

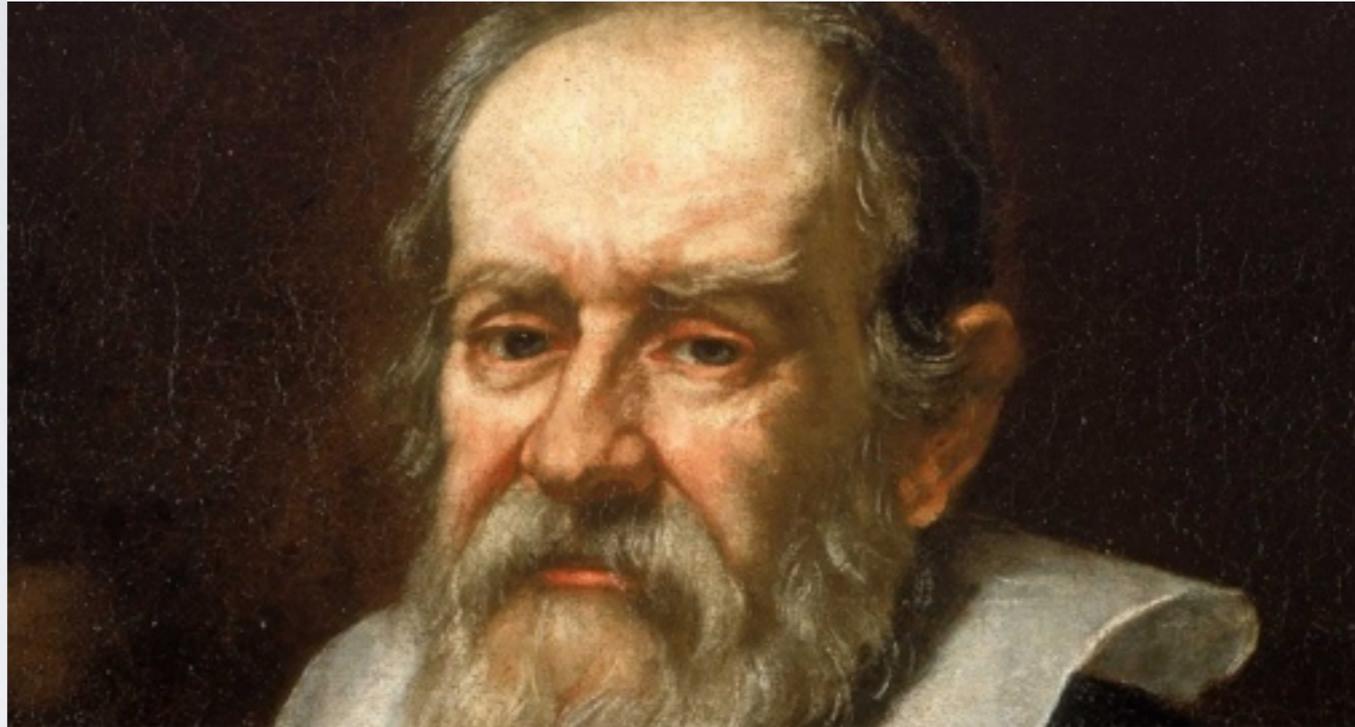


7 Giugno 2018, Bologna

E PUR SI FORMA! I PIANETI EXTRASOLARI E IL MISTERO DELLA LORO NASCITA

ANTONIO GARUFI con INAF, SPHERE, ETH, UAM

PREAMBOLO



“E pur si muove” è una frase celebre attribuita a Galileo.

In realtà venne scritta da Giuseppe Baretta nella sua antologia in difesa di Galileo del 1757.

“Nell’uso comune, si ripete a chi si ostina a negare l’evidenza” *Treccani*.

PREAMBOLO

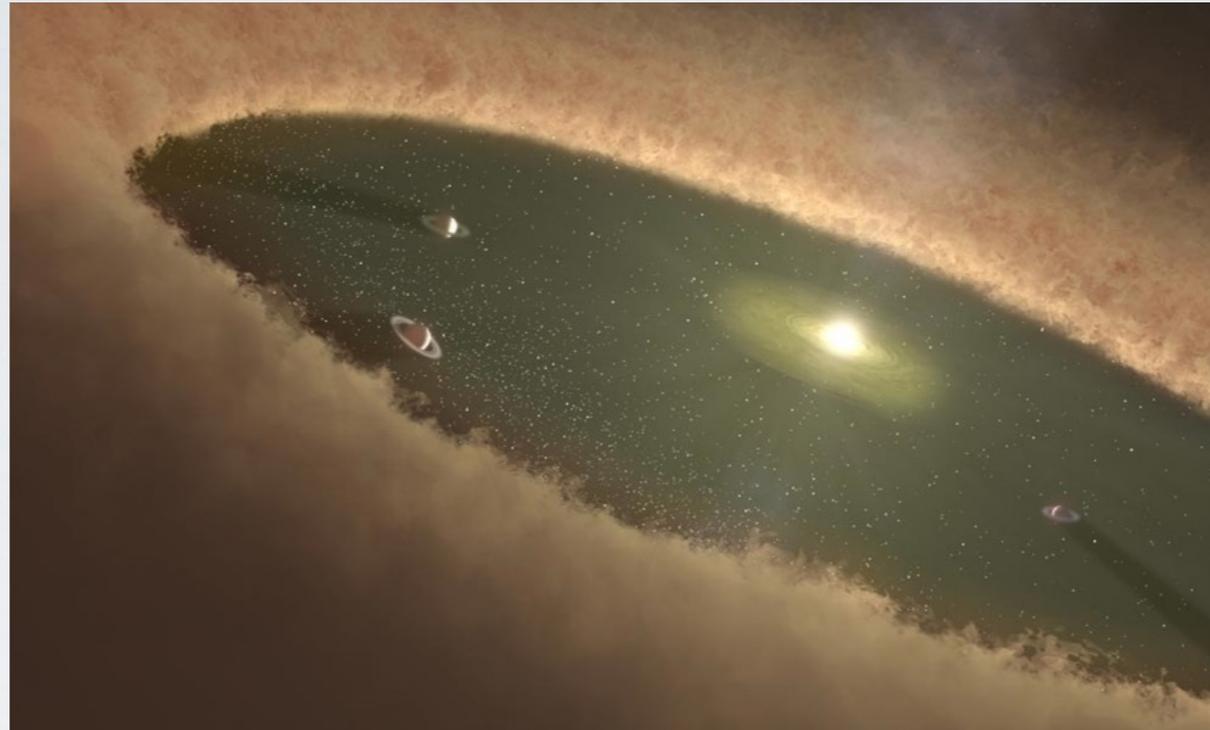


Illustrazione d'artista. NASA/JPL-Caltech.

**“E pur si forma” riassume il paradosso legato
alla formazione dei pianeti.
Non dovrebbero formarsi ma lo fanno.**

PREAMBOLO



Me. VLT/Cerro Paranal, Cile, 7 Maggio 2015.

Ho studiato tra Bologna e l'Olanda e lavorato in Svizzera e in Spagna. Da tre giorni lavoro a Firenze.

Sono un astronomo 'osservativo'. La mia ricerca si occupa di guardare ai primi istanti della vita di un pianeta, o a quelli appena precedenti.

SCALETTA

✓ Preambolo

Cos'è un pianeta

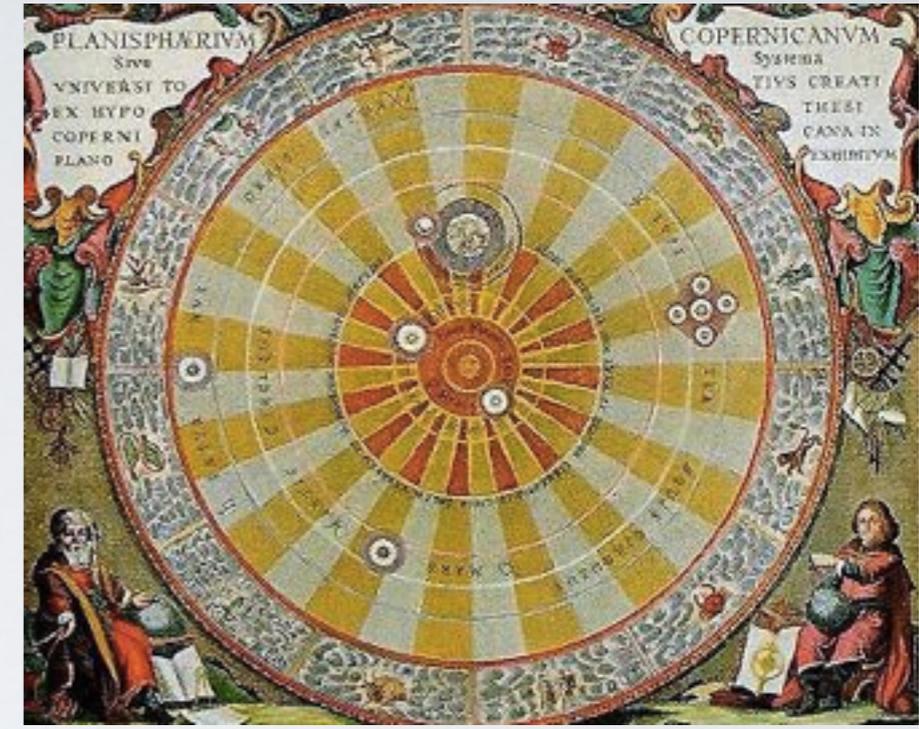
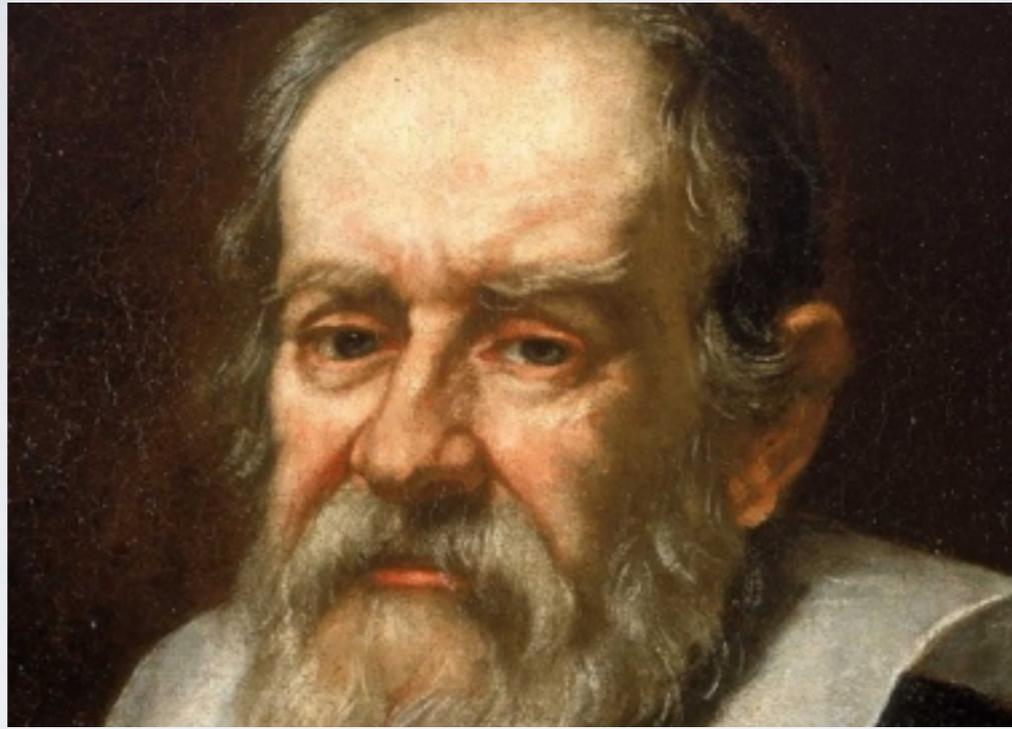
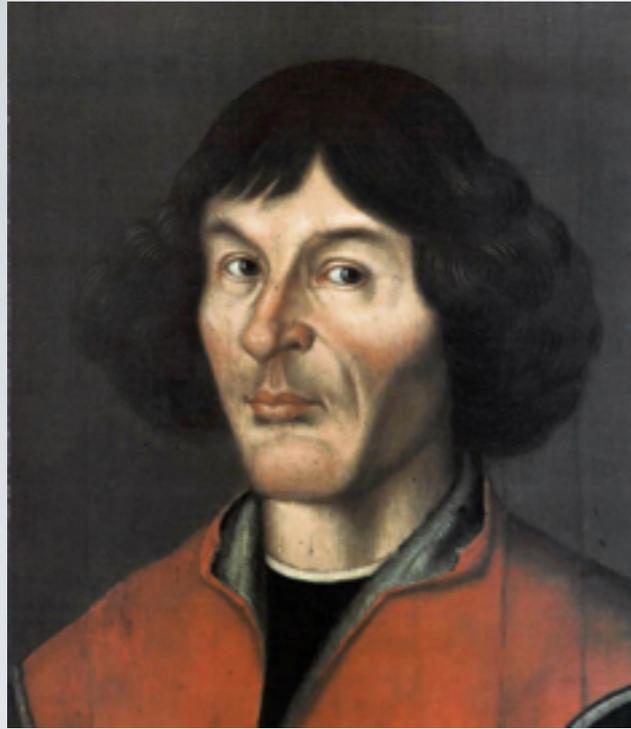
Come abbiamo scoperto 3700+ *esopianeti*

I dischi protoplanetari e la formazione planetaria

Uno strumento all'avanguardia: SPHERE

Il futuro e la ricerca di vita

I PIANETI



“E pur si muove” è anche un’ottima sinossi della teoria copernicana, secondo cui la Terra compie un moto di rotazione e uno di rivoluzione.

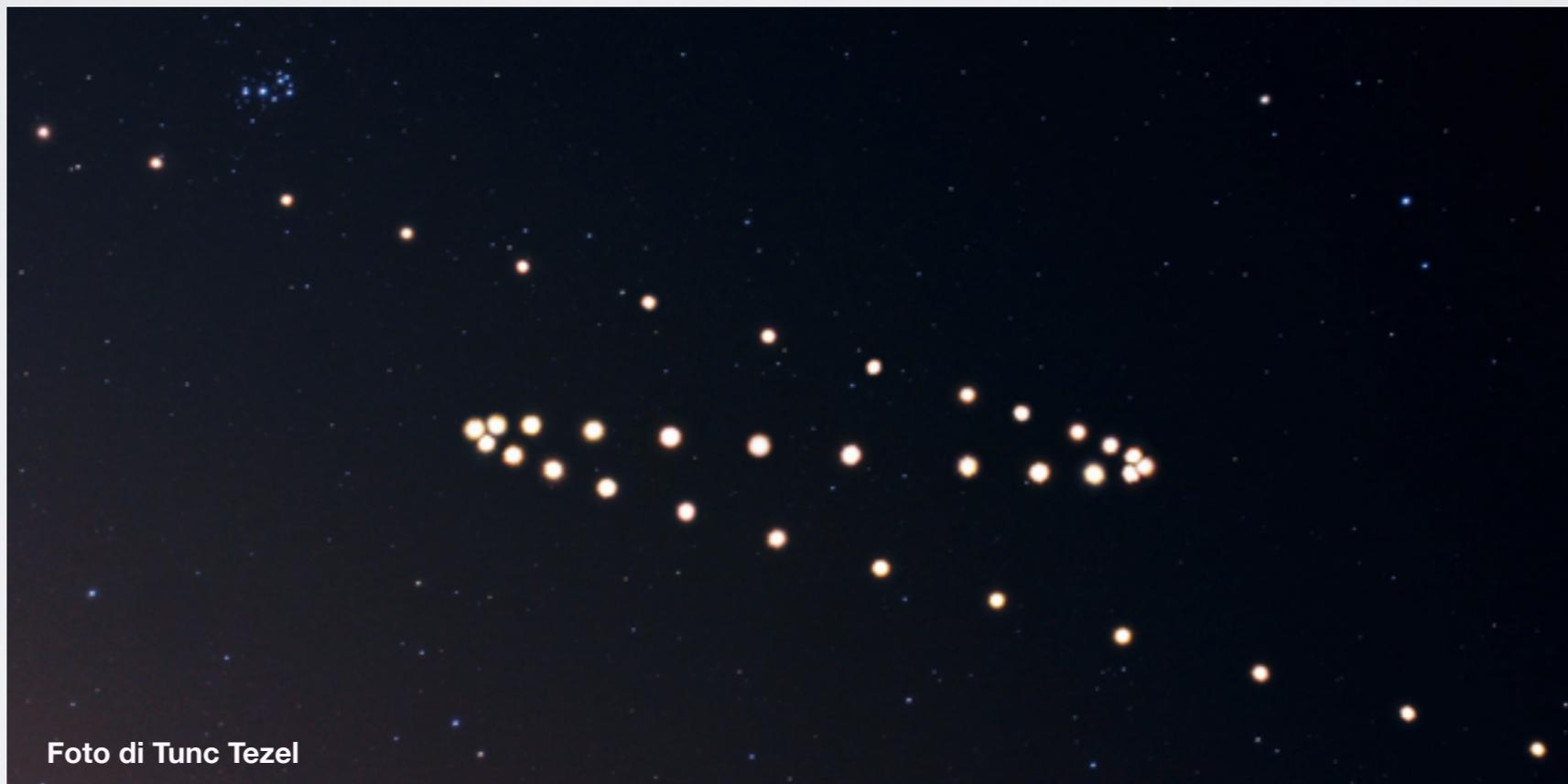
“E in mezzo a tutto sta il sole”

(Niccolò Copernico, *De revolutionibus orbium coelestium*, Libro I, Cap. X)

I PIANETI

Già in antichità si sapeva che, tra le circa 6000 stelle osservabili a occhio nudo, ce ne fossero cinque speciali.

Planētēs: vagante, errante in greco antico.



Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno rimasero gli unici pianeti noti fino a dopo l'invenzione del telescopio.

I PIANETI

Urano venne poi scoperto nel 1781, anche se sue osservazioni erano già avvenute decenni prima.

**La scoperta di Nettuno fu sfiorata già da Galileo.
Ritenuto inizialmente una *stella fissa*, venne riconosciuto come pianeta nel 1846 studiando il moto di Urano.**

Similmente venne infine scoperto Plutone nel 1930.

I PIANETI

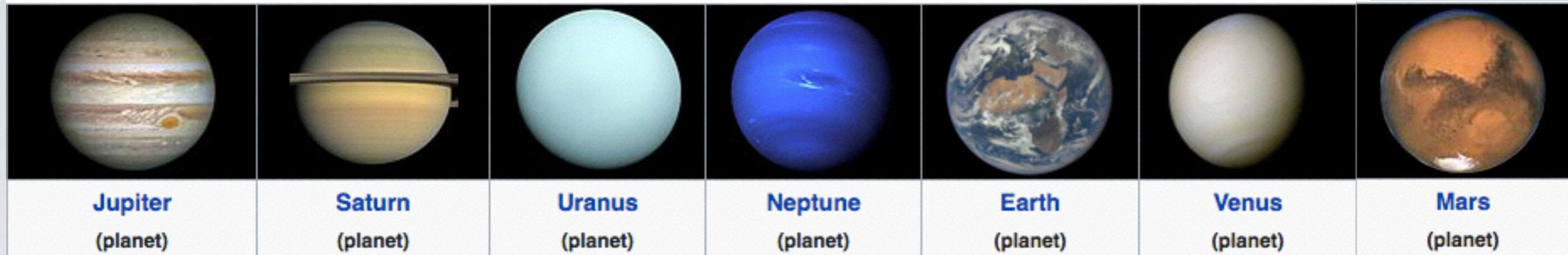
L'attuale definizione di Pianeta del sistema solare è:

- 1. Corpo celeste in orbita diretta attorno al Sole.**
- 2. Ha una massa sufficiente ad essere in equilibrio idrostatico (oggetto autogravitante).**
- 3. Ha sgomberato il vicinato attorno alla sua orbita.**

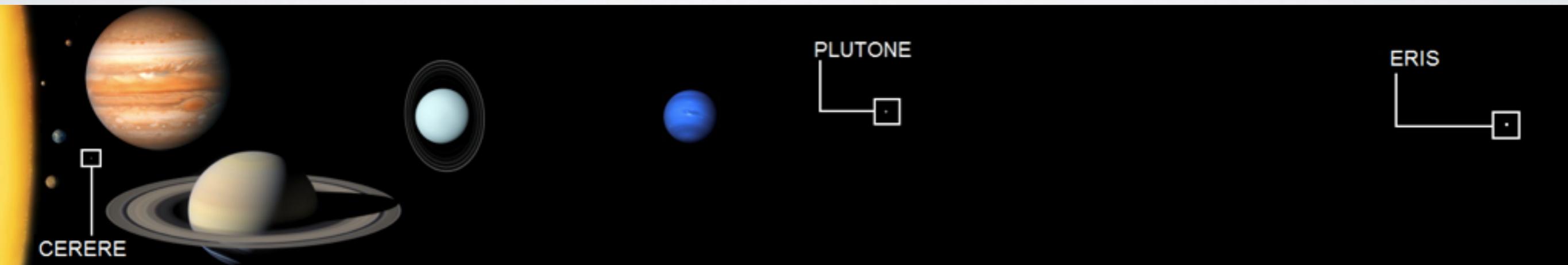
(IAU, international astronomical union, Praga 2006)

I PIANETI

L'attuale criterio dell'IAU definisce quindi 8 pianeti...

