

**Università degli Studi di Padova**

---

Dipartimento di Fisica e Astronomia Galileo Galilei  
Corso di Laurea in Astronomia

**Telescopio Spaziale CHEOPS: analisi delle  
scelte tecniche per soddisfare i requisiti  
scientifici**

Tesi di laurea triennale

Candidata:

**Patrizia Bussatori**

Matricola:

**1162405**

Relatrice:

**Prof.ssa**

**Valentina Viotto**

Correlatrice:

**Dott.sa**

**Valentina Granata**

---

Anno Accademico 2019-2020



*A Eva e Lilith*

## Abstract

Lanciato nel dicembre 2019, il telescopio spaziale CHEOPS (CHAracterising ExO-Planet Satellite), frutto della collaborazione dell’Agenzia Spaziale Europea ESA e di un Consorzio guidato dall’Università di Berna con il contributo di altri dieci Stati Membri dell’ESA, tra cui l’Italia, si pone l’obiettivo di caratterizzare esopianeti noti, fornendo un affinamento della misura dei raggi per gli oggetti di dimensioni già note e una prima stima delle dimensioni per quei pianeti di cui è nota la massa grazie a survey spettroscopiche terrestri.

Per ottenere queste misurazioni, CHEOPS utilizza il metodo dei transiti, attraverso il quale il team scientifico, che elabora i dati raccolti dal telescopio, è in grado di realizzare curve di luce ad elevata precisione fotometrica, ovvero grafici che riportano l’andamento, nel tempo, della misura di flusso luminoso proveniente dalla stella osservata. Nello specifico il telescopio osserva all’interno della banda ottica (4000–11000 Å) sia transiti primari, passaggi del disco planetario di fronte a quello stellare, sia transiti secondari detti anche occultazioni, cioè passaggi del pianeta dietro il disco stellare. In entrambi i casi nelle curve di luce si evidenzia una diminuzione di luminosità proveniente dalla sorgente stellare.

Per rispondere a questo ampio programma scientifico il CIS (CHEOPS Instrument System) è dotato, ad esempio, di un telescopio (TEL) di 320 mm di diametro in configurazione Ritchey-Chrétien, di un ampio baffle posizionato anteriormente al treno ottico allo scopo di minimizzare la straylight dovuta alla radiazione luminosa terrestre e solare e del detector CCD scelto per la missione. La straordinarietà di CHEOPS risiede però nell’innovativa tecnica di riprodurre un’immagine estesa della Point Spread Function (PSF) distribuita su un numero di pixel maggiore di quello che interesserebbe se l’immagine fosse a fuoco. In tal modo si riduce l’eventuale disuniformità spuria introdotta dal sensore. Per raggiungere e mantenere la precisione fotometrica prefissata, risulta però fondamentale la stabilità meccanica della struttura, ovvero del sistema BEO (Back-End-Optics) che sostiene le ottiche di re-imaging e del banco ottico (OBA) al quale le precedenti meccaniche sono fissate, nonché la stabilità termica, raggiunta anche attivamente tramite radiatori. A queste richieste fa fronte la scelta della fibra di carbonio per la costruzione della struttura meccanica grazie alle proprietà termiche e alle sue caratteristiche fisiche e meccaniche.

Nell’elaborato si riporta la prima occultazione osservata dal telescopio CHEOPS, quella di un pianeta gioviano caldo, WASP-189 b, con massa  $M_P \approx 2M_J$  e orbitante attorno ad una stella di tipo A. Il team scientifico ha registrato l’occultazione riportando una profondità media del transito secondario di  $dF = 87.9 \pm 4.3$  ppm basandosi su quattro occultazioni. Tale risultato è stato comparato ai modelli teorici e, assumendo una redistribuzione del calore inefficiente, si verifica una sostanziale consistenza con i dati sperimentali per un pianeta con atmosfera non riflettente, riscaldato alla temperatura di  $3435 \pm 27$  K. Si presentano inoltre due transiti di tale pianeta caratterizzati da una forma asimmetrica della curva di luce attribuibile al gravity darkening, effetto dovuto alla forma di sferoide oblatto della stella causato dalla sua elevata velocità di spin.

Infine si presentano le principali differenze ed analogie del telescopio CHEOPS con i suoi predecessori COROT, missione dell'ESA a guida francese pionieristica di sismologia stellare e ricerca di esopianeti, Kepler, missione NASA con l'obiettivo di osservare pianeti di massa terrestre in zona abitabile e TESS, della NASA dedicato alla ricerca di transiti su tutto il cielo. Risultano invece inevitabili i confronti con le future missioni ESA, quali PLATO, che scoprirà nuovi pianeti terrestri in orbita attorno a stelle di tipo solare, e ARIEL, incentrato sullo studio della composizione chimica di un variegato campione di esopianeti. Quest'ultime due missioni, insieme alla missione CHEOPS, sono orientate nella medesima direzione: osservare, caratterizzare ed analizzare esopianeti mantenendo l'ESA all'avanguardia in questo campo della ricerca astronomica per ben oltre il prossimo decennio.

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1	Il lancio e le operazioni di gestione . . . . .	1
1.2	Le caratteristiche generali della missione . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Finalità scientifiche della missione</b>	<b>4</b>
2.1	I metodi di analisi utilizzati . . . . .	4
2.1.1	Il metodo dei transiti . . . . .	4
2.2	Programma scientifico . . . . .	9
2.2.1	Ricerca di transiti . . . . .	9
2.2.2	Determinazione delle relazione massa-raggio . . . . .	10
2.2.3	Esplorazione . . . . .	10
2.2.4	Individuazione di pianeti con atmosfere . . . . .	11
2.2.5	Vincoli sulle migrazioni planetarie . . . . .	11
2.2.6	Nuovi target per future survey spettroscopiche . . . . .	11
2.2.7	Programmi scientifici secondari . . . . .	12
2.3	Richiesta scientifica e risposta strumentale . . . . .	12
2.3.1	Precisione fotometrica . . . . .	13
2.3.2	Stima delle performance . . . . .	13
2.3.3	Sky coverage . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Il telescopio spaziale Cheops</b>	<b>18</b>
3.1	Design della missione . . . . .	18
3.2	Design del veicolo spaziale . . . . .	19
3.3	Design dello strumento . . . . .	21
3.3.1	The Optical Telescope Assembly (OTA) . . . . .	21
3.3.2	The Baffle and Cover Assembly (BCA) . . . . .	24
3.3.3	The Sensor Electronics Module (SEM) . . . . .	24
3.3.4	The Back End Electronics (BEE) . . . . .	25
3.4	Obiettivi di precisione fotometrica . . . . .	26
3.5	Filosofia dei modelli . . . . .	28
3.6	Osservazione dei target e processamento dei dati . . . . .	29
<b>4</b>	<b>Primi risultati: WASP-189b</b>	<b>32</b>
4.1	Osservazione del target . . . . .	32
4.2	Analisi dati . . . . .	34
4.3	Risultati . . . . .	36
4.3.1	Misure dell'occultazione . . . . .	37

4.3.2	L'atmosfera di WASP-189b . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Confronto con le altre missioni</b>	<b>40</b>
<b>A</b>	<b>Il metodo dei transiti</b>	<b>43</b>
<b>B</b>	<b>La configurazione Ritchey-Chrètien</b>	<b>48</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>51</b>

# Capitolo 1

## Introduzione

Il telescopio spaziale CHEOPS, CHaracterising ExOPlanet Satellite, è la prima missione di classe S del programma scientifico dell’Agenzia Spaziale Europea dedicato alla caratterizzazione e analisi dei pianeti extrasolari o esopianeti. Approvata nell’ottobre 2012, la missione è il risultato della collaborazione tra ESA, la Svizzera e altri dieci Stati Membri ESA, tra cui l’Italia che si è occupata della progettazione e costruzione del sistema ottico nonché dell’integrazione e dell’accertamento tecnico di TEL, il telescopio. L’Università di Berna si è invece occupata dello sviluppo meccanico della struttura, con particolare attenzione alla stabilità termica e meccanica e alla resistenza di CHEOPS nel suo complesso alle sollecitazioni del lancio. Il paraluce è invece stato fornito dal Belgio mentre il compito degli istituti tedeschi è stato costruire il piano focale. Il computer di bordo e l’elettronica di controllo attivo della temperatura sono stati forniti da Austria e Ungheria rispettivamente mentre il sensore CCD necessario per le riprese astronomiche è stato fornito direttamente da ESA.

### 1.1 Il lancio e le operazioni di gestione

CHEOPS, in figura 1.1, è stato lanciato con successo il 18 dicembre 2019 alle ore 9:54 italiane, come parte del carico del vettore Soyuz-Fregat partito dallo spazioporto di Kourou, nella Guiana Francese. Il lancio, inizialmente previsto per il giorno precedente, era stato infatti cancellato a causa di un malfunzionamento rilevato nel sistema di controllo del razzo. Lo strumento si trova in un’orbita bassa (Low Earth Orbit, LEO) eliosincrona (Sun-Synchronous Orbit, SSO), ad un’altitudine dal suolo di circa 700 *km*.

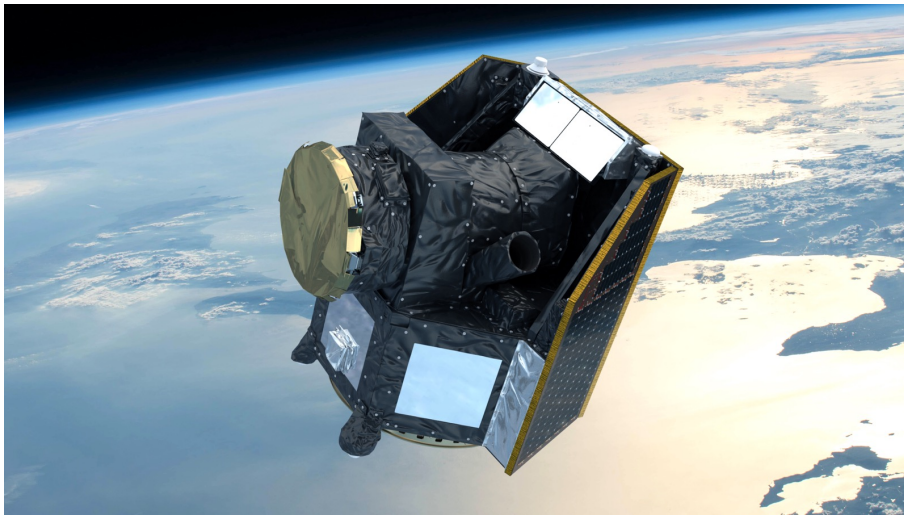
Terminata la messa in orbita dello strumento, il controllo di CHEOPS è passato al centro operativo di missione INTA, a Torrejón de Ardoz, in Spagna. Il centro operativo scientifico ha invece sede presso l’Università di Ginevra, responsabile dell’archiviazione e della distribuzione dei dati scientifici raccolti.

Attualmente il telescopio è operativo e dedica l’80% del tempo riservato alle operazioni scientifiche al completamento del programma d’osservazione previsto dal Cheops Science Team e che comprende l’analisi di circa 500 target in 3.5 anni previsti per la missione. Il restante 20% del tempo è disponibile alla comunità scientifica per



lo sviluppo e la messa in atto di nuovi programmi scientifici che possano sfruttare le caratteristiche tecniche di CHEOPS.

Lo strumento spaziale permette un downlink di 1.2 *Gbit* al giorno. I dati del telescopio inviati a Terra subiscono una prima decompressione da parte di un software sviluppato in Svizzera e successivamente i dati grezzi vengono elaborati in modo automatico da un software sviluppato in Francia. In seguito, i dati scientifici così elaborati vengono ridistribuiti all'interno del Consorzio attraverso l'archivio della missione. Questi dati sono considerati privati per un anno dalla loro acquisizione e poi vengono messi a disposizione dell'intera comunità scientifica. Infine Svizzera e Regno Unito si occupano del continuo controllo e gestione del comportamento in orbita e delle prestazioni rispettivamente.



**Figura 1.1:** Rappresentazione artistica e fedele del telescopio spaziale CHEOPS in orbita attorno alla Terra, con copertura del tubo ottico. Credits: ESA / ATG medialab

## 1.2 Le caratteristiche generali della missione

Il telescopio spaziale CHEOPS ha l'importante compito di proseguire nell'intensa attività di ricerca e caratterizzazione di esopianeti, cominciata nel 1995 con la scoperta del primo pianeta orbitante attorno ad una stella al di fuori del Sistema Solare; il gioviano caldo 51 Pegasi b scoperto da Michel Mayor e Didier Queloz attorno all'omonima stella (Mayor & Queloz, 1995). Tale scoperta ha valso loro il premio Nobel della fisica 2019. Attualmente la conoscenza degli esopianeti è straordinariamente ampia, oltre 4000 sono gli oggetti ad oggi rilevati, ma spesso frammentaria in termini di proprietà fisiche e chimiche. Cresce quindi la necessità di una sempre maggiore caratterizzazione di questi pianeti, nello specifico la conoscenza precisa delle masse e dei raggi di pianeti orbitanti attorno a stelle brillanti.

La natura "continuativa" dello studio di CHEOPS, che osserva un singolo target alla volta, lo rende una missione unica nel suo genere. Lo scopo infatti non è quello di scoprire ulteriori esopianeti bensì caratterizzare un set di target particolarmente

interessanti per verificare o ricostruire le teorie di formazione ed evoluzione planetaria. Questo difficile obiettivo si traduce però in una serie di sfide tecnologiche legate alla precisione fotometrica delle osservazioni e alla visibilità del cielo nonché alle limitazioni dovute all'inquadramento del progetto, che è la prima missione di classe S (small) di ESA, riguardanti il budget di costo, le dimensioni e la massa totale del satellite e i tempi di realizzazione.

Grazie alle sue peculiarità CHEOPS risulta essere il punto di arrivo di missioni pionieristiche che lo hanno preceduto, come i famosi precursori COROT (Baglin et al., 2006), missione ESA dedicata alla ricerca di nuovi pianeti e all'analisi di sismologia stellare, Kepler (Koch et al., 2010), missione NASA mirata a pianeti di dimensioni terrestri in zona abitabile e che nell'arco degli anni ha fornito migliaia di possibili candidati, e la più recente TESS (Ricker et al., 2014), che effettua survey di transiti sulla quasi totalità del cielo. CHEOPS risulta però anche il punto di partenza per survey terrestri su grande scala, per telescopi spaziali come il JMST (James Webb Space Telescope) o come PLATO (Rauer et al., 2014) e ARIEL, missioni di scala maggiore che verranno lanciate nel prossimo futuro per completare il programma spaziale europeo dedicato agli esopianeti.

Una commissione degli Stati partecipanti ha decretato nel marzo 2020 che CHEOPS ha raggiunto tutti i requisiti tecnici richiesti, fornendo il via libera della fase scientifica vera e propria.

## Capitolo 2

# Finalità scientifiche della missione

CHEOPS è la prima missione ESA dedicata al solo studio e caratterizzazione di esopianeti attraverso fotometria di elevatissima precisione realizzata su stelle già note per ospitare pianeti nel range di massa delle super Terre e di Nettuno ovvero pianeti tali che  $1 < M_{planet}/M_{Earth} < 20$ . Nello specifico lo strumento è in grado di determinare accuratamente i raggi per quei pianeti di cui già si conosce la massa, stimata con survey spettroscopiche terrestri, oppure fornire misure di elevata precisione per quegli oggetti di cui già si conosce il raggio. In entrambi i casi il fine è combinare l'informazione di massa e raggio e stimare la densità e dunque la natura del pianeta: roccioso o gassoso.

### 2.1 I metodi di analisi utilizzati

Il Telescopio Spaziale CHEOPS opera nella banda ottica, tra  $400\text{ nm}$  e  $1100\text{ nm}$ , sfruttando il metodo dei transiti per la determinazione precisa del raggio. Le velocità radiali hanno invece fornito, in programmi scientifici precedenti a quelli di CHEOPS, misure della massa.

Il metodo delle velocità radiali utilizza l'effetto Doppler osservabile sullo spostamento delle righe spettrali di una stella che ospita un esopianeta. La componente radiale del moto della stella è ricavabile attraverso analisi spettroscopiche: quando la stella nel suo moto attorno al centro di massa del sistema stella-pianeta si allontana rispetto alla Terra, le righe sul suo spettro risulteranno spostate verso il rosso (redshift); viceversa quando la stella si avvicina alla Terra le righe sul suo spettro risultano spostate verso il blu (blushift). L'ampiezza del fenomeno dipende dalla massa del pianeta, dalla sua distanza dalla stella e dall'inclinazione orbitale dello stesso ovvero dall'angolo formato dal piano orbitale del pianeta e quello di riferimento del sistema, solitamente scelto come coincidente con il piano equatoriale stellare.

Il metodo del transito è invece il principale metodo di analisi sfruttato dal telescopio CHEOPS. Dunque è approfondito nel paragrafo seguente.

#### 2.1.1 Il metodo dei transiti

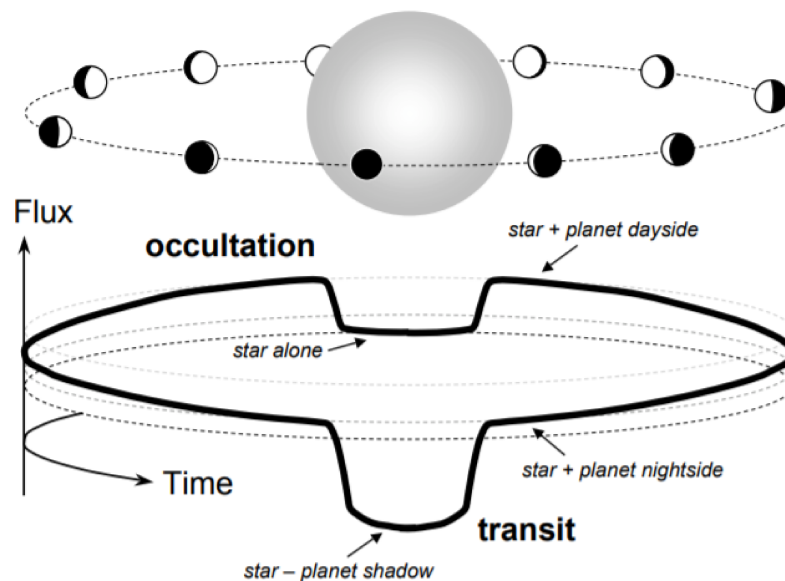
Il metodo dei transiti (Winn, 2014) è il metodo più funzionale per l'individuazione e la caratterizzazione di esopianeti abbastanza distanti dalla propria stella poiché

la curva di luce, che dipende dalla geometria del sistema, è meglio definita e più profonda. Si tratta di un metodo fotometrico applicabile fino a grandi distanze ma solo per quei sistemi planetari posizionati lungo la linea di vista dell'osservatore. Tale metodo si basa sul principio che il transito di un corpo planetario (transito primario) oppure una sua occultazione (transito secondario), di fronte al disco stellare oppure dietro di esso, rispettivamente, causano una variazione di luminosità misurabile della stella, nonostante questi oggetti presentino generalmente dimensioni estremamente inferiori rispetto alla stella ospite, causando al massimo una variazione di luminosità del 3% per pianeti della taglia di Giove che effettuano transiti primari.

Maggiori informazioni relative al metodo dei transiti sono disponibili nell'appendice A.

Vediamo in dettaglio alcuni elementi del metodo del transito.

**Curve di luce** Nello specifico un transito causa una diminuzione del flusso luminoso proveniente dalla stella proporzionalmente al rapporto tra l'area del pianeta e quella della stella. In caso di occultazione, la diminuzione di flusso è dovuta al fatto che si rileva solamente la luce proveniente dalla stella e non anche quella riflessa o emessa termicamente dal pianeta. In ogni caso la diminuzione per occultazione è molto minore rispetto a quella per transito, emettendo la stella un flusso estremamente maggiore rispetto a quello del pianeta.



