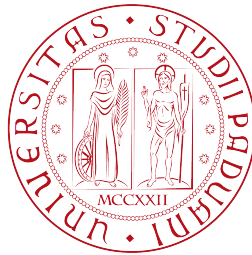


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA

CORSO DI LAUREA IN ASTRONOMIA

TESI DI LAUREA TRIENNALE

Ricerca di target per la missione ARIEL

Relatore:
Prof. Giampaolo Piotto
Correlatore:
Prof. Valerio Nascimbeni

Candidata:
Alice Boin
Matr.:1094169

Anno Accademico 2017-2018

Sommario

ARIEL è un satellite ESA, proposto per il lancio nel 2028, che si occuperà di studiare le atmosfere dei pianeti extrasolari tramite la spettroscopia di trasmissione ed emissione nell'infrarosso. Scopo di questa tesi è individuare quali tra i pianeti transitanti già noti saranno osservabili da ARIEL e con quale priorità, basandosi sia su criteri tecnici che scientifici.

I target risultati idonei ad essere osservati da ARIEL sono 468: 379 sono pianeti gassosi ($M_p > 15 M_e$), di cui 27 *warm Jupiters* e 191 *hot Jupiters*; 61 sono pianeti di transizione ($5M_e < M_p < 15M_e$), di cui 19 *warm* e 30 *hot*; 28 sono pianeti terrestri ($M_p < 5 M_e$), di cui 9 *warm* e 11 *hot*.

Indice

Introduzione	2
1 Studio degli esopianeti	5
1.1 Tecniche di osservazione	5
1.1.1 Velocità radiali	5
1.1.2 Astrometria	6
1.1.3 Timing	6
1.1.4 Microlensing	7
1.1.5 Imaging	7
1.1.6 Transitto	8
1.2 Studio di una atmosfera planetaria	11
1.2.1 Spettroscopia di trasmissione	12
1.2.2 Spettroscopia di emissione	13
2 La missione	15
2.1 Obiettivi Scientifici	17
2.1.1 Domande chiave per ARIEL	19
2.1.2 Il Sistema Solare in un contesto più ampio	21
2.1.3 Formazione ed evoluzione di pianeti ricchi di gas	22
2.1.4 Formazione ed evoluzione di pianeti di transizione	23
2.1.5 Formazione ed evoluzione di pianeti rocciosi/ ghiacciati	24
2.1.6 Pianeti in condizioni rare ed estreme	25
2.2 Requisiti scientifici	26
2.3 Payload	27
2.3.1 Il telescopio di ARIEL	27
2.3.2 Ottiche comuni, lenti dicroiche e unità di calibrazione	28
2.3.3 AIRS - ARIEL InfraRed Spectrometer	28
3 Ricerca dei target	30

4	Target individuati	37
5	Target di interesse specifico	50
5.1	Sinergie con JWST	56
6	Conclusione	58

Introduzione

L'idea dell'esistenza di altri pianeti al di fuori del Sistema Solare ha origini molto antiche nel tempo. Già nel V secolo a.C. Anassagora sosteneva la teoria della pluralità dei mondi e successivamente nel XVI secolo Giordano Bruno proponeva il concetto di Universo infinito popolato di infiniti mondi. Si deve attendere il 1995 per passare dalla teoria alla pratica, con la scoperta del primo pianeta extrasolare attorno alla stella 51 Pegasi, realizzata da M. Mayor e D. Queloz dell'Osservatorio di Ginevra. Questo evento segna la nascita di un nuovo promettente settore dell'astronomia, lo studio degli esopianeti, che da allora ha vissuto un progresso rapido e crescente grazie anche alla realizzazione di missioni dedicate, come CoRoT, Kepler, K2 e Gaia e alla scoperta di sempre più numerosi sistemi planetari. La missione TESS per la ricerca fotometrica di pianeti transitanti è stata lanciata ad aprile 2018 e altre sono in fase di preparazione come CHEOPS, PLATO e il telescopio spaziale JWST, erede di HST.

La scienza dei pianeti è giunta alla soglia di una rivoluzione nella comprensione del nostro posto nell'Universo: quanto sono speciali la Terra e il Sistema Solare, e perché? Finora sono quasi 4000 gli esopianeti scoperti e confermati, ma conoscerne l'esistenza non è sufficiente, l'obiettivo adesso è comprendere i meccanismi di formazione ed evoluzione dei sistemi planetari. Per fare questo è necessario disporre non solo di un grande campione di oggetti, ma anche effettuare uno studio approfondito delle loro caratteristiche fisiche e chimiche, tramite l'osservazione delle loro atmosfere.

È in questo contesto che si inserisce la missione ARIEL, Atmospheric Remote-sensing InfraRed Large survey, proposta nell'ambito di Cosmic Vision 2015-2025 e confermata per il lancio nel 2028. ARIEL è una missione dedicata alla caratterizzazione delle atmosfere di un campione di centinaia o anche migliaia di esopianeti tramite la spettroscopia di trasmissione, di emissione e lo studio delle curve di fase. Lo scopo della missione è progredire nella conoscenza della composizione e dei meccanismi di formazione ed evoluzione dei sistemi planetari, dei singoli pianeti e delle loro atmosfere.

L'obiettivo di questa tesi è dunque di selezionare fra i pianeti finora sco-

perti quelli più idonei ad essere osservati durante i quattro anni di durata prevista della missione ARIEL, tenendo conto delle caratteristiche tecniche e dei requisiti scientifici richiesti da ARIEL. Inoltre si vogliono mettere in evidenza gli oggetti di maggior interesse scientifico, indicandone le proprietà che li rendono tali.

Capitolo 1

Studio degli esopianeti

1.1 Tecniche di osservazione

Brillando essenzialmente di luce riflessa, gli esopianeti simili ai pianeti del nostro Sistema Solare sono miliardi di volte più deboli della loro stella madre e hanno una separazione angolare da essa di al più qualche secondo d'arco, a seconda della loro distanza. La combinazione di questi fattori ne rende estremamente difficile la rilevazione diretta, specialmente in ottico dove il rapporto di intensità pianeta-stella è molto piccolo (dell'ordine di 10^{-9} per un pianeta come la Terra e 10^{-4} per un *hot Jupiter*). Nelle rilevazioni da terra le misure sono ulteriormente complicate dagli effetti di perturbazione atmosferica. Esistono tuttavia una varietà di tecniche ampiamente utilizzate per la rilevazione e caratterizzazione di esopianeti che sono: tecnica delle velocità radiali, astrometria, timing, microlensing, imaging, tecnica dei transiti.

1.1.1 Velocità radiali

Il moto di un pianeta in orbita attorno ad una stella induce a sua volta un moto della stella attorno al centro di massa del sistema stella-pianeta. Tale fenomeno si traduce in una perturbazione periodica di tre proprietà osservabili della stella: la velocità radiale, la posizione angolare nel cielo e il tempo di arrivo di alcuni segnali di riferimento.

Le misure della velocità radiale, possibili grazie all'effetto Doppler sistematico sulle righe dello spettro stellare, descrivono il moto proiettato lungo la linea di vista della stella mentre orbita attorno al centro di massa del sistema. La forma della curva di velocità radiale (misura della velocità radiale in funzione della fase orbitale) può essere determinata conoscendo l'eccentricità e e l'argomento del pericentro ω ; da questa, in combinazione con il periodo P , è possibile ricavare dei vincoli per il semiasse maggiore dell'orbita stellare

non de-proiettato $a_{\text{st}} \sin i$. Noto il prodotto $a_{\text{st}} \sin i$ si ottiene una stima per la funzione di massa e quindi, misurata la massa della stella in altri modi ad es. attraverso dei modelli, del valore della massa del pianeta $M_p \sin i$, a meno di un fattore $\sin i$.

Dei sette elementi che descrivono un'orbita in tre dimensioni (semiasse maggiore a , eccentricità e , periodo P , inclinazione i , argomento del pericentro ω , longitudine del nodo ascendente Ω e il tempo del passaggio al pericentro t_p), i e Ω non possono essere determinati tramite la misura delle velocità radiali e non si possono misurare individualmente le masse planetarie. Inoltre questa tecnica utilizzata da sola non sempre è sufficiente per confermare in modo univoco la presenza di un pianeta, è necessario perciò combinarla con misure fotometriche, astrometriche e con tecniche di analisi statistica.

La rilevabilità di un pianeta tramite misura di velocità radiali dipende dal periodo e dall'ampiezza del segnale. Per periodi orbitali inferiori all'intervallo di osservazione, la rilevabilità è stabilita del rapporto segnale/rumore (S/N) confrontato con la semi-ampiezza delle velocità radiali K . Per periodi più lunghi dell'intervallo di osservazione, la rilevabilità dipende da quale porzione dell'orbita planetaria viene osservata. Orbite molto eccentriche rendono più difficile la rilevazione di pianeti di breve periodo orbitale, producendo degli effetti di selezione.

1.1.2 Astrometria

Ripetute e accurate misure di astrometria permettono di determinare la componente tangenziale dello spostamento della stella ospite rispetto al baricentro del sistema dovuto all'attrazione gravitazionale di un pianeta orbitante. Questa manifestazione dinamica osservata sul piano del cielo è strettamente collegata con le misure di velocità radiali, che sono sensibili al corrispondente spostamento della stella lungo la linea di vista.

1.1.3 Timing

Un pianeta orbitante produce un'oscillazione periodica della posizione della stella madre attorno al baricentro del sistema, riconoscibile attraverso cambiamenti nella velocità radiale e nella posizione astrometrica della stella.

Se la stella è caratterizzata da pulsazioni periodiche intrinseche, allora questo può fornire un mezzo alternativo per rilevare dinamicamente un pianeta orbitante attraverso le variazioni nella misura del periodo, dovuti allo spostamento della stella lungo la linea di vista. Ci sono tre classi di oggetti, oltre ai pianeti transitanti, che offrono questa possibilità: le radio pulsar, le

stelle variabili e le binarie d'eclisse.

1.1.4 Microlensing

In relatività generale, la presenza di materia distorce lo spaziotempo e questo comporta una deflessione nel percorso della radiazione elettromagnetica. I raggi luminosi provenienti da una sorgente lontana possono essere deviati dalla curvatura dello spaziotempo prodotta dal potenziale gravitazionale di un oggetto situato fra sorgente e osservatore, detto lente, creando una o più immagini distorte, ma amplificate, della sorgente stessa.

Ci sono differenti regimi di lensing gravitazionale, a seconda che gli effetti siano riconoscibili a livello del singolo oggetto (lente forte) o solo in modo statistico (lente debole). Il microlensing è un particolare tipo di lente forte (in opposizione al macrolensing, immagini multiple risolte) in cui un numero discreto di immagini sono non risolte.

Il moto relativo fra sorgente, lente e osservatore porta ad amplificazioni dell'immagine variabili con il tempo, su tempi scala di ore, mesi o anni, a seconda della natura di sorgente e lente.

Nel dominio di interesse per la rilevazione di esopianeti, un sistema stellapianeta agisce come lente multipla e una stella più lontana dentro la Galassia agisce come sorgente. Il cambiamento dell'ingrandimento dell'immagine, dovuto alla variazione temporale dell'allineamento osservatore- stella madre-sorgente, può portare a variazioni significative dell'intensità della somma delle immagini multiple prodotte dalla lente su tempi scala di settimane. Questa variazione di intensità con il tempo permette di riconoscere l'evento come fenomeno di microlensing.

Il microlensing costituisce un metodo potente non solo di rilevazione, ma anche di caratterizzazione dei sistemi planetari.

1.1.5 Imaging

La tecnica dell'imaging si riferisce alla realizzazione dell'immagine di un esopianeta come sorgente puntiforme. Quest'immagine si può realizzare nel visibile con la luce della stella madre riflessa dal pianeta, oppure in IR tramite l'emissione termica propria del pianeta.

L'interesse scientifico di ottenere immagini di esopianeti sta nel confermare le evidenze spesso molteplici, ma indirette, della loro esistenza, prima di uno studio spettroscopico esteso.

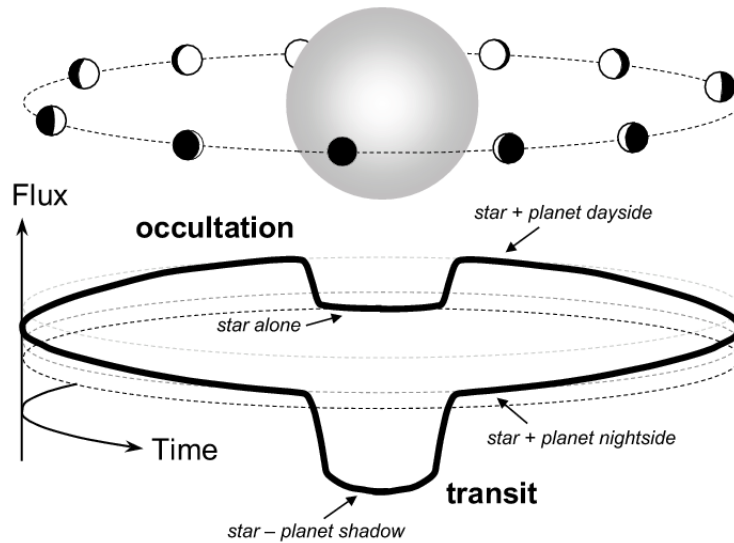


Figura 1.1: Illustrazione di transito e occultazione. Solo il flusso combinato di stella e pianeta è osservabile.

1.1.6 Transit

Si definisce *transito* il passaggio di un corpo celeste davanti a un altro di dimensioni molto maggiori; si chiama invece *occultazione* (o eclisse secondaria) quando il corpo più piccolo passa dietro.

Durante il transito, il flusso $F(t) = F_*(t) + F_p(t)$ del sistema stella-pianeta (come si vede in Figura 1.1) scende perchè il pianeta blocca una parte della luce. Poi il flusso aumenta man mano che il lato illuminato del pianeta diventa visibile e diminuisce di nuovo durante l'eclisse secondaria. In generale, il flusso stellare F_* può variare nel tempo a causa di brillamenti, macchie stellari e altri fattori; il flusso del pianeta F_p , invece, cambia a seconda della frazione di disco planetario che viene illuminata e dei cambiamenti intrinseci alla sua atmosfera.

Tramite l'osservazione del transito è possibile determinare il rapporto fra la massa del pianeta e la massa della stella M_p/M_* (senza l'incertezza associata all'inclinazione, perchè per un pianeta transitante $i \approx 90^\circ$) e il rapporto fra i raggi R_p/R_* . Combinando queste informazioni con misure di velocità radiali della stella madre e con informazioni relative alla stella stessa, è possibile ricavare una misura della massa e del raggio planetario.

Oltre alla profondità del transito δ , la curva di luce offre due osservabili T (intervallo di tempo tra il punto di mezzo di entrata e uscita) e τ (durata dell'ingresso/uscita del pianeta davanti al disco stellare), mostrati in Figura

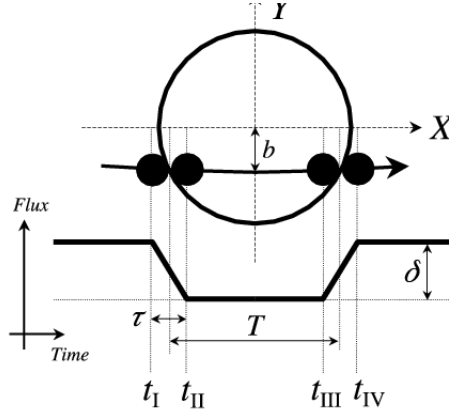


Figura 1.2: Questo schema riporta i parametri che descrivono un transito: la profondità del transito δ , il parametro d'impatto b , τ durata dell'ingresso/uscita del pianeta davanti al disco stellare, T intervallo di tempo tra il punto di mezzo di entrata e uscita.

1.2, che possono essere utilizzati per calcolare il parametro d'impatto b e il rapporto R_*/a . Infatti, nel limite $R_p \ll R_* \ll a$ e $\tau \ll T$:

$$b^2 = 1 - \sqrt{\delta} \frac{T}{\tau} \quad (1.1)$$

e

$$\frac{R_*}{a} = \frac{\pi}{\delta^{1/4}} \frac{\sqrt{T\tau}}{P} \left(\frac{1 + e \sin \omega}{\sqrt{1 - e^2}} \right) \quad (1.2)$$

Il parametro d'impatto b rappresenta la distanza proiettata nel piano del cielo al momento della congiunzione, in unità di raggio stellare, ed è definito come:

$$b = \frac{a \cos i}{R_*} \left(\frac{1 - e^2}{1 + e \sin \omega} \right) \quad (1.3)$$

con a semiasse maggiore dell'orbita, i inclinazione, R_* raggio stellare, e eccentricità e ω argomento del pericentro.

Ricerca di esopianeti da terra e dallo spazio

Ricerca da terra

Le principali operazioni di ricerca da terra sono:

- HAT/HATNet: la Hungarian Automated Telescope Network Exoplanet Survey è una survey realizzata da 7 piccoli telescopi distribuiti in varie

zone geografiche e ottimizzati per la rilevazione di esopianeti transittanti. È attiva dal 2003.

- OGLE: l'Optical Gravitational Lensing Experiment è un progetto di ricerca di esopianeti con tecnica di transiti e microlensing gravitazionale tramite il telescopio ottico di Varsavia.
- WASP/SuperWASP: la Wide Angle Search for Planets è un progetto di collaborazione che mira a scoprire esopianeti tramite il metodo dei transiti. Fra le operazioni di ricerca da terra è la più riuscita, con più di 100 pianeti scoperti che grazie alla loro brillantezza risultano idonei ad essere studiati in modo approfondito tramite spettroscopia. La collaborazione sfrutta telescopi collocati sia nell'emisfero nord che sud ed è attiva dal 2006.
- NGTS: Next-Generation Transit Survey è un programma di ricerca di esopianeti attivo dal 2015 al Paranal Observatory in Cile con lo scopo di scoprire super-Terre e pianeti nettuniani transittanti relativamente brillanti e vicini alla stella ospite. NGTS consiste in un array di 12 telescopi da 0.2 m, ognuno equipaggiato con una camera CCD sensibile al rosso che opera nel visibile e vicino IR.

Ricerca dallo spazio

Le principali operazioni di ricerca dallo spazio sono:

- CoRot: Convection, Rotation et Transits planétaires è stata una missione di osservazione spaziale compiuta fra il 2006 e il 2013 con obiettivo la ricerca di pianeti extrasolari di corto periodo orbitale, in particolare di super-Terre, e misure di astrosismologia.
- Kepler/K2: La missione Kepler, iniziata nel 2009 e proseguita per 4 anni, ha monitorato circa 150000 stelle alla ricerca di pianeti transittanti, in particolare di tipo terrestre ($R < 2.5R_e$), collocati entro la zona abitabile di stelle di tipo solare. Nel 2013, la missione Kepler viene terminata, a causa di danni al sistema di puntamento del telescopio spaziale Kepler, che tuttavia viene riprogrammato in modo tale da permettere l'estensione del suo utilizzo nella missione K2, a partire

dal 2014. La missione K2 consiste in una serie di campagne osservative continue nella zona di cielo vicina al piano dell'eclittica con precisione fotometrica prossima a quella di Kepler.

- Gaia: attivo dal 2013, il satellite Gaia effettua misure di astrometria di elevatissima precisione e permette la rilevazione di pianeti extrasolari tramite la misura degli spostamenti della stella ospite attorno al bari-centro del sistema, proiettati sul piano tangente alla sfera celeste.
- TESS: Transiting Exoplanet Survey Satellite è un satellite in funzione da marzo 2018. Per circa due anni monitorerà più di 200000 stelle alla ricerca di diminuzioni della luminosità della stella ospite associate al transito di un pianeta.
- CHEOPS: CHaracterising ExOPlanet Satellite è un telescopio spaziale, progettato per il lancio nel 2019, che andrà a studiare i meccanismi di formazione degli esopianeti. L'obiettivo principale sarà fornire misure accurate del raggio di pianeti per cui survey spettroscopiche da terra hanno già dato una stima della massa, al fine di misurarne la densità e quindi la composizione. Sarà anche usato per la conferma di pianeti di cui TESS ha misurato solo uno o due transiti.
- PLATO: PLANetary Transits and Oscillations of stars è un osservatorio spaziale in fase di sviluppo per il lancio nel 2026. Gli scopi della missione sono la ricerca di pianeti transitanti e la scoperta e caratterizzazione di pianeti terrestri anche in zona abitabile attorno a stelle di tipo solare, subgiganti e nane rosse.

Inoltre i telescopi spaziali HST, Spitzer e, in futuro, JWST, erede di HST, dedicano parte del loro tempo alla caratterizzazione di pianeti transitanti e delle loro atmosfere.

1.2 Studio di una atmosfera planetaria

L'atmosfera planetaria è una fonte straordinaria di informazioni: misurandone la composizione chimica e la struttura fisica, è possibile mettere dei

vincoli sulla storia di formazione ed evoluzione di un pianeta, sul clima corrente e anche sull'abitabilità.

