

METODO CHE USI, PIANETA CHE TROVI

(prima parte)

Sabrina Masiero e Riccardo Claudi

sabrina.masiero@oapd.inaf.it

riccardo.claudi@oapd.inaf.it

Abstract

Humans have long wondered whether other planetary systems exist around the billions of stars in our Galaxy. A generation ago, the idea of a planet orbiting a distant star was still in the realm of science fiction. But since the discovery of the first exoplanet orbiting a Sun-like star in 1995, we have found thousands of them, with the discoveries coming at a faster rate over time. Over the past few decades, researchers have developed a variety of techniques to spot the many planets outside our Solar System, often used in combination to confirm the initial discovery and learn more about the planet's characteristics. Here is an explanation of the direct methods used so far.

FIG. 1: Questa viene considerata la prima immagine di un pianeta al di fuori del nostro Sistema Solare ottenuta nel 2005 dal Very Large Telescope dell'European Southern Observatory - ESO.

2M1207b è un pianeta con massa pari a cinque volte la massa di Giove a una distanza due volte quella di Nettuno dal Sole e che ruota attorno alla sua stella compagna, la nana bruna 2M1207.

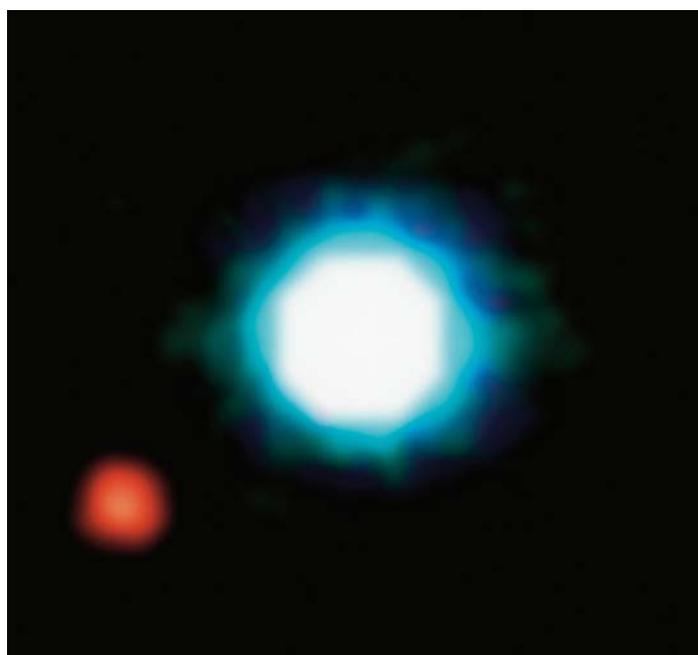
Il sistema è stato studiato a lungo con osservazioni aggiuntive, sempre al VLT, misurando il moto apparente della nana bruna e determinandone in modo accurato la posizione relativa del pianeta. Le osservazioni hanno portato a confermare che tale oggetto non è una stella di fondo ma risulta legato gravitazionalmente alla stella, per il fatto che non vi è alcun cambiamento nella posizione relativa tra i due oggetti su una scala temporale di un anno (che rappresenta il periodo di osservazione). Solo su periodi di tempo molto più lunghi sarebbe possibile vedere i due oggetti in orbita l'uno attorno all'altra, data la grande distanza relativa.

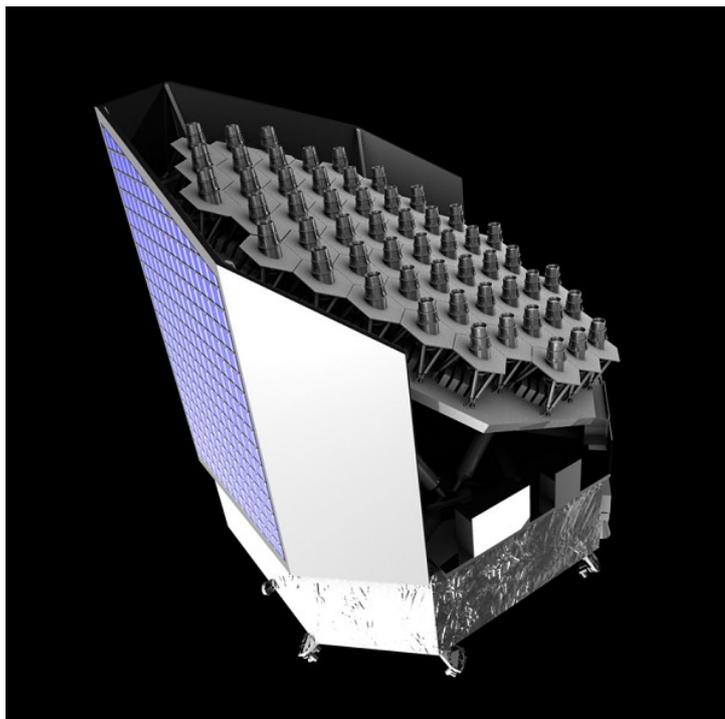
Il sistema planetario si trova a 230 anni-luce di distanza nella costellazione dell'Idra. L'immagine è stata ottenuta da tre esposizioni nel vicino infrarosso (nelle bande H, K e L) con il NACO montato al Telescopio Yepun di 8,2 metri di diametro al presso l'Osservatorio Paranal dell'ESO in Cile. Crediti: ESO.

Da sempre il genere umano si è chiesto se esistessero sistemi planetari attorno ai miliardi di stelle della nostra Galassia. Solo una generazione fa l'idea di un pianeta orbitante attorno ad una stella lontana era ancora fantascienza. Ma dalla scoperta del primo pianeta extrasolare attorno ad una stella di tipo solare nel 1995, di pianeti extrasolari ne abbiamo trovato a migliaia, e il loro numero aumenta sempre di più col passare del tempo. Nel corso degli ultimi decenni i ricercatori hanno sviluppato una serie di tecniche per individuarli, spesso utilizzate combinandole fra loro per confermarne la scoperta e per imparare di più sulle caratteristiche dei pianeti al di fuori del nostro Sistema Solare. Qui di seguito una spiegazione dei metodi diretti utilizzati finora.

Introduzione

Un pianeta extrasolare (o esopianeta) è un pianeta che non appartiene al nostro Sistema Solare, ma orbita attorno a una stella diversa dal Sole.





Perché è importante lo studio dei pianeti extrasolari? Vi è una duplice motivazione scientifica. Da una parte lo studio dei pianeti extrasolari mette alla prova i modelli teorici di formazione ed evoluzione dei sistemi planetari in un gran numero di sistemi extrasolari. Dall'altra, permette di quantificare la frequenza di pianeti con condizioni fisiche atte a sostenere la vita. Oltre alla motivazione scientifica, vi è anche l'aspetto tecnologico: l'osservazione di pianeti extrasolari richiede un notevole sforzo di affinamento delle tecniche osservative in ambito astronomico (*imaging*, coronografia, spettroscopia ad alta risoluzione, fotometria, interferometria, e altre ancora).

Fino al 1995, anno della scoperta del primo pianeta extra-solare attorno a una stella di tipo solare, non si conoscevano altri sistemi planetari al di là del nostro. Tale scoperta ha rivoluzionato la visione che si aveva di un universo largamente formato da stelle. Nell'ultimo ventennio, infatti, sono stati fatti notevoli progressi tecnologici e la ricerca, lo studio e quindi la caratterizzazione dei pianeti extrasolari sono diventati uno degli obiettivi principali in campo astronomico.

Numerose missioni spaziali, tra le quali Kepler della NASA iniziata nel 2009, e missioni già in orbita (come GAIA dell'ESA) o le molteplici in programma nei prossimi anni tra cui CHEOPS e PLATO dell'ESA, TESS e JWST della NASA, potranno dare nuove risposte sulla caratterizzazione dei sistemi planetari al di fuori del nostro.

FIG. 2: Una rappresentazione artistica di PLATO-Planetary Transits and Oscillations of Stars dell'ESA-Agenzia Spaziale Europea, il cui lancio è in programma per il 2024. Tale missione cercherà Terre e Super-Terre nella zona abitabile della loro stella, che rappresenta la regione attorno alla stella dove l'acqua si trova allo stato liquido.

CHEOPS-CHARACTERISING EXOPLANET SATELLITE il cui lancio è previsto per il 2017, è la prima missione dell'ESA dedicata alla ricerca di pianeti in transito davanti alla loro stella con fotometria di altissima precisione e la prima di una possibile classe di piccole missioni dell'ESA. CHEOPS farà un campionamento di un certo numero di stelle luminose vicine al Sole, già note per ospitare pianeti extrasolari, con lo scopo di caratterizzare meglio tali sistemi planetari. Anche TESS-TRANSITING EXOPLANET SURVEY TELESCOPE della NASA, in programma per il 2017, andrà a caccia di pianeti che transitano davanti alla stella, in circa un milione e mezzo di stelle della nostra Galassia.

Il JWST-JAMES WEBB SPACE TELESCOPE della NASA, il cui lancio è previsto per il 2018, è un osservatorio orbitante con molti programmi scientifici fra cui la possibilità di osservare spettroscopicamente i pianeti in transito già noti, per analizzarne le nubi e le atmosfere. In particolare, il coronografo del JWST sarà in grado di attenuare l'alta luminosità proveniente dalla stella intorno a cui orbita il pianeta, e osservarne lo spettro in modo da stabilire o escludere l'esistenza di vita su quel dato esopianeta. Crediti: ESA.

Uno degli obiettivi è quello di vedere per via diretta i pianeti, non solo i pianeti giganti, inadatti alla vita, ma anche quelli di taglia terrestre, e scoprire i segni dell'esistenza della vita sulla loro superficie. Un modo potrebbe essere quello di riconoscere la presenza di vegetazione sulla loro superficie in linea di principio, da un esame della luce che ci inviano.

