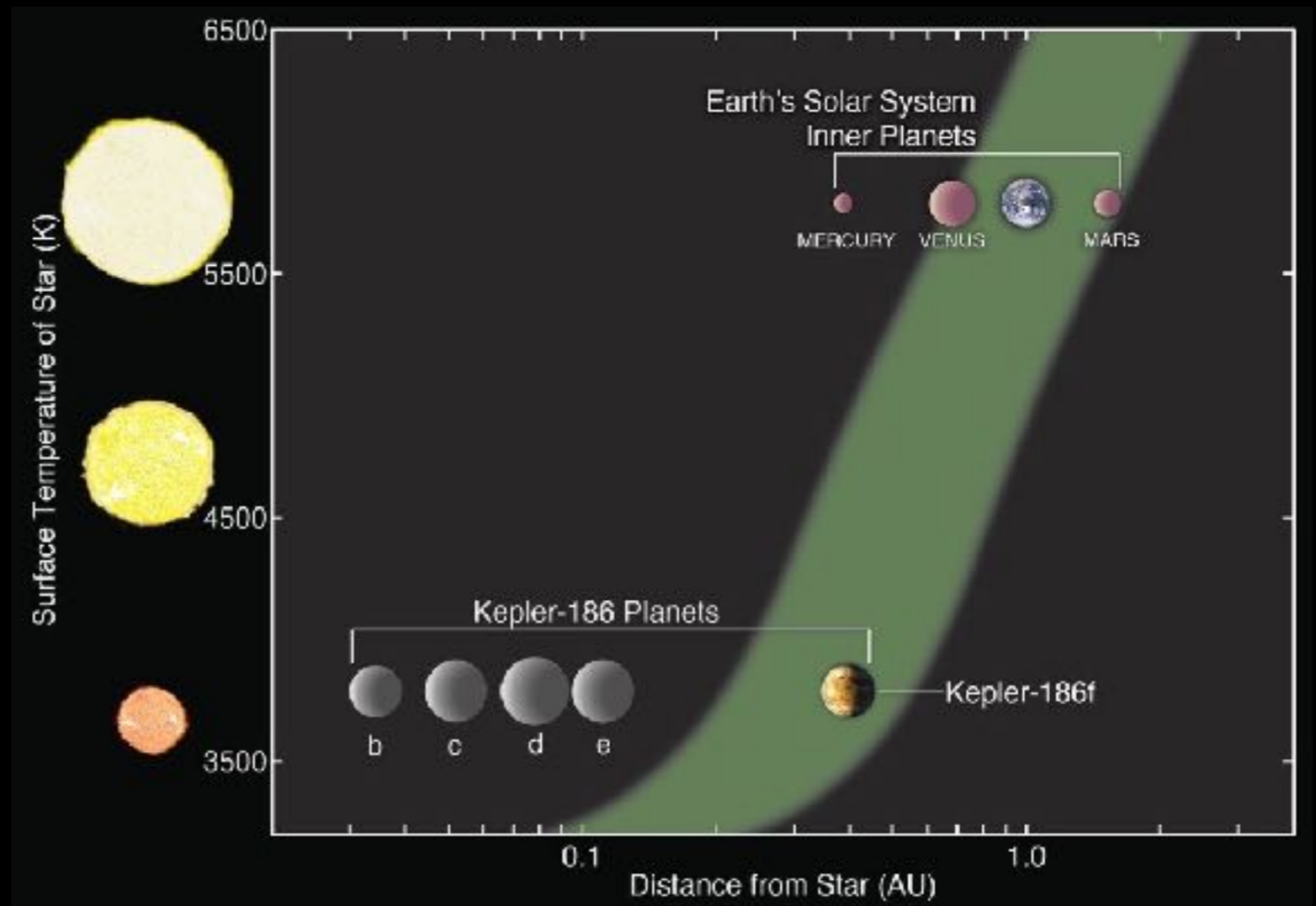


I pianeti nella zona abitabile

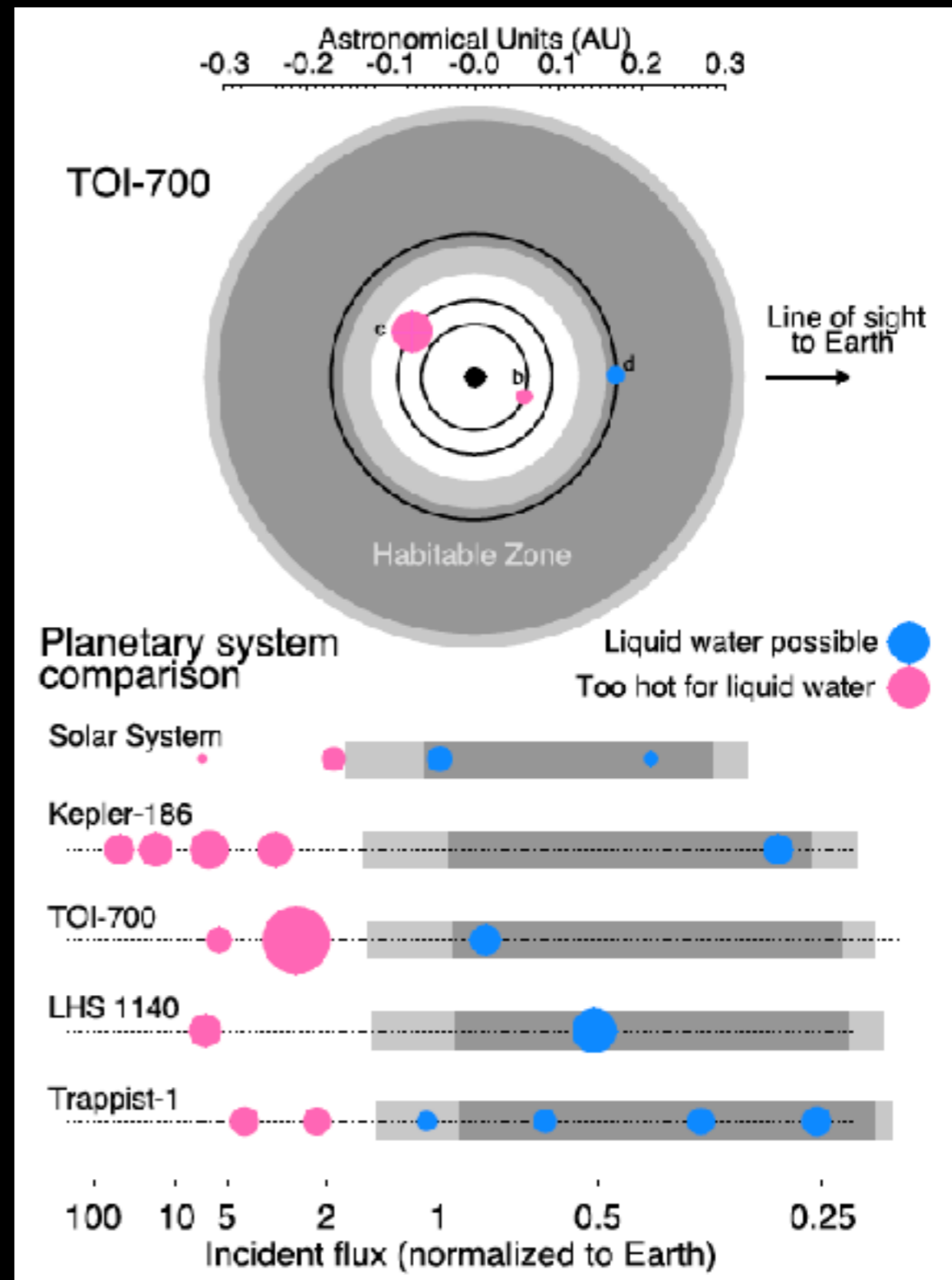
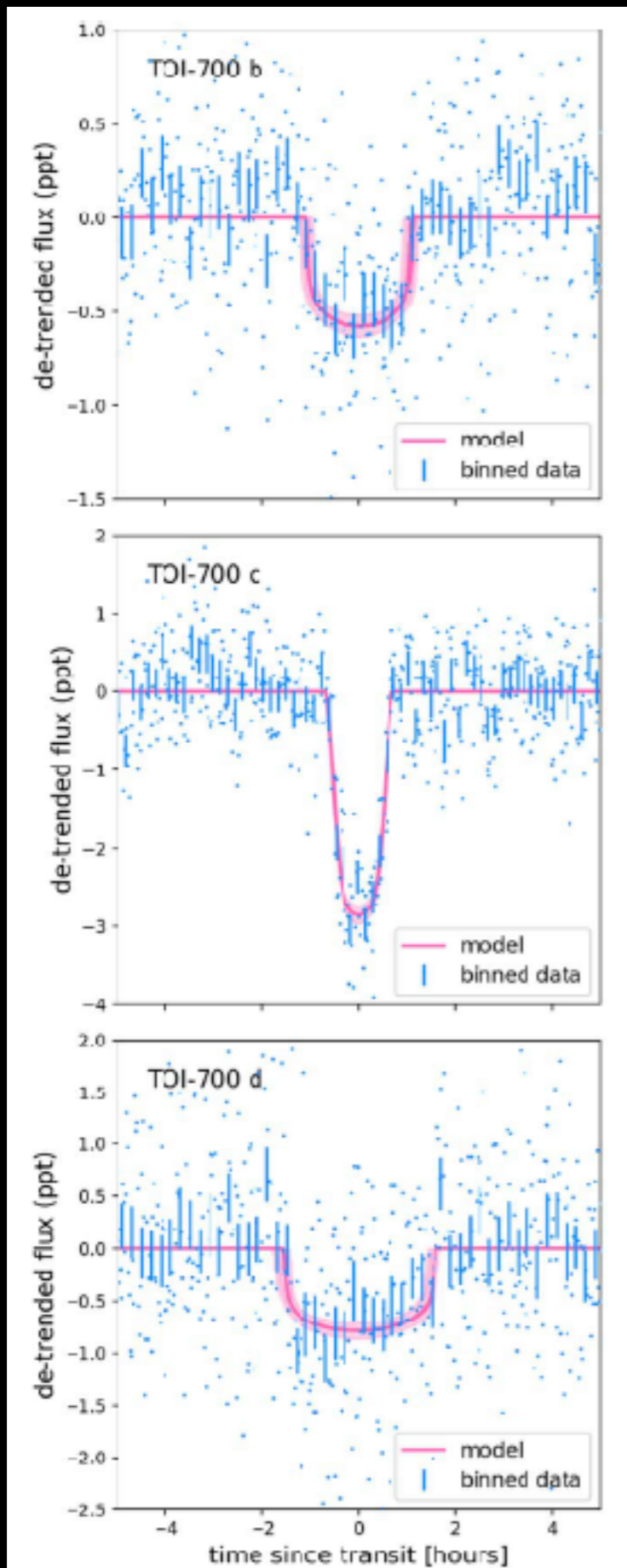


Sia spettrografi ad alta precisione (HARPS) sia telescopi spaziali (Kepler, TESS) permettono di scoprire pianeti nella zona abitabile, che è la distanza dalla stella alla quale l'acqua può trovarsi allo stato liquido.

