

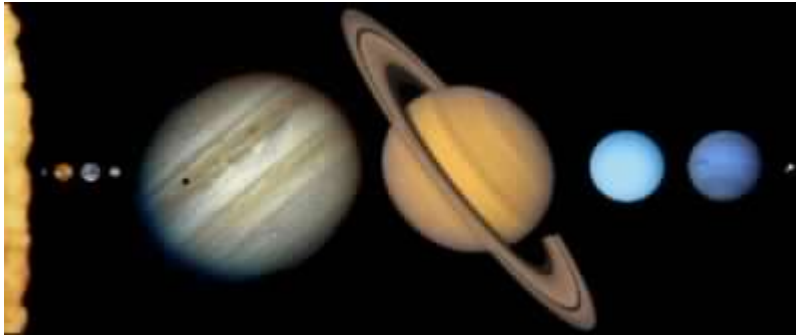
Pianeti extrasolari e la vita nell'universo

di Giuseppe Cutispoto (2006)

L'autore è ricercatore dell'Istituto Nazionale di Astrofisica presso l'Osservatorio Astrofisico di Catania

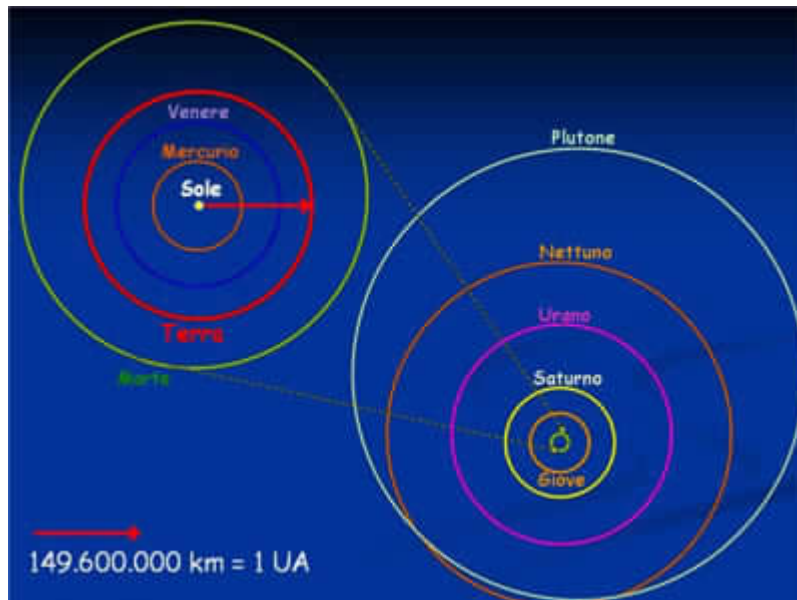
1. Il nostro Sistema Solare

Il nostro Sistema Solare è composto dal Sole, dai Pianeti (Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove, Saturno, Urano, Nettuno e Plutone) e dai Corpi Minori (Satelliti dei pianeti, Asteroidi e Comete)



Alcune caratteristiche del Sistema Solare:

- Distribuzione della massa (**M**): Sole: 99.85 %, Pianeti: 0.13 %, Corpi Minori: 0.02 %
- Periodi orbitali (**P**): Mercurio: 88 giorni, Terra: 1 anno, Giove: 11.86 anni
- Distanza dal Sole (**a**): Mercurio: 0.39 UA, Terra: 1 UA, Giove: 5.20 UA (Unità Astronomiche)



Il Sistema Solare si è originato dalla contrazione di una Nebulosa (probabilmente causata dall'esplosione di una "Supernova"). La contrazione del Sole, che iniziò 4,6 miliardi di anni fa, durò circa 100.000 anni. Intorno al Sole si formò un disco di materia e da esso (in circa 100 milioni di anni) si formarono i pianeti e i corpi minori.



@ Royal Observatory Edinburgh / Anglo-Australian Observatory

2. Esistono altri Sistemi Solari?

Esistono altri Sistemi Solari? E' un'idea che ha profonde radici nel pensiero scientifico e filosofico. Le prime intuizioni sulla "pluralità dei mondi", e sulla possibilità di forme di vita su altre "terre", risalgono alla civiltà greca (Aristarco di Samo, Democrito, Epicuro), ma Aristotele disse: "Non può esistere che un solo mondo". Giordano Bruno affermò (1584): "Esistono innumerevoli soli e innumerevoli terre in orbita intorno ai loro soli"



Oggi sappiamo che la nostra galassia contiene circa 200 miliardi di stelle e che nell'Universo esistono almeno 100 milioni di galassie. Un grande impulso per la ricerca di pianeti intorno ad altre stelle si ebbe nel 1980, con la scoperta di un disco di materia intorno alla stella β Pictoris, e questo disco sembra avere le caratteristiche di un sistema planetario in corso di formazione.

