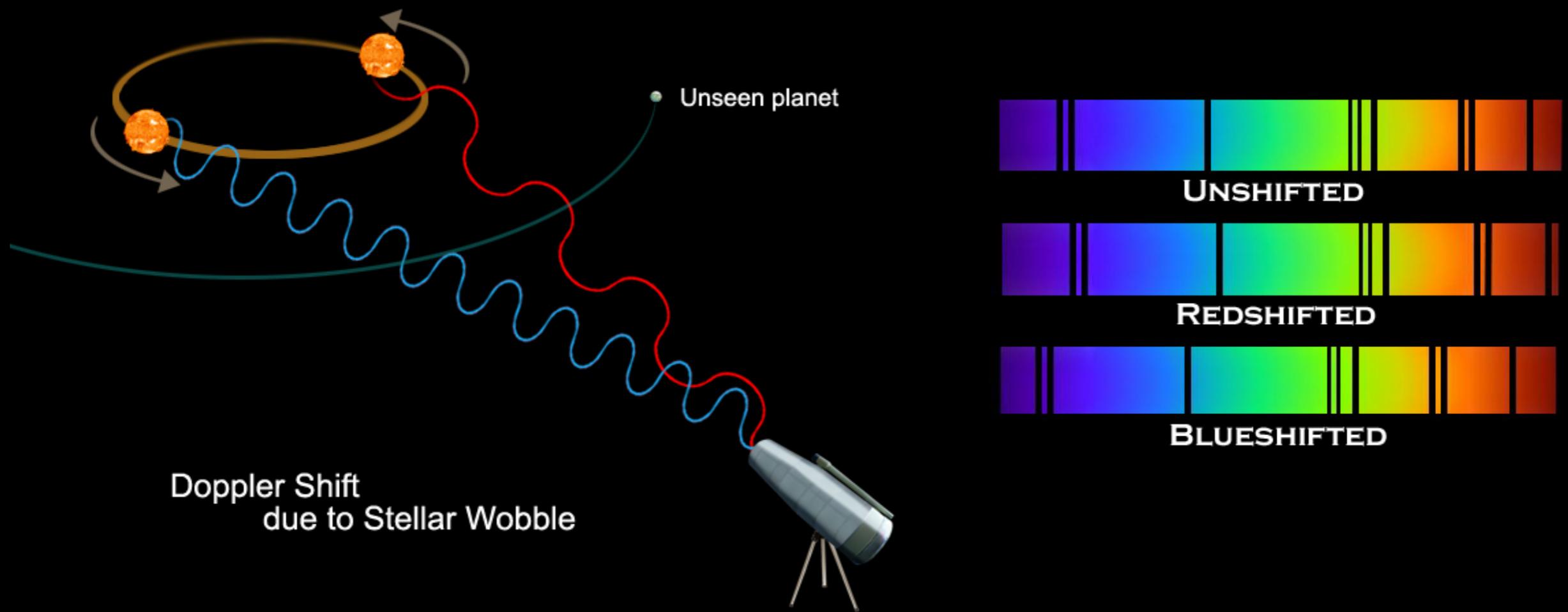


Effetto Doppler: misura della velocità di una stella lungo la linea di visuale (velocità radiale)



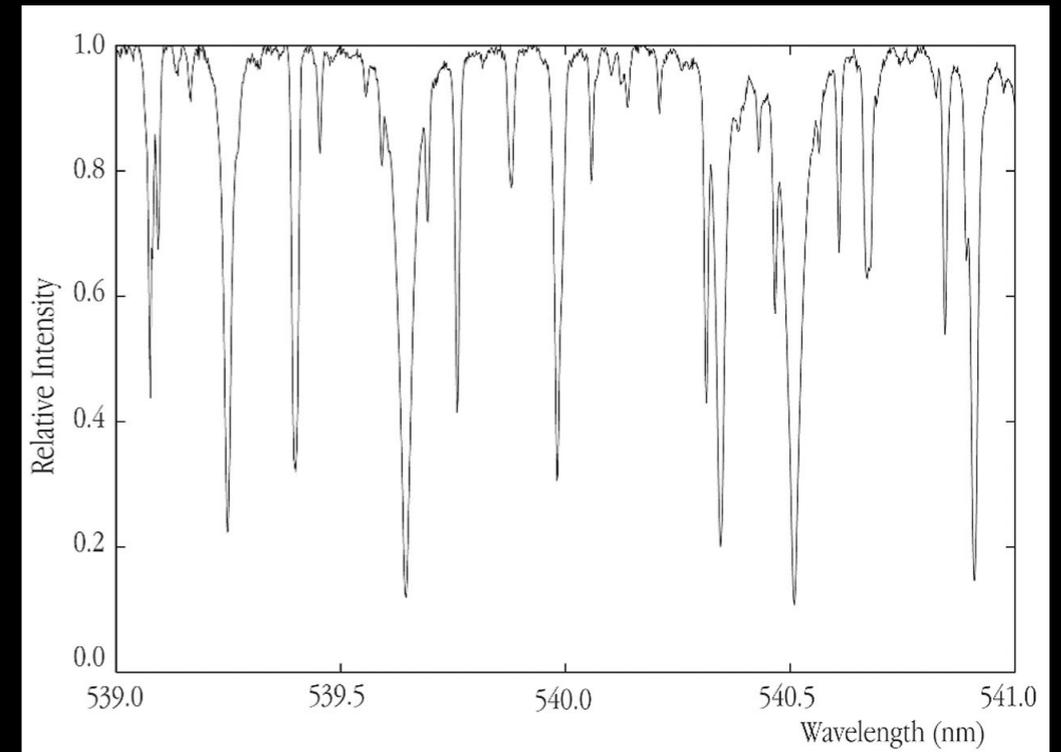
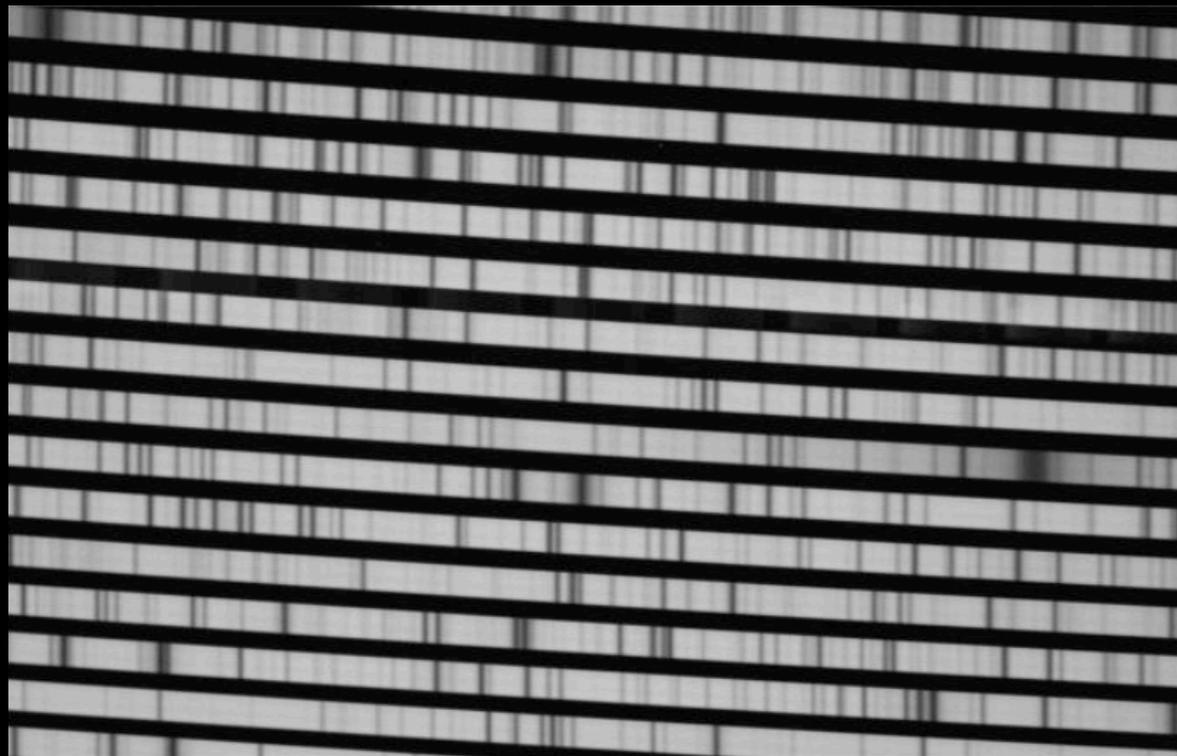
Effetto Doppler: $\Delta \lambda / \lambda = \Delta v / c$

λ : lunghezza d'onda della luce;

v : velocità della sorgente lungo la linea di visuale;

c : velocità della luce.

Effetto Doppler: misura della velocità di una stella lungo la linea di visuale (velocità radiale)

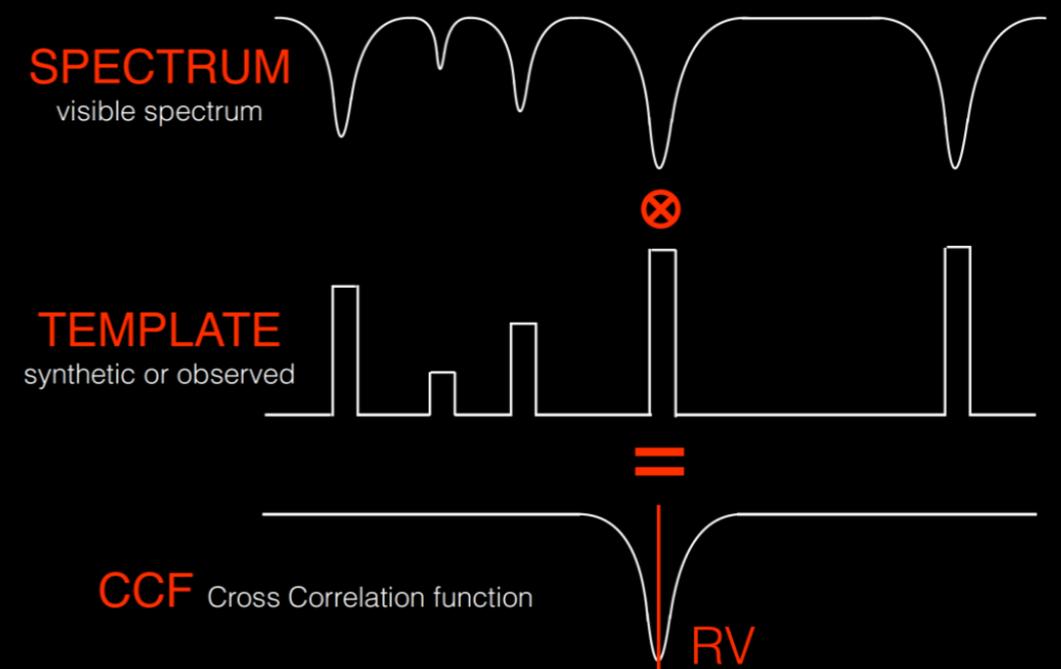


Effetto Doppler: $\Delta \lambda / \lambda = \Delta v / c$

λ : lunghezza d'onda della luce;

v : velocità della sorgente lungo la linea di visuale;

c : velocità della luce.