**Figura 2.1:** Illustrazione schematica di un transito e di una occultazione. Si osserva solo il flusso combinato di stella e pianeta. In entrambi i casi si evidenzia una diminuzione del flusso luminoso proveniente dalla stella ospite. (Winn, 2014)

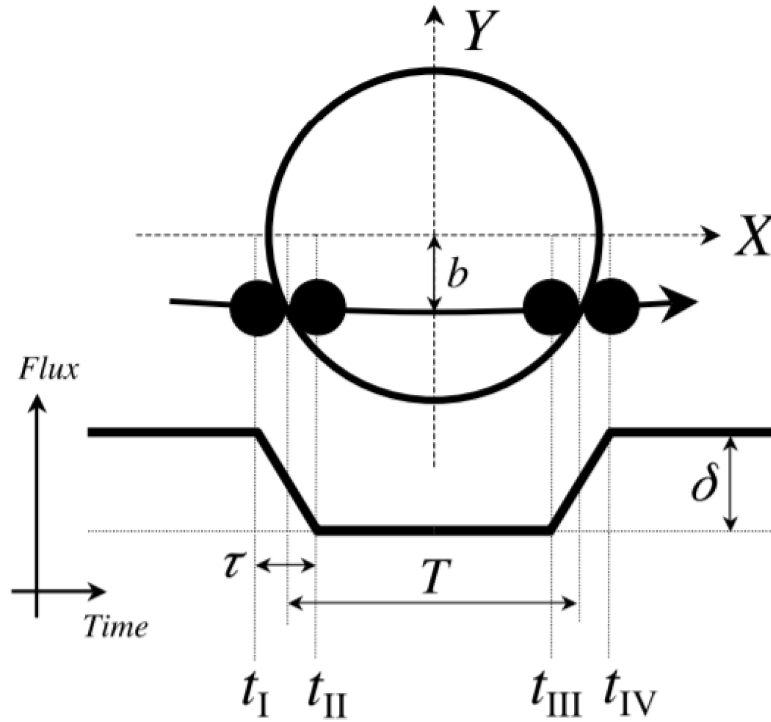
In entrambi i casi si costruiscono delle curve di luce (figura 2.1) che mostrano il progressivo andamento del flusso luminoso stellare in funzione del tempo e in corrispondenza del moto di transito del pianeta di fronte, o dietro, alla stella. Come rappresentato in figura 2.2, nell'istante in cui il pianeta comincia a transitare di

fronte alla stella si verifica una rapida diminuzione del flusso in modo lineare dal tempo  $t_1$ , nel quale il disco del pianeta è tangente al disco stellare e dal tempo  $t_2$ , istante al quale il disco del pianeta rientra per intero nel disco stellare.

A questo processo si aggiunge però il fenomeno del limb darkening ovvero l'oscuramento al bordo, responsabile della diminuzione di flusso proveniente dalla stella ospite in corrispondenza del bordo del disco stellare. Esso è causato dal decrescere della densità stellare nelle regioni più esterne e dalla corrispondente diminuzione della temperatura stellare con l'aumentare del raggio. Al tempo  $t_3$  comincia l'uscita del pianeta, tangente al disco stellare e al tempo  $t_4$  si verifica la completa fuoriuscita del pianeta dal disco stellare. In quest'ultimo istante il flusso stellare ritorna al normale livello e il transito si può considerare concluso.

Nello specifico, la durata del transito e la durata dell'ingresso del disco planetario entro quello stellare sono proporzionali a  $(1 - b^2)^{1/2}$  dove  $b$  è detto *parametro d'impatto*. Esso è individuato come la distanza proiettata sul piano del cielo tra il centro del disco planetario e il centro del disco stellare.

Per maggiori dettagli sul parametro d'impatto si veda l'appendice A.



**Figura 2.2:** Illustrazione di un transito e delle quantità misurabili analizzando una curva di luce. (Winn, 2014)

La differenza  $T_{tot} = t_4 - t_1$  è detta *durata totale del transito* mentre  $T_{full} = t_3 - t_2$  è il tempo trascorso dal disco planetario per intero all'interno di quello stellare. Le differenze  $\tau \simeq t_2 - t_1 \simeq t_4 - t_3$  corrispondono all'incirca ai tempi di entrata e uscita del pianeta di fronte alla stella ospite; la differenza fra questi due intervalli si può infatti considerare trascurabile.

**Da misure fotometriche a misure del raggio planetario** Operativamente si realizza quindi un grafico con in ascissa l'asse temporale e in ordinata la variazione del flusso proveniente dalla stella istante per istante. Supponendo di conoscere il raggio della stella e la sua luminosità vale l'approssimazione (Perryman, 2000):

$$\frac{\Delta L}{L_*} \simeq \left( \frac{R_p}{R_*} \right)^2 \quad (2.1)$$

nella quale  $\Delta L$  è il calo di luminosità prodotto da un oggetto che realizza un transito di fronte alla stella ospite,  $L_*$  è la luminosità della stella,  $R_p$  il raggio del pianeta e  $R_*$  il raggio della stella. L'assunzione è valida per una stella con luminosità superficiale uniforme.

In tal modo si può ricavare una stima del raggio planetario.

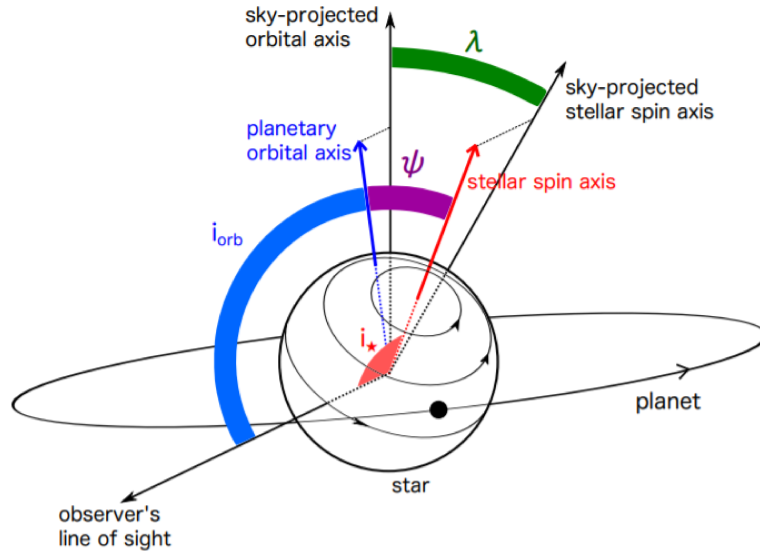
Il passaggio da flusso  $F$ , energia per unità di tempo per unità di area, a luminosità  $L$ , energia per unità di tempo, è stato realizzato tenendo conto della relazione che intercorre fra i due, ovvero, nell'ipotesi di emissione isotropa,  $L = 4\pi d^2 F$  dove  $d$  è la distanza della stella dall'osservatore.

**Obliquità stellare** Tramite il metodo dei transiti si possono ricavare informazioni anche riguardo le posizioni reciproche tra piano orbitale del pianeta e asse di rotazione stellare.

In particolare si definisce  $\Psi$  *vera obliquità stellare* l'angolo tra l'asse di rotazione stellare e il vettore del momento angolare orbitale del pianeta ovvero l'asse perpendicolare al piano orbitale. Si indica invece con  $\lambda$  l'*obliquità stellare proiettata*, l'obliquità stellare vera proiettata sul piano del cielo cioè sul piano perpendicolare alla linea di vista.

La conoscenza di  $\lambda$  e  $\Psi$  è direttamente correlata allo studio dinamico del sistema stella-pianeta, come di evince nel capitolo 4.

Una rappresentazione schematica di questi parametri è riportata nella figura 2.3.



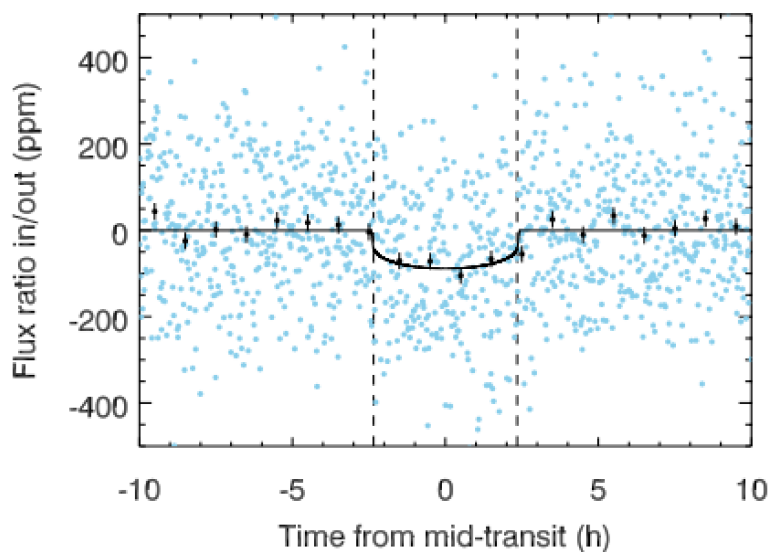
**Figura 2.3:** Rappresentazione schematica dell'angolo  $\lambda$  e  $\Psi$  ricavabili attraverso il metodo dei transiti. Nel grafico si indica con  $i_{orb}$  l'angolo fra la linea di vista dell'osservatore e l'asse perpendicolare al piano orbitale del pianeta. Si indica invece con  $i_*$  l'angolo tra la linea di vista dell'osservatore e l'asse di rotazione stellare. (Masuda, 2018)

**Limitazioni al metodo dei transiti** Il metodo dei transiti favorisce la scoperta ed analisi di pianeti di grandi dimensioni e in orbite di raggio sufficientemente piccolo da essere abbastanza vicini alla stella ospite. Un pianeta come Giove visto esternamente al Sistema Solare causerebbe con il suo transito di fronte al Sole una riduzione del flusso stellare di solo 1% mentre un pianeta delle dimensioni della Terra solo lo 0.01% (Winn, 2014).

Si richiede dunque una elevatissima precisione strumentale e una buona capacità di riconoscere e sottrarre il rumore di fondo, come la straylight proveniente dalla Luna e dal Sole.

Si rende necessario inoltre saper riconoscere eventuali errori sistematici di registrazione del segnale causati dagli strumenti e che deformano il segnale fotometrico originario. Per fare ciò i telescopi utilizzati per queste survey fotometriche realizzano osservazioni non solo dei target ma anche di sorgenti stellari non variabili all'interno dello stesso campo di vista del target (fotometria differenziale). Confrontando i flussi dei target e degli oggetti di riferimento si possono evidenziare variazioni di flusso dovuti alla presenza di un sistema planetario o dovuti ad errori sistematici dello strumento.

Ultimo fenomeno da considerare, ma non per importanza, sono le disuniformità di flusso causate da deficit del sensore. Per ridurre questo fenomeno, almeno parzialmente, si ricorre alla realizzazione e integrazione delle pose con file di calibrazione detti *flat field*, ottenuti illuminando in modo uniforme il sensore oppure si può ricorrere a tecniche d'osservazione innovative, come quelle previste da CHEOPS e analizzate nel capitolo 3.



**Figura 2.4:** Simulazione della curva di luce ottenuta dal transito di un pianeta delle dimensioni della Terra con periodo orbitale di 50 giorni attorno ad una stella nana di tipo G5 e di  $V=9$ . Il tempo di campionamento è di 1 minuto e il rumore fotonico è di  $150 \text{ ph/px/sec}$  (fotoni per pixel per secondo). I punti neri indicano dati fotometrici mediati in un'ora. Il rapporto segnale-rumore è 10. (Broeg et al., 2013)

## 2.2 Programma scientifico

Come precedentemente riportato, una delle principali funzioni di CHEOPS è caratterizzare quegli esopianeti già noti e fornire importanti informazioni al fine di implementare o modificare le attuali teorie di formazione ed evoluzione planetaria. Per soddisfare a questa vasta richiesta il telescopio dedica il 90% del suo tempo di missione al completamento del programma scientifico mentre il restante 10% è riservato ad operazioni di controllo, gestione e monitoraggio dell'efficienza e dell'integrità del veicolo spaziale.

Si espongono qui di seguito i principali scopi scientifici della missione CHEOPS.

### 2.2.1 Ricerca di transiti

L'obiettivo centrale di CHEOPS è realizzare ampie survey usando il metodo dei transiti il quale offre una pratica via per determinare il raggio di un esopianeta. Oggetto di studio del telescopio sono corpi dalle dimensioni di una super Terra fino a Nettuno orbitanti attorno ad una stella brillante.



Le due principali tipologie di target di CHEOPS sono dunque stelle luminose ( $6 < V < 12$ ) che sappiamo ospitare pianeti, scoperti con il metodo delle velocità radiali e di cui si vuole stimare per la prima volta il raggio oppure stelle i cui pianeti sono già stati scoperti attraverso il metodo dei transiti, di cui dunque si conosce già il raggio ma si richiede un affinamento della misura.

In generale le stelle osservate sono comprese nei tipi spettrali da G0 con  $T_{eff} \sim 5900K$  a M0 con  $T_{eff} \sim 3800K$  ove  $T_{eff}$  è la temperatura del corpo nero avente la stessa luminosità della stella.

## 2.2.2 Determinazione delle relazione massa-raggio

Combinando la misura del raggio del pianeta, fornita dalle curve di luce dei transiti acquisite da CHEOPS, e quella della massa, ricavabile da survey di velocità radiale, è possibile determinare la densità del pianeta e avere dunque un discriminante per determinare la natura della composizione interna del corpo planetario. Questo è il primo passaggio verso la completa comprensione delle proprietà planetarie, soggetti mirati dell'attività di CHEOPS (Zeng et al., 2019). In questo contesto la conoscenza della struttura e della composizione dei pianeti, specie se di piccola massa, permette di vincolare i modelli di formazione ed evoluzione planetaria e può essere utilizzata per dimostrare il trasporto di materiale all'interno del disco proto-planetario (Thiabaud et al., 2015).

Grandi survey spettroscopiche terrestri hanno identificato un centinaio di stelle che ospitano pianeti dalle dimensioni di super Terre fino a Nettuno ovvero quei pianeti che rientrano nel campione osservativo di CHEOPS. In particolare la conoscenza della luminosità di tali stelle, dei loro bassi livelli di attività stellare e delle effemeridi del pianeta rendono questi sistemi planetari i target ideali per CHEOPS. Inoltre la nuova generazione di survey terrestri che sfruttano il metodo del transiti (NGTS), capaci di raggiungere  $1 \text{ mmag}$  (ove  $1 \text{ mmag}$  è pari a  $10^{-3} \text{ mag}$ ) di precisione fotometrica per stelle di magnitudine  $V < 13$ , costituiscono un'ulteriore importante sorgente di target.

CHEOPS è dunque in grado di determinare la relazione massa-raggio per pianeti da  $1 M_{Earth}$  a  $20 M_{Earth}$  con la più elevata precisione raggiungibile attualmente ed è capace di determinare il raggio con una precisione del 10%.

## 2.2.3 Esplorazione

Il programma esplorativo di CHEOPS include una serie di sotto-programmi costituiti da diversi punti quali l'analisi strutturale dei sistemi planetari che ospitano pianeti di piccole dimensioni con lunghi periodi orbitali e lo studio dettagliato della polvere presente in dischi edge-on attorno a stelle giovani. A ciò si aggiunge l'identificazione di nuovi sistemi planetari attorno a stelle brillanti tramite l'analisi TTV, Transit Timing Variation. Infatti, in un sistema planetario l'interazione gravitazionale tra i pianeti può ritardare o anticipare l'istante  $t_c$  di transito al centro, rendendo le effemeridi non lineari e i transiti non con la medesima cadenza che avrebbero senza interazioni gravitazionali. Di particolare interesse sono i sistemi multi-planetari. Analizzando la variazione temporale dei transiti è inoltre possibile ricavare scenari di migrazioni planetarie e cercare esotroiani.

## 2.2.4 Individuazione di pianeti con atmosfere

Le occultazioni osservate e le curve di luce ricreate da CHEOPS sfruttano l'elemento distintivo di questo telescopio ovvero fotometria ad altissima precisione nella banda visibile dello spettro elettromagnetico. Tali informazioni hanno un importante valore per la comprensione dei processi atmosferici di un pianeta e assumono sempre maggior rilievo se sfruttati unitamente a misurazioni infrarosso. Questo è particolarmente vero per i pianeti gioviani caldi nei quali, in questo modo, è possibile capire se il flusso osservato nel visibile si debba all'emissione termica a più piccole lunghezze d'onda oppure se si debba alla luce riflessa data dallo scattering di Rayleigh o condensazioni ad alta quota. Gaidos et al. (2017) hanno, ad esempio, dimostrato che combinando le osservazioni in banda ottica del telescopio TESS e di CHEOPS si può distinguere, per alcuni target, l'emissione termica dalla luce riflessa, grazie alla differente dipendenza di questi effetti dalla lunghezza d'onda.

Dalle osservazioni si possono, inoltre, ricavare informazioni riguardo l'albedo dei pianeti, cioè la frazione di radiazione stellare incidente sul pianeta e riflessa in tutte le direzioni. Infatti la forma della curva e la sua ampiezza al variare del tempo rappresentano un potente mezzo per studiare la distribuzione termica nelle atmosfere (Knutson et al., 2007) e dunque i meccanismi fisici e l'efficienza del trasporto di energia dal lato giorno al lato notte del pianeta. Dato che questo effetto può essere visto solo nei gioviani caldi, il numero di target a disposizione per questo studio è elevato.

## 2.2.5 Vincoli sulle migrazioni planetarie

È generalmente accettata l'ipotesi che la struttura e la composizione gassosa di Urano e Nettuno sono direttamente correlate alla formazione dei pianeti stessi all'interno del nostro Sistema Solare. Tuttavia, data la loro vicinanza a Giove e Saturno, non si è pienamente in grado di capire perché questi due pianeti non si siano accresciuti in gas tanto quanto i vicini giganti gassosi. Attualmente c'è un'ampia evidenza che i pianeti non sono nati dove oggi li osserviamo ma che quasi certamente è avvenuto un fenomeno migratorio degli stessi attraverso ampie regioni orbitali seguendo percorsi determinati dal progressivo accrescimento del pianeta così come dall'interazione dello stesso con il disco gassoso o con gli altri pianeti. Come conseguenza di ciò, la composizione e la densità media di questi pianeti è il risultato del loro percorso all'interno della nube proto-planetaria.

Il telescopio spaziale CHEOPS ha lo scopo di fornire un vasto campione di pianeti di cui è già nota la densità media al fine di distinguere tra diversi gruppi di pianeti frutto dello stesso percorso migratorio all'interno del proprio sistema planetario, dotando gli scienziati di vincoli da applicare alle attuali teorie migratorie.

## 2.2.6 Nuovi target per future survey spettroscopiche

La piena comprensione della natura di pianeti come le super Terre richiede non solo la precisa conoscenza del raggio e della massa al fine di stabilire una densità media

ma anche l'acquisizione di nozioni relative alle proprietà atmosferiche. Questo è però possibile solo per transiti di esopianeti orbitanti attorno a delle stelle tanto luminose da concedere osservazioni spettro-fotometriche con un elevato rapporto segnale-rumore. Questa condizione è però molto stringente, specie per pianeti di piccola massa, dunque solamente poche dozzine di super Terre soddisfano questi requisiti tecnici (Seager & Deming, 2009)).

In generale pianeti di tipo terrestre non sono in grado di sostenere massicce atmosfere e generalmente gli strati atmosferici gassosi costituiscono solo una piccola frazione della massa totale. Quest'ultimi, unitamente ad eventuali mantelli di ghiaccio che non superano il 10% della massa totale, hanno un importante effetto sul raggio del pianeta e sulla densità media. CHEOPS è in grado di distinguere tra pianeti tellurici come la Terra e pianeti di massa simile alla Terra ma ricchi di idrogeno o ricoperti quasi completamente da oceani. Esso fornirà al termine della missione un catalogo di corpi planetari che saranno i target di future survey spettroscopiche realizzate da Terra, ad esempio con E-ELT (European Extremely Large Telescope) oppure dallo spazio, ad esempio con il telescopio spaziale James Webb, che potranno ulteriormente indagare sulle loro proprietà fisico-chimiche.