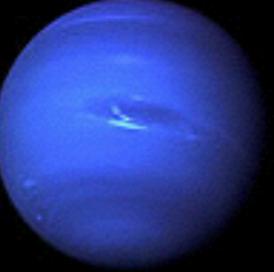


...e i pianeti nani, come Cerere (1801), Plutone ed Eris (2005)...



I PIANETI

...e poi ci sono satelliti, asteroidi e comete.

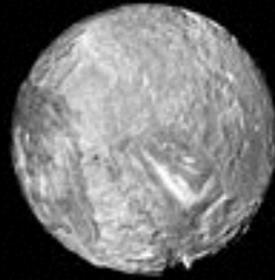
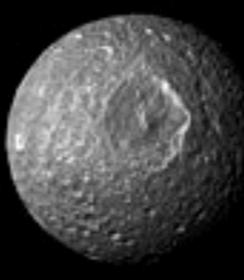
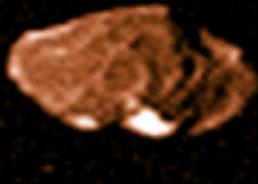
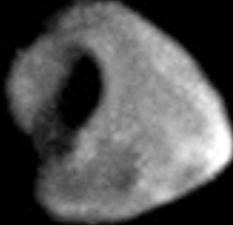
						
Sun (star)	Jupiter (planet)	Saturn (planet)	Uranus (planet)	Neptune (planet)	Earth (planet)	Venus (planet)
						
Mars (planet)	Ganymede (moon of Jupiter)	Titan (moon of Saturn)	Mercury (planet)	Callisto (moon of Jupiter)	Io (moon of Jupiter)	Moon (moon of Earth)
						
Europa (moon of Jupiter)	Triton (moon of Neptune)	Pluto (Kuiper belt object)	Titania (moon of Uranus)	Rhea (moon of Saturn)	Oberon (moon of Uranus)	Iapetus (moon of Saturn)

In ordine decrescente di massa (Wikipedia)

“E pur si forma!”, Antonio Garufi, 7 giugno 2018, Bologna

I PIANETI

...e poi ci sono satelliti, asteroidi e comete.

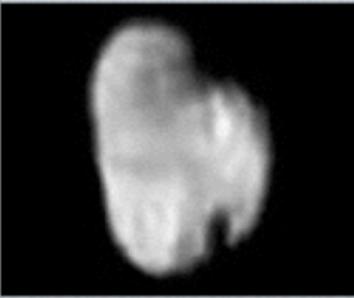
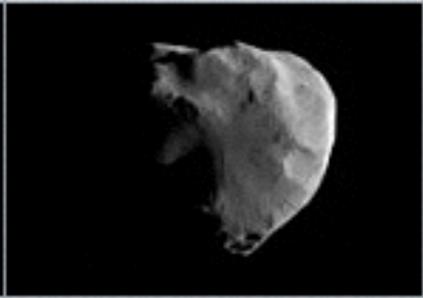
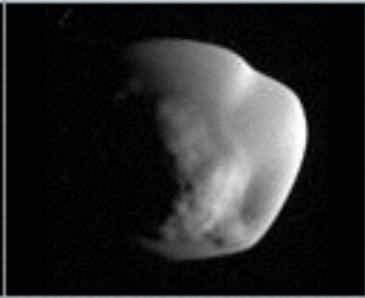
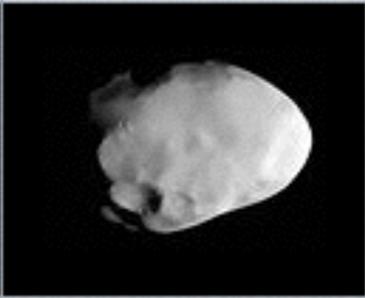
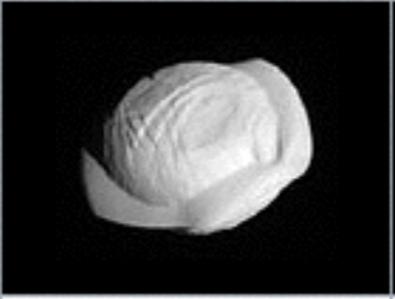
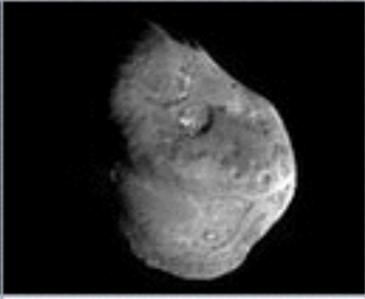
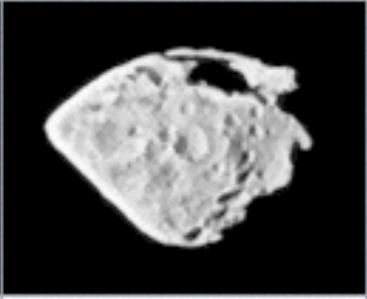
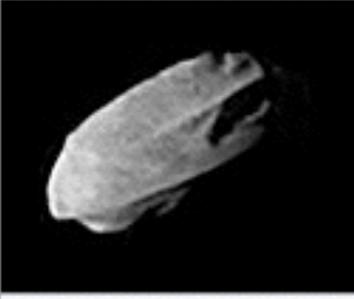
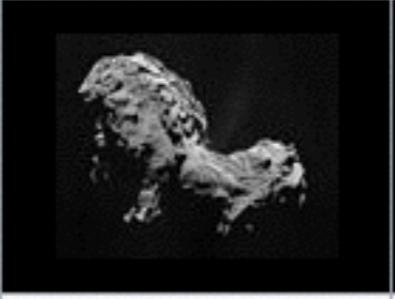
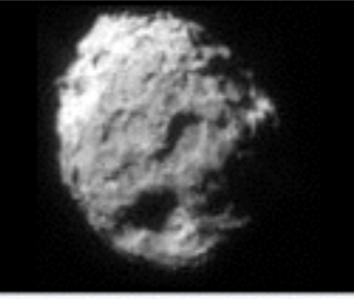
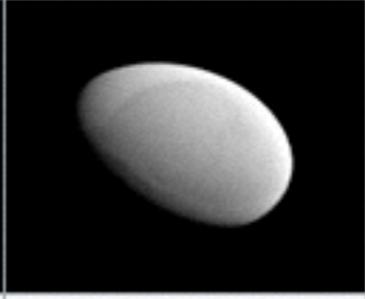
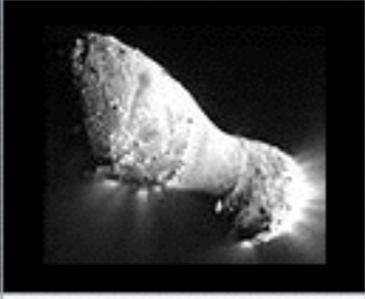
						
Charon (moon of Pluto)	Umbriel (moon of Uranus)	Ariel (moon of Uranus)	Dione (moon of Saturn)	Tethys (moon of Saturn)	Ceres (belt asteroid)	Vesta (belt asteroid)
						
Enceladus (moon of Saturn)	Miranda (moon of Uranus)	Proteus (moon of Neptune)	Mimas (moon of Saturn)	Hyperion (moon of Saturn)	Phoebe (moon of Saturn)	Janus (moon of Saturn)
						
Amalthea (moon of Jupiter)	Epimetheus (moon of Saturn)	Thebe (moon of Jupiter)	Lutetia (belt asteroid)	Prometheus (moon of Saturn)	Pandora (moon of Saturn)	Mathilde (belt asteroid)

In ordine decrescente di massa (Wikipedia)

“E pur si forma!”, Antonio Garufi, 7 giugno 2018, Bologna

I PIANETI

...e poi ci sono satelliti, asteroidi e comete.

						
Hydra (moon of Pluto)	Helene (moon of Saturn)	Nix (moon of Pluto)	Ida (belt asteroid)	Atlas (moon of Saturn)	Telesto (moon of Saturn)	Calypso (moon of Saturn)
						
Phobos (moon of Mars)	Eros (near-Earth asteroid)	Pan (moon of Saturn)	Deimos (moon of Mars)	Gaspra (belt asteroid)	Tempel 1 (comet)	Šteins (belt asteroid)
						
Daphnis (moon of Saturn)	Borrelly (comet)	Churyumov-Gerasimenko (comet)	Wild 2 (comet)	Methone (moon of Saturn)	Hartley 2 (comet)	Dactyl (moon of Ida)

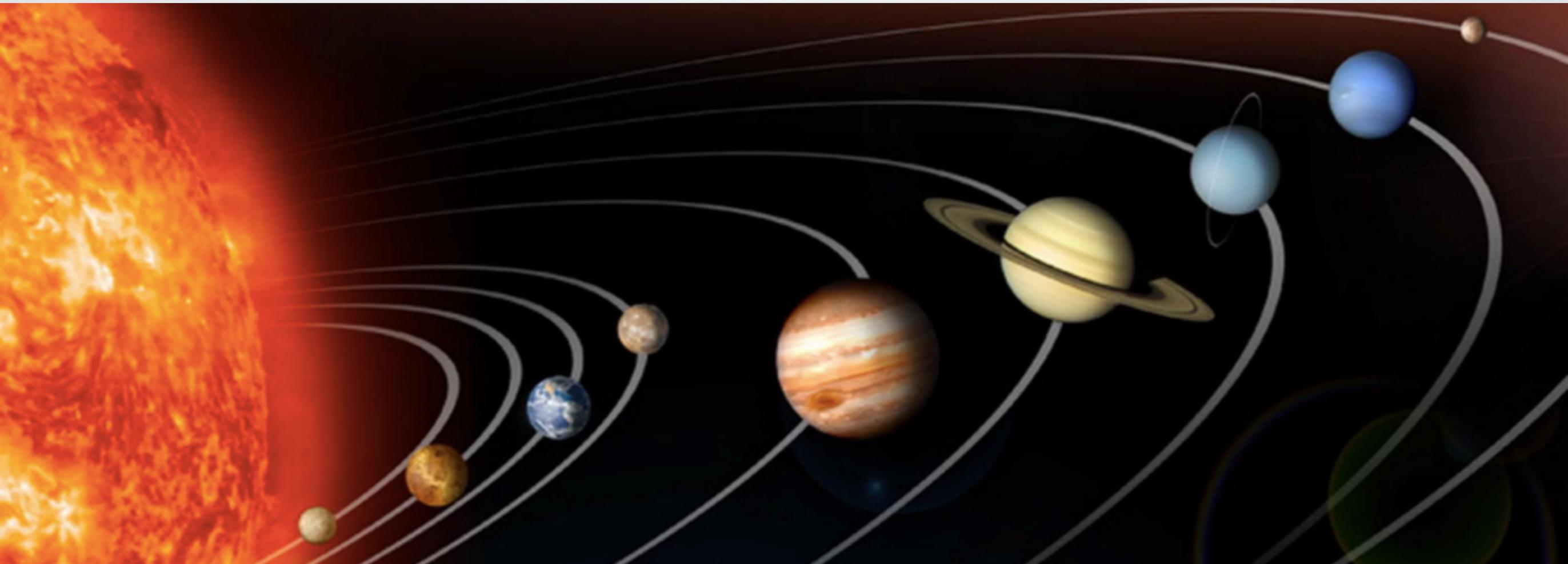
In ordine decrescente di massa (Wikipedia)

“E pur si forma!”, Antonio Garufi, 7 giugno 2018, Bologna

I PIANETI

I pianeti si dividono tipicamente in rocciosi e gassosi.

Nel sistema solare (ma solo qui!) questa classificazione coincide coi pianeti interni ed esterni.



I PIANETI

Si dice spesso che Giove sia una stella mancata.

Ma qual è davvero la differenza tra i pianeti e le stelle?

C'è un limite in massa?

O sta nella loro diversa formazione?



GLI ESOPIANETI

Fino al 1990, i pianeti del sistema solare sono rimasti gli unici conosciuti nell'intero Universo.

Non c'era però motivo di pensare che solo il Sole ospitasse un certo numero di pianeti...



GLI ESOPIANETI

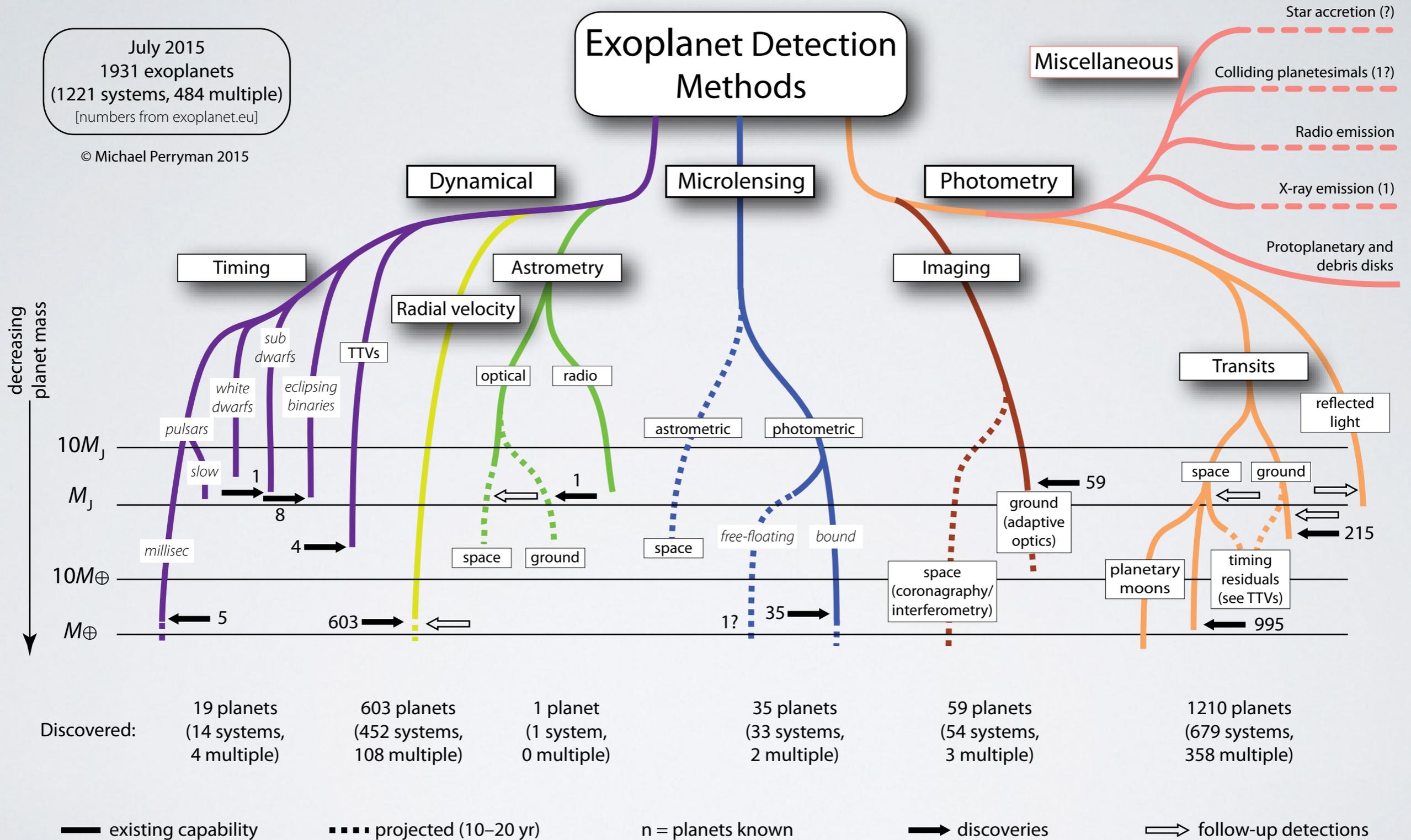
Il problema di rivelare esopianeti è che sono piccoli, poco brillanti e vicinissimi ad una stella.

L'impresa è quella di individuare un moscerino a pochi cm da un faro essendo noi a km di distanza.

Per farlo abbiamo implementato diverse tecniche.



GLI ESOPIANETI



“E pur si forma!”, Antonio Garufi, 7 giugno 2018, Bologna

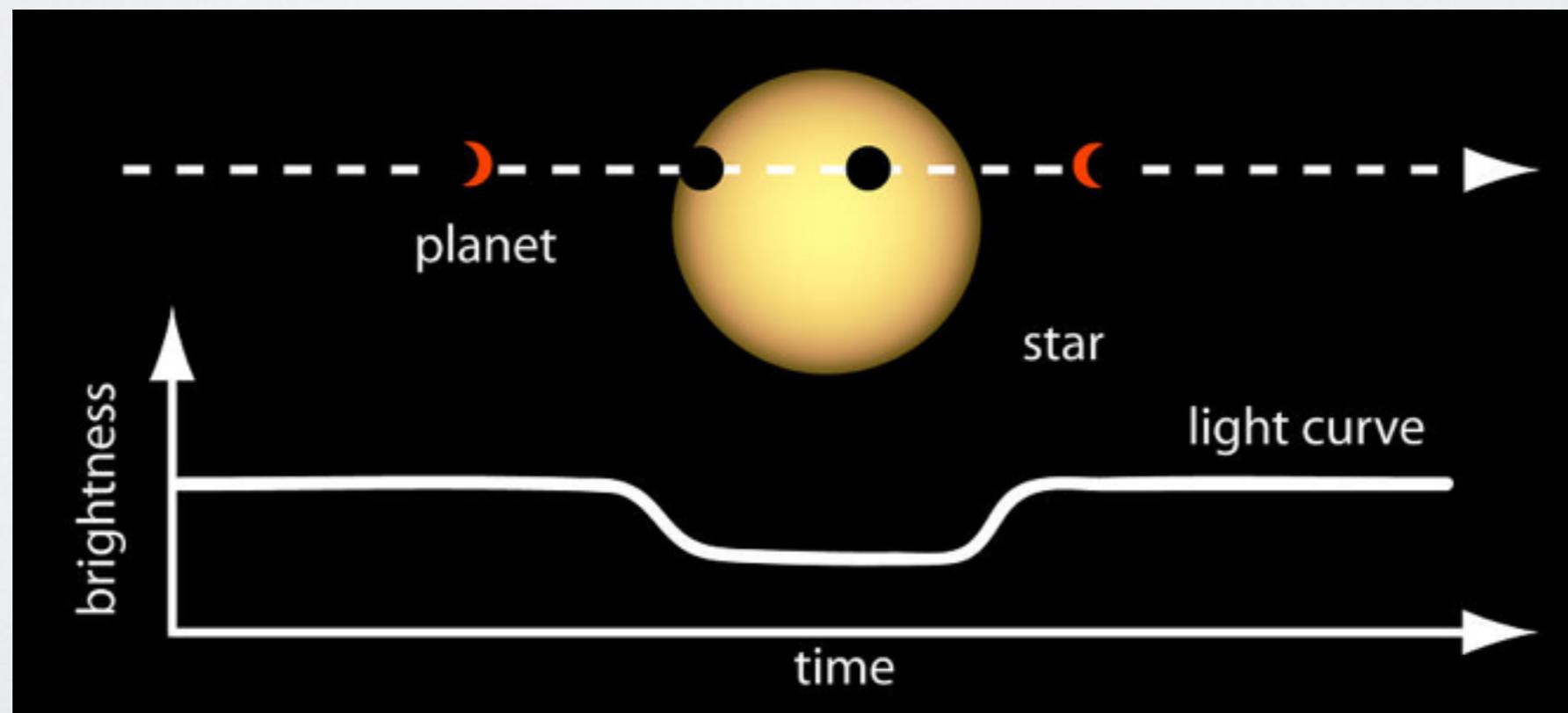
GLI ESOPIANETI

Il metodo più riuscito finora è quello del transito.

Sfrutta l'occultazione della stella nei casi in cui l'orbita del pianeta sia allineata con la linea di vista.

Il telescopio spaziale Kepler ne ha trovati migliaia.