Il metodo Doppler

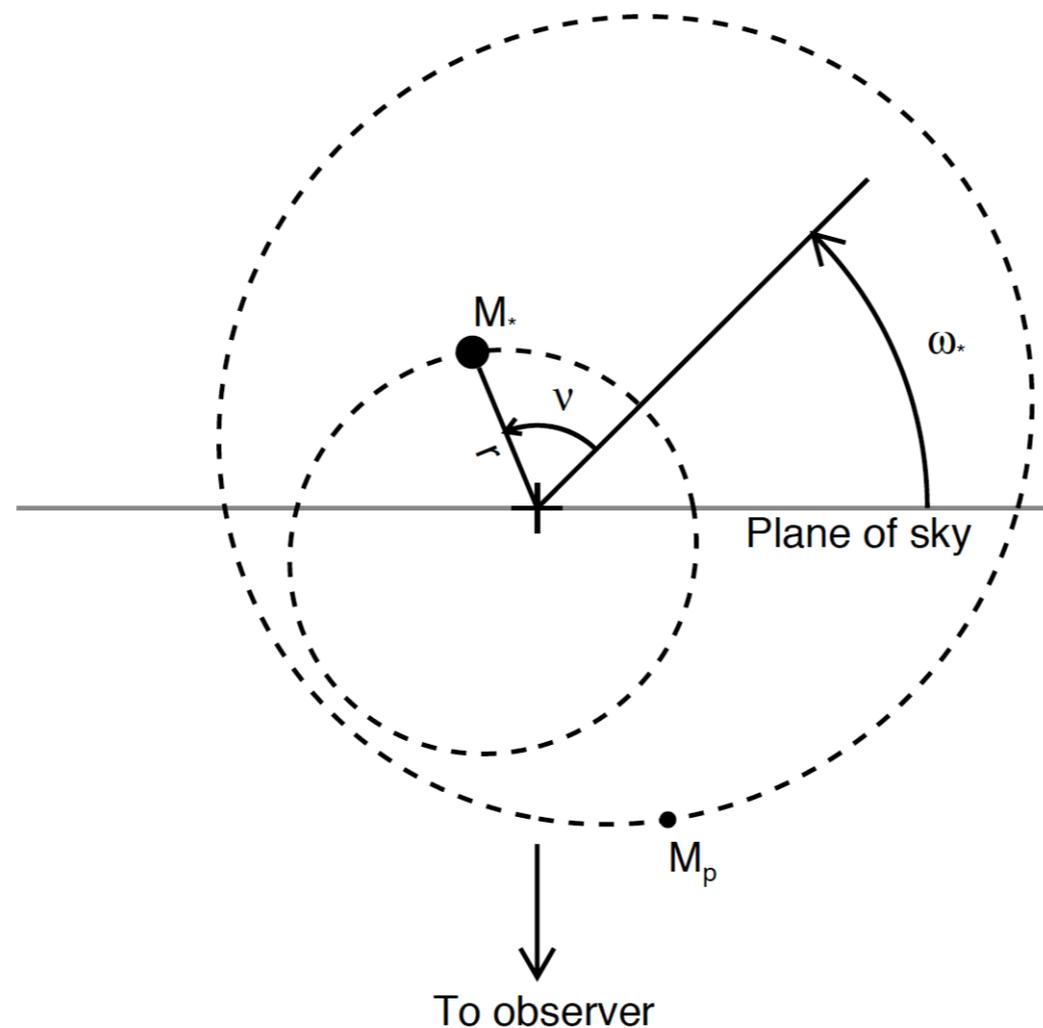
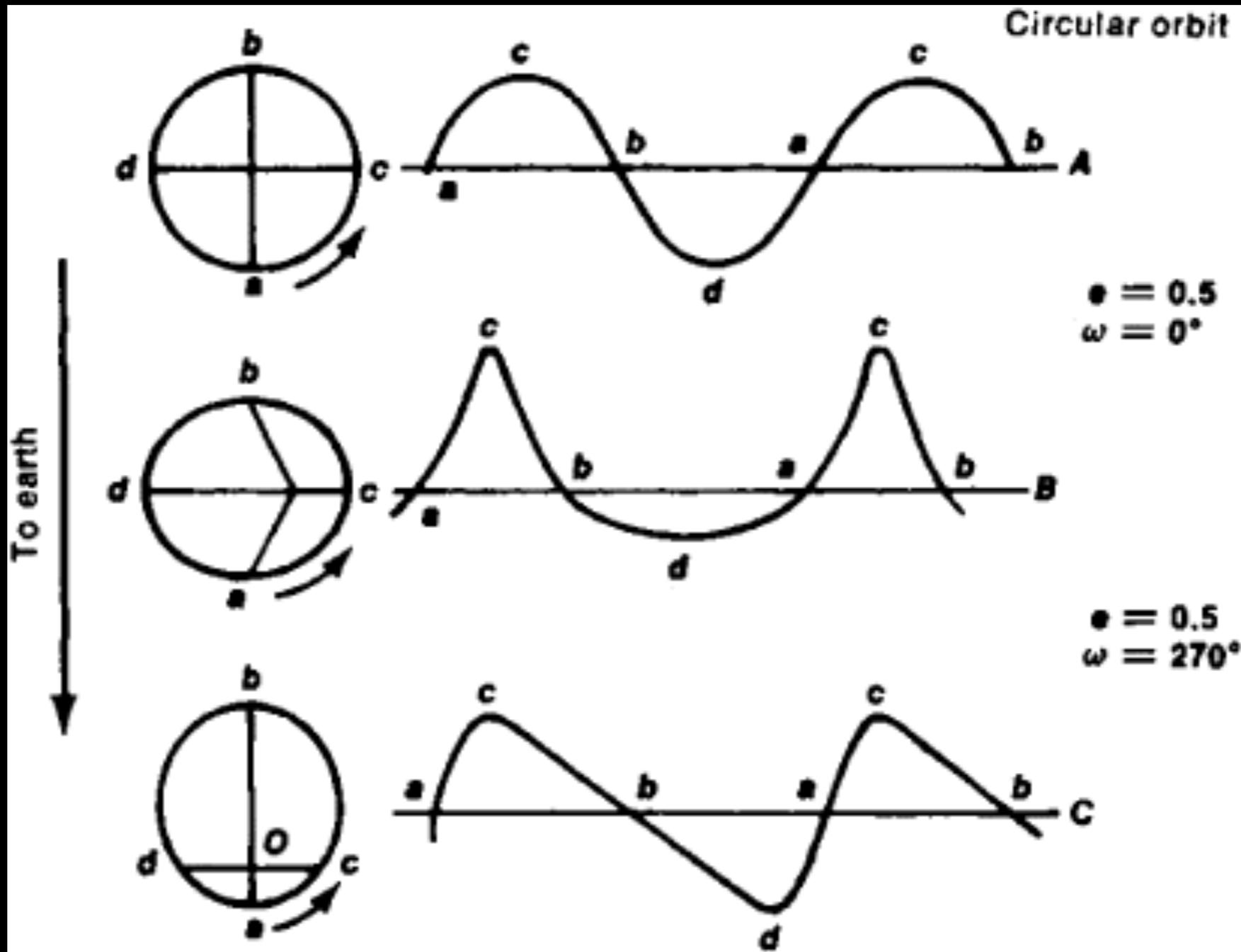
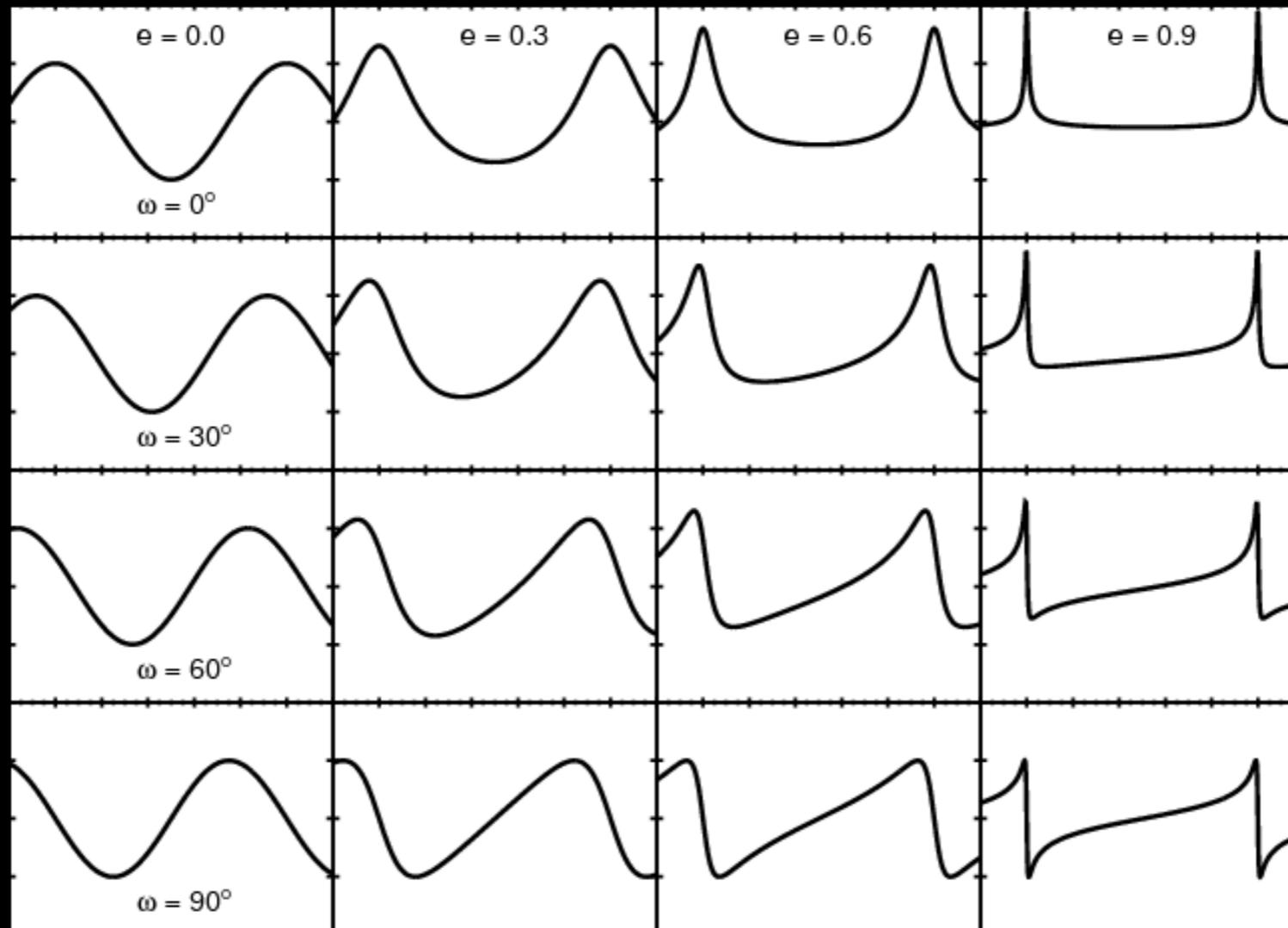
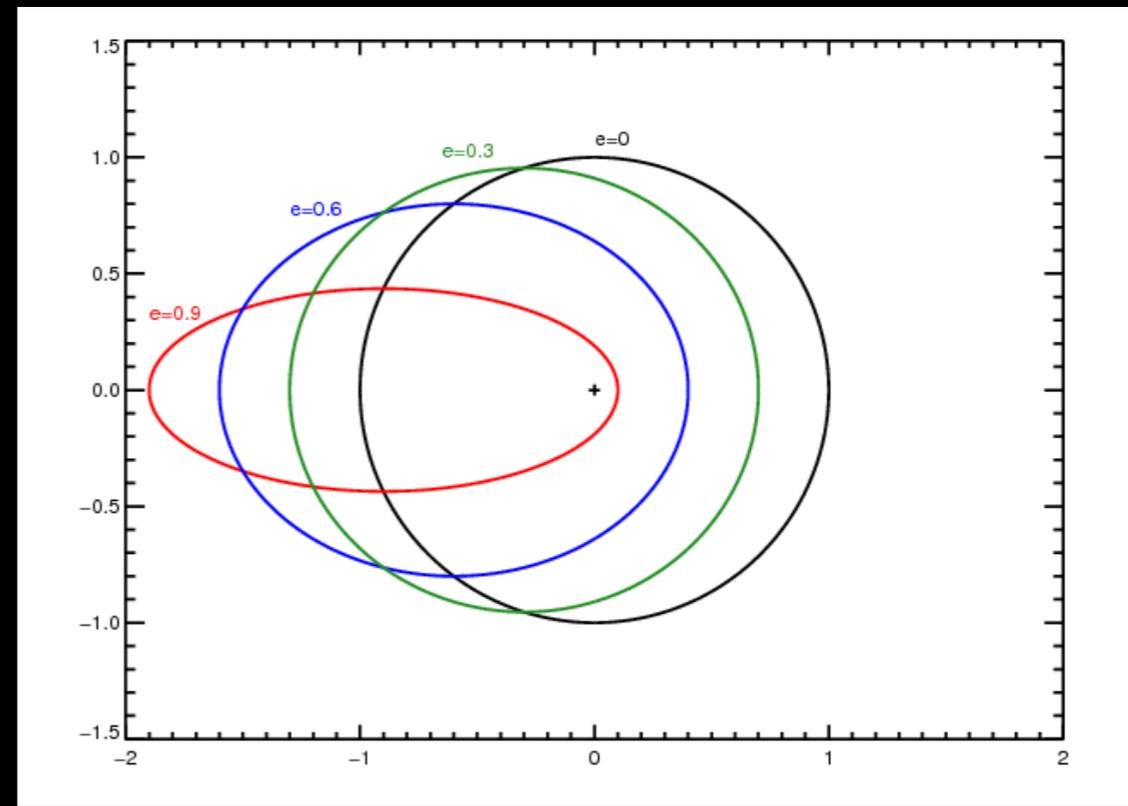


Figure 1: Elements describing orbital motion in a binary with respect to the center of mass (cross). The argument of periastron ω is measured from the ascending (receding) node, and the true anomaly ν is measured with respect to the periastron. Both angles increase along the direction of the star's motion in the plane of the orbit. The longitude of the periastron of the star ω_* is indicated. At a given time in the orbit, the true anomalies of the planet and star are equal, whereas the longitude of periastron of the planet is related to that of the star by $\omega_p = \omega_* + \pi$. In Doppler planet detection, the orbital elements of the star are conventionally reported, from which the orbital elements of the planet can be inferred.