Poiché nella maggioranza dei casi non c'è risoluzione angolare del pianeta che non può essere distinto dalla sua stella e poiché la brillantezza della stella stessa supera di molti ordini di grandezza quella del pianeta, lo studio delle atmosfere non è un compito facile e quindi è stato necessario sviluppare raffinate tecniche di osservazione e analisi dati:

1. *spettroscopia di trasmissione*: studia la luce stellare filtrata dall'atmosfera di un pianeta durante il transito;
2. *spettroscopia di emissione*: misura la variazione nell'emissione termica planetaria e della luce stellare riflessa dal pianeta quando il pianeta scompare dietro il disco stellare durante un'eclissi.

1.2.1 Spettroscopia di trasmissione

Quando il pianeta transita davanti alla sua stella, una frazione della luce stellare attraversa uno stretto anello di atmosfera che circonda il pianeta: a lunghezze d'onda in cui l'atmosfera assorbe maggiormente la luce emessa dalla stella la profondità del transito aumenta. La dipendenza dalla lunghezza d'onda dello spettro in trasmissione permette di indagare le regioni esterne dell'atmosfera e di reperire informazioni sulle specie atomiche, molecolari e aerosol presenti.

L'area di atmosfera planetaria intercettata corrisponde all'incirca a un anello di dimensione radiale $5H$, dove H è l'altezza di scala, cioè l'incremento di altitudine necessario a far variare la pressione atmosferica di un fattore e :

$$H = \frac{K_B T_{\text{eq}}}{\mu_m g_p} \quad (1.4)$$

dove K_B è la costante di Boltzmann $K_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$, T_{eq} e g_p sono la temperatura di equilibrio e la gravità superficiale del pianeta, μ_m è il peso molecolare medio.

Il contributo frazionario del segnale in trasmissione è dato dal rapporto dell'area dell'anello su quella stellare, moltiplicato per un fattore che è tipicamente 5 per righe di assorbimento intense:

$$S \simeq 5 \frac{2R_p H}{R_*^2} = 5 \frac{2H}{R_p} \delta \quad (1.5)$$

Con R_p raggio planetario, R_* raggio stellare e δ profondità del transito $\delta = (R_p/R_*)^2$. Per un *hot Jupiter* la cui atmosfera è dominata dall'idro-

geno ($\mu_m=2$), $S \approx 10^{-4}$.

1.2.2 Spettroscopia di emissione

La spettroscopia di emissione studia l'emissione termica e la luce riflessa dal pianeta quando questo passa dietro la stella. L'eclisse secondaria permette di effettuare una misura del solo flusso stellare e, quando il pianeta torna ad essere visibile, ogni incremento della luminosità può essere attribuito alla sua emissione termica e alla sua luce riflessa.

Emissione termica

Per i pianeti transitanti di breve periodo orbitale, la sorgente dominante di emissione termica è la re-irradiazione del flusso stellare incidente piuttosto che il calore latente di formazione, come per i pianeti di cui è possibile fare immagini dirette.

L'ampiezza del segnale in emissione si può predire dalla temperatura di equilibrio del pianeta:

$$\frac{F_p}{F_*} = \frac{B(\lambda, T_{\text{eq}})}{B(\lambda, T_*)} \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2 \quad (1.6)$$

dove F_p/F_* è il rapporto tra il flusso del pianeta e della stella, $B(\lambda, T)$ è la radiazione di corpo nero a temperatura T e R_p/R_* è il rapporto fra raggio planetario e stellare. Poiché il pianeta è più freddo della stella, il rapporto fra flussi è maggiore a lunghezze d'onda maggiori.

Questa relazione fornisce una buona approssimazione al primo ordine del segnale planetario, ma bisogna tenere conto anche di effetti più complessi che compaiono nello spettro in emissione dovuti ai cambiamenti di opacità dell'atmosfera con la lunghezza d'onda. A lunghezze d'onda dove l'opacità è più alta, la fotosfera si trova ad un'altitudine maggiore, dove la temperatura può essere diversa da T_{eq} .

La dimensione e la forma delle righe spettrali dipendono dal profilo di temperatura-pressione dell'atmosfera, quindi la spettroscopia di emissione termica costituisce un mezzo per comprendere la distribuzione della temperatura atmosferica, oltre che la composizione chimica.

Curve di fase

L'osservazione della curva di fase di un pianeta consiste in una serie di misure fotometriche e spettroscopiche, continue nel tempo, effettuate duran-

te tutto il suo periodo orbitale.

Le curve di fase sono uno strumento potente perchè permettono di studiare la fisica e la composizione chimica dell'atmosfera planetaria su regioni geografiche più ampie rispetto a quelle analizzabili con i transiti o con le eclissi secondarie.

Capitolo 2

La missione

ARIEL, Atmospheric Remote-sensing InfraRed Large survey mission (Figura 2.1), si inserisce fra le proposte delle prossime missioni di classe media M4 nel programma Cosmic Vision 2015-2025 di ESA (<http://sci.esa.int/cosmic-vision/>). Selezionata nel giugno 2015 per accedere alla fase 0/A di valutazione, è stata selezionata per lo studio di fase B1 a marzo 2018.

La missione ARIEL sarà volta ad approfondire alcune questioni fondamentali sulla composizione degli esopianeti e sulla formazione ed evoluzione dei sistemi planetari, investigando le atmosfere di centinaia di diversi pianeti orbitanti attorno a differenti tipologie di stelle. Questa survey, idealmente priva di effetti di selezione, contribuirà a progredire nella ricerca di una risposta alla prima delle quattro ambiziose domande di Cosmic Vision: “Quali sono le condizioni per la formazione dei pianeti e per l’insorgenza della vita?”.

Sono stati scoperti migliaia di esopianeti caratterizzati da una grande varietà di dimensioni, orbite e masse, dai pianeti rocciosi simili alla Terra ai giganti gassosi in un’orbita vicinissima alla loro stella ospite. Tuttavia, la natura di questi esopianeti rimane tuttora poco compresa: non c’è un modello riconosciuto che relazioni la presenza, la dimensione o i parametri orbitali di un pianeta alle caratteristiche della sua stella ospite; non è chiaro se e come la chimica di un pianeta sia collegata all’ambiente di formazione o se il tipo di stella ospite influenzi le caratteristiche chimiche e fisiche della nascita ed evoluzione di un pianeta.

ARIEL osserverà circa un migliaio di pianeti transitanti per permetterne uno studio statistico della loro atmosfera. Osserverà giganti gassosi, pianeti nettuniani, super terre e pianeti terrestri attorno a stelle di diversi tipi spettrali utilizzando la spettroscopia di trasmissione nell’intervallo spettrale 1.25-7.8 μm e fotometria ottica in molteplici bande strette. Una particola-

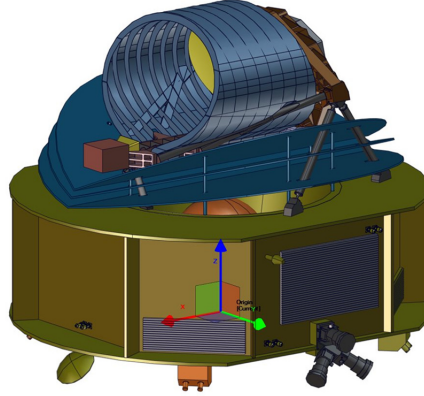


Figura 2.1: ARIEL, Atmospheric Remote-sensing InfraRed Large survey mission.

re attenzione sarà riservata ai pianeti *hot* ($T \sim 750\text{-}1500\text{ K}$) e *warm* ($T \sim 350\text{-}750\text{ K}$) poiché presentano atmosfere ben mescolate verticalmente; inoltre dovrebbero mostrare minime condensazioni e catture di elementi pesanti e permettono quindi di ottenere informazioni sulla loro composizione generale (specialmente C, O, N, S, Si). Questo permetterà di comprendere le fasi iniziali della formazione planetaria e atmosferica durante la fase nebulare e i successivi milioni di anni. Inoltre ARIEL fornirà una descrizione rappresentativa della natura chimica degli esopianeti e della relazione diretta di quest'ultima con il tipo e l'ambiente chimico della stella ospite.

Per sviluppare questo programma scientifico, ARIEL è pensata come una survey dedicata della durata di 4 anni. Le tecniche utilizzate saranno spettroscopia di trasmissione, di emissione e le curve di fase, per cui i segnali provenienti dalla stella e dal pianeta saranno differenziati utilizzando le conoscenze delle effemeridi planetarie; ciò permetterà di misurare il segnale dell'atmosfera del pianeta a un livello di 10-100 ppm e, data la natura brillante dei target, di applicare anche tecniche più sofisticate, come l'eclipse mapping, per risolvere più in dettaglio la struttura delle atmosfere.

Questo tipo di osservazioni richiede uno strumento stabile e specificatamente progettato con copertura ampia e simultanea di lunghezze d'onda in grado di individuare molte specie molecolari, sondare la struttura termica, identificare le nuvole e monitorare l'attività stellare. Il range di lunghezze d'onda selezionato da ARIEL ha proprio lo scopo di rilevare tutti i principali

gas atmosferici attesi, H₂O, CO₂, CH₄, NH₃, HCN, H₂S e i composti metallici come TiO, VO e gli aerosol.

ARIEL sarà lanciata da Kourou a bordo di un Ariane 62 circa a metà del 2028 e percorrerà un'orbita di grande ampiezza attorno al punto L2. Questo tipo di orbita è fondamentale per poter rispettare due irrinunciabili requisiti scientifici: lavorare in un ambiente termicamente molto stabile (mostrare sempre lo stesso lato al Sole da una parte e allo spazio dall'altro e assenza di eclissi) e una frazione di cielo accessibile molto ampia. Il veicolo spaziale è di tipo modulare, dotato di un modulo di servizio (SVM) e un modulo di carico (PLM). Il SVM conterrà tutte le unità richieste per far operare lo spacecraft e mantenere il payload nelle condizioni richieste. Il PLM è ottimizzato per soddisfare i requisiti scientifici. Consiste in un telescopio Cassegrain fuori asse con specchio in alluminio con un meccanismo di messa a fuoco collocato dietro il secondario e che permette di correggere i disallineamenti provocati durante l'assemblaggio, il lancio o il raffreddamento. Il telescopio invia un fascio collimato a due moduli strumentali separati. Nel primo modulo sono presenti Fine Guidance System/ VIS-Photometer/ NIR-Spectrometer, che contiene 3 canali di fotometria tra 0.50 e 1.2 μm , e uno spettrometro a bassa risoluzione nella banda 1.2-1.95 μm ottimizzato per la caratterizzazione degli aerosol. Nel secondo modulo, è collocato ARIEL IR Spectrometer (AIRS) che copre la banda fra 1.95 e 7.8 μm con una risoluzione fra 30 e 100.

La spettroscopia di trasmissione non richiede un'elevata risoluzione angolare e accurati studi hanno dimostrato che un telescopio con un'area utilizzabile di 0.64 m² è sufficiente per le osservazioni necessarie ad ARIEL entro il tempo di vita della missione.

2.1 Obiettivi Scientifici

Fin dalla loro prima scoperta nel 1990, i pianeti sono stati trovati attorno a ogni tipo di stella, comprese pulsar e binarie. Poiché si formano nella parte finale del processo di formazione stellare, sembrano essere presenti quasi ovunque. Le statistiche correnti indicano che in media ogni stella della Galassia ospita almeno un compagno planetario e quindi dovrebbero esistere circa 10¹² pianeti solo nella nostra Via Lattea (Cassan et al., 2012; Batalha et al., 2014).

Anche se il numero di pianeti scoperti attualmente è ancora molto lontano da questa cifra, nuove importanti scoperte sono attese dalle missioni in corso GAIA, Kepler/K2 e dalle survey da terra e risultati anche maggiori sono previsti per le future missioni TESS, CHEOPS e PLATO.

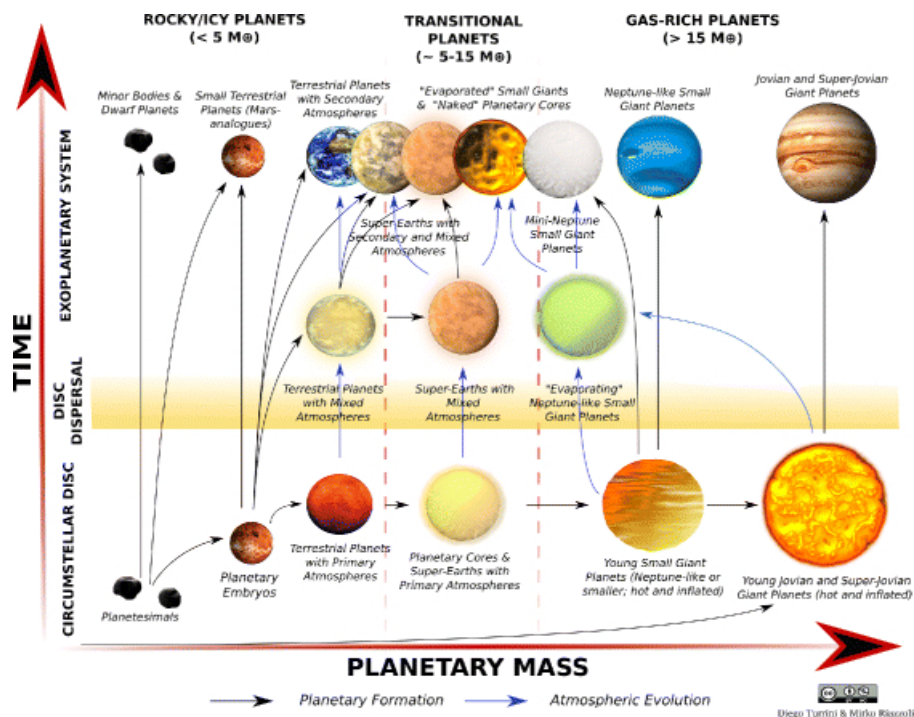


Figura 2.2: Rappresentazione schematica delle tre ampie categorie di pianeti, rocciosi ($M < 5 M_e$), di transizione ($5 M_e < M < 15 M_e$) e gassosi ($M > 15 M_e$), e i processi di formazione ed evoluzione che li collegano (ARIEL Assessment Study Report).

Disporre di un campione di pianeti grande e statisticamente significativo è fondamentale per comprendere la straordinaria varietà esistente nella nostra galassia. Solo attraverso l'osservazione diretta della composizione chimica di un tale campione di pianeti infatti sarà possibile comprendere i meccanismi di formazione ed evoluzione e quindi la varietà di casi che essi generano. Questo è possibile attraverso l'osservazione dei loro strati gassosi esterni, cioè tramite la caratterizzazione delle atmosfere. Conoscere la composizione degli esopianeti è essenziale per capire non solo la loro storia individuale (cioè se il pianeta si è formato nella sua orbita attuale, oppure se ha subito una migrazione successiva da una distanza maggiore), ma anche quella del sistema planetario a cui appartengono. Inoltre, conoscere la composizione chimica di un ampio campione permetterà anche di determinare i meccanismi chiave che governano l'evoluzione planetaria su diverse scale temporali.

2.1.1 Domande chiave per ARIEL

I pianeti vengono suddivisi in 3 categorie a seconda della loro massa rispetto a un range di massa critica, come mostra la Figura 2.2: i pianeti rocciosi/ghiacciati hanno massa minore di $5 M_e$, i pianeti di transizione fra 5 e $15 M_e$, i pianeti gassosi hanno massa maggiore di $15 M_e$. I modelli teorici indicano che quando viene raggiunta la massa critica, i corpi planetari inseriti nel disco circumstellare iniziano a catturare gravitazionalmente il gas nebulare e diventano pianeti giganti. I pianeti rocciosi/ghiacciati, che stanno al di sotto della massa critica, sono pertanto poveri di gas e principalmente composti di rocce e ghiacci. I pianeti al di sopra della massa critica, pianeti gassosi, si sono formati all'interno del disco circumstellare e pertanto hanno accresciuto una porzione non trascurabile della loro massa dalla componente gassosa del disco. I pianeti che si collocano all'interno del range di massa critica sono detti di transizione poiché a seconda del periodo di formazione (prima o dopo la dissoluzione del disco circumstellare) possono essere superterre massicce oppure pianeti sub-nettuniani gassosi. Il grande campione di pianeti che ARIEL osserverà, assicurerà che per ciascuna delle tre classi si avrà una popolazione statisticamente significativa da poter analizzare.

Ci si aspetta che queste ampie classi di pianeti siano caratterizzate da differenti meccanismi di formazione, di migrazione e storie evolutive che sono rimaste impresse nelle loro atmosfere e nelle loro caratteristiche chimiche. Molti modelli teorici hanno cercato di spiegare i vari processi che controllano la formazione ed evoluzione delle atmosfere planetarie, tuttavia hanno bisogno di essere confermati e calibrati dalle osservazioni. ARIEL si concentrerà specialmente, anche se non solo, sui pianeti *hot* ($T \sim 750-1500$ K) e *warm* ($T \sim 350-750$ K) nei quali la composizione atmosferica è più rappresentativa di quella totale.

In Figura 2.3 viene mostrata la composizione atmosferica teorica in funzione della temperatura e della massa del pianeta. ARIEL si concentrerà sulla parte centrale-destra del diagramma, fornendo i vincoli osservazionali per una grande popolazione di pianeti rocciosi e gassosi in un ampio intervallo di temperature e stelle ospiti. L'approccio statistico di ARIEL è indispensabile per confermare o identificare nuove transizioni tra differenti regimi e spiegare i processi fisici sottostanti. Un'altra caratteristica fondamentale di ARIEL è l'abilità di tracciare un ampio intervallo di specie chimiche, senza la quale non si potrebbe catturare la diversità e complessità degli esopianeti osservati. Tracciare un gran numero di molecole è importante non solo per i pianeti terrestri/ghiacciati ma anche per i pianeti gassosi, infatti anche

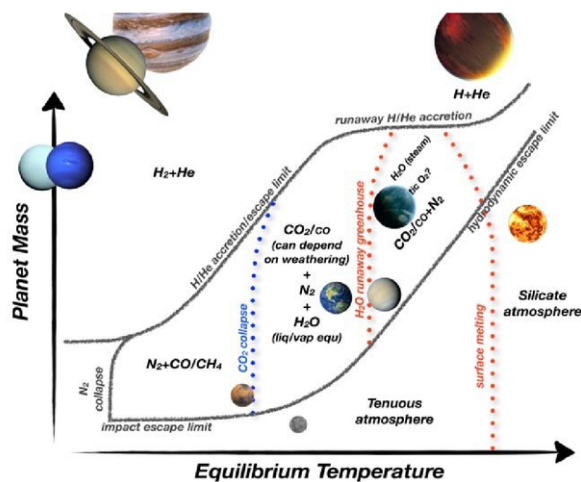


Figura 2.3: Classi di atmosfere come vengono predette in Forget & Leconte (2014). Ogni linea rappresenta la transizione da un regime ad un altro. Sono indicati i pianeti del Sistema Solare, un pianeta di lava, un pianeta Oceano e un *hot Jupiter*.

se H e He costituiscono la quasi totalità della loro atmosfera, le abbondanze dei restanti elementi contengono la storia della loro formazione ed evoluzione.

Per sfruttare le atmosfere come finestra sulla composizione interna, si devono studiare esopianeti in condizioni diverse da quelle del nostro Sistema Solare. I pianeti solari sono infatti relativamente freddi e la loro composizione atmosferica è significativamente alterata dalle specie condensate e precipitate, sia volatili che refrattarie. Al contrario, i pianeti *hot* rappresentano un laboratorio naturale per gli studi sulla chimica e la formazione. Questo perché le temperature atmosferiche più alte limitano l'effetto di condensazione e precipitazione delle specie volatili, rendendo la composizione atmosferica più rappresentativa di quella totale. I pianeti *hot* inoltre permettono di investigare regimi chimici esotici (atmosfera ricche di Si e di metalli) che è impossibile osservare nel Sistema Solare e che offriranno suggerimenti sulla composizione dei materiali ad alto Z presenti all'interno dei pianeti più freddi.

Il campione di esopianeti attualmente disponibile indica che la migrazione planetaria è un processo diffuso e importante per la formazione delle architetture dei sistemi planetari. Circa la metà degli esopianeti scoperti orbita la propria stella a una distanza minore di 0.1 UA e, soprattutto nel caso di pianeti gassosi, questo rappresenta una solida indicazione che probabilmente si sono formati altrove, forse dietro la linea della neve (snow line), e sono poi

migrati alla posizione attuale.¹ La migrazione può avvenire in diversi momenti della vita di un sistema planetario per diverse cause e può riguardare pianeti di masse differenti. Grazie alla sua diffusione e alla capacità di produrre pianeti *hot* la migrazione planetaria porta pianeti che si sono formati in tempi, luoghi e modi diversi attorno alla loro stella, in posizione ottimale per la spettroscopia di trasmissione, rendendo il campione osservabile da ARIEL statisticamente completo dal punto di vista dei processi di formazione ed evoluzione dei pianeti.

Le domande chiave a cui ARIEL darà una risposta sono dunque:

- “Di cosa sono fatti gli esopianeti?”
- “Come si formano i pianeti e i sistemi planetari?”
- “Come evolvono i pianeti e le loro atmosfere nel tempo?”

