
Mondi Alieni:
gli Esopianeti
Scoperta, caratterizzazione, abitabilità e ricerca della vita
Adriano Gaspani
Società Italiana di Astrobiologia
adriano . gaspani.astro@gmail.com

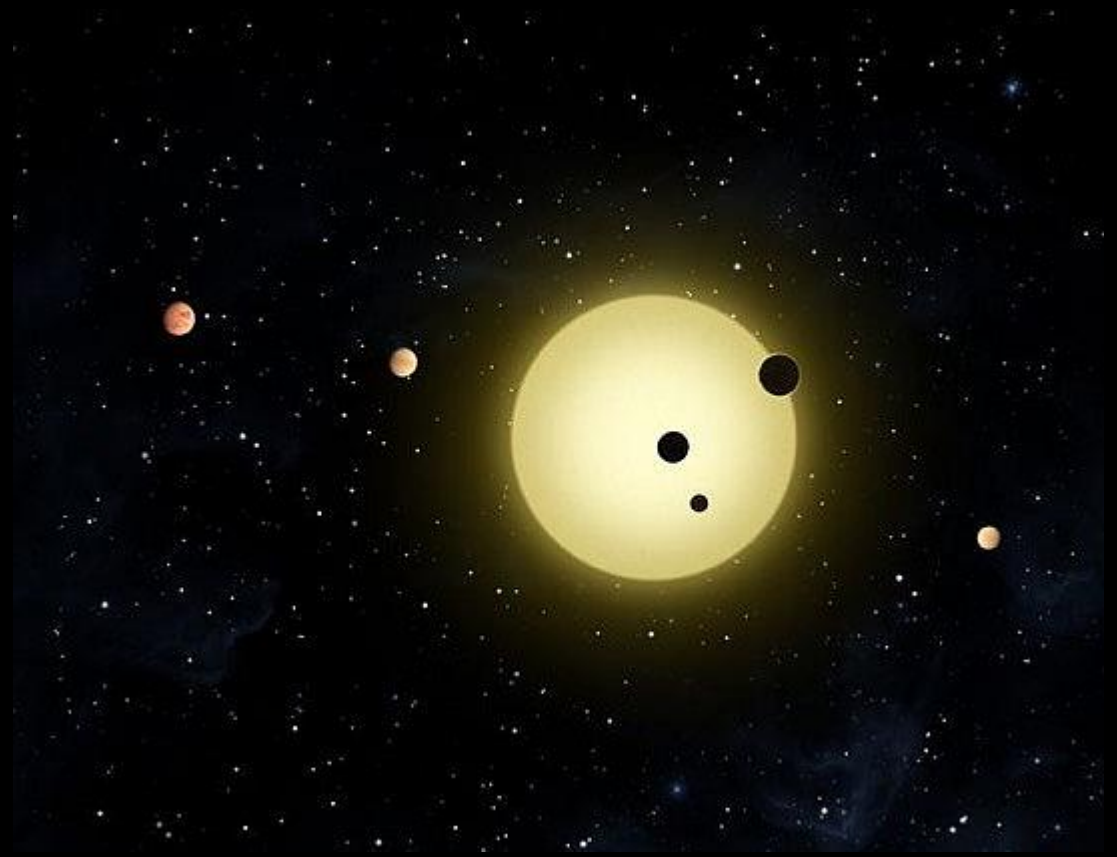
Che cos’è un esopianeta

Definizione e contesto

Un esopianeta è un pianeta che orbita attorno a una stella diversa dal Sole.

Può essere roccioso, gassoso, ricco d’acqua o privo di una superficie solida.

Le osservazioni rivelano una grande varietà di mondi, spesso senza analoghi nel Sistema Solare.



Dalla teoria alla scoperta

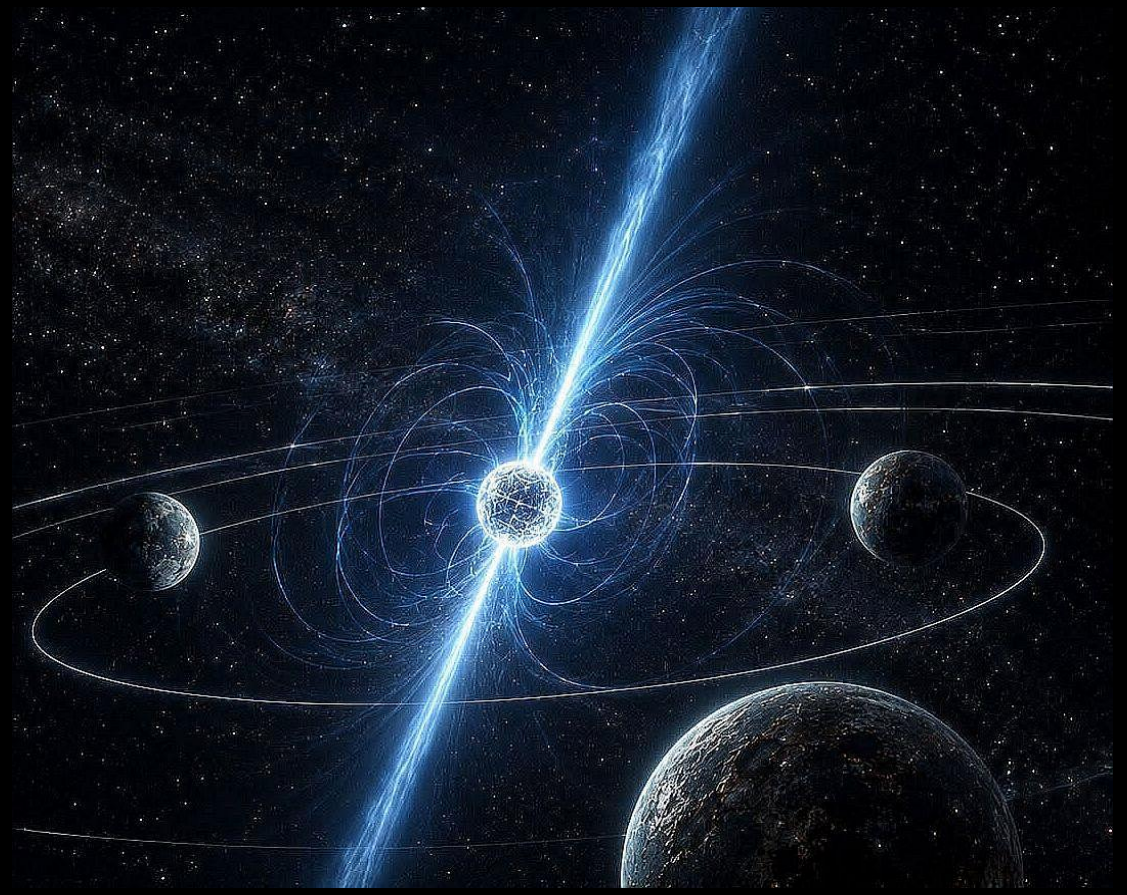
Una breve cronologia

Per decenni i pianeti extrasolari furono ipotesi plausibili ma non verificabili.

Nel 1992 furono individuati pianeti attorno alla pulsar PSR B1257+12.

Nel 1995 51 Pegasi b inaugurò l’era moderna degli esopianeti attorno a stelle simili al Sole.

PSR B1257+12



Le tappe principali della scoperta

1992

Primi pianeti extrasolari scoperti, attorno alla pulsar PSR B1257+12

1995

51 Pegasi b: primo esopianeta attorno a una stella simile al Sole

2009

Lancio del telescopio Kepler, dedicato alla ricerca sistematica

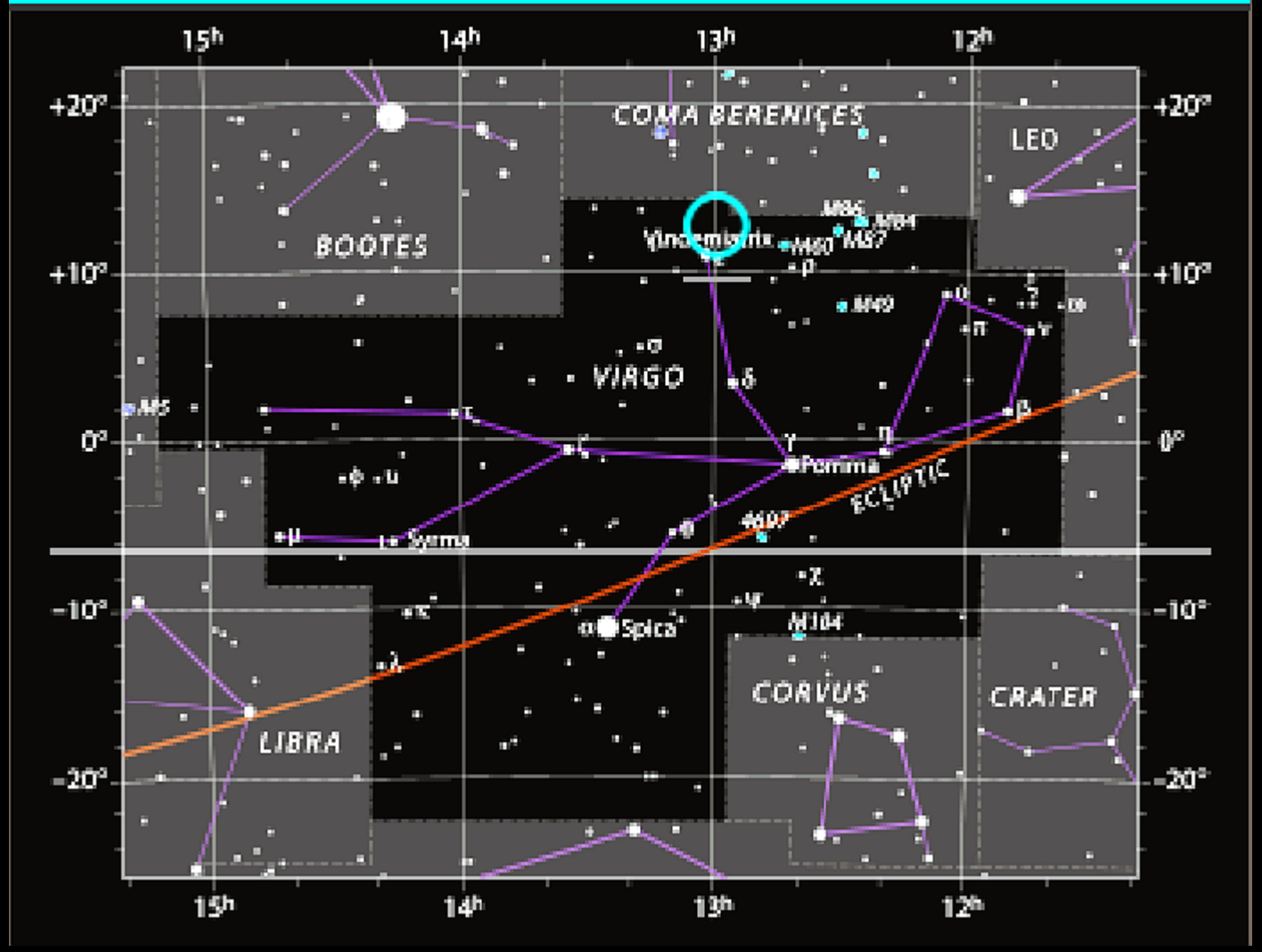
2018

Lancio di TESS, il successore di Kepler per l'intero cielo

2022

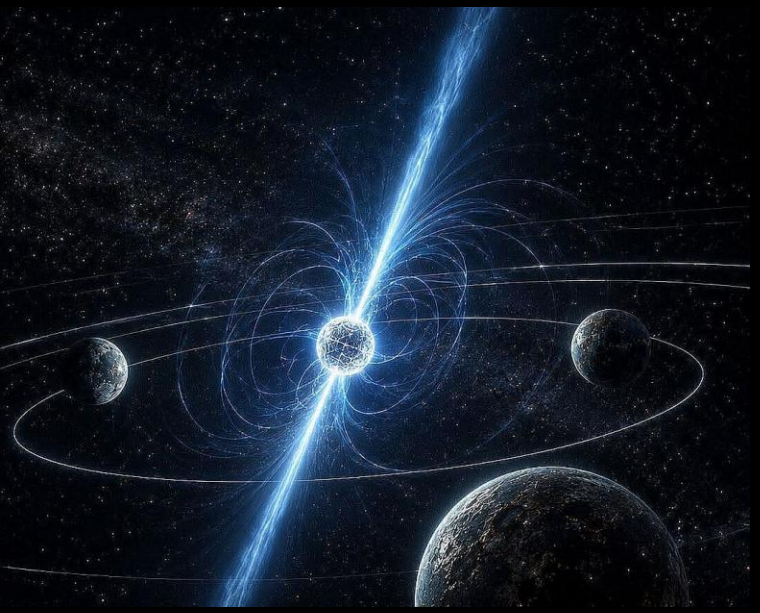
Il James Webb Space Telescope inizia ad analizzare le atmosfere

PSR B1257+12



Scoperta	1990
Classificazione	Stella di neutroni
Classe spettrale	?
Tipo di variabile	Pulsar millisecondo
Distanza dal Sole	980 anni luce
Costellazione	Vergine
Coordinate	
(all'epoca J2000.0)	
Ascensione retta	$13^{h}\ 00^{m}\ 01^{s}$
Declinazione	12° 40′ 00″

PSR B1257+12



Parametri orbitali	
Semiasse maggiore	0,46 au
Eccentricità	0,0252
Dati fisici	
Raggio medio	0,00002 $R_\odot$
Massa	1,4 $M_\odot$
Periodo di rotazione	0,006219 secondi
Età stimata	800 milioni di anni
Nomenclature alternative	
PSR J1300+1240, PSR 1257+12	

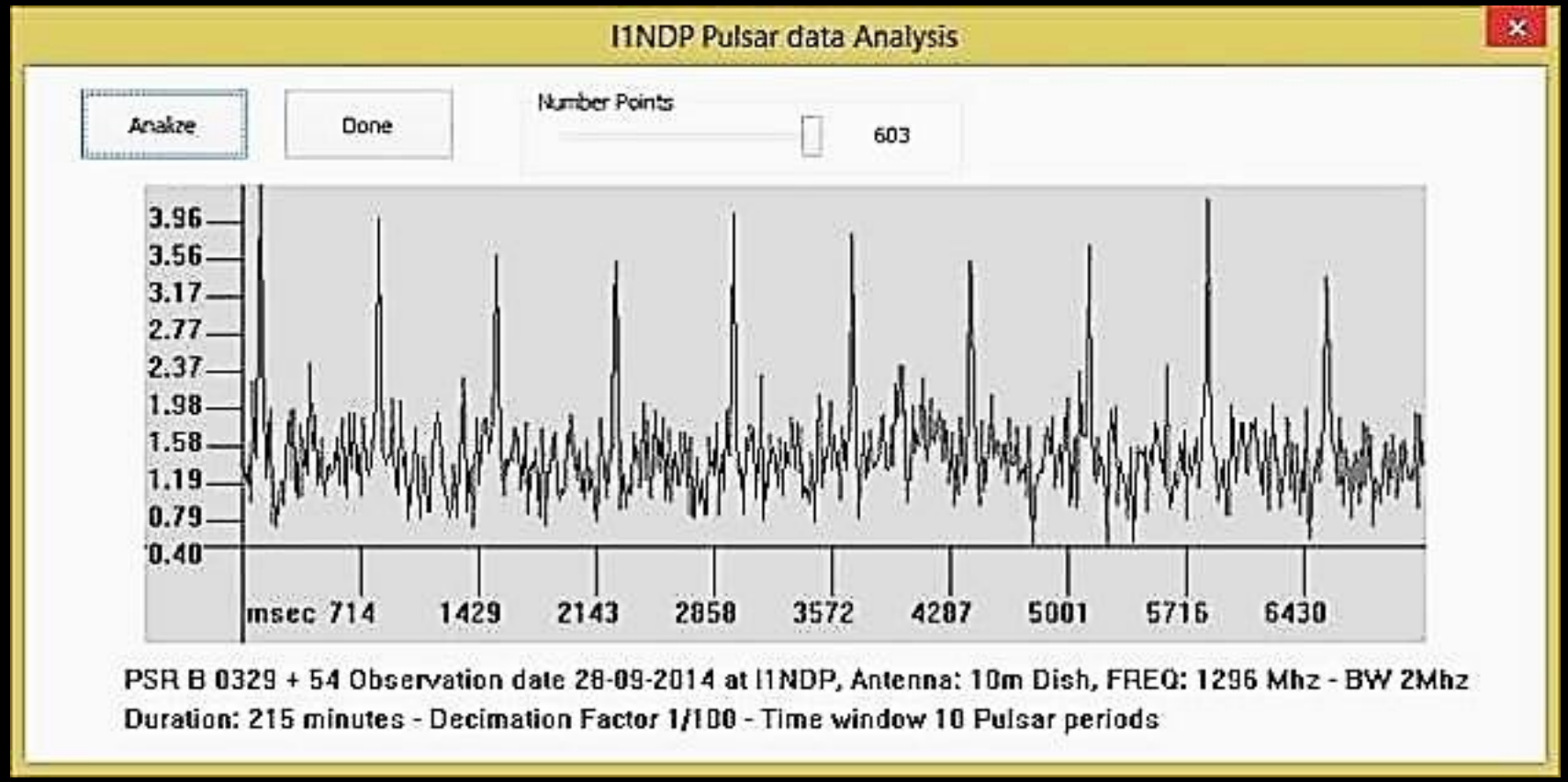


Rappresentazione artistica dei pianeti del sistema PSR B1257+12 confrontati con le dimensioni della Terra

Pianeta	Tipo	Massa	Periodo orb.	Sem. maggiore	Eccentricità
A (b / Draugr)	roccioso	0,020 ±0,002 $M_\oplus$	25,262 ± 0,003 giorni	0,19 au	0,0
B (c / Poltergeist)	super Terra	4,3 ±0,2 $M_\oplus$	66,5419 ± 0,0001 giorni	0,36 au	0,0186 ± 0,0002
C (d / Phobetor)	super Terra	3,9 ±0,2 $M_\oplus$	98,2114 ± 0,0002 giorni	0,46 au	0,0252 ± 0,0002

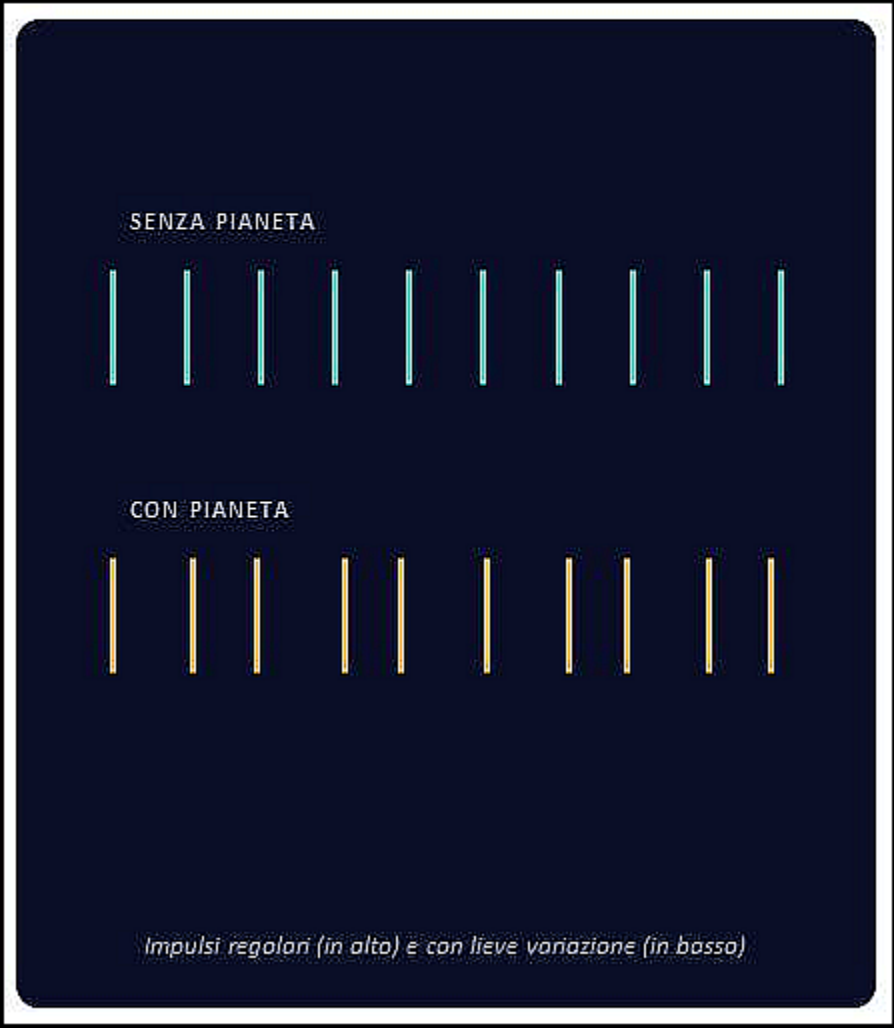
Variazioni degli intervalli di emissioni di una Pulsar

L'individuazione di pianeti extrasolari orbitanti attorno alle pulsar è deducibile dal passaggio dell'eventuale pianeta davanti al fascio di radiazione emesso dalla pulsar. Sapendo il periodo di rotazione della pulsar Il corpo orbitante può essere rilevato calcolando l'intervallo nella ricezione dell'emissione che esso provoca al suo passaggio.



Il timing delle pulsar

Variazioni minuscole nella regolarità di un metronomo cosmico



Impulsi regolari (in alto) e con lieve variazione (in basso)

IL PRIMO MAI RIUSCITO

COSA MISURA	CONTRIBUTO	LIMITE PRINCIPALE
Variazioni nel tempo di arrivo degli impulsi radio	Rarissimo, ma è stato il primo metodo di successo (1992)	Funziona solo attorno a pulsar, ambienti ostili alla vita

Le pulsar emettono impulsi radio con una regolarità quasi perfetta, come un metronomo cosmico. Un pianeta in orbita attorno alla pulsar introduce piccolissime variazioni periodiche nel tempo di arrivo di questi impulsi sulla Terra, rivelandone la presenza con precisione sorprendente.

Perché funziona bene: Ha portato alla prima conferma assoluta di pianeti extrasolari della storia, attorno alla pulsar PSR B1257+12, nel 1992.

51 Pegasi b

La scoperta del 1995

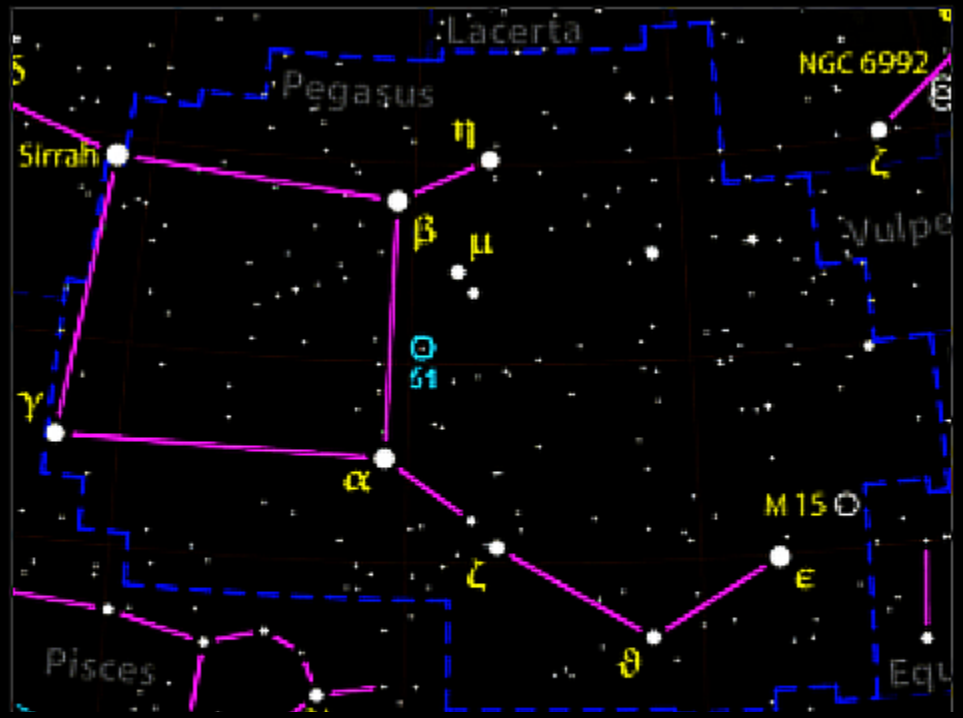
Fu rivelato tramite velocità radiale, misurando lo spostamento Doppler delle righe spettrali della stella.

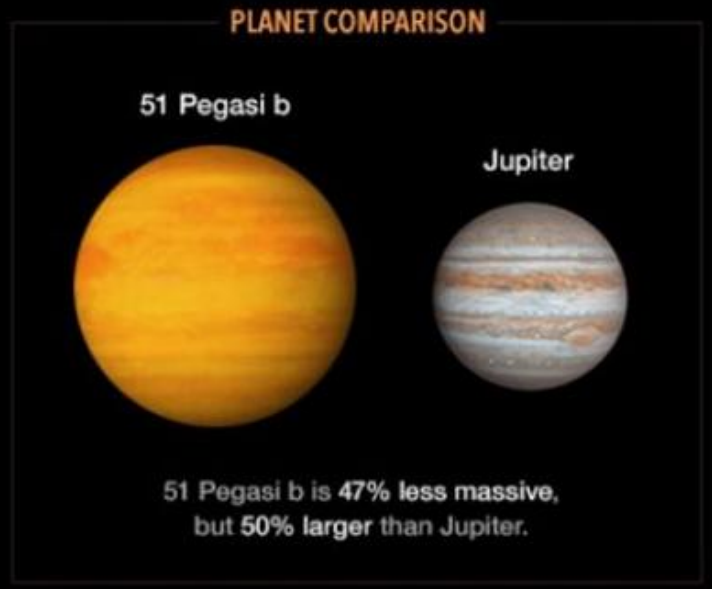
È un “hot Jupiter”: massa simile a Giove ma orbita di pochi giorni.

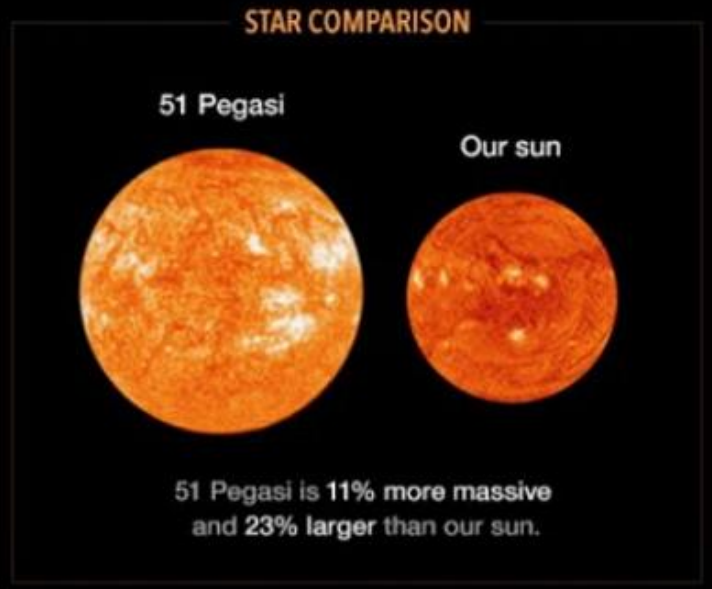
La scoperta dimostrò che sistemi planetari molto diversi dal nostro sono comuni.



51 Pegasi b

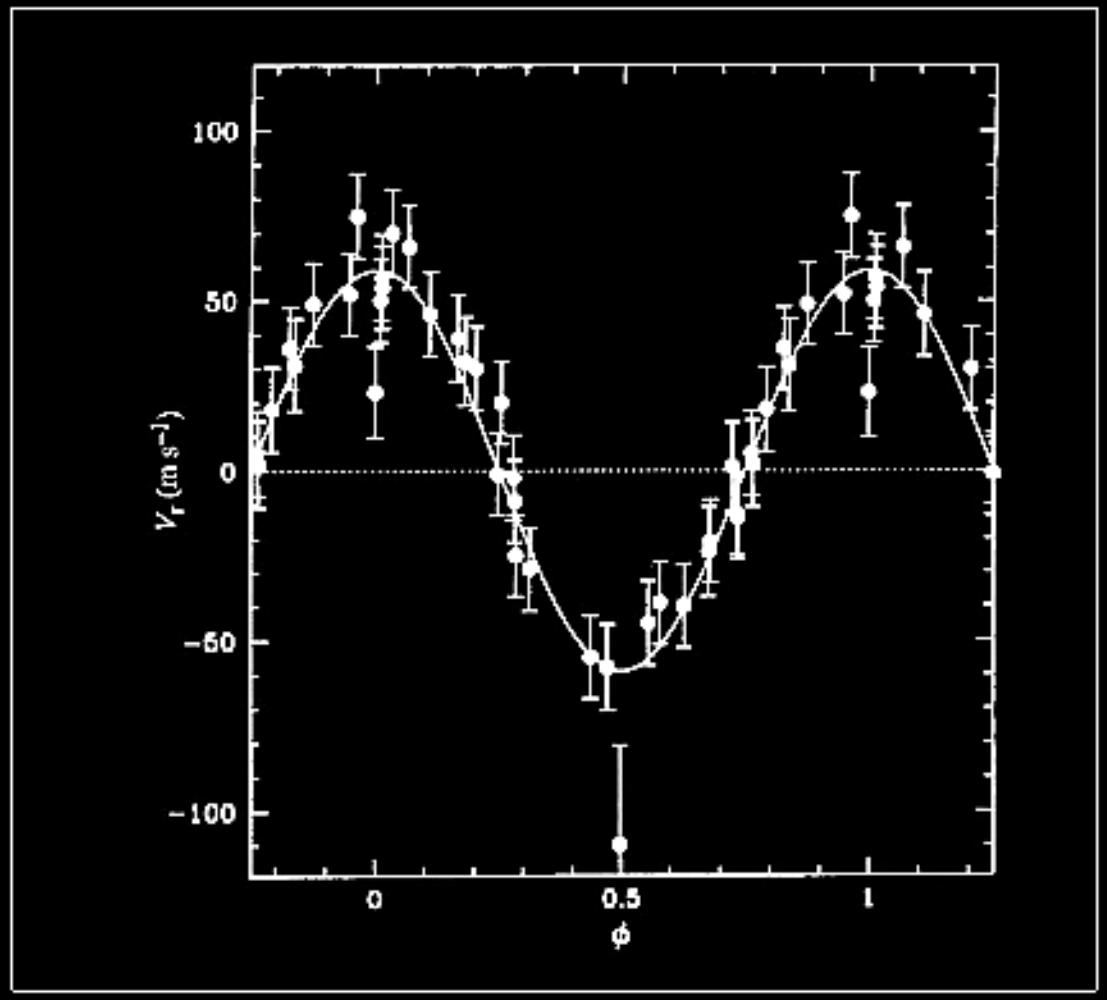






51 Pegasi b	
Stella madre	51 Pegasi
Scoperta	1995
Scopritori	Mayor e Queloz
Costellazione	Pegaso
Distanza dal Sole	50 anni luce
Parametri orbitali	
Semiasse maggiore	0,0527 ± 0,0030 UA
Periodo orbitale	4,230785 ± 0,000036 giorni
Eccentricità	0,013 ± 0,012
Dati fisici	
Raggio medio	1,9 ± 0,3 r_J
Massa	>0,472 ± 0,039 M_J

51 Pegasi b



La storica curva di velocità radiale della stella 51 Pegasi ottenuta da Mayor e Queloz: l'oscillazione dimostra l'esistenza di un corpo massiccio e invisibile in orbita attorno alla stella. È la firma inequivocabile di 51 Pegasi b (Nature, 378, 355, nov. 1995)

"È quasi una follia" affermò sulla rivista New Scientist il compianto Franco Pacini, allora direttore dell'osservatorio astrofisico di Arcetri, fra i presenti in sala all'annuncio di Mayor. "Fatemi il piacere!" sbottò oltreoceano Geoffrey Marcy, leader di uno dei team concorrenti: "Dobbiamo proprio perdere altro tempo al telescopio per confutare l'ennesimo falso pianeta?" Lo stesso Queloz ammetterà più tardi che "quando annunciammo 51 Pegasi b, forse soltanto il 10% delle persone credeva che avessimo trovato un pianeta". Eppure, saranno proprio le osservazioni compiute da Marcy appena una settimana dopo al Lick Observatory in California a confermare definitivamente l'esistenza del nuovo pianeta (e finalmente Nature si deciderà a pubblicare la scoperta).

51 Pegasi b

51 Peg b è stato soprannominato *Bellerofonte* dal nome dell'eroe greco che domò il cavallo alato Pegaso, la costellazione in cui si trova.

Nel luglio del 2014, l'Unione Astronomica Internazionale ha indetto il concorso pubblico NameExoWorlds per assegnare dei nomi propri ad alcuni esopianeti e alle loro stelle. La procedura ha previsto che partecipanti appartenenti ad associazioni astronomiche potessero proporre delle denominazioni, che successivamente sono state sottoposte a votazione aperta a chiunque volesse partecipare. Il nome che ha ottenuto il numero maggiori di voti per 51 Pegasi b è stato *Dimidium*, proposto dall'Astronomische Gesellschaft Luzern, associazione astronomica di Lucerna, in Svizzera. Il termine, che in latino significa *metà*, intende sottolineare il fatto che il pianeta ha circa la metà della massa di Giove. Nello stesso concorso, la stella è stata rinominata *Helvetios*.

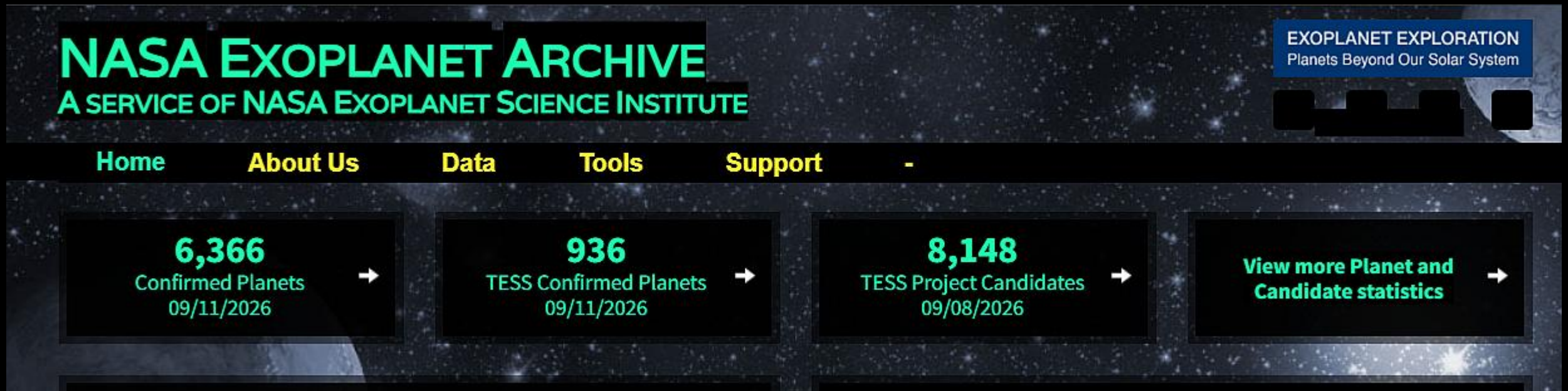
Il censimento planetario

Cataloghi e numeri

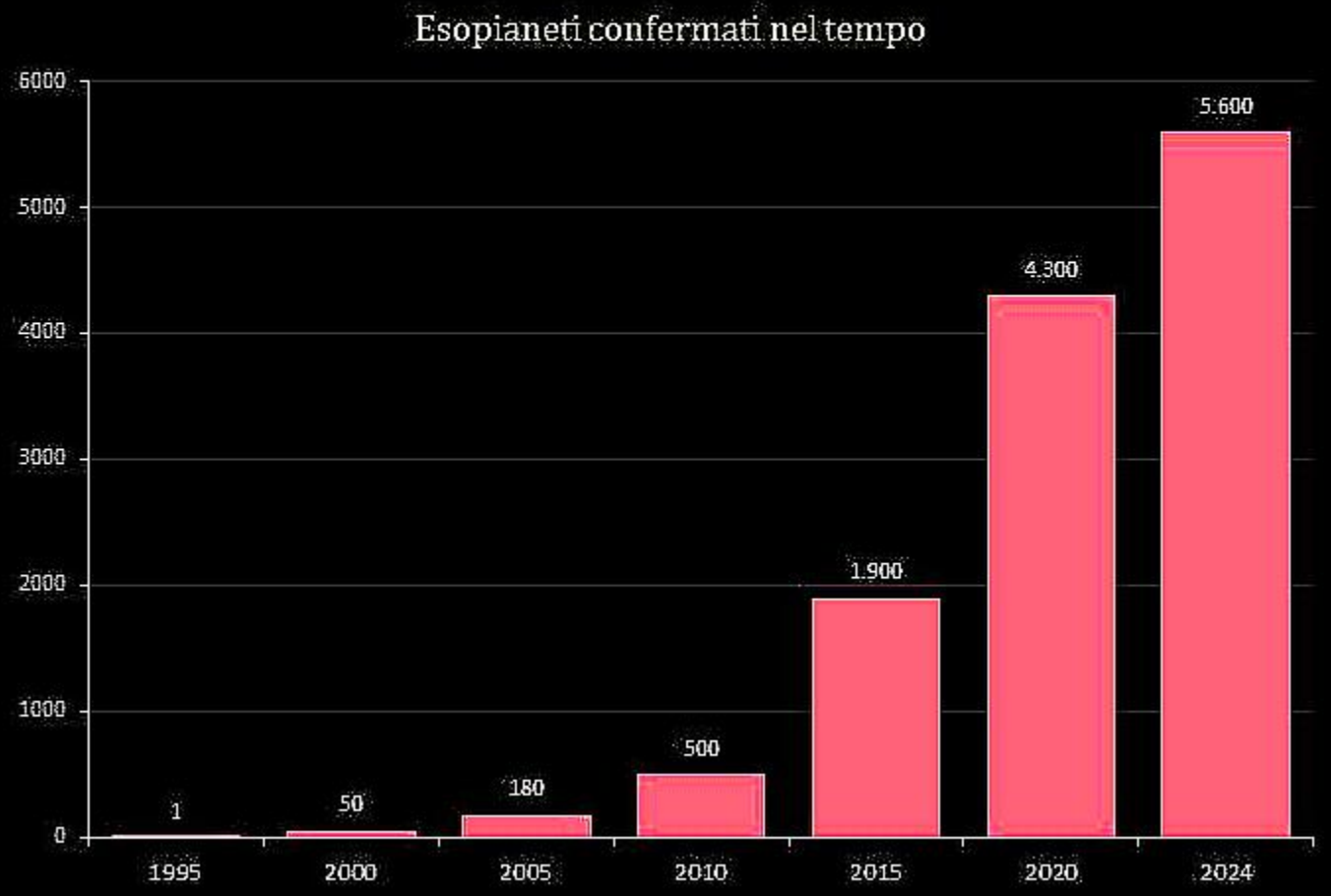
I cataloghi moderni contengono oltre 5.700 pianeti confermati.

Il numero cresce grazie a survey fotometriche e follow-up spettroscopici.

Ogni valore va interpretato considerando i bias degli strumenti e delle tecniche di scoperta.



