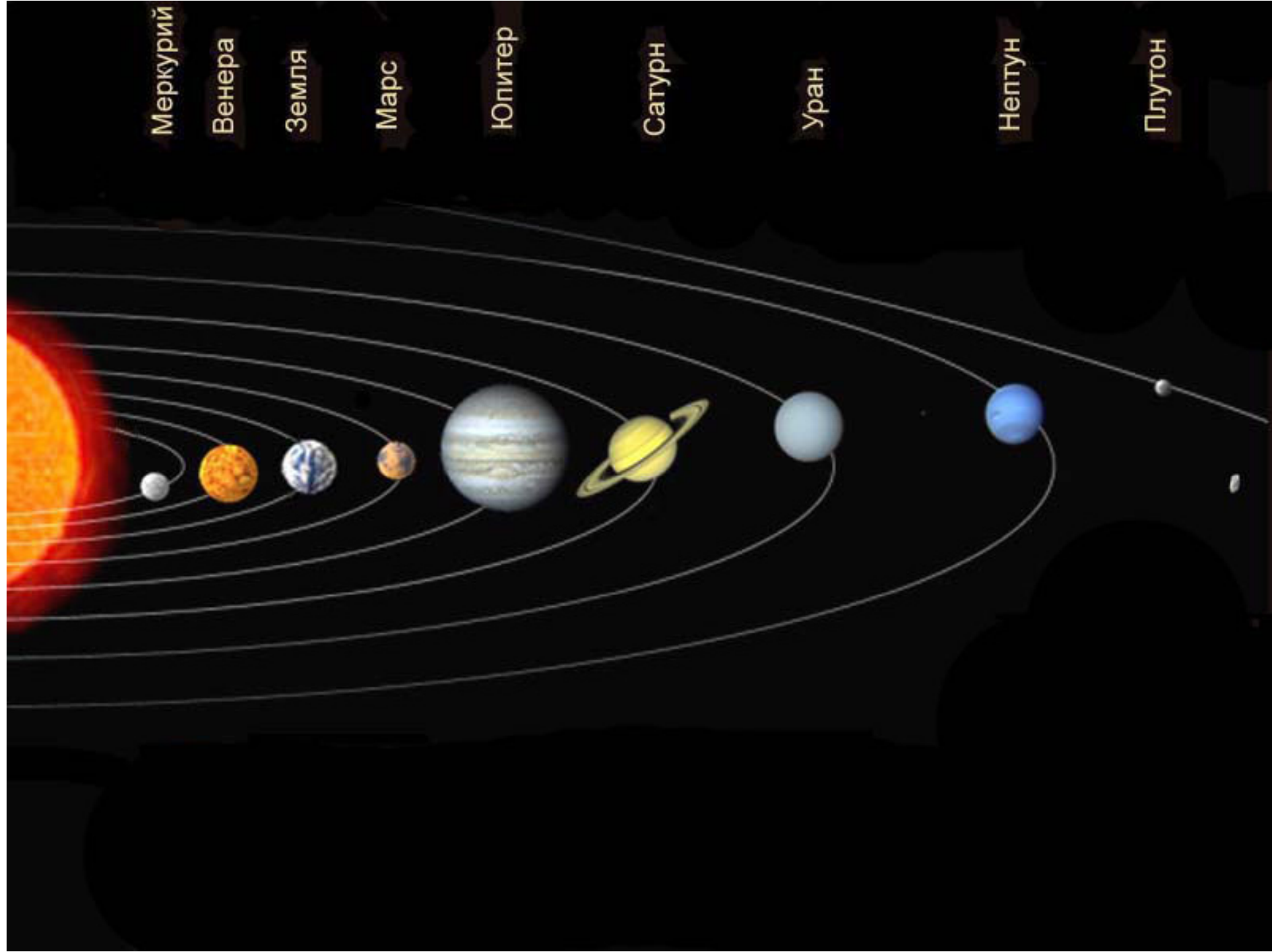


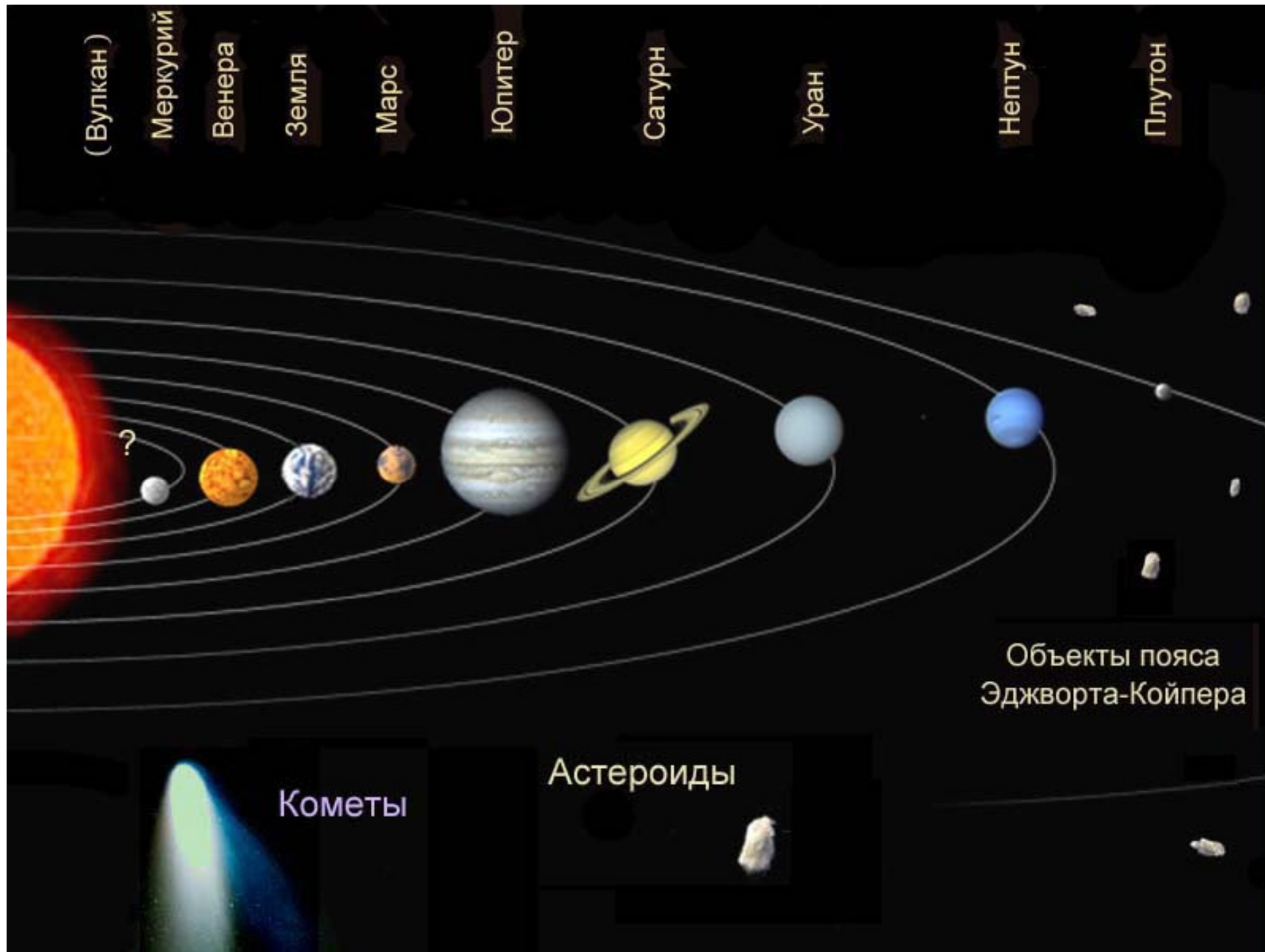
ПЛАНЕТЫ ИНЫХ ЗВЕЗД



ЭКЗОПЛАНЕТЫ

Сурдин В.Г. ГАИШ МГУ





(Вулкан)

Меркурий

Венера

Земля

Марс

Юпитер

Сатурн

Уран

Нептун

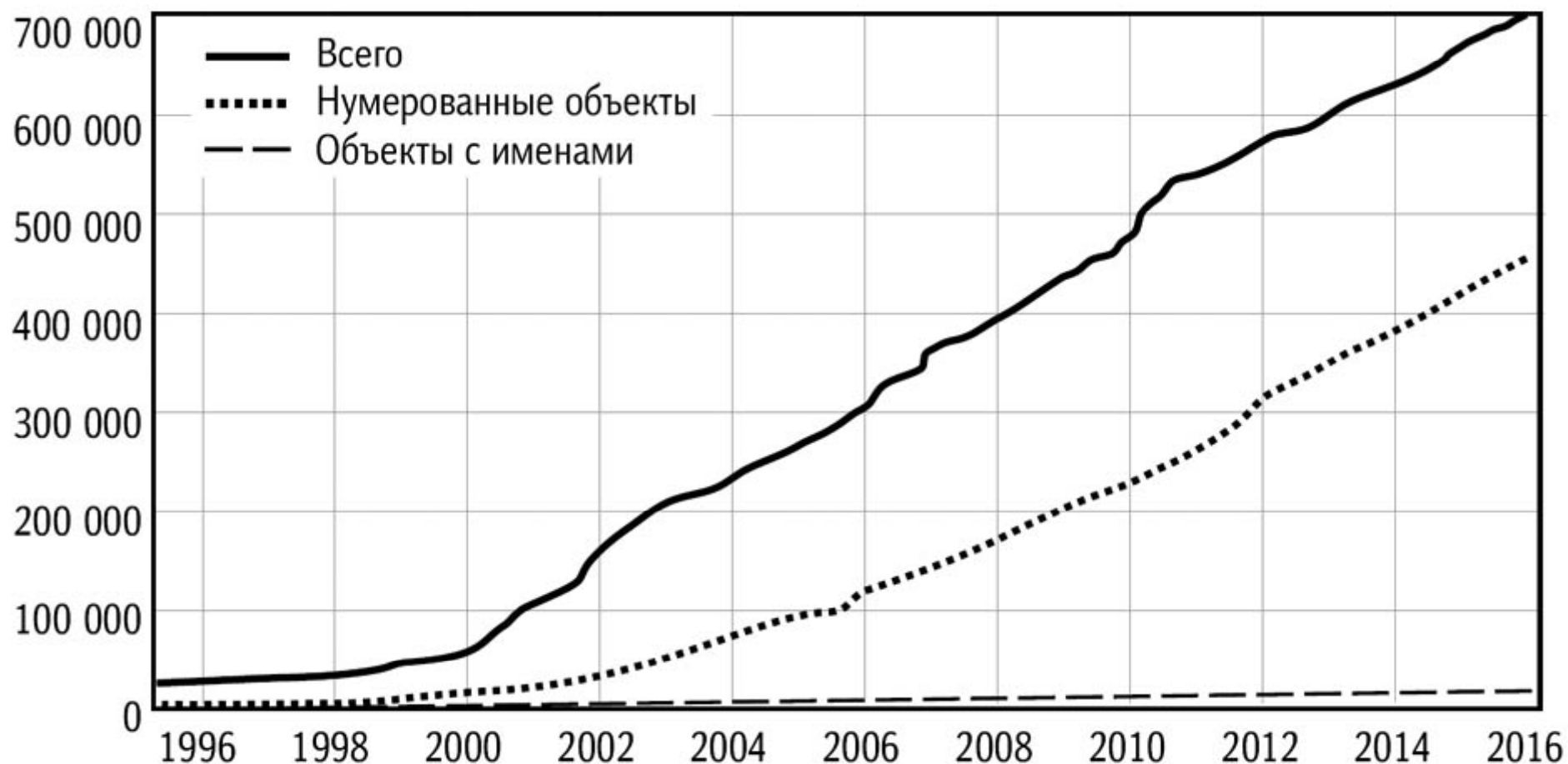
Плутон

?

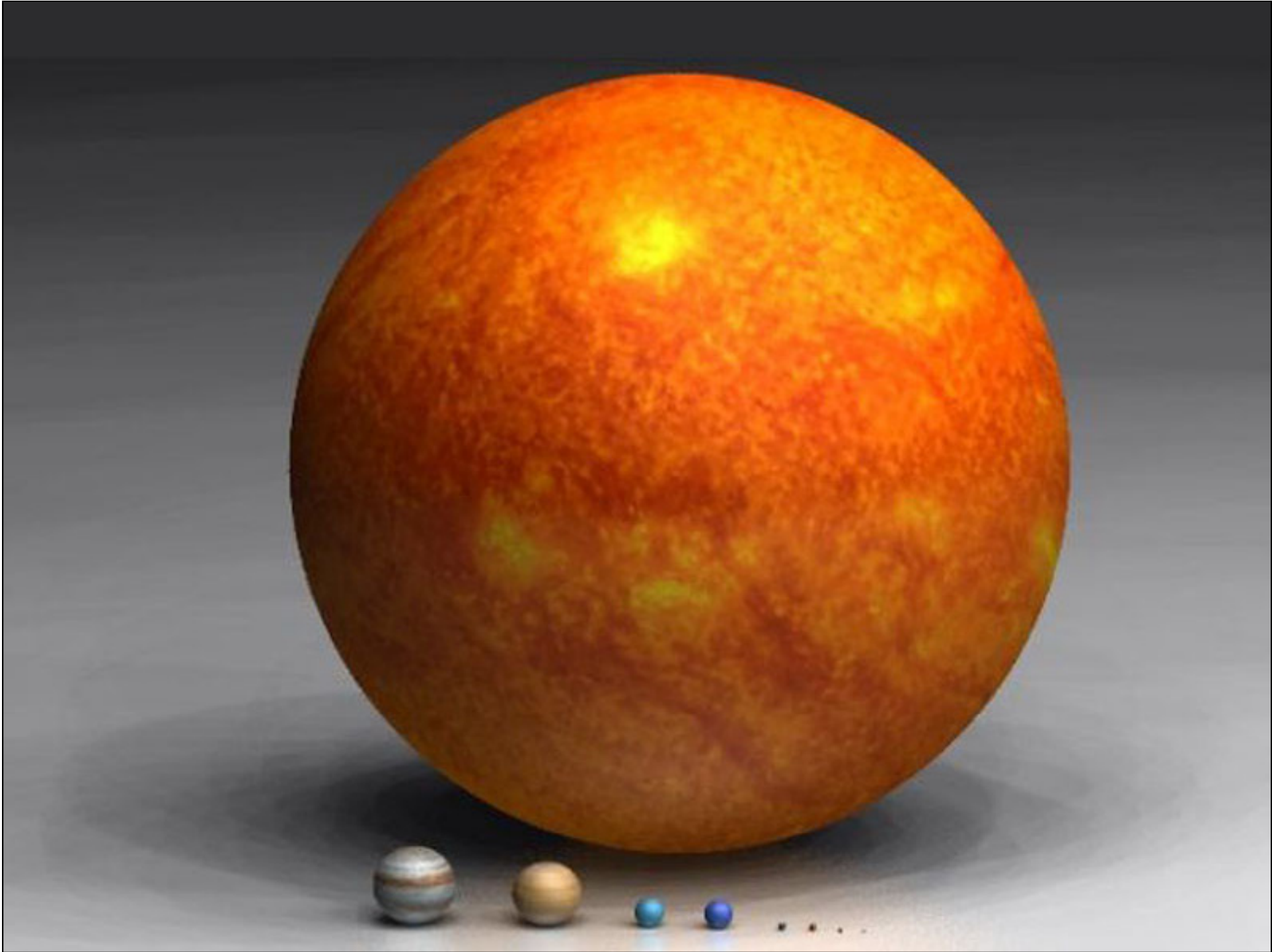
Объекты пояса
Эдварта-Койпера

Кометы

Астероиды



Количество объектов, зарегистрированных в каталоге Центра малых планет. В подавляющем большинстве это астероиды Главного пояса, но есть также троянцы, кентавры, объекты пояса Койпера и кометы.

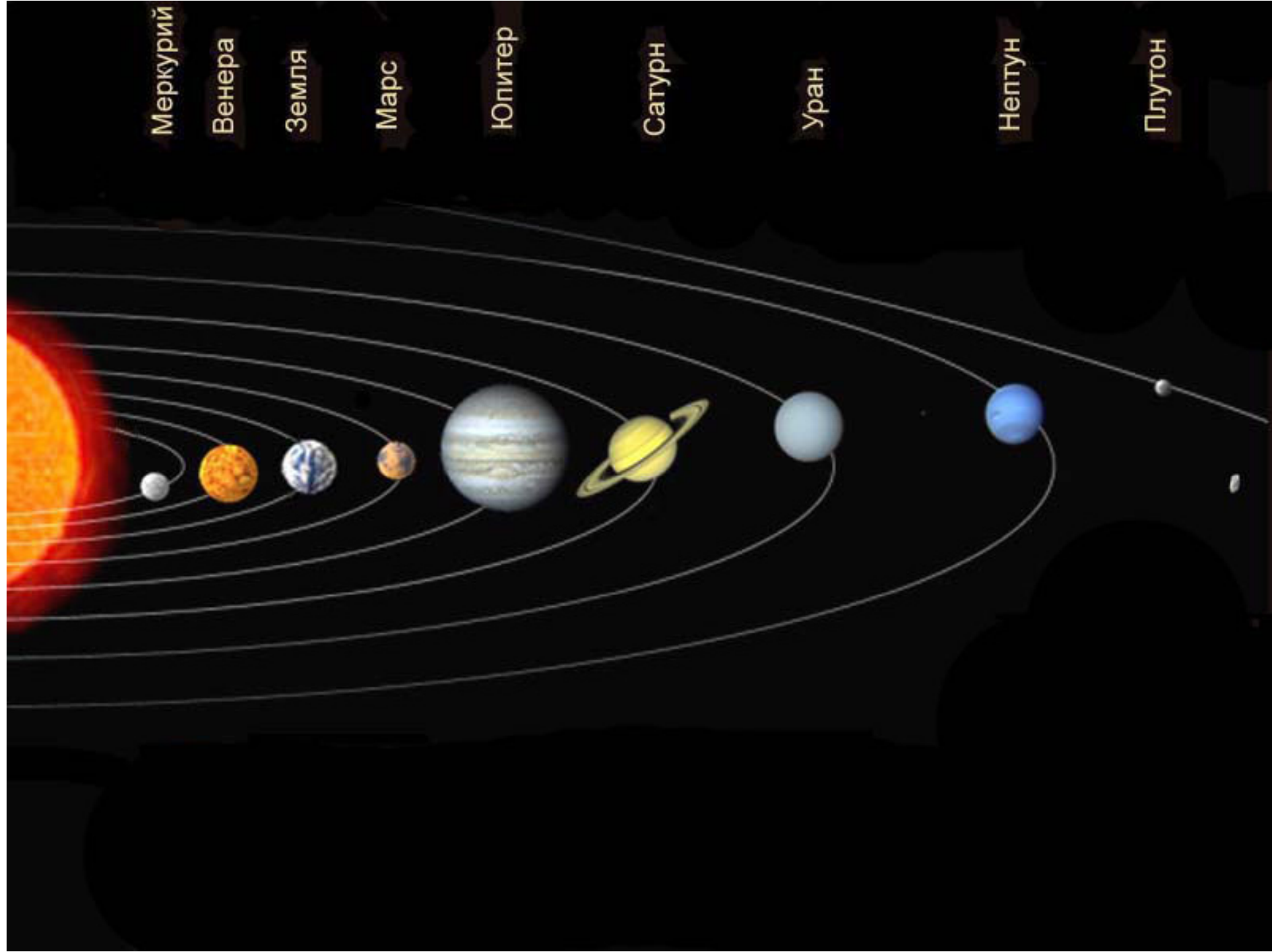








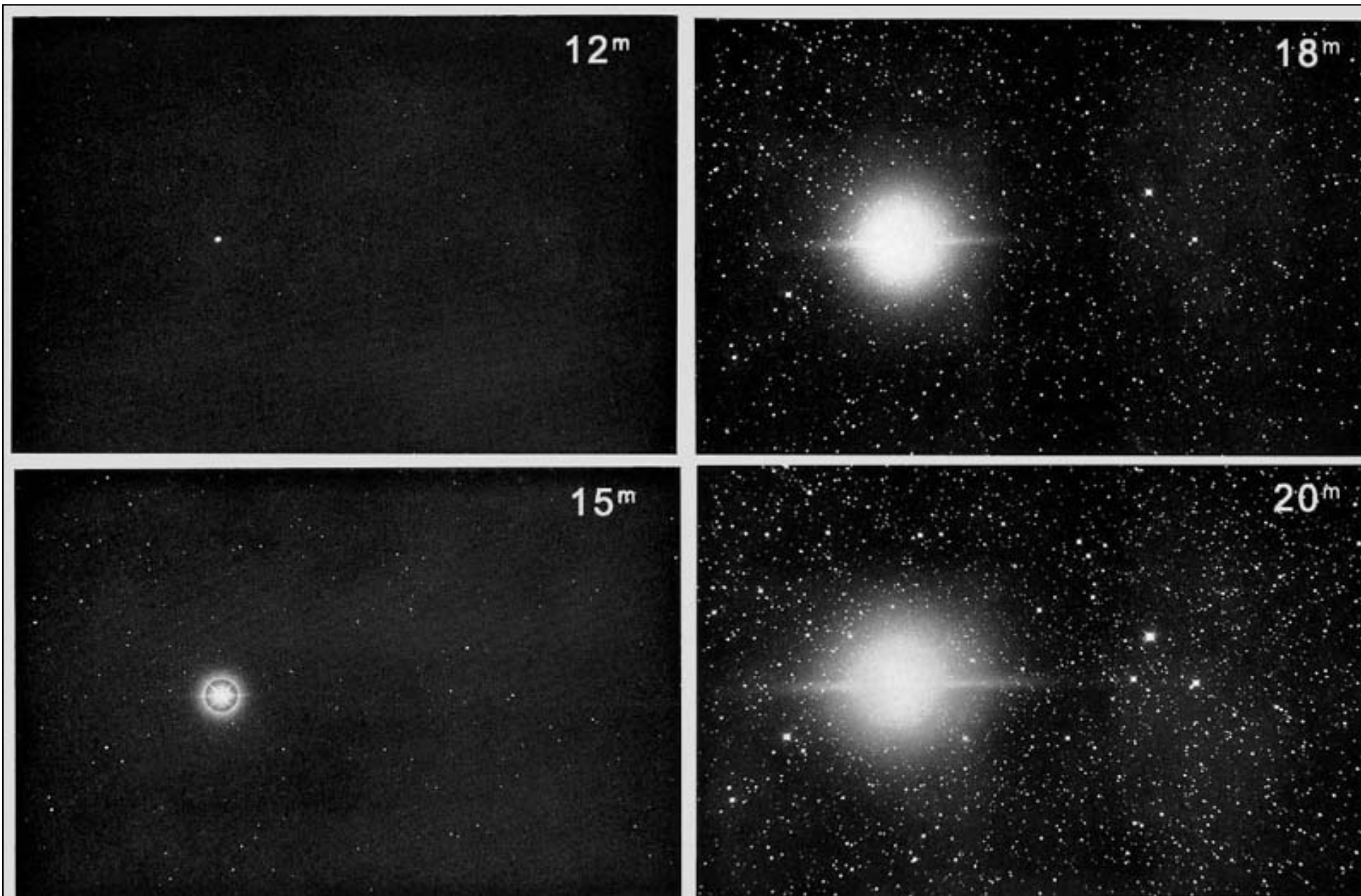




Солнечная система при наблюдении от α Cen

	Угловое расстояние от Солнца	Блеск
Меркурий	0,3''	27 ^m
Венера	0,5	24
Земля	0,8	25
Марс	1,1	27
Юпитер	3,9	22
Сатурн	7,2	23
Уран	14	27
Нептун	23	27
Плутон	30	34

При этом само Солнце имеет видимый блеск 0,5^m

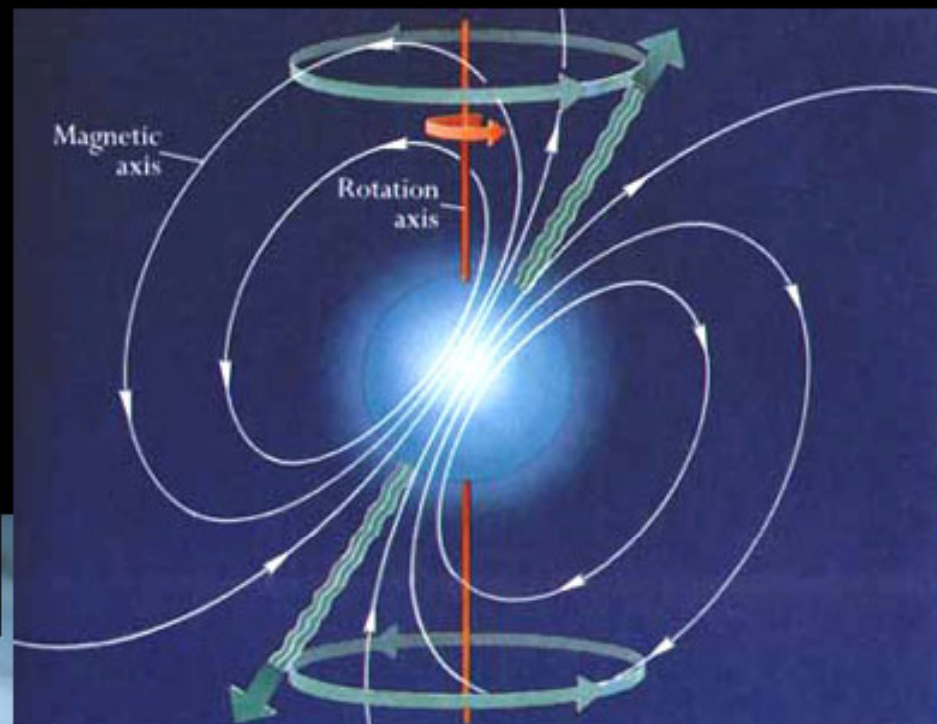
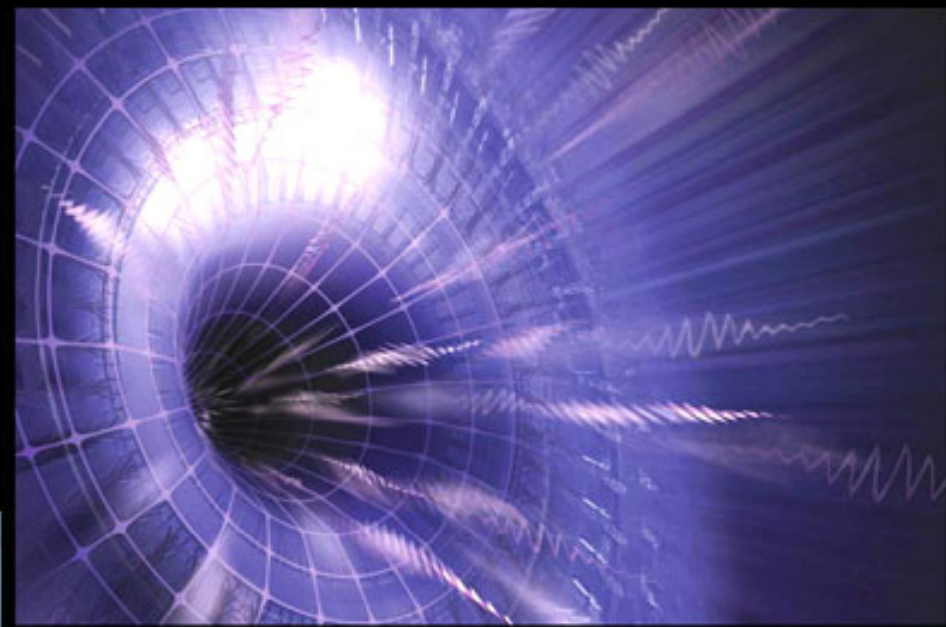


Участок неба в созвездии Возничий, полученный в обсерватории Маунт-Вилсон с разными экспозициями (в поле снимка указана предельная звездная величина)

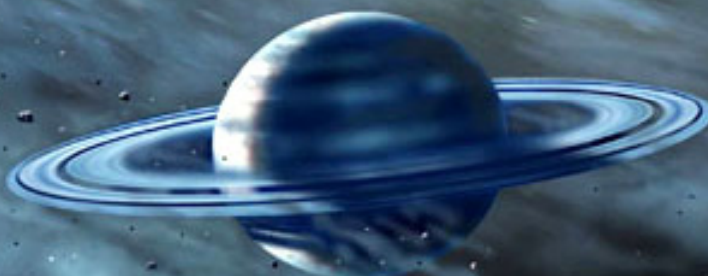
Что общего между

чёрными дырами

нейтронными звездами



и экзопланетами ?



В начале 1960-х обсуждалась возможность обнаружения трех типов гипотетических объектов - черных дыр, нейтронных звезд и экзопланет.

Возможность обнаружить черные дыры казалась за гранью разумного - ведь они, по определению, невидимы!

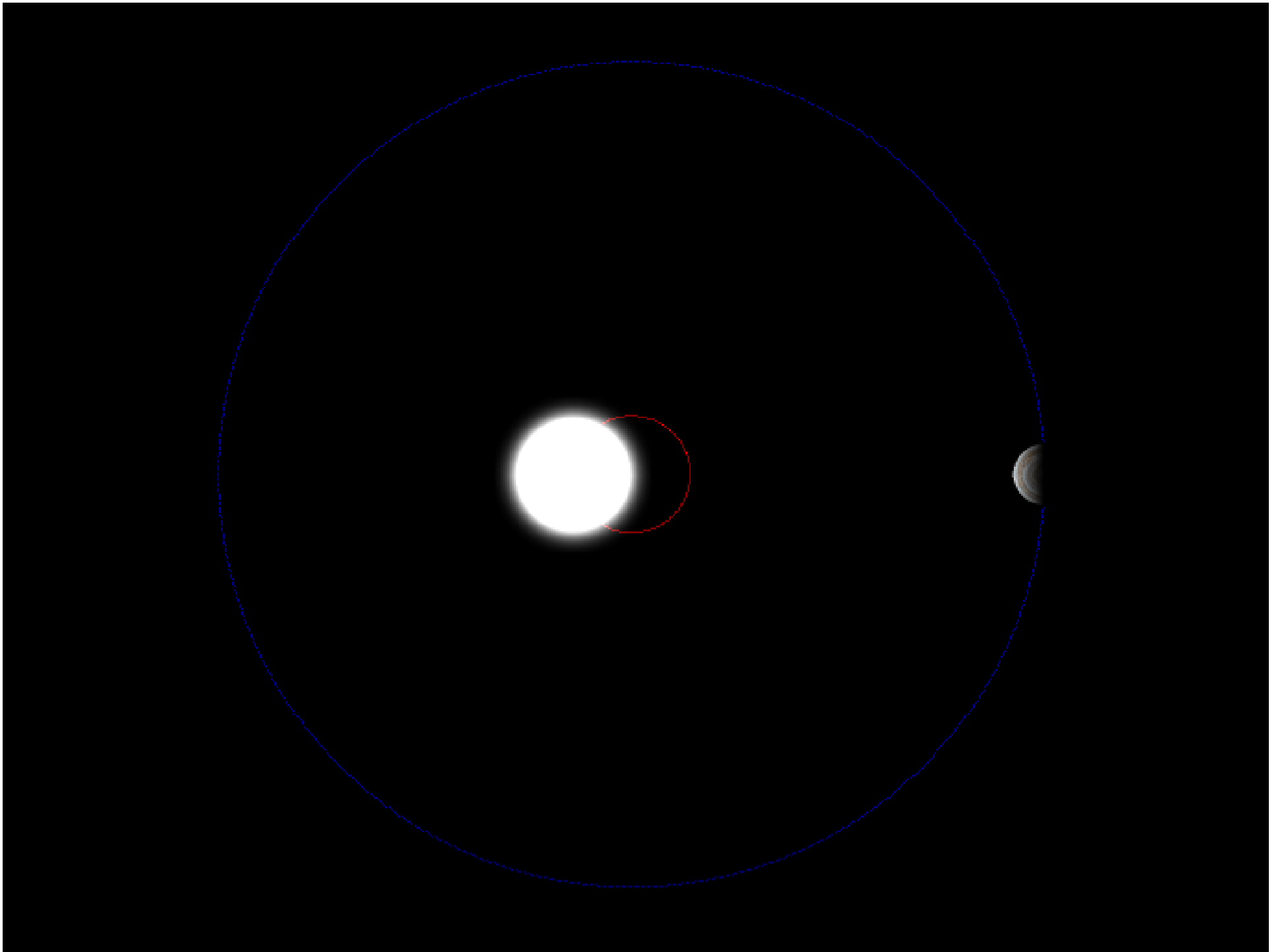
А вот что думали о нейтронных звездах:

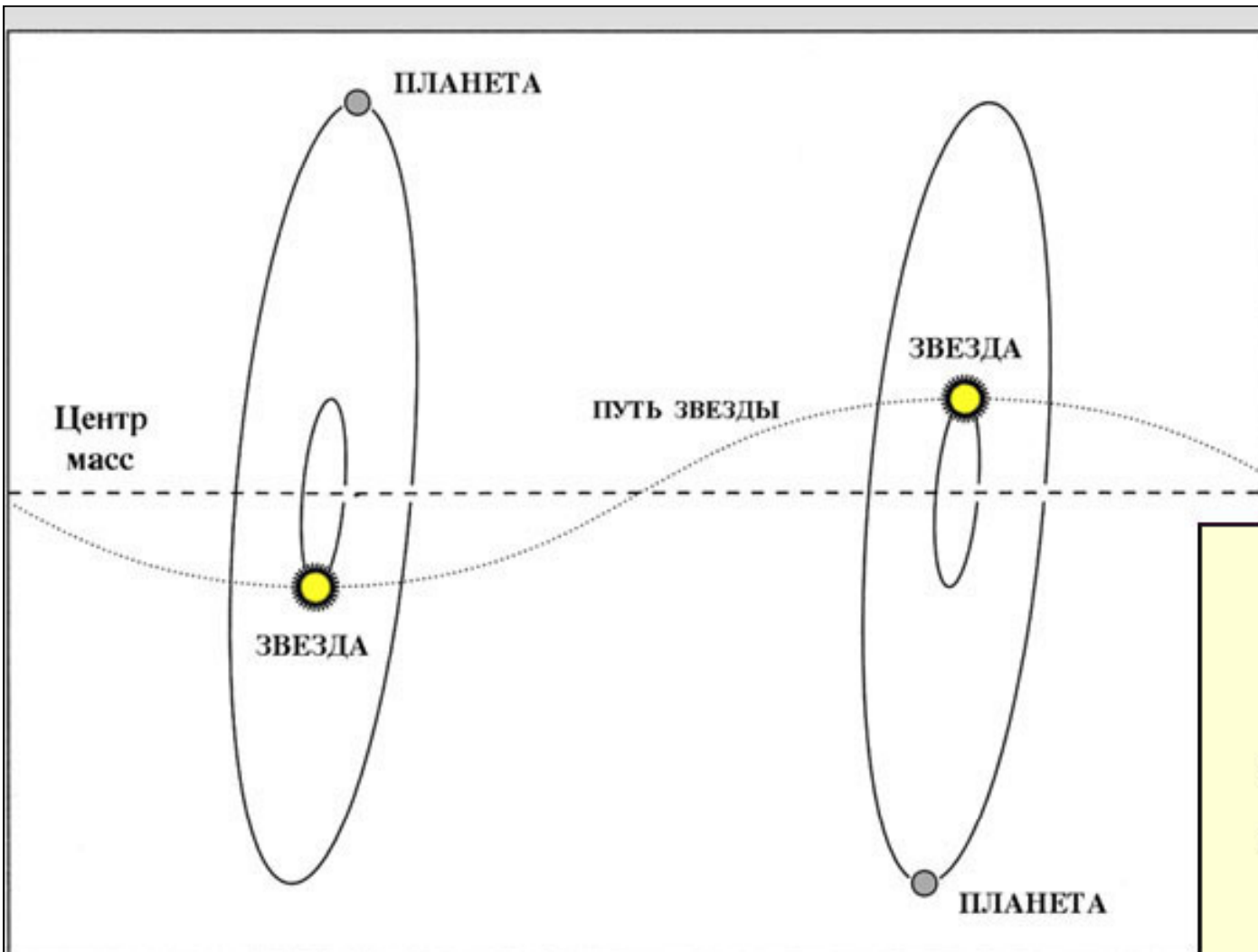
"Такой объект будет иметь диаметр порядка 30 км, и он будет быстро остывать. Надежда увидеть такой тусклый объект столь же мала, как и надежда увидеть планету, принадлежащую другой звезде. Иными словами - надежды нет"



(Торн К. Черные дыры и складки времени. М.: Физматлит, 2007)

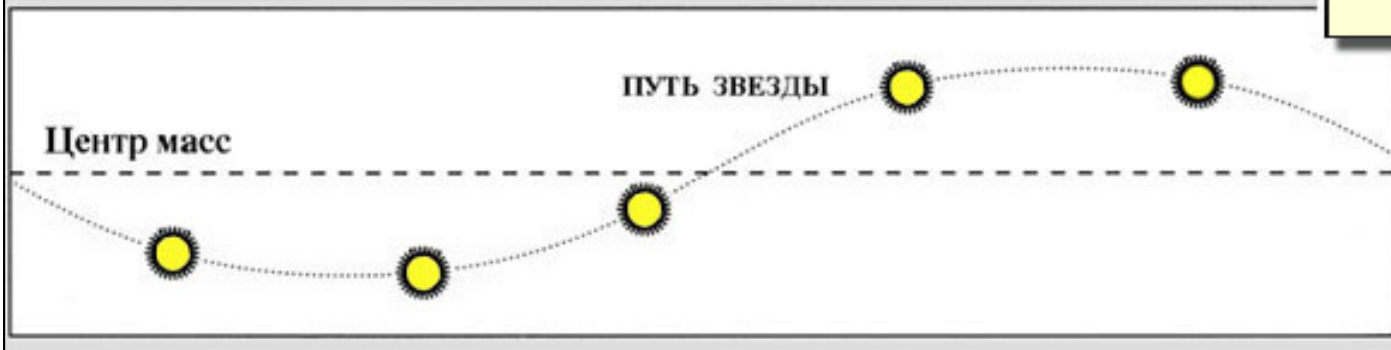
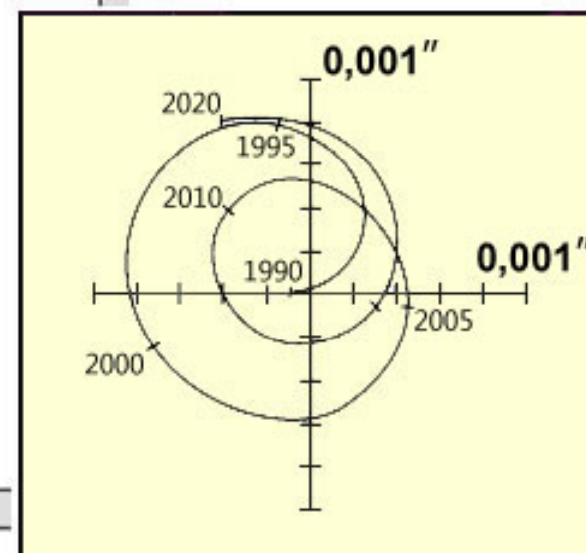
Вскоре удалось обнаружить пульсары. Прошло еще 30 лет и практически одновременно (1995-96 гг.) были открыты одиночные остывающие нейтронных звезд и экзопланеты! В некотором смысле прогноз оказался верным: их открытие было одинаково трудным, но оно состоялось, причем раньше, чем на это можно было рассчитывать.



