
CONCORSO
GIOVANI ASTRONOMI AL TNG
IV EDIZIONE, A.S. 2026-27
Pianeti extra-solari
Riccardo Spinelli
INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA
SPECULA PANORMITANA
MDCCXC
EXOPA

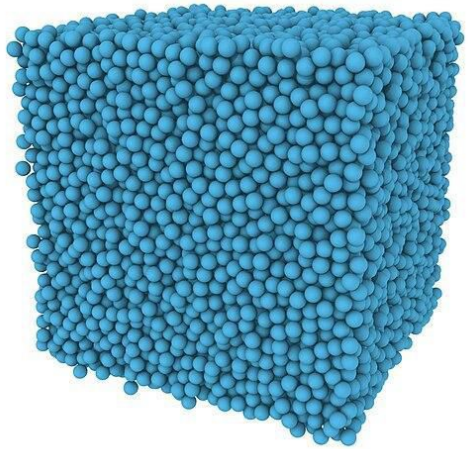
Pianeti extra-solari (o esopianeti)

1. Cosa sono? Come vengono scoperti?
2. Cosa sappiamo sui pianeti extrasolari?
3. Le domande aperte
4. Esempi di proposte osservative al TNG

Un pianeta extrasolare è un pianeta che orbita attorno ad una stella che non è il Sole (può essere una stella di sequenza principale, ma anche una stella di neutroni, una nana bianca ecc): è dunque un **oggetto sferoidale**, la sua massa deve essere abbastanza grande da aver “ripulito” la sua orbita ma non troppo grande da innescare processi di fusione nucleare al suo interno (**13 masse** gioviane = 4134 masse terrestri)

In realtà esistono anche **“esopianeti erranti”** o **“solitari”** che probabilmente si sono formati in un sistema planetario ma che poi sono stati espulsi.

Atomisti: Democrito (470-350 a.C. circa), Leucippo (460-370 a.C. circa), Epicuro (341-270 a.C.)



Credit: Eric Hahn, CC BY-SA 4.0.



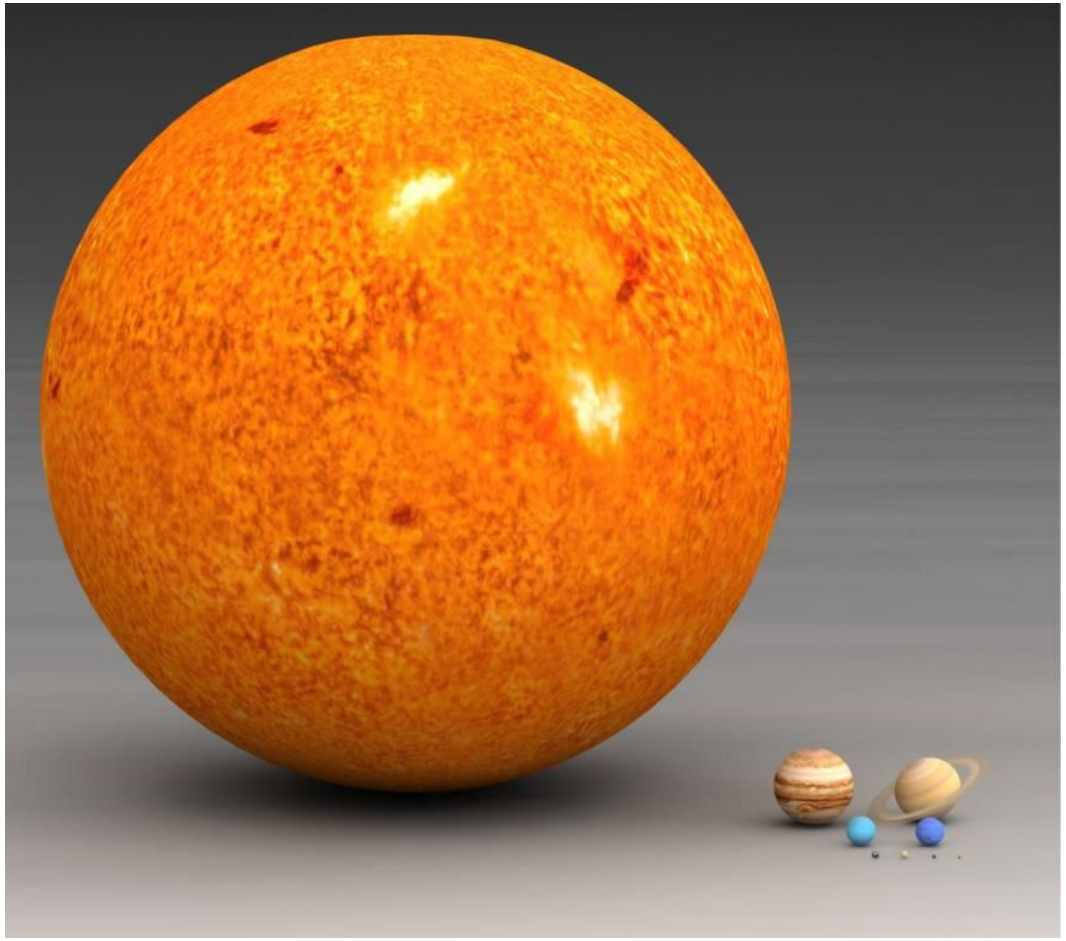
Credit: HDblog

Lucrezio, De Rerum Natura, II libro (70 a.C):
"Se tanto il numero dei nuclei creatori che tutta l'età dei viventi non basta a contarli, se la stessa forza permane che possa gli stessi elementi riunire ovunque al modo che qui li ha riuniti , è certo, che altrove ci sono altre terre e altri mari, altre forme ci sono di animali e di uomini.

"Sono dunque soli innumerabili, sono terre infinite, che similmente circuiscono quei soli; […] noi veggiamo gli soli, che son gli più grandi, anzi grandissimi corpi, ma non veggiamo le terre, le quali, per esserno corpi molto minori, sono invisibili […] o per lontananza maggiore o per quantità minore…" De l'infinito, universo et mondi, Giordano Bruno



Credit: Wikimedia Commons

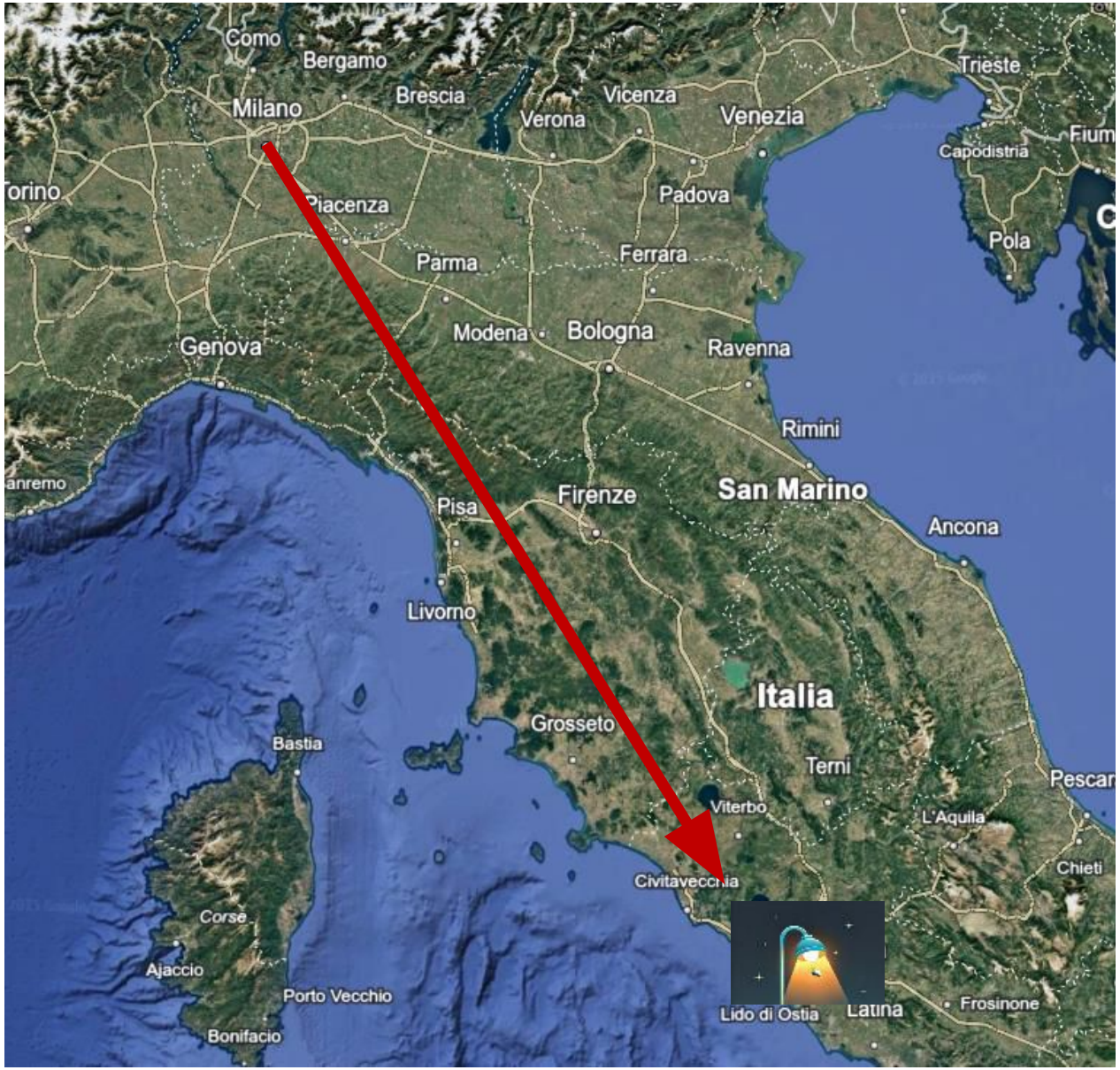


Credit: Lsmpascal, CC BY-SA 3.0

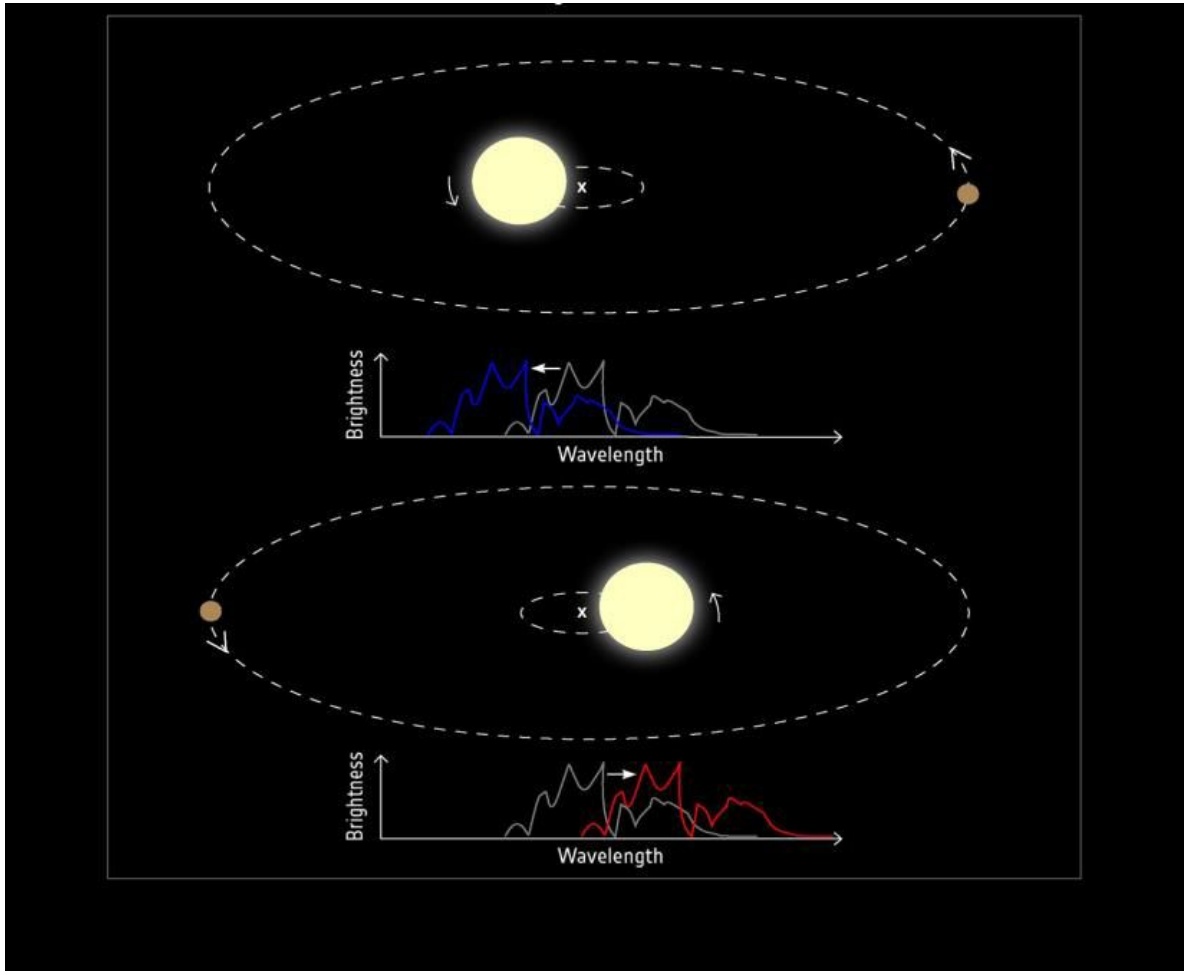


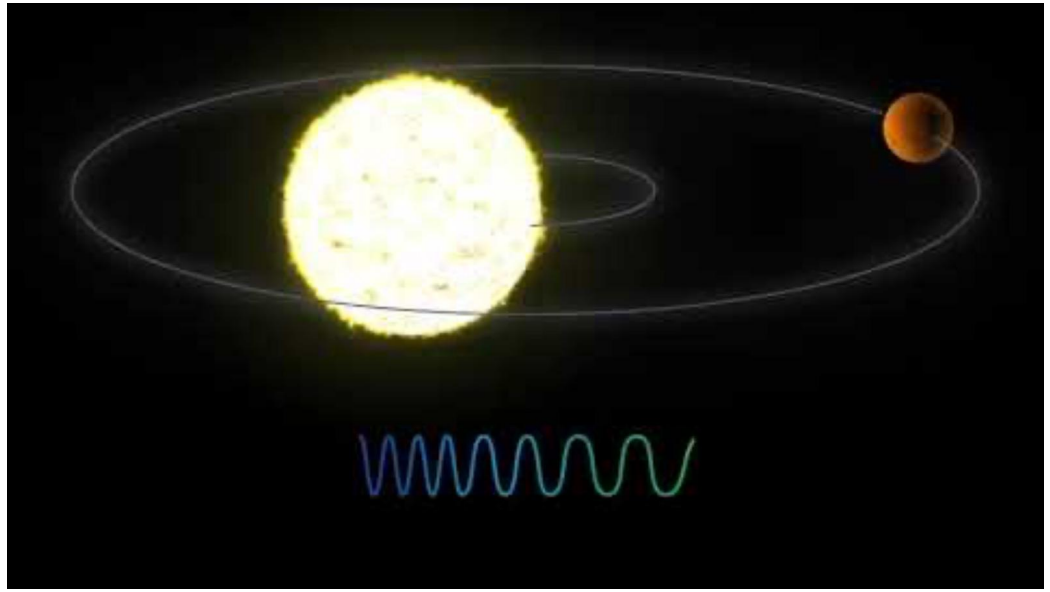
Credit: NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute

Terra-Saturno: 1.4 miliardi di km
Terra-Proxima Centauri: 38000 miliardi di km


Como
Bergamo
Milano
Brescia
Verona
Vicenza
Venezia
Trieste
Capodistria
Fium
Pola
Padova
Ferrara
Parma
Modena
Bologna
Ravenna
Rimini
Genova
Pisa
Firenze
San Marino
Ancona
Livorno
Italia
Grosseto
Bastia
Terni
Viterbo
L'Aquila
Chieti
Civitavecchia
Corse
Ajaccio
Porto Vecchio
Bonifacio
Lido di Ostia
Latina
Frosinone

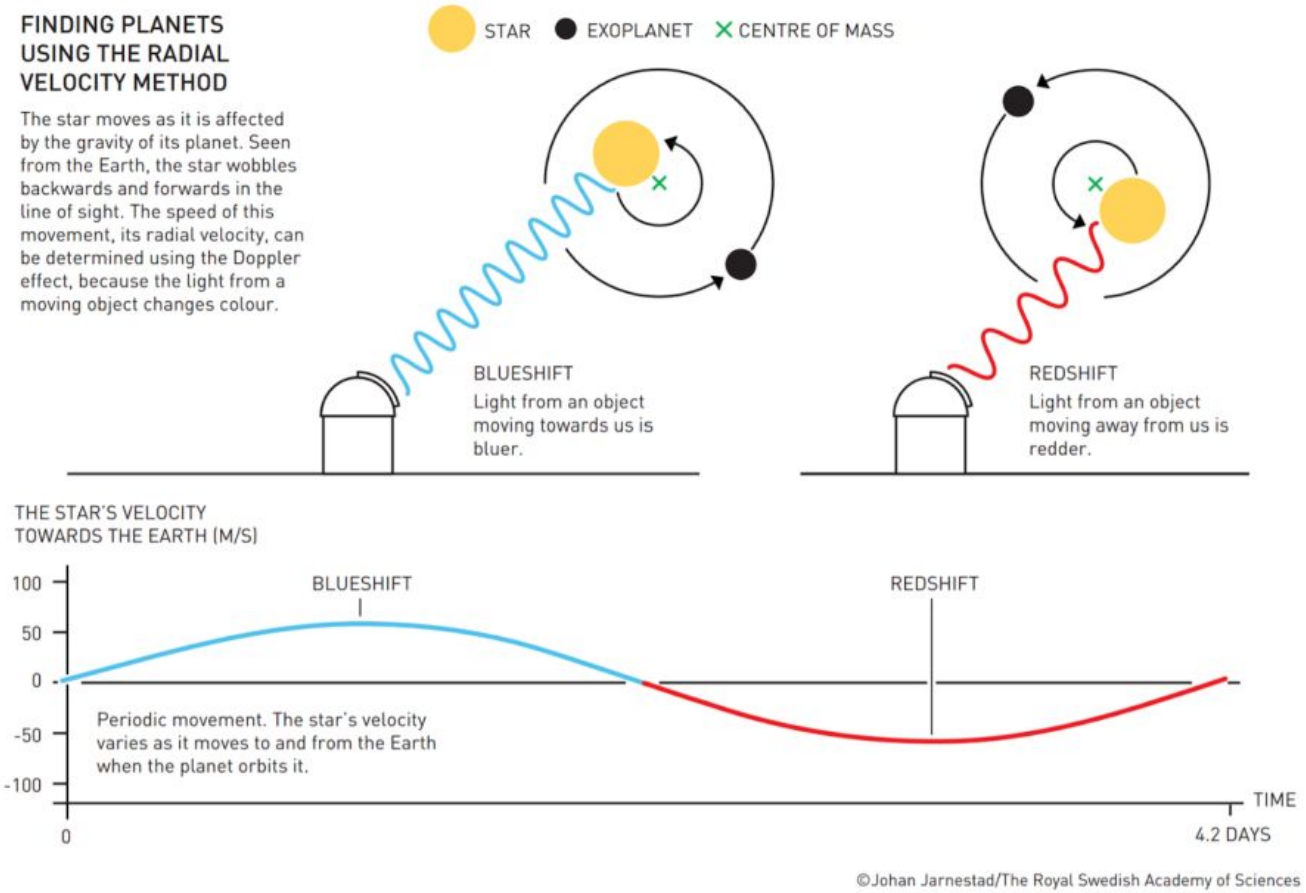
Il metodo delle velocità radiali

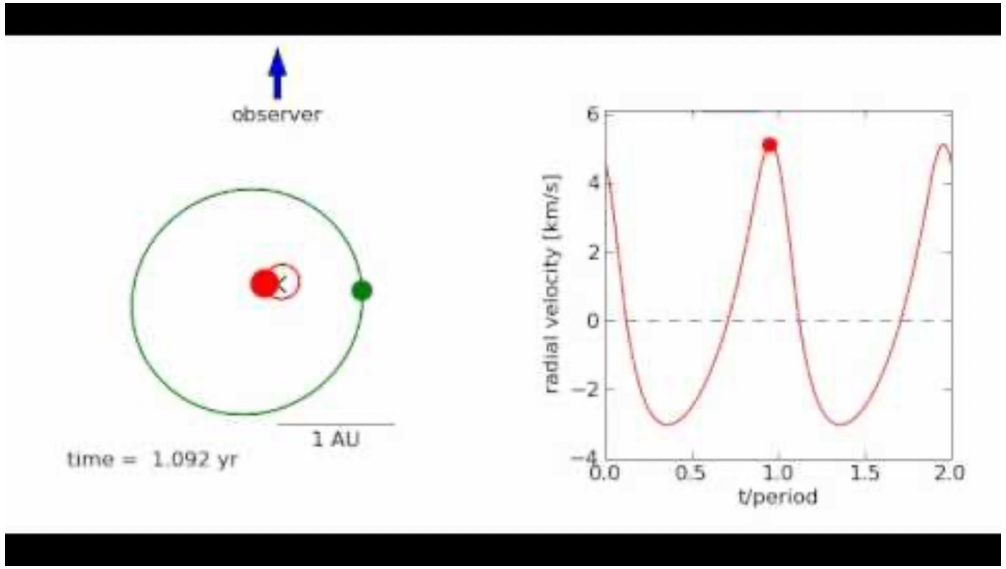




- Limite inferiore sulla massa del pianeta.
- Favoriti: pianeti massicci, vicini alla stella, orbitanti attorno a stelle poco massicce, fredde, vecchie, brillanti.
- Non può essere utilizzato per sistemi con piano orbitale perpendicolare alla linea di vista.

Proxima Centauri b: il pianeta «potenzialmente abitabile» più vicino a noi è stato scoperto con il metodo delle velocità radiali





Credit: Mike Zingale, YouTube

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P}\right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_\star + M_p)^{2/3}} \frac{1}{(1-e^2)^{1/2}}$$

W. D. COCHRAN AND A. P. HATZES

Table I
Radial Velocity Signals of the Planets

Planet	M_p (M_J)	R (AU)	P (years)	$\Theta_\star$ at 10 pc (mas)	$V_\star$ (ms^{-1})
Mercury	1.74E-4	0.387	0.241	6.4E-6	0.008
Venus	2.56E-3	0.723	0.615	1.8E-4	0.086
Earth	3.15E-3	1.000	1.000	3.0E-4	0.089
Mars	3.38E-4	1.524	1.881	4.9E-5	0.008
Jupiter	1.0	5.203	11.86	0.497	12.4
Saturn	0.299	9.54	29.46	0.273	2.75
Uranus	0.046	19.18	84.01	0.084	0.297
Neptune	0.054	30.06	164.8	0.156	0.281
Pluto	6.3E-6	39.44	247.7	2.4E-5	3E-5

Il metodo delle velocità radiali: un piccolo esperimento…



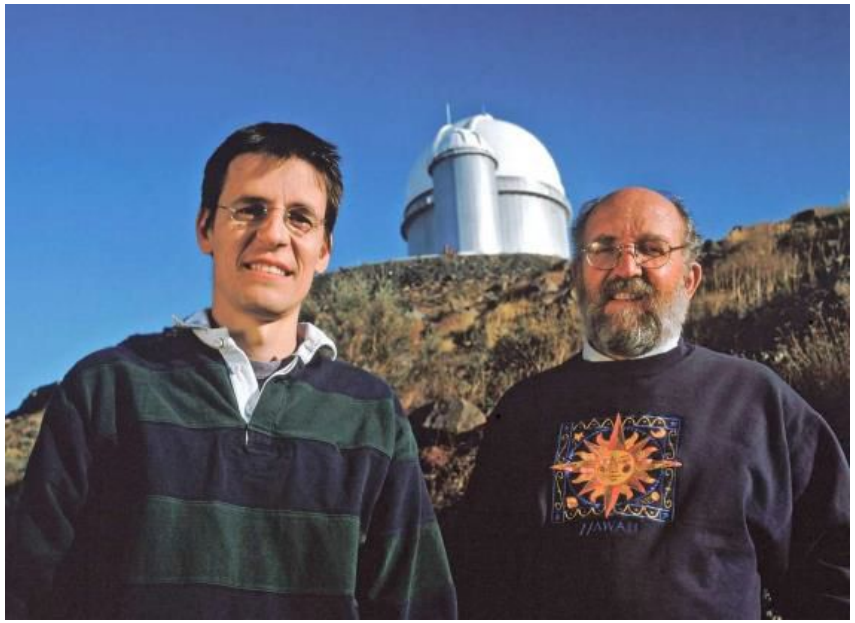
Pepite di Scienza di Simone Baroni:
https://www.youtube.com/watch?v=DYKTCK4KxUw

Published: 01 November 1995

A Jupiter-mass companion to a solar-type star

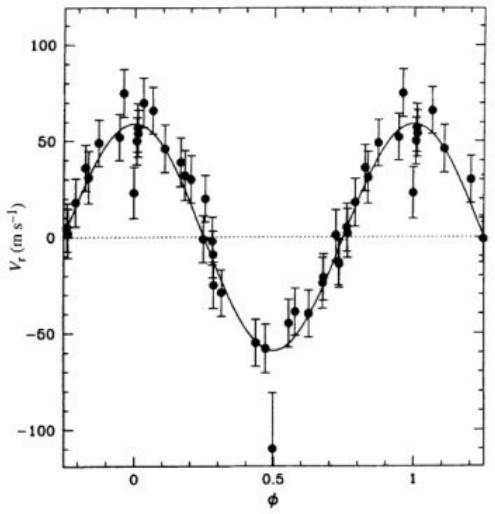
Michel Mayor & Didier Queloz

Nature **378**, 355–359 (1995) | Cite this article



Credit: Wikimedia Commons





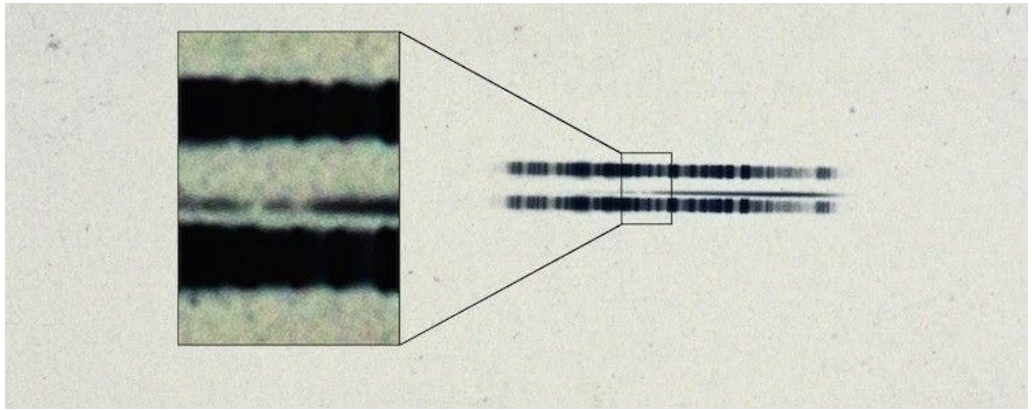
Mayor & Queloz, 1995



Credit: Nobel Prize

HARPS-N: High Accuracy Radial velocity Planet Searcher for the Northern emisphere

Stella di Van Maanen, nana bianca con fotosfera inquinata di metalli: 1917 (Walter Adams)

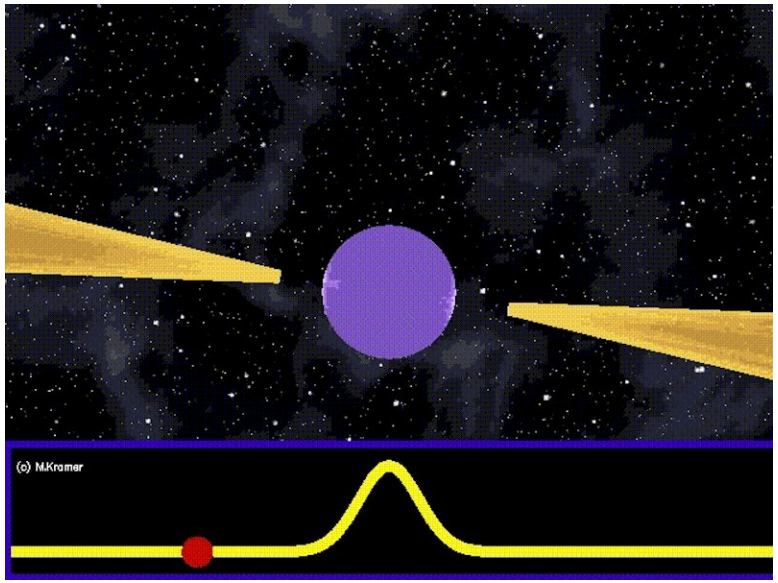


https://science.nasa.gov/universe/exoplanets/overlooked-treasure-the-first-evidence-of-exoplanets/

