

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria  
Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

**Caratterizzazione di pianeti extrasolari:**  
Nuove scoperte dalla missione spaziale CHEOPS

Tutor universitario:

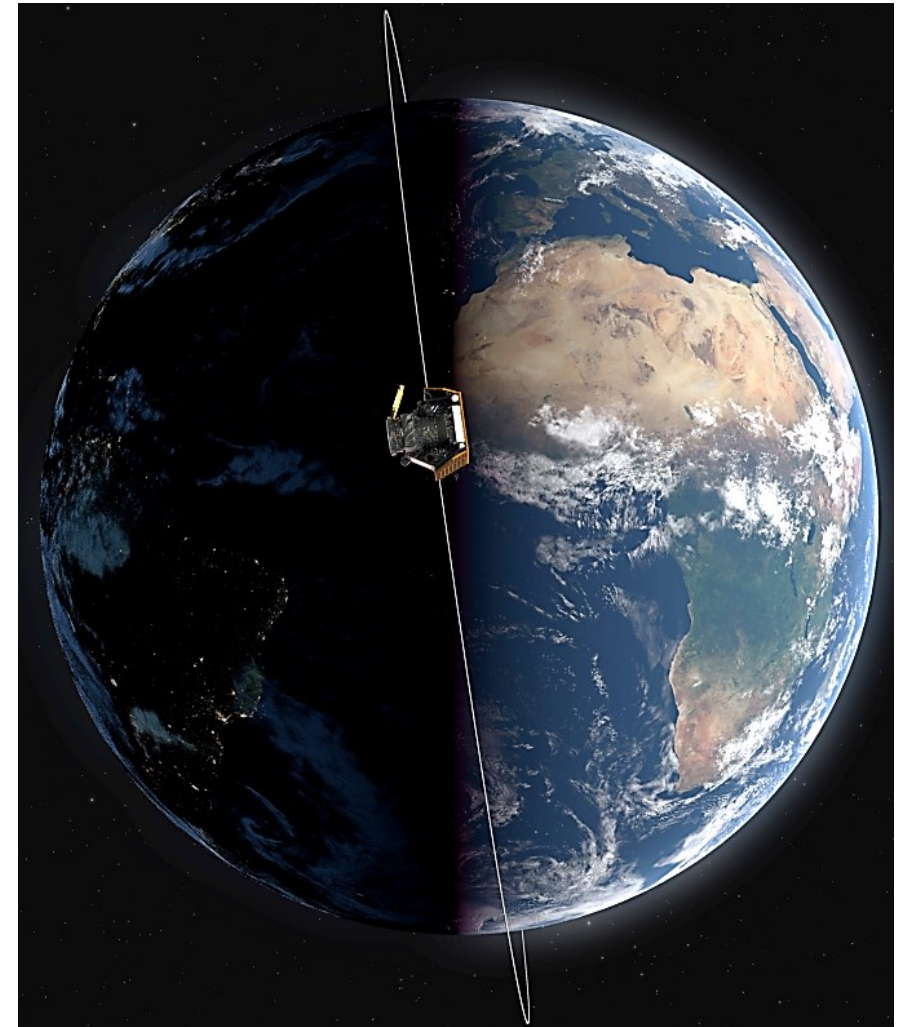
Prof. Malavolta Luca

Laureando:

*Miriana Caporaso*

Padova, 14/07/2022

- Introduzione ai metodi di rilevamento di pianeti extrasolari, con approfondimento del **metodo dei transiti**.
- Missione spaziale «*CHaracterising ExOplanets Satellite*», **CHEOPS**, condotta *dall'European Space Agency (ESA)*, con l'obiettivo di studiare e caratterizzare esopianeti già noti orbitanti stelle luminose.
- Descrizione di un'applicazione della precedente analisi teorica, attraverso le caratteristiche e le tecniche implementate da CHEOPS, in correlazione alle **nuove scoperte** condotte dal telescopio spaziale.



Credit ESA

# Metodi di rilevamento di pianeti extrasolari

Si definisce «**esopianeta**» un corpo celeste che:

- Deve orbitare intorno ad una stella;
- Deve possedere una massa sufficiente da assumere una forma sferica, in condizioni di equilibrio idrostatico;
- Deve aver «ripulito» l'ambiente intorno alla propria orbita.



Classificazione:

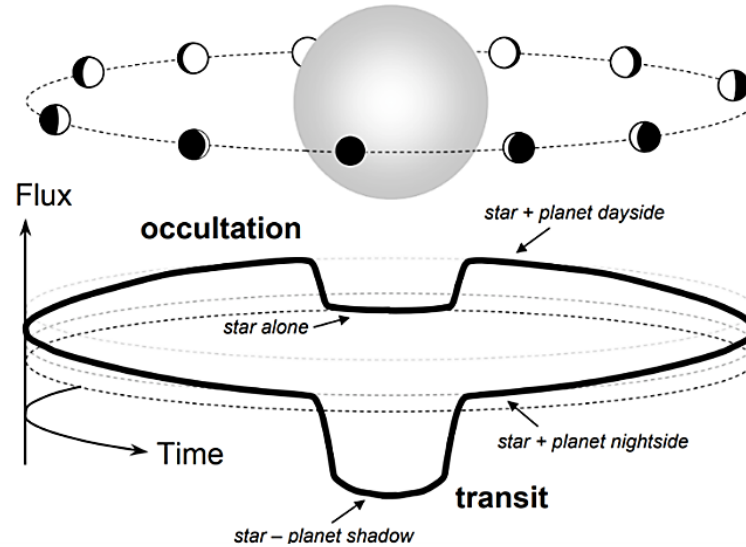
- **Mercuriani**
- **Mini-terre**
- **Terrestri**
- **Superterrestri**
- **Nettuniani**
- **Gioviani**

## 1. Metodo diretto

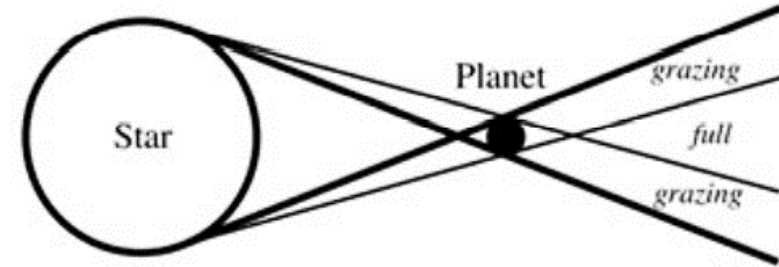
## 2. Metodo indiretti

- Perturbazione gravitazionale del moto stellare
  - *Timing di pulsar*
  - *Velocità radiali*
  - *Metodo astrometrico*
- Variazione del flusso luminoso stellare
  - *Microlensing gravitazionale*
  - **Metodo del transito**

Quando un pianeta orbita intorno ad una stella, se ci si pone in un punto di osservazione fisso, si definiscono due fenomeni: **transito**, se è il pianeta a passare di fronte alla stella, e **occultazione** (o transito secondario), se il pianeta passa dietro la stella.