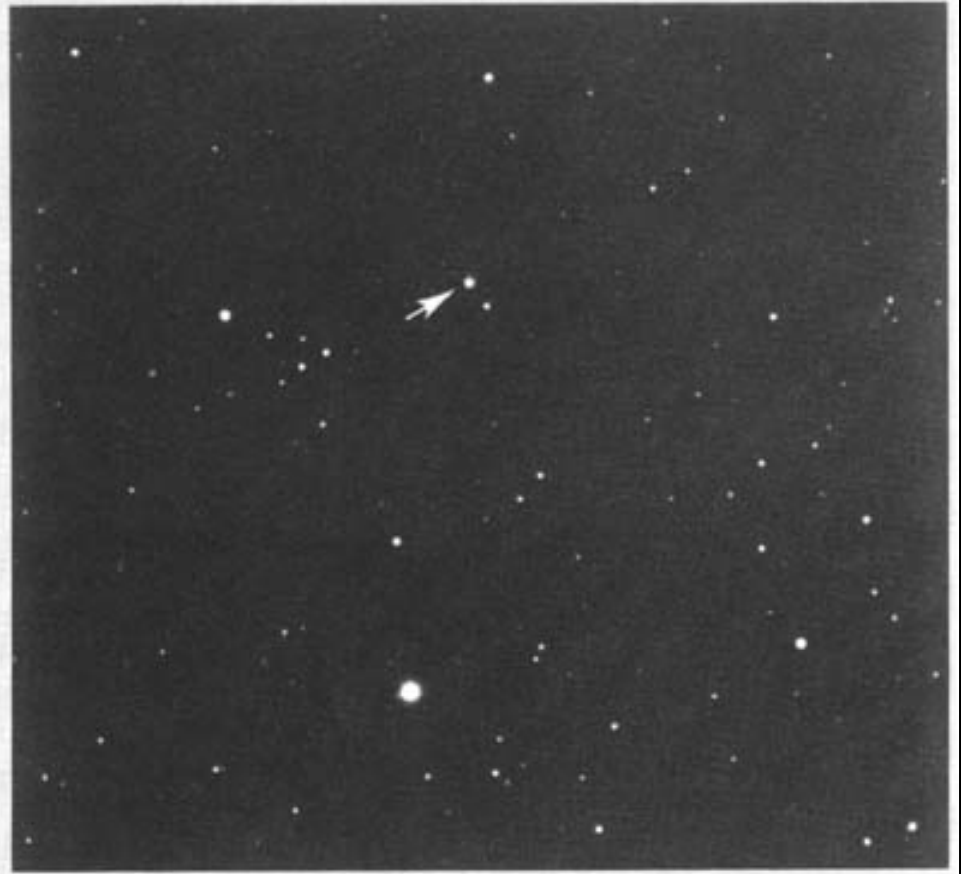


**Движение планеты
искривляет
траекторию звезды**

**Угловое
движение Солнца**



**для наблюдателя
на расстоянии
33 световых года**



Robert S. Harrington
U.S. Naval Observatory
and

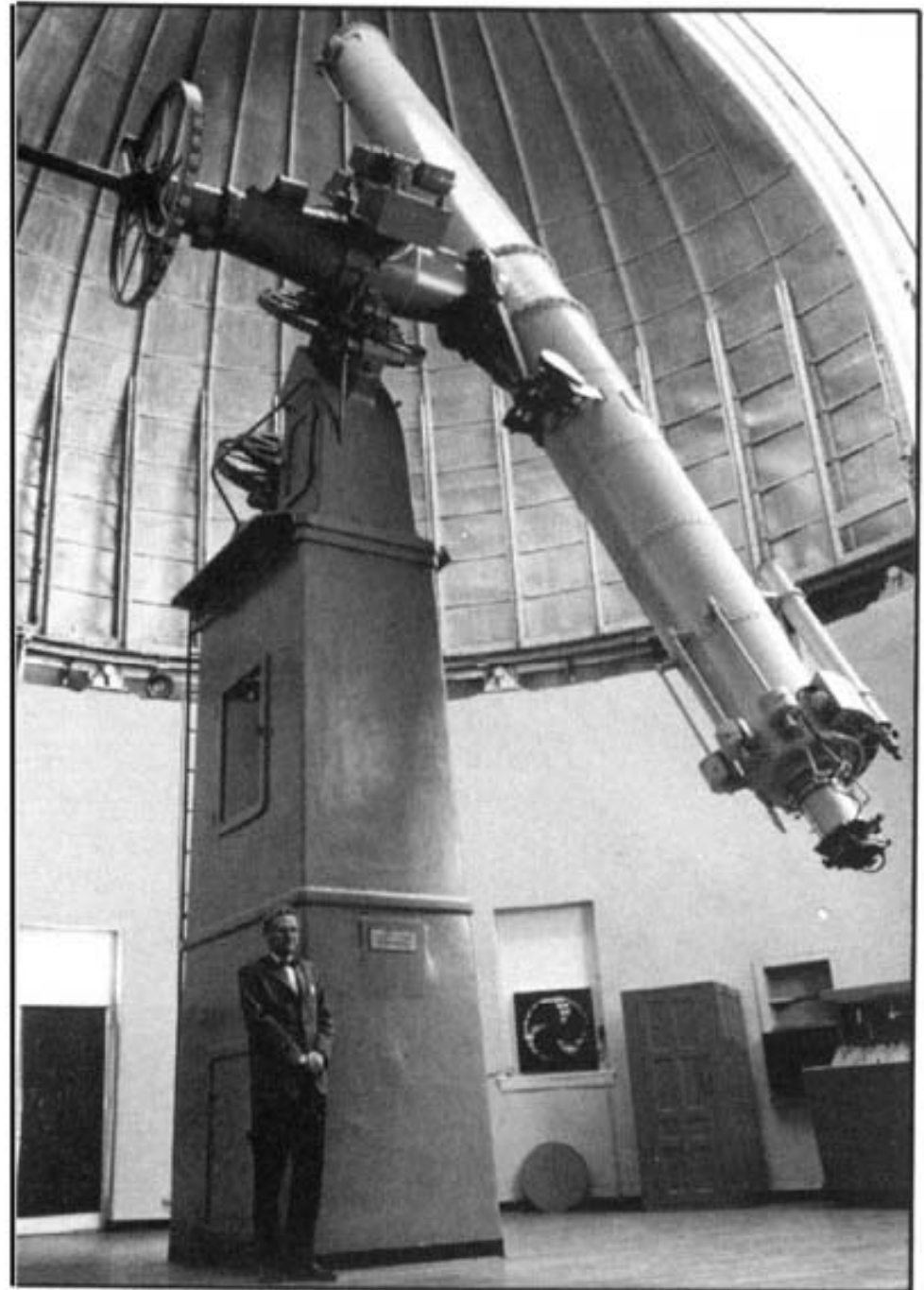
Motion of Barnard's Star (arrowed) in ten years. During one decade, Barnard's Star moves more than 1½ minutes of arc almost due north. At this rate, its position changes by the equivalent of the full Moon's diameter in only 175 years. (20-inch Carnegie Astrograph photographs courtesy of Lick Observatory.)

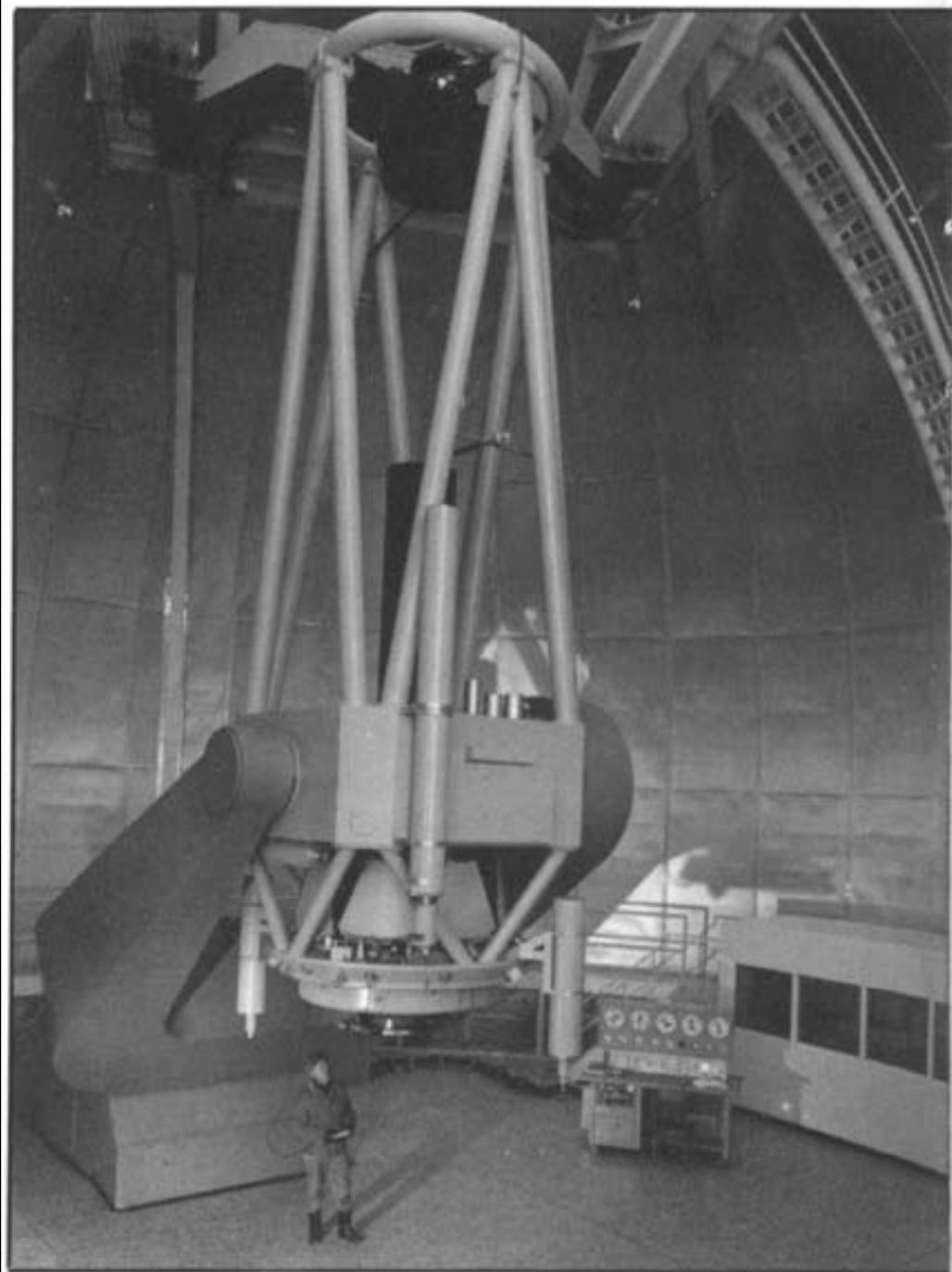
Перемещение Летящей Звезды Барнарда за 10 лет

Питер ван де Камп у 24-дюйм рефрактора обсерватории Спрул (США)

С 1937 по 1960 г. он наблюдал
Звезду Барнарда и заключил,
что у нее есть планета или
даже несколько с массами
близкими к массе Юпитера

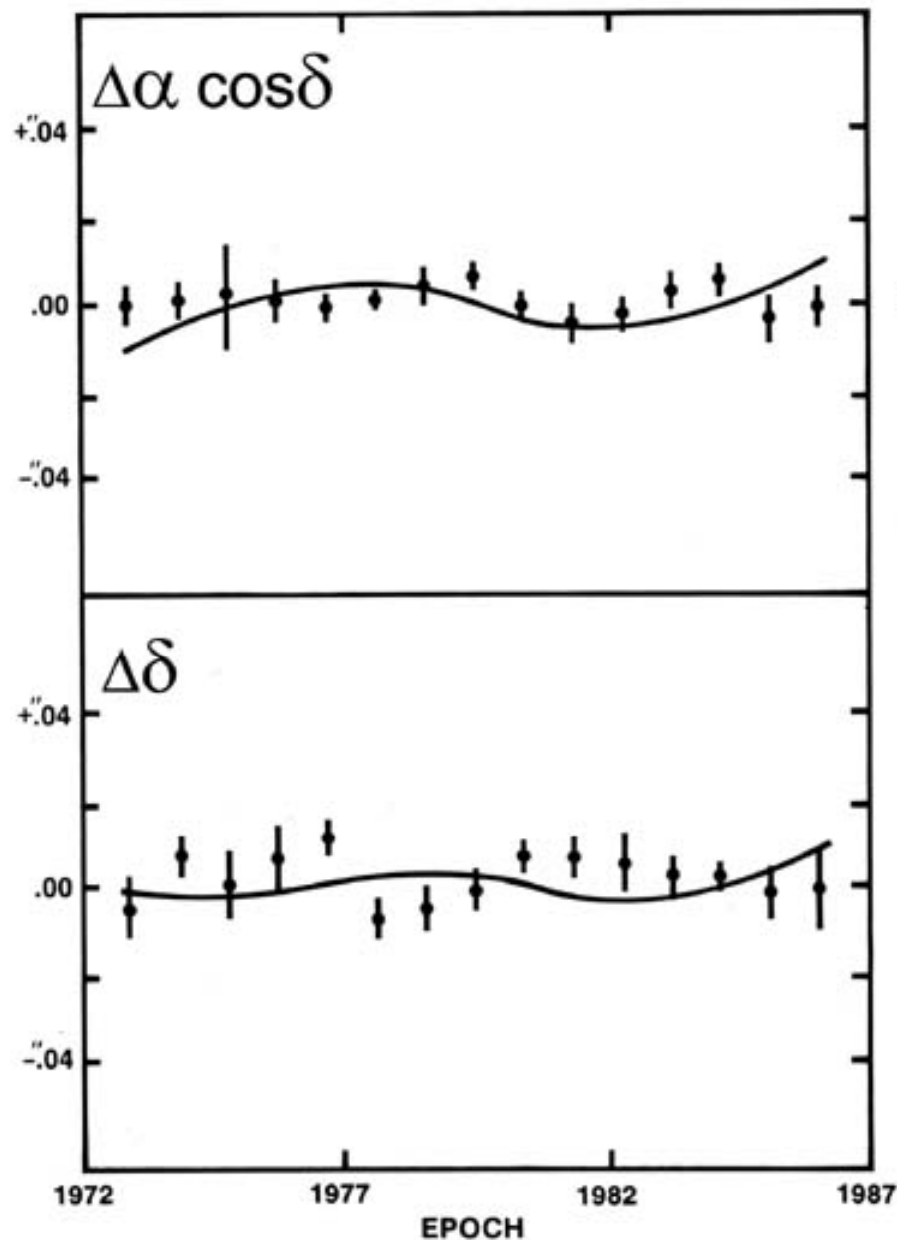
*The 24-inch telescope at Sproul Observatory.
Peter van de Kamp (posed in front of the
telescope) has used this instrument for
decades in his continuing study of the motions
of nearby stars. (Photograph courtesy of
Swarthmore College.)*





***Более качественные
наблюдения
не подтвердили
наличие планет
у звезды Барнарда***

61-дюймовый
астрометрический
рефлектор
Морской обсерватории
близ Флагстаффа
(Аризона)

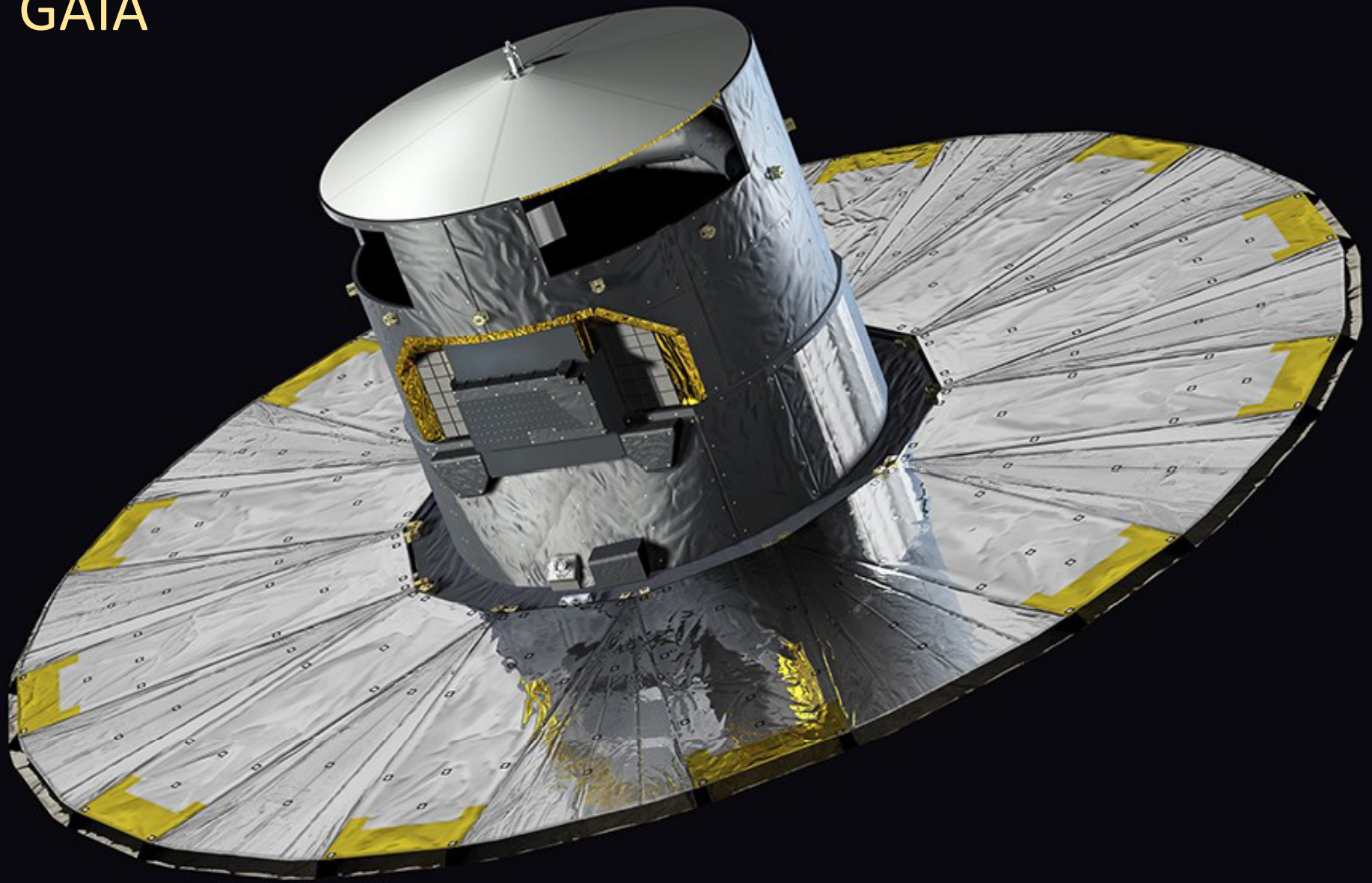


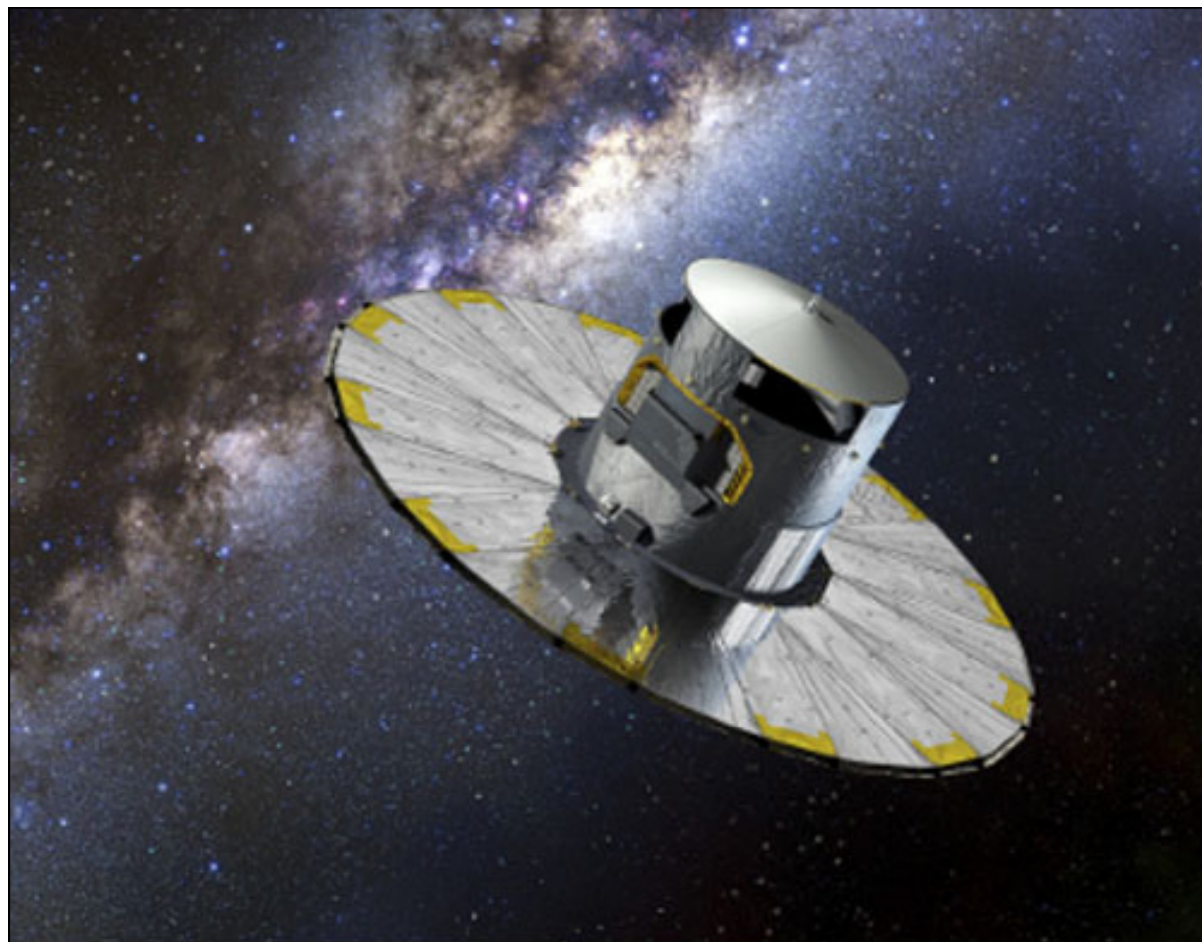
Отклонения собственного движения
Звезды Барнарда от прямолинейного
по данным Морской обсерватории США
за 1972-1986 гг. (точки)

Сплошная линия показывает,
как двигалась бы звезда
по данным ван де Кампа

"Residuals" in the motion of Barnard's Star as derived from U.S. Naval Observatory data, 1972-1986. Charted here are the measured deviations (residuals) from a straight-line path shown by Barnard's Star in the east-west (top) and north-south (bottom) directions. The dots mark the measured residuals in each year, the vertical short lines through the dots indicate the estimated uncertainties in the measurements, and the smooth lines (curves) show what the residuals should be according to Peter van de Kamp's work. A perfectly straight-line path would be represented by a horizontal line through ".00" on each graph.

GAIA





Астрометрический
спутник

GAIA (ESA)

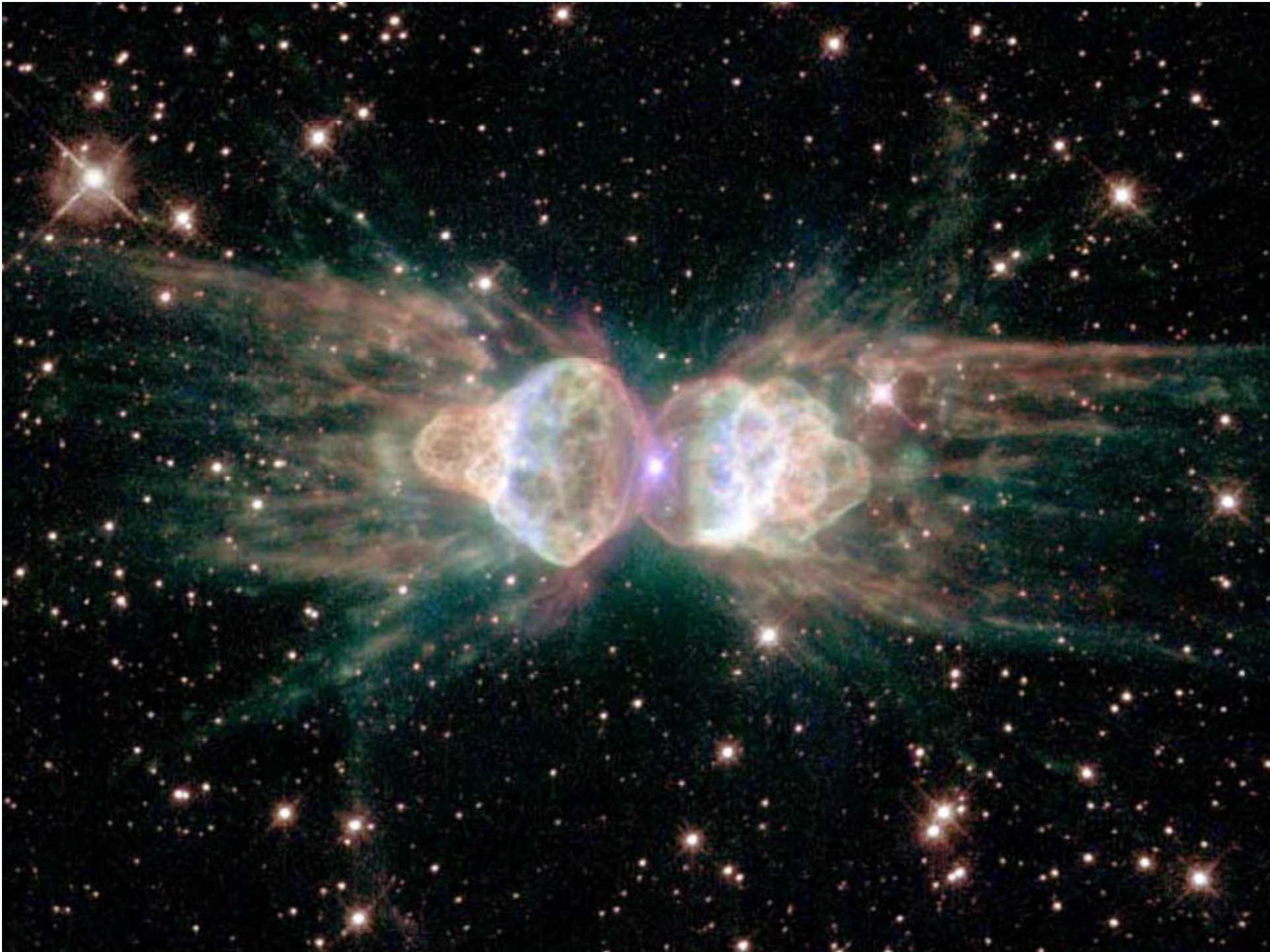
Должен измерить
положение и движение
звезд ярче 15 зв. вел.
с точностью до

0,00002''

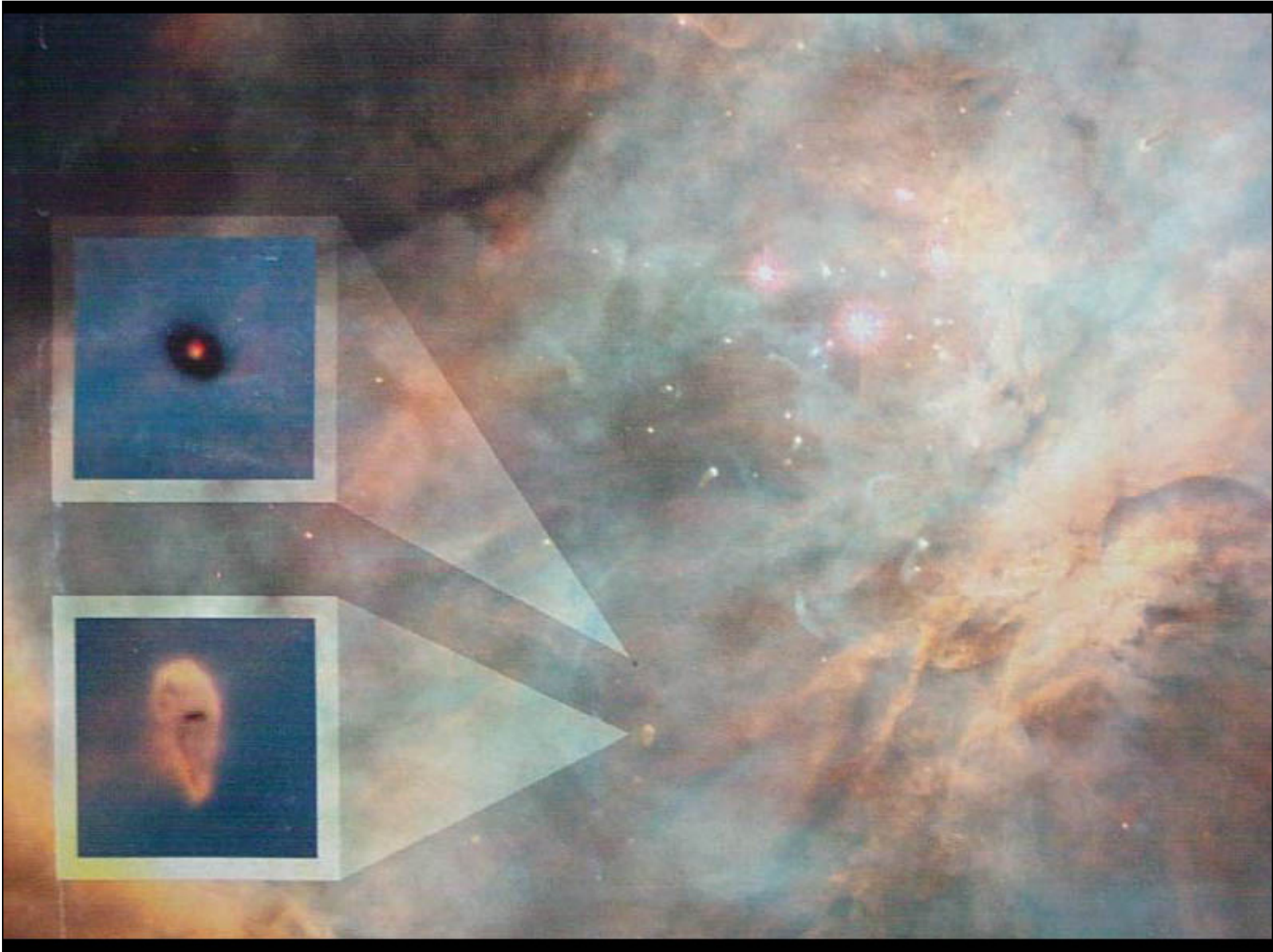
Запущен в декабре 2013 г.
в точку Лагранжа L2
системы Солнце-Земля

Это откроет перспективу
астрометрическому
методу поиска экзопланет
(который пока себя
почти не проявил)







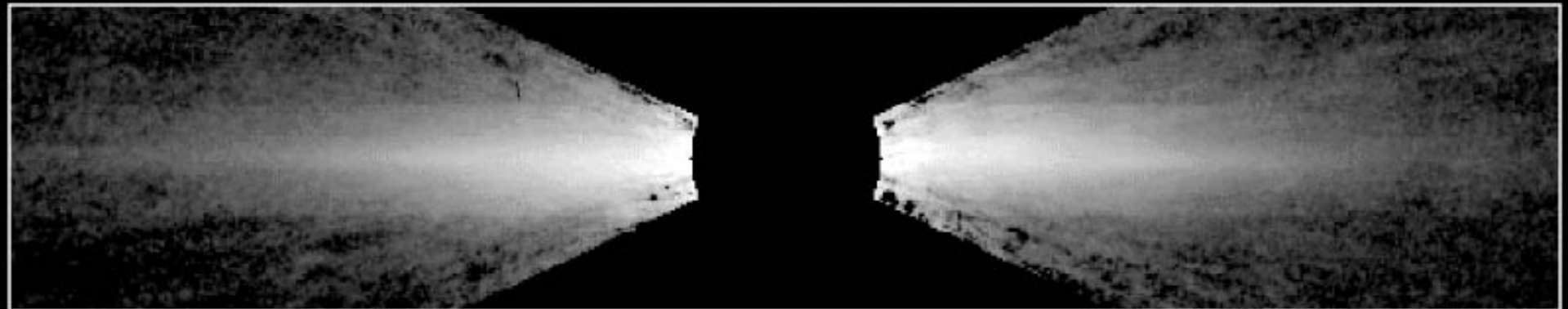




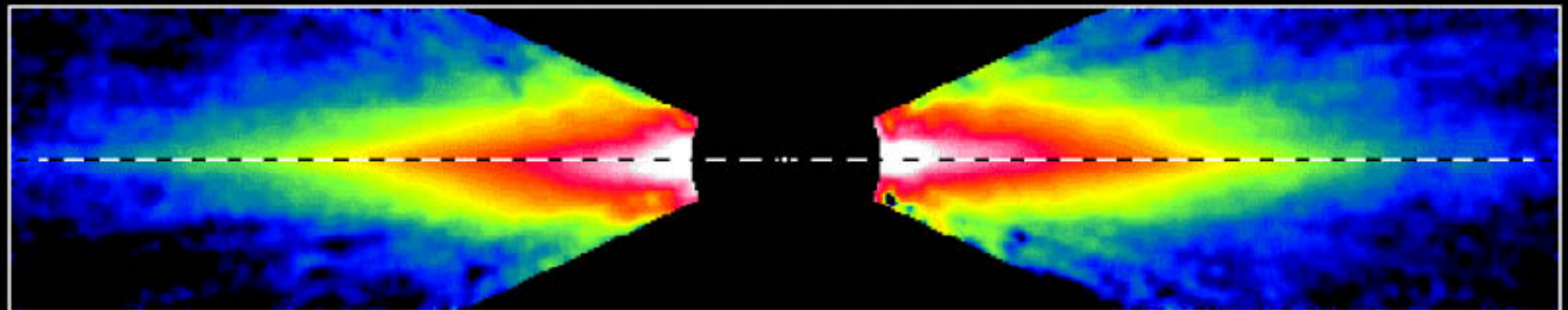
В конце 2012 г. по наблюдениям микроволнового комплекса ALMA обнаружены пылевые диски вокруг коричневых карликов. Это указывает, что и там могут формироваться планеты типа Земли

Газо-пылевой диск вокруг звезды Бета Живописца

64 св. года от Солнца



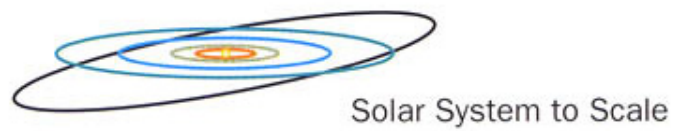
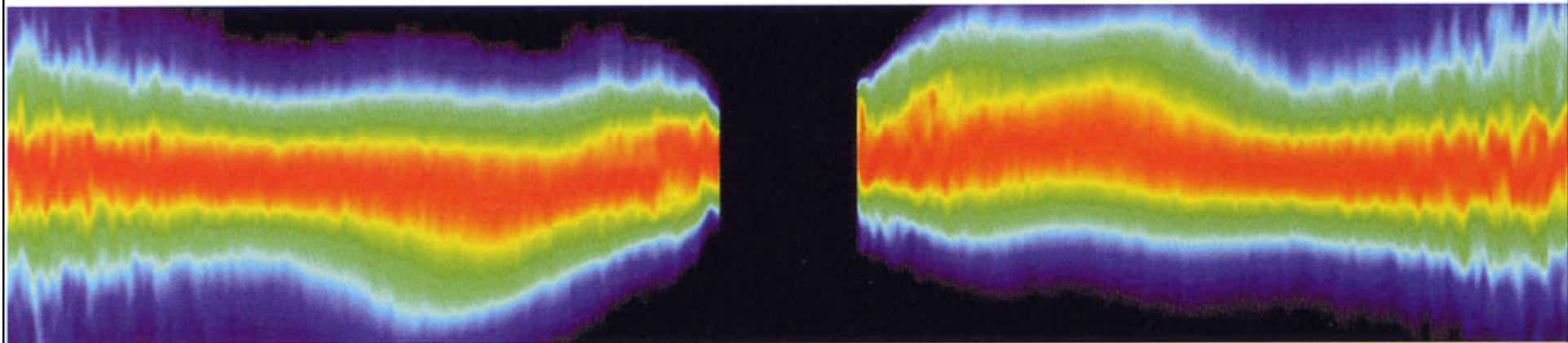
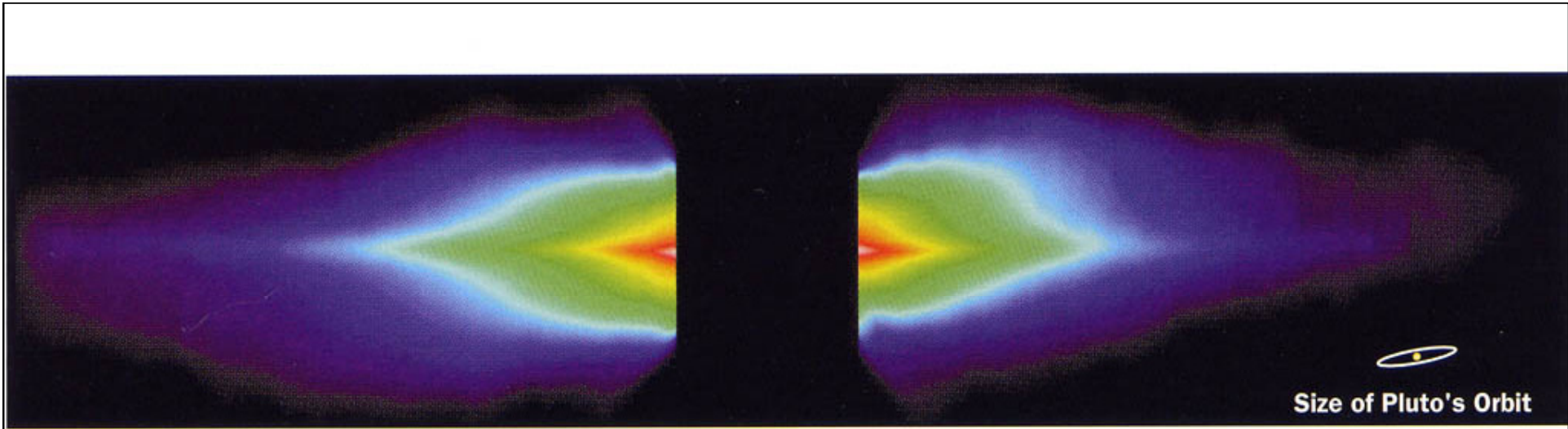
Size of Pluto's Orbit



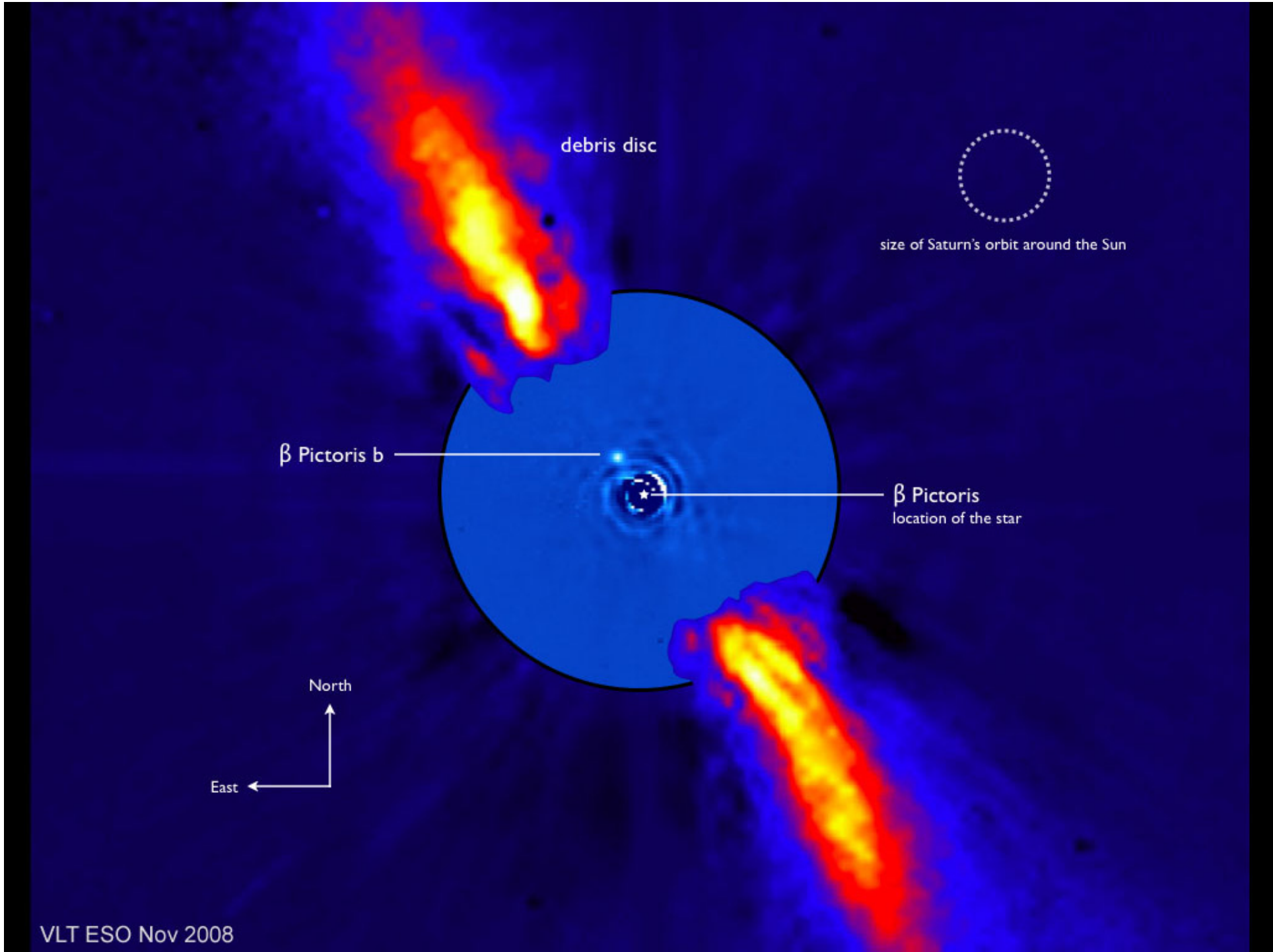
Warped Disk • Beta Pictoris

HST • WFPC2

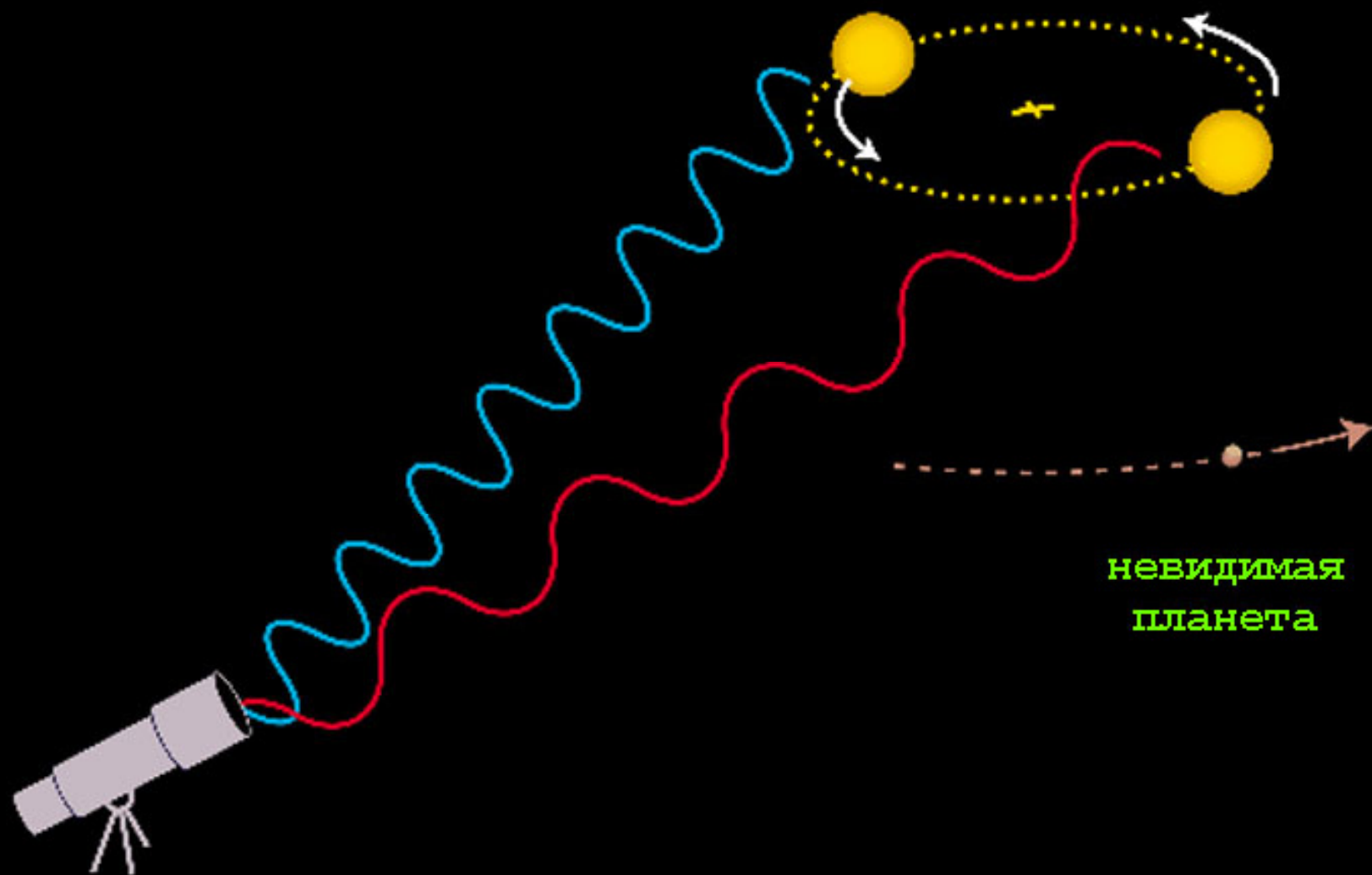
PRC96-02 • ST ScI OPO • January 17, 1995 • C. Burrows and J. Krist (ST ScI), WFPC2 IDT, NASA



β Pic



Доплеровское смещение линий в спектре звезды



невидимая
планета

PSR B1257+12



Планетная система радиопульсара

(*Wolszczan A., Frail D., 1992*)

~ 100 M_E

~ 40 а.е.



