Pianeti abitabili in sistemi extra-solari: lo stato dell'arte della ricerca

Antonio Maggio

Istituto Nazionale di Astrofisica

Osservatorio Astronomico di Palermo

Ci sono altri pianeti nell'universo?

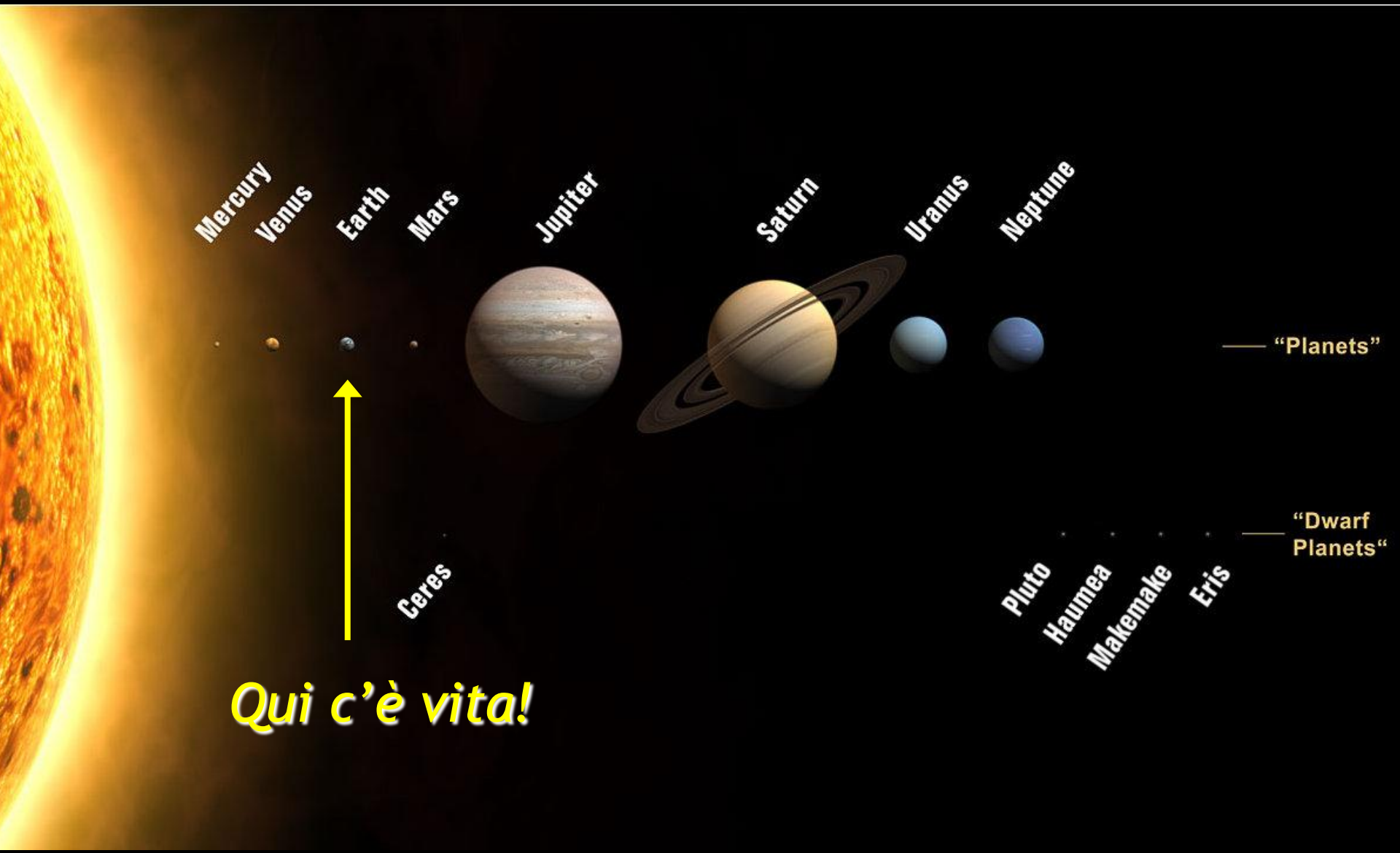
Esistono altri mondi abitabili da qualche parte?

Tappe della ricerca

Per rispondere, occorre affrontare il problema per passi successivi

- Ricerca di sistemi planetari extra-solari
- Caratteristiche dei sistemi su grande scala
  - ⇒ Formazione, evoluzione
  - ⇒ In che ambiente, con che frequenza
- Caratteristiche dei pianeti
  - ⇒ Densità, composizione chimica, temperatura, ecc…
  - ⇒ Evoluzione con l'età
- Studio delle condizioni di abitabilità (vedi avanti)

Il sistema Solare (dal 24 agosto 2006)



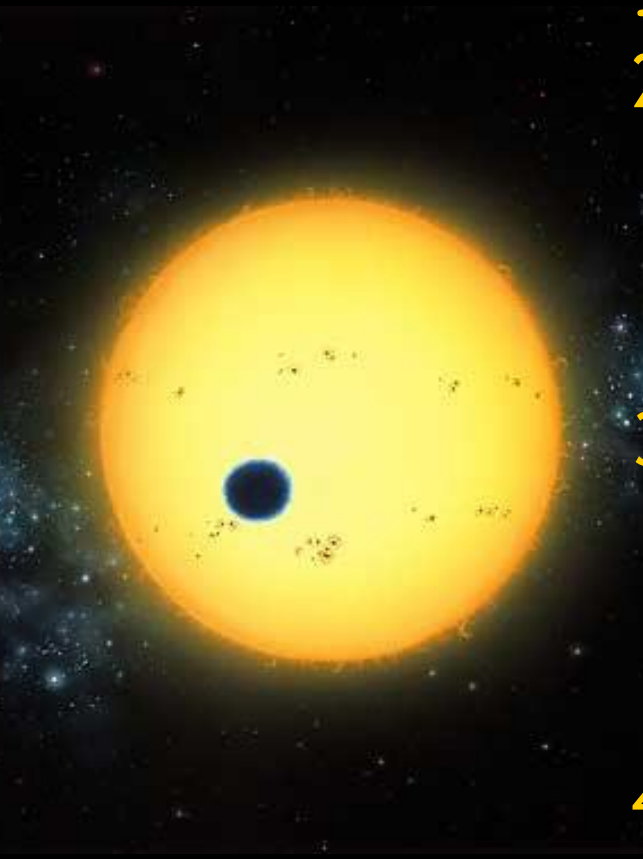
Come trovare un'altra Terra?

I pianeti non emettono luce propria

Quelli come la Terra sono piccoli

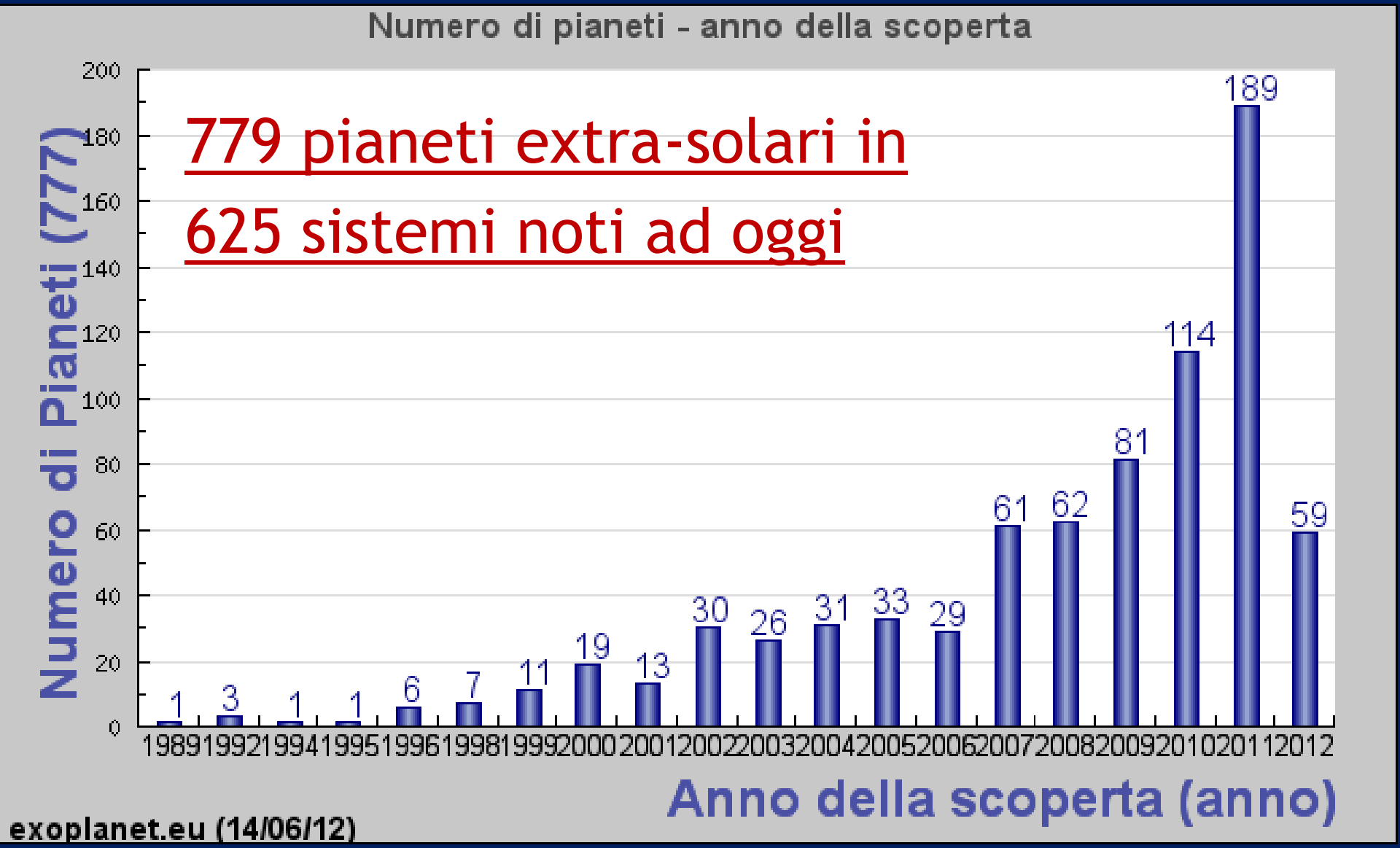
e molto vicini alla stella che li ospita

Tecniche di ricerca



1. Immagini dirette *(coronografia)*
2. Effetti indotti sulla stella ospite dal moto orbitale
   a. Moto proprio (astrometria)
   b. Velocità radiale (spettroscopia)
3. Variazione della luminosità della stella (fotometria)
   a. Micro-Lenti gravitazionali
   b. Transiti
4. Effetti indotti su un pianeta da un altro pianeta
   a. Variazioni del tempo di transito *(timing)*

Quanti ne abbiamo trovati?



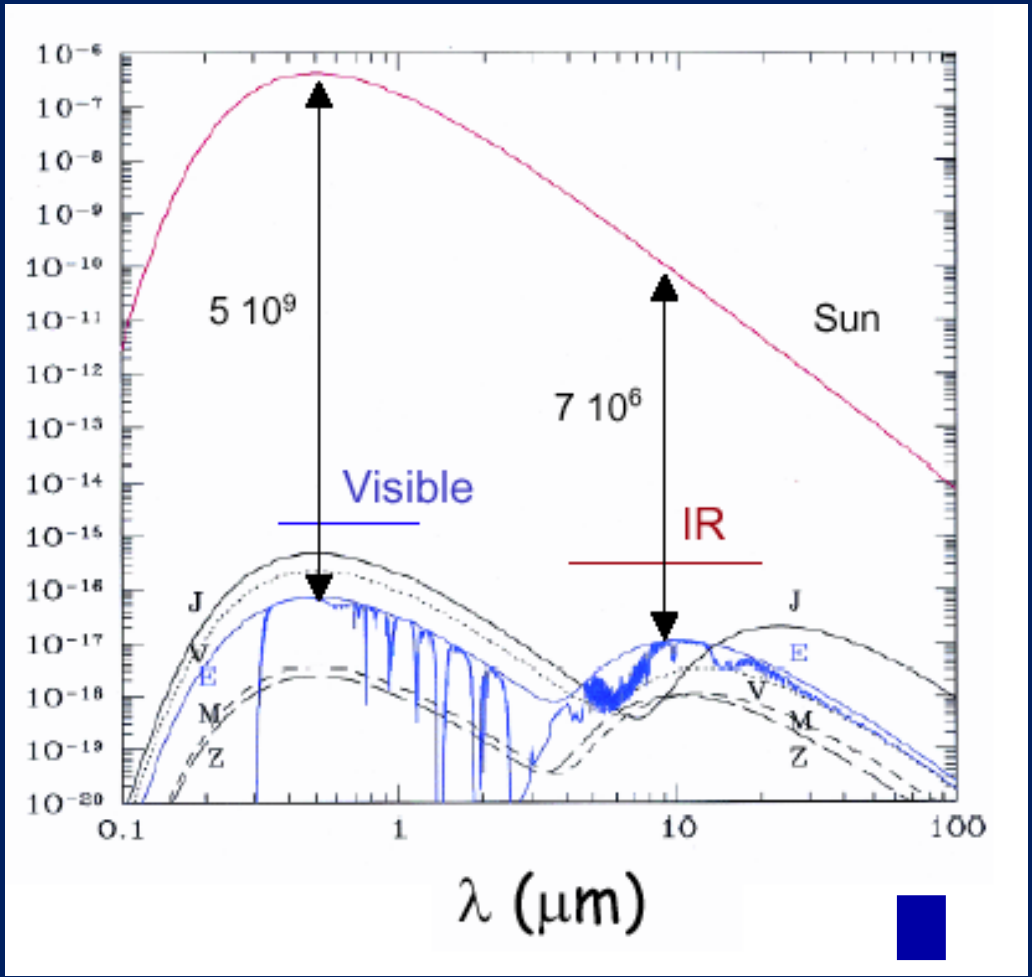
Ricerca di pianeti extra-solari
1. Immagini dirette?

MOLTO difficili!

contrasto 1 : 1.000.000.000
nel caso di Giove / Sole

piccola separazione dalla stella

Osservazione diretta: meglio in IR



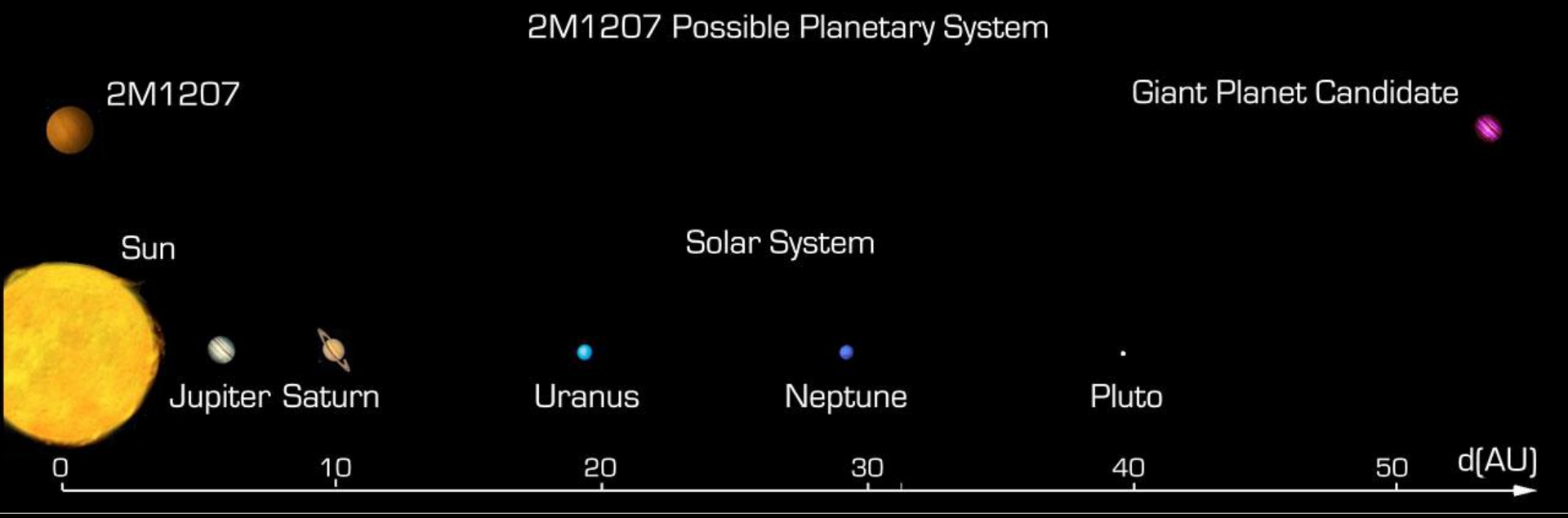
Nell'InfraRosso il contrasto è minore che in luce visibile:
il pianeta Terra è circa 7×10^6 volte meno luminoso del Sole

Ad oggi (giugno 2012) 27 sistemi planetari (2 multipli, 31 pianeti in totale) rivelati tramite immagini dirette

2M1207b visto da ESO/VLT 8.2m (Yepun) con NACO nel 2004

Un possibile pianeta attorno a una nana bruna

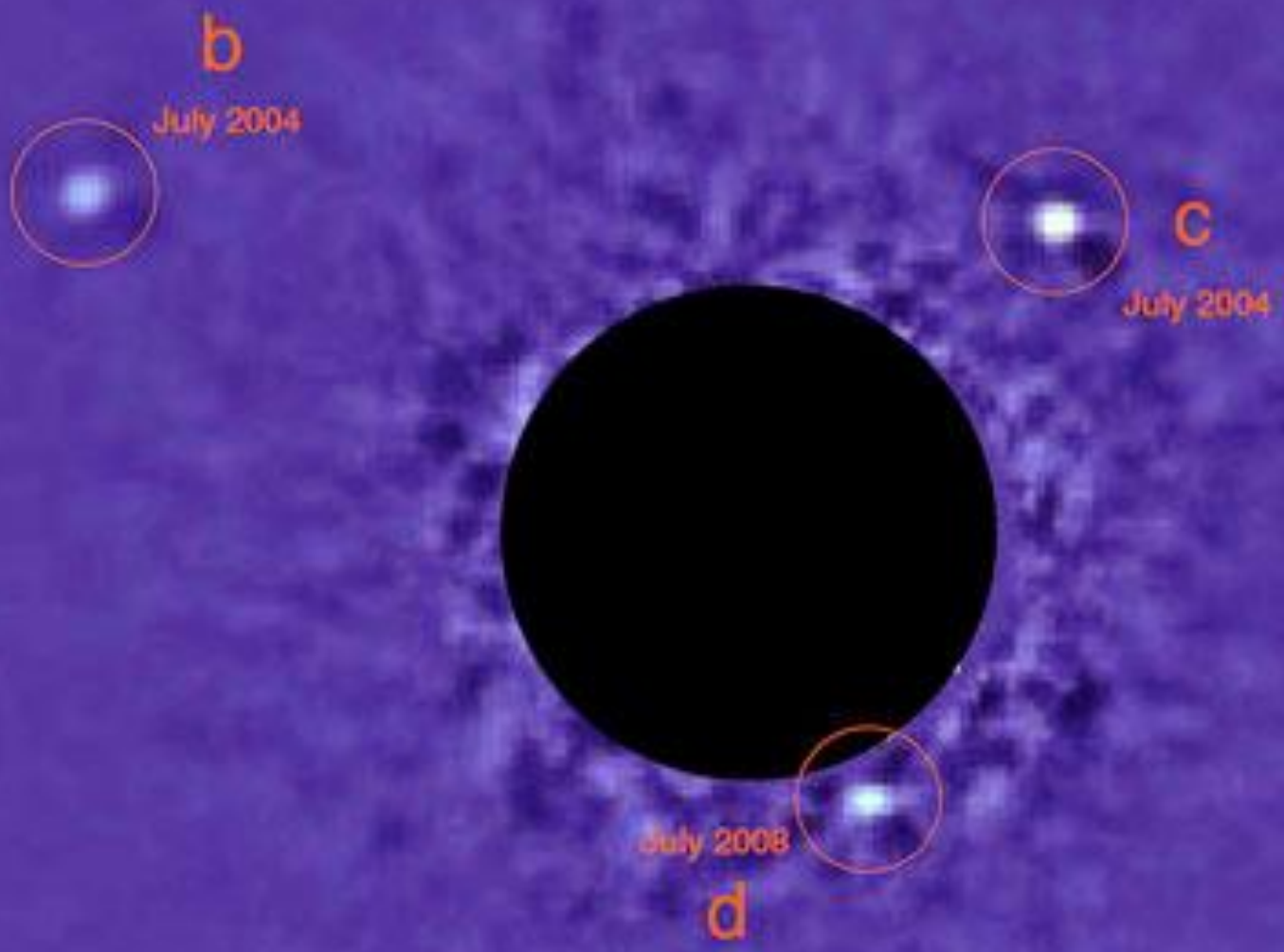
Il sistema 2M1207

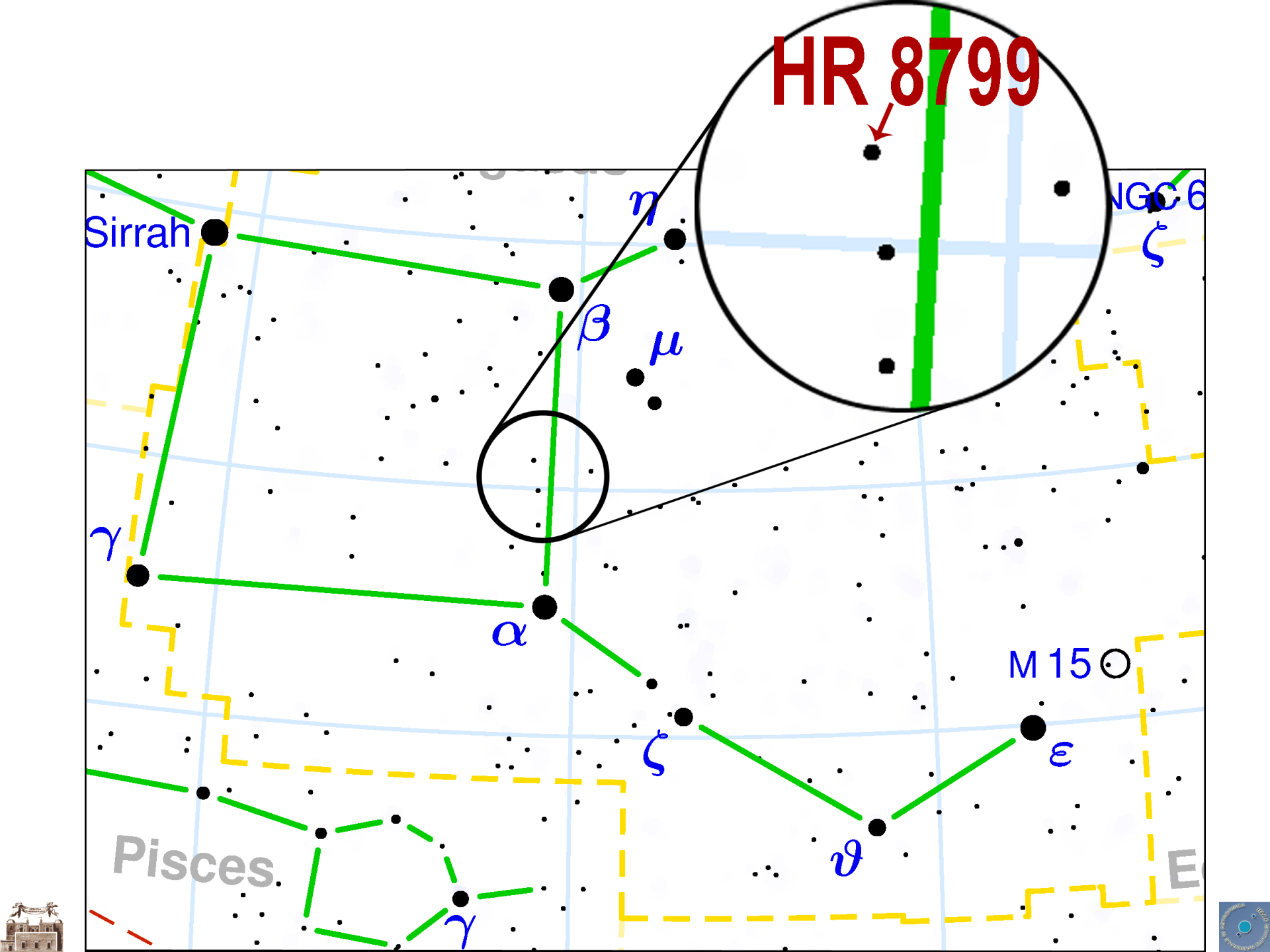


Associazione TW Hya, a 230 anni luce da qui

Primo sistema planetario multiplo identificato con immagini dirette attorno a V342 Pegasi (HR 8799, tipo spettrale A5V, V 5.95)