Una scoperta in continua accelerazione



5.800+

Pianeti confermati

6,366
Confirmed Planets
09/11/2026

4.200+

Sistemi planetari

~150

Sistemi multipli con 3+ pianeti

Fonte: NASA Exoplanet Archive (dati indicativi)

Posta in arrivo (3.906) - adriano | 51 pegasi b - Cerca con Google | Data Resources in the Exoplane | Planetary Systems

exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/TblView/nph-tblView?app=ExoTbls&config=PS

YouTube | Maps | Traduci | Adobe Acrobat | Adobe Acrobat | Google | Tutti i preferiti

NASA Exoplanet Archive

NASA Exoplanet Science Institute

Home | About Us | Data | Tools | Support | Login

Select Columns | Download Table | Plot Table | View Documentation | User Preferences

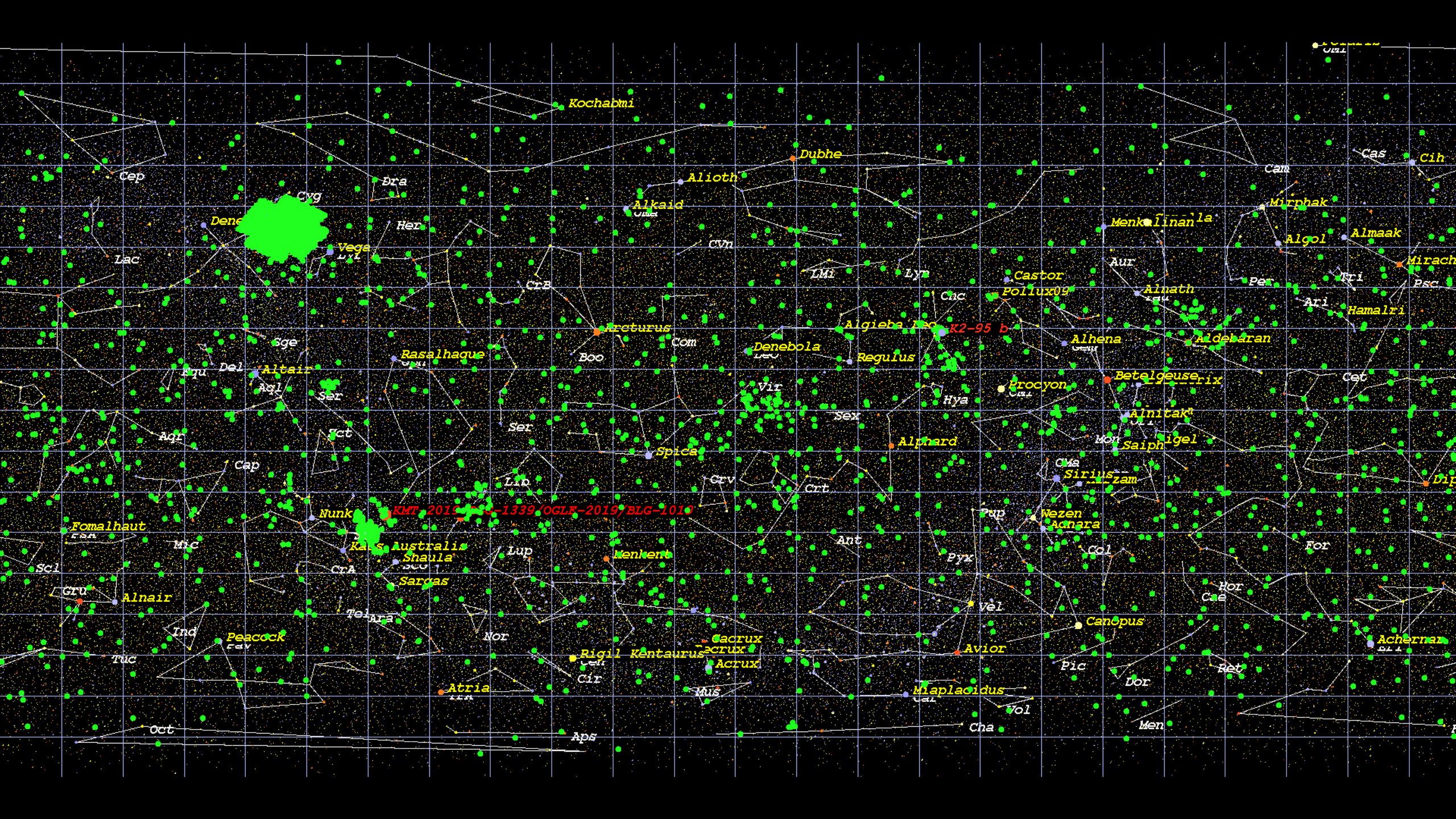
Planetary Systems

Planet Name	Host Name	Default Parameter Set	Number of Stars	Number of Planets	Discovery Method	Discovery Year	Discovery Facility	Solution Type	Controversial Flag	Planetary Parameter Reference	Orbital Period [days]
11 Com b	11 Com	0	2	1	Radial Velocity	2007	Xinglong Station	Published Confirmed	0	Kunitomo et al. 2011	
11 Com b	11 Com	1	2	1	Radial Velocity	2007	Xinglong Station	Published Confirmed	0	Teng et al. 2023	323.21 $^{+0.06}_{-0.05}$
11 Com b	11 Com	0	2	1	Radial Velocity	2007	Xinglong Station	Published Confirmed	0	Liu et al. 2008	326.03±0.32
11 UMi b	11 UMi	1	1	1	Radial Velocity	2009	Thueringer Lande	Published Confirmed	0	Stassun et al. 2017	516.21997±3.20000
11 UMi b	11 UMi	0	1	1	Radial Velocity	2009	Thueringer Lande	Published Confirmed	0	Kunitomo et al. 2011	
11 UMi b	11 UMi	0	1	1	Radial Velocity	2009	Thueringer Lande	Published Confirmed	0	Dollinger et al. 2009	516.22±3.25
14 And b	14 And	1	1	1	Radial Velocity	2008	Okayama Astroph	Published Confirmed	0	Teng et al. 2023	186.76 $^{+0.11}_{-0.12}$
14 And b	14 And	0	1	1	Radial Velocity	2008	Okayama Astroph	Published Confirmed	0	Sato et al. 2008	185.84±0.23
14 And b	14 And	0	1	1	Radial Velocity	2008	Okayama Astroph	Published Confirmed	0	Kunitomo et al. 2011	
14 Her b	14 Her	0	1	2	Radial Velocity	2002	W. M. Keck Obser	Published Confirmed	0	Butler et al. 2003	1724±50
14 Her b	14 Her	0	1	2	Radial Velocity	2002	W. M. Keck Obser	Published Confirmed	0	Stassun et al. 2017	1773.40002±2.50000
14 Her b	14 Her	0	1	2	Radial Velocity	2002	W. M. Keck Obser	Published Confirmed	0	Rosenthal et al. 2021	1766.41 $^{+0.67}_{-0.68}$
14 Her b	14 Her	0	1	2	Radial Velocity	2002	W. M. Keck Obser	Published Confirmed	0	Gozdziewski et al. 2006	
14 Her b	14 Her	0	1	2	Radial Velocity	2002	W. M. Keck Obser	Published Confirmed	0	Gozdziewski et al. 2008	1766
14 Her b	14 Her	0	1	2	Radial Velocity	2002	W. M. Keck Obser	Published Confirmed	0	Naef et al. 2004	1796.4±8.3
14 Her b	14 Her	1	1	2	Radial Velocity	2002	W. M. Keck Obser	Published Confirmed	0	Bardalez Gagliuffi et al. 2025	

Showing records 1 to 28 of 40155 (40155 total) DOI 10.26133/NEA12

Clear Checked | Check All | Reset Filters

21:37
17/09/2026


Kochab
Dubhe
Alioth
Alkaid
Mirphak
Algol
Almaak
Mirach
Hamal
Sheratan
Menkalinan
Castor
Pollux
Alnath
Capella
Alhena
Aldebaran
Rigel
Betelgeuse
Procyon
Alnilam
Alnitak
Saiph
Mintaka
Sirius
Adhara
Wezen
Aludra
Canopus
Avior
Miaplacidus
Suhail
Acrux
Gacrux
Mimosa
Rigil Kentaurus
Menkent
Shaula
Sargas
Kaus Australis
Nunki
Ascella
Kaus Media
Kaus Borealis
Alnair
Peacock
Atria
Fomalhaut
Altair
Tarazed
Alshain
Deneb
Vega
Sheliak
Sulafat
Arcturus
Rasalhague
Denebola
Regulus
Algieba
Spica
Alphard
Zosma
Chertan
Cor Caroli
Diadem
Unukalhai
Zubenelgenubi
Zubeneschamali
Izar
Porrima
Vindemiatrix
Algorab
Kraz
Minkar
Gienah
Alkes
Nashira
Deneb Algedi
Dabih
Nunki
Ascella
Kaus Australis
Kaus Media
Kaus Borealis
Polaris
Kochab
Pherkad
Yildun
Alderamin
Alfirk
Cepheus
Cygnus
Deneb
Draco
Ursa Major
Ursa Minor
Lacerta
Cassiopeia
Camelopardalis
Perseus
Auriga
Gemini
Taurus
Aries
Pisces
Andromeda
Triangulum
Cetus
Eridanus
Orion
Lepus
Monoceros
Canis Major
Canis Minor
Hydra
Crater
Corvus
Leo
Leo Minor
Coma Berenices
Canes Venatici
Boötes
Corona Borealis
Hercules
Lyra
Cygnus
Vulpecula
Sagitta
Aquila
Delphinus
Equuleus
Pegasus
Lacerta
Andromeda
Cassiopeia
Cepheus
Draco
Ursa Major
Ursa Minor
Camelopardalis
Lynx
Cancer
Sextans
Antlia
Pyxis
Puppis
Vela
Carina
Columba
Lepus
Caelum
Horologium
Fornax
Eridanus
Cetus
Sculptor
Phoenix
Grus
Tucana
Hydrus
Octans
Apus
Indus
Pavo
Telescopium
Ara
Norma
Circinus
Musca
Chamaeleon
Volans
Dorado
Reticulum
Pictor
Centaurus
Crux
Lupus
Triangulum Australe
Corona Australis
Scorpius
Libra
Ophiuchus
Serpens Caput
Serpens Cauda
Sagittarius
Microscopium
Capricornus
Aquarius
Piscis Austrinus
Pegasus
Equuleus
Delphinus
Vulpecula
Sagitta
Aquila
Antinous
Scutum
Lyra
Hercules
Corona Borealis
Boötes
Canes Venatici
Coma Berenices
Leo
Leo Minor
Sextans
Crater
Corvus
Hydra
Virgo
Libra
Lupus
Centaurus
Crux
Circinus
Norma
Ara
Telescopium
Triangulum Australe
Corona Australis
Scorpius
Ophiuchus
Serpens Caput
Serpens Cauda
Sagittarius
Microscopium
Capricornus
Aquarius
Piscis Austrinus
Grus
Phoenix
Tucana
Hydrus
Indus
Pavo
Octans
Apus
Chamaeleon
Musca
Volans
Dorado
Reticulum
Pictor
Vela
Puppis
Pyxis
Antlia
Sextans
Crater
Corvus
Hydra
Virgo
Libra
Lupus
Centaurus
Crux
Circinus
Norma
Ara
Telescopium
Triangulum Australe
Corona Australis
Scorpius
Ophiuchus
Serpens Caput
Serpens Cauda
Sagittarius
Microscopium
Capricornus
Aquarius
Piscis Austrinus
Grus
Phoenix
Tucana
Hydrus
Indus
Pavo
Octans
Apus
Chamaeleon
Musca
Volans
Dorado
Reticulum
Pictor
Vela
Puppis
Pyxis
Antlia
KMT-2019-BLG-1339/OGLE-2019-BLG-1019
K2-95 b

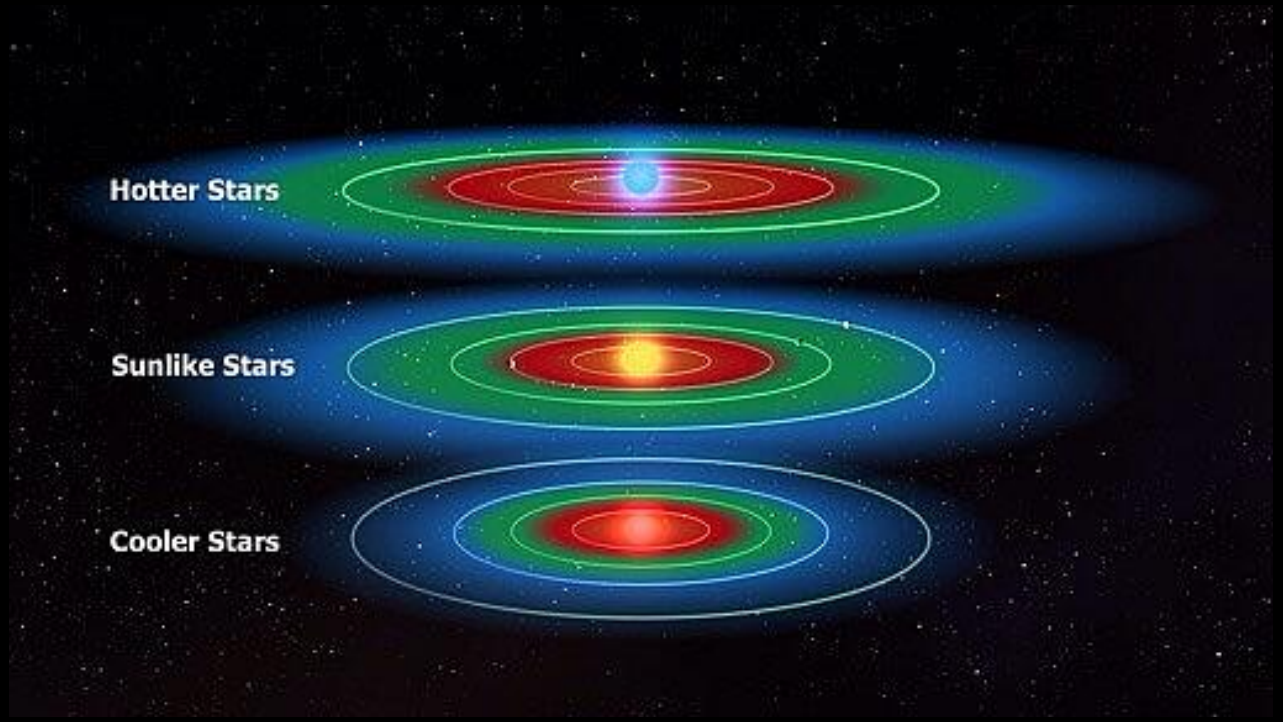
Perché studiarli

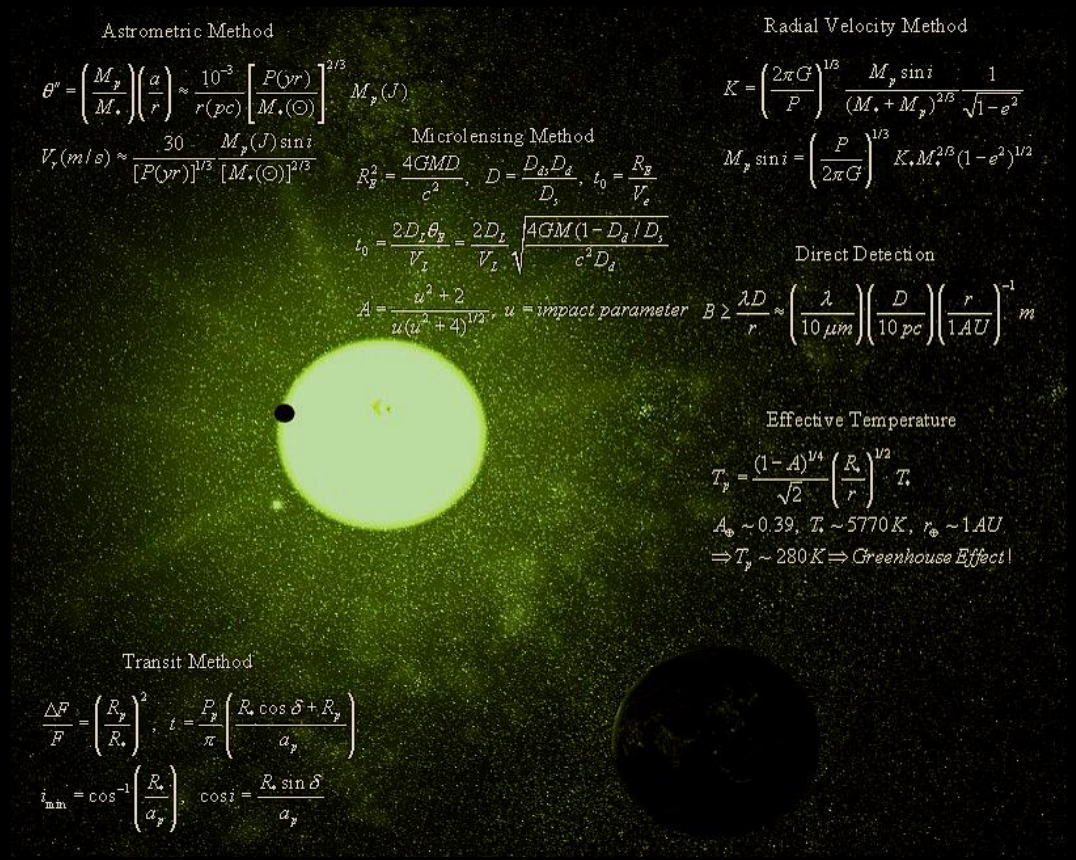
Domande fondamentali

Come si formano e migrano i pianeti?

Quanto sono frequenti pianeti terrestri in orbite temperate?

Quali atmosfere e condizioni possono sostenere acqua liquida e processi biologici?





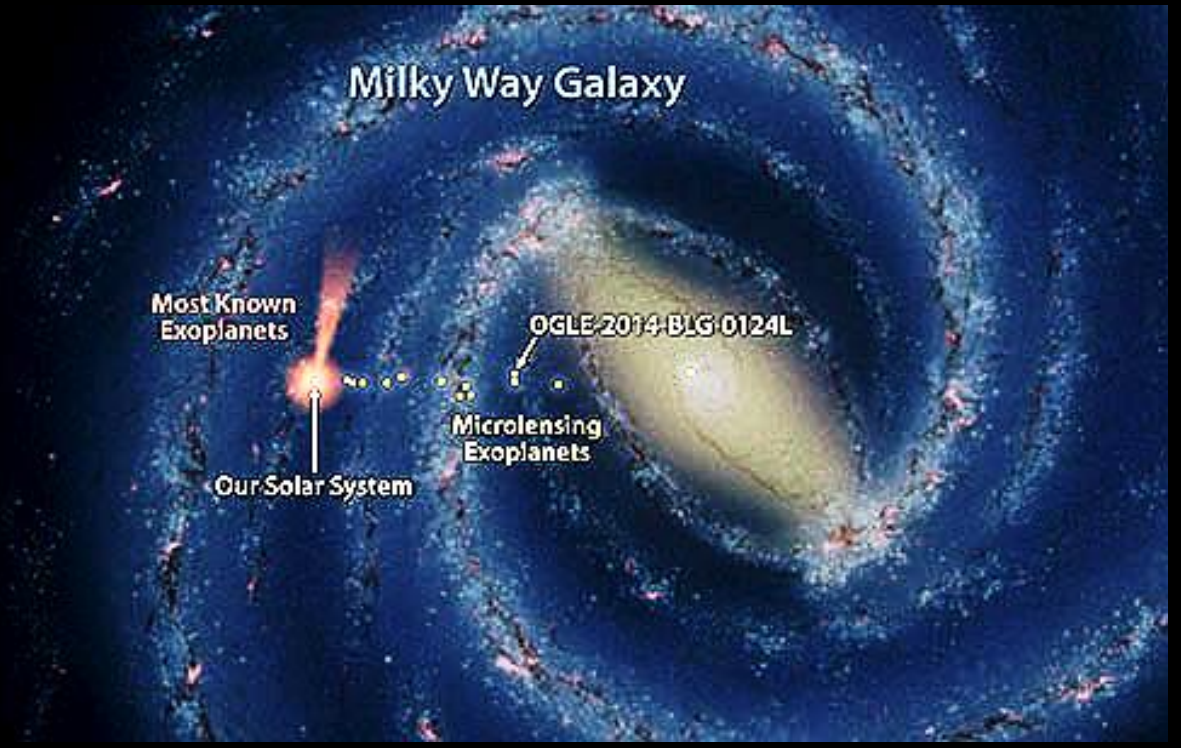
La galassia dei pianeti

Un Universo popolato

Le stelle della Via Lattea ospitano spesso sistemi planetari.

La frequenza planetaria dipende da massa stellare, metallicità e periodo orbitale.

Un campione osservato non è una fotografia neutra della popolazione galattica.



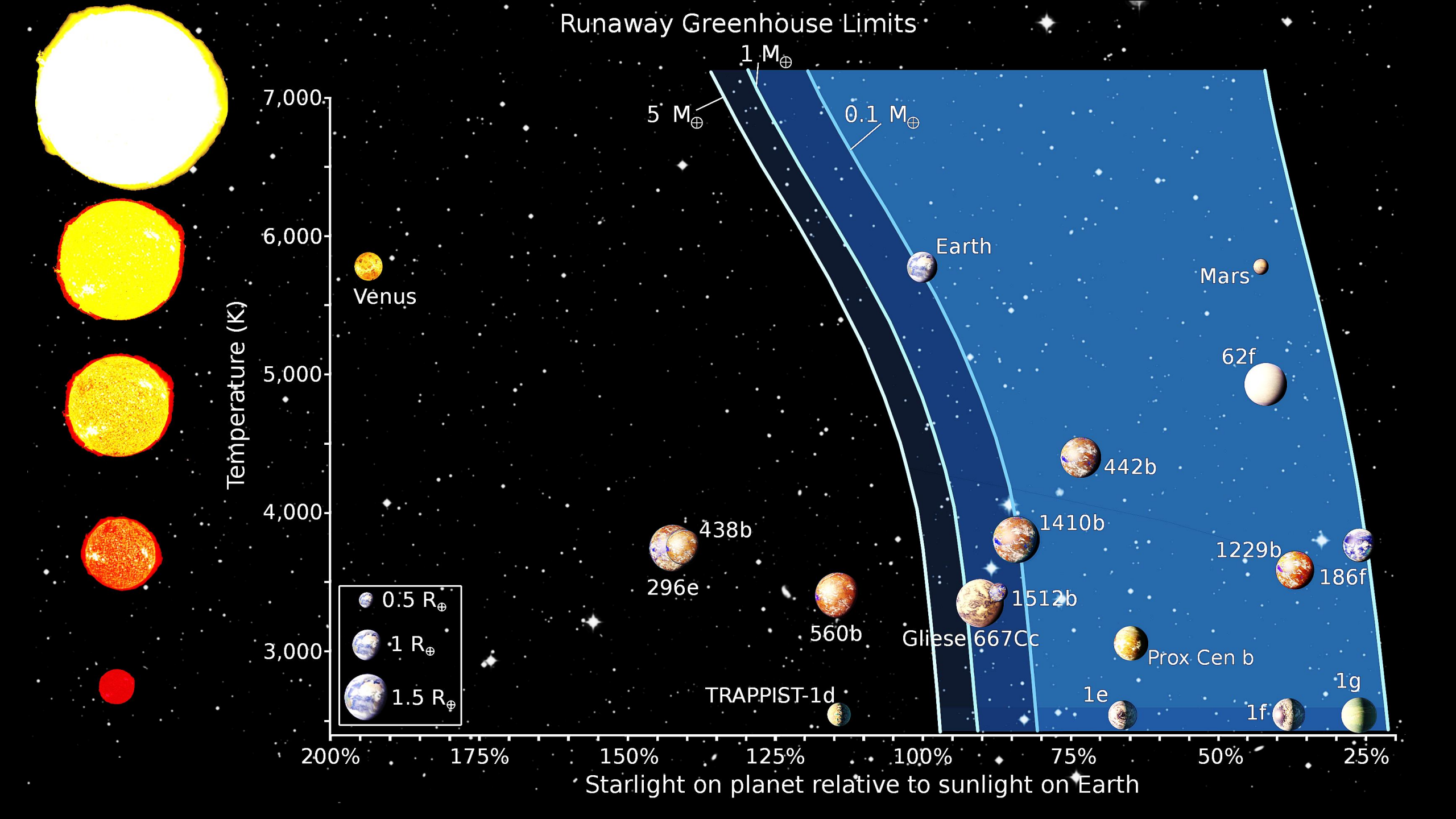
Obiettivi

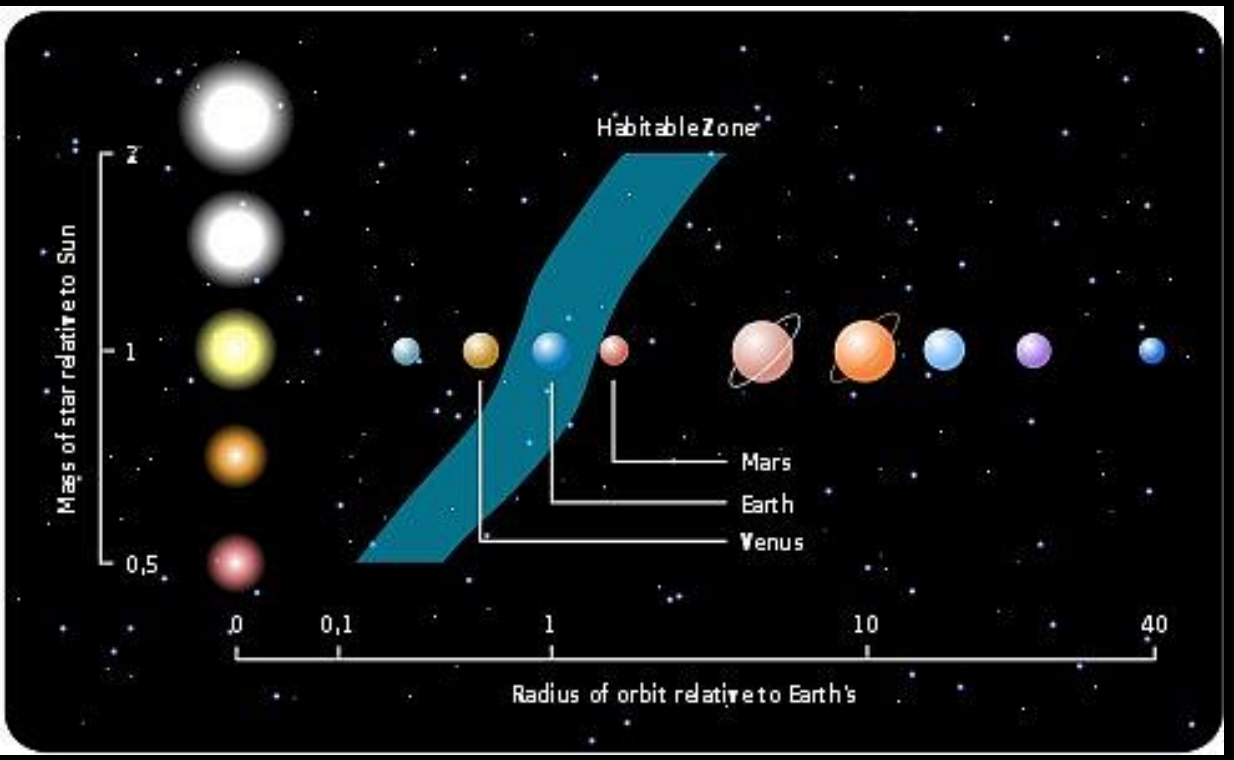
Capire come si scoprono gli esopianeti.

Distinguere famiglie fisiche e architetture planetarie.

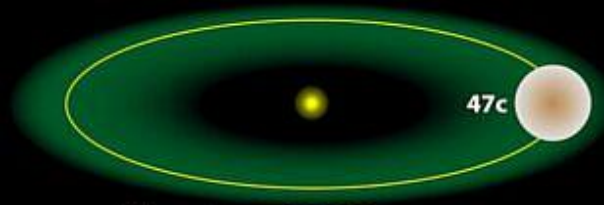
Esaminare abitabilità, atmosfere e prospettive osservative.



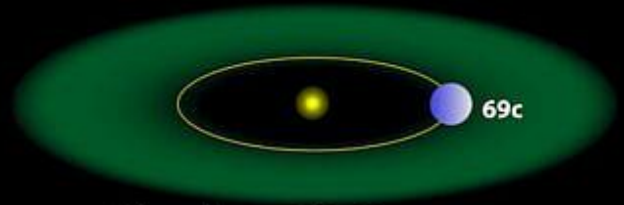

Runaway Greenhouse Limits
1 M⊕
5 M⊕
0.1 M⊕
7,000
6,000
5,000
4,000
3,000
Temperature (K)
Venus
Earth
Mars
62f
442b
1410b
1229b
186f
438b
296e
560b
1512b
Gliese 667Cc
Prox Cen b
TRAPPIST-1d
1e
1f
1g
0.5 R⊕
1 R⊕
1.5 R⊕
200%
175%
150%
125%
100%
75%
50%
25%
Starlight on planet relative to sunlight on Earth



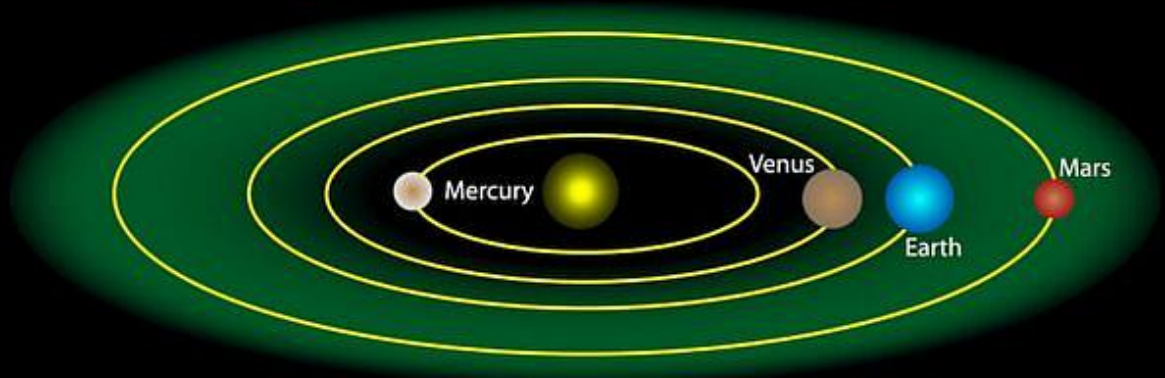
Habitable Zone



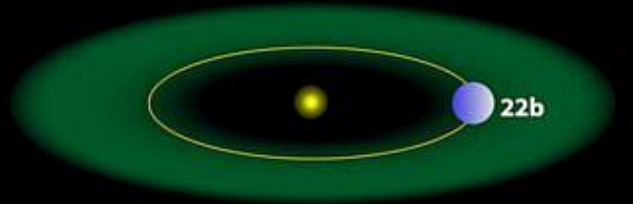
Kepler-47 System



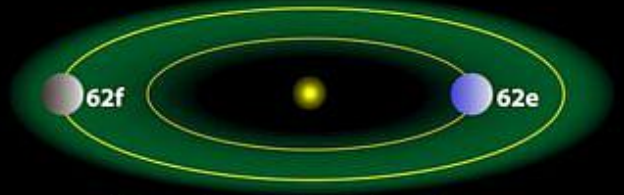
Kepler-69 System



Solar System



Kepler-22 System



Kepler-62 System

Metodi di scoperta

Transiti e velocità radiale dominano il campione noto.

Astrometria, microlensing, timing e imaging diretto coprono regimi complementari.

Ogni metodo misura un effetto indiretto o attenua il bagliore della stella.



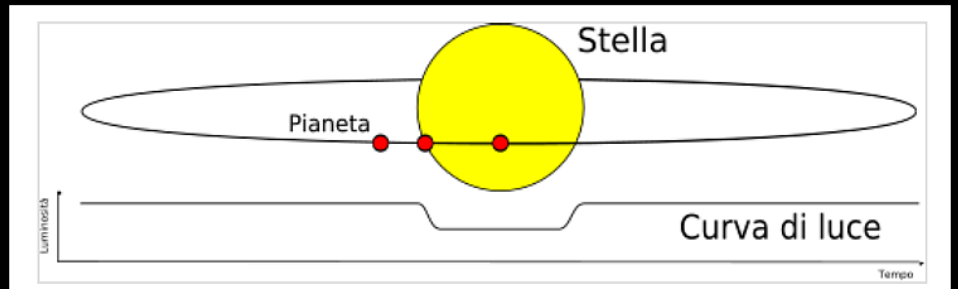
Metodo del transito

Un piccolo calo di luce

Il pianeta passa davanti al disco stellare lungo la linea di vista.

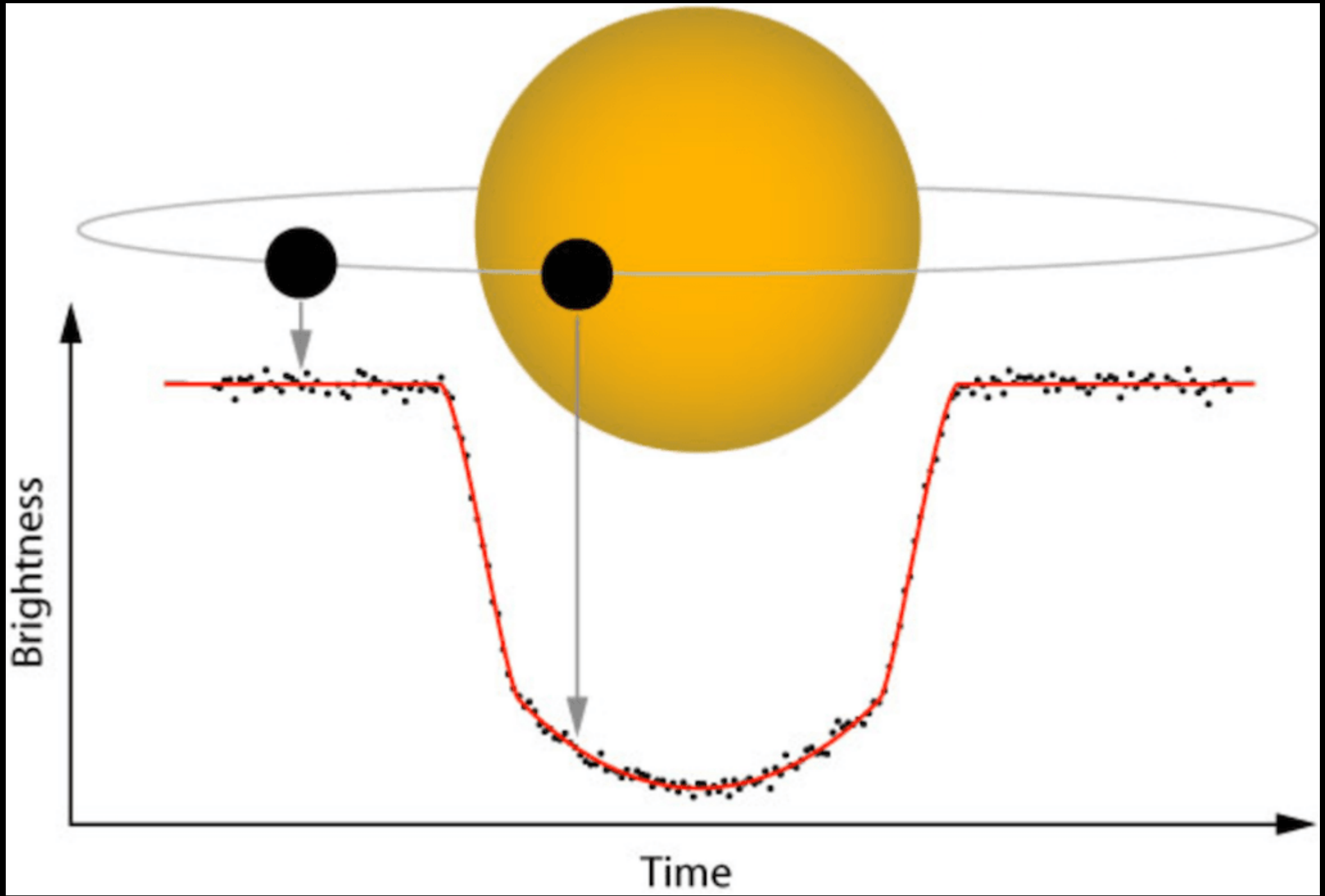
La profondità approssimata è delta F/F circa (Rp/Rs)^2.

Transiti periodici forniscono periodo orbitale, raggio relativo e geometria dell'orbita.



Transito di un pianeta sulla sua stella. In basso il grafico della curva di luce.

La variazione del tempo di transito (abbreviata **TTV**, dall'inglese ***Transit-timing variation***) è un metodo per rilevare pianeti extrasolari osservando le variazioni dei tempi di un transito. Ciò fornisce un metodo estremamente sensibile in grado di rilevare pianeti aggiuntivi nel sistema con masse potenzialmente piccole come quella della Terra. In sistemi planetari numerosi, l'attrazione gravitazionale reciproca dei pianeti fa sì che un pianeta acceleri e un altro pianeta deceleri mentre compie la sua orbita, l'accelerazione fa cambiare il periodo orbitale di ogni pianeta. Il rilevamento di questo effetto misurando il cambiamento è noto come variazioni dei tempi di transito. L'analisi della "variazione temporale", se esiste, permette quindi di rilevare la presenza di un pianeta non transitante in un sistema dove c'è almeno un pianeta che transita davanti alla propria stella.


Brightness
Time

Curva di luce

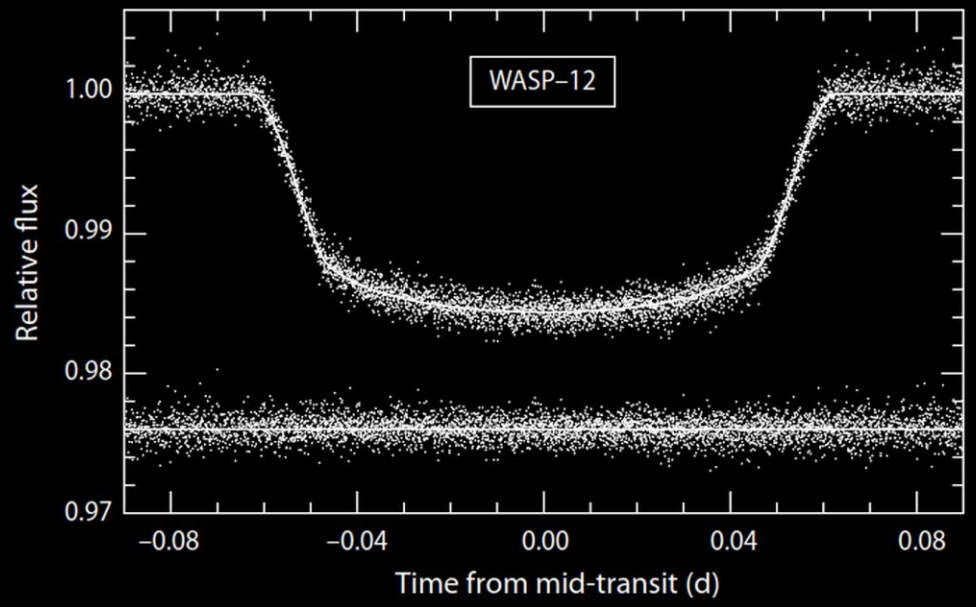
Metodo dei transiti

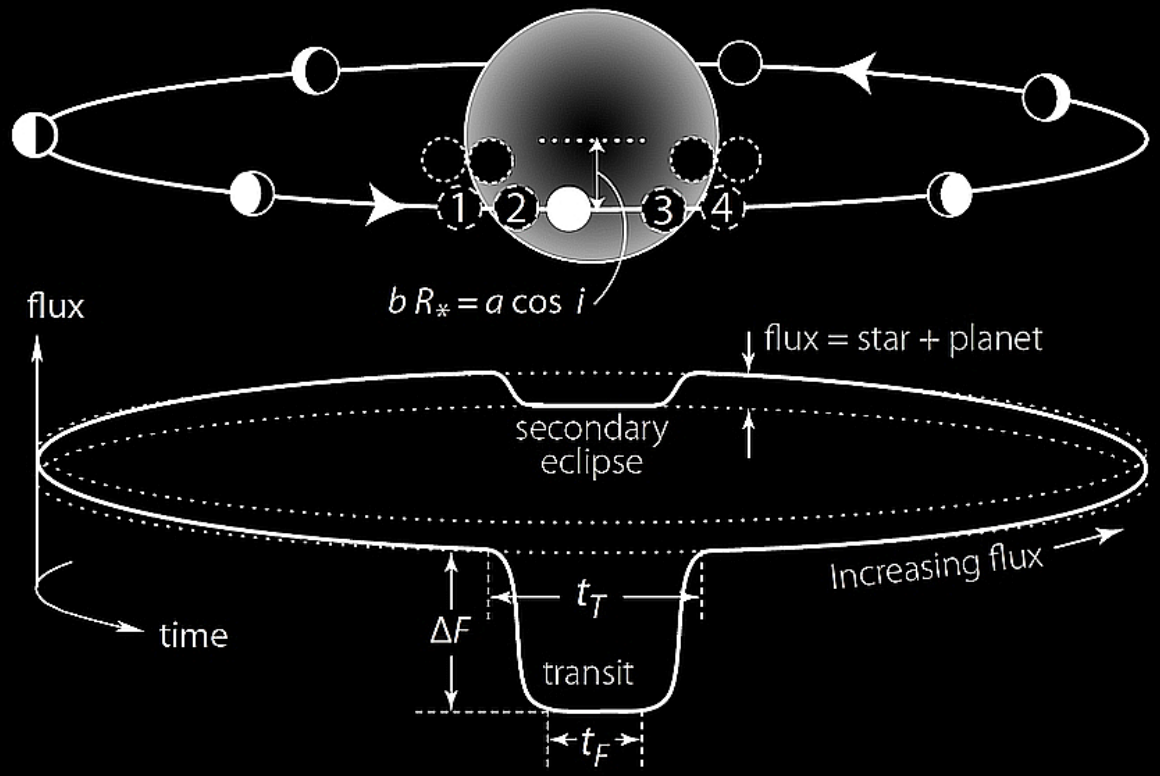
Dal segnale ai parametri

La profondità misura soprattutto il rapporto fra raggio planetario e stellare.

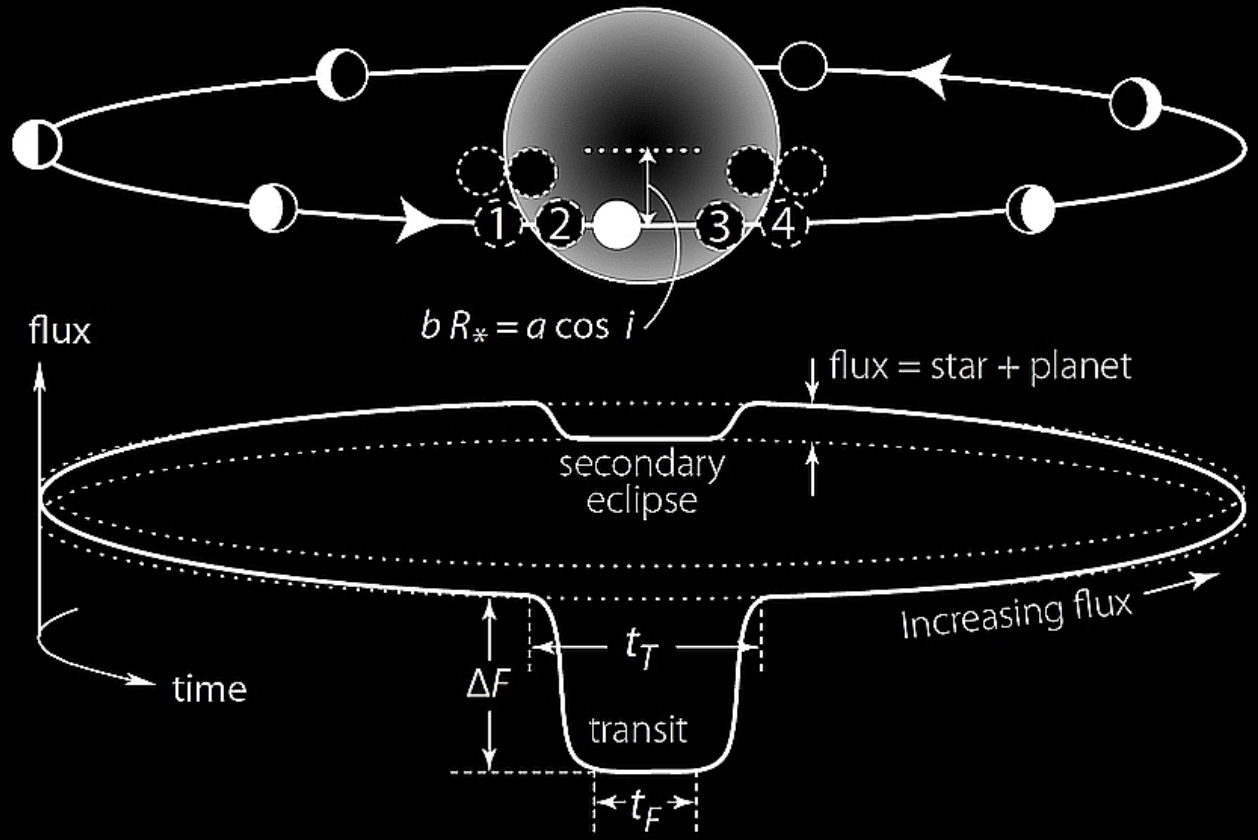
Durata e forma del transito vincolano inclinazione, impatto e densità stellare.

