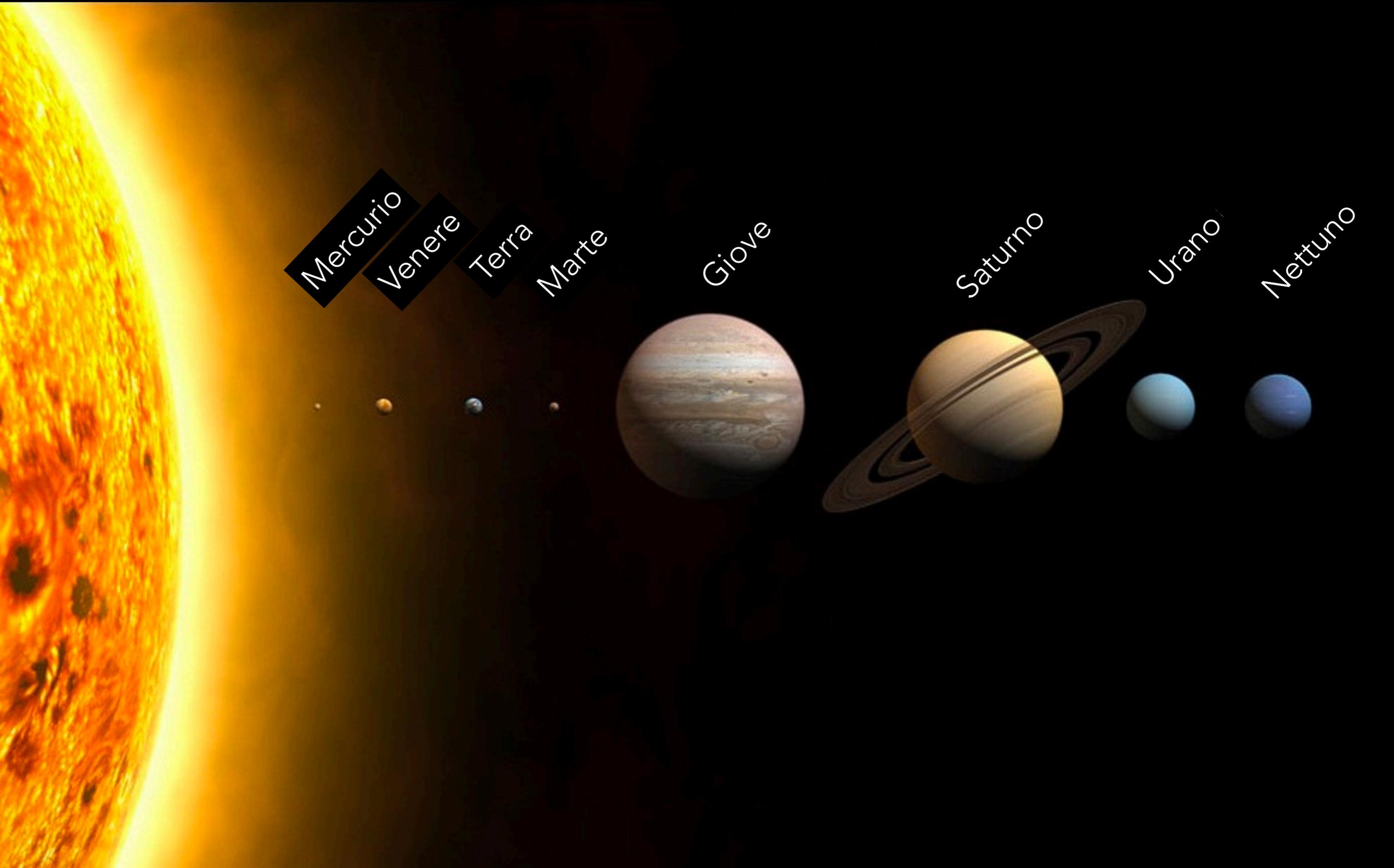


La ricerca e lo studio dei pianeti extra- solari con i telescopi spaziali TESS e CHEOPS

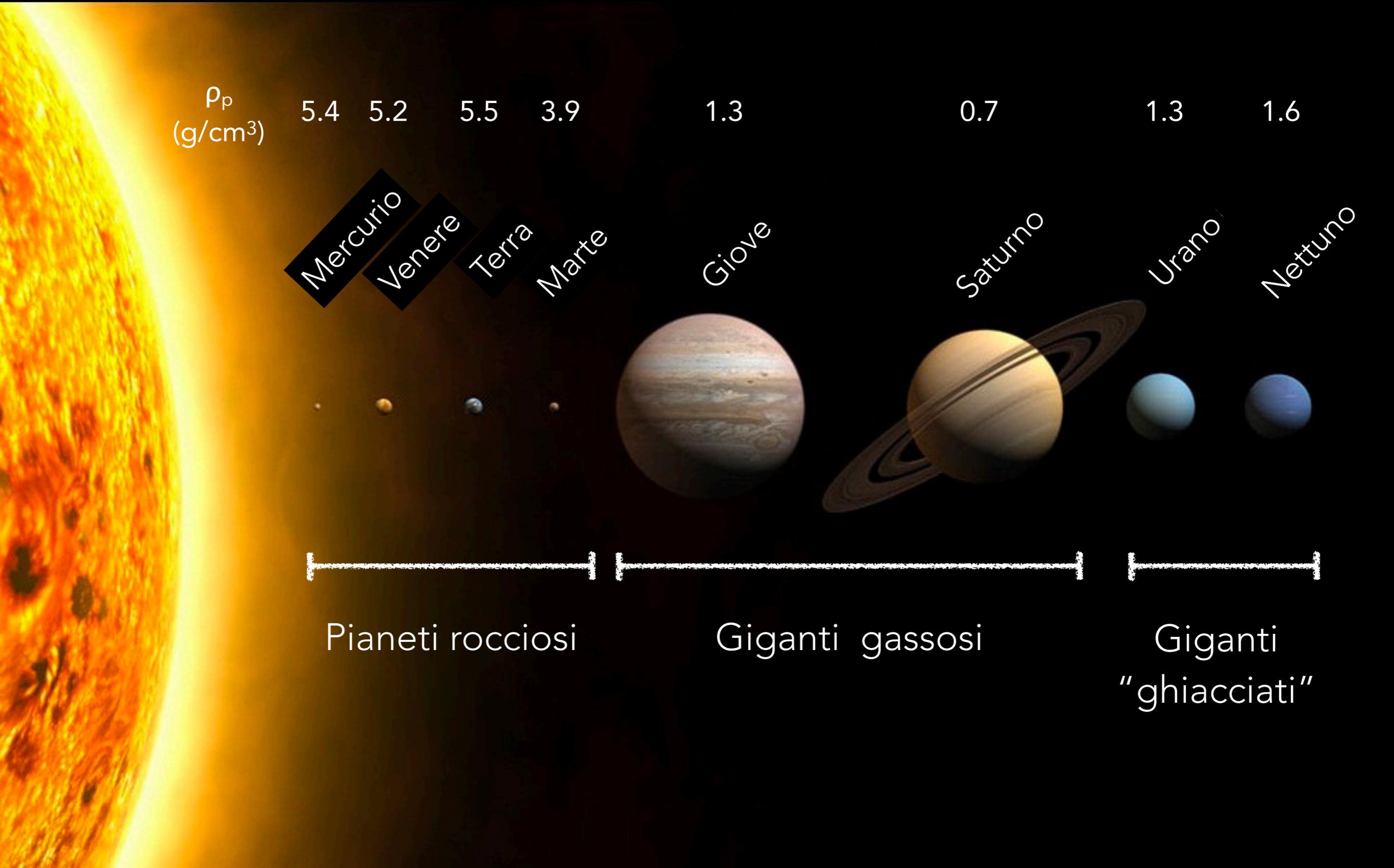
Aldo Bonomo

Istituto Nazionale di AstroFisica (INAF) - Osservatorio Astrofisico di Torino

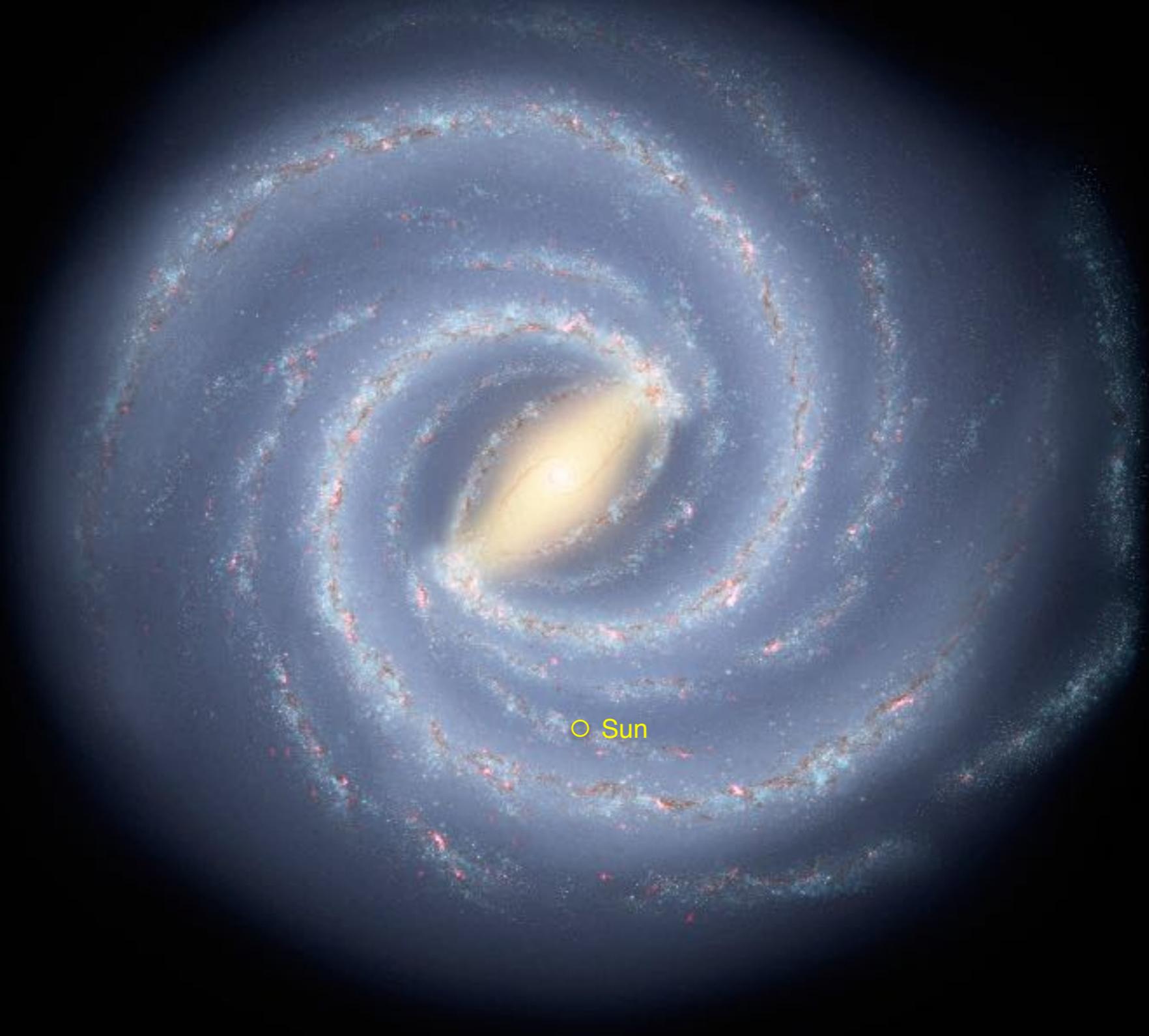
Il Sistema Solare



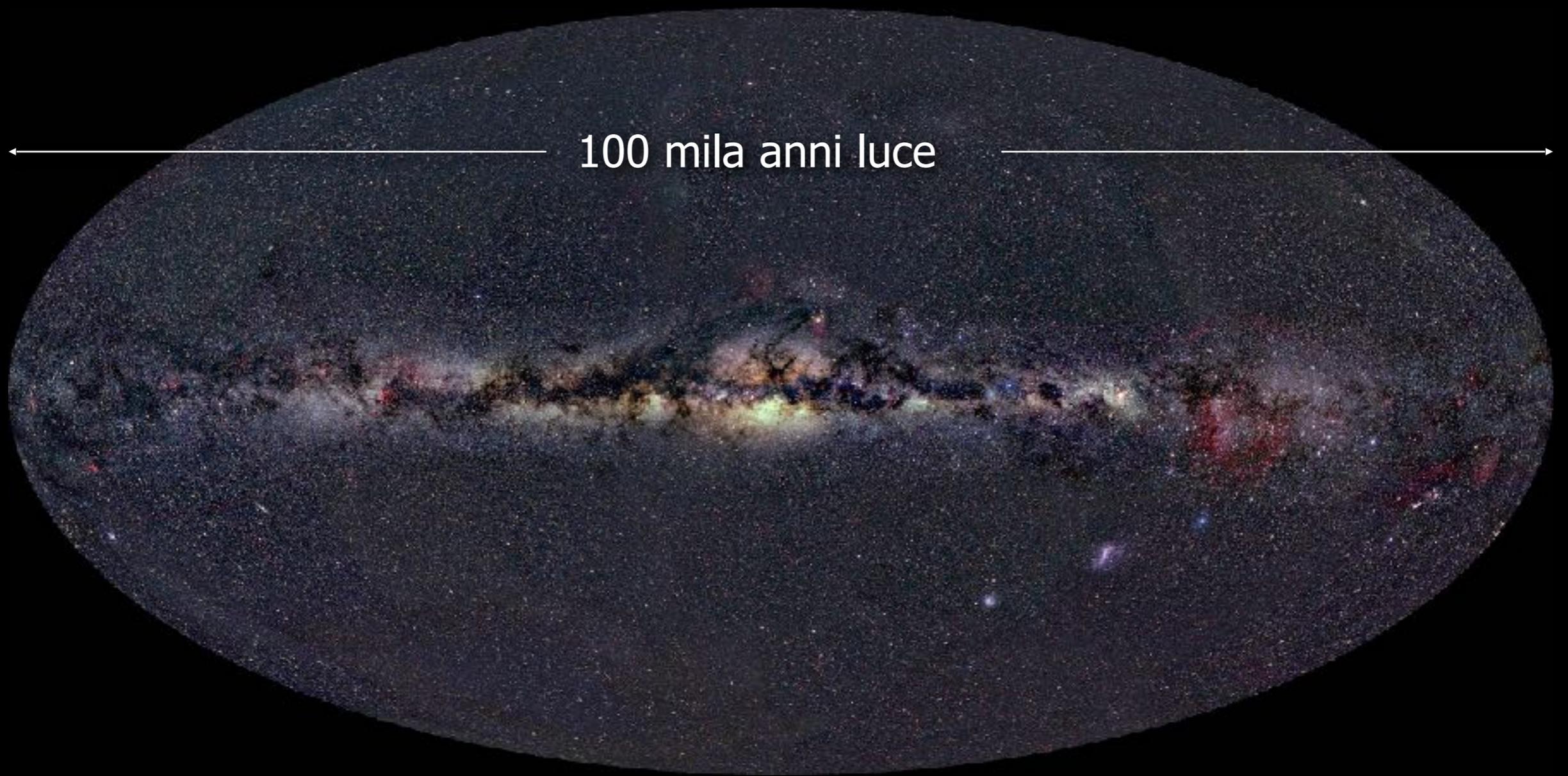
Il Sistema Solare



La Via Lattea



Ricostruzione della nostra galassia, la Via Lattea (circa 200 miliardi di stelle)



La nostra galassia, la Via Lattea
(circa 200 miliardi di stelle)



La nostra galassia, la Via Lattea, contiene circa 200 miliardi di stelle
e nell'Universo vi sono almeno 200 miliardi di galassie.