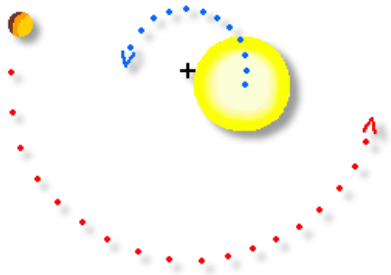
Masse da 5 a 13 Masse di Giove, distanze 24, 38 e 68 AU

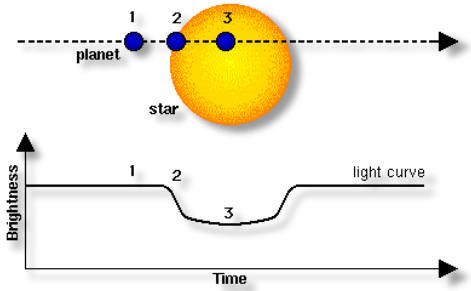


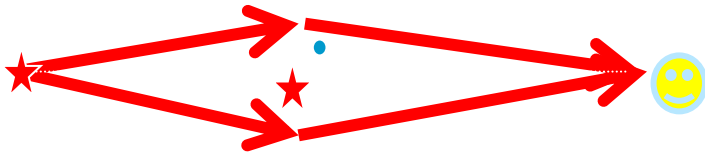

HR 8799
Sirrah
η
β
μ
γ
α
ζ
M 15
ε
ϑ
Pisces
γ

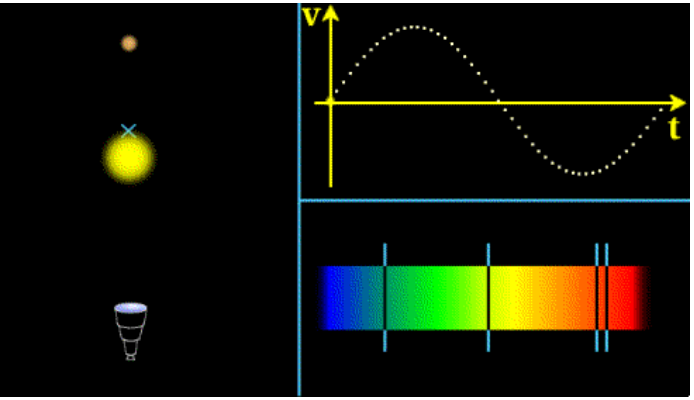
Exo-Planet Discovery Methods

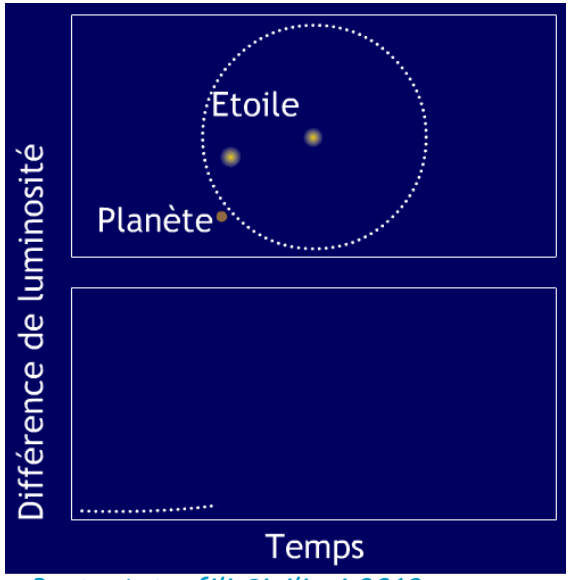
- Velocità radiali (effetto Doppler)
- Transiti
- Micro-lenti gravitazionali











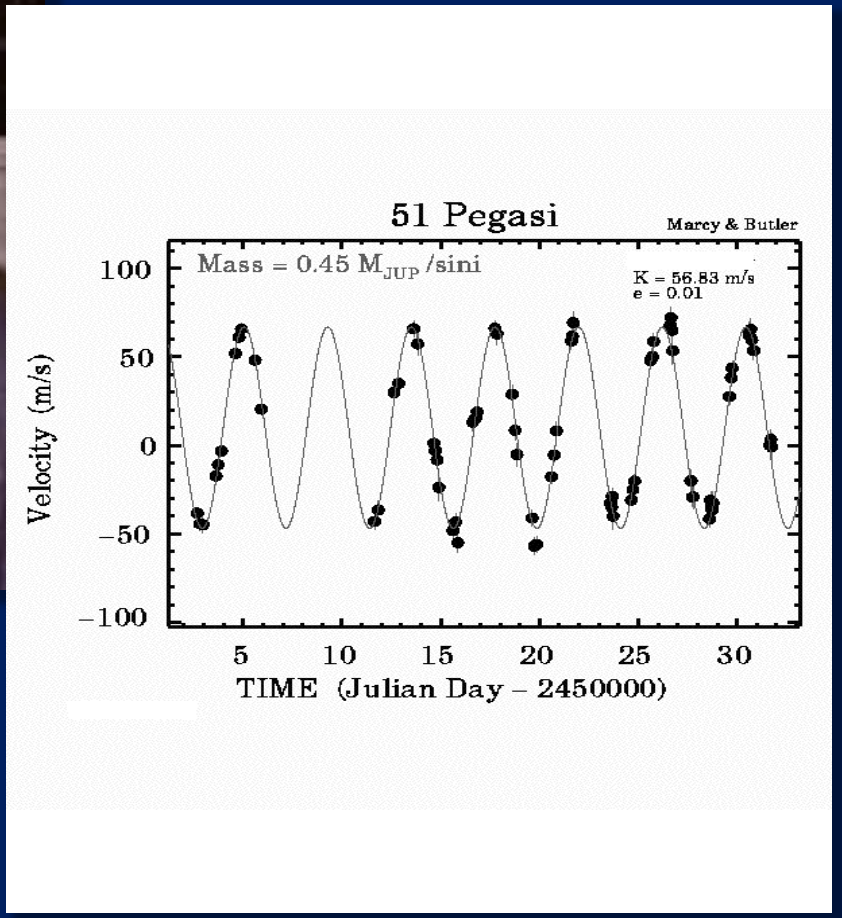
2. Metodo delle velocità radiali

- Il metodo più efficiente (prima di *Kepler*)
- Pianeti di massa relativamente grande più facili da scoprire
- Velocità del Sole indotta da Giove: 13 m/s
- Velocità indotta dalla Terra: 0.1 m/s
- Precisione tipica delle misure ≈ 1 m/s (non dipende dalla distanza!)
- Misure più precise ottenute finora: 30 cm/s

La scoperta del primo pianeta extra-solare: 51 Pegasi b

Michel Mayor e Didier Queloz,
Osservatorio di Ginevra

10 giugno 1995

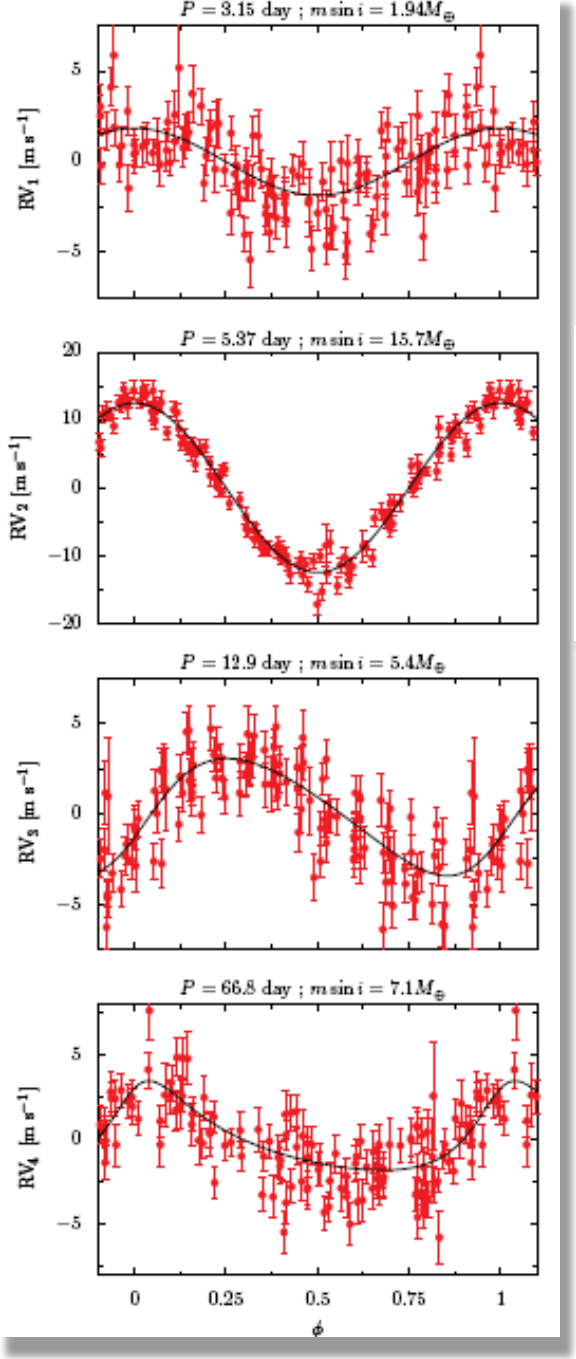


Il progetto HARPS

(High Accuracy Radial velocity Planet Searcher)

- ESO 3.6m telescope, La Silla
- Spettrografo Echelle (sotto vuoto!) a fibra ottica sul fuoco Cassegrain
- 2 CCD da 16 Mpx, 15 μm/pixel
- Banda spettrale 380-690 nm
- Potere risolutivo: 115.000
- Accuratezza in velocità radiale: 1 m/s
- In funzione dal 2003

Un sistema multiplo: GJ 581



Parameter		GJ 581 e	GJ 581 b	GJ 581 c	GJ 581 d
P	[days]	3.14942 ± 0.00045	5.36874 ± 0.00019	12.9292 ± 0.0047	66.80 ± 0.14
e		0 (fixed)	0 (fixed)	0.17 ± 0.0	0.38 ± 0.09
ω	[deg]	0 (fixed)	0 (fixed)	-110 ± 25	-33 ± 15
K	[m s^{-1}]	1.85 ± 0.23	12.48 ± 0.23	3.24 ± 0.24	2.63 ± 0.32
V	[km s^{-1}]		-9.2082 ± 0.0002		
$f(m)$	[$10^{-14} M_\odot$]	0.21	108.11	4.34	10.05
$m_2 \sin i$	[$M_\oplus$]	1.94	15.65	5.36	7.09
a	[AU]	0.03	0.04	0.07	0.22

- L'incertezza sulla singola misura in velocita' radiale è ~1 m/s, ma l'incertezza finale sulla stima della velocità della stella diminuisce aumentando il numero di misure!
- GJ581d: orbita molto ellittica
- GJ581e: M ~2 masse terrestri

Un nuovo cacciatore di pianeti alle Canarie: HARPS-N

- Strumento gemello di HARPS-S, al Telescopio Nazionale Galileo
- Collaborazione: Osservatorio Astronomico Uni. Ginevra, CfA (Cambridge, MA, USA), Università di St. Andrews ed Edinburgo, Queens University of Belfast, e INAF-TNG-INAF
- In funzione da maggio 2012

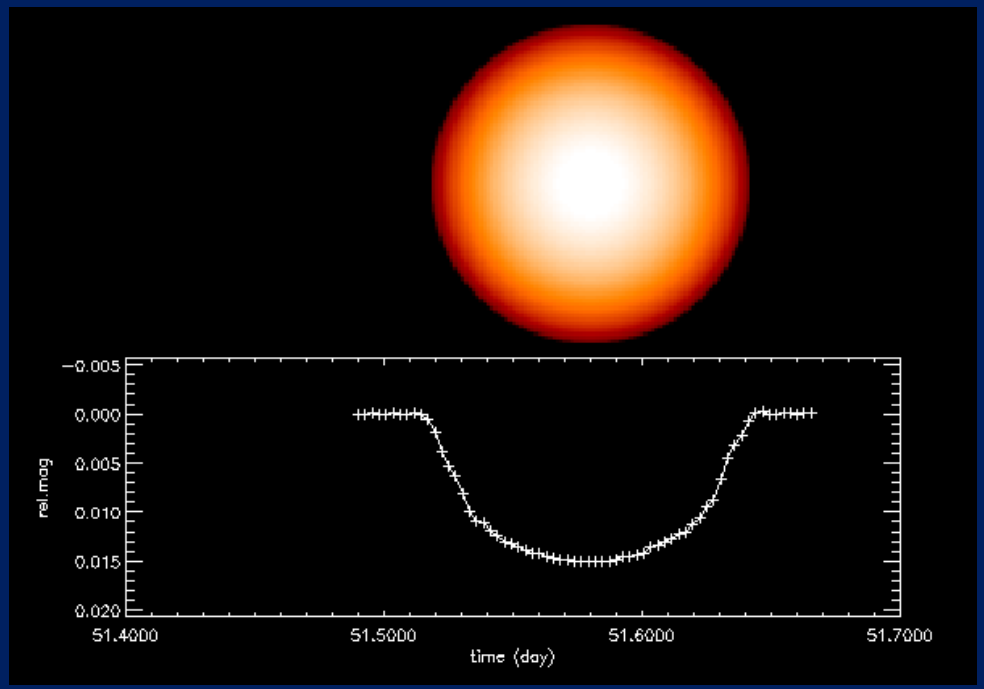
Scopo principale: Conferma e caratterizzazione di pianeti di tipo terrestre scoperti dal satellite Kepler, tramite misure di velocità radiale per stelle con V < 12 mag

Cuts (1)
Pixel Values
2000
1500
0
200
400
600
800
X: 849
Value: 1705.0
Print...
Close
CODORNÍU
BRUT
EXTRA
Cuvée Seleccionada
CODORNÍU
MÈTODE TRADICIONAL

Obiettivi scientifici di HARPS-N

1. Conferma e caratterizzazione di un pianeta gemello della Terra, con una precisione sulla massa del 30%, nella zona abitabile di una stella G5V o più tarda
2. Caratterizzazione di pianeti con masse 2-5 $M_{\oplus}$ ("super-Terre") in varie orbite, con precisione sufficiente da distinguere tra pianeti ricchi d'acqua e pianeti secchi
3. Studio della transizione da super-Terra a "Gigante" (tipo Nettuno, ad es.) per pianeti con circa 10 masse terrestri, con una precisione del 5% in massa o migliore

Ricerca di pianeti extra-solari
3. Metodo dei transiti



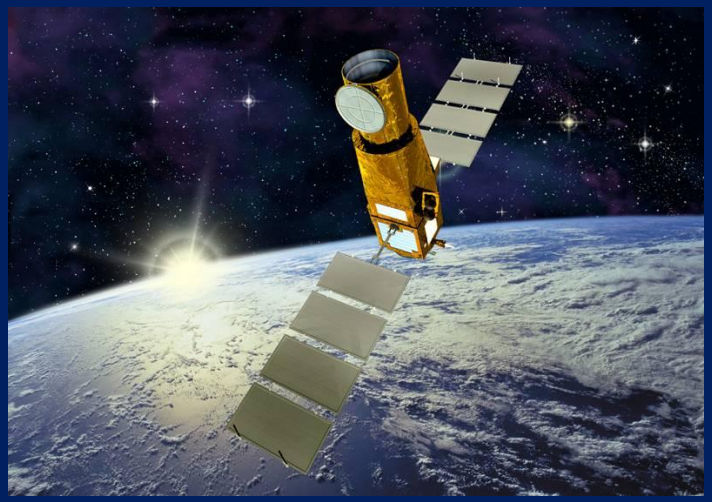
La luce della stella diminuisce leggermente quando un pianeta passa davanti

Il satellite della NASA Kepler, lanciato nel marzo 2009, cerca pianeti extra-solari con questo metodo.

I “transiti” ci permettono di…

- Misurare le dimensioni del pianeta
  - Variazione della luminosità stellare proporzionale al rapporto delle aree pianeta/stella (Giove/Sole ≈ 1%, Terra/Sole ≈ 0.01%)
- Misurare la durata del periodo orbitale
- Calcolare la distanza del pianeta dalla stella e quindi la sua temperatura superficiale
- Studiare la composizione delle atmosfere planetarie (spettroscopia di trasmissione)

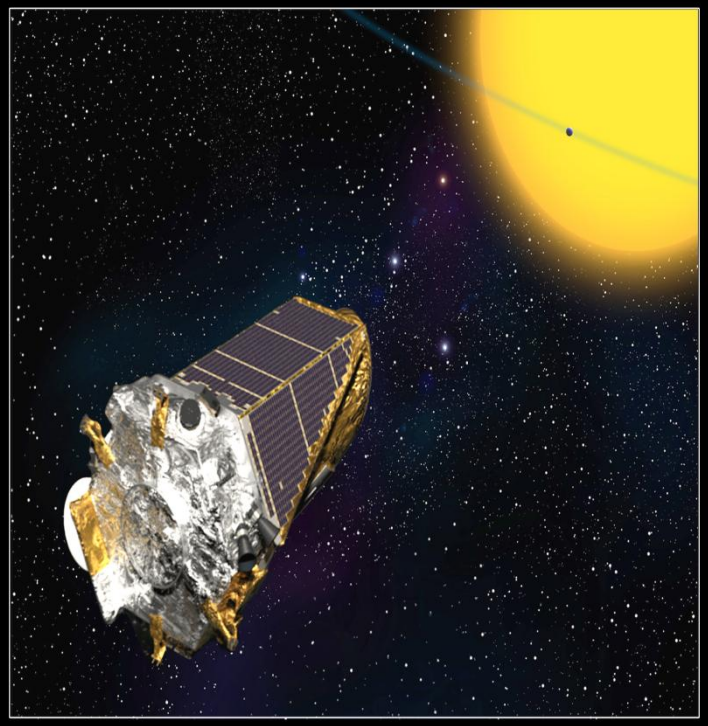
Missioni spaziali dedicate



CoRoT (Convection, Rotation, and planetary Transits)