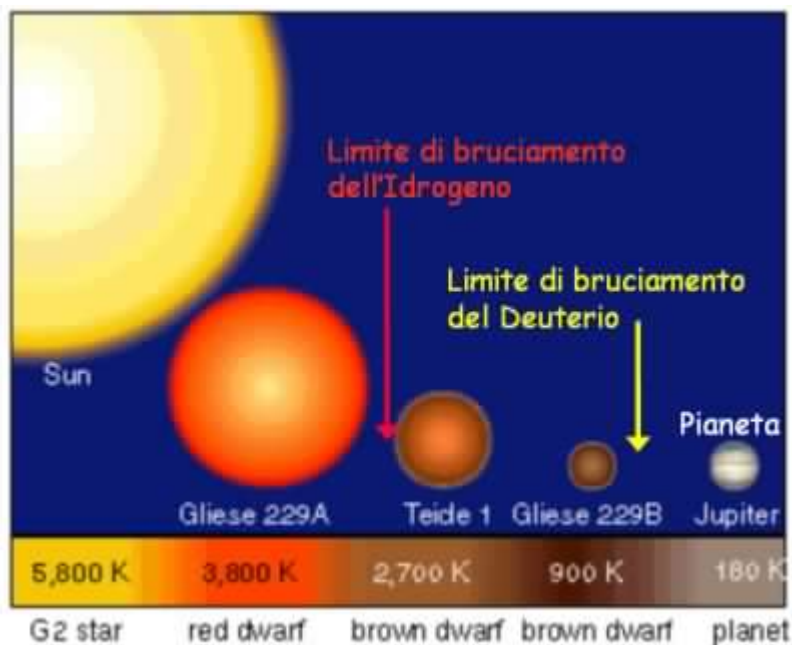
Stelle, Nane brune e Pianeti

Le stelle generano energia nel loro interno tramite reazioni di fusione ("bruciamento") nucleare. Più è grande la massa di un corpo gassoso in equilibrio maggiore è la temperatura al suo interno, per il "bruciamento" dell'idrogeno è necessaria una temperatura di circa $10 \cdot 10^6$ K (es. interno del Sole). La reazione nucleare che ha luogo a temperatura più bassa è quella di "bruciamento" del Deuterio ($\sim 10^6$ K).

- Oggetti con massa maggiore di $0.08 M_{\text{Sole}}$ ($\sim 85 M_{\text{Giove}}$) riescono a "bruciare" l'idrogeno: questi corpi sono le **stelle**.
- Oggetti con massa minore di $0.08 M_{\text{Sole}}$ ma maggiore di $0.012 \cdot M_{\text{Sole}}$ ($\sim 13 M_{\text{Giove}}$) riescono a "bruciare" solo il Deuterio: questi corpi sono le **nane brune**.

- Oggetti con massa minore di $13 M_{\text{Giove}}$ non possono produrre energia per mezzo di reazioni nucleari: questi corpi sono i **planeti**.

Le nane brune (*Brown Dwarf*) sono l'anello di congiunzione tra le stelle e i planeti:



Si chiama **fascia di abitabilità** la regione entro la quale un pianeta ha una temperatura tale da poter mantenere l'acqua allo stato liquido sulla sua superficie.



3. Come osservare i planeti extrasolari?

Come osservare i planeti extrasolari? I planeti sono molto piccoli e non emettono luce propria. L'osservazione diretta dei planeti è estremamente difficile, fotografare un pianeta in orbita intorno a una stella è come cercare di vedere una candela vicino a un faro da una distanza di 1000 km! I "disturbi" che la presenza di un pianeta induce sulla stella attorno a cui esso ruota possono essere osservati più facilmente.

Pianeti e Pulsar

La scoperta dei primi "pianeti" extrasolari risale al 1994: le variazioni regolari del periodo di rotazione della pulsar **PSR 1257+12** furono attribuiti agli effetti gravitazionali di tre piccoli corpi in orbita intorno ad essa:

1. $M_1 = 0.02 M_{Terra}$; $a_1 = 0.19 \text{ UA}$; $P_1 = 25.262$ giorni
2. $M_2 = 4.3 M_{Terra}$; $a_2 = 0.36 \text{ UA}$; $P_2 = 66.542$ giorni
3. $M_3 = 3.9 M_{Terra}$; $a_3 = 0.46 \text{ UA}$; $P_3 = 98.211$ giorni

Le osservazioni della pulsar **PSR 0329+54** hanno mostrato evidenza di un pianeta grande due volte la Terra con periodo orbitale di 16.9 anni. Tuttavia questi oggetti non sono ritenuti "veri" pianeti. Si pensa che siano dei resti della supernova da cui è nata la pulsar e che si siano formati in modo del tutto diverso dai pianeti "convenzionali". Intorno alle Pulsar non esiste una "Fascia di Abitabilità".

