

PLANETAS E SISTEMAS PLANETÁRIOS (AGA0502)

2MASSWJ1207334-393254

Enos Picazzio (IAGUSP)



PLANETAS EXTRASSOLARES (Exoplanetas)

NÃO HÁ PERMISSÃO DE USO PARCIAL OU TOTAL DESTE MATERIAL PARA OUTRAS FINALIDADES.

Conceitos antigos

*Assim surgem os mundos : corpos de todos os tamanhos e formas movem-se do infinito em um grande vácuo; lá eles juntam-se, rodopiam e formam um único vórtice, uns colidindo com outros, revolvendo de todas as maneiras, e começam a separar-se uns dos outros. **Leucippus (~480-420 a.C.)***

*Há infinitos mundos, parecidos ou não como o nosso. Assim como os átomos são infinitos em número, como já foi provado, (...) não há em nenhuma parte obstáculo ao número infinito de mundos. **Epicurus (341-270 a.C.)***

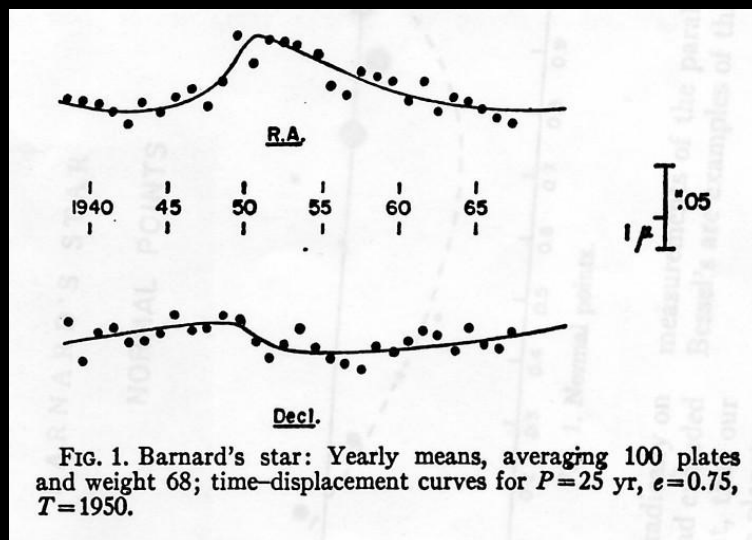
*Não pode haver mais mundos que um. **Aristóteles (384-322 a.C.)***

*Existem inúmeros sóis com inúmeras terras girando em torno deles...Seres vivos habitam esses mundos. **Giordano Bruno (1548 - 1600)***

Conceitos modernos

- **Christian Huygens (1629 - 1695):** primeira procura por planetas extra-solares documentada no final do séc. 17.

Peter van de Kamp (~1950): placas fotográficas registrando o movimento próprio da **Estrela de Barnard**:



Sua conclusão: o balanço (oscilação) é causado por um planeta com cerca de 1,6 massa de Júpiter, em órbita excêntrica.



Refinando os cálculos (~1982) concluiu haver dois planetas em órbitas circulares, com 0,7 e 0,5 massa de Júpiter.

Muitos tentaram verificar os trabalhos de van de Kamp mas não encontraram oscilações; as encontradas estavam dentro da margem de erro do método utilizado. Peter van de Kamp morreu em 1995 afirmando suas conclusões.

Planetas não foram confirmados.

BARNARD'S STAR AND VAN DE KAMP'S PLANETS: THE BEGINNING

by George H. Bell

In the September 15, 1916 issue of The Astronomical Journal (1) and the September 7, 1916 issue of Nature, (2) an article appeared that dealt with the discovery of a rather small, insignificant star that demonstrated a large proper motion. The purpose of this article was to alert the astronomical world that indeed, E. E. Barnard detected a unique find, that is a star with a proper motion larger than any star that had been studied previously. The large proper motion was calculated by Barnard to be approximately 10.3 arcseconds per year. (3) The proper motion is defined as "the apparent angular motion per year of a star on the celestial sphere, i.e., in a direction perpendicular to the line of sight". (4) Proper motion is attributed to two basic premises: the star can move of its own accord and the star's galaxy can also move. Because of the vast distances between us and

Exoplanetas

[Página Inicial](#)[Todos os catálogos](#)[Diagramas](#)[Bibliografia](#)[Projectos](#)[Congressos](#)[Outras páginas](#)[VO](#)

<http://exoplanet.eu/catalog/>

VO CONNECTION ?

OFF ON

Catalog ?

12-11-2017

Download [VOTable](#) | [CSV](#) | [DAT](#)

Status ▾

Detection ▾



Filter

Showing 3704 planets / 2774 planetary systems / 621 multiple planet systems

[All fields](#)

Show 100 ▾ entries

Planet Search

Show / hide columns

Planet	Mass (M_{Jup})	Radius (R_{Jup})	Period (day)	a (AU)	e	i (deg)	Ang. dist. (arcsec)	Discovery	Update
K2-137 b	0.7	0.079	0.179715	0.0058	—	89.6	—	2017	2017-11-09
EPIC 246393474 b	0.0167	0.137	0.2803226	—	0	90	—	2017	2017-11-08
GJ 9827 d	0.012	0.186	6.201472	0.0627	0	87.39	—	2017	2017-11-07



NASA EXOPLANET ARCHIVE
A SERVICE OF NASA EXOPLANET SCIENCE INSTITUTE

FOR THE PUBLIC
PLANETQUEST

[Home](#)[About Us](#)[Data](#)[Tools](#)[Support](#)[Login](#)

Luz refletida por um exoplaneta

Planeta, de raio R , na distância r da estrela **intercepta**

uma fração $f = \frac{\pi R^2}{4\pi r^2} = \left(\frac{R}{2r}\right)^2$ **da luminosidade** da estrela

Suponha que o planeta reflita **toda** essa luz; a razão entre as luminosidades do planeta (L_P) e da estrela (L_S) será:

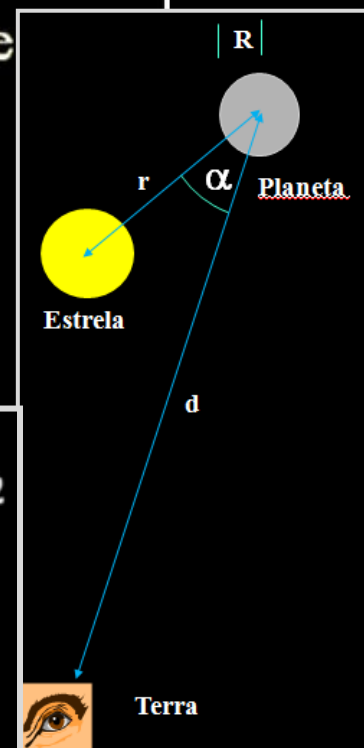
$$\frac{L_P}{L_S} = \left(\frac{R}{2r}\right)^2$$

http://www.astro.gla.ac.uk/users/martin/teaching/plystar/extra_solar_planets.ppt

Generalizando

$$\frac{L_P}{L_S} = p \left(\frac{R}{2r}\right)^2$$

p - albedo



Conceituação

Exemplos

$$\frac{L_P}{L_S} = \left(\frac{R}{2r} \right)^2$$

Sol – Terra:

$$\begin{aligned} R &= 6,4 \times 10^6 \text{ m} \\ r &= 1,5 \times 10^{11} \text{ m} \end{aligned} \Rightarrow \frac{L_P}{L_S} = 4,6 \times 10^{-10}$$

Sol – Júpiter:

$$\begin{aligned} R &= 7,2 \times 10^7 \text{ m} \\ r &= 7,8 \times 10^{11} \text{ m} \end{aligned} \Rightarrow \frac{L_P}{L_S} = 2,1 \times 10^{-9}$$

Se fosse em torno da estrela Próxima Centauro ($r = 4,3 \cdot 10^{16} \text{ m}$): $L_P/L_S = 7 \cdot 10^{-19}$

Separação angular

Separação angular entre estrela e planeta é **muito pequena**

Unidades de Distância

Unidade Astronômica = distância média Terra-Sol

$$1 \text{ U.A.} = 1,496 \times 10^{11} \text{ m}$$

Para distâncias interestelares: **Ano Luz**

$$1 \text{ ano luz} = 9,461 \times 10^{15} \text{ m}$$

Separação angular

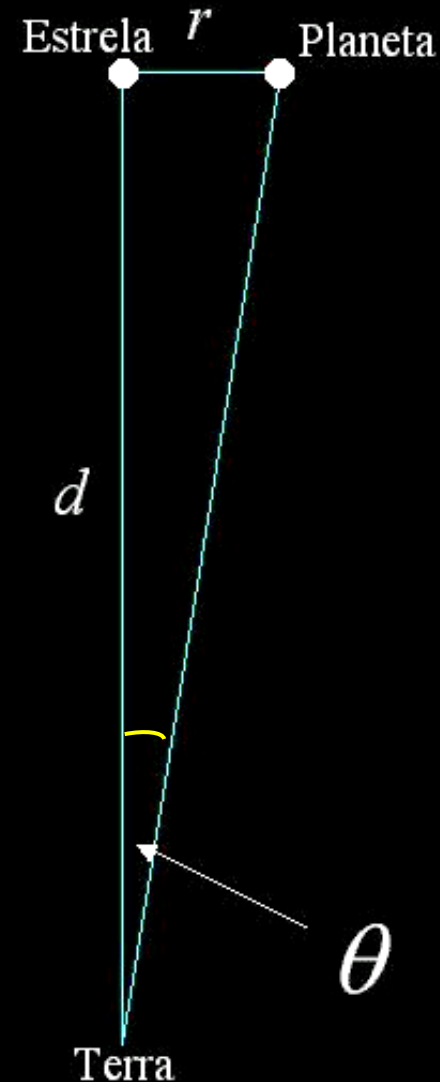
Exemplo: planeta tipo Júpiter, orbitando
estrela a 5 UA, distante 30 a.L.

$$d = 30 \text{ a.l.} = 2,8 \times 10^{17} \text{ m}$$

$$r = 5 \text{ U.A.} = 7,5 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$\tan \theta \cong \theta = \frac{r}{d}$$

$$\begin{aligned} \theta &= 2,7 \times 10^{-6} \text{ radianos} \\ &= 1,5 \times 10^{-4} \text{ grau} \end{aligned}$$



Telescópios ópticos

Potência de acúmulo de luz

uma quantidade proporcional ao quadrado do diâmetro da objetiva

Campo de Visão

área visível, determinada pela abertura da entrada e a pupila de saída do sistema

Limite de resolução

distância mínima para que duas fontes possam ser distinguidas
(Critério de Rayleigh, Sparrow...)

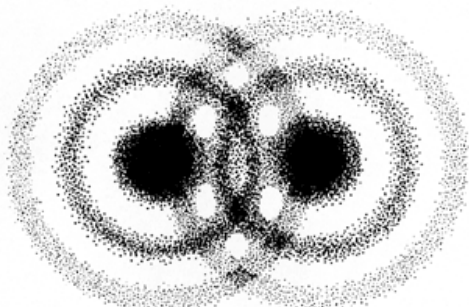
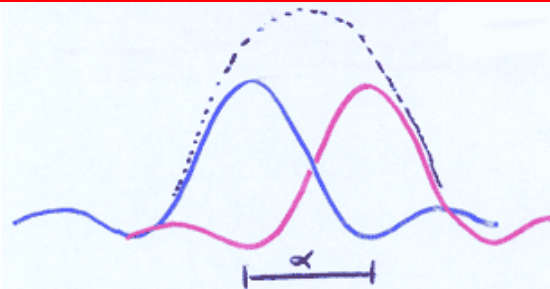


Imagem (negativo) de 2 fontes pontuais distantes, vistas através de uma fenda circular.



$$\alpha = 1.22 \left(\lambda / d \right)$$

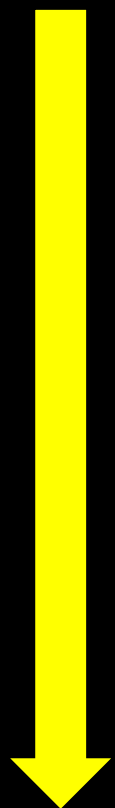
Critério: máximo de uma fonte coincide com o mínimo da outra. É o limite teórico de resolução de um telescópio -> melhora com o aumento da abertura “d”:

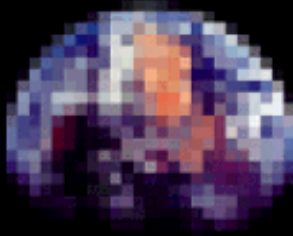
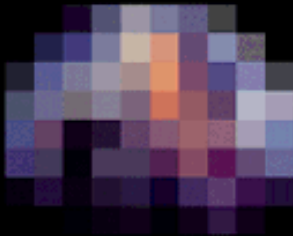
- Telescópio LNA (1.6-m) = 0.71"
- Telescópio Hubble (2.5-m) = 0.046"
- Telescópio Keck (10-m) = 0.012"

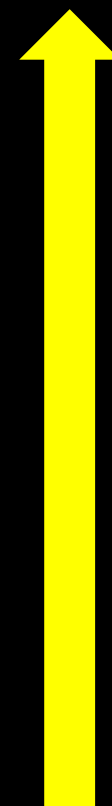
Diâmetro do telescópio

Telescópios ópticos e CCDs

Tamanho
do
pixel



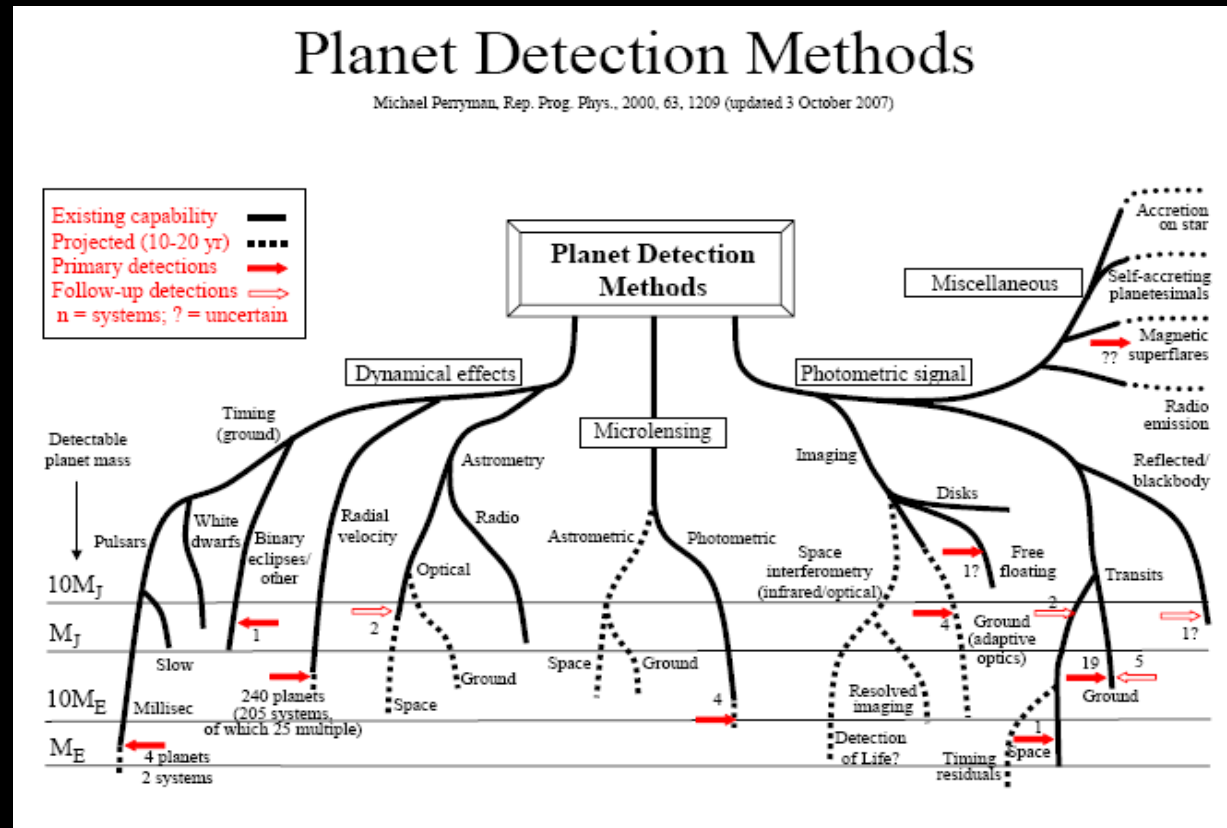
Pixel / Diameter	Pixel size @ planet (km)	Image	Interferometer Requirements		
				Collecting Area	Baseline
400	32		IR Visible	144 km ² 1,296 km ²	100,000 km 5,000 km
100	128		IR Visible	0.64 km ² 5.76 km ²	24,000 km 1,200 km
Pixel / Diameter	Pixel size @ planet (km)	Image	Interferometer Requirements		
				Collecting Area	Baseline
25	510		IR Visible	1,024 m ² 9,216 m ²	6,000 km 303 km
10	1276		IR Visible	64 m ² 576 m ²	2,4km 120 km



Tamanho
do
Telescópio

Métodos de detecção

- Velocidade Radial
- Astrometria
- Trânsitos
- “Pulsar timing”
- Lente Gravitacional
- Configuração de Disco
- Astrometria Diferencial
- Luz Refletida
- Luz Transmitida
- Emissões Aurorais
- Emissões Rádio
- Sinais Antropogênicos
- Imageamento por Coronógrafo
- Imageamento por Interferometria



Métodos de detecção

Velocidade radial

Movimento relativo da estrela projetado na direção do observador causa deslocamento Doppler no **espectro estelar**.

Astrometria

Movimento relativo da estrela projetado no plano do céu causa deslocamento aparente perceptível na **posição da estrela**.

Trânsito

Trânsitos dos planetas pelo disco estelar causa diminuição sutil de brilho da estrela, perceptível pela **curva de luz**.

Micro lente gravitacional

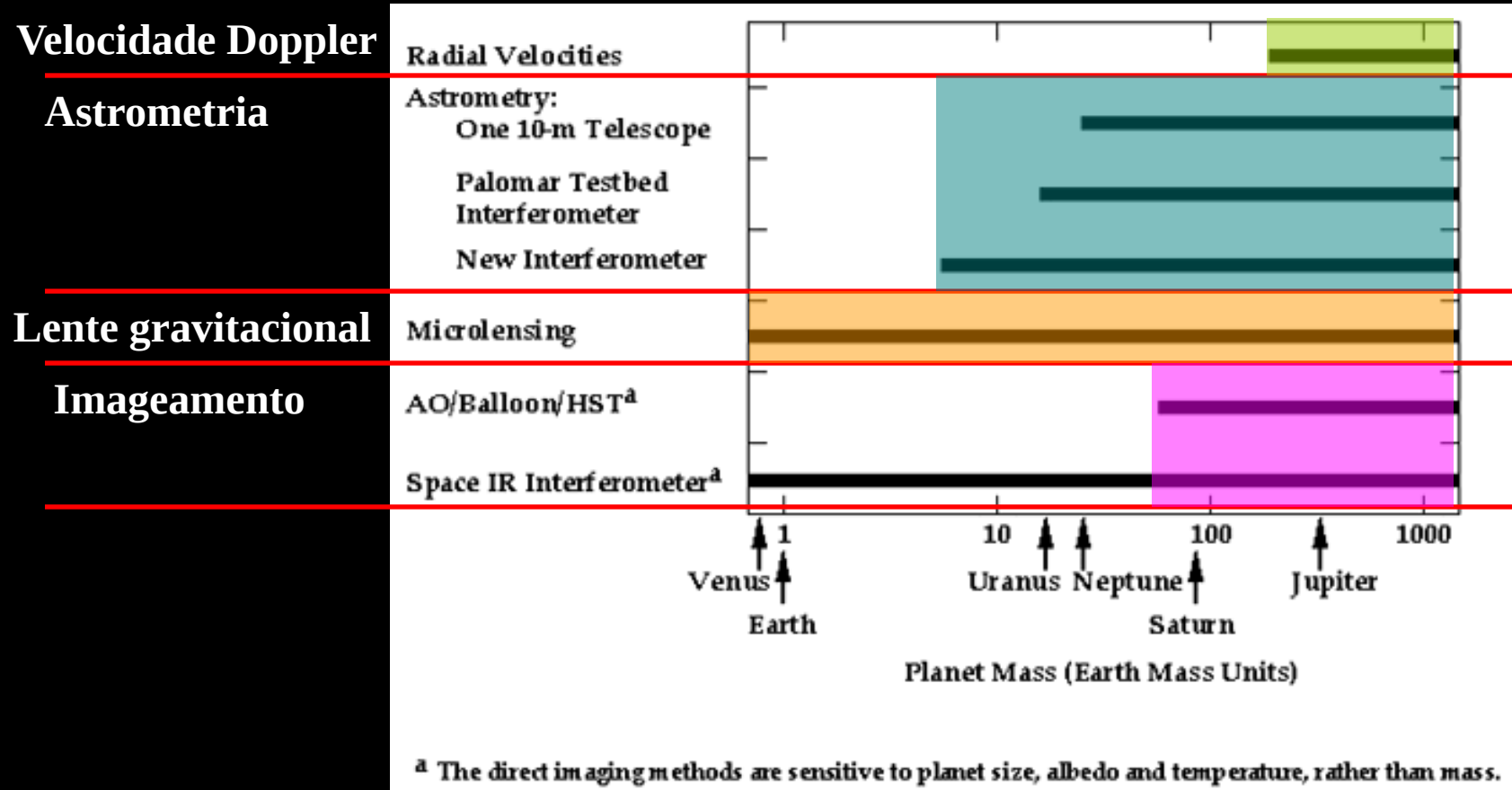
Estrelas provocam efeito de lente ao transitarem em frente de estrelas de fundo. A presença de planetas provoca um **pico na curva de luz** da estrela de fundo.

Imageamento

Planetas refletem a luz da estrela e podem ser imageados. Método exige processo artificial para remover a imagem da estrela.

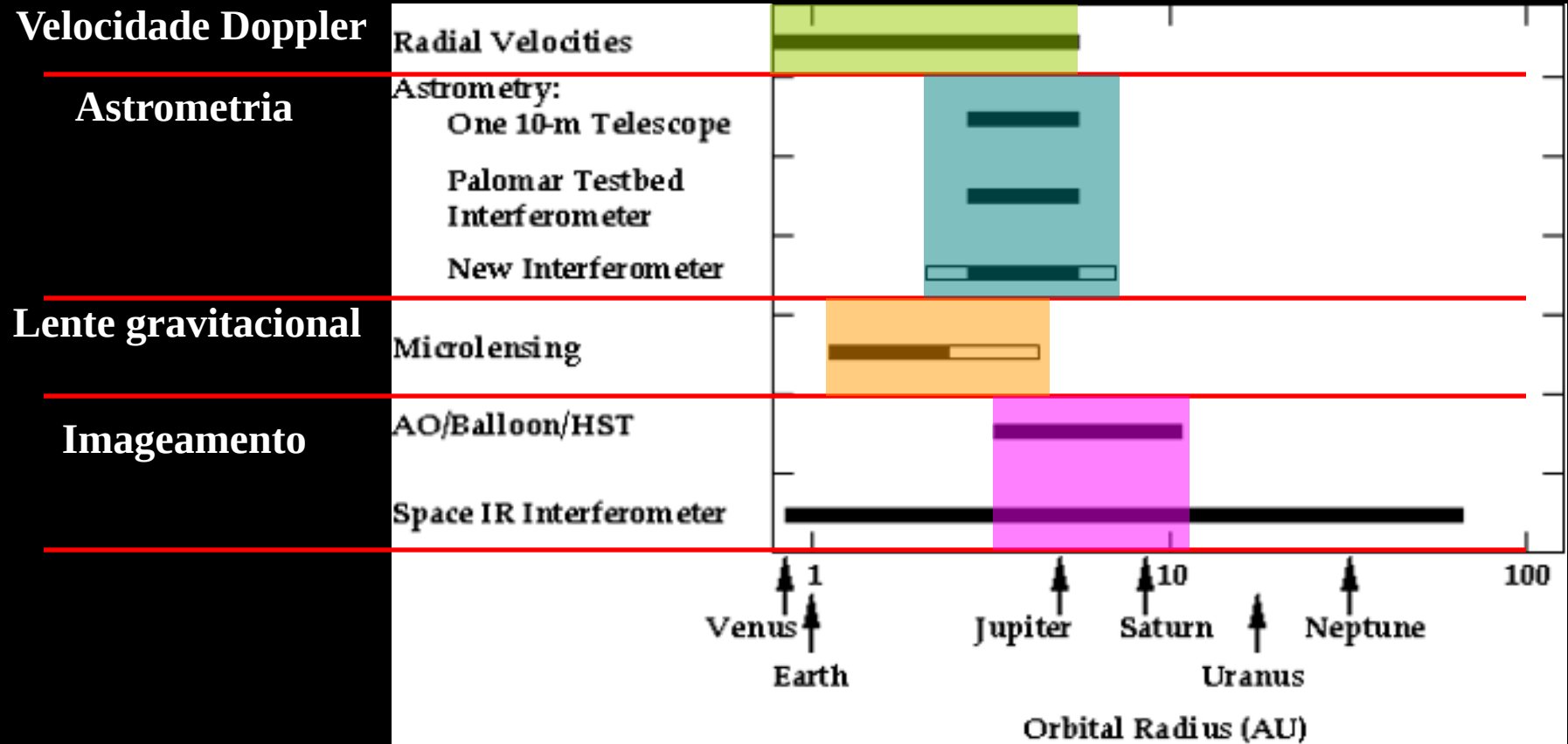
Comparando os métodos:

Critério: massa



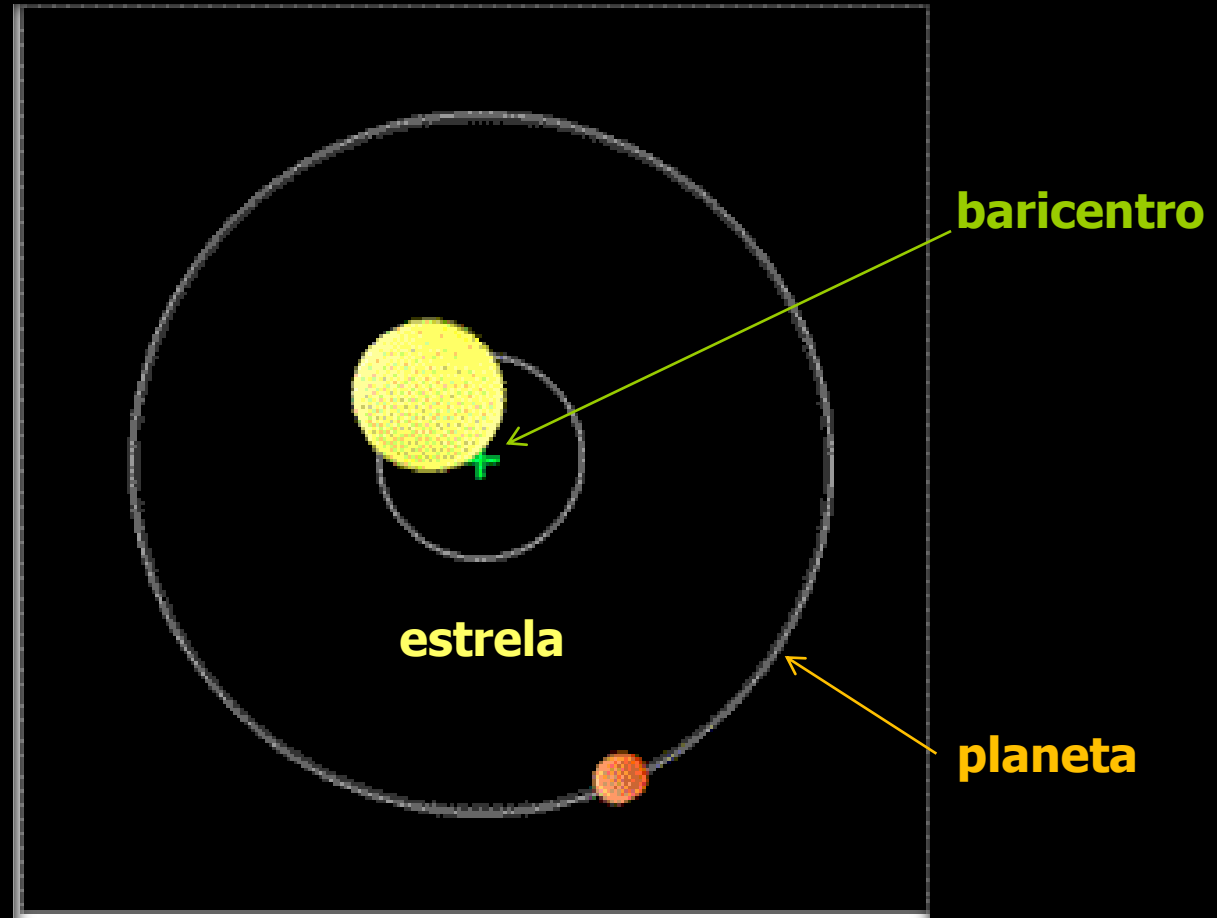
Comparando os métodos:

Critério: órbita



Métodos indiretos de detecção: Astrometria

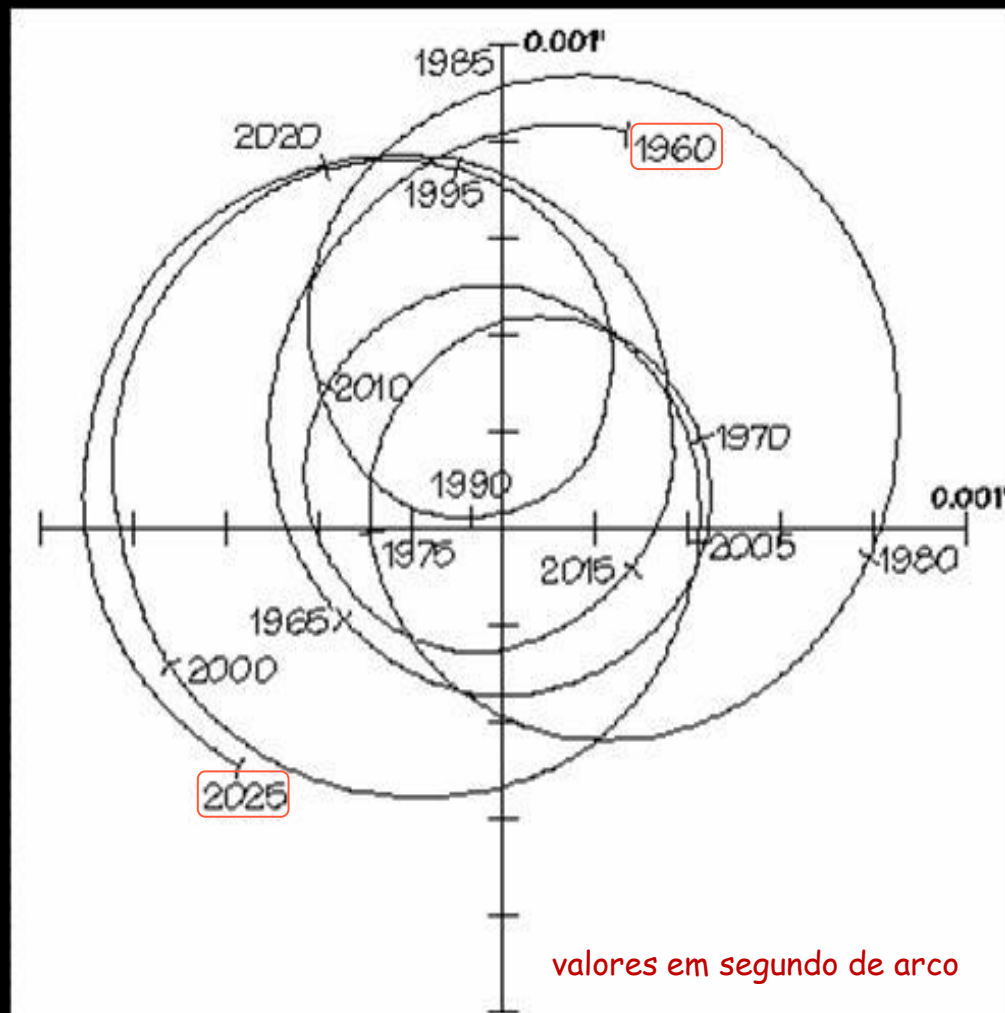
Estrela move-se em torno do centro de massa do sistema



Métodos indiretos de detecção: Astrometria

Estrela move-se em torno do centro de massa do sistema

- Movimento do centro do Sol (ou do baricentro em relação ao centro do Sol) para o período de 1960 a 2025, visto de uma distância de 10 pc (~ 32 a.l.) na direção perpendicular ao plano da eclíptica ($i = 0^\circ$).
- Astrometria apresenta precisão bem maior se observação for feita do espaço.



