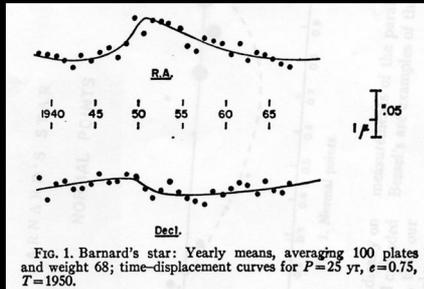


Vemos aqui uma imagem digital centrada em uma estrela e que foi submetida ao tratamento digital com ferramenta específica. A intenção do tratamento é eliminar a luminosidade da estrela que ofusca a região em seu entorno. O disco central homogêneo é essencialmente o da estrela. Removida a estrela e a luminosidade em seu entorno, surgem os planetas que a estão orbitando, no caso três planetas, identificados pelas letras **b**, **c** e **d**.

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**:



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

by George W. Bell

In the September 15, 1916 issue of *The Astronomical Journal* (1) and the September 7, 1918 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, S. E. Barnard detected a unique field, 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". (3) Proper motion is attributed to two basic premises, the star can move of its own accord



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.

02

A especulação sobre a existência de outros mundos, planetas em torno de estrelas, é muito antiga. Porém, a procura sistemática, baseada em métodos mais científicos, só ocorreu no século 17, com Huygens. Nenhum planeta foi identificado, ou encontrado. Mas na década de 1950, o astrônomo holandês van de Kamp passou a estudar as oscilações de posição de uma estrela menor e mais fria que o Sol: a estrela de Barnard (sobrenome do astrônomo que descobriu essa variação de posição). Van de Kamp sugeriu que um planeta mais massivo do que Júpiter orbitava a estrela a fazê-la mudar de posição enquanto a orbitava. Posteriormente, refinando seus cálculos chegou à conclusão que eram dois planetas menores do que Júpiter.

Exoplaneta da estrela de Barnard

The screenshot shows the Exoplanet.eu website interface. At the top, there is a navigation bar with links: 'Página Inicial', 'Todos os catálogos', 'Diagramas', 'Bibliografia', 'Projectos', 'Congressos', and 'Outras páginas'. The main content area is titled 'Planet Barnard's b'. It features a table of planetary data and a separate section for the host star, 'Barnard's star'.

Planet Barnard's b	
Name	Barnard's b
Planet Status	Confirmed
Discovered in	2018
Mass	0.01016 (± 0.00138) M_J
Mass* $\sin(i)$	0.01016 (± 0.00138) M_J
Semi-Major Axis	—
Orbital Period	232.8 (-0.41 $^{+0.38}$) day
Eccentricity	0.32 (-0.15 $^{+0.1}$)
Update	2018-11-21
Detection Method	Radial Velocity
Mass Detection Method	Radial Velocity
Calculated temperature	105.0 (± 3.0) K

Star	
Barnard's star	
Name	Barnard's star
Distance	1.8 pc
Spectral type	M4V
Apparent magnitude V	9,5
Mass	0.163 (± 0.022) M_{Sun}
Age	8.5 (± 1.5) Gyr
Effective temperature	3278.0 (± 51.0) K
Radius	0.178 (± 0.011) R_{Sun}

03

A estrela de Barnard recebeu o nome do astrônomo que percebeu que ela se movimentava em torno de um ponto imaginário, ou seja, suas coordenadas variavam de forma cíclica. Isso só poderia ser explicado pela ação de força gravitacional de algum corpo massivo nas imediações da estrela. A estrela de Barnard é pequena (tem apenas 16% da massa solar), vermelha (tipo espectral M3) e de pouco brilho (magnitude aparente 9,5), que fica na constelação do Serpentário (Ophiuchus). Embora observada desde a década de 1950 à procura do possível planeta, ele só identificado e confirmado em 2018. É o exoplaneta “Barnard b”

Exoplanet.eu

Página Inicial Todos os catálogos Diagramas Bibliografia Projectos Congressos Outras páginas VO

VO CONNECTION OFF ON

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

Status

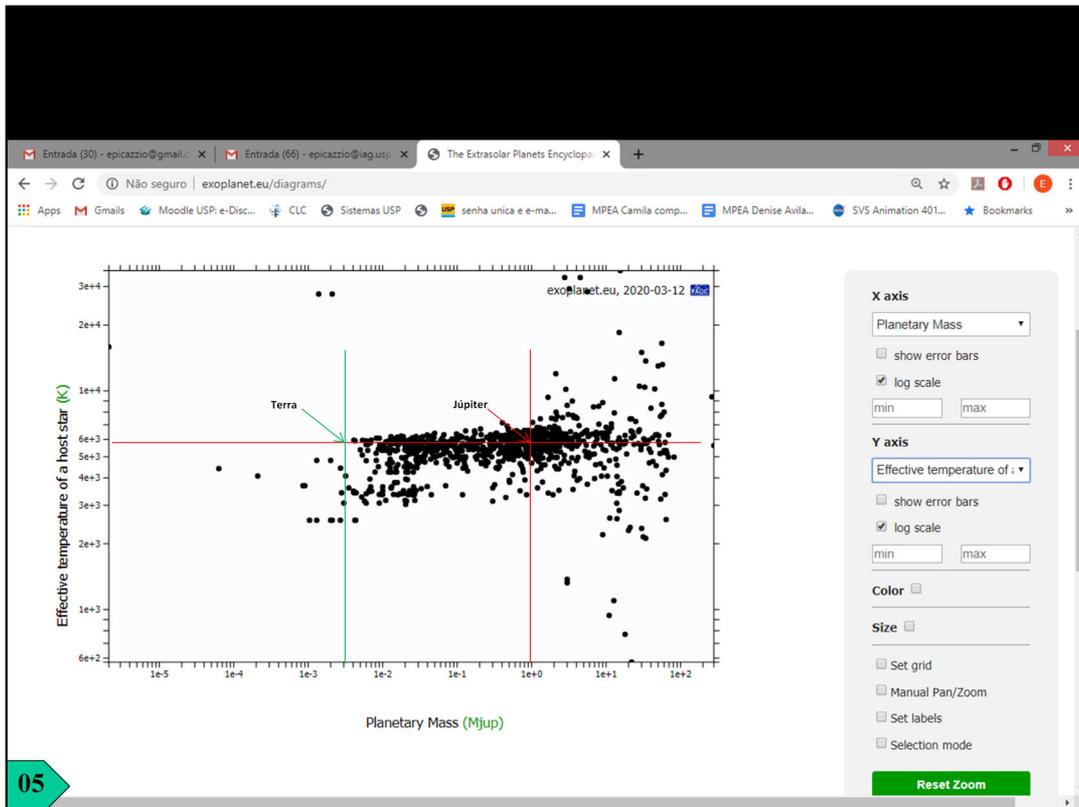
Showing 4217 planets / 3126 planetary systems / 688 multiple planet systems [All fields](#)

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
WASP-76 b	0.92	1.83	1.809886	0.033	0	88	—	2013	21
Kepler-1657 b	1.93	0.99	141.241671	0.534	0.496	89.892	—	2017	21
Kepler-1654 b	—	0.819	1047.8356	2.026	0.26	89.982	—	2017	21
Kepler-1653 b	—	0.22107	140.2524	0.4706	—	89.788	—	2017	21
Kepler-65 e	0.82	—	258.8	—	0.28	127	—	2019	21

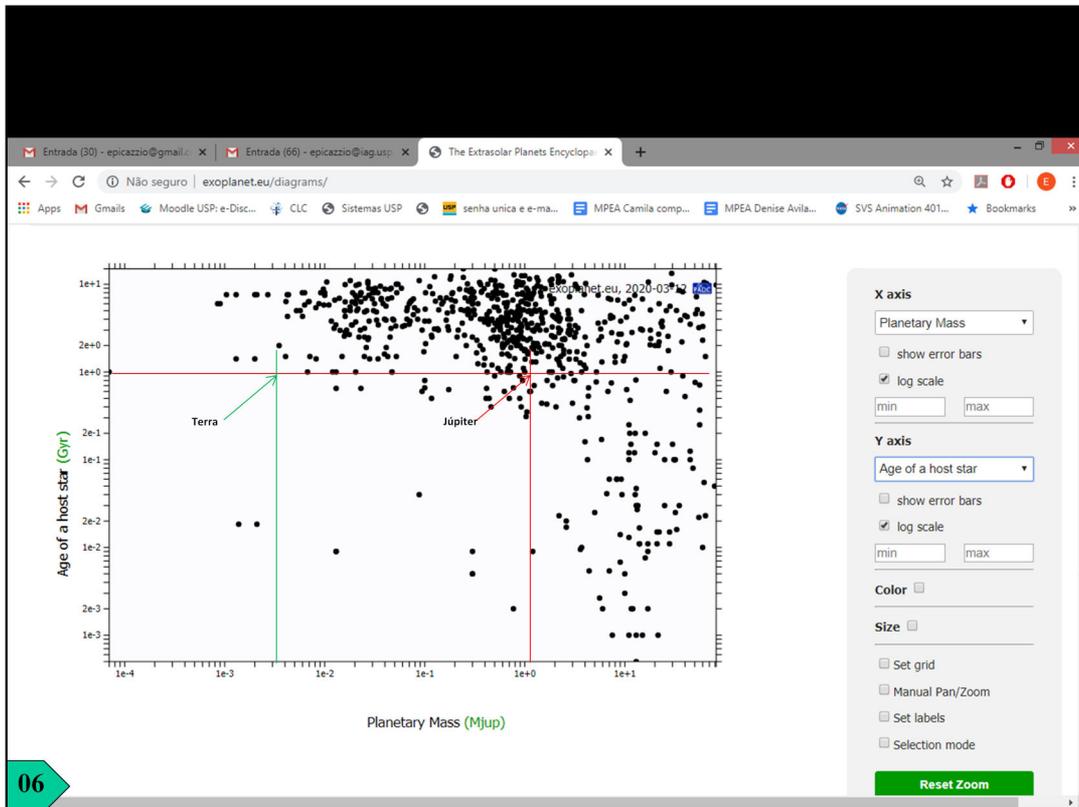
Esta é a situação em 17/03/2020. São confirmados 4217 exoplanetas, distribuídos em 3126 sistemas planetários. Confirmados significa candidatos que foram observados geralmente por períodos longos o suficiente para se ter certeza de que se tratava de exoplaneta. É quase certo que os 3126 sistemas planetários tenham mais planetas, porém a instrumentação atual ainda não é sensível o suficiente para detectá-los.

Na página do Exoplanet.eu é possível obter todos os parâmetros principais dos exoplanetas, assim como de suas estrelas. Esse dados podem ser manipulados em gráficos ou diagramas.



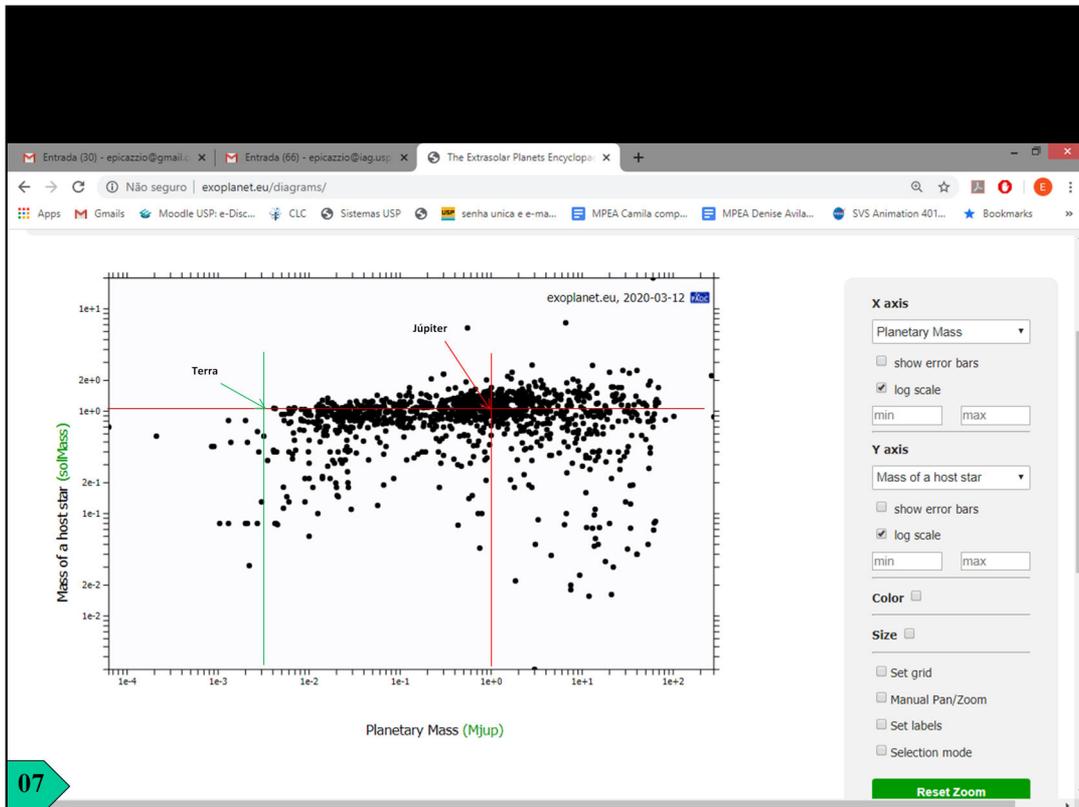
Esta é uma distribuição de exoplanetas, em função da massa (expressa em massas de Júpiter) e da temperatura efetiva da estrela hospedeira (expressa em Kelvin). As escalas são logarítmicas: a temperatura do Sol é pouco menos que 6.000K ($6e+3$) e a massa de Júpiter é $1M_{jup}$ ($1e+0$). Acima da linha vermelha horizontal estão as estrelas mais quentes que o Sol; abaixo, as mais frias. À esquerda da linha vermelha vertical estão os exoplanetas menos massivos que Júpiter; à direita, os mais massivos. A linha vertical verde representa a massa da Terra. Na região entre as linhas verticais verde e vermelha estão os exoplanetas parecidos com Netuno, Urano e Saturno. À esquerda da linha vertical verde ficam os exoplanetas rochosos, como Vênus, Marte e Mercúrio. O cruzamento das linhas vermelhas indica a posição aproximada do planeta Júpiter.