### 2.2.7 Programmi scientifici secondari

Questo programma scientifico di CHEOPS raccoglie tutti gli scopi scientifici secondari, realizzati contemporaneamente o successivamente al completamento di quelli principali. Tra questi si ricorda la realizzazione di precise misure fotometriche differenziali di un gran numero di sorgenti luminose variabili e la derivazione di precise leggi di limb darkening come funzione della temperatura stellare, dove per limb darkening (oscuramento al bordo) si intende un effetto ottico per il quale la luminosità dell'area centrale della stella appare maggiore di quella del bordo stellare. Questo si deve alla diminuzione della densità e della temperatura dal centro stellare verso la superficie.

## 2.3 Richiesta scientifica e risposta strumentale

Come descritto nelle sezioni precedenti, lo scopo principale di CHEOPS è realizzare analisi fotometriche ad altissima precisione in sequenza, per cui si rende necessario osservare l'area di cielo più ampia possibile per aumentare il numero di potenziali target. Realizzare survey di questo genere impone però una serie di limitazioni. Il telescopio spaziale di fatto non presenta vincoli costruttivi sui periodi orbitali dei pianeti osservati ma l'analisi di periodi maggiori di 50 giorni si rende abbastanza difficile.

Per rispondere a queste e alle precedenti richieste scientifiche, CHEOPS deve essere in grado di fornire adeguate performance tecniche. Si analizzano qui di seguito i range di precisione e stabilità necessari per adempiere alle richieste scientifiche.

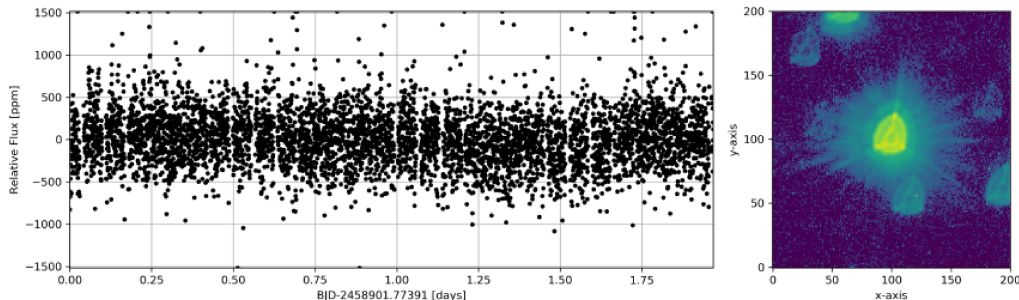
### 2.3.1 Precisione fotometrica

I target di CHEOPS sono stelle con magnitudine  $6 \leq V \leq 12$ . Tutti gli oggetti al di fuori di questo limite possono essere osservati senza garantire però la medesima precisione. Si analizzano qui di seguito le principali classi di target.

**Bright stars** Sono stelle nane di tipo G5 di raggio  $0.9R_{\odot}$  che in banda V presentano magnitudini nell'intervallo  $6 \leq V \leq 9$  e attorno alle quali orbitano pianeti di dimensioni terrestri. La profondità evidenziata all'interno della curva di luce è di 100 parti-per-milione (*ppm*) di conseguenza la precisione fotometrica necessaria è 20 *ppm* in 6 ore d'integrazione (goal: 10 *ppm*) con rapporto segnale-rumore di almeno 5. Questa precisione permette di identificare transiti di pianeti con tempo di rivoluzione attorno alla stella ospite di 50 giorni.

**Faint stars** Si tratta di stelle nane di tipo K con raggio tipico di  $0.7R_{\odot}$  con magnitudine in banda  $V = 12$  (goal: 13 *ppm*) attorno a cui orbitano pianeti delle dimensioni di Nettuno con un rapporto segnale-rumore di 30. Per transiti di 3 ore si raggiunge una profondità di 2500 *ppm* per pianeti con periodo di rivoluzione di 13 giorni. Quindi una precisione di 85 *ppm* viene raggiunta per 3 ore di integrazione.

CHEOPS può mantenere questi livelli di precisione fotometrica durante una singola sequenza d'osservazione, senza alcuna interruzione, oppure per 48 ore totali, includendo eventuali interruzioni. In ogni caso è richiesta una grande stabilità, sia termica che meccanica che di puntamento del target.



**Figura 2.5:** Sulla sinistra: curva di luce della stella HD 88111 ottenuta da immagini prese ogni 30 secondi per 47 ore senza interruzioni. I gap sono dovuti all'occultazione del target da parte della Terra e al passaggio del veicolo spaziale sulla South Atlantic Anomaly. Per 6 ore d'integrazione, si è raggiunta una precisione di 15.5 *ppm*. Sulla destra: immagine della stella HD 88111 ripresa da CHEOPS. (Benz et al., 2020)

### 2.3.2 Stima delle performance

Per raggiungere e mantenere i livelli di precisione e stabilità richiesti, le performance globali dello strumento sono state stimate attraverso l'uso di software creati appositamente. In tal modo si sono realizzate misurazioni e confronti con la richiesta scientifica e la risposta strumentale [(Deline et al., 2020) e (Futyan et al., 2020)].

Il rumore totale registrato dal telescopio ha diverse origini, di tipo sia strumentale che astronomico.

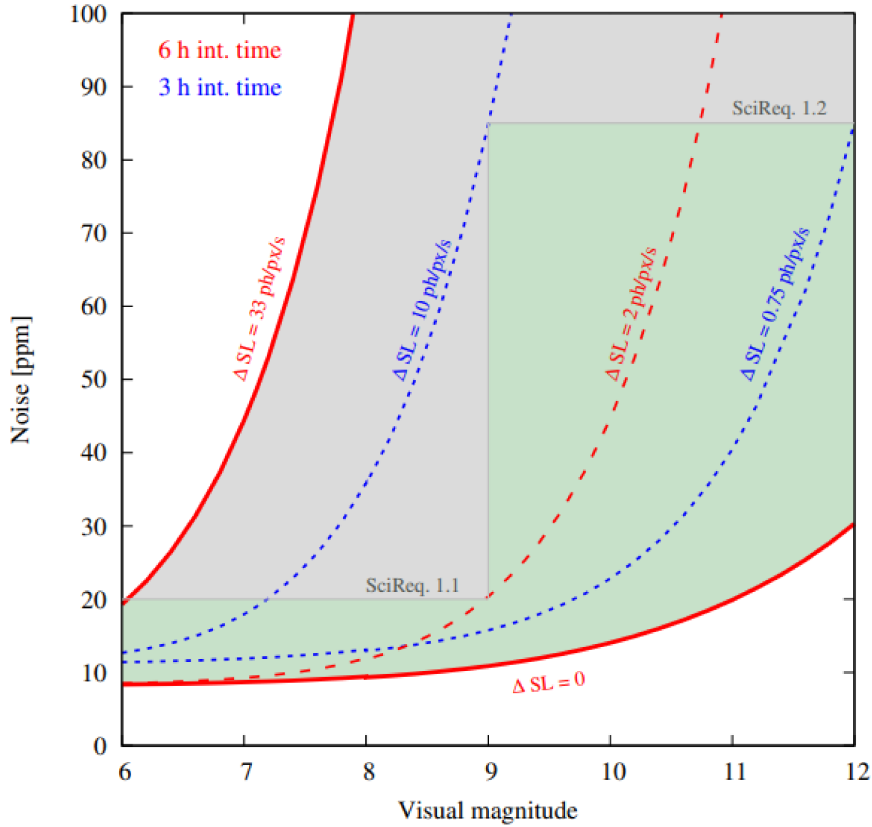
Nello specifico il rumore di tipo astronomico/astrofisico si deve alla luce zodiacale, luminosità diffusa lungo il piano dell'eclittica, al rumore fotonico, ai raggi cosmici primari e alla radiazione straylight, letteralmente "luce sporadica" non voluta che rientra per riflessioni spurie nel campo di vista del telescopio.

Per rumore strumentale si intende invece il read-out noise del CCD, numero di elettroni introdotti nel segnale finale in fase di lettura del dispositivo, o le correnti di buio che si creano con le variazioni di temperatura (transito casuale di uno o più elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione) ma anche il gain del CCD e l'efficienza quantica del sensore ovvero la capacità del CCD di registrare l'energia incidente e trasformarla in informazione astronomica (rapporto tra il numero degli elettroni raccolti e dei fotoni incidenti). A ciò si aggiunge la stabilità elettronica, l'incertezza associata alla misurazione del tempo e della Point Spread Function in combinazione con il tremolio inevitabile, per quanto molto riducibile, evidenziato al momento di puntamento del target. Questi aspetti verranno trattati più approfonditamente nel capitolo successivo.

Il budget di rumore totale è dunque la combinazione di tutti questi contributi. Le sorgenti di rumore si possono assumere indipendenti e quindi si possono sommare in quadratura. Dunque il rumore totale che ci si aspetta di registrare è:

$$N = \sqrt{\sum N_i^2} \quad (2.2)$$

dove  $N_i$  è il singolo contributo di rumore dovuto agli effetti sopra descritti. In questo calcolo non vengono considerati però gli apporti dovuti a variazioni intrinseche delle stelle o la contaminazione dovuta alle stelle di background rientranti nel campo di vista.



**Figura 2.6:** Rumore fotometrico [ $ppm$ ] in funzione della magnitudine visuale nel range tra 6 e 12  $mag$ . Il grafico mostra le misurazioni legate alla stima del rumore totale osservabile  $\Delta SL$ , nel quale la contaminazione per radiazione straylight domina sugli altri contributi. La sezione verde rappresenta la regione nel quale le condizioni di rumore di fondo permettono di mantenere la precisione fotometrica richiesta e perseguire gli obiettivi scientifici prefissati. (Benz et al., 2020)

La figura 2.6 mostra i risultati del rumore che ci si aspetta registrare dopo 3 ore d'integrazione (curve blu) e 6 ore d'integrazione (curve rosse). Il confronto tra queste simulazioni strumentali di rumore con l'effettiva misura realizzata in orbita da CHEOPS mostra che in realtà il contributo più variabile è la luce parassita proveniente dalla Terra e la luce riflessa del Sole sulla superficie terrestre cioè la straylight. Questo contributo varia molto a seconda della direzione d'osservazione e a seconda della posizione relativa Terra-Sole. Si può infatti andare da un contributo quasi nullo, quando CHEOPS osserva in corrispondenza del lato notturno della Terra, fino a migliaia di fotoni per pixel per secondo se si osserva in prossimità del lato illuminato dal Sole. Fondamentale evidenziare che il contributo di questo tipo di radiazione è corretto per il 99.5% in fase di post-produzione delle immagini.

Dalla figura 2.6, si evidenzia il contributo del rumore base, denotato come  $\Delta SL = 0$ . Si tratta di una curva calcolata per stelle di tipo M0 con 6 ore d'integrazione ininterrotta senza contaminazione di straylight. Essa fornisce il rumore minimo che si può registrare nelle migliori condizioni d'osservazione ottenibili. Si nota in

particolare che le stelle luminose soffrono maggiormente il rumore strumentale e quelle di maggior magnitudine sono invece affette soprattutto da rumore fotonico.

La curva rossa tratteggiata si riferisce al rumore associato a 6 ore d'integrazione senza interruzioni per stelle G0 con una straylight massima di  $2 \text{ ph/px/sc}$ . Ipotizzando di realizzare delle osservazioni in condizioni non perfette, si nota che questa sorgente di rumore comincia a dominare il budget totale per stelle più deboli di magnitudine 9. Dunque per osservare stelle deboli con l'elevata precisione fotometrica prefissata e un elevato rapporto segnale-rumore è necessario che la variazione di radiazione di straylight sia molto bassa. La curva blu tratteggiata a destra ricavata per 3 ore di integrazione per stelle di tipo M0 con una variazione straylight di  $0.75 \text{ ph/px/sc}$  è invece ancora pienamente contenuta del riquadro verde il quale segnala i limiti di rumore sopportabili per raggiungere la precisione fotometrica richiesta. La curva blu tratteggiata a sinistra è il risultato dell'analisi del rumore per osservazioni di 3 ore su stelle G0 con variazione di straylight di  $10 \text{ ph/px/sc}$ . Qui si evidenzia l'egemonia della radiazione straylight. Infine la curva rossa superiore in linea continua, ripresa per 6 ore d'integrazione per stelle di tipo G0 e  $\Delta SL = 33 \text{ ph/px/sc}$  mostra un completo dominio della straylight.

### 2.3.3 Sky coverage

Dato il profilo della missione CHEOPS, la copertura del cielo è così suddivisa.

Il 50% del cielo è accessibile per osservazioni consecutive della durata di 50 giorni all'anno e per target con osservazioni più lunghe del 50% dell'orbita del telescopio, ovvero si realizzano analisi per meno di 50 min per orbite della durata di 100 minuti. Questa survey ha come obiettivo la caratterizzazione di pianeti scoperti con il metodo delle velocità radiali.

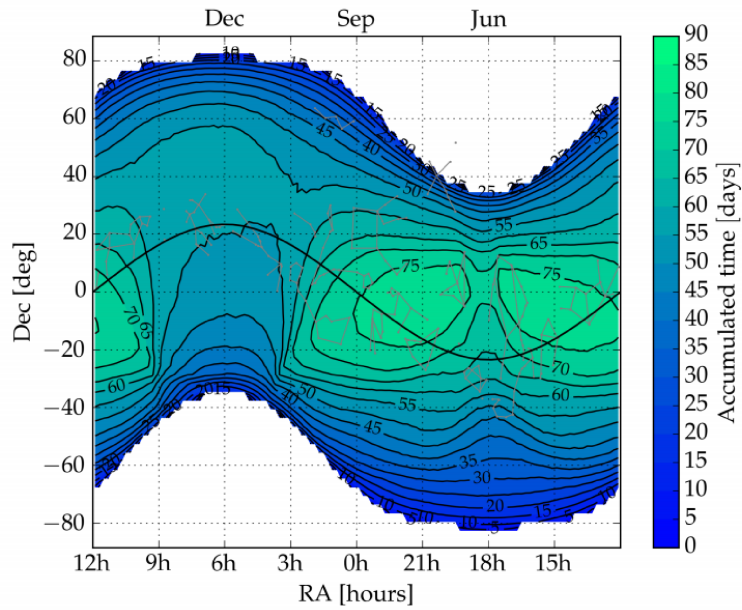
Il 25% del cielo, per 2/3 nell'emisfero Sud, è accessibile per 13 giorni all'anno per target con osservazioni della durata approssimativa dell'80% dell'orbita ovvero osservazioni di meno di 80 minuti per un'orbita di 100 minuti. Questa survey ha come obiettivo pianeti scoperti con il metodo dei transiti in progetti scientifici precedenti a CHEOPS.

Il restante 25% del cielo è destinato alle Guest Observation cioè alle osservazioni degli scienziati che si occupano di studiare gli esopianeti ma che non fanno parte del Consorzio di CHEOPS.

Come riportato nel paragrafo 1.1, l'orbita del telescopio è posta tra 650 e 800 km di altitudine, sincronizzata con il Sole e selezionata in modo tale da minimizzare l'occultazione del cielo da parte della Terra.

Relativamente all'orbita realizzata da CHEOPS e alla posizione del target, può succedere che la straylight terrestre sia troppo alta, il target venga occultato dalla Terra oppure i raggi cosmici colpiscano il sensore durante il passaggio sulla South Atlantic Anomaly, zona caratterizzata da un campo magnetico di intensità minore rispetto al campo medio della Terra situata per la maggior parte nel Sud Atlantico e nella quale i satelliti artificiali sono soggetti a forti radiazioni per molti minuti.

Gli effetti di queste interruzioni si traducono in gap nelle curve di luce.



**Figura 2.7:** Mappa di visibilità del Telescopio CHEOPS. La scala di colori indica la quantità di tempo a disposizione nell’arco di un anno per ogni possibile direzione d’osservazione. Le orbite che prevedevano interruzioni per più del 50% del tempo a disposizione sono state scartate. Nell’asse delle ascisse superiori sono riportati i mesi di Dicembre, Settembre e Giugno come riferimento per capire quando una certa area è osservabile. Per un miglior orientamento sono state riportate le costellazioni Zodiacali (in grigio) e la linea dell’eclittica (la sottile linea nera). (Benz et al., 2020)



## Capitolo 3

# Il telescopio spaziale Cheops

Il telescopio spaziale CHEOPS è dotato di implementazioni tecnologiche innovative per realizzare immagini di interesse scientifico. Come infatti descritto in questo capitolo, tipiche aberrazioni ottiche come il defocus, sono state qui sfruttate positivamente per raggiungere precisioni fotometriche maggiori e meglio rispondere alle richieste scientifiche.

Il presente capitolo riporta sinteticamente una descrizione della struttura e dei sistemi ottici ponendo attenzione al design della missione, alla stabilità meccanica e termica richiesta, alle procedure di verifica delle performance e allineamento delle ottiche nonché alla precisione fotometrica e alla distribuzione della Point Spread Function.

### 3.1 Design della missione

La durata nominale della missione è di 3.5 anni, estendibili fino a 5. I fattori decisivi per la durata totale della missione sono i possibili danni causati al sensore CCD dalla continua esposizione alla radiazione, il deterioramento della struttura complessiva a causa dell'esposizione ai raggi cosmici o dell'usura dei materiali per continua esposizione all'ambiente.

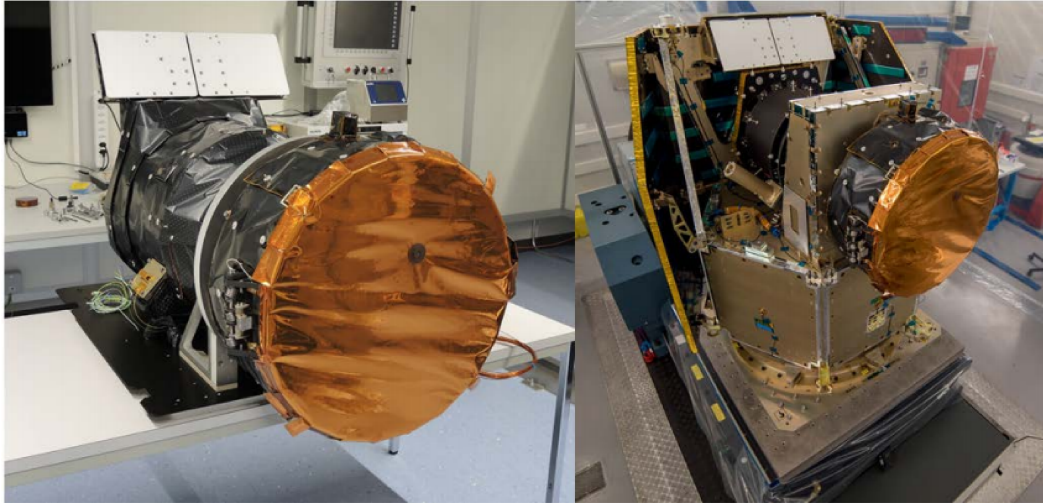
Per le operazioni nominali non è previsto l'utilizzo di combustibili ma il veicolo spaziale è dotato di un modulo aggiuntivo con propellente (Propulsion Module, PM) necessario per realizzare manovre in seguito al lancio, correzioni dell'orbita e manovre al fine di evitare collisioni con altri oggetti orbitanti. Infine parte di questo carburante è destinato a far rientrare la missione entro 25 anni dalla sua fine.

La missione è stata progettata per operare in un'orbita bassa, la Low Earth Orbit (LEO), eliosincrona (Sun-Synchronous Orbit) a un'altitudine di circa 700 km dal suolo terrestre.

L'interfaccia strumentale dello spacecraft è montata su una struttura isostatica sulla quale sono ancorati il paraluce, Baffle Cover Assembly (BCA), e l'optomeccanica del telescopio Optical Telescope Assembly (OTA). Entrambi sono posizionati nella parte superiore della piattaforma, termicamente separate dal resto dello spacecraft. Il tutto è inserito in una struttura dalle dimensioni e dal peso limitati.

Le dimensioni compatte e il peso contenuto sono stati necessari per inserire CHEOPS nel vano cargo dei vettori candidati al lancio, adattandolo sia al sistema cargo ASAP-S sul razzo russo Soyuz che all'adattatore VESPA per lanci multipli

sul razzo VEGA. Come riportato nel capitolo 1, la scelta del vettore di trasporto è ricaduta sul mezzo russo.