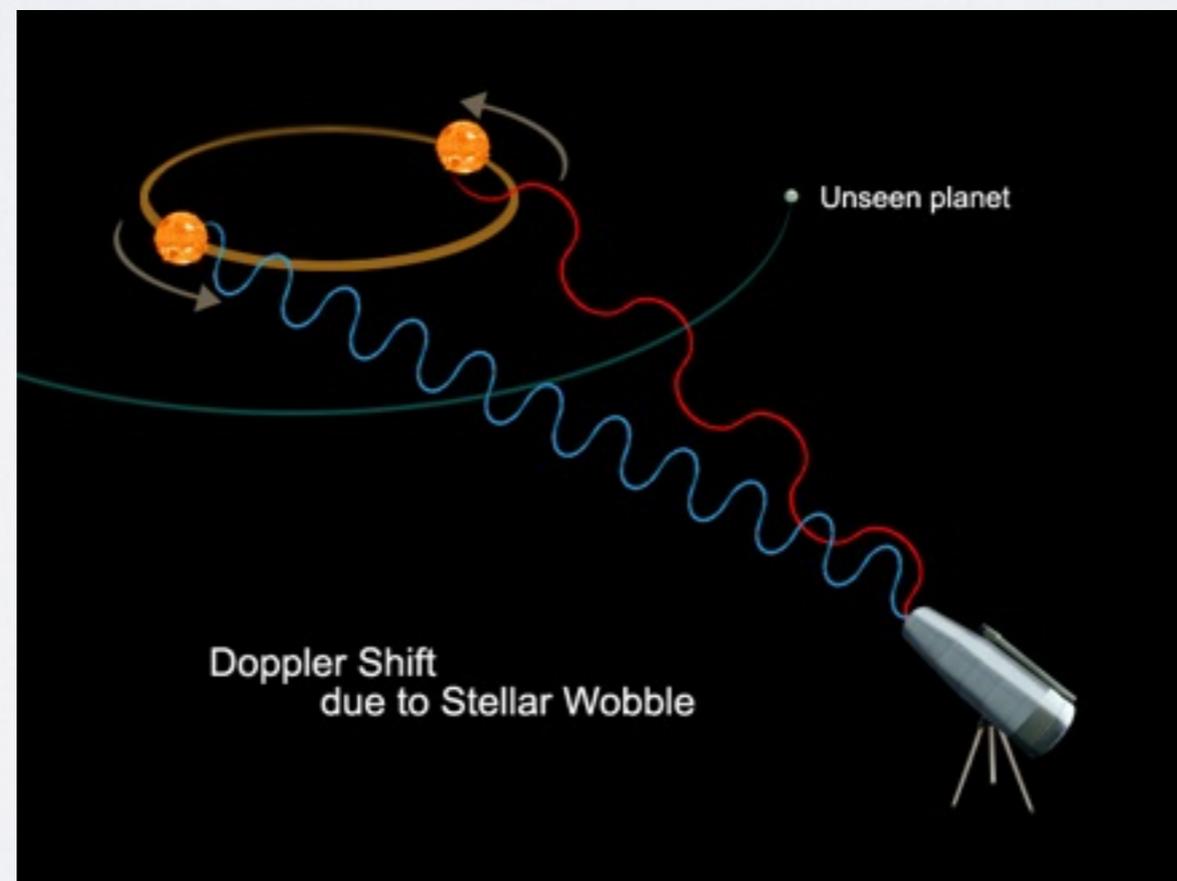
Kepler



GLI ESOPIANETI

Il metodo della velocità radiale sfrutta l'effetto Doppler: un'onda che si avvicina è più acuta (blu) e viceversa.

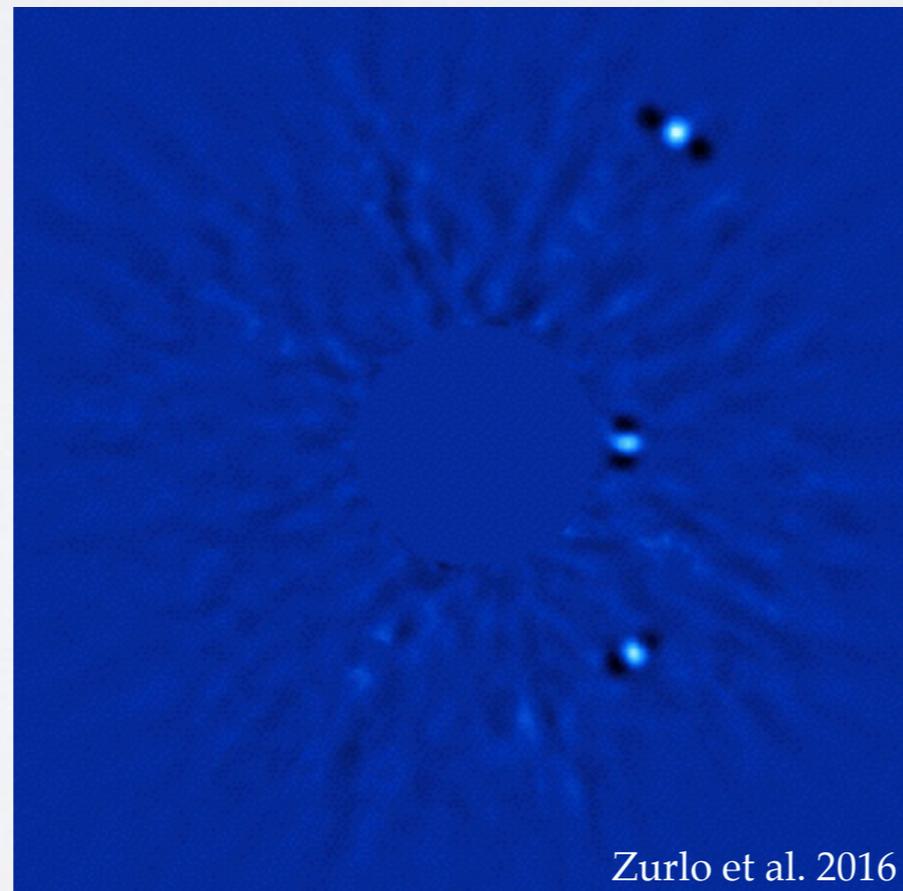
Da spettri stellari possiamo quindi verificare se la stella gira intorno al baricentro comune al pianeta.



GLI ESOPIANETI

L'imaging diretto è possibile tramite trucchetti al telescopio per rimuovere la accecante luce della stella.

A differenza degli altri metodi, è più efficace con pianeti lontani dalla stella. I vari metodi sono complementari.

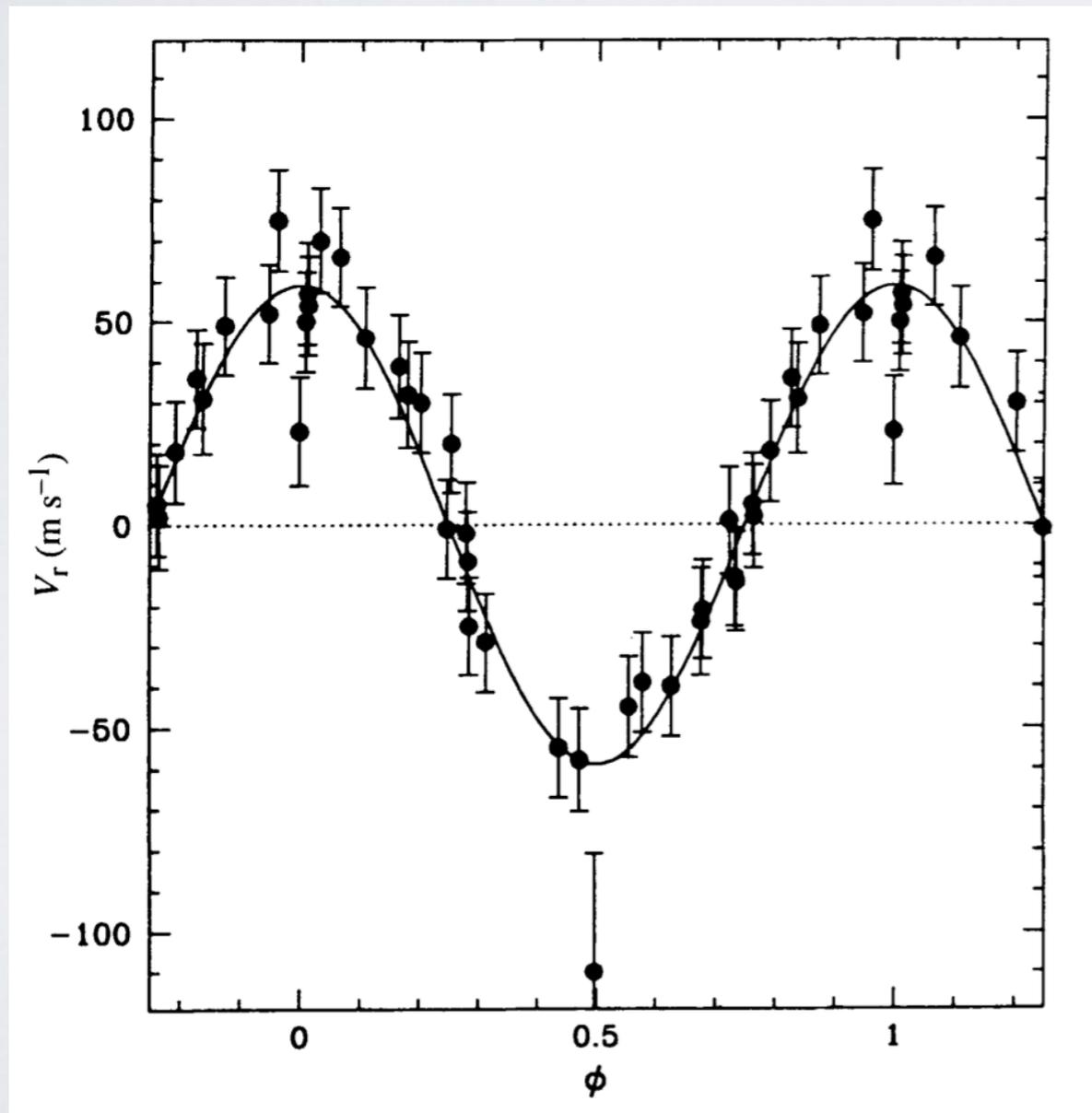


Zurlo et al. 2016

GLI ESOPIANETI

La scoperta del primo esopianeta fu annunciata il 6 ottobre 1995 da un team svizzero.

51 Pegasi b fu scoperto tramite la velocità radiale.

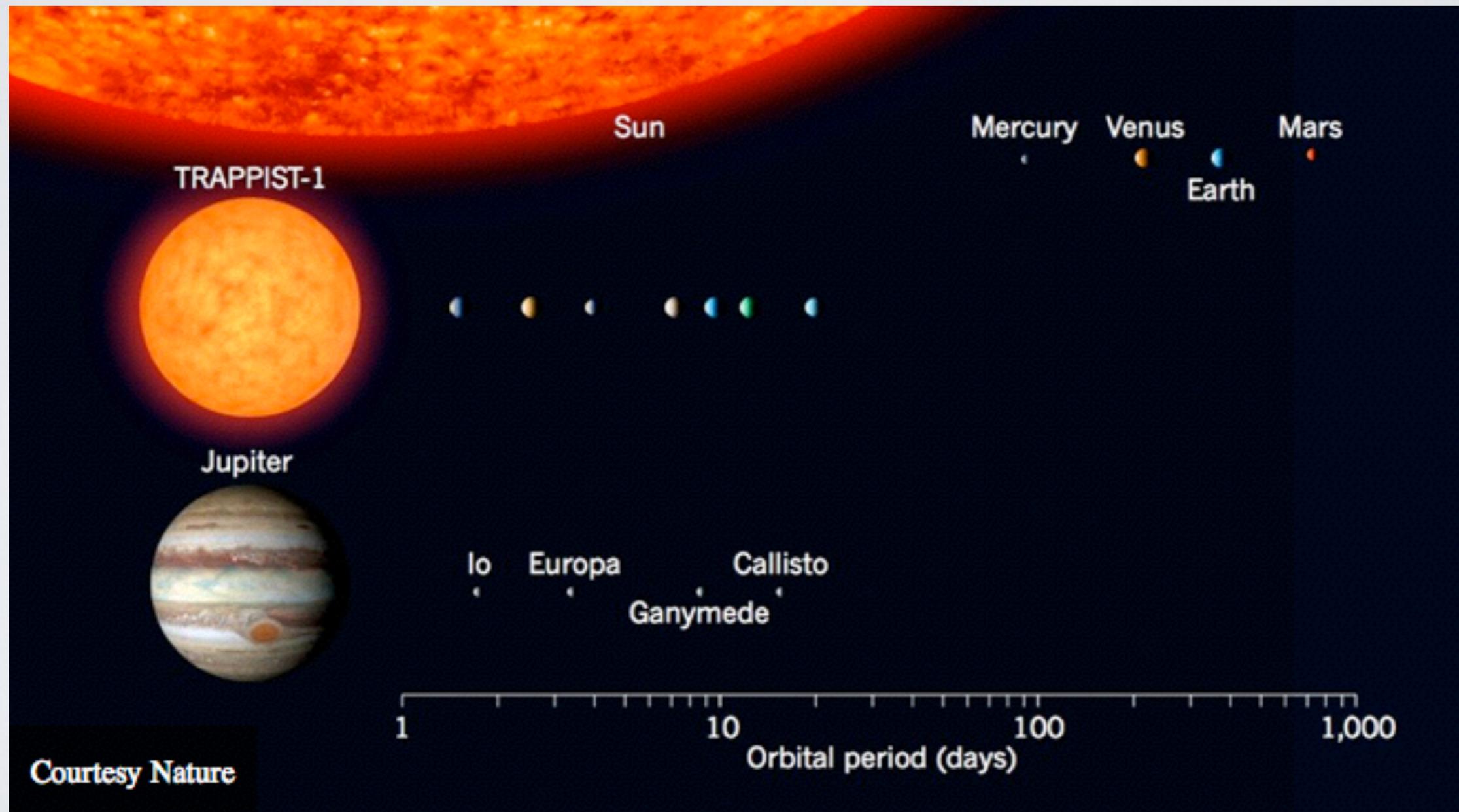


Mayor & Queloz, Nature, 1995

A **Hot Jupiter** planet:
Orbital period: 4.2 days
Minimum M_p : $0.5 M_{\text{Jup}}$

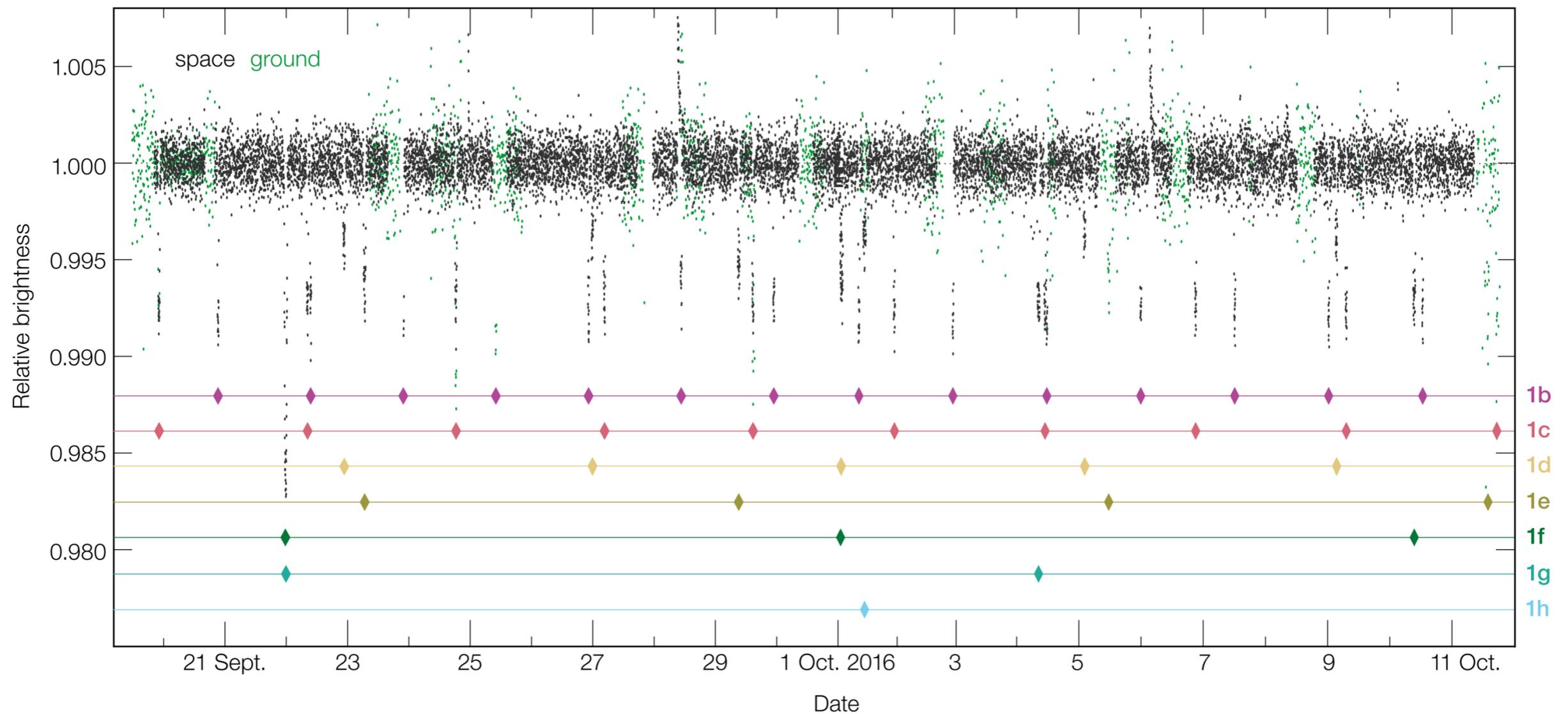
GLI ESOPIANETI

Il 22 febbraio 2017 la NASA ha confermato la scoperta belga di TRAPPIST-1, una stella che ospita 7 piccoli pianeti.



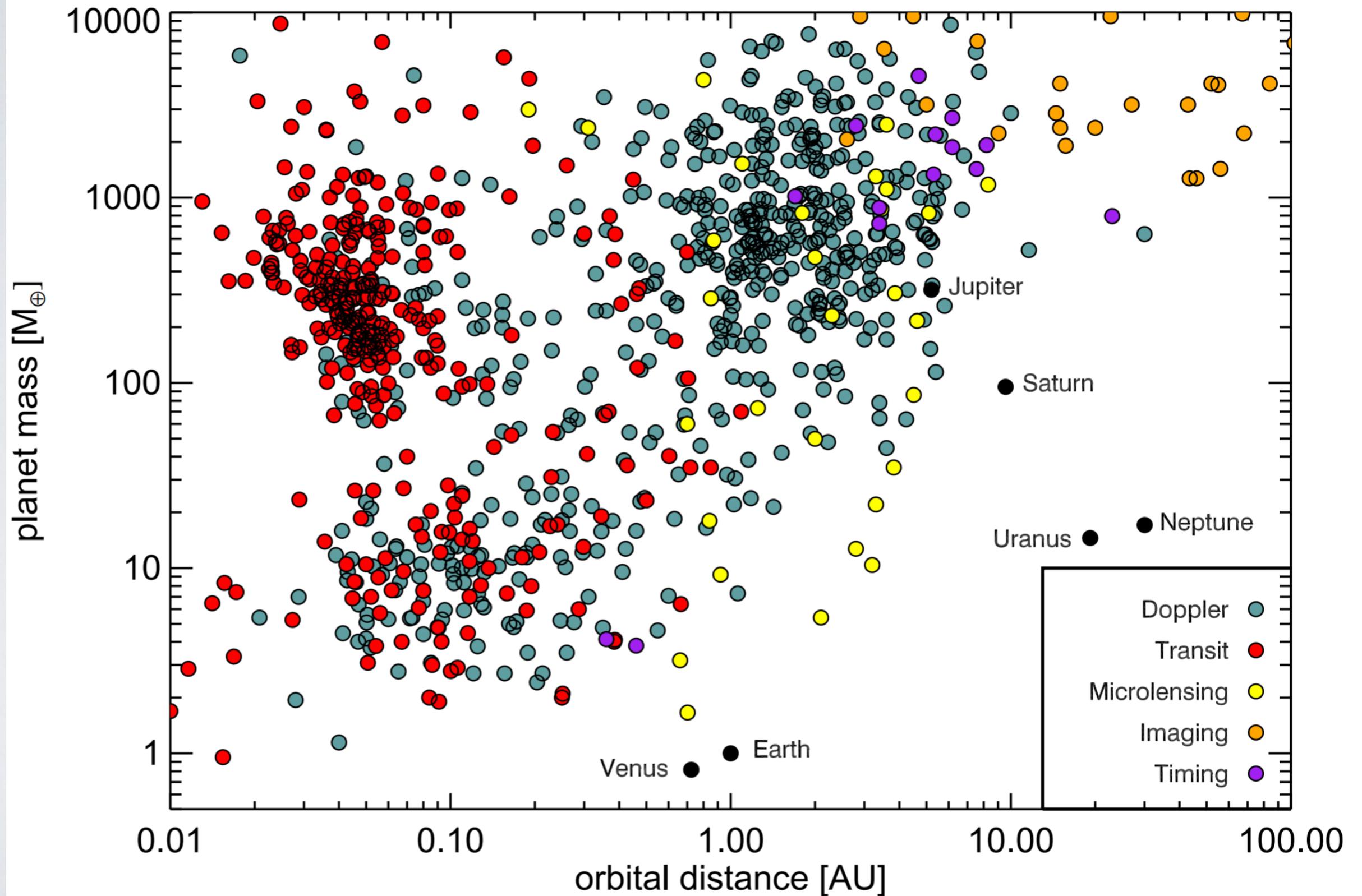
GLI ESOPIANETI

Il 22 febbraio 2017 la NASA ha confermato la scoperta belga di TRAPPIST-1, una stella che ospita 7 piccoli pianeti.