~10000 galassie osservate dal telescopio spaziale Hubble

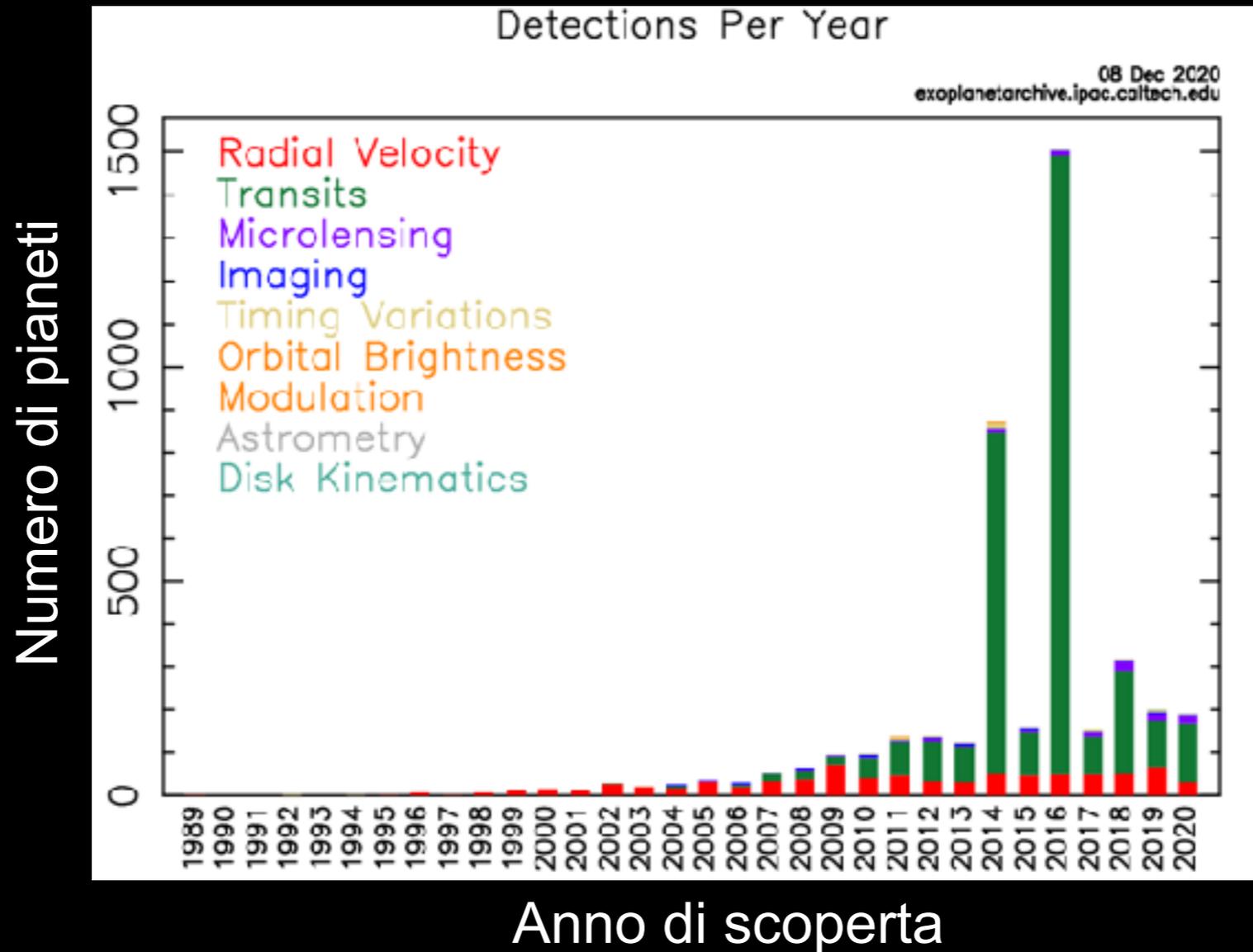
“Esistono molti mondi o non vi è che un solo mondo? Questa è una delle domande più eccelse che si possano incontrare nello studio della natura.”

Sant'Alberto Magno, 1260 circa

~10000 galassie osservate dal telescopio spaziale Hubble

I pianeti extrasolari o esopianeti

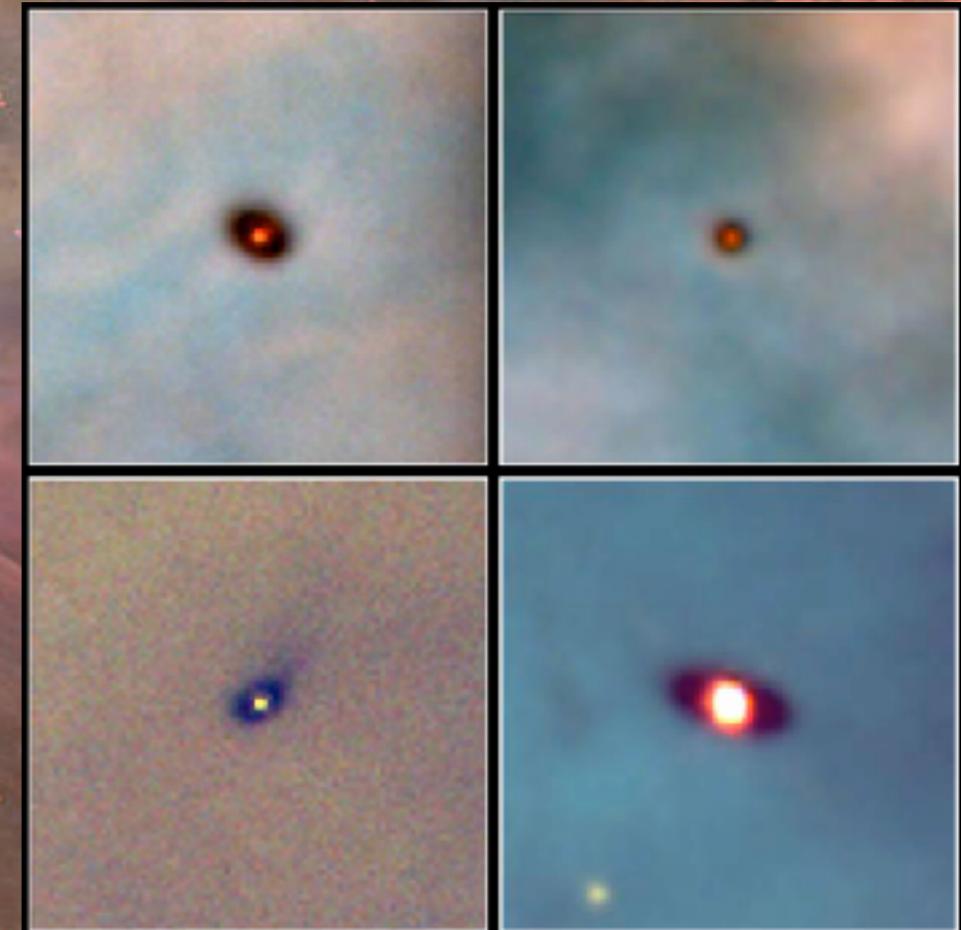
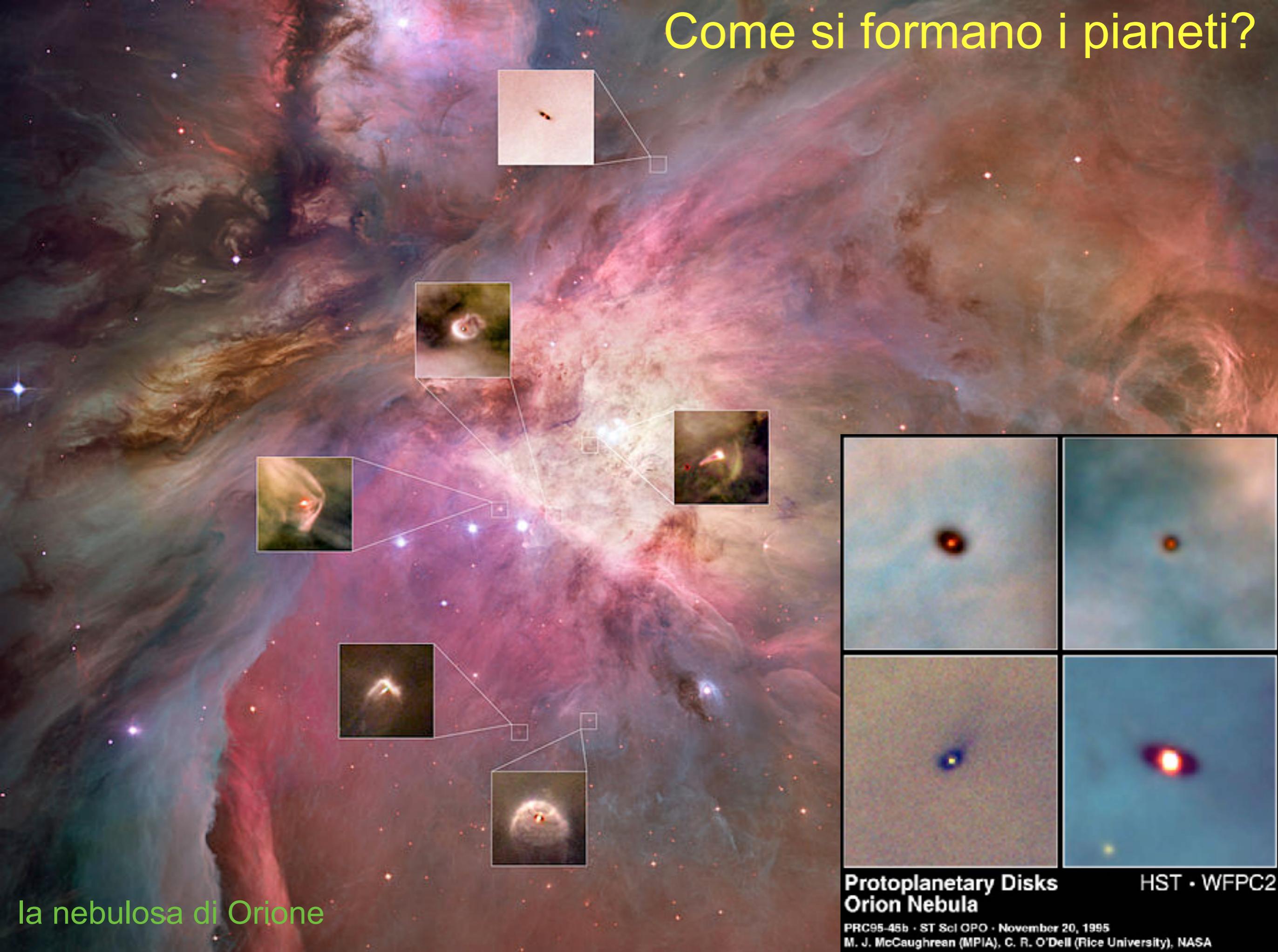
(ovvero pianeti che orbitano intorno ad altre stelle, al di fuori del Sistema Solare)



Oltre 4000 pianeti extrasolari e 700 sistemi planetari multipli (più pianeti orbitano intorno alla stessa stella) sono stati scoperti fino ad oggi.

Studi statistici mostrano che la maggior parte delle stelle hanno un sistema planetario.

Come si formano i pianeti?



