

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale
La ricerca di esopianeti transitanti da
spazio: un confronto tra Kepler, TESS
e PLATO

Tutor universitario: Prof. Luca Malavolta

Laureanda: *Delia Visconi*

Padova, 9/03/2022

1. Metodo delle velocità radiali
2. Metodo dei transiti
3. Missioni Kepler, TESS e PLATO
4. Conclusione: breve confronto tra le missioni

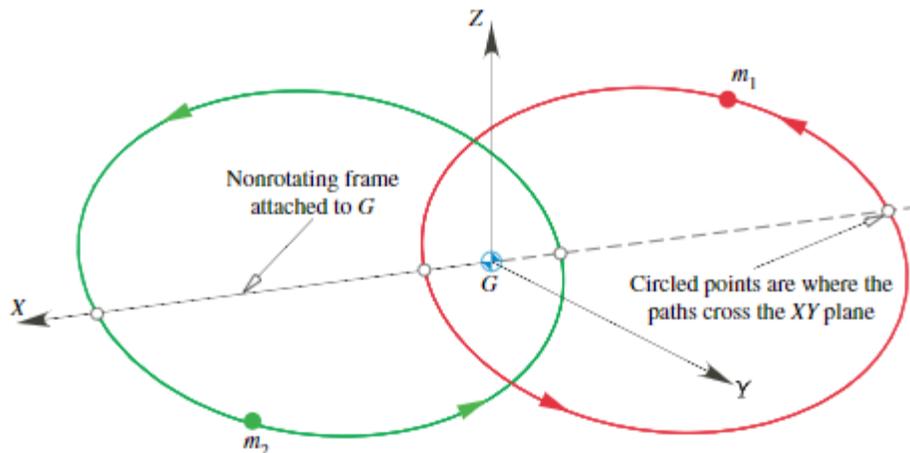
EFFETTO DOPPLER

(relatività speciale)

$$\lambda_{obs} = \lambda_0 \frac{1 + \frac{1}{c} \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow v \cos \theta \approx \left(\frac{\lambda_{obs} - \lambda_0}{\lambda_0} \right) c$$

k: vettore unitario che definisce la direzione dall'osservatore alla sorgente nel sistema di riferimento dell'osservatore

θ : angolo compreso tra il versore **k** e la velocità **v**



(fonte: Curtis, Orbital Mechanics for engineering students)

PROBLEMA DEI DUE CORPI

Sistema di riferimento: coordinate cartesiane con origine nel centro di massa e asse x parallelo alla direzione del pericentro.

θ : anomalia vera

In coordinate perifocali la velocità $\dot{\mathbf{r}}_*$ diventa:

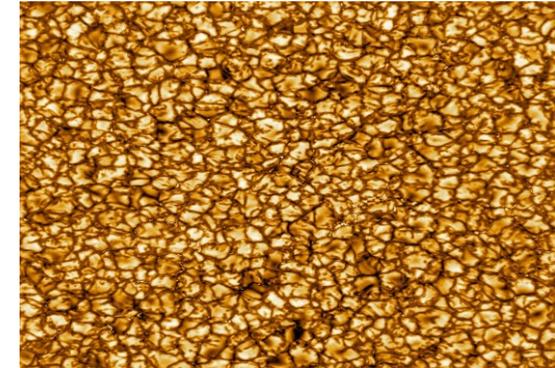
$$\dot{\mathbf{r}}_* \cdot \mathbf{k} = \sqrt{\frac{Gm_p^2}{m_p + m_*} \frac{1}{a(1 - e^2)}} \begin{pmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta + e \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sin \omega \sin i \\ \cos \omega \sin i \\ \cos i \end{pmatrix}$$

$$v_{r,*} = \sqrt{\frac{G}{(m_* + m_p)a(1 - e^2)}} m_p \sin i \cdot (\cos(\omega + \theta) + e \cos \omega)$$

ω : argomento del pericentro: angolo compreso tra la linea dei nodi e la direzione del pericentro

i : inclinazione: angolo compreso tra il piano orbitale e il piano della linea di vista