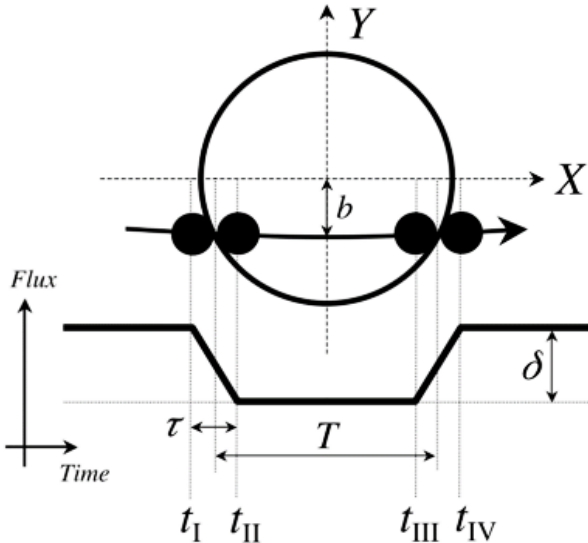


Geometria dell'osservazione stella-pianeta-osservatore:



- Transiti completi
- Transiti radenti

**Parametri per caratterizzare un transito:**



$$\frac{R_p}{R_*} = k \longrightarrow$$

*k* rapporto tra raggio planetario e raggio stellare

$$T = T_{tot} - \tau \longrightarrow$$

$\tau$  durata dell'ingresso o dell'uscita del pianeta  
 $T$  durata effettiva del transito

$$b_{tra} = \frac{a \cos i}{R_*} \left( \frac{1 - e^2}{1 + e \sin \omega} \right)$$

$$b_{occ} = \frac{a \cos i}{R_*} \left( \frac{1 - e^2}{1 - e \sin \omega} \right) \longrightarrow$$

$b$  parametro d'impatto

$$\delta_{tra} \approx k^2 \left[ \frac{I_p(t_{tra})}{I_*} \right]$$

$$\delta_{occ} \approx k^2 \left[ \frac{I_p(t_{occ})}{I_*} \right] \longrightarrow$$

$\delta$  profondità del transito

Orbite *circolari* con eccentricità nulla  $e = 0$

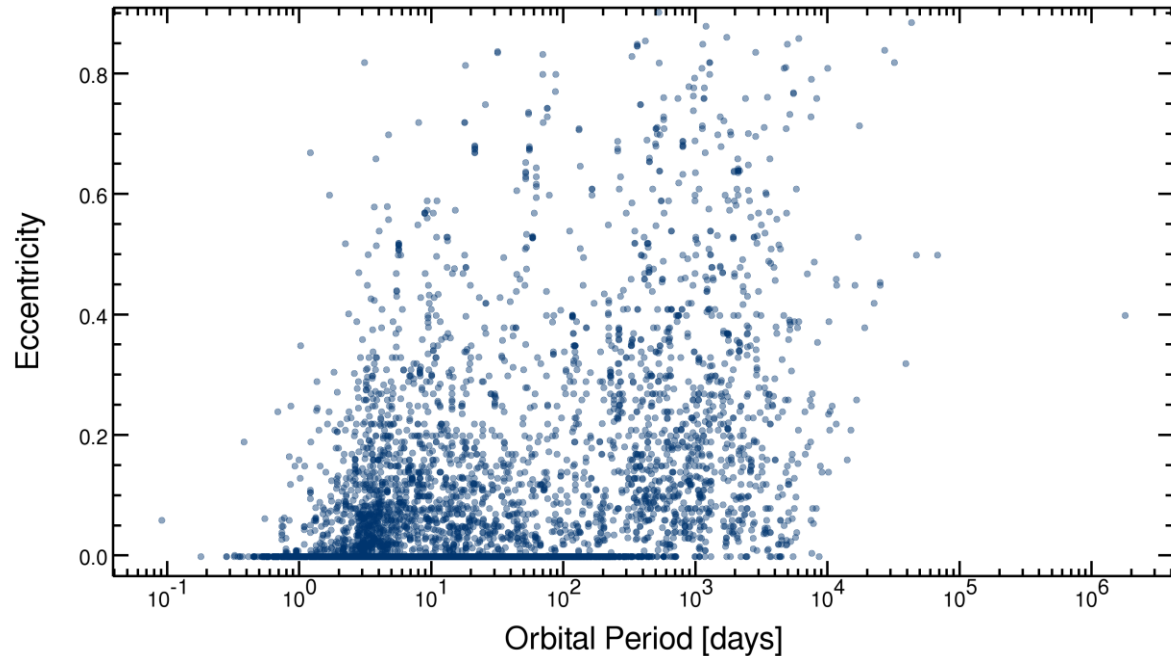
$$T_{tot} = t_{IV} - t_I = \frac{P}{\pi} \sin^{-1} \left[ \frac{R_*}{a} \frac{\sqrt{(1+k)^2 - b^2}}{\sin i} \right]$$

Orbite *ellittiche* con eccentricità  $e \neq 0$

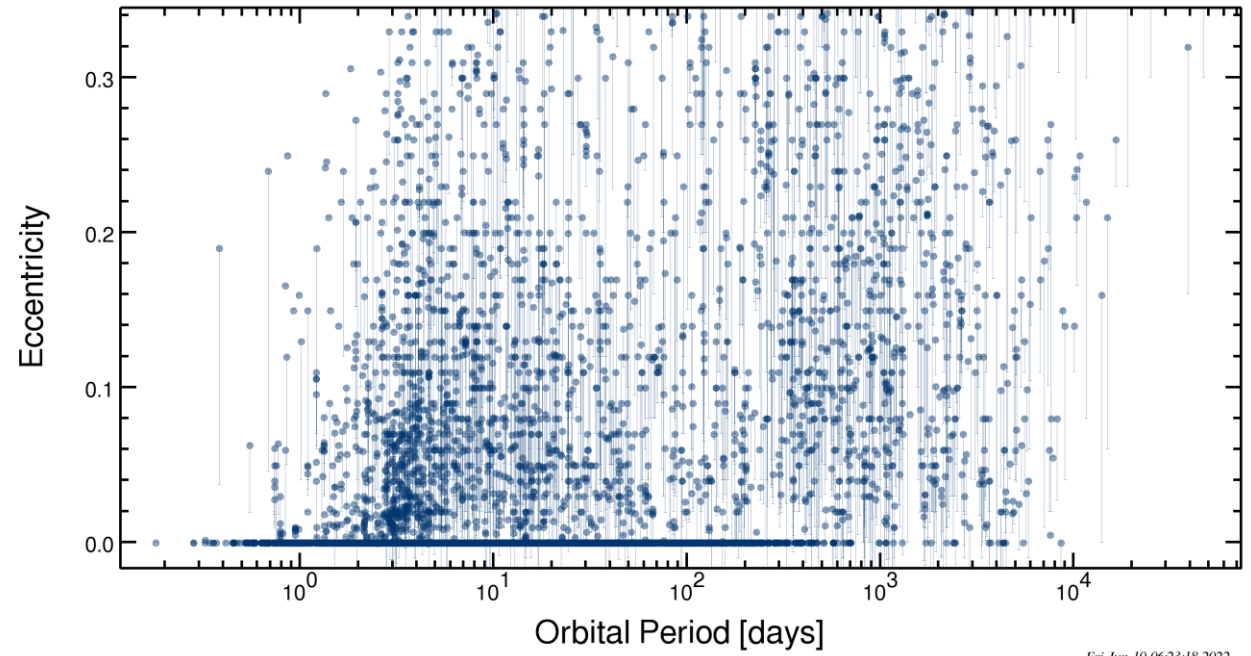
Fattore correttivo  $\rightarrow \frac{\sqrt{1 - e^2}}{1 \pm e \sin \omega}$

Distribuzione dell'*eccentricità* degli esopianeti in funzione del periodo orbitale, con la presenza dell'errore relativo nella misura di  $e$ .