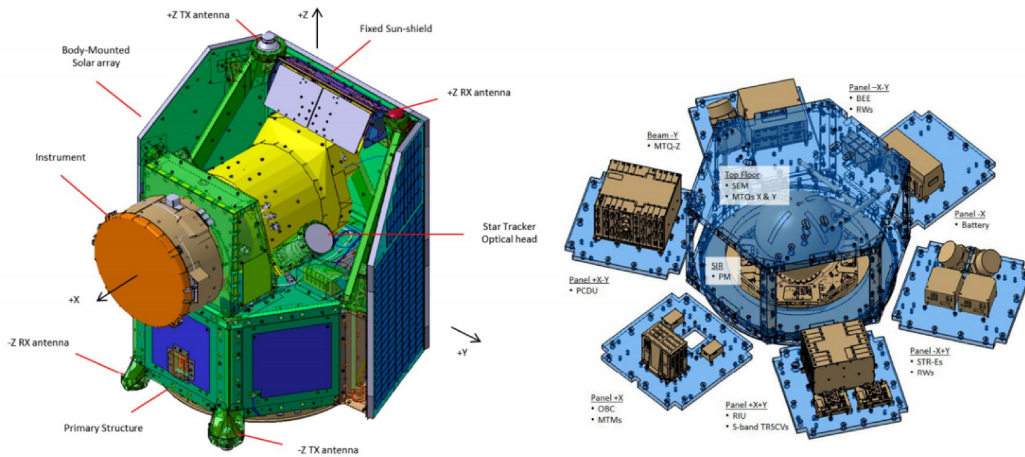
**Figura 3.1:** A sinistra immagine dello strumento di CHEOPS, a destra immagine dello strumento posizionato sullo spacecraft. (Beck et al., 2017)

## 3.2 Design del veicolo spaziale

Il satellite sul quale è montato lo strumento è la piattaforma AS-250 realizzata da Airbus Defence & Space e disegnata appositamente per telescopi spaziali di piccole e medie dimensioni su orbite basse, come appunto quella scelta per la missione. La sezione spagnola della Airbus è il principale appaltatore del progetto (Rando et al., 2018).

Come riportato nel precedente paragrafo, il satellite ha dimensioni compatte compatibili con il vano cargo del razzo russo Soyuz scelto per il lancio, a forma prismatica esagonale. Lo spacecraft è alto  $1.5\text{ m}$  e all'interno dell'area esagonale è inscritta una circonferenza di raggio  $1.6\text{ m}$ . La massa totale è circa  $275\text{ kg}$ .

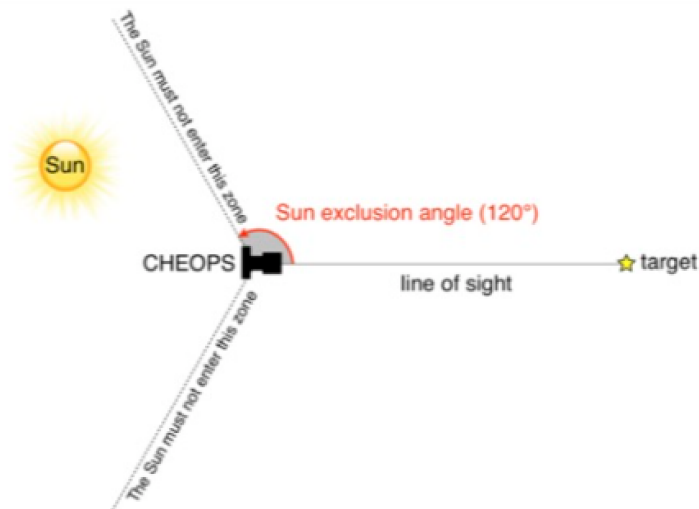
Come si può vedere dalla figura 3.2, la configurazione prismatica esagonale del satellite fa sì che vi siano pannelli laterali sostenuti da un'intelaiatura di supporto. Tali pannelli laterali possono essere aperti al fine di inserire l'attrezzatura necessaria. I tre pannelli laterali posti nella direzione del Sole sono invece ricoperti con altrettanti pannelli solari, due laterali e uno centrale. Essi hanno un'area totale di  $2.5\text{ m}^2$  e forniscono sufficiente energia ( $200\text{ W}$  in media) per il funzionamento dell'elettronica. Questi tre pannelli sono anche dotati di radiatori, scambiatori termici che mantengono attivamente la stabilità termica.



**Figura 3.2:** Configurazione del satellite nel suo complesso a sinistra, base esagonale della piattaforma apribile lateralmente per completare le operazioni di montaggio dei sistemi elettronici a destra. (Benz et al., 2020)

Il telescopio è inoltre dotato di due strumenti d'inseguimento delle stelle con lo scopo di minimizzare i possibili disallineamenti causati da distorsioni termoeelastiche. Questi sistemi d'inseguimento permettono di mantenere la corretta orientazione del satellite ed applicare, se necessario, delle correzioni. Il sistema di controllo orbitale (Attitude and Orbital Control System, AOCS) li usa come sensori di guida. Tali sistemi misurano la differenza tra la reale posizione di centramento del target e quella prevista teoricamente. Questa informazione viene trasmessa all'AOCS per migliorare la stabilità di puntamento, specie per lunghe integrazioni, raggiungendo così una precisione di un 1".

Quando si osserva un target, la posizione apparente in cielo di quest'ultimo è allineata con la linea di vista del telescopio. I radiatori, responsabili della stabilità termica come descritto precedentemente, per eseguire il loro compito devono essere sempre puntati verso il cielo profondo evitando quanto più possibile luce infrarossa termica e luce riflessa ottica dalla Terra. A tal fine è stata attribuita a CHEOPS la capacità di rotazione della piattaforma attorno alla linea di vista dello strumento. Inoltre, al tal scopo, il Sole deve rimanere dietro un cono di 120° centrato nella direzione contraria al Sole (figura 3.3).



**Figura 3.3:** Schema esemplificativo dell'area entro cui il telescopio CHEOPS può operare mantenendo la giusta temperatura del sensore CCD.

### 3.3 Design dello strumento

Il design strumentale di CHEOPS ha lo scopo di realizzare misure fotometriche ad alta precisione. In particolare, lo strumento è composto da quattro unità, qui di seguito discusse.

#### 3.3.1 The Optical Telescope Assembly (OTA)

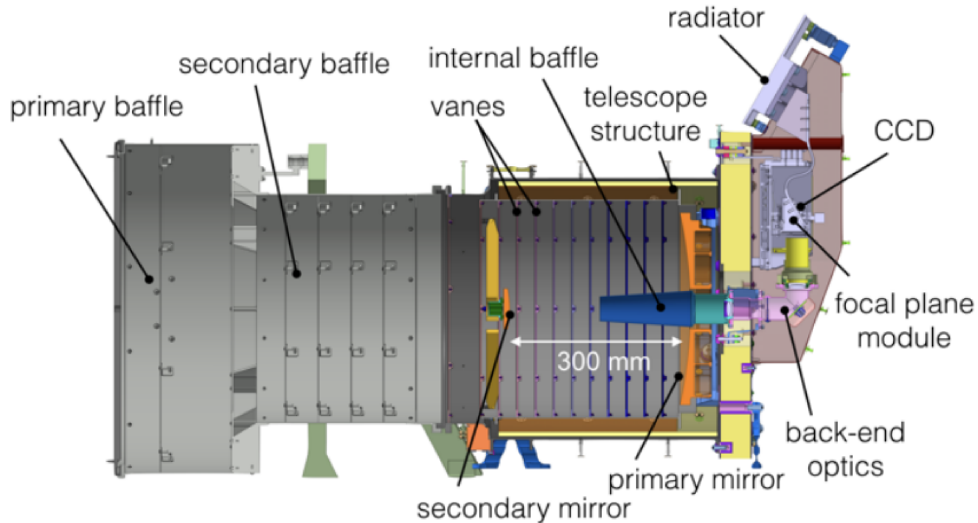
L'OTA (Optical Telescope Assembly) è costituito da diversi elementi quali le ottiche del telescopio TEL, la struttura meccanica, i radiatori e il piano focale.

**Il telescopio Ritchey-Chrétien** Il sistema ottico consiste in un telescopio in configurazione Ritchey-Chrétien e nel sistema BEO, Back End Optics che include le ottiche di re-imaging, due doppietti acromatici i quali ricreano l'immagine del piano focale sul sensore e costituiscono un passaggio intermedio nel quale posizionare una maschera di pupilla al fine di bloccare e rigettare la straylight. Il sistema specchio primario (che da solo individua quasi un rapporto  $F/1$ ) di  $320\text{ mm}$  di diametro, e specchio secondario, fornisce un rapporto focale  $F/5$ , che, tenendo conto di BEO, diventa  $F/8.38$  ovvero un'effettiva lunghezza focale di  $2681\text{ mm}$ .

La scelta della configurazione ottica è ricaduta su un sistema Ritchey-Chrétien poiché esso permette di avere una grande lunghezza focale nonostante le dimensioni compatte, necessarie per rientrare nei vincoli di dimensioni e massa imposti da una missione di classe S. Inoltre, le aberrazioni principali a cui è soggetto questo tipo di telescopio sono simmetriche. La qualità del campo di vista nominale è assisimetrica, cioè la qualità è nominalmente la stessa ad una data distanza dall'asse, ma le aberrazioni sono quantitativamente limitate, per un ampio campo di vista.

Per maggiori informazioni sul telescopio di tipo Ritchey-Chrétien si rimanda all'appendice B.

L'unità ottica sopra descritta è rappresentata schematicamente e in sezione nella figura 3.4.

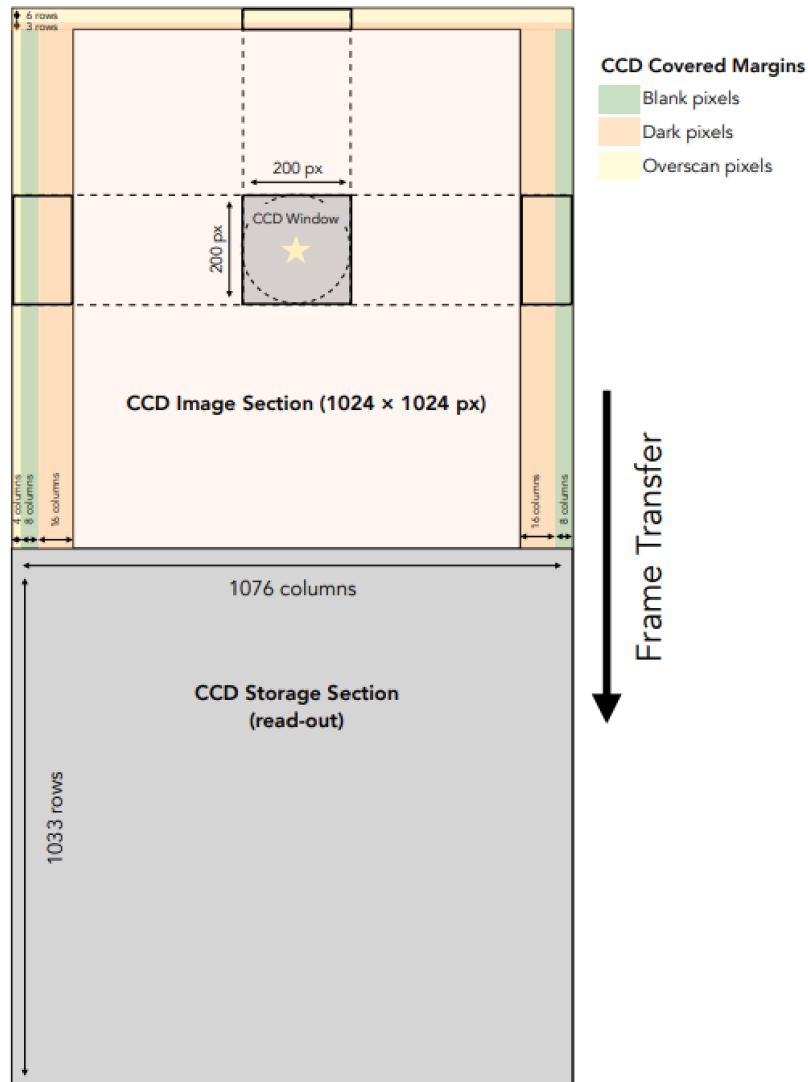


**Figura 3.4:** Rappresentazione schematica e in sezione delle unità OTA e BCA del telescopio. (Benz et al., 2020)

**Il sensore CCD** Il sensore CCD è un detector retroilluminato che trasferisce un singolo frame per volta. L'area di effettiva ripresa dell'immagine full frame è  $1024 \times 1024$  pixel (il campo di vista è  $0.32^\circ$ ) mentre un'immagine che tiene conto dei margini conta di 1076 colonne di pixel per 1033 righe di pixel. Si deve infatti tener conto di 8 colonne di pixel per lato formate da "blank" pixel, ovvero pixel non reali ma registri elettronici del segnale, 16 colonne per lato di "dark" pixel e di 4 colonne di pixel dal lato dell'amplificatore di segnale detti pixel di overscan. I dark pixel sono righe e colonne di pixel che possono essere usate per la calibrazione dei dark, con il vantaggio che i dati scientifici sono esattamente simultanei ai dati per la calibrazione. La sezione di overscan è composta, invece, da colonne di pixel non reali ma creati dal CCD mandando alcuni cicli di lettura vuoti, prima che il detector venga effettivamente letto. Operativamente se ne calcola il valore medio dei conteggi e si sottrae questo valore medio ad ogni pixel delle immagini scientifiche.

Data la grande quantità di dati da scaricare, non tutti indispensabili all'analisi scientifica, ciò che viene inviato a Terra è un'immagine circolare di 200 pixel di diametro centrata attorno al target. Maggiori informazioni relative al processo di invio delle immagini sono riportate nel paragrafo 3.6.

La figura 3.5 mostra schematicamente quanto qui riportato.



**Figura 3.5:** Schema di suddivisione dei pixel del CCD e della reale dimensione dell'immagine inviata a Terra. Si tratta di un'area circolare centrata sul target di 200 pixel di diametro. (Benz et al., 2020)

Il sensore CCD lavora a una temperatura di  $228\text{ K}$  al fine di avere un rumore di lettura (read-out noise) del detector basso e stabile. Esso è misurato in elettroni per pixel introdotti nel segnale finale dopo la lettura del CCD. In generale operare a basse temperature in condizioni termiche stabili permette di minimizzare variazioni del gain del sensore, fluttuazioni dell'efficienza quantica o degli elettroni che vengono casualmente liberati dall'elettronica durante il suo funzionamento. Nello specifico si ricorda che per gain di una camera CCD si intende il numero di elettroni corrispondenti ad ogni ADU (Analog to Digital Unit) ovvero quanti elettroni sono associati all'unità di intensità luminosa di un pixel di una posa. Per efficienza quantica si intende invece la capacità del sensore di generare un foto-evento per ogni fotone che lo colpisce ovvero il rapporto tra i fotoni rilevati e quelli incidenti.

### 3.3.2 The Baffle and Cover Assembly (BCA)

Il sistema BCA (Baffle and Cover Assembly) ha l'obiettivo di minimizzare la stray-light. Esso si compone di un baffle, ovvero un tubo cilindrico in alluminio con una serie di vani circolari per intrappolare, come in un labirinto, la luce spuria, generata da fenomeni di diffusione e riflessione all'interno dello stesso paraluce. Allo stesso tempo, tali fenomeni sono minimizzati dalla verniciatura nera opaca, che riveste l'intero paraluce, studiata per assorbire la maggior parte della radiazione. Il baffle termina con una copertura che protegge le ottiche del telescopio durante le fasi di assemblaggio, integrazione e test così come durante il lancio e nelle prime fasi di settaggio una volta messo in orbita.

Le unità BCA e OTA sono meccanicamente separate e montate sul piano della piattaforma spaziale. L'interfaccia tra le due è sigillata attraverso una guarnizione di vetronite, materiale composto di fibre di vetro, al fine di mantenere isolata la cavità ottica.

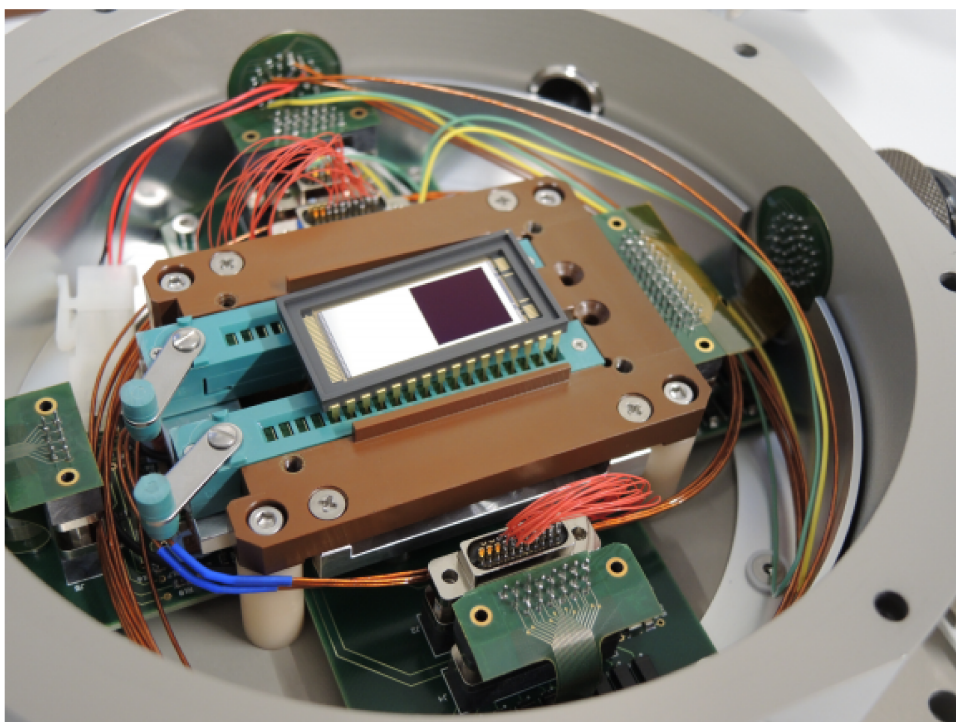
Per minimizzare la radiazione contaminante è anche necessaria un'ottima pulizia degli strumenti da eventuali particelle di polvere che potrebbero diffondere la luce nella banda ottica. A tal fine, l'assemblaggio, l'integrazione e i diversi test a cui è stato sottoposto CHEOPS prima del lancio sono stati effettuati in camere bianche.

### 3.3.3 The Sensor Electronics Module (SEM)

L'unità SEM (Sensor Electronics Module), come suggerisce il nome, ha la funzione di controllare elettronicamente il modulo del piano focale. Il sistema ospita l'unità di controllo del sensore CCD (Sensor Control Unit) e l'unità di gestione della potenza (Power Conditioning Unit). SEM si interfaccia poi con l'elettronica BEE (Back End Electronics) ed è comandata da essa.

Come accennato nei precedenti passaggi, per realizzare fotometria ad alta precisione il gain del CCD deve rimanere estremamente stabile. A tal fine la scelta del sensore CCD, la calibrazione dello strumento, il gain e il rumore di lettura sono stati misurati in laboratorio presso l'università di Berna, che si è occupata di questo delicato aspetto della missione (si vedano Wildi et al. (2017) e Chazelas et al. (2019)). A ciò si aggiunge la caratterizzazione delle eventuali distorsioni dello strumento e la misura della Point Spread Function attraverso il campo di vista del telescopio (Chazelas et al., 2019).

In figura 3.6 si può osservare il sensore CCD scelto e testato per essere mandato in orbita.



