

# STELLE E ESOPIANETI

**Costanza Argiroffi**

DiFC, Università degli Studi di Palermo, Italy  
INAF – Osservatorio Astronomico di Palermo, Italy

# STELLE E ESOPIANETI – CONTENUTO DELLE LEZIONI

1. Richiamo di concetti di base
2. Fisica delle stelle
3. Evoluzione stellare
4. Esopianeti: tecniche di rivelazione e proprietà

# ESOPIANETI

# ESOPIANETI

## Definizione

1. Oggetti con massa minore di  $0.013 M_{\odot}$  (massa limite di un oggetto per la fusione del deuterio)
2. Oggetti che orbitano attorno a una stella

## Difficoltà nella rivelazione

- Mancanza di risoluzione spaziale
- Contrasto fra la radiazione emessa dalla stella e dal pianeta

## Scoperta di pianeti extrasolari

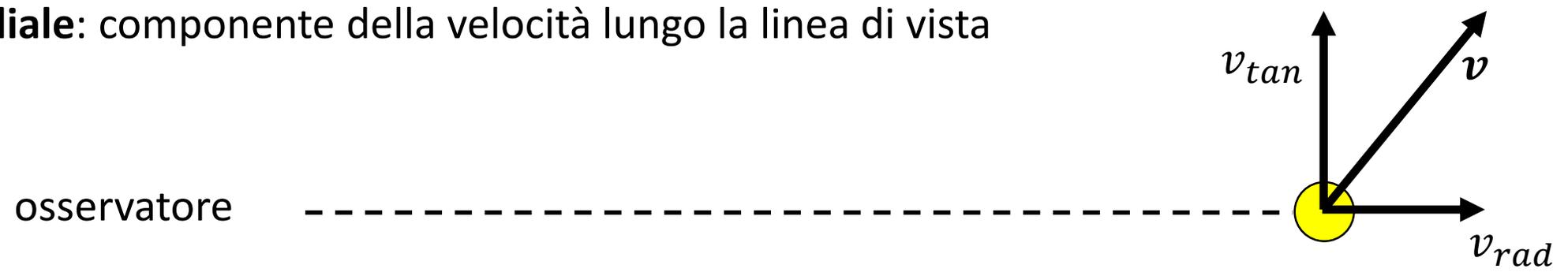
- Primo pianeta extrasolare attorno a una stella di tipo solare scoperto nel 1995 (Mayor & Queloz 1995, Nature, 378, 6555)
- Ad oggi sono noti ~6000 esopianeti