Rumore strumentale e attività stellare richiedono validazione e modellazione accurata.





Metodo dei transiti

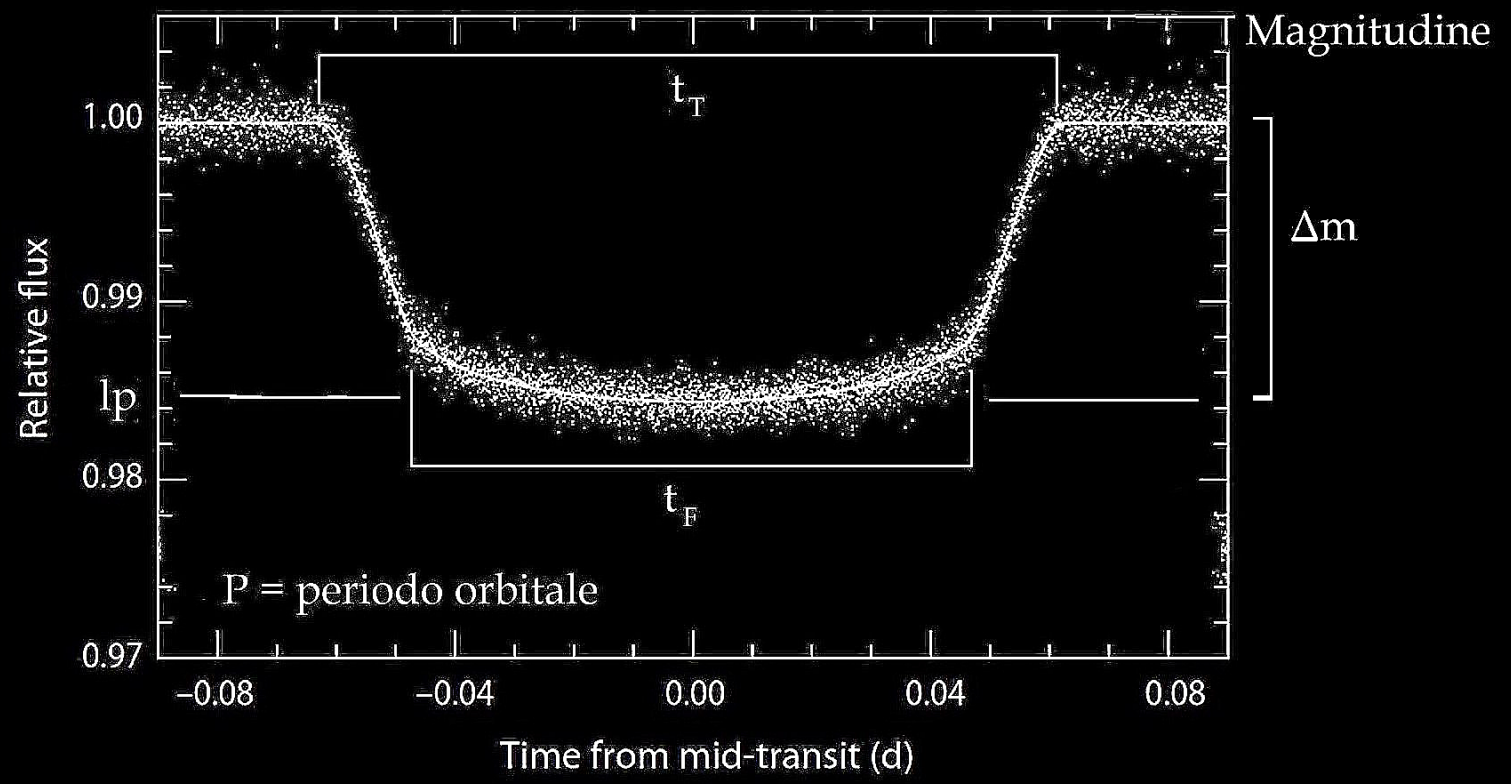


$$\Delta F = \left(\frac{R_p}{R_s}\right)^2$$

$$t_T = \frac{P}{\pi}\arcsin\left[\frac{R_s}{a}\left(\frac{[1+(R_p/R_s)]^2 - [(a/R_s)\cos i]^2}{1-\cos^2 i}\right)^{1/2}\right]$$

$$t_F = \frac{P}{\pi}\arcsin\left[\frac{R_s}{a}\left(\frac{[1-(R_p/R_s)]^2 - [(a/R_s)\cos i]^2}{1-\cos^2 i}\right)^{1/2}\right]$$

Metodo dei transiti



$$\begin{cases} G1 = \left(\frac{105 - 49 \cdot u}{105 - 57 \cdot u}\right) \cdot \frac{\pi^2}{4 \cdot \sqrt{(1 - lp)}} \cdot \frac{1}{P^2} \cdot (t_T^2 - t_F^2) \\ G2 = G1 \cdot \left(1 + \sqrt{(1 - lp)}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{P} \cdot t_F\right)^2 \end{cases}$$

(Gaspani, 2026)

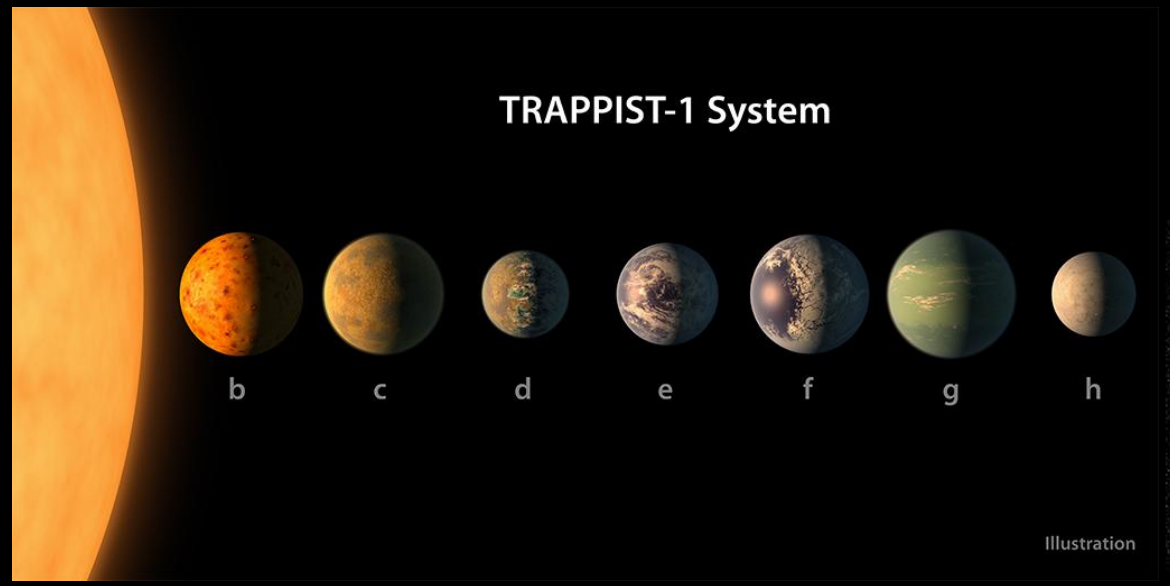
Metodo dei transiti

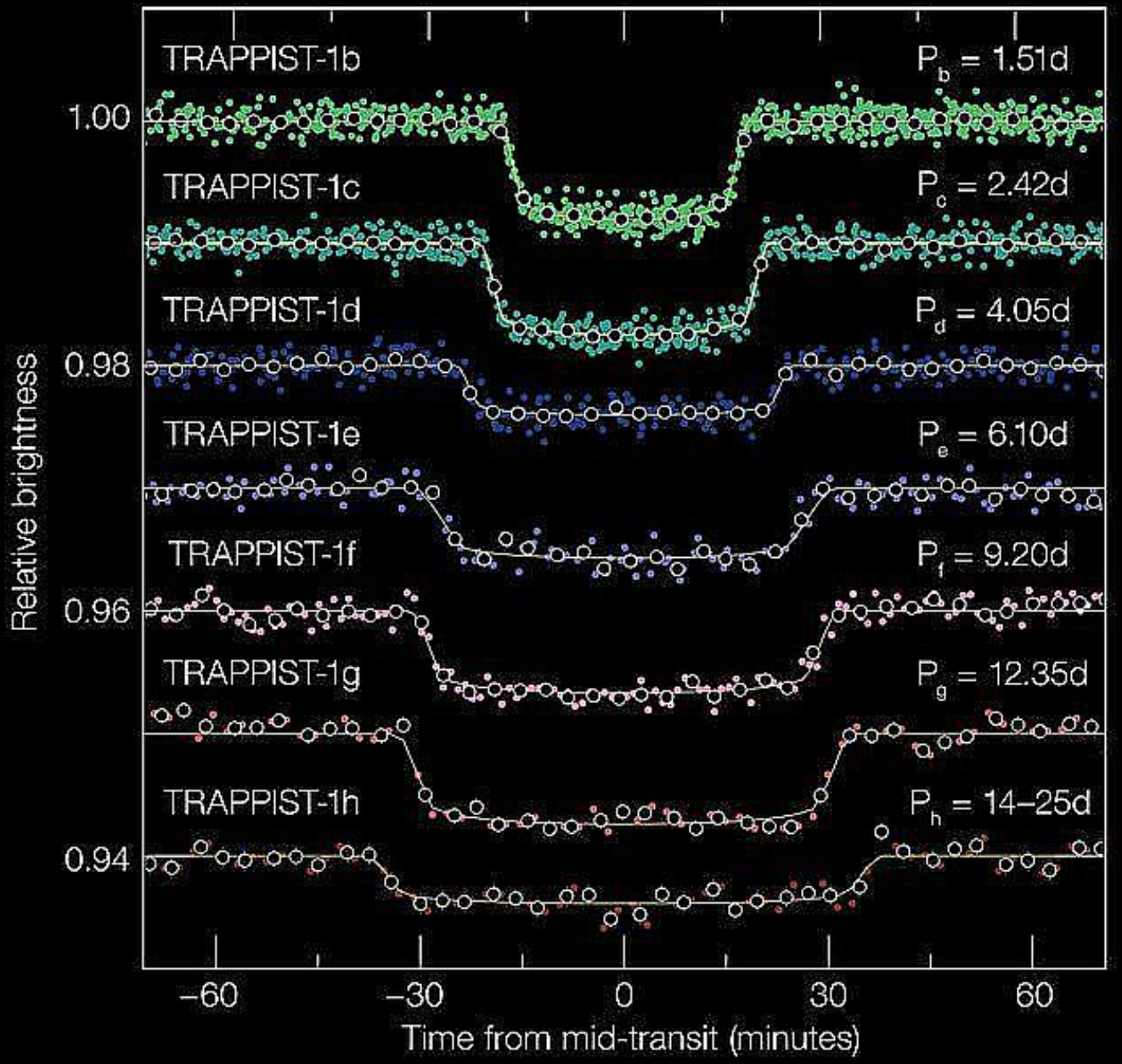
da cui:

$$
\begin{cases}
|i| = \operatorname{atan}\left(\dfrac{1}{\sqrt{G2}}\right) & \text{(inclinazione dell'orbita)} \\
r^* = \sqrt{\dfrac{G1}{1+G2}} & \text{(raggio frazionale della stella } (R^*/a) \\
 & \text{(a = raggio dell'orbita)} \\
r_p = \sqrt{(1-lp)} \cdot r^* & \text{(raggio frazionale } (Rp/a) \text{ del pianeta} \\
b = \sqrt{\dfrac{G2}{G1}} & \text{("impact parameter)}
\end{cases}
$$

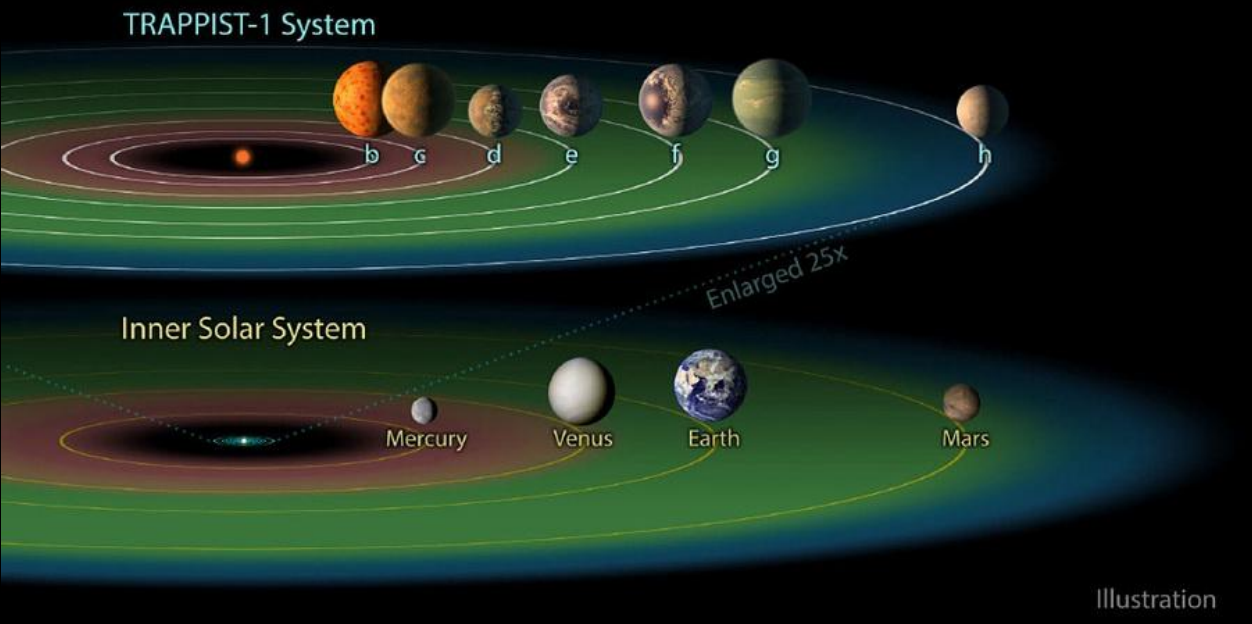
(Gaspani, 2026)

Metodo dei transiti





Metodo dei transiti



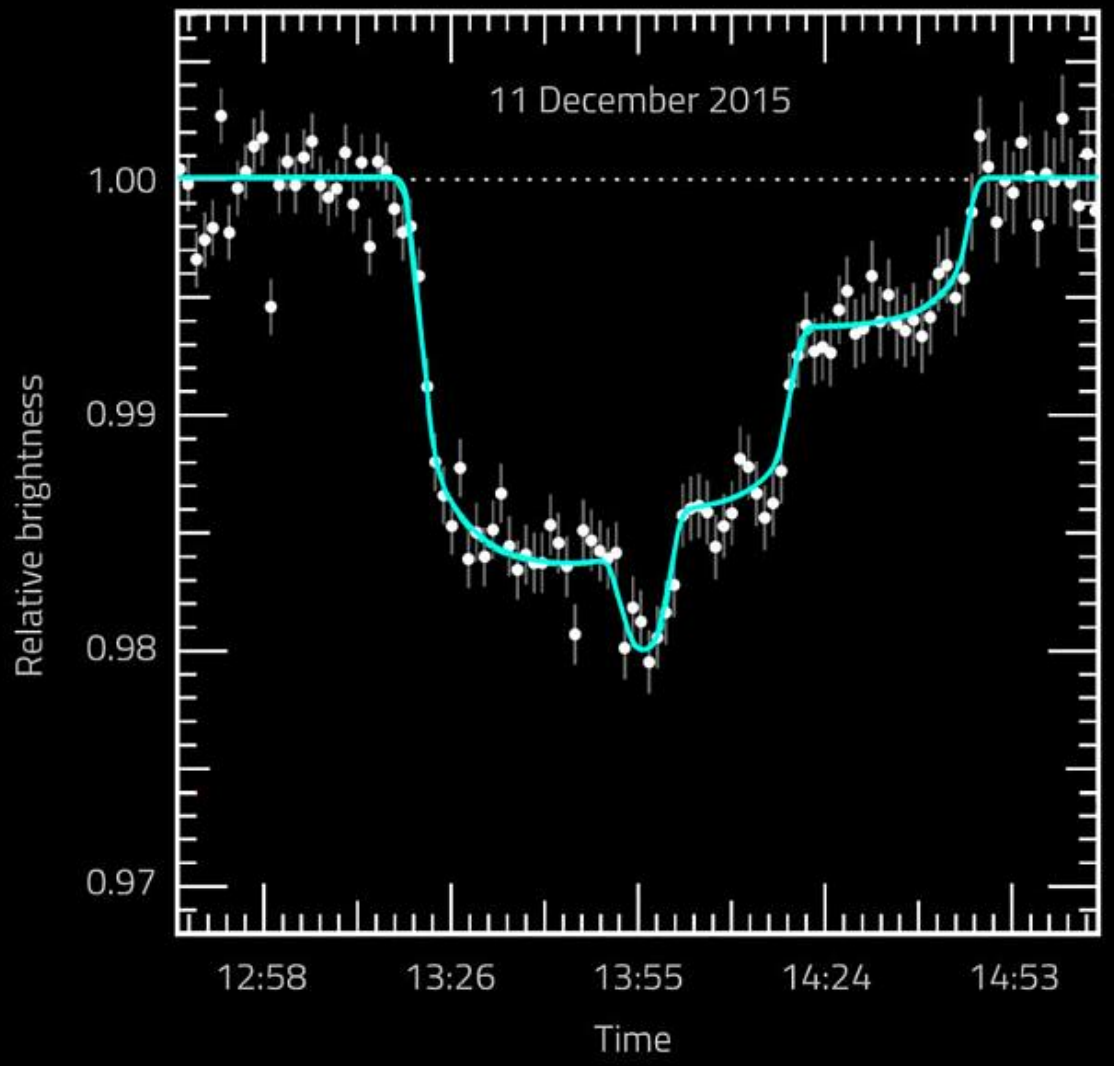


Figura 1: Il Grafico mostra la variazione di luminosità della nana rossa TRAPPIST-1, causato da tre esopianeti che transitano in rapida successione di fronte alla stella.

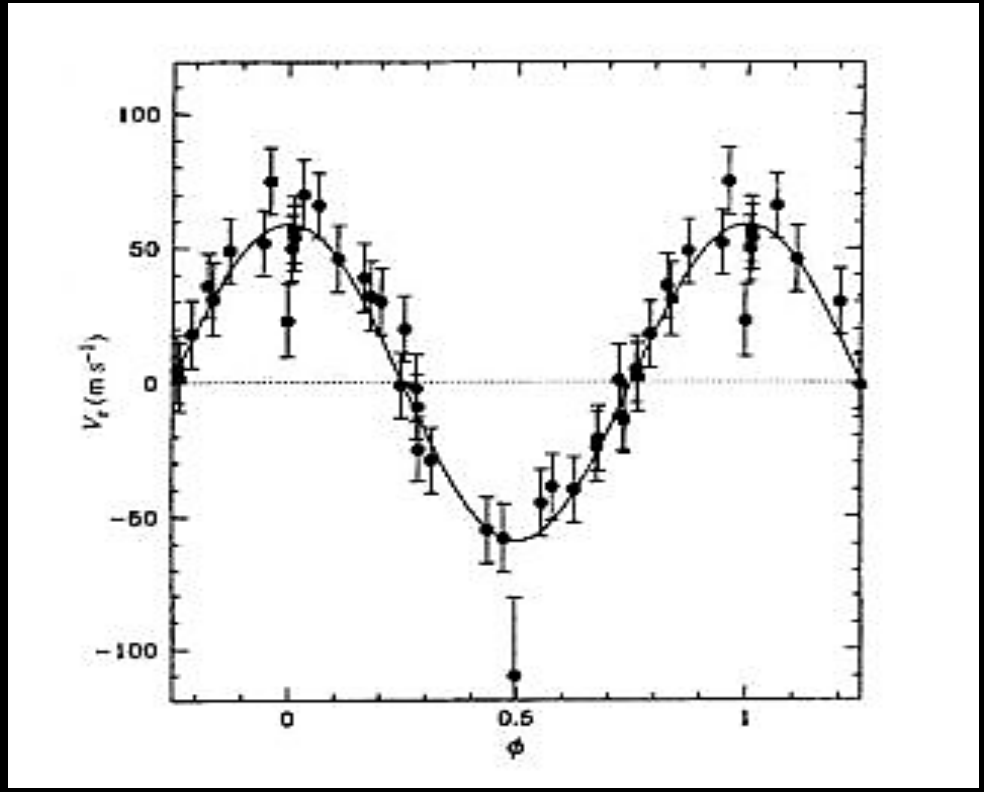
Velocità radiale

L’oscillazione Doppler

Pianeta e stella orbitano il loro comune baricentro.

La velocità della stella produce spostamenti periodici verso il rosso e il blu.

Si ottiene la massa minima Mp sin i, da combinare con il transito quando disponibile.



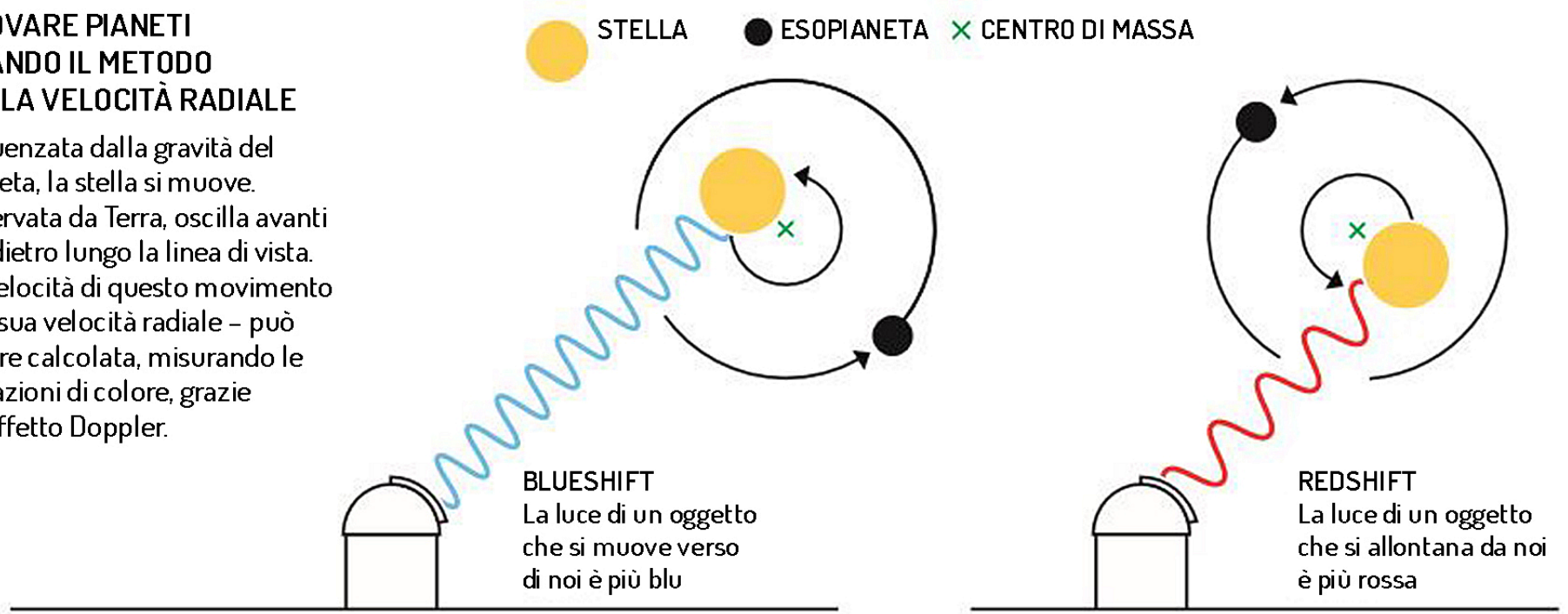
Metodo delle velocità radiali

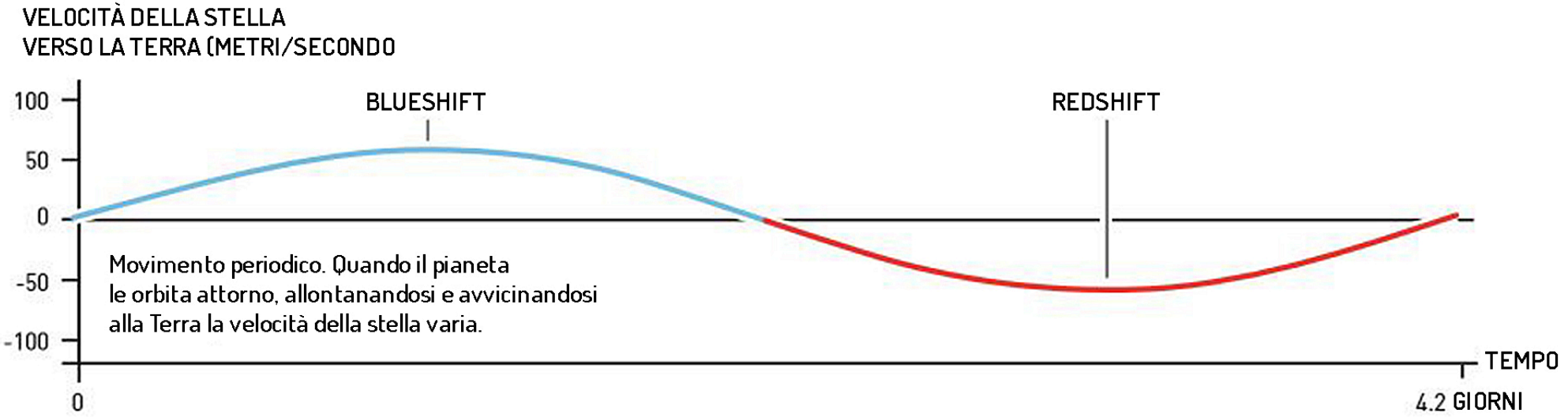
Una stella attorno a cui orbiti un pianeta può essere pensata come una binaria spettroscopica, di cui è visibile un solo spettro. In questa situazione le righe di emissione o di assorbimento non hanno più la lunghezza d'onda corrispondente ai campioni osservati in quiete in laboratorio, ma risultano spostate per effetto Doppler verso il rosso o il blu, a seconda che la velocità sia positiva (allontanamento) o negativa (avvicinamento). Se l'orbita del pianeta è inclinata rispetto al piano tangente alla sfera celeste, nel punto in cui si osserva la stella, allora lo spostamento delle righe varia a seconda del valore della velocità e oscilla tra i valori estremi assunti dalla velocità radiale. Una volta ottenuti degli spettri ben distribuiti nel tempo, e dedotte da questi le velocità radiali ad ogni istante, si potrà costruire la curva di velocità radiale.

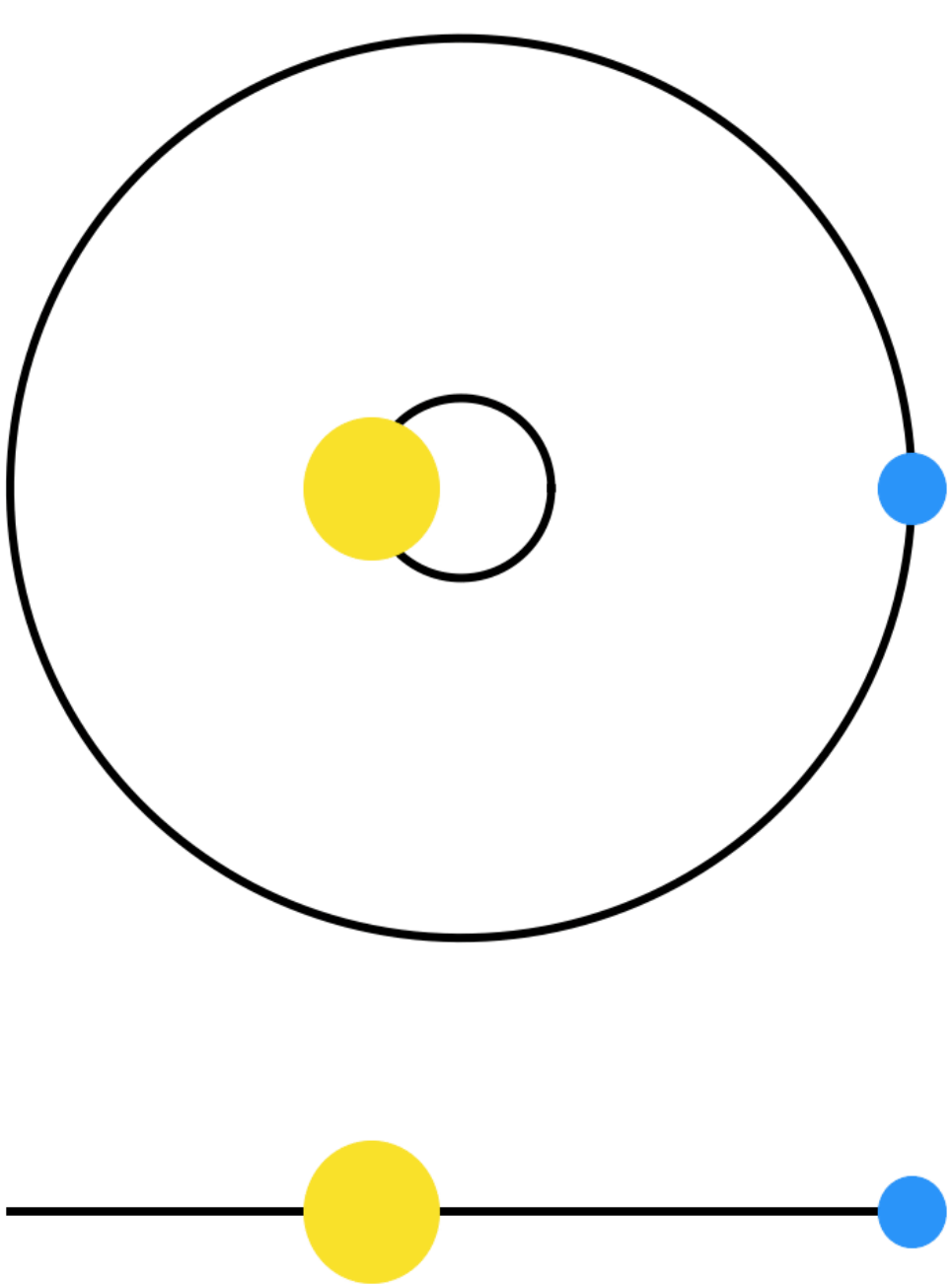
Questo è il metodo che ha fornito la maggior parte dei pianeti scoperti durante la prima fase delle ricerche. Questo metodo è in grado di individuare facilmente pianeti molto vicini alla loro stella, ma per riuscire a rilevare pianeti aventi un lungo periodo orbitale, come ad esempio Giove, sono necessarie osservazioni che coprano molti anni, affinché il pianeta transiti due o più volte davanti alla stella. La tecnica è limitata alle stelle più brillanti della quindicesima magnitudine, poiché anche con i più grandi telescopi del mondo è difficile ottenere spettri di buona qualità che permettano di misurare queste piccole variazioni di velocità.

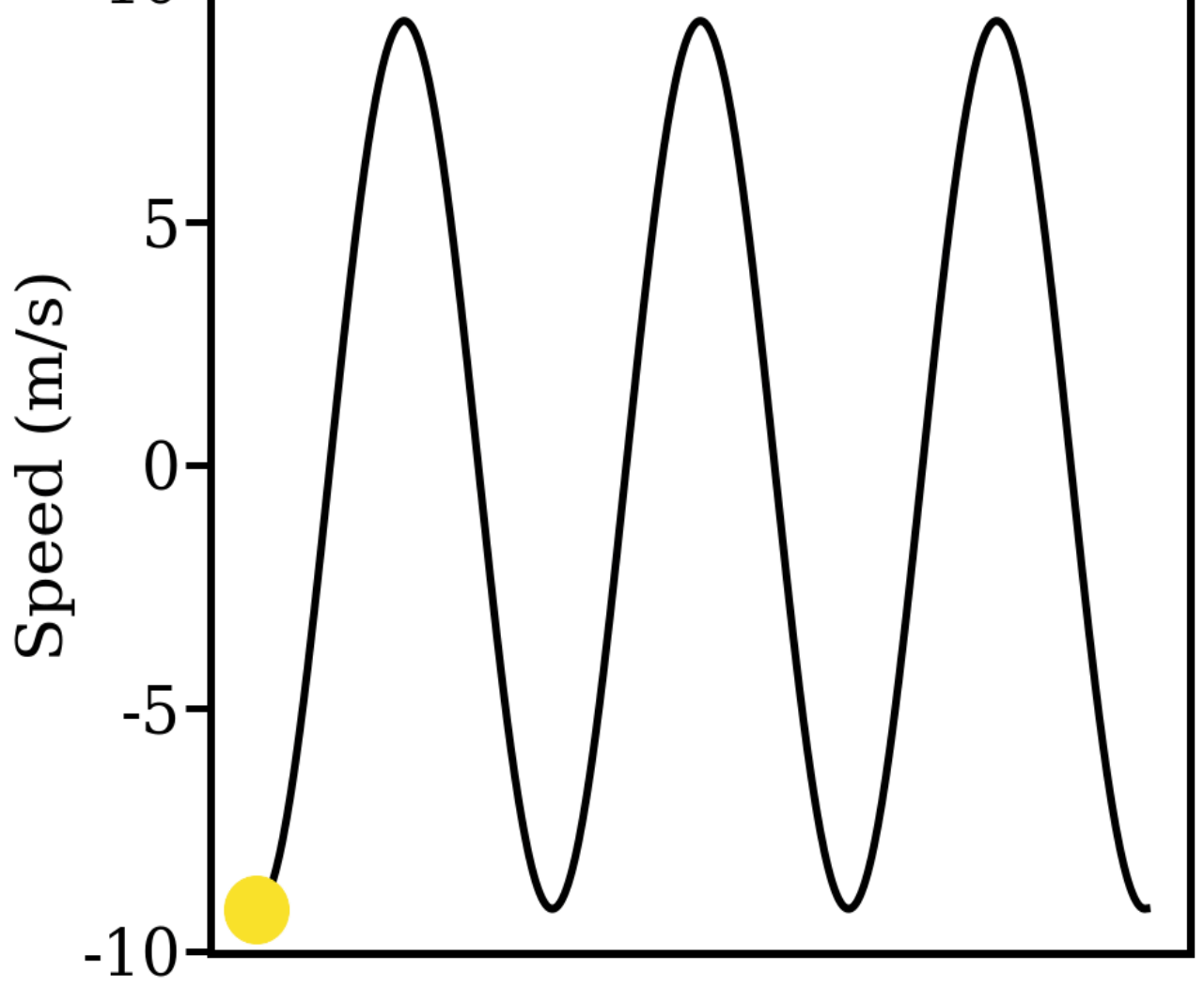
TROVARE PIANETI USANDO IL METODO DELLA VELOCITÀ RADIALE

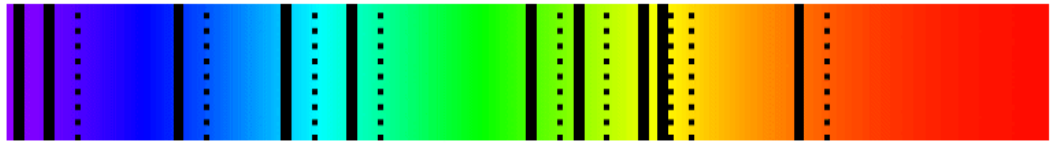
Influenzata dalla gravità del pianeta, la stella si muove. Osservata da Terra, oscilla avanti e indietro lungo la linea di vista. La velocità di questo movimento – la sua velocità radiale – può essere calcolata, misurando le variazioni di colore, grazie all'effetto Doppler.








Speed (m/s)
10
5
0
-5
-10



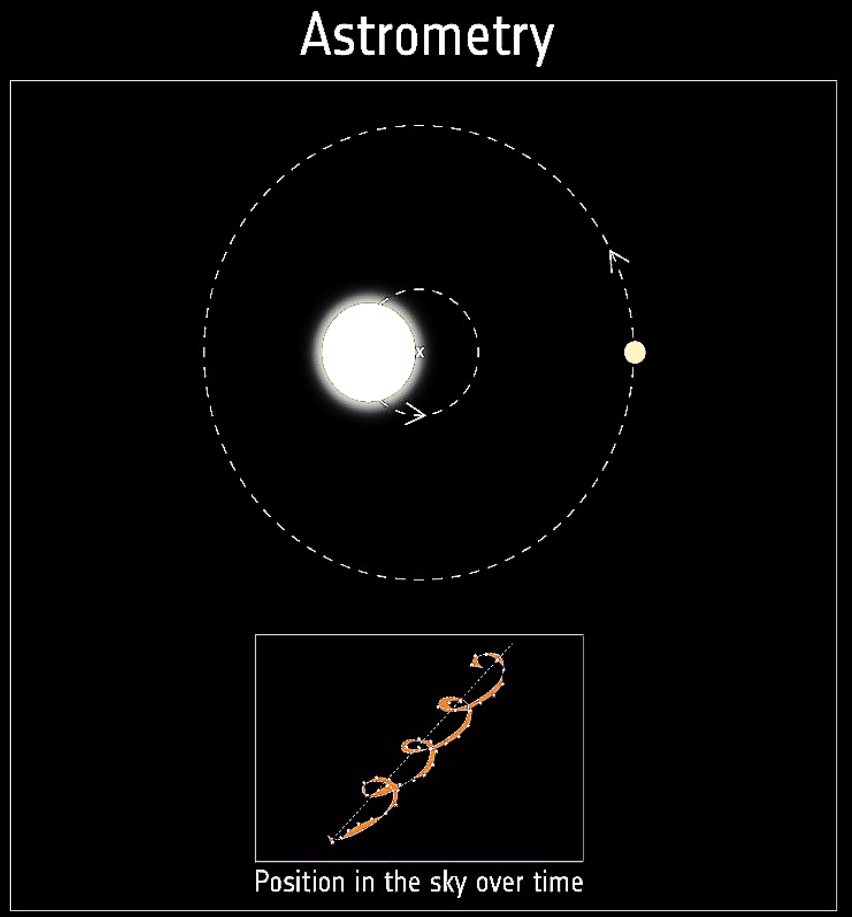
Astrometria

Misurare la posizione

L’astrometria cerca il moto apparente della stella sul piano del cielo.

È più sensibile a pianeti massicci e relativamente lontani dalla stella.

Insieme alla velocità radiale può ricostruire massa reale e orientazione orbitale.



Astrometria

Il primo metodo storicamente usato è l'astrometrico i cui primi tentativi risalgono al 1943. Con questo metodo sono stati individuati molti candidati, ma nessuno è stato confermato come pianeta, costringendo la maggior parte degli astronomi a rinunciare al suo utilizzo, a favore di altri metodi. Il suo punto debole è dovuto al fatto che richiede una misura molto precisa del moto proprio di una stella: nel caso essa abbia un pianeta, il moto presenta piccole oscillazioni periodiche. Sfortunatamente queste sono così piccole che i migliori telescopi esistenti non possono produrre misure sicure. Inoltre le misure sono più facili quando le orbite dei pianeti sono perpendicolari alla nostra linea di vista (cioè sono viste di faccia invece che di taglio), cosa che rende impossibile l'uso degli altri metodi per confermare l'osservazione.

Nel maggio del 2009, questo metodo ha portato all'individuazione di VB 10b la cui reale esistenza è ora da verificare anche con altri metodi.

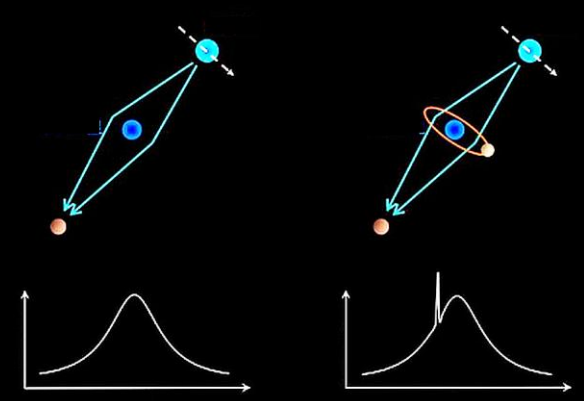
Microlensing

Una lente gravitazionale

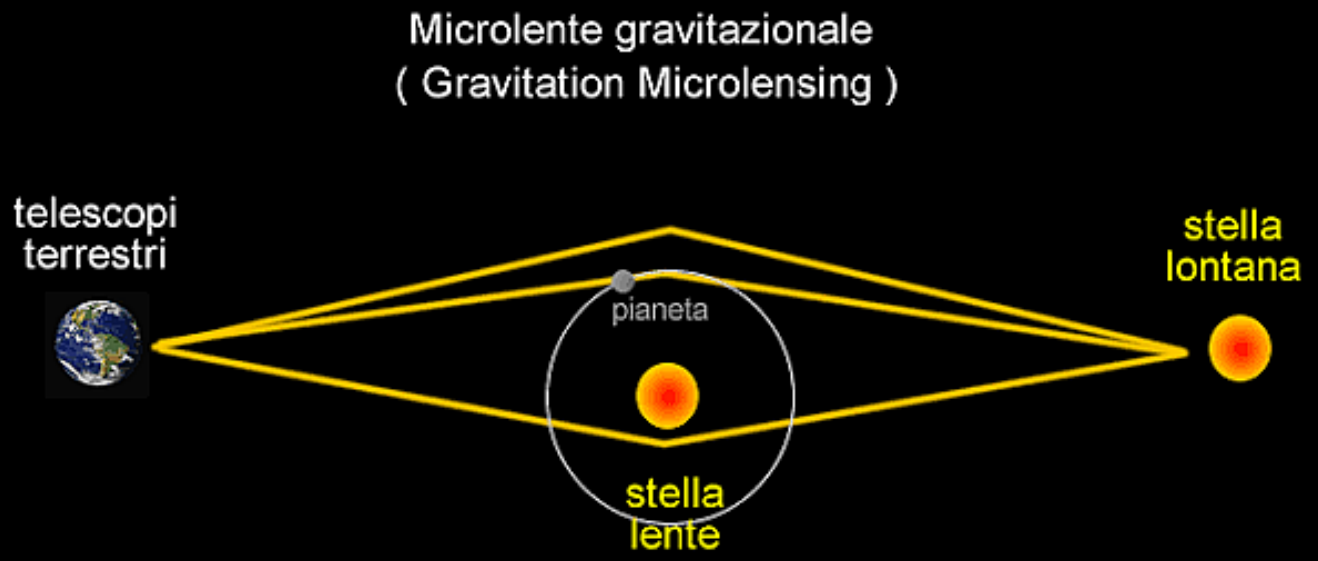
Una stella in primo piano amplifica temporaneamente la luce di una sorgente più lontana.