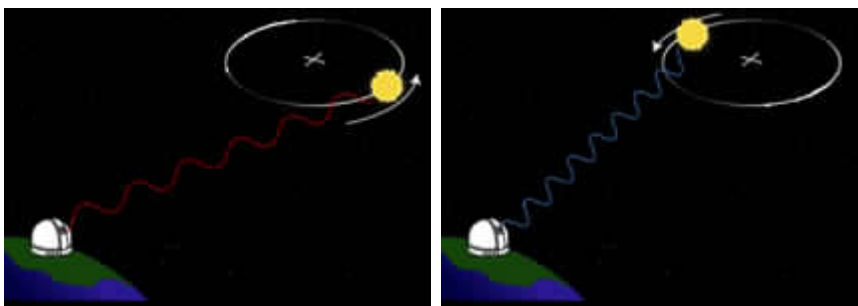
Tecniche per l'osservazione dei pianeti extrasolari



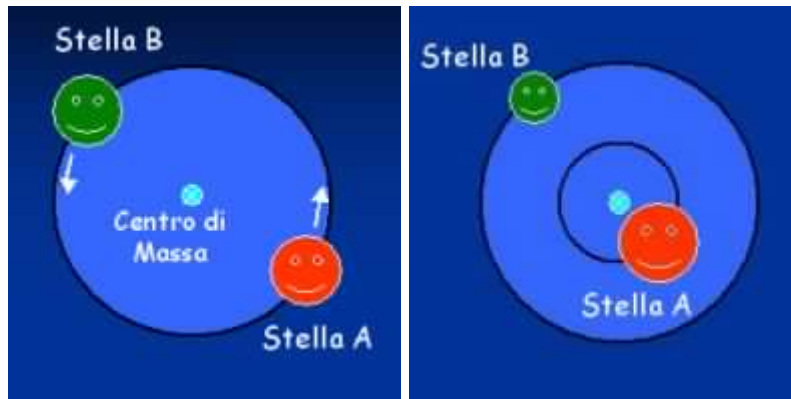
4. Lo studio degli effetti dinamici

Velocità Radiali (*RV*)

In conseguenza dell'effetto Doppler la radiazione di una sorgente in moto rispetto ad un osservatore risulta "più rossa" se la sorgente si allontana, "più blu" se la sorgente si avvicina. Con osservazioni spettroscopiche è possibile ricavare la velocità relativa sorgente–osservatore, cioè la **Velocità Radiale**.

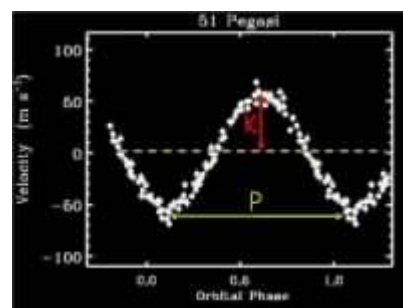


Binarie Spettroscopiche: la variazione di *RV* è di svariati km/s, la stella di massa minore mostra una variazione di *RV* maggiore perché percorre un'orbita più grande. Si misura il periodo di rivoluzione.

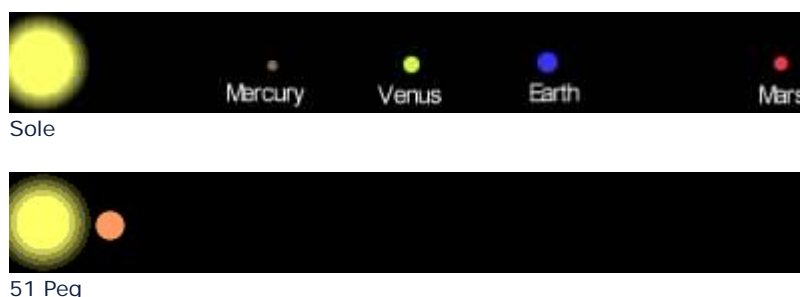


Sistemi Stella-Pianeta: Lo spettro del pianeta non è osservabile, la variazione di RV della stella è estremamente piccola (al massimo di poche decine di m/s) e richiede misure di altissima precisione. Dalla curva di Velocità Radiale si ricavano:

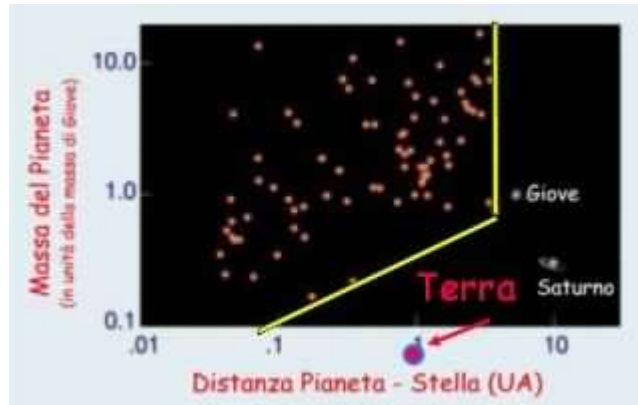
1. la distanza stella-pianeta (terza legge di Keplero);
2. la velocità orbitale del pianeta;
3. $M_{\text{Pianeta}} \cdot \sin i$, cioè il valore minimo della massa del pianeta (legge di conservazione del momento angolare).



Il primo pianeta in orbita intorno ad una stella simile al Sole è **51 Pegasi b**, scoperto nel 1995 con il metodo delle velocità radiali da Michel Mayor and Didier Queloz. Il pianeta ha un periodo di 4.2 giorni (!), la distanza da 51 Peg è 0.05 AU, la temperatura di circa 2000 °C e una massa > 0.53 della massa di Giove.



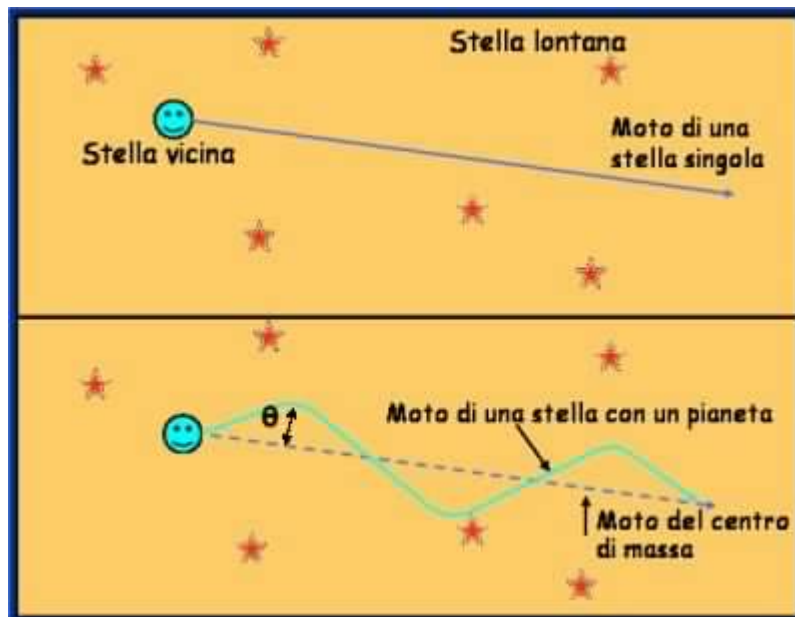
Fino ad oggi con il metodo delle velocità radiali sono stati scoperti 197 pianeti extrasolari. Quasi tutti hanno periodi orbitali molto brevi e massa simile o maggiore a quella di Giove, il pianeta più piccolo scoperto fino ad oggi con questa tecnica ha massa simile a quella di Urano ($0.042 M_{\text{Giove}}$) e $K = 4.1 \text{ m/s}$. Il metodo delle Velocità Radiali ha permesso di identificare sistemi multipli, per esempio nel sistema υ And i pianeti di periodo 4.6171 giorni, 0.7 anni e 3 anni. Fuori dal Sistema Solare non esistono quindi pianeti con caratteristiche simili a quelle della Terra? Probabilmente (sicuramente) sì, ma le "Terre" extrasolari non sono ancora osservabili con il metodo delle velocità radiali.



L'ampiezza della curva di RV diminuisce con la massa del pianeta e all'aumentare della sua distanza dalla stella: si ha $K \sim 10$ m/s per $M \sim M_{\text{Giove}}$ e $K \sim 0.1$ m/s per $M \sim M_{\text{Terra}}$. Attualmente le migliori misure di RV hanno una precisione di 1-2 m/s.

Il metodo astrometrico

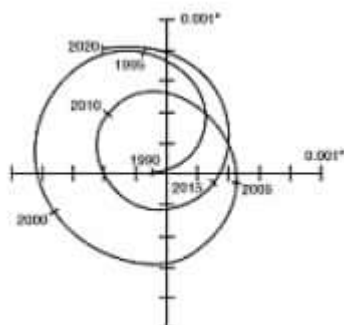
Il moto apparente di una stella vicina non è rettilineo se intorno ad essa è presente un pianeta:



$$\theta = (M_p / M_*) (a/d) \text{ [arcsec]}$$

dove M_p è la massa del pianeta, M_* la massa della stella, a il semiasse maggiore dell'orbita in U.A. e d la distanza in parsec

I limiti di questo metodo sono diversi: l'angolo θ è sempre estremamente piccolo (< 0.001 arcsec), si può applicare solo alle stelle più vicine, e infine richiede osservazioni su tempi molto lunghi.