ESA, lanciato il 27/12/2006

14 pianeti scoperti fino ad oggi



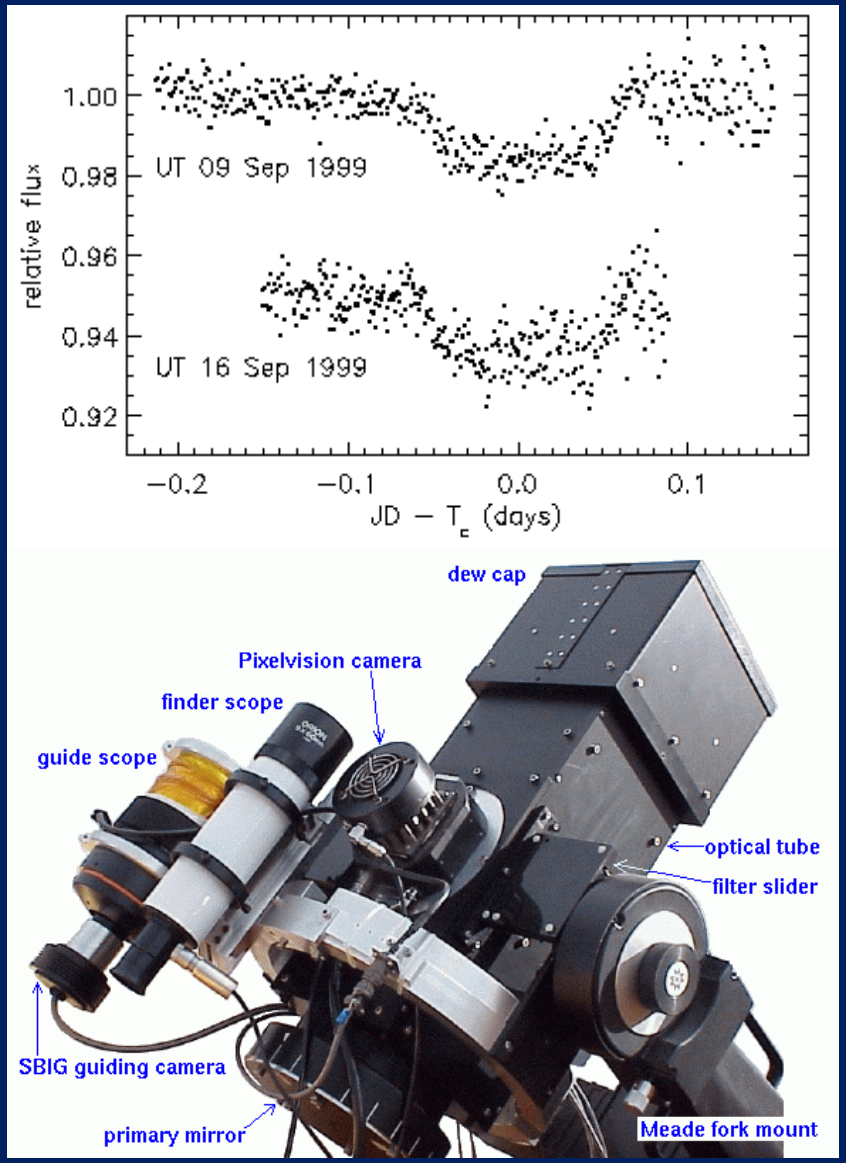
Kepler

NASA, lanciato il 6/3/2009

15 nuovi pianeti scoperti fino a giugno 2011 in 8 sistemi planetari

61 nuovi pianeti scoperti fino a giugno 2012 in 32 sistemi planetari

1999: il primo Transito planetario osservato



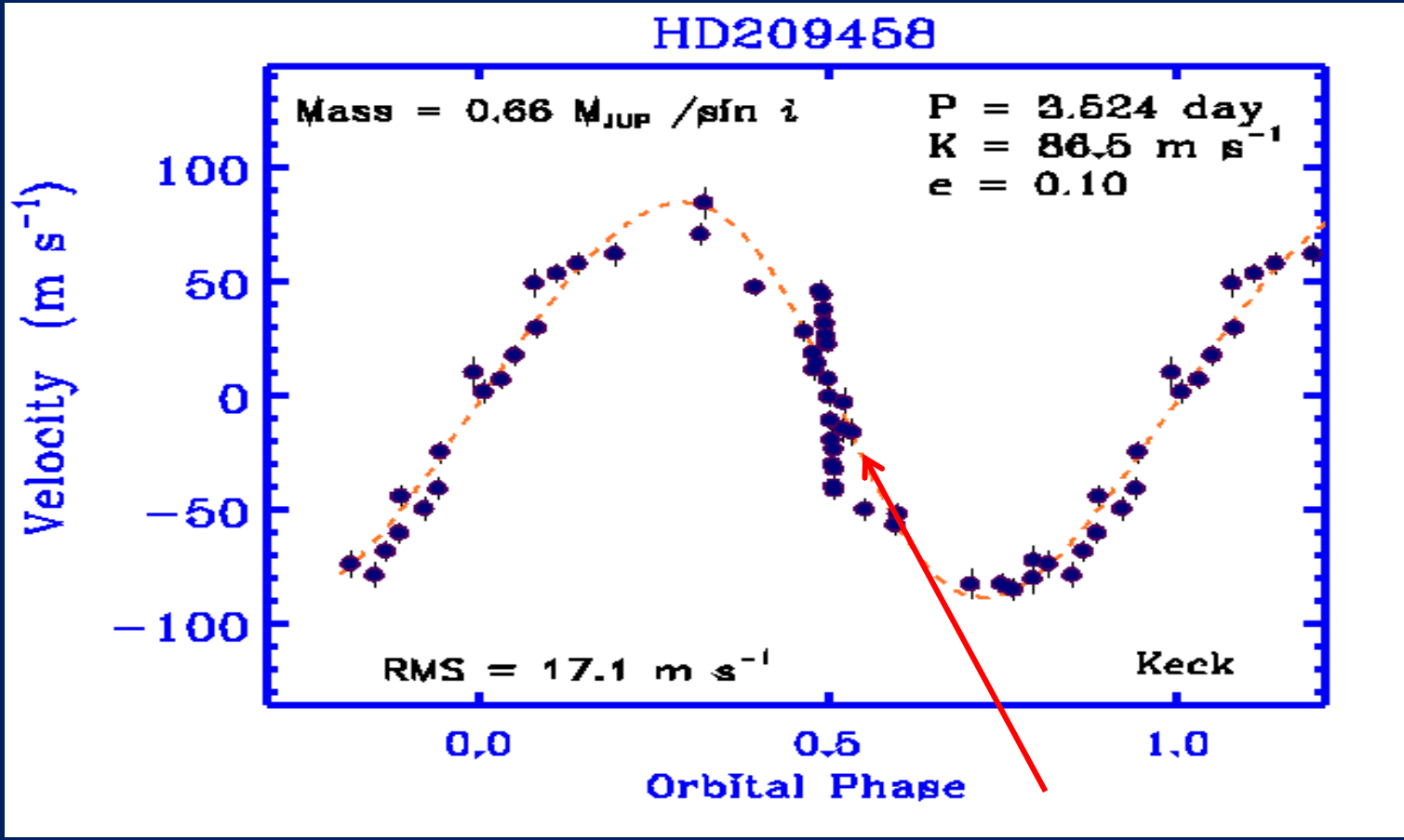
HD 209458, V=7.6 mag

Variazione di magnitudine 1,6% della durata di 3 ore, con periodo di 3,5 giorni

(Charbonneau & Brown, 2000)

Osservato con il telescopio *STARE* da 10 cm di diametro!

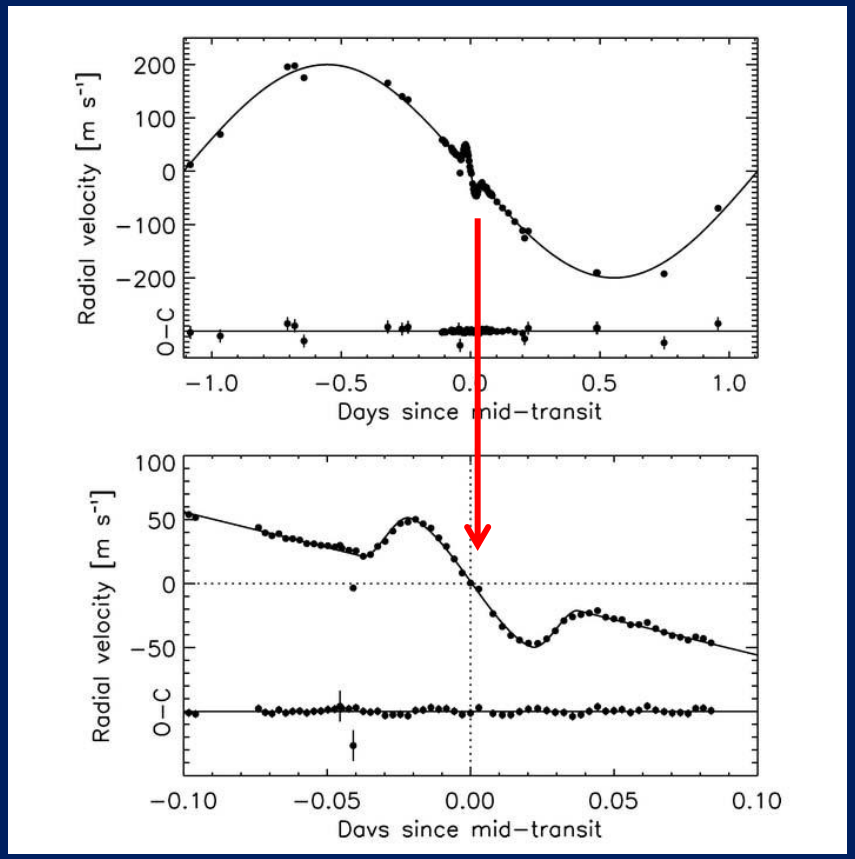
Velocità radiale di HD 209458b

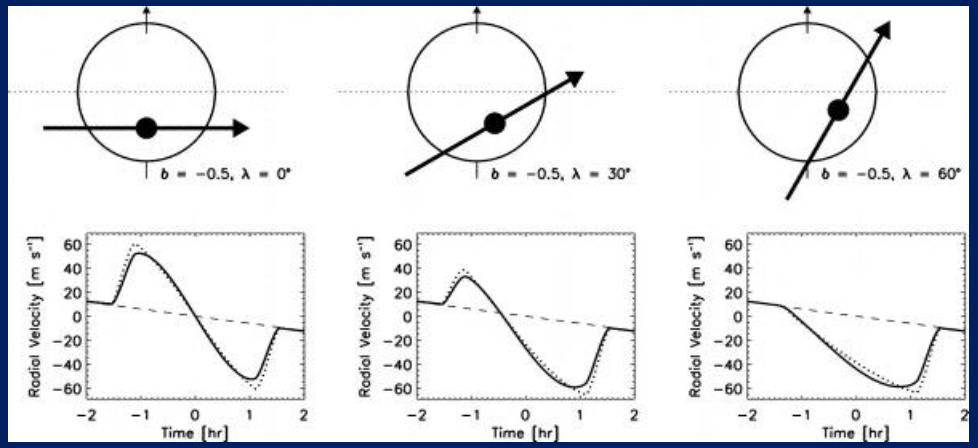


Fluttuazione Doppler scoperta per prima, transito successivamente osservato al tempo previsto.

Effetto Rossiter-McLaughlin

Effetto Rossiter-McLaughlin





Effetto dovuto all'oscuramento di una stella che ruota

$\Rightarrow$ Può fornire informazioni sulla direzione del transito e sul dis-allineamento tra asse dell'orbita planetaria e asse di rotazione della stella

Campagne osservative di transiti planetari (elenco del 2005)

Grande campo

Profondo cielo

Transit Search Programmes

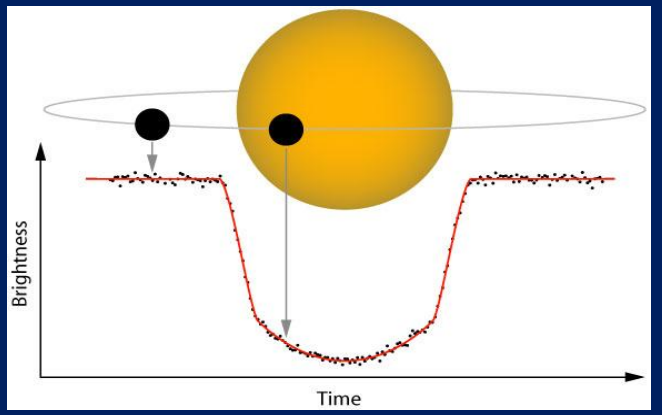
	Programme	D (cm)	focal ratio	$W^{0.5}$ (deg)	N_x (kpix)	N_y (kpix)	no. of CCDs	pixel (arcsec)	sky mag	star mag	d (pc)	stars ($x10^3$)	planets /month
1	PASS	2.5	2.0	127.25	2.0	2.0	15	57.75	6.8	9.4	83	18	6.3
2	WASP0	6.4	2.8	8.84	2.0	2.0	1	15.54	9.6	11.8	246	2	0.8
3	ASAS-3	7.1	2.8	11.21	2.0	2.0	2	13.93	9.9	12.0	272	5	1.7
4	RAPTOR	7.0	1.2	55.32	2.0	2.0	8	34.38	7.9	11.1	179	33	11.7
5	TrES	10.0	2.9	10.51	2.0	2.0	3	10.67	10.5	12.7	362	10	3.5
6	HATnet	11.1	1.8	19.42	2.0	2.0	6	13.94	9.9	12.5	338	28	9.7
7	SWASP	11.1	1.8	31.71	2.0	2.0	16	13.94	9.9	12.5	338	74	26.0
8	Vulcan	12.0	2.5	7.04	4.0	4.0	1	6.19	11.6	13.4	497	12	4.1
9	RAPTOR-F	14.0	2.8	5.93	2.0	2.0	2	7.37	11.3	13.4	498	8	2.9
10	BEST	19.5	2.7	3.01	2.0	2.0	1	5.29	12.0	14.2	668	5	1.8
11	Vulcan-S	20.3	1.5	6.94	4.0	4.0	1	6.10	11.7	14.1	642	24	8.5
12	SSO/APT	50.0	1.0	7.00	2.9	5.9	2	4.20	12.5	15.5	1103	126	43.8
13	TeMPEST	76.0	3.0	0.77	2.0	2.0	1	1.35	15.0	17.1	1944	8	2.9
14	EXPLORE-OC	101.6	7.0	0.32	2.0	3.3	1	0.44	17.1	18.4	2881	5	1.6
15	PISCES	120.0	7.7	0.38	2.0	2.0	4	0.33	17.1	18.6	3045	8	2.7
16	ASP	130.0	13.5	0.17	2.0	2.0	1	0.30	17.1	18.7	3125	2	0.6
17	OGLE-III	130.0	9.2	0.59	2.0	4.0	8	0.26	17.1	18.7	3125	20	7.1
18	STEPSS	240.0	0.0	0.41	4.0	2.0	8	0.18	17.1	19.5	3757	17	5.9
19	INT	250.0	3.0	0.60	2.0	4.0	4	0.37	17.1	19.5	3800	37	13.1
20	ONC	254.0	3.3	0.53	2.0	4.0	4	0.33	17.1	19.5	3817	30	10.5
21	EXPLORE-N	360.0	4.2	0.57	2.0	4.0	12	0.21	17.1	19.9	4196	46	16.2
22	EXPLORE-S	400.0	2.9	0.61	2.0	4.0	8	0.27	17.1	20.0	4313	58	20.1
	Total number of planets/month:												**201**

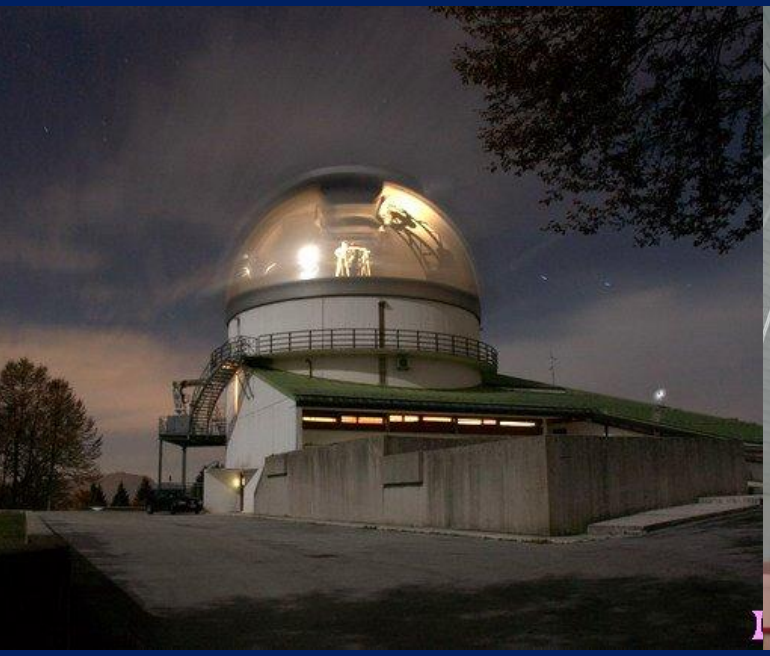
$W^{0.5}$ degrees is the square root of the field of view. Not all fields are square.

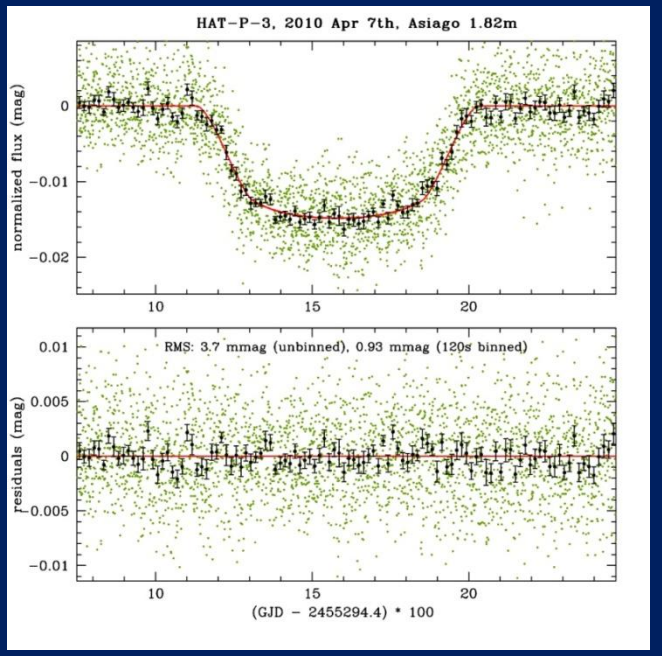
d parsecs is the distance at which a transit with $R = R_{Jup}$ and $P = 4$ days across a G2V star will be detected with a S/N of 10.

star mag is the limiting magnitude for this event.

The Asiago Survey for Transit timing of Exoplanets (TASTE)







Wide-Angle Search for Planets (WASP, UK)

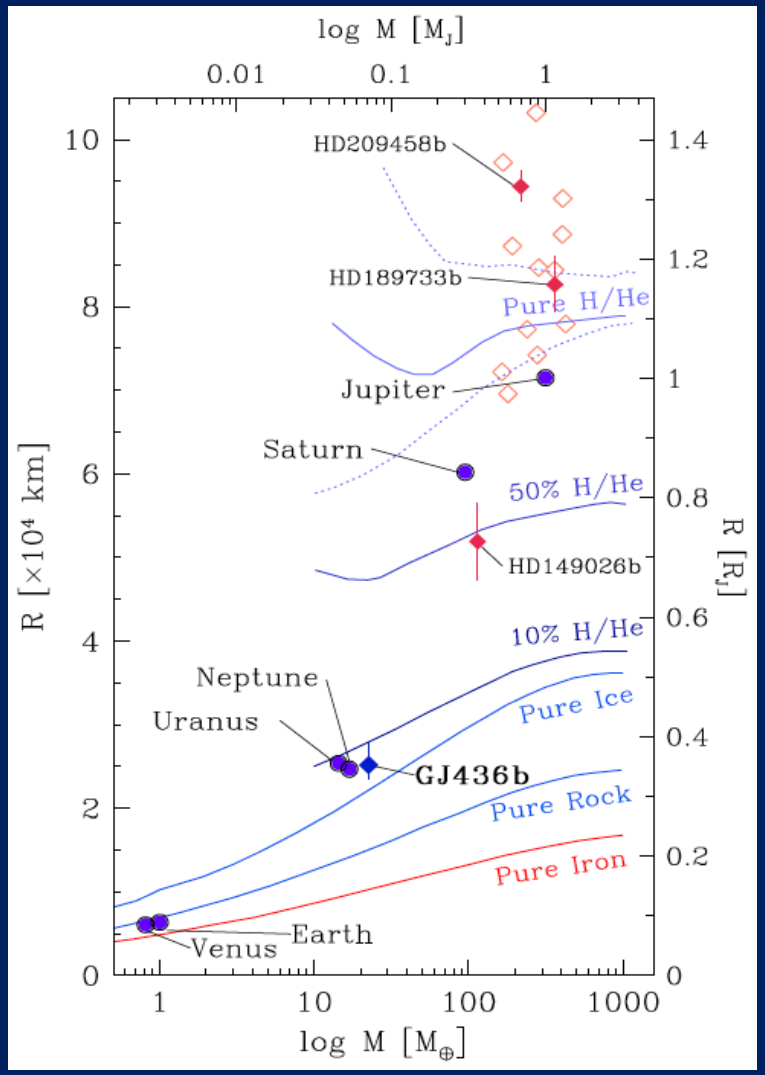
2004 SuperWASP La Palma
2005 SuperWASP SAAO

Robotic Mount
8 cameras / mount
11cm F/1.8 lens
2K x 2K E2V CCD
8^o x 8^o field
15 arcsec pixels

Combinando fotometria (transiti) e spettroscopia (velocità radiali)

- Conferma che si tratta di un pianeta
  - Variazioni periodiche della luminosità stellare possono essere dovute a diversi effetti spuri
- Misurare sia il raggio (dal transito) che la massa del pianeta (dalla velocità orbitale) è fondamentale per stimare la sua densità e composizione chimica

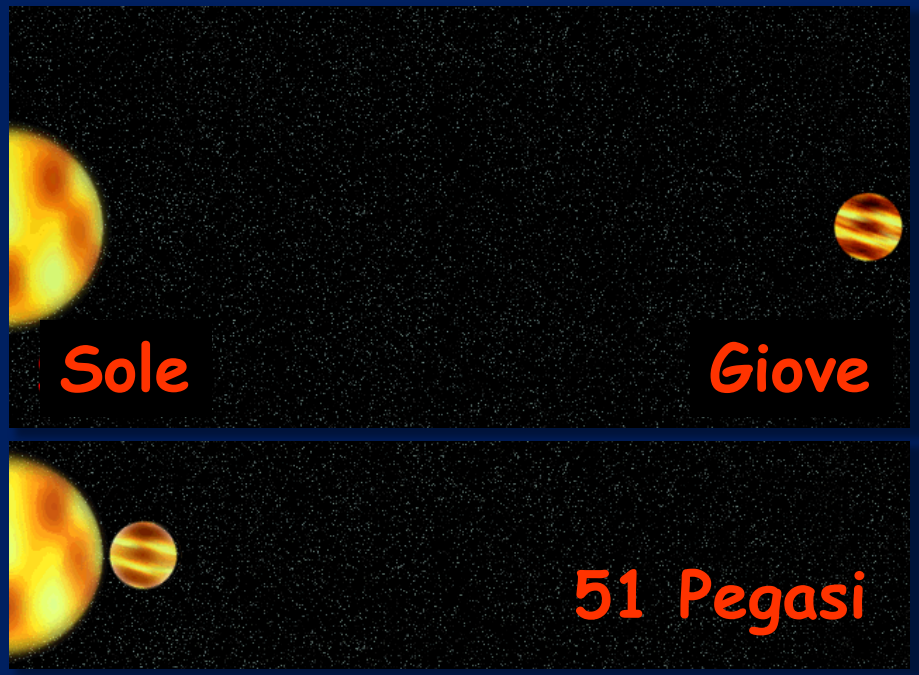
Diagramma Massa-Raggio e composizione chimica



(Fortney et al 2007)