Ad oggi conosciamo circa una trentina di pianeti di piccola taglia (o massa) nella zona abitabile.



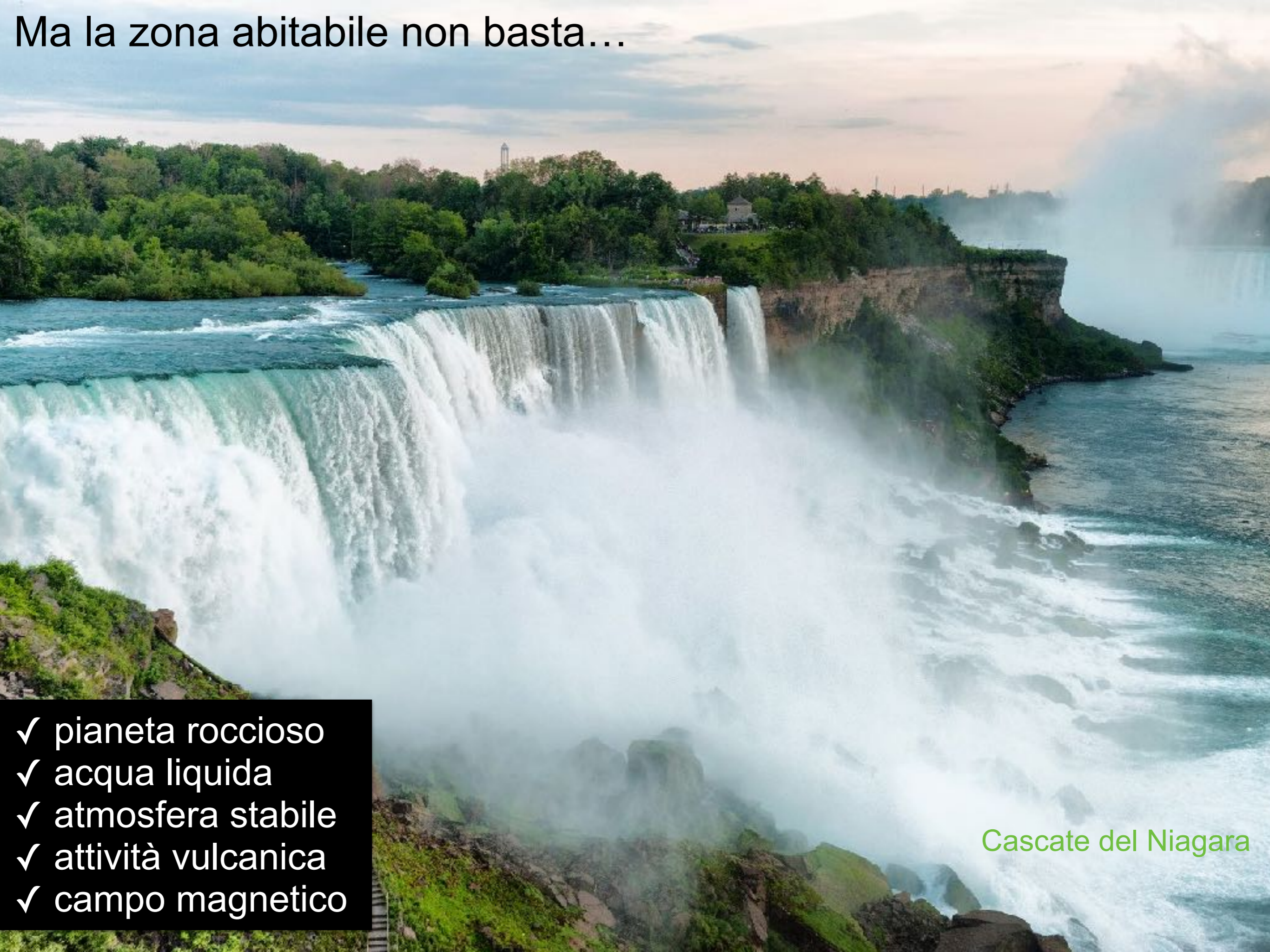
TOI-700 d: il primo pianeta TESS nella zona abitabile



Ma la zona abitabile non basta...

- ✓ pianeta roccioso
- ✓ acqua liquida
- ✓ atmosfera stabile
- ✓ attività vulcanica
- ✓ campo magnetico

