

**PLANETAS  
EXTRASSOLARES  
(Exoplanetas)**

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

Showing 4000 planets / 2990 planetary systems / 652 multiple planet systems

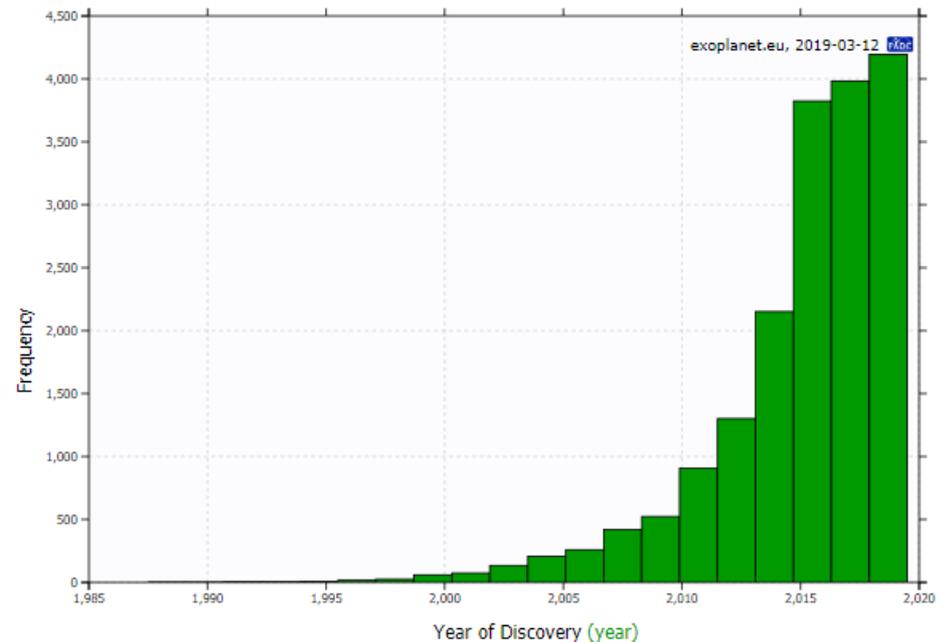
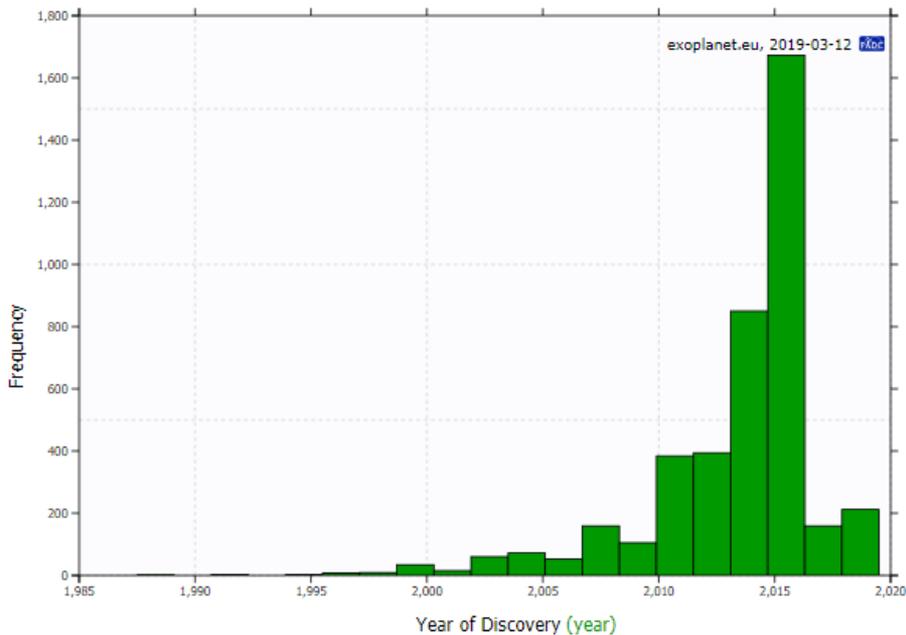
All fields

Show  entries

Planet Search

Show / hide columns

Planet	Mass ( $M_{Jup}$ )	Radius ( $R_{Jup}$ )	Period (day)	$a$ (AU)	$e$	$i$ (deg)	Ang. dist. (arcsec)	Discovery	U
EPIC 203868608 (AB) b	25.6	2.49	4.451	19.3	0.3227	—	—	2019	2019
EPIC 203868608 (AB) a	23.2	2.75	4.451	19.3	0.3227	—	—	2019	2019
EP212 b	47.8	0.819	5.169884	0.0621	0.1325	84.11	—	2019	2019
EPIC 219388192 b	36	0.846	5.292569	0.0593	0.1893	89.63	—	2016	2019
WASP-74 b	0.826	1.404	2.1377445	0.03443	0	79.86	—	2014	2019
GJ 436 b	0.07	0.38	2.64394	0.02887	0.1912	85.8	0.00283	2004	2019



## 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** (Ofiúco, 1916):



Sua conclusão: o balanço (oscilação) causado por um planeta com cerca 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.

**Icy 'Super-Earth' Exoplanet Spotted Around Nearby Barnard's Star . November 14, 2018**

Fonte: Science & Astronomy

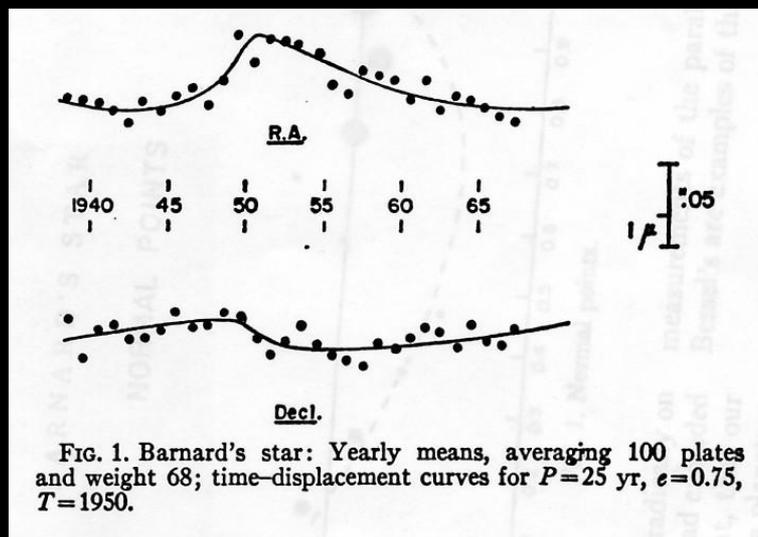


FIG. 1. Barnard's star: Yearly means, averaging 100 plates and weight 68; time-displacement curves for  $P=25$  yr,  $e=0.75$ ,  $T=1950$ .

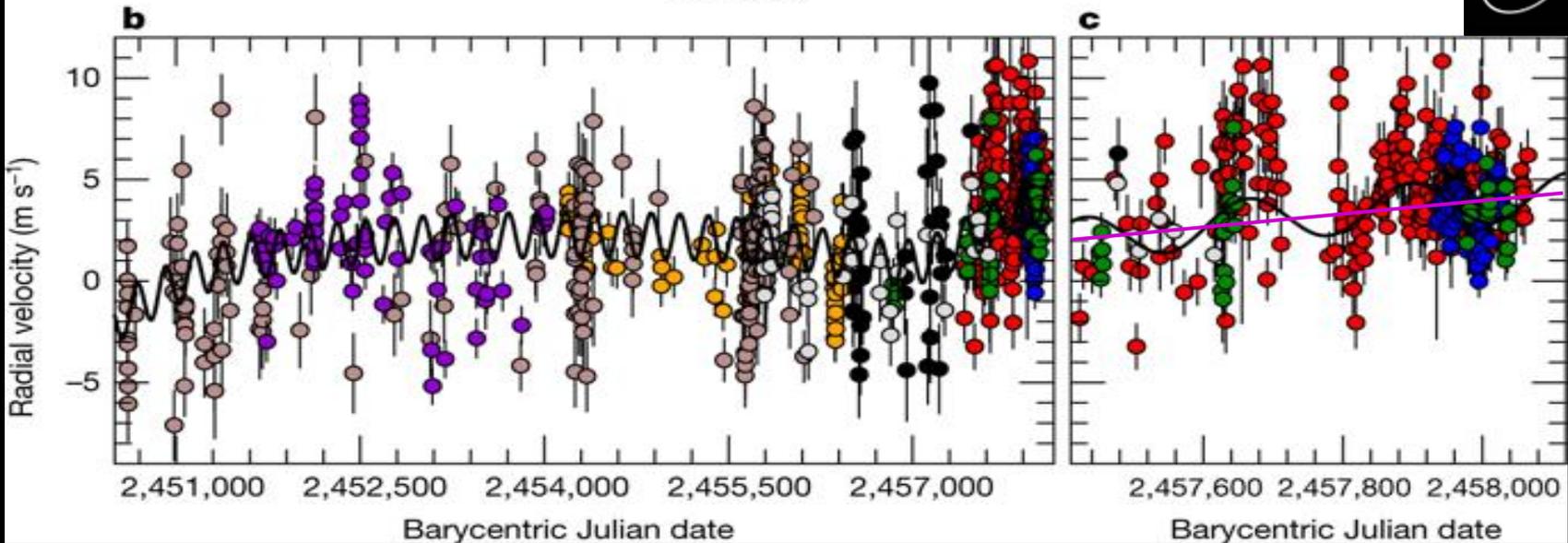
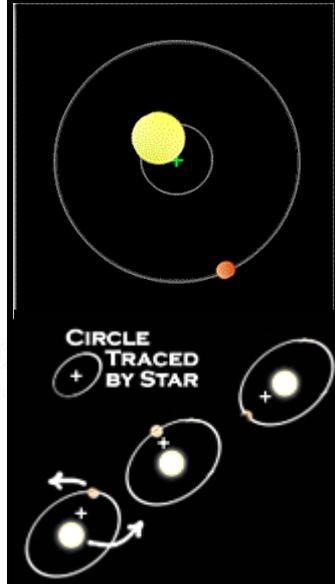
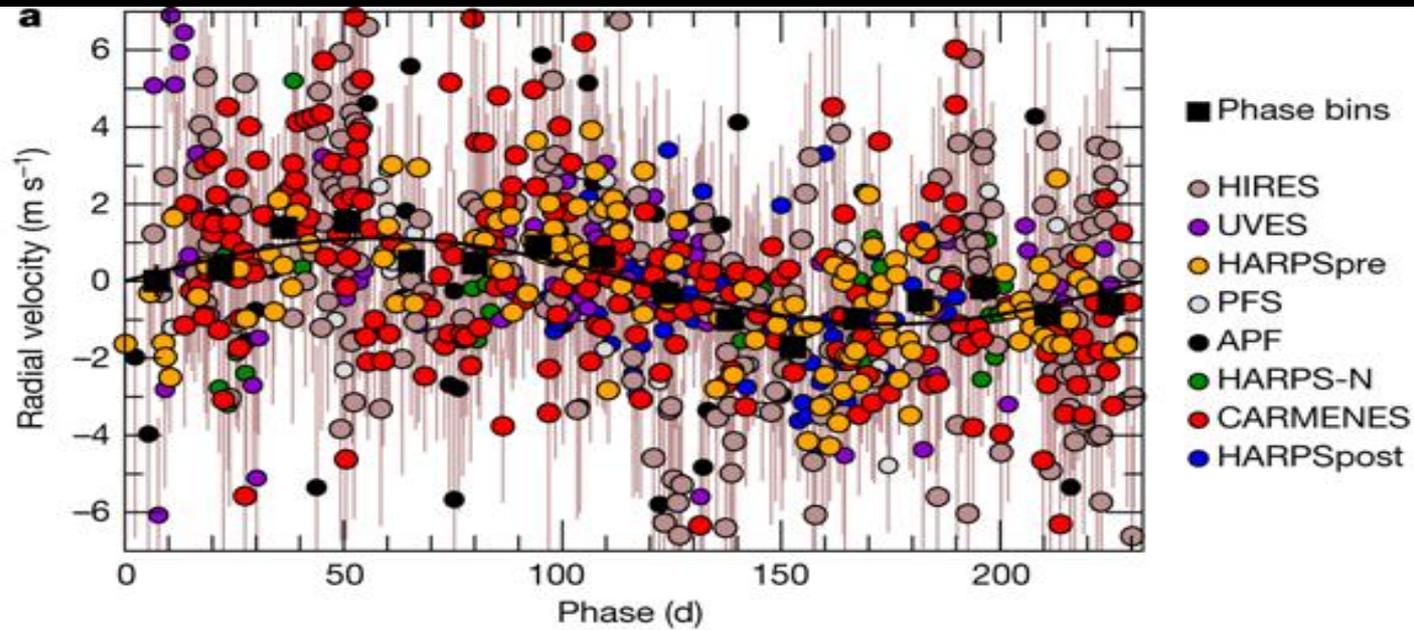
(Home) (Home-2) (Site) (Site-Map) (Site-Map-2) (Home-Board) (Search) (Amazon)

## 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 the 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

# Confirmação ...



# Confirmação ...

MENU ▾

**nature**  
International Journal of Science



Stellar parameter	Value
Spectral type	M3.5 V
Mass ( $M_{\odot}$ )	$0.163 \pm 0.022$
Radius ( $R_{\odot}$ )	$0.178 \pm 0.011$
Luminosity ( $L_{\odot}$ )	$0.00329 \pm 0.00019$
Effective temperature (K)	$3,278 \pm 51$
Rotation period (d)	$140 \pm 10$
Age (Gyr)	7-10
Planetary parameter	Value
Orbital period (d)	$232.80^{+0.38}_{-0.41}$
Radial-velocity semi-amplitude ( $\text{m s}^{-1}$ )	$1.20 \pm 0.12$
Eccentricity	$0.32^{+0.10}_{-0.15}$
Argument of periastron ( $^{\circ}$ )	$107^{+19}_{-22}$
Mean longitude at BJD 2,455,000.0 ( $^{\circ}$ )	$203 \pm 7$
Minimum mass, $M \sin i$ ( $M_{\oplus}$ )	$3.23 \pm 0.44$
Orbital semi-major axis (AU)	$0.404 \pm 0.018$
Irradiance (Earth units)	$0.0203 \pm 0.0023$
Maximum equilibrium temperature (K)	$105 \pm 3$
Minimum astrometric semi-amplitude, $\alpha \sin i$ (mas)	$0.0133 \pm 0.0013$
Angular separation (mas)	$221 \pm 10$

# Conceituação

## 1o. problema:

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:

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

# 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 ( $r = 4,3 \cdot 10^{16} \text{ m}$ ):  $L_P/L_S = 7 \cdot 10^{-19}$**

## 2o. problema:

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**

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

# Conceituação

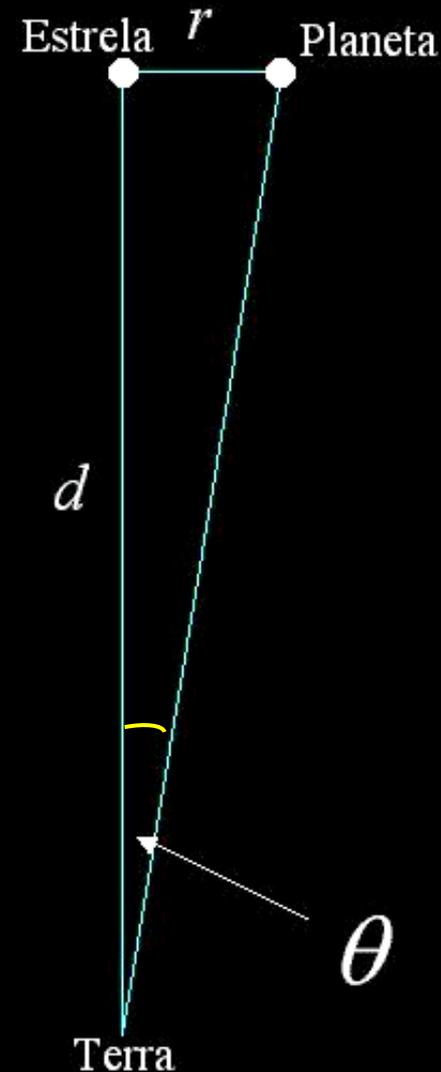
Exemplo: planeta tipo Júpiter, orbitando estrela a 5 UA, distante 30 a.L.

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

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

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

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



# 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...)

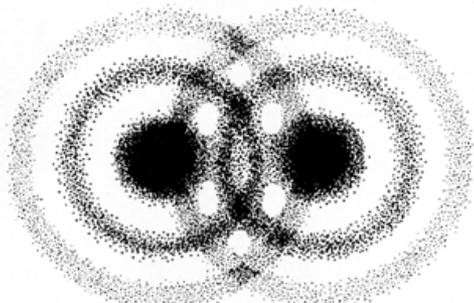
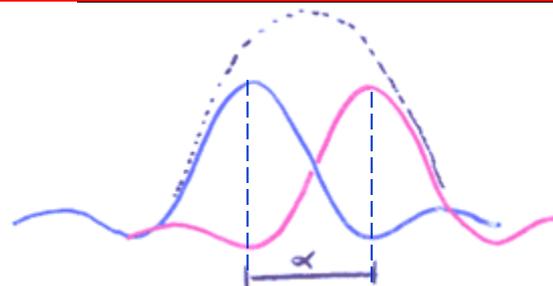


Imagem (negativo) de 2 fontes pontuais distantes, vistas através de uma fenda circular.



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

$d$  = diâmetro do telescópio

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"

# Telescópios ópticos

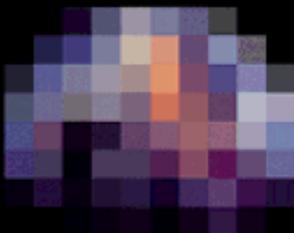
**Pouquíssima luz exige:**

- ➔ **telescópio grande + óptica excelente**
- ➔ **detector de alta sensibilidade e elevada eficiência**
- ➔ **espectro de alta resolução**
- ➔ **técnicas sofisticadas de imageamento**
- ➔ **descoberta: telescópios espaciais**  
(pequenos telescópios + CCDs de alta sensibilidade detectam variações de luz)
- ➔ **observação posterior: telescópios de solo**

# Telescópios ópticos e CCDs

Tamanho  
do  
pixel



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

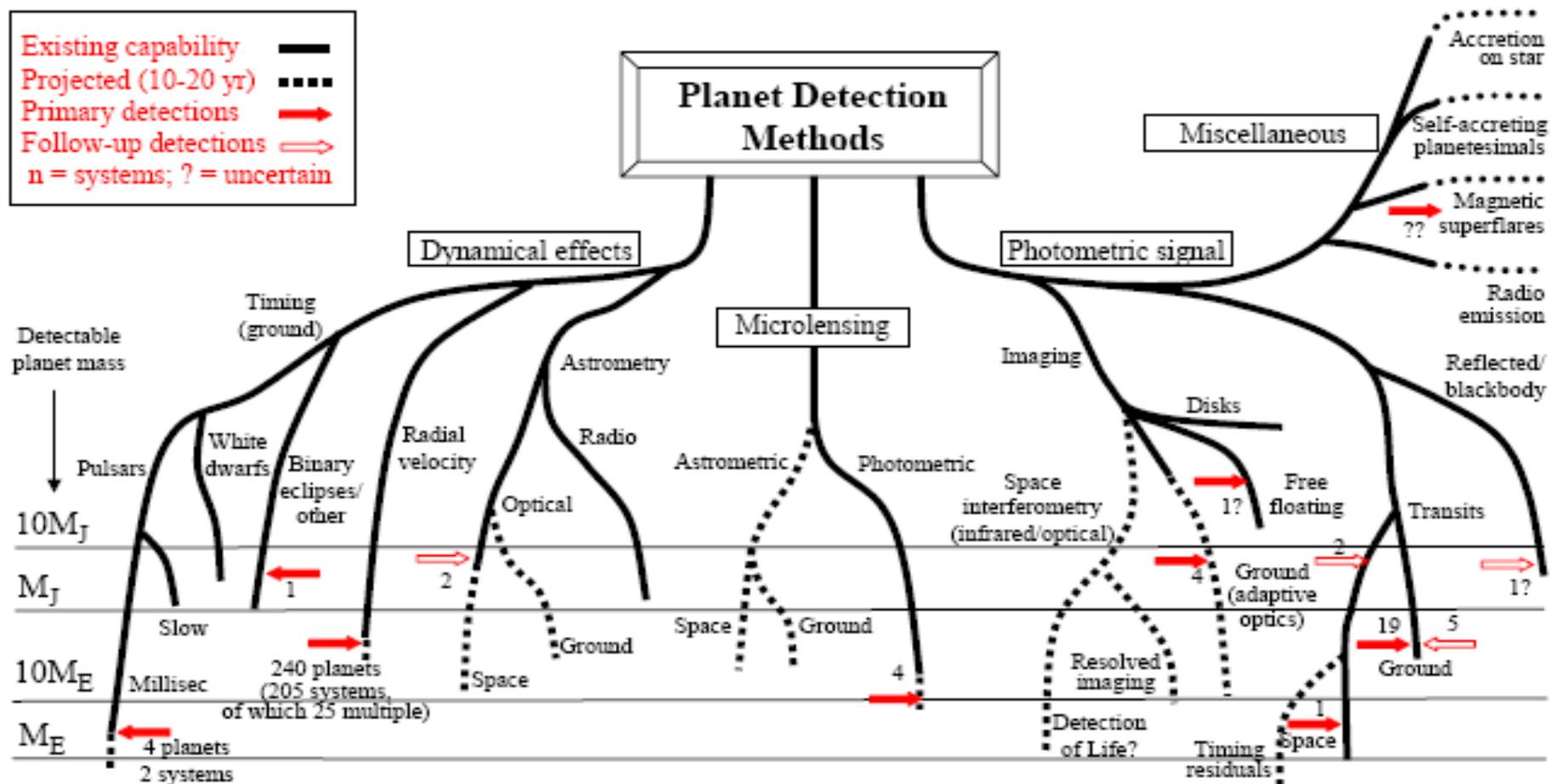
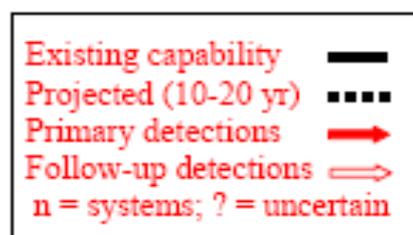


Tamanho  
do  
Telescópio

# Métodos de detecção

## Planet Detection Methods

Michael Perryman, Rep. Prog. Phys., 2000, 63, 1209 (updated 3 October 2007)



# Métodos de detecção

Velocidade Radial

Astrometria

Trânsitos

“Pulsar timing”

Lente Gravitacional

Configuração de Disco

Astrometria Diferencial

Luz Refletida

Luz Transmitida

Emissões Aurorais

Emissões Rádio

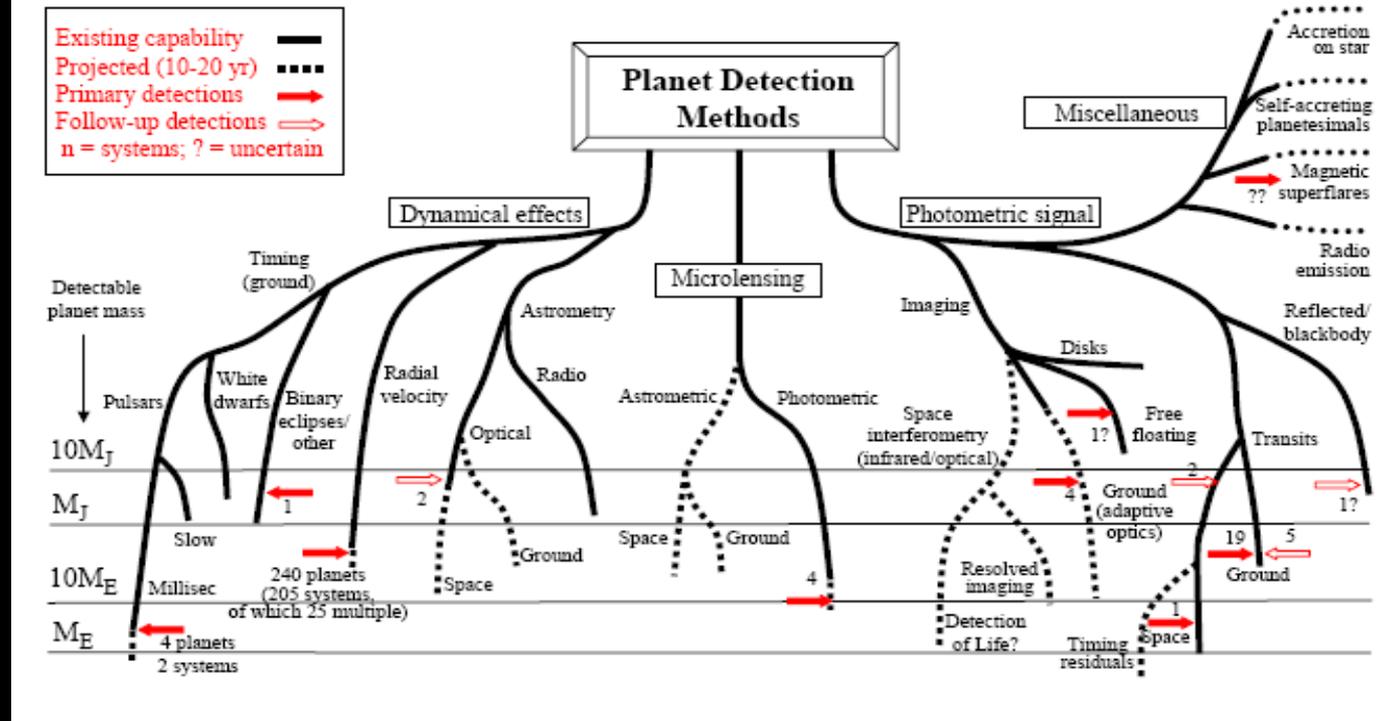
Sinais Antropogênicos

Imageamento por Coronógrafo

Imageamento por Interferometria

## Planet Detection Methods

Michael Perryman, Rep. Prog. Phys., 2000, 63, 1209 (updated 3 October 2007)



# 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.

---

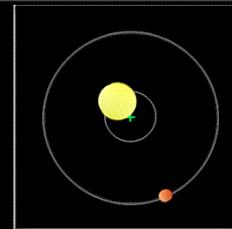
## **Imageamento**

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



Velocidade Doppler

Radial Velocities

Astrometria

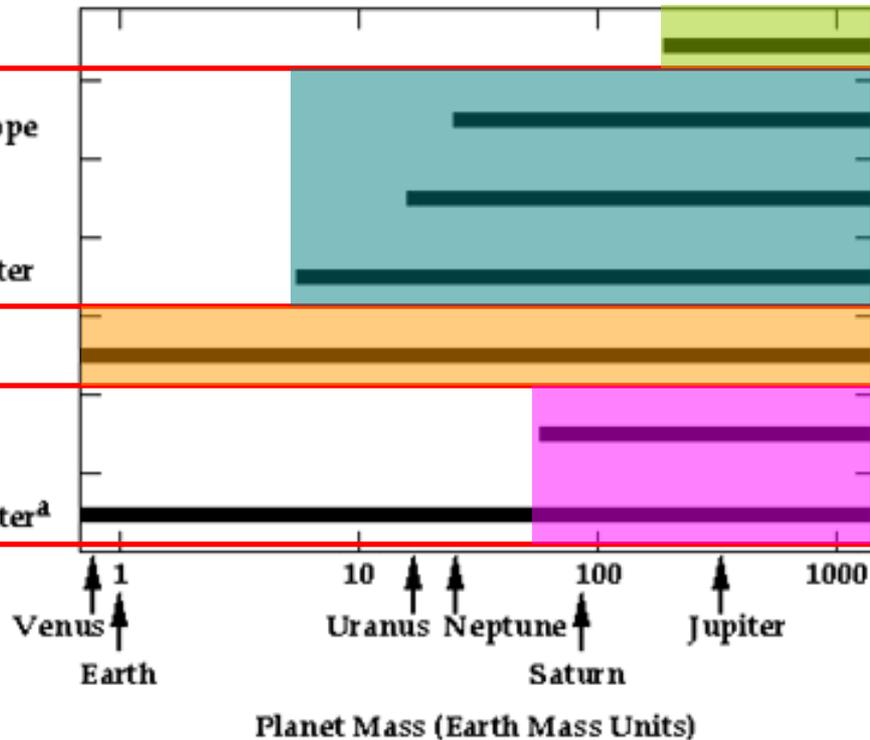
Astrometry:  
One 10-m Telescope  
Palomar Testbed  
Interferometer  
New Interferometer

