



Instituto de Física



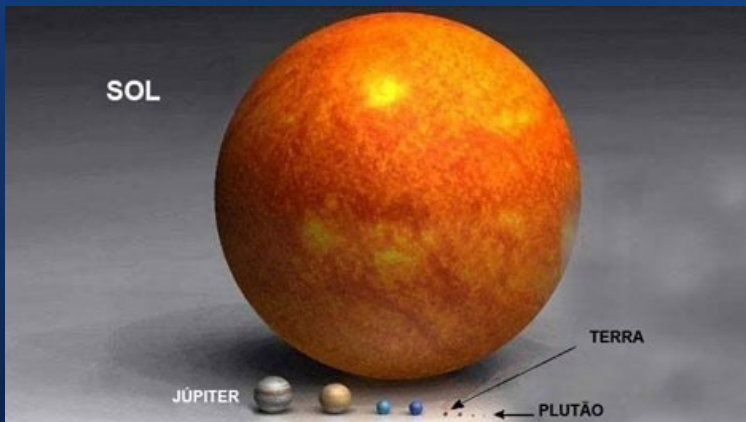
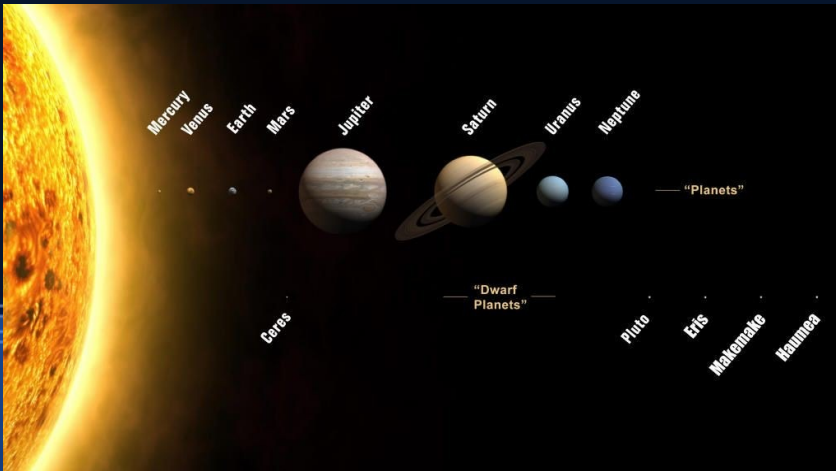
UFRGS

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

Planetas fora do Sistema Solar

Dep. Astronomia
Instituto de Física – UFRGS

O Sistema Solar

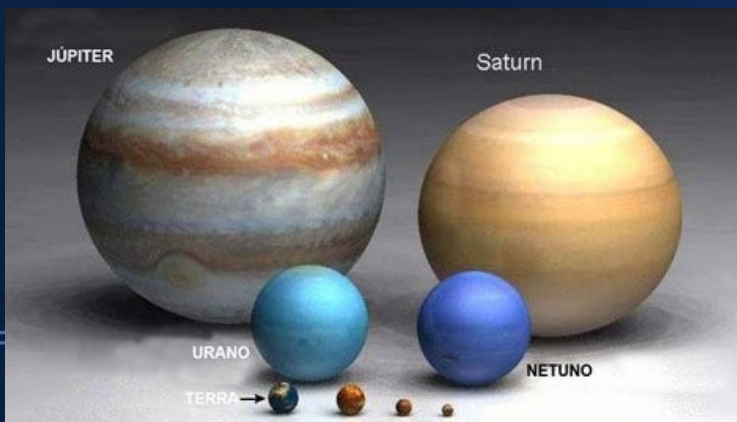


Massa do Sol = 2×10^{30} Kg
(333 000 x massa da Terra; 1 000 x massa de Júpiter)

Diâmetro do Sol = 1 400 000 km
(109x diâmetro da Terra; 10x diâmetro de Júpiter)

Massa de Júpiter = **318 x** massa da Terra

Diâmetro de Júpiter = 143 000 km
= **11 x** diâmetro da Terra



Mercúrio, Vênus, Terra e Marte: “**Rochosos**” ou “**Terrestres**”

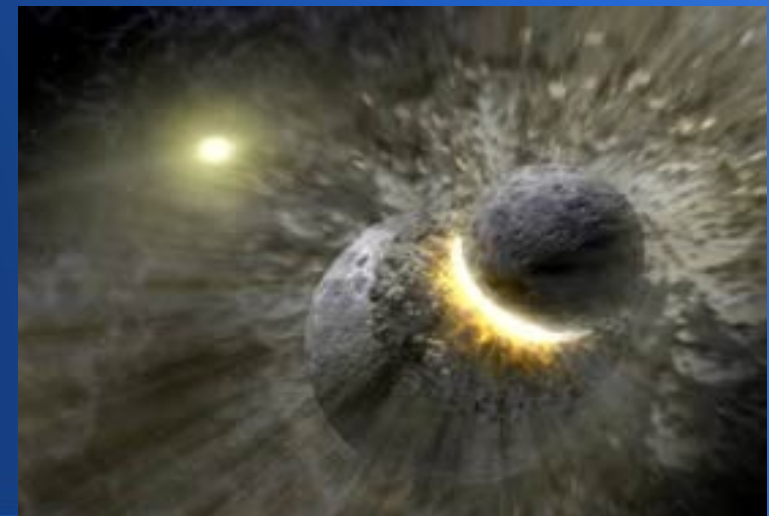
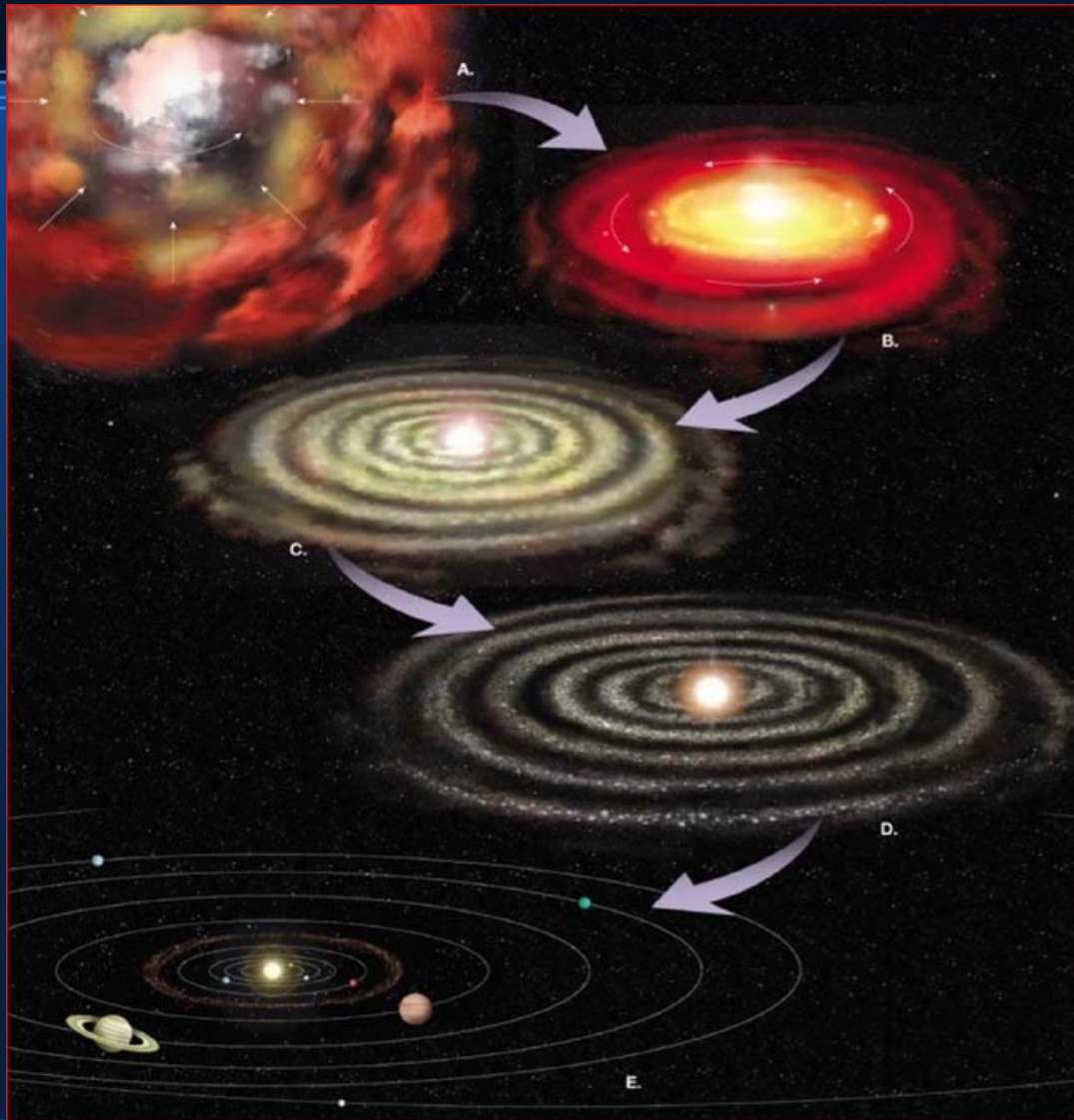
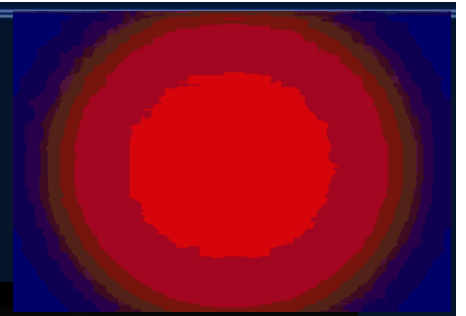
Júpiter e Saturno: “**Gigantes Gasosos**”

Urano e Netuno: “**Gigantes Gelados**”

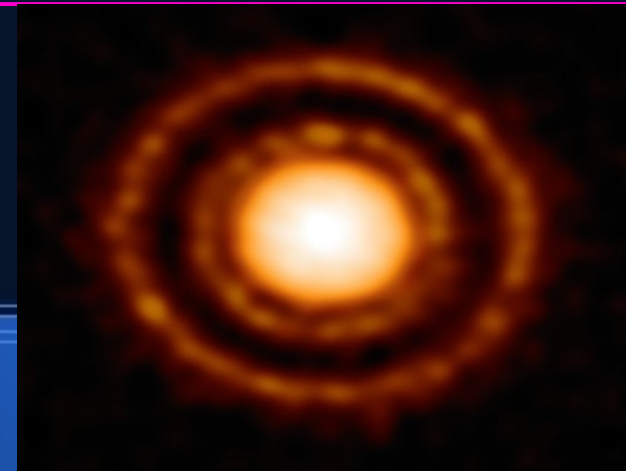
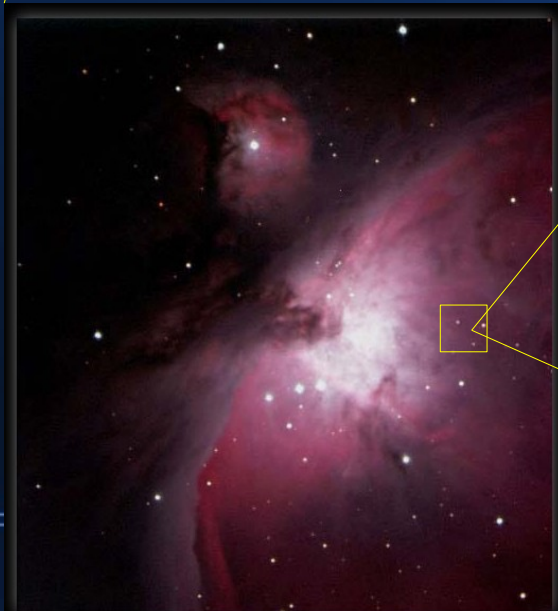
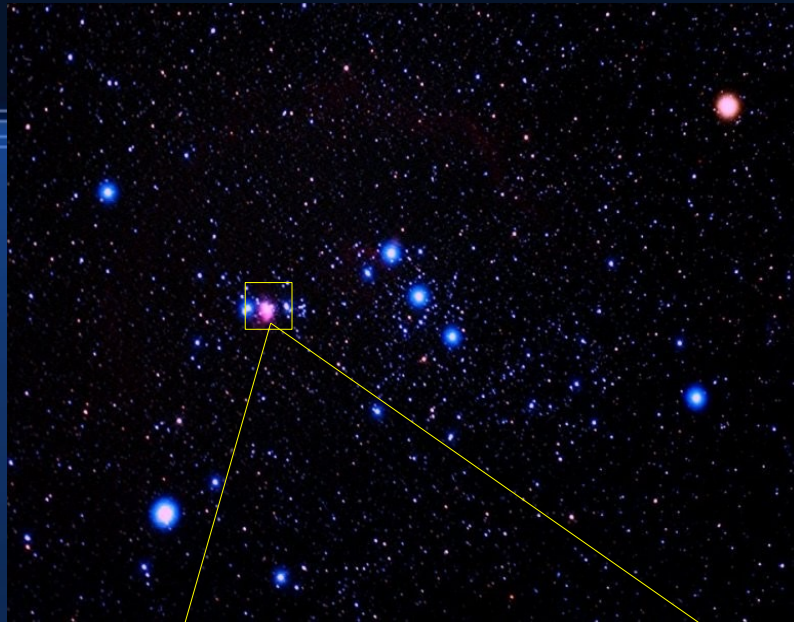


“**Jovianos**”

Formação do Sistema Solar

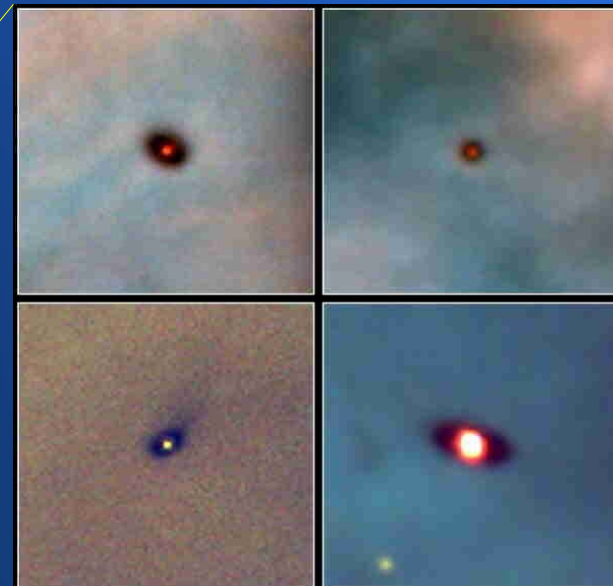


Observação de Discos Protoplanetários



Discos protoplanetários ao redor da estrela AS 209

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



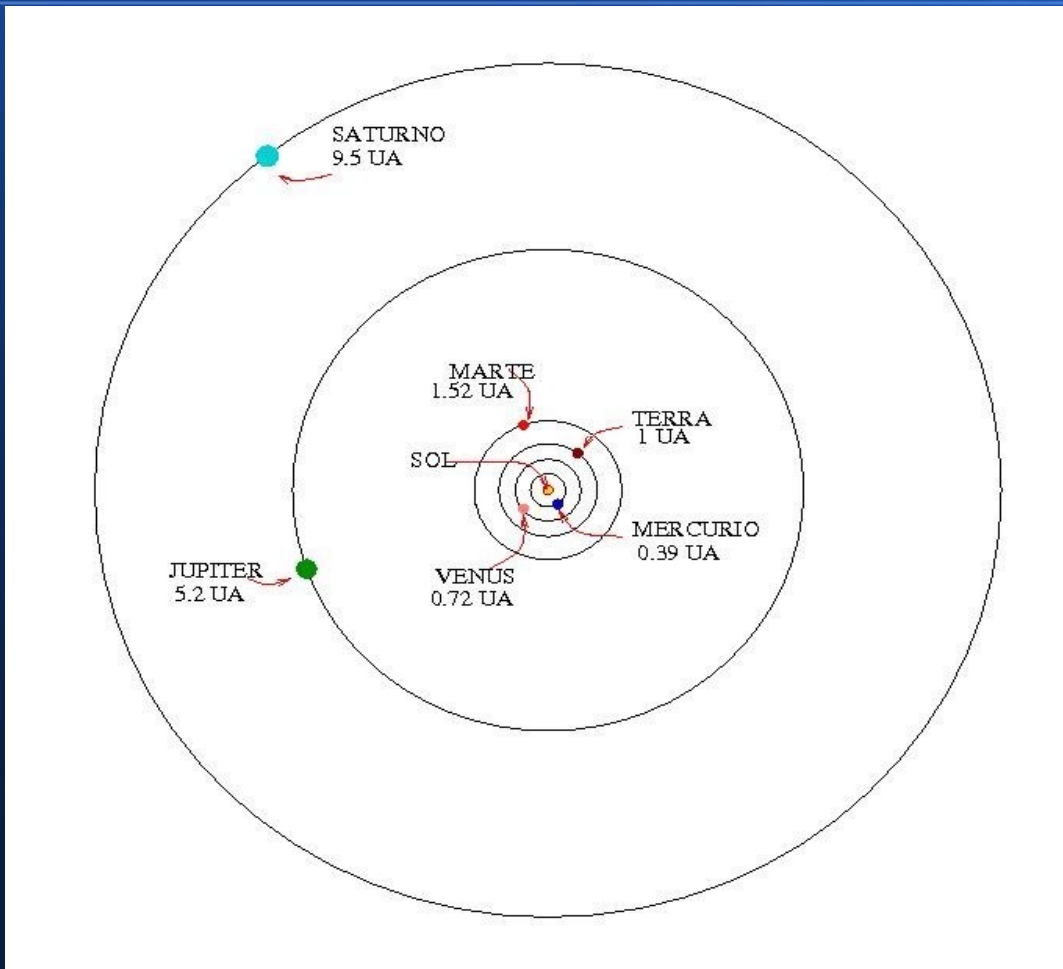
Protoplanetary Disks
Orion Nebula

HST · WFPC2

PRC95-45b · ST ScI OPO · November 20, 1995
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA

Discos protoplanetários ao redor de estrelas em formação na Nebulosa de Órion.