Un pianeta attorno alla lente può aggiungere una perturbazione caratteristica.

È efficace anche per pianeti freddi e distanti, ma gli eventi raramente si ripetono.



La curva di luce di un evento di microlensing senza (sx) e con un pianeta (dx) orbitante attorno alla stella. Si noti il picco che individua il pianeta.



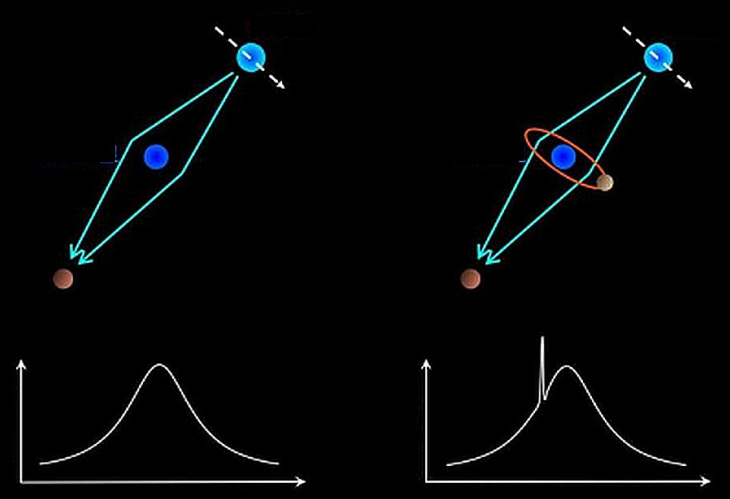
Microlente gravitazionale

L'effetto denominato microlente gravitazionale per la ricerca astronomica lo propose nel 1986 Bohdan Paczyński della Princeton University e nel 1991 suggerì che poteva essere utilizzato anche per cercare pianeti. I primi successi si ebbero nel 2002 quando un gruppo di astronomi polacchi (Andrzej Udalski, Marcin Kubiak e Michal Szymanski da Varsavia e il polacco-americano Bohdan Paczynski della Princeton) perfezionarono un metodo che poteva essere utilizzato nell'ambito del progetto OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment), finanziato da NASA e NSF. In un mese di lavoro scoprirono 46 oggetti, molti dei quali potevano essere pianeti.

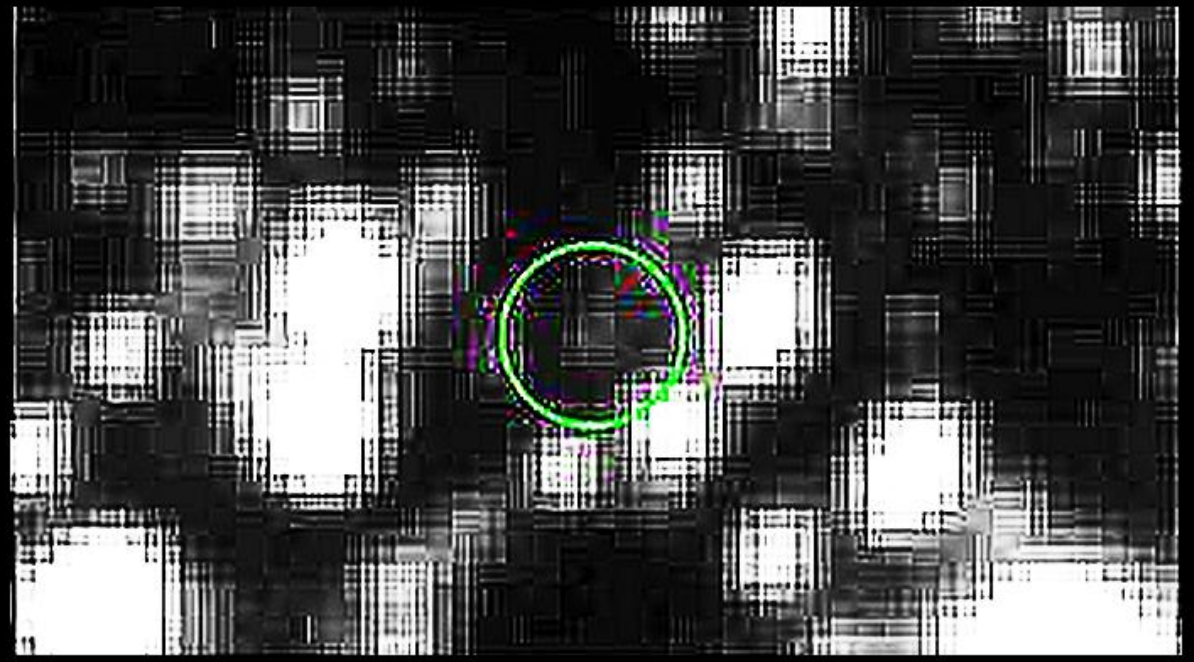
L'effetto avviene anche quando i campi gravitazionali di un pianeta e della sua stella cooperano per focalizzare la luce di una stella lontana. Per realizzarsi occorre che il pianeta e il suo sole e la stella lontana si trovino esattamente in linea prospettica con l'osservatore. Poiché un allineamento perfetto capita molto di rado (e l'effetto è molto piccolo da cui il nome *micro*) occorre tenere sotto sorveglianza un grande numero di stelle. Il suo studio funziona al meglio inquadrando stelle che si trovano tra noi e il nucleo galattico, in quanto si ha a disposizione un gran numero di stelle sullo sfondo.

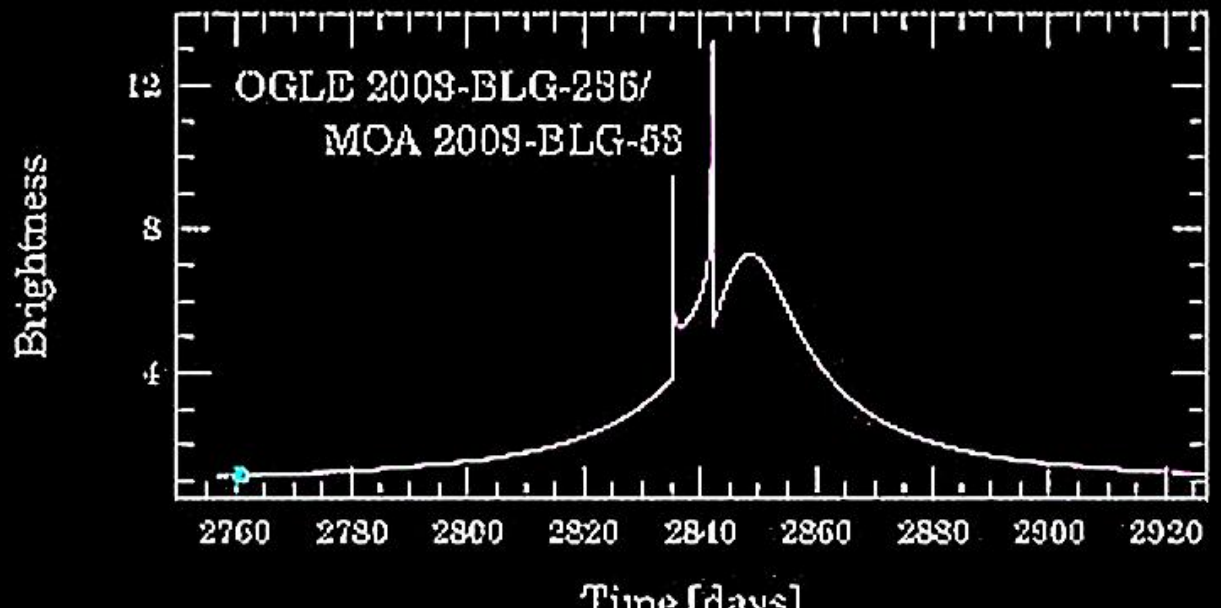
Gli **eventi-lente** sono brevi, solo alcuni giorni o settimane, perché i corpi osservati e la Terra si muovono l'una rispetto all'altra. Comunque sono stati misurati più di 1000 eventi-lente negli ultimi dieci anni.

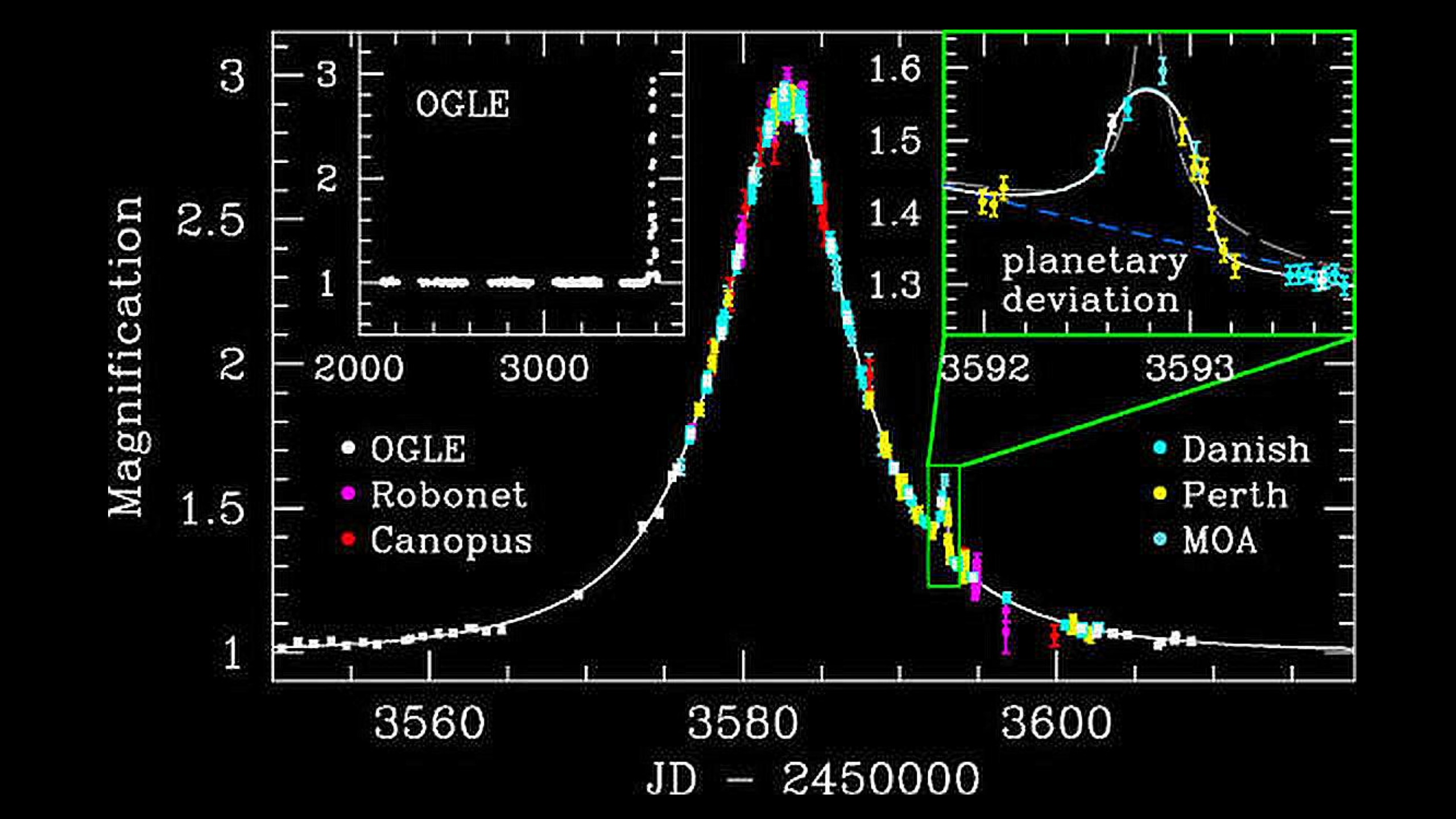
Questo metodo permette di scoprire pianeti di massa equiparabile a quella terrestre usando le tecnologie oggi disponibili, l'osservazione non può essere ripetuta poiché l'allineamento necessario capita raramente. La maggior parte di stelle osservate con questo metodo dista migliaia di anni luce il che rende problematica la scoperta di tali pianeti con mezzi più tradizionali, però osservando con continuità un sufficiente numero di stelle si può avanzare una stima della loro frequenza nella nostra galassia.

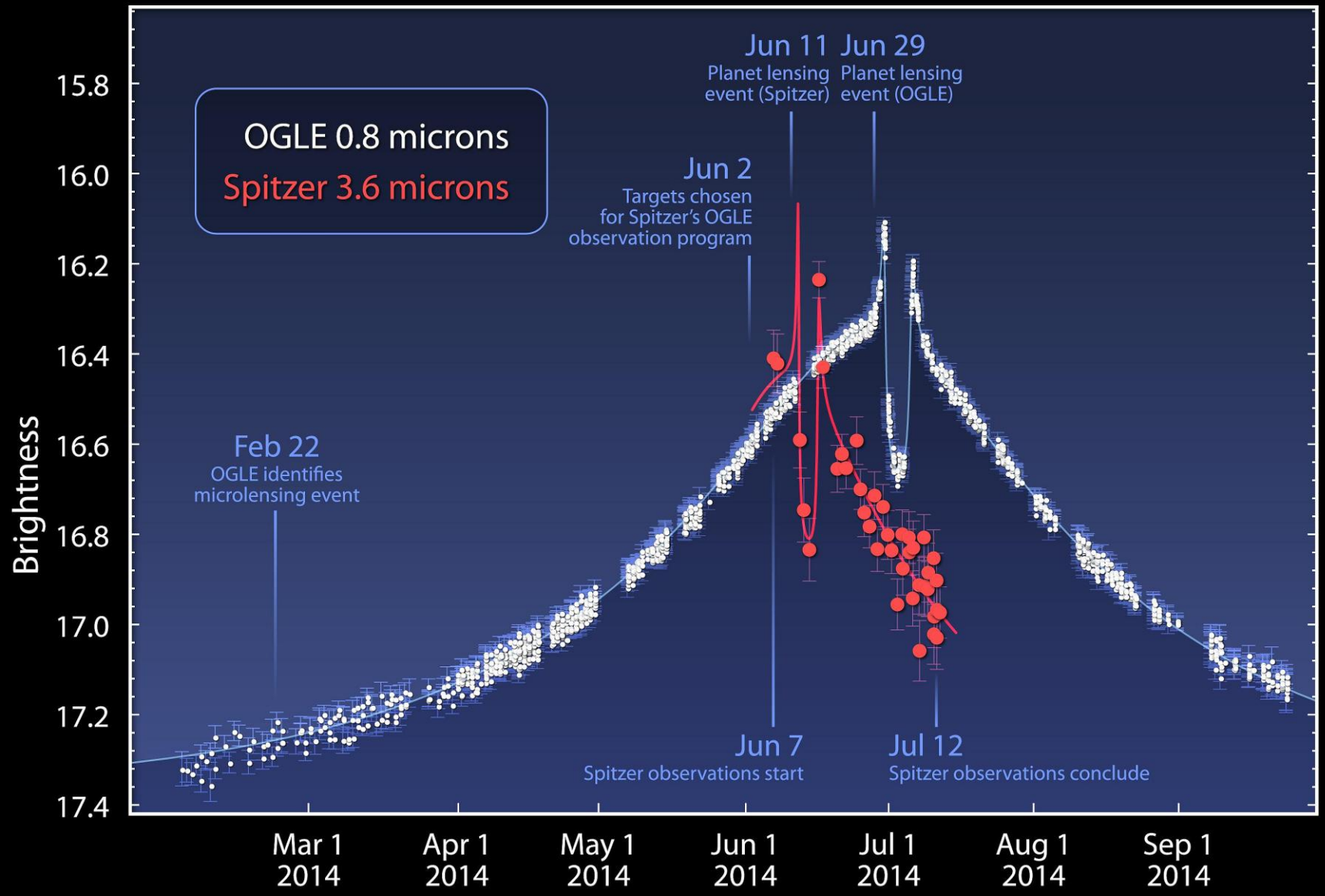


La curva di luce di un evento di microlensing senza (sx) e con un pianeta (dx) orbitante attorno alla stella. Si noti il picco che individua il pianeta.




OGLE 2009-BLG-266/
MOA 2009-BLG-68
Brightness
12
8
4
2760
2780
2800
2820
2840
2860
2880
2900
2920
Time [days]


Magnification
3
2.5
2
1.5
1
3560
3580
3600
JD − 2450000
OGLE
Robonet
Canopus
Danish
Perth
MOA
OGLE
2000
3000
planetary
deviation
3592
3593
1.6
1.5
1.4
1.3



Microlens Parallax Vector of OGLE-2014-BLG-0124L **Spitzer Space Telescope • IRAC**

NASA / JPL-Caltech / A. Udalski (Warsaw University Observatory) sig15-005

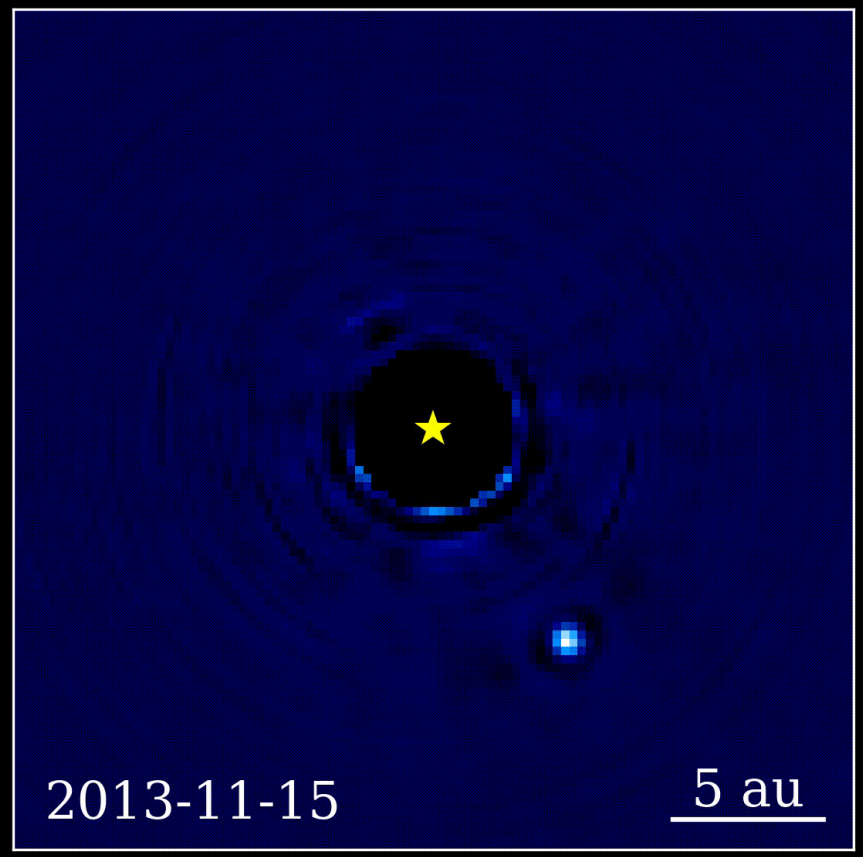
Imaging diretto

Vedere il pianeta

Il contrasto stella-pianeta è estremo, soprattutto nel visibile.

Coronografi e ottica adattiva attenuano la luce stellare e controllano le speckle.

La tecnica favorisce pianeti giovani, caldi e su orbite ampie.



Rilevamento diretto

L'individuazione di pianeti extrasolari mediante *imaging* diretto è resa molto difficile dal fatto che l'osservazione di tali corpi celesti è sovrastata dalla luce di ogni stella intorno a cui ruotano, la quale ovviamente offusca la debole luminosità riflessa dei pianeti.

È meno arduo ottenere immagini dirette quando il pianeta è particolarmente massivo (in genere più di quanto sia Giove) e la sua orbita è molto lontana dalla sua stella ma è abbastanza caldo da emettere radiazione infrarossa percepibile. Proprio per merito di quest'ultima proprietà si possono captare direttamente nell'infrarosso immagini di corpi catalogabili come pianeti.

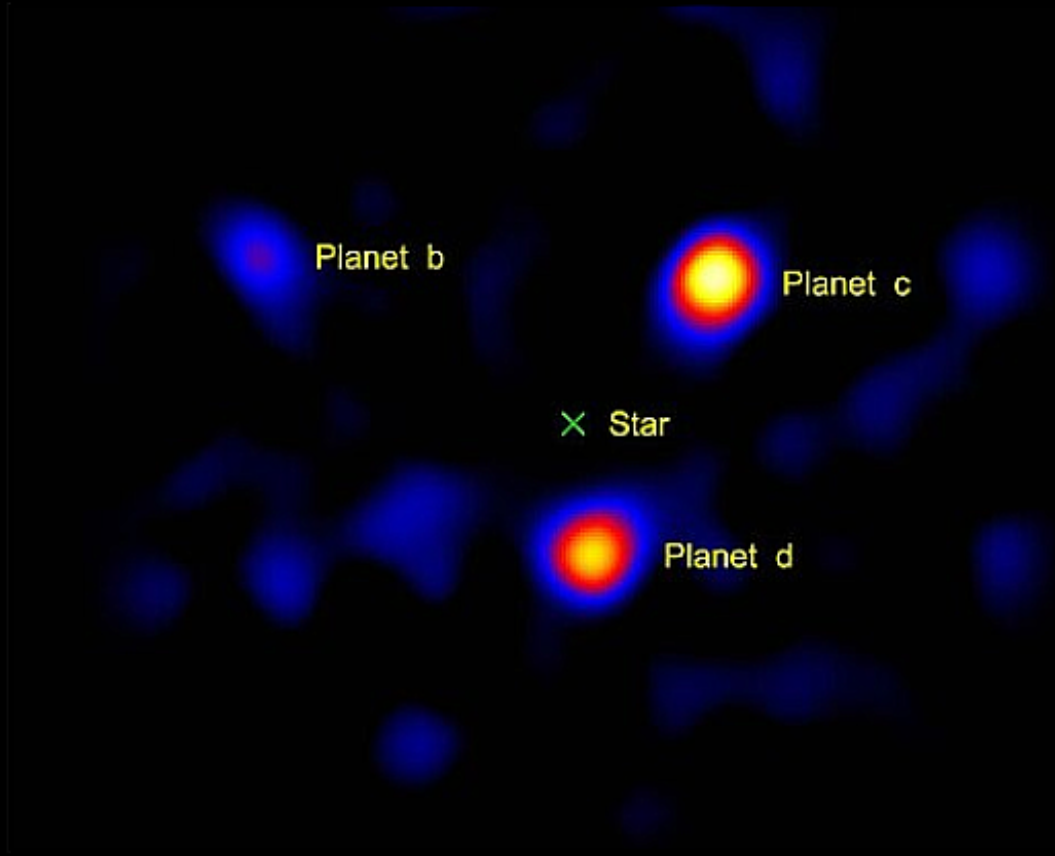
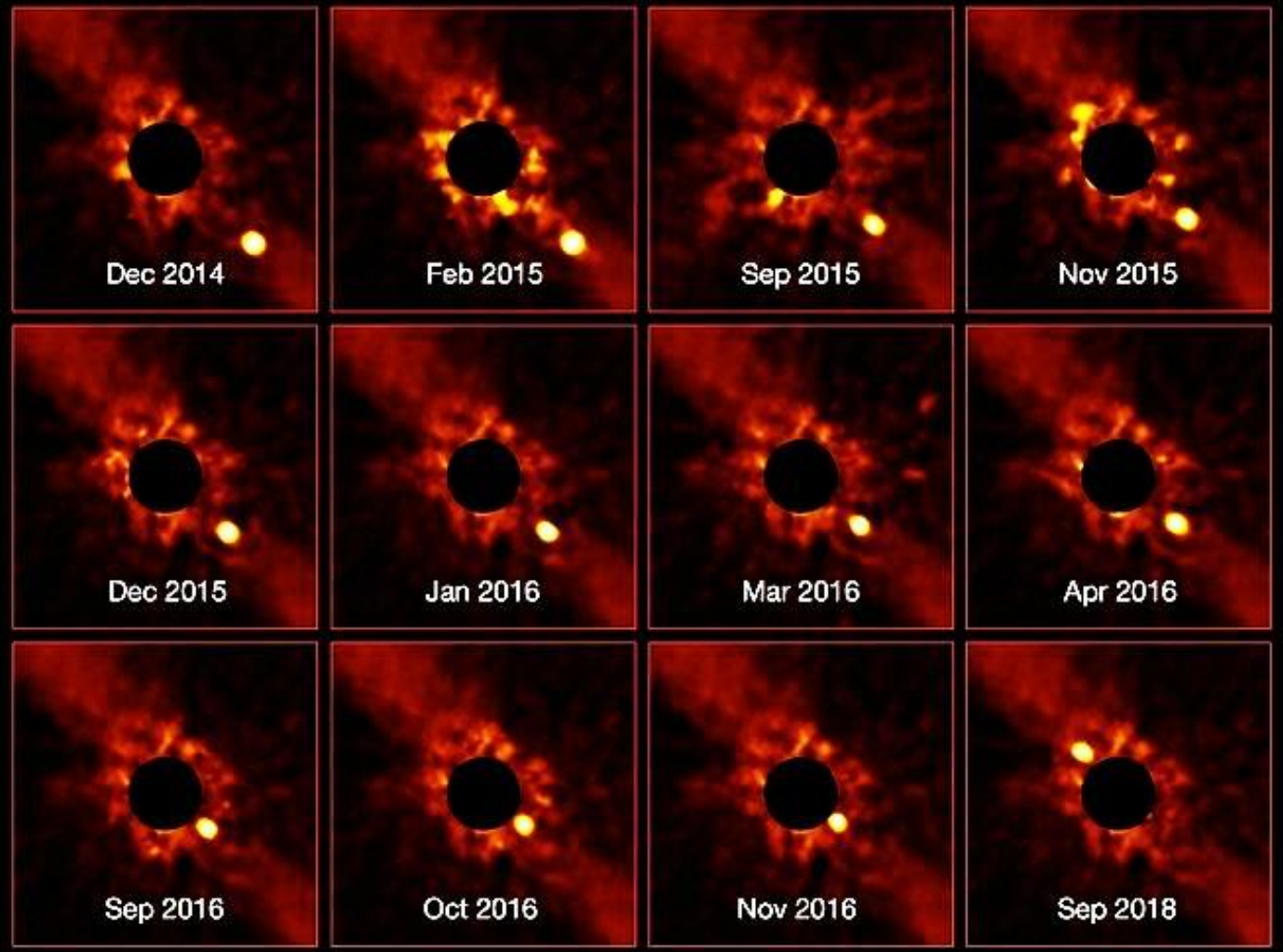
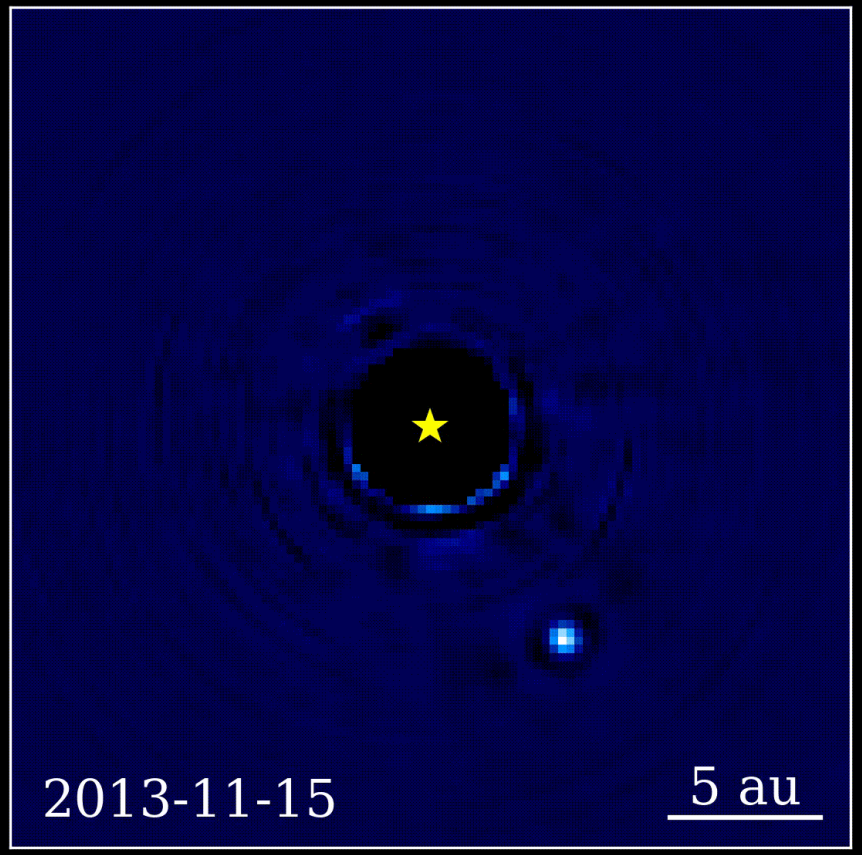


Immagine diretta di esopianeti attorno alla stella HR 8799, ottenuta con un coronografo a vortice su una porzione di 1,5 m del Telescopio Hale.





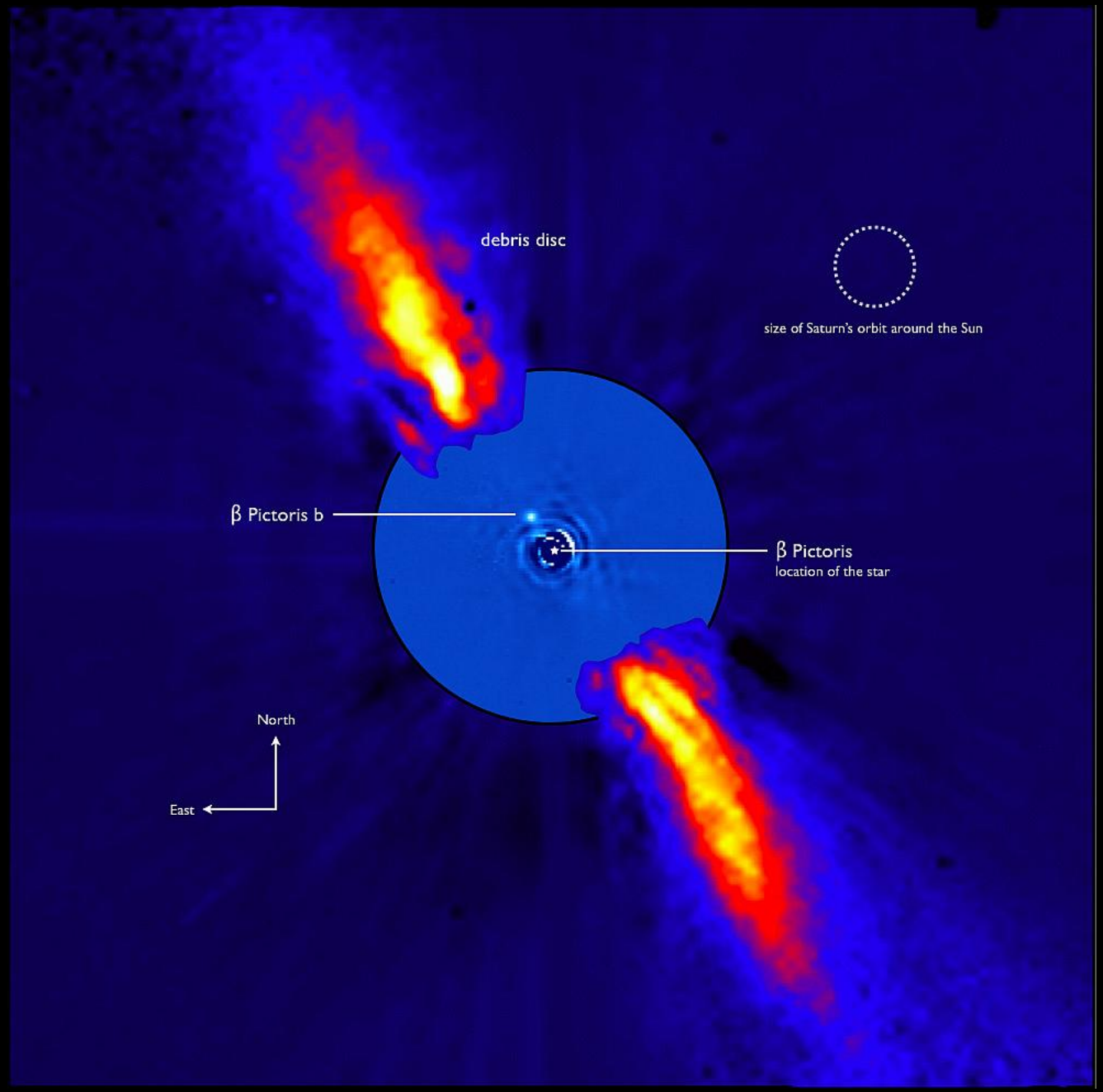
Beta Pictoris b

Il Very Large Telescope (VLT) dell'ESO ha catturato una serie di immagini senza precedenti che mostrano il passaggio dell'esopianeta Beta Pictoris b attorno alla sua stella madre. Questo giovane esopianeta massiccio fu inizialmente scoperto nel 2008 usando lo strumento NACO sul VLT. Lo stesso team scientifico ha monitorato l'esopianeta dalla fine del 2014 fino alla fine del 2016, usando lo strumento SPHERE (Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch) - un altro strumento sul VLT. Beta Pictoris b passò così vicino all'alone della stella che nessuno strumento riuscì a distinguerli l'uno dall'altro perché l'esopianeta si confondeva con l'immagine della stella. Quasi due anni dopo Beta Pictoris b è ora riemerso dall'aureola. Questa ricomparsa è stata nuovamente ripresa da SPHERE. La serie completa di immagini, con il bagliore luminoso della stella Beta Pictoris bloccato, è stata compilata per creare uno straordinario ed unico time-lapse dell'orbita di lungo periodo di Beta Pictoris b.

prospetto del sistema di Beta Pictoris:

Pianeta	Tipo	Massa	Raggio	Periodo orb.	Sem. maggiore	Eccentricità	Incl. orbita
c	Gigante gassoso	8,89 ±0,75 M_J	1,2 r_J	3,36 anni	2,68 UA	0,32	89,95°
Cintura asteroidale	—	—		—	6,4 UA	—	~89°
b	Gigante gassoso	$11{,}9\ ^{+2{,}93}_{-3{,}04}\ M_J$	1,65 r_J	21,1 anni	9,93 ±3 UA	0,103	89°
Cintura secondaria		—	—	—	30-130 UA	—	89 ± 1°
Disco esterno		—	—	—	fino a 1835 UA	—	89 ± 1°

Beta Pictoris



Discovery of radio emission from the exoplanet β Pictoris b

K. N. Ortiz Ceballos[1*], E. Berger[1], Y. Cendes[2]

[1]Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian, 60 Garden St, Cambridge, MA 02138, USA

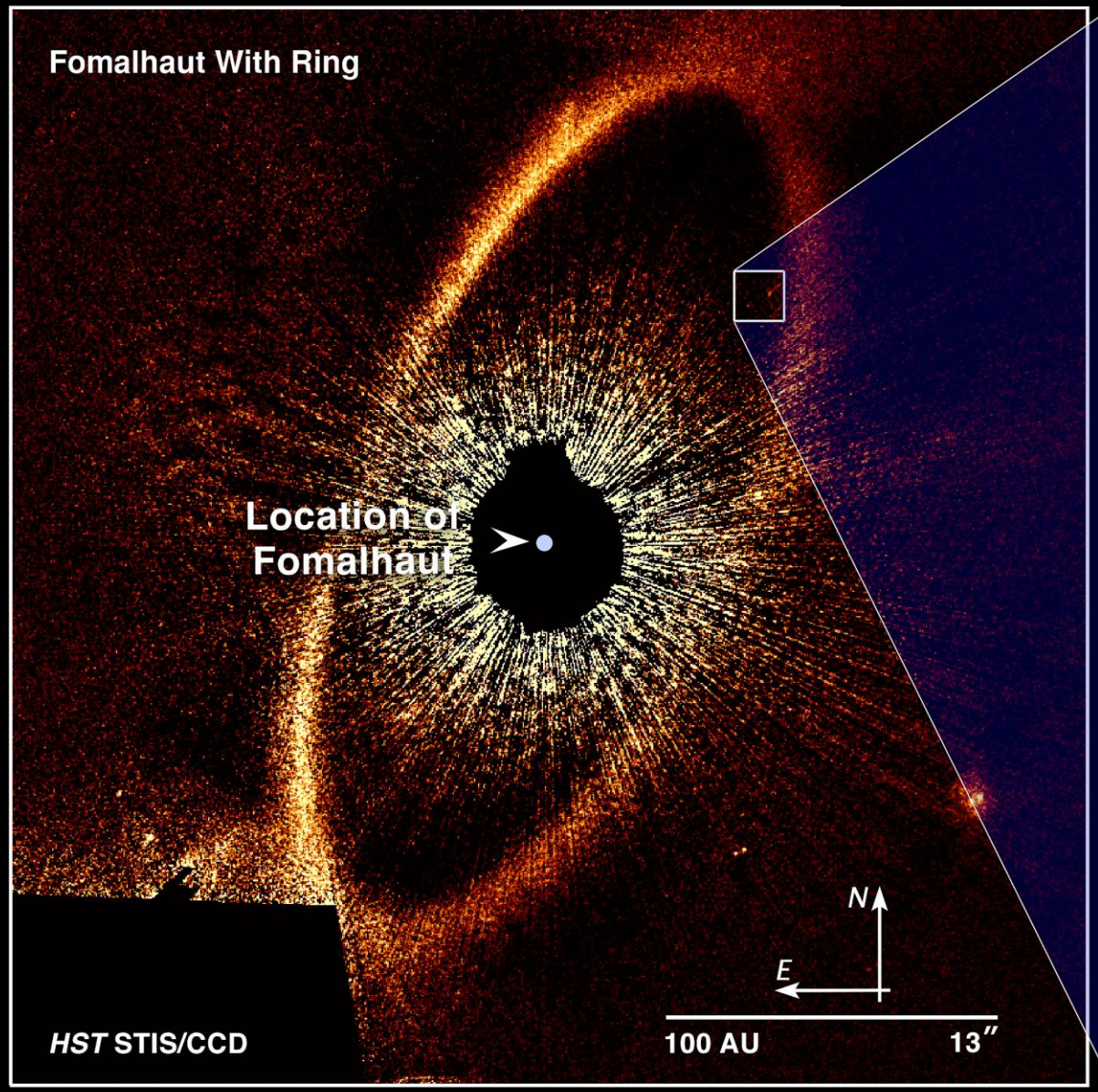
[2]Department of Physics and Astronomy, University of Oregon, Eugene, OR 97403, USA

