



Università del Salento



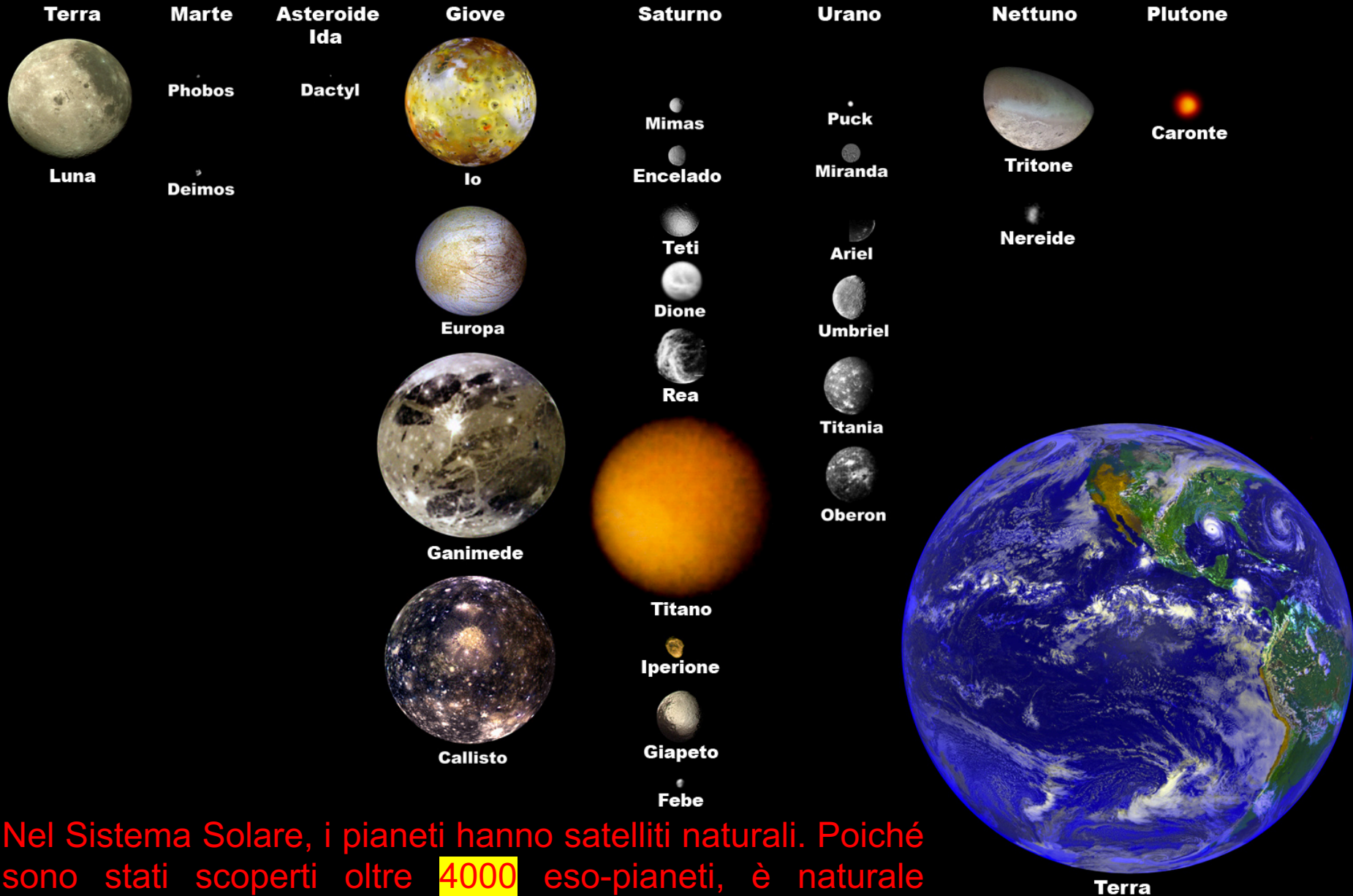
Università del Salento
Dipartimento di Matematica e Fisica
"Ennio De Giorgi"
Gruppo di Astrofisica




ESO-LUNE

A.A.Nucita

Lune del Sistema Solare comparate alla Terra e alla Luna



Nel Sistema Solare, i pianeti hanno satelliti naturali. Poiché sono stati scoperti oltre **4000** eso-pianeti, è naturale attendersi l'esistenza di eso-lune.



Il termine **ESO-LUNA** (cioè una luna **extrasolare**) indica un oggetto celeste, estraneo al Sistema Solare, vincolato ad orbitare intorno ad un ESO-PIANETA.

In altri termini una eso-luna è un satellite naturale di un pianeta in un altro sistema stellare.

- 1) Possiamo osservare un eso-pianeta?
- 2) Possiamo osservare una eso-luna?

Più facile a dirsi!

VELOCITA' RADIALI

ASTROMETRIA

TRANSITI

MICROLENTE

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;
- verificare vecchi e nuovi modelli sull'origine, l'evoluzione e la struttura dei sistemi planetari;
- ricercare eventuali forme di vita extra-terrestre.

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.

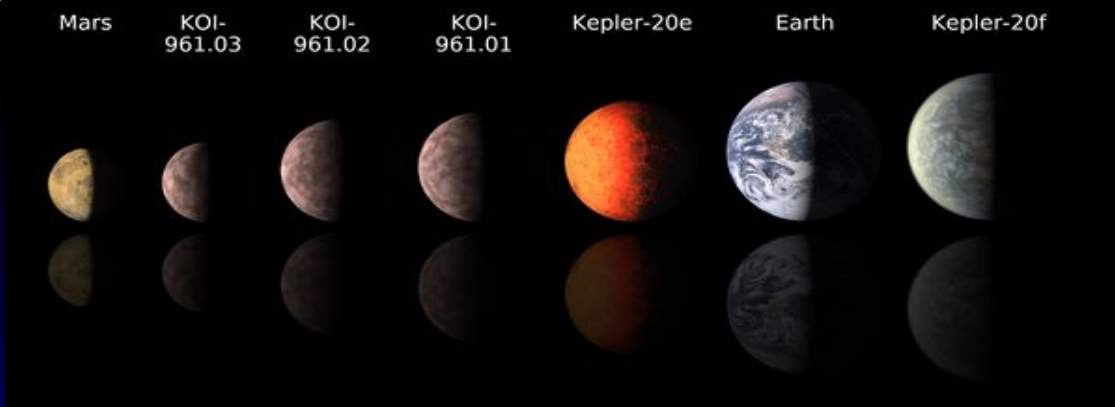
Le tappe fondamentali della ricerca degli eso-pianeti:

- 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**;
- 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**;

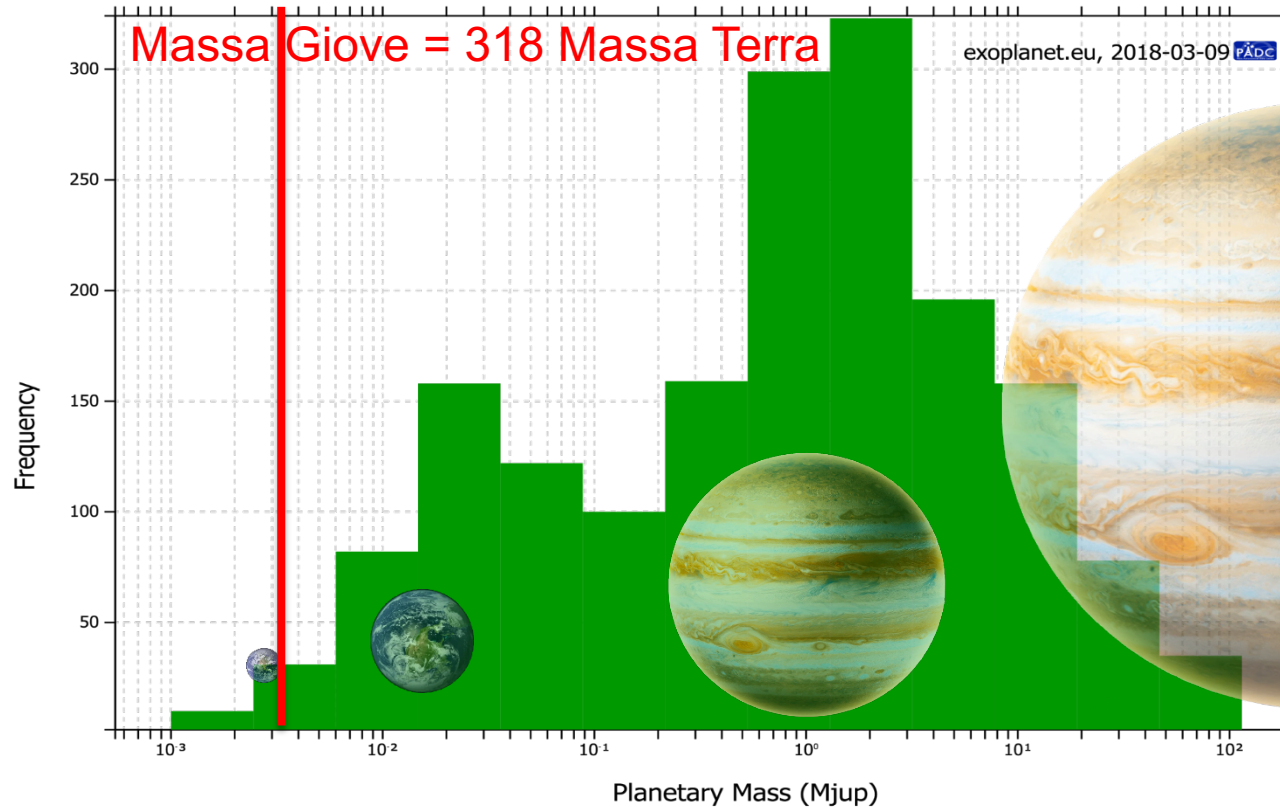
- 1999 - Scoperto un pianeta transitante davanti la stella **HD 209458**;
- 1999 - Rivelato da parte dei team degli osservatori Lick e Whipple il primo sistema planetario triplo attorno alla stella di tipo solare **υ Andromedae**;
- 2003 - Rivelato il primo pianeta attraverso il microlensing (**OGLE-2003-BLG-235** 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 oggetto candidato ad essere un pianeta extragalattico (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;

- 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 3
- 2012 - KOI-96: un mini sistema planetario;
- 2012 - Nella MW si prevede ci siano circa 10^{11} pianeti, la maggior parte dei quali di tipo roccioso;



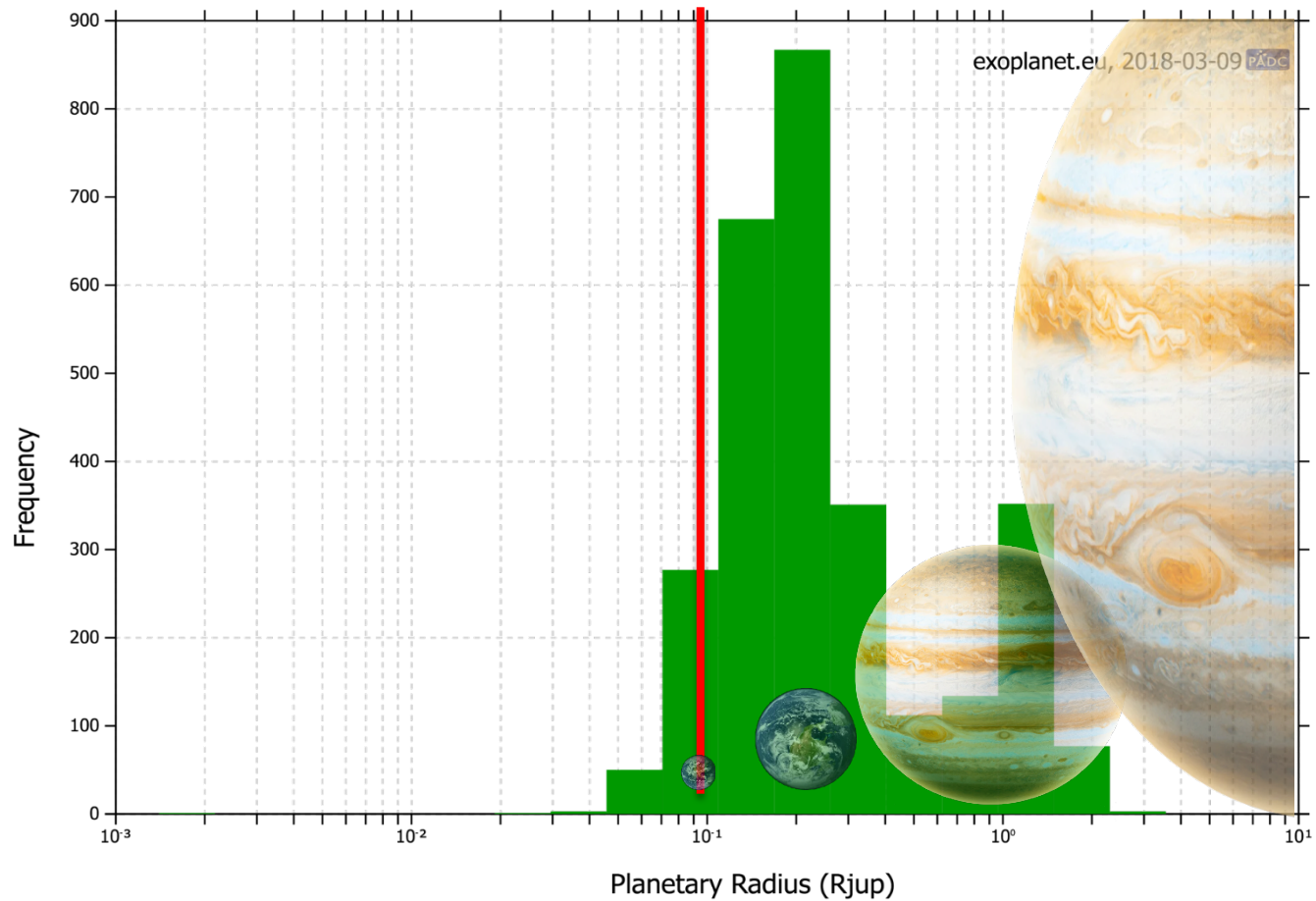
➤ 2012 - Kepler conclude l'anno osservativo con 2740 candidati al ruolo di esopianeta. Il 43% è in corrispondenza di sistemi multipli. 105 già confermati;