Orbite circolari ed eccentriche



Orbite circolari ed eccentriche



Simulatore online di orbite planetarie

Scrivere su google: "Radial velocity simulator"

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

Con la meccanica classica si può dimostrare che la velocità radiale in funzione del tempo è pari a

$$V_{rad} = V_0 + K \cdot [\cos(\nu(t) + \omega) + e \cos \omega],$$

$$K = \frac{m \sin i}{(M_* + m)^{2/3}} \cdot \frac{(2\pi G)^{1/3}}{P^{1/3} \sqrt{1 - e^2}}$$

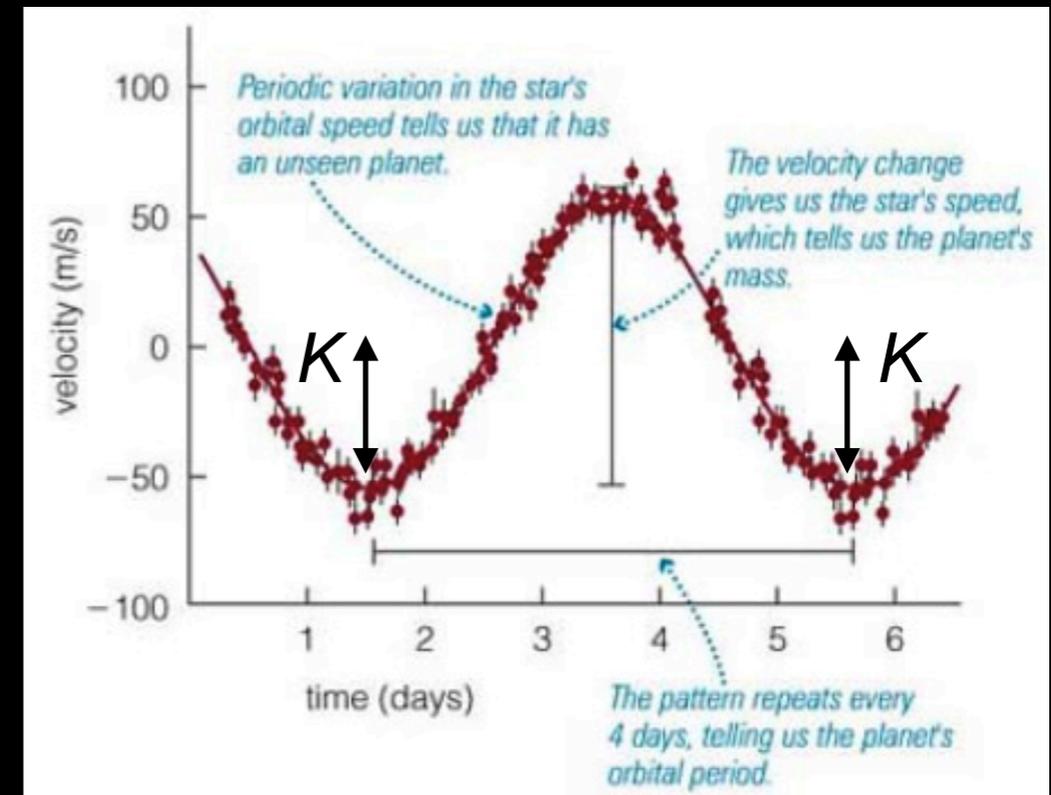
$$K \propto \frac{M_p \sin i}{M_*^{2/3} \cdot P^{1/3}}$$

M_p : massa del pianeta

i_p : inclinazione orbitale

M_s : massa della stella

P : periodo orbitale



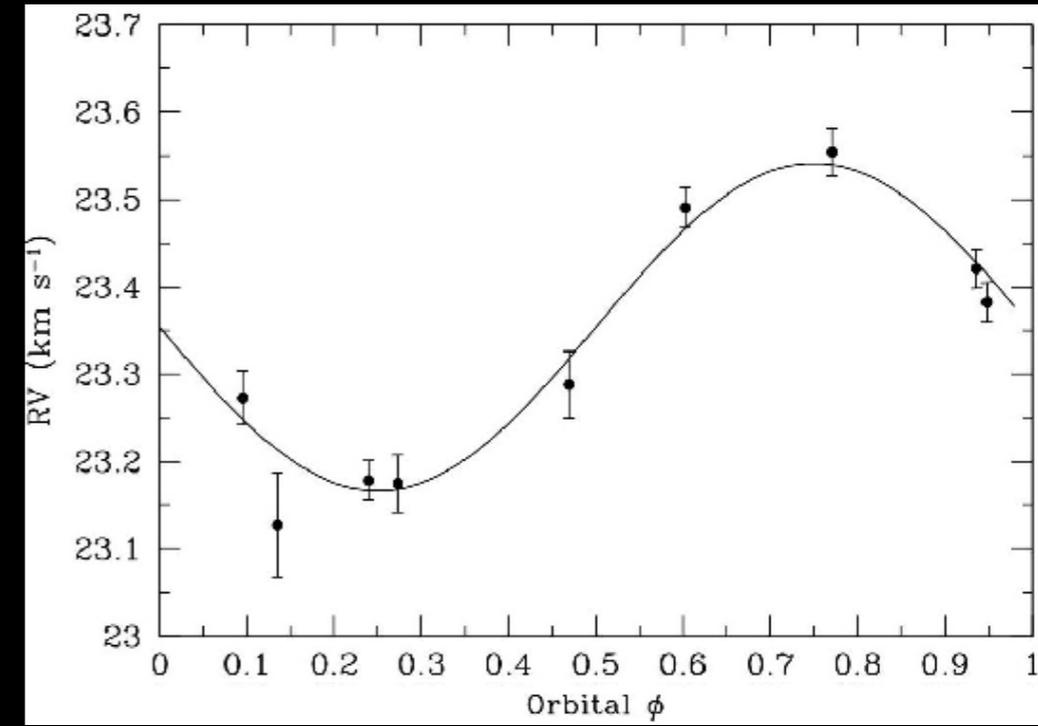
- $\propto M_p \sin i$: quanto più massivo è il pianeta, tanto maggiore è la perturbazione gravitazionale che esercita sulla stella (e dunque il segnale Doppler indotto)
- $\propto 1 / (M_*^{2/3})$: quanto più grande è la massa della stella, tanto maggiore è la sua inerzia e dunque la sua resistenza alla perturbazione gravitazionale del pianeta
- $\propto 1 / (P^{1/3})$: quanto più lungo è il periodo orbitale, tanto maggiore è la sua distanza dalla stella (per la terza legge di Keplero) e pertanto minore la forza di gravità ($1/r^2$)

Il metodo Doppler

$$K \propto \frac{M_p \sin i}{M_\star^{2/3} \cdot P^{1/3}}$$

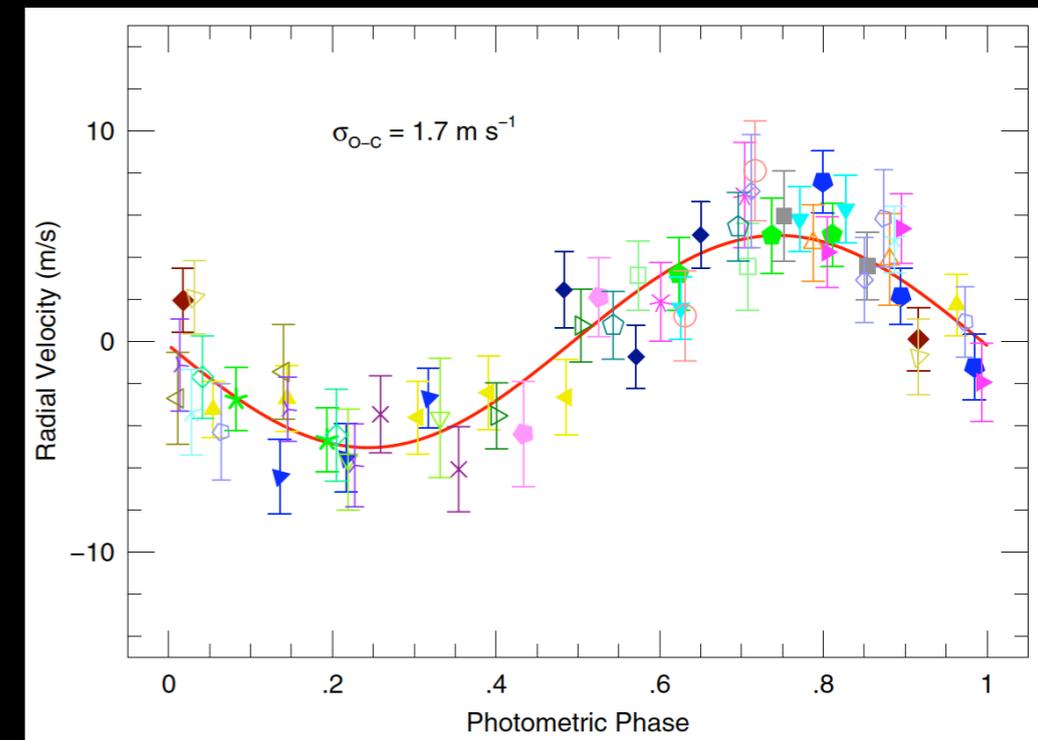
CoRoT-1b

$P = 1.5$ d
 $K = 188 \pm 11$ m/s
 $M_p = 327 \pm 38 M_\oplus$



CoRoT-7b

$P = 0.85$ d
 $K = 5.3 \pm 0.8$ m/s
 $M_p = 7.4 \pm 1.2 M_\oplus$



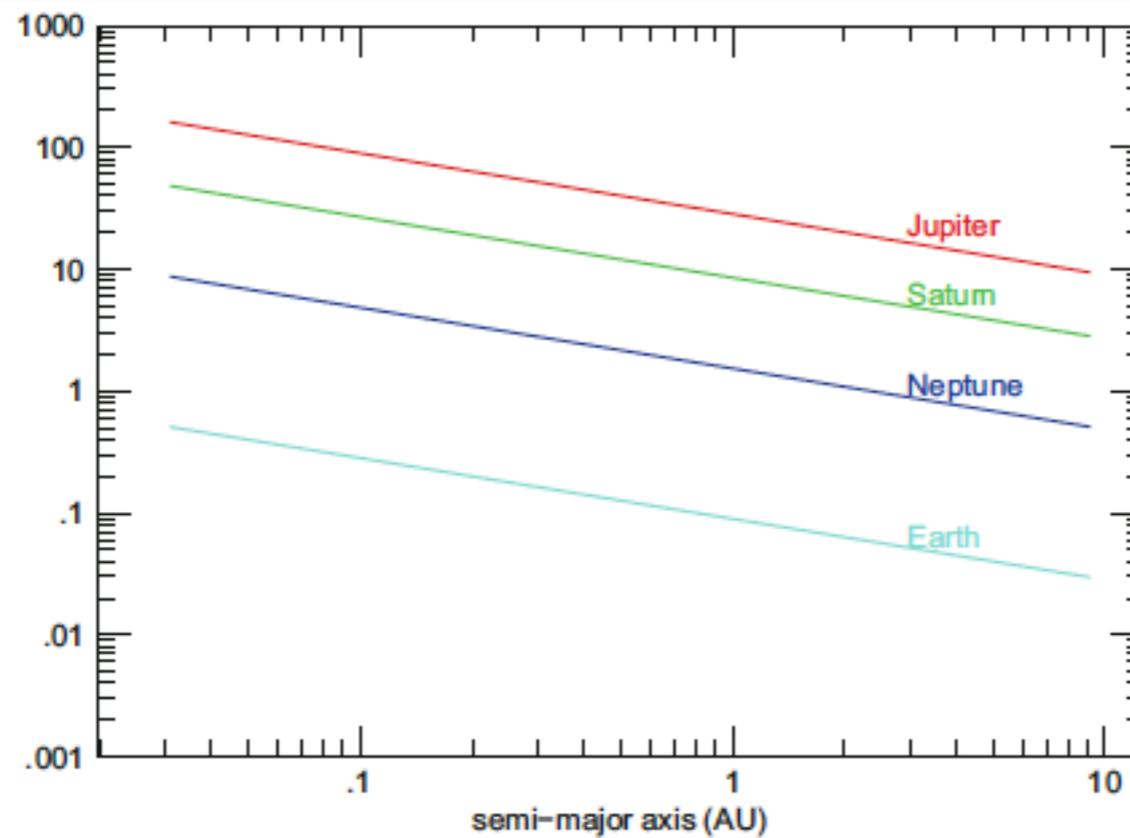


Fig. 1.1 The amplitude of the barycentric radial velocity variations for a one solar mass star orbited by Earth, Neptune, Saturn, or Jupiter at various orbital distances