Cascate del Niagara



Alla ricerca di indicatori di vita

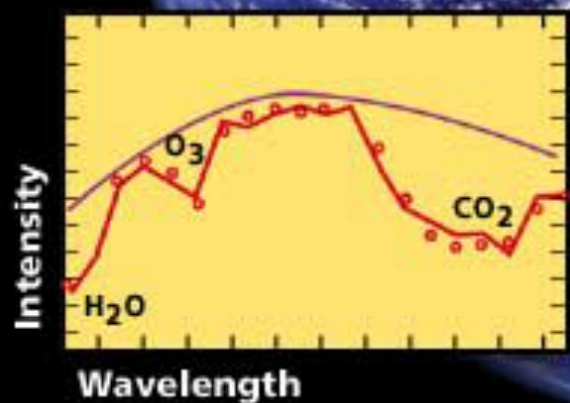
O₃ Ozone, produced by plants, algae



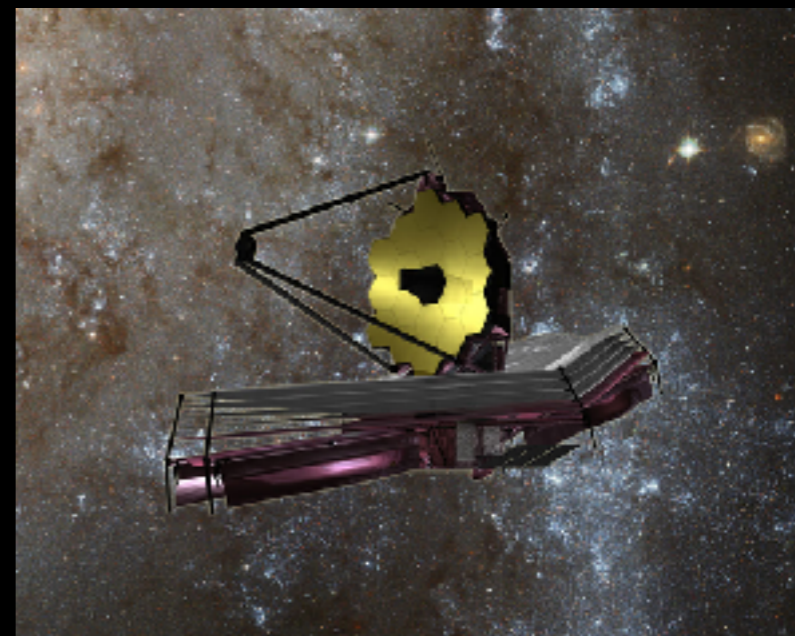
H₂O Liquid water



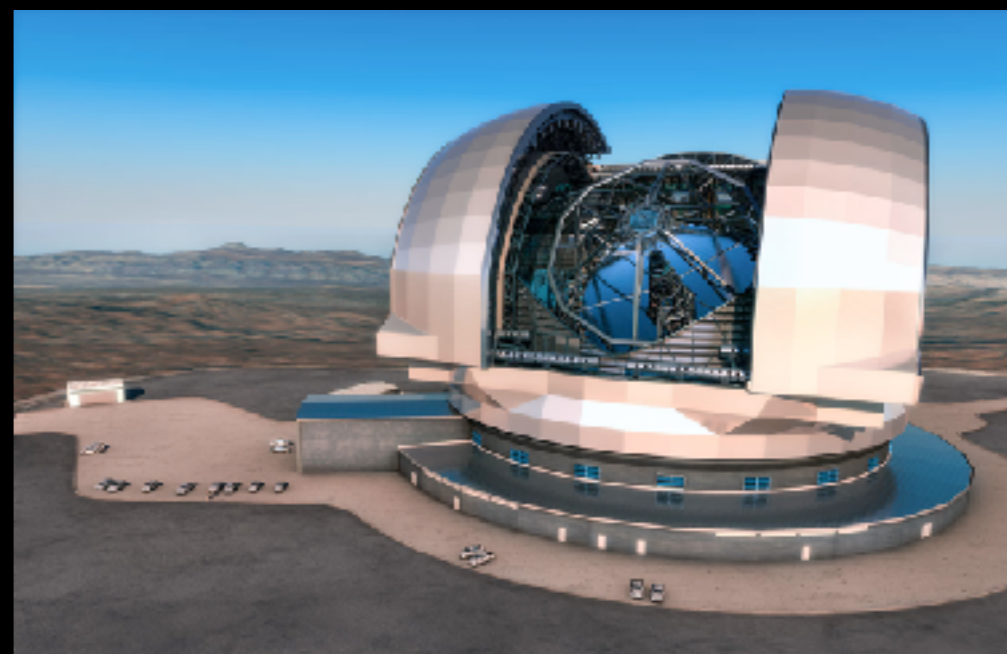
Methane produced by living organisms



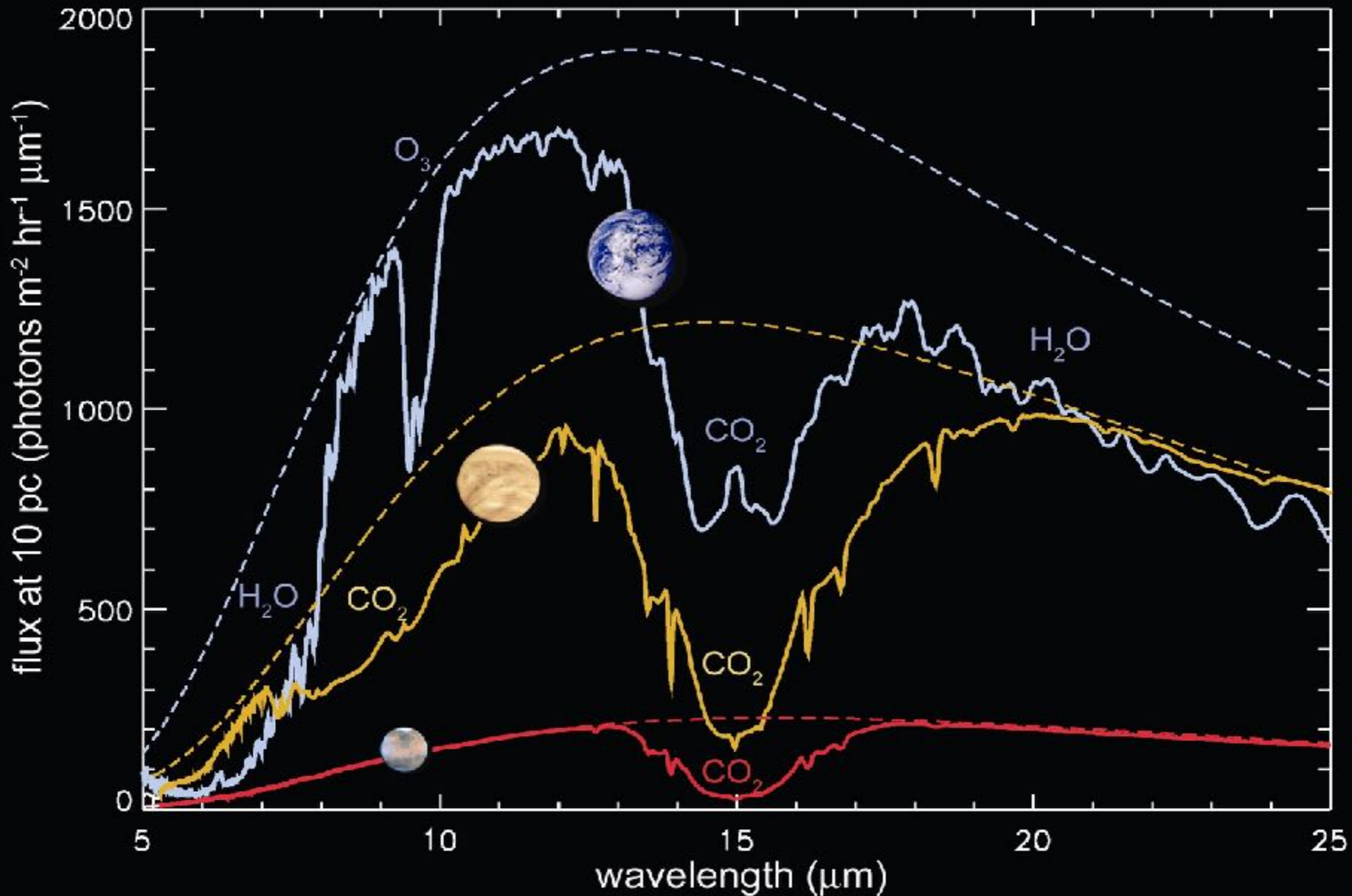
**James Webb Space Telescope
(lancio previsto nel 2021)**



**European Extremely Large Telescope
D=39 m, prima luce nel 2026+**



Alla ricerca di indicatori di vita



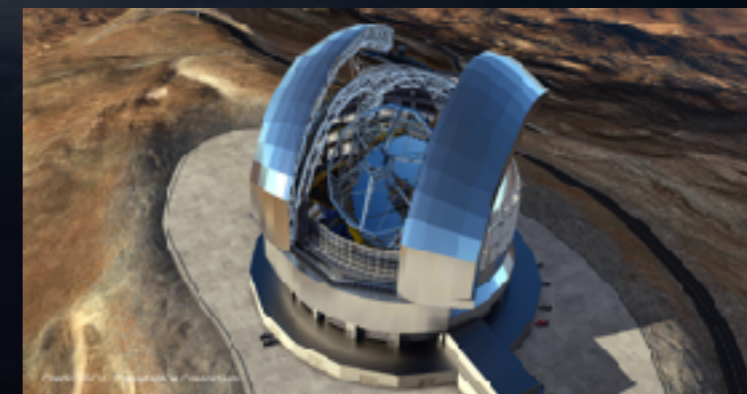
Exoplanet Missions



W. M. Keck Observatory



Very Large Telescope / ESO



European Extremely Large Telescope

¹ NASA/ESA Partnership
² NASA/ESA/CSA Partnership
³ CNES/ESA



*La domanda che ci assilla è di dove proveniamo e dove andiamo.
È per questo che abbiamo l'ansia di scoprire tutto quanto possiamo.
E nel tentativo proviamo un piacere, lo troviamo estremamente interessante.*

Erwin Schrödinger

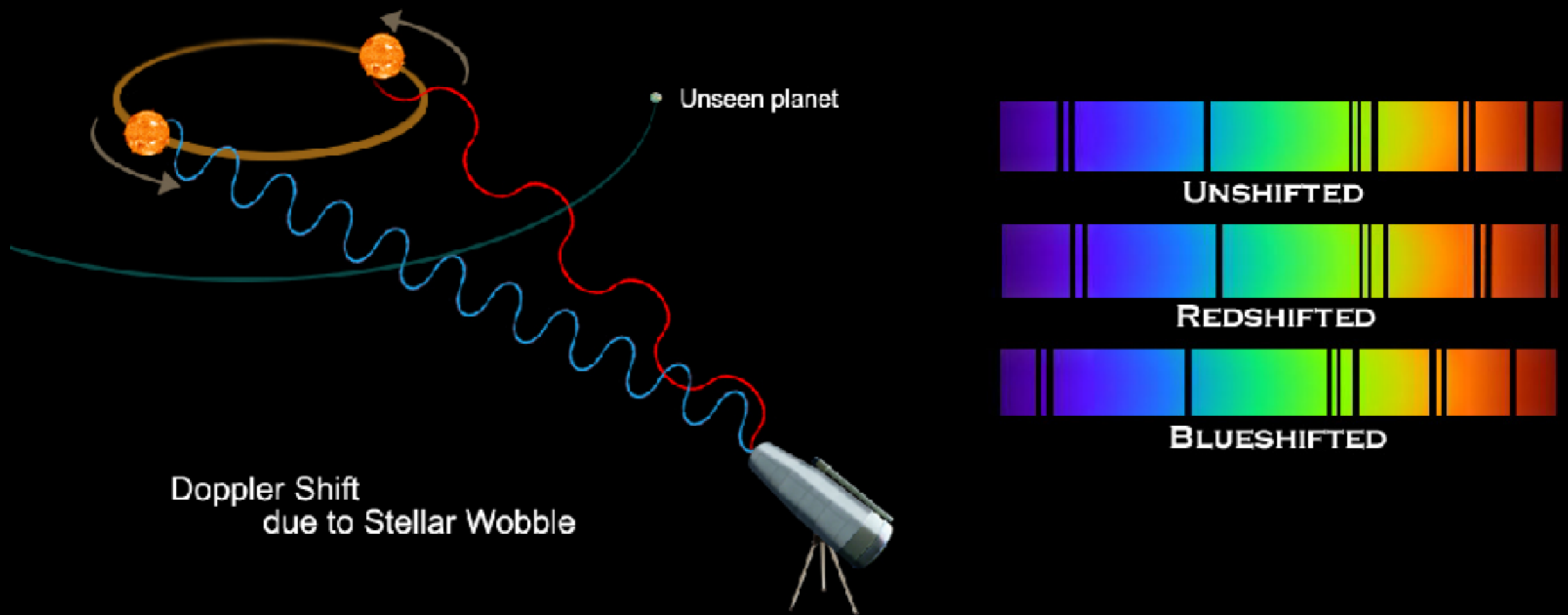
Fine prima parte

(introduzione e descrizione dei telescopi spaziali Kepler, TESS e CHEOPS)

Seconda parte:

caratterizzazione dei sistemi esoplanetari
combinando il metodo Doppler
(o delle velocità radiali) e i transiti

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.

