

Новые земли у других звезд

Как открывают экзопланеты

Статистика

Где ближайшие земли пригодные для обитания?

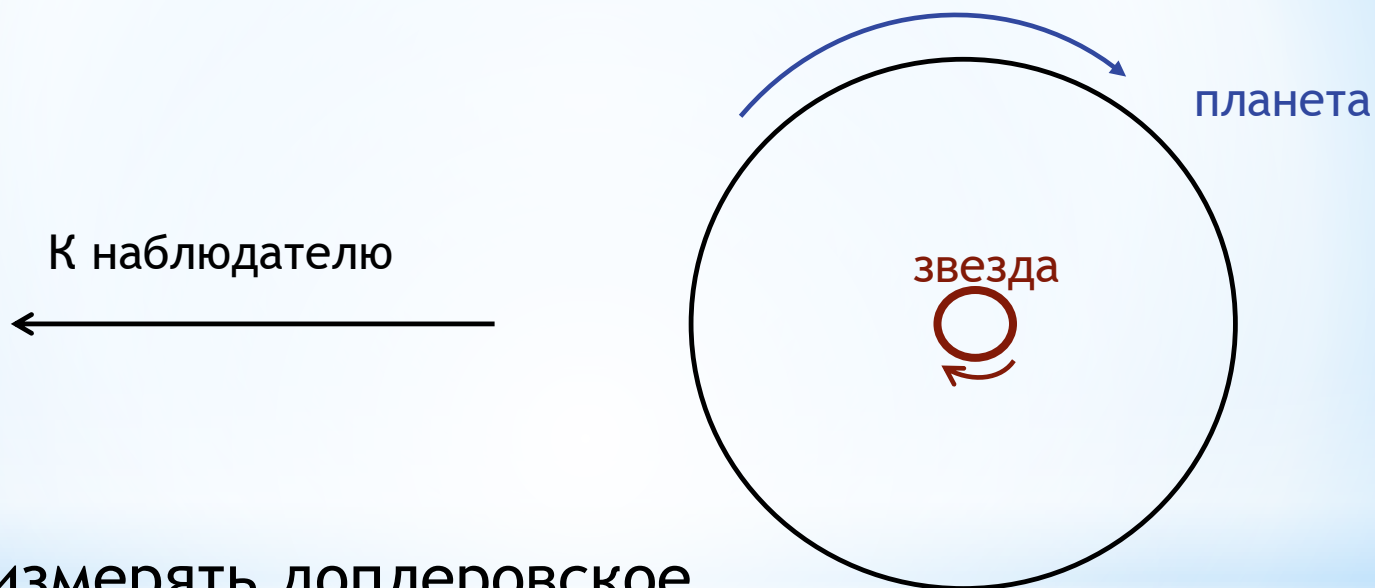
Сопутствующие мистерии

Можно ли узнать есть ли на них жизнь?

Можно ли туда отправить зонд или посылку?

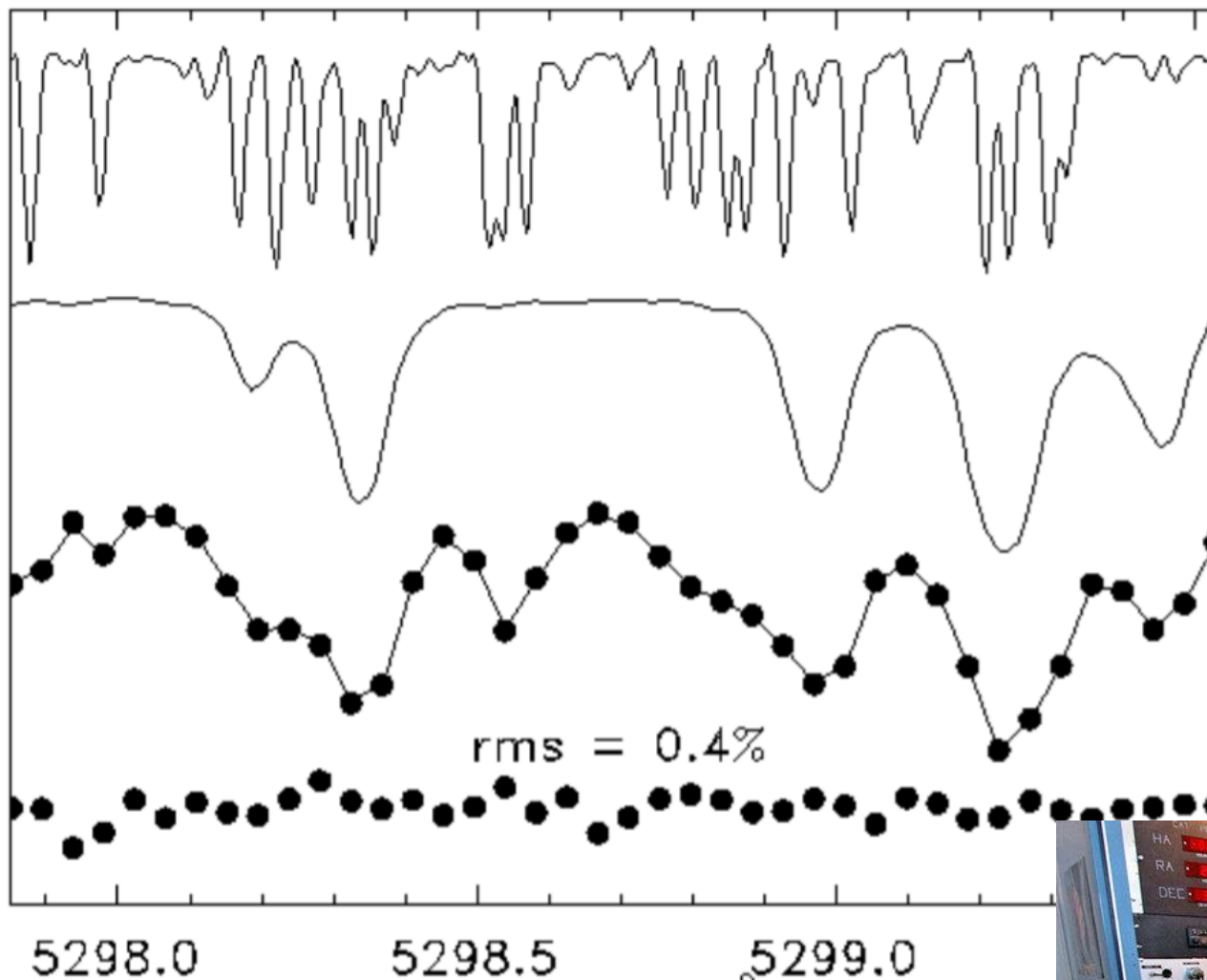
Исторически первый метод

Колебания лучевой скорости звезды



Надо измерять доплеровское
смещение спектра на $1/1000$
($1/10000$) ширины линий

Юпитер -> Солнце 10 м/с Земля -> Солнце - 10 см/с



Спектр йода

**Шаблонный
спектр звезды**

Суперпозиция

Остаток x 10

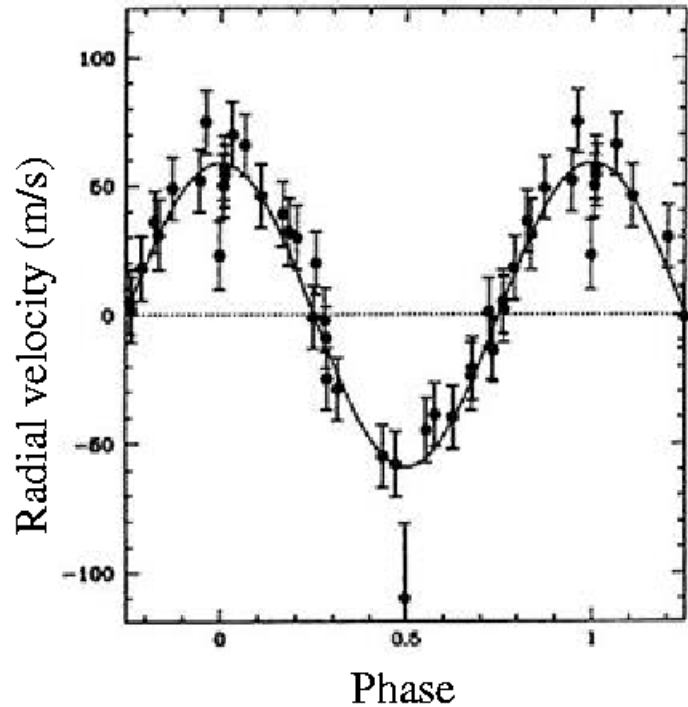
**Как измерить смещение спектра на
1/1000 ширины линий?**

**На рисунке - меньше одной сотой
ширины спектра**



Первая экзопланета у нормальной звезды

Майор и Келос 1995



51 Пегаса

Минимальная масса $0.47 M_J$

Орбитальный период - 4.23 дня, радиус орбиты 0.057 а.е.

Такое никому и в страшном сне не могло присниться!

Вторая половина 90-х: сплошные горячие юпитеры, теплые юпитеры,

В старой космогонической теории горячих юпитеров быть не должно. Вблизи от звезды им не из чего образоваться.

Теория аккреции твердых частиц. На образование планет
нужны десятки миллионов лет

Гравитационный коллапс газа и пыли на периферии системы. Почти мгновенно.

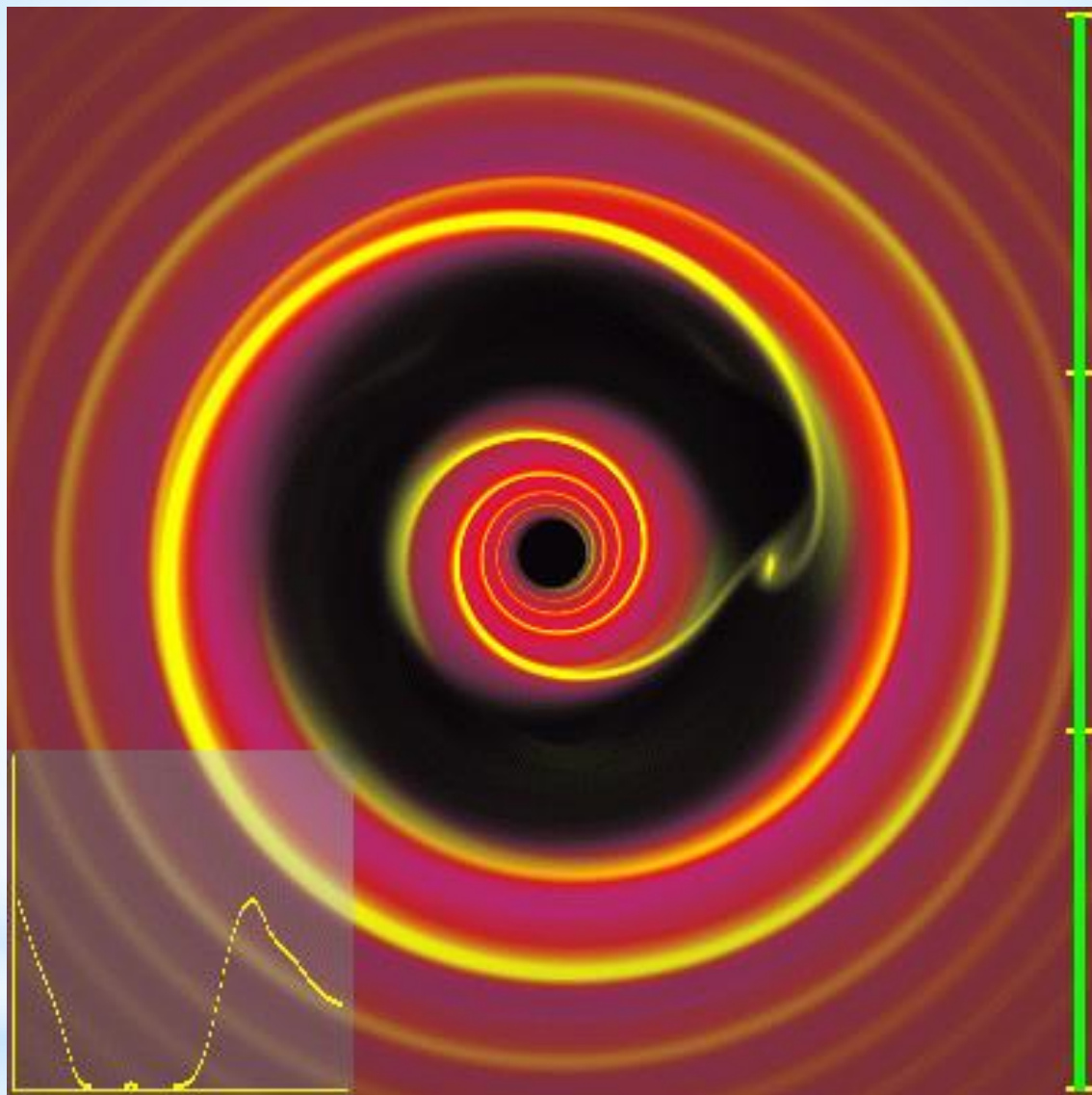
Так откуда взялись горячие юпитеры?

«Мигрировали» с периферии к звезде!