Métodos indiretos de detecção: Astrometria

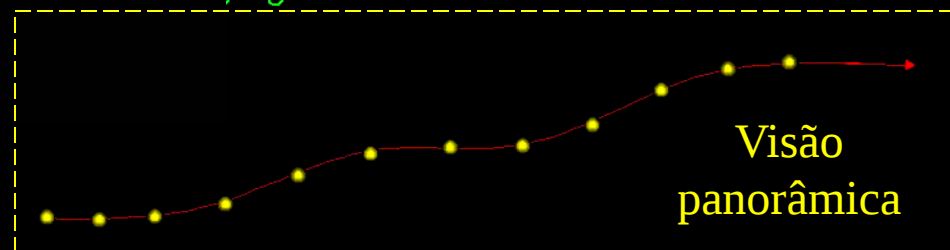
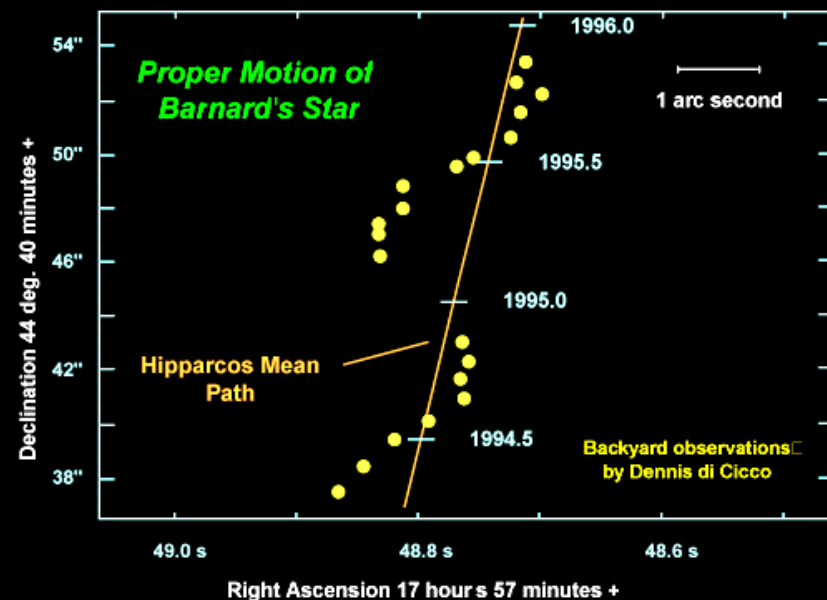
Estrela move-se em torno do centro de massa do sistema

Visão nas proximidades da estrela

CIRCLE
TRACED
BY STAR

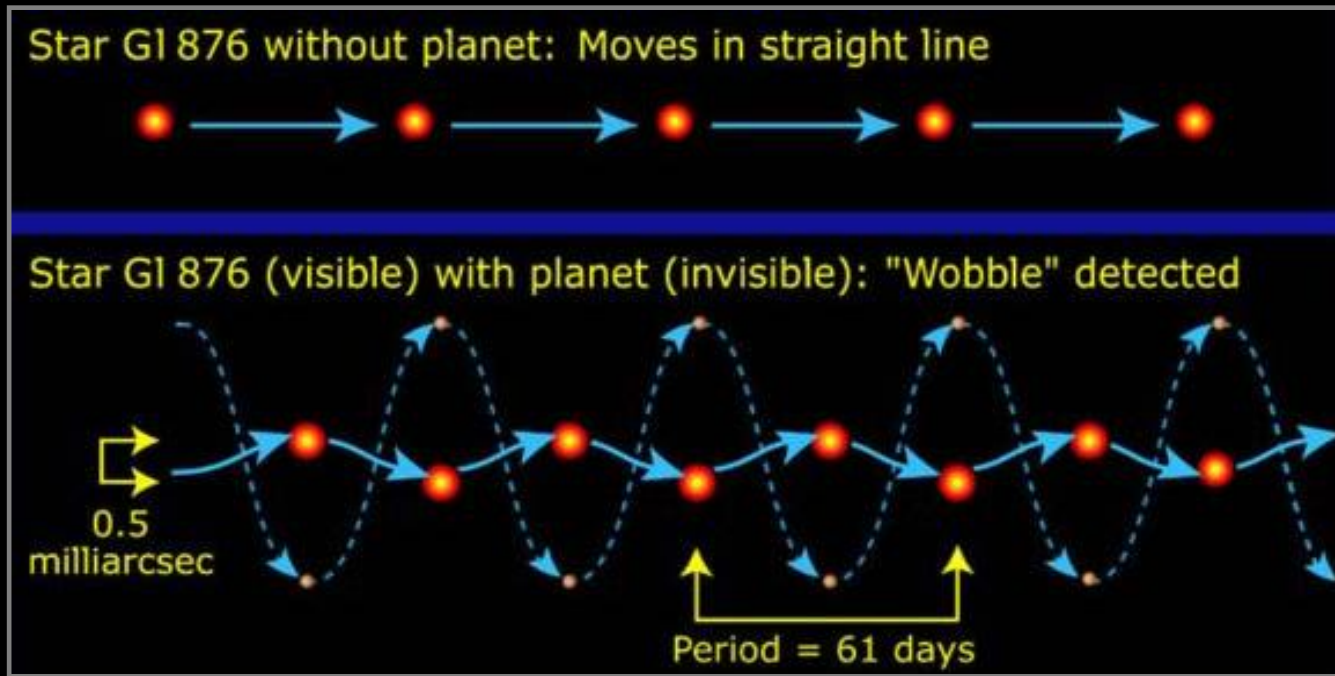
Centro
de massa

Quanto maior for o planeta,
mais pronunciado será o efeito



Métodos indiretos de detecção: Astrometria

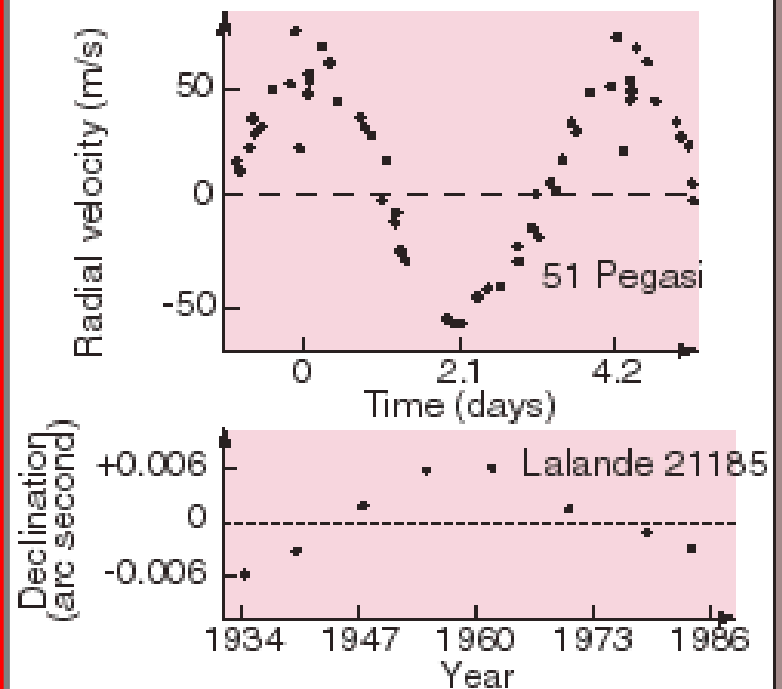
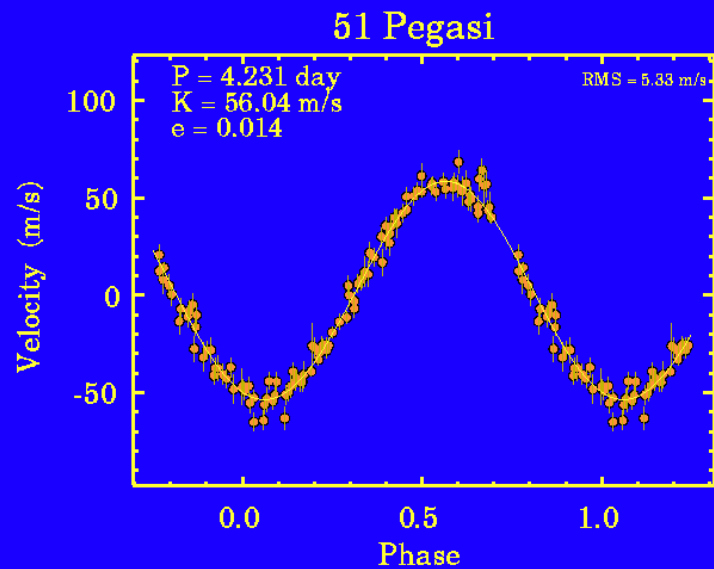
Estrela move-se em torno do centro de massa do sistema



Os planetas da estrela Gliese 876, cerca de 15 anos-luz.
O planeta tem quase a metade de seu tamanho .

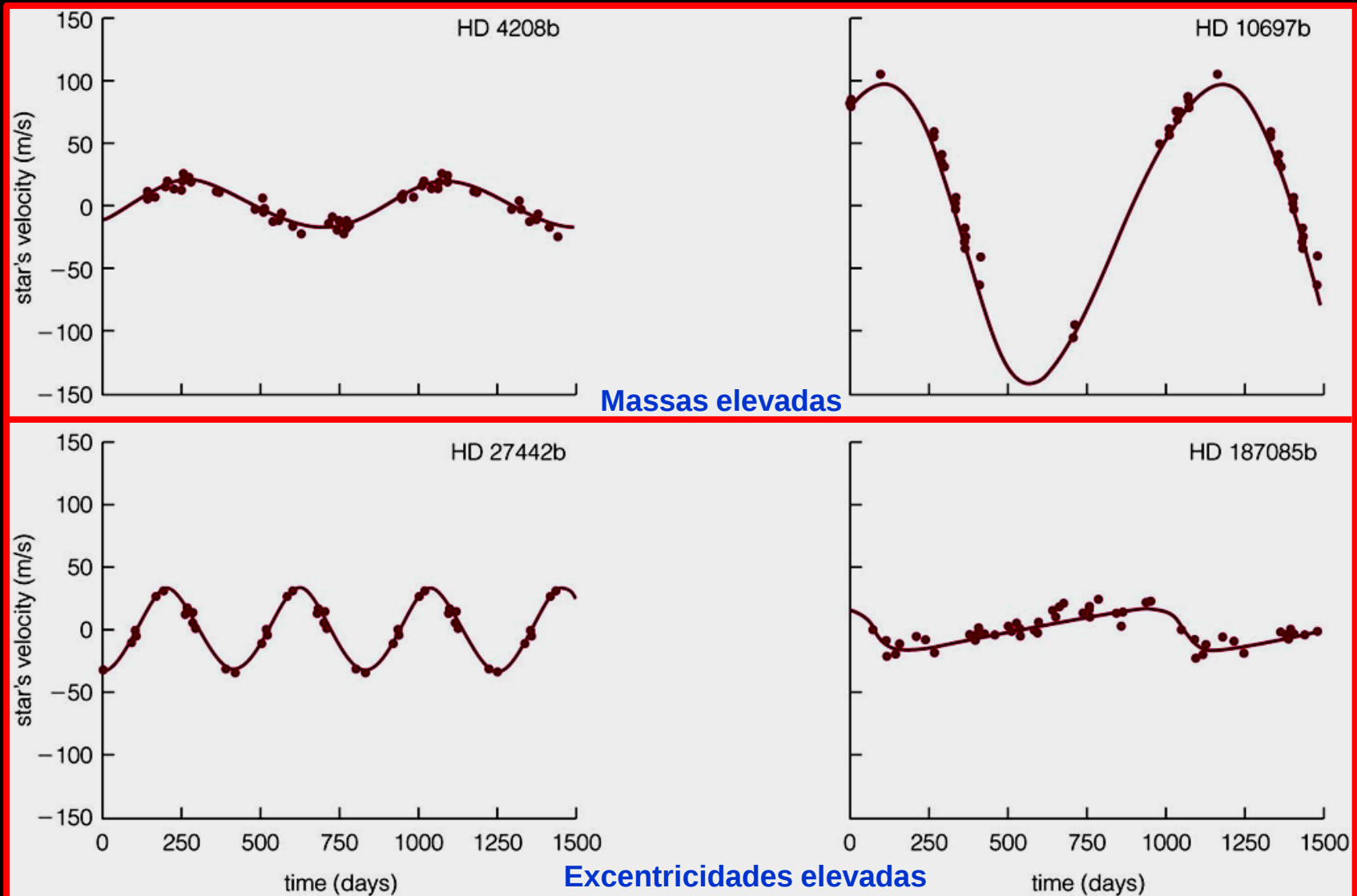
Métodos indiretos de detecção: Astrometria

Estrela move-se em torno do centro de massa do sistema



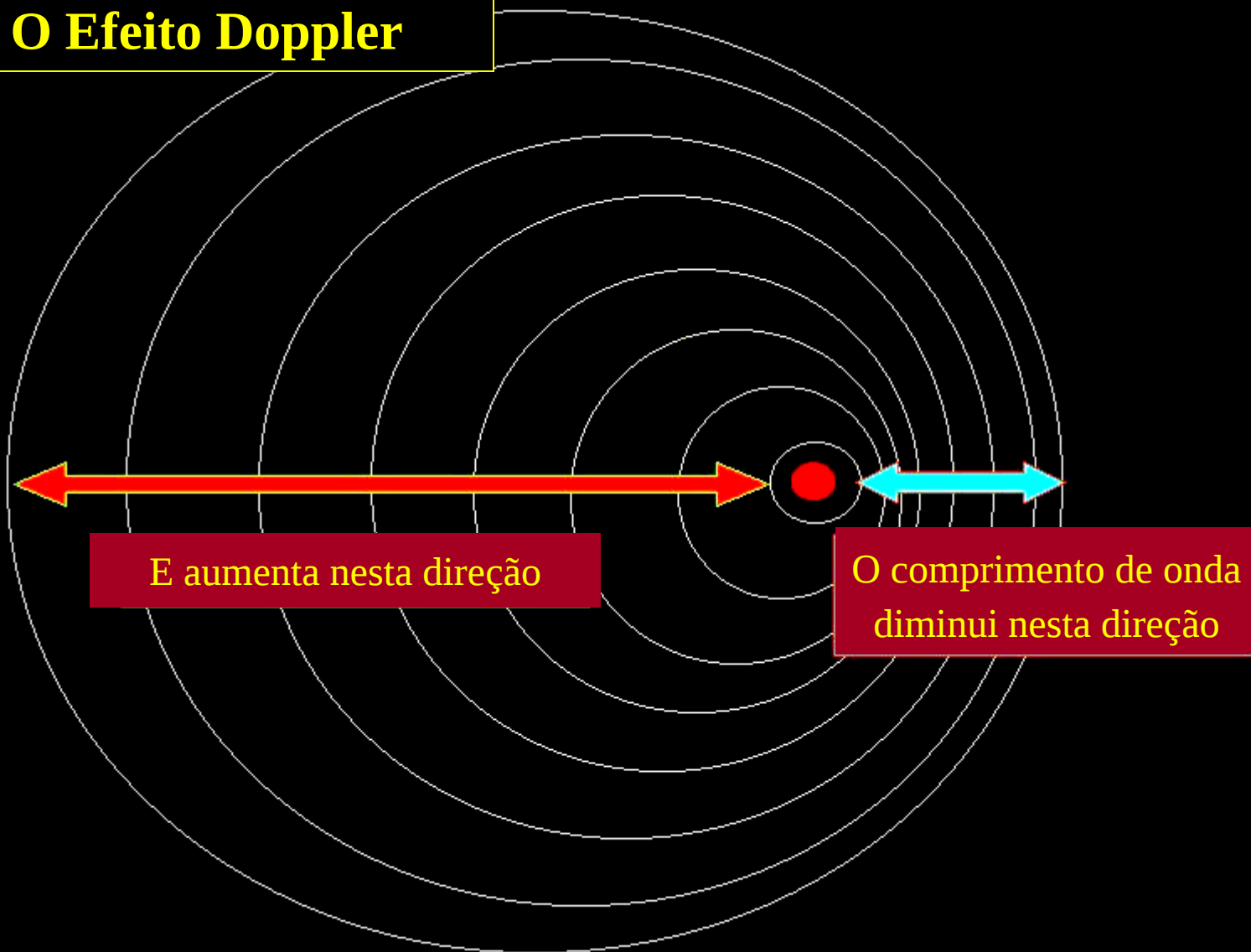
Métodos indiretos de detecção: Astrometria

Estrela move-se em torno do centro de massa do sistema

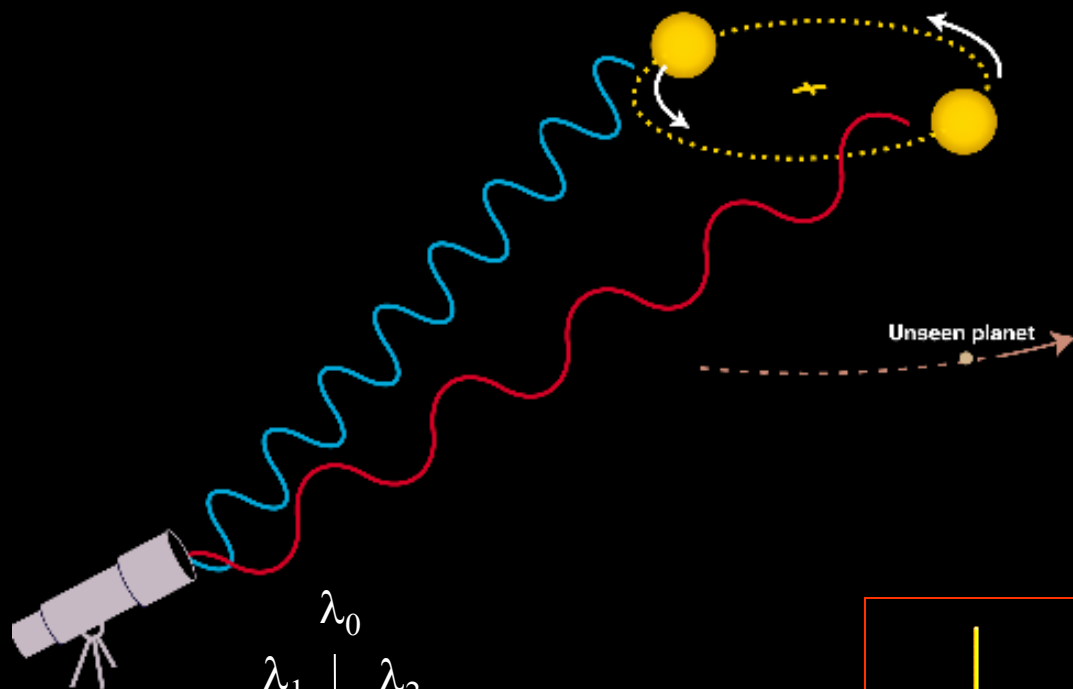


Métodos indiretos de detecção

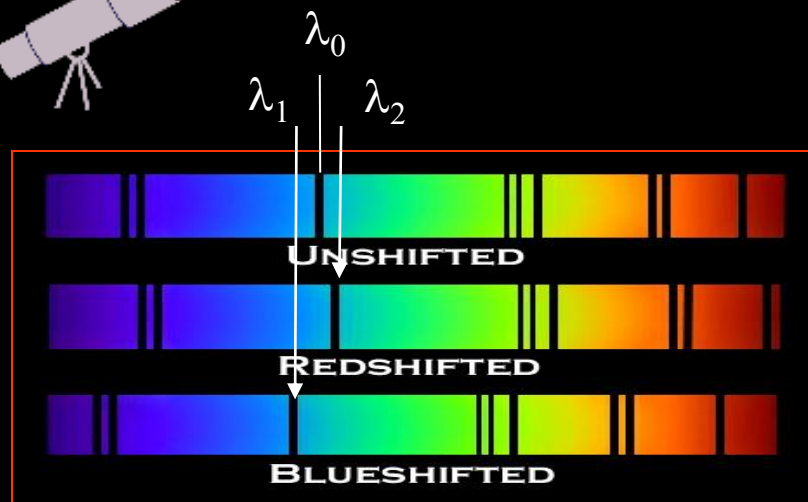
O Efeito Doppler



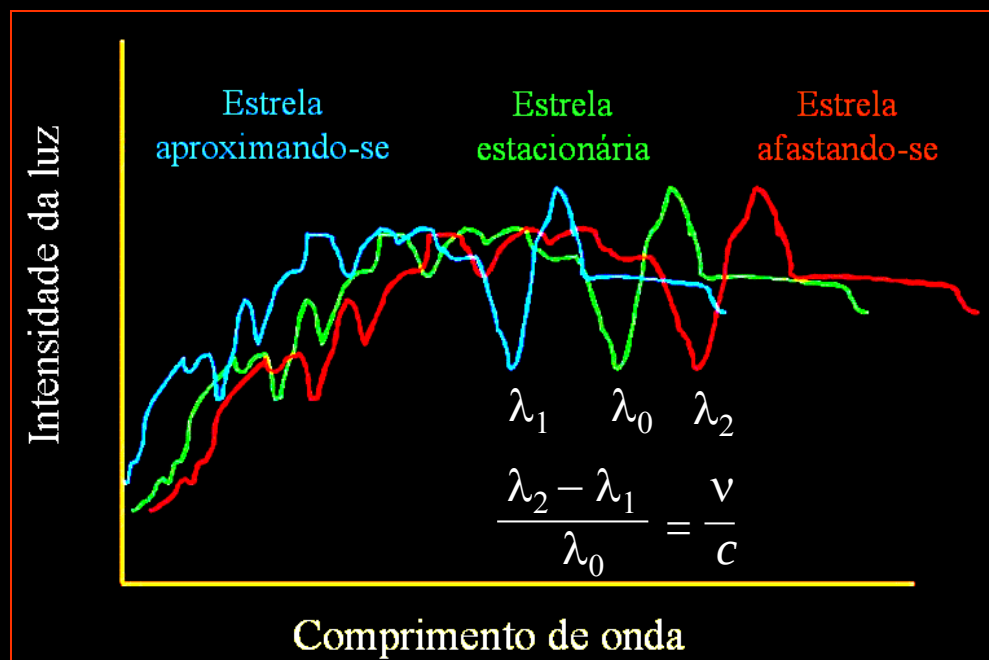
Métodos indiretos de detecção: Velocidade Radial



Deslocamento Doppler
provocado pelo
movimento da estrela

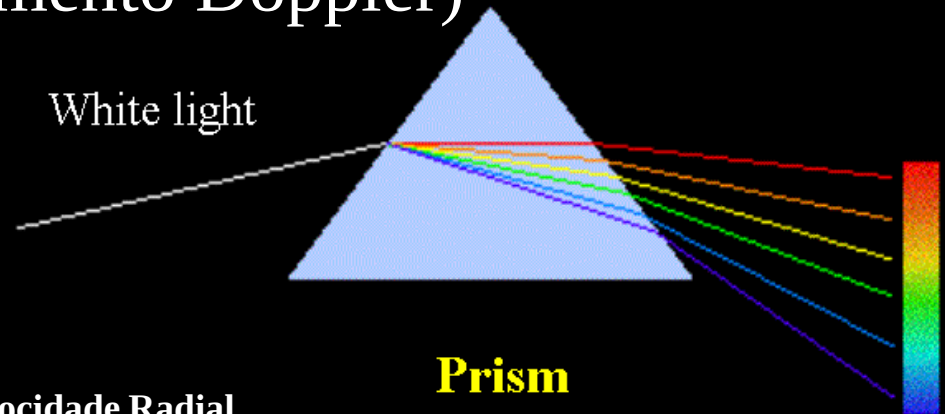


**Quanto maior for o planeta,
mais pronunciado será o efeito**



Métodos indiretos de detecção: Velocidade Radial

(Deslocamento Doppler)



Desvio Doppler:

Mudança no comprimento
de onda

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

Velocidade Radial

Comprimento de onda
da luz medido
em laboratório
(referência)

Velocidade da luz

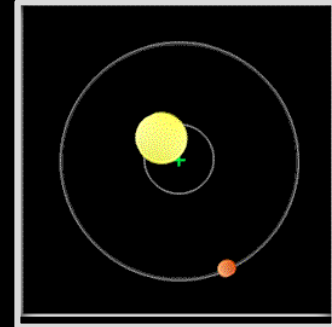
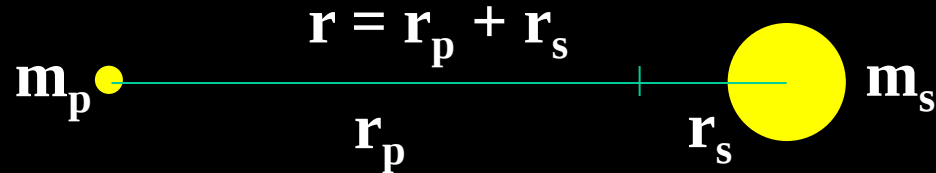
Limite da tecnologia atual:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx 10^{-8}$$



$$v \approx 3 \text{ ms}^{-1}$$

Movimento Doppler



Equacionando as acelerações gravitacional e circular:

Planeta:

$$F_C = \cancel{m_P} \omega^2 r_P = \frac{G \cancel{m_P} m_S}{r^2}$$

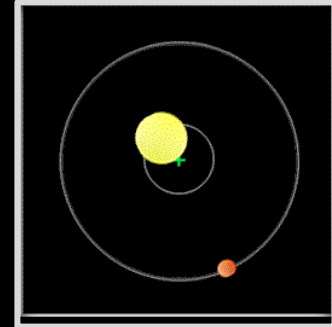
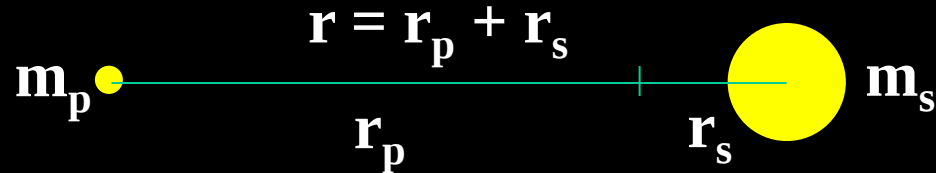
Estrela:

$$F_C = \cancel{m_S} \omega^2 r_S = \frac{G m_P \cancel{m_S}}{r^2}$$

Somando:

$$\omega^2 (r_P + r_S) = \omega^2 r = \frac{G (m_S + m_P)}{r^2}$$

Movimento Doppler



Equacionando as acelerações gravitacional e circular:

Planeta:

$$F_C = \cancel{m_P} \omega^2 r_P = \frac{G \cancel{m_P} m_S}{r^2}$$

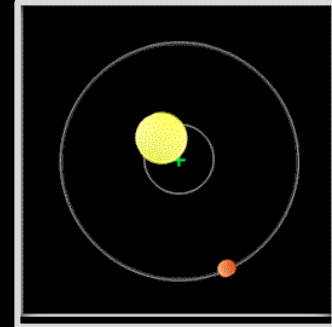
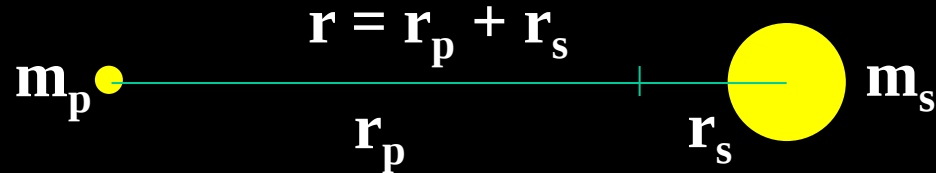
Estrela:

$$F_C = \cancel{m_S} \omega^2 r_S = \frac{G m_P \cancel{m_S}}{r^2}$$

Somando:

$$\omega^2 (r_P + r_S) = \omega^2 r^3 = G (m_S + m_P)$$

Movimento Doppler



Equacionando as acelerações gravitacional e circular:

Planeta:

$$F_C = \cancel{m_P} \omega^2 r_P = \frac{G \cancel{m_P} m_S}{r^2}$$

Estrela:

$$F_C = \cancel{m_S} \omega^2 r_S = \frac{G m_P \cancel{m_S}}{r^2}$$

Somando:

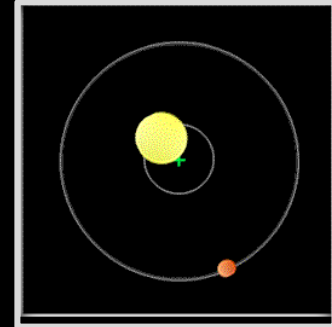
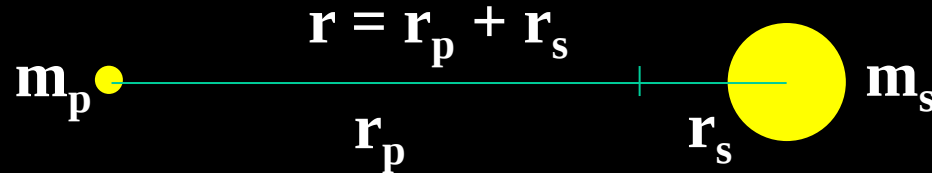
$$\omega^2 (r_P + r_S) = \omega^2 r^3 = G (m_S + m_P)$$

Lembrando:
Velocidade angular

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Período de oscilação

Movimento Doppler



Equacionando as acelerações gravitacional e circular:

Planeta:

$$F_C = \cancel{m_P} \omega^2 r_P = \frac{G \cancel{m_P} m_S}{r^2}$$

Estrela:

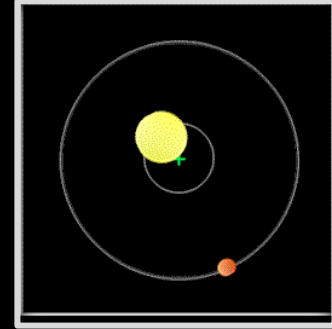
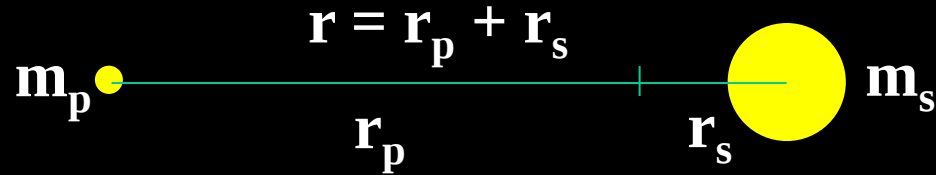
$$F_C = \cancel{m_S} \omega^2 r_S = \frac{G m_P \cancel{m_S}}{r^2}$$

Somando:

$$\omega^2 r^3 = \frac{4\pi^2 r^3}{T^2} = G(m_S + m_P) \cong Gm_S$$

3a Lei de Kepler

Movimento Doppler



$$r_P m_P = r_S m_S$$

$$r_P m_P + r_S m_P = r_S m_S + r_S m_P$$

$$m_P (r_P + r_S) = r_S (m_S + m_P)$$

$$m_P r = r_S (m_S + m_P)$$

$$r = \frac{(m_S + m_P) r_S}{m_P}$$

Amplitude da velocidade radial de uma estrela

do centro de massa

$$r = \frac{(m_S + m_P) r_S}{m_P}$$

3a Lei de Kepler

$$\omega^2 r^3 = G(m_S + m_P)$$

$$G(m_S + m_P) = \frac{\omega^2 (m_S + m_P)^3 r_S^3}{m_P^3}$$

Amplitude da velocidade radial de uma estrela

do centro de massa

$$r = \frac{(m_S + m_P) r_S}{m_P}$$

3a Lei de Kepler

$$\omega^2 r^3 = G(m_S + m_P)$$

$$G(m_S + m_P) = \frac{\omega^2 (m_S + m_P)^3 r_S^3}{m_P^3}$$

$$v_S = \omega r_S$$

$$v_S^3 = \omega^3 r_S^3$$

$$\frac{v_S^3}{\omega} = \omega^2 r_S^3$$

$$\text{e } \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Amplitude da velocidade radial de uma estrela

do centro de massa

$$r = \frac{(m_S + m_P) r_S}{m_P}$$

3a Lei de Kepler

$$\omega^2 r^3 = G(m_S + m_P)$$

$$G(m_S + m_P) = \frac{\omega^2 (m_S + m_P)^3 r_S^3}{m_P^3}$$

$$G(m_S + m_P) = \frac{v_s^3 (m_S + m_P)^{\cancel{3}^2} r_S^3}{\omega m_P^3}$$

$$G m_P^3 = \frac{v_s^3 (m_S + m_P)^2 r_s^3 T}{2\pi} \approx \frac{v_s^3 m_s^2 r_s^3 T}{2\pi}$$

$$v_S = \omega r_S$$

$$v_S^3 = \omega^3 r_S^3$$

$$\frac{v_S^3}{\omega} = \omega^2 r_S^3$$

$$\text{e } \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Amplitude da velocidade radial de uma estrela

do centro de massa

$$r = \frac{(m_S + m_P) r_S}{m_P}$$

3a Lei de Kepler

$$\omega^2 r^3 = G(m_S + m_P)$$

$$G(m_S + m_P) = \frac{\omega^2 (m_S + m_P)^3 r_S^3}{m_P^3}$$

$$G(m_S + m_P) = \frac{v_s^3 (m_S + m_P)^3 r_S^3}{\omega m_P^3}$$

$$G m_P^3 = \frac{v_s^3 (m_S + m_P)^2 r_s^3 T}{2\pi} \approx \frac{v_s^3 m_s^2 r_s^3 T}{2\pi}$$

$$v_S = \left(\frac{2\pi G}{T} \right)^{1/3} m_S^{-2/3} m_P$$

$$v_S = \omega r_S$$

$$v_S^3 = \omega^3 r_S^3$$

$$\frac{v_S^3}{\omega} = \omega^2 r_S^3$$

$$\text{e } \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Amplitude da velocidade radial de uma estrela

$$v_S = \left(\frac{2\pi G}{T} \right)^{1/3} m_S^{-2/3} m_P$$

$$G = 6,673 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$
$$m_{\text{Sun}} = 2,0 \times 10^{30} \text{ kg}$$

Exemplos

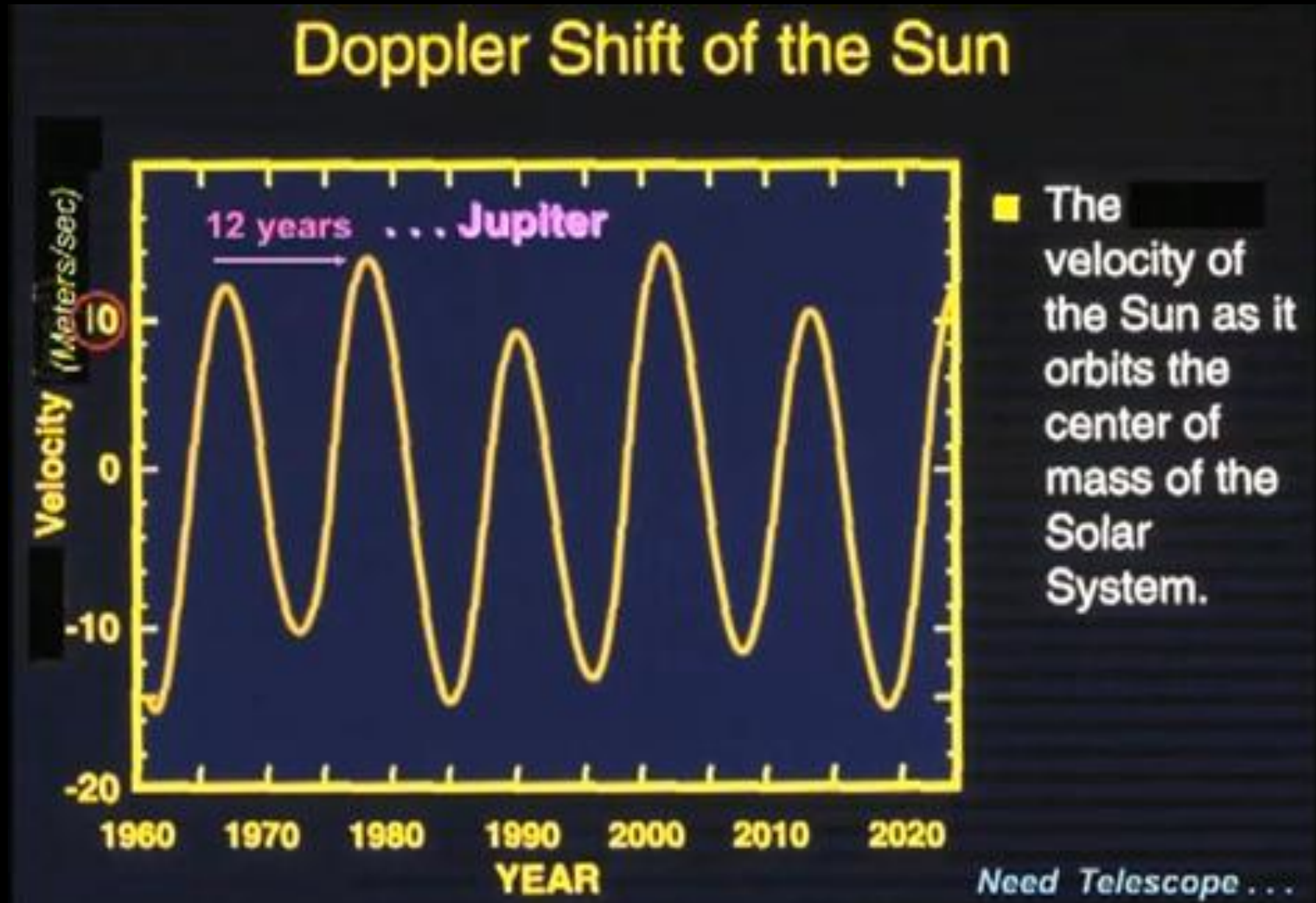
Júpiter:

$$m_{\text{Júp}} = 1,9 \times 10^{27} \text{ kg} \quad T = 11,86 \text{ anos}$$
$$v_S = 12,4 \text{ ms}^{-1}$$

Terra:

$$m_{\text{Terra}} = 6,0 \times 10^{24} \text{ kg} \quad T = 1 \text{ ano}$$
$$v_S = 0,09 \text{ ms}^{-1}$$

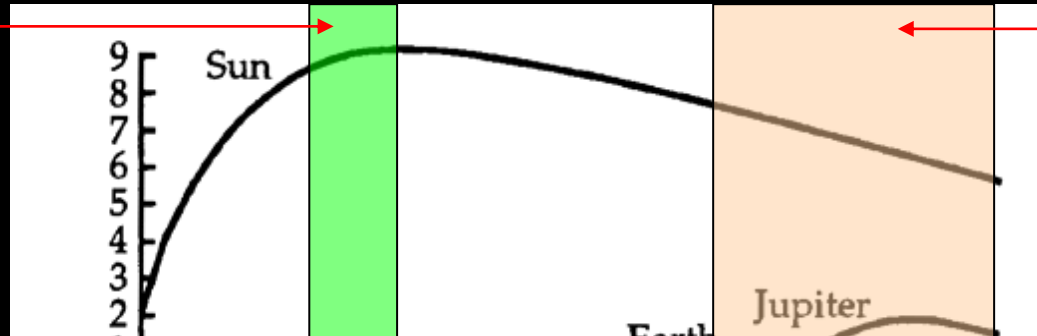
Amplitude da velocidade radial de uma estrela



Método direto de detecção: Imageamento

Luz refletida pelo planeta

Visível:
estrela/planeta
= 1 bilhão



Infravermelho:
estrela/planeta
= 1 milhão

Visible (optical) band



Planet lost in glare of star that is very bright in the visible band.

Infrared band

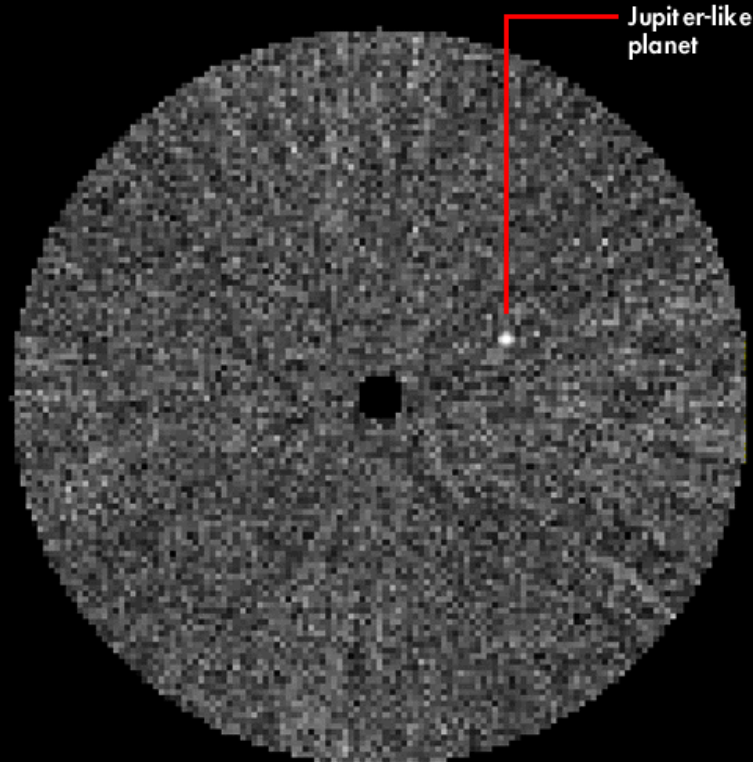


Planet more luminous in the infrared band and star not so bright.

Método direto de detecção: Imageamento

Luz refletida pelo planeta

(Imagem simulada de Júpiter se visto à distância de 10pc)

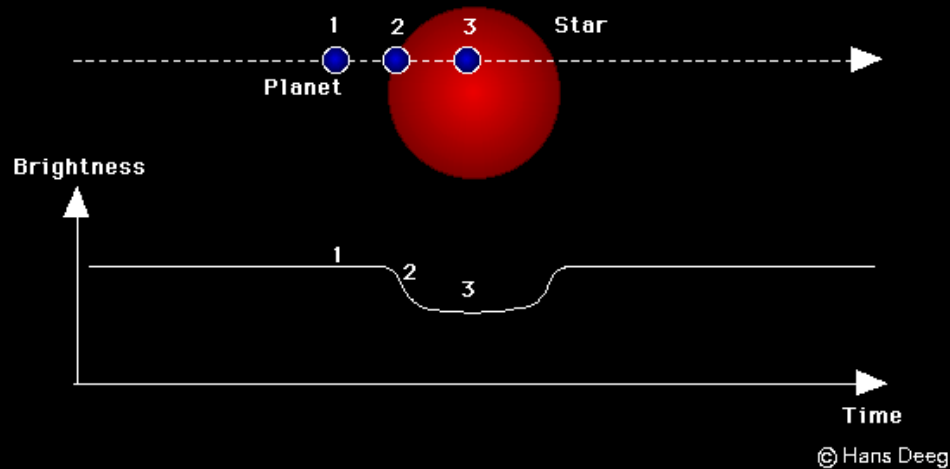


Método usa interferometria no infravermelho com telescópio de solo. Resultado depende a luz do planeta, não da inclinação do seu plano orbital.

Fonte: Christopher W. Churchill

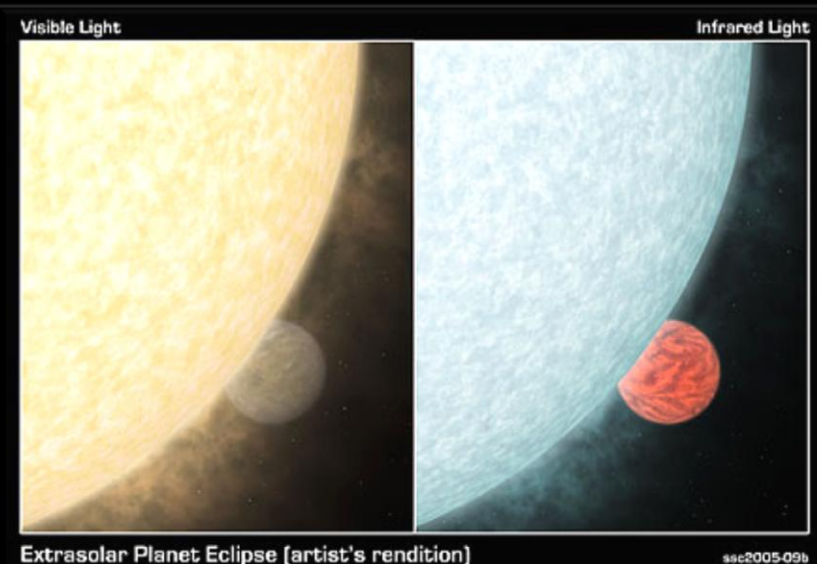
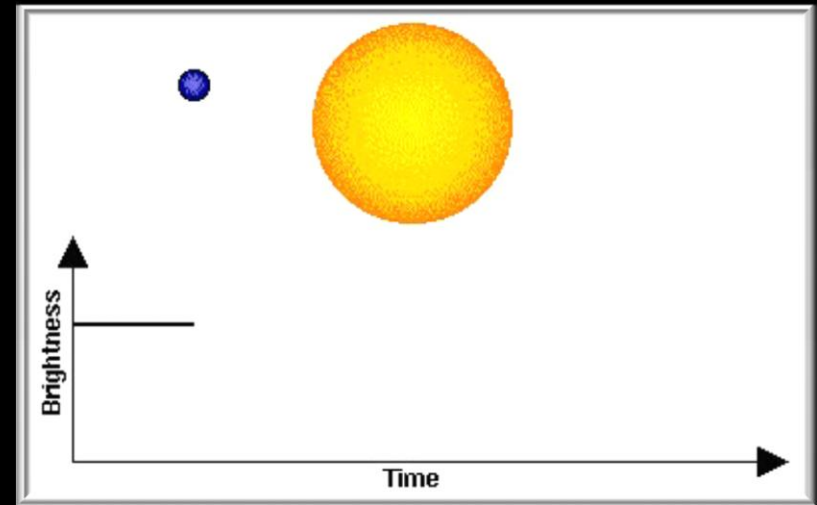
Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Variação de luz decorrente de um eclipse



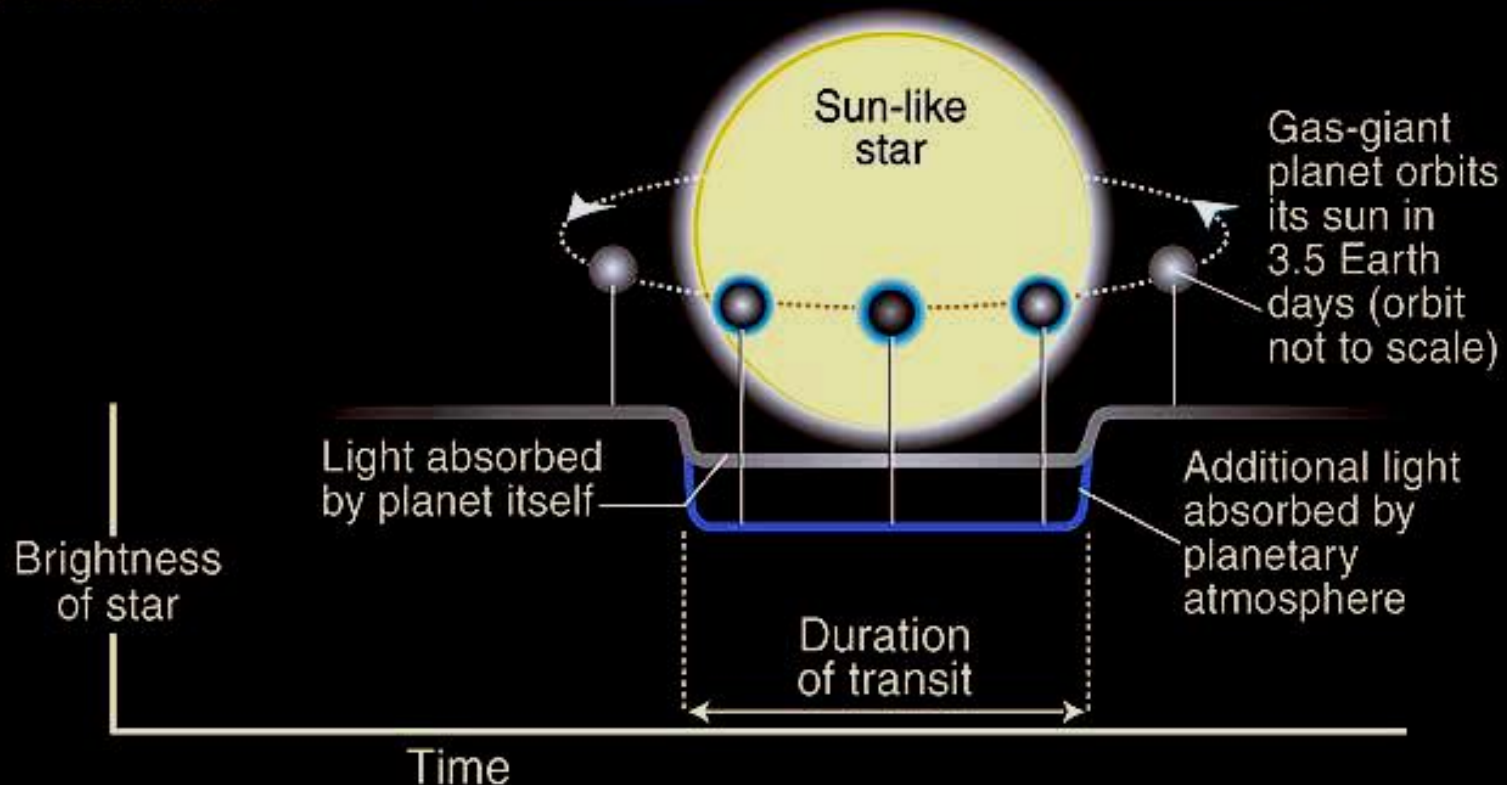
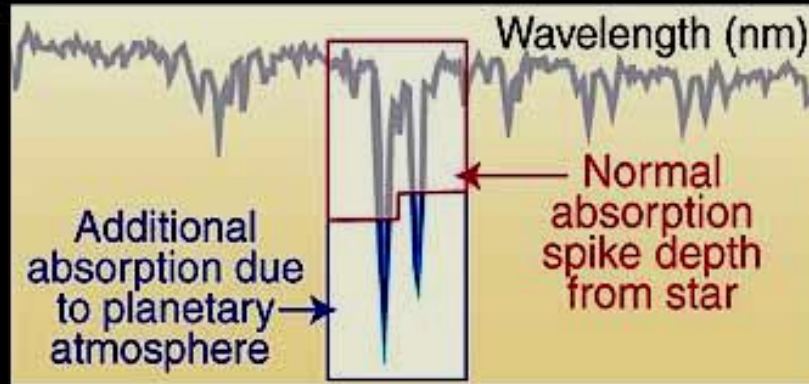
Quanto maior for o planeta, mais pronunciado será o efeito.

Contraste é maior no infravermelho que no visível

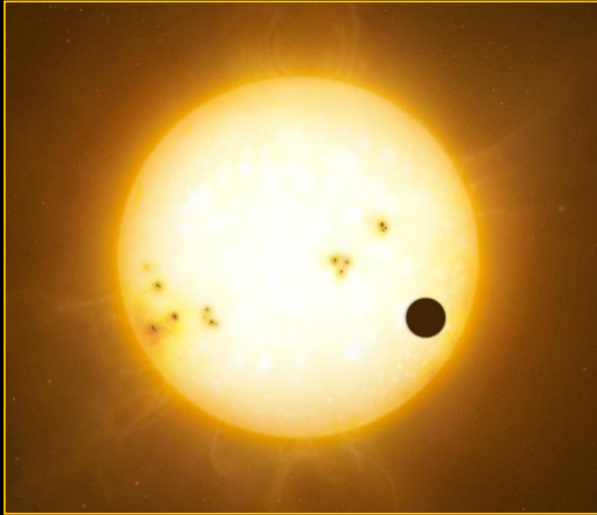


Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Absorção adicional de sódio decorrente da passagem da luz pela atmosfera do planeta.