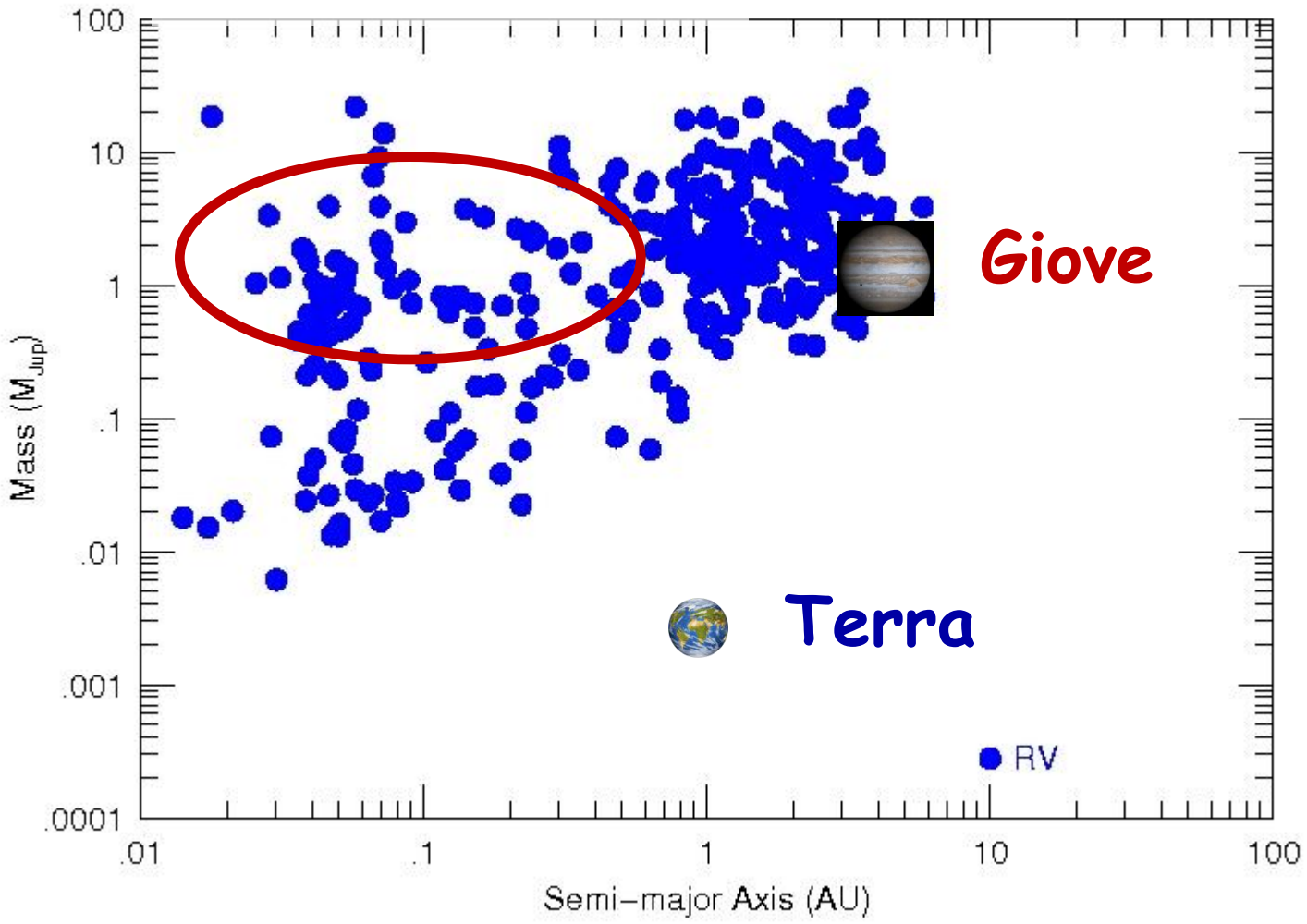
COSA ABBIAMO SCOPERTO FINORA?

51 Pegasi b: un pianeta “inusuale”



- Massa del pianeta circa metà di Giove
- Distanza dalla stella 0,05 UA (circa come Mercurio – Sole)
- Periodo di rivoluzione 4,2 giorni

Prime sorprese dai pianeti scoperti tramite il metodo delle velocità radiali



Dati aggiornati al 19.04.2010

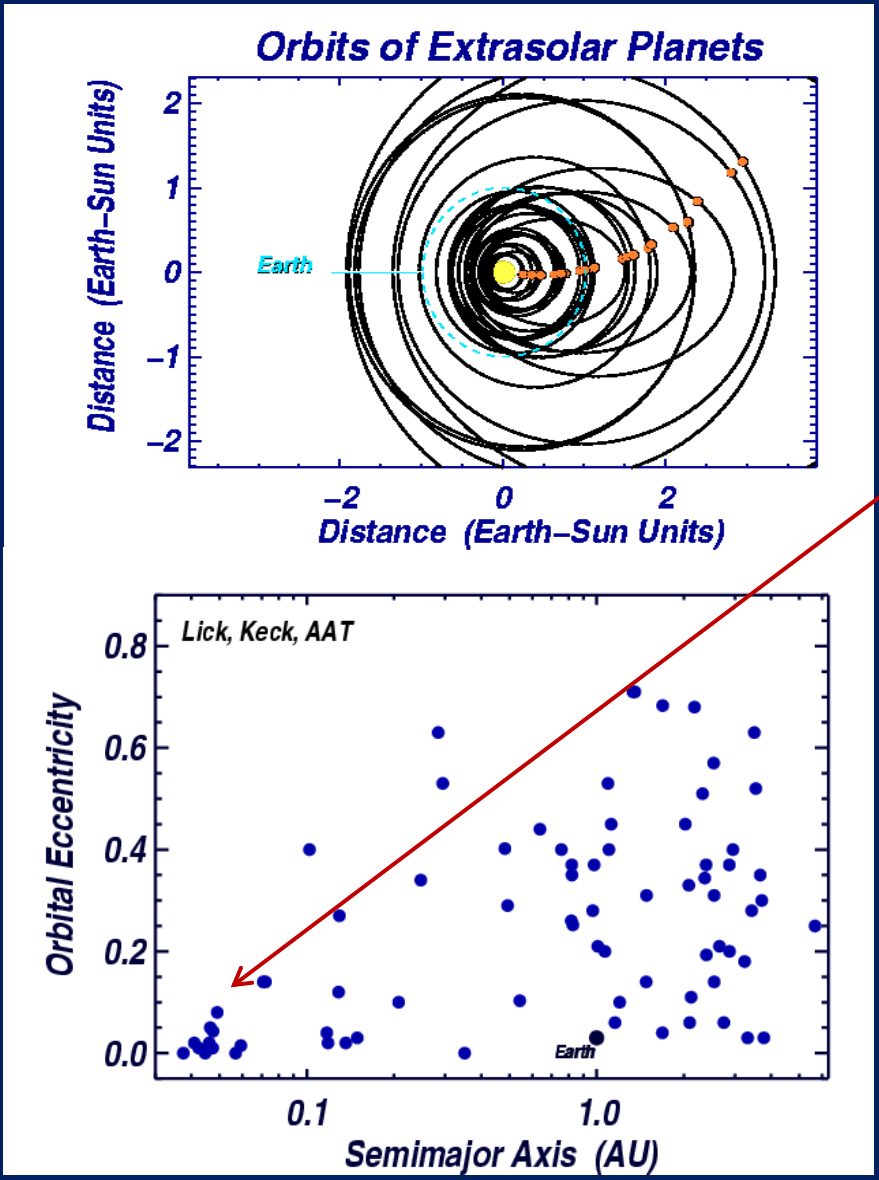
"Hot Jupiters"

Pianeti massicci come e piu` di Giove con orbite simili a quella di Mercurio o anche più strette

CONSEGUENZE:

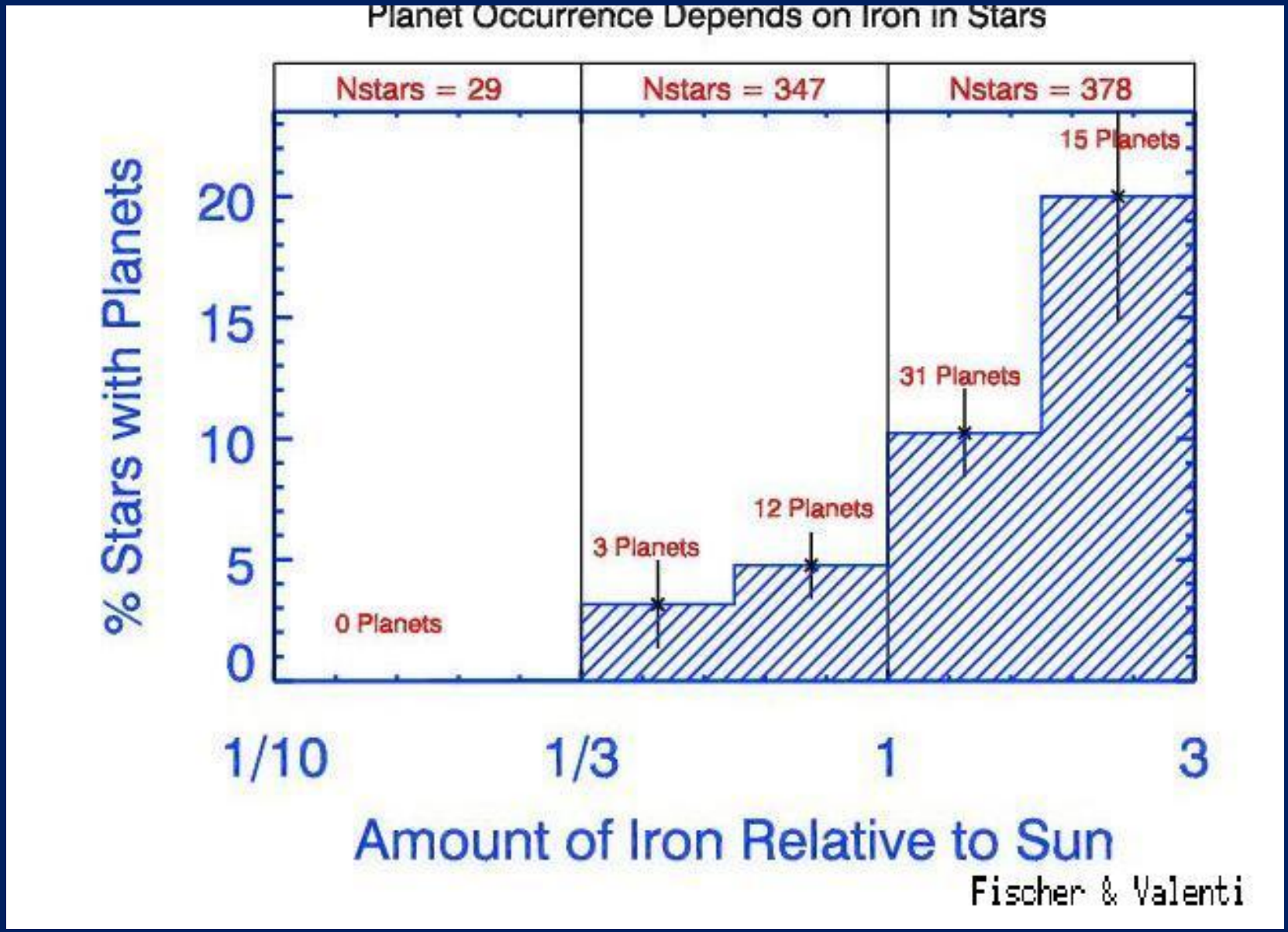
- Temperature molto elevate
- Accoppiamento mareale
- Riscaldamento radiativo ed evaporazione atmosferica
- Interazione di origine magnetica

Orbite eccentriche



- Dovute a perturbazioni gravitazionali tra diversi pianeti?
- Circolarizzazione mareale soltanto per i pianeti più vicini alla stella
- Pianeti più piccoli espulsi dal sistema?

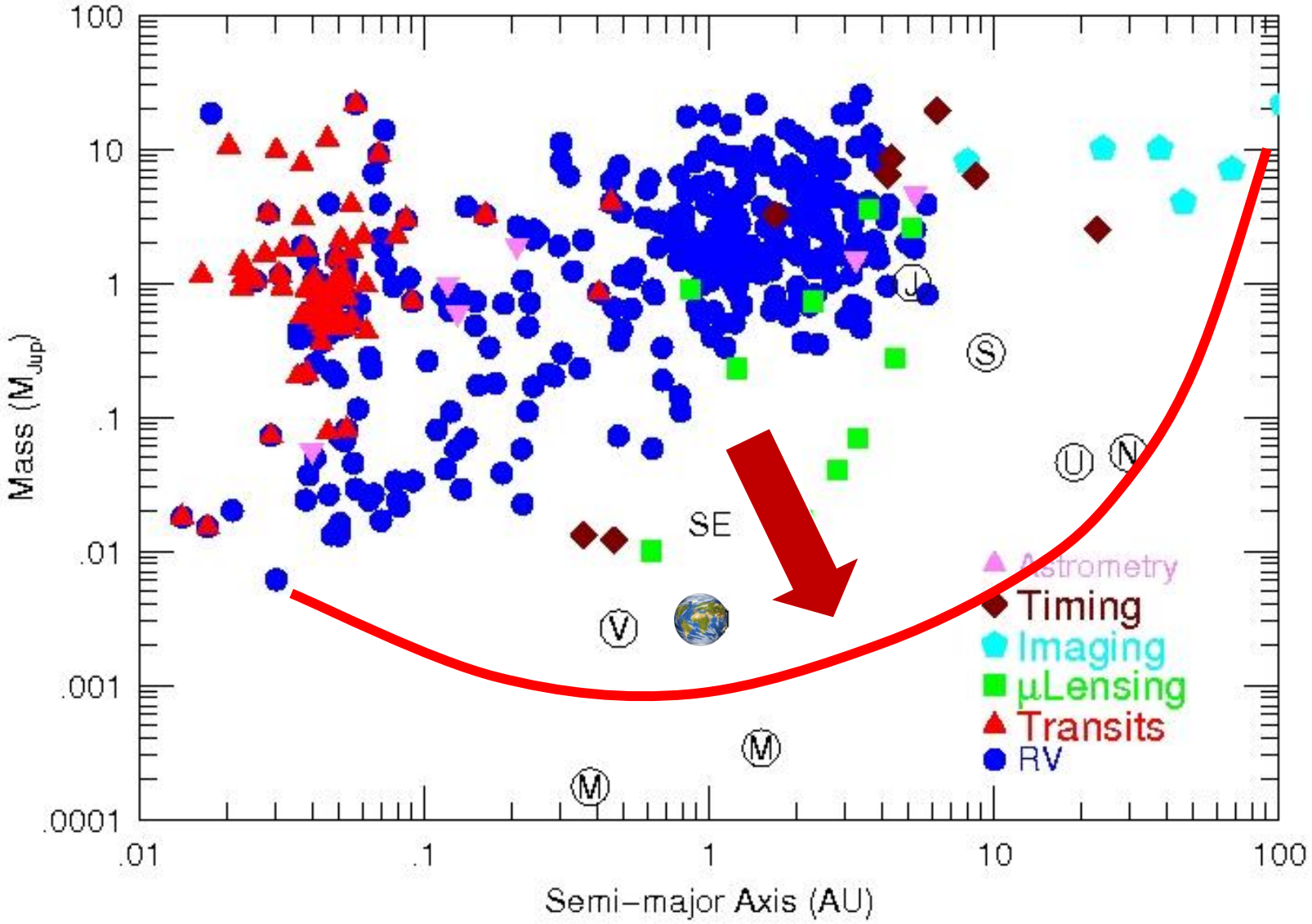
Alta metallicità delle stelle con pianeti



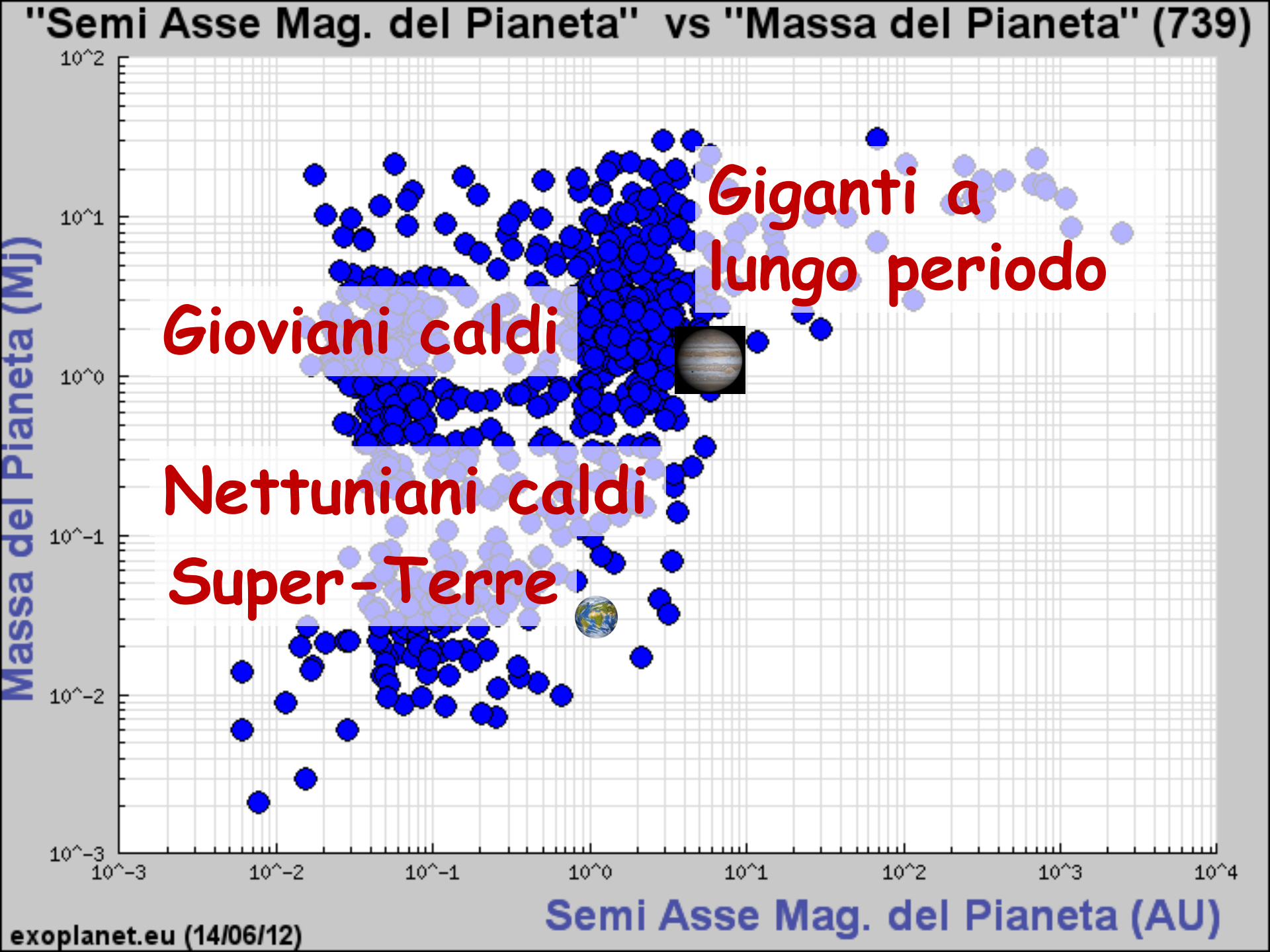
Cosa abbiamo imparato dai pianeti scoperti tramite le velocità radiali

- Pianeti tipo Giove in più del 6% delle stelle simili al Sole
- Probabilità maggiore per stelle con composizione chimica ricca di metalli
- Orbite differenti da quelle del Sistema Solare:
  - Ampio intervallo di dimensioni delle orbite e periodi P > 3 giorni
  - Ampio intervallo di eccentricità
  - Nuovi fenomeni: migrazione, espulsione, ...
- ...e il restante 94% delle stelle?

Cosa vorremmo ancora scoprire?