A Terceira Lei de Kepler



Planeta	Raio da Órbita (a) (UA)	Período Orbital (P) (aprox.)
Mercúrio	0.5	88 dias
Vênus	0.7	225 dias
Terra	1	365 dias
Marte	1.5	1.9 anos
Júpiter	5.2	12 anos
Saturno	9.5	29.5 anos
Urano	19.2	84 anos
Netuno	39.4	165 anos

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G(m + M)} a^3$$

A partir da medida do período orbital P, pode-se calcular o **semi-eixo** da órbita, a.

Planetas Extrassolares

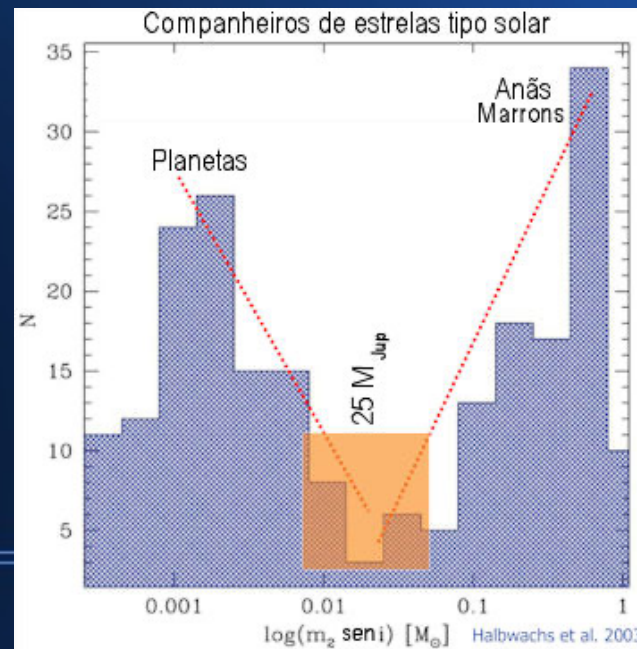
Planetas são corpos que orbitam estrelas e **não têm nem nunca tiveram reações nucleares.**

Os objetos acima de $75 M_{\text{Júpiter}}$ têm reações nucleares transformando H em He: estrelas.

Entre $13 M_{\text{Júpiter}}$ e $75 M_{\text{Júpiter}}$ têm reações nucleares transformando o deutério em trítio:

anãs marrons.

Os objetos abaixo de $13 M_{\text{Júpiter}}$, que orbitam uma estrela, são chamados planetas.



Observação Direta de Planetas Extrassolares

Difícil observar diretamente um planeta orbitando

uma estrela, porque seu brilho é mais de

1 milhão de vezes mais fraco

$$F(r) = \frac{L}{4\pi r^2}$$

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{ef}}^4$$

$$\frac{F_{\text{planeta}}}{F_{\text{estrela}}} = \frac{R_{\text{planeta}}^2}{R_{\text{estrela}}^2} \frac{T_{\text{planeta}}^4}{T_{\text{estrela}}^4} \leq \frac{1}{1 \text{ milhão}}$$

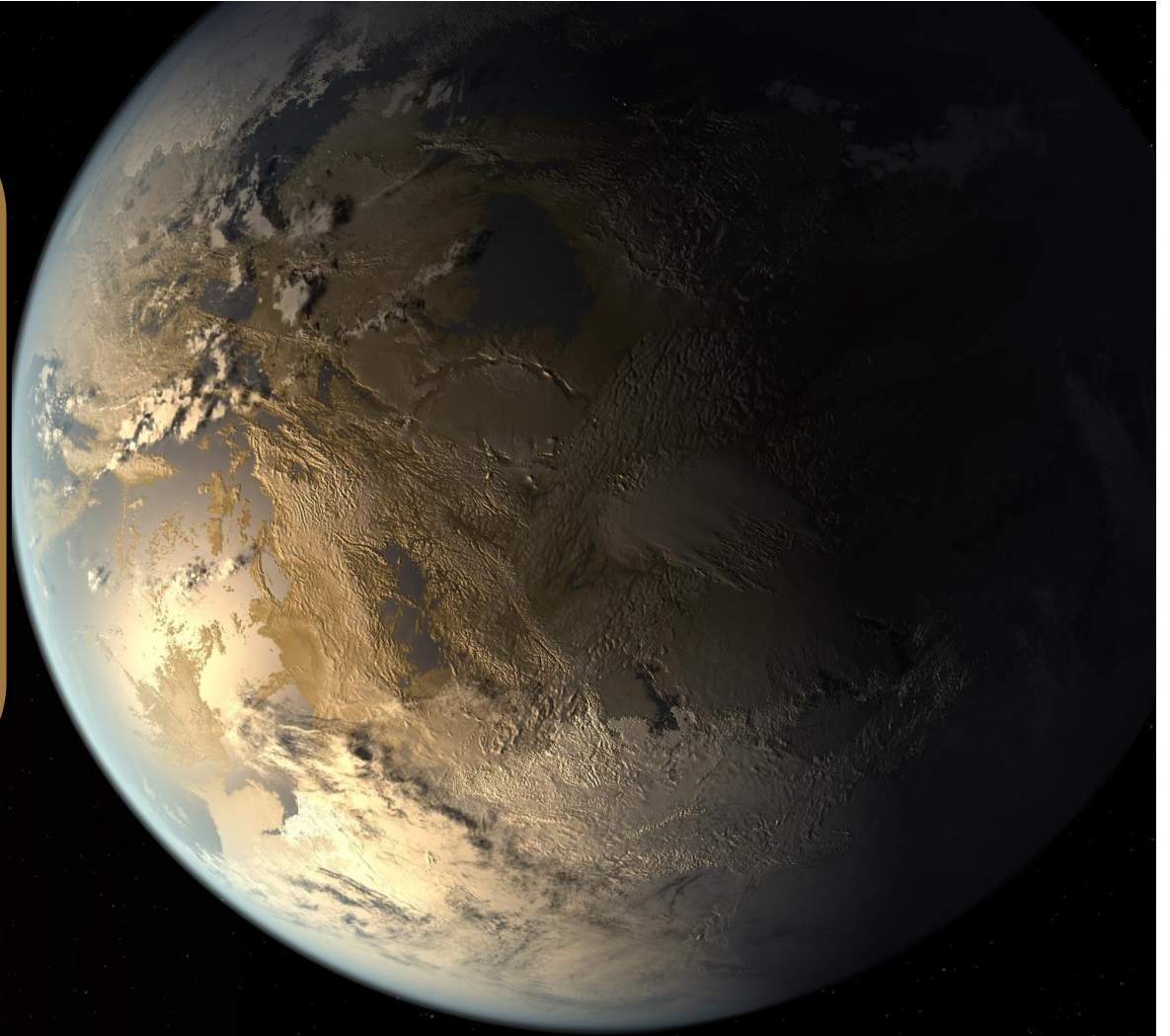
A luz da estrela “ofusca” a luz refletida pelo planeta.

Somente em casos especiais a observação direta é possível.

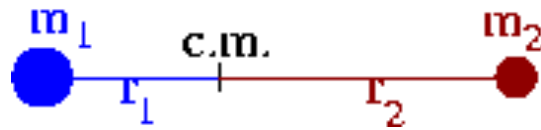
**A maior parte das descobertas de planetas extrassolares
tem sido feita por meio de observações indiretas.**

Planetas Extrassolares

- Detectamos estrelas adequadas a terem planetas habitáveis, mas já foram detectados planetas fora do Sistema solar, ou seja, em outras estrelas?
- Mais de 8288 ($25M_J$), 6477 ($13M_J$) planetas extrassolares foram detectados até 11 set 2026.
- <http://exoplanet.eu/>

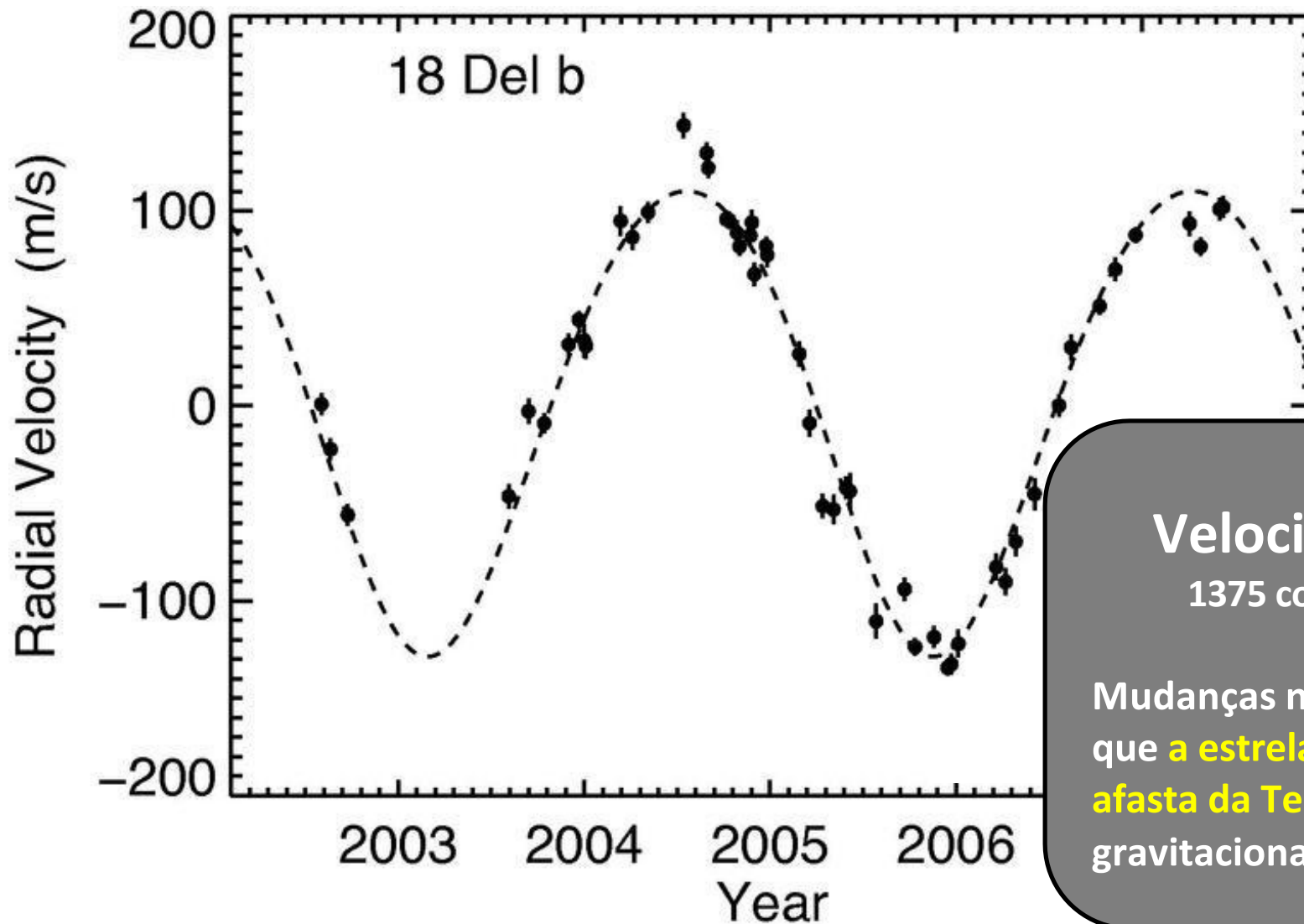
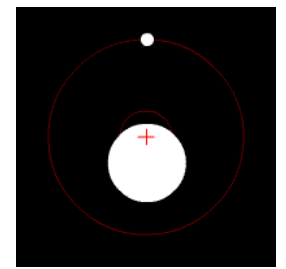


Objetos orbitam o centro de massa



$$m_1 r_1 = m_2 r_2$$

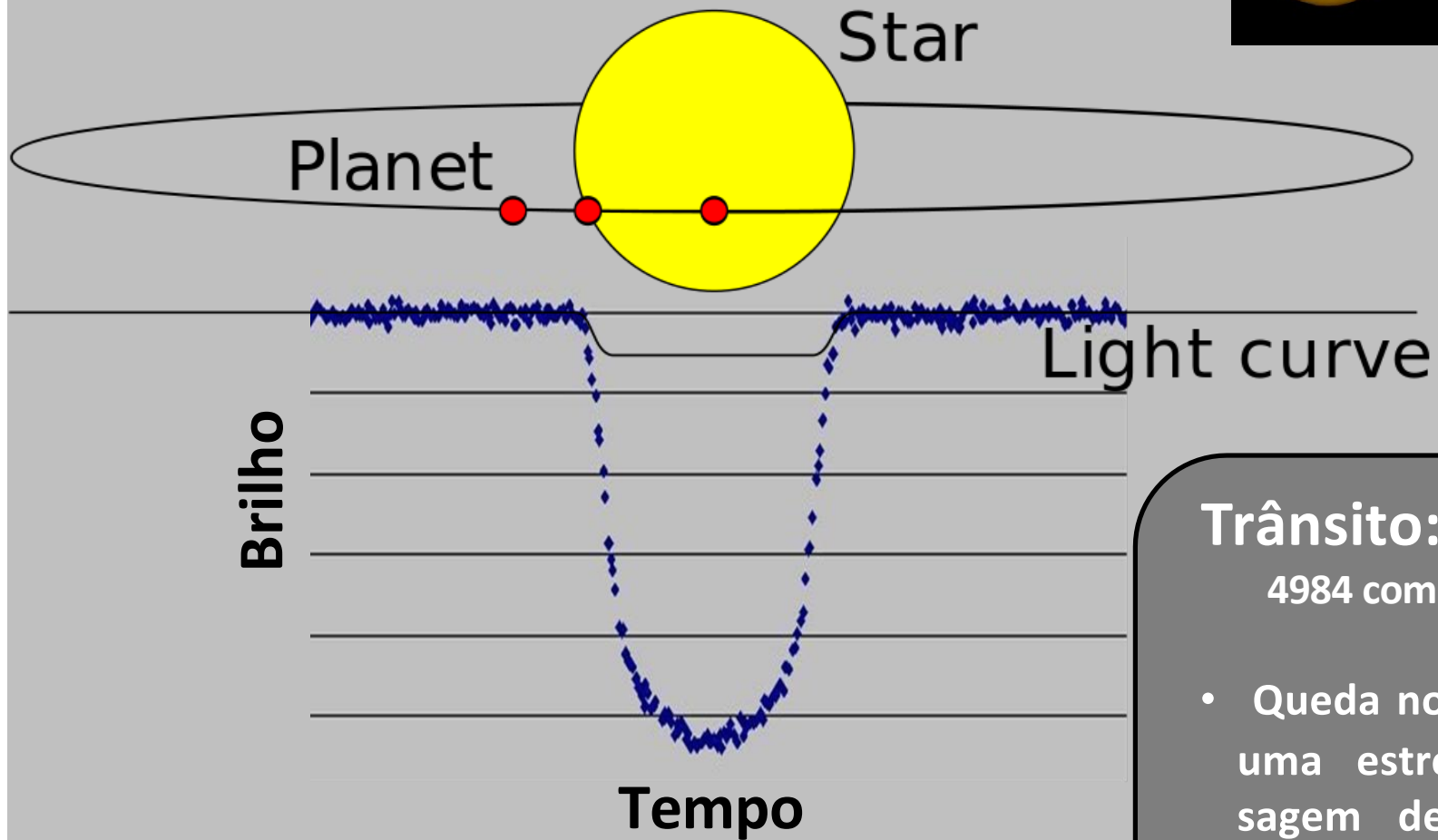
$$m_1 v_1 = m_2 v_2$$



Velocidade Radial:

1375 com 256 múltiplos

Mudanças na velocidade com que **a estrela se aproxima e se afasta da Terra** devido à atração gravitacional de um planeta.