Protoplanetary Disks
Orion Nebula

HST · WFPC2

PRC95-45b · ST ScI OPO · November 20, 1995
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA

la nebulosa di Orione

L'interesse per gli esopianeti

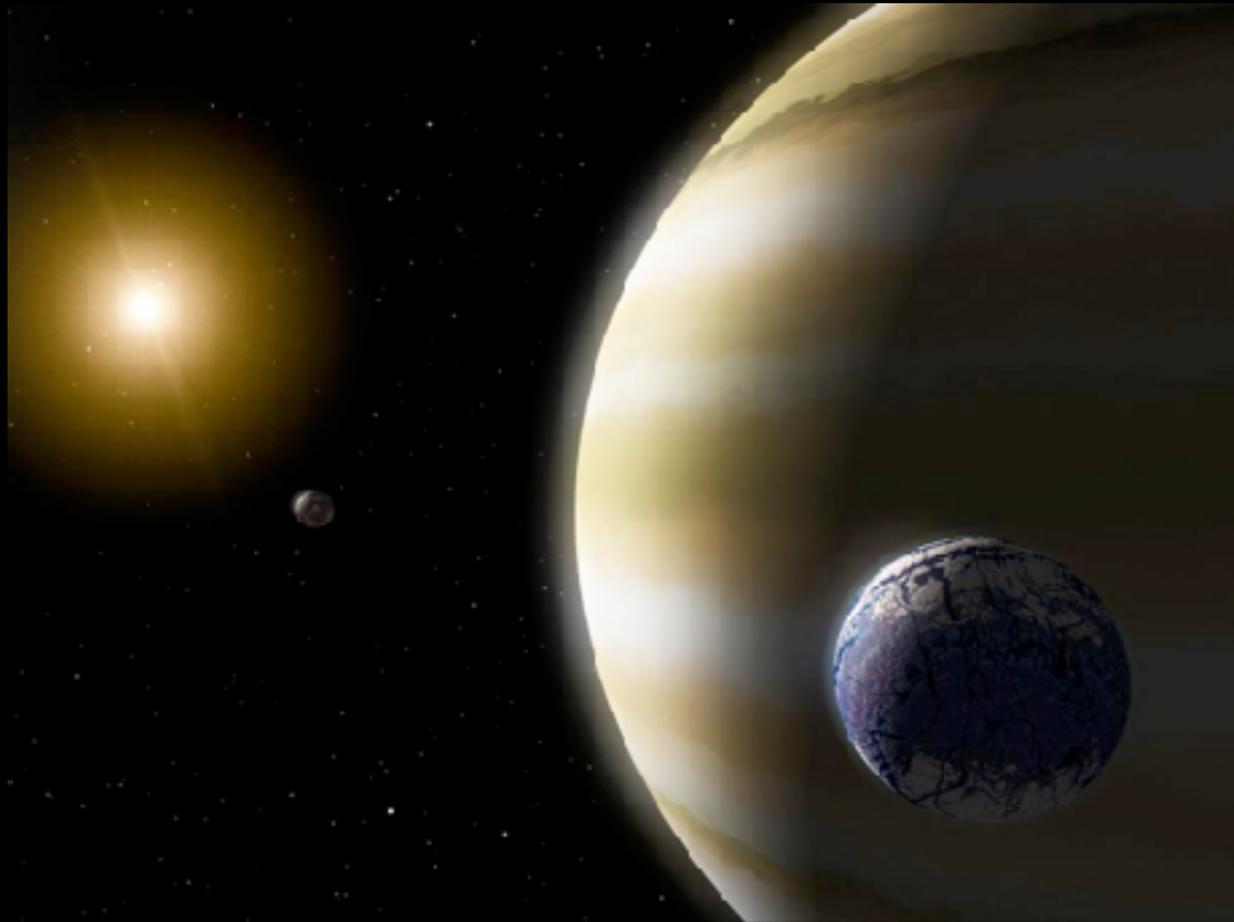
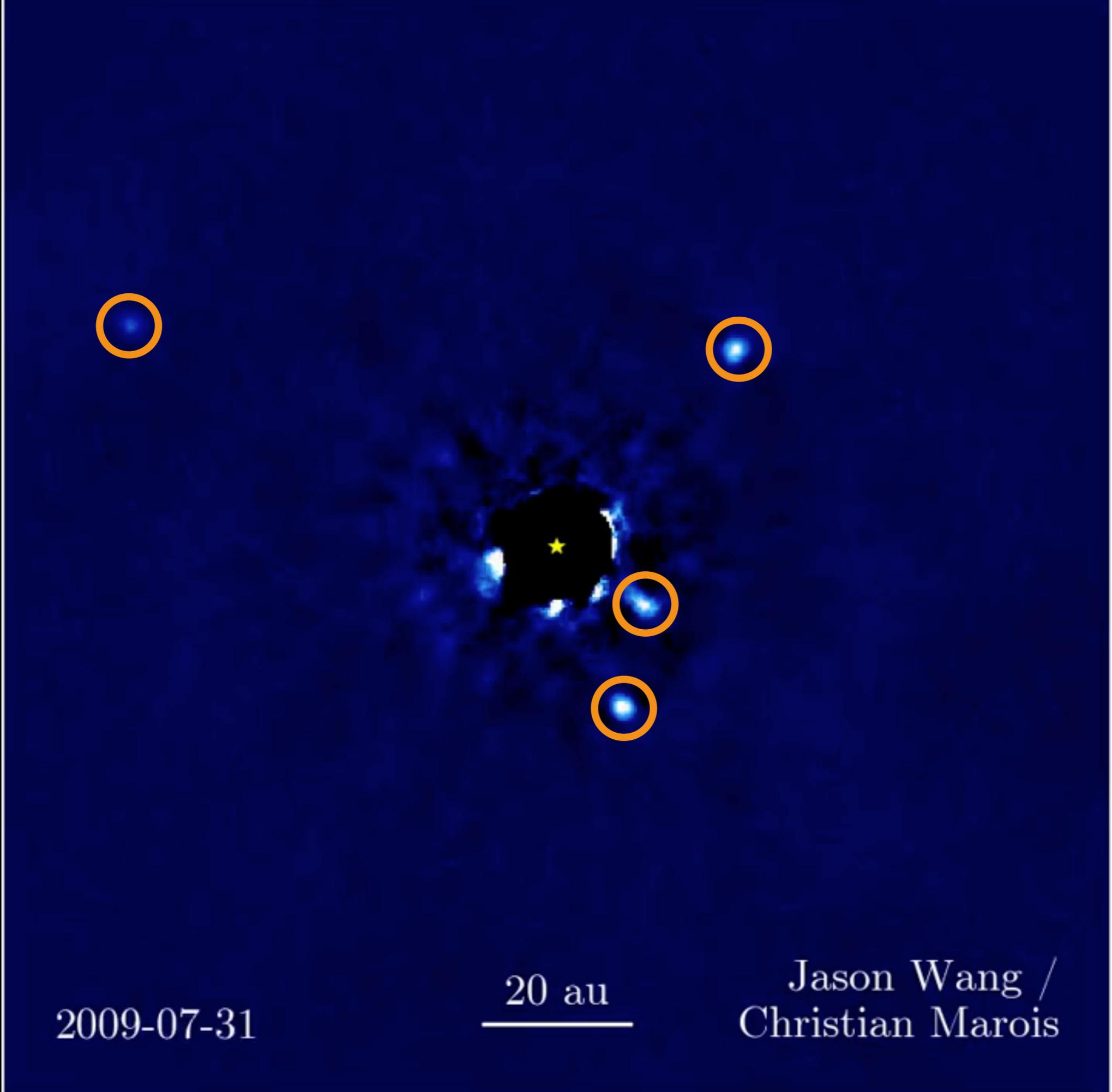


Immagine artistica di esopianeti

- Gli esopianeti sono simili ai pianeti del nostro Sistema Solare?
- Come si formano i pianeti?
- Di cosa sono costituiti?
- Come interagiscono con altri pianeti dello stesso sistema e con la loro stella?
- Quanti pianeti sono abitabili? La comparsa della vita sulla Terra è un evento unico nel cosmo?
- Esistono altre forme di vita, anche intelligente, nell'Universo?

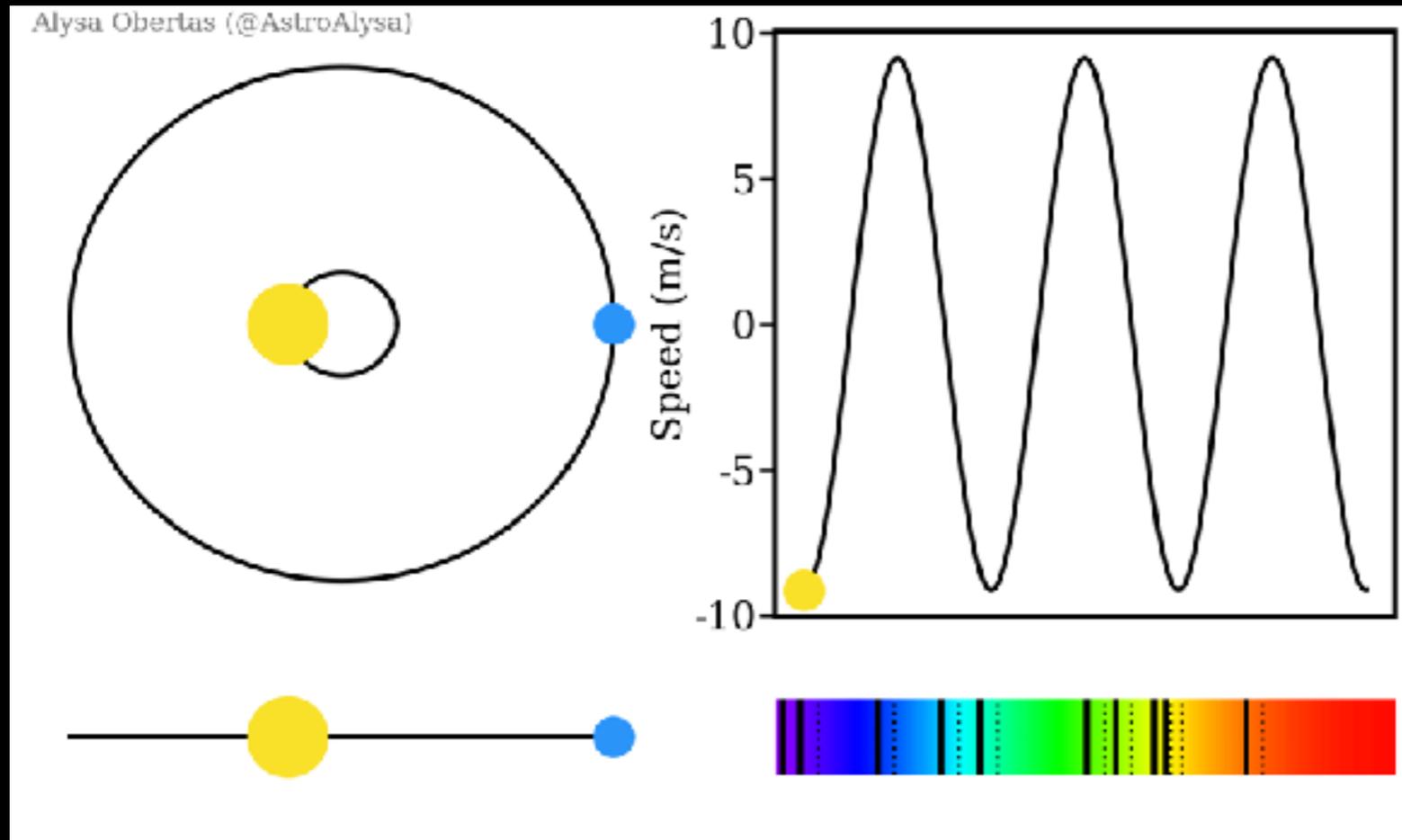


2009-07-31

20 au

Jason Wang /
Christian Marois

Il metodo Doppler



$$K \propto M_p \sin i_p M_s^{-2/3} P^{-1/3}$$

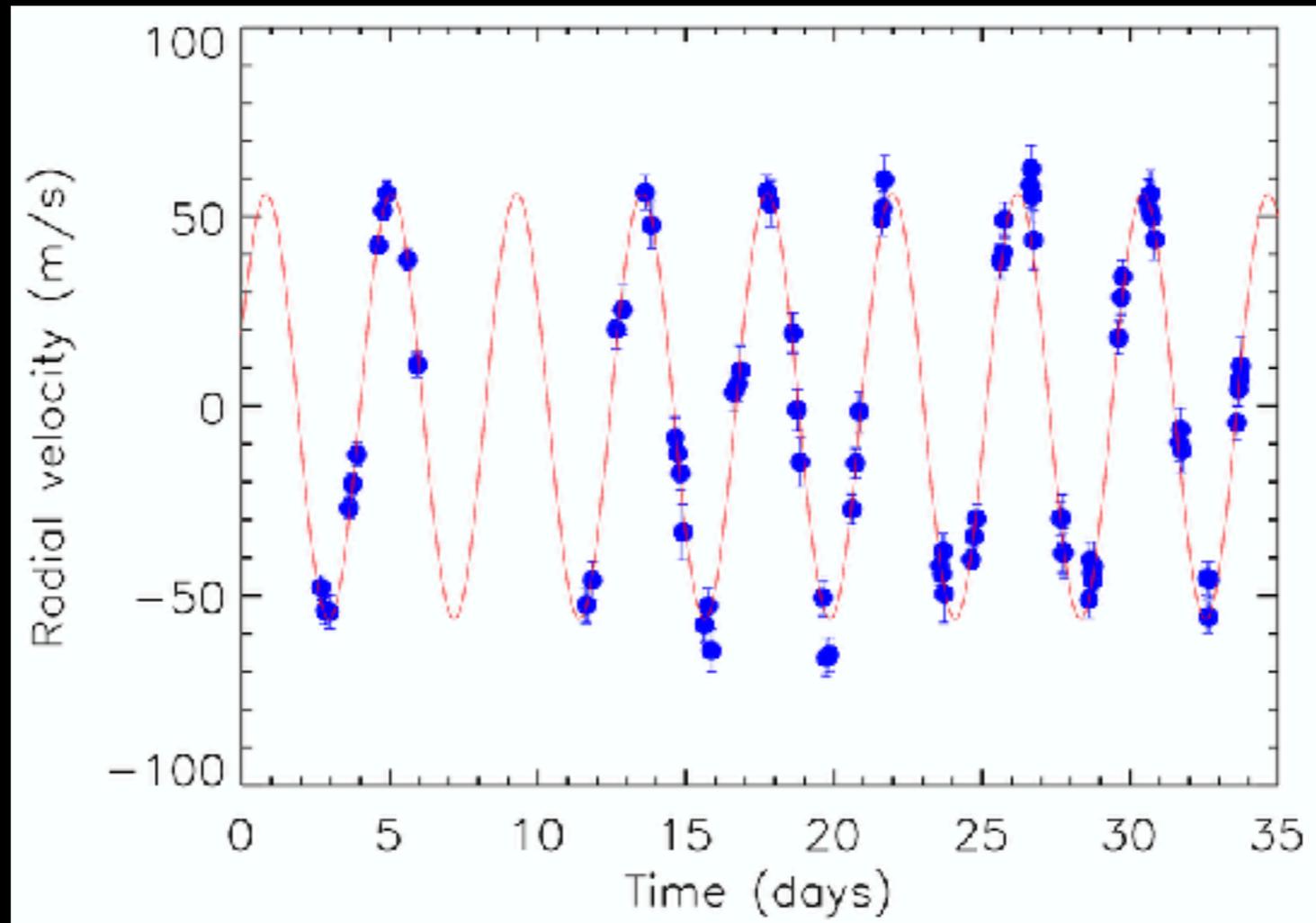
M_p : massa del pianeta
 i_p : inclinazione orbitale
 M_s : massa della stella
 P : periodo orbitale

Il pianeta, anche se a noi “invisibile”, per la forza di gravitazione universale perturba la sua stella e fa sì che anch’essa compia un moto orbitale (della stessa durata del moto del pianeta).

