

Nuovi mondi possibili: i pianeti extrasolari

INAF - Osservatorio Astronomico di Brera
Mario.Carpino@inaf.it

Ordini di grandezza

Distanza

Massa

Unità di distanza

1 Unità Astronomica (AU) = 1.496×10^8 km = 149.6 milioni di km
(dimensioni del Sistema Solare $\approx$ 30-40 AU)

1 anno luce = 63241 AU

(distanza stella più vicina $\approx$ 4.22 anni luce)

(diametro della Galassia $\approx 10^5$ anni luce)

(distanza della galassia più vicina $\approx 2 \times 10^6$ anni luce)

1 parsec (parallasse secondo) = 3.26 anni luce

(1" = moneta da 1 euro a 5 km)

Difficoltà dell'osservazione diretta

Come apparirebbe Venere se fosse osservata alla distanza di una delle stelle più vicine al Sole?

	Sole	Stella a 1 pc	Stella a 10 pc
Distanza dalla Terra	1 AU	200,000 AU	2,000,000 AU
Angolo stella-pianeta	50°	5''	0.5''
Luminosità relativa	1	1×10^{-10}	1×10^{-12}
Magnitudine	−4	23	28

Massa: unità di misura e limiti

massa terrestre (M_E) = 5.97×10^{24} kg

massa di Giove (M_J) = $318 M_E$

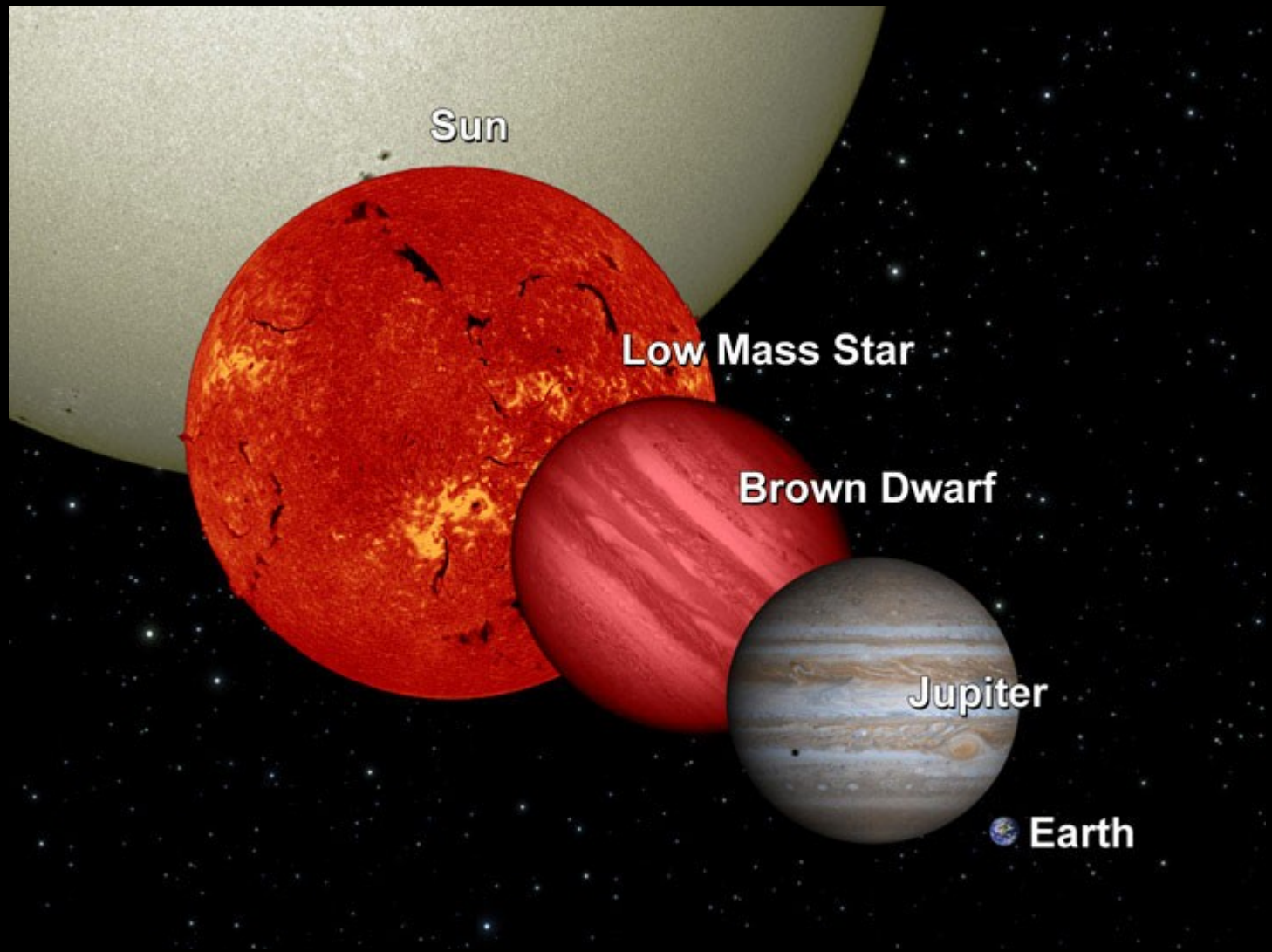
massa del Sole (M_S) = $333000 M_E = 1047 M_J$

pianeta: $M < 13-15 M_J$

nana bruna: $13-15 M_J < M < 70-80 M_J$

stella : $70-80 M_J < M$

Stella, nana rossa, nana bruna, pianeta



Tappe della scoperta

1984: anello di polveri attorno a β Pictoris

1988: prima scoperta di un pianeta extrasolare
(γ Cephei, conferma 2003)

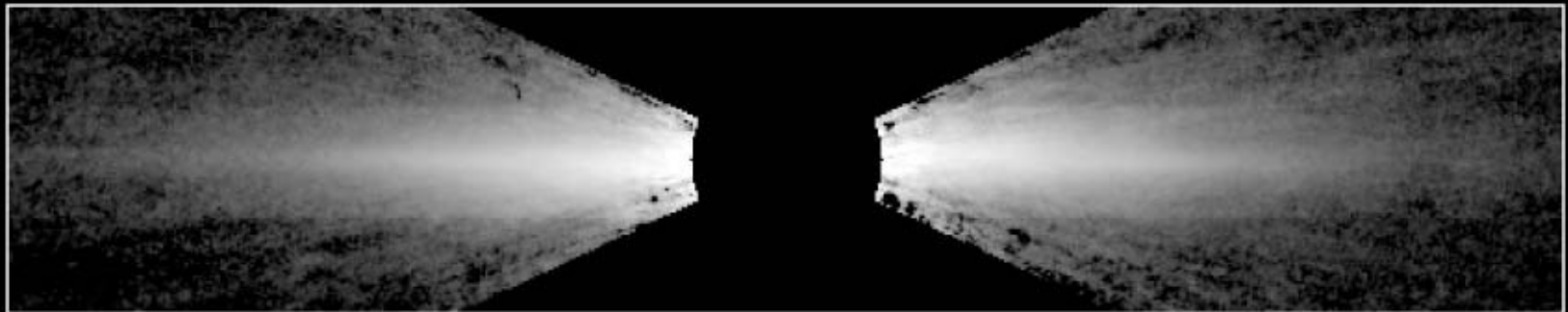
1992: primo pianeta attorno a una pulsar

1995: prima scoperta sicura (51 Pegasi)

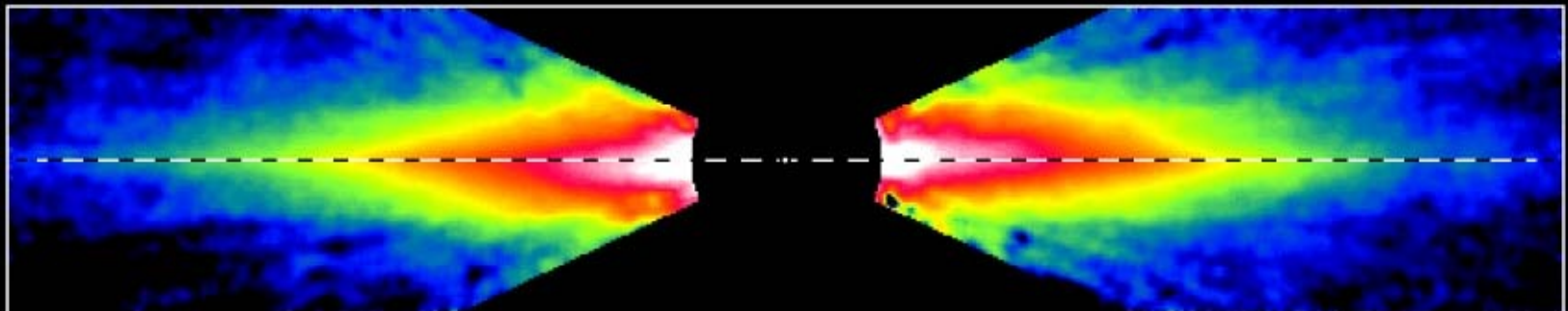
2004: prima osservazione ottica diretta

2018: 3906 pianeti, 2910 sistemi planetari

Anelli di polvere
attorno ad altre stelle



Size of Pluto's Orbit

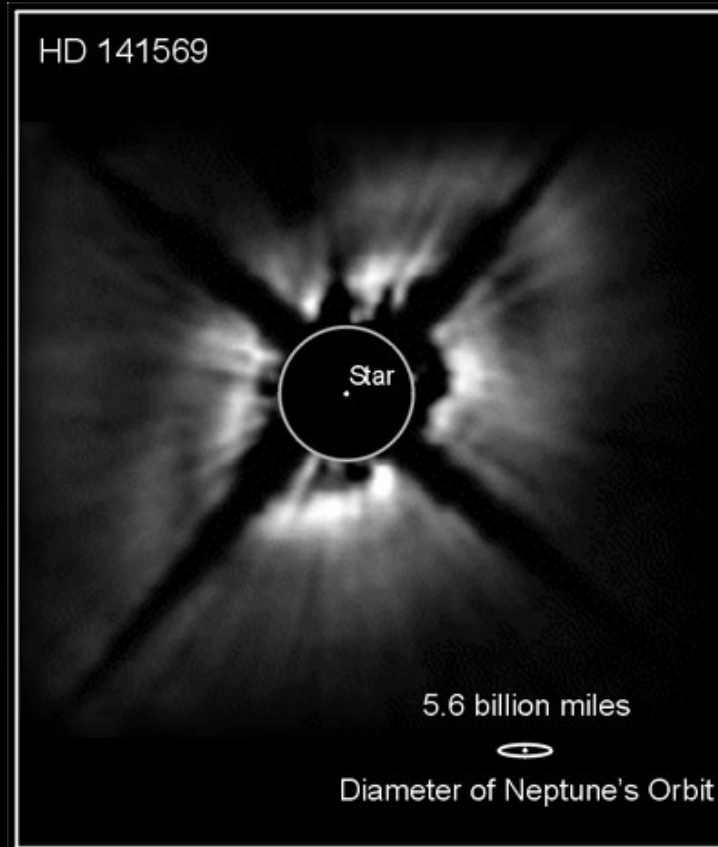


Warped Disk • Beta Pictoris

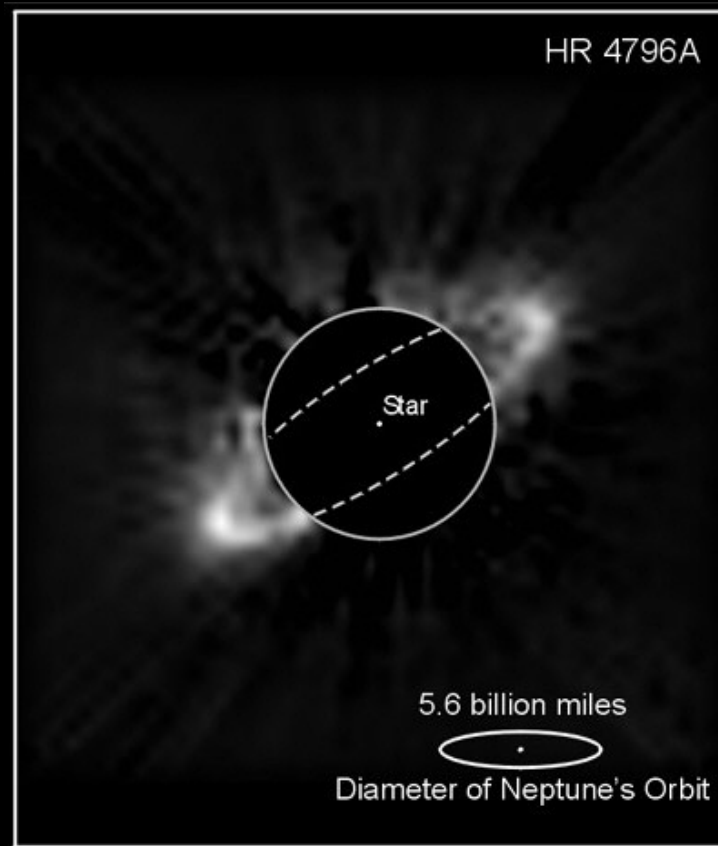
HST • WFPC2

PRC96-02 • ST ScI OPO • January 17, 1995 • C. Burrows and J. Krist (ST ScI), WFPC2 IDT, NASA

Anelli di polvere attorno ad altre stelle



Anelli di polvere attorno ad altre stelle



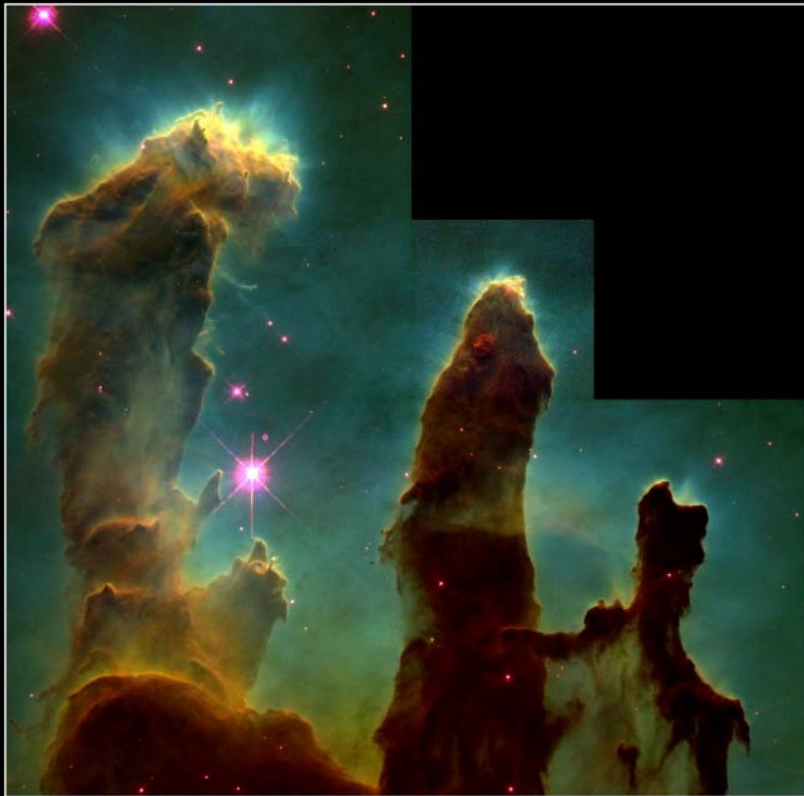
Dischi protoplanetari



Meccanismo di formazione dei sistemi planetari



Nubi molecolari giganti



Gaseous Pillars • M16

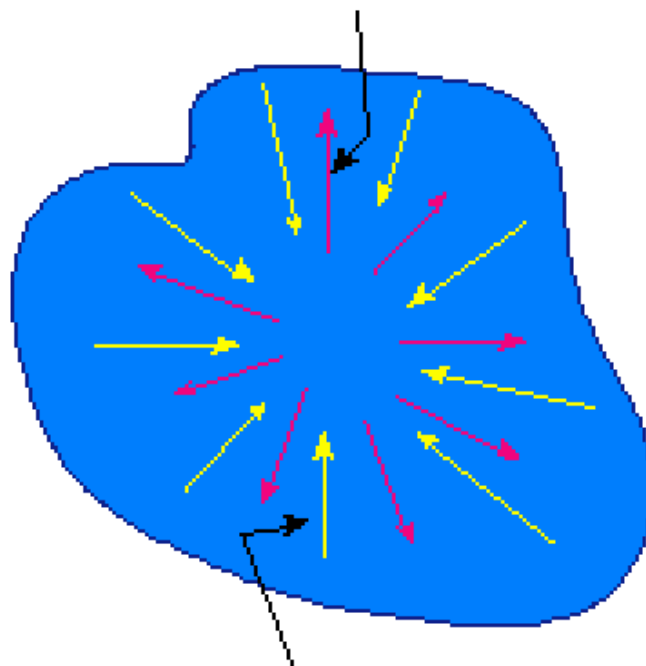
HST • WFPC2

PRC95-44a • ST ScI OPO • November 2, 1995
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA



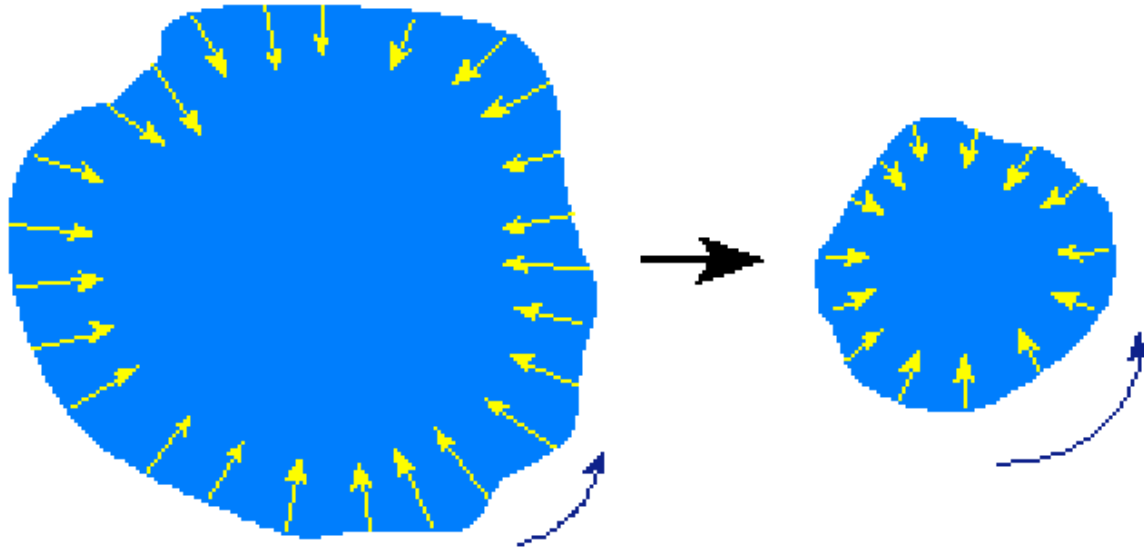
Formazione del Sistema Solare - 1

la pressione del gas tende
a far espandere la nube



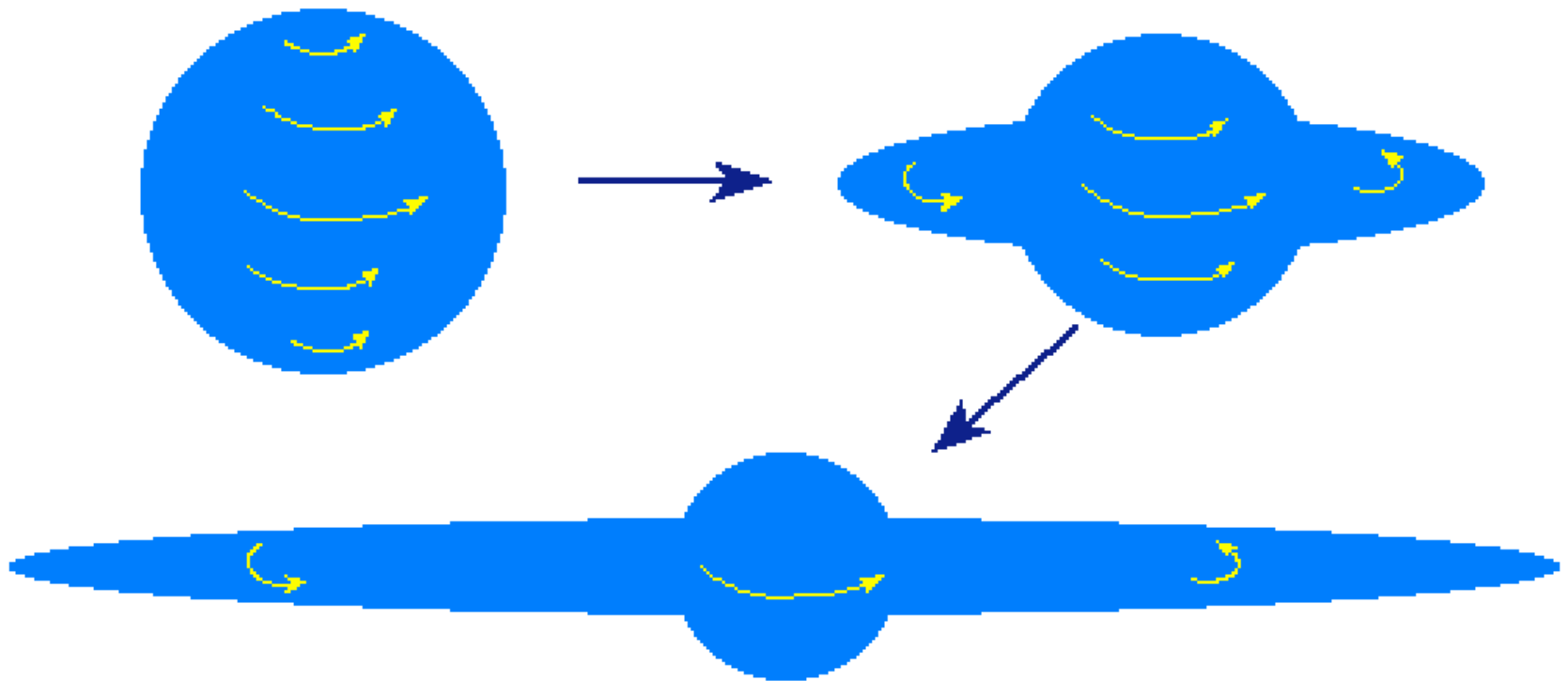
la forza di gravitazione tende
a far contrarre la nube

Formazione del Sistema Solare - 2



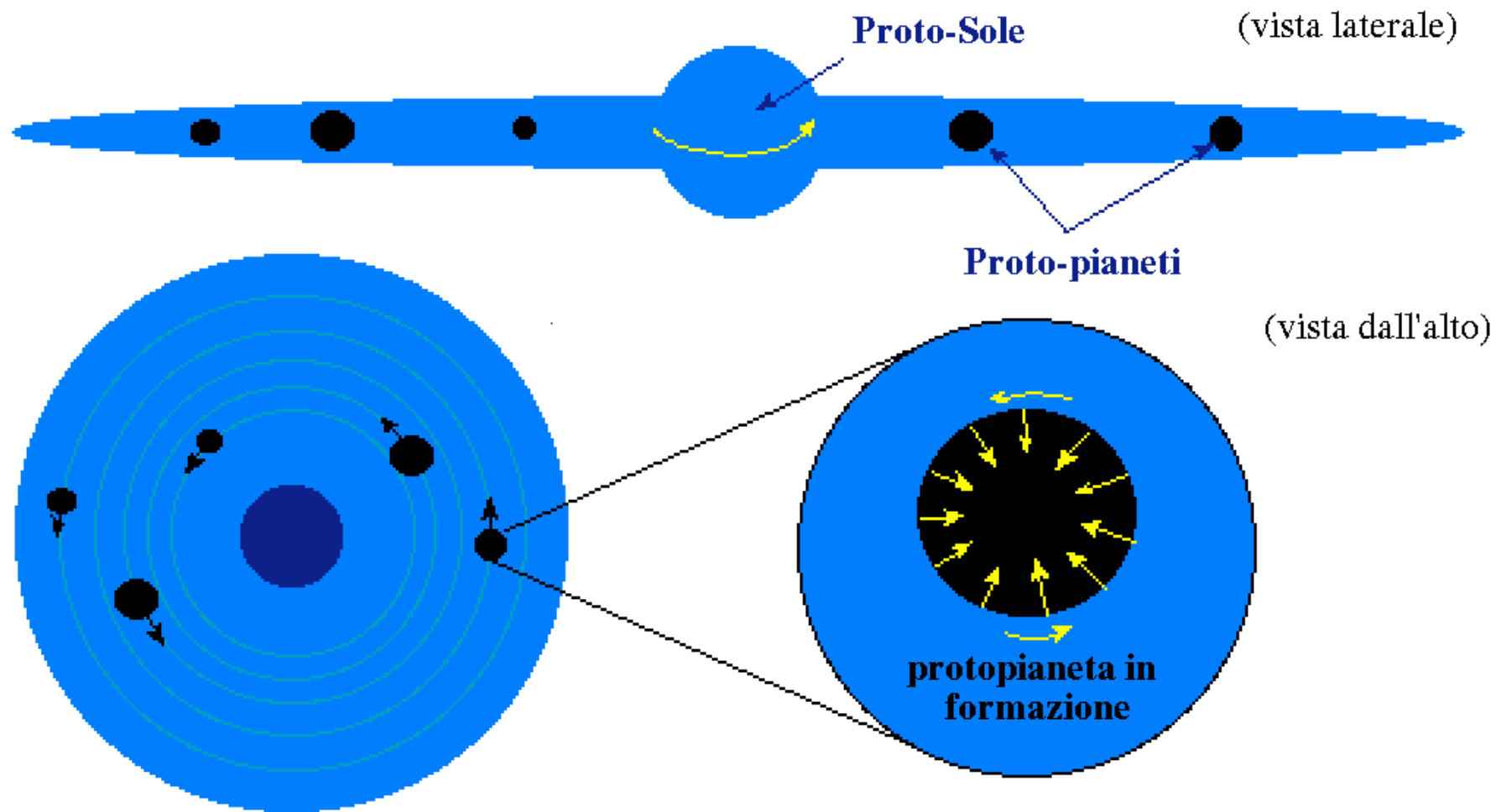
Collassando la nube accelera la sua velocità di rotazione per la conservazione del momento angolare

Formazione del Sistema Solare - 3

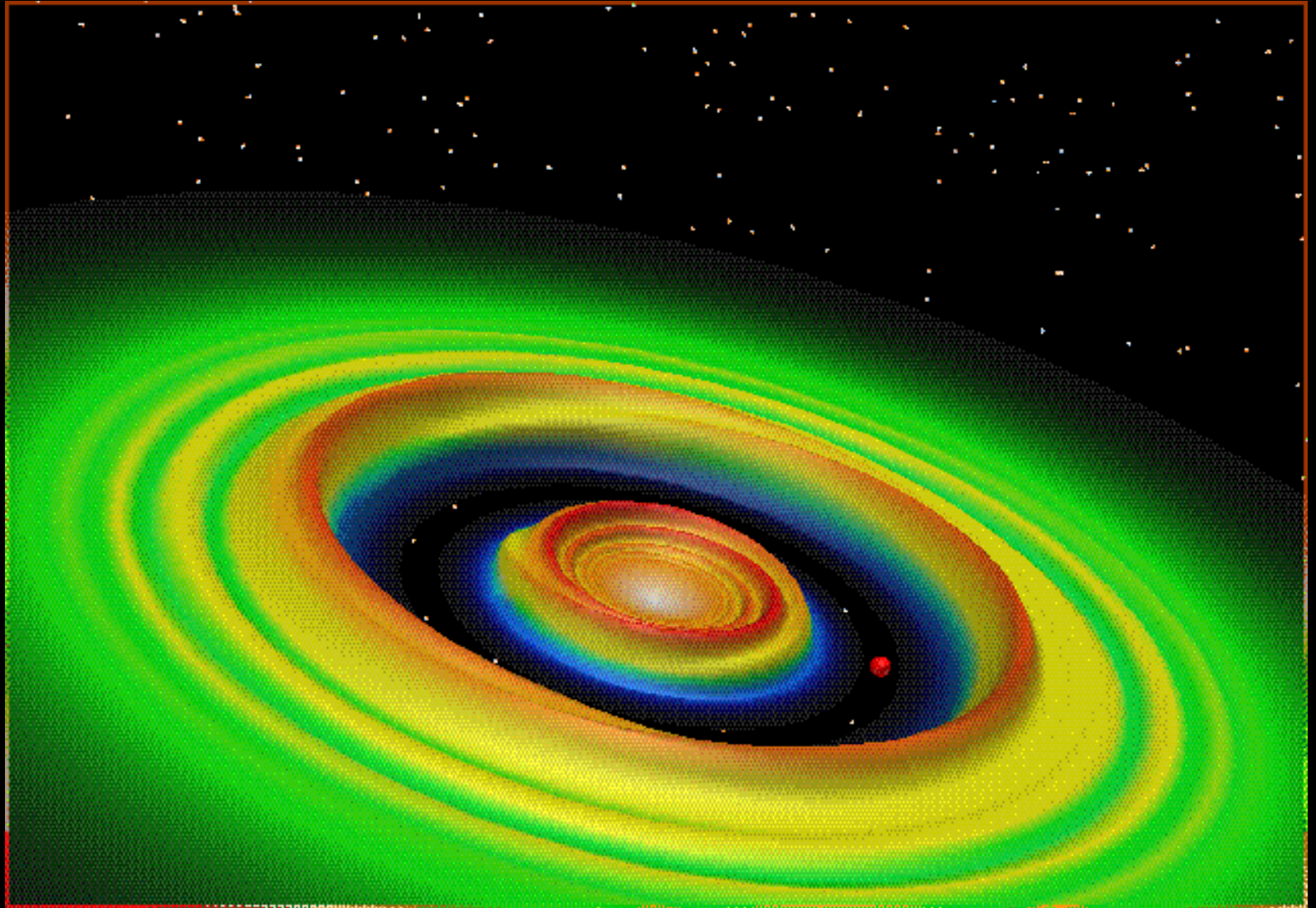


Formazione del disco (veduta laterale)

