astrophysics Research (STAR) Institute, Université de Liège, Allée du 6 Août 17, 4000 Liège, Belgium

<sup>2</sup>Acton Sky Portal (Private Observatory), Acton, MA, USA

<sup>3</sup>Central Astronomical Observatory at Pulkovo of Russian Academy of Sciences, Pulkovskoe shosse d. 65, St. Petersburg, Russia, 196140

<sup>4</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnij Arkhyz, Russia, 369167

<sup>5</sup>Ural Federal University, ul. Mira d. 19, Yekaterinburg, Russia, 620002

<sup>6</sup>Astrophysics Group, Cavendish Laboratory, J.J. Thomson Avenue, Cambridge CB3 0HE, UK

<sup>7</sup>Institut d'Astrophysique de Paris, UMR 7095 CNRS, Université Pierre & Marie Curie, 98bis boulevard Arago, 75014 Paris, France

<sup>8</sup>Observatoire de Haute-Provence, Université d'Aix-Marseille & CNRS, 04870 Saint Michel l' Observatoire, France

<sup>9</sup>Aix Marseille Université, CNRS, LAM (Laboratoire d'Astrophysique de Marseille) UMR 7326, 13388 Marseille, France

<sup>10</sup>Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço, Universidade do Porto, CAUP, Rua das Estrelas, 4150-762 Porto, Portugal

<sup>11</sup>Ankara University, Faculty of Science, Department of Astronomy and Space Science, TR-06100 Tandogan, Ankara, Turkey

<sup>12</sup>Institute of Theoretical Physics and Astronomy, Vilnius University, Goštauto 12, Vilnius, LT-01108, Lithuania

<sup>13</sup>Astronomical Observatory - DSFTA, University of Siena, Via Roma 56, 53100 Siena, Italy

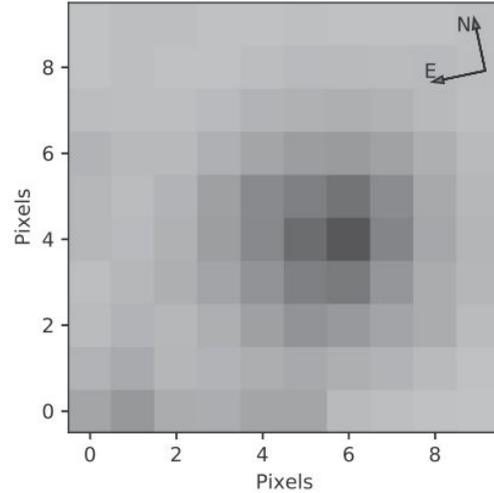
<sup>14</sup>Baronnies Provençales Observatory, Hautes Alpes - Parc Naturel Régional des Baronnies Provençales, 05150 Moydans, France

<sup>15</sup>Physics and Engineering Physics Department, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, Canada, S7N 5E2

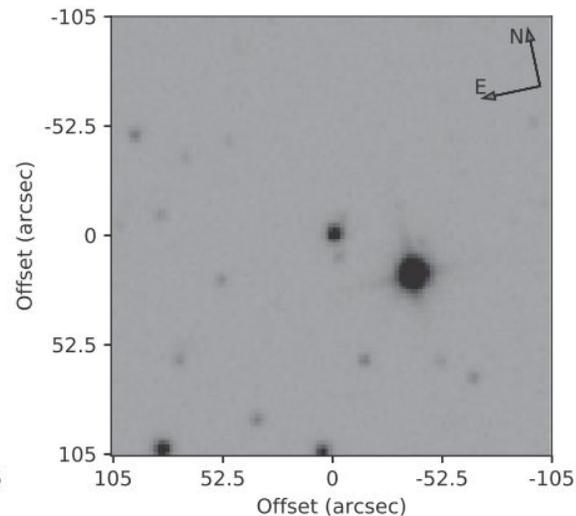
<sup>16</sup>Irkutsk State University, ul. Karla Marxa d. 1, Irkutsk, Russia, 664003