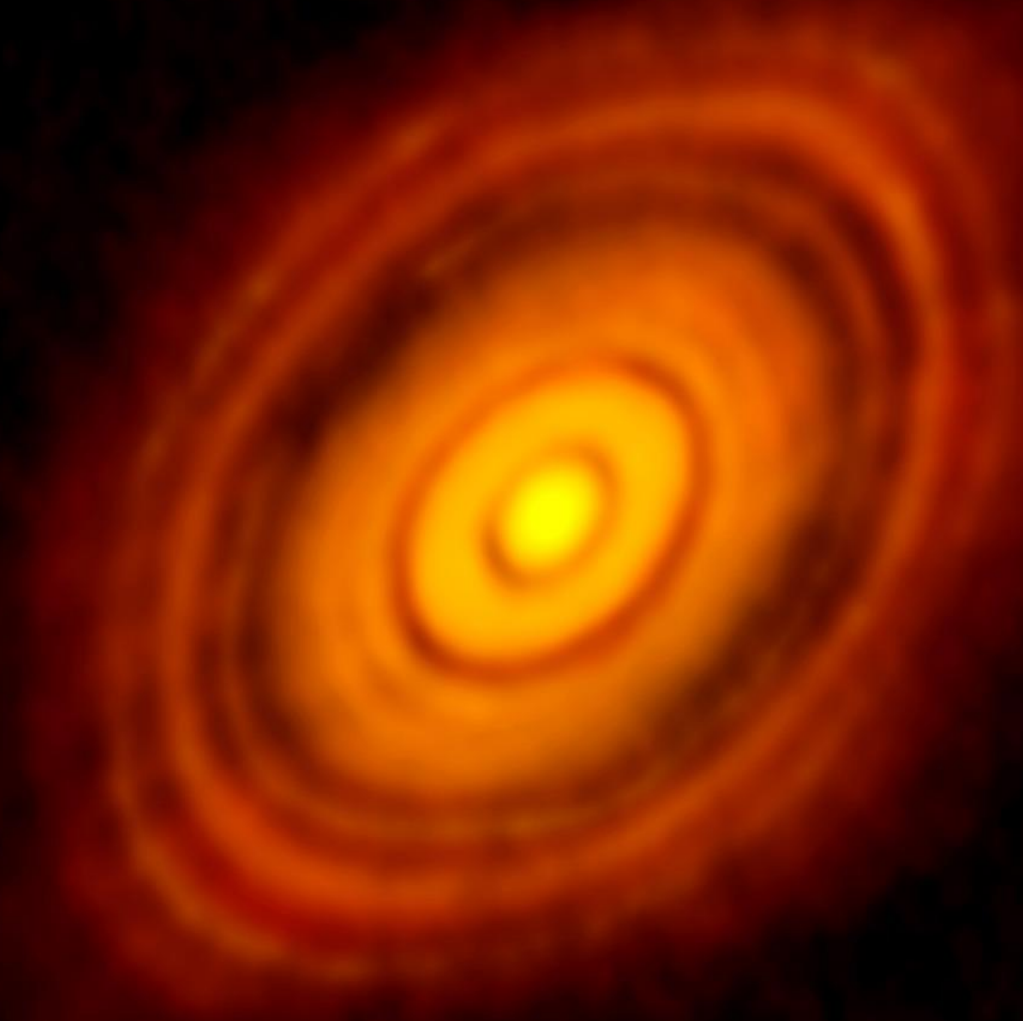
Вторая половина 90-х: пересмотр теории формирования планетных систем: гравитационный коллапс в протопланетном диске + миграция.
Аккреция остается для внутренних планет

Массовое рождение планет-гигантов
Численное моделирование

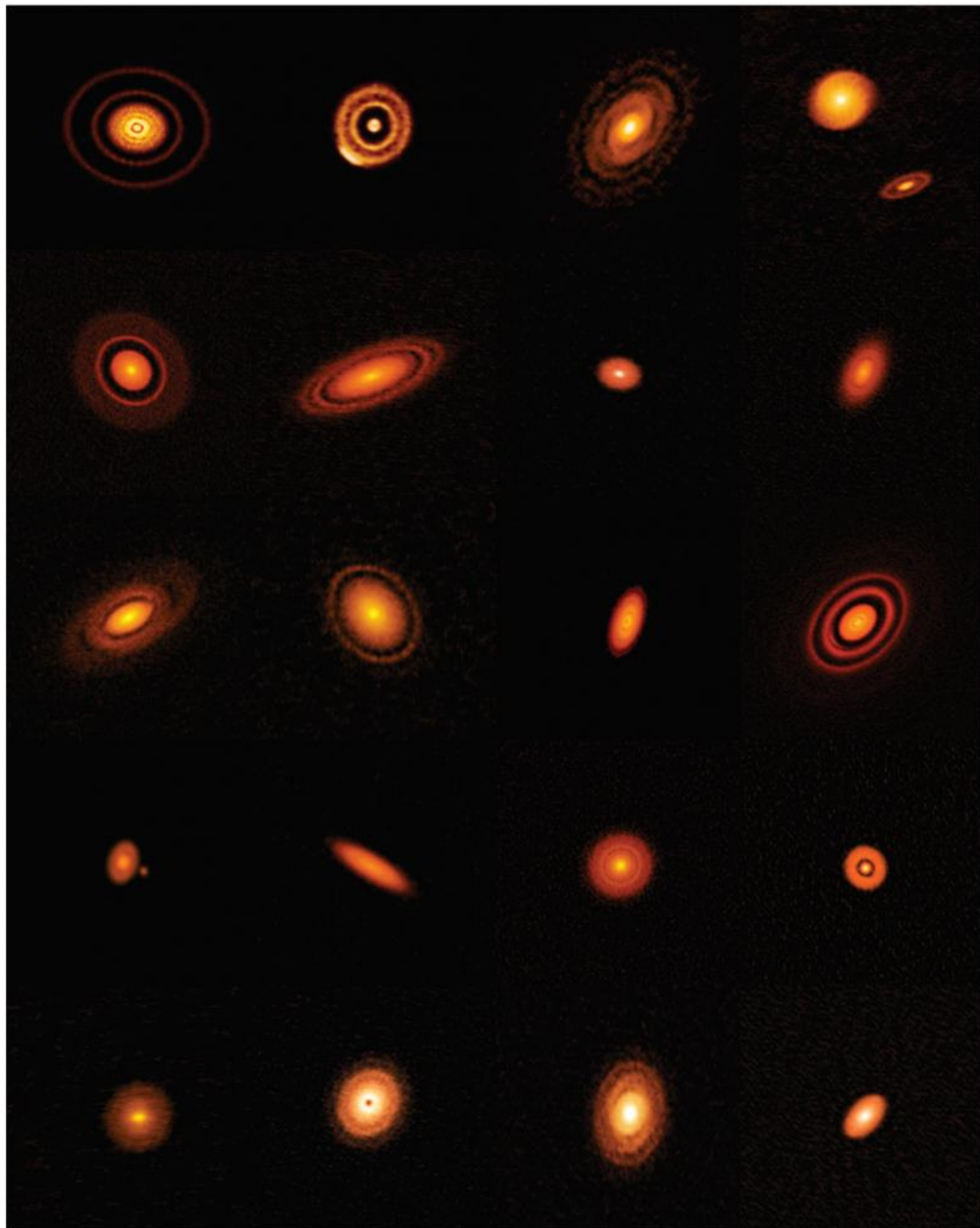




Компьютерная симуляция



Реальность



ALMA

Второй метод: транзиты планет

Планету можно увидеть, если ее орбита лежит в плоскости луча зрения от наблюдателя и планета периодически проходит по диску звезды

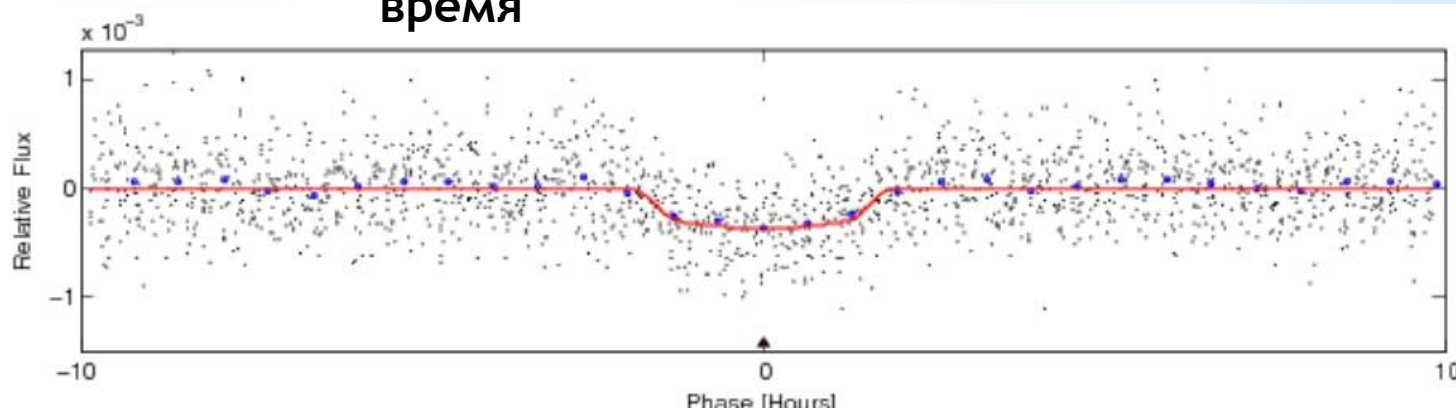
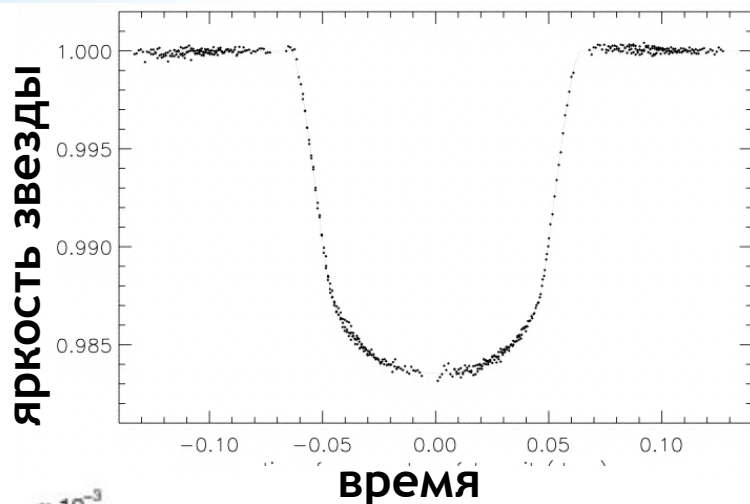
Революция «Кеплера»
2009