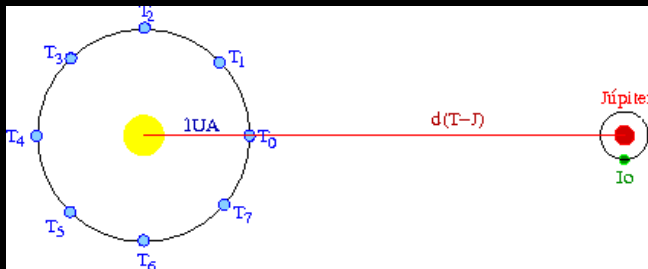


Trânsito:

4984 com 746 multiplos

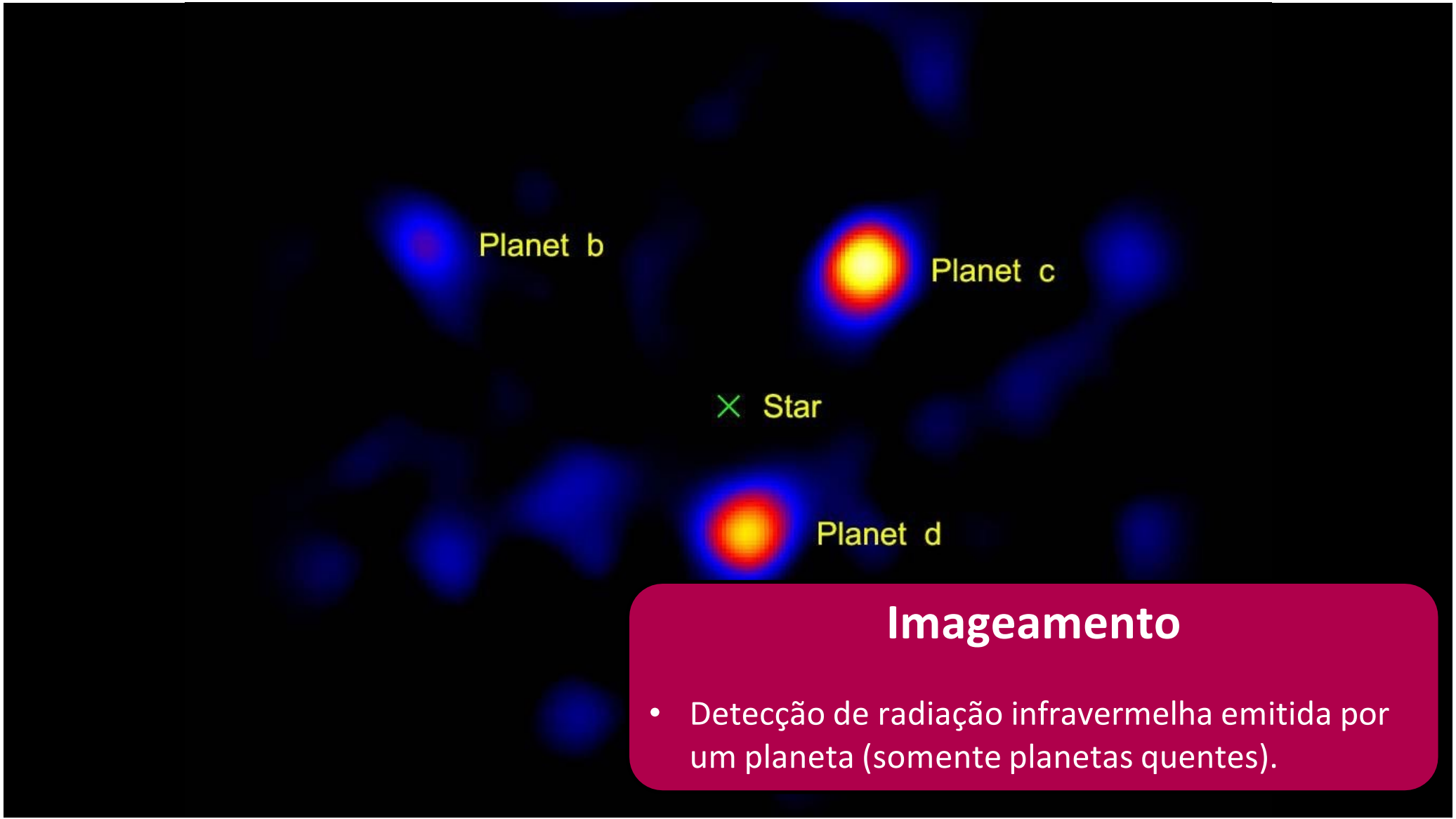
- Queda no brilho aparente de uma estrela devido a passagem de um planeta em frente dela (trânsito).

A determinação da velocidade da luz foi feita pela primeira vez em **1675**, pelo astrônomo dinamarquês Olaus Rømer (1644-1710), que mediu o intervalo entre sucessivos eclipses da lua Io de Júpiter ($P=1,769138d$) em diferentes pontos da órbita da Terra em torno do Sol.



Variação no tempo de trânsito:

- Mudanças no tempo que um planeta leva para passar em frente a sua estrela devido a atração gravitacional de um segundo planeta.



Planet b

Planet c

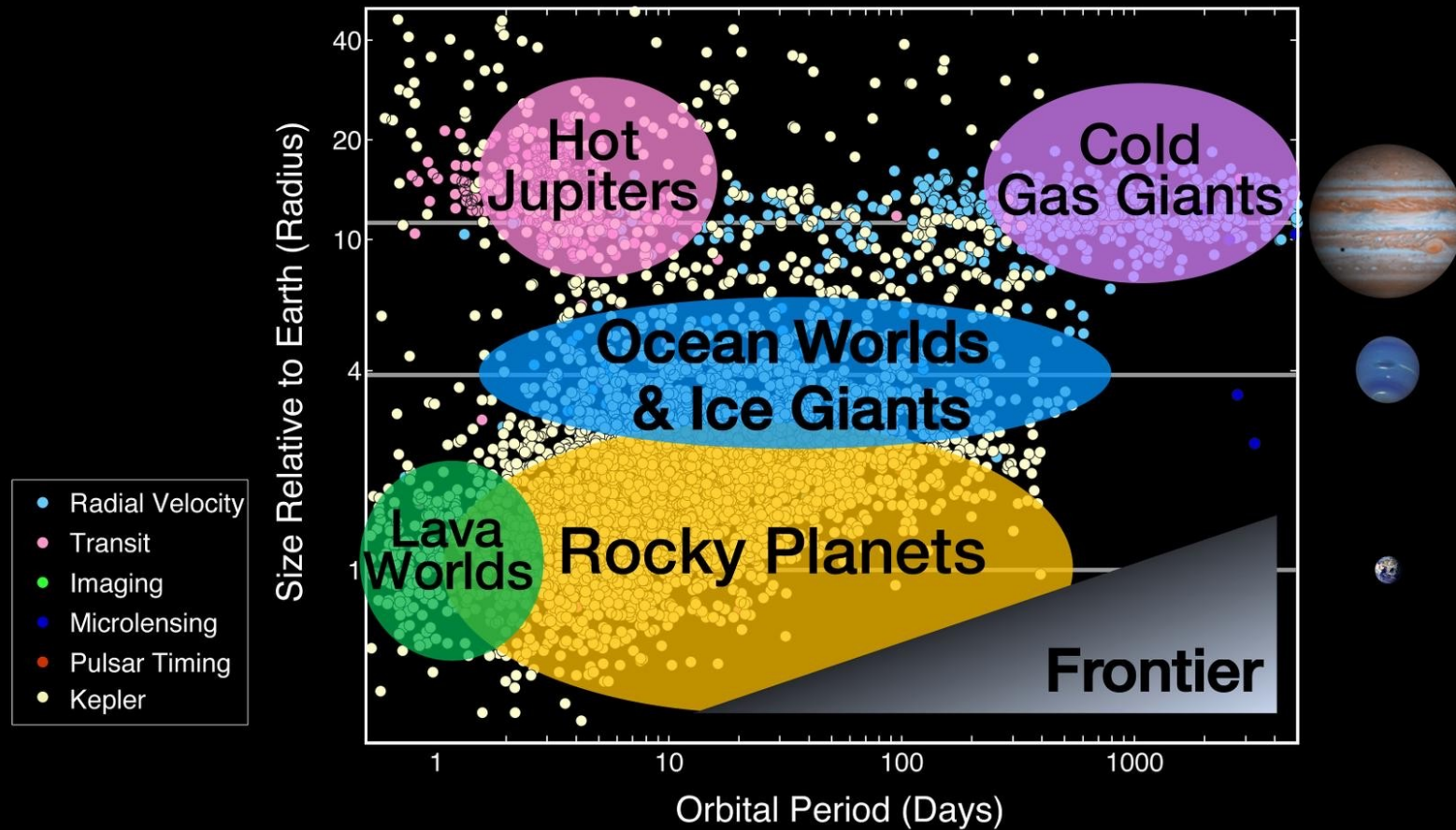
× Star

Planet d

Imageamento

- Detecção de radiação infravermelha emitida por um planeta (somente planetas quentes).

Exoplanet Populations



Métodos de Detecção de Exoplanetas

Existe uma grande variedade de métodos de detecção.
Os principais são:

- 1 – Astrometria
- 2 – Velocidades radiais
- 3 – Trânsitos planetários
- 4 – Microlentes gravitacionais

DETECÇÃO
INDIRETA

- 5 – Imageamento direto

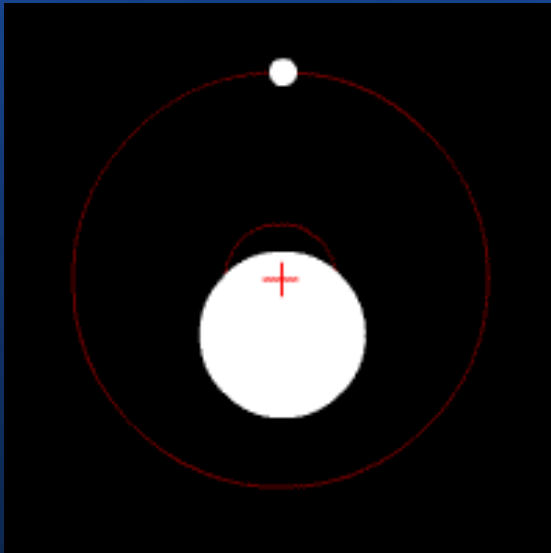
DETECÇÃO
DIRETA

Até 11 set 26 haviam sido descobertos **8288 planetas** extrassolares
Até 25 mar 25 eram 7430.

Este número aumenta quase que semanalmente.
A maior parte das descobertas foram feitas através de métodos de detecção indireta.

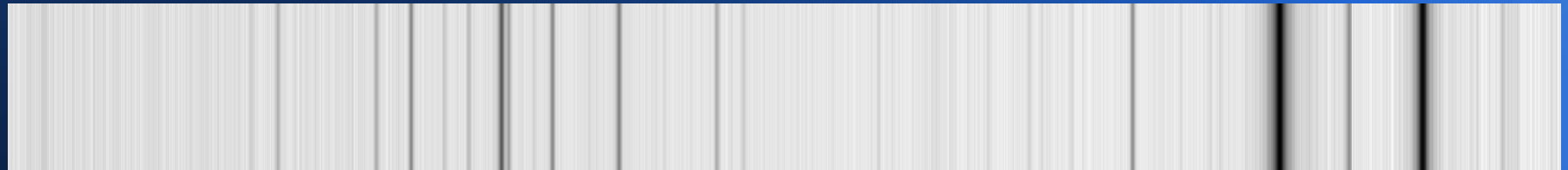
Detecção por ASTROMETRIA

101 planetas, 6 múltiplos



- Consiste em medir a posição de uma estrela ao longo de vários meses ou anos.
 - Variações observadas na posição da estrela
 - podem indicar a presença de um ou mais planetas.
 - É aplicado amplamente na observação de sistemas de estrelas binárias.
 - Introduzido por William Herschel (~ 1803) para estudar perturbações observadas na estrela *70 Ophiuchi*.
- Até pouco tempo, a aplicação da astrometria na detecção de exoplanetas era muito difícil, devido à dificuldade de se obter medidas precisas da posição da estrela.
Por causa disso, muitos “alarmes falsos” foram gerados.

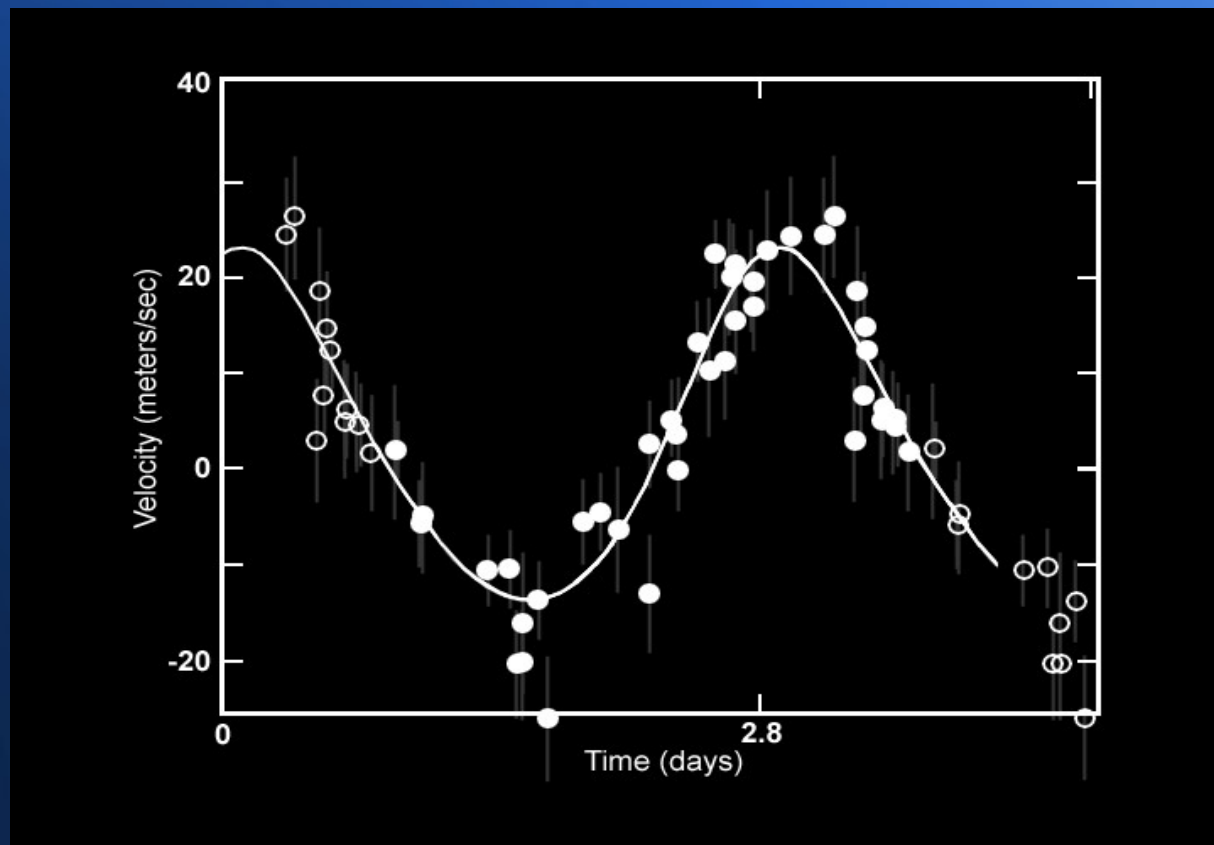
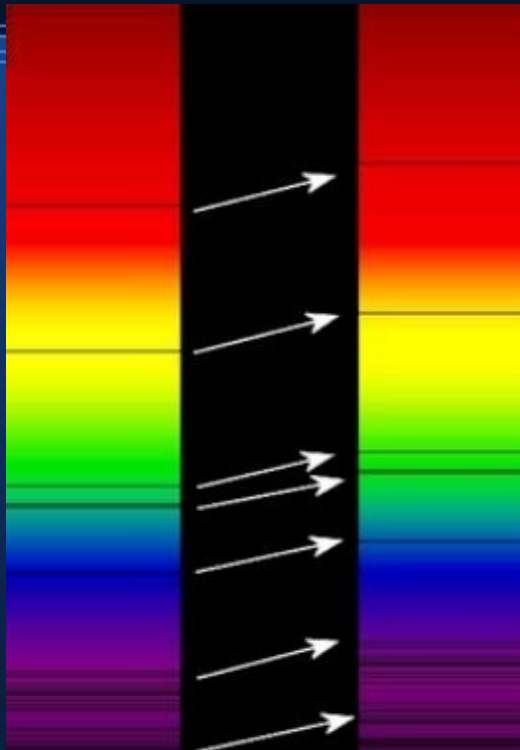
Efeito Doppler → medida de velocidades