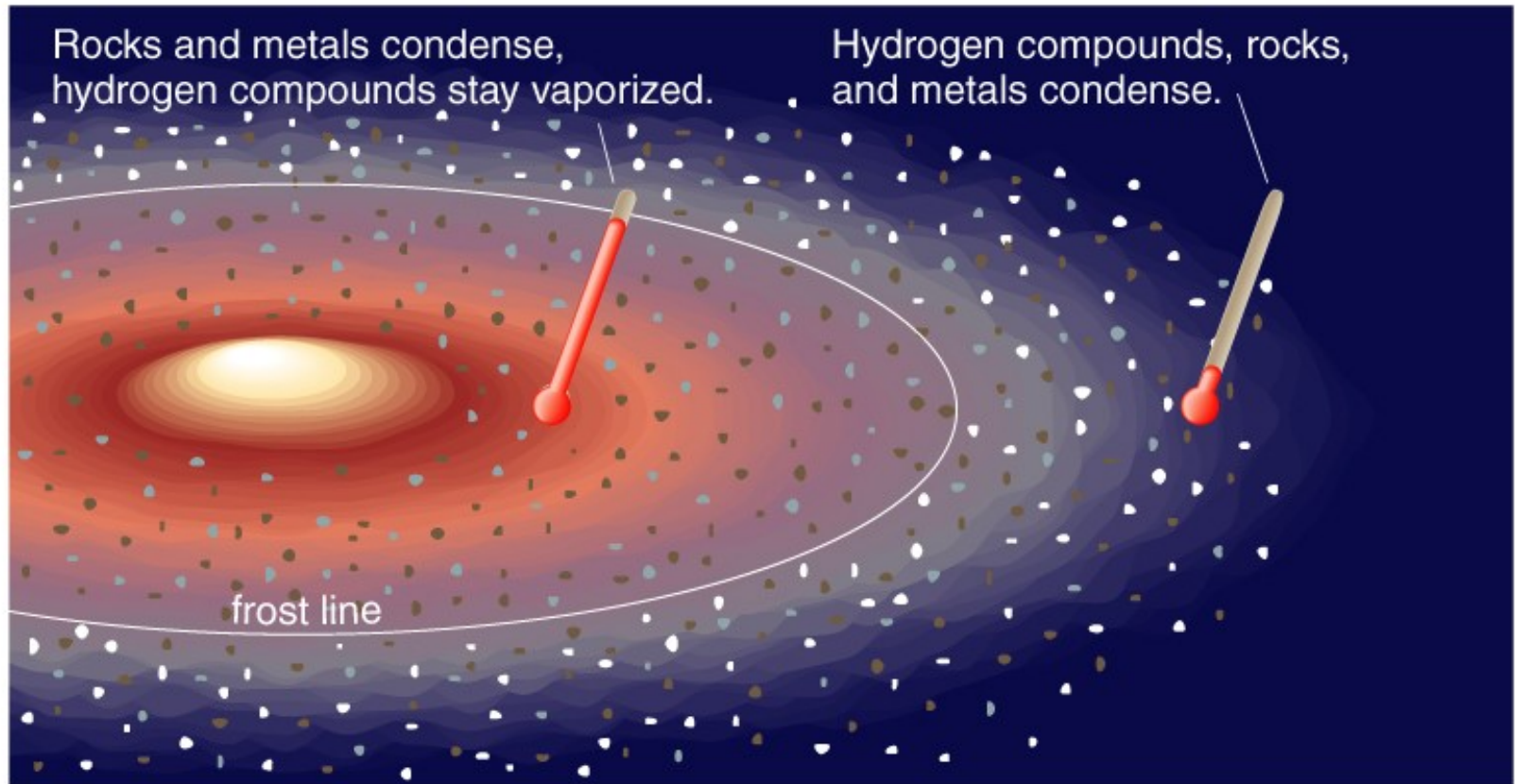
Formazione del Sistema Solare - 4



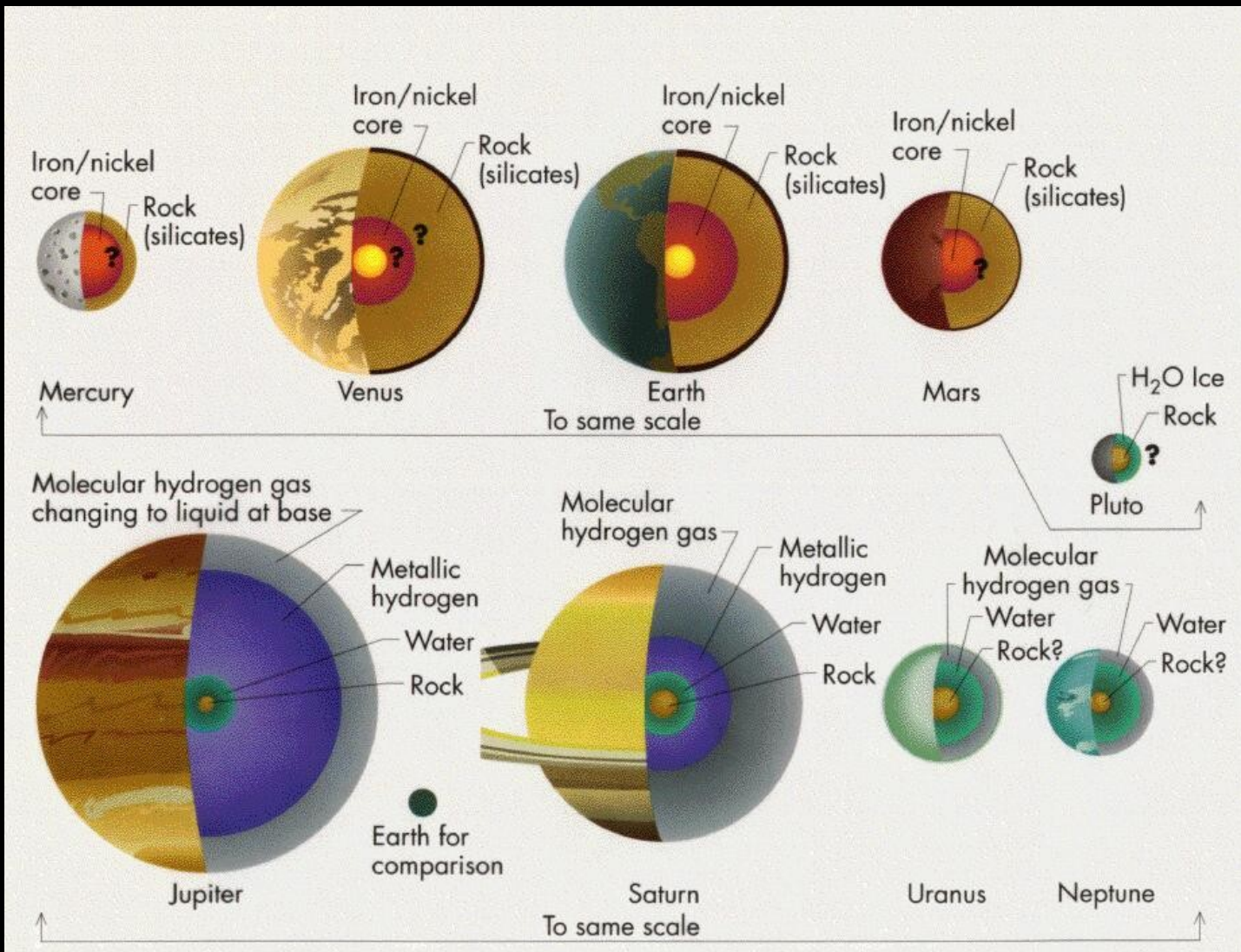
Formazione del Sistema Solare



Gradiente di temperatura



Differenze di composizione interna



pianeti
"terrestri"
(interni)

pianeti
"giganti"
(esterni)

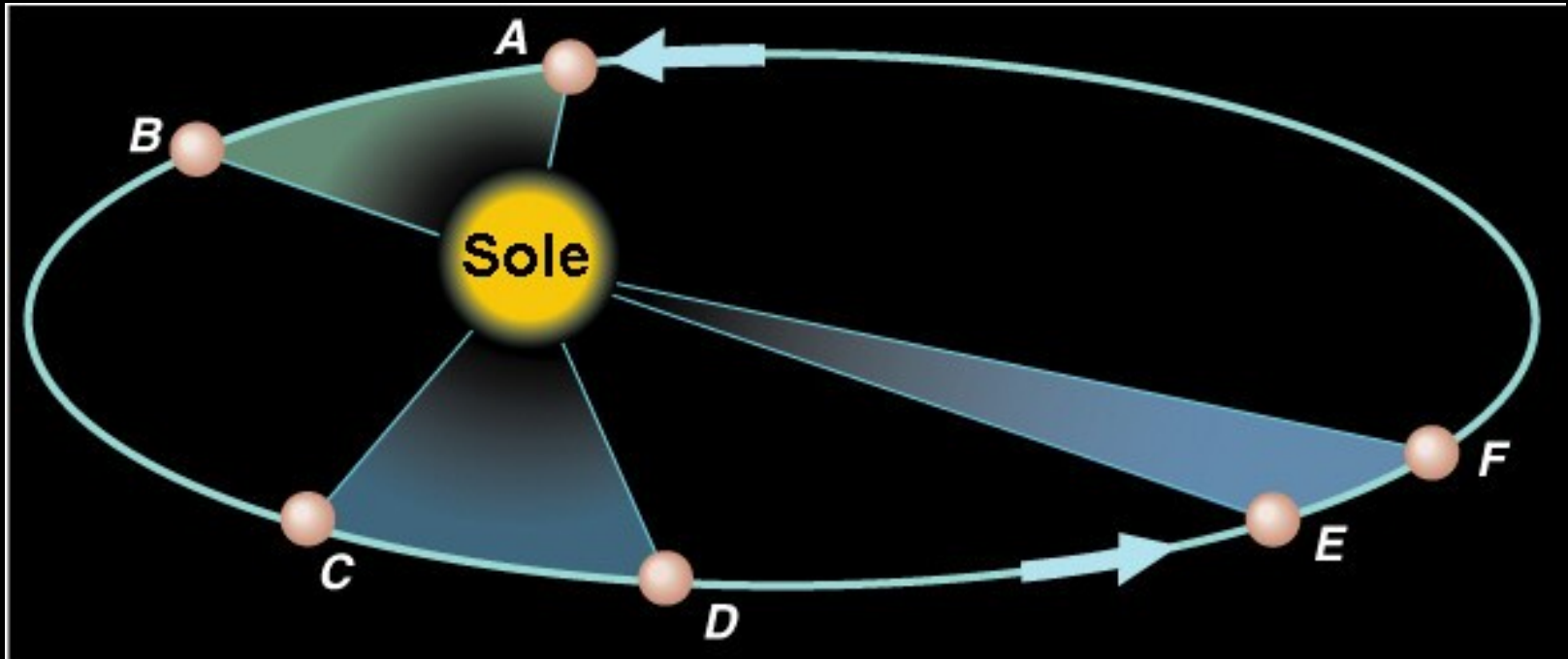
Metodi di detezione

- spettroscopia (velocità radiale)
- fotometria (occultazioni)
- ritardi nei segnali di *pulsar*
- astrometria di precisione
- *microlensing* gravitazionale
- immagini dirette:
 - ottiche adattive
 - interferometria (da terra e dallo spazio)
 - immagini nell'infrarosso termico

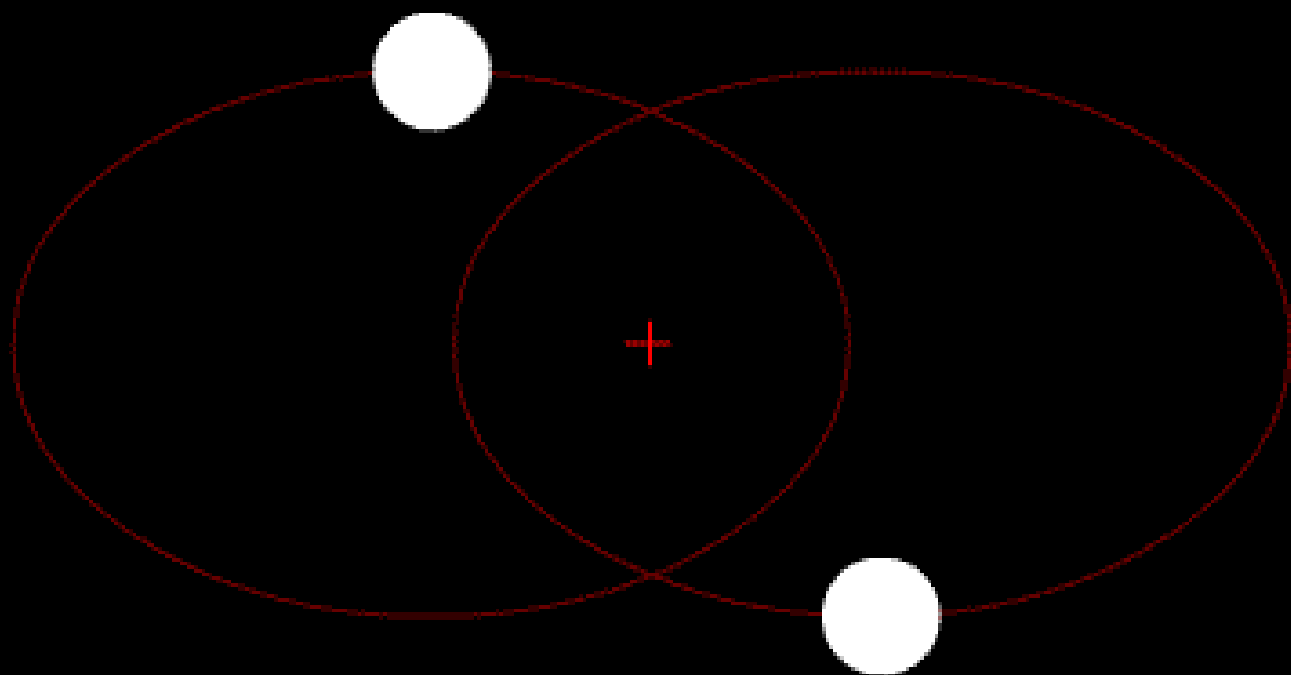
Metodi di detezione

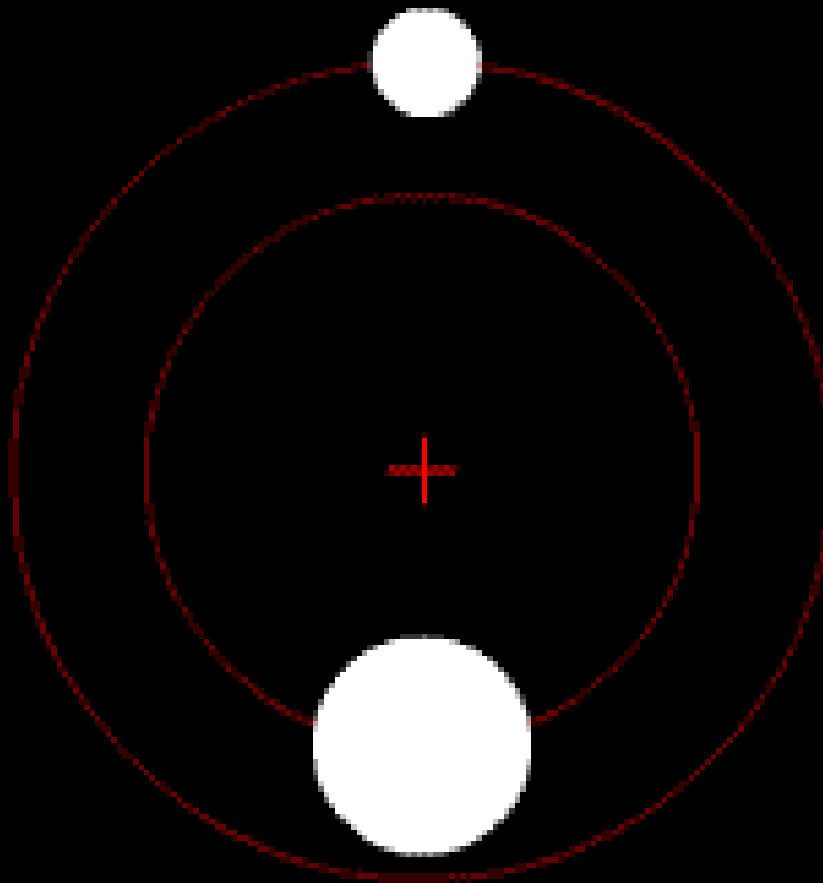
Misure di velocità radiale
(effetto Doppler)

I pianeti si muovono attorno al Sole



Ma è proprio vero che il Sole è immobile?

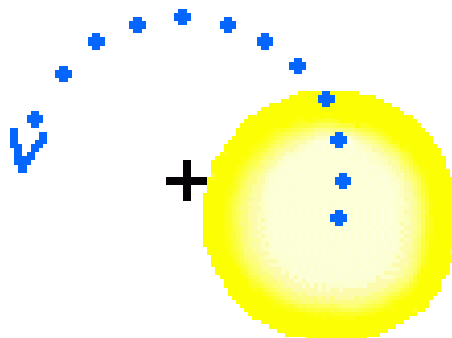




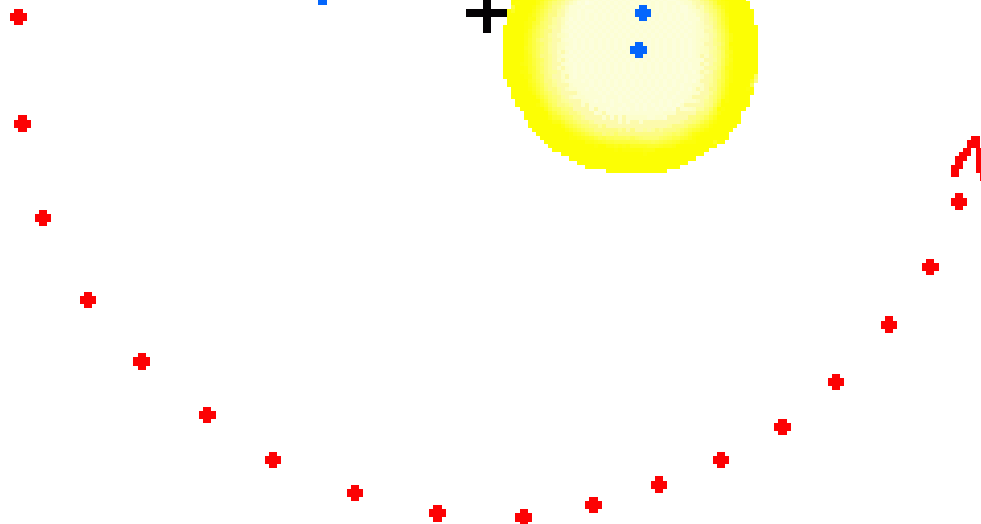
$$M_1 R_1 = M_2 R_2$$

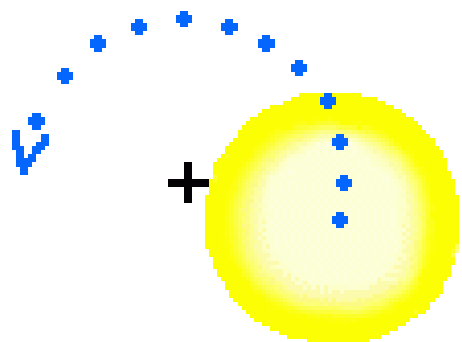
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{M_2}{M_1}$$

Pianeta



Stella

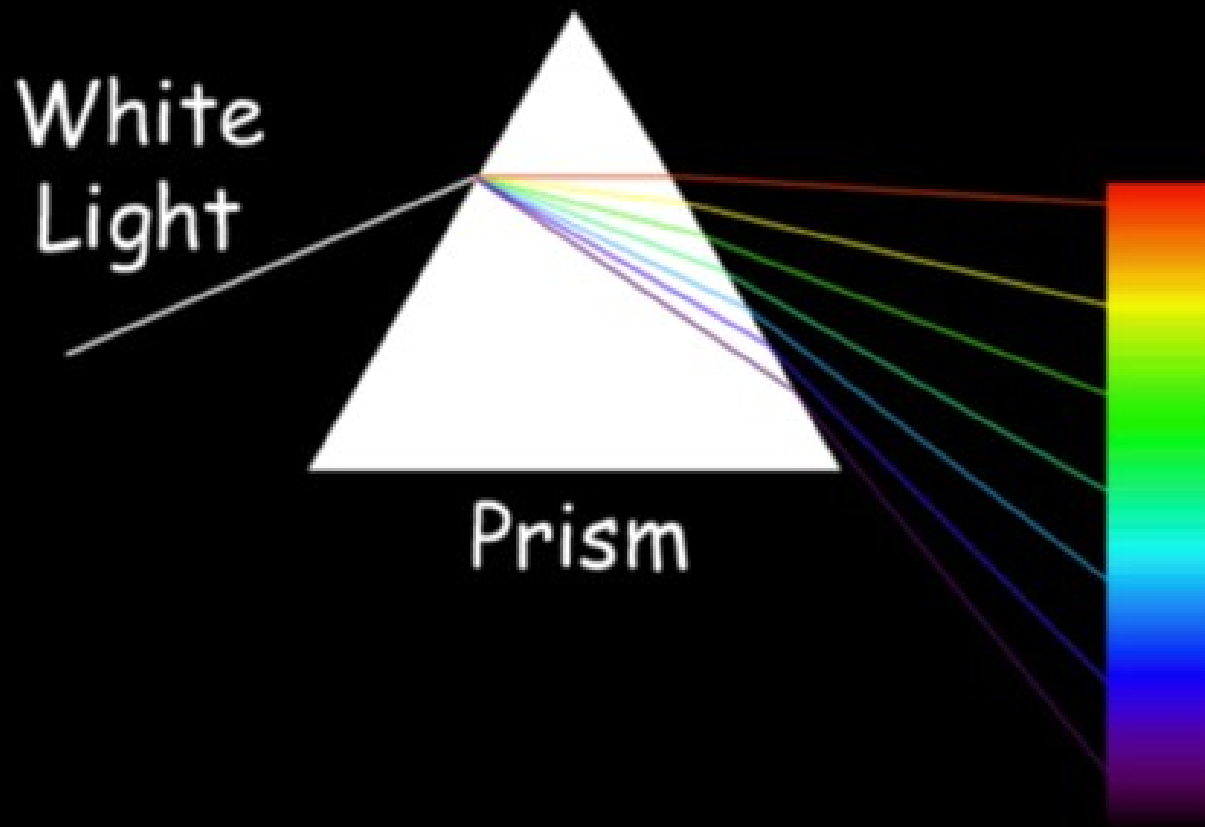




Ricerca di pianeti extrasolari con il metodo spettroscopico

Pianeta	Massa (M_s)	Velocità orbitale	Velocità del Sole
Giove	1×10^{-3}	13 km/s	13 m/s
Terra	3×10^{-6}	30 km/s	10 cm/s