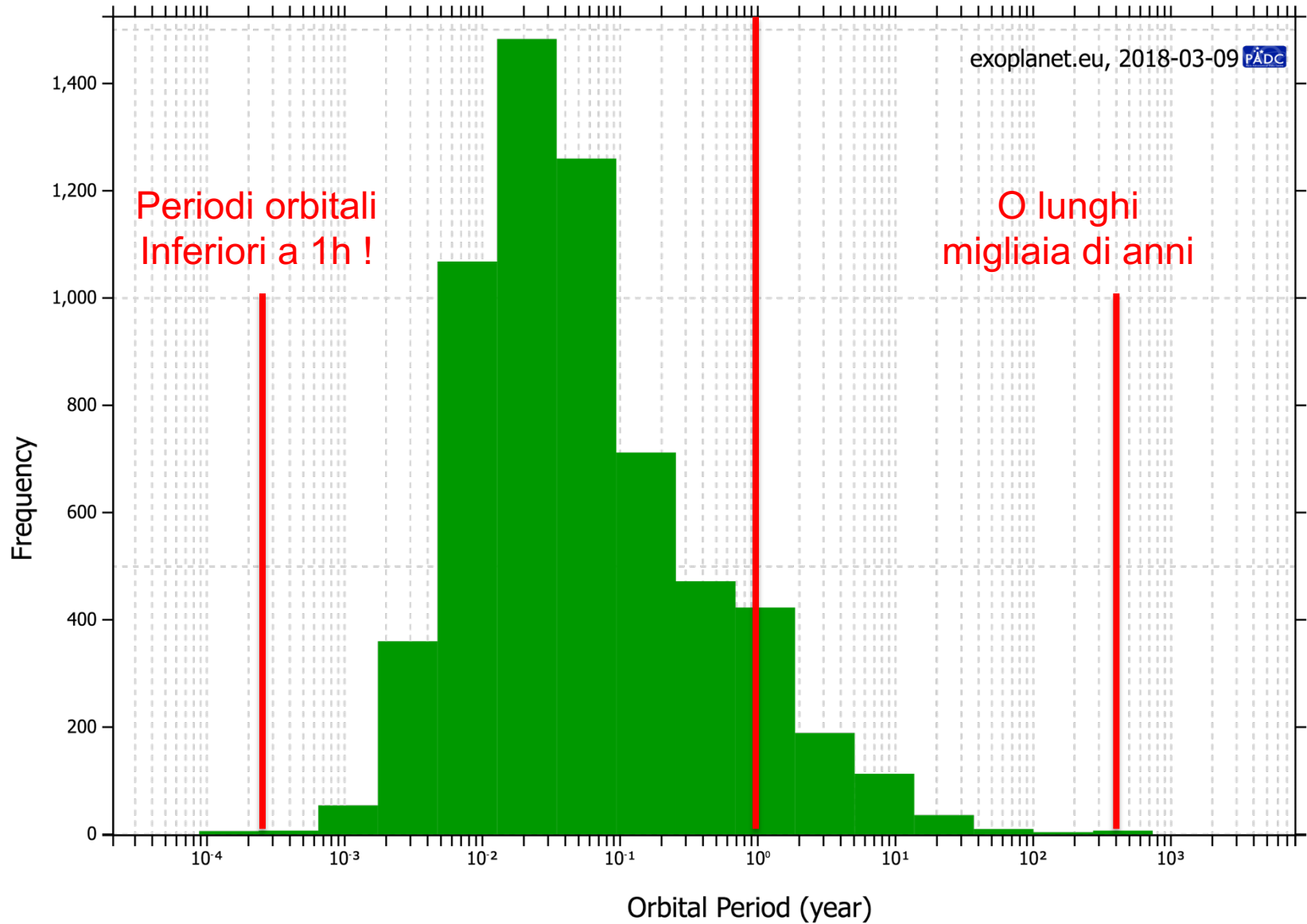
➤ 2018 – Il team di Kepler annuncia 4496 pianeti osservati, 2341 pianeti confermati, 30 pianeti nella ZONA ABITABILE!

Tipicamente i pianeti osservati mostrano dimensioni molto maggiore della Terra

Raggio Giove = 11 Raggio Terra



E periodi anche molto rapidi...



Tutti i metodi classici si basano sulle leggi di Keplero

- **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.

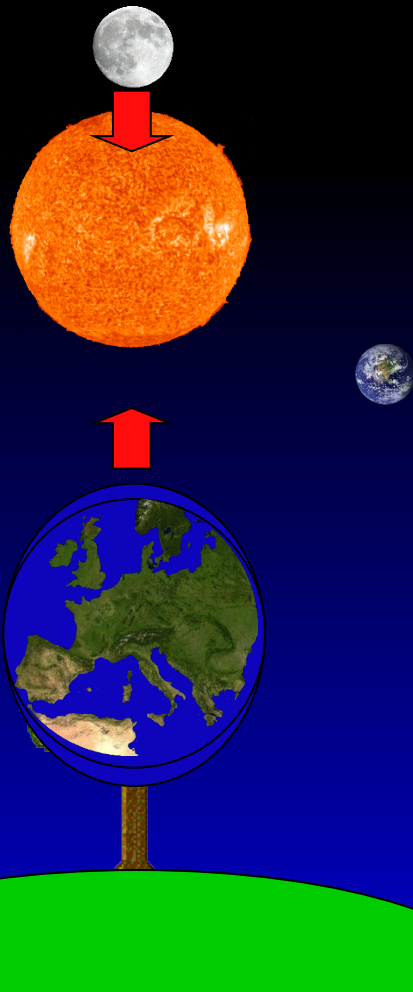
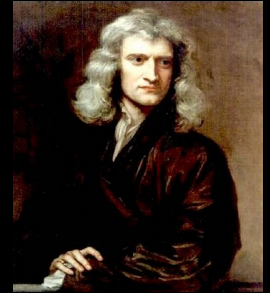
- **II Legge di Keplero**

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.

La legge di Newton



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

In formule:

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

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.

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

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

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

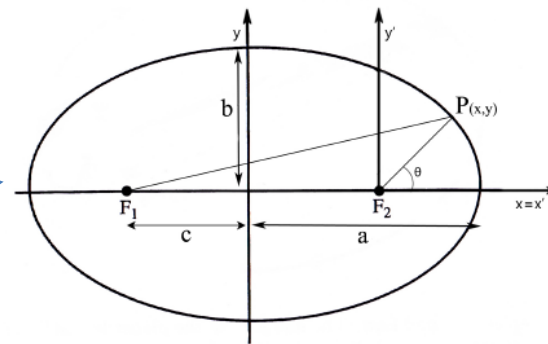
$$\mathbf{N} = \frac{d\mathbf{L}}{dt} = 0. \quad (1.10)$$

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

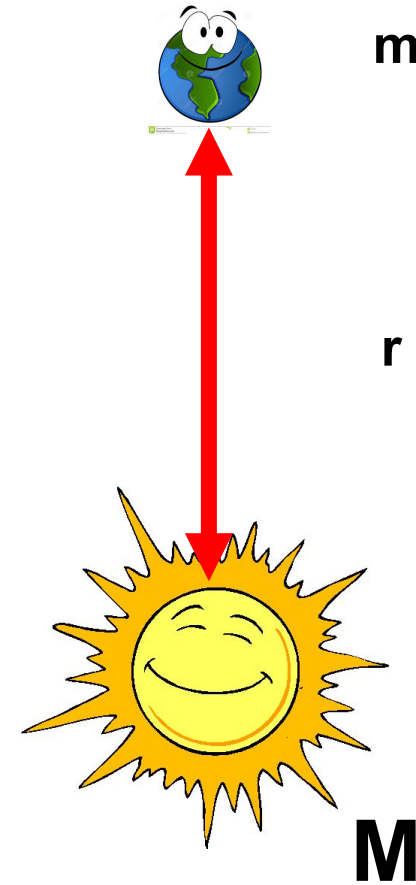
$$-\frac{GMm}{r^3}\mathbf{r} = m\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}.$$

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

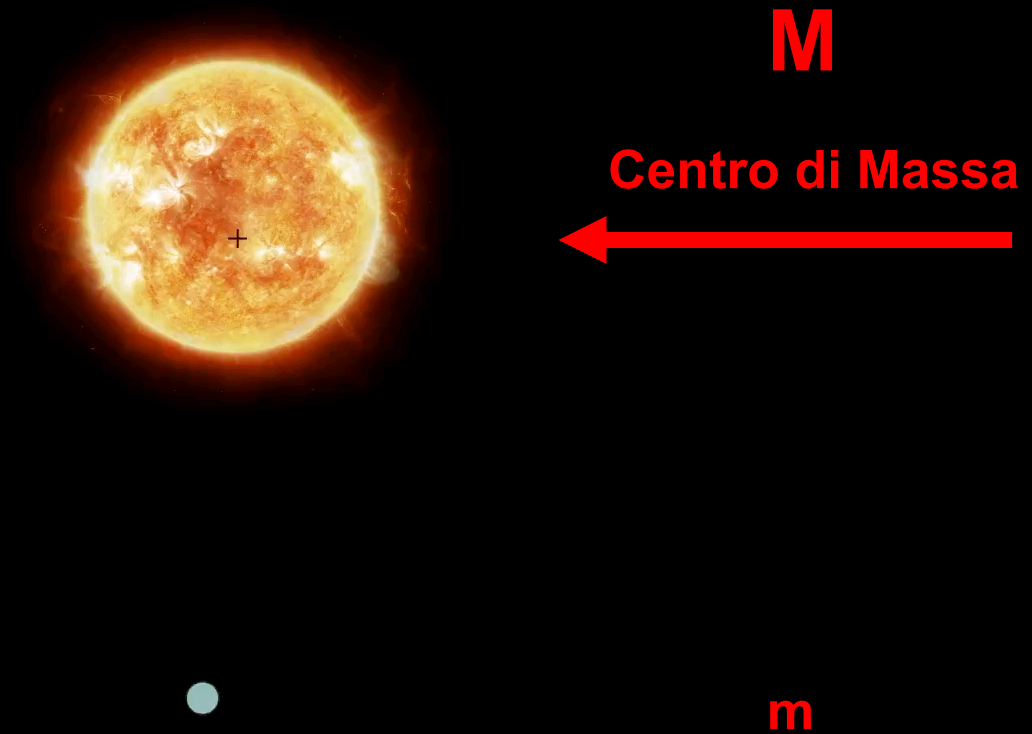
$$GM P^2 = 4\pi^2 a^3.$$



Terza legge di Keplero



Le stelle non “danzano” da sole!



Un astronomo usa la legge di Keplero riscritta nella forma di

FUNZIONE 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

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



$$f_1 = \frac{m_2^3 \sin^3 i}{(m_1 + m_2)^2} = \frac{v_{x1}^3 P}{2\pi G}, \quad \leftarrow v_x = \frac{2\pi a}{P} \sin i, \quad (1.80)$$

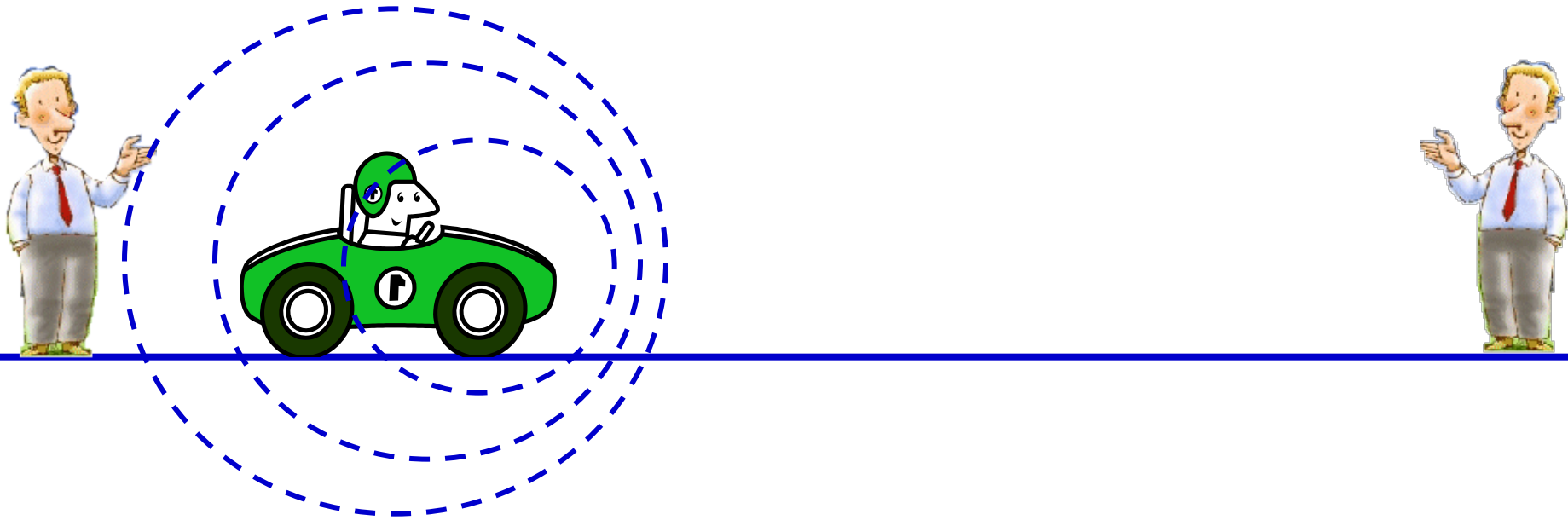
dove le grandezze misurabili sono v_{x1} e P , le quali permettono di stimare la funzione di massa f_1 . Analogamente per la funzione di massa f_2 si ha

$$f_2 = \frac{m_1^3 \sin^3 i}{(m_1 + m_2)^2} = \frac{v_{x2}^3 P}{2\pi G}. \quad (1.81)$$

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

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{m_1^3}{m_2^3}. \quad \mathbf{P, v, a, i ?} \quad (1.82)$$

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



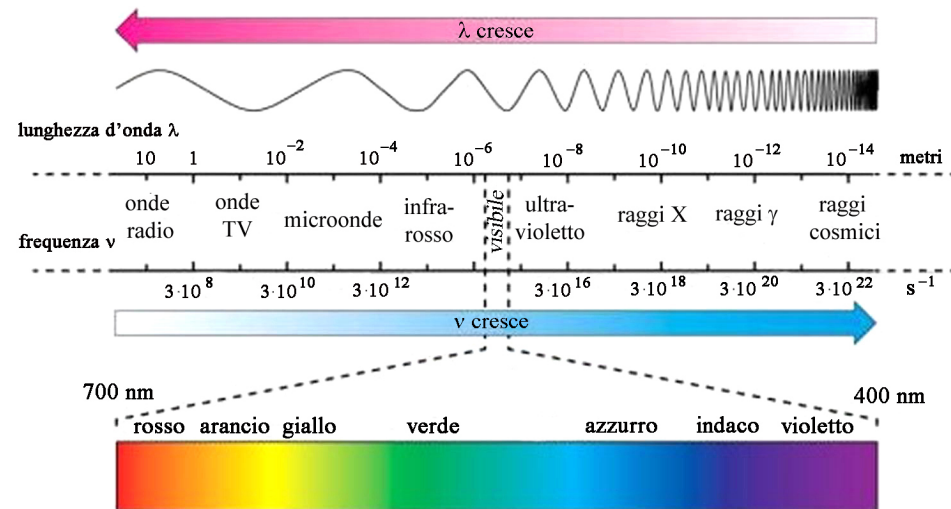
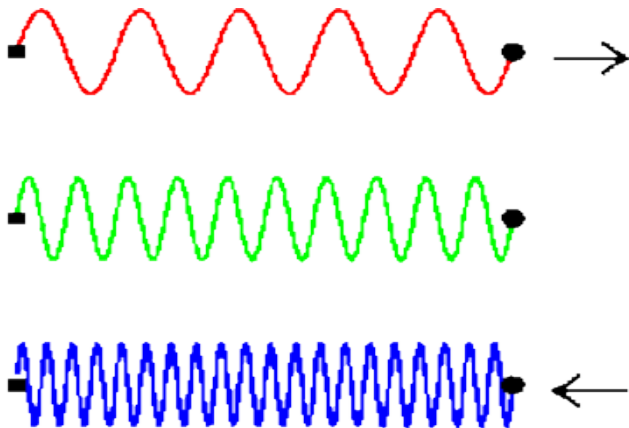
L'effetto Doppler è quel fenomeno per cui sentiamo un suono più acuto quando la sorgente si avvicina e più grave quando si allontana!