Lente gravitacional

Microlensing

Imageamento

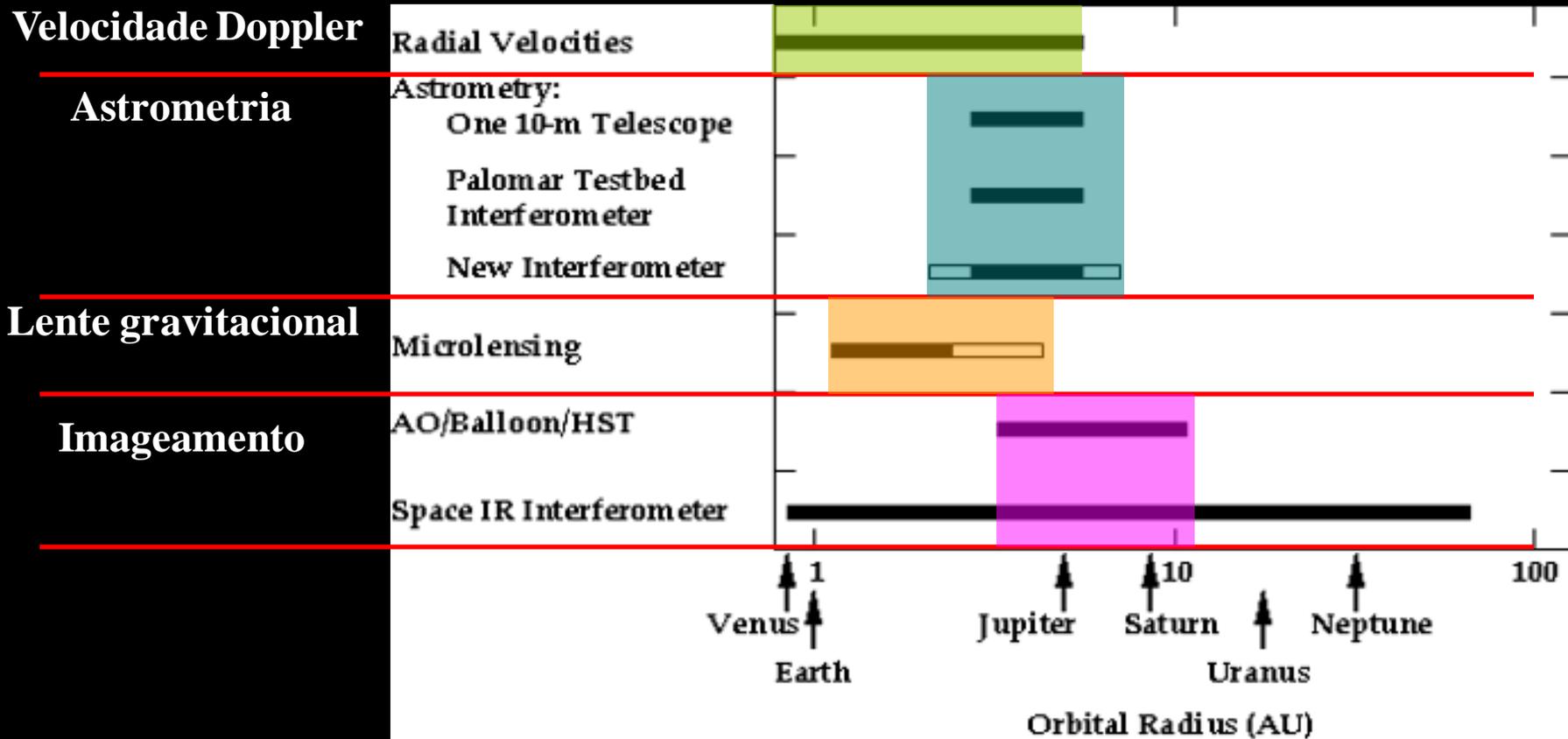
AO/Balloon/HST<sup>a</sup>  
Space IR Interferometer<sup>a</sup>



<sup>a</sup> The direct imaging methods are sensitive to planet size, albedo and temperature, rather than mass.

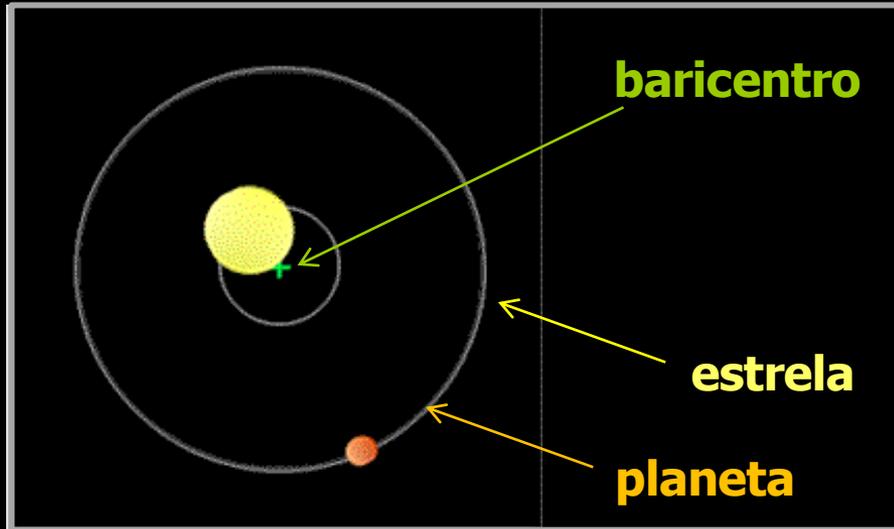
# Comparando os métodos:

## Critério: órbita

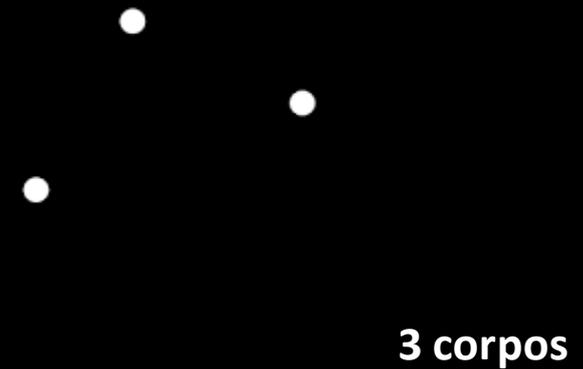


# Métodos indiretos de detecção: Astrometria

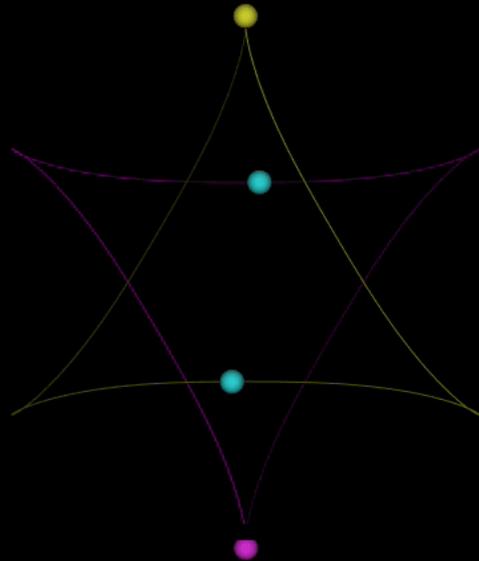
Estrela move-se em torno do centro de massa do sistema



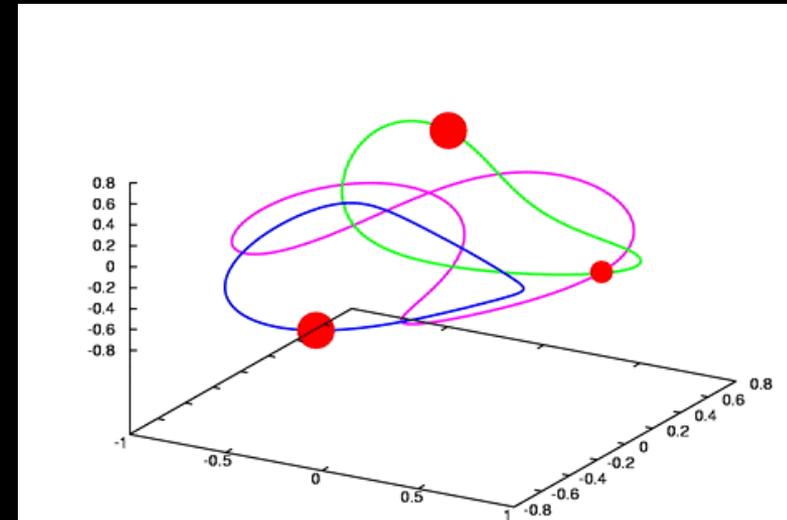
Alguns exemplos



3 corpos



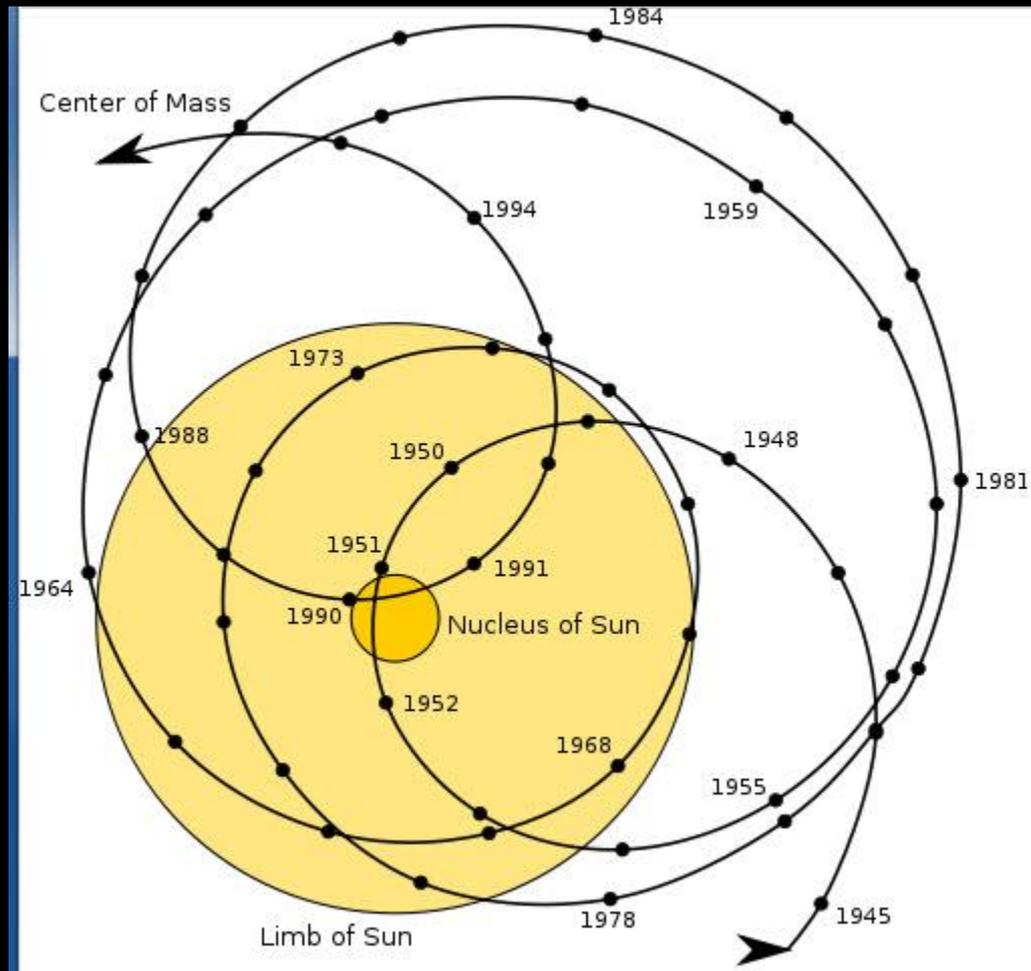
4 corpos



# 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 ( $\sim 32$  a.l.) na direção perpendicular ao plano da eclíptica ( $i = 0^\circ$ ).
- Astrometria apresenta precisão bem maior se observação for feita do espaço.



Fonte: <https://skydoginstitute.com/2011/05/01/the-mass-and-the-center-the-2011-piscesaries-stellium-and-uranus-in-aries-2/>

# Métodos indiretos de detecção: Astrometria

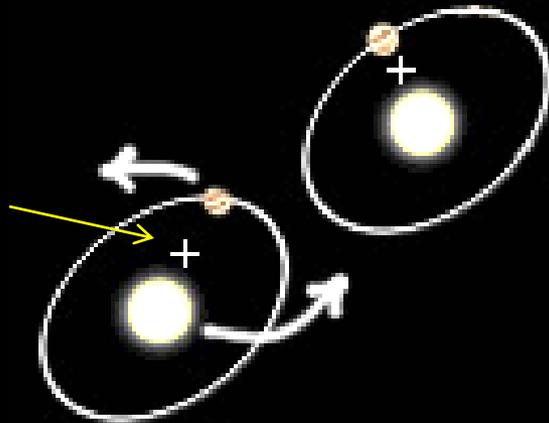
Estrela move-se em torno do centro de massa do sistema

Visão nas proximidades da estrela

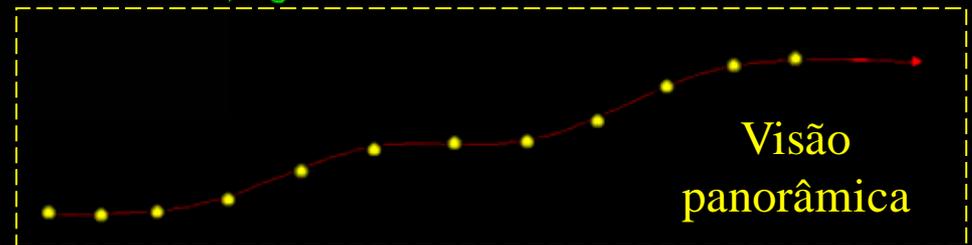
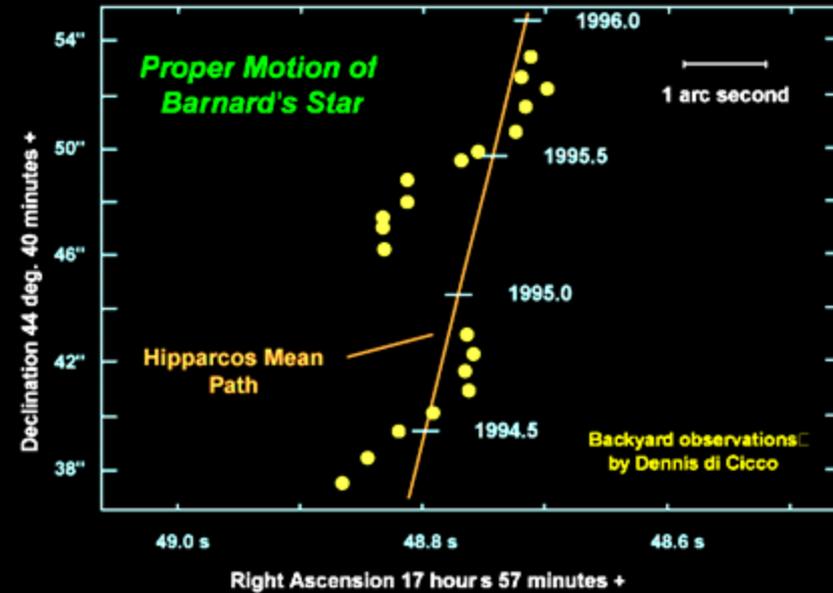
CIRCLE TRACED BY STAR



Centro de massa

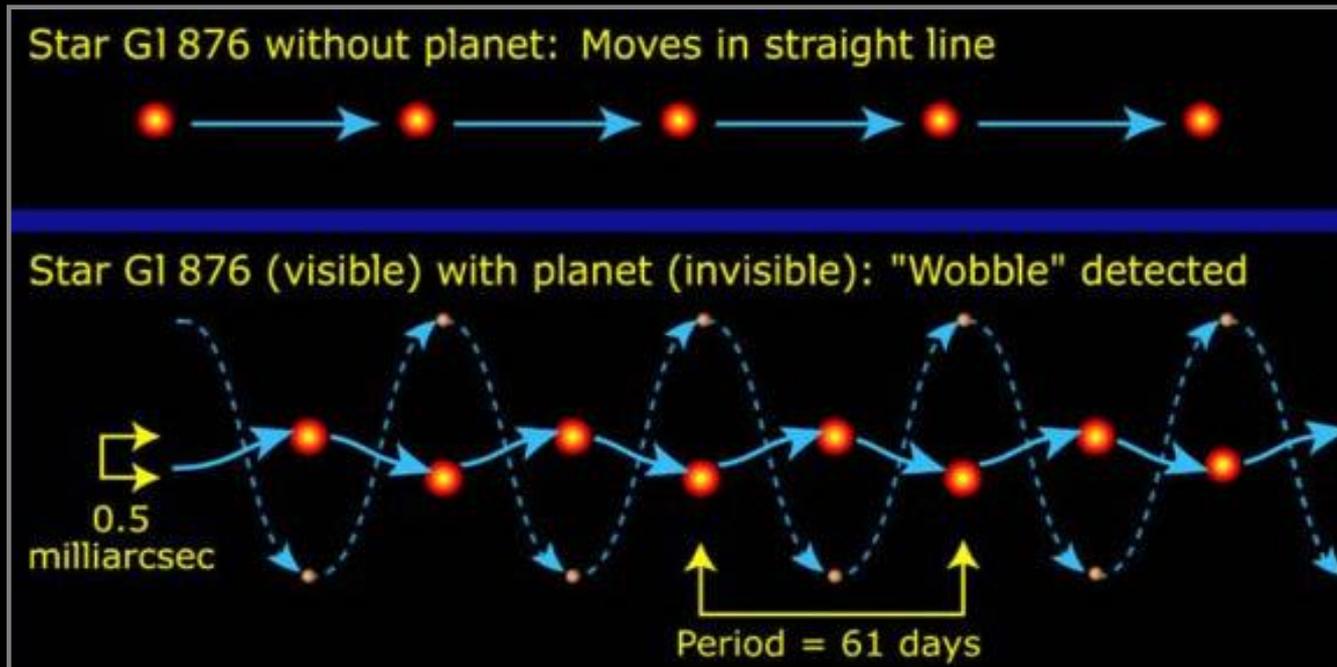


Quanto maior for o planeta, mais pronunciado será o efeito



# Métodos indiretos de detecção: Astrometria

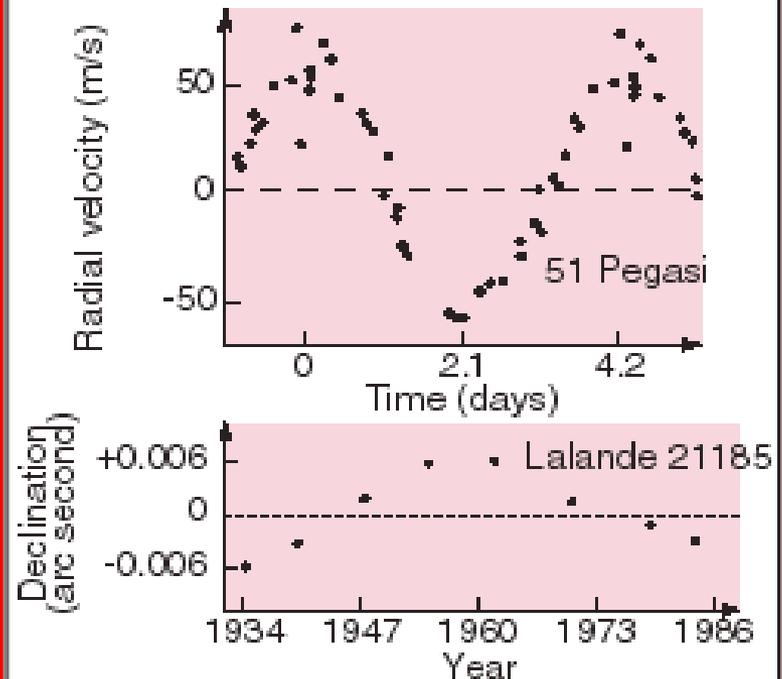
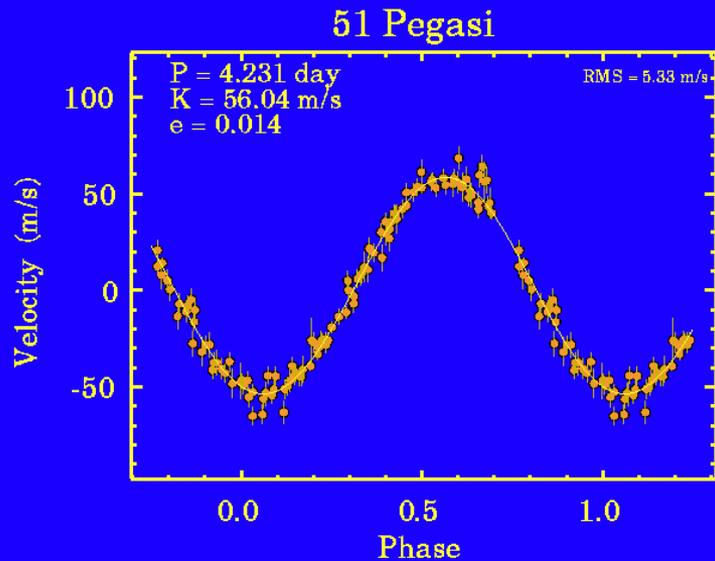
Estrela move-se em torno do centro de massa do sistema



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

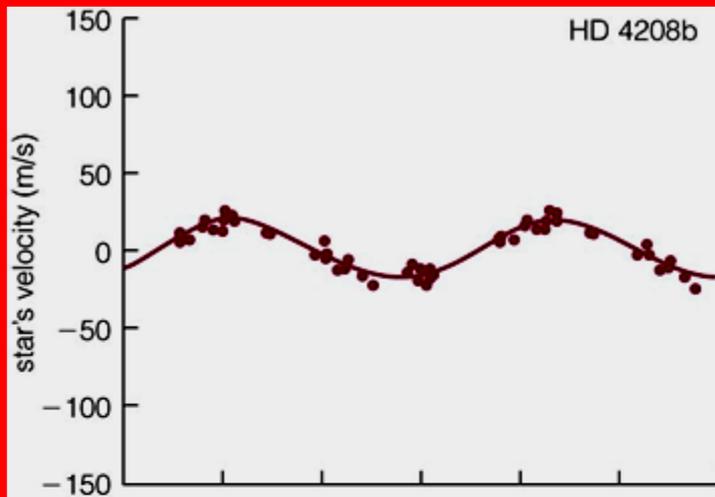
# Métodos indiretos de detecção: Astrometria

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

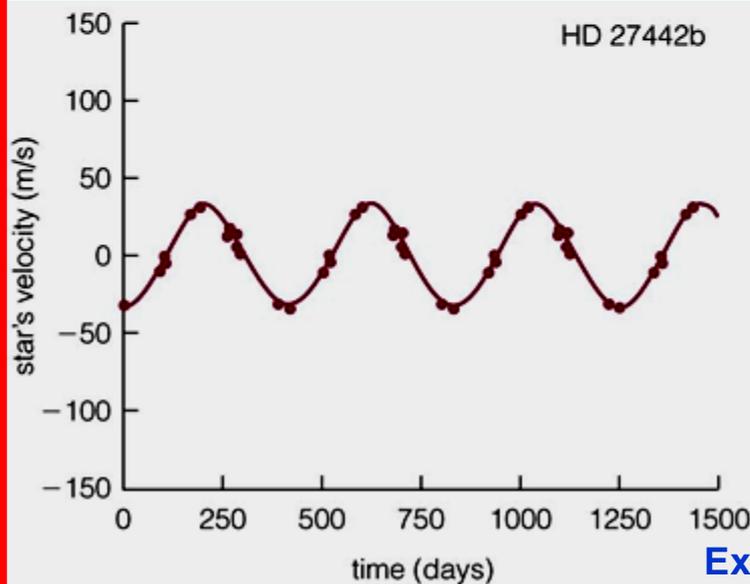
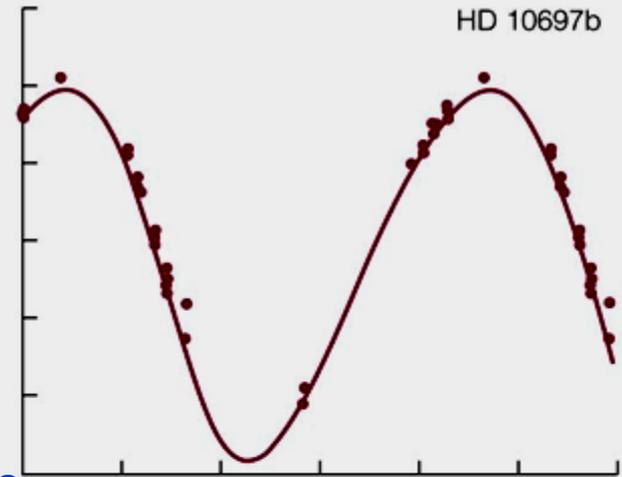


# Métodos indiretos de detecção: Astrometria

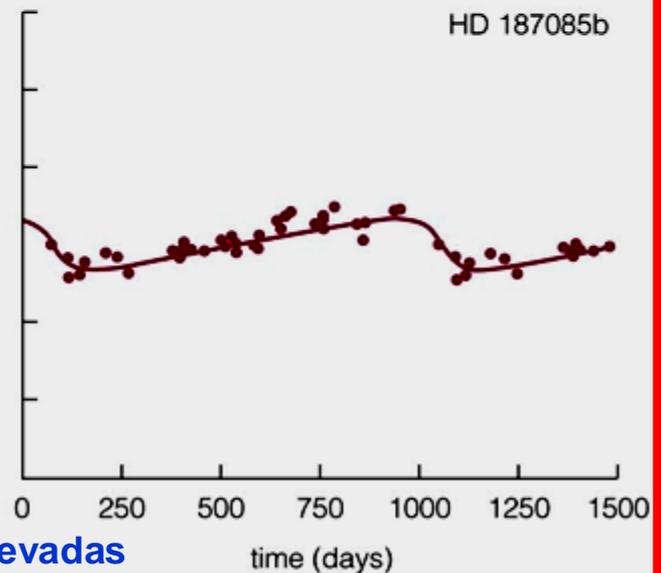
Estrela move-se em torno do centro de massa do sistema