# Как открыть свою экзопланету?

## Galactic Plane exoplanet Survey (GPX)



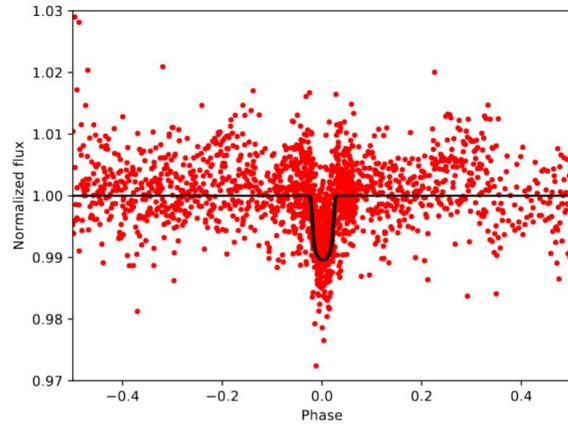
После запуска космической обсерватории TESS поиск экзопланет с помощью наземных телескопов кажется малоэффективным – TESS ведет обзор всего неба и способен обнаруживать очень слабые колебания блеска вызванные транзитами экзопланет. Тем не менее, есть ниша в которой эффективность небольших наземных телескопов выше. Угловое разрешение TESS очень мало, и близкие звезды сливаются в одно большое пятно. Даже небольшой любительский телескоп имеет разрешение в 10-20 раз больше и позволяет искать экзопланеты в плотных звездных полях, например в плоскости Млечного пути и рассеянных скоплениях.



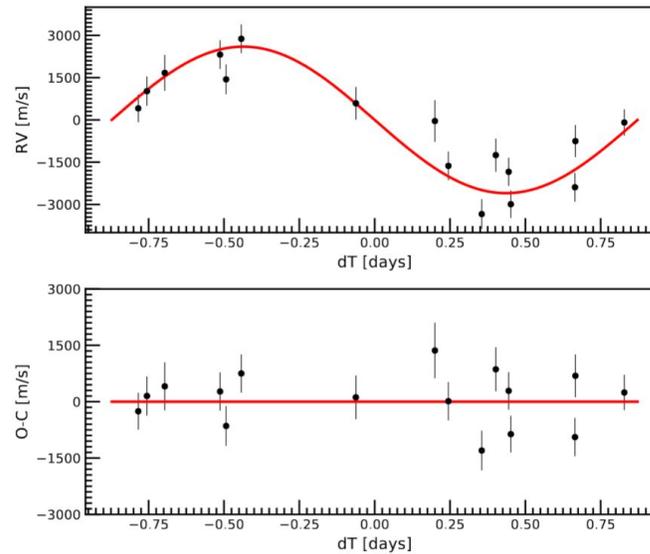
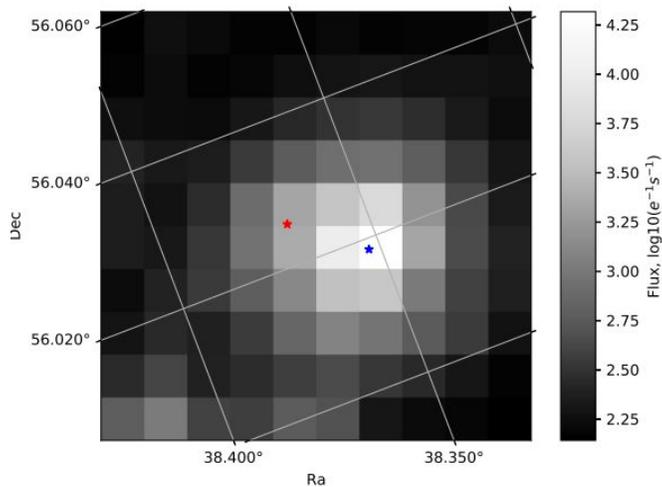
GPX – проект по поиску экзопланет в плоскости Галактики.

Обзор проводится Полом Бенни в своей домашней обсерватории на телескопе диаметром 28см. Для обработки данных мы предоставили ему пакет программного обеспечения и помогаем с проверкой кандидатов на больших телескопах.