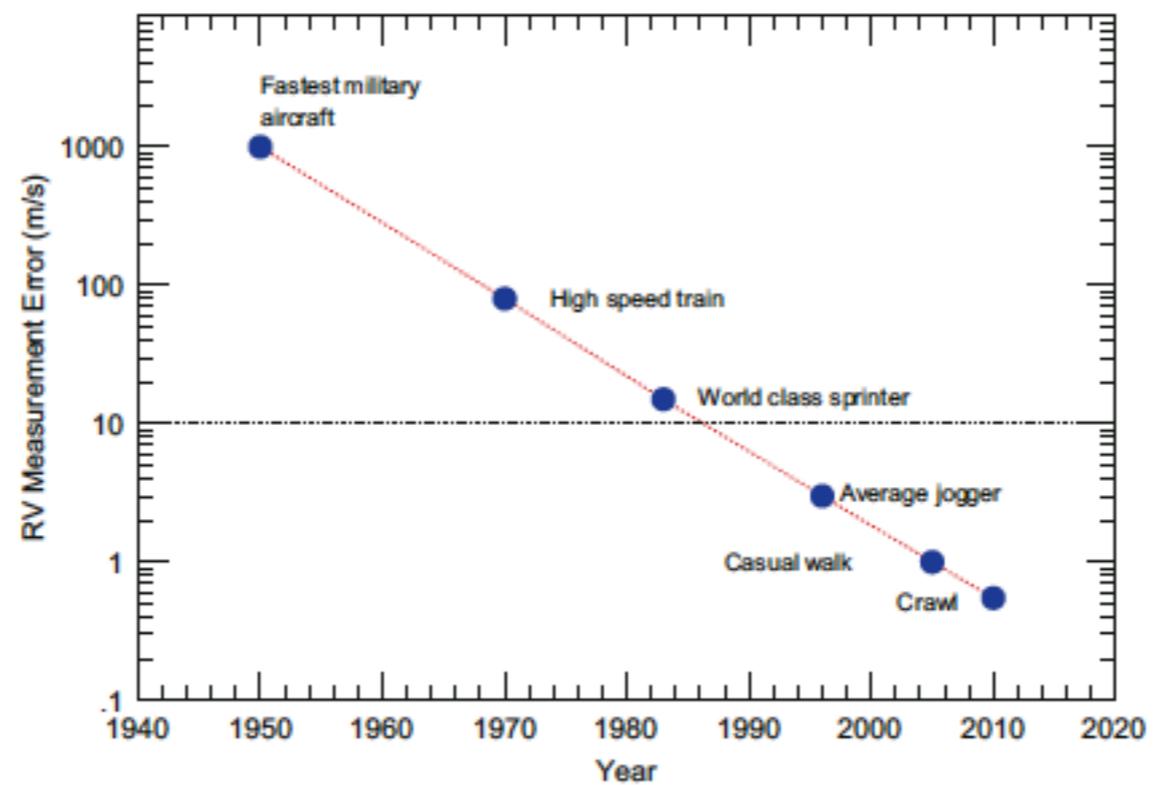
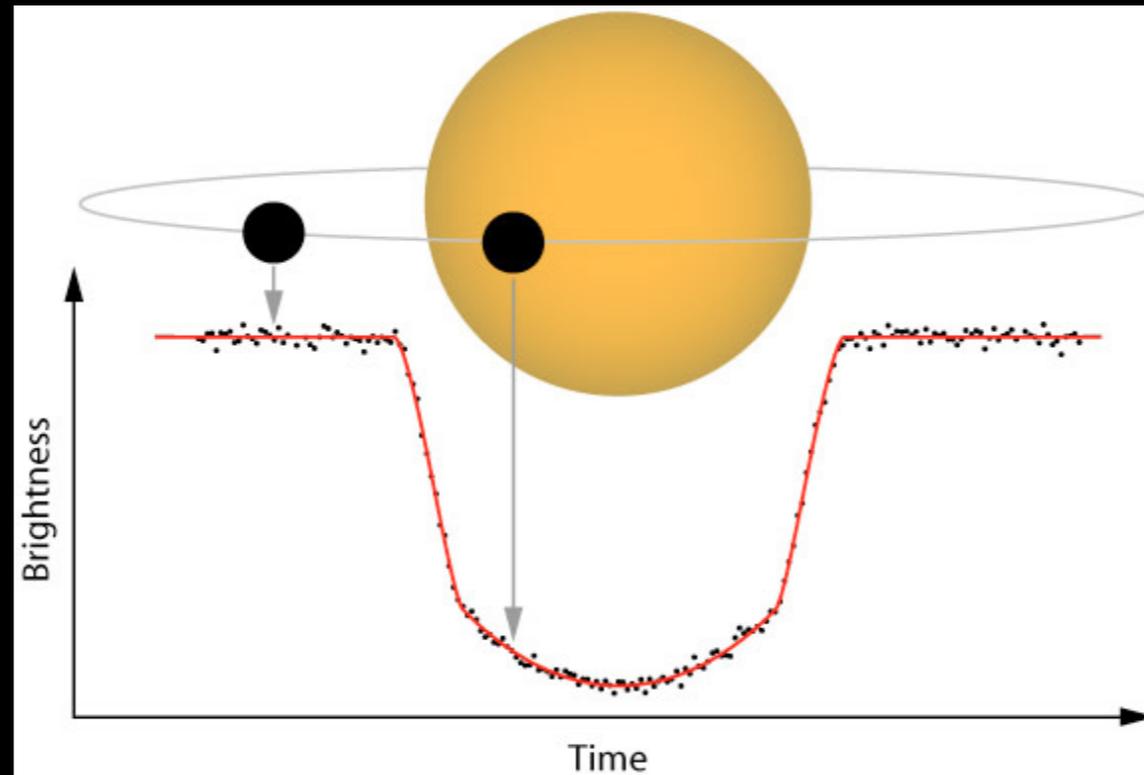


Fig. 1.2 The evolution of the radial velocity measurement error as a function of time. The horizontal line marks the reflex motion of a solar mass star with a Jupiter analog

Il metodo dei transiti



Parametri osservabili:

- profondità

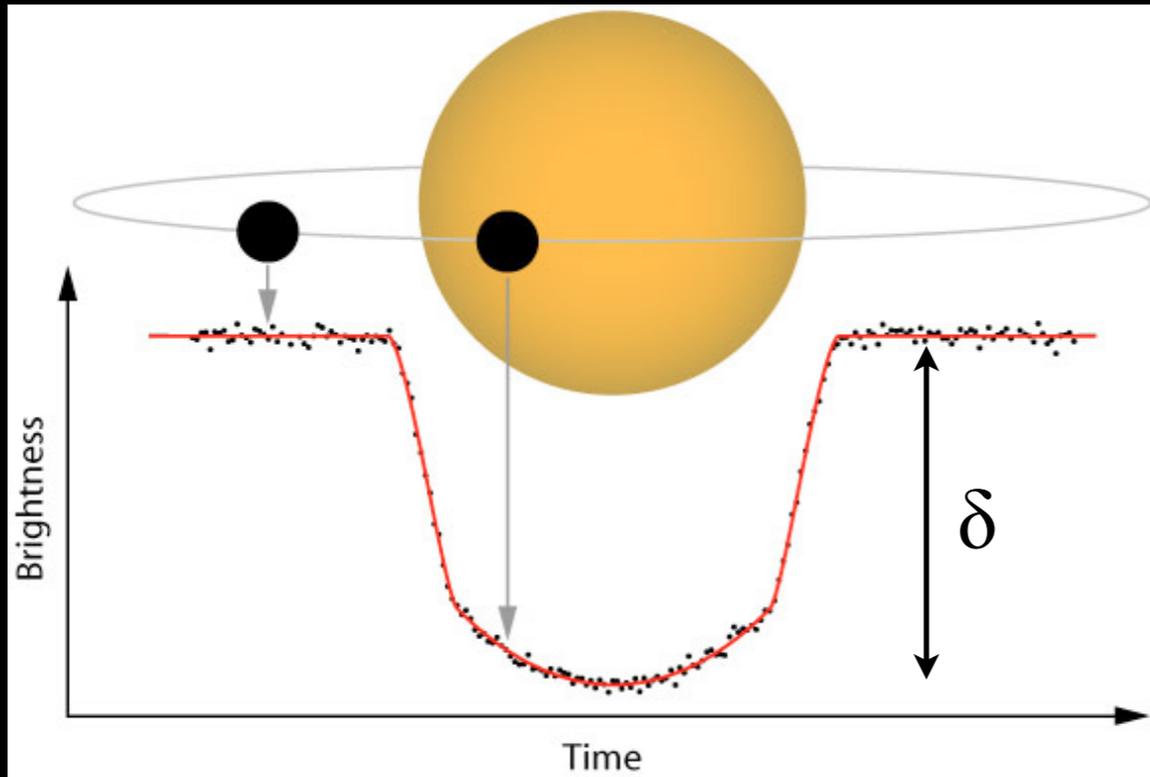
$$\delta = \left(\frac{R_p}{R_s} \right)^2$$

- durata

$$d_{tr} = f(R_s, i, a)$$

- coefficienti di limb darkening (oscuramento al bordo)

Il metodo dei transiti



È possibile dimostrare facilmente che la profondità del transito

$$\delta = (R_p / R_s)^2$$

F_s : flusso stellare, ovvero energia per unità di tempo e di superficie emessa dalla stella in un dato intervallo di lunghezza d'onda;

πR_s^2 : area del disco della stella;

πR_p^2 : area del disco del pianeta.

$$\frac{F_s \cdot (\pi R_s^2 - \pi R_p^2)}{F_s \cdot \pi R_s^2} = 1 - \frac{R_p^2}{R_s^2} = 1 - \delta \implies \delta = \left(\frac{R_p}{R_s} \right)^2$$

se $R_s = R_\odot$

$$\delta \approx 0.01$$

per $R_p = R_{J} = 11.2 R_\oplus$

$$\delta \approx 0.0012$$

per $R_p = R_\Psi = 3.9 R_\oplus$

$$\delta \approx 0.0001$$

per $R_p = 1 R_\oplus$

Parametri planetari dai vari metodi di rivelazione

	Periodo orbitale P	Eccentricità orbitale e	Inclinazione orbitale i	Massa planetaria minima $M_p \sin i$	Massa planetaria M_p	Raggio planetario R_p
IMAGING	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TRANSITI	✓	✓	✓	✗	✗	✓
DOPPLER	✓	✓	✗	✓	✗	✗

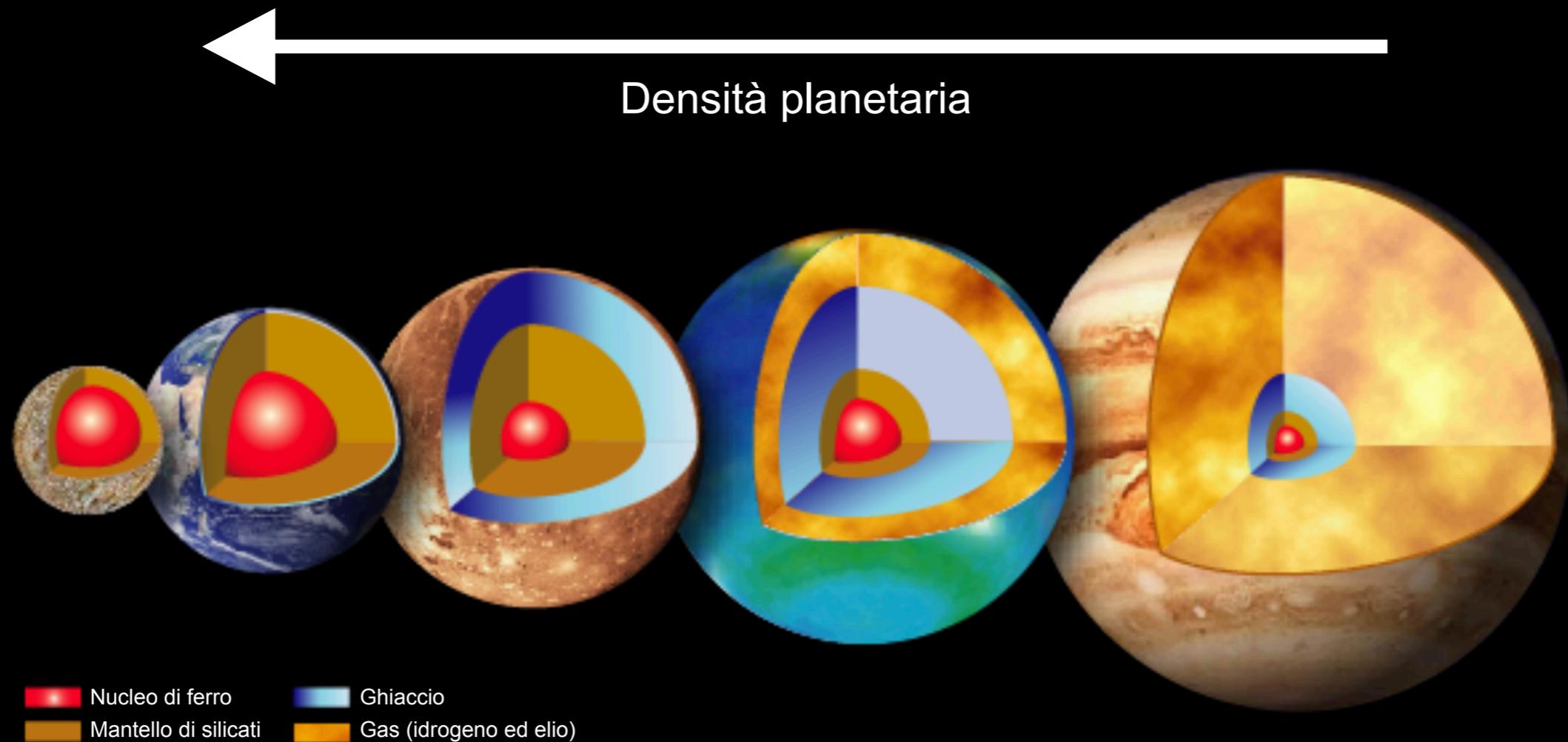
Combinando i metodi Doppler e dei transiti è possibile determinare tutti i parametri fisici di un dato pianeta, ovvero R_p , M_p e densità:

$$\rho_p = \frac{M_p}{V_p} = \frac{M_p}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_p^3}$$

La misura di densità ci dà informazioni sulla natura del pianeta e sulla sua composizione e struttura interna. Ad es., Giove ($\rho=1.3 \text{ g/cm}^3$) è un gigante gassoso, la Terra ($\rho=5.5 \text{ g/cm}^3$) è un pianeta roccioso.