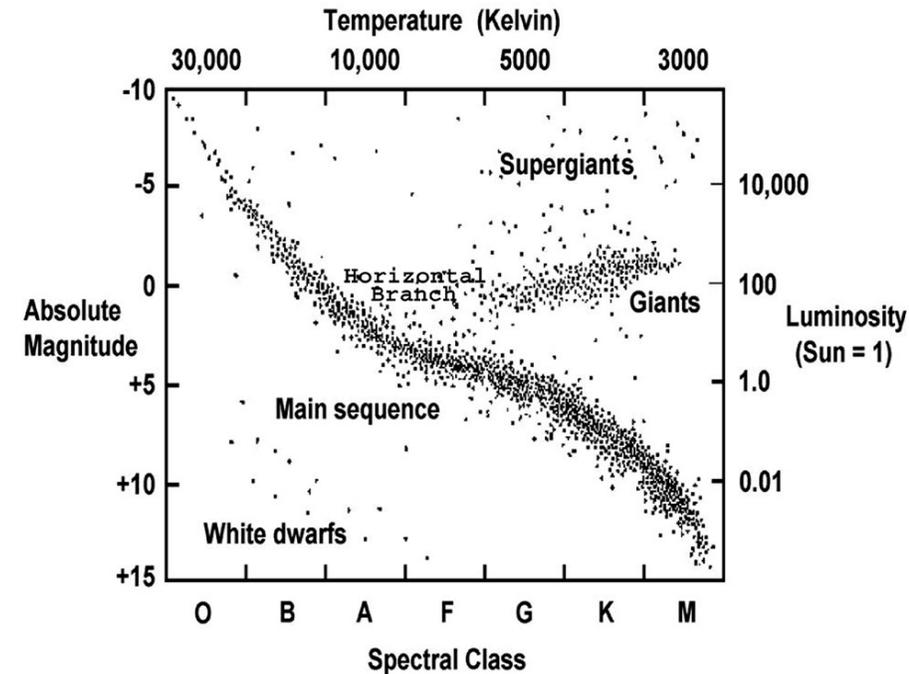
$$v_{r,*} = \sqrt{\frac{G}{(m_* + m_p)a(1 - e^2)}} m_p \sin i \cdot (\cos(\omega + \theta) + e \cos \omega)$$



www.dii.unipd.it

- Dipendenza dall'inclinazione:

$$f(i)di = \sin i di$$
- RAAN non nota
- Limitazioni dovute alle strumentazioni: dalla Terra risulta complicata la lettura dello spettro nel campo mid-IR (dove emettono le stelle massicce)
- Dipendenza dalla temperatura efficace della fotosfera:
 - se $T > 10\,000\text{ K}$ gli elementi chimici risultano parzialmente ionizzati e le linee di opacità sono trascurabili
 - se $T < 3500\text{ K}$ le linee spettrali sono troppo dense e difficili da identificare.
- Guscio convettivo con oscillazioni p – mode sulla loro superficie;
- Granulazioni sulla fotosfera della stella;
- Presenza di campi magnetici sulla superficie della stella.



(a. granulazione, fonte: Wikipedia,
b. Diagramma H-R, fonte: Chandra X-ray
observatory)

Sistema di riferimento centrato nella stella, con X e Y che definiscono il piano celeste e Z rivolto verso lo spettatore

Ascensione retta del nodo ascendente = 180° .

Parametri in congiunzione:

- Anomalia vera

$$\theta_{tra} = +\frac{\pi}{2} - \omega, \theta_{occ} = -\frac{\pi}{2} - \omega$$

