



Università del Salento



Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

Progetto Lauree Scientifiche 2015

I pianeti extrasolari



Achille Nucita & Luigi Manni

Dipartimento di Matematica e Fisica
“Ennio De Giorgi”
Università del Salento



Sommario

Introduzione

Metodi di rivelazione

Dati sperimentali

Missioni in atto e prospettive future

Bibliografia e links

Introduzione

Un pò di geometria e forse anche di fisica

Metodi di rivelazione

Velocità radiali

Astrometria

Transiti planetari

Lensing gravitazionale

Immagini dirette

Dati sperimentali

Candidati rivelati

Diagrammi di correlazione

Missioni in atto e prospettive future

Bibliografia e links



Rappresentazione artistica di come apparirebbe il cielo osservato da una luna di HD 188753 Ab, il primo esopianeta scoperto all'interno di un sistema stellare triplo.



Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

Un pò di storia
Un pò di geometria
La legge di gravitazione di Newton

Introduzione

Le tappe fondamentali della ricerca degli esopianeti:

- Era pre-contemporanea;
- 1989 - David Latham del Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics e quattro suoi collaboratori trovano forti indizi di quello che poteva essere un pianeta in orbita attorno alla stella HD 114762;
- 1992 - Alexander Wolszczan della Pennsylvania State University e Dale A. Frail del National Radio Astronomy Observatory usano un metodo per misurazioni temporali molto accurato per scoprire due pianeti di massa simile a quella terrestre in orbita attorno alla pulsar PSR B1257+12 (**cosa???**);
- 1995 - Michel Mayor e Didier Queloz dell'Osservatorio di Ginevra individuano un esopianeta con massa pari a circa 150 volte quella della Terra che compie un'orbita completa in appena 4,2 giorni terrestri attorno alla stella 51 Pegasi;



Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

Un pò di storia
Un pò di geometria
La legge di gravitazione di Newton

Introduzione

- 1999 - Scoperto un pianeta transitante davanti la stella HD 209458;
- 1999 - Rivelato da parte dei team degli osservatori Lick e Whipple il primo sistema planetario triplo attorno alla stella di tipo solare υ Andromedae;
- 2003 - Rivelato il primo pianeta attraverso il microlensing (OGLE-2003-BLG-235 o MOA-2003-BLG-53);
- 2007 - Ricavato il primo spettro di un pianeta transitante;
- 2008 - HST fornisce le prime immagini dirette di pianeti extrasolari: uno attorno alla stella Fomalhaut e tre attorno a HR 8799;
- 2009 - **Individuato il primo candidato come pianeta extra-galattico in M31;**
- 2009 - Rivelato dal JPL (CalTech) il primo esopianeta col metodo astrometrico attorno alla stella VB 10;
- 2009 - Scoperto il pianeta roccioso CoRoT7-b, il più piccolo e veloce esopianeta;

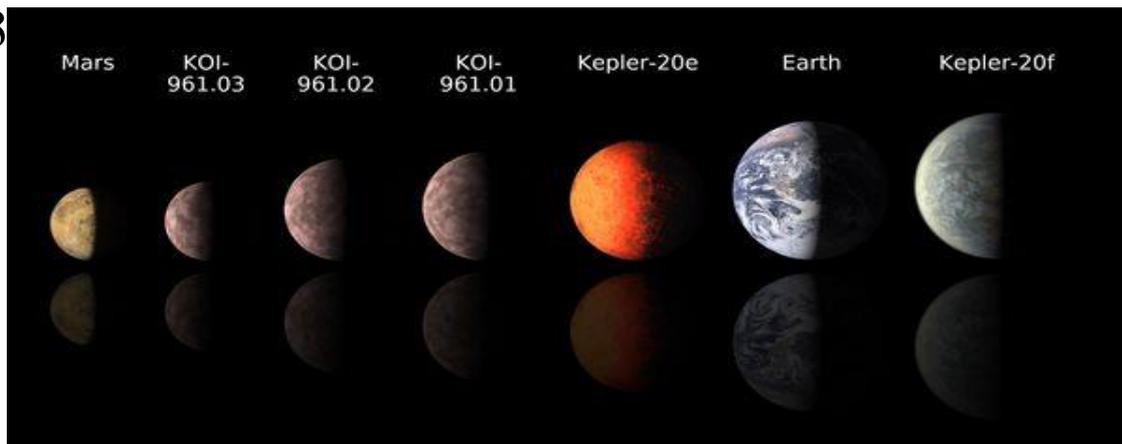


Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

Un pò di storia
Un pò di geometria
La legge di gravitazione di Newton

Introduzione

- 2010 - Tra i nuovi compagni di Gliese 581 forse uno è abitabile;
- 2011 - Kepler presenta 1235 nuovi candidati al ruolo di esopianeti;
- 2011 - Kepler rivela il suo primo pianeta nella zona abitabile di una stella di tipo solare, si tratta di Kepler-22b; E' un gigante roccioso con raggio pari a 2.5 Rt.
- 2011 - Kepler-20: un sistema con 5 pianeti di cui 2 di dimensioni terrestri;
- 2012 - Kepler 34-b e Kepler 35-b
- 2012 - KOI-96: un mini sistema planetario;
- 2012 - Nella MW si prevede ci siano circa 10^{11} pianeti, la maggior parte dei quali a carattere roccioso;



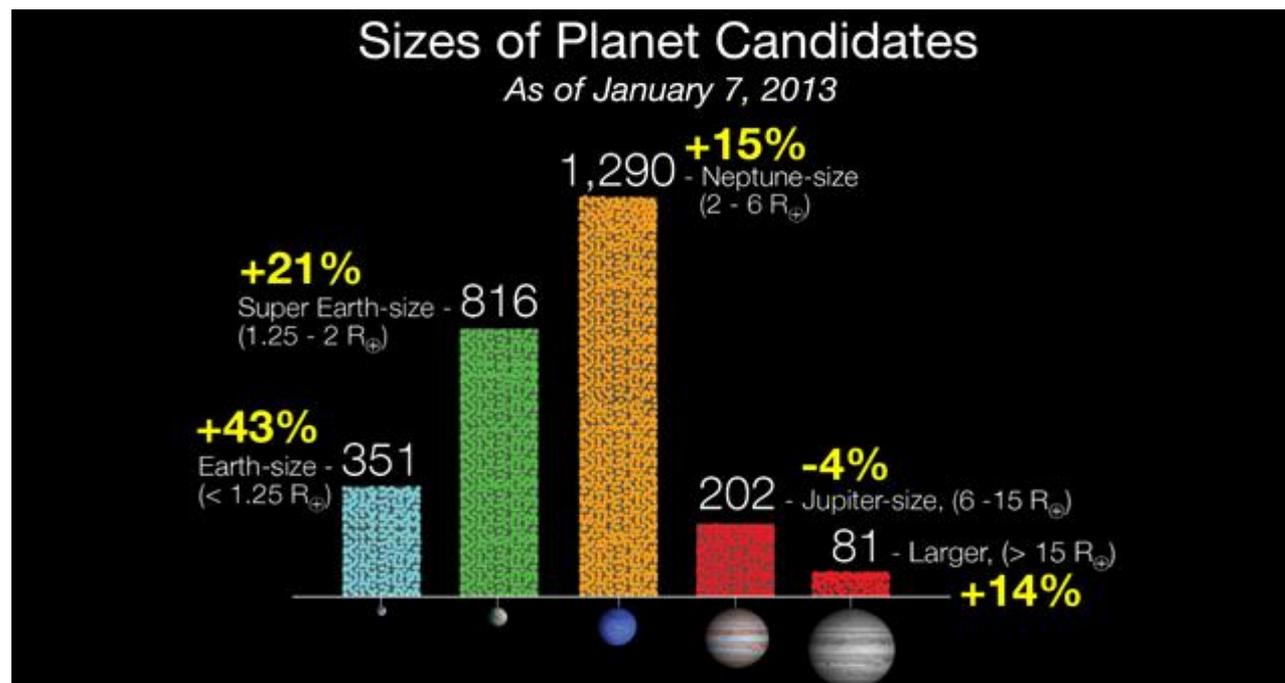


- Sommario
- Introduzione
- Metodi di rivelazione
- Dati sperimentali
- Missioni in atto e prospettive future
- Bibliografia e links

- Un pò di storia
- Un pò di geometria
- La legge di gravitazione di Newton

Introduzione

➤ 2012 - Kepler conclude l'anno osservativo con 2740 candidati al ruolo di esopianeta. Il 43% è in corrispondenza di sistemi multipli. 105 già confermati;



➤ 2013 – Il team di Kepler annuncia 461 nuovi candidati planetari. Quattro di essi hanno dimensioni minori di due volte quelle terrestri ed orbitano nella zona abitabile della loro stella.



Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

Un pò di storia
Un pò di geometria
La legge di gravitazione di Newton

Introduzione

La ricerca di pianeti extra-solari ed extra-galattici è a tutti gli effetti una scienza “giovane” e in continua evoluzione.

Un paio di motivazioni per tale ricerca degne di nota:

- approfondire l'attuale comprensione circa la formazione dei singoli pianeti;
- testare vecchi e nuovi modelli sull'origine, l'evoluzione e la struttura dei sistemi planetari;
- ricercare eventuali forme di vita extra-terrestre (**??? ALIENI ???**).

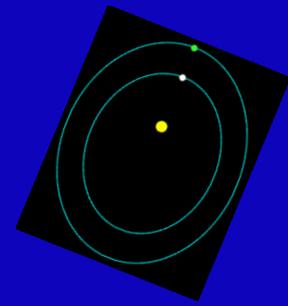
Le difficoltà di rivelazione sono dovute al fatto che gli esopianeti:

- non brillano di luce propria ma riflettono quella della stella genitrice;
- si trovano ad elevate distanze dall'osservatore e molto prossimi alla stella.



Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

Un pò di storia
Un pò di geometria
La legge di gravitazione di Newton



Introduzione: le leggi di Keplero (arghhh !!!)

- **I Legge di Keplero**

La traiettoria percorsa da un pianeta attorno al Sole è un'ellisse giacente in un piano con il Sole in uno dei due fuochi.

- **II Legge di Keplero**

Il moto di un pianeta sulla sua orbita non è uniforme. Il moto è tale che il raggio vettore che unisce il pianeta al Sole spazza aree uguali in tempi uguali.

- **III Legge di Keplero**

Il quadrato del periodo impiegato da un pianeta a completare la sua orbita è proporzionale al cubo del semiasse maggiore dell'orbita stessa.

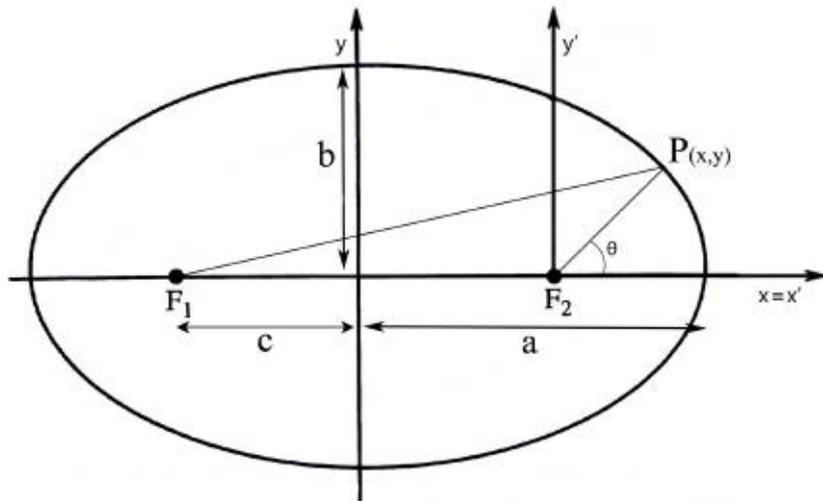
Un pò di geometria...

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

$F_1 = (-c, 0)$, $F_2 = (c, 0)$ e $P = (x, y)$ (con $c^2 = a^2 - b^2$ ed $a > b$)

$$\overline{PF_1} + \overline{PF_2} = 2a.$$

$$\begin{aligned}\overline{PF_1}^2 &= (x + c)^2 + y^2 = x^2 + 2xc + c^2 + y^2 = \\ &= \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right)x^2 + 2xc + a^2,\end{aligned}$$



$$e = c/a$$

$$\overline{PF_1} = (a + ex).$$

$$\overline{PF_2} = (a - ex).$$

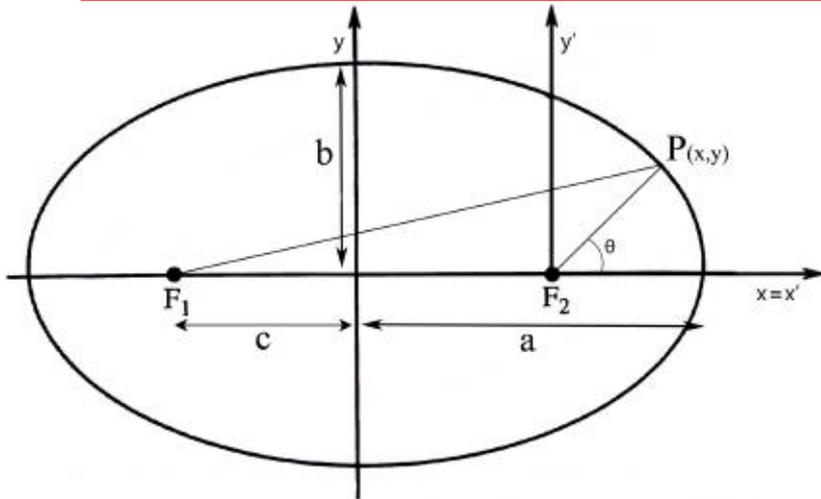
Usando le coordinate polari...

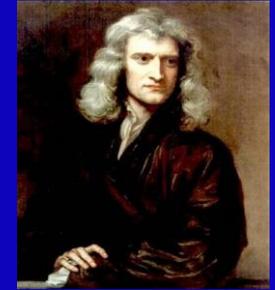
$$\begin{cases} x' = ea + r \cos \theta, \\ y' = r \sin \theta, \end{cases}$$



$$r(\theta) = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \theta}.$$

Osserviamo inoltre che, per $\theta = 0$, la minima distanza dal polo è $r_{min} = a(1 - e)$, e per $\theta = \pi$, la massima distanza dal polo $r_{max} = a(1 + e)$. Nel caso di un oggetto celeste, quale un pianeta in orbita attorno ad una stella, r_{min} ed r_{max} sono detti rispettivamente raggio di *periastro* e raggio di *afastro*.





Sommaro

Introduzione

Metodi di rivelazione

Dati sperimentali

Missioni in atto e prospettive future

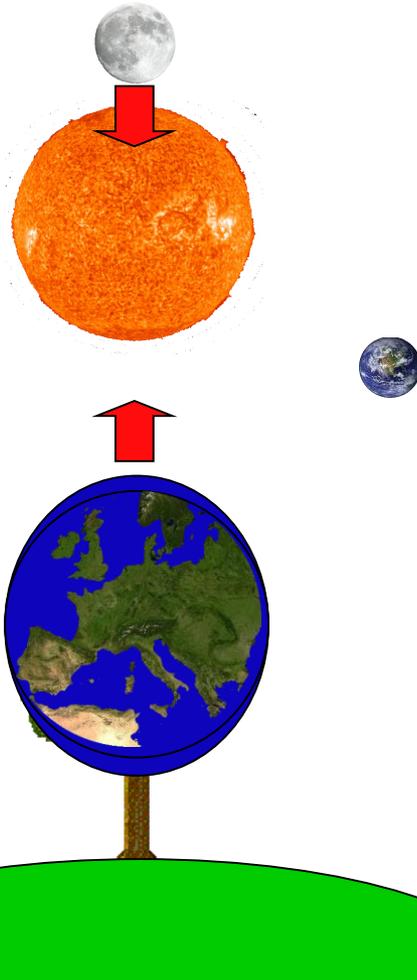
Bibliografia e links

Un pò di storia

Un pò di geometria

La legge di gravitazione di Newton

Introduzione: la legge di Newton (doppio arghhh !!!)



La gravità è una forza di attrazione che esiste fra due masse, corpi o particelle, dovunque esse siano nell'Universo.

In formule:

$$F = Gm_1m_2 / r^2,$$

dove G è chiamata Costante Gravitazionale.