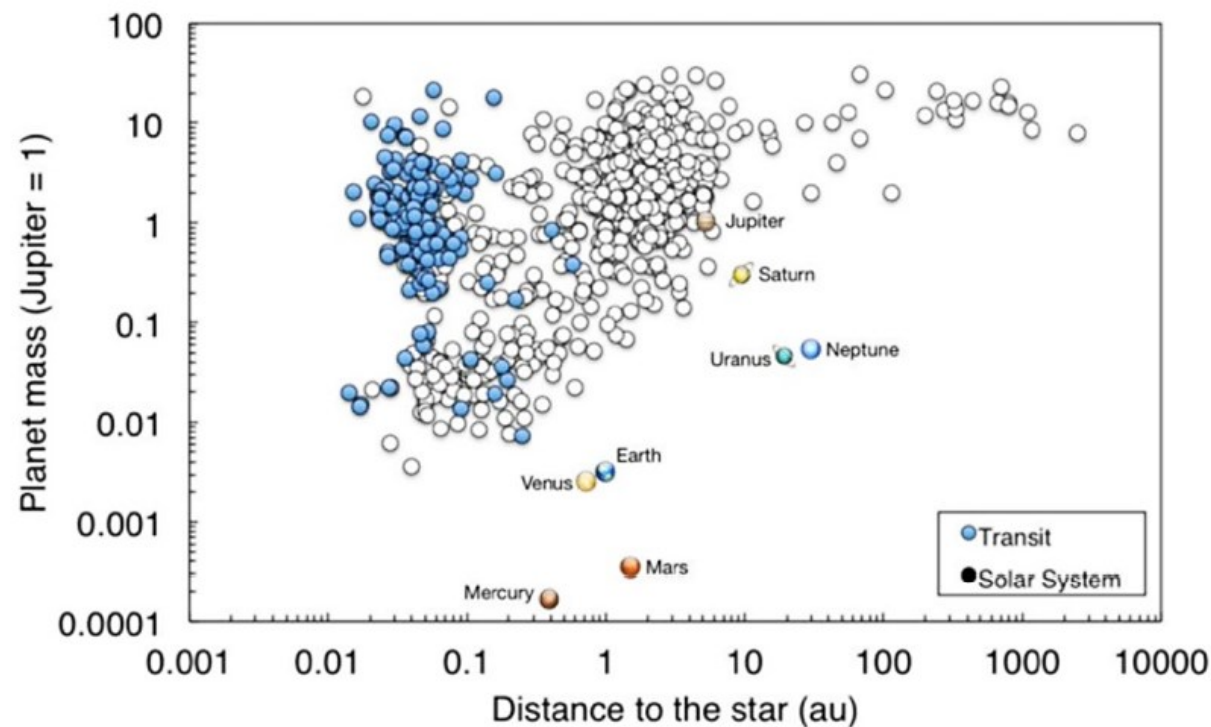
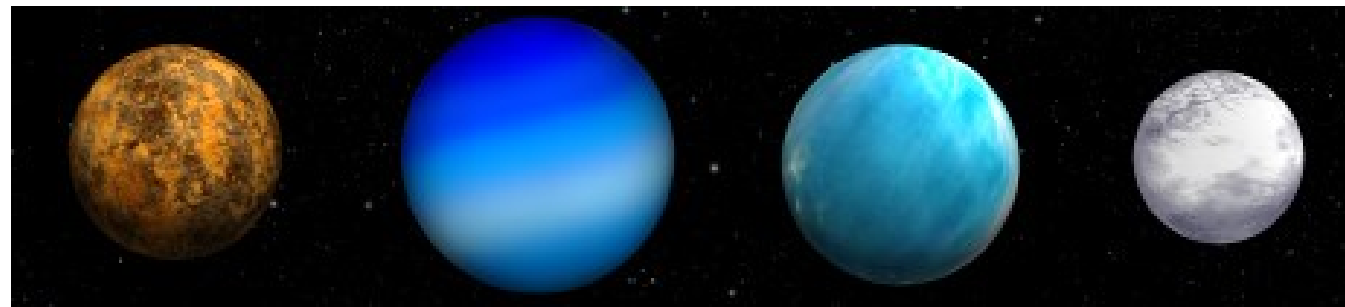
NASA Exoplanet Archive



NASA Exoplanet Archive



**CHEOPS** è un telescopio spaziale dell'European Space Agency (ESA) in orbita intorno alla Terra con l'obiettivo di studiare con precisione e caratterizzare pianeti transitanti, di dimensioni superterrestri e nettuniane.



## OBIETTIVI DI MISSIONE

- Ricerca mirata di transiti, per caratterizzare pianeti superterrestri;
- Miglioramento della misura massa-raggio;
- Caratterizzazione dell'atmosfera planetaria;
- Rilevamento di nuovi esopianeti;
- Stima dell'albedo attraverso le occultazioni.

Nota la **massa** del pianeta, CHEOPS analizza e misura il **raggio** planetario dal transito di quest'ultimo davanti la stella: da queste due informazioni si ottiene la **densità**.

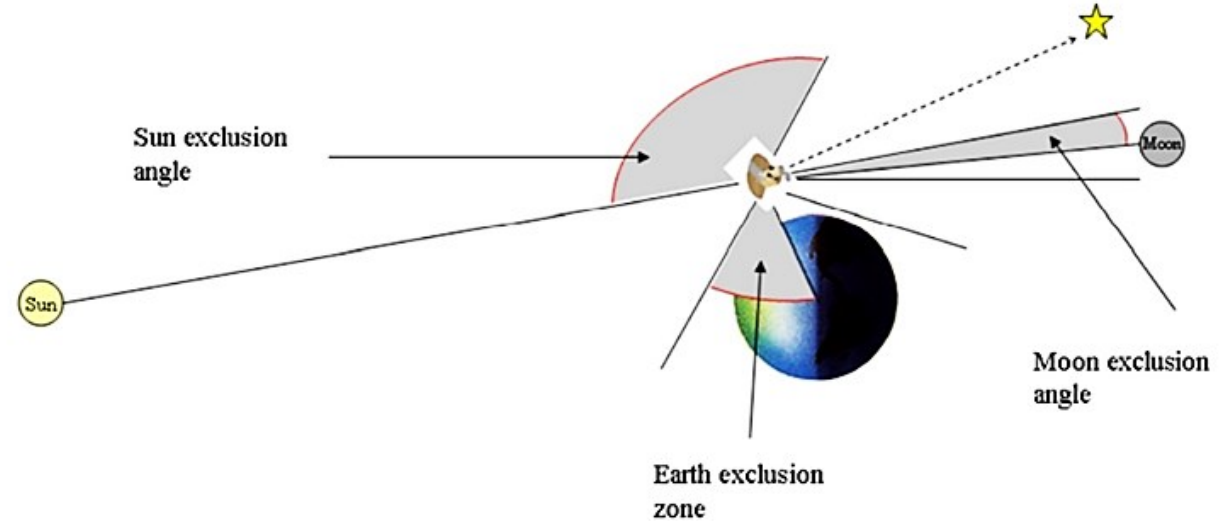
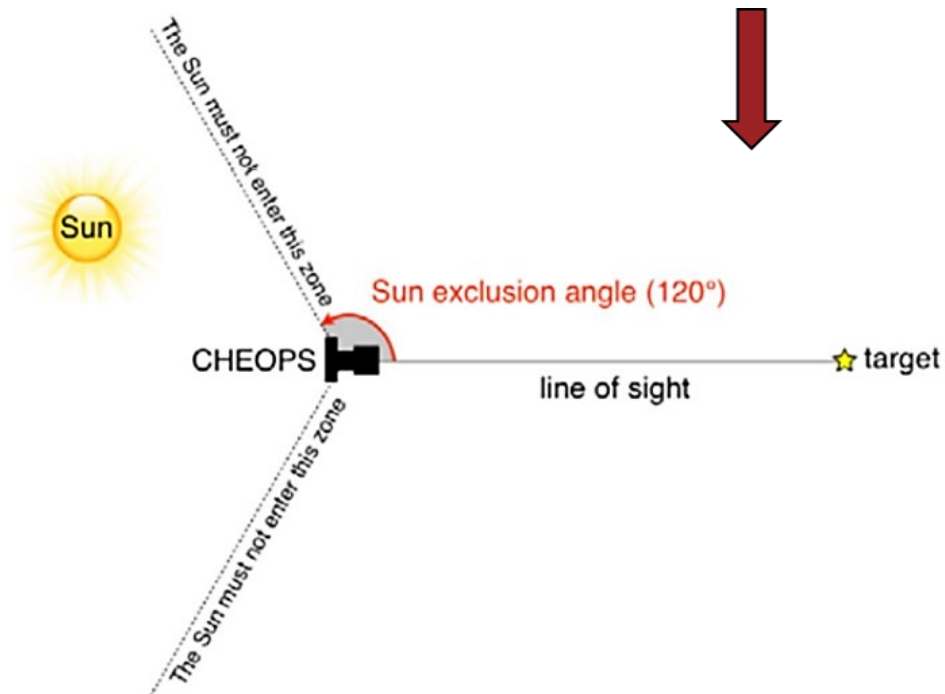
CHEOPS risulta una importante missione *follow-up* che permette di ottenere maggiori informazioni sugli esopianeti.