Massas elevadas



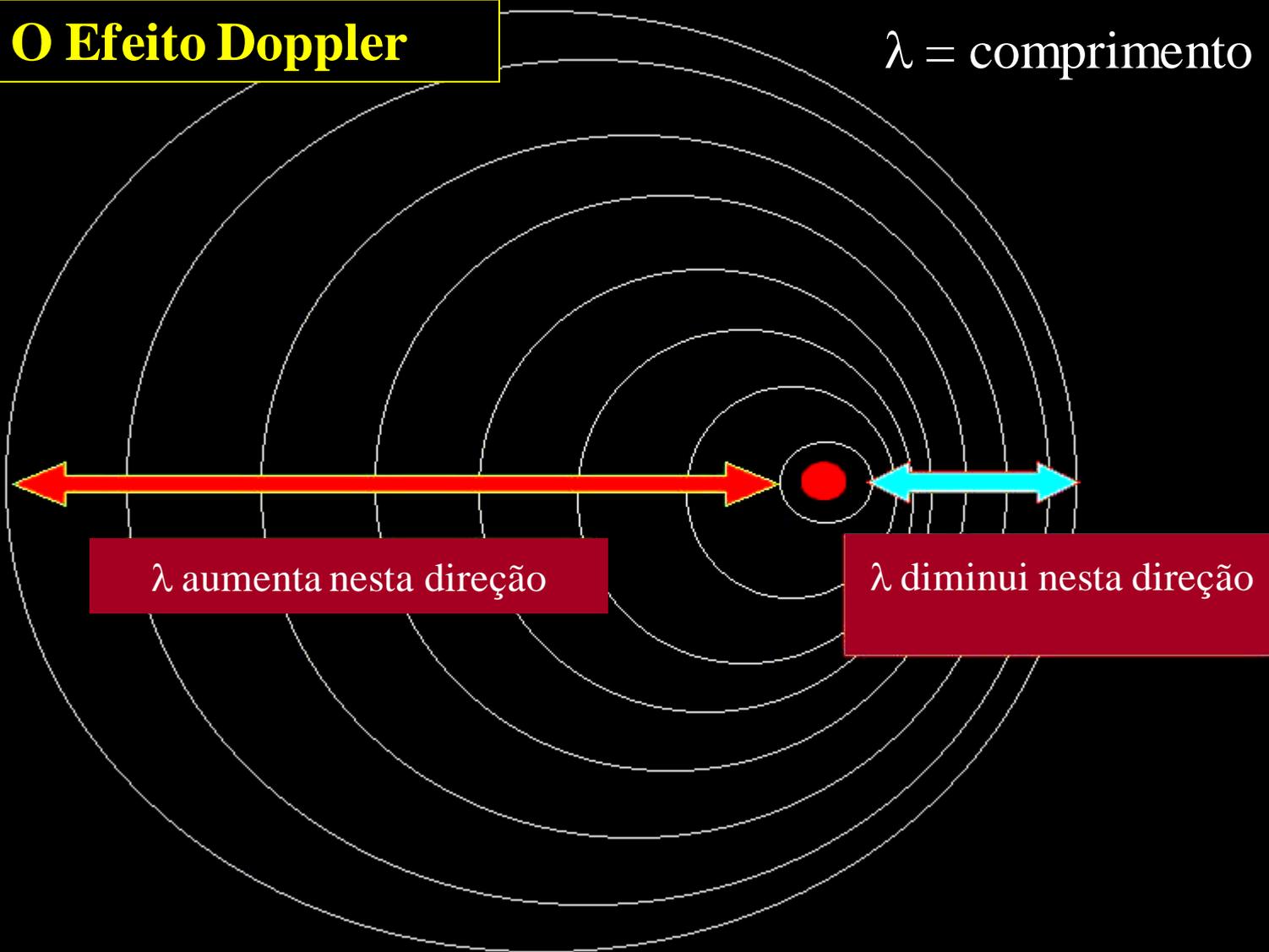
Excentricidades elevadas



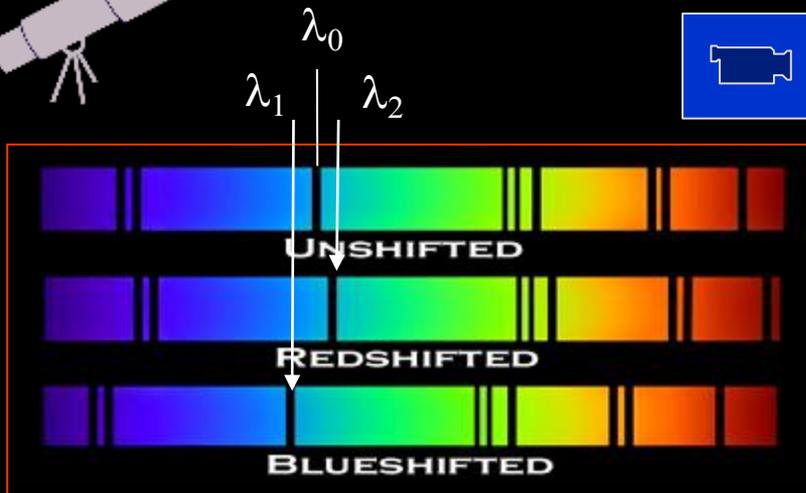
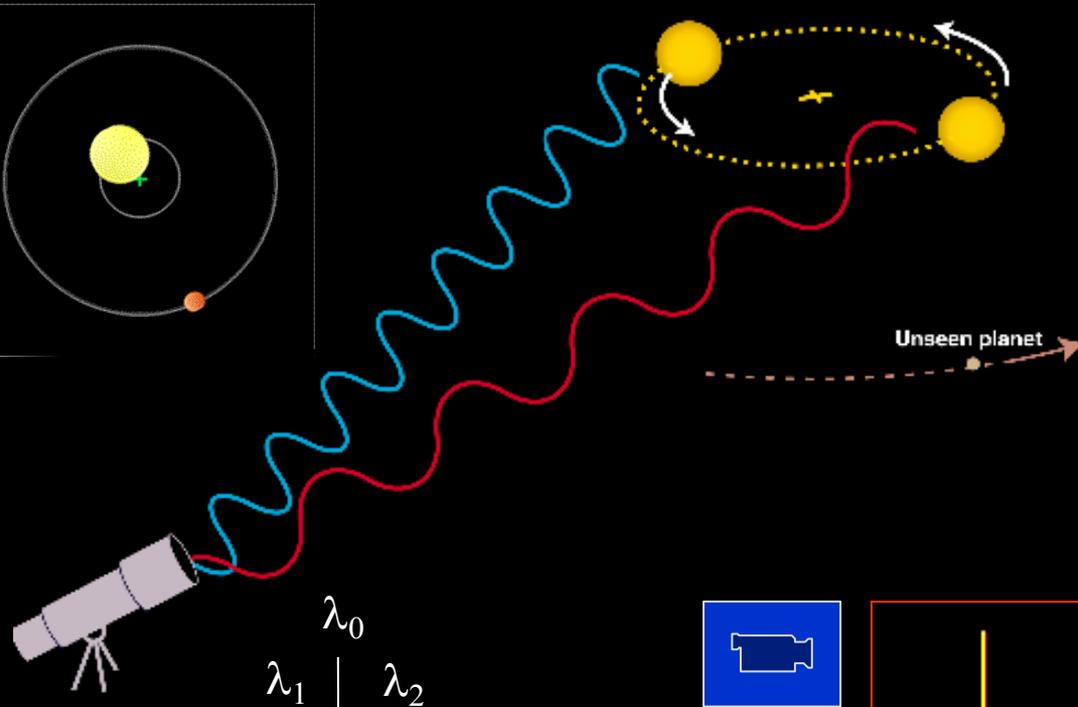
# Métodos indiretos de detecção

## O Efeito Doppler

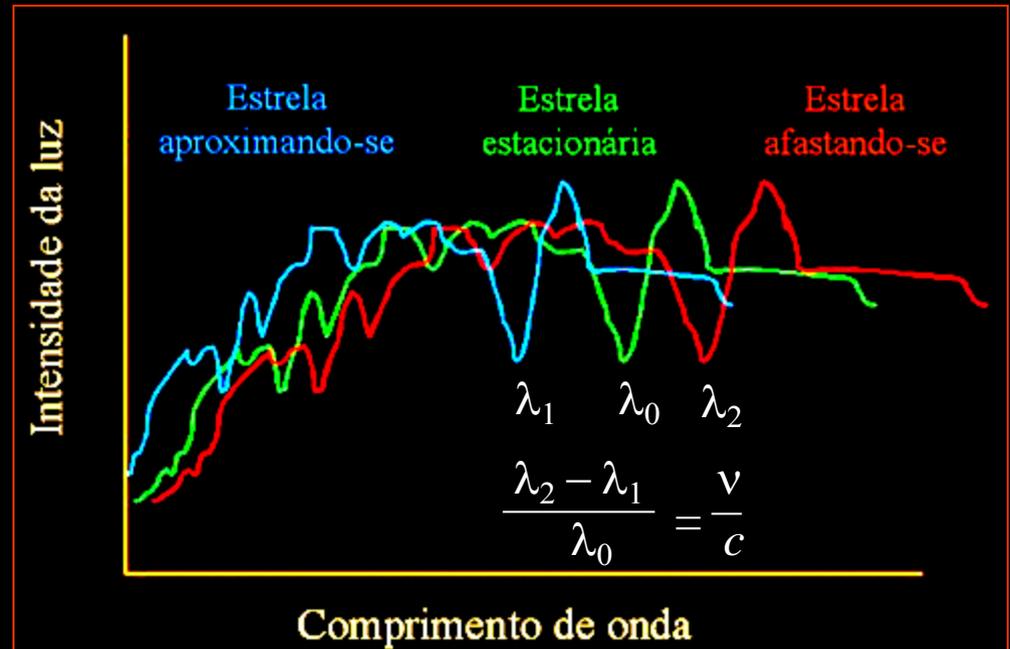
$\lambda$  = comprimento de onda



# Métodos indiretos de detecção: Velocidade Radial

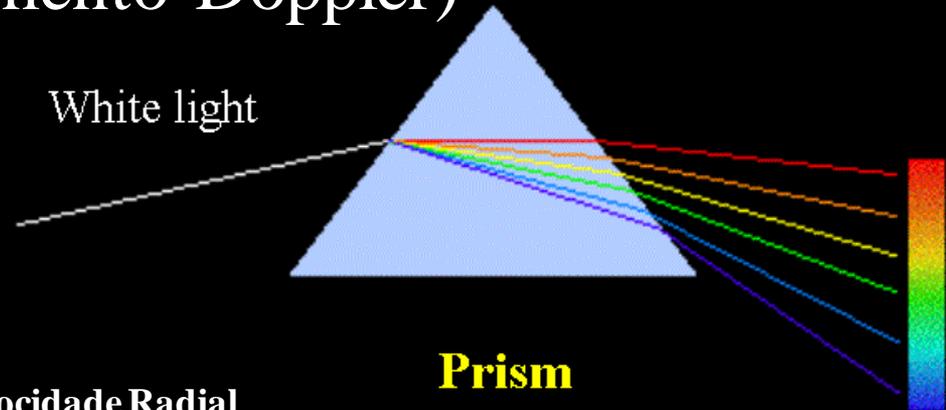


**Quanto maior for o planeta, mais pronunciado será o efeito**



# 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

Prism

Comprimento de onda da luz como medido em laboratório (referência)

Velocidade da luz

Limite da tecnologia atual:

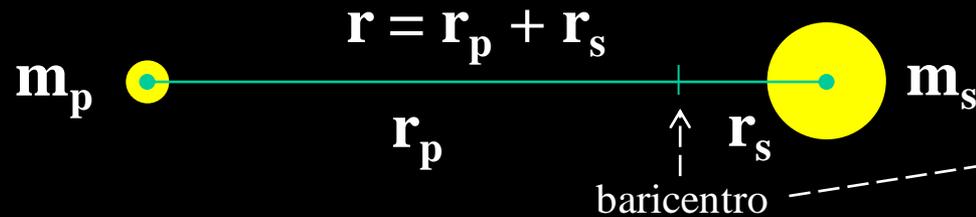
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx 10^{-8}$$



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

10,8 km/h

# Movimento Doppler



Equacionando as acelerações gravitacional e centrípeta:

Planeta:

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

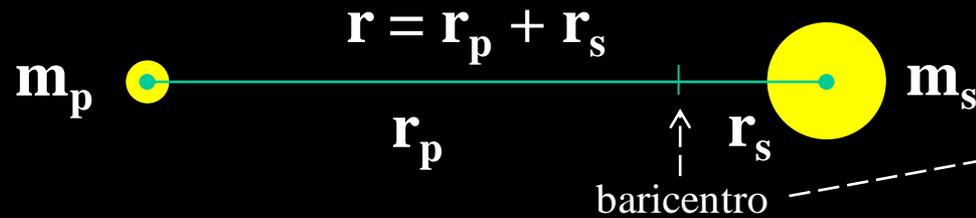
Estrela:

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

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 centrípeta:

Planeta:

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

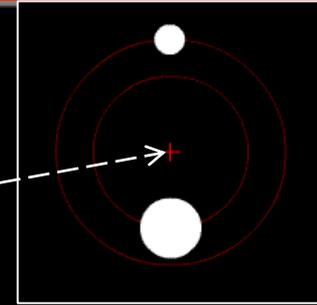
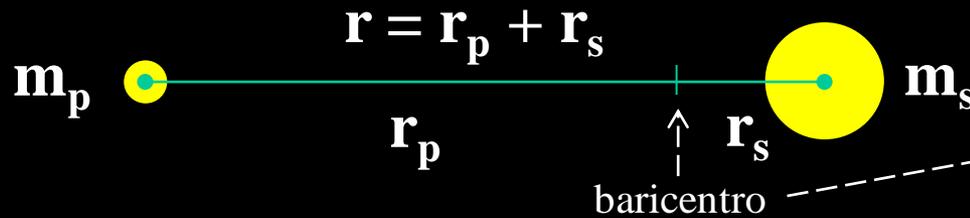
Estrela:

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

Somando:

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

# Movimento Doppler



Equacionando as acelerações gravitacional e centrípeta:

Planeta:

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

Estrela:

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

Somando:

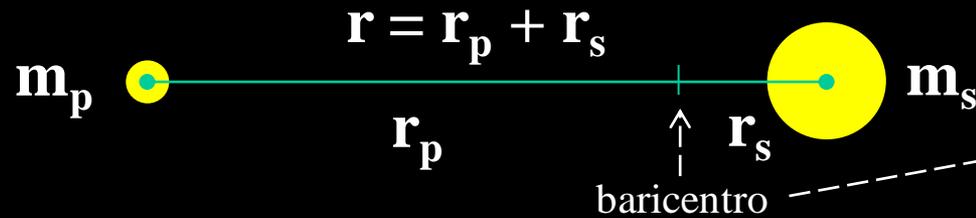
$$\omega^2 (r_P + r_S) = \omega^2 r^3 = G (m_S + m_P)$$

Lembrando:  
Velocidade angular

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

Período de oscilação

# Movimento Doppler



Equacionando as acelerações gravitacional e centrípeta:

Planeta:

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

Estrela:

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

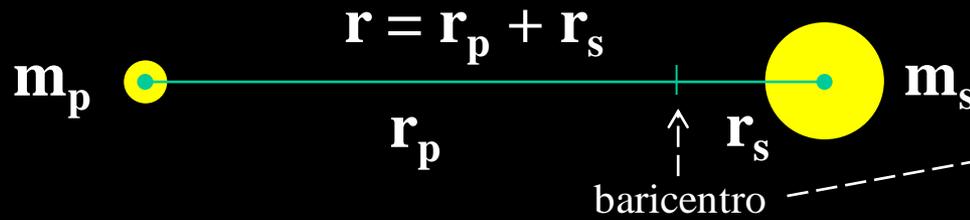
Somando:

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

**3ª Lei de Kepler**

$$T^2 \propto d^3$$

# Movimento Doppler



$$r_P m_P = r_S m_S$$

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

somando em  
ambos os lados

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

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

do centro  
de massa

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

# 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

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

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

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

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

$$v_S = \omega r_S$$

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

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

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

# 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

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

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

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

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

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

$$v_S = \omega r_S$$

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

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

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

# 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:

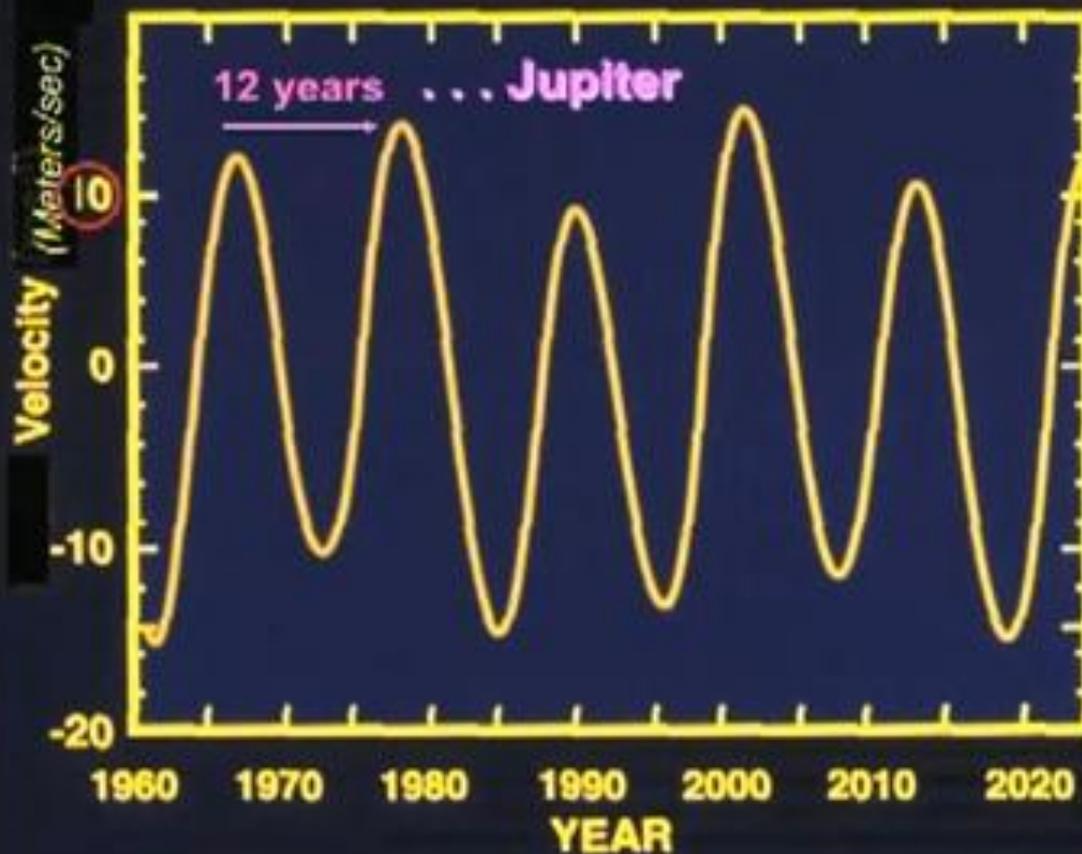
$$m_{\text{Júp}} = 1,9 \times 10^{27} \text{ kg} \quad T = 11,86 \text{ anos}$$
$$v_S = 12,4 \text{ ms}^{-1}$$

Terra:

$$m_{\text{Terra}} = 6,0 \times 10^{24} \text{ kg} \quad T = 1 \text{ ano}$$
$$v_S = 0,09 \text{ ms}^{-1} \quad (0,324 \text{ km/h})$$

# Amplitude da velocidade radial de uma estrela

## Doppler Shift of the Sun



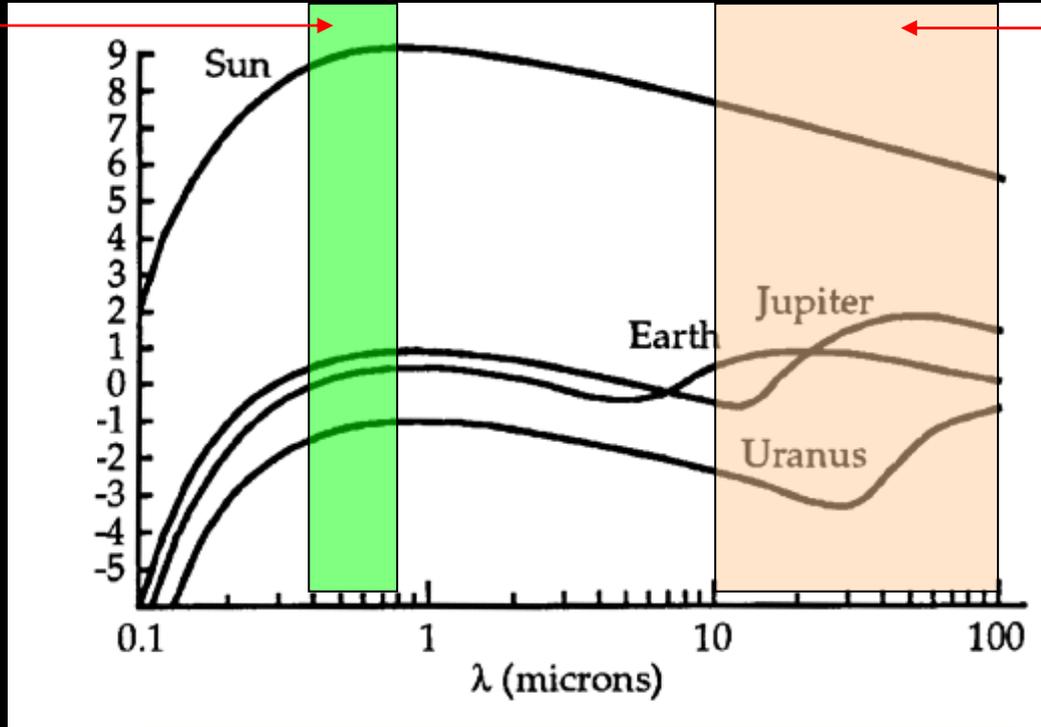
- The velocity of the Sun as it orbits the center of mass of the Solar System.

*Need Telescope ...*

# 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

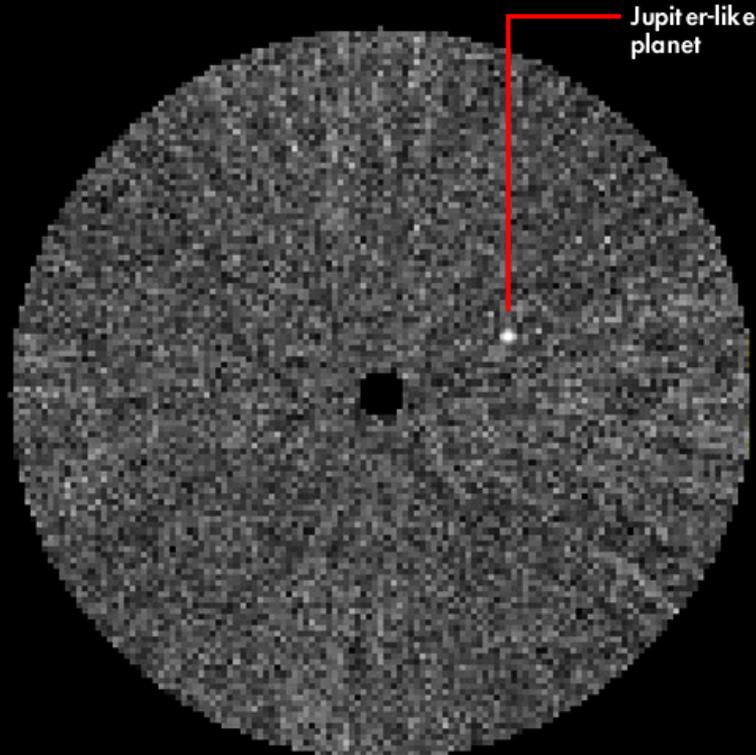


Planet more luminous in the infrared band and star not so bright.

# Método direto de detecção: Imageamento

Luz refletida pelo planeta

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

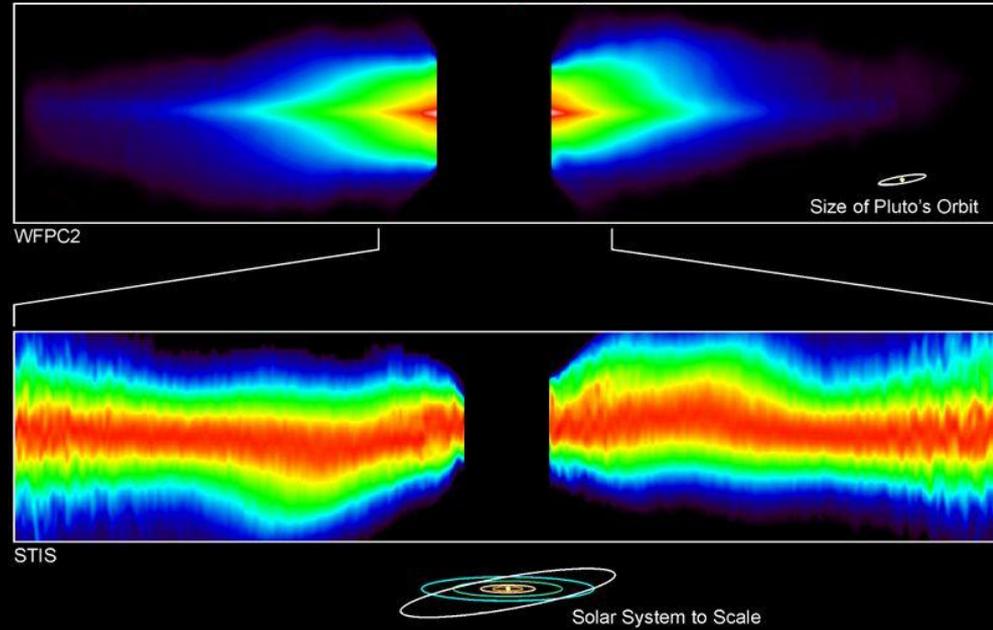


Método usa interferometria no infravermelho com telescópio de solo. Resultado depende a luz do planeta, não da inclinação do seu plano orbital.