A sinistra è riportato il moto apparente del Sole dovuto alla presenza di Giove osservato da una distanza di 10 pc. La variazione della posizione del Sole è sempre minore di 0.001 arcsec.

Misurare un angolo di 0.001 arcsec equivale a vedere una moneta da 1 € a 4700 km (da Ancona alla Groenlandia...)

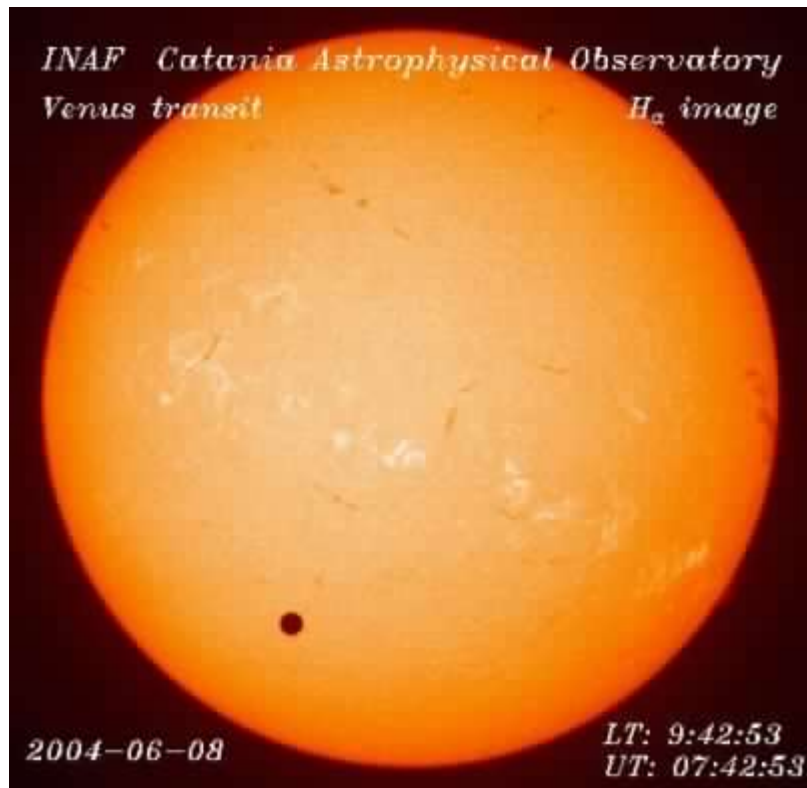


Con questo metodo intorno alla stella **GL 876** distante 15 anni luce e di massa = $0.3 M_{\text{Sole}}$ è stato trovato il pianeta **GL 876b** (massa = $1.9\text{--}2.4 M_{\text{Giove}}$, periodo = 61 giorni, $a = 0.2 \text{ UA}$, $\theta = 0.005 \text{ arcsec}$). Il futuro delle misure astrometriche riguarda stelle di tipo solare entro 10 pc:

- Da Terra: **VLT** e **Keck**, precisione $10\text{--}20 \mu\text{arcsec}$, massa limite $\sim 60 M_{\text{Terra}}$ ($a = 1 \text{ UA}$); una precisione di $10 \mu\text{arcsec}$ equivale a vedere una moneta da 1 € sulla Luna;
- Dallo spazio: **Space Interferometry Mission** (NASA – 2011), precisione $2 \mu\text{arcsec}$, massa limite $\sim 6.6 M_{\text{Terra}}$ ($a = 1 \text{ UA}$).