Gillon et al. 2017

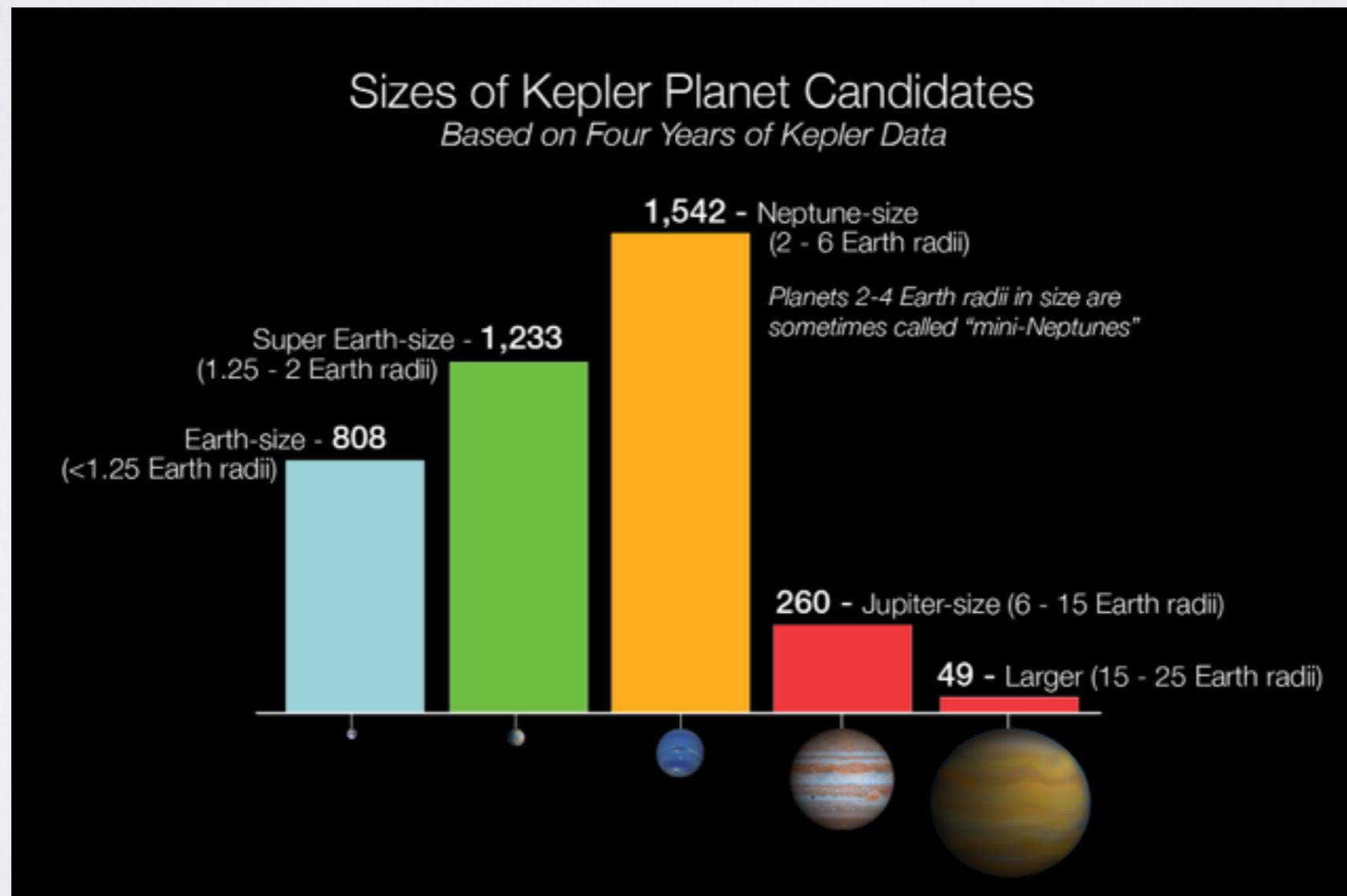
GLI ESOPIANI



GLI ESOPIANETI

Ad oggi pensiamo che quasi ogni stella ne ospiti almeno uno.

I piccoli sono più frequenti dei grandi, ma ci sono anche molti intermedi e giganti 'caldi' (assenti nel sistema solare).



LA FORMAZIONE PLANETARIA

L'ubiquità di sistemi planetari, la loro diversità e (perché no?) la ricerca di vita aliena ci motivano a capire come si formano.

Lo studio della formazione planetaria è stato molto vivace già da prima della scoperta del primo esopianeta.

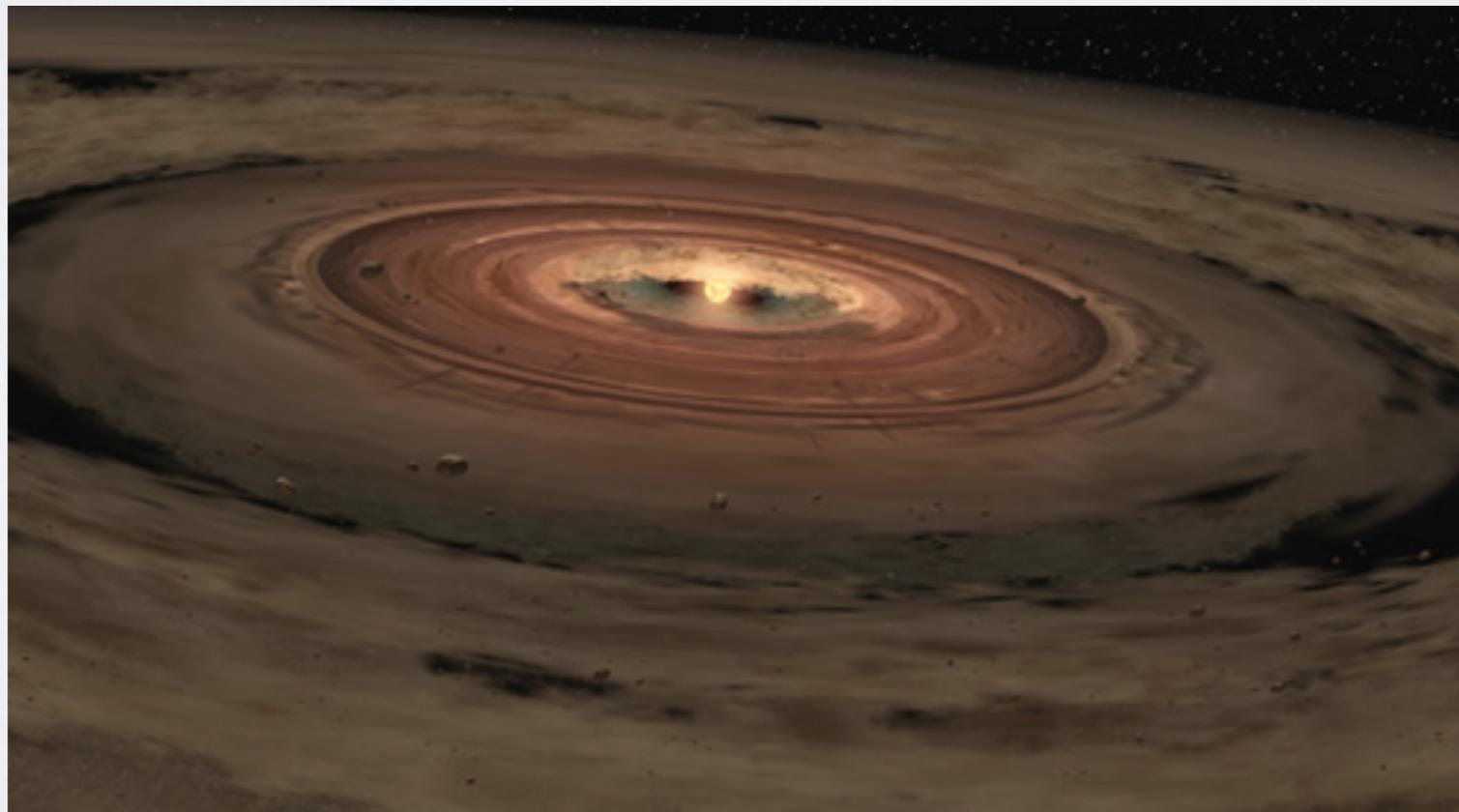


LA FORMAZIONE PLANETARIA

Sappiamo per certo che i pianeti si formano in dischi di polvere e gas ‘avanzati’ dal processo di formazione stellare.

Già Kant nel 1755 aveva ipotizzato qualcosa di simile.

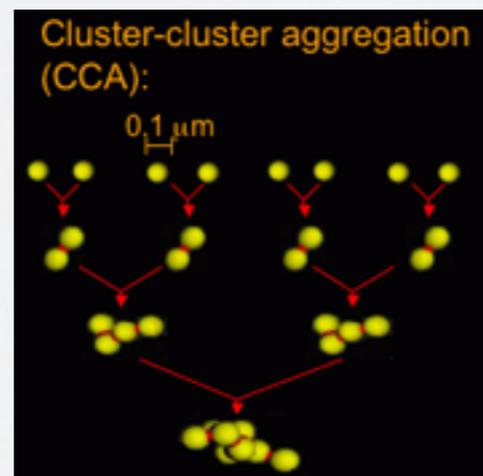
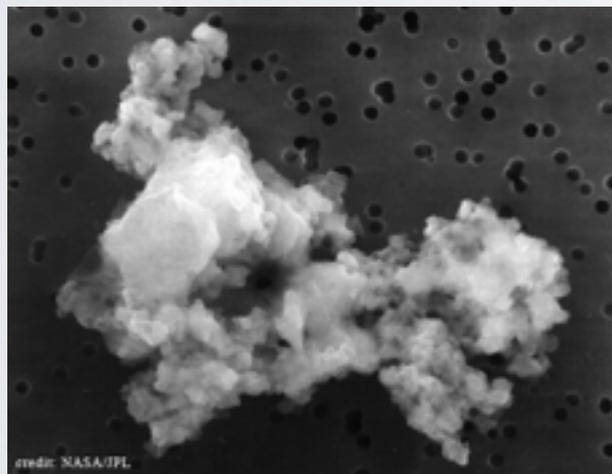
Potremmo dire che la formazione planetaria è un effetto collaterale della nascita di una stella.



LA FORMAZIONE PLANETARIA

La teoria attuale è che i microscopici granelli di polvere interstellare possano crescere in questi dischi fino a diventare pianeti rocciosi.

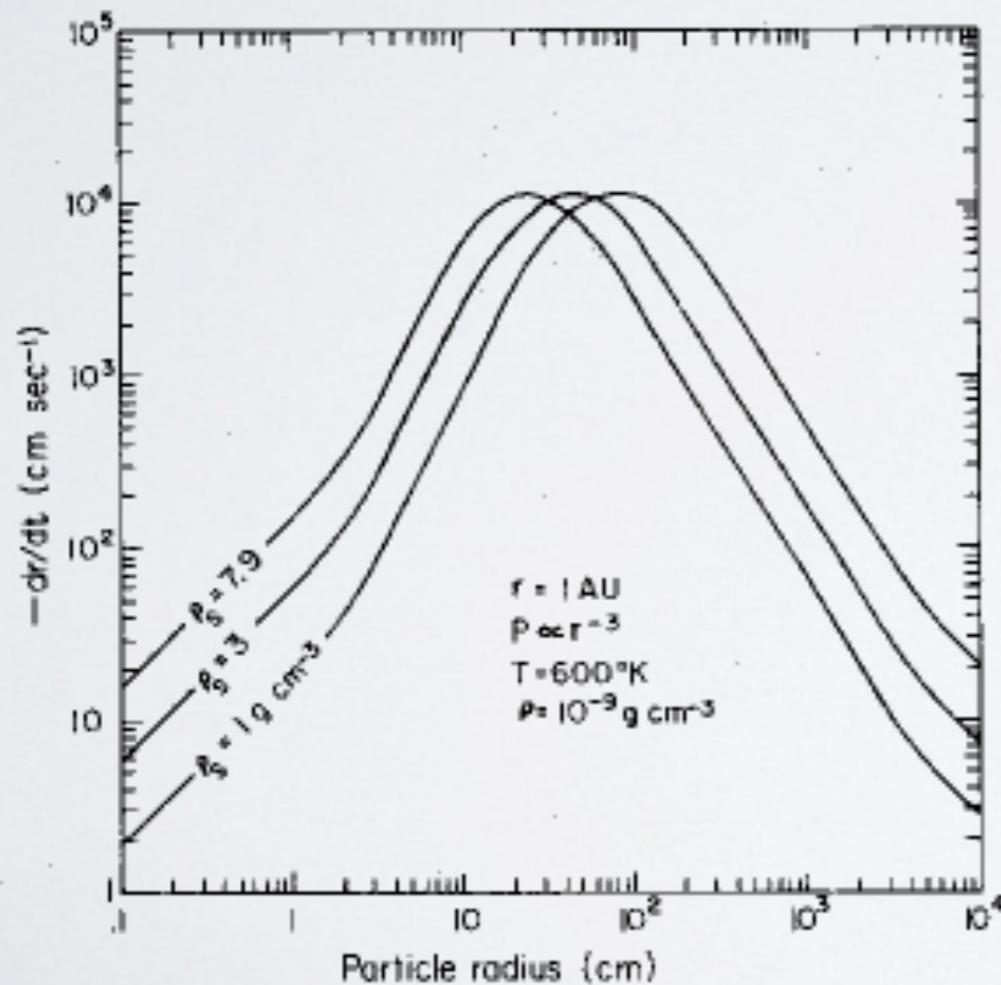
Questo processo deve essere molto rapido perché i dischi si dissipano in fretta (~10 milioni di anni).



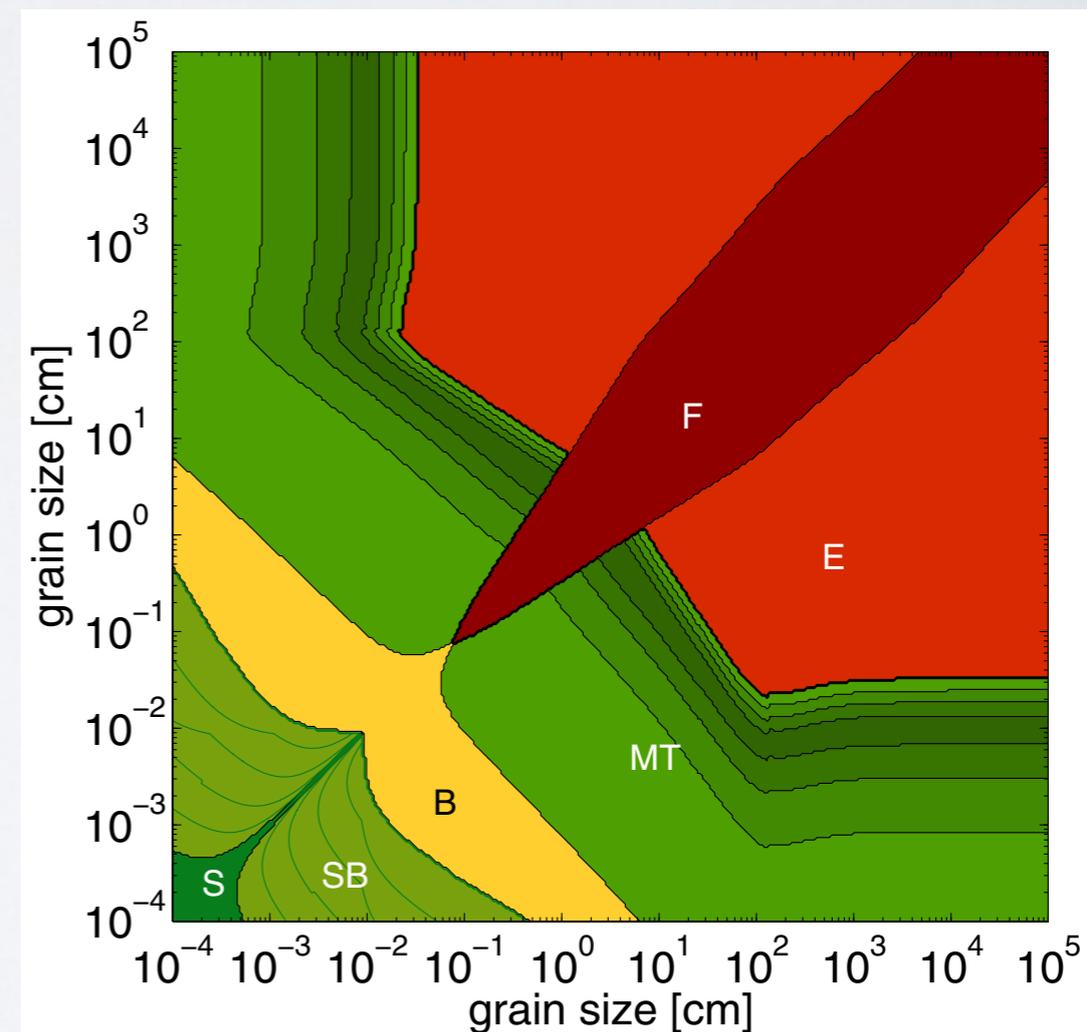
LA FORMAZIONE PLANETARIA

Il problema nasce alla cosiddetta barriera di 1 metro.

Particelle così grandi si distruggono invece di accrescersi e precipitano rapidamente sulla stella.



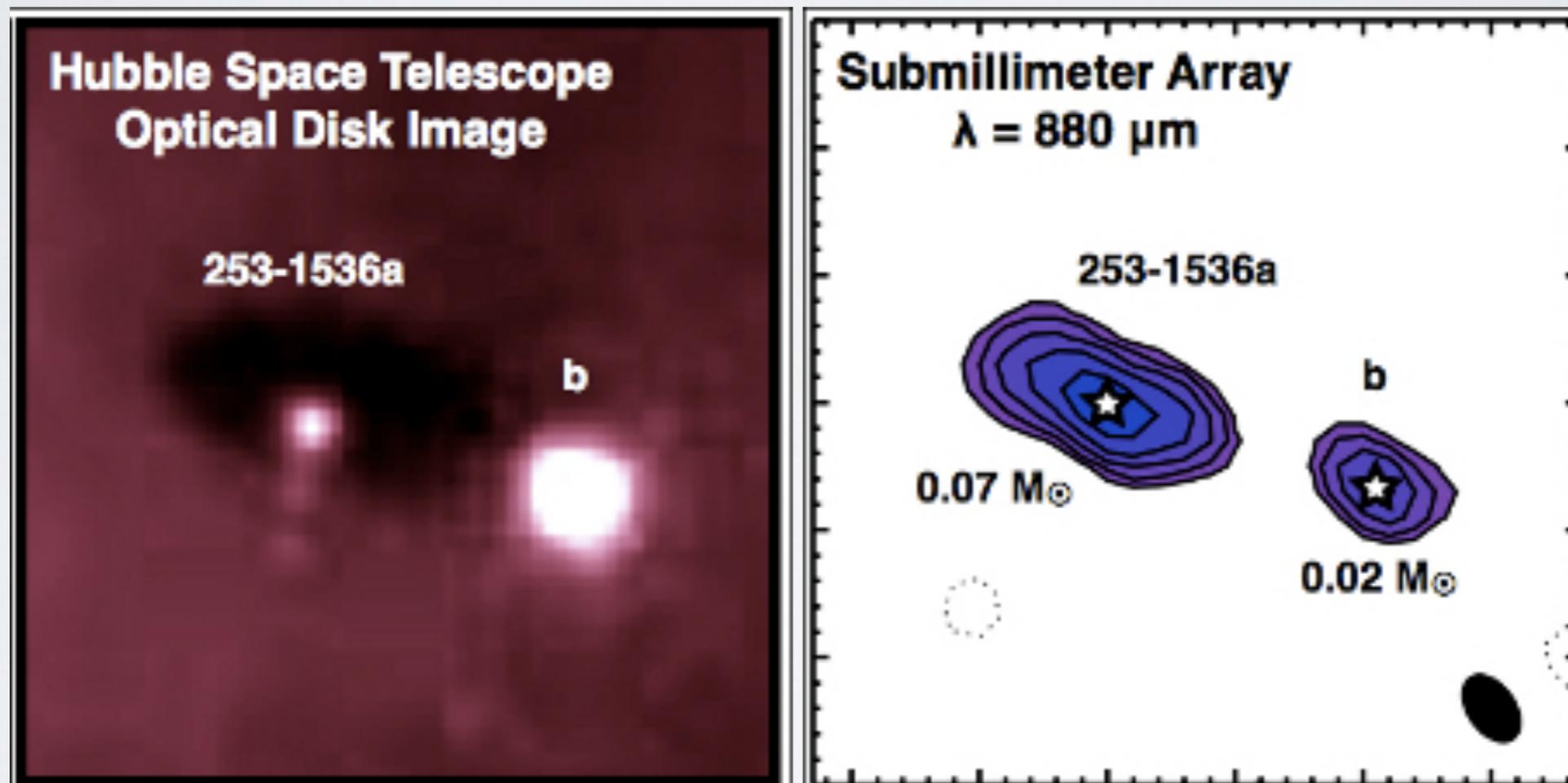
Weidenschilling et al. (1977)



Windmark et al. (2012)

LA FORMAZIONE PLANETARIA

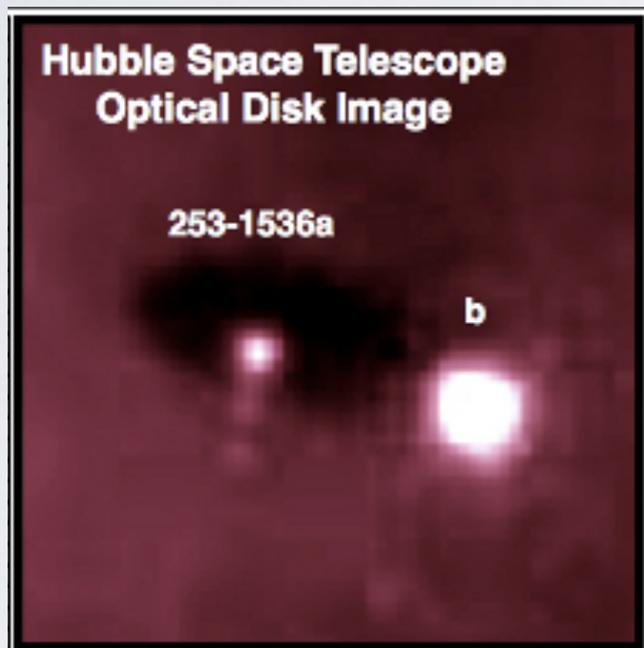
Le prime osservazioni dirette di dischi protoplanetari sono state possibili solo recentemente con il telescopio spaziale Hubble e con interferometri radio come SMA.