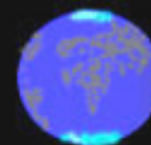
Солнце



Меркурий



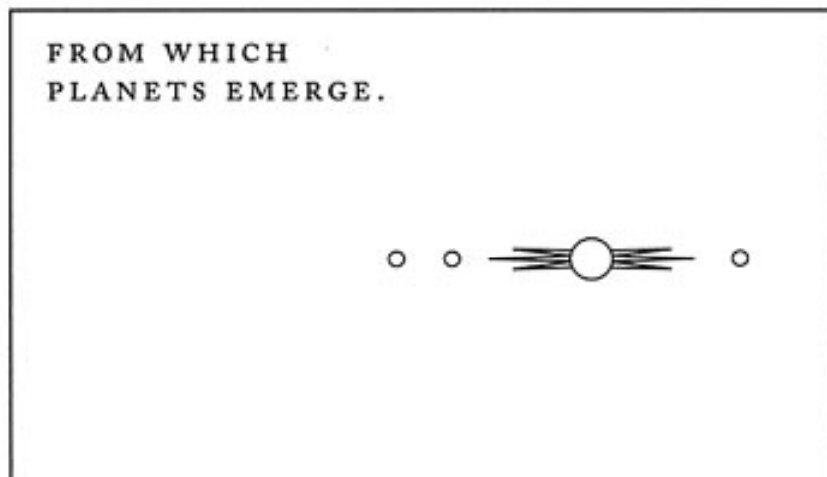
Венера



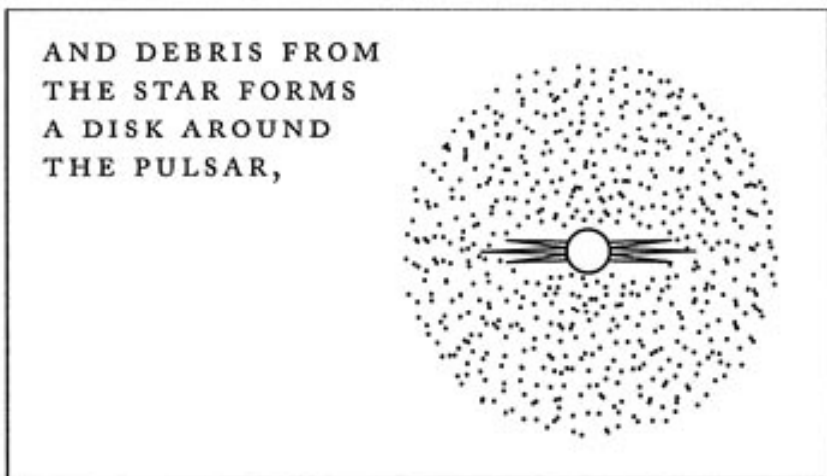
Земля

Формирование планет у пульсара (А):

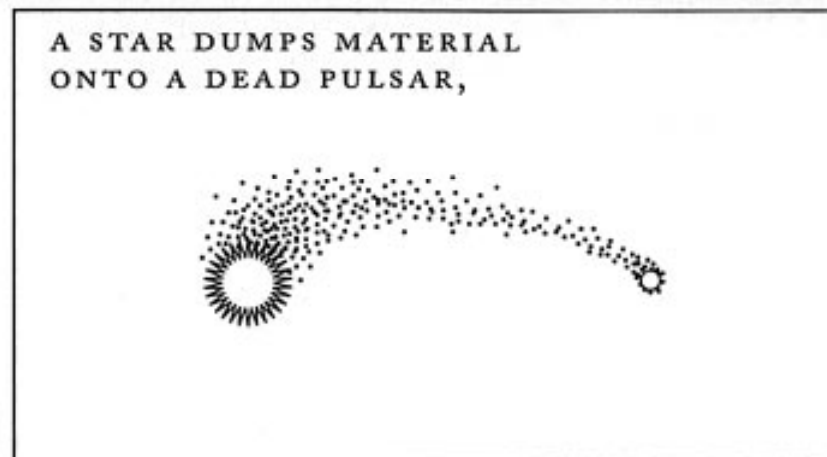
аккреция с нормальной звезды на нейтронную "оживляет" пульсар, который разрушает звезду и из её вещества рождаются планеты



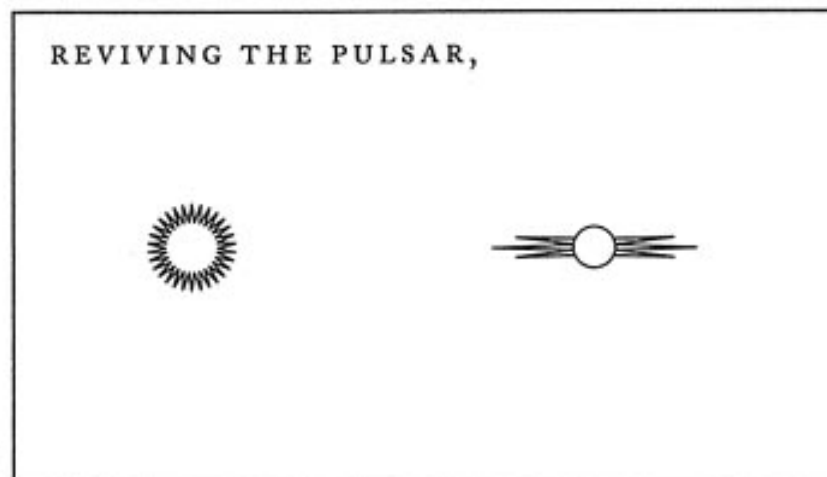
5



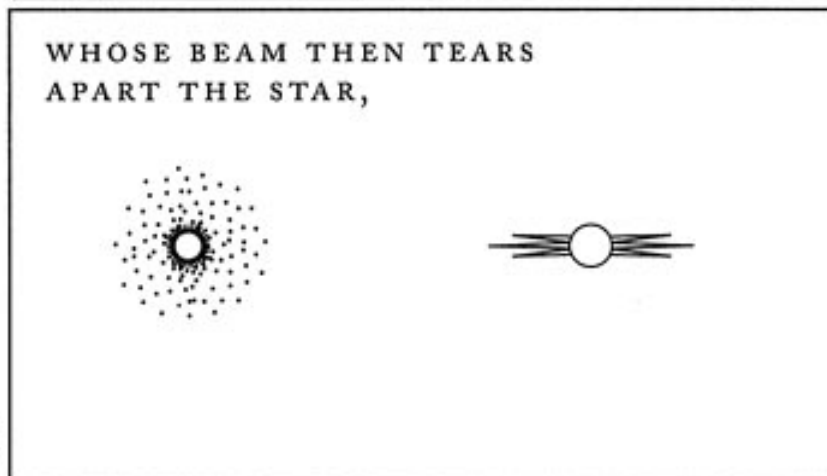
4



1



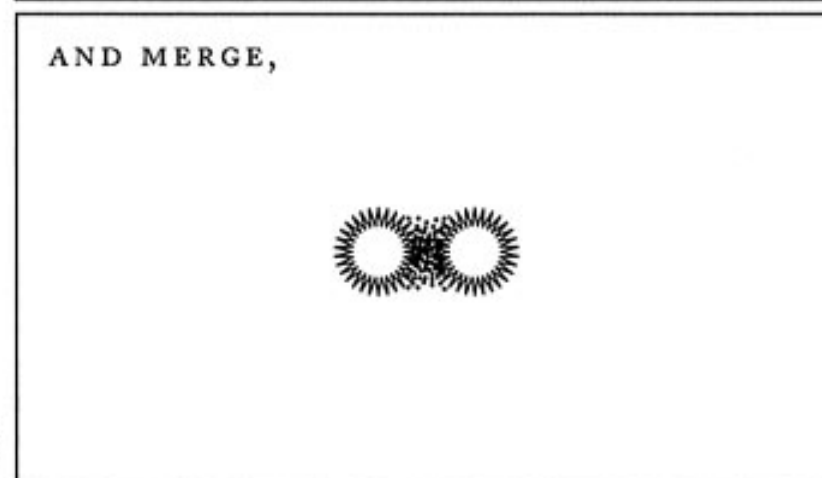
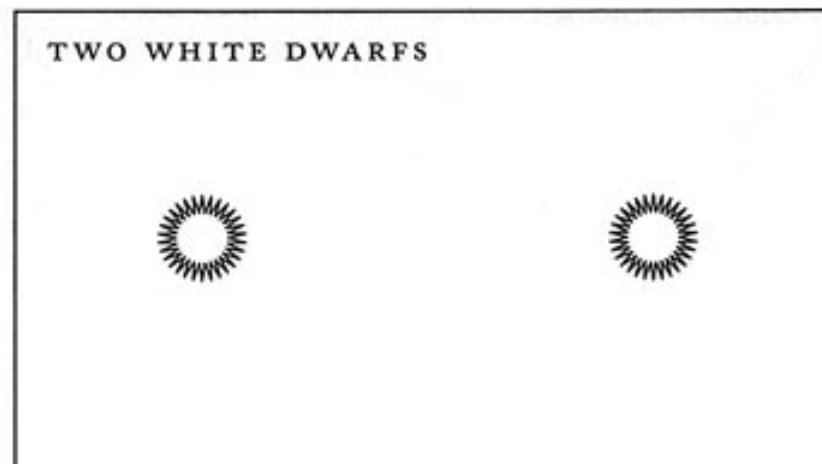
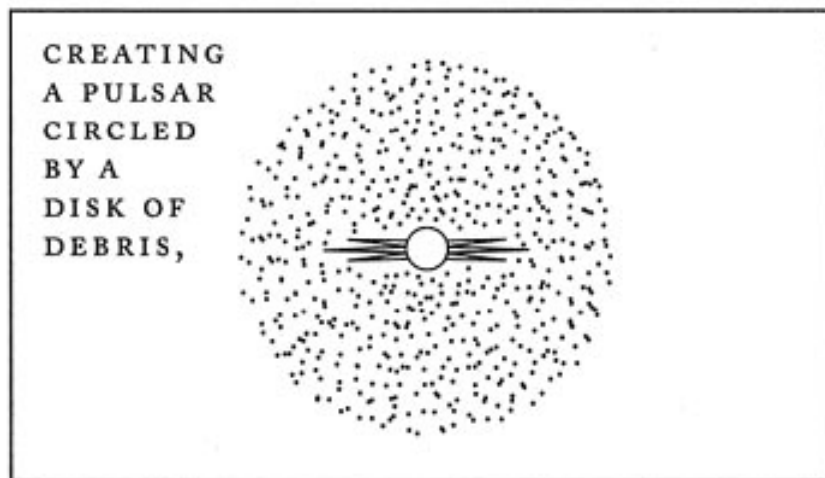
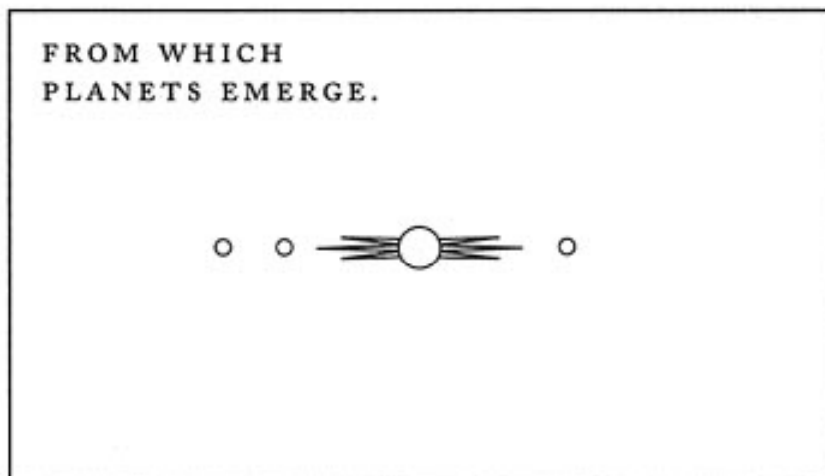
2

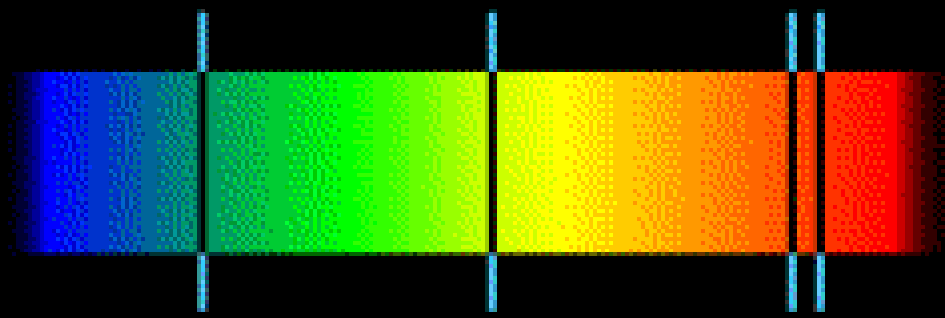
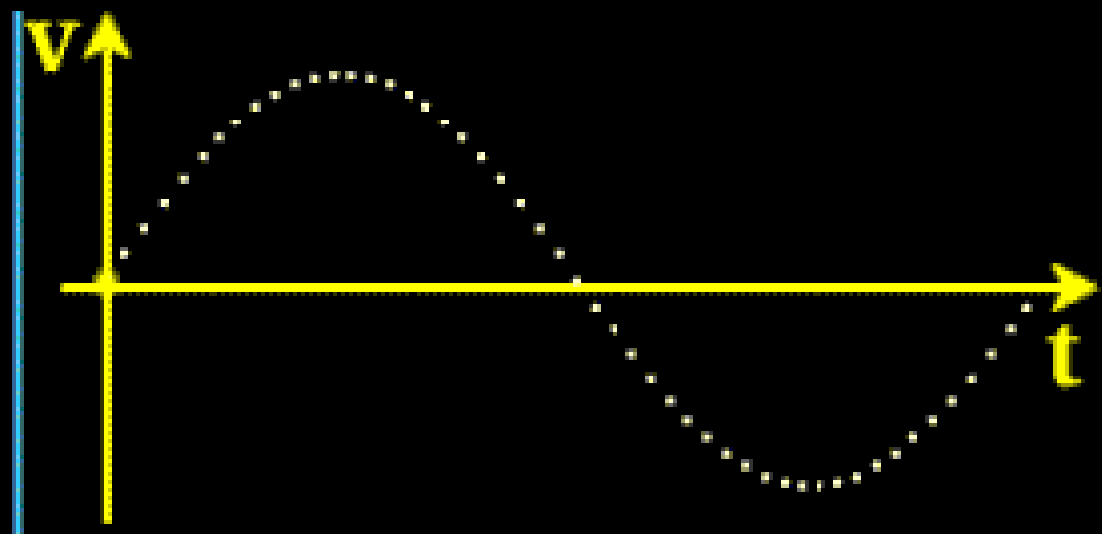


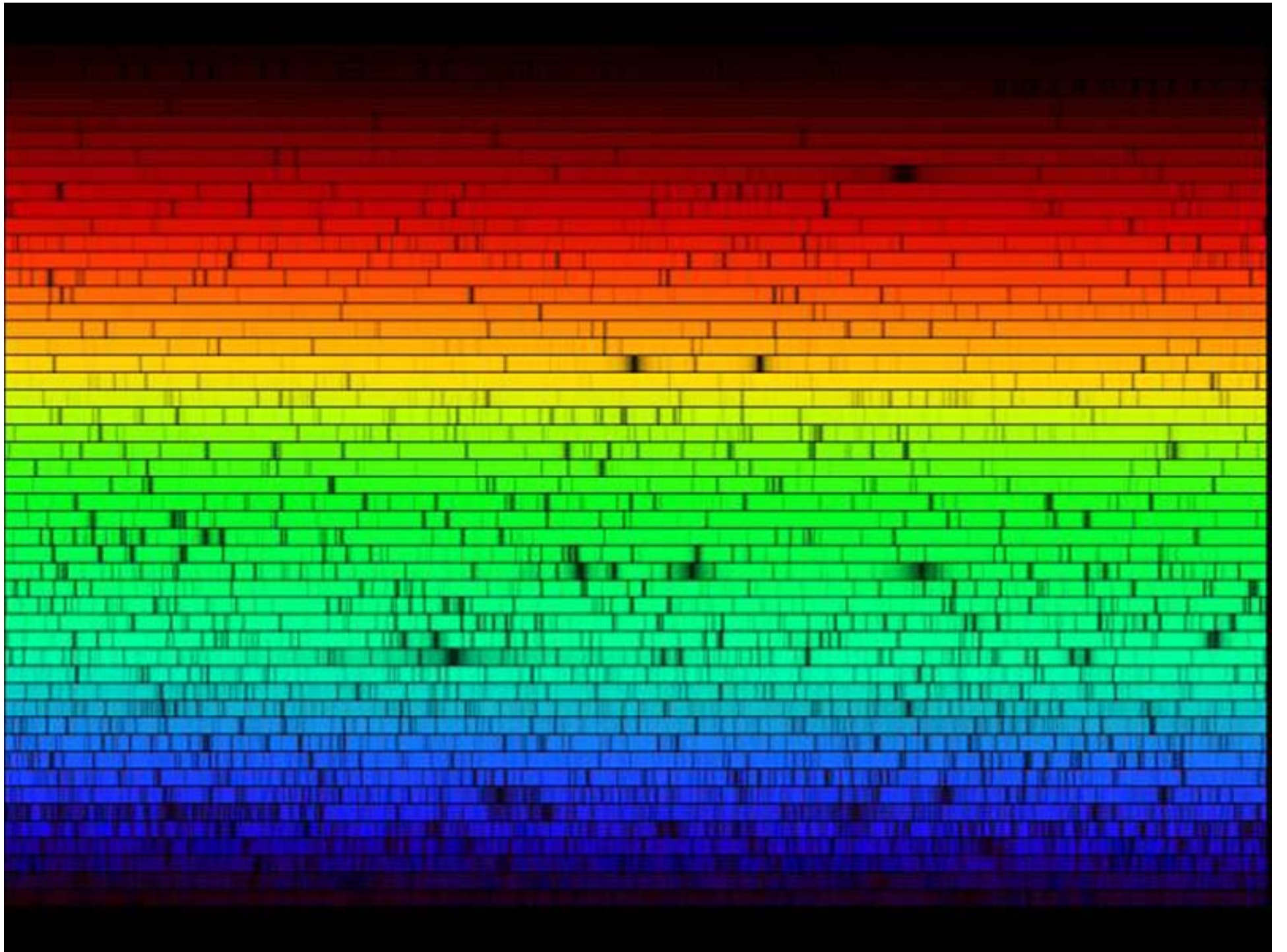
3

Формирование планет у пульсара (B):

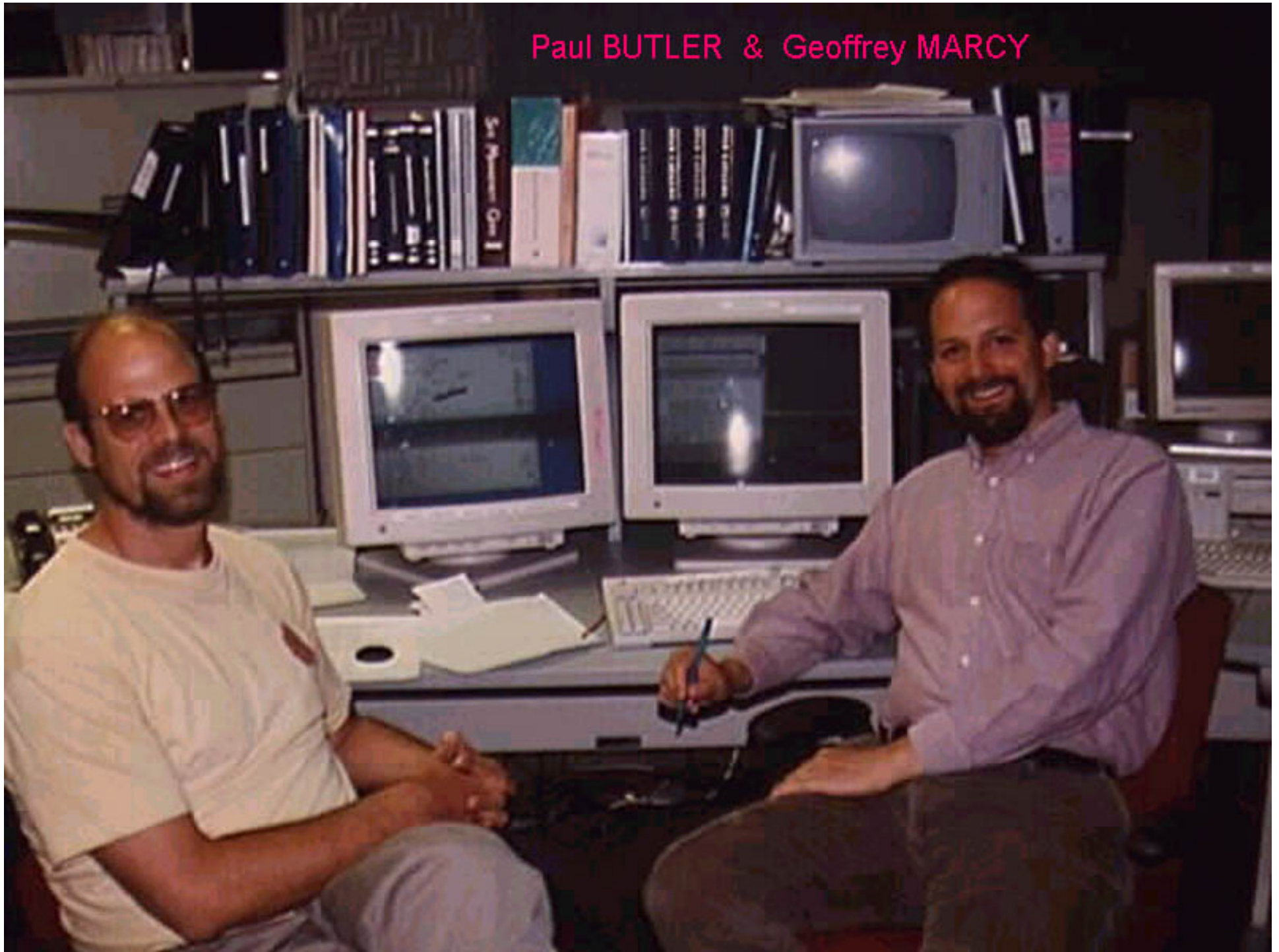
два белых карлика сливаются,
образуется нейтронная звезда -
молодой пульсар, а из остатков
вещества рождаются планеты

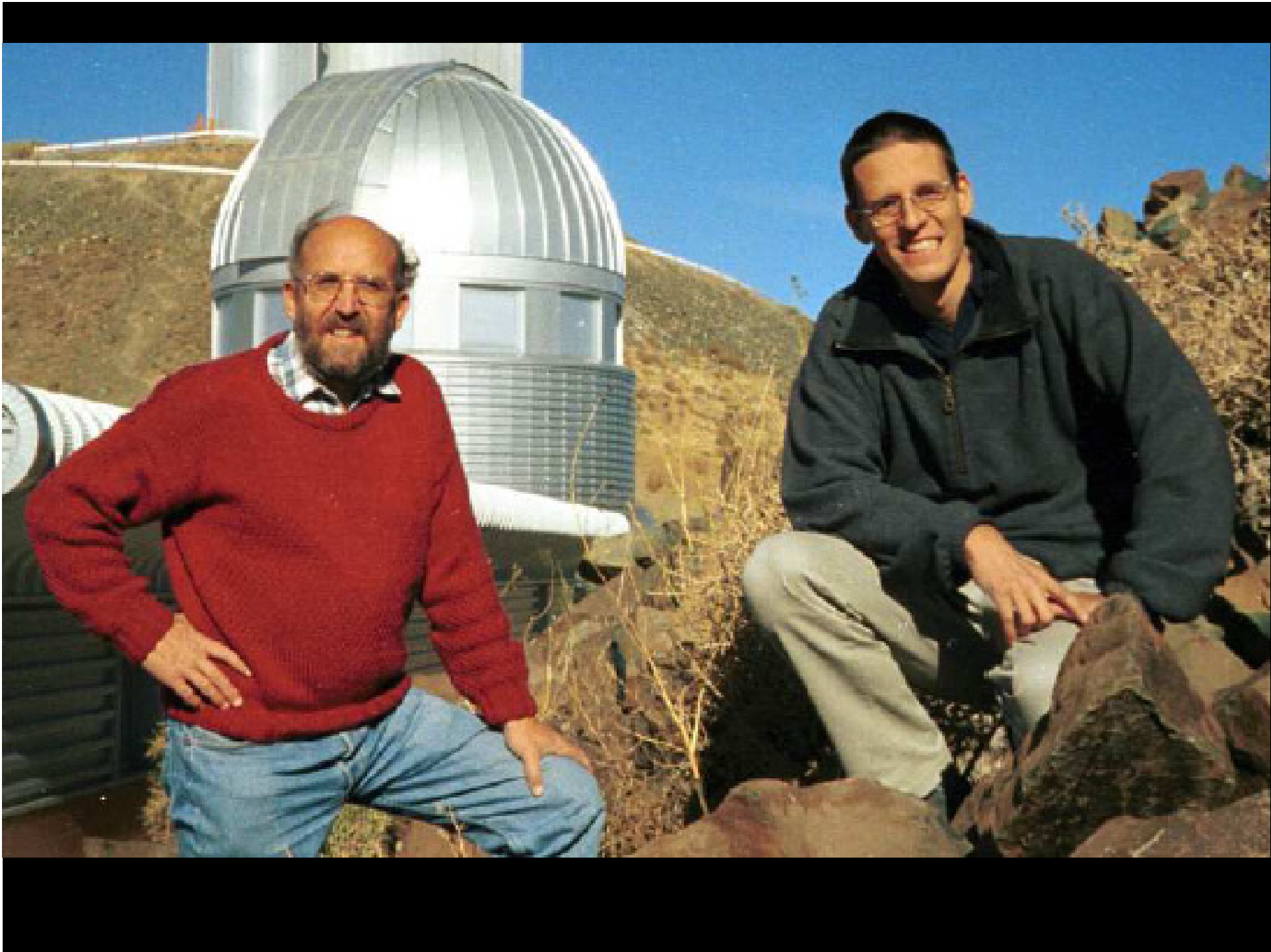






Paul BUTLER & Geoffrey MARCY





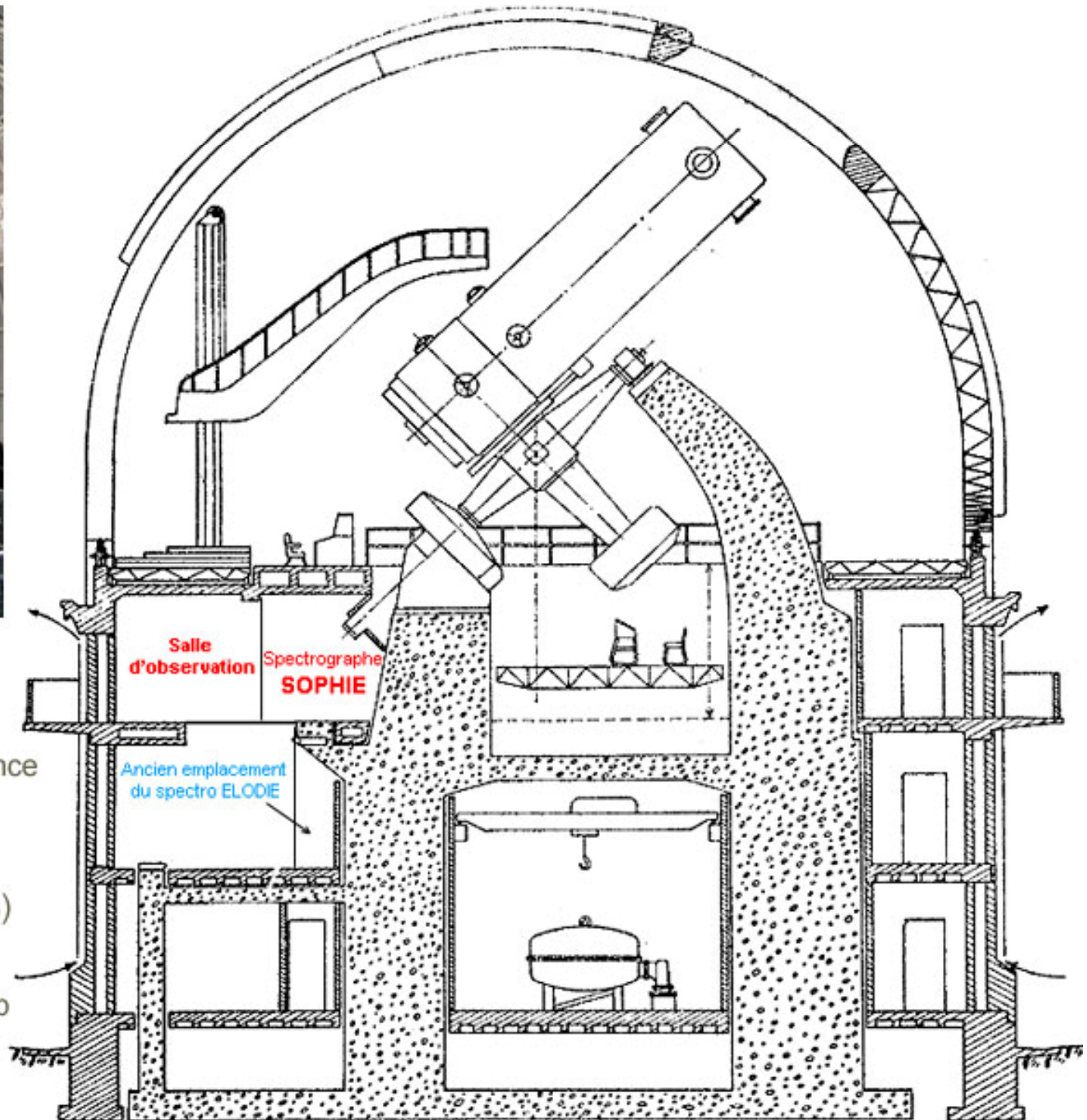


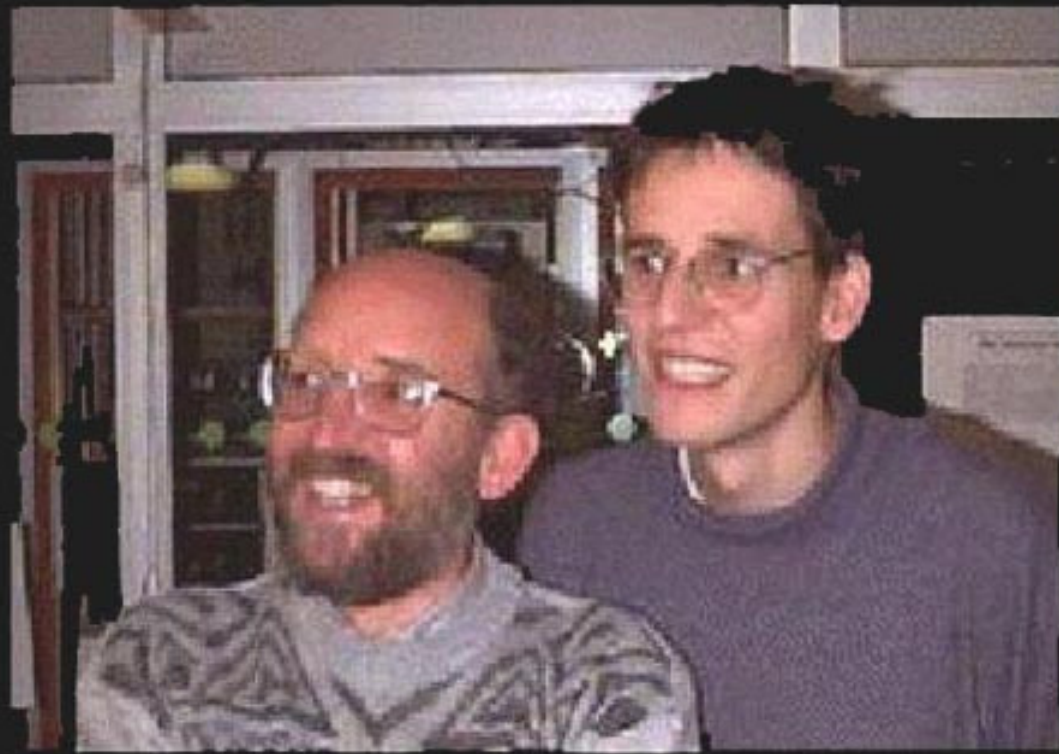
OHP 1.93-m telescope
(1958 г.)

Observatoire de Haute-Provence

Sophie - cross-dispersed
echelle spectrograph
very high precision (< 5 m/s)
radial velocity (2006 г.)

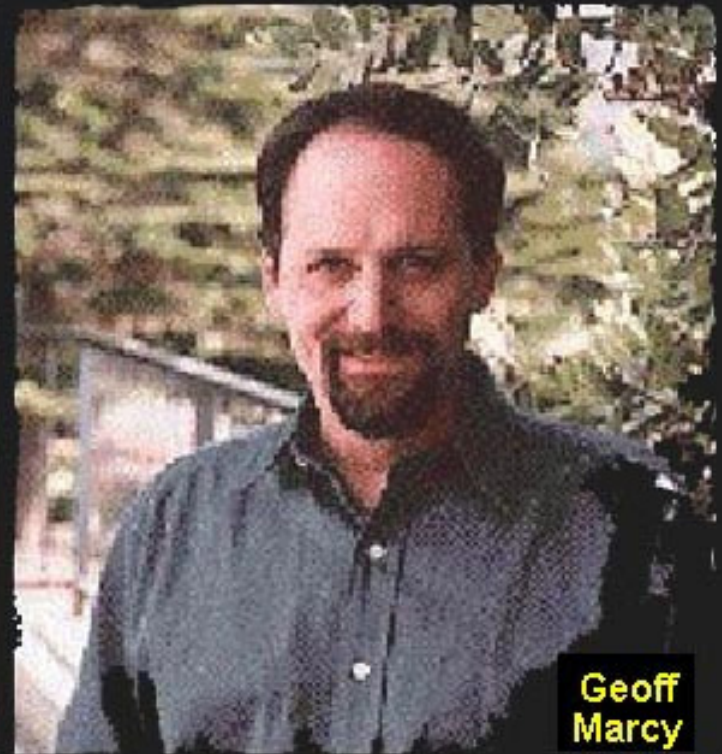
Первая экзопланета 51 Peg b
открыта здесь в 1995 г.
Майором и Келозом
со спектрометром Elodie