**Figura 3.6:** Immagine del CCD di CHEOPS presso l'Università di Berna inserito nel criostato, un'apparecchiatura utilizzata per mantenere bassissime temperature durante la lavorazione. (Benz et al., 2020)

La sensibilità del gain del CCD dipende anche dalla temperatura all'interno della piattaforma e dal voltaggio a cui l'elettronica opera. La dipendenza dalla temperatura si traduce in variazioni di  $1 \text{ ppm/mK}$  mentre nel caso del voltaggio a cui si lavora la situazione è più complessa e le variazioni possono anche essere da 5 a 40  $\text{ppm/mV}$ . Questi fatti sottolineano dunque la necessità di mantenere temperature e voltaggi stabili durante il funzionamento dello strumento, ad esempio attraverso radiatori, stabilizzatori attivi della temperatura, o apparecchiature elettroniche appositamente costruite per rientrare nei limiti richiesti dalla fotometria ad alta precisione.

### 3.3.4 The Back End Electronics (BEE)

L'unità BEE (Back End Electronics) costituisce il principale computer di controllo dello strumento. Essa, infatti, fornisce la potenza necessaria al funzionamento dell'intero carico, si interfaccia con il computer di bordo e con l'unità SEM. Si tratta dunque di un sistema di gestione generale dello strumento e, similmente a SEM, è dotato di unità di processamento dei dati (Data Processing Unit, DPU) e un'unità di fornitura e gestione della potenza (Power Supply and Distribution Unit).

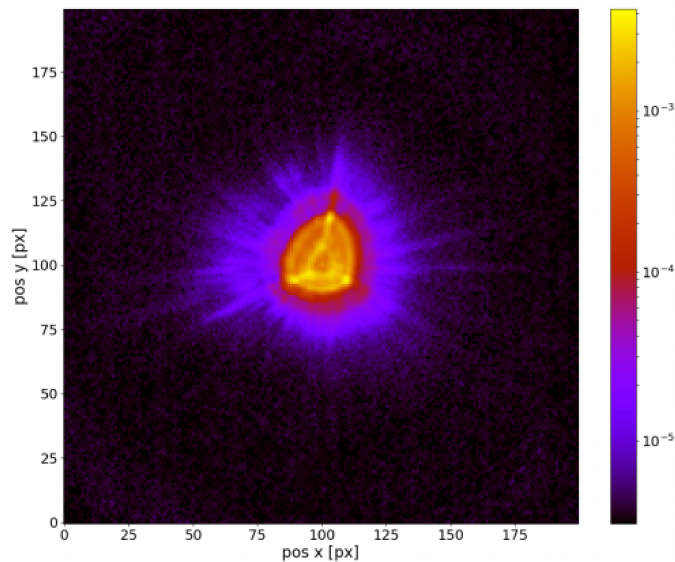


## 3.4 Obiettivi di precisione fotometrica

Per raggiungere la precisione fotometrica descritta nel paragrafo 2.3.1, e quindi i fini scientifici prestabiliti riportati nel paragrafo 2.2, CHEOPS è stato dotato di un'innovativa tecnologia che permette di sfruttare positivamente l'aberrazione ottica di defocus del target.

La presente sezione descrive in dettaglio questo meccanismo.

**La funzione PSF** La funzione PSF, Point Spread Function, individua l'andamento tridimensionale della diffrazione della luce emessa da una sorgente puntiforme, dopo che la radiazione è stata processata dallo strumento. Quando un fascio luminoso è emesso da una sorgente puntiforme e passa attraverso il treno ottico, una frazione di esso viene selezionata dalla maschera di pupilla e focalizzata sul piano focale. Tuttavia, il fascio selezionato non viene focalizzato in un singolo punto poiché i raggi luminosi che convergono al piano focale interferiscono fra loro producendo un effetto di diffrazione. Di conseguenza il fascio luminoso viene focalizzato su più pixel. Operativamente, per CHEOPS, si è utilizzata, come tracciante della forma e dimensione della PSF, l'area all'interno della quale è contenuto il 90% del flusso luminoso della sorgente. La figura 3.7 mostra la distribuzione di flusso della PSF misurato durante operazioni in orbita.



**Figura 3.7:** In questa figura si mostra la distribuzione ampia e triangolare della PSF di una sorgente osservata in fase di collaudo. (Benz et al., 2020)

In assenza di aberrazioni ottiche che deformino l'immagine in modo asimmetrico, la PSF tende ad assumere una forma simmetrica.

Nello specifico, la PSF di CHEOPS assume una forma triangolare a causa dei tre punti di fissaggio meccanico dello specchio primario. Questo meccanismo di fissaggio

del telescopio si era reso necessario per resistere all'ingente carico sostenuto durante la fase di lancio.

Infine, come previsto dallo studio e dalla comparazione di modelli termo-elastici in fase di sviluppo (Magrin et al., 2018), la PSF misurata in orbita è più piatta rispetto a quella misurata in laboratorio.

La straordinarietà tecnica di CHEOPS risiede dunque in questo: per raggiungere la precisione fotometrica necessaria a soddisfare i requisiti scientifici si è proceduto a rendere volutamente l'immagine defocalizzata. In tal modo la funzione PSF risulta essere distribuita su un numero di pixel maggiore di quello che interesserebbe se l'immagine fosse a fuoco. Una più ampia e piatta PSF permette infatti di:

- ridurre il rischio di avere pixel saturi per stelle luminose;
- minimizzare le disuniformità di lettura del sensore dovute al tremolio del puntamento. Questo fenomeno, dovuto a vibrazioni meccaniche, fa sì che in ogni posa la PSF interessi pixel diversi caratterizzati da una differente risposta quantica. Ampliando la PSF su un'area maggiore, più pixel verranno interessati, probabilmente con una diversa risposta quantica ma mediando fra essi l'effetto di non omogeneità di risposta viene ridotto.

Il defocus volutamente introdotto per avere un'ampia PSF porta con sé, però, anche degli svantaggi. Essi sono:

- la difficoltà di allineamento del piano focale alla dimensione desiderata della PSF in fase di costruzione;
- la difficile realizzazione di fotometria di precisione per stelle deboli, per le quali la luce è distribuita su molti pixel ma l'intensità della radiazione è bassa;
- la difficile realizzazione di fotometria di precisione per target in campi di vista ricchi di sorgenti, dove la PSF della stella sorgente potrebbe sommarsi a quella di stelle di campo.

Tutti i vantaggi e gli svantaggi di un'ampia PSF sono stati confrontati all'interno di uno studio di trade-off, realizzato utilizzando delle PSF simulate, ottenute attraverso l'analisi di Montecarlo in Zemax. In questo modo è stata individuata la dimensione ottimale della PSF, di 12/15 pixel, risultata poi maggiore, 16 pixel, in orbita.

Per garantire la precisione fotometrica richiesta, è quindi necessario mantenere un'ampia PSF caratterizzata da una stabilità di 20 *ppm* per 6 ore di integrazione, come riportato nel paragrafo 2.3.1. Di questi solamente 5 sono destinati al budget del sottosistema TEL (Telescope) di CHEOPS. Quest'ultimo include OMT, (OptoMechanical Train), OBA, (Optical Bench Assembly) e il BEO, introdotto nel paragrafo 3.3.1. L'ottica del sistema OMT e del sistema BEO sono di responsabilità italiana.

Tuttavia test per verificare la stabilità entro questi range non sono realizzabili a Terra. Infatti, si avrebbe bisogno di una sorgente ordini di grandezza più stabile per evitare di introdurre errori e questa non è reperibile in nessun laboratorio. Per ovviare a questa problematica si è quindi scelto l'ausilio di un software di simulazione chiamato CHEOPSim. Esso permette, infatti, di simulare diverse condizioni di

lavoro per lo strumento, tenendo conto del sistema ottico, della stabilità termica e meccanica, del tremolio di puntamento del target, della contaminazione di straylight e di altri fattori minori.

Si analizzano qui di seguito la stabilità meccanica, termica e le configurazioni di allineamento necessari per mantenere stabile la dimensione della PSF, permettendo, così, di raggiungere e conservare la precisione fotometrica richiesta.

**Stabilità meccanica** In termini di stabilità meccanica, l'obiettivo più difficile da raggiungere è stabilire e mantenere la tolleranza meccanica accettabile di inter-distanza tra specchio primario e secondario. Infatti, uno spostamento relativo dei due si amplifica 50 volte al livello del piano focale. Per rendere minimo questo effetto, la scelta del materiale con cui costruire la struttura meccanica che mantiene l'inter-distanza tra gli specchi è ricaduta sulla fibra di carbonio, nota per le sue proprietà meccaniche. Le proprietà meccaniche della fibra di carbonio rispondono anche alla necessità di resistenza alle sollecitazioni del lancio e ai limiti stringenti di massa massima raggiungibile per una missione di classe S.

**Stabilità termica** La scelta della fibra di carbonio si deve anche alle sue proprietà termiche. Infatti, questo materiale permette di rendere lo strumento soggetto solo a piccole variazioni di temperatura (minori di  $0.2 \text{ ppm/K}$ ). Inoltre, come riportato nel paragrafo 3.2, i tre pannelli posizionati in direzione del Sole sono dotati di radiatori, scambiatori termici che mantengono attivamente una temperatura adeguata al corretto ed efficiente funzionamento degli strumenti a bordo.

**Allineamento delle ottiche** I limiti di tolleranza previsti per l'allineamento delle ottiche derivano da analisi dei requisiti necessari per fotometria ad alta precisione: in questo caso forma e dimensione della PSF sul detector incidono sul rumore associato alla misura del flusso della sorgente.

Nello specifico, data la grande sensibilità dello specchio primario all'allineamento con il secondario, l'assemblaggio, l'integrazione e la verifica della configurazione Ritchey-Chrétien (AIV, Assembly, Integration and Verification) sono state fasi fondamentali della costruzione del telescopio. Si è dunque prima proceduto alla realizzazione di un modello dimostrativo equivalente al sistema che sarebbe entrato in orbita. Le procedure AIV sono state quindi testate e raffinate sul modello [(Bergomi et al., 2014), (Bergomi et al., 2016)] e successivamente applicate al reale telescopio (Bergomi et al., 2018).

Studiando poi la posizione relativa tra banco ottico e sistemi di riferimento meccanici, si è individuato il miglior posizionamento del piano focale e del piano defocalizzato dove posizionare il CCD.

## 3.5 Filosofia dei modelli

Per un veicolo spaziale, spesso non riparabile in fasi seguenti al lancio, la realizzazione di test e verifiche si rendono fondamentali, nonché gli aspetti più delicati della realizzazione dello stesso.

A tal fine, i team che hanno collaborato allo sviluppo di CHEOPS hanno realizzato diversi prototipi e modelli da testare prima della realizzazione del reale telescopio spaziale. Si riporta qui di seguito un elenco dei principali modelli e prototipi.

- Il primo prototipo realizzato era un modello dello specchio primario e della montatura, in alluminio ma che presentava la stessa configurazione fisica di quello finale ovvero la stessa massa e il medesimo centro di massa. Esso è stato utilizzato per verificare le procedure di assemblaggio dello specchio e il comportamento alle sollecitazioni vibrazionali.
- Per verificare i cambiamenti di struttura al variare della temperatura sono stati realizzati due modelli denominati Structural and Thermal Models (STM). Uno è stato costruito per analizzare l'inter-distanza tra lo specchio principale M1 e quello secondario M2. Uno è stato realizzato per riprodurre il sistema ottico con le sue caratteristiche termiche ed ottiche ed è stato utilizzato per individuare i limiti di accettazione alle sollecitazioni meccaniche del modello di volo, realizzato dall'industria italiana.
- Per completare le verifiche antecedenti alla realizzazione del reale veicolo spaziale, è stato costruito un Demonstration Model (DM) con le stesse caratteristiche ottiche e meccaniche del modello di volo ma realizzato con un diverso materiale con proprietà termiche differenti. Questo modello aveva lo scopo di verificare la fattibilità delle procedure di allineamento del sistema ottico.

### 3.6 Osservazione dei target e processamento dei dati

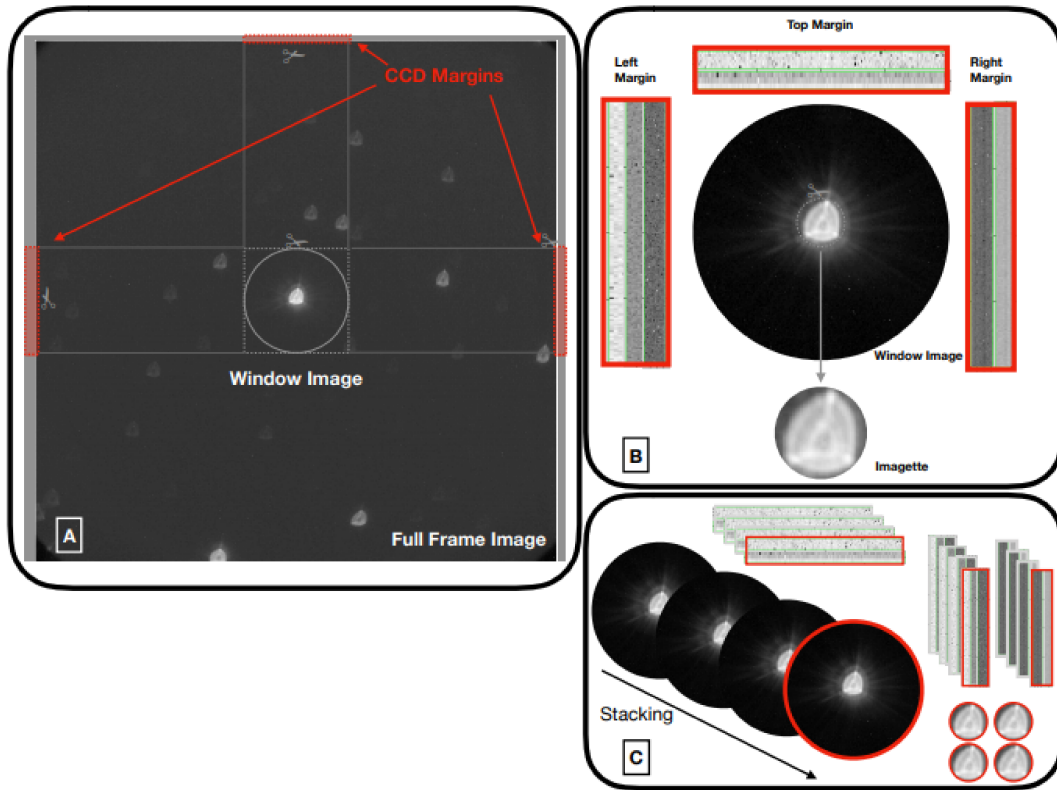
Un'osservazione scientifica nominale avviene secondo una specifica procedura denominata *nominal science*. Una volta che lo strumento ha raggiunto la fase *pre-science*, nella quale il CCD è acceso e risulta operativo alla temperatura stabilita per le operazioni nominali, i parametri specifici d'osservazione vengono caricati sul computer principale dello strumento. Quando il telescopio si è posizionato in direzione del target, avvengono una serie di operazioni.

- **Acquisizione del target** Lo strumento acquisisce immagini full frame dell'area di interesse e realizza una griglia confrontando l'immagine con le mappe stellari caricate sul computer di bordo. Una volta riconosciuta la stella, la misurazione della differenza tra la posizione del target e la linea di vista del telescopio viene comunicata al sistema AOCs che, a sua volta, comunica la correzione da apportare per ottenere un preciso puntamento. Questo processo avviene finché questa deviazione dal perfetto puntamento del target rientra nelle soglie prestabilite di acquisizione delle immagini. Una volta che il target è stato puntato correttamente, vengono acquisite le immagini.
- **Calibrazione del primo frame** Il telescopio riprende un'immagine full frame inviata a Terra per caratterizzare il campo di vista mostrato dall'immagine.

- **Osservazione scientifica** A questa punto della procedura, la modalità d'osservazione dello strumento viene cambiata in *window mode* nella quale le immagini vengono riprese con una cadenza pari al tempo di esposizione. Per ogni immagine, lo strumento calcola la posizione centrale, nella regione d'interesse, di una *sub-finestra* di area 51 pixel x 51 pixel e comunica la posizione deviata al sistema AOCS per apportare le ultime modifiche.

Occasionalmente la quantità di dati da mandare a Terra risulta maggiore del limite giornaliero di 1.2 Gb. Inoltre non tutti i dati hanno utilità scientifica. Per ridurre, quindi, la quantità di dati da inviare, e rientrare nel limite di scaricamento imposto, gli angoli delle immagini riprese con al centro il target vengono eliminati e ciò che effettivamente viene inviato è un'immagine con una forma circolare e un diametro di 200 pixel.

Nello specifico, la figura 3.8 mostra il processo di elaborazione delle immagini realizzato a bordo di CHEOPS, prima dell'invio a Terra dei dati. Il pannello A mostra l'immagine full frame di dimensioni 1024x1024 pixel. Tuttavia, l'immagine full frame è troppo carica di dati per poter essere trasmessa per cui si realizza un ritaglio di un'immagine circolare di 200 pixel di diametro con al centro il target (pannello B). Con essa vengono anche ritagliati i bordi laterali e quello superiore del campo del sensore in corrispondenza dell'area circolare. A questo punto, se il tempo di esposizione è maggiore di 30 secondi, l'immagine circolare e i corrispettivi margini vengono inviati a Terra senza ulteriori manipolazioni. Se invece la posa ha un tempo di esposizione minore di 30 secondi, le immagini vengono sommate a bordo ovvero ciò che verrà mandato a Terra sarà lo stack (somma) delle immagini e dei margini separatamente. In questo caso solo delle piccole *immaginette* contenenti la PSF della stella, vengono ritagliate e inviate a Terra individualmente. Ad esempio, come illustrato nel pannello C, se il tempo di esposizione è 15 secondi, un'immagine data dallo stack di quattro pose viene scaricata insieme allo stack dei margini e a quattro imaginette.



**Figura 3.8:** Questa figura mostra il processo di elaborazione delle immagini realizzato a bordo di CHEOPS. Il pannello A mostra l'immagine full frame, troppo ricca di dati per essere inviata interamente a Terra. Il pannello B mostra l'immagine che effettivamente verrà inviata, ovvero un'area circolare centrata attorno al target di 200 pixel di diametro e i rispettivi bordi laterali e superiori del campo di vista del sensore. Il pannello C riporta invece il processo di stack delle immagini circolari e dei bordi per pose con un tempo di esposizione di 15 secondi. In questo caso si invieranno la somma delle immagini, la somma dei bordi e 4 *imaginelette* individuali. (Benz et al., 2020)

## Capitolo 4

# Primi risultati: WASP-189b

Terminate le procedure di configurazione e settaggio del telescopio in orbita, CHEOPS ha osservato uno dei suoi primi target, un pianeta gioviano caldo, WASP-189b (Anderson et al., 2018), un gigante gassoso orbitante attorno alla stella HR 5599, di tipo A e con una magnitudine  $V = 6.6$ .

Sono pochi i pianeti noti transitare davanti a stelle di tipo A e la stella ospite risulta irradiare molto il pianeta. In questi aspetti risiede dunque l'interesse che il team scientifico mostra verso questo target.

Si suppone che il pianeta abbia una temperatura di equilibrio diurna di  $\sim 3400 K$  (Anderson et al., 2018). Esso orbita attorno ad una stella dei primi tipi morfologici simile all'oggetto estremo KELT-9b (Gaudi et al., 2017), con un periodo orbitale più lungo, di 2.7 giorni, rendendolo più simile, almeno in temperatura, ai pianeti che orbitano attorno a stelle di tipo F o G con periodi orbitali molto brevi.

Lo studio di WASP-189b è quindi molto importante per capire come il tipo di stella, e la sua conseguente distribuzione spettrale di energia, possa impattare, specie la radiazione di piccola lunghezza d'onda, sulle atmosfere planetarie. Inoltre il sistema è giovane ( $730 \pm 130 Myr$ ) per cui fornisce la possibilità di studiare l'evoluzione dei sistemi planetari nelle prime fasi.

In questo capitolo si descrivono le osservazioni di WASP-189b realizzate da CHEOPS e successivamente elaborate dal team scientifico. Si tratta di due transiti di fronte alla stella ospitante utilizzati al fine di aggiornare il valore del raggio e per determinare l'obliquità del sistema orbitale tenendo conto dell'effetto di gravity darkening della stella calda. Le quattro occultazioni sono state invece sfruttate per ottenere informazioni riguardo alla temperatura e alle proprietà riflettive del pianeta.