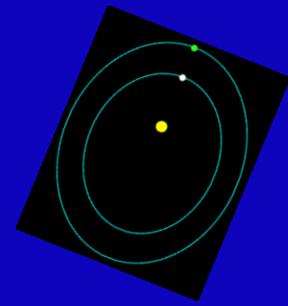
L'effetto della gravità si estende da ogni corpo in tutte le direzioni dello spazio, e fino a distanza infinita.

Tuttavia, la sua intensità si riduce molto velocemente all'aumentare della distanza tanto che (ad esempio) non ci rendiamo conto dell'attrazione che la Luna esercita su di noi.



Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

Un pò di storia
Un pò di geometria
La legge di gravitazione di Newton



Introduzione: la legge di Newton (doppio arghhh !!!)

Le leggi di Keplero possono essere spiegate naturalmente nell'ambito della meccanica newtoniana in termini di una forza centrale proporzionale al prodotto delle masse interagenti (ad esempio il Sole ed un pianeta) ed inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza, cioè

$$\mathbf{F}_G = -\frac{GMm}{r^3}\mathbf{r}, \quad (1.9)$$

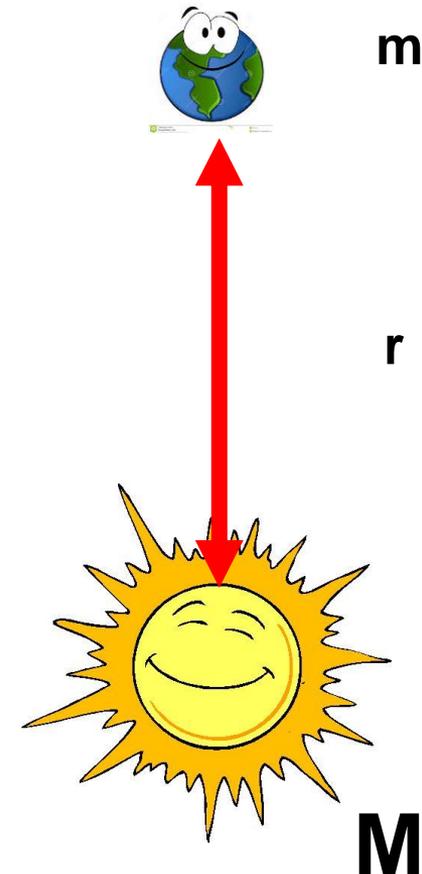
dove $G = 6.672 \times 10^{-8} \text{ dyn cm}^2\text{g}^{-2}$ è la costante di gravitazione universale. Il vettore forza gravitazionale \mathbf{F}_G non presenta alcuna componente azimutale ma solo radiale e di conseguenza il momento torcente \mathbf{N} sarà sempre nullo. Segue dunque la conservazione del momento angolare L poichè

$$\mathbf{N} = \frac{d\mathbf{L}}{dt} = 0. \quad (1.10)$$

Il moto è quindi confinato su di un piano e, dalla seconda legge della dinamica, si può ottenere l'equazione del moto di una particella di massa m nel potenziale gravitazionale generato da una particella di massa M (con $M \gg m$) cioè

$$-\frac{GMm}{r^3}\mathbf{r} = m\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}. \quad (1.11)$$

Che risolta (ma la faccenda è complicata) vi permette di calcolare l'orbita percorsa dal "pianeta", ovvero...

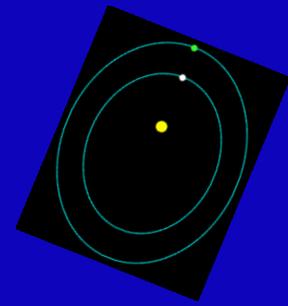




Sommario

- Introduzione
- Metodi di rivelazione
- Dati sperimentali
- Missioni in atto e prospettive future
- Bibliografia e links

Un pò di storia
 Un pò di geometria
 La legge di gravitazione di Newton



Introduzione: la legge di Newton (doppio arghhh !!!)

$$r(\theta) = \frac{L^2}{GMm^2} \frac{1}{1 + e \cos \theta}$$

dove

$$L = \sqrt{\frac{GM}{a}} mb,$$

che rappresenta il momento angolare della massa m in un'orbita ellittica di semiassi a e b attorno alla massa M per $M \gg m$.

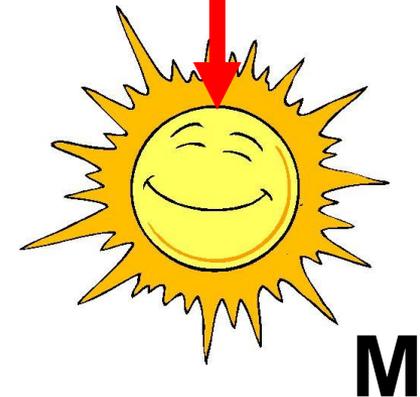
RICONOSCETE L'EQUAZIONE?

Esercizio: Troviamo il periodo Kepleriano usando la legge di Newton. Assumiamo l'orbita circolare e di raggio r !

Chi mi spiega cos'è la forza centripeta? E la velocità angolare? Bhè adesso è facile...!



$$GM P^2 = 4\pi^2 a^3.$$



I sistemi binari costituiscono una grande risorsa dell'astrofisica in quanto è solo grazie ad essi che è possibile stimare la massa delle stelle.

I sistemi binari si dividono in sistemi *visuali*, in cui è possibile distinguere le componenti come separate, e sistemi *spettroscopici* per i quali i corpi non possono essere distinti l'uno dall'altro.

Nei sistemi binari visuali il periodo di rivoluzione e la separazione orbitale possono essere misurati direttamente, permettendo quindi di stimare la massa totale del sistema attraverso la terza legge di Keplero¹ cioè

$$G(m_1 + m_2)P^2 = 4\pi^2 a_s^3, \quad (1.73)$$

dove a_s è il semiasse maggiore dell'ellisse relativa spazzata dal vettore di posizione tra i corpi (Bradt, 2010). In Figura, s rappresenta il vettore di posizione relativo

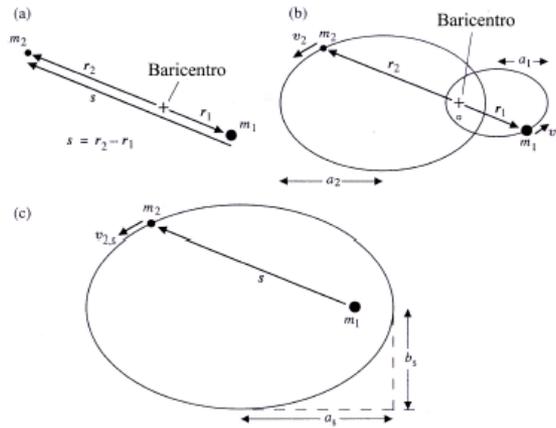


Figura 1.6: Vettori di posizione delle componenti di un sistema binario rispetto al centro di massa e rispetto ad uno dei due oggetti.

della massa m_2 rispetto alla massa m_1 , ciascuna delle quali in moto intorno al comune centro di massa su ellissi di semiasse maggiori a_2 e a_1 . In particolare, per la massa m_1 si ha

$$a_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} a_s. \quad (1.74)$$

Il periodo kepleriano della massa m_1 attorno al centro di massa è quindi ottenuto dalla definizione stessa di baricentro ($m_1 r_1 = -m_2 r_2$) e da $s = r_1 - r_2$. Sostituendo la (1.74) nella (1.73) (Bradt, 2010)

$$GP^2 \frac{m_2^3}{(m_1 + m_2)^2} = 4\pi^2 a_1^3. \quad (1.75)$$



m



r



M



Cos'è il centro di massa?

Quello che si osserva in realtà non è il semiasse maggiore a_1 ma la sua proiezione sulla sfera celeste, in quanto il sistema binario risulta avere un'inclinazione di un angolo i rispetto al piano di vista (Figura 1.7). Per questo motivo moltiplichiamo ambo i membri per $\sin^3 i$, ottenendo così al secondo membro esattamente la proiezione sulla sfera celeste di a_1

$$\frac{m_2^3 \sin^3 i}{(m_1 + m_2)^2} = \frac{4\pi^2}{GP^2} (a_1 \sin i)^3. \quad (1.76)$$

Funzione di massa f_1 . Il gioco è quasi fatto!

$$f_1 = \frac{m_2^3 \sin^3 i}{(m_1 + m_2)^2} = \frac{v_{x_1}^3 P}{2\pi G}, \quad \leftarrow v_x = \frac{2\pi a}{P} \sin i, \quad (1.80)$$

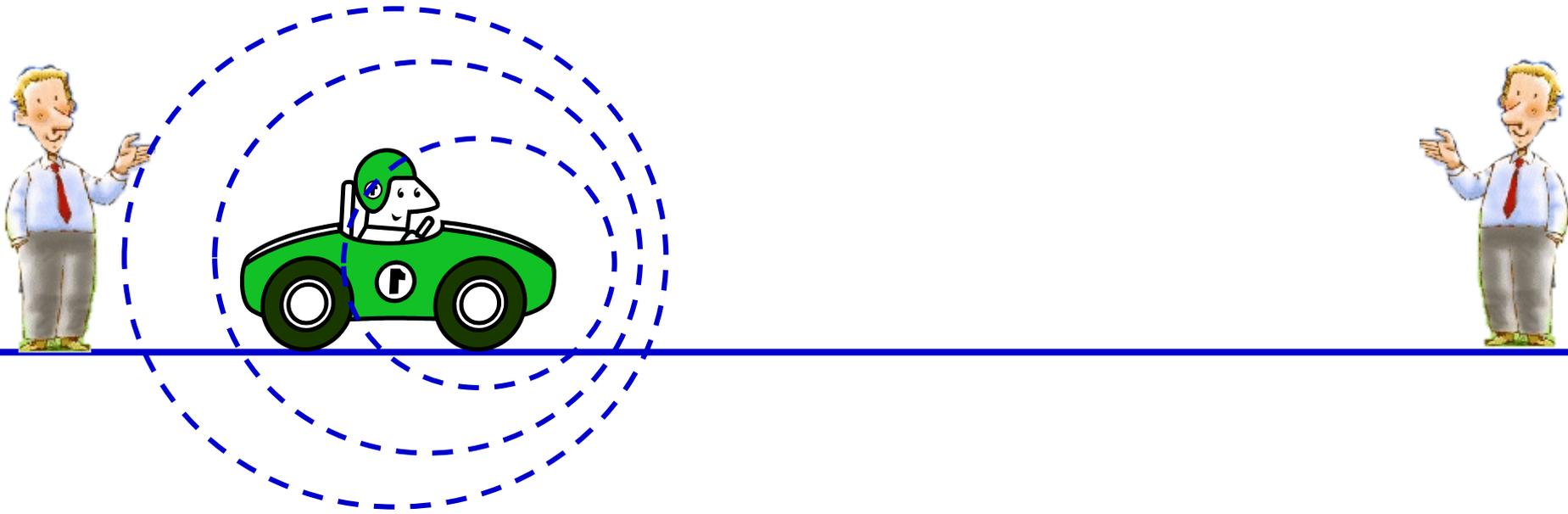
dove le grandezze misurabili sono v_{x_1} e P , le quali permettono di stimare la funzione di massa f_1 . Analogamente per la funzione di massa f_2 si ha

$$f_2 = \frac{m_1^3 \sin^3 i}{(m_1 + m_2)^2} = \frac{v_{x_2}^3 P}{2\pi G}. \quad (1.81)$$

Una volta noti i valori delle funzioni di massa f_1 ed f_2 si può ottenere il rapporto tra le due masse interagenti

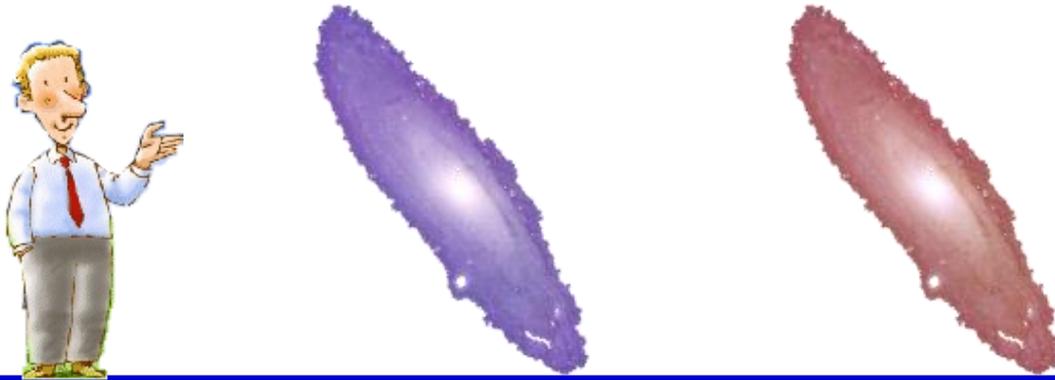
$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{m_1^3}{m_2^3}. \quad (1.82)$$

P si misura facilmente: basta osservare qualcosa che si ripete “periodicamente”!
Ma v ? Fortunatamente c'è l'effetto Doppler!

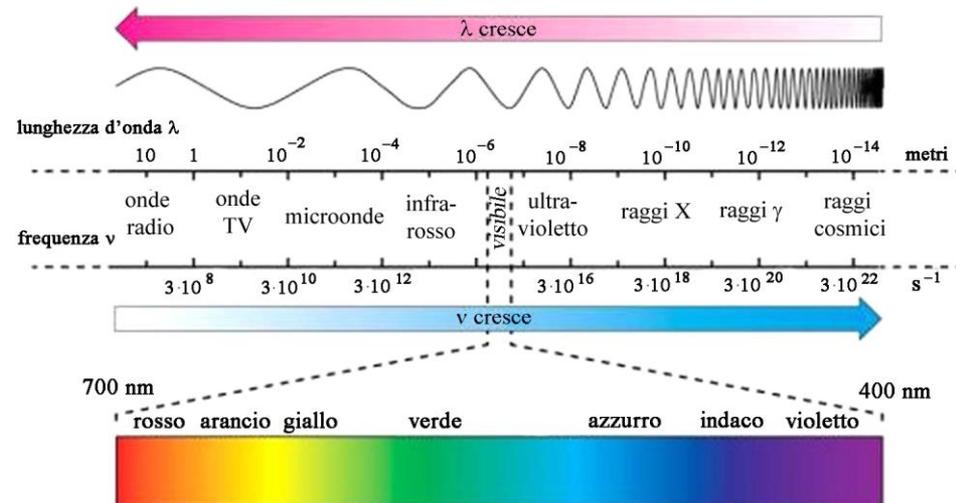
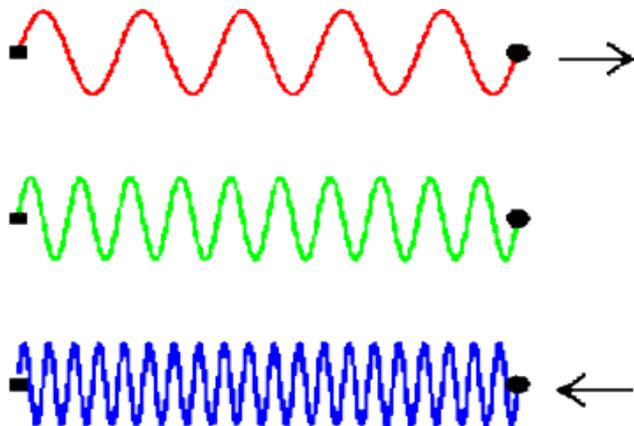


L'effetto Doppler è quel fenomeno per cui sentiamo un suono più acuto quando la sorgente si avvicina e più grave quando si allontana!