Scomposizione spettrale della luce

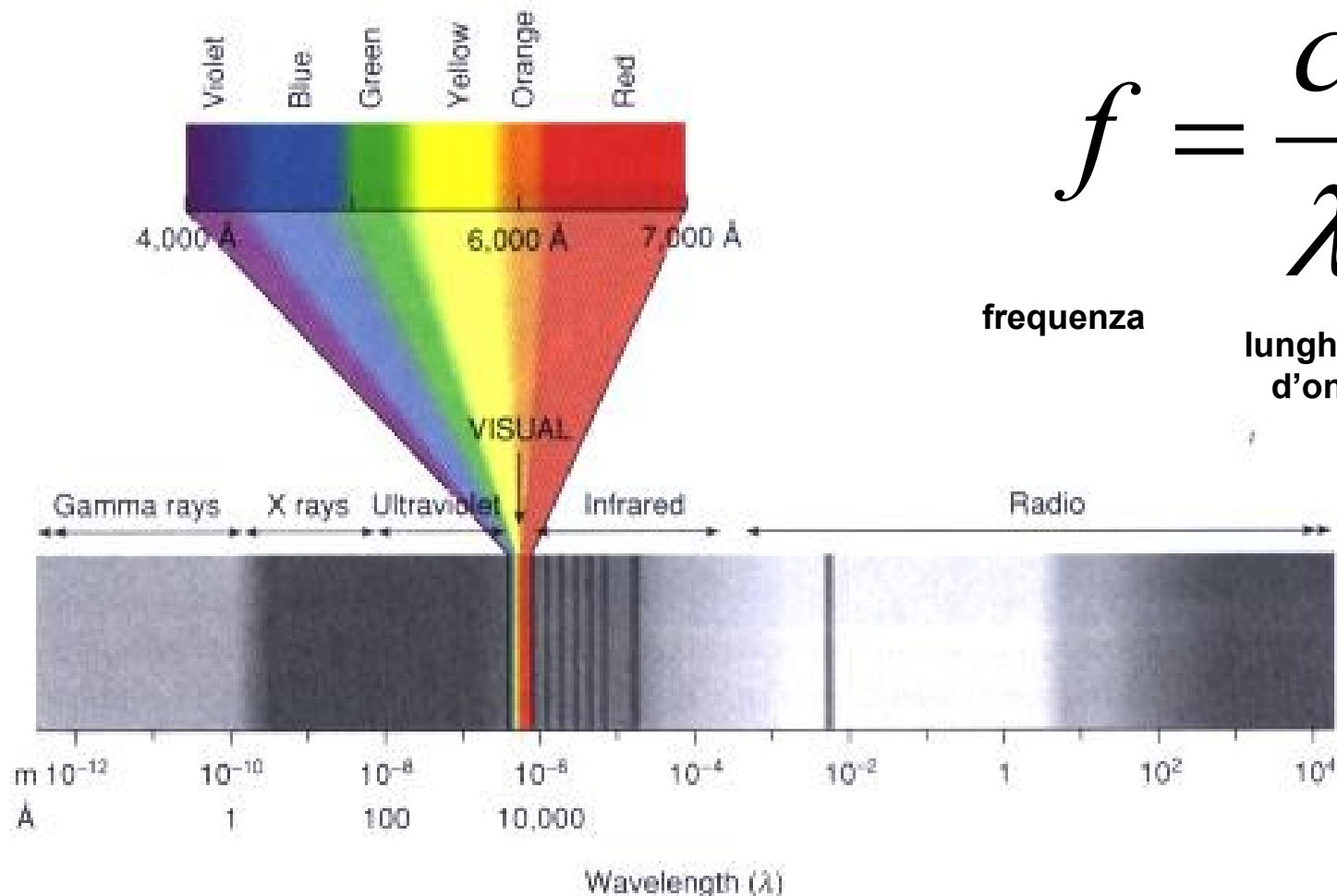


La luce come forma di radiazione elettromagnetica

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

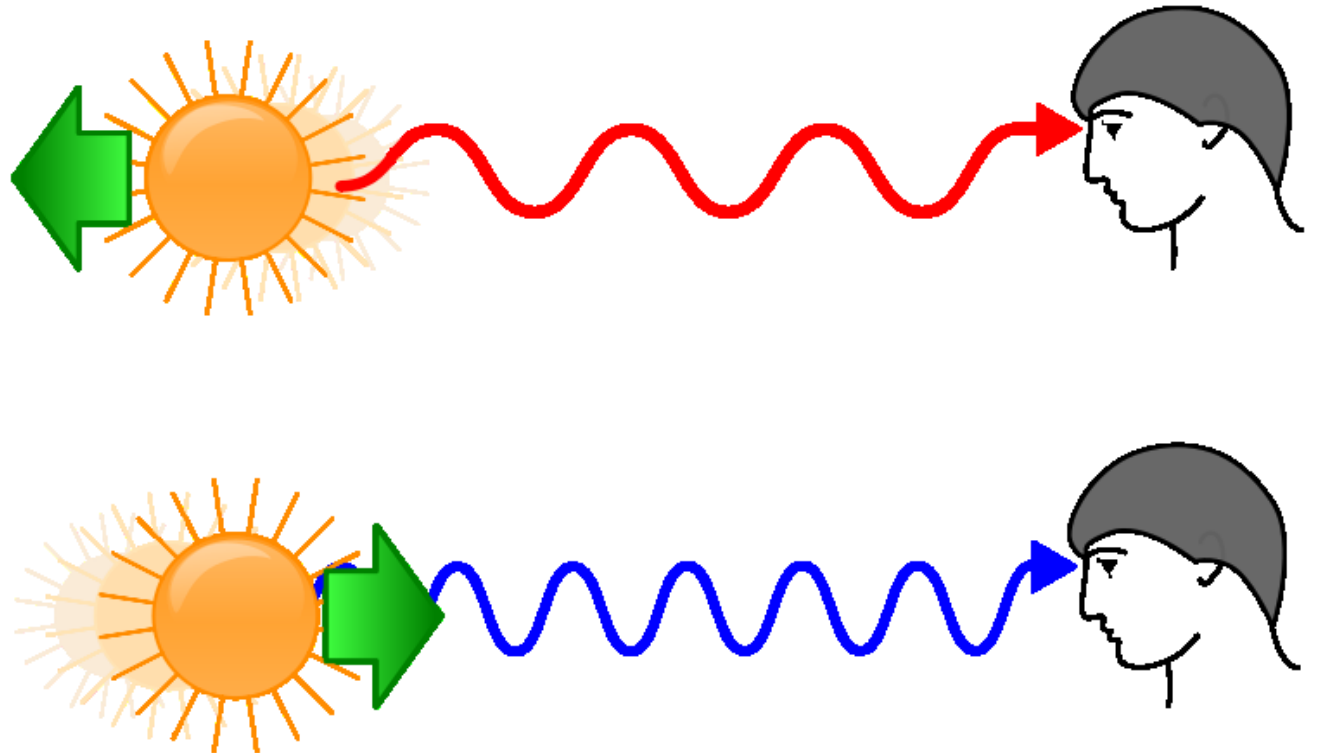
frequenza

lunghezza
d'onda

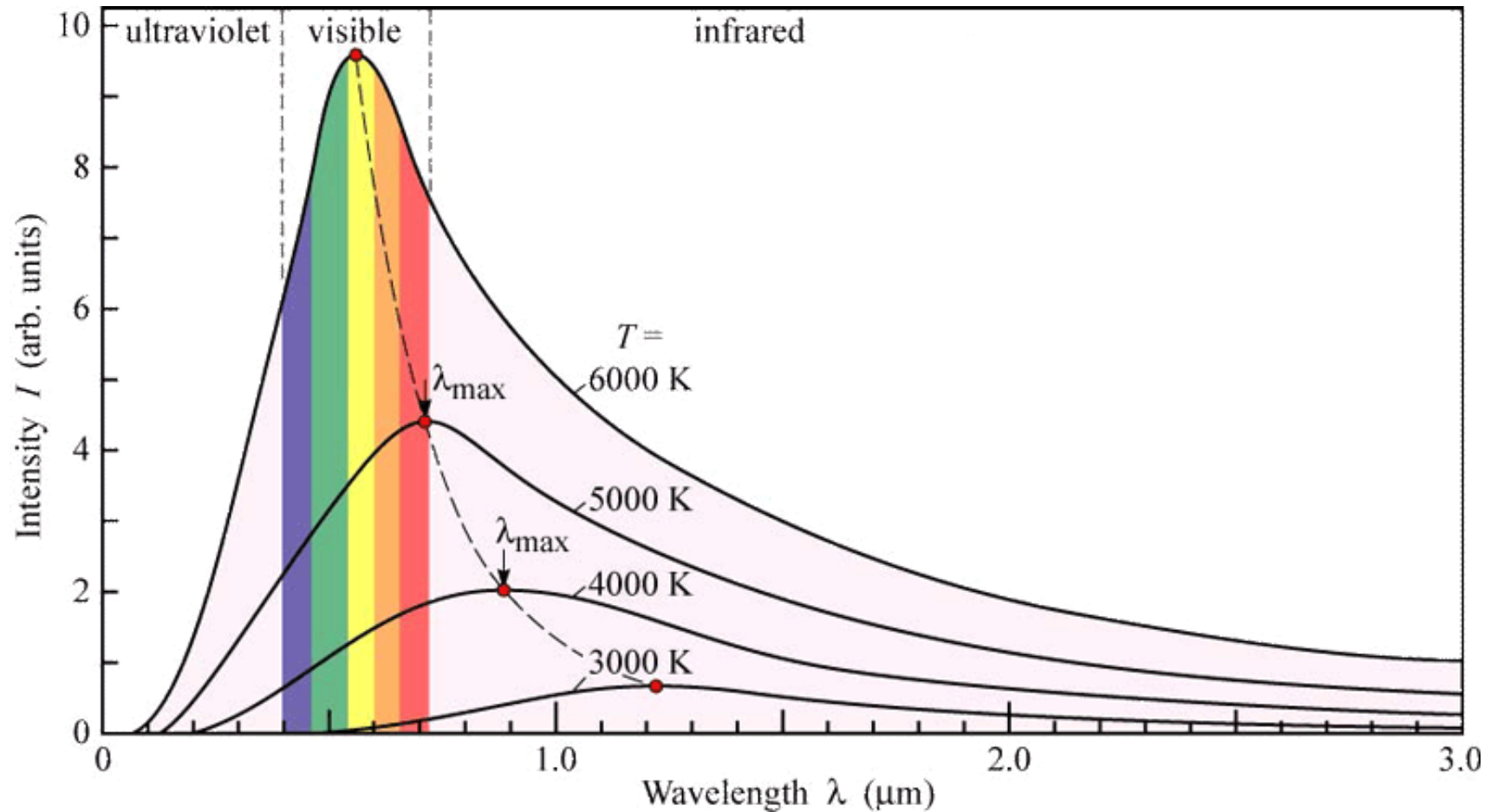


Effetto Doppler

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta v}{c}$$



Radiazione termica (di corpo nero)



Righe spettrali di alcuni elementi chimici

Hydrogen



Magnesium



Iron



Calcium

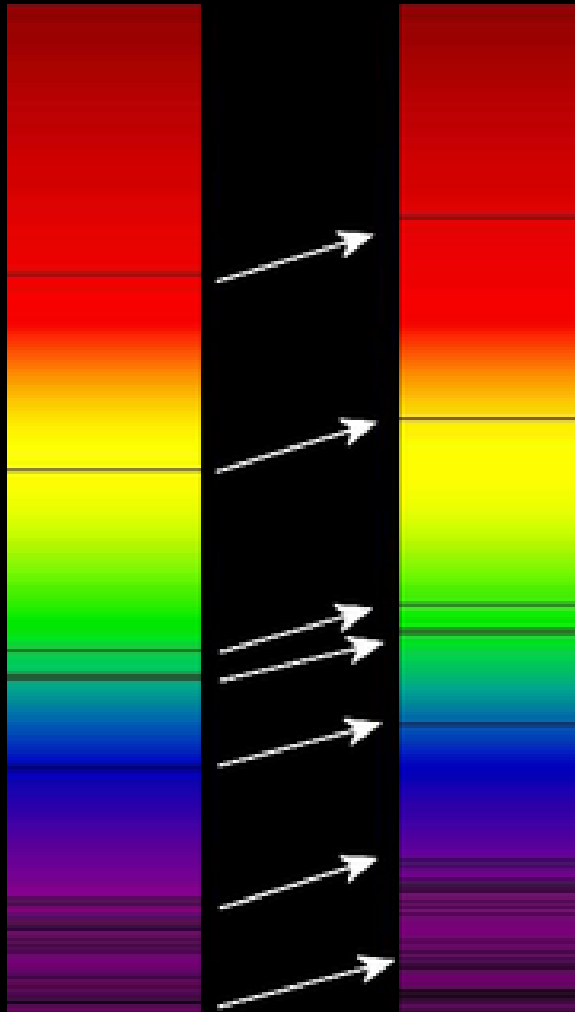


Spettro della luce solare

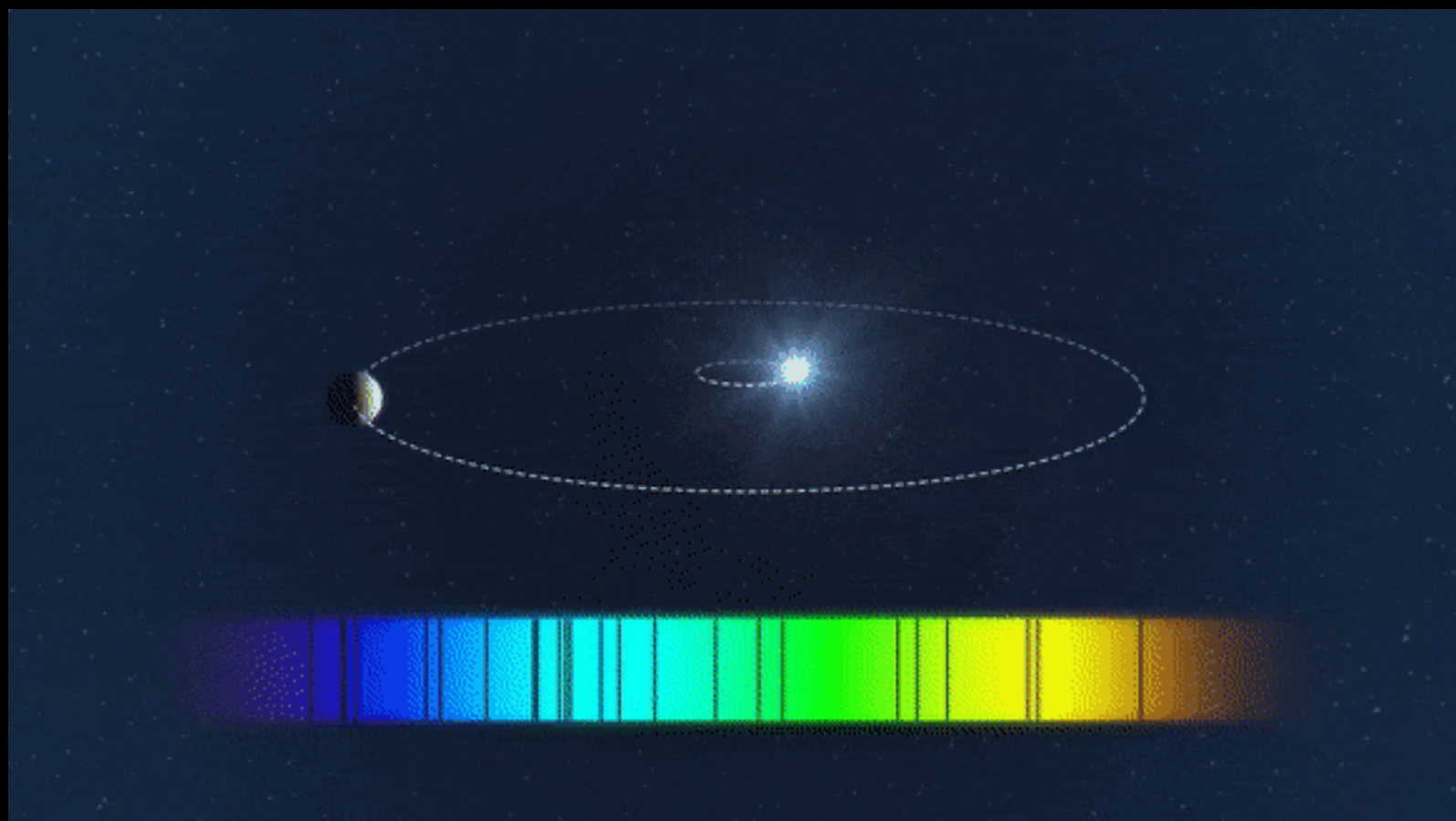


Effetto Doppler

(spostamento delle righe spettrali)



$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta v}{c}$$

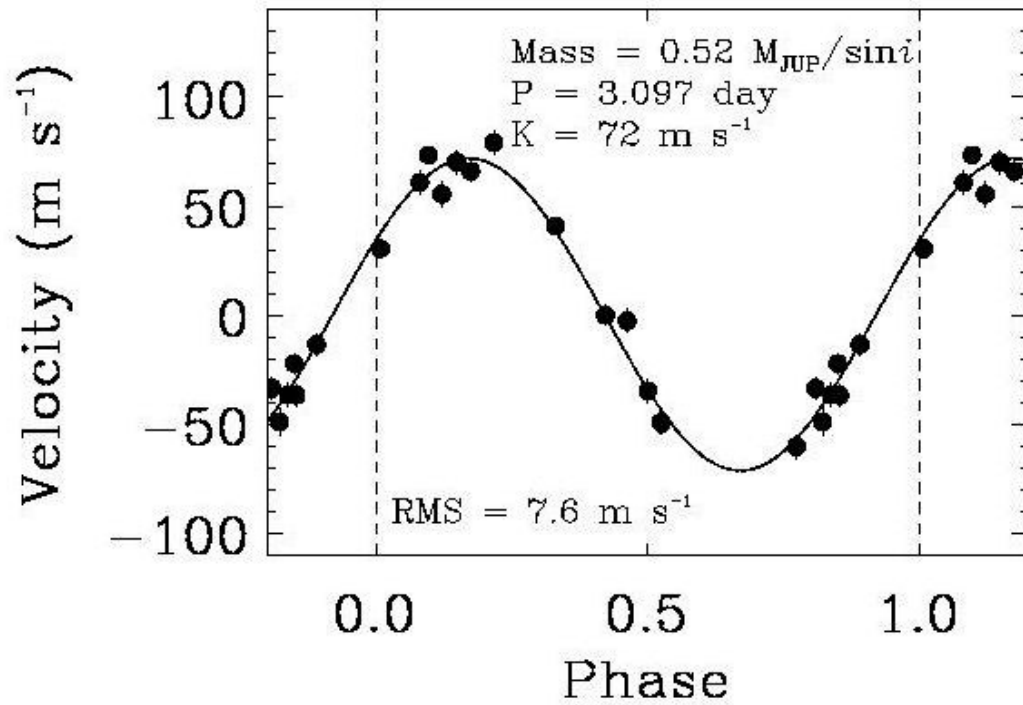


Effetto Doppler: aspetti quantitativi

La variazione di velocità radiale della stella:

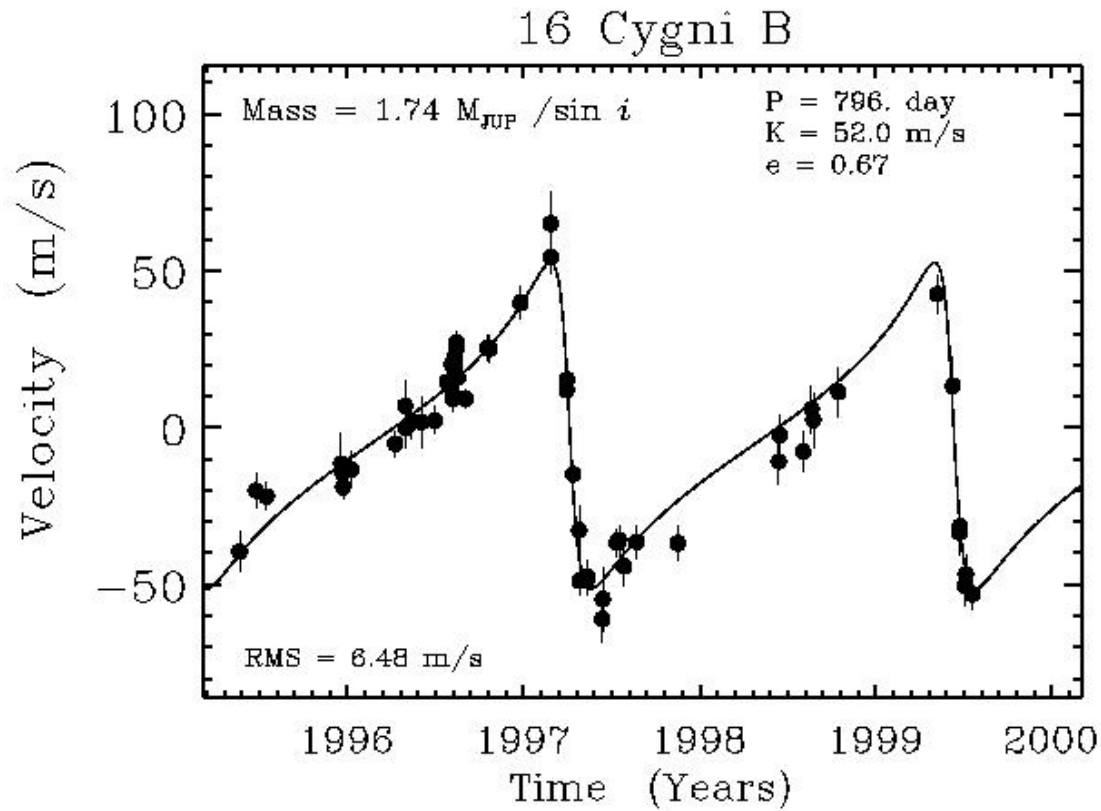
- 1) è proporzionale alla massa del pianeta;
- 2) è maggiore per pianeti vicini alla stella (terza legge di Keplero)
- 3) non dipende dalla distanza della stella da noi (ma ...)
- 4) dipende dall'inclinazione dell'orbita rispetto alla linea di vista

Sistema HD187123



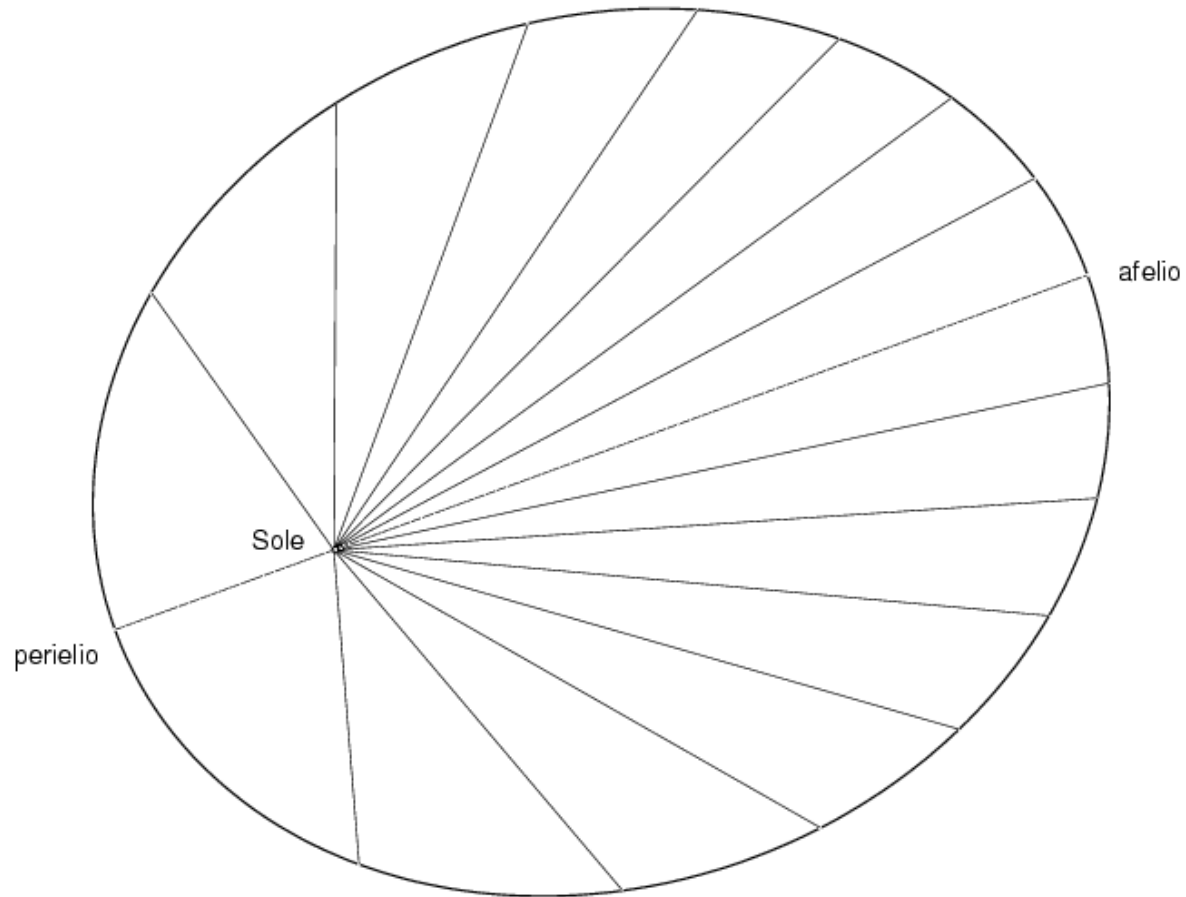
$$M \sin I = 0.52 M_{\text{Giove}} \quad a = 0.042 \text{ AU} \quad \text{periodo} = 3.09 \text{ d} \quad e = 0.03$$

Sistema 16 Cyg B



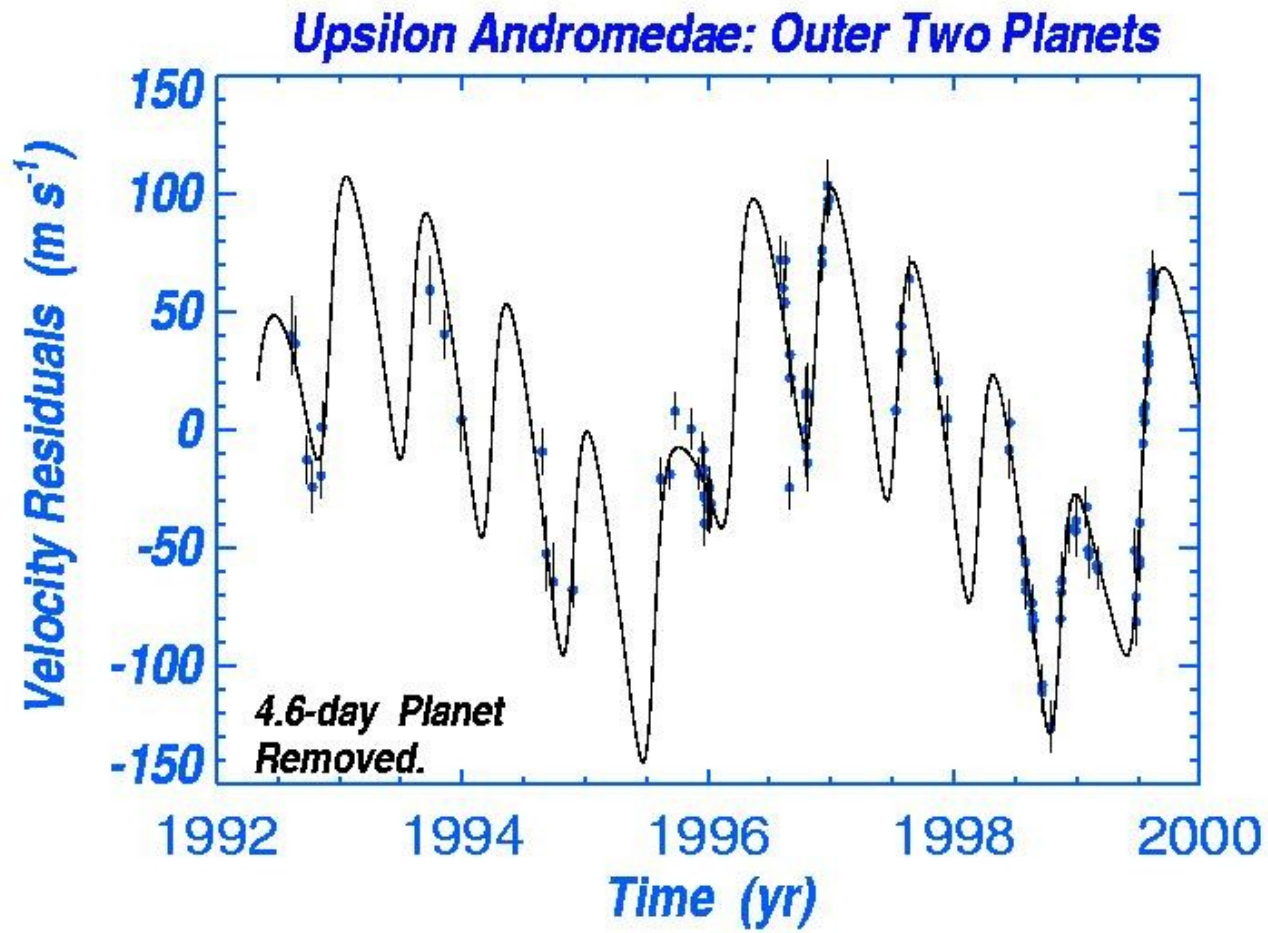
$$M \sin I = 1.5 M_{\text{Giove}} \quad a = 1.72 \text{ AU} \quad \text{periodo} = 804 \text{ d} \quad e = 0.63$$

Seconda legge di Keplero



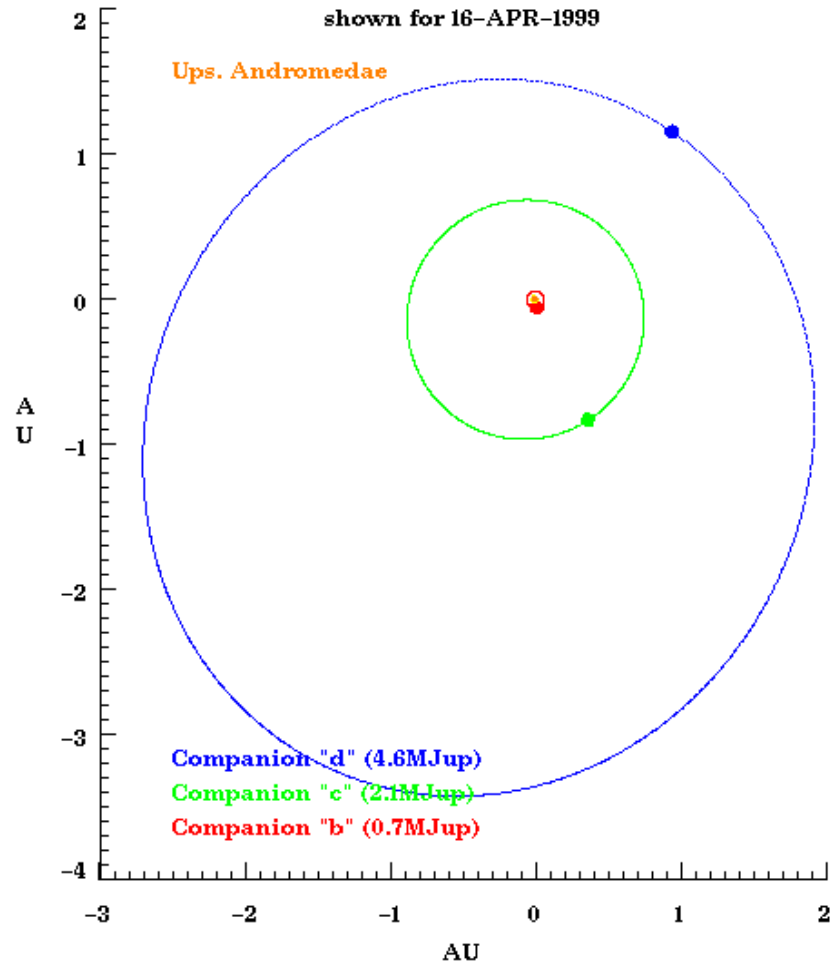
(velocità *areolare* costante $\rightarrow$ velocità *lineare* maggiore al periastro)