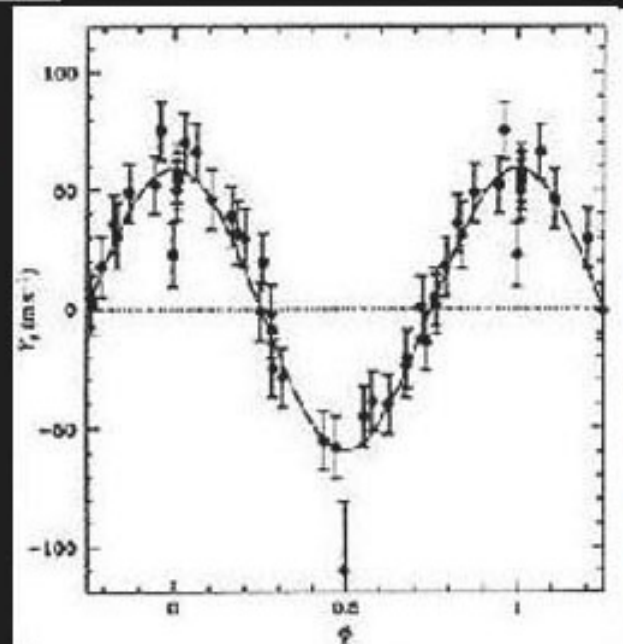


**Michel MAYOR
Didier QUELOZ**

**51 Peg
(1995)**

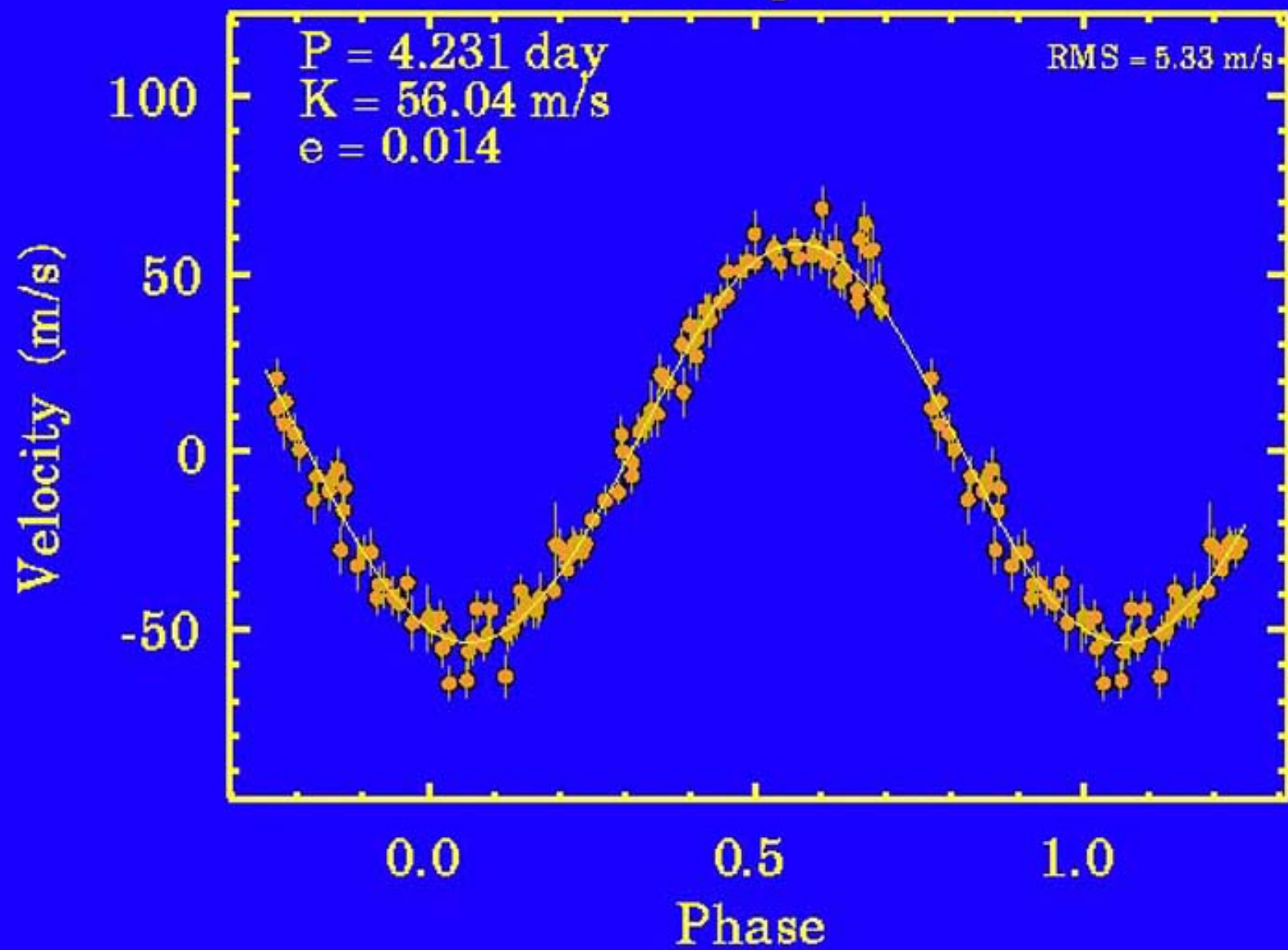


**Geoff
Marcy**



**Paul
Butler**

51 Pegasi





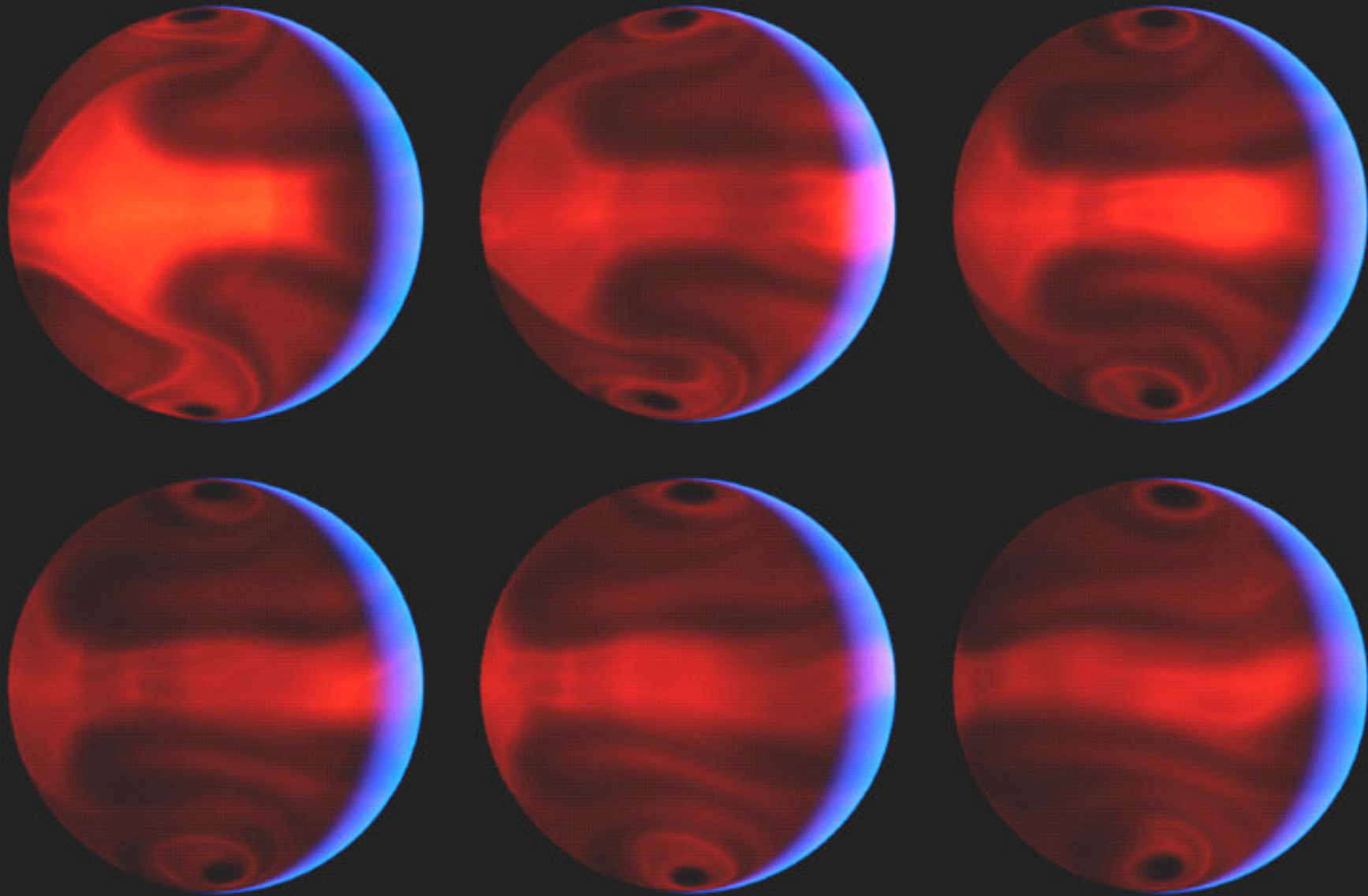
Queloz

Mayor





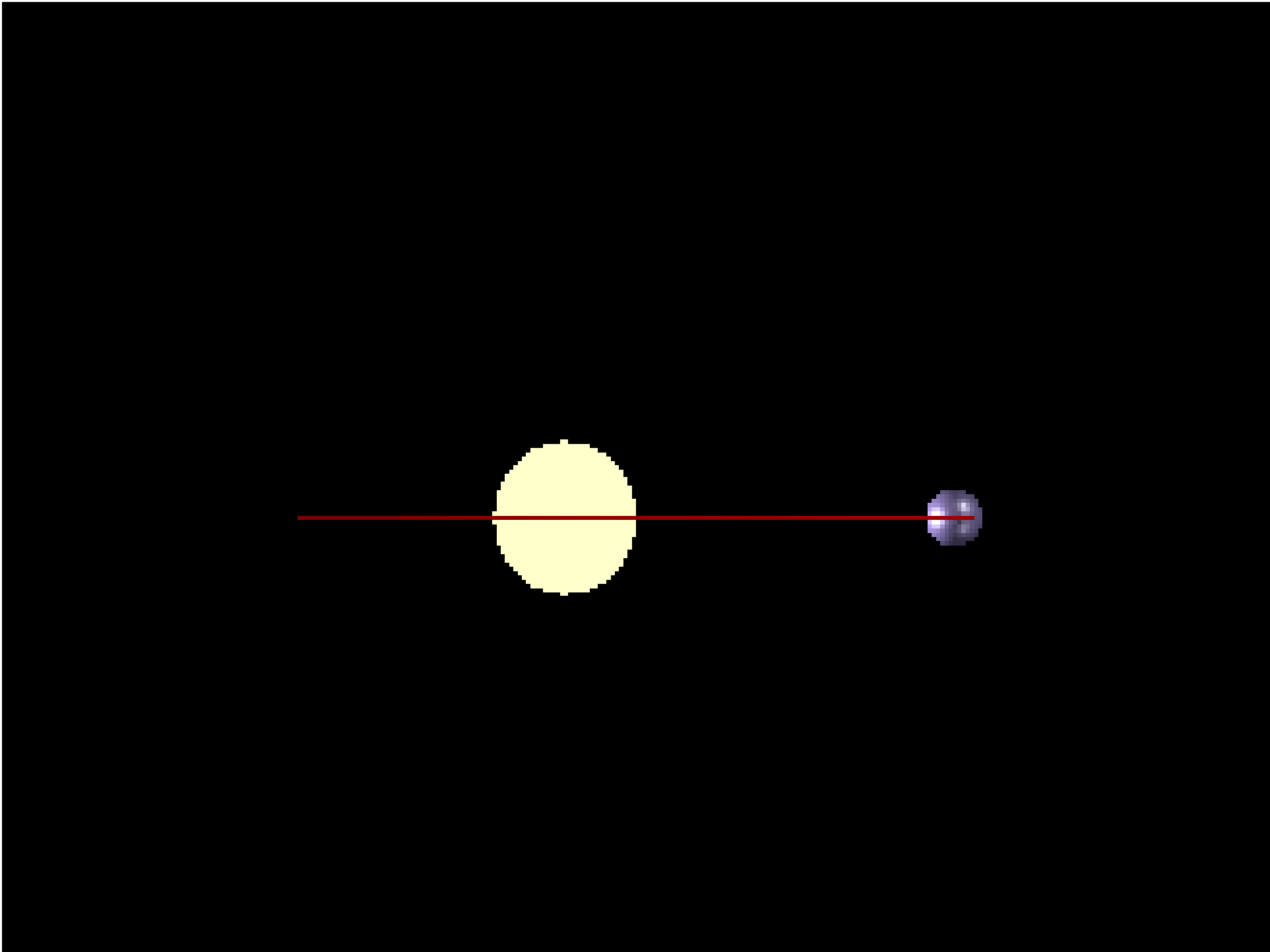
© 2013 Corall
2013

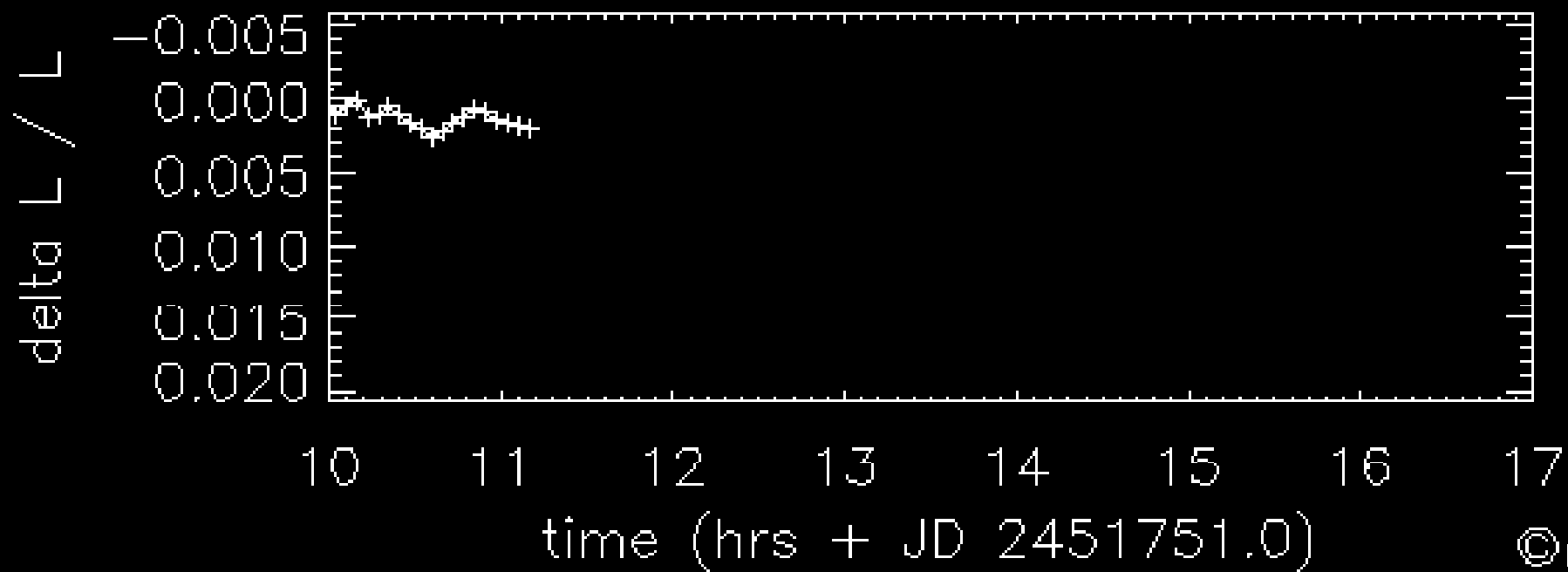
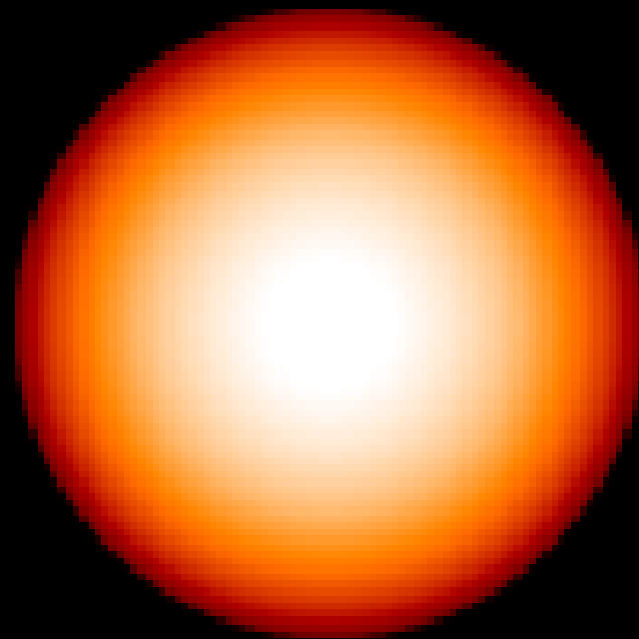


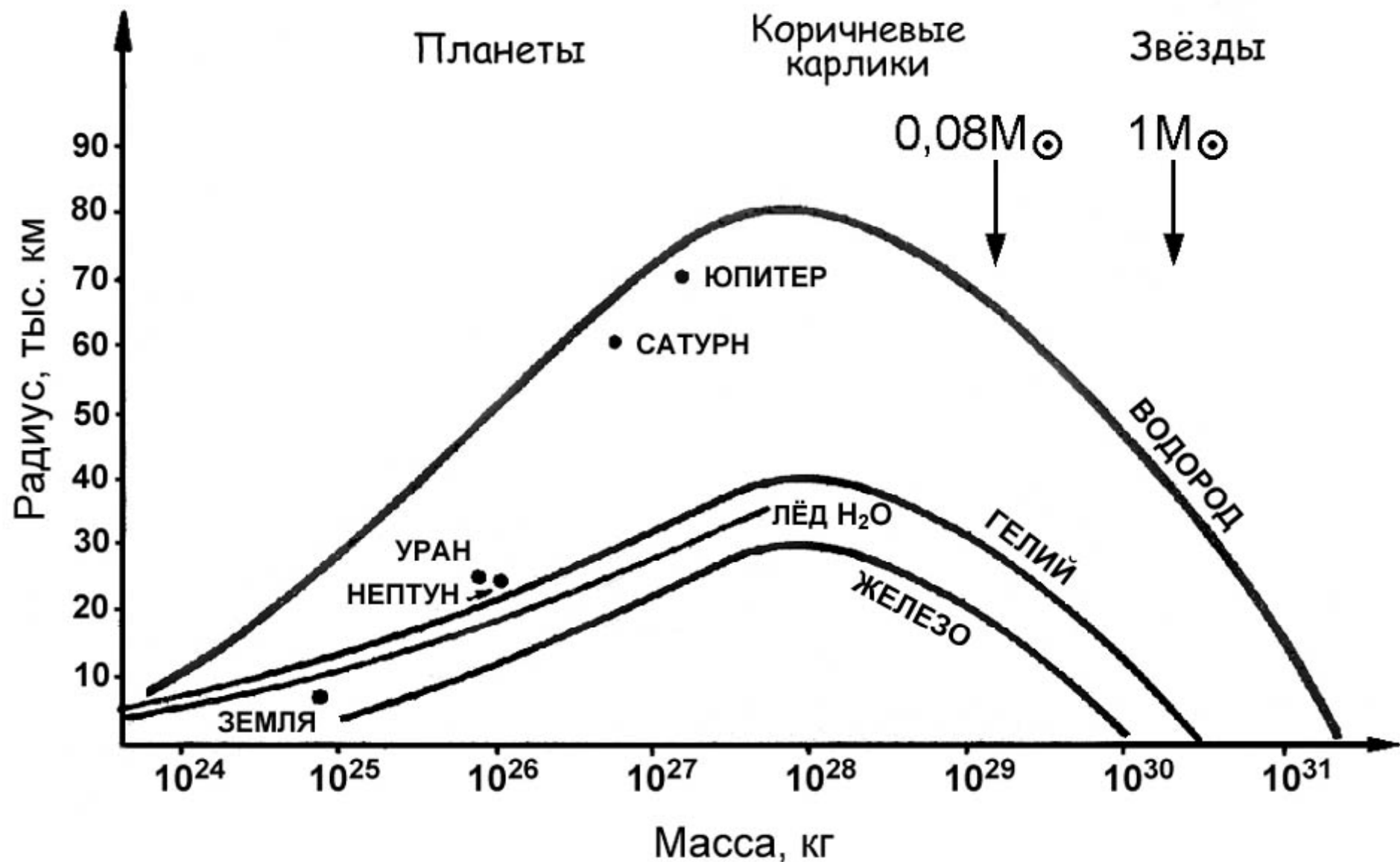
Atmospheric Simulation of Exoplanet HD 80606b

NASA / JPL-Caltech / J. Langton (Univ. of California, Santa Cruz)

ssc2009-02b

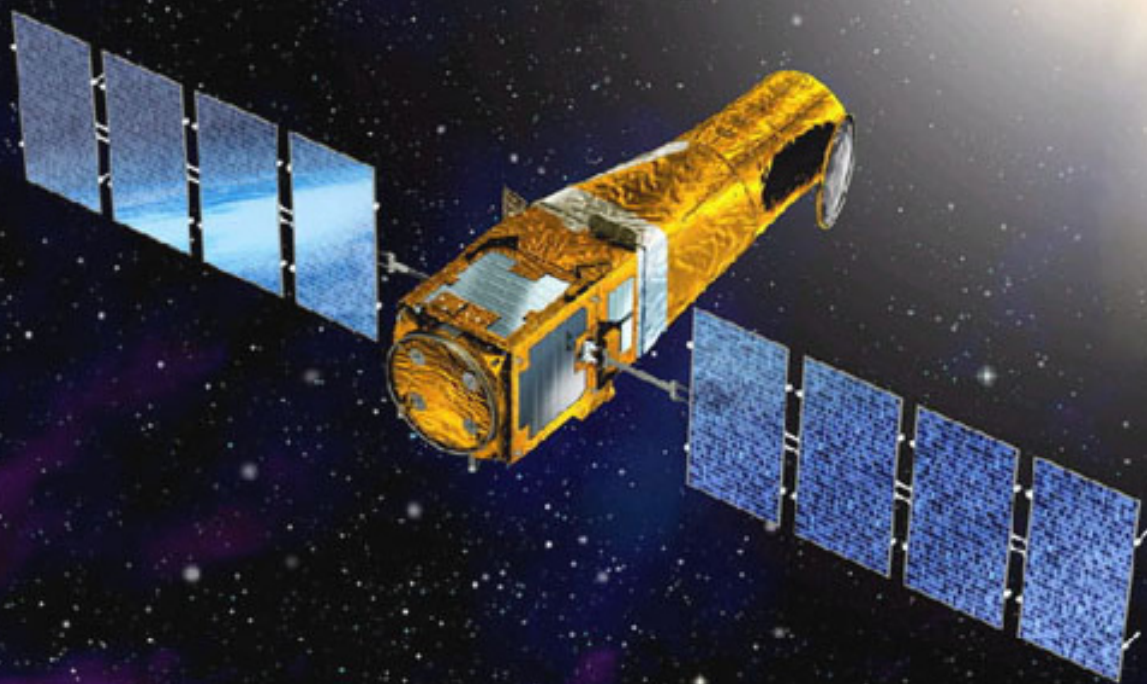






**Размер холодных равновесных конфигураций
различной массы и химического состава**

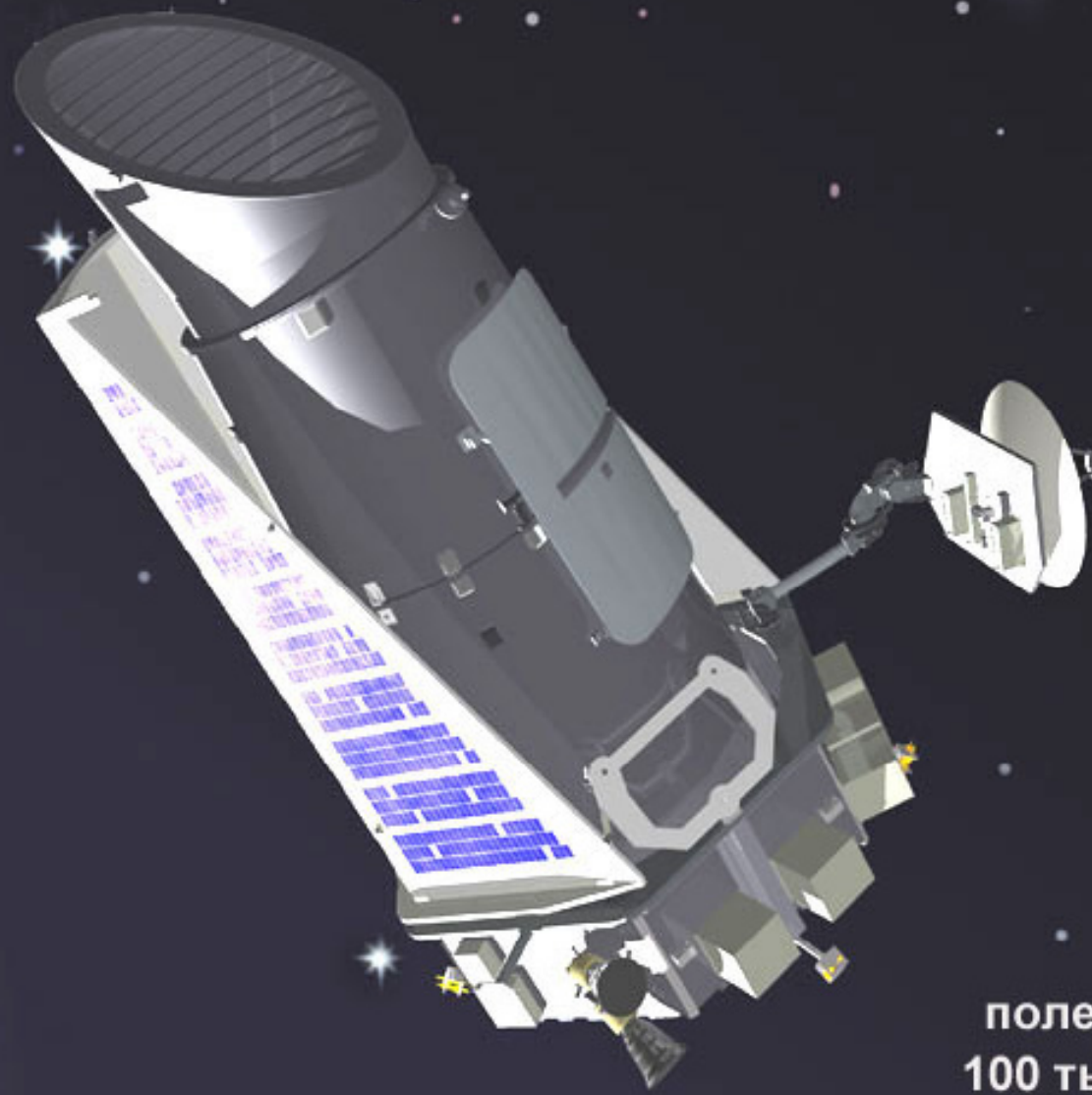
Звездная
сейсмология
и
прохождения
экзопланет



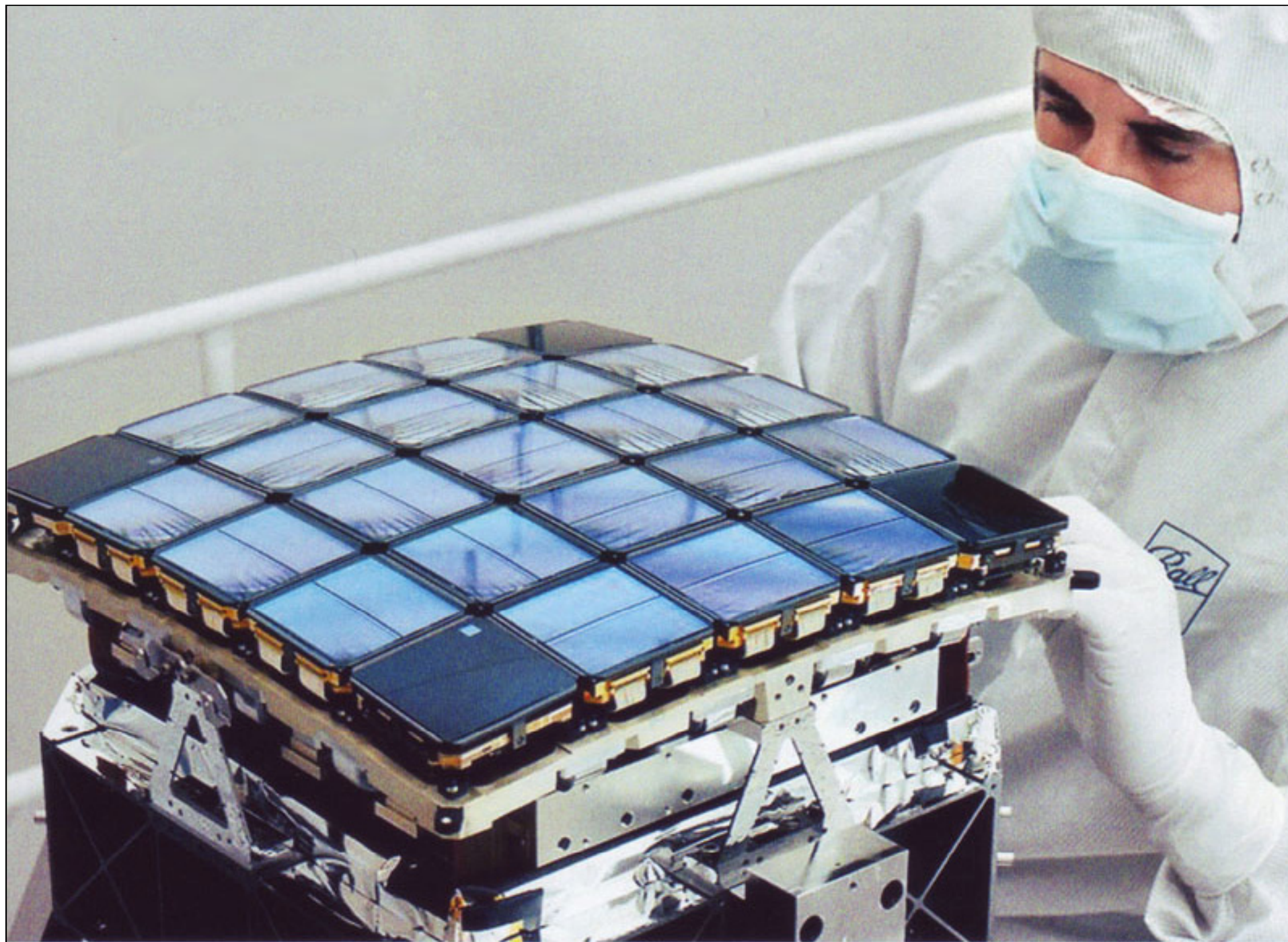
Франция
(ракета "Союз")

COROT
2007

Kepler (NASA, 2009)



поле $10^\circ \times 10^\circ$
100 тыс. звезд

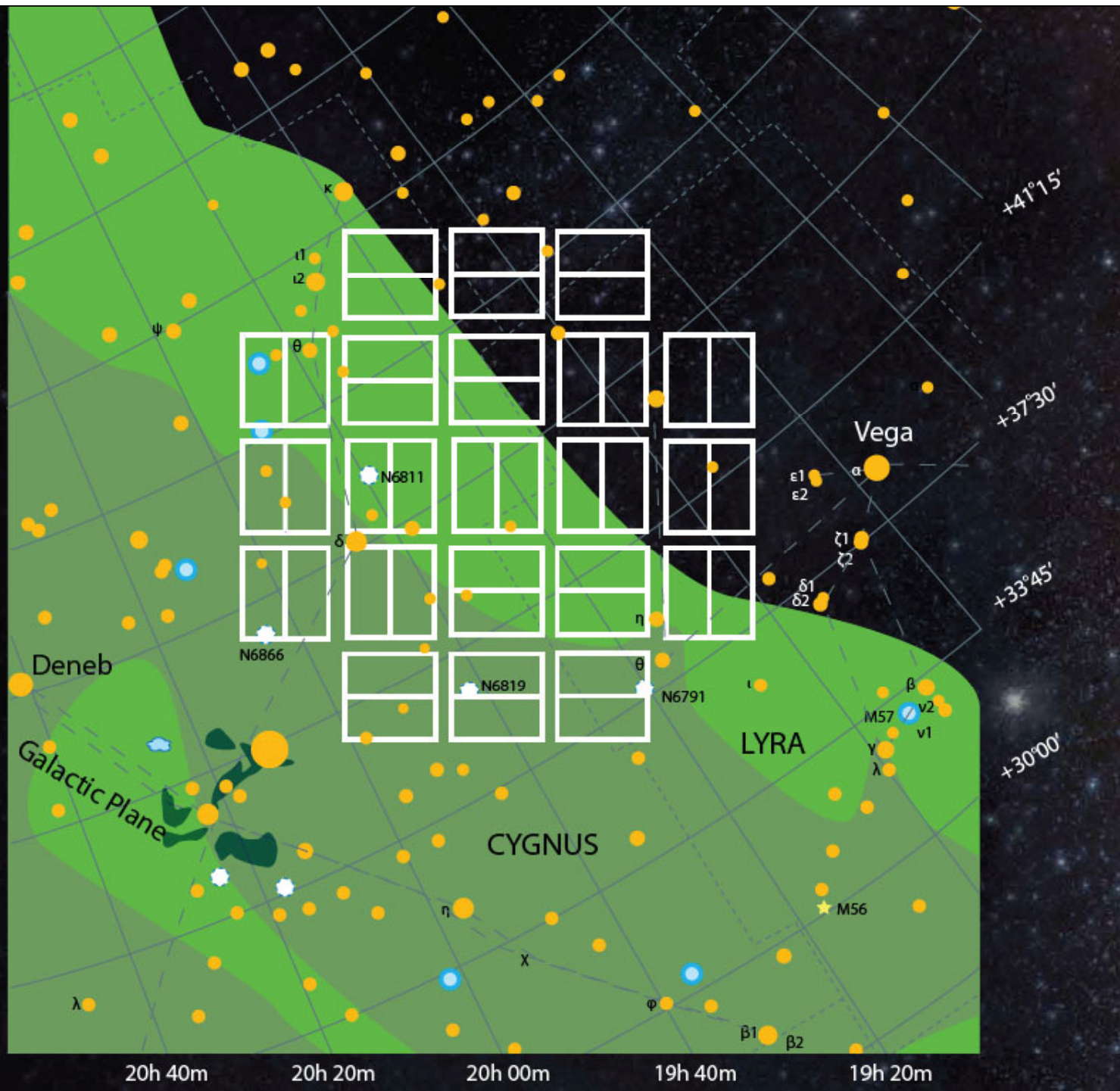


ПЗС-матрица обсерватории "Кеплер" (NASA)

«Кеплер» смотрит на небольшой участок неба над плоскостью Млечного Пути (на карте обозначен зеленым). Поле зрения телескопа поделено на 42 прямоугольника. Сектора выбраны так, чтобы яркие звезды оказались между ними.



- Open Cluster
- Globular Cluster
- Nebula
- Planetary Nebula



<http://exoplanet.eu>

The Extrasolar Planets Encyclopaedia
Interactive Extra-solar Planets Catalog

Дата	Количество надежно обнаруженных экзопланет
5 октября 2003	117
14 декабря 2006	210
23 марта 2009	344
7 ноября 2012	843
1 декабря 2016	3544
11 января 2020	4168

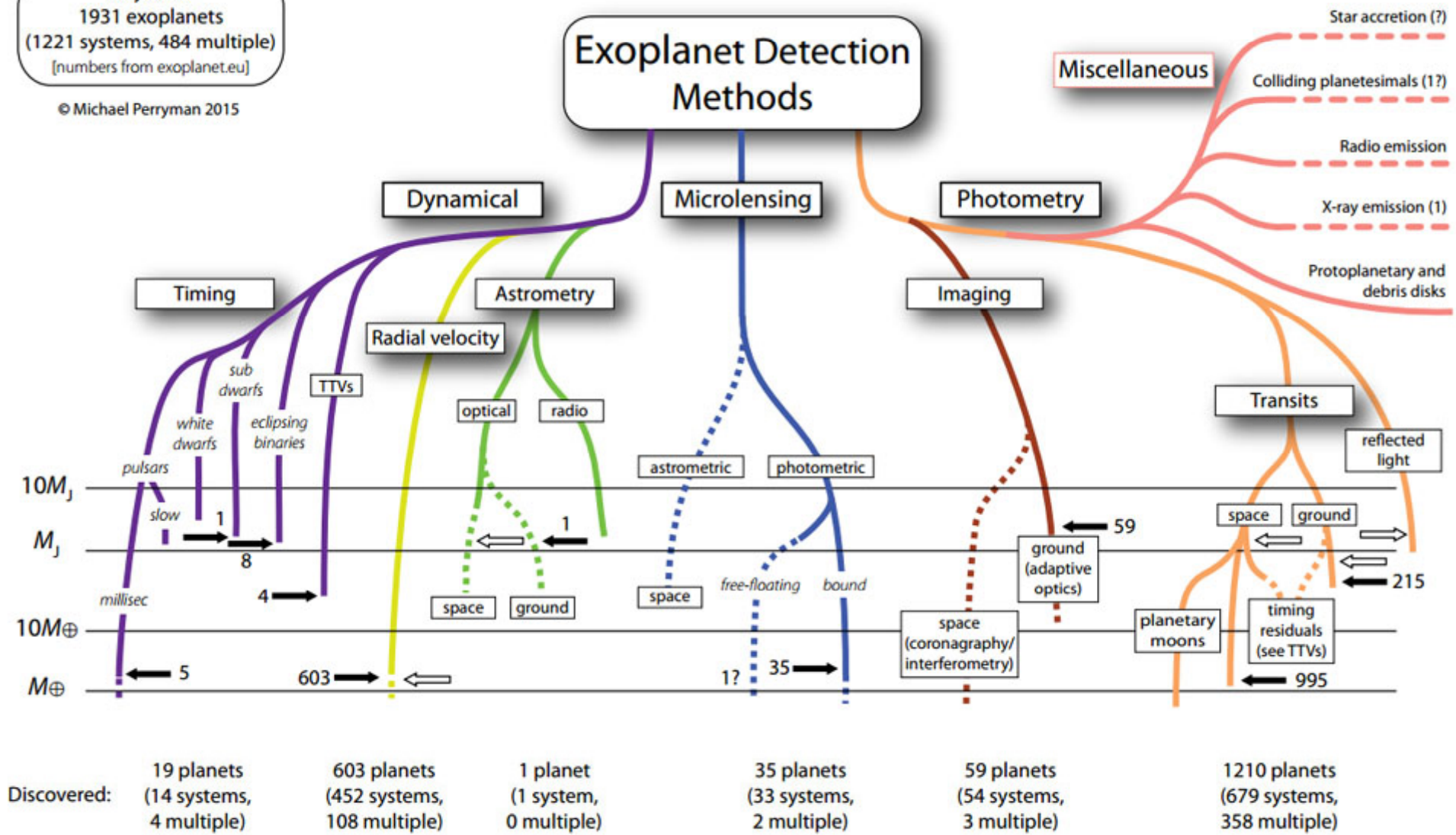
Методы поиска экзопланет

- 1. Radial Velocity** - **Лучевые скорости**
(спектр, эффект Доплера)
- 2. Astrometry** - **Астрометрия**
(смещение в плоскости неба)
- 3. Transit** - **Прохождение**
(изменение блеска звезды)
- 4. Microlensing** - **Микролинзирование**
(грав. искривление лучей)
- 5. Imaging** - **Прямое изображение**
(регистрация света планеты)

July 2015
 1931 exoplanets
 (1221 systems, 484 multiple)
 [numbers from exoplanet.eu]

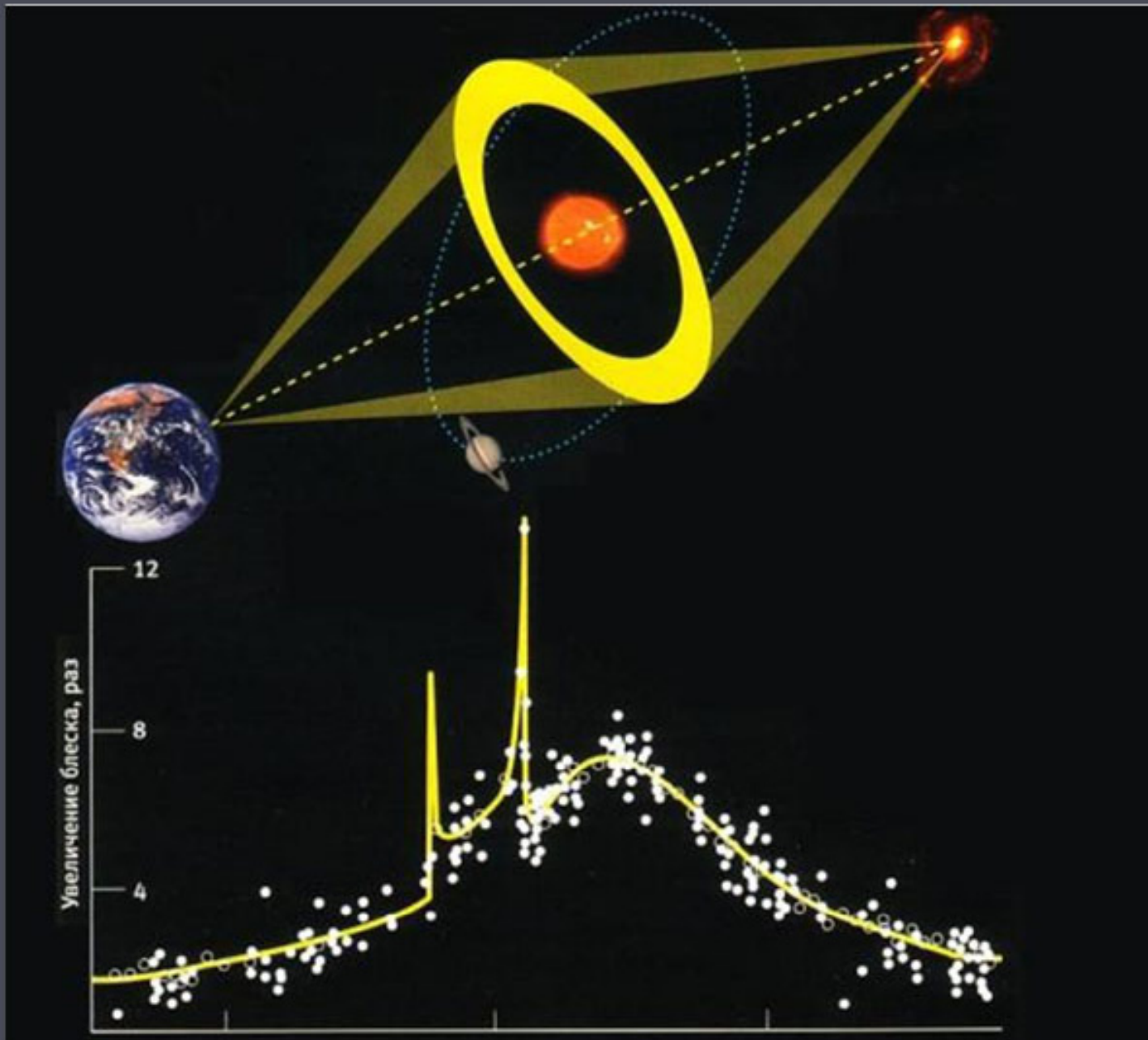
© Michael Perryman 2015

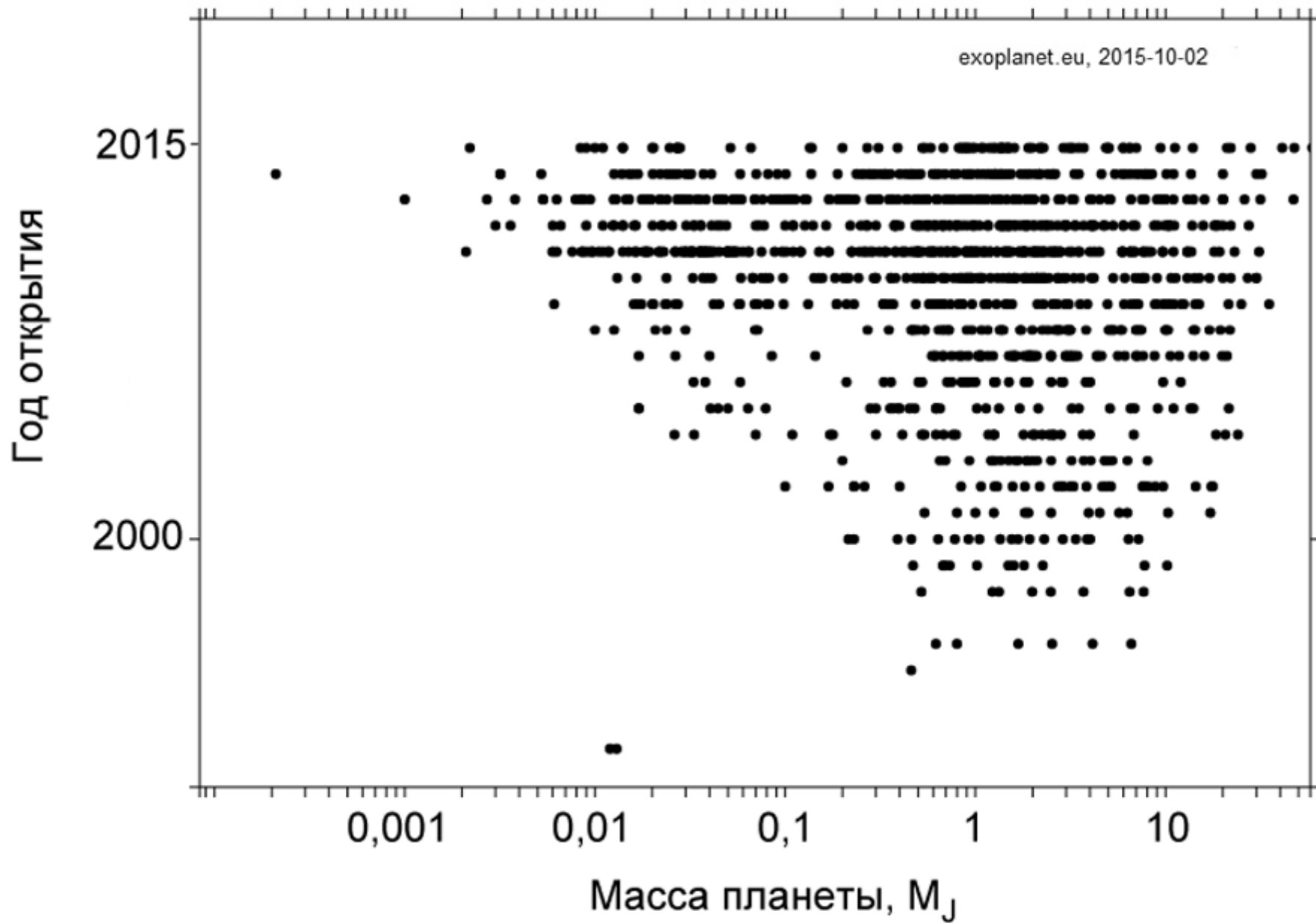
Exoplanet Detection Methods

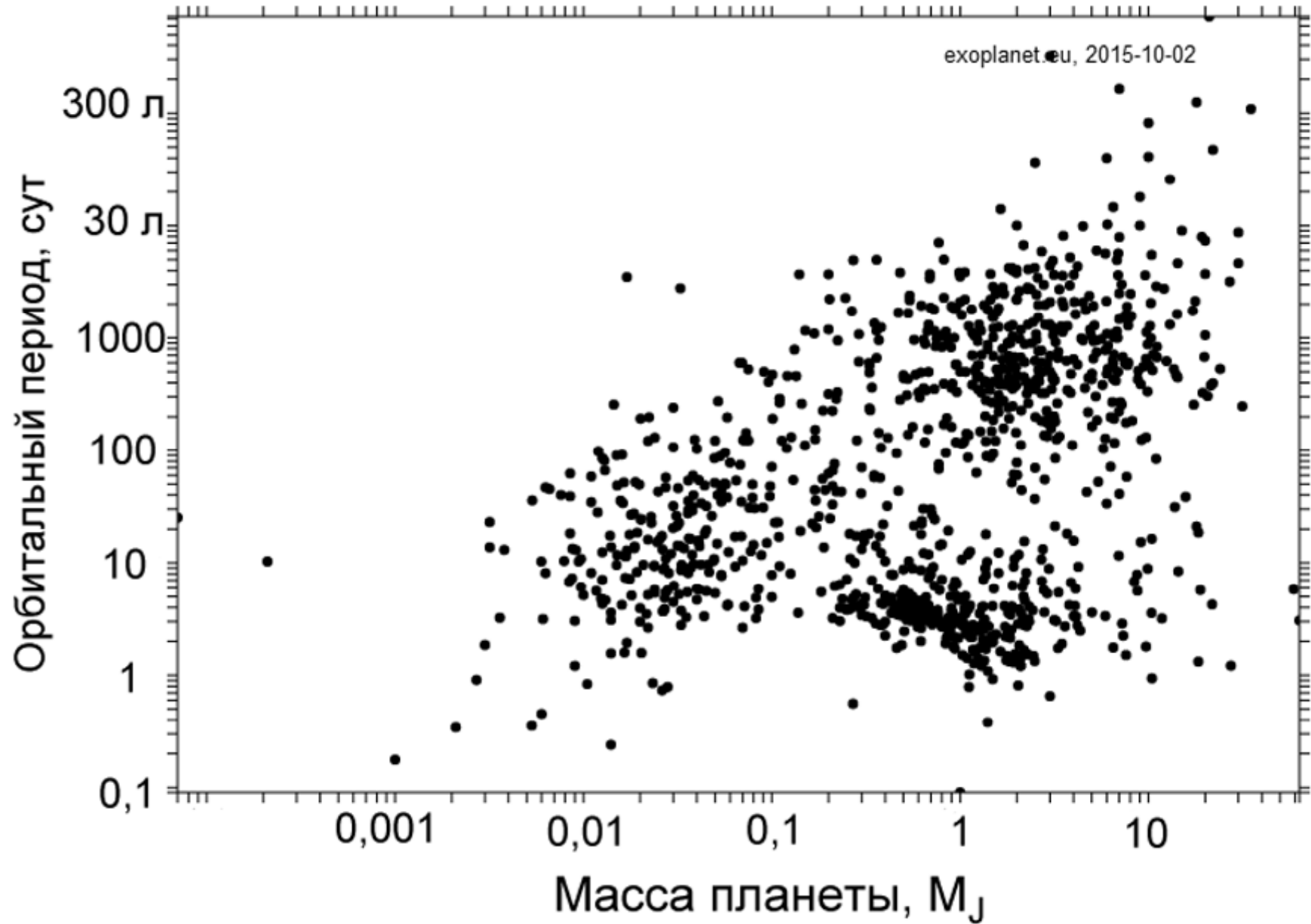


— existing capability projected (10-20 yr) n = planets known → discoveries ⇨ follow-up detections