Possiamo allora misurare la variazione di velocità della stella durante il suo moto, lungo la nostra linea di vista, per un effetto fisico noto come effetto Doppler.

Il metodo Doppler

misure di
velocità radiale
della stella
51 Pegasi



Il pianeta, anche se a noi “invisibile”, per la forza di gravitazione universale perturba la sua stella e fa sì che anch’essa compia un moto orbitale (della stessa durata del moto del pianeta).

Possiamo allora misurare la variazione di velocità della stella durante il suo moto, lungo la nostra linea di vista, per un effetto fisico noto come effetto Doppler.

Il metodo Doppler

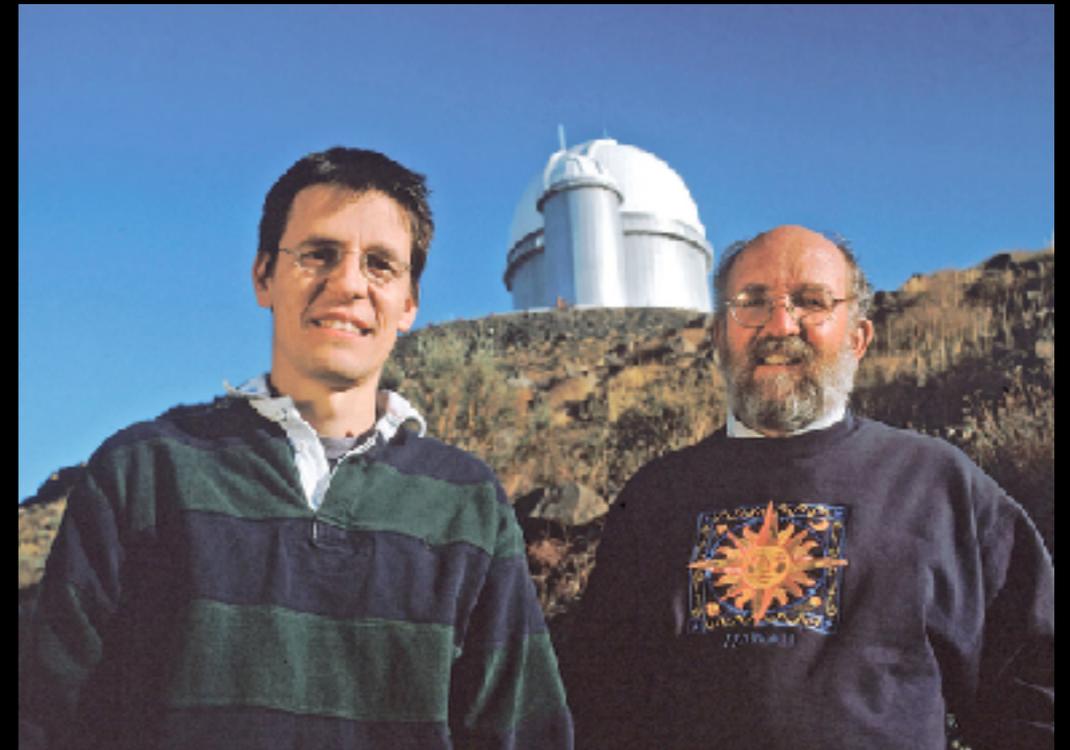
1995: due ricercatori svizzeri, M. Mayor e D. Queloz, scoprono il primo pianeta extrasolare intorno ad una stella simile al Sole, 51 Pegasi

Si tratta di un pianeta gigante gassoso che orbita intorno alla sua stella in soli quattro giorni... mentre $P_{\text{orb}}=12$ anni

Trovandosi molto vicino alla sua stella, ha una temperatura superiore ai 1000°C . E' un cosiddetto "hot Jupiter" (gioviano caldo).



Immagine artistica di 51 Peg b





Nobel prize for physics 2019

Their work has contributed to our
"understanding of the evolution of the universe
and Earth's place in the cosmos"



*Theoretical discoveries in
physical cosmology*

*Discovery of an exoplanet orbiting
a solar-type star*



James Peebles

Canadian-American

aged 84, born in
Winnipeg (Canada)

- Albert Einstein
Professor of Science
at Princeton University



Michel Mayor

Swiss

aged 77, born in
Lausanne (Switzerland)

- Professor
at University
of Geneva



Didier Queloz

Swiss

aged 53

- Professor
at University
of Geneva and
Cambridge (UK)

Doctorate obtained in

• Princeton

• Geneva

• Geneva

Source: nobelprize.org

AFP photo, handout Princeton university /
Mark Czajkowski / University of Geneva

© AFP

Il metodo Doppler

1995: due ricercatori svizzeri, M. Mayor e D. Queloz, scoprono il primo pianeta extrasolare intorno ad una stella simile al Sole, 51 Pegasi

Si tratta di un pianeta gigante gassoso che orbita intorno alla sua stella in soli quattro giorni... mentre $P_{\text{orb}}=12$ anni

Trovandosi molto vicino alla sua stella, ha una temperatura superiore ai 1000°C . E' un cosiddetto "hot Jupiter" (gioviano caldo).

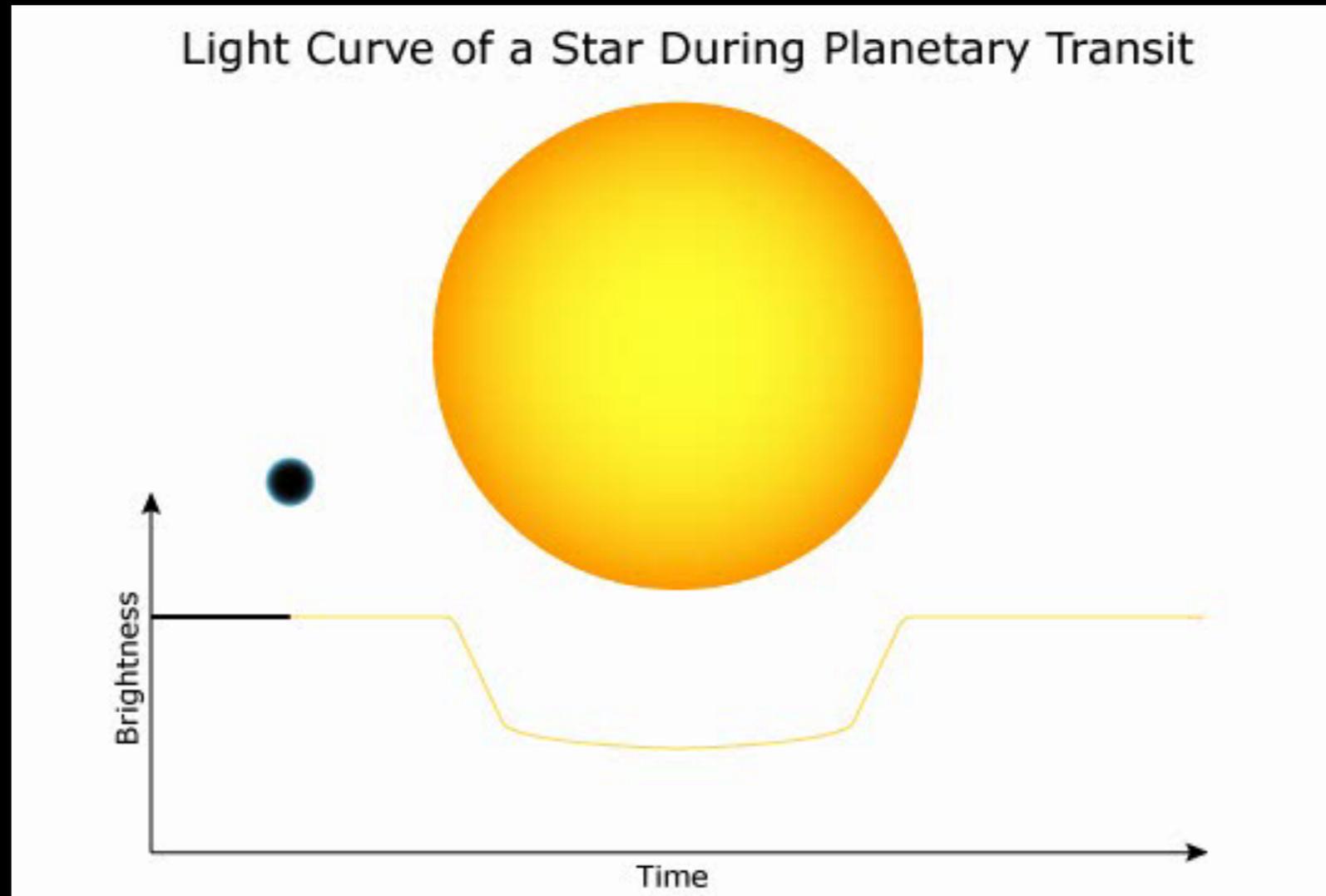


Immagine artistica di 51 Peg b



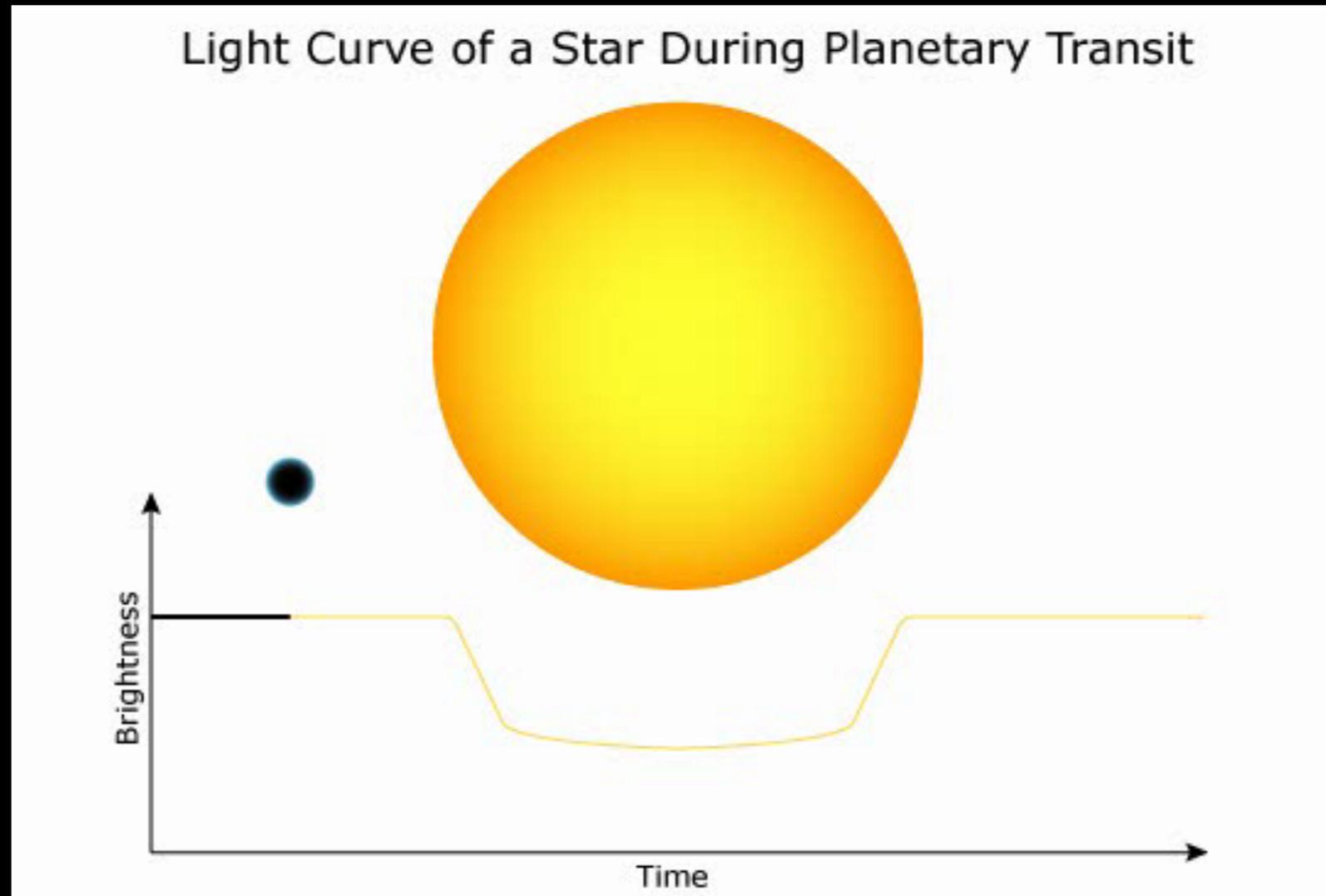
Ma stavano realmente cercando pianeti con un periodo così breve?

