



Universiteit
Leiden

The Netherlands

Atmospheres of hot alien Worlds

Brogi, M.

Citation

Brogi, M. (2014, June 5). *Atmospheres of hot alien Worlds*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/25873>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/25873>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Riepilogo

La sorprendente diversità dei pianeti extrasolari

I pianeti che orbitano stelle diverse dal Sole si chiamano *esopianeti*, oppure *pianeti extrasolari*. In soli 20 anni, la ricerca dei pianeti extrasolari è passata dalla pura speculazione a una solida evidenza osservativa, con più di mille pianeti attualmente scoperti. Una delle caratteristiche più stupefacenti degli esopianeti è la loro varietà, e la mancanza di corpi analoghi nel sistema solare. Per esempio, conosciamo pianeti giganti, detti *pianeti gioviani caldi*, che orbitano dieci volte più vicini al loro sole di quanto faccia Mercurio. Inoltre, sappiamo che i pianeti più comuni nella Via Lattea hanno dimensioni intermedie tra quelle della Terra e di Urano. Non c'è traccia di queste due categorie di pianeti intorno al Sole.

Grandi progressi sono stati fatti non solo nella scoperta dei pianeti extrasolari, ma anche nello studio delle loro caratteristiche. La forma, la dimensione, e l'inclinazione dell'orbita, così come la massa e il raggio del pianeta, sono oggi determinati con una buona accuratezza attraverso la combinazione dei due principali metodi per scoprire esopianeti: le velocità radiali e i transiti. Con il primo metodo il pianeta viene identificato attraverso il moto della stella che lo ospita attorno al baricentro del sistema. Questo moto provoca uno spostamento verso il rosso o verso il blu della radiazione stellare, a seconda che l'astro si allontani o si avvicini a noi. Ne risultano righe stellari soggette all'effetto Doppler, con velocità tipiche di decine o centinaia di metri al secondo. Questo fenomeno è del tutto analogo alla variazione del tono di una sirena posta su un veicolo in movimento, per esempio un'ambulanza. Con il secondo metodo, la luce proveniente dal sistema pianeta + stella è monitorata con precisione per rilevarne una piccola diminuzione dovuta al passaggio del pianeta di fronte o dietro al disco stellare, come mostrato in Figura 9.2.

La scoperta dei pianeti transitanti ci ha anche dato modo di accedere alle loro atmosfere. Durante un transito, una piccola parte della luce stellare filtra attraverso l'atmosfera planetaria per raggiungere l'osservatore, e viene alterata da eventuali atomi o molecole ivi presenti. Essi tendono a bloccare il passaggio dei fotoni a certe specifiche frequenze, in corrispondenza delle quali il pianeta appare più grande, perché assorbe una frazione leggermente maggiore della luce stellare. Questo fenomeno viene utilizzato per osservare il cosiddetto *spettro di trasmissione* di un esopianeta, che è essenzialmente una misura del raggio planetario in funzione della frequenza della luce.

Un altro modo per studiare le atmosfere dei pianeti transitanti è misurare la diminuzione della luce quando passano dietro al disco stellare (eclisse). Nel visibile è possibile misurare la quantità di luce riflessa, mentre nell'infrarosso si può misurare direttamente l'emissione termica del pianeta. Quest'ultima, a seconda della frequenza della luce osservata, proviene da strati atmosferici situati a diverse altitudini. Nell'atmosfera di un pianeta, la temperatura può sia diminuire che aumentare con l'altitudine. Ciò significa che la radiazione termica può provenire da regioni

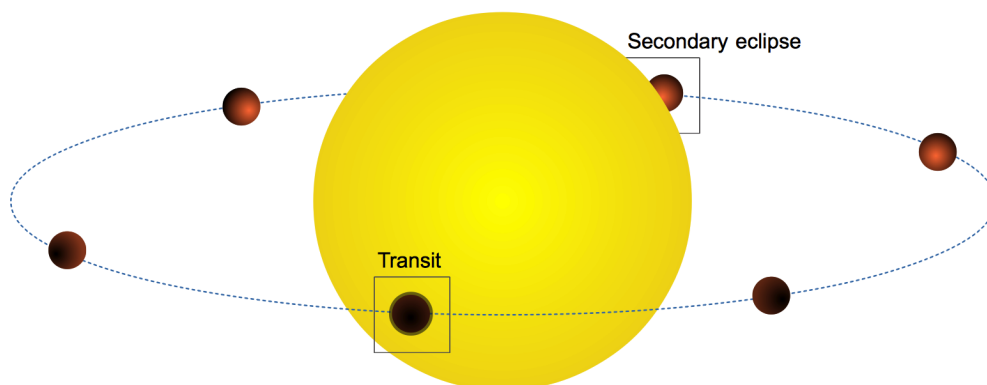


Figura 9.2: Rappresentazione schematica di un pianeta transitante. Data la vista di taglio dell'osservatore, il pianeta passa di fronte al disco stellare (transito) o ne è occultato (eclisse).