Юпитер

Вероятность
транзитов
1/1000

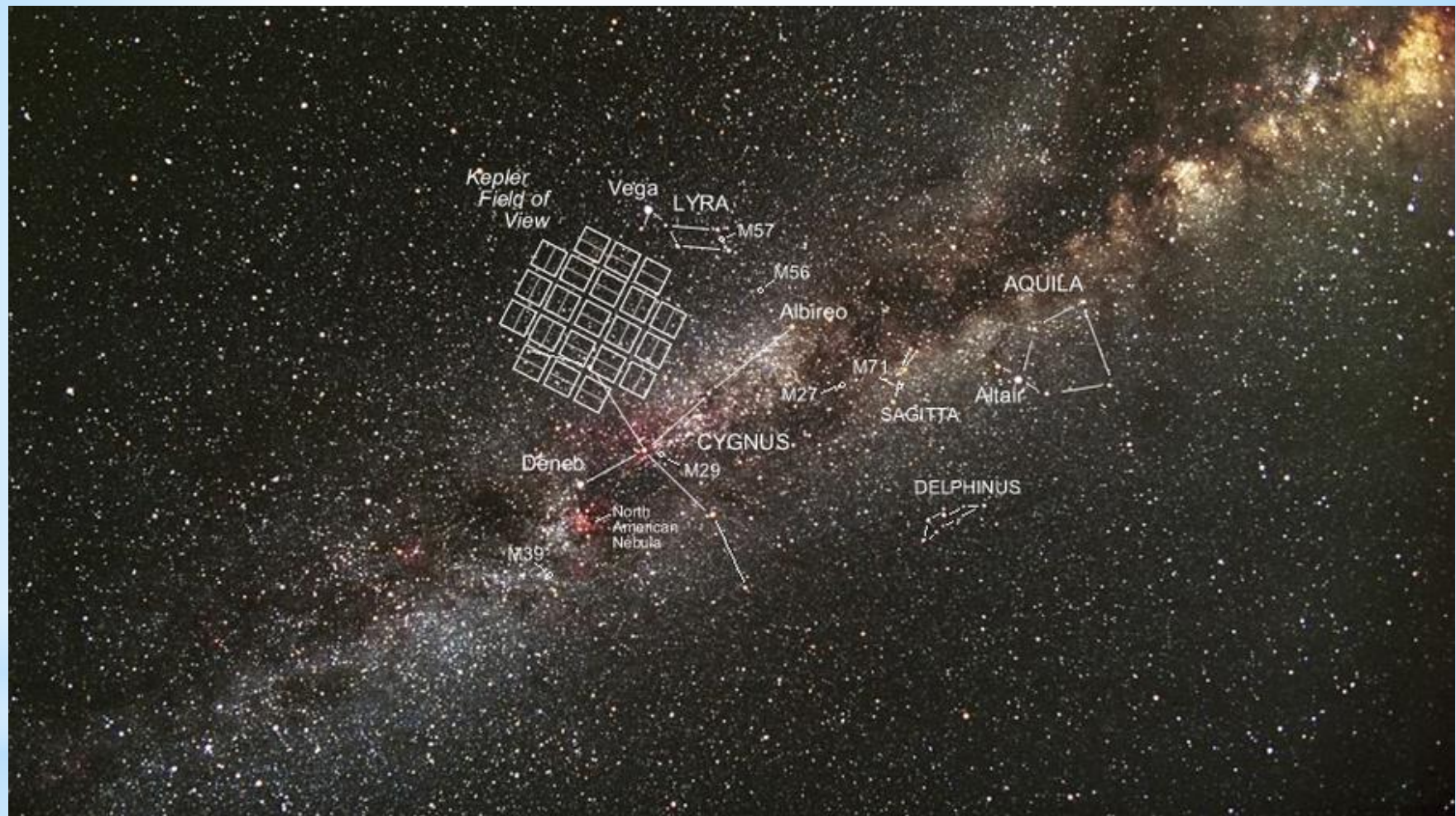
Земля

Вероятность
транзитов
1/200

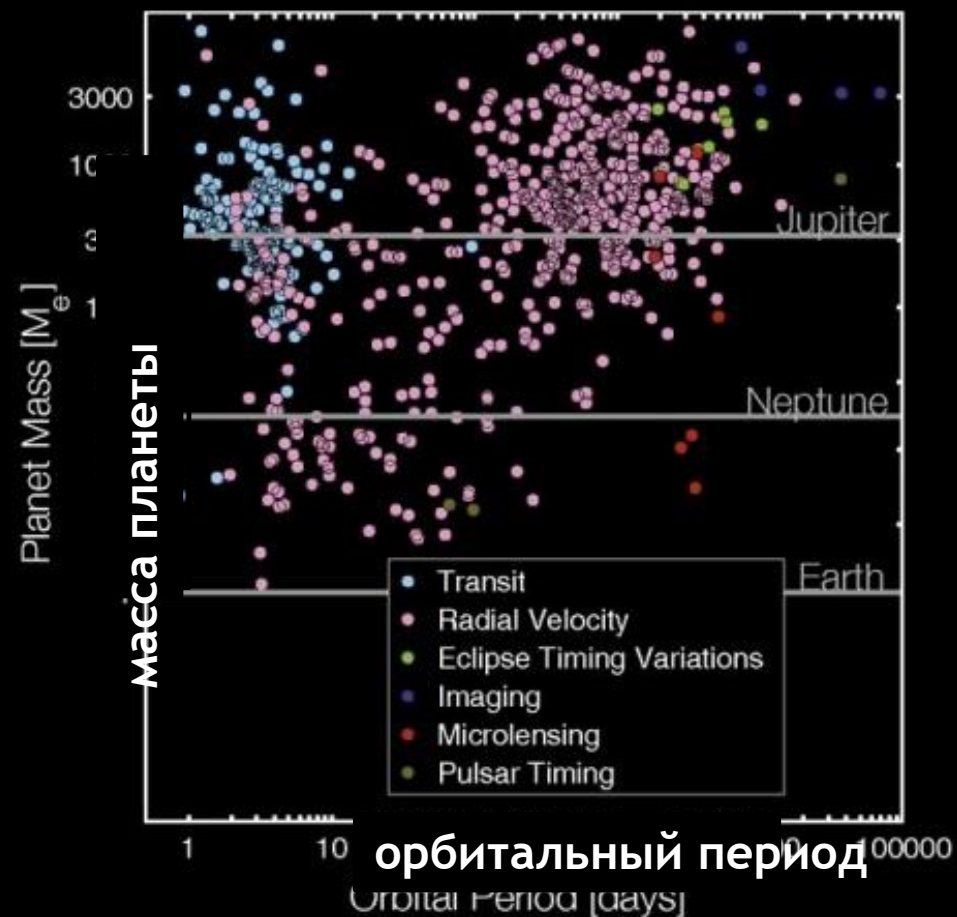


Главная часть «Кеплера» - ПЗС матрицы



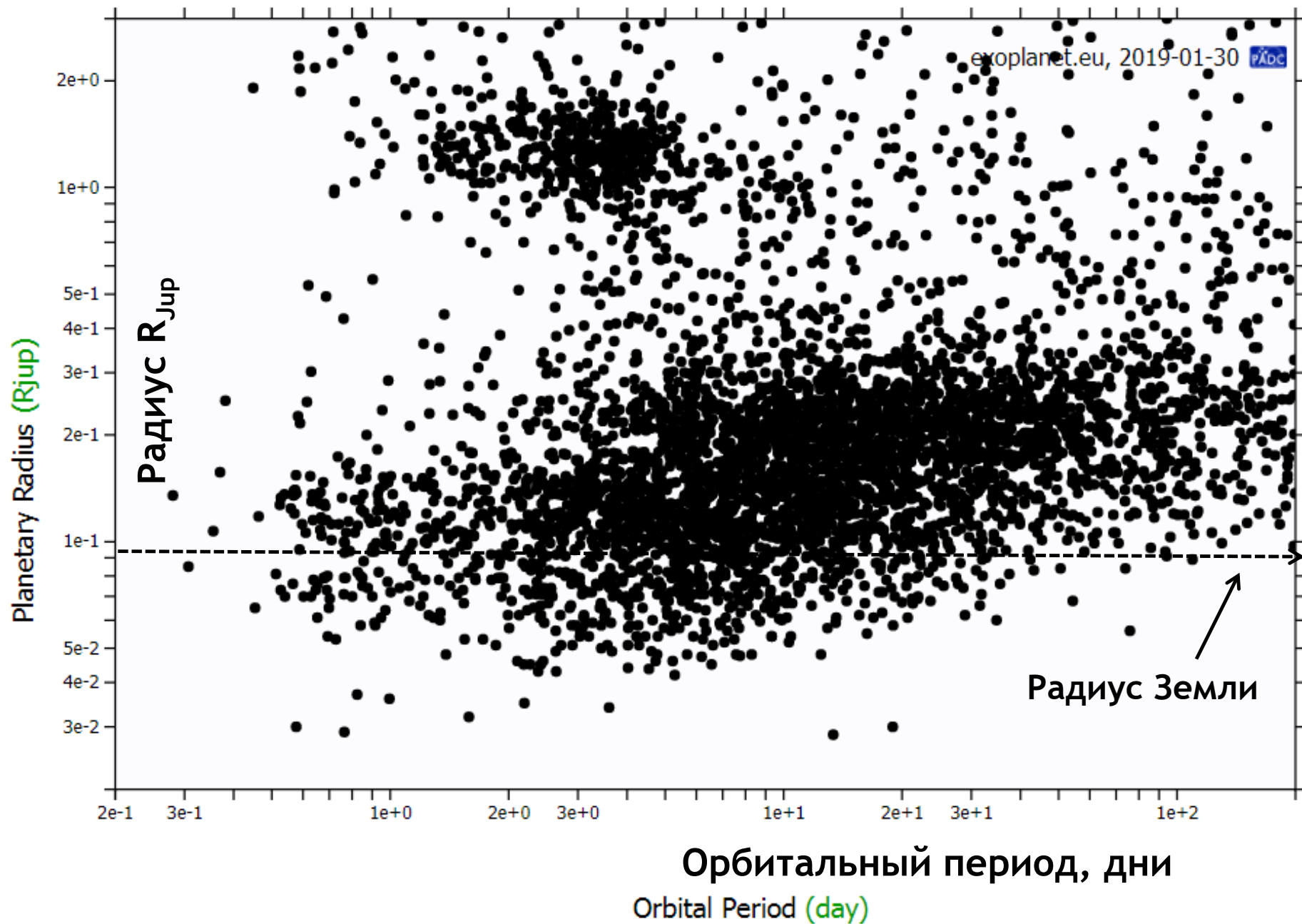


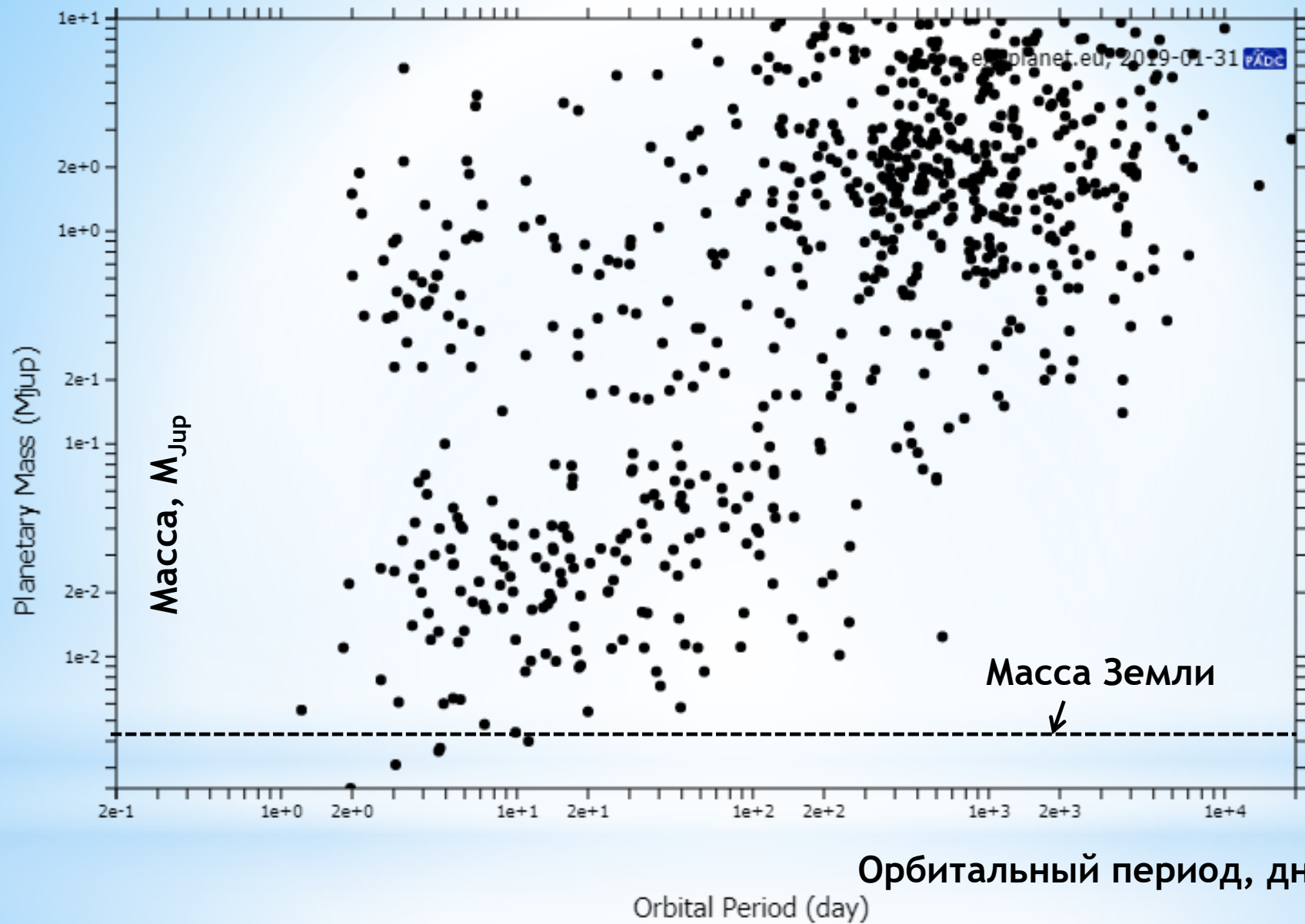
До «Кеплера»



С первыми результатами «Кеплера»







Метод лучевой скорости:

сильный эффект селекции в пользу больших планет и более слабый в пользу маленьких орбит

Юпитеры, нептуны, изредка - земли на маленьких орбитах у красных карликов

Хорошо работает с наземных телескопов

Метод транзитов:

Сильный эффект селекции в пользу маленьких орбит («Кеплер» слишком быстро сломался) с и более слабый в пользу больших планет.

Планеты всех размеров на небольших орбитах

Низкая чувствительность для наземных телескопов

Что нам интересно в первую очередь?

- Планеты, на которых возможна жизнь (нашего типа) .

Это планеты:

- $0.7 R_{\oplus} < R < 1.5 R_{\oplus}$ с полтностью, близкой к земной (будем называть их «землями»).
- нагреваемые звездой так, чтобы на ней могла существовать жидкая вода - планеты в «зоне обитаемости» (habitability zone).