Гравитационное микролинзирование



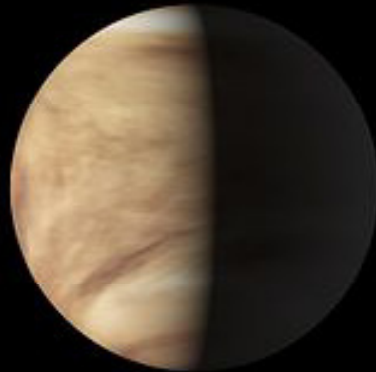




Kepler-20e



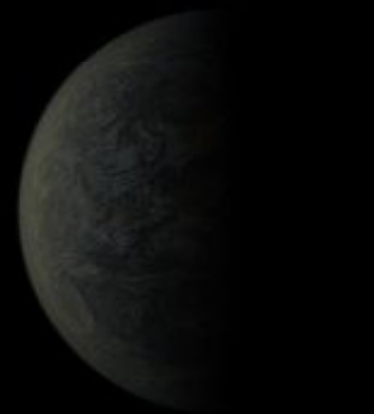
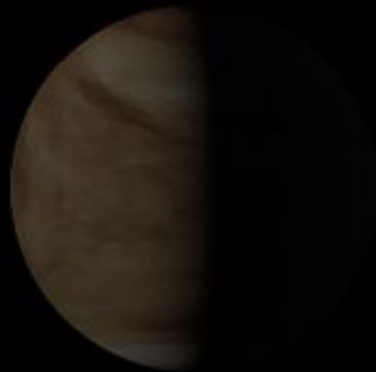
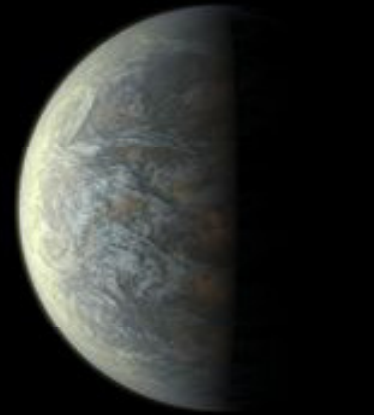
Venus



Earth



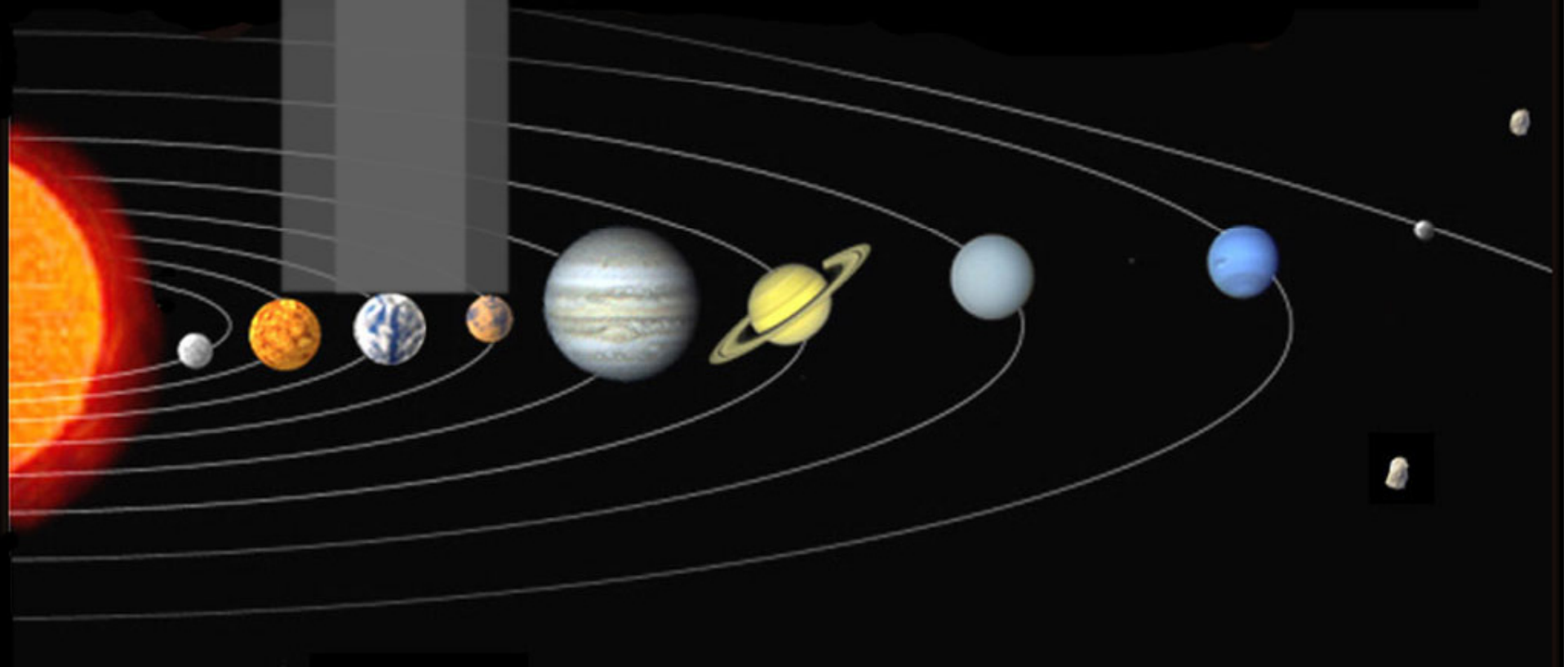
Kepler-20f

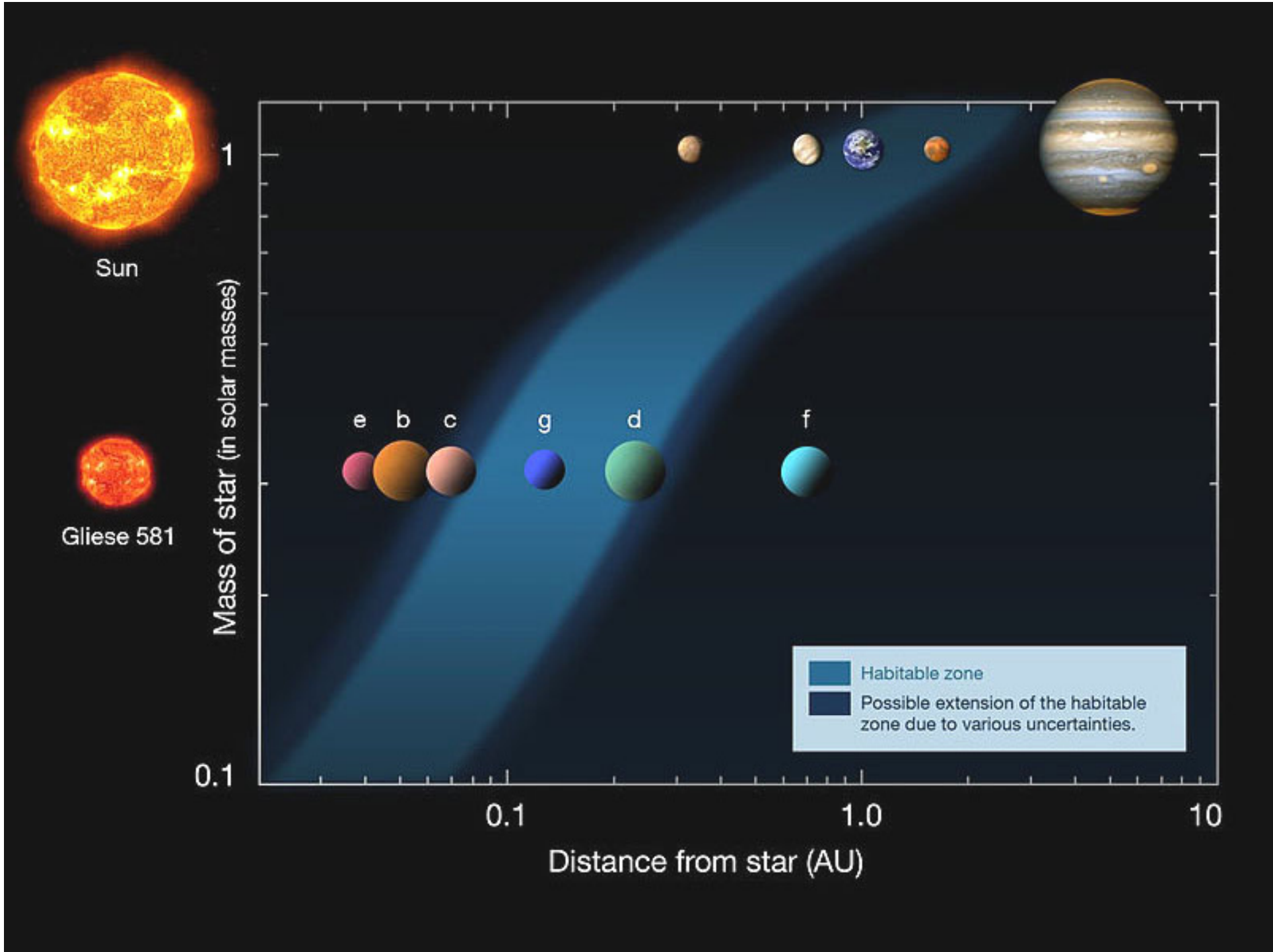


Зона жизни

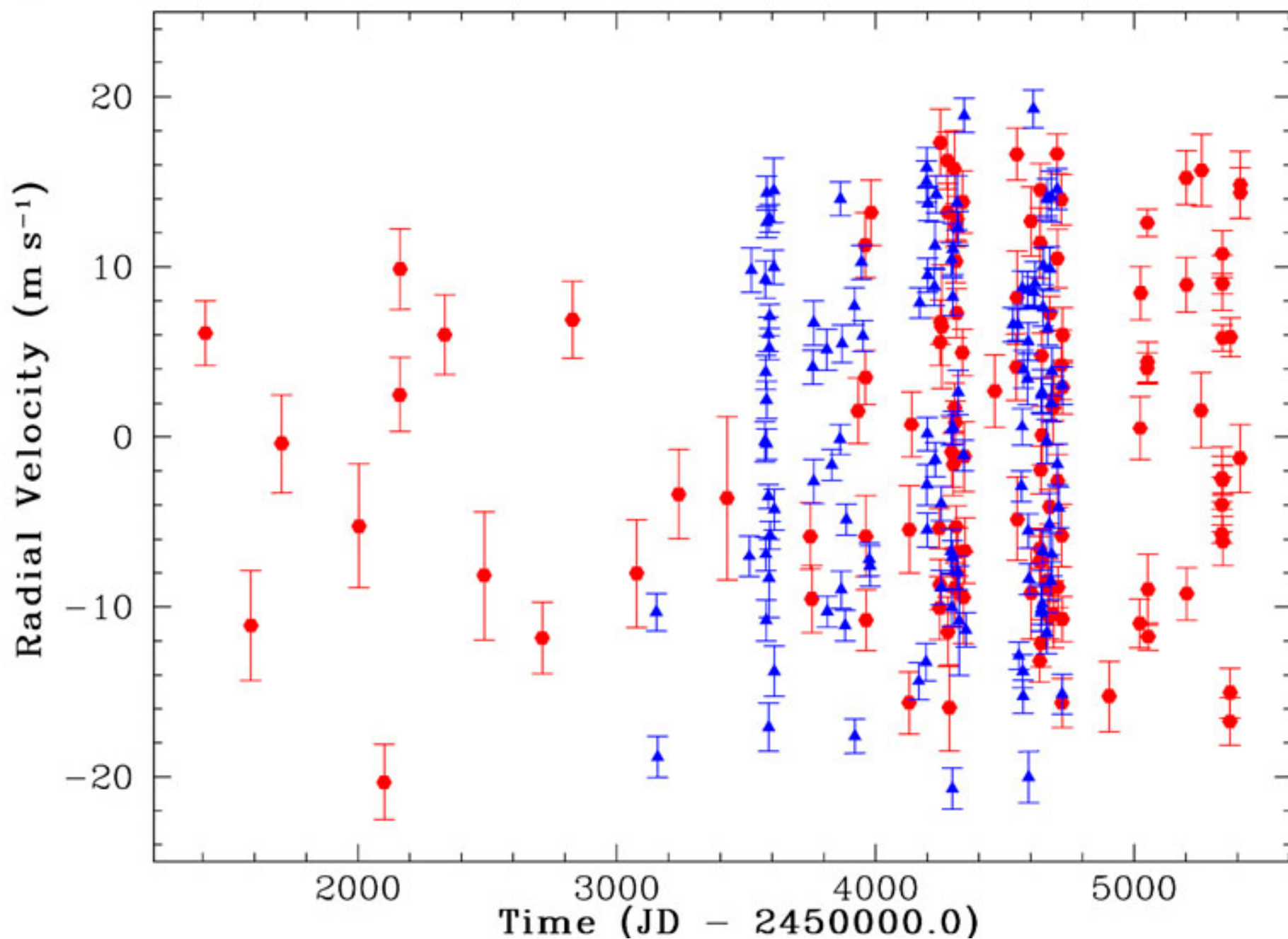
4,5 млрд лет назад

Сегодня

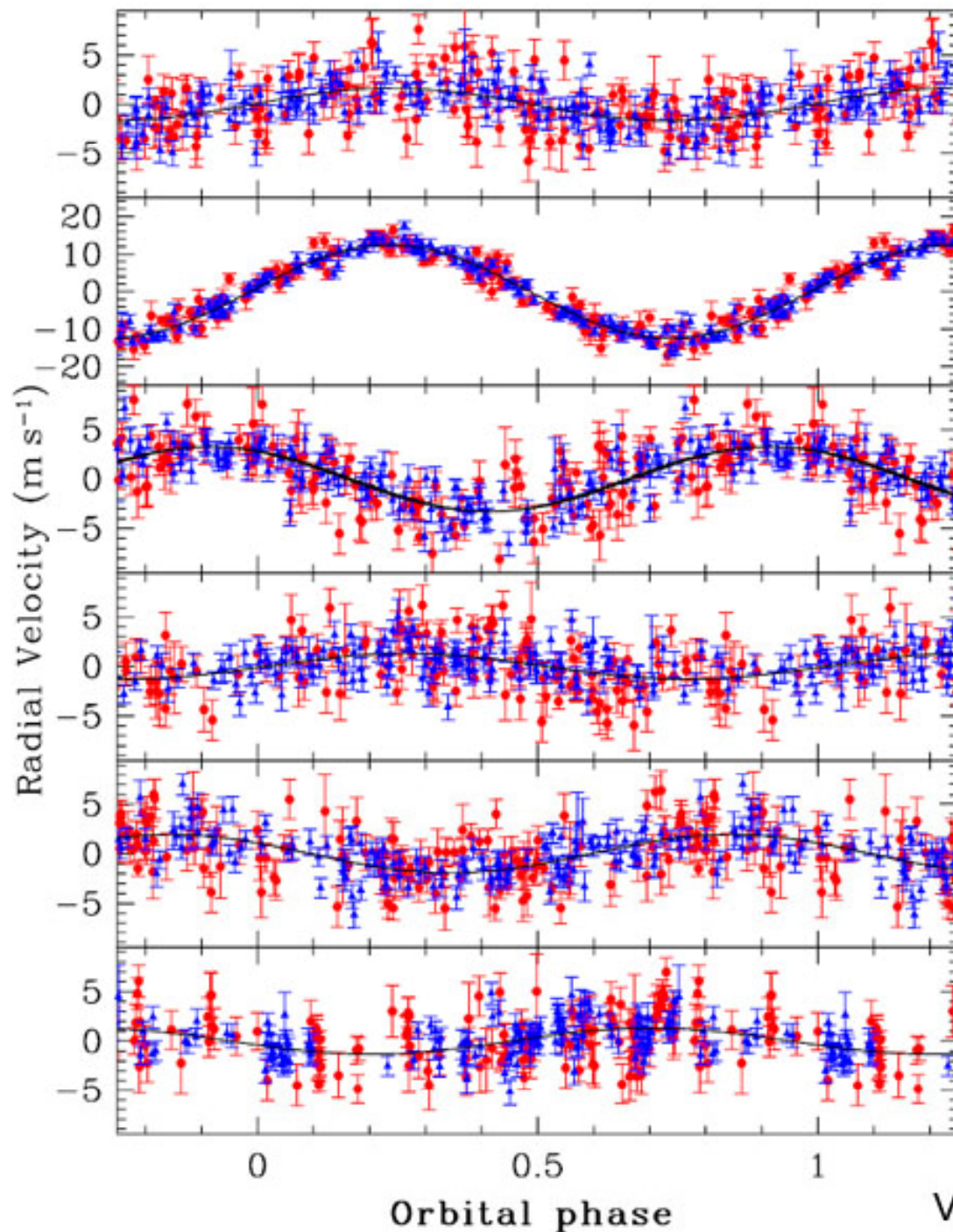




Лучевая скор. GJ 581 по данным спектрометра HIRES (Butler, 10-м, Кеск), 122 точки за 11 лет, и HARPS (Mayor, 3,6-м La Silla), 119 точек за 4,3 года. Точность 1,3 м/с.



GJ 581



e 3,15 cyт

b 5,37 cyт

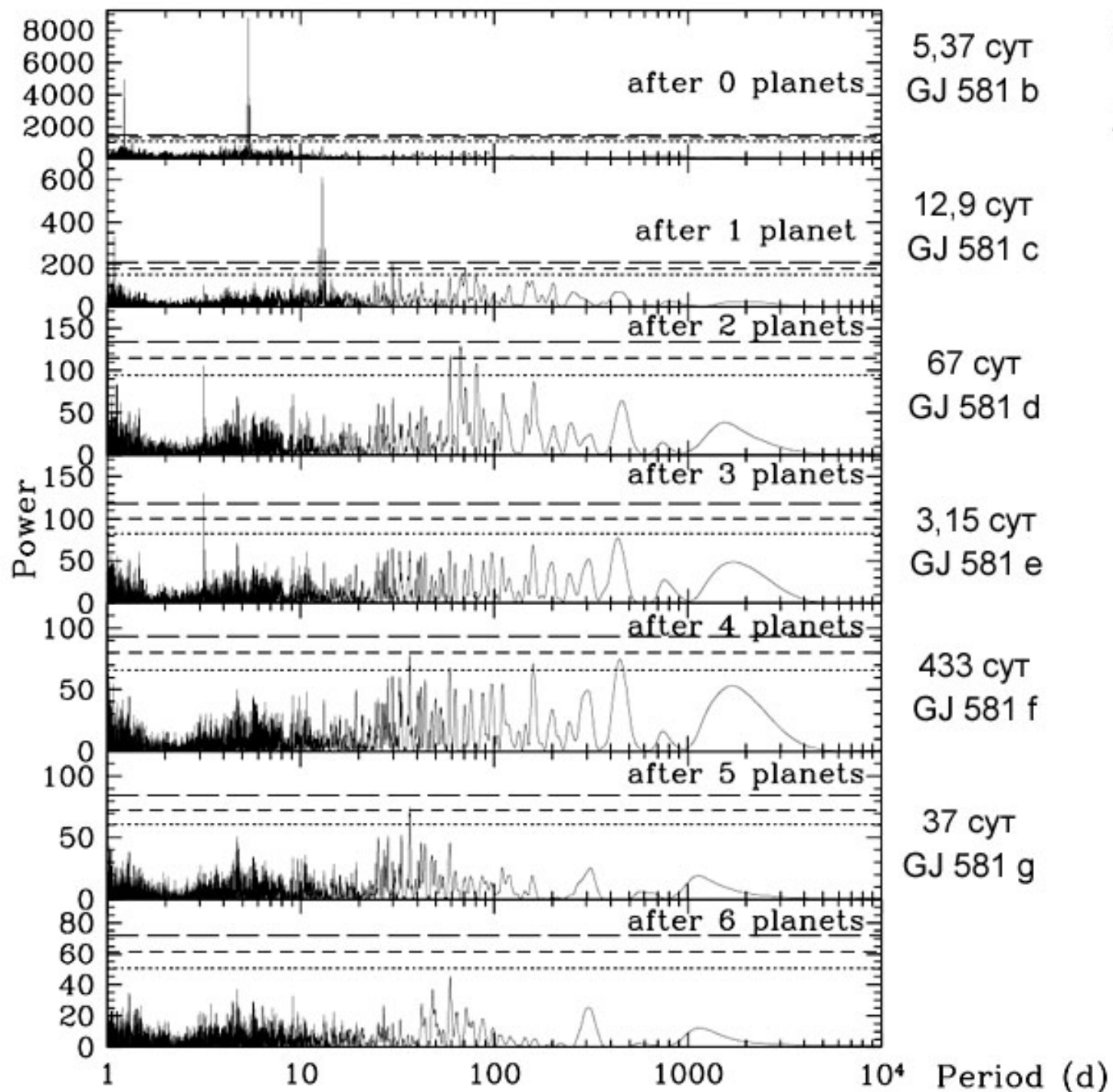
c 12,9 cyт

g 37 cyт

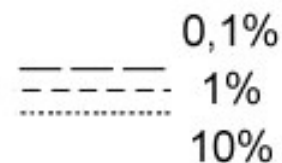
d 67 cyт

f 433 cyт

Спектр мощности
колебаний
лучевой скорости
звезды GJ 581



Вероятность
ошибки:



Kepler-22 System

Solar System

Habitable Zone



Kepler-22b

Mercury



Venus

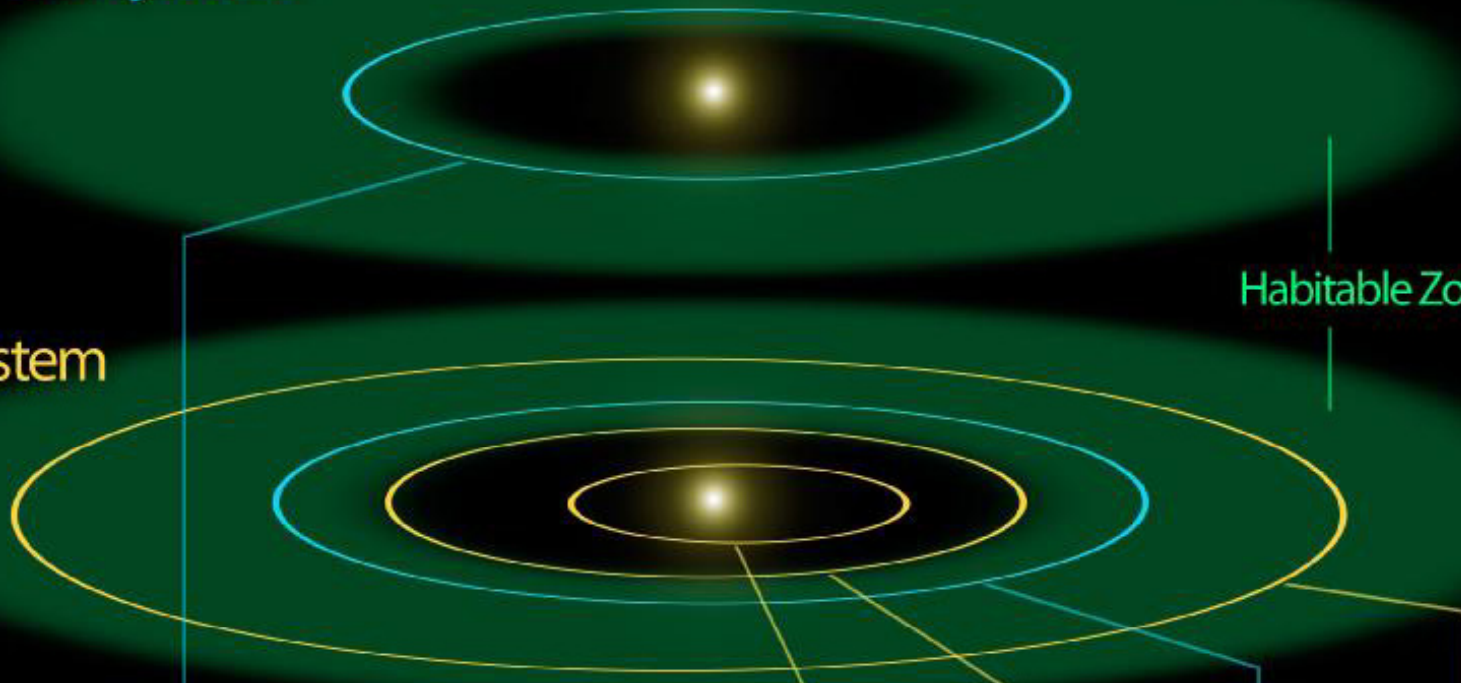


Earth

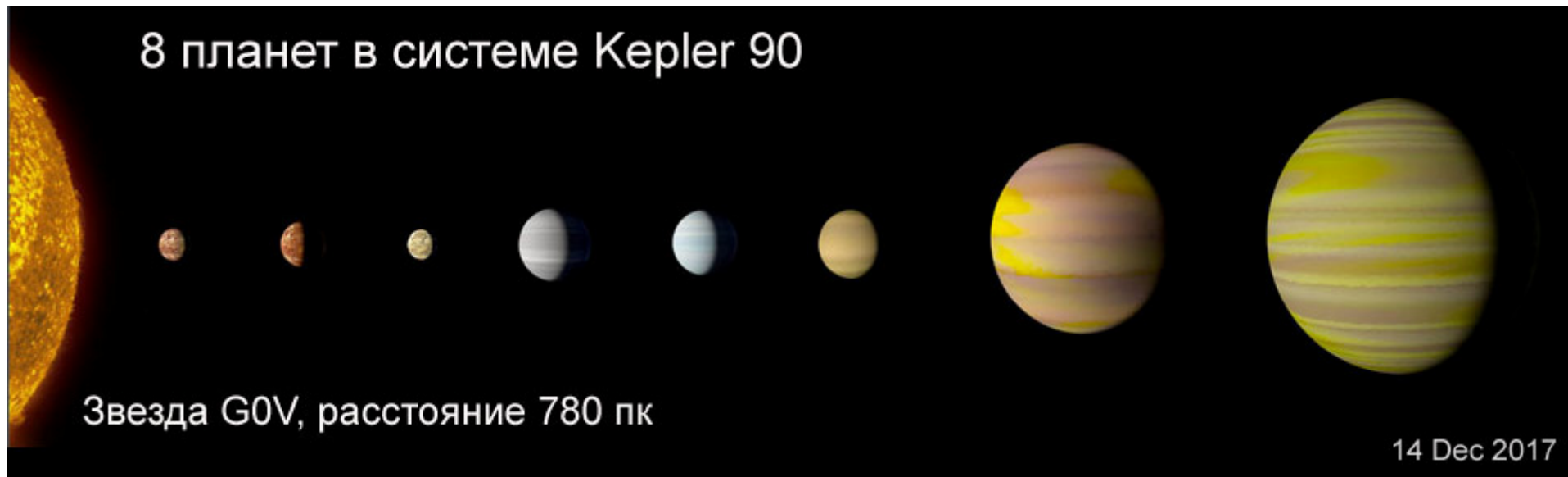


Mars

Planets and orbits to scale



8 планет в системе Kepler 90



Звезда G0V, расстояние 780 пк

14 Dec 2017

Companion (in order from star)	Mass	Semimajor axis (AU)	Orbital period (days)	Eccentricity	Inclination	Radius
b	—	0.074 ± 0.016	7.008151	—	89.4°	$1.31 R_\oplus$
c	—	0.089 ± 0.012	8.719375	—	89.68°	$1.18 R_\oplus$
i	—	0.1234	14.44912	—	89.2°	$1.32 R_\oplus$
d	—	0.32 ± 0.05	59.73667	—	89.71°	$2.88 R_\oplus$
e	—	0.42 ± 0.06	91.93913	—	89.79°	$2.67 R_\oplus$
f	—	0.48 ± 0.09	124.9144	0.01	89.77°	$2.89 R_\oplus$
g	$<0.8 M_J$	0.71 ± 0.08	210.60697	—	89.8°	$8.13 R_\oplus$
h	$<1.2 M_J$	1.01 ± 0.11	331.60059	—	89.6°	$11.32 R_\oplus$

Kepler-90 System Planet Sizes

(Artist's Concepts)

Kepler-90b



Kepler-90c



Kepler-90i



Kepler-90d



Kepler-90e



Kepler-90f



Kepler-90g



Kepler-90h



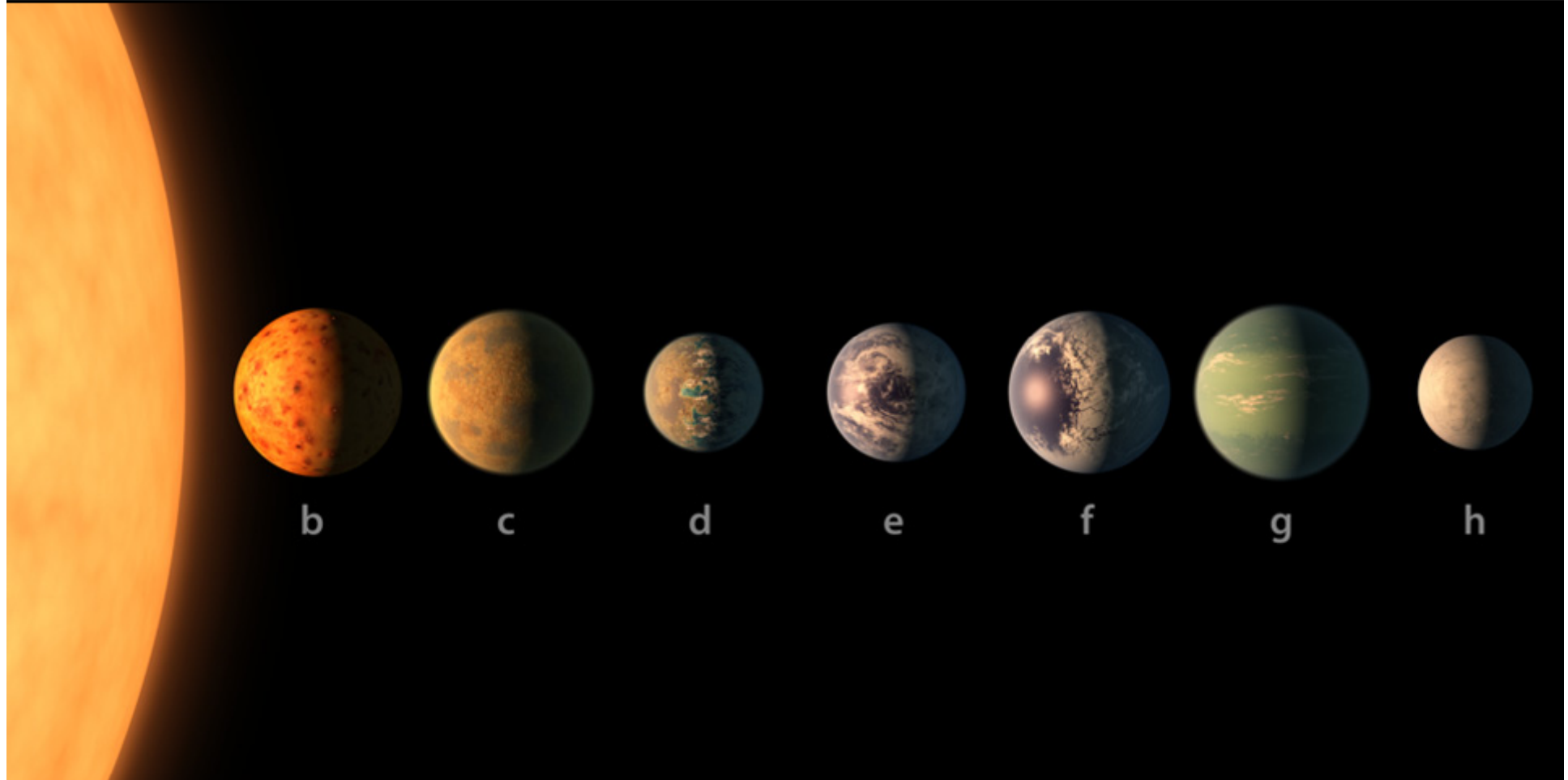
Solar System



Planet sizes are to scale; distances are not.