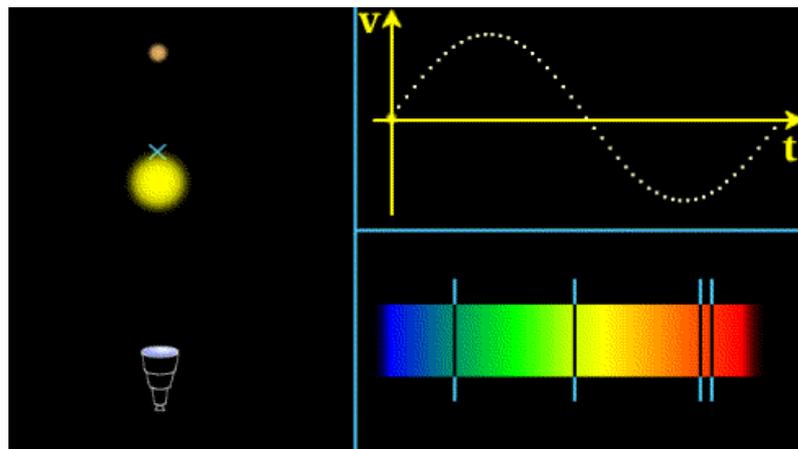
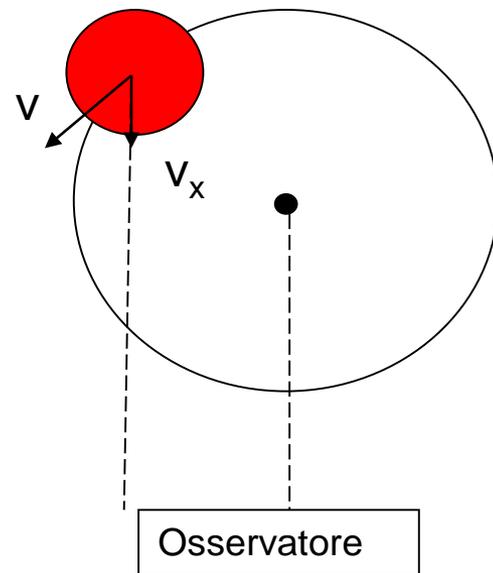
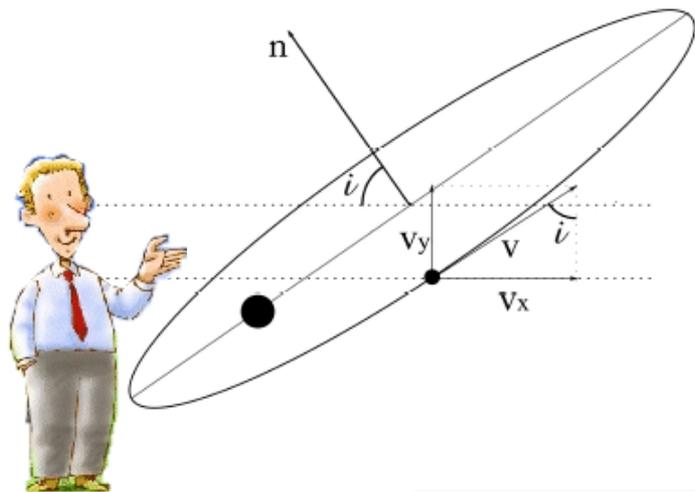
Effetto Doppler: Velocità di un oggetto (quale una galassia)!



Analogamente...una sorgente apparirà più rossa se in allontanamento e più blu se in avvicinamento ad un osservatore!



Quello che si osserva e che si misura in pratica! (Ascoltate le relazioni dei vostri colleghi: carpitene i segreti!)



$$v_x = \frac{2\pi a}{P} \sin i,$$

$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} c.$$



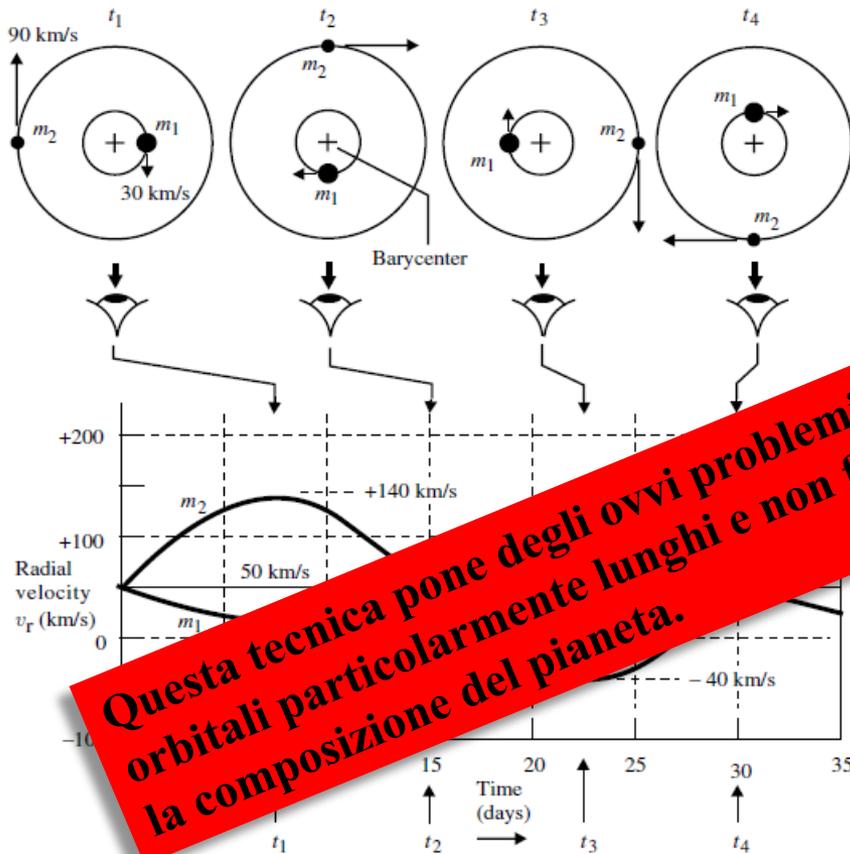
Sommario

- Introduzione
- Metodi di rivelazione
- Dati sperimentali
- Missioni in atto e prospettive future
- Bibliografia e links

Velocità radiali

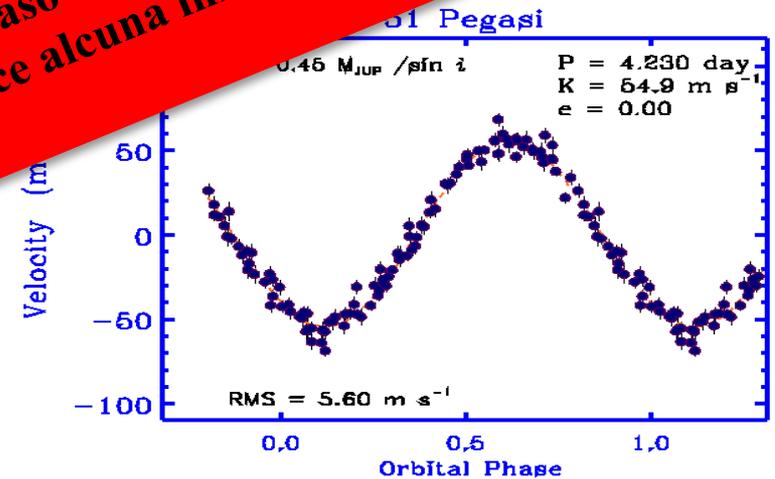
- Astrometria
- Transiti planetari
- Rivelazione decametrica
- Lensing gravitazionale
- Immagini dirette

Velocità radiali



Se l'asse di rotazione del sistema coincide con la linea di spostamento, l'assorbimento della stella è massimo.

Questa tecnica pone degli ovvi problemi nel caso di pianeti poco massivi con periodi orbitali particolarmente lunghi e non fornisce alcuna informazione circa le dimensioni e la composizione del pianeta.



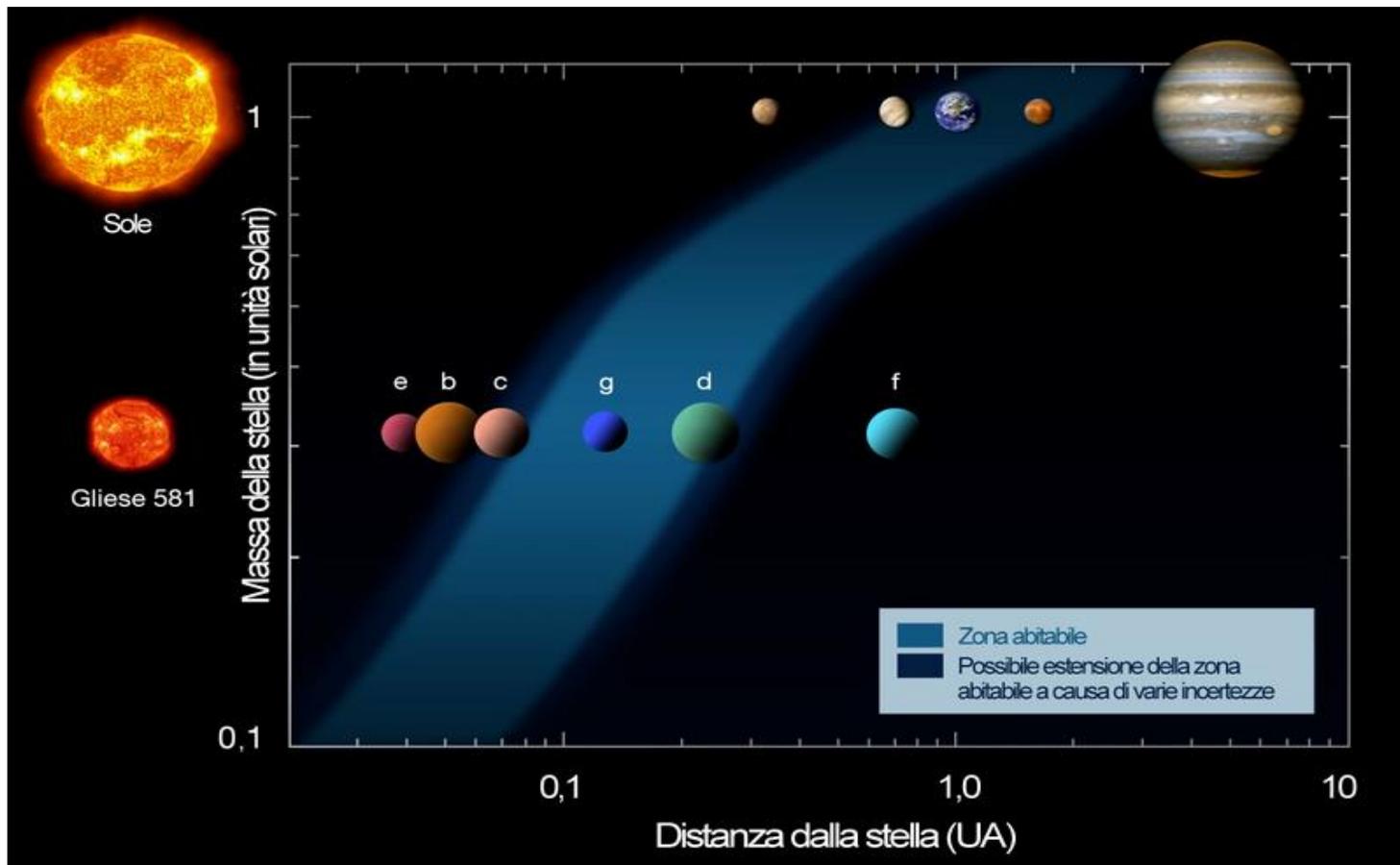
$$V = \frac{m \sin \theta}{m+M} \sqrt{G \frac{m+M}{a}} \simeq \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{m \sin \theta}{M^{2/3}}$$



Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

Velocità radiali
Astrometria
Transiti planetari
Rivelazione decametrica
Lensing gravitazionale
Immagini dirette

Velocità radiali



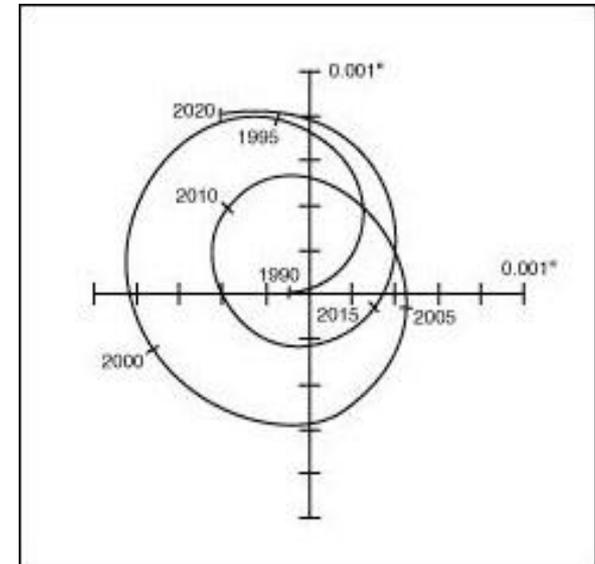


- Sommario
- Introduzione
- Metodi di rivelazione
- Dati sperimentali
- Missioni in atto e prospettive future
- Bibliografia e links

- Velocità radiali
- Astrometria
- Transiti planetari
- Rivelazione decametrica
- Lensing gravitazionale
- Immagini dirette

Astrometria

Sempre a causa dell'interazione esopianeta-stella, quest'ultima può variare la sua posizione rispetto alle stelle più lontane, che perciò risultano “fisse”. Dalla misura della variazione periodica della posizione relativa degli astri si possono ottenere delle utili informazioni sul pianeta che orbita attorno alla sua stella genitrice. Naturalmente lo spostamento della posizione della stella è tanto maggiore quanto maggiore è il rapporto delle masse e la distanza dell'esopianeta dalla stella, secondo la relazione a lato. Nel caso del sistema Sole/Giove, visto da una distanza di 5 pc, $d=1$ mas (10 volte inferiore della massima risoluzione di HST).



$$d_{Stella-CM} = \frac{m}{M + m} a$$

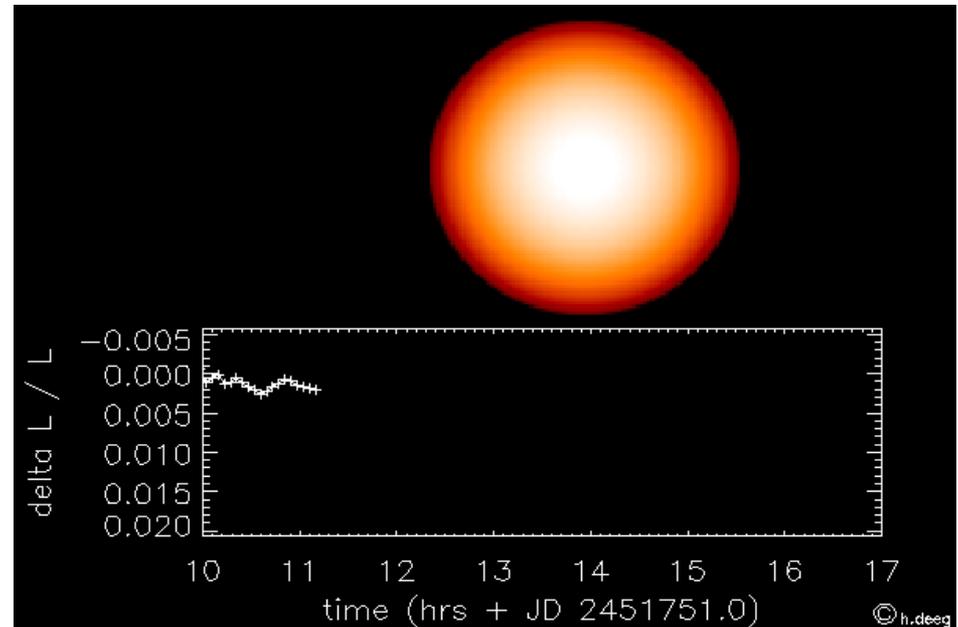


- Sommario
- Introduzione
- Metodi di rivelazione
- Dati sperimentali
- Missioni in atto e prospettive future
- Bibliografia e links

- Velocità radiali
- Astrometria
- Transiti planetari
- Rivelazione decametrica
- Lensing gravitazionale
- Immagini dirette

Transiti planetari

Il passaggio del pianeta davanti alla stella compagna produce una discreta diminuzione periodica della luminosità di quest'ultima. Dallo studio di tale effetto si può risalire al raggio del pianeta, quindi alle sue dimensioni. Tuttavia la forma precisa della curva di luce oltre che dal suddetto raggio dipende anche da parametri stellari (massa e raggio) e dall'inclinazione tra la linea di vista ed il piano orbitale del sistema considerato.