Sistema υ Andromedae

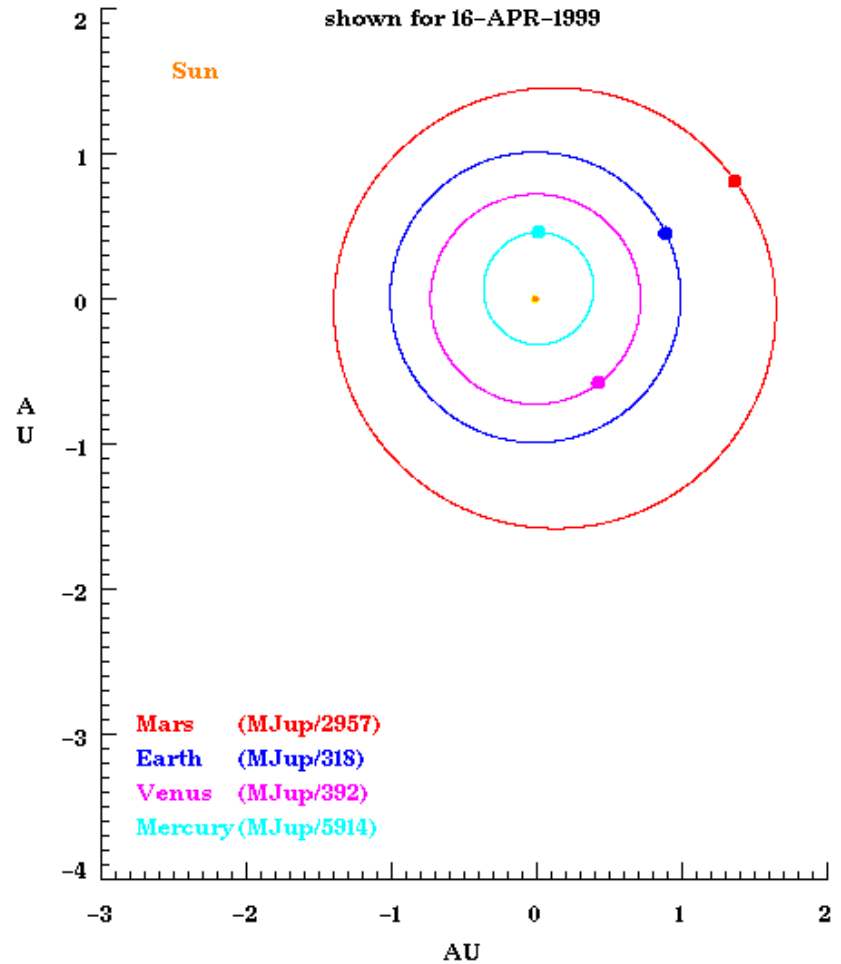


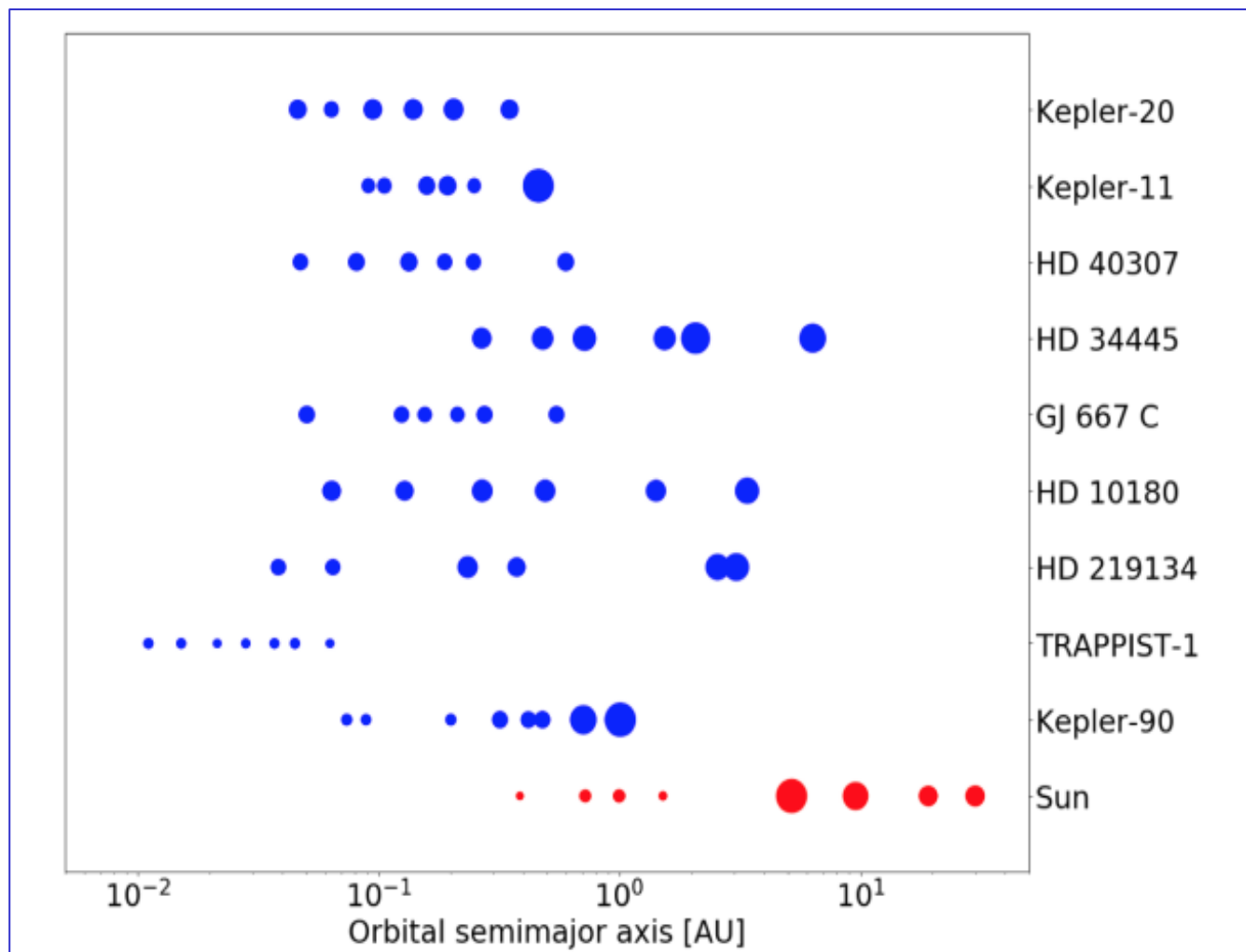
Sistema υ Andromedae

Upsilon Andromedae: A Multiple Companions System
shown for 16-APR-1999



Our Solar System, Inner Planets Only
shown for 16-APR-1999

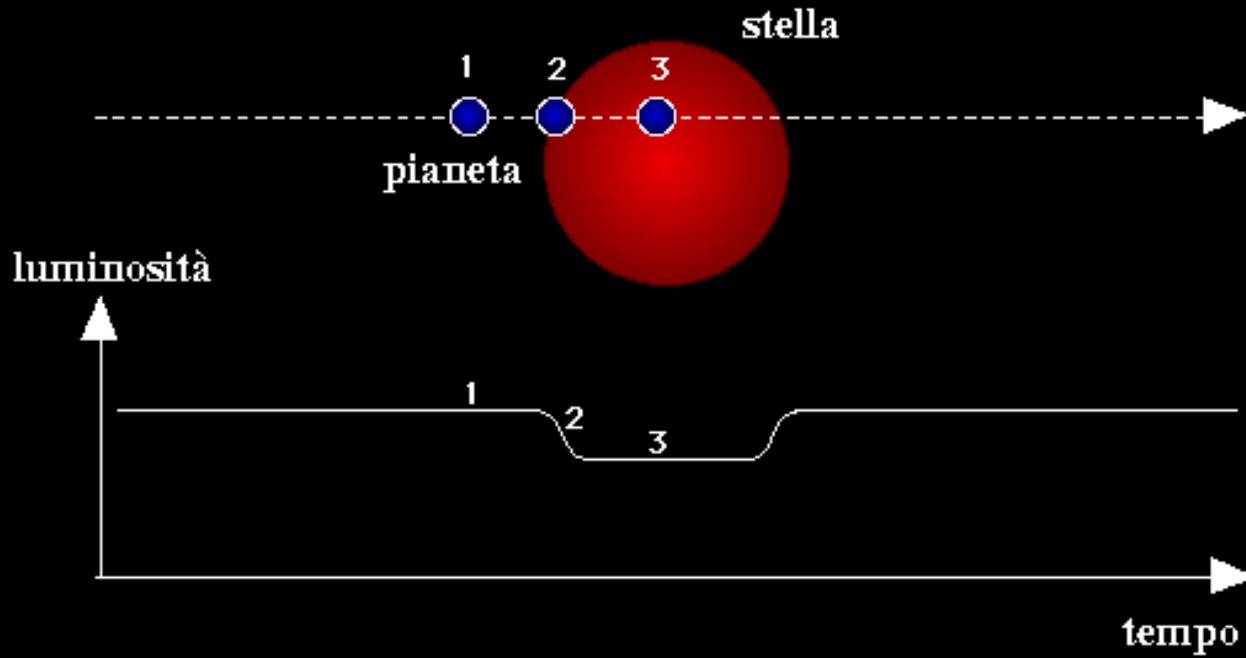




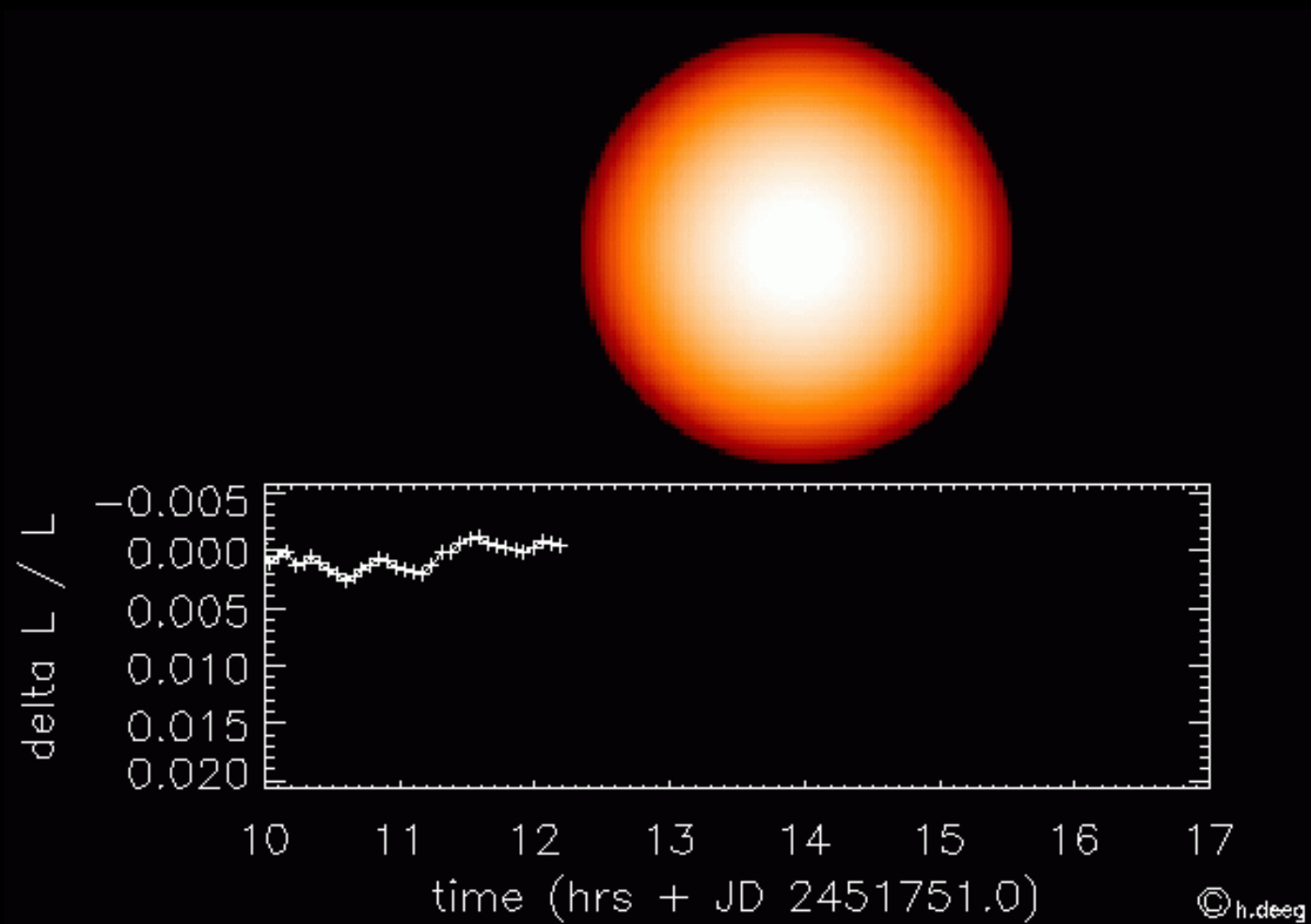
Metodi di detezione

Metodo fotometrico
(occultazioni)

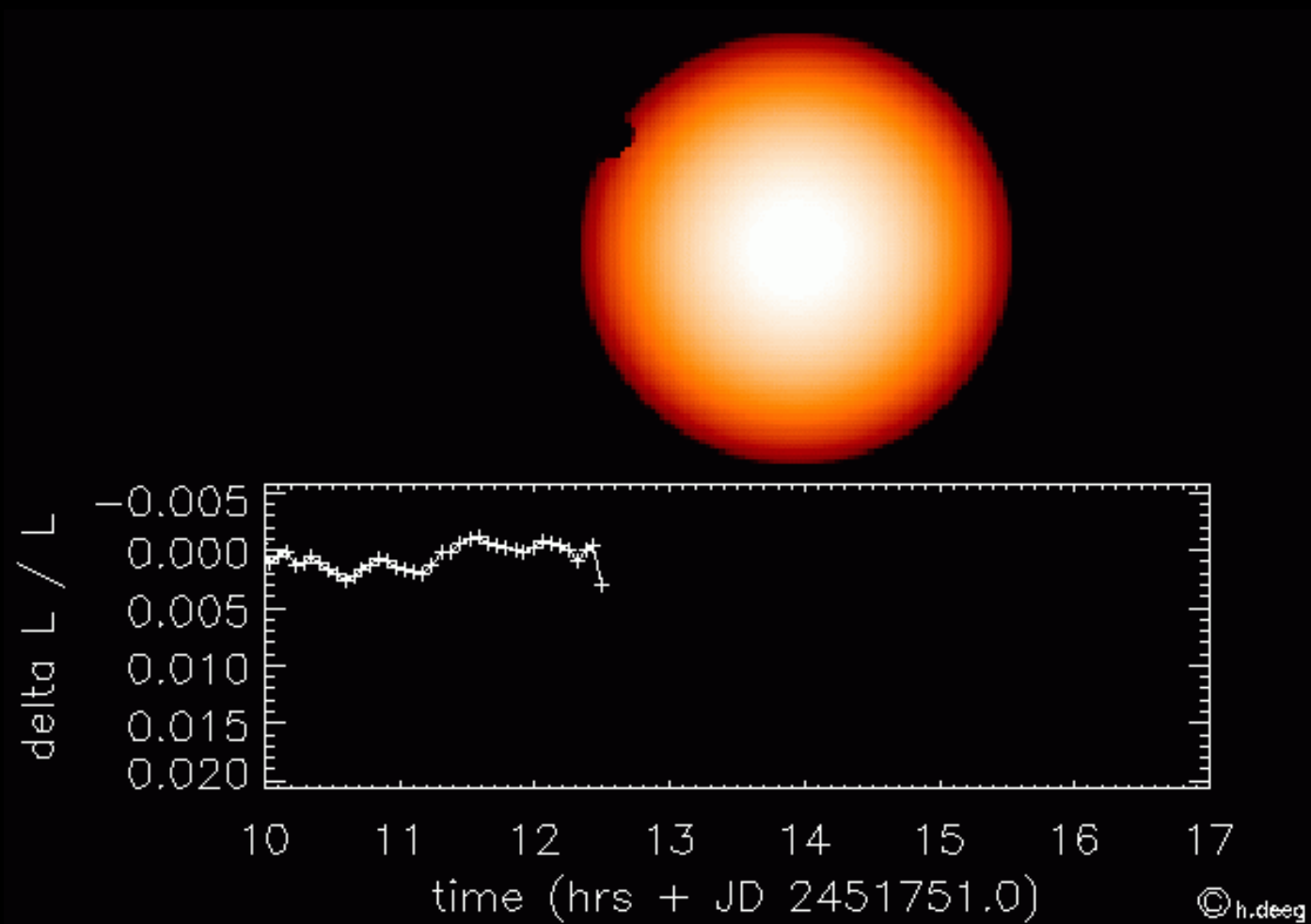
Fotometria (occultazioni)