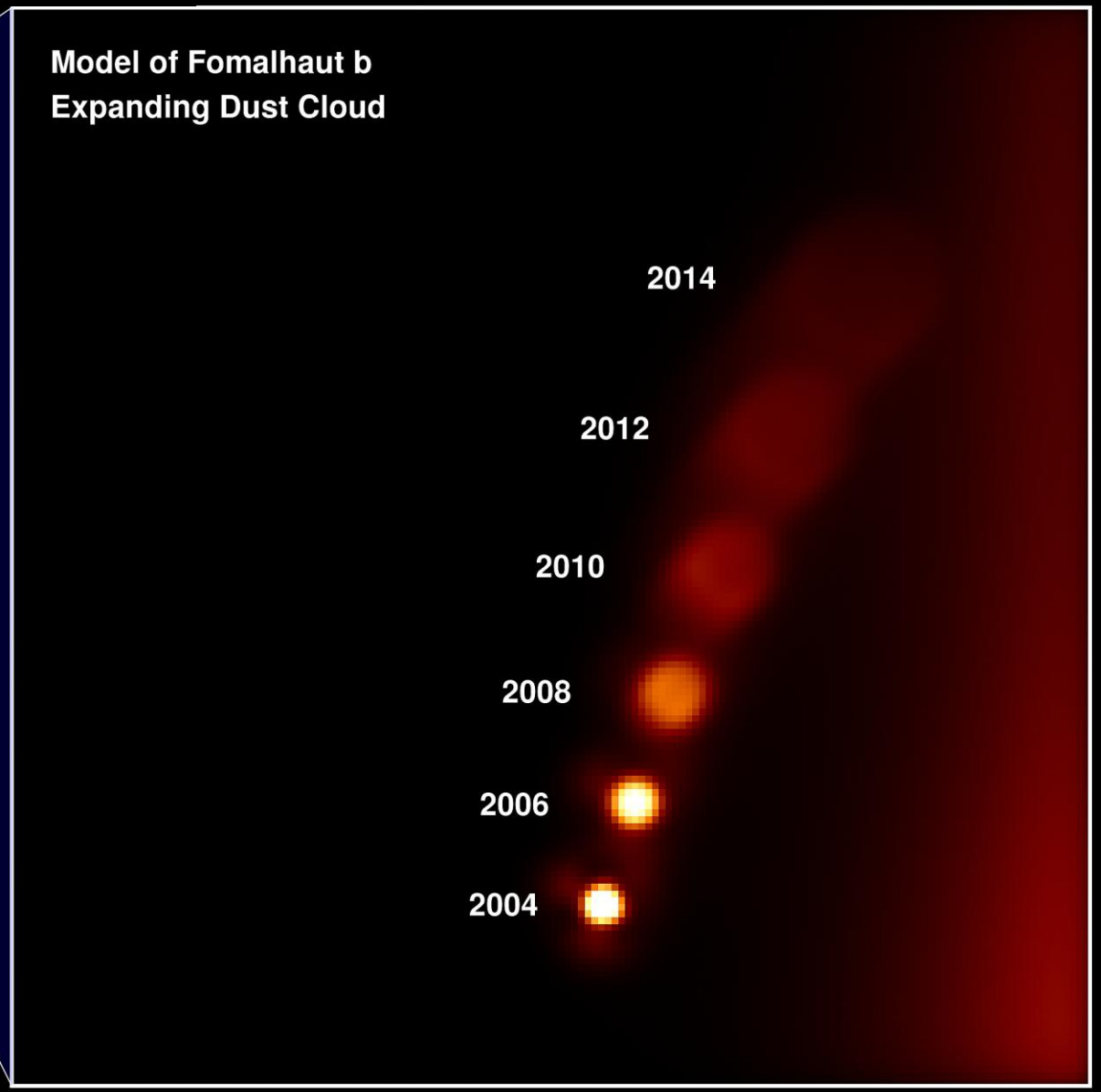
*e-mail: kortizceballos@cfa.harvard.edu

0v1 [astro-ph.EP] 15 Sep 2026

Planetary magnetic fields shape atmospheric escape, mediate interactions with stellar winds, and encode information about planetary interiors[1], yet they have not been directly measured for planets beyond the Solar System. A direct observable signature is auroral radio emission produced by the electron cyclotron maser instability, whose highest emitted frequency is set by the magnetic field strength at its source[2]. Although auroral radio bursts are observed in Solar System planets and in some ultracool dwarfs[3–5], no radio detection has previously been unambiguously localized to an extrasolar planet rather than its host star[6,7]. Here, we report the first direct detection of auroral radio emission from an exoplanet, the giant planet β Pictoris b, with the MeerKAT array. We detect rapid, recurring, and highly circularly polarized bursts, as well as persistent emission, at frequencies of 0.85 to 3.5 GHz. We identify the emission as electron cyclotron maser radiation, which

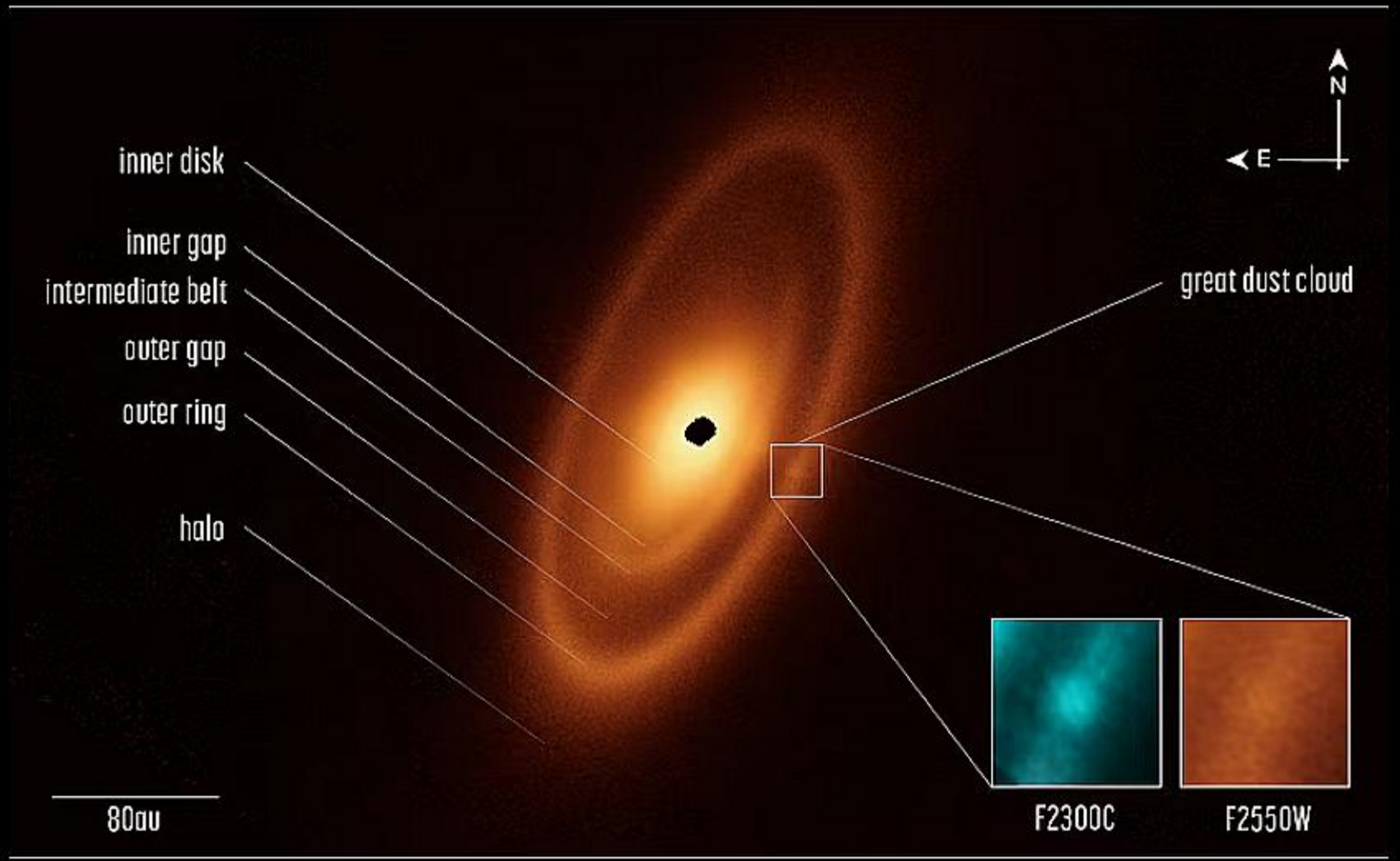
Fomalhaut

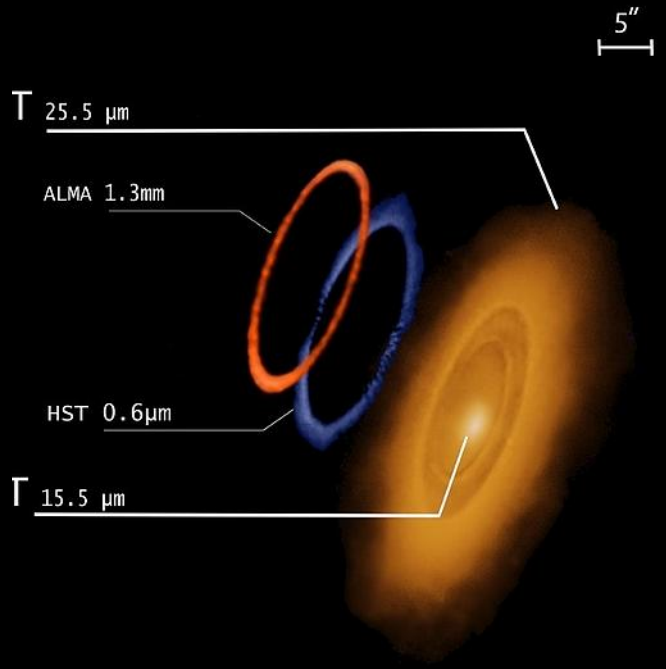

Fomalhaut With Ring
Location of Fomalhaut
N
E
100 AU
13″
HST STIS/CCD


Model of Fomalhaut b
Expanding Dust Cloud
2014
2012
2010
2008
2006
2004

JAMES WEBB SPACE TELESCOPE

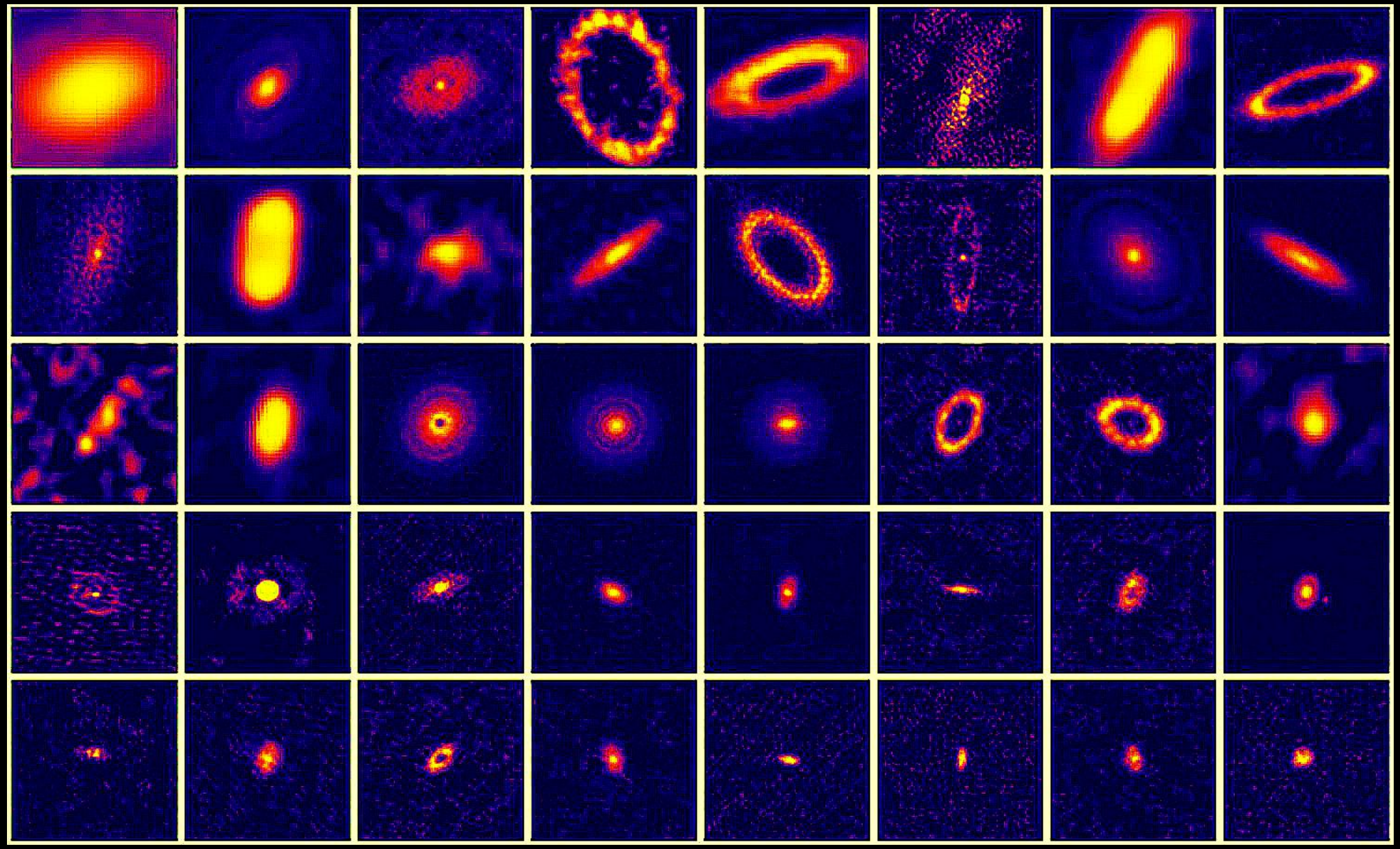
FOMALHAUT





MIRI Filters | F2550W

Dischi protoplanetari



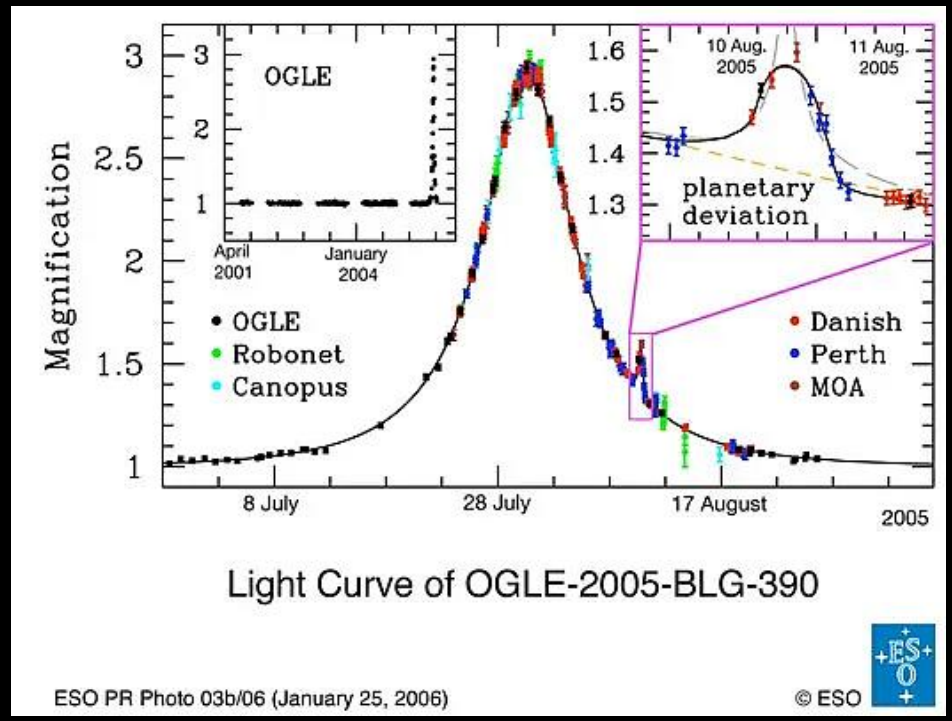
Metodi a confronto

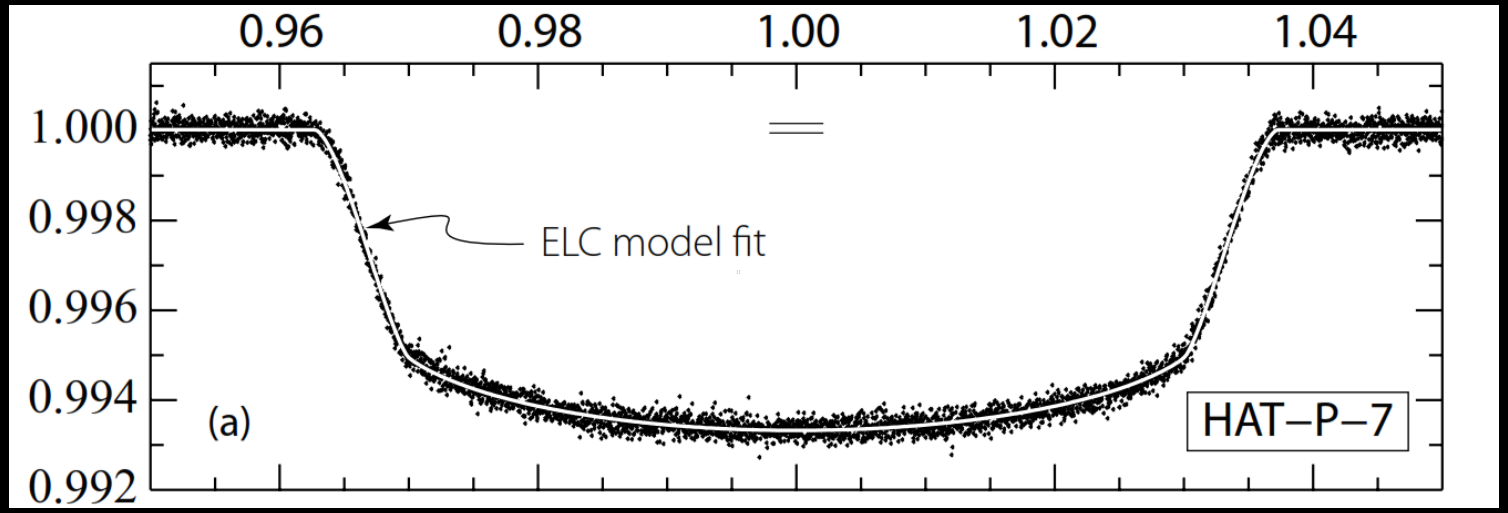
Punti di forza e limiti

Transiti: raggi precisi ma richiedono allineamento favorevole.

Velocità radiale: masse minime e alta sensibilità a pianeti vicini.

Imaging e microlensing aprono regimi orbitali meno accessibili, con diversi compromessi.





Metodi di scoperta degli esopianeti

Metodo	Principio fisico	Cosa si misura	Vantaggi	Limiti / bias	Strumenti tipici
Transit fotometrico	Il pianeta passa davanti alla stella, oscurandone una frazione della luce.	Variazione periodica della luminosità stellare (curva di luce).	Molto sensibile; permette di stimare raggio, periodo e, con RV, densità; ideale per survey su grandi campioni.	Richiede allineamento favorevole; falsi positivi (binarie); favorisce pianeti vicini e di grande raggio.	Kepler, TESS, CoRoT, CHEOPS, PLATO (futuro)
Velocità radiale (RV)	Il pianeta e la stella orbitano attorno al centro di massa; la stella "oscilla" lungo la linea di vista.	Spostamento Doppler delle righe spettrali stellari (velocità radiale periodica).	Fornisce massa minima ($M \sin i$); funziona anche senza transito; buono per pianeti massicci e/o vicini.	Sensibile soprattutto a pianeti massicci e vicini; richiede stelle brillanti e spettri ad alta risoluzione; attività stellare può mimare segnali.	HARPS, ESPRESSO, HIRES, CARMENES, NEID
Imaging diretto	Si riprende la luce propria (o riflessa) del pianeta, separandola da quella stellare.	Immagini IR/ottiche con coronografi o maschere; fotometria e spettroscopia del compagno.	Caratterizzazione diretta (spettro, atmosfera, temperatura); accessibile a grandi separazioni angolari.	Estremamente difficile: contrasto elevatissimo; favorisce pianeti giovani, caldi, massicci e lontani dalla stella.	VLT/SPHERE, Gemini/GPI, Keck/NIRC2, JWST (coronografia), futuri ELT/METIS

Metodi di scoperta degli esopianeti

Metodo	Principio fisico	Cosa si misura	Vantaggi	Limiti / bias	Strumenti tipici
Microlensing gravitazionale	Una stella-lente curva la luce di una stella-sfondo; un pianeta attorno alla lente produce anomalie nella curva di luce.	Picchi/anomalie temporanee nella curva di luce durante un evento di microlensing.	Sensibile a pianeti lontani (anche verso il bulge galattico) e a separazioni medie/grandi; non richiede luce del pianeta.	Eventi non ripetibili; allineamenti rari; parametri orbitali spesso poco vincolati.	OGLE, MOA, KMTNet, future missioni (es. Roman)
Astrometria	La stella descrive una piccola orbita sul cielo per effetto del pianeta.	Variazioni periodiche della posizione stellare (RA/Dec) con precisione micro-arcosecondo.	Sensibile a pianeti su orbite ampie; fornisce massa vera e inclinazione.	Segnali minuscoli; richiede stabilità e baseline lunghe; finora pochi casi confermati.	Gaia (in corso), HST/FGS, futuri missioni astrometriche
Timing di pulsar	Un pianeta attorno a una pulsar modifica i tempi di arrivo degli impulsi radio.	Variazioni periodiche nei tempi di arrivo (TOA) degli impulsi.	Precisione estrema; ha prodotto le prime scoperte di esopianeti (attorno a pulsar).	Raro (pulsar con pianeti); ambiente estremo; non rappresentativo per pianeti "tipo Terra" attorno a stelle normali.	Radiotelescopi (Arecibo, Parkes, FAST, ecc.)

Metodi di scoperta degli esopianeti

Metodo	Principio fisico	Cosa si misura	Vantaggi	Limiti / bias	Strumenti tipici
Timing di transiti / variazioni (TTV/TDV)	Interazioni gravitazionali tra pianeti in sistemi multipli alterano i tempi e la durata dei transiti.	Scostamenti periodici dai transiti attesi (TTV) e variazioni di durata (TDV).	Rivela pianeti non transitanti o di massa piccola; vincola masse e risonanze.	Richiede sistemi multipli con transiti ben misurati; interpretazione complessa.	Kepler, TESS, CHEOPS, PLATO
Variazioni di luminosità orbitale / fase	La luce riflessa/emessa dal pianeta varia con la fase orbitale (curva di fase).	ModULazioni periodiche nella luce totale stella+pianeta.	Sensibile a pianeti vicini e caldi; può dare albedo e temperatura.	Segnale molto debole; degenerazioni con attività stellare.	Kepler, TESS, CHEOPS, futuri telescopi

Bias osservativi

Ciò che vediamo non è tutto

Pianeti grandi e vicini producono segnali più facili da misurare.

Le probabilità geometriche di transito diminuiscono con la distanza orbitale.

Per stimare occorrenze reali occorrono funzioni di completezza e modelli di selezione.

Qualche nota operativa

- **Combinare metodi** è la strategia più potente: RV + transit danno massa e raggio → densità → composizione (roccioso/gassoso).
- **Bias osservativi:** transit e RV dominano le scoperte e favoriscono pianeti vicini; imaging e microlensing coprono regioni diverse dello spazio dei parametri (separazioni grandi, popolazioni lontane).

Probabilità di transito di un esopioaneta

La probabilità geometrica di transito di un esopianeta è, in prima approssimazione, il rapporto tra il "bersaglio" offerto dalla stella (più il pianeta) e la dimensione dell'orbita: più il pianeta è vicino e più la stella è grande, più è probabile vedere un transito. [1] [2] [3] [4] [5] [6]

Formula base (orbita circolare)

Per un'orbita circolare e orientazione casuale, la probabilità che un osservatore esterno veda un transito è:

$$P_{\mathrm{tr}} \simeq \frac{R_\star + R_p}{a}$$

dove:

- $R_\star$ = raggio stellare
- R_p = raggio planetario (spesso trascurabile rispetto a $R_\star$)
- a = semiasse maggiore dell'orbita

In pratica si usa spesso l'approssimazione:

$$P_{\mathrm{tr}} \approx \frac{R_\star}{a}$$

Questa espressione deriva dal fatto che, per orientazioni casuali del piano orbitale, solo una frazione pari a $(R_\star + R_p)/a$ delle possibili inclinazioni porta il pianeta a intersecare il disco stellare visto dalla Terra.

Ordini di grandezza tipici

Per una stella tipo Sole ($R_\star \approx R_\odot$):

- **Terra analogo** ($a \approx 1\ \mathrm{AU}$):

$$P_{\mathrm{tr}} \approx \frac{R_\odot}{1\ \mathrm{AU}} \approx 0.0047\ (\text{circa } 0.47\%)$$

- **Venere analogo** ($a \approx 0.72\ \mathrm{AU}$):
  $\sim 0.65\%$
- **Marte analogo** ($a \approx 1.52\ \mathrm{AU}$):
  $\sim 0.31\%$
- **Giove analogo** ($a \approx 5.2\ \mathrm{AU}$):
  $\sim 0.09\%$
- **Hot Jupiter** ($a \approx 0.05\ \mathrm{AU}$):

$$P_{\mathrm{tr}} \approx \frac{R_\odot}{0.05\ \mathrm{AU}} \approx 0.093\ (\text{circa } 9\text{–}10\%)$$

> Questo spiega perché i survey di transiti (Kepler, TESS, ecc.) scoprono moltissimi pianeti a corto periodo: la loro probabilità di transito è molto più alta.

Espressione in funzione del periodo

Usando la terza legge di Keplero ($a^3 \propto M_\star P^2$), si può riscrivere la probabilità in funzione del periodo P e della massa stellare $M_\star$:

$$P_{\rm tr} \propto R_\star \, M_\star^{-1/3} \, P^{-2/3}$$

Una forma pratica (per orbite circolari) è:

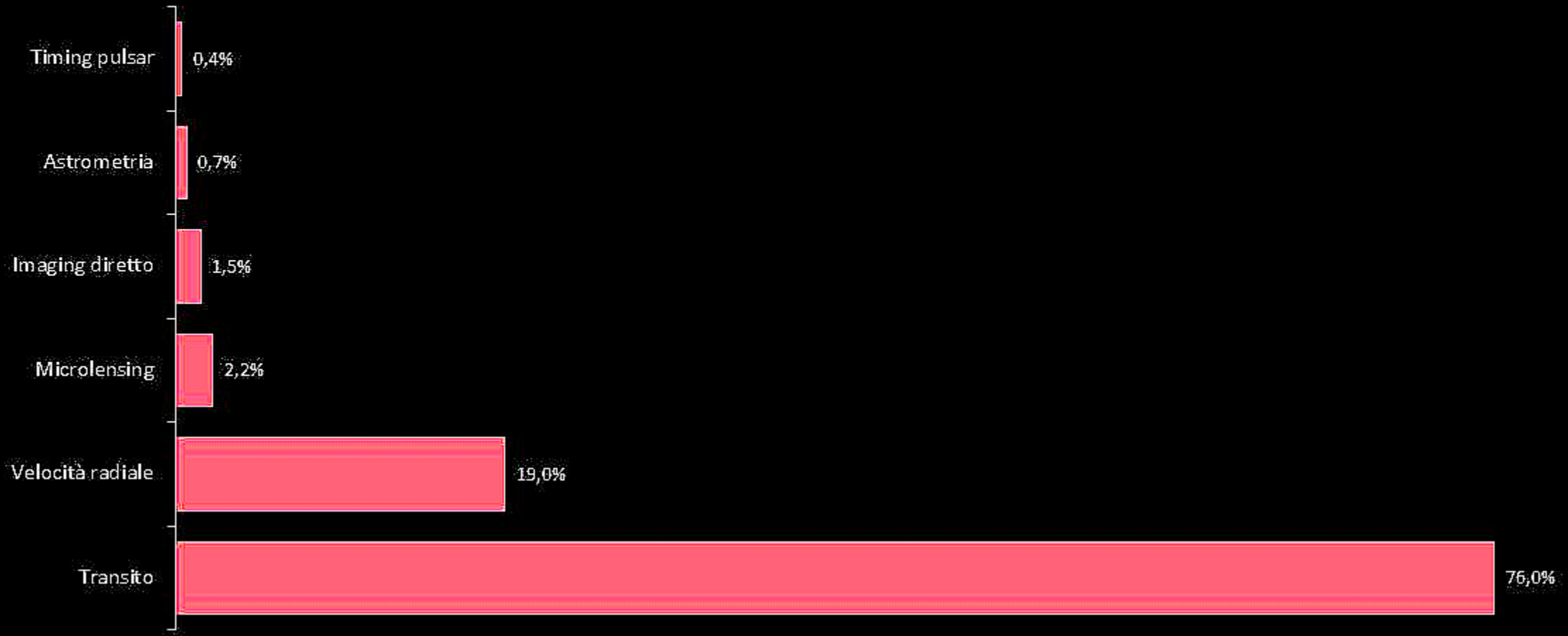
$$P_{\rm tr} \approx 23.8 \left(\frac{M_\star}{M_\odot}\right)^{-1/3} \left(\frac{R_\star}{R_\odot}\right) \left(\frac{P}{\rm day}\right)^{-2/3} \times 10^{-3}$$

(dove il coefficiente numerico dipende dalle unità scelte; l'importante è la scalatura $P^{-2/3}$).

Questo mostra esplicitamente perché i pianeti a periodo corto dominano i cataloghi di transiti.

Sei tecniche, un unico obiettivo

Quota di esopianeti confermati scoperta da ciascun metodo



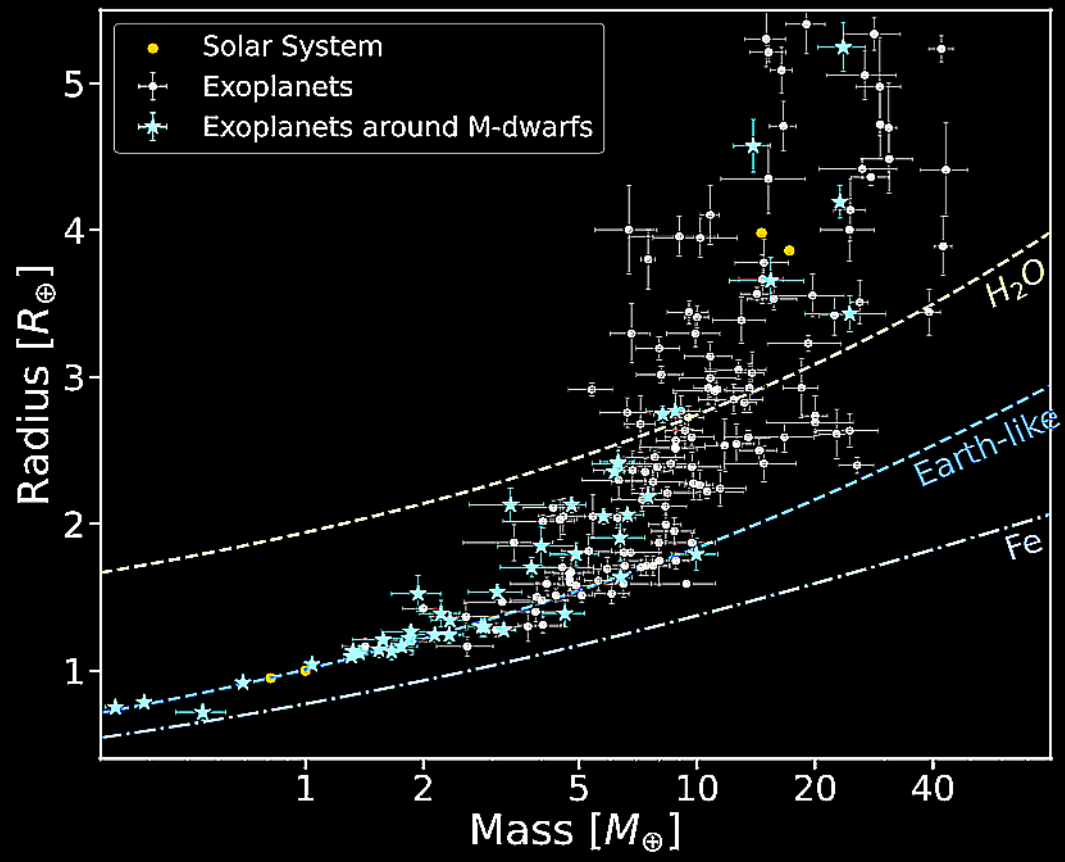
Classificare i mondi

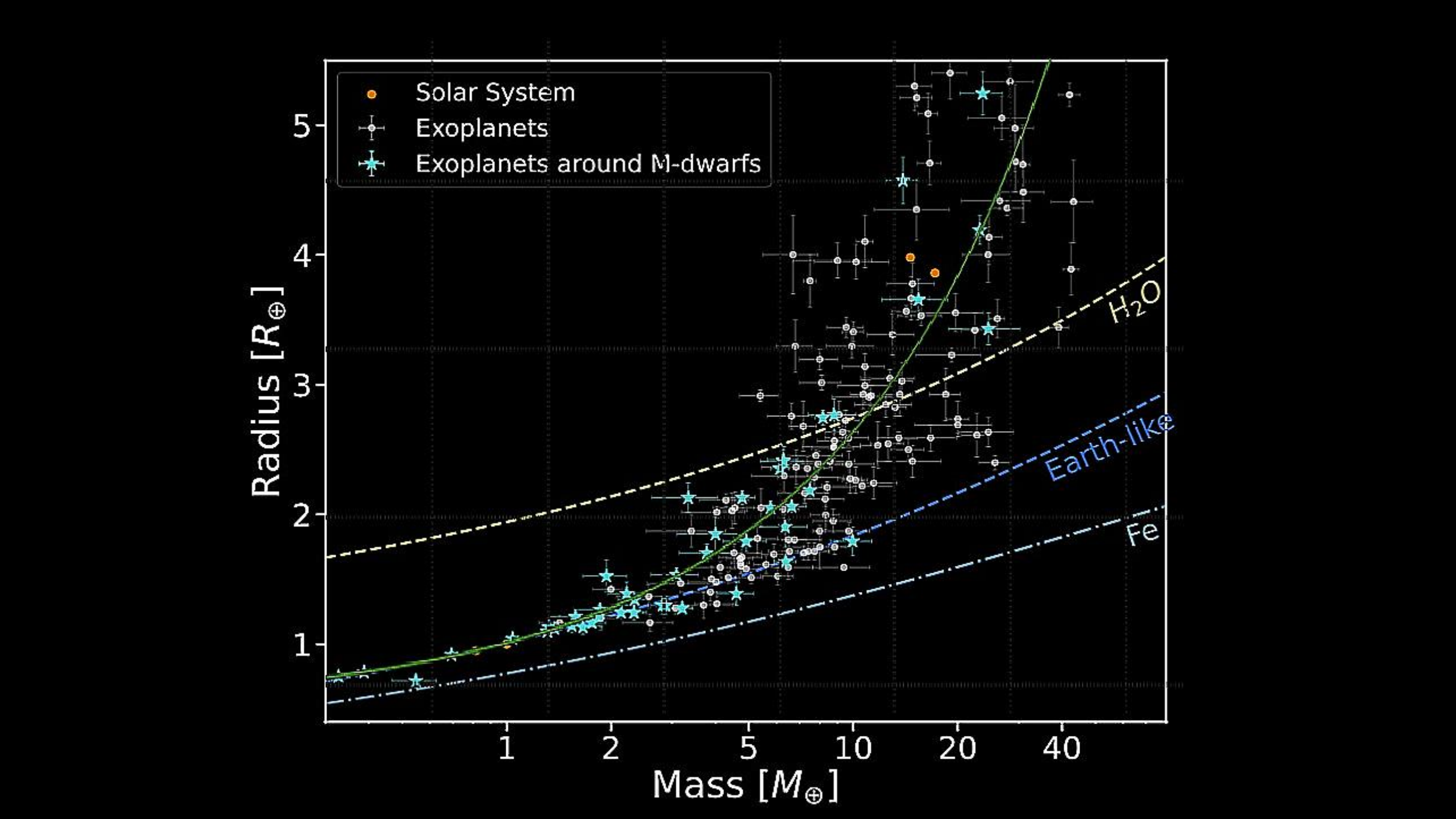
Massa, raggio, densità

Massa e raggio permettono di derivare una densità media.

La densità suggerisce composizione, ma esiste degenerazione fra nucleo, mantello e atmosfera.

Temperatura di equilibrio e irraggiamento completano il quadro fisico.




Solar System
Exoplanets
Exoplanets around M-dwarfs
H_2O
Earth-like
Fe
Radius [$R_\oplus$]
Mass [$M_\oplus$]
1
2
3
4
5
1
2
5
10
20
40

La densità[°°] media di un esopianeta si ottiene combinando massa e raggio, che a loro volta derivano tipicamente da velocità radiale (massa) e transito (raggio).

Formula di base

Per un pianeta approssimato a sfera:

$$\bar{\rho} = \frac{M_p}{V_p} = \frac{M_p}{\frac{4}{3}\pi R_p^3}$$

dove:

- M_p = massa del pianeta
- R_p = raggio del pianeta
- $V_p = \frac{4}{3}\pi R_p^3$ = volume ethz +4

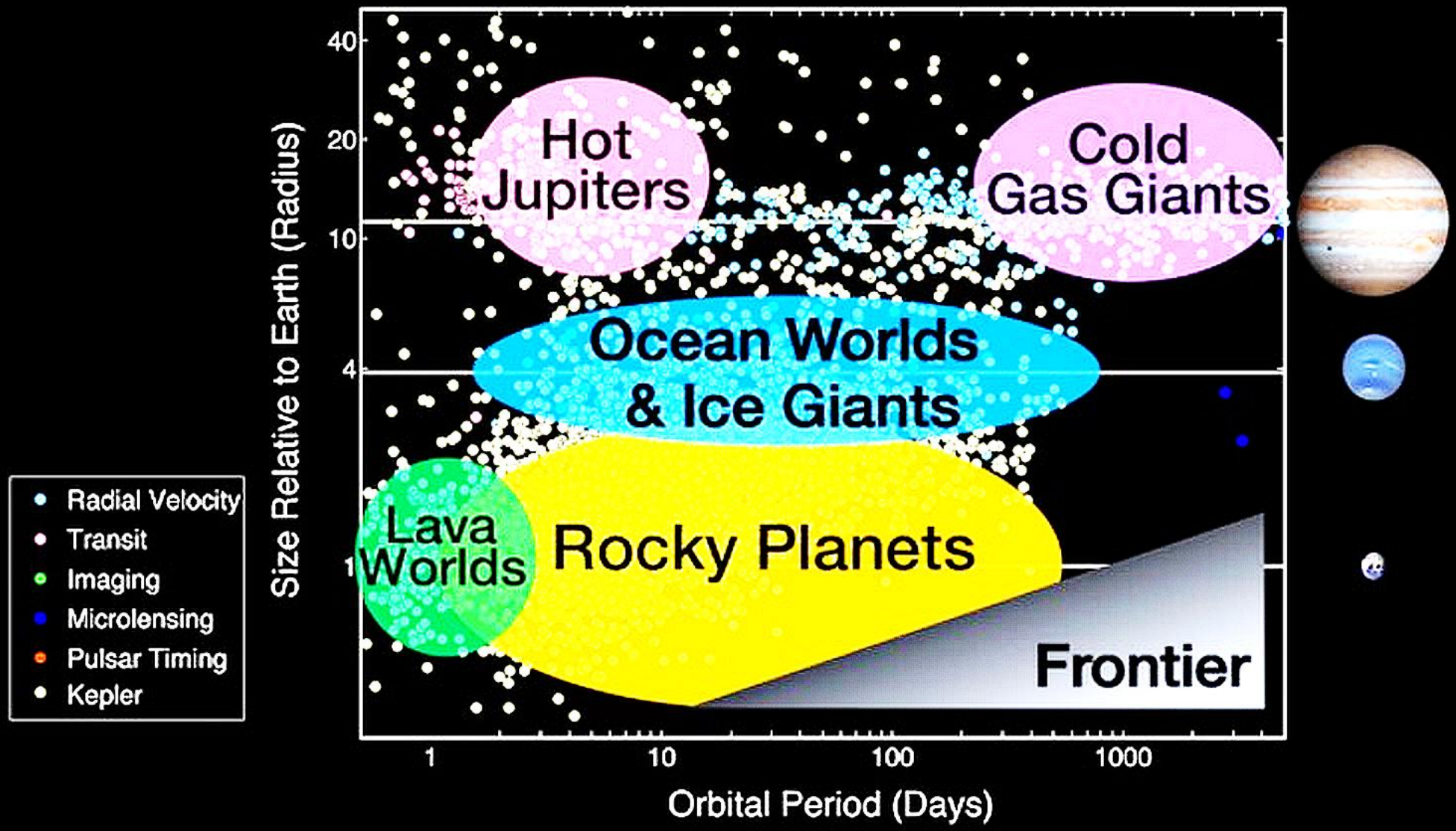
In unità pratiche (quelle usate negli articoli di esopianeti):

$$\bar{\rho}\ [\mathrm{g\,cm^{-3}}] = \frac{M_p/M_\oplus}{(R_p/R_\oplus)^3}\,\rho_\oplus \quad \text{con} \quad \rho_\oplus \simeq 5.51\ \mathrm{g\,cm^{-3}}$$

oppure, in unità joviane:

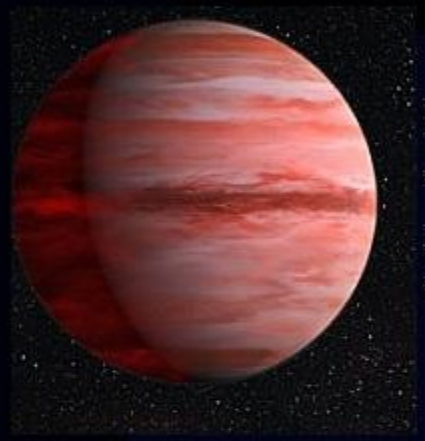
$$\rho_{\cdot}\ [\mathrm{g\,cm^{-3}}] = \frac{M_p/M_J}{(R_p/R_J)^3}\,\rho_J \quad \text{con} \quad \rho_J \simeq 1.33\ \mathrm{g\,cm^{-3}}$$

Exoplanet Populations



Le principali tipologie

- *Gli esopianeti sono classificati soprattutto per massa, dimensione e composizione*



Giganti gassosi caldi

« Hot Jupiter »

Enormi pianeti gassosi in orbita strettissima attorno alla loro stella, con temperature estreme.



Super-Terre

Rocciosi, massicci

Massa maggiore della Terra ma inferiore a quella dei giganti ghiacciati come Nettuno.



Mini-Nettuniani

Gas e ghiacci

Pianeti di taglia intermedia avvolti da spesse atmosfere di idrogeno ed elio.



Pianeti terrestri

Simili alla Terra

Piccoli, rocciosi: i candidati più interessanti nella ricerca di mondi abitabili.