TRAPPIST-1 System

22 Feb 2017



Distance = 40 ly = 12 pc

Star: M8V, $M = 0,08 M_{\odot}$, $R = 0,1 R_{\odot}$

TRAPPIST - Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope at the La Silla Observatory in Chile

Illustrations

TRAPPIST-1 System



b

c

d

e

f

g

h

Orbital Period <small>days</small>	1.51 days	2.42 days	4.05 days	6.10 days	9.21 days	12.35 days	~20 days
Distance to Star <small>Astronomical Units (AU)</small>	0.011 AU	0.015 AU	0.021 AU	0.028 AU	0.037 AU	0.045 AU	~0.06 AU
Planet Radius <small>relative to Earth</small>	1.09 R_{earth}	1.06 R_{earth}	0.77 R_{earth}	0.92 R_{earth}	1.04 R_{earth}	1.13 R_{earth}	0.76 R_{earth}
Planet Mass <small>relative to Earth</small>	0.85 M_{earth}	1.38 M_{earth}	0.41 M_{earth}	0.62 M_{earth}	0.68 M_{earth}	1.34 M_{earth}	—

Solar System Rocky Planets



Mercury

Venus

Earth

Mars

Orbital Period <small>days</small>	87.97 days	224.70 days	365.26 days	686.98 days
Distance to Star <small>Astronomical Units (AU)</small>	0.387 AU	0.723 AU	1.000 AU	1.524 AU
Planet Radius <small>relative to Earth</small>	0.38 R_{earth}	0.95 R_{earth}	1.00 R_{earth}	0.53 R_{earth}
Planet Mass <small>relative to Earth</small>	0.06 M_{earth}	0.82 M_{earth}	1.00 M_{earth}	0.11 M_{earth}

TRAPPIST-1 System



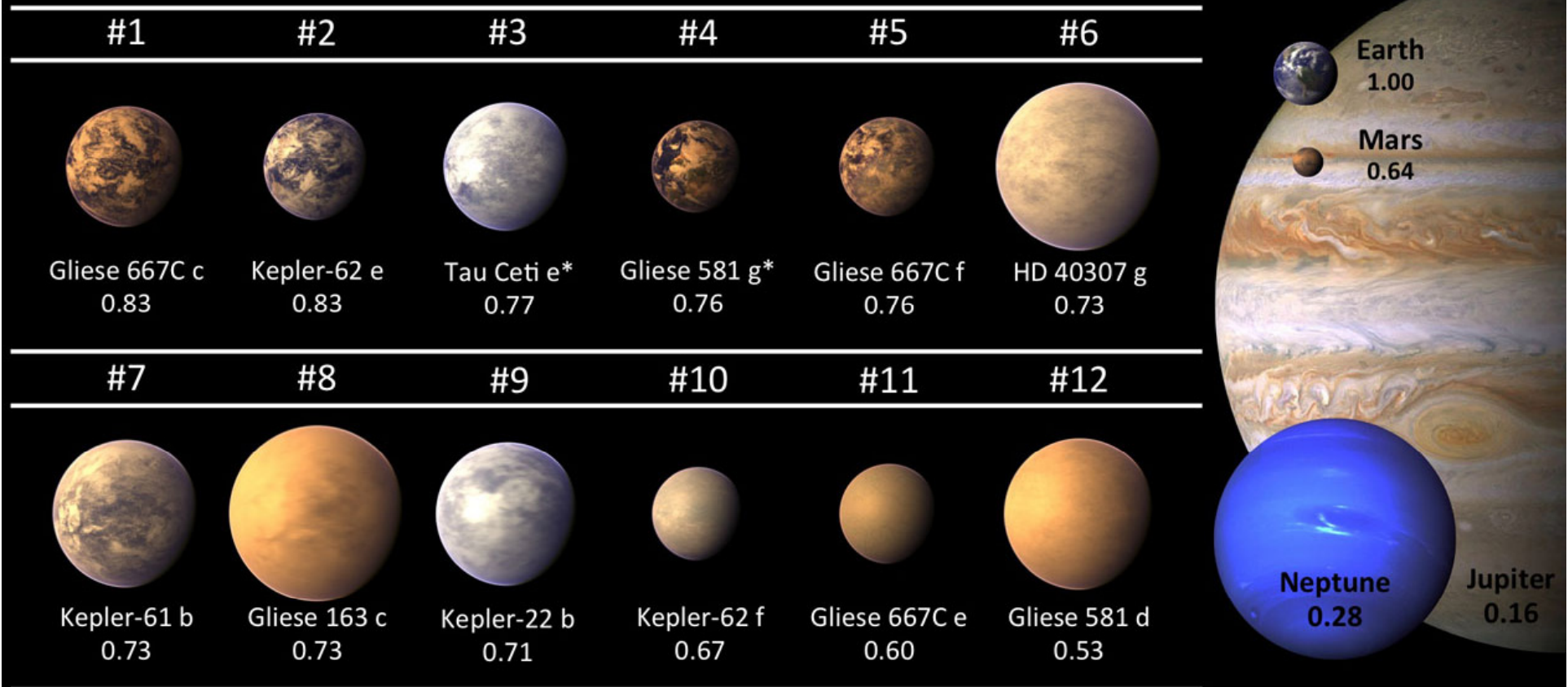
Inner Solar System



Enlarged 25x

Current Potentially Habitable Exoplanets

Ranked in Order of Similarity to Earth



*planet candidates

Number below the names is the Earth Similarity Index (ESI)

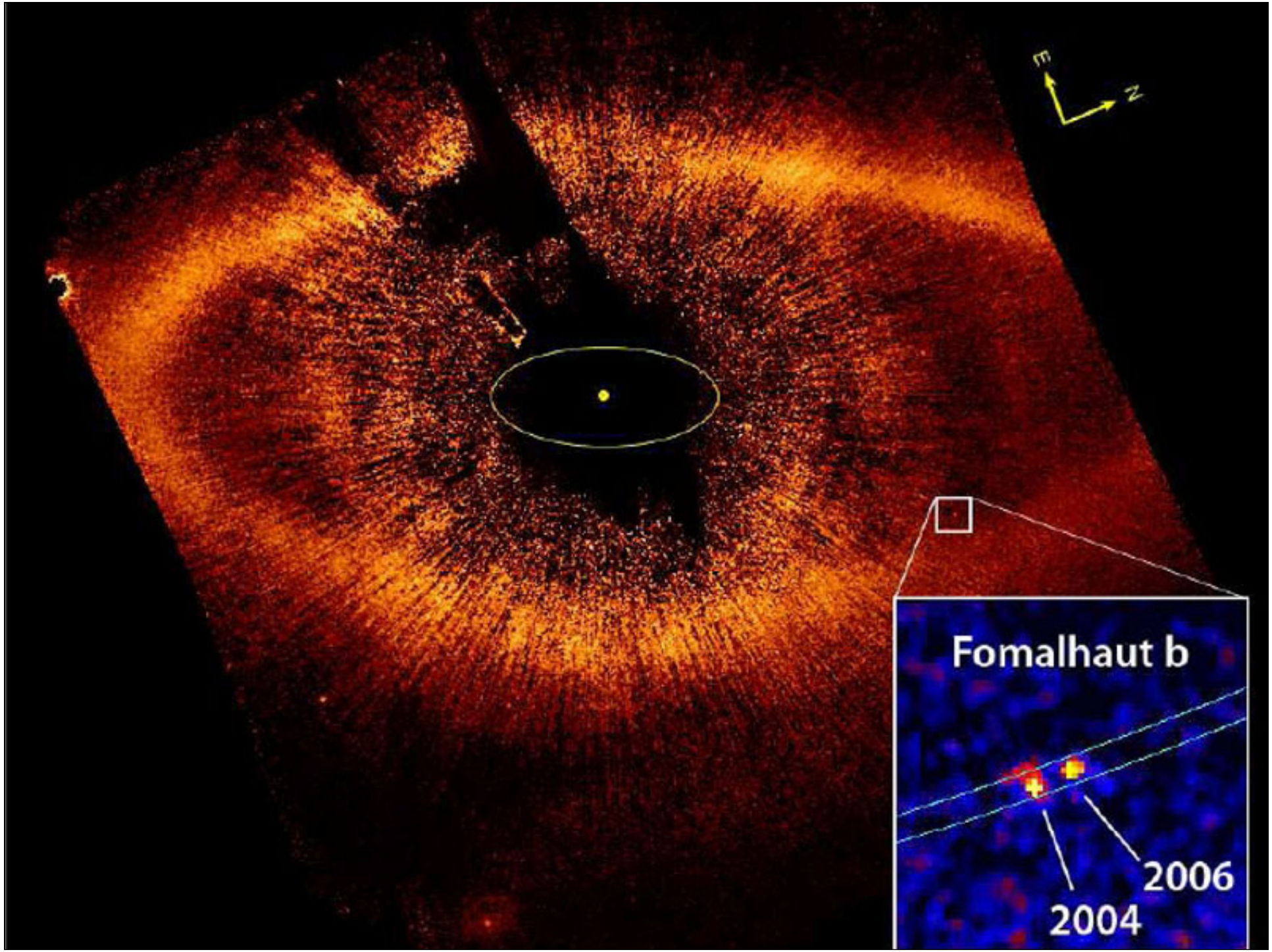
CREDIT: PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) December 5, 2013

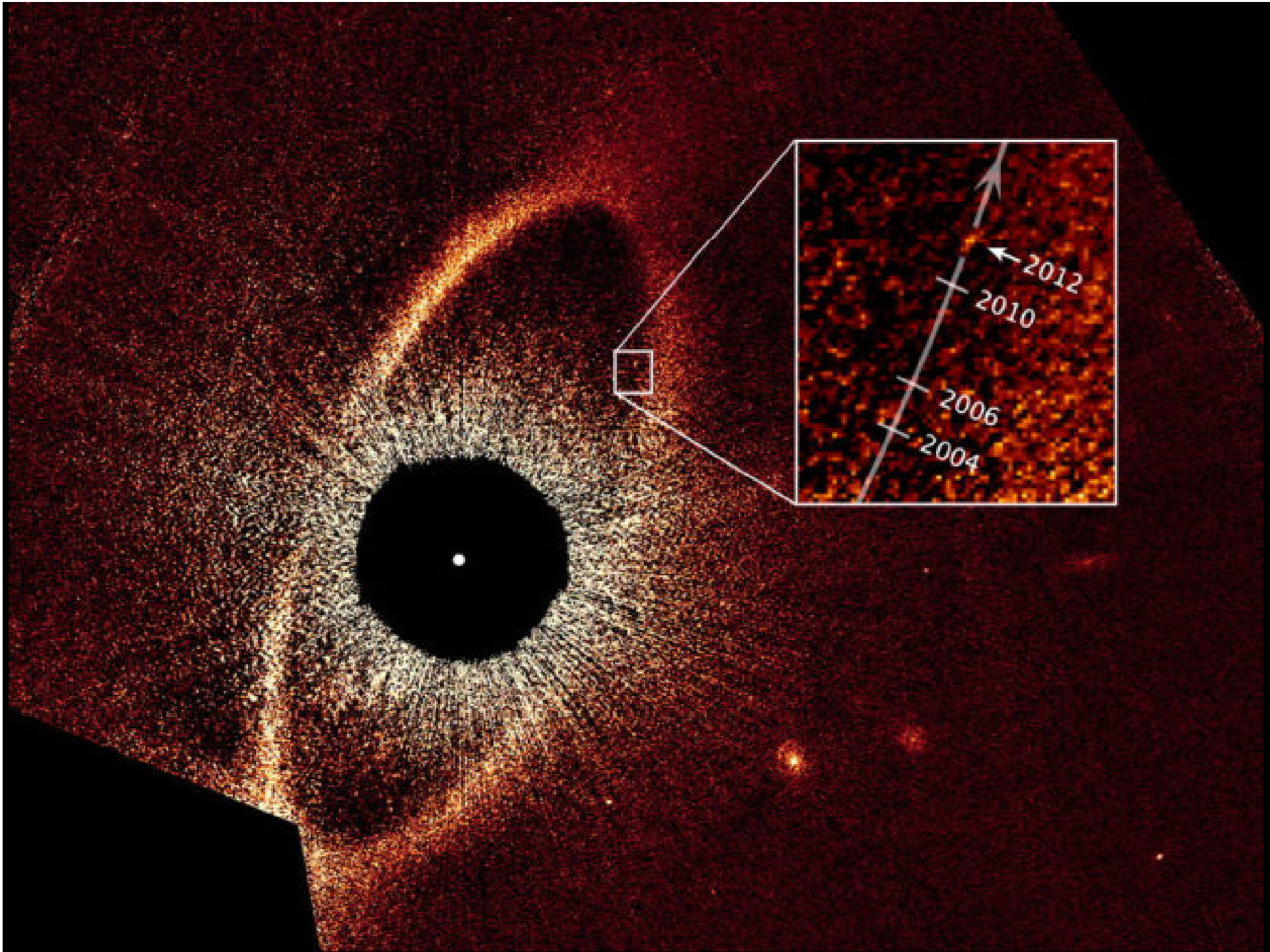
Proxima Centauri b - $M \Rightarrow 1 M_E$ $a = 0,048 \text{ AU}$ (HZ)

Proxima Centauri c - $M \Rightarrow 6 M_E$ $a = 1,5 \text{ AU}$

Proxima Cen - $M = 0,12 M_{\text{Sun}}$ $T = 3000 \text{ K}$





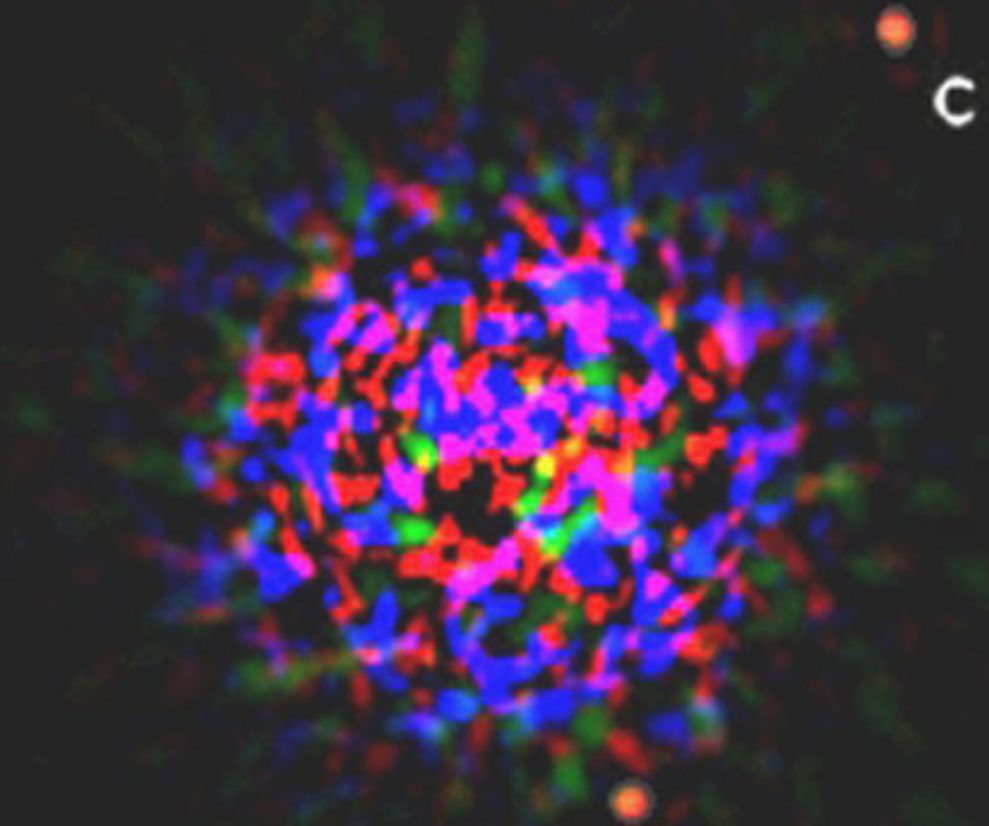




b



c



d

HR 8799

Nov 2008

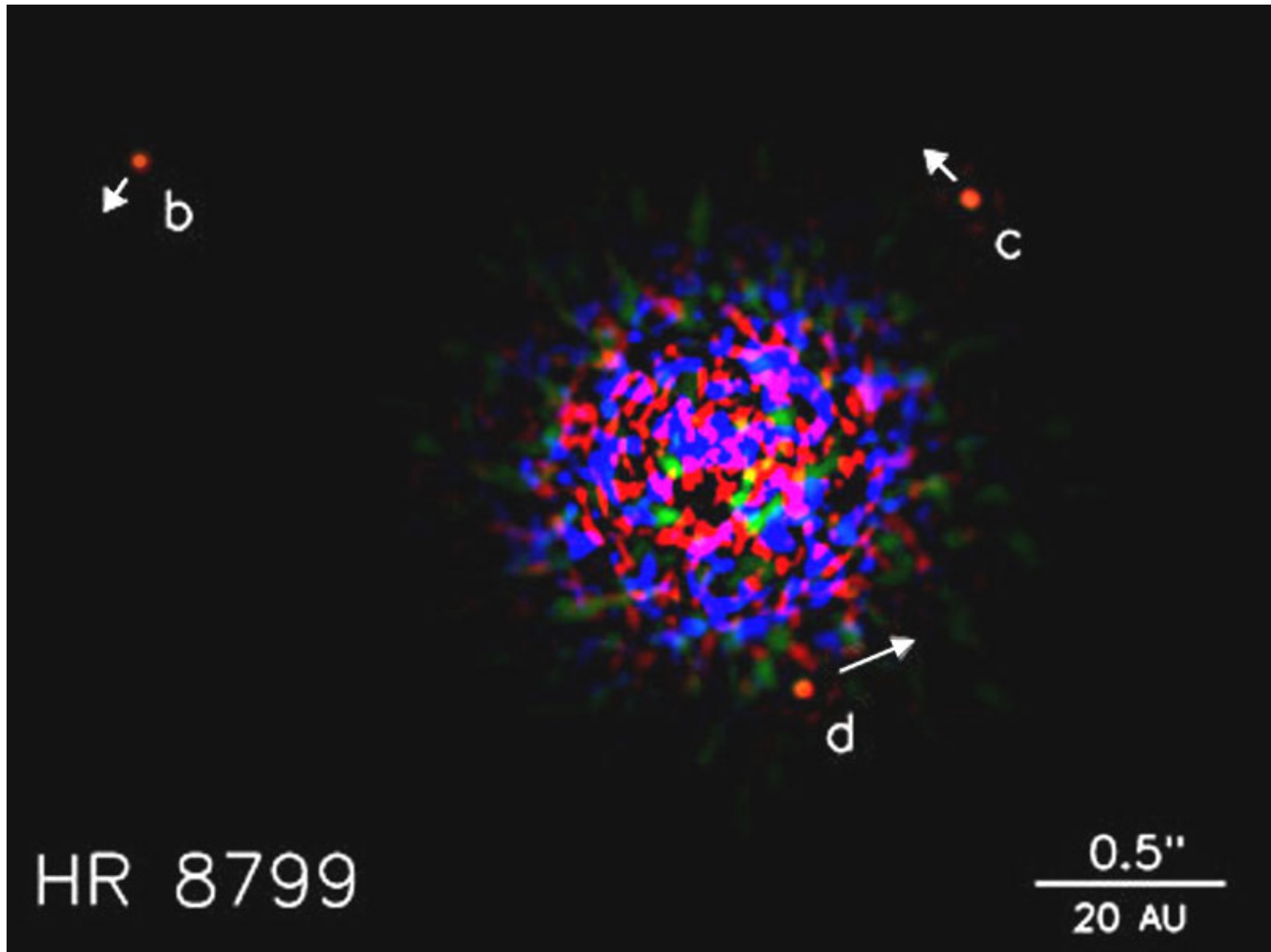
b

c

d

HR 8799

0.5"
20 AU

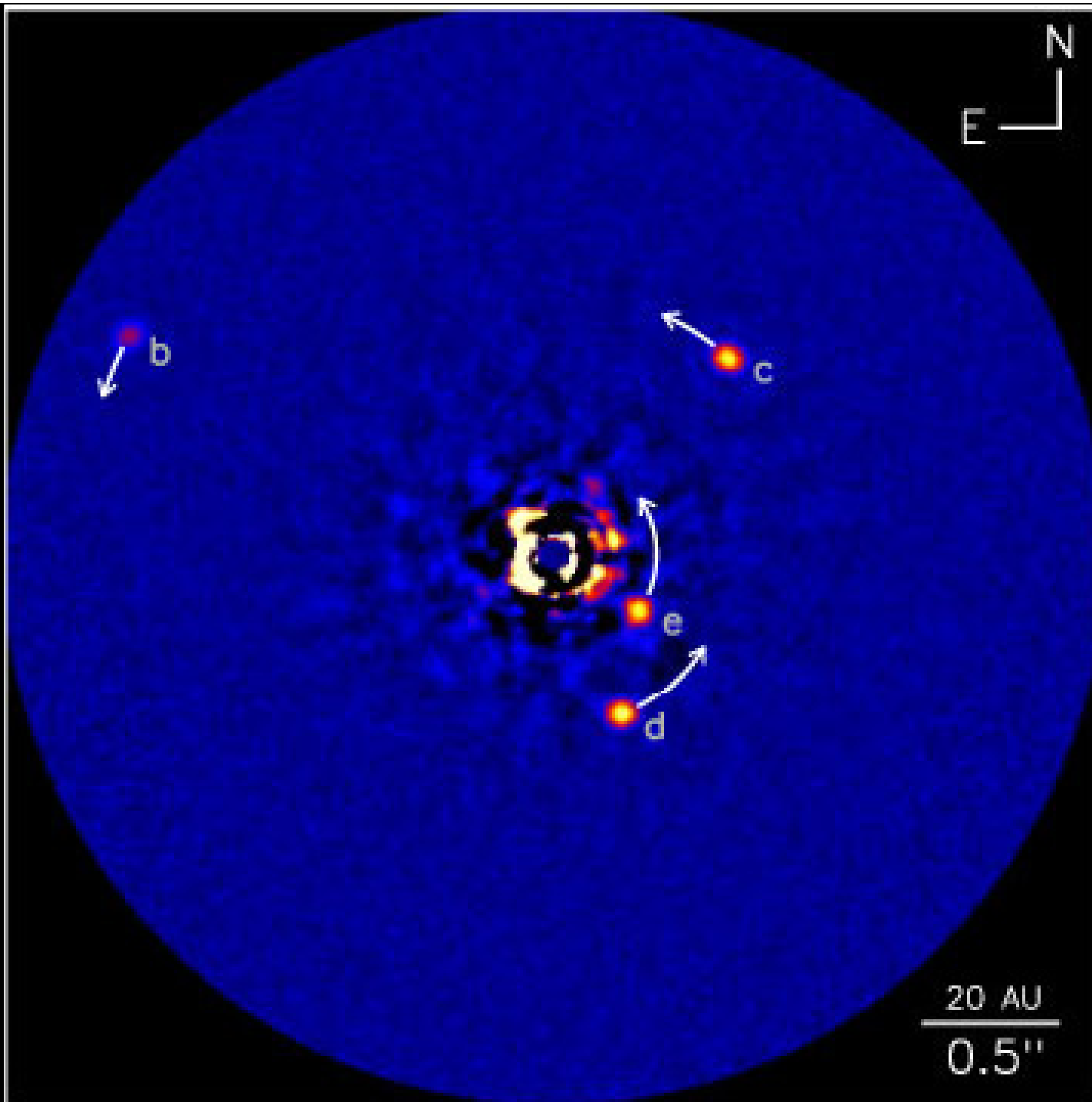




2009-07-31

20 au

Jason Wang /
Christian Marois



Vector vortex coronagraph on the Hale telescope (2010)

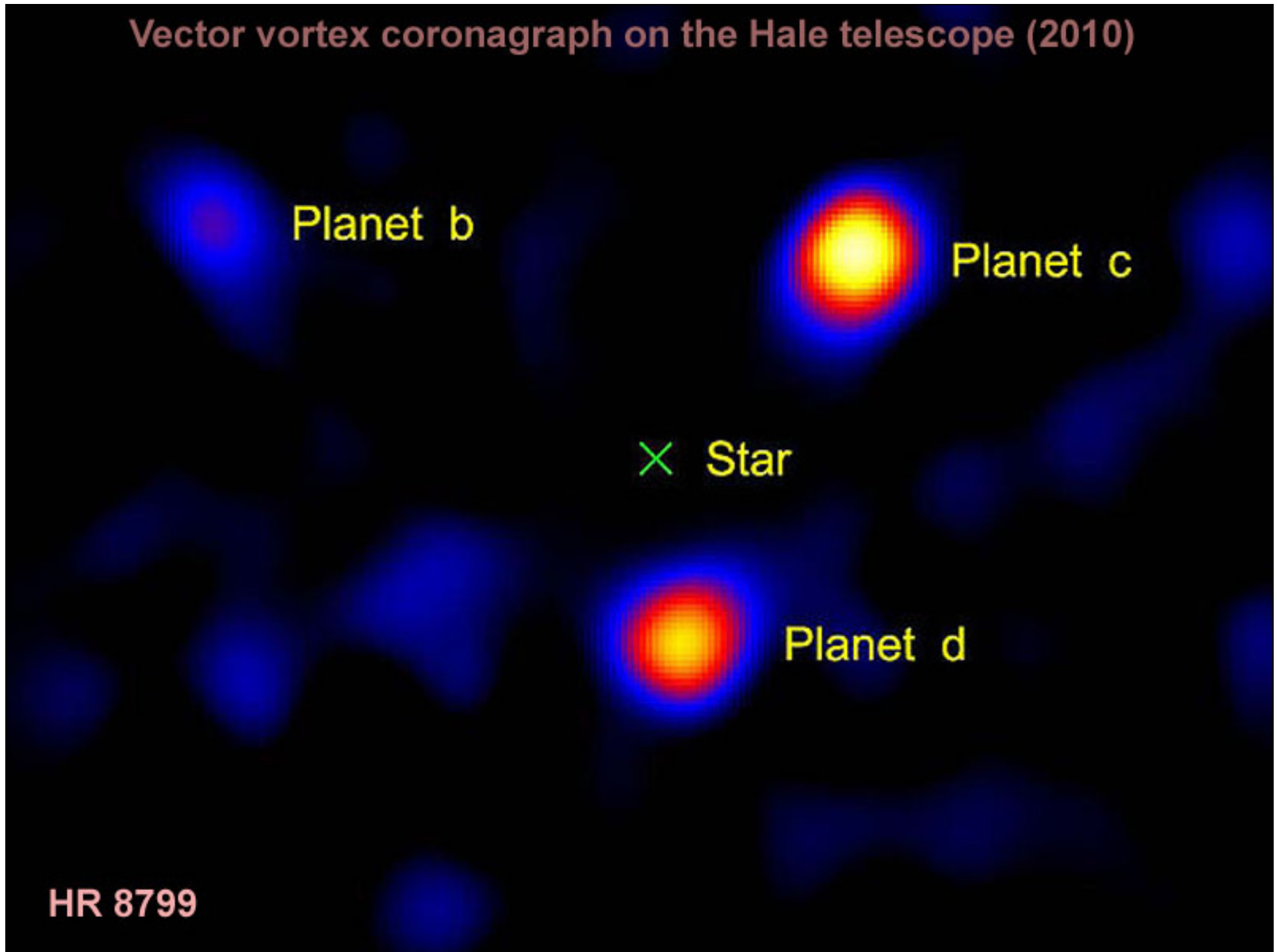
Planet b

Planet c

× Star

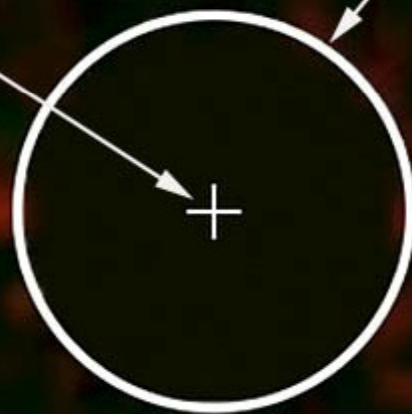
Planet d

HR 8799



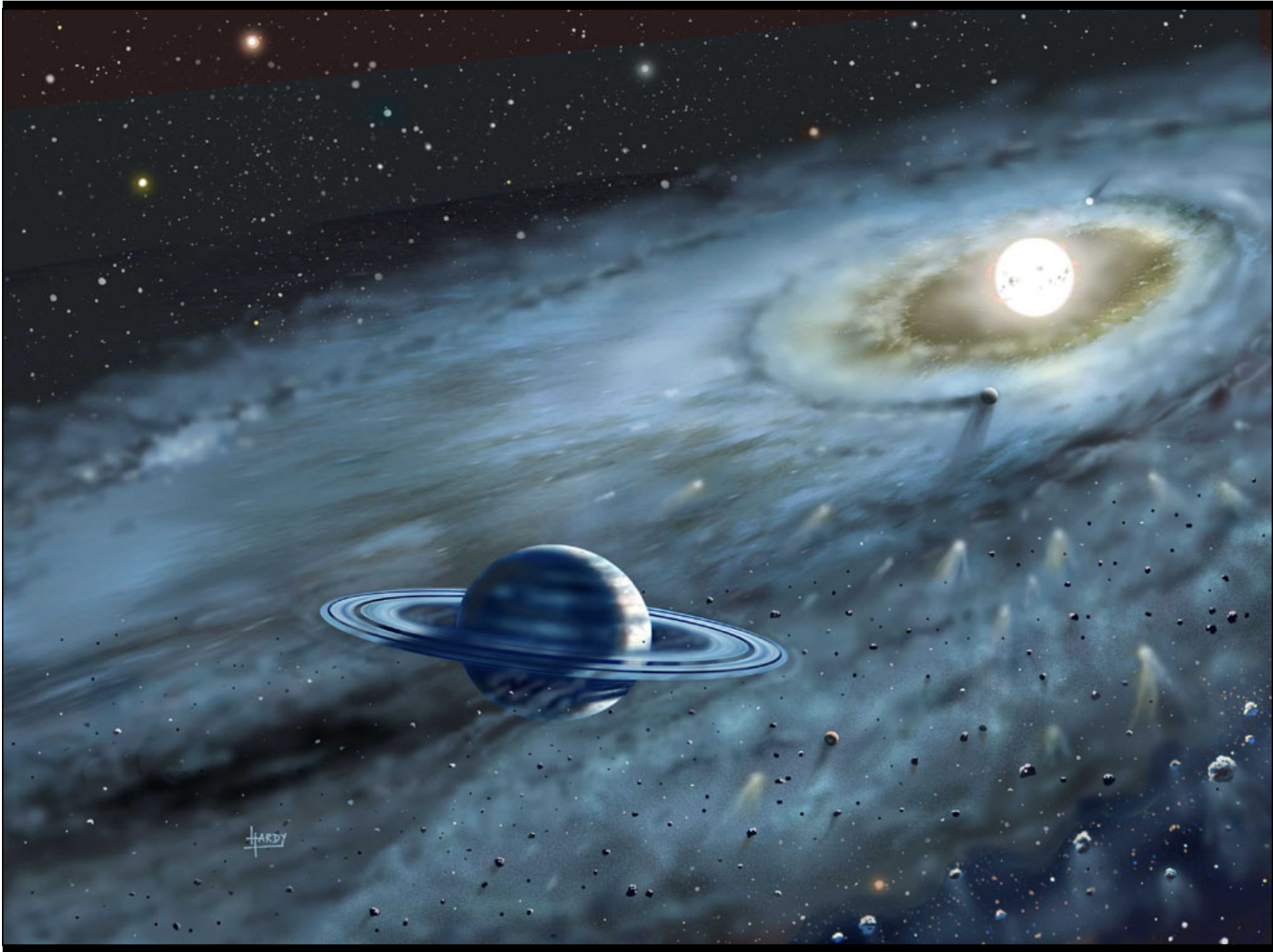
Звезда HIP 65426

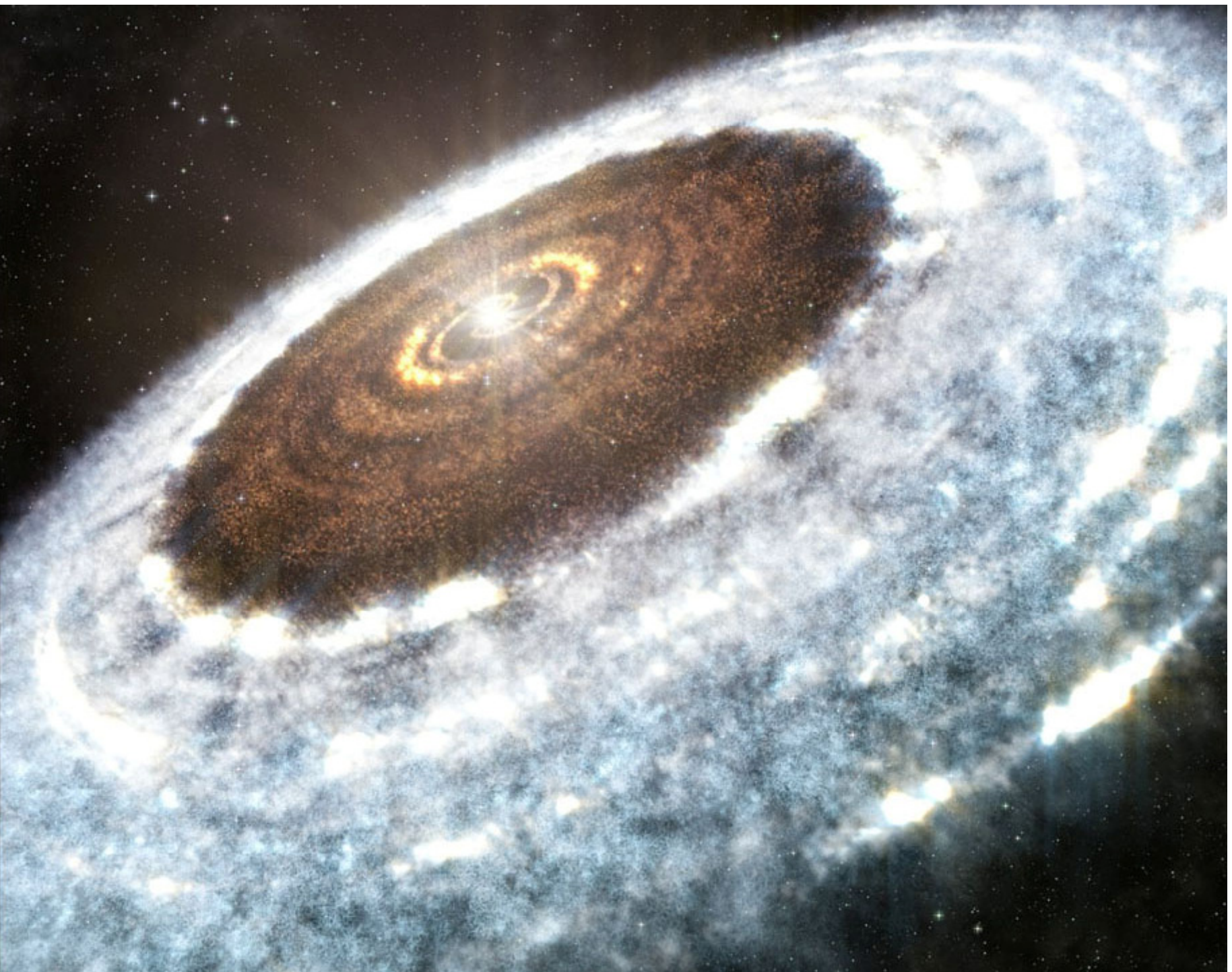
Размер орбиты Нептуна



Планета HIP 65426b

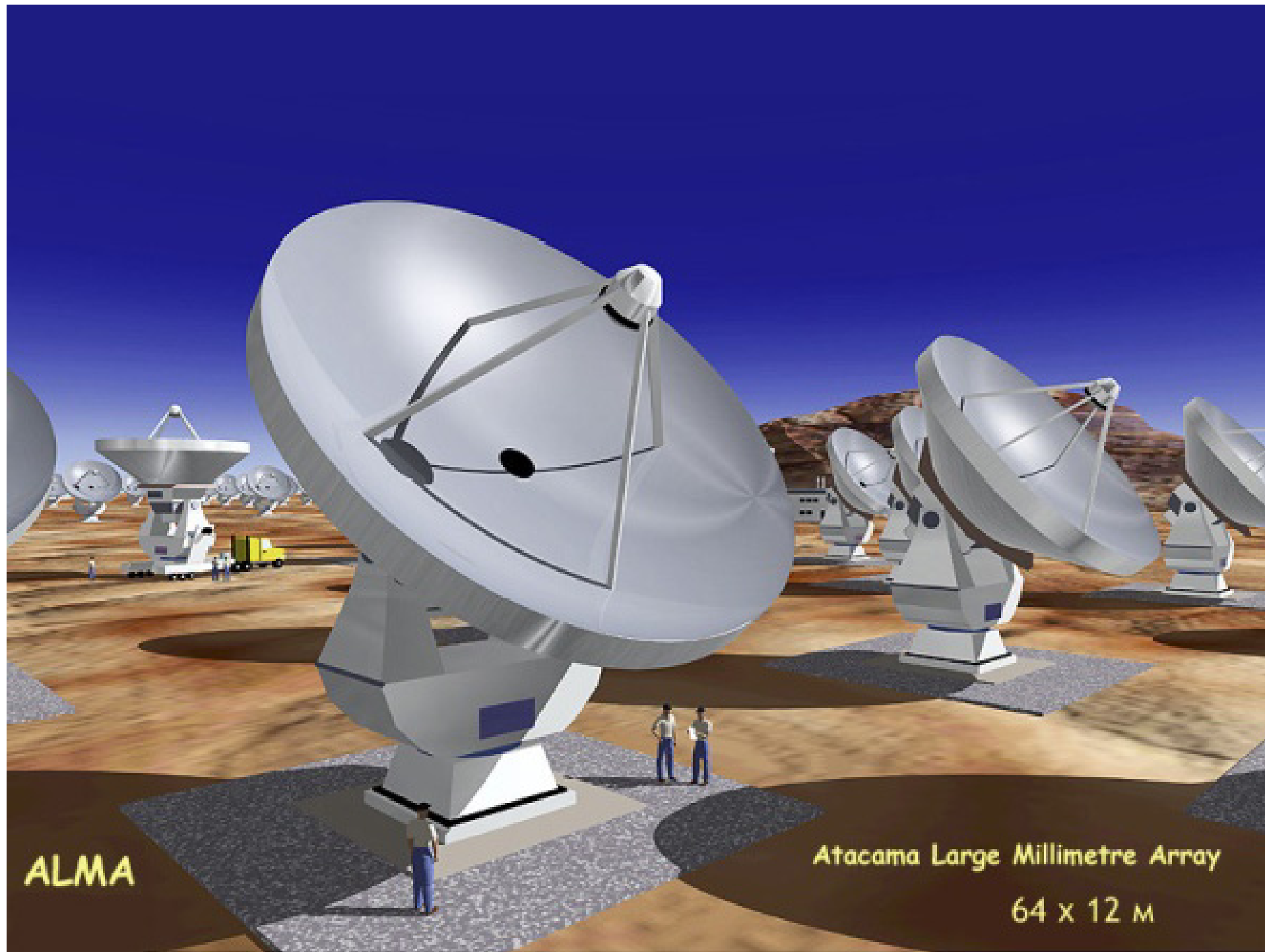
VLT, SPHERE, 2017





Water snowline (линия льдов)

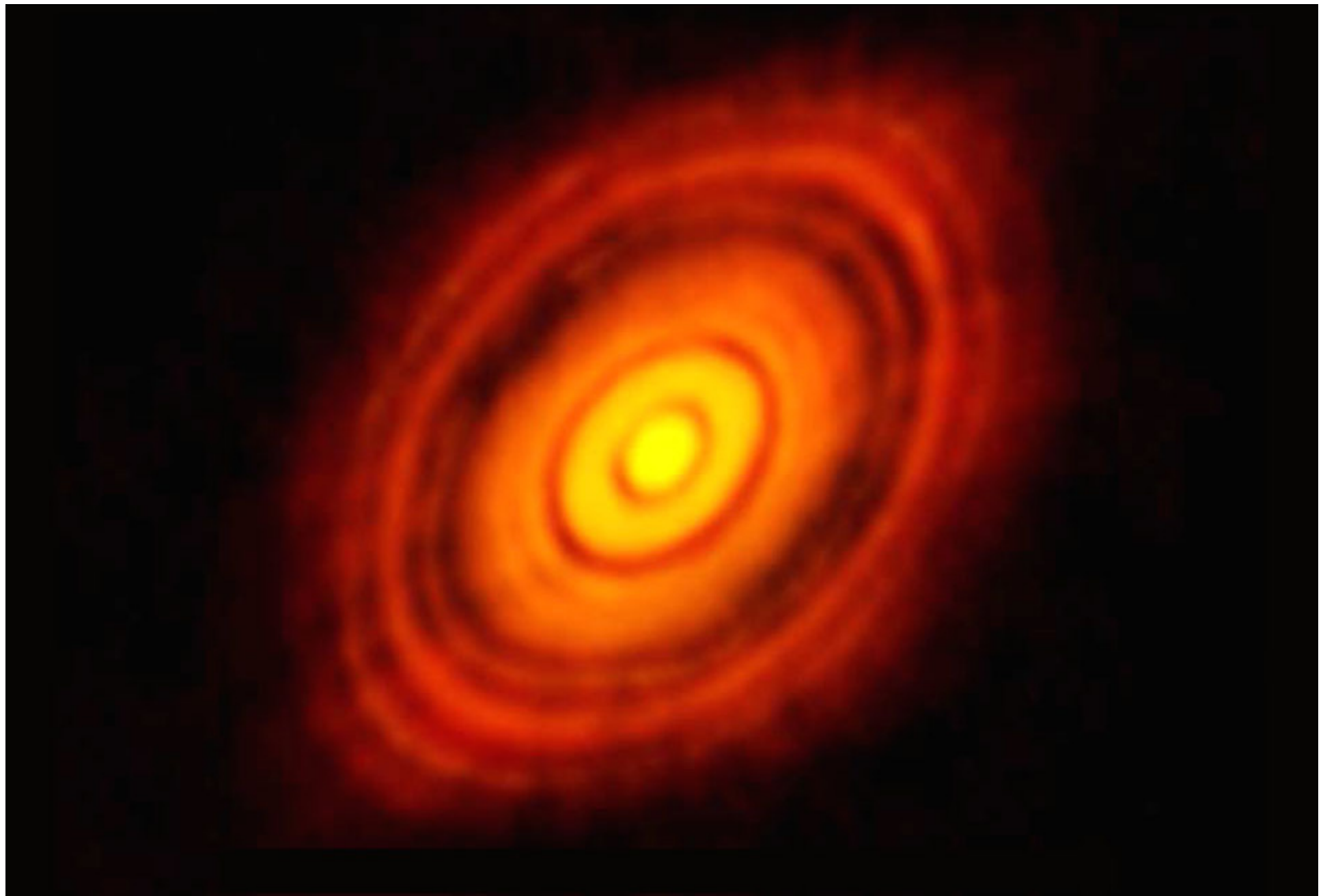
Credit: A. Angelich (NRAO/AUI/NSF)/ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)



ALMA

Atacama Large Millimetre Array

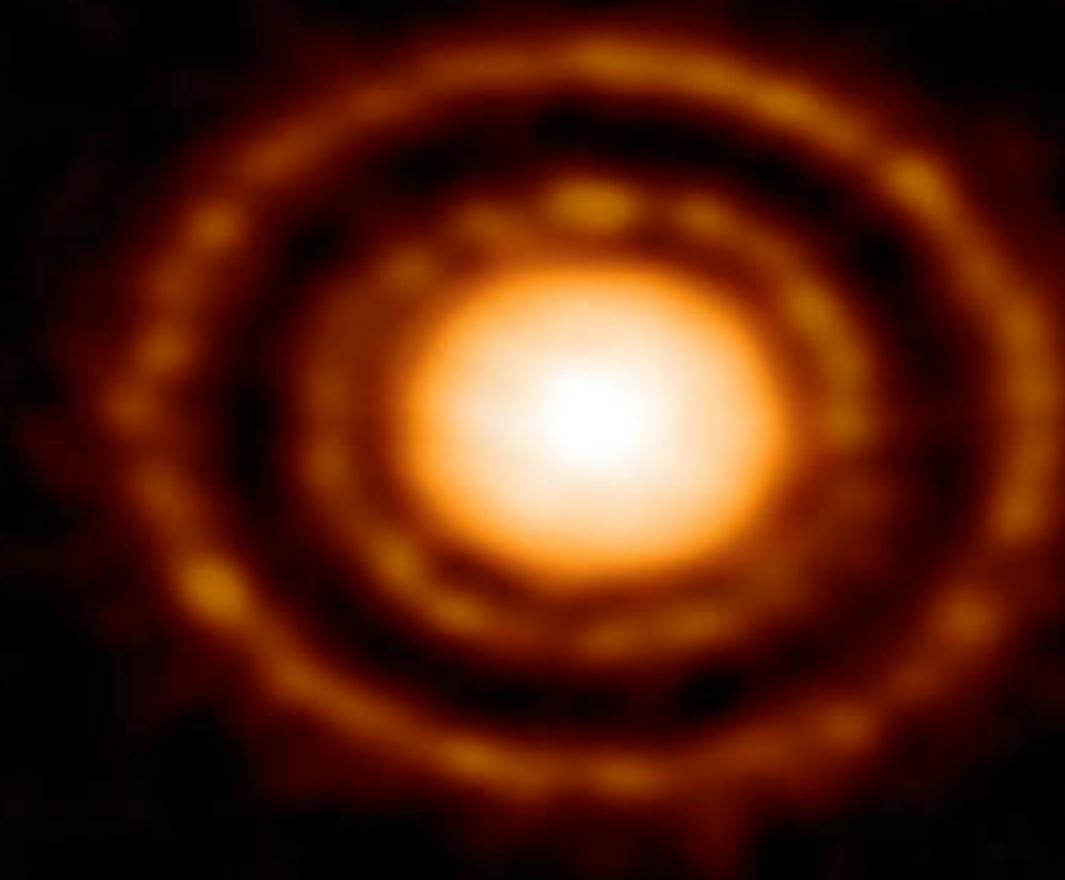
64 x 12 M



ALMA 1 mm continuum image of the disk surrounding HL Tau.
The disk is 0.8 arcsec in radius, corresponding to about 100 AU

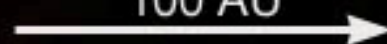
ALMA Partnership et al. (2015)

Протопланетный диск у звезды типа Т Тау,
проходящей стадию гравитационного сжатия



AS 209

100 AU



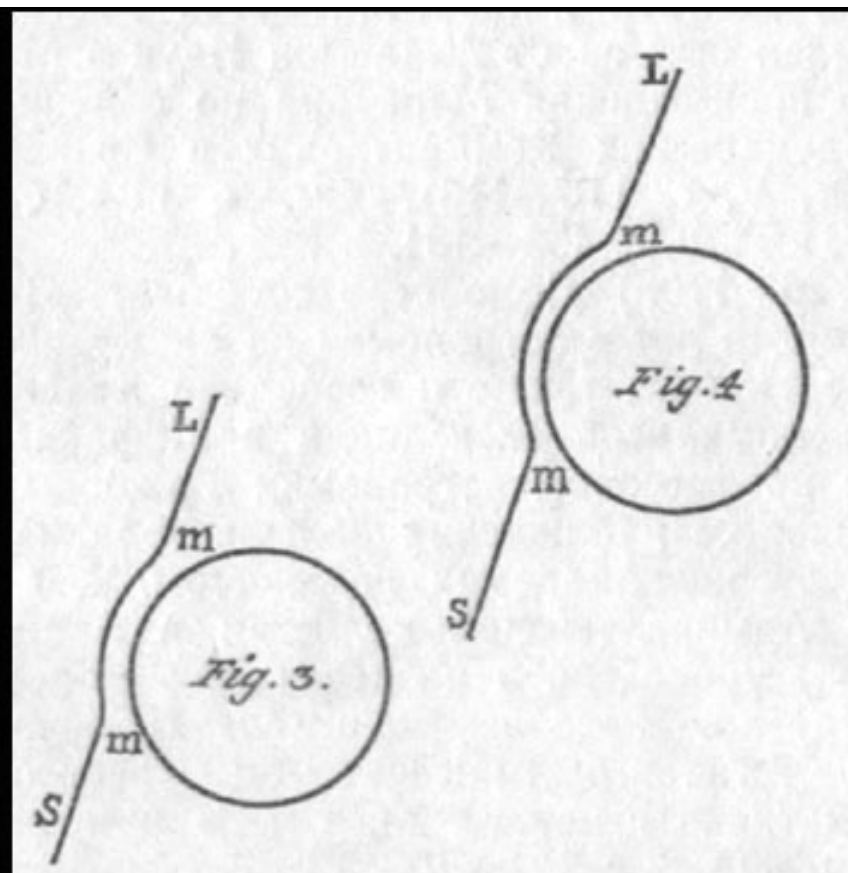
ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/ D. Fedele et al. 2018



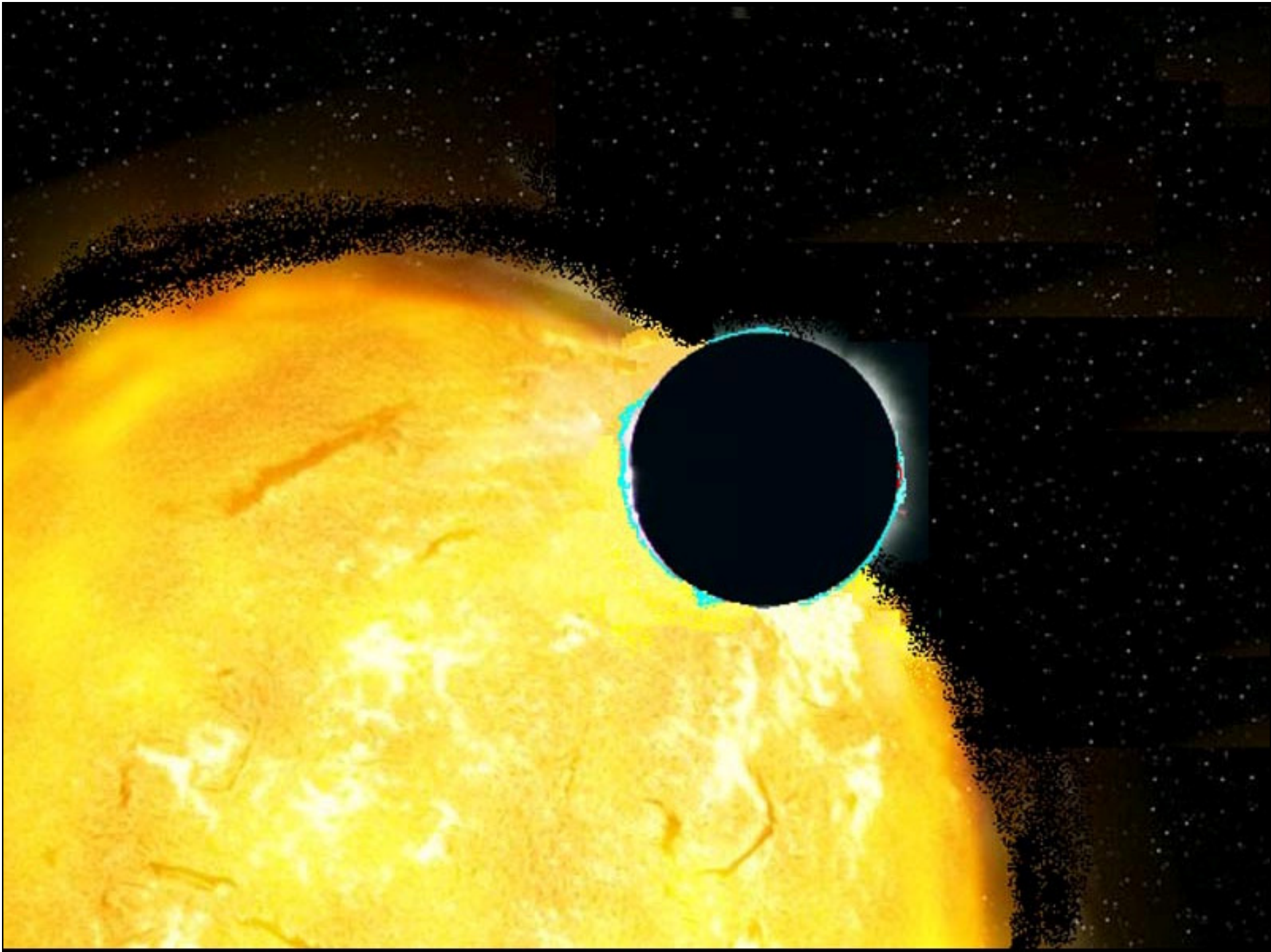
Прохождение Венеры
по диску Солнца
8 июня 2004



Следующее
утром 6 июня 2012



М. В. Ломоносов
наблюдал прохождение
Венеры по диску Солнца
26 мая 1761 г.