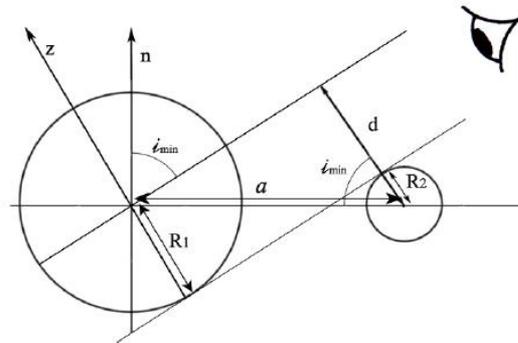




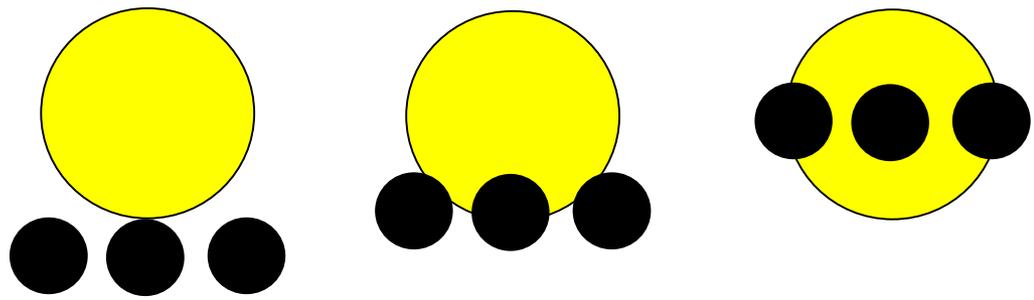
- Sommario
- Introduzione
- Metodi di rivelazione
- Dati sperimentali
- Missioni in atto e prospettive future
- Bibliografia e links

- Velocità radiali
- Timing
- Astrometria
- Transiti planetari
- Rivelazione decametrica
- Lensing gravitazionale
- Immagini dirette

Transiti planetari: cioè eclissi su Soli lontani!



$$\begin{cases} d = R_1 + R_2, \\ d = a \cos i_{\min}, \end{cases}$$



$$R_1 + R_2 = a \cos i_{\min} \implies i_{\min} = \cos^{-1} \left(\frac{R_1 + R_2}{a} \right),$$

Angoli prossimi a 90 gradi!

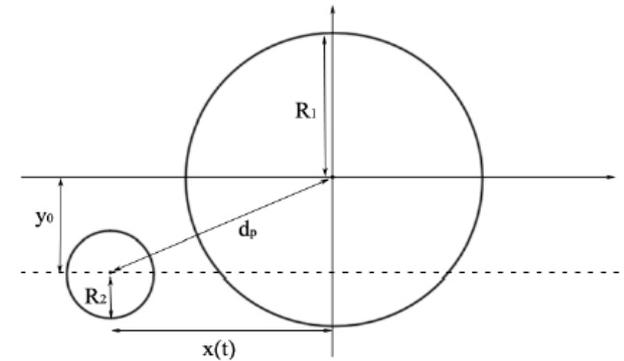


- Sommario
- Introduzione
- Metodi di rivelazione
- Dati sperimentali
- Missioni in atto e prospettive future
- Bibliografia e links

- Velocità radiali
- Astrometria
- Transiti planetari
- Rivelazione decametrica
- Lensing gravitazionale
- Immagini dirette

Transiti planetari: simuliamone uno!

Esercizio per i volenterosi. Basta un pò di trigonometria



Come illustrato in Figura 3.1, il sistema considerato per lo studio di un transito planetario è caratterizzato da un'angolo d'inclinazione $i \geq i_{\min}$ (eq.(2.2)) ed un valore del parametro d'impatto $y_0 = a \cos i$ dove a è il semiasse maggiore dell'orbita del pianeta. In un sistema di riferimento centrato nella stella, l'ascissa $x(t)$ del pianeta (che si muove con velocità v_p) è

$$x(t) = v_p t = 2\pi a \varphi, \quad (3.1)$$

dove con $\varphi = t/P$ ($0 < t < P$) è stata definita la fase del moto di rivoluzione del pianeta.

Segue quindi che la distanza tra il centro della stella e quello del pianeta durante il suo moto orbitale è data da

$$d_p^2 = x(t)^2 + y_0^2. \quad (3.2)$$

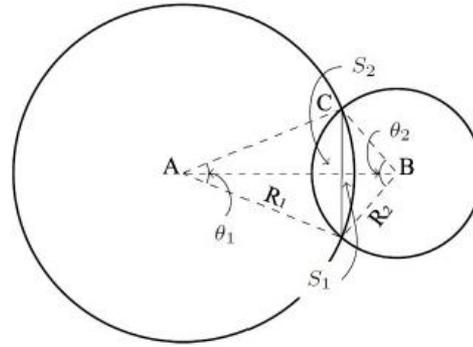


Figura 3.2: Superficie occultata al variare di θ_1 e θ_2 durante un transito.

Per poter descrivere il flusso elettromagnetico osservabile al variare del tempo, si sono ricavati i valori degli angoli θ_1 e θ_2 con l'uso del teorema del coseno applicato al triangolo ABC (si veda la Figura 3.2) ed ottenendo

$$\theta_1 = 2 \arccos \frac{R_1^2 - R_2^2 + d_p^2}{2R_1 d_p}, \quad (3.3)$$

e

$$\theta_2 = 2 \arccos \frac{R_2^2 - R_1^2 + d_p^2}{2R_2 d_p}. \quad (3.4)$$

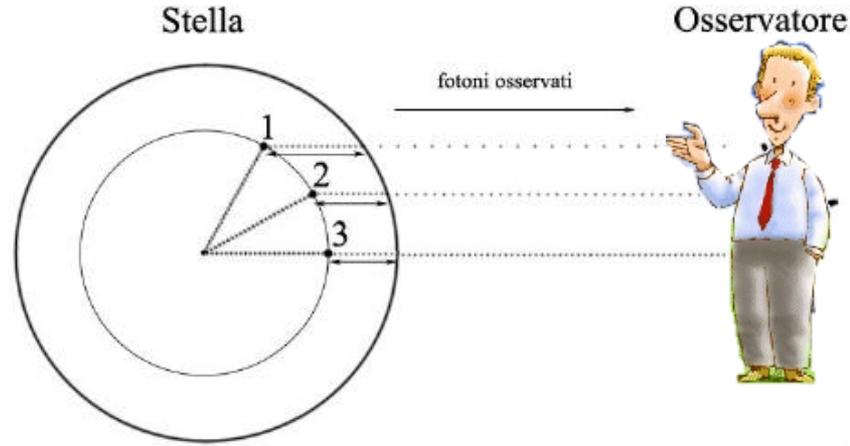
Il flusso della stella (normalizzato ad 1) è quindi

$$F = 1 - \frac{\delta A}{A_1}, \quad (3.5)$$

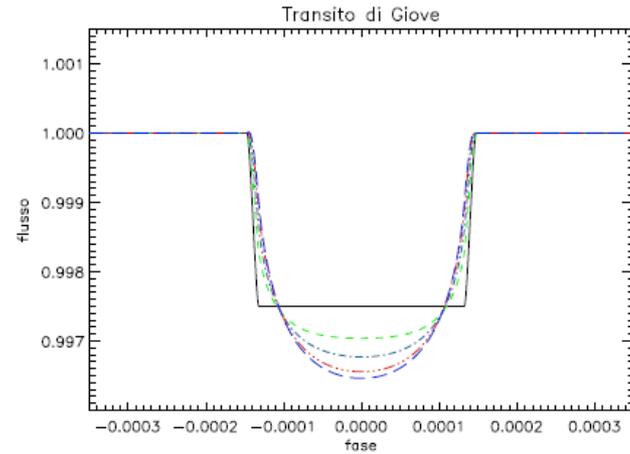
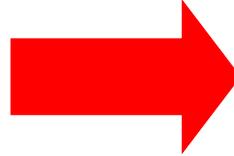
dove A_1 è l'area del disco della stella e δA è la superficie del disco stellare occultata dal pianeta data da

$$\delta A = \begin{cases} 0 & \text{se } d_p > R_1 + R_2, \\ \frac{R_1^2}{2}(\theta_1 - \sin \theta_1) + \frac{R_2^2}{2}(\theta_2 - \sin \theta_2) & \text{se } R_1 - R_2 \leq d_p \leq R_1 + R_2, \\ \pi R_2^2 & \text{se } d_p < R_1 - R_2, \end{cases} \quad (3.6)$$

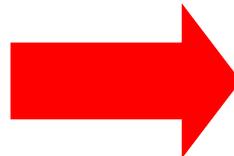
Limb Darkening



	Giove	Sole
Raggio	$0.05R_{\odot}$	$1.0R_{\odot}$
Massa	$0.001M_{\odot}$	$1.0M_{\odot}$
a	5.2UA	
i	89.99°	
Periodo	11.83 anni	



	WASP-10b	WASP-10
Raggio	$1.08R_J$	$0.71R_{\odot}$
Massa	$3.06M_J$	$0.783M_{\odot}$
a	0.0371UA	
i	86.8°	
Periodo	3.08 giorni	
γ_1	0.64	
γ_2	-0.23	





Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

Velocità radiali
Timing
Astrometria
Transiti planetari
Rivelazione decametrica
Lensing gravitazionale
Immagini dirette

Transiti planetari

Facendo uso dei parametri così ottenuti e nota la massa della stella (per altre vie) si può risalire alla densità del pianeta, discriminando quindi il carattere terrestre (roccioso) da quello gioviano (gassoso).

Tramite questa tecnica si può avere un'idea sulla composizione dell'atmosfera del pianeta dal momento che la luce proveniente dalla stella viene "filtrata" dall'atmosfera del pianeta e rilevata dagli spettroscopi a terra.

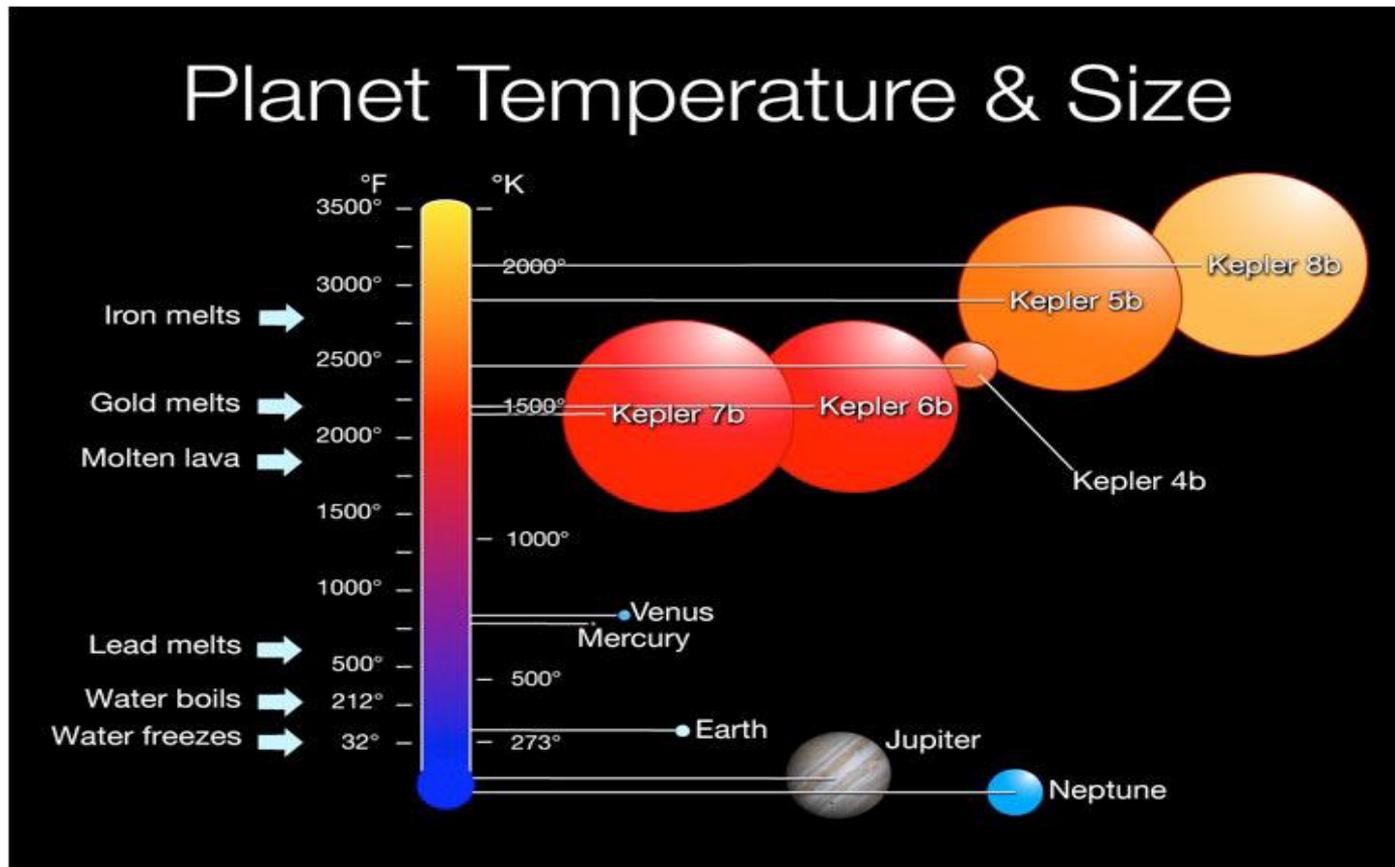
Perché si possa sfruttare questa tecnica d'osservazione occorre un certo allineamento stella-esopianeta-Terra.



Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

Velocità radiali
Timing
Astrometria
Transiti planetari
Rivelazione decametrica
Lensing gravitazionale
Immagini dirette

Transiti planetari





Sommario

Introduzione

Metodi di rivelazione

Dati sperimentali

Missioni in atto e prospettive future

Bibliografia e links

Velocità radiali

Timing

Astrometria

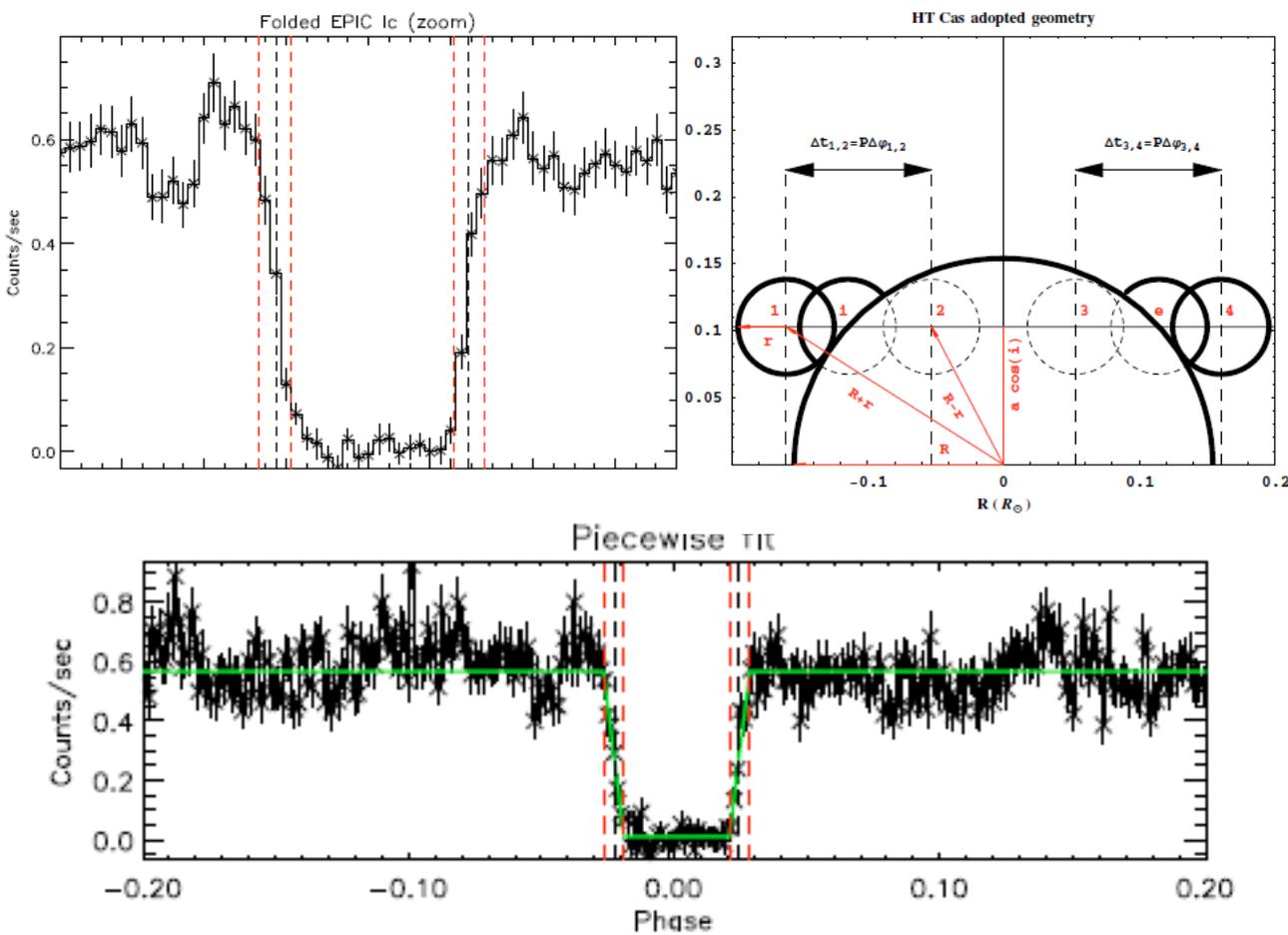
Transiti planetari

Rivelazione decametrica

Lensing gravitazionale

Immagini dirette

Transiti planetari: la nostra esperienza



Si stimeranno i “punti di contatto” e quindi le durate di ingresso, egresso ed eclisse. Excel.