Siamo sicuri di una cosa. La ricerca di pianeti simili alla nostra Terra, come dimensioni e come giusta distanza dalla loro stella, con eventuali forme di vita come noi la conosciamo, è ancora estremamente lunga. Tale ricerca è fortemente legata alla domanda, ancora senza risposta, se vi sono altre forme di vita nell'universo. Certamente, l'eventuale scoperta di altre forme di vita al di fuori della Terra provocherebbe un profondo sconvolgimento della nostra attitudine verso il mondo.

Ciò che affascina e spinge in avanti la ricerca è sicuramente la possibilità di trovare un pianeta simile alla nostra Terra, alla giusta distanza dalla sua stella e con l'acqua sulla sua superficie, in grado di ospitare una qualche forma di vita.

Inizialmente il ritmo delle scoperte dei pianeti extrasolari è stato lento, ma negli ultimi anni ha conosciuto un grande aumento, passando dai 20 pianeti scoperti nel 2000 ai 189 nel 2011, fino ad arrivare a 850 nel 2014, come si vede nel grafico di figura 3.

Fino ad oggi 1921 pianeti extrasolari sono stati confermati (fonte: www.exoplanet.eu) e oltre 4175 candidati pianeti, secondo le stime della NASA (<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>), la maggior parte dei quali sono stati individuati dalla missione Kepler. Questi risultati hanno portato ad affermare che la formazione di sistemi planetari risulta un fenomeno strettamente legato alla formazione delle stelle e che la presenza di pianeti extrasolari è un fatto comune nell'universo. Infatti, l'osservazione di una grande quantità di sistemi planetari permette di iniziare a fare considerazioni di carattere statistico. I risultati più recenti portano ad affermare che quasi tutte le stelle ospitano pianeti. Abbiamo compreso, inoltre, come i modelli di formazione basati sull'osservazione del solo Sistema Solare fossero quanto meno parziali: i sistemi scoperti hanno caratteristiche molto diverse da quelle del Siste-

ma Solare, tanto da richiedere un totale ripensamento dei modelli di formazione planetaria.

Metodi per individuare i pianeti extrasolari

Individuare pianeti extrasolari è sicuramente un processo complesso. In primo luogo, la luminosità del pianeta extrasolare è molto più debole di quella della stella. Il rapporto tra la luminosità della stella e quella del pianeta nel visibile è in media dell'ordine di 10^9 (la stella è un miliardo di volte più brillante) mentre è dell'ordine di 10^4 (la stella è diecimila volte più brillante) nell'infrarosso. Tale contrasto dipende dalle caratteristiche fisiche della stella e del pianeta e, naturalmente, dalla regione spettrale in cui vengono fatte le osservazioni.

In secondo luogo, la distanza tra stella e pianeta è molto minore rispetto alla distanza tra il sistema binario stella-pianeta e l'osservatore. La nostra tecnologia permette di osservare fino qualche centinaia di parsec (dove un parsec è pari a 206 265 unità astronomiche), mentre la distanza stella-pianeta extrasolare è dell'ordine al massimo di qualche decina di unità astronomiche.

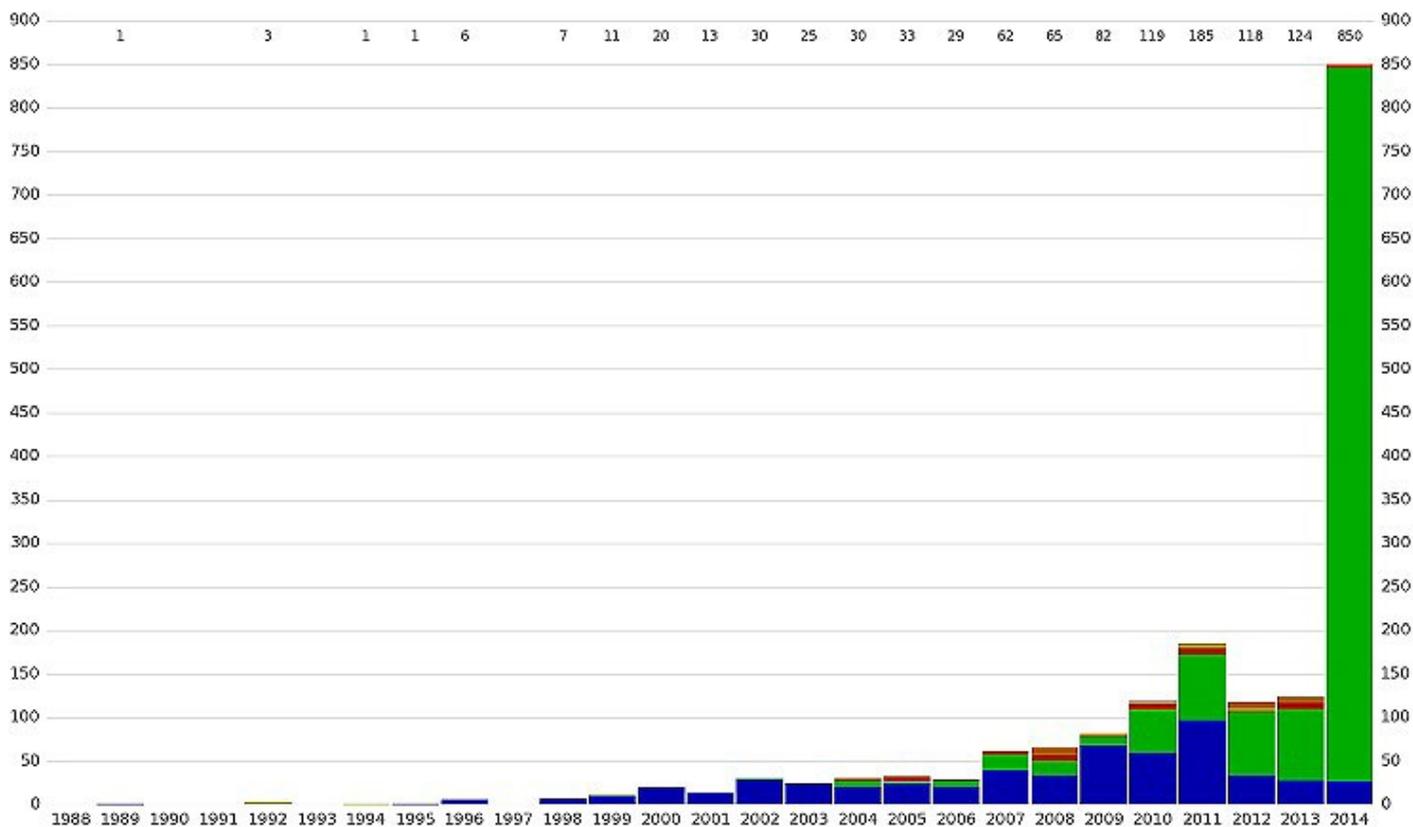


Fig. 3: Numero di pianeti extrasolari scoperti per anno dal 1988 ad oggi (settembre 2014). Il colore indica il metodo utilizzato per rilevarlo. Blu: velocità radiale; verde chiaro: metodo dei transiti; giallo scuro: astrometria; rosso scuro: direct imaging; microlensing; marrone chiaro. Crediti: Open Exoplanet Catalogue (2014-09-23).

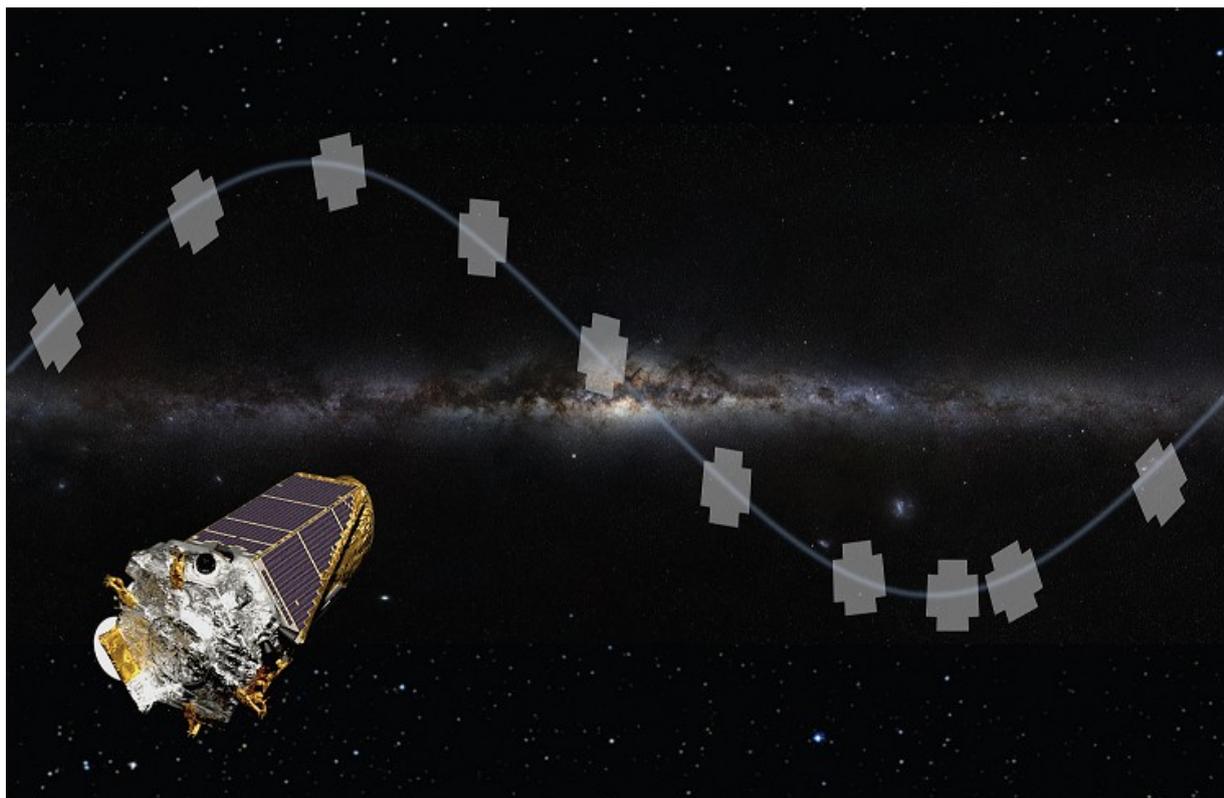


FIG. 5: La missione K2 è l'estensione della Missione Kepler della NASA iniziata nel 2009 e interrotta nel maggio 2013 a causa di un guasto a una seconda delle quattro ruote di reazione di Kepler che aveva comportato l'impossibilità di uno stabile puntamento dell'oggetto da studiare. La prima ruota, quella di scorta, si era guastata nell'estate del 2012. K2 è stata approvata nel maggio 2014 con altri due anni di finanziamento per continuare la ricerca dei pianeti extrasolari e per nuove osservazioni relative allo studio di stelle giovani e vecchie in ammassi globulari oltre a galassie attive e supernove.