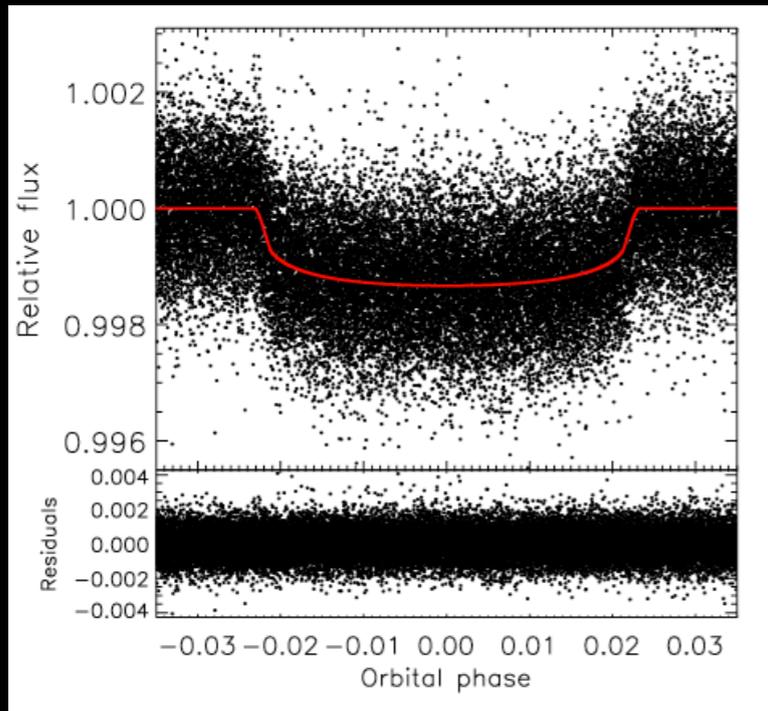
La composizione degli esopianeti

$$\rho_p = \frac{M_p}{V_p} = \frac{M_p}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_p^3}$$



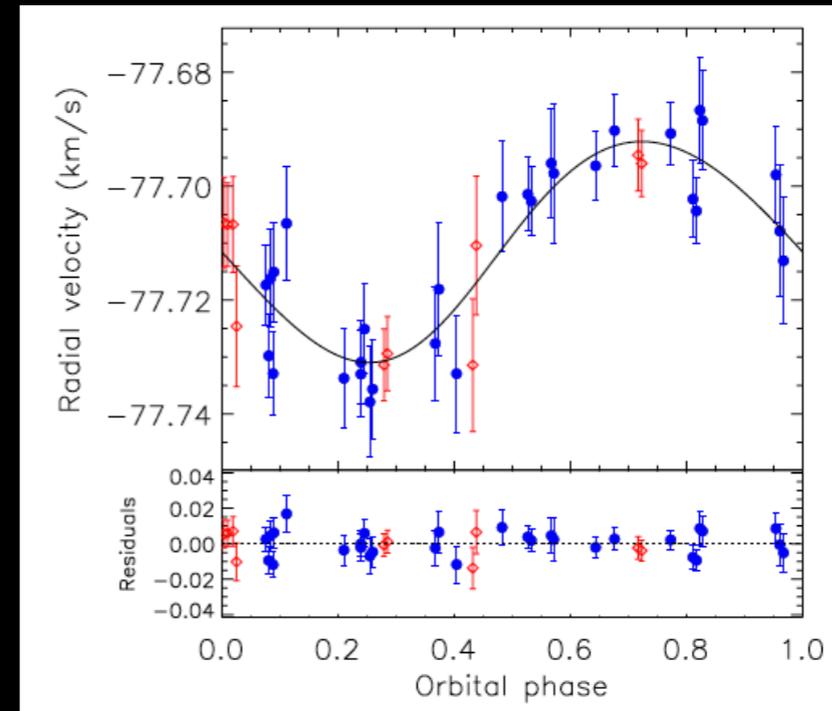
La composizione di un esopianeta a partire dalla sua misura di densità ci consente in alcuni casi di risalire alla sua storia di formazione ed evoluzione, ovvero dei processi che hanno eventualmente modificato le sue proprietà dopo la formazione.

Caratterizzazione del pianeta Kepler-101b con *Kepler* e HARPS-N

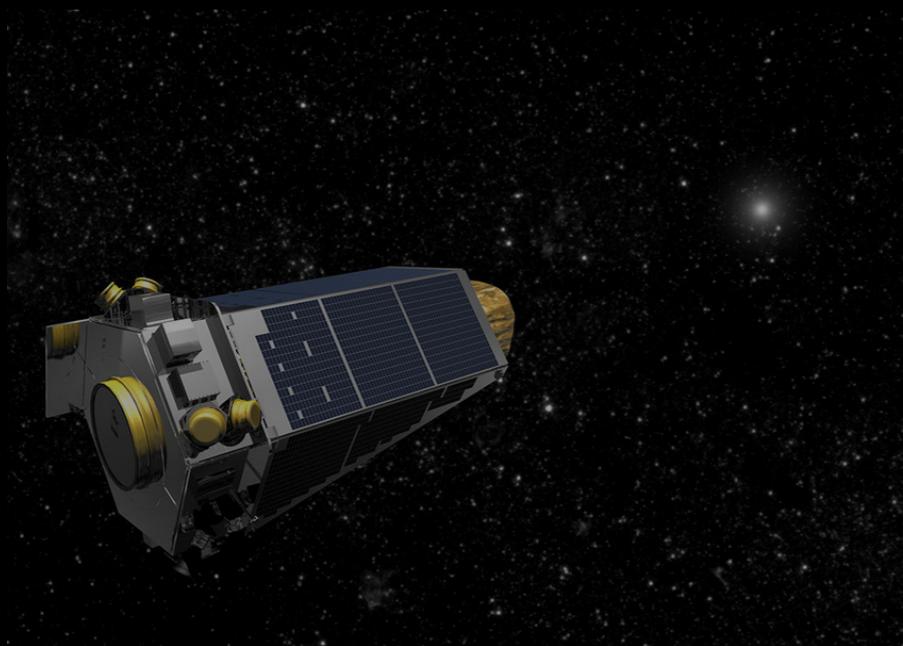


Kepler-101b

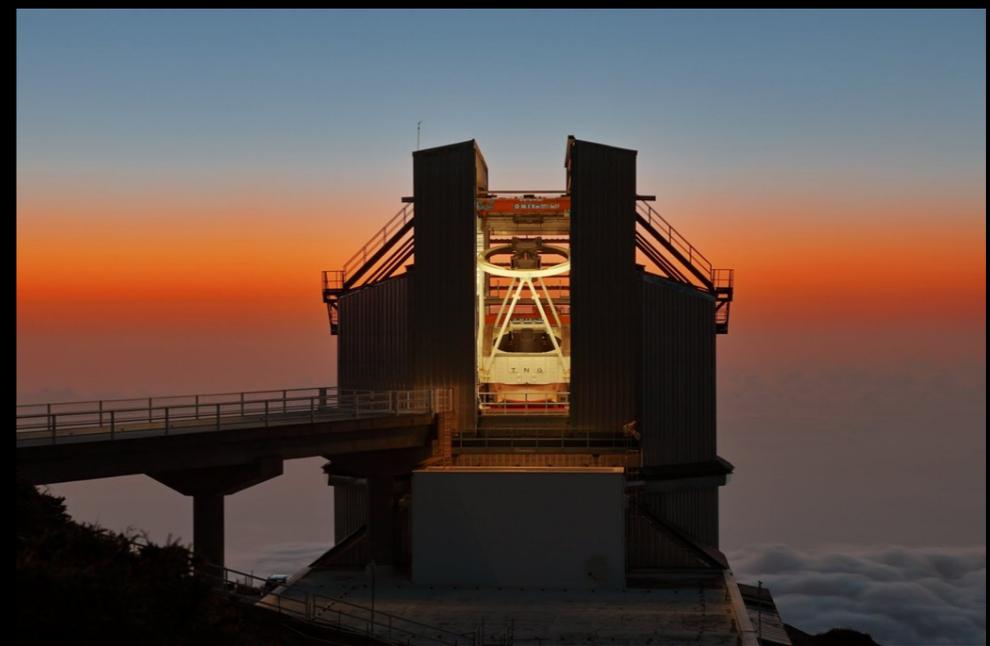
$P=3.49$ d;
 $R_p=5.8 R_{\oplus}$;
 $M_p=51 M_{\oplus}$;
 $\rho_p=1.46$ g/cm³



Bonomo et al. 2014, *Astron. Astrophys.*, 572, A2

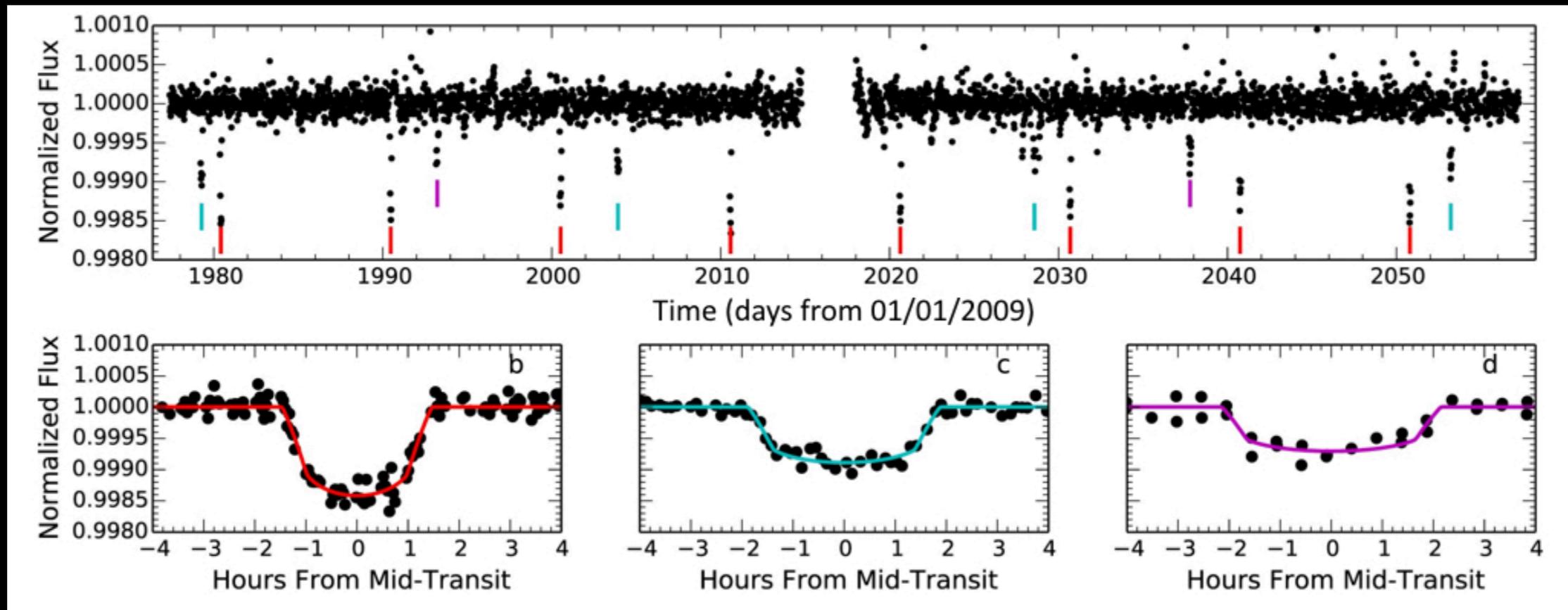


Il telescopio spaziale Kepler (NASA)



Il Telescopio Nazionale Galileo (TNG)