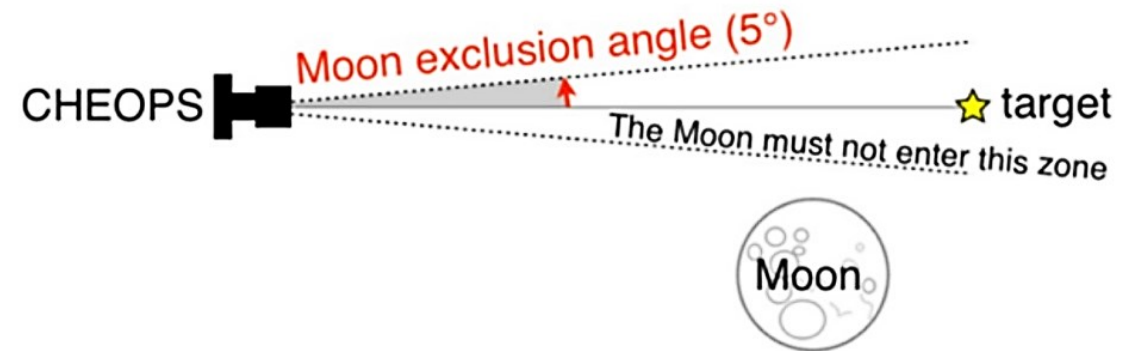
## POSIZIONE ORBITALE DEL SATELLITE

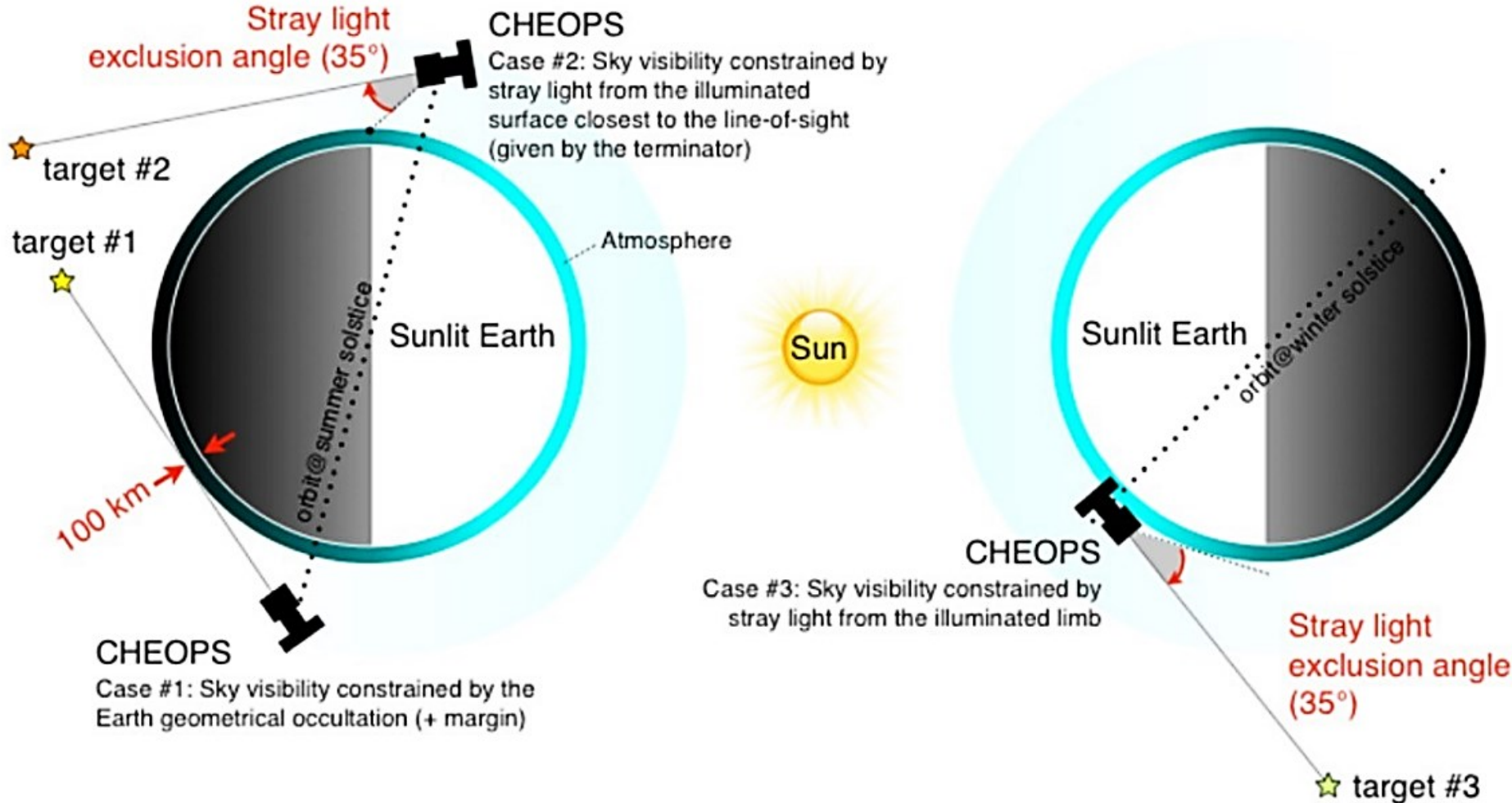
CHEOPS è posto in un'orbita **eliosincrona** dawn/dusk intorno alla Terra a 700 km di altitudine con un periodo di 98.7 minuti.

- Il Sole si deve trovare al di fuori del cono di osservazione del telescopio: esso è misurato da un angolo pari a  $120^\circ$ , definito **angolo di esclusione del Sole**.



- La Luna riflette la luce solare e tale fenomeno deve essere tenuto in considerazione, infatti tale riflessione non deve entrare nel cono di osservazione di ampiezza di  $5^\circ$ , definito **angolo di esclusione della Luna**.