La sonda Kepler in questa sua "seconda vita" viene mantenuta orientata in modo quasi parallelo al suo percorso orbitale intorno al Sole, un po' fuori asse rispetto al piano dell'eclittica, il piano ideale su cui si muove il Sole. In questo modo K2 può mantenere una data porzione di cielo nel suo campo di vista per un intervallo di tempo fino a un massimo di 83 giorni; trascorso questo periodo, la sonda viene ripuntata in un'altra direzione di cielo per evitare che la luce del Sole finisca nel telescopio.

Per bilanciare il telescopio in modo da renderlo sufficientemente stabile viene utilizzata la pressione dei fotoni provenienti dal Sole per continuare a cercare pianeti in transito davanti alla loro stella.

La prima missione Kepler è stata un grande successo per la NASA: programmata per una durata di quattro anni, ha individuato oltre 4 200 candidati pianeti attorno ad altre stelle di cui 978 confermati. Crediti: NASA.

Questo rende difficoltosa la misurazione della distanza angolare tra stella e pianeta. La separazione angolare tra stella e pianeta è così piccola che neppure i grandi telescopi professionali sono per ora in grado di risolvere il pianeta. Per esempio, il semiasse orbitale di Giove, 5,2 UA a 10 parsec di distanza (equivalente a 32,6 anni-luce) verrebbe visto sotto un angolo di soli 0,5 secondi d'arco. Teoricamente, un telescopio professionale (per esempio con uno specchio di 4 m, o anche meno) potrebbe risolvere il pianeta, ma quest'ultimo verrebbe a trovarsi nell'ala della figura di diffrazione dello strumento, dove prevale il disturbo dei fotoni diffusi dalla microrugosità dello specchio, dai sostegni dello specchio secondario del telescopio, dalle variazioni di densità dell'aria e dai moti atmosferici lungo la linea di vista.

Infine, la massa del pianeta extrasolare è molto piccola se rapportata a quella della stella e pertanto il moto della stella attorno al centro di massa del sistema è difficilmente rilevabile. Basti pensare che se il rapporto tra le due masse è pari a 1000, come si ha nel caso del Sole e di Giove, allora l'orbita, gli spostamenti e la velocità della stella saranno 1000 volte più piccoli rispetto a quelli del pianeta. La massa totale dei pianeti del nostro Sistema Solare rappresenta solo lo 0,2 per cento della massa del Sole. Di conseguenza, le perturbazioni gravitazionali che il pianeta esercita sulla stella sono di piccola entità e quindi difficilmente rilevabili.

Inoltre, durante il transito del pianeta l'attenuazione della luminosità della stella è proporzionale al quadrato del rapporto tra il raggio del pianeta e quello della stella.

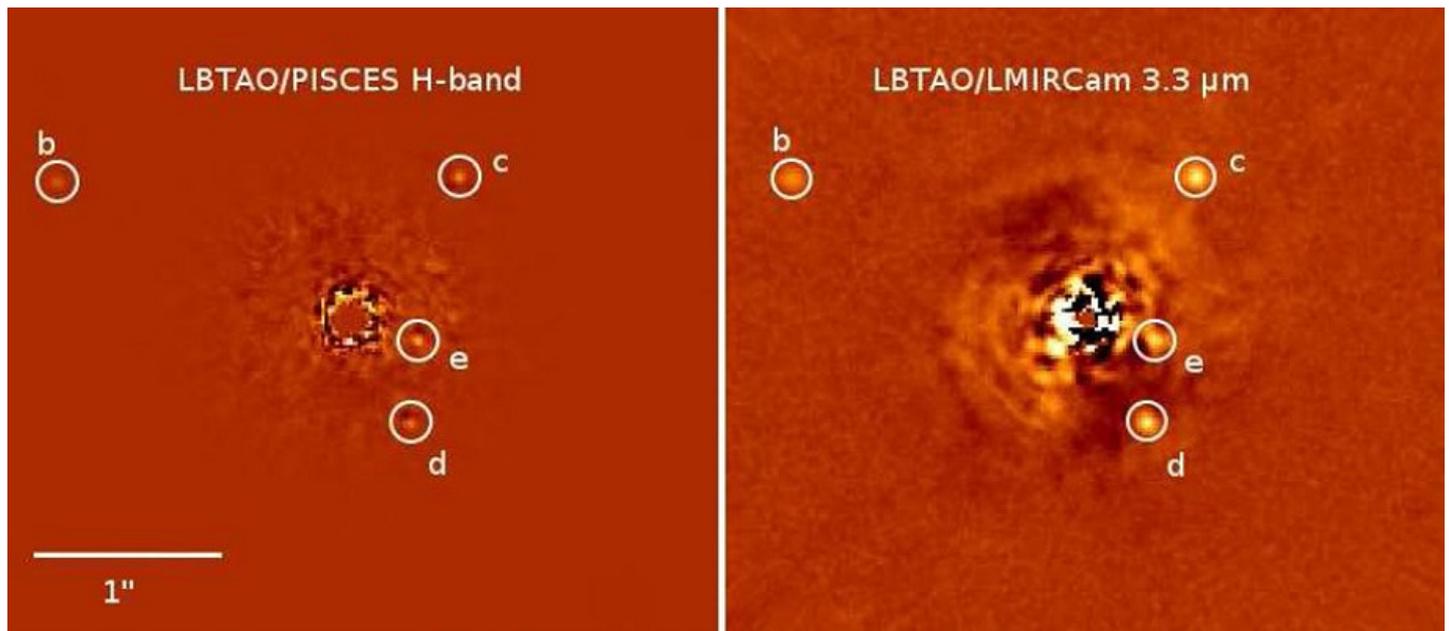


FIG. 6: La stella HR 8799 è stata occultata al centro da un coronografo; intorno ad essa quattro pianeti in immagini riprese dai Telescopi Keck, e Gemini con l'uso di ottiche adattive nel novembre 2008. I tre pianeti, denominati HR 8799b, c, d erano stati fotografati ben undici anni prima, nel 1998, dall'Hubble Space Telescope, quando i ricercatori avevano analizzato, nel 2009, le immagini di HST suggerendo che lo stesso Telescopio poteva aver fotografato altri pianeti extrasolari non ancora individuati nelle immagini di archivio. Il quarto pianeta, denominato HR 8799e, fu scoperto sempre in modo diretto dai telescopi Keck due anni più tardi. Dei tre pianeti osservati da HST sono stati calcolati i periodi orbitali: HR 8799b, più esterno, ha un periodo orbitale di 460 anni; HR 8799c di 190 anni e HR 8799d di 100 anni. Nell'immagine, il sistema HR 8799 con il suo sistema di pianeti b, c, d, e indicati con i cerchi bianchi, nella bande 1,65 e 3,3 micron. Crediti: LBT, Andrew J. Skemer et al., First Light LBT AO Images of HR 8799 bcd e at 1.65 and 3.3 Microns: New Discrepancies between Young Planets and Old Brown Dwarfs, *arXiv:1203.2615*.

Pertanto, minore è tale rapporto e più difficile sarà rilevare il transito.

Malgrado queste difficoltà, numerosi metodi sono stati sviluppati e che si possono suddividere in due classi fondamentali:

- I metodi diretti, che permettono di osservare direttamente il pianeta attraverso un sistema fotometrico o di registrare lo spettro della sua atmosfera.
- I metodi indiretti, che si basano sugli effetti che un eventuale pianeta genera sulla stella ospite. Questi possono a loro volta essere suddivisi in metodi dinamici, microlensing e metodi dei transiti.

I metodi diretti

A questa categoria appartengono tutti i metodi, spettroscopici e fotometrici, che permettono di osservare direttamente il pianeta o la sua atmosfera. La grossa difficoltà di questo tipo di osservazioni è l'estrema debolezza dell'emissione (ottica riflessa e/o infrarossa termica) del pianeta rispetto a quella della stella centrale. Un modo per ovviare è quello di scegliere opportunamente la banda di lunghezze d'onda dentro la quale ottimizza-

re il sistema di osservazione. Infatti, grazie ai differenti valori del contrasto di luminosità tra un pianeta e la sua stella nelle diverse regioni dello spettro, si può riuscire a guadagnare anche 5 ordini di grandezza nel contrasto. Bisogna tener conto tuttavia anche degli effetti della diffusione della luce causati dalle parti meccaniche dello strumento (per esempio, i sostegni dello specchio secondario) e degli effetti indotti dai moti turbolenti dell'atmosfera che provocano piccole variazioni nelle traiettorie dei singoli fotoni. Il risultato è che la qualità ottica del telescopio, o come si dice in termini tecnici, la sua figura di diffrazione, viene degradata al punto che, anche con lo specchio primario delle dimensioni giuste, l'immagine del pianeta riprodotta nel piano focale risulterebbe confusa con i fotoni derivanti dalla stella.