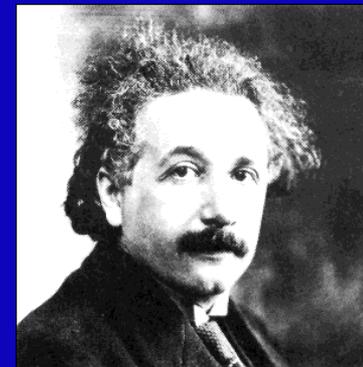
Semplicemente usando queste stime, potremo valutare la dimensione relativa della sorgente e dell’oggetto oscurante. Infatti:

$$r/\Delta t_{i,e} = R^*/\Delta t$$



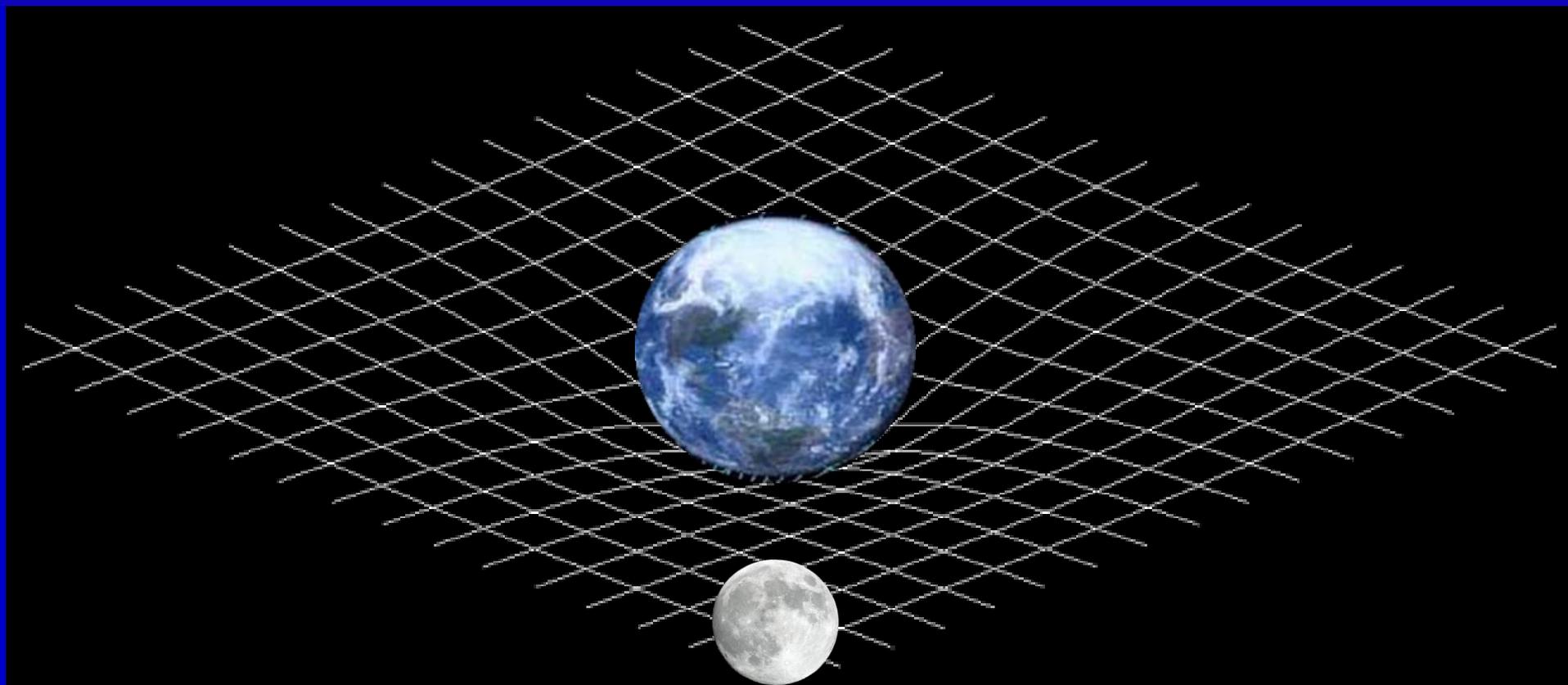
Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

Velocità radiali
Timing
Astrometria
Transiti planetari
Rivelazione decametrica
Lensing gravitazionale
Immagini dirette



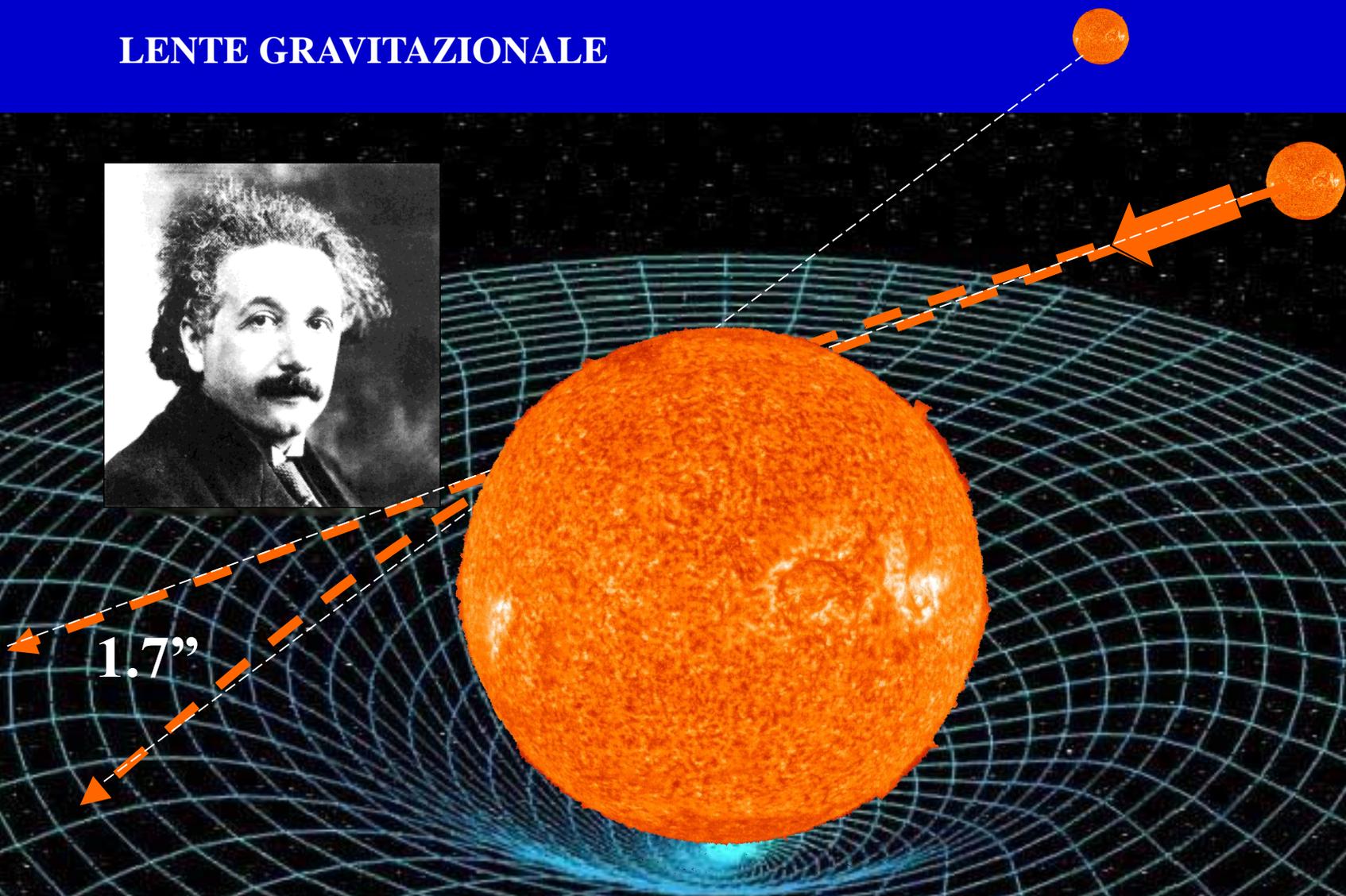
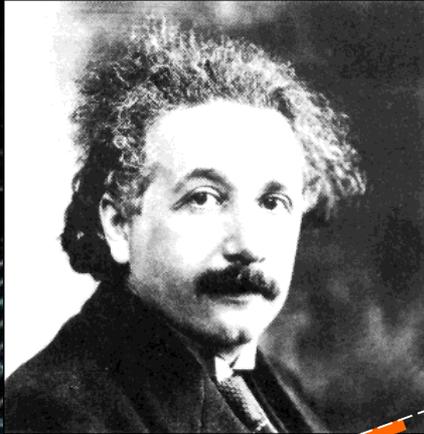
Albert Einstein

Lensing gravitazionale: Einstein (triplo arghhh!!!)



Il Campo Gravitazionale di un oggetto “deforma” lo spazio-tempo. E’ come se i corpi si muovessero su un lenzuolo incurvato seguendone gli affossamenti!

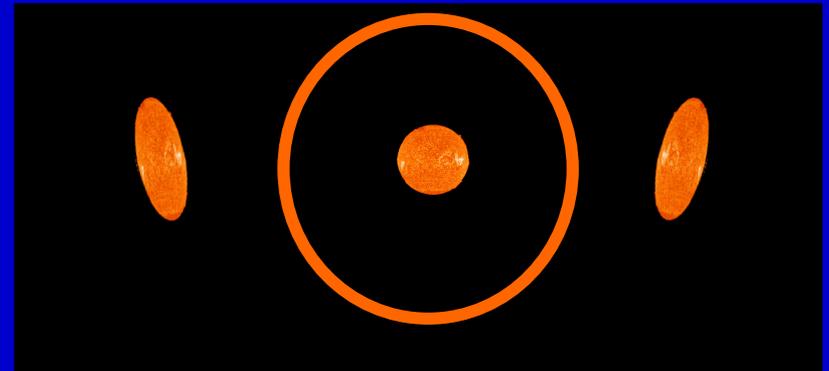
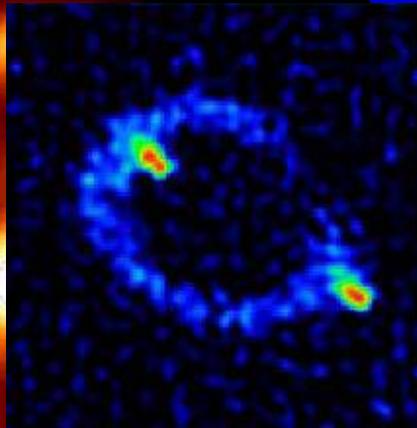
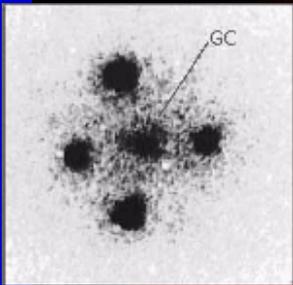
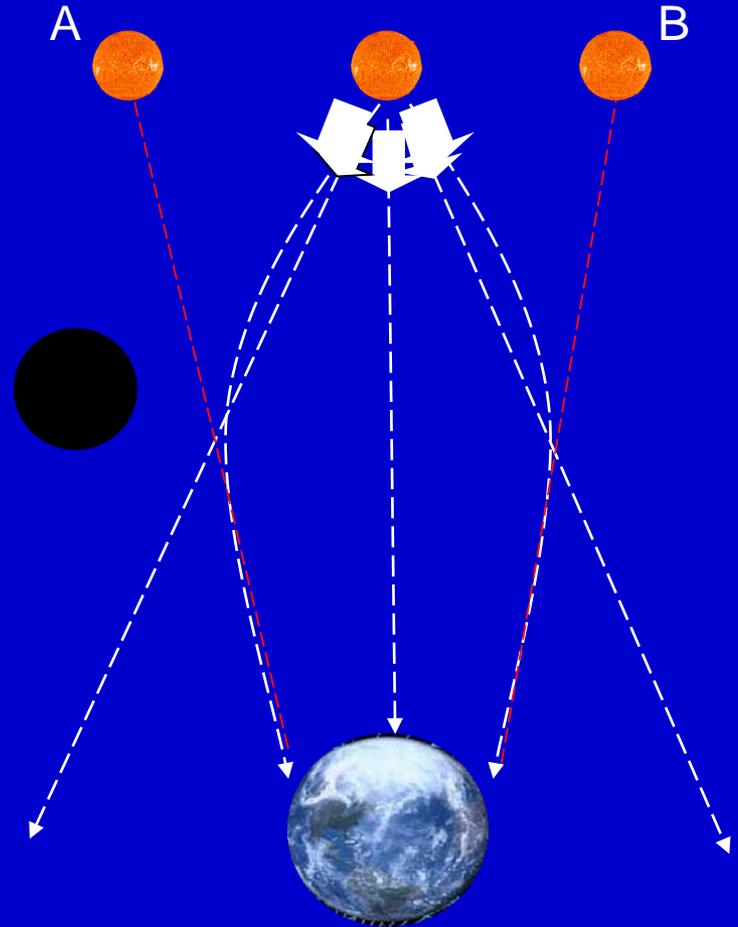
LENTE GRAVITAZIONALE



Anche la luce si comporta nello stesso modo e risente dell'attrazione della gravità!