### 4.1 Osservazione del target

Le quattro occultazioni sono state osservate tra il 19 marzo e il 7 aprile 2020. Le osservazioni individuali sono durate tra 12.4 e 13 ore, per 7 o 8 orbite di 98.77 minuti.

I due transiti sono stati invece osservati il 15 e il 18 giugno 2020 e sono stati solo successivamente inclusi nelle analisi. Essi hanno coperto un totale di 6 orbite di CHEOPS.

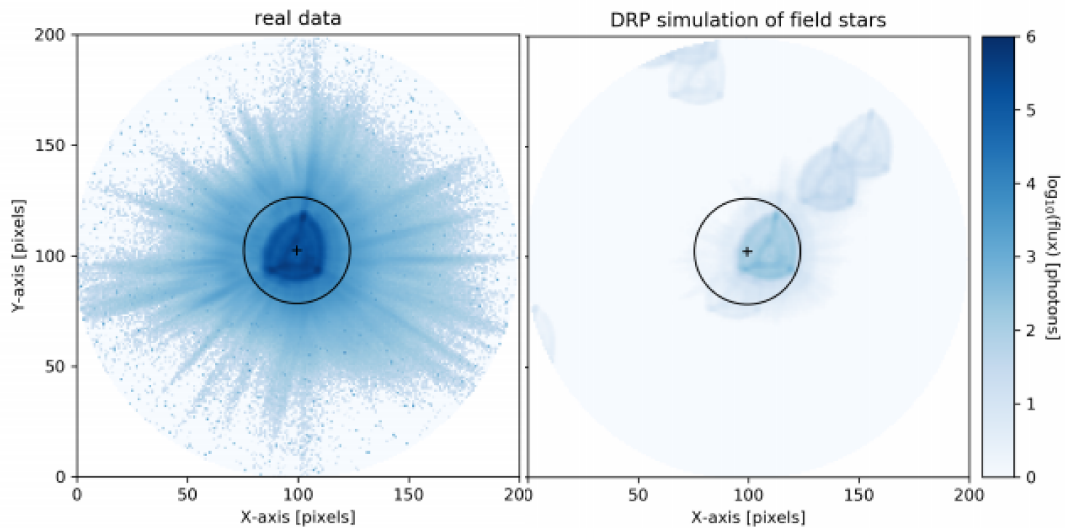
Le osservazioni sono state interrotte da 17 a 41 minuti per orbita a causa di occultazioni della Terra o del passaggio di CHEOPS sopra la South Atlantic Anomaly,

visibili come gap nelle curve di luce (si veda la figura 4.2). Il tempo di esposizione delle singole pose era 4.8 *sec*, a cui si aggiungevano esposizioni individuali di 7 *sec* l'una per la stella target con magnitudine 6.55 in banda G.

I dati raccolti sono stati poi processati secondo quanto previsto dalle procedure a bordo e a Terra (Hoyer et al., 2020), apportando correzioni alle immagini e usando la fotometria di apertura per estrarre i flussi del target a diverse aperture.

All'interno della curva di luce si sono evidenziate anche delle contaminazioni variabili che introducono una variazione di flusso a forma a V in fase con l'angolo di rotazione del telescopio attorno alla linea di vista. Queste variazioni mostrano un trend al variare del tempo, l'origine del quale potrebbe risiedere nelle stelle pulsanti tipo  $\delta$  Scuti e  $\gamma$  Doradus. Come spiegato da Hoyer et al. (2020), le procedure di riduzione dei dati (DRP, Data Reduction Pipeline) determinano il livello di contaminazione del flusso proveniente dalla stella alle diverse aperture e per ogni esposizione. Queste stime vengono realizzate attraverso simulazioni con e senza target.

Ad esempio, WASP-189b appare ben isolato nel campo di vista ma alcune simulazioni mostrano la contaminazione di due sorgenti deboli nell'apertura tra 14.4 e 18.9 di magnitudine in banda G e distanti 9 e 19 arcsec dal target rispettivamente. Un confronto tra la reale immagini e le simulazioni è riportato in figura 4.1.



**Figura 4.1:** L'immagine qui riportata mostra un esempio del campo di vista di CHEOPS a sinistra e la rispettiva simulazione DRP a destra. Il cerchio e la croce rappresentano l'apertura di fotometria e la posizione della PSF rispettivamente. Si nota chiaramente la forma triangolare della PSF dovuta ai tre supporti meccanici a cui è fissato lo specchio primario. (Lendl et al., 2020)

Lo studio del pianeta WASP-189b è certamente connesso alla conoscenza di alcuni importanti parametri stellari relativi a HR 5599. Si riportano qui di seguito quelli calcolati dal team scientifico.

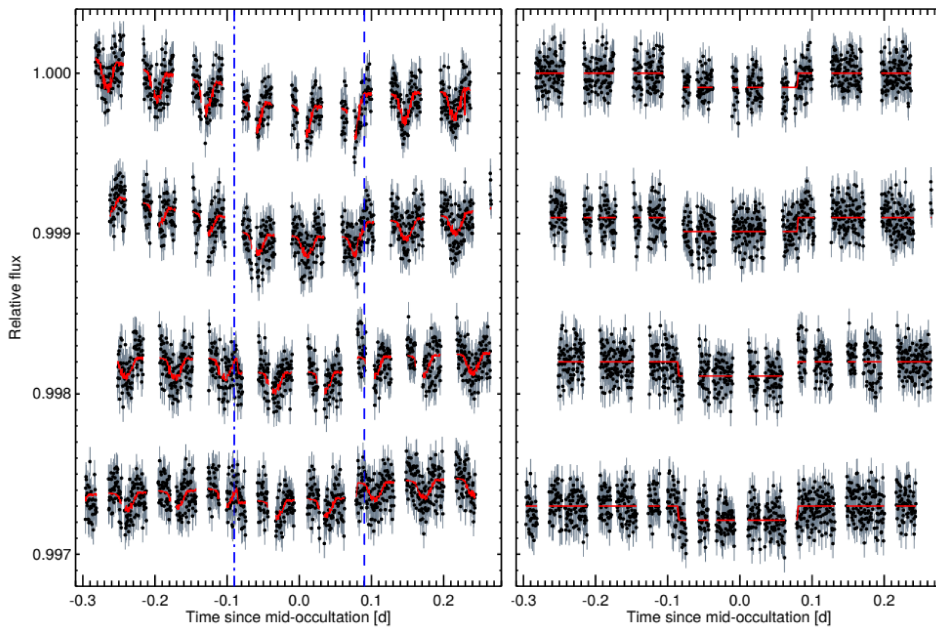
- La temperatura effettiva risulta essere  $T_{eff} = 8000 \pm 80 K$ ;



- Il logaritmo della gravità superficiale è pari a  $\log(g) = 3.9 \pm 0.2$ ;
- Il raggio della stella risulta essere  $R_* = 2.362 \pm 0.030 R_\odot$ ;
- La massa della stella è  $M_* = 2.030 \pm 0.066 M_\odot$ ;
- L'età della stella è  $730 \pm 130 \text{ Myr}$ .

## 4.2 Analisi dati

Nelle prime settimane di operazioni scientifiche nominali, sono state realizzate le immagini delle occultazioni, come mostrato in figura 4.2. Successivamente le misure di transiti hanno mostrato una profondità della curva di luce non attesa, rendendo necessaria una correzione del raggio planetario al fine di interpretare correttamente il segnale dell'occultazione. Questi dati sono stati quindi inseriti nell'analisi del sistema planetario.



**Figura 4.2:** Il grafico riporta le quattro occultazioni osservate da CHEOPS di WASP-189b. In entrambi i pannelli sono riportate cronologicamente, dall'alto verso il basso: 19, 27 e 30 marzo e 7 aprile 2020. Sulla sinistra si riportano le osservazioni non corrette (punti neri) insieme con la curva di luce dei modelli di transito (linea rossa). La linea blu verticale tratteggiata indica l'inizio e la fine dell'occultazione. Sulla destra i dati, rappresentati da punti neri, sono stati corretti per i trend stellari e strumentali, insieme con il modello dell'occultazione (linea rossa). (Lendl et al., 2020)

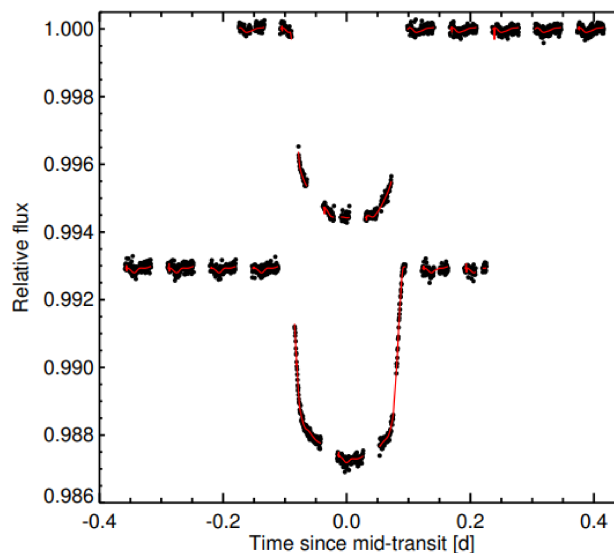
Il segnale delle occultazioni è stato analizzato insieme a tutti i segnali di origine non planetaria in modo da garantire una piena propagazione delle incertezze. Per

tenere conto del rumore correlato al segnale, sono stati utilizzati modelli parametrici (Gillon et al., 2010) e modelli che sfruttando la funzione gaussiana o metodi che combinino entrambi.

Per quanto riguarda i transiti, la precisione fotometrica di CHEOPS permette di osservare che la curva di luce risulta avere una forma asimmetrica a causa dell'effetto di gravity darkening dovuto alla combinazione dell'elevato tasso di rotazione della stella ospite e all'inclinazione del piano orbitale [(von Zeipel, 1924),(Barnes, 2009)]. Questo effetto rende infatti la stella uno sferoide oblatto che produce una conseguente asimmetria nella curva di luce. Data l'entità del fenomeno non trascurabile, esso ha meritato una specifica analisi.

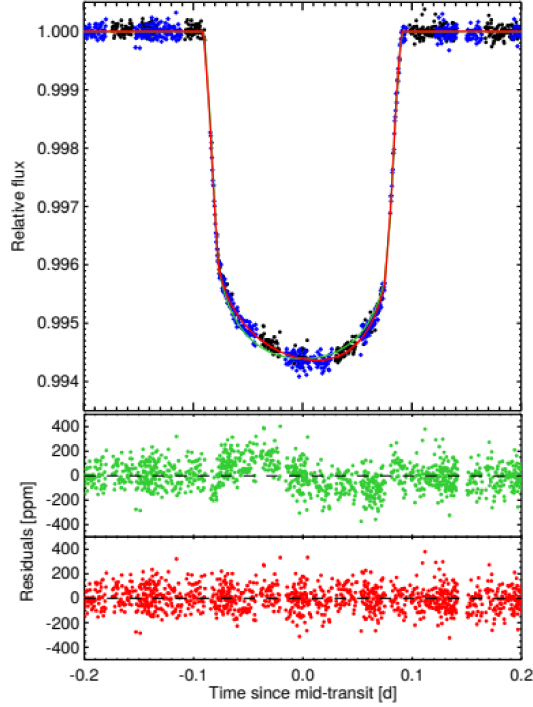
Per fare ciò è stato utilizzato il Modellatore di Curve di Luce e Transiti (Transit and Light Curve Modeller, TLM) esposto in Csizmadia (2020). Tuttavia, a causa della presenza dell'effetto di gravity darkening, sono state apportate delle modifiche al modello analitico che possano tener conto della variazione di flusso stellare emesso lungo il percorso del transito planetario.

In figura 4.3 sono riportati i due transiti registrati a giugno 2020 di WASP-189b.



**Figura 4.3:** L'immagine qui riportata mostra i due transiti realizzati da CHEOPS di WASP-189b. Le osservazioni sono i punti neri mentre la linea rossa individua il modello della curva di luce previsto per il transito. Il transito più in alto è stato ripreso il 15 giugno e quello più in basso il 18 giugno 2020. (Lendl et al., 2020)

La curva di luce finale risultante dai due transiti è invece riportata in figura 4.4. In essa si evidenzia come i dati ottenuti nelle due sessioni d'osservazione dei transiti forniscono fit delle curve di luce differenti a seconda che si consideri la presenza, oppure l'assenza, dell'effetto di gravity darkening (rispettivamente curve rosse e verdi). In entrambi i casi è individuabile un pattern residuo di dati (seconda parte del grafico).



**Figura 4.4:** Il grafico qui riportato mostra la curva di luce corretta dei due transiti di WASP-189b osservati da CHEOPS. I dati del 15 giugno 2020 sono mostrati in nero, quelli del 18 giugno 2020 in blu. Le curve rosse e verdi illustrano i modelli di best fit includendo ed escludendo, rispettivamente, l'effetto di gravity darkening. Nella seconda metà del grafico sono invece riportati i dati residui di ogni modello. I punti in verde si riferiscono al modello senza gravity darkening e quelli in rosso al modello con tale effetto. (Lendl et al., 2020)

### 4.3 Risultati

Le nuove e più precise osservazioni di CHEOPS permettono di rivedere i parametri dei sistemi planetari, così come la natura dell'effetto di gravity darkening della fotosfera stellare permette di derivare una misura indipendente dell'angolo tra il vettore momento angolare orbitale del pianeta e quello di rotazione stellare, ovvero l'obliquità stellare vera  $\Psi$  (si veda il paragrafo 2.1.1).

In particolare, la più importante differenza tra l'analisi realizzata da Anderson et al. (2018) e quella dal team di CHEOPS sta nel fatto che con le immagini realizzate dal telescopio spaziale si evidenzia un transito il 25% più profondo a cui corrisponde una raggio planetario il 15% più grande e quindi una densità media del pianeta più piccola. Nello specifico, il raggio del pianeta risulta  $R_p = 1.619 \pm 0.021 R_J$  dove  $R_J = 69911 \text{ km}$  è il raggio di Giove. La massa del pianeta è  $M_p = 1.99^{+0.16}_{-0.14} M_J$  dove  $M_J = 1.9 \times 10^{27} \text{ kg}$  è la massa di Giove. La densità planetaria media è quindi  $\rho_p = 0.469^{+0.058}_{-0.0275} \rho_J$  dove  $\rho_J = 1.33 \text{ g/cm}^3$  è la densità media di Giove.

La tabella seguente mostra i dati ottenuti dallo studio di Anderson et al. (2018) e Lendl et al. (2020).

Studio	Raggio	Massa	Densità media
Anderson et al. (2018)	$R_p = 1.374 \pm 0.082 R_J$	$M_p = 2.13 \pm 0.28 M_J$	$\rho_p = 0.83 \pm 0.10 \rho_J$
Lendl et al. (2020)	$R_p = 1.619 \pm 0.021 R_J$	$M_p = 1.99^{+0.16}_{-0.14} M_J$	$\rho_p = 0.469^{+0.058}_{-0.0275} \rho_J$

Questa discrepanza si può forse attribuire alla difficoltà di realizzare fotometria ad alta precisione per stelle luminose da Terra a causa della scarsità di stelle di riferimento vicine al target. Inoltre lo studio di Anderson et al. (2018) era ulteriormente limitato a transiti parziali ovvero non era in grado di realizzare osservazioni continuative per oltre 40 ore a causa del moto di rotazione terrestre. Questo comporta delle inevitabili imprecisioni nel determinare i trend fotometrici che a loro volta affettano la profondità osservata della curva di luce del transito. Al contrario, né il contributo dell'attività stellare né la rotazione del piano focale di CHEOPS attorno alla linea di vista, necessario per mantenere l'assetto del telescopio, sono tali da affettare sensibilmente la profondità del transito attesa per una stella della magnitudine di WASP-189.

Dall'analisi del fenomeno di gravity darkening, il team scientifico può riconfermare ciò che già si supponeva: questo sistema planetario è caratterizzato da un'orbita fortemente disallineata rispetto all'asse di rotazione stellare. Dagli studi di Anderson et al. (2018) era risultata un'obliquità stellare proiettata  $\lambda = 89.3 \pm 1.4 \text{ deg}$  mentre la fotometria ad alta precisione di CHEOPS fornisce  $\lambda = 86.4^{+2.9}_{-4.4} \text{ deg}$ . La vera obliquità stellare, da Anderson et al. (2018) era stata stimata essere  $\Psi = 90.0^\circ \pm 5.8^\circ$ . Lo studio di Lendl et al. (2020) ha fornito il nuovo valore di  $\Psi = 85.4^\circ \pm 4.3^\circ$ . I due studi hanno quindi fornito valori di  $\lambda$  e  $\Psi$  confrontabili fra loro. Nello specifico, l'elevato valore dell'obliquità stellare proiettata, unitamente alla giovane età della stella ( $730 \pm 130 \text{ Myr}$ ), può far supporre che si tratti di un sistema planetario ancora immerso nelle fasi iniziali della formazione e che quindi risulti instabile dinamicamente. Questo potrebbe spiegare l'intensa attività termica osservata all'interno del pianeta.

Studio	Obliquità proiettata	Obliquità vera
Anderson et al. (2018)	$\lambda = 89.3 \pm 1.4 \text{ deg}$	$\Psi = 90.0^\circ \pm 5.8^\circ$
Lendl et al. (2020)	$\lambda = 86.4^{+2.9}_{-4.4} \text{ deg}$	$\Psi = 85.4^\circ \pm 4.3^\circ$

### 4.3.1 Misure dell'occultazione

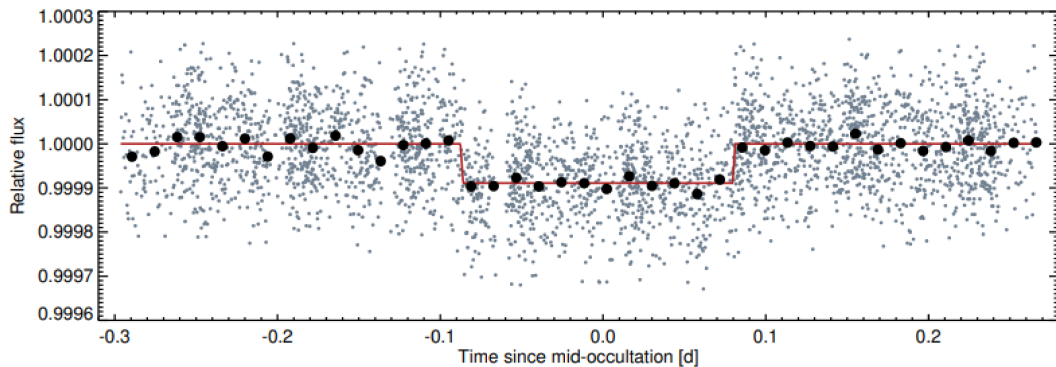
Sfruttando le quattro occultazioni di WASP-189b riprese dal telescopio spaziale, il team scientifico di CHEOPS ha rilevato nella banda d'osservazione dell'ottico una profondità della curva di luce di quattro transiti secondari di  $87.9 \pm 4.3 \text{ ppm}$ . Il valore è stato ottenuto con una media pesata sugli errori delle profondità delle quattro occultazioni. La precisione di questa misura supera le precedenti misurazioni ottenute con i telescopi spaziali CoRoT (Parviainen, H. et al., 2013) e TESS (Wong et al., 2020) ed è comparabile alla precisione delle misure della profondità d'occultazione misurate per gioviani caldi dal telescopio Kepler [(Angerhausen et al., 2015), (Esteves et al., 2015), (Morris et al., 2013) per lo stesso oggetto].

Nello specifico, le quattro occultazioni sono state analizzate individualmente per verificare che non vi fosse nessuna potenziale variazione della misura di profondità

della curva di luce. La tabella seguente mostra le profondità misurate per ogni occultazione.

Data (anno 2020)	19 Marzo	27 Marzo	30 Marzo	7 Aprile
$dF_{occ}$ ppm	$88.6^{+8.5}_{-11}$	$83.5^{+11.4}_{-8.5}$	$94.1^{+9.9}_{-9.6}$	$89.3^{+6.5}_{-6.9}$

I valori sono consistenti entro  $1\sigma$ , dove per  $\sigma$  si intende l'indice di dispersione statistica ovvero una stima della variabilità di dati. Come si può notare dai valori riportati nella tabella, non è stata trovata alcuna significativa variazione nel flusso di WASP-189b nei 19 giorni d'osservazione. La figura 4.5 mostra la curva di luce corretta fornita dai dati delle quattro occultazioni.