2.1.2 Il Sistema Solare in un contesto più ampio

Il Sistema Solare è stato per secoli l’unico esempio noto di sistema planetario, e i suoi pianeti il nostro unico campione dei differenti tipi di corpi planetari esistenti nella Galassia. Tuttavia i pianeti del Sistema Solare non sono rappresentativi di tutti i possibili risultati dei processi di formazione planetaria. Inoltre i pianeti giganti sono freddi: le loro basse temperature fanno sì che la composizione atmosferica sia condizionata da processi di condensazione e di rimozione. Le atmosfere degli *hot Jupiters* e *Neptunes* invece presentano un vantaggio decisivo rispetto ai nostri pianeti giganti: le alte temperature, che garantiscono la presenza in atmosfera di specie come H₂O, CO₂, CH₄, NH₃, che condensano a temperature molto più basse. L’osservazione di esopianeti giganti caldi permette quindi di accedere alla loro composizione elementare e capire i primi stadi della formazione planetaria e atmosferica durante la fase nebulare e i successivi pochi milioni di anni.

Per tali motivi, grazie allo studio dei pianeti extrasolari in generale, e in particolare dei target di ARIEL, che sono molto più caldi dei pianeti del Sistema Solare, molti degli ostacoli incontrati nello studio delle composizioni atmosferiche saranno eliminati o ridotti.

¹La *snow line* è una linea immaginaria che segna in un sistema planetario la distanza dalla stella madre oltre la quale è sufficientemente freddo da trovare condensati i composti volatili come acqua, ammoniaca, metano, anidride carbonica e monossido di carbonio.

2.1.3 Formazione ed evoluzione di pianeti ricchi di gas

I pianeti ricchi di gas possiedono un involucro massiccio di idrogeno ed elio catturato dal gas nebulare. La metallicità di questo involucro è determinata dagli elementi pesanti catturati dal pianeta attraverso il gas e le particelle solide e racconta la storia di formazione del pianeta stesso. Elementi diversi permettono di tracciare diverse componenti: metalli ed elementi refrattari sono collegati all'accrescimento di rocce, elementi volatili ai ghiacci e gli elementi più abbondanti C, O e N sono legati a entrambi. I diversi scenari di formazione e migrazione dei pianeti ricchi di gas predicono diversi contributi relativi di queste sorgenti alla composizione atmosferica e metallicità dei pianeti.

Anche se la determinazione di massa e raggio pongono dei vincoli sulla composizione media, lasciano importanti degenerazioni su quella reale che possono essere risolte solo aggiungendo dei vincoli indipendenti. Considerando il grande numero e la diversità di pianeti che ARIEL osserverà, tali vincoli migliorati massa-raggio-composizione permetteranno davvero di capire quali sono i fattori principali che determinano l'arricchimento di elementi totale e relativo, se dovuto all'abbondanza stellare oppure al luogo di formazione, e di capire se i pianeti sono davvero costituiti da un nucleo centrale denso.

A un livello fondamentale, la composizione chimica delle atmosfere è determinata da tre fattori: l'abbondanza elementare con cui si è formato il pianeta, la temperatura dell'atmosfera e i processi fisici che vi avvengono, che partecipano a determinare la temperatura atmosferica stessa insieme alle sorgenti di calore interno al pianeta e all'influenza della stella ospite.

Per i pianeti *warm*, con atmosfere lontane dall'equilibrio chimico, è interessante quantificare l'effetto dei diversi parametri che sembrano influenzare la composizione chimica. Ad esempio, in uno studio di Venot et al. (2015) è stato visto che per atmosfere a temperature di circa 500 K il cambiamento nel rapporto di abbondanza relativa C/O da valori solari (C/O=0.54) al doppio (C/O=1.1) non ha quasi alcun effetto sulla composizione chimica o sugli spettri sintetici.

Per i pianeti *hot*, l'effetto dell'abbondanza elementare relativa è molto importante (Venot et al. 2015). L'incremento del rapporto C/O porta a un importante aumento dell'abbondanza di idrocarburi e altre specie, accompagnato a un decremento dell'abbondanza di acqua. Tali differenze nella composizione chimica sono visibili negli spettri sintetici e saranno individuate da ARIEL laddove presenti.

Un altro aspetto importante che verrà esaminato da ARIEL sarà la dinamica delle atmosfere planetarie e la distribuzione delle nuvole. Per gli *hot*

Jupiters le molecole di CO, H₂O, N₂, H₂ mostrano un'abbondanza uniforme con altezza e longitudine, sia tenendo conto dei contributi di mixing orizzontali sia verticali (Agúndez et al. 2012, 2014). Il profilo di abbondanza verticale di altre molecole principali come CH₄, NH₃, CO₂ e HCN mostra invece importanti differenze se calcolato con mixing orizzontale o verticale.

Variazioni longitudinali nelle proprietà termiche di un pianeta causano una variazione nella sua brillantezza con la fase orbitale. Questa modulazione orbitale è stata osservata nell'IR in sistemi transitanti (Knutson et al. 2007) e non (Crossfield et al. 2010). Le misurazioni spettroscopiche delle curve di fase di ARIEL del lato illuminato e delle regioni di confine procureranno un test osservativo chiave per vincolare il range di modelli dei processi termochimici, fotochimici e di trasporto che determinano la composizione e la struttura verticale di queste atmosfere.

Le nuvole possono modificare in modo significativo l'opacità e la riflettività atmosferica, e quindi la circolazione e la struttura termica del pianeta. Individuare la loro presenza e distribuzione spaziale inhomogena è quindi di primaria importanza. ARIEL produrrà curve di fase, mappe 2D-IR registrate simultaneamente a molteplici lunghezze d'onda, per diversi pianeti gassosi, permettendo lo studio di gradienti orizzontali e verticali termici e chimici, della discontinuità delle nubi e della eso-cartografia.

2.1.4 Formazione ed evoluzione di pianeti di transizione

Questa classe di pianeti è quella di cui si sa meno, poichè manca completamente nel Sistema Solare, ed è quella che costituisce maggiormente una sfida per i modelli di formazione planetaria. I pianeti di transizione comprendono sia super-Terre ($5 M_e < M < 10 M_e$) che sub-Nettuni ($10 M_e < M < 15 M_e$) e pongono la domanda critica e tuttora aperta di quando e dove avvenga la transizione fra queste due popolazioni, la prima essenzialmente rocciosa, la seconda con frazioni significative di gas. Gli attuali modelli di formazione suggeriscono che i pianeti di transizione si formino durante il tempo di vita del disco circumstellare per permettere la cattura dei gas nebulari e diventare così i core planetari dei pianeti ricchi di gas. La formazione delle super-Terre potrebbe essere un prodotto estremo degli stessi processi che governano la formazione dei pianeti rocciosi/ghiacciati e dovrebbe accadere principalmente dopo la dispersione della componente gassosa del disco circumstellare (Schlichting, 2018).

I corpi planetari che raggiungono il range di massa critica prima della dispersione del gas nebulare possono dare origine alla popolazione dei pianeti sub-nettuniani (scenario ricco di H/He), mentre quelli che completano il processo di accrescimento dopo la dispersione del disco possono andare a

produrre le super-Terre (scenario povero di H/He). In tale contesto, il raggio planetario può essere un indicatore inaffidabile della natura del pianeta in quanto non ci sono motivi di supporre che una super-Terra molto grande non possa avere un raggio maggiore di un sub-Nettuno molto piccolo.

Inoltre, dato che i corpi nel range di massa critica possono già subire una migrazione significativa dovuta all'interazione con il disco, anche le informazioni provenienti dalla massa e densità possono essere fuorvianti. La più affidabile misura della natura di un pianeta di massa critica può essere effettuata tramite lo studio della composizione della sua atmosfera.

ARIEL potrebbe cambiare radicalmente la nostra comprensione di questa categoria di pianeti, cercando nelle loro atmosfere la presenza di idrogeno ed elio per studiare la transizione da super-Terre a sub-Nettuni. Mentre le super-Terre dovrebbero possedere atmosfere secondarie costituite da elementi pesanti, i sub-Nettuni dovrebbero possedere atmosfere primarie principalmente composte da gas catturati dal disco circumstellare.

2.1.5 Formazione ed evoluzione di pianeti rocciosi/ ghiacciati

Per quanto concerne la formazione ed evoluzione dei pianeti piccoli, prevalentemente solidi, si prospettano diversi scenari. Questi oggetti potrebbero essersi formati *in situ* oppure aver subito una migrazione nelle regioni interne del sistema planetario a causa di interazioni dinamiche con il disco o con altri corpi, o ancora potrebbero essere core residui di pianeti gassosi che hanno subito importanti processi di evaporazione. Poiché sono poco massicci, le atmosfere di questi pianeti possono essersi evolute drammaticamente dalla condizione iniziale in seguito alla perdita delle molecole più leggere come l'idrogeno, a causa di impatti con altri corpi oppure dell'attività vulcanica. A sostegno di ciò c'è il fatto che nessun pianeta roccioso nel Sistema Solare ha mantenuto la sua atmosfera primordiale formata da H e He. Si pensa che, entro il tempo di vita del disco gassoso protoplanetario, gli embrioni di pianeti, formati nel Sistema Solare interno, abbiano una massa pari a quella di Marte, una primitiva e sottile atmosfera e che abbiano assorbito al loro interno parte dei gas circostanti. Molto più tardi, dopo la rimozione del gas del disco protoplanetario, si formano i pianeti terrestri tramite mutue collisioni fra gli embrioni che durante questo processo disperdono le loro atmosfere nello spazio. Se le super terre si formassero in modo analogo ai pianeti terrestri del Sistema Solare, dovrebbero presentare atmosfere prive di H e He. ARIEL sarà in grado di confermare la presenza o assenza di H e He nelle atmosfere dei pianeti rocciosi e la loro composizione in generale così da poter verificare

la validità di queste teorie.

2.1.6 Pianeti in condizioni rare ed estreme

ARIEL osserverà un certo numero di pianeti in condizioni estreme e insolite per testare la fisica in questi ambienti inusuali. Tramite lo studio del clima e della chimica di questi pianeti ARIEL sarà in grado di fare chiarezza sulla provenienza e la storia di questi oggetti. Alcuni esempi sono:

- Pianeti in orbite molto eccentriche: una frazione significativa di esopianeti scoperti fino ad oggi percorre un'orbita molto eccentrica attorno alla propria stella. In alcuni casi l'eccentricità è estrema, come per il pianeta HD80606 b per il quale vale 0.98.
- Pianeti circumbinari: sono stati scoperti circa 20 pianeti che orbitano attorno a un sistema binario di stelle.
- Sistemi di pianeti transitanti multipli: studiare sistemi planetari multipli costituisce un'opportunità unica di rivelare la diversità dei sistemi con un'architettura orbitale anche molto diversa da quella del nostro Sistema Solare. Sistemi di questo tipo sono ad esempio Kepler-6, Kepler-11, Kepler-9, 55 Cnc e TRAPPIST-1.
- Pianeti in fase di disintegrazione e planetesimi: caratterizzare la distribuzione in dimensione delle particelle in questi casi porterà informazioni sulla formazione ed evoluzione delle particelle di polvere. La fotometria multi banda durante il transito può mettere dei vincoli sulla sezione d'urto delle particelle di polvere e quindi sulla loro natura. Il fatto che ARIEL osservi fra 0.5 e 7.8 μm permette di rilevare la variazione di profondità ottica della nube di polvere rispetto alla lunghezza d'onda e quindi di rendere possibile la comprensione della morfologia della nube di polvere, dei meccanismi che ne producono la variabilità e di come si formano planetesimi e pianeti disintegranti.
- Pianeti attorno a stelle con brillamenti (*flares*): studiando gli effetti dell'attività stellare sugli spettri degli esopianeti si è visto che ci sono cambiamenti significativi nelle atmosfere dei pianeti attorno a stelle M attive (Tabataba-Vakili et al. 2016). La capacità di ARIEL di osservare su una ampia banda permetterà lo studio di questi spettri con grande accuratezza e quindi di verificare le predizioni teoriche sulle atmosfere planetarie in condizioni estreme.

2.2 Requisiti scientifici

Per massimizzare l'impatto scientifico ottenibile con ARIEL è necessario rilevare tutte le specie chimiche che ci si aspetta giochino un ruolo chiave nella fisica e chimica delle atmosfere planetarie. Inoltre è essenziale osservare pianeti *warm* e *hot* a differenti temperature, principalmente fra i 500 K e i 3000 K, per evidenziare differenze di composizione potenzialmente collegate alla formazione ed evoluzione dei sistemi planetari.

A questo scopo è necessario disporre di una copertura ampia e simultanea in lunghezze d'onda che permetta di misurare albedo ed emissione termica del pianeta per determinarne il bilancio energetico; classificare la varietà dei pianeti a diverse temperature; rilevare la varietà di specie chimiche presenti nelle atmosfere di esopianeti *warm* e *hot*; garantire la rilevazione delle molecole in differenti parti dello spettro (ridondanza) così da assicurare che la rilevazione sia affidabile, specialmente dove molte specie si sovrappongono nella stessa porzione di spettro; rendere possibile un calcolo ottimale delle abbondanze chimiche e del profilo termico dell'atmosfera; individuare la presenza di aerosol e mettere dei vincoli sulla loro distribuzione spaziale e variabilità temporale; correggere per gli effetti sistematici dovuti all'attività stellare.

In particolare, l'intervallo di lunghezze d'onda fra 1.25 – 7.8 μm per pianeti *warm* e *hot* garantisce che tutte le specie chimiche chiave possano essere rilevate. Lo spettrografo nelle bande NIR e VIS/NIR permette di individuare e distinguere lo scattering Rayleigh dalla presenza di nuvole.

Errori sistematici e rumore con ARIEL

Il requisito di livello più alto che viene richiesto per ARIEL è che la stabilità fotometrica sulla banda di frequenze interessata non si aggiunga in modo significativo al rumore fotometrico proveniente dal cielo (stelle, pianeti, luce zodiacale). Questo implica avere la capacità di rimuovere tutti i residui sistematici e di sommare le osservazioni elementari ottenute da ripetute visite ad un target.

Per raggiungere tali performance bisogna prestare particolare attenzione al design di payload e strumentazione, alle strategie di calibrazione e alle linee di elaborazione dei dati.

La richiesta per ARIEL è di raggiungere una sensibilità tale da ottenere un rapporto segnale rumore SNR pari a 7 nella misura del segnale in trasmissione e in emissione del pianeta.

2.3 Payload

Dal punto di vista strumentale la missione è costituita da due componenti principali, il cold payload module (PLM), contenente gli strumenti scientifici, e il modulo di servizio dello spacecraft (SVM), che ospita gli strumenti di controllo. Le principali attrezzature che andranno a formare l'architettura di ARIEL sono:

- Nel Cold PLM (mantenuto a una temperatura di circa 50 K):
 - Un telescopio costituito da tre specchi M1, M2 e M3, un meccanismo di messa a fuoco sullo specchio M2, detto M2M e una struttura portante.
 - Un banco ottico su cui sono collocati il telescopio e gli strumenti.
 - Un set di ottiche comuni composto da specchi ripiegati, lenti dicroiche, ottiche formatting e una sorgente di calibrazione.
 - Lo strumento ARIEL IR Spectrometer (AIRS).
 - Gli strumenti Fine Guidance Sensor (FGS), Visible Photometer, Near-IR Spectrometer.
 - Strumentazione per il controllo della temperatura (strumenti di raffreddamento attivo e passivo e strutture di supporto per l'isolamento termico del PLM dal SVM a temperatura maggiore)
- Nel Warm SVM (tenuto a una temperatura di 270-290 K):
 - L'unità di controllo degli strumenti (ICU), che ospita l'unità di controllo del sensore di AIRS, l'unità centrale di analisi dati, l'unità di fornitura di potenza e l'unità di controllo del telescopio.
 - L'unità di controllo FGS (FCU), che comprende le unità di controllo del sistema di puntamento, del Visible Photometer, e del Near-IR Spectrometer.
 - Il sistema di raffreddamento attivo.
 - Il cablaggio che connette la parte calda del SVM con la parte fredda del PLM, caratterizzato da buone proprietà elettriche e bassa conduttività termica.

2.3.1 Il telescopio di ARIEL

Il telescopio è in configurazione Cassegrain, ovvero è formato da uno specchio primario M1 parabolico e un secondario M2 iperbolico, con un terzo

specchio M3 parabolico necessario per ricollimare il fascio di luce. Un quarto specchio piatto M4 dirige il fascio collimato sul banco ottico.

Il diaframma di apertura posto sul primario M1 definisce una pupilla d'entrata ellittica di dimensione 1100 mm×730 mm. La visuale del cielo dello specchio primario è limitata in entrata dalla struttura cilindrica che racchiude le ottiche e dal diaframma posizionato in corrispondenza della prima superficie ottica, il che fornisce una schermatura iniziale per la luce fuori campo. Anche sulla parte superiore dello specchio secondario è posizionato un diaframma per impedire la visuale diretta del cielo a M2 al di là del cilindro d'entrata. Il fuoco Cassegrain collocato dopo il M2 rende possibile l'inserimento di un diaframma di campo per aiutare l'eliminazione della luce fuori campo. Dopo il fuoco Cassegrain, il fascio viene ricollimato da M3 assumendo un'ampiezza di 20 mm×13.3 mm e viene diretto su M4, che a sua volta lo invia al banco ottico. Si richiede che il telescopio sia diffraction-limited a 3 μm .

2.3.2 Ottiche comuni, lenti dicroiche e unità di calibrazione

La funzione delle ottiche comuni è di suddividere in lunghezza d'onda il fascio di luce in tre parti destinate a FGS e ai due canali dello spettrometro (CH0 e CH1), attraverso il sistema di lenti dicroiche. In questo elemento è collocata un'unità di calibrazione a bordo che quando viene attivata illumina in modo uniforme tutti i piani focali.

2.3.3 AIRS - ARIEL InfraRed Spectrometer

AIRS è lo strumento scientifico dedicato alla spettroscopia IR suddiviso in due canali, il canale 0 (CH0) per la banda 1.95-3.90 μm e il canale 1 (CH1) per la banda 3.90-7.80 μm . È collocato sul piano focale intermedio del telescopio e del sistema ottico ed è composto da tre moduli:

- Il banco ottico di AIRS, principale elemento strutturale dello spettrometro, costituisce l'interfaccia meccanica e termica al banco ottico; vi sono collocati gli elementi ottici, si interfaccia con gli elementi assemblati sul piano focale e contribuisce a limitare l'accesso della luce fuori campo.
- Gli elementi di AIRS assemblati sul piano focale che determinano i due canali CH0 e CH1; sono costituiti da una struttura termo-meccanica

che si interfaccia con il banco ottico di AIRS e che contiene sensore ed elettronica.

- Unità di controllo del detector di AIRS (AIRS-DCU), unità elettronica collocata nella parte calda del SVM; si occupa del controllo del processo di elaborazione dei pacchetti dati.

Il banco ottico e gli elementi sul piano focale sono collocati nella parte del Cold-PLM, mentre l'unità di controllo del detector è situata nella parte del Warm-SVM.

Capitolo 3

Ricerca dei target

Per selezionare i target adatti ad essere osservati durante il tempo di vita di ARIEL (4 anni) sono stati utilizzati come base di partenza i dati provenienti dal catalogo NASA Exoplanet Archive scaricato in formato VOTable il 13 febbraio 2018 (<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>), contenente 3605 esopianeti e analizzato con il programma TOPCAT.

Per iniziare è stata eseguita una scrematura basandosi su tre quantità fondamentali:

- Sono stati selezionati dal totale solo i pianeti per cui è possibile fare spettroscopia di trasmissione, cioè i transitanti, tramite il parametro *pl_tranflag*, che indica con 1 i pianeti transitanti e con 0 i non transitanti. Da questo insieme è stato eliminato il pianeta 30 Ari B, poiché non è un pianeta transitante ma compare ugualmente nella lista.
- Selezione per massa: sono stati scartati tutti i pianeti per cui non è riportato nel catalogo il valore *pl_bmassj* (la migliore misura della massa del pianeta in unità di masse gioviane; può essere la massa reale corretta per inclinazione oppure quella proiettata $M_p \sin i$, il cui valore è comunque accettabile per questo lavoro poiché nei pianeti transitanti $i \approx 90^\circ$ e quindi $M_p \sin i \approx M$). A questa lista sono stati aggiunti due pianeti per i quali il parametro *pl_bmassj* non era riportato pur essendo noto: HD 209458 e HD 189733. In questo caso le masse sono state estratte dagli articoli più recenti indicati nel catalogo, aggiornati al febbraio 2018.
- L'ultimo passaggio preliminare consiste nel confrontare i valori di magnitudine ottica *st_optmag* (magnitudine della stella nella banda V di Johnson o nella banda di Kepler), magnitudine infrarossa nelle bande

J (st_j), H (st_h), K (st_k) (riferite alle bande di 2MASS) e magnitudine WISE nella banda centrata a $4.6 \mu\text{m}$ st_wise2 , di riferimento rispetto al range di lunghezze d'onda coperto da ARIEL. Per gli esopianeti visibili in ottico o nelle bande J, H, K di cui non è riportato il valore st_wise2 è stato aggiunto attingendo dal catalogo WISE Data Release 2013. Le host star Kepler-415 e Lupus-TR-3 per cui non è stato possibile reperire un valore di st_wise2 sono state scartate dalla lista.