Método das Velocidades Radiais: Efeito Doppler

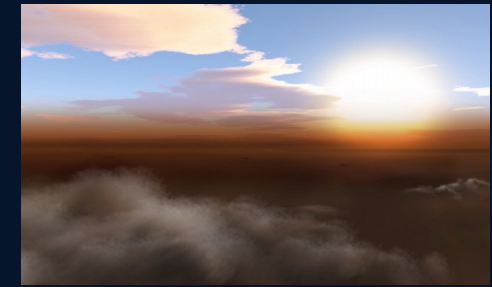
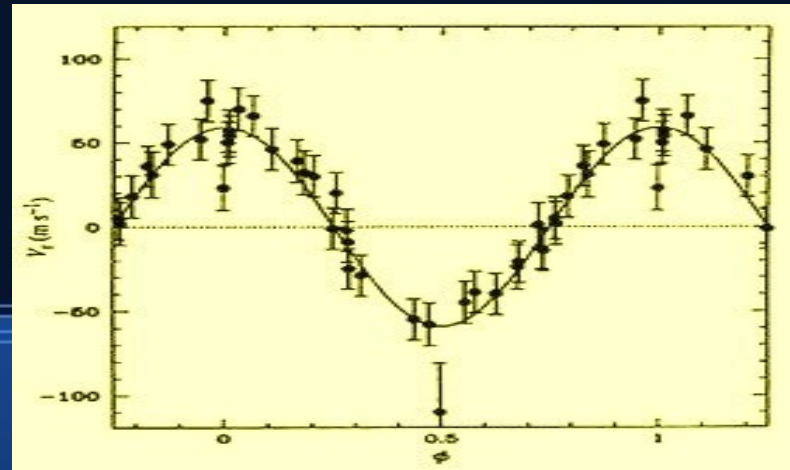
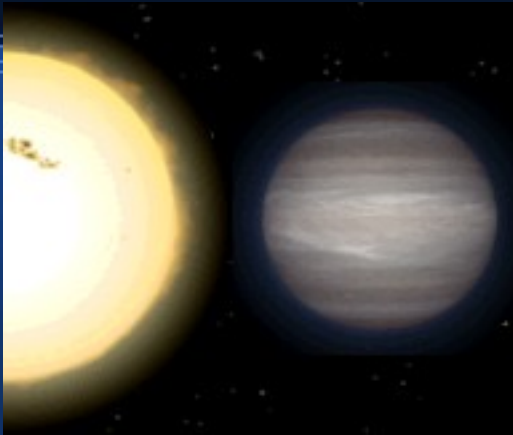
Em repouso

Em movimento



Variação da velocidade radial
ao longo do tempo

51 Pegasi-b

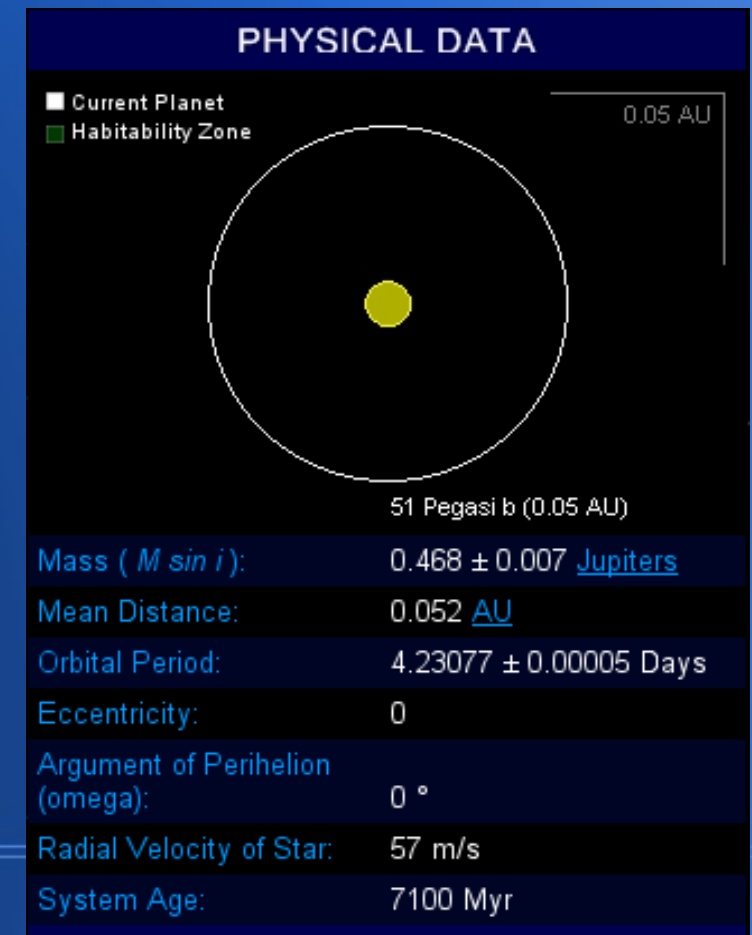


Sódio (gás) → cor acinzentada/marrom

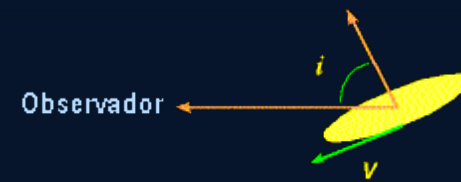
6/10/1995 → Mayor e Queloz detectaram um planeta orbitando a estrela *51 Pegasi*

Constelação:	Pégaso
Distância ao Sol:	48 anos luz
Tipo de estrela:	tipo solar

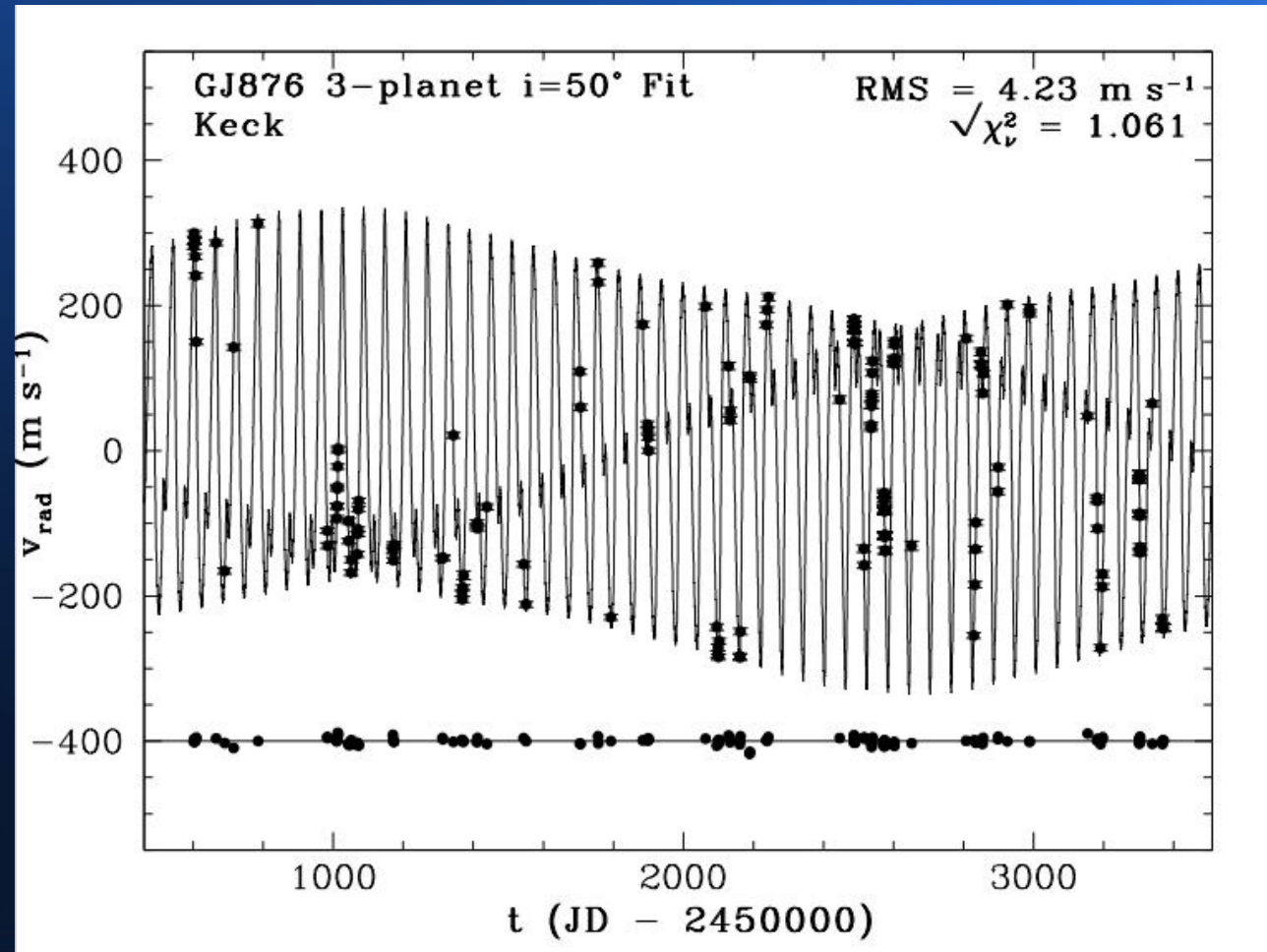
Planeta:	51 Pegasi B
Período Orbital:	4.23 dias



Multiplos planetas

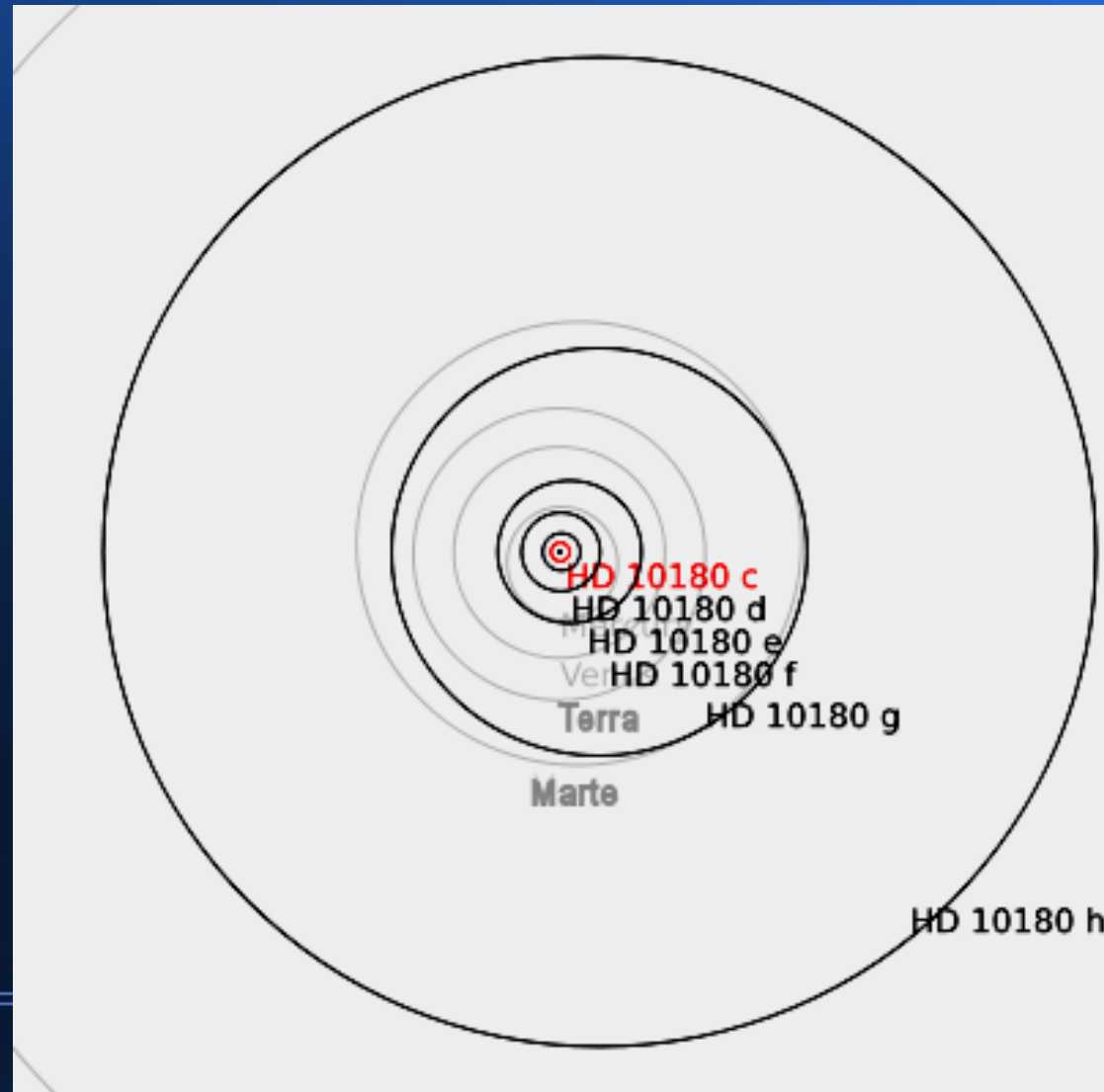


$$v_1^{med} = v_1 \sin i$$



Sistemas planetários similares ao nosso

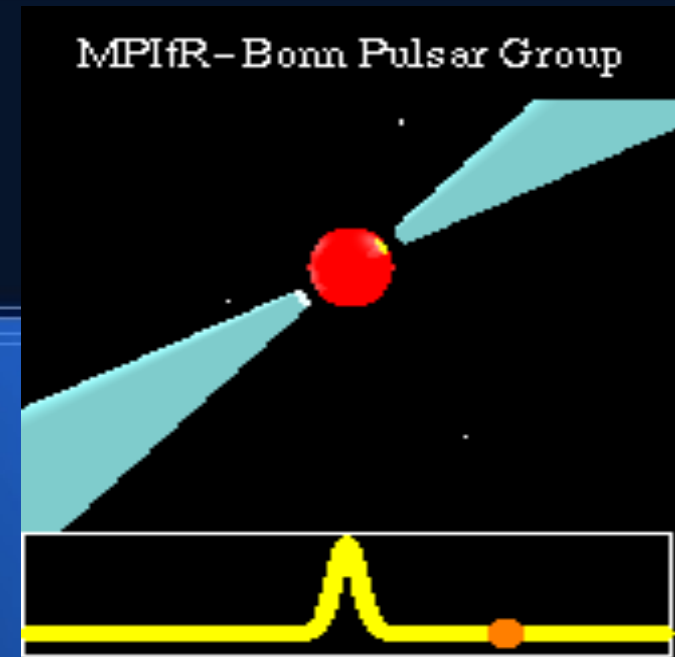
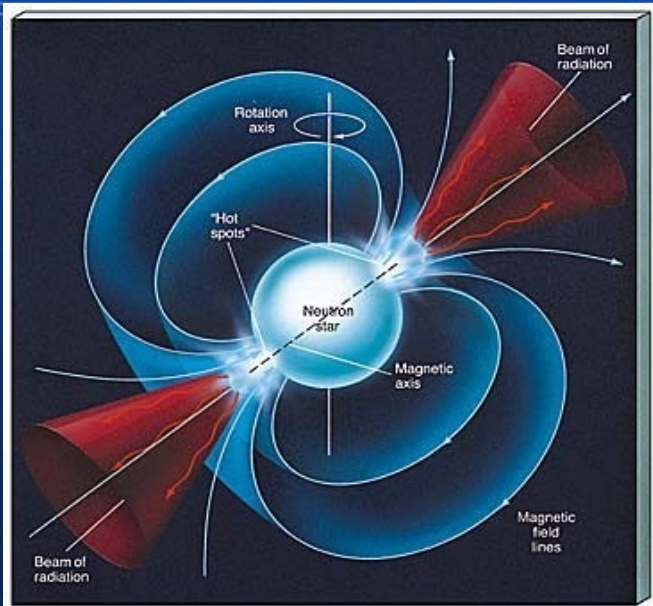
6 planetas com massa do tipo Netuno, 12 a 25 M_{Terra}