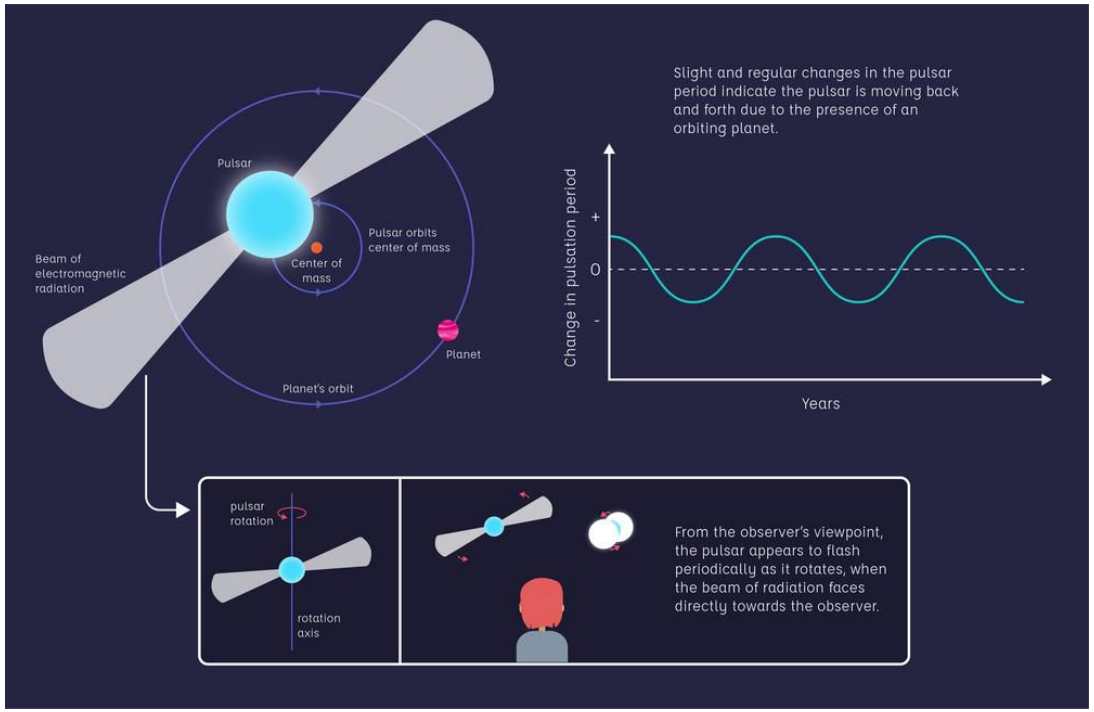
Letter | Published: 09 January 1992

A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12

A. Wolszczan & D. A. Frail

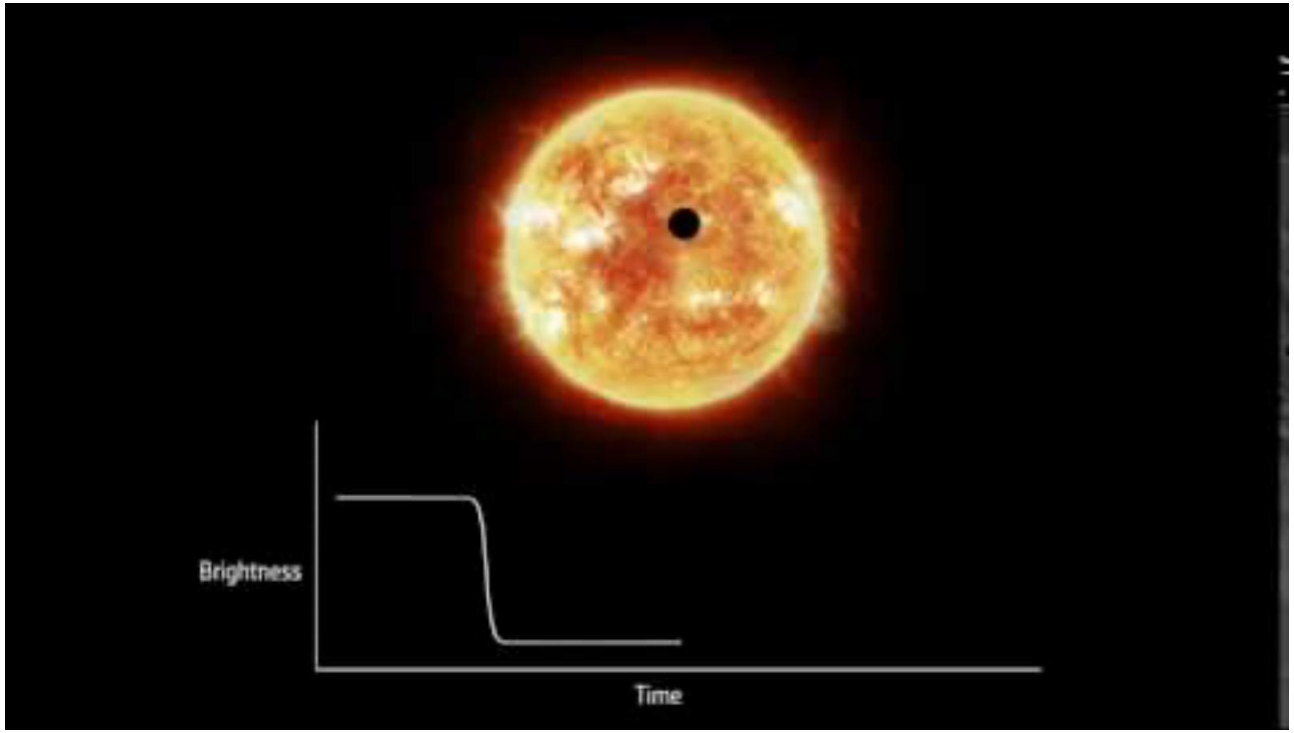


Credit: Michael Kramer, CC BY



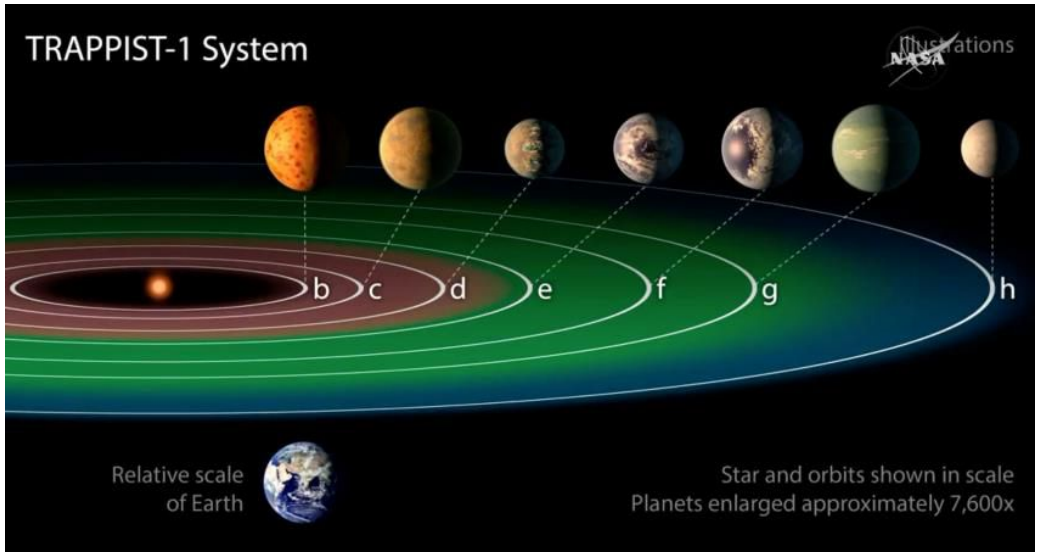
Credit: Carnegie Institution for Science

Il metodo dei transiti



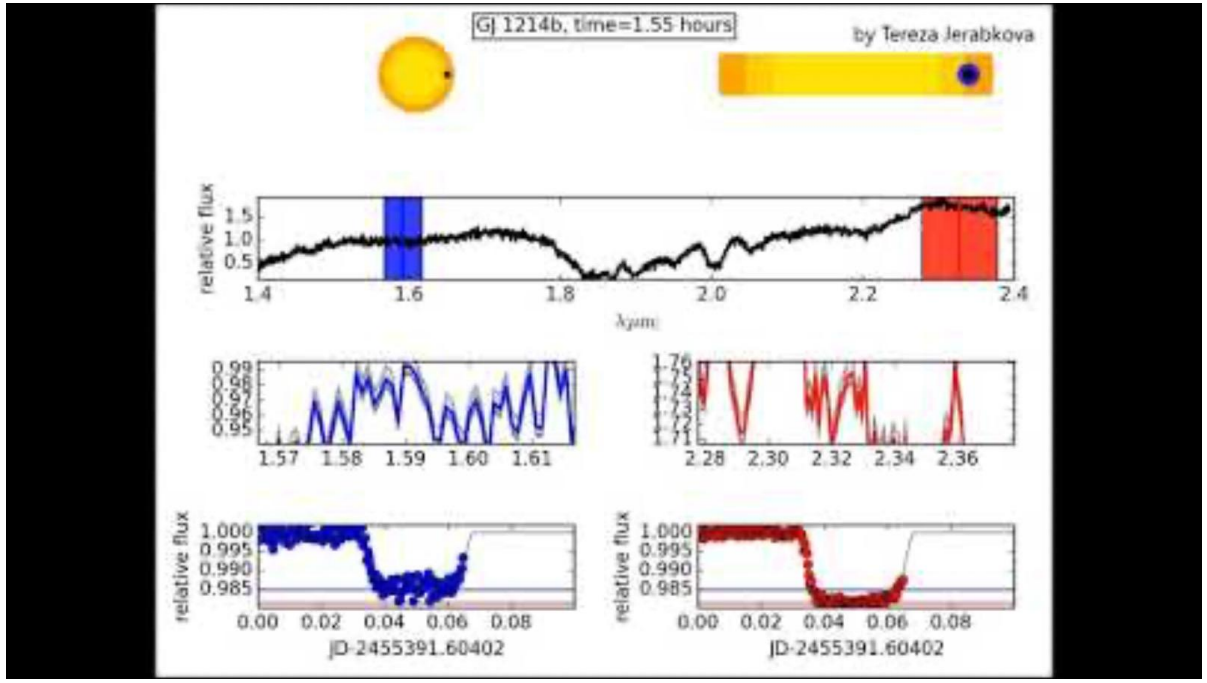
Credit: ESA

- Stima del raggio del pianeta.
- Favoriti: pianeti grandi, orbitanti attorno a stelle piccole, fredde, vicini alla stella, vecchie e brillanti.
- Non può essere utilizzato per sistemi con piano orbitale perpendicolare alla linea di vista.
- Kepler (2009-2018): 2342 esopianeti
- Trappist-1