La selezione così ottenuta comprende 582 pianeti transitanti di massa e magnitudine WISE a $4.6 \mu\text{m}$ nota per i quali sono stati calcolati temperatura di equilibrio T_{eq} , gravità g e altezza di scala H come segue.

La temperatura di equilibrio T_{eq} di un pianeta risulta dall'equilibrio fra la radiazione incidente prodotta dalla stella madre e quella assorbita dal pianeta o dalla sua atmosfera. Trascurando addizionali sorgenti di calore (come deformazioni mareali, effetto serra o decadimenti radioattivi) e considerando l'energia incidente intercettata dal disco del pianeta, la legge di Stefan-Boltzmann può essere scritta come:

$$T_{\text{eq}} = T_* \sqrt{\frac{R_*}{2a}} [f(1 - A_B)]^{1/4} \quad (3.1)$$

Dove T_* e R_* sono rispettivamente la temperatura efficace e il raggio della stella, a è il semiasse maggiore dell'orbita del pianeta, A_B è l'albedo di Bond (la frazione di radiazione incidente che viene riflessa a tutte le lunghezze d'onda) ed f è un fattore che descrive l'efficacia della circolazione atmosferica e il grado con cui l'energia assorbita è trasferita dalla zona illuminata a quella in ombra del pianeta. Il parametro f è un fattore particolarmente importante nei pianeti *hot Jupiters*, che per il breve periodo orbitale ci si aspetta siano in configurazione di "tidal-lock", ovvero il pianeta mostra sempre la stessa faccia alla stella madre.

I valori dei parametri utilizzati sono:

- La temperatura efficace T_* è data dal valore st_teff misurato in K come viene riportato nel catalogo, che è stato completato dei valori mancanti utilizzando i dati di exoplanet.eu e degli articoli più recenti indicati in NASA Exoplanet Archive, aggiornati al febbraio 2018.
- Il raggio stellare R_* corrisponde al valore st_rad misurato in raggi solari R_\odot ($R_\odot = 6.96 \times 10^5 \text{ km}$).
- Il semiasse maggiore dell'orbita a è dato da $pl_orbsmax$ ed è misurato in UA ($1 \text{ UA} = 1.496 \times 10^8 \text{ km}$); i valori non riportati in tabella sono

stati reperiti consultando exoplanet.eu e gli articoli più recenti indicati in NASA Exoplanet Archive, aggiornati al febbraio 2018.

- L'albedo di Bond e il fattore f sono dati da $A_B=0$ e $f=1$. Giove e i giganti gassosi del Sistema Solare hanno A_B comprese fra 0.3 e 0.5, gli *hot Jupiters* invece mostrano valori generalmente più bassi, pertanto il caso $A_B=0$ corrisponde a stabilire un limite superiore per T_{eq} . Il fattore f assume valore 1 quando un pianeta in blocco mareale è in grado di ridistribuire l'energia incidente in modo da avere una re-emissione isotropica e una temperatura di equilibrio uniforme in entrambi gli emisferi; se è solo l'emisfero diurno a irradiare energia allora la temperatura di equilibrio è più alta e $f=2$. Per stabilire quale combinazione di valori riportati in letteratura di A_B e f fossero più idonei per calcolare i valori di T_{eq} è stato fatto un confronto fra le temperature di equilibrio riportate in NASA Exoplanet Archive per le quali i dettagli di calcolo non sono presenti nella documentazione e quelle ottenute utilizzando le combinazioni $A_B=0$ e $f=1$, $A_B=0.3$ e $f=1$, $A_B=0$ e $f=2$, $A_B=0.3$ e $f=2$. Ne è risultato che $A_B=0$ e $f=1$ sono i parametri che riproducono i risultati del catalogo e che per consistenza vengono adottati in questo studio.

La temperatura di equilibrio risulta perciò da:

$$T_{eq} = T_* \sqrt{\frac{4.65 \times 10^{-3} R_*}{2a}} \quad (3.2)$$

La gravità superficiale del pianeta g viene ricavata direttamente dalla Legge di Gravitazione Universale di Newton in unità del SI, m s^{-2} :

$$g \cong 25 M_p R_p^{-2} \quad (3.3)$$

M_p è la massa del pianeta data da *pl_bmassj* in unità di masse gioviane ($M_j = 1.898 \times 10^{27}$ kg) e R_p è il raggio del pianeta dato da *pl_radj* in unità di raggi gioviani ($R_j = 6.99 \times 10^4$ km).

A questo punto è possibile calcolare l'altezza di scala H , ovvero l'altezza dalla superficie per la quale la pressione diminuisce di un fattore $1/e$. In una atmosfera omogenea e isoterma essa vale:

$$H = \frac{K_B T_{eq}}{\mu_m g_p} \quad (3.4)$$

dove K_B è la costante di Boltzmann $K_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$, T_{eq} e g_p sono la temperatura di equilibrio e la gravità superficiale del pianeta

calcolati precedentemente in Kelvin e m s^{-2} , μ è il peso molecolare medio in una che viene fissato a 2.1 poiché si assume la presenza di una atmosfera di idrogeno ed elio in abbondanza solare, corrispondete a $\mu = 3.486 \times 10^{-27}$ kg.

Il contributo relativo del segnale in trasmissione S per una specie chimica presente ad una altezza di scala si può calcolare come la variazione della profondità di transito dovuta alla presenza della corona circolare di spessore H attorno al disco del pianeta, ovvero è dato da:

$$S = 1.44 \times 10^{-10} \frac{2R_p H}{R_*^2} \quad (3.5)$$

H è l'altezza di scala ottenuta sopra in metri, R_p è il raggio del pianeta pl_radj in raggi gioviani, R_* è il raggio stellare st_rad in raggi solari.

La durata del transito t_{dur} è calcolata utilizzando la relazione più generale per un'orbita eccentrica:

$$t_{dur} = 4.65 \times 10^{-3} \frac{R_* P}{\pi a} \sqrt{\left(1 + \frac{R_p}{R_*}\right)^2 - b^2} \quad (3.6)$$

R_* è il raggio stellare st_rad in raggi solari, R_p è il raggio del pianeta pl_radj in raggi gioviani, P è il periodo orbitale del pianeta pl_orbper misurato in giorni, a è il semiasse maggiore dell'orbita $pl_orbsmax$ misurato in UA; b è il parametro d'impatto, pl_imppar . Laddove in catalogo non è riportato il valore di b è stato aggiunto attingendo da exoplanet.eu e dagli articoli più recenti indicati in NASA Exoplanet Archive aggiornati al febbraio 2018, oppure è stato calcolato tramite:

$$b = 214.9 \frac{a \cos i}{R_*} \quad (3.7)$$

con i inclinazione dell'orbita $pl_orbincl$ (i valori mancanti nel catalogo sono stati aggiunti da exoplanet.eu e dagli articoli più recenti indicati in NASA Exoplanet Archive aggiornati al febbraio 2018), a è il semiasse maggiore dell'orbita $pl_orbsmax$ misurato in UA e R_* è il raggio stellare st_rad in raggi solari. In particolare, K2-108 riporta il valore di b presente in Petigura et al. 2018; mentre Kepler-56, Kepler-92 e Kepler-396 riportano i valori di Rowe et al. (2014). I pianeti di cui non sono riportati in letteratura né i né b sono stati esclusi dalla lista poiché risultano comunque estremamente deboli in banda WISE 2 e quindi non osservabili da ARIEL.

Per tutte le quantità derivate a partire dai dati del catalogo non è stato effettuato il calcolo della propagazione dell'errore perché l'entità delle incertezze di misura è trascurabile rispetto alle incertezze sistematiche legate ad esempio alla scelta dei parametri f , A_B , μ nel modello.

Tutti i calcoli finora effettuati sono stati necessari al fine di ottenere un valore che permettesse di stabilire l'idoneità di un oggetto ad essere osservato o meno durante il tempo di vita di ARIEL e stilare una lista prioritizzata degli obiettivi più interessanti.

Per tale ragione, è stata calcolata l'ampiezza del segnale atmosferico in trasmissione S degli oggetti del campione in relazione al segnale di WASP-76 b. WASP-76 b è stato scelto come riferimento perché ne viene simulato uno spettro in trasmissione sintetico nel proposal di ARIEL e perché viene utilizzato come calibratore in uno studio specifico sulla spettroscopia di transizione dei temperate Jupiters con ARIEL (*Transit spectroscopy of temperate Jupiters with ARIEL: a feasibility study*, Encrenaz, Tinetti, Coustenis 2017). WASP-76 b è un pianeta di $0.92 M_J$, raggio $1.83 R_J$ e una temperatura di equilibrio di 2200 K. Orbita attorno a una stella di magnitudine $V=9.5$, collocata a 120 pc dal Sole, con massa $1.46 M_\odot$, raggio $1.73 R_\odot$ e temperatura 6250 K. Il pianeta dista dalla stella 0.033 UA e ha un periodo orbitale di 1.81 giorni. La profondità del transito è 1.0×10^{-3} per una durata del transito pari a 3.4 ore (Encrenaz et al. 2017). In base alle simulazioni di Encrenaz et al. (2017), una somma di 25 transiti osservati con ARIEL dà un rapporto segnale rumore $S/N=10$ sulla misura dell'ampiezza del segnale in trasmissione.

L'ampiezza del segnale A' in trasmissione equivale a:

$$A' = \frac{S}{S_{\text{WASP-76}}} \sqrt{\frac{F_*}{F_{\text{WASP-76}}}} \sqrt{\frac{t_{\text{dur}}}{t_{\text{WASP-76}}}} \quad (3.8)$$

In questa relazione, appare il contributo frazionario del segnale in trasmissione rapportato al valore $S_{\text{WASP-76}}$; viene introdotta la dipendenza dell'errore di misura dal tempo di osservazione, che scala secondo una statistica poissoniana come la radice della durata del transito del pianeta t_{dur} rapportata a quella di WASP-76 $t_{\text{WASP-76}}=3.4$ ore; infine appare la dipendenza dal rumore poissoniano (photon noise) associato al flusso della stella, pari alla radice del flusso stesso calcolato relativamente a quello di WASP-76 $F_{\text{st}} = 10^{0.4(m_{\text{WASP-76}}-m_{\text{st}})}$, con $m_{\text{WASP-76}}=8.228$ e $\sqrt{F_{\text{WASP-76}}}=0.00107$. La banda fotometrica in cui è stata estratta la magnitudine è WISE2 centrata a $4.6 \mu\text{m}$ perché di riferimento per la banda di osservazione di ARIEL.

A questo punto, per poter determinare l'osservabilità di un oggetto con ARIEL relativamente a WASP-76 b, è necessario fare alcune considerazioni sul rapporto S/N. È stato calcolato in Encrenaz et al. (2017) che per ottenere un rapporto segnale rumore S/N= 12 per WASP-76 b è necessario osservare con ARIEL 30 transiti. Si è scelto di fissare una soglia arbitraria per S/N pari a 5, per avere la certezza di realizzare la rilevazione, in un numero di 3 transiti. Il che si traduce in un fattore di penalizzazione del segnale A' pari a $\sqrt{30/3}$ (volendo ottenere lo stesso risultato di WASP-76 b ma con un numero 10 volte inferiore di transiti) e un fattore aggiuntivo 12/5 dovuto al fatto che il S/N richiesto è inferiore a quello di WASP-76 b. La quantità che va considerata come parametro di osservabilità è perciò:

$$A'' = A' \frac{12}{5} \sqrt{\frac{3}{30}} \quad (3.9)$$

Questa quantità stabilisce infatti se per ogni oggetto siano sufficienti 3 transiti per raggiungere un S/N=5 sulla misura dell'ampiezza del segnale in trasmissione (caso $A'' \geq 1$) oppure se siano richiesti più di tre transiti (caso $A'' \leq 1$). Per conoscere il numero di transiti necessario a un S/N=5 si calcola:

$$N_{\text{tr}} = \frac{3}{A''^2} \quad (3.10)$$

Una volta completati i passaggi sopra descritti, la lista dei target si è ridotta a 539 oggetti. Tuttavia il campione deve essere ulteriormente ridotto, poichè sono presenti alcuni oggetti le cui stime di massa e raggio sono palesemente errate, oppure sono riportate in catalogo solo come stime del limite superiore. Questi oggetti sono stati individuati ed esclusi creando con TOPCAT un sottoinsieme tale che il parametro *pl_bmassjerr1* (errore positivo sulla stima della massa) fosse non nullo. Inoltre, per verificare la sensatezza fisica dei valori di massa e raggio riportati in catalogo, è stato utilizzato un modello teorico della struttura interna del pianeta (Zeng et al. 2016) che tabula una stima di massa e raggio per pianeti fino a 30 M_e (o 0.1 M_j) per varie composizioni chimiche medie tra cui 100% di Fe oppure 100% di H₂/He freddo. Tutti gli oggetti che si trovano al di fuori di queste stime limite sono stati esclusi dalla lista. La figura 3.1 mostra in giallo i target mantenuti nel campione, in nero i target scartati perché riportano solo una stima superiore della massa e in verde i target che presentano una misura della massa fisicamente non accettabile rispetto al modello teorico (in rosso è rappresentata una composizione al 100% ferrosa, in blu una composizione al 100% di H₂/He).

I target sopravvissuti nel campione e sviluppati nella successiva analisi sono pertanto 468.

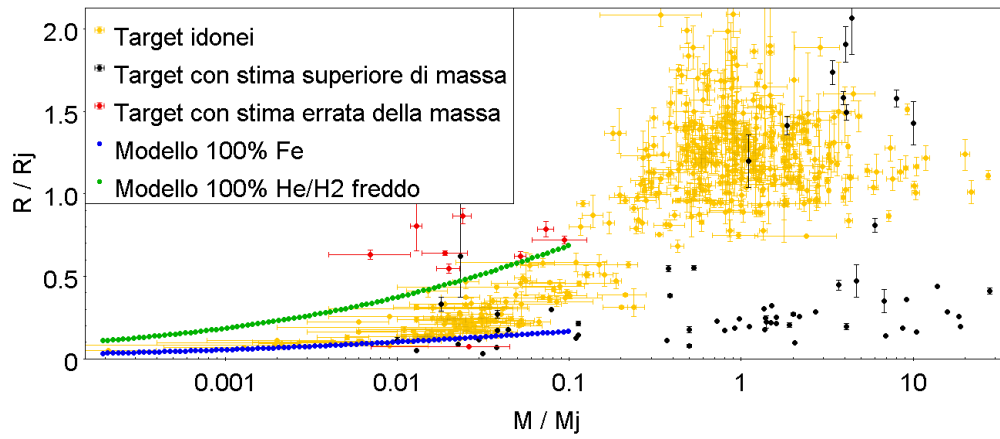


Figura 3.1: Selezione dei target per massa e raggio utilizzando un modello fisico per l'interno del pianeta.

Capitolo 4

Target individuati

Tabella 4.1: Target idonei per ARIEL

Nome	M_p (M_e)	R_p (R_e)	T_{eq} (K)	magWise2	A	N_{tr}
55 Cnc e	8.07	1.86	1955	3.296	9.4×10^{-5}	18
BD+20 594 b	16.30	2.18	546	9.344	2.1×10^{-5}	25789
CoRoT-1 b	327.35	16.34	1878	12.136	1.1×10^{-4}	287
CoRoT-10 b	874.00	10.64	669	11.752	7.8×10^{-5}	35599
CoRoT-11 b	740.52	15.68	1741	11.265	2.6×10^{-4}	2217
CoRoT-12 b	291.44	15.79	1445	13.47	8.3×10^{-4}	1481
CoRoT-13 b	415.70	9.70	1276	13.217	1.4×10^{-4}	35310
CoRoT-14 b	2415.43	11.95	1948	13.729	5.0×10^{-5}	869212
CoRoT-16 b	170.03	12.83	1195	12.266	5.6×10^{-4}	1104
CoRoT-17 b	772.30	11.18	1625	10.441	6.1×10^{-5}	9133
CoRoT-18 b	1102.83	14.37	1527	12.955	2.2×10^{-4}	14905
CoRoT-19 b	352.78	14.15	1657	11.787	2.6×10^{-4}	1875
CoRoT-2 b	1102.83	16.08	1547	10.098	3.7×10^{-4}	385
CoRoT-20 b	1347.55	9.21	953	12.46	2.8×10^{-5}	349720
CoRoT-22 b	12.07	4.77	1008	11.95	3.7×10^{-4}	1112
CoRoT-23 b	889.89	11.51	1648	12.173	5.8×10^{-5}	63479
CoRoT-24 c	27.96	4.82	707	13.001	2.0×10^{-4}	11651
CoRoT-25 b	85.81	11.84	1321	12.909	9.6×10^{-4}	908
CoRoT-26 b	165.26	13.82	1572	13.295	4.2×10^{-4}	2619
CoRoT-27 b	3302.14	11.04	1355	13.068	2.5×10^{-5}	1097461
CoRoT-28 b	153.82	10.47	1349	11.005	1.7×10^{-4}	1781
CoRoT-29 b	270.14	9.87	1225	12.105	2.9×10^{-4}	4016
CoRoT-3 b	6883.98	11.07	1688	11.394	7.3×10^{-6}	2071898
CoRoT-4 b	228.83	13.05	1076	12.246	4.0×10^{-4}	1160
CoRoT-5 b	148.42	15.22	1442	12.521	1.3×10^{-3}	245
CoRoT-6 b	940.74	12.79	1014	12.178	1.2×10^{-4}	15637
CoRoT-7 b	5.72	1.54	1760	9.824	9.0×10^{-5}	11209
CoRoT-8 b	69.92	6.25	856	11.465	2.7×10^{-4}	2350
CoRoT-9 b	266.96	11.69	419	11.699	1.4×10^{-4}	2907
CoRoTID 223977153 b	47.67	6.25	960	12.162	4.2×10^{-4}	1785
EPIC 220674823 b	9.00	1.77	2255	10.355	8.3×10^{-5}	17271
EPIC 220674823 c	5.69	2.70	789	10.355	1.6×10^{-4}	1555
GJ 1132 b	1.63	1.40	649	8.0	8.7×10^{-4}	34
GJ 1214 b	6.26	2.78	546	8.442	3.1×10^{-3}	4
GJ 3470 b	13.66	3.79	693	7.783	6.4×10^{-4}	19
GJ 436 b	22.24	4.08	706	5.69	5.4×10^{-4}	7
HAT-P-1 b	166.85	14.46	1322	8.751	9.3×10^{-4}	15