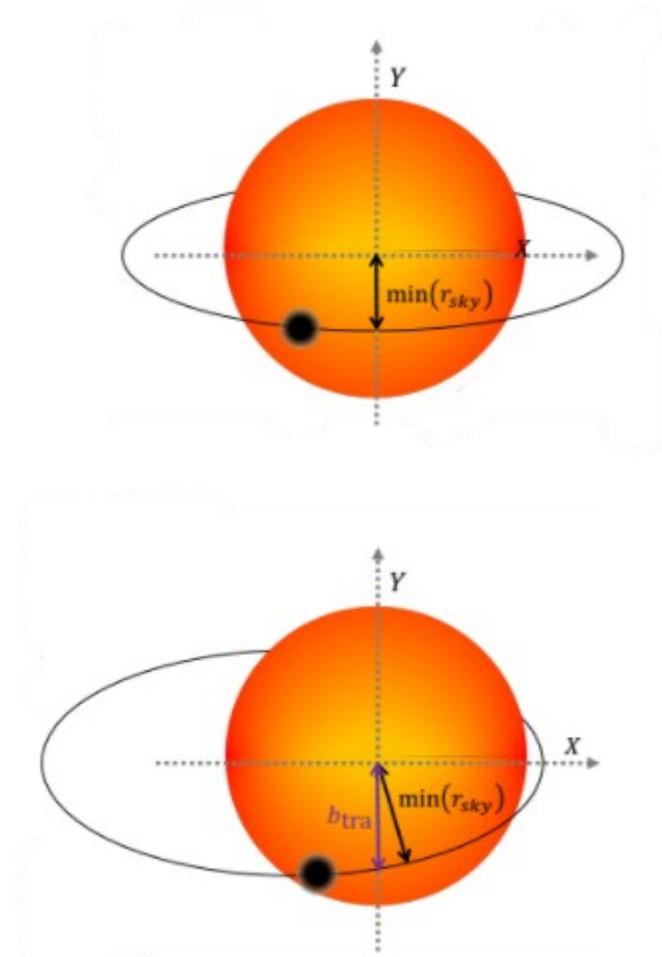
- Parametro di impatto: la distanza proiettata nel piano XY nelle condizioni di congiunzione

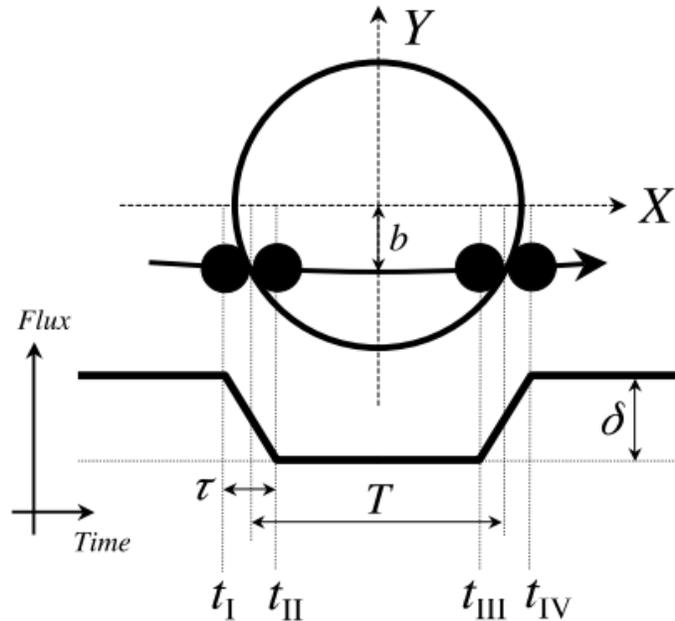
$$b_{tra} = \frac{\text{acos } i}{R_*} \left(\frac{1 - e^2}{1 + e \sin \omega} \right)$$

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

- Rapporto tra il raggio del pianeta e il raggio della stella k

$$\begin{cases} X = -r \cos(\omega + \theta) \\ Y = -r \sin(\omega + \theta) \cos i \\ Z = -r \sin(\omega + \theta) \sin i \end{cases}$$





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

$\tau = t_{II} - t_I = t_{IV} - t_{III}$ parametro di ingresso/uscita del disco planetario

$$T = T_{TOT} - \tau$$

Intervallo di tempo tra la metà del tempo di ingresso e la metà del tempo di uscita

Orbita circolare ($R_* \ll a, b \ll 1 - k$)

$$T \approx T_0 \sqrt{1 - b^2}, \quad \tau \approx \frac{T_0 k}{\sqrt{1 - b^2}}$$