Nota-se que há planetas orbitando estrelas mais massivas e menos massivas que o Sol, porém não há planetas orbitando estrelas muito mais massivas que o Sol. Isso porque essas estrelas nascem rápido, são muito quentes e vivem pouco; nestas condições, o disco protoplanetário pode ser destruído antes do tempo necessário para formar planetas. Muitas dessas estrelas massivas morrem de forma catastrófica, elas se desintegram e ejetam matéria com grande violência.



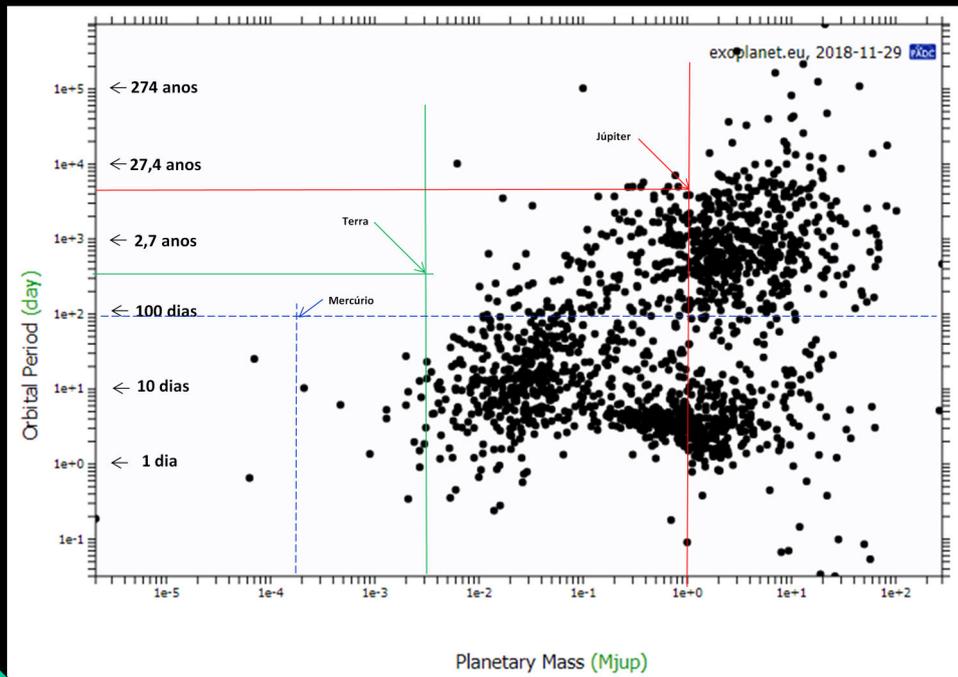
06

Neste gráfico o eixo vertical apresenta a idade da estrela hospedeira (em unidades da idade do Sol, no caso indicada por $1e+0$). A linha horizontal avermelhada representa estrelas com a idade do Sol. No eixo horizontal temos a massa do exoplaneta (em unidades de massa de Júpiter, no caso $1e+0$). Nota-se que estrelas mais massivas que o Sol têm bastante planetas, porém são poucos os caso de estrelas com massa maior que 10 vezes ($1e+1$) a massa solar. Estas estrelas nascem muito rápido, são muito quentes e vivem bem menos que o Sol, condição que não favorece a formação de planetas. Já as estrelas menos massivas têm planetas mesmo gigantes (bem mais massivos que Júpiter). Estas estrelas vivem muito.



O gráfico mostra a distribuição da massa planetária (em unidades de massa de Júpiter, $1e+0$) em função da massa (em massa solar, $1e+0$) da estrela hospedeira. A concentração de exoplanetas ocorre em estrelas com massa próxima à do Sol. Estrelas menores que o Sol (abaixo de $1e+0$) têm menos planetas, mas as estrelas mais massivas que o Sol (acima de $1e+0$) têm menos planetas. As supermassivas praticamente não têm. É que estas estrelas nascem e evoluem muito rápido destruindo o disco protoplanetário que forma planetas.

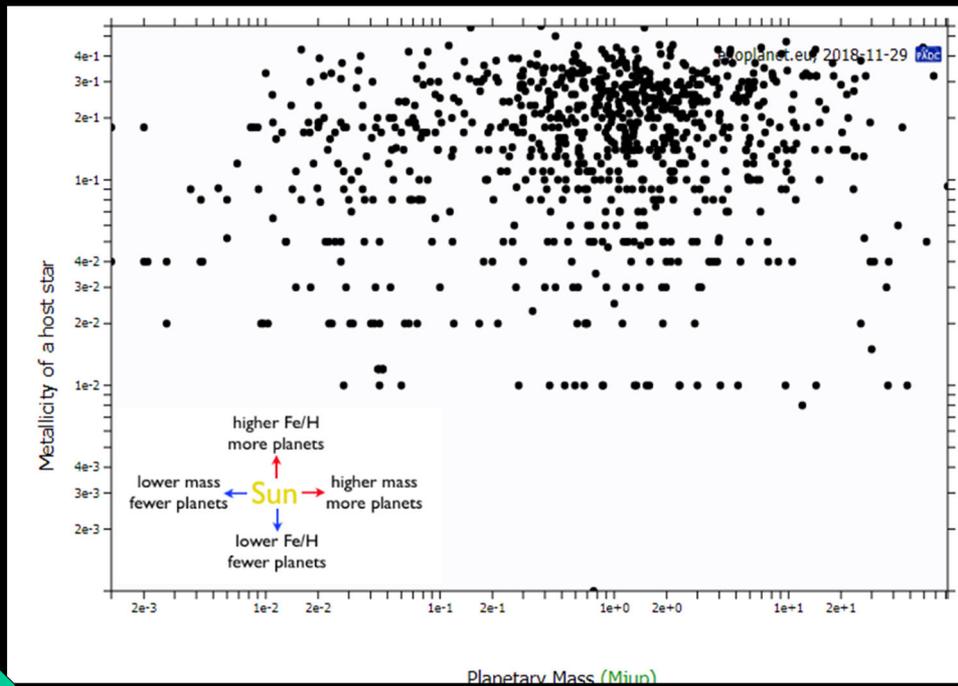
Exoplanetas confirmados



08

Gráfico obtido da página <http://exoplanet.edu/catalog/> : distribuição de períodos orbitais em função da massa dos exoplanetas confirmados até a data indicada. Vê-se que há muitos planetas com períodos de até 100 dias, pequenos e rochosos, assim como planetas gasosos enormes, muitos deles mais próximos de suas estrelas do que Mercúrio está do Sol. Estes planetas são chamados “Júpiteres quentes”, alguns estão evaporando.

Exoplanetas confirmados



09

Gráfico obtido da página <http://exoplanet.edu/catalog/> : distribuição das massas dos exoplanetas em função da metalicidade das estrelas hospedeiras. Metalicidade é um parâmetro que indica a quantidade relativa de ferro das estrelas. Esse parâmetro é normalizado pelo valor apresentado pelo Sol. Estrelas mais jovens tendem a apresentar maior quantidade de ferro, e isso parece ajudar na formação de planetas. O conceito matemática de metalicidade é apresentado no próximo slide.

Definição de metalicidade

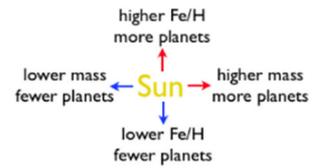
A way of measuring a star's chemical composition is by the **Iron(Fe)-to-Hydrogen(H) ratio**:

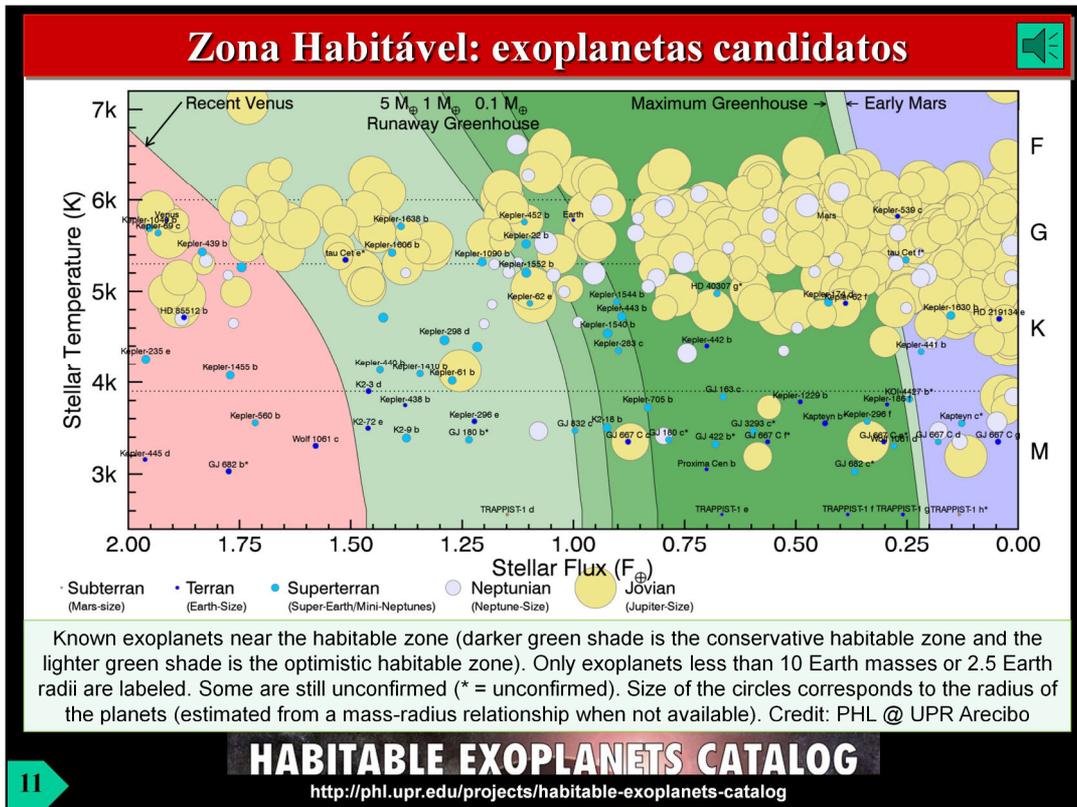
for the sun, $\log\left(\frac{N_{Fe}}{N_H}\right) \simeq -4.33$ so that for every Iron atom there are 20,000 Hydrogen atoms.