**Método da variacao do tempo de
viajem da luz para estrelas
pulsantes: 208 planetas com 6 multiplos**

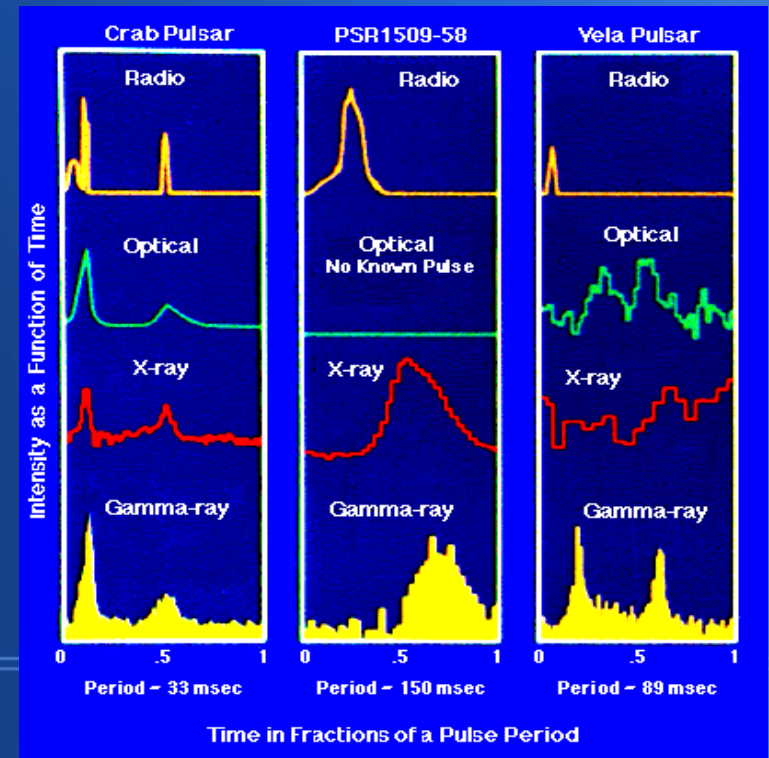
MÉTODO: PULSAR TIMING

Efeitos sobre as pulsações estelares



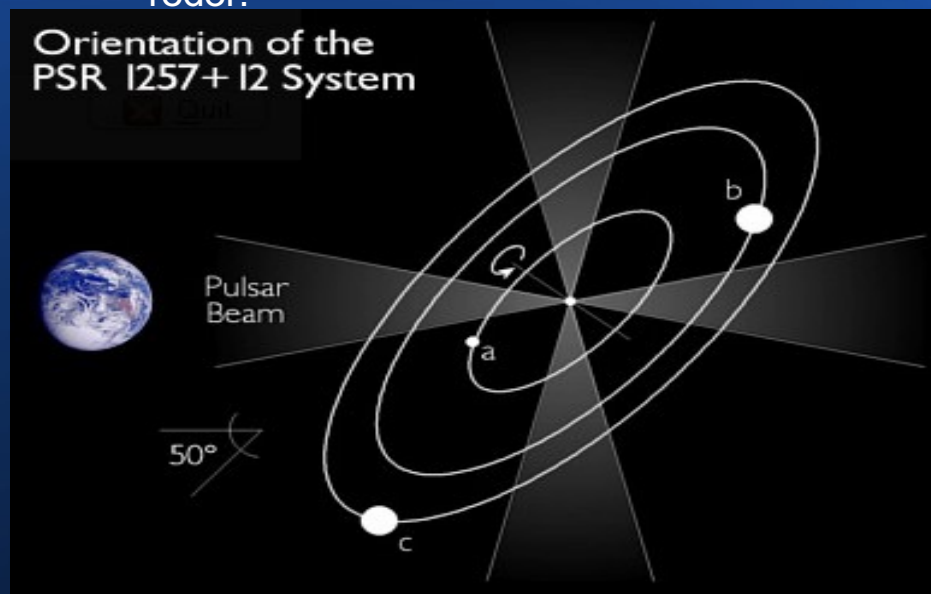
Pulsares são estrelas de nêutrons com um forte campo magnético. Jatos de radiação são emitidos na direção dos eixos do campo magnético, inclinados em relação ao eixo de rotação. Enquanto o pulsar gira, os feixes de radiação varrem o espaço, como faróis.

Pulsares emitem pulsos na faixa de radiofrequências, com frequências extremamente estáveis e que podem ser captados por radiotelescópios. Podemos medir a variação no momento de chegada dos pulsos.

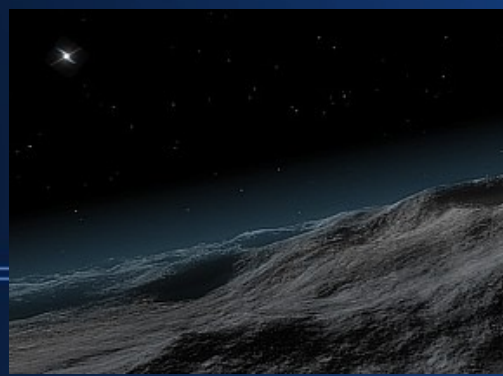


Pulsar PSR 1257+12

- Localizado a 2300 anos luz do Sol
- 1992 → Aleksander Wolszczan & Dail Frail detectaram possíveis planetas ao seu redor.



O planeta PSR 1257+12 tem mais ou menos o tamanho da Lua.



PHYSICAL DATA

- Current Planet
- Habitability Zone



Mass : 0.025 [Earths](#)

Mean Distance: 0.19 [AU](#)

Orbital Period: 25.34 Days

Eccentricity: 0

System Age: 800 Myr

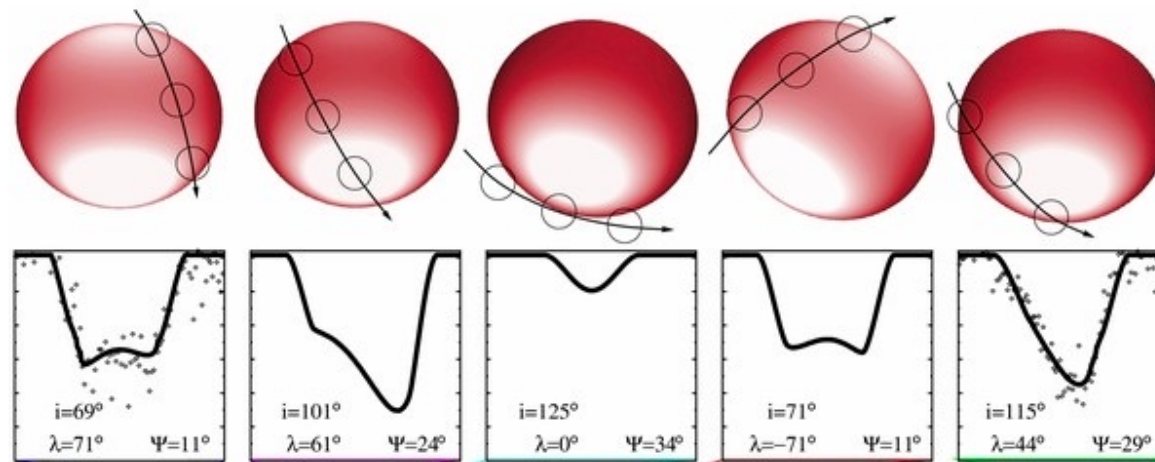
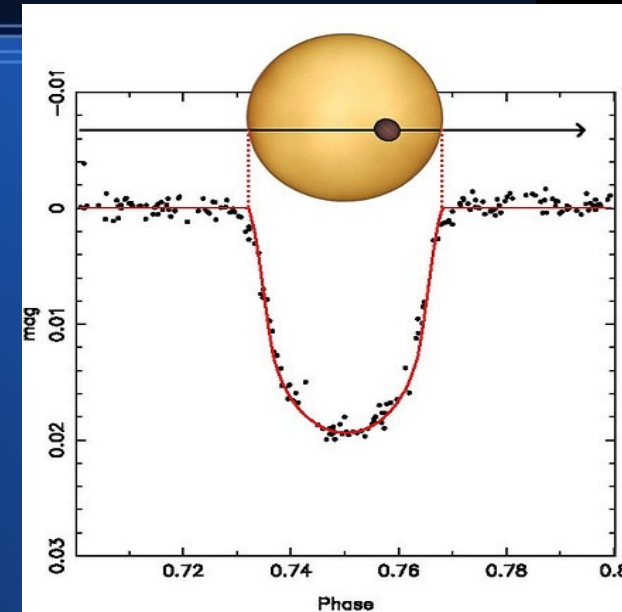
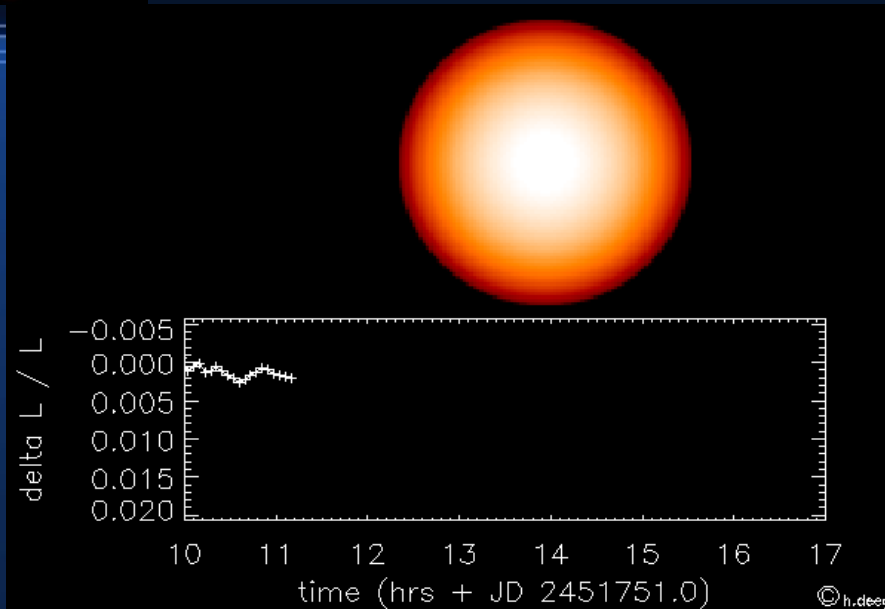
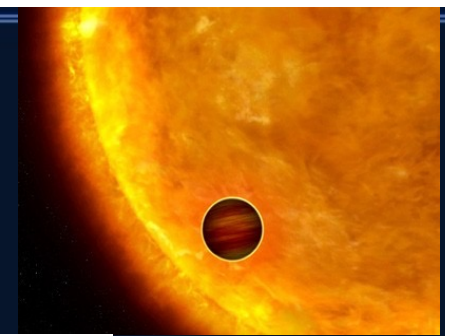
INFERRED PROPERTIES

Planet Appearance: Thin or No Atmosphere

Estimated Mean Temp: 266 Kelvin

Mean Angular Star Size: 0°

Método dos Trânsitos Planetários





Telescópio Espacial CoRoT

(uma missão Europa-Brasil)

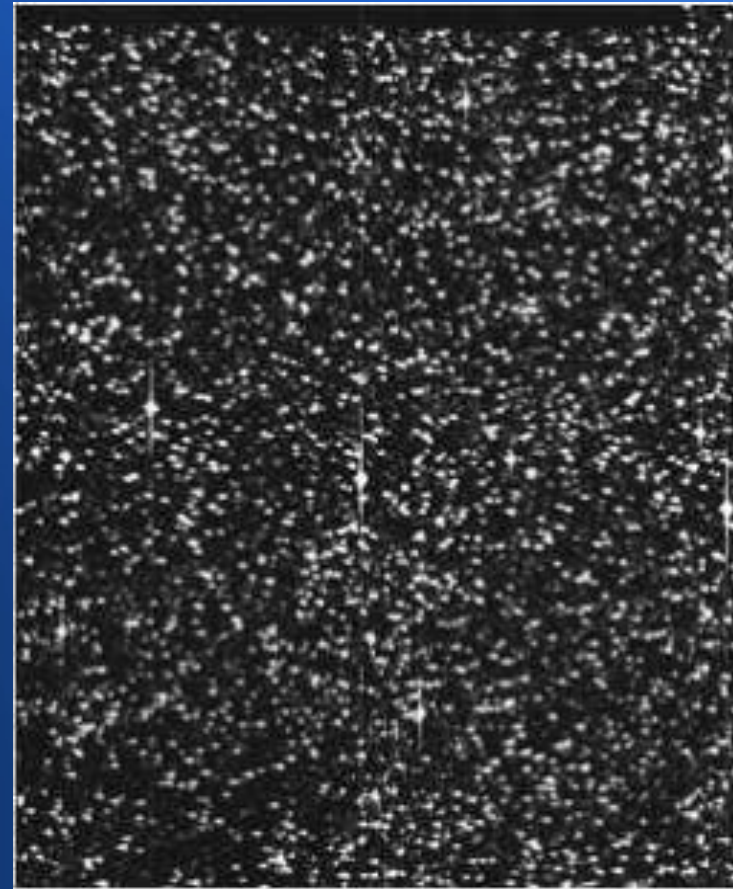
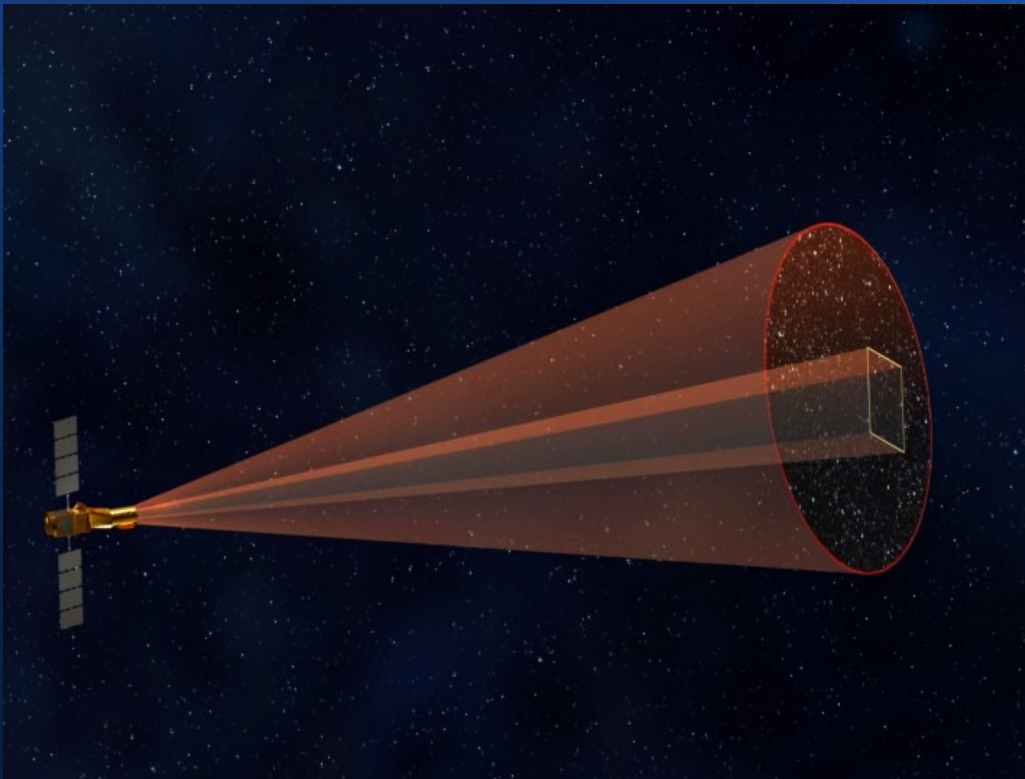


27 planetas descobertos + cerca de 600 candidatos

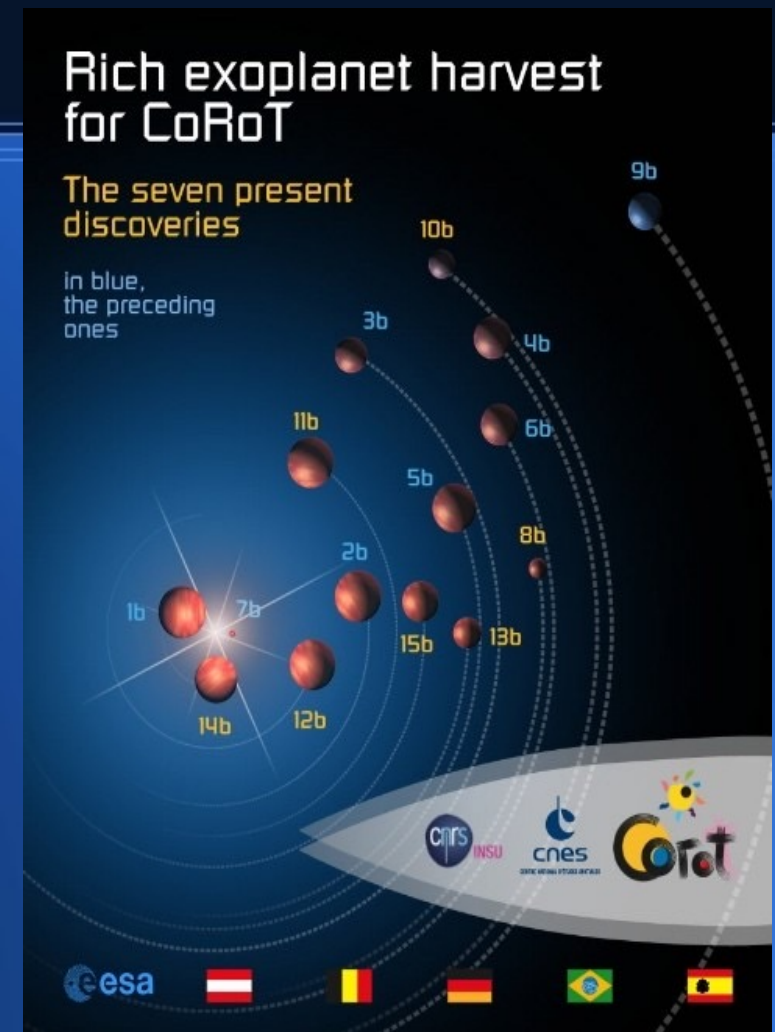


O Telescópio Espacial CoRoT foi colocado no espaço no dia 26/12/2006 e foi projetado para operar por 2,5 anos, mas funcionou por ~6 anos, encerrando atividades em 2/11/2012.