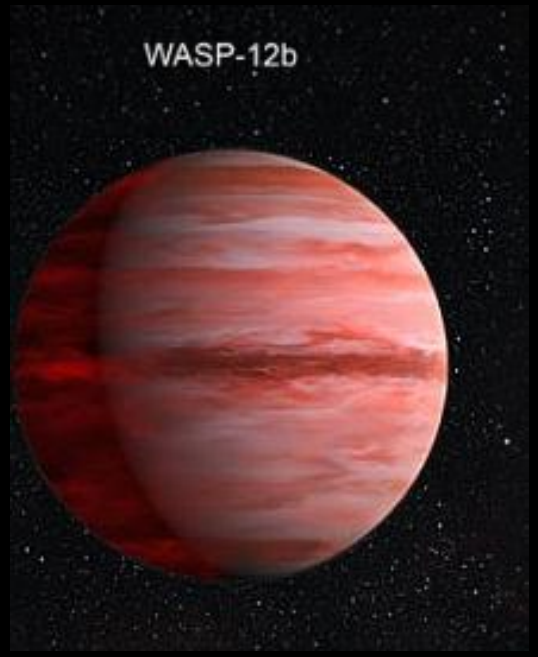
Giganti gassosi caldi

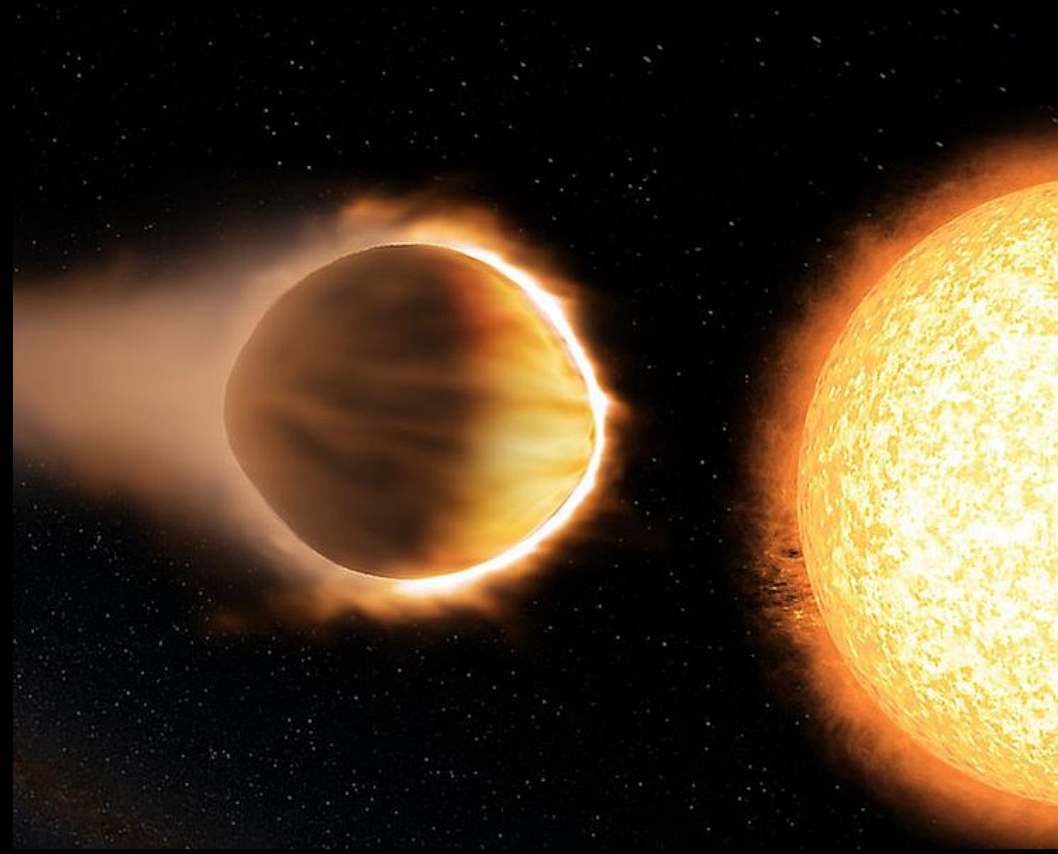
Hot Jupiter

Sono pianeti di massa gioviana in orbite molto ravvicinate.

Le alte temperature producono atmosfere dinamiche e spesso gonfie.

La loro esistenza indica migrazione orbitale o formazione in situ in condizioni particolari.





Caratteristiche degli esopianeti gioviani caldi

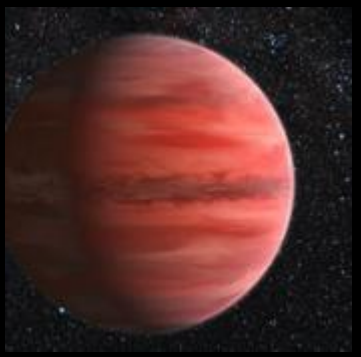
Proprietà	Valori tipici / intervallo	Note fisiche e osservative
Massa	~ 0.3–$12\ M_J$ (spesso 0.5–$5\ M_J$)	Limite superiore ≈ 13.6 M_J: oltre si innesca fusione del deuterio (nane brune). wikipedia +1
Raggio	~ 0.9–$2.0\ R_J$ (molti 1.1–$1.6\ R_J$)	Molti mostrano "radius anomaly": raggi > 1.2 R_J non spiegabili con modelli standard di raffreddamento.
Densità media	~ 0.1–$1.5\ \mathrm{g\ cm^{-3}}$ (spesso < 1 g/cm³)	Inferiore a quella di Giove ($\approx 1.33\ \mathrm{g\ cm^{-3}}$) per effetto dell'insolazione e dell'inflazione.
Semiasse maggiore	~ 0.015–$0.5\ \mathrm{AU}$ (tipicamente < 0.1 AU)	Molto più vicini della distanza Mercurio–Sole (0.39 AU); spesso 8× più vicini di Mercurio rispetto alla loro stella. wikipedia +2
Periodo orbitale	$P \lesssim 10$ giorni (tipicamente 1–5 giorni)	Definizione operativa comune: giganti gassosi con $P < 10$ giorni.
Temperatura di equilibrio	$T_{\mathrm{eq}} \sim 1000$–$3000\ \mathrm{K}$ (ultra-hot fino a ≳ 3500 K)	Dipende da flusso stellare, albedo e redistribuzione del calore; alcuni superano i 4000 K in brightness temperature (es. KELT-9b).

Caratteristiche degli esopianeti gioviani caldi

Proprietà	Valori tipici / intervallo	Note fisiche e osservative
Composizione	Principalmente H e He, con tracce di metalli e molecole	Analoga a Giove/Saturno, ma con chimica atmosferica modificata da alte T (dissociazione molecolare, ionizzazione).
Struttura interna	Nucleo (roccia/ghiaccio) + involucro H/He massiccio	Modelli prevedono nuclei da pochi a decine di $M_{\oplus}$, ma poco vincolati osservativamente.
Rotazione / locking	Probabilmente in rotazione sincrona (tidally locked)	Tempo di locking molto più breve dell'età del sistema; lato perenne giorno/notte, con forti gradienti termici.
Atmosfera e venti	Venti supersonici, jet equatoriali super-rotanti, forte mixing	Modelli prevedono stratificazione verticale, venti ad alta velocità e redistribuzione parziale del calore giorno–notte.
Albedo e colore	Albedo geometrico spesso basso ($\lesssim$ 0.1–0.3); alcuni blu (es. HD 189733b)	Colori e albedo dipendono da nuvole, aerosol e assorbitori (Na, K, TiO/VO, H^-); HD 189733b appare blu per scattering.

Proprietà	Valori tipici / intervallo	Note fisiche e osservative
Fenomeni estremi	Evaporazione atmosferica, code di gas, possibili piogge di silicati/ferro	Alta irradiation può strappare atmosfera (es. HD 209458b, HD 189733b); T elevate favoriscono condensati esotici.
Radius anomaly	Raggi fino a ≈ 2 R_J; correlazione con flusso stellare incidente	L'inflazione cresce con il flusso ricevuto; meccanismi proposti: dissipazione di maree, ohmic heating, onde, mixing profondo.

Alcuni esempi



- **HD 209458 b**
  - $M \approx 0.69\, M_J$, $R \approx 1.38\, R_J$
  - $P \approx 3.5$ giorni, $T_{\text{eq}} \sim 1400$ K
  - Primo esopianeta con atmosfera caratterizzata (evaporazione osservata).
- **HD 189733 b**
  - $M \approx 1.14\, M_J$, $R \approx 1.14\, R_J$
  - $P \approx 2.2$ giorni, $T_{\text{eq}} \sim 1200$ K
  - Atmosfera blu, venti veloci (~km/s), forte attività stellare.
- **KELT-9 b** (ultra-hot Jupiter estremo)
  - $M \approx 2.7\, M_J$, $R \approx 1.8\, R_J$
  - $P \approx 1.5$ giorni attorno a una stella A0 (~9600 K)
  - Brightness temperature ~4600 K, scala d'altezza atmosferica ~1000 km.

HD 209458 b (soprannominato *Osiride* od *Osiris*) è un pianeta extrasolare che orbita intorno alla stella HD 209458, una nana gialla simile al Sole di magnitudine 8 visibile nella costellazione di Pegaso, che dista circa 150 anni luce dal sistema solare.

HD 189733 Ab è un pianeta extrasolare scoperto nel 2005 in orbita intorno alla stella HD 189733 A, quando astronomi francesi guidati da François Bouchy dell'Astrophysics Laboratory di Marsiglia hanno osservato transitare il pianeta sulla sua stella madre. Si tratta di un gigante gassoso simile a Giove, classificabile tra i pianeti gioviani caldi. Possiede una massa del 16% superiore a quella di Giove, e orbita attorno alla sua stella ogni 2,2 giorni ad una velocità orbitale di 152,5 km/s, quindi è un pianeta con scarse prospettive per la vita.

KELT-9 b, o **HD 195689 b** è il più caldo esopianeta gigante gassoso noto al 2020, con una temperatura nel suo emisfero diurno di 4600 K, vale a dire che è più caldo della superficie delle stelle nane rosse e di diverse nane arancioni. Orbita attorno a HD 195689 (o KELT-9), una stella di classe B9.5-A0 a circa 650 anni luce dalla Terra, avente una massa 2,2 volte quella del Sole, una temperatura superficiale di 10.170 K e un'età attorno ai 300 milioni di anni. Osservazioni effettuate con il telescopio TESS su 27 transiti hanno consentito di approfondire l'orbita. Il pianeta seguirebbe un'orbita polare stretta intorno alla stella; le diverse temperature superficiali evidenziate dallo studio contribuiscono a rendere peculiare il ciclo stagionale di KELT-9 b.

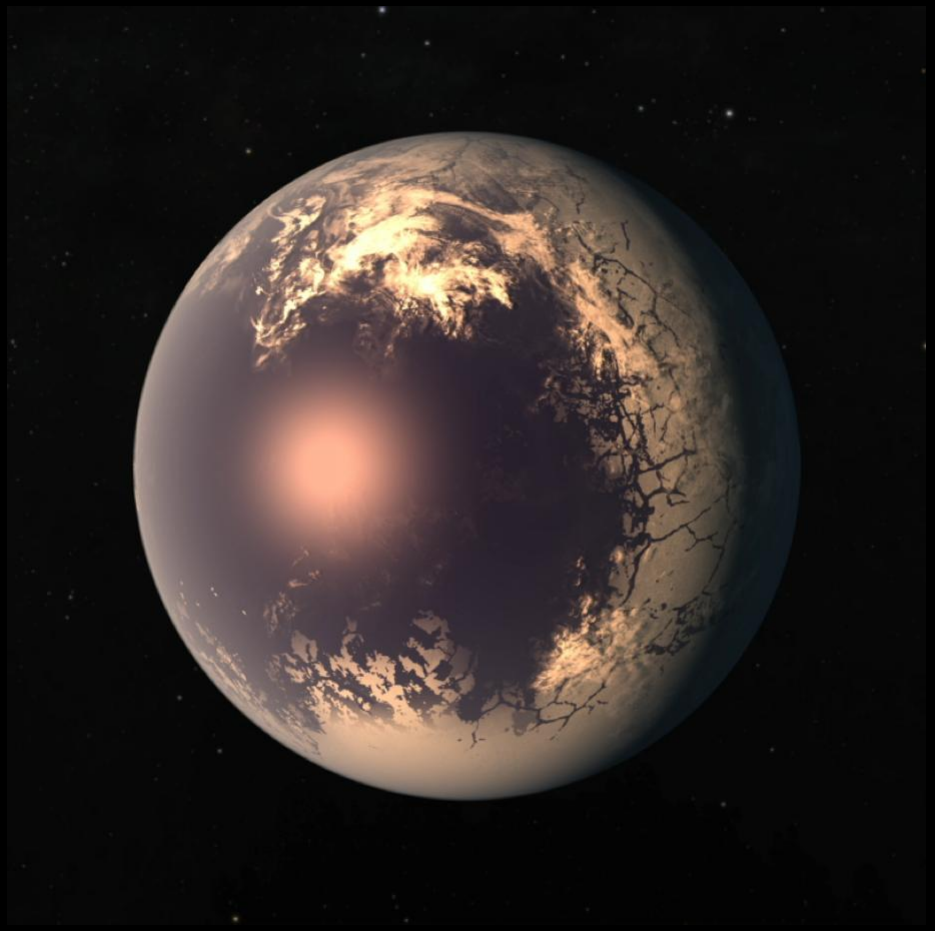
Super-Terre

Più grandi della Terra

Il termine descrive soprattutto una fascia di massa o raggio, non una composizione unica.

Possono essere rocciose, ricche d’acqua o avvolte da gas leggero.

Sono abbondanti nei dati Kepler e non hanno un equivalente diretto nel Sistema Solare.



Caratteristiche medie delle superterre

Proprietà	Intervallo tipico / valore medio	Note e interpretazione fisica
Definizione (massa)	~ 1–$10\ M_\oplus$ (spesso 2–10 $M_\oplus$)	Il termine si riferisce principalmente alla massa, non alla composizione o abitabilità.
Raggio tipico	~ 1.0–$2.0\ R_\oplus$ (alcuni fino a 2.5 $R_\oplus$)	Raggi $\gtrsim 1.6\ R_\oplus$ tendono a implicare frazioni significative di volatili (mini-Nettuni / sub-Nettuni).
Densità∞ media	~ 3–$10\ \mathrm{g\ cm^{-3}}$ (dipende dalla composizione)	Superterre rocciose/ferrose: 5–10 g/cm³; "ocean planets" e sub-Nettuni: 1–4 g/cm³.
Composizione possibile	- Rocciosa/metallica (tipo Terra scalata) - Ocean planet (grande frazione d'acqua) - Sub-Nettuno (nucleo solido + envelope H/He)	La densità∞ da M e R vincola la ricetta interna, ma con degenerazioni (es. acqua vs gas).

Proprietà	Intervallo tipico / valore medio	Note e interpretazione fisica
Massa tipica della popolazione Kepler	Picco attorno a $\sim 8\ M_\oplus$ (scalato con $M_\star$)	Modellando la fotoevaporazione, emerge una popolazione sorprendentemente uniforme in massa e frazione iniziale di H/He (~pochi %).
Relazione massa–raggio	Approssimabile con $R \propto M^\beta$, con $\beta \approx 0.26$–0.28 per composizioni solide	Coerente con modelli di pianeti terrestri compressi; il coefficiente dipende dalla composizione (ferro, silicati, acqua). arxiv +2
Gravità superficiale	$g \sim 1$–$3\ g_\oplus$ (tipicamente)	Per una superterra rocciosa di 5 $M_\oplus$ e 1.5 $R_\oplus$: $g \approx (5/1.5^2) g_\oplus \approx 2.2\ g_\oplus$.
Velocità di fuga	$v_{\text{esc}} \sim 1.2$–$2\ v_{\text{esc},\oplus}$	Maggiore ritenzione atmosferica rispetto alla Terra; favorisce atmosfere più spesse se presenti.
Orbite tipiche (Kepler)	Periodi da pochi giorni a ~100 giorni; molte dentro 0.5 AU	La popolazione di superterre è dominata da pianeti a corto periodo, scoperti in transito.
Abitabilità potenziale	Dipende da posizione nella zona abitabile, composizione, atmosfera	"Superterra" non implica abitabilità; alcune sono nella zona abitabile (es. LHS 1140b), altre sono mondi di lava o sub-Nettuni.

Esempi rappresentativi

- **LHS 1140 b**
  - $M \approx 4.8$–$8.5\ M_\oplus$, $R \approx 1.4\ R_\oplus$
  - Densità°° stimata ~ 9–$16\ \mathrm{g\ cm^{-3}}$ → pianeta molto denso, probabilmente roccioso/ferroso.
  - Nella zona abitabile di una nana M.
- **Kepler-107 b e c**
  - Raggi simili: $R \approx 1.5\ R_\oplus$
  - Densità°° molto diverse: Kepler-107c ha un nucleo con frazione di ferro almeno doppia rispetto alla "gemella" 107b.
  - Esempio di diversità composizionale a parità°° di raggio.
- **55 Cancri e**
  - $M \approx 8\ M_\oplus$, $R \approx 2\ R_\oplus$
  - Periodo brevissimo (~0.74 giorni), superficie probabilmente fusa (lava planet).

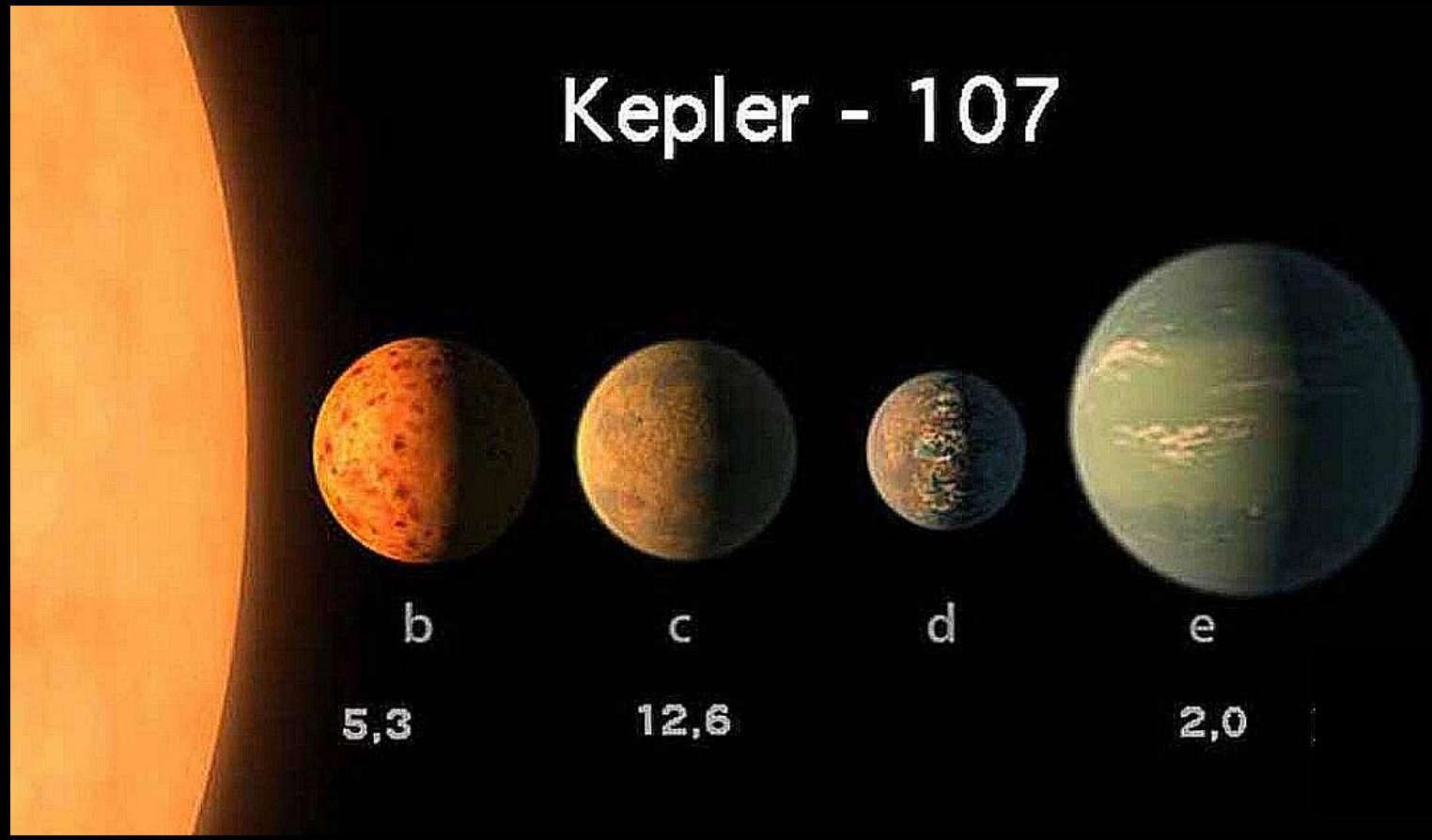
LHS 1140 b è un esopianeta in orbita all'interno della zona abitabile conservativa della nana rossa LHS 1140. Scoperto nel 2017 attraverso il progetto MEarth, LHS 1140 b ha una massa quasi 6 volte maggiore e un raggio oltre il 70% più grande rispetto alla Terra; era stato inserito nella categoria dei pianeti considerati come Super Terre, tuttavia studi più recenti suggeriscono che si tratti di un mininettuno o di un pianeta oceanico.

LHS 1140 b dista da noi solo 40 anni luce e transita davanti alla sua stella, rendendolo un ottimo candidato per studiare la sua atmosfera con i più grandi telescopi terrestri e quelli spaziali, in particolare con il telescopio spaziale James Webb, il cui lancio è avvenuto il 25 dicembre del 2021.



Kepler-107

Nonostante abbia caratteristiche simili al quelle del Sole, Kepler-107 ospita un sistema planetario molto compatto, con quattro pianeti che orbitano tutti a breve distanza da essa, inferiore a quella che divide Mercurio dal Sole. I periodi orbitali dei pianeti sono di pochi giorni, dai 3 di Kepler-107 b ai 15 giorni di Kepler-107 d, il pianeta più esterno. Si pensa che difficilmente i pianeti si siano formati in questa posizione, così prossimi a una stella relativamente massiccia come Kepler-107, molto probabilmente sono migrati da orbite più esterne dopo la formazione o durante il loro percorso evolutivo.



Pianeta	Massa	Raggio	Densità	Periodo orb.	Sem. maggiore	Incl. orbita
b	3,51 ± 1,52 $M_\oplus$	1,536 $r_\oplus$	5,3 ± 2,3 g/cm³	3,18 giorni	0,04544 UA	89,05°
c	9,39 ± 1,77 $M_\oplus$	1,597 $r_\oplus$	12,65 ± 2,65 g/cm³	4,9 giorni	0,06 UA	89,49°
d	<3,8 $M_\oplus$	0,86 $r_\oplus$	<33,1 g/cm³	7,958 giorni	0,08377 UA	87,55°
e	8,6 ± 3,6 $M_\oplus$	2,903 $r_\oplus$	2 ± 0,82 g/cm³	14,749 giorni	0,1264 UA	89,67°

55 Cancri Ae

55 Cancri e, chiamato anche **Janssen**, è un pianeta extrasolare con una massa 8,6 volte quella terrestre, con un raggio circa il doppio di quello del nostro pianeta. Orbita attorno alla stella 55 Cancri, impiega meno di un giorno terrestre per completare la sua orbita ed è il pianeta più interno del suo sistema planetario. Scoperto nel 2004, fu la prima super Terra scoperta, e a causa della sua relativa vicinanza, di circa 40 anni luce, è divenuto in seguito uno degli esopianeti maggiormente studiati dagli scienziati.

Dopo la sua scoperta si è creduto che 55 Cancri e fosse un pianeta oceanico, o un piccolo gigante gassoso, o in alternativa, un pianeta di carbonio. Tuttavia dopo diversi anni, osservando i suoi transiti, si è potuta calcolare la densità, piuttosto elevata, e, primo caso per un pianeta relativamente piccolo, si è potuta mappare direttamente la sua superficie, suggerendo che si tratti di un pianeta di lava.

Osservazioni condotte con il telescopio spaziale Hubble nel 2016 hanno rilevato la presenza di idrogeno ed elio, mentre non sono state rilevate tracce di vapor d'acqua

55 Cancri A

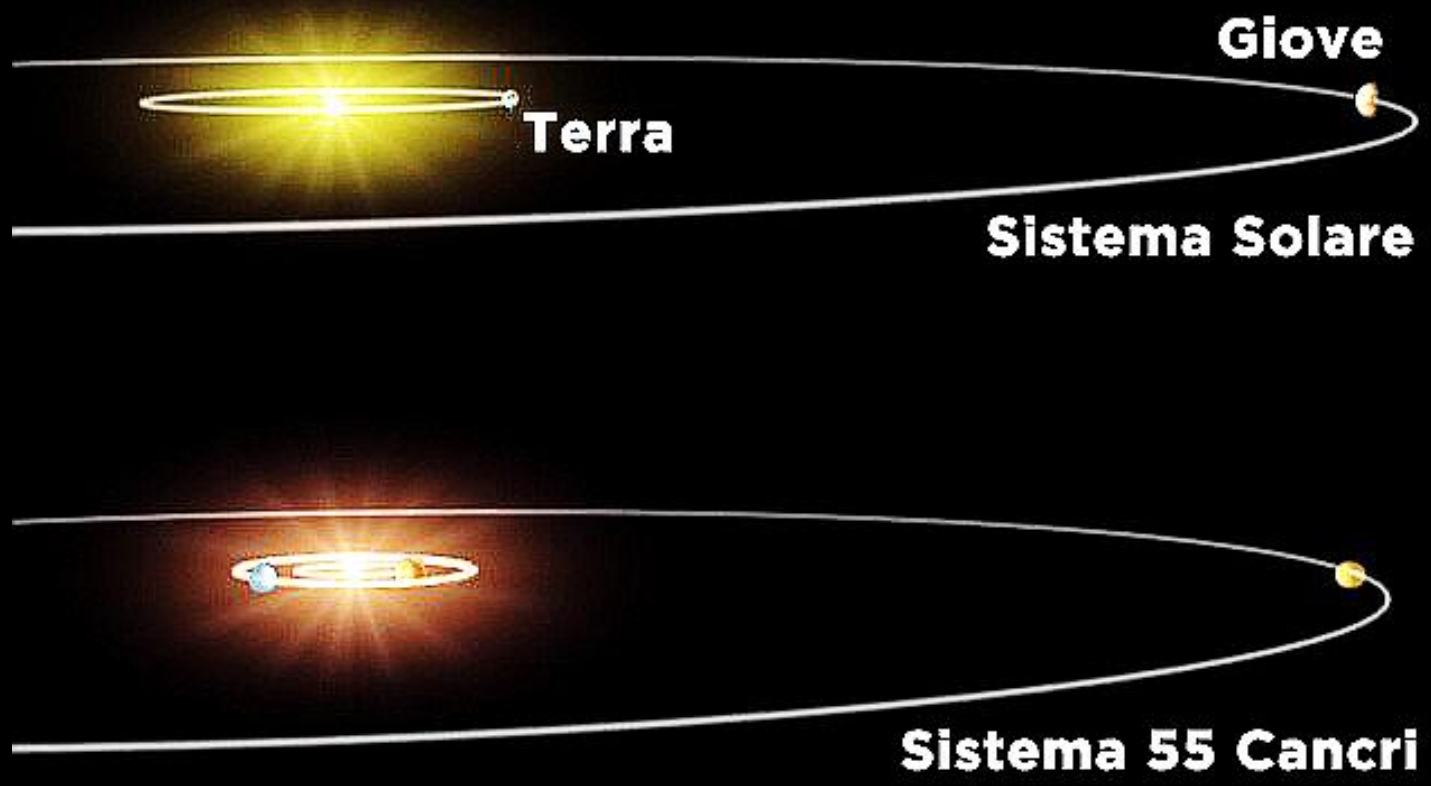
Pianeta	Massa	Raggio	Periodo orb.	Sem. maggiore	Eccentricità	Scoperta
Ae (Janssen)	7,99 $M_\oplus$[3]	1,875 $r_\oplus$	0,74 giorni	0,0154 UA	0,028	2004
Ab (Galileo)	0,84 M_J	-	14,653 giorni	0,1134 UA	0,0023	1996
Ac (Brahe)	> 56,7 $M_\oplus$	-	44,373 giorni	0,237 UA	0,072	2002
Af (Harriot)	> 47 $M_\oplus$	-	260,91 giorni	0,773 UA	0,08	2007
Ad (Lippershey)	>3,86 M_J	-	4867 giorni	5,446 UA	0,027	2002

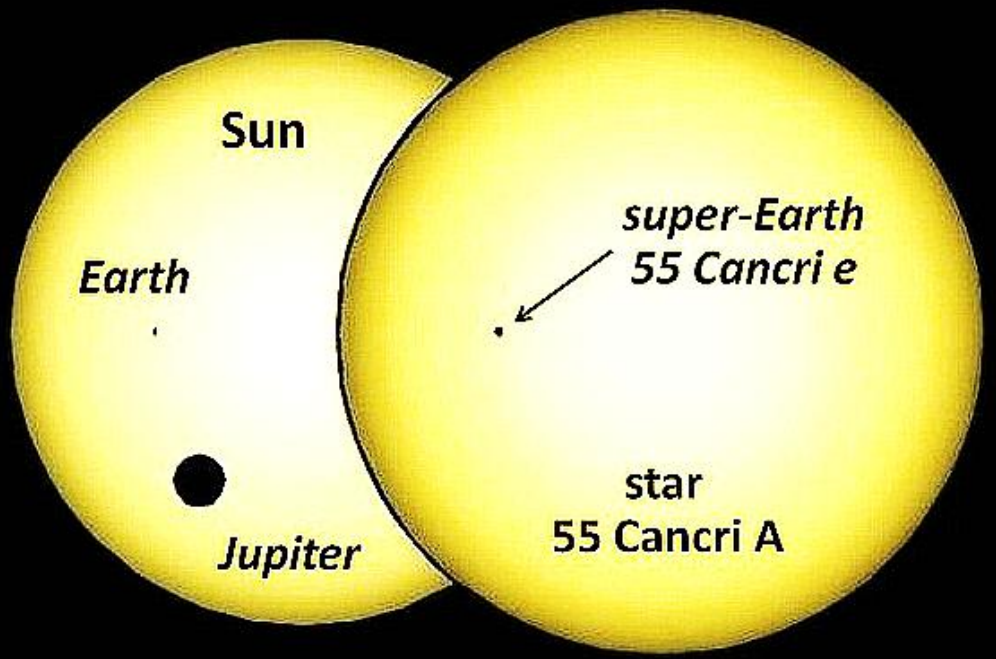


rappresentazione schematica del sistema

sistema planetario di 55 Cancri B.

Pianeta	Massa	Raggio	Periodo orb.	Sem. maggiore	Eccentricità	Scoperta
Bb	≥3,5 ± 0,8 $M_\oplus$	—	6,7994 giorni	0.044 UA	0	2004
Bc	≥5,3 ± 1,4 M_J	—	33,747 giorni	0,130 UA	0	1996


Giove
Terra
Sistema Solare
Sistema 55 Cancri


Sun
Earth
Jupiter
super-Earth
55 Cancri e
star
55 Cancri A

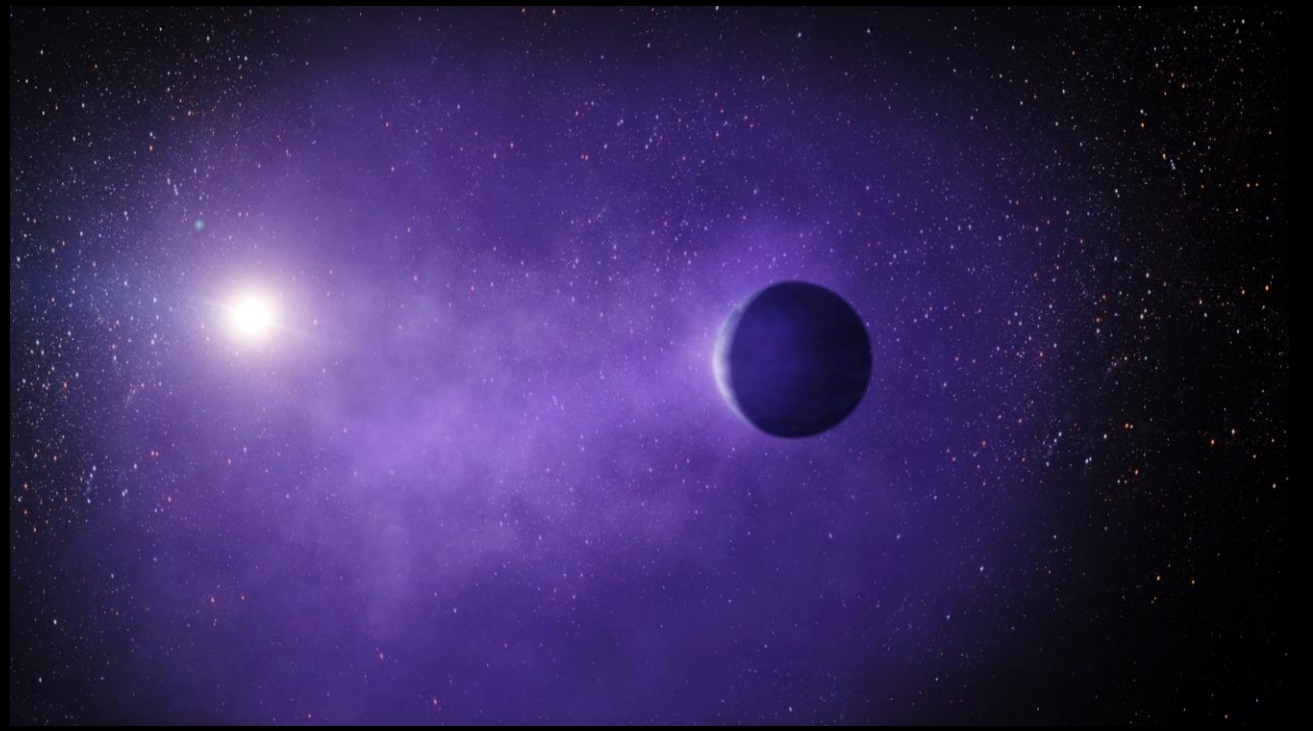
Mini-Nettuni

Atmosfere estese

Hanno in genere un nucleo solido circondato da un involucro di idrogeno-elio o volatili.

Raggi superiori a quello terrestre non implicano una superficie abitabile.

L’evaporazione fotoindotta aiuta a modellare la distribuzione dei raggi osservata.



Caratteristiche medie dei mininettuni

Proprietà	Intervallo tipico / valore medio	Note e interpretazione fisica
Definizione (raggio)	~ 1.6–$4.0\ R_\oplus$ (spesso 1.8–3.0 $R_\oplus$)	Sopra il "radius valley" (~1.7–2.0 $R_\oplus$) e sotto il "radius cliff" (~3–4 $R_\oplus$).
Massa tipica	~ 2–$20\ M_\oplus$ (molti 3–10 $M_\oplus$)	Intermedia tra superterre e giganti ghiacciati; la massa è dominata dal nucleo roccioso/ferroso.
Densità media	~ 0.5–$3.0\ \mathrm{g\ cm^{-3}}$ (spesso 1–2 g/cm³)	Inferiore a quella dei pianeti rocciosi; indica presenza di involucri a bassa densità (H/He, ices).
Struttura interna	Nucleo roccioso/ferroso + mantello di ices/acqua + envelope H/He	Modelli: pochi % di massa in H/He bastano a gonfiare il raggio; possibile frazione significativa di acqua.
Envelope H/He (frazione in massa)	~ 0.1–5% (tipicamente 1–3%)	Anche frazioni piccole (≈1%) producono raggi ~2–3 $R_\oplus$; vincolate da fotoevaporazione / core-powered mass loss.

Caratteristiche medie dei mininettuni

Proprietà	Intervallo tipico / valore medio	Note e interpretazione fisica
(frazione in massa)	3%)	$R_\oplus$; vincolate da fotoevaporazione / core-powered mass loss.
Composizione possibile	- Gas dwarf (nucleo + envelope H/He) - Mini-Nettuno "classico" (tipo Nettuno in miniatura) - Water world (interno dominato da H_2O)	La degenerazione composizione-struttura è forte: stessa M, R può corrispondere a ricette diverse.
Orbite tipiche (Kepler)	Periodi da ~1 a ~100 giorni; molti dentro 0.5 AU	Popolazione dominante nei survey di transito a corto periodo.
Temperatura di equilibrio	$T_{eq} \sim 500–1500\ K$ (dipende da stella e distanza)	Molti sono "warm" o "hot"; l'irraggiamento influenza evoluzione atmosferica e possibile perdita di envelope.

Esempi rappresentativi

- **GJ 3090 b**
  - $M \approx 3.34 \pm 0.72\, M_\oplus$, $R \approx 2.13 \pm 0.11\, R_\oplus$
  - Densità°° $\approx 1.9^{+0.5}_{-0.5}\ \mathrm{g\ cm^{-3}}$
  - Considerato uno dei mininettuni più favorevoli per caratterizzazione atmosferica.

- **HD 18599 b** (sub-Nettuno denso)
  - $M \approx 25.5 \pm 4.6\, M_\oplus$, $R \approx 2.70 \pm 0.05\, R_\oplus$
  - Densità°° $\approx 7.1 \pm 1.4\ \mathrm{g\ cm^{-3}}$
  - Modelli: ~23% H_2O, 77% roccia/ferro, envelope H/He molto sottile (~1%).

- **Popolazione Kepler**
  - Picchi di distribuzione a ~1.3 $R_\oplus$ (superterre) e ~2.4 $R_\oplus$ (sub-Nettuni), con minimo a ~1.8 $R_\oplus$.
  - Massa media della popolazione di sub-Nettuni stimata intorno a 3–8 $M_\oplus$.

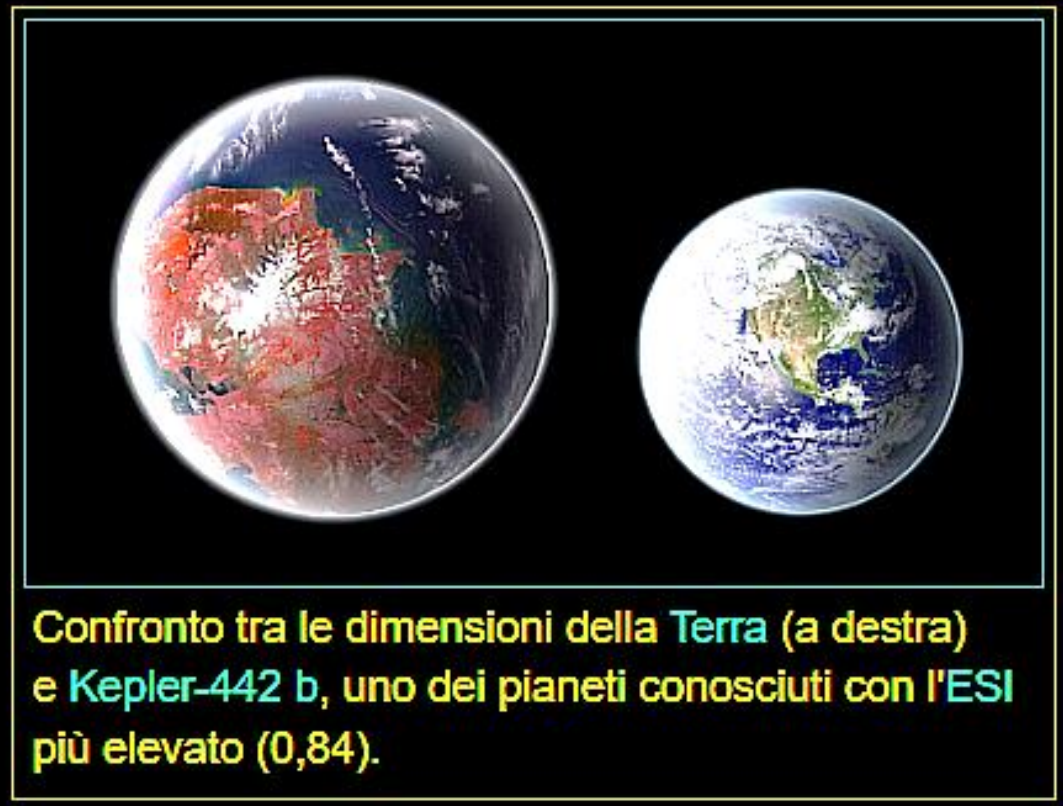
Pianeti terrestri

Mondi rocciosi

Sono composti prevalentemente da silicati e metalli.

La massa, la tettonica, l’atmosfera e l’irraggiamento determinano l’evoluzione superficiale.

Un raggio terrestre non garantisce condizioni simili alla Terra.



Confronto tra le dimensioni della Terra (a destra) e Kepler-442 b, uno dei pianeti conosciuti con l'ESI più elevato (0,84).

Analogo terrestre

Un **analogo terrestre**, chiamato anche **gemello della Terra** o **pianeta di tipo terrestre**, è un esopianeta con condizioni simili a quelle che si trovano sulla Terra. Per essere considerato un analogo terrestre, un corpo planetario deve orbitare attorno alla sua stella nella cosiddetta zona abitabile, possedere una massa ed un raggio simili a quelli della Terra, avere un'adeguata composizione atmosferica, appartenere ad un sistema nel quale la stella madre sia simile al Sole, ed altre caratteristiche basiche del nostro pianeta che permettono, in combinazione con gli altri fattori sopra elencati, la presenza della vita come noi la conosciamo.

Caratteristiche medie degli esopianeti terrestri

Proprietà	Intervallo tipico / valore medio	Note e interpretazione fisica
Definizione (raggio)	~ 0.5–$1.5\ R_\oplus$ (alcuni fino a 1.6 $R_\oplus$)	Sotto il “radius valley”; compatibili con composizioni prevalentemente rocciose.
Massa tipica	~ 0.1–$2.0\ M_\oplus$ (alcuni fino a ~3 $M_\oplus$)	Coerente con pianeti rocciosi; sopra ~2 $M_\oplus$ si entra spesso nel regime superterre.
Densità media	~ 4–$8\ \mathrm{g\ cm^{-3}}$ (picco ~7.6 g/cm³ a 1.4 $R_\oplus$)	Compatibile con rocce + metallo; la densità sale con R fino a ~1.4 $R_\oplus$, poi scende (ingresso volatili).
Composizione	Nucleo ferroso + mantello di silicati; possibile crosta e atmosfera sottile	Analoga ai terrestri del Sistema Solare; possibili variazioni nella frazione di ferro e nel contenuto di acqua.
Relazione densità–raggio (per $R_p < 1.5\ R_\oplus$)		

- **Kepler-10 b**
  - $R \approx 1.42\,R_\oplus$, $M \approx 4.6\,M_\oplus$
  - $\rho \approx 8.8^{+2.1}_{-2.9}\ \mathrm{g\ cm^{-3}}$
  - Compatibile con composizione rocciosa/ferrosa; uno dei primi terrestri confermati.