Caratterizzazione del sistema K2-3 con *Kepler* e HARPS/HARPS-N



K2-3b

$P = 10.0 \text{ d}$

$R_p = 2.3 R_{\oplus}$

K2-3c

$P = 24.6 \text{ d}$

$R_p = 1.8 R_{\oplus}$

K2-3d

$P = 44.6 \text{ d}$

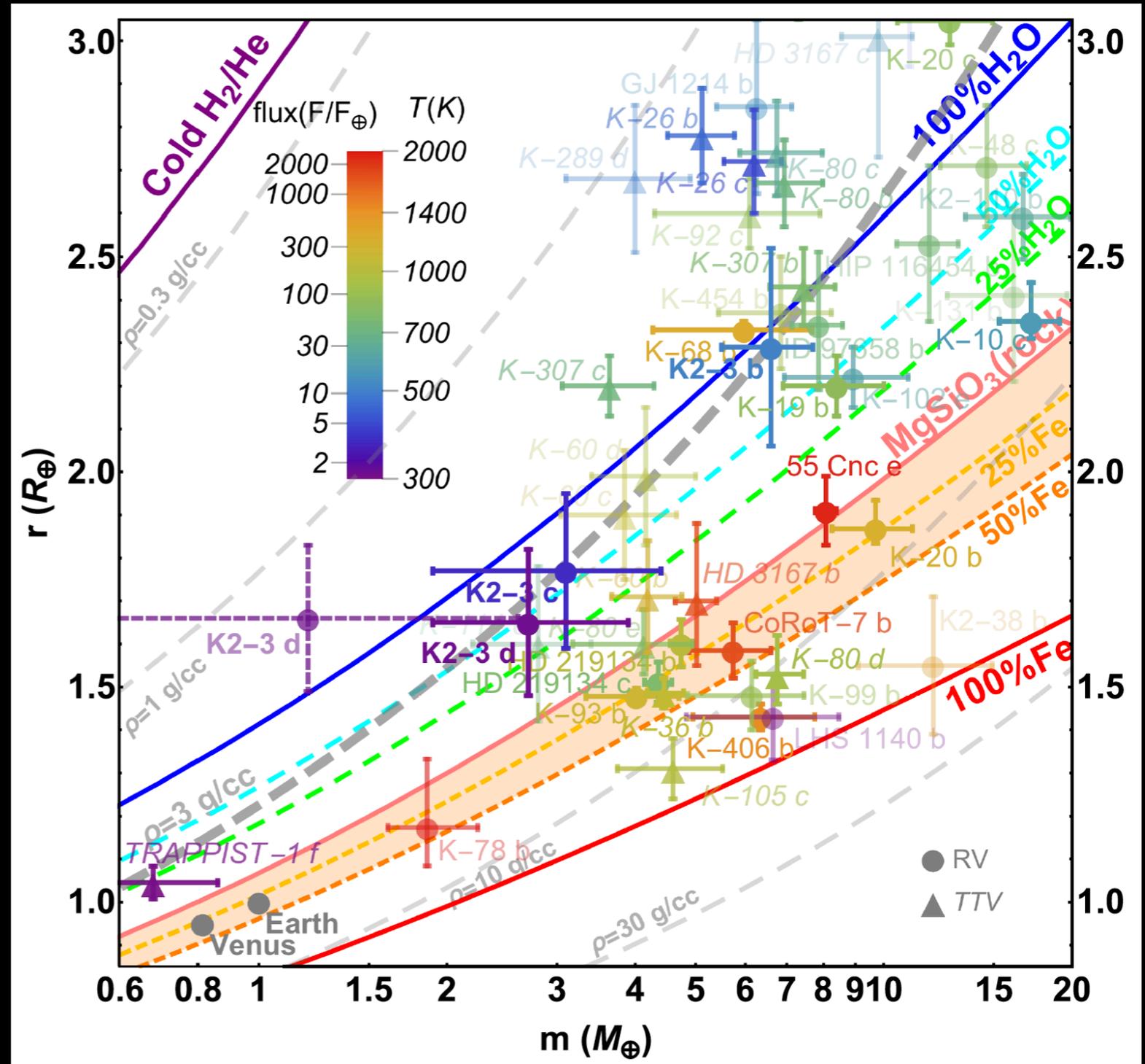
$R_p = 1.6 R_{\oplus}$

appena all'interno della
fascia di abitabilità

parametri stellari: $R_s = 0.6 R_{\odot}$; $T_{\text{eff}} = 3800 \text{ K}$

Il sistema K2-3

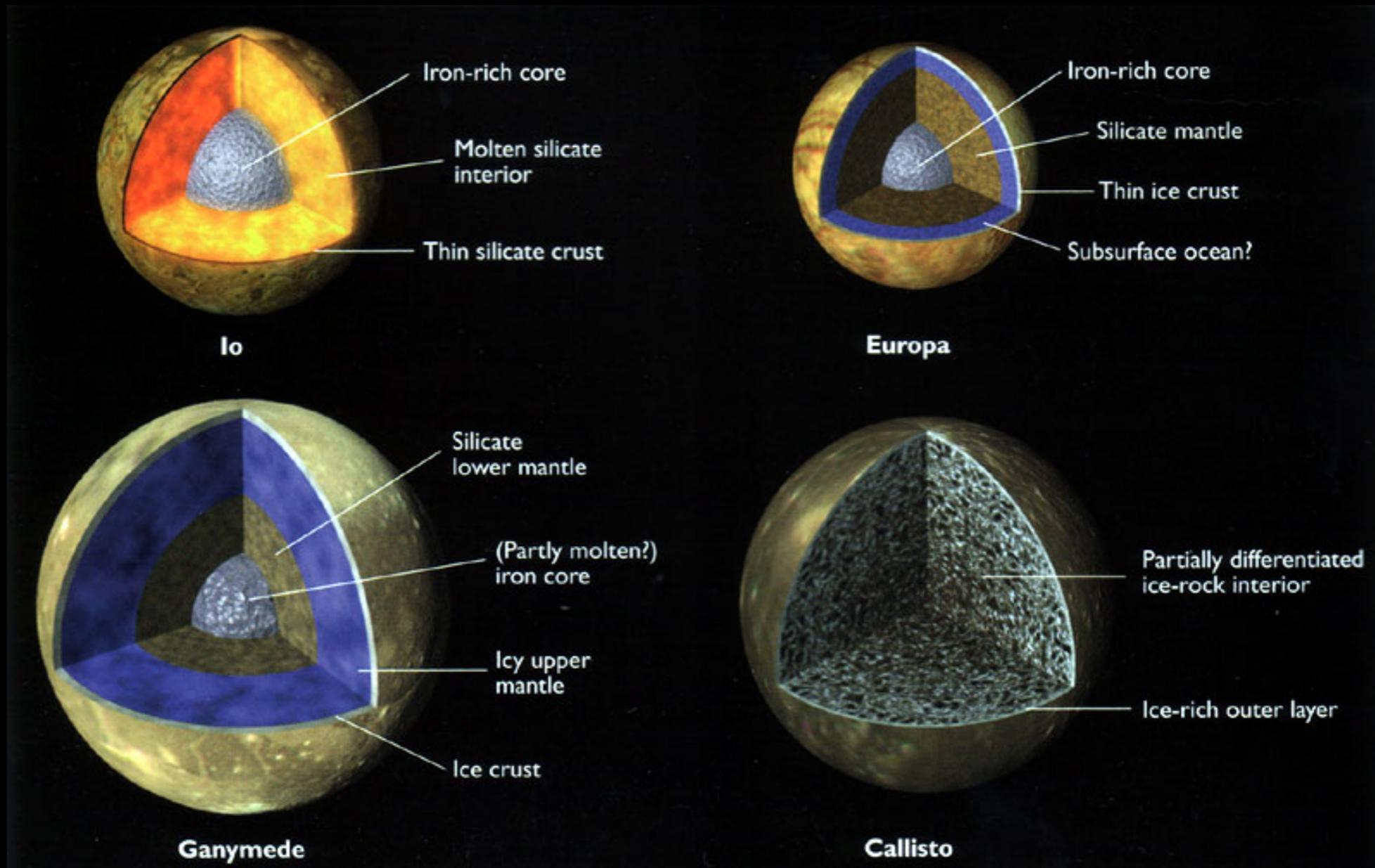
- Linee colorate di iso-composizione
- Colore funzione della temperatura del pianeta
- Composizione terrestre: $\approx 33\% \text{ Fe} + 67\% \text{ MgSiO}_3$



Damasso, Bonomo, A.-Defru et al. 2018, *Astron. Astrophys.*, 615, A69

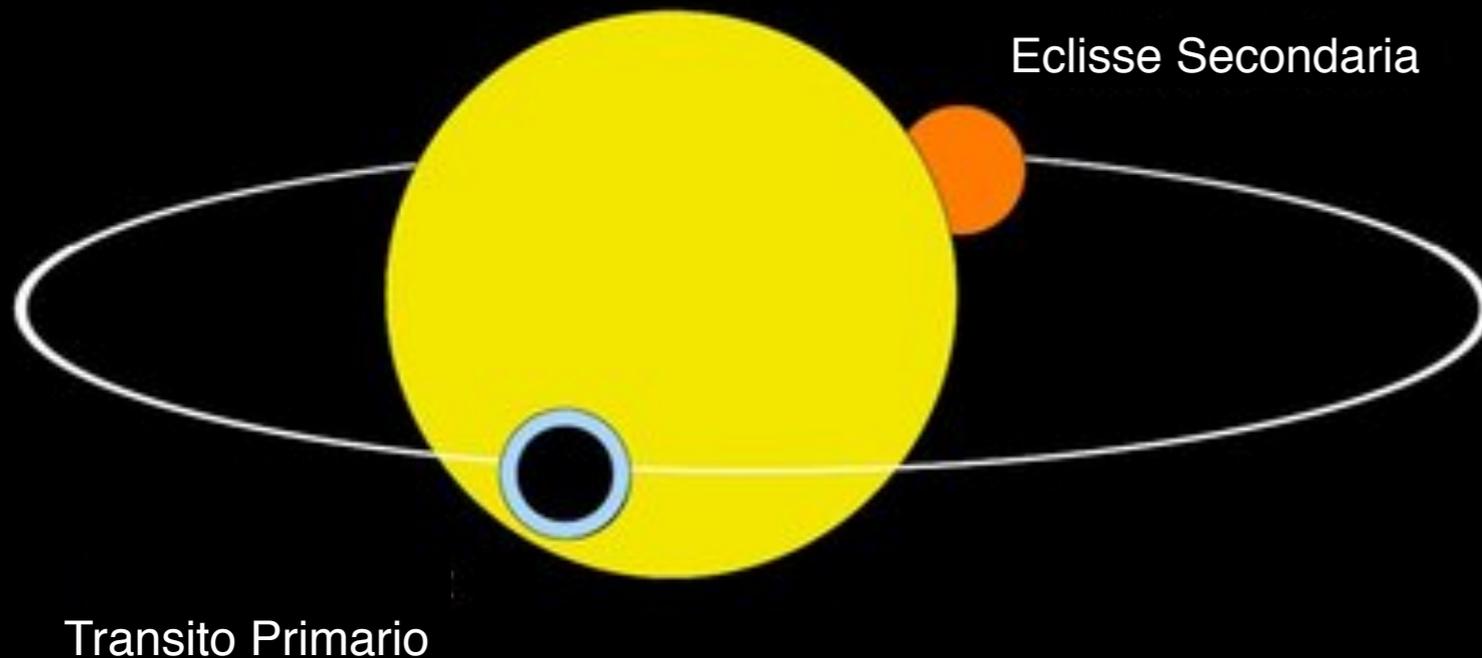
Masse dei pianeti K2-3 determinate con oltre 300 misure di velocità radiale di alta precisione (HARPS-N + HARPS)

Composizione di K2-3d simile a quella di Ganimede



Se confermato con ESPRESSO, K2-3d non sarebbe roccioso (ancora “abitabile”?)

Le atmosfere esoplanetarie: come si studiano?