Para a detecção de trânsitos planetários
é necessário observar milhares e milhares
de estrelas durante muitos meses.



Exoplanetas descobertos pela Missão CoRoT



CoRoT 7b --- Massa = $4,8 M_{Terra}$; Raio = $1,7 R_{Terra}$; distância = 50 anos-luz

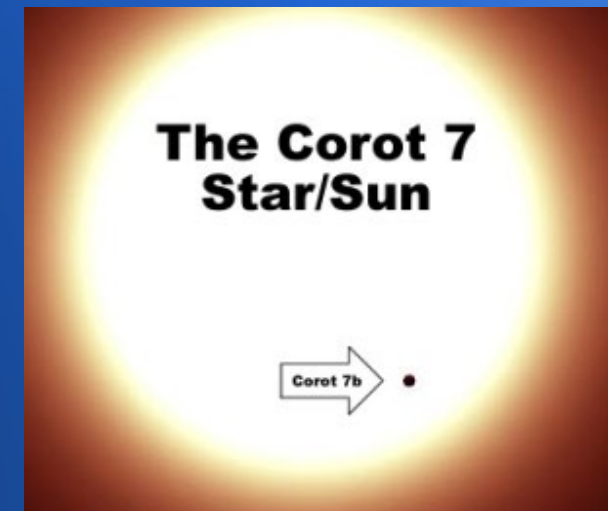
Corot-7b: uma super Terra

O planeta Corot-7b orbita uma estrela similar ao Sol (G9V, $0.91 M_{\text{sol}}$, $0.82 R_{\text{sol}}$).

O raio de Corot-7b: 60% maior do que o raio da Terra e sua massa é 2,3 a 8,5 vezes maior do que a massa da Terra.

Corot-7b está muito próximo da estrela central: a apenas 0,2 U.A. e seu período orbital (ano) é de apenas 20 horas!

O planeta é, portanto, muito quente e não apresenta condições de habitabilidade na superfície.



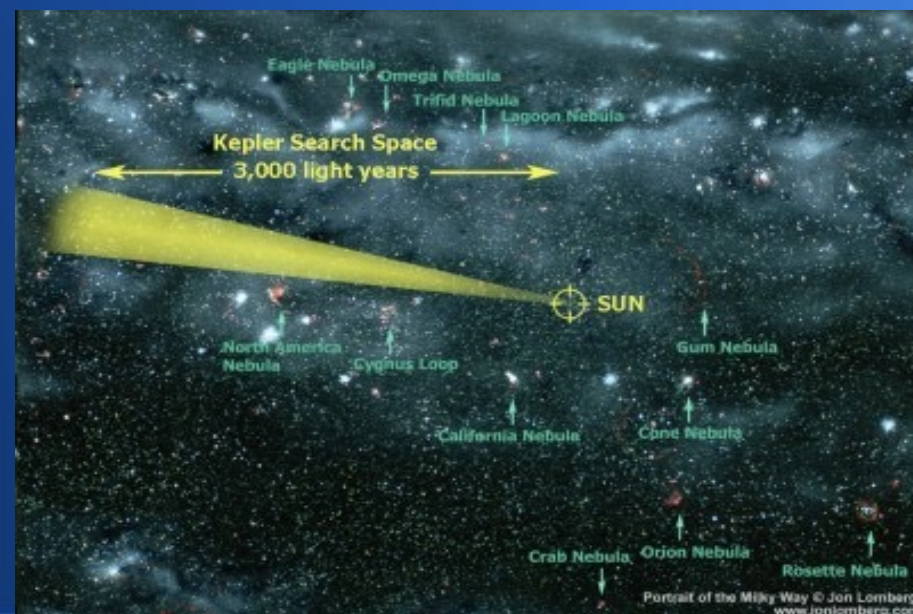
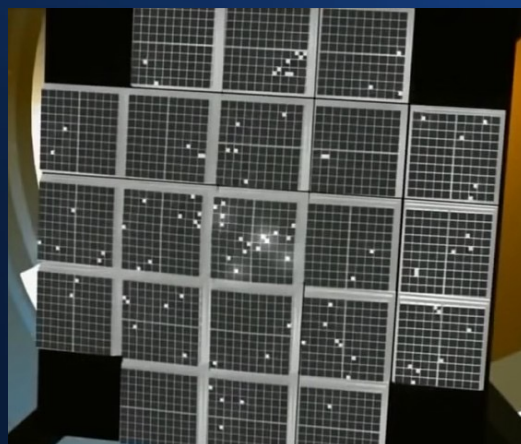
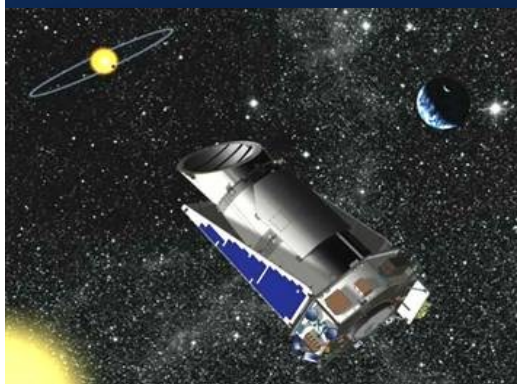
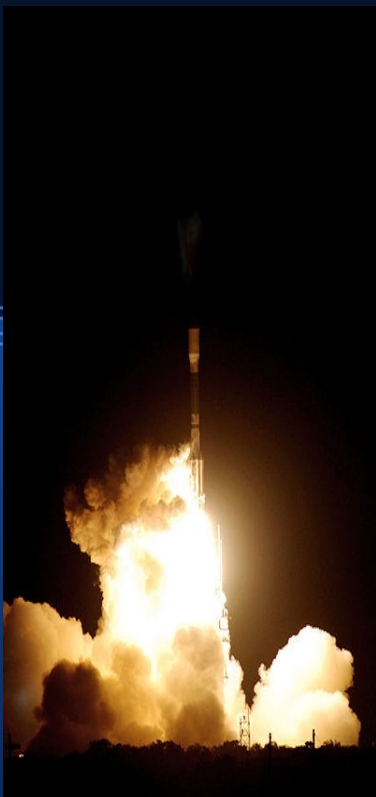
Telescópio Espacial Kepler

(Detecção de Trânsitos Planetários)

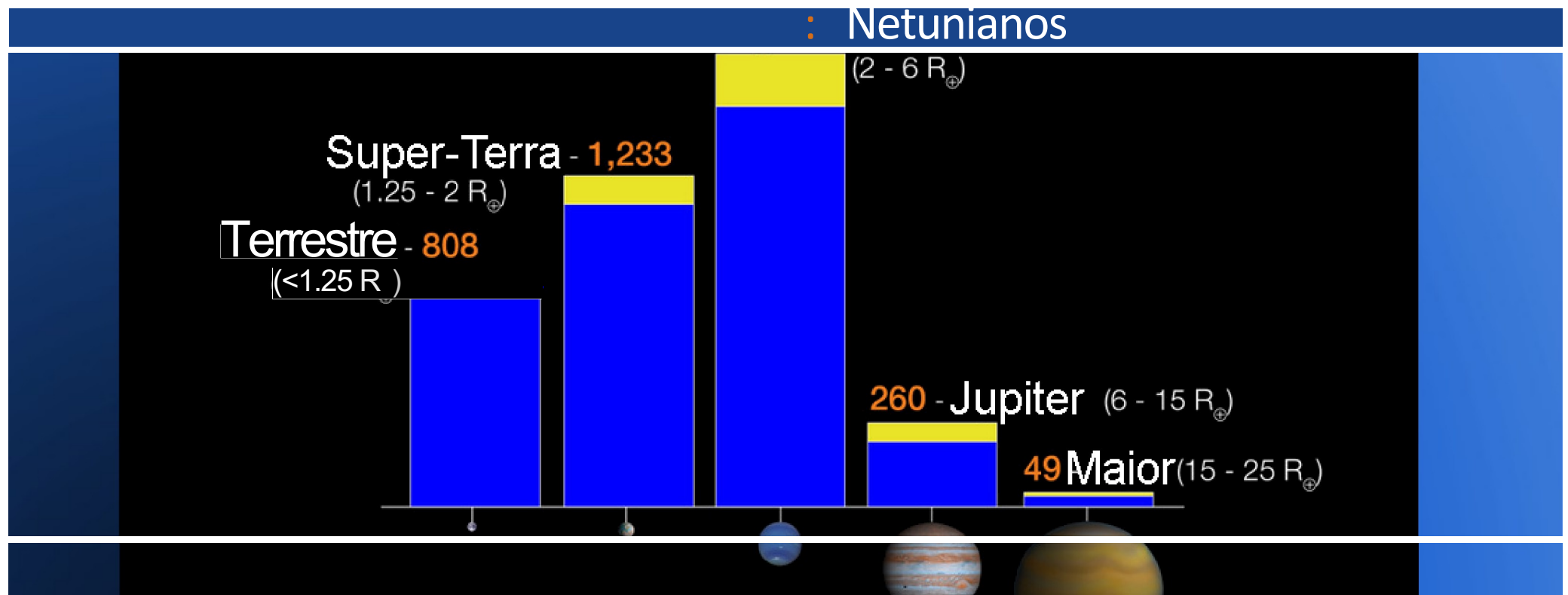
Espelho primário: 1.4 m
Abertura: 0.95 m

No. de estrelas: 150 mil
Magnitudes: 9 a 16
Lançamento: 03/2007

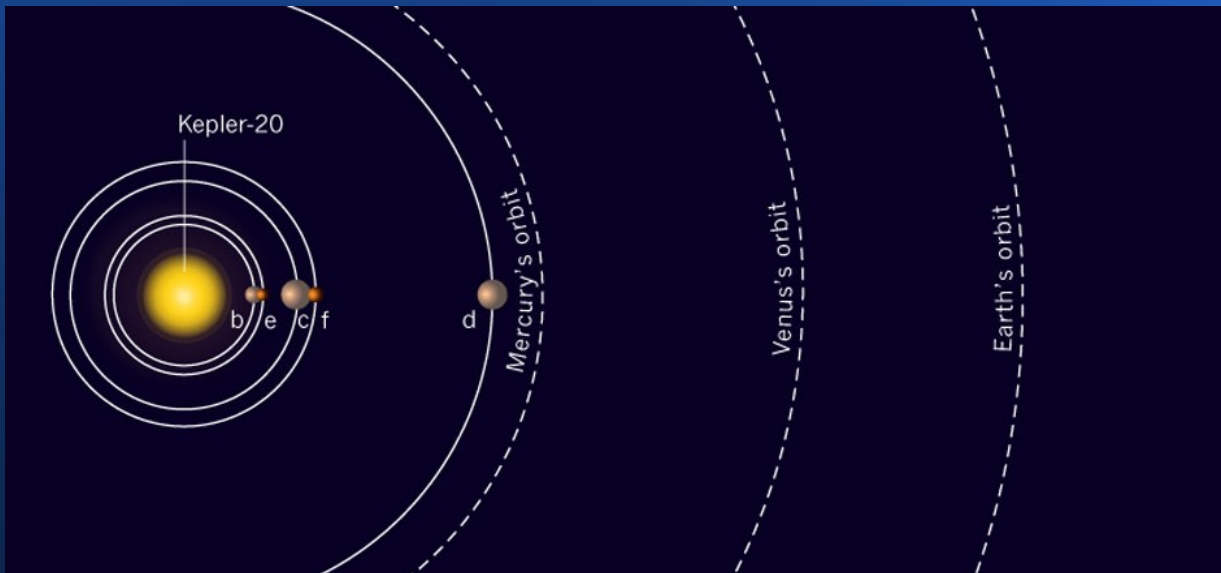
Duração da missão: 6 anos + 30 dias



Missao Kepler: 2787 confirmados, 361 na zona habitável e 1977 candidatos



Terras detectadas pela missão Kepler: Kepler-20e e 20f

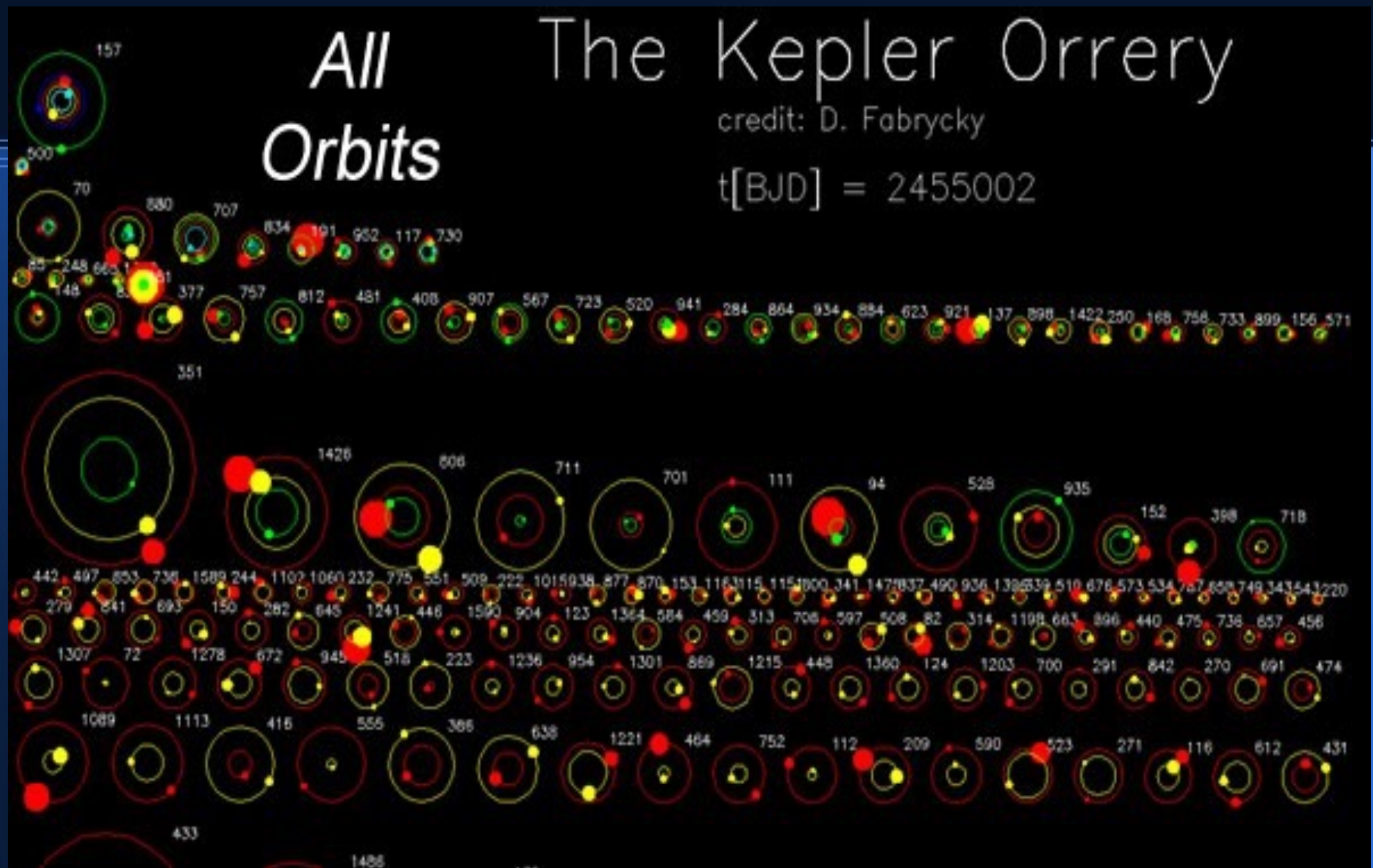


	Kepler 20e	Kepler 20f
Diâmetro	0,87 R_T	1,03 R_T
Massa	0,4-1,6 M_T	0,7-3 M_T
Raio Orbital	0,05 ua	0,11 ua
Período Orbital	6 dias	19,6 dias

O planeta Kepler-20e tem 87% do diâmetro da Terra. Sua massa é incerta, mas deve estar entre 0,4 e 1,6 vezes a massa da Terra. O planeta está apenas a 0,05 ua da estrela central e leva ~6 dias para completar uma volta ao redor da mesma.