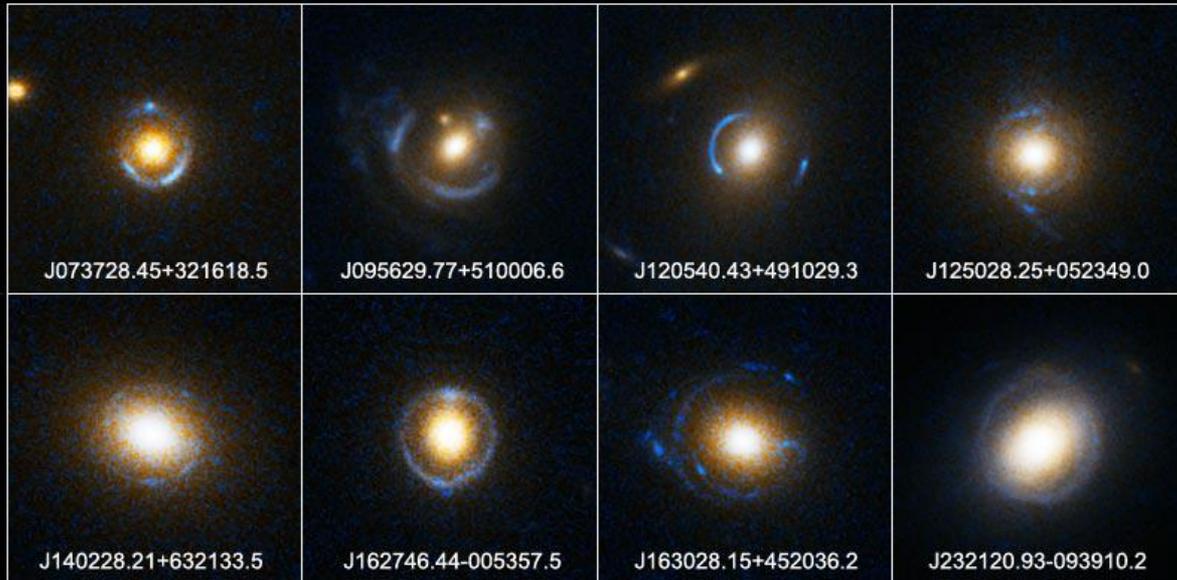
Prima prova della Teoria della Relatività (1919, Sir Artur Eddington)

LENTE GRAVITAZIONALE



Einstein Ring Gravitational Lenses

Hubble Space Telescope • ACS

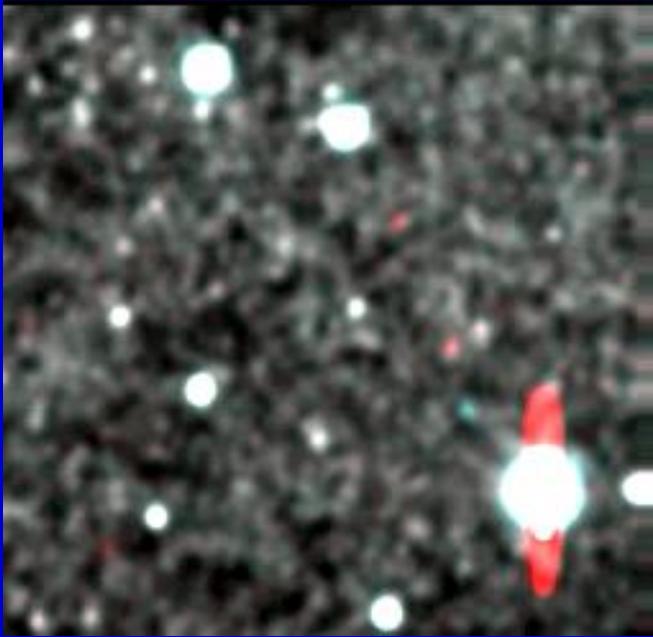


NASA, ESA, A. Bolton (Harvard-Smithsonian CfA), and the SLACS Team

STScI-PRC05-32

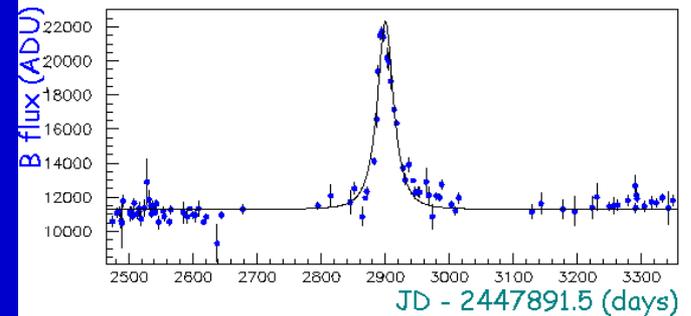
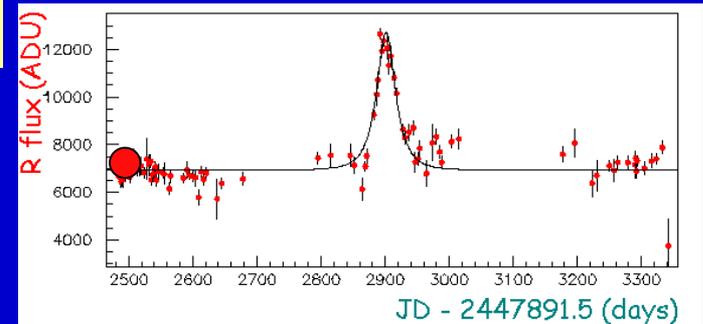
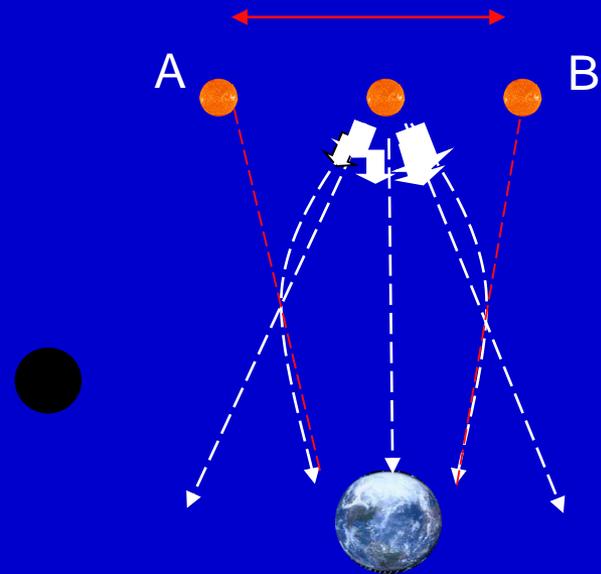


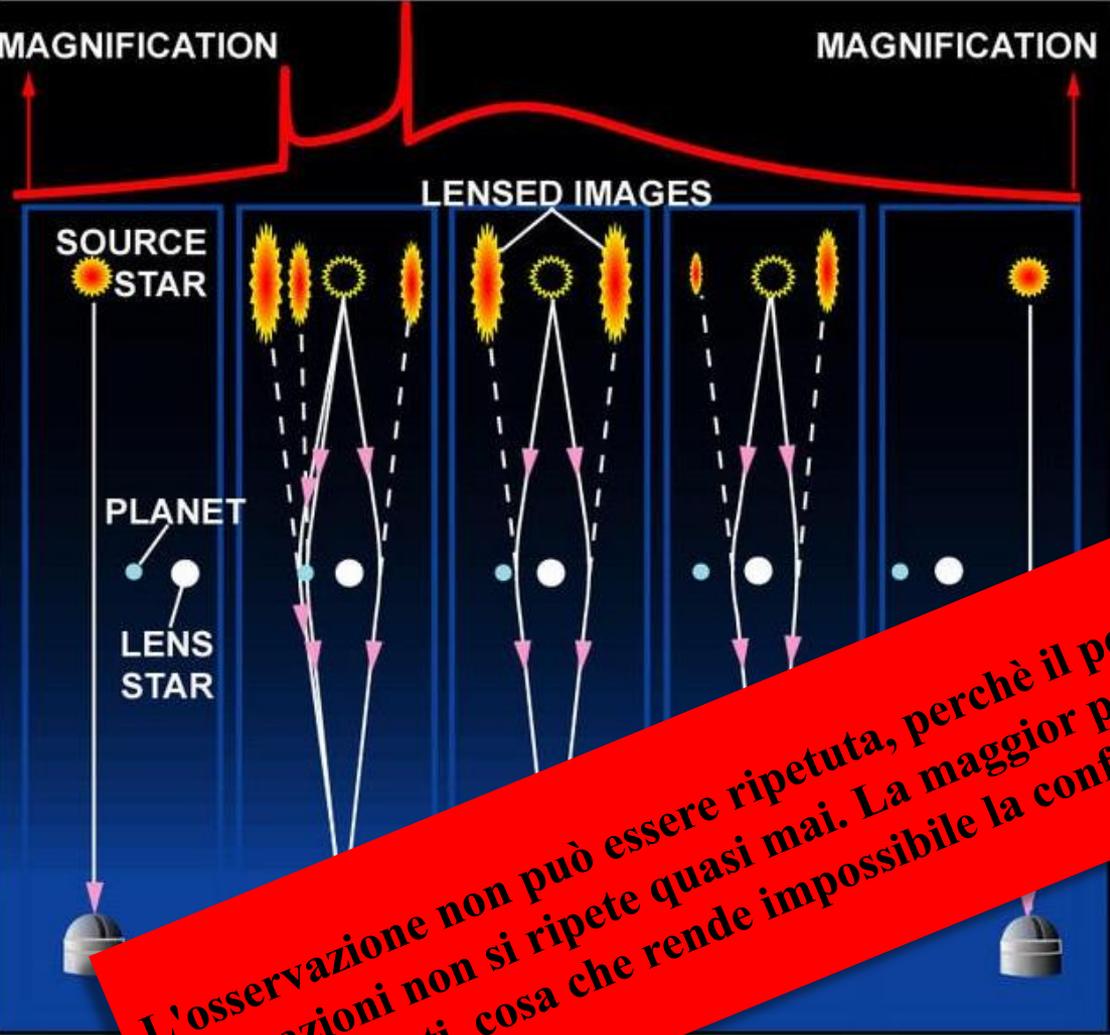
MICRO Lenti Gravitazionali, Esperimenti



EROS2 #5

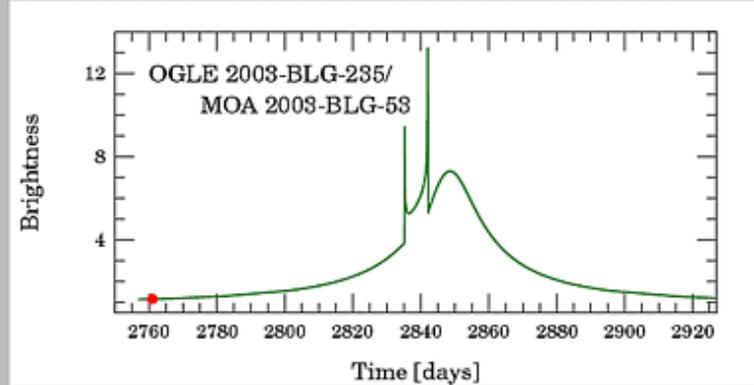
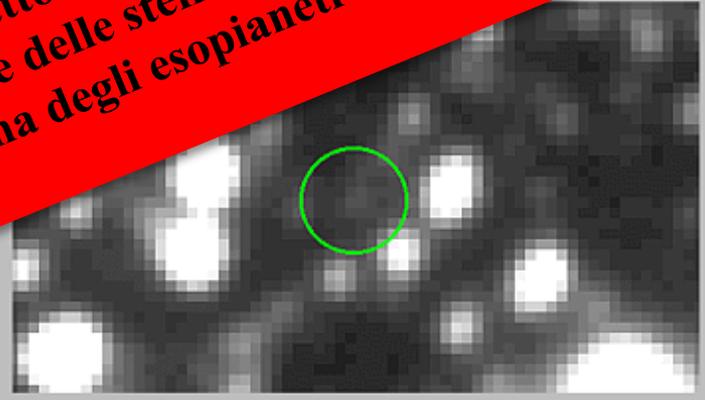
La probabilità che avvenga un evento è infatti solo di 1 su un milione per ogni stella ☹️. Oggi, si possono osservare contemporaneamente milioni di stelle 😊. Le campagne sono molto lunghe ☹️, tediose ☹️ e si lotta con il cattivo tempo ☹️ ☹️





2009, Scoperto il primo pianeta EXTRAGALATTICO!

L'osservazione non può essere ripetuta, perchè il perfetto allineamento necessario alle misurazioni non si ripete quasi mai. La maggior parte delle stelle osservate sono inoltre molto distanti, cosa che rende impossibile la conferma degli esopianeti con altri metodi.



- Sommario
- Introduzione
- Metodi di rivelazione
- Dati sperimentali
- Missioni in atto e prospettive future
- Bibliografia e links

- Velocità radiali
- Timing
- Astrometria
- Transiti planetari
- Rivelazione decametrica
- Lensing gravitazionale
- Immagini dirette

Immagini dirette

Oggi giorno lo sviluppo tecnologico ha reso possibile rivelare direttamente corpi celesti a grandi distanze per mezzo di potenti telescopi sia a terra che in orbita attorno al nostro pianeta.

Le tecniche usate sfruttano l'interferometria, i coronografi, i coronografi distruttiva e i coronografi. La luce della stella viene bloccata dalla corona orbitante.

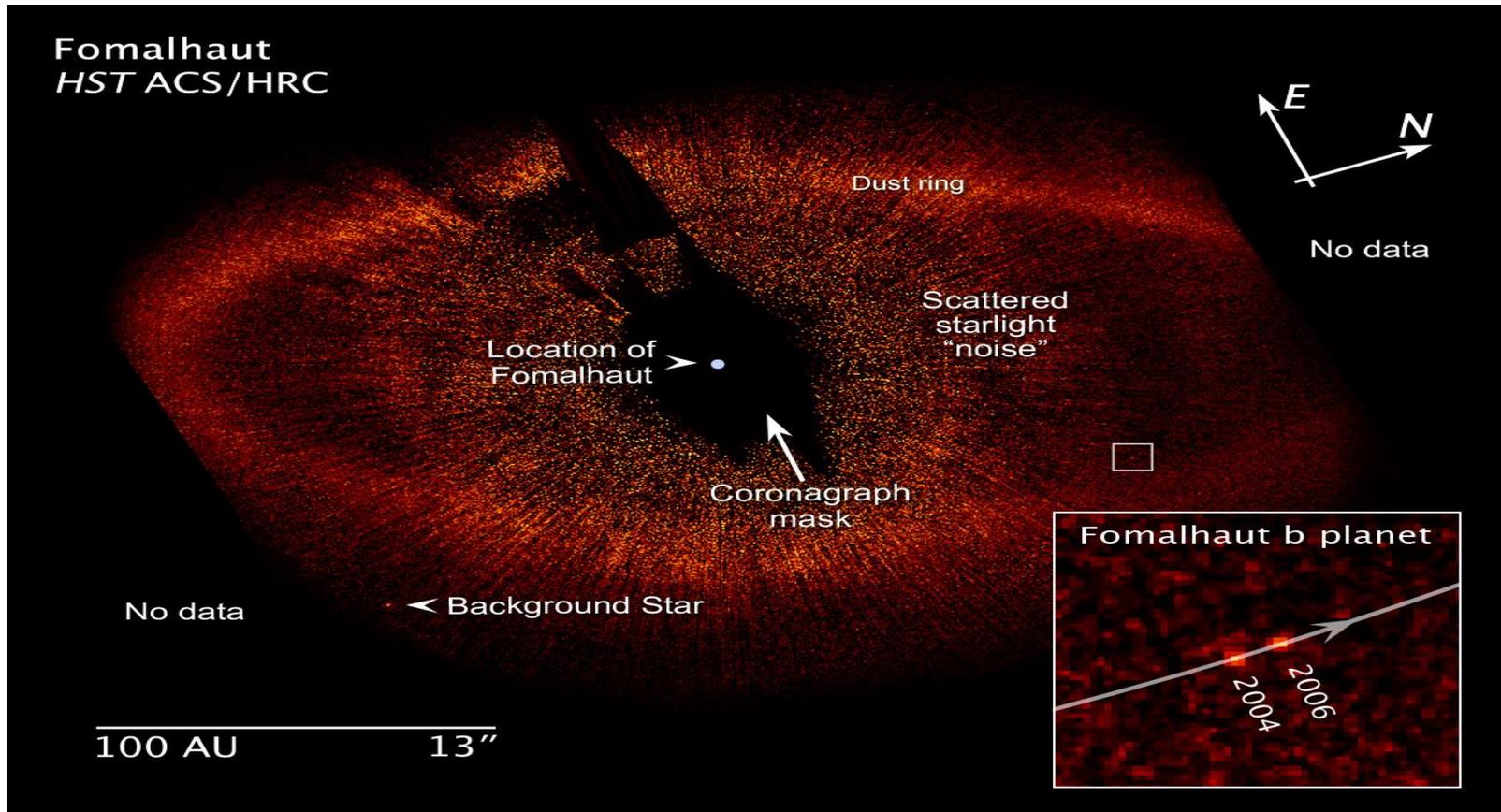


Da terra vi sono ovvi problemi di seeing causati dall'atmosfera terrestre, inoltre la luce della stella è miliardi di volte più intensa di quella proveniente dai pianeti.