Transito primario
studio dell'atmosfera al "terminatore", ovvero la separazione fra l'emisfero giorno, rivolto verso la stella, e quello notte (nascosto).

$$S = \frac{(R_p + H)^2}{R_\star^2} - \left(\frac{R_p}{R_\star}\right)^2 \approx \frac{2HR_p}{R_\star^2} \quad \text{per } H \ll R_p$$

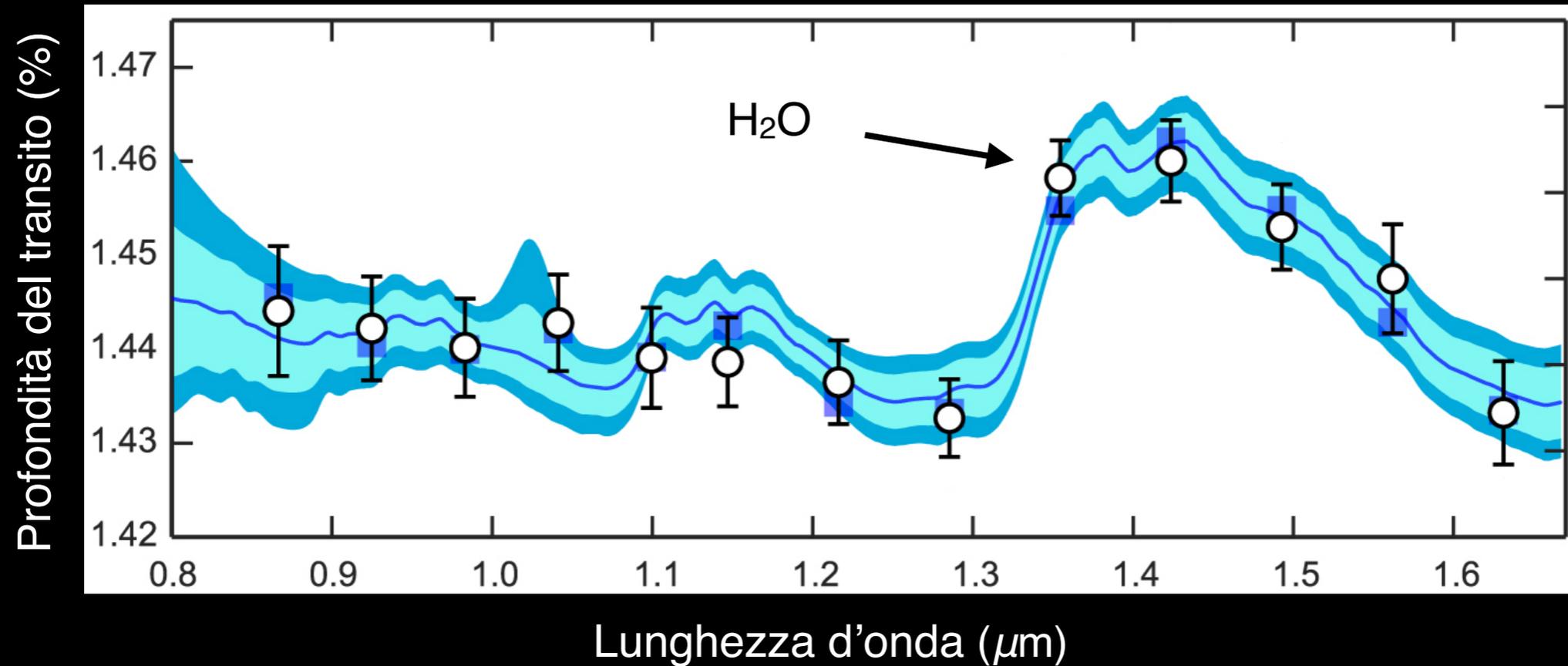
$$H = \frac{k_B T_{eq}}{\mu g}$$

H altezza scala atmosferica: altezza alla quale la pressione dell'atmosfera diminuisce di un fattore e

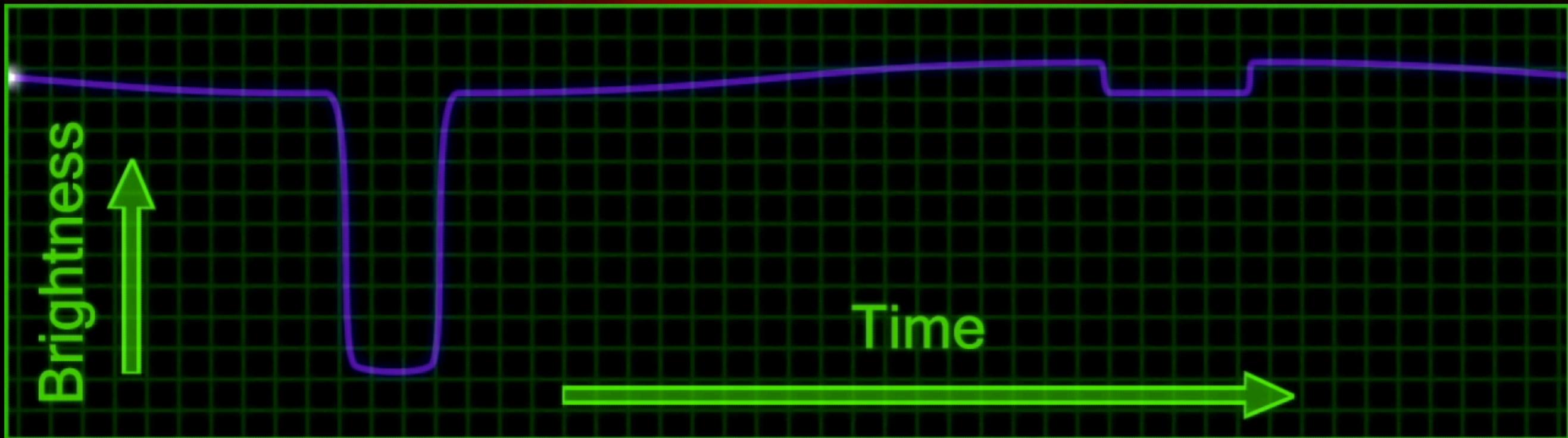
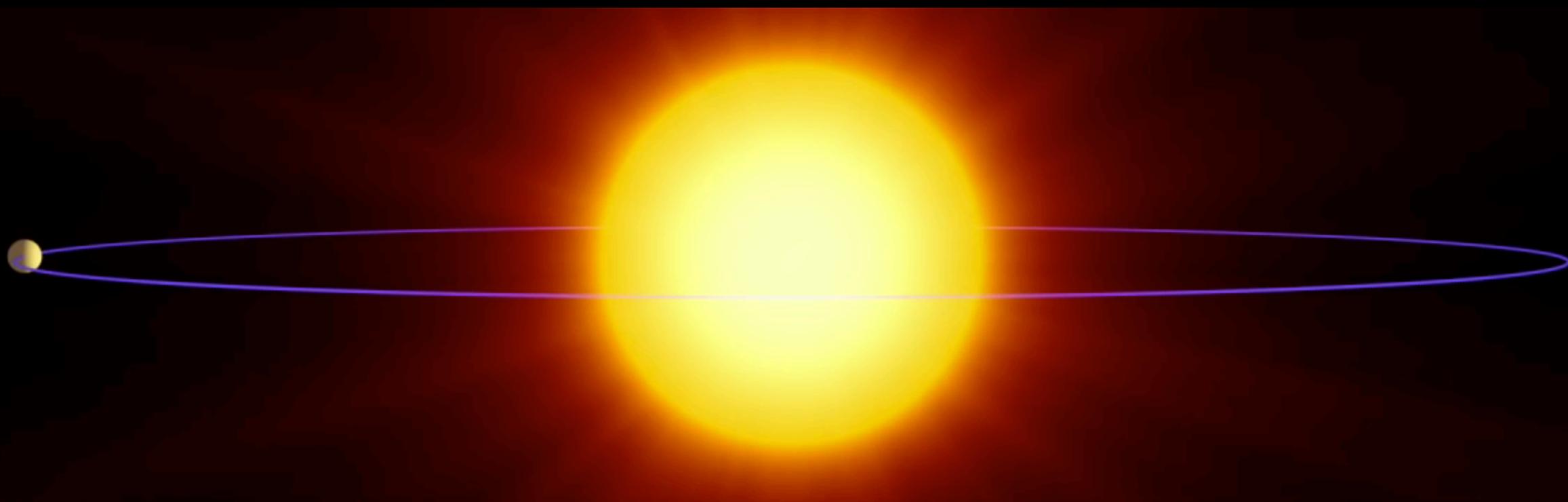
k_B : costante di Boltzman; T_{eq} : temperatura di equilibrio del pianeta;
 μ : peso molecolare dell'atmosfera; g : gravità superficiale del pianeta.

Spettro di trasmissione dell'esopianeta WASP-12

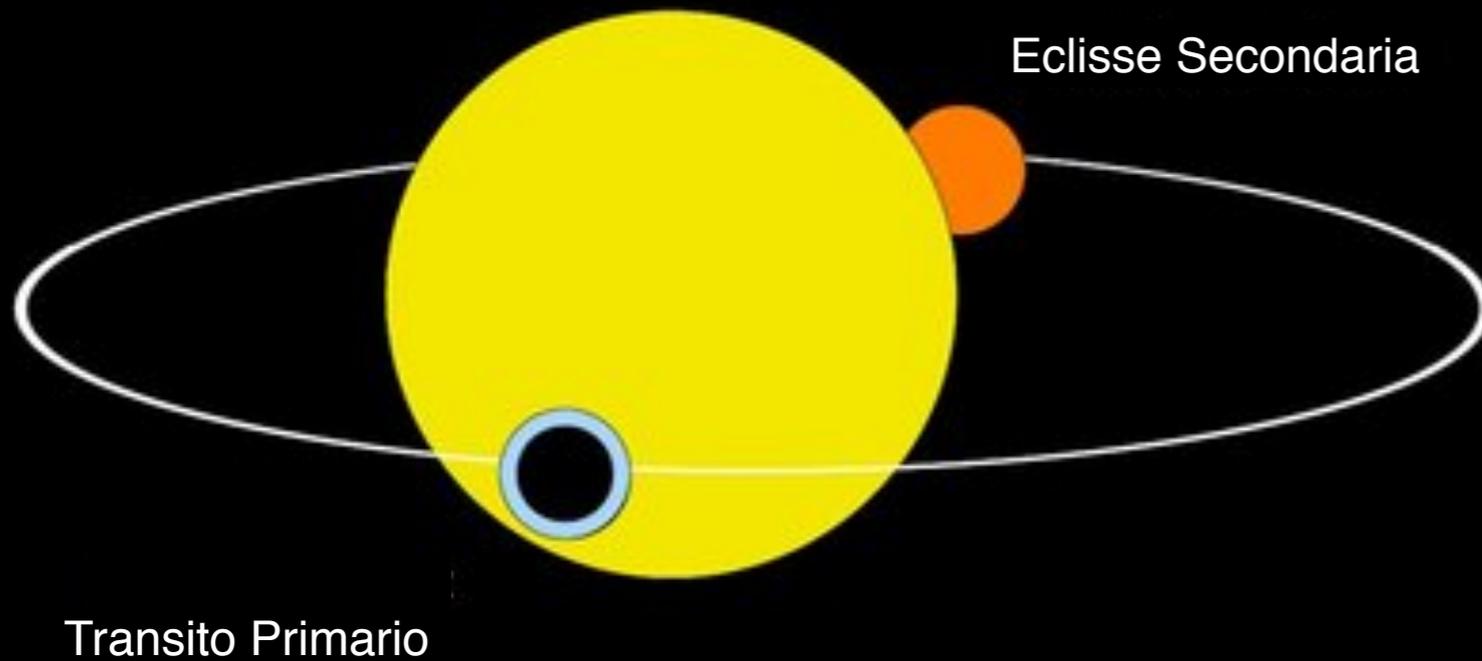
WASP-12b: hot Jupiter con $P=1.1$ giorni e $T_p \sim 2300^\circ\text{C}$



Dati a bassa risoluzione ($R \sim 100-5000$) ottenuti con l'Hubble Space Telescope



Le atmosfere esoplanetarie: come si studiano?



Eclisse secondaria
studio dell'atmosfera
nell'emisfero giorno, ovvero
quello irradiato perché rivolto
verso la stella.

$$S = \frac{B_p(\Delta\lambda, T_{eq})}{B_\star(\Delta\lambda, T_{eff})} \left(\frac{R_p}{R_\star} \right)^2$$