# Как открыть свою экзопланету? Galactic Plane eXoplanet Survey (GPX)



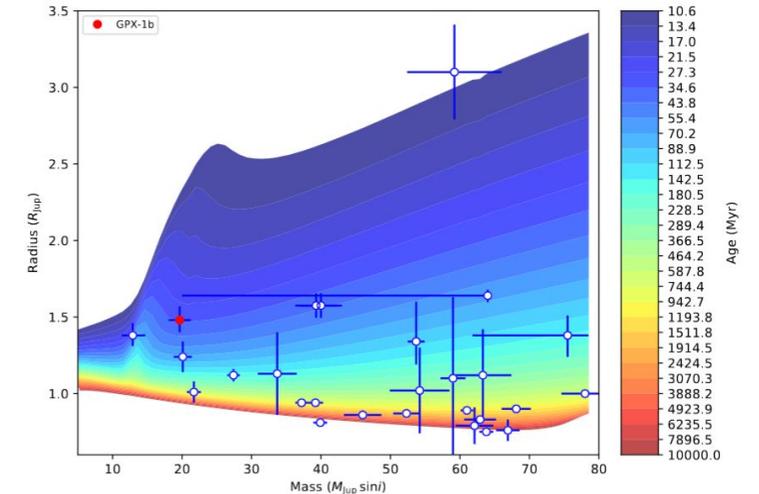
**Figure 2.** GPX discovery light curve as obtained with the RASA 11" wide-field telescope and folded with  $\sim 1.75$  d period. The solid black line represents the best-fit transit model.



**Figure 8.** Top: SOPHIE radial velocity (RV) measurements of GPX-1 phase-folded at the 1.75 days period of the BD with the imposed best-fit Keplerian model. Bottom: best-fit residuals.

Пол – везунчик. В данных своего обзора он нашел еще одного кандидата в экзопланеты. Самое интересное, что TESS наблюдал эту звезду, но не обнаружил ничего интересного. Транзитная система находится недалеко от яркой звезды и полностью утонула в ее ярком свете.

Метод лучевых скоростей показал, что это не обычная экзопланета, а молодой коричневый карлик – объект с массой в 20 раз больше массы Юпитера.

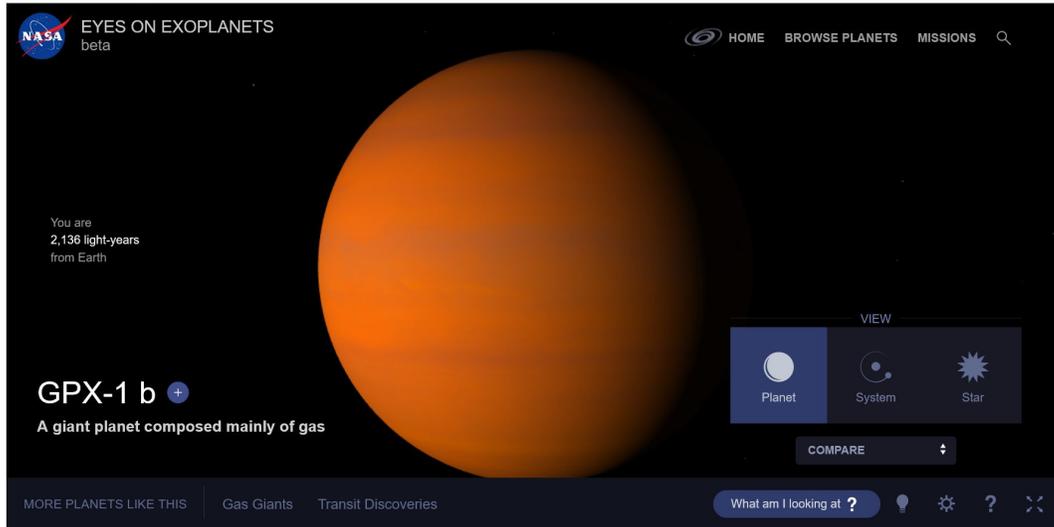


**Figure 11.** Mass-radius relationship of a set of known transiting brown dwarfs ( $\sim 13$ - $80 M_{\text{Jup}}$ ) as of May 2020 and isochrones from the evolutionary models of Phillips et al. (2020).