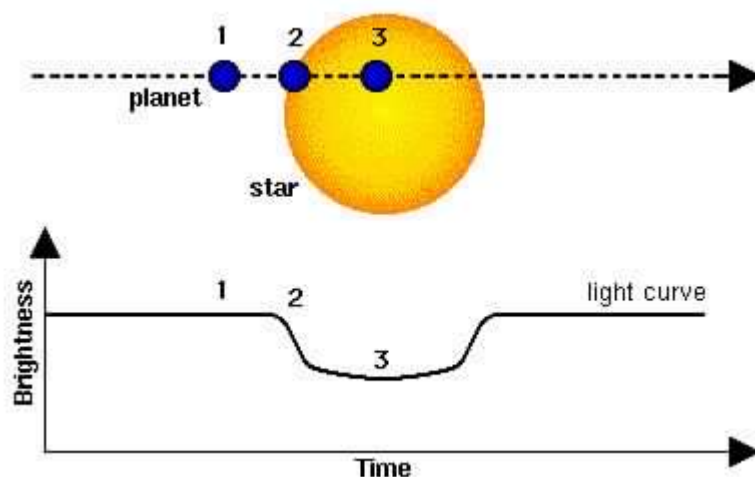
5. Lo studio degli effetti fotometrici

Il metodo dei transiti



8 Giugno 2004, transito di Venere sul disco solare osservato a Catania

Il transito di un pianeta extrasolare non può essere osservato direttamente, ma provoca una seppur piccola diminuzione della luminosità totale della stella. La variazione di luminosità (Δm) è tanto maggiore quanto più grandi sono le dimensioni del pianeta. Questo metodo permette di ricavare il raggio del pianeta: $\Delta m = (R_{\text{Pianeta}}/R_{\text{Stella}})^2$; poiché $R_{\text{Terra}} = 0.01 R_{\text{Sole}}$ e $R_{\text{Giove}} = 0.1 R_{\text{Sole}}$, osservando il transito sul Sole si avrebbe per la Terra la variazione di luminosità $\Delta m = 10^{-4}$ e per Giove si avrebbe $\Delta m = 10^{-2}$.



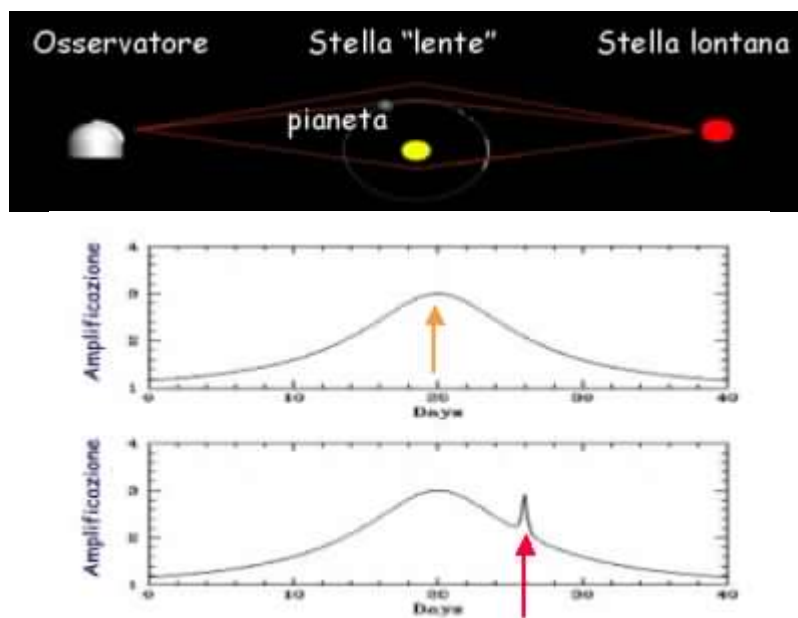
Per il pianeta **HD 209458b**, scoperto con il metodo dei transiti si ha $\Delta m = 1.7 \cdot 10^{-2}$; unendo le misure di velocità radiale con la fotometria del transito, si è trovato che il pianeta ha massa = $0.69 M_{\text{Giove}}$, Raggio = $1.40 R_{\text{Giove}}$, $\sigma = 0.31 \text{ g/cm}^3$, $a = 0.048 \text{ U.A.}$ e periodo = 3.5246 giorni.

Con le osservazioni da Terra il metodo dei transiti consente di rivelare solo pianeti giganti, le osservazioni dallo spazio permetteranno di rivelare anche pianeti di tipo terrestre. I vantaggi del metodo dei transiti sono la determinazione del raggio del pianeta, la rivelazione di pianeti "terrestri" (a basso costo) e lo studio dell'atmosfera del pianeta. Ma la probabilità di osservare un transito è bassa, sono favoriti i periodi orbitali brevi ed il metodo è efficace solo per studi su grandi campioni di stelle.

Il futuro sono il satellite **COROT** del CNES/ESA (lancio a dicembre 2006) che osserverà circa 60.000 stelle, e **KEPLER** della NASA (lancio previsto a giugno 2008), che osserverà circa 100.000 stelle. Questi satelliti potranno scoprire oltre 1000 pianeti medio-giganti e almeno 12 "Terre" nella "zona abitabile".

Il metodo delle lenti gravitazionali

La forza di gravità è in grado di deflettere la luce: la luce proveniente da una sorgente lontana può essere deflessa e focalizzata se una grande massa viene a trovarsi tra la sorgente e l'osservatore. Il risultato è un'amplificazione del segnale della sorgente simile a quella causata da una lente o una deformazione dell'immagine originale fino alla formazione di immagini multiple.