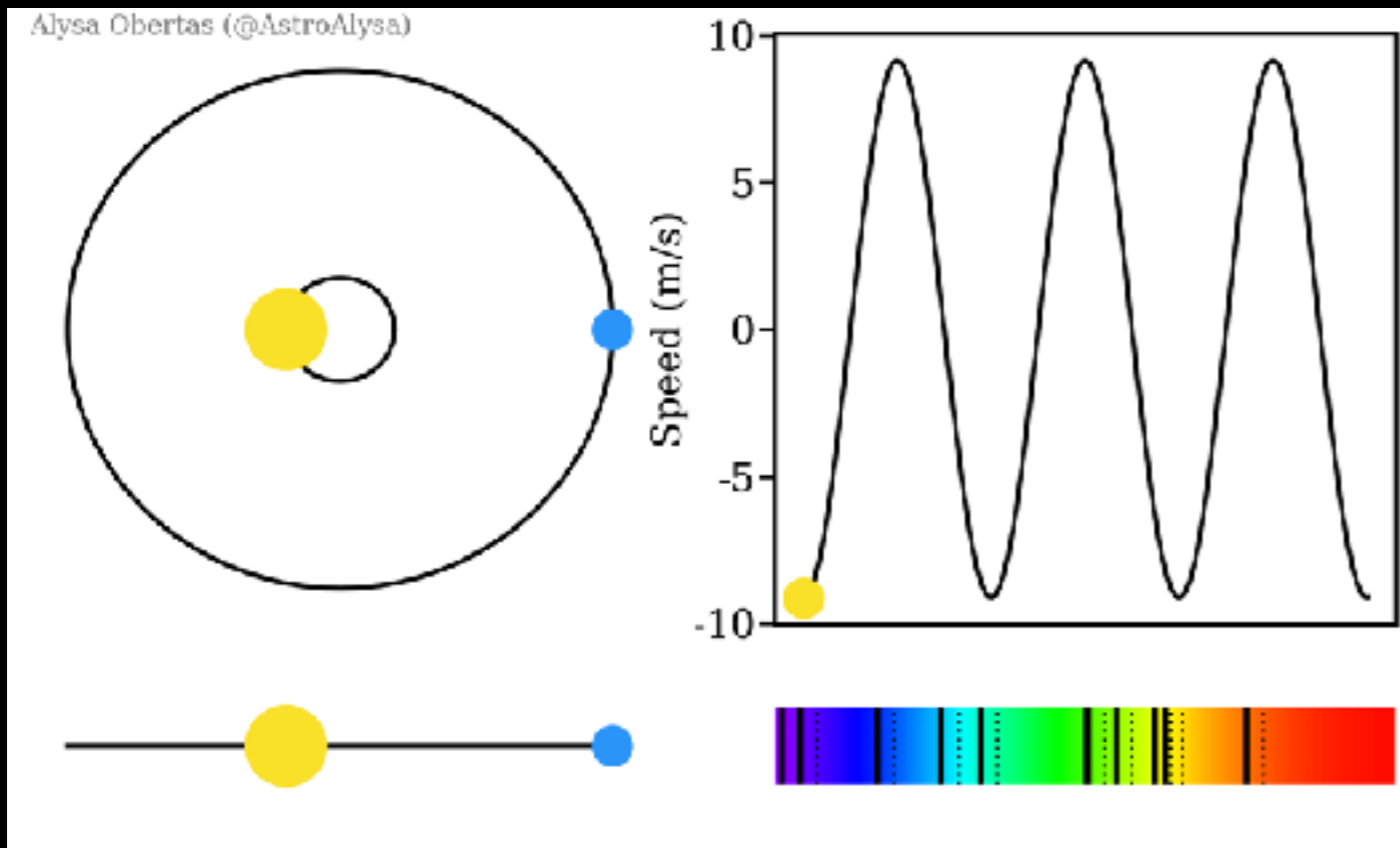
Spettro stellare échelle



Il metodo Doppler

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

λ : lunghezza d'onda della luce;
 v : velocità della sorgente lungo la linea di vista;
 c : velocità della luce.



$$K \propto M_p \sin i_p M_s^{-2/3} P^{-1/3}$$

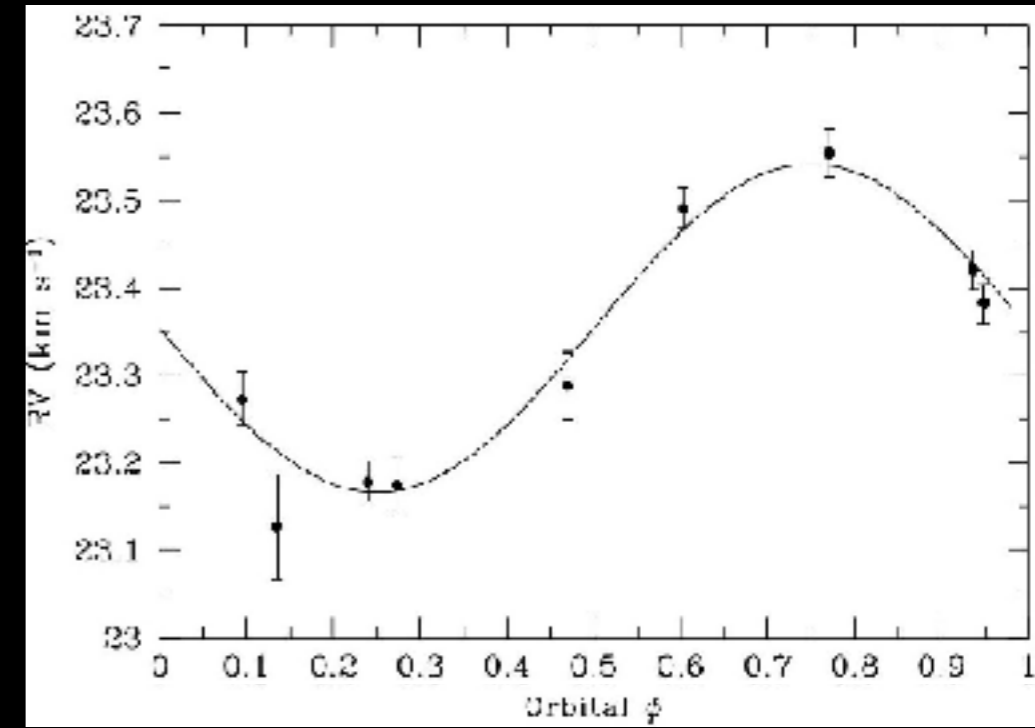
M_p : massa del pianeta
 i_p : inclinazione orbitale
 M_s : massa della stella
 P : periodo orbitale

Il metodo Doppler

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

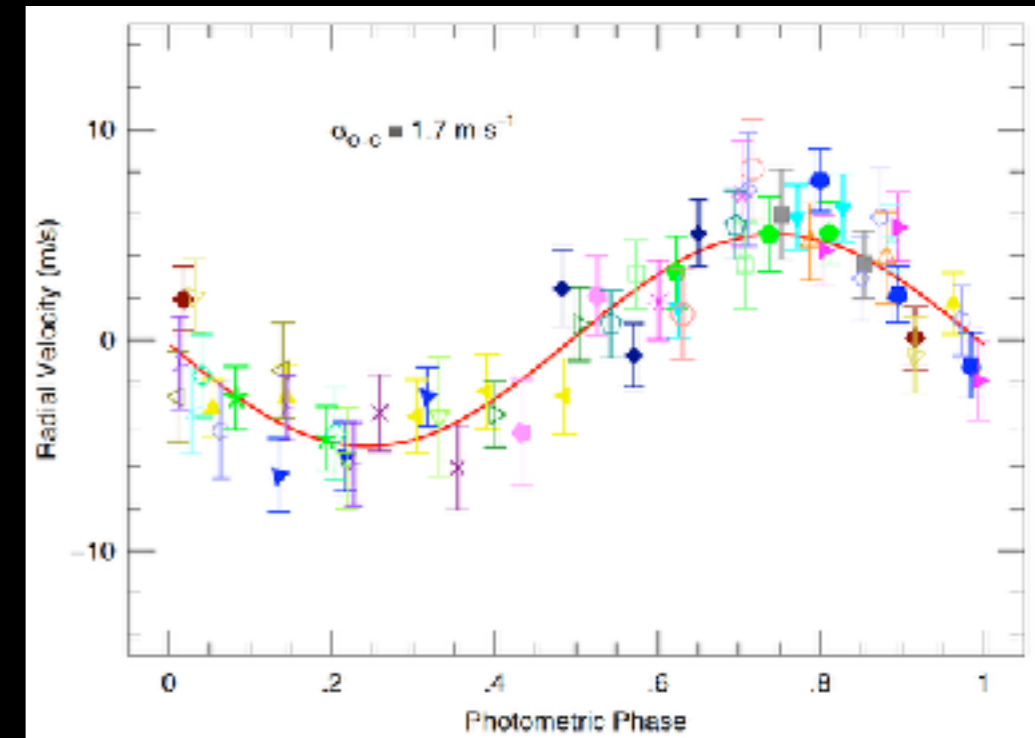
CoRoT-1b

$P = 1.5$ 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
 $M_p = 7.4 \pm 1.2 M_\oplus$