We measure this value for other stars relative to the sun using a quantity called [Fe/H]:

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log \frac{(\text{Fe}/\text{H})_*}{(\text{Fe}/\text{H})_{\odot}} = \log (\text{Fe}/\text{H})_* - \log (\text{Fe}/\text{H})_{\odot}$$

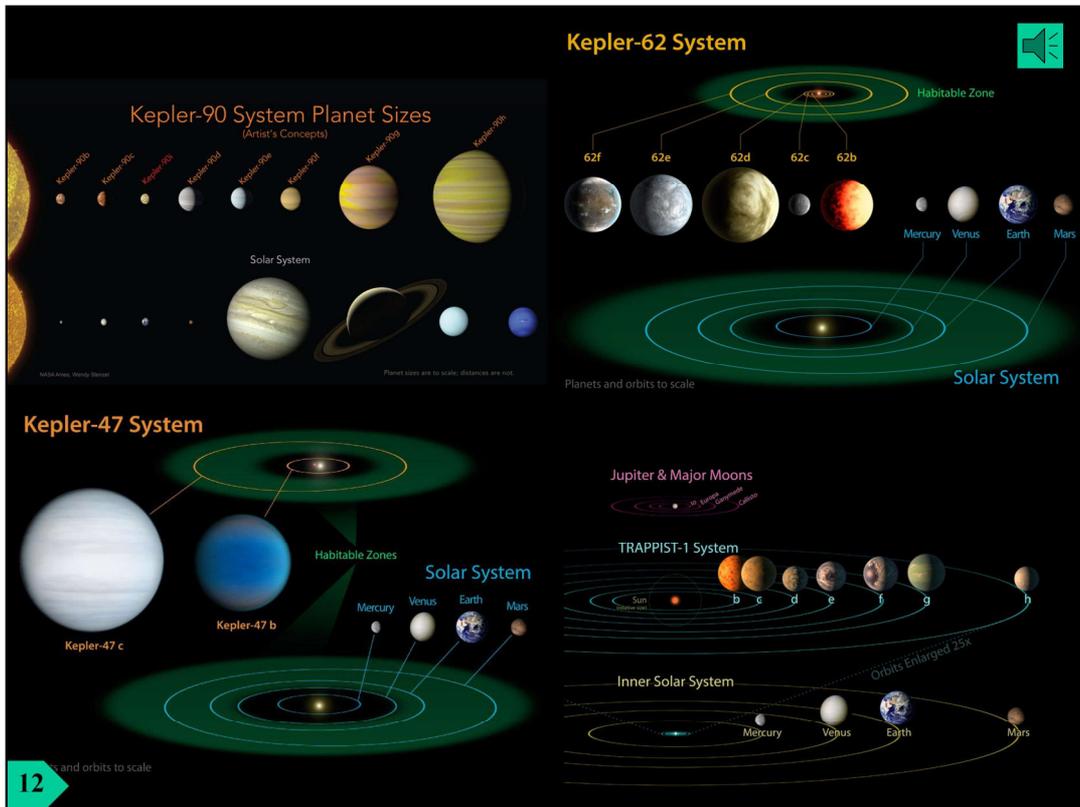
Defined this way the Sun has a metallicity $[\text{Fe}/\text{H}]_{\odot} \equiv 0.0$





Esta ilustração nos permite ter uma ideia do quão comum é a presença de planetas na zonas habitáveis de estrelas que possuem planetas em seu entorno. A região de cor rosa é quente porque está próxima da estrela. Planetas que estejam nessa região certamente são pobres em água. Planetas que estiverem na região de cor lilás (na extrema direita) se tiverem água na superfície ela estará congelada por conta da baixa temperatura. Havendo atmosfera espessa a água poderá aparecer em estado líquido. Grandes planetas podem ter água no estado de vapor ou mesmo gelo, mesmo estando em grandes distâncias de suas estrelas.

O que se percebe é a dominância de planetas grandes, com as dimensões de Júpiter. Há casos, inclusive, de planetas gigantes “colados às suas estrelas.



Vemos aqui comparações de alguns sistemas planetários com o Sistema Solar. Na realidade, ainda não encontramos um sistema planetários semelhante ao nosso.

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



13

Ou seja, a fração f de luz estelar interceptada pelo planeta é igual ao quadrado da razão entre o raio do planeta (R) e o dobro da distância do planeta à estrela. Lembrando que f é, na realidade, a razão entre as luminosidades da estrela (L_S) e do planeta (L_P), chega-se a uma expressão simples. Planetas gasosos têm albedo relativamente elevado, já os planetas rochosos podem ter albedos bem mais baixos por conta da composição química de suas superfícies.

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:

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

14

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

Exemplos para os casos de Terra e Júpiter. As luminosidades dos planetas é muito pequena se comparada à do Sol.

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**

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

15

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

Quanto mais distante a estrela hospedeira estiver da Terra, mais difícil será perceber a existência de um exoplaneta em seu entorno.

Separação angular

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

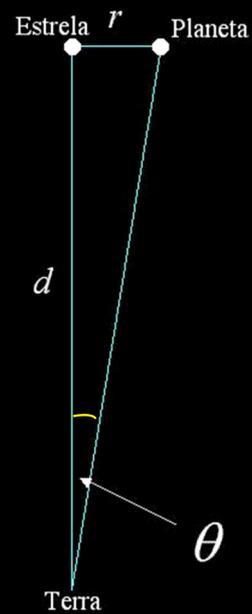
$$d = 30 \text{ a.l.} = 2,8 \times 10^{17} \text{ m}$$

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

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

$$\theta = 2,7 \times 10^{-6} \text{ radianos}$$

$$= 1,5 \times 10^{-4} \text{ grau}$$



16

http://www.astro.gla.ac.uk/users/martin/teaching/p1ystar/extra_solar_planets.ppt

Quanto mais distante a estrela hospedeira estiver da Terra, mais difícil será perceber a existência de um exoplaneta em seu entorno.

Telescópios ópticos

Potência de acúmulo de luz

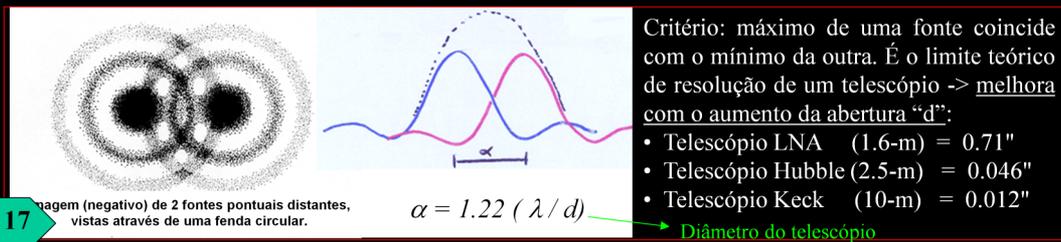
uma quantidade proporcional ao quadrado do diâmetro da objetiva

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...)



Mesmo com telescópios a observação é limitada. Telescópios grandes coletam mais luz, têm limite de resolução menor (ou seja, maior capacidade de observar objetos pequenos ou discernir pontos próximos). Toda óptica tem um limite de resolução, ou seja, capacidade de distinguir pontos próximos. A ilustração no canto inferior esquerdo mostra a relação entre comprimento de onda em que se está observando e o diâmetro de abertura do telescópio. Para um mesmo comprimento de onda, telescópios maiores têm melhor resolução espacial.

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		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

18

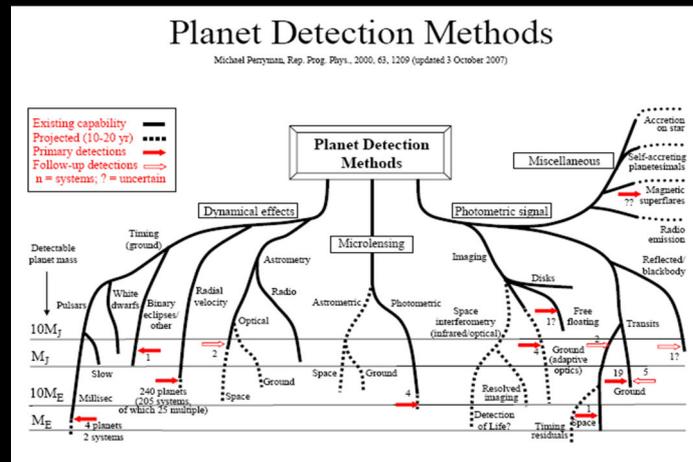
Fonte: Christopher W. Churchill

O telescópio coleta luz e a câmera acoplada a ele produz uma imagem. Esse conjunto pode ser otimizado. Quanto maior for o telescópio, mais luz ele coleta. Quanto melhor for a câmera, melhor será a imagem produzida. Uma câmera digital de má qualidade tem poucos píxeis e os píxeis são grandes. Uma imagem dessa câmera tem pouca resolução (é o caso da imagem da base). Já uma câmera de boa tem CCD grande e píxeis muito pequenos, e a imagem é de excelente qualidade. Resumindo, otimizar o sistema telescópio/câmera significa aumentar o tamanho do telescópio e reduzir o tamanho dos píxeis; a imagem resultante é de excelente qualidade (veja a imagem do topo).

A câmera CCD pode ser utilizada para produzir imagens diretas do planeta e da estrela, ou pode ser acoplado a espectrógrafos. Neste caso, a imagem produzida é a do espectro de luz, que pode ser analisada.

Métodos de detecção

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



19

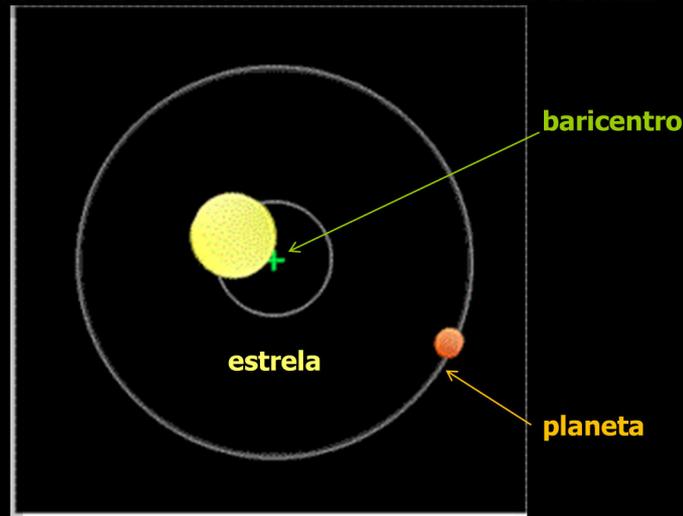
Há muitos métodos de detecção e com características diferentes. Muitas vezes é possível utilizar mais de um método para observar o mesmo caso.

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 .
Microlente 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.

Métodos indiretos de detecção: Astrometria

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



Ver animação em: <https://spaceplace.nasa.gov/barycenter/en/>

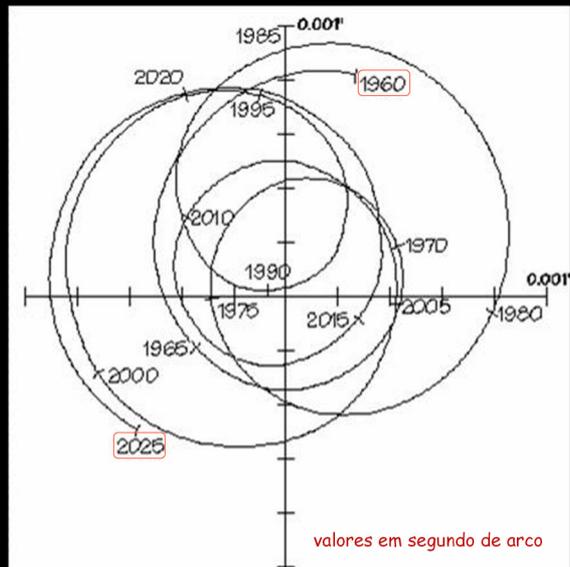
21

Em um sistema de estrela e planeta, ambos circulam o centro de massa do sistema (também chamado baricentro). Quanto maior for o planeta e quanto mais próximo ele orbitar a estrela, mais distante o baricentro estará do centro da estrela, ou seja, maior é a amplitude do movimento da estrela. Portanto, mais fácil de ser percebido. Esse movimento da estrela pode ser detectado a depender da distância dela à Terra. Essa é a característica do método astrométrico. Ele é muito eficiente para estrelas próximas da Terra e com planetas grandes em seu entorno.

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.