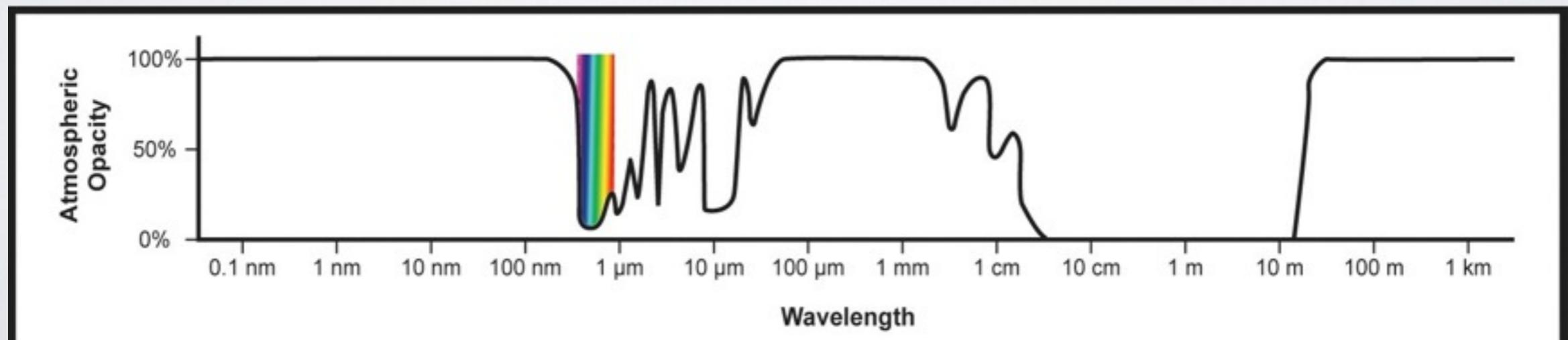
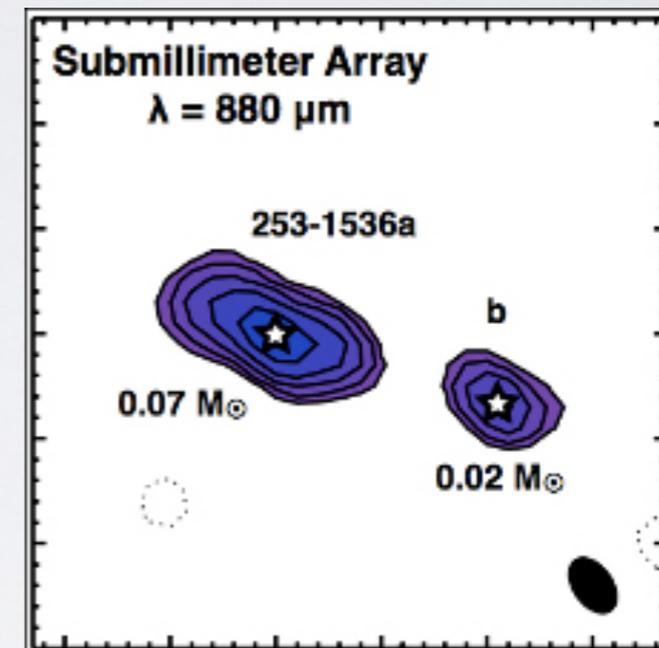
Mann et al. (2009)

LA FORMAZIONE PLANETARIA

Nel visibile è difficile ottenere un buon contrasto con la luce stellare.



Nel radio/microonde è difficile ottenere una buona risoluzione dell'immagine.

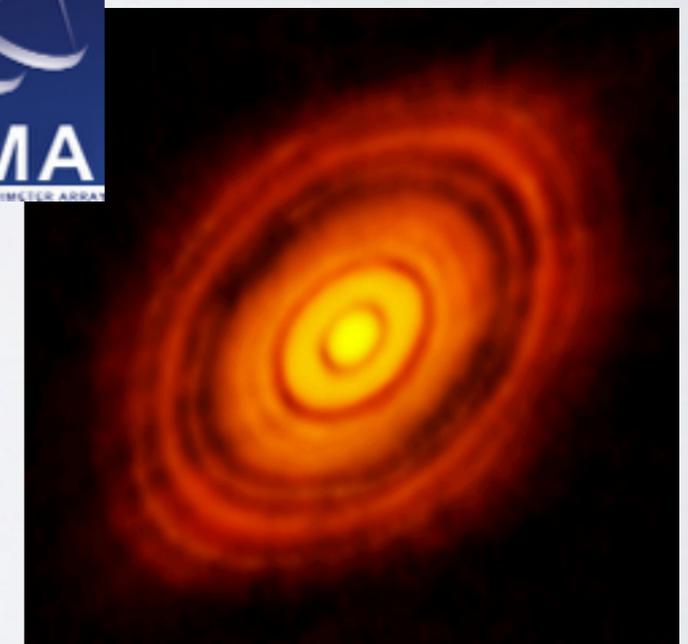
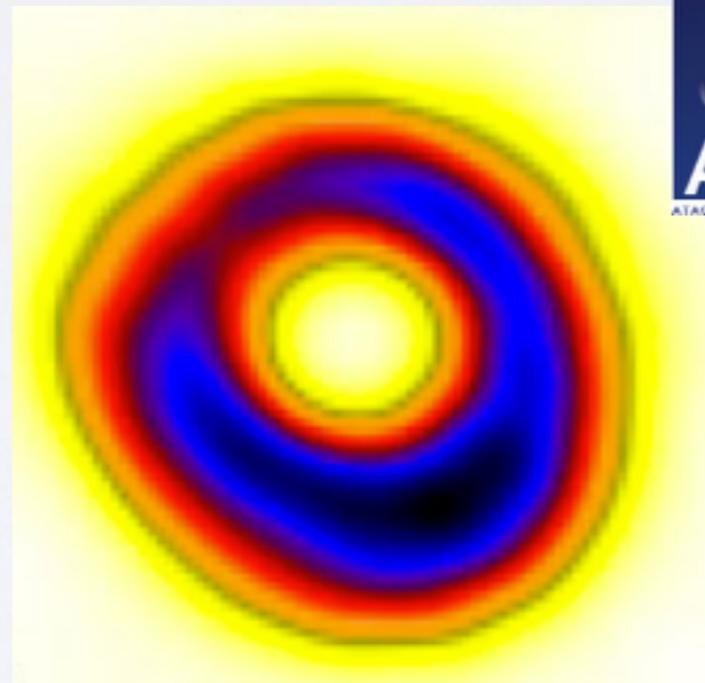
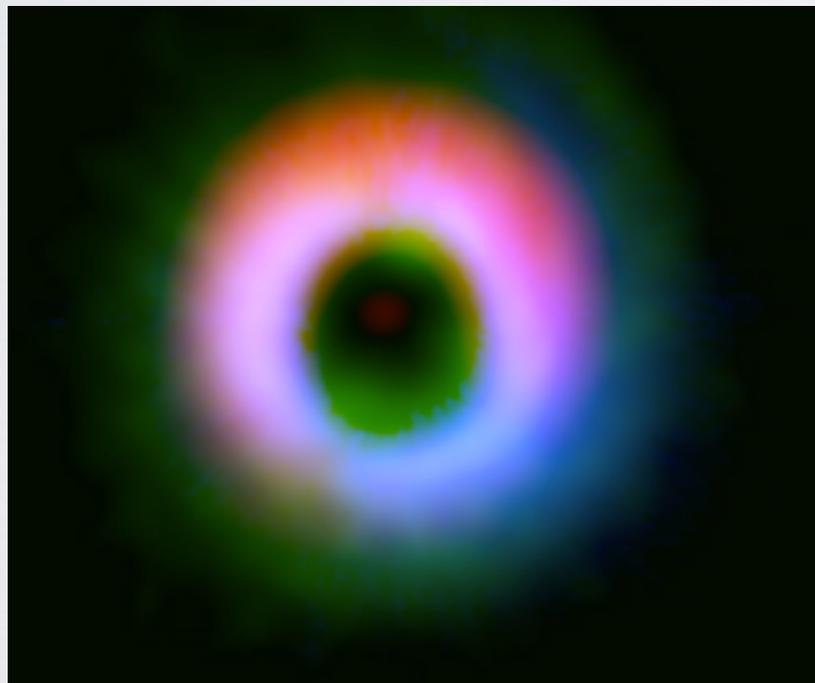
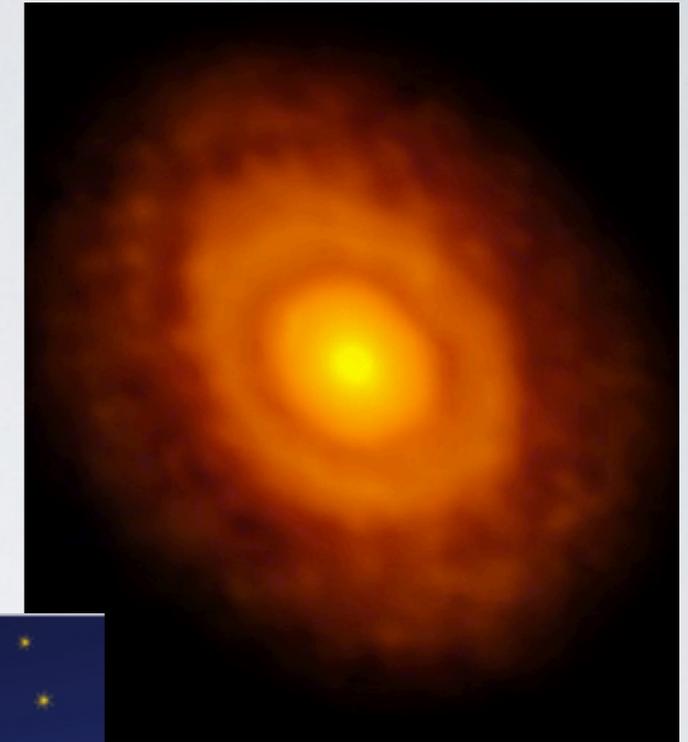
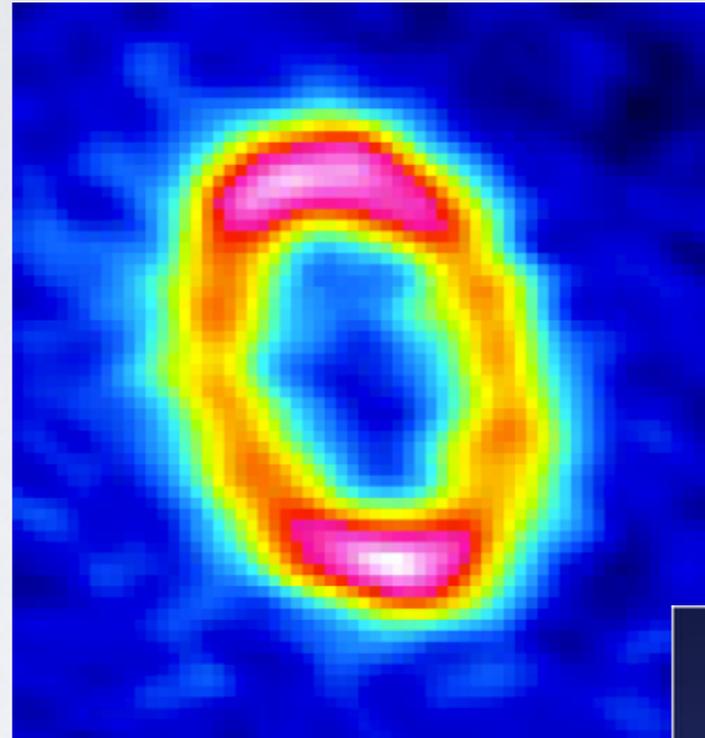
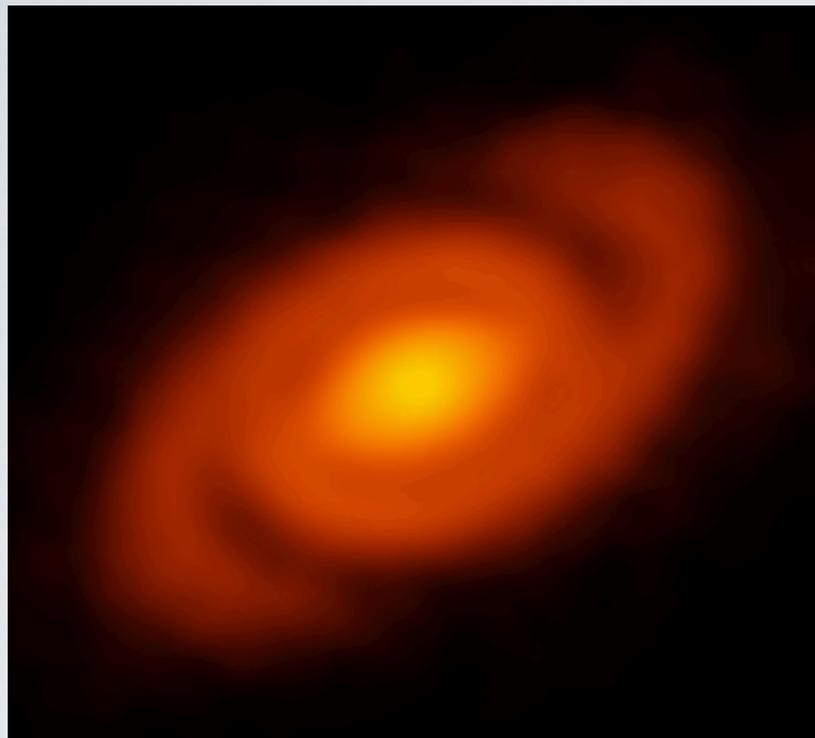


LA FORMAZIONE PLANETARIA

Strumenti moderni come ALMA e VLT/SPHERE consentono di ovviare in buona misura a questi problemi.

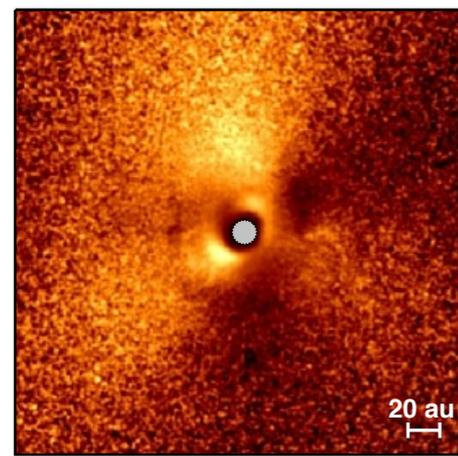


LA FORMAZIONE PLANETARIA

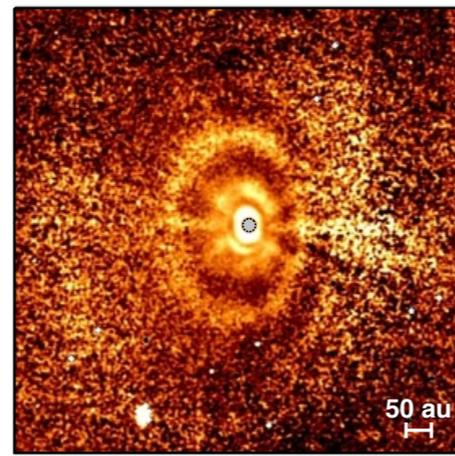


Alcune immagini di dischi protoplanetari da ALMA.

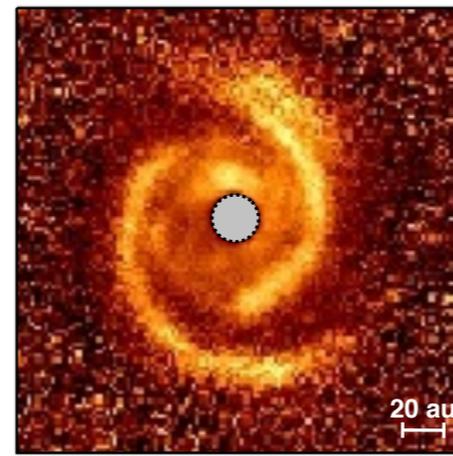
LA FORMAZIONE PLANETARIA



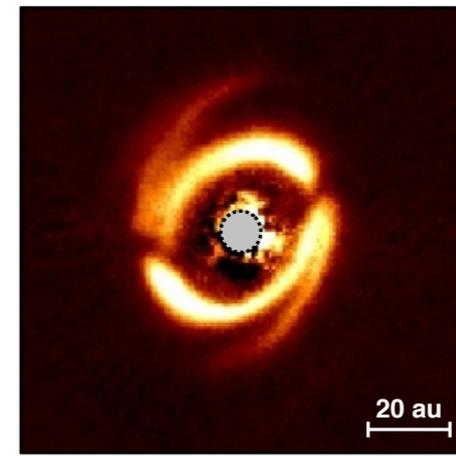
HD100546
(Garufi et al. 2016)



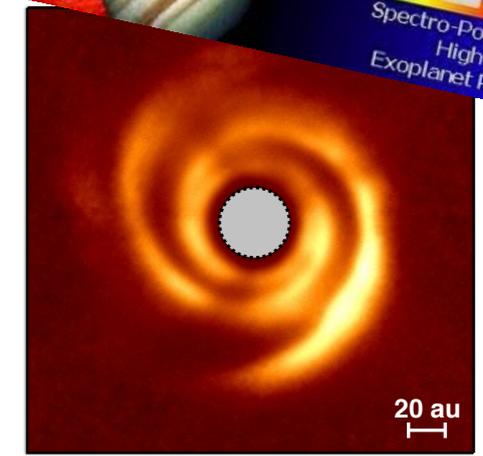
HD97048
(Ginski et al. 2016)



MWC 758
(Benisty et al. 2015)



HD100453
(Benisty et al. 2017)

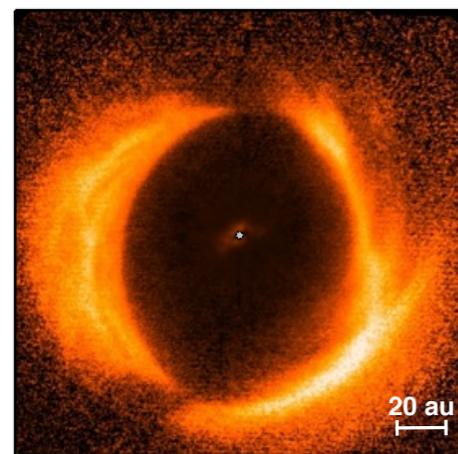


HD135344B
(Stolker et al. 2016)