Continua nella pagina successiva

Tabella 4.1 – Target idonei per ARIEL

Nome	M_p	R_p	T_{eq}	magWise2	A	N_{tr}
HAT-P-11 b	25.74	4.62	867	7.001	3.2×10^{-4}	29
HAT-P-12 b	67.06	10.52	957	10.139	1.8×10^{-3}	17
HAT-P-13 b	270.46	13.95	1640	9.007	3.6×10^{-4}	111
HAT-P-14 b	709.37	12.61	1567	8.82	1.1×10^{-4}	1324
HAT-P-15 b	618.47	11.75	898	9.647	1.1×10^{-4}	1562
HAT-P-16 b	1332.61	14.14	1627	9.531	1.2×10^{-4}	1721
HAT-P-17 b	169.71	11.07	780	8.579	4.7×10^{-4}	37
HAT-P-18 b	62.61	10.91	848	10.253	1.7×10^{-3}	18
HAT-P-19 b	92.80	12.41	1009	10.557	1.6×10^{-3}	26
HAT-P-2 b	2888.98	12.69	1481	7.582	2.1×10^{-5}	5994
HAT-P-20 b	2302.92	9.51	968	8.648	4.0×10^{-5}	10973
HAT-P-21 b	1291.30	11.23	1271	10.112	6.1×10^{-5}	10809
HAT-P-22 b	682.35	11.84	1281	7.736	1.5×10^{-4}	208
HAT-P-23 b	657.88	13.42	1953	10.793	3.2×10^{-4}	1052
HAT-P-24 b	217.70	13.62	1637	10.513	5.8×10^{-4}	148
HAT-P-25 b	180.20	13.05	1204	10.816	8.6×10^{-4}	119
HAT-P-26 b	18.75	6.19	994	9.601	1.0×10^{-3}	26
HAT-P-27 b	197.04	11.18	1212	10.116	5.6×10^{-4}	233
HAT-P-28 b	198.95	13.29	1379	11.078	7.1×10^{-4}	190
HAT-P-29 b	247.26	12.14	1255	10.278	3.2×10^{-4}	407
HAT-P-3 b	187.83	9.07	1137	9.451	3.7×10^{-4}	235
HAT-P-30 b	225.97	14.69	1640	9.078	8.2×10^{-4}	35
HAT-P-31 b	689.98	11.73	1454	10.092	9.8×10^{-5}	3190
HAT-P-33 b	242.17	18.49	1782	10.015	9.2×10^{-4}	32
HAT-P-34 b	1057.70	13.13	1477	9.208	7.2×10^{-5}	2363
HAT-P-35 b	334.98	14.61	1581	11.036	3.8×10^{-4}	534
HAT-P-36 b	582.24	13.86	1823	10.633	3.7×10^{-4}	647
HAT-P-37 b	371.53	12.92	1278	11.67	5.1×10^{-4}	867
HAT-P-38 b	84.85	9.05	1078	10.501	5.9×10^{-4}	173
HAT-P-39 b	190.37	17.23	1749	11.152	9.5×10^{-4}	87
HAT-P-4 b	213.25	13.97	1697	9.768	4.5×10^{-4}	106
HAT-P-40 b	195.45	18.97	1767	10.011	6.7×10^{-4}	41
HAT-P-41 b	254.25	18.48	1935	9.601	9.0×10^{-4}	23
HAT-P-42 b	331.80	14.04	1428	10.617	2.7×10^{-4}	678
HAT-P-43 b	210.39	14.05	1356	11.799	7.8×10^{-4}	297
HAT-P-44 b	111.87	13.62	1105	11.309	1.0×10^{-3}	54
HAT-P-45 b	283.49	15.64	1649	10.143	6.8×10^{-4}	80
HAT-P-46 b	156.68	14.08	1453	9.869	7.0×10^{-4}	59
HAT-P-49 b	549.82	15.50	2126	9.338	2.3×10^{-4}	288
HAT-P-5 b	336.88	13.82	1540	10.468	4.7×10^{-4}	273
HAT-P-50 b	429.05	14.12	1855	10.481	2.2×10^{-4}	965
HAT-P-51 b	98.20	14.18	1190	11.563	1.7×10^{-3}	49
HAT-P-52 b	259.97	11.06	1214	11.625	4.2×10^{-4}	1172
HAT-P-53 b	471.64	14.45	1777	12.084	4.1×10^{-4}	1623
HAT-P-54 b	241.54	10.35	821	10.342	5.2×10^{-4}	317
HAT-P-55 b	184.97	12.96	1312	11.672	8.0×10^{-4}	278
HAT-P-56 b	692.84	16.08	1841	9.833	2.9×10^{-4}	521
HAT-P-6 b	335.93	14.59	1673	9.299	3.8×10^{-4}	115
HAT-P-65 b	167.49	20.73	1930	11.532	1.6×10^{-3}	43
HAT-P-66 b	248.85	17.44	1900	11.663	6.1×10^{-4}	300
HAT-P-67 b	108.05	22.87	1934	8.877	1.7×10^{-3}	2
HAT-P-7 b	534.57	16.35	2197	9.3	2.8×10^{-4}	209
HAT-P-8 b	483.08	16.45	1703	8.946	3.3×10^{-4}	103
HAT-P-9 b	247.89	15.35	1528	11.016	6.8×10^{-4}	184
HATS-1 b	589.55	14.28	1370	10.533	3.3×10^{-4}	626
HATS-10 b	167.17	10.62	1403	11.475	4.4×10^{-4}	754
HATS-11 b	263.79	16.31	1632	12.224	6.9×10^{-4}	426
HATS-12 b	759.58	15.18	2098	11.42	1.0×10^{-4}	8317
HATS-13 b	172.57	13.29	1247	11.985	1.1×10^{-3}	206

Continua nella pagina successiva

Tabella 4.1 – Target idonei per ARIEL

Nome	M _p	R _p	T _{eq}	magWise2	A	N _{tr}
HATS-14 b	340.38	11.39	1273	12.032	3.4×10^{-4}	2418
HATS-15 b	689.66	12.12	1491	12.692	2.4×10^{-4}	10206
HATS-16 b	1039.27	14.26	1592	12.268	1.5×10^{-4}	14816
HATS-17 b	425.24	8.52	813	10.752	5.3×10^{-5}	17071
HATS-18 b	629.28	14.66	2055	12.334	5.3×10^{-4}	1861
HATS-2 b	427.46	12.81	1577	11.333	5.1×10^{-4}	722
HATS-22 b	870.82	10.45	858	10.974	1.2×10^{-4}	7597
HATS-23 b	467.19	20.40	1656	12.222	1.1×10^{-3}	397
HATS-24 b	775.48	16.31	2074	11.336	4.5×10^{-4}	793
HATS-25 b	194.82	13.82	1278	11.418	7.5×10^{-4}	234
HATS-26 b	206.58	19.19	1921	11.415	8.4×10^{-4}	113
HATS-27 b	168.44	16.45	1657	11.527	7.7×10^{-4}	162
HATS-28 b	213.57	13.09	1251	12.023	8.3×10^{-4}	457
HATS-29 b	207.53	13.72	1208	10.894	7.0×10^{-4}	165
HATS-3 b	340.38	15.14	1645	10.704	4.5×10^{-4}	292
HATS-30 b	224.38	12.88	1414	10.757	6.4×10^{-4}	203
HATS-31 b	279.68	17.99	1825	11.521	5.8×10^{-4}	301
HATS-32 b	292.39	13.70	1437	12.67	5.5×10^{-4}	1513
HATS-33 b	378.84	13.49	1427	10.274	4.7×10^{-4}	245
HATS-34 b	299.06	15.68	1443	12.098	1.0×10^{-3}	481
HATS-35 b	388.37	16.06	2031	11.11	5.6×10^{-4}	320
HATS-36 b	1022.10	13.54	1371	12.816	1.3×10^{-4}	27242
HATS-4 b	420.47	11.18	1320	11.602	2.7×10^{-4}	2710
HATS-5 b	75.32	10.00	1024	10.702	9.6×10^{-4}	79
HATS-50 b	123.94	12.39	1361	12.244	8.9×10^{-4}	371
HATS-51 b	244.08	15.46	1547	10.889	6.0×10^{-4}	182
HATS-52 b	711.91	15.16	1879	12.007	4.4×10^{-4}	1750
HATS-53 b	189.10	14.69	1309	12.022	9.6×10^{-4}	223
HATS-6 b	101.38	10.94	712	11.122	1.5×10^{-3}	69
HATS-8 b	43.85	9.57	1323	12.671	1.2×10^{-3}	311
HATS-9 b	259.34	12.85	1815	11.539	3.5×10^{-4}	1083
HD 149026 b	116.95	8.91	1780	6.802	2.4×10^{-4}	31
HD 17156 b	1023.38	11.18	878	6.778	3.1×10^{-5}	1545
HD 189733 b	359.13	12.24	1198	5.342	5.2×10^{-4}	4
HD 209458 b	232.00	14.48	1399	6.191	7.6×10^{-4}	2
HD 219134 b	4.73	1.56	1016	2.934	7.2×10^{-5}	34
HD 219134 c	4.36	1.48	783	2.934	5.1×10^{-5}	37
HD 3167 b	5.01	1.66	1746	7.09	1.1×10^{-4}	396
HD 3167 c	9.79	2.95	555	7.09	1.0×10^{-4}	155
HD 80606 b	1252.21	10.75	402	7.322	2.2×10^{-5}	2834
HD 97658 b	7.85	2.29	732	5.603	1.2×10^{-4}	45
HIP 116454 b	11.75	2.47	691	8.078	9.2×10^{-5}	1107
K2-10 b	26.99	3.76	724	10.692	7.9×10^{-5}	7301
K2-105 b	29.99	4.04	897	10.121	1.2×10^{-4}	2730
K2-107 b	266.96	15.79	1771	11.207	4.4×10^{-4}	573
K2-108 b	59.39	5.16	1459	10.585	5.9×10^{-5}	11610
K2-110 b	16.69	2.53	637	9.577	6.5×10^{-5}	5360
K2-111 b	8.60	1.86	1229	9.347	3.3×10^{-5}	19606
K2-113 b	409.98	10.20	1177	11.956	1.5×10^{-4}	10456
K2-114 b	587.96	10.33	723	12.326	1.0×10^{-4}	22219
K2-115 b	266.96	12.23	680	11.7	3.2×10^{-4}	1295
K2-131 b	6.49	1.76	2254	9.997	1.5×10^{-4}	4474
K2-132 b	155.73	14.26	1513	9.534	1.0×10^{-4}	97
K2-139 b	122.99	8.86	564	9.677	2.3×10^{-4}	313
K2-140 b	323.85	12.01	1116	11.03	3.2×10^{-4}	672
K2-141 b	5.07	1.48	2161	8.391	1.6×10^{-4}	1057
K2-18 b	7.95	2.32	282	8.668	1.4×10^{-4}	564
K2-27 b	30.89	4.38	922	10.663	1.7×10^{-4}	2278
K2-29 b	232.00	13.05	1167	10.142	8.0×10^{-4}	86

Continua nella pagina successiva

Tabella 4.1 – Target idonei per ARIEL

Nome	M_p	R_p	T_{eq}	magWise2	A	N_{tr}
K2-30 b	184.01	11.39	1090	11.058	6.6×10^{-4}	299
K2-31 b	563.81	11.62	1516	8.859	3.7×10^{-4}	314
K2-32 b	16.49	5.02	822	9.787	4.7×10^{-4}	123
K2-32 d	10.30	3.35	540	9.787	1.4×10^{-4}	1222
K2-34 b	559.36	14.80	1740	10.207	2.3×10^{-4}	1054
K2-38 b	12.00	1.51	1294	9.466	1.6×10^{-5}	92690
K2-38 c	9.90	2.36	937	9.466	5.5×10^{-5}	6650
K2-39 b	39.79	5.58	1692	8.514	4.6×10^{-5}	1949
K2-60 b	135.39	7.49	1323	11.019	1.7×10^{-4}	3456
K2-66 b	21.30	2.43	1500	10.609	1.9×10^{-5}	117042
K2-95 b	10.99	3.40	414	12.225	4.9×10^{-4}	2161
K2-97 b	349.60	14.37	1762	10.09	4.5×10^{-5}	7939
K2-98 b	32.19	4.21	1100	10.856	7.9×10^{-5}	8015
K2-99 b	308.28	14.15	1275	9.714	6.5×10^{-5}	1710
KELT-1 b	8654.23	12.17	2418	9.419	1.2×10^{-5}	153365
KELT-10 b	215.79	15.34	1377	9.35	8.4×10^{-4}	24
KELT-11 b	61.97	15.02	1711	6.068	6.7×10^{-4}	1
KELT-12 b	301.92	19.52	1800	9.351	4.2×10^{-4}	62
KELT-14 b	408.08	19.12	1962	9.426	7.7×10^{-4}	51
KELT-15 b	289.21	15.82	1639	9.817	5.4×10^{-4}	78
KELT-16 b	874.00	15.52	2453	10.595	3.0×10^{-4}	889
KELT-17 b	416.34	16.72	2090	8.658	4.6×10^{-4}	45
KELT-18 b	375.02	17.22	2084	9.154	4.1×10^{-4}	66
KELT-2 A b	483.72	14.10	1711	7.335	1.6×10^{-4}	76
KELT-3 b	469.42	14.75	1816	8.601	3.0×10^{-4}	107
KELT-4 A b	286.67	18.63	1822	8.636	8.5×10^{-4}	13
KELT-6 b	140.47	12.94	1322	9.072	4.6×10^{-4}	40
KELT-7 b	406.80	16.81	2049	7.525	4.2×10^{-4}	18
KELT-8 b	275.54	20.40	1677	8.983	9.8×10^{-4}	13
KELT-9 b	915.32	20.74	4049	7.509	3.8×10^{-4}	21
KOI-1257 b	460.83	10.31	457	12.645	4.5×10^{-5}	70249
KOI-13 b	2949.36	16.58	2550	9.409	6.9×10^{-5}	4327
KOI-142 b	8.58	3.69	776	11.469	3.1×10^{-4}	1359
KOI-94 b	10.48	1.67	1624	10.813	1.9×10^{-5}	212331
KOI-94 c	15.57	4.22	1154	10.813	1.3×10^{-4}	2776
KOI-94 d	106.15	11.02	895	10.813	2.6×10^{-4}	464
KOI-94 e	34.96	6.41	666	10.813	1.1×10^{-4}	1812
Kepler-10 b	4.60	1.44	2130	9.491	6.6×10^{-5}	9067
Kepler-10 c	17.16	2.30	569	9.491	1.9×10^{-5}	28535
Kepler-100 b	7.30	1.29	1379	9.763	9.8×10^{-6}	188948
Kepler-101 b	50.85	5.59	1568	12.018	1.2×10^{-4}	14361
Kepler-102 d	3.81	1.15	761	9.378	2.8×10^{-5}	21552
Kepler-102 e	8.89	2.17	657	9.378	6.9×10^{-5}	3038
Kepler-103 b	9.85	3.30	1029	10.894	9.6×10^{-5}	5072
Kepler-103 c	36.23	5.03	463	10.894	4.2×10^{-5}	9177
Kepler-105 c	4.59	1.28	980	11.479	3.0×10^{-5}	158921
Kepler-106 c	10.48	2.44	938	11.414	6.4×10^{-5}	25112
Kepler-106 e	11.12	2.50	637	11.414	4.4×10^{-5}	27583
Kepler-11 b	1.90	1.76	932	12.125	1.3×10^{-4}	11490
Kepler-11 c	2.86	2.80	859	12.125	3.1×10^{-4}	1743
Kepler-11 d	7.30	3.04	714	12.125	1.3×10^{-4}	8381
Kepler-11 e	7.94	4.10	636	12.125	2.6×10^{-4}	2705
Kepler-11 f	1.90	2.43	562	12.125	2.0×10^{-4}	3086
Kepler-113 b	11.75	1.77	913	11.279	4.9×10^{-5}	56000
Kepler-117 b	29.87	7.88	990	12.984	3.3×10^{-4}	2264
Kepler-117 c	584.78	12.07	710	12.984	4.4×10^{-5}	85634
Kepler-12 b	137.29	19.24	1483	12.079	1.9×10^{-3}	47
Kepler-131 b	16.20	2.35	853	10.075	3.4×10^{-5}	28236
Kepler-138 b	0.06	0.51	442	9.355	2.5×10^{-4}	595

Continua nella pagina successiva

Tabella 4.1 – Target idonei per ARIEL

Nome	M_p	R_p	T_{eq}	magWise2	A	N_{tr}
Kepler-138 c	1.97	1.17	408	9.355	9.2×10^{-5}	3477
Kepler-138 d	0.63	1.18	343	9.355	2.4×10^{-4}	642
Kepler-14 b	2669.68	12.46	1590	10.976	1.4×10^{-5}	193374
Kepler-15 b	209.76	10.53	1107	11.985	3.3×10^{-4}	2190
Kepler-16 b	105.83	8.27	206	8.953	1.4×10^{-4}	269
Kepler-1647 b	482.98	11.61	242	11.909	1.3×10^{-5}	155171
Kepler-17 b	778.65	14.37	1774	12.594	3.2×10^{-4}	4970
Kepler-18 b	6.99	1.95	1284	11.787	5.9×10^{-5}	82457
Kepler-18 c	17.16	5.37	990	11.787	3.9×10^{-4}	1141
Kepler-19 b	8.39	2.15	924	10.331	7.9×10^{-5}	6162
Kepler-20 b	9.69	1.83	1206	10.85	4.4×10^{-5}	46095
Kepler-20 c	12.75	2.98	842	10.85	1.0×10^{-4}	6608
Kepler-20 d	10.06	2.68	438	10.85	4.9×10^{-5}	15241
Kepler-21 b	5.07	1.60	2028	6.926	2.4×10^{-5}	3165
Kepler-223 b	7.39	2.92	1365	13.607	8.3×10^{-5}	72209
Kepler-223 c	5.10	3.36	1243	13.607	1.7×10^{-4}	19461
Kepler-223 d	7.99	5.12	1083	13.607	3.3×10^{-4}	4520
Kepler-223 e	4.79	4.49	985	13.607	3.3×10^{-4}	3209
Kepler-25 b	9.59	2.65	1327	9.498	8.0×10^{-5}	3013
Kepler-25 c	24.59	5.09	1043	9.498	1.7×10^{-4}	809
Kepler-26 b	5.12	2.72	461	12.501	3.7×10^{-4}	3159
Kepler-26 c	6.20	2.66	411	12.501	2.6×10^{-4}	6398
Kepler-289 b	7.30	2.10	630	12.537	4.3×10^{-5}	107349
Kepler-289 c	133.48	11.34	404	12.537	2.3×10^{-4}	2347
Kepler-289 d	4.13	2.62	502	12.537	1.2×10^{-4}	11853
Kepler-30 b	11.44	3.81	609	13.473	1.7×10^{-4}	17192
Kepler-30 c	638.81	12.03	471	13.473	7.6×10^{-5}	68336
Kepler-36 b	4.44	1.45	1071	10.78	1.5×10^{-5}	148012
Kepler-36 c	7.94	3.59	1016	10.78	1.2×10^{-4}	2188
Kepler-39 b	6388.18	13.60	894	12.892	9.6×10^{-6}	2706497
Kepler-396 b	75.64	3.42	611	10.276	1.5×10^{-5}	72041
Kepler-396 c	17.79	5.18	481	10.276	1.8×10^{-4}	404
Kepler-4 b	24.47	3.91	1614	10.778	9.5×10^{-5}	6746
Kepler-40 b	699.20	12.83	1620	13.244	5.7×10^{-5}	99581
Kepler-406 b	6.35	1.40	1570	10.984	3.2×10^{-5}	92658
Kepler-41 b	177.97	14.15	1788	12.887	9.1×10^{-4}	819
Kepler-412 b	299.06	14.71	1850	12.897	6.3×10^{-4}	1976
Kepler-413 b	67.06	4.25	335	13.174	3.4×10^{-5}	344812
Kepler-419 b	794.55	10.53	672	11.851	1.7×10^{-5}	284411
Kepler-422 b	136.66	12.61	1120	12.079	5.7×10^{-4}	555
Kepler-423 b	189.10	13.07	1380	12.696	9.6×10^{-4}	536
Kepler-424 b	327.35	9.76	1217	12.55	2.1×10^{-4}	19077
Kepler-425 b	79.45	10.72	1073	12.871	1.2×10^{-3}	473
Kepler-426 b	108.05	11.95	1301	13.238	1.3×10^{-3}	614
Kepler-427 b	92.16	13.49	1077	12.772	8.4×10^{-4}	352
Kepler-428 b	403.63	11.84	1067	13.295	3.7×10^{-4}	6766
Kepler-43 b	1026.55	13.37	1618	12.552	9.9×10^{-5}	41727
Kepler-432 b	1719.40	12.56	884	10.12	3.3×10^{-6}	518683
Kepler-433 b	896.25	15.90	1769	12.795	8.3×10^{-5}	32481
Kepler-434 b	908.96	12.39	1001	13.609	5.8×10^{-5}	360480
Kepler-435 b	266.96	21.83	1729	12.309	3.5×10^{-4}	789
Kepler-44 b	317.82	11.95	1539	12.857	2.4×10^{-4}	8736
Kepler-447 b	435.41	18.10	978	10.802	6.4×10^{-4}	356
Kepler-45 b	160.49	10.53	788	12.838	1.0×10^{-3}	941
Kepler-454 b	6.83	2.31	920	9.974	7.7×10^{-5}	10380
Kepler-48 b	3.94	1.84	1109	11.181	1.2×10^{-4}	7193
Kepler-48 c	14.61	2.65	878	11.181	7.5×10^{-5}	14598
Kepler-48 d	7.94	1.99	537	11.181	3.6×10^{-5}	36649
Kepler-5 b	670.91	15.64	1751	11.741	1.6×10^{-4}	4541