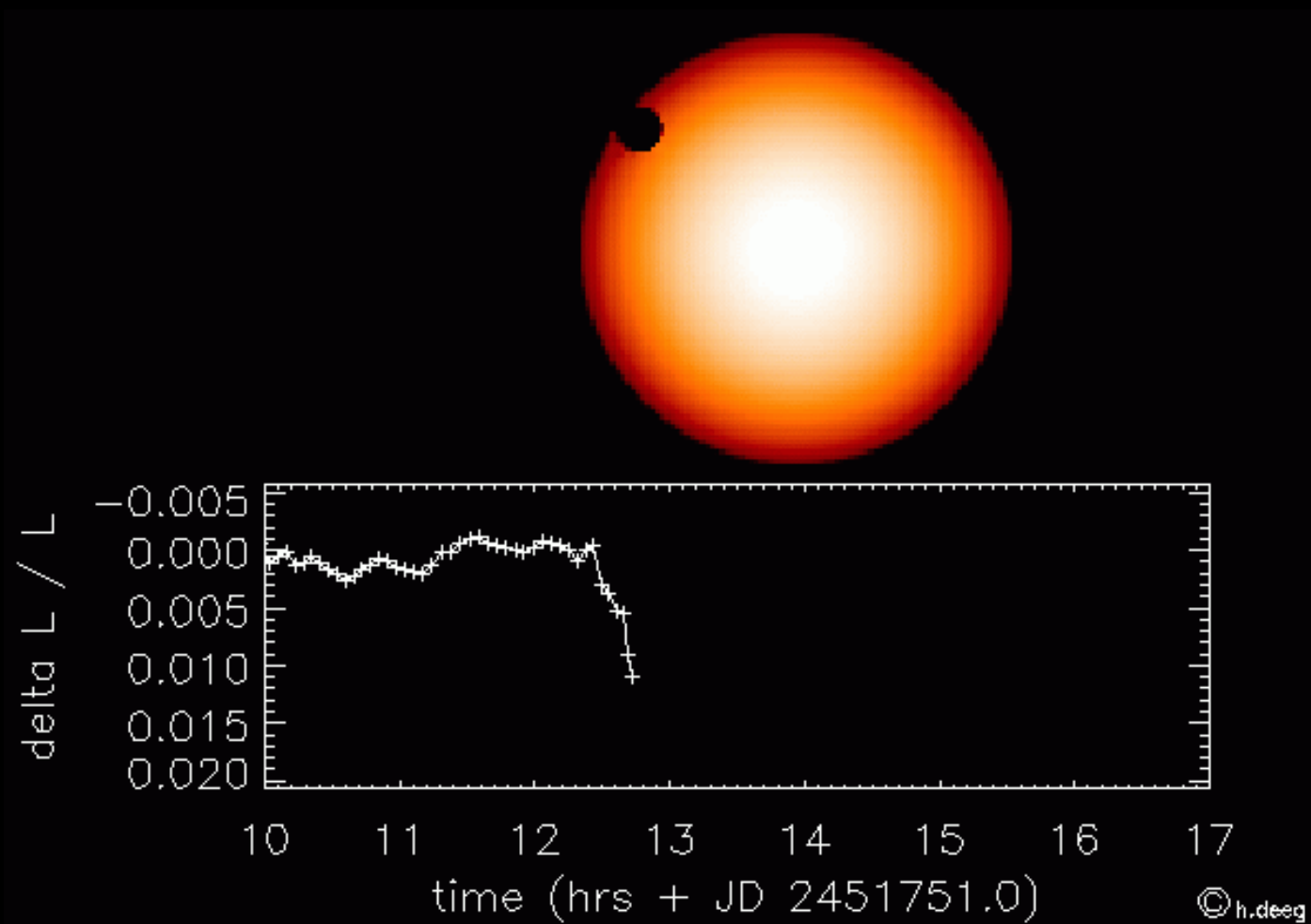
Sistema HD209458



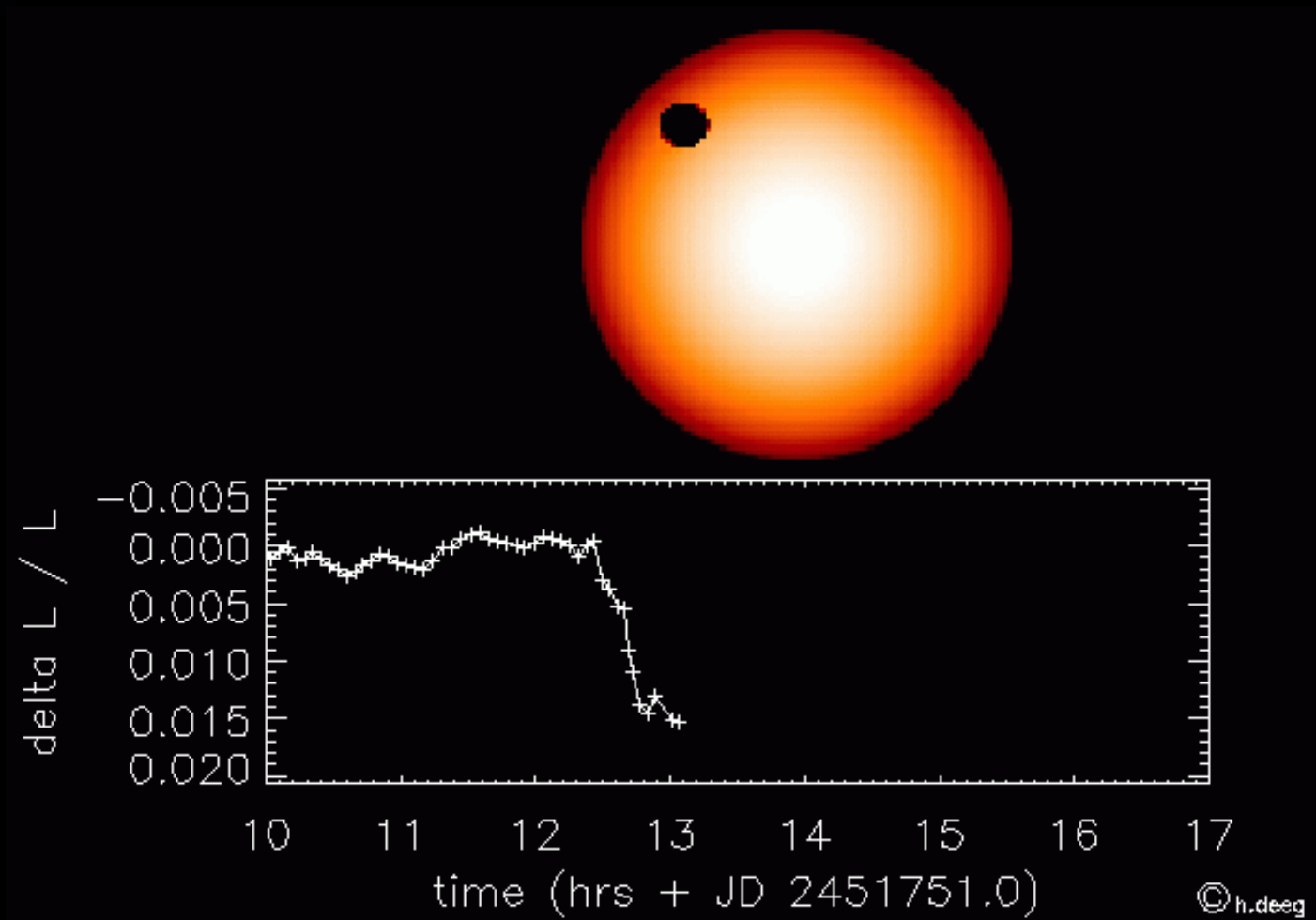
Sistema HD209458



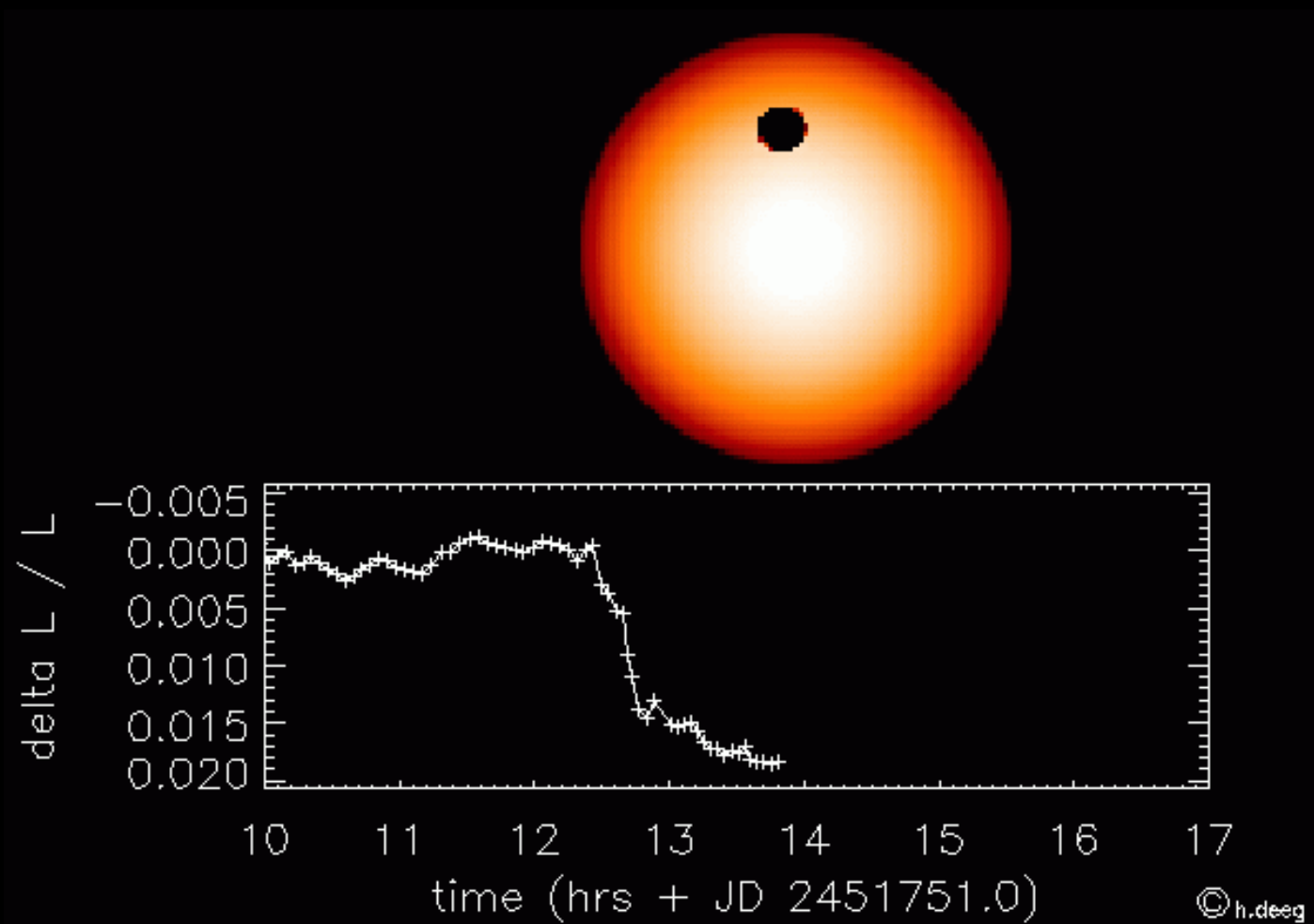
Sistema HD209458



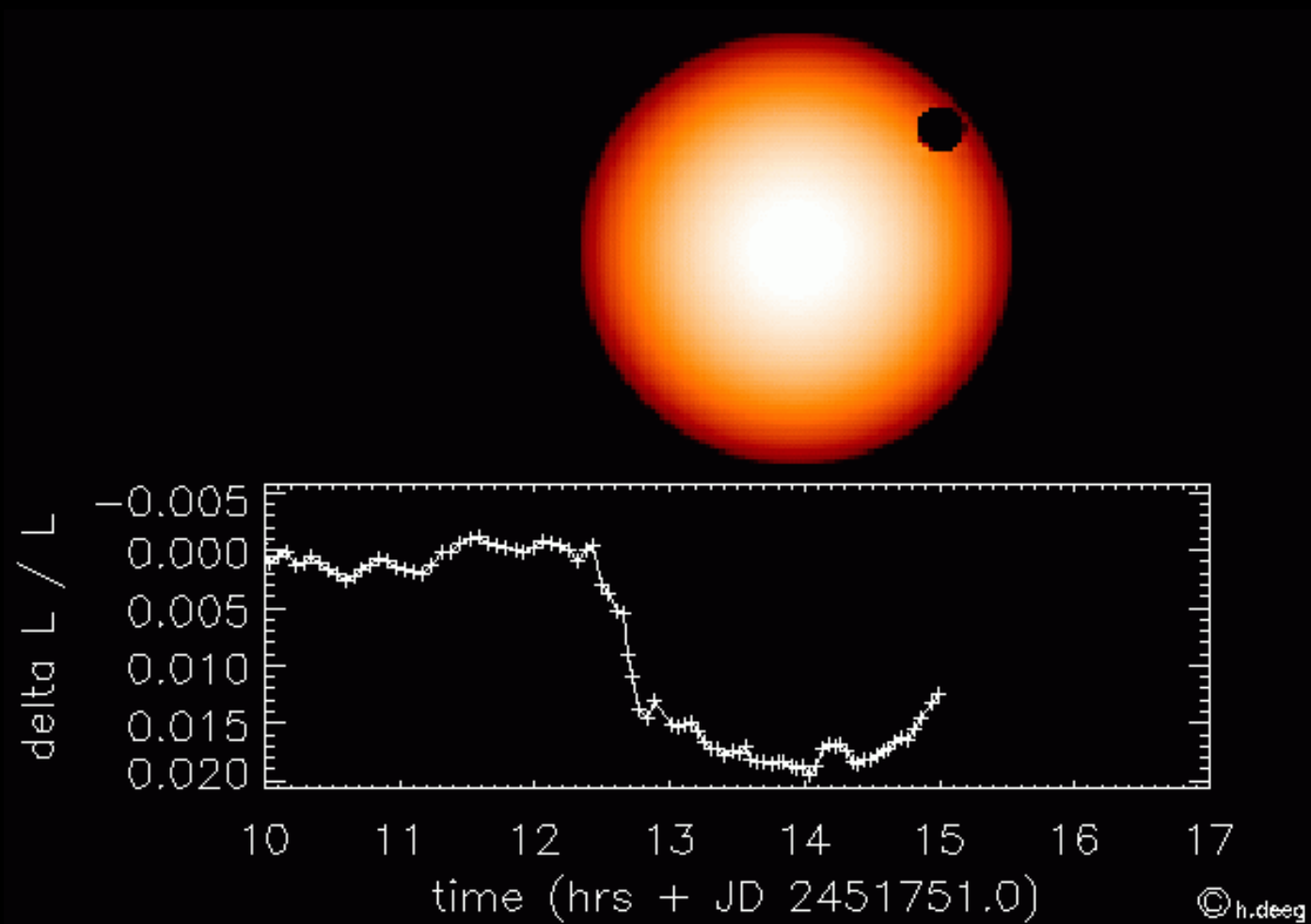
Sistema HD209458



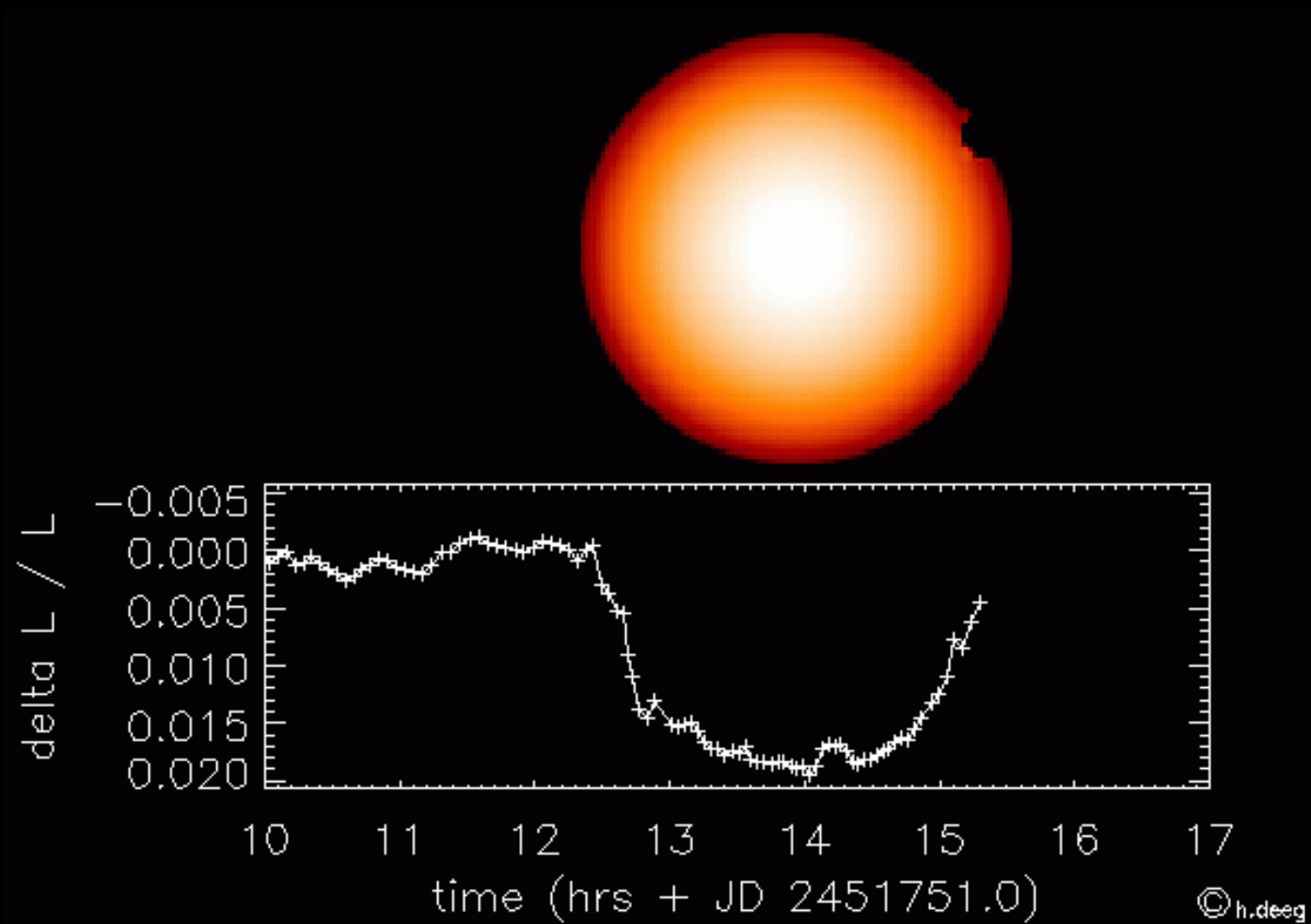
Sistema HD209458



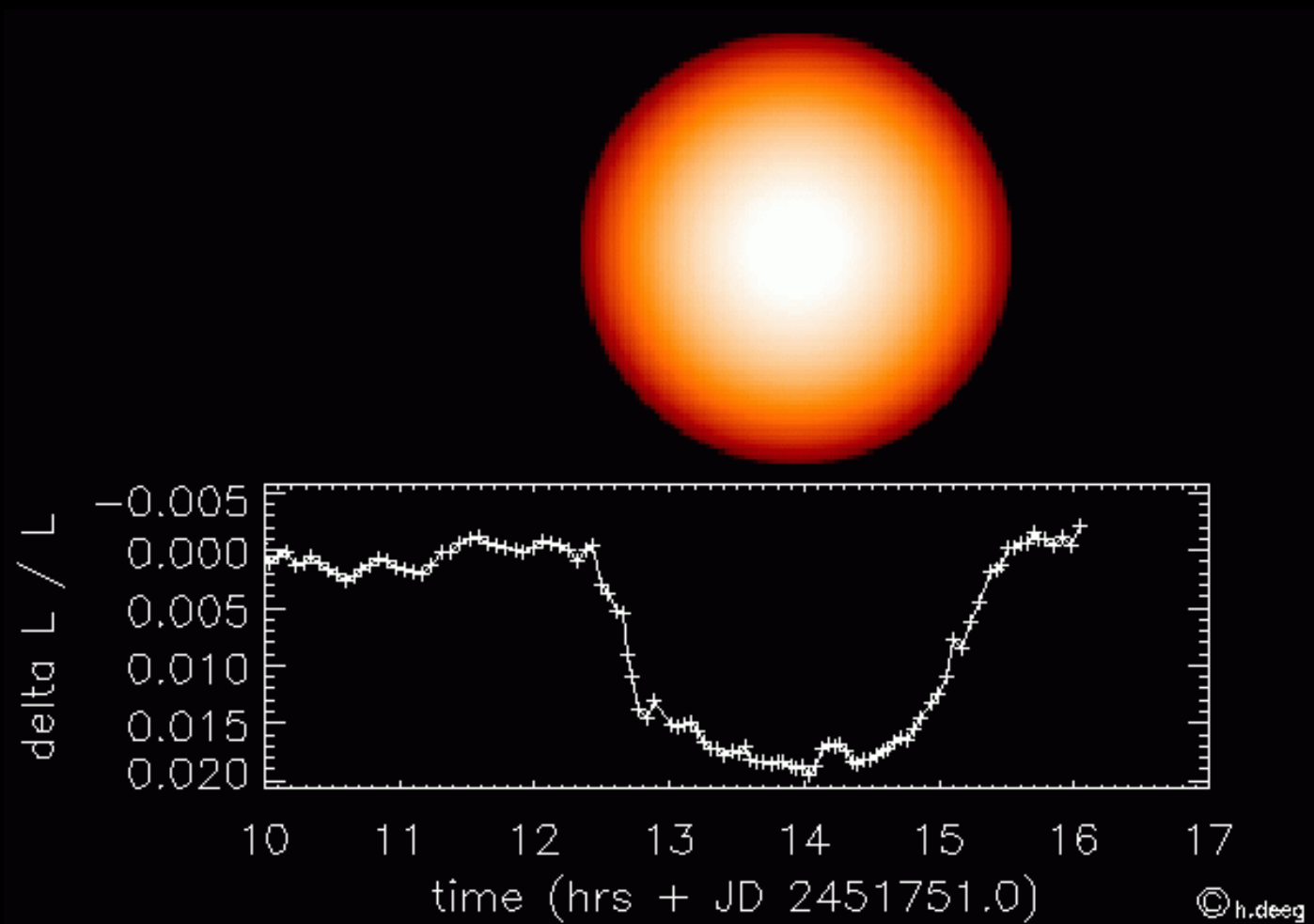
Sistema HD209458



Sistema HD209458



Sistema HD209458

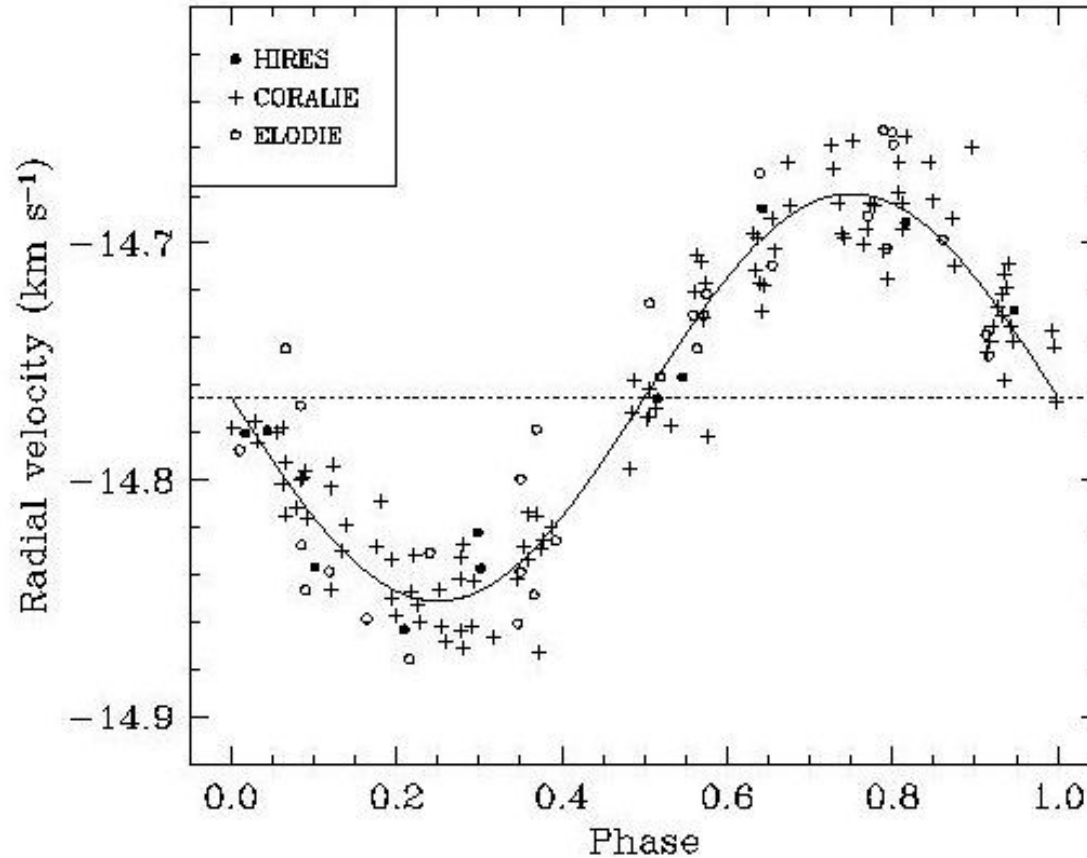


Fotometria: aspetti quantitativi

La variazione di luminosità della stella:

- 1) dipende dal diametro del pianeta (non dalla massa)
- 2) non dipende dalla distanza del pianeta dalla stella
- 3) non dipende dalla distanza della stella da noi (ma ...)
- 4) suggerisce l'inclinazione dell'orbita

Sistema HD209458

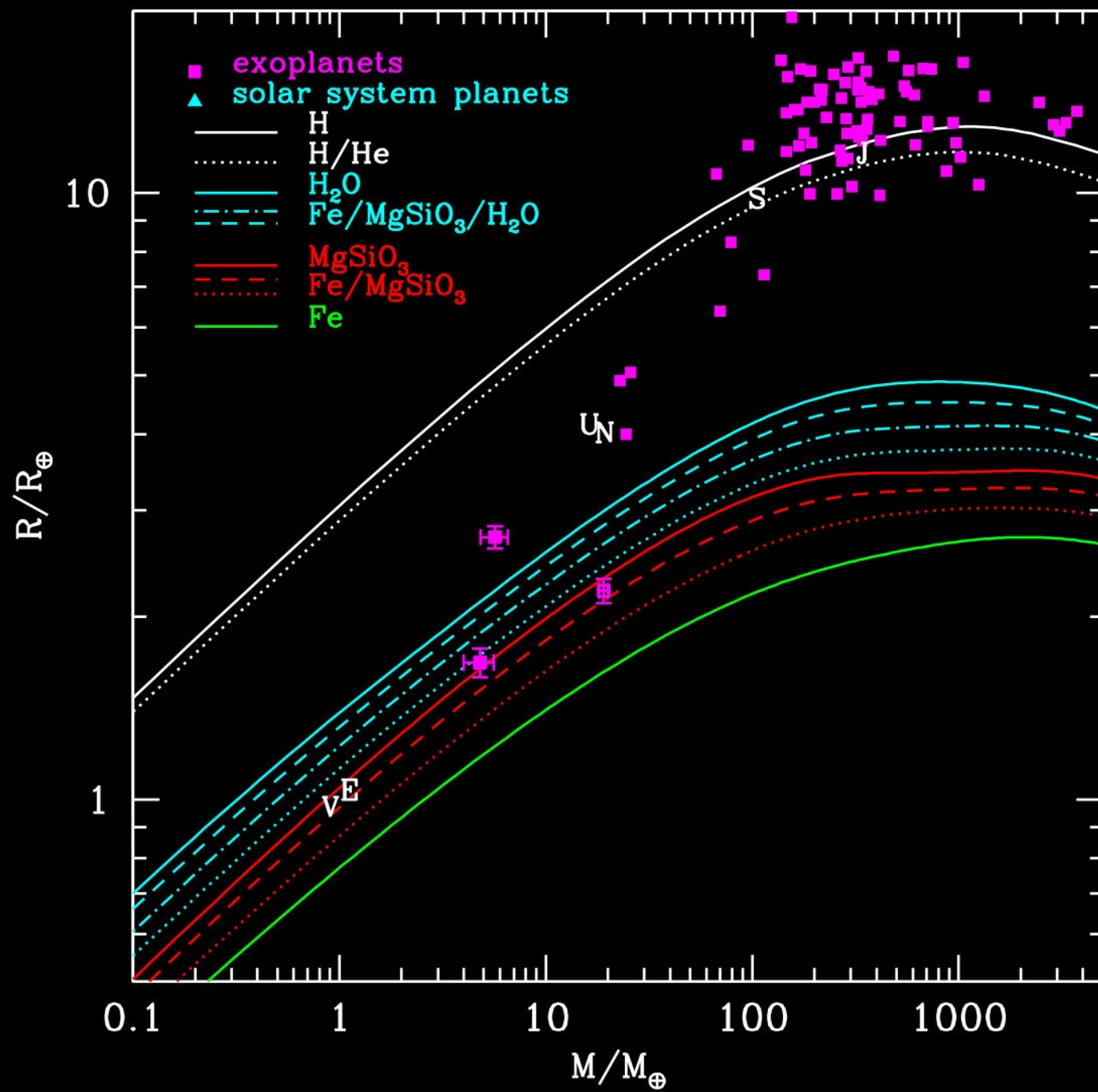


$$M = 0.71 M_{\text{Giove}}$$

$$a = 0.045 \text{ AU} \quad \text{periodo} = 3.5 \text{ d}$$

$$R = 1.38 R_{\text{Giove}}$$

densità = 1/3 dell'acqua

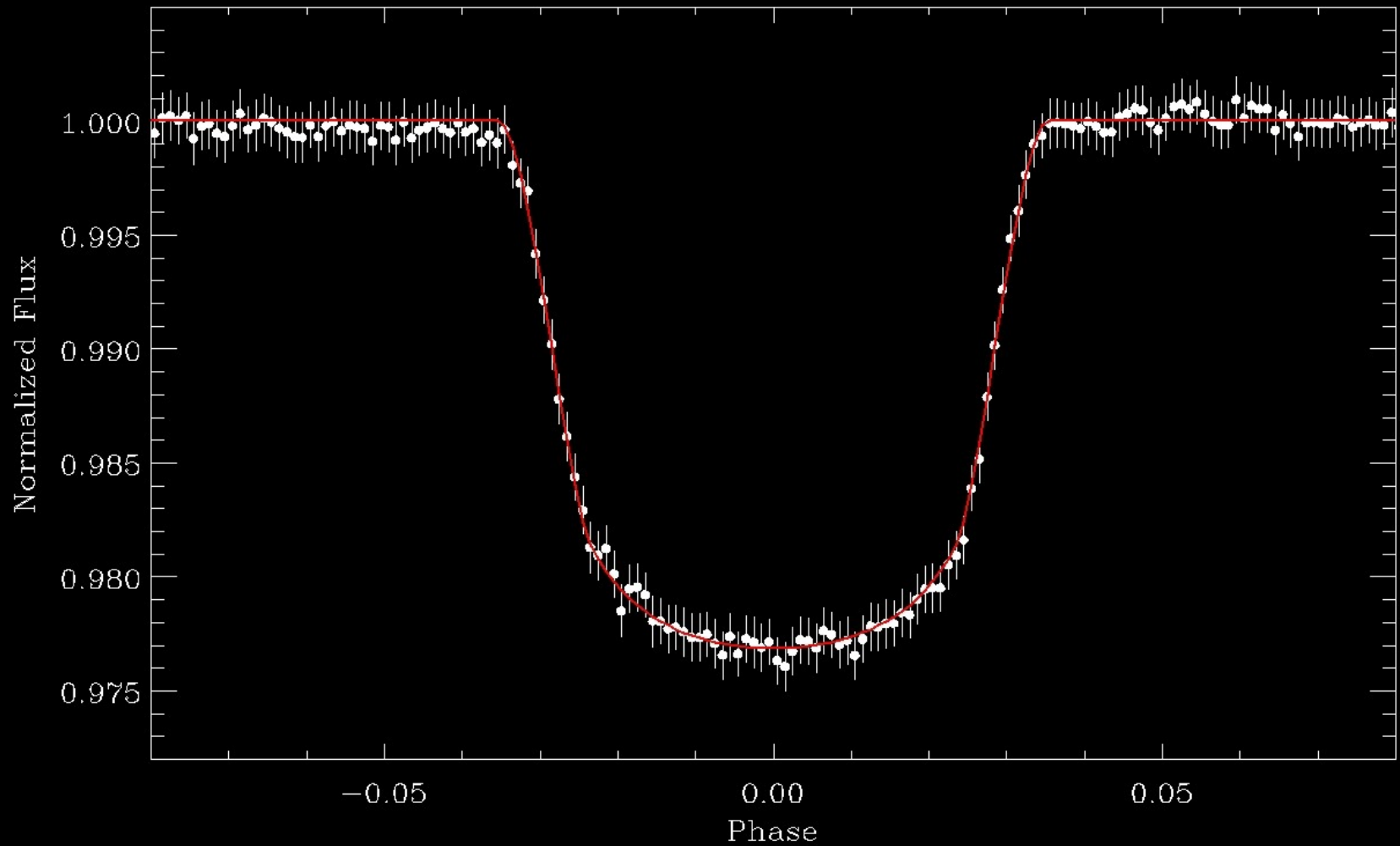


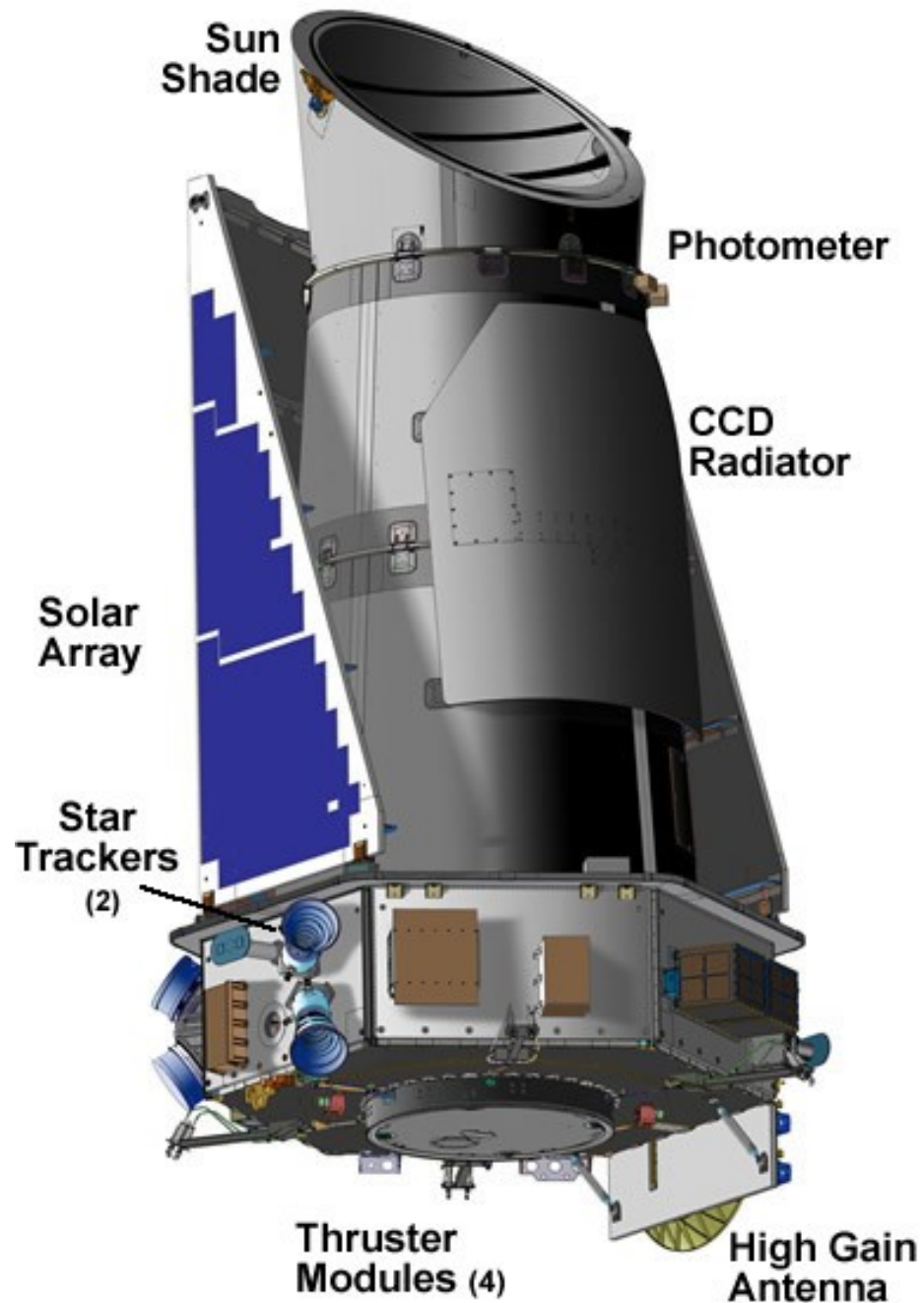
COROT (COnvection ROfation and planetary Transits)



(2007-2012)

COROT (CONvection ROTation and planetary Transits)