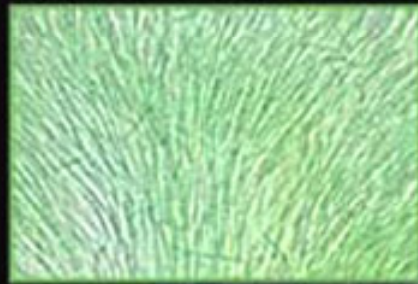


Биомаркеры

Озон O_3

признак
кислорода,
выделяемого
растениями и
водорослями

O_3 Ozone, produced
by plants, algae

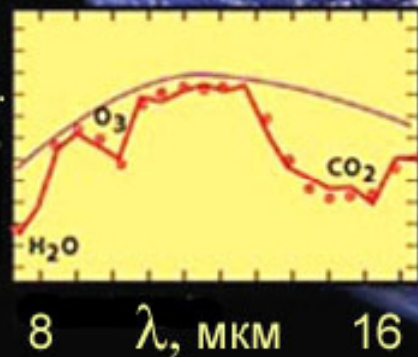


H_2O Liquid water



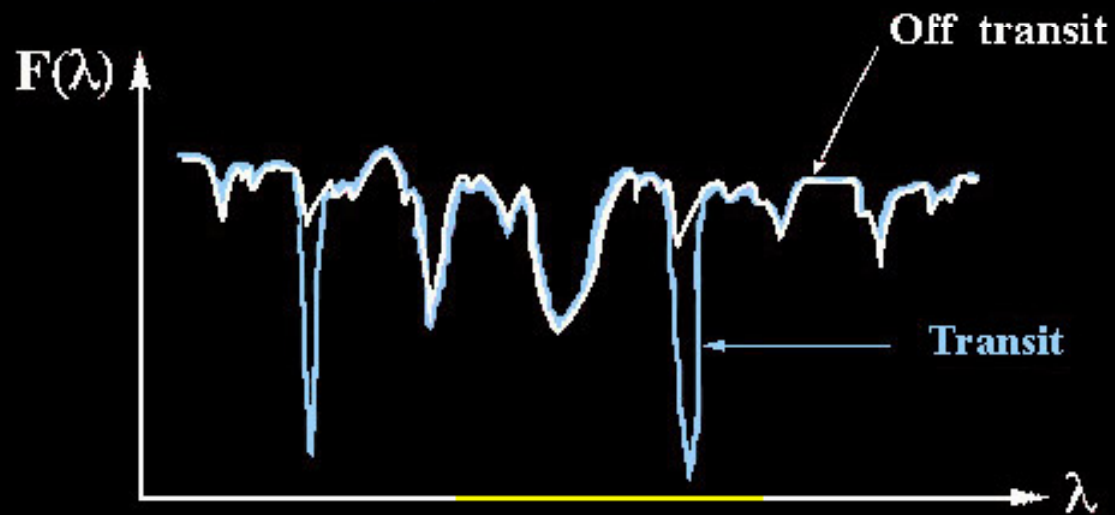
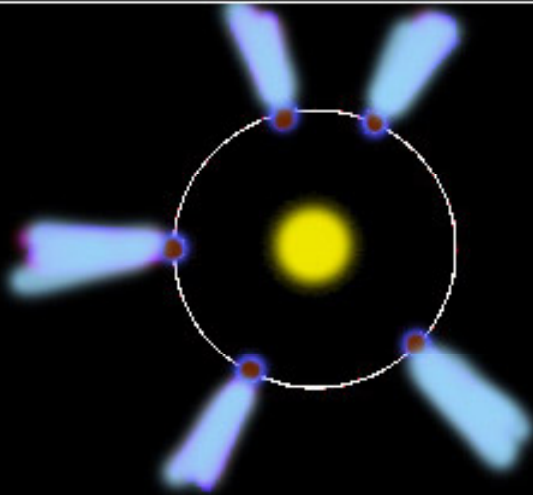
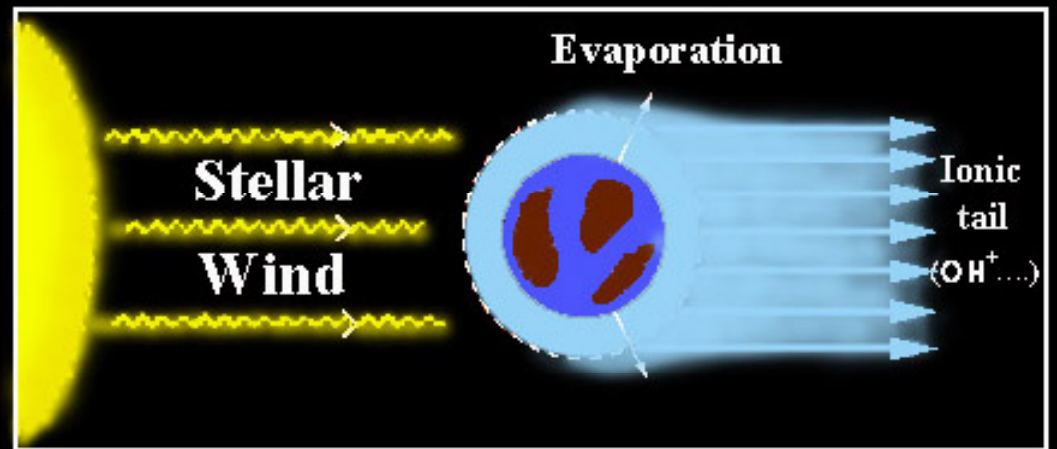
Вода H_2O
благоприятные
условия

ИК-спектр Земли,
который мог бы
получить космич.
интерферометр
«Дарвин»
(6 x 1,5 м)
с расстояния
30 св. лет



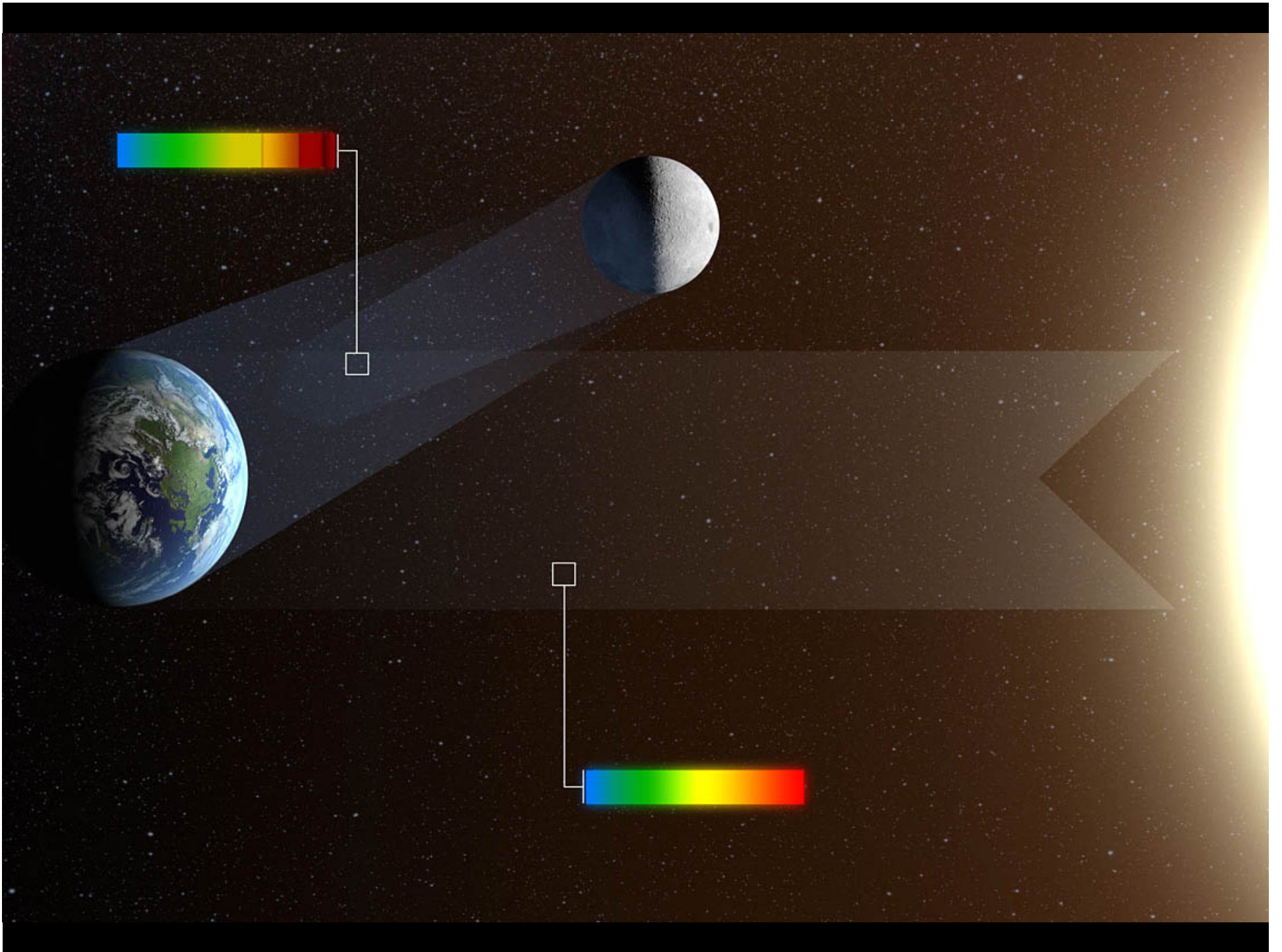
Methane produced
by living organisms

Метан CH_4
выделяют
живые
организмы



51 Peg



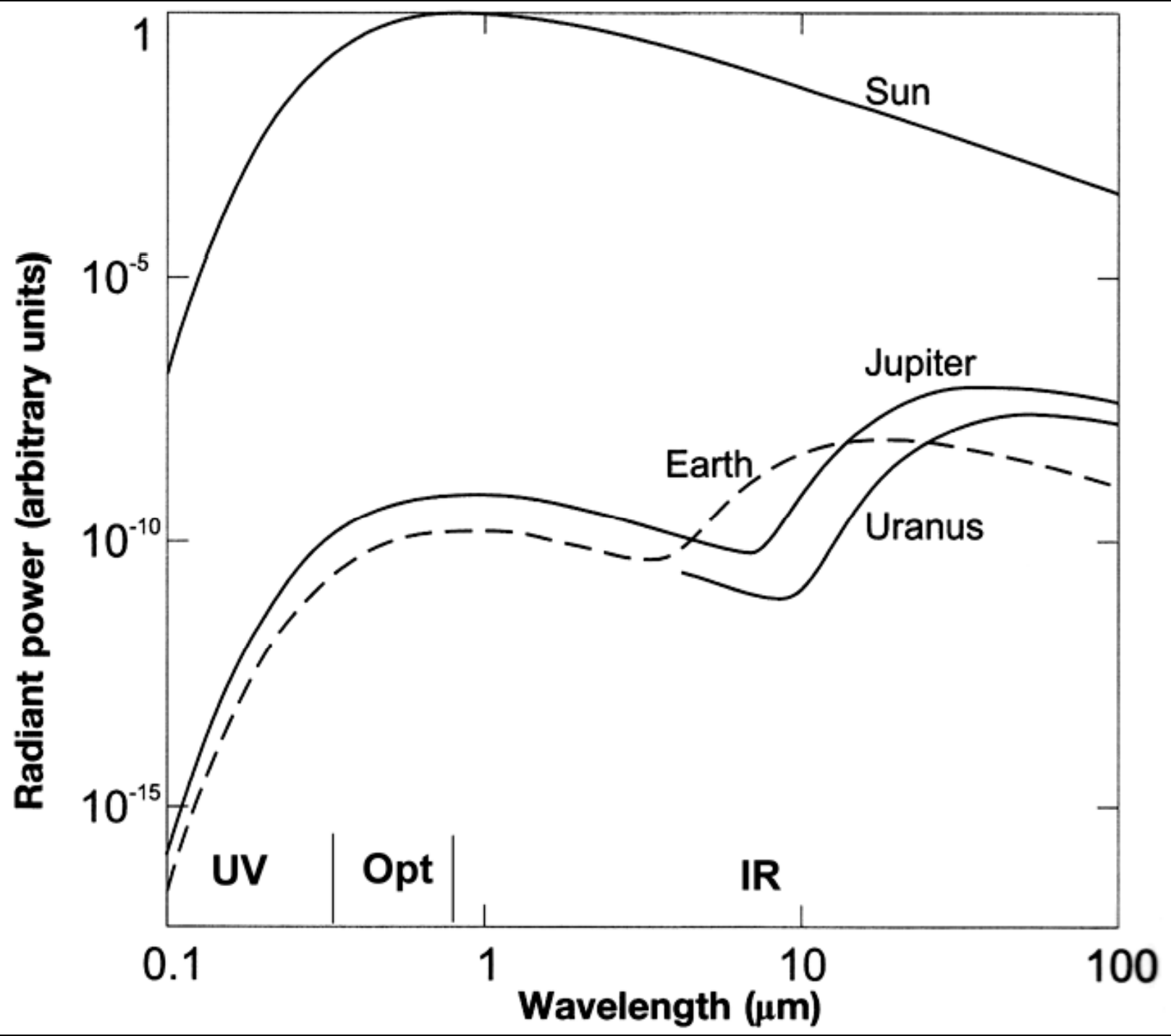


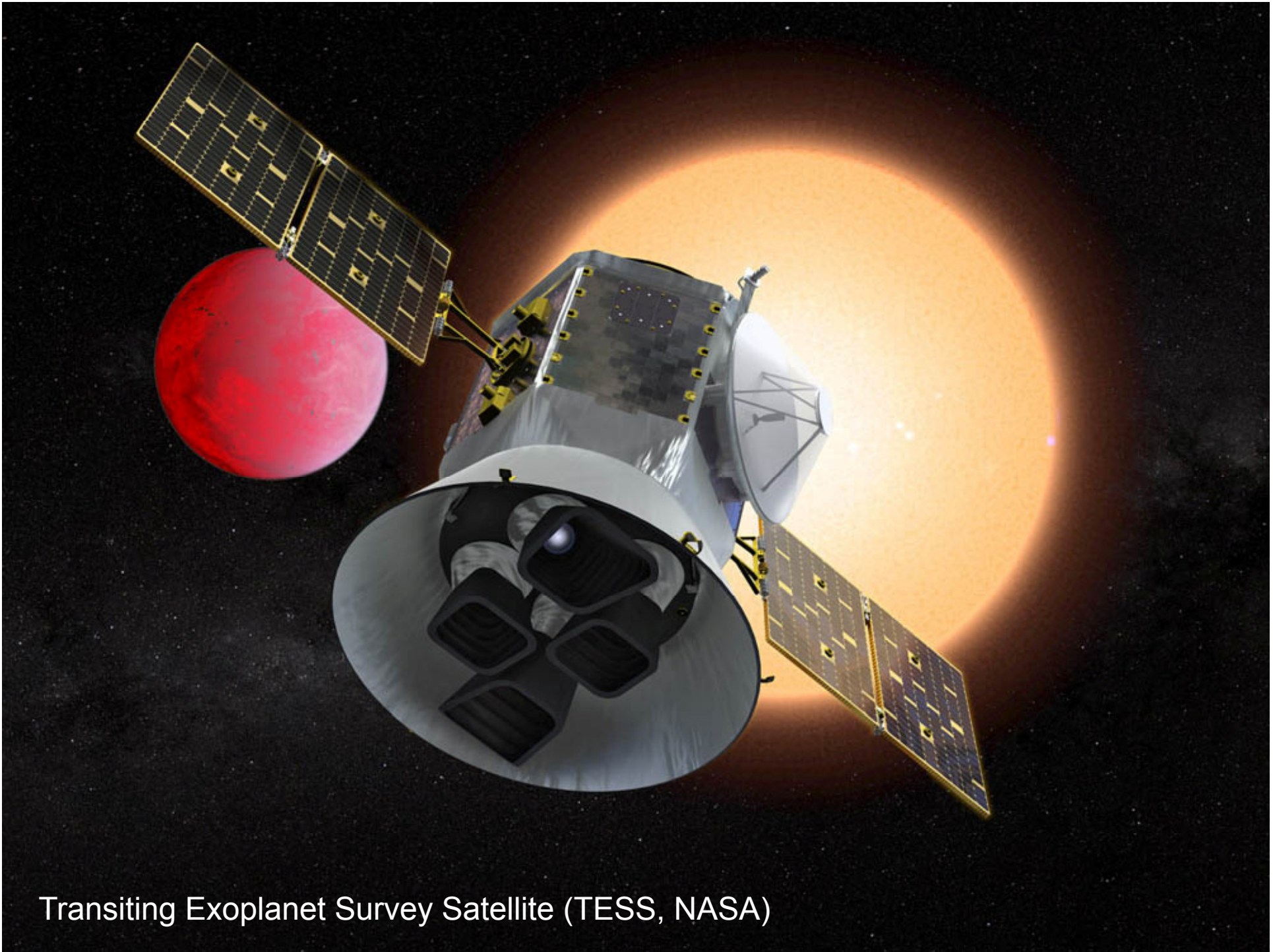


**ESO
La Silla
2400 m**



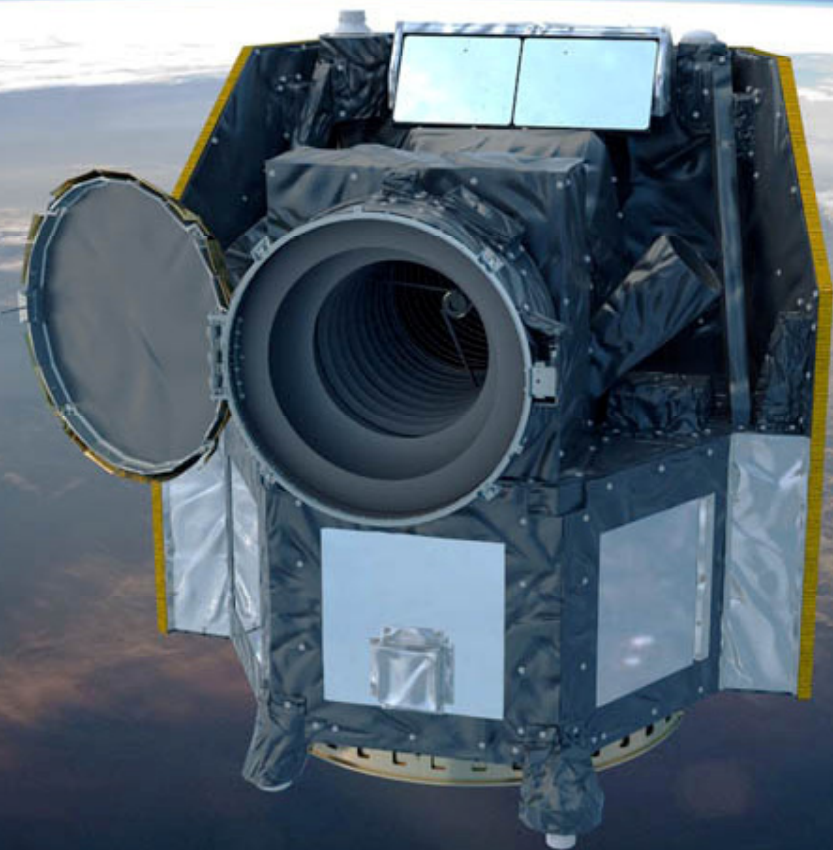
Мауна-Кеа, о.Гавайи, 4130 м





Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS, NASA)

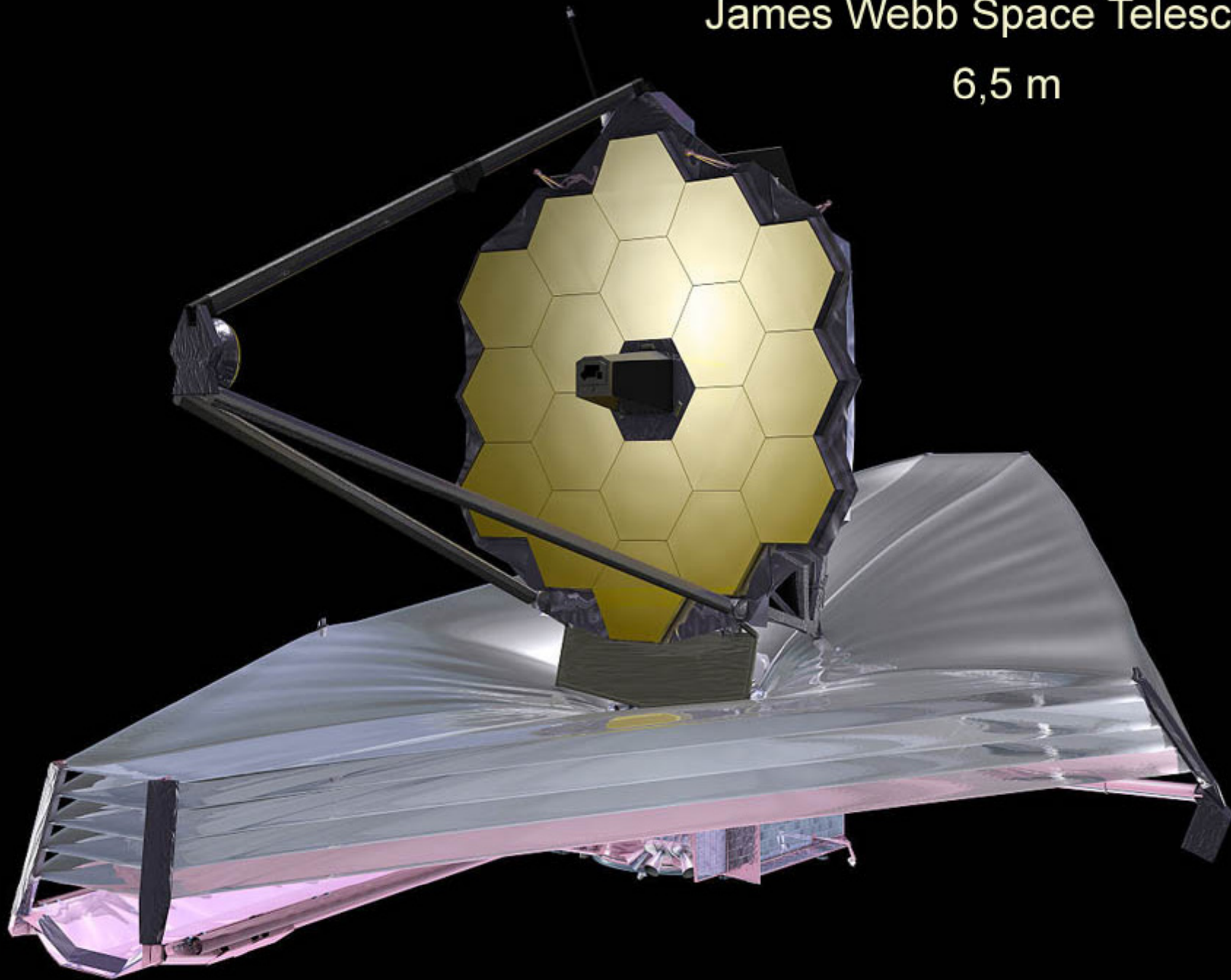
CHEOPS - CHaracterising ExOPlanet Satellite (ESA, Dec 2019)

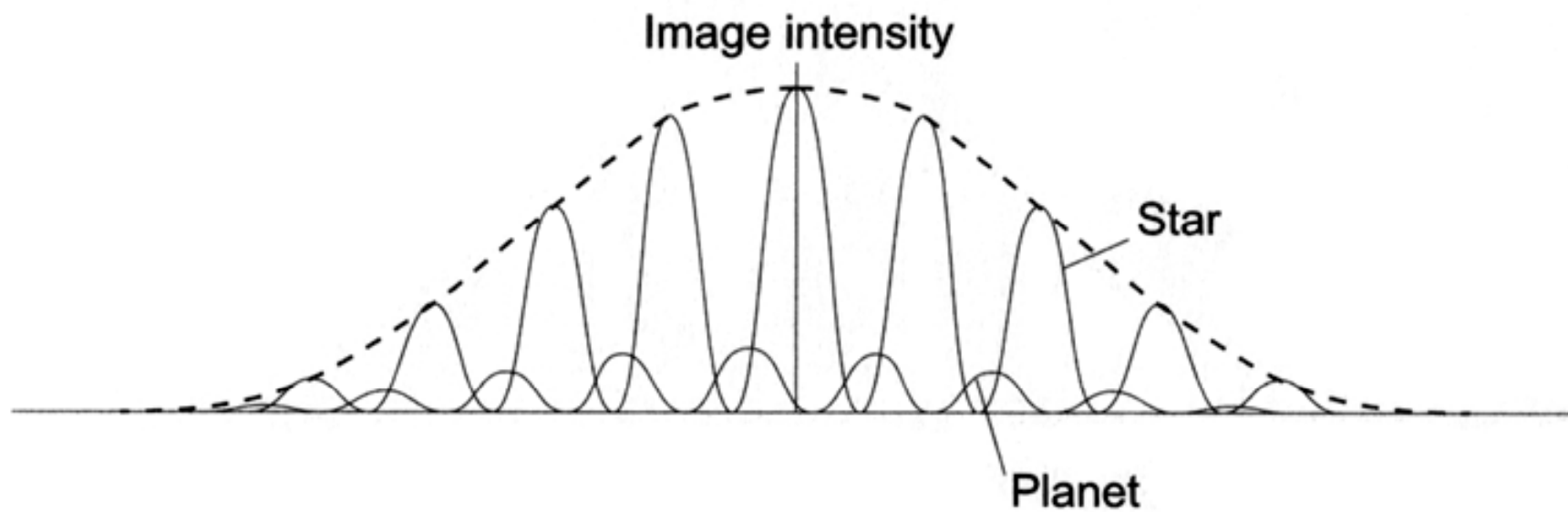
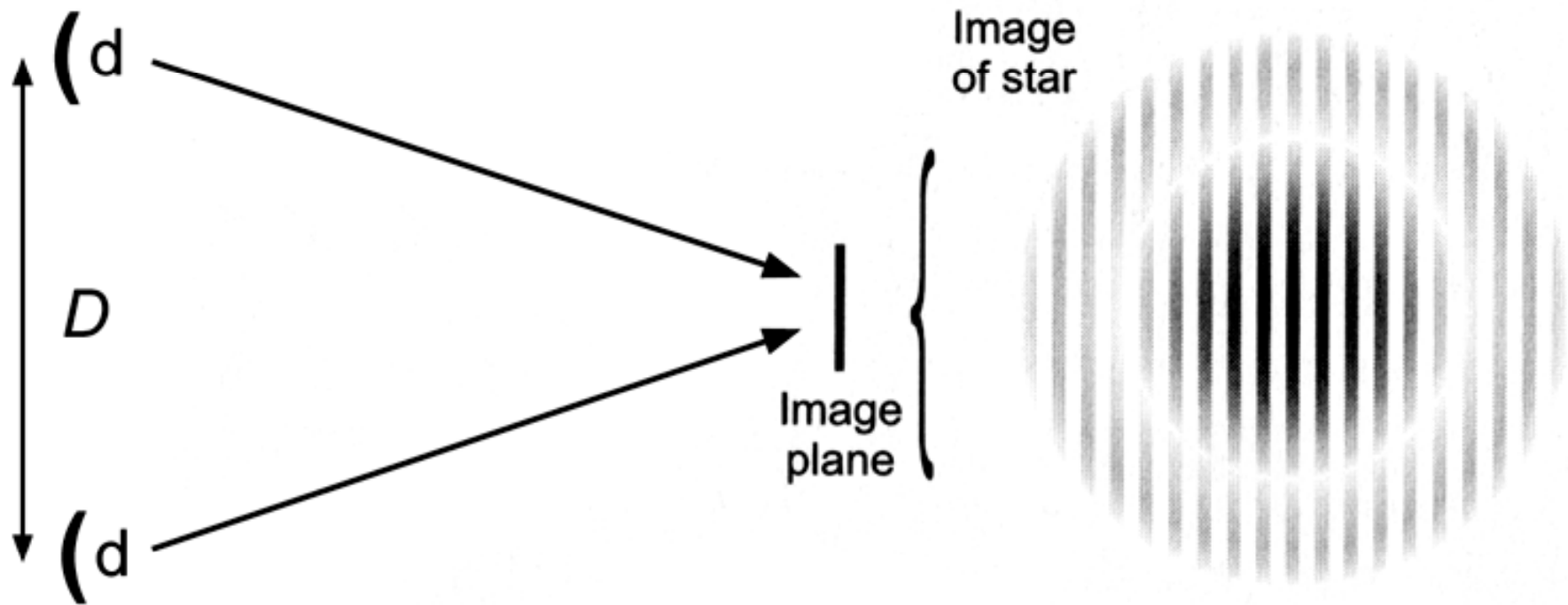


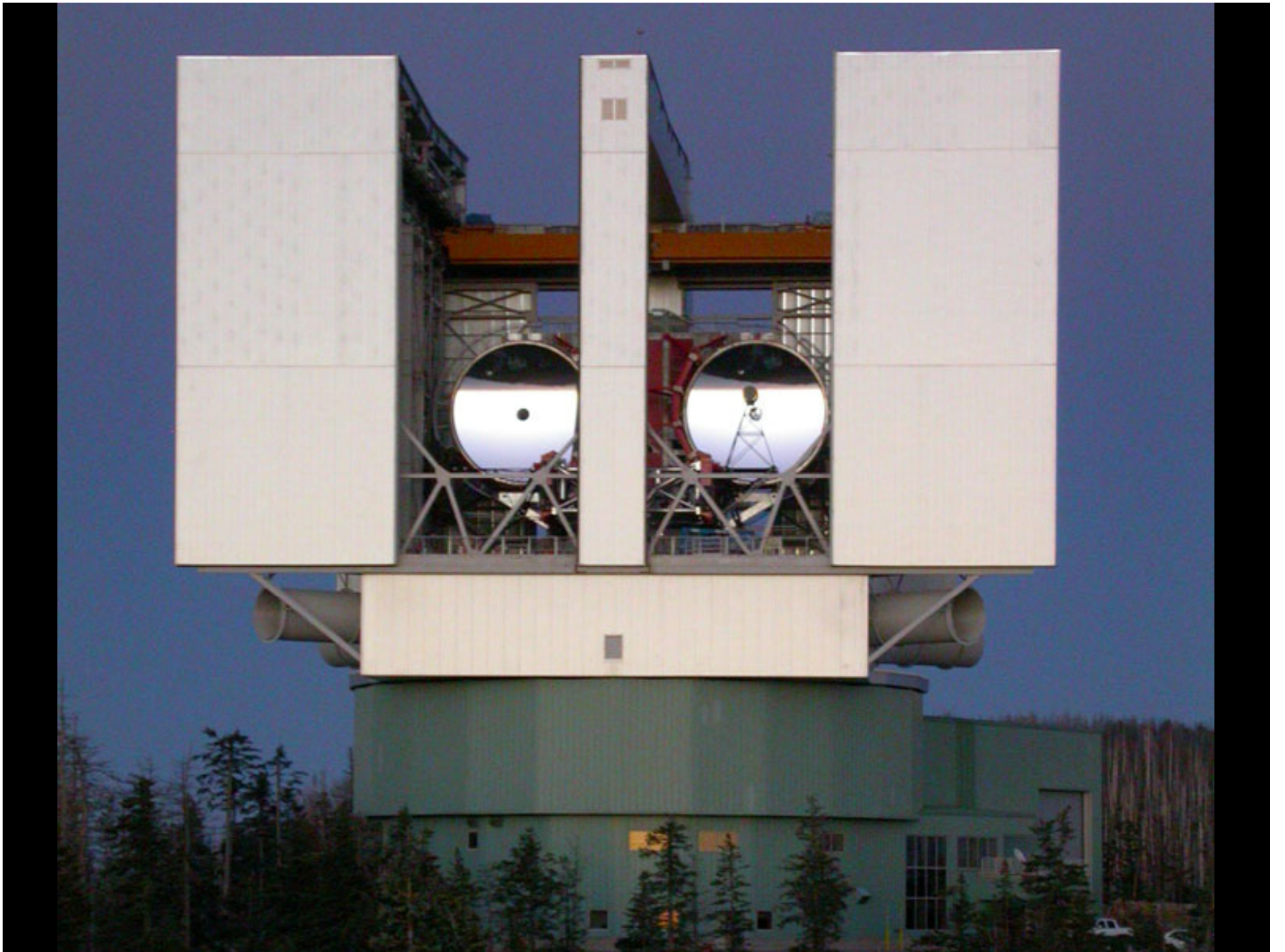
Спутник 1,5 x 1,5 x 1,5 м массой 300 кг на солнечно-синхронной орбите высотой 700 км
Телескоп Ричи-Кретьен 30 см. Задача - измерение размеров экзопланет (суперземель)