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



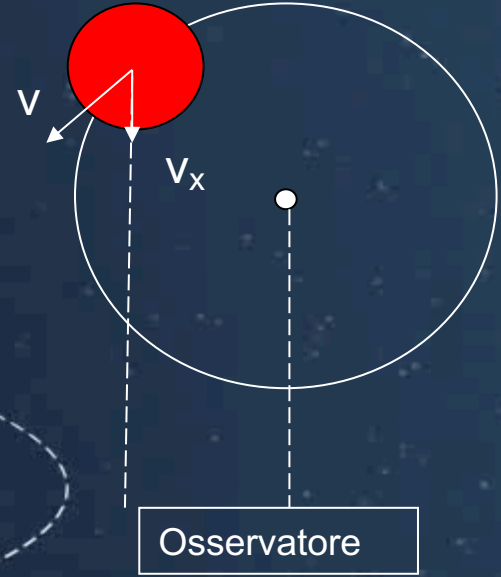
Analogamente...una sorgente apparirà più rossa se in allontanamento e più blu se in avvicinamento ad un osservatore!

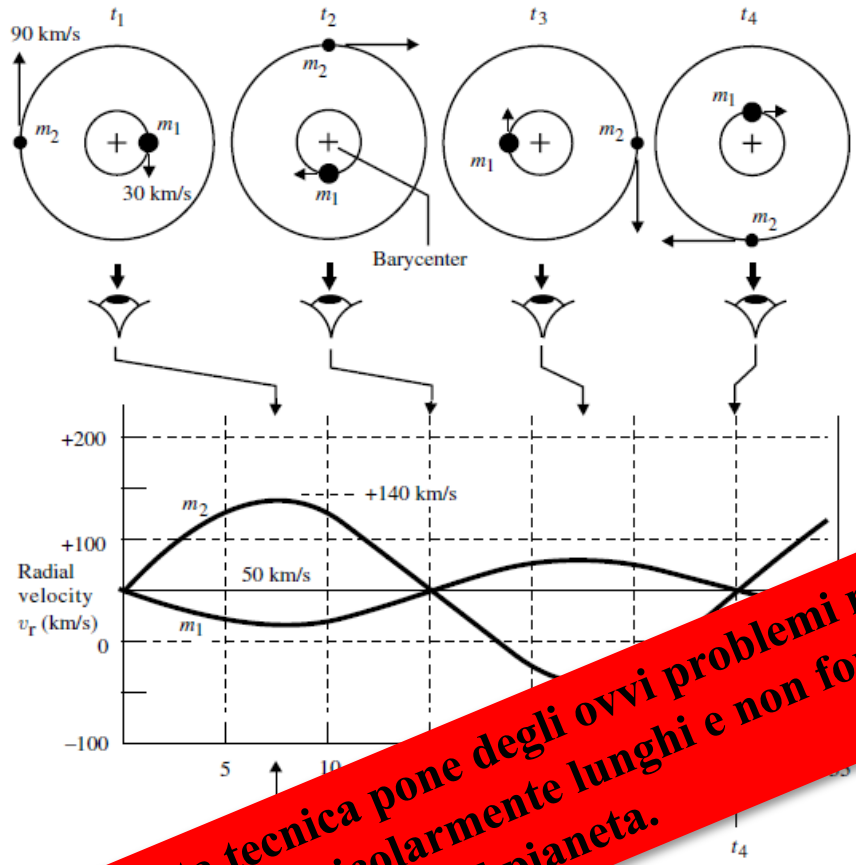


VELOCITA' RADIALI: quello che si osserva e che si misura in pratica!

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

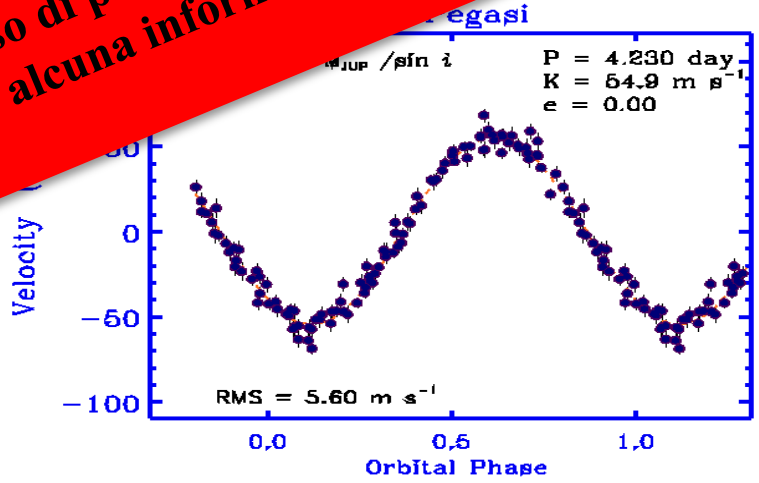
$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} c.$$





Se l'asse di rivoluzione del sistema non coincide con la linea di vista si nota lo spostamento delle righe di assorbimento/emissione nello spettro della stella per effetto Doppler.

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.



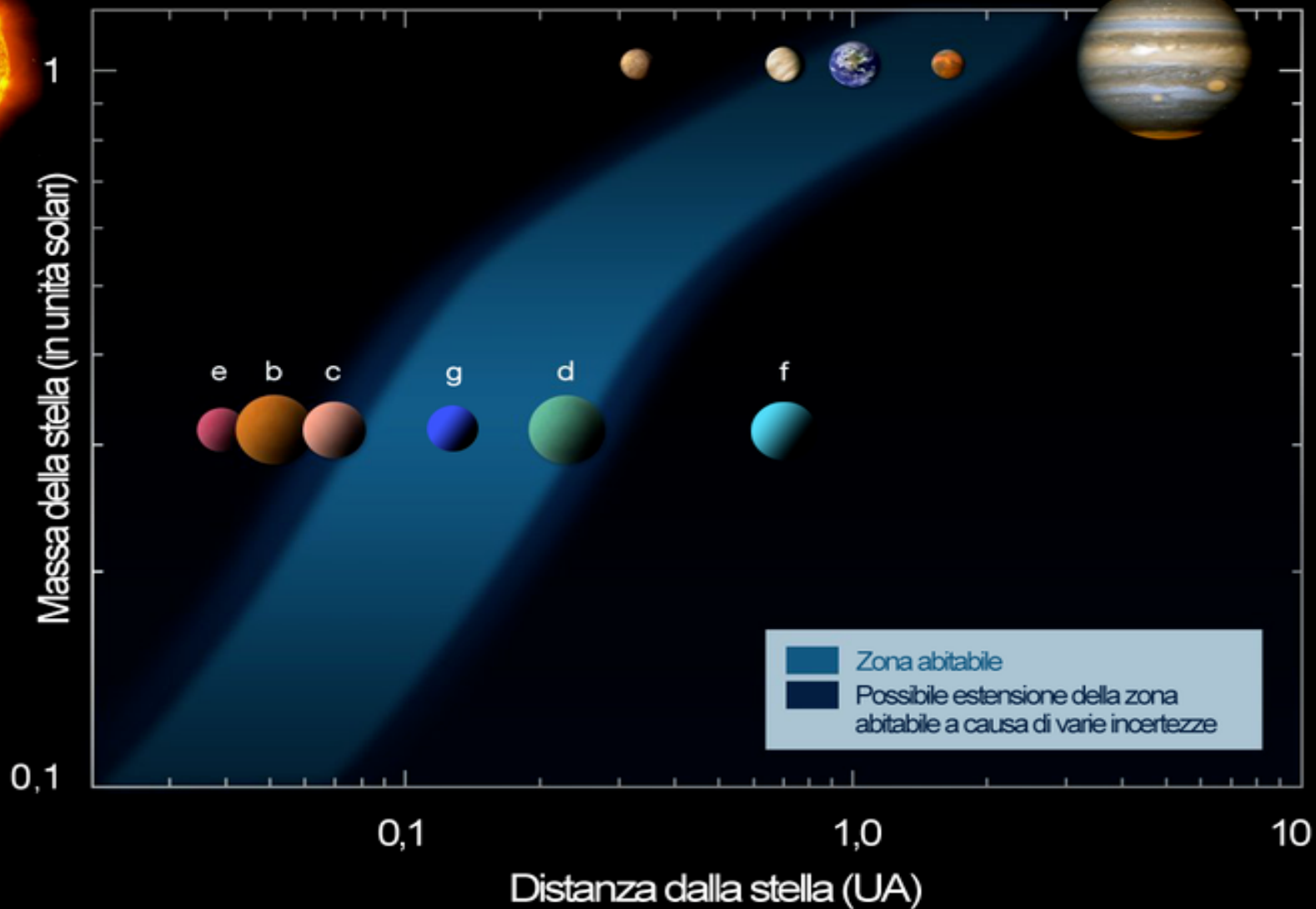
$$V = \frac{m \sin \theta}{m+M} \sqrt{G \frac{m+M}{a}} \simeq \left(\frac{2\pi G}{P}\right)^{1/3} \frac{m \sin \theta}{M^{2/3}}$$



Sole



Gliese 581



I limiti delle velocità radiali: sensibilità attuale del m/s \rightarrow cm/s

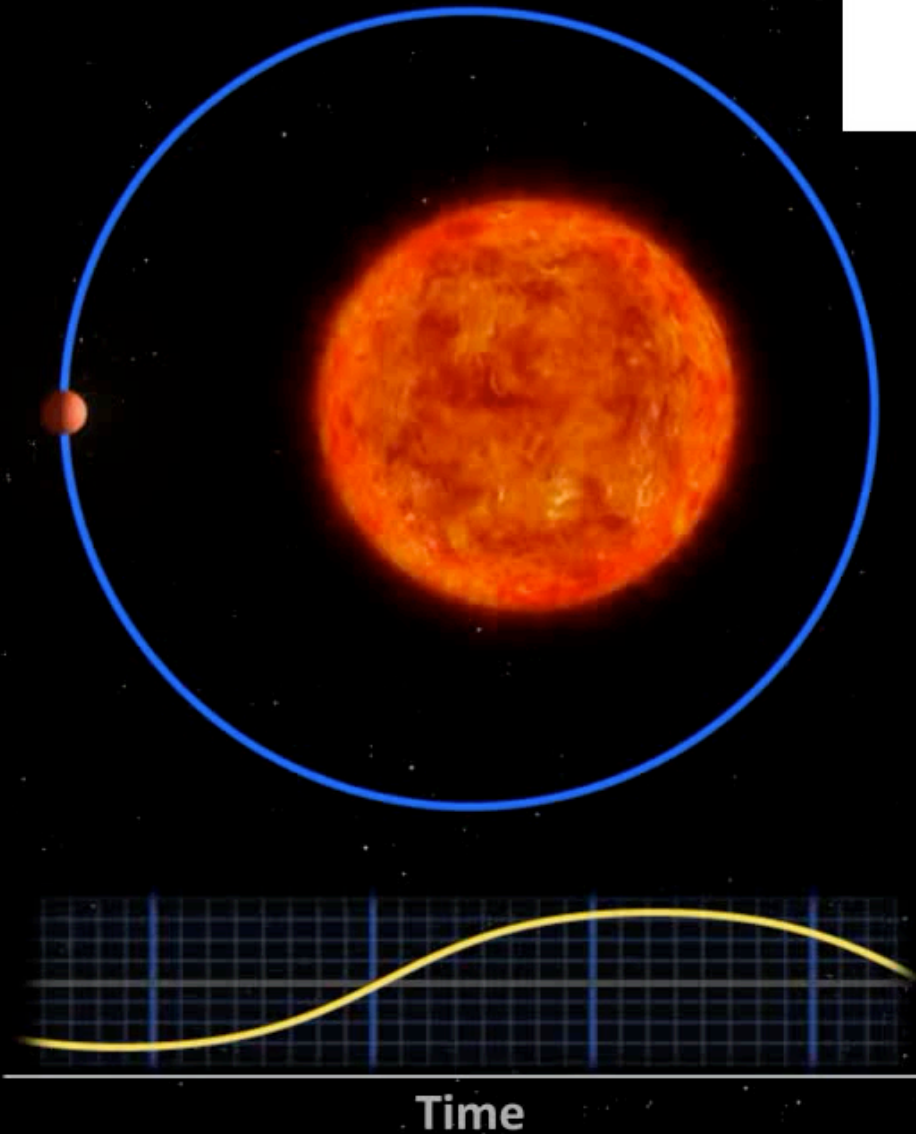
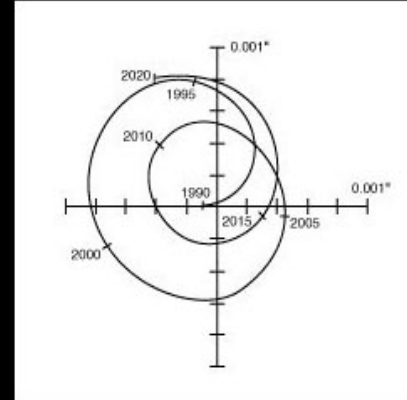
Astrometria

A causa dell'interazione esopianeta-stella, quest'ultima può variare la sua posizione rispetto alle stelle più lontane, che perciò risultano “fisse”.