B_p : intensità specifica del pianeta

B_\star : intensità specifica della stella

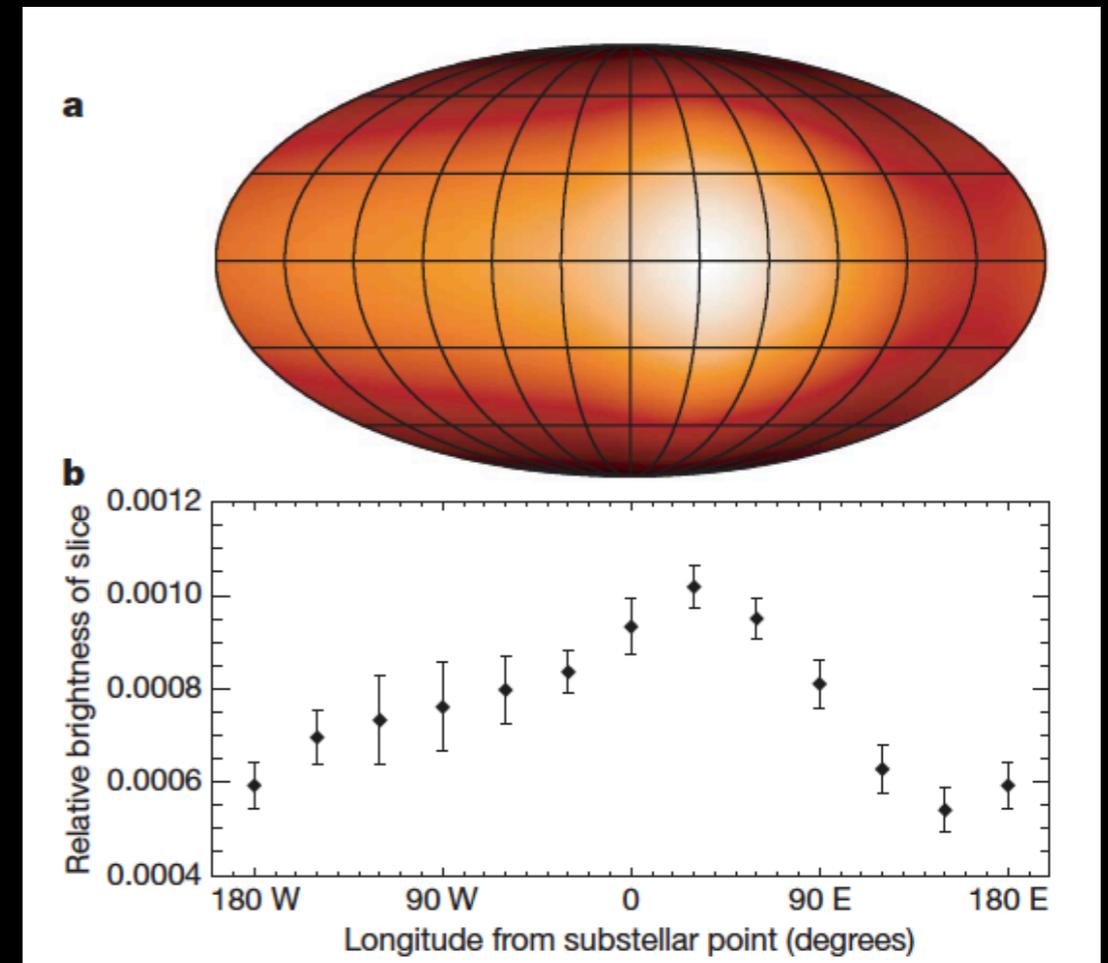
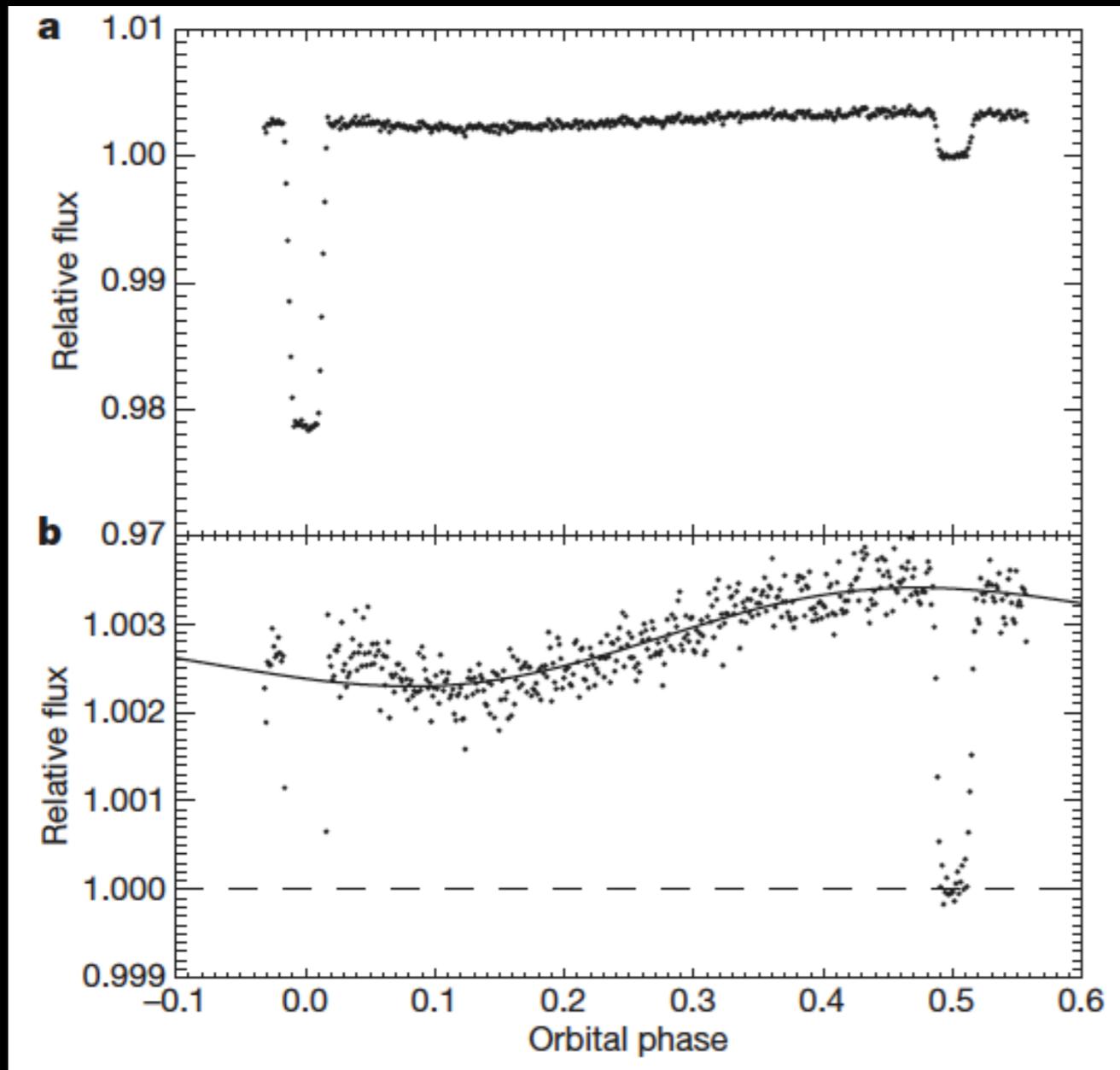
Approssimazione di corpo nero

T_{eq} : temperatura di equilibrio del pianeta;

T_{eff} : temperatura efficace della stella.

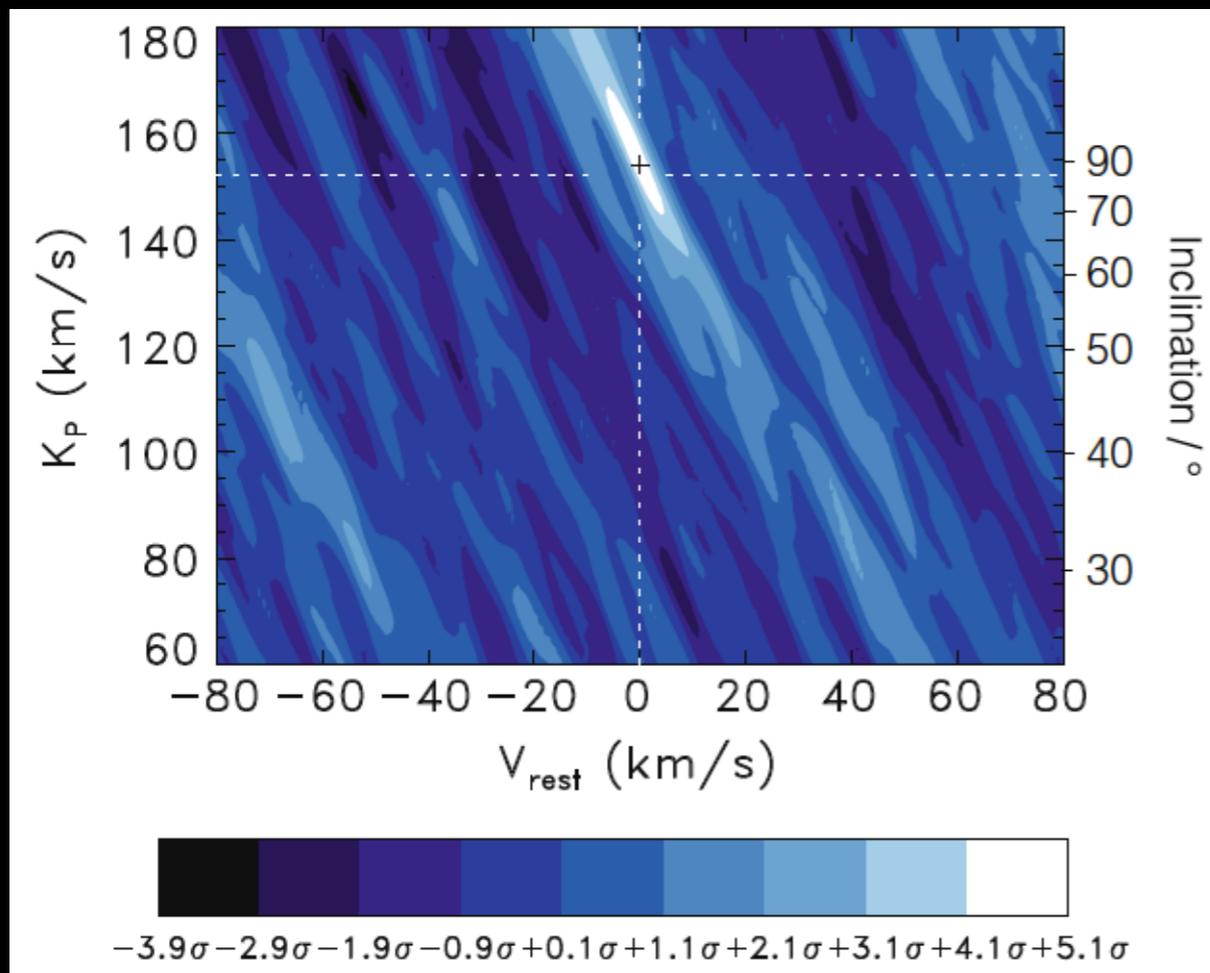
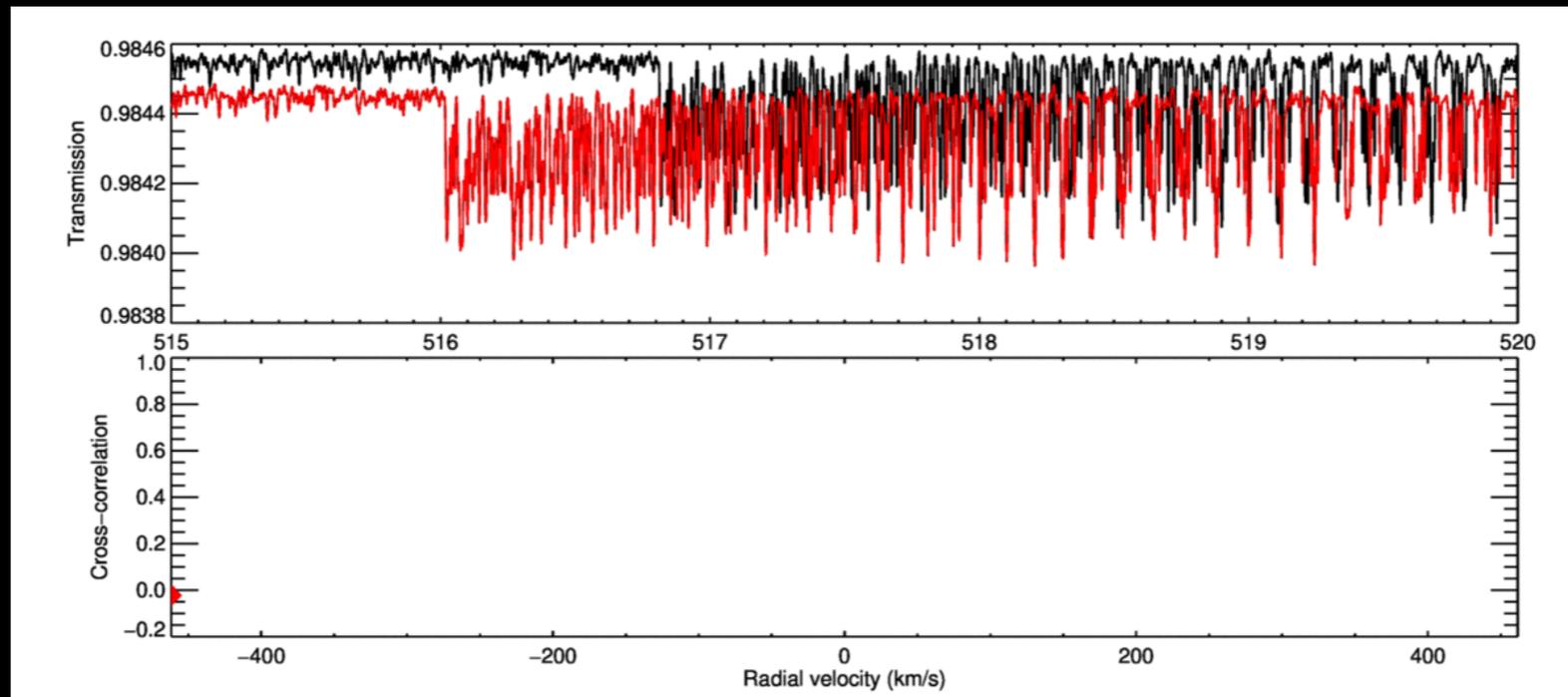
Eclissi secondaria dell'esopianeta HD189733b

HD189733b: hot Jupiter con $P=2.2$ giorni e $T_p \sim 1000^\circ\text{C}$



Dati del telescopio spaziale Spitzer a $8\ \mu\text{m}$

Le atmosfere esoplanetarie ad alta risoluzione



HD189733b Rivelazione di H_2O ad alta risoluzione ($R \sim 100000$) ottenuta con il telescopio VLT (Very Large Telescope) in Cile

Alla ricerca dei biomarkers

H₂O, CO₂: molecole indicatrici di un'atmosfera simile a quella terrestre
O₂, O₃, CH₄: molecole dovute alla presenza di vita complessa