Se la lente gravitazionale è una stella (microlente) si osserverà un aumento temporaneo della luce della stella lontana con un caratteristico picco. Se la lente gravitazionale è una stella con un pianeta, è possibile osservare un **picco secondario** nella curva di luce. La durata dell'intensificazione luminosa è di alcune settimane per la stella; alcuni giorni per pianeti giganti; alcune ore per pianeti terrestri.

Sono almeno 4 i pianeti identificati fino ad oggi con il metodo delle microlenti, come **OGLE-05-390L** (distanza di circa 6.600 pc, $M_{\text{Stella}} = 0.22 M_{\text{Sole}}$, $M_{\text{Pianeta}} = \sim 5 M_{\text{Terra}}$, $a \sim 2.6 \text{ UA}$, $P \sim 3800 \text{ g} = 10,4 \text{ anni}$) e **OGLE235-MOA53** (distanza di circa 5.200 pc, $M_{\text{Stella}} = 0.36 M_{\text{Sole}}$, $M_{\text{Pianeta}} = 2 M_{\text{Giove}}$, $a > 2.9 \text{ UA}$). Sono già stati osservati circa 50 eventi "microlente", e ci si aspetta di rilevare un pianeta con dimensioni simili alla Terra entro cinque anni.

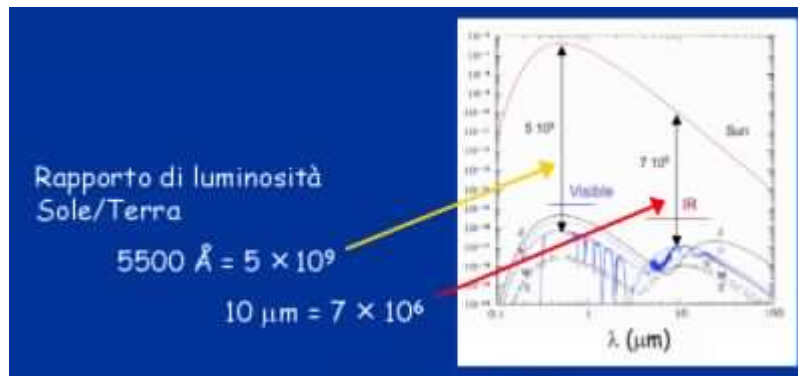
I vantaggi del metodo delle microlenti sono la possibilità di scoprire pianeti di tipo terrestre (tecnologie già disponibili) e di trovare pianeti anche a grandi distanze. Ma gli eventi sono rari, il metodo è efficace solo per studi su grandi campioni di stelle, le possibili scoperte sono casuali e sporadiche, l'osservazione non può essere ripetuta e c'è difficoltà di osservazione con altri metodi.

6. Le immagini dirette dei pianeti extrasolari

Il metodo delle immagini dirette è la tecnica più difficile ma è quella che può fornirci i risultati più completi sulla fisica dei pianeti extrasolari e darci indicazione sulla presenza di processi biologici. I problemi principali sono la differenza di luminosità tra stella e pianeta (tra Sole e Giove = 10^8) e la separazione angolare (Sole e Giove da 10 pc sono separati da un angolo di 0.5 arcsec). I vantaggi sono la visione dell'intero sistema planetario e la rilevazione dei dati fisici dei pianeti: le masse (dalle orbite), la temperatura e la composizione chimica (dagli spettri), i raggi (dalla luminosità e dalle temperature).

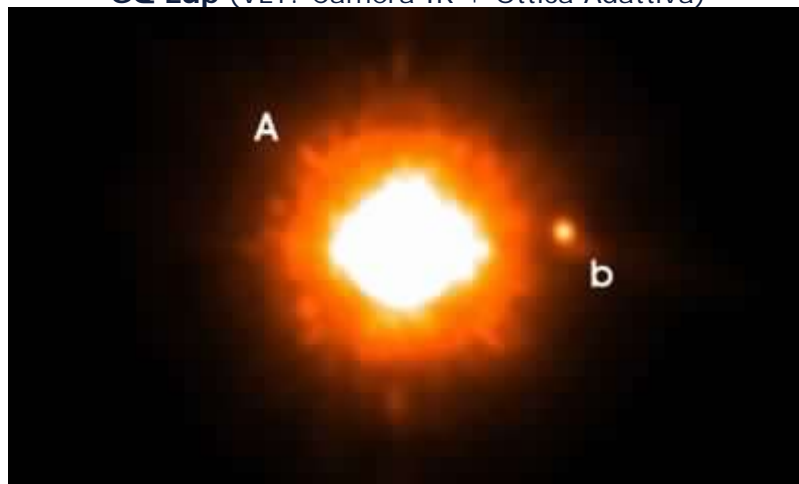
Le tecniche per le immagini dirette sono:

- **Osservazioni IR:** nell'infrarosso la differenza di luminosità Stella–Pianeta è sensibilmente ridotta.