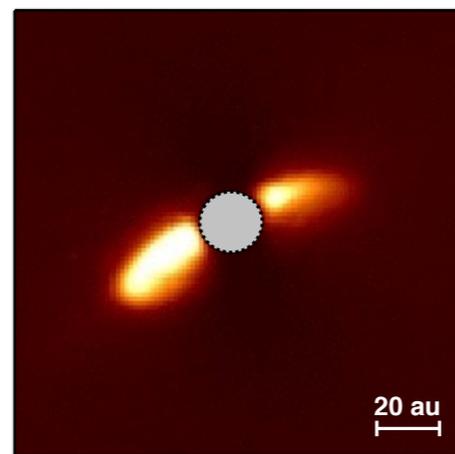
← Early stellar type

← Herbig Ae/Be stars →

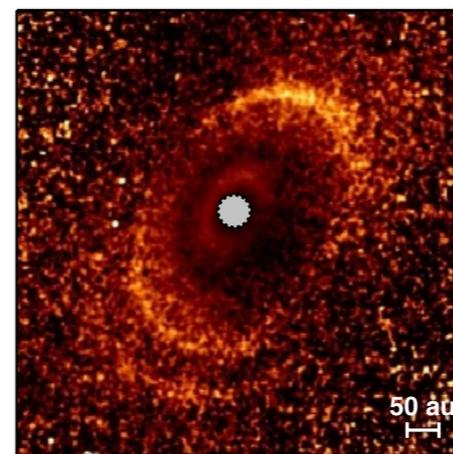
← F stars →



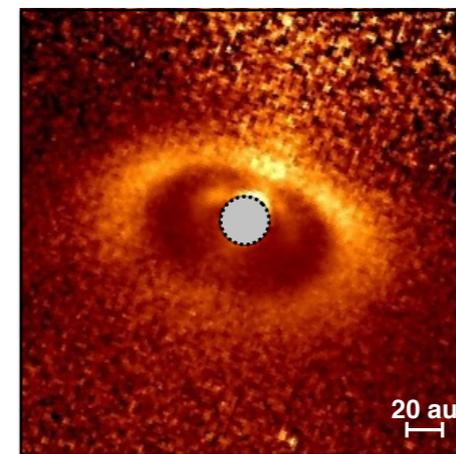
HD142527
(Avenhaus et al. 2017)



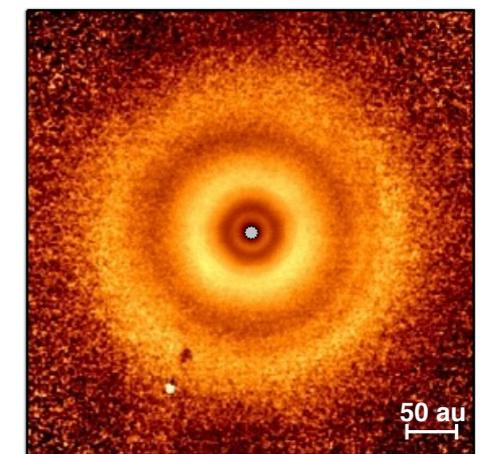
T Cha
(Pohl et al. 2017)



RX J1615-3255
(de Boer et al. 2016)



LkCa15
(Thalmann et al. 2016)



TW Hya
(van Boekel et al. 2017)

T Tau stars →

Late stellar type →

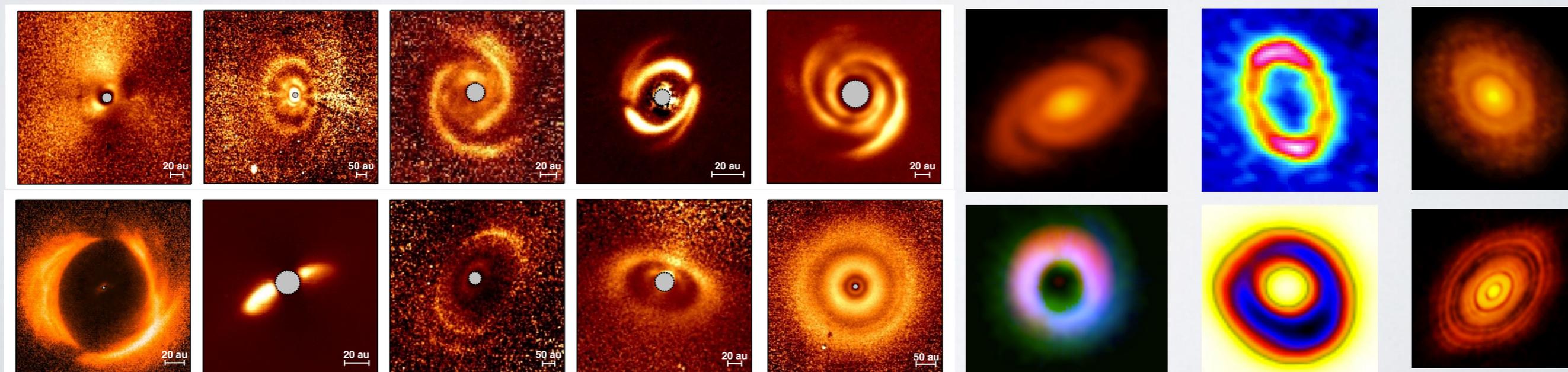
Alcune immagini di dischi protoplanetari da SPHERE.

LA FORMAZIONE PLANETARIA

E' ormai evidente che tutti i dischi protoplanetari contengono sotto-strutture peculiari (anelli, cavità, spirali).

E' possibile che queste siano causa e/o conseguenza della formazione planetaria.

Ad esempio alcune strutture potrebbero agire da 'trappole' consentendo alle particelle di 1m di crescere oltre.



SCALETTA

- ✓ **Preambolo**
- ✓ **Cos'è un pianeta**
- ✓ **Come abbiamo scoperto 3700+ *esopianeti***
- ✓ ***I dischi protoplanetari* e la formazione planetaria**

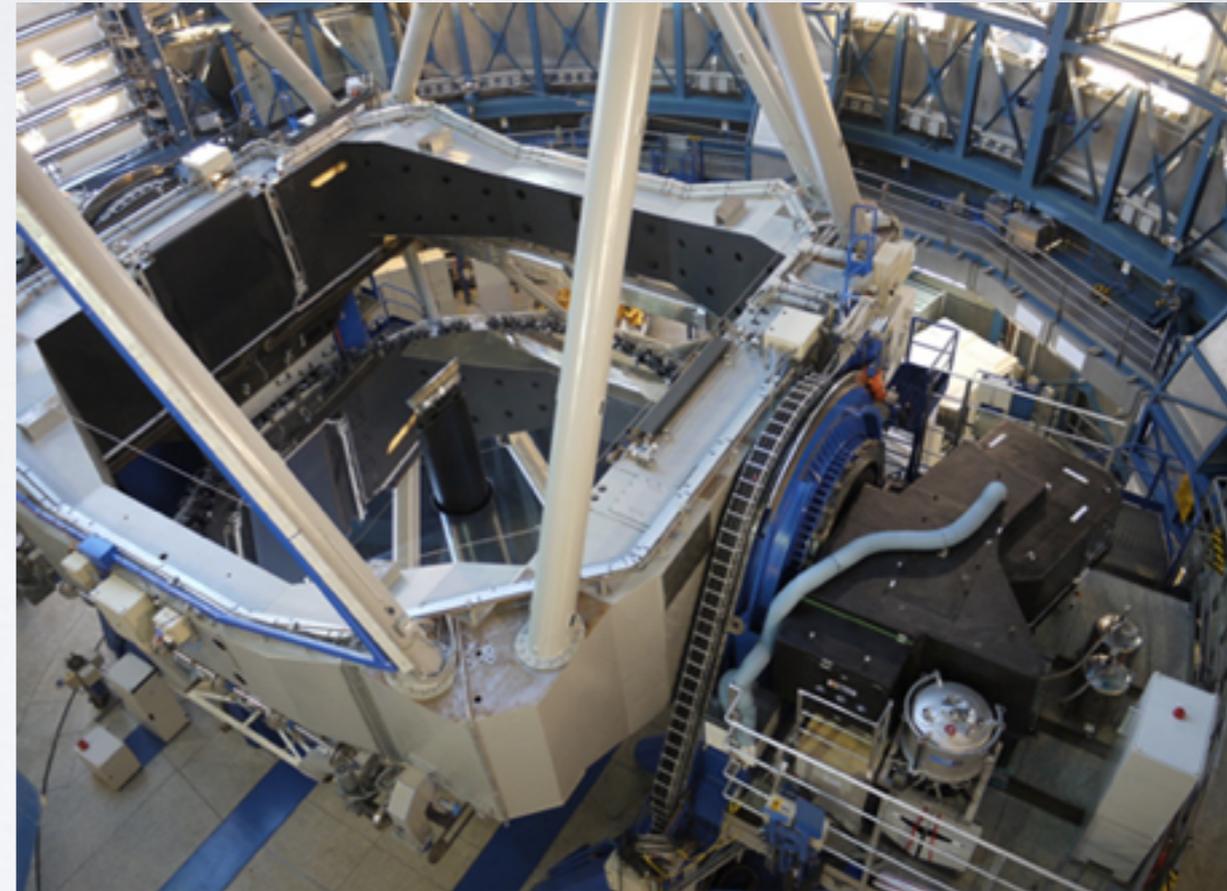
Uno strumento all'avanguardia: SPHERE

Il futuro e la ricerca di vita

SPHERE

SPHERE è uno strumento di ultima generazione per la scoperta e caratterizzazione di dischi e pianeti.

Si trova al VLT del Cerro Paranal (Cile).



SPHERE

Il Cerro Paranal (2635 m) è uno dei migliori siti di osservazione astronomica.

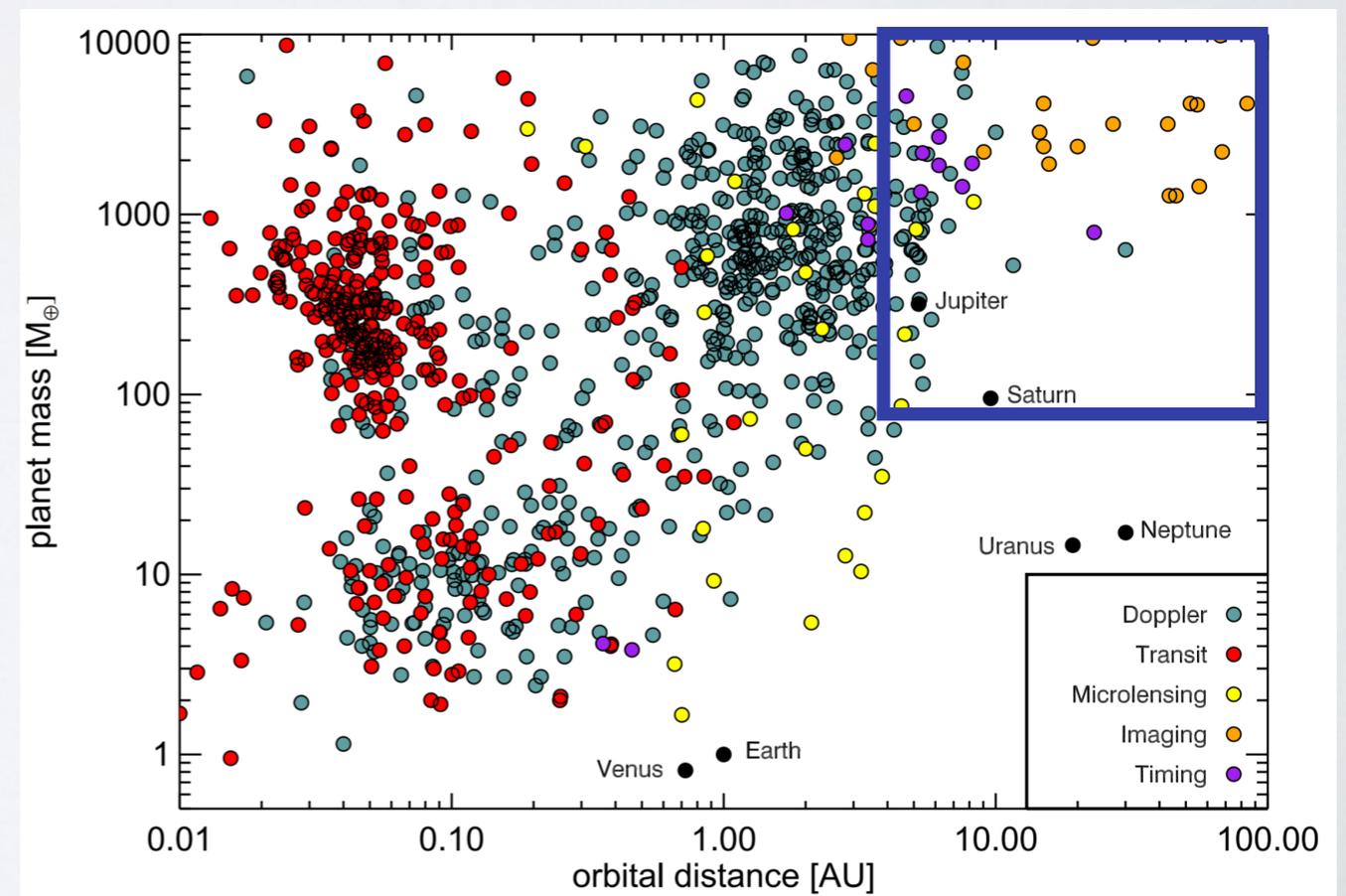
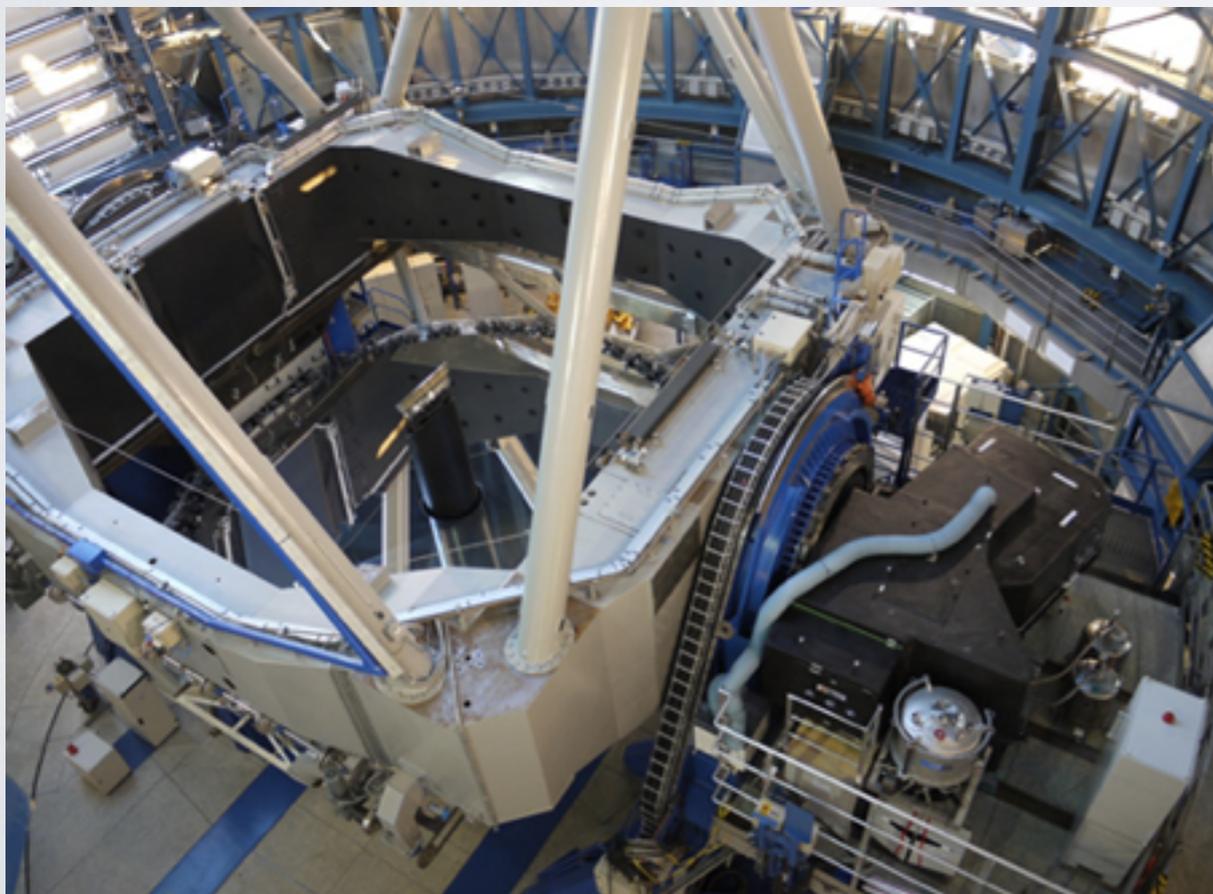
Negli anni '90 l'ESO ci ha costruito il VLT, un sistema di quattro telescopi con specchi di 8.2 m ciascuno.



SPHERE

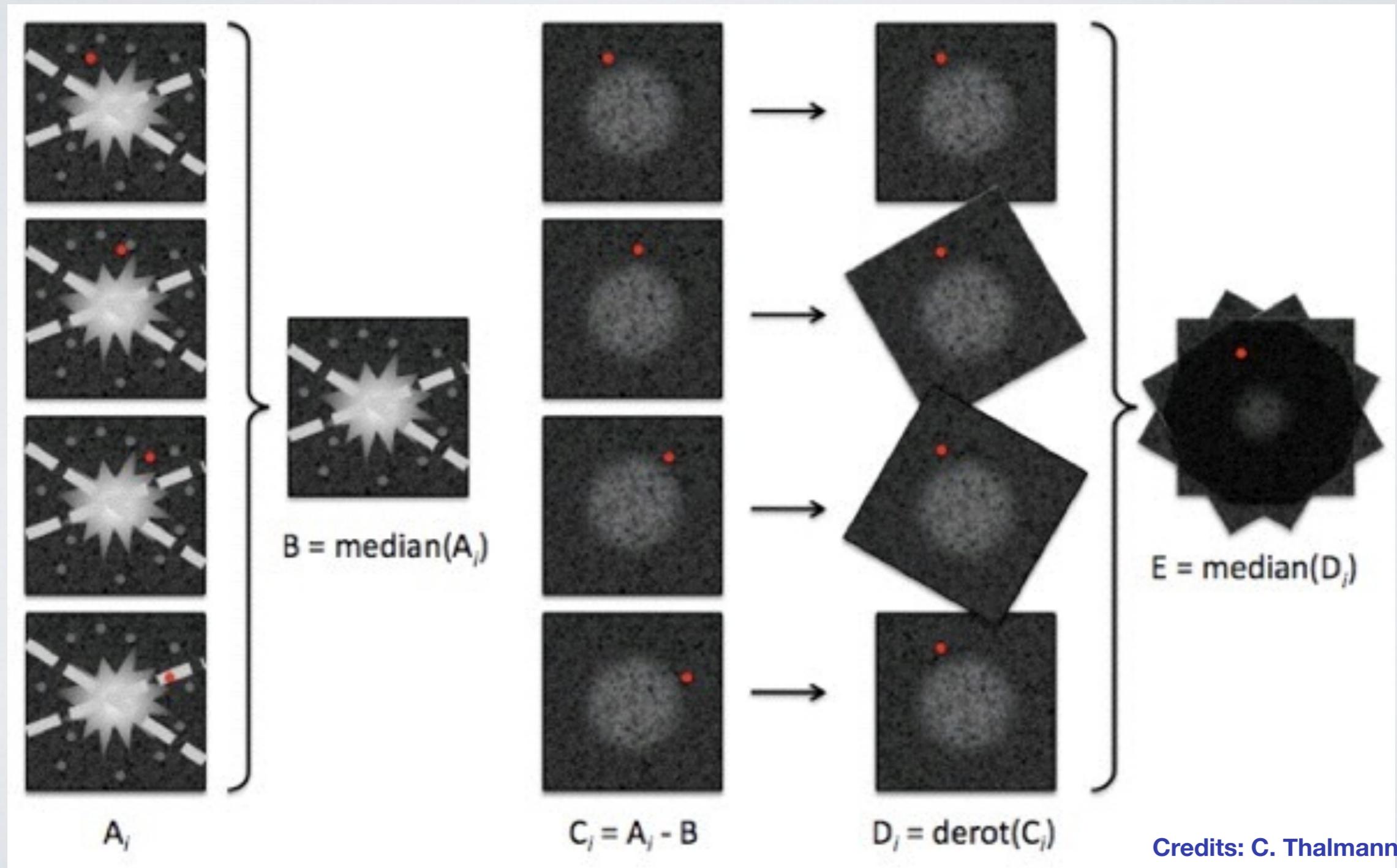
Recentemente l'ESO e un consorzio europeo di università ha concepito e costruito SPHERE (4 Maggio 2014).

Grazie ad una nuova tecnologia di ottiche adattive, SPHERE è in grado di vedere pianeti più piccoli e caldi che mai.