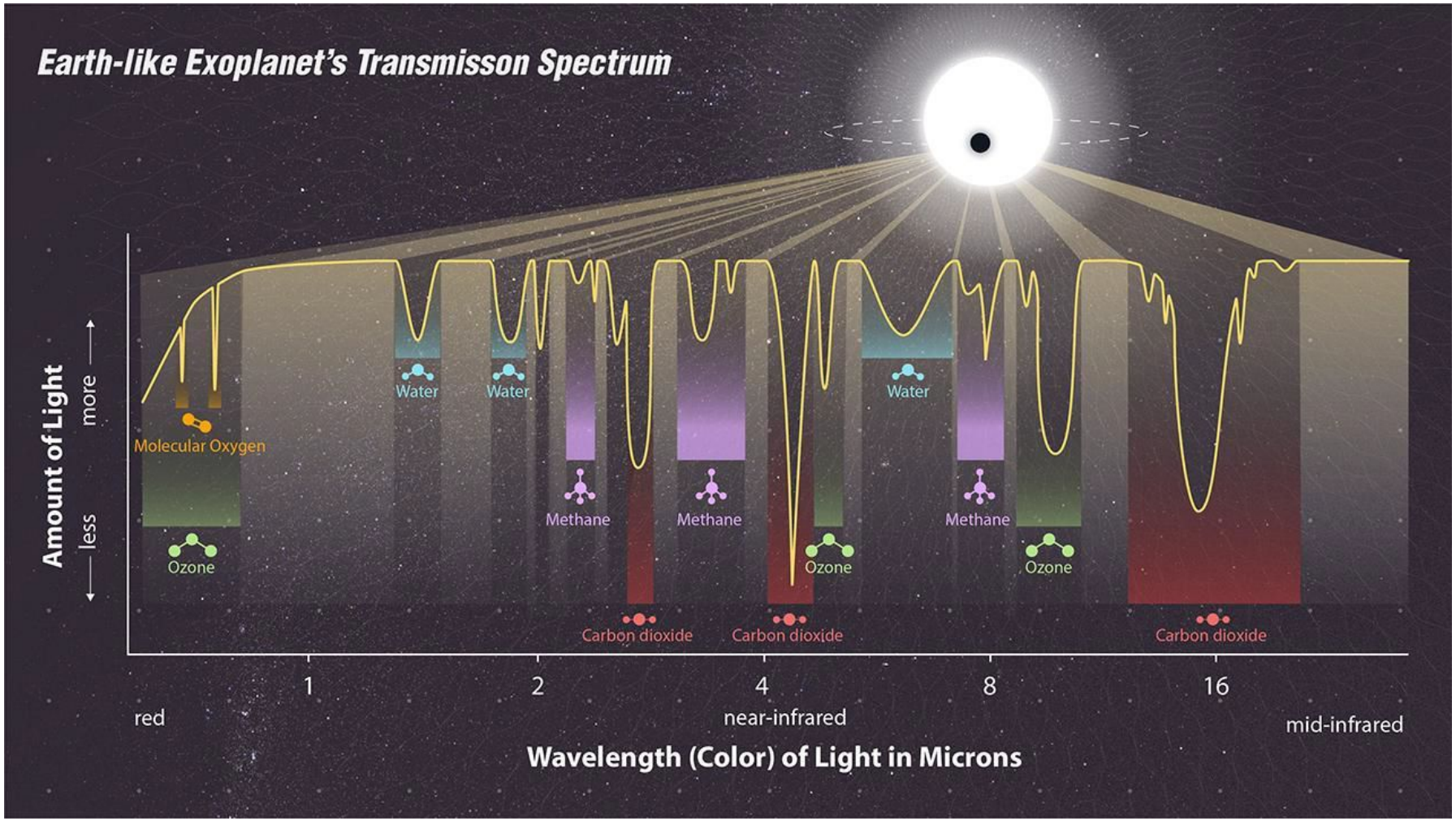
Credit: ESA

Spettroscopia di trasmissione



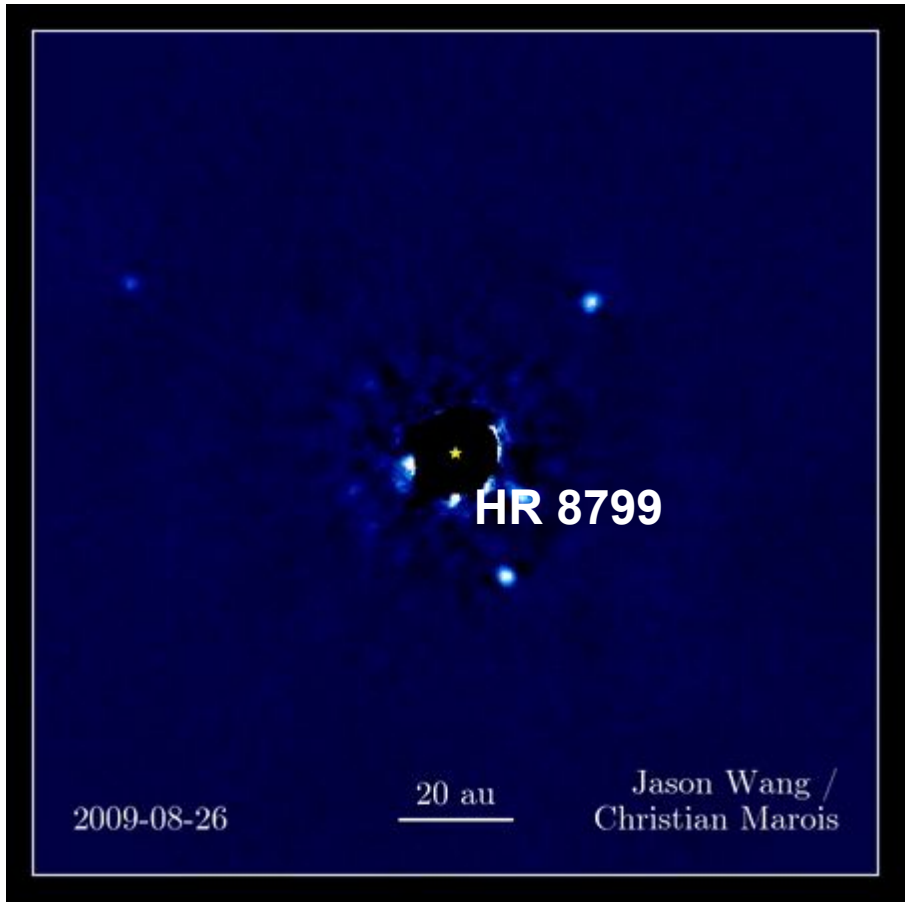
Credit: TerezaJerabkova, YouTube



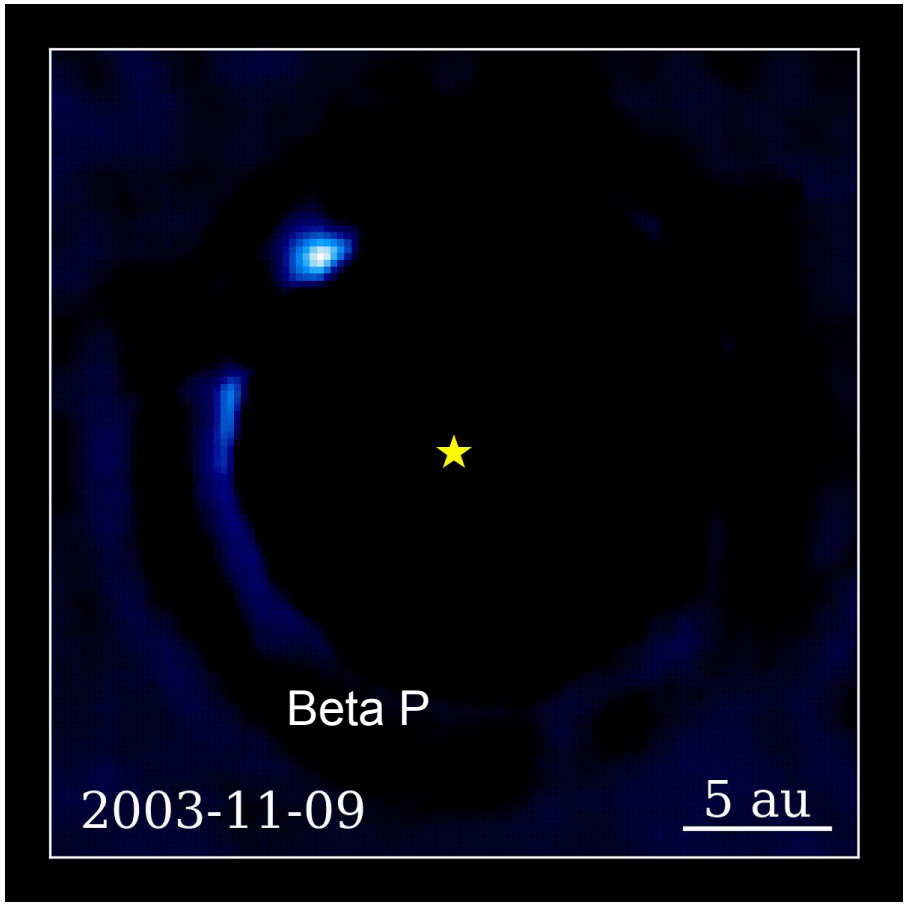


Qualche decina di pianeti: pianeti caldi, vicini alla loro stella, grandi, attorno a stelle piccole, vecchie, brillanti

Direct imaging



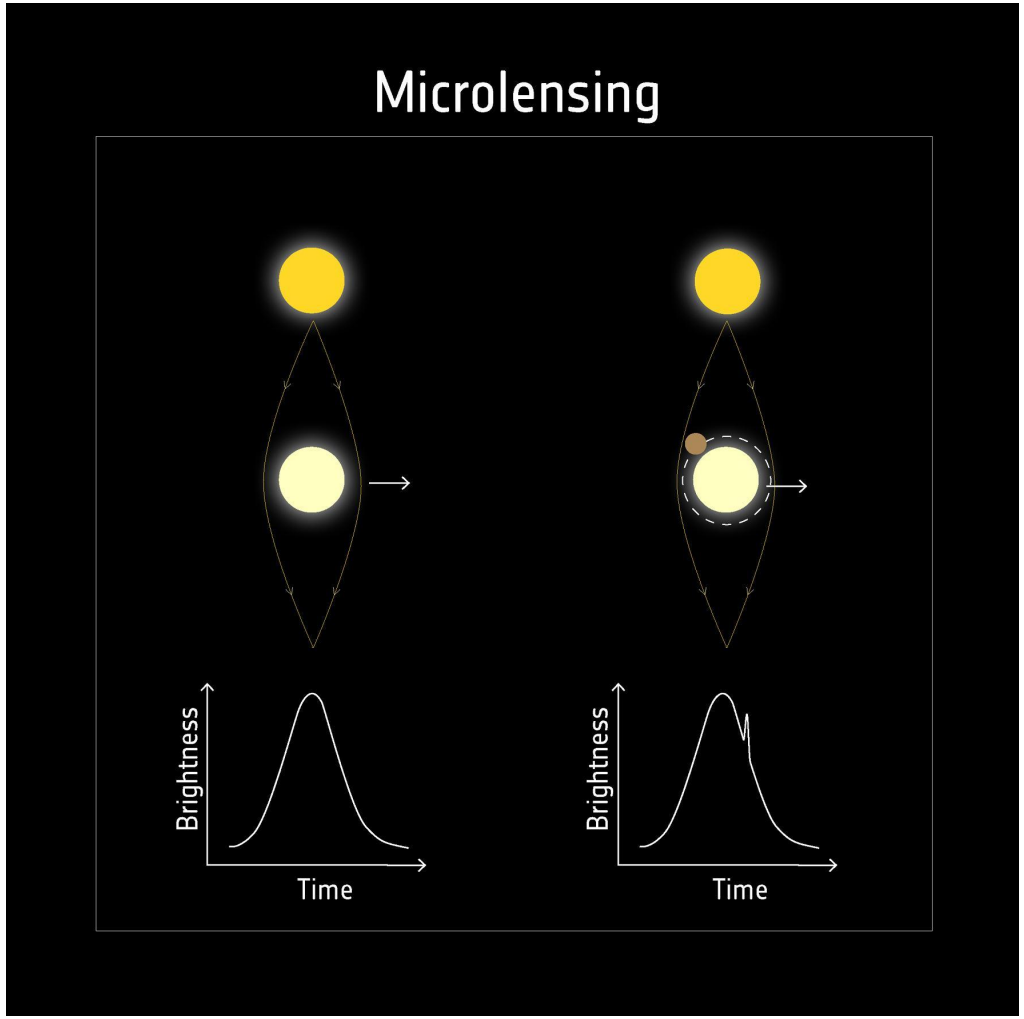
Credit: Jason Wang (Caltech)/Christian Marois(NRC Herzberg)



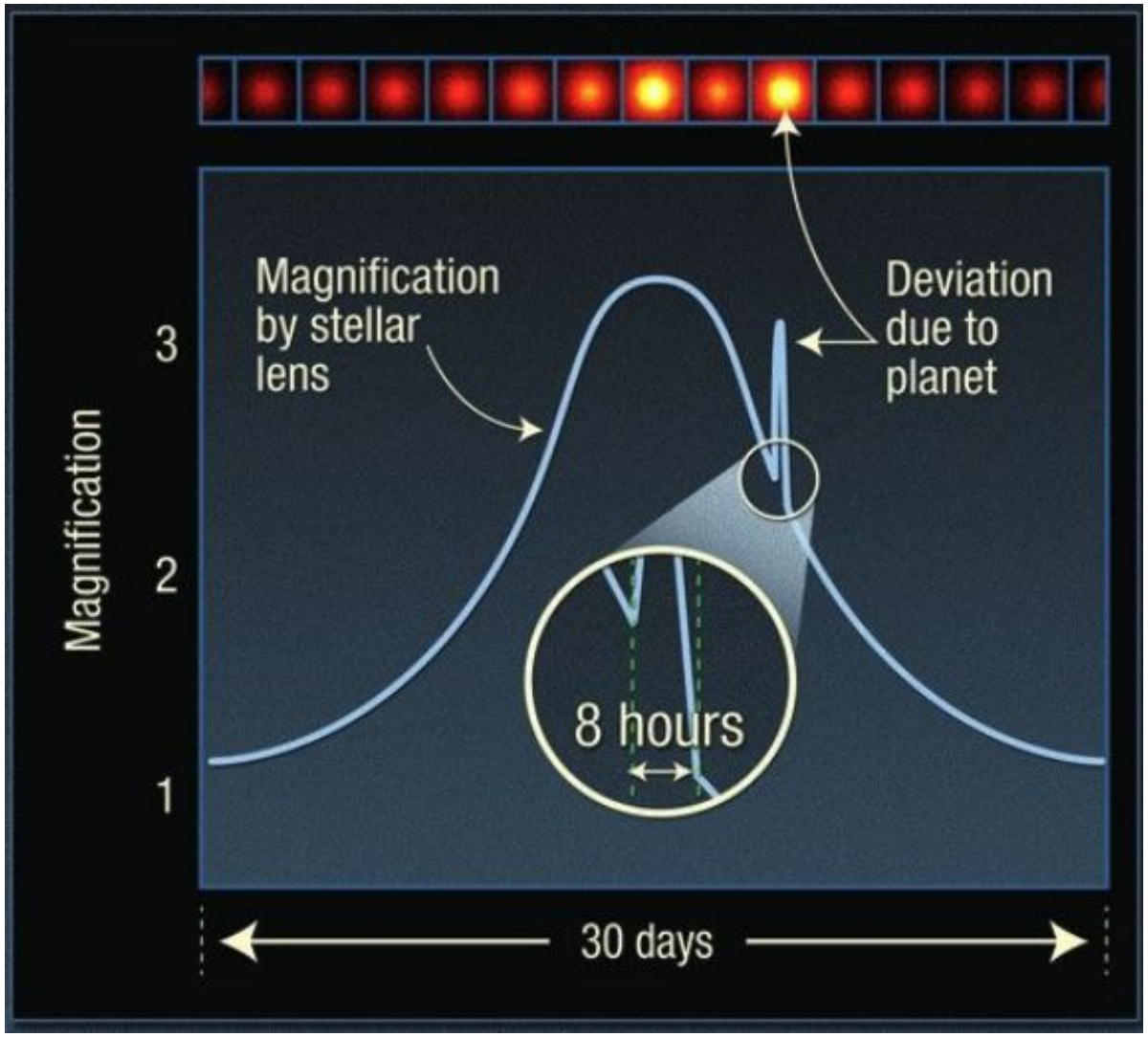
Credit: Jason Wang (Caltech)/Christian Marois(NRC Herzberg)

Favoriti: pianeti giovani, lontani dalla stella e vicini a noi.