Métodos indiretos de detecção: Fotometria



Diâmetro (km)

Área relativa → queda de brilho

Sol	1.400.000	1
Júpiter	143.000	0,01
Netuno	49.600	0,001
Terra	12.800	0,0008
Mercúrio	4.900	0,0001

Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy

The *Kepler* Space Telescope

- * 1--meter Diameter Telescope
 - * Field of View: 10 deg x 10 deg
 - * Camera: 95 MegaPixel
-
- Images 150,000 stars simultaneously
 - Every 30 minutes
 - For 4 Years
 - Brightness Precision: 0.01%

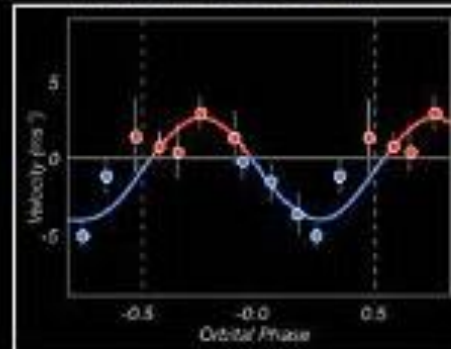


Comprovação da existência

W. M. KECK OBSERVATORY



RADIAL VELOCITY



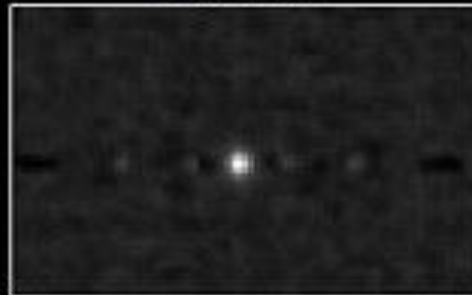
KEPLER-10b



GEMINI NORTH OBSERVATORY



IMAGING



KEPLER-186f

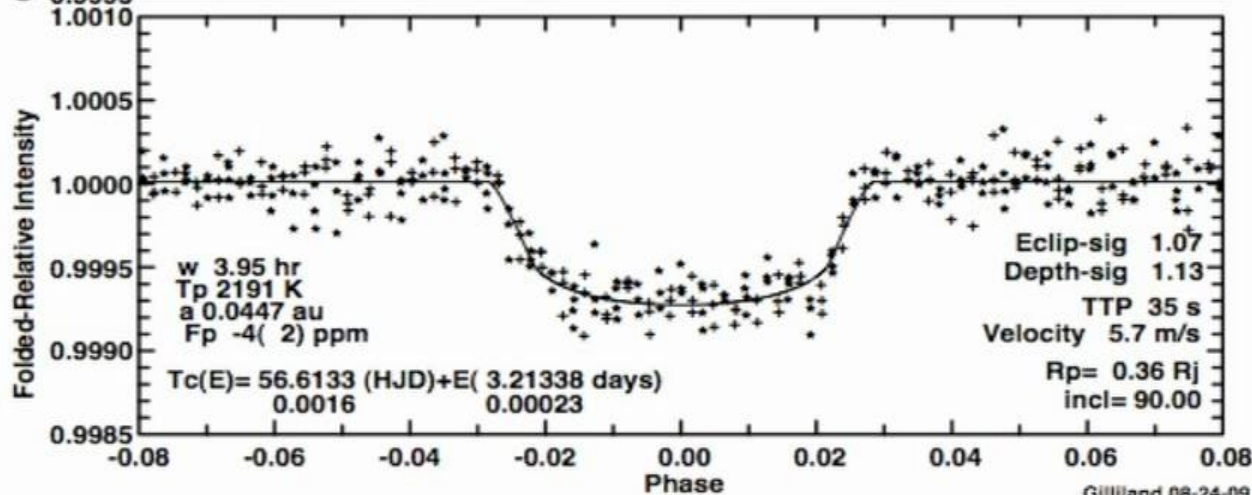
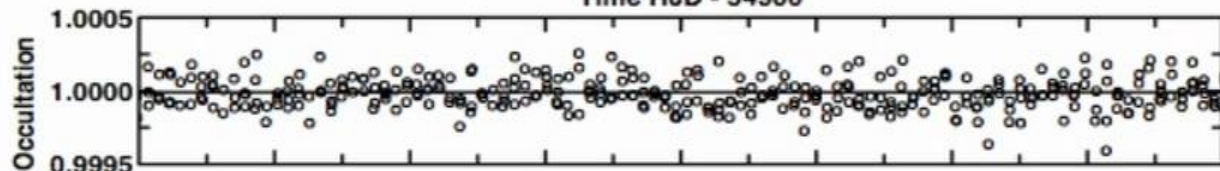
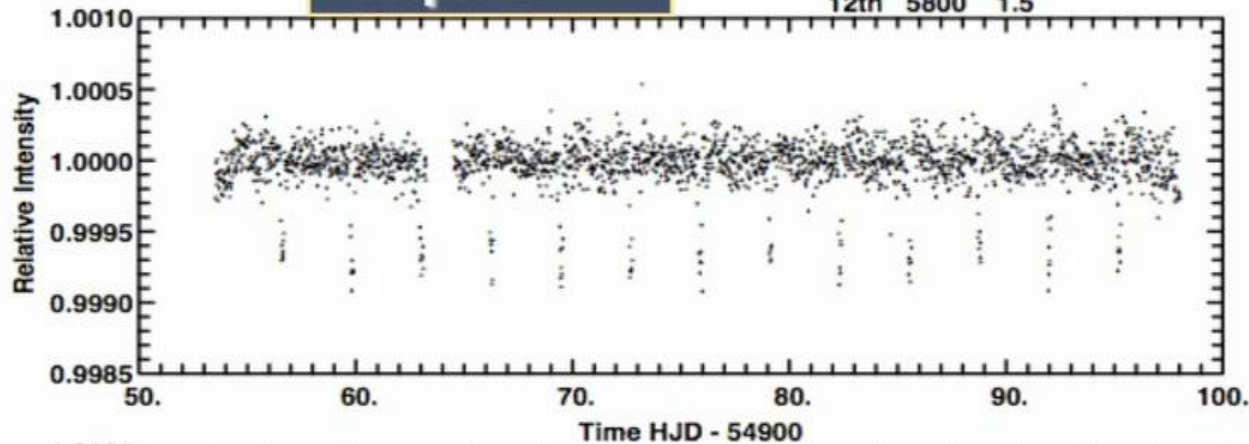


Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy

Kepler-4

12th 5800 1.5



Planet Properties:

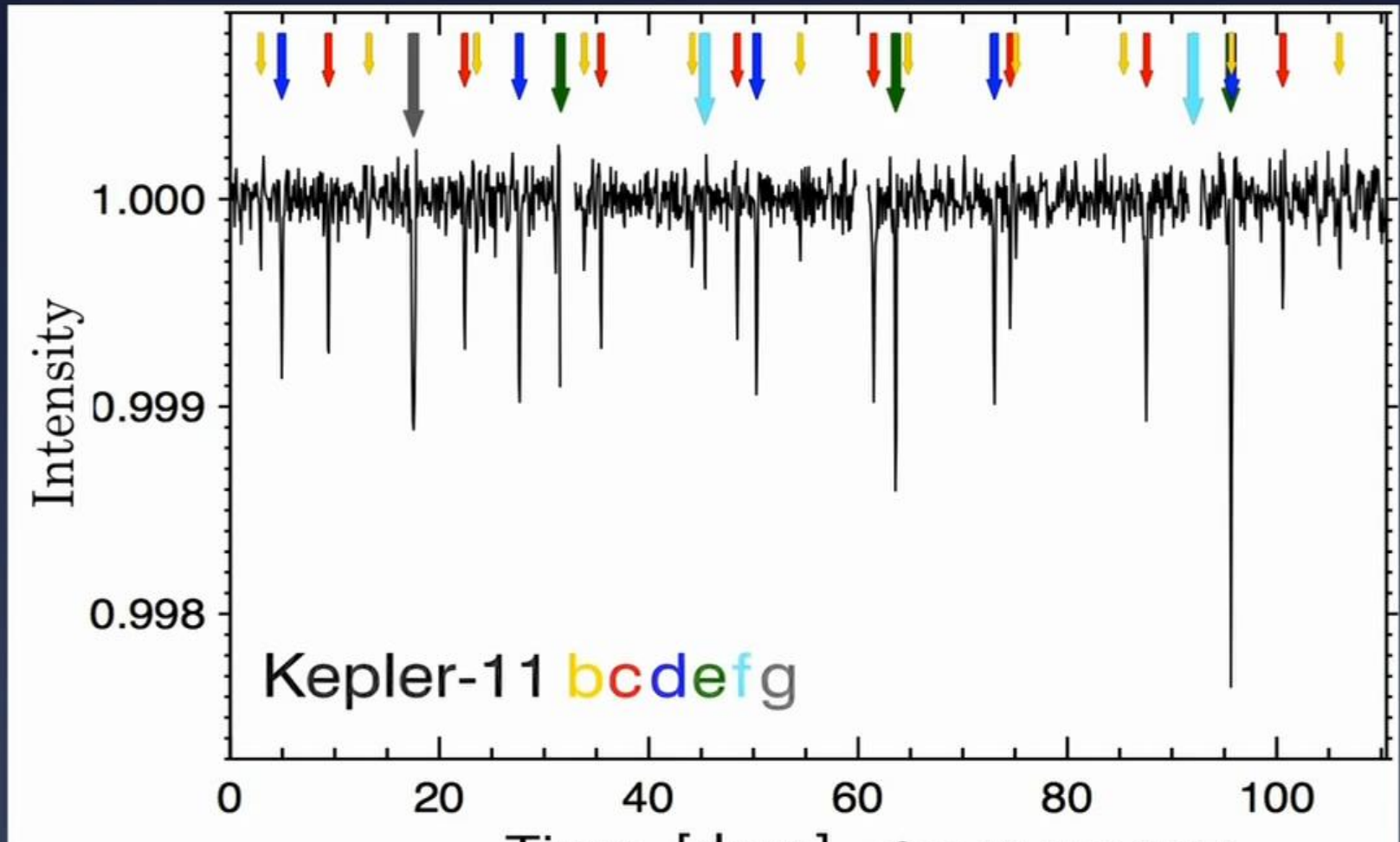
Period = 3.213day

Radius = 4.1 R_{Earth}

Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy

Kepler-11: Six Transiting Planets

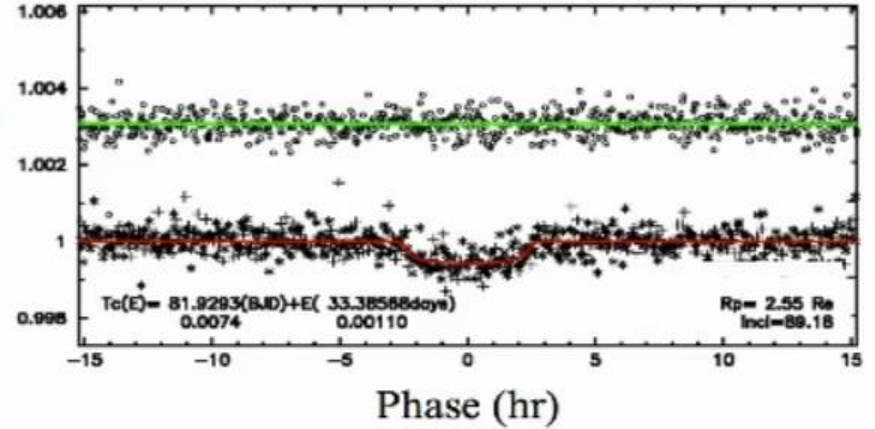
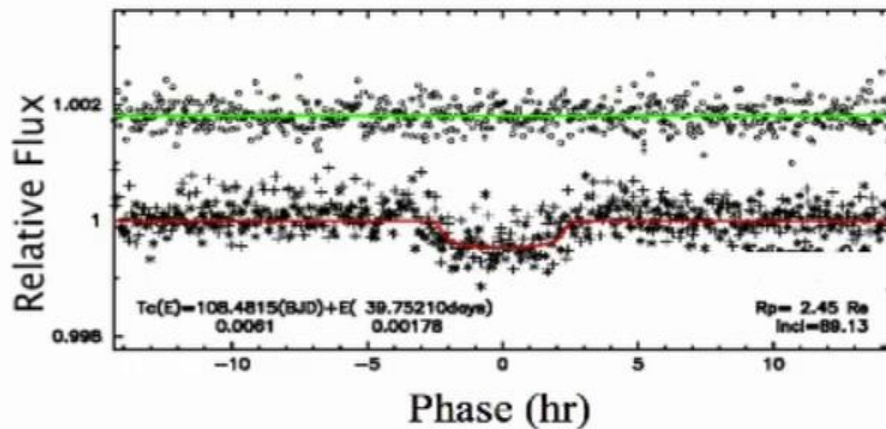
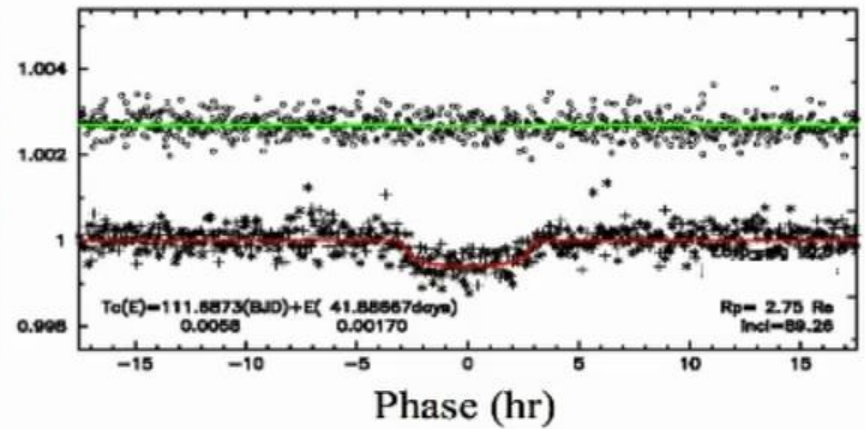
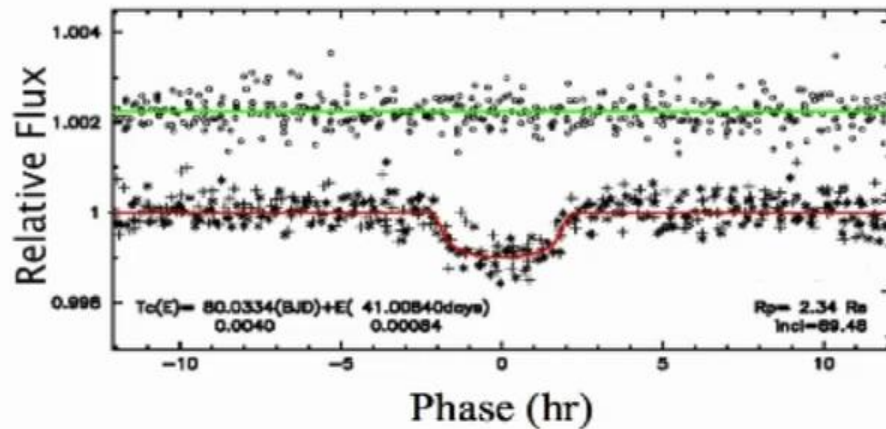


Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy

Most Common:

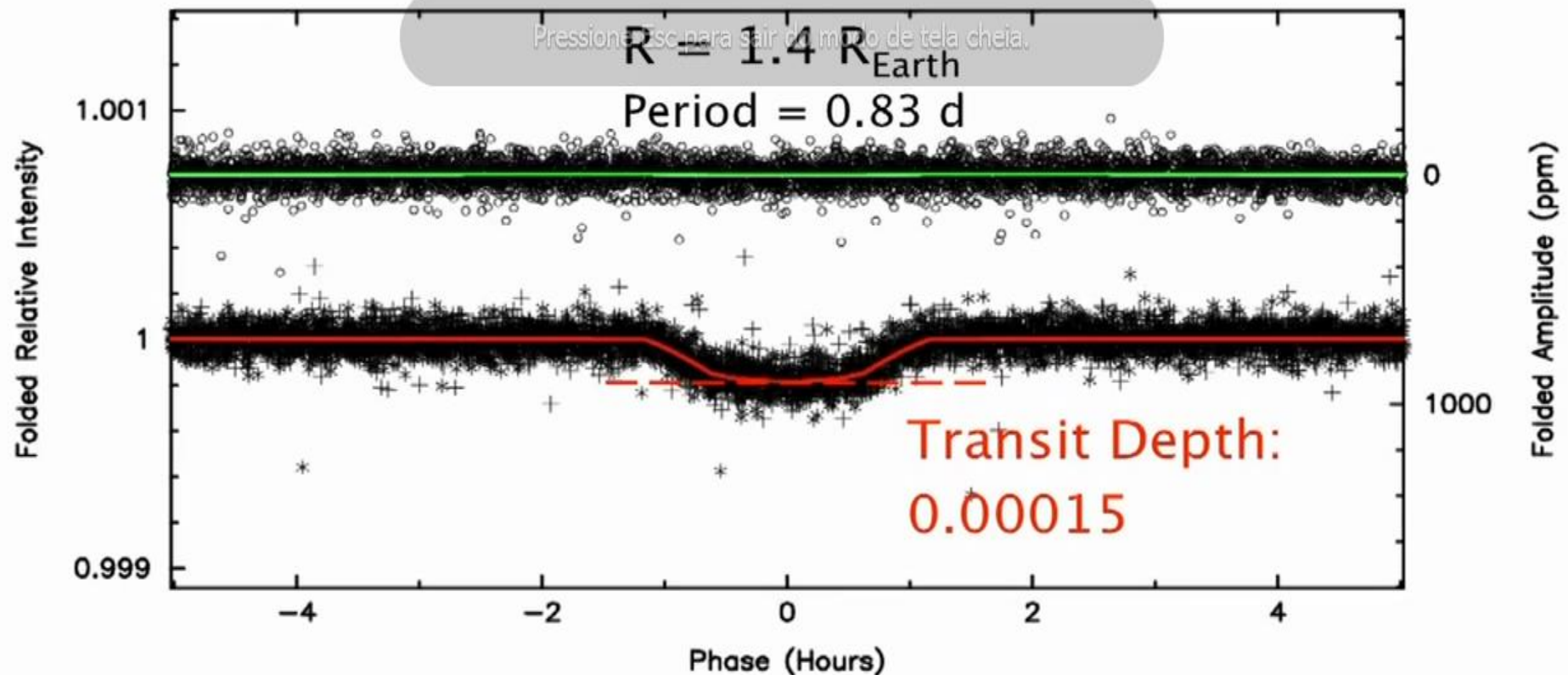
Radius = 2 - 3 R_{Earth}



Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy

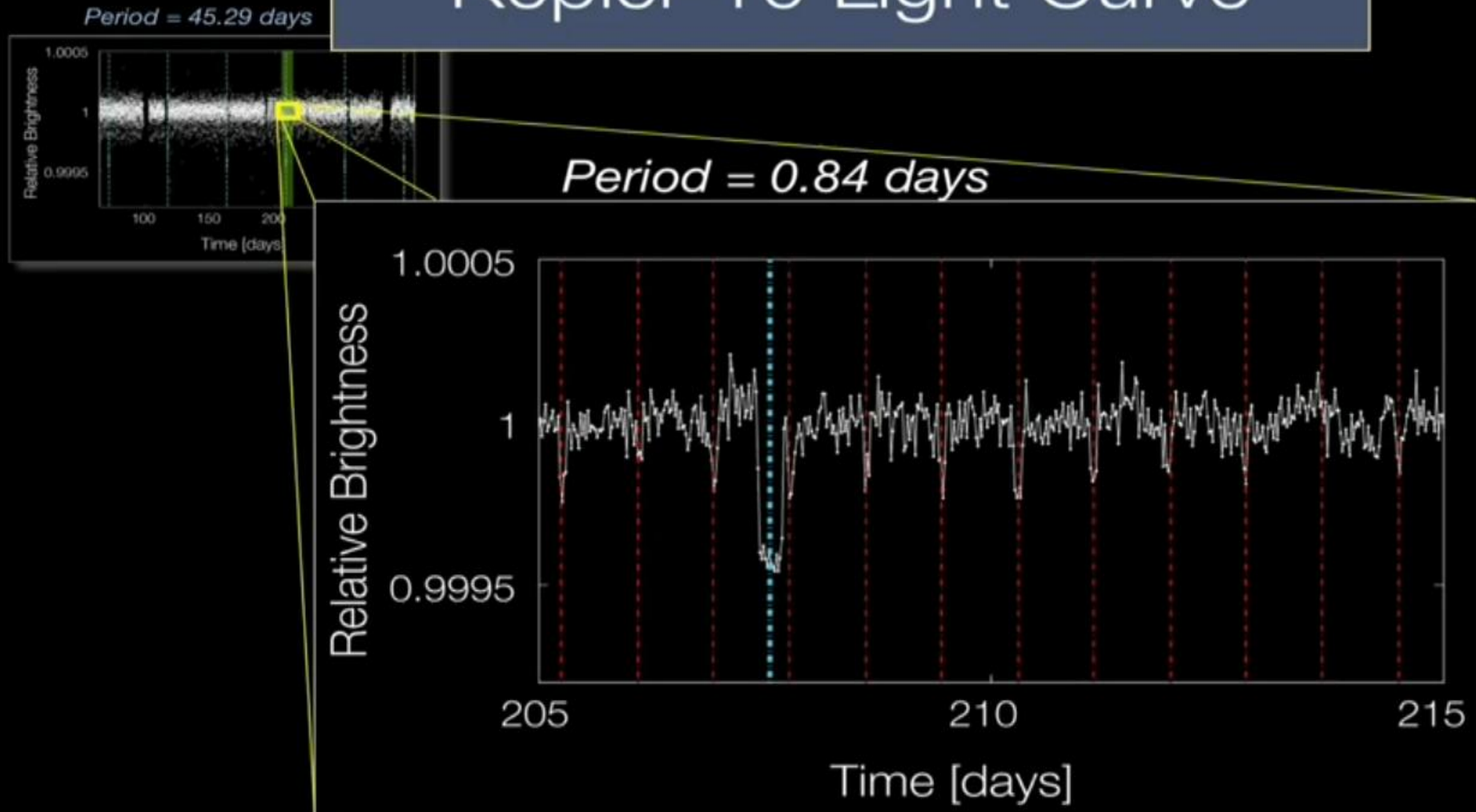
Kepler-10 Light Curve



Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy

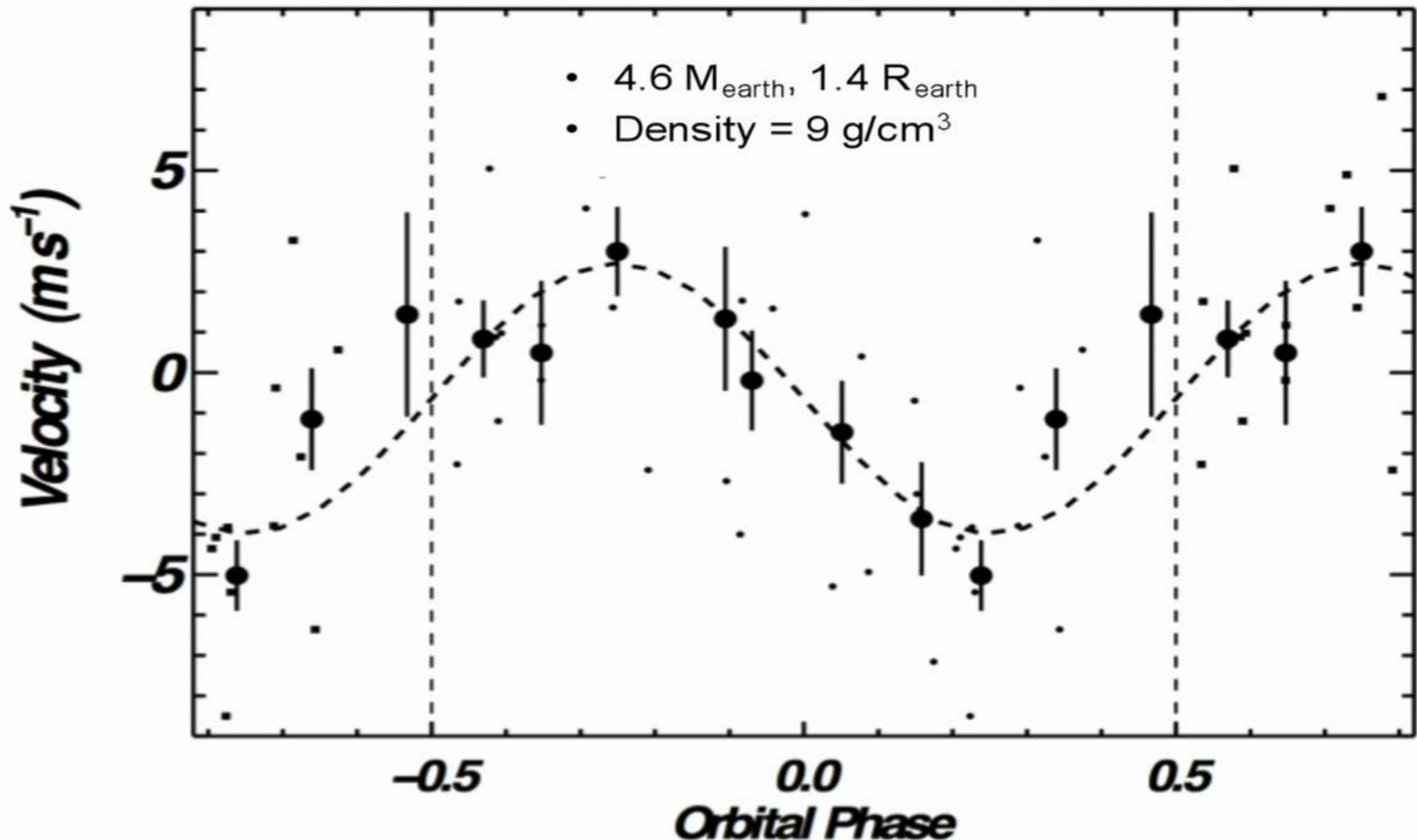
Kepler-10 Light Curve



Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy

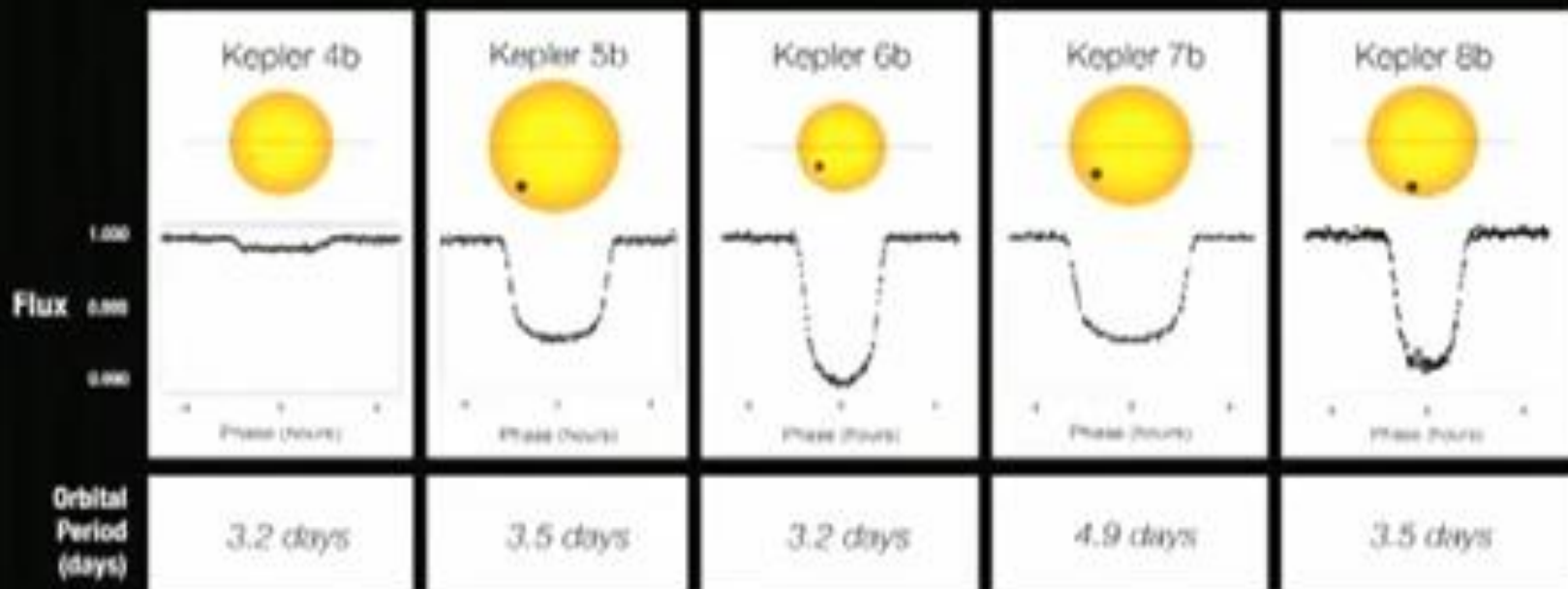
Kepler-10: Reflex Velocities vs Time



Planet Mass = 4.6 Earth-masses

Métodos indiretos de detecção: Fotometria

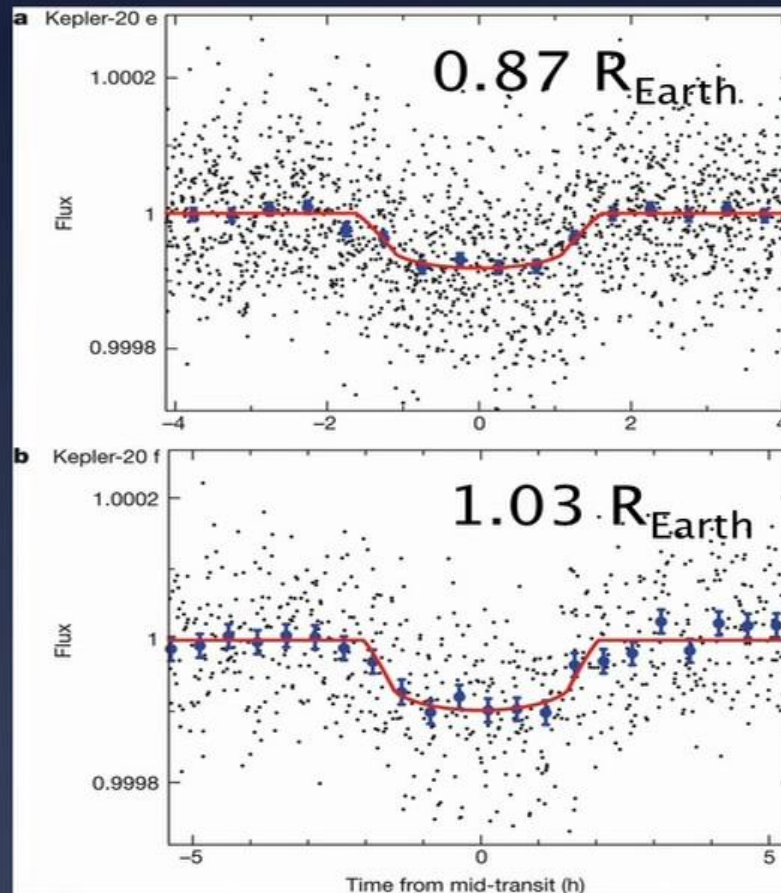
Transit Light Curves



Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy

The First Two Earth-Size Planets Kepler 20 e, f



Two Planet Transits
in the G8 star Kepler-20.