$$T_0 \equiv \frac{R_* P}{\pi a}$$

Orbita ellittica: si moltiplicano le relazioni appena trovate per

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

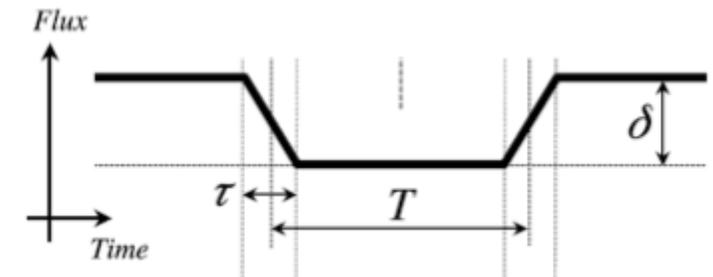
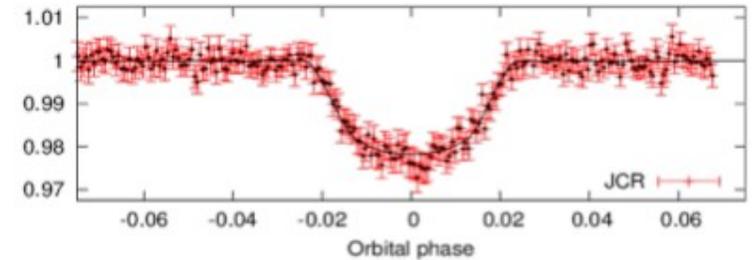
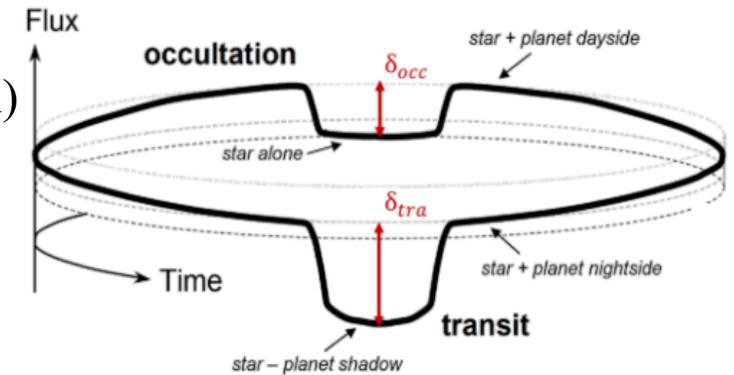
$$F(t) = F_*(t) + F_p(t) - \begin{cases} k^2 \alpha_{tra} F_*(t) & \text{(flusso proveniente da un transito)} \\ 0 & \text{(flusso in assenza di condizioni di eclissi)} \\ \alpha_{occ} F_p(t) & \text{(flusso proveniente da un'occultazione)} \end{cases}$$

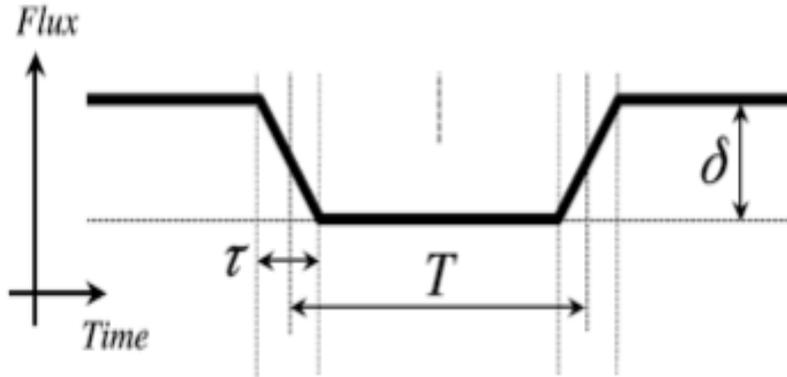
I coefficienti dipendono dalla sovrapposizione del disco stellare e del disco planetario.

Perdita massima di luminosità:

$$\delta_{tra} \approx k^2 \left[1 - \frac{I_p(t_{tra})}{I_*} \right] \approx k^2 = \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2$$

Se l'intensità luminosa del lato in ombra del pianeta è trascurabile
Rispetto all'intensità luminosa della stella





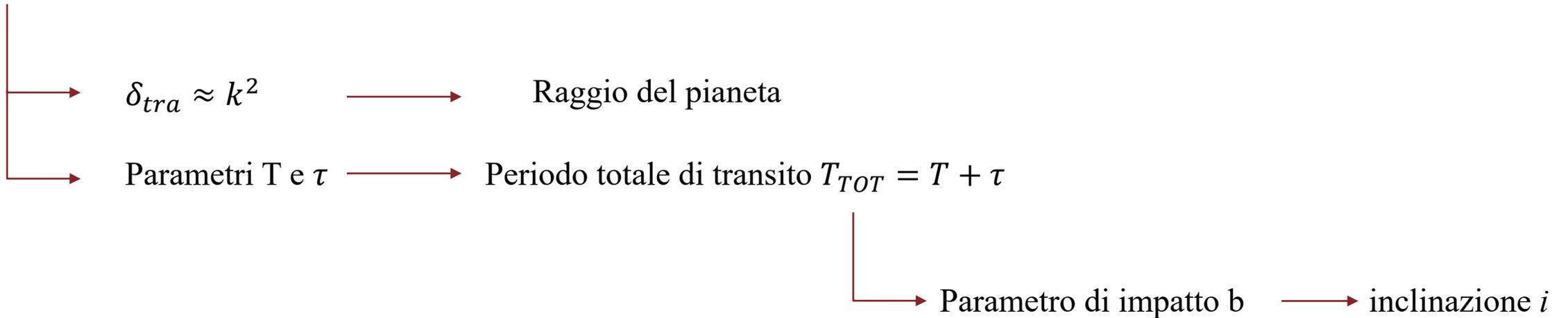
Curva di luce dovuta al metodo dei transiti