Microlensing

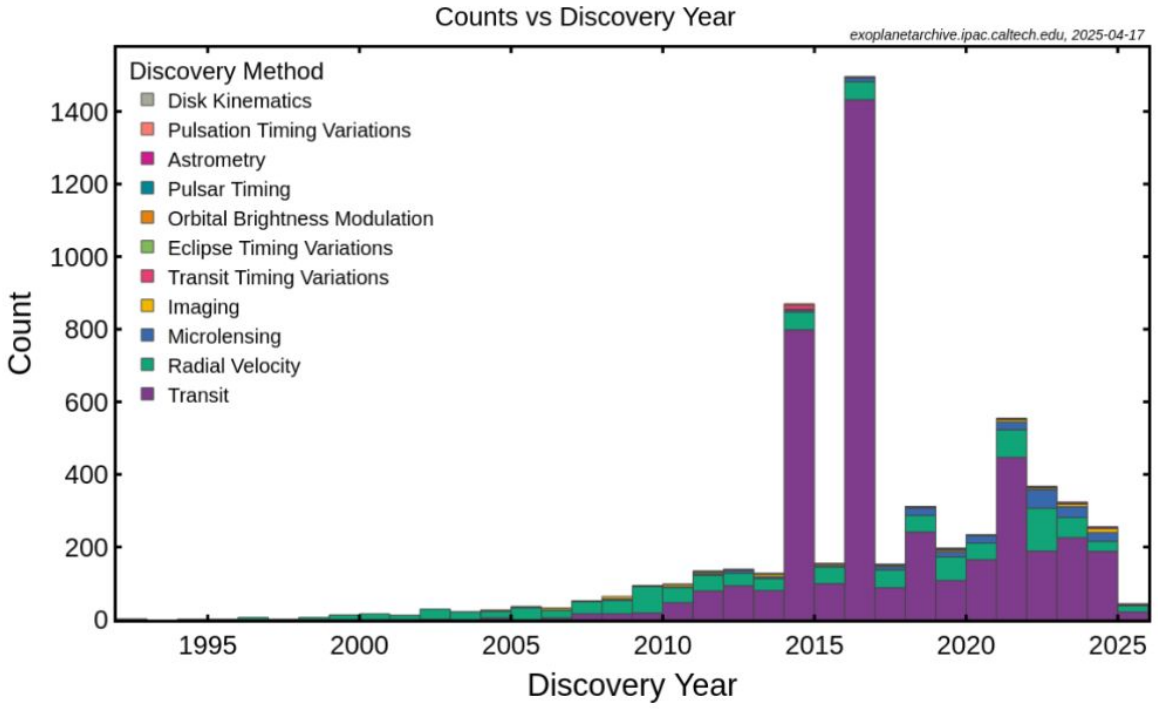


Credit: NASA

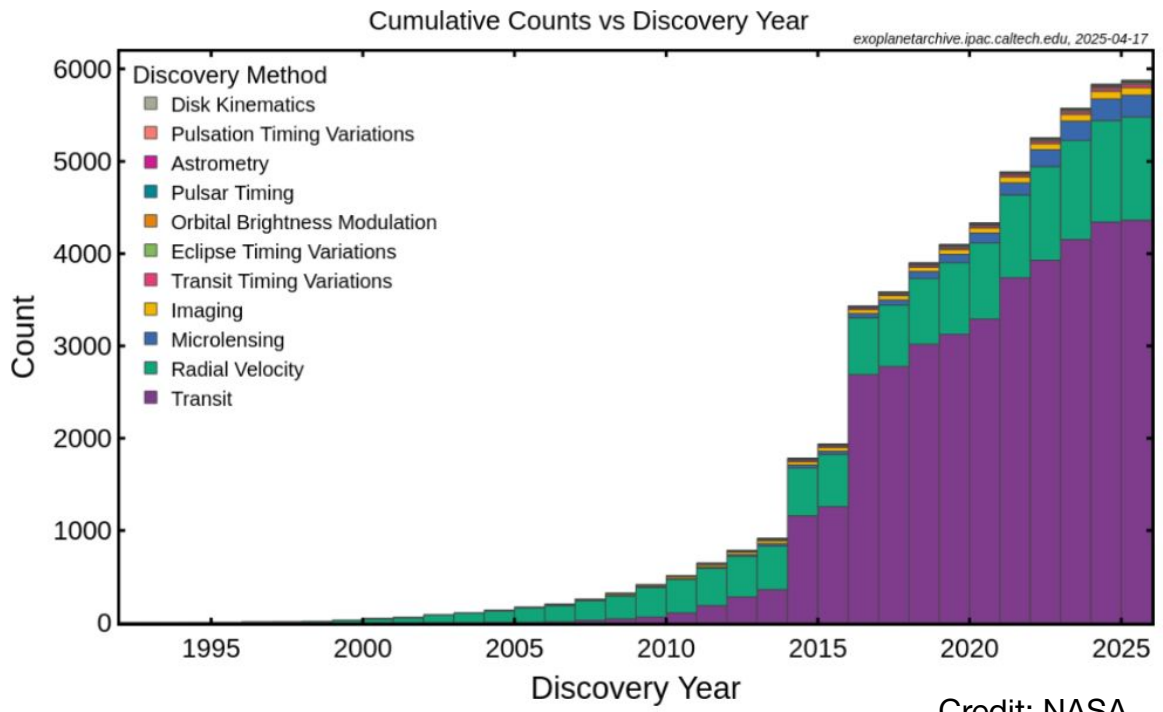


Credit: NASA

Pianeti scoperti



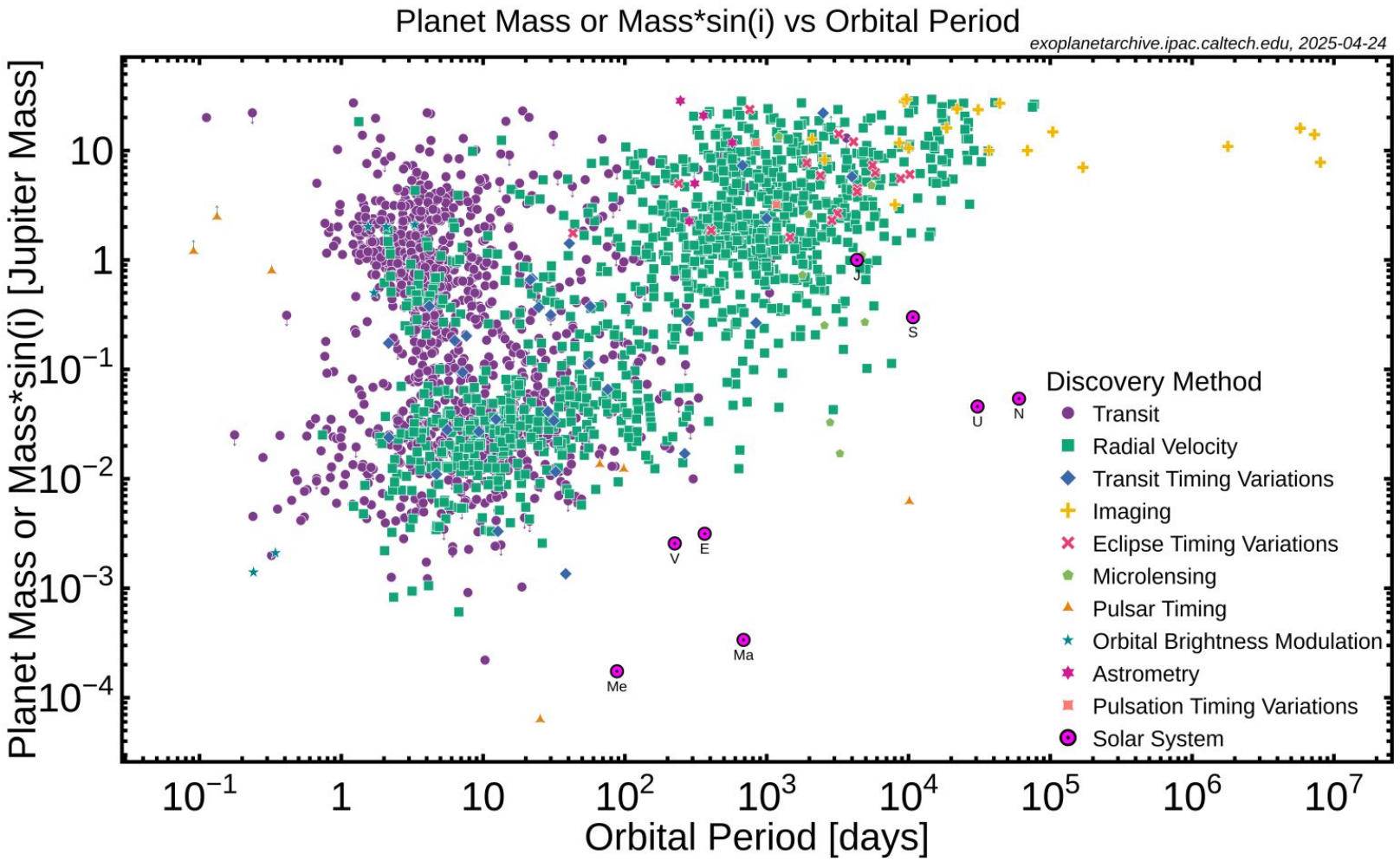
Credit: NASA

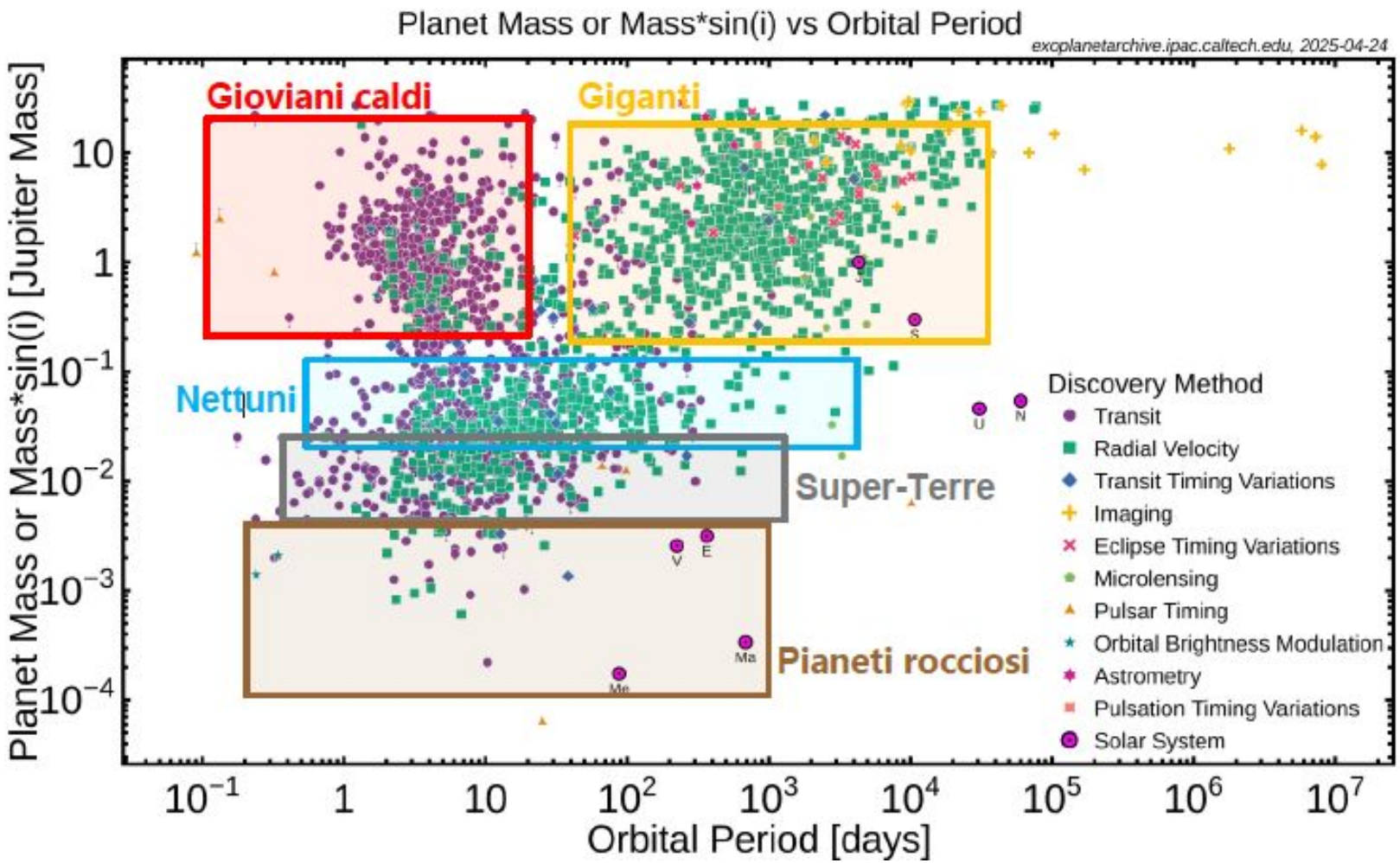


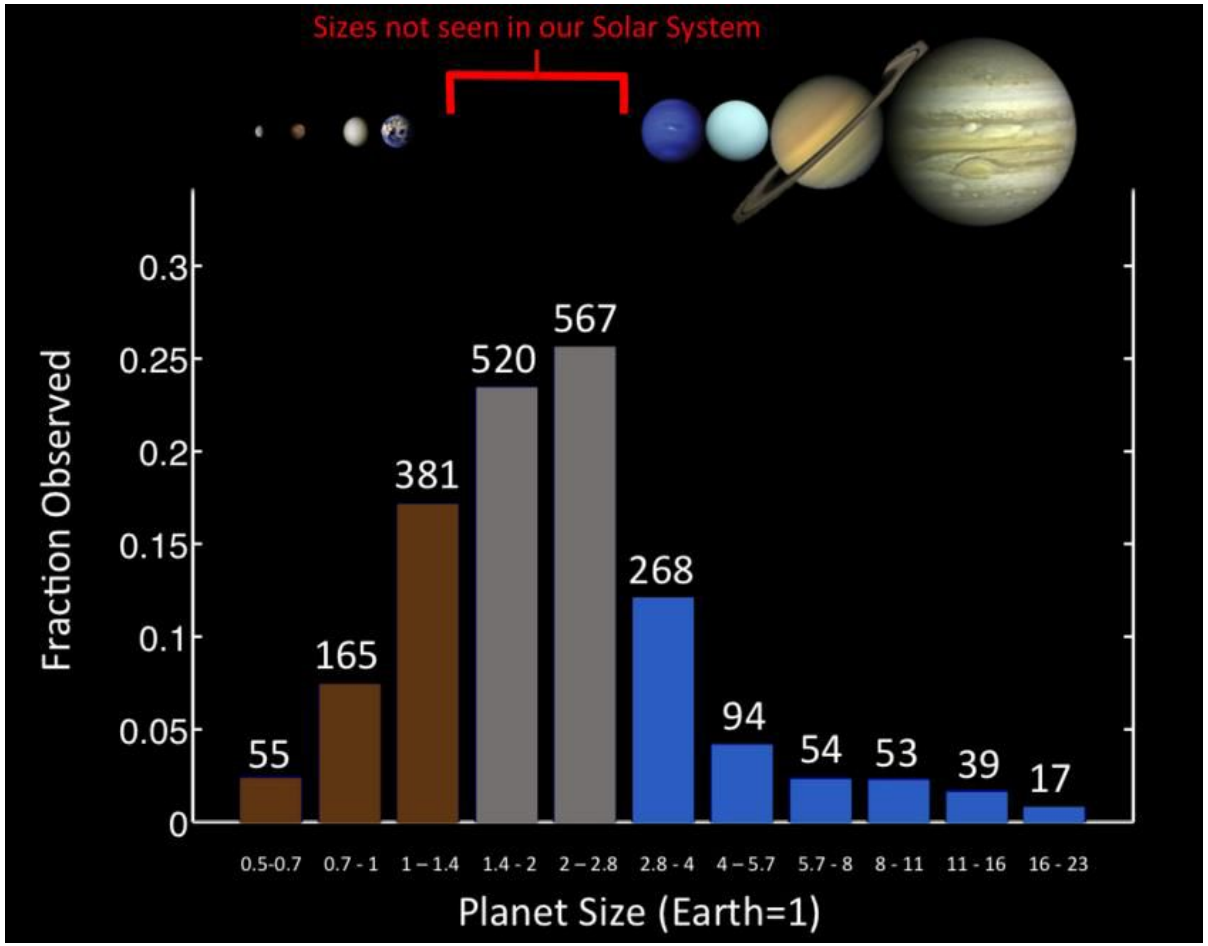
Credit: NASA

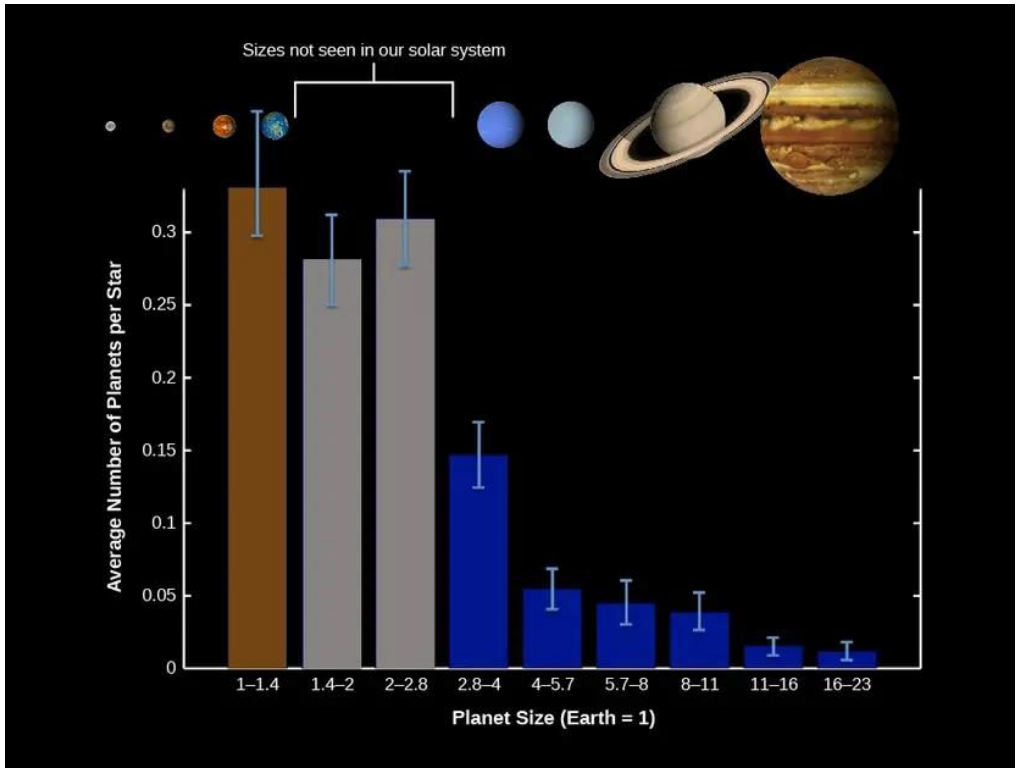
Da un’epoca di scoperte ad un’epoca di caratterizzazione:

- Di che cosa sono fatti gli esopianeti?
- Come si formano e come evolvono i sistemi planetari?
- La struttura del «nostro» sistema solare è comune o è rara nell’Universo?
- Esistono pianeti abitati da forme di vita fuori dal sistema solare?

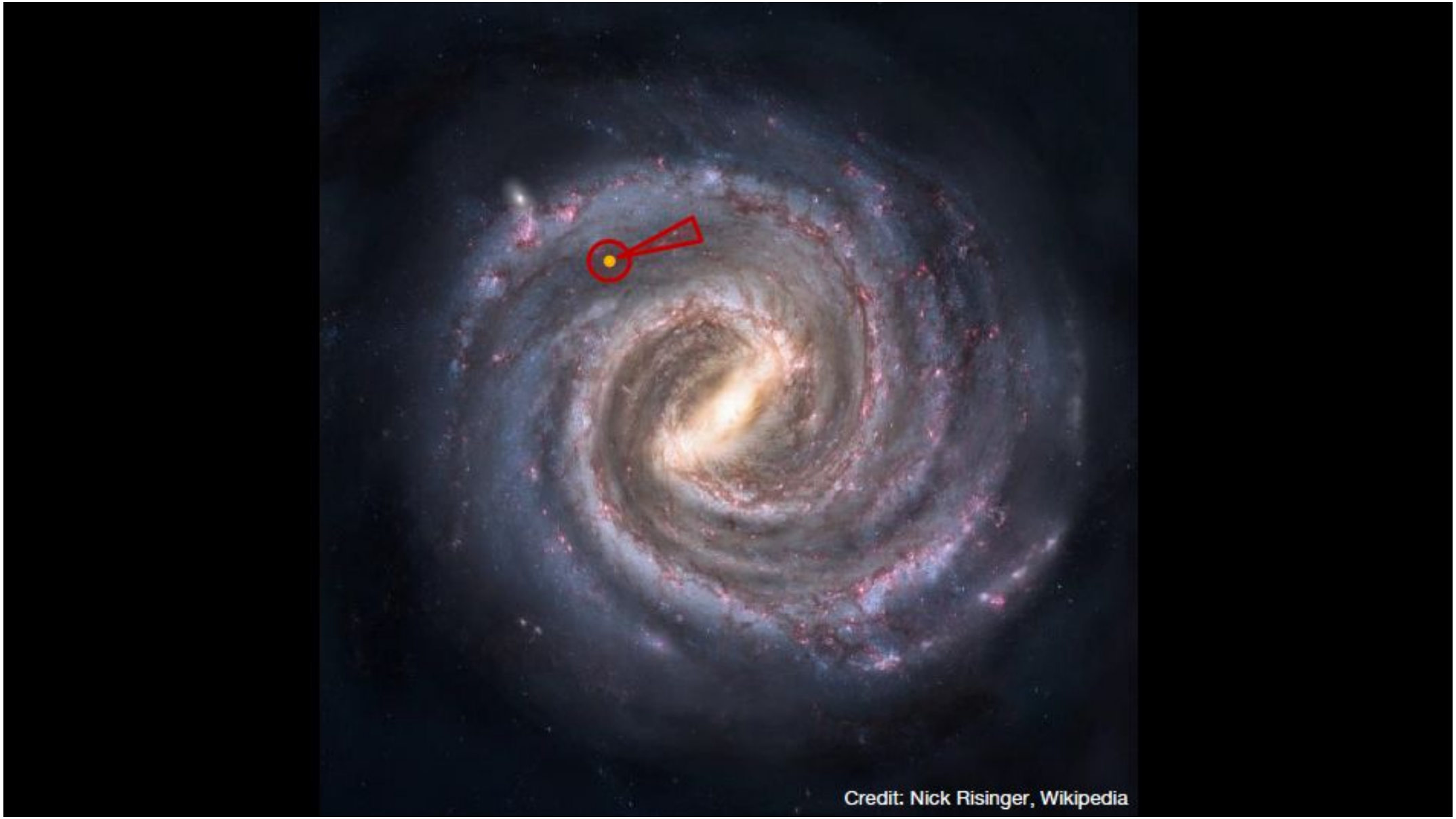

Planet Mass or Mass*sin(i) vs Orbital Period
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu, 2025-04-24
Planet Mass or Mass*sin(i) [Jupiter Mass]
Orbital Period [days]
Discovery Method
Transit
Radial Velocity
Transit Timing Variations
Imaging
Eclipse Timing Variations
Microlensing
Pulsar Timing
Orbital Brightness Modulation
Astrometry
Pulsation Timing Variations