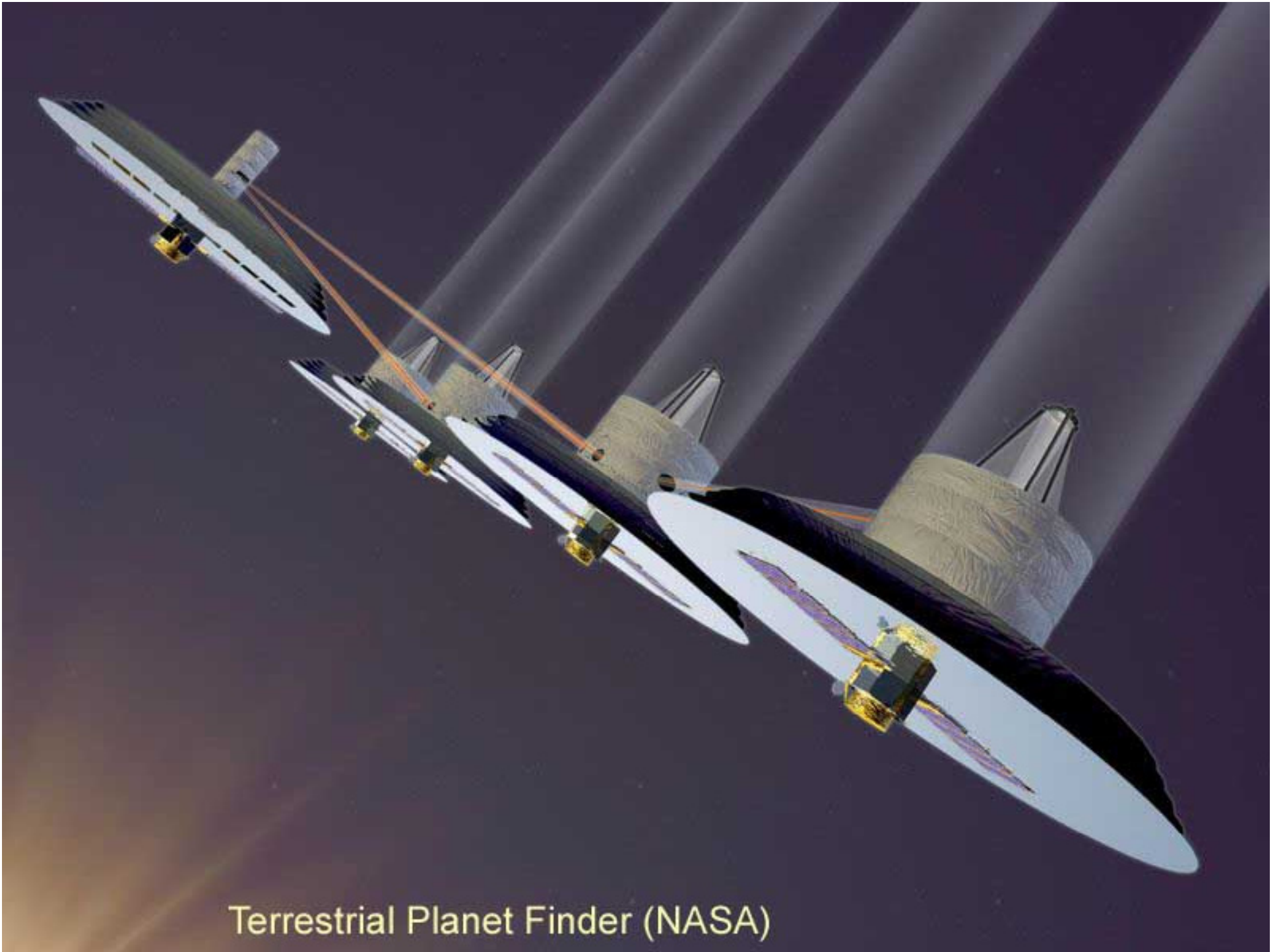
James Webb Space Telescope

6,5 m

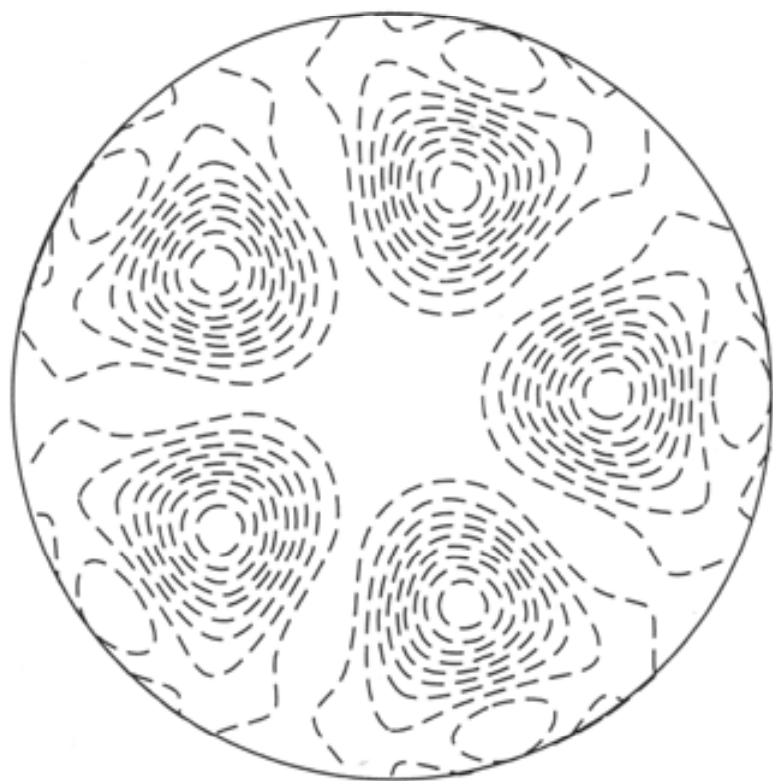




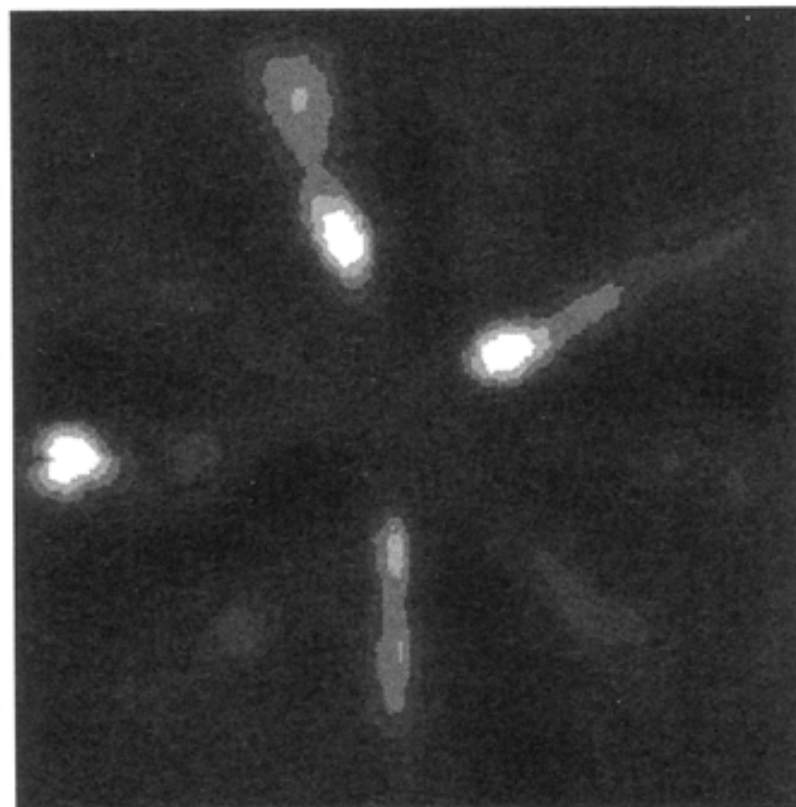




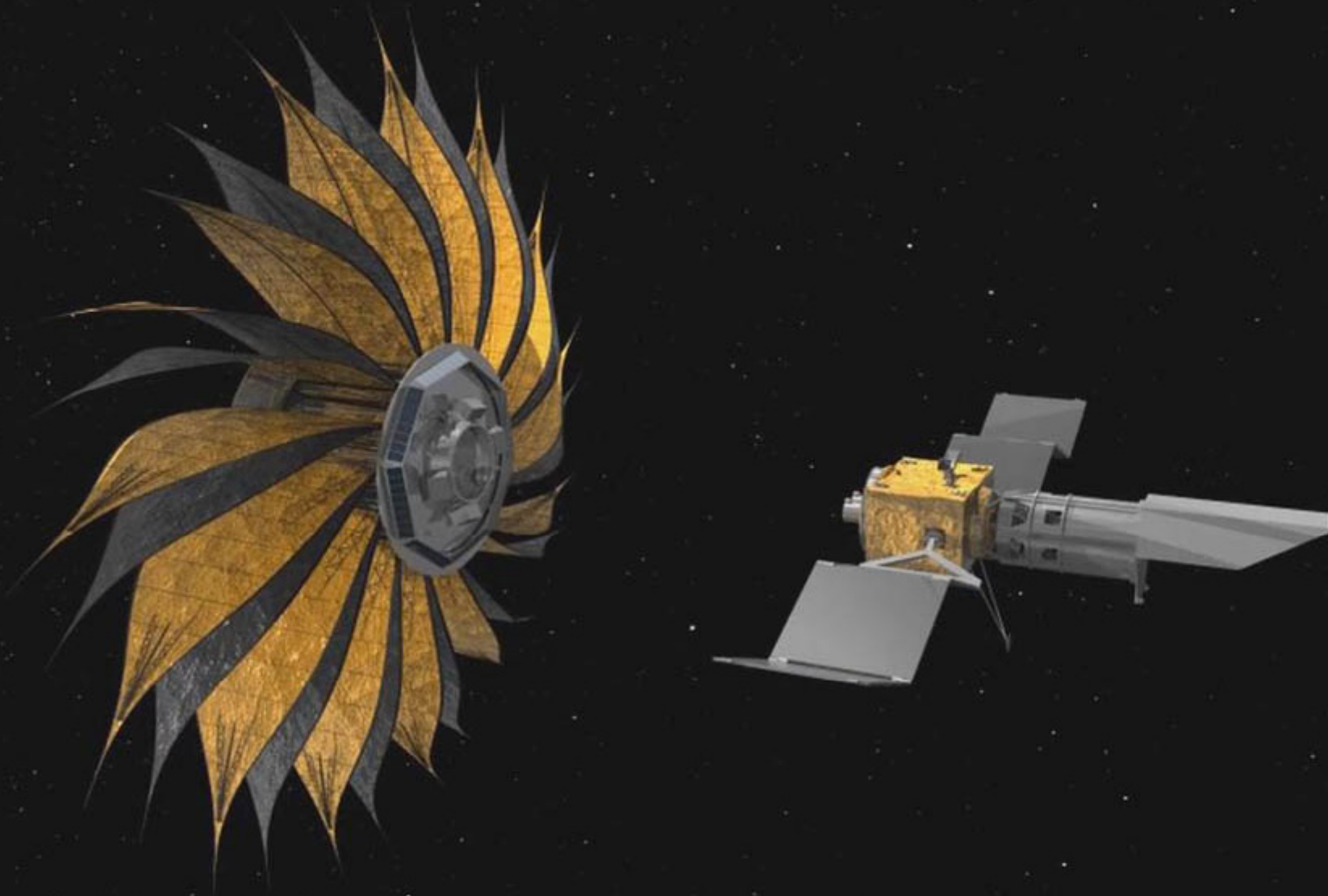
Terrestrial Planet Finder (NASA)



*Карта ослабления в плоскости изображения
нуль-интерферометра из пяти телескопов.
Пять контурных "холмов" указывают зоны
наименьшего ослабления.*

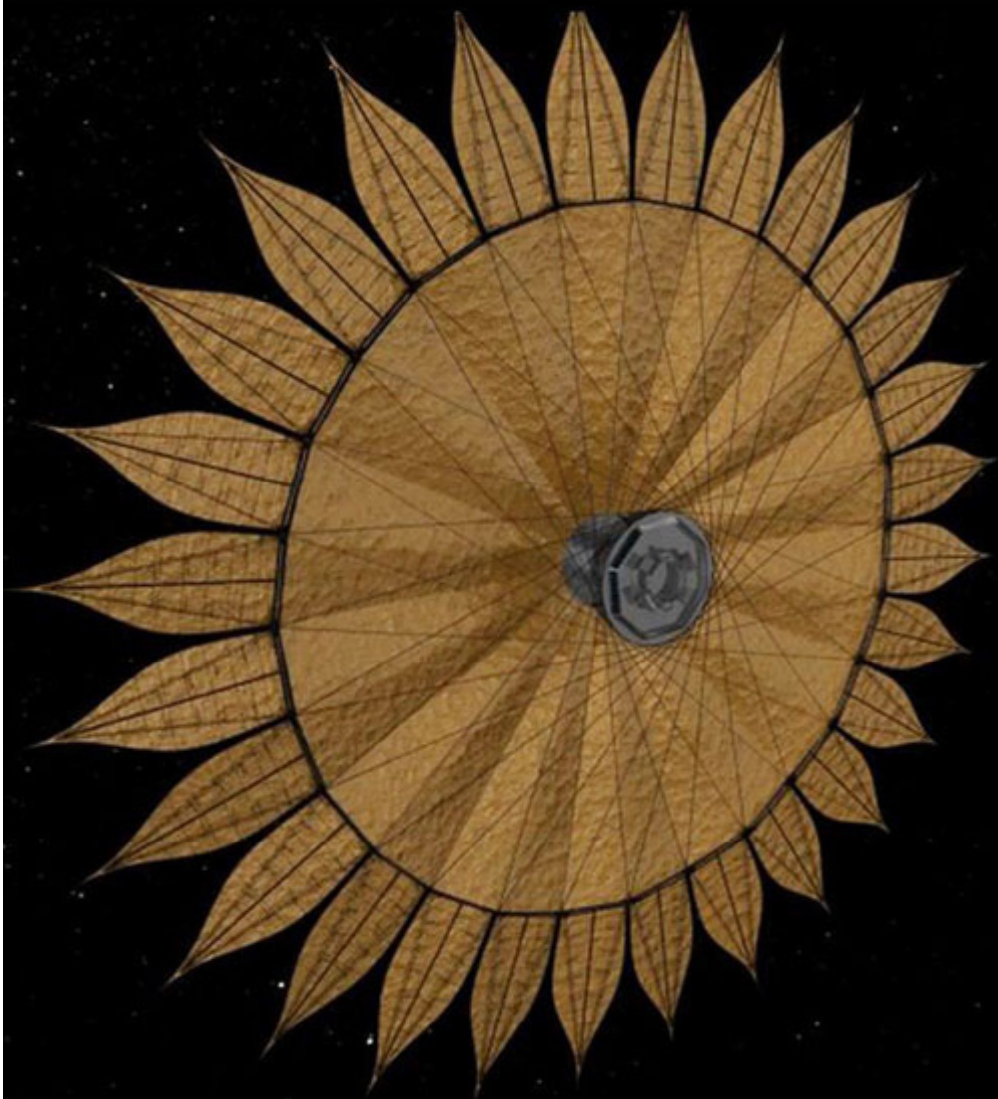


*Так интерферометр "Дарвин"
мог бы увидеть
Солнечную систему;
три ярких пятна –
Венера, Земля и Марс.*

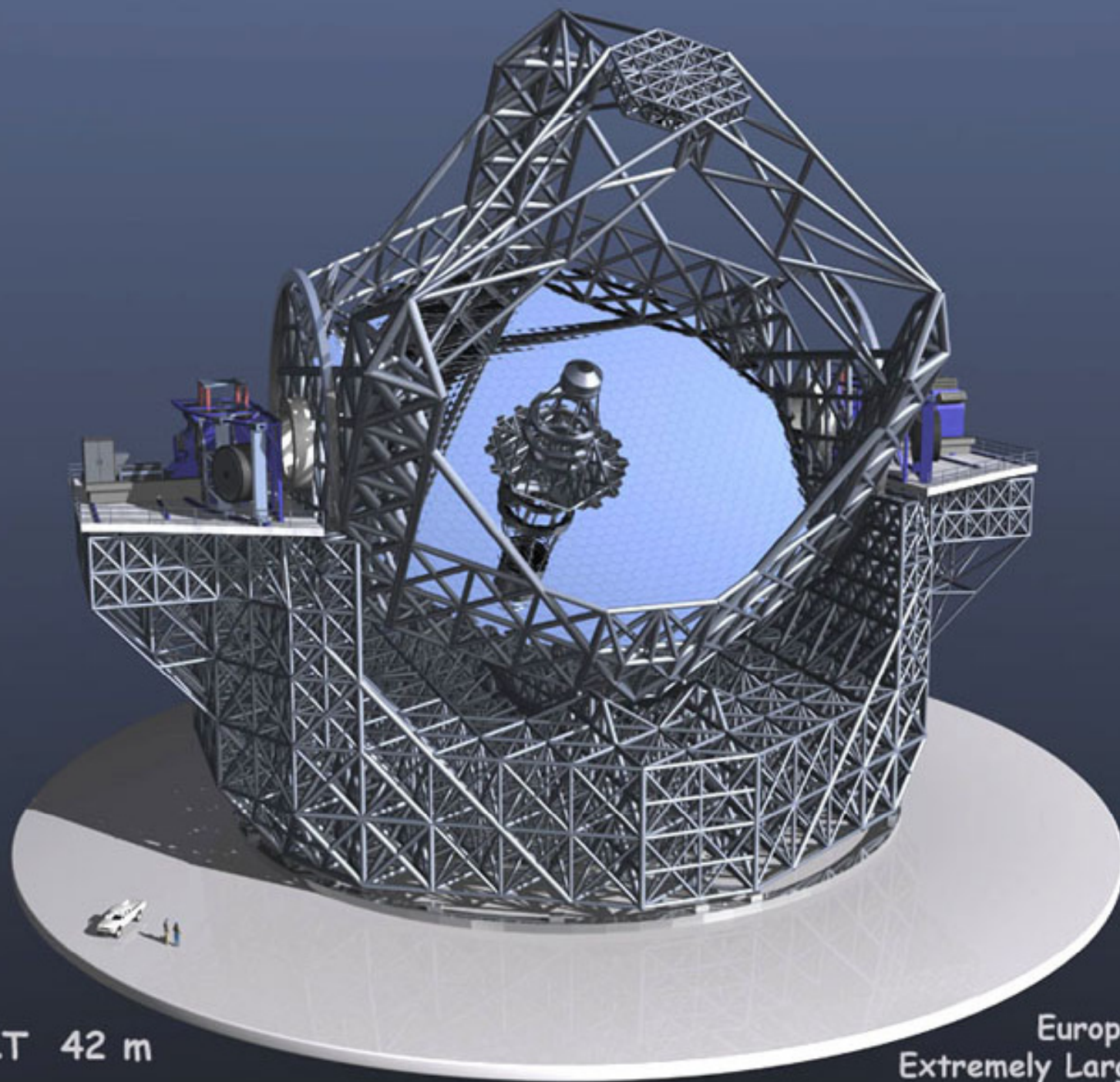


Habitable Exoplanet Imaging Mission (HabEx), NASA 2035

Телескоп 4 м с коронографом и экран диаметром 56 м на расстоянии 72 тыс.км



Диапазоны: видимый, UV, NIR, IR. Полная масса около 19 тонн.
Запускается в точку L2 двумя тяжелыми ракетами



E-ELT 42 m

European
Extremely Large Telescope

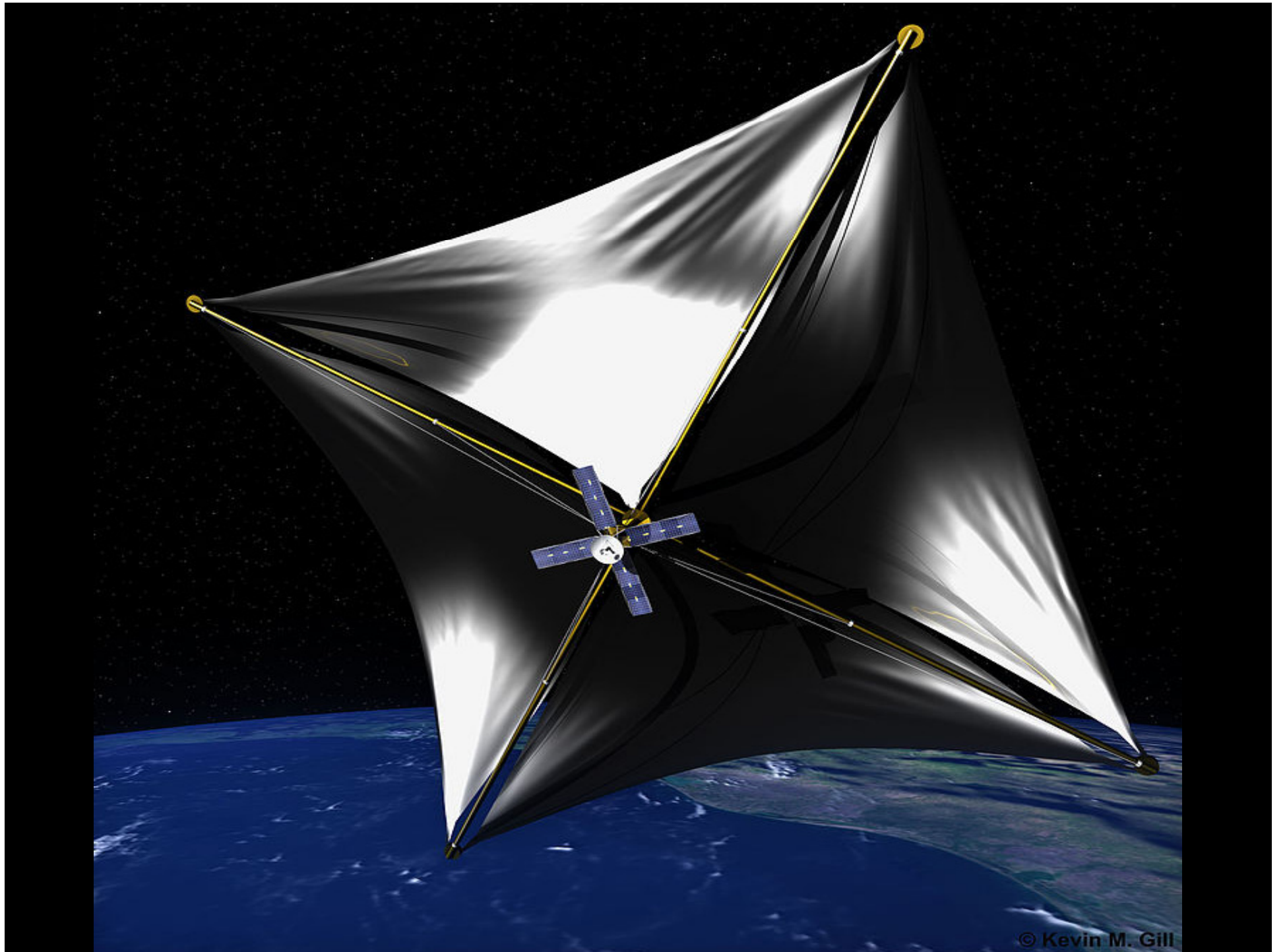


2015 г.

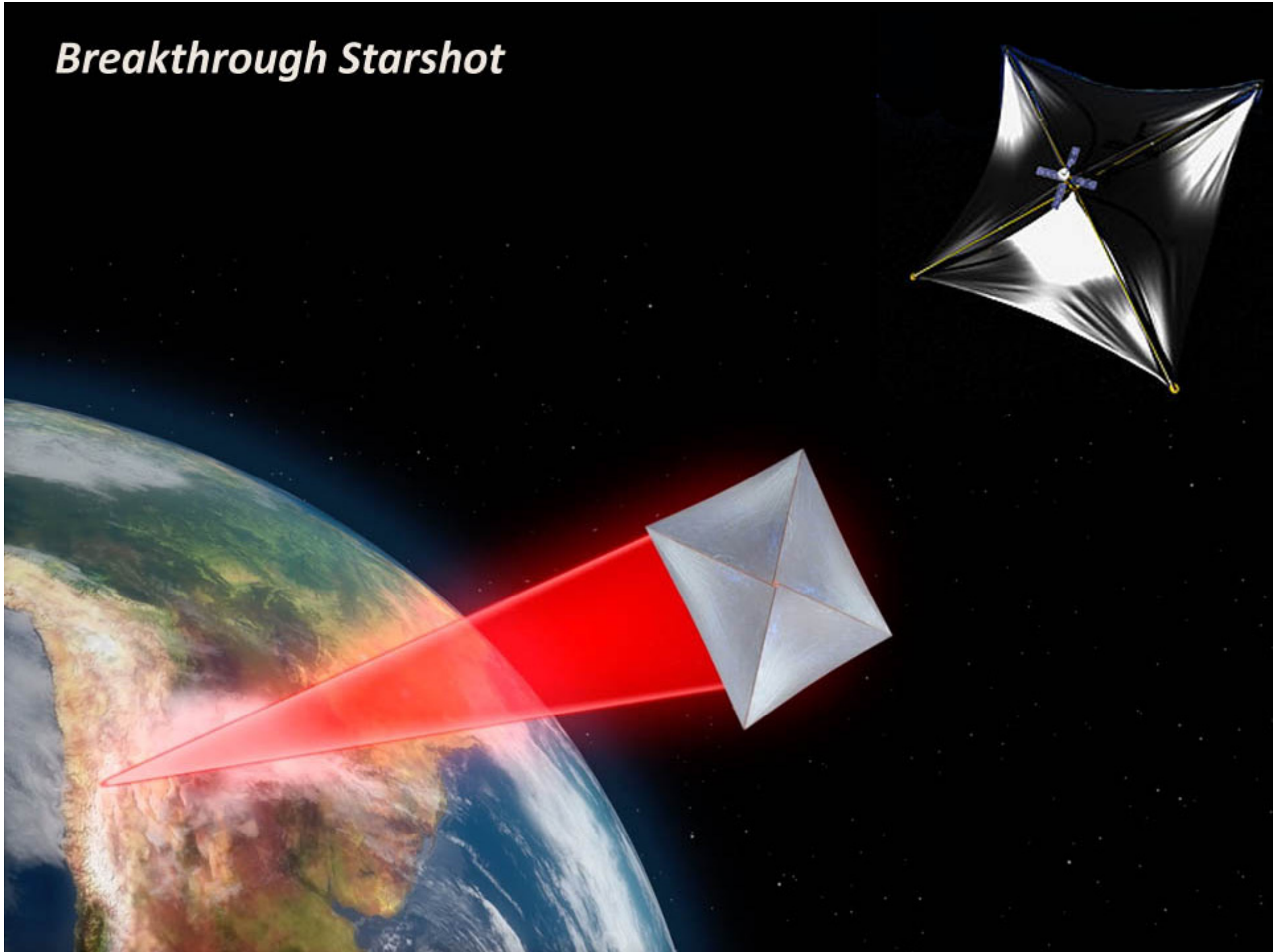
**Сооснователь Mail.ru
Юрий Мильнер
вложит \$100 млн
в программу SETI**

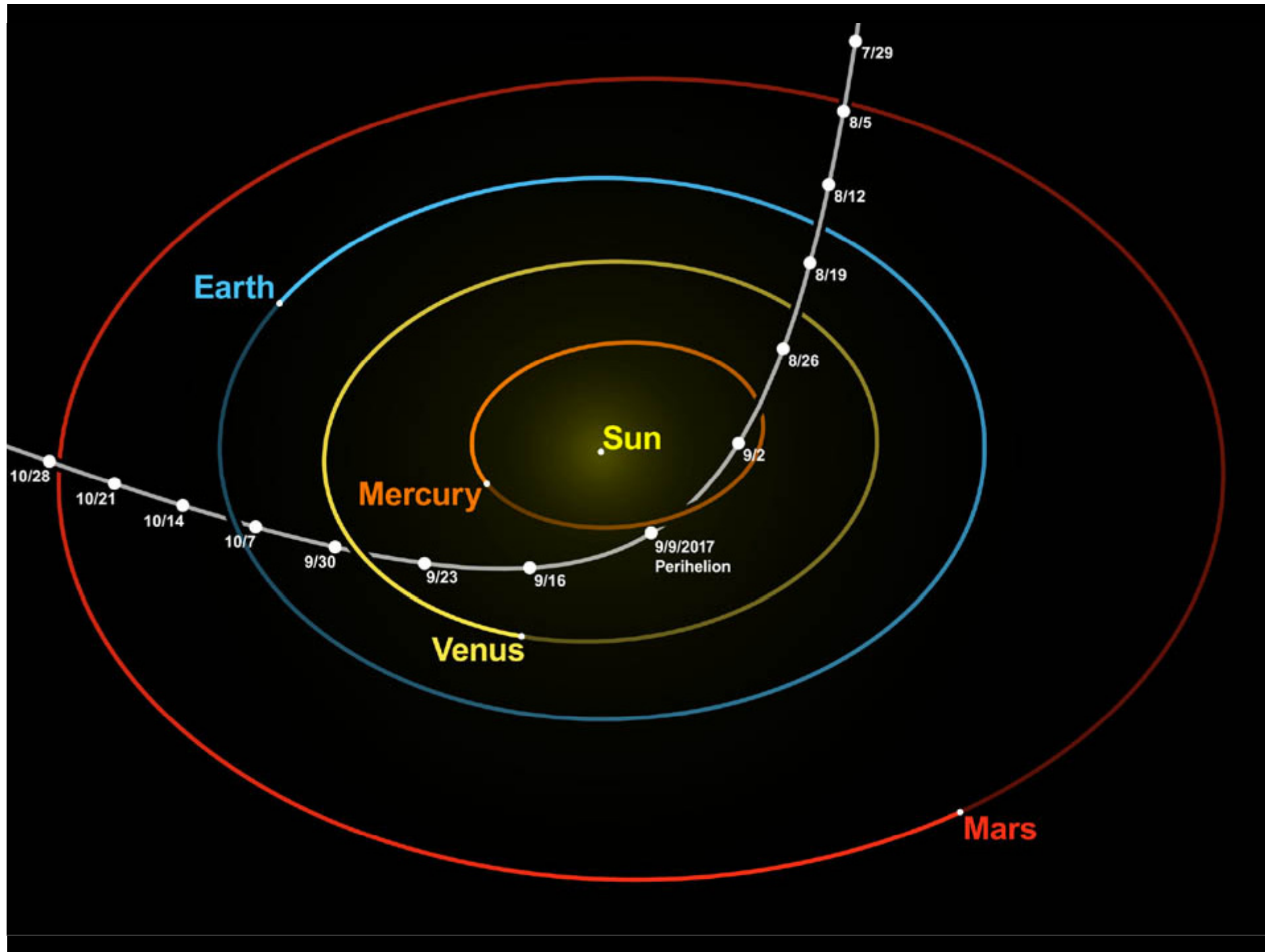
**Идеологом проекта
Мильнер назвал
физика Стивена Хокинга,
а его "научными лидерами" –
Френка Дрейка и Джефа Марси**

**Бизнесмен планирует финансировать аренду телескопов
и компьютерных сетей. Участники проекта
будут пытаться выявить сигналы двух типов - радиоволны
(в диапазоне от 500 МГц до 15 ГГц) или лазерное излучение.
Ожидается, что проект поможет расширить охват
таких исследований более чем в 100 раз.**



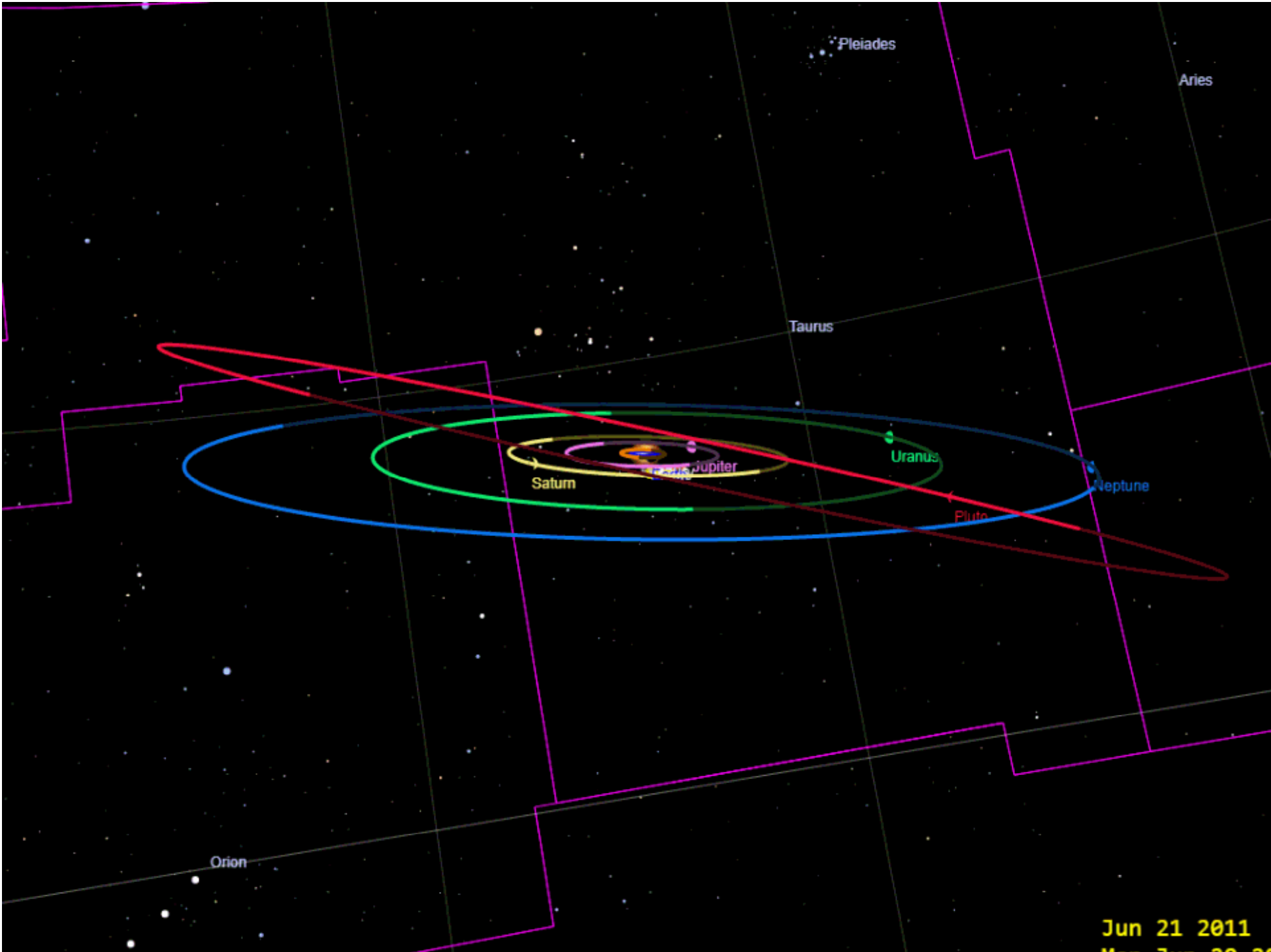
Breakthrough Starshot





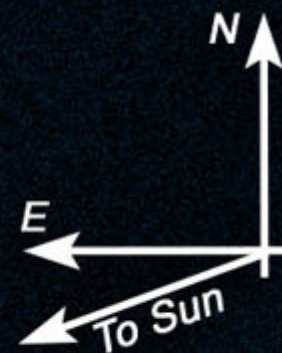


Первый межзвездный объект Оумуамуа 1I/2017 U1 открыт 19 октября 2017 г. телескопом Pan-STARRS 1 (Гавайи) через 40 сут после прохожд. перигелия (0,26 а. е.) Орбита гиперб. ($e = 1,2$; $i = 123^\circ$). Скорость вдали 26 км/с. Влетел от Веги (близ апекса) Размер 180x30x30 м. Альbedo 0,1. Цвет красноватый. Комы нет. Кувыркается с пер. 8 час



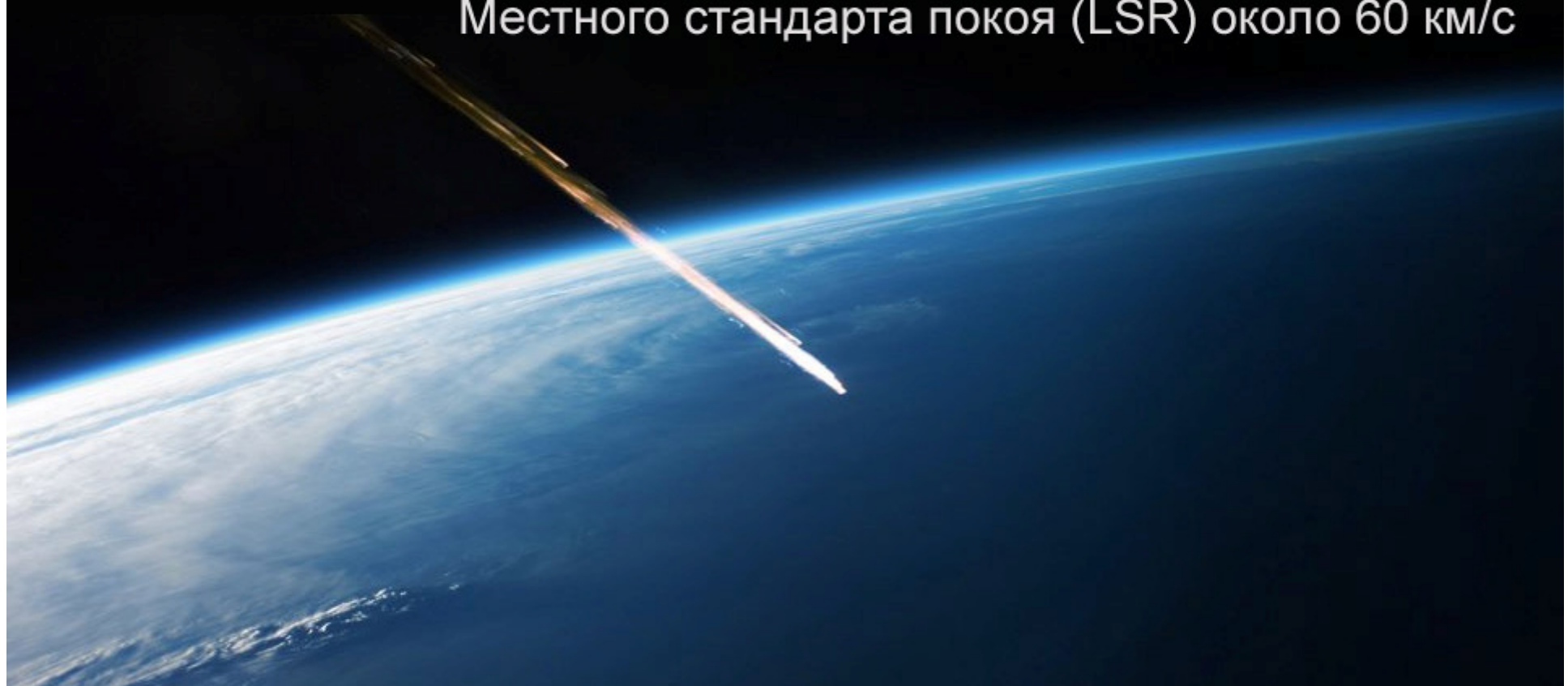
21/Borisov
20,200km 10''

C/2019 Q4 (Borisov)
HST WFC3/UVIS F350LP
Oct. 12, 2019



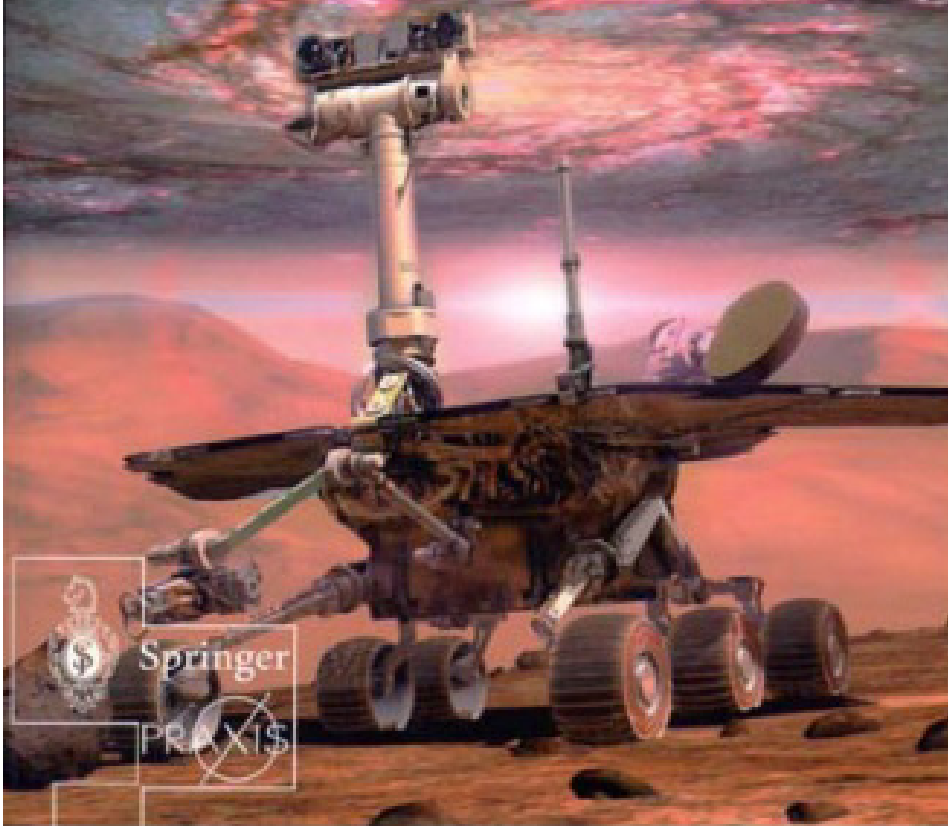
Первый межзвездный болид

В каталоге Центра изучения околоземных объектов (Centre for Near-Earth Object Studies, CNEOS, NASA/JPL) астрономы Amir Siraj и Abraham Loeb в 2019 г. обнаружили, что 8 янв 2014 г. в атмосферу Земли со скоростью 45 км/с влетел объект размером 0,5 м. Его скорость при влёте в Солнечную систему была 44 км/с, а относительно Местного стандарта покоя (LSR) около 60 км/с



LIFE IN THE SOLAR SYSTEM AND BEYOND

BARRIE W. JONES



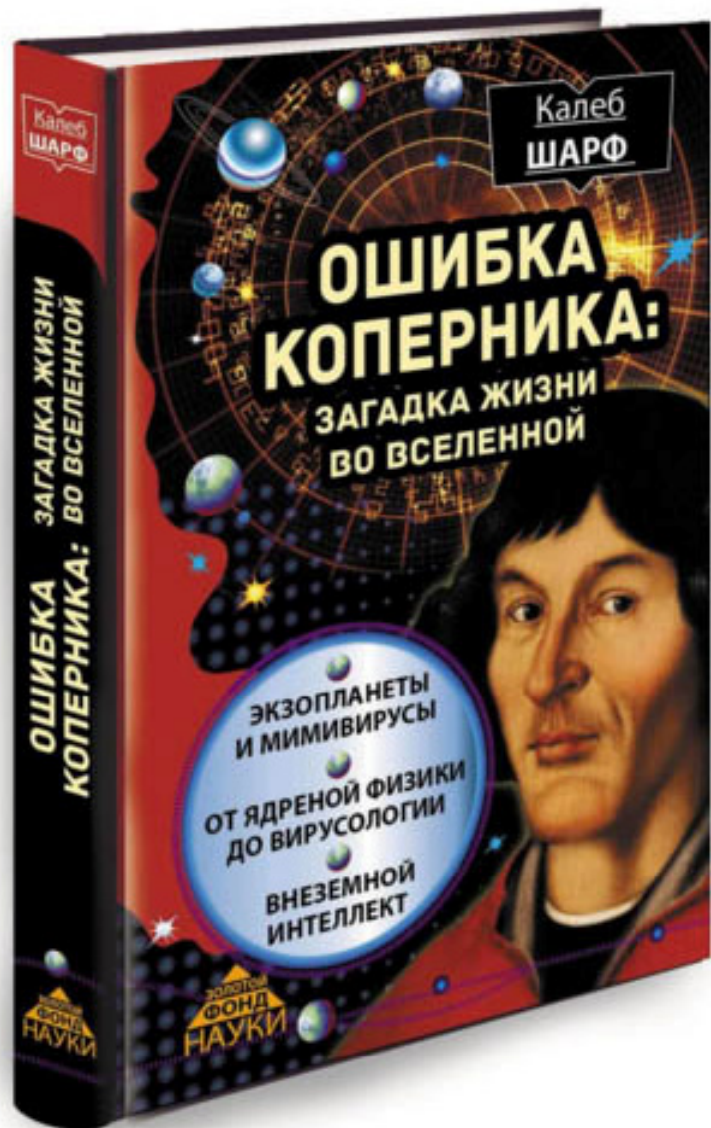
Б.У. Джонс

Жизнь

в Солнечной системе и за ее пределами



Издательство «Мир»



Copyrighted Material

SECOND EDITION

THE
Exoplanet
HANDBOOK

Michael Perryman

CAMBRIDGE

Copyrighted Material



Michael Carroll

Earths of Distant Suns

How We Find Them,
Communicate with Them,
and Maybe Even Travel There

 Springer

Kevin Heng



EXOPLANETARY ATMOSPHERES

Theoretical Concepts and Foundations

PRINCETON SERIES IN ASTROPHYSICS



В начале XXI века астрономия остается в авангарде естествознания. Вместе с физиками астрономы работают над фундаментальными проблемами, способными изменить наше представление о природе. До сих пор не раскрыты тайны «темного вещества», составляющего основную массу галактик, и «темной энергии», ускоряющей расширение Вселенной. Не выяснены механизмы взрывов звезд и активности ядер галактик. Нет общепринятых теорий происхождения планет, галактик и самой Вселенной. Но работа во всех этих направлениях идет в нарастающем темпе, и каждый день приносит удивительные открытия.

В. Г. Сурдин Разведка далеких планет



В. Г. Сурдин

РАЗВЕДКА далеких планет