Il target che si osserva deve avere un'altitudine di almeno 100 km dalla superficie della Terra in modo da evitare l'influenza dell'atmosfera terrestre. Il minimo angolo consentito tra linea di osservazione del target e la parte illuminata della superficie è di  $35^\circ$ , definito **angolo di esclusione della luce diffusa**.



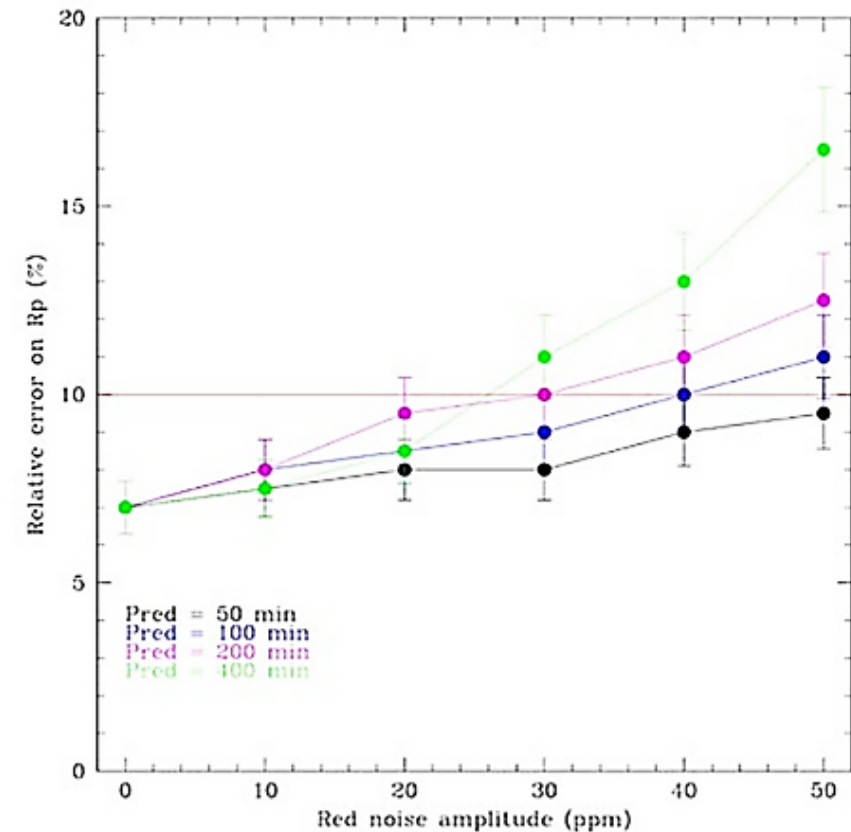
La caratterizzazione di un esopianeta richiede una *misura della massa e del raggio con delle incertezze inferiori al 10%*.

La **precisione fotometrica** di CHEOPS è stata definita attraverso delle simulazioni, sulla base di un numero di parametri planetari di valore minore possibile:

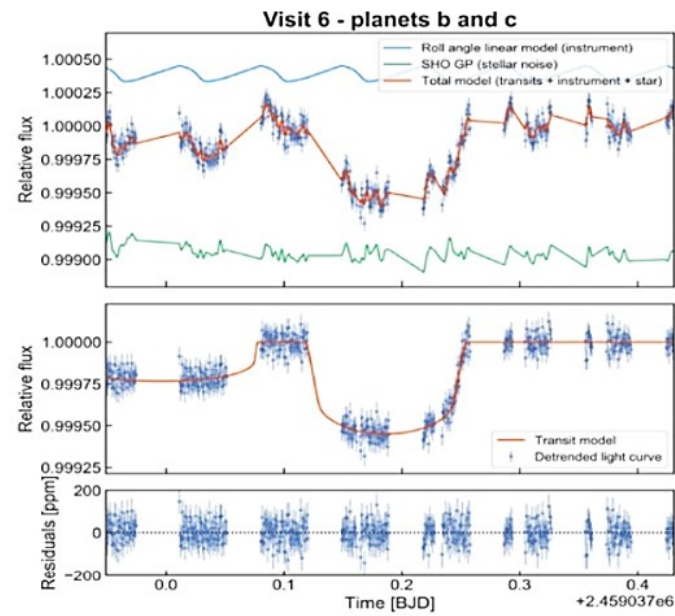
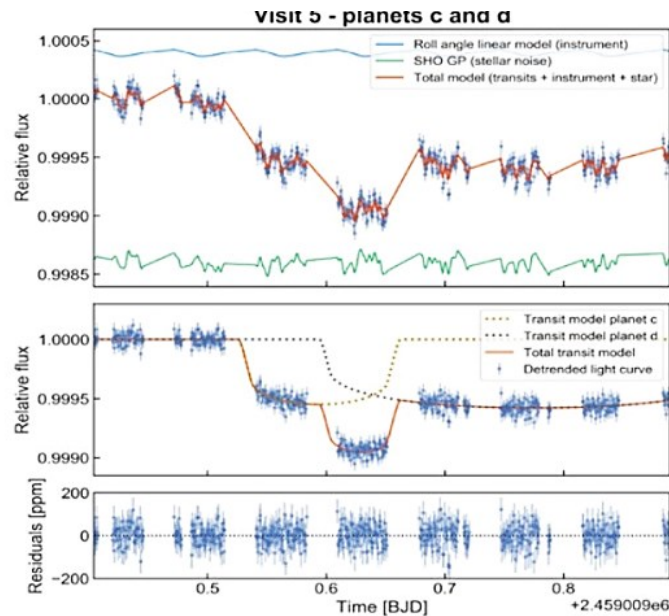
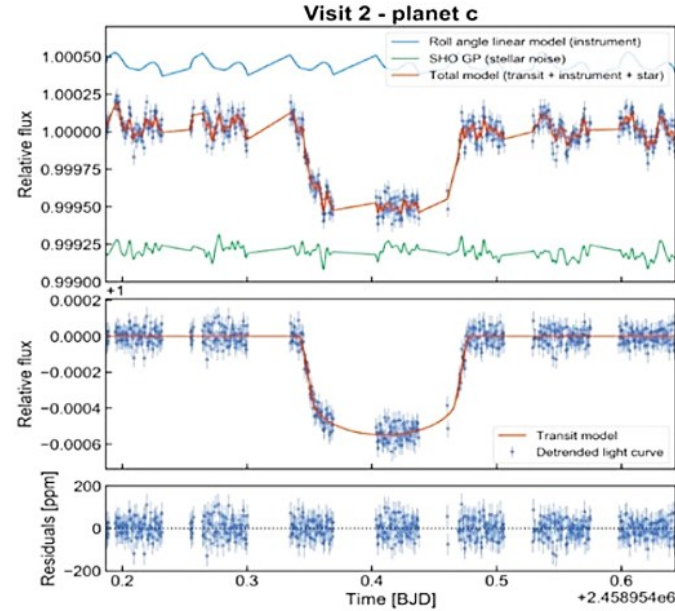
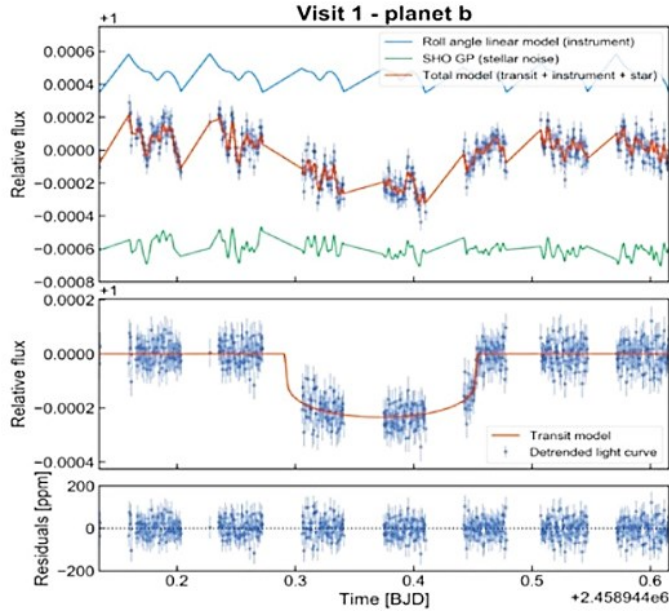
Parameter	Value
Radius of the planet, $R_p$ ( $R_{\oplus}$ )	1
Revolution period of the planet, $P$ (days)	30
Stellar magnitude, $V$ (mag)	8.5
Stellar mass, $M_*$ ( $M_{\odot}$ )	$0.92 \pm 0.045$
Stellar radius, $R_*$ ( $R_{\odot}$ )	$0.94 \pm 0.08$
Stellar effective temperature, $T_{\text{eff}}$ (K)	$5\,500 \pm 50$
Transit impact parameter, $b$	0.25