Orbital periods: 6.1 days,
19.6 days.

Flux decrements of:
82 p.p.m.
101 p.p.m.:

Determinação da densidade

Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy

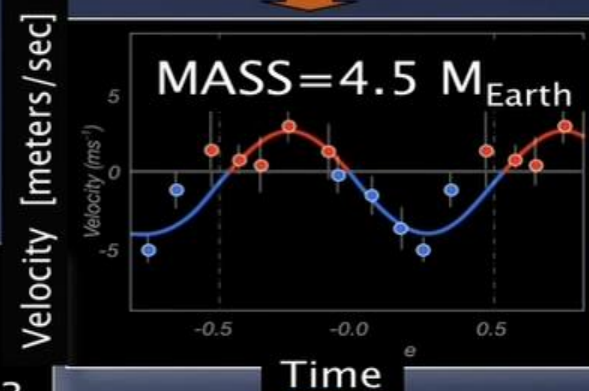
The Planet Radius

Planet Transit



The Planet Mass

Doppler of Star

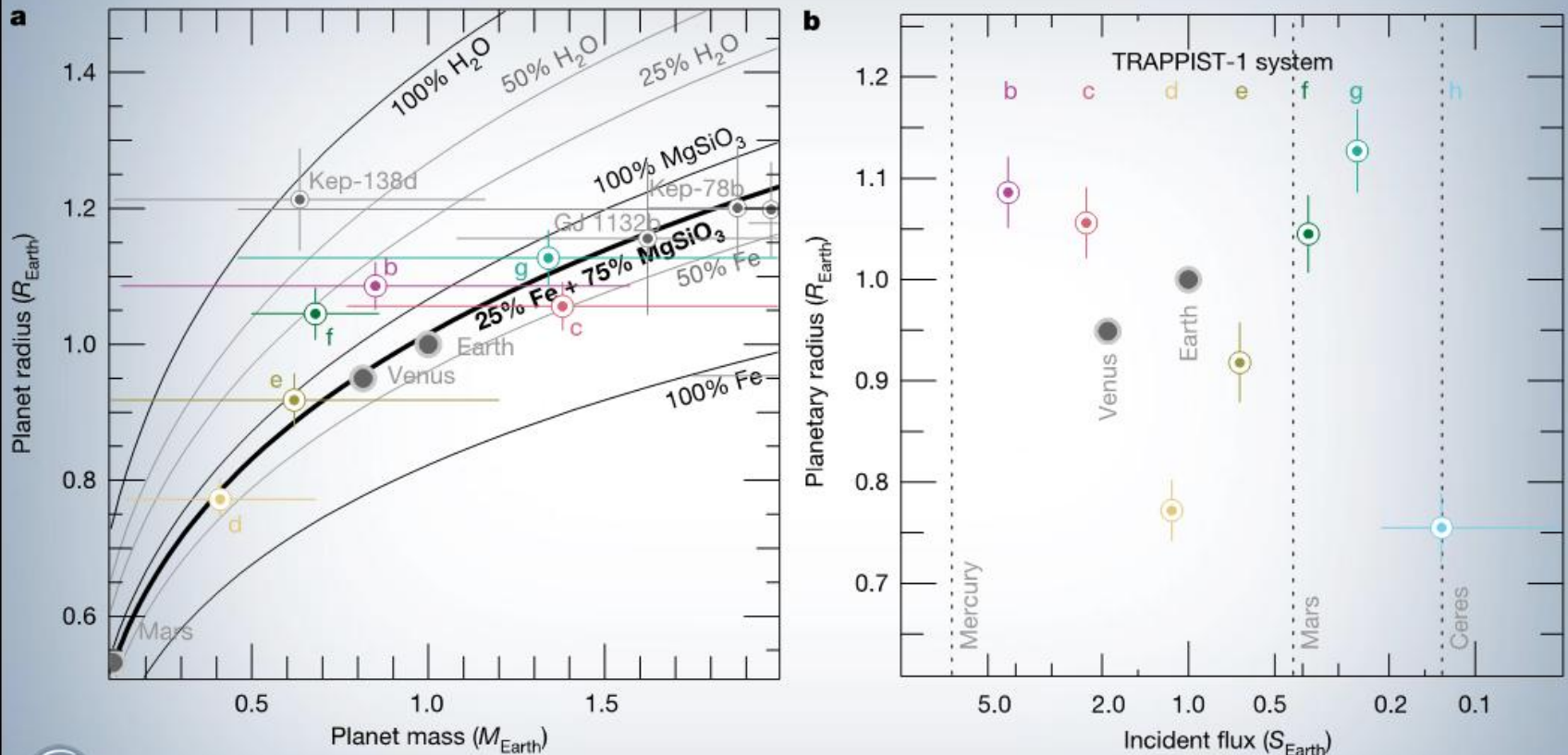


Planet Density:

$$\frac{\text{Mass}}{\text{Volume}} = 8.8 \text{ g/cm}^3$$

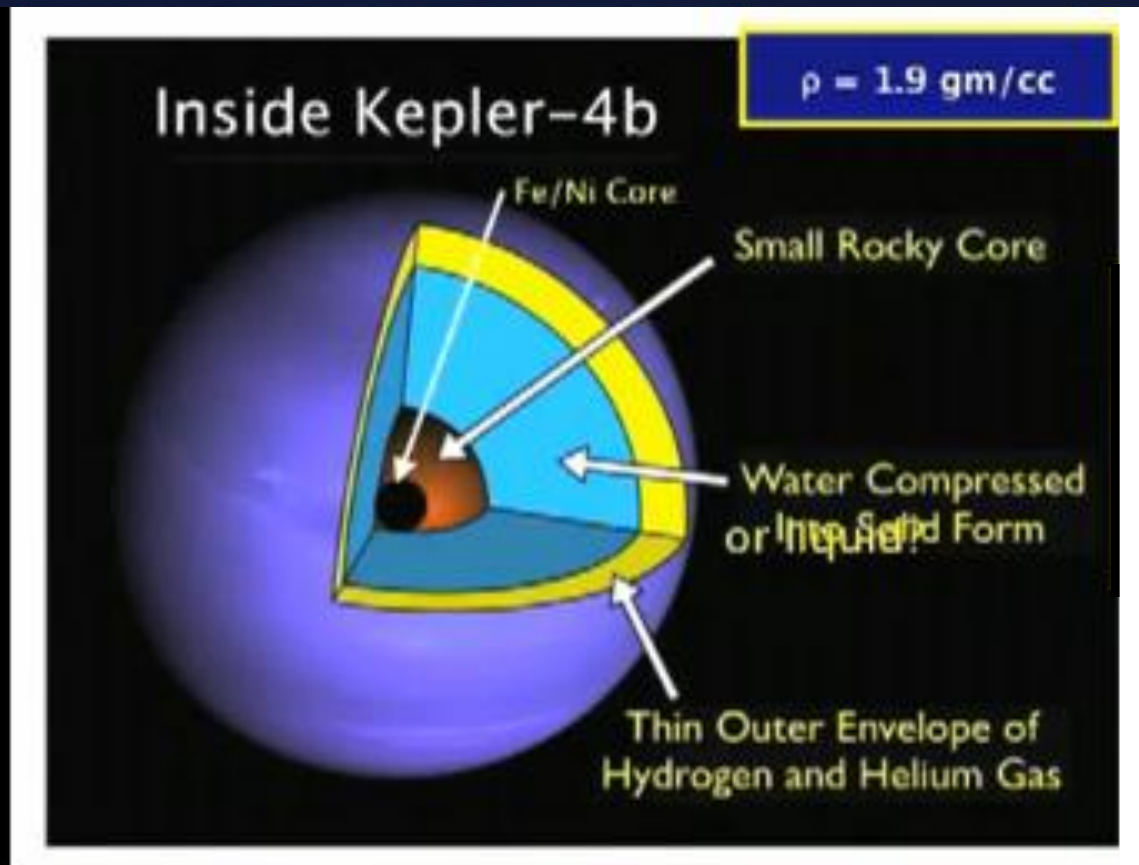
Determinação da densidade

The 'Earth-like' Nature of the TRAPPIST-1 Planets



Estrutura interna provável do exoplaneta Kepler 4B

Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy



Model from Fortney, Marley, & Jones 2007

"It seems likely that planets with masses within an order of magnitude of the Earth's mass will be composed primary of ...ices, rocks, and iron." (Fortney et al. 2007)

Dave Stevenson,
Deming et al. 2007,
Chiang &
Murray-Clay 2007
Seager et al. 2008
Valencia et al. 2007
Figueira et al. 2009

California NANOSystems Institute

C (N) S I

C (N) S I

C (N) S I

C (N) S I

C (N) S I

C (N) S I

C (N) S I

C (N) S I

C (N) S I

C (N) S I

C (N) S I

C (N) S I

C (N) S I

C (N) S I

C (N) S I

C (N) S I

C (N) S I

C (N) S I

C (N) S I

C (N) S I

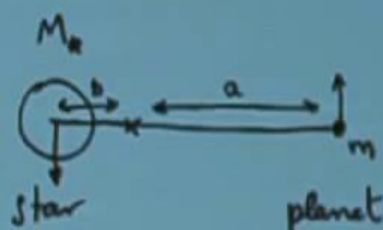
C (N) S I

David Jewitt

Earth and Space Sciences, Physics and Astronomy, UCLA

C (N) S I

Doppler



$$m \ll M_*$$

$$M_* b = m a$$

$$V_* = \frac{2\pi b}{T} = \frac{2\pi}{T} a \frac{m}{M_*}$$

$$\text{Kepler } \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{GM_*}{a^3}}$$

$$\text{So } V_* = \sqrt{\frac{G}{M_* a}} m$$

Large V_* favors small M_* , small a , large m
 (M stars) "hot Jupiters"

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{eg: } M_* = M_\odot, a = 1 \text{ AU}, m = m_J \rightarrow V_* = 0.09 \text{ m s}^{-1} = 9 \text{ cm s}^{-1} \\ a = 5 \text{ AU}, m = m_J \rightarrow V_* = 12 \text{ m s}^{-1} \end{array} \right\}$$

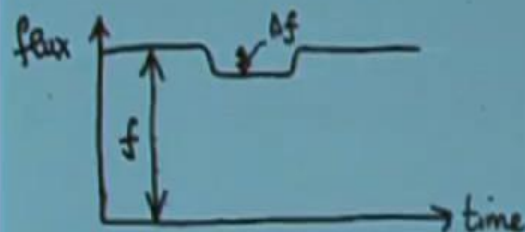
Current limits near 1 m s^{-1}

Transits



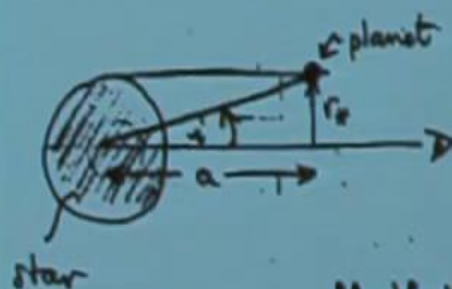
$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right) \sim \left(\frac{r_p}{r_s}\right)^2$$

$$r_s \sim \left(\frac{M_s}{M_\odot}\right) r_\odot$$



$$\frac{\Delta f}{f} \sim \left(\frac{M_\odot}{M_s}\right)^2 \left(\frac{r_p}{r_\odot}\right)^2$$

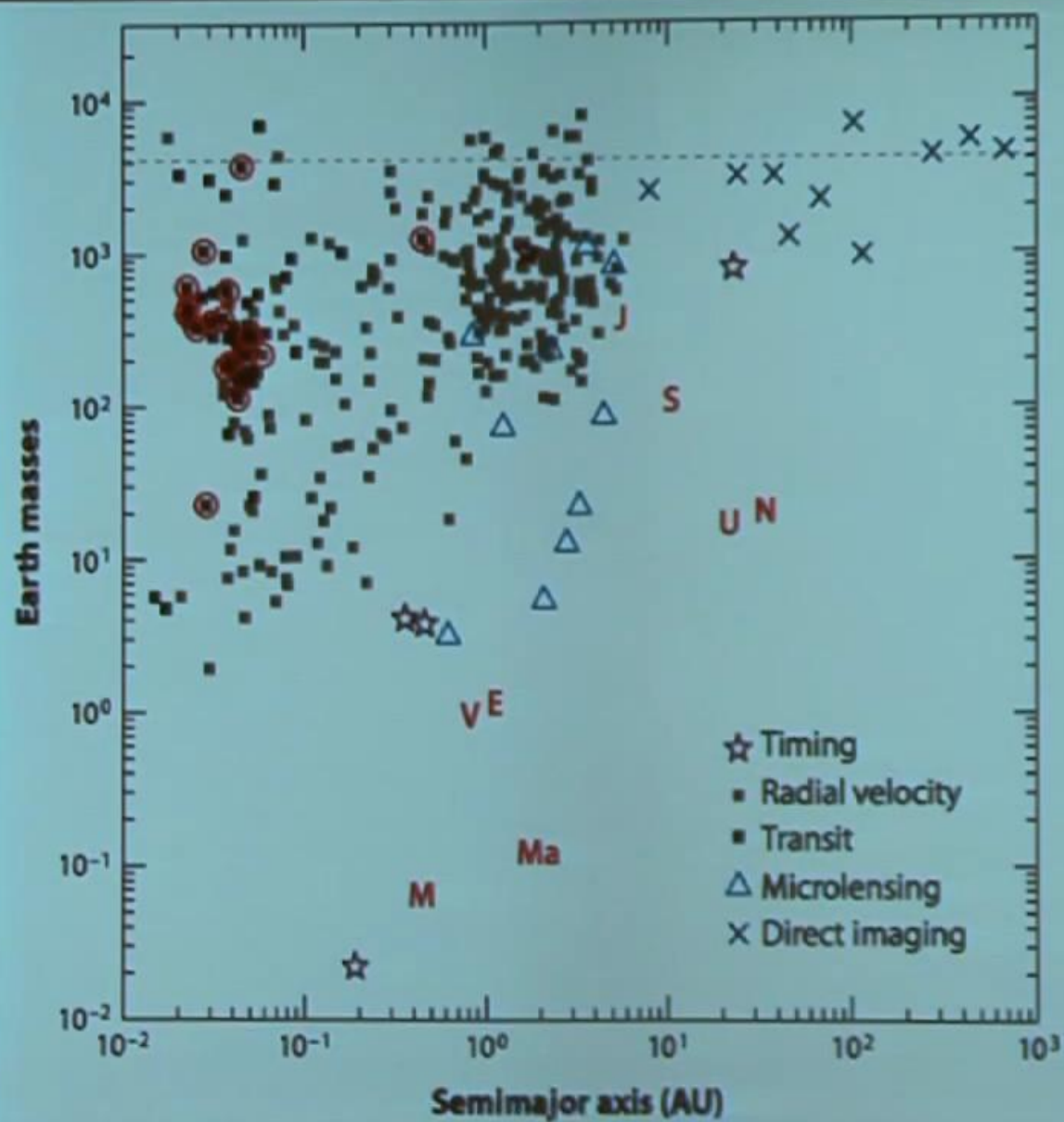
$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{eg: } M_s = M_\odot, r_p = r_\oplus & \frac{\Delta f}{f} \sim 10^{-4} \\ M_s = M_\odot, r_p = r_J & \frac{\Delta f}{f} \sim 10^{-2} \end{array} \right\}$$



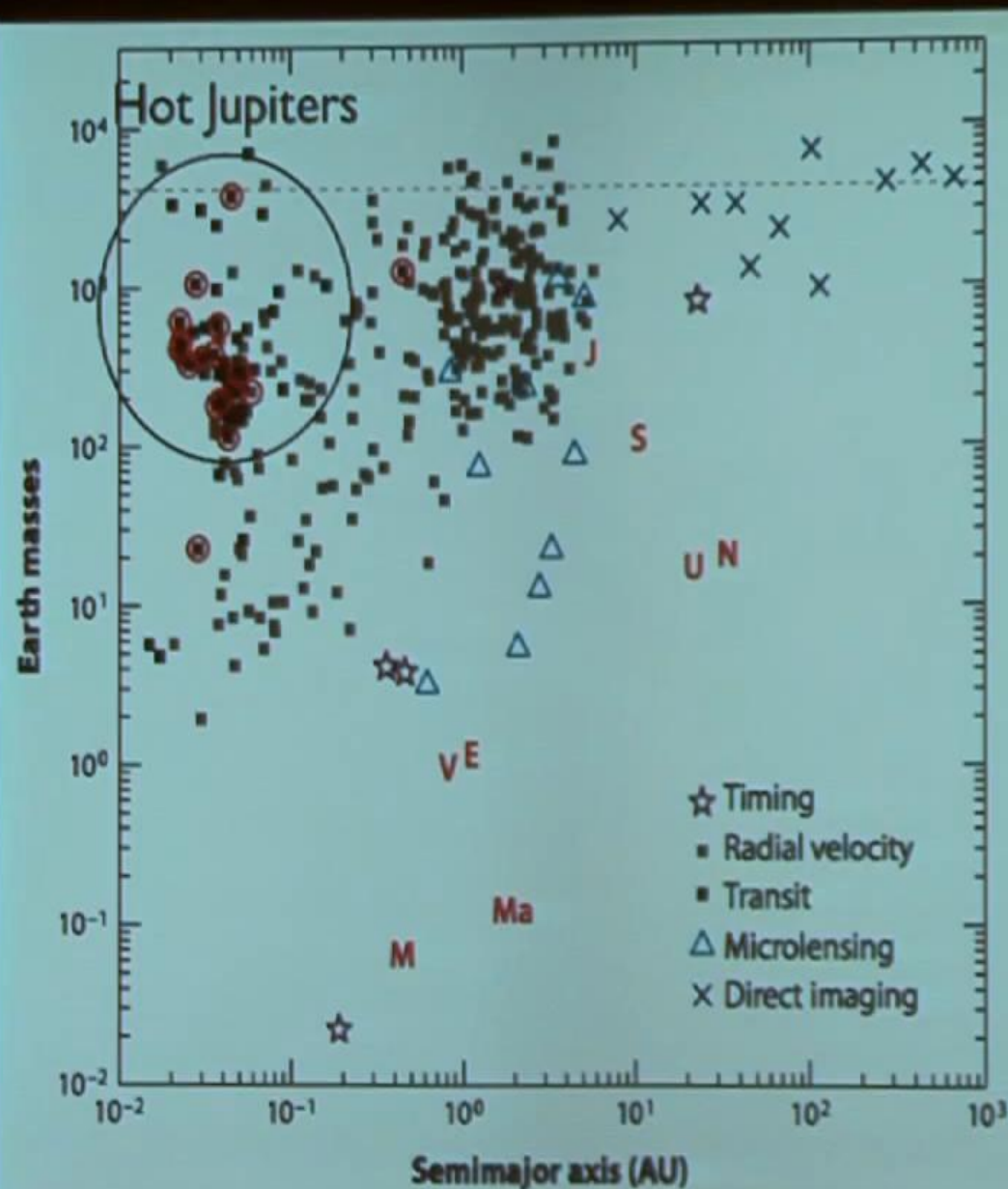
Transit requires

$$i \leq r_s/a$$

Method favors small M_s , large r_p , small a
 $\rightarrow$ hot Jupiters around M dwarfs.



Science 2010 ARAA 48: 631



Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Kepler

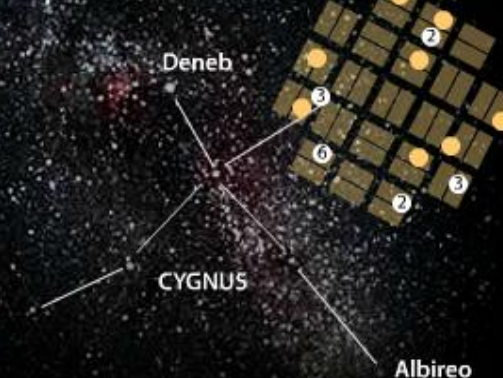
A Search for Habitable Planets

Home Mission News Science Discoveries Galleries Education ▲ Confirmed Planets: 024

Notable Discoveries

Click on a planet in the Kepler field of view for more details.

Kepler Field of View



[See All Discoveries ▶](#)

Grid On

- Earth-size
- Super-Earth
1.3–2.0 x ●
- Neptune-size
2–6 x ●
- Giant-size
6–22 x ●



Kepler Makes Splash at AAS meeting

50 presentations at American Astronomical Society meeting

Métodos indiretos de detecção: Fotometria

planethunters.org

CLASSIFY LOGIN ABOUT ▾ CANDIDATES TALK TUTORIAL ▾ PLANETOMETER™ ▾



Welcome to planet hunters.

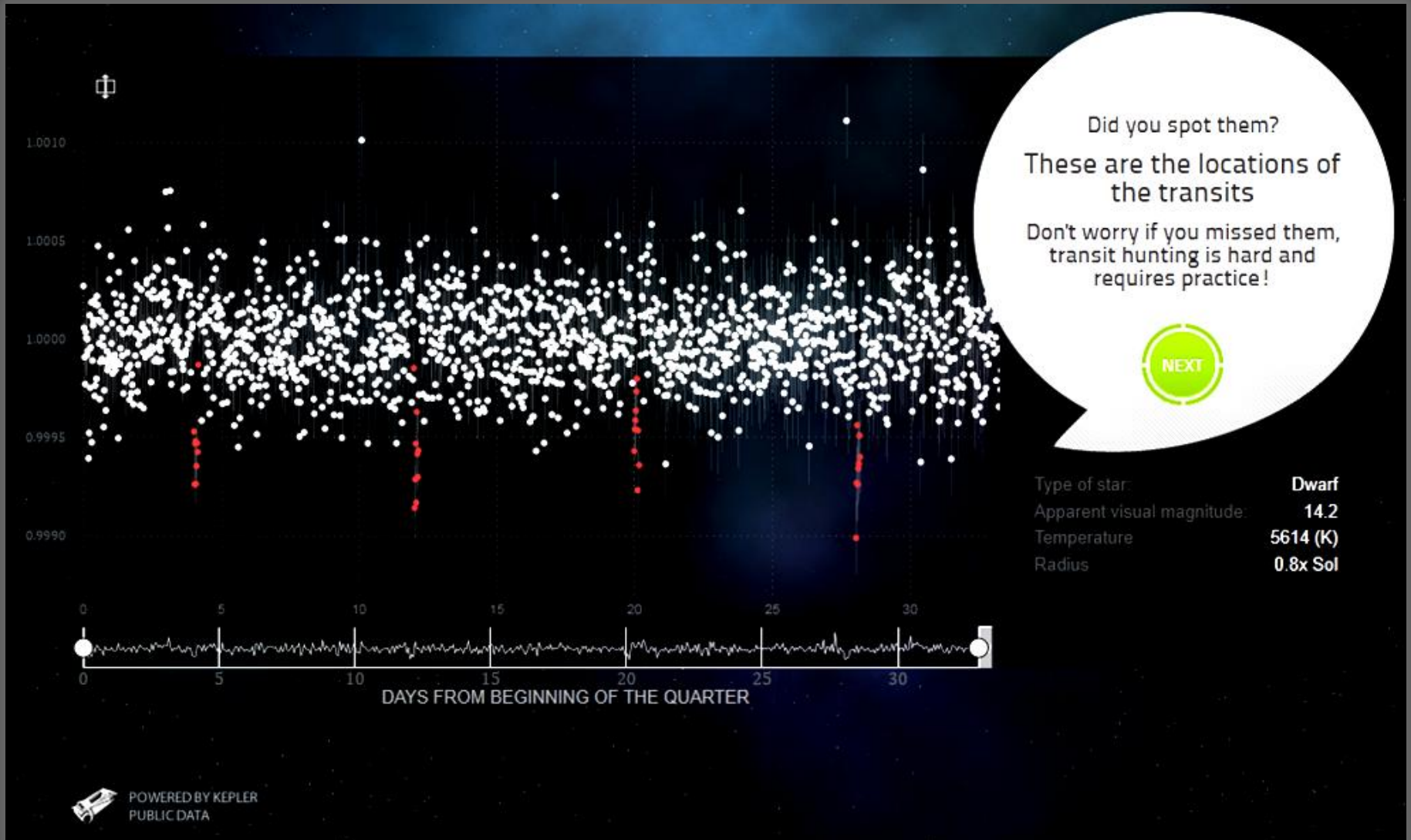
With your help, we are looking for planets around other stars

Start hunting for planets >



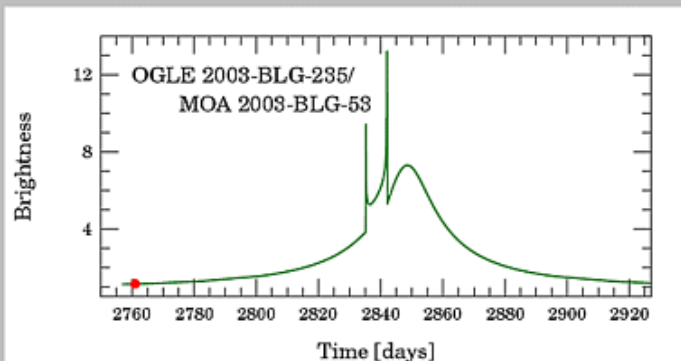
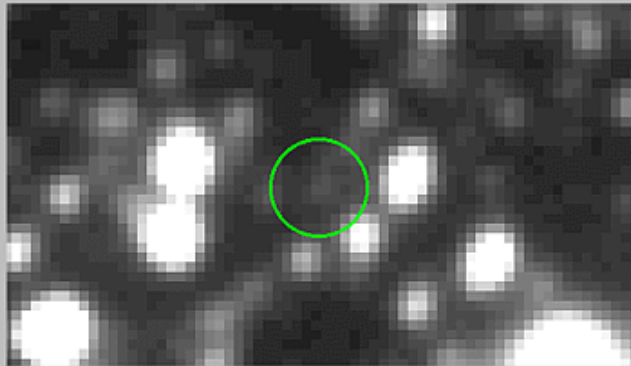
POWERED BY KEPLER
PUBLIC DATA

Métodos indiretos de detecção: Fotometria



Métodos indiretos de detecção: Microlente gravitacional

A curva de luz da estrela que está sendo submetida ao efeito, aumenta ligeiramente quando o planeta cruza seu disco.