Fonte: Christopher W. Churchill

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

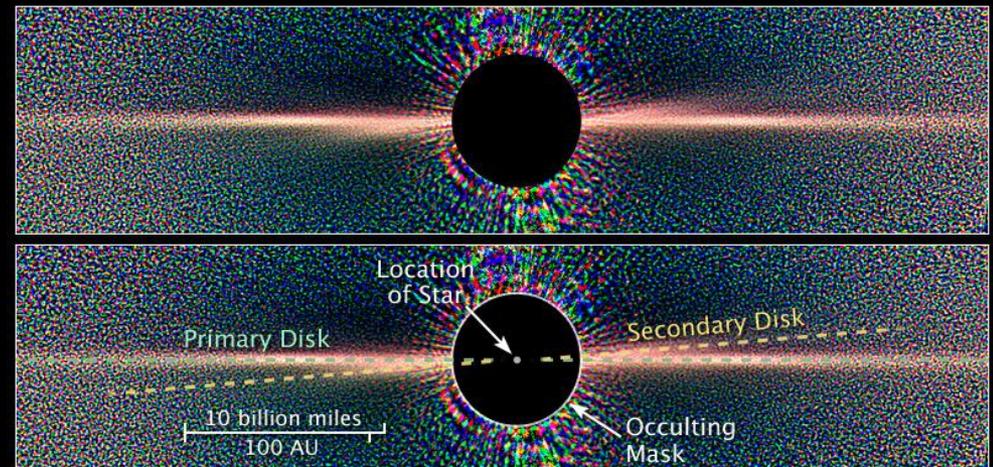
A estrela central é ocultada por um disco artificial no instrumento.  
(Smith & Terrile, 1987)



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

Beta Pictoris

Hubble Space Telescope ■ ACS/HRC

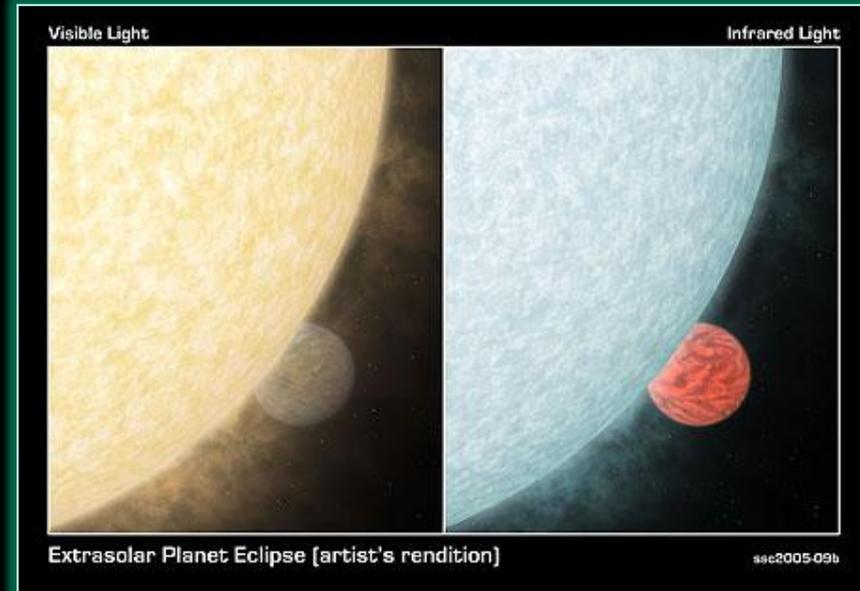
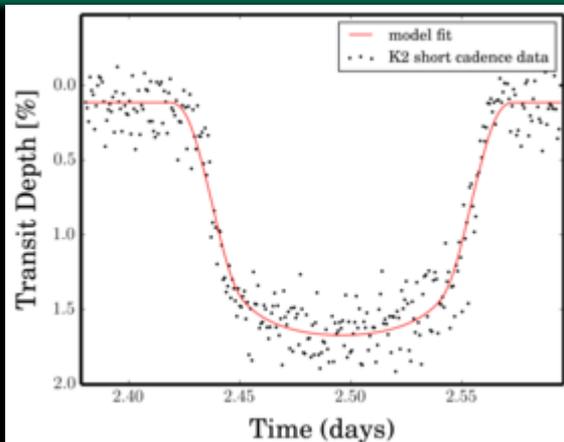


# Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Variação de luz decorrente de um eclipse

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

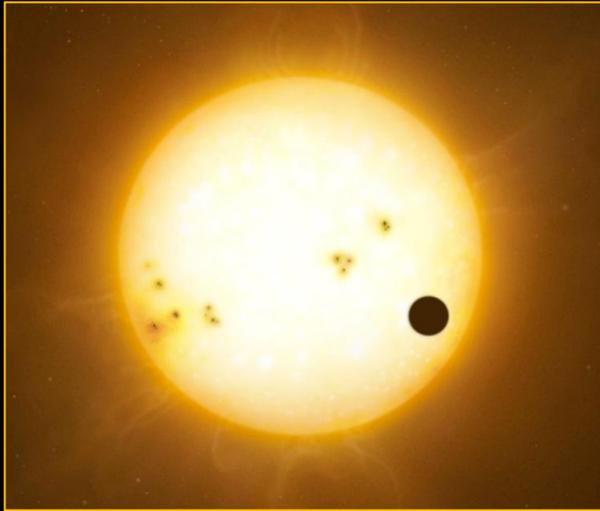
**Contraste é maior no infravermelho que no visível**



<http://astro.unl.edu/classaction/animations/extrasolarplanets/transitsimulator.html>

[http://kepler.nasa.gov/images/videos/OccultationGraphWEB1\\_H264.mov](http://kepler.nasa.gov/images/videos/OccultationGraphWEB1_H264.mov)

# Métodos indiretos de detecção: Fotometria



**Diâmetro (km)**

**Área relativa → queda de brilho**

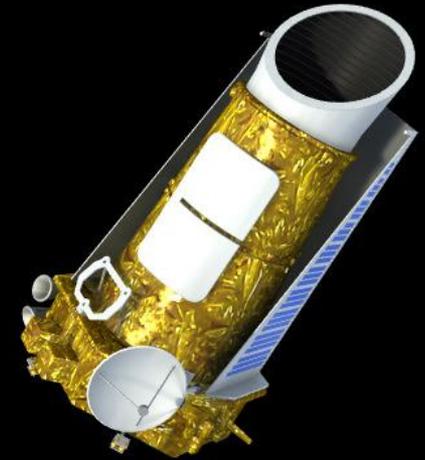
Sol	1.400.000	1
Júpiter	143.000	0,01
Netuno	49.600	0,001
Terra	12.800	0,0008
Mercúrio	4.900	0,0001

# Métodos indiretos de detecção: Fotometria

## The *Kepler* Space Telescope

- \* 1--meter Diameter Telescope
- \* Field of View: 10 deg x 10 deg
- \* Camera: 95 MegaPixel

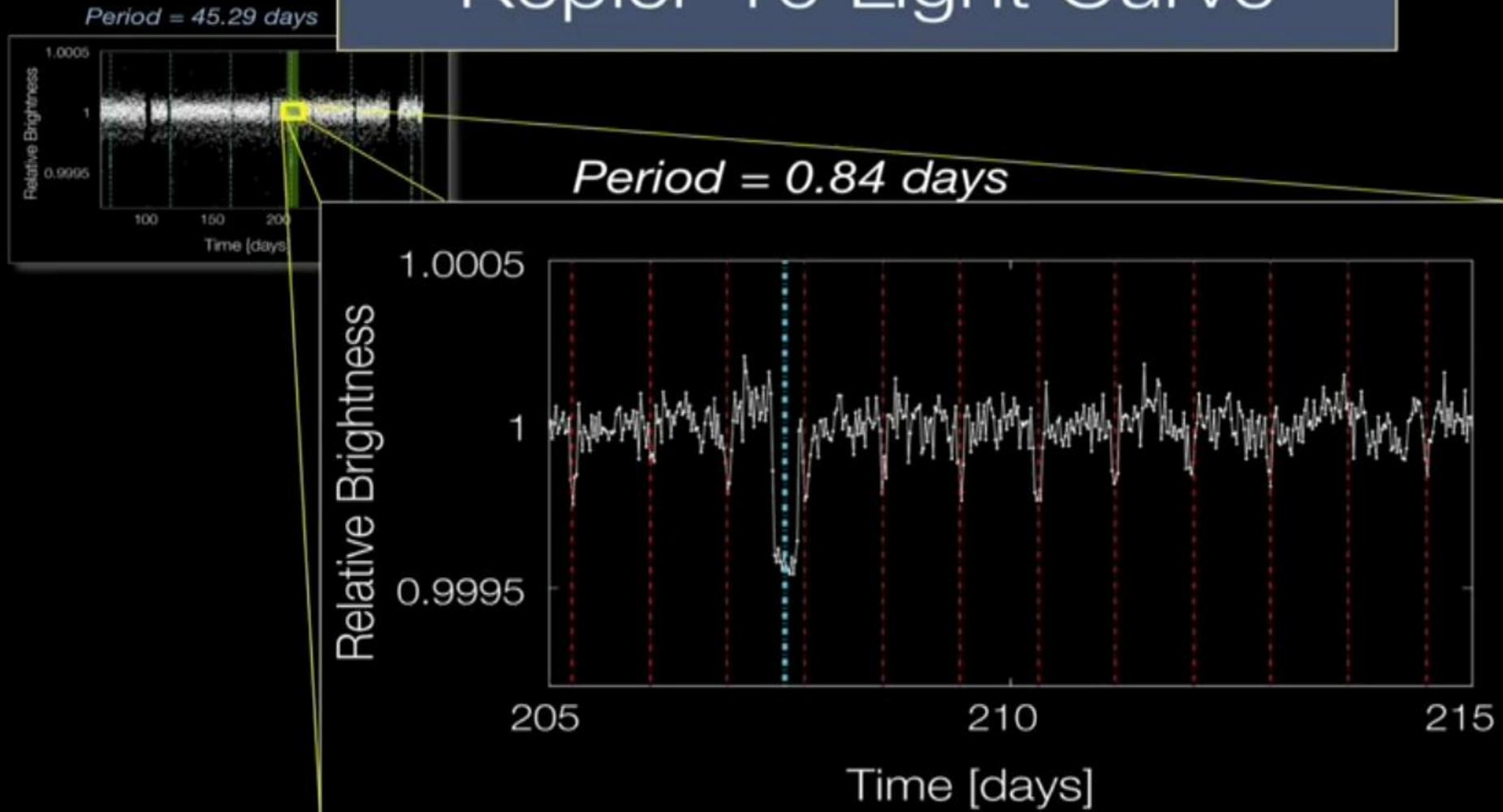
- Images 150,000 stars simultaneously
- Every 30 minutes
- For 4 Years
  
- Brightness Precision: 0.01%



# Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy

## Kepler-10 Light Curve

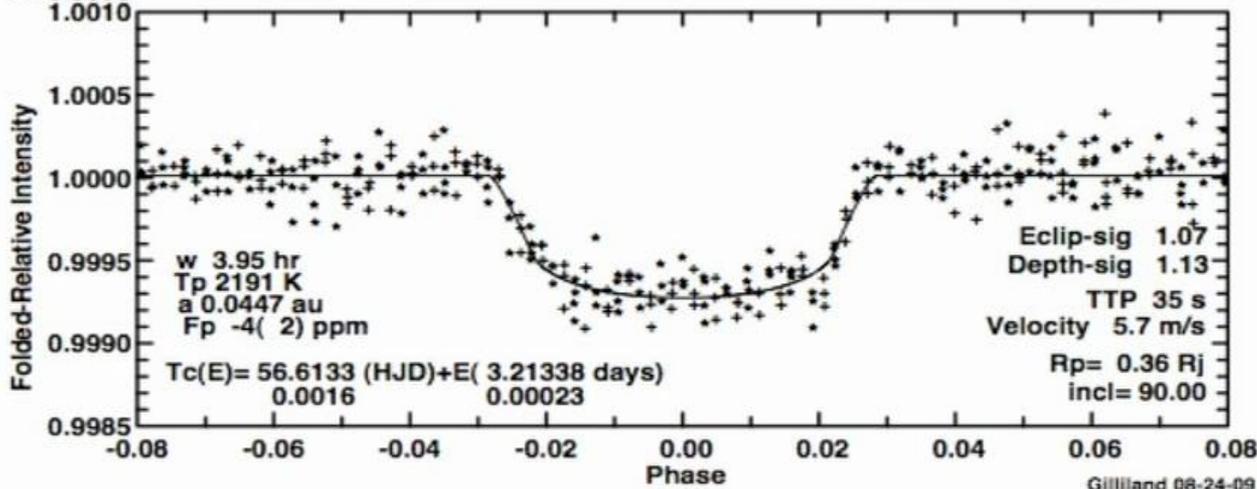
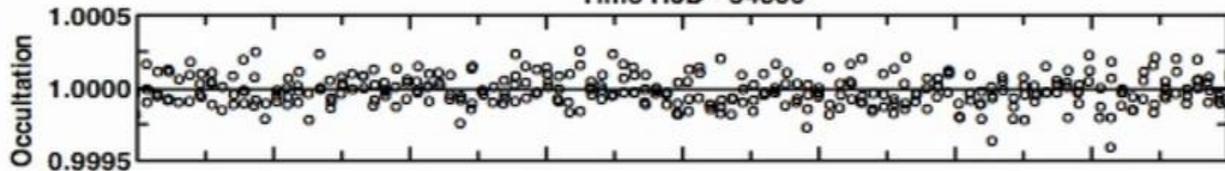
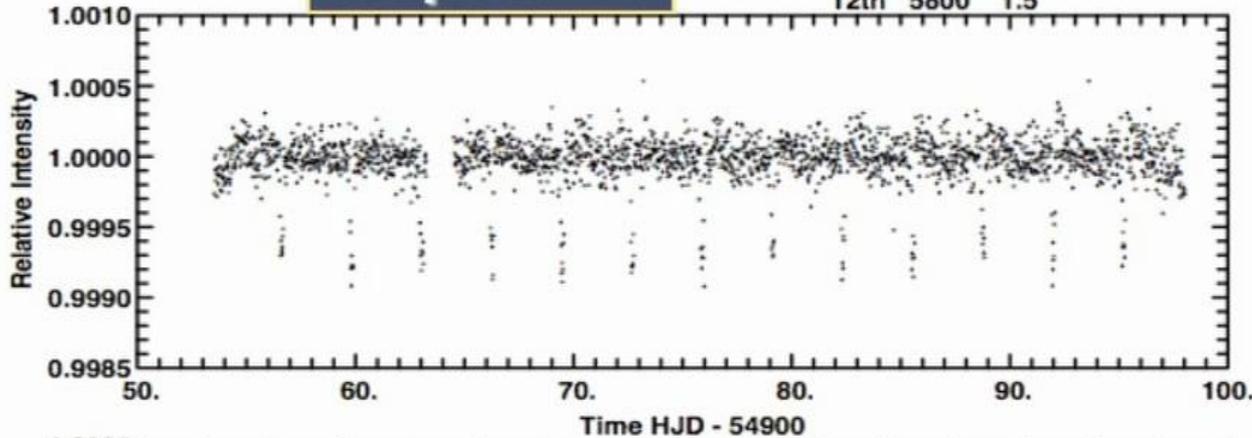


# Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy

## Kepler-4

12th 5800 1.5



Planet Properties:

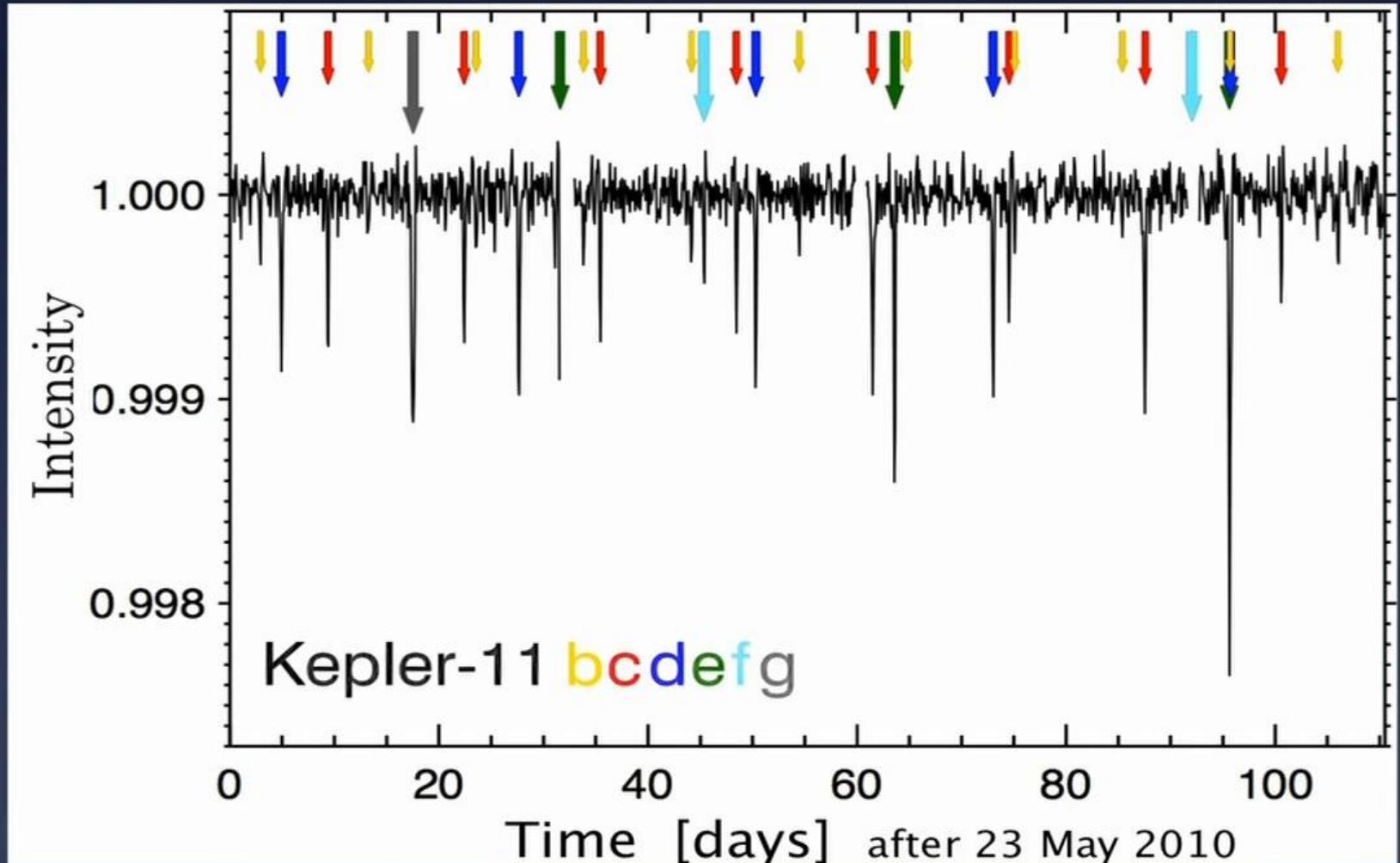
Period = 3.213day

Radius = 4.1  $R_{\text{Earth}}$

# Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy

## Kepler-11: Six Transiting Planets

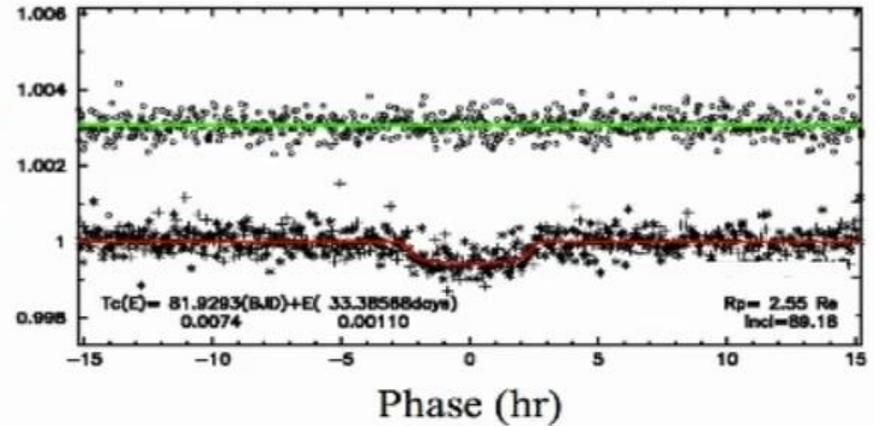
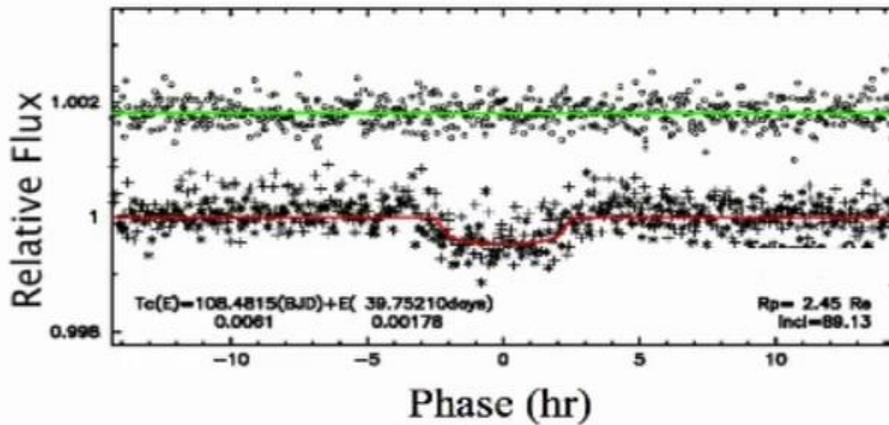
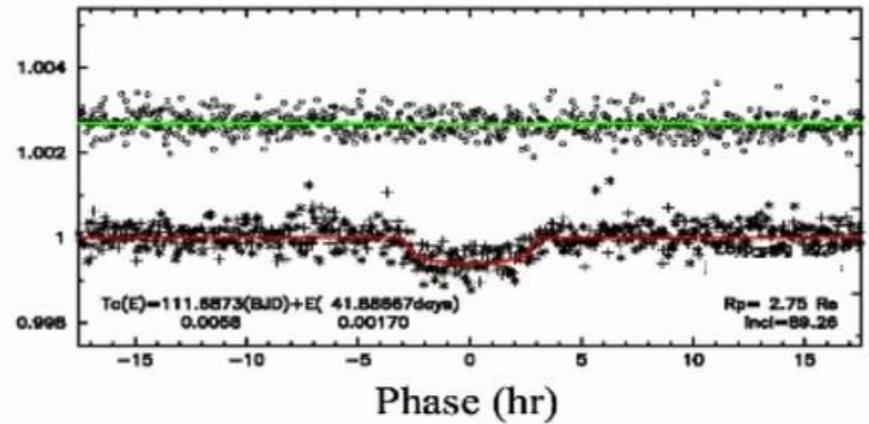
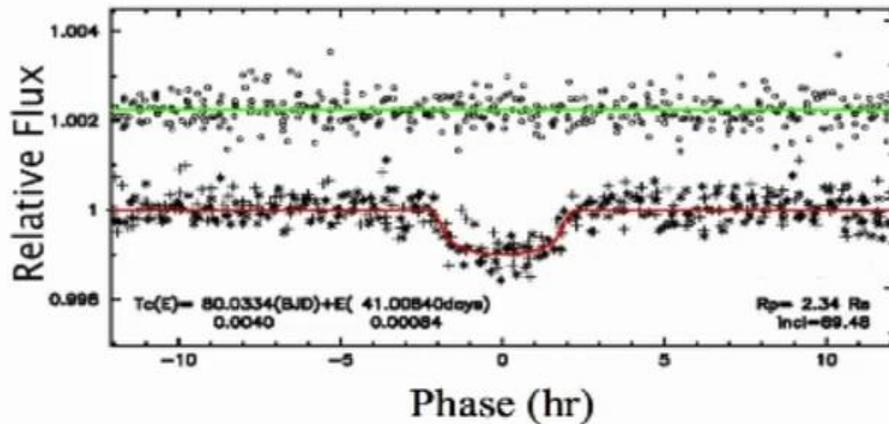


# Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy

Most Common:

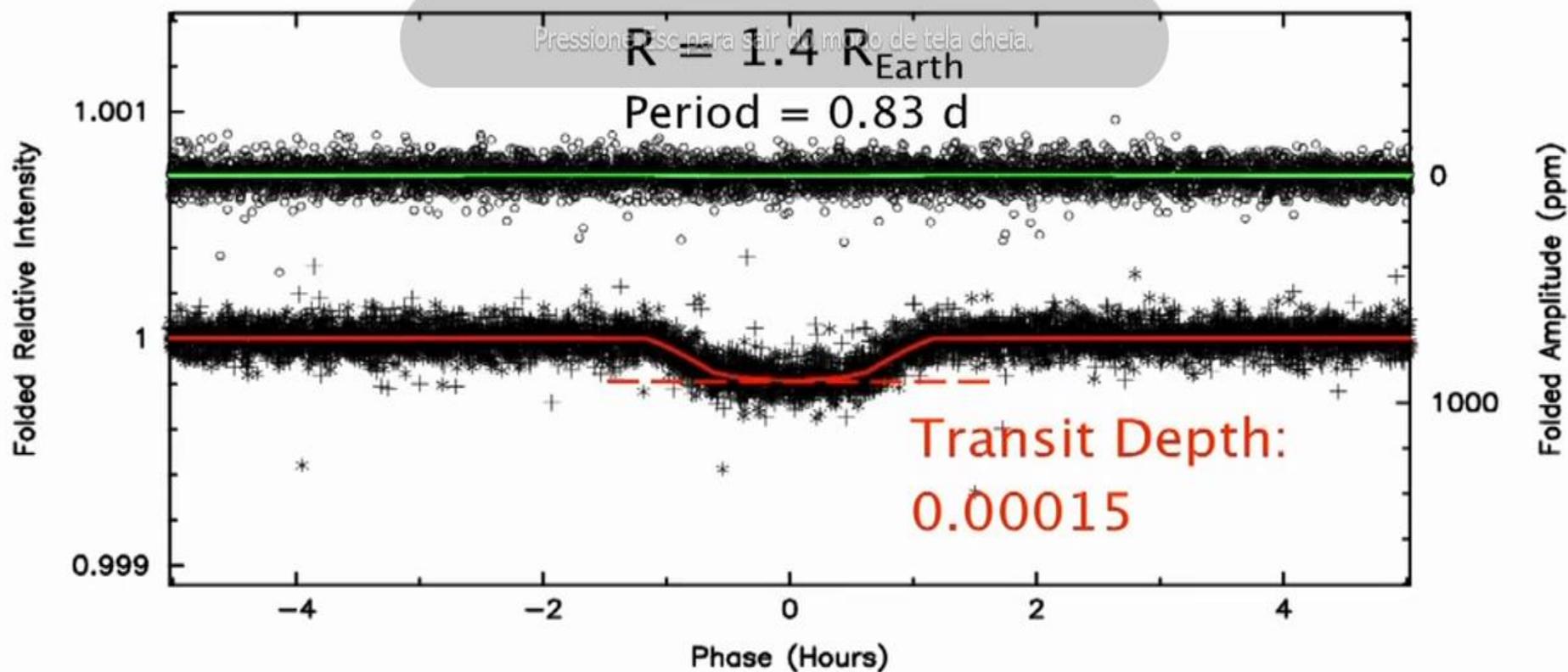
Radius = 2 - 3  $R_{\text{Earth}}$



# Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy

## Kepler-10 Light Curve

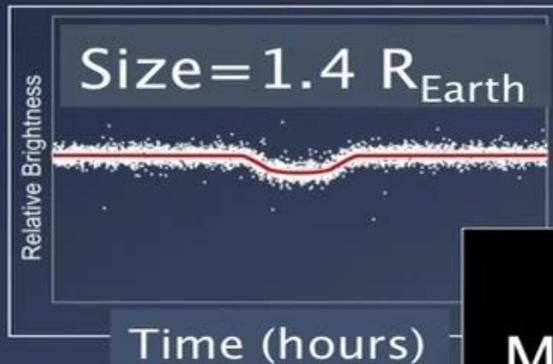
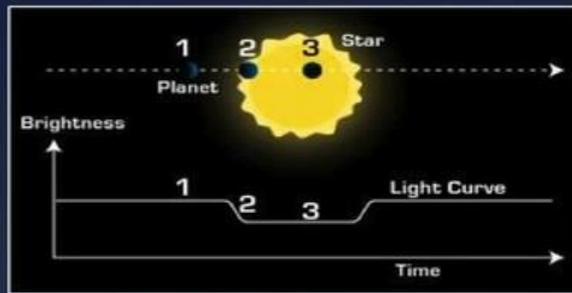


# Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy

## The Planet Radius

### Planet Transit

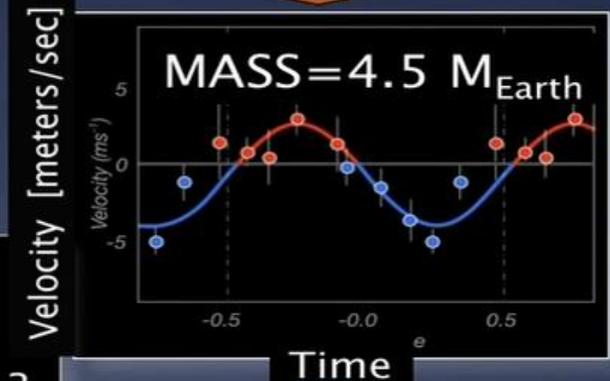


Size =  $1.4 R_{\text{Earth}}$

**Planet Density:**  
 $\frac{\text{Mass}}{\text{Volume}} = 8.8 \text{ g/cm}^3$

## The Planet Mass

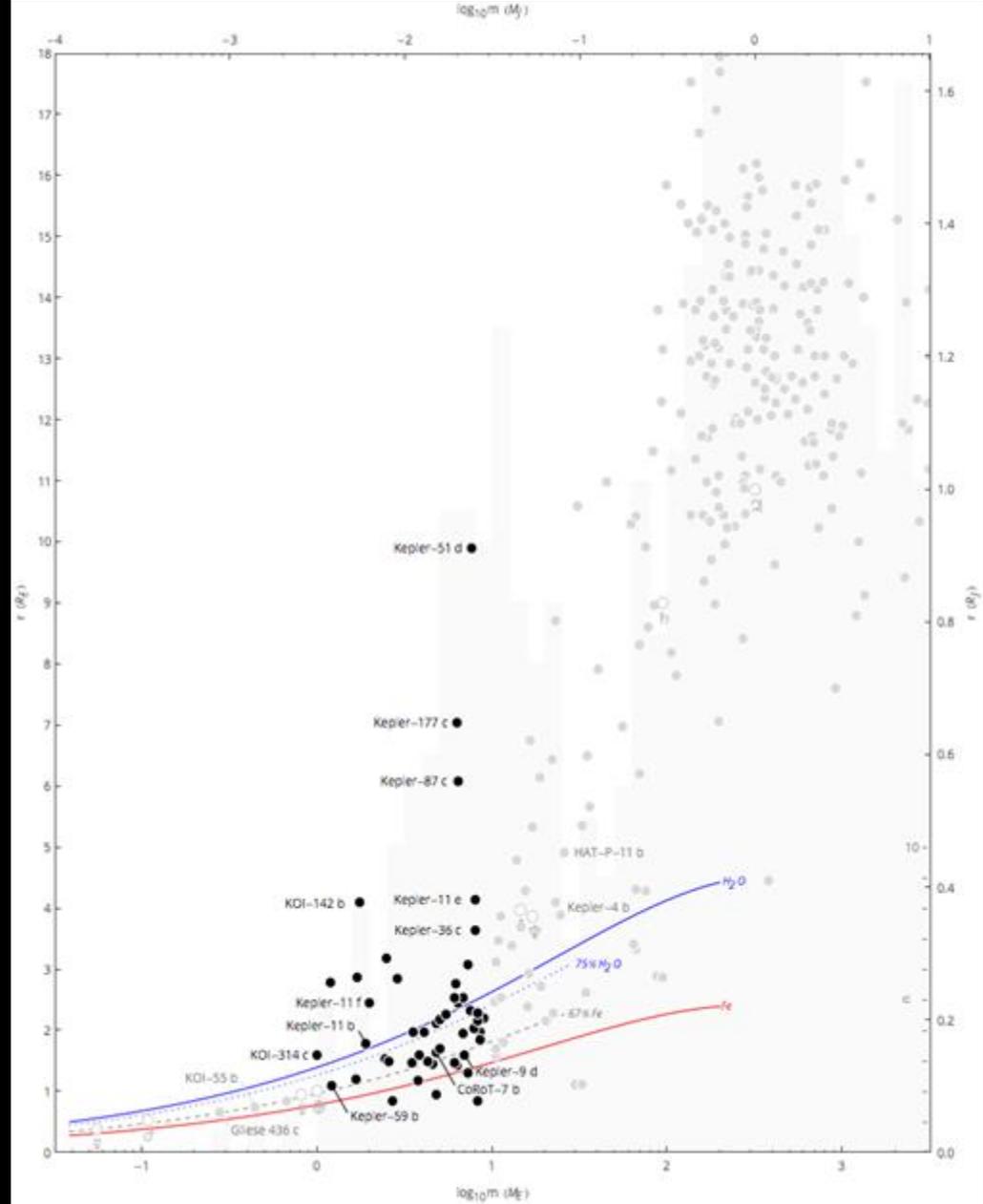
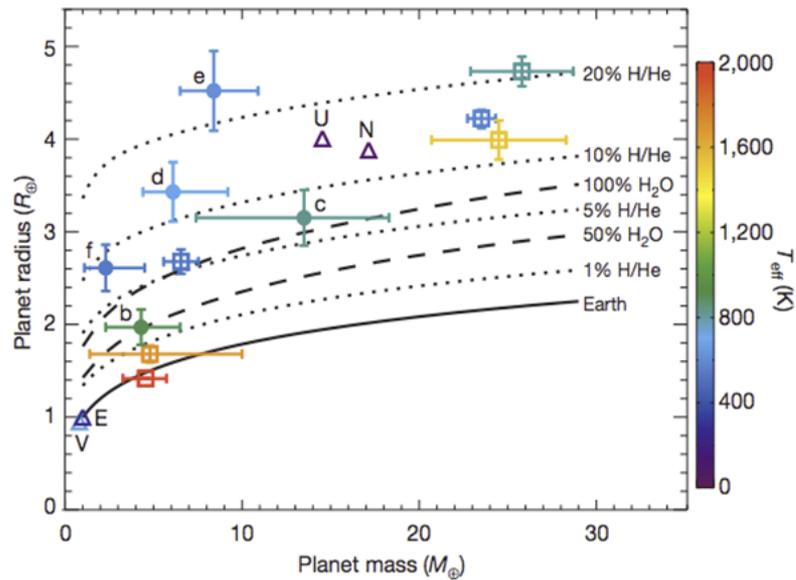
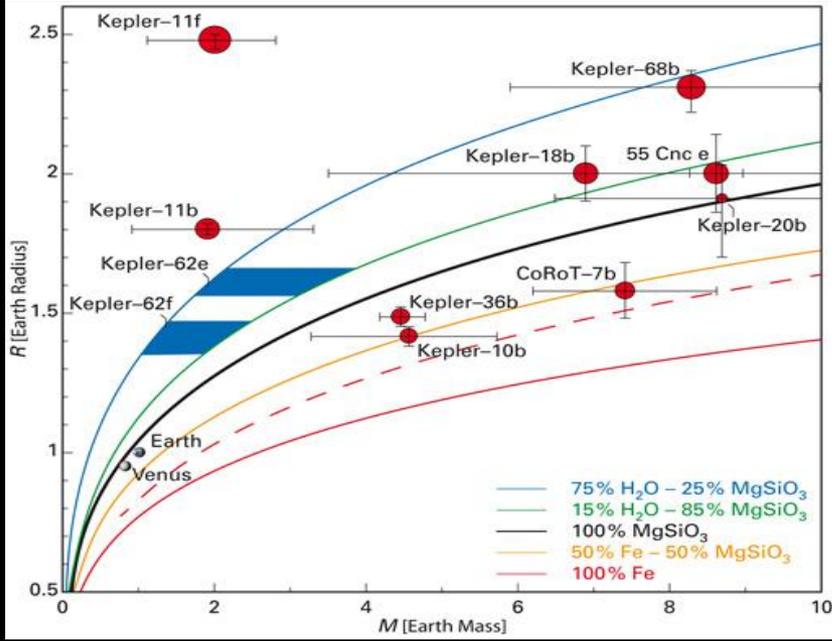
### Doppler of Star



Velocity [meters/sec]

Time

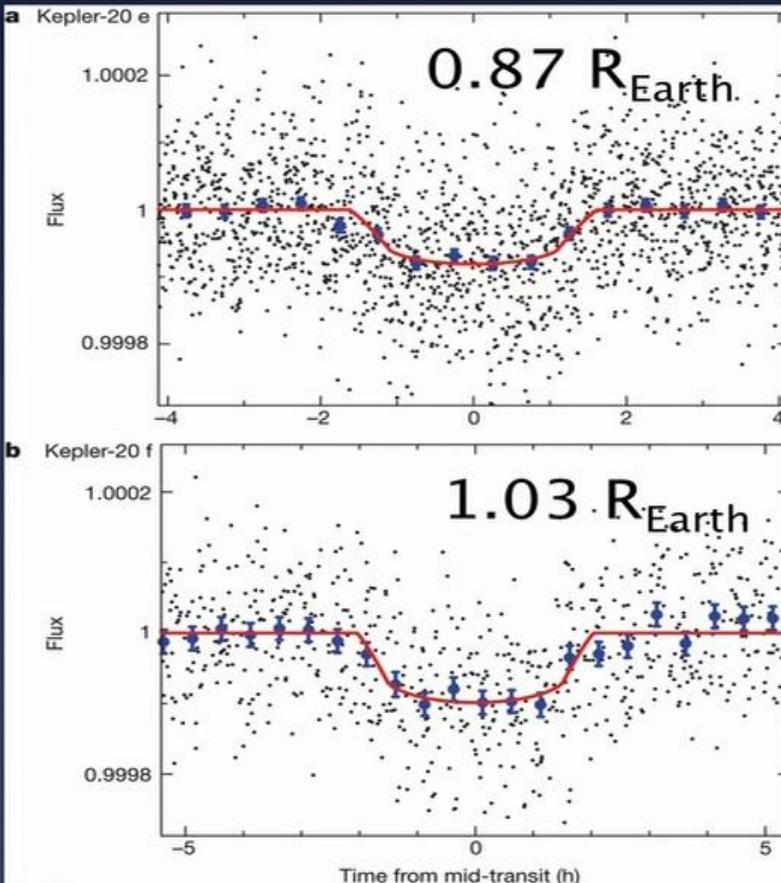
# Métodos indiretos de detecção: Fotometria



# 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.:

California NANOSystems Institute

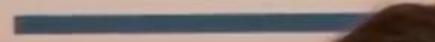
C (N) S I

ES ES

**David Jewitt**

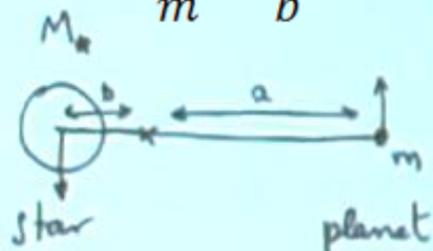
Earth and Space Sciences, Physics and Astronomy, UCLA

C (N) S I



# Doppler

$$\frac{M_*}{m} = \frac{a}{b}$$



$$M_* b = m a$$

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

$$m \ll M_*$$

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

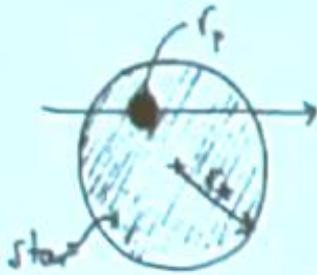
$$\text{So } V_* = \sqrt{\frac{G}{M_* a}} m$$

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

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

Current limits near  $1 \text{ m s}^{-1}$

# Transits



massa estrela  
raio estrela

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

raio planeta  
raio estrela  
raio Sol

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

massa Sol

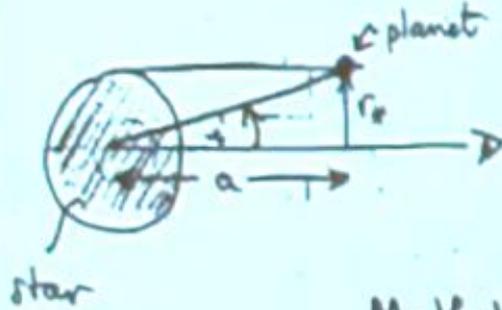


$$\frac{\Delta f}{f} \sim \left(\frac{M_\oplus}{M_s}\right)^2 \left(\frac{r_p}{r_\oplus}\right)^2$$

raio Terra

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

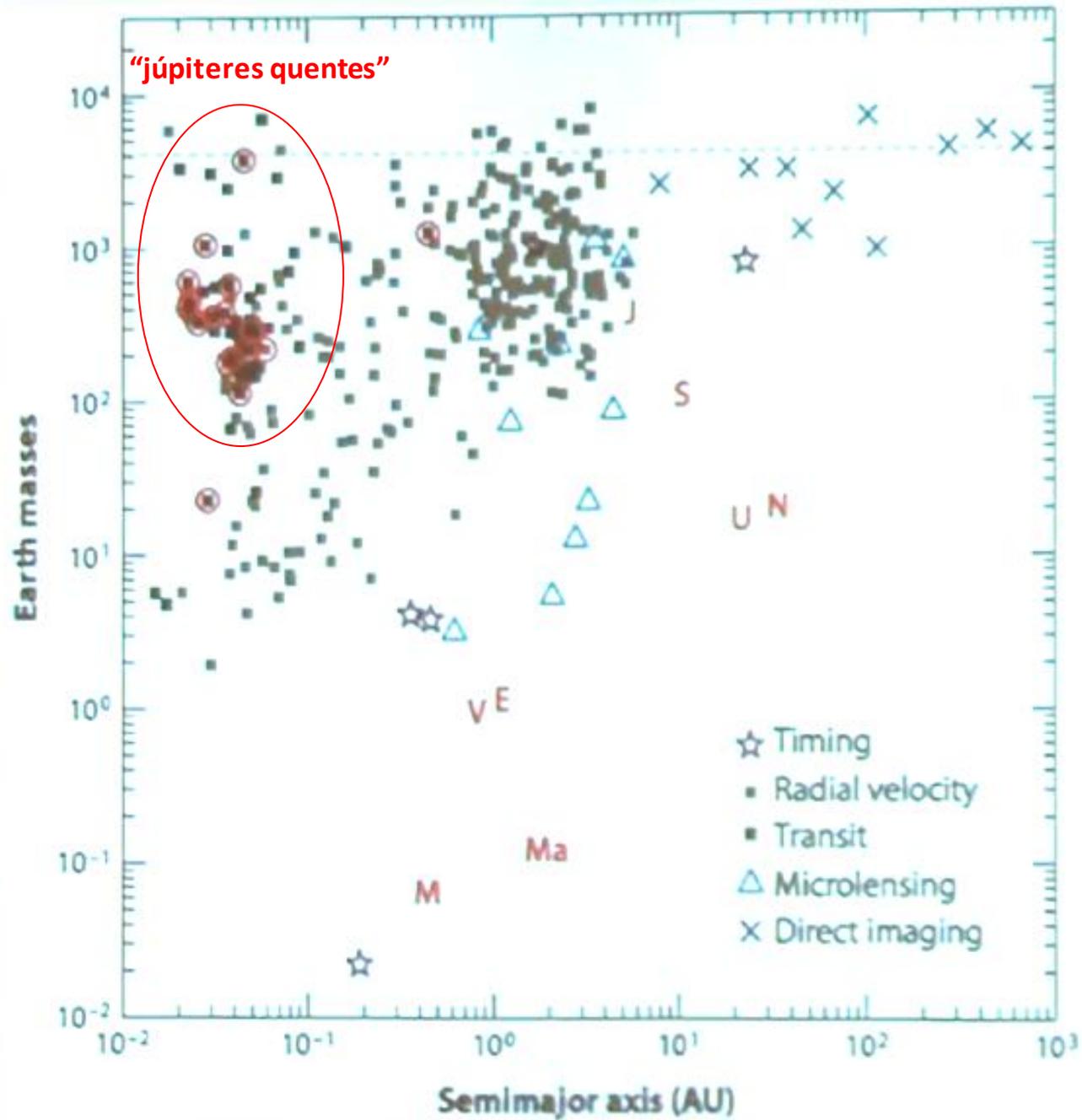
raio Júpiter



Transit requires

$$i \leq r_s/a$$

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



# Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Seja um



... de exoplanetas !

## 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.

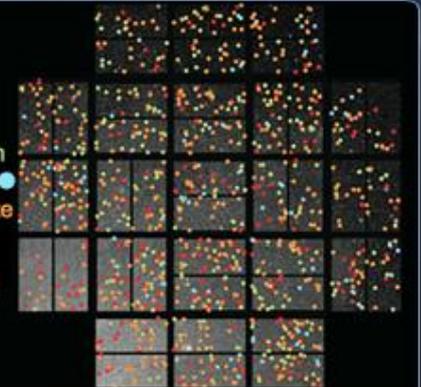
### Kepler Field of View



[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.

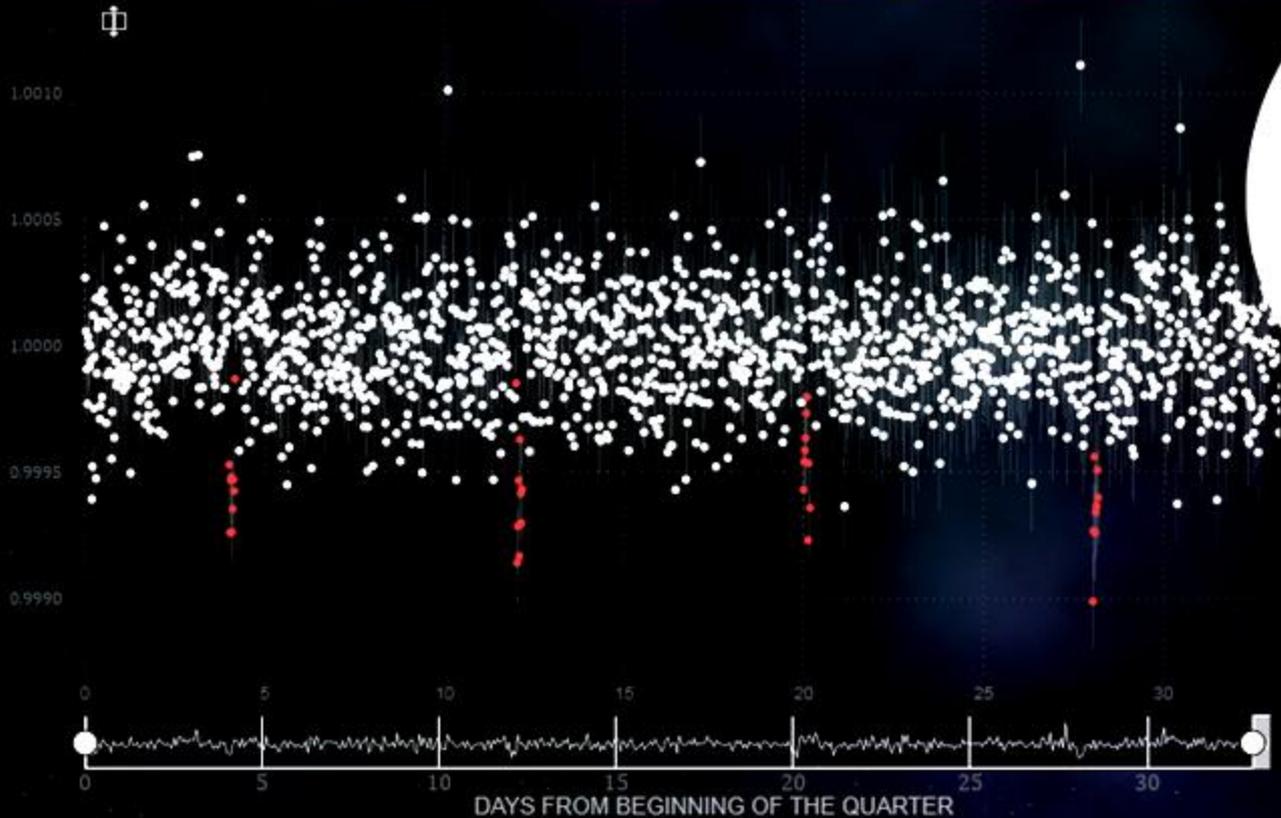
# With your help, we are looking for planets around other stars

Start hunting for planets >



POWERED BY KEPLER  
PUBLIC DATA

# Métodos indiretos de detecção: Fotometria



Did you spot them?  
These are the locations of  
the transits  
Don't worry if you missed them,  
transit hunting is hard and  
requires practice!



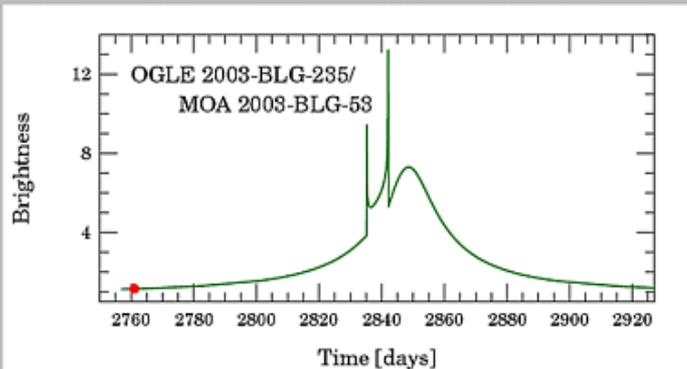
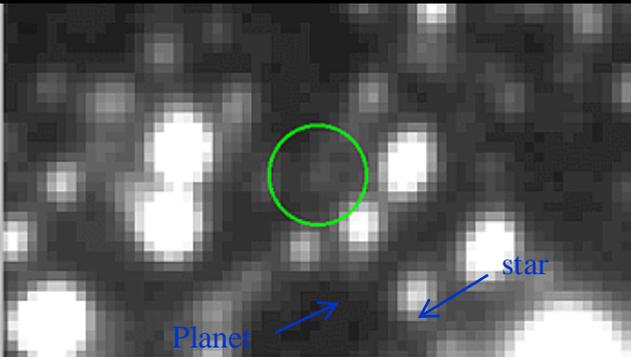
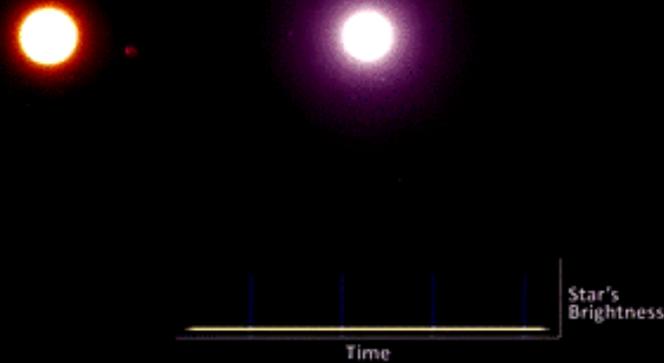
Type of star	Dwarf
Apparent visual magnitude	14.2
Temperature	5614 (K)
Radius	0.8x Sol



POWERED BY KEPLER  
PUBLIC DATA

# 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.



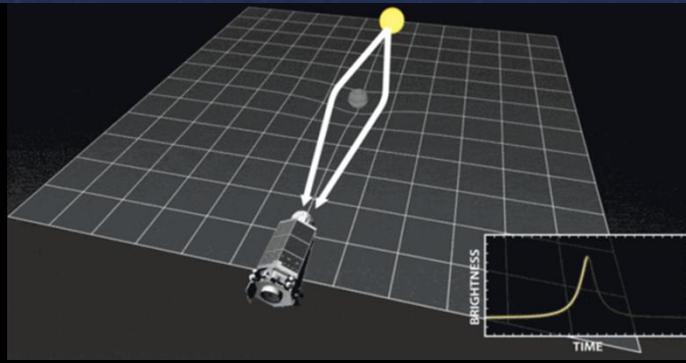
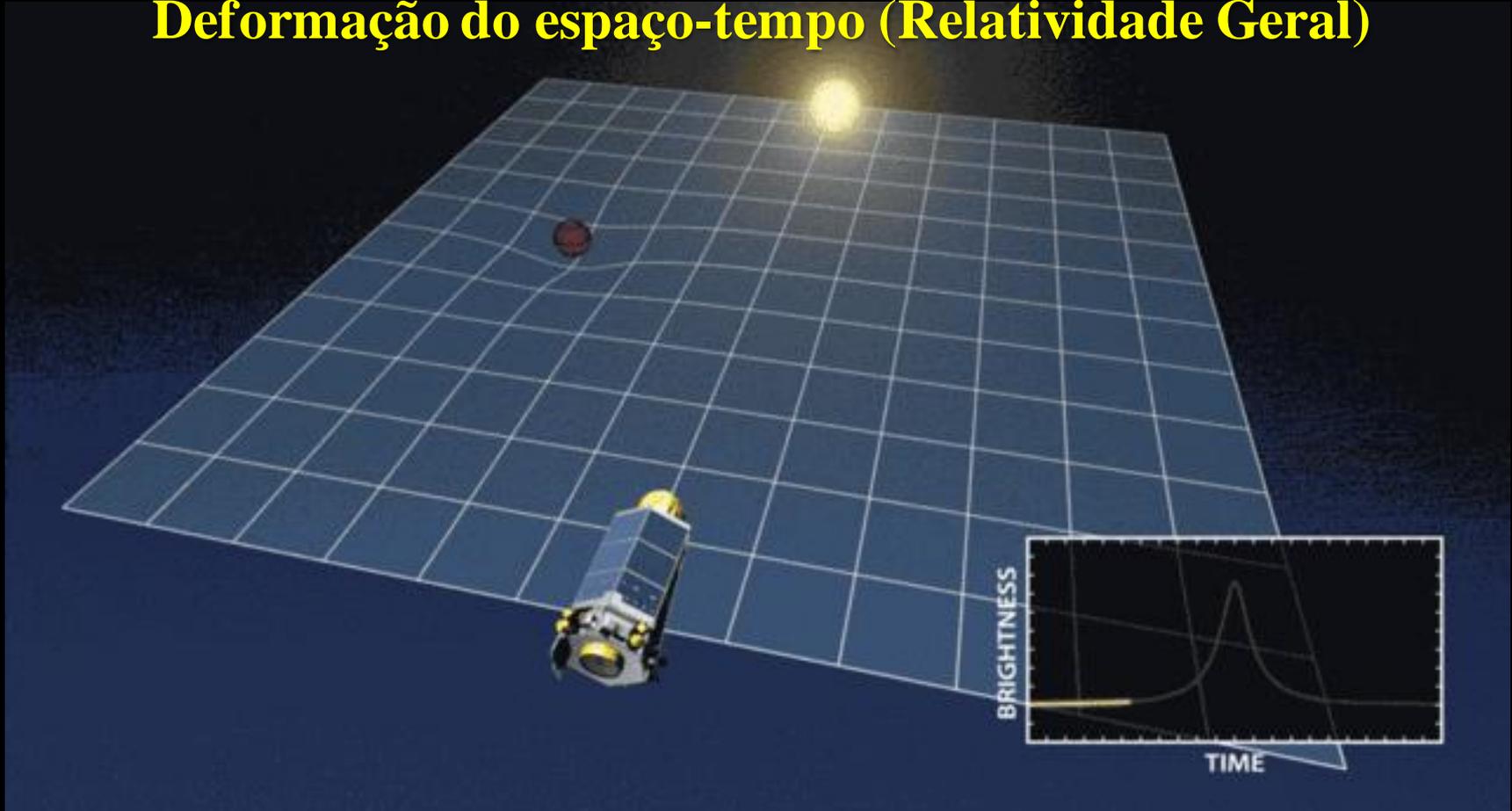
## From light curve to planet parameters

- The 'widths' of the star and planet peaks in the light curve are proportional to the square roots of the respective masses, so the **planet-to-star mass ratio** comes from the ratio of widths.
- The time delay of the planet peak with respect to the stellar peak gives the **projected separation of the lensing star and its planet**, in units of the Einstein radius

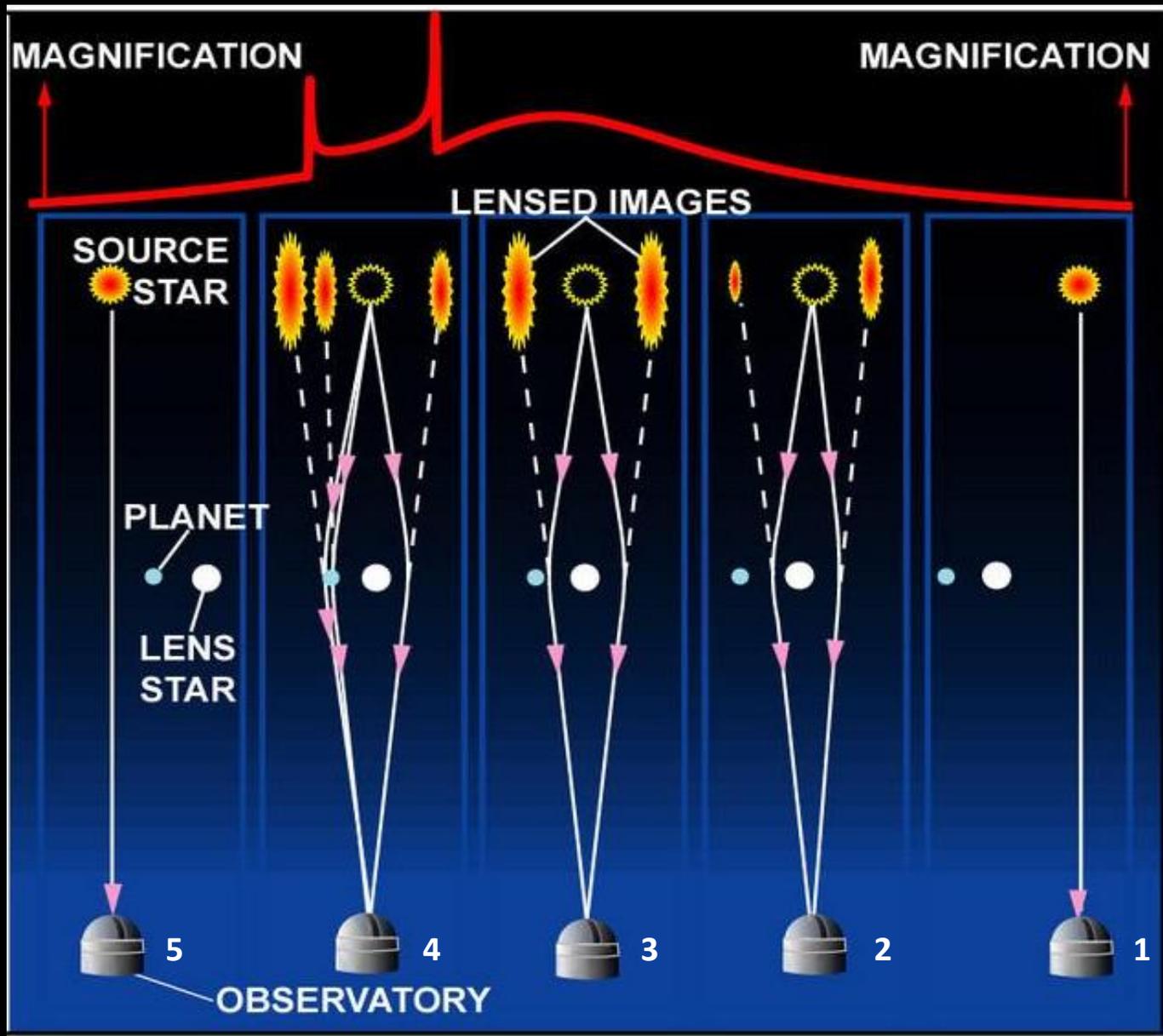
$$R_E = D_L \theta_E = D_L \sqrt{\frac{4GM_L}{c^2} \frac{D_S - D_L}{D_L D_S}}$$