atmosferiche più calde o più fredde rispetto alla media. Nel primo caso il pianeta appare più luminoso (righe di emissione), nel secondo caso appare più debole (righe di assorbimento). Misurando la luminosità del pianeta in funzione della lunghezza d'onda gli astronomi possono quindi misurare lo *spettro termico* di un pianeta extrasolare. In pratica ciò si ottiene misurando la diminuzione del flusso ricevuto dal sistema extrasolare durante un eclisse, in funzione della lunghezza d'onda della luce osservata.

Studiando le atmosfere dei pianeti extrasolari nei due modi appena descritti gli scienziati riescono a misurare la loro composizione, la struttura termica in funzione dell'altitudine e i meccanismi che regolano la redistribuzione energetica fra l'emisfero illuminato e quello in ombra. Tuttavia, molti dettagli sono ancora da chiarire. Per esempio, non conosciamo i fattori che determinano quando la temperatura diminuisca o aumenti con l'altitudine. Il livello di irraggiamento stellare potrebbe avere un ruolo importante, così come la presenza di particolari molecole capaci di assorbire la radiazione stellare nell'ottico, in modo simile all'ozono nell'atmosfera terrestre. Un'altra variabile da considerare potrebbe essere l'abbondanza dei vari elementi chimici nell'atmosfera planetaria, potenzialmente connessa alla regione in cui il pianeta si è formato all'interno del disco protoplanetario.

Nonostante gli sforzi degli astronomi, misurare queste quantità è attualmente molto difficile, e limitato a un piccolo campione di oggetti.

Caratterizzare gli esopianeti è una sfida continua

La maggior parte delle questioni irrisolte nello studio delle proprietà degli esopianeti è connessa a difficoltà osservative. I segnali spettrali delle atmosfere planetarie sono estremamente deboli. Nei casi più favorevoli, solo un fotone su mille appartiene al pianeta piuttosto che alla stella. Inoltre, la strumentazione migliore si trova

nello spazio, dove l'atmosfera terrestre non contamina le osservazioni in modo sensibile. Sfortunatamente gli specchi dei telescopi spaziali sono più piccoli di quelli dei telescopi a terra e gli strumenti sono dotati di una minore risoluzione spettrale. Ciò significa che sono meno efficienti nel separare la luce nelle varie frequenze che la compongono. Conseguentemente, gli astronomi campionano gli spettri dei pianeti extrasolari, potenzialmente ricchi di righe in assorbimento o emissione, con pochi punti sparsi. Questo rende difficile l'individuazione delle specie atomiche o molecolari responsabili delle modulazioni osservate.

In aggiunta, gli strumenti comunemente utilizzati per le osservazioni di esopianeti non sono stati progettati per tale scopo e vengono spinti ben oltre le loro possibilità. Di conseguenza il rumore strumentale è spesso presente ai livelli del segnale astrofisico, e deve essere rimosso efficacemente per evitare false rilevazioni. Infine, osservando dalla superficie terrestre, le variazioni nelle proprietà della nostra atmosfera possono introdurre ulteriori errori sistematici.

Queste limitazioni vanno messe in relazione all'obiettivo finale della ricerca sui pianeti extrasolari, ovvero la scoperta di altri pianeti abitabili oltre alla Terra e la ricerca di altre forme di vita nella Galassia. Questi obiettivi richiedono tecniche di osservazione robuste, affidabili e applicabili al campione più ampio possibile di pianeti. In passato c'è stato un forte dibattito riguardo alle strategie migliori per rimuovere gli effetti sistematici. Grazie allo sforzo collettivo della comunità scientifica, oggi stiamo convergendo verso tecniche di analisi dei dati oggettive, con risultati pienamente riproducibili da gruppi diversi.

Su questa linea, la mia tesi è propone un'inedita strategia osservativa volta a superare la maggior parte degli ostacoli sopra descritti.