Sono perciò importanti tutti gli sforzi tecnici tendenti a migliorare le immagini sul piano focale del telescopio, correggendo o riducendo gli effetti di degrado indotti dalle sorgenti di luce diffusa e dall'atmosfera terrestre.

L'ottica adattiva, applicata ai telescopi dai 3,5 metri in su, è una prima tecnica che permette di applicare un metodo diretto. Essa modifica direttamente il fronte d'onda della luce osservata. In particolare, con opportu-

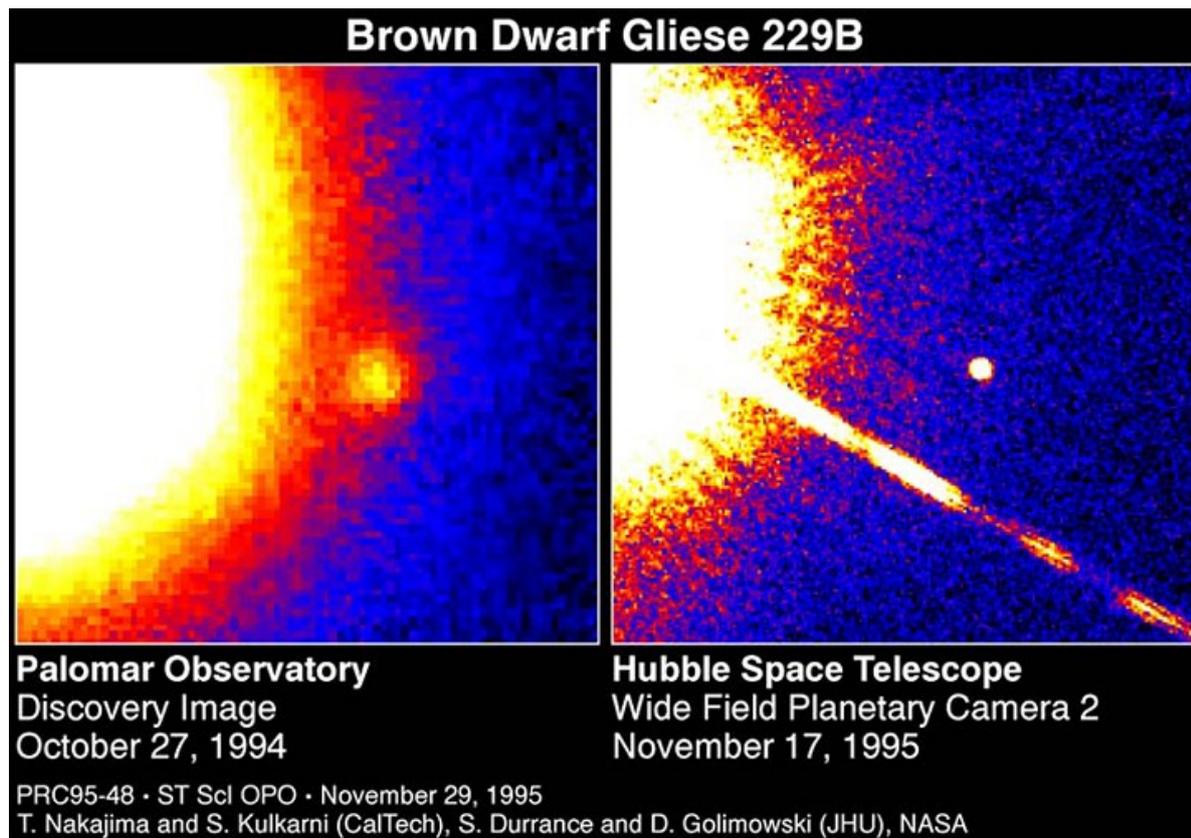


FIG. 7: Confronto tra le immagini del sistema Gliese 229 riprese dal Telescopio riflettore di 1,5 m a Monte Palomar (sinistra) e dall'Hubble Space Telescope (destra). Queste immagini a falsi colori mostrano il primo oggetto più debole osservato orbitante attorno ad una stella diversa dal Sole, e la prima rilevazione di una nana bruna. La nana bruna Gliese 229 b è in orbita attorno alla stella Gliese 229 che si trova a circa 18 anni-luce di distanza da noi. La nana bruna ha una massa 20-50 volte quella di Giove ma ha un diametro che è confrontabile con il gigante gassoso del nostro Sistema Solare, quindi risulta estremamente densa. Crediti: California Institute of Technology, Pasadena, CA, e the Johns Hopkins University, Baltimore, MD; T. Nakajima e S. Kulkarni (CalTech), S. Durrance e D. Golimowski (JHU), NASA.

ni sensori, viene misurata la forma del fronte d'onda (l'insieme delle traiettorie dei fotoni) della luce che ci giunge da una sorgente in modo da capire quanto e dove si discosti dalla forma ideale.

A quel punto, utilizzando una batteria di pistoni comandati da un calcolatore, si applicano in tempo reale, da dietro, punto per punto, la pressione opportuna che modifica la forma dello specchio in modo tale che la forma del fronte d'onda riflesso si avvicini il più possibile a quella ideale.

In definitiva, il fronte d'onda riflesso, corretto dal sistema d'ottica adattiva, risulterà molto prossimo, come forma alla superficie di una sfera, essendo state rimosse tutte o quasi le aberrazioni introdotte dalla turbolenza dell'atmosfera. Il risultato è la diminuzione del cerchio di confusione (l'immagine di una sorgente puntiforme) che viene a formarsi sul piano focale. A tal riguardo possiamo confrontare l'immagine del si-

stema binario della stella Gliese 229 (fig. 7) presa nel vicino infrarosso con un riflettore di 1,5 m a Monte Palomar (sinistra) utilizzando un metodo di ottica adattiva e quella presa dall'HST- Hubble Space Telescope (a destra).

La stellina compagna è una nana bruna di una quarantina di masse gioviane. La risoluzione dell'HST è di gran lunga superiore anche per via del maggior diametro, ma soprattutto per il fatto che, essendo in orbita, elude le aberrazioni introdotte dall'atmosfera. Comunque, il risultato ottenuto con un piccolo strumento al suolo, cui è applicato un sistema di ottica adattiva, non è certo da disprezzare.

Una seconda tecnica che permette di applicare un metodo diretto è la coronografia ottica, tecnica che blocca la luce della stella usando un particolare strumento chiamato coronografo. Tale strumento può essere posto internamente al telescopio oppure esternamente.

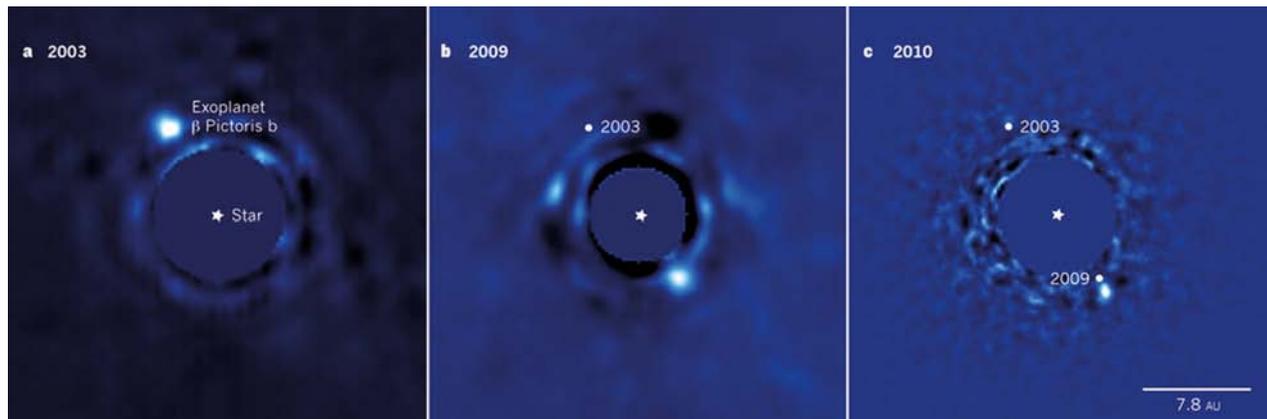


FIG. 8: Immagini nell'infrarosso del pianeta Beta Pictoris b ottenute nel 2003 (a sinistra), nel 2009 (in centro) e nel 2010 (a destra) che mostrano il moto del pianeta in un piano orbitale che è quasi visto di fronte per un osservatore terrestre. La stella madre si trova nella regione centrale, ma la sua luce è stata nascosta per evidenziare la presenza del pianeta (che ha una luce molto più debole). Beta Pictoris b, circa quattro volte il pianeta Giove, si trova a 63 anni-luce di distanza dal nostro Sistema Solare in orbita attorno alla stella Beta Pictoris, simile al nostro Sole ma molto più giovane, circa 12 milioni di anni (il nostro Sole per confronto ha 4,6 miliardi di anni). La stella è circondata da un enorme disco di materia, un sistema planetario giovane e molto attivo in cui gas e polvere sono prodotti dall'evaporazione delle comete e della collisione degli asteroidi. Quasi 500 le comete scoperte in orbita intorno alla stella Beta Pictoris, appartenenti a due famiglie distinte di esocomete: le esocomete più vecchie, che sono passate più di una volta vicino alla stella, e le esocomete più giovani, che derivano, probabilmente, dalla rottura recente di uno o più oggetti più grandi. Beta Pictoris b ha una velocità di rotazione di sole otto ore, molto più veloce dei pianeti del Sistema Solare. In particolare, il suo equatore si muove a quasi 100 000 chilometri all'ora. Per confronto, l'equatore di Giove si muove a una velocità di circa 47 000 chilometri all'ora, mentre la Terra a circa 1700 chilometri all'ora. L'orbita che descrive è a circa 8 volte la distanza Terra-Sole dalla stella madre, diventando così il pianeta extrasolare più vicino a una stella di cui sia stata ottenuta l'immagine in modo diretto.