Métodos indiretos de detecção: Microlente gravitacional

Anel de Einstein

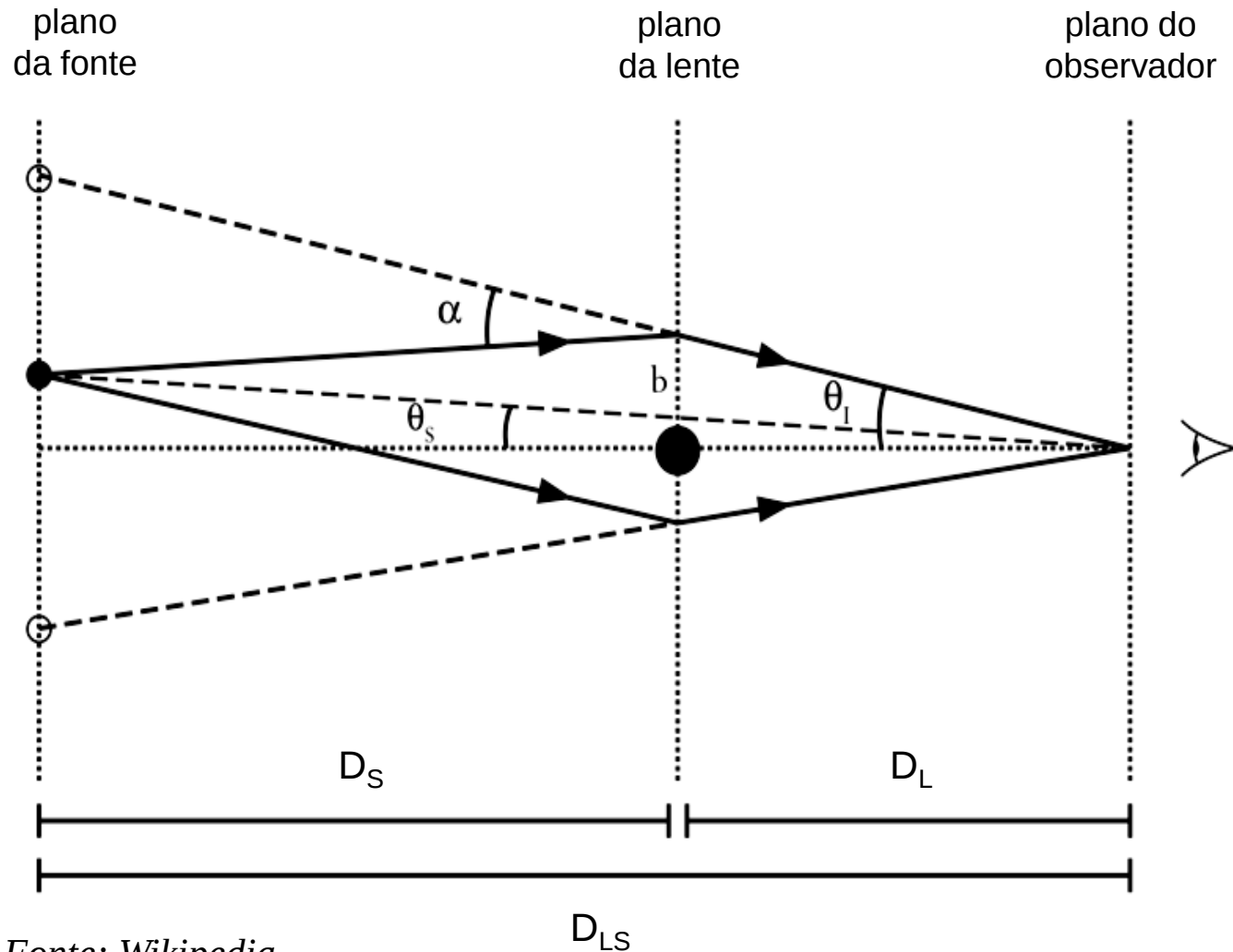
$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \times \frac{D_{LS}}{D_L D_S}}$$

G = cte gravitacional

M = massa do objeto que causa a lente

c = veloc. da luz

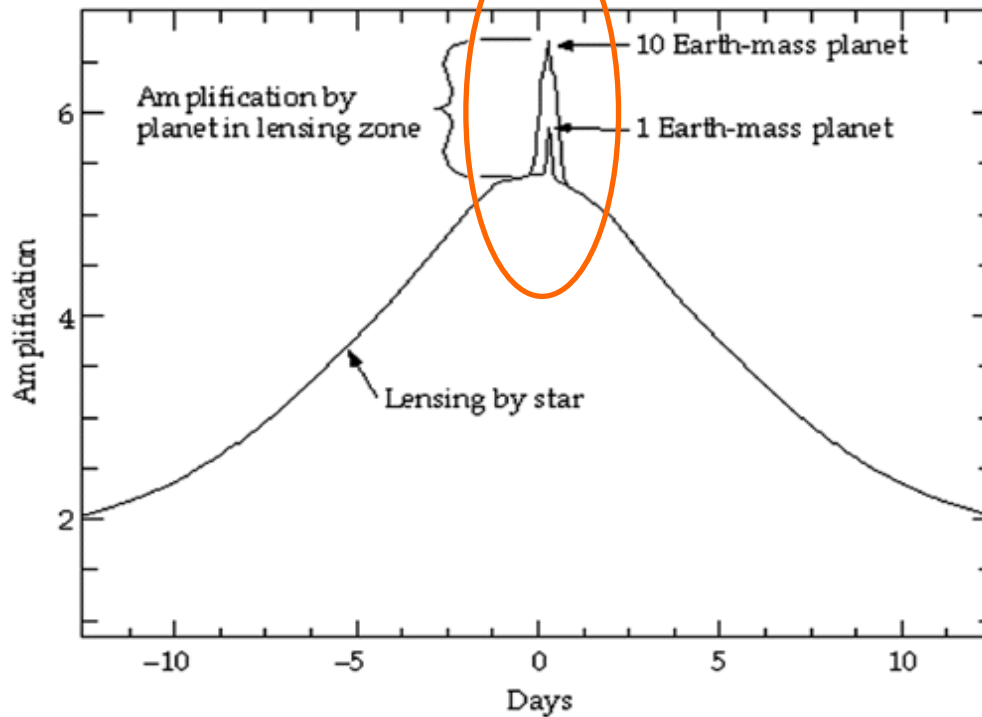
θ_E = diâmetro angular do anel de Einstein.



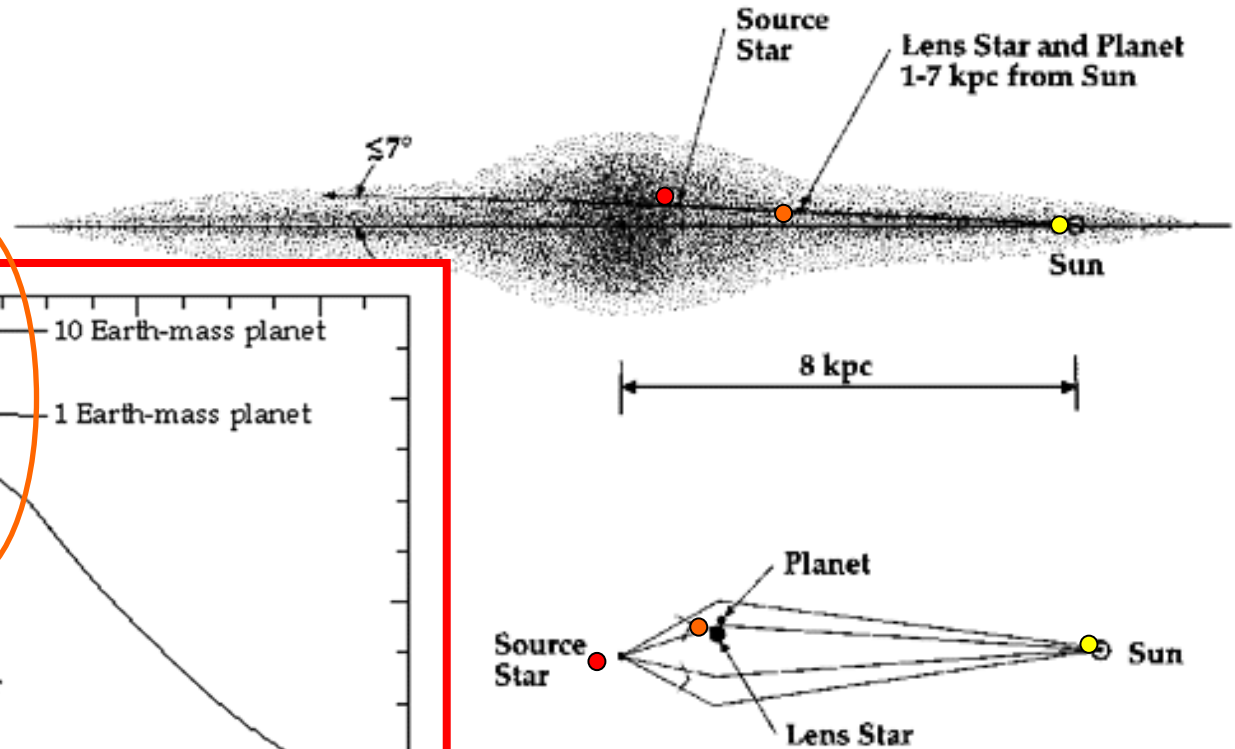
Fonte: Wikipedia

Métodos indiretos de detecção: Microlente gravitacional

Pico sobre a curva de luz da estrelas de fundo

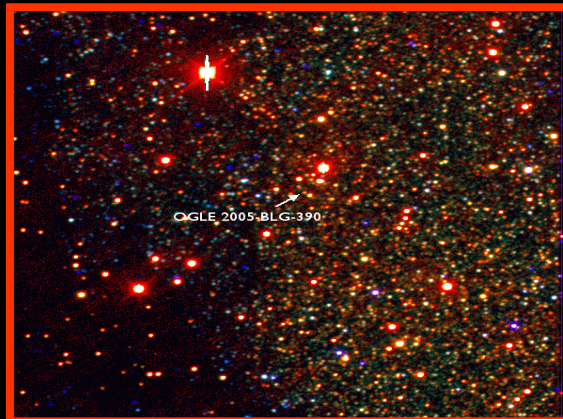
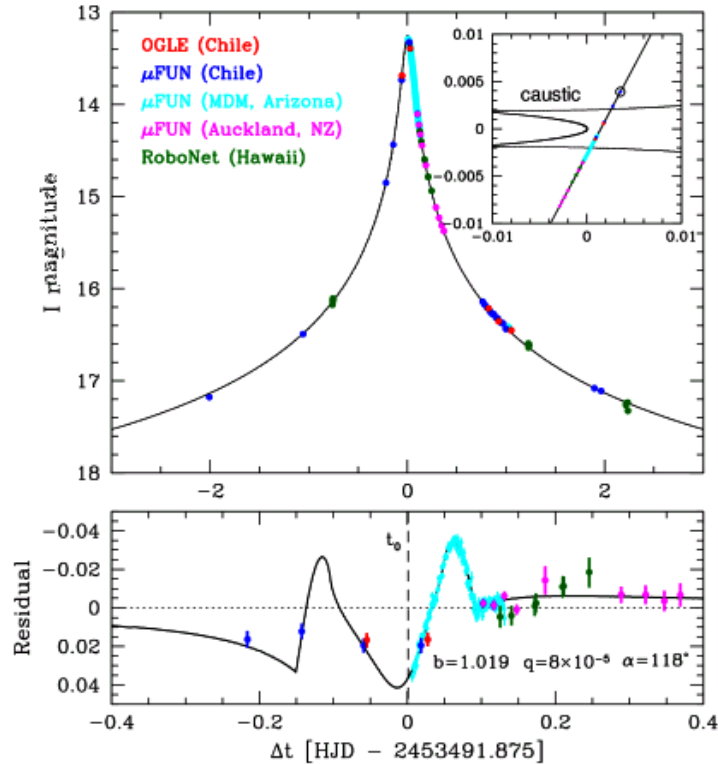


From Bennett and Rhie, 1995

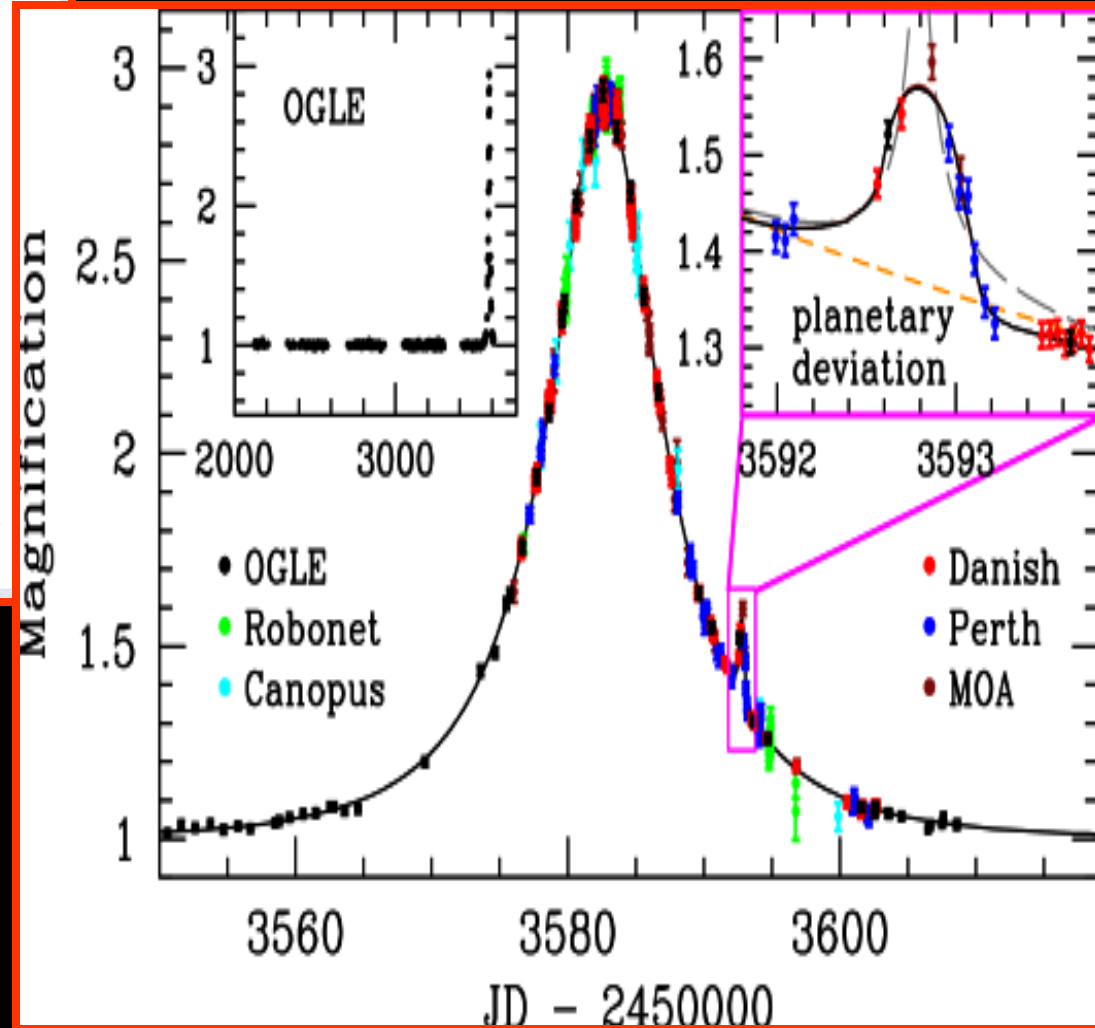


Fonte: Christopher W. Churchill

Métodos indiretos de detecção: Microlente gravitacional



OGLE-2005-BLG-169Lb “super-Terra” (13 massas terrestres)



$$RV = \text{proj}_{\text{linha de visada}} \vec{V} = K [\cos(v + \omega) + e \cos \omega]$$

$$K = \frac{m}{m + M} \frac{na \sin i}{\sqrt{1 - e^2}}$$

RV = velocidade radial

K ~ a metade da amplitude de variação das velocidades radiais medidas.

ω - ângulo entre a direção do semi-eixo maior da órbita elíptica, no espaço, e a linha em que o plano do movimento intercepta um plano perpendicular à linha de visada

v - ângulo formado pelo segmento estrela-planeta e o eixo-maior da elipse (contando-se a partir do periastro)

$n = 2\pi/T$ (T – período)

a = semi-eixo maior

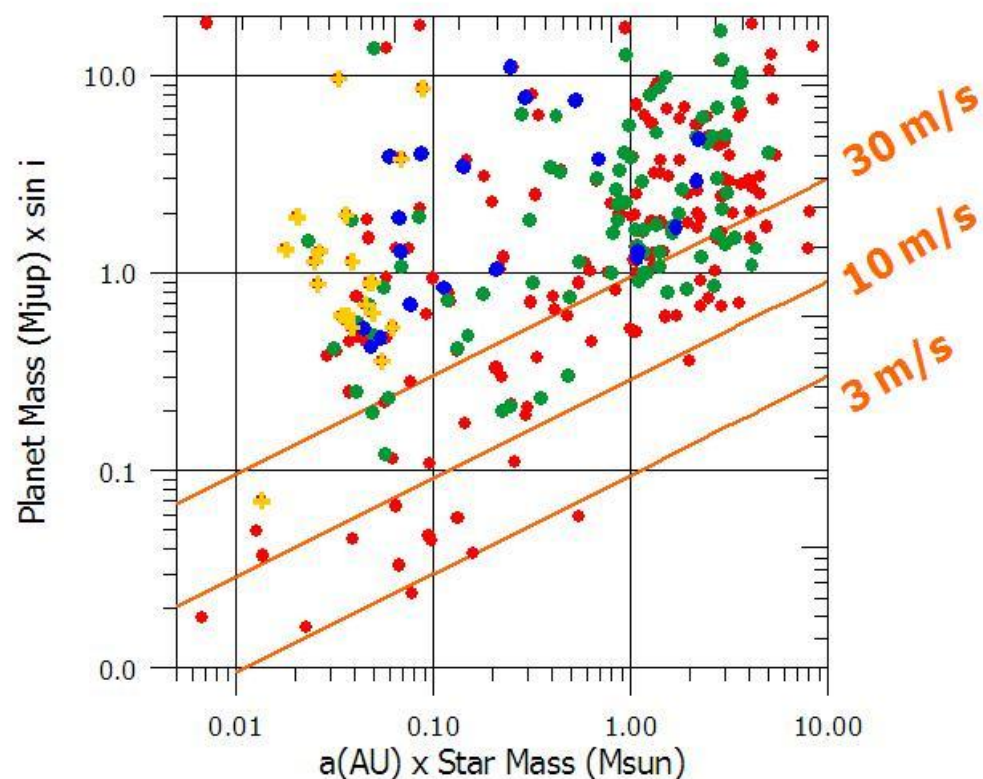
A curva das velocidades radiais medidas só é uma senóide se a órbita for circular ($e=0$). Se a órbita é elíptica, a curva é uma senóide deformada.

As deformações permitem determinar e e ω .

Do tipo espectral da estrela podemos estimar o valor de M .

Das medidas obtemos 2 parâmetros principais: período e K e com eles determinamos os demais parâmetros (supondo que a massa da estrela é bem maior do que a do planeta e $M+m \sim M$). **Não há como separar m e $\sin i$ sem informações adicionais.**

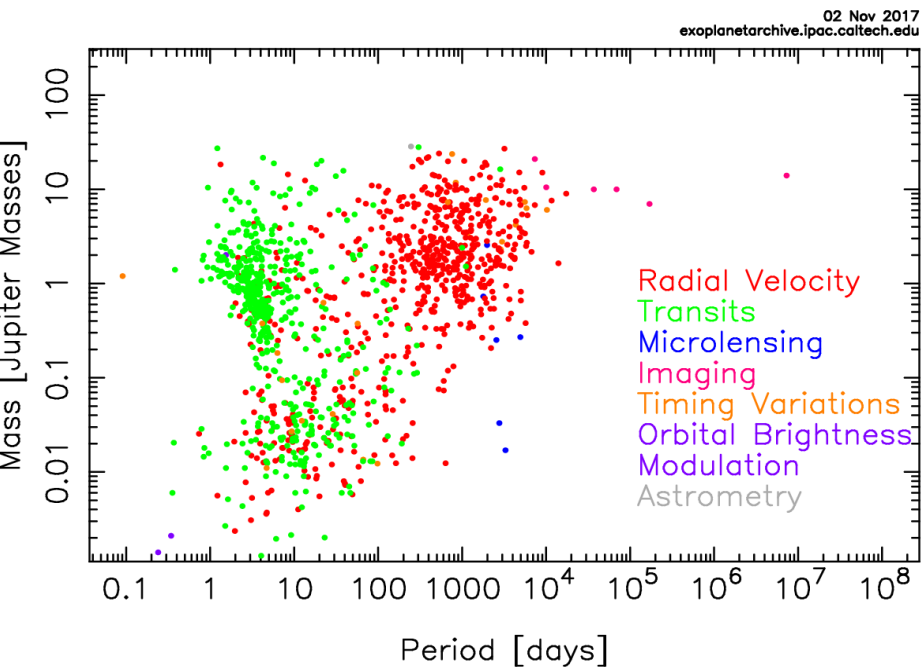
A descoberta também é favorecida quando a estrela é de baixa massa. Estes resultados estão traduzidos de forma gráfica na figura:



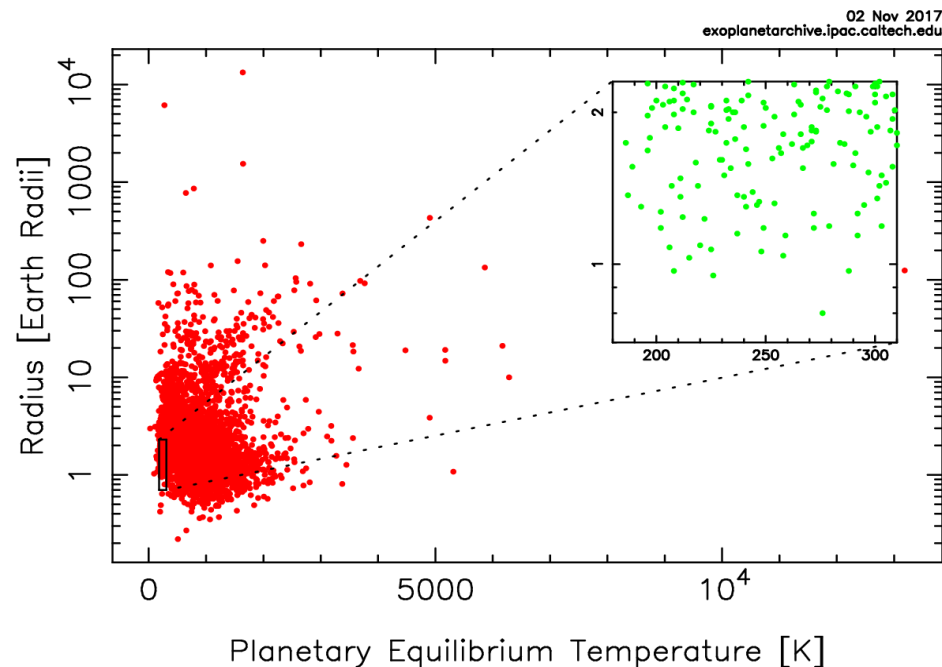
As tres linhas da figura indicam os valores de $K=30$ m/s, $K=10$ m/s e $K=3$ m/s. Para um planeta como Júpiter ao redor de uma estrela como o Sol, e à mesma distância da estrela que Júpiter do Sol, $K=13$ m/s. Esse valor está acima do limite dos espectrógrafos atuais e um planeta desse tipo poderá ser descoberto acumulando-se observações por um tempo longo (o período de Júpiter ao redor do Sol é 11,8 anos).

Já para um planeta como a Terra, a 1 UA de uma estrela como o Sol, $K=10$ cm/s. Isso é muito menos do que permitem os melhores espectrógrafos e menor do que as variações de velocidade na fotosfera de muitas estrelas devidas à turbulência.

Mass – Period Distribution

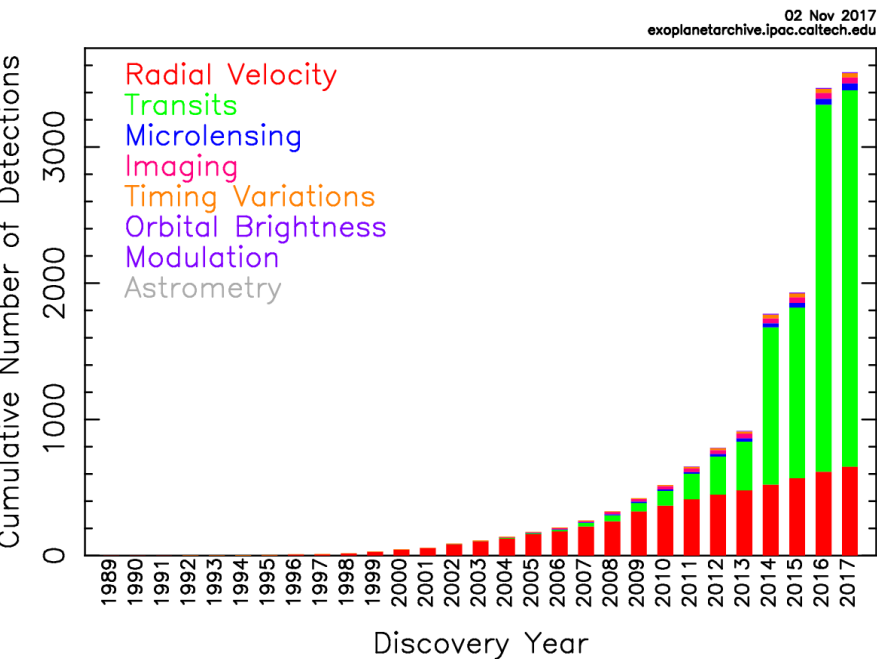


Kepler Radius – Teq Distribution

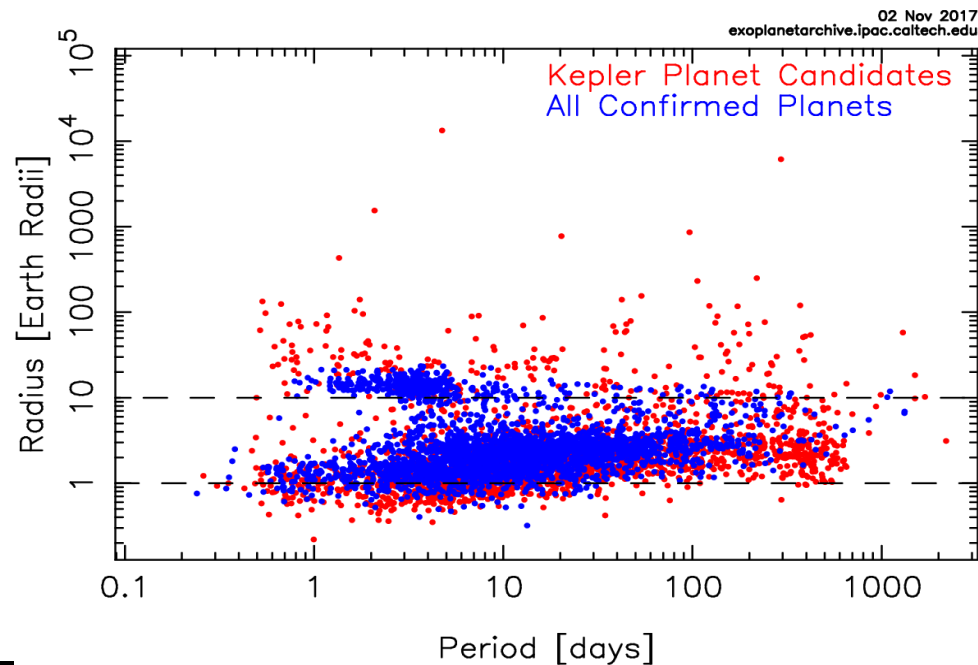


<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

Cumulative Detections Per Year



Radius – Period Distribution

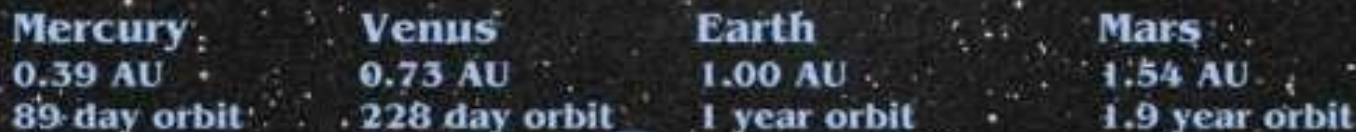


Alguns exemplos

The Upsilon Andromedae System



Our Inner Solar System



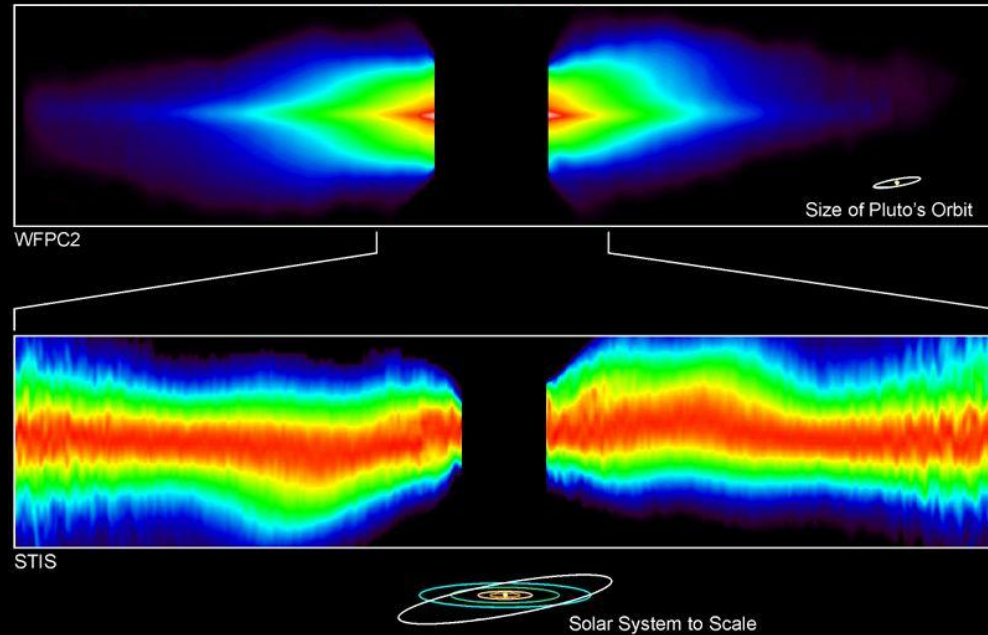
Alguns exemplos

β Pictoris

Enos Picazzio
IAGUSP
Agosto 2006

Imagem da estrela beta da constelação do Pintor, obtida com coronógrafo estelar.