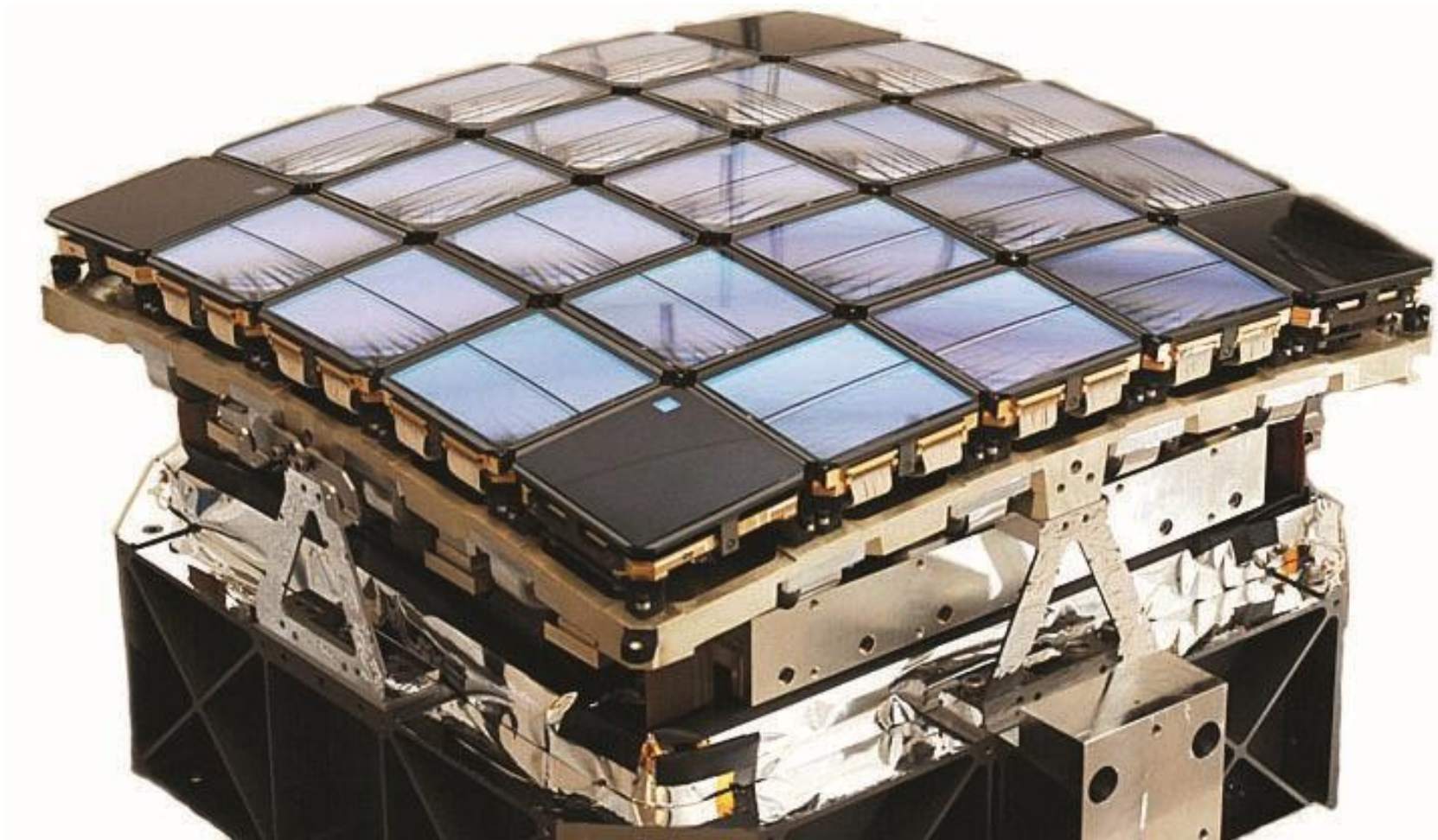




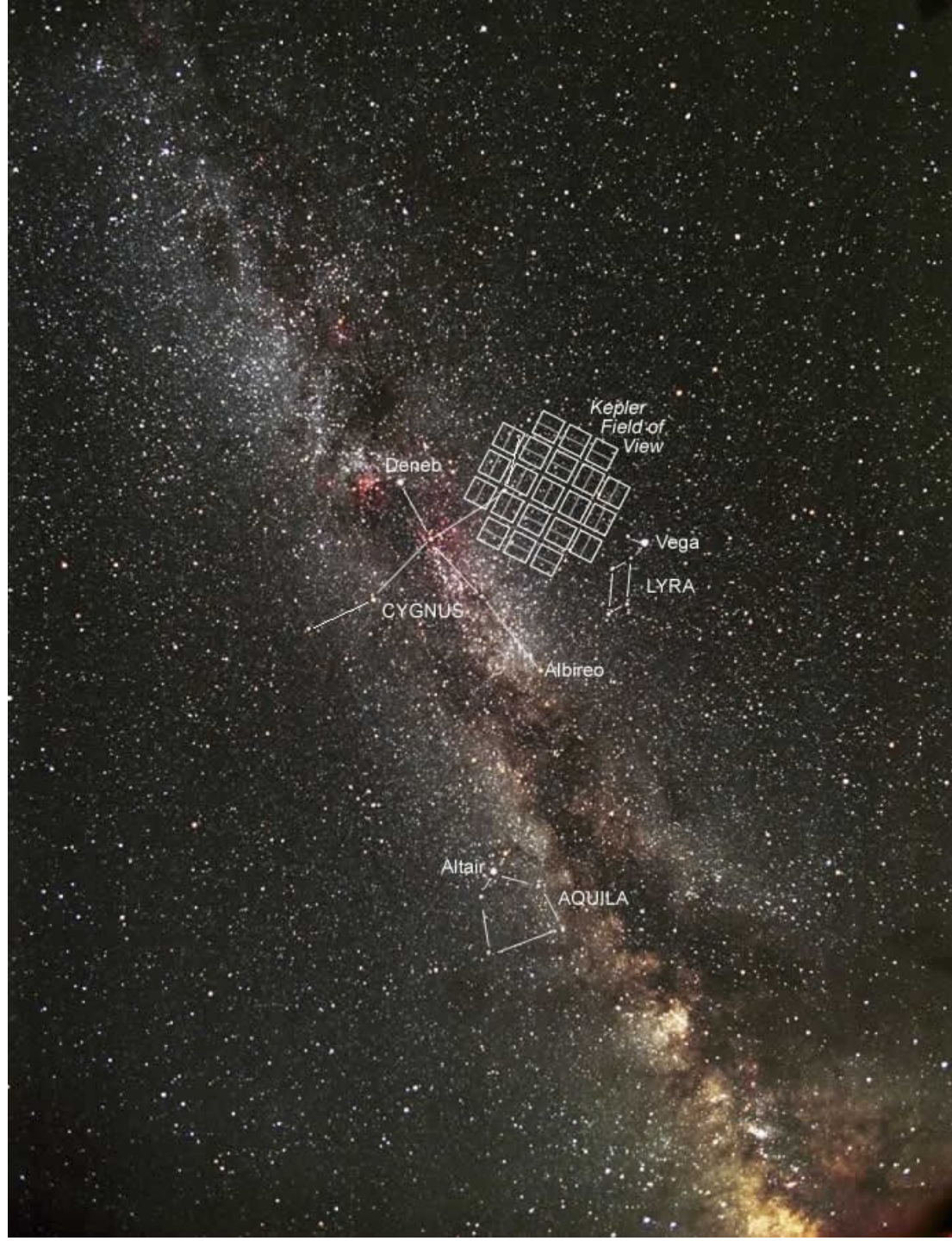
Kepler

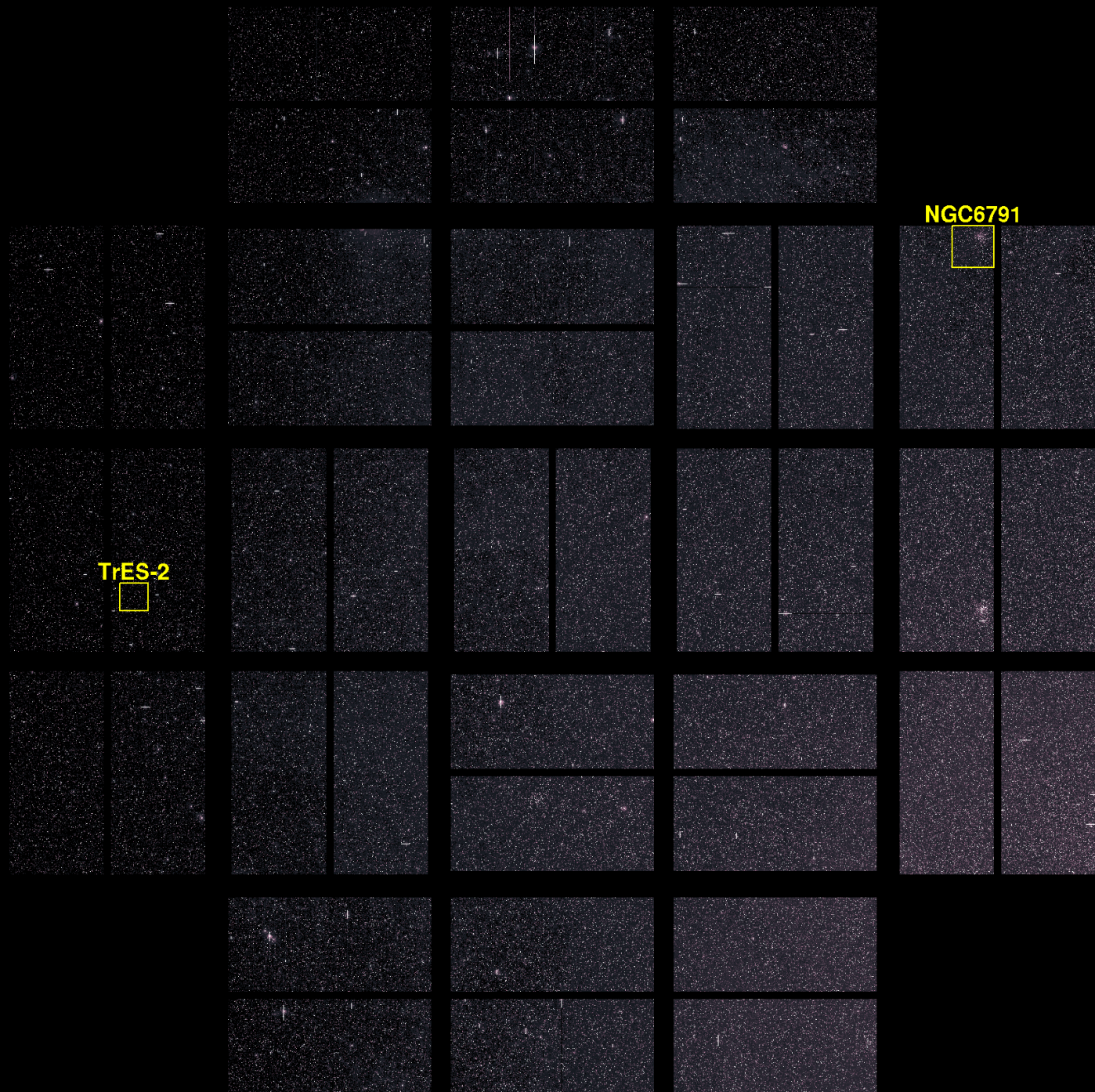
(2009-2013)

Diametro: 95 cm

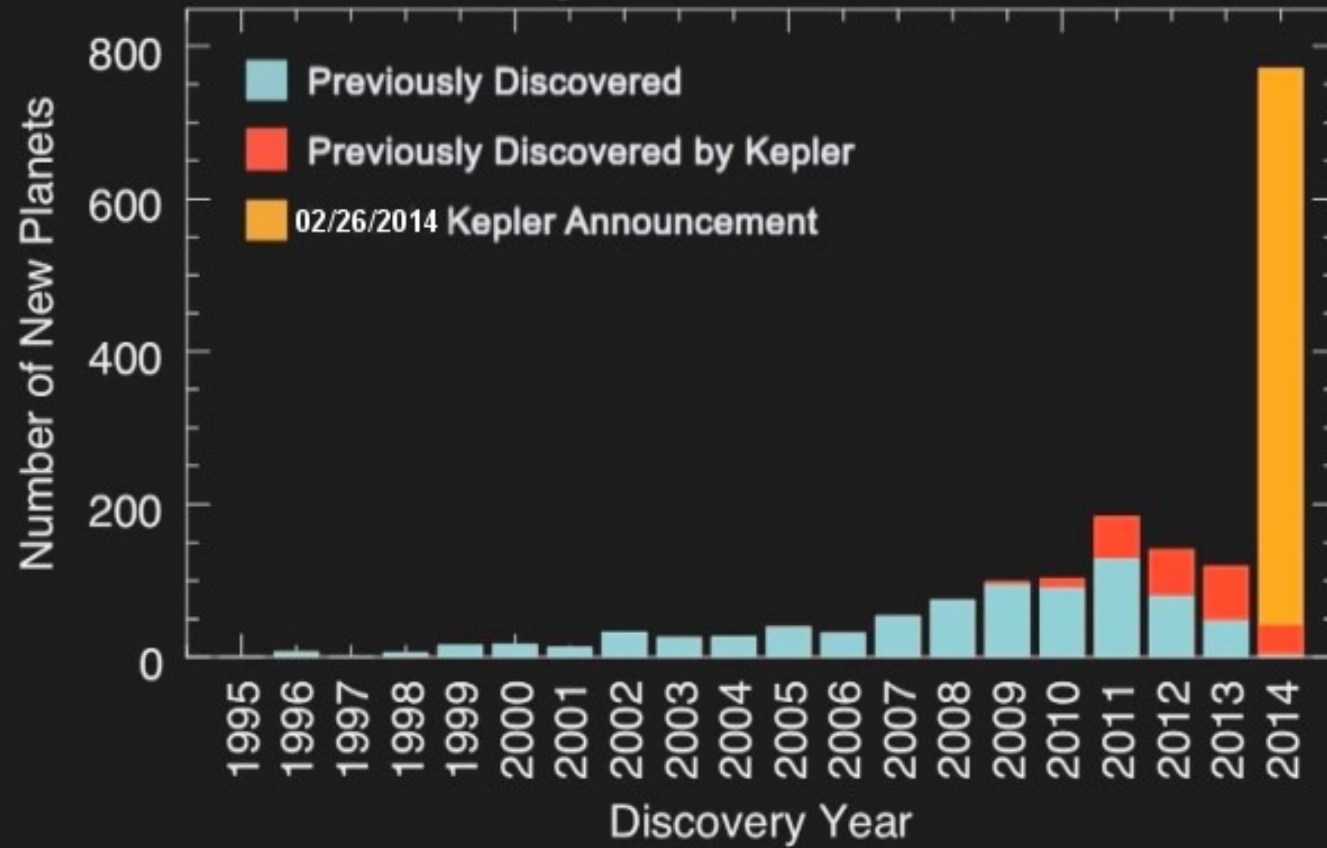


Matrice di 42 CCD di 2200×1024 pixel ciascuno (95 Megapix)





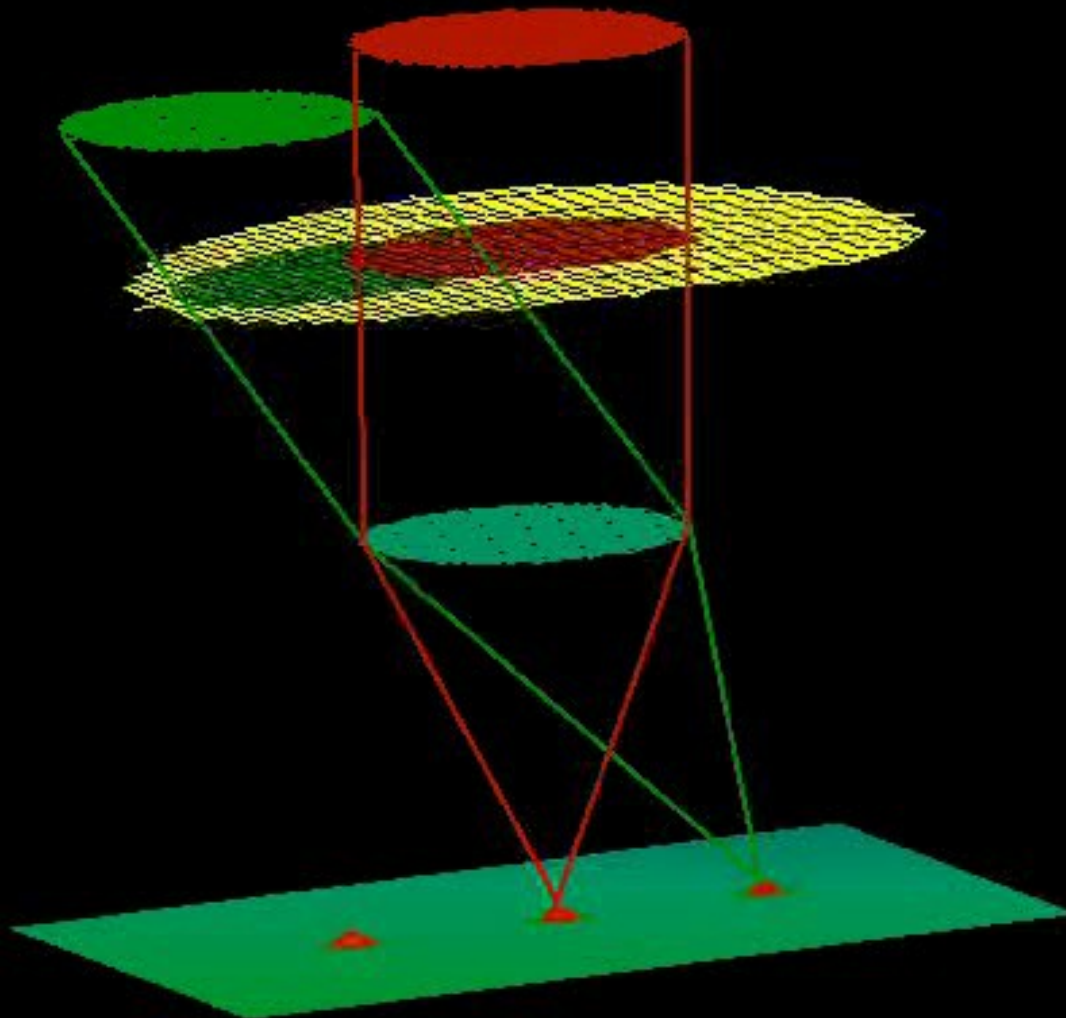
Exoplanet Discoveries



Metodi di detezione

Osservazione diretta
(ottico o infrarosso)

Effetto della turbolenza atmosferica sulla risoluzione dell'immagine



Effetti della turbolenza atmosferica (*seeing*)



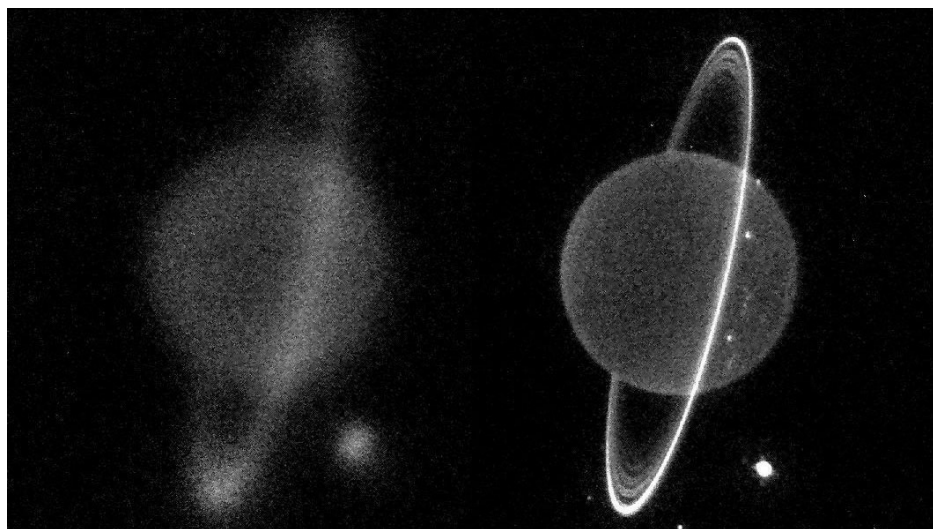
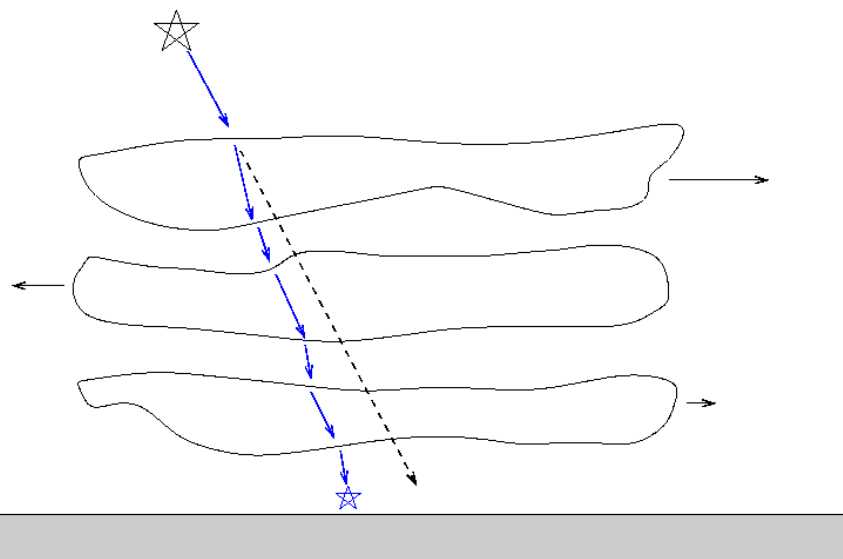


ESO VLT (Cerro Paranal, Chile)

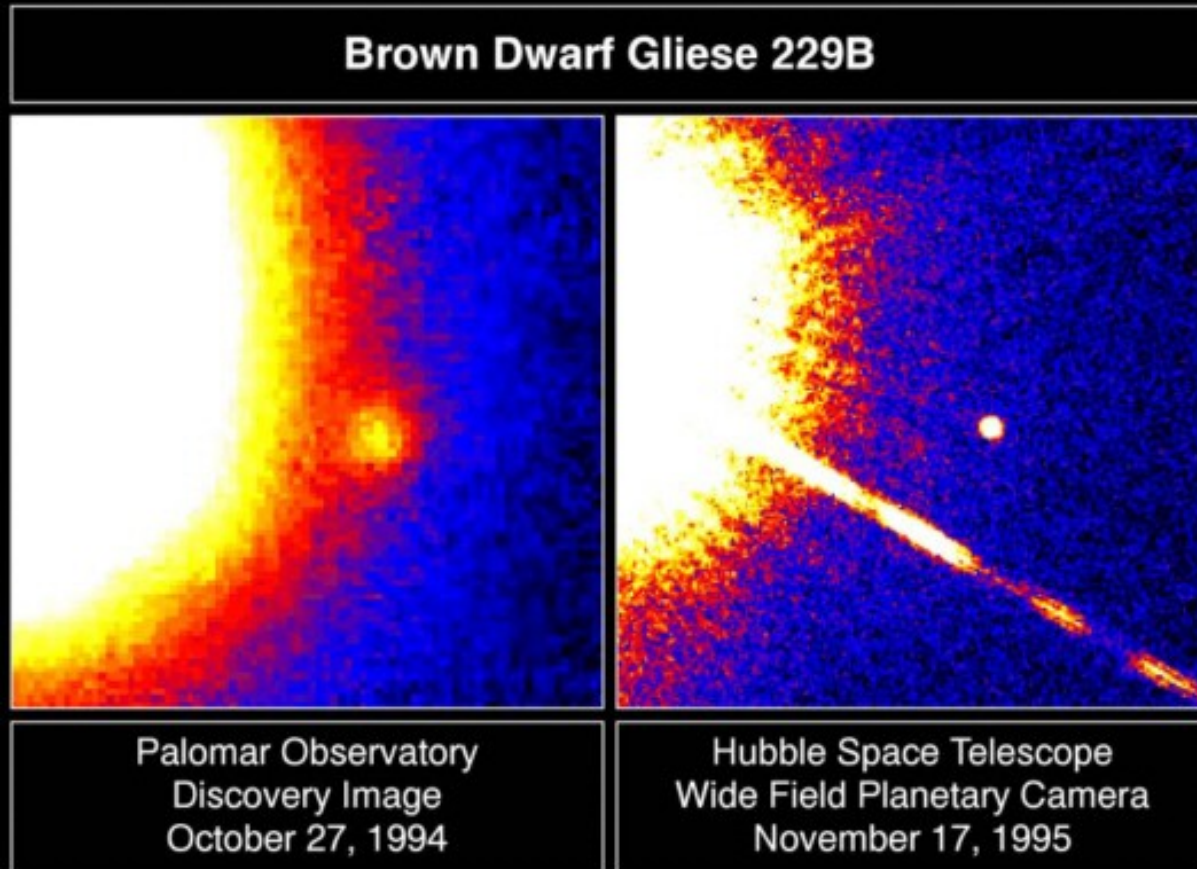
Apertura: 4×8.2 m

Lunghezza focale: 14/120 m

Turbolenza atmosferica e ottiche adattive



Ottiche adattive

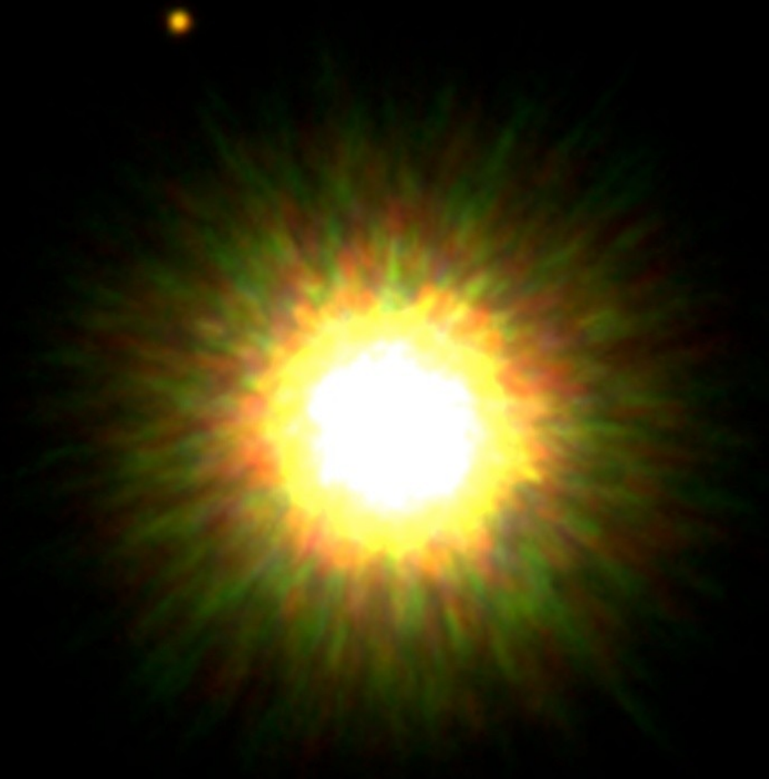


PRC95-48 • ST Sci OPO • November 29, 1995 • T. Nakajima and S. Kulkarni (CalTech), S. Durrance and D. Golimowski (JHU), NASA

(ottica adattiva)

(telescopio spaziale)

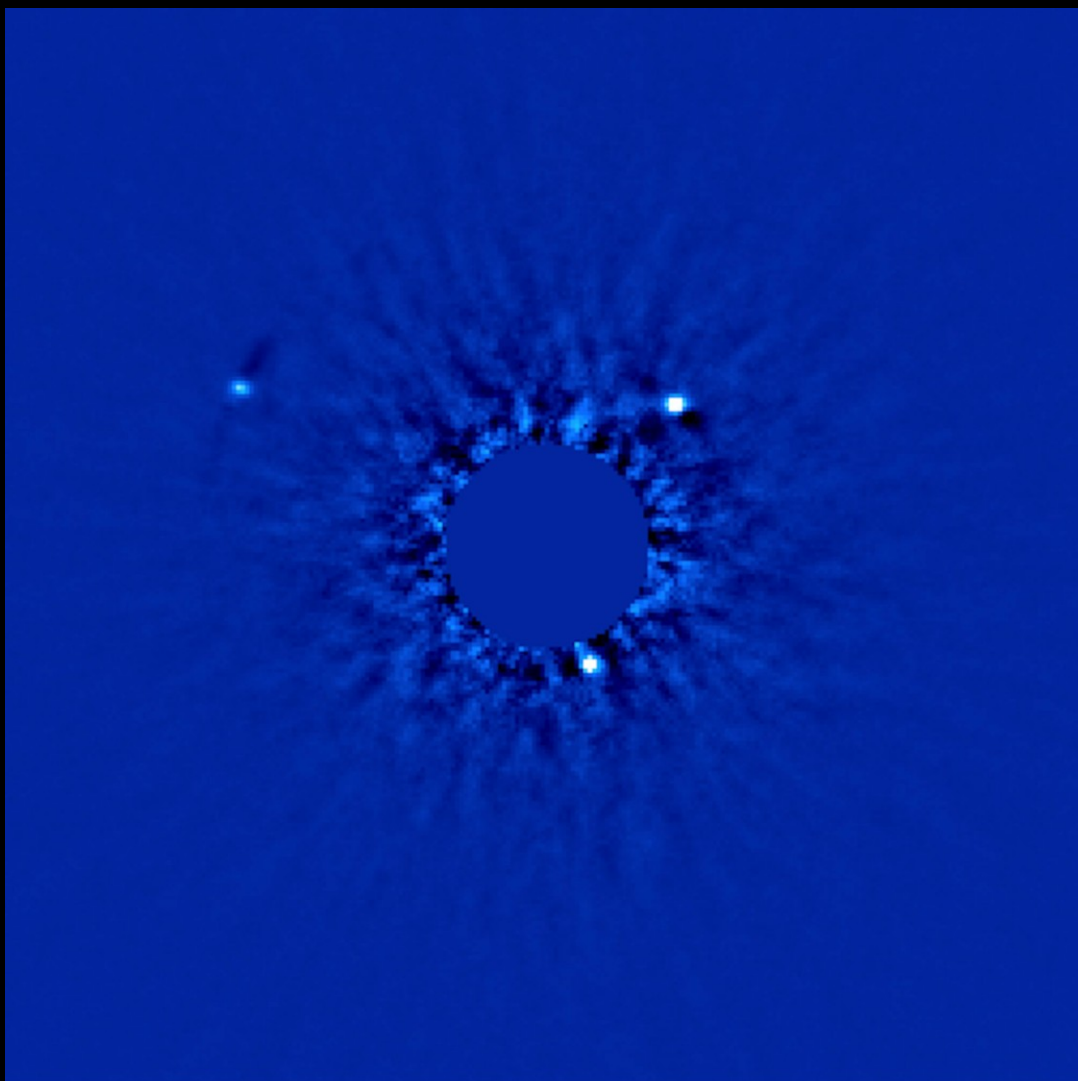
Pianeta 1RXS1609 b



Distanza: 500 anni luce
Massa: $14 M_{\text{Giove}}$

Scoperta: settembre 2008
Raggio: $1.7 R_{\text{Giove}}$

Conferma: luglio 2010
Raggio orbitale: 330 AU



Sistema planetario di HR 8799

Gemini Observatory / NRC / AURA / Christian Marois, et al.

Gemini Observatory Legacy Image

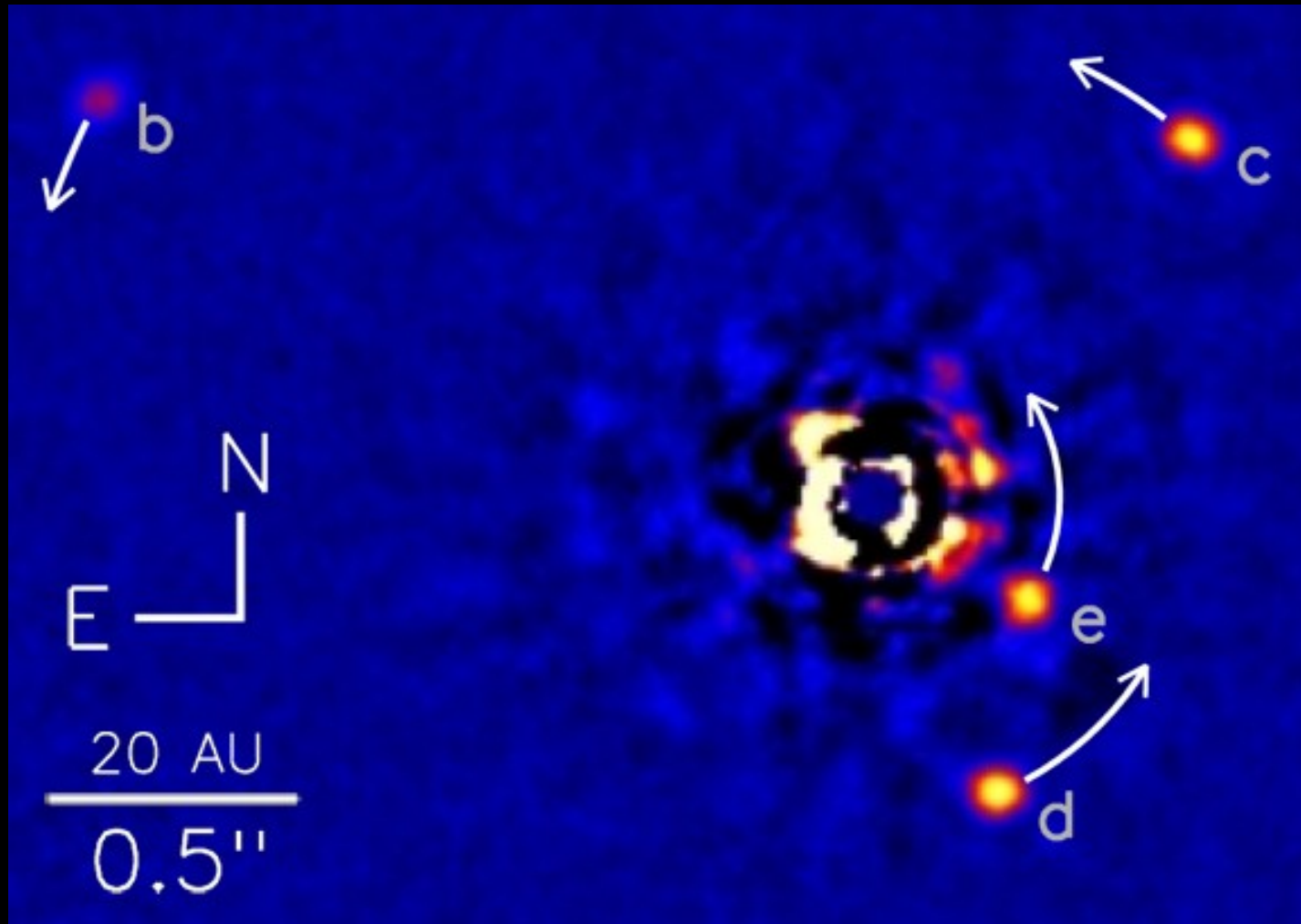
Distanza: 130 anni luce

Scoperta: novembre 2008 (telescopio Gemini, Hawaii)