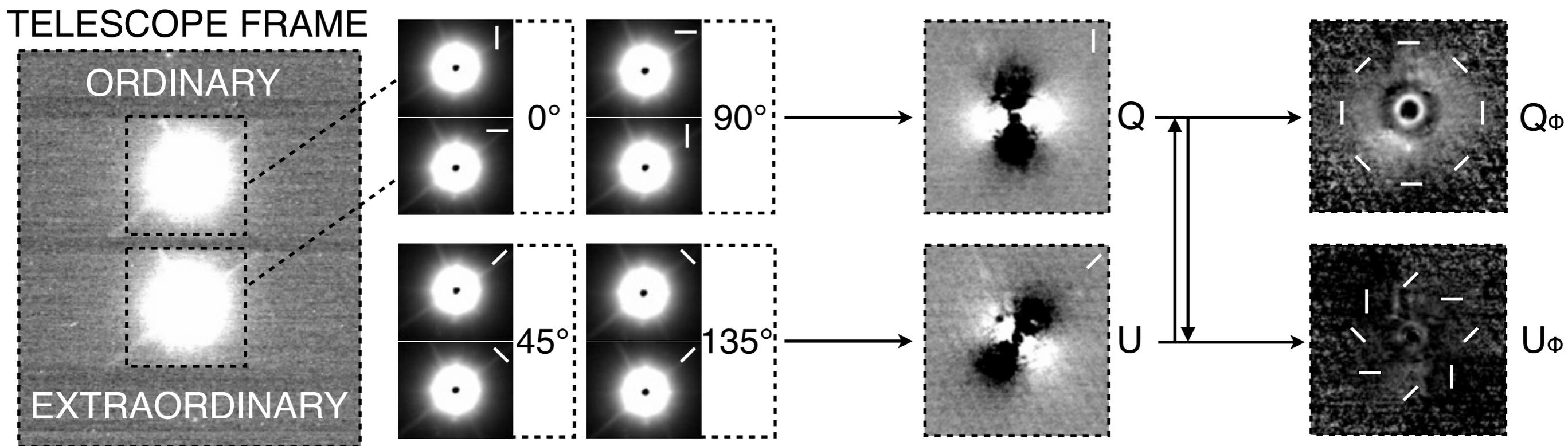
SPHERE

I principi base si chiamano imaging differenziale angolare e polarimetrico (ADI e PDI).



SPHERE

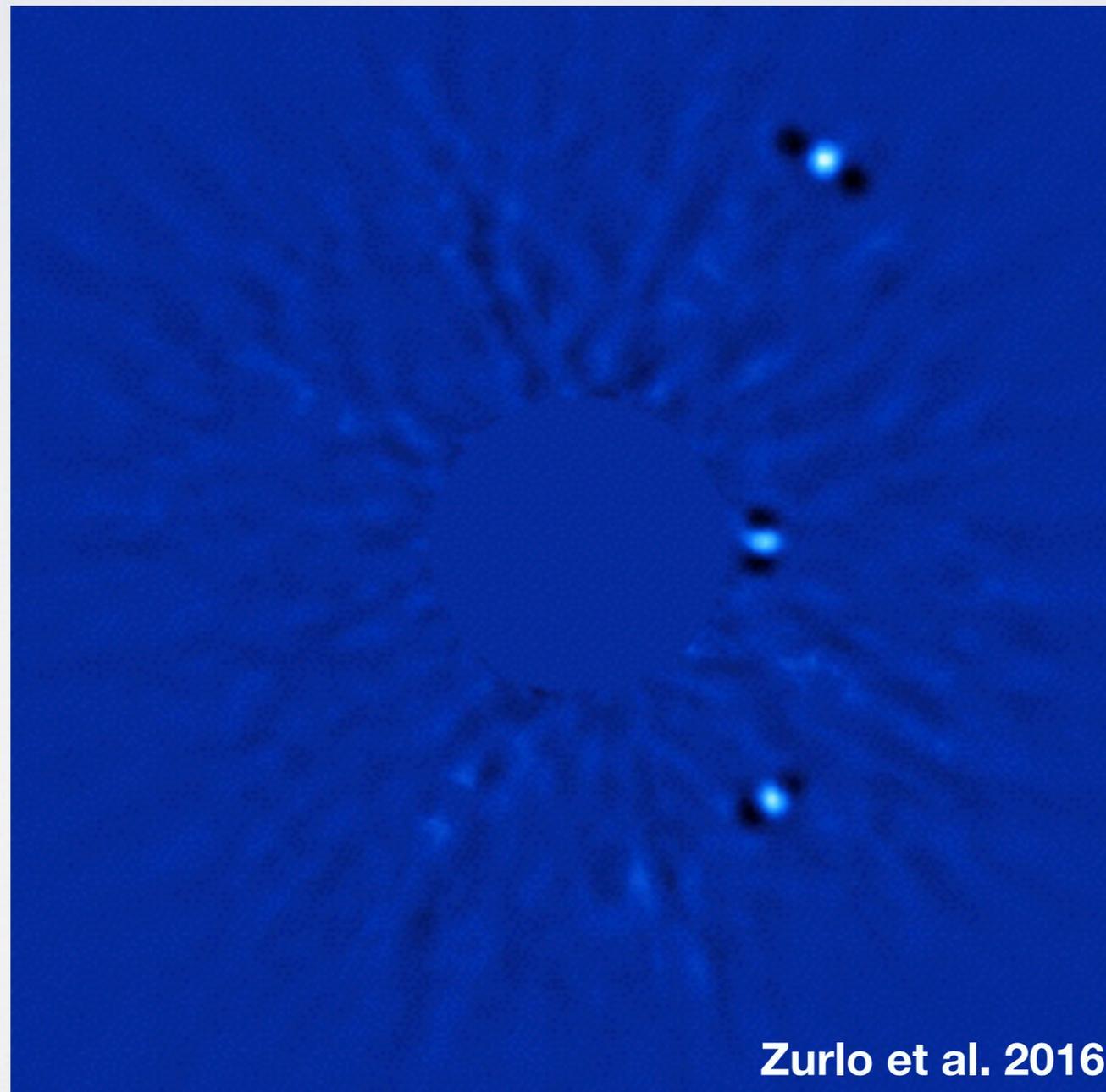
I principi base si chiamano imaging differenziale angolare e polarimetrico (ADI e PDI).



Credits: A. Garufi

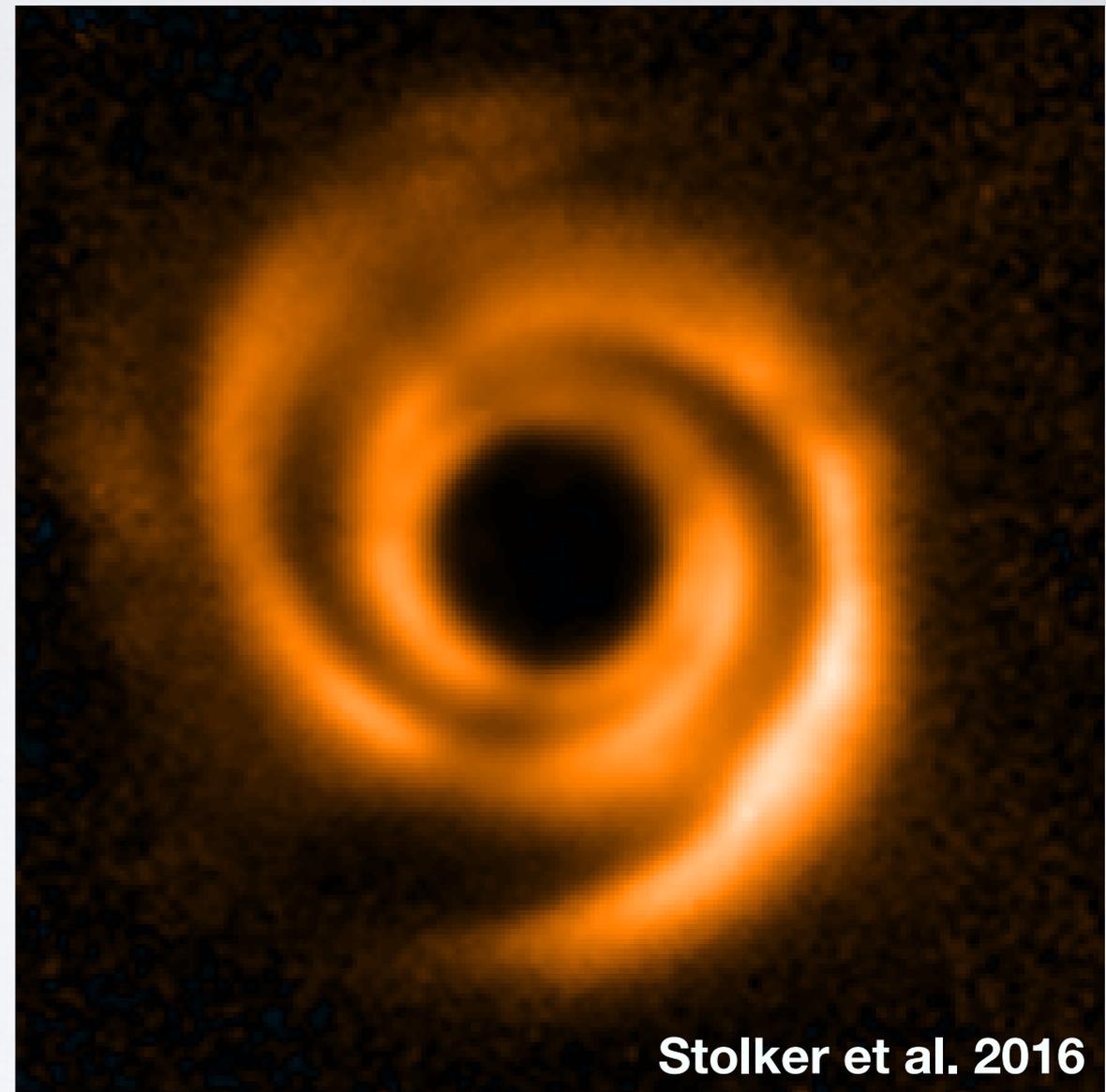
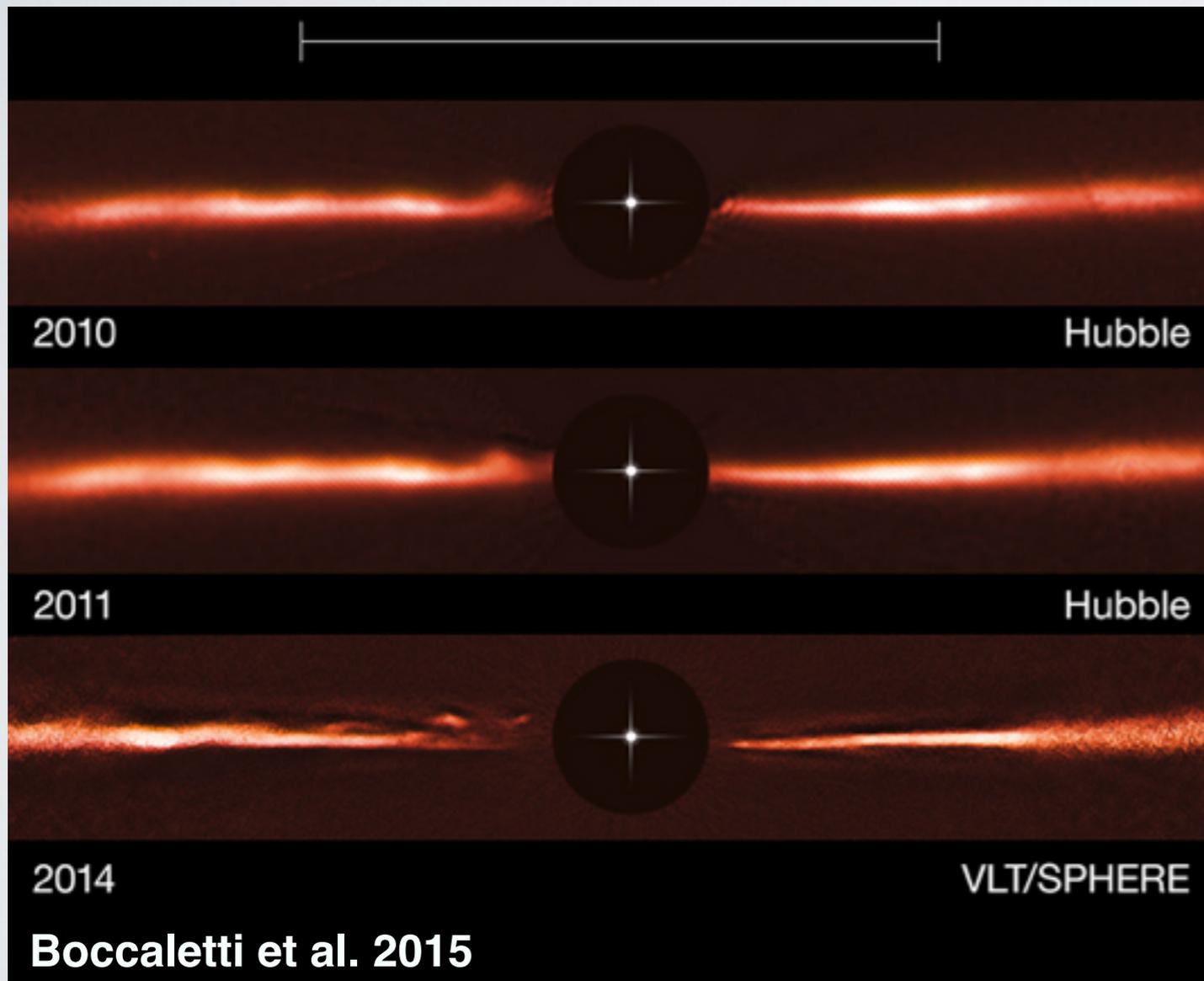
SPHERE

**I pianeti scoperti sono pochi. Quei pochi sono visti
(e caratterizzati) come mai prima d'ora.**



SPHERE

I dischi protoplanetari e quelli di ‘detriti’ sono straordinariamente attivi.



SPHERE

SPHERE è stato concepito, costruito ed è ora mantenuto da:

- **Laboratoire d'Astrophysique de Grenoble (P.I. institute)**
- **Max-Planck Institut for Astronomy in Heidelberg (co-P.I. institute)**
 - **Laboratoire d'Astrophysique de Marseille**
- **Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation Astrophysique (Observatoire de Paris)**
 - **Laboratoire Universitaire d'Astrophysique de Nice**
 - **ONERA**
 - **Observatoire de Genève**
 - **Osservatorio Astronomico di Padova**
 - **Institute of Astronomy of the ETH Zurich**
 - **Astronomical Institute of the University of Amsterdam**
 - **ASTRON**

In collaborazione con l'European Southern Observatory (ESO)

SPHERE

Ogni membro di un'istituzione SPHERE ha accesso al
Tempo di Osservazione Garantito (GTO):

SHINE: 200 notti. Ricerca e caratterizzazione di esopianeti.

DISKS: 20 notti. Indagine di dischi circumstellari.

REFPLANETS: 20 notti. Pianeti in luce riflessa.

OTHER SCIENCE: 12 notti. Sistema solare, stelle evolute,
getti, etc.



SPHERE



European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere

OBSERVING PROGRAMMES OFFICE • Karl-Schwarzschild-Straße 2 • D-85748 Garching bei München • e-mail: opo@eso.org • Tel.: +49 89 320 06473

APPLICATION FOR OBSERVING TIME

PERIOD: 99A

Important Notice:

By submitting this proposal, the PI takes full responsibility for the content of the proposal, in particular with regard to the names of CoIs and the agreement to act according to the ESO policy and regulations, should observing time be granted.

1. Title	Category: C-4								
Revealing scattered light asymmetries in the HD97048 transition disk									
2. Abstract / Total Time Requested									
Total Amount of Time: 0.3 nights VM, 1 hours SM									
The well known transition disk around HD97048 has recently been imaged in unprecedented detail in NIR scattered light (Ginski et al. 2016) as well as in dust mm-emission (Walsh et al. 2016, van der Plas et al. 2016). Several ring like structures have been recovered that may be carved by nascent planets. Besides these structures there are indications of asymmetries in the inner and outer part of the disk from our own data and earlier HST observations, respectively. In particular spiral features may be present which could be another signpost of ongoing planet-disk interaction. We now propose to take deep coronagraphic images of the outer part of the disk with SPHERE/IRDIS in polarimetric mode as well as high resolution images of the inner part of the disk with SPHERE/ZIMPOL. Our observations will clarify the nature of the potential asymmetric disk features and allow us one of the most detailed views of a planet forming disk to date.									
3. Run	Period	Instrument	Time	Month	Moon	Seeing	Sky	Mode	Type
A	99	SPHERE	0.3n	apr	n	0.8	CLR	v	
B	99	SPHERE	1h	apr	n	0.8	CLR	s	
4. Number of nights/hours		Telescope(s)	Amount of time						
a) already awarded to this project:									
b) still required to complete this project:									
5. Special remarks:									
The proposing team consists of experts in SPHERE observations and data reduction which also took part in the instrument commissioning and are still involved in the ongoing SPHERE GTO program. Specifically C. Ginski, J. de Boer, T. Stolker and H. Avenhaus are some of the few experts in IRDIS DPI and ZIMPOL PDI data reduction. J. de Boer has recently characterized the polarimetric efficiency of the IRDIS DPI mode and observation strategies were adjusted according to his findings (see SPHERE Manual). C. Ginski has recently published the first detection of the sub-structure in the HD97048 disk in scattered light with SPHERE/IRDIS.									
6. Principal Investigator: Christian Ginski, ginski@strw.leidenuniv.nl , NL, Sterrewacht, University of Leiden									
6a. Co-investigators:									
C.	Dominik	Pannekoek Institute, University of Amsterdam, NL							
T.	Henning	Max Planck Institut fuer Astronomie, D							
F.	Ménard	Institut de Planetologie et d'Astrophysique de Grenoble (UMR 5274), F							
M.	Benisty	Institut de Planetologie et d'Astrophysique de Grenoble (UMR 5274), F							
Following CoIs moved to the end of the document ...									

- 1 -

Tuttavia, come per tutti gli strumenti, l'intera comunità scientifica ha accesso a osservazioni.

Il mezzo per accedere al tempo aperto (open time) è un bando (proposal) che viene garantito due volte all'anno.

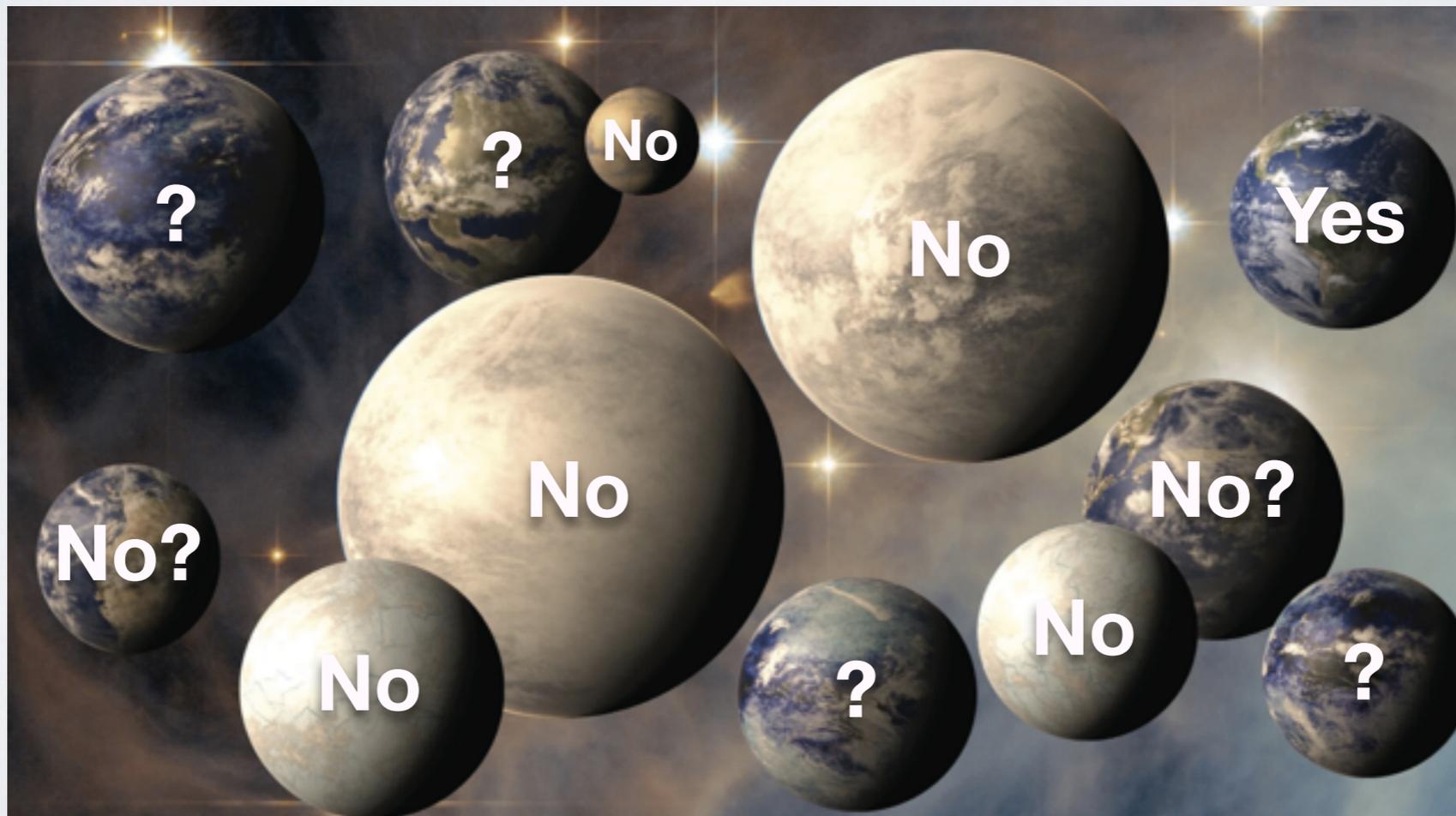
Un proposal deve presentare un buon caso scientifico e un'accurata descrizione del setting.