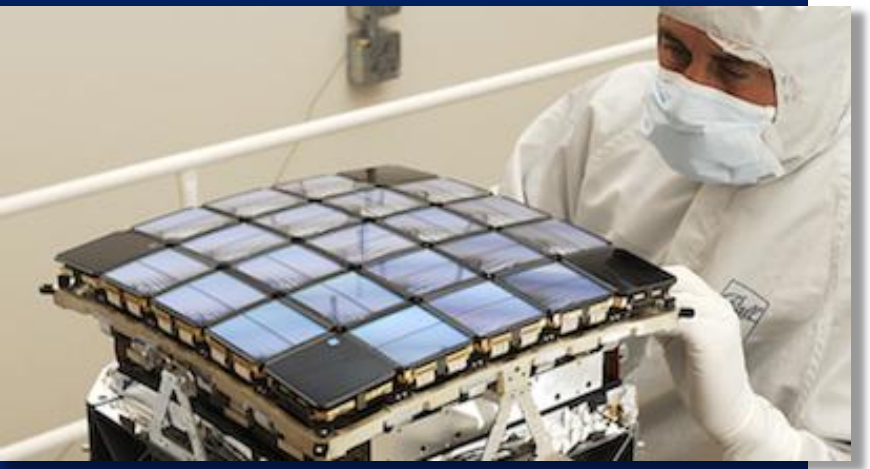


Dati aggiornati al 19.04.2010

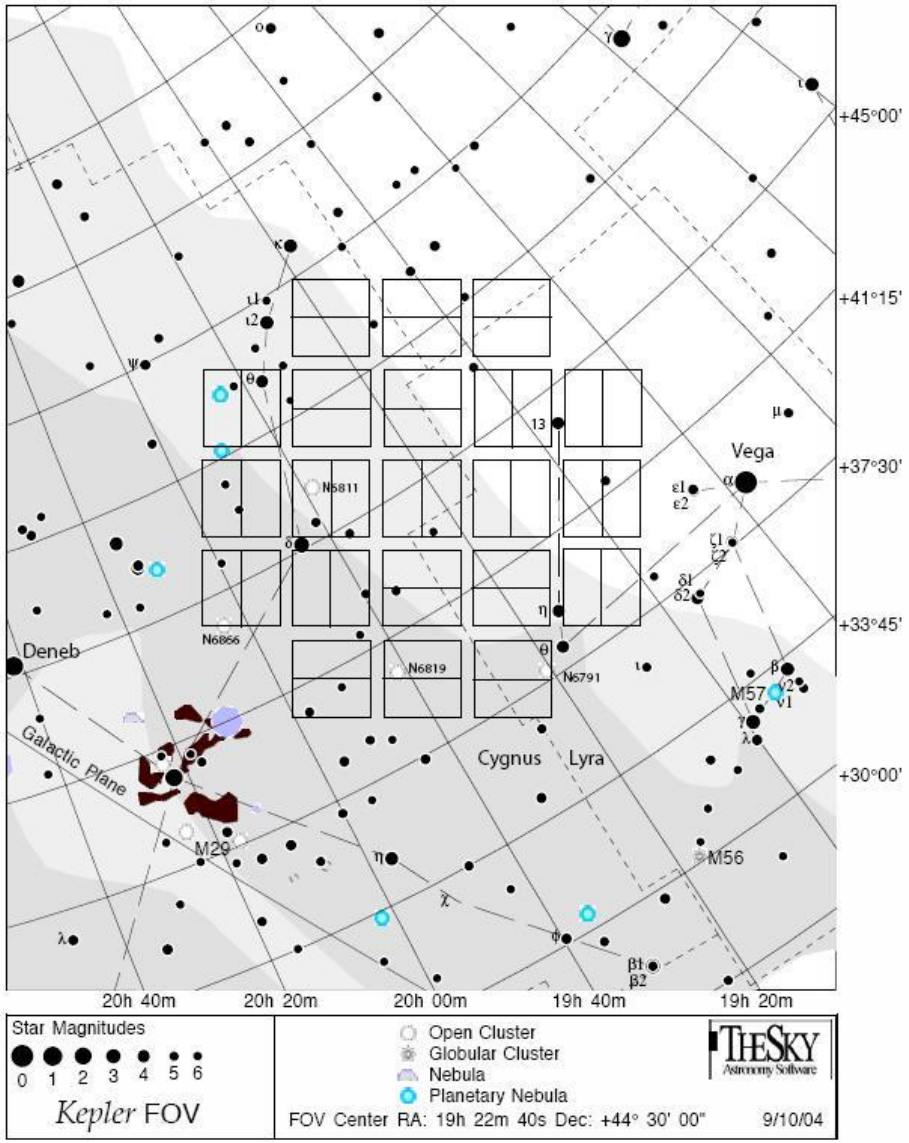

"Semi Asse Mag. del Pianeta" vs "Massa del Pianeta" (739)
Giganti a lungo periodo
Gioviani caldi
Nettuniani caldi
Super-Terre
Massa del Pianeta (Mj)
Semi Asse Mag. del Pianeta (AU)
10^2
10^1
10^0
10^-1
10^-2
10^-3
10^-3
10^-2
10^-1
10^0
10^1
10^2
10^3
10^4
exoplanet.eu (14/06/12)

Ricerca di pianeti extra-solari con il satellite Kepler

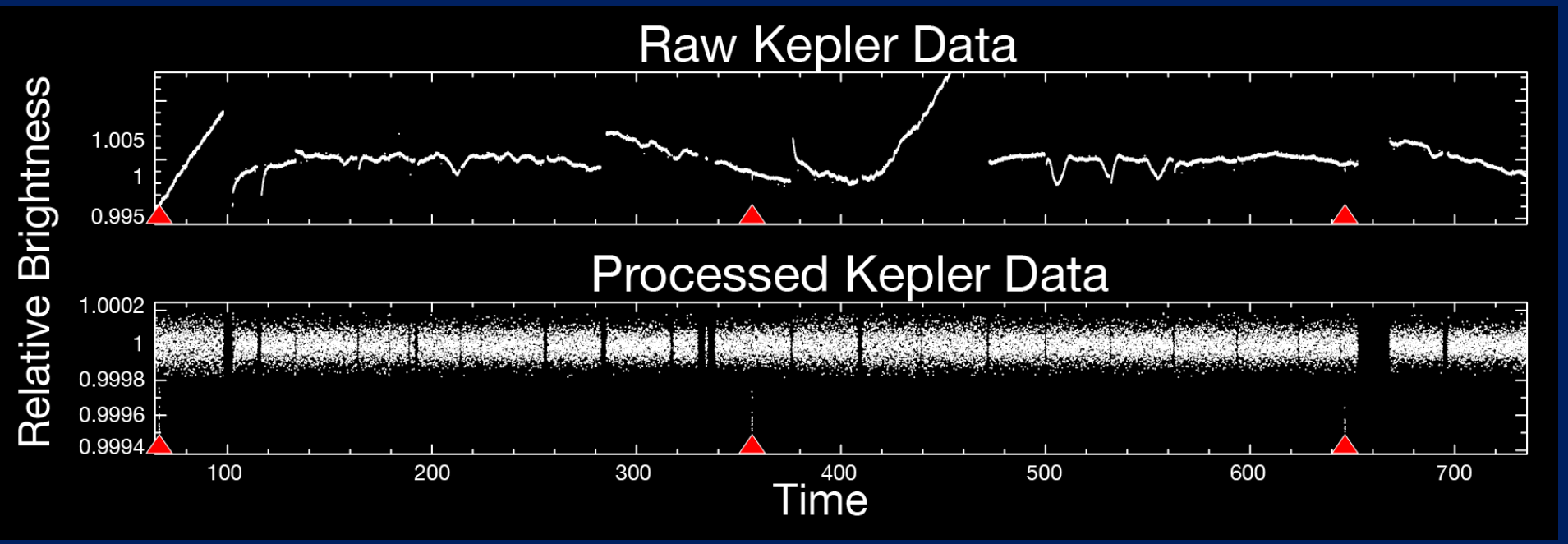
Kepler

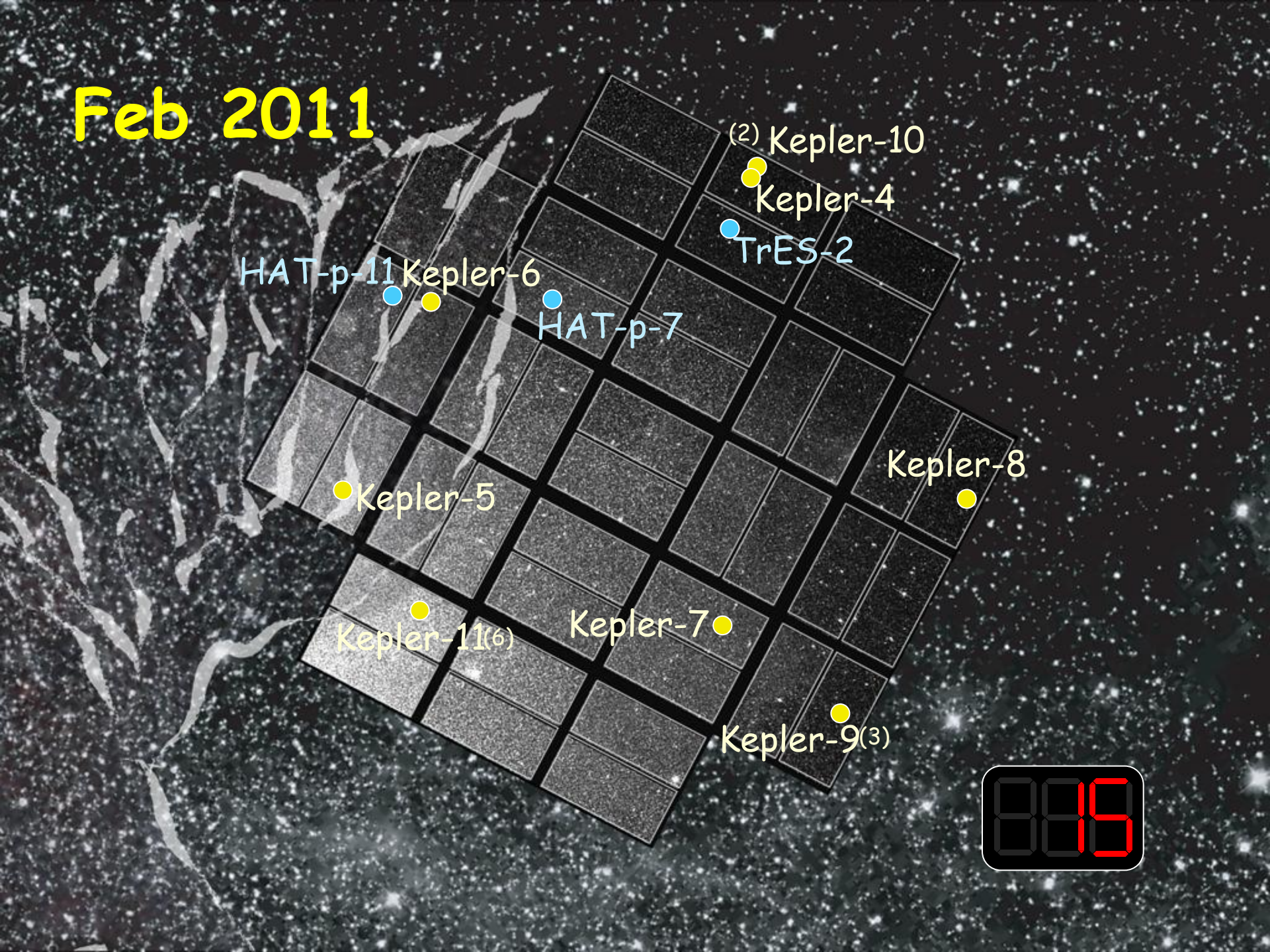


42 CCD 2200x1024 (95 Mpx), frequenza di lettura 6 sec



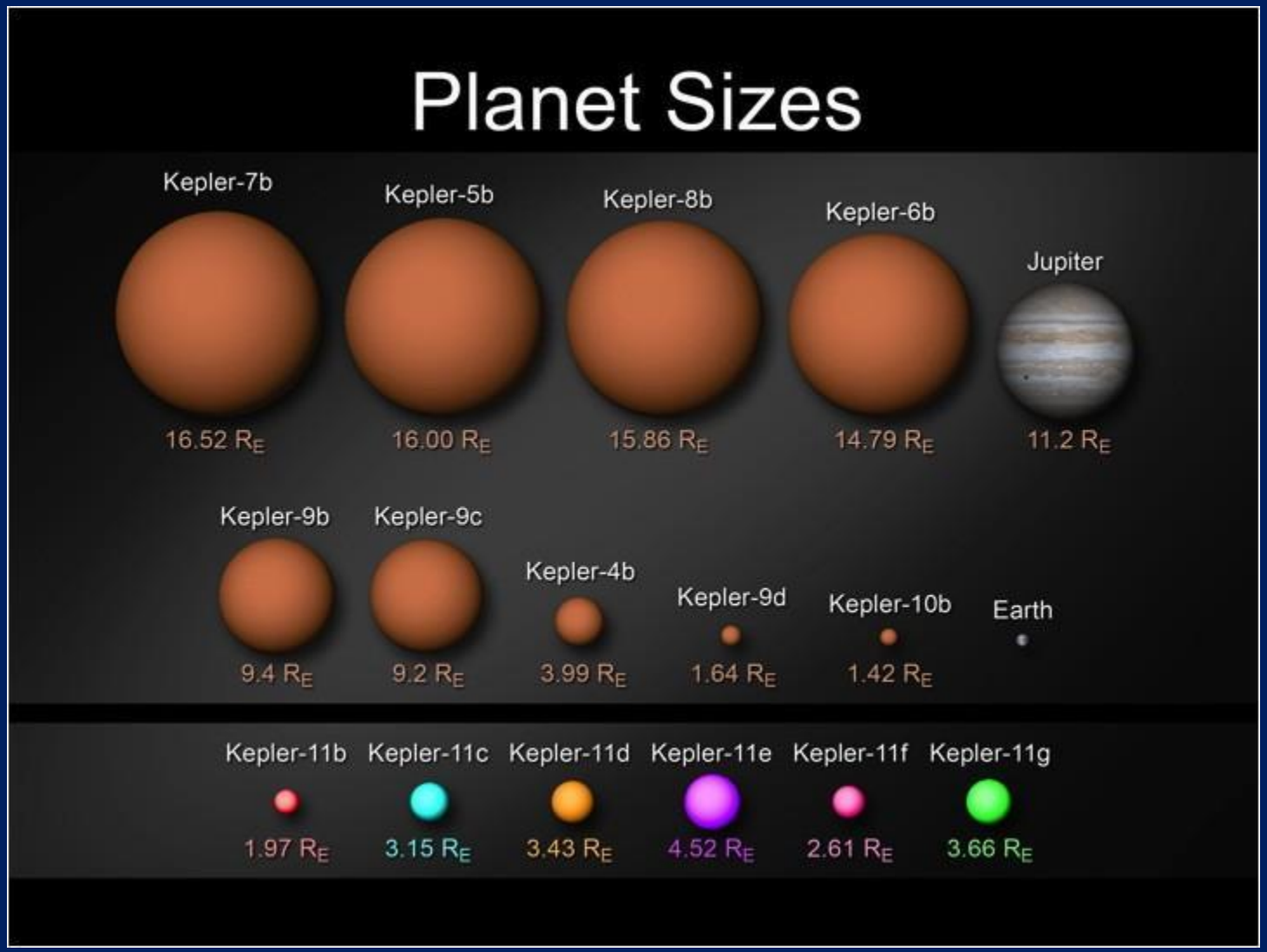
Data Confirmation

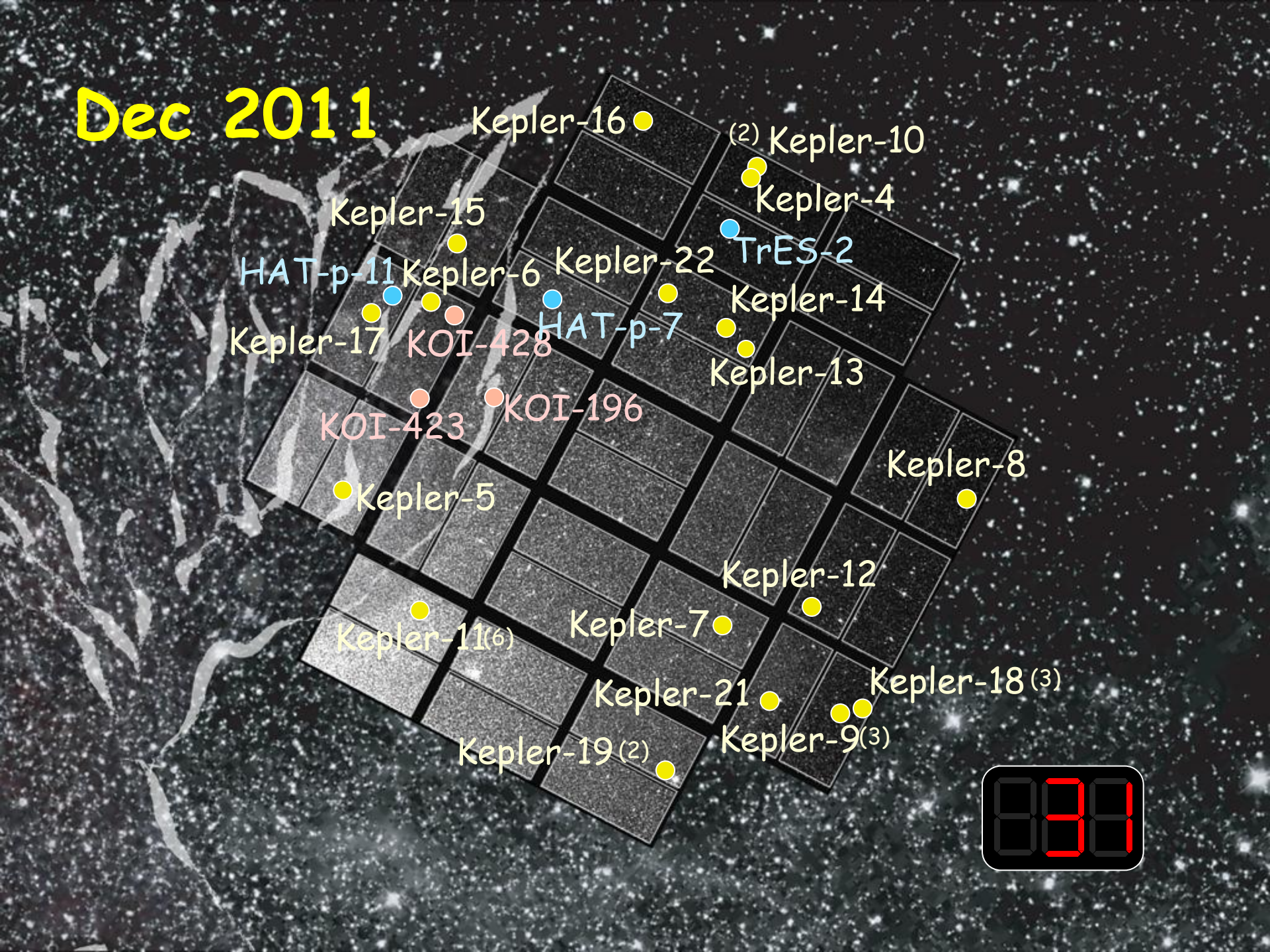



Feb 2011
(2) Kepler-10
Kepler-4
TrES-2
HAT-p-11
Kepler-6
HAT-p-7
Kepler-8
Kepler-5
Kepler-11(6)
Kepler-7
Kepler-9(3)
19

I primi 8 sistemi planetari di KEPLER

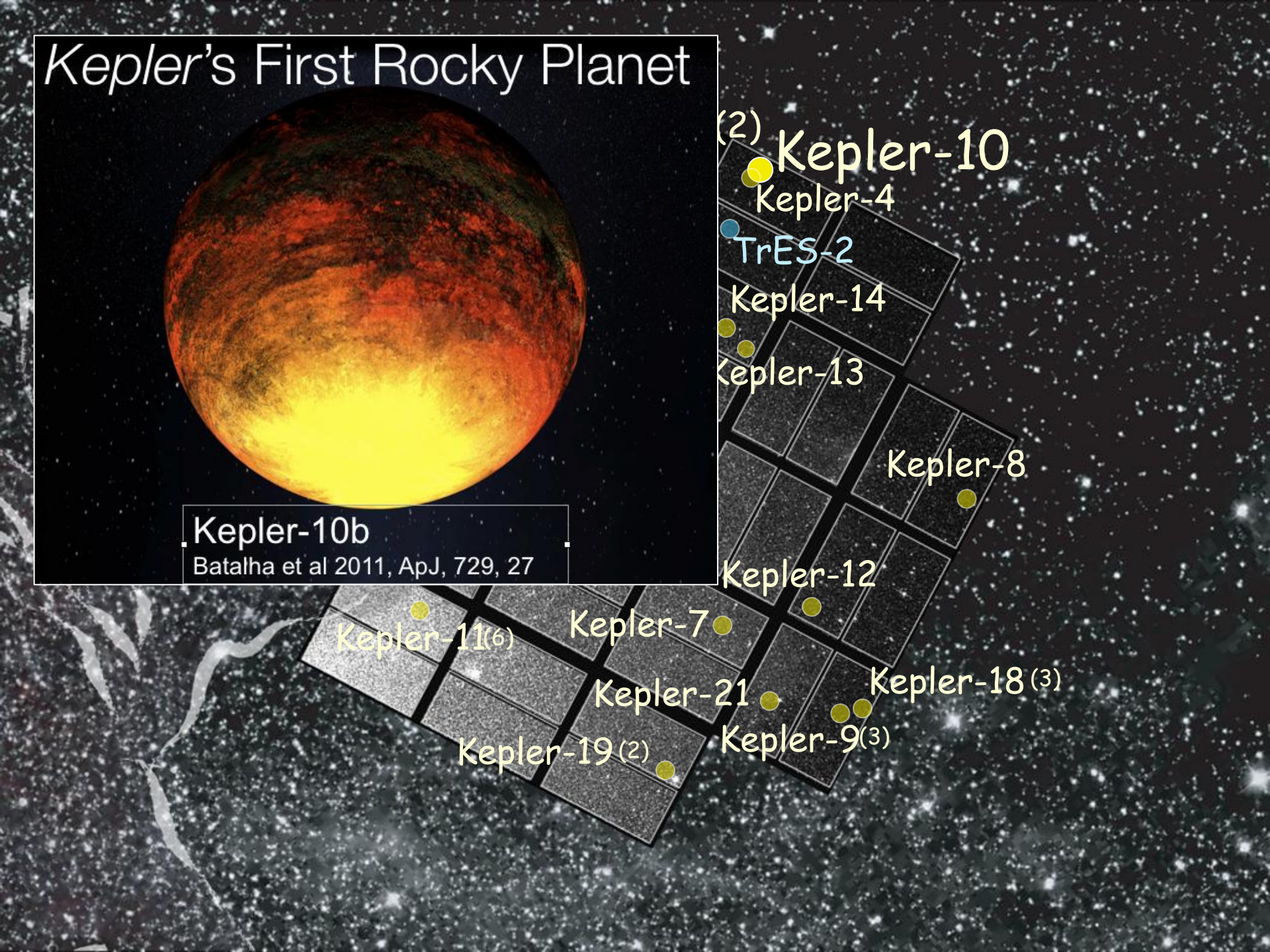
http://kepler.nasa.gov/



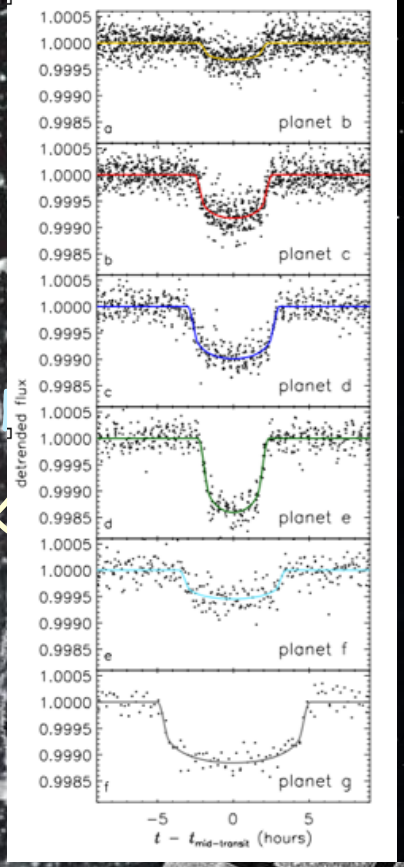

Dec 2011
Kepler-16
(2) Kepler-10
Kepler-4
Kepler-15
TrES-2
HAT-p-11
Kepler-6
Kepler-22
Kepler-14
HAT-p-7
Kepler-17
KOI-428
Kepler-13
KOI-423
KOI-196
Kepler-8
Kepler-5
Kepler-12
Kepler-7
Kepler-11(6)
Kepler-18 (3)
Kepler-21
Kepler-9(3)
Kepler-19 (2)
31