Il contributo di questa tesi

Questa tesi presenta una nuova tecnica per studiare le atmosfere dei pianeti extrasolari basata su spettroscopia ad altissima risoluzione condotta con telescopi terrestri.

La scelta di un alto potere risolvete apporta due fondamentali vantaggi. In primo luogo, è possibile individuare le singole righe di assorbimento delle bande molecolari. A questo livello di dettaglio, ogni specie possiede un proprio segno distintivo, simile ad un'impronta digitale. Ciò riduce al minimo le ambiguità nell'interpretazione degli spettri. In aggiunta, la contaminazione dell'atmosfera terrestre (assorbimento tellurico), che di solito riduce la qualità delle osservazioni da terra rispetto a quelle degli osservatori spaziali, può essere efficacemente separata dal segnale dell'esopianeta. Infatti l'assorbimento tellurico è stazionario in lunghezza d'onda, mentre lo spettro del pianeta extrasolare è soggetto a un effetto Doppler variabile dovuto al moto orbitale.

Messi assieme, questi due vantaggi ci hanno permesso di determinare senza ambiguità la presenza di monossido di carbonio e vapore acqueo nelle atmosfere di quattro esopianeti (vedi Capitoli 2, 3, 4 e 6). In aggiunta, è stato possibile misurare alcune proprietà impossibili da determinare con le tecniche precedentemente utilizzate. Per la prima volta è stato possibile studiare l'atmosfera dei pianeti che non

transitano, misurare direttamente il loro moto orbitale e di conseguenza stimare la massa del pianeta e l'inclinazione dell'orbita (Capitoli 2, 3 e 4). Inoltre, si è potuto misurare la rotazione di un pianeta extrasolare (Capitolo 6) e mostrare che il corpo sembra essere in rotazione sincrona, in linea con le predizioni teoriche.

Un altro importante risultato degli studi presentati in questa tesi è che la temperatura decresce con l'altitudine nell'atmosfera dei pianeti osservati. Questo tipo di misura è arduo a bassa risoluzione spettrale. Come spiegato in precedenza, la diminuzione o la crescita della temperatura in funzione dell'altitudine produce righe rispettivamente in assorbimento o in emissione, il cui segno distintivo può essere riconosciuto ad alta risoluzione spettrale durante l'analisi dei dati.

Infine, la spettroscopia ad alta risoluzione è stata utilizzata per fornire una stima del rapporto fra carbonio e ossigeno (C/O, vedi Capitoli 4 e 6).

Perché osservare pianeti caldi e vicini alle loro stelle?

Questa tesi è incentrata sulle atmosfere di pianeti molto vicini alla loro stella madre, per una duplice ragione. Primo, questi pianeti sono i più facili da osservare sia nell'ottico che nel vicino infrarosso. Le loro atmosfere sono calde, dunque molto espanse, il che significa che filtrano una frazione maggiore della luce stellare, producendo un segnale più forte. Le alte temperature aumentano inoltre l'emissione termica del pianeta e dunque il suo flusso rispetto a quello della stella. Infine, i pianeti giganti più caldi dovrebbero essere in equilibrio chimico e la loro composizione uniforme su una larga porzione dell'atmosfera. Ciò riduce la complessità dei modelli atmosferici utilizzati per interpretare le osservazioni.

È estremamente importante verificare le tecniche osservative sugli oggetti più facili da osservare. Sebbene gli studiosi di pianeti extrasolari siano in fibrillazione per la futura ma concreta possibilità di scoprire e caratterizzare pianeti terrestri, il campione correntemente accessibile è formato dai pianeti caldi studiati in questa tesi, ed è importante raffinare le misurazioni su questi oggetti prima di passare a qualcosa di molto più complesso.

Infine, pianeti che orbitano molto vicini alla loro stella sono affascinanti anche per via dell'ambiente in cui sono situati. A causa delle alte temperature e dell'intenso flusso stellare, i pianeti più piccoli rischiano di perdere completamente la loro atmosfera. Nei casi più estremi la loro superficie può venire vaporizzata, in modo più o meno catastrofico. La missione spaziale *Kepler* sembra aver trovato un possibile pianeta in disintegrazione. Il Capitolo 5 di questa tesi presenta un'accurata analisi e un modello della sua curva di luce, volti a produrre ulteriore evidenza di questo affascinante e unico fenomeno.