Continua nella pagina successiva

Tabella 4.1 – Target idonei per ARIEL

Nome	M_p	R_p	T_{eq}	magWise2	A	N_{tr}
Kepler-539 b	308.28	8.19	387	10.897	4.1×10^{-5}	17927
Kepler-539 c	762.76	8.16	175	10.897	7.4×10^{-6}	332575
Kepler-56 b	22.24	6.37	1497	10.245	5.2×10^{-5}	3432
Kepler-56 c	181.15	9.58	1181	10.245	1.7×10^{-5}	42122
Kepler-6 b	212.30	14.30	1457	11.643	5.5×10^{-4}	471
Kepler-68 b	5.96	2.28	1052	8.583	7.2×10^{-5}	2404
Kepler-7 b	140.15	17.79	1630	11.551	9.0×10^{-4}	112
Kepler-74 b	200.22	10.53	1095	12.89	2.7×10^{-4}	7020
Kepler-75 b	3209.98	11.51	827	13.266	2.6×10^{-5}	861254
Kepler-76 b	638.81	14.91	2145	12.056	3.4×10^{-4}	4561
Kepler-77 b	136.66	10.53	1248	12.396	5.8×10^{-4}	1054
Kepler-78 b	1.90	1.15	2379	9.584	1.8×10^{-4}	2048
Kepler-79 b	10.90	3.40	992	12.577	1.1×10^{-4}	19200
Kepler-79 c	6.03	3.64	785	12.577	2.0×10^{-4}	4665
Kepler-79 e	4.13	3.41	546	12.577	1.6×10^{-4}	13207
Kepler-8 b	187.51	15.53	1680	12.267	8.0×10^{-4}	435
Kepler-80 b	6.92	2.61	709	12.254	2.1×10^{-4}	7906
Kepler-80 c	6.74	2.67	641	12.254	2.1×10^{-4}	7198
Kepler-80 d	6.75	1.49	936	12.254	5.3×10^{-5}	163029
Kepler-80 e	4.12	1.56	814	12.254	8.8×10^{-5}	53550
Kepler-87 b	324.17	13.20	525	12.964	6.0×10^{-5}	40222
Kepler-9 b	80.09	9.23	752	12.202	3.8×10^{-4}	1217
Kepler-9 c	54.34	9.02	593	12.202	4.1×10^{-4}	1062
Kepler-91 b	257.43	14.99	2037	10.155	3.6×10^{-5}	9887
Kepler-92 b	64.19	3.43	1162	10.392	1.3×10^{-5}	126341
Kepler-92 c	6.03	2.54	933	10.392	4.7×10^{-5}	12683
Kepler-93 b	4.02	1.44	1139	8.37	5.4×10^{-5}	2971
Kepler-94 b	10.80	3.43	1140	10.585	3.9×10^{-4}	958
Kepler-95 b	13.03	3.34	1107	10.843	8.5×10^{-5}	7257
Kepler-96 b	8.58	2.61	850	8.888	9.0×10^{-5}	1040
Kepler-97 b	3.49	1.44	1568	11.325	7.5×10^{-5}	25030
Kepler-98 b	3.49	1.95	1881	11.276	1.7×10^{-4}	5328
Kepler-99 b	6.03	1.44	953	10.772	4.8×10^{-5}	36274
LHS 1140 b	6.64	1.40	222	8.391	1.4×10^{-4}	689
Lupus-TR-3 b	257.43	9.76	1013	14.545	2.9×10^{-4}	34504
MASCARA-1 b	1175.93	16.45	2546	7.713	1.2×10^{-4}	260
NGTS-1 b	258.06	14.59	789	11.772	1.5×10^{-3}	200
OGLE-TR-056 b	441.76	14.95	2204	12.004	4.8×10^{-4}	1724
OGLE-TR-10 b	197.04	13.71	1490	8.764	7.6×10^{-4}	19
OGLE-TR-113 b	400.45	11.99	1339	11.45	5.2×10^{-4}	844
OGLE-TR-132 b	375.02	13.16	1975	12.924	3.7×10^{-4}	5098
OGLE-TR-182 b	320.99	12.39	1350	12.231	3.3×10^{-4}	3147
OGLE-TR-211 b	327.35	14.91	1729	12.383	3.5×10^{-4}	1951
OGLE2-TR-L9 b	1430.19	17.66	2356	11.404	2.0×10^{-4}	2784
POTS-1 b	734.16	10.32	843	14.268	1.9×10^{-4}	82050
Qatar-1 b	411.25	12.53	1416	10.395	5.6×10^{-4}	314
Qatar-2 b	792.64	13.75	1348	10.642	3.9×10^{-4}	730
Qatar-3 b	1369.80	12.02	1678	11.166	7.0×10^{-5}	21881
Qatar-4 b	1938.70	12.45	1385	11.503	1.0×10^{-4}	20721
Qatar-5 b	1372.98	12.14	1417	10.98	8.4×10^{-5}	13508
TRAPPIST-1 b	0.84	1.06	405	9.807	2.1×10^{-3}	34
TRAPPIST-1 c	1.37	1.03	346	9.807	1.0×10^{-3}	127
TRAPPIST-1 d	0.40	0.75	291	9.807	1.1×10^{-3}	87
TRAPPIST-1 e	0.61	0.89	254	9.807	1.1×10^{-3}	79
TRAPPIST-1 f	0.68	1.02	221	9.807	1.3×10^{-3}	54
TRAPPIST-1 g	1.34	1.10	201	9.807	7.5×10^{-4}	143
TrES-1 b	239.00	11.70	1145	9.821	6.2×10^{-4}	98
TrES-2 b	380.43	13.67	1472	9.792	5.3×10^{-4}	189
TrES-3 b	607.03	14.65	1643	10.611	6.6×10^{-4}	340

Continua nella pagina successiva

Tabella 4.1 – Target idonei per ARIEL

Nome	M_p	R_p	T_{eq}	magWise2	A	N_{tr}
TrES-4 b	157.00	20.16	1798	10.277	1.5×10^{-3}	17
TrES-5 b	568.89	13.09	1483	11.592	4.1×10^{-4}	1619
WASP-1 b	271.41	16.26	1838	10.247	7.2×10^{-4}	74
WASP-10 b	1001.13	11.84	970	9.997	1.7×10^{-4}	1630
WASP-100 b	645.17	18.53	2201	9.637	2.9×10^{-4}	250
WASP-101 b	158.91	15.46	1558	9.071	1.1×10^{-3}	13
WASP-103 b	473.55	16.76	2509	10.747	6.4×10^{-4}	212
WASP-104 b	404.26	12.47	1514	9.907	4.2×10^{-4}	338
WASP-105 b	572.07	10.53	847	9.945	1.1×10^{-4}	2260
WASP-106 b	611.80	11.90	1137	10.17	8.6×10^{-5}	3329
WASP-107 b	38.13	10.31	740	8.625	2.6×10^{-3}	2
WASP-11 b	154.77	11.02	1023	9.438	7.5×10^{-4}	45
WASP-113 b	150.96	15.45	1485	10.302	7.4×10^{-4}	63
WASP-114 b	562.22	14.68	2028	11.093	3.0×10^{-4}	1279
WASP-117 b	87.55	11.20	1024	8.791	6.4×10^{-4}	20
WASP-118 b	163.35	15.79	1726	9.783	7.6×10^{-4}	33
WASP-119 b	390.91	15.35	1566	10.522	5.3×10^{-4}	217
WASP-12 b	467.19	20.84	2583	10.109	9.6×10^{-4}	46
WASP-120 b	1541.42	16.15	1876	9.822	7.8×10^{-5}	4536
WASP-121 b	375.98	20.45	2359	9.387	1.3×10^{-3}	12
WASP-123 b	285.72	14.45	1516	9.354	5.2×10^{-4}	75
WASP-124 b	190.69	13.60	1390	11.347	9.4×10^{-4}	174
WASP-126 b	88.98	10.53	1487	9.608	6.4×10^{-4}	56
WASP-127 b	57.20	15.02	1401	8.67	2.3×10^{-3}	2
WASP-129 b	317.82	10.20	1077	10.372	2.3×10^{-4}	1071
WASP-13 b	151.60	15.23	1515	9.11	7.7×10^{-4}	21
WASP-130 b	390.91	9.76	835	9.433	1.1×10^{-4}	1372
WASP-131 b	85.81	13.38	1460	8.566	9.2×10^{-4}	10
WASP-132 b	130.30	9.54	765	9.638	4.9×10^{-4}	106
WASP-133 b	368.67	13.27	1776	11.178	2.9×10^{-4}	1169
WASP-135 b	603.85	14.26	1720	11.058	4.7×10^{-4}	834
WASP-136 b	479.90	15.13	1745	8.754	1.4×10^{-4}	348
WASP-138 b	387.74	11.95	1587	10.486	2.0×10^{-4}	1159
WASP-139 b	37.18	8.77	919	10.504	1.4×10^{-3}	33
WASP-14 b	2333.11	14.05	1883	8.595	6.9×10^{-5}	2395
WASP-140 b	775.48	15.79	1316	9.15	4.7×10^{-4}	156
WASP-141 b	854.93	13.27	1537	11.187	1.2×10^{-4}	6644
WASP-142 b	266.96	16.78	1992	11.262	7.0×10^{-4}	278
WASP-15 b	172.25	15.66	1654	9.667	8.9×10^{-4}	28
WASP-151 b	98.52	12.39	1289	11.205	1.0×10^{-3}	91
WASP-153 b	123.94	17.00	1712	11.022	1.2×10^{-3}	52
WASP-156 b	40.68	5.59	969	9.377	3.8×10^{-4}	180
WASP-157 b	182.42	11.68	1301	10.754	4.7×10^{-4}	526
WASP-16 b	271.73	11.05	1305	9.578	3.8×10^{-4}	273
WASP-17 b	154.46	21.84	1770	10.225	2.6×10^{-3}	5
WASP-18 b	3314.86	12.78	2405	8.123	5.3×10^{-5}	3280
WASP-19 b	339.74	15.27	2100	10.494	1.2×10^{-3}	83
WASP-2 b	290.80	11.74	1297	9.637	5.4×10^{-4}	154
WASP-20 b	98.84	16.03	1378	9.364	1.6×10^{-3}	8
WASP-21 b	95.34	11.73	1309	9.963	9.1×10^{-4}	37
WASP-22 b	196.09	13.15	1500	10.352	5.9×10^{-4}	129
WASP-23 b	280.95	10.55	1124	10.472	4.2×10^{-4}	424
WASP-24 b	340.38	14.26	1768	10.131	4.5×10^{-4}	233
WASP-25 b	184.33	13.38	1213	10.168	9.9×10^{-4}	49
WASP-26 b	326.71	14.05	1636	9.702	4.4×10^{-4}	191
WASP-28 b	288.26	13.30	1464	10.709	5.4×10^{-4}	235
WASP-29 b	77.54	8.68	974	8.79	6.7×10^{-4}	32
WASP-3 b	629.28	15.35	2028	9.338	3.4×10^{-4}	197
WASP-31 b	151.91	16.99	1574	10.639	1.7×10^{-3}	26

Continua nella pagina successiva

Tabella 4.1 – Target idonei per ARIEL

Nome	M_p	R_p	T_{eq}	magWise2	A	N_{tr}
WASP-32 b	1144.15	12.94	1561	10.185	1.3×10^{-4}	3321
WASP-34 b	187.51	13.38	1158	8.761	9.1×10^{-4}	23
WASP-35 b	228.83	14.48	1451	9.525	8.6×10^{-4}	32
WASP-36 b	750.37	14.55	1738	11.202	3.9×10^{-4}	1227
WASP-37 b	572.07	12.72	1324	11.091	2.5×10^{-4}	1538
WASP-38 b	855.25	12.00	1247	8.022	7.6×10^{-5}	708
WASP-39 b	88.98	13.93	1120	10.224	2.2×10^{-3}	10
WASP-4 b	386.46	14.59	1651	10.748	8.3×10^{-4}	151
WASP-41 b	298.75	12.94	1247	9.689	6.3×10^{-4}	79
WASP-42 b	167.49	12.30	1021	9.986	7.6×10^{-4}	67
WASP-43 b	565.71	10.20	1379	9.225	3.8×10^{-4}	327
WASP-44 b	282.54	12.50	1350	11.301	5.7×10^{-4}	507
WASP-45 b	318.45	10.88	1172	10.275	3.0×10^{-4}	966
WASP-46 b	607.03	12.87	1639	11.372	4.1×10^{-4}	1435
WASP-47 b	384.56	12.61	1270	10.236	2.6×10^{-4}	578
WASP-47 d	16.79	3.63	976	10.236	1.1×10^{-4}	2720
WASP-47 e	9.09	1.77	2202	10.236	5.4×10^{-5}	25999
WASP-48 b	288.26	15.31	1958	10.368	5.6×10^{-4}	166
WASP-49 b	120.13	12.23	1373	9.677	1.1×10^{-3}	29
WASP-5 b	502.15	11.92	1707	10.589	2.9×10^{-4}	986
WASP-50 b	466.55	12.64	1390	9.958	4.5×10^{-4}	295
WASP-52 b	146.19	13.93	1299	10.094	2.0×10^{-3}	16
WASP-53 b	677.59	11.78	1055	10.43	2.1×10^{-4}	1667
WASP-54 b	202.13	18.13	1782	9.036	8.3×10^{-4}	14
WASP-55 b	199.27	14.64	1299	10.343	9.0×10^{-4}	55
WASP-56 b	181.47	11.97	1218	10.535	5.0×10^{-4}	211
WASP-57 b	204.67	11.51	1341	11.236	6.1×10^{-4}	401
WASP-58 b	282.85	15.02	1277	10.279	5.9×10^{-4}	109
WASP-59 b	274.27	8.50	663	9.749	2.1×10^{-4}	743
WASP-6 b	154.14	13.49	1181	10.338	1.3×10^{-3}	31
WASP-60 b	163.35	9.43	1318	10.59	2.8×10^{-4}	766
WASP-61 b	654.70	13.60	1567	10.949	1.7×10^{-4}	2296
WASP-62 b	181.15	15.24	1439	8.917	9.1×10^{-4}	13
WASP-63 b	120.77	15.68	1537	9.388	7.4×10^{-4}	22
WASP-64 b	403.94	13.94	1647	11.012	5.2×10^{-4}	438
WASP-65 b	492.62	12.19	1485	10.351	2.8×10^{-4}	705
WASP-66 b	737.34	15.24	1796	10.426	1.5×10^{-4}	1659
WASP-67 b	133.48	15.35	1036	10.077	2.0×10^{-3}	16
WASP-68 b	301.92	13.60	1487	8.968	2.3×10^{-4}	160
WASP-69 b	82.63	11.59	962	7.441	1.5×10^{-3}	3
WASP-7 b	305.10	14.59	1484	8.376	3.9×10^{-4}	37
WASP-70 A b	187.51	12.76	1393	9.39	5.5×10^{-4}	63
WASP-71 b	712.55	16.01	2044	9.313	1.2×10^{-4}	800
WASP-72 b	491.38	13.93	2202	9.61	1.6×10^{-4}	786
WASP-73 b	597.50	12.72	1784	9.008	7.6×10^{-5}	1397
WASP-74 b	301.92	17.11	1916	8.19	6.3×10^{-4}	24
WASP-75 b	340.06	13.93	1705	10.054	4.5×10^{-4}	296
WASP-76 b	292.39	20.07	2182	8.228	1.1×10^{-3}	6
WASP-77 A b	559.36	13.27	1668	8.162	4.1×10^{-4}	57
WASP-78 b	282.85	18.64	1955	10.976	9.3×10^{-4}	99
WASP-79 b	286.03	22.92	1702	9.045	1.6×10^{-3}	6
WASP-8 b	713.18	11.38	925	7.921	1.1×10^{-4}	397
WASP-80 b	170.98	10.95	827	8.322	9.7×10^{-4}	12
WASP-81 b	231.69	15.67	1620	10.846	8.7×10^{-4}	93
WASP-82 b	394.09	18.31	2185	8.757	3.8×10^{-4}	50
WASP-83 b	95.34	11.40	1121	10.393	8.4×10^{-4}	68
WASP-84 b	220.56	10.33	799	8.859	3.8×10^{-4}	101
WASP-85 A b	402.04	13.60	1447	8.705	5.4×10^{-4}	45
WASP-88 b	177.97	18.64	1763	10.295	7.9×10^{-4}	40

Continua nella pagina successiva

Tabella 4.1 – *Target idonei per ARIEL*

Nome	M_p	R_p	T_{eq}	magWise2	A	N_{tr}
WASP-89 b	1875.13	11.40	1123	11.036	6.1×10^{-5}	28835
WASP-90 b	200.22	17.88	1840	10.236	7.1×10^{-4}	83
WASP-91 b	425.87	11.29	1144	9.752	2.8×10^{-4}	505
WASP-92 b	255.84	16.02	1879	11.454	8.9×10^{-4}	195
WASP-93 b	467.19	17.51	1941	9.9	5.1×10^{-4}	175
WASP-94 A b	143.65	18.86	1610	8.837	1.5×10^{-3}	4
WASP-95 b	359.13	13.27	1561	8.569	4.2×10^{-4}	60
WASP-96 b	152.55	13.16	1286	10.903	9.3×10^{-4}	125
WASP-97 b	419.52	12.39	1540	9.006	3.3×10^{-4}	162
WASP-98 b	293.03	12.54	1170	11.258	7.6×10^{-4}	321
WASP-99 b	883.53	12.06	1476	8.108	5.0×10^{-5}	1487
WTS-1 b	1274.45	16.34	1491	15.751	2.0×10^{-4}	205906
WTS-2 b	355.95	14.95	1533	13.367	1.3×10^{-3}	904
XO-1 b	292.39	13.27	1214	9.518	5.8×10^{-4}	72
XO-2 N b	189.73	11.17	1348	9.31	5.2×10^{-4}	80
XO-3 b	3747.09	13.35	1709	8.765	3.0×10^{-5}	14015
XO-4 b	565.71	14.59	1462	9.398	1.8×10^{-4}	462
XO-5 b	378.20	12.50	1226	10.381	2.6×10^{-4}	741

I target che hanno superato la selezione sono dunque 468, riportati in Tabella 4.1:

- 379 sono pianeti gassosi ($M_p > 15M_e$), di cui 27 *warm Jupiters* ($T \sim 350\text{-}750$ K) e 191 *hot Jupiters* ($T \sim 750\text{-}1500$ K);
- 61 sono pianeti di transizione ($5M_e < M_p < 15M_e$), di cui 19 *warm* e 30 *hot*;
- 28 sono pianeti rocciosi ($M_p < 5M_e$), di cui 9 *warm* e 11 *hot*.

In Figura 4.1 viene rappresentato il campione completo in un diagramma massa-raggio-temperatura di equilibrio del pianeta. Il campione è costituito in prevalenza da pianeti gioviani *warm* e *hot*, che rappresentano i target di maggior interesse scientifico per ARIEL, in quanto presentano atmosfere ben mescolate e rappresentative della loro storia di formazione ed evoluzione.

Le proprietà statistiche del campione vengono rappresentate nelle Figure da 4.2 a 4.6: negli istogrammi sono evidenziati in particolare HD 209458 b e HD 189733 b, che sono tra gli esopianeti più studiati e caratterizzati, e WASP-76 b, che viene utilizzato come oggetto di riferimento per il calcolo del rapporto S/N nella precedente sezione.

Le Figure 4.2 e 4.3, istogrammi che mostrano rispettivamente la distribuzione dei raggi e delle masse dei target del campione, evidenziano ancora la

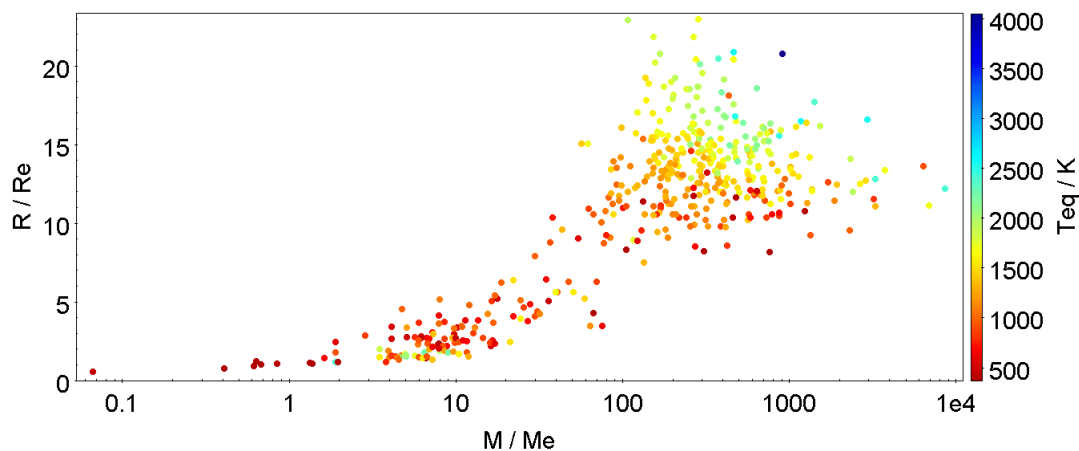


Figura 4.1: Diagramma massa-raggio dei target idonei in unità di massa e raggio terrestre, nel quale viene indicata anche la temperatura di equilibrio del pianeta in Kelvin in base alla scala di colore. L'asse della massa è espresso in forma logaritmica.

prevalenza di pianeti gassosi con una lacuna (GAP) a circa $7-8 R_{\odot}$ che separa i pianeti nettuniani e rocciosi. La Figura 4.5 mostra invece la distribuzione delle temperature di equilibrio dei pianeti, che si concentrano particolarmente fra i 1200 e i 1700 K.

La Figura 4.4 è un istogramma che raffigura la distribuzione delle magnitudini WISE 2 a $4.6 \mu\text{m}$ degli oggetti che si concentrano prevalentemente attorno a valori di 10-11 mag.

Infine, la Figura 4.6 mostra la distribuzione dei target in funzione del numero di transiti necessario a raggiungere un $S/N=5$ con ARIEL calcolato riscalando le prestazioni previste dallo *yellow book* sul pianeta WASP-76 b. Come si vede per la grande maggioranza dei target questa soglia non è raggiungibile in pratica a causa dell'enorme numero di osservazioni richieste, mentre sono solo 16 i target per cui è possibile ottenerlo con 10 o meno osservazioni. Di questi 16 oggetti si trova un approfondimento nel Capitolo 5.