Sistema planetario di HR 8799

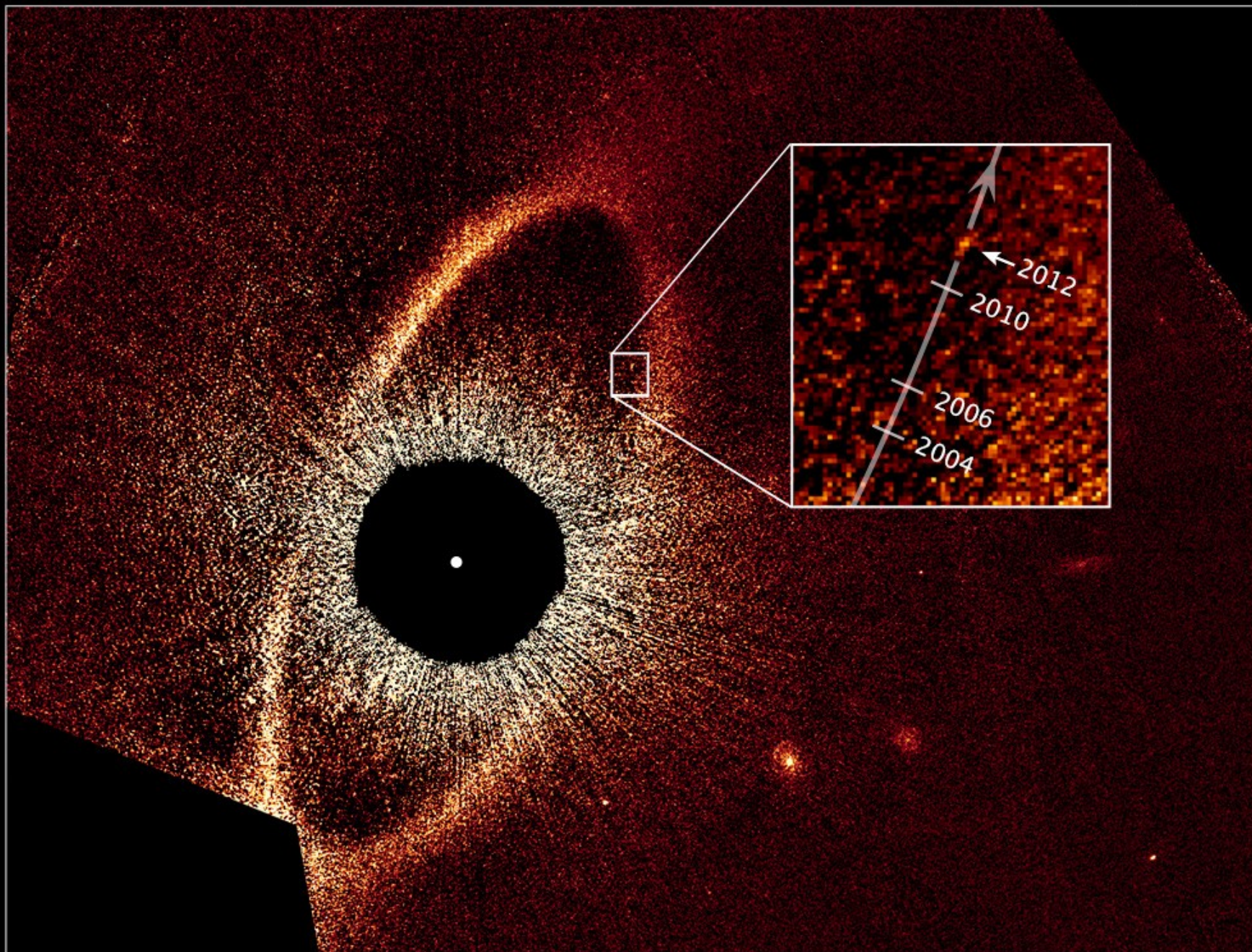
Pianeta	Massa (M_J)	Raggio (R_J)	Distanza (AU)
b	7	1.1	68
c	10	1.3	43
d	10	1.2	27
e	9		15

Sistema planetario di HR 8799 (quarto pianeta)



Distanza: 130 anni luce

Scoperta: dicembre 2010 (telescopio Keck II, Hawaii)



Statistica dei sistemi trovati finora (gennaio 2013)

676 sistemi planetari

859 pianeti

128 sistemi multipli

Statistica dei sistemi trovati finora (ottobre 2015)

~~676~~ 1250 sistemi planetari

~~859~~ 1970 pianeti

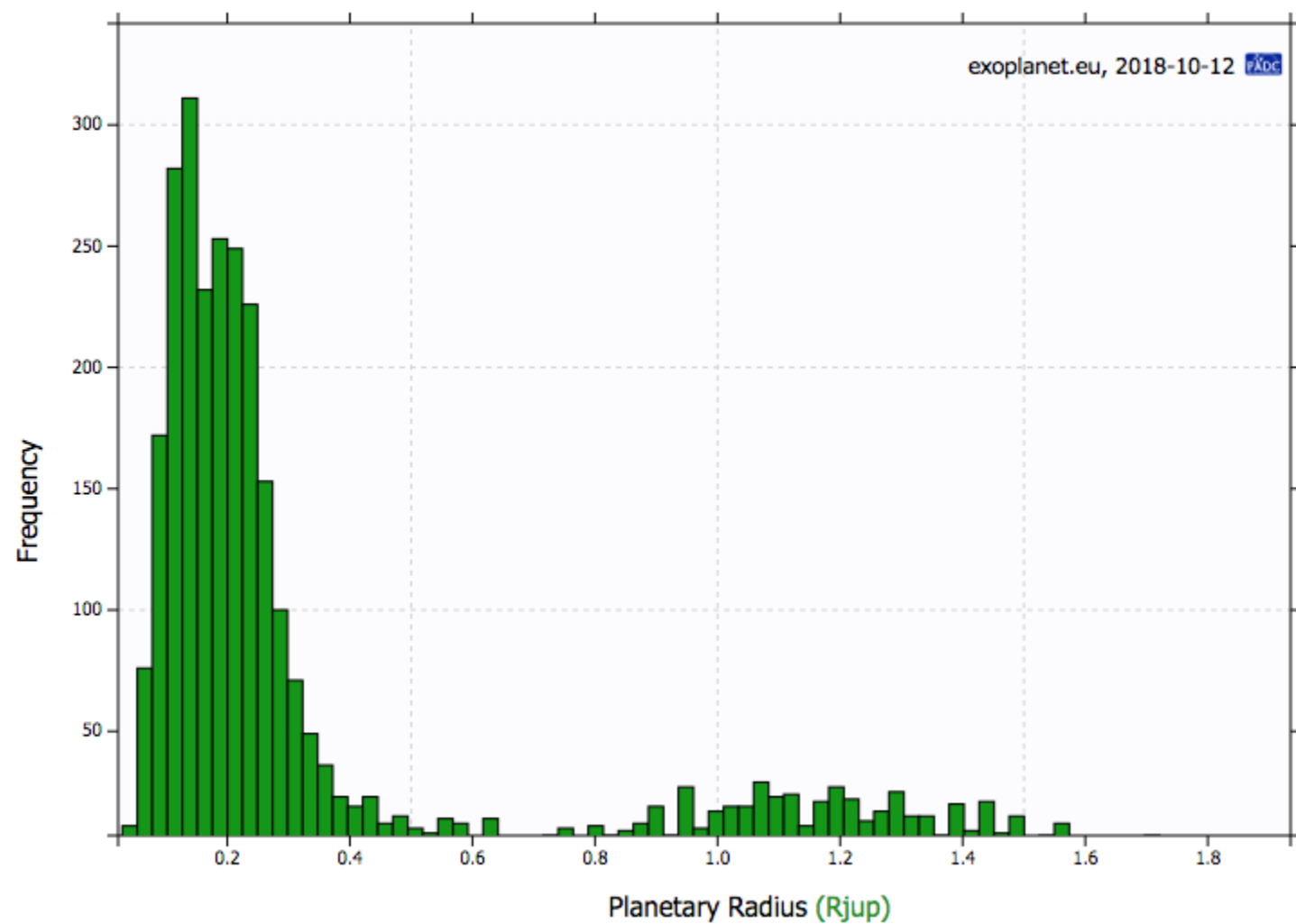
~~128~~ 490 sistemi multipli

Statistica dei sistemi trovati finora (dicembre 2018)

2910 sistemi planetari

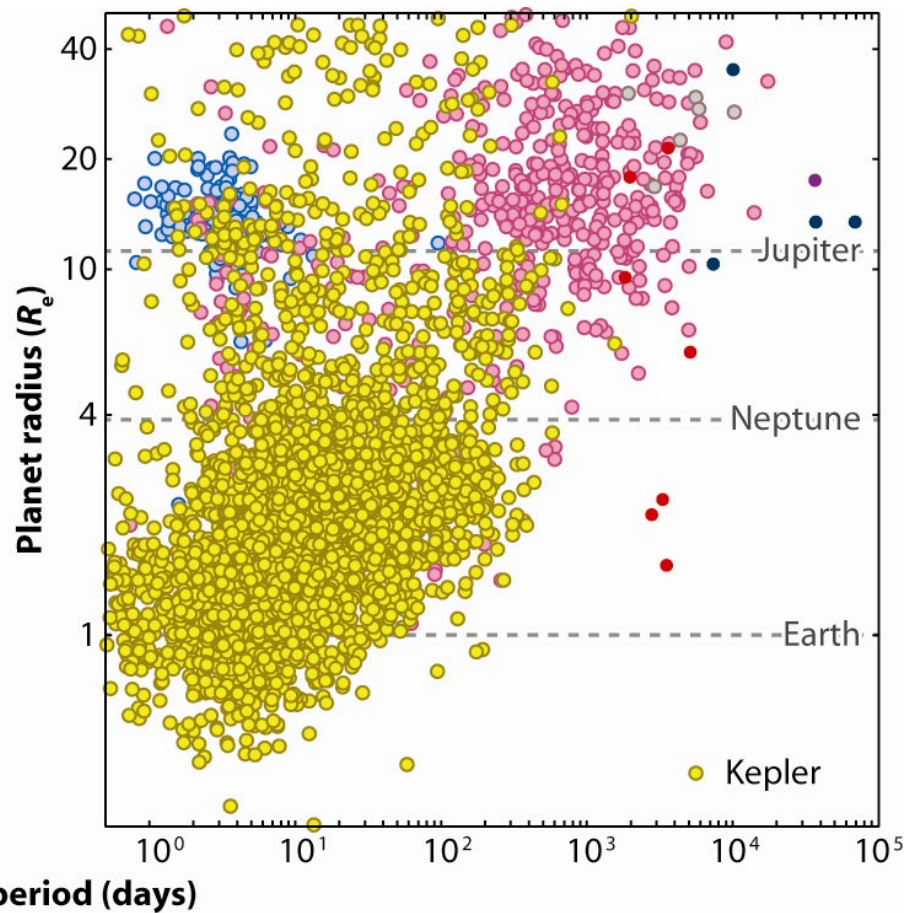
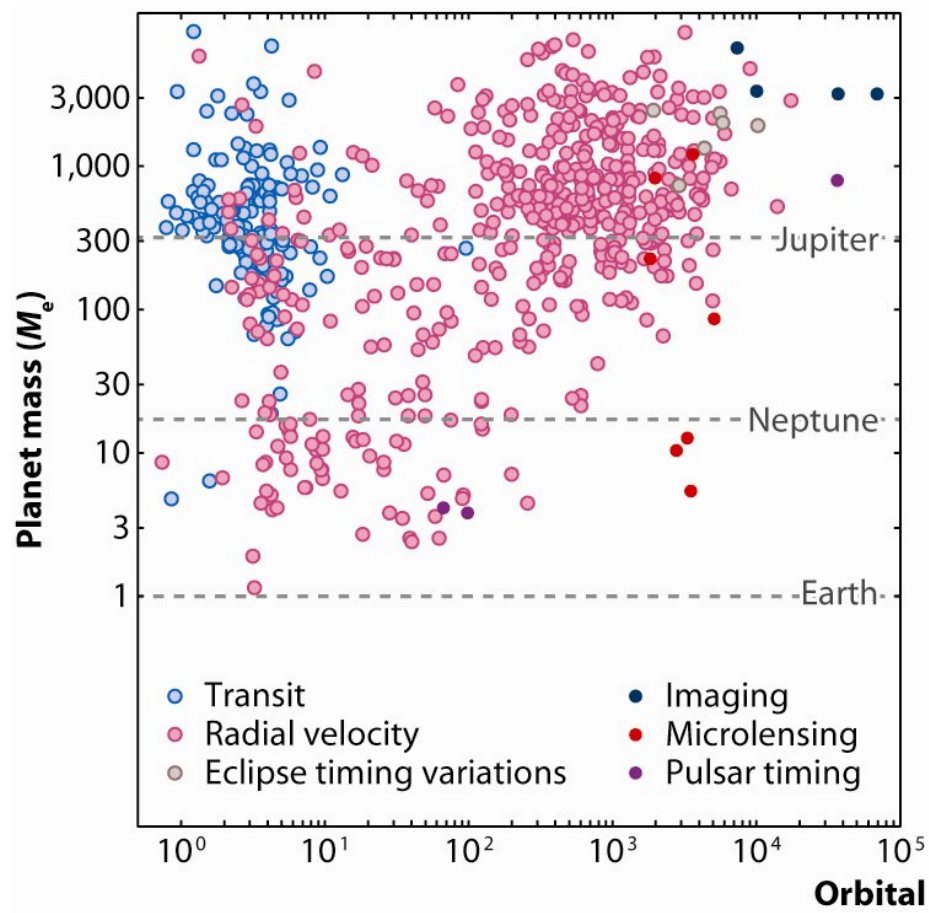
3906 pianeti

647 sistemi multipli



Giove

• Terra



Le teorie tradizionali di formazione planetaria

- la differenza di temperatura crea un gradiente chimico:
 - Sistema Solare interno: elementi pesanti, pianeti piccoli
 - Sistema Solare esterno: elementi leggeri, pianeti giganti
- come si formano i "Giovi caldi" ?
 - migrazione di pianeti esterni?
 - frizione nel protodisco?
 - incontri ravvicinati?
 - formazione *in loco* per instabilità gravitazionale?

~~Esistono pianeti abitati da forme di vita?~~

Esistono pianeti abitabili?

Cosa vuol dire “abitabile”?

Requisiti ragionevoli:

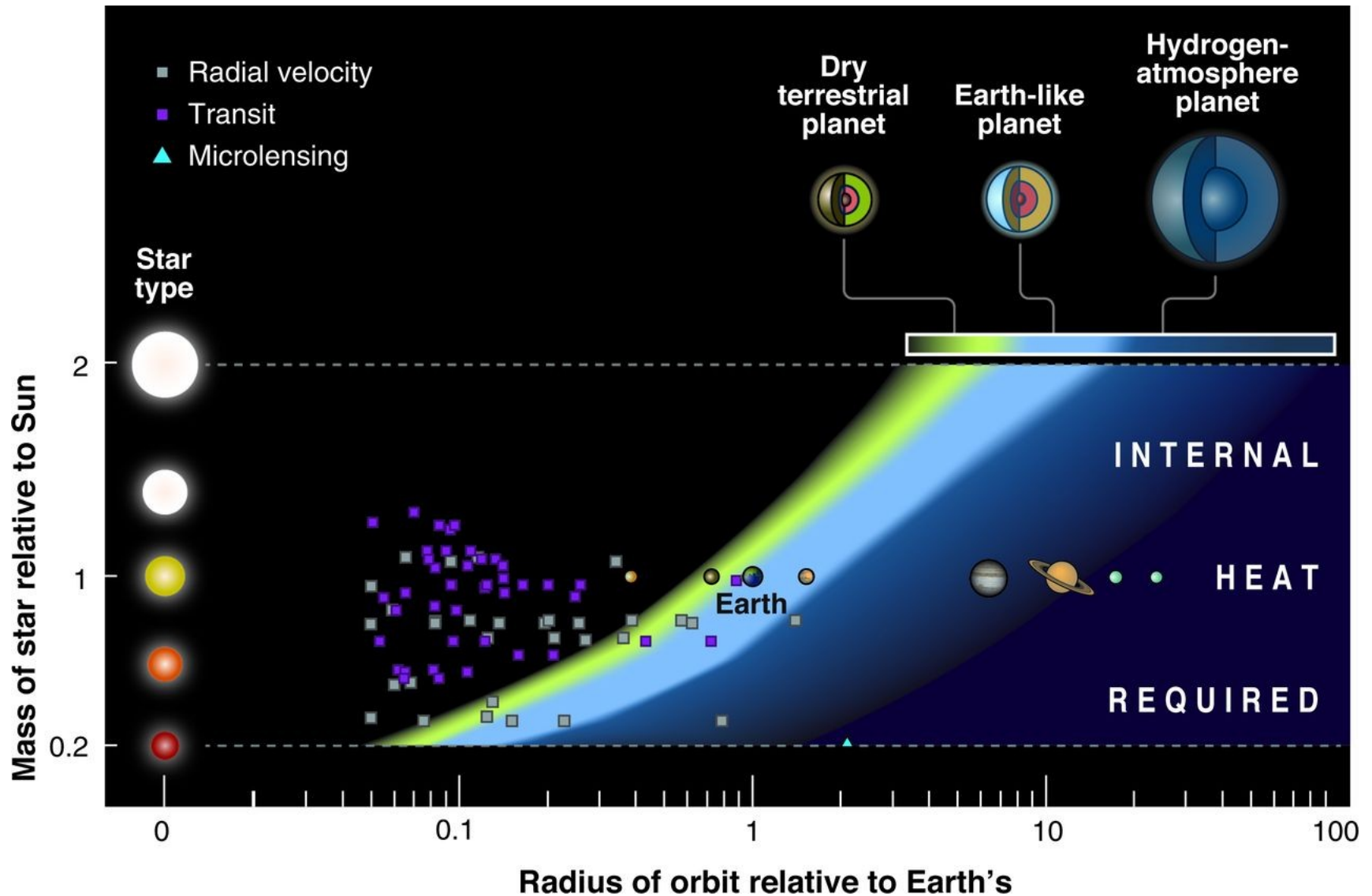
Atmosfera (massa, temperatura, composizione chimica)

Acqua liquida (temperatura)

Campo magnetico (massa, composizione chimica, età)

Composizione chimica

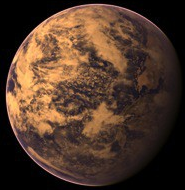
Zona di abitabilità



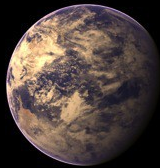
Potentially Habitable Exoplanets



Earth



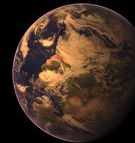
Gliese 667C c



Kepler-62 e



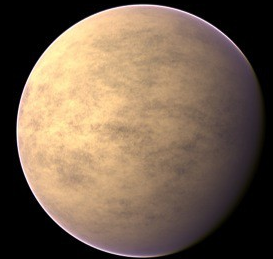
Tau Ceti e*



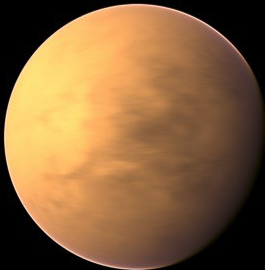
Gliese 581 g*



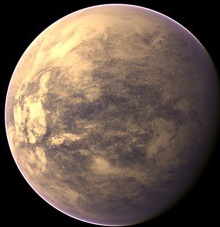
Gliese 667C f



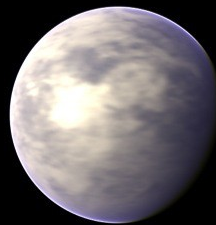
HD 40307 g



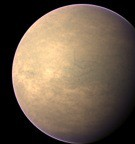
Gliese 163 c



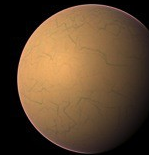
Kepler-61 b



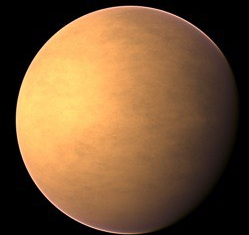
Kepler-22 b



Kepler-62 f



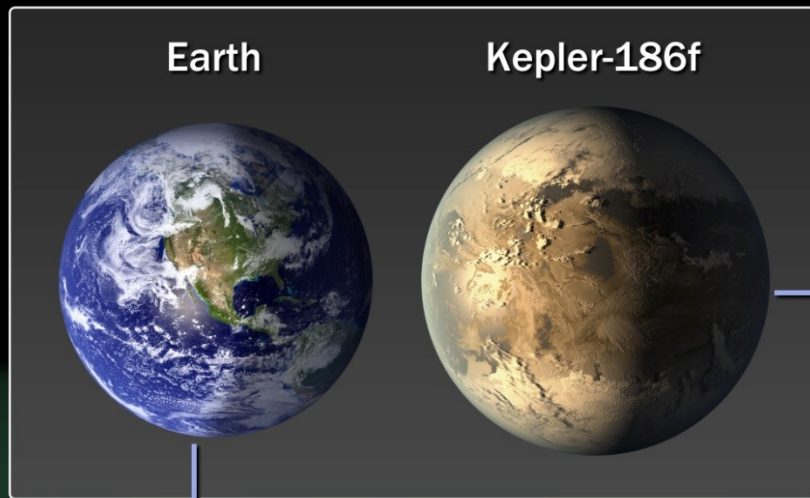
Gliese 667C e



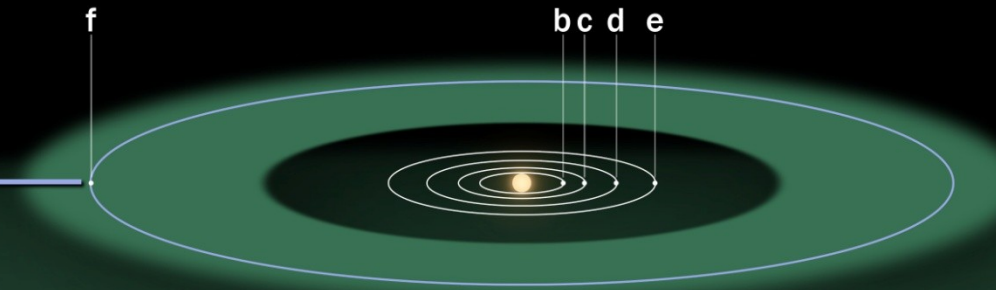
Gliese 581 d

*planet candidates

CREDIT: PHL @ UPR Arecibo (phl.upr.edu) December 5, 2013



Kepler-186 System



Solar System

Earth

Venus

Mercury

Planets and orbits to scale

$$a = 0.356 \text{ AU}; \quad P = 130 \text{ d}; \quad R = 1.1 R_{\text{T}}$$

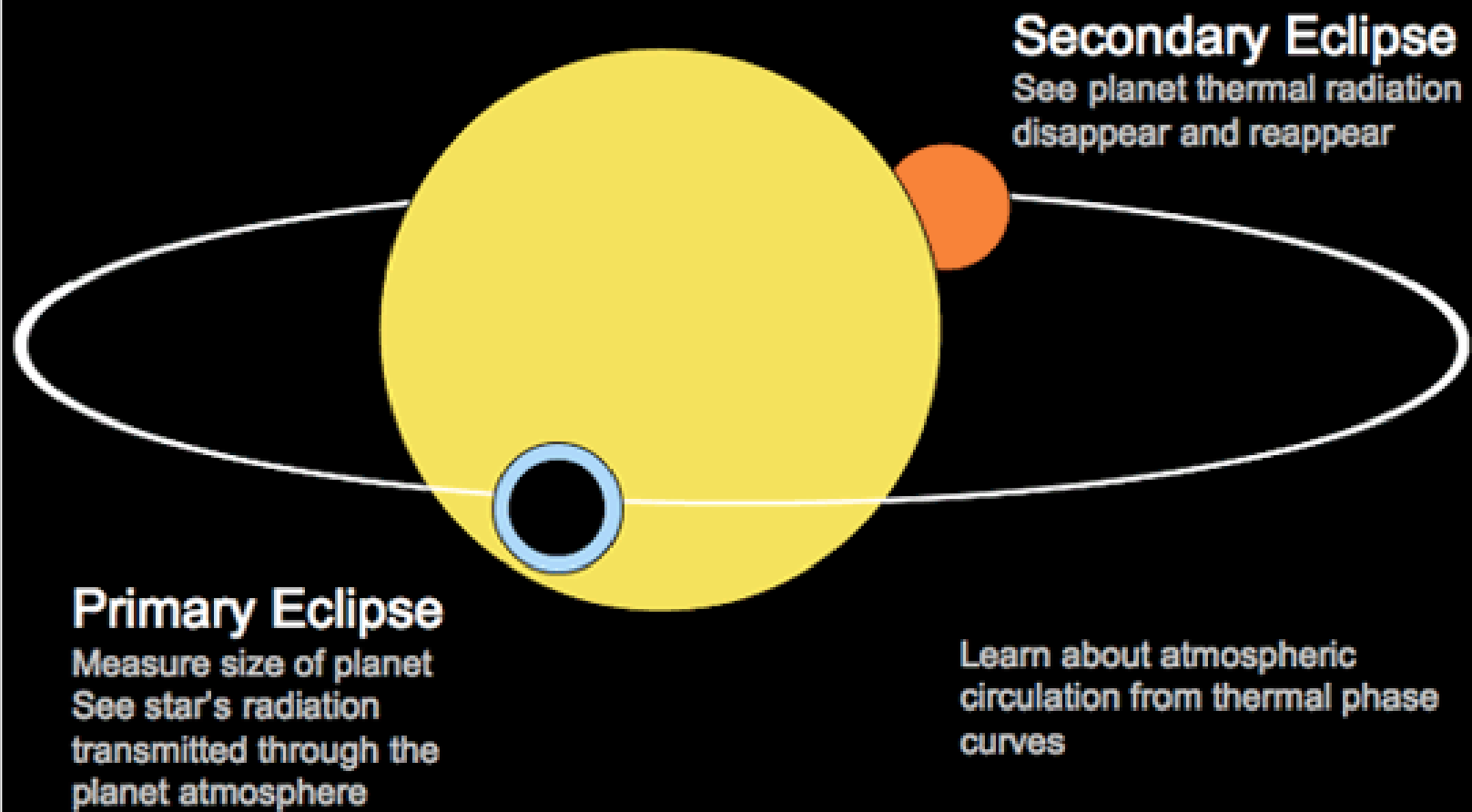
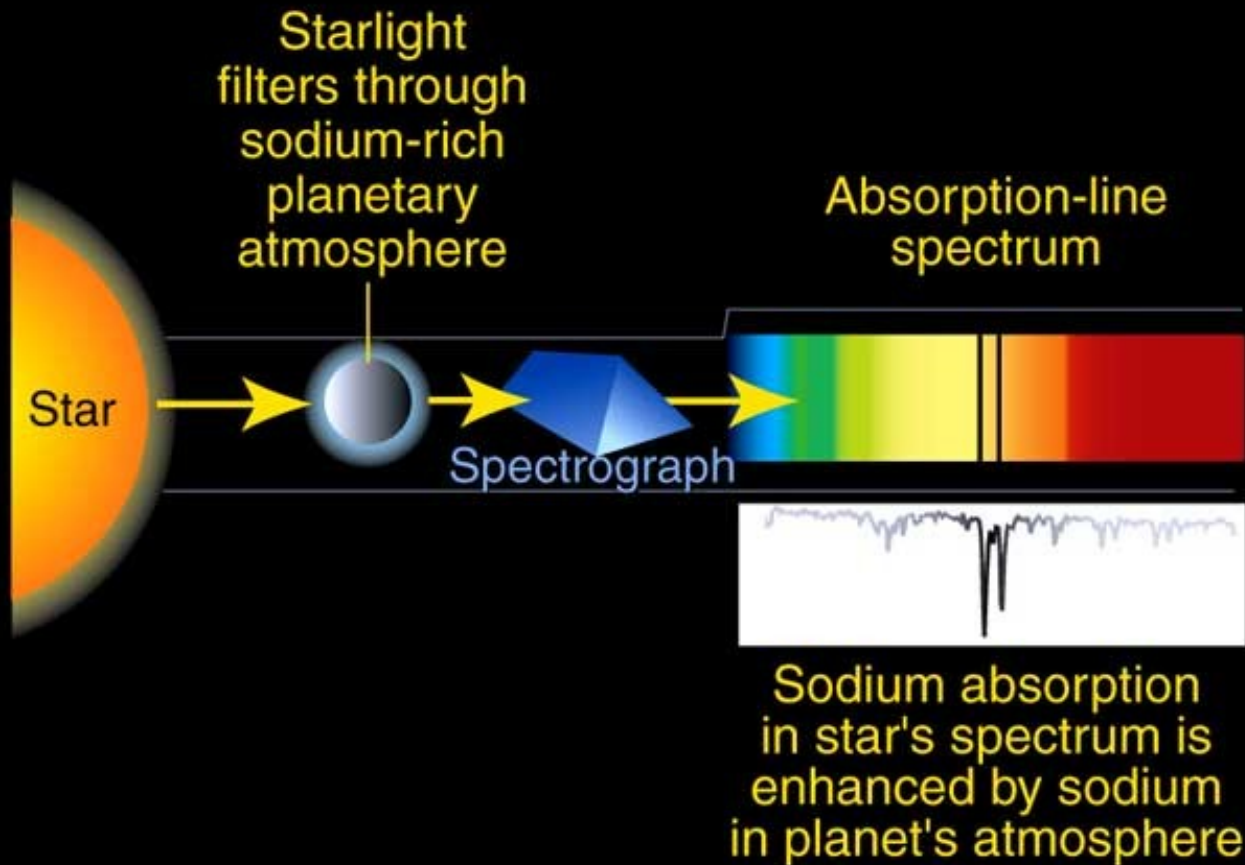
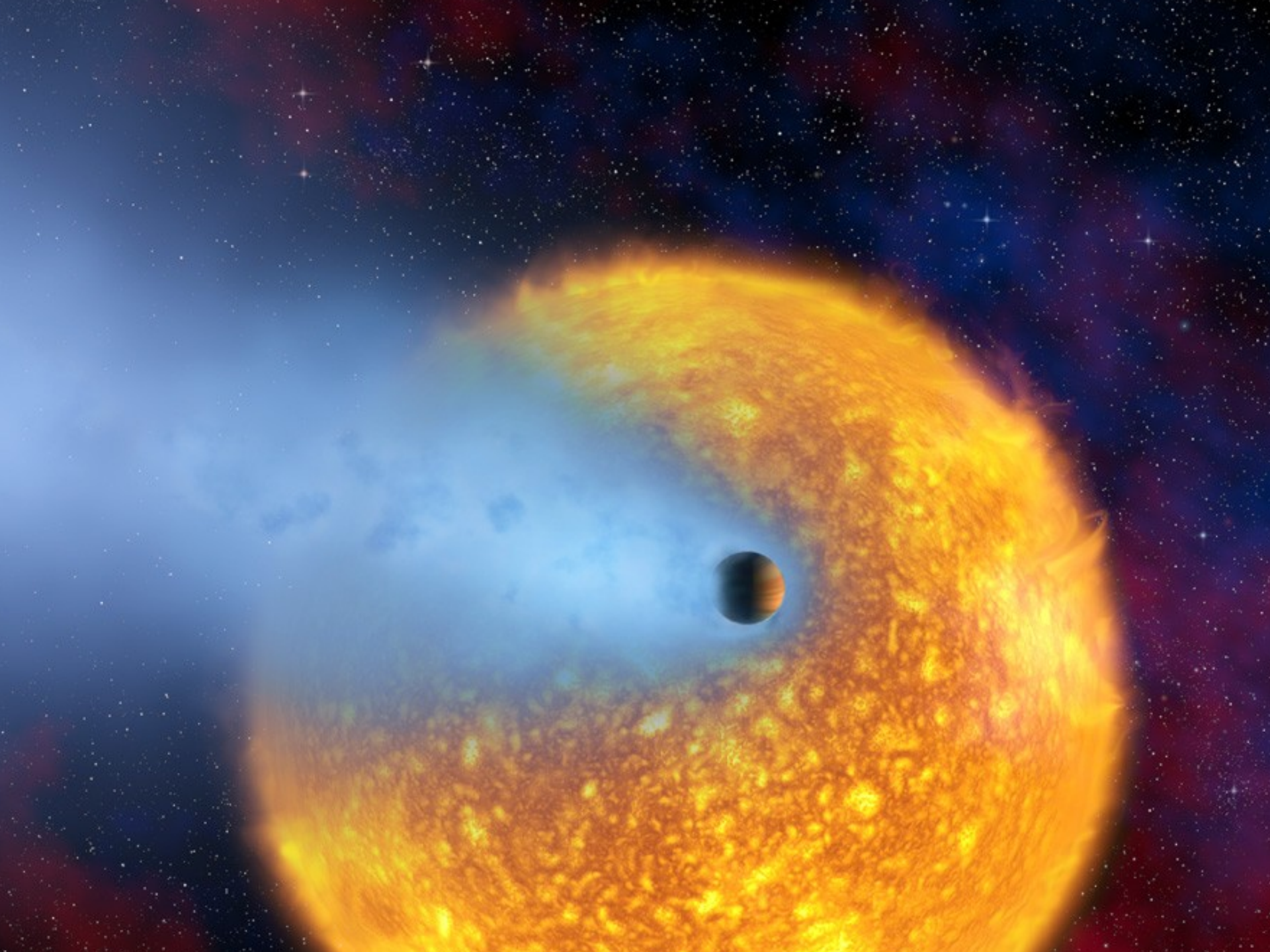