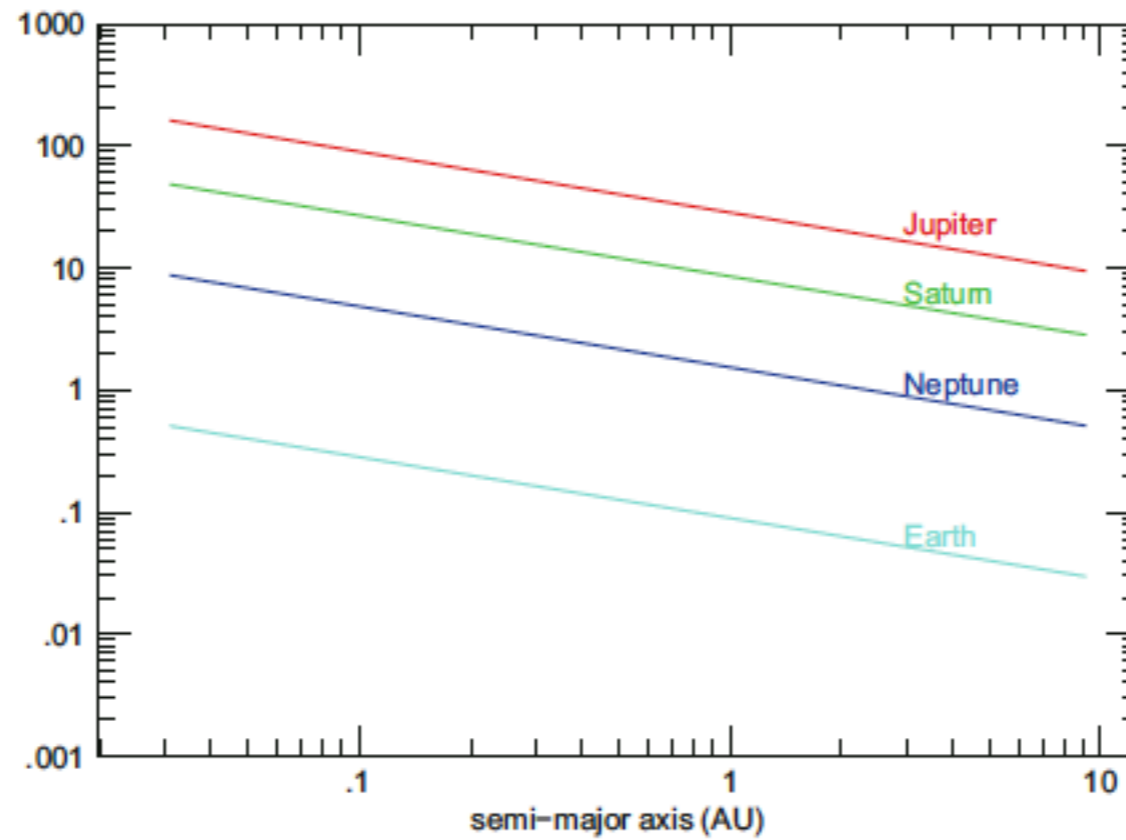


Fig. 1.1 The amplitude of the barycentric radial velocity variations for a one solar mass star orbited by Earth, Neptune, Saturn, or Jupiter at various orbital distances

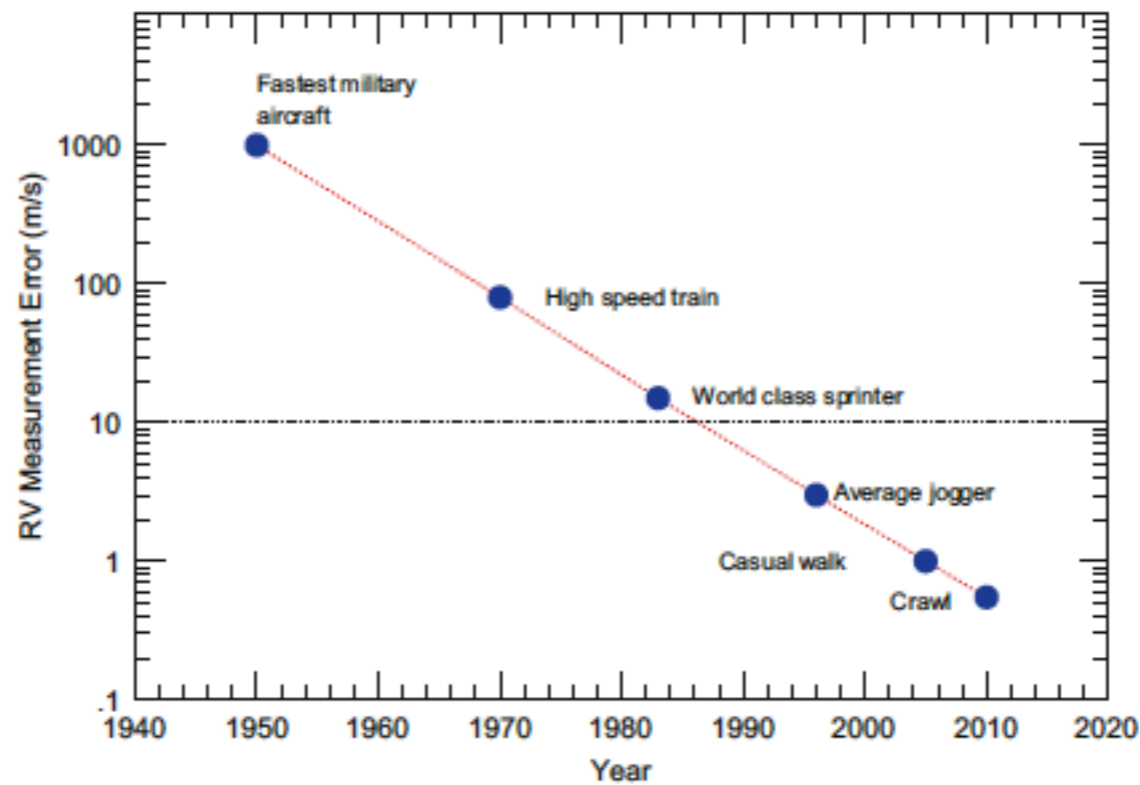
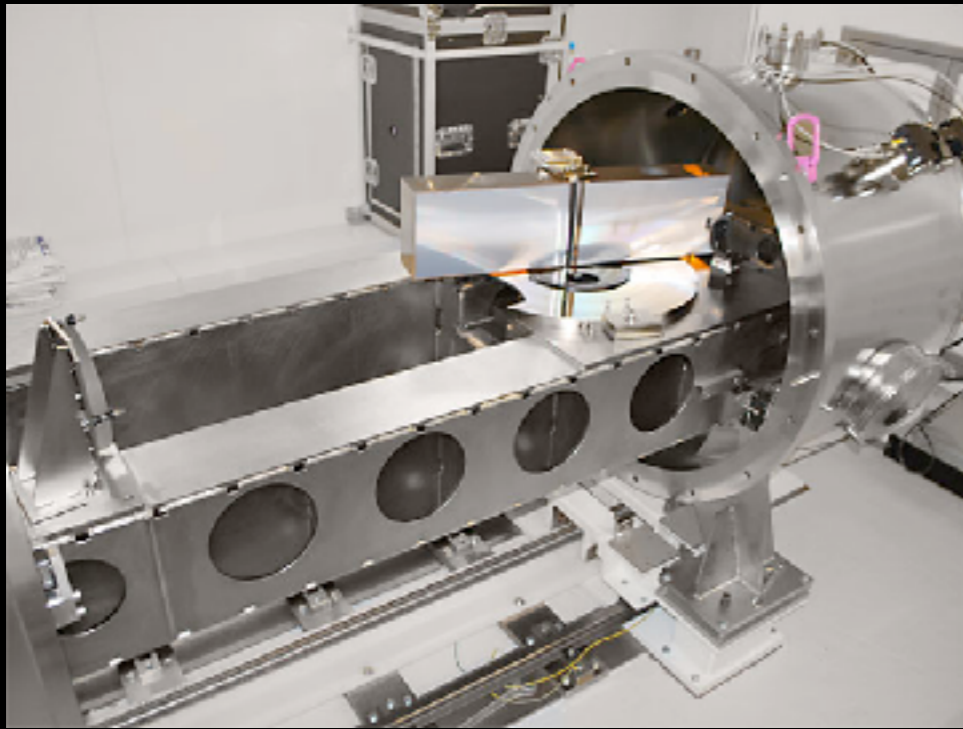


Fig. 1.2 The evolution of the radial velocity measurement error as a function of time. The horizontal line marks the reflex motion of a solar mass star with a Jupiter analog

Lo spettrografo HARPS-North



- Permette di misurare lo spostamento di una stella per effetto Doppler con altissima precisione (1 m/s)

- E' stato installato ad aprile 2012 presso il Telescopio Nazionale Galileo che si trova alle Canarie (La Palma)

Il Telescopio Nazionale Galileo

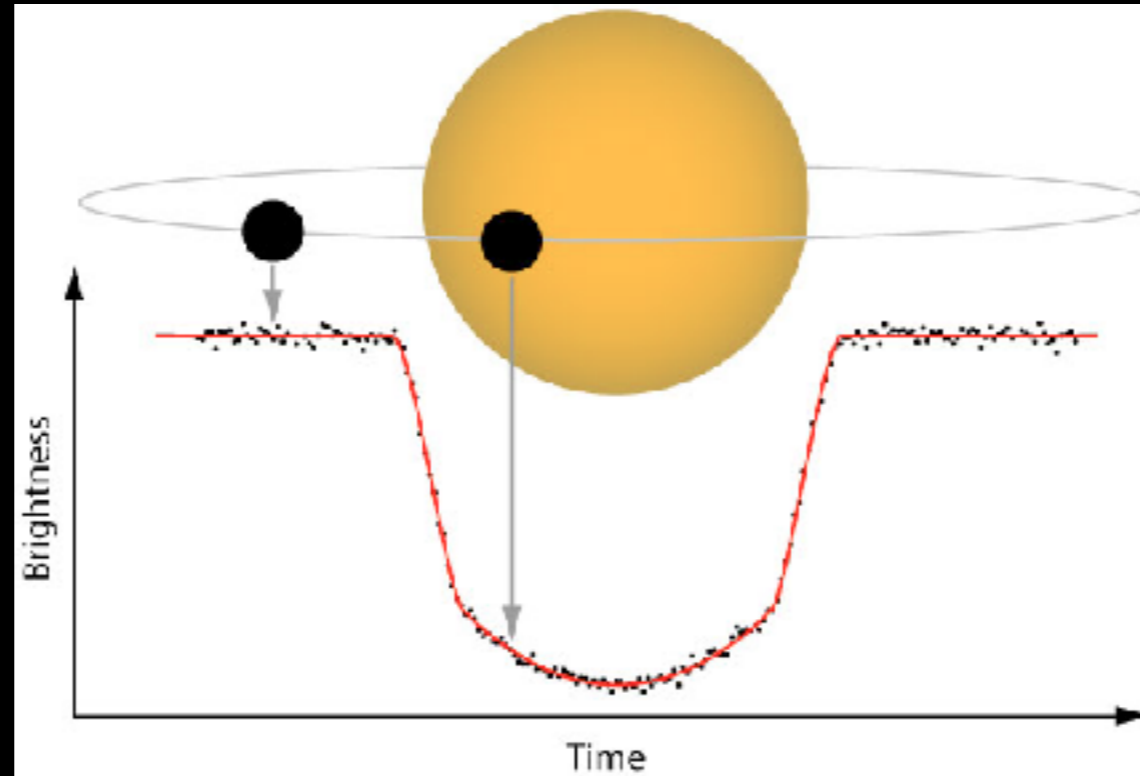




Roque de los Muchachos (La Palma)