Si prevede che vi sia una piccola possibilità del transito del pianeta davanti alla sua stella alla fine del 2017. L'evento sarà visibile dalla Terra e sarà possibile fare misure molto accurate delle dimensioni del pianeta. Crediti: Lagrange, A.-M. et al. *Science* 329, 57-59 (2010) e Bonnefoy, M. et al. *Astron. Astrophys.* 528, L15 (2011).

La seconda modalità è possibile solo dallo spazio, usando un primo veicolo come telescopio ed un secondo, posto a migliaia di chilometri di distanza dal primo, come coronografo.

Con questo metodo si è individuato il pianeta Beta Pictoris b, attorno alla stella Beta Pictoris nell'ottobre 2008 (fig. 8).

il pianeta Fomalhaut b, con un periodo di rivoluzione attorno alla propria stella Fomalhaut di 2000 anni, il più lungo finora conosciuto, è stato individuato, sempre con osservazioni coronografiche, dall'Hubble Space Telescope (fig. 9).

Una terza tecnica che permette di applicare un metodo diretto è quella interferometrica, utile nel caso in cui la coronografia ottica diventa poco efficace, cioè nella banda infrarossa media (tra i 60 e i 20 micron).

Così come il potere risolutivo di un telescopio migliora all'aumentare del suo diametro, allo stesso modo il potere risolutivo di un sistema interferometrico migliora quanto più aumenta la mutua distanza dei diversi telescopi. In un telescopio il potere risolutivo è dato dal

rapporto tra il diametro effettivo e la lunghezza d'onda centrale della banda fotometrica di osservazione. In un sistema interferometrico è la distanza tra i telescopi (la base) che costituisce il diametro efficace del sistema e quindi determina il potere risolutivo.

In questo caso, i fotoni emessi da una sorgente lontana vengono raccolti da due o più telescopi a grandissima distanza. I risultati vengono successivamente ricombinati per ottenere le figure di interferenza. La principale applicazione è quella definita "nulling interferometry" dove si elimina la luce proveniente dalla stella per concentrarsi su quella del pianeta. L'idea che sta alla base di questa applicazione è lo sfasamento nella luce che entra in uno dei telescopi generando un'interferenza distruttiva nell'elemento centrale, ossia la stella. Questo però non dovrebbe verificarsi per il pianeta extrasolare, se presente, in quanto la sua posizione sarà leggermente sfasata rispetto alla stella, permettendone l'individuazione.

L'interferometria è di grande interesse nella caratterizzazione diretta di pianeti extrasolari. Per esempio, è un

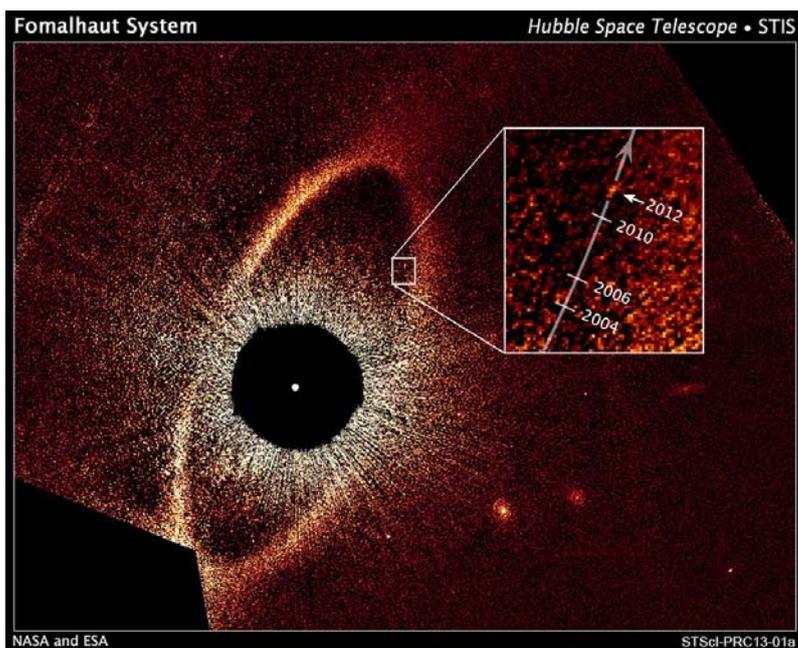


FIG. 9: Questa immagine composta in falsi colori, presa con Hubble Space Telescope, mostra il moto orbitale del pianeta Fomalhaut b. Sulla base di queste osservazioni è stato calcolato un periodo orbitale di 2000 anni su un'orbita fortemente ellittica. Per i prossimi vent'anni il pianeta si troverà a transitare entro una regione di detriti disposti intorno alla stella. Se l'orbita del pianeta si trovasse sullo stesso piano di questo anello, le polveri, il ghiaccio e i detriti di tale anello potrebbero penetrare nell'atmosfera del pianeta dando vita a vari fenomeni. L'applicazione della tecnica interferometrica la si nota nel cerchio nero al centro dell'immagine che blocca la radiazione della stella, permettendo di evidenziare la luce riflessa dall'anello e dal pianeta. Le immagini sono state prese dallo Space Telescope Imaging Spectrograph nel 2010 e nel 2012. Crediti: NASA, ESA e P. Kalas/University of California, Berkeley e SETI Institute.

metodo utile per escludere dei falsi positivi che sono un problema frequente nella ricerca compiuta dal Telescopio Spaziale Kepler.

Vi possono essere, infatti, molti corpi che producono dei segnali di transito, e quindi una diminuzione della luminosità della luce della stella ma che non sono pianeti. Queste piccole eclissi che si evidenziano nella misurazione della luminosità nella curva di luce della stella potrebbero essere indicative della presenza di un pianeta che blocca la luce della sua stella.

Tuttavia, in alcuni casi, delle stelle binarie potrebbero mimare perfettamente la stessa impronta nel segnale.

E' stato possibile portare a termine osservazioni interferometriche con il Precision Astronomical Visual Observations (PAVO) al Center for High Angular Resolution Astronomy (CHARA) Array del National Optical Astronomy Observatory (NOAO) per confermare la presenza di un pianeta attorno alla stella Kepler-21 (denominata anche HD179070). Il pianeta Kepler-21b è circa 1,6 volte il raggio della Terra e quasi 10 volte la massa della Terra. Orbitando intorno alla sua calda stella ogni 2,8 giorni, ha una distanza di sei milioni di chilometri, quasi 10 volte più vicino di quanto lo sia il pianeta Mercurio dal Sole. La temperatura superficiale di Kepler-21b si stima intorno a 1900 K, ossia circa 1630 °C.

La stella madre, HD 179070, si trova a 352 anni-luce di distanza dalla Terra. E' simile alla nostra stella, con una massa di 1,3 masse solari, un diametro di 1,9 volte il nostro Sole e la sua età, basata su modelli stellari, di 2,84 miliardi di anni.