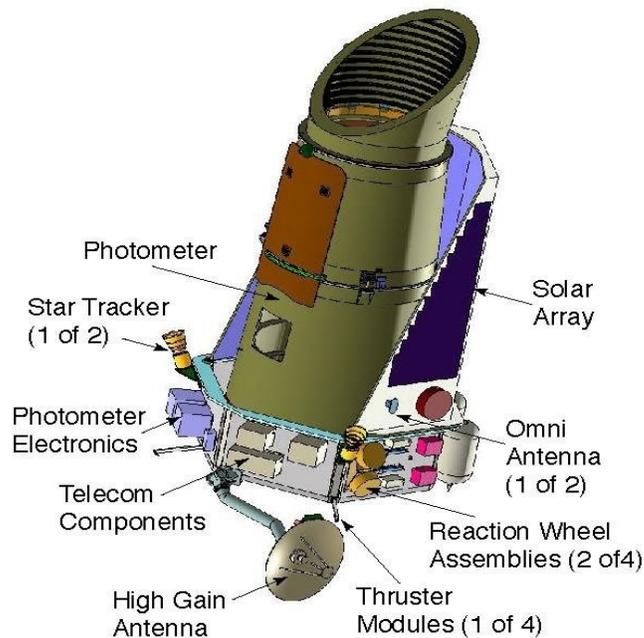
+

Informazioni dalla metodo delle velocità radiali

+

Informazioni sulla luminosità e caratteristiche della
fotosfera tramite altri metodi (come la fotometria)





- Determinare della percentuali di Terre e Super – Terre nella zona di abitabilità orbitanti intorno ad un’alta varietà di stelle tramite il metodo dei transiti
- Determinare le caratteristiche degli *hot Jupiters* già osservati tramite altri metodi
- Orbita ETHO: essendo lontana dalla Terra, si riduce l’azione delle coppie di disturbo e fornisce una maggiore precisione di puntamento al telescopio.

Telescopio e apertura

Telescopio Schmidt con 95 cm di diametro

CCDs

42 CCDs disposte in moduli da quattro con l’eccezione delle due camere centrali

Frequenza di readouts

30 minuti in long cadence, 59 secondi in short cadence

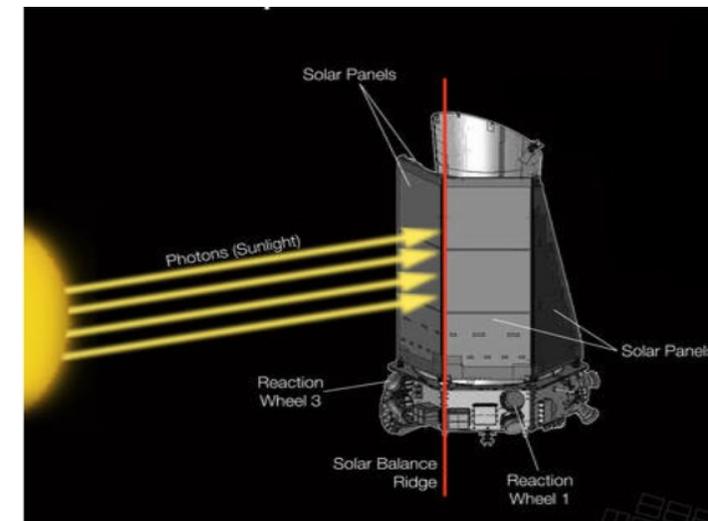
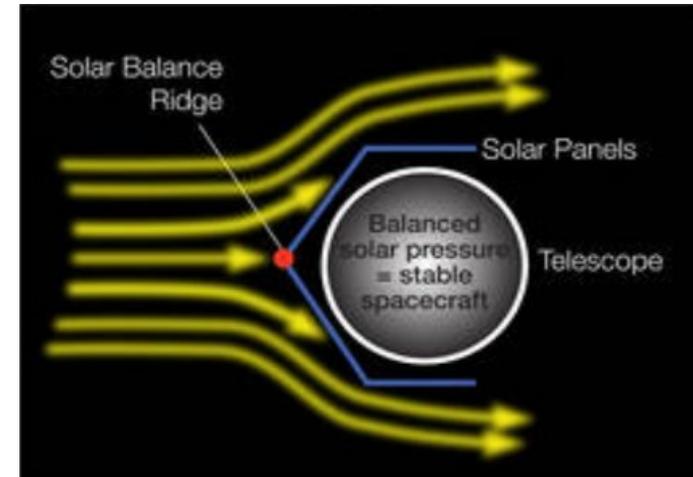
Magnitudine delle stelle