Будем использовать термин «**зона жизни**»

Это очень неопределенное понятие. Для Солнечной системы по разным оценкам между

0.725 - 0.99 АЕ ----- И ----- 1.01 - 3 АЕ

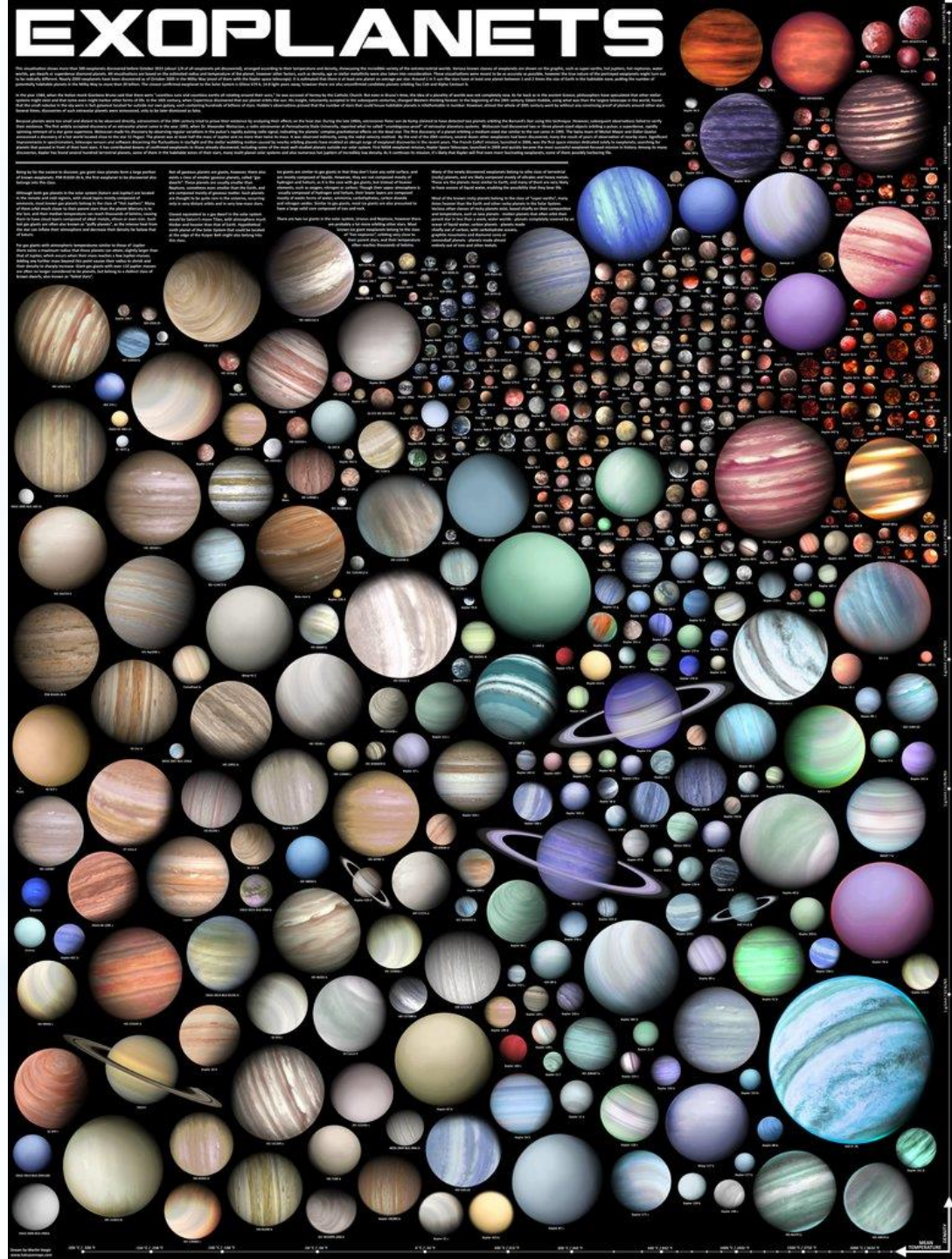
Статистика на настоящий момент:

Число найденных экзопланет приближается к **6000** (из них **3786** - подтвержденных разными наблюдениями).

Большинство открыты «Кеплером» на 1/400 части неба.

Из них всего два - три десятка земель в зоне жизни.

К тому же, большинство из последних обращаются вокруг красных карликов.



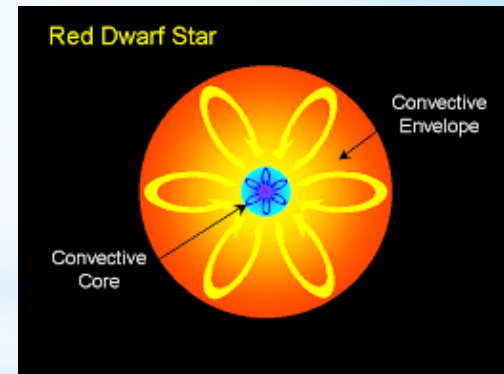
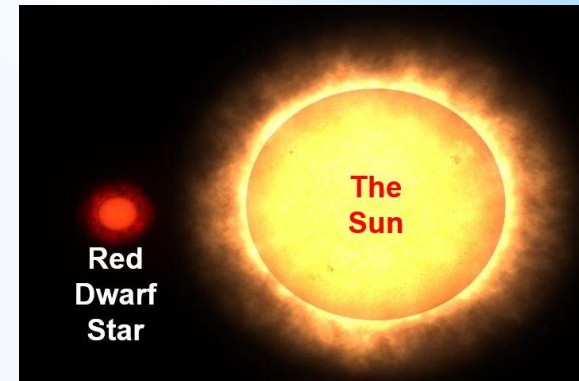
Главные находки после «Кеплера»

1. Проксима Центавра b - в зоне жизни. Метод лучевой скорости. Красный карлик. 4.2 световых года. Минимальная масса $1.3 M_{\oplus}$
2. Траппист 1. Три планеты в зоне жизни. Метод транзитов. Красный карлик. 40 световых лет. Массы близкие к земной.
3. Тау Кита e и f. Суперземли на краях зоны жизни. Метод лучевой скорости. Ближайшая одиночная звезда класса Солнца. 12 световых лет. Масса больше 4 земных. **40 см/с**

Возможна ли жизнь на Проксиме b и в системе TRAPPIST-1?

Отягчающие обстоятельства:

1. Красные карлики очень активны. Интенсивное рентгеновское излучение (в 100 - 1000 раз сильнее облучения Земли), сильный звездный ветер, сильные вспышки.
1. Красные карлики светят намного сильнее в первые десятки-сотни миллионов лет.
2. Планета в зоне обитаемости обязательно попадает в приливное замыкание. Это либо синхронное вращение (все время повернута одной стороной к звезде) либо резонанс 3:2 (сутки равны двум орбитальным годам)



Борьба за обитаемость Проксимы b

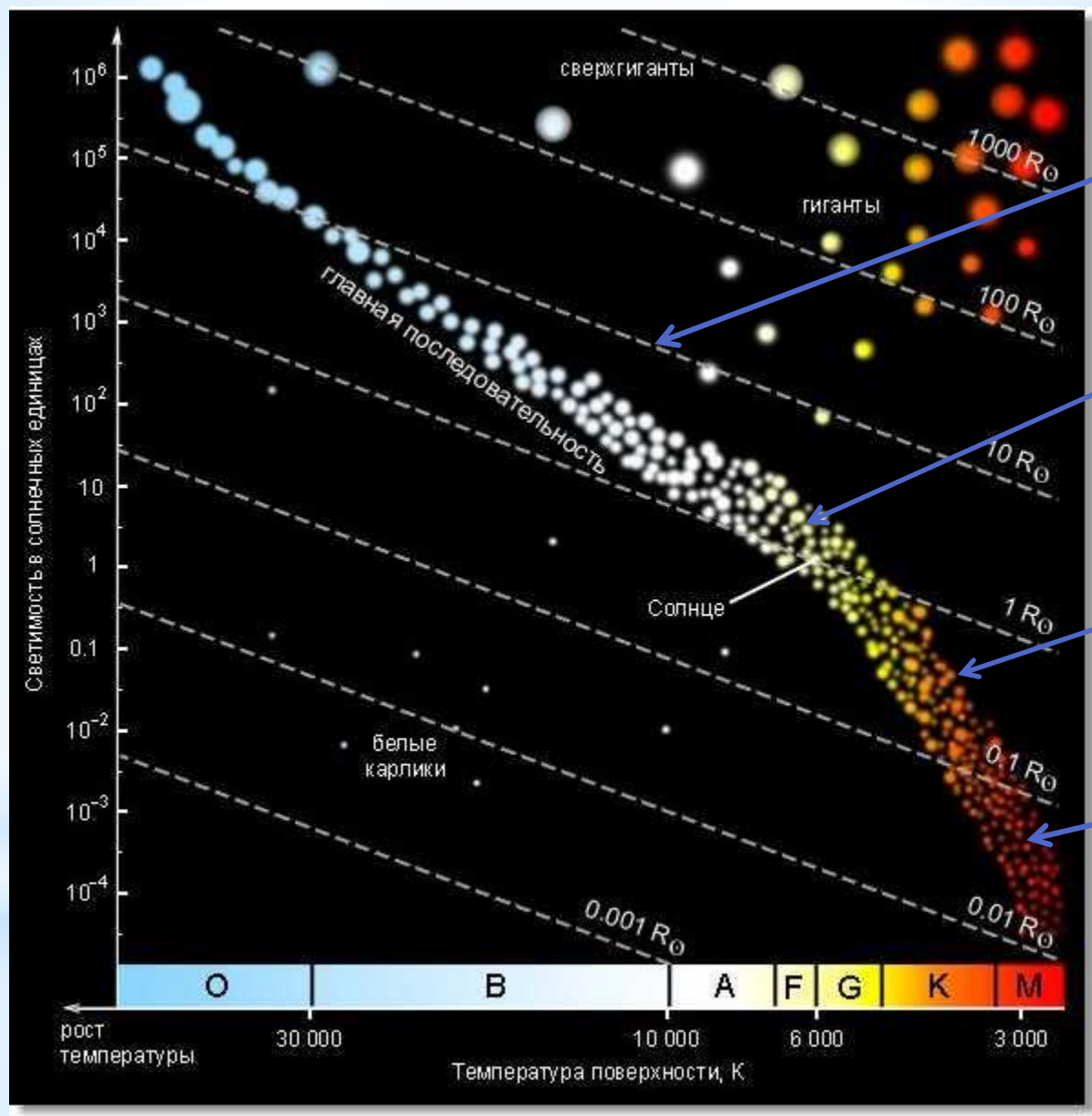
Проблемы

- Огромный перепад температуры при синхронном вращении
- Улетучивание воды и азота в начальный период из-за сильного излучения
- Истощение атмосферы из-за звездного ветра
- При рождении планеты было слишком жарко, воды там быть не могло

«Решения»

- Возможно планета в резонансе 3:2. При толстой атмосфере возможен перенос тепла
- Воды улетучилось не более «земного океана»
- Может быть у планеты есть достаточно сильное магнитное поле
- Планета могла образоваться дальше, за «снеговой линией» и потом мигрировать на современную орбиту

Какие нужны звезды?



Слишком
мало
живут

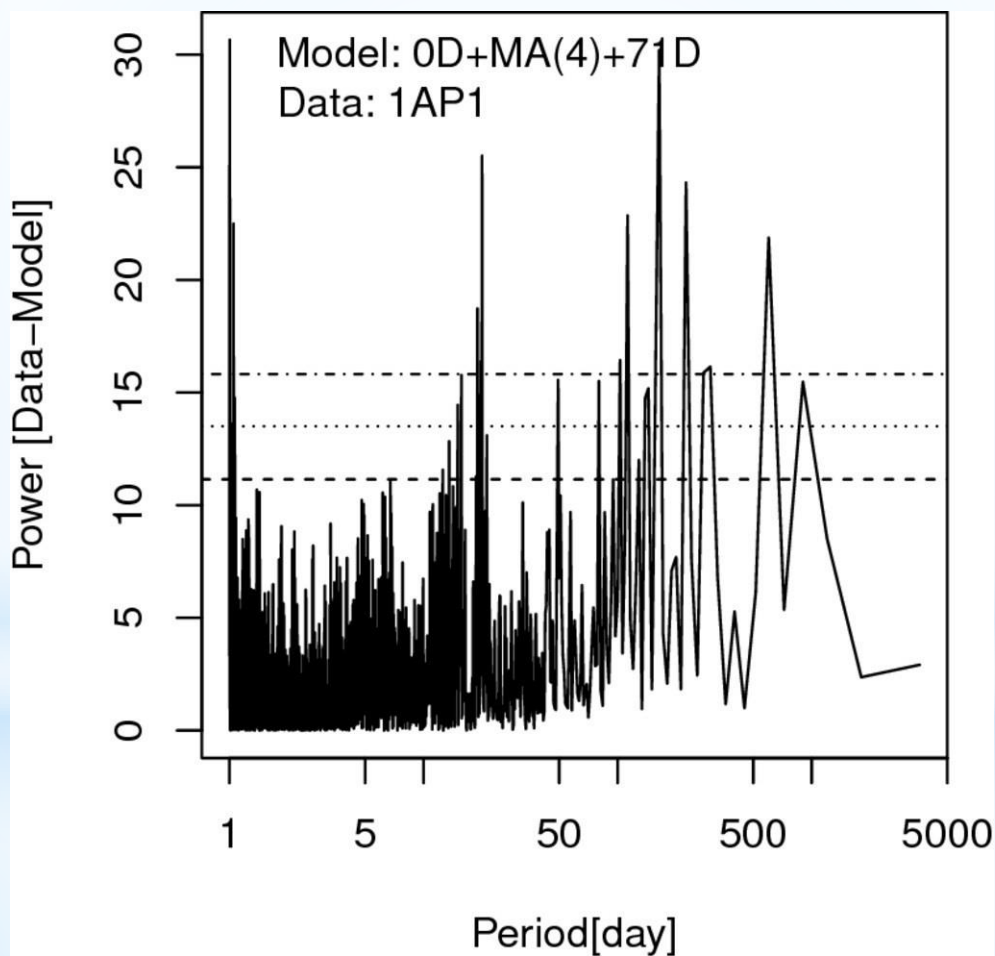
Хорошие
звезды

Приливное
замыкание
Сильный
звездный
ветер

Тау Кита

4 землеподобных планеты

По архивным данным спектрометра HARPS



Тау Кита

Солнце



Отягчающее обстоятельство:
пылевой диск в 10 раз плотнее, чем у нас

Там, где пыль, там и астероиды,

Там и бомбардировка ☹️

Их динозавры будут вымирать
в 10 раз чаще наших!