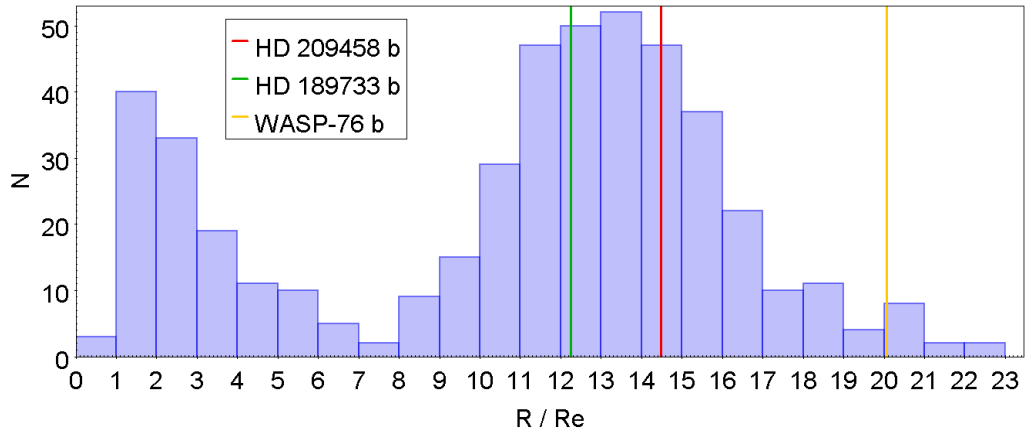


Figura 4.2: Istogramma che rappresenta la distribuzione dei raggi planetari nel campione in unità di raggi terrestri.

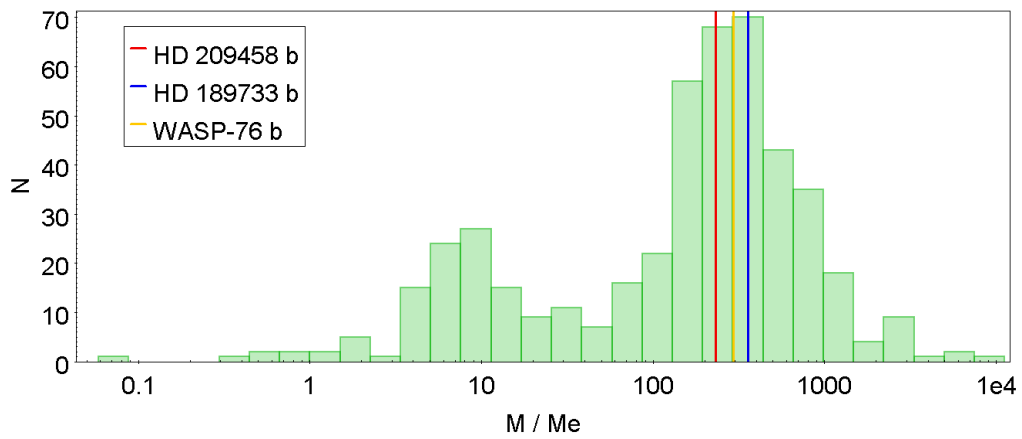


Figura 4.3: Istogramma che rappresenta la distribuzione delle masse planetarie nel campione in scala logaritmica in unità terrestri.

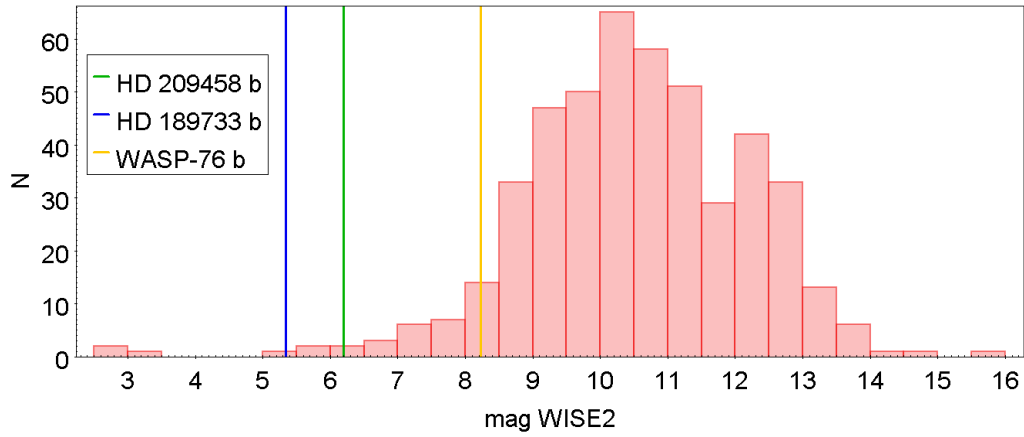


Figura 4.4: Istogramma che rappresenta la distribuzione in magnitudine WISE 2 dei target nel campione.

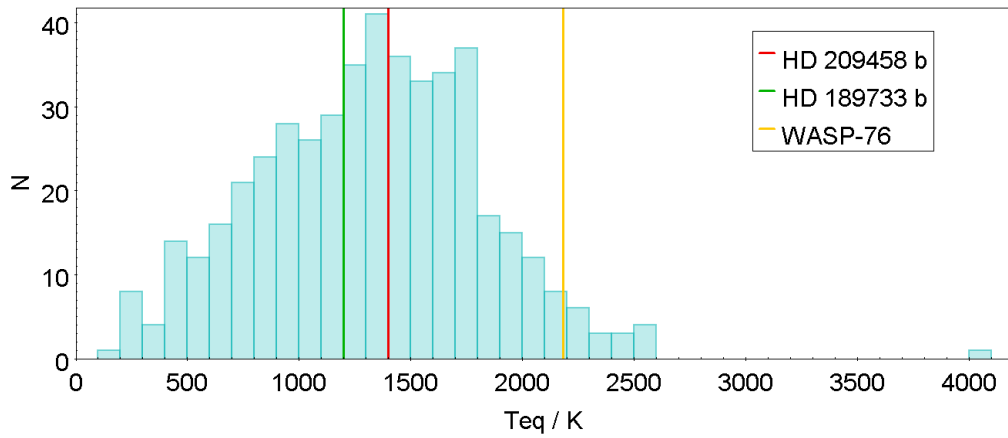


Figura 4.5: Istogramma che rappresenta la distribuzione delle temperature di equilibrio dei target nel campione.

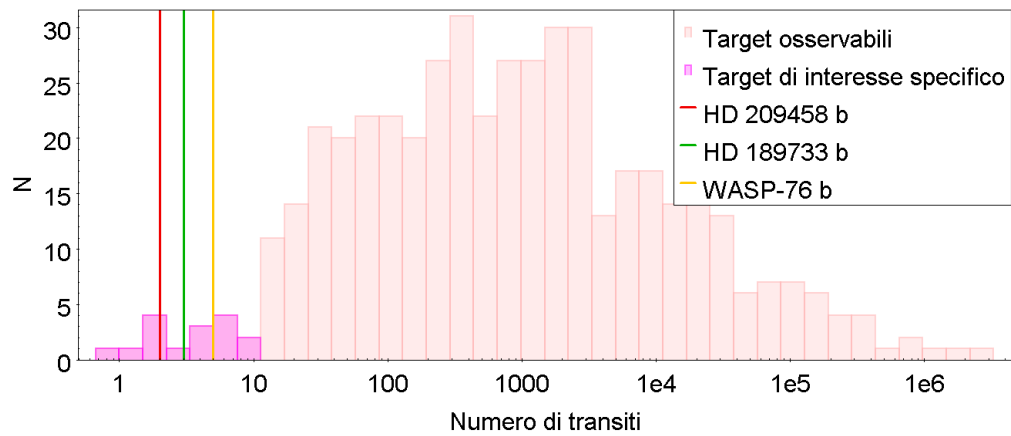


Figura 4.6: Istogramma che rappresenta la distribuzione del numero di transiti necessari per la rilevazione del target con un $S/N=5$, calcolato riscalando le prestazioni previste dallo *yellow book* sul pianeta WASP-76 b. I target con $N < 10$ sono stati selezionati per una discussione individuale nel Capitolo 5.

Capitolo 5

Target di interesse specifico

Tra tutti i target del campione sono stati selezionati quelli che possono essere osservati con un $S/N=5$, riscalando le prestazioni previste dallo *yellow book* sul pianeta WASP-76 b, in 10 o meno transiti, riportati in Tabella 5.1 e in Figura 5.1.

In questa sezione vengono riassunte le principali informazioni riguardo ai target di interesse specifico, in particolare per quanto concerne le loro atmosfere:

- KELT-11 b (Pepper et al. 2017): è un pianeta con massa paragonabile a Saturno, ma raggio maggiore di quello di Giove ($M_p=0.195 M_j$, $R_p=1.37 R_j$, Pepper et al. 2017), perciò con una bassa densità; orbita attorno a HD 93396, una delle stelle che ospita pianeti giganti transittanti più brillanti dell'emisfero sud ($V=8.04$ e $K=6.122$), il che lo rende un oggetto di riferimento in esoplanetologia, al pari di HD 189733 b e HD 209458 b, ma con la particolarità di orbitare attorno a una stella sub-gigante. Lo studio della sua atmosfera risulta particolarmente interessante grazie alla sua bassissima gravità superficiale ($\log g \sim 2.5$), insolita nei pianeti sub-gioviniani, e per il fatto che permette di studiare gli effetti dell'evoluzione di una stella di *post main-sequence* su un *hot Jupiter* (Beatty et al. 2015).
- WASP-127 b (Lam et al. 2017): è un super-Nettuno caratterizzato da una bassa densità e un'atmosfera molto estesa ($M_p=0.18 M_j$, $R_p=1.37 R_j$, Lam et al. 2017). Il suo spettro in trasmissione mostra una forte pendenza di Rayleigh nel blu e tracce di assorbimento del Na, anche se sono necessarie misurazioni più precise per confermarne la rilevazione; nel rosso sono presenti righe di assorbimento che sembrano essere

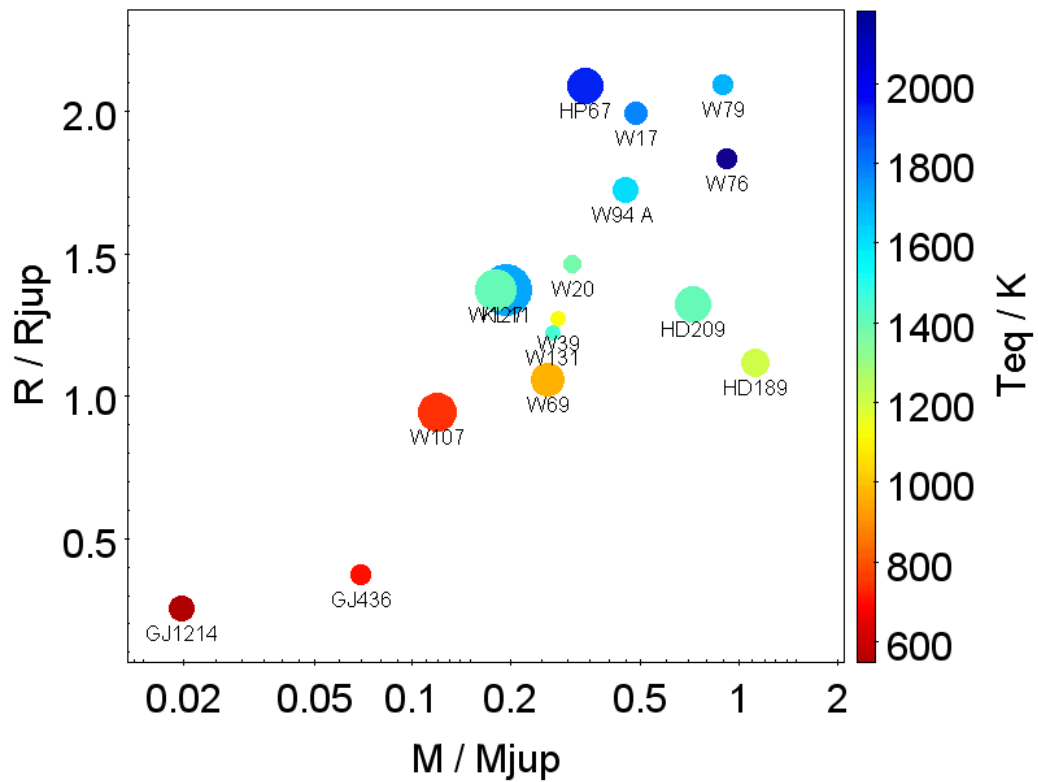


Figura 5.1: Diagramma massa-raggio dei target in Tabella 5.1, in cui viene indicata anche la temperatura di equilibrio del pianeta T_{eq} in K codificata dalla scala di colore e l'ampiezza del segnale in trasmissione A' in base alla dimensione relativa dei punti.

Tabella 5.1: Target che possono essere rilevati con un S/N=5 rispetto a WASP-76 b con l’osservazione di meno di 10 transiti.

Nome	M_p (M_e)	R_p (R_e)	T_{eq} (K)	mag WISE2	A	N_{tr}
KELT-11 b	61	15	1711	6.068	6.7×10^{-4}	1
WASP-127 b	57	15	1401	8.670	2.3×10^{-3}	2
WASP-107 b	38	10	740	8.625	2.6×10^{-3}	2
HAT-P-67 b	108	22	1934	8.877	1.7×10^{-3}	2
HD 209458 b	232	14	1399	6.191	7.6×10^{-4}	2
WASP-69 b	82	11	962	7.441	1.5×10^{-3}	3
HD 189733 b	359	12	1198	5.342	5.2×10^{-4}	4
WASP-94 A b	143	18	1610	8.837	1.5×10^{-3}	4
GJ 1214 b	6	2	546	8.442	3.1×10^{-3}	4
WASP-17 b	154	21	1770	10.225	2.6×10^{-3}	5
WASP-76 b	292	20	2182	8.228	1.1×10^{-3}	6
WASP-79 b	286	22	1702	9.045	1.6×10^{-3}	6
GJ 436 b	22	4	706	5.690	5.4×10^{-4}	7
WASP-20 b	98	16	1378	9.364	1.6×10^{-3}	8
WASP-131 b	85	13	1460	8.566	9.2×10^{-4}	10
WASP-39 b	88	13	1120	10.224	2.2×10^{-3}	10

associate a TiO e VO (Palle et al. 2017). WASP-127 b presenta un’atmosfera apparentemente priva di nuvole (Palle et al. 2017) e questo lo rende un target primario per uno studio dettagliato della composizione chimica e delle abbondanze atmosferiche. Infatti da tempo si prevede che i metalli alcalini debbano mostrare nello spettro di trasmissione ali allargate per effetto della pressione, ma la maggior parte delle misure mostra solo righe di assorbimento molto strette al di sopra di un continuo spettrale piatto, probabilmente a causa della presenza di nuvole (Chen et al. 2018).

- WASP-107 b (Anderson et al. 2017): è un *warm super-Neptune* ($M_p=0.119 M_j$, $R_p=0.924 R_j$, Močnik et al. 2017) caratterizzato da uno spettro in trasmissione con forte assorbimento di H_2O ; le righe dello spettro sono più piccole di quanto previsto da un modello di atmosfera priva di nuvole, perciò sembra esserci uno spesso strato condensato ad elevata altitudine (0.1–3 mbar) (Kreidberg et al. 2018). Si è trovato inoltre un forte assorbimento (0.049 per cento) causato dall’He metastabile, circa cinque volte superiore a quello prodotto dall’attività stellare, che indica la presenza di un’atmosfera estesa in fase di erosione e di una possibile

coda di gas modellata dalla pressione di radiazione (Spake et al. 2018).

- HAT-P-67 b (Zhou et al. 2017): è un *hot-Saturn* ($M_p=0.34 M_j$, $R_p=2.085 R_j$, Zhou et al. 2017) che orbita attorno a una stella di tipo F subgigante in rapida rotazione. Questo è uno degli esopianeti meno densi conosciuti ($\rho = 0.052 \text{ g/cm}^{-3}$), congiuntamente alla sua elevata temperatura di equilibrio ($T_{\text{eq}}=1903 \text{ K}$), ciò lo rende uno dei target con la maggiore altezza di scala nota (Zhou et al. 2017).
- HD 209458 b (Henry et al. 2000): è un *hot Jupiter* ($M_p=0.73 M_j$, $R_p=1.39 R_j$, Stassun et al. 2017) tra i più studiati in assoluto e il primo di cui venne scoperto un transito nel 1999. L'osservazione della riga Lyman- α nello spettro in trasmissione è un segnale della presenza di idrogeno neutro che sfugge dagli strati superiori dell'atmosfera planetaria, formando una sorta di coda cometaria, a causa della pressione di radiazione stellare (Bourrier & Lecavelier des Etangs 2013). La temperatura atmosferica decresce linearmente con il diminuire della pressione, quindi non sembra esserci inversione termica (Line et al. 2016). I modelli sulla distribuzione e composizione delle nuvole, che riproducono i dati osservativi, indicano che il pianeta è coperto da nuvole formate da particelle minerali con una composizione e dimensione variabile con l'altezza e collocate principalmente in alta atmosfera (Helling et al. 2016).
- WASP-69 b (Anderson et al. 2014): si tratta di un *hot Jupiter* ($M_p=0.29 M_j$, $R_p=1.11 R_j$, Stassun et al. 2017) che orbita attorno a una stella di tipo K. Nello spettro in trasmissione ad alta risoluzione è stato individuato il doppietto del sodio piuttosto chiaramente, ma sono necessarie misure più accurate per comprendere meglio le proprietà dell'atmosfera (Casasayas-Barris et al. 2017).
- HD 189733 b (Bouchy et al. 2005): è un *hot Jupiter* ($M_p=1.13 M_j$, $R_p=1.13 R_j$, Stassun et al. 2017) studiatissimo, al pari di HD 209458 b. Come HD 209458 b, possiede una coda cometaria di idrogeno che viene strappato agli strati atmosferici dalla pressione di radiazione e del vento stellare (Bourrier & Lecavelier des Etangs 2013). La sua atmosfera presenta strati di nuvole dalla composizione minerale che, a differenza di HD 209458 b, sembrano collocati in profondità, come testimoniano

le intense righe di assorbimento dell'acqua (Helling et al. 2016). Ulteriori studi dello spettro in trasmissione individuano la presenza di uno scattering associato ad aerosol troposferici e righe di assorbimento del Na di origine termosferica. Queste due caratteristiche insieme indicano che la temperatura in termosfera raggiunge i 10000 K (Pino et al. 2018).

- WASP-94 A b (Neveu-VanMalle et al. 2014): è un *hot Jupiter* ($M_p=0.50 M_j$, $R_p=1.58 R_j$, Stassun et al. 2017) che orbita attorno a una stella di tipo spettrale F8V, che forma un sistema binario con una compagna pressochè identica (Berta-Thompson et al. 2018). I sistemi binari costituiscono un laboratorio ideale per investigare gli effetti potenziali della formazione planetaria sulla composizione stellare. Assumendo che le stelle si siano formate nello stesso ambiente, ogni anomalia nella composizione può indicare differenze in come il materiale è stato sequestrato nei pianeti o accresciuto dalla stella nel processo di formazione planetaria. In questo sistema binario, malgrado le stelle siano molto simili, la loro separazione di 2700 UA suggerisce che i dischi protoplanetari non siano stati influenzati dall'interazione fra le compagne. L'orbita di WASP-94 A b, disallineata con l'asse di rotazione della sua stella e forse retrograda, indica un meccanismo di formazione dinamico e attivo, probabilmente differente da quello di WASP-94 B b, che non è disallineato dalla sua stella e ha un'orbita quasi circolare (Teske et al. 2016).
- GJ 1214 b (Charbonneau et al. 2009): è una super-Terra/sub-Nettuno ($M_p=0.0197 M_j$, $R_p=0.254 R_j$, Harpsøe et al. 2013), l'unico pianeta di questa categoria all'interno del nostro campione ristretto. Il suo spettro in trasmissione nel vicino IR risulta appiattito, forse a causa della presenza in atmosfera di alti e spessi strati condensati di KCl o ZnS oppure di nebbie fotochimiche (Charnay et al. 2015). La formazione di questo genere di nuvole/nebbie richiederebbe un forte mescolamento verticale collegato con la circolazione atmosferica. Uno studio di Charnay et al. (2015) ha mostrato che uno spettro in trasmissione piatto consistente con le osservazioni di HST può essere generato da particelle di aerosol di circa $0.5 \mu\text{m}$. Grazie ai dati che saranno forniti da ARIEL, si potranno porre dei forti vincoli sulla natura dell'atmosfera di GJ 1214 b.
- WASP-17 b (Anderson et al. 2010): è il prototipo ideale di *hot Jupiter inflated* (a bassa densità) ($M_p=0.780 M_j$, $R_p=1.87 R_j$, Stassun et al.

2017), il che lo ha reso un target idoneo per uno studio dettagliato anche nel programma JWST GTO (PI Mountain/Clampin) (Wakeford & Hannah, 2016). Nella sua atmosfera sono state rilevate tracce di H₂O, Na e K in alta atmosfera, il che indicherebbe un gradiente di temperatura atmosferica relativamente basso (Sedaghati et al, 2016).