7 – 12 mag, per evitare di bruciare la strumentazione.

Field of view

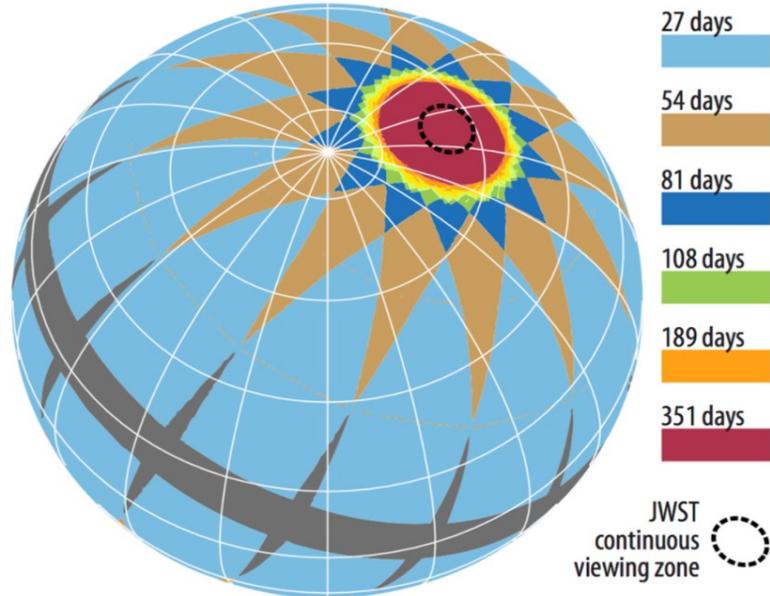
Regione del cigno, a 13.5° al di sopra dell’equatore galattico, influenzato dal sun avoidance angle di 55°.

- 4 aprile 2009: il telescopio entra ufficialmente in funzione
- 24 luglio 2012: rottura della ruota di reazione RWA2 in ridondanza
- 15 maggio 2013: rottura della ruota di reazione RWA4
- 17 aprile 2014: viene scoperto il primo pianeta di dimensioni paragonabili a quelle della Terra nella zona di abitabilità, Kepler – 186f
- 16 maggio 2014: viene ufficializzata la missione K2: è dunque richiesto un cambio di FOV ogni 83 giorni tramite rotazione dello spacecraft
- 30 ottobre 2018: conclusione ufficiale della missione, con un totale di 2600 pianeti potenzialmente in grado di ospitare la vita.



In figura: Funzionamento ibrido di K2 (fonte: NASA)

TESS 2-year sky coverage map



- Obiettivi di missione: ricerca di pianeti esterni con il metodo dei transiti
- Orbita HEO al di sopra della magnetosfera terrestre e delle fasce di Van Halen, raggiunta tramite un ΔV impartito al lanciatore di 3 km/s per la manovra di cambio piano
- Satellite deploabile controllato a tre assi, che durante la pausa di sedici ore al perigeo viene controllato tramite sistema propulsivo a idrazina per contrastare il momento angolare di 1.5 Nm dovuto alla pressione solare

Telescopio e apertura

Telescopio con apertura di 10.5 cm

CCDs

CCDs in silicio con filtro passabanda molto alto per diminuire il rumore fotonico, tra i 600 e i 1000 nm.