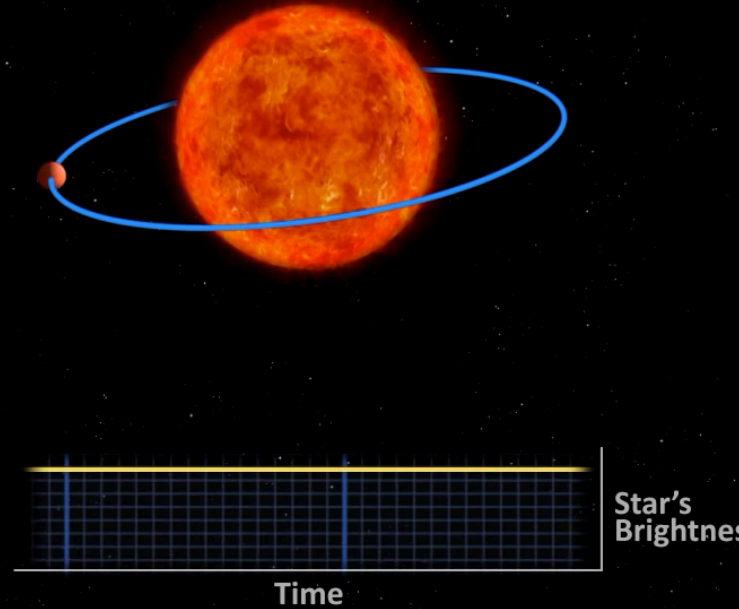
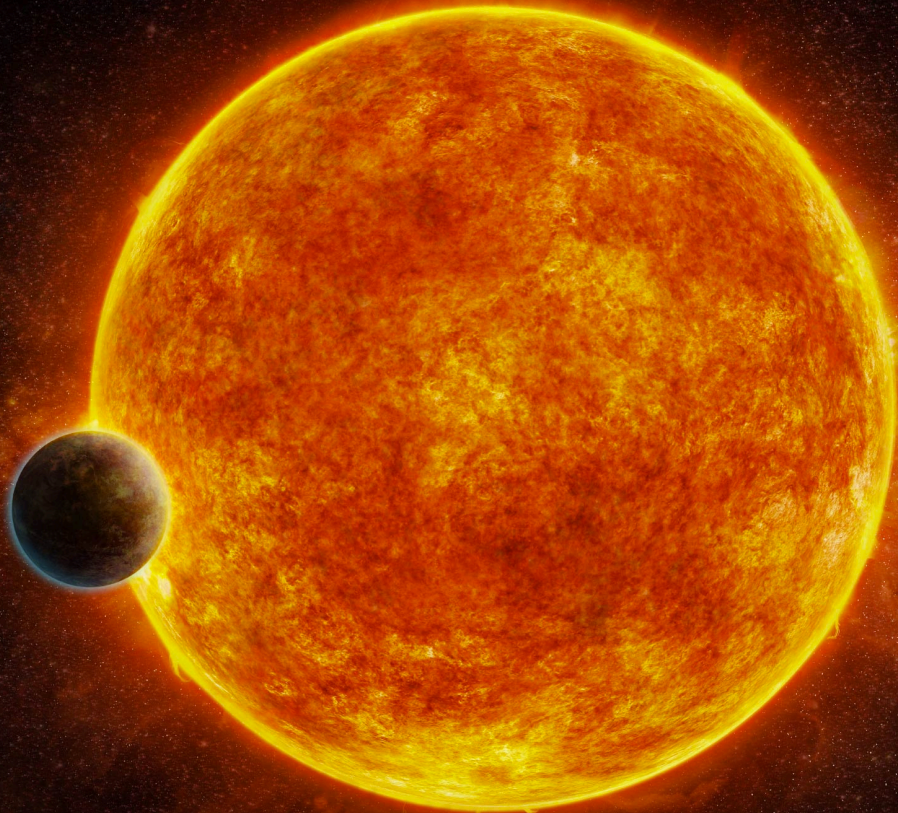
Naturalmente lo spostamento della posizione della stella è tanto maggiore quanto maggiore è il rapporto delle masse e la distanza dell'esopianeta dalla stella, secondo la relazione a lato.

Nel caso del sistema Sole/Giove, visto da una distanza di 15 anni luce, $d=1$ mas (10 volte inferiore della massima risoluzione di HST).

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



Transiti planetari

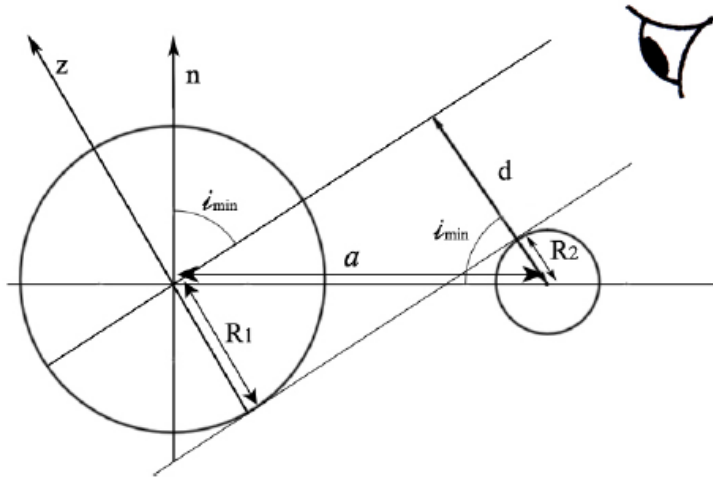


Il passaggio del pianeta davanti alla stella compagna produce una diminuzione della luminosità osservata.

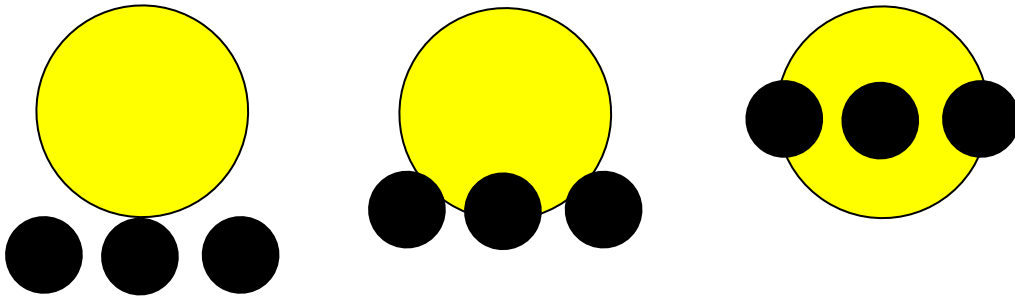
L'effetto è simile ad osservare la luce di un faro lontano intorno al quale vola una falena!

La forma precisa della curva di luce dipende dalla forma e grandezza della falena (Pianeta), da dove si osserva il faro (Stella) e da quanto tempo abbiamo a disposizione!

Transiti planetari: cioè eclissi su Soli lontani!



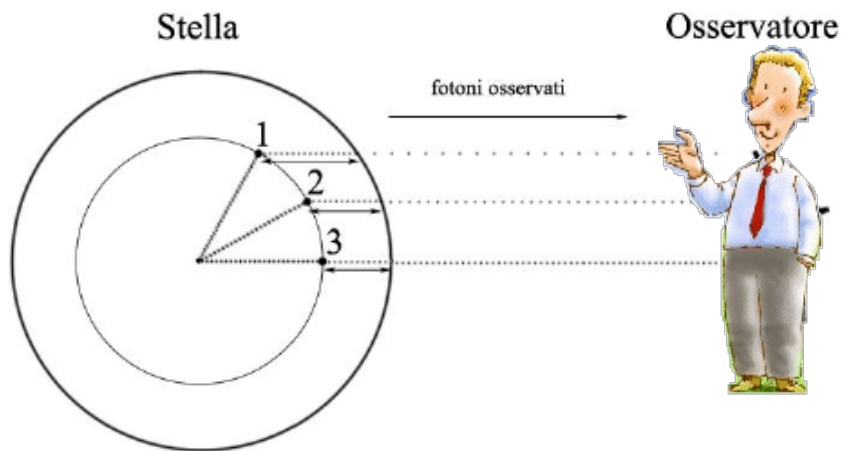
$$\begin{cases} d = R_1 + R_2, \\ d = a \cos i_{\min}, \end{cases}$$



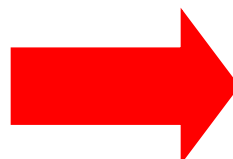
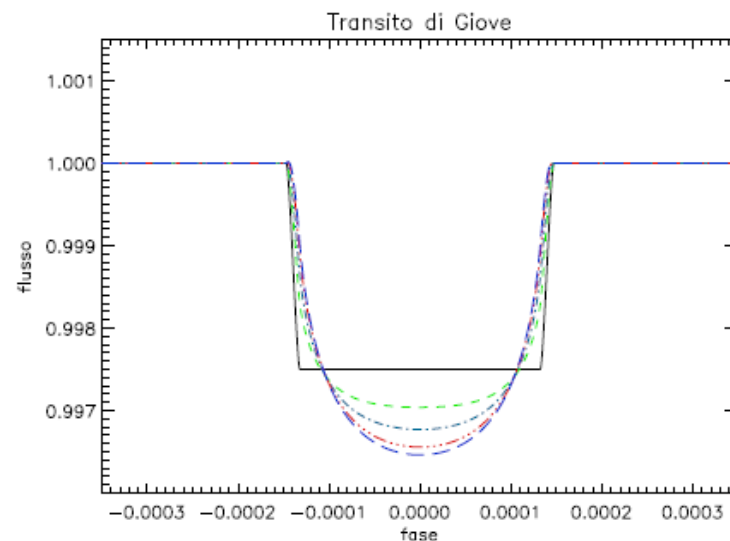
$$R_1 + R_2 = a \cos i_{\min} \implies i_{\min} = \cos^{-1} \left(\frac{R_1 + R_2}{a} \right),$$

Angoli prossimi a 90 gradi!

Limb Darkening



	Giove	Sole
Raggio	0.05R _☉	1.0R _☉
Massa	0.001M _☉	1.0M _☉
<i>a</i>	5.2UA	
<i>i</i>	89.99°	
Periodo	11.83 anni	

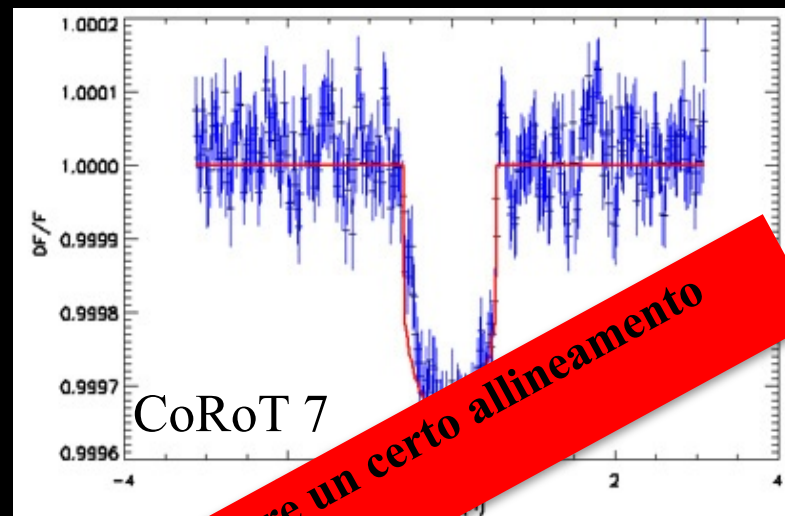


	WASP-10b	WASP-10
Raggio	1.08R _J	0.71R _☉
Massa	3.06M _J	0.783M _☉
<i>a</i>	0.0371UA	
<i>i</i>	86.8°	
Periodo	3.08 giorni	
γ_1	0.64	
γ_2	-0.23	

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

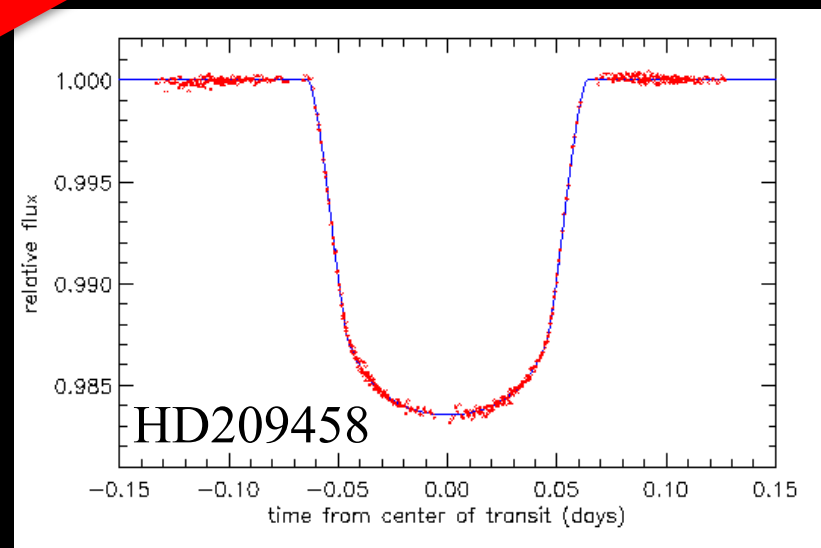
Transiti planetari

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).