# Métodos indiretos de detecção: Microlente gravitacional

## Deformação do espaço-tempo (Relatividade Geral)

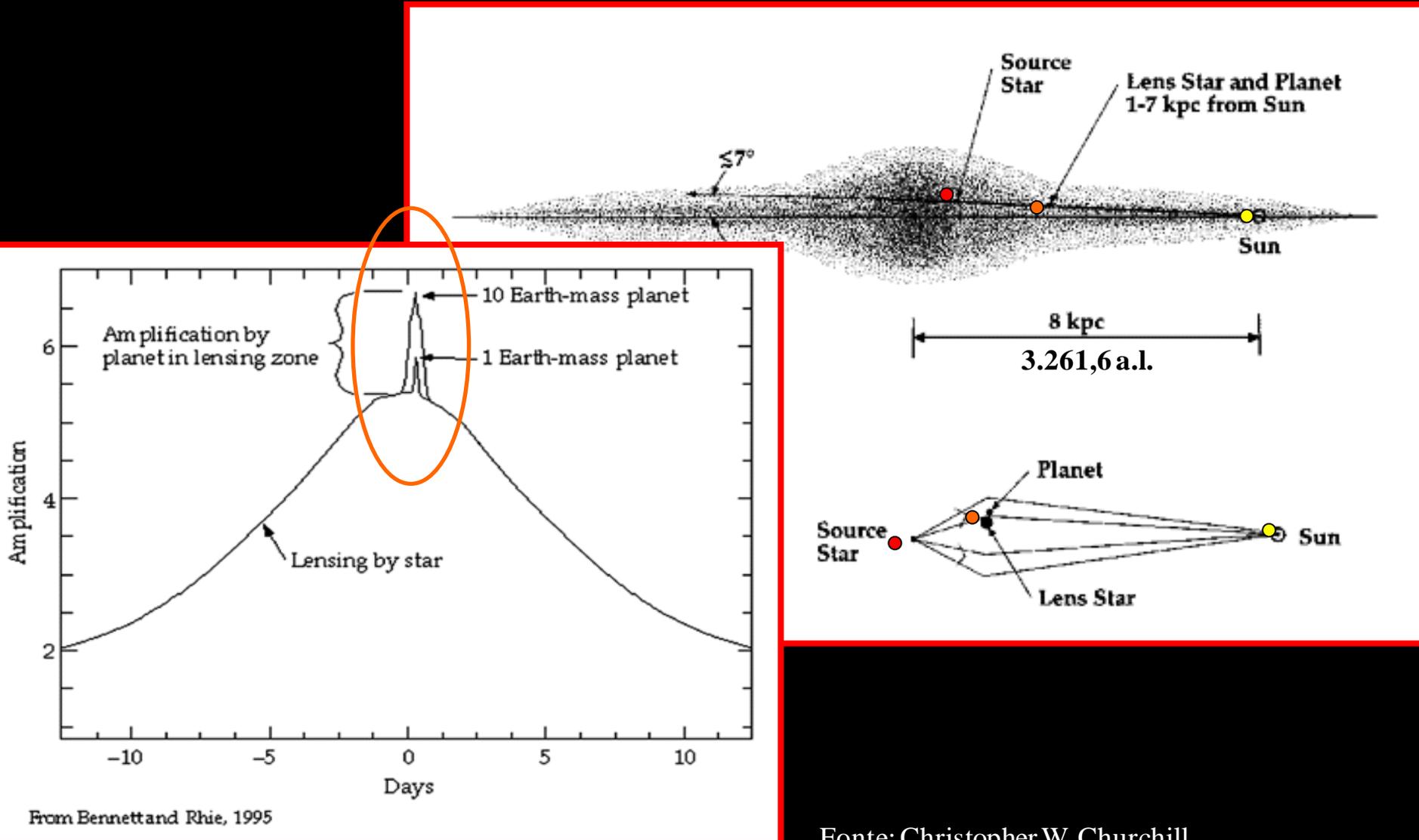


# Métodos indiretos de detecção: Microlente gravitacional



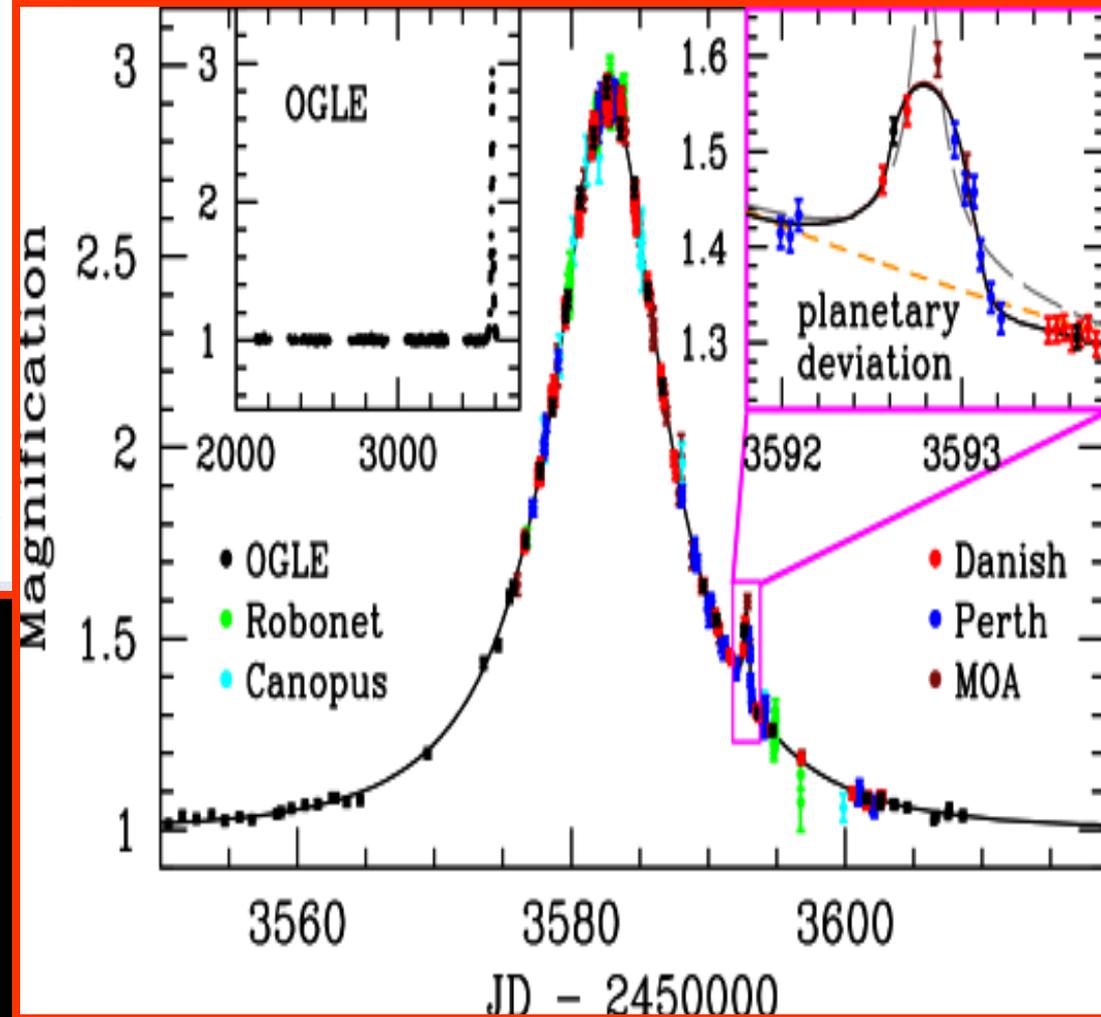
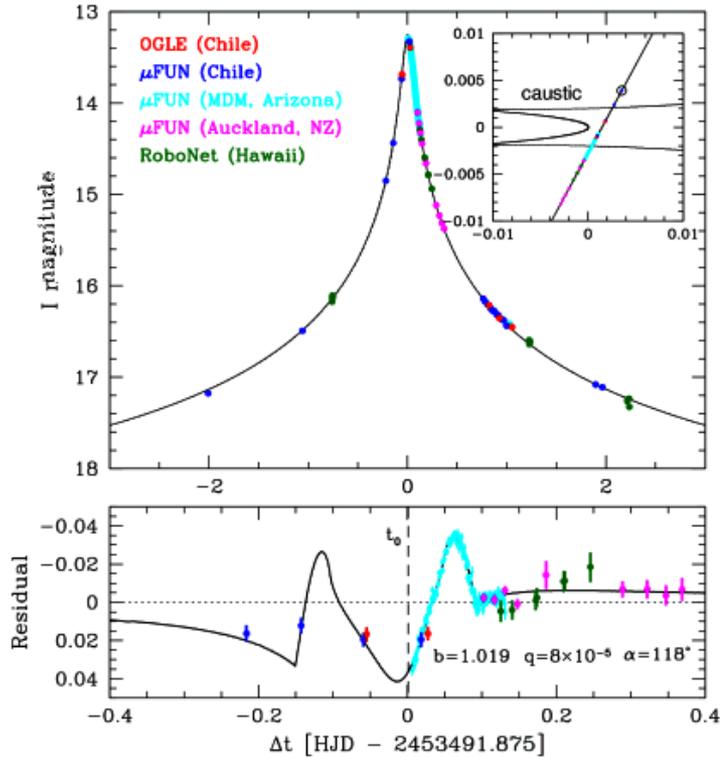
# Métodos indiretos de detecção: Microlente gravitacional

## Pico sobre a curva de luz da estrelas de fundo

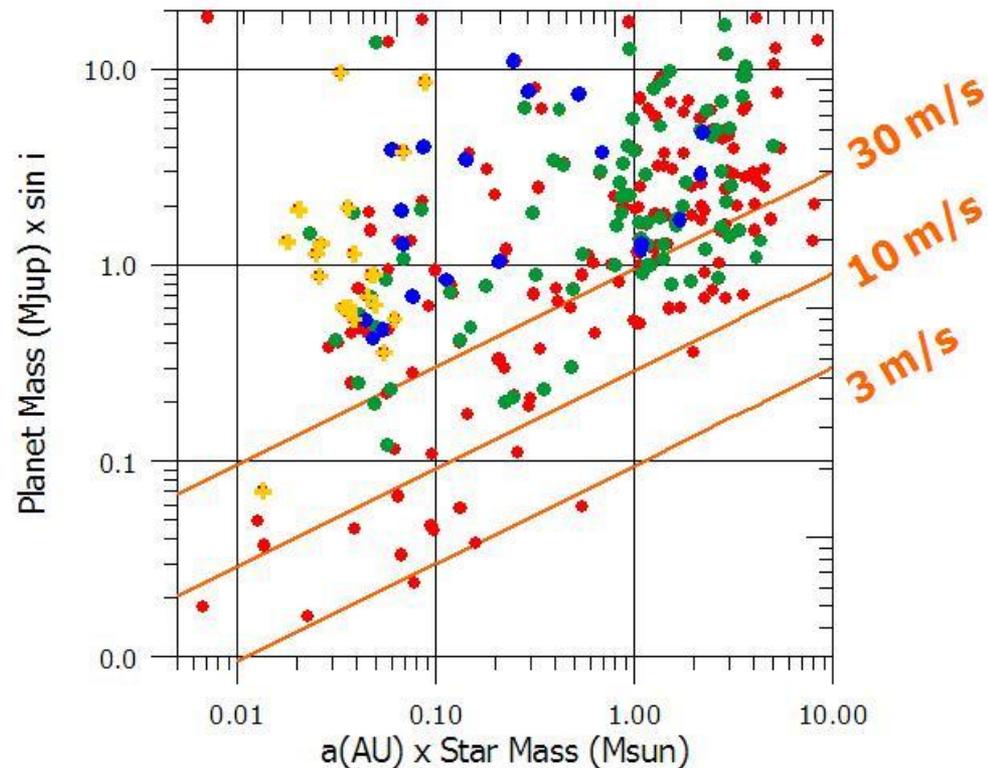


# Métodos indiretos de detecção: Microlente gravitacional

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



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.

# Exoplanetas: Missão Kepler (Procura de Planetas Habitáveis)

Kepler-7b



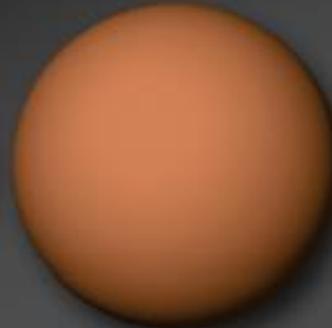
16.52  $R_E$

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  $R_E$

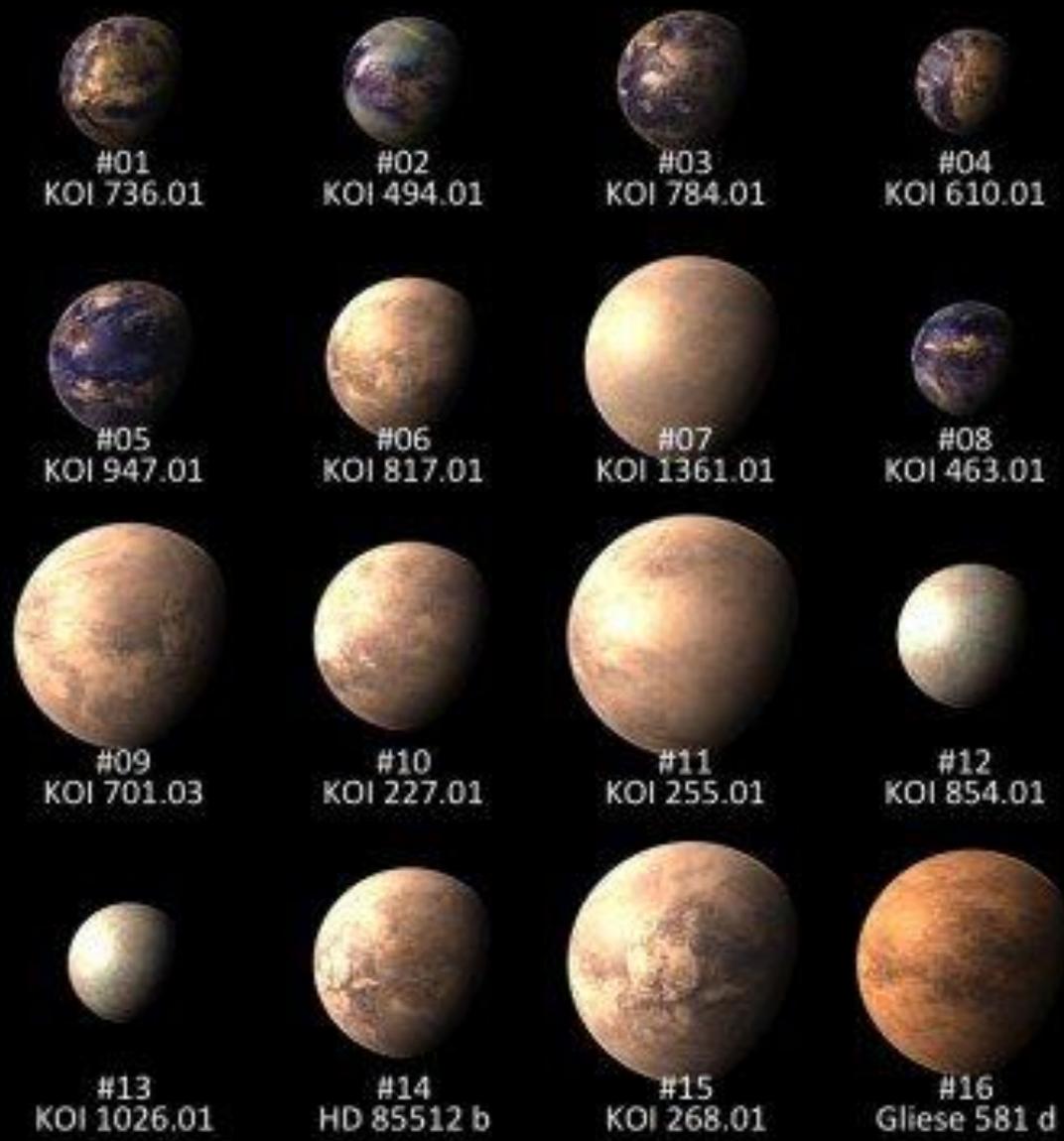
Kepler-11g



3.66  $R_E$

# Potential Habitable Worlds in the Universe

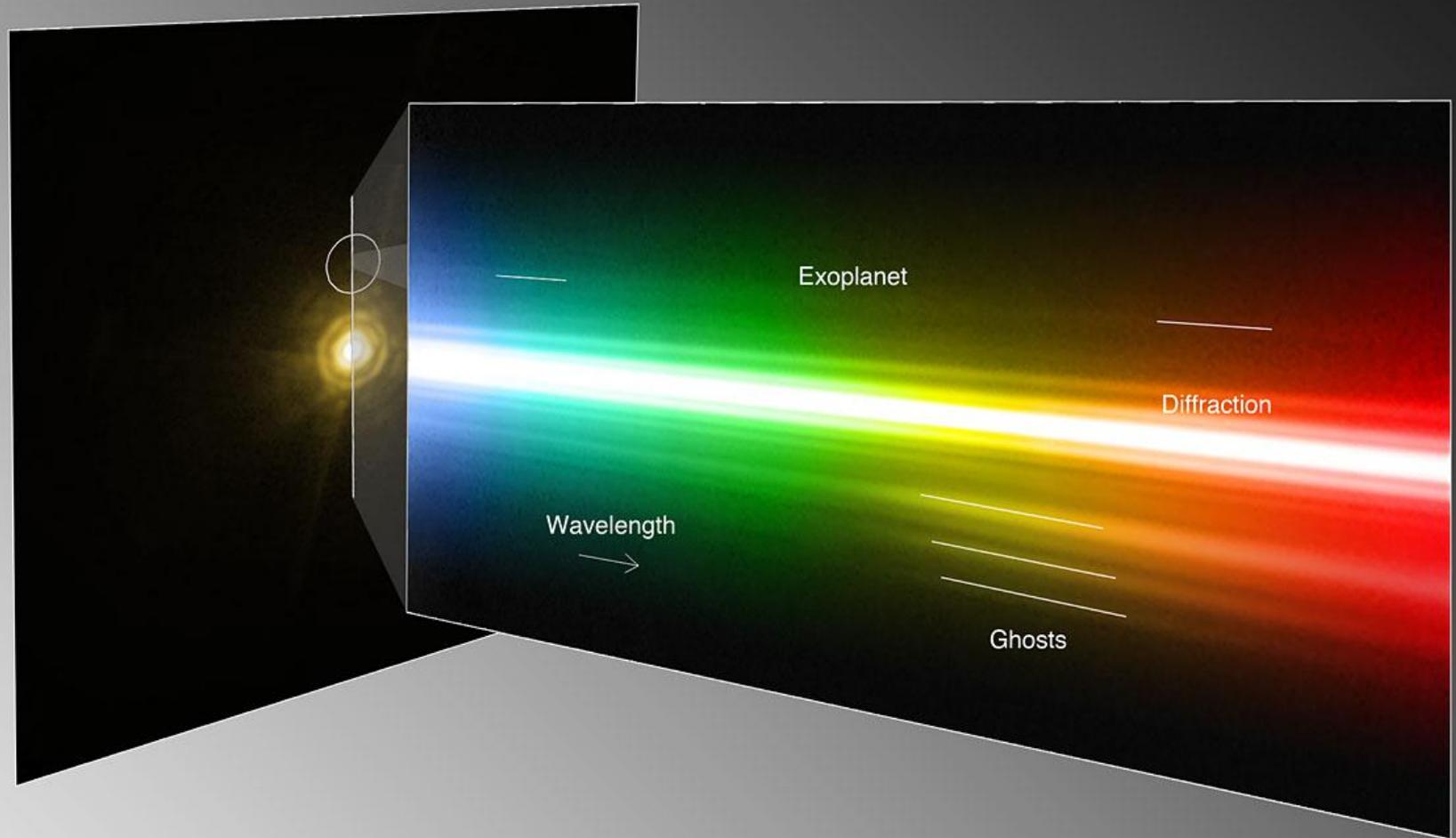
Scientists are starting to identify potential habitable exoplanets in over 2,000 exoplanets that have been detected so far. Here is the current working list of 16 potential habitable exoplanets candidates ranked by similarity to Earth, from best to worst. All are to scale and can be compared to Earth, Venus, Mars, and Mercury below.



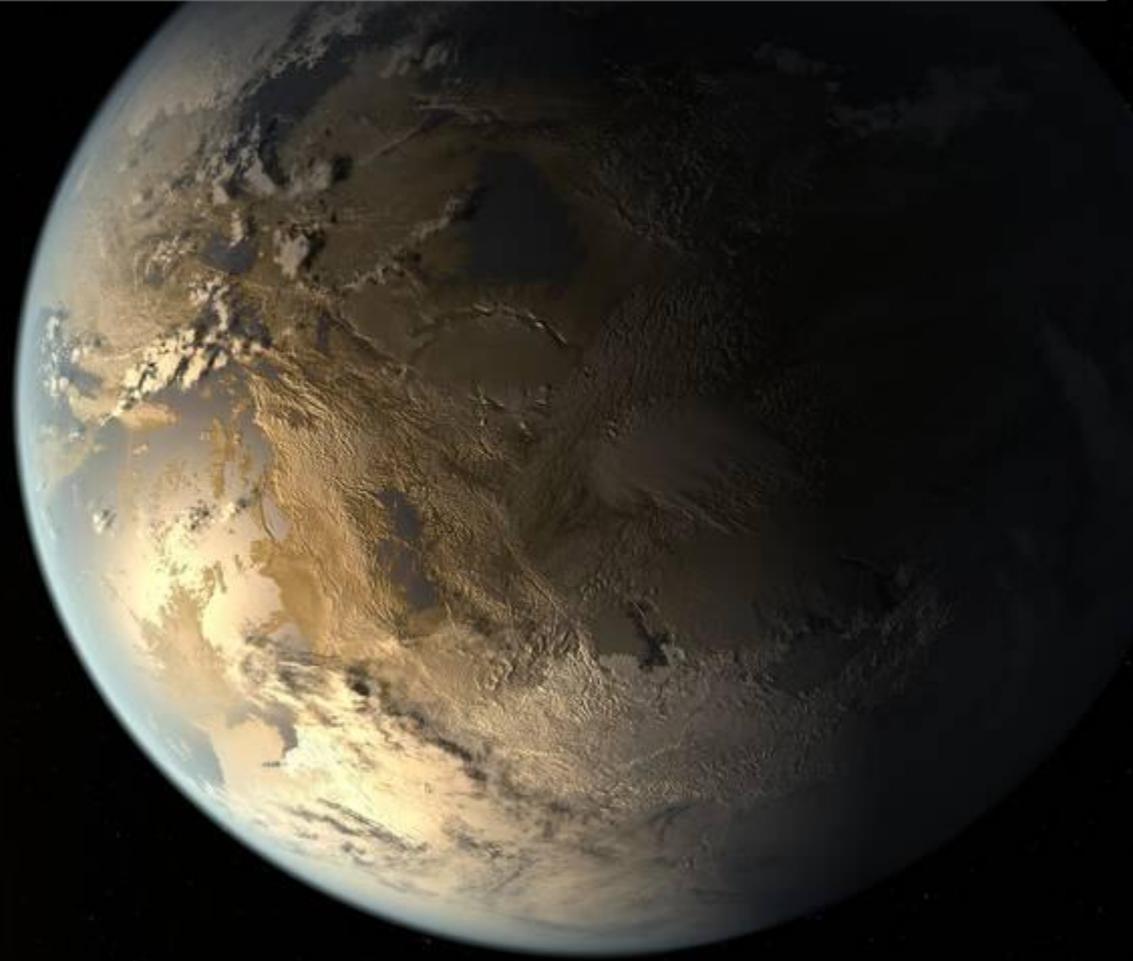
## Solar System Terrestrial Planets



# Fotometria: extraindo espectro de exoplaneta



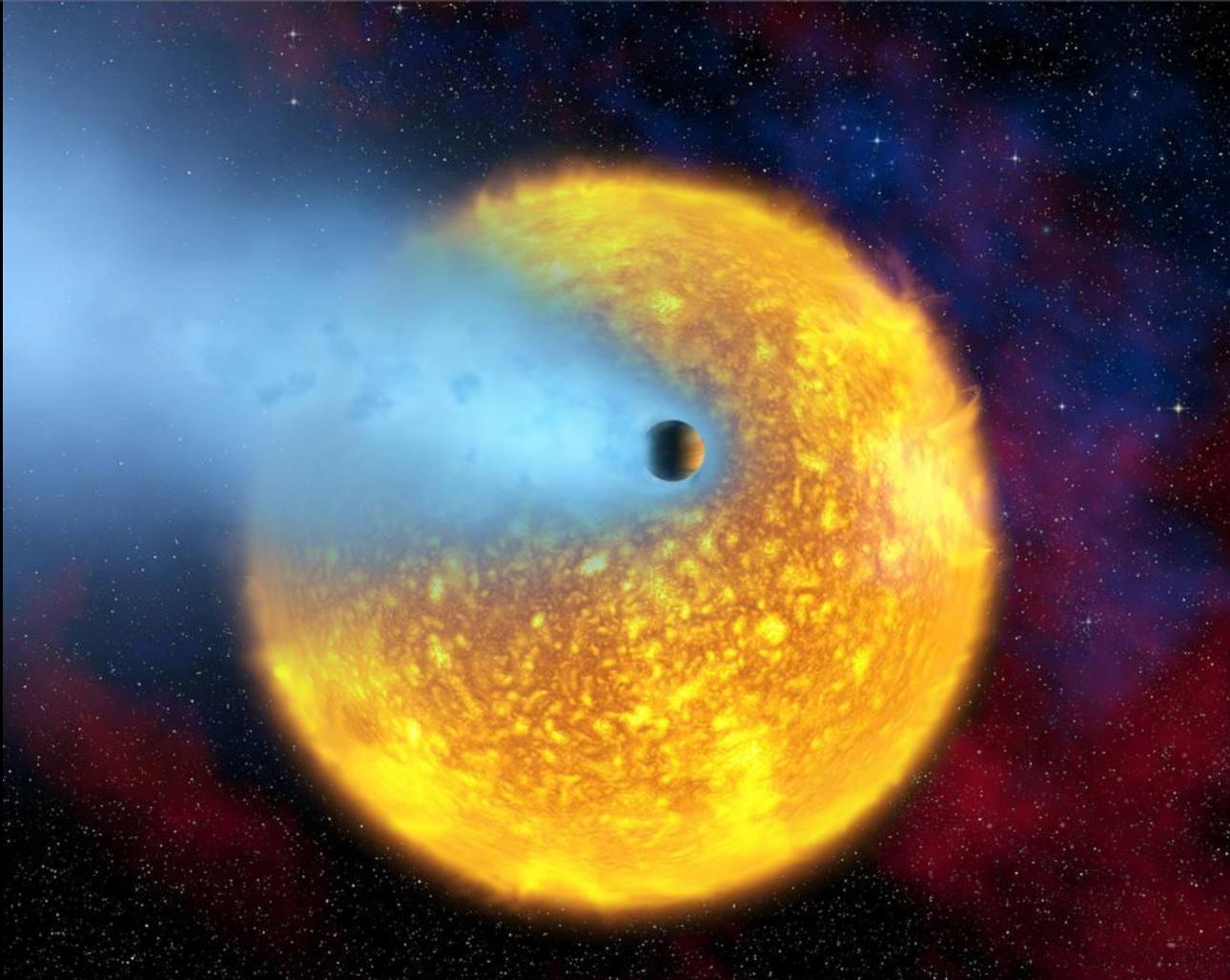
# Exoplanetas intrigantes: Kepler-186f



Kepler-186f foi o primeiro planeta rochoso encontrado na zona habitável (a região ao redor da estrela hospedeira onde a temperatura é adequada para a água líquida). Este planeta também é quase do tamanho da Terra. Ainda não podemos descobrir o que está acontecendo na sua superfície, mas novas tecnologias estão sendo desenvolvidas.