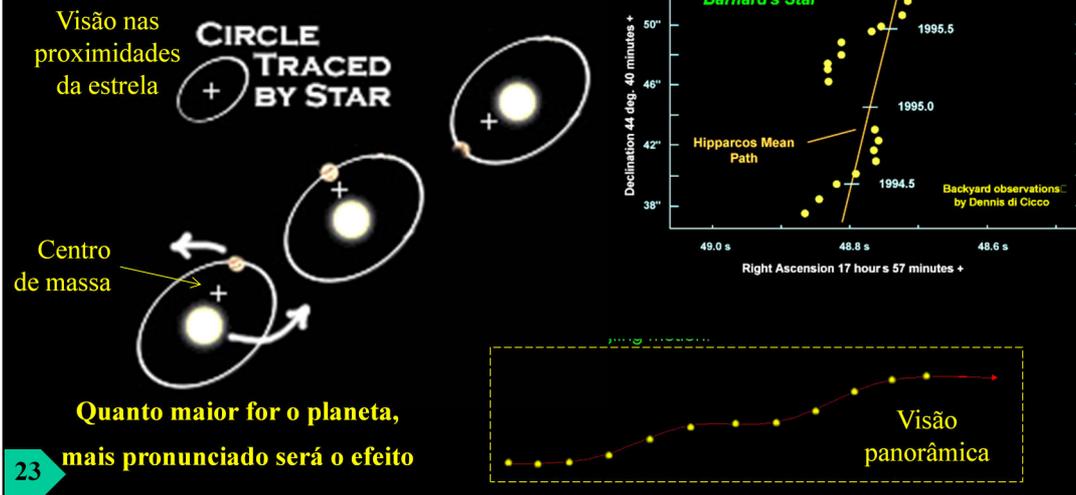
http://planetquest.jpl.nasa.gov/Navigator/material/sim_material.cfm

Havendo mais planetas orbitando a estrela, o movimento dela em torno do centro de massa é mais evidente e mais complexo.

Esta ilustração mostra o movimento do Sol em torno do centro de massa do Sistema Solar (basicamente o centro de massa do Sol e dos planetas) entre 1960 e 2025, se visto de uma distância de 32 a.l. do Sol. A dificuldade de estimar a quantidade de planetas em torno de uma estrela é desvendar esse movimento da estrela em função da massa dos planetas.

Métodos indiretos de detecção: Astrometria

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

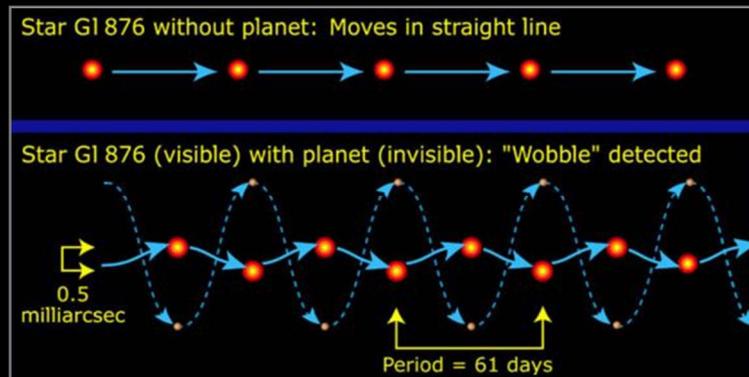


A estrela tem movimento próprio, ou seja, ela se desloca com velocidade e direção particulares. Havendo planetas em seu entorno, a estrela circula o baricentro do sistema. O movimento aparente da oscilação astrométrica da estrela é a composição dos dois movimentos, ou seja, um movimento tortuoso e repetitivo, como mostra o esquema da direita. A linha alaranjada representa o movimento do centro de massa e os pontos amarelos a oscilação composta da estrela.

Estrelas sem planetas deslocam-se em linha reta no plano de visão do céu.

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 .

24

Caso da estrela GL 876. Na parte superior da ilustração vê-se o movimento do baricentro do sistema, que seria o movimento da estrela caso ela não tivesse planetas em seu entorno. Abaixo vê-se o movimento composto.

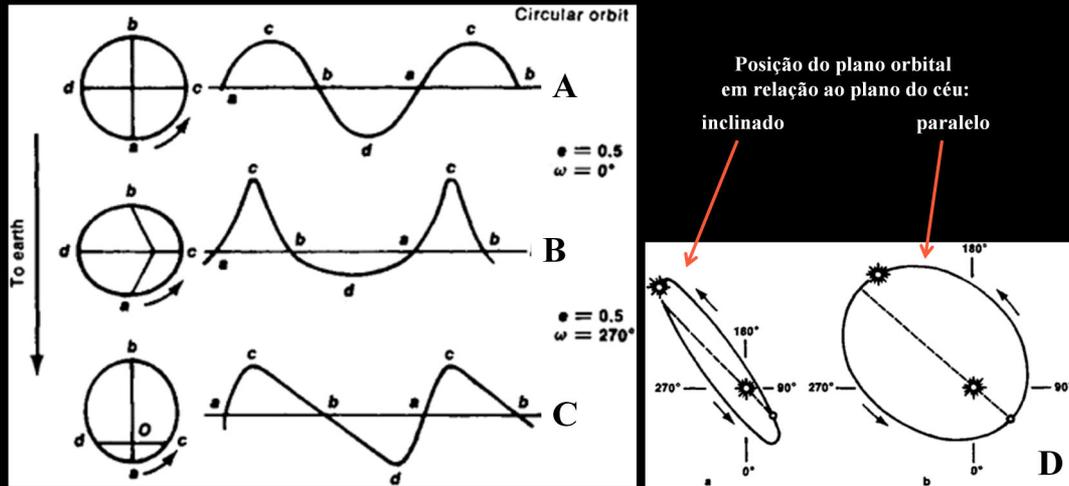
Ref.:

<http://www.ambafrance-au.org/fst/pages/fst35/>

<http://www.astron.sh.cn/yiwen/2002/yw021217->

[First%20Accurate%20Measurement%20of%20an%20Extrasolar%20Planet%20Mass.files/astrometry_gliese876.jpg](http://www.astron.sh.cn/yiwen/2002/yw021217-First%20Accurate%20Measurement%20of%20an%20Extrasolar%20Planet%20Mass.files/astrometry_gliese876.jpg)

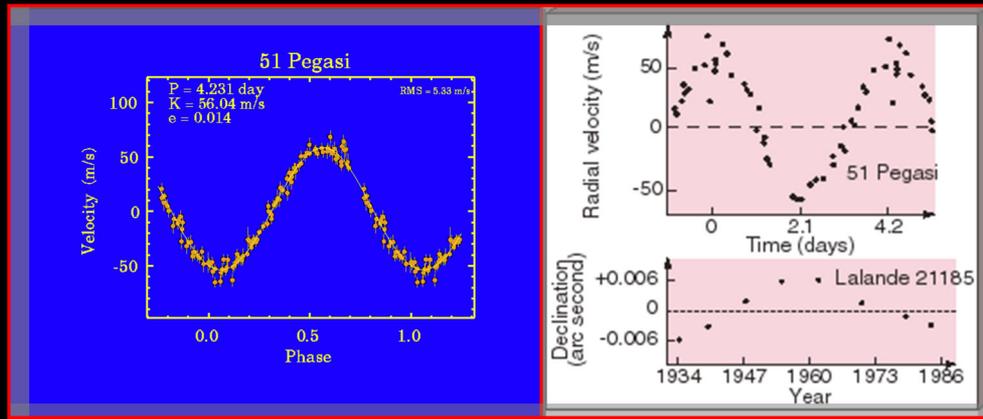
Formatos de curvas periódicas



A aparência da curva de movimento próprio, de velocidade radial e de luz depende do formato da órbita, da inclinação do plano orbital em relação ao plano do céu e da direção de observação .

Métodos indiretos de detecção: Astrometria

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

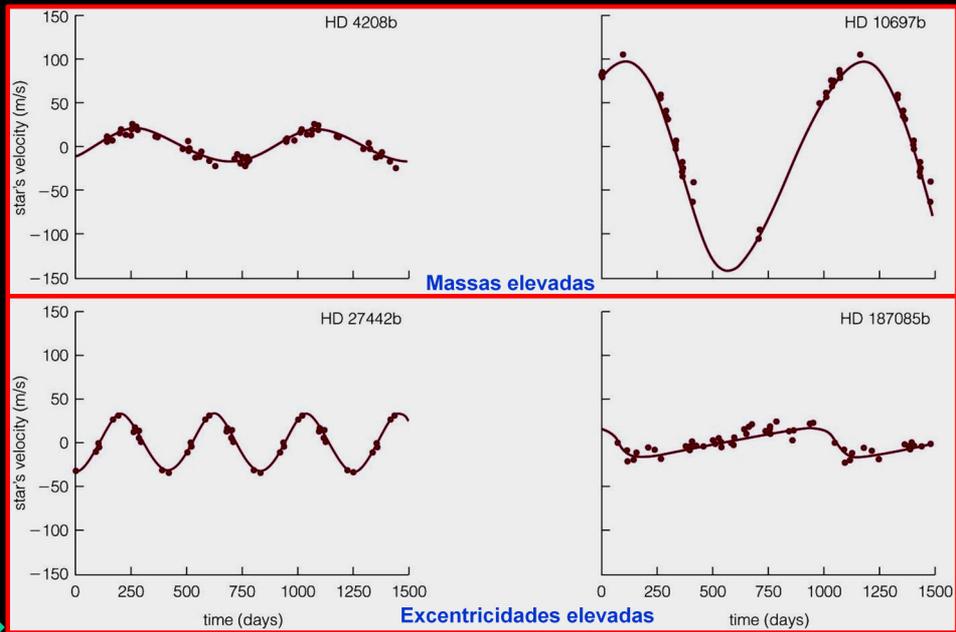


26

Caso das estrelas 51 da constelação Pégaso e Lalande 21185 da constelação Ursa Maior.

Métodos indiretos de detecção: Astrometria

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

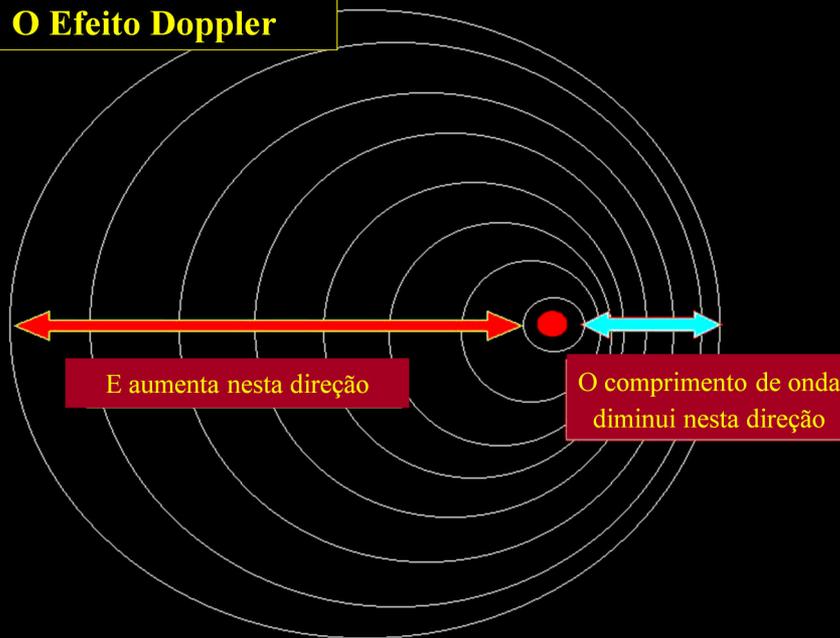


27

Casos das estrelas HD 4208b, HD 10697b, HD 27442b e HD 187085b. O tempo decorrido entre dois picos, ou duas depressões, é o período orbital do planeta.

Métodos indiretos de detecção

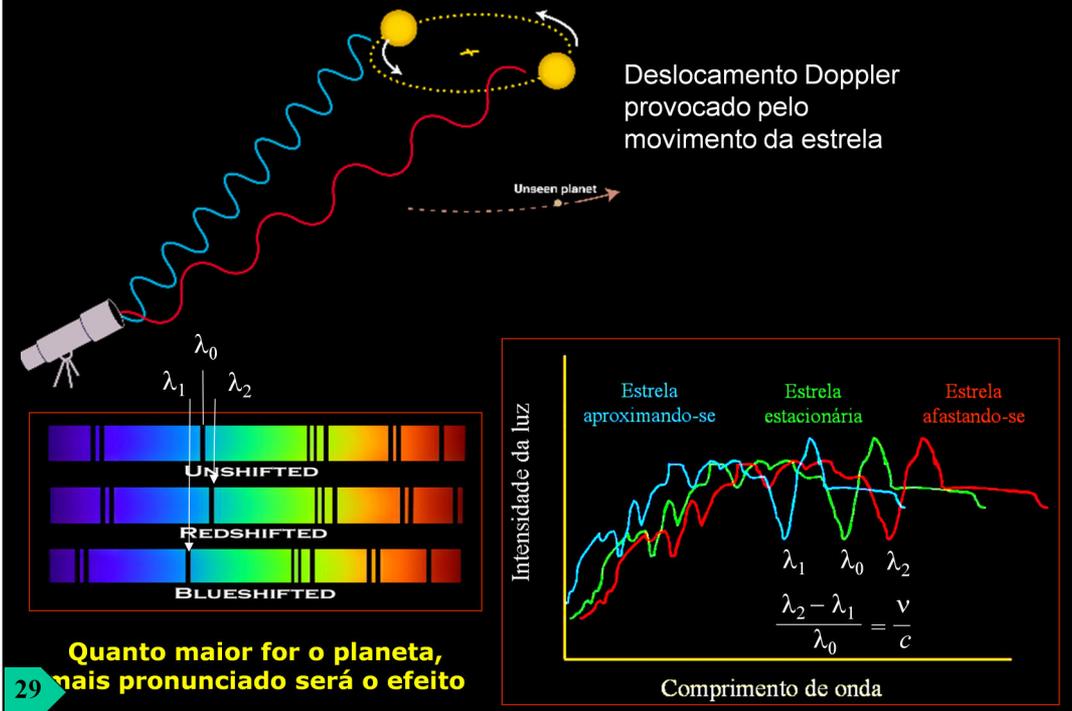
O Efeito Doppler



28

O método Doppler de detecção usa o deslocamento do espectro provocado pelo movimento de aproximação e afastamento da estrela em relação ao observador. As ondas eletromagnéticas (ondas de luz) não se alteram se fonte emissora e observador não possuírem movimento relativo, isto é, se a distância entre emissor e receptor mantiver-se inalterada. Havendo movimento relativo, as ondas eletromagnéticas sofrem alteração no comprimento de onda; (a) as ondas que se propagam na direção do movimento da fonte são comprimidas (têm o comprimento de onda encurtado), o que significa dizer que a cor da luz fica azulada; (b) as ondas que se propagam na direção oposta a do movimento da fonte emissora têm os comprimentos de onda alongados, portanto ficam avermelhadas. Esse efeito é conhecido por avermelhamento e azulamento (ou desvio para o vermelho – redshift – e desvio para o azul – blueshift). Em outras palavras, se a luz é desviada para o vermelho então a fonte está em movimento recessivo. Se for desviada para o azul o movimento é aproximativo.