Но не надо терять оптимизма!

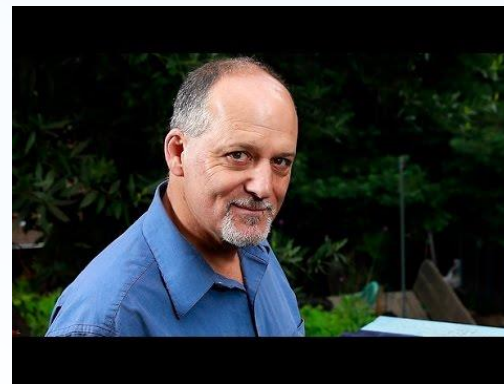
Кандидаты в земли на нынешний момент

	звезда класс	масса $M_{\text{ж}}$	радиус $R_{\text{ж}}$	нагрев $F_{\text{ж}}$	расстояние св. лет
Kepler 452b	G		1.5	1.1	1402
Kepler 442b	K		1.34	0.7	1292
Kepler 62f	K		1.41	0.39	1200
Kepler 62e	K		1.6	1.11	1200
Kepler 1638b	G		1.6	1.17	2492
Тау Кита e ?	G	>3.9		1.51	12
Тау Кита f ?	G	> 3.9		0.25	12

И это пока все!

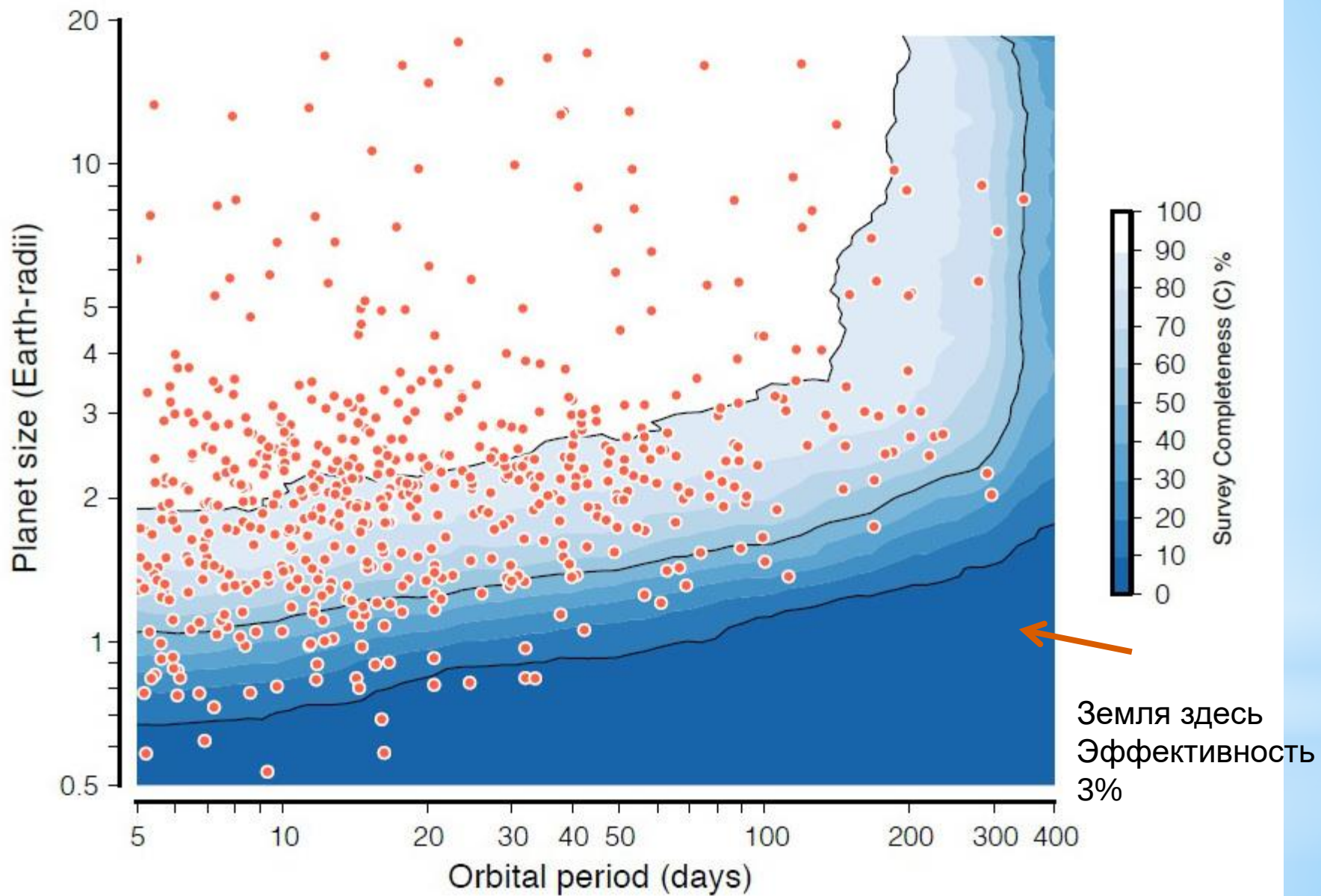
Erik Petigura, Andrew W. Howard, and Geoffrey Marcy

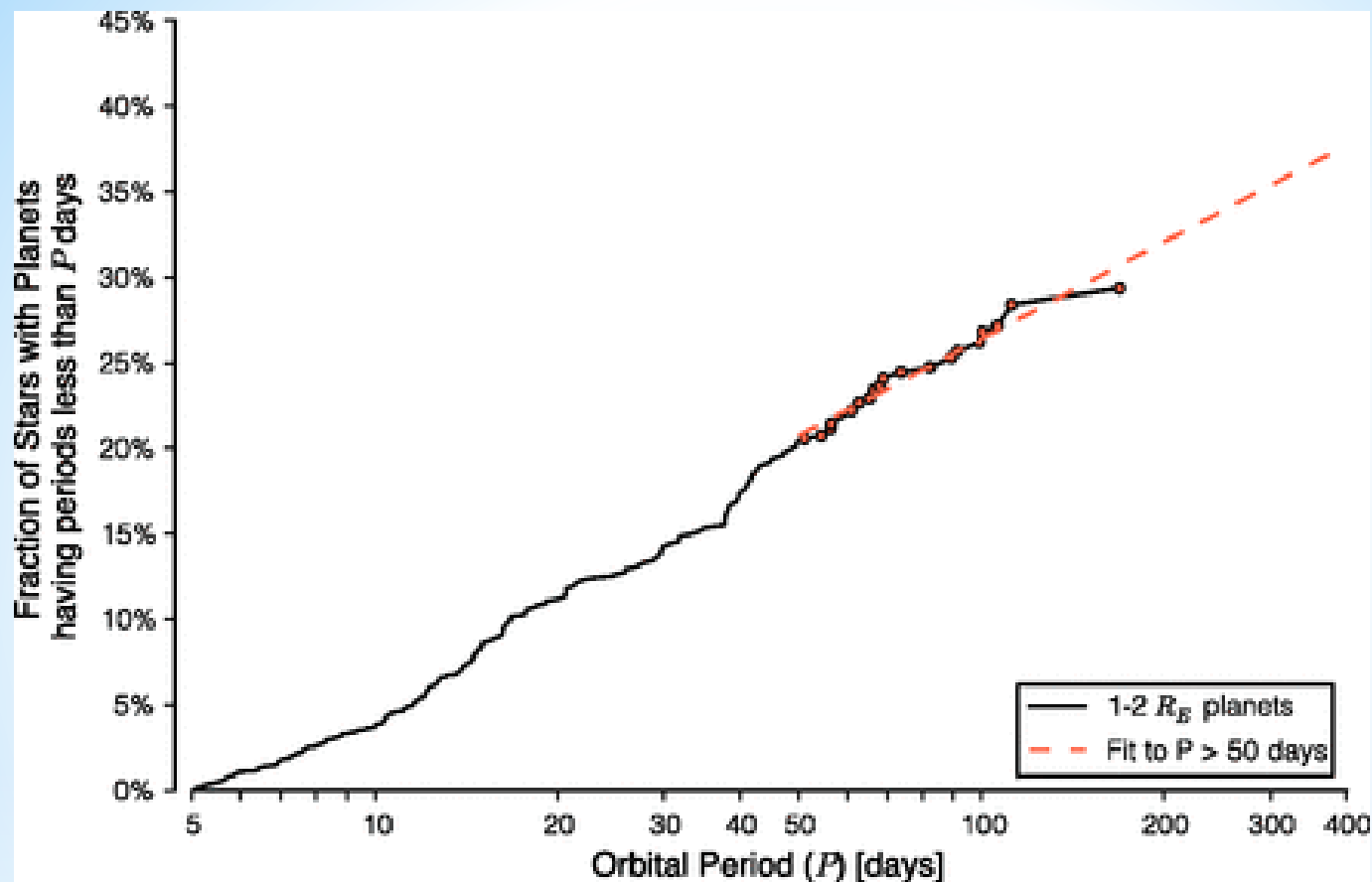
Переобработали данные Кеплера, добавив к ним «подсадные» планеты



Оказалось: вероятность найти в данных «Кеплера» транзитную планету с периодом обращения больше 200 дней не превышает 3%. («Кеплер» слишком мало проработал по основной программе.)

Поэтому ближайшая земля у звезд типа Солнца, где-то в 15 световых годах!





Чтобы оценить число планет в зоне жизни, надо экстраполировать распределение с малых орбит.

Результат:

**Звезда типа Солнца – вероятность земли в
зоне обитаемости – 15%**

Более поздние работы > 20%

**Ближайшая земля в зоне обитаемости солнца
(класс G) – 15 – 20 световых лет**

Найти ее будет непросто...

Спектрометрия на уровне 10 см/с?

Гигантский наземный телескоп?

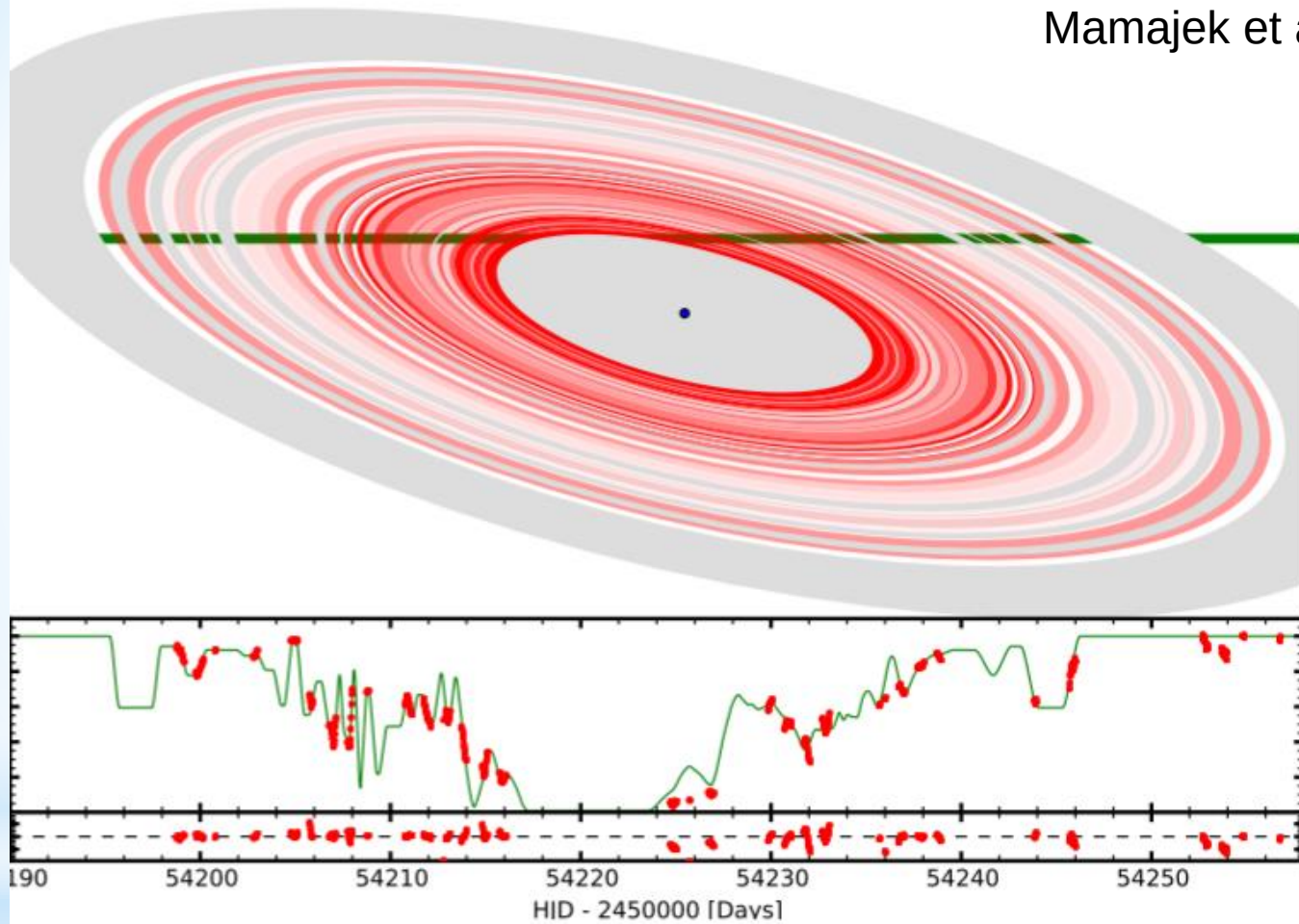
Сопутствующие мистерии

1. Чудо с кольцами

2. Звезда «Табби»

1SWASP J140747

Mamajek et al. 2012



Мистерия с кольцами



Если вместо Сатурна

Минимальная скорость – 30 км/с

Максимальное расстояние – 2 а.е.
при вытянутой орбите

Проблема: сфера Хилла

Kenworthy & Mamaĵek (2015):
**Для удержания колец планета должна весить
не менее 60M_J**

Kenworthy & Mamajek (2015) отвергают случайную проекцию планеты-сироты: вероятность мала!