*Creditos: NASA Ames/SETI Institute/JPL-Caltech*

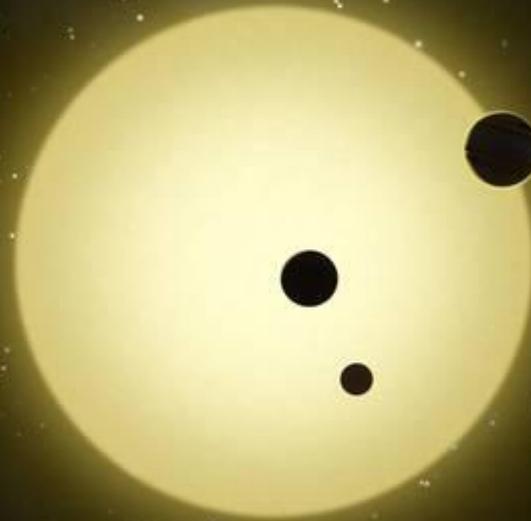
# Exoplanetas intrigantes: HD 209458 b (apelido "Osiris")



O primeiro planeta a ser visto em trânsito atravessando sua estrela. A descoberta de trânsito HD 209458 b mostrou que as observações de trânsito eram viáveis e abriram um novo campo de caracterização de exoplaneta. *Credits: NASA, European Space Agency, Alfred Vidal-Madjar (Institut d'Astrophysique de Paris, CNRS)*

# Exoplanetas intrigantes: sistema Kepler 11

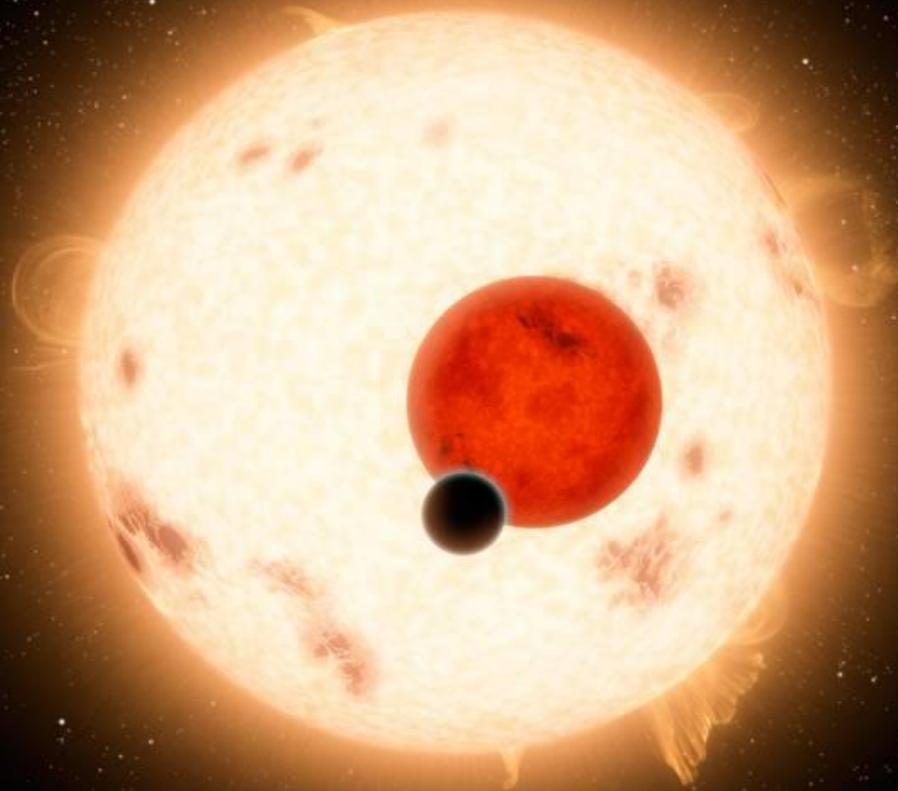
<https://www.nasa.gov/feature/jpl/20-intriguing-exoplanets>



Foi o primeiro sistema planetário compacto descoberto pelo telescópio espacial Kepler, e revelou que um sistema pode ser fortemente agregado pela gravidade, com pelo menos cinco planetas localizados em região equivalente a da órbita de Mercúrio e ainda ser estável. Ele desencadeou um novo olhar nas ideias de formação de planetas e sugeriu que vários sistemas planetários compactos, como o nosso, podem ser comuns.

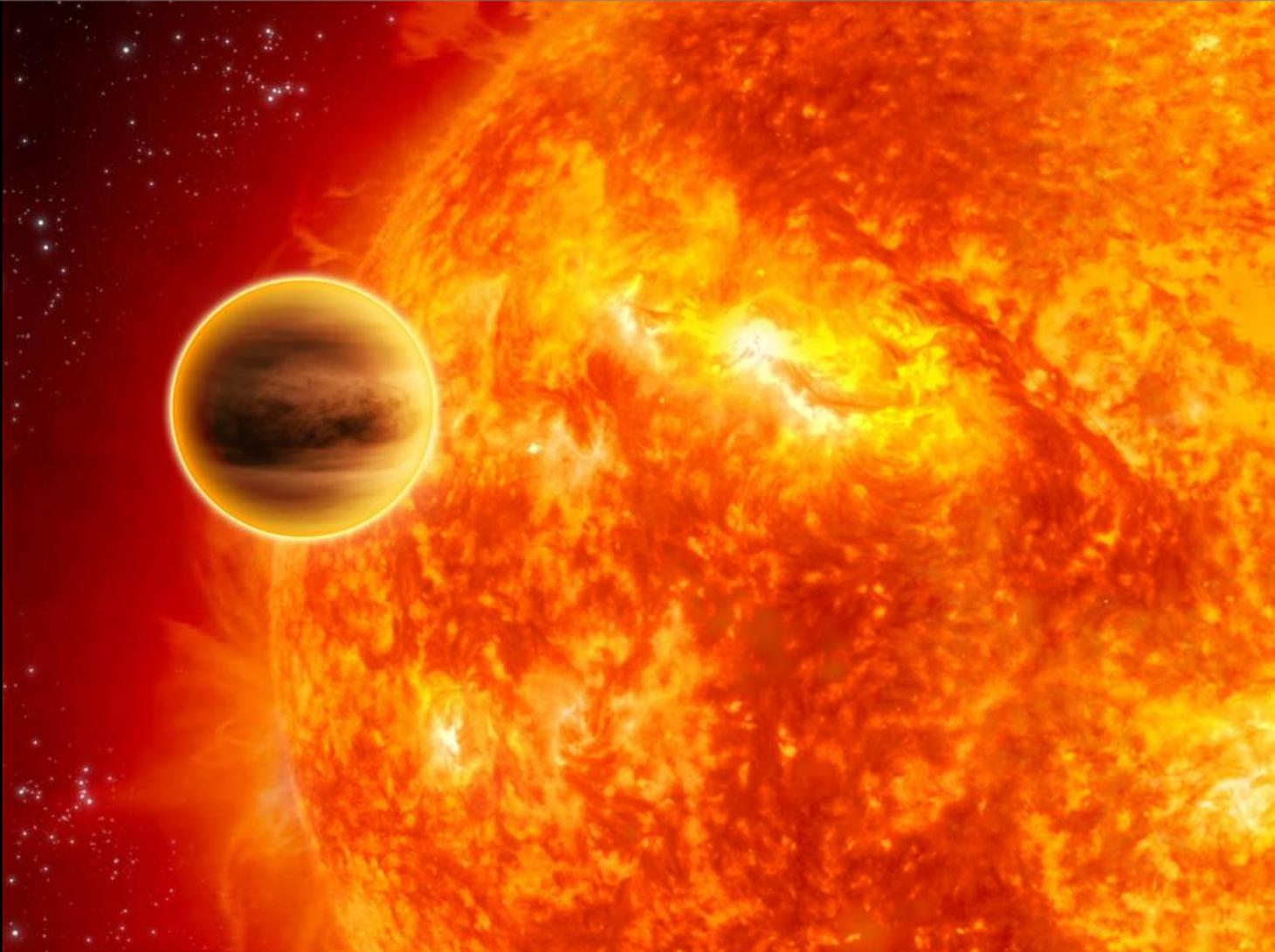
*Creditos: NASA/JPL-Caltech*

# Exoplanetas intrigantes: Kepler-16b



Um "Tatooine" da vida real (Tatooine é o planeta natal da família Skywalker ; foi um planeta desértico em um sistema estelar binário do setor Arkanis na Orla Exterior. ). Este planeta foi a primeira descoberta do telescópio espacial Kepler. Ele orbita um sistema duplo de estrelas. *Credits: NASA/JPL-Caltech*

# Exoplanetas intrigantes: 51 Pegasi b



Este planeta gigante, que é cerca de metade da massa de Júpiter e orbita sua estrela a cada quatro dias, foi o primeiro exoplaneta confirmado em torno de uma estrela parecida com o Sol, uma descoberta que lançou um novo campo de exploração. *Creditos: NASA/JPL-Caltech*

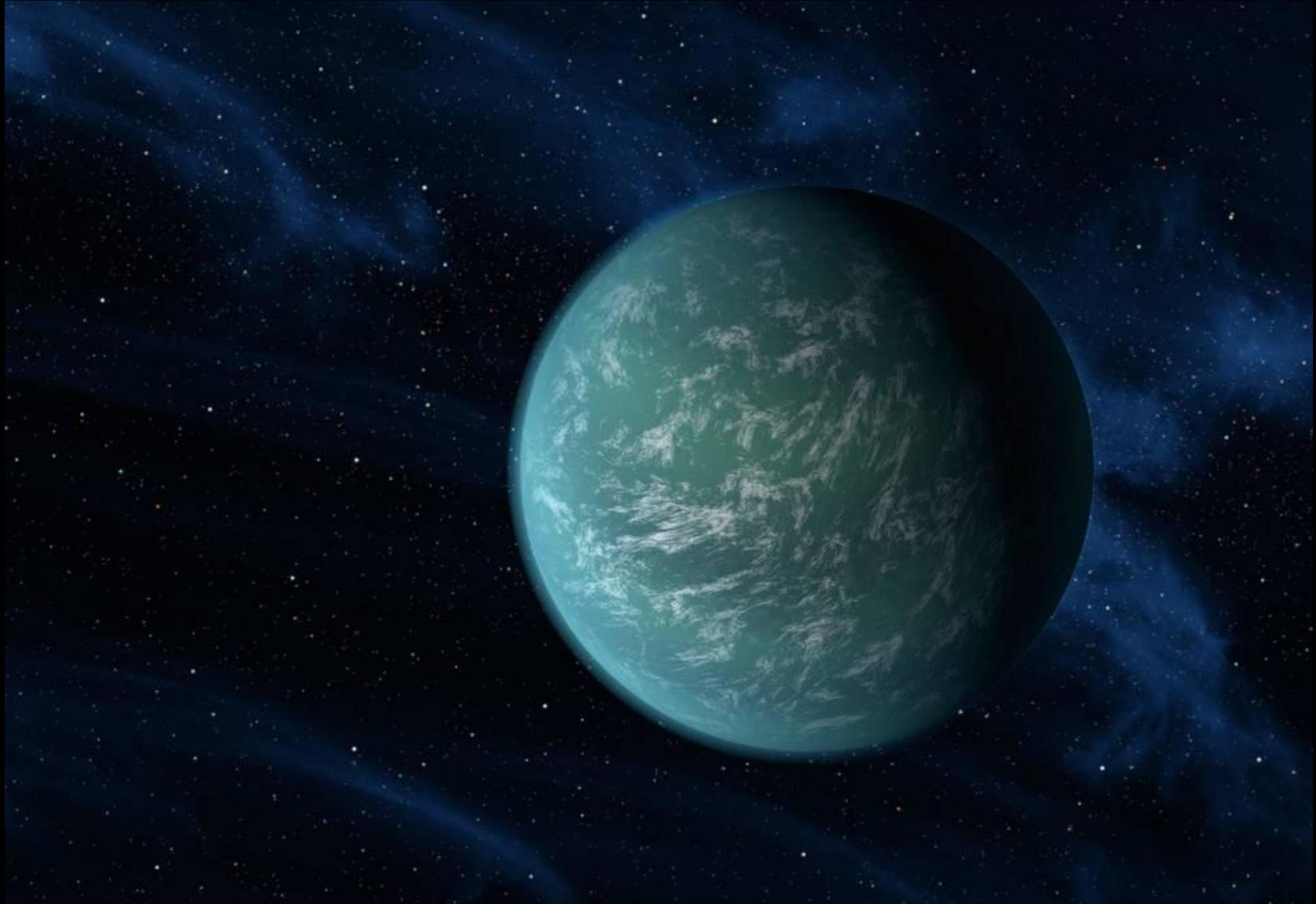
# Exoplanetas intrigantes: CoRoT 7b

<https://www.nasa.gov/feature/jpl/20-intriguing-exoplanets>

A primeira super-Terra identificada como um exoplaneta rochoso, este planeta provou que mundos como a Terra eram realmente possíveis e que a busca por mundos potencialmente habitáveis (planetas rochosos na zona habitável) poderia ser frutífera.

*Creditos: ESO/L. Calçada*

# Exoplanetas intrigantes: Kepler-22b

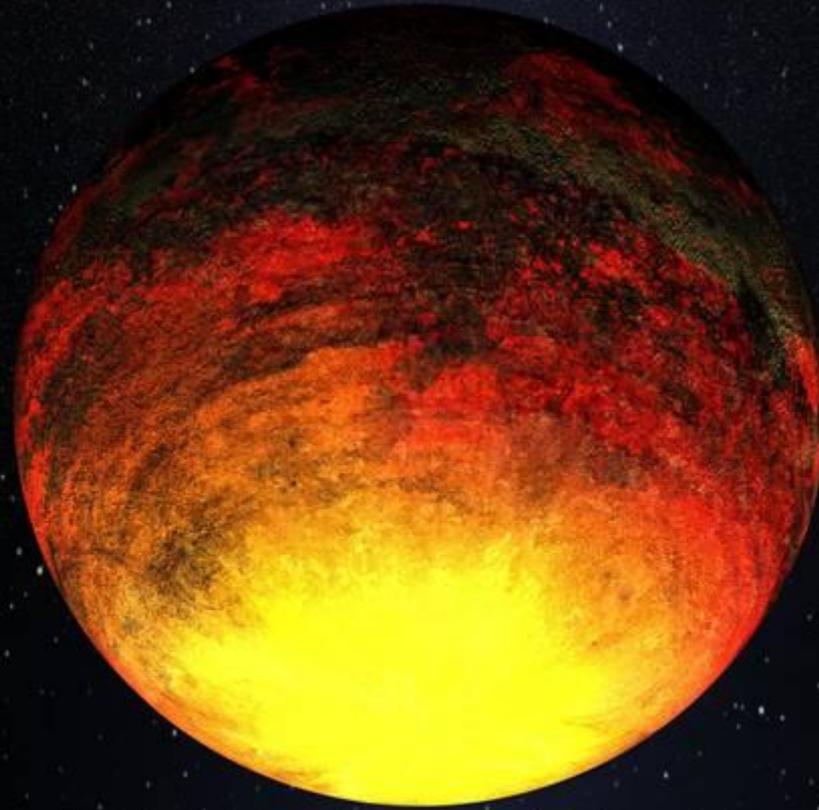


<https://www.nasa.gov/feature/jpl/20-intriguing-exoplanets>

Um planeta na zona habitável e um possível planeta do mundo da água.

*Creditos: NASA/Ames/JPL-Caltech*

# Exoplanetas intrigantes: Kepler-10b



<https://www.nasa.gov/feature/jpl/20-intriguing-exoplanets>

**A primeira descoberta de planeta rochoso do telescópio espacial Kepler é um mundo do tamanho de Terra que os cientistas acreditam que pode ter um oceano de lava na superfície.**

*Creditos: NASA/Kepler Mission/Dana Berry*

# Exoplanetas intrigantes: sistema Kepler-444

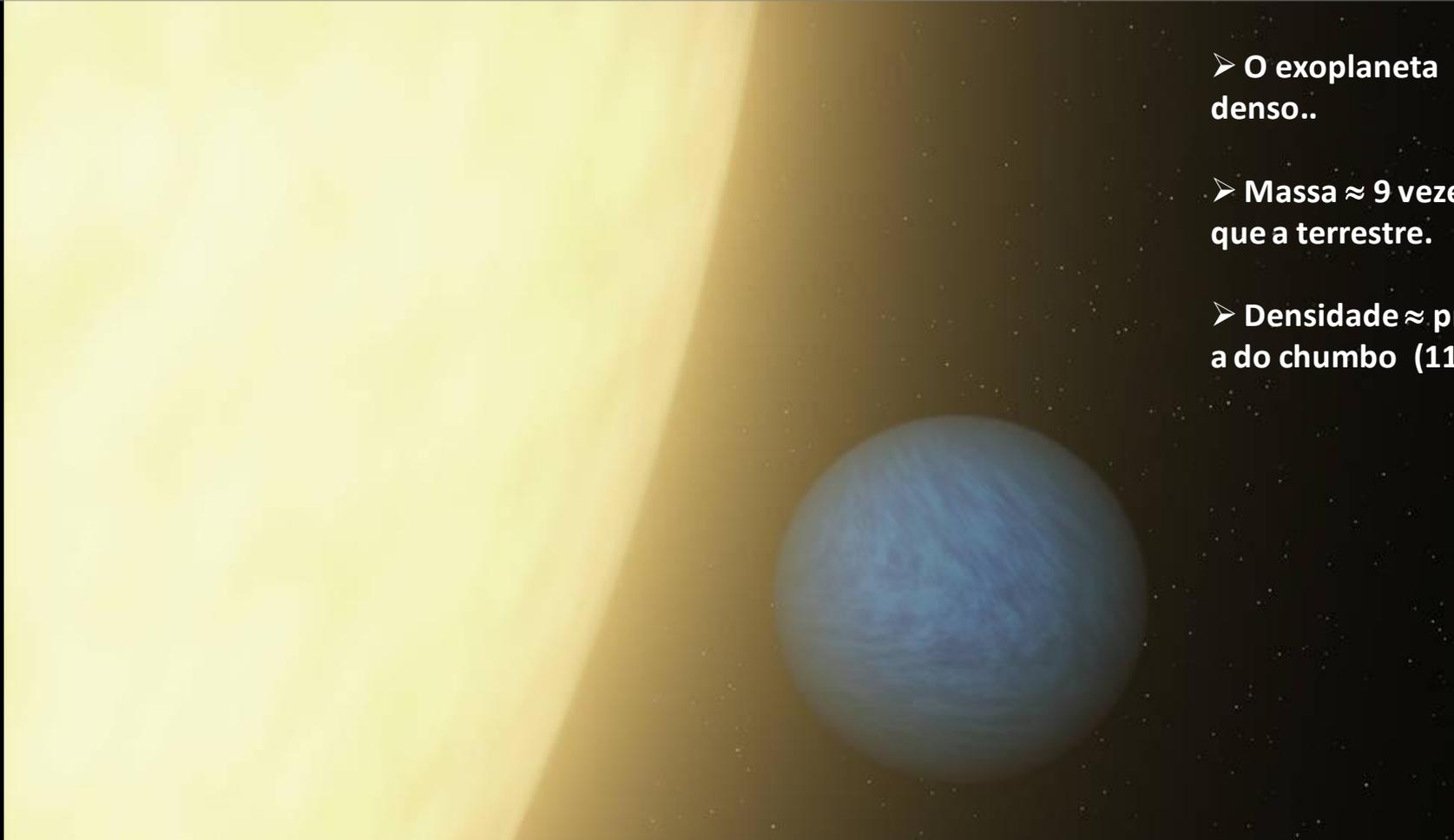
<https://www.nasa.gov/feature/jpl/20-intriguing-exoplanets>



O sistema planetário conhecido mais antigo possui cinco planetas de tamanho terrestre, todos em ressonância orbital. Este grupo estranho mostrou que os sistemas solares se formaram e viveram em nossa galáxia por quase toda a sua existência. *Creditos: Tiago Campante/Peter Devine*

# Exoplanetas intrigantes: 55 Cancri e

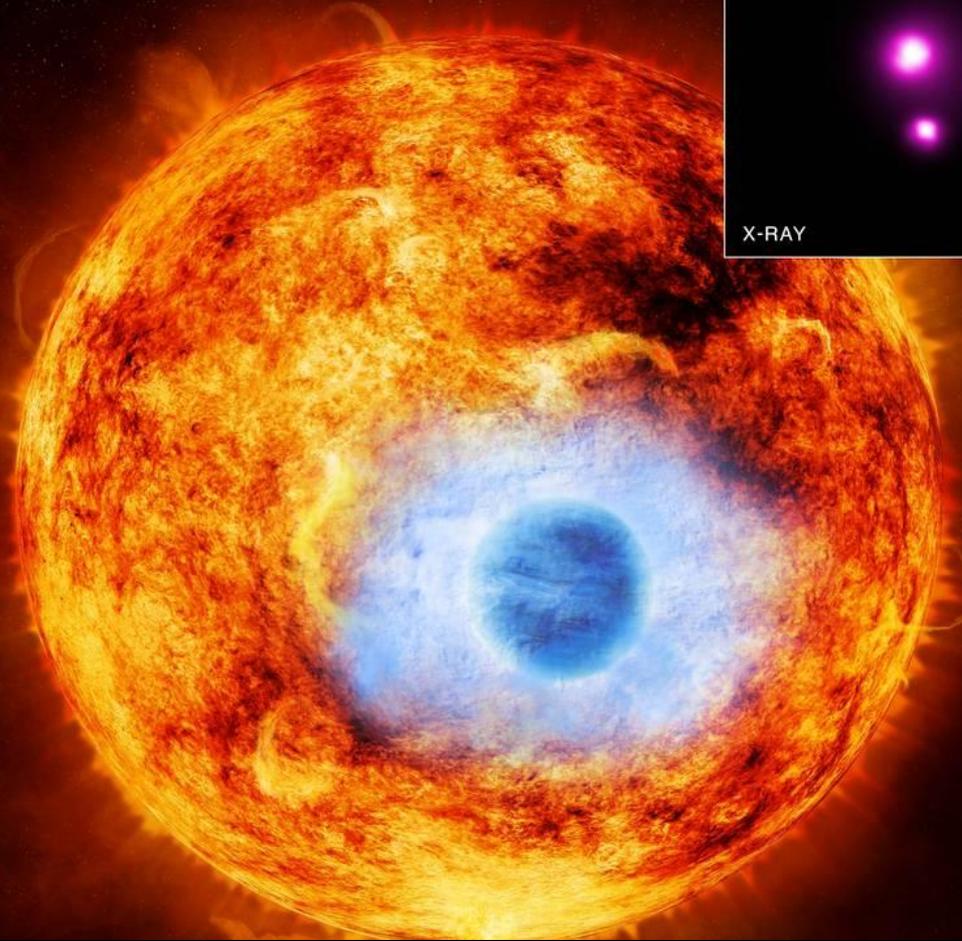
<https://www.nasa.gov/feature/jpl/20-intriguing-exoplanets>



- O exoplaneta mais denso..
- Massa  $\approx$  9 vezes maior que a terrestre.
- Densidade  $\approx$  próxima a do chumbo (11,3 g/cc)

É um mundo tostado que circula sua estrela a cada 18 horas. Ele orbita tão de perto - cerca de 25 vezes mais do que Mercúrio é para o Sol - que está travado por forças de maré, expondo uma das suas faces diretamente para a sua estrela; sua superfície deve estar parcialmente fundida. O planeta deve ter um núcleo rochoso cercado por uma camada de água em um estado "supercrítico", onde é simultaneamente líquido e gás; todo o planeta pode estar envolto por uma atmosfera de vapor. *Creditos: NASA / JPL-Caltech*

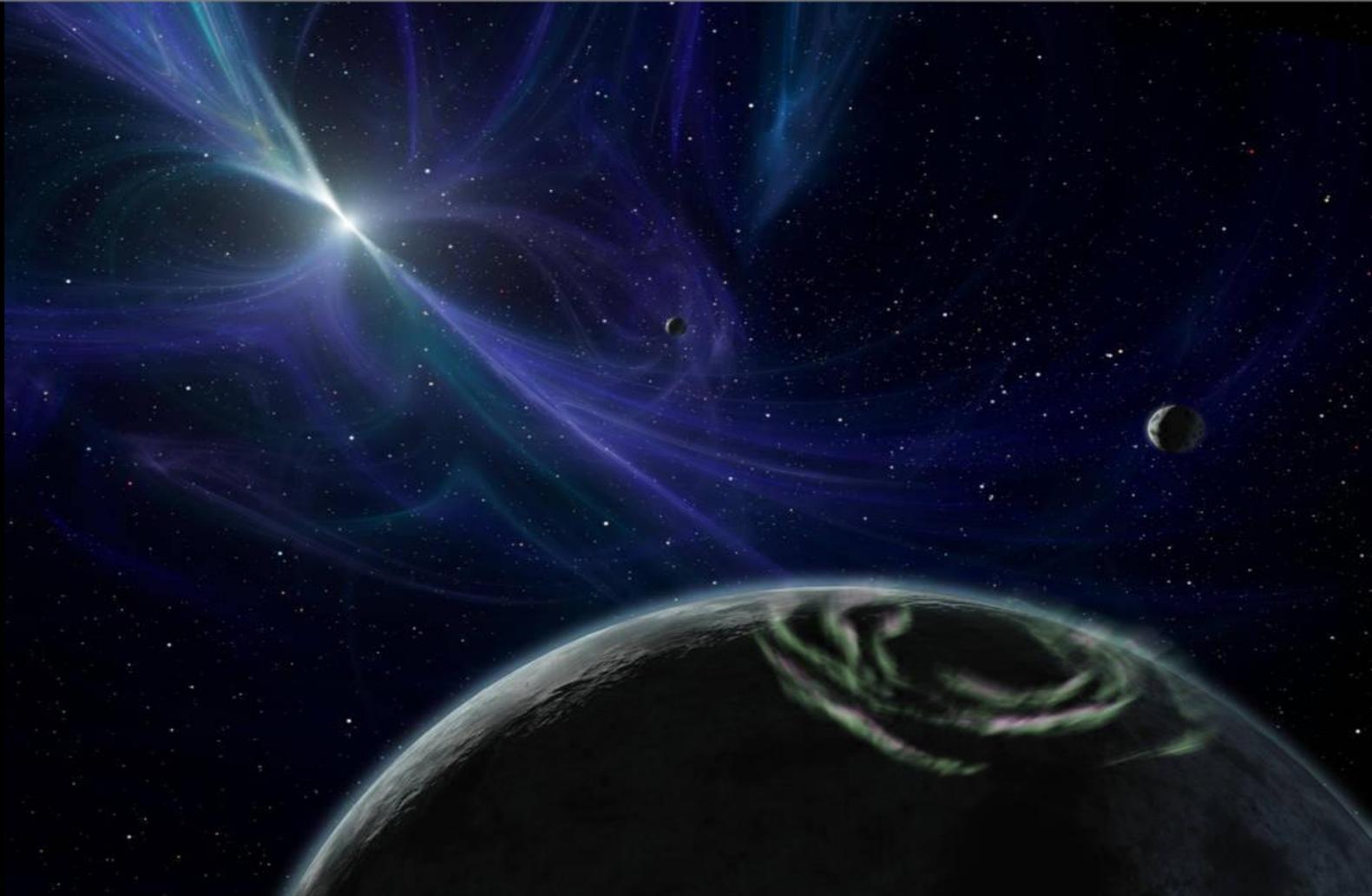
# Exoplanetas intrigantes: HD 189733 b



Este exoplaneta, do tamanho de Jupiter, é um dos mais estudados e é o primeiro trânsito detectado em raios-X. O Observatório de raios-X Chandra da NASA e o Observatório XMM Newton da Agência Espacial Europeia foram utilizados para observar esse trânsito na estrela HD 189733b do tipo solar.