Solar System
Me
V
E
Ma
J
S
U
N


Planet Mass or Mass*sin(i) vs Orbital Period
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu, 2025-04-24
Gioviani caldi
Giganti
Nettuni
Super-Terre
Pianeti rocciosi
Planet Mass or Mass*sin(i) [Jupiter Mass]
Orbital Period [days]
Discovery Method
Transit
Radial Velocity
Transit Timing Variations
Imaging
Eclipse Timing Variations
Microlensing
Pulsar Timing
Orbital Brightness Modulation
Astrometry
Pulsation Timing Variations
Solar System



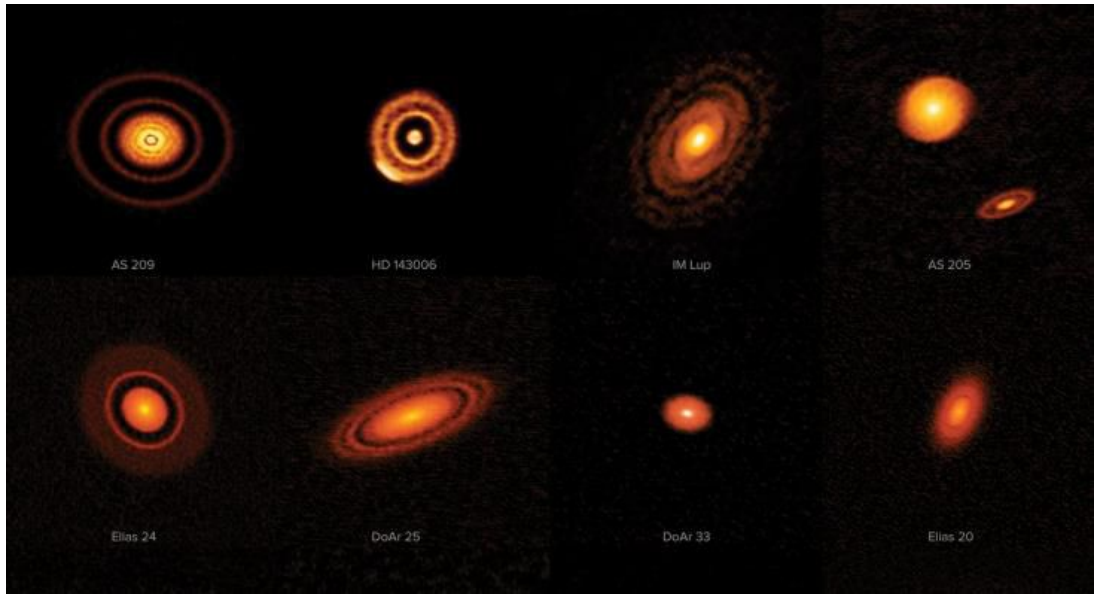


Credit: https://courses.lumenlearning.com/

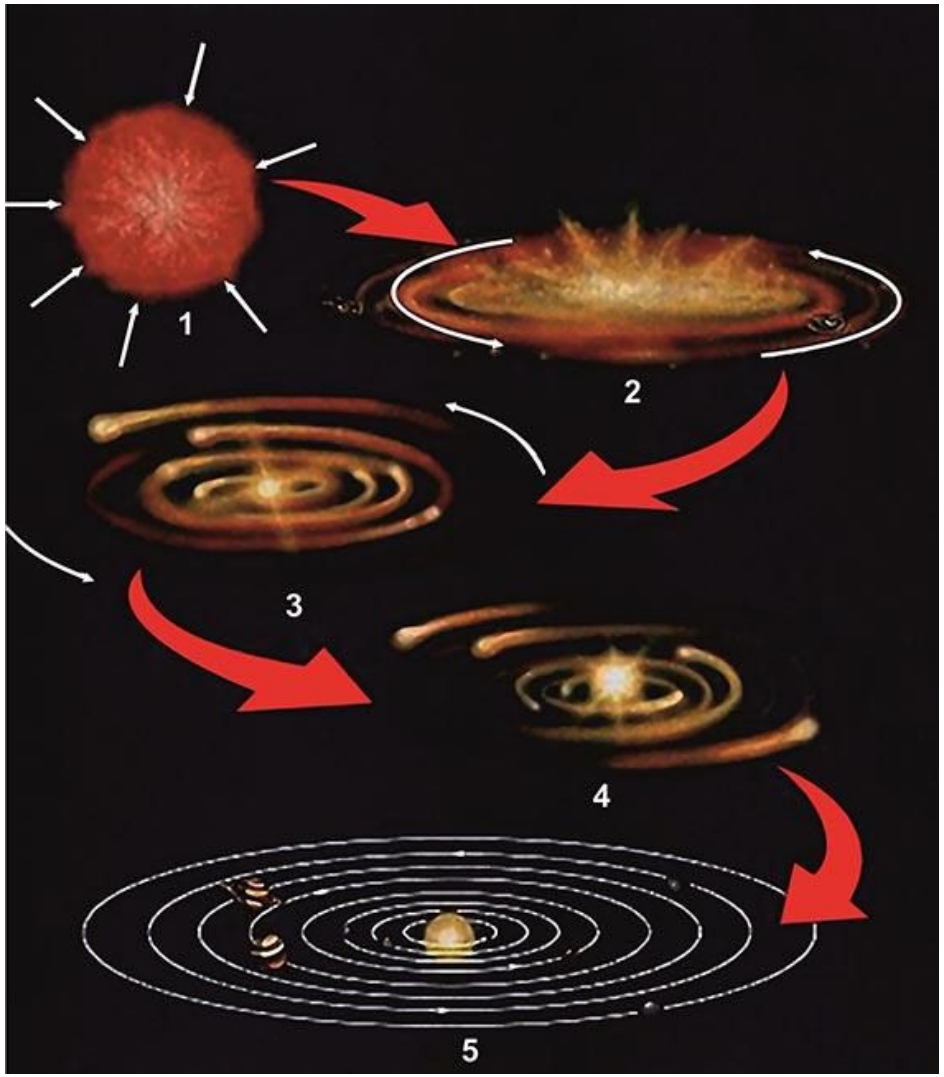

Credit: Nick Risinger, Wikipedia

Come si formano

- Nubi molecolari di gas
- Formazione stellare
- Disco protoplanetario: H/He e grani di polveri
- Grani di polveri si uniscono per formare planetesimi (oggetti rocciosi di qualche km): 100000 anni.
- I planetesimi si uniscono per formare i protopianeti (grandi quanto la Luna/Marte)
- I protopianeti si scontrano per formare i pianeti: 100 Myr. Zona interna: pianeti rocciosi. Zona esterna: giganti gassosi.