Il metodo dei transiti



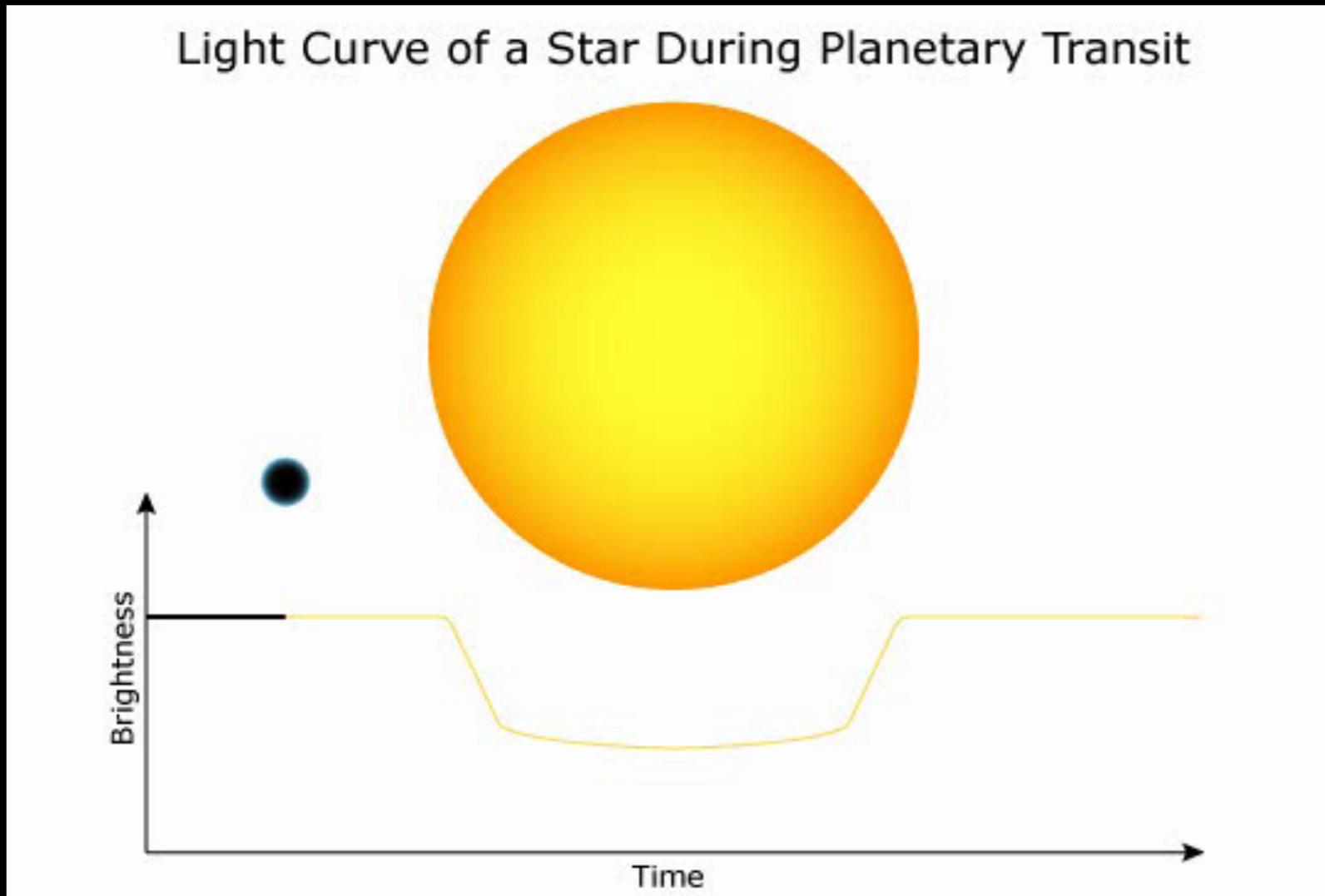
Per un'inclinazione orbitale favorevole (quasi allineamento dell'orbita con la nostra linea di vista), quando il pianeta passa davanti alla sua stella, occulta una parte del disco della stella che emette luce dando luogo a diminuzioni periodiche della luce della stella.

Il metodo dei transiti



Non vediamo il pianeta passare davanti alla stella perché le stelle ci appaiono puntiformi anche con i più potenti telescopi; possiamo solo rivelare le diminuzioni periodiche della luce della sua stella.

Il metodo dei transiti



$$\delta \cong (R_p / R_s)^2$$

R_p : raggio del pianeta

R_s : raggio della stella

Per trovare pianeti più piccoli, delle dimensioni della Terra, occorre mandare dei satelliti nello spazio perché l'atmosfera terrestre limita la precisione dei telescopi da terra.

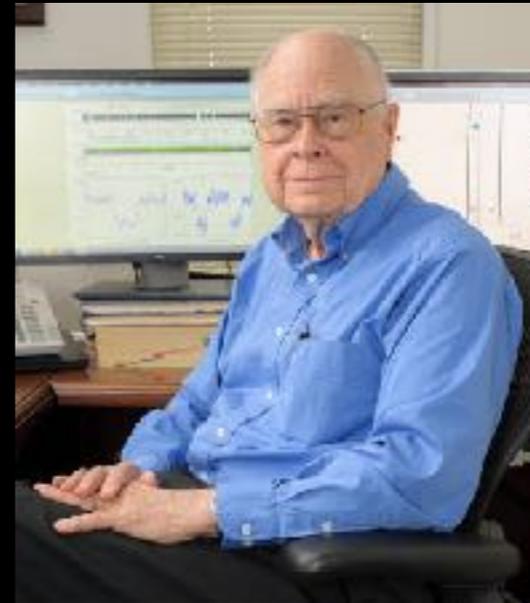
I pianeti del sistema TRAPPIST-1

video

<https://exoplanets.nasa.gov/resources/2160/transiting-trappist-1-planets/>

La missione spaziale Kepler

- Diametro dello specchio del telescopio: 1 m
- 42 rivelatori CCD a bordo
- Campo di vista: 115 gradi quadrati



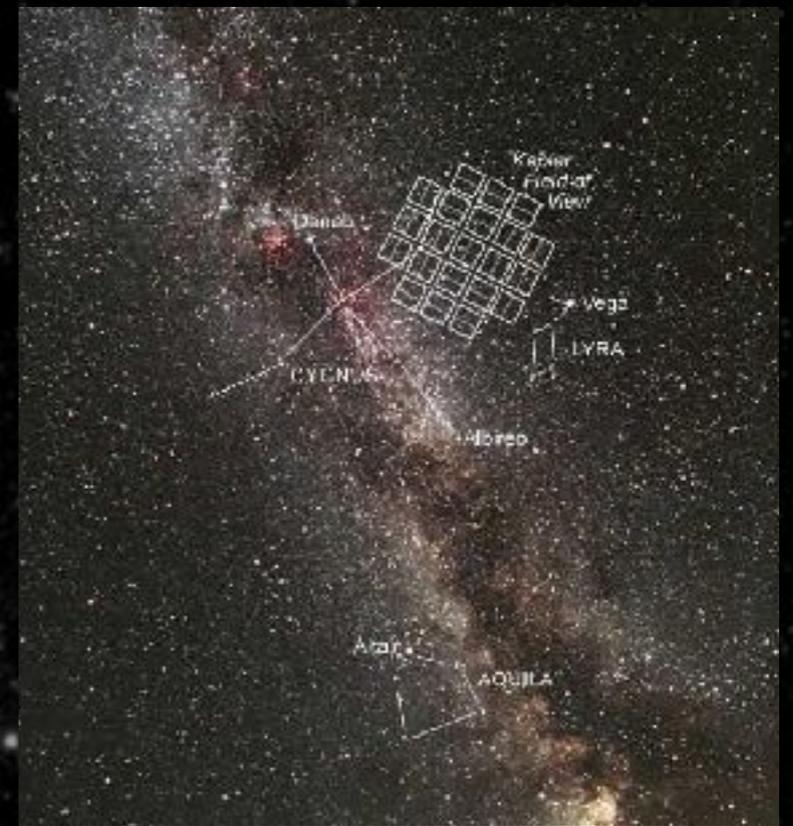
William Borucki
Principal Investigator



- Orbita eliocentrica (P=372 giorni)
- Lancio da Cape Canaveral il 7 marzo 2009
- Durata prevista (effettiva): 3.5 (9.6) anni

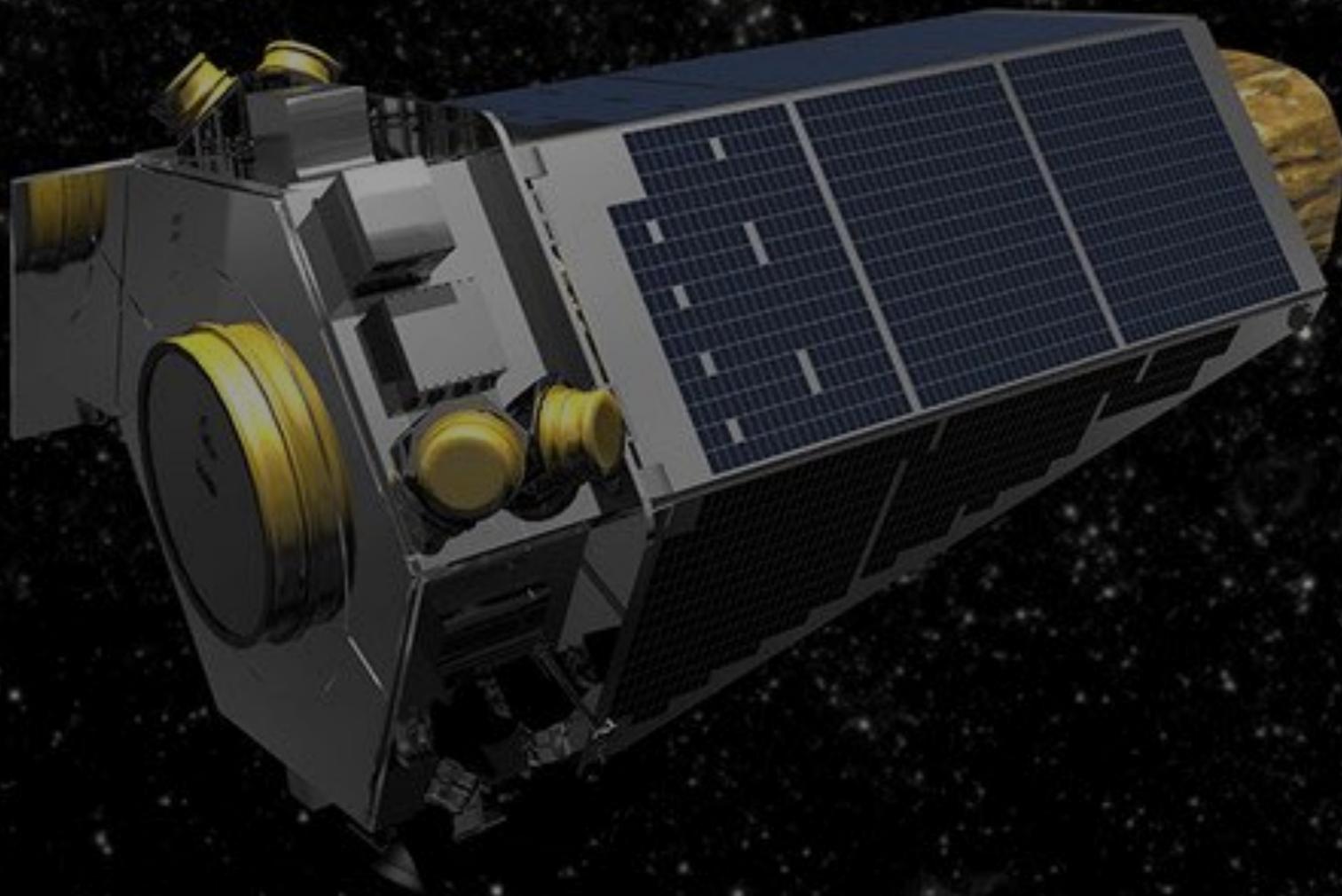
Dove ha osservato Kepler

Prima fase della missione (03/2009 - 08/2013) : osservazione simultanea di ~ 150000 stelle nella costellazione del Cigno per oltre 4 anni