La minima profondità di transito rilevabile che si ricava con i dati della tabella, risulta:  $\frac{R_p}{R_*} = 95 \text{ ppm}$ .

Rappresentazione dell'errore nella misura del raggio planetario in funzione dell'ampiezza del rumore rosso per diversi periodi di CHEOPS.



Il livello di rumore rosso tollerato nella fotometria di CHEOPS deve essere **< 20 ppm**.

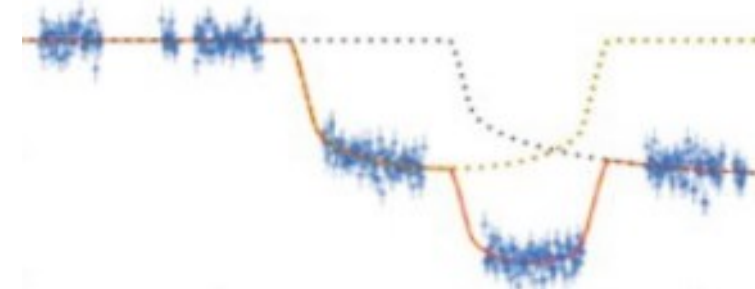


Osservazione di un sistema di 2 pianeti «b» e «c» intorno **HD 136352**, una stella simile al Sole, attraverso diverse «visite» di CHEOPS.



Scoperta di un terzo pianeta «d», attraverso lo studio delle curve di transito.

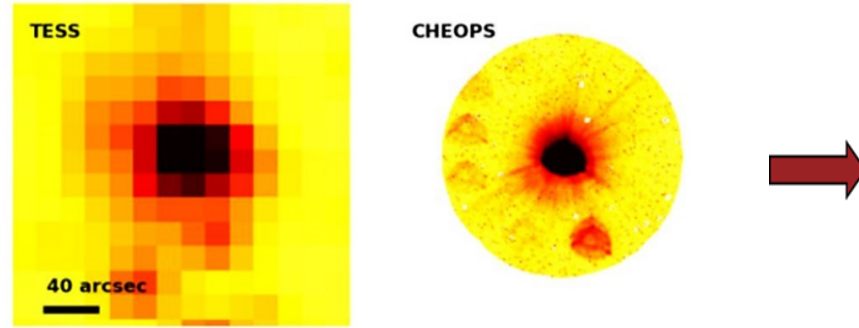
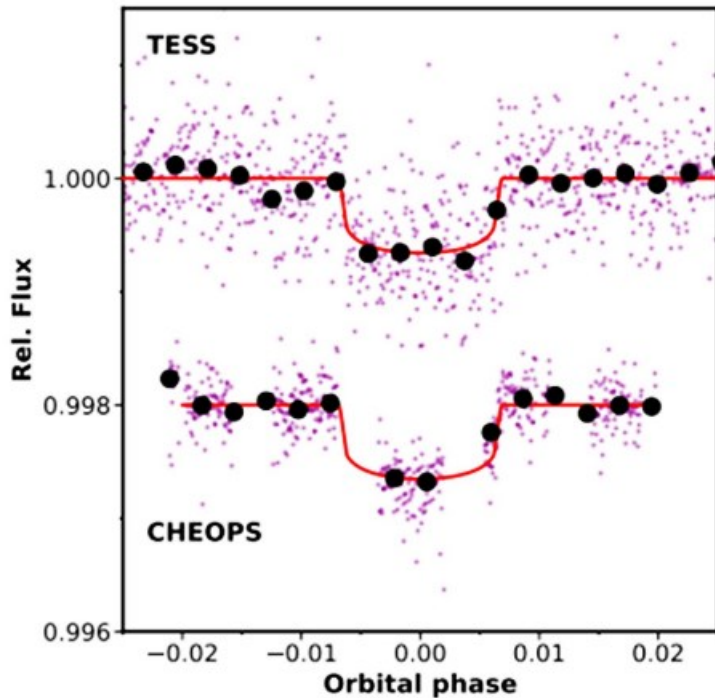
Ingrandimento del fenomeno:



CHEOPS lavora sinergicamente con diverse fonti di dati da Terra e dallo spazio, specialmente con il *Transiting Exoplanet Survey Satellite*, **TESS**, della NASA.



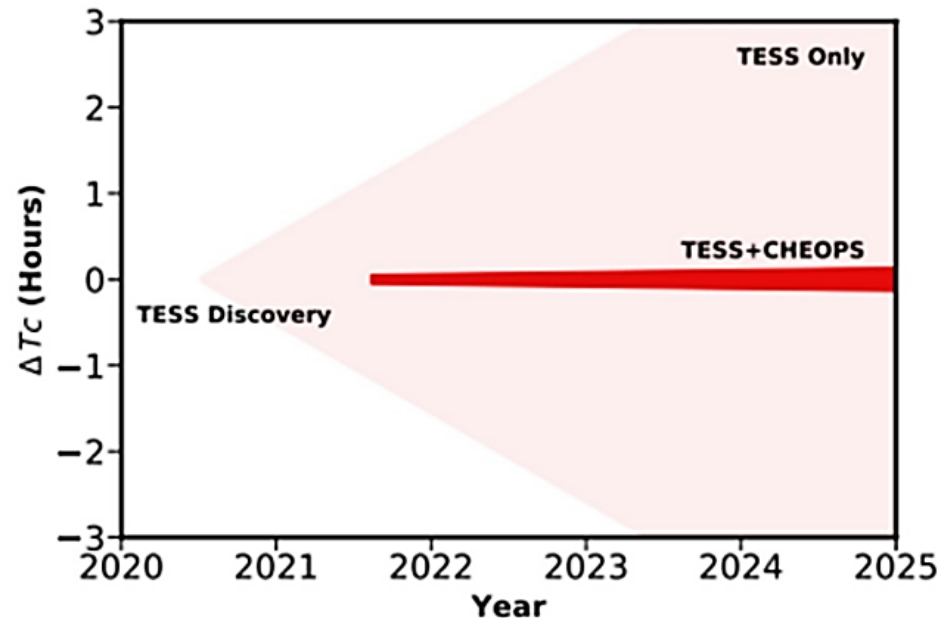
CHEOPS e TESS nello studio di un esopianeta transitante la stella **HIP 94235**.