# Как открыть свою экзопланету?

## Galactic Plane eXoplanet Survey (GPX)

### GPX-1 b



GPX-1 b is a gas giant exoplanet that orbits an F-type star. Its mass is 19.7 Jupiters, it takes 1.7 days to complete one orbit of its star, and is 0.0338 AU from its star. Its discovery was announced in 2021.

[Back to list](#)

<b>PLANET TYPE</b>	Gas Giant	<b>DISCOVERY DATE</b>	2021
<b>MASS</b>	19.7 Jupiters	<b>PLANET RADIUS</b>	1.47 x Jupiter
<b>ORBITAL RADIUS</b>	0.0338 AU	<b>ORBITAL PERIOD</b>	1.7 days
<b>ECCENTRICITY</b>	0.0	<b>DETECTION METHOD</b>	<a href="#">Transit</a>

## Discovery of a young low-mass brown dwarf transiting a fast-rotating F-type star by the Galactic Plane eXoplanet (GPX) survey

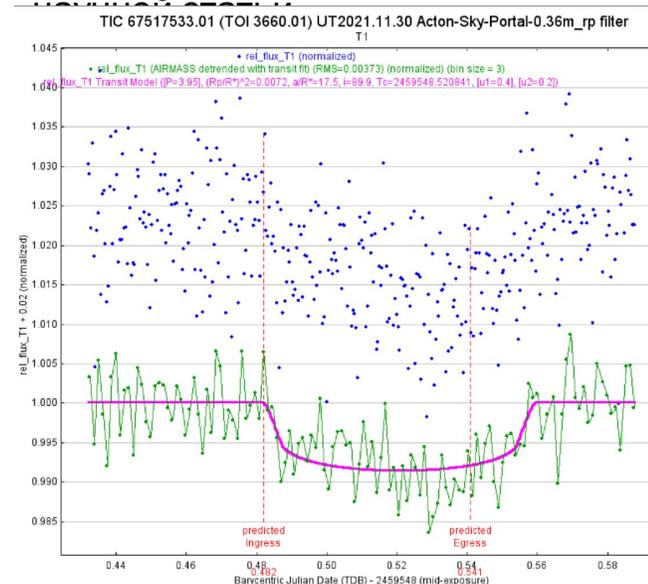
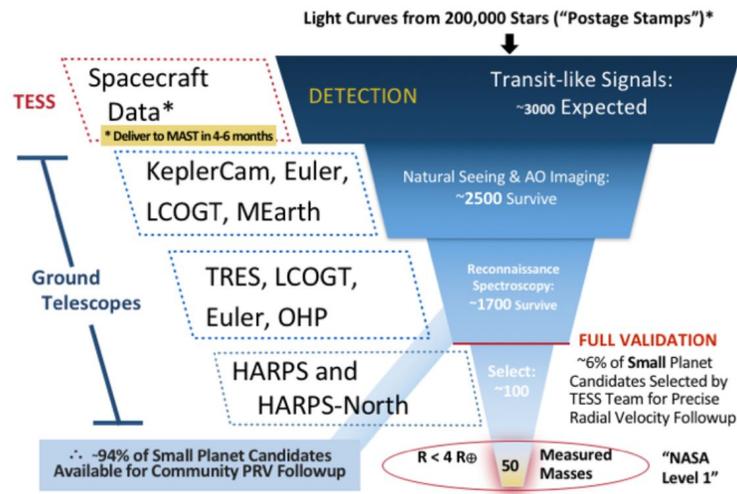
P. Benni<sup>1\*</sup>, A. Y. Burdanov<sup>2,3\*</sup>, V. V. Krushinsky<sup>4</sup>, A. Bonfanti<sup>5,6</sup>, G. Hébrard<sup>7,8</sup>, J. M. Almenara<sup>9</sup>, S. Dalal<sup>7</sup>, O. D. S. Demangeon<sup>10</sup>, M. Tsantaki<sup>11</sup>, J. Pepper<sup>12</sup>, K. G. Stassun<sup>13</sup>, A. Vanderburg<sup>14,15</sup>, A. Belinski<sup>16</sup>, F. Kashaev<sup>17</sup>, K. Barkaoui<sup>18,19</sup>, T. Kim<sup>20</sup>, W. Kang<sup>20</sup>, K. Antonyuk<sup>21</sup>, V. V. Dyachenko<sup>22</sup>, D. A. Rastegaev<sup>22</sup>, A. Beskakov<sup>22,23</sup>, A. A. Mitrofanova<sup>22</sup>, F. J. Pozuelos<sup>18,6</sup>, A. Popov<sup>24</sup>, F. Kiefer<sup>7</sup>, P. A. Wilson<sup>25,26</sup>, G. Ricker<sup>27</sup>, R. Vanderspek<sup>27</sup>, D. W. Latham<sup>28</sup>, S. Seager<sup>27,2,29</sup>, J. M. Jenkins<sup>30</sup>, E. Sokov<sup>23,31</sup>, I. Sokova<sup>23,31</sup>, A. Marchini<sup>32</sup>, R. Papini<sup>33</sup>, F. Salviaggio<sup>33</sup>, M. Banfi<sup>33</sup>, Ö. Baştürk<sup>34</sup>, Ş. Torun<sup>34</sup>, S. Yalçınkaya<sup>34</sup>, K. Ivanov<sup>35</sup>, G. Valyavin<sup>22,21,23</sup>, E. Jehin<sup>6</sup>, M. Gillon<sup>18</sup>, E. Pakštienė<sup>36</sup>, V.-P. Hentunen<sup>37</sup>, S. Shadick<sup>38</sup>, M. Bretton<sup>39</sup>, A. Wünsche<sup>39</sup>, J. Garlitz<sup>40</sup>, Y. Jongen<sup>41</sup>, D. Molina<sup>42</sup>, E. Girardin<sup>43</sup>, F. Grau Horta<sup>44</sup>, R. Naves<sup>45</sup>, Z. Benkhaldoun<sup>19</sup>, M. D. Jøner<sup>46</sup>, M. Spencer<sup>46</sup>, A. Bieryla<sup>28</sup>, D. J. Stevens<sup>47,48,49</sup>, E. L. N. Jensen<sup>50</sup>, K. A. Collins<sup>28</sup>, D. Charbonneau<sup>28</sup>, E. V. Quintana<sup>51</sup>, S. E. Mullally<sup>52</sup>, C. E. Henze<sup>30</sup>