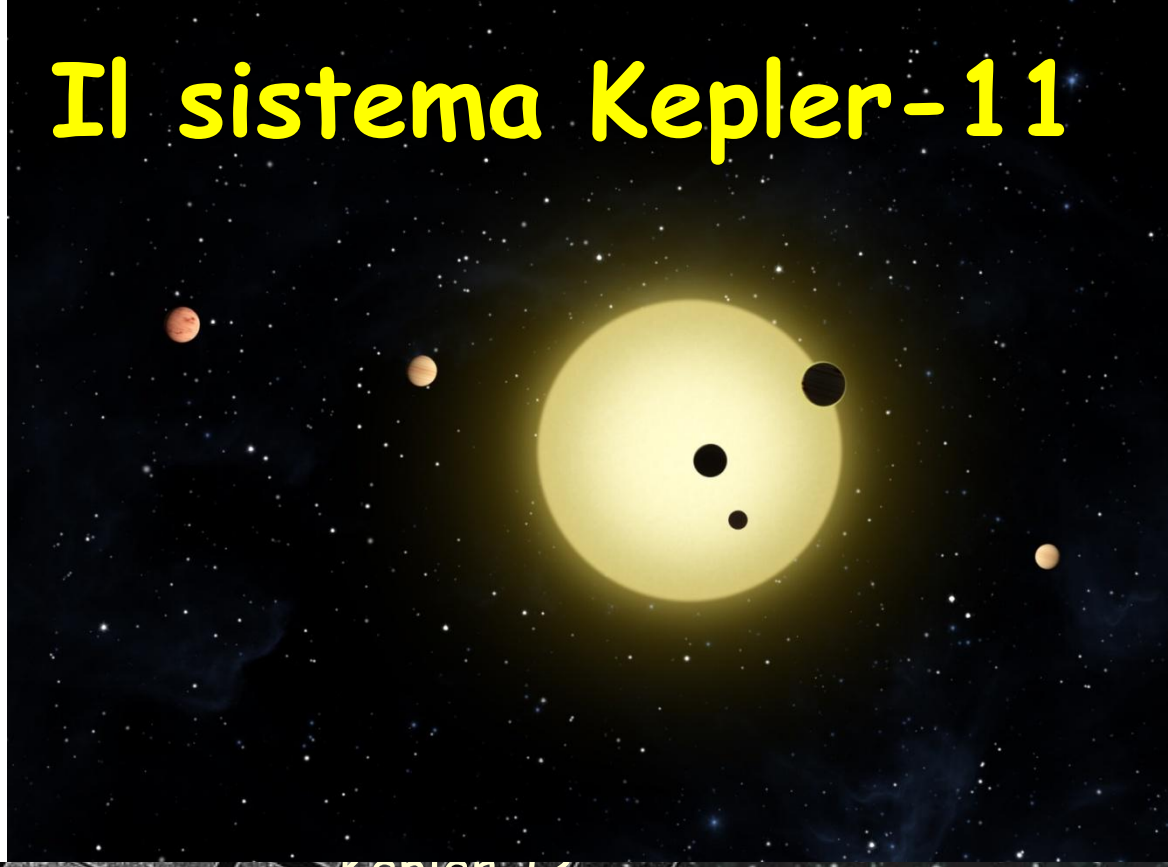
Ultime notizie da Kepler (giugno 2012)

61 pianeti confermati in 32 sistemi


Kepler's First Rocky Planet
Kepler-10b
Batalha et al 2011, ApJ, 729, 27
(2) Kepler-10
Kepler-4
TrES-2
Kepler-14
Kepler-13
Kepler-8
Kepler-12
Kepler-11(6)
Kepler-7
Kepler-21
Kepler-18 (3)
Kepler-9(3)
Kepler-19 (2)

Il sistema Kepler-11





Lissauer et al. 2011, Nature, 470, 53

6 pianeti entro 0.7 AU !

KEPLER'S FIRST PLANET
IN THE
HABITABLE ZONE -
KEPLER-22B
ANNOUNCED
DEC 5, 2011
Kepler
Kepler-16
(2) Kepler-10
Kepler-4
Kepler-22
rES-2
Kepler-14
HAT-p-7
Kepler-13
Kepler-8
Kepler-12
Kepler-7
Kepler-21
Kepler-18 (3)
Kepler-9 (3)
epler-19 (2)

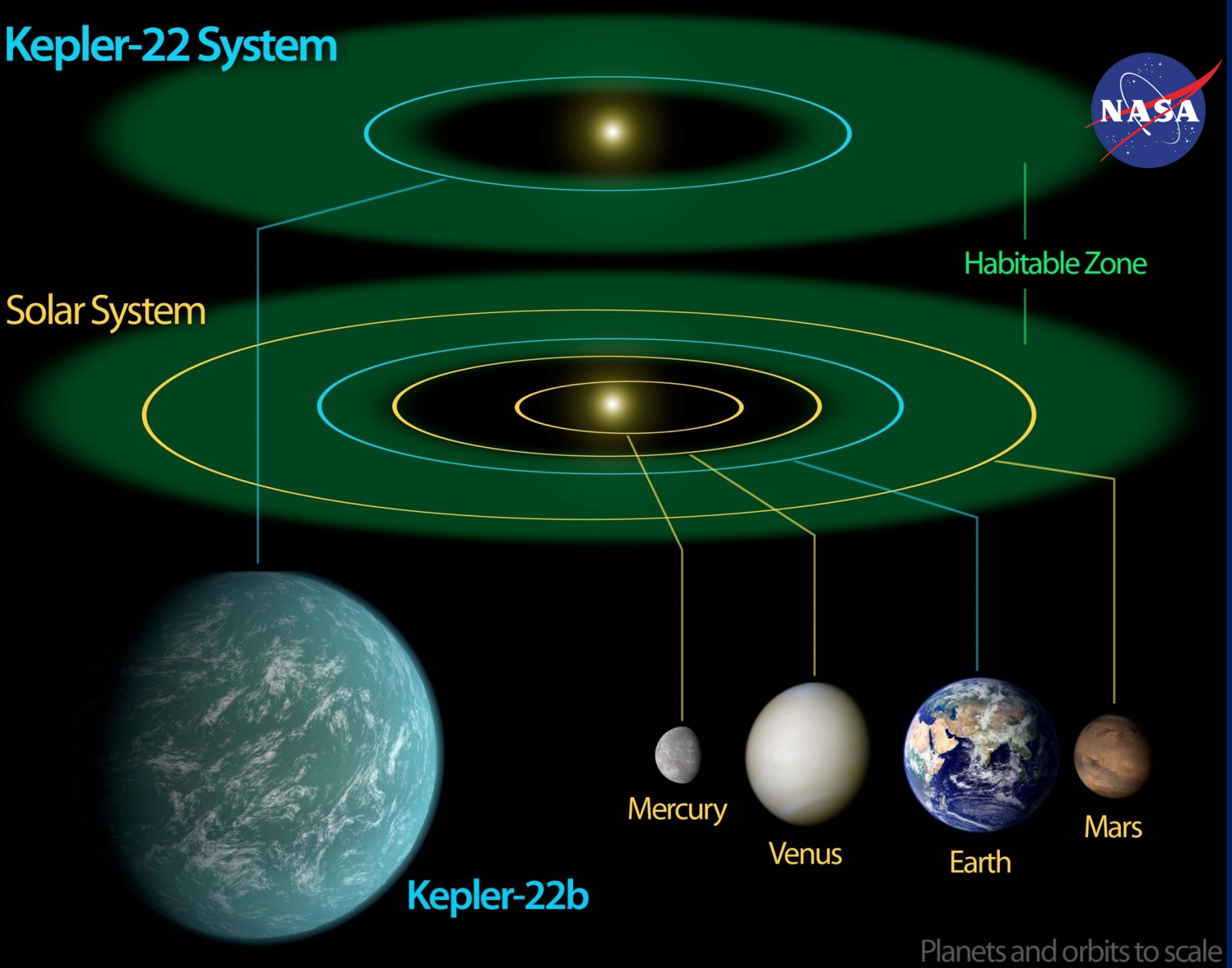
Pianeti abitabili?

Un pianeta è abitabile quando…

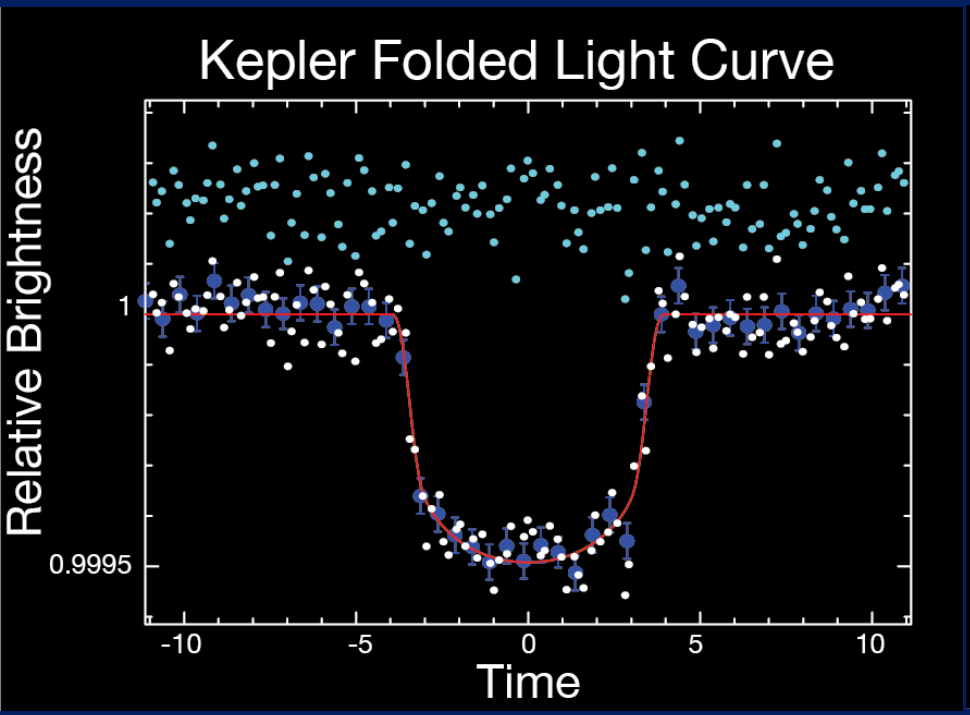
- Ha una superficie solida
- Non è troppo piccolo (nessuna atmosfera)
- Non è troppo grande (gravità eccessiva, gassoso)
- Non è nè troppo freddo nè troppo caldo (necessità di acqua allo stato liquido)

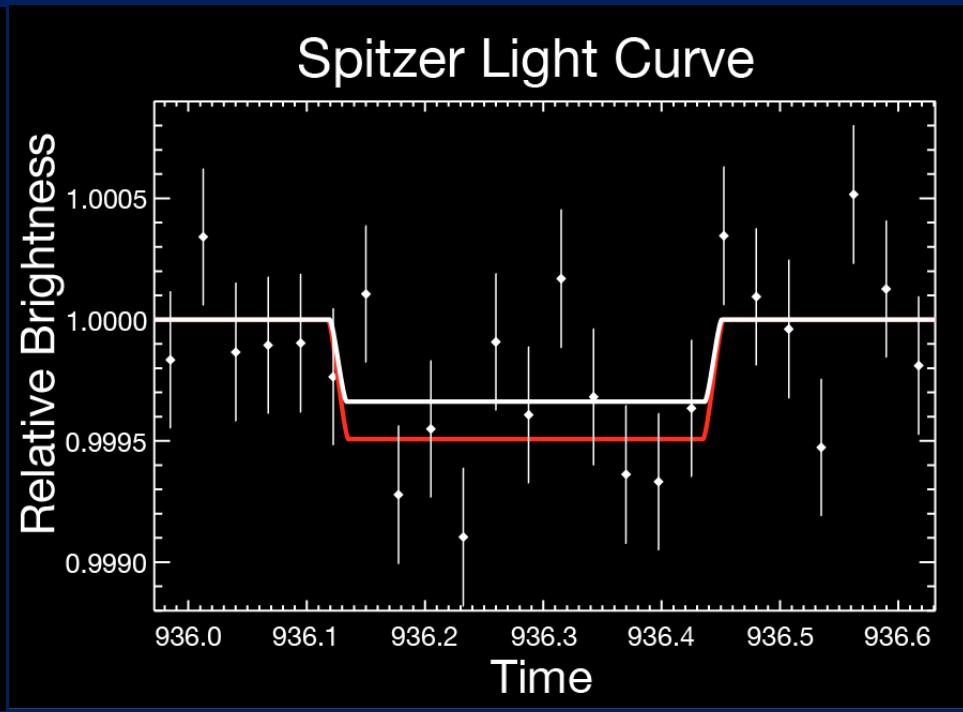
Ogni stella ha una diversa zona "abitabile"

Temperatura superficiale compresa tra 0° e 100°
(acqua liquida, prima condizione per la vita)

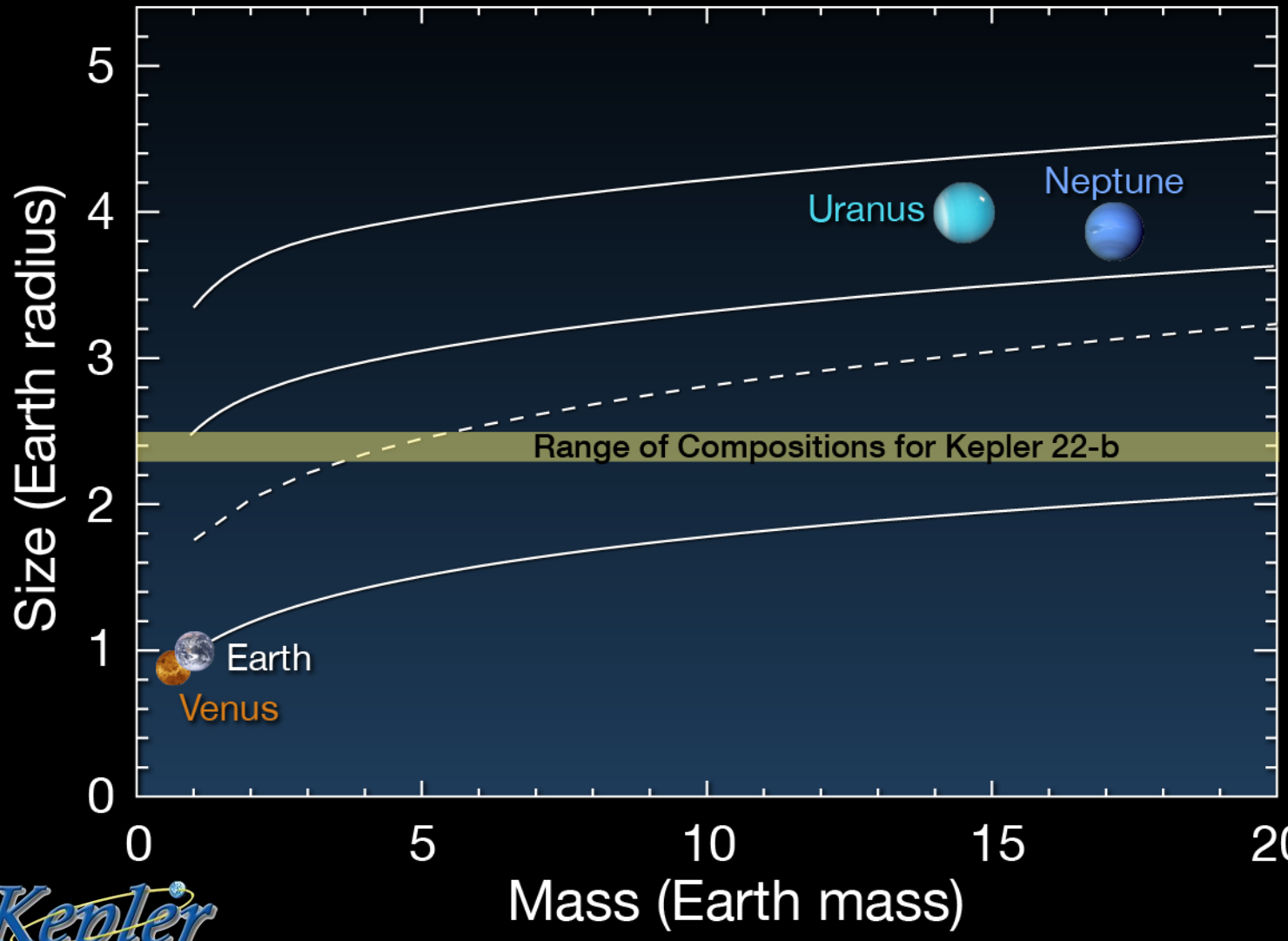

Kepler-22 System
NASA
Habitable Zone
Solar System
Mercury
Venus
Earth
Mars
Kepler-22b
Planets and orbits to scale

Kepler-22b
Data Confirmation





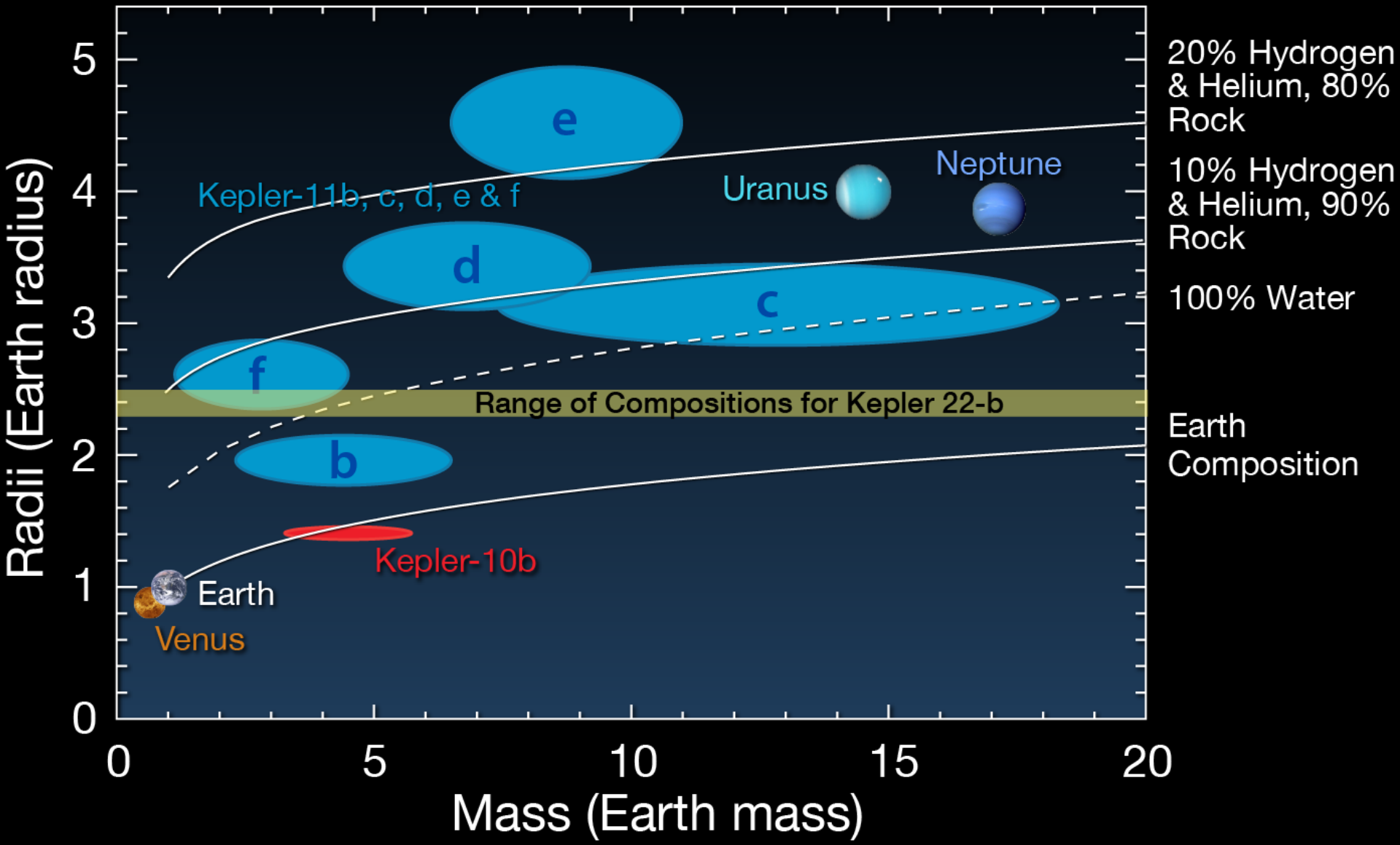
Che composizione chimica avrà Kepler-22b?