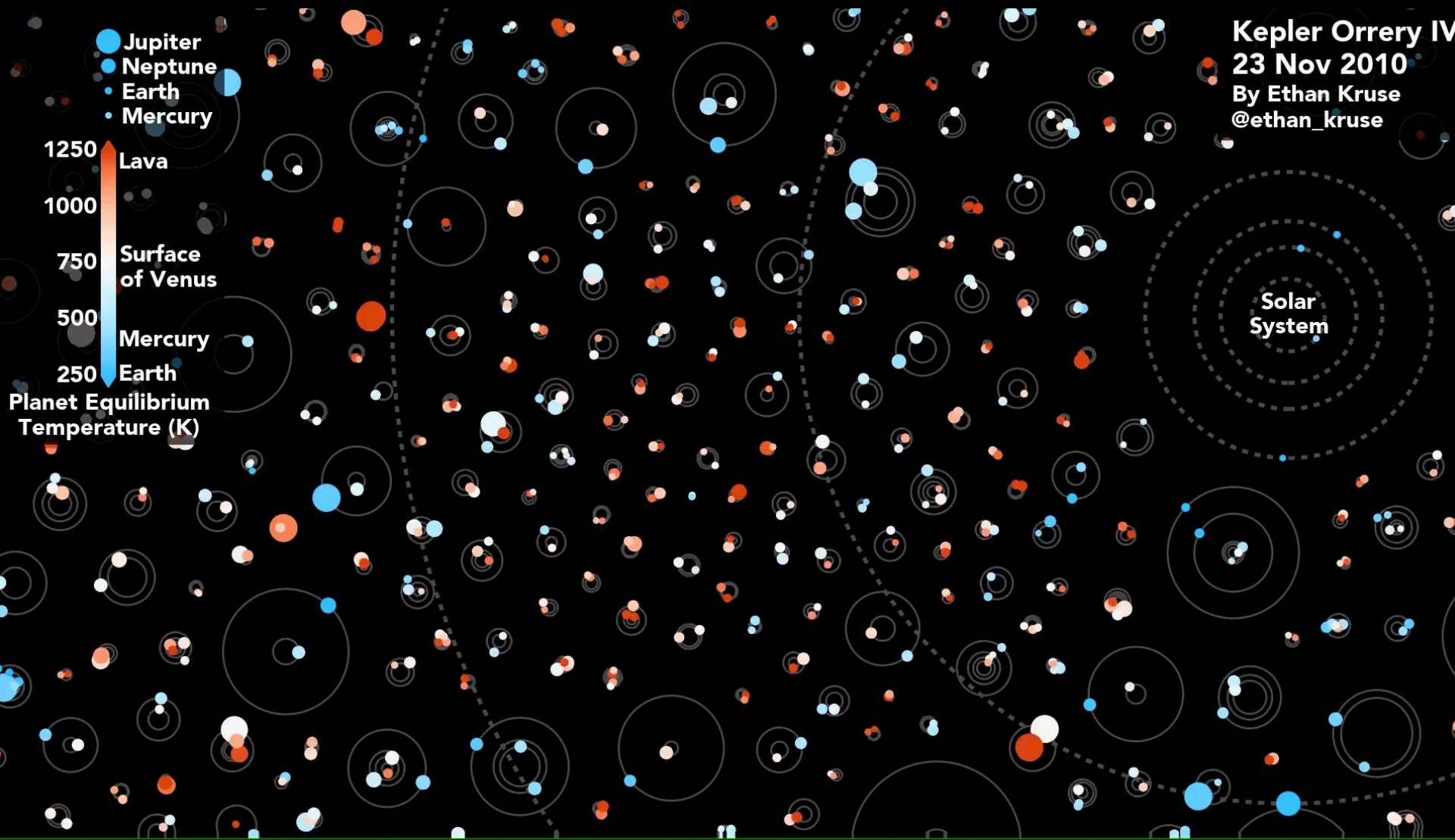
Tramite questo metodo si può avere anche un'idea sulla composizione dell'atmosfera dell'esopianeta, dato che la luce proveniente dalla stella viene "filtrata" dall'atmosfera del pianeta e misurata dagli spettroscopi a terra.

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



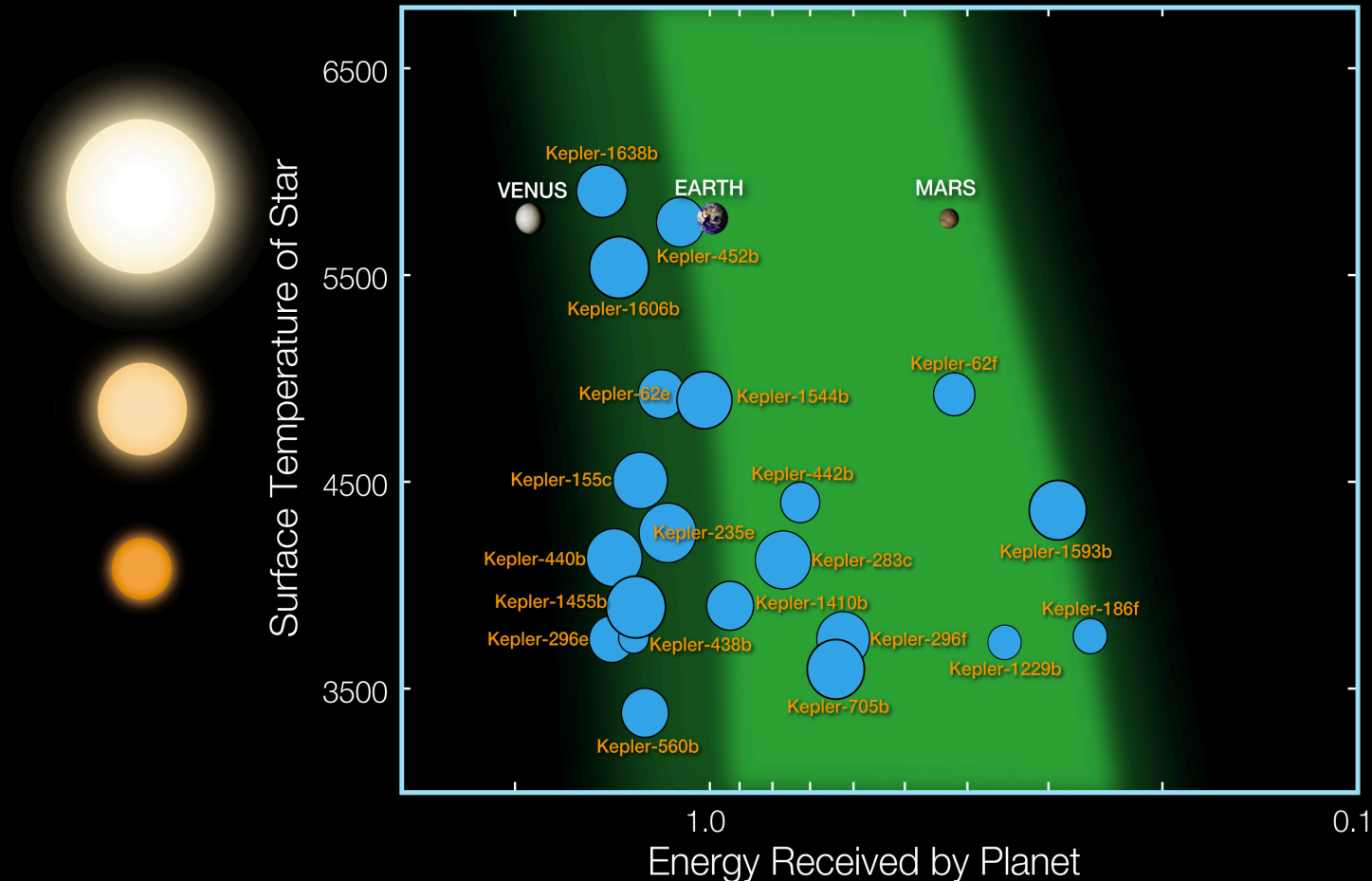
Transiti planetari: COROT, KEPLER

**Oltre 4000 pianeti identificati
alla ricerca dei "golden planets" ...
ovvero "pianeti abitabili"**



Kepler's Small Habitable Zone Planets

As of May 10, 2016

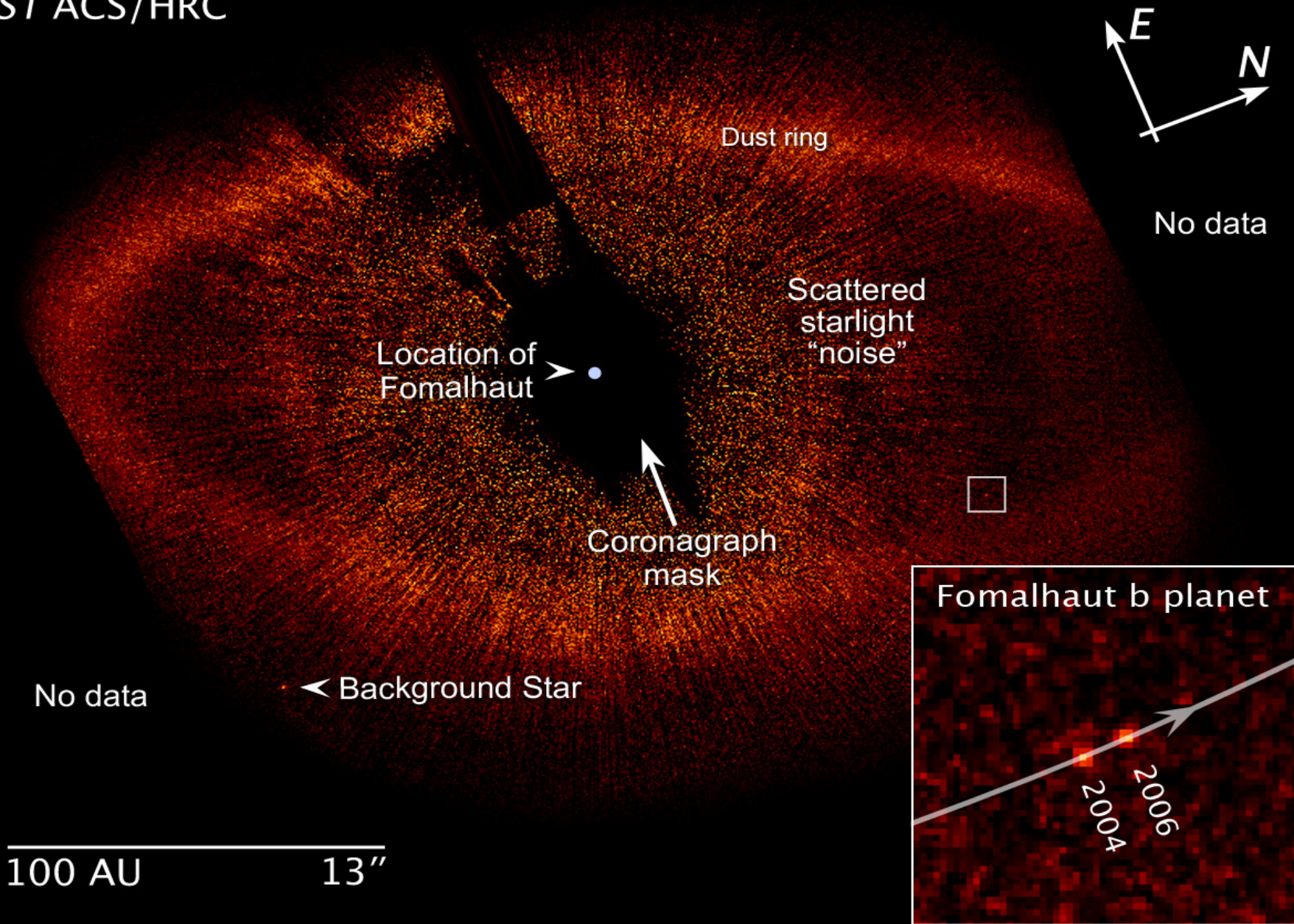


Ad oggi (2019)
Candidati: 2,245
Confermati: 2,342

Confermati nella zona abitabile con massa
sino a due volte quella terrestre: 30

Fomalhaut
HST ACS/HRC

Immagini dirette



Planets Orbiting HR 8799 (Sept. 2008)

July 2004
+

July 2004
+

July 2008
+

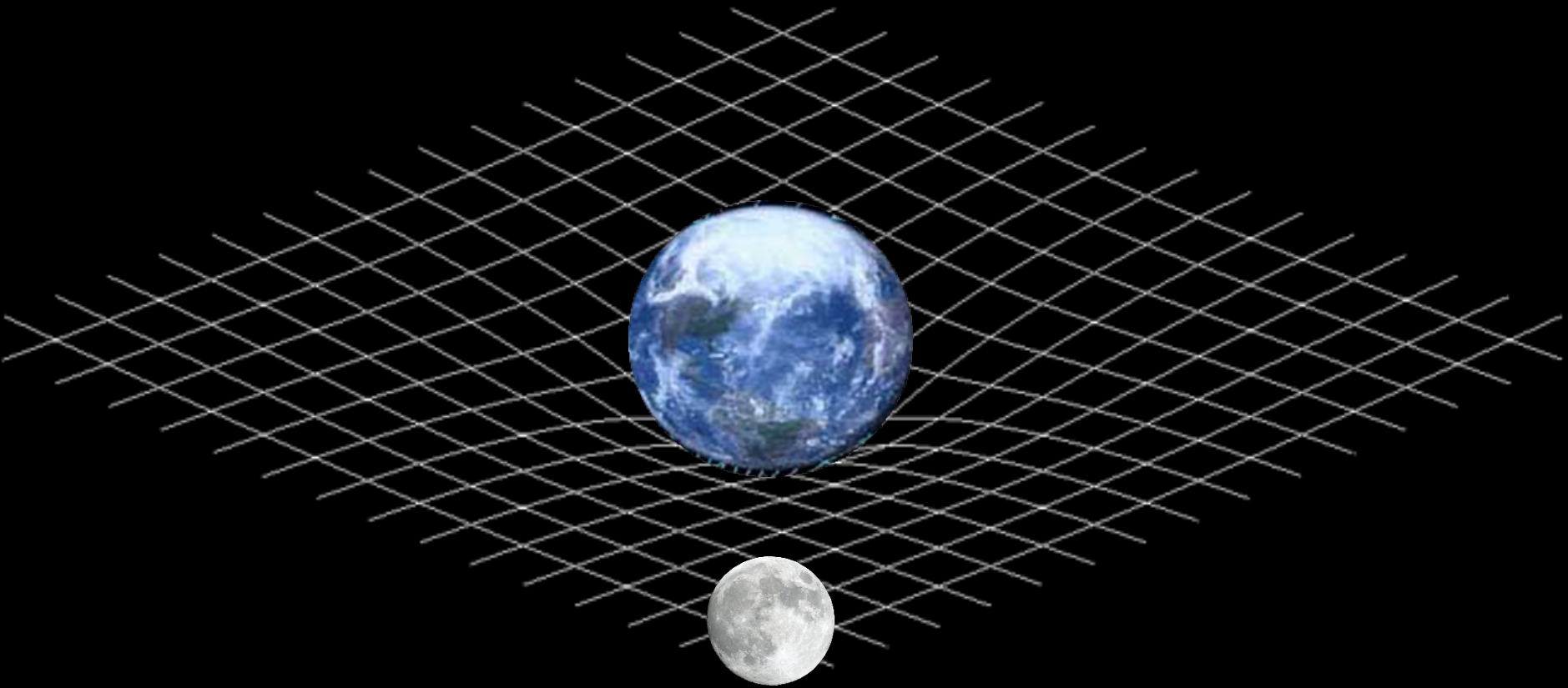
$\frac{0.5 \text{ arcsec}}{20 \text{ AU}}$