# Как вы можете помочь искать экзопланеты?

The screenshot shows the Zooniverse Planet Hunters TESS website. At the top, there's a 'ZOOVERSE TALK' section with a 'Join in' button. Below that are three subject cards for 'SUBJECT 71602891', 'SUBJECT 71615123', and 'SUBJECT 71619810'. A 'PLANET HUNTERS TESS STATISTICS' section features a progress bar at 0% and statistics: 32,351 Volunteers, 19,996 Subjects, 105,518 Classifications, and 1 Completed subject. A 'MESSAGE FROM THE RESEARCHER' section includes a photo of Nora Eisner and text about finding complex planetary systems. An 'ABOUT PLANET HUNTERS TESS' section provides a welcome message and details about the TESS mission.

С космической обсерватории TESS поступает огромное количество данных и вы можете помочь их анализировать. На платформе [Zooniverse](https://www.zooniverse.org) есть проект по поиску транзитных явлений в данных TESS и вы можете участвовать в нем даже без специальной подготовки. Требуется минимальные знания английского.

Если у вас есть возможность проводить собственные наблюдения, то вы можете помочь проверять кандидаты TESS. Для этого необходим телескоп диаметром от 10 см, астрономическая цифровая камера и немного аккуратности. Для участников проекта TESS Follow-up Observing Program есть подробные рекомендации и предоставляется программное обеспечение. Если полученные вами данные будут использованы при подготовке публикации, то вы станете соавтором научной статьи.



## Почитать и посмотреть

<https://arxiv.org/abs/1705.05791> – обзор посвященный поиску биомаркеров на экзопланетах

<https://arxiv.org/abs/1712.07479> – обзор посвященный задачам экзопланетологии и будущим методам исследования

<https://www.youtube.com/watch?v=H0pZyX-ZrvA> – короткое выступление TG Tan на TEDex. Открываем экзопланеты и сверхновые у себя на заднем дворе

<https://www.astro.louisville.edu/software/astroimagej/> – AstroImageJ, программа для обработки наблюдений экзопланет на небольших телескопах