- WASP-76 b (West et al. 2016): è un *hot Jupiter* di grande raggio ($M_p=0.92 M_j$, $R_p=1.83 R_j$, West et al. 2016), estremamente irradiato dalla sua stella madre, che è di tipo spettrale F. La sua temperatura di equilibrio ($T_{eq}=2160$ K, West et al. 2016) è la più elevata di tutto il campione.
- WASP-79 b (Smalley et al. 2012): è un *hot Jupiter* ($M_p=0.850 M_j$, $R_p=1.67 R_j$, Stassun et al. 2017) caratterizzato da un significativo disallineamento fra l'asse di rotazione della stella madre e il piano orbitale del pianeta, che percorre un'orbita quasi polare (Addison et al. 2013).
- GJ 436 b (Butler et al. 2004): è un oggetto di interesse primario per la comprensione delle atmosfere dei *warm Neptunes* ($M_p=0.0728 M_j$, $R_p=0.3739 R_j$, Turner et al. 2016), unico pianeta nettuniano del nostro campione ristretto, ed è stato scelto come target per molteplici programmi osservativi futuri con JWST (Lothringer et al. 2018). Lo spettro in trasmissione indica un'alta metallicità ($\sim 100-1000$ metallicità solare), poichè mancano le righe di assorbimento degli alcali e non è stata rilevata la pendenza nello spettro associata allo scattering di aerosol a lunghezze d'onda maggiori di $0.53 \mu\text{m}$ (Lothringer et al. 2018). Anche lo spettro ottico esclude la presenza di nebbie (Lothringer et al. 2018). GJ 436 b è inoltre soggetto alla dispersione della sua esosfera a causa del vento stellare (Lavie et al. 2017).
- WASP-20 b (Anderson et al. 2015): è un gigante gassoso con una massa simile a quella di Saturno ($M_p=0.378 M_j$, $R_p=1.28 R_j$, Evans et al. 2016); grazie alla sua bassa densità ($\rho=0.099 \rho_j$, Anderson et al. 2015) e alla brillantezza della sua stella madre ($V = 10.7$; tipo spettrale F9) è un buon target per la caratterizzazione dell'atmosfera tramite la spettroscopia. Il suo allineamento orbitale ($\lambda=8^\circ$, Anderson et al. 2015) è consistente con l'ipotesi che i pianeti giganti molto vicini alla stella vengano scalzati su orbite più eccentriche in modo casuale, che

vengono poi rese più circolari e allineate con lo spin della stella tramite dissipazione mareale (Anderson et al. 2015).

- WASP-131 b (Hellier et al. 2017): è un pianeta con massa dell'ordine di quella di Saturno ($M_p=0.27 M_j$, $R_p=1.22 R_j$, Hellier et al. 2017); grazie alla sua grande altezza di scala e alla brillantezza della sua stella ospite ($V=10.1$) è un target molto adatto alla caratterizzazione atmosferica (Hellier et al. 2017).
- WASP-39 b (Faedi et al. 2011): è un esopianeta *hot Saturn-mass* ($M_p=0.283 M_j$, $R_p=1.332 R_j$, Maciejewski et al. 2016), la cui atmosfera appare rappresentata meglio da un modello di *gray cloud*, piuttosto che da un modello di scattering Rayleigh prodotto da aerosol (Barstow et al. 2017), ovvero presenta un'atmosfera per lo più trasparente, libera da nuvole. Il suo spettro in trasmissione infatti è piuttosto piatto, effetto tipico di *gray clouds*, in particolare nel visibile dove lo scattering Rayleigh avrebbe un effetto più forte, se fosse presente (Barstow et al. 2017). Lo spettro in trasmissione completo suggerisce un'atmosfera dominata da H_2 , in cui sono presenti tracce di sodio e potassio (Fischer et al. 2016). La mancanza di condensati e nebbie lo rende un target ideale per lo studio delle abbondanze chimiche, in particolare per misurare l'abbondanza assoluta di H_2O (Wakeford 2015).

5.1 Sinergie con JWST

I dati che verranno ottenuti con la missione ARIEL potranno essere combinati e confrontati con quelli prodotti dai nuovi strumenti in fase di sviluppo, quali E-ELT per la ricerca da terra e JWST per la ricerca spaziale

Per quanto riguarda JWST, sono già stati stilati dettagliati programmi di ricerca per sfruttare al meglio il tempo dedicato allo studio degli esopianeti. Programmi quali GTO (*Guaranteed Time Observations*) che si articola in GTO 1274, GTO 1224, GTO 1201 per la caratterizzazione degli esopianeti; GTO 1193, GTO 1194, GTO 1195, GTO 1194, GTO 1241 per la coronografia planetaria; GTO 1200 per lo studio di sistemi planetari di cui si può fare imaging; GTO 1188, GTO 1270 per la spettroscopia di pianeti non transitanti; GTO 1177, GTO 1185 per la spettroscopia di trasmissione; GTO 1275, GTO 1276, GTO 1277, GTO 1278, GTO 1279, GTO 1280, GTO 1281, GTO 1292 e GTO 1184 per lo studio di esopianeti che orbitano stelle nane brune e stelle

di classe M giovani; oppure i programmi 1366 e 1386 *Early Release Science*, per lo studio di pianeti transitanti il primo e per l'imaging dei sistemi planetari il secondo.

Alcuni dei target di interesse specifico per ARIEL esposti in questa sezione risultano presenti fra gli oggetti indicati dai programmi osservativi: HD 189733 b e HD 209458 b rientrano in GTO 1274 con lo scopo di misurare la metallicità e le abbondanze elementari degli *hot Jupiters*, derivandole da quelle molecolari, a partire dagli spettri in trasmissione; WASP-17 b appare in GTO 1224 in cui si propone di misurare lo spettro in trasmissione e in emissione sull'intervallo di lunghezza d'onda 0.6-14 μm ; WASP-107 b e GJ 436 b vengono citati in GTO 1177 e GTO 1185, dove si vuole condurre un'osservazione combinata con NIRCam e MIRI GTO program per osservare gli spettri fra 2.4–12 μm di pianeti transitanti più piccoli e freddi di quelli analizzati finora con HST e Spitzer, al fine di misurarne la pressione atmosferica e le regioni superficiali; WASP-79 b viene invece messo in evidenza nel programma 1366 ERS, al fine di effettuare una serie di osservazioni nel tempo che permettano di caratterizzare gli errori sistematici introdotti dagli strumenti su varie scale temporali rilevanti per lo studio degli esopianeti, di valutarne la resa a lunghezze d'onda sovrapposte e di misurarne i rumori di fondo.

In aggiunta ai programmi di osservazione, è stato realizzato uno studio da Mollière et al. (2017) in cui vengono indicati i target di interesse primario per JWST, procurando modelli atmosferici autoconsistenti e osservazioni teoriche con JWST per identificare le regioni spettrali di maggior importanza e il numero di transiti necessari per capire quale modello teorico si addica ai dati raccolti. I target primari coprono tutte le categorie di esopianeti e annoverano oggetti come GJ 1214 b (super-Terra), WASP-76 b e WASP-39 b (*inflated giants*) che appartengono anche alla lista dei target di interesse specifico per ARIEL.

L'utilizzo combinato dei dati di alta qualità provenienti da questi diversi, nuovi e potenti strumenti permetterà di progredire nella conoscenza degli esopianeti e di dare una risposta alle numerose questioni ancora insolute.

Capitolo 6

Conclusione

La missione ARIEL (Capitolo 2), *Atmospheric Remote-sensing InfraRed Large survey mission*, si pone lo scopo di comprendere i meccanismi di formazione ed evoluzione dei sistemi planetari attraverso lo studio delle atmosfere degli esopianeti tramite la spettroscopia di trasmissione ed emissione nell'infrarosso. Nell'arco dei quattro anni di vita della missione, l'obiettivo è osservare circa un migliaio di oggetti di differenti classi (pianeti gassosi, di transizione e rocciosi) e in diverse condizioni ambientali, per permettere di utilizzare un approccio statistico. A causa della durata limitata prevista per la missione, è necessario individuare fra gli esopianeti noti quelli di maggior interesse scientifico e dai quali si possono ricavare maggiori informazioni ed è questo lo scopo della tesi.

A seguito dell'analisi (Capitolo 3) degli oggetti raccolti nel catalogo NASA Exoplanet Archive, aggiornato a febbraio 2018, i target risultati idonei ad essere osservati e studiati con le tecniche di spettroscopia di trasmissione ed emissione nell'infrarosso con il satellite ARIEL sono 468. Il campione comprende 379 pianeti gassosi, 61 pianeti di transizione e 28 pianeti rocciosi e risulta perciò completo rispetto alle tre diverse popolazioni di esopianeti finora individuate.

I target selezionati sono stati raccolti in una lista prioritizzata (Capitolo 4) in base al numero di transiti che è necessario osservare al fine di ottenere uno spettro in trasmissione caratterizzato da un rapporto segnale/rumore $S/N=5$ (ovvero dalla certezza di effettuare la rilevazione delle specie chimiche presenti in atmosfera), riscaldando le prestazioni previste dallo *yellow book* sul pianeta WASP-76 b. Per la grande maggioranza dei casi questo obiettivo non è raggiungibile, tuttavia sono stati evidenziati i 16 oggetti per cui invece questo è possibile in 10 transiti o meno (Capitolo 5). Questo gruppo ridotto conta prevalentemente *hot Jupiter* (12), ma presenta anche una super-Terra (GJ 1214 b) e alcuni oggetti di transizione (WASP-127 b, WASP-107 b, GJ

436 b).

Bibliografia

- [1] Addison B.C. et al. (2013), *A Nearly Polar Orbit for the Extrasolar Hot Jupiter WASP-79b*, 2013ApJ...774L...9A
- [2] Agundez M. et al. (2012), *The impact of atmospheric circulation on the chemistry of the hot Jupiter HD 209458b*, 2012A&A...548A..73A
- [3] Agundez M. et al. (2014), *Pseudo 2D chemical model of hot-Jupiter atmospheres: application to HD 209458b and HD 189733b*, 2014A&A...564A..73A
- [4] All WISE Data Release (Cutri+ 2013): <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR-3>
- [5] Anderson D.R. et al. (2010), *WASP-17b: An Ultra-Low Density Planet in a Probable Retrograde Orbit*, 2010ApJ...709..159A
- [6] Anderson D.R. et al. (2014), *Three newly discovered sub-Jupiter-mass planets: WASP-69b and WASP-84b transit active K dwarfs and WASP-70Ab transits the evolved primary of a G4+K3 binary*, 2014MNRAS.445.1114A
- [7] Anderson D.R. et al. (2015), *WASP-20b and WASP-28b: a hot Saturn and a hot Jupiter in near-aligned orbits around solar-type stars*, 2015A&A...575A..61A
- [8] Anderson D.R. et al. (2017), *The discoveries of WASP-91b, WASP-105b and WASP-107b: Two warm Jupiters and a planet in the transition region between ice giants and gas giants*, 2017A&A...604A.110A
- [9] Barstow J.K. et al. (2017), *A Consistent Retrieval Analysis of 10 Hot Jupiters Observed in Transmission*, 2017ApJ...834...50B
- [10] Beatty T. et al. (2015), *A Spitzer Transit of the Most Inflated Planet Known, Around an Extremely Bright Sub-giant Star*, 2015sptz.prop12096B

- [11] Berta-Thompson Z. et al. (2018), *The Optical Transmission Spectrum of the Inflated Hot Jupiter WASP-94Ab*, 2018AAS...23142709B
- [12] Bouchy F. et al. (2005), *ELODIE metallicity-biased search for transiting Hot Jupiters. II. A very hot Jupiter transiting the bright K star HD 189733*, 2005A&A...444L..15B
- [13] Bourrier V., Lecavelier des Etangs A. (2013), *3D model of hydrogen atmospheric escape from HD 209458b and HD 189733b: radiative blow-out and stellar wind interactions*, 2013A&A...557A.124B
- [14] Butler R.P. et al. (2004), *A Neptune-Mass Planet Orbiting the Nearby M Dwarf GJ 436*, 2004ApJ...617..580B
- [15] Casasayas-Barris N. et al. (2017), *Detection of sodium in the atmosphere of WASP-69b*, 2017A&A...608A.135C
- [16] Charbonneau D. et al. (2009), *A super-Earth transiting a nearby low-mass star*, 2009Natur.462..891C
- [17] Charnay B. et al. (2015), *3D modeling of clouds in G J1214 b's atmosphere*, 2015ESS.....311915C
- [18] Chen G. et al. (2018), *The GTC exoplanet transit spectroscopy survey IX. Detection of Haze, Na, K, and Li in the super-Neptune WASP-127b*, 2018arXiv180511744C
- [19] CHEOPS: <http://cheops.unibe.ch/>
- [20] CoRot: <https://corot.cnes.fr/en/COROT/index.htm>
- [21] Crossfield et al. (2010), *A New 24 μ m Phase Curve for ν Andromedae b*, 2010ApJ...723.1436C
- [22] Deming D. et al. (2015), *Spitzer Secondary Eclipses of Two Hubble-observed Exoplanets*, 2015sptz.prop12085D
- [23] Encrenaz T., Tinetti G., Coustenis A. (2017), *Transit spectroscopy of temperate Jupiters with ARIEL: a feasibility study*, Springer Nature 2017
- [24] ESA Cosmic Vision: <http://sci.esa.int/cosmic-vision/>
- [25] Evans D.F. et al (2016), *WASP-20 Is a Close Visual Binary with a Transiting Hot Jupiter*, 2016ApJ...833L..19E

- [26] Faedi F. et al. (2011), *WASP-39b: a highly inflated Saturn-mass planet orbiting a late G-type star*, 2011A&A...531A..40F
- [27] Fischer P.D. et al. (2016), *HST Hot-Jupiter Transmission Spectral Survey: Clear Skies for Cool Saturn WASP-39b*, 2016ApJ...827...19F
- [28] Gaia: <http://sci.esa.int/gaia/>
- [29] Harpsøe K.B. W. et al. (2013), *The transiting system GJ1214: high-precision defocused transit observations and a search for evidence of transit timing variation*, 2013A&A...549A..10H
- [30] Hellier C. et al. (2017), *WASP-South transiting exoplanets: WASP-130b, WASP-131b, WASP-132b, WASP-139b, WASP-140b, WASP-141b and WASP-142b*, 2017MNRAS.465.3693H
- [31] Helling C. et al. (2016), *The mineral clouds on HD 209458b and HD 189733b*, 2016MNRAS.460..855H
- [32] Henry G.W. et al. (2000), *A Transiting “51 Peg-like” Planet*, 2000ApJ...529L..41H
- [33] James Webb Space Telescope User Documentation: <https://jwst-docs.stsci.edu/display/JSP/JWST+GTO+Observation+Specifications#JWSTGTOObservationSpecifications-Extra-solarplanets>
- [34] Kepler & K2: <https://keplerscience.arc.nasa.gov/>
- [35] Knutson, H.A. et al. (2007), *A map of the day-night contrast of the extrasolar planet HD 189733b*, 2007Natur.447..183K
- [36] Kreidberg L. (2017), *Exoplanet Atmosphere Measurements from Transmission Spectroscopy and Other Planet Star Combined Light Observations*, 2017haex.bookE.100K
- [37] Kreidberg L. et al. (2018), *Water, High-altitude Condensates, and Possible Methane Depletion in the Atmosphere of the Warm Super-Neptune WASP-107b*, 2018ApJ...858L...6K
- [38] Lam K.W.F. et al. (2017), *From dense hot Jupiter to low-density Neptune: The discovery of WASP-127b, WASP-136b, and WASP-138b*, 2017A&A...599A...3L
- [39] Lavie B. et al.(2017), *The long egress of GJ 436b’s giant exosphere*, 2017A&A...605L...7L

- [40] Line M.R. et al. (2016), *No Thermal Inversion and a Solar Water Abundance for the Hot Jupiter HD 209458b from HST/WFC3 Spectroscopy*, 2016AJ....152..203L
- [41] Lothringer J.D. et al. (2018), *An HST/STIS Optical Transmission Spectrum of Warm Neptune GJ 436b*, 2018AJ....155...66L
- [42] Maciejewski G. et al. (2016), *New Transit Observations for HAT-P-30 b, HAT-P-37 b, TrES-5 b, WASP-28 b, WASP-36 b and WASP-39 b*, 2016AcA....66...55M
- [43] Močnik T. et al. (2017), *Starspots on WASP-107 and pulsations of WASP-118*, 2017MNRAS.469.1622M
- [44] Mollière P. et al. (2017), *Observing transiting planets with JWST. Prime targets and their synthetic spectral observations*, 2017A&A...600A..10M
- [45] NASA Exoplanet Archive: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>
- [46] Neveu-VanMalle M. et al. (2014), *emphWASP-94 A and B planets: hot-Jupiter cousins in a twin-star system*, 2014A&A...572A..49N
- [47] OGLE Optical Gravitational Lensing Experiment: <http://ogle.astrouw.edu.pl/>
- [48] Palle E. et al. (2017), *Feature-rich transmission spectrum for WASP-127b. Cloud-free skies for the puffiest known super-Neptune?*, 2017A&A...602L..15P
- [49] Pepper J. et al. (2017), *KELT-11b: A Highly Inflated Sub-Saturn Exoplanet Transiting the V = 8 Subgiant HD 93396*, 2017AJ....153..215P
- [50] Perryman M. (2011), *The Exoplanet handbook*, Cambridge, New York.
- [51] Pino L. et al. (2018), *Combining low- to high-resolution transit spectroscopy of HD 189733b. Linking the troposphere and the thermosphere of a hot gas giant*, 2018A&A...612A..53P
- [52] PLATO: <http://sci.esa.int/plato/>
- [53] Rowe J.F. et al (2014), *Validation of Kepler's Multiple Planet Candidates. III: Light Curve Analysis & Announcement of Hundreds of New Multi-planet Systems*, arXiv:1402.6534v1
- [54] Schlichting H.E. (2018), *Formation of Super-Earths*, arXiv:1802.03090

- [55] Sedaghati E. et al. (2016), *Potassium detection in the clear atmosphere of a hot-Jupiter. FORS2 transmission spectroscopy of WASP-17b*, 2016A&A...596A..47S
- [56] Smalley B. et al. (2012), *WASP-78b and WASP-79b: two highly-bloated hot Jupiter-mass exoplanets orbiting F-type stars in Eridanus*, 2012A&A...547A..61S
- [57] Spake J.J. et al. (2018), *Helium in the eroding atmosphere of an exoplanet*, 2018Natur.557...68S
- [58] Stassun K.G. et al. (2017), *Accurate Empirical Radii and Masses of Planets and Their Host Stars with Gaia Parallaxes*, 2017AJ....153..136S
- [59] Tabataba-Vakili F. et al. (2016), *Atmospheric effects of stellar cosmic rays on Earth-like exoplanets orbiting M-dwarfs*, 2016A&A...585A..96T
- [60] Teske J.K. et al. (2016), *The Curious Case of Elemental Abundance Differences in the Dual Hot Jupiter Hosts WASP-94A and B*, 2016ApJ...819...19T
- [61] TESS: <https://tess.gsfc.nasa.gov/>
- [62] The HATNet Exoplanet Survey: <https://hatnet.org/>
- [63] Tinetti G. et al. (2017), *ARIEL Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey, Enabling Planetary Science across Light-years, Assessment Study Report*, ESA/SCI(2017)2
- [64] Turner J.D. et al. (2016), *Ground-based near-UV observations of 15 transiting exoplanets: constraints on their atmospheres and no evidence for asymmetrical transits*, 2016MNRAS.459..789T
- [65] Venot O. et al. (2015), *New chemical scheme for studying carbon-rich exoplanet atmospheres*, 2015A&A...577A..33V
- [66] Wakeford H. (2015), *Measuring the absolute H₂O abundance of WASP-39b's atmosphere*, 2015hst..prop14169W
- [67] Wakeford H. (2016), *Definitive measurement of WASP-17b's water abundance in preparation for JWST*, 2016hst..prop14918W
- [68] WASP Planets: <https://wasp-planets.net/about/>
- [69] West R.G. et al. (2016), *Three irradiated and bloated hot Jupiters: WASP-76b, WASP-82b, and WASP-90b*, 2016A&A...585A.126W

- [70] Wheatley P.J. et al (2018), *The Next Generation Transit Survey (NGTS)*, 2018MNRAS.475.4476W
- [71] Winn J.N. (2014), *Transits and Occultations*, arXiv:1001.2010
- [72] Zeng L., Sasselov D.D., Jacobsen S.B. (2016), *Mass-Radius Relation for Rocky Planets Based on PREM*, 2016ApJ...819..127Z
- [73] Zhou G. et al. (2017), *HAT-P-67b: An Extremely Low Density Saturn Transiting an F-subgiant Confirmed via Doppler Tomography*, 2017AJ....153..211Z
- [74] 1366 - The Transiting Exoplanet Community Early Release Science Program: <https://www.stsci.edu/jwst/phase2-public/1366.pdf>