LA RICERCA DI VITA

Ad oggi la vita sulla Terra è l'unica conosciuta.

La mancata conoscenza di altre è molto probabilmente un limite strumentale.

Siamo vicini, ma non troppo, ad avere i mezzi per trovarla.



LA RICERCA DI VITA

Secondo l'attuale paradigma le condizioni necessarie alla vita sono:

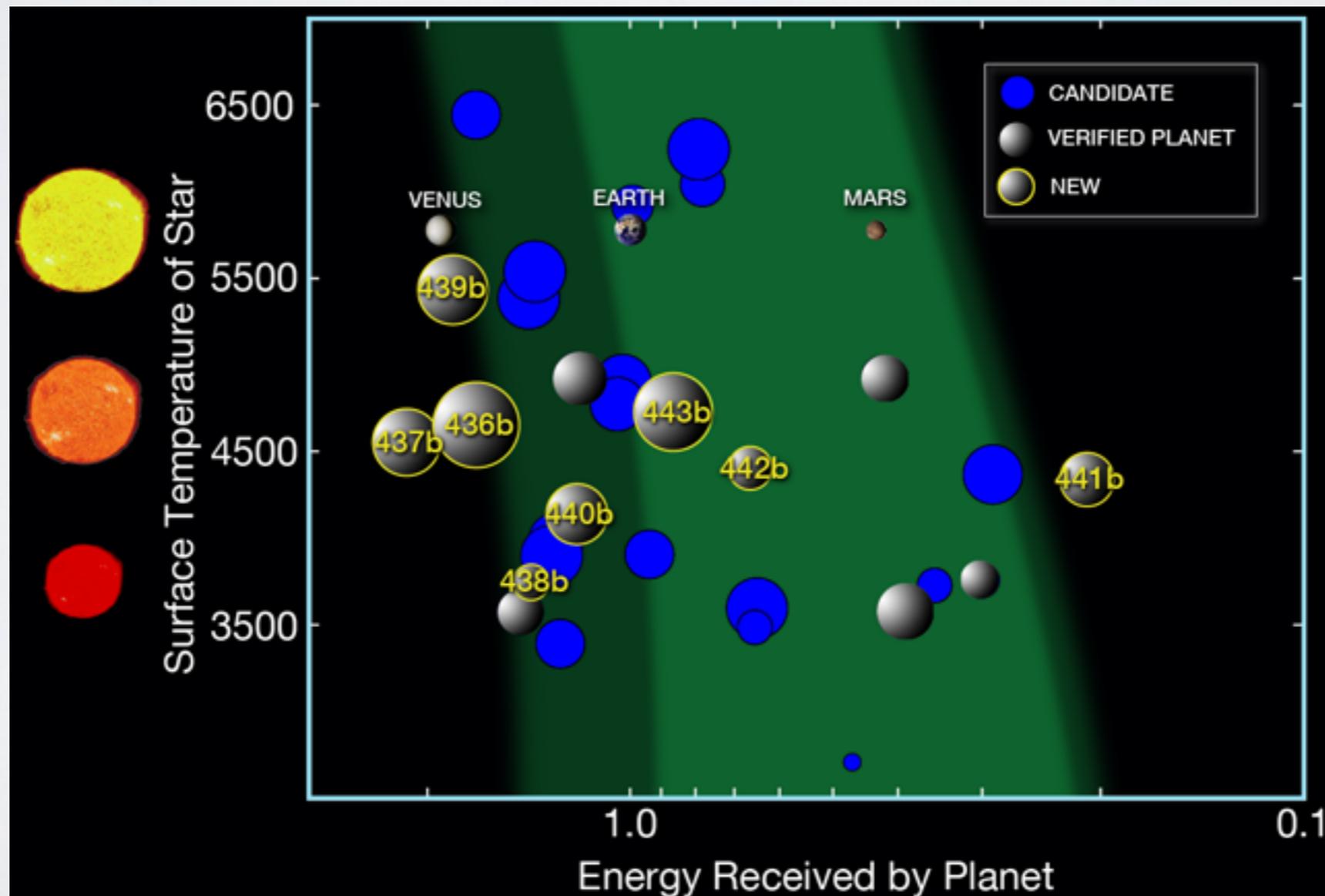
- 1. Vi sia una fonte di energia (stella)**
- 2. Il pianeta sia roccioso e di massa intermedia**
- 3. Vi sia la temperatura a cui l'acqua ha stato liquido**
- 4. Vi siano scarse fluttuazioni di temperatura**
- 5. Il nucleo sia di ferro e la Terra sia in rotazione**
- 6. Geochimica di carbonio, idrogeno, ossigeno ed azoto**

LA RICERCA DI VITA

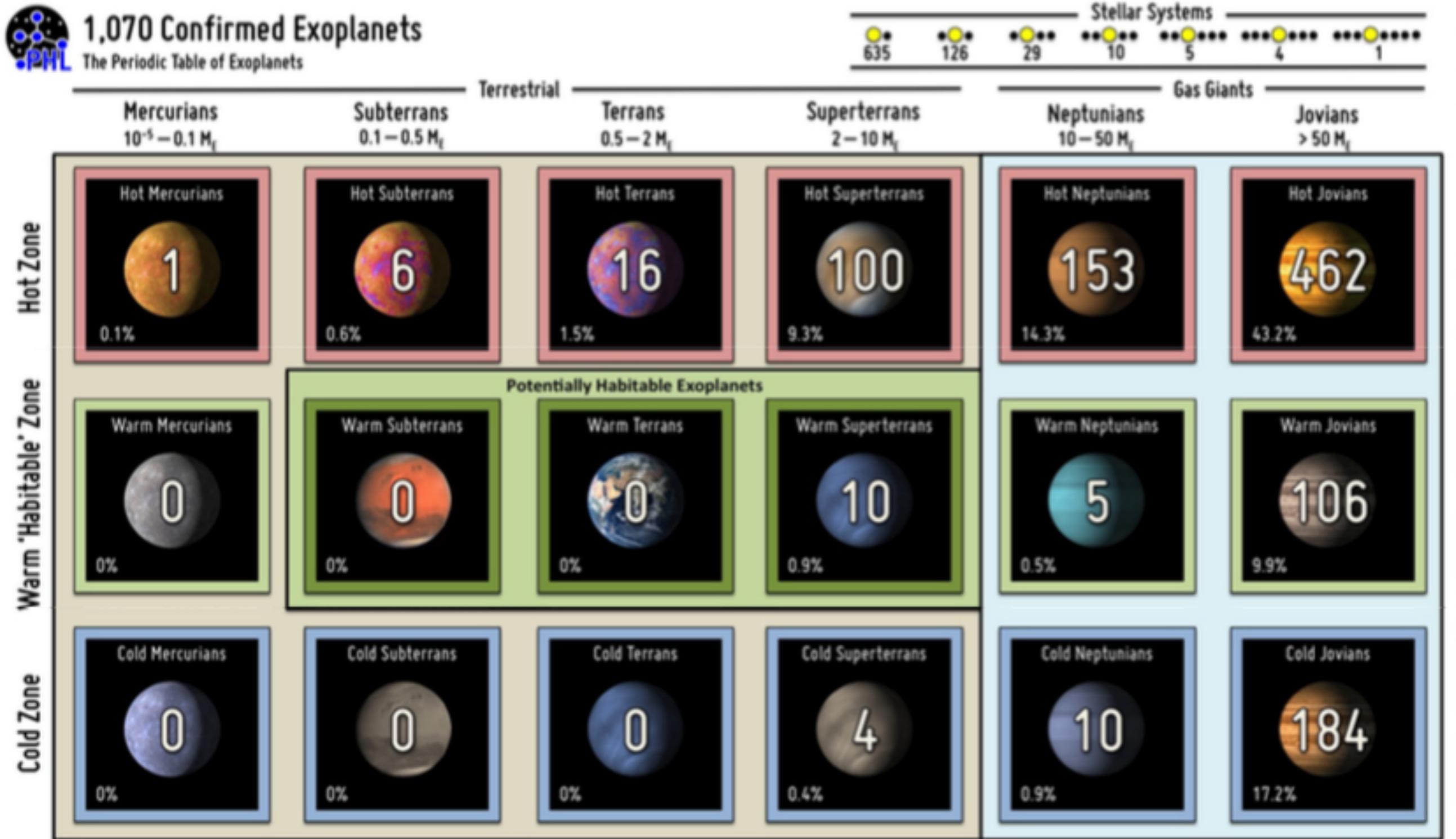
Zona abitabile:

dominio teorico in prossimità della stella in seno al quale i pianeti possono mantenere acqua liquida.

(Wikipedia)



LA RICERCA DI VITA



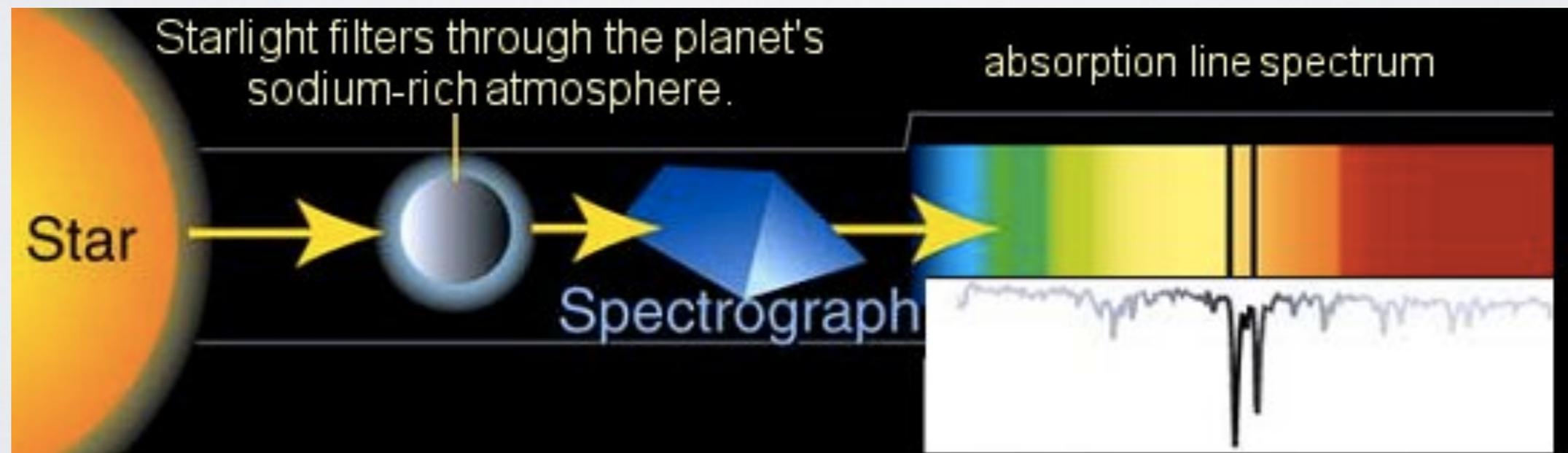
CREDIT: PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) Jan 2014

“E pur si forma!”, Antonio Garufi, 7 giugno 2018, Bologna

LA RICERCA DI VITA

Tramite velocità radiale e transito stimiamo massa e densità (quindi composizione) del pianeta oltre alla sua temperatura superficiale.

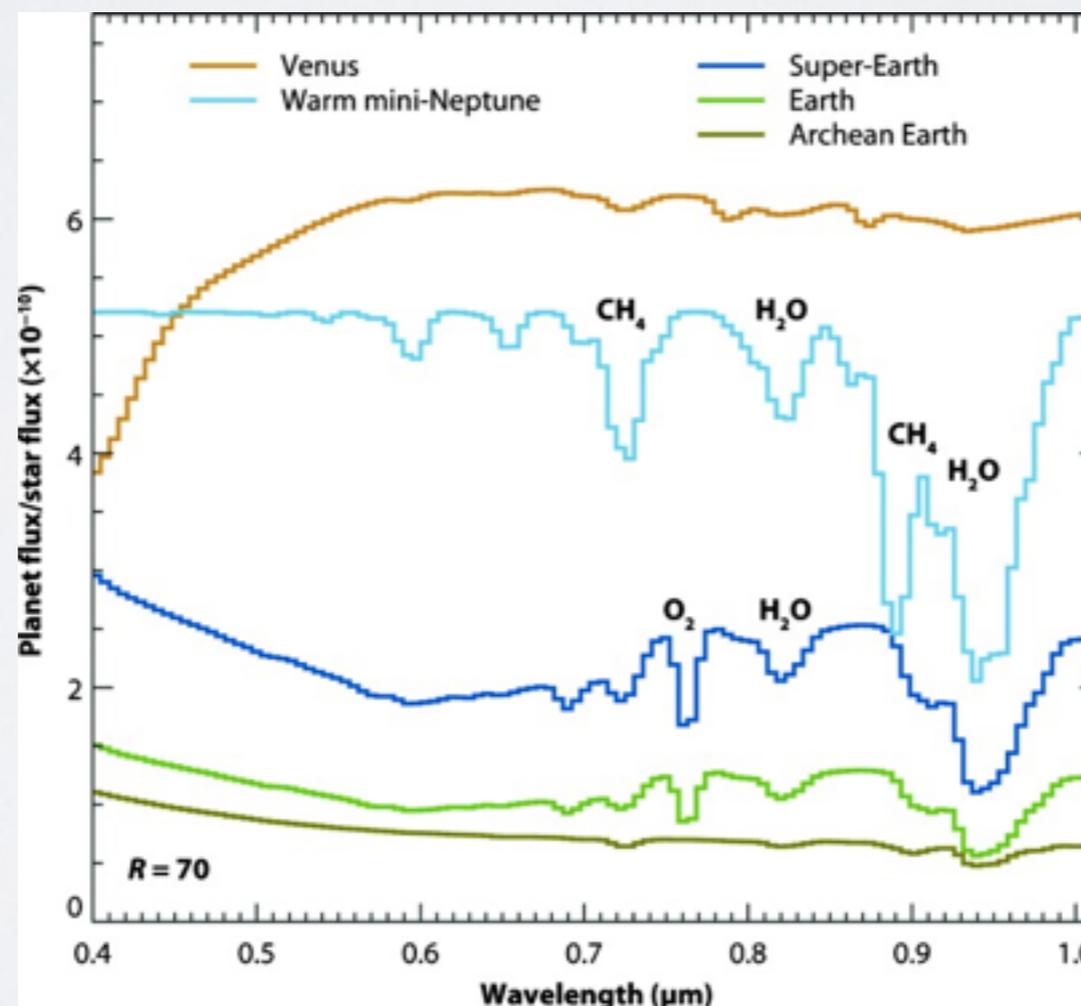
Per sapere la composizione chimica dell'atmosfera si sfrutta la *spettroscopia di trasmissione*.



LA RICERCA DI VITA

Al momento questa tecnica ci consente di trovare molecole semplici come CO, H₂O, Na.

In futuro però potremo trovare elementi chimici considerati 'biomarkers' (firme biologiche) come (CH₃)₂S o (CH₃Cl).

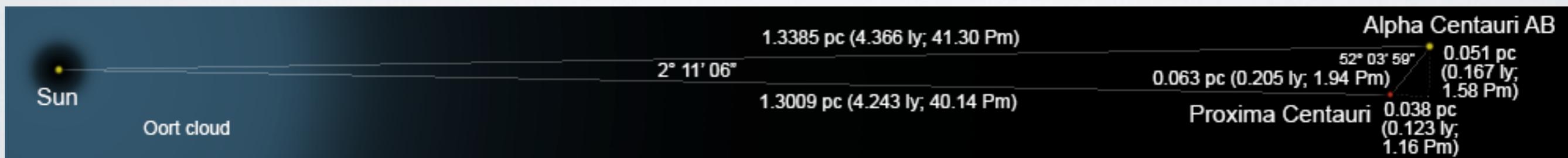


LA RICERCA DI VITA

Per quanto riguarda i viaggi spaziali, dovremo attendere qualche generazione in più.

Tuttavia arrivare a Alpha Centauri è virtualmente possibile. Un progetto ambizioso chiamato StarShot è stato annunciato nel 2016 da un team di scienziati e imprenditori.

In 20 anni una flotta di mini navicelle potrebbe arrivarci e vedere da vicino il piccolo pianeta Proxima Cen b.

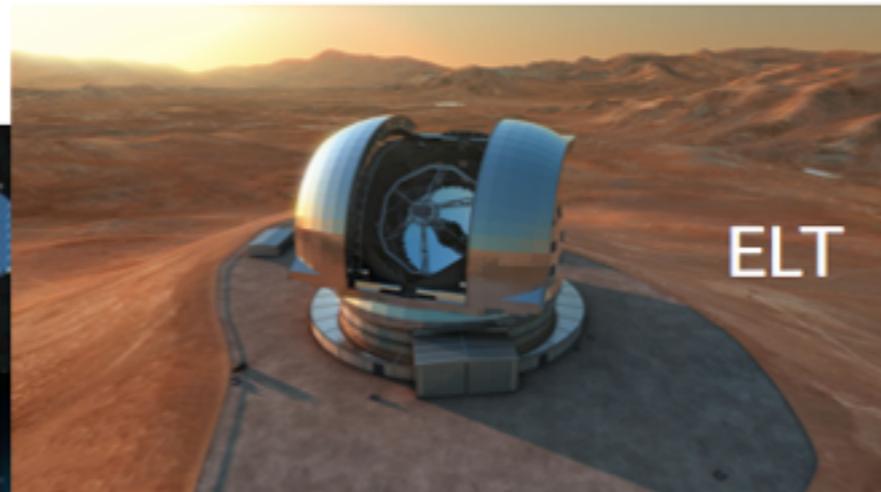


LA RICERCA DI VITA

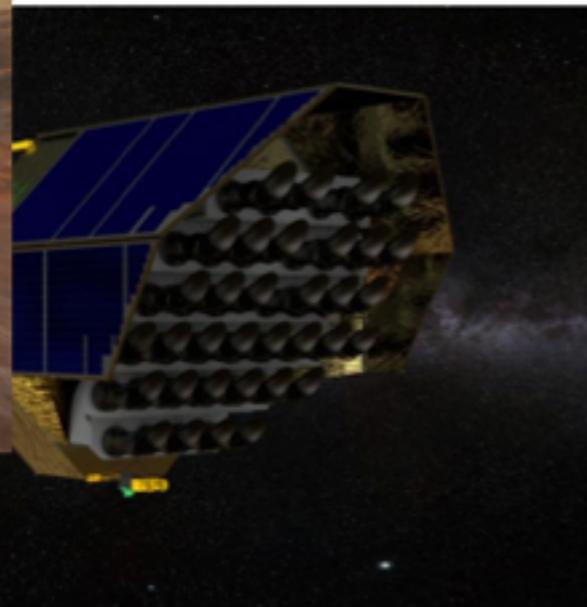
Gli strumenti degli anni '20 renderanno molto di quanto detto obsoleto e garantiranno nuove inattese opportunità.



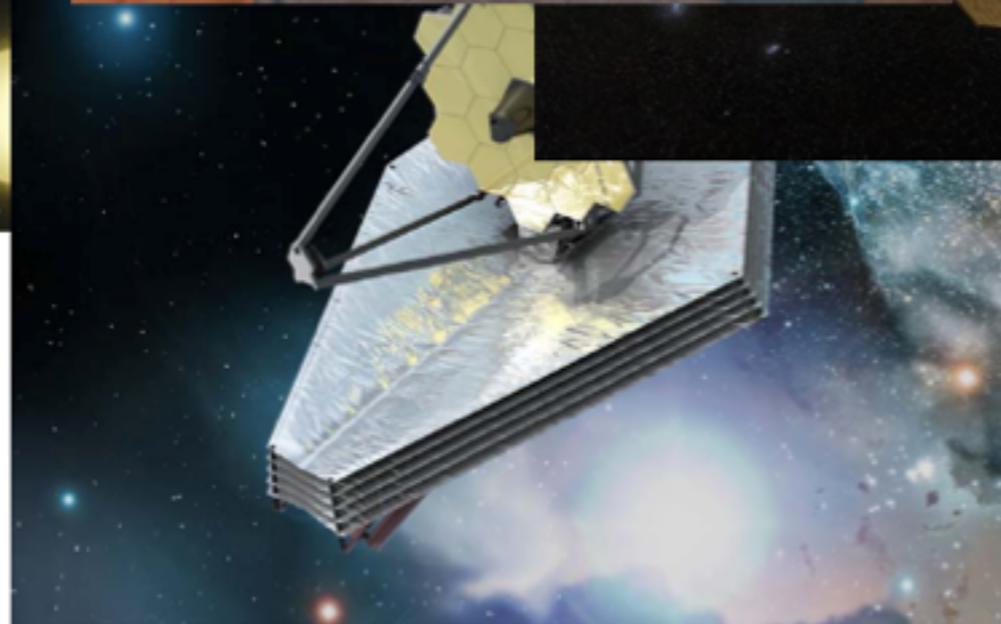
TESS



ELT



PLATO



James Webb Space Telescope

FINE



Cerro Paranal, Chile, 17 Dicembre 2015

Grazie!

“E pur si forma!”, Antonio Garufi, 7 giugno 2018, Bologna