Frequenza di readouts

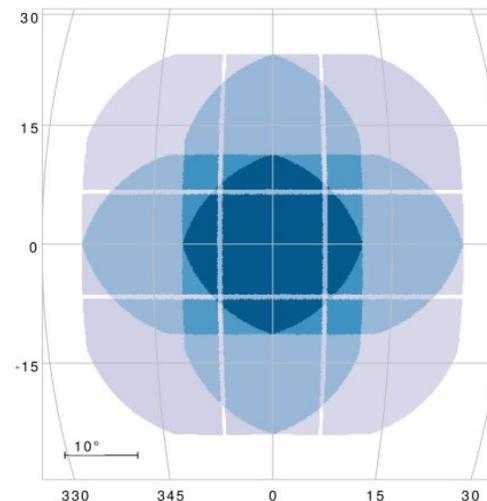
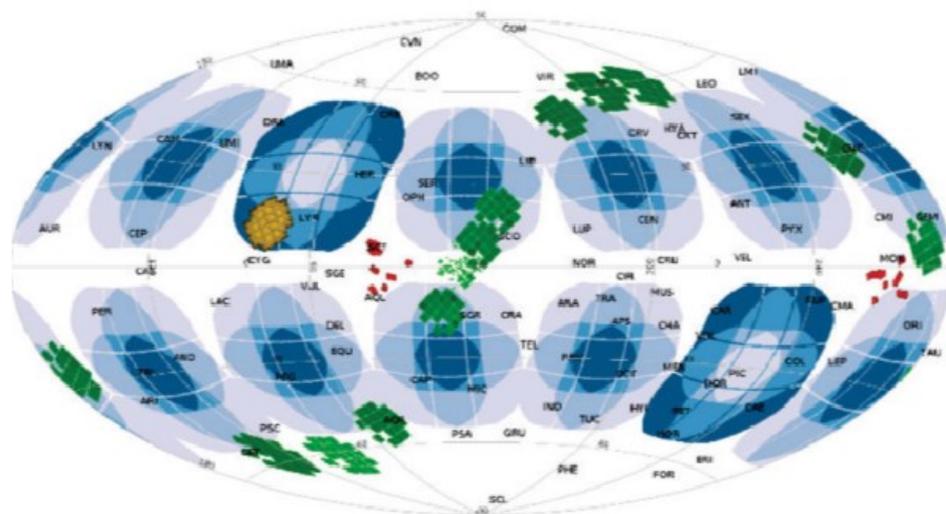
Quattro ore quando il satellite si trova al perigeo.

Magnitudine delle stelle

9 – 15 mag.

Field of view

Suddivisione del cielo in 26 segmenti, ognuno dei quali viene osservato per 27.4 giorni. I poli vengono osservati fino a 351 giorni. Si ha un totale di $24^\circ \times 96^\circ$.



- Ricerca di esopianeti in zona di abitabilità con il metodo dei transiti e delle velocità radiali
- Orbita Lissajous intorno al punto lagrangiano L2, è necessario ruotare lo spacecraft di 90° ogni tre mesi

Telescopio e apertura	24 telescopi di classe 20 cm con una pupilla di ingresso di 12 cm
CCDs	Normal cameras: 4 CCDs in silicio per camera, con una risoluzione di 4150 x 4150 pixel in 18 micrometri, passabanda di 450 – 1000 nm, fast cameras per monitorare la regione interna del campo di vista
Frequenza di readouts	25 secondi per le normal cameras, 2.5 secondi per le fast cameras
Magnitudine delle stelle	Fino a 11 con limite nel rumore fotometrico di 50 ppm/h e con magnitudine superiore a 13 senza limite riguardo il rumore fotometrico per le normal cameras; magnitudine superiore a 8.5 per le fast cameras
Field of view	Due puntamenti della durata di due anni ciascuno, implementati da osservazioni di durata inferiore, che espandono l'area totale di osservazione fino al 40% della volta celeste

Luminosità delle stelle osservate

- Kepler: stelle poco brillanti
- TESS e PLATO: stelle F, G, K, M della main sequence



Field of view

- Kepler: zona di osservazione fissa nella costellazione del Cigno
- TESS: cambio di puntamento ogni 27.4 giorni (ad eccezione delle zone polari), che impone l'osservazione di pianeti con periodi orbitali estremamente brevi
- PLATO: ricerca di pianeti anche rocciosi con periodi orbitali intermedi

Nell'immagine: rappresentazione di Kepler (NASA)