2009-07-31

$\frac{20 \text{ au}}{\quad}$

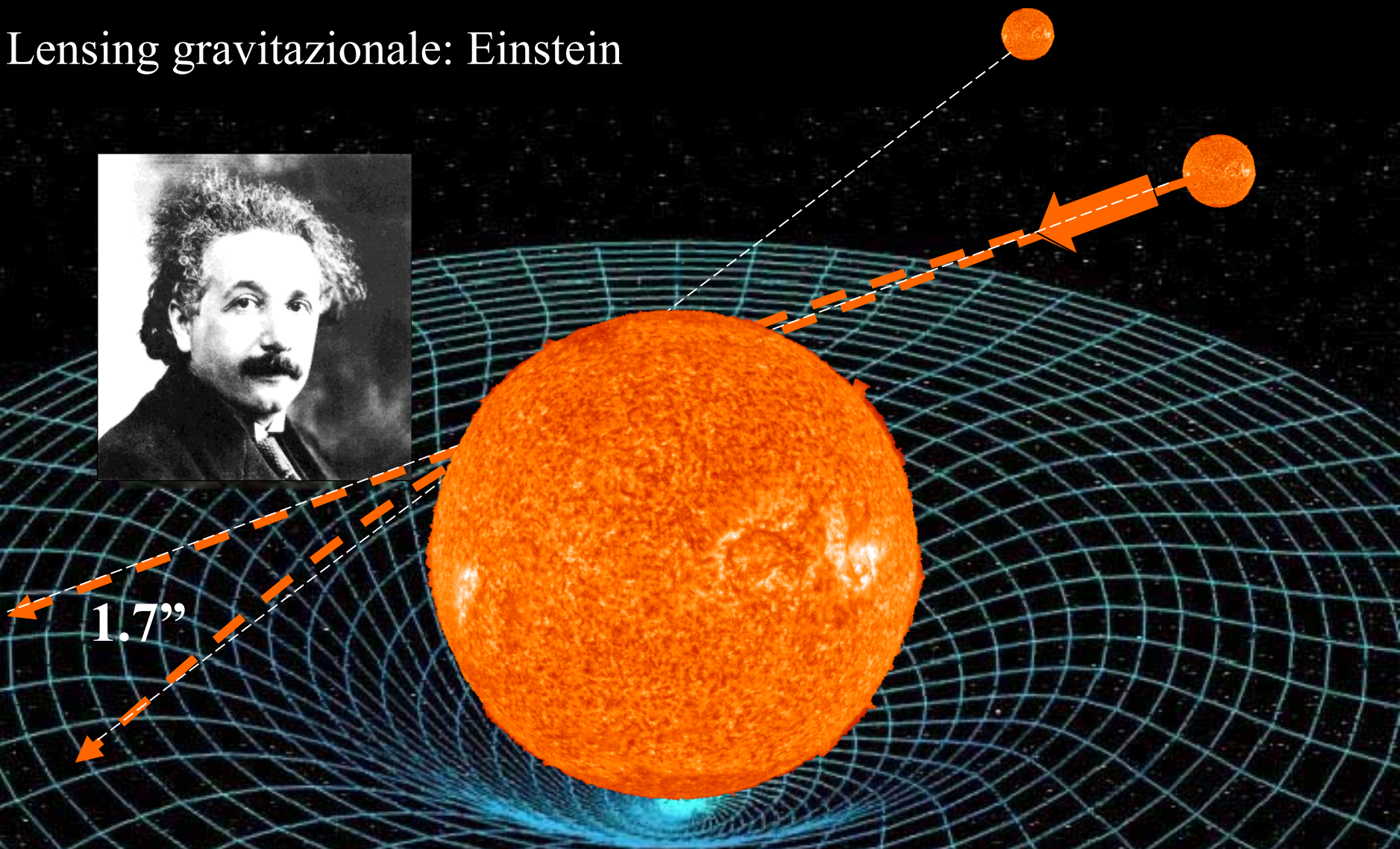
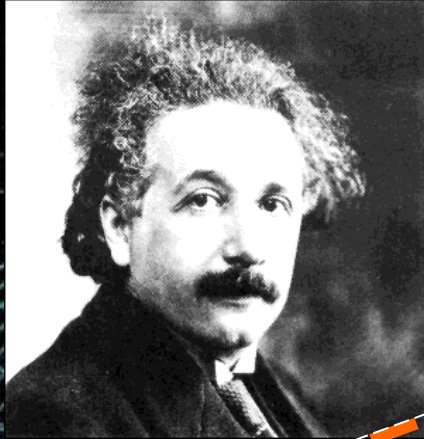
Da terra vi sono ovvi problemi di seeing causati dall'atmosfera terrestre, inoltre la luce della stella è miliardi di volte più intensa di quella proveniente dai pianeti.

Lensing gravitazionale: Einstein



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

Lensing gravitazionale: Einstein

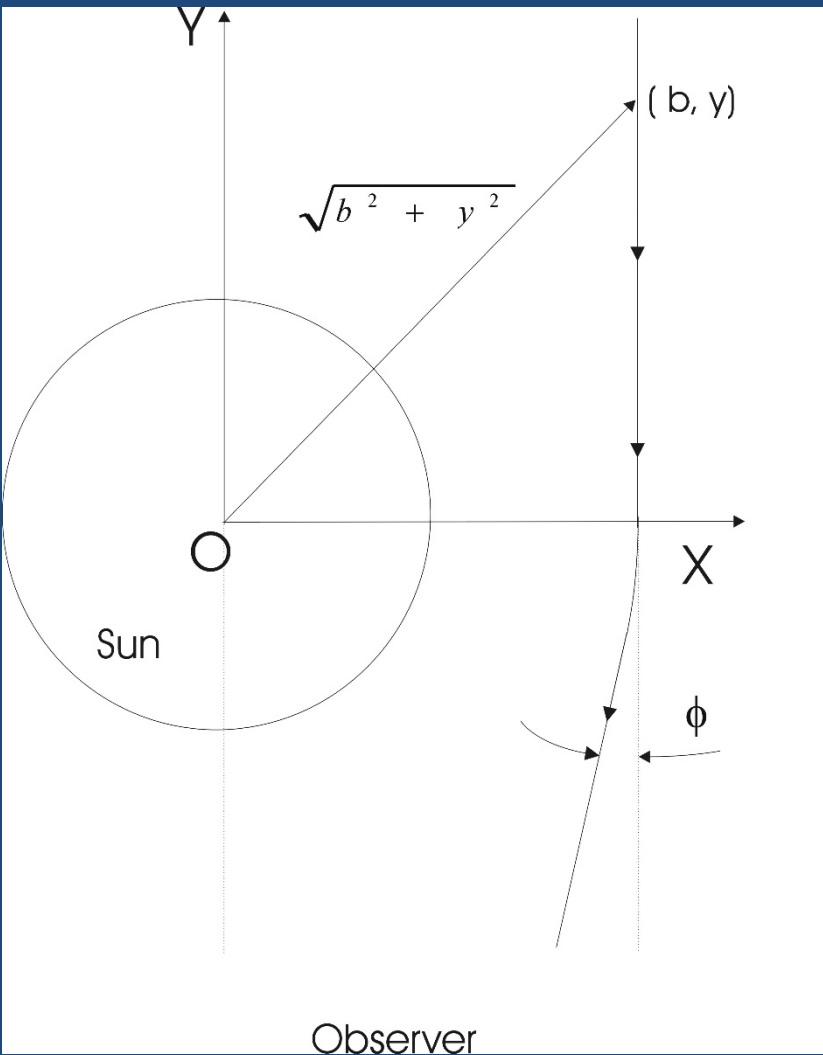


1.7''

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

Centenario della prima prova della Teoria della Relatività (1919, Sir Artur Eddington)

UN CALCOLO SBAGLIATO...(di tipo Newtoniano)



Siano $m=hc/c^2$ e M la “massa” del fotone e del Sole...

$$\vec{F} = -\frac{GmM}{(b^2 + y^2)^{3/2}} \vec{r}$$

$$F_x = -\frac{GmM}{(b^2 + y^2)^{3/2}} b$$

Poichè $mdv_x/dt=F_x$ si ha

$$v_x = \int_{-\infty}^{+\infty} -\frac{GMb}{(b^2 + y^2)^{3/2}} dt = -\frac{2GM}{cb}$$

$$\phi \cong \frac{|v_x|}{c} \cong \frac{2GM}{Rc^2} \cong \frac{r_s}{R} \cong 0.84''$$

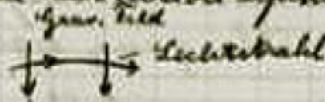
$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Zürich. 14. I. 13.

Aus

Hoch geehrten Herr Kollege!

Eine einfache theoretische Überlegung macht die Annahme plausibel, dass Lichtstrahlen in einem Gravitationsfelde eine Deviation erfahren.



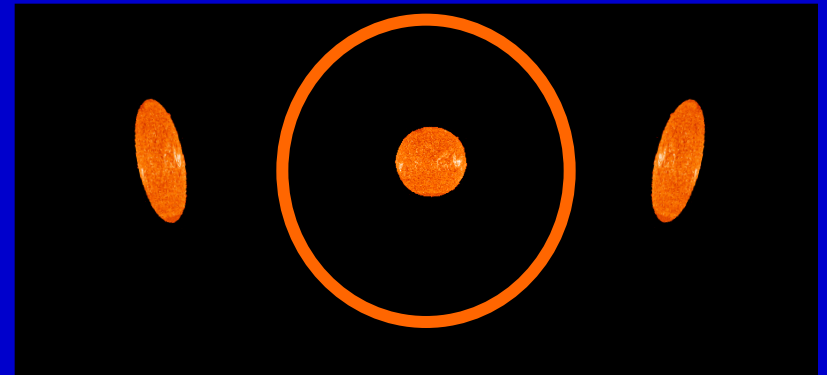
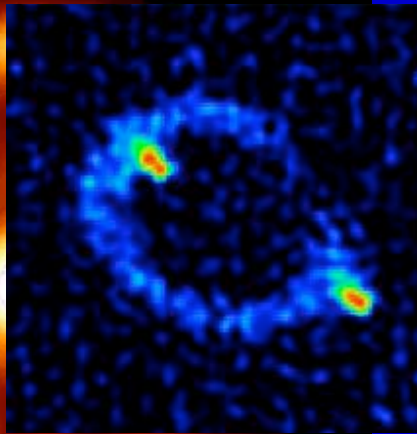
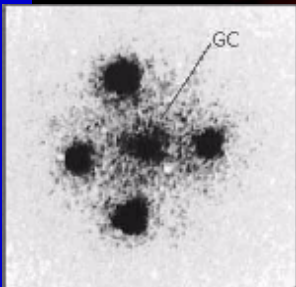
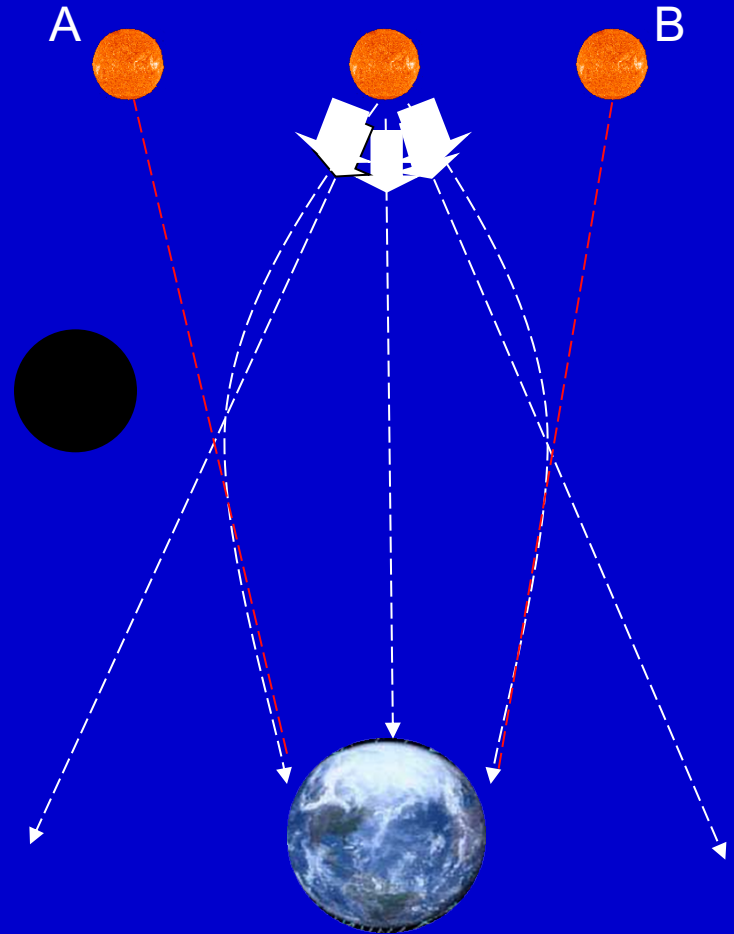
Am Sonnensande müsste diese Ablenkung $0,84^\circ$ betragen und wie $\frac{1}{R}$ abnehmen (Abstand vom Sonnenmittelpunkt) ($R = \text{Sonnenradius}$).



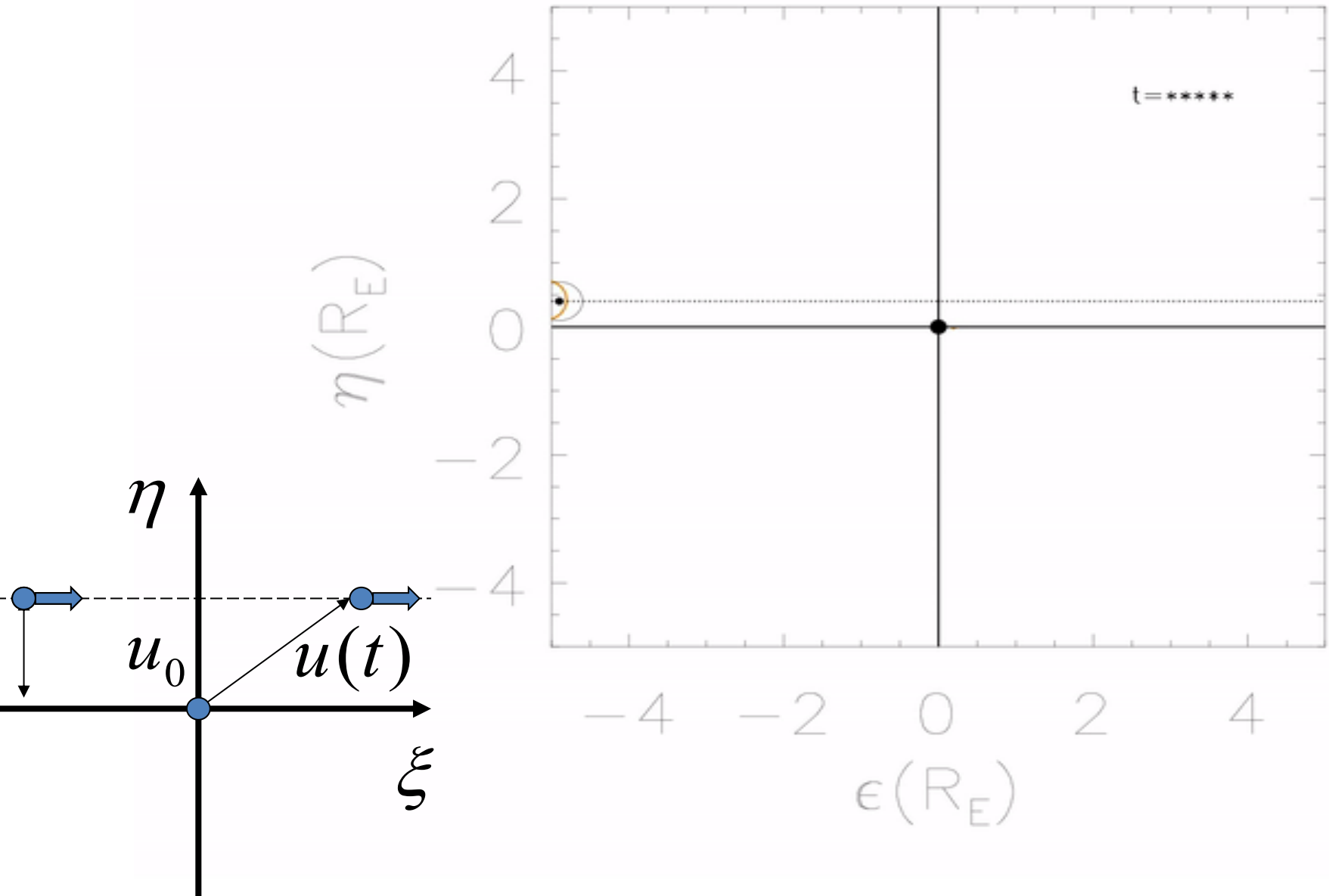
Es wäre deshalb von grösstem Interesse, bis zu wie grosser Sonnen-nähe ^{helle} grosse Fixsterne bei Anwendung der stärksten Vergrösserungen bei Tage (ohne Sonnenfinsternis) gesehen werden können.