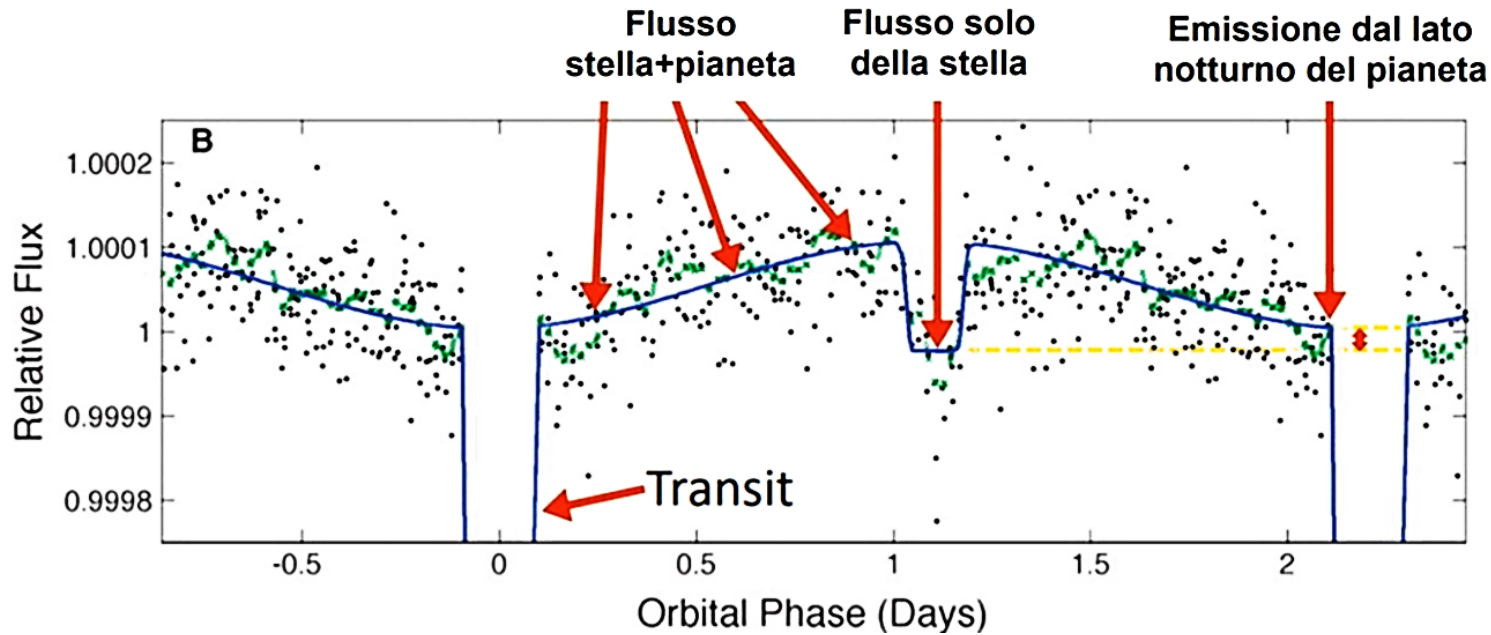
Confronto di precisione della misurazione del target di CHEOPS in relazione alla stessa misura fotometrica effettuata da TESS.

www.dii.unipd.it

Le misure ottenute da *un transito* di CHEOPS corrispondono alle misure ottenute da *10 transiti* con TESS.



Il lavoro congiunto di CHEOPS e TESS permette di ridurre l'errore nella misura del tempo che intercorre tra un transito e il successivo, passando ad un errore di *pochi minuti*.



- Transit del pianeta davanti alla stella
- Pianeta orbita intorno alla stella e riflette una porzione di luce
- Occultazione del pianeta dietro la stella
- Conclusione del periodo orbitale

$$\delta_{occ} \approx k^2 \left[ \frac{I_p(t_{occ})}{I_*} \right]$$

Si può definire  $\delta$  in termini di  $\lambda$  lunghezza d'onda, assumendo la stella e il pianeta come due corpi neri:

$$\delta_{occ}(\lambda) = k^2 \frac{B_\lambda(T_p)}{B_\lambda(T_*)} \rightarrow k^2 \frac{T_p}{T_*}$$

Si può ricavare la **temperatura del pianeta  $T_p$** .



Se ci si concentra solo sulla radiazione riflessa, la profondità di occultazione risulta:

$$\delta_{occ}(\lambda) = A_\lambda \left( \frac{R_p}{a} \right)^2$$

Si può ricavare l'**albedo geometrico  $A_\lambda$** .

Dove  $B_\lambda(T)$  è la funzione di Plank:  $B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda k_B T)} - 1} \rightarrow \frac{2ck_B T}{\lambda^4}$

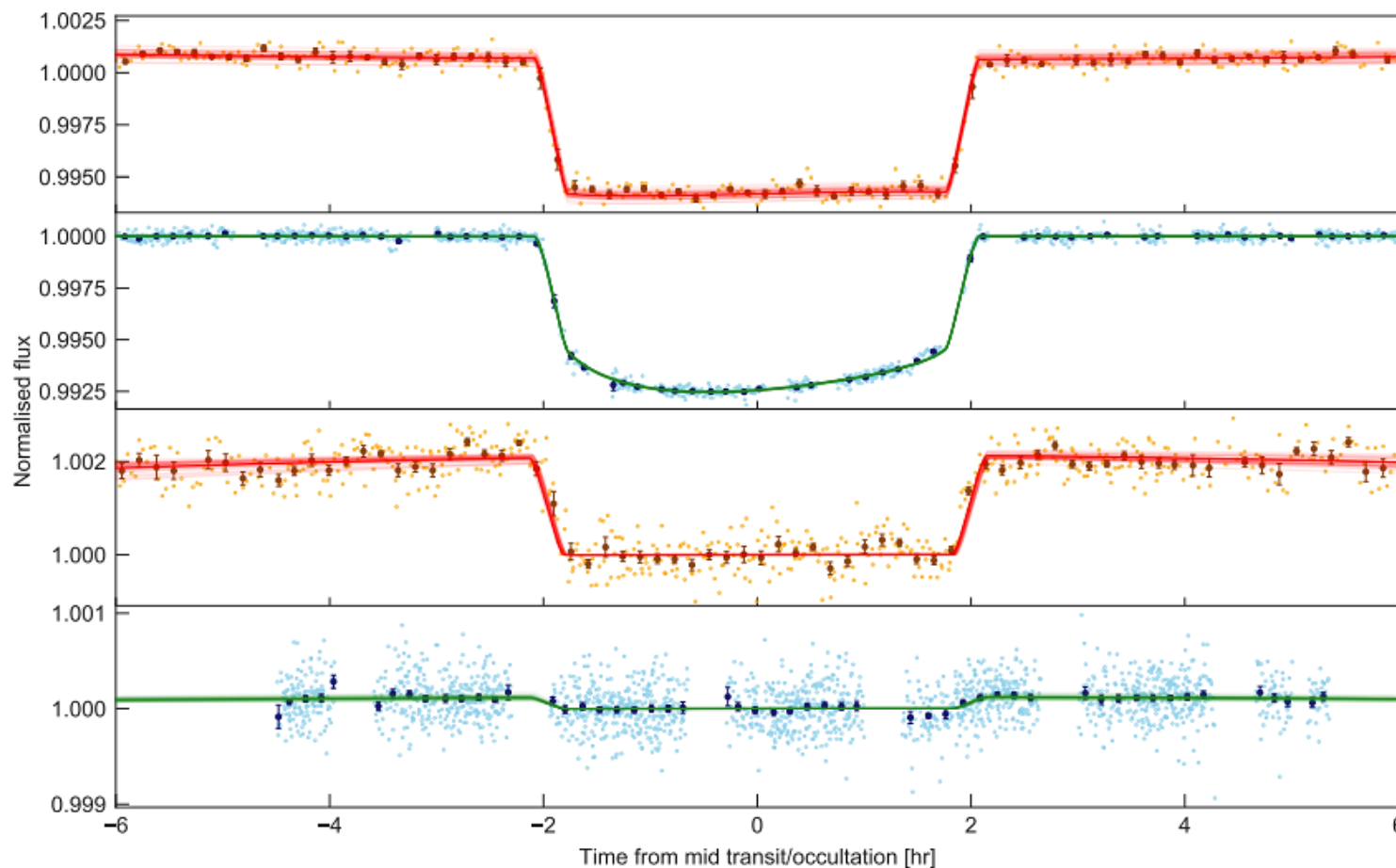
Interazione tra CHEOPS e *Spitzer Space Telescope*, **SST**, un satellite NASA per osservazioni spaziali, operativo fino al 2020.