**Figura 4.5:** I dati provenienti dalle quattro occultazioni hanno permesso di realizzare la curva di luce dell'occultazione di WASP-189b. I punti neri mostrano l'andamento della curva di luce per intervalli di 20 minuti. La linea rossa individua il modello finale d'occultazione. (Lendl et al., 2020)

### 4.3.2 L'atmosfera di WASP-189b

Per interpretare la profondità dell'occultazione osservata è stato utilizzato uno specifico codice detto HELIOS che descrive il meccanismo di trasferimento radiativo all'interno del pianeta [(Malik et al., 2017), (Malik et al., 2019)] e che permette di calcolare la distribuzione spettrale di energia (Spectral Energy Distribution, SED).

Il modello atmosferico è assunto essere senza nubi e in equilibrio chimico con una metallicità atmosferica di circa  $M/H = 0.2 \pm 0.3$  dove per  $M$  si intendono i metalli (tutti gli elementi che non sono idrogeno ed elio) mentre per  $H$  si intende l'idrogeno. Le sorgenti di opacità sono principalmente linee spettrali di atomi e ioni metallici come Ca, Fe, Ti e Na (Kurucz & Bell, 1995) che erano state predette teoricamente (Kitzmann et al., 2018) e osservate con un'elevata risoluzione spettrale anche in altri gioviani molto caldi (Parviainen, H. et al., 2013).

Vale la pena notare che il codice HELIOS comprende anche contributi dovuti allo scattering di Rayleigh delle molecole ovvero dovuti alla diffusione della radiazione attraverso particelle di dimensioni minori rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione incidente. I modelli predicono che il pianeta WASP-189b possiede un'inversione termica, dedotta recentemente dalle osservazioni spettroscopiche ad alta

risoluzione realizzate da Yan et al. (2020). Nello specifico, assumendo una circolazione dell'energia inefficiente all'interno del pianeta e un albedo geometrico nullo, si ricava una temperatura planetaria del lato illuminato dalla stella ospite pari a  $T_{day} = 3435 \pm 27 K$ . Si ricorda che per albedo geometrico di un corpo si intende il rapporto tra la luminosità effettiva della stella e la luminosità di una superficie ideale che riflette l'energia incidente in modo isotropo (uguale in tutte le direzioni) per superfici piatte completamente riflettenti.

## Capitolo 5

# Confronto con le altre missioni

Nella seconda metà dello scorso secolo e negli ultimi decenni, di pari passo con il grande sviluppo tecnologico, sono state diverse le missioni dedicate direttamente alla scoperta e caratterizzazione di esopianeti. Così anche in futuro le agenzie spaziali prevedono progetti scientifici con questi scopi.

In questo capitolo si riportano in breve le principali missioni spaziali passate e future dedicate alla scoperta, allo studio e all'analisi di pianeti extrasolari, ponendo particolare attenzione agli elementi comuni e a quelli distintivi rispetto alla missione CHEOPS.

**La missione CoRoT** La missione CoRot (Convection Rotation et Transits) è stata una missione dell'Agenzia Spaziale Francese in collaborazione con ESA, Austria, Belgio, Germania, Spagna e Brasile. Essendo stata sviluppata a partire dalla fine degli anni '90 ed essendo stata lanciata nel 2007, CoRoT risulta essere temporalmente e tecnologicamente distanziata da CHEOPS.

CoRoT si distingue inoltre per gli obiettivi scientifici. La missione aveva lo scopo di realizzare studi pionieristici di asterosismologia ovvero studi che permettessero di capire come la struttura e l'attività stellare cambia in funzione delle pulsazioni e dello spettro stellare.

La scoperta di nuovi esopianeti era il secondo principale obiettivo del telescopio spaziale, nello specifico pianeti di tipo terrestre attraverso il metodo dei transiti primari. Questo metodo di ricerca è di fatto l'unico elemento comune alla missione CHEOPS, insieme al fatto che CoRoT era dotato di un telescopio di 270 mm di diametro, leggermente più piccolo di quello di cui è dotato CHEOPS.

Entrambi gli obiettivi sono stati soddisfatti realizzando misurazioni della variazione di luminosità del target stellare al variare del tempo. Le scoperte di esopianeti attraverso il transito vennero poi confermate a Terra da osservazioni con il metodo delle velocità radiali. Ciò che è risultato da tale missione è stata una raccolta di migliaia di curve di luce, sfruttate in missioni e survey terrestri successive. La missione è stata dichiarata conclusa nel 2013.

Una generale descrizione di CoRoT e dei suoi primi risultati risalenti al 2008 sono riportati da Baglin et al. (2008).

**La missione Kepler** Molto si potrebbe dire sulla missione che prende il nome dall'astronomo tedesco Johannes Kepler, trattandosi di una famosa e storica mis-

sione dell'Agencia Spaziale Americana NASA. Limitandosi a comparare la missione Kepler a quella europea CHEOPS, si nota immediatamente che il tubo ottico di Kepler presenta dimensioni maggiori (specchio primario di 1.4  $m$  e un'apertura di 950  $mm$ ).

L'obiettivo della missione (Latham, 2015), lanciata nel 2009 ed ancora operativa come missione K2, è principalmente individuare pianeti terrestri e super Terre nell'area abitabile in zone specifiche della Via Lattea (nella costellazione del Cigno per la missione Kepler e in altre zone scelte appositamente per la missione K2) nonché la stima numerica e lo studio dinamico dei sistemi planetari, sfruttando il metodo dei transiti.

La missione americana si distingue dunque da CHEOPS per la limitata area di cielo osservata, per il telescopio di apertura maggiore e per lo scopo, la scoperta di nuovi pianeti terrestri, al contrario di CHEOPS, già dotato di un catalogo di esopianeti da caratterizzare con maggior precisione. Kepler, inoltre, rispetto a CHEOPS, si avvantaggia di ben 10 anni di differenza in termini di sviluppo tecnologico.

**La missione TESS** La missione TESS, Transiting Exoplanet Survey, costituisce un altro importante passo nell'astronomia esoplanetaria. Si tratta di un progetto NASA, parte del programma Explorer, con il principale obiettivo di esaminare stelle luminose entro 200 parsec per individuare nuovi esopianeti orbitanti attorno ad esse. Lanciata un anno prima di CHEOPS, nel 2018, presenta molte affinità con la missione europea quali, ad esempio, il target di stelle luminose, il metodo del transito utilizzato e un livello tecnologico della strumentazione a bordo comparabile, nonostante l'obbiettivo sia differente.

Tuttavia TESS, non presentando limitazioni economiche alla classe della missione, si trova su un'orbita alta e molto ellittica che gli permette di realizzare osservazioni continuative per più di 300 ore per orbita e permette di minimizzare molto la straylight, tanto da renderla trascurabile.

A settembre del 2018 Huang et al. (2018) espone i primi risultati della missione, riportando la scoperta di un pianeta simile ad una super Terra in orbita molto stretta attorno alla stella ospite HD 39091 di tipo solare e che era già nota ospitare un pianeta gioviano.

**La missione PLATO** Proposta per la prima volta nel 2007, PLATO, PLANetary Transits and Oscillations of stars, (Rauer, 2017), è una missione del programma scientifico nell'ambito della Cosmic Vision di ESA nel periodo 2015-2025.

Come CHEOPS, utilizzerà il metodo dei transiti per realizzare analisi fotometriche di elevata precisione con lo scopo, però, di scoprire nuovi esopianeti. Come intuibile dal nome, avrà anche l'obiettivo di studiare le caratteristiche fondamentali della stella madre, come appunto le oscillazioni dovute a pulsazioni o attività stellari che permettono di indagare la struttura stellare interna e i meccanismi astrofisici delle stelle.

Similmente a CHEOPS, osserverà stelle brillanti, fornendo successivamente un catalogo di target per future survey spettroscopiche terrestri.

Ciò che distingue PLATO da CHEOPS è però il tipo di missione. Si tratta di un progetto di classe media e che dispone, quindi, di maggior tempo di sviluppo e risorse economiche per la progettazione e la costruzione. Esso sarà infatti dotato di



molteplici telescopi, 24 rifrattori innovativi per la configurazione ottica sviluppata presso la sede INAF di Padova, più 2 rifrattori usati come guida o per l'osservazione di speciali liste di stelle. Il lancio è previsto nel 2026.

**La missione ARIEL** Per completare il programma Cosmic Vision dell'ESA, è in fase di sviluppo la missione ARIEL, Atmospheric Remote-Sensing Infrared Exoplanet Large-survey, recentemente approvata dall'Istituto Spaziale Europeo. Si tratta di una missione di classe M che quindi, come PLATO, dispone di maggiore libertà di progettazione.

Come CHEOPS, il suo scopo non è scoprire nuovi pianeti extrasolari ma caratterizzarne di già conosciuti. Nello specifico, osserverà oltre 1000 pianeti, dalle dimensioni di Giove, a quelle di Nettuno fino alle super Terre, realizzando la prima significativa indagine sulla composizione chimica delle atmosfere planetarie e fornirà nuovi dati per meglio comprendere le teorie di formazione ed evoluzione dei pianeti.

La missione è stata selezionata nel marzo 2018 e si prevede di lanciarla nel 2028 per una durata nominale di circa 4 anni. A differenza di CHEOPS, sarà dotata di tecnologie più avanzate, sarà posizionata su un'orbita più alta e sarà il risultato di un consorzio di ben 60 istituti, di cui 15 dell'ESA.

Per i dettagli relativi al progetto ARIEL si consulti Pascale et al. (2018).

## Appendice A

### Il metodo dei transiti

Relativamente al metodo dei transiti riportato nel paragrafo 2.1.1, si possono analizzare vari aspetti qui di seguito riportati.

**Probabilità di transito** Seguendo sempre la trattazione di Winn (2014), i transiti di pianeti extrasolari possono avvenire solo entro una certa probabilità. Sia  $R_*$  il raggio stellare e  $R_p$  quello del pianeta e sia  $k = R_p/R_*$  il rapporto tra i raggi, un evento di transito può avvenire se è minimizzata la seguente quantità:

$$r_{sky} = r \sqrt{1 - \sin^2(\omega + f) \sin^2 i} \quad (\text{A.1})$$

dove  $\omega$  è l'argomento del pericentro,  $i$  l'inclinazione dell'orbita rispetto alla linea di vista,  $f$  l'anomalia vera dell'orbita e  $r$  la distanza propria tra stella e pianeta, definita come:

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos f} \quad (\text{A.2})$$

dove  $a$  è il semiasse maggiore dell'orbita ed  $e$  è l'eccentricità dell'orbita.

Sfruttando le coordinate cartesiane centrate sulla stella dove il piano X-Y è posizionato sul piano perpendicolare alla linea di vista e l'asse Z è posizionato lungo la linea di vista, la posizione del pianeta in questo sistema di riferimento è:

$$X = -r \cos(\omega + f) \quad (\text{A.3})$$

$$Y = -r \sin(\omega + f) \cos i \quad (\text{A.4})$$

$$Z = -r \sin(\omega + f) \sin i \quad (\text{A.5})$$

In tal modo  $r_{sky}$  si può riscrivere come  $r_{sky} = \sqrt{X^2 + Y^2}$ . Quando si verifica un transito  $r_{sky}$  appena ridefinito è minimizzato e poiché porta con sé un'algebra complessa si applica l'approssimazione  $X = 0$ , ovvero l'ipotesi che le eclissi avvengano in prossimità dei punti di *congiunzione* i quali possono essere *inferiori* quando avviene un transito (passaggio del pianeta di fronte alla stella) oppure *superiori* quando avviene un'occultazione (la stella si interpone tra il pianeta e l'osservatore). Tale approssimazione è generalmente valida, ad eccezione di orbite molto eccentriche e piccole nelle quali le eclissi avvengono tangenti al disco stellare.

Riferendosi a queste specifiche configurazioni, si individuano precise condizioni geometriche affinché un transito possa verificarsi. Nello specifico per i transiti primari vale la relazione:

$$f_{tra} = \frac{\pi}{2} - \omega \quad (\text{A.6})$$

mentre per le occultazioni vale:

$$f_{occ} = -\frac{\pi}{2} - \omega \quad (\text{A.7})$$

Da Winn (2014) si ricava inoltre che un transito o una occultazione si verificano solo se è rispettata la condizione  $|b| < 1 + k$  dove  $b$  è detto *parametro d'impatto* ed è definito come la distanza proiettata sul cielo tra la stella e il pianeta al momento della congiunzione, in unità di raggio stellare ovvero:

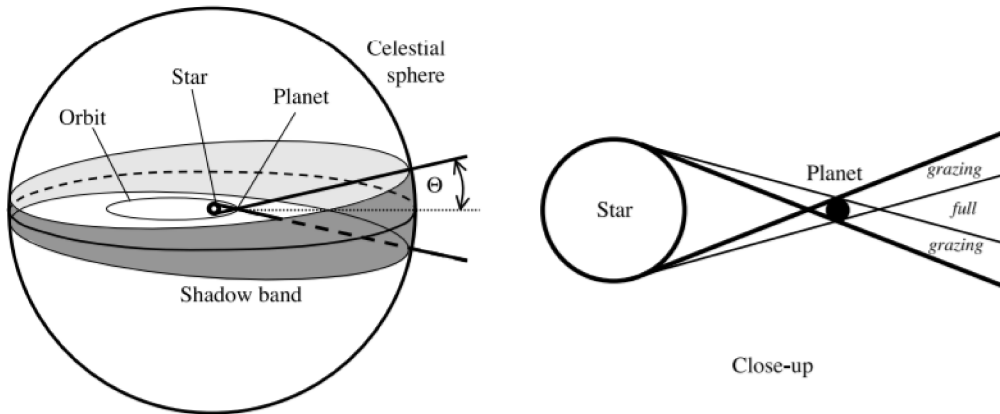
$$b_{tra} = \frac{a \cos i}{R_*} \frac{1 - e^2}{1 + e \sin \omega} \quad (\text{A.8})$$

per i transiti e:

$$b_{occ} = \frac{a \cos i}{R_*} \frac{1 - e^2}{1 - e \sin \omega} \quad (\text{A.9})$$

per le occultazioni. Per i casi in cui  $R_* \ll a$ , il moto apparente del pianeta attraverso il disco stellare è una linea retta compresa tra gli estremi  $X = \pm R_* \sqrt{1 - b^2}$  e  $Y = b R_*$ .

Nel passaggio del corpo celeste di fronte alla stella ospite, esso descrive un *cono d'ombra* e uno di *penombra* dell'ampiezza angolare di  $\theta$  che il pianeta proietta in cielo. La figura 2.3 riporta schematicamente la configurazione geometrica nel quale si viene a trovare il pianeta oggetto del transito.



**Figura A.1:** Rappresentazione schematica del cono d'ombra e di penombra che si vengono a creare a causa del transito di un pianeta di fronte alla stella ospite. (Winn, 2014)

Si consideri un osservatore che osservi il transito dall'interno della banda di ombra. Dal cono di penombra si verifica la condizione:

$$\sin \theta = \frac{R_* + R_p}{r} \quad (\text{A.10})$$

Per il cono d'ombra, interno a quello di penombra, vale invece:

$$\sin \theta = \frac{R_* - R_p}{r} \quad (\text{A.11})$$

Note queste condizioni e la configurazione geometrica del transito, la probabilità che un evento di transito si verifichi è data da:

$$p_{tra} = \frac{R_* \pm R_p}{a} \frac{1 + e \sin \omega}{1 - e^2} \quad (\text{A.12})$$

mentre per un'occultazione la probabilità è data da:

$$p_{occ} = \frac{R_* \pm R_p}{a} \frac{1 - e \sin \omega}{1 - e^2} \quad (\text{A.13})$$

dove il segno "+" considera anche le eclissi tangenti al disco stellare e il segno "-" le esclude.

Nel caso più semplice ed ideale di orbita circolare, ovvero  $e = 0$ , e per  $R_p \ll R_*$  si può applicare l'approssimazione:

$$p_{tra} = p_{occ} = \frac{R_*}{a} \approx 0.005 \left( \frac{R_*}{R_\odot} \right) \left( \frac{a}{1 \text{ AU}} \right) \quad (\text{A.14})$$

Dunque si nota che pianeti in orbite circolari possono realizzare transiti ed occultazioni in egual modo mentre per orbite eccentriche si possono verificare transiti senza occultazioni o viceversa. Nello specifico immaginando di osservare un pianeta distante 1 AU orbitante attorno ad una stella delle medesime dimensioni del Sole, si ha 1 probabilità su 200 di osservare un transito.

**Durata del transito e densità stellare** Da Winn (2014) e ricordando come sono definiti  $T_{tot}$  e  $T_{full}$  nel paragrafo 2.1.1, per orbite circolari si ricava che:

$$T_{tot} = \frac{P}{\pi} \sin^{-1} \left[ \frac{R_*}{a} \frac{\sqrt{(1+k)^2 - b^2}}{\sin i} \right] \quad (\text{A.15})$$

$$T_{full} = \frac{P}{\pi} \sin^{-1} \left[ \frac{R_*}{a} \frac{\sqrt{(1-k)^2 - b^2}}{\sin i} \right] \quad (\text{A.16})$$

nelle quali compaiono i differenti parametri orbitali e il periodo orbitale  $P$  del pianeta, tutti elementi calcolabili direttamente o ricavabili indirettamente.

Ricordando che  $\tau \simeq t_2 - t_1 \simeq t_4 - t_3$  e definendo  $T = T_{tot} - \tau$  l'intervallo temporale che intercorre tra la metà della fase di ingresso (e uscita) del disco planetario e considerando il transito di un pianeta in orbita circolare si trova che:

$$T \simeq T_0 \sqrt{1 - b^2} \tau \simeq \frac{T_0 k}{\sqrt{1 - b^2}} \quad (\text{A.17})$$

dove  $T_0$  è il tempo scala tipico ricavabile sfruttando la terza legge di Keplero ed è utile per stimare la densità della stella che ospita il pianeta. In formule:

$$T_0 = \frac{R_* P}{\pi a} \approx 13hr \left( \frac{P}{1yr} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\rho_*}{\rho_\odot} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (\text{A.18})$$

In questa equazione  $hr$  indica per ora,  $yr$  indica per anno,  $\rho_*$  è la densità della stella e  $\rho_\odot$  è la densità del Sole.

**Il raggio del pianeta** Il flusso luminoso totale  $F(t)$  osservato è la somma di quello del pianeta e quello della stella, quest'ultimo molto maggiore rispetto al primo. La curva di luce generata dal transito o da un'occultazione di un esopianeta è un diagramma che, per quanto descritto precedentemente, individua delle diminuzioni la cui profondità può essere sfruttata per determinare il raggio del pianeta. La profondità della curva di luce in caso di transiti, detta  $\delta_{tra}$  ovvero *profondità di transito*, dipende dal flusso stellare e planetario secondo la relazione:

$$\delta_{tra} \approx \frac{F_* - F_p}{F_*} \approx k^2 \left[ 1 - \frac{I_p(tra)}{I_*} \right] \approx k^2 \quad (\text{A.19})$$

nella quale  $I_p$  e  $I_*$  sono rispettivamente l'intensità della radiazione emessa dal pianeta e dalla stella.  $\delta_{tra}$  corrisponde dunque alla profondità della curva di luce all'istante centrale del transito  $t_c$ , dove il flusso osservato risulta essere minimo, ed è proporzionale al quadrato del rapporto tra raggio planetario e quello stellare. Questo permette di determinare il raggio del pianeta, supponendo di conoscere quello della stella. Matematicamente, vale l'approssimazione (Perryman, 2000):

$$\frac{\Delta L}{L_*} \simeq \left( \frac{R_p}{R_*} \right)^2 \quad (\text{A.20})$$

nella quale  $\Delta L$  è il calo di luminosità prodotto da un oggetto che realizza un transito di fronte alla stella ospite,  $L_*$  è la luminosità della stella,  $R_p$  il raggio del pianeta e  $R_*$  il raggio della stella. L'assunzione è valida per una stella con luminosità superficiale uniforme. Il passaggio da flusso  $F$ , energia per unità di tempo per unità di area, a luminosità  $L$ , energia per unità di tempo, è stato realizzato tenendo conto della relazione che intercorre fra i due, ovvero, nell'ipotesi di emissione isotropa,  $L = 4\pi d^2 F$  dove  $d$  è la distanza della stella dall'osservatore.