- **CoRoT-7 b**
  - $R \approx 1.58\,R_\oplus$, $M \approx 8\,M_\oplus$
  - $\rho \approx 11 \pm 3.5\ \mathrm{g\ cm^{-3}}$
  - Densità°° molto alta, suggerisce frazione di ferro elevata.

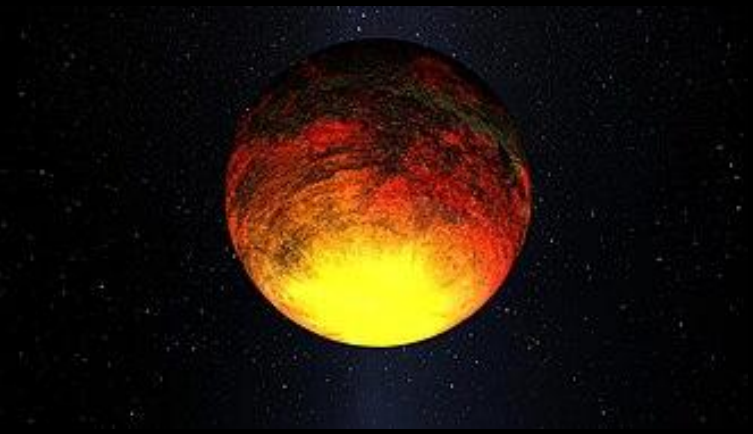
- **Terra, Venere, Marte, Mercurio** (come riferimento)
  - Densità°° nel range 3.9–5.5 g/cm³; massa 0.055–1 $M_\oplus$; raggio 0.38–1 $R_\oplus$.

Punti chiave per lo studio

- La **soglia di ~1.5 $R_\oplus$** è cruciale:
  - $R_p \lesssim 1.5\,R_\oplus$ → densità°° compatibili con pianeti rocciosi.
  - $R_p \gtrsim 1.5\,R_\oplus$ → la densità°° media scende, indicando frazioni crescenti di volatili (acqua, H/He).

Kepler-10 b

Kepler-10 b è un pianeta extrasolare che orbita attorno alla stella Kepler-10, una nana gialla piuttosto simile al Sole, distante 560 anni luce dal sistema solare, visibile nella costellazione del Dragone.



Si tratta probabilmente di un pianeta roccioso molto simile alla Terra per la struttura, ma troppo vicino alla stella per ipotizzare eventuale presenza di acqua allo stato liquido. Il pianeta è stato individuato dopo otto mesi di osservazione con il telescopio spaziale Kepler della NASA.

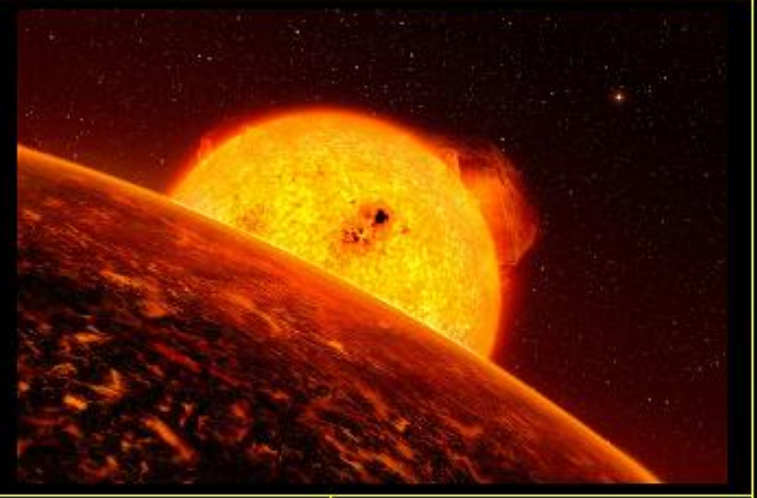


Rappresentazione artistica della superficie rovente di Kepler-10b; definito anche "pianeta di lava", con temperature superficiali superiori ai 1800 K.

CoRoT-7 b

CoRoT-7 b, precedentemente designato **CoRoT-Exo-7 b** , è un pianeta extrasolare che orbita intorno alla stella CoRoT-7, anche chiamata TYC 4799-1733-1, nella costellazione dell'Unicorno a una distanza di circa 489 anni luce dalla Terra . Individuato nel 2009 con il metodo del transito tramite il progetto SuperWASP, si tratta di una super Terra ed è il primo pianeta roccioso scoperto attorno a una stella di sequenza principale.

CoRoT-7 b



Mondi d’acqua e carbonio

Ipotesi composizionali

Alcuni pianeti potrebbero avere grandi frazioni di acqua e ghiacci ad alta pressione.

Rapporti chimici diversi nel disco protoplanetario possono favorire composizioni insolite.

Queste categorie restano difficili da confermare direttamente con dati limitati.



Rappresentazione artistica della superficie di Toi-1452b, un esopianeta che potrebbe essere un “pianeta oceano”, ovvero un pianeta interamente ricoperto da uno spesso strato di acqua liquida.

Caratteristiche medie dei mondi oceanici

Proprietà	Intervallo tipico / valore medio	Note e interpretazione fisica
Definizione (frazione d'acqua)	$\gtrsim 10\%$ della massa in H_2O (spesso 10–50%)	Per essere classificato come "pianeta oceanico" serve una frazione di acqua ben superiore a quella terrestre (~0.02%).
Massa tipica	~ 1–$10\ M_\oplus$ (alcuni fino a ~15 $M_\oplus$)	Molti ricadono nella fascia superterre / sub-Nettuni; la massa è dominata dal nucleo roccioso/ferroso.
Raggio tipico	~ 1.3–$2.5\ R_\oplus$ (alcuni fino a ~3 $R_\oplus$)	A parità[∞] di massa, un mondo oceanico ha raggio maggiore di un pianeta roccioso (acqua meno densa di rocce/ferro).
Densità[∞] media	~ 2–$6\ \mathrm{g\ cm^{-3}}$ (spesso 3–5 g/cm³)	Intermedia tra terrestri rocciosi (~5–8 g/cm³) e mini-Nettuni (~1–3 g/cm³); indica grande frazione di volatili (H_2O).
Struttura interna	Nucleo ferroso + mantello di silicati + strato di ghiaccio ad alta pressione + oceano superficiale	Modelli a strati: core Fe/Ni, mantello roccioso, eventuale strato di HPP (high-pressure ices), poi oceano liquido e/o ghiaccio superficiale.

Proprietà	Intervallo tipico / valore medio	Note e interpretazione fisica
	alta pressione + oceano superficiale	oceano liquido e/o ghiaccio superficiale.
Profondità dell'oceano	Da decine a centinaia di km; in alcuni modelli fino a ~1000 km	Per TOI-1452 b si stima fino a ~30% della massa in acqua; per LHS 1140 b fino a 9–19% in massa, con oceani di ordine ~100–800 km.
Composizione volatile	H_2O dominante; possibile CO_2 disciolto (fino a ~3–30 mol% rispetto a H_2O)	I mondi oceanici possono avere riserve significative di CO_2 nell'idrosfera, con implicazioni per clima e abitabilità.
Atmosfera	Possibile atmosfera da sottile a moderata (H_2O, CO_2, N_2, ecc.)	Non necessariamente spessa come nei mini-Nettuni; la distinzione richiede vincoli atmosferici (spettroscopia).
Orbite tipiche (campioni noti)	Molti nella zona abitabile o poco interni; periodi da ~10 a ~200 giorni	I candidati migliori sono spesso attorno a nane M/K, dove la zona abitabile è vicina e i transiti più frequenti.
Esempi candidati	TOI-1452 b, LHS 1140 b, alcuni pianeti di Kepler (es. Kepler-62 f, 186 f)	TOI-1452 b: ~30% massa in acqua; LHS 1140 b: 9–19% in acqua (o denso mini-Nettuno).

Esempi rappresentativi

- **TOI-1452 b**
  - $M \approx 4.8\,M_\oplus$, $R \approx 1.67\,R_\oplus$ (valori tipici riportati)
  - Densità°° inferiore a quella attesa per un pianeta roccioso; modelli suggeriscono fino a ~30% della massa in acqua.
  - Considerato un forte candidato “ocean planet” nella zona abitabile di una nana M.

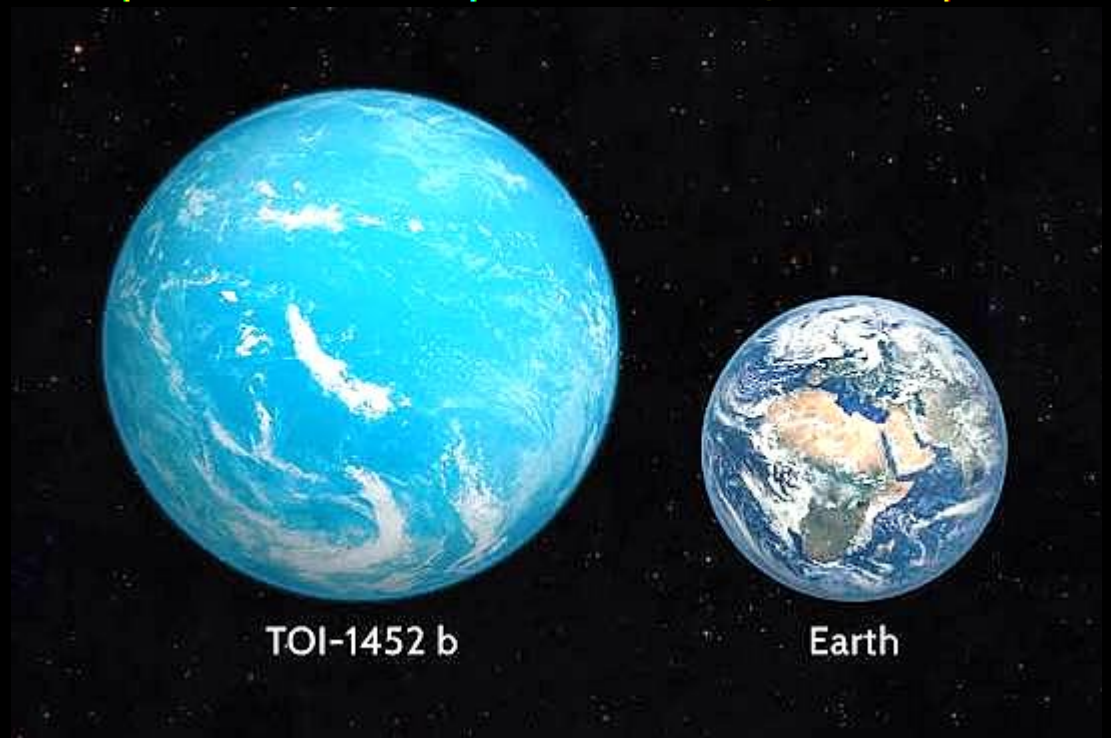
- **LHS 1140 b**
  - $M \approx 5.6\,M_\oplus$, $R \approx 1.73\,R_\oplus$
  - $\bar{\rho} \approx 5.9\ \mathrm{g\,cm^{-3}}$
  - Inizialmente classificato come superterra densa; studi successivi indicano 4–19% di massa in acqua, compatibile con un mondo oceanico o un denso mini-Nettuno.

- **Kepler-62 f, Kepler-186 f** (candidati)
  - Raggi ~1.4–1.6 $R_\oplus$, nella zona abitabile.
  - Compatibili con composizioni ricche in acqua, ma non univocamente vincolati senza massa precisa.

TOI-1452 b

TOI-1452 b è un pianeta extrasolare in orbita attorno alla stella TOI-1452, a circa 100 anni luce di distanza dal sistema solare, nella costellazione del Dragone. È stato scoperto nel 2022 con il metodo del transito tramite il telescopio spaziale TESS della NASA (TOI, sta per TESS Objects of Interest).

TOI-1452 b potrebbe essere un pianeta oceanico, cioè completamente ricoperto d'acqua.





Rappresentazione artistica dell'esopianeta Toi-1452b, un piccolo pianeta che potrebbe essere interamente coperto da un oceano immenso.

TOI-1452-b è una super Terra e il confronto tra la massa (circa cinque volte la Terra) e la densità (simile alla Terra) fanno pensare a un nucleo roccioso circondato da elementi più volatili. Più precisamente, il rapporto tra raggio e massa, unito all'analisi spettrale degli elementi presenti intorno alla stella madre (misurati tramite lo spettro-polarimetro SPIRou) sono consistenti con la possibilità che circa il 22% della massa del pianeta sia costituito da acqua.

Uno studio del 2024 ha stimato la temperatura di equilibrio in 326 ±7 K, che equivalgono a 52,85 °C, suggerendo che a seconda della composizione e spessore dell'atmosfera, potrebbe essere un mondo acquatico o avere la superficie rocciosa, in quanto l'effetto serra aumenterebbe la temperatura e l'acqua non potrebbe esistere allo stato liquido.

LHS 1140 b

LHS 1140 b è un esopianeta in orbita all'interno della zona abitabile conservativa della nana rossa LHS 1140. Scoperto nel 2017 attraverso il progetto MEarth, LHS 1140 b ha una massa quasi 6 volte maggiore e un raggio oltre il 70% più grande rispetto alla Terra; era stato inserito nella categoria dei pianeti considerati come Super Terre, tuttavia studi più recenti suggeriscono che si tratti di un mininettuno o di un pianeta oceanico.

LHS 1140 b dista da noi solo 40 anni luce e transita davanti alla sua stella, rendendolo un ottimo candidato per studiare la sua atmosfera con i più grandi telescopi terrestri e quelli spaziali, in particolare con il telescopio spaziale James Webb, il cui lancio è avvenuto il 25 dicembre del 2021.

LHS 1140 b



Rappresentazione artistica di LHS 1140 b

Orbita e temperatura [modifica | modifica wikitesto]

L'orbita di LHS 1140 b richiede 24,737 giorni circa per essere completata, battendo il periodo di rivoluzione della Luna, che è di 27,32 giorni. Il suo raggio orbitale è di 0,0936 AU, o 14 milioni di chilometri, ossia il 9% della distanza tra la Terra e il Sole. Anche se è abbastanza vicino, la stella LHS 1140 è così debole che il pianeta riceve solo il 50% del flusso incidente della Terra. Con un'albedo di 0, LHS 1140 b ha una temperatura di equilibrio media di 230 K (−43 °C; −46 °F), rispetto a quella della Terra a 255 K (−18 °C; −1 °F). Se LHS 1140 b avesse un'albedo simile a quello terrestre, la temperatura sarebbe ancora più bassa. Come molti altri pianeti potenzialmente abitabili, l'orbita di LHS 1140 b è piuttosto circolare: l'eccentricità è misurata essere inferiore a 0,29 con una confidenza del 90% e la circolarità dell'orbita non può essere spiegata dalle maree stellari, quindi si presume che sia la stessa dalla nascita del pianeta.

Abitabilità

LHS 1140 b si trova all'interno della zona abitabile, una regione attorno a una stella dove le temperature sono giuste per permettere la presenza di acqua allo stato liquido che si può accumulare sulla superficie, data una pressione atmosferica sufficiente. La temperatura di equilibrio di LHS 1140 b è piuttosto bassa, circa 226 K, ma sfruttando l'effetto serra, LHS 1140 b avrebbe una temperatura superficiale maggiore di 266 K (−7 °C; 19 °F), nel caso avesse un effetto serra paragonabile a quello terrestre, e di 296 K (23 °C; 73 °F) se avesse l'effetto doppio di quello terrestre, dando così la possibilità di abitarvi. Tuttavia a causa dell'elevata massa del pianeta, probabilmente l'atmosfera potrebbe addensarsi con un effetto serra più potente. Inoltre, la sua stella è scarsamente attiva implicando che l'erosione atmosferica non sarà molto elevata, il che consentirebbe al pianeta di conservare la sua atmosfera per tempi molto lunghi.

Uno studio del 2023 indica che il pianeta potrebbe essere un nano gassoso, con un'atmosfera ricca di elementi leggeri come idrogeno ed elio, oppure un pianeta oceanico; nel secondo caso, trovandosi all'interno della zona abitabile, potrebbe avere condizioni che consentano lo sviluppo di qualche forma di vita, fatto da escludere per i mininettuno che sono privi di una superficie definita.

In un ulteriore studio della NASA pubblicato alla fine del 2023, sono stati presi in considerazione alcuni pianeti che hanno all'incirca le dimensioni della Terra ma meno densi. Nonostante la composizione chimica di questi pianeti sia ancora sconosciuta, basandosi sulla stima della loro densità, si ipotizza che potrebbero avere oceani di acqua al di sotto di calotte di ghiaccio superficiali invece di roccia, che risulterebbe più densa. In questo caso, lo spessore stimato dello strato di ghiaccio superficiale su LHS 1140 b è stato calcolato essere di circa 1,6 chilometri.

Pianeti circumbinari

Due soli nel cielo

Orbitano attorno a entrambe le stelle di un sistema binario stretto.

La stabilità dinamica dipende dal rapporto fra separazione binaria e orbita planetaria.

I transiti possono essere variabili perché il piano orbitale precessa.



Caratteristiche dei pianeti circumbinari

Proprietà	Intervallo tipico / valore medio	Note e interpretazione fisica
Definizione orbitale	Orbita “P-type”: il pianeta orbita attorno al baricentro del sistema binario, esterno a entrambe le stelle.	Distinto dai pianeti “S-type” (orbitano attorno a una sola stella del sistema binario).
Separazione stellare (binaria)	$a_b \sim 0.1$–0.2 AU (per i sistemi Kepler transitanti)	Le binarie scoperte con CBP transitanti hanno periodi tipicamente 7–40 giorni.
Semiasse maggiore del pianeta	$a_p \sim 0.6$–1.1 AU (Kepler CBP)	Tutti i CBP noti di Kepler orbitano vicino al limite di stabilità interna, a ~1 AU. thesis.unipd +2
Rapporto a_p/a_b	~ 3–5 (spesso 2–4)	Regola pratica: orbita stabile se $a_p \gtrsim 2$–$4\, a_b$; i CBP noti tendono a stare appena fuori dal limite critico.
Periodo orbitale del pianeta	$P_p \sim 100$–300 giorni (alcuni più lunghi)	Tipicamente ~160 giorni per i CBP Kepler; periodi ~3–8 volte quello della binaria.
Massa / raggio	$R_p \gtrsim 3\, R_\oplus$; molti $R_p \sim 6$–$11\, R_\oplus$ (Nettuno–Saturno)	Tutti i CBP confermati hanno $R > 3\, R_\oplus$; la maggior parte è di tipo sub-Gioviano / Nettuniano.

Proprietà	Intervallo tipico / valore medio	Note e interpretazione fisica
Densità media	~ 0.4–$1.0\,\mathrm{g\,cm^{-3}}$ (per i giganti gassosi noti)	Coerente con pianeti a bassa densità (giganti gassosi / sub-Saturno).
Eccentricità orbitale	Generalmente bassa ($e_p \lesssim 0.1$)	Molti CBP hanno orbite quasi circolari e complanari con la binaria. aanda +1
Inclinazione mutua	$\Delta i \lesssim 3.5°$ (tipicamente)	I CBP transitanti tendono a essere quasi complanari con il piano orbitale della binaria.
Stabilità orbitale	Limite critico: $a_p \gtrsim a_{\mathrm{crit}} \approx (2$–$4)\,a_b$	Dentro questa "zona caotica" le perturbazioni gravitazionali destabilizzano l'orbita; fuori, il potenziale medio è sufficientemente regolare.
Formazione	Probabilmente migrati verso l'interno fino al bordo del disco circumbinario	Si pensa che si formino più esterni e migrino verso il limite di stabilità, dove si accumulano.
Abitabilità potenziale	Zona abitabile possibile, ma con variazioni di insolazione complesse	L'insolazione varia su scale temporali multiple (periodo binario, periodo planetario, precessione); stagioni estreme in alcuni casi.

Esempi rappresentativi

- **Kepler-16 b**
  - Primo CBP confermato con transiti.
  - Pianeta di tipo saturniano, $R \approx 0.75\,R_J$, $M \approx 0.33\,M_J$.
  - Orbita a ~1.05 AU attorno a una binaria con $a_b \approx 0.22$ AU; periodo ~229 giorni.

- **Kepler-34 b e Kepler-35 b**
  - Entrambi giganti gassosi a bassa densità.
  - Kepler-34 b: $M \approx 0.22\,M_J$, $R \approx 0.76\,R_J$, $P \approx 289$ giorni, $\bar{\rho} \approx 0.61\ \mathrm{g\,cm^{-3}}$.
  - Kepler-35 b: $M \approx 0.13\,M_J$, $R \approx 0.73\,R_J$, $P \approx 131$ giorni, $\bar{\rho} \approx 0.41\ \mathrm{g\,cm^{-3}}$.

- **Popolazione Kepler (14 CBP transitanti)**
  - Tutti con $R > 3\,R_\oplus$, molti Nettuno–Saturno.
  - Orbite vicine al limite di stabilità; binarie centrali con periodi > 7 giorni.

Kepler-16 (AB)b

Kepler-16 (AB)b è un pianeta extrasolare scoperto nella costellazione del Cigno. Si tratta di un pianeta di massa simile a quella di Saturno, che orbita attorno alla stella binaria Kepler-16 con un periodo di rivoluzione di 226 giorni. È il primo esempio osservativo di pianeta circumbinario attorno a stelle di sequenza principale. Il pianeta sarebbe costituito per metà da gas e per l'altra metà da un nucleo di roccia e ghiacci.

Nel nome ufficiale del pianeta "Kepler-16" indica il sistema di appartenenza e "(AB)" la circumbinarietà dell'orbita. Il pianeta è stato scoperto tramite il telescopio spaziale Kepler della NASA, che si è servito del metodo del transito: si è vista infatti una diminuzione di luminosità di una delle componenti del sistema anche quando questa non viene eclissata dall'altra. Inoltre, i transiti del pianeta hanno consentito di misurare con particolare accuratezza i parametri orbitali e le masse delle componenti del sistema.



Tatooine

Gli astronomi hanno ribattezzato colloquialmente Keplero-16b *Tatooine*, un pianeta fittizio su cui è ambientata parte della serie dei film di *Guerre stellari*: una scena del primo film mostra infatti un doppio tramonto su Tatooine.


Kepler-16b
Earth
Mercury
B
A



Pianeti erranti

Senza stella ospite

Un pianeta può essere espulso da un sistema giovane tramite interazioni dinamiche.

Il microlensing è una delle strategie migliori per cercarli.

Senza luce stellare, eventuale abitabilità richiederebbe sorgenti energetiche interne o atmosfere molto spesse.



Pianeta interstellare

Un **pianeta interstellare** o **pianeta errante** è un corpo celeste avente una massa equivalente a quella di un pianeta, ma non legato gravitazionalmente a nessuna stella: questi corpi celesti si muovono dunque nello spazio interstellare come oggetti indipendenti da qualsiasi sistema planetario, il che giustifica l'appellativo di **pianeta orfano** attribuito a volte, in maniera alternativa, a questo tipo di oggetti

Alcuni astronomi nel riferirsi a questi oggetti li chiamano "pianeti", considerandoli tali a tutti gli effetti: una delle teorie sulla formazione di questi oggetti, infatti, sarebbe proprio quella dell'origine planetaria. Si tratterebbe, dunque, di pianeti che un tempo orbitavano attorno a stelle, ma che poi (per motivi da definirsi) sarebbero stati espulsi dal proprio sistema.

I **pianeti interstellari** (o *pianeti erranti*, *rogue planets*, *free-floating planets* – FFP) sono oggetti di massa planetaria che non orbitano attorno a nessuna stella, ma si muovono liberamente nello spazio interstellare, legati solo al potenziale gravitazionale della Galassia. [2]

Definizione e terminologia

Un pianeta interstellare è un corpo celeste con massa comparabile a quella di un pianeta (da quella di Marte fino a diverse masse gioviane), ma **non legato gravitazionalmente a nessuna stella o nana bruna**. Nella letteratura scientifica si usano anche i termini:

- **Free-floating planet (FFP)**
- **Isolated planetary-mass object (iPMO)**
- **Rogue planet** (pianeta "ribelle" o "nomade")
- **Pianeta orfano** (in italiano, meno comune)

Per la definizione formale, ciò che conta è la massa (tipicamente sotto il limite per la fusione del deuterio, ~13 M_Jup) e l'assenza di un legame orbitale stabile con una stella. [1]

Metodi di individuazione

Poiché non riflettono luce stellare in modo stabile e sono freddi e deboli, i pianeti interstellari sono difficili da osservare. I metodi principali sono:

1. **Microlente gravitazionale**
    - Quando un FFP passa quasi esattamente lungo la linea di vista verso una stella lontana, la sua gravità deflette e amplifica temporaneamente la luce della stella.
    - Si osserva un picco di luminosità della durata da minuti a ore, senza ripetizione.

    - Questo è il metodo che ha fornito le prime evidenze statistiche solide di una popolazione abbondante di FFP.
2. **Imaging diretto in infrarosso**
    - I FFP giovani sono ancora caldi per contrazione gravitazionale e brillano in infrarosso.
    - In regioni di formazione stellare (es. Upper Scorpius) si cercano oggetti con colori e moti propri compatibili con appartenenza alla regione, ma senza stella ospite.

TRAPPIST-1

Sette pianeti terrestri

TRAPPIST-1 è una nana ultrafredda con sette pianeti di taglia terrestre.

Le orbite sono molto compatte e vicine a risonanze dinamiche.

Il sistema è un laboratorio per confrontare mondi simili per dimensione ma diversi per irraggiamento.



Prospetto del sistema

TRAPPIST-1

Pianeta	Massa	Raggio	Densità	Periodo orb.	Sem. maggiore	Incl. orbita
b	1,374 ± 0,069 $M_\oplus$	1,116 $r_\oplus$	5,425 g/cm³	1,51 giorni	0,01154 UA	89,56 ± 0,23°
c	1,308 ± 0,056 $M_\oplus$	1,097 $r_\oplus$	5,447 g/cm³	2,42 giorni	0,0158 UA	89,7 ± 0,18°
d	0,388 ± 0,012 $M_\oplus$	0,778 $r_\oplus$	4,354 g/cm³	4,05 giorni	0,0223 UA	89,87 ± 0,1°
e	0,692 ± 0,022 $M_\oplus$	0,920 $r_\oplus$	4,885 g/cm³	6,10 giorni	0,029 UA	89,736°
f	1,039 ± 0,031 $M_\oplus$	1,045 $r_\oplus$	5,009 g/cm³	9,21 giorni	0,039 UA	89,719°
g	1,321 ± 0,038 $M_\oplus$	1,129 $r_\oplus$	5,042 g/cm³	12,35 giorni	0,047 UA	89,721°
h	0,326 ± 0,020 $M_\oplus$	0,775 $r_\oplus$	4,147 g/cm³	18,77 giorni	0,062 UA	89,796°



rappresentazione schematica del sistema

Illustrations



TRAPPIST-1 System

	b	c	d	e	f	g	h
Orbital Period *days*	1.51 *days*	2.42 *days*	4.05 *days*	6.10 *days*	9.21 *days*	12.35 *days*	~20 *days*
Distance to Star *Astronomical Units (AU)*	0.011 *AU*	0.015 *AU*	0.021 *AU*	0.028 *AU*	0.037 *AU*	0.045 *AU*	~0.06 *AU*
Planet Radius *relative to Earth*	1.09 R_{earth}	1.06 R_{earth}	0.77 R_{earth}	0.92 R_{earth}	1.04 R_{earth}	1.13 R_{earth}	0.76 R_{earth}
Planet Mass *relative to Earth*	0.85 M_{earth}	1.38 M_{earth}	0.41 M_{earth}	0.62 M_{earth}	0.68 M_{earth}	1.34 $_{earth}$	–



Solar System
Rocky Planets

	Mercury	Venus	Earth	Mars
Orbital Period *days*	87.97 *days*	224.70 *days*	365.26 *days*	686.98 *days*
Distance to Star *Astronomical Units (AU)*	0.387 *AU*	0.723 *AU*	1.000 *AU*	1.524 *AU*
Planet Radius *relative to Earth*	0.38 R_{earth}	0.95 R_{earth}	1.00 R_{earth}	0.53 R_{earth}
Planet Mass *relative to Earth*	0.06 M_{earth}	0.82 M_{earth}	1.00 M_{earth}	0.11 M_{earth}

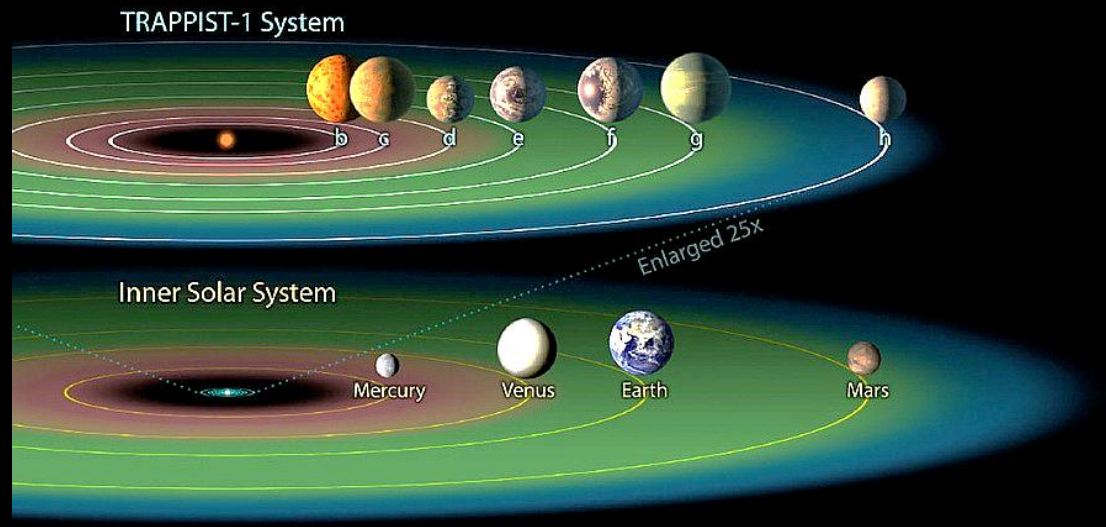
TRAPPIST-1 e zona abitabile

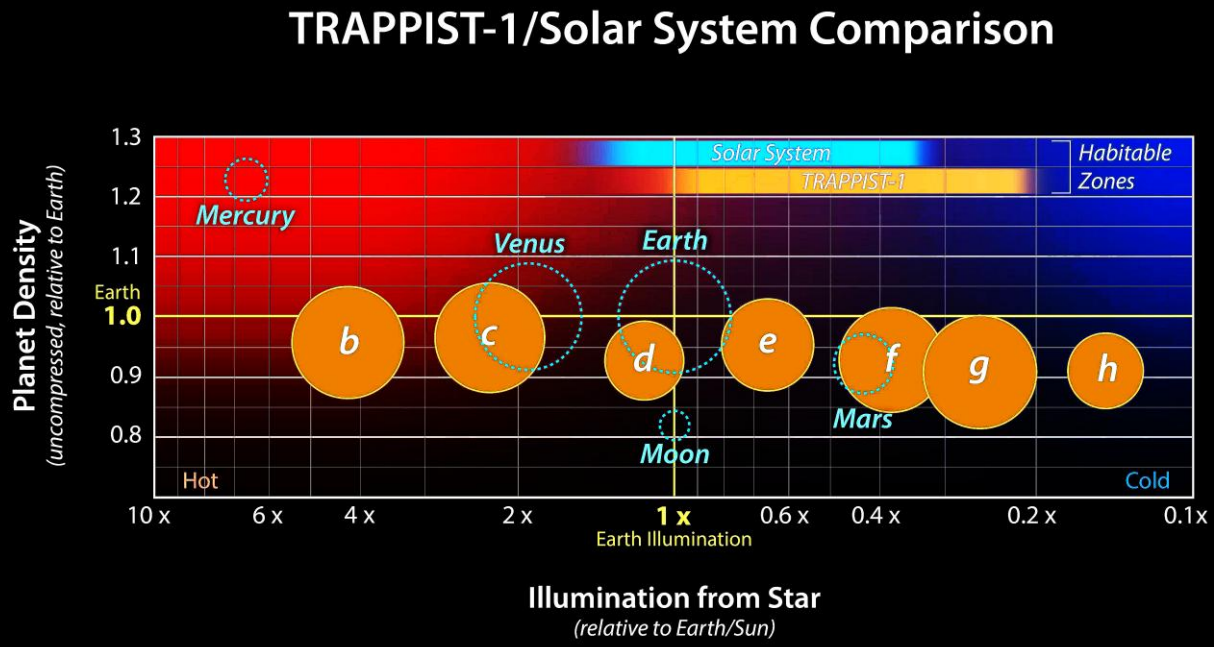
Pianeti e, f e g

Alcuni pianeti ricadono nella zona abitabile definita dal flusso stellare ricevuto.

La zona abitabile non determina da sola presenza di acqua o atmosfera.

L’attività della stella e la storia di perdita atmosferica sono fattori decisivi.





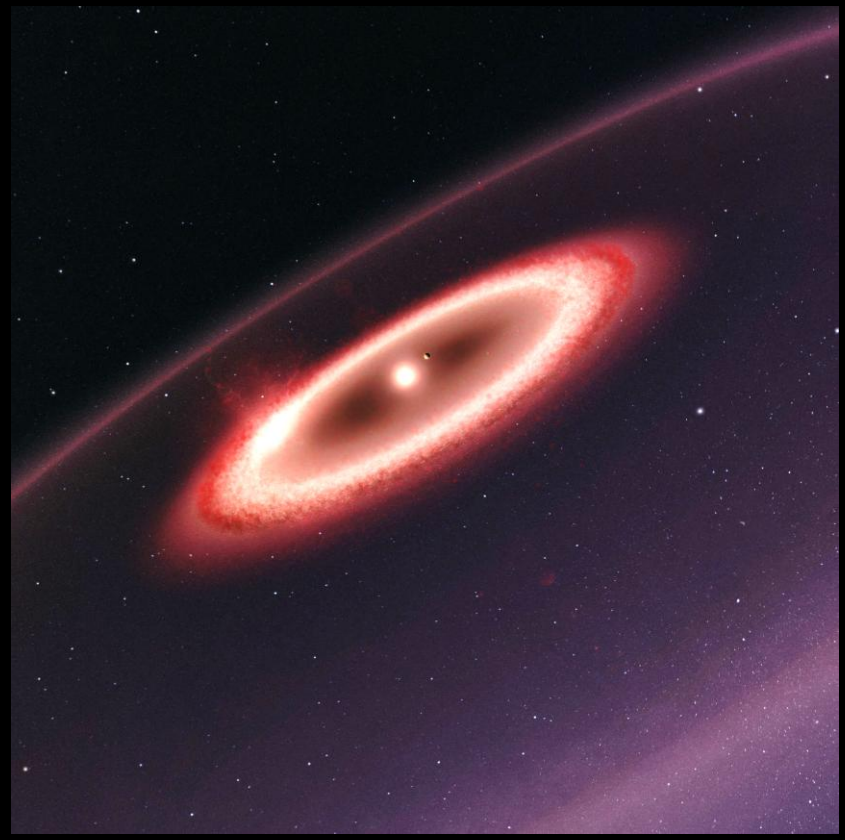
Proxima Centauri b

Il vicino più interessante

Proxima Centauri b orbita attorno alla stella più vicina al Sole, a circa 4,2 anni luce.

È stato individuato con velocità radiale e riceve un flusso compatibile con una zona temperata.

Le eruzioni e il vento stellare della nana rossa rendono l'abitabilità un problema aperto.



Prospetto del sistema

Pianeta	Tipo	Massa	Periodo orb.	Sem. maggiore	Eccentricità	Scoperta
d	Sub Terra	0,26 ±0,05 $M_\oplus$	5,122 giorni	0,02885 au	0,04	2020
b	Pianeta terrestre	1,173 ±0,086 $M_\oplus$	11,184 giorni	0,05 au	0,1	2016
c *	Super Terra	7 ±1 $M_\oplus$	5,23 anni	1,48 au	0,04	2019

** Non confermato*

Esopianeti nelle altre galassie

M51-ULS-1

Sistema binario a raggi X nella galassia M51

Comprende una stella compagna e un oggetto compatto

L'oggetto compatto è interpretato come stella di neutroni o buco nero

MNRAS **000**, 1–?? (2020) Preprint 22 September 2020 Compiled using MNRAS LATEX style file v3.0

M51-ULS-1b: The First Candidate for a Planet in an External Galaxy

R. Di Stefano,[1]★ Julia Berndtsson,[2] Ryan Urquhart,[3] Roberto Soria,[4,5] Vinay L. Kashyap,[1] Theron W. Carmichael,[1] Nia Imara[1]

[1]*Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian, 60 Garden St., Cambridge, MA 02138, USA*
[2]*Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA.*
[3]*Center for Data Intensive and Time Domain Astronomy, Department of Physics and Astronomy, Michigan State University, East Lansing MI 48824, USA*
[4]*University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
[5]*Sydney Institute for Astronomy, School of Physics A28, Sydney, NSW 2006, Australia*

M51-ULS-1 è un sistema binario a raggi X nella galassia M51 (Whirlpool Galaxy), famoso per aver ospitato il **primo candidato pianeta extragalattico**, indicato come **M51-ULS-1b**.

Contesto: la galassia M51

M51, nota come **Whirlpool Galaxy**, è una galassia spirale "grand design" a circa **8–9 Mpc** (~26–28 milioni di anni luce) nella costellazione dei Cani da Caccia È in interazione con una galassia compagna (NGC 5195), il che favorisce intensa formazione stellare e la presenza di molte sorgenti X giovani e luminose.



Il sistema M51-ULS-1

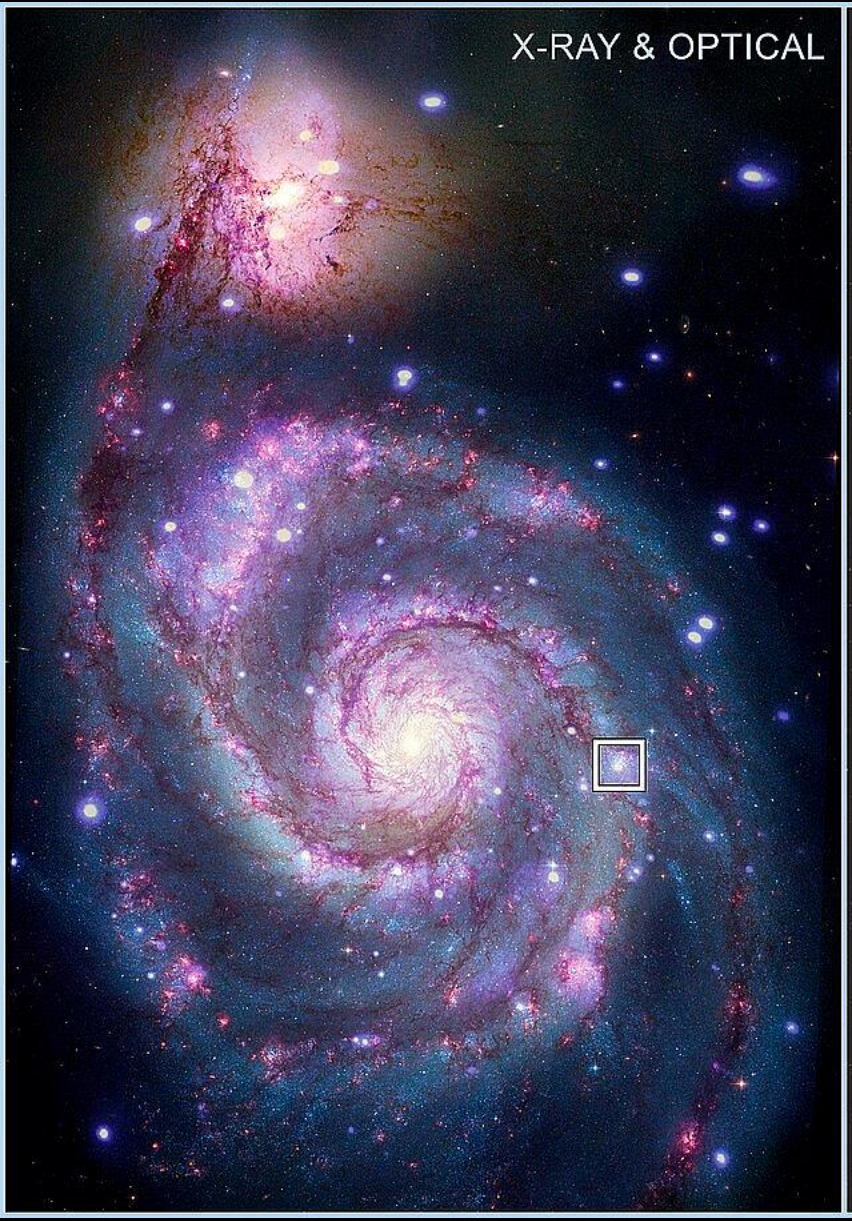
M51-ULS-1 è una **binaria a raggi X** (X-ray binary, XRB) molto luminosa in M51.