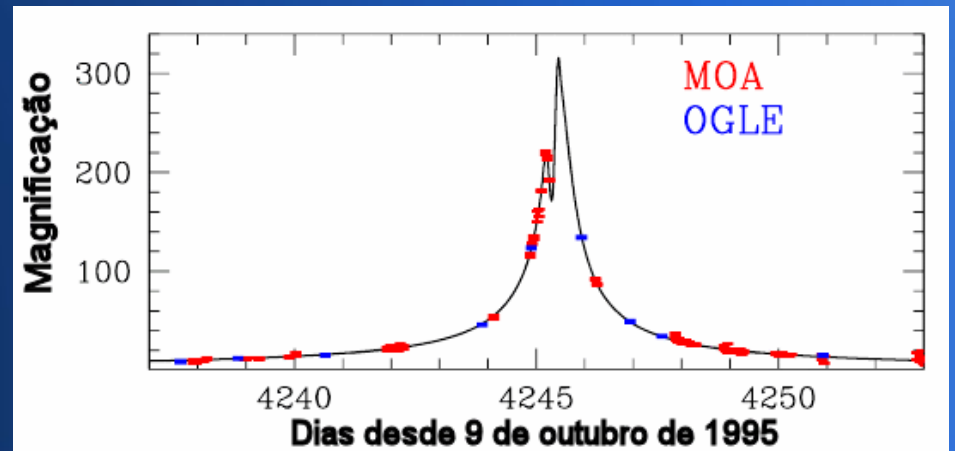
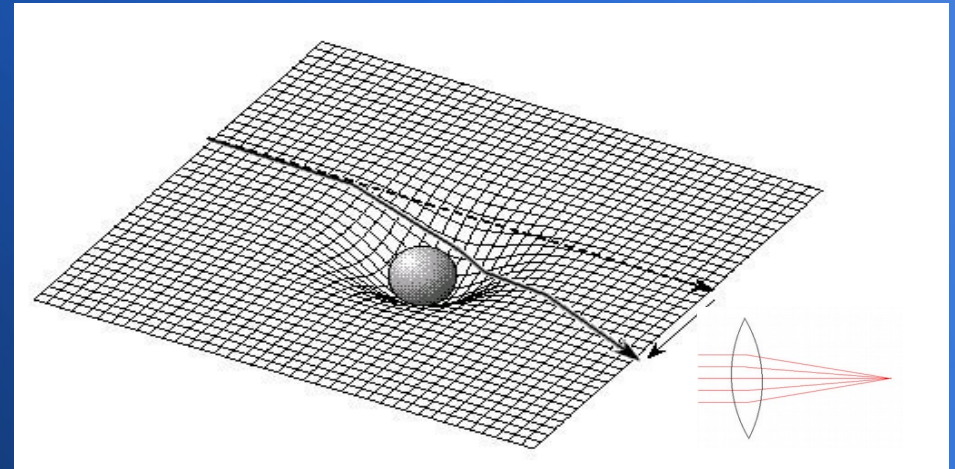
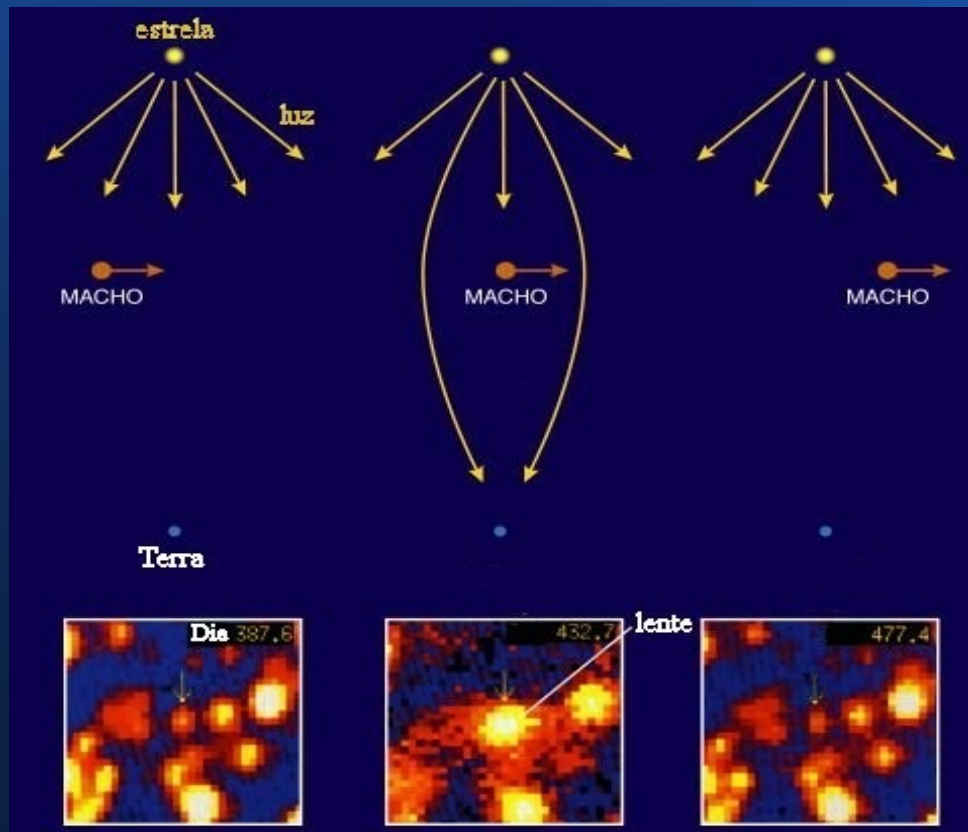
Kepler-20f é praticamente do tamanho da Terra (3% maior) e sua massa deve estar entre 0,7 e 3 vezes a massa da Terra. Está a 0,11 ua da estrela central e seu período orbital é de 19,6 dias.

Sistemas Planetários descobertos pelo Kepler



Microlentes Gravitacionais

331 planetas com 12 sistemas múltiplos



MACHO (*MA*ssive *C*ompact *H*alo *O*bjects)

Imageamento Direto

380 com 19 multiplos

A observação direta de exoplanetas é possível quando:

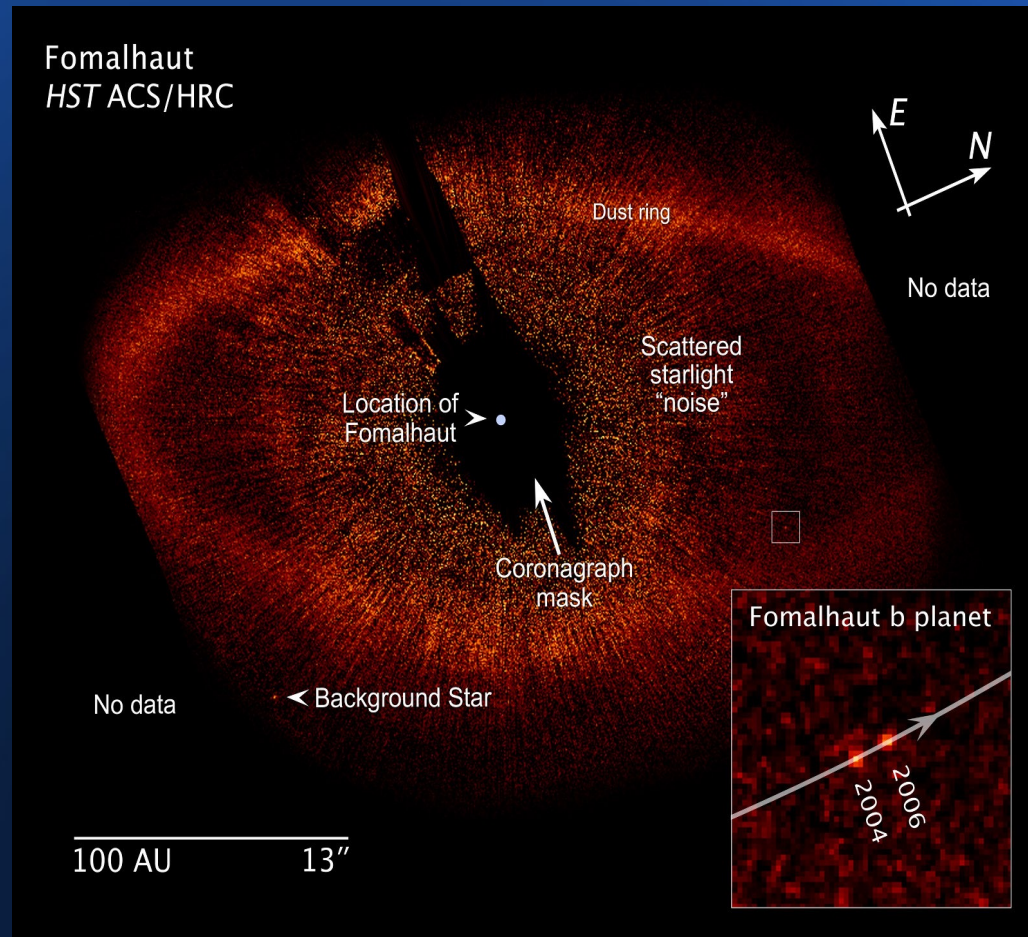
- (1) a estrela é não muito luminosa
- (2) quando os planetas estão suficientemente distantes da estrela.

2004, ESO: TW Hyd (25 M_J)

Ana Marrom

1 planeta com $5 \pm 2 M_J$

$1.5 R_J$, 55 UA)



Fomalhaut b ($2.3 M_{Sol}$)

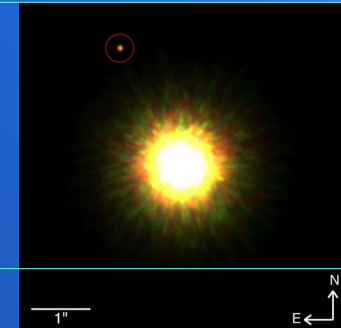
1 planeta, $M < 3 M_{Jup}$; 115 UA; 320 mil anos

2008, Gemini:

CT Cha ($0.85 M_{Sol}$)

1 planeta

$(17 \pm 2) M_J$ 40 UA



HR 8789 ($1.5 M_{Sol}$)

4 planetas;

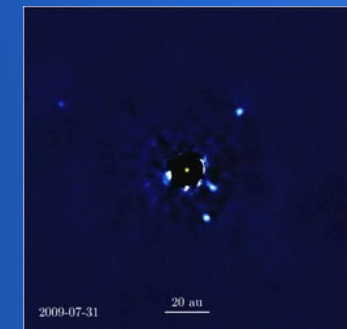
Raios das órbitas:

b – 14 ua

c – 24 ua

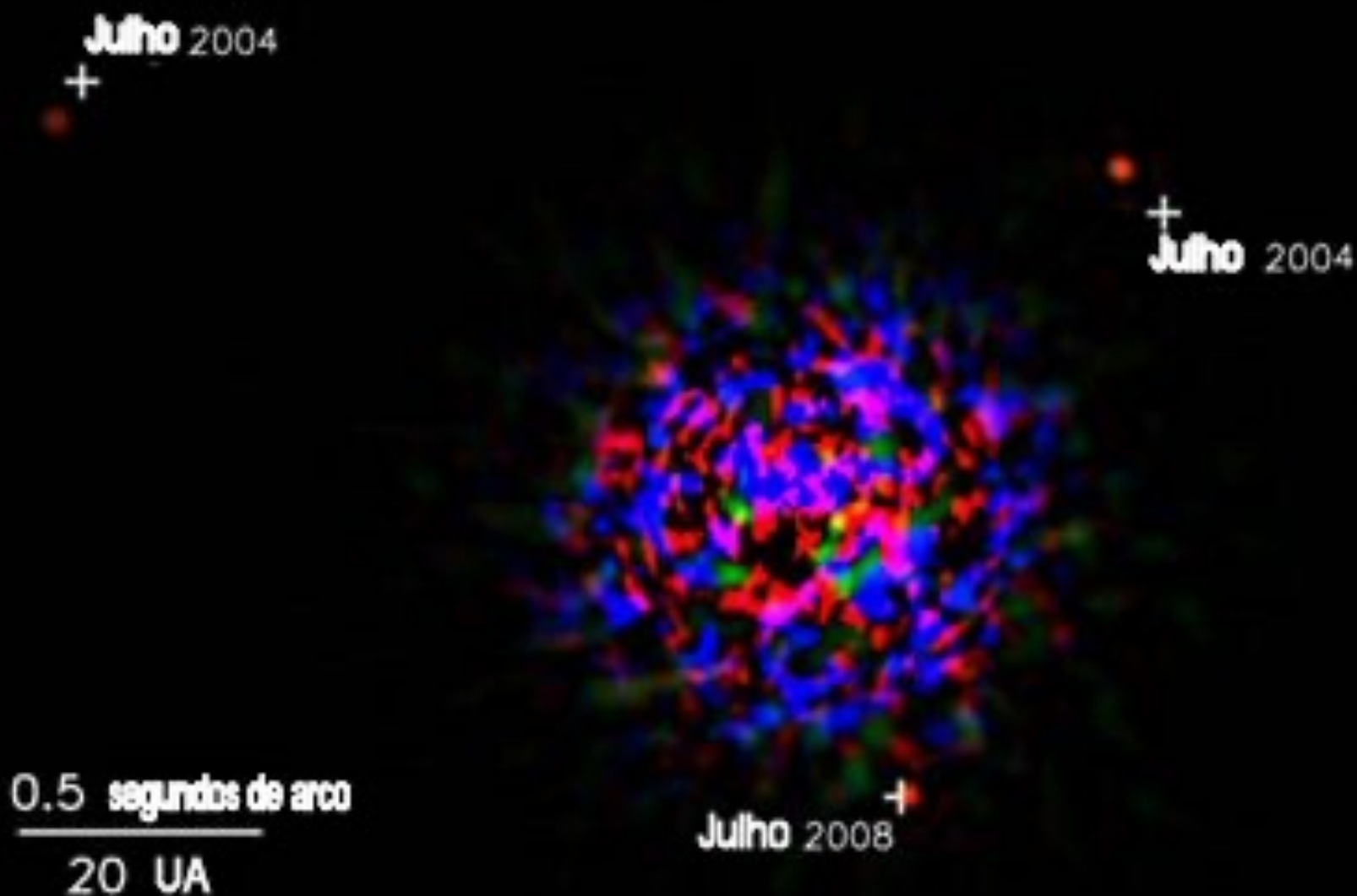
d – 38 ua

e – 68 ua



Planetas Orbitando HR 8799

ϵ Eridani A b



Algumas Descobertas

Os planetas extrassolares mostram uma incrível diversidade, tanto em relação ao tamanho e características estruturais, quanto em relação às órbitas, diferindo em muito dos planetas do sistema solar.

Onde estão os sistemas planetários descobertos?

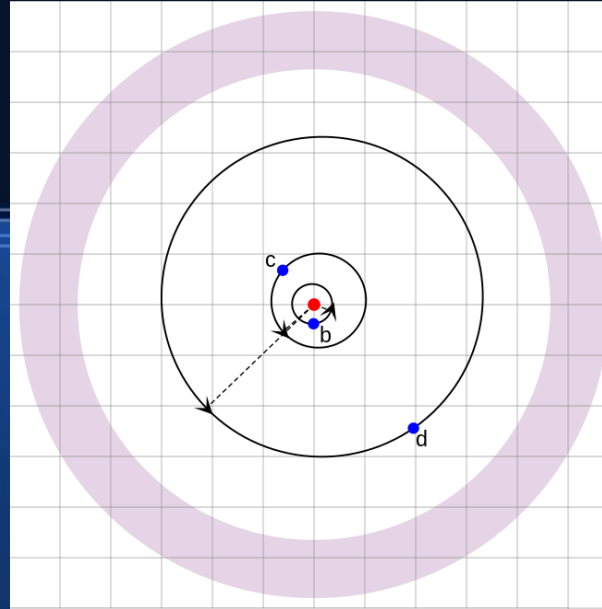
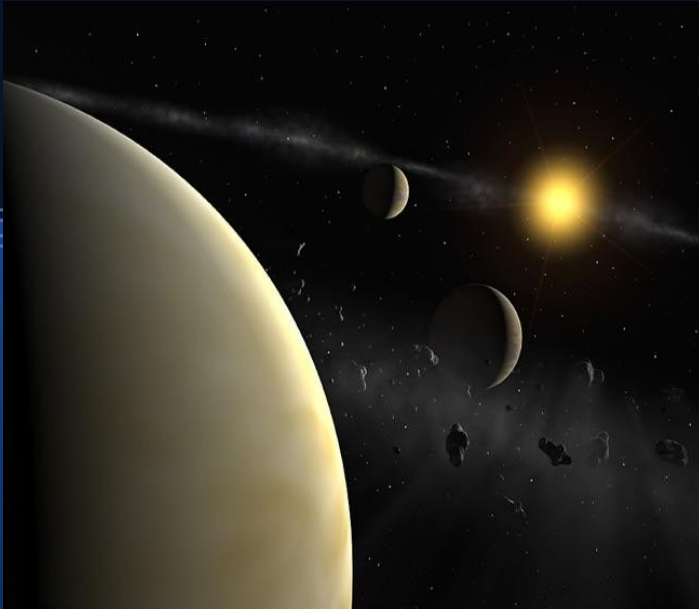


A grande maioria dos planetas descobertos até agora, orbita estrelas que estão relativamente perto do Sol, dentro de um raio de ~ 300 anos-luz.