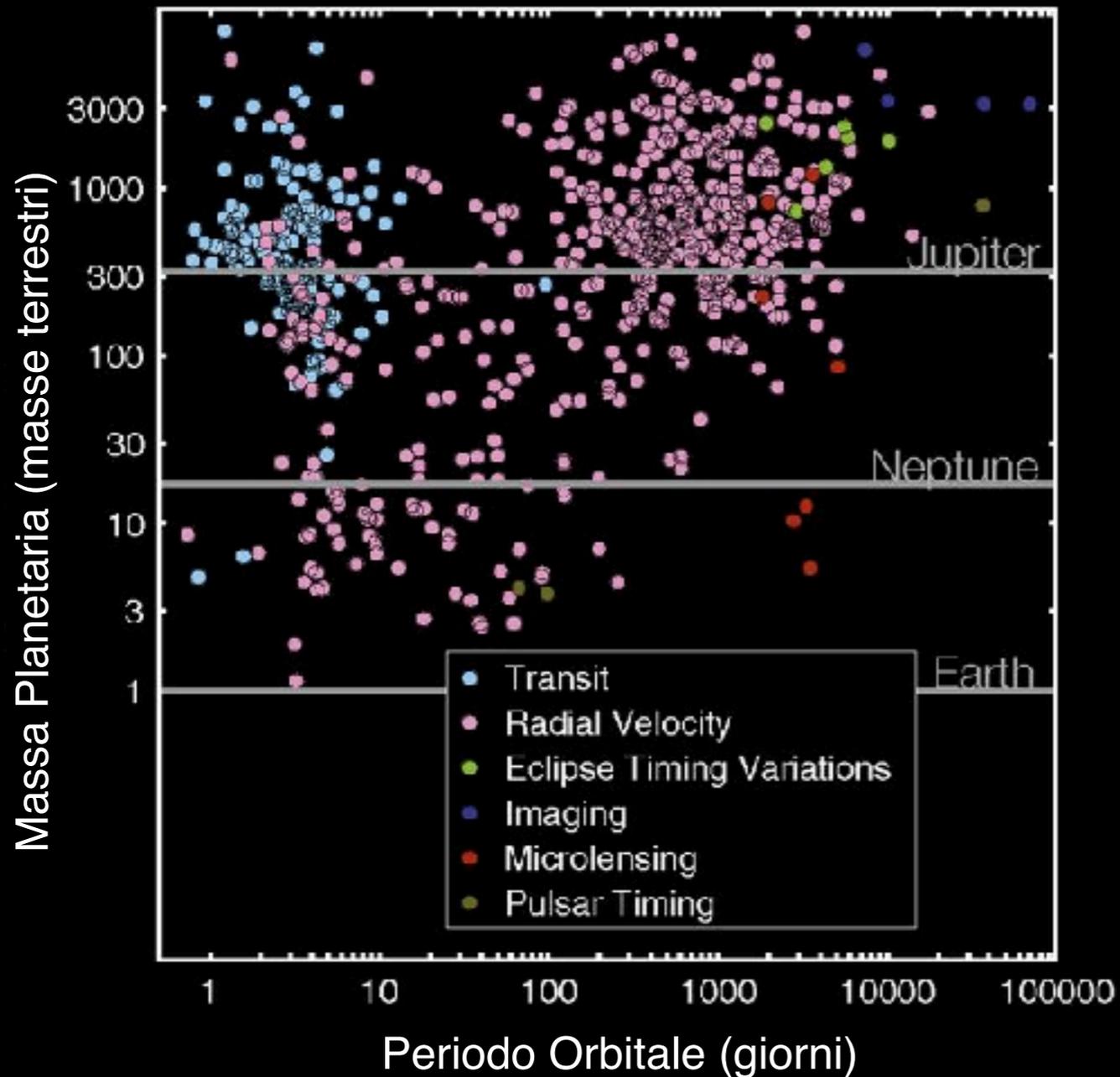
Seconda fase della missione (05/2014 - 10/2018) : a causa di danni al sistema di puntamento, Kepler è costretto a cambiare la strategia di osservazione; ha osservato altri 18 campi di stelle per circa 3 mesi ciascuno

Fine della missione il 30/10/2018: finito il propellente (idrazina), Kepler viene lasciato in orbita attorno al Sole



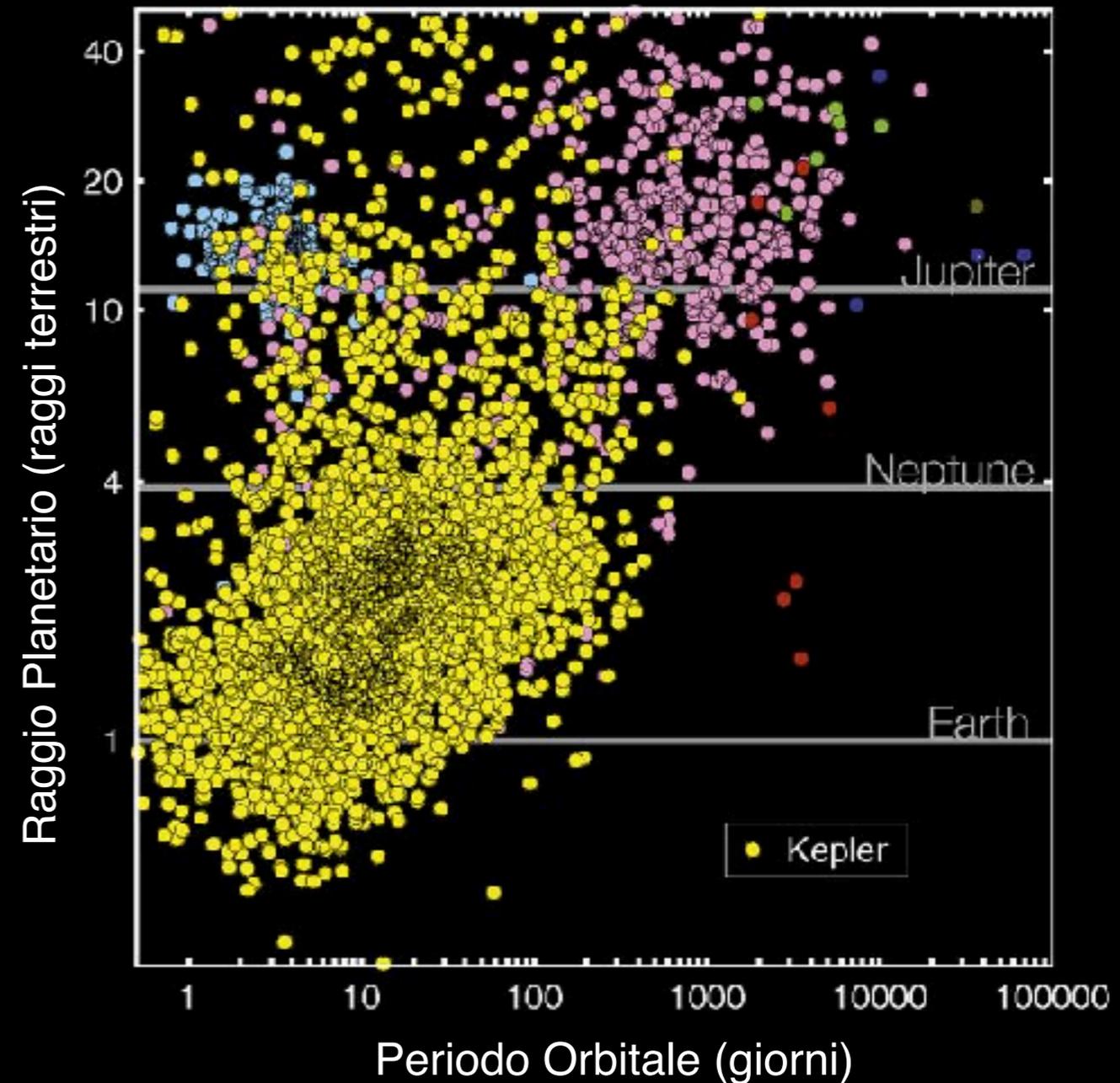
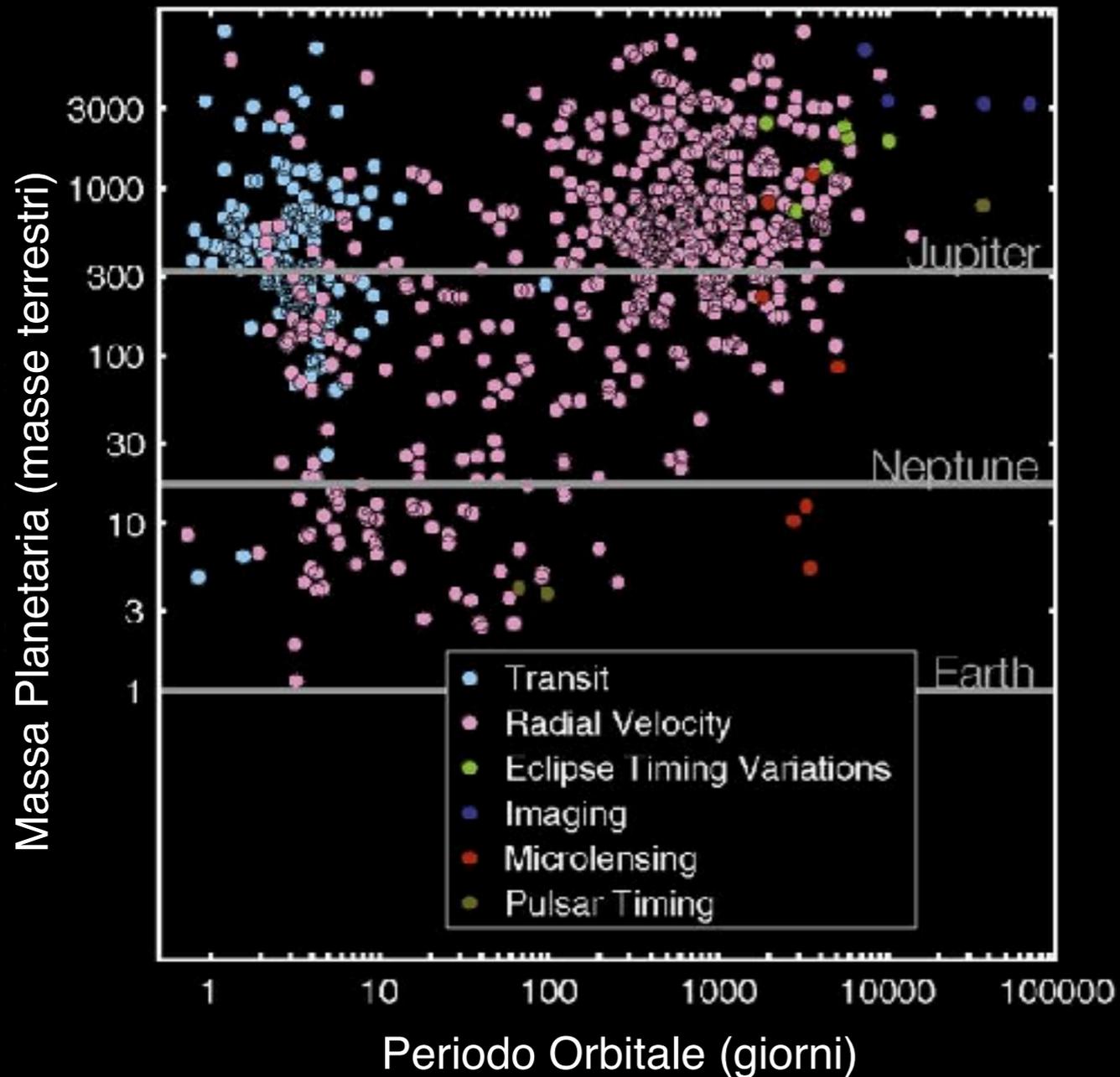
Il telescopio spaziale *Kepler*: una rivoluzione

Ha scoperto circa 2400 esopianeti, alcuni delle dimensioni della terra.



Il telescopio spaziale *Kepler*: una rivoluzione

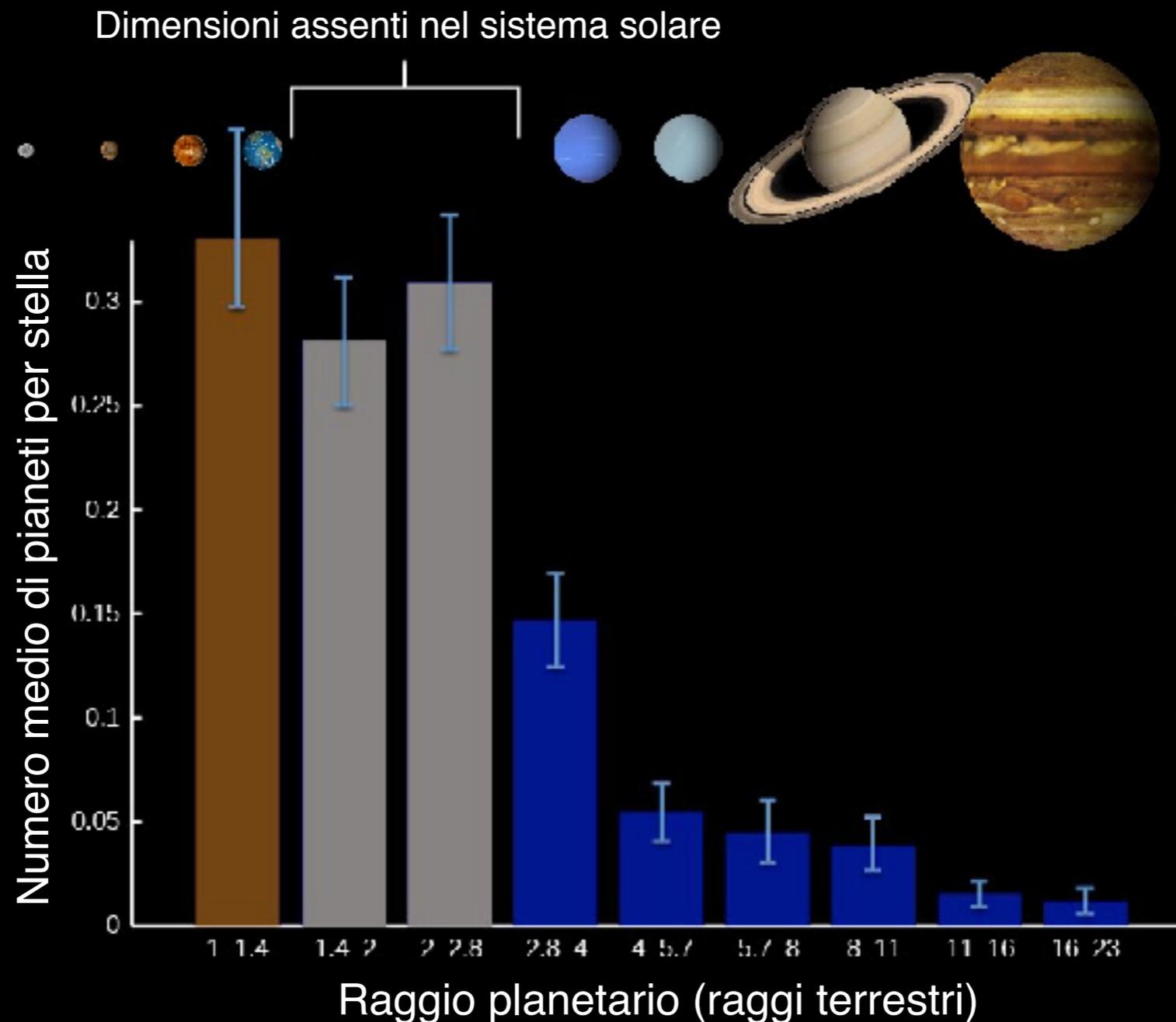
Ha scoperto circa 2400 esopianeti, alcuni delle dimensioni della terra.