FINE PRIMA PARTE DELL'ARTICOLO

SEGNI DI VITA SU ALTRI PIANETI

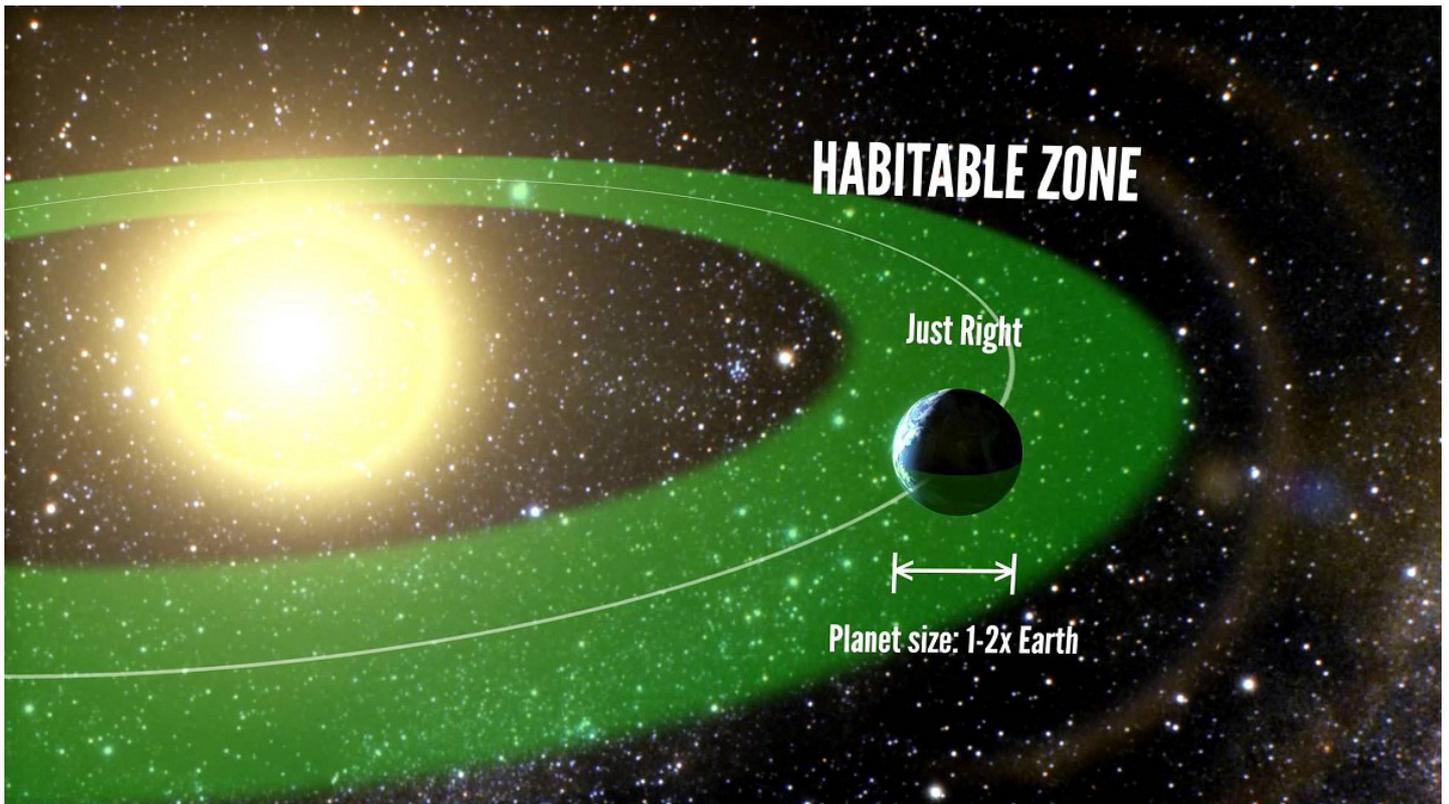
ZONA ABITABILE

Il concetto di zona abitabile considera la vita che utilizza la chimica del carbonio ed usa l'acqua come solvente per le reazioni chimiche come quella che ha una probabilità maggiore di originarsi e sopravvivere. La zona abitabile è, infatti, definita come la regione di spazio intorno ad una stella dove la temperatura superficiale di un pianeta roccioso con atmosfera è tale da mantenere l'acqua liquida. Il pianeta deve essere roccioso perché è necessario avere un'interfaccia solida tra l'interno del pianeta e l'atmosfera dove sia possibile raccogliere l'acqua liquida.

Prima di entrare nel merito va fatta una considerazione generale. Il concetto di zona abitabile è solo un concetto di lavoro utile per la ricerca di vita in modo remoto (per esempio, l'analisi spettrale delle atmosfere dei pianeti). E' sempre possibile l'esistenza di nicchie abitabili ben al di fuori della zona abitabile.

Nel Sistema Solare, per esempio, il satellite di Giove, Europa, ha probabilmente un oceano sotto la coltre ghiacciata che ne caratterizza la superficie. Questo oceano potrebbe essere una nicchia di abitabilità al di fuori della zona abitabile del Sole.

Il concetto fondamentale su cui si basa la definizione di zona abitabile è la diluizione della radiazione stellare con il quadrato della distanza. Il flusso (la quantità di energia nell'unità di tempo che incide sull'unità di area) ad una distanza d dalla stella è dato dalla relazione:



Rappresentazione artistica della zona di abitabilità di un pianeta extrasolare. Crediti: Petigura/UC Berkeley, Howard/UH-Manoa, Marcy/UC Berkeley.

$$F_a = \frac{L}{4\pi d^2}$$

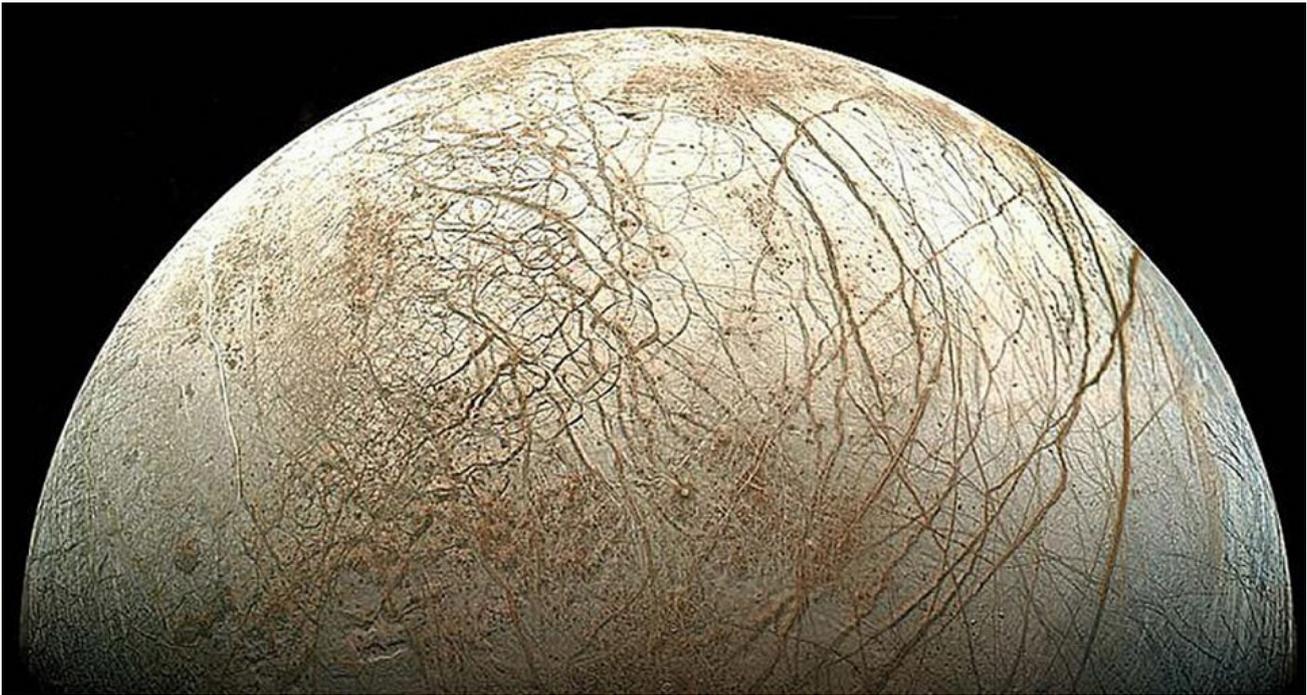
dove L è l'energia totale emessa dalla stella nell'unità di tempo (potenza). Da questa definizione, supponendo che il pianeta si comporti parzialmente come un corpo nero (**nota 1**), è possibile definire la temperatura di equilibrio per valutare la quale occorre considerare la frazione di energia che incidendo sulla superficie del pianeta viene da questa riflessa (albedo, che si indica con la lettera A). La definizione di albedo sarebbe in realtà più complicata e comprenderebbe molti casi particolari legati alla geometria del corpo. In ogni caso l'albedo dipende essenzialmente dalle caratteristiche, sia geometriche che materiali, del corpo. Eguagliando la quantità di radiazione assorbita dal pianeta ($F_a(1-A)\pi R_p^2$) a quella emessa dal pianeta in tutte le direzioni come se il pianeta fosse un corpo nero ($\epsilon\sigma ST_{eq}^4$), dove S è la superficie del pianeta ($S=4\pi R_p^2$), possiamo ottenere il valore della temperatura di equilibrio del pianeta alla distanza a :

$$T_{eq} = \left[\frac{F_a(1-A)}{4\sigma} \right]^{1/4}$$

La temperatura di equilibrio non è esattamente la temperatura che si ha alla superficie del pianeta ma è la

temperatura sulla superficie di un pianeta privo di atmosfera alla distanza orbitale a . La temperatura alla superficie di un pianeta con atmosfera è regolata proprio da quest'ultima e dall'effetto serra che essa è in grado di mantenere. Per esempio, per quanto riguarda la Terra, la temperatura di equilibrio è di 255 K (circa -19°C) ma a causa della presenza dell'atmosfera e dell'effetto serra viene innalzata di circa 30°C rendendo la Terra abitabile (la temperatura media sulla superficie terrestre è di 288 K o +16°C).

La presenza dell'atmosfera diventa perciò importante poiché permette di avere un effetto serra che mantiene la temperatura al di sopra del valore di congelamento dell'acqua. L'effetto serra è dovuto all'interazione tra la radiazione solare e l'atmosfera del pianeta. In altre parole, la radiazione proveniente dalla stella e che non viene riflessa dall'atmosfera viene assorbita dalla superficie del pianeta che si riscalda. La superficie del pianeta, riscaldandosi, aumenta la sua temperatura ed emette nella zona rossa e infrarossa dello spettro elettromagnetico. La radiazione rossa e infrarossa vengono assorbite dalle molecole di alcuni gas, quali l'anidride carbonica, il metano e il vapore acqueo, oltre che da altri gas prodotti dall'attività industriale umana presenti in atmosfera. Il risultato è un riscaldamento dell'atmosfera.



Il satellite di Giove, Europa, è un mondo ghiacciato. Sotto la sua superficie si ipotizza la presenza di un oceano. Crediti: Ted Stryk/Galileo Project/JPL/NASA.