Métodos indiretos de detecção: Velocidade Radial

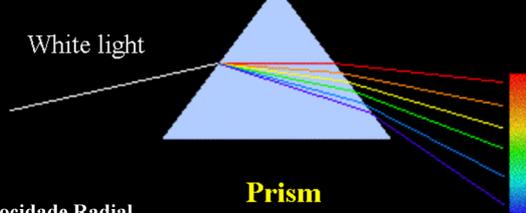


O método Doppler de detecção usa o deslocamento do espectro provocado pelo movimento de aproximação e afastamento da estrela em relação ao observador.

Quando a estrela move-se afastando-se do observador (curva vermelha da ilustração superior) o espectro de luz desvia-se para a direção do vermelho (λ_2). Diz-se que houve deslocamento para o vermelho (redshift em inglês). Quando o movimento da estrela é de aproximação (curva azul) o espectro move-se para a direção do azul (blueshift em inglês), λ_1 . A posição central (λ_0) é quando não há deslocamento entre estrela e observador (estrela move perpendicularmente à linha de visada). O percentual de deslocamento total ($\lambda_2 - \lambda_1$) relativo ao caso em repouso (λ_0) é proporcional à razão das velocidades de deslocamento da estrela (v) e da luz (c). λ_0 , λ_1 , λ_2 e c são conhecidos, logo tira-se a velocidade v da estrela.

Métodos indiretos de detecção: Velocidade Radial

(Deslocamento Doppler)



White light

Prism

Desvio Doppler:

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

Mudança no comprimento de onda

Velocidade Radial

Velocidade da luz

Comprimento de onda da luz medido em laboratório (referência)

Limite da tecnologia atual:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx 10^{-8}$$
$$v \approx 3 \text{ ms}^{-1}$$

30

O movimento de estrelas com velocidade de deslocamento menor que 3 m/s (10,8 km/h) não é percebido com os instrumentos atuais. Precisamos de telescópios maiores, instrumentos mais sensíveis e métodos de análise mais refinados para detectar planetas menores ou planetas em estrelas mais distantes.

Amplitude da velocidade radial de uma estrela

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

Exemplificando o nosso caso:

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

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

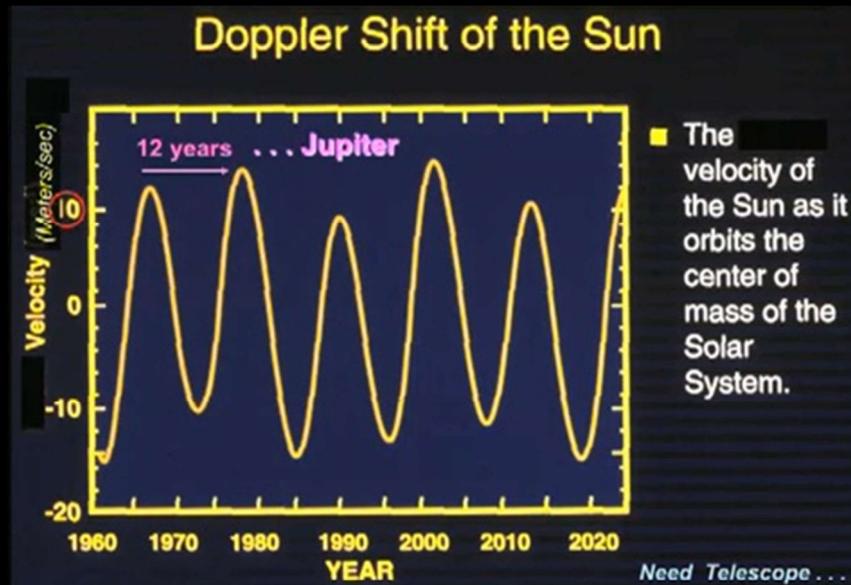
$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ $M_{\text{sol}} = 2,0 \times 10^{30} \text{ kg}$

31

A amplitude (intensidade) da velocidade radial da estrela (V_S), decorrente da perturbação gravitacional do planeta, é obtida através da expressão acima, onde T é o período orbital da estrela em torno do baricentro, m_S e m_P são as massas da estrela e do planeta, respectivamente. V_S e T são obtidos da observação (V_S pelo desvio espectral e T pela curva de luz); a massa m_S é conhecida pelo tipo espectral da estrela; logo, podemos determinar a massa do planeta m_P .

Vemos aqui uma aplicação para os casos da Terra e Júpiter. Um planeta grande como Júpiter desloca uma estrela do tipo solar com velocidade detectável pela instrumentação atual, mas um planeta pequeno é difícil de ser percebido porque sua atuação sobre a estrela é muito sutil e ainda estamos limitados pela instrumentação.

Amplitude da velocidade radial de uma estrela



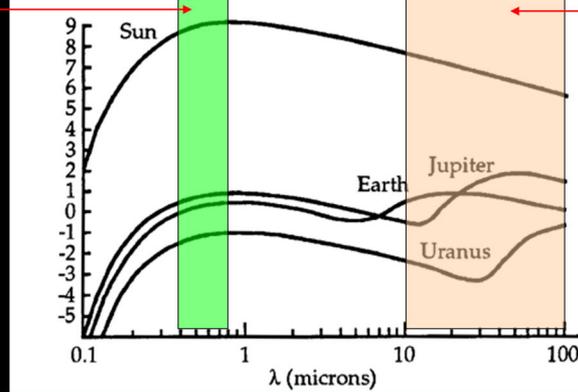
32

Geoff Marcy) [The Search for other Earths and Life in the Universe, January 14, 2010., [StanfordUniversity](#)]

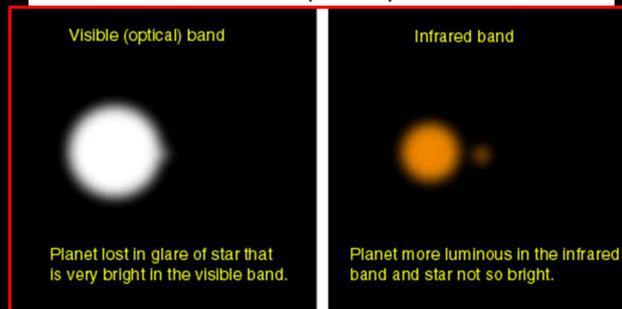
Aqui é ilustrada a velocidade do Sol em torno do centro de massa (baricentro) entre Sol e Júpiter, decorrente da ação gravitacional de Júpiter. Júpiter e Sol orbitam o centro de massa com o mesmo período, porém a distâncias diferentes e sempre em posições opostas, ou seja, Sol de um lado e Júpiter do outro.

Método direto de detecção: Imageamento

Visível:
estrela/planeta
= 1 bilhão



Infravermelho:
estrela/planeta
= 1 milhão



33

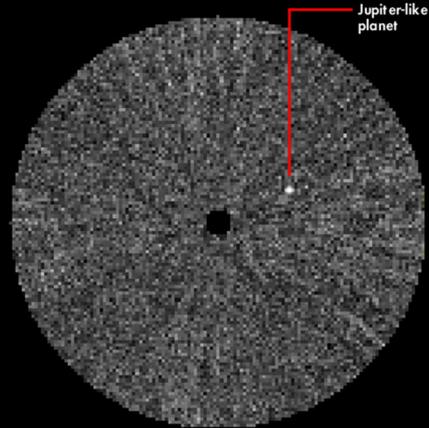
Fonte: Christopher W. Churchill

Na região do visível (coluna verde) o brilho do Sol é muito mais intenso do que os dos planetas; cerca de 1 bilhão de vezes maior que o do planeta. Já na região do infravermelho (coluna rosada) essa diferença de brilho cai. Logo, é melhor observar o sistema nessa região espectral. A figura inferior ilustra a possibilidade de se ver o planeta quando escolhida adequadamente a região espectral de observação.

Método direto de detecção: Imageamento

Luz refletida pelo planeta

Imagem simulada de Júpiter se visto à distância de 10pc do Sol



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

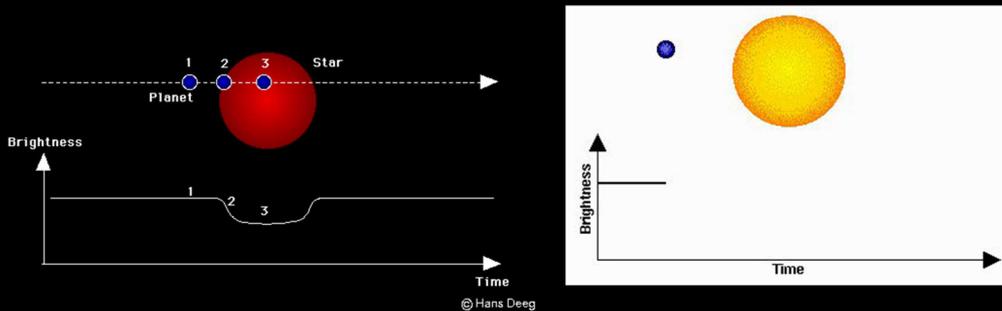
34

Fonte: Christopher W. Churchill

Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Variação de luz decorrente de um eclipse

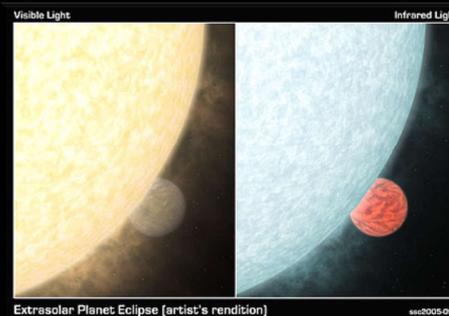
Animação: <https://community.dur.ac.uk/physics.astrolab/exoplanets.html>



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

Contraste é maior no infravermelho que no visível

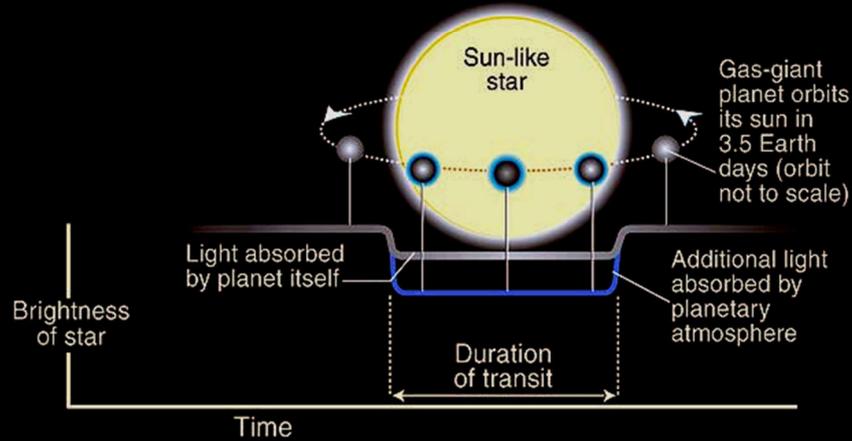
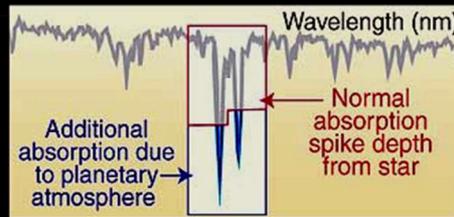
35



O método de detecção por fotometria (ou trânsito) baseia-se na queda de luz estelar provocada pela passagem do planeta em frente da estrela, ou seja, colocando-se entre a estrela e o observador. Qualquer que seja o tamanho do planeta, o trânsito provocará uma queda da luz. O problema é ter instrumento sensível o suficiente para detectar essa queda.