Kepler

NASA

Altri pianeti nel diagramma Massa-Raggio



Candidati planetari di Kepler (febbraio 2011)

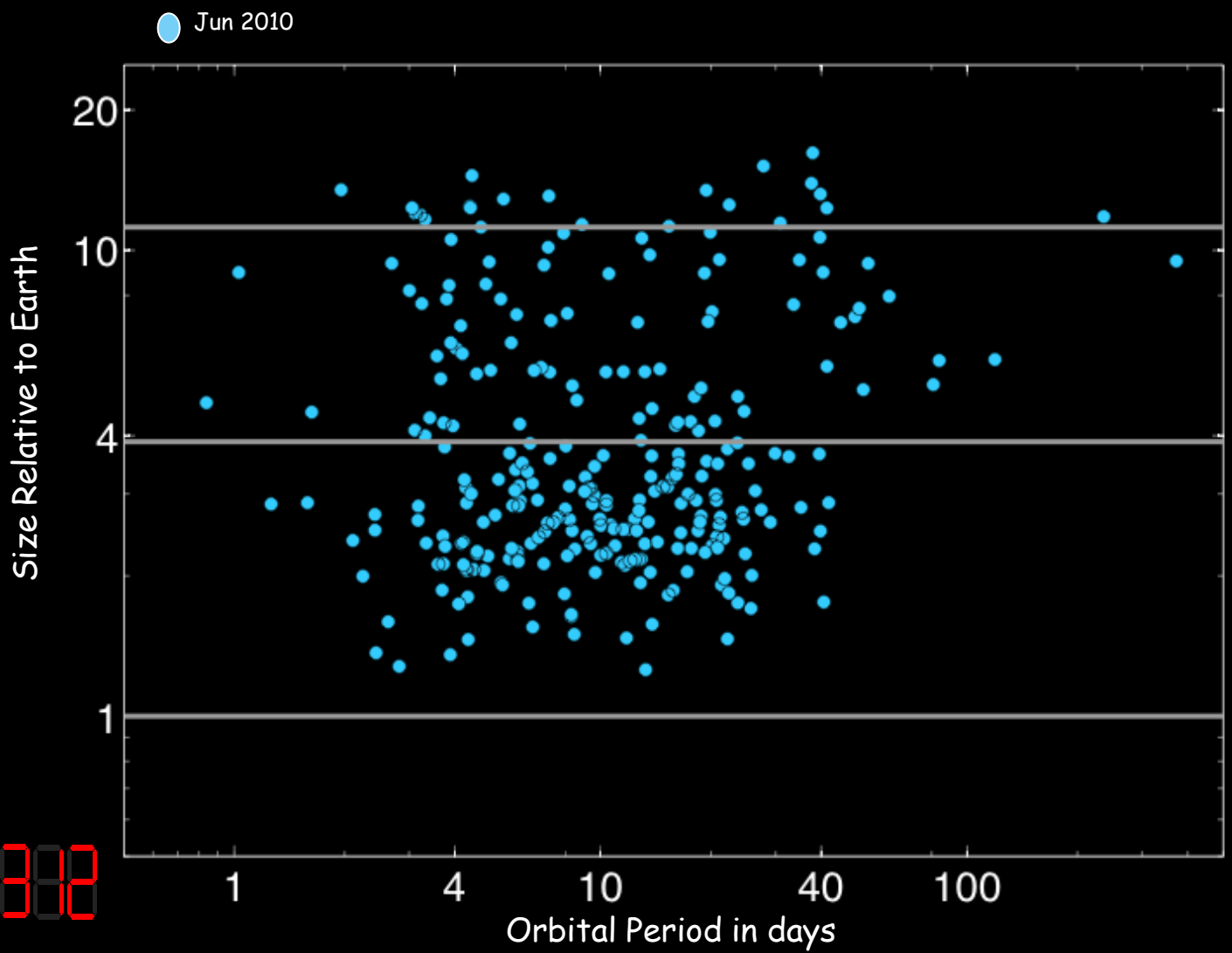
Da verificare:

1235 possibili pianeti su 997 stelle

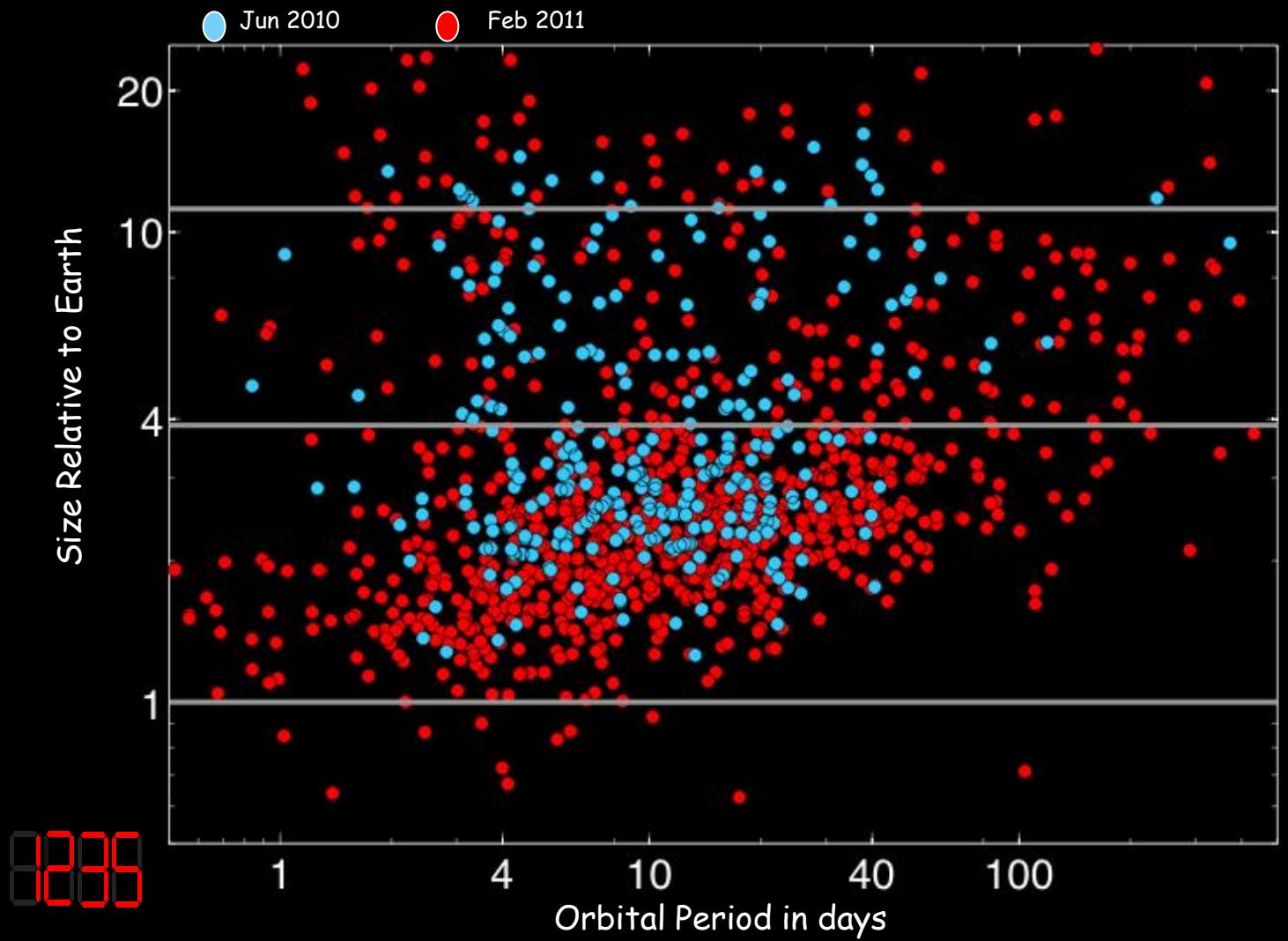
68 di dimensioni simili alla Terra

54 in zone abitabili

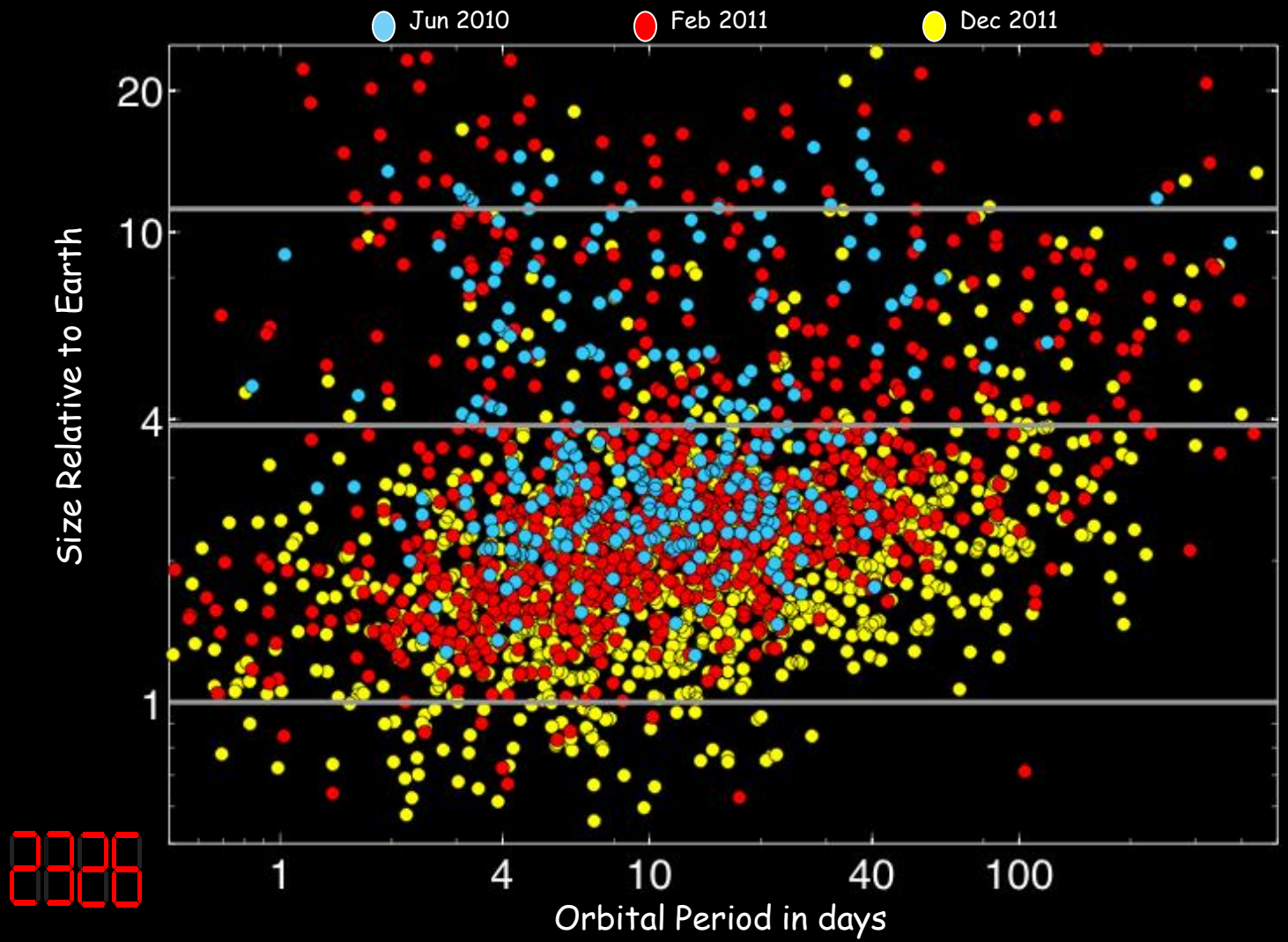
Planet Candidates as of June 2010



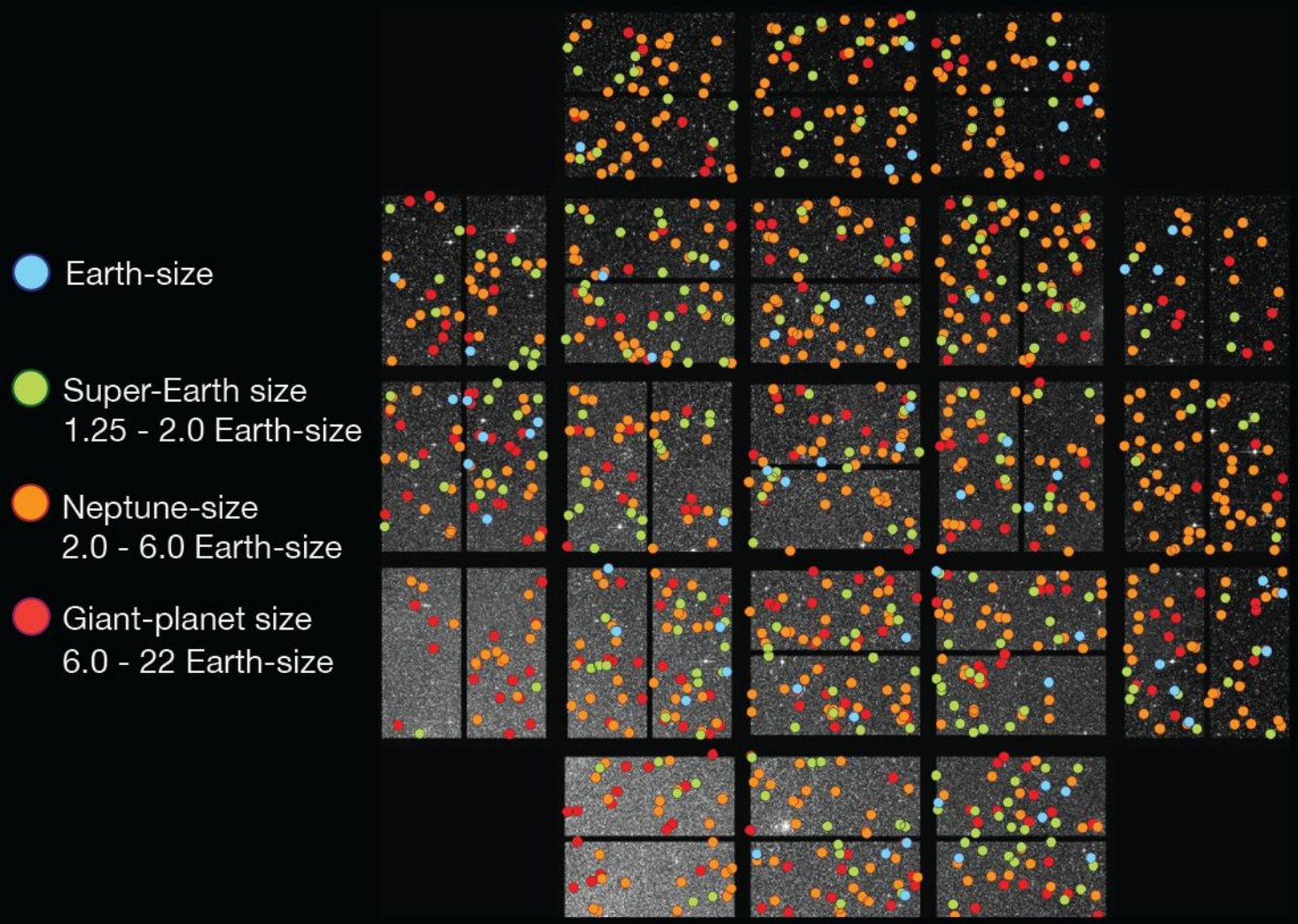
Kepler Planet Candidates as of Feb 2011



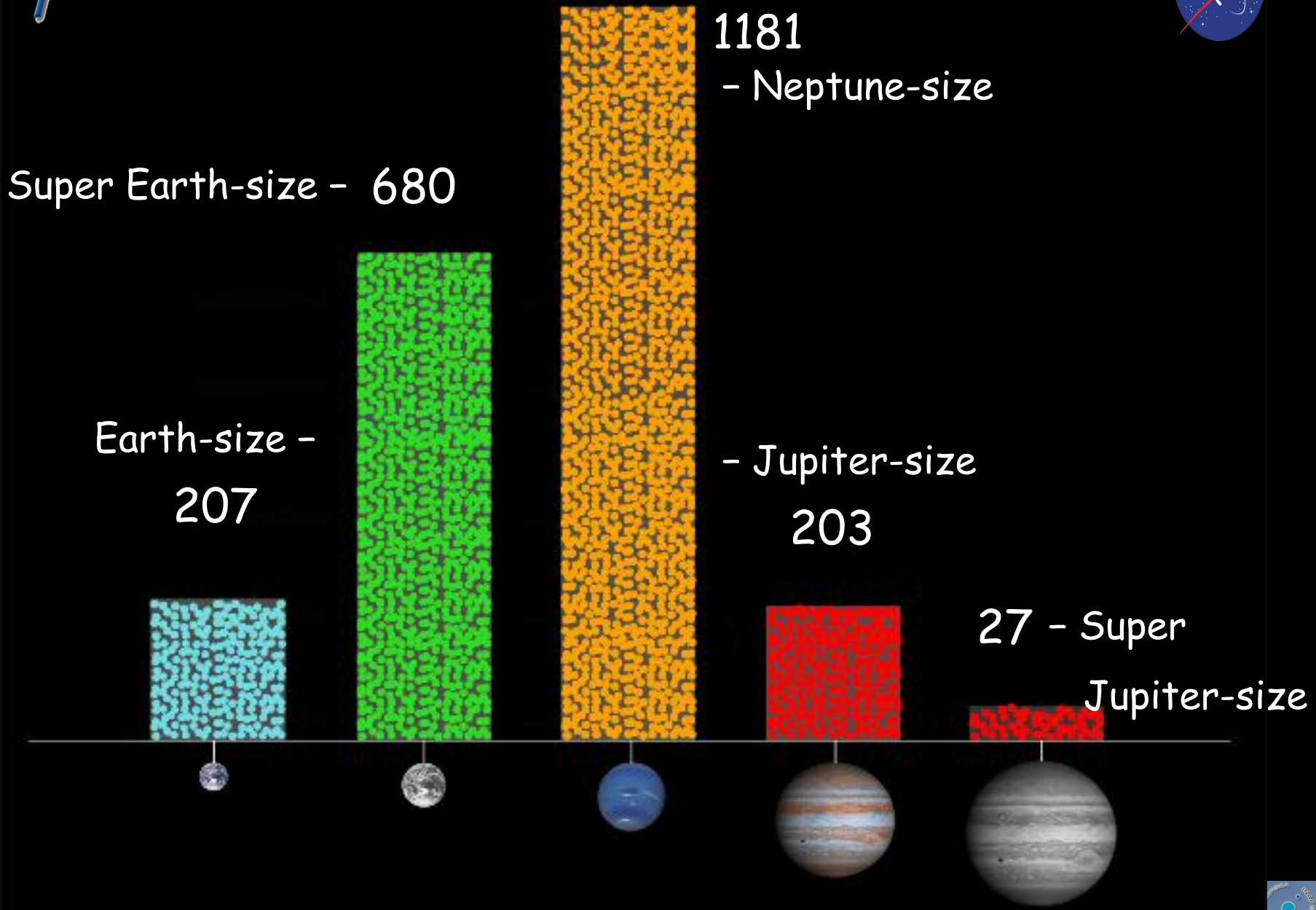
Kepler Planet Candidates as of Dec 2011



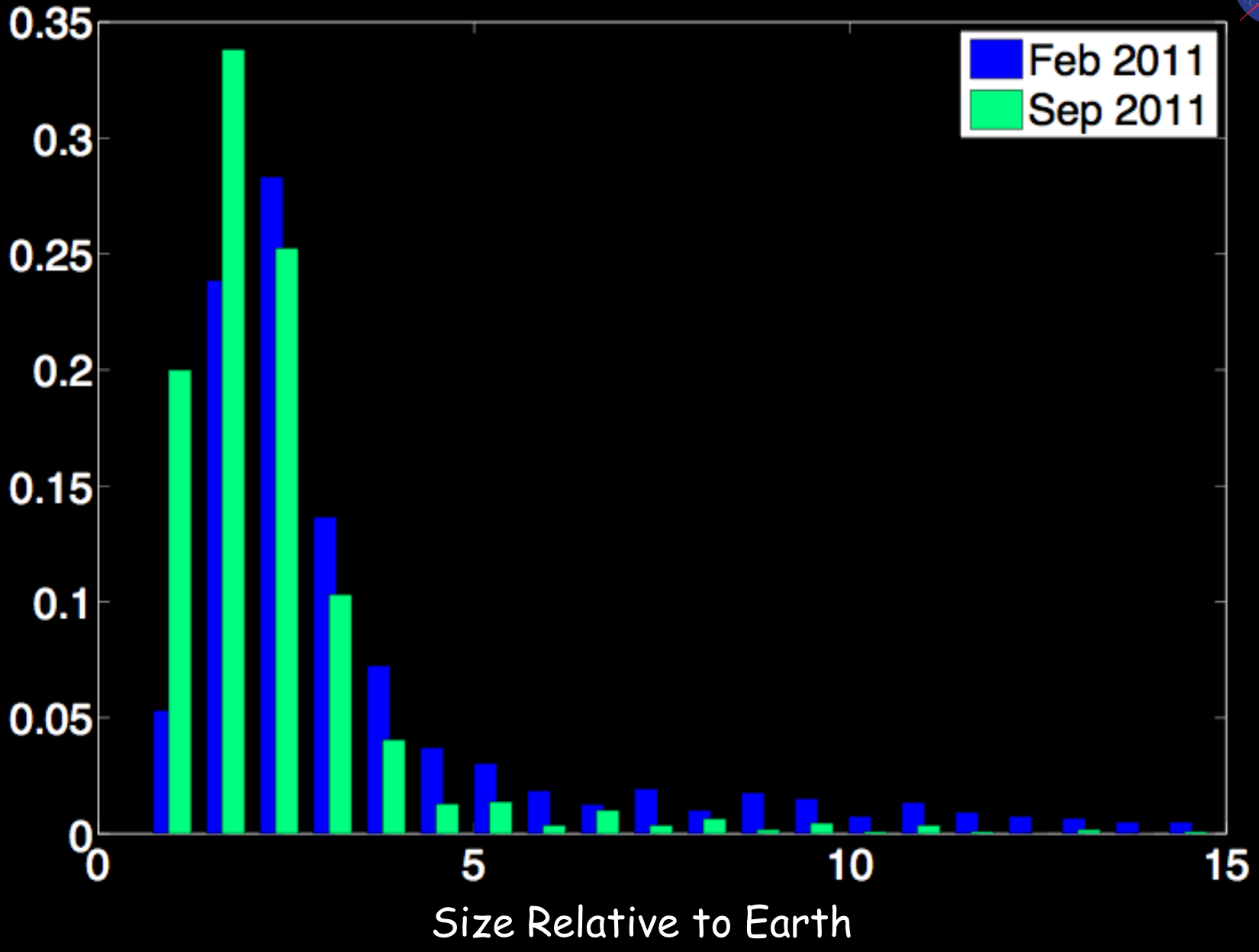
Locations of Kepler Planet Candidates



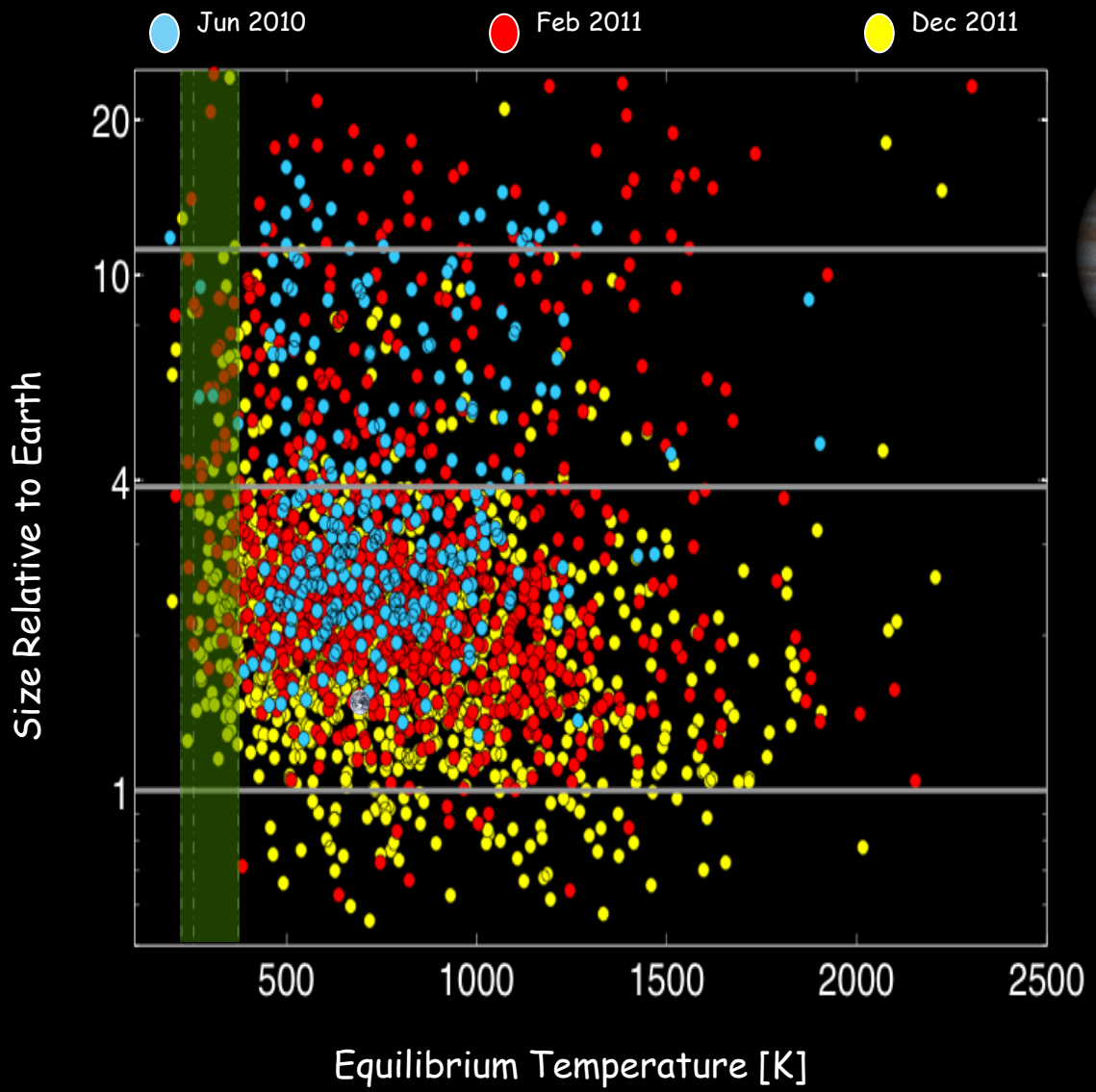
Sizes of Planet Candidates

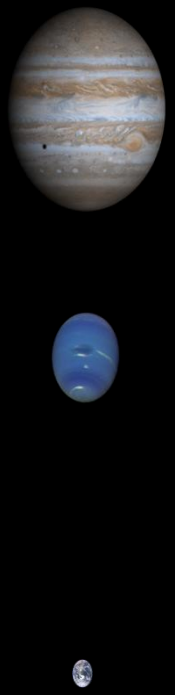


Size Distribution: Feb vs. Dec



Kepler Candidates in the Habitable Zone



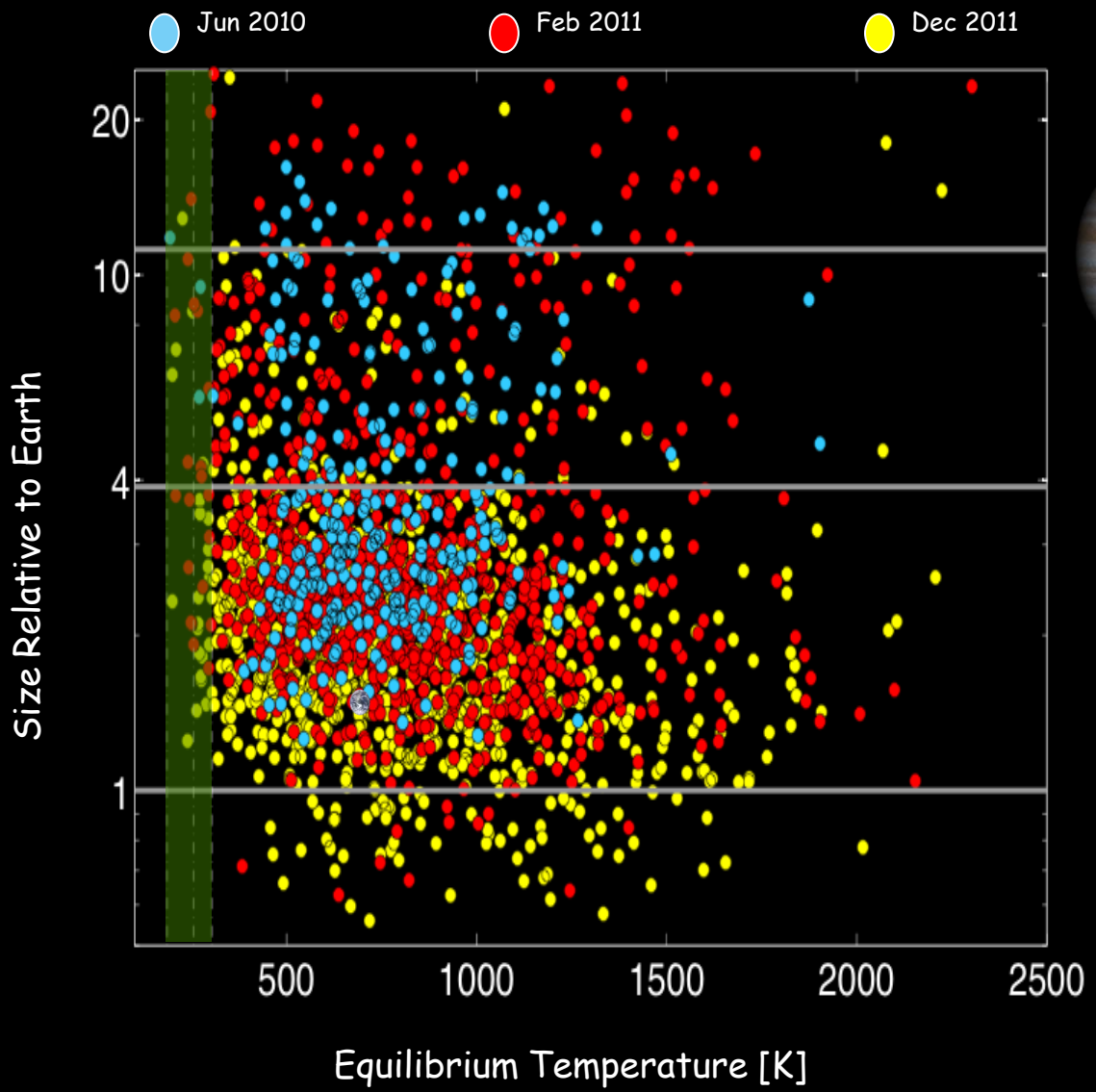


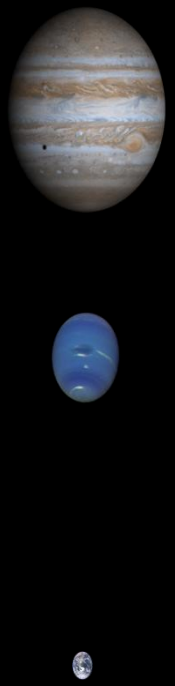
223K - 373K

Dec: 139

Feb: 54

Kepler Candidates in the Habitable Zone

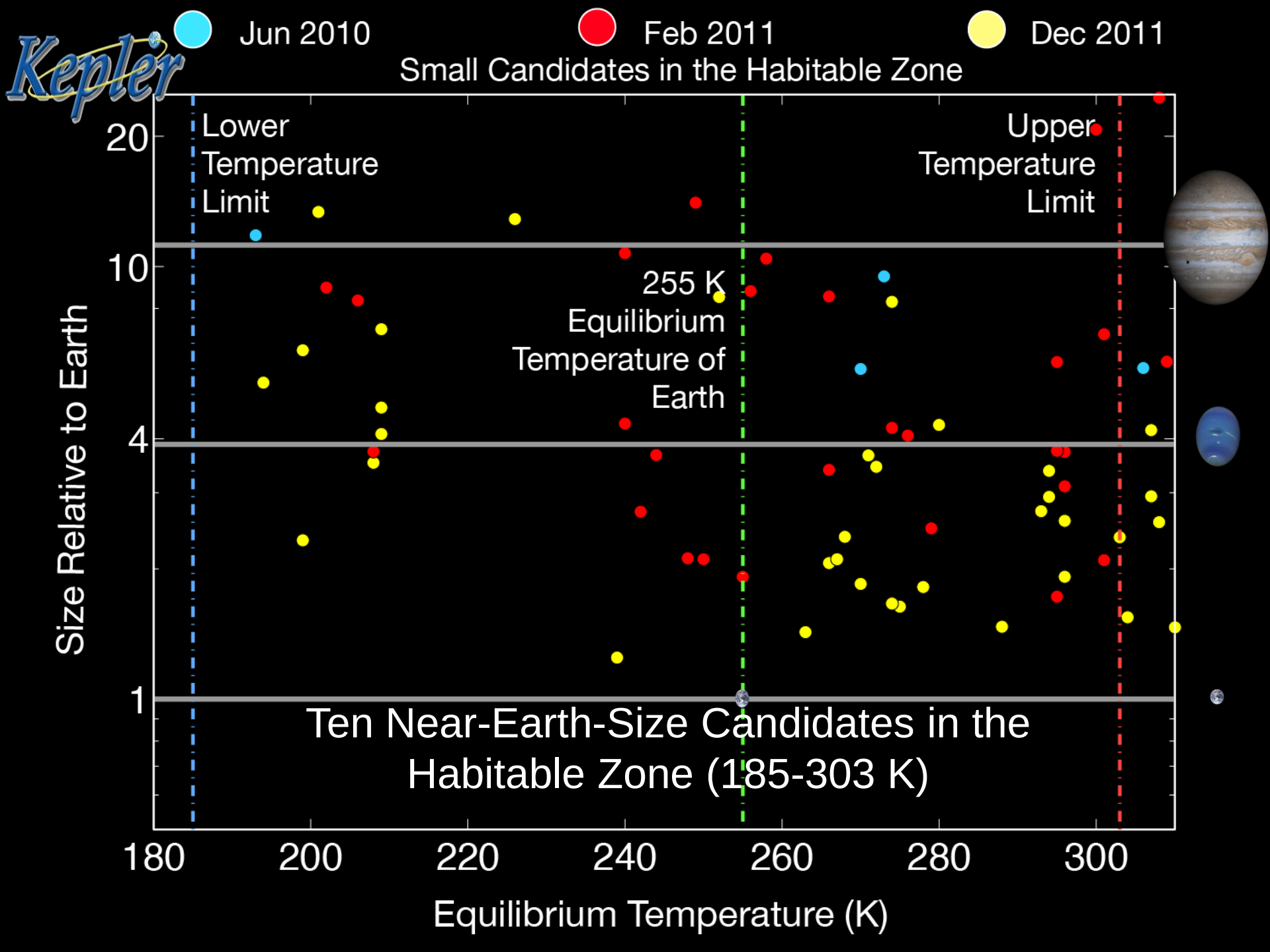


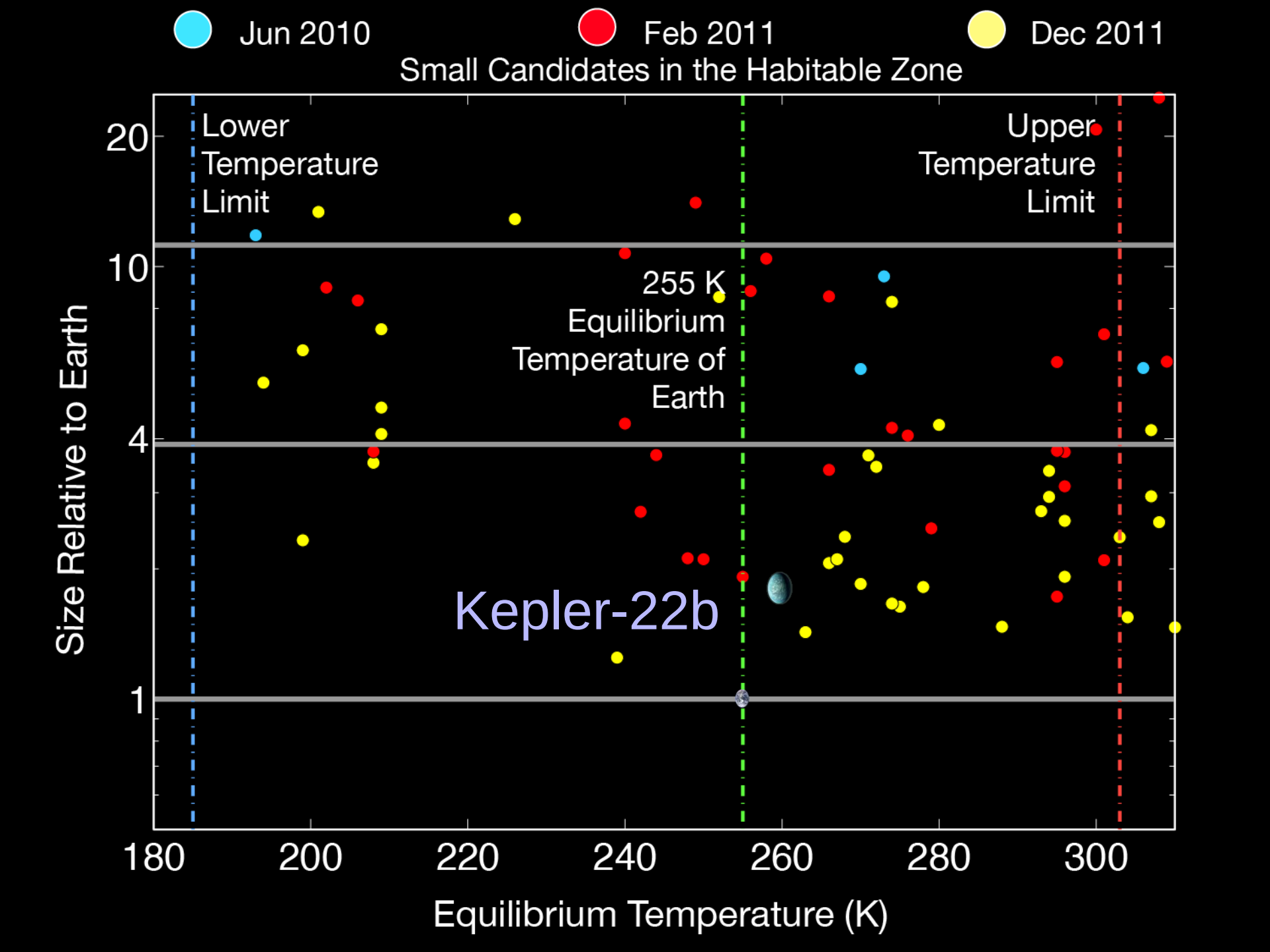


185K - 303K

Dec: 48

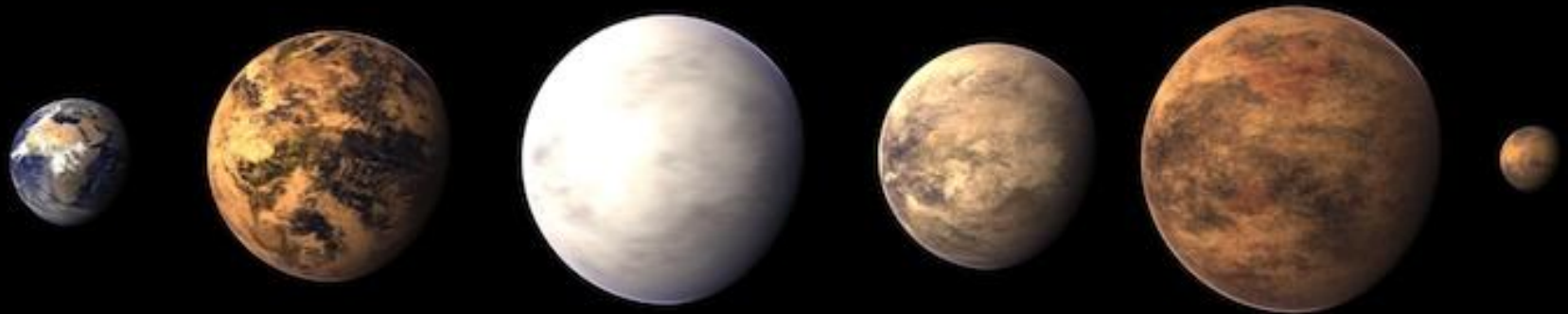
Feb: 25


Kepler
Jun 2010
Feb 2011
Dec 2011
Small Candidates in the Habitable Zone
Lower Temperature Limit
Upper Temperature Limit
255 K Equilibrium Temperature of Earth
Size Relative to Earth
20
10
4
1
Ten Near-Earth-Size Candidates in the Habitable Zone (185-303 K)
180
200
220
240
260
280
300
Equilibrium Temperature (K)


Jun 2010
Feb 2011
Dec 2011
Small Candidates in the Habitable Zone
Lower Temperature Limit
Upper Temperature Limit
255 K Equilibrium Temperature of Earth
Kepler-22b
Size Relative to Earth
20
10
4
1
180
200
220
240
260
280
300
Equilibrium Temperature (K)

Current Potential Habitable Worlds

Compared with Earth and Mars and Ranked in Order of Similarity to Earth



#1	#2	#3	#4	#5	#6
Earth	Gliese 667C c	Kepler-22 b	HD 85512 b	Gliese 581 d	Mars
1.00	0.85	0.81	0.77	0.71	0.66

Updated: March 23, 2012

CREDIT: The Habitable Exoplanets Catalog, Planetary Habitability Laboratory @ UPR Arecibo (phl.upr.edu)

Ma c'è vita su questi pianeti?

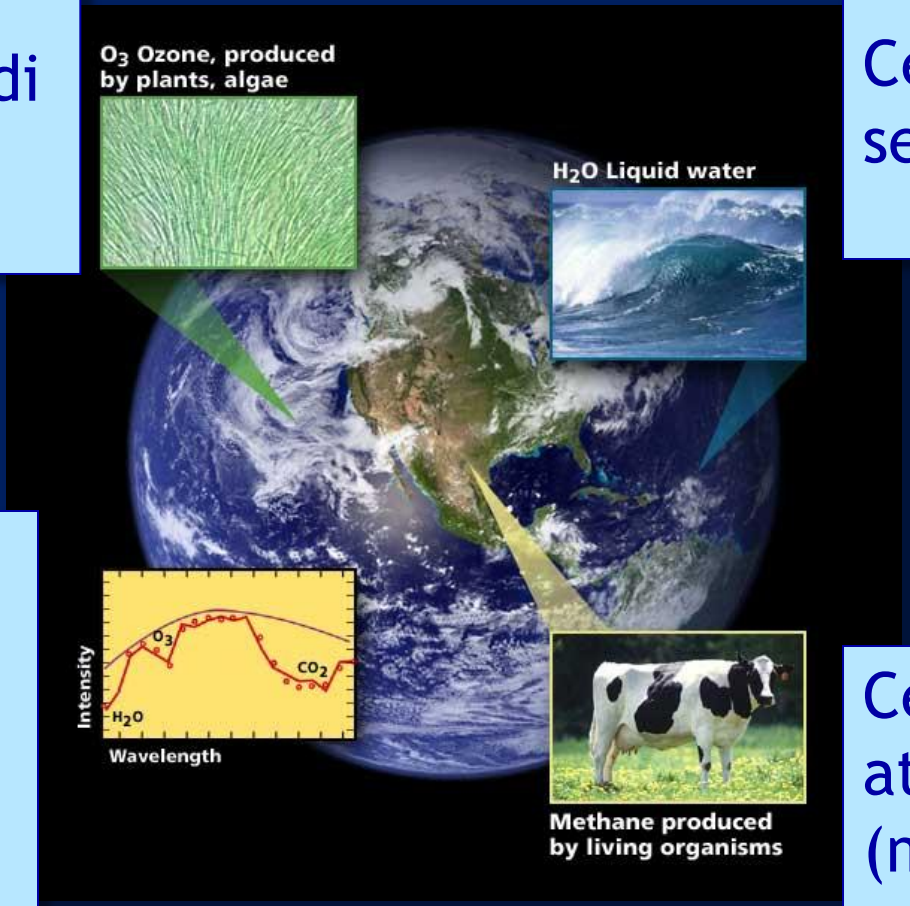
Per cercare di rispondere occorre affrontare il problema per passi successivi

- Ricerca di sistemi planetari extra-solari
- Studio delle caratteristiche: sono abitabili?
- Ricerca di segnali biologici nelle atmosfere planetarie: c'è vita?
- Vita intelligente?

Ma come potremo sapere se c'è vita?

Cercare tracce di ossigeno

Cercare di capire se c'è acqua



Analizzando la luce assorbita o riflessa dal pianeta possiamo studiare la sua atmosfera

Cercare segnali di attività biologica (metano)

EChO

Exoplanets Characterization Observatory

E' un progetto recentemente selezioanto dall'ESA perchè inizi uno studio di fattibilità. L'idea è mandare in orbita un telescopio dedicato alla caratterizzazione delle atmosfere di pianeti extrasolari, perstudiarne la composizione e la struttura

Il progetto è ideato per andare in orbita nel 2022. partecipano alla realizzazione di ECho numerosi istituti di ricerca italiani, capitanati in Italia dall'Osservatorio Astronomico di Palermo.

La rivoluzione copernicana continua...

Il Sole è una stella come tante altre ...

situata alla periferia di una Galassia ...

che di stelle ne contiene migliaia di miliardi.

Perchè dovremmo essere soli?

Ci sono due possibilità:
o siamo soli nell'Universo
o non lo siamo...
Entrambe mi spaventano.

Isaac Asimov

Siti e riconoscimenti

- Exoplanets in Italy
  http://www.oact.inaf.it/exoit/EXO-IT/Home.html
- Enciclopedia dei Pianeti Extrasolari
  http://exoplanet.eu/
- HARPS-N, Kepler, Echo
  https://plone2.unige.ch/HARPS-N/overview
  http://www.kepler.arc.nasa.gov/
  http://www.media.inaf.it/tag/echo/
- Exoplanet Data Explorer
  http://exoplanets.org/
- JPL Planet Quest
  http://planetquest.jpl.nasa.gov/
- Altri link
  http://exoplanets.org/linkframe.html
  http://obswww.unige.ch/~udry/planet/planet_links.html

maggio@astropa.inaf.it