Per le occultazioni vale invece la relazione:

$$\delta_{occ} \approx \frac{F(t_c) - F_*}{F_*} \approx k^2 \frac{I_p(t_{occ})}{I_*} \quad (\text{A.21})$$

**Periodo orbitale, eccentricità e sequenza di transiti** Sfruttando tecniche fotometriche di elevata precisione possiamo anche ricavare l'informazione del periodo orbitale  $P$  del pianeta. Osservando il pianeta tramite il metodo dei transiti, si può ricavare il tempo di congiunzione dell' $n$ -esimo transito a partire da quello osservato al tempo  $t_c(0)$  ovvero:

$$t_c(n) = t_c(0) + nP \quad (\text{A.22})$$

detta *effemeride lineare*. Certamente, maggiore è il numero delle osservazioni di transiti, maggiore sarà il distacco temporale fra questi e dunque migliore sarà la stima del periodo  $P$ . Per orbite con eccentricità  $e = 0$ , circolari, il periodo che intercorre tra un transito e un'occultazione è  $\Delta t_c = \frac{P}{2}$  mentre più in generale vale:

$$\Delta t_c \approx \frac{P}{2} \left( 1 + \frac{4}{\pi} e \cos \omega \right) \quad (\text{A.23})$$

Conoscendo il periodo orbitale  $P$ , sfruttando la terza legge di Keplero, si può ricavare il semiasse maggiore dell'orbita  $a$ . Quantificare  $\Delta t_c$  dalla A.23 permette inoltre di ricavare l'eccentricità  $e$  e il valore di  $\cos \omega$  che, combinati con il valore di  $e \sin \omega$  ottenibile conoscendo le durate di transito  $T_{tra}$  e occultazione  $T_{occ}$  dalla relazione  $\frac{T_{occ}}{T_{tra}} \approx \frac{1+e \sin \omega}{1-e \sin \omega}$ , permette di stimare singolarmente l'eccentricità e l'argomento del pericentro.

## Appendice B

# La configurazione Ritchey-Chrétien

La configurazione ottica del telescopio Ritchey-Chrétien è stata sviluppata nella prima metà del XX secolo dall'astronomo statunitense George Ritchey e dall'astronomo francese Henri Chrétien.

Si tratta di un telescopio riflettore ed è l'evoluzione della configurazione ottica Cassegrain.

In generale i telescopi riflettori sono costituiti da uno specchio di forma concava o convessa la cui superficie è descritta dall'equazione di una conica in coordinate cilindriche:

$$(1 + b)z^2 - 2Rz + r^2 = 0 \quad (\text{B.1})$$

nella quale  $z$  ed  $r$  sono le variabili delle coordinate cilindriche che si ricordano essere  $(r \cos \theta, r \sin \theta, z)$  e dove  $R$  è il raggio di curvatura della conica. Al variare di  $b$  parametro, cambia anche la conica:

- $b > 0$  per un ellissoide oblato;
- $b = 0$  per una sfera;
- $-1 < b < 0$  per un paraboloide;
- $b < -1$  per un iperboloide.

Esplicitando  $z$  in funzione di  $r$ , realizzandone uno sviluppo di Taylor e appor-tando delle opportune sostituzioni e riscritture algebriche, si ottiene la lunghezza focale del telescopio riflettore in funzione di  $R$  raggio di curvatura e  $b$  parametro:

$$f = \frac{R}{2} - (1 + b)\frac{r^2}{4R} - (1 + b)(3 + b)\frac{r^4}{16R^3} - \dots \quad (\text{B.2})$$

Un telescopio riflettore è soggetto a diverse aberrazioni ottiche date dalla struttura stessa del telescopio e dai limiti di costruzione del sistema ottico. Minimizzare questi disturbi ottici è di particolare importanza per ottenere immagini scientificamente valide.

In particolare, per un telescopio a due specchi, Schwarzschild ha calcolato i coefficienti correlati alle principali aberrazioni ottiche dei riflettori ovvero quelle che fanno perdere di stigmatismo al sistema.

L'aberrazione sferica, ad esempio, è un'aberrazione monocromatica che trasforma una sorgente puntiforme in un disco. Essa è individuata dal coefficiente  $B$ :

$$B = \frac{1 + b_1}{8f_1^3} - \left[ b_2 + \left( \frac{f + f_1}{f - f_1} \right)^2 \right] \frac{(f - f_1)^3 (f_1 - d)}{8f^3 f_1^4} \quad (\text{B.3})$$

nella quale  $b_1$  è il parametro che definisce la forma dello specchio primario,  $b_2$  è il parametro che definisce la forma del secondario,  $d$  è la distanza che separa specchio primario e secondario,  $f_1$  la focale del primario,  $f_2$  la focale del secondario e  $f$  la focale equivalente data da:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \quad (\text{B.4})$$

Generalmente dovuto a due diverse curvature dello specchio, l'astigmatismo invece è un tipo di difetto ottico che ha come conseguenza l'allungamento dell'immagine della sorgente. Esso è individuato dal coefficiente  $C$ :

$$C = \frac{f_1(f - d)}{2f^2(f_1 - d)} - \left[ b_2 + \left( \frac{f + f_1}{f - f_1} \right)^2 \right] \frac{(f - f_1)^3 d^2}{8f^3 f_1^2 (f_1 - d)} \quad (\text{B.5})$$

Infine la coma è un'aberrazione causata dai raggi obliqui che cadono al di fuori dell'asse ottico. Esso ha come effetto la distorsione dell'immagine che appare, appunto, come una cometa. Questo tipo di aberrazione è individuata dal coefficiente  $F$ :

$$F = \frac{1}{4f^2} + \left[ b_2 + \left( \frac{f + f_1}{f - f_1} \right)^2 \right] \frac{(f - f_1)^3 d}{8f^3 f_1^3} \quad (\text{B.6})$$

Un telescopio di tipo Ritchey-Chrétien è un modello che elimina l'effetto di aberrazione sferica e aberrazione di coma, ovvero una configurazione per la quale  $B(b_1, b_2) = 0$  e  $F(b_2) = 0$ . Matematicamente:

$$B = 0 \Rightarrow \frac{1 + b_1}{8f_1^3} - K \frac{(f - f_1)^3 (f_1 - d)}{8f^3 f_1^4} = 0 \quad (\text{B.7})$$

$$F = 0 \Rightarrow \frac{1}{4f^2} + K \frac{(f - f_1)^3 d}{8f^3 f_1^3} = 0 \quad (\text{B.8})$$

dove:

$$K = b_2 + \left( \frac{f + f_1}{f - f_1} \right)^2 \quad (\text{B.9})$$

Dalla seconda equazione si ricava che:

$$K = -\frac{2ff_1^3}{(f - f_1)^3 d} = b_2 + \left( \frac{f + f_1}{f - f_1} \right)^2 \quad (\text{B.10})$$

da cui, sostituendo  $K$ , si ricava:

$$b_2 = -\frac{2ff_1^3}{(f - f_1)^3 d} - \left( \frac{f + f_1}{f - f_1} \right)^2 \quad (\text{B.11})$$



Sostituendo ora il valore di  $b_2$  nell'espressione del coefficiente  $B$ , si ottiene:

$$\frac{1 + b_1}{8f_1^3} + \frac{2ff_1^3}{(f - f_1)^3d} \frac{(f - f_1)^3(f_1 - d)}{8f^3f_1^4} = 0 \quad (\text{B.12})$$

Da quest'ultima espressione si può ricavare la definizione di  $b_1$  data da:

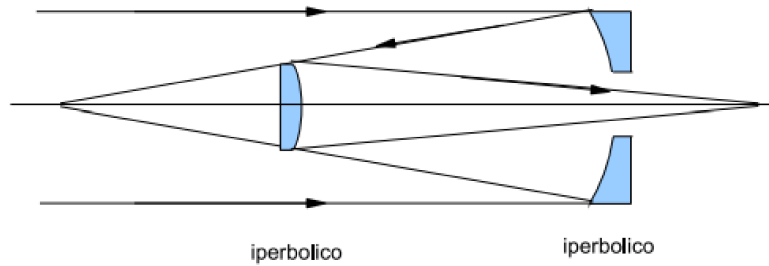
$$b_1 = -1 - 2\frac{f_1 - d}{d} \left(\frac{f_1}{f}\right)^2 \quad (\text{B.13})$$

Ora se  $f_1 > d$  cioè se la distanza che separa specchio primario e secondario è minore della lunghezza focale del primario, così come avviene nella configurazione in questione nota appunto per la sua compattezza, si ottiene  $b_1 < -1$  cioè il primario è uno specchio iperbolico.

D'altra parte se consideriamo l'espressione di  $b_2$  data dall'equazione B.11, ci si accorge che  $b_2 < -1$  ovvero si nota che anche il secondario è iperbolico.

La configurazione Ritchey-Chrétien è dunque dotata di due specchi iperbolici, il primario concavo e il secondario convesso. Il sistema ottico nel suo complesso risulta molto compatto, nonostante la grande lunghezza focale che lo caratterizza e con effetti di aberrazione sferica e di coma del tutto trascurabili. Calcoli matematici del coefficiente  $C$  mostrano che l'astigmatismo, seppur presente, è comunque un fenomeno di entità non significativa.

La figura B.1 riporta un grafico esemplificativo del telescopio Ritchey-Chrétien.



**Figura B.1:** L'immagine qui riportata mostra lo schema della configurazione Ritchey-Chrétien nel quale è visibile la forma dello specchio primario iperbolico concavo posto sul fondo del tubo ottico e la forma dello specchio secondario iperbolico convesso di dimensioni minori rispetto al primario e posto all'interno del tubo ottico. Il primario ha un foro al centro che permette ai raggi luminosi di fuoriuscire dal tubo ottico e focalizzarsi sul piano focale.

# Bibliografia

- Anderson D. R., et al., 2018, *WASP-189b: an ultra-hot Jupiter transiting the bright A star HR 5599 in a polar orbit*, arXiv e-prints, p. [arXiv:1809.04897](https://arxiv.org/abs/1809.04897)
- Angerhausen D., DeLarme E., Morse J. A., 2015, *A Comprehensive Study of Kepler Phase Curves and Secondary Eclipses: Temperatures and Albedos of Confirmed Kepler Giant Planets*, , [127](#), [1113](#)
- Baglin A., et al., 2006, in 36th COSPAR Scientific Assembly. p. 3749
- Baglin A., Auvergne M., Barge P., Deleuil M., Michel E., 2008, *CoRoT: Description of the Mission and Early Results*, [Proceedings of the International Astronomical Union](#), 4, 71
- Barnes J. W., 2009, *Transit Lightcurves of Extrasolar Planets Orbiting Rapidly Rotating Stars*, , [705](#), [683](#)
- Beck T., et al., 2017. p. 245, [doi:10.1117/12.2296216](https://doi.org/10.1117/12.2296216)
- Benz W., et al., 2020, *The CHEOPS mission* ([arXiv:2009.11633](https://arxiv.org/abs/2009.11633))
- Bergomi M., et al., 2014, in Oschmann Jacobus M. J., Clampin M., Fazio G. G., MacEwen H. A., eds, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series Vol. 9143, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. p. 91435B, [doi:10.1117/12.2056635](https://doi.org/10.1117/12.2056635)
- Bergomi M., et al., 2016, in MacEwen H. A., Fazio G. G., Lystrup M., Batalha N., Siegler N., Tong E. C., eds, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series Vol. 9904, Space Telescopes and Instrumentation 2016: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. p. 990439, [doi:10.1117/12.2232136](https://doi.org/10.1117/12.2232136)
- Bergomi M., et al., 2018. p. 177, [doi:10.1117/12.2313992](https://doi.org/10.1117/12.2313992)
- Broeg C., et al., 2013, *CHEOPS: A transit photometry mission for ESA's small mission programme*, [EPJ Web of Conferences](#), 47, 03005
- Chazelas B., Deline A., Wildi F., Sarajlic M., Sordet M., Kuntzer T., 2019, in International Conference on Space Optics &mdash; ICSO 2018. p. 111802U, [doi:10.1117/12.2536021](https://doi.org/10.1117/12.2536021)
- Csizmadia S., 2020, *The Transit and Light Curve Modeller*, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 496, 4442

- Deline A., et al., 2020, *Expected performances of the Characterising Exoplanet Satellite (CHEOPS)*, [Astronomy & Astrophysics](#), 635, A22
- Esteves L. J., De Mooij E. J. W., Jayawardhana R., 2015, *Changing Phases of Alien Worlds: Probing Atmospheres of Kepler Planets with High-precision Photometry*, , [804](#), [150](#)
- Futyan D., et al., 2020, *Expected performances of the Characterising Exoplanet Satellite (CHEOPS)*, [Astronomy & Astrophysics](#), 635, A23
- Gaidos E., Kitzmann D., Heng K., 2017, *Exoplanet characterization by multi-observatory transit photometry with TESS and CHEOPS*, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 468, 3418
- Gaudi B. S., et al., 2017, *A giant planet undergoing extreme-ultraviolet irradiation by its hot massive-star host*, , [546](#), [514](#)
- Gillon M., et al., 2010, *The thermal emission of the young and massive planet CoRoT-2b at 4.5 and 8  $\mu\text{m}$* , , [511](#), [A3](#)
- Hoyer S., Guterman P., Demangeon O., Sousa S. G., Deleuil M., Meunier J. C., Benz W., 2020, *Expected performances of the Characterising Exoplanet Satellite (CHEOPS). III. Data reduction pipeline: architecture and simulated performances*, , [635](#), [A24](#)
- Huang C. X., et al., 2018, *TESS Discovery of a Transiting Super-Earth in the  $\pi$  Mensae System*, [The Astrophysical Journal](#), 868, L39
- Kitzmann D., et al., 2018, *The Peculiar Atmospheric Chemistry of KELT-9b*, , [863](#), [183](#)
- Knutson H. A., et al., 2007, *A map of the day–night contrast of the extrasolar planet HD 189733b*, [Nature](#), 447, 183–186
- Koch D. G., et al., 2010, *Kepler Mission Design, Realized Photometric Performance, and Early Science*, , [713](#), [L79](#)
- Kurucz R., Bell B., 1995, *Atomic Line Data*, Atomic Line Data (R.L. Kurucz and B. Bell) Kurucz CD-ROM No. 23. Cambridge, [23](#)
- Latham D., 2015, *Kepler Mission*. pp 1329–1333, [doi:10.1007/978-3-662-44185-5\\_846](#)
- Lendl M., et al., 2020, *The hot dayside and asymmetric transit of WASP-189b seen by CHEOPS* ([arXiv:2009.13403](#))
- Magrin D., et al., 2018, in Lystrup M., MacEwen H. A., Fazio G. G., Batalha N., Siegler N., Tong E. C., eds, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series Vol. 10698, Space Telescopes and Instrumentation 2018: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. p. 106983B, [doi:10.1117/12.2313406](#)
- Malik M., et al., 2017, *HELIOS: An Open-source, GPU-accelerated Radiative Transfer Code for Self-consistent Exoplanetary Atmospheres*, , 153, 56

- Malik M., Kitzmann D., Mendonça J. M., Grimm S. L., Marleau G.-D., Linder E. F., Tsai S.-M., Heng K., 2019, *Self-luminous and Irradiated Exoplanetary Atmospheres Explored with HELIOS*, , 157, 170
- Masuda K., 2018, *Measurements of Stellar Obliquities*. pp 21–34, doi:10.1007/978-981-10-8453-9`2
- Mayor M., Queloz D., 1995, *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*, , 378, 355
- Morris B. M., Mandell A. M., Deming D., 2013, *Kepler’s Optical Secondary Eclipse of HAT-P-7b and Probable Detection of Planet-induced Stellar Gravity Darkening*, , 764, L22
- Parviainen, H. Deeg, H. J. Belmonte, J. A. 2013, *Secondary eclipses in the CoRoT light curves - A homogeneous search based on Bayesian model selection*, *A&A*, 550, A67
- Pascale E., et al., 2018, in Lystrup M., MacEwen H. A., Fazio G. G., Batalha N., Siegler N., Tong E. C., eds, Vol. 10698, *Space Telescopes and Instrumentation 2018: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*. SPIE, pp 169 – 178, doi:10.1117/12.2311838, <https://doi.org/10.1117/12.2311838>
- Perryman M. A. C., 2000, *Extra-solar planets*, *Reports on Progress in Physics*, 63, 1209–1272
- Rando N., et al., 2018, in Lystrup M., MacEwen H. A., Fazio G. G., Batalha N., Siegler N., Tong E. C., eds, Vol. 10698, *Space Telescopes and Instrumentation 2018: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*. SPIE, pp 191 – 204, doi:10.1117/12.2311300, <https://doi.org/10.1117/12.2311300>
- Rauer H., 2017, in EGU General Assembly Conference Abstracts. EGU General Assembly Conference Abstracts. p. 4829
- Rauer H., et al., 2014, *The PLATO 2.0 mission*, *Experimental Astronomy*, 38, 249
- Ricker G. R., et al., 2014, in Oschmann Jacobus M. J., Clampin M., Fazio G. G., MacEwen H. A., eds, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series Vol. 9143, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*. p. 914320 ([arXiv:1406.0151](https://arxiv.org/abs/1406.0151)), doi:10.1117/12.2063489
- Seager S., Deming D., 2009, *On the Method to Infer an Atmosphere on a Tidally Locked Super Earth Exoplanet and Upper Limits to GJ 876d*, , 703, 1884
- Thiabaud A., Marboeuf U., Alibert Y., Leya I., Mezger K., 2015, *Elemental ratios in stars vs planets*, , 580, A30
- Wildi F., Chazelas B., Deline A., Sarajlic M., Sordet M., 2017, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. p. 105623H, doi:10.1117/12.2296041

- Winn J. N., 2014, *Transits and Occultations* ([arXiv:1001.2010](#))
- Wong I., et al., 2020, *Systematic Phase Curve Study of Known Transiting Systems from Year One of the TESS Mission*, [The Astronomical Journal](#), 160, 155
- Yan F., et al., 2020, *A temperature inversion with atomic iron in the ultra-hot dayside atmosphere of WASP-189b*, [Astronomy & Astrophysics](#), 640, L5
- Zeng L., et al., 2019, *Growth model interpretation of planet size distribution*, [Proceedings of the National Academy of Sciences](#), 116, 9723
- von Zeipel H., 1924, *The radiative equilibrium of a slightly oblate rotating star*, , [84](#), [684](#)



## Ringraziamenti

Desidero ricordare tutti coloro che mi hanno aiutato nella stesura di questo elaborato con suggerimenti, critiche ed osservazioni: a loro va la mia gratitudine.

Vorrei ringraziare per la professionalità, la cortesia e la disponibilità la mia relattrice, la professoressa Viotto, la correlatrice, la professoressa Granata e il professor Ortolani.

Un ringraziamento particolare va ai miei amici e compagni di corso che mi hanno sempre incoraggiato e con i quali ho condiviso gran parte della mia quotidianità padovana; grazie a Greta, Linda, Flavio, Fabrizio, Giulia, Erika, Nicola, Marco, Mario e Carlo. Grazie per le serate in aula studio, il supporto morale in periodo di sessione, le feste e le serate in compagnia.

Vorrei infine ringraziare le persone a me più care che mi hanno accompagnato in questo percorso formativo e di vita dal primo all'ultimo anno: i miei genitori, Maria Grazia e Fiorenzo, il mio fidanzato Luca, mia sorella Silvia, mio cognato Claudio, mia nipote Lilith, mia zia Lucia e le mie cugine Eleonora ed Eva ed i miei amici Romeo, Luca ed Elisa.

Un sentito grazie a tutti per il supporto che mi avete dimostrato in questo percorso professionale e personale concluso con grande soddisfazione.