Métodos indiretos de detecção: Fotometria

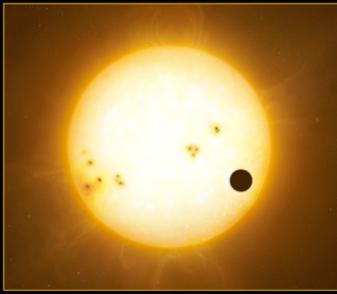
Absorção adicional de sódio decorrente da passagem da luz pela atmosfera do planeta.



36

Na realidade, o espectro da estrela está contaminado pelo espectro dos planetas que ela pode possuir. Despreza-se esse fato porque o espectro da estrela é, de longe, o predominante. Porém, pode haver a possibilidade de se identificar o espectro do planeta em alguma banda específica, como ilustra a imagem superior.

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

37

Vemos aqui alguns valores relativo das áreas dos discos do Sol e planetas. Essa área relativa é a responsável pela reflexão da luz solar, logo representa também o fluxo relativo, ou o brilho relativo. Planetas pequenos são quase imperceptíveis porque seu brilhos são muito débeis.

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



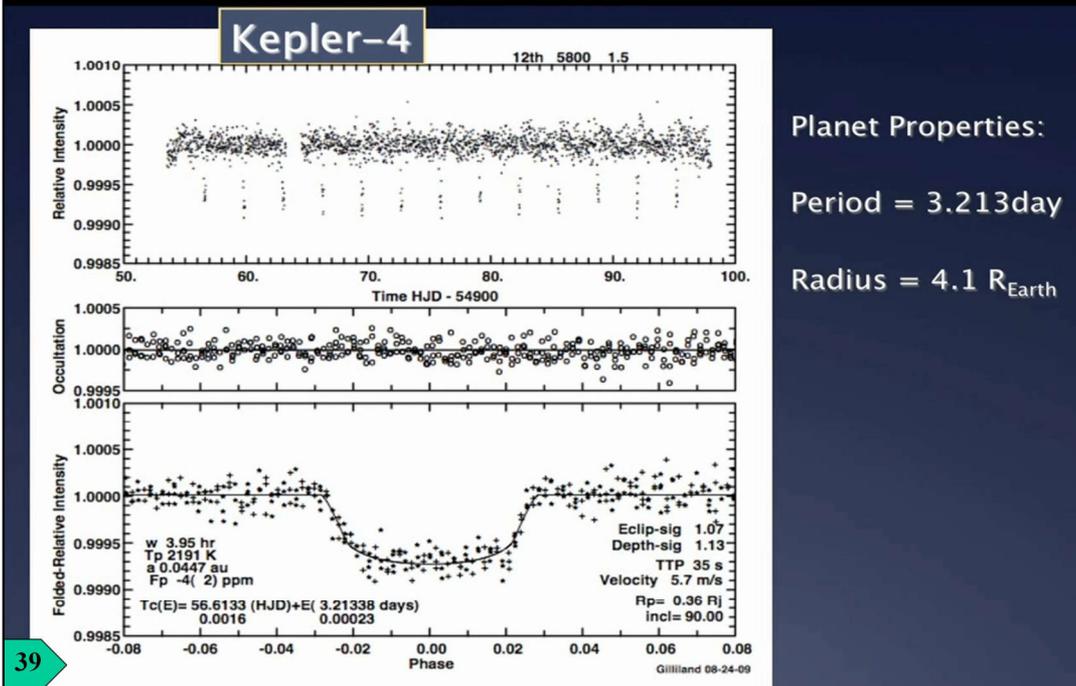
- Images 150,000 stars simultaneously
- Every 30 minutes
- For 4 Years
- Brightness Precision: 0.01%

38

A missão Kepler foi a mais produtiva até o momento. O telescópio Kepler era mantido para uma posição fixa, livre da interferência da luz solar, observando por 24 horas seguidas um campo de $10^\circ \times 10^\circ$ (só para comparação, o diâmetro angular da Lua é $0,5^\circ$), contendo cerca de 150.000 estrelas. O CCD monitorava a luz de todas essas estrelas.

Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy

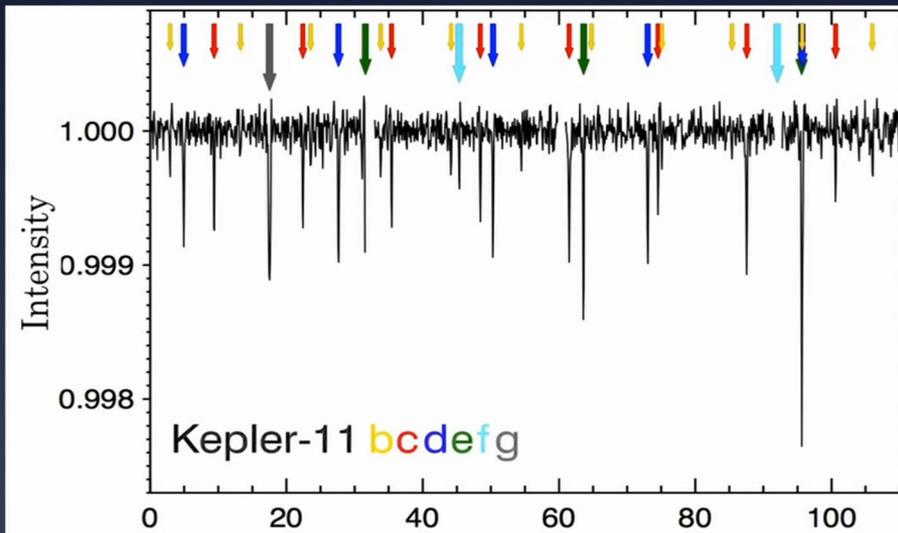


Exemplo de curva de luz produzida pela missão Kepler. O gráfico superior mostra a curva de luz da estrela Kepler-4. Quando um planeta transita na frente dela ele provoca uma queda brusca de luz. O espaçamento no tempo dessa queda indica o período de translação do planeta. O gráfico inferior mostra a queda de luz durante o trânsito com maior resolução temporal. Quanto maior profunda a queda, maior é o planeta. A inclinação dos bordos da depressão reflete o tamanho do planeta: se ele for pequeno a queda é brusca, e linha é quase vertical. Se o planeta for grande, a queda é uma linha inclinada.

Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy

Kepler-11: Six Transiting Planets

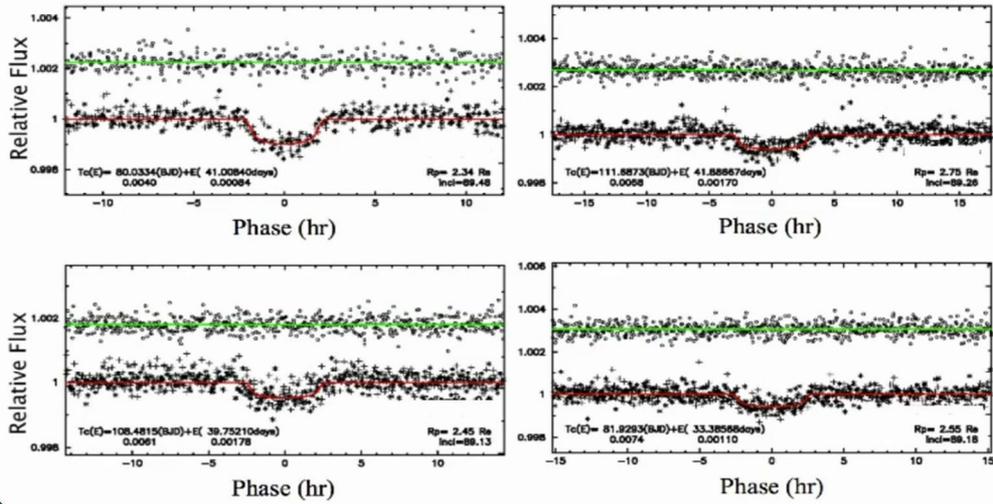


O espectro da estrela Kepler-11 mostra seis picos de queda provocados pelos seis planetas da estrela, mostrados em cores diferentes. Quando dois ou mais planetas cruzam simultaneamente o disco da estrela, a queda de luz é mais profunda.

Métodos indiretos de detecção: Fotometria

Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy

Most Common:
Radius = 2 - 3 R_{Earth}



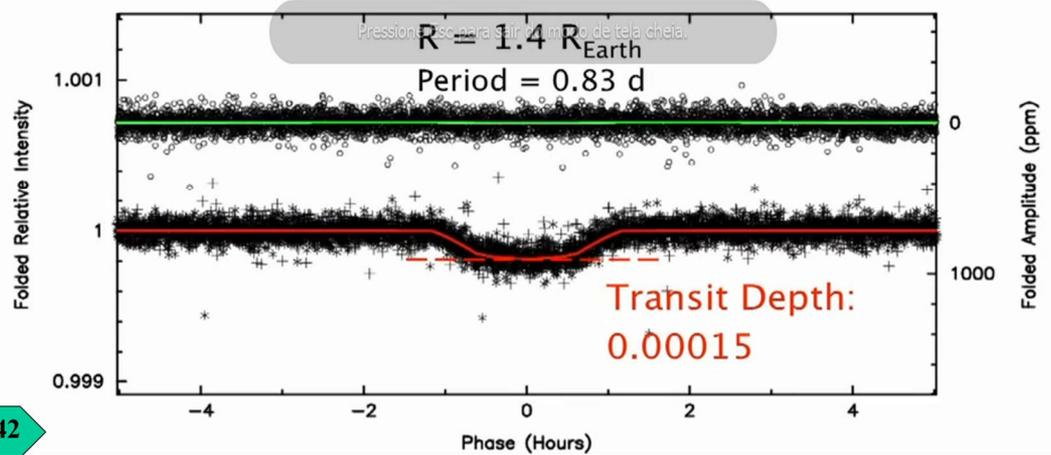
41

Ilustração da queda de luz produzida por planetas pouco maiores que a Terra.

Métodos indiretos de detecção: Fotometria

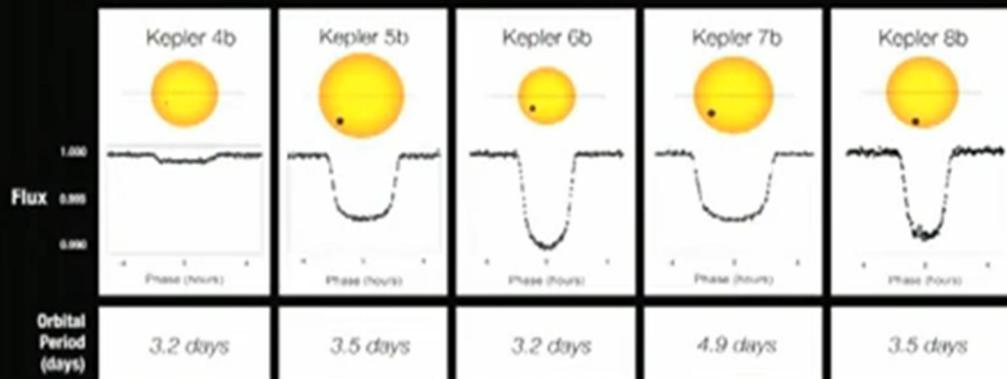
Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy

Kepler-10 Light Curve



Neste caso, a queda é muito pequena porque o planeta tem quase o tamanho da Terra

Transit Light Curves



43

A figura ilustra os formatos de queda de luz produzidos decorrentes do trânsito de um planeta pelo disco estelar em diferentes latitudes do disco.

Information from Transit Lightcurves

One can use the timing of the transit lightcurve to measure a number of things about the planet and the star.

The duration of the linear part of the decrease is related to the diameter of the planet, $d_p = 2R_p$,

$$t_2 - t_1 = t_4 - t_3 = d_p / v_{orb}$$

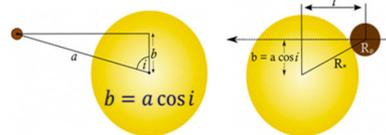
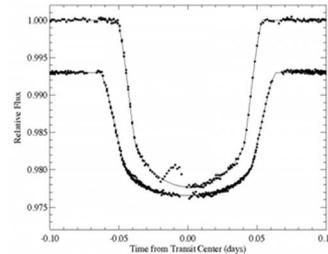
We get the orbital velocity by $v_{orb} = \frac{2\pi a}{P}$, where a and P are related by Kepler's third law.