Figure 1: Einstein's note to Hale, including a sketch of how he expected light to be deviated by the mass of the Sun.

LENTE GRAVITAZIONALE



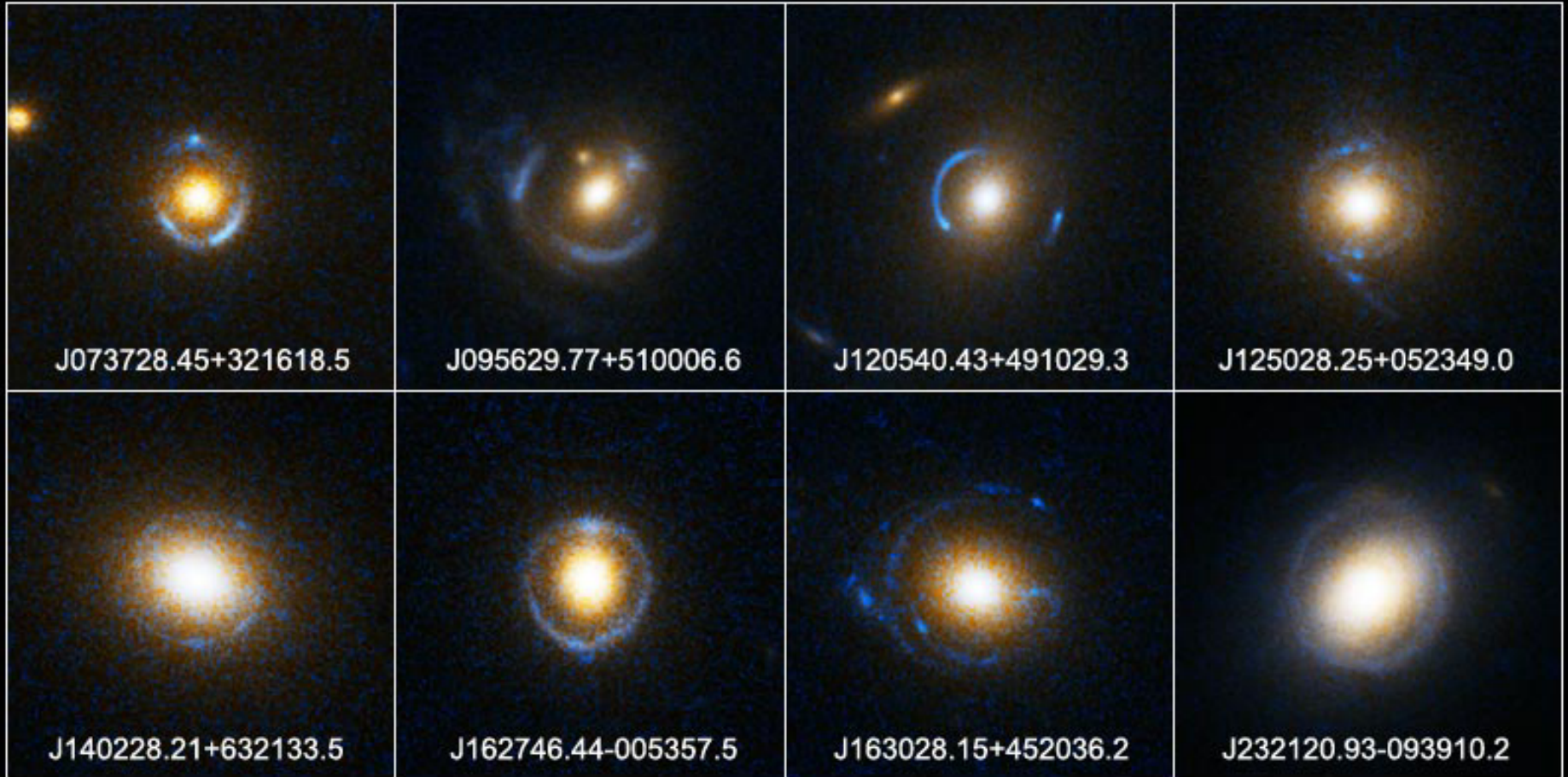
Simuliamo una lente singola, puntiforme...



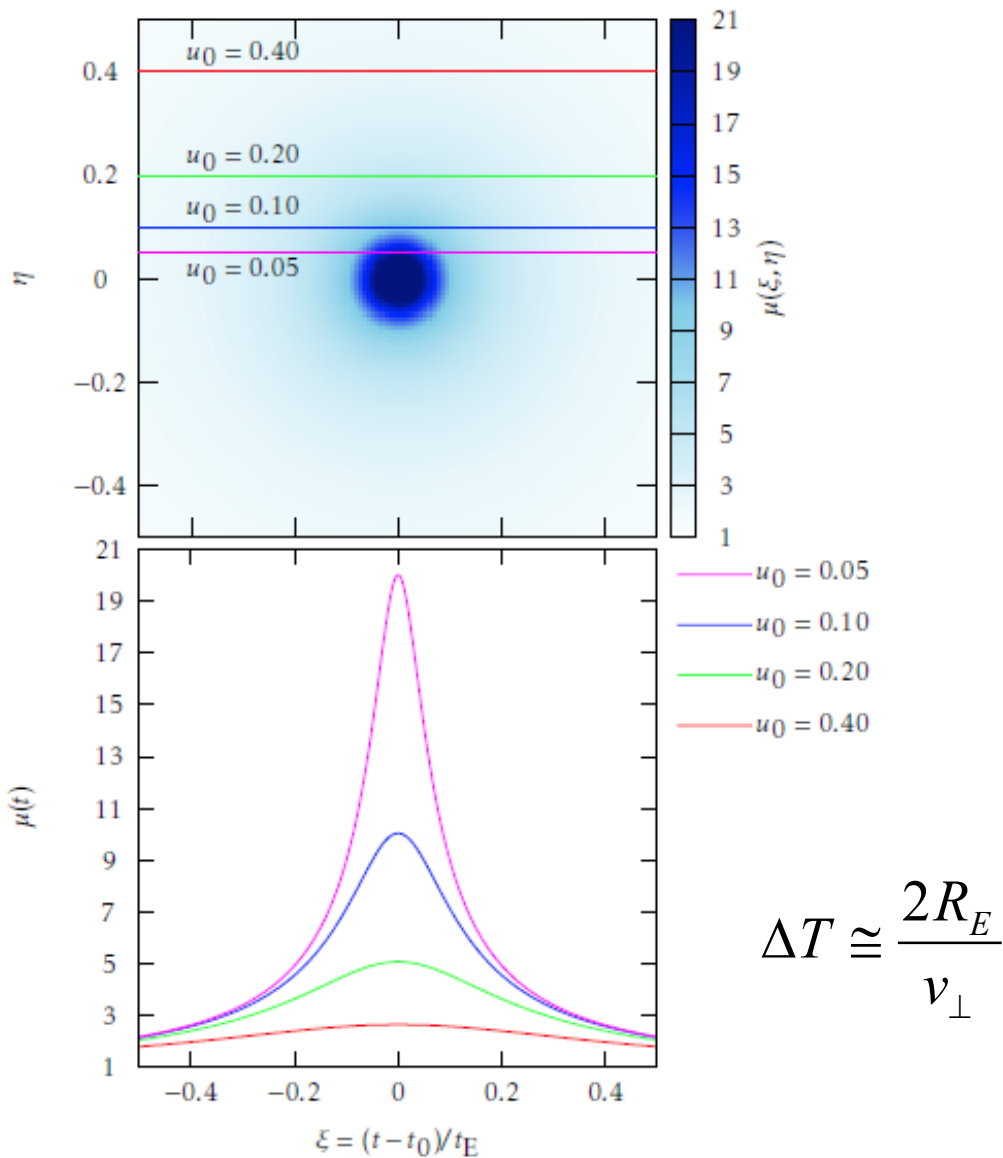
LENTE FORTE (STRONG): Lente estesa come una galassia, lunghissimi tempi scala!

Einstein Ring Gravitational Lenses

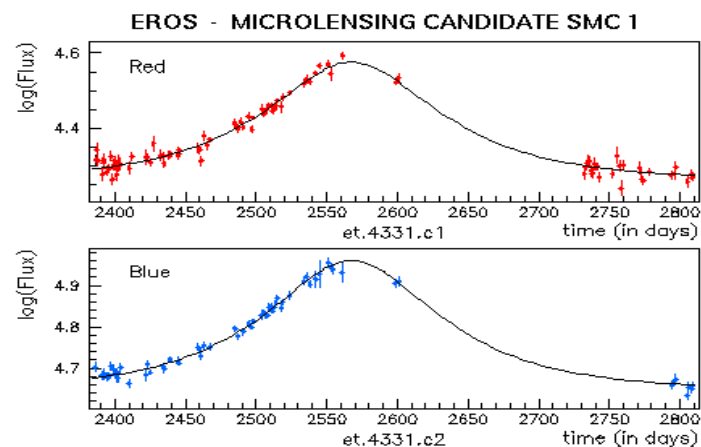
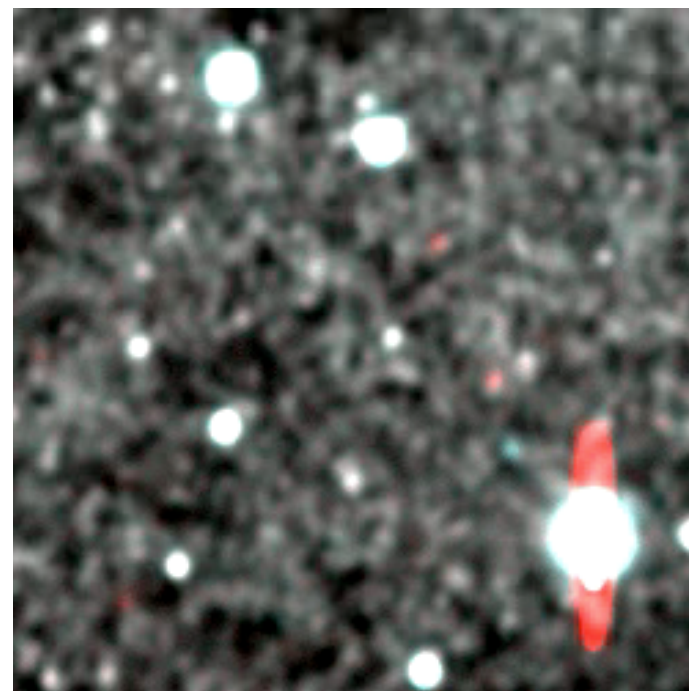
Hubble Space Telescope • ACS