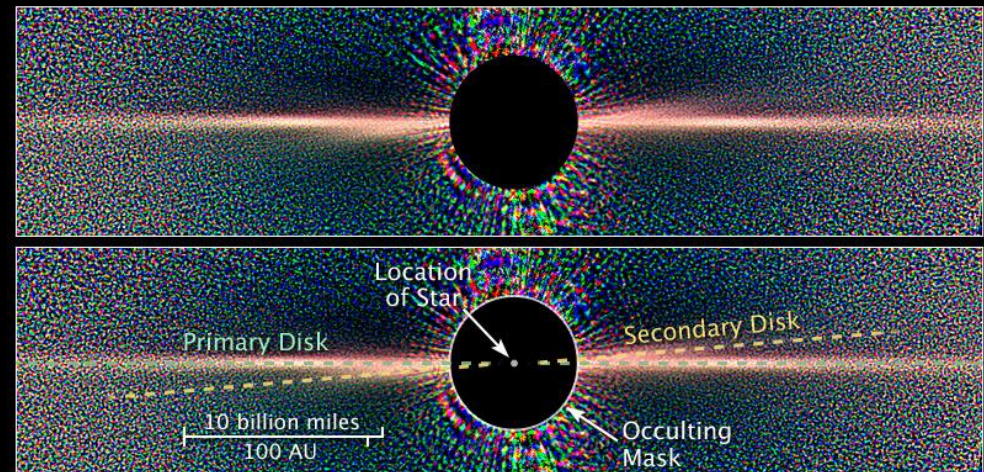
A estrela central é ocultada por um disco artificial no instrumento.
(Smith & Terrile, 1987)



Disco secundário pode ser maior que 130 AU
(HST 2006)

Beta Pictoris

Hubble Space Telescope ■ ACS/HRC



NASA, ESA, and D. Golimowski (Johns Hopkins University)

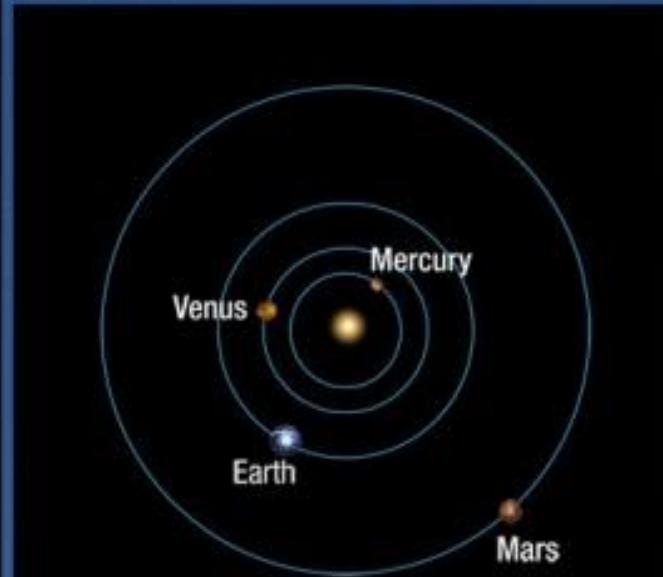
STScI-PRC06-25

Alguns exemplos

- semelhante ao Sol, porém um pouco mais jovem, mais massiva e mais brilhante
- 44 a.l. de distância
- conhecida há pouco mais de uma década
- tem 3 planetas do tipo de Júpiter
- 2 planetas têm órbitas inclinadas em $\sim 30^\circ$
- é possível que haja um 4o. Planeta com órbita altamente excêntrica
- Causas possíveis para órbitas inclinadas:
 - ✓ migração interna dos planetas
 - ✓ ejeção de outros planetas do sistema, por interação mútua
 - ✓ influência da estrela companheira Upsilon B

Upsilon Andromedae

Inner Solar System

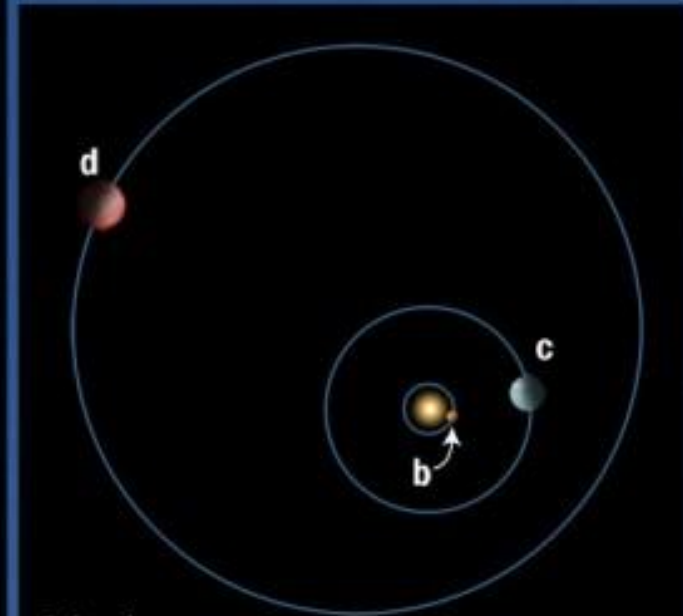


Polar view



Oblique view

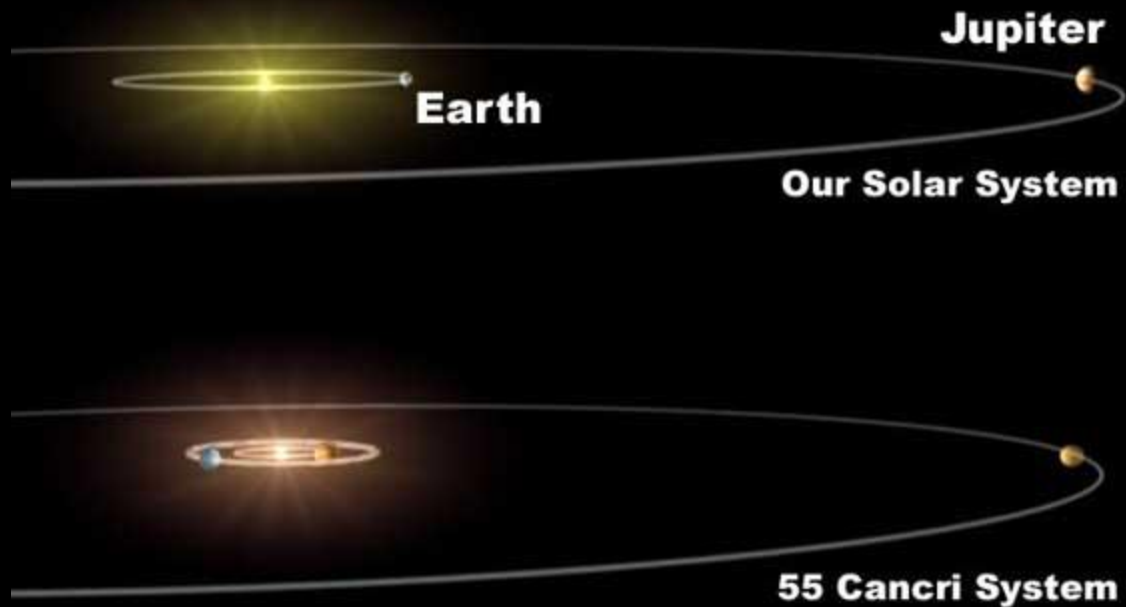
Upsilon Andromedae System



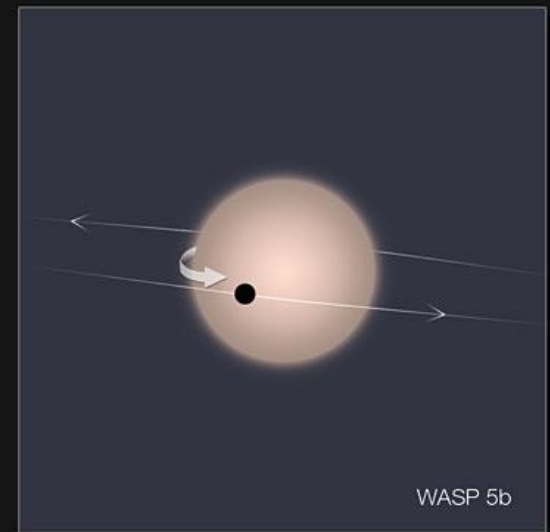
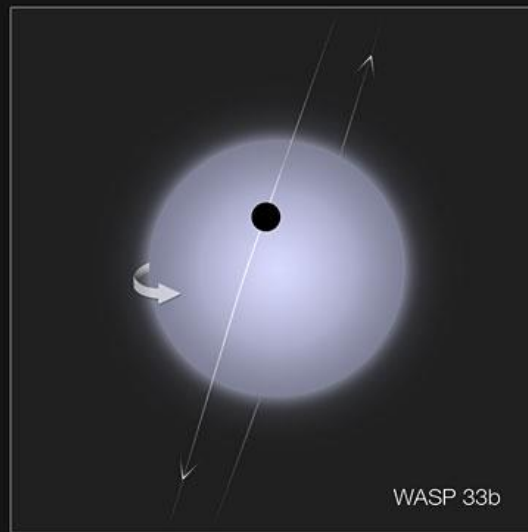
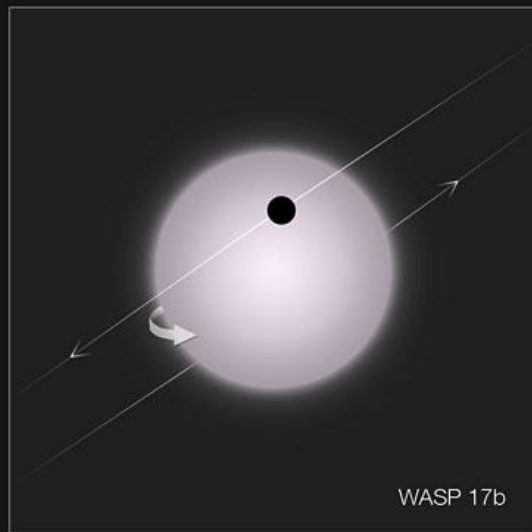
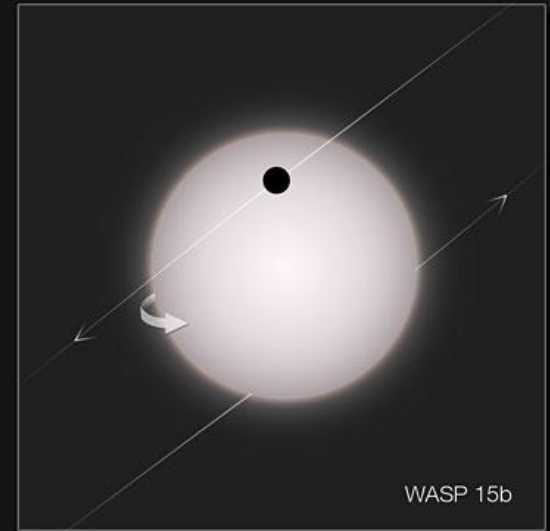
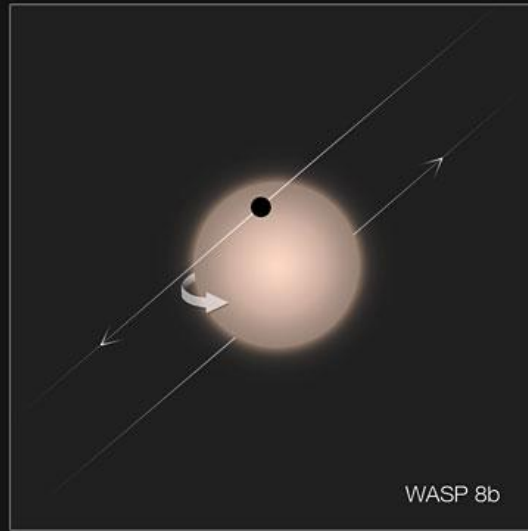
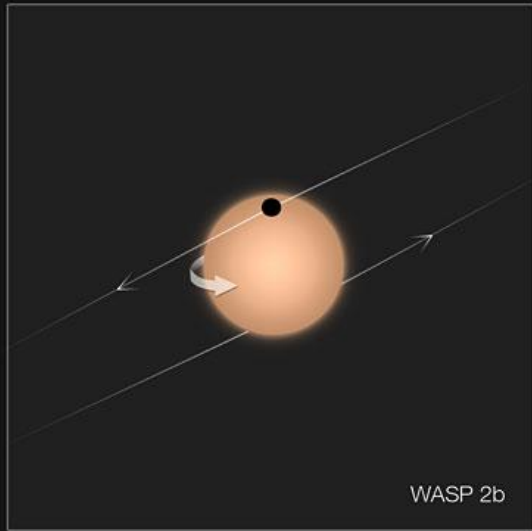
Polar view



Oblique view



Gigantes quentes com órbitas inclinadas



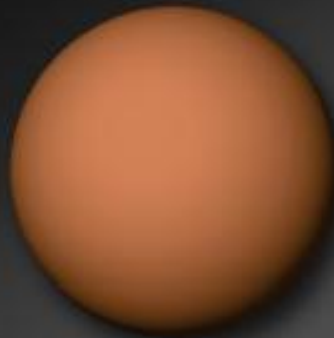
Exoplanetas: Missão Kepler (Procura de Planetas Habitáveis)

Kepler-7b



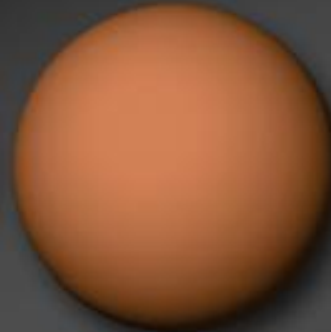
16.52 R_E

Kepler-5b



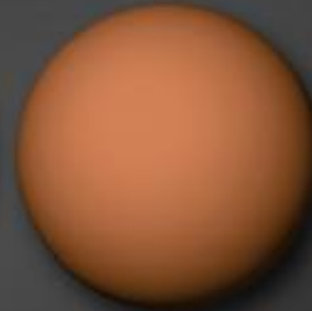
16.00 R_E

Kepler-8b



15.86 R_E

Kepler-6b



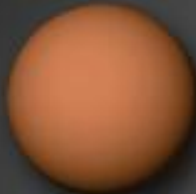
14.79 R_E

Jupiter



11.2 R_E

Kepler-9b



9.4 R_E

Kepler-9c



9.2 R_E

Kepler-4b



3.99 R_E

Kepler-9d



1.64 R_E

Kepler-10b



1.42 R_E

Earth



Kepler-11b



1.97 R_E

Kepler-11c



3.15 R_E

Kepler-11d



3.43 R_E

Kepler-11e



4.52 R_E

Kepler-11f



2.61 R_E

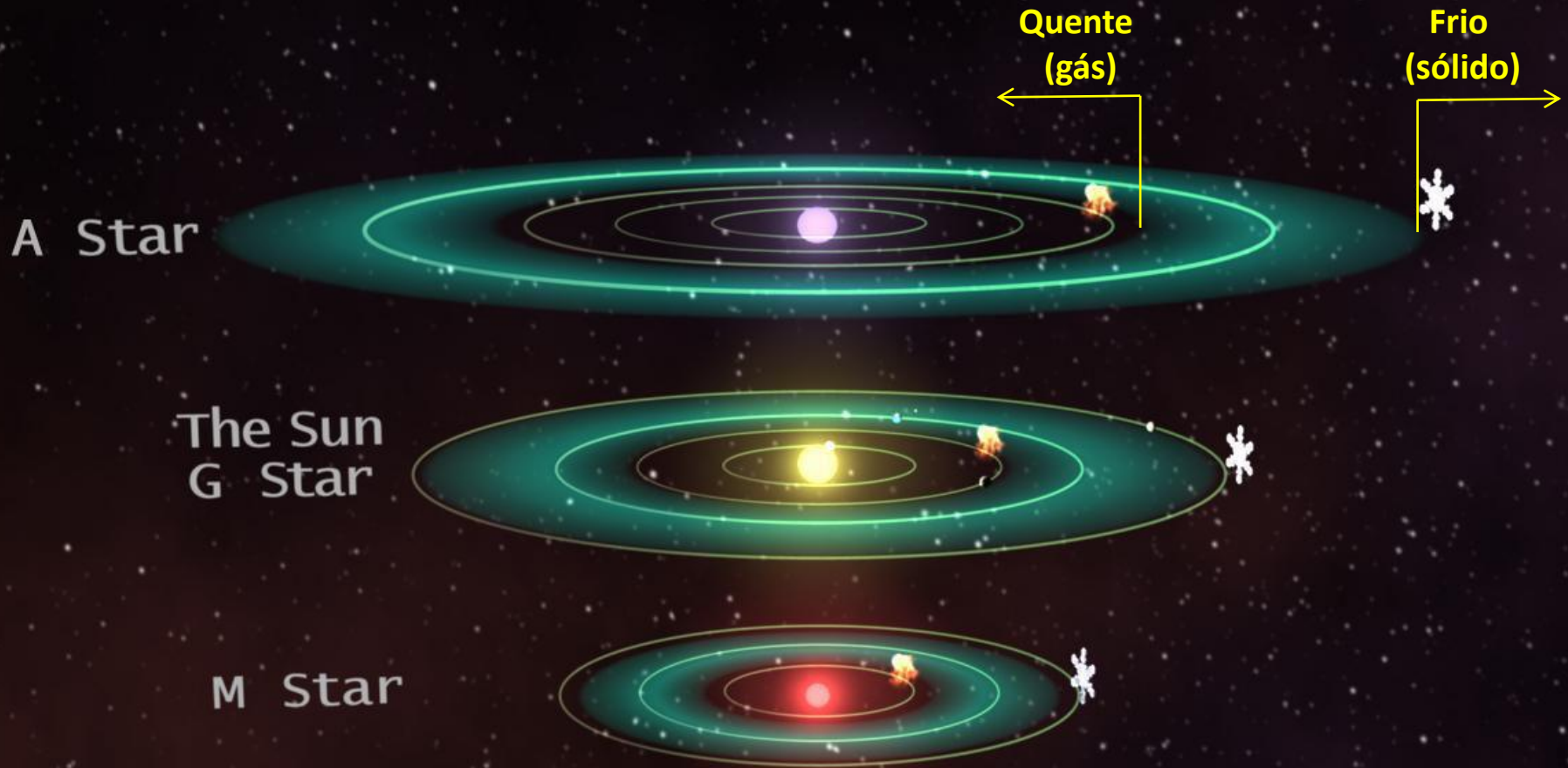
Kepler-11g



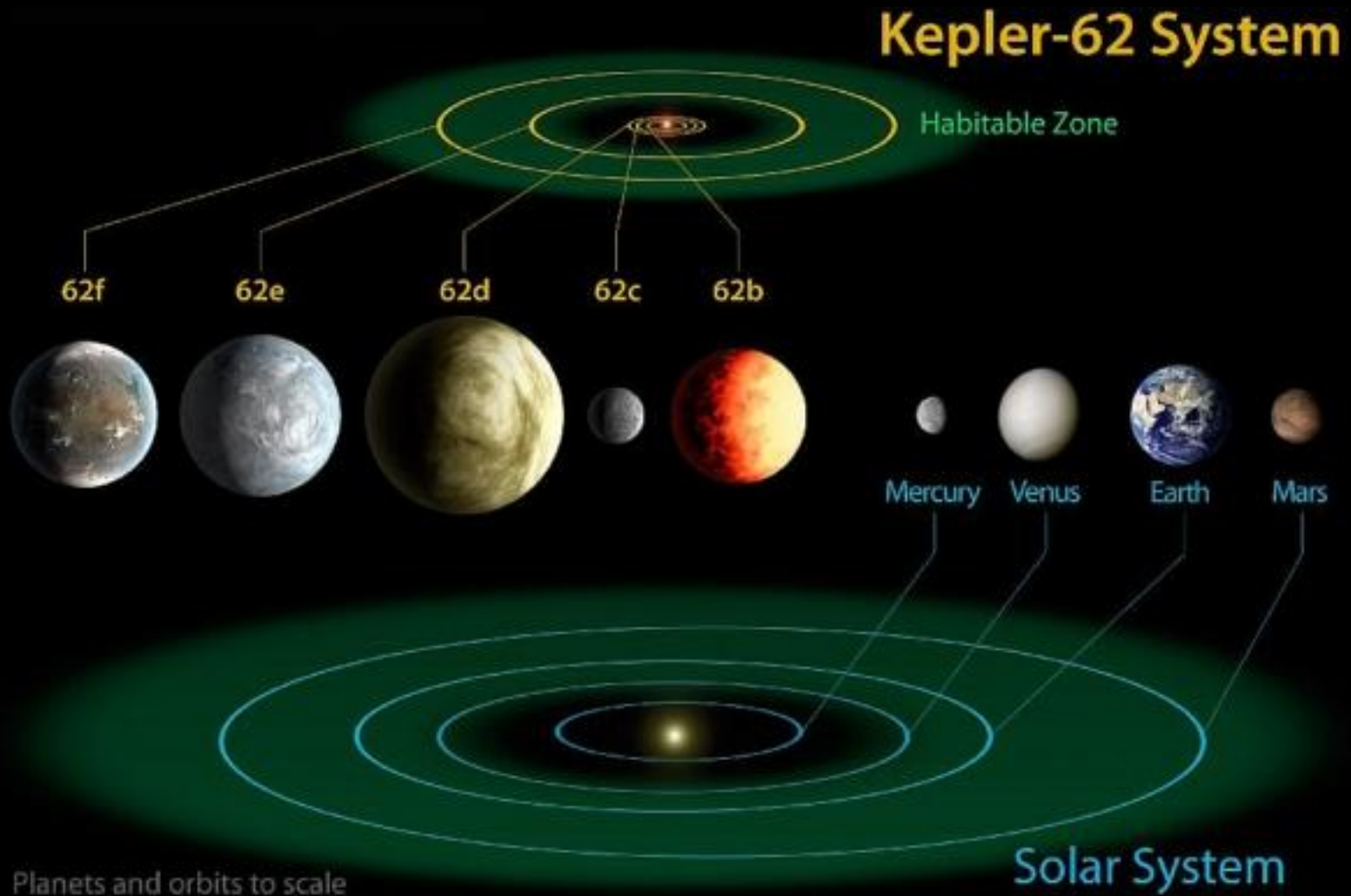
3.66 R_E

Zona Habitável

Região em torno de uma estrela onde a temperatura ambiente permite a existência de água líquida.