Il metodo dei transiti



Parametri osservabili:

- profondità

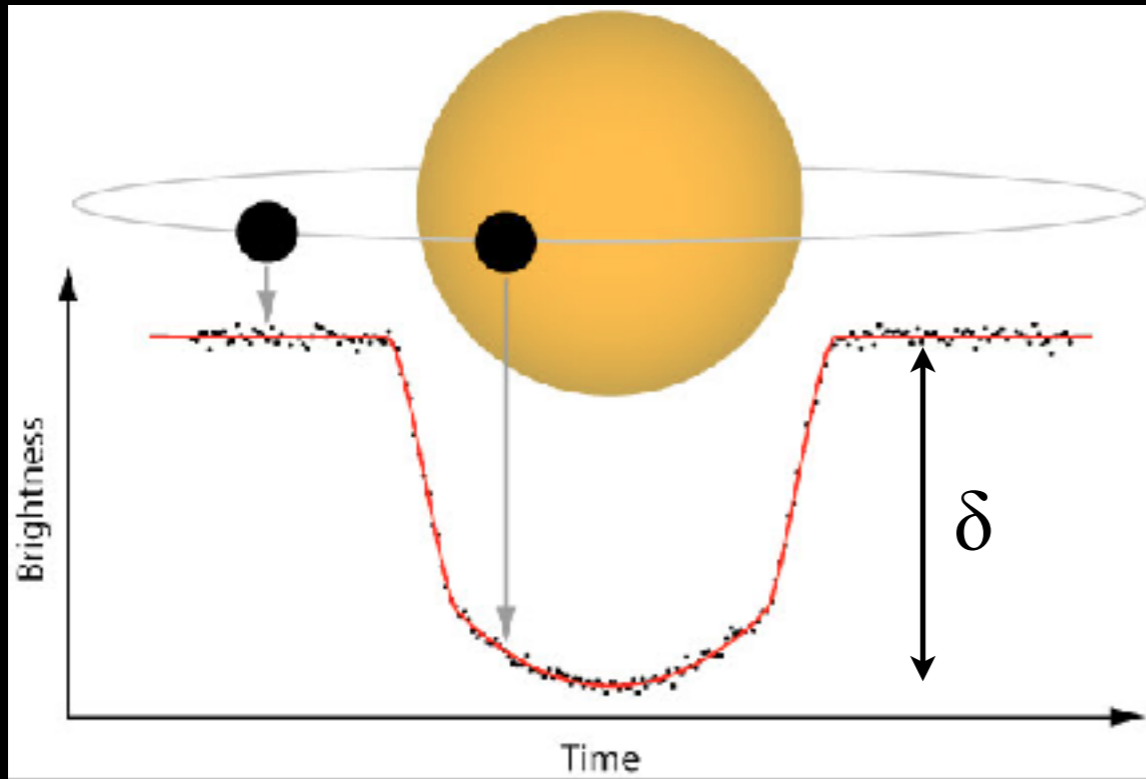
$$\delta = \left(\frac{R_p}{R_s} \right)^2$$

- 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	✓	✓	✗	✓	✗	✗

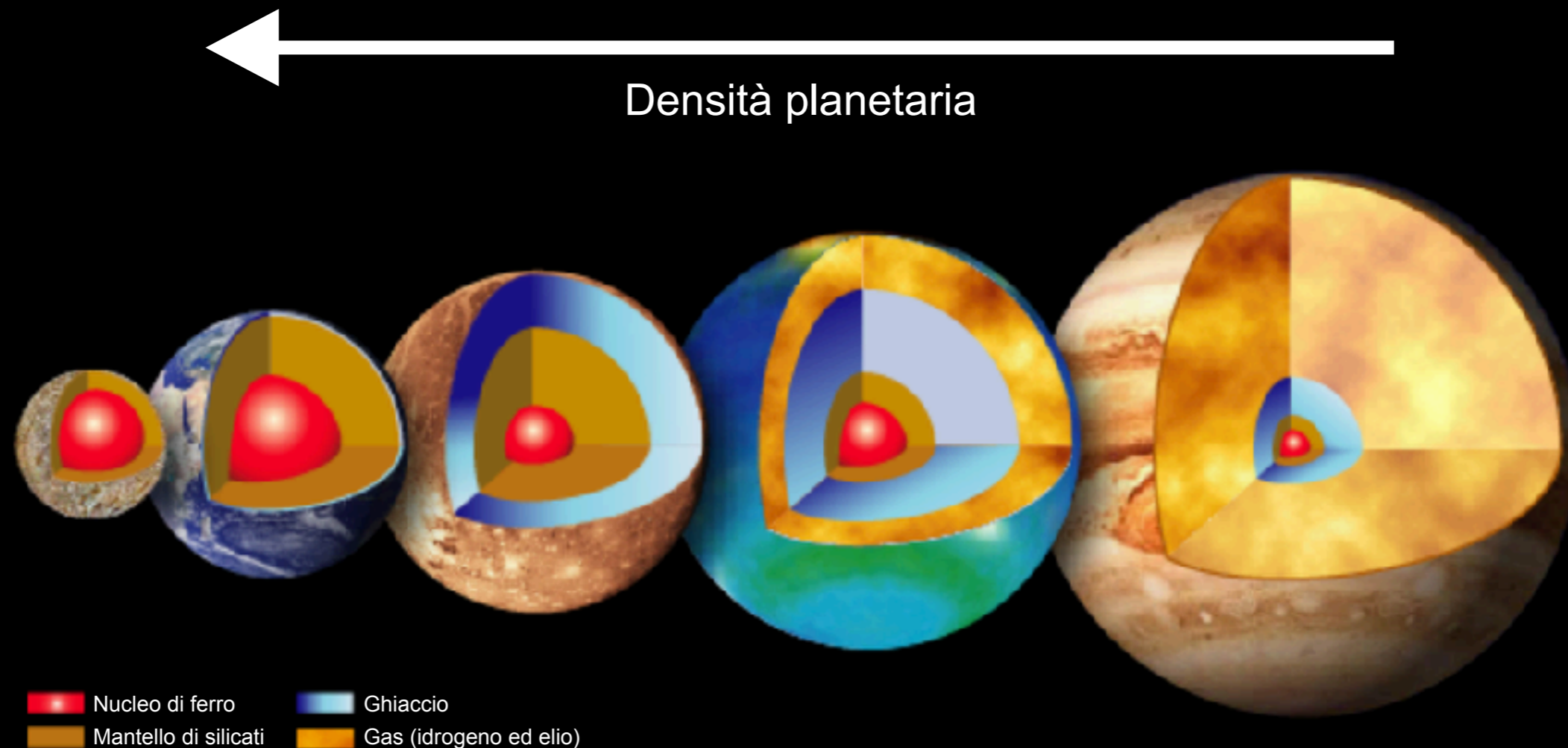
Combinando i metodi Doppler e dei transiti è possibile determinare tutti i parametri fisici di un dato pianeta, ovvero R_p , M_p e densità:

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

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.

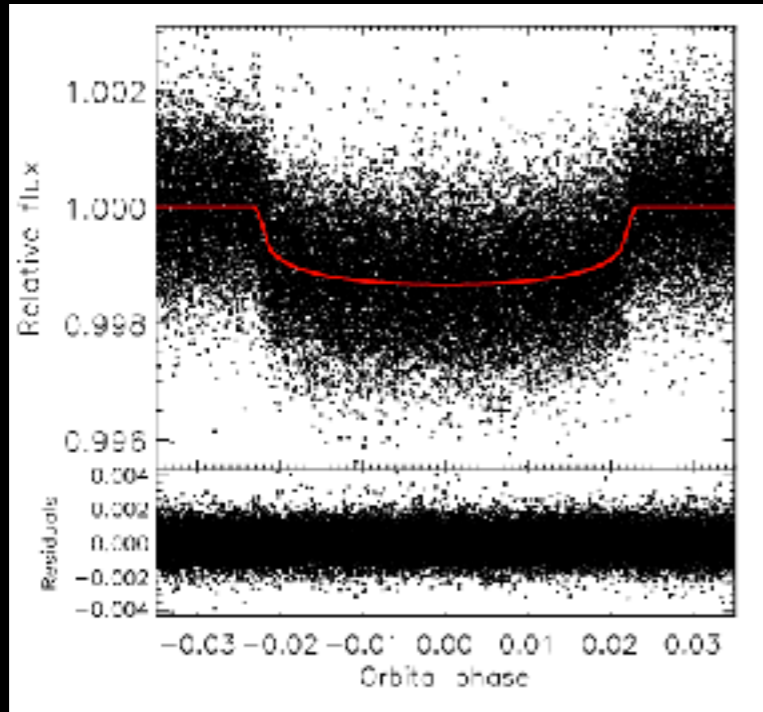
La composizione degli esopianeti

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



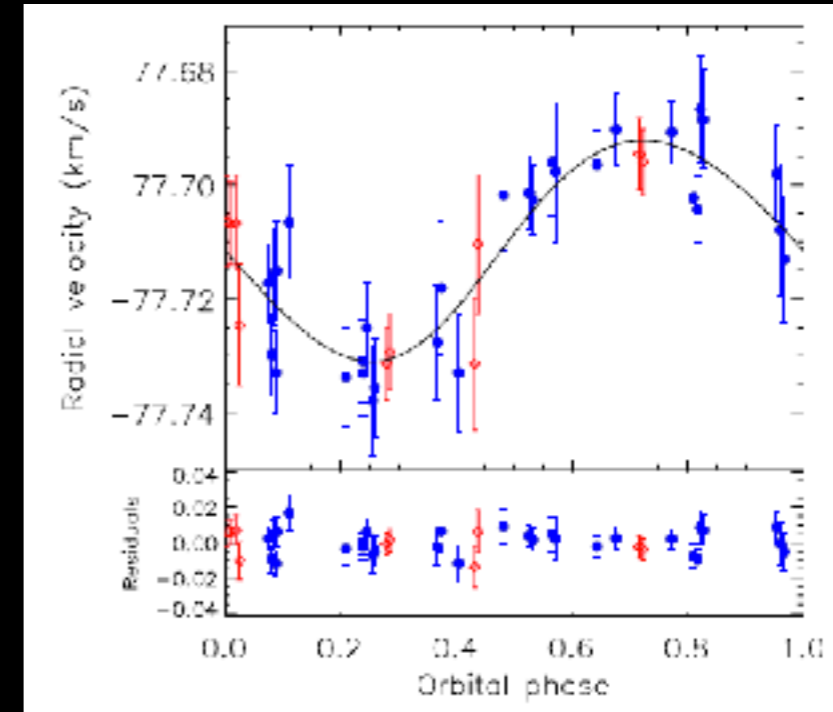
La composizione di un esopianeta a partire dalla sua misura di densità ci consente in alcuni casi di risalire alla sua storia di formazione ed evoluzione, ovvero dei processi che hanno eventualmente modificato le sue proprietà dopo la formazione.