Il telescopio spaziale *Kepler*: una rivoluzione

I pianeti di piccola taglia sono molto più numerosi dei pianeti giganti.

Le super-Terre, che non esistono nel nostro sistema solare, si formano molto frequentemente attorno alle altre stelle.



La straordinaria diversità dei pianeti extrasolari

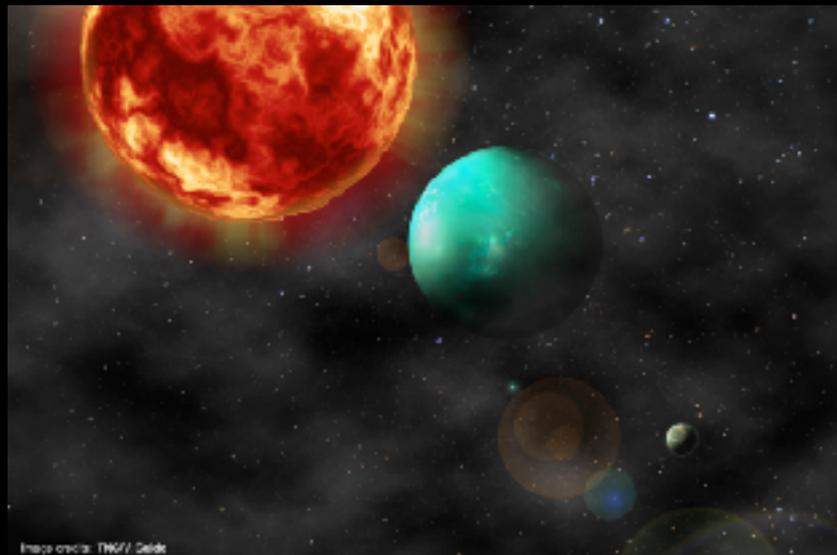


planeti infernali

compiono un giro completo attorno alla propria stella in meno di un giorno e hanno pertanto temperature molto elevate ($T_{eq} > 2000^{\circ} \text{C}$); quelli rocciosi sono verosimilmente ricoperti da oceani di lava...

superTerre

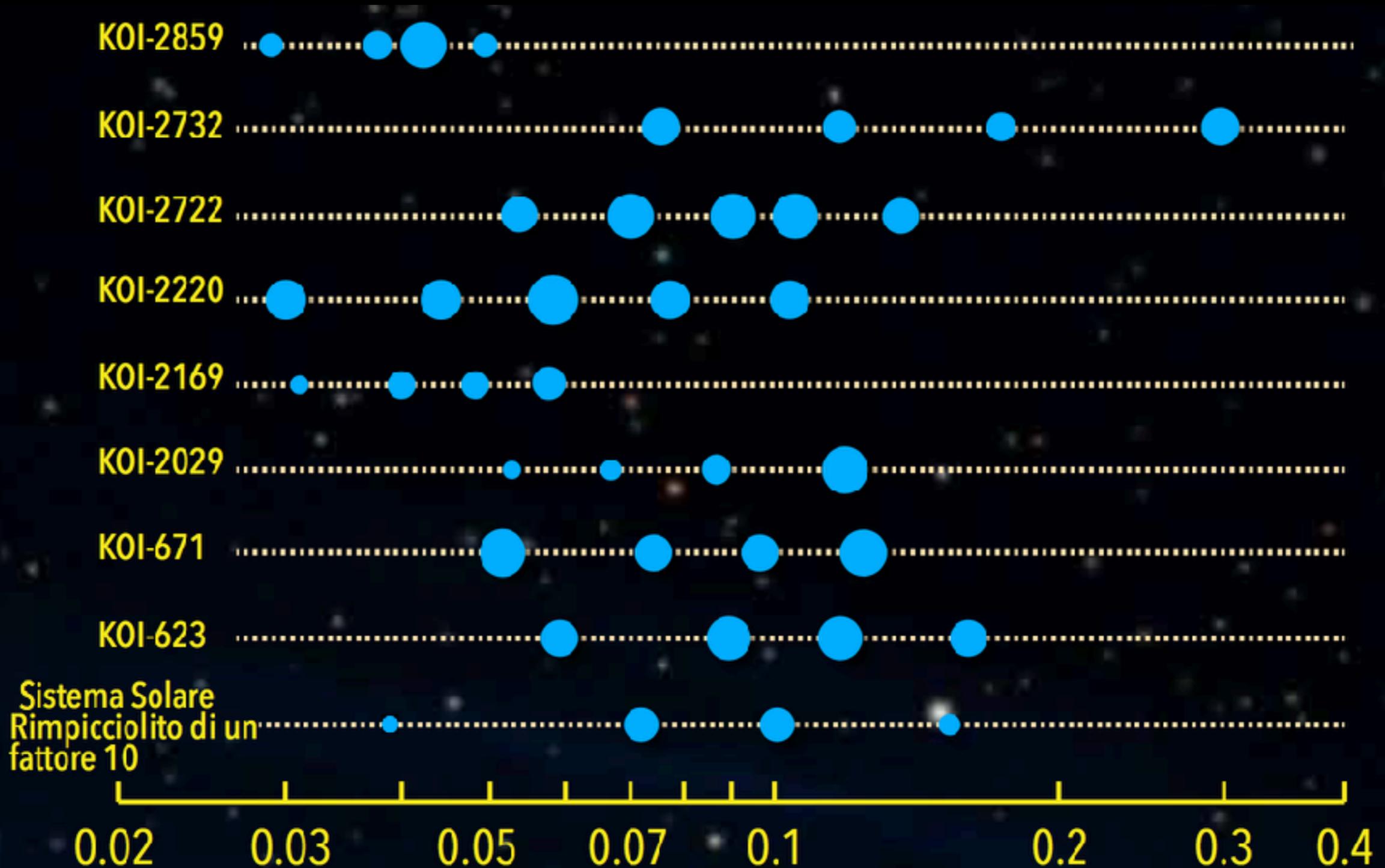
pianeti con masse di 3-10 volte quella della Terra: non esistono nel Sistema Solare ma sono molto frequenti attorno alle altre stelle in sistemi planetari compatti



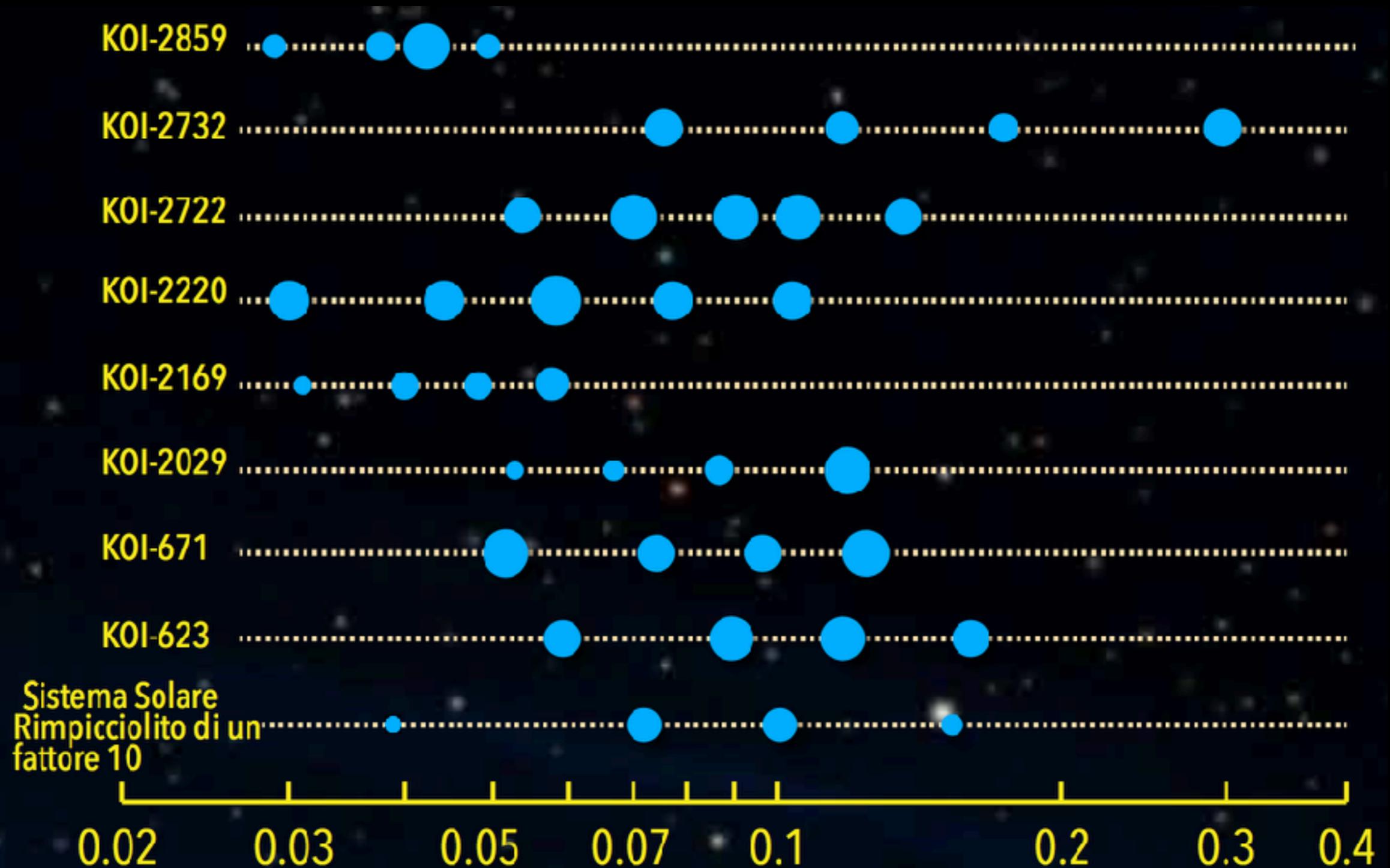
sistemi planetari "invertiti"

che contengono pianeti giganti all'interno e pianeti più piccoli in orbite esterne...

La diversità delle architetture dei sistemi planetari



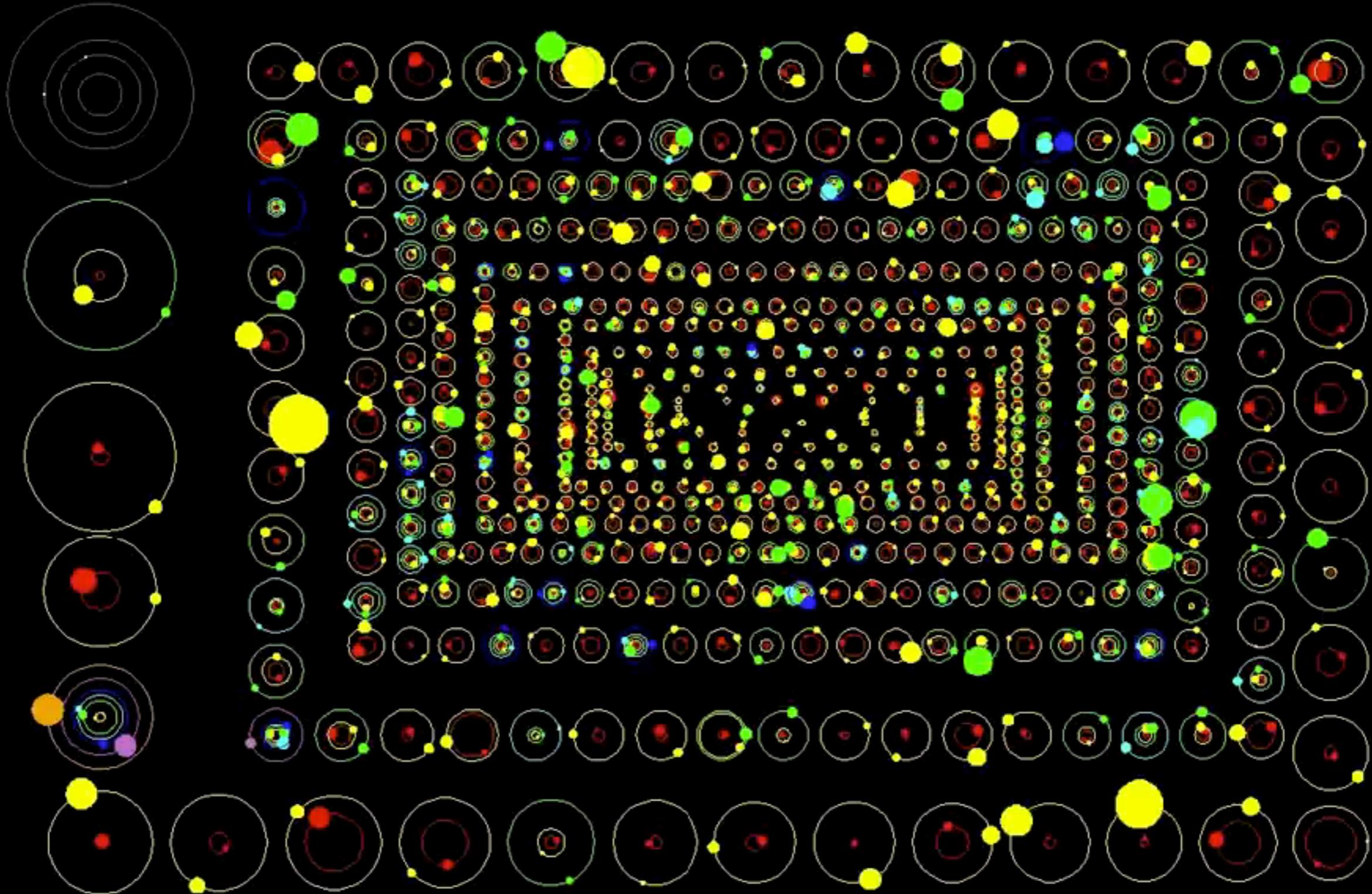
Ma in molte altre stelle è stato trovato un solo pianeta... la “dicotomia” Kepler