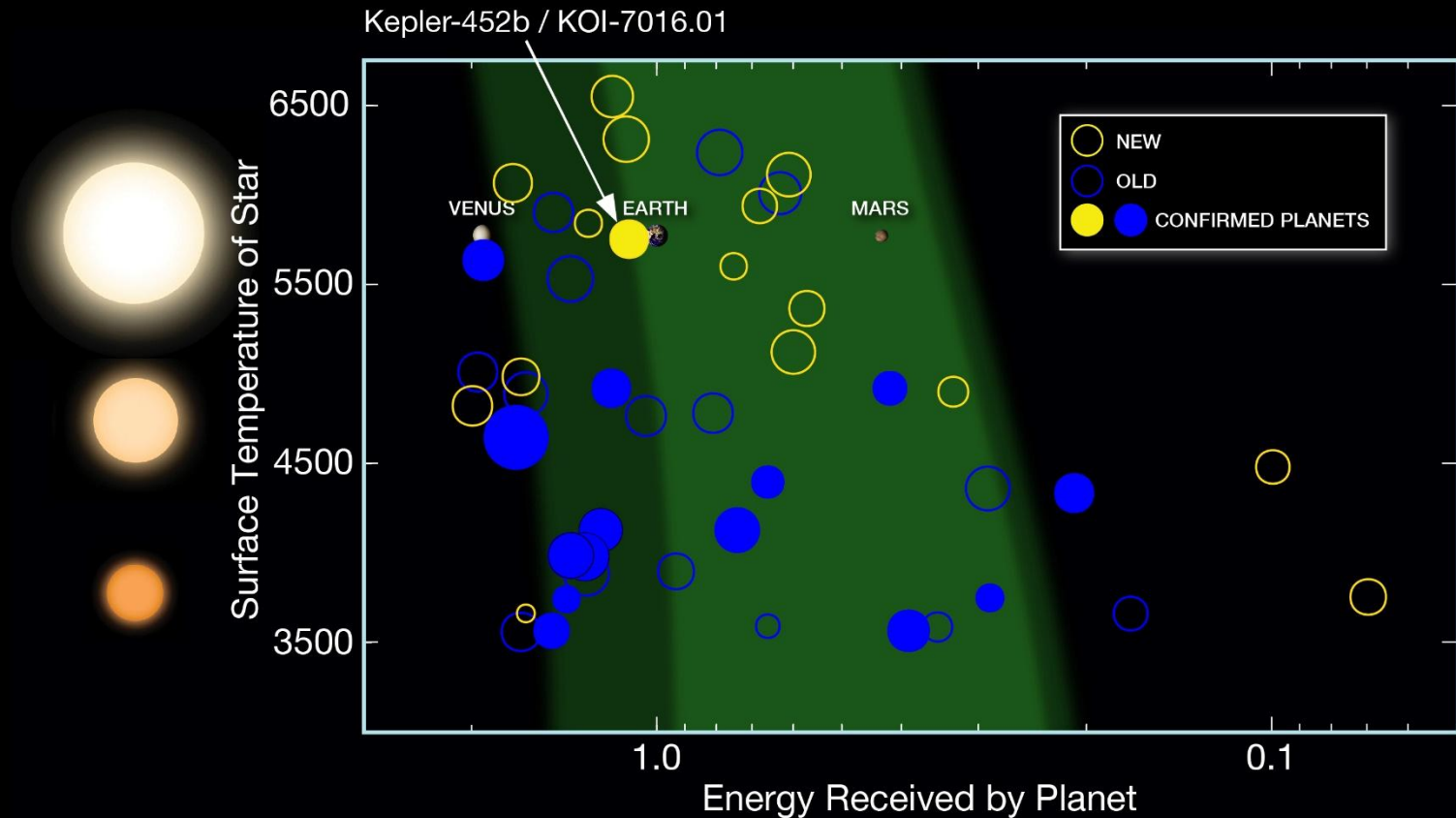


Exoplanetas: o sistema Kepler-62

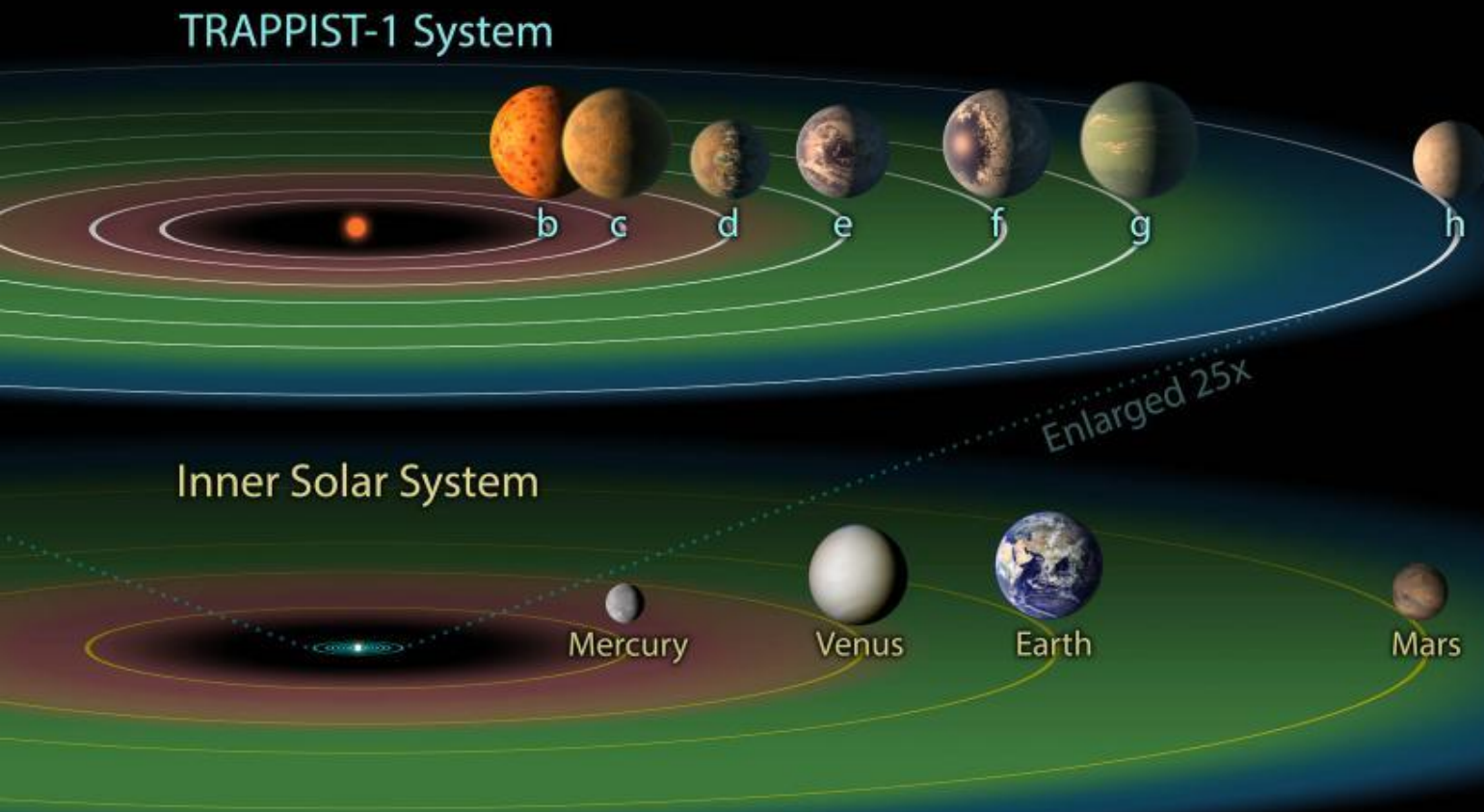


Exoplanetas pequenos na Zona Habitável - Missão Kepler

Twelve New Small Kepler Candidates in the Habitable Zone



Exoplanetas na Zona Habitável – sistema Trappist-1



Illustration

Exoplanetas na Zona Habitável

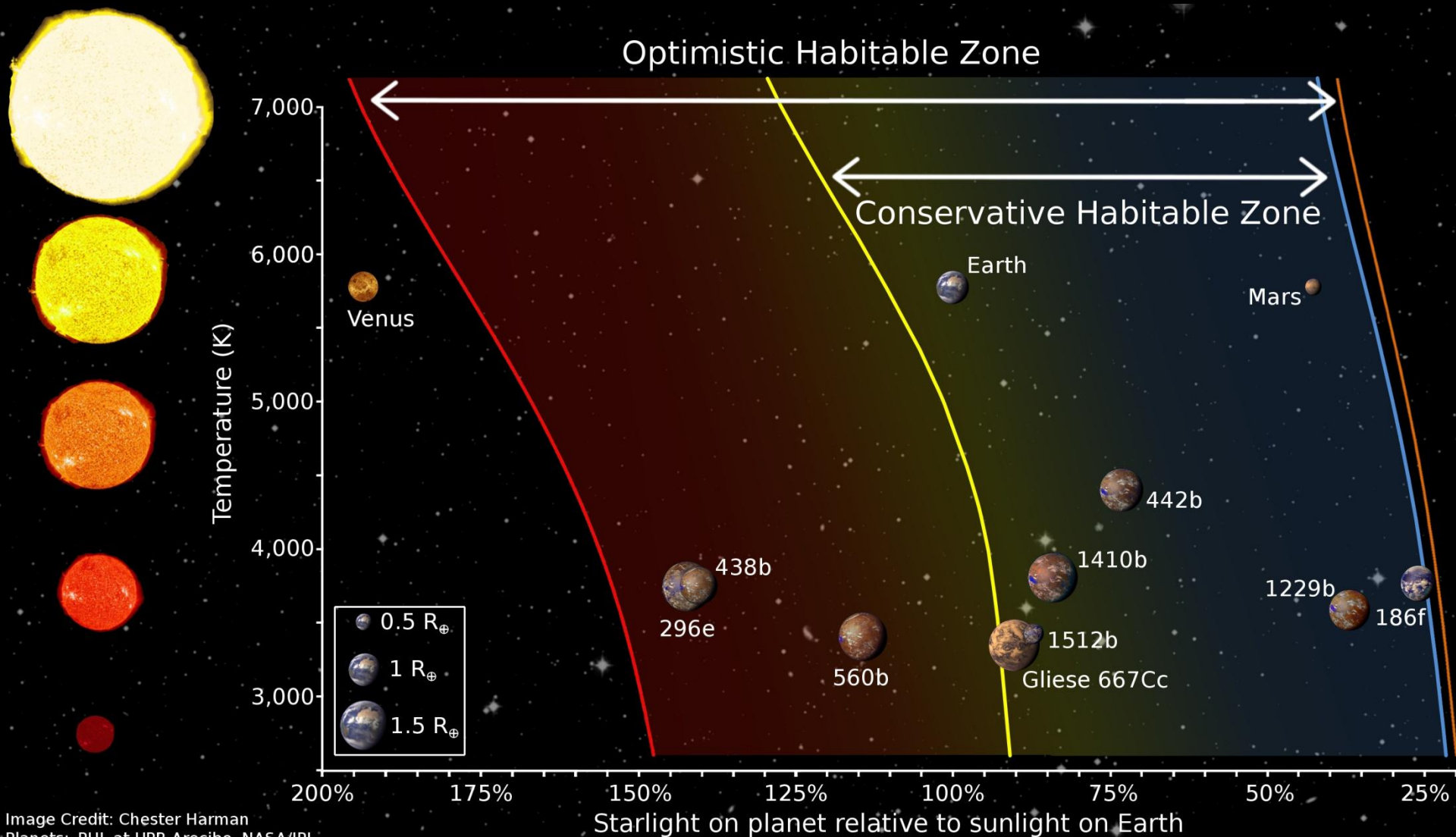
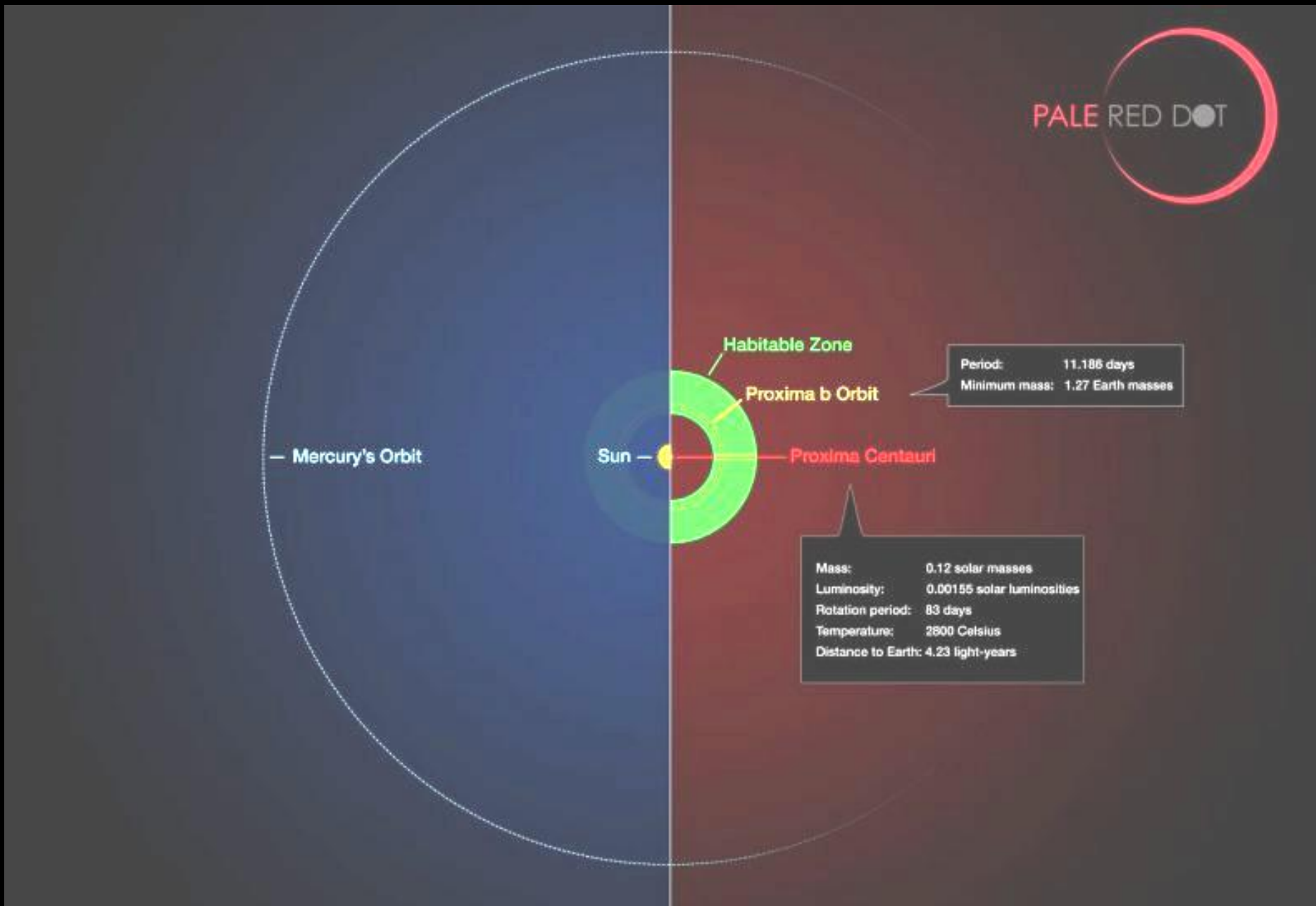


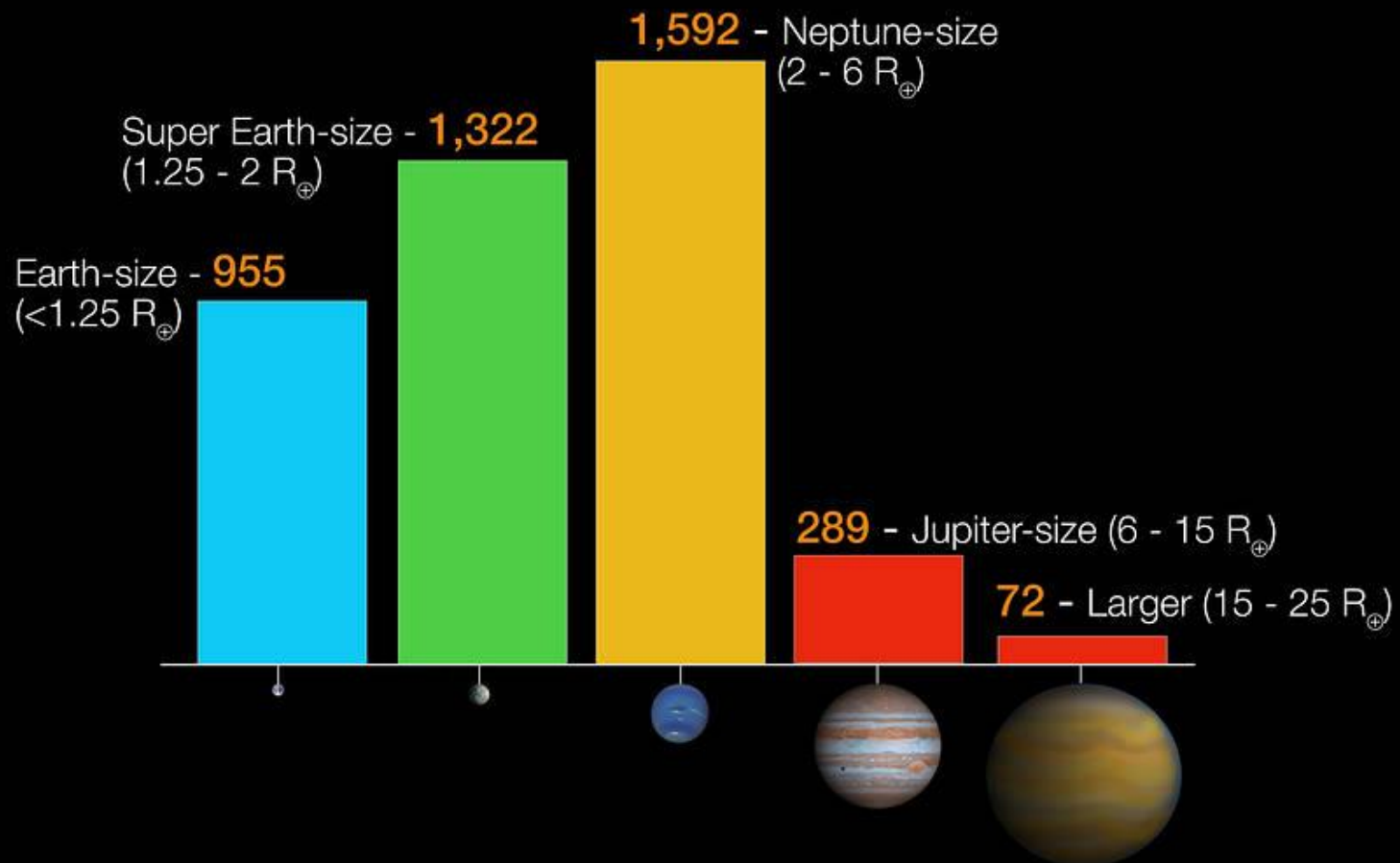
Image Credit: Chester Harman
Planets: PHL at UPR Arecibo, NASA/JPL

Exoplanetas na Zona Habitável – sistema Próxima Centauro



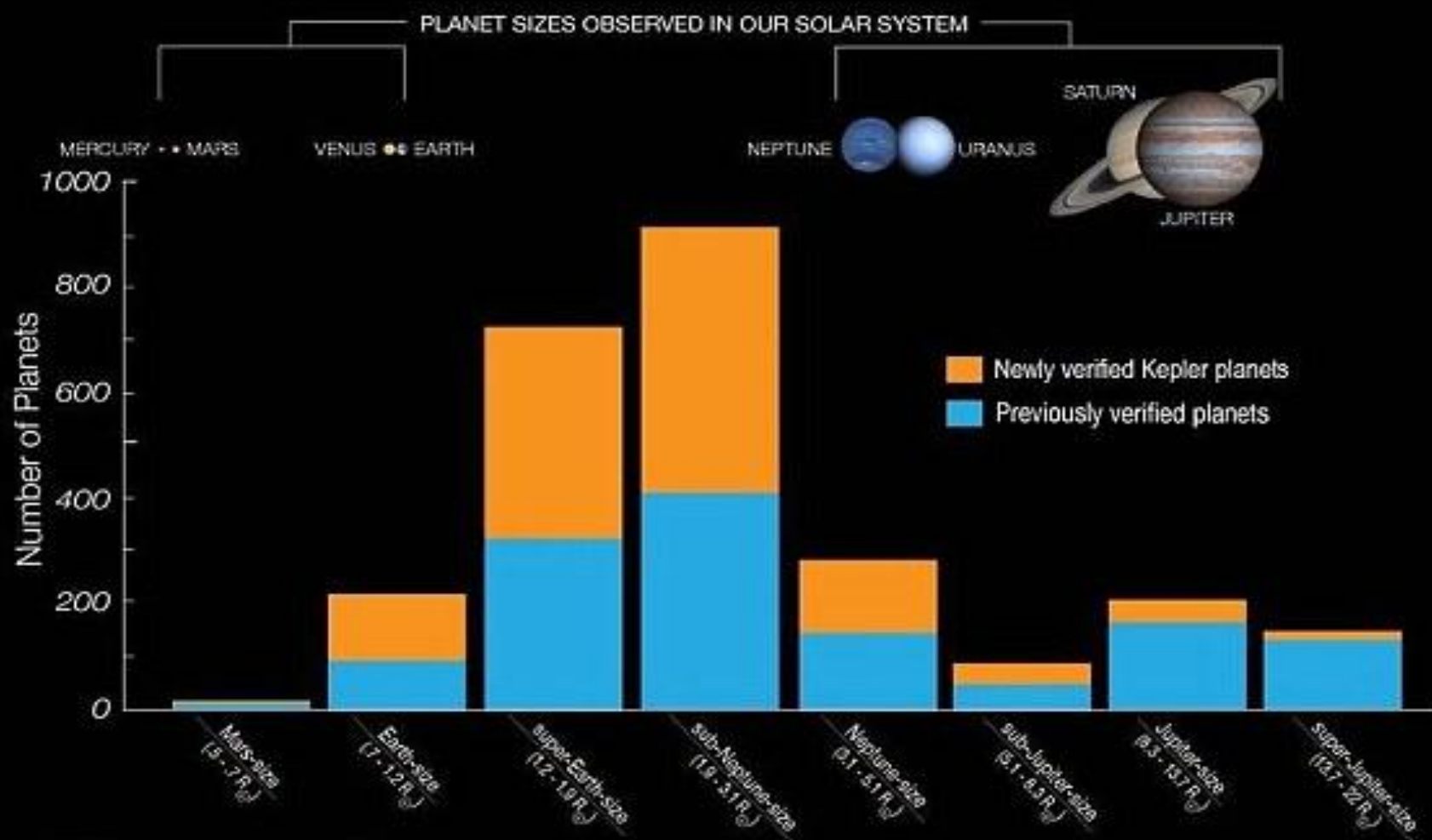
Dimensões prováveis - Missão Kepler

As of July 23, 2015



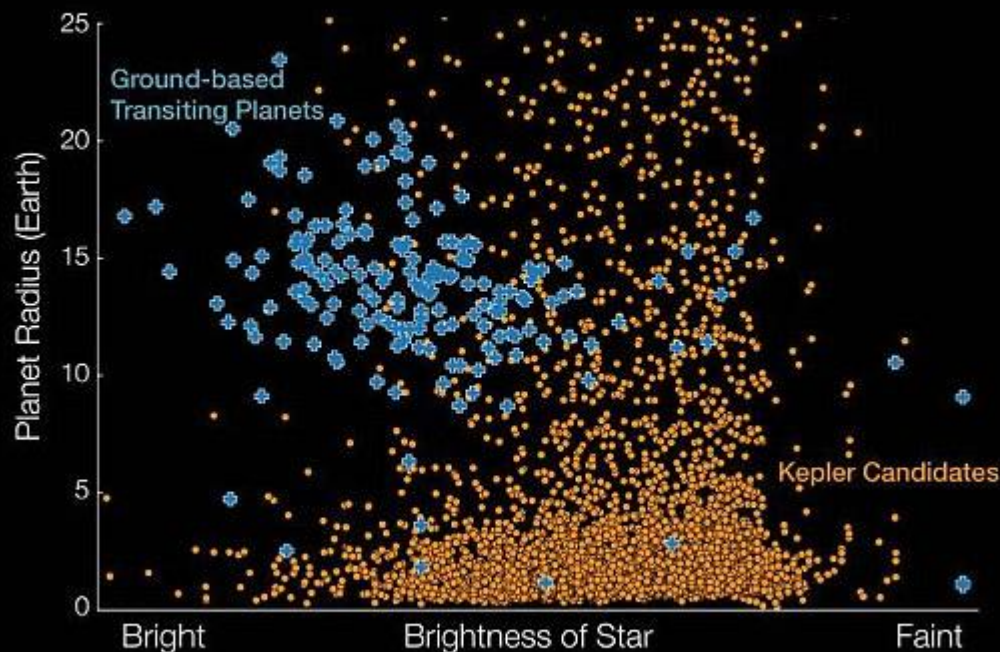
Known Planets by Size

As of May 10, 2016



Dimensões prováveis - Missão Kepler

The Kepler Follow-up Challenge



Follow-up observations are time and resource intensive!

O que nos dizem os fatos observados?

Poucos gigantes gasosos são júpiteres-quentes



Jupiter

Composed primarily of hydrogen and helium
5 AU from the Sun
Orbit takes 12 Earth years
Cloud top temperatures ≈ 130 K
Clouds of various hydrogen compounds
Radius = 1 Jupiter radius
Mass = 1 Jupiter mass
Average density = 1.33 g/cm^3
Moons, rings, magnetosphere



“Hot Jupiters” orbiting other stars

Composed primarily of hydrogen and helium
As close as 0.03 AU to their stars
Orbit as short as 1.2 Earth days
Cloud top temperatures up to 1,300 K
Clouds of “rock dust”
Radius up to 1.3 Jupiter radii
Mass from 0.2 to 2 Jupiter masses
Average density as low as 0.2 g/cm^3
Moons, rings, magnetospheres: unknown

O que nos dizem os fatos observados?

Sobre a formação de sistemas planetários

Podemos explicar as peculiaridades das órbitas observadas?

Precisamos modificar a teoria de formação do Sistema Solar?

O que nos dizem os fatos observados?

Revisando a Teoria Nebular

- Essa teoria preve que planetas de grande massa como Júpiter não deveriam se formar na região interna a 5 UA (onde apenas rochas e metais se condensam).
- A presença de “júpiteres quentes” (gigantes gasosos muito próximos de suas estrelas) sugere o mecanismo de “migração planetária” (interação gravitacional desloca planetas na direção da estrela).

Modificando a Teoria Nebular

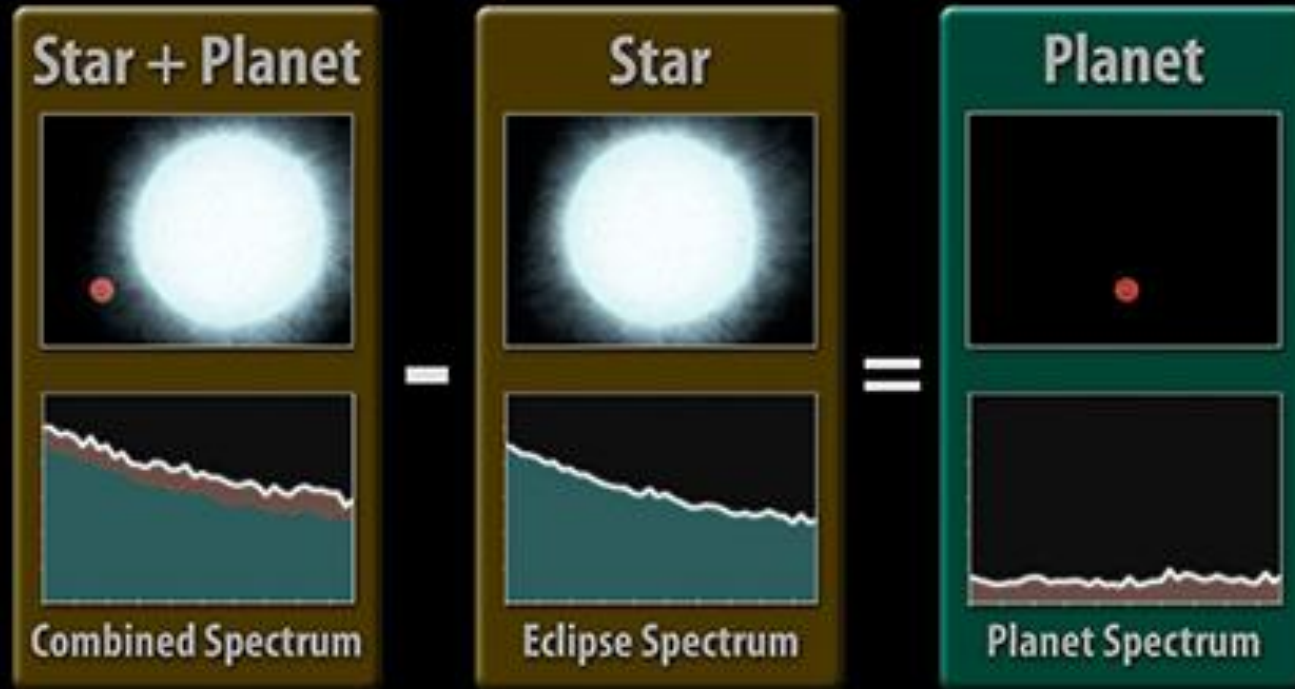
- Observações sugerem que a teoria nebular parece inadequada para explicar os sistemas planetários conhecidos.
- Migração planetária e encontros gravitacionais devem ser mais importantes do que se pensava.

O que nos dizem os fatos observados?

Exoplanetas são comuns ou raros?

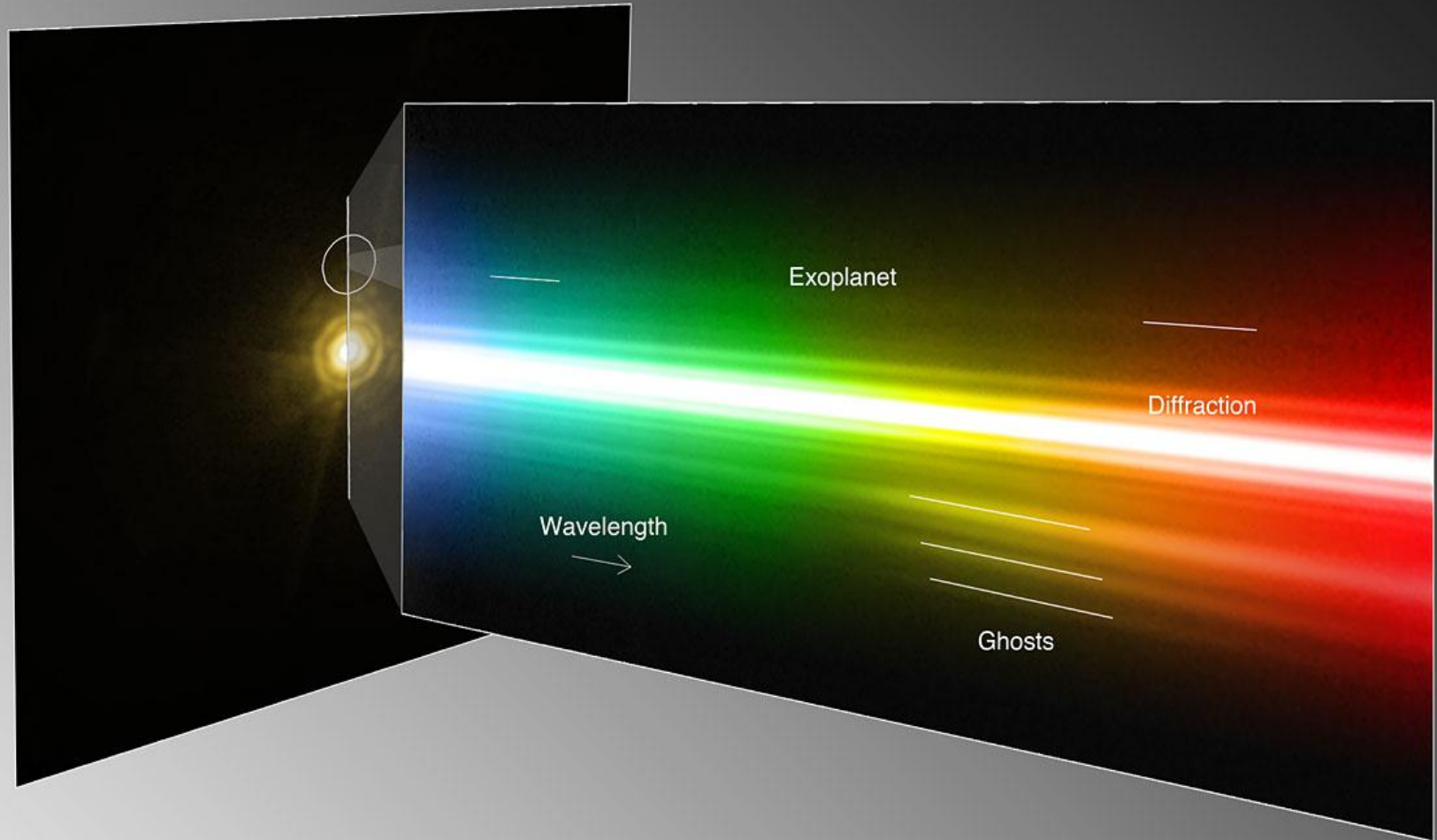
- Uma em cada 10 estrelas examinadas tinham exoplanetas.
- As demais podem ter exoplanetas pequenos que ainda não podem ser identificados com a instrumentação e as técnicas atuais.

Fotometria: extraíndo espectro de exoplaneta

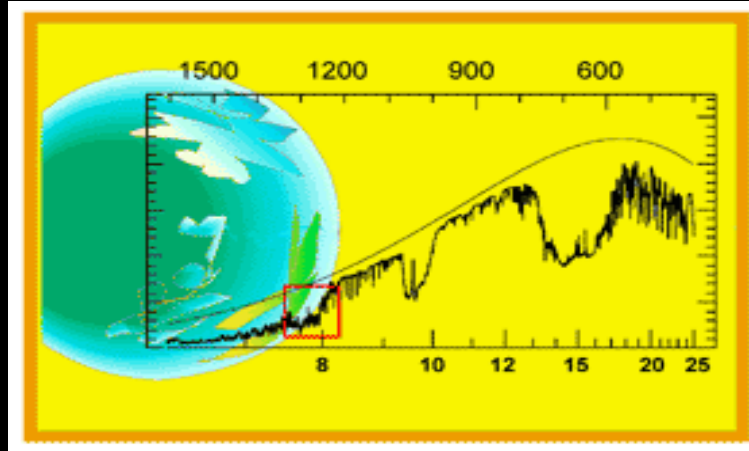


Isolating a Planet's Spectrum

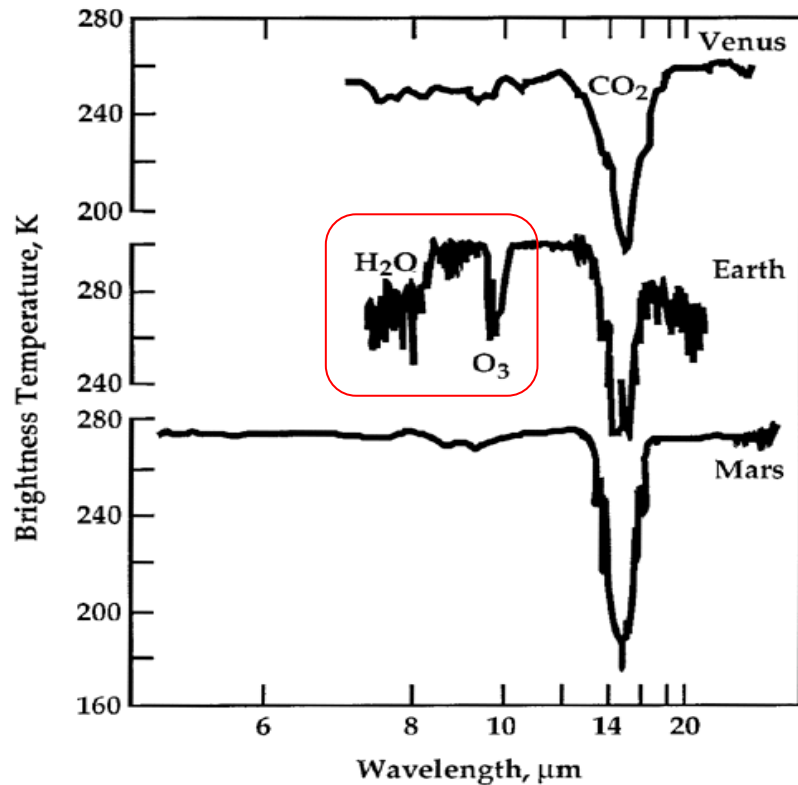
Fotometria: extraindo espectro de exoplaneta



Procura de planetas com alguma espécie de vida



Fonte: Christopher W. Churchill



Espectro simulado