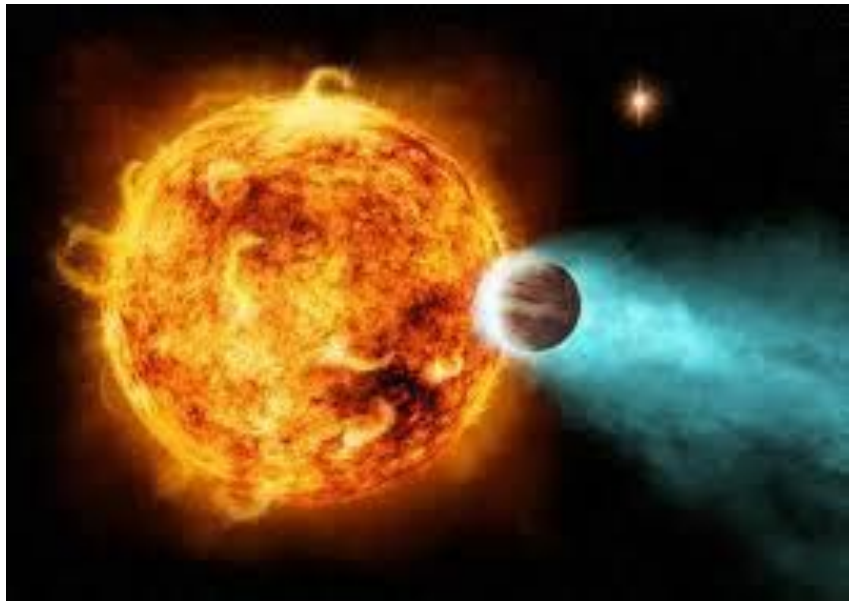


Credit ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

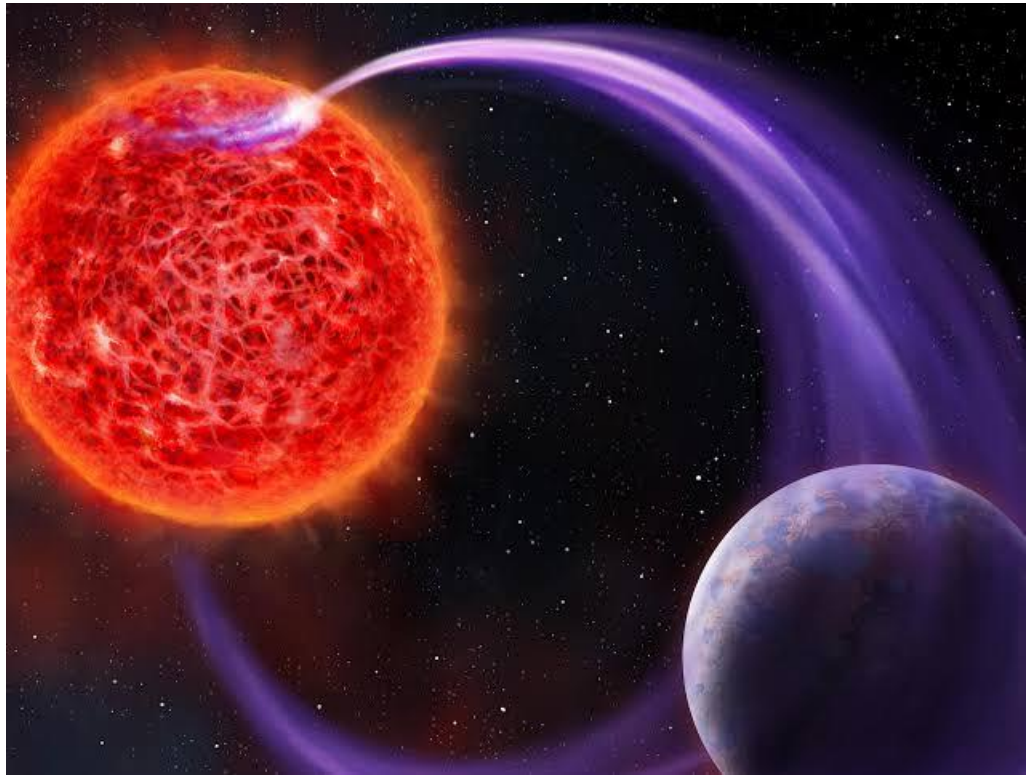


Stella e pianeta interagiscono in vari modi

- Tramite il campo gravitazionale (effetti mareali)
- Tramite la radiazione (processo di fotoevaporazione)
- Tramite i campi magnetici



Credit: NASA



EXOPLANETS

Constraining an exoplanet's magnetic field using star-planet interactions

D. Revilla[1]*, P. J. Amado[1]†, R. Luque[1,2]†, P. Schöfer[1]‡, A. F. Lanza[3], A. Binnenfeld[4]§, J. A. Caballero[5], A. P. Hatzes[6], G. W. Henry[7], S. V. Jeffers[6], S. Kaur[8,9], E. Pallé[10,11], L. Peña-Moñino[1], M. Pérez-Torres[1,12], A. Quirrenbach[13], A. Reiners[14], I. Ribas[8,9], D. Viganò[8,9,15], M. R. Zapatero-Osorio[5], S. Zucker[4,16]

Article

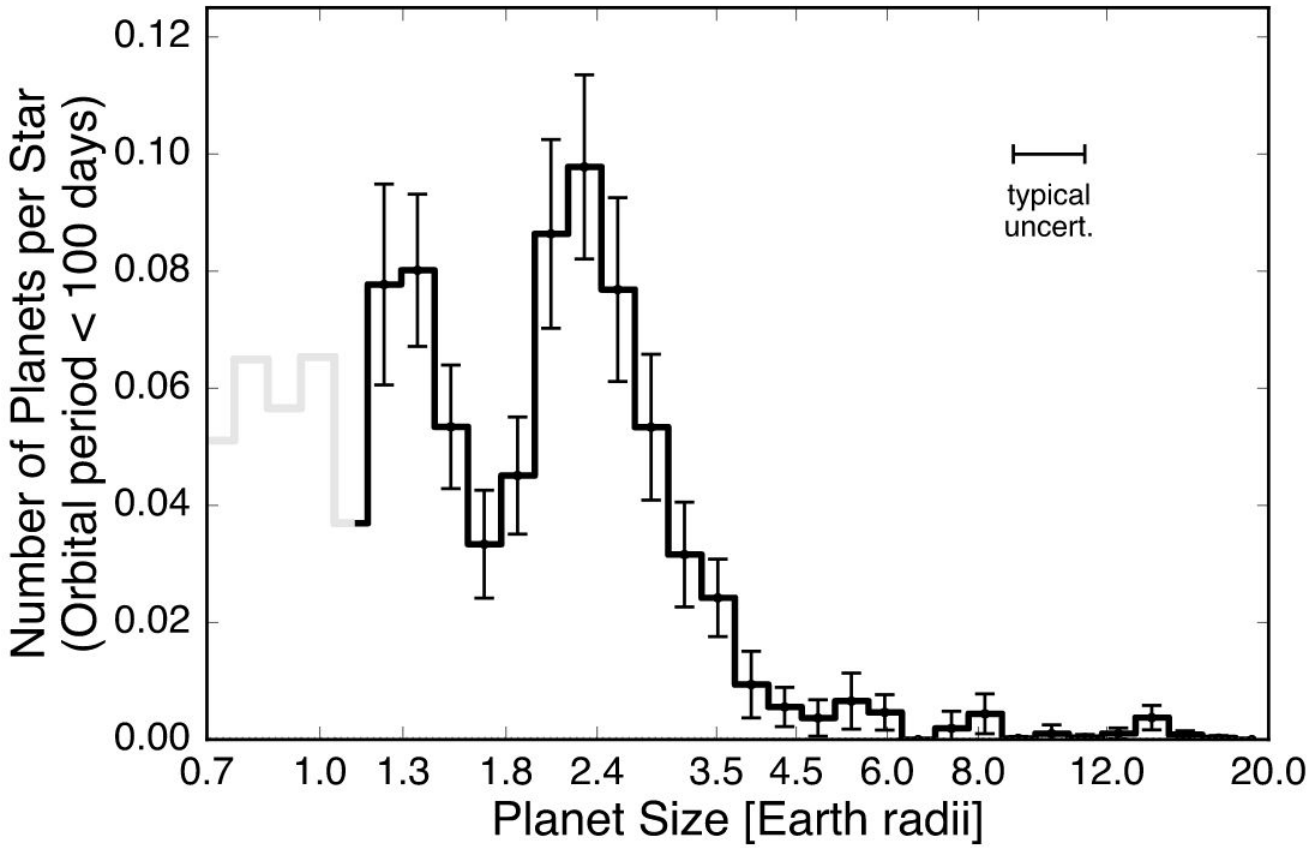
Close-in planet induces flares on its host star

https://doi.org/10.1038/s41586-025-09236-z

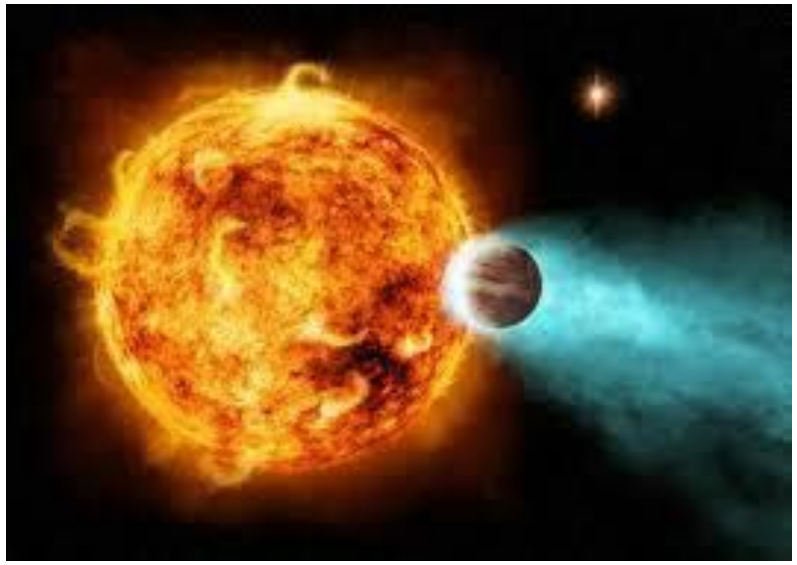
Received: 23 January 2025

Ekaterina Ilin[1,2], Harish K. Vedantham[1,3], Katja Poppenhäger[2,4], Sanne Bloot[1,3], Joseph R. Callingham[1,5], Alexis Brandeker[6] & Hritam Chakraborty[7]

Come evolvono? Migrano ed evaporano…

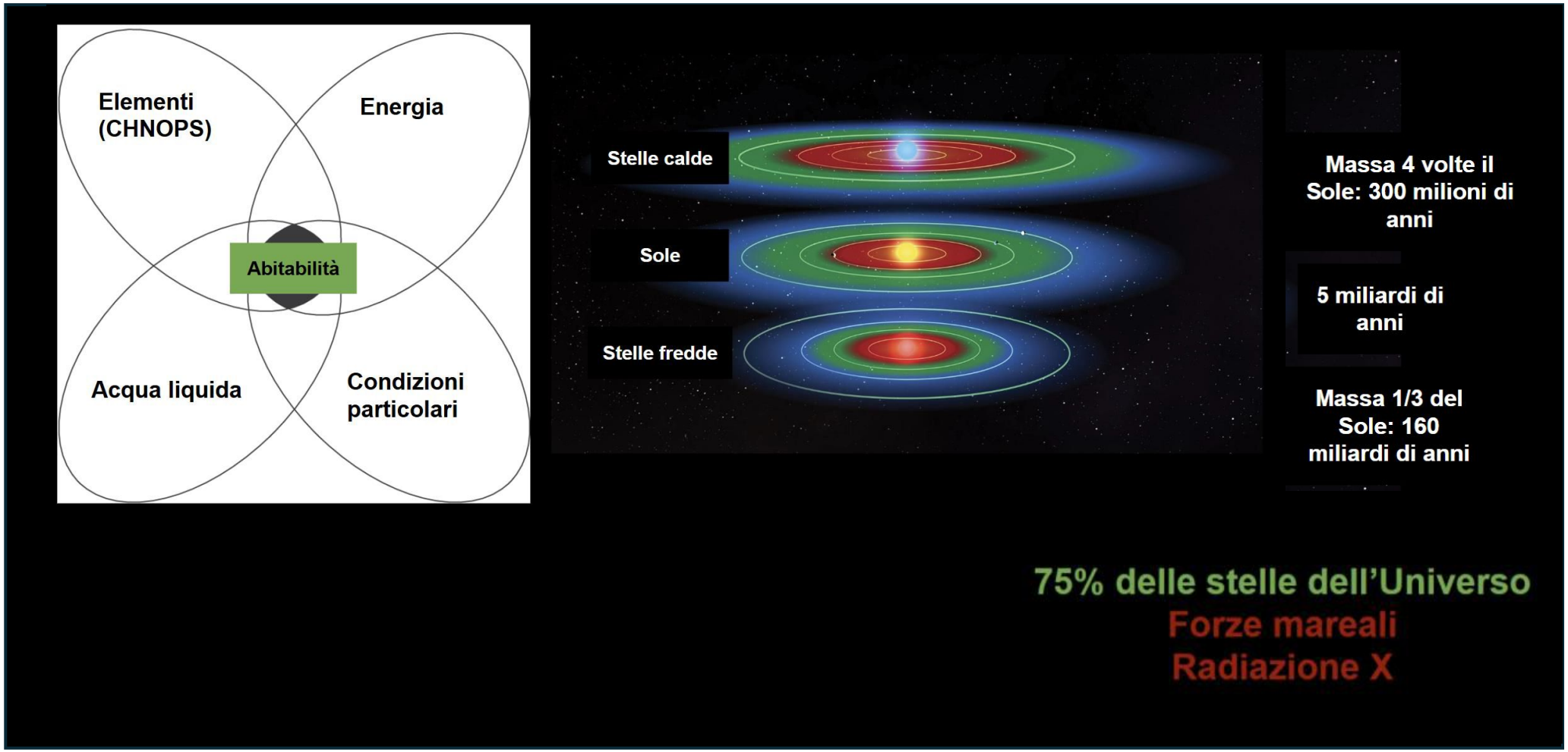


Credit: Joshua N. Winn, 2018



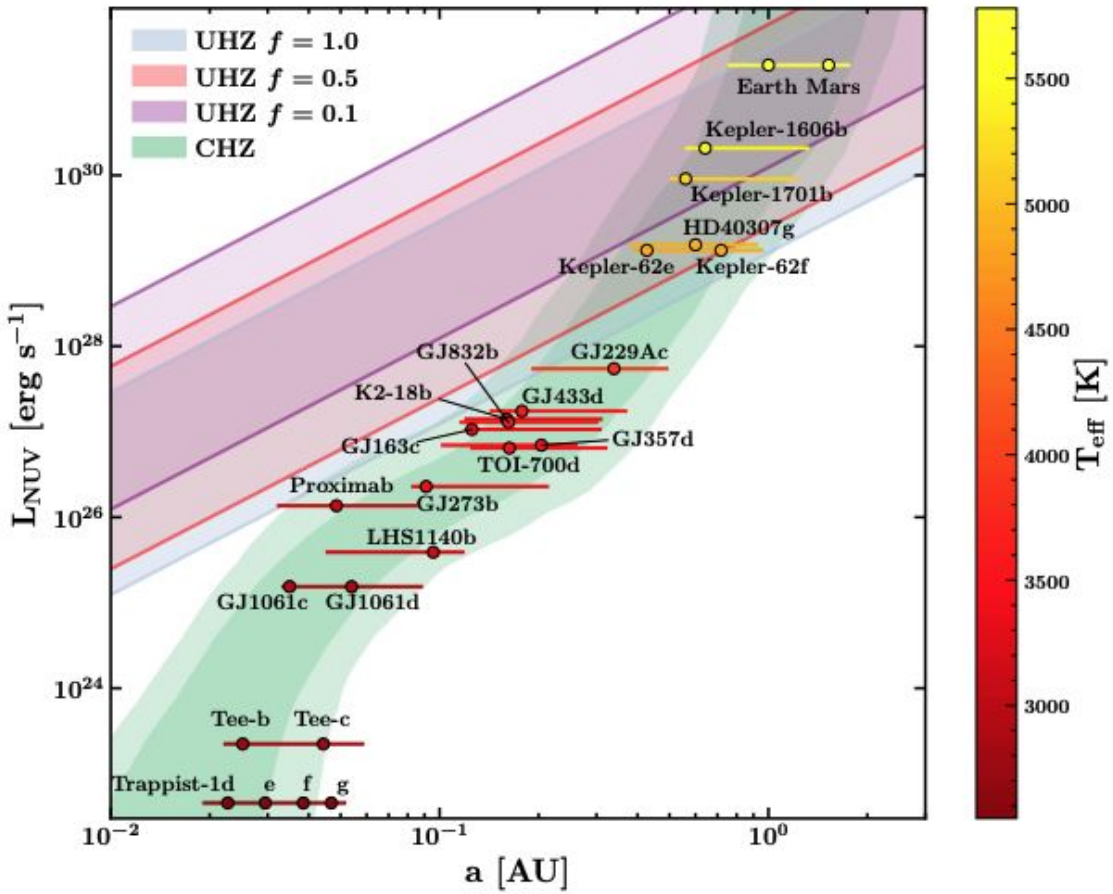
Credit: NASA

Esistono pianeti abitabili?