Figure by S. Seager

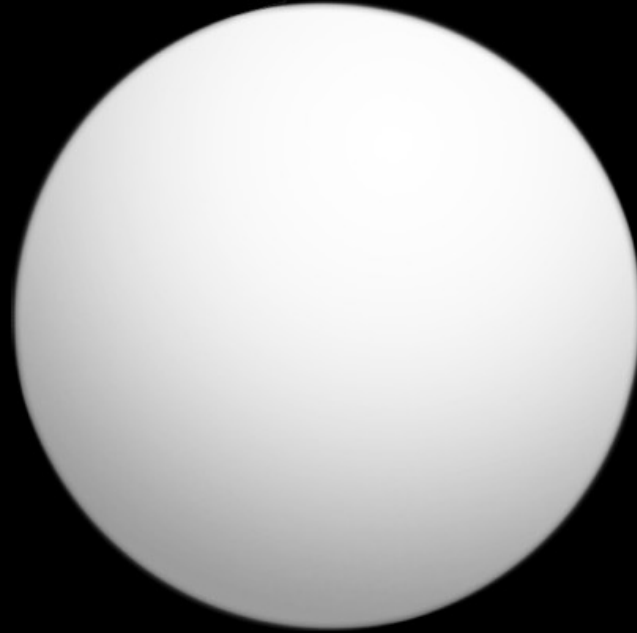
Sistema HD209458



Elementi rivelati: sodio, idrogeno, carbonio, ossigeno

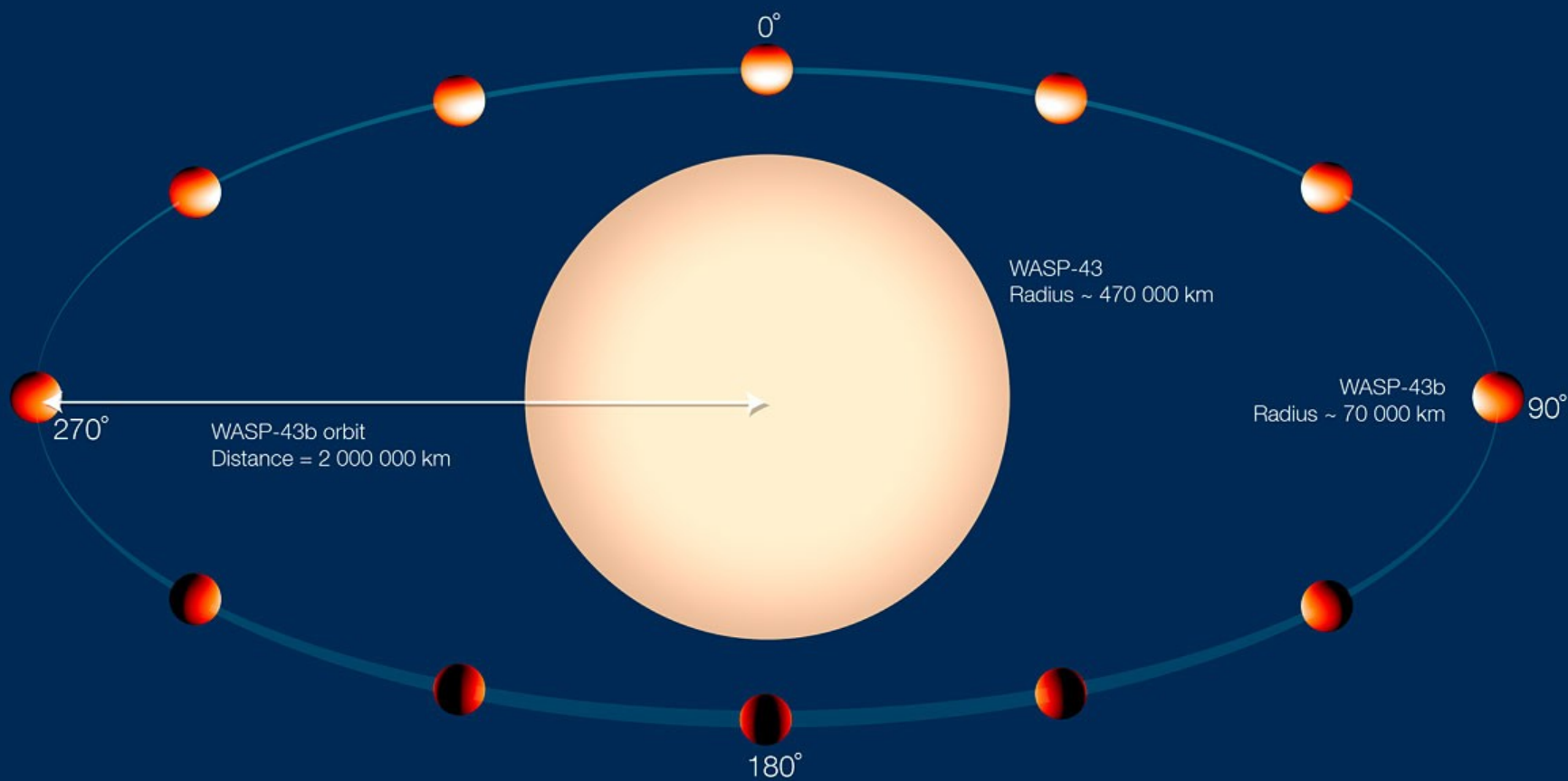


Sistema HD189733 (scoperta: 2005)

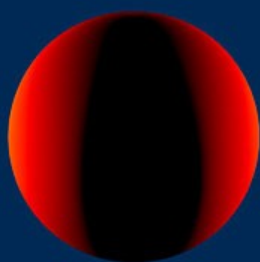


Massa = $1.13 M_J$
Raggio = $1.14 R_J$
 $a = 0.03 \text{ AU}$
 $P = 2.2 \text{ d}$

Composti rilevati: idrogeno,
ossigeno, vapor d'acqua, metano,
monossido di carbonio



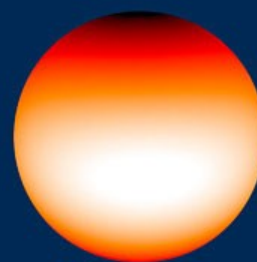
270°



180°

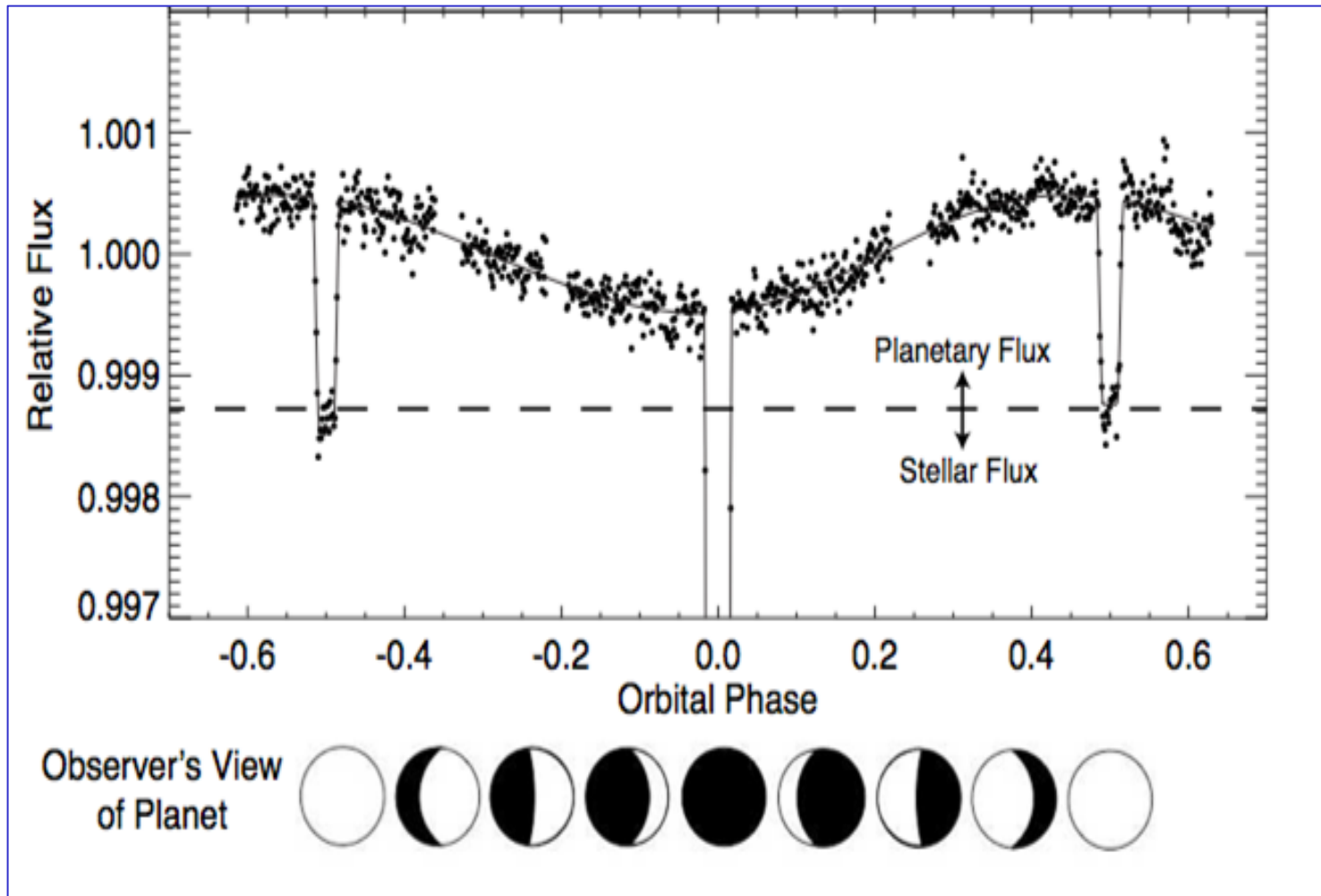


90°

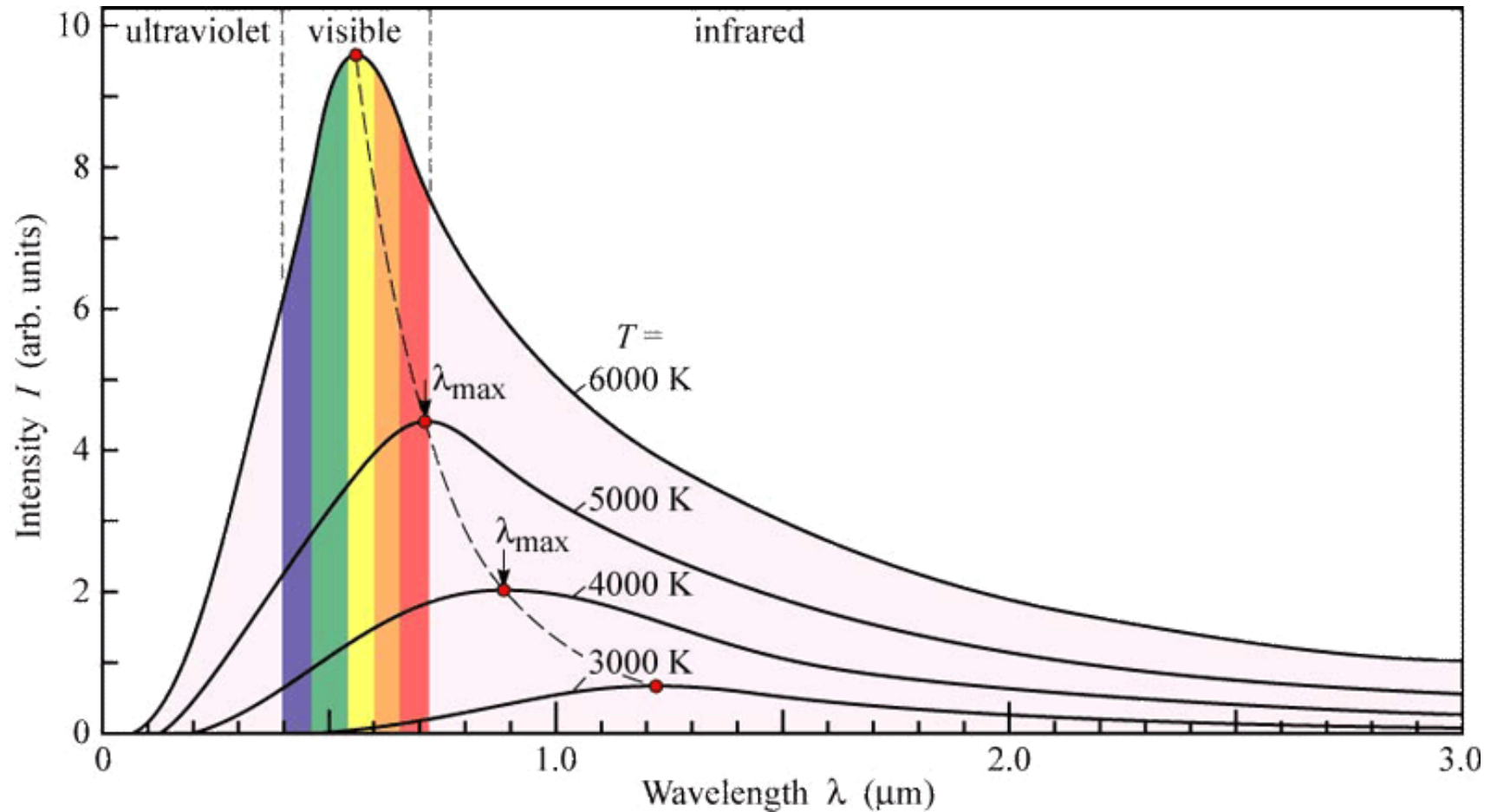


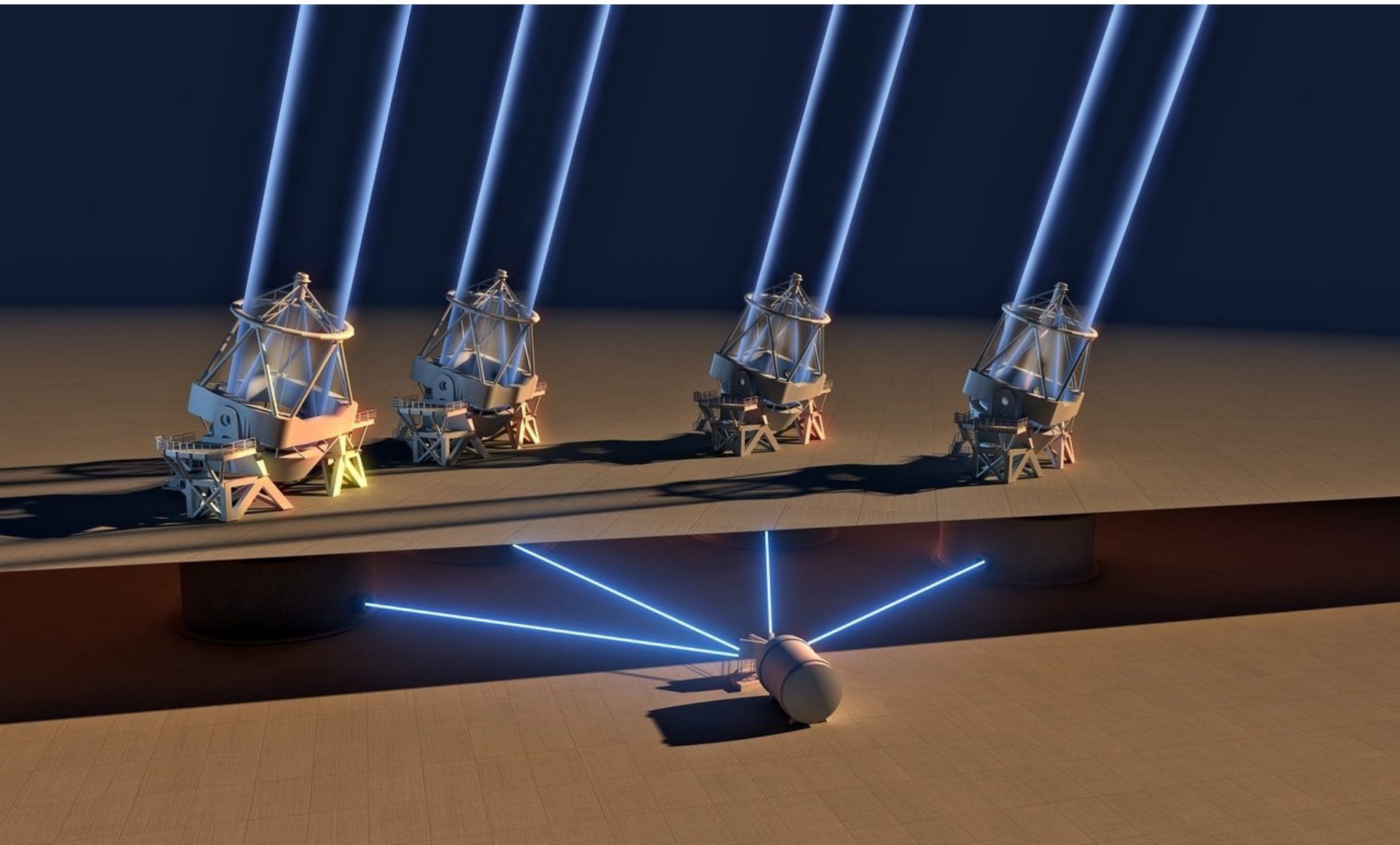
0°

Fotometria infrarossa



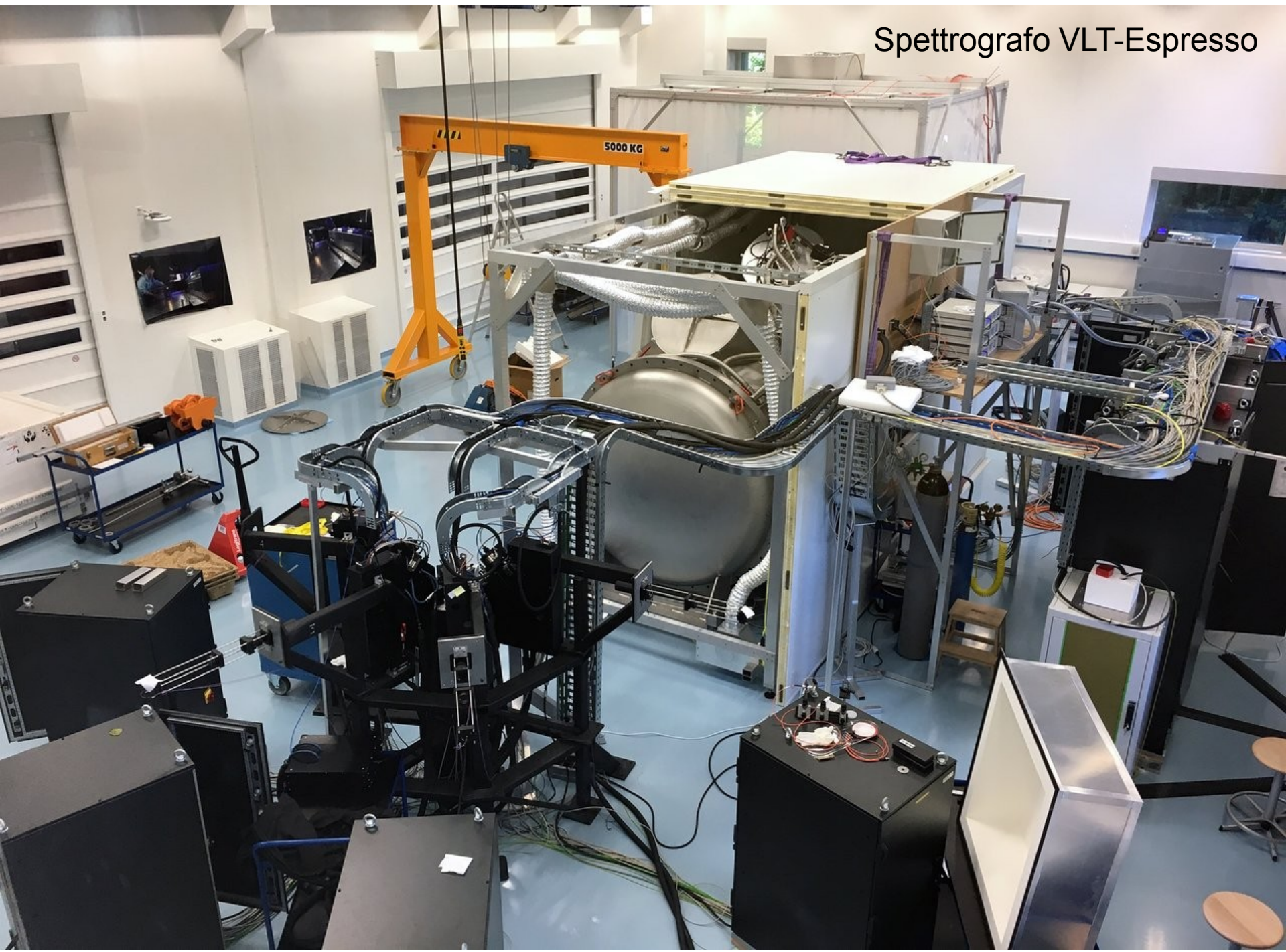
Radiazione termica (di corpo nero)



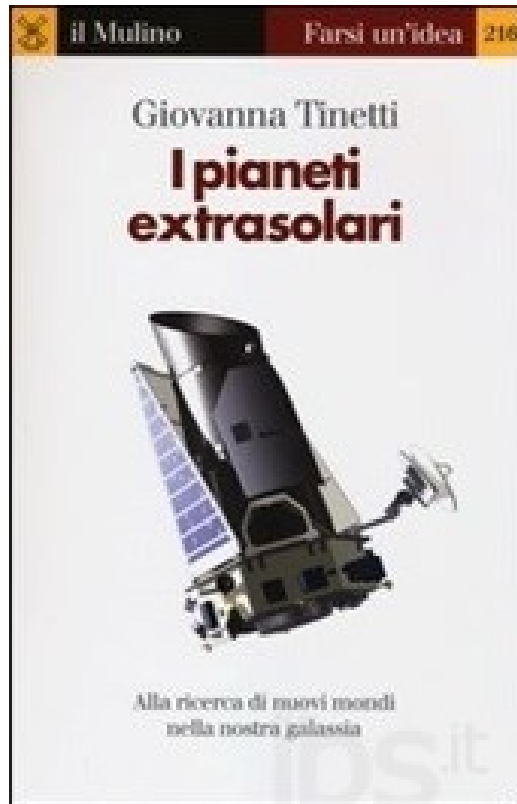


ESO VLT (Cerro Paranal, Chile)

Spettrografo VLT-Espresso

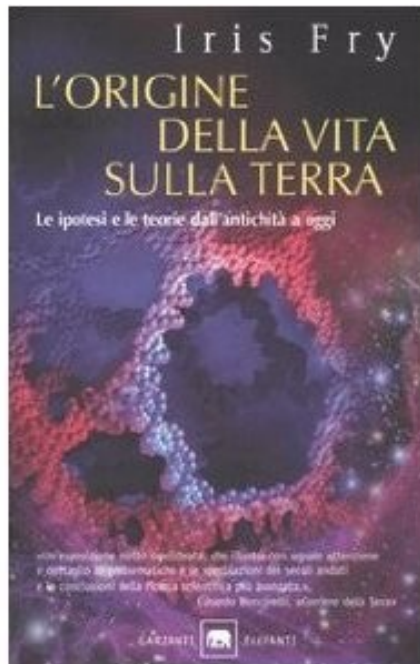


Bibliografia



Giovanna Tinetti,
*I pianeti extrasolari. Alla ricerca di
nuovi mondi nella nostra galassia,*
Il Mulino (2013)

Bibliografia



Iris Fry,
L'origine della vita sulla Terra,
Garzanti (2002, orig. 2000)

Siti web

- Wikipedia (inglese!)
- The Extrasolar Planet Encyclopedia
(exoplanet.eu)

The Extrasolar Planets Encyclopaedia

Prima versione: Febbraio 1995

Jean Schneider, CNRS/LUTH - Osservatorio di Parigi

Last update: 17 gennaio 2013 (859 planets)

Please report any problems to vo.exoplanet@obspm.fr



Catalog

Filter, sort, export — arbitrary data manipulations with the Extrasolar Planets Encyclopaedia



Diagrams

Analyze the Extrasolar Planets Encyclopaedia data online. Simple plotting tool right in the browser

News

22 settembre 2011 [KIC 10905746 b](#) e [KIC 6185331 b](#): i primi

2 Kepler candidati pianeti transitanti rivelati da PlanetHunters (Fischer et al.).

15 settembre 2011 [Kepler-16 \(AB\)b](#): il primo pianeta

transitante attorno a un binaria (Doyle et al.)

12 settembre 2011 [41 nuovi pianeti HARPS](#) tra cui 16

Super-Terre - Mayor et al.) et [23 nuovi pianeti WASP](#). HD 97658 b è un [pianeta transitante](#) (Henry et al.).

31 agosto 2011 [Un pianeta abitabile](#) attorno a [HD 85512?](#) E

[cinque altre super-Terre](#) (Pepe et al.).

[PSR 1719-14 b](#): un nuovo pianeta attorno a una pulsar (Bailes et al.).

02 febbraio 2011 6 pianeti attorno alla stella [Kepler-11](#), tutti

transitanti (Lissauer et al.)

Informazioni introduttive

Last update: 17 maggio 2012

Bibliografia

Last update: 17 maggio 2012

Searches

Last update: 18 aprile 2012

Congressi

Last update: 17 maggio 2011

Lavoro teorico

Last update: 03 aprile 2012

Altri siti

Last update: 16 aprile 2012

Other tools

Last update: 16 aprile 2012