The duration of the entire transit is related to the diameter of the star. The distance l is:

$$l = \sqrt{(R_* + R_p)^2 - b^2}$$

So the duration of the transit gives

$$t_4 - t_1 = \frac{2l}{v_{orb}} = 2l \frac{P}{2\pi a}$$



From: <https://www.paulanthonywilson.com/the-transit-light-curve/>

Aqui mostra-se as informações que podem ser tiradas das curvas de luz do trânsito de um exoplaneta.

A duração da parte linear de decaimento da luz da estrela está relacionado com o tamanho do planeta; quanto maior for o planeta, mais inclinada será essa parte da curva - planetas pequenos provocam decaimento quase vertical.

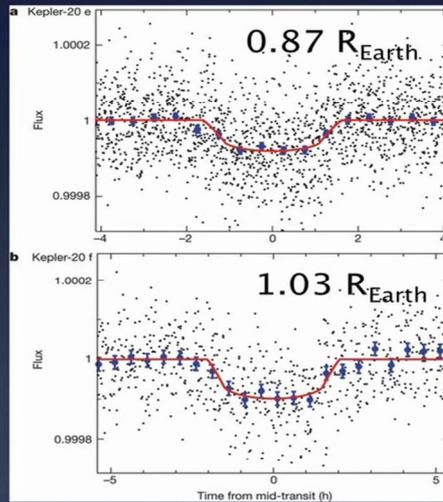
A duração de todo o trânsito está relacionada ao diâmetro da estrela, à velocidade orbital e ao período orbital do planeta (ambos definidos pelas leis de Kepler).

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.

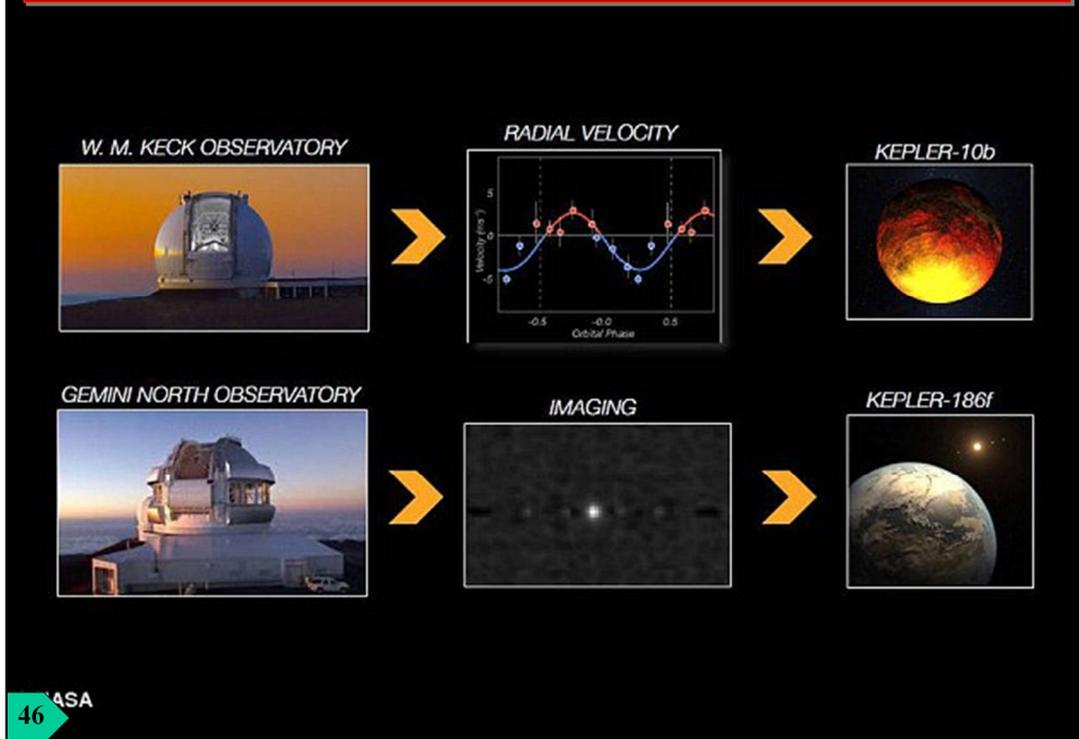
Flux decrements of:
82 p.p.m.
101 p.p.m.:

45

F. Fressin et al. 2012

Curvas de luz da estrela Kepler-20, provocadas pelos planetas Kepler20e e Kepler20f. Repare como muda o formato da curva com o tamanho do planeta.

Comprovação da existência



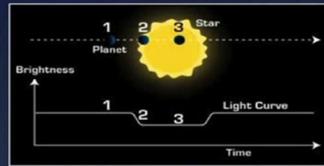
O processo de confirmação pode levar meses ou anos. Identificada uma estrela candidata a ter planetas, ela passa a ser observada em solo por grandes telescópios equipados com instrumentações sensíveis (câmeras CCD, espectrômetro e outros). Se a análise das observações comprovar a presença de planetas, então eles são incluídos nos catálogos e, geralmente, comunicado à comunidade científica através de artigos científicos.

Determinação da densidade

Astrobiology - Exoplanets - Geoff Marcy

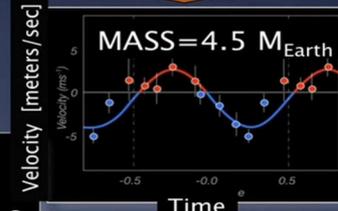
The Planet Radius

Planet Transit



The Planet Mass

Doppler of Star

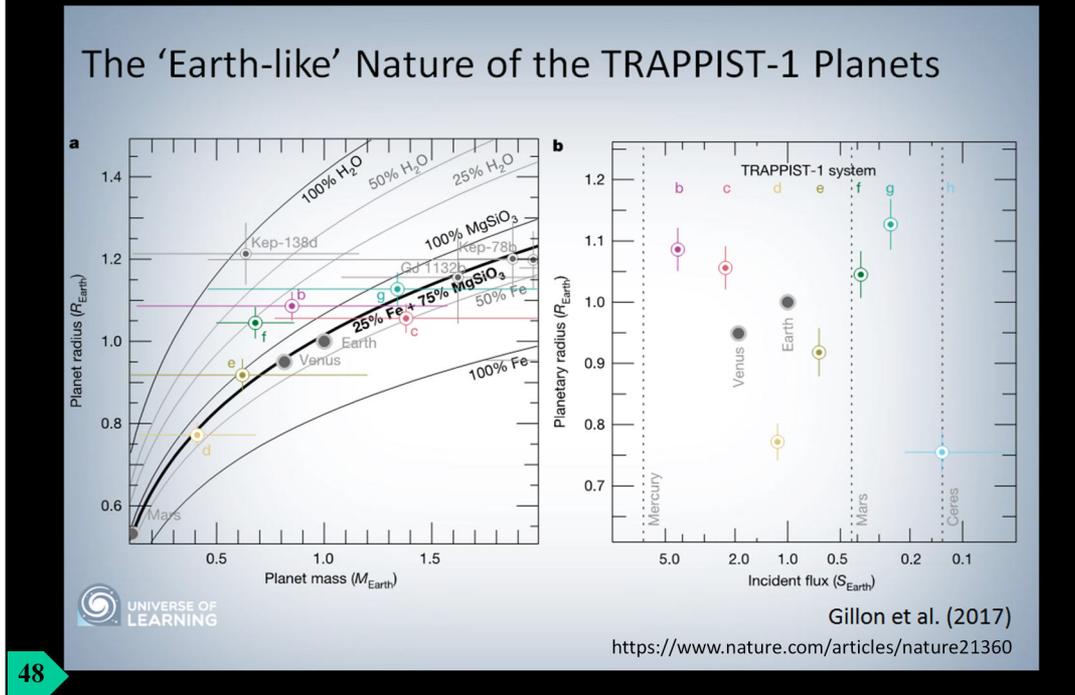


Planet Density:
$$\frac{\text{Mass}}{\text{Volume}} = 8.8 \text{ g/cm}^3$$

47

Neste slide vemos o processo pelo qual deduzimos a natureza física do planeta. Pelo método de trânsito (esquerda) é possível obter uma estimativa do raio do planeta. Pelo método espectroscópico (desvio Doppler) podemos deduzir a massa do planeta. Com raio e massa deduzimos a densidade. Nesse caso trata-se de um planeta rochoso, maior que a Terra e mais denso. Se ele tiver atmosfera, a pressão na superfície pode ser mais elevada que a da Terra. Para essa análise é preciso que o planeta possa ser observado por métodos distintos.

Determinação da densidade

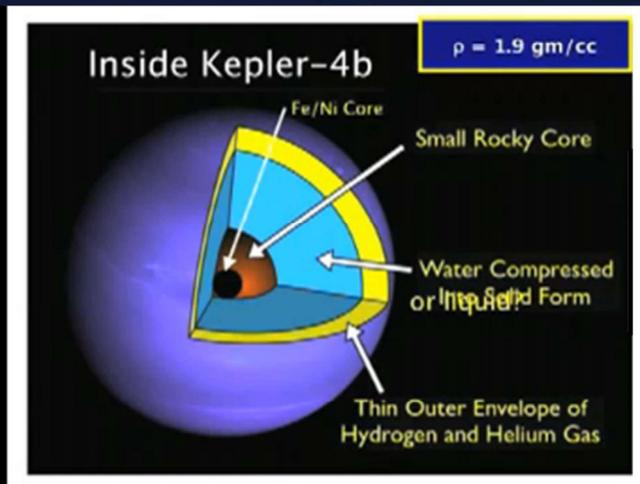


O gráfico da esquerda mostra curvas de raio x massa de exoplanetas com composições químicas diferentes, entre dois extremos: composto só de ferro (curva inferior) e só de água (curva superior). Quando a massa e o raio de um exoplaneta são conhecidos, esse gráfico ajuda a identificar a sua composição química global.

O gráfico da esquerda ilustra a comparação entre os planetas solares e os da estrela Trappist-1, da constelação Aquário, distante 39 anos-luz da Terra. Esta estrela (tecnicamente identificada por 2MASS J23062928-0502285) é uma anã vermelha fria. Ela tem sete planetas, o maior número de planetas de dimensões semelhantes aos da Terra, possivelmente em condições de possuírem água. Todos os planetas da Trappist-1 possuem órbitas menores que a órbita de Mercúrio; o mais próximo está a 0,01 u.a. e o mais distante está a 0,06 u.a. Mercúrio está a 0,39 u.a. do Sol.

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 primarily of ...ices, rocks, and iron." (Fortney et al. 2007)

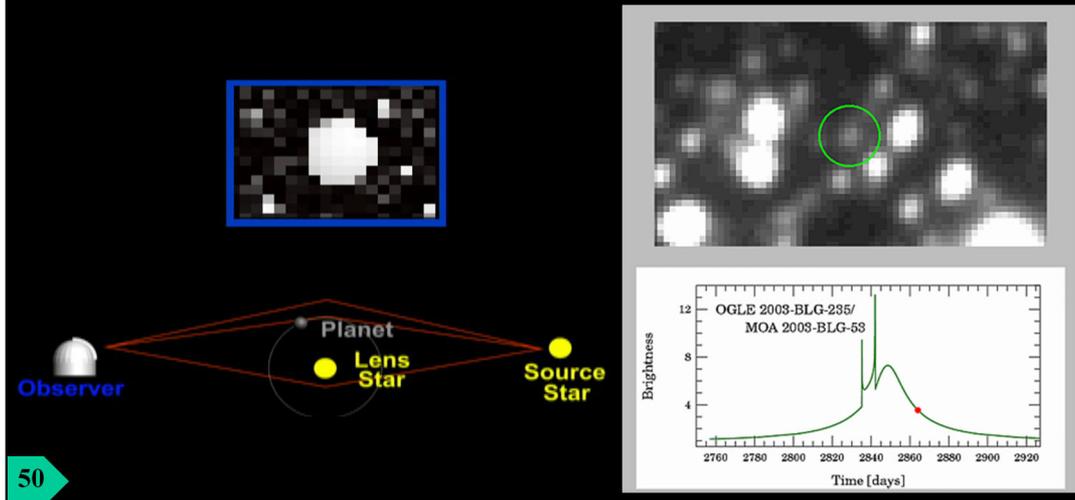
Dave Stevenson,
Deming et al. 2007,
Chiang &
Murray-Clay 2007
Seager et al. 2008
Valencia et al. 2007
Figueira et al. 2009

49

Este é um exemplo de estrutura interna teórica de um exoplaneta do tipo gasoso, com densidade $1,9 \text{ g/cm}^3$.