L'efficienza di questo fenomeno dipende dalla quantità di gas serra presenti nell'atmosfera che a sua volta è regolata dai processi di equilibrio tra la produzione dei gas serra (attività vulcanica, evaporazione, industrializzazione) e la loro rimozione dall'atmosfera (precipitazioni). Questi fenomeni sono detti "cicli di stabilizzazione del clima". Sulla Terra il ciclo di stabilizzazione del clima principale è quello dei carbonati – silicati. La zona abitabile è quindi una corona sferica intorno alla stella la cui larghezza e distanza dipendono dalla luminosità della stella, da come essa evolve nel tempo e dalla composizione ed evoluzione dell'atmosfera del pianeta. Il limite interno di questa zona è la distanza a cui l'effetto serra è talmente efficiente nello scaldare l'atmosfera che tutta l'acqua presente sul pianeta evapora e lo strato invertente (lo strato atmosferico dove il vapore acqueo condensa, legata all'inversione nell'andamento della temperatura atmosferica con l'altitudine) raggiunge un'altitudine dove la radiazione stellare è in grado di ionizzare le molecole di acqua, separandole in idrogeno e ossigeno.

L'idrogeno, essendo più leggero dell'ossigeno, sfugge l'attrazione gravitazionale del pianeta e si perde nello spazio. Il risultato netto è la perdita di acqua dal pianeta, come successe a Venere. Nel caso del Sistema Solare il limite interno di distanza dovuto alla perdita di acqua è a 0,95 UA (**nota 2**). Il limite esterno è la distanza dalla stella a cui l'effetto serra fallisce nel riscaldare la

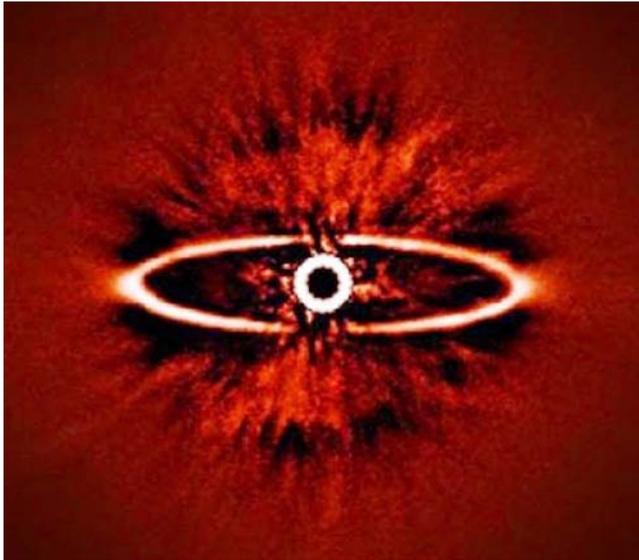
superficie del pianeta al di sopra del punto di congelamento dell'acqua. Nel caso del Sistema Solare questa condizione è rappresentata da Marte e il limite di "massimo effetto serra" è a 1,67UA. Limiti simili possono essere definiti per tutte le stelle di tutti i tipi spettrali. Stelle più calde del Sole avranno la zona abitabile più esterna, mentre stelle più fredde l'avranno più interna.

Nota 1: *Un corpo nero è un corpo che assorbe tutta l'energia incidente. La radiazione emessa da un corpo nero è detta radiazione di corpo nero e dipende dalla temperatura del corpo nero. Un corpo nero ad alta temperatura emette uno spettro di radiazione con il massimo di emissione nel blu – ultravioletto, mentre un corpo nero a bassa temperatura emette nella parte infrarossa dello spettro.*

Nota 2: *1 unità astronomica (UA) è pari a $1.4960 \times 10^{11} \text{m}$*

LA SFIDA DELL'IMAGING DIRETTO

Al contrario dei metodi indiretti, l'immagine diretta permette di avere in una sola osservazione, se il campo di vista dello strumento è grande abbastanza, l'immagine del sistema planetario. La situazione in realtà sembra semplice, ma non lo è affatto e, a complicarla, sono due cose fondamentali: la risoluzione angolare del telescopio e il contrasto di luminosità fra la stella e il pianeta.



Anello di polvere intorno alla stella HR 4796A a 237 anni luce di distanza dalla Terra, osservato nell'infrarosso dallo strumento SPHERE (Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch) montato al VLT-Very Large Telescope al Paranal, Cile. Per maggiori informazioni : Pianeta, prego sorrida! Media INAF: <http://www.media.inaf.it/2014/01/17/pianeta-prego-sorrida/> e Il lampione e la falena, Media INAF: <http://www.media.inaf.it/2014/06/04/il-lampione-e-la-falena/> . Crediti: ESO.

La prima è legata alla distanza della stella che vogliamo osservare, a quanto è prossimo ad essa il compagno di piccola massa che si vuole rilevare e al telescopio che si ha a disposizione per l'osservazione. Infatti, considerando un sistema Solare posto ad una distanza di 10 pc da un osservatore, se si vuole osservare Giove (5 UA dal Sole) occorre che il telescopio sia in grado di apprezzare una distanza angolare dal centro dell'immagine sul piano focale della stella di $5\text{UA}/10\text{pc}=0.5$ arcsec. Un telescopio di classe 8 – 10 m avrebbe la potenzialità di risolvere il pianeta (ovvero la risoluzione angolare opportuna), ma trovandosi immerso all'interno dell'atmosfera si trova a combattere con il fenomeno del *seeing* che allarga la distribuzione dei fotoni sul piano focale. Sappiamo che esiste una soluzione a questo problema che è l'uso di moduli di ottica adattiva che correggono il fronte d'onda riportando l'immagine della stella a dimensioni molto vicine a quelle dell'immagine di diffrazione. Il problema è risolto? No, ora entra in ballo la grande diversità di emissione di energia luminosa tra il pianeta e la stella, detta contrasto di luminosità. Il contrasto di luminosità tra la stella e il compagno può essere dell'ordine di 10^{-6} per pianeti giganti con luminosità propria, cioè pianeti giovani che sono ancora nella fase di contrazione gravitazionale e all'inizio della sequenza di raffreddamento, ma può ar-

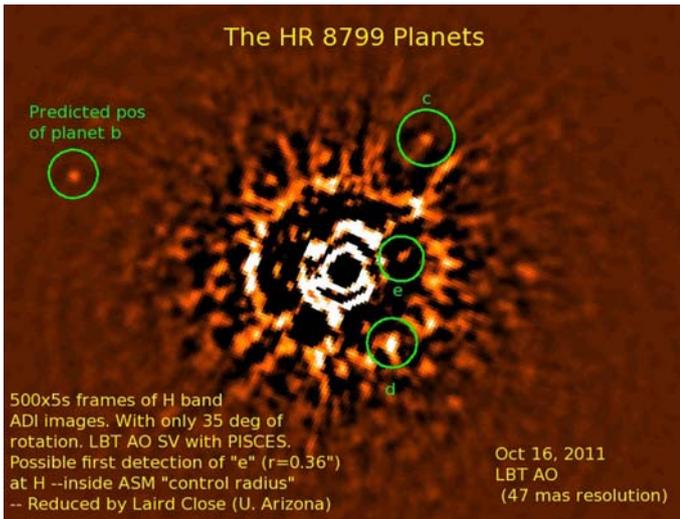
rivare a valori più bassi come 10^{-8} , 10^{-9} per pianeti freddi che ormai riflettono solo la luminosità della stella. Nel primo caso il contrasto sarà indipendente dalla distanza del pianeta dalla stella, mentre nel secondo caso, dipenderà inversamente dalla distanza. Con questi contrasti i compagni di piccola massa a distanze interessanti dalla stella centrale (al di sotto delle 20 UA) si perdono nel rumore dell'immagine della stella. Il problema e la sfida dell'immagine diretta è superare i limiti imposti da queste problematiche trovando tecniche che non solo permettano di sfruttare la risoluzione angolare dello strumento (moduli di ottica adattiva), ma anche di ridurre l'influenza dell'intensità del picco di luminosità dell'immagine della stella (coronografia) oltre che di rimuovere o controllare le fonti di rumore in modo da riuscire a visualizzare le zone più vicine alla stella stessa, senza però cancellare il segnale del compagno. In questo, l'uso di coronografi permette di ridurre il picco di luminosità dell'immagine stellare.

Il problema è che per fare il loro lavoro comunque nascondono una porzione della parte più interna dell'immagine. Minore è questa porzione, più il coronografo ci permette di arrivare vicini alla stella.

I coronografi non sono oggetti semplici da trattare perché il loro principio non si basa sui concetti dell'ottica geometrica, ma su quelli dell'ottica fisica. Comunque eliminato il picco di diffrazione non rimane che trovare un modo efficiente per rimuovere o controllare il piedistallo di rumore.

Ogni sistema ottico, per quanto sia fatto bene, soffre oltre che del rumore dovuto alla statistica dei fotoni al rumore così detto delle "speckle". Speckle è un termine inglese che denota la formazione di immagini sul piano focale dovute all'interferenza fra due o più fotoni che arrivano allo stesso momento all'imboccatura del telescopio. Le speckle possono essere, oltre che di natura atmosferica, anche di natura strumentale causate da imperfezioni nel materiale delle ottiche o nel loro allineamento. L'intensità di queste immagini spurie può essere superiore al rumore statistico; la loro dimensione è dell'ordine delle dimensioni dell'immagine stessa. La loro eliminazione o il loro controllo prevede tecniche di osservazione e di riduzione dati che prendono il nome di "differential Imaging", "speckle deconvolution", "angular differential imaging" ecc. Queste tecniche si basano sulla caratteristica che le speckle hanno una dipendenza nota dalla lunghezza d'onda e che la loro posizione non cambia con la rotazione del campo di vista di un telescopio altazimutale.

Finalmente, una volta eliminato questo rumore possiamo finalmente osservare il compagno nascosto. Quanto a fondo riusciamo a spingerci? La risposta risiede nella capacità di correzione dei moduli di ottica adattiva e nella tecnologia di costruzione dei coronografi. Quest'ultimi, riescono ormai ad arrivare a valori dell'angolo di lavoro interno (*Inner Working Angle*) minori di un decimo di secondo d'arco.