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

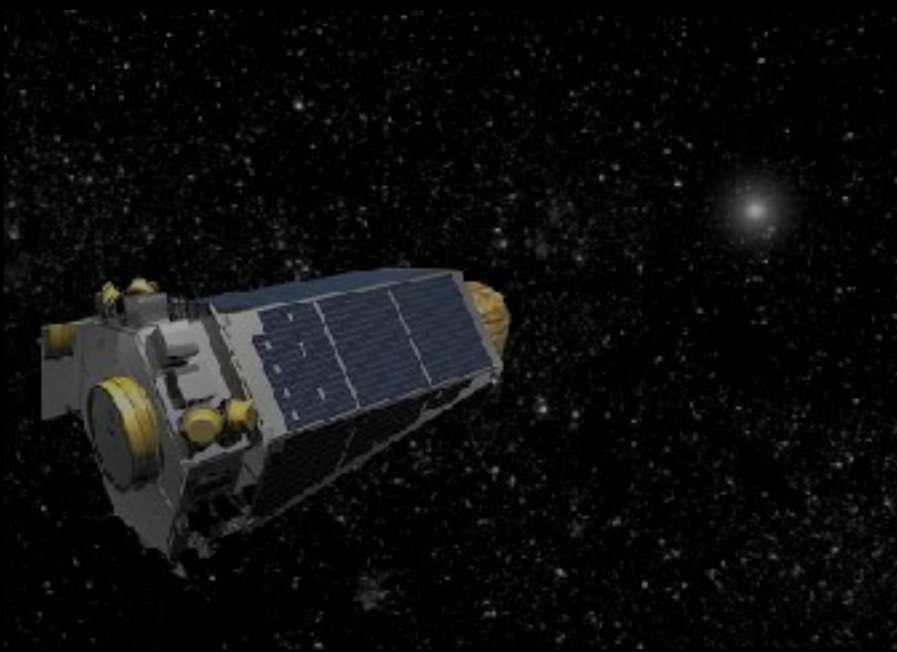


Kepler-101b

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



Bonomo et al. 2014



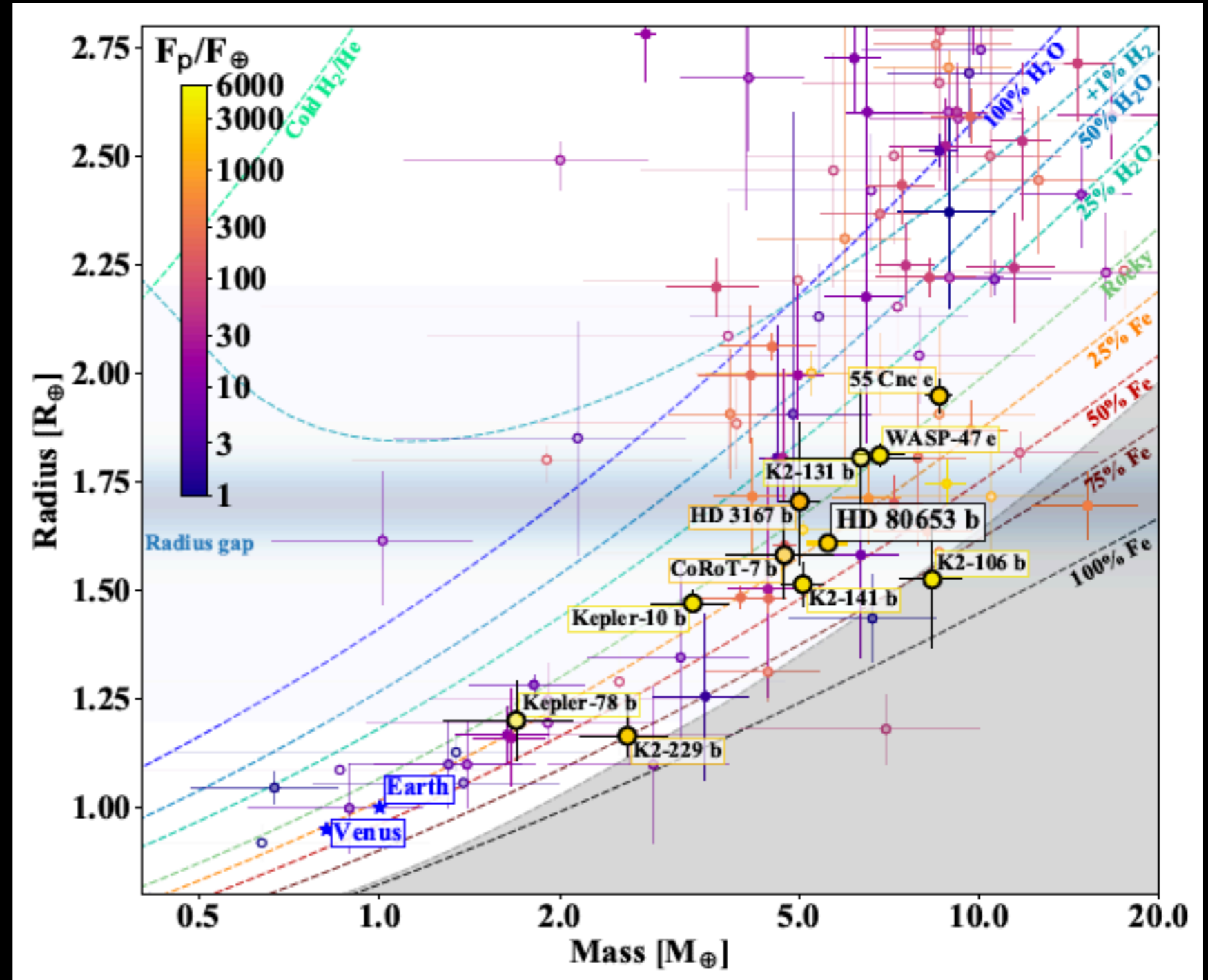
Il telescopio spaziale Kepler (NASA)



Il Telescopio Nazionale Galileo (TNG)

Diagramma massa-raggio dei pianeti di piccola taglia

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

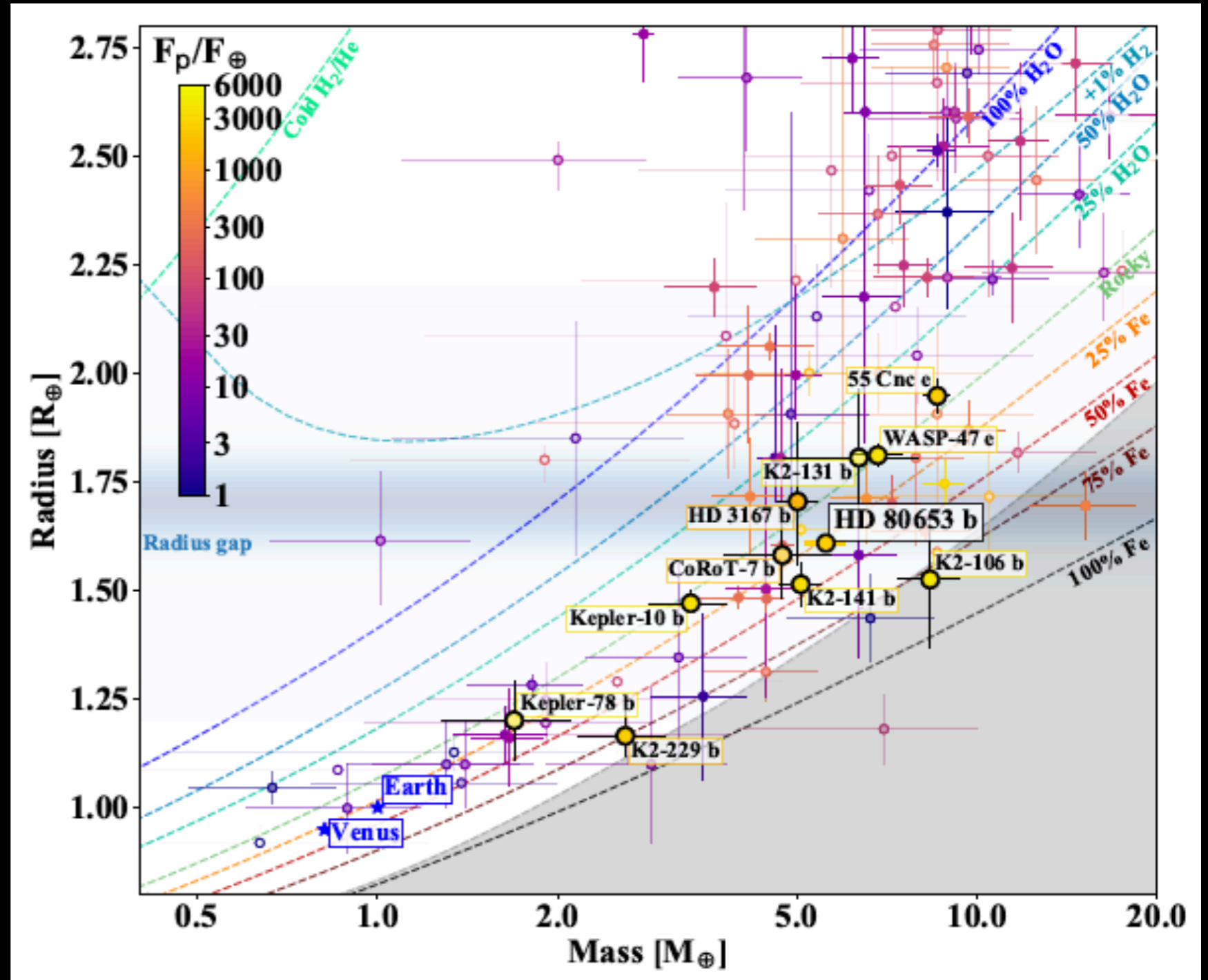


Frustagli et al. 2020 (incl. Bonomo)