- **Ottica "Adattiva":** permette di eliminare gran parte dei disturbi causati dall'atmosfera terrestre e fruttare al massimo il potere risolutivo dei grandi telescopi.
- **Interferometria (+ "Nulling"):** si combina la luce raccolta da più telescopi per ottenere un potere risolutivo estremamente elevato; questa tecnica consente anche di eliminare la luce proveniente dalla stella ("Nulling") mettendo così in evidenza la luce proveniente dai pianeti.

GQ Lup (VLT: Camera IR + Ottica Adattiva)



Rapporto di luminosità ~ 250 , $D_{\text{angolare}} = 0.73 \text{ arcsec} = 100 \text{ UA}$ (~ 2 volte Sole–Plutone)
GQ Lup b: $T = 1600\text{-}2500 \text{ K}$, Raggio = $1.8 R_{\text{Giove}}$, Massa = da 3 a $42 M_{\text{Giove}}$, Periodo orbitale oltre 1000 anni

2M 1207 (VLT: Camera IR + Ottica Adattiva)



2M 1207 a: $M \sim 0.025 M_{\text{Sole}}$, età $\sim 8 \cdot 10^6$ anni, $D \sim 230$ anni luce
2M 1207 b: $M \sim 5 M_{\text{Giove}}$, $T \sim 1300$ K, 100 volte meno luminoso di 2M 1207a;
è ancora in fase di contrazione ($R = 1.5 R_{\text{Giove}}$), mostra presenza di H_2O

Per il futuro da Terra sarà possibile solo osservare pianeti giganti, per osservare e caratterizzare pianeti di tipo terrestre occorreranno osservazioni interferometriche dallo spazio. La Terrestrial Planet Finder (TPF) della NASA (2015) e Darwin dell'ESA (2015) e forse il NASA's Planet Imager (2040?) permetteranno di osservare pianeti terrestri nella zona abitabile, determinare la presenza di CO_2 , H_2O , O_3 , CH_4 , e stabilire se il pianeta può ospitare forme di vita.


- **Terrestrial Planet Finder**
 - *Coronografo* (2014): un telescopio da 4-6 m per osservazioni nel visibile, il Coronografo riduce la luce proveniente dalla stella di un fattore 109 permettendo di rivelare i pianeti terrestri.
 - *Interferometro* (2020): "Formazione" di 5 telescopi IR da 3-4 m; analizzerà la luce dei pianeti scoperti dal coronografo e osserverà nuovi sistemi non osservabili col coronografo. Sarà possibile studiare stelle entro 160 anni luce dal Sole.
- **Darwin**

Sarà costituito da una flotta di 5-8 navette in "constellation flight": 3-6 telescopi IR da 3-4m, 1 telescopio collettore (HUB), 1 navetta di comunicazione. Come potere risolutivo sarà equivalente ad un telescopio con diametro di alcune centinaia di metri. Potrà fornire immagini di sistemi planetari ed analizzare la luce dei pianeti.
- **NASA's Planet Imager**

Interferometro con telescopi da 8-metri, potere risolutivo pari ad un telescopio da 360 km; la risoluzione è sufficiente per mappare oceani, nubi, continenti, foreste di "terre" extrasolari.

7. il presente e il futuro

IL PRESENTE...

- 
- 1995: **51 Pegasi** (metodo delle RV)
 - 1999: **HD 209458** (metodo dei transiti)
 - 2006: **205 pianeti** extrasolari noti (vari metodi)
 - 169 sistemi planetari (20 sistemi multipli)
 $a_{\text{minimo}} = 0.0225$ U.A., $a_{\text{massimo}} > 250$ U.A.

$P_{\text{minimo}} = 1.2$ giorni, $P_{\text{massimo}} > 4500$ anni
 $M_{\text{minima}} = 0.018 M_{\text{Giove}}$

... IL FUTURO

- **2007-10**: scoperta di un pianeta di tipo terrestre (metodo dei transiti, osservazioni dallo spazio, microlenti)
- **2015-20**: scoperta di almeno 100 pianeti terrestri con caratteristiche spettrali che indicano presenza di processi biologici (interferometria dallo spazio)
- **2040-50**: mappe di oceani, nuvole, continenti, foreste di "Terre" extrasolari (*Planet Imager*)
- **2100 ??** ... Una sonda automatica arriva su "Terra Nova"