Il sistema HR 8799 ripreso dal LBT-Large Binocular Telescope nell'ottobre 2011. Sono indicate con un cerchio verde le posizioni dei vari pianeti (b, c, d, e) del sistema. Crediti: LBT/Laird Close/University of Arizona.

IL SISTEMA HR8799

Fino ad oggi sono stati osservati con il metodo dell'immagine diretta circa 50 pianeti extrasolari ma solo in due casi sono stati osservati sistemi multipli: Kepler 70 (b e c) e HR8799 (b, c, d ed e).

Kepler 70 è un sistema con due super terre in orbita attorno a una stella che ha superato la fase di gigante rossa.

Il sistema HR8799, è invece costituito da quattro pianeti giganti che risulta interessante perché, pur essendo i quattro pianeti ancor più massicci dei pianeti gassosi del nostro Sistema Solare, presentano un rapporto fra le masse e le separazioni orbitali con valori simili a quelli che si hanno per i pianeti giganti del Sistema Solare. La stella HR8799 (V342 Peg o HIP 114189) appartiene al tipo spettrale A5 (stelle calde con T_{eff} dell'ordine di circa 9500 K) di sequenza principale (classe di luminosità V), con una massa pari a circa 1,5 la massa del Sole e una luminosità un fattore 4,5 maggiore di quella solare. La stella è posta a 39,4 pc dalla

Terra ed è classificata simultaneamente come una stella γ Doradus (variabile), λ Bootis (stella A di popolazione I povera di metalli) e Vega Like (che presenta un eccesso IR dovuto all'emissione di polvere circumstellare).

L'età di questa stella è giovane ed è stata stabilita tenendo conto di una serie di argomentazioni che vanno dal moto della stella, dalla sua posizione nel diagramma colore magnitudine, alla età tipica delle stelle γ Doradus e λ Bootis e la massa del disco della stella stessa. Considerando tutto ciò si ottiene una stima di 60 milioni di anni con un intervallo di variabilità fra 30 e 160 milioni di anni.

Il sistema HR8799 è stato osservato per la prima volta con l'ottica adattiva montata al Telescopio Keck e al Telescopio Gemini Nord, nella banda dell'infrarosso vicino. Con queste osservazioni si sono trovati tre compagni, b, c e d, con evidenza di moto comune con la stella.

Due anni dopo, nel 2010, è stato scoperto il quarto pianeta, HR8799e, più vicino alla stella di quanto non lo fossero gli altri pianeti. Il contrasto fra la stella e i pianeti è dell'ordine di 10^{-5} che equivale a una differenza di magnitudine di 12.

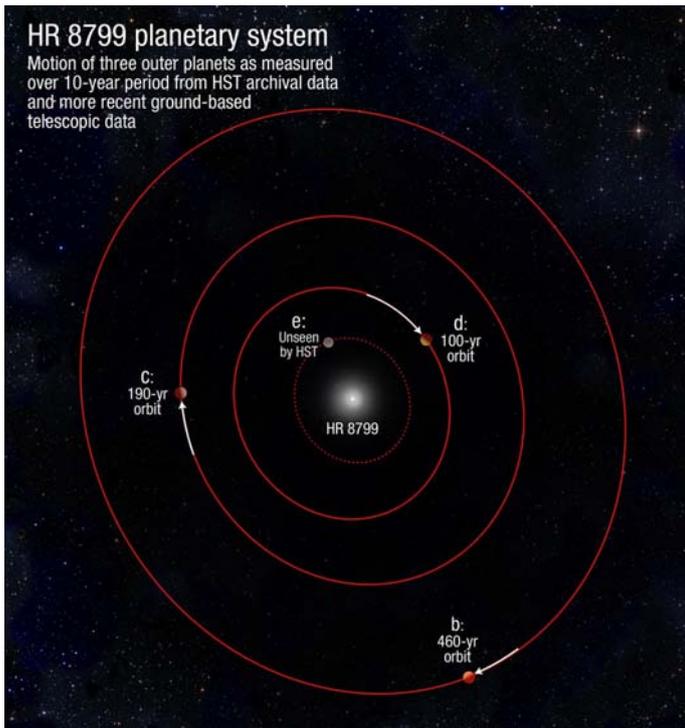
Questi pianeti sono abbastanza brillanti a causa della loro giovane età, in particolare per la sorgente interna di energia ancora attiva. La temperatura stimata dell'atmosfera si aggira intorno ai 1000 K.

I semiassi maggiori dei quattro compagni di HR8799 sono compresi tra 14 e 67 UA. Le masse, stimate dall'età (**nota 1**) variano nell'intervallo fra 5 – 11 M_J per HR8799 b e tra 7 – 13 M_J per gli altri tre pianeti.

I limiti di stabilità dinamica del sistema pongono le masse dei pianeti HR8799bcd al di sotto della massa limite del bruciamento del deuterio (13 M_J , separazione teorica tra corpi planetari e stellari) e il sistema è mantenuto stabile da interazioni risonanti fra i diversi pianeti.

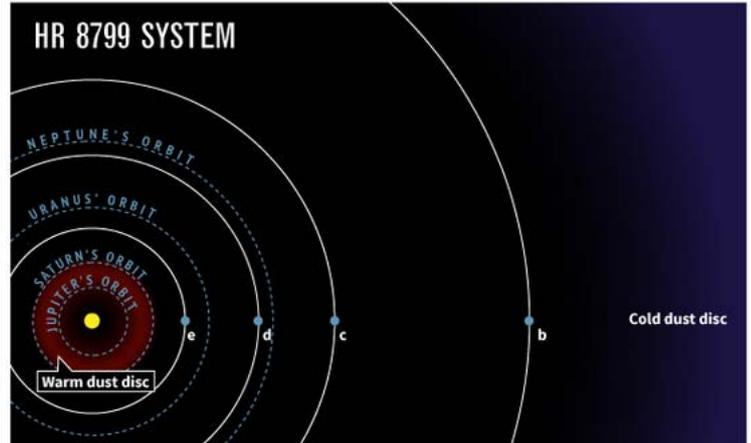
Per quanto riguarda la massa di HR8799e molto probabilmente, si trova alla fine bassa dell'intervallo di variazione delle sequenze di raffreddamento che rappresentano l'evoluzione temporale dei corpi planetari. Tutti e quattro i pianeti giganti sono collocati oltre la "snow line" (**nota 2**) (a circa 3 UA nel nostro Sistema Solare e a circa 6 UA per HR 8799).

Fin dalle prime osservazioni si è visto che il sistema planetario, oltre alla presenza dei pianeti, era caratterizzato dalla presenza di tre componenti di disco di detriti.



Rappresentazione delle orbite dei pianeti del sistema HR 8799 con indicati i loro periodi in anni terrestri. Crediti: NASA, ESA e A. Feild (STScI). Parte scientifica: NASA, ESA e R. Soummer (STScI).

Le orbite dei pianeti di HR 8799 con sovrapposte le orbite dei pianeti esterni del nostro sistema solare.



SOURCES: BRUCE MACINTOSH, LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY, OPEN EXOPLANET CATALOG

Le tre componenti sono riconoscibili come una cintura di polvere calda (con temperature intorno ai 150 K) tra le 6 e le 10 UA (analoga della cintura degli asteroide del nostro Sistema Solare), seguita da una cintura larga di polvere fredda (a temperature dell'ordine dei 45 K) tra le 90 e le 300 UA, il cui limite interno è definito dall'interazione con il pianeta più esterno.

Per ultimo è presente anche un alone esteso di piccoli grani a circa 1000 UA a cui viene fatto risalire l'eccesso infrarosso rilevato anche dal Telescopio orbitante infrarosso Spitzer. Lo scenario che si può estrapolare da questi elementi è che malgrado la stella sia molto diversa dal Sole (che è una G2V con una T_{eff} intorno ai 5700 K) e abbia una evoluzione molto più veloce di quella della nostra stella, HR8799 mostra una architettura delle sue zone esterne simile a quella della zona esterna del nostro Sistema Solare.

Nota 1: Dall'età, infatti, si può ricostruire in quale momento della loro evoluzione o meglio della loro sequenza di raffreddamento si trovano e, valutandone la loro luminosità bolometrica dalla fotometria e dalla temperatura, dai modelli teorici si è in grado di risalire al valore della massa.

Nota 2: Con il termine "snow line" (o linea del ghiaccio) si intende la distanza dalla stella centrale oltre la quale si ha una temperatura tale per cui si comincia la condensazione dei ghiacci. per il Sistema Solare è circa 3UA. Questa distanza dipende dalla stella, più è calda e luminosa più si pone distante.



Riccardo Claudi si è laureato in Fisica presso l'università di Roma "La Sapienza" ed è ricercatore astronomo presso INAF Osservatorio Astronomico di Padova. E' responsabile della collaborazione italiana a SPHERE; è stato responsabile e partecipa a GAPS (Global Architecture of Planetary Systems) e si occupa dello studio delle atmosfere di pianeti extrasolari. Tiene corsi di Planetologia Extrasolare presso le scuole di Dottorato in Fisica e Astronomia delle tre università di Roma e dell'università di Padova.

Sabrina Masiero si è laureata e dottorata in Astronomia presso l'Università degli Studi di Padova. Attualmente si occupa della comunicazione del programma GAPS-Global Architecture of Planetary Systems con lo strumento HARPS-N montato al Telescopio Nazionale Galileo (TNG) per lo studio e la ricerca dei pianeti extrasolari presso l'INAF-Osservatorio Astronomico di Padova e la Fundación Galileo Galilei-TNG a La Palma. E' una degli autori del libro *Astro-kids - Avventure e scoperte nello Spazio*, a cura di Laura Daricello e Stefano Sandrelli edito da Scienza Express, 2014.