LENTE MICRO: lente singola puntiforme, tempi scala di ore, giorni, mesi



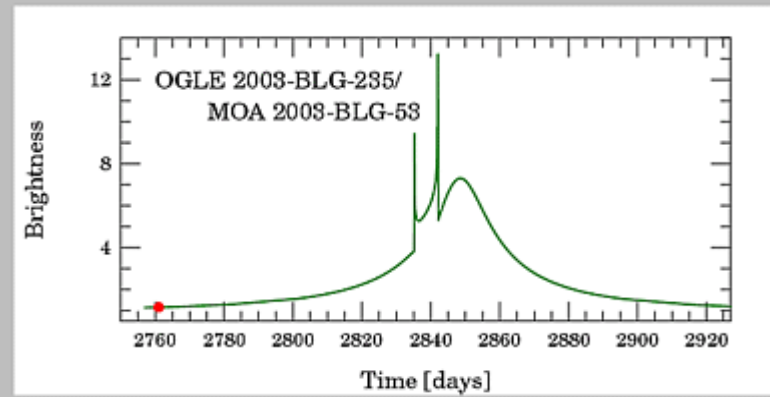
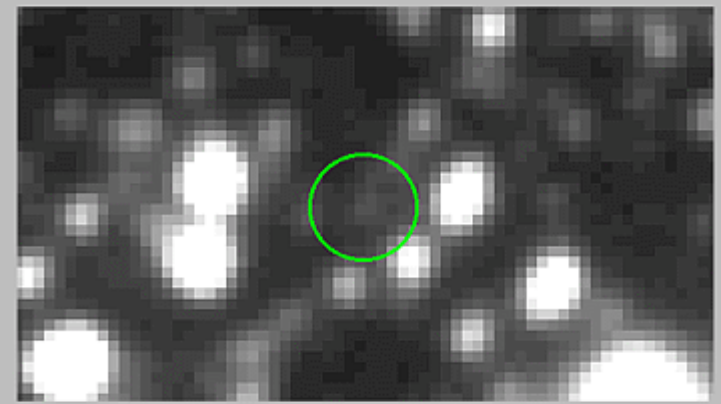
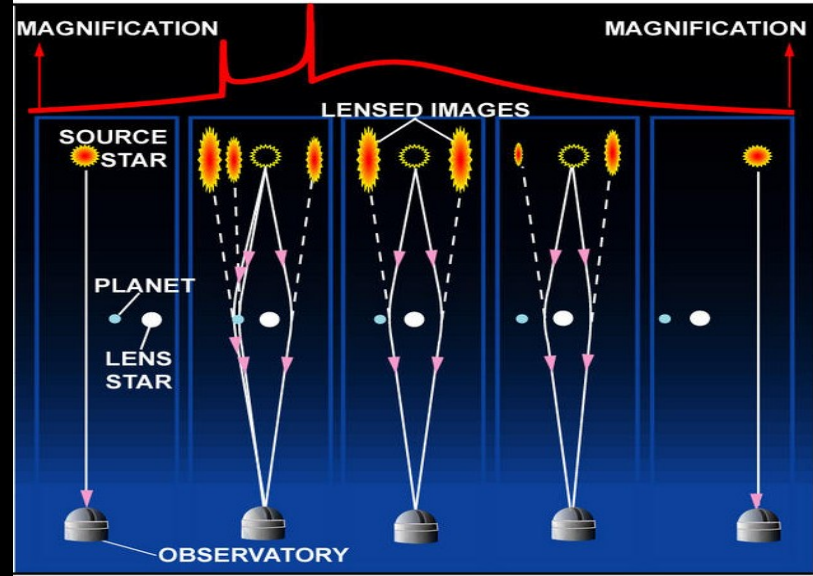
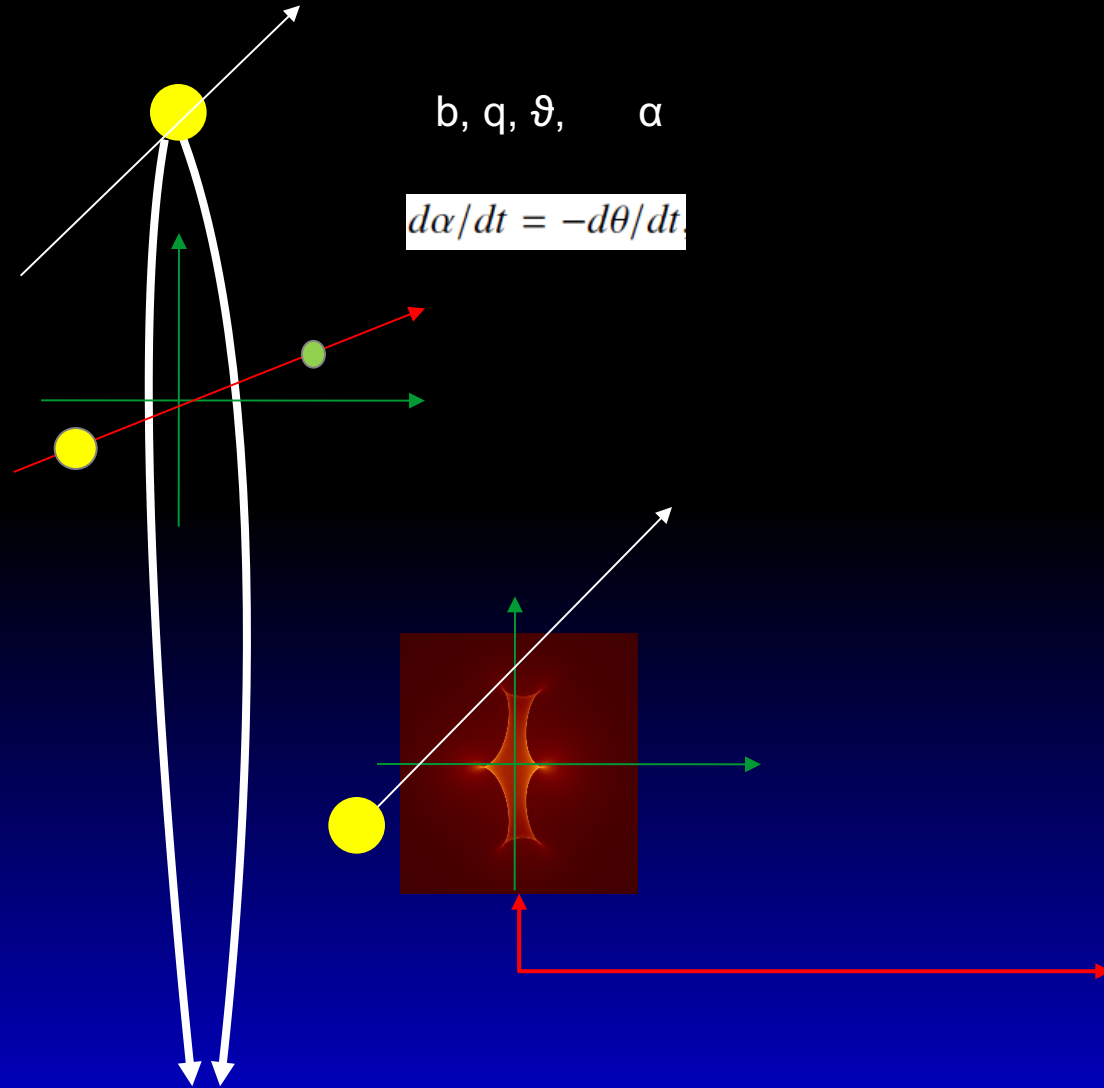
$$\Delta T \cong \frac{2R_E}{v_{\perp}}$$



MICRO LENTE DA SISTEMI BINARI

b, q, ϑ, α

$$d\alpha/dt = -d\theta/dt$$



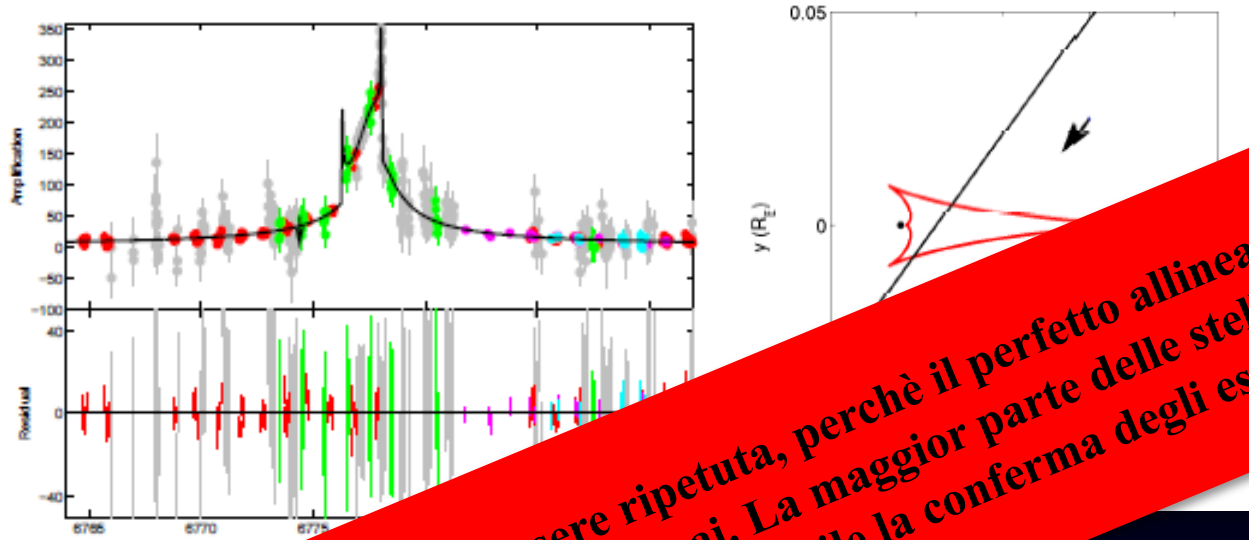
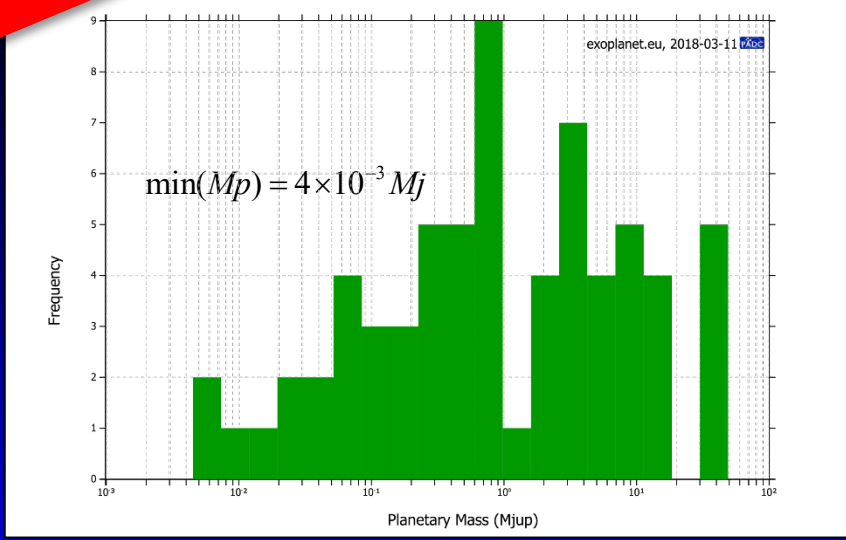


Figure 1. G_{125} light curve of HD 10180 B b. The black arrow indicates the transit. The red arrow indicates the transit. The black arrow indicates the transit. The red arrow indicates the transit. The black arrow indicates the transit. The red arrow indicates the transit.

67 PIANETI TROVATI SONO AD ORA!

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.



METODI PER OSSERVARE UN ESO-PIANETA

VELOCITA' RADIALI

ASTROMETRIA

TRANSITI

IMMAGINI DIRETTE

MICRO-LENTE

METODI PER OSSERVARE UNA ESOLUNA

VELOCITA' RADIALI DI ESO LUNE

ASTROMETRIA DI ESOLUNE

TRANSITI DI ESO-LUNE

VARIAZIONI TEMPORALI DEI TRANSITI ESO-PIANETI

IMMAGINI DIRETTE

MICRO-LENTE

VELOCITA' RADIALI DI ESO LUNE

ASTROMETRIA DI ESOLUNE

DIPENDONO DA RAPPORTI DI MASSA

IMMAGINI DIRETTE

LA PRESSIONE DI RADIATIONE LUNA/PIANETA \propto (Raggio Luna/ Raggio Pianeta)²

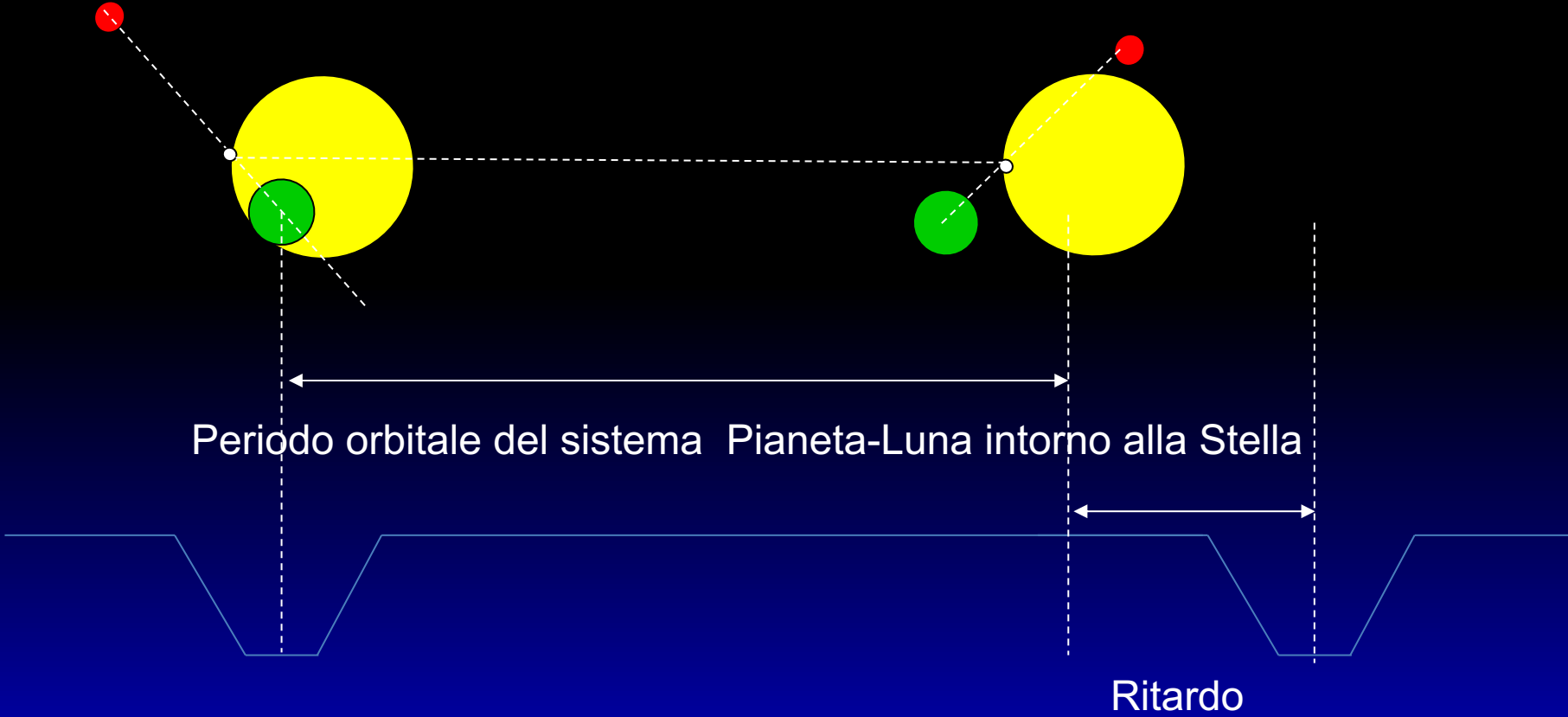
MISURE IMPRATICABILI CON LA STRUMENTAZIONE ATTUALE

TRANSITI DI ESO-LUNE (come in KEPLER 1625 b , $P = 9.5$ mesi. Attualmente osservato da HST) (Kipping, 2009, MNRAS, 392, 181): Extra-transiti o deformazioni del transito principale. PRIMA ESO-LUNA OSSERVATA!



Credit: ILLIAD, SUPD

VARIAZIONI TEMPORALI DEI TRANSITI ESO-PIANETI (Kipping, 2009, MNRAS, 392, 181)



TTV VARIAZIONI DELL'ISTANTE DEL TRANSITO
TDV VARIAZIONI DELLA DURATA DEL TRANSITO

SCUSATE SE E' POCO: SOLO 4 EXO-LUNE OSSERVATE!

Host star of the host planet	Planet designation/order	Planet mass (M _J)	Semimajor axis (AU)	Exomoon semimajor axis (AU)	Exomoon mass (M _e)	Notes
1SWASP J140747.93-394542.6	J1407b ^[29]	14–26	2.2–5.6	0.24	<0.3	Two possible exomoons residing in small ring gaps around J1407b.
				0.25		
				0.40	<0.8	Possible exomoon residing in a large ring gap around J1407b.
WASP-12	WASP-12b ^[30]	1.35–1.43	0.0221–0.0237	?	0.57–6.4	Found by studying periodic increases and decreases in light given off from WASP-12b.
Rogue planet	MOA-2011-BLG-262 ^[31]	<189	N/A	?	8–46	Found by microlensing; however it is unknown if the system is a low Neptune-mass planet orbiting a free floating planet, or a low Jupiter-mass planet orbiting a low-mass red dwarf.
Kepler-1625	Kepler-1625b	≈10?	0.85	0.0023	~17?	Possible Neptune-sized exomoon or Double planet , indicated by transit observations. ^[32]