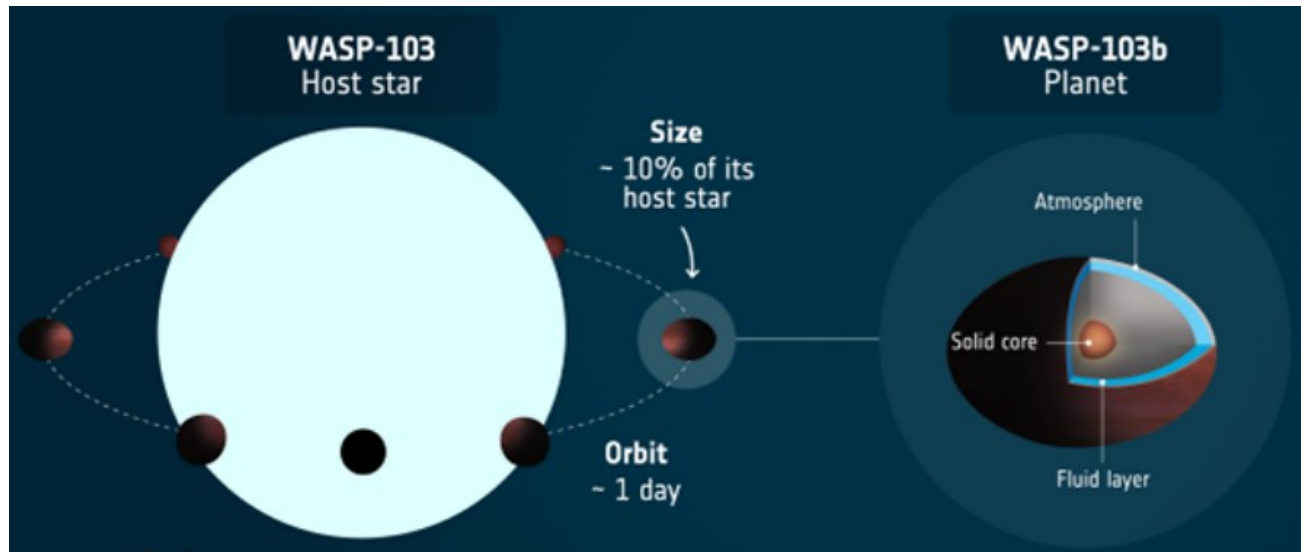
SST fornisce misure nell'infrarosso e comporta delle differenze con CHEOPS, sulla base delle lunghezze d'onda rilevate dal flusso luminoso.



Visualizzazione del transito con Spitzer e CHEOPS e dell'occultazione con Spitzer e CHEOPS del pianeta caldo gioviano **Mascara 1-b**, che orbita intorno la sua stella Mascara 1.

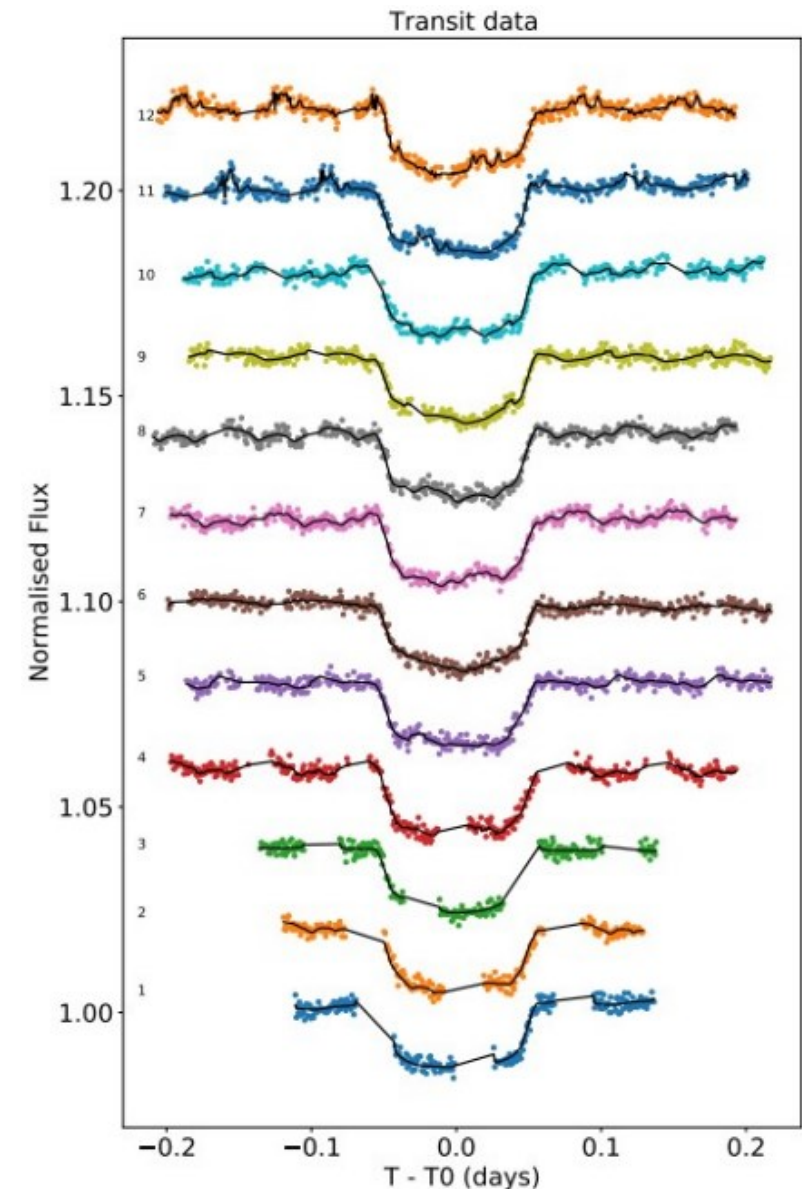


Osservazione da parte di CHEOPS dell'esopianeta **WASP-103b** attraverso 12 transiti intorno la sua stella.



Caratteristiche del pianeta:

- 1.5 volte la massa di Giove
- 2 volte il raggio di Giove
- 20 volte più caldo di Giove
- Orbita di 1 giorno
- Deformazione della struttura del pianeta



Ovunque nell'universo è possibile trovare pianeti transitanti la loro stella. La *vastità* e la *varietà* dei pianeti fuori dal sistema solare forniscono informazioni cruciali rispetto ciò che non si conosce: ci si aspetta che le stelle e i loro rispettivi sistemi di pianeti siano simili a quello che ci circonda, ma ci si rende conto che in realtà nell'universo *tutto è possibile*.