- Sommario
- Introduzione
- Metodi di rivelazione
- Dati sperimentali
- Missioni in atto e prospettive future
- Bibliografia e links

- Velocità radiali
- Timing
- Astrometria
- Transiti planetari
- Rivelazione decametrica
- Lensing gravitazionale
- Immagini dirette

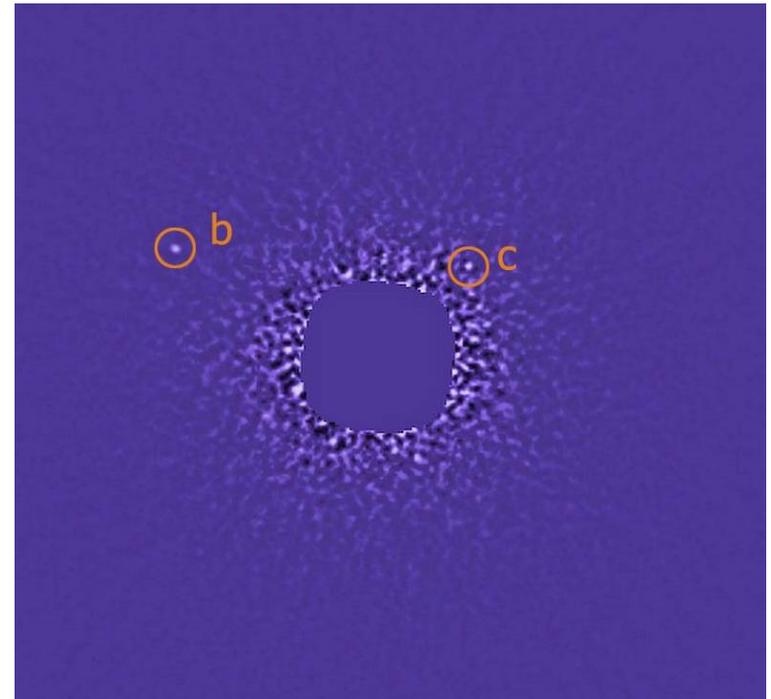
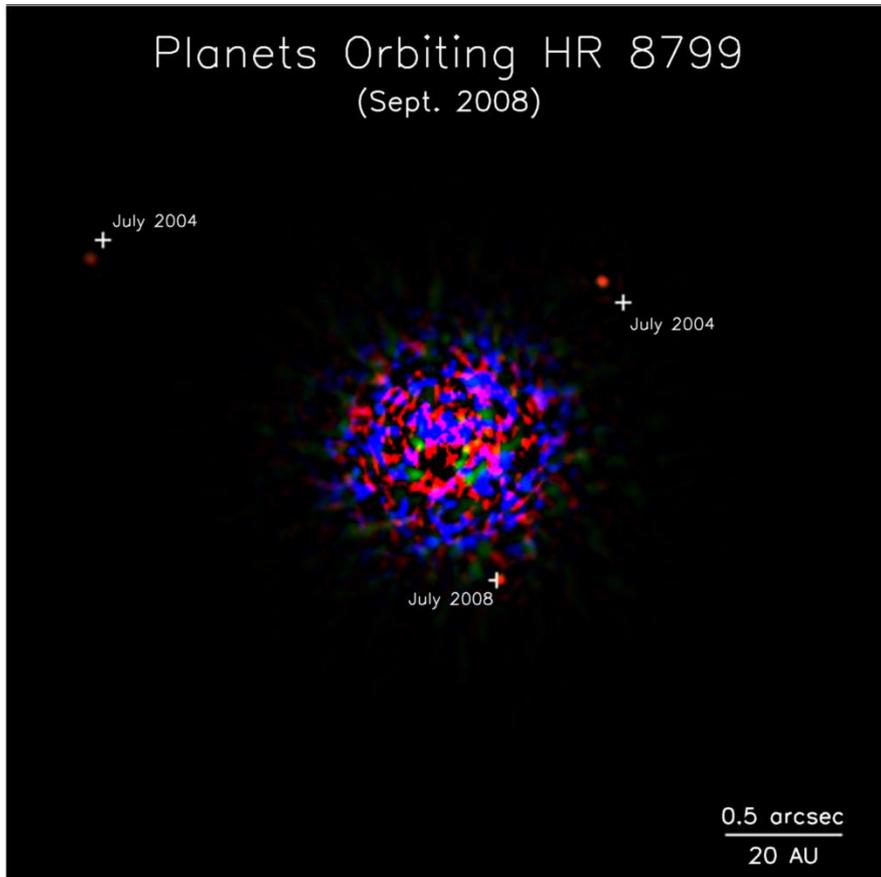
Immagini dirette



Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

Velocità radiali
Timing
Astrometria
Transiti planetari
Rivelazione decametrica
Lensing gravitazionale
Immagini dirette

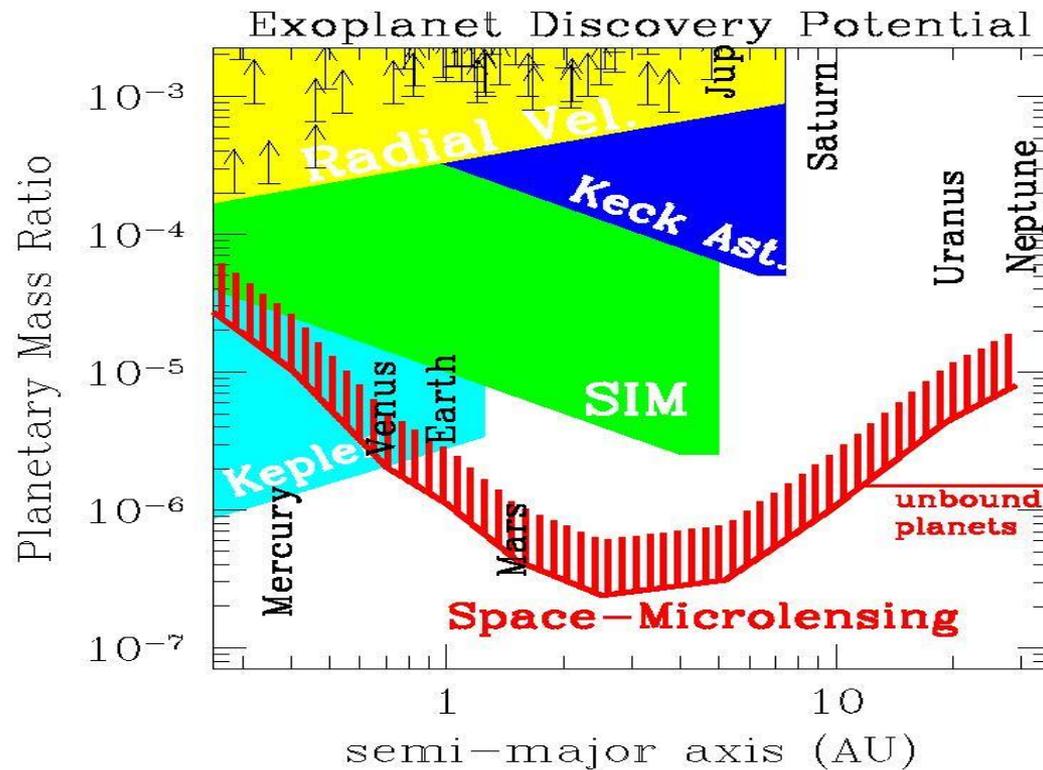
Immagini dirette



- Sommario
- Introduzione
- Metodi di rivelazione
- Dati sperimentali
- Missioni in atto e prospettive future
- Bibliografia e links

- Velocità radiali
- Timing
- Astrometria
- Transiti planetari
- Rivelazione decametrica
- Lensing gravitazionale
- Immagini dirette

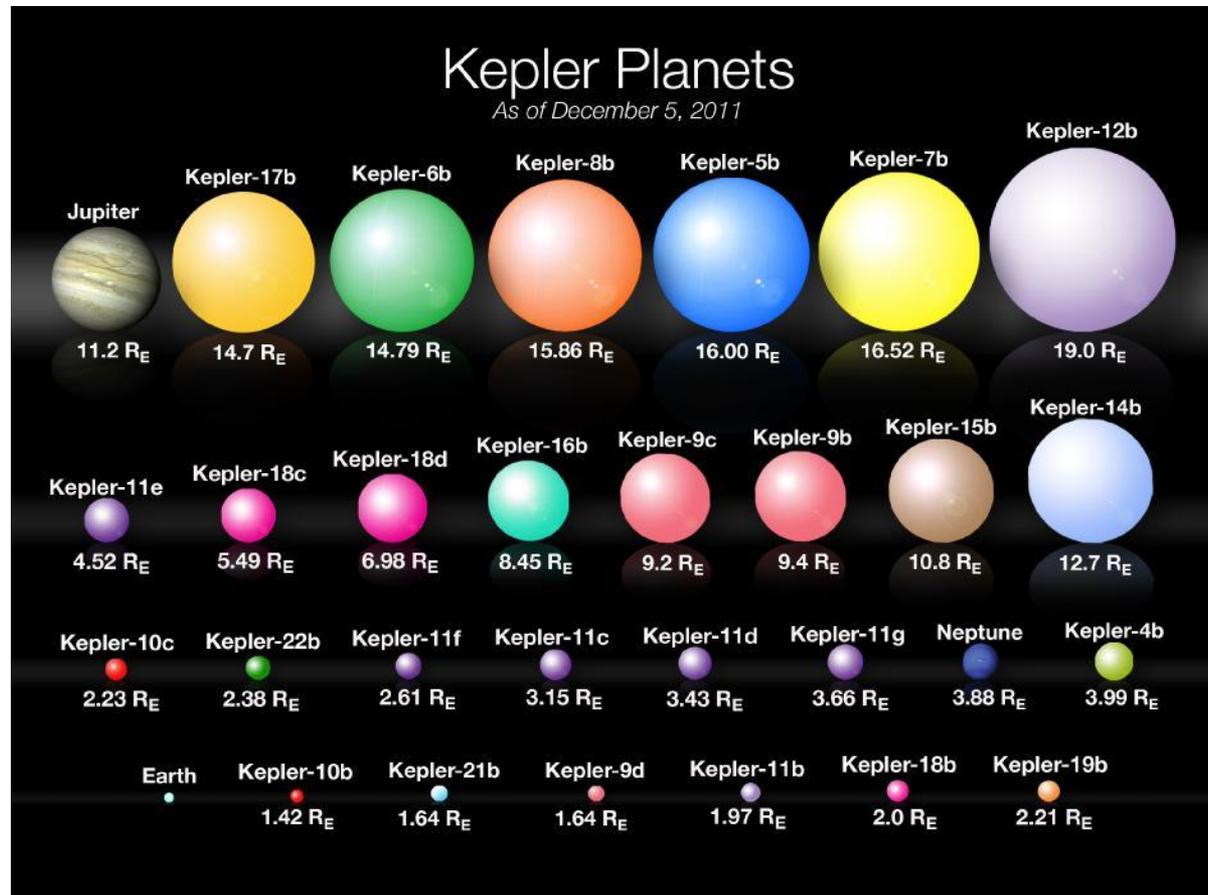
Ricapitolazione



Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

Velocità radiali
Astrometria
Transiti planetari
Rivelazione decametrica
Lensing gravitazionale
Immagini dirette

Ricapitolazione



Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

Candidati rivelati
Diagrammi di correlazione

Candidati rivelati

Il conteggio aggiornato dei pianeti extra-solari prevede:

Totale esopianeti 861
Stelle con pianeti 677
Giganti gassosi 343
Giovi Caldi 141
Pianeti vicino a Pulsar 4
Altri pianeti 80
Pianeti di tipo terrestre 0

Candidati rivelati

- ✓ **Velocità radiali e astrometria**
 - 390 Sistemi planetari**
 - 504 Pianeti**
 - 82 Sistemi di pianeti multipli**
- ✓ **Timing**
 - 12 Sistemi planetari**
 - 15 Pianeti**
 - 2 Sistemi di pianeti multipli**
- ✓ **Transiti planetari**
 - 238 Sistemi planetari**
 - 294 Pianeti**
 - 37 Sistemi di pianeti multipli**

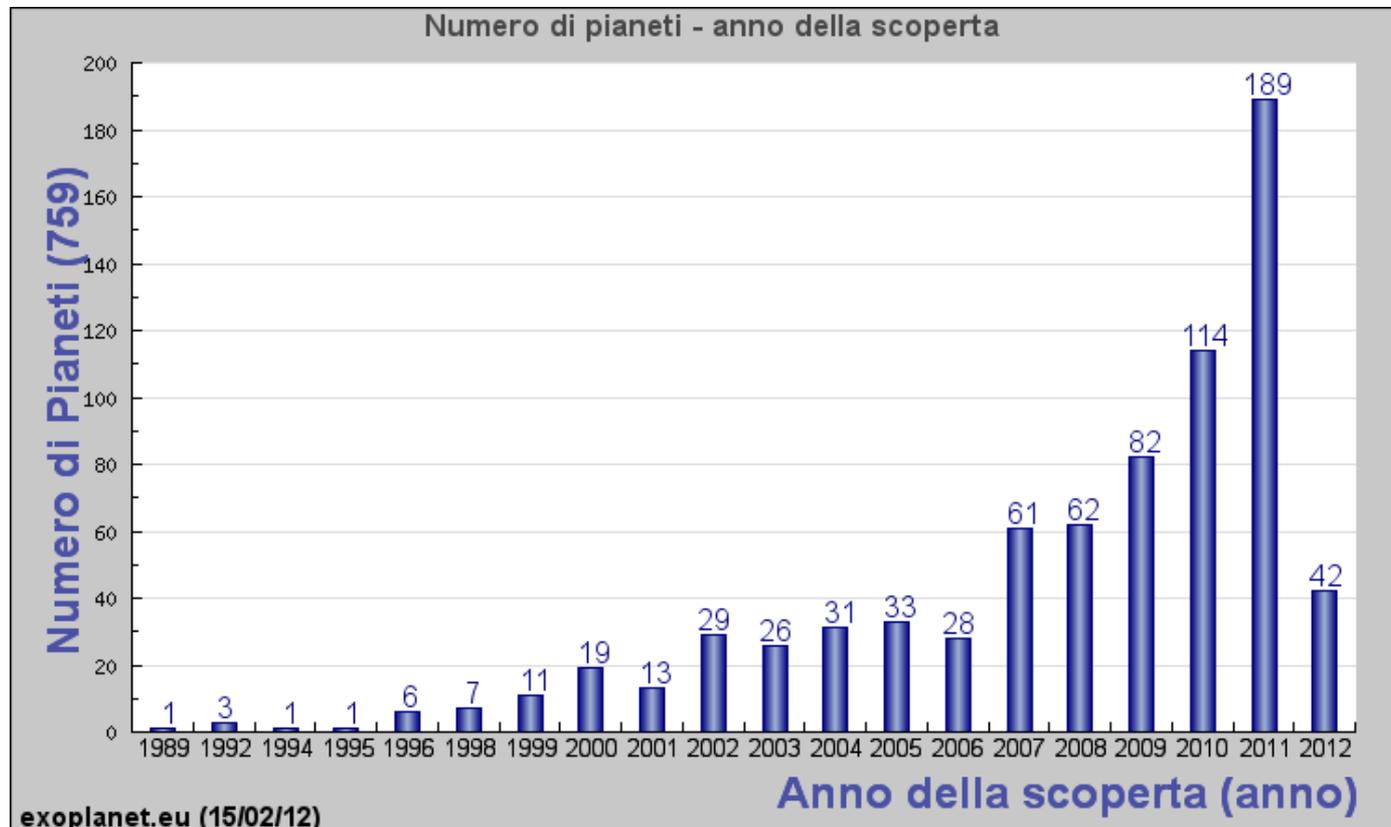
Candidati rivelati

- ✓ **Lensing gravitazionale**
 - 16 Sistemi planetari**
 - 18 Pianeti**
 - 2 Sistemi di pianeti multipli**
- ✓ **Immagini dirette**
 - 27 Sistemi planetari**
 - 30 Pianeti**
 - 1 Sistemi di pianeti multipli**

Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

Candidati rivelati
Diagrammi di correlazione

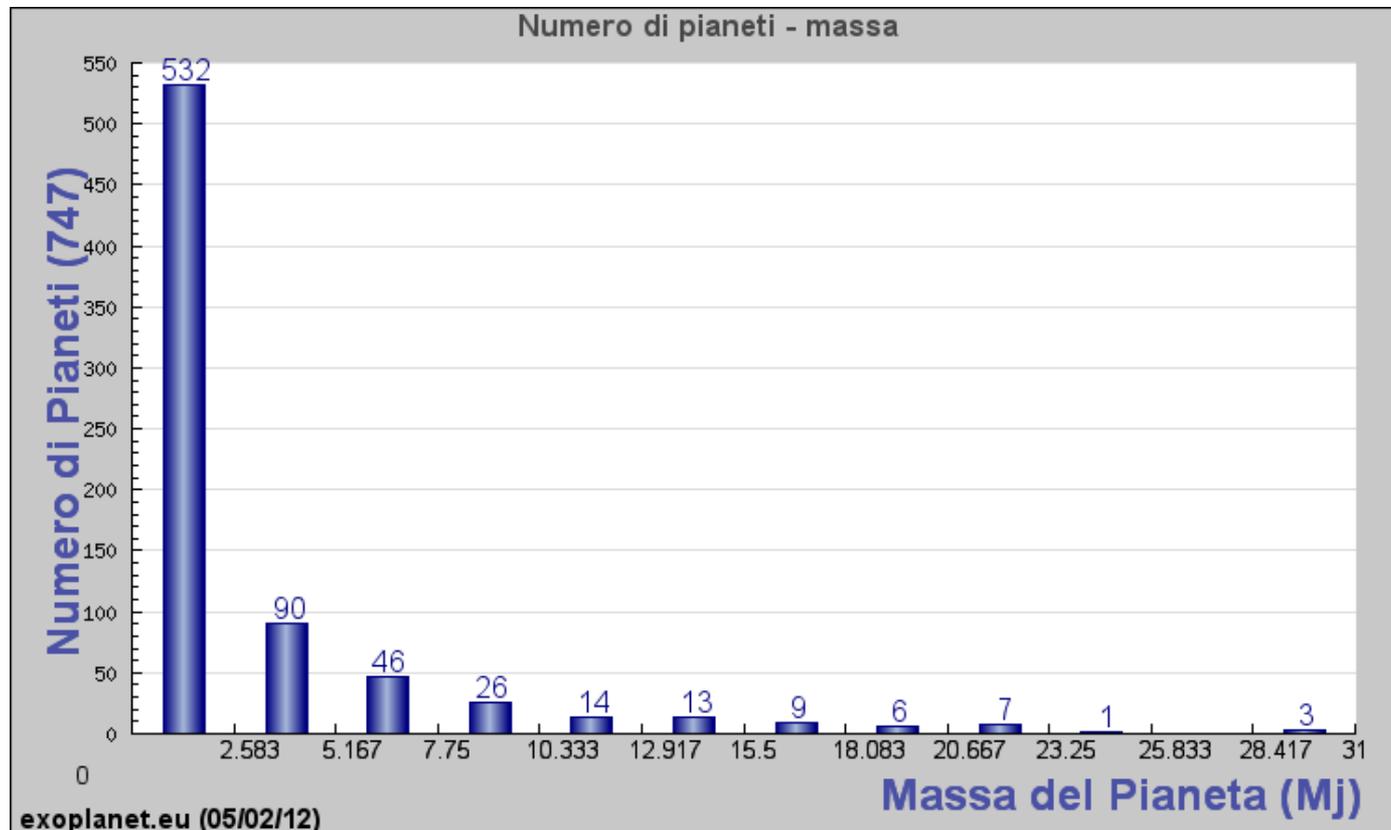
Immagini di correlazione



Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

Candidati rivelati
Diagrammi di correlazione

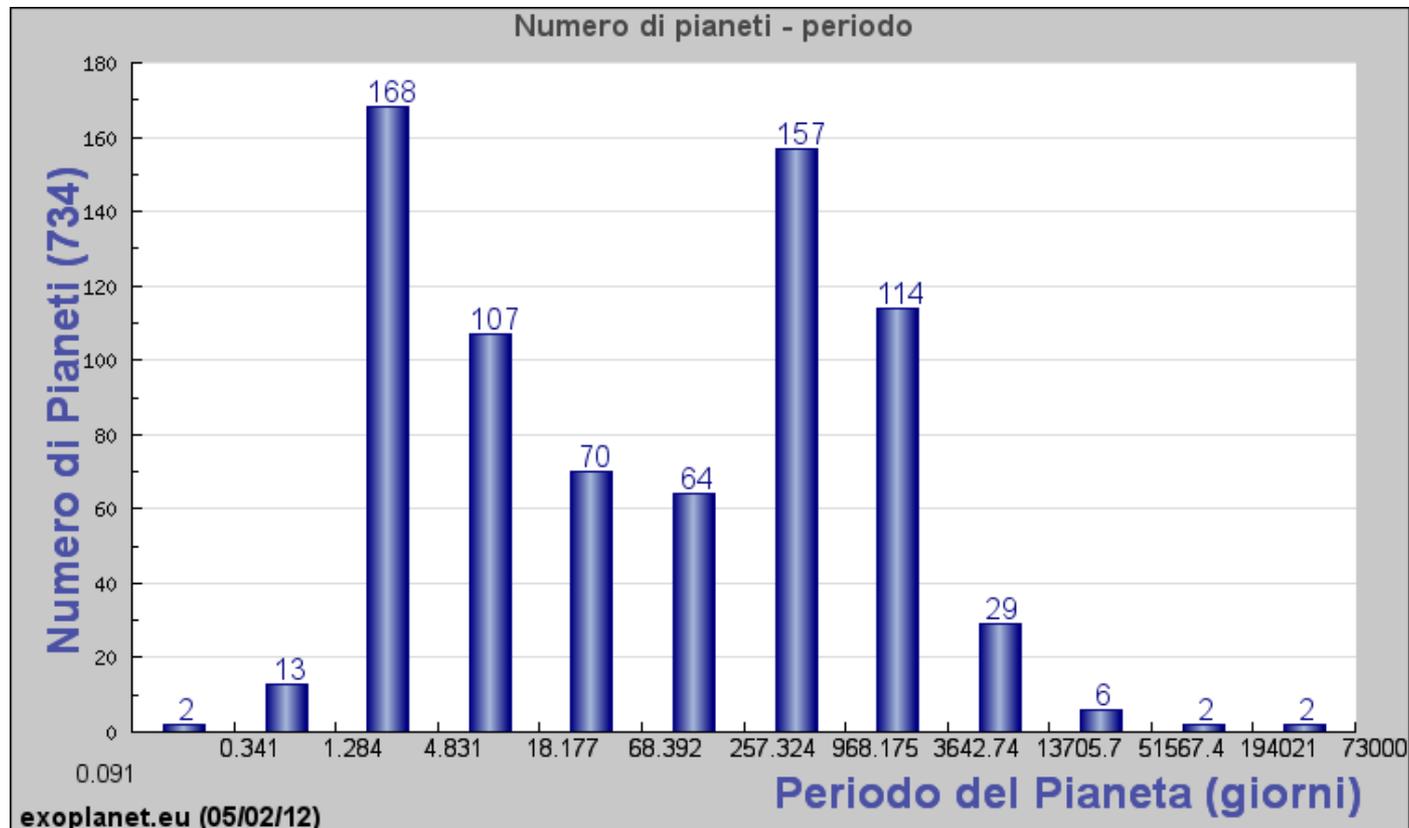
Immagini di correlazione



Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

Candidati rivelati
Diagrammi di correlazione

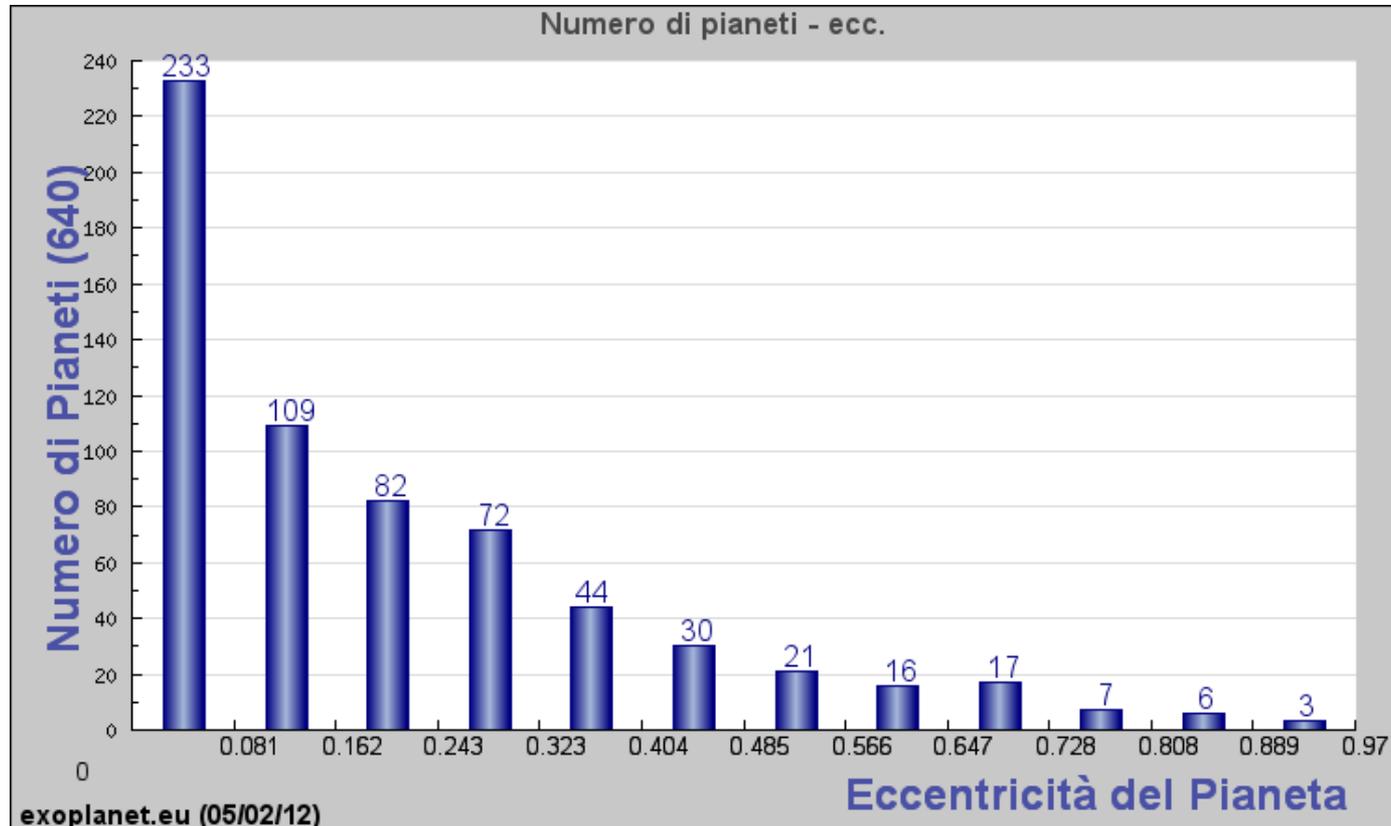
Immagini di correlazione



Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

Candidati rivelati
Diagrammi di correlazione

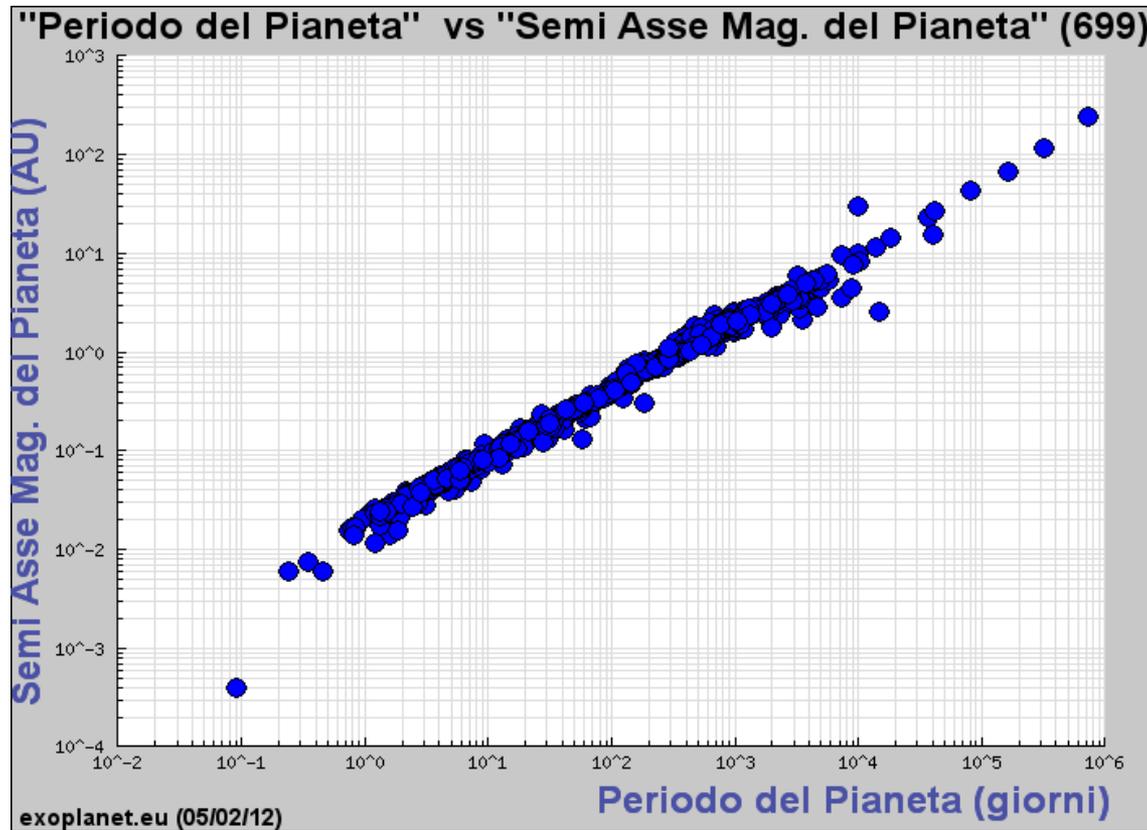
Immagini di correlazione



Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

Candidati rivelati
Diagrammi di correlazione

Immagini di correlazione



Missioni in atto...

Alcuni tra i più importanti esperimenti in atto:

- HST - NASA - 1990
- VLT - ESA - 1999/2002 - Interferometria
- MOST - CSA - Giugno 2003 - Transiti
- HARPS - ESO - 2003 - Velocità radiali
- Spitzer - NASA - Agosto 2003 - Spettroscopia
- EPOCh - NASA - Gennaio 2005 - Transiti
- LBT - USA, De, It - Arizona - 2006 - Interferometria
- CoRoT - CNES - Dicembre 2006 - Transiti
- Kepler - NASA - 6 Marzo 2009 - Transiti
- LOFAR - ASTRON - 2012 – Rivelazione decametrica

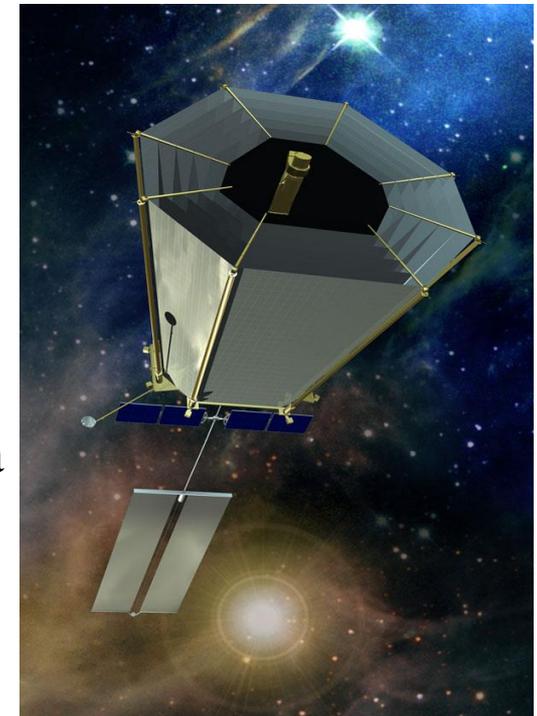


Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

... e prospettive future

Progetti in fase di ultimazione:

- SIM - NASA - 2015 - Astrometria
- TPF Coronagraph - NASA - Coronografia
- TPF Interferometer - NASA - Interferometria
- Gaia - ESA - 2013 - Transiti, VR, Astrometria
- JWST - ESA / NASA - 2014 - Interferometria
- Darwin - ESA - 2015 - Interferometria



Sommario
Introduzione
Metodi di rivelazione
Dati sperimentali
Missioni in atto e prospettive future
Bibliografia e links

Bibliografia e links

Solar and Extra - Solar Planetary Systems - Williams, Thomas – LNP
Encyclopedia of the Solar System (2nd ed.) - McFadden, Weissman, Johnson

<http://exoplanet.eu>

<http://planetquest.jpl.nasa.gov/index.cfm>

<http://sci.esa.int/Gaia>

<http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=39>

<http://smc.cnes.fr/COROT>

<http://www.kepler.nasa.gov/>

<http://planetquest.jpl.nasa.gov/>

<http://exep.jpl.nasa.gov/>

LA FINE?

Qualche volta i pianeti si distruggono