Просто не удосужились посчитать эту вероятность.

Вероятность случайной проекции планеты-сироты в круге 0.6 а.е. у данной звезды в данный момент – $0.25 \cdot 10^{-6}$

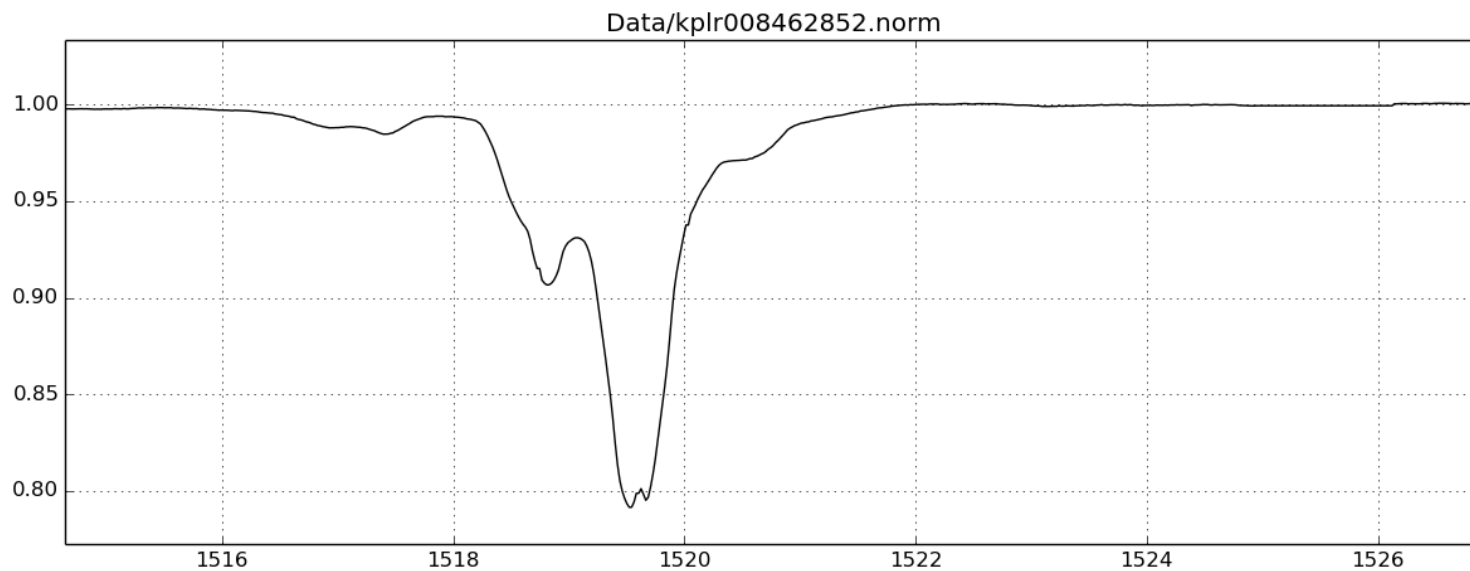
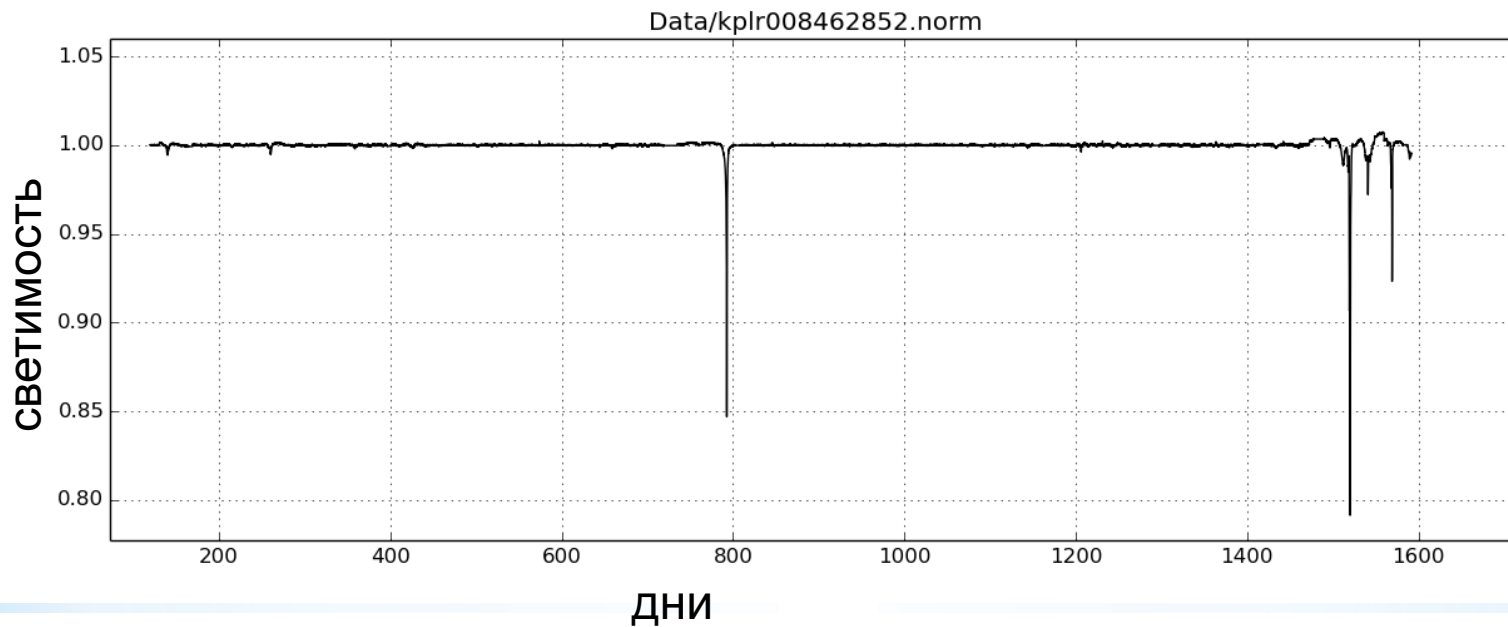
Вероятность проекции за 10 лет наблюдений $0.3 \cdot 10^{-4}$

Звезд, наблюдавшихся WASP , $\sim 10^6$

Десятки планет-сирот прошли в проекции ближе 0.6 а.е. от этих звезд

Одна из них оказалась с роскошными кольцами!

Звезда KIC 8462852 («Табби»)



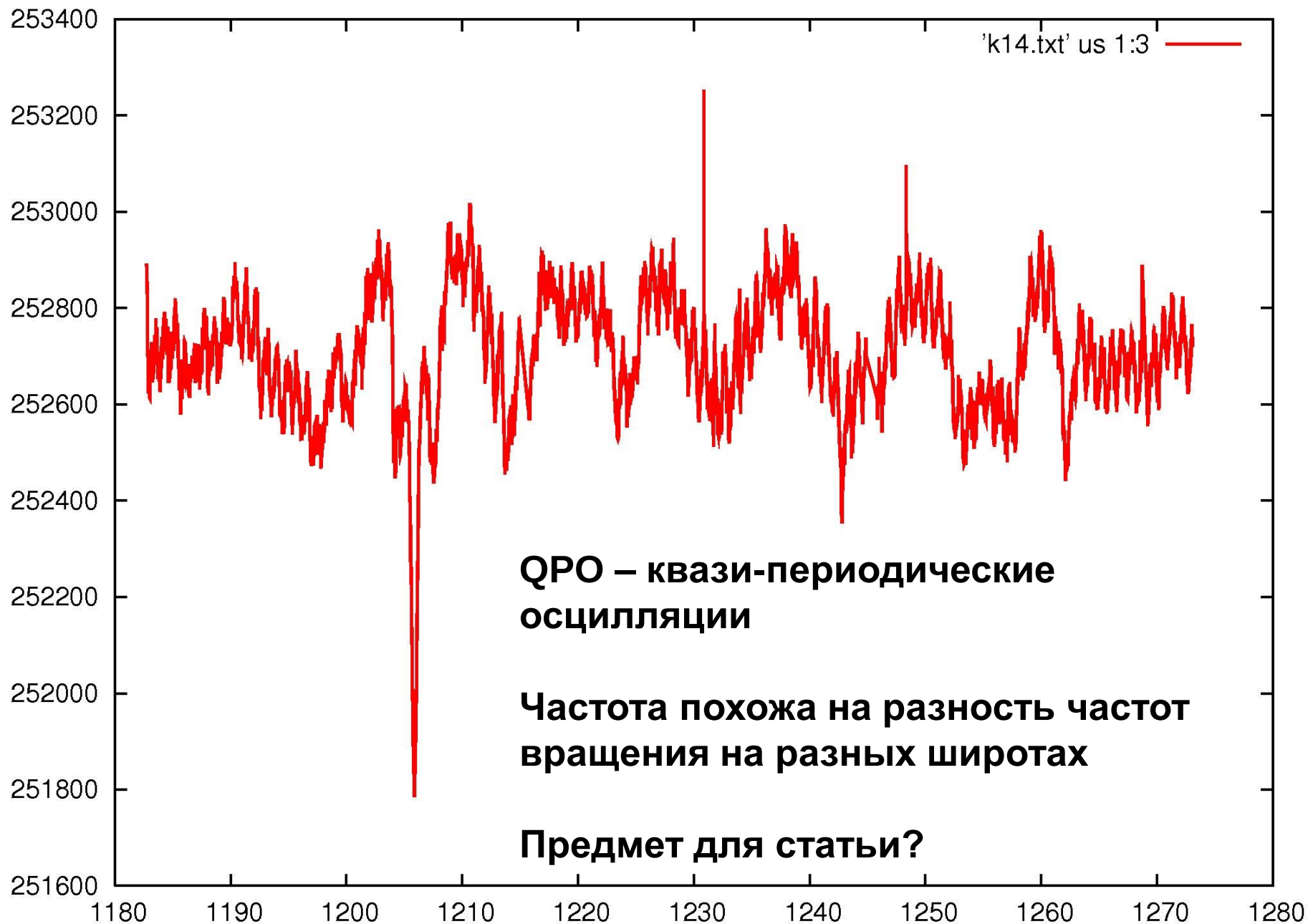
Звезда F3, $1.4 M_{\odot}$, $1.5 R_{\odot}$, $4.7 L_{\odot}$