Esta região contém milhões de estrelas, mas é muito pequena comparada com as dimensões da Via Láctea, cujo disco tem $\sim 50\,000$ anos-luz de raio ($\sim 100\,000$ anos-luz de diâmetro).

O planeta mais distante detectado está a $\sim 27\,700$ anos-luz ($= 8\,500$ pc).

A estrela HD 69830 com três Netunos



BJD 2453400.0 (29 Jan 2005CE, 11:51:57.0 UT)
Each grid square 0.2 AU × 0.2 AU
Planets and star not drawn to scale



HD69830 System



Earth's System

Descoberta: maio / 2007

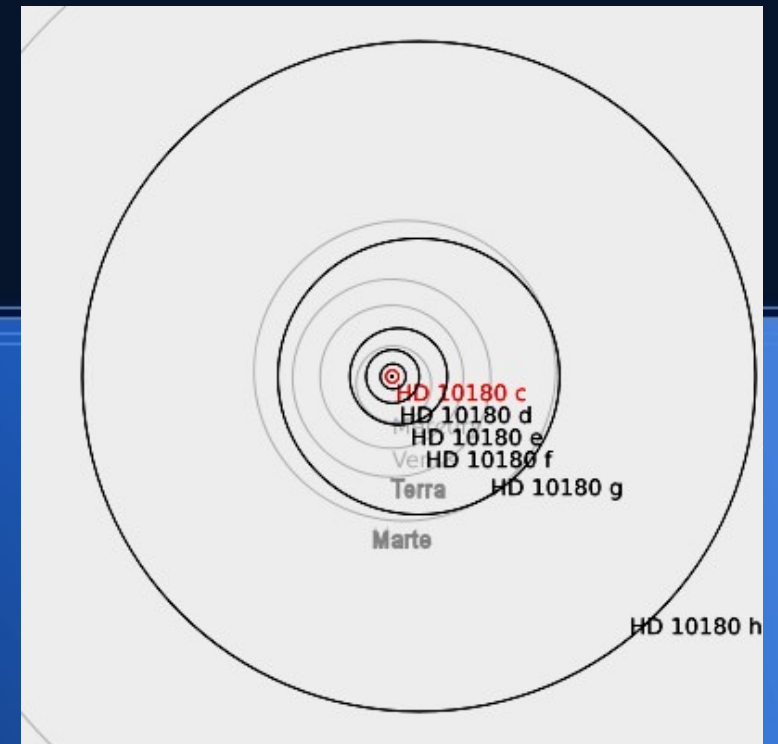
A estrela HD 69830 é levemente menor do que o Sol ($0,9 M_{\text{sol}}$ e $0,9 R_{\text{sol}}$) e possui 3 planetas com tamanhos similares ao de Netuno e um cinturão de asteroides.

The HD 69830 planetary system^{[12][13]}

Companion (in order from star)	Mass	Semimajor axis (AU)	Orbital period (days)	Eccentricity	Inclination	Radius
b	$10.2 M_{\oplus}$	0.0785	8.667 ± 0.003	0.1 ± 0.04	—	—
c	$11.8 M_{\oplus}$	0.186	31.56 ± 0.04	0.13 ± 0.06	—	—
d	$18.1 M_{\oplus}$	0.63	197 ± 3	0.07 ± 0.07	—	$\sim 4 R_{\oplus}$
Asteroid belt	0.93–1.16 AU				—	—

HD 10180: um sistema planetário com pelo menos 7 planetas

(+ 2 não confirmados, sendo um deles uma super Terra)



O planeta mais próximo está a 0,2 U.A. e o mais distante a 3,5 U.A., com períodos orbitais de 1,1 dia e ~6 anos.

Companion (in order from star)	Mass	Semimajor axis (AU)	Orbital period (days)	Eccentricity	Inclination	Radius
b	$>1.3 \pm 0.8 M_{\oplus}$	0.02222 ± 0.00011	1.17766 ± 0.00022	0.0005 ± 0.0049	—	—
c	$>13.0 \pm 2.0 M_{\oplus}$	0.0641 ± 0.0010	5.75973 ± 0.00083	0.07 ± 0.08	—	—
i (unconfirmed)	$>1.9 \pm 1.8 M_{\oplus}$	0.0904 ± 0.047	9.655 ± 0.072	0.05 ± 0.23	—	—
d	$>11.9 \pm 2.15 M_{\oplus}$	0.1284 ± 0.0061	16.354 ± 0.0013	0.011 ± 0.013	—	—
e	$>25.0 \pm 3.9 M_{\oplus}$	0.270 ± 0.0013	49.75 ± 0.007	0.001 ± 0.010	—	—
j (unconfirmed)	$>5.1 \pm 3.2 M_{\oplus}$	0.330 ± 0.016	67.55 ± 1.28	0.07 ± 0.12	—	—
f	$>23.9 \pm 1.4 M_{\oplus}$	0.4929 ± 0.0078	122.88 ± 0.65	0.13 ± 0.015	—	—
g	$>21.4 \pm 3.4 M_{\oplus}$	1.415 ± 0.091	596 ± 37	0.03 ± 0.40	—	—
h	$>65.8 \pm 12.9 M_{\oplus}$	3.49 ± 0.60	2300 ± 550	0.18 ± 0.016	—	—

Há fortes evidências de grandes quantidades de água em HD 1018b.

HD 155358: dois Júpiteres

HD 155358 é uma estrela anã amarela (em Hércules) e é orbitada por 2 Júpiteres que interagem entre si.

Tem idade de ~11,9 bilhões de anos e ~90% da massa do Sol. A região onde os planetas orbitam tem baixa metalicidade, ~ 21% da metalicidade encontrada no sistema solar, sendo quimicamente pobre.



Companion (in order from star)	Mass	Semimajor axis (AU)	Orbital period (days)	Eccentricity	Inclination	Radius
b	$>0.89 \pm 0.12 M_J$	0.628 ± 0.020	195.0 ± 1.1	0.112 ± 0.037	—	—
c	$>0.504 \pm 0.075 M_J$	1.224 ± 0.081	530.3 ± 27.2	0.176 ± 0.174	—	—

HD 149026b: o planeta mais quente conhecido

Descoberta: maio/2007

Estrela: HD 149026
Constelação: Hércules
Distância: 279 anos luz.

Júpiter quente.

Temperatura na superfície: 2 040° C
É o planeta mais quente conhecido.

Vênus: 450° C



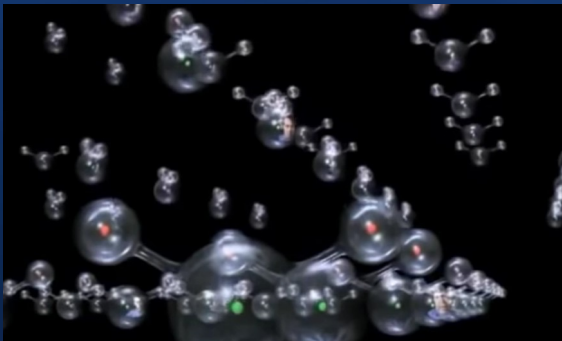
The HD 149026 planetary system

Companion (in order from star)	Mass	Semimajor axis (AU)	Orbital period (days)	Eccentricity	Inclination	Radius
b (Smertrios)	$0.36 \pm 0.03 M_J$	0.042	2.8766 ± 0.001	0	—	—

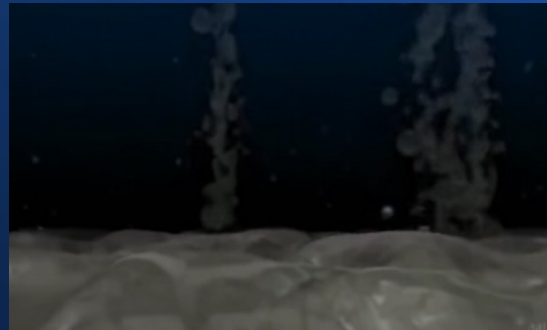
Gliese 581e: um dos menores planetas detectados



Possíveis oceanos
de água líquida.



Mas, a grandes profundidades, sob altíssimas pressões,
a água assume um novo estado físico.



Planeta: Gl 581 e
Massa: 1,7 massa da Terra
Período orbital: 3.2 dias

Estrela: Gl 581 (4 planetas detectados)
Tipo espectral: M3
Massa: 0.31 M_{sol}
Raio: 0.4 R_{sol}
Distância: 0.03 anos luz
Idade: ~ 8 Gyr

The Gliese 581 planetary system^[18]

Companion (in order from star)	Mass	Semimajor axis (AU)	Orbital period (days)	Eccentricity	Inclination	Radius
Gliese 581 e	$>1.7 \pm 0.2 M_{\oplus}$	0.02815 ± 0.00006	3.1490 ± 0.0002	0.00-0.06	—	—
Gliese 581 b	$>15.8 \pm 0.3 M_{\oplus}$	0.04061 ± 0.00003	5.3686 ± 0.0001	0.00-0.03	—	—
Gliese 581 c	$>5.5 \pm 0.3 M_{\oplus}$	0.0721 ± 0.0003	12.914 ± 0.002	0.00-0.06	—	—
Debris disk ^[39]	$25 \pm 12 \text{ AU} \rightarrow 60 \text{ AU}$				$30^{\circ} - 70^{\circ}$	—

LHS 1140b

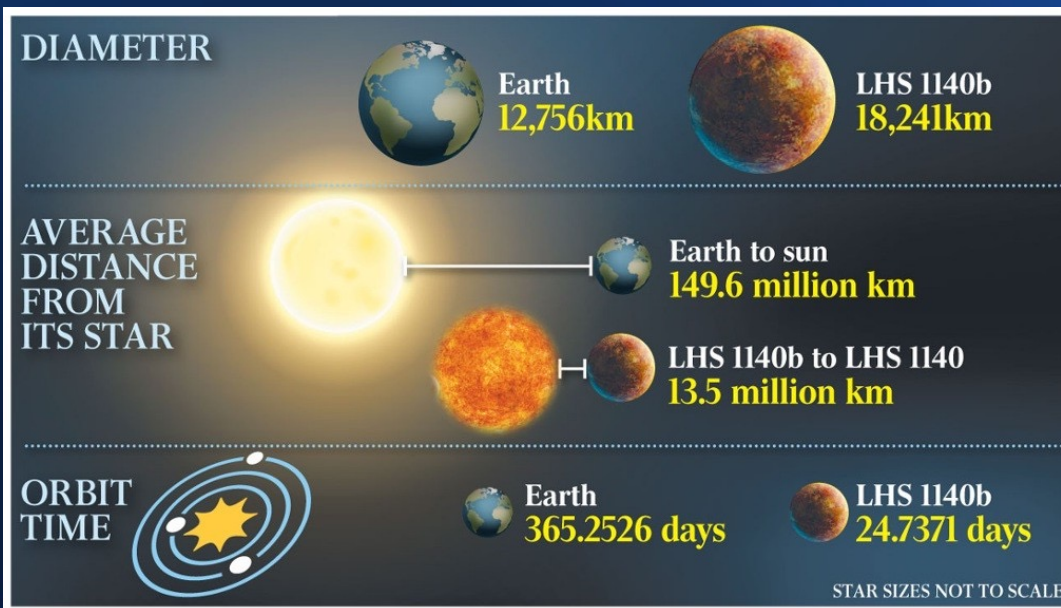
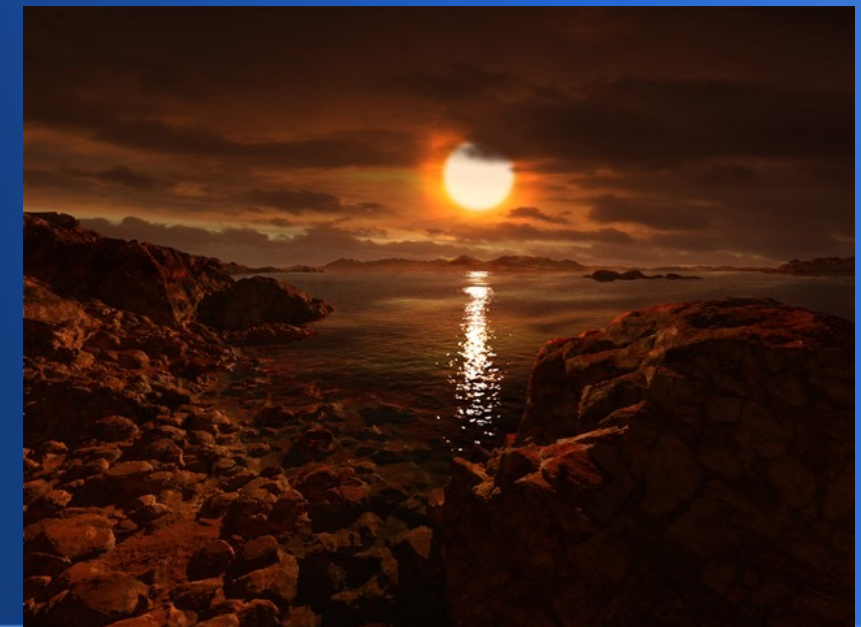
Estrela central: LHS 1140

0.15 Msol (anã vermelha)
~ mesma idade do Sol.

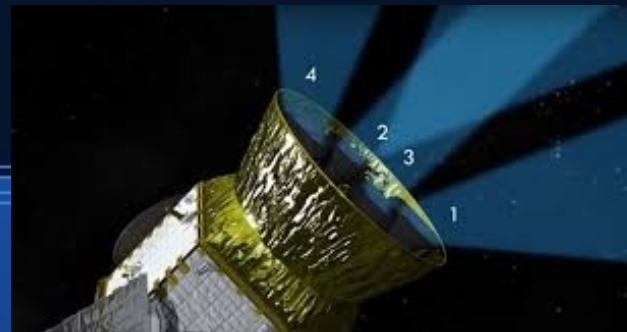
Planeta: LHS 1140b

Diâmetro: 40% maior do que a Terra
Massa: 4,5-8,5 vezes a massa da Terra

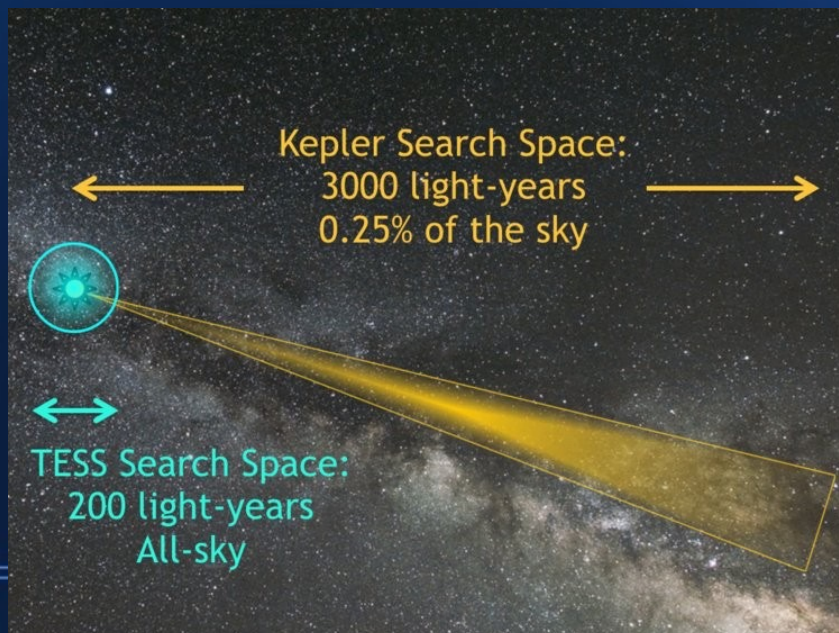
Uma super-Terra dentro da zona habitável da estrela,
podendo conter água líquida em sua superfície.



Novo Caçador de Exoplanetas: TESS



- Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)
- Telescópio espacial da NASA - 4x15 cm
- Lançado em 18 / Abril / 2018
- TESS observa estrelas dentro de um raio de 200 anos luz do Sol, muito menor do que o do Telescópio Kepler, de 3000 anos-luz.
- TESS observa todo o céu, enquanto o campo do Kepler cobre apenas 0,25% do céu.
- Descobriu 926 exoplanetas confirmados e 4835 candidatos.



Detecção de material sólido em volta de estrelas: 25% das anãs brancas

A primeira detecção de matéria asteroidal em torno das estrelas ocorreu em 2008 com a descoberta de piroxeno rico em ferro, enstatita (piroxeno rico em Mg) e forsterita (olivina - silicato de ferro magnésio) em torno da anã branca G29-38, asteroidal.



Olivina



Papakōlea Green Sand Beach, Kamao'a-Pu'u'eo, Hawai'i

Proxima Centauri



Proxima Cen b

11.06M_{Terra}



Proxima Cen c

5.8M_{Terra}



Proxima Cen d

0.26M_{Terra}

Proxima Cen | 0.14 R_⊕ | 3295.50 K

Planetas na Zona Habitável

detectados pelo satélite Kepler até maio/2016