La diversità delle architetture dei sistemi planetari

The Kepler Orrery III

$t[\text{BJD}] = 2455215$



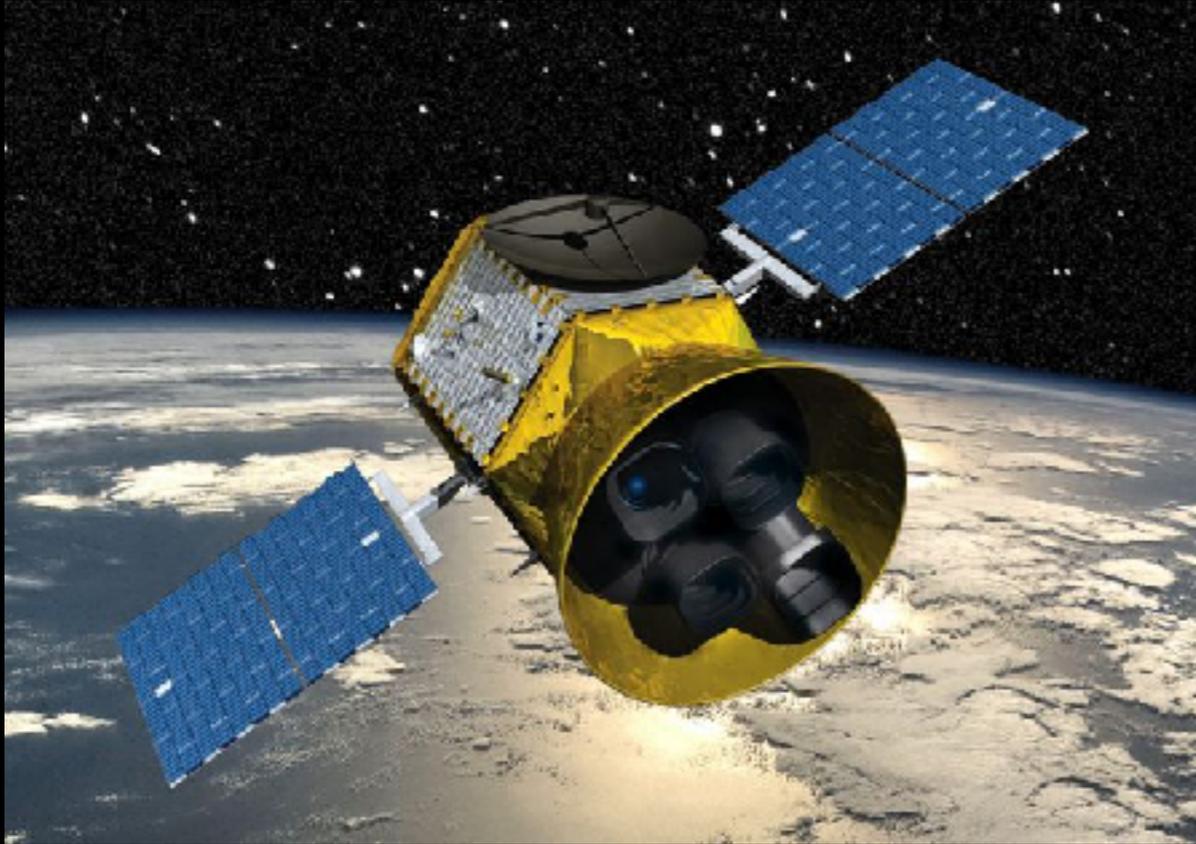
Limiti della missione Kepler

Soprattutto nella prima fase della missione, Kepler ha osservato moltissime stelle relativamente distanti e quindi deboli ($V > 12-13$). Sebbene i pianeti scoperti attorno a queste stelle abbiano contribuito a studi delle frequenze/architetture dei sistemi planetari, per molti di essi non è possibile:

- determinare con precisione la massa (e quindi la densità) con il metodo Doppler (studi di composizione interna)
- studiare l'atmosfera (composizione chimica, proprietà chimico-fisiche)

Occorre osservare stelle più brillanti ($V < 9-10$)!

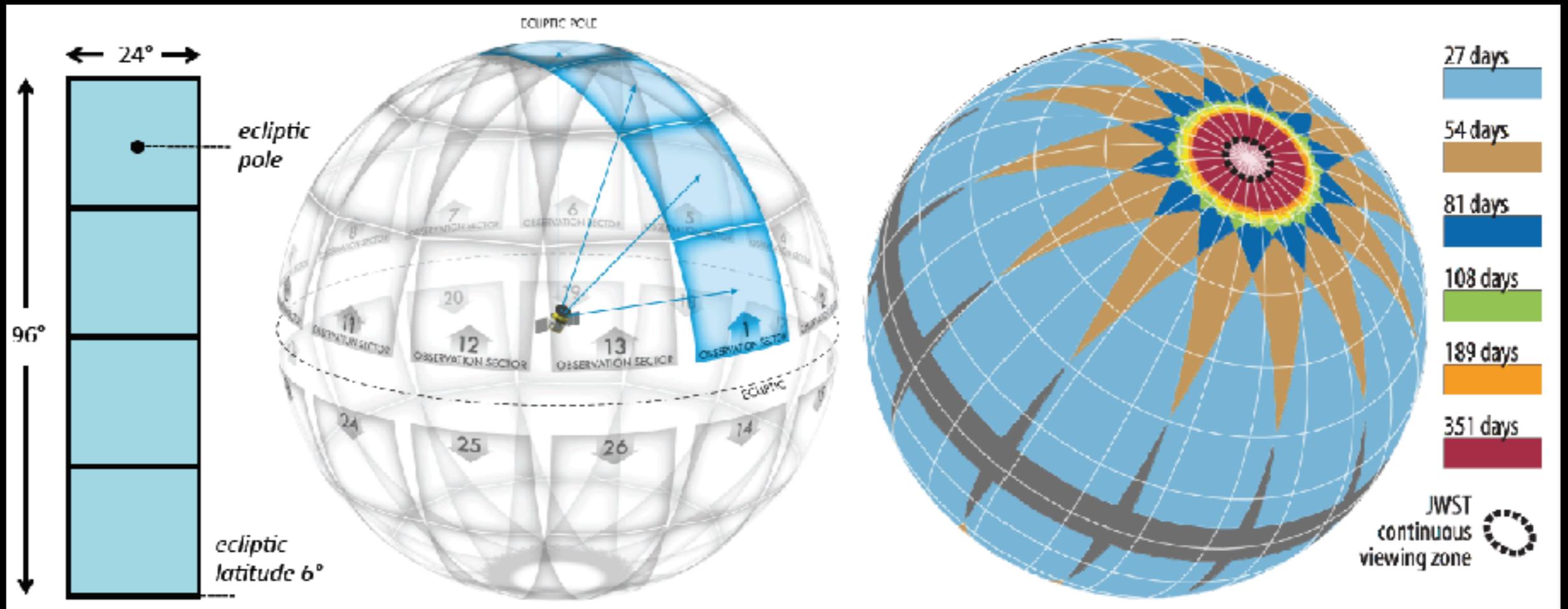
Il telescopio spaziale *TESS* (NASA)



George Ricker
Principal Investigator

- 4 telescopi con diametro dello specchio di 10 cm
- 4 rivelatori CCD a bordo (uno per telescopio)
- Campo di vista: $24^\circ \times 96^\circ$ per puntamento (85% del cielo intero)
- Orbita geocentrica ed eccentrica in risonanza 2:1 con la Luna (13.7 giorni)
- Lancio da Cape Canaveral il 18 aprile 2018
- Durata prevista (effettiva): 2 (4+) anni

Dove osserva *TESS* (NASA)



Osserverà circa 200000 stelle brillanti per almeno 27 giorni (54 giorni per il prolungamento della durata della missione a 4 anni).

I due campi osservati più a lungo si trovano al polo sud e nord dell'eclittica, essi saranno sempre in vista per il telescopio spaziale JWST che potrà così osservare gli esopianeti trovati da TESS per studiarne l'atmosfera.

Il telescopio spaziale *CHEOPS* (ESA)



Willy Benz
Principal Investigator

- 1 telescopio con diametro dello specchio di 30 cm
- 1 rivelatore CCD
- Campo di vista: $0.3^\circ \times 0.3^\circ$
- Orbita “bassa” geocentrica polare (700 km)
- Lancio dalla Guyana Francese (Kourou) il 18 dicembre 2019
- Durata prevista: 3.5 (goal 5) anni

Il telescopio spaziale *CHEOPS* (ESA)

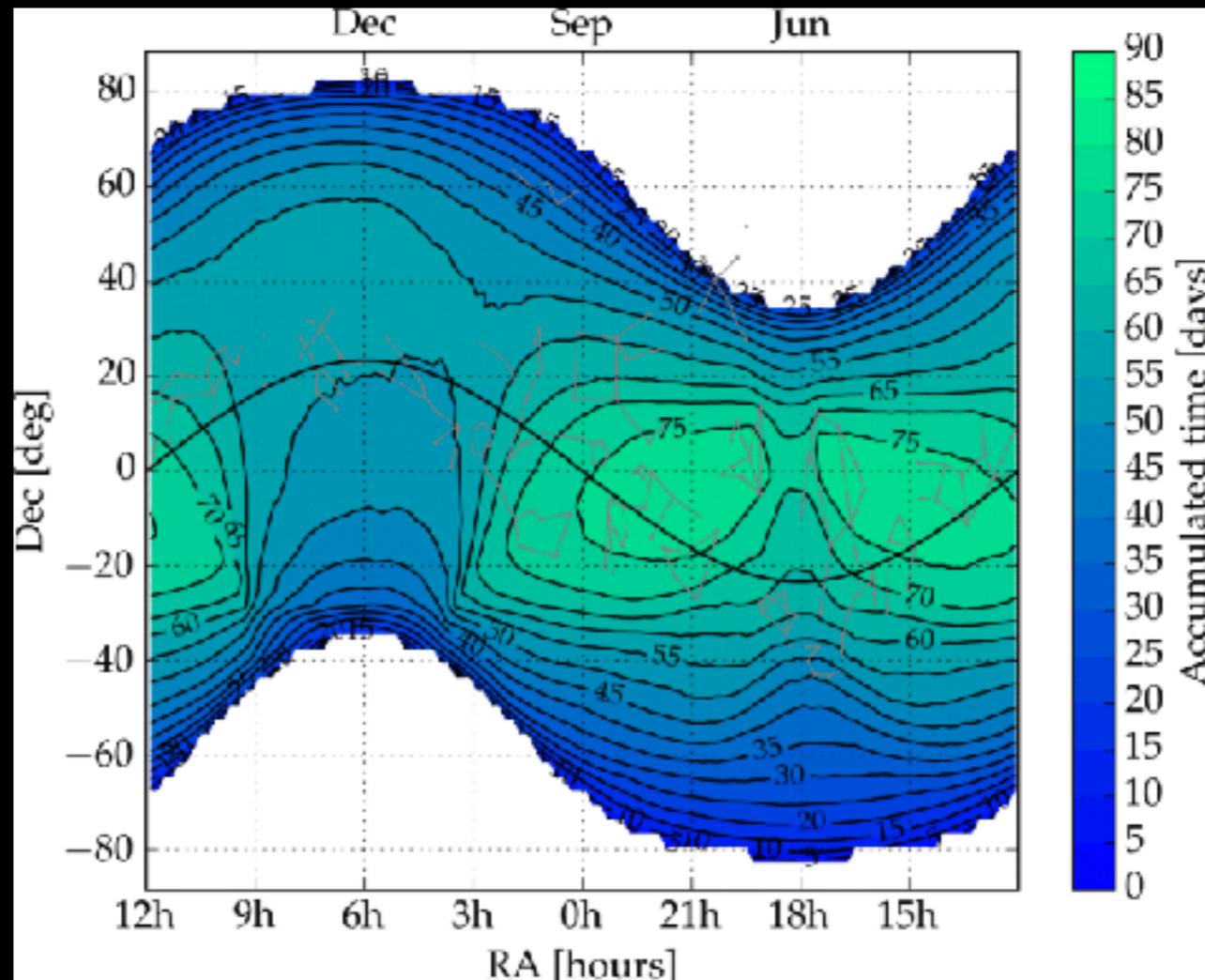
Lancio il 18/12/2019 dalla Guyana Francese

Video col
ariane
ariãnegroup

00 : 15



Dove osserva *CHEOPS* (ESA)



Osserva stelle molto brillanti, una stella alla volta, per

- cercare transiti in sistemi esoplanetari rivelati con il metodo Doppler
- cercare nuovi pianeti in sistemi esoplanetari già noti
- caratterizzare meglio sistemi esoplanetari già osservati da TESS (misura più precisa del raggio planetario, effemeride dei transiti, etc.)