Plato (2026), Ariel (2029), ExtremelyLarge Telescope(2029), HabitableWorlds Observatory(2040?)

Le condizioni per l'abiogenesi (l'origine della vita) non è detto che siano le stesse per il «mantenimento» della vita…



PROPOSTE OSSERVATIVE

Una proposta osservativa **è un compito di realtà**: è un compromesso.

Il laboratorio di un astrofisico (e non solo!) è l'universo.

Abbiamo bisogno di strumenti all'avanguardia: costruzione telescopi/selezione delle proposte.

Dati privati e dati pubblici (archivi)

Gli esopianeti al TNG

Articoli scientifici pubblicati con dati TNG: 80% esopianeti.

60-70% tempo di osservazione del TNG: esopianeti

The Global Architecture of Planetary Systems GAPS: https://www.gaps.inaf.it/



Come scrivere una proposta osservativa

- Identificare la domanda scientifica alla quale si vuole rispondere (lettura articoli): perché è importante rispondere a questa domanda/perché è importante ora.

- Quale oggetto celeste devo osservare? Sorgente in cui ho speranza di osservare un dato fenomeno

- Questo oggetto è già stato osservato?

- Quali dati devo raccogliere? Quali misure devo fare?

- Qual è lo strumento migliore?

- Come uso questo strumento? L'oggetto selezionato è visibile da questo strumento? Quanto tempo mi serve?

- Qual è l'impatto atteso (pubblicazioni/cataloghi)

Esempio 1. Voglio misurare la massa di un esopianeta con la tecnica delle velocità radiali

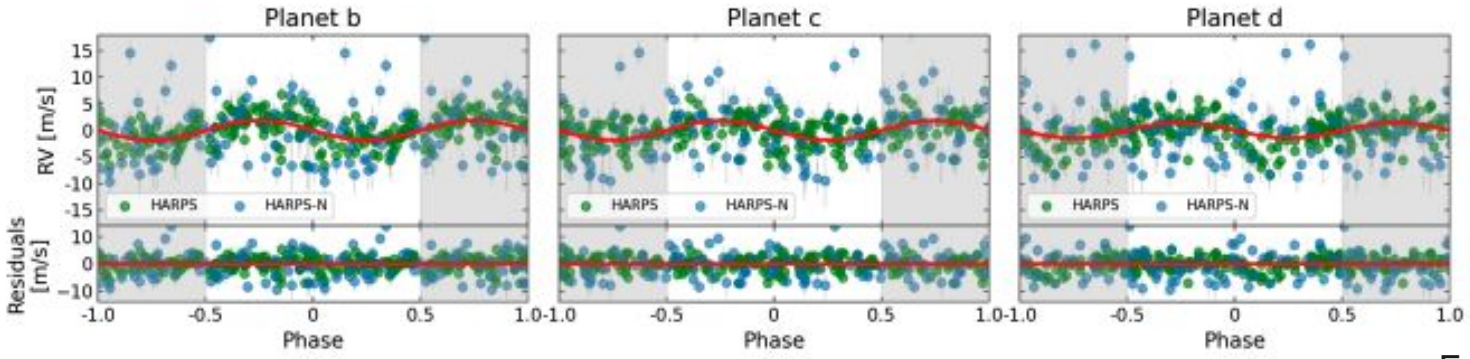
Domanda scientifica: conosciamo il raggio (da TESS ad esempio) ma non la massa.

Perché è importante: senza la massa non sappiamo la densità del pianeta e quindi non sappiamo di cosa è fatto.

Come scelgo il target? ExoFOP (https://exofop.ipac.caltech.edu/tess/): banca dati dei candidati TESS che necessitano follow-up da terra.

Riferimento al TNG: Programma ArMS (Ariel Masses Survey) - Serena Benatti, INAF: monitoraggio sistematico di pianeti che verranno osservati da ARIEL con HARPS-N.

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P}\right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_\star + M_p)^{2/3}} \frac{1}{(1-e^2)^{1/2}}$$



Fardella et al. 2026

Esempio 2. Voglio conoscere la composizione dell'atmosfera di un esopianeta

Domanda scientifica: quali molecole sono presenti nell'atmosfera di un esopianeta?

Perché è importante: rapporti molecolari ci dicono ad esempio dove si è formato il pianeta all'interno del disco protoplanetario.

Come scelgo il target? L'ampiezza del segnale è direttamente proporzionale alla scala di altezza dell'atmosfera

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

Come lo osservo? Devo conoscere le efemeridi: https://astro.swarthmore.edu/transits/
https://research.iac.es/proyecto/exoatmospheres/index.php

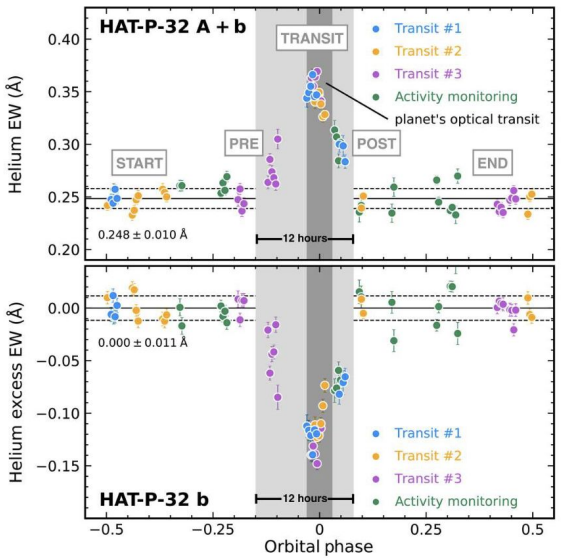
Riferimento al TNG Building a Road to the In-Depth investiGation of Exoplanetary atmospheres (BRIDGES) – PI: F. Borsa INAF.

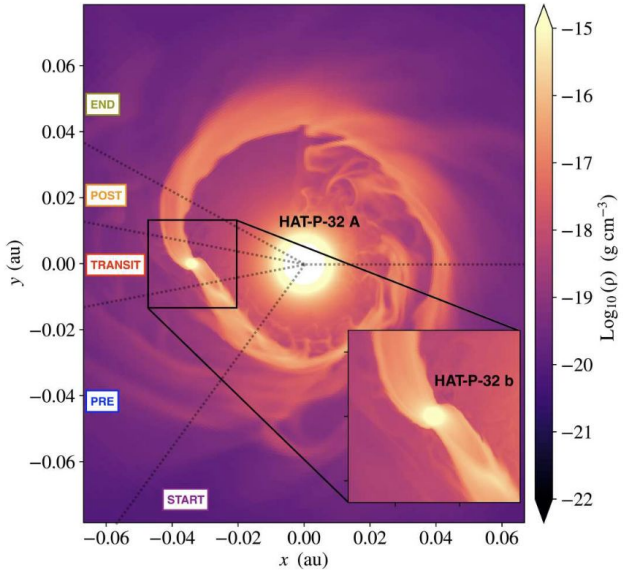
$$H = \frac{kT}{mg} \qquad \frac{R_P}{R_*}$$

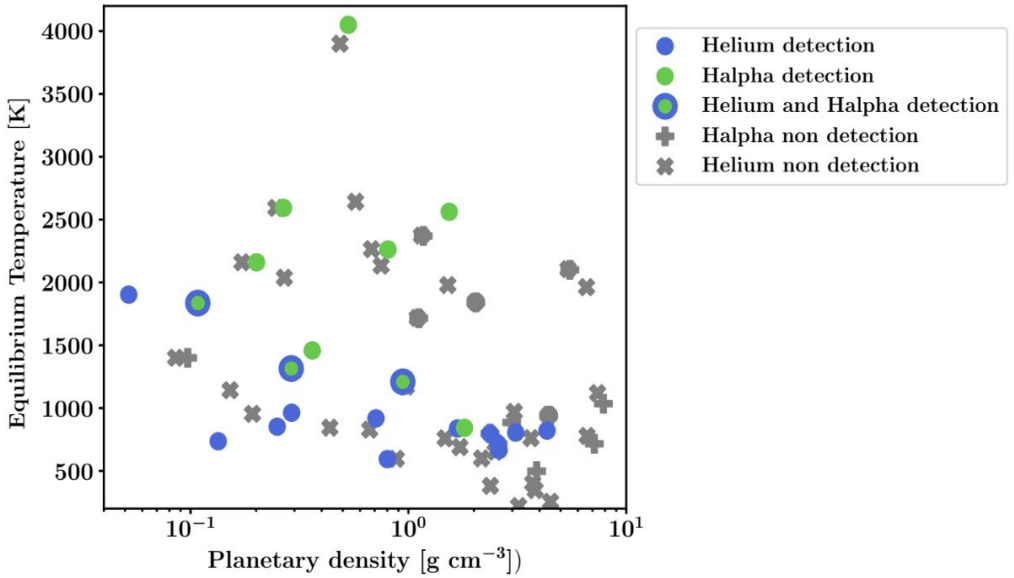
Esempio 3. Il processo di fotoevaporazione

Domanda scientifica: come evolvono gli esopianeti?
Perché è importante? Non si sa ancora quali sono i processi dominanti.
Qual è il ruolo del processo di fotoevaporazione?
Il pianeta sta perdendo la sua atmosfera?

Come scelgo il target? Un pianeta nella 'valley dei raggi', attorno a una stella giovane e attiva.
Come osservo il processo di fotoevaporazione?
Osservo dentro e fuori transito per il segnale in assorbimento dell'elio.
https://research.iac.es/proyecto/exoatmospheres/index.php
Scelta del target: XUV - riga dell'elio a 10830 Å (GIANO-B) e Hα (HARPS-N), osservate simultaneamente con GIARPS, possono darci indicazioni sull'abbondanza He/H e EUV.







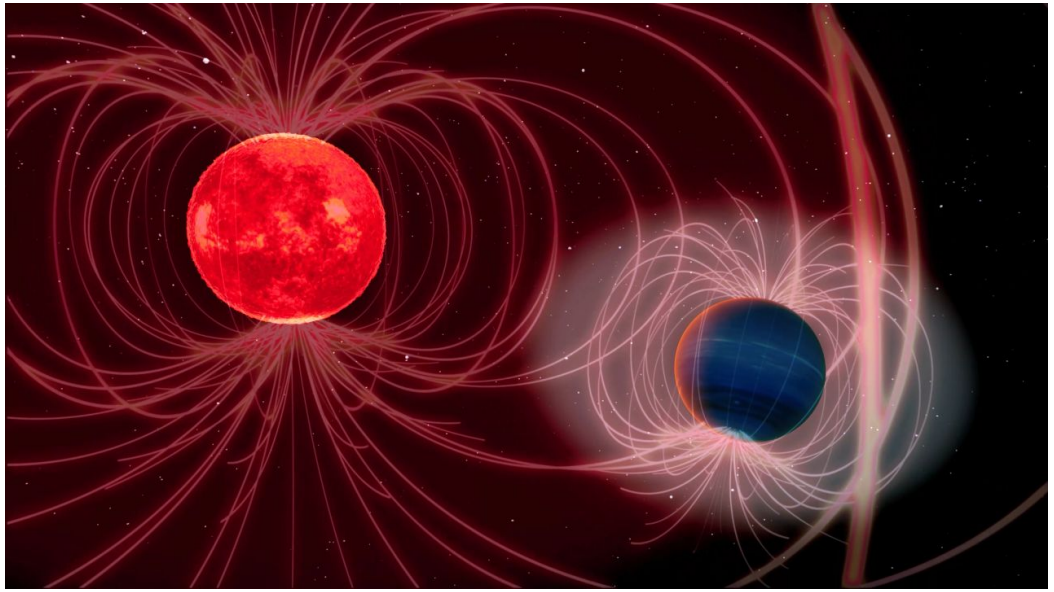
Zhang et al. 2022

Interazione stella-pianeta

Domanda scientifica: stelle e pianeti interagiscono attraverso i campi magnetici?
Perché è importante? Stimare il campo magnetico di un pianeta può darci indicazioni sulla sua composizione interna

Come scelgo il target? Devo trovare un pianeta che orbita nella regione sub-alfvenica di una stella
Come osservo un'interazione stella magnetica?
La variazione periodica di alcuni indicatori di attività stellare con un periodo che è correlato al periodo orbitale del pianeta e al periodo rotazionale della stella.

https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/science.adv3075



EXOPLANETS

Constraining an exoplanet's magnetic field using star-planet interactions

D. Revilla[1]*, P. J. Amado[1]†, R. Luque[1,2]†, P. Schöfer[1]‡, A. F. Lanza[3], A. Binnenfeld[4]§, J. A. Caballero[5], A. P. Hatzes[6], G. W. Henry[7], S. V. Jeffers[6], S. Kaur[8,9], E. Pallé[10,11], L. Peña-Moñino[1], M. Pérez-Torres[1,12], A. Quirrenbach[13], A. Reiners[14], I. Ribas[8,9], D. Viganò[8,9,15], M. R. Zapatero-Osorio[5], S. Zucker[4,16]

Credit: IAA-CSIC/LampScience