*Credito: X-ray: NASA/CXC/SAO/K. Poppenhaefer et al; Illustration: NASA/CXC/M. Weiss*

# Exoplanetas intrigantes: PSR B1257 + 12

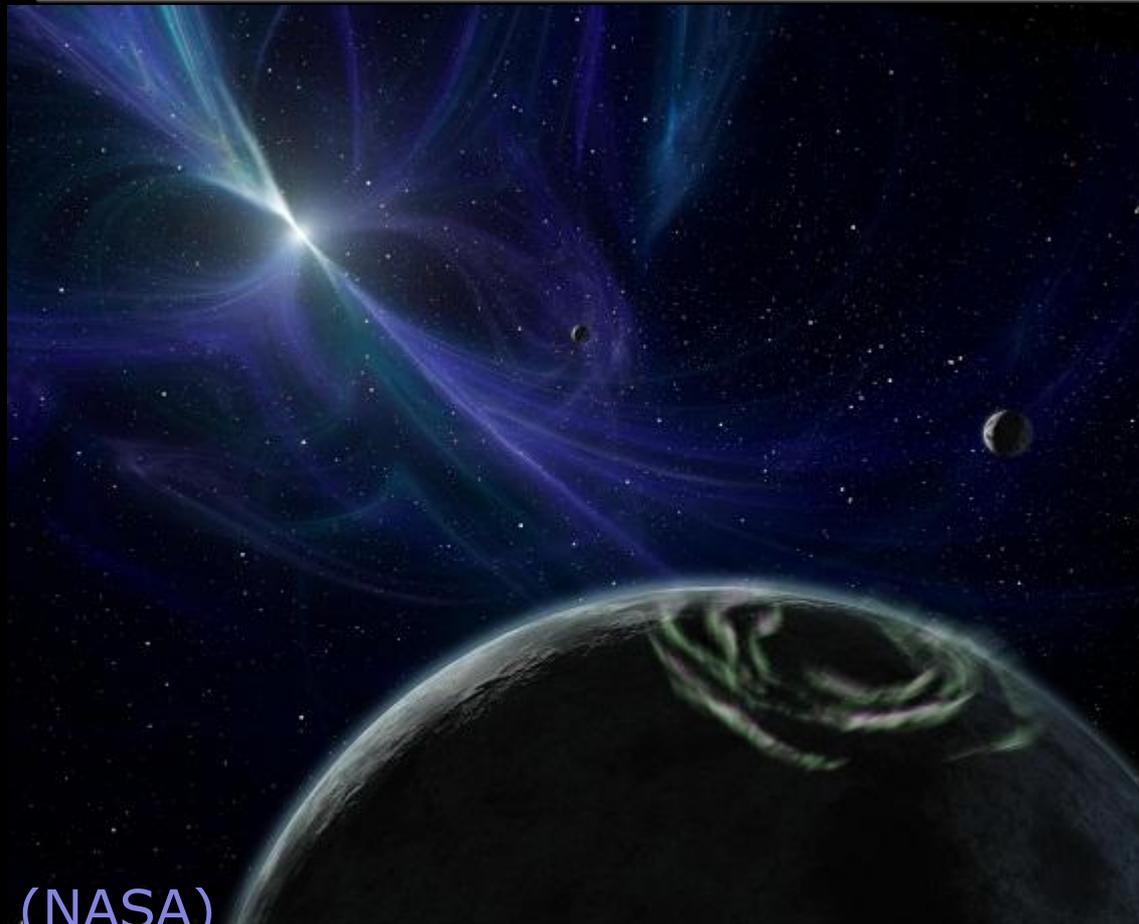


<https://www.nasa.gov/feature/jpl/20-intriguing-exoplanets>

Descobertos em 1992 e 1994, os planetas que orbitam pulsar PSR B1257 + 12 não são apenas os menores exoplanetas, eles também orbitam uma estrela de nêutrons. Esses estranhos "planetas de pulsar" demonstraram que os planetas existem em todos os ambientes da galáxia - mesmo em torno dos restos de uma estrela explodida. Idade estimada em cerca de 13 bilhões de anos.

*Creditos: NASA / JPL-Caltech*

## Exoplanetas: PSR B1620-26b é o mais velho



(NASA)

**Planetas em pulsares são remanescentes de estrelas mortas. Estão sob radiação intensa**

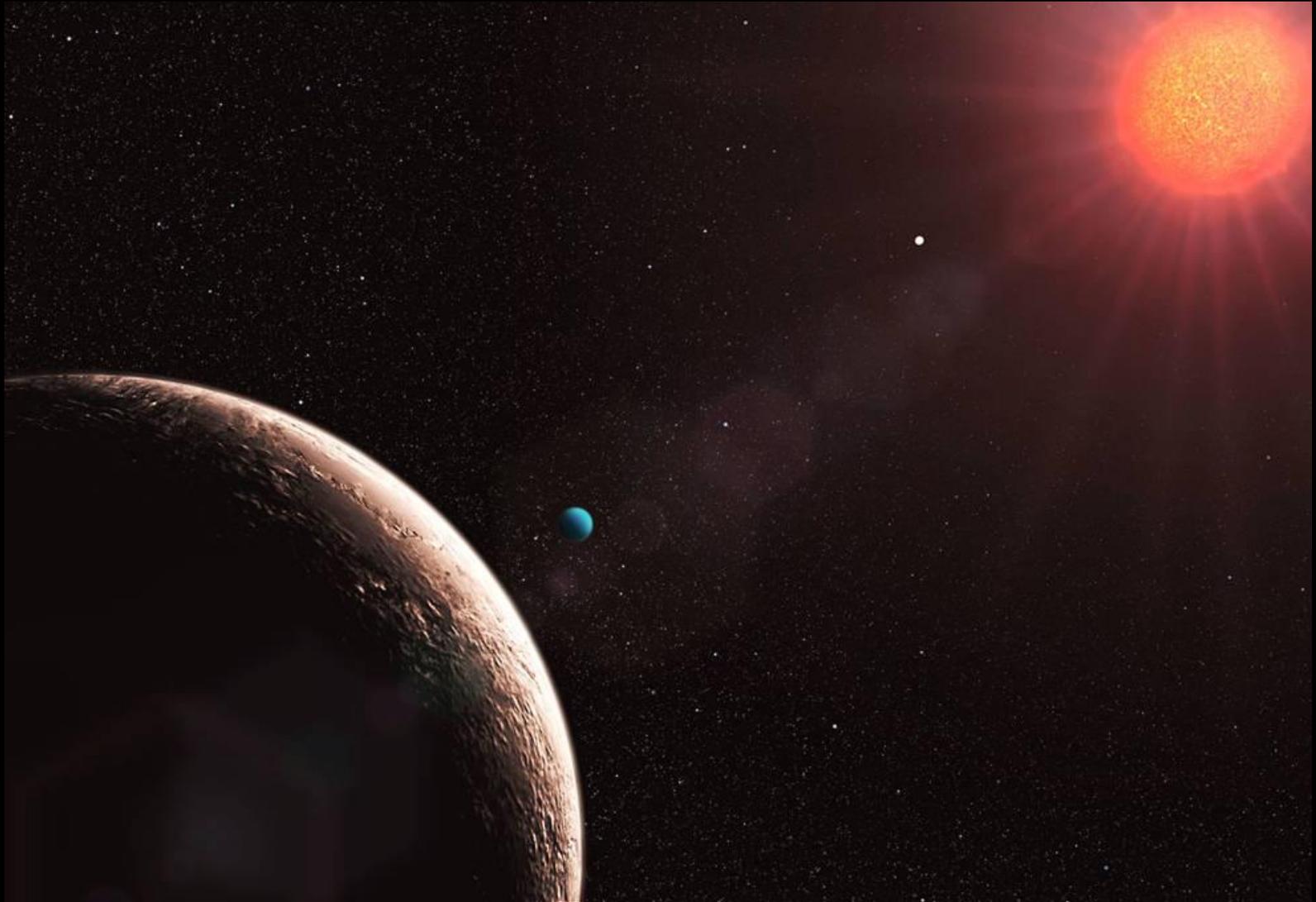
**Foi o primeiro caso observado.**

**A descoberta ocorreu em 1993, mas só foi confirmada em 2003.**

**Esse planeta orbita um par de estrelas (pulsar e anã branca), em um aglomerado globular na constelação do Escorpião.**

**Sua idade é estimada em cerca de 13 bilhões de anos.**

# Exoplanetas intrigantes: K2-3

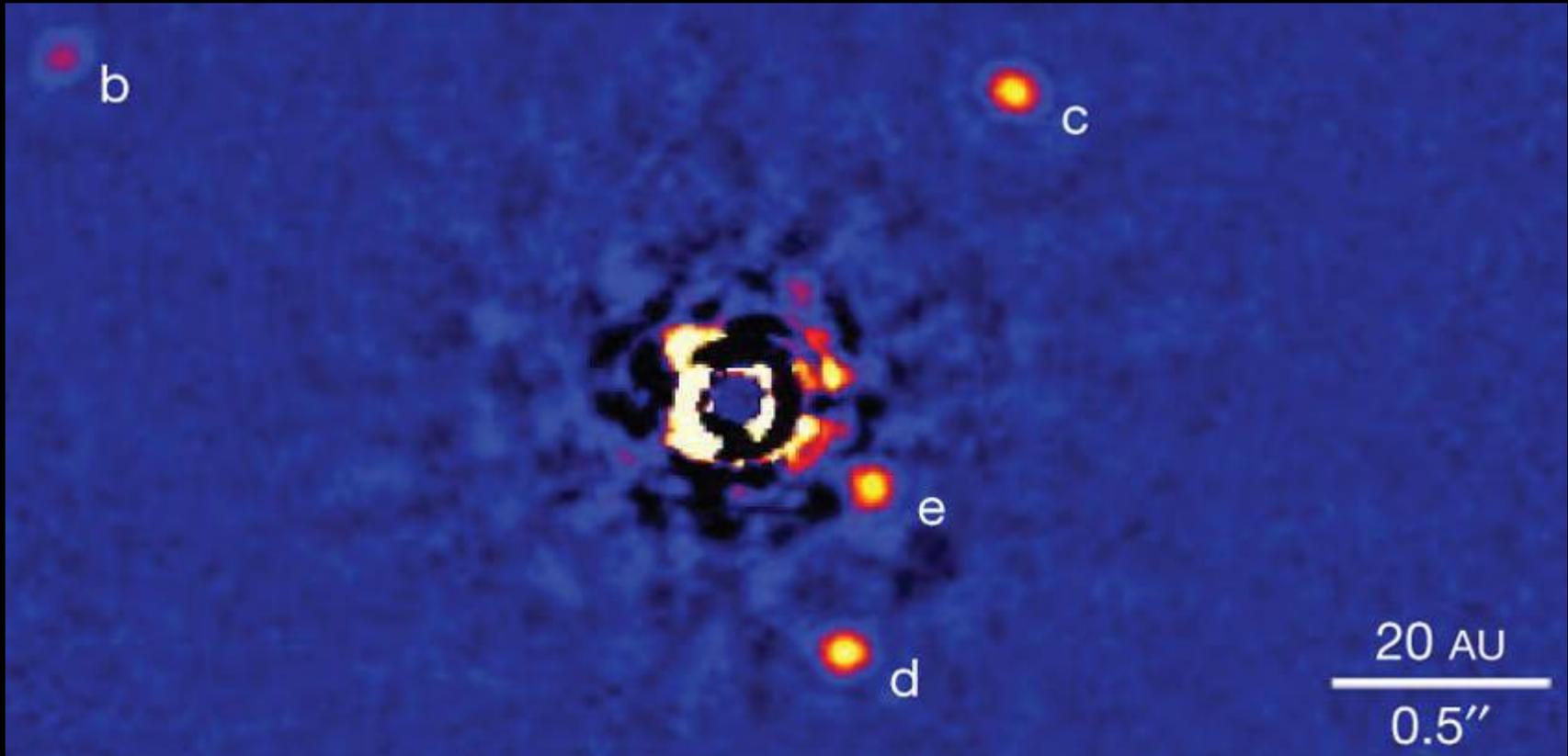


<https://www.nasa.gov/feature/jpl/20-intriguing-exoplanets>

Três super-Terras descobertas pela missão K2 orbitando uma estrela próxima. Massa e raio já são conhecidos e logo eles podem revelar sua composição atmosférica.

*Creditos: ESO / M. Kornmesser / Nick Risinger / L. Calcada*

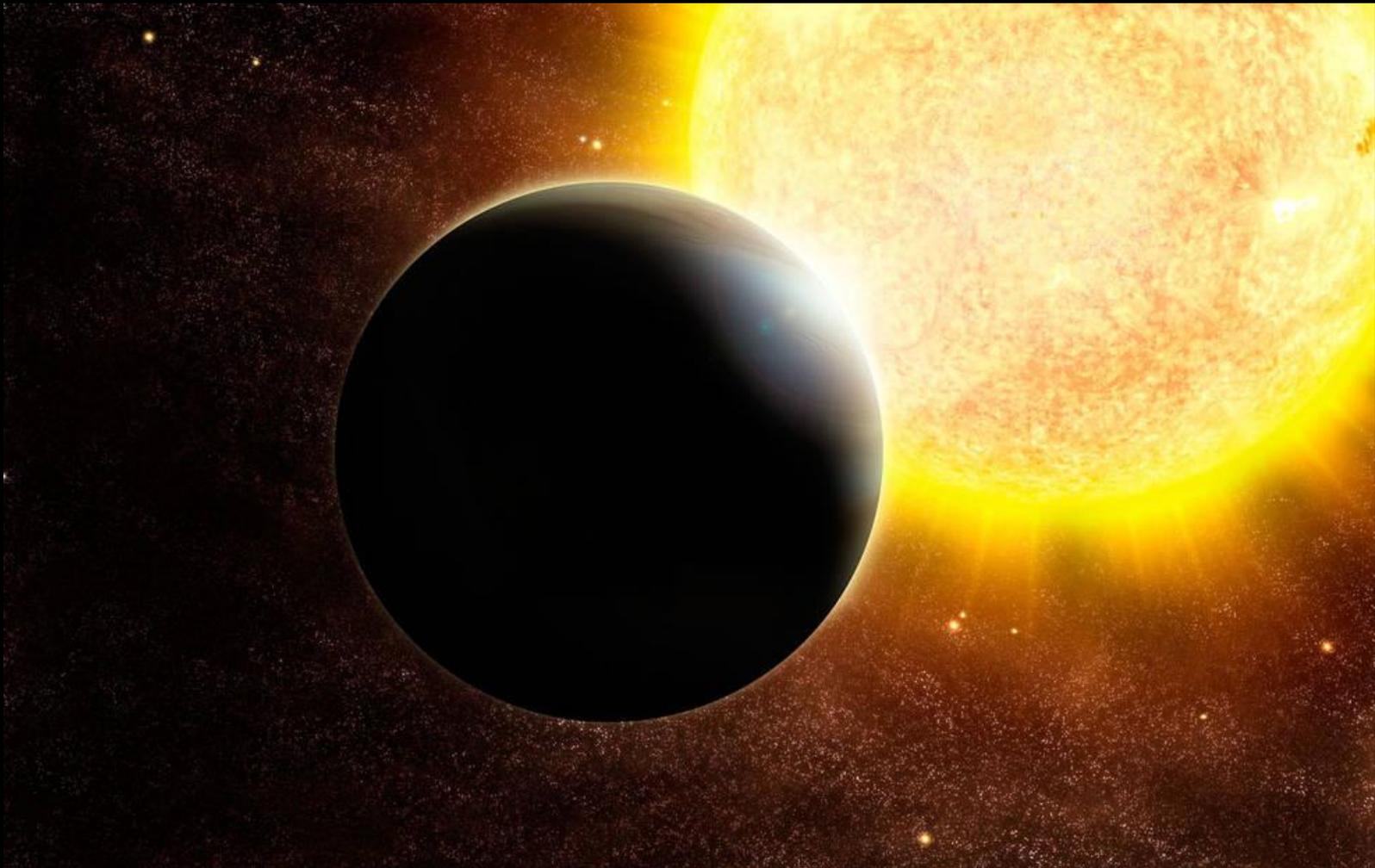
# Exoplanetas intrigantes: HR 8799



<https://www.nasa.gov/feature/jpl/20-intriguing-exoplanets>

O primeiro sistema multi-exoplaneta de imagem direta. Este sistema contém um disco de detritos e pelo menos quatro planetas maciços. *Creditos: NRC-HIA, Christian Marois, Keck Observatory*

# Exoplanetas intrigantes: HD 114762 b



Descoberto em 1989, três anos antes dos planetas de pulsar e seis anos antes de 51 Peg b, HD 114762 b é verdadeiramente o primeiro planeta descoberto em torno de uma estrela parecida com o sol. No entanto, porque sua massa é 11 vezes maior que a de Júpiter e foi encontrada em uma órbita de 84 dias, inicialmente foi assumida (incorretamente) como uma anã marrom.

*Creditos: NASA / JPL-Caltech*

# Exoplanetas intrigantes: sistema Kepler-36

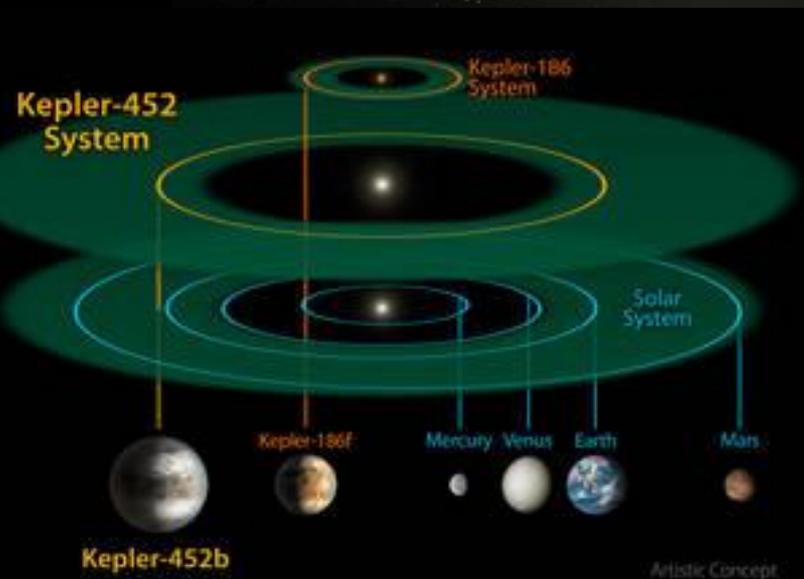


<https://www.nasa.gov/feature/jpl/20-intriguing-exoplanets>

Os dois planetas conhecidos neste sistema possuem as órbitas mais próximas já confirmadas. Em sua maior aproximação, a dupla chega a cerca de 2 milhões de km um do outro - apenas cinco vezes a distância Terra-Lua. *Creditos: ESO*

# Exoplanetas intrigantes: Kepler-452b

<https://www.nasa.gov/feature/jpl/20-intriguing-exoplanets>



O primeiro planeta do tamanho da Terra encontrado na zona habitável de uma estrela parecida com o Sol. O planeta é 60 por cento maior do que a Terra e 5 por cento mais longe da sua estrela principal do que a Terra é do Sol.

*Creditos: NASA / Ames / JPL-Caltech*

# Exoplanetas intrigantes: HD 80606 b

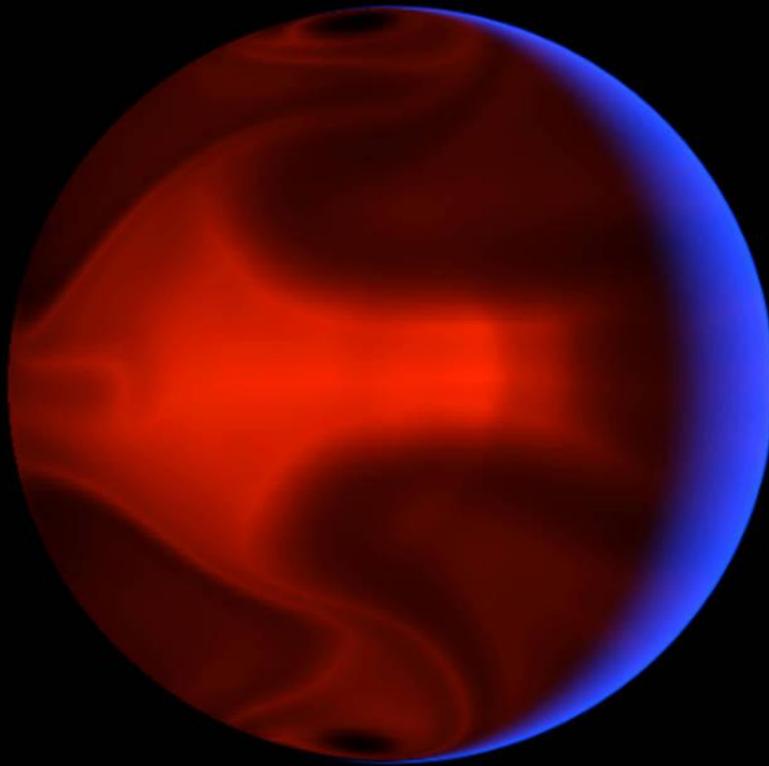
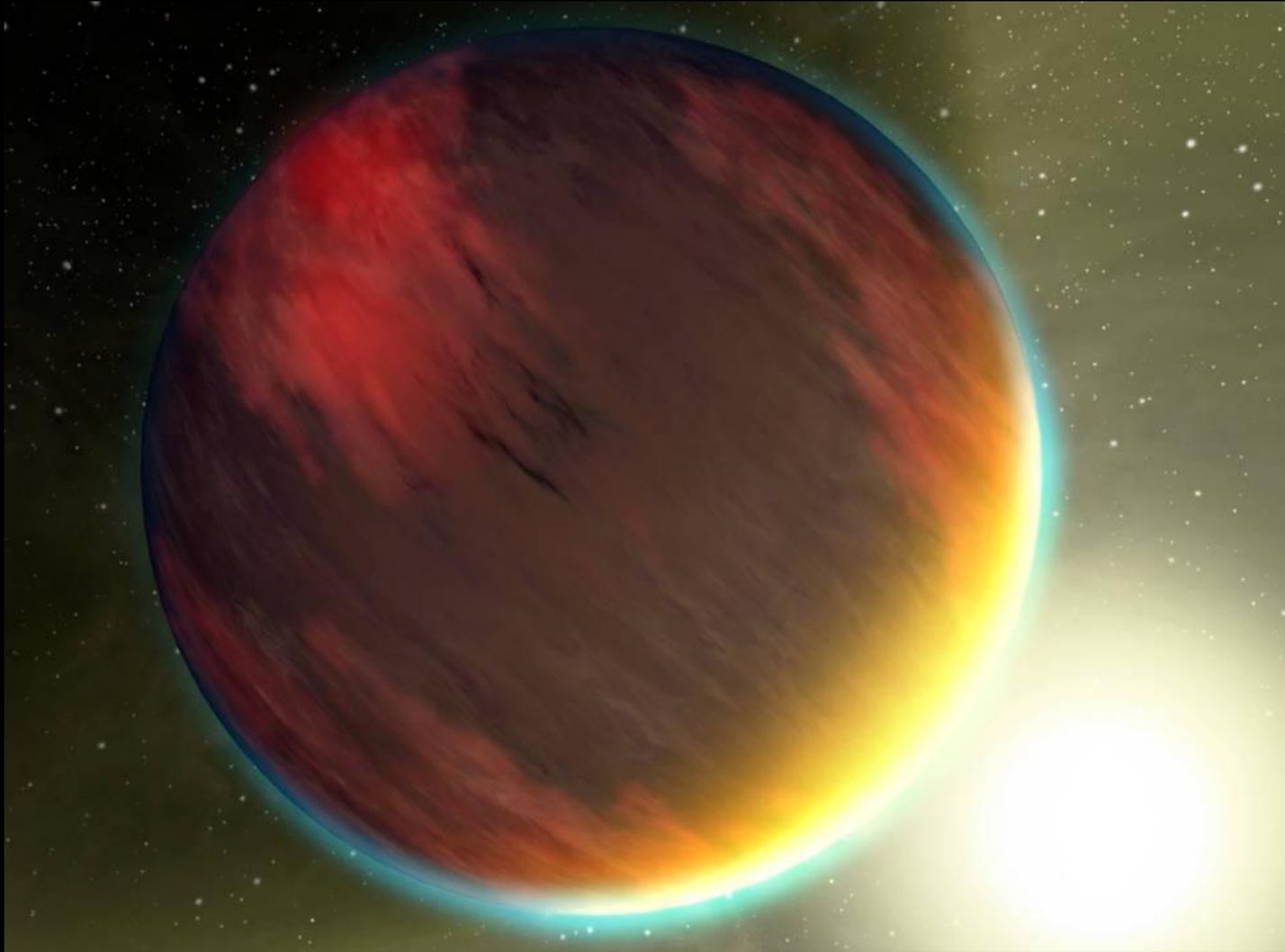


Imagem gerada por computador mostrando padrões climáticos severos no exoplaneta com órbita altamente excêntrica, durante os dias após sua maior aproximação da estrela principal.

Este mundo tem a órbita mais excêntrica, e como um cientista colocou, "usa o coração na manga", com tempestades, rotação, aquecimento atmosférico e uma órbita louca, todos claramente visíveis.

*Creditos: NASA / JPL-Caltech / UCSC*

# Exoplanetas intrigantes: WASP 47



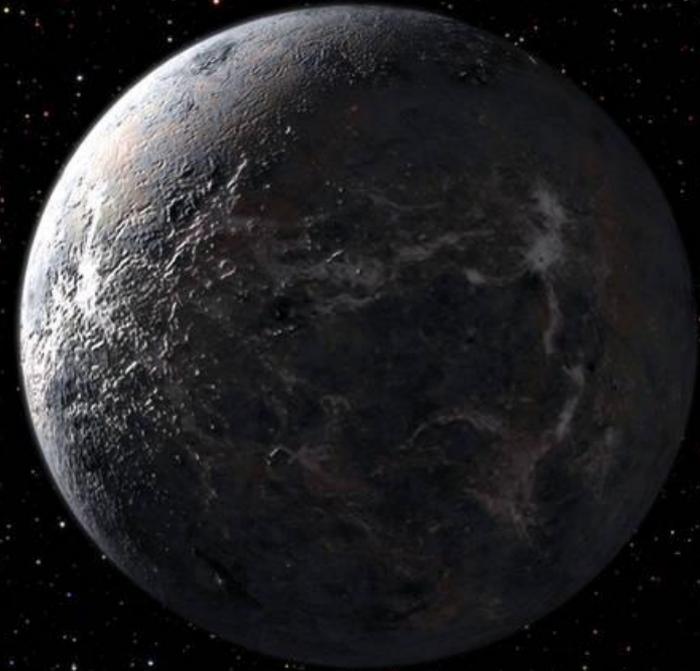
<https://www.nasa.gov/feature/jpl/20-intriguing-exoplanets>

Parte de um sistema multi-planetas compacto, este é o único “Jupiter quente” conhecido com companheiros planetários próximos.

*Creditos: NASA / JPL-Caltech*

# Exoplanetas intrigantes: OGLE-205-BLG-390

<https://www.nasa.gov/feature/jpl/20-intriguing-exoplanets>



Considerado como a primeira super-Terra congelada, este exoplaneta começou a formar um núcleo do tipo do planeta Júpiter, formado de rocha e gelo, mas não conseguiu crescer suficientemente rápido em tamanho. Sua massa final é cinco vezes maior que a da Terra. O apelido do planeta é Hoth, depois de um planeta de Star Wars. *Creditos: NASA, ESA e G. Bacon (STScI)*