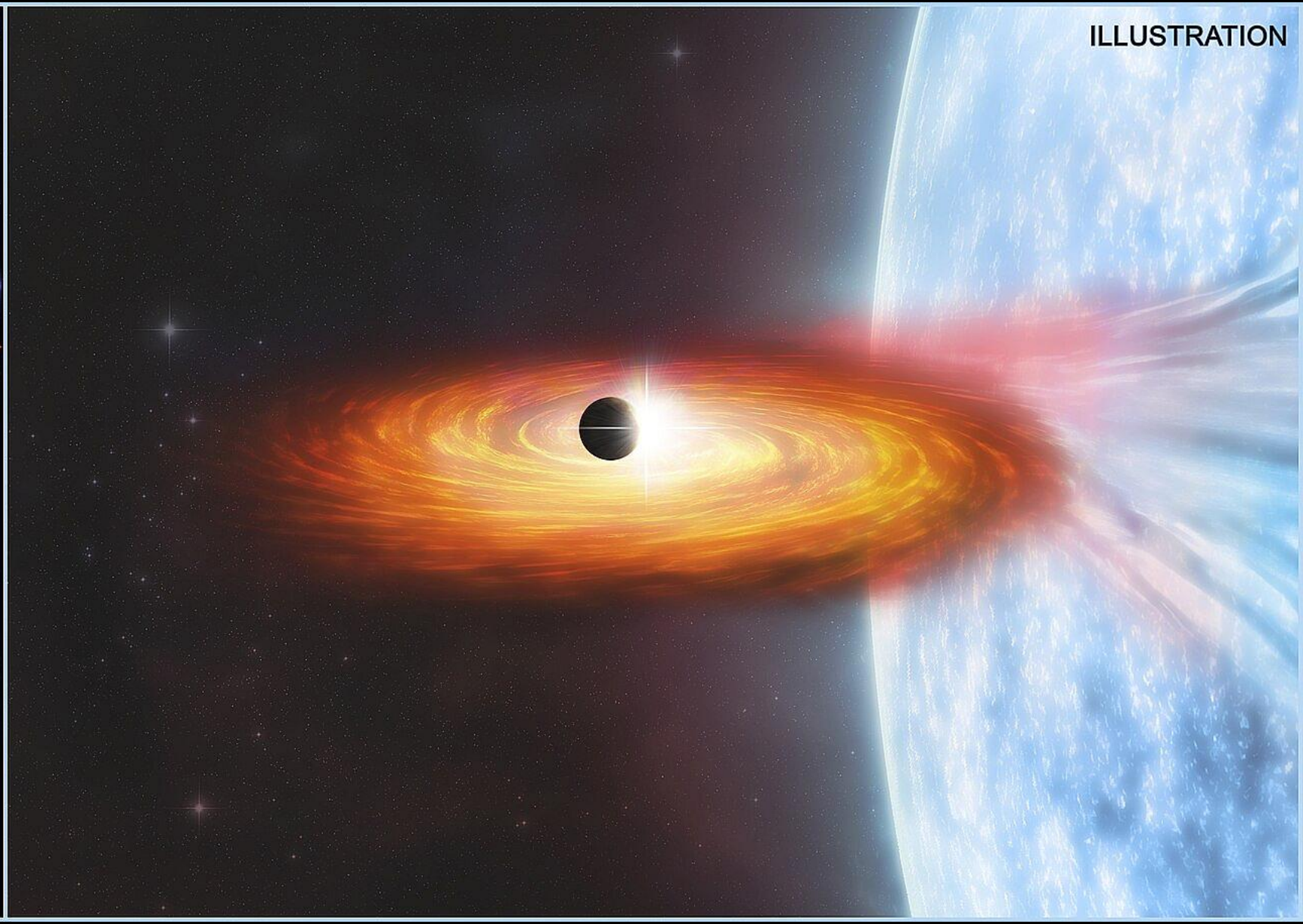
Il sistema è composto da:

- una **stella massiccia** (probabilmente una supergigante di tipo B, con massa $\gtrsim 8$–$20\ M_\odot$);
- un **oggetto compatto** (stella di neutroni o buco nero) che accresce materia dalla compagna, generando una potente emissione X.

Il nome "ULS" sta per *Ultra-Luminous Source* (o *Ultra-Luminous X-ray source*, ULX/ULS), a indicare una sorgente più luminosa delle tipiche binarie X galattiche.

M51-ULS-1



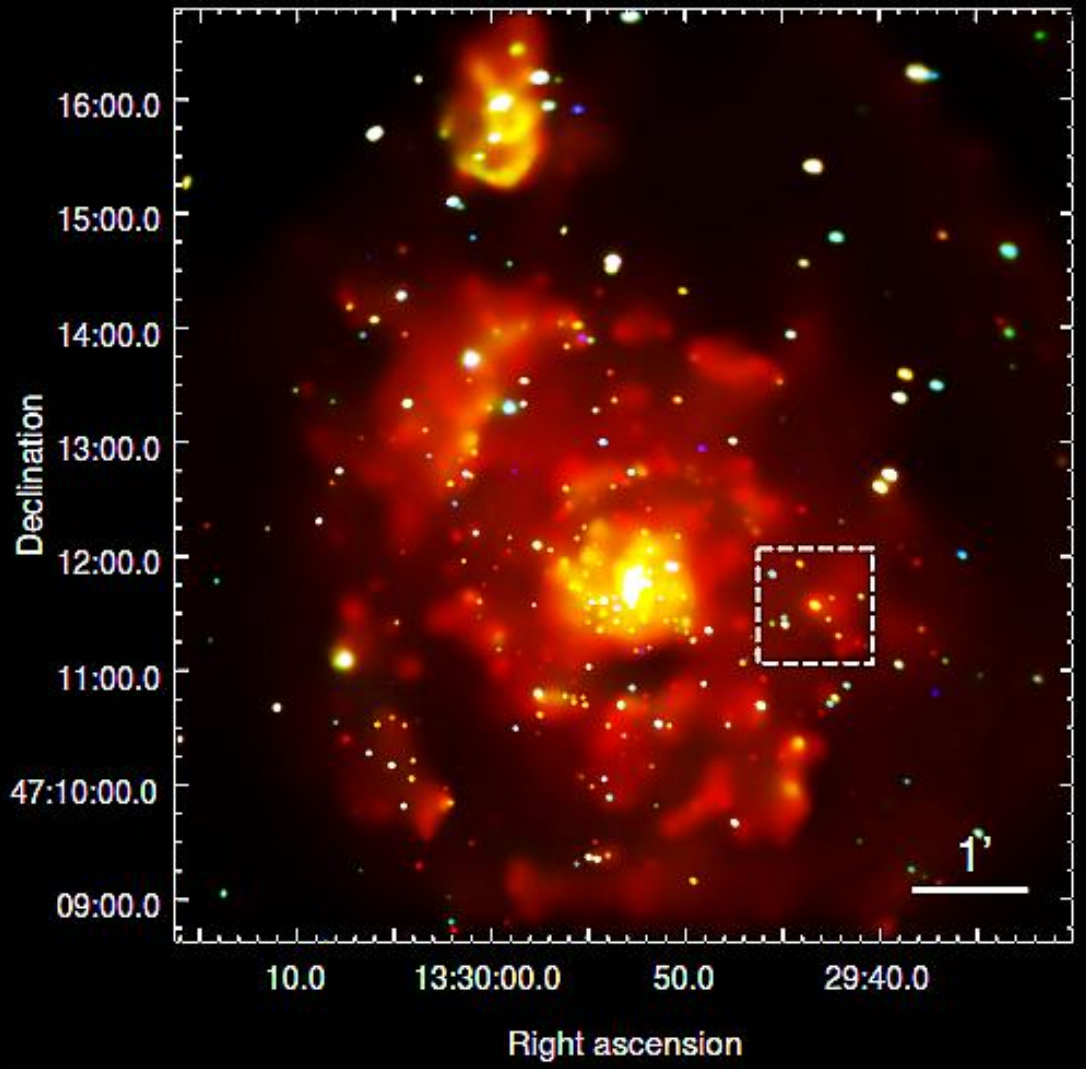


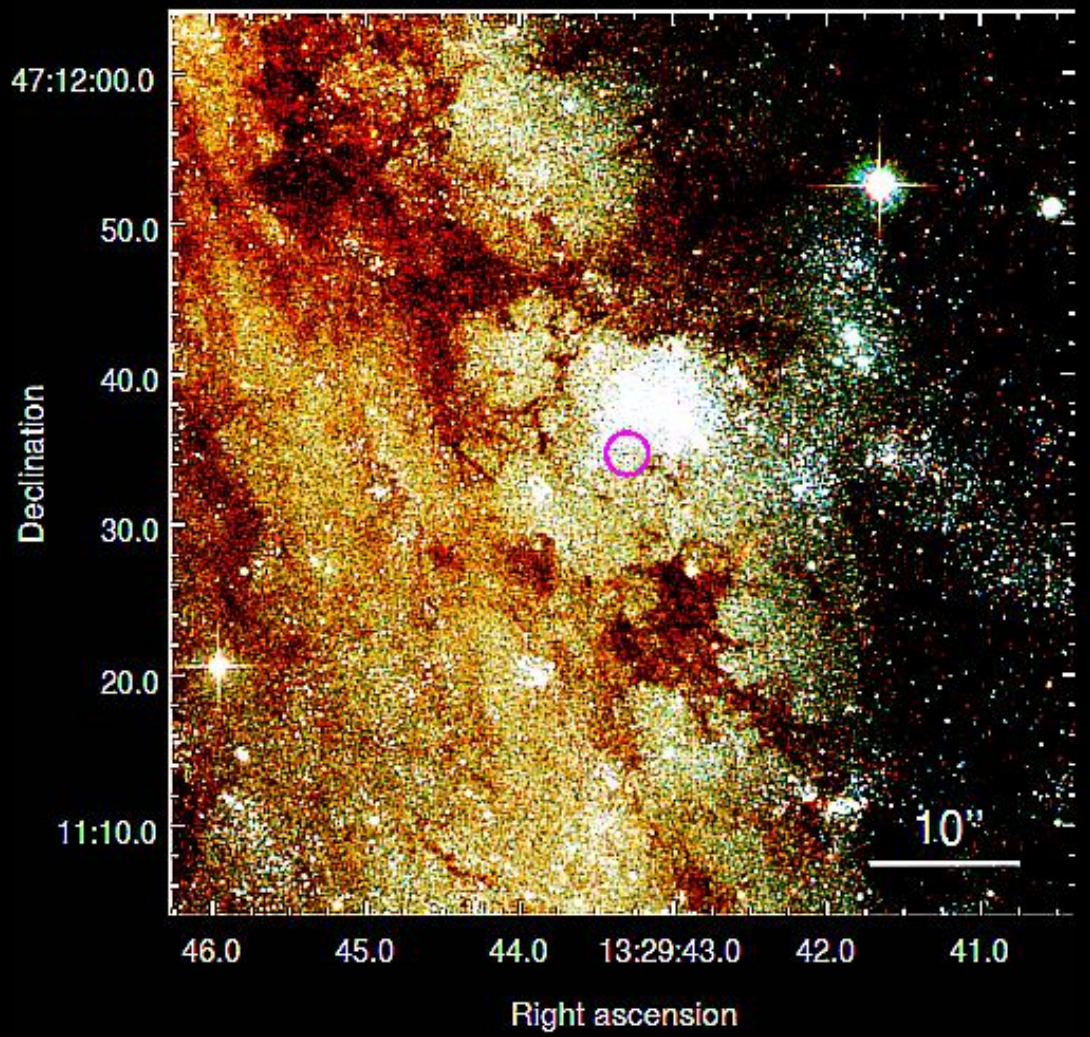
Il candidato pianeta M51-ULS-1b

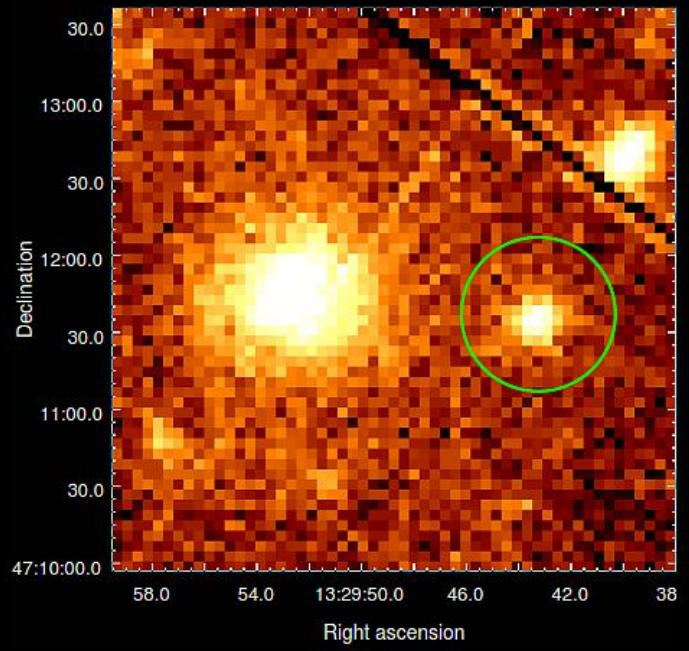
Nel 2020–2021, un team guidato da **Rosanne Di Stefano** ha analizzato dati dell'osservatorio a raggi X **Chandra** e ha individuato un **eclissi completo e breve** della sorgente X di M51-ULS-1.

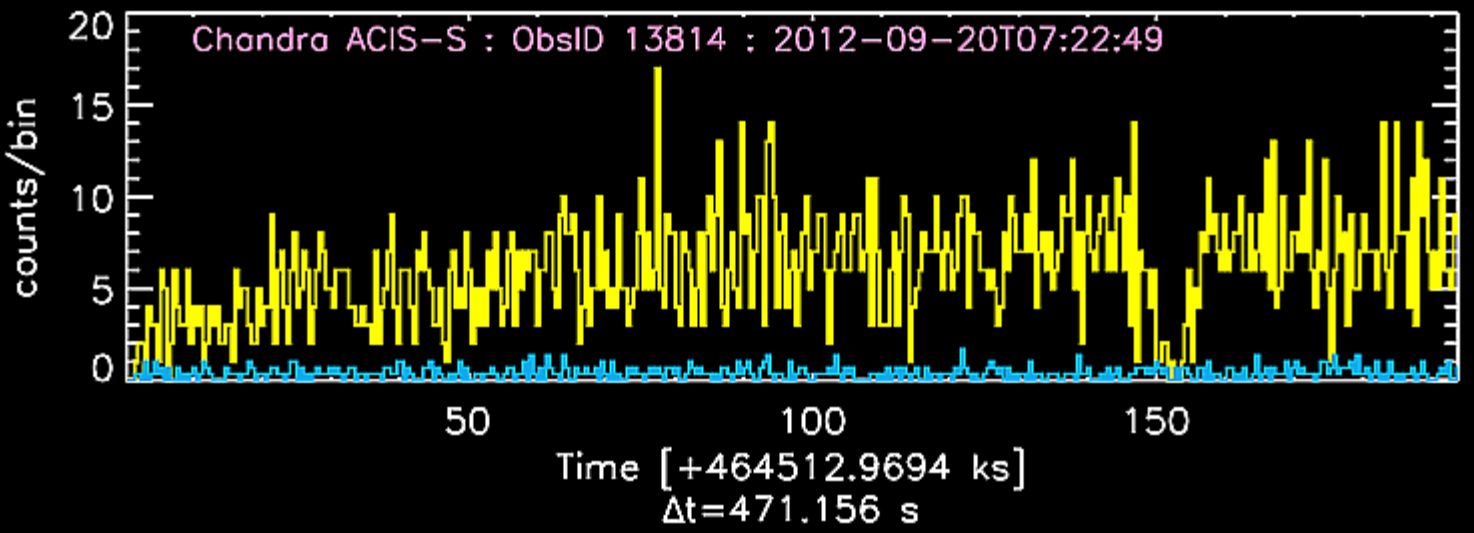
Caratteristiche dell'evento

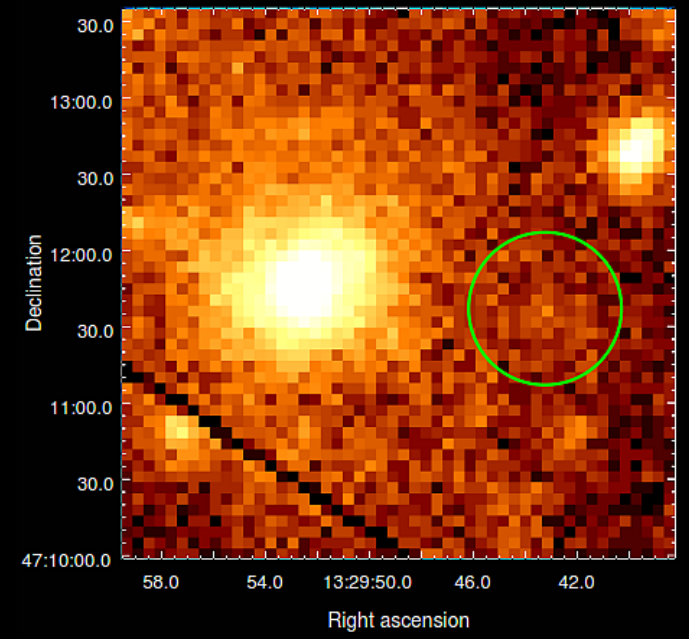
- Durante l'evento, il flusso X è sceso **quasi a zero** per circa **20–30 minuti**, con una deviazione dalla baseline di circa **3 ore** in totale.
- L'oggetto che ha causato l'eclissi ha dimensioni confrontabili con quelle della regione emittente X (molto compatta, dell'ordine del raggio di un pianeta o poco più).
- Modellando la curva di luce come un transito planetario, la soluzione più probabile indica un corpo con raggio **leggermente inferiore a quello di Saturno**, circa **0,7 R_Jup** (~50.000 km), con un intervallo di confidenza al 90% che va da ~0,18 a ~2,7 R_Jup.

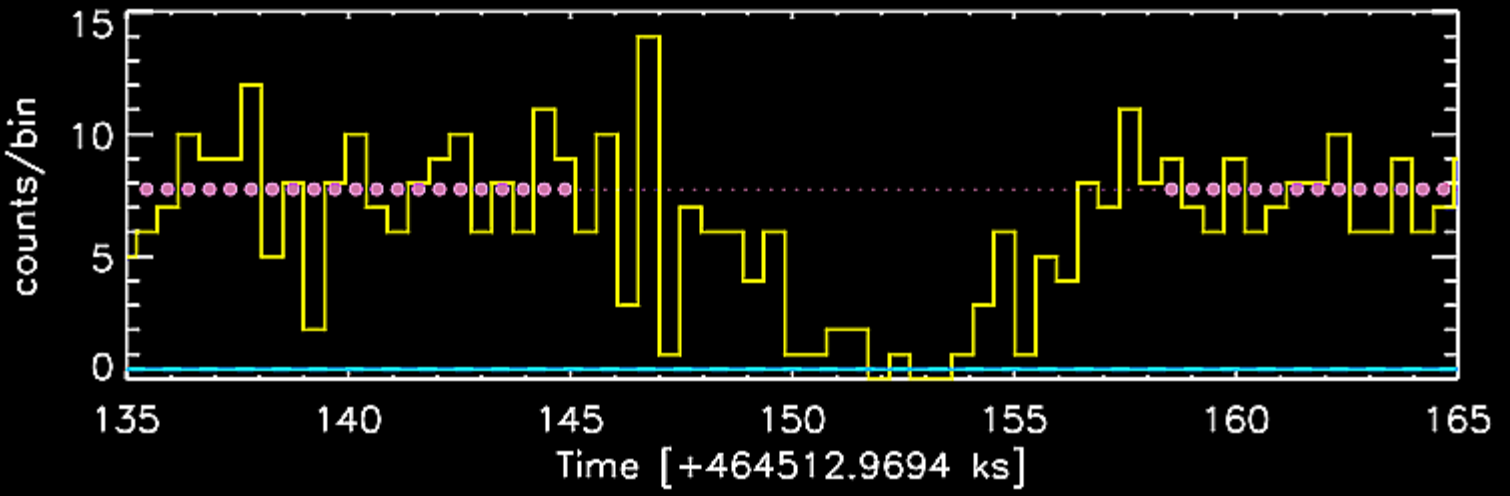

16:00.0
15:00.0
14:00.0
13:00.0
12:00.0
11:00.0
47:10:00.0
09:00.0
Declination
1'
10.0
13:30:00.0
50.0
29:40.0
Right ascension

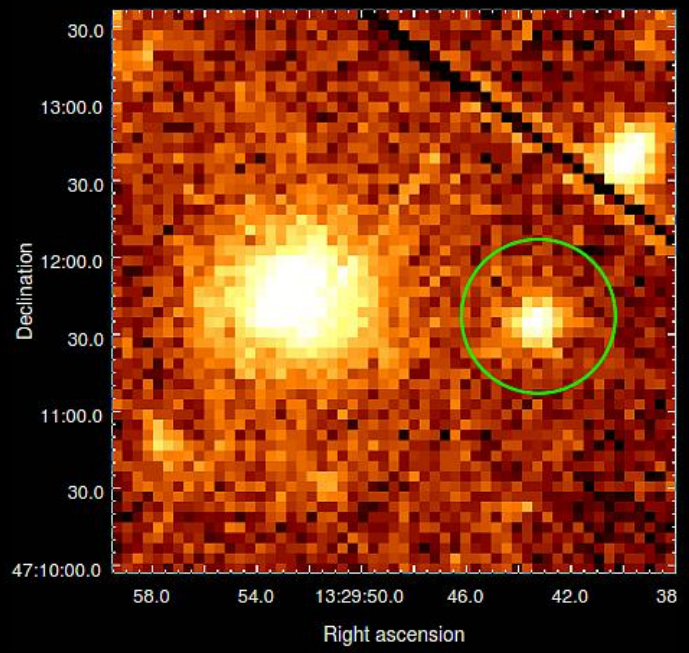

47:12:00.0
50.0
40.0
30.0
20.0
11:10.0
Declination
1.0"
46.0
45.0
44.0
13:29:43.0
42.0
41.0
Right ascension

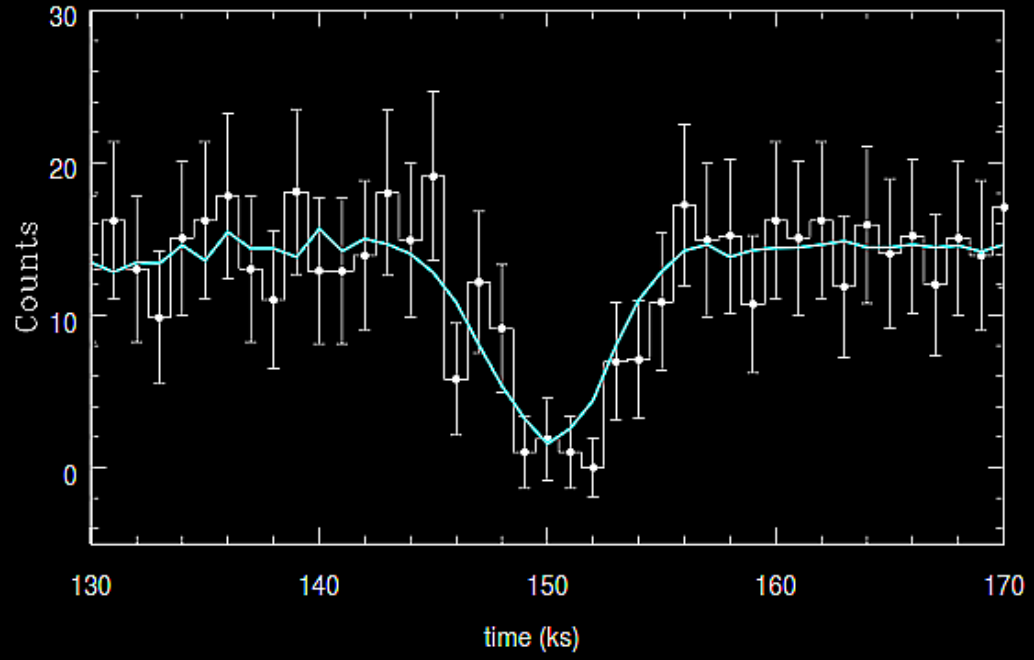

30.0
13:00.0
30.0
12:00.0
30.0
11:00.0
30.0
47:10:00.0
Declination
58.0
54.0
13:29:50.0
46.0
42.0
38
Right ascension

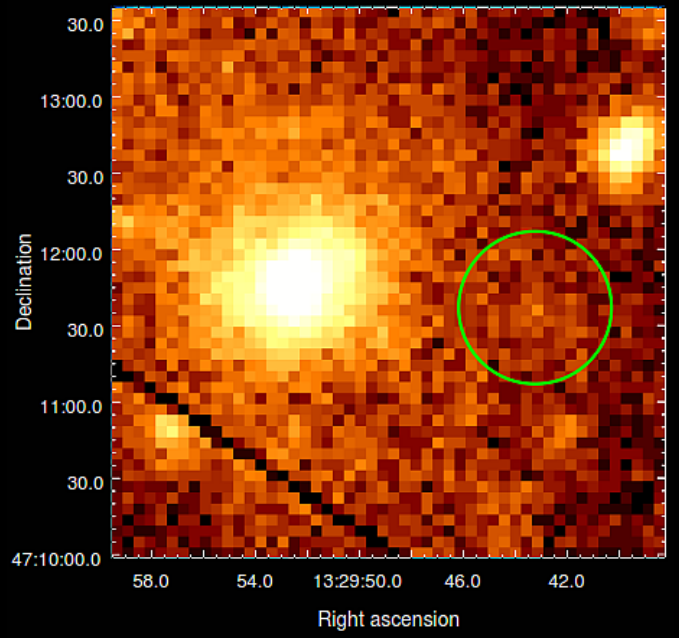

Chandra ACIS-S : ObsID 13814 : 2012-09-20T07:22:49
counts/bin
20
15
10
5
0
50
100
150
Time [+464512.9694 ks]
Δt=471.156 s

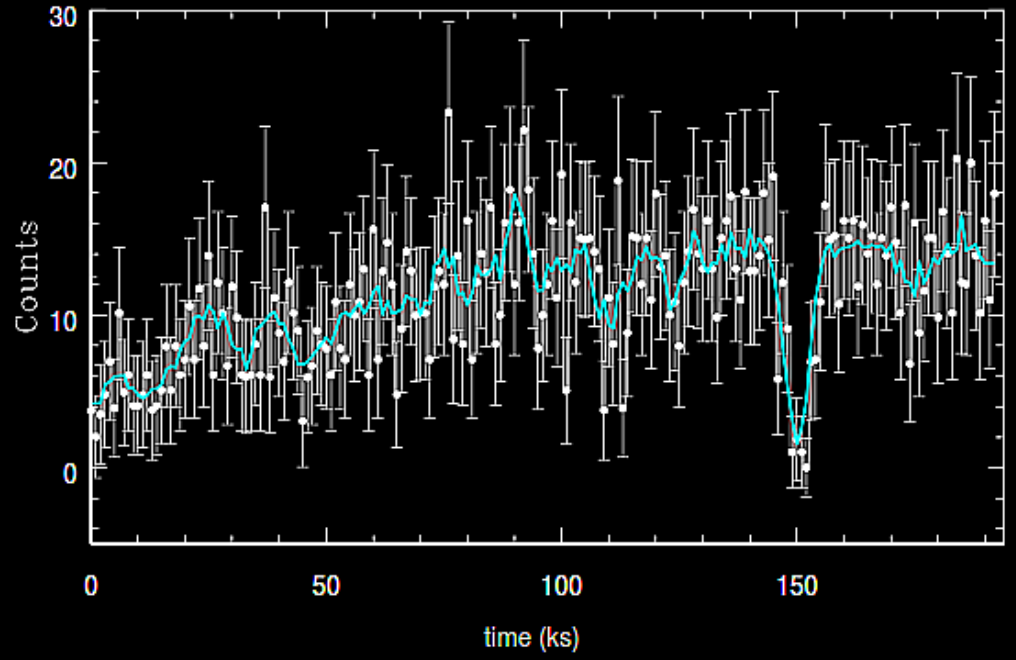

30.0
13:00.0
30.0
12:00.0
30.0
11:00.0
30.0
47:10:00.0
Declination
58.0
54.0
13:29:50.0
46.0
42.0
Right ascension


counts/bin
15
10
5
0
135
140
145
150
155
160
165
Time [+464512.9694 ks]


30.0
13:00.0
30.0
12:00.0
30.0
11:00.0
30.0
47:10:00.0
Declination
58.0
54.0
13:29:50.0
46.0
42.0
38
Right ascension


30
20
10
0
Counts
130
140
150
160
170
time (ks)


30.0
13:00.0
30.0
12:00.0
30.0
11:00.0
30.0
47:10:00.0
Declination
58.0
54.0
13:29:50.0
46.0
42.0
Right ascension


30
20
10
0
Counts
0
50
100
150
time (ks)

Parameter	Mode	90% bounds[†]	Mean $\pm 1\sigma$
c_X [ct bin^{-1}]	7.6	(7.3, 8.0)	7.6 ± 0.2
b [km]	0	$(0, 1.8 \times 10^5)$	$(7 \pm 11) \times 10^4$
f_{ec} [R_{Jup}]	0.74	(0.18, 2.7)	1.4 ± 1.3
v_{pl} [km s^{-1}]	17.1	(5.1, 56)	30 ± 20
T_{mid} [ks]	152.7	(152.2, 153.4)	152.8 ± 0.4
[‡]Eclipse start [ks]	147.8	(143.9, 151.3)	147.4 ± 2.6
[‡]Eclipse duration [ks]	10.5	(3.1, 17.9)	11 ± 5

Orbita ipotizzata

Secondo lo studio pubblicato su *Nature Astronomy* (2021):

- il candidato pianeta orbita attorno all'intera binaria (orbita circumbinaria);
- semiasse maggiore stimato: **~45 AU**;
- periodo orbitale: **~70 anni**.

Questo lo colloca a una distanza simile a quella di Nettuno dal Sole, ma attorno a un sistema binario molto più massiccio ed energetico.

Perché "pianeta" e non altro?

Gli autori hanno valutato alternative come:

- nubi di gas/polvere in transito;
- fluttuazioni intrinseche della sorgente X;
- nane brune o nane bianche.

Hanno escluso o ritenuto meno probabili queste ipotesi per:

- assenza di variazioni di "colore" X coerenti con assorbimento da gas;
- vincoli di età del sistema (≤ 20 Myr), incompatibili con alcune classi di oggetti compatti;
- la forma e la durata dell'eclissi, ben riprodotte da un modello di transito planetario.

Importanza scientifica

M51-ULS-1b è importante perché:

- è il **primo candidato pianeta in una galassia esterna** alla Via Lattea con evidenze osservative dirette (transito/eclissi).
- dimostra che la **caccia agli esopianeti** può essere estesa oltre la nostra galassia, sfruttando sorgenti X compatte e transiti completi.
- suggerisce che i pianeti possano formarsi e sopravvivere anche in ambienti estremi: vicino a binarie X giovani e massicce, con forte irradiazione e dinamica complessa.

Resta comunque un **candidato non ancora confermato** in modo indipendente; la conferma definitiva richiederebbe ulteriori transiti o metodi complementari, estremamente difficili a questa distanza.

PA-99-N2

L'unico **candidato esopianeta nella galassia M31** (Andromeda) finora discusso in letteratura è quello associato all'evento di microlente gravitazionale **PA-99-N2**, indicato come **PA-99-N2 b**.

Contesto: M31 e la ricerca di pianeti extragalattici

M31, la **Galassia di Andromeda**, è la grande galassia spirale più vicina alla Via Lattea, a circa **2,5 milioni di anni luce**. Per la sua distanza, i metodi classici di caccia agli esopianeti (transiti fotometrici su stelle singole, velocità radiali ad alta precisione) non sono applicabili: le stelle non sono risolvibili singolarmente con la precisione necessaria.

PA-99-N2

PA-99-N2 è un evento di microlente gravitazionale rilevato dalla collaborazione Point-Agape nel 1999, in direzione della Galassia di Andromeda (M31). Il segnale è stato il secondo rilevato in quell'anno nel quadrante nord di osservazione, da cui il nome.

L'evento è stato interpretato come causato da una stella nel disco di M31 che ha prodotto una lente gravitazionale, ingrandendo una gigante rossa, anch'essa nel disco. La stella che ha fatto da lente avrebbe una massa compresa tra 0,02 e 3,6 masse solari, con il valore di massima probabilità vicino a 0,5 masse solari.

La tecnica usata per cercare pianeti in M31 è il **pixel-lensing**, una variante del microlensing gravitazionale:

- una stella "lente" (in M31, nel suo alone, o nella Via Lattea) passa quasi esattamente lungo la linea di vista verso una stella sorgente in M31;
- la gravità della lente amplifica temporaneamente la luce della sorgente, producendo un picco di luminosità;
- se la lente è un sistema binario (stella + pianeta), la curva di luce mostra deviazioni caratteristiche rispetto al profilo "a campana" di Paczyński tipico delle lenti singole.

L’evento PA-99-N2

PA-99-N2 è un evento di microlente individuato nel 1999 dalla collaborazione **POINT-AGAPE** in direzione del disco nord di M31.

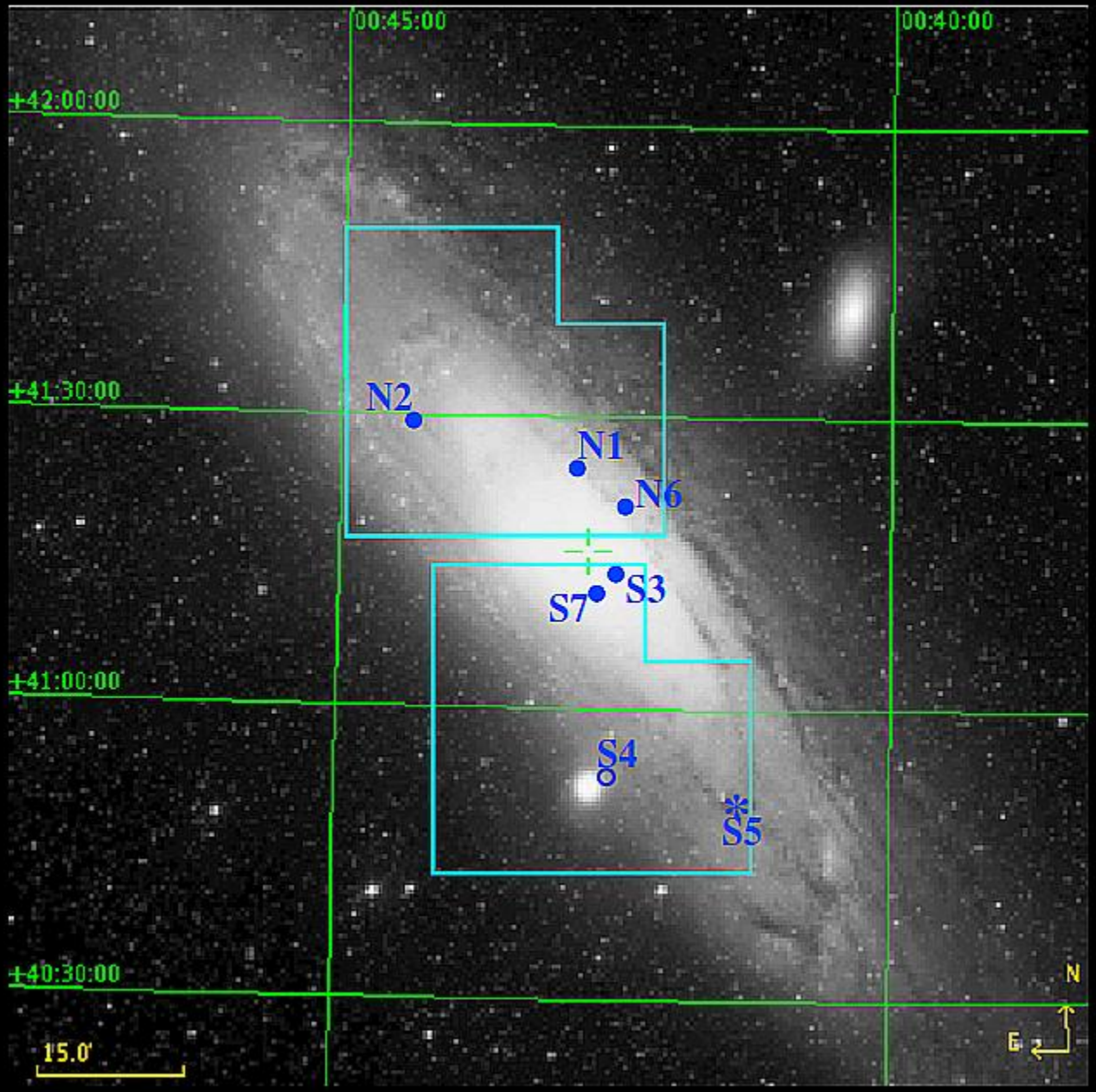
Caratteristiche principali:

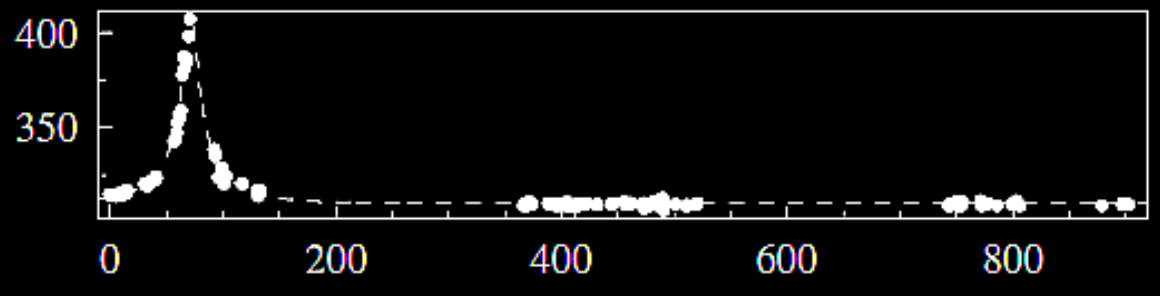
- è uno degli eventi di microlente più luminosi e con miglior rapporto segnale/rumore verso M31;
- la curva di luce mostra piccole anomalie rispetto a un profilo di lente singola, compatibili con una **lente binaria**.

Modelli successivi hanno interpretato l’evento come:

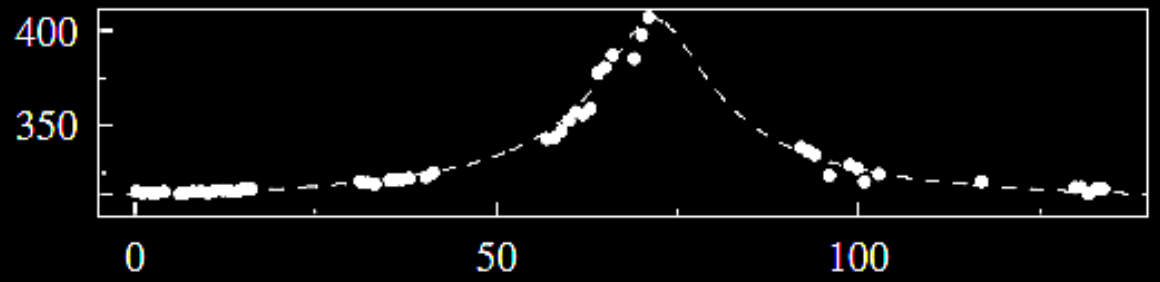
- una **stella sorgente** (gigante rossa, RGB/AGB) nel disco di M31;
- una **stella lente** (probabilmente nel disco o nell’alone di M31) con massa stimata tra **0,02 e 3,6 M⊙**, con valore più probabile attorno a **~0,5 M⊙**.

Evento PA-99-N2

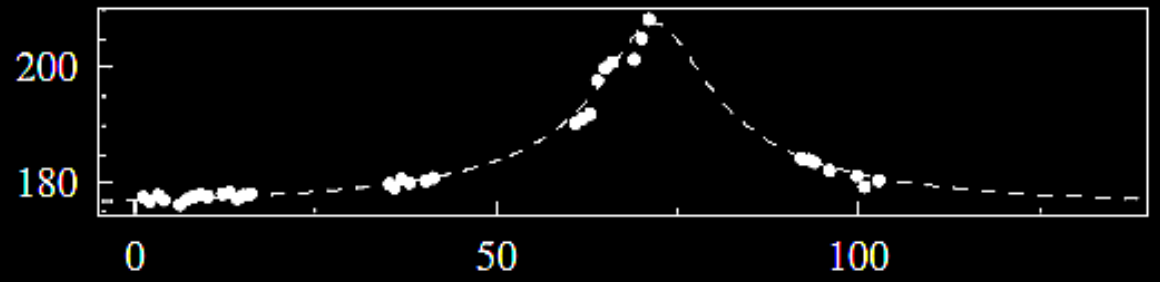




PA-99-N2 r light curve



PA-99-N2 r light curve (zoom)



PA-99-N2 g light curve (zoom)

Il candidato pianeta PA-99-N2 b

Assumendo che la lente sia una stella di ~0,5 M⊙ nel disco di M31, le deviazioni nella curva di luce sono ben riprodotte dalla presenza di un **companione planetario** attorno alla stella lente.

Parametri principali del candidato (dai lavori di Ingrosso et al. e successivi):

- **Massa del pianeta**: circa **6,34 M_Jup** (masse gioviane);
- **Tipo**: gigante gassoso, analogo a Giove ma più massiccio;
- **Stato**: **candidato non confermato**, classificato come "unconfirmed" nei cataloghi di esopianeti.

Nei database (es. exoplanet.eu) compare come:

- **Nome**: PA-99-N2 b
- **Status**: Candidate
- **Anno di pubblicazione come pianeta**: 2009 (analisi dedicate al caso planetario)
- **Massa**: 6,34 M_J (da un'unica pubblicazione principale).

Confronto con M51-ULS-1b

Per completezza, è utile mettere PA-99-N2 b a confronto con l'altro famoso candidato extragalattico, **M51-ULS-1b**:

Proprietà	PA-99-N2 b (M31)	M51-ULS-1b (M51)
Galassia ospite	M31 (Andromeda, ~2,5 Mly)	M51 (Whirlpool, ~28 Mly)
Metodo di rilevamento	Pixel-lensing (microlente gravitazionale)	Transito/eclissi in raggi X (Chandra)
Tipo di sistema	Stella lente + pianeta (binaria)	Binaria X (stella + oggetto compatto) + pianeta circumbinario
Massa stimata	~6,34 M_Jup	raggio ~0,7 R_Jup (massa non diretta)
Stato	Candidato, non confermato	Candidato, non confermato
Anno scoperta (evento)	1999 (pianeta discusso dal 2009)	2020–2021

Entrambi restano **candidati**: la conferma indipendente è estremamente difficile a queste distanze, ma mostrano che, in linea di principio, la popolazione planetaria si estende anche oltre la Via Lattea.



Grazie dell'attenzione!!