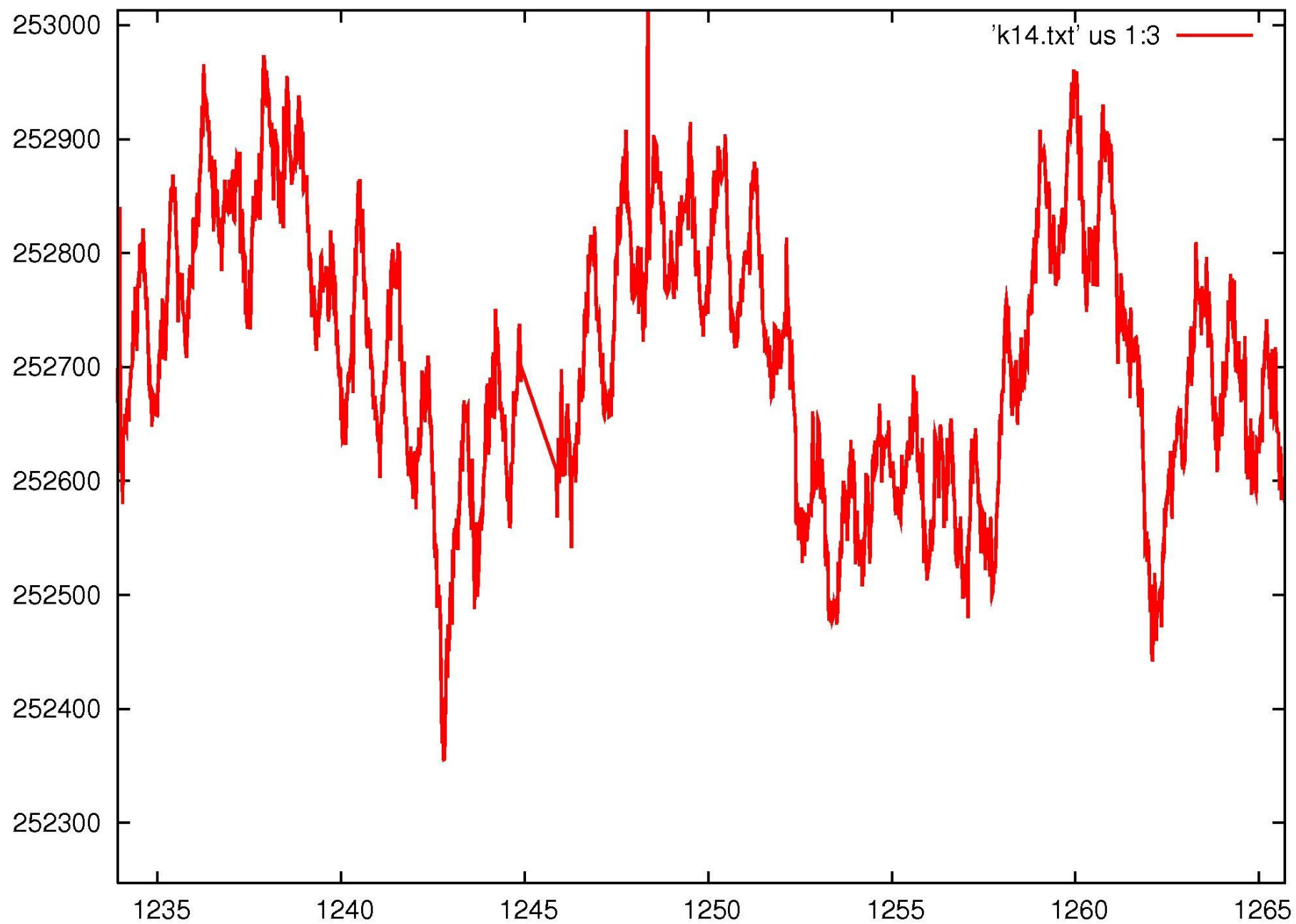
Гипотезы:

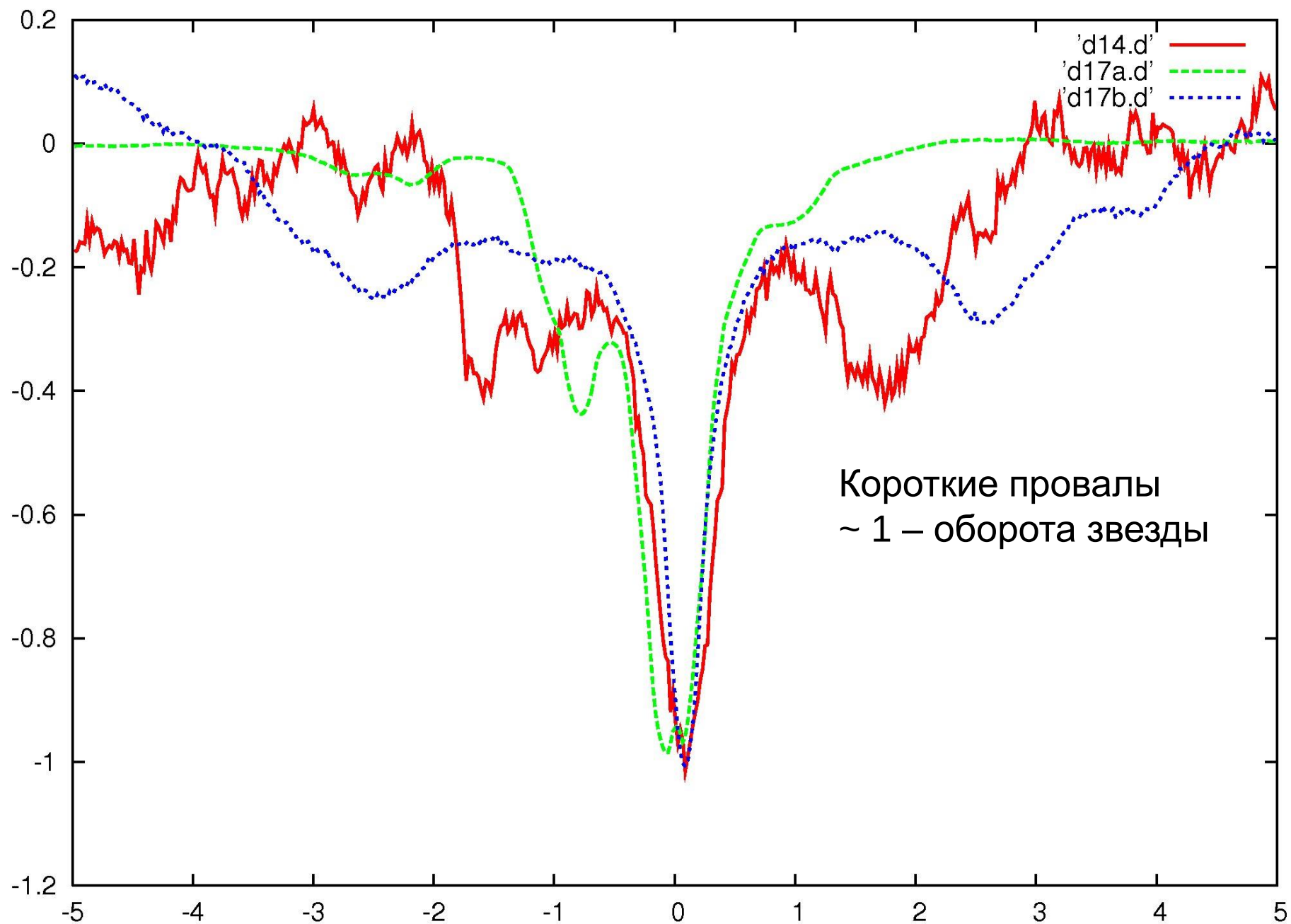
- 1. Большие облака пыли (звезда старая)**
- 2. Рои комет или обломков**
- 3. Элементы конструкции сферы Дайсона**
- 4. Выбросы из звезды**
- 5. Резкое падение теплопроводности (магнитная активность)**

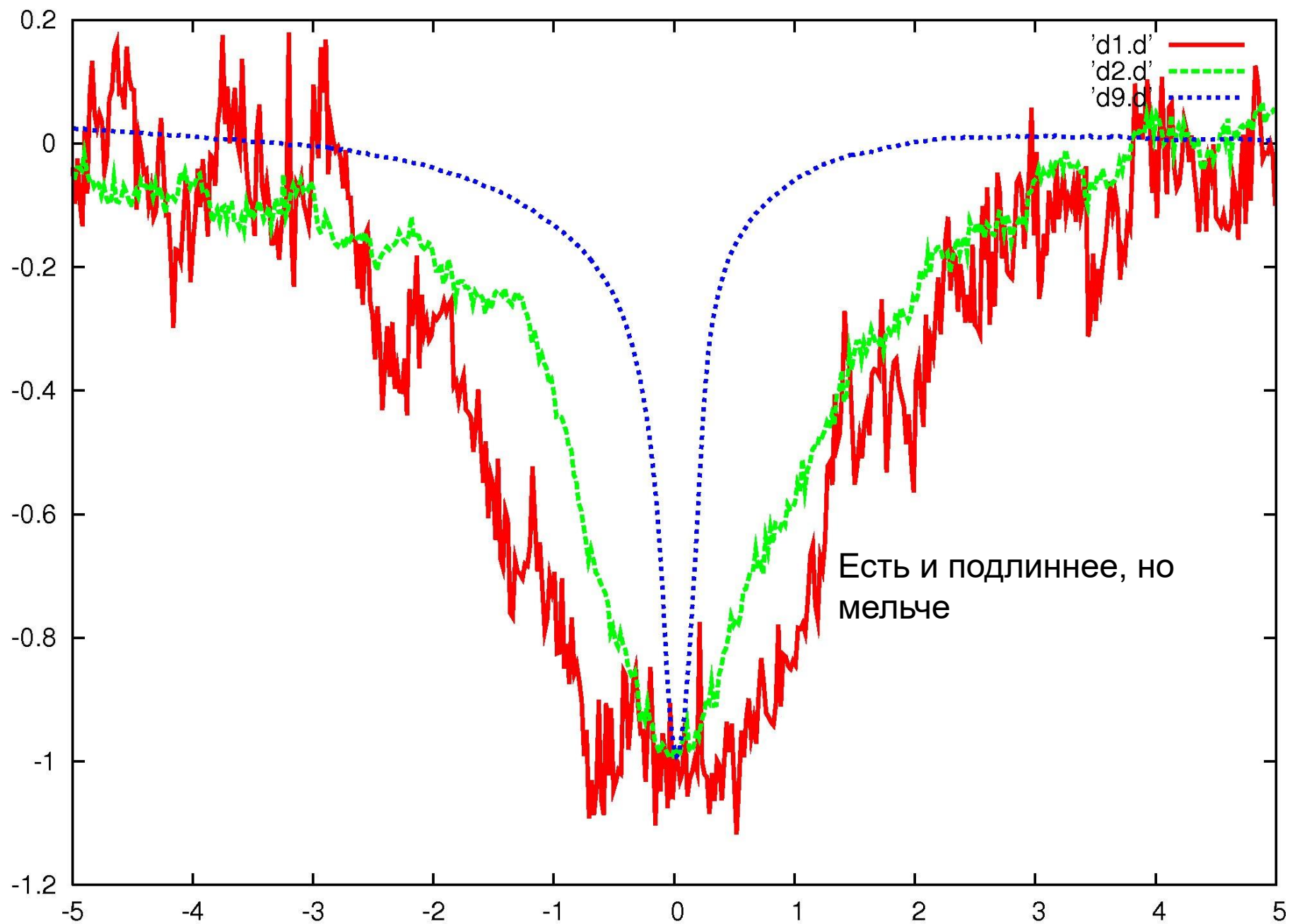
Ничего подобного у звезд такого типа не наблюдалось

Посмотрим на данные:



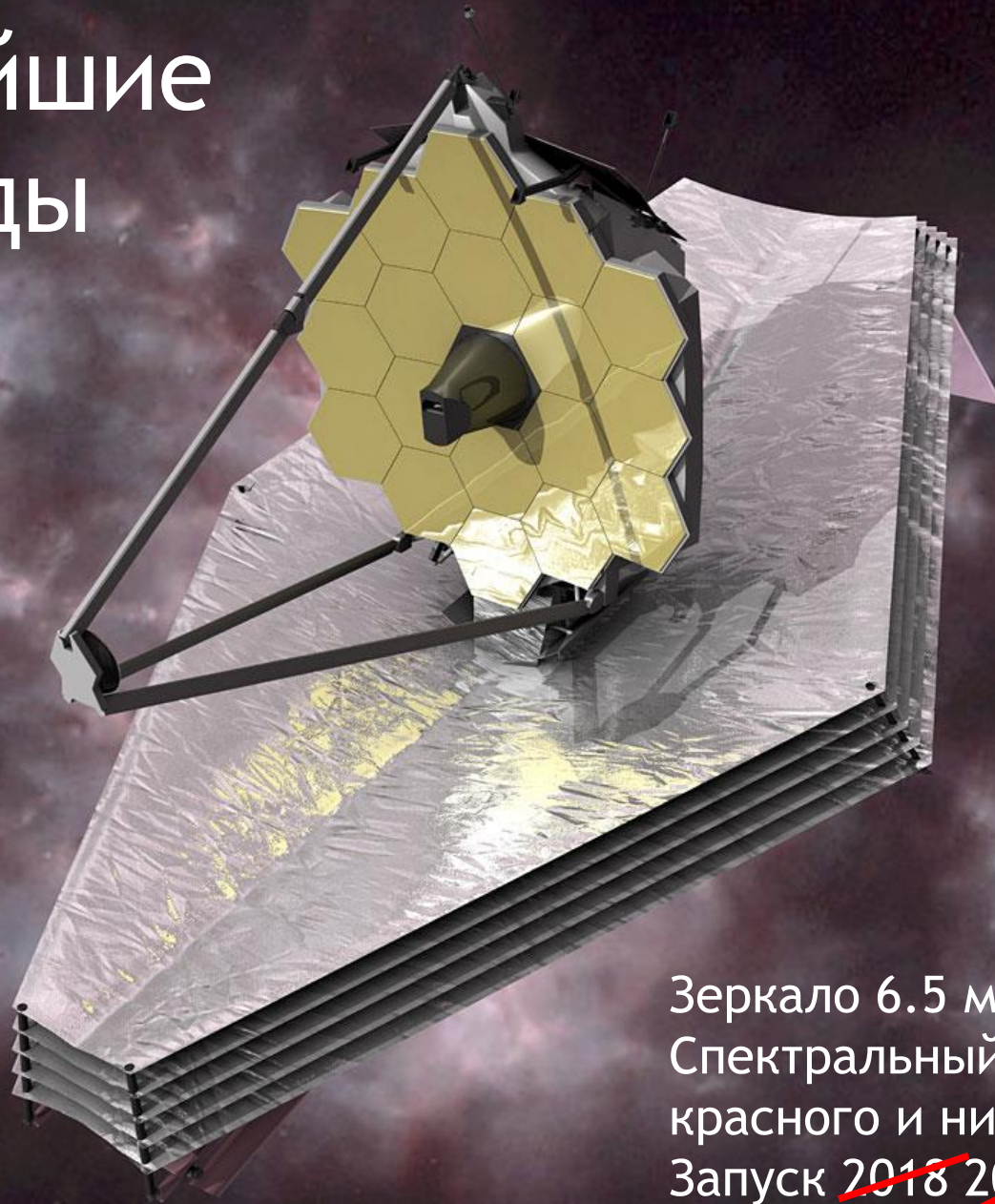






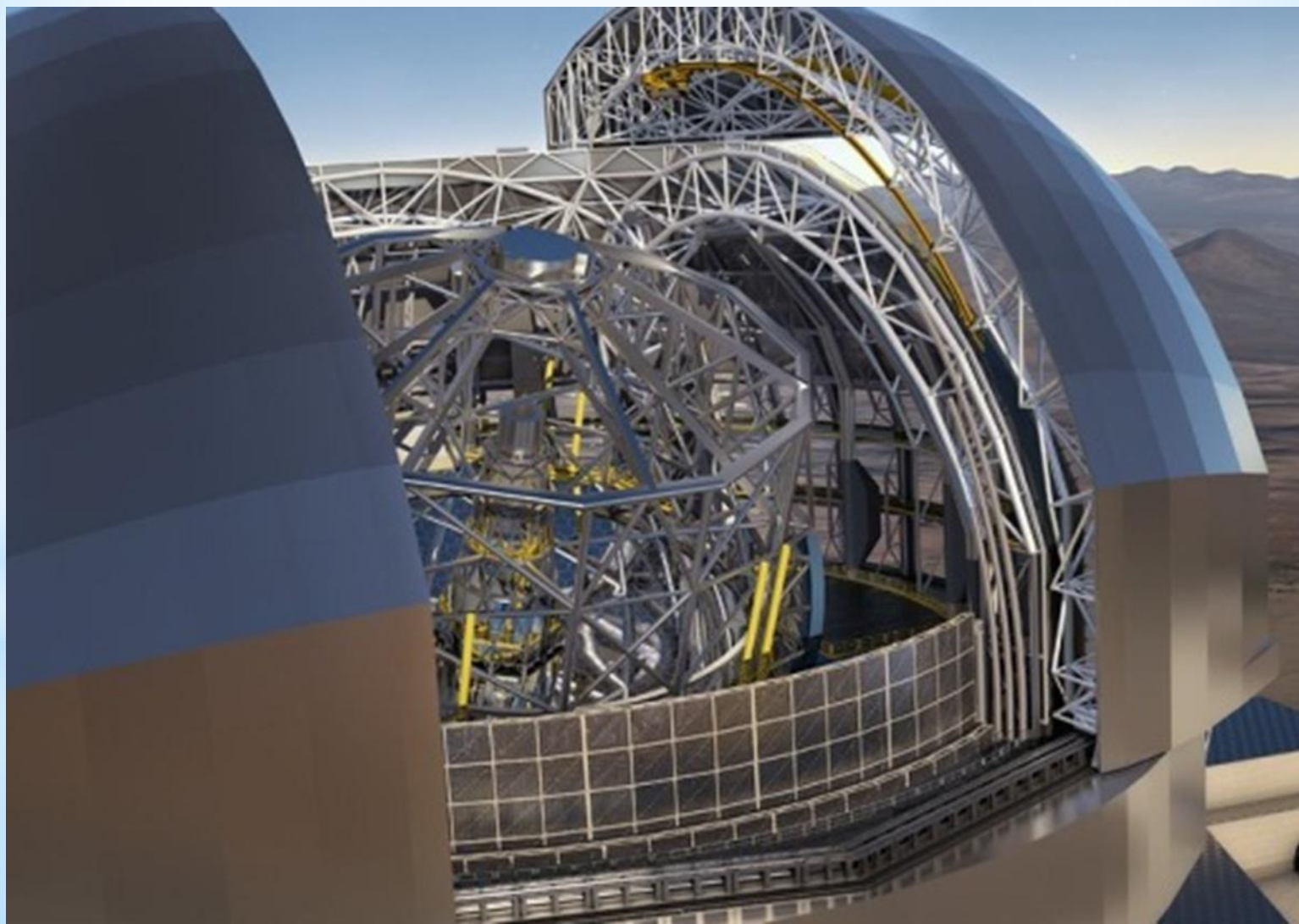
Ближайшие надежды

JWST



Зеркало 6.5 м
Спектральный диапазон: От
красного и ниже
Запуск ~~2018~~ ~~2019~~, 1921
Точка Лагранжа L2

Увидеть напрямую на пределе возможностей
Проксиму Ъ и планеты Тау Кита может
строющийся телескоп E-ELT



Космические интерферометры «Дарвин» / TPF

Нет и не будет в обозримое время



Фантастические проекты:

1. Послать армаду телескопов на 500 а.е. (3 световых дня), чтобы снять линзированное Солнцем изображение планеты.
2. Гигантский космический интерферометр - база сотни километров, изображение планеты 20 X 20 пикселей
3. Отправить зонд

Как узнать, пригодна ли планета для жизни и есть ли на ней жизнь

1. Должна быть атмосфера. Для ближайших транзитных планет ее может увидеть на просвет и примерно измерить состав космический телескоп «Джеймс Вебб» и наземные гигантские телескопы.

Но у Венеры тоже есть атмосфера! Придется изучать состав и строить модели.

Это подходит только для транзитных планет ☹

2. Должна быть приемлемая температура. Ее можно измерить по собственному излучению планеты в инфракрасном диапазоне. Но для этого современных и проектируемых установок недостаточно.

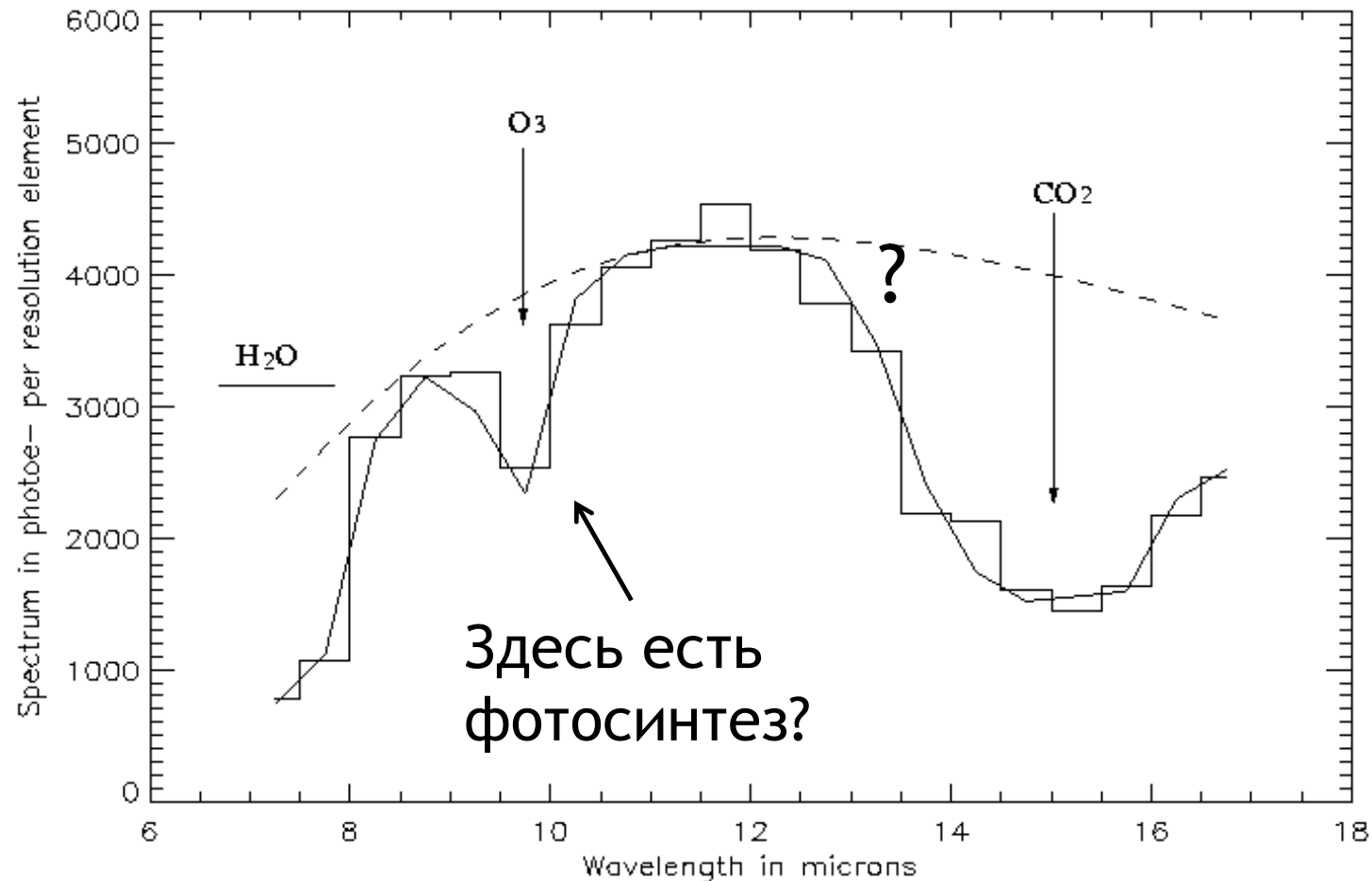
(Венера тоже имеет приемлемую температуру в инфракрасном диапазоне)

Химия?

Биомаркеры?

Биомаркеры: кислород (озон), метан, закись азота

Спектр Земли, каким бы его снял «Дарвин» с расстояния 30 световых лет



Армен Мулкиджанян : «Биомаркеры – фуфло!»

Кислород: фотодиссоциация воды XUV

**Противоядие: тепловая (тропосферная) ловушка для
воды**



**Азот практически невидимый, но можно положиться
на его вездесущность.**

**Сильное (но не безусловное) свидетельство жизни
только одно:**

**Много кислорода, звезда с умеренным XUV,
планета в зоне жизни, достаточно тяжелая,
чтобы удерживать азот.**

А есть ли внеземная жизнь в Галактике?



Евгений Кунин: Вероятность спонтанной сборки самореплицирующейся РНК ~ 10^{-1000} - мы одни в пределах горизонта

Армен Мулкиджанян: даже в случае возникновения жизни на других планетах эта жизнь могла «застрять» на любой начальной стадии, причем вероятность навсегда остаться на примитивном уровне развития была несравненно выше



Если неферментативная репликация РНК возможна, то живых планет в обозримой Вселенной может оказаться не так уж мало. Если НР возможна, то дарвиновская эволюция могла начаться практически сразу после появления первых коротких молекул РНК.

Зонд или посылка

20% скорости света (Starshot) - нереалистично

**10% скорости света (взрыволет «Орион») - не
удосужились посчитать**

**3% скорости света - достижимо с трудом(ядерный
реактор)**

1% скорости света - вполне достижимо

Оптимальная стратегия:

Реактор - мощность 50 - 100 Мегаватт, сильно обогащенный U235 (ТВЭЛы километровой длины)

Тысячи лет непрерывной работы - половину пути медленное ускорение, половину - медленное торможение

Тяга: один - три килограмма силы

Полный вес: сотни - тысяча тонн.

Рабочее вещество: отработанное топливо

Ускорение: десятки микрон в секунду за секунду

Максимальная скорость: 3 тысячи километров в секунду

Время полета

Зонд (не надо тормозить, небольшая полезная нагрузка)

Чуть больше ста лет до Проксимы Центавра
(скорей 200)

Около 500 лет до предполагаемой ближайшей земли
(скорей 1000)

**Корабль (надо тормозить, полезная нагрузка
- сотни тонн)**

2 - 3 тысячи лет до предполагаемой
ближайшей земли, пригодной для обитания.

Может ли млекопитающее как-нибудь
добратся до земли за 20 световых лет
от нас?

Да!

В один конец!

В виде замороженного эмбриона
из нескольких клеток

Для этого не хватает:

- Долговечность механизмов (тысячи лет непрерывной работы)
- Высокотемпературная сверхпроводимость (30К) для магнитной защиты спор, семян и эмбрионов
- Искусственный интеллект хотя бы на уровне насекомых.

Главная проблема: мотивация

Не доросли!

Стивен Хокинг:

**Либо человечество выйдет в космос, либо скоро
погибнет.**



Докладчик:

**Жизнь, особенно разумная - вероятно, самое ценное и
дефицитное, что есть во Вселенной. Примем за
постулат, что ее распространение - важнейшая из
наших задач**