Circa la metà di misure precise di massa e densità dei pianeti di piccola taglia sono state effettuate grazie al telescopio italiano Galileo.

Diagramma massa-raggio dei pianeti di piccola taglia

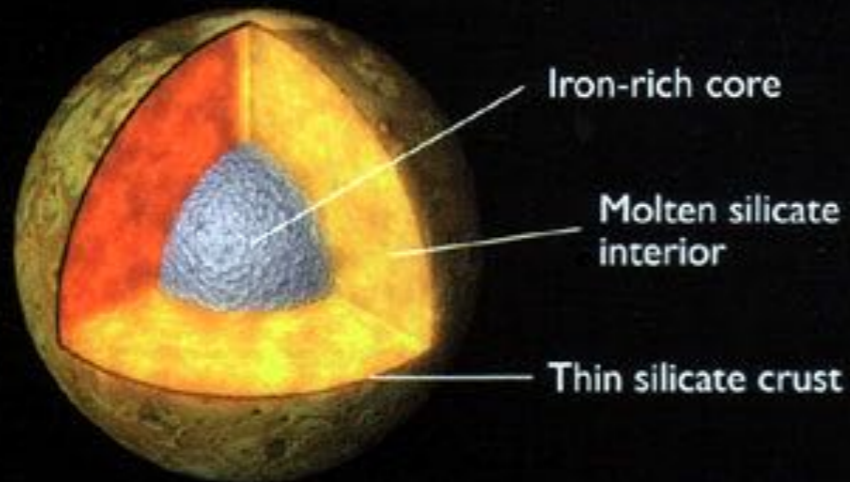
- Linee colorate di iso-composizione
- Colore funzione della temperatura del pianeta
- Composizione terrestre: $\approx 33\% \text{ Fe} + 67\% \text{ MgSiO}_3$



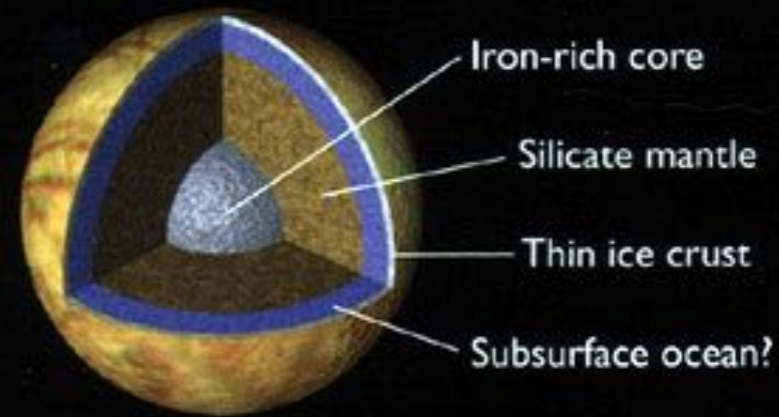
Frustagli et al. 2020 (incl. Bonomo)

Tale diagramma verrà popolato con un numero crescente di pianeti e/o misure sempre più precise dei raggi planetari grazie a TESS e CHEOPS! Ciò permetterà nuove analisi statistiche con un campione di pianeti sempre più grande.

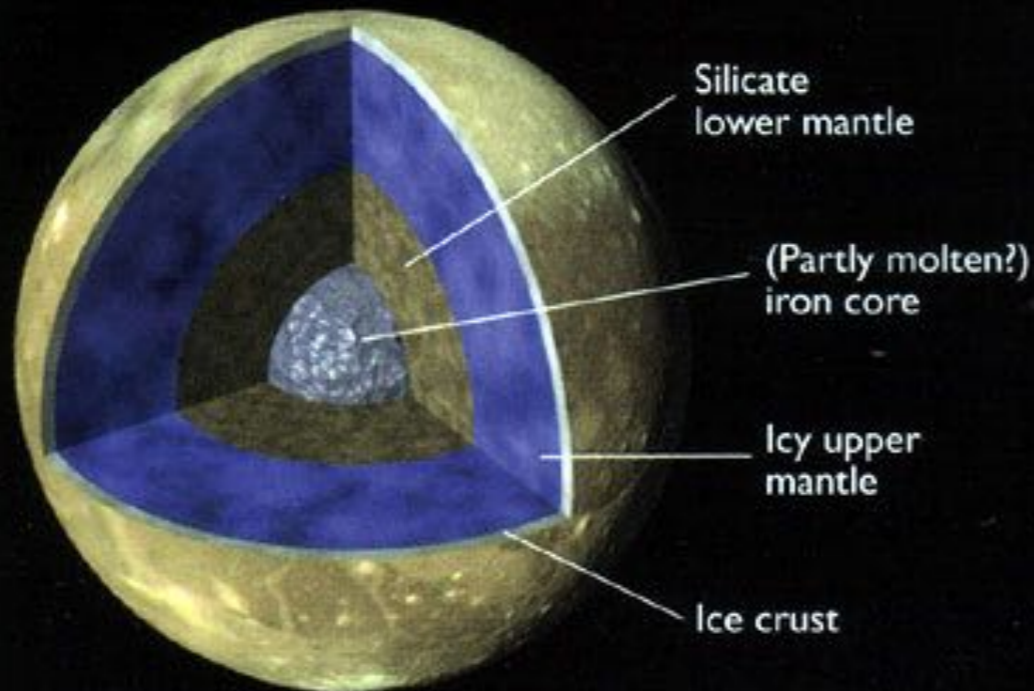
Composizione di alcuni pianeti "abitabili" simile a quella di Ganimede



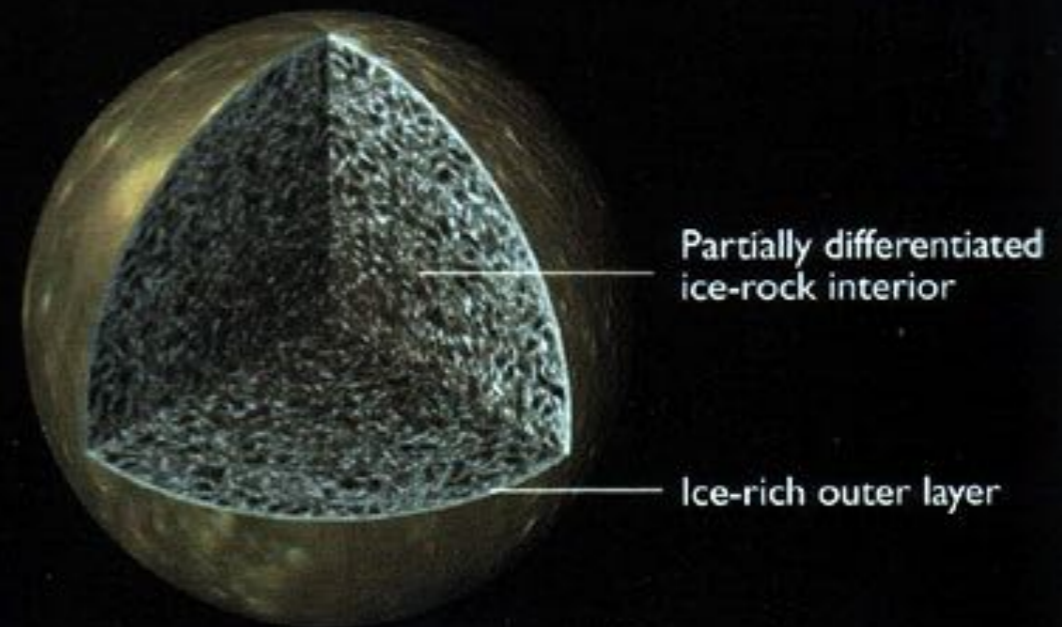
Io



Europa



Ganymede



Callisto

Composizione degli esopianeti e scenari di formazione/evoluzione planetarie

- Origine dei **planeti rocciosi di breve periodo** ($P < 1$ d): hanno perso un'atmosfera primordiale per l'irraggiamento stellare?
- Origine dei **planeti ricchi di ferro**: composizione primordiale o alterata da impatti fra protopianeti che hanno rimosso parte del mantello di silicati (es. Kepler-107c)?
- Origine dei **planeti con elementi volatili**: formati in situ (involuppo gassoso) oppure oltre la linea di condensazione dell'acqua (2-3 AU) con successiva migrazione verso la stella (shell di ghiaccio di acqua ad alta pressione)?
- Composizione tipica dei **planeti "abitabili"**? Terrestri (ad es. LHS-1140b, TRAPPIST-1e) o water worlds (es. K2-3d o K2-18b)?