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.



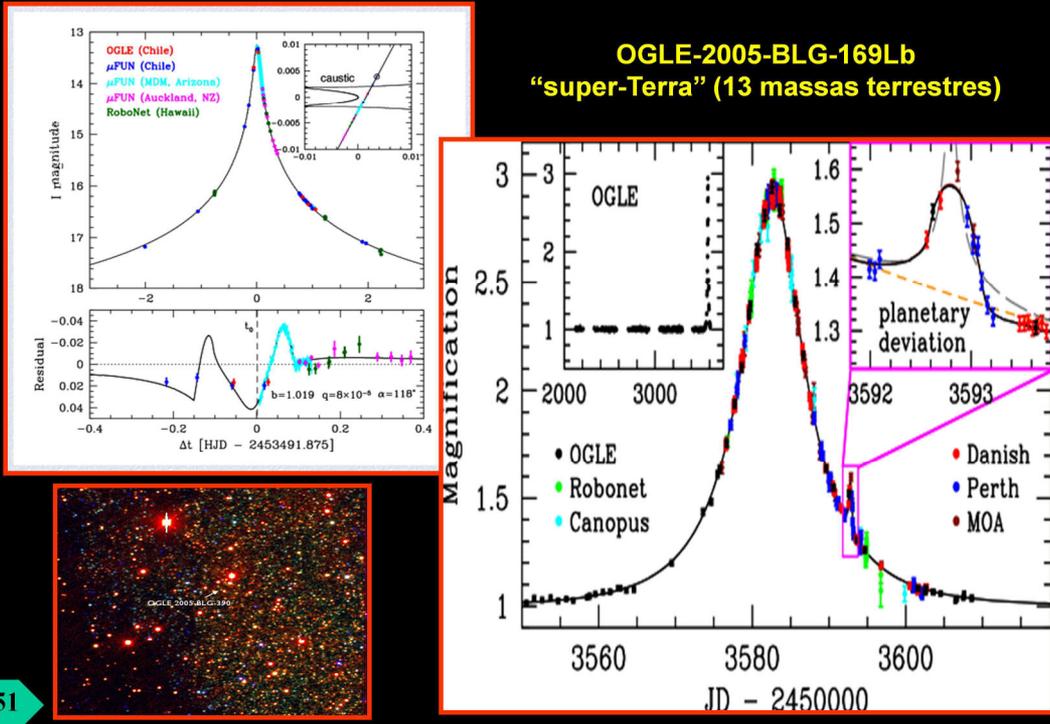
A animação acima demonstra os princípios da microlente gravitacional, previstos pela curvatura do espaço-tempo da teoria da relatividade. O observatório na Terra (*Observer*) vê uma estrela distante (*Source Star*) quando uma estrela com planeta (*Lens Star + Planet*) cruza a linha de visada. A estrela e seu planeta provocam a distorção do espaço-tempo que desvia a luz da estrela distante e provoca um aumento de brilho quase instantâneo. Esse efeito é ilustrado na animação da direita.

É um fenômeno comum, porém raro porque é questão de sorte. Na prática o que se faz é deixar um telescópio (geralmente pequeno) apontado para uma direção escolhida e registrando o brilho das estrelas de campo durante um período de tempo. Posteriormente, as imagens são analisadas e se houver um trânsito ele será identificado em alguma estrela do campo.

REF: http://www.astro.physik.uni-potsdam.de/~jkw/group_jkw.htm

<http://www.jpl.nasa.gov/releases/2004/103a.cfm>

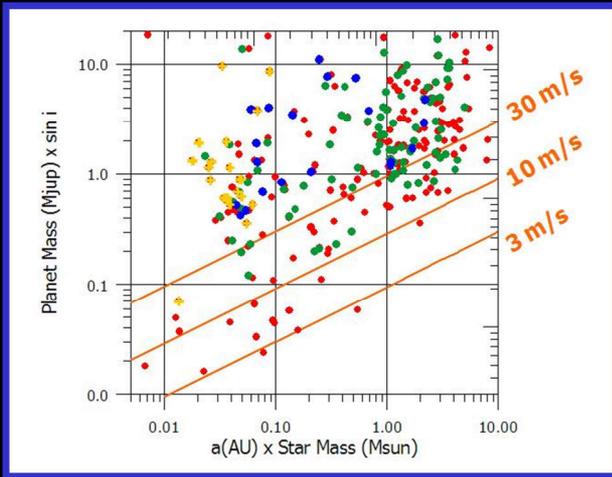
Métodos indiretos de detecção: Microlente gravitacional



51

Caso do planeta b da estrela OGLE-2005-BLG-169L, localizada a cerca de 13.372 anos-luz da Terra, na constelação Sagitário. A assinatura do planeta pode ser vista no trecho ampliado da curva de luz da estrela (canto superior direito da figura da direita).

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.

Alguns exemplos

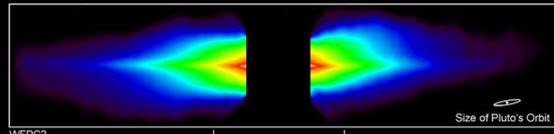
β Pictoris

Enos Picazzio
IAGUSP
Agosto 2006

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

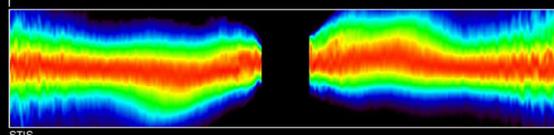
A estrela central é ocultada por um disco artificial no instrumento.
(Smith & Terrile, 1987)

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



WFPC2

Size of Pluto's Orbit

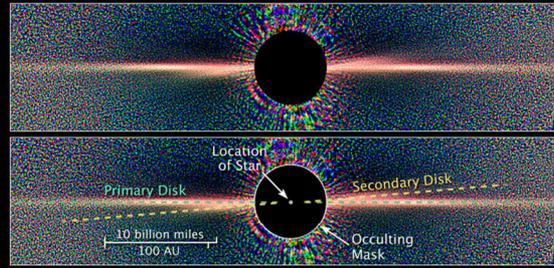


STIS

Solar System to Scale

Beta Pictoris

Hubble Space Telescope • ACS/HRC

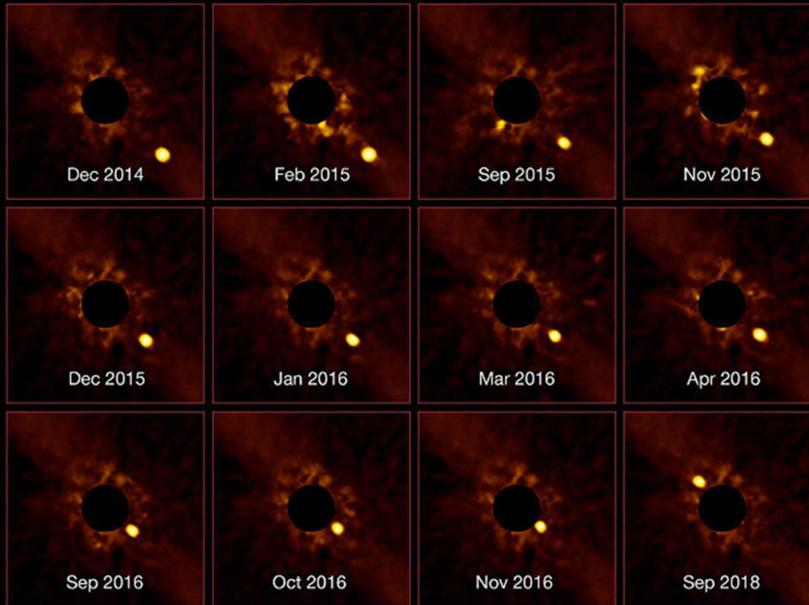


NASA, ESA, and D. Golimowski (Johns Hopkins University)

STScI-PRC06-25

Alguns exemplos

β Pictoris



Novo planeta:

Beta Pictoris C

Massa:

9 M_J (1200 M_T)

Período:

1.200 dias

Dist. heliocêntrica:

2,7 u.a.

54

Anne-Marie Lagrange, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS),
Instituto de Planetologia e de Astrofísica de Grenoble,

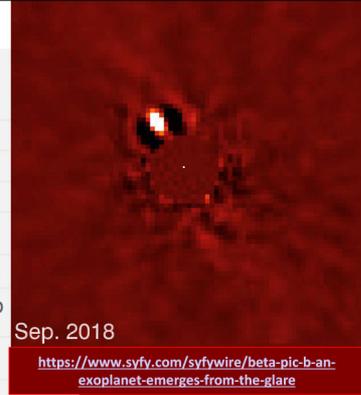
Planet beta Pic b

Name	beta Pic b
Planet Status	Confirmed
Discovered in	2008
Mass	12.9 (\pm 0.5) M_J
Mass $\sin(i)$	—
Semi-Major Axis	11.8 (\pm 0.9) AU
Orbital Period	10921.0 (-1170.0 ^{+1060.0}) day
Eccentricity	0.24 (\pm 0.06)
ω	189.3 (\pm 3.0) deg
T_{peri}	2456380.0 (-60.0 ^{+80.0}) JD
Radius	1.65 (-0.06 ^{+0.06}) R_J
Inclination	88.87 (\pm 0.08) deg
Update	2019-04-12
Detection Method	Imaging
Mass Detection Method	Spectrum
Radius Detection Method	Flux
Primary transit	—
Secondary transit	—
Parameter b	—

55

Star

beta Pic	
Name	beta Pic
Distance	19.3 (\pm 0.2) pc
Spectral type	A6V
Apparent magnitude V	3.86
Mass	1.73 (\pm 0.05) M_{Sun}
Age	0.04 (-0.004 ^{+0.004}) Gyr
Effective temperature	—
Radius	—
Metallicity [Fe/H]	—
Detected Disc	Imaging
Magnetic Field	—
RA ₂₀₀₀	05:47:17.0
Dec ₂₀₀₀	-51:03:59
Alternate Names	—
Planetary system	2 planets
More data	<ul style="list-style-type: none"> • Simbad • Most recent references (ADS)



Alguns exemplos

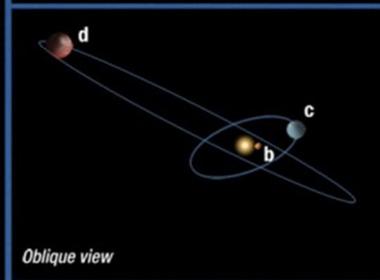
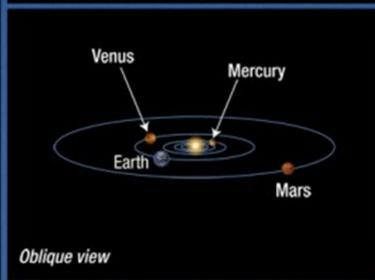
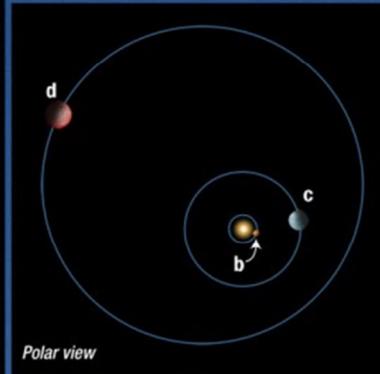
- semelhante ao Sol, porém um pouco mais jovem, mais massiva e mais brilhante
- 44 a.l. de distância
- conhecida há pouco mais de uma década
- tem 3 planetas do tipo de Júpiter
- 2 planetas têm órbitas inclinadas em $\sim 30^\circ$
- é possível que haja um 4o. Planeta com órbita altamente excêntrica
- 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



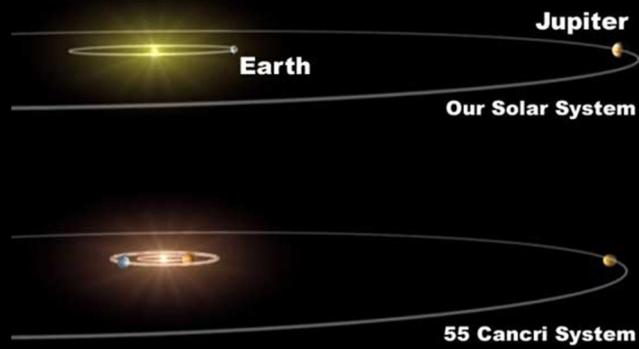
Upsilon Andromedae System



56

NASA, ESA, and A. Feild (STScI)

STScI-PRC10-17b



Alguns exemplos

Upsilon Andromedae