# TECNICHE PER LA RIVELAZIONE DI ESOPIANETI

1. Velocità radiali
2. Transiti
3. Osservazione diretta
4. Microlenti gravitazionali
5. ...

# VELOCITÀ RADIALE

**velocità radiale:** componente della velocità lungo la linea di vista



# VELOCITÀ RADIALE

**misura della velocità radiale:** attraverso lo spostamento Doppler delle righe spettrali

La lunghezza d'onda  $\lambda$  delle righe è nota

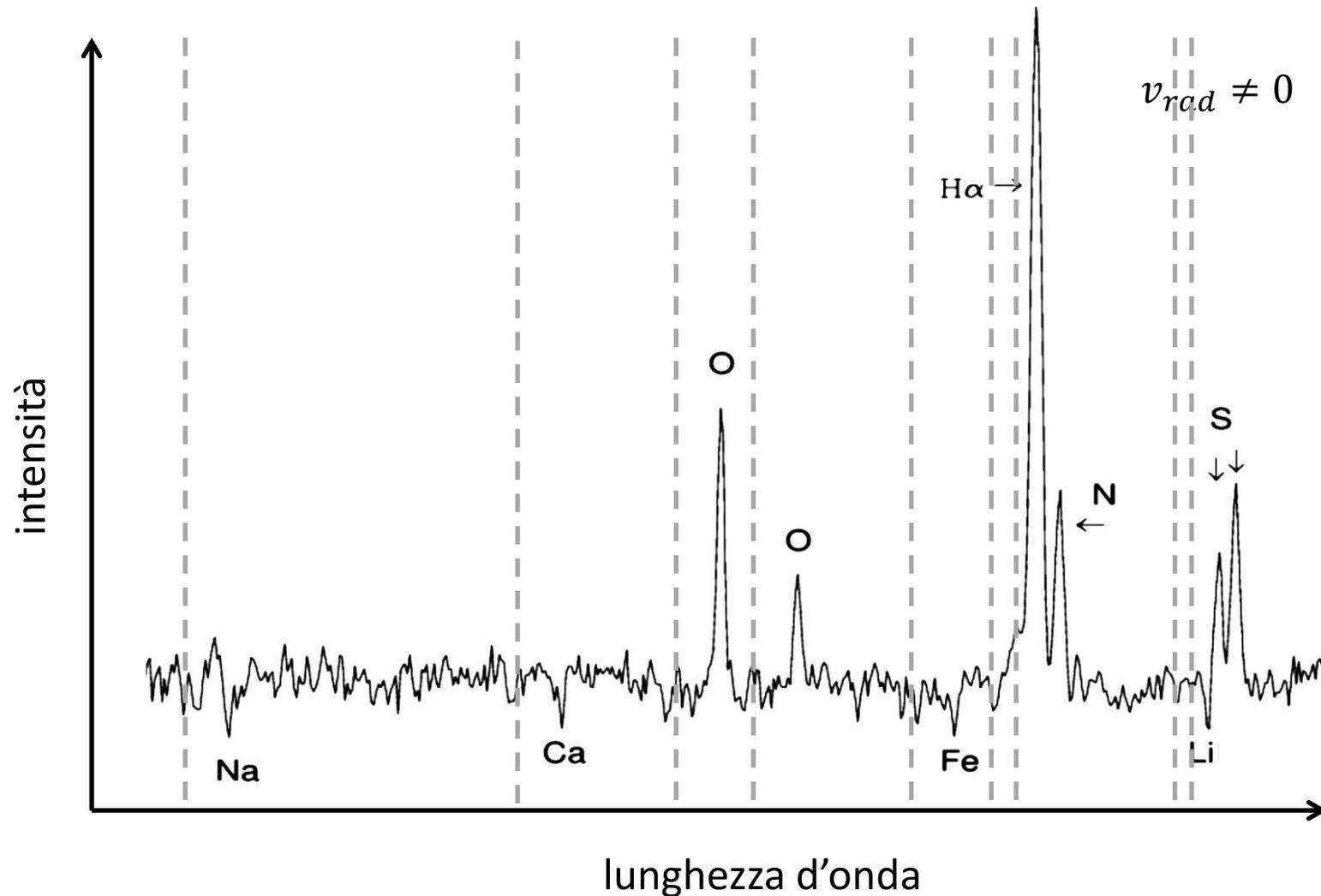
Se una sorgente ha una  $v_{rad}$  diversa da zero allora tutto il suo spettro subirà un Doppler shift:

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} =$$

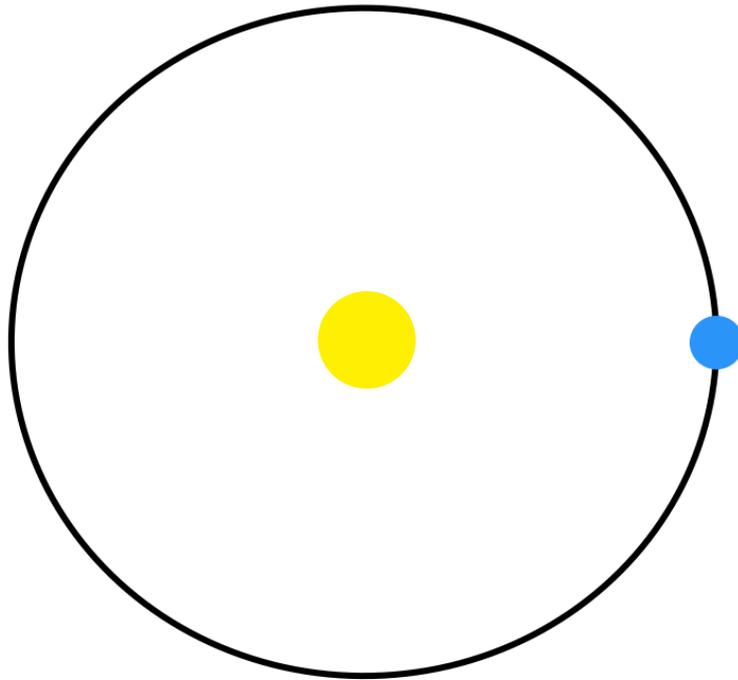
Lo spostamento delle righe rispetto alla posizione teorica è facilmente misurabile.

Per misure precise servono strumenti con risoluzione spettrale elevata:

→ HARPS-N



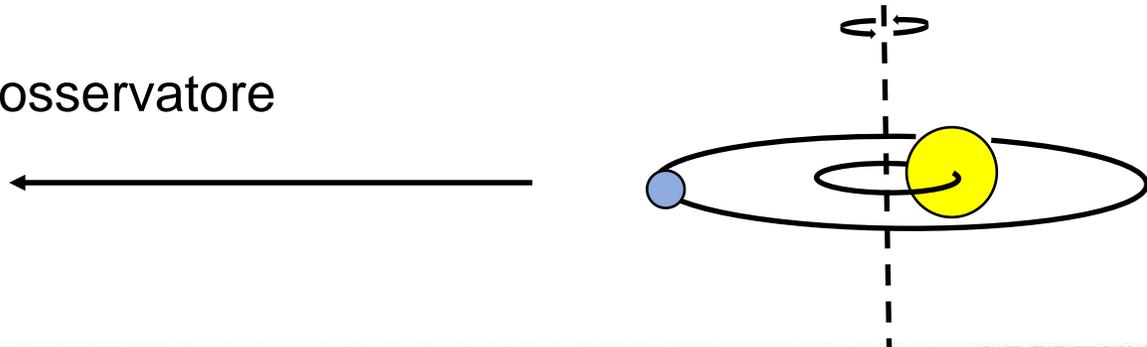
# METODO DELLE VELOCITÀ RADIALI



↓  
osservatore

# METODO DELLE VELOCITÀ RADIALI

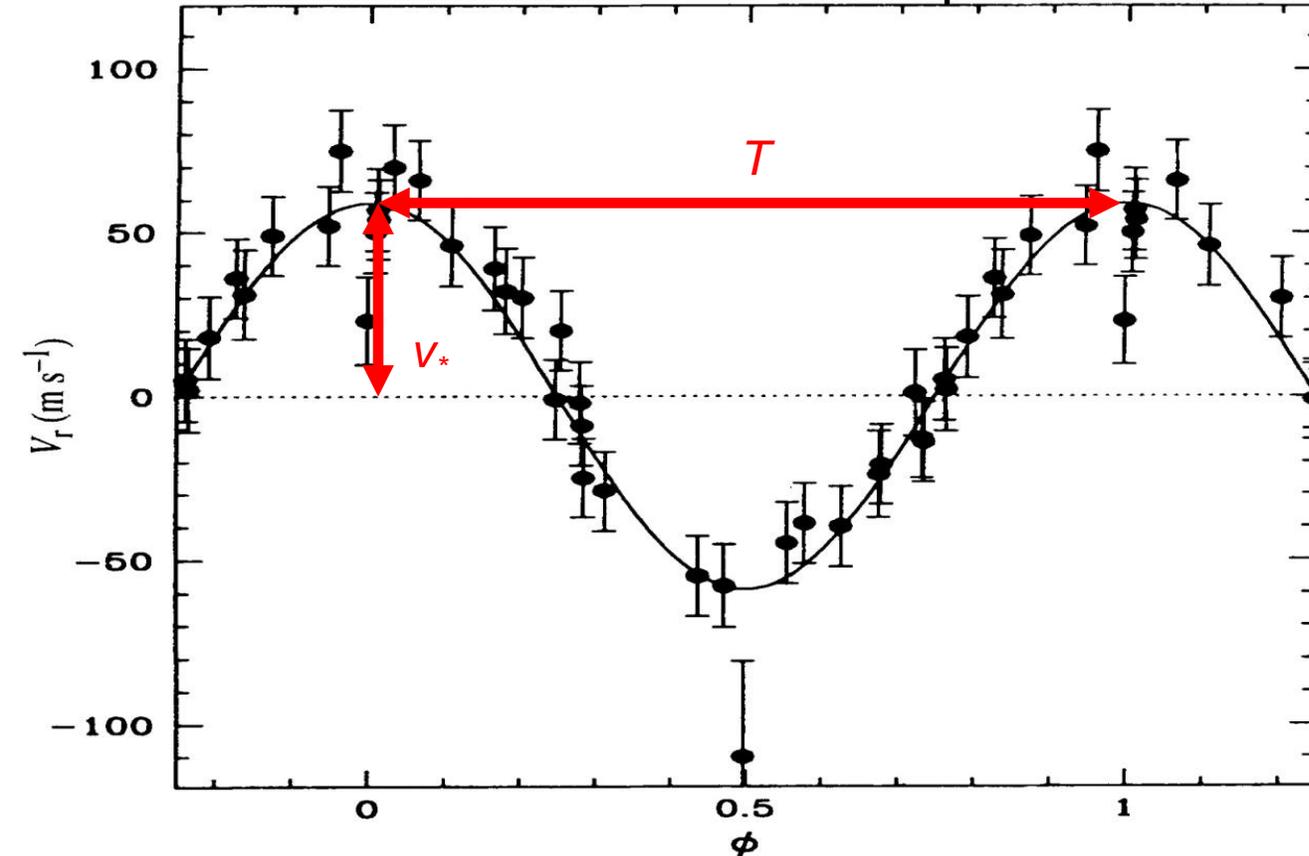
osservatore



Metodo:

- Misura ripetuta della  $v_{rad}$  di una stella
- Ricerca di variazioni periodiche

Ampiezza e periodo di queste variazioni sono le quantità che si misurano, e sono legati alle proprietà del sistema



$$v_* = \frac{M_P}{M_*} v_P;$$

Dove:

$M_*, v_*$  = massa e velocità della stella

$M_P, v_P$  = massa e velocità del pianeta

$T, a$  = periodo e raggio dell'orbita del pianeta

Si misurano  $v_*$  e  $T$ , si assume nota  $M_*$



Si determinano  $M_P$  e  $a$

# METODO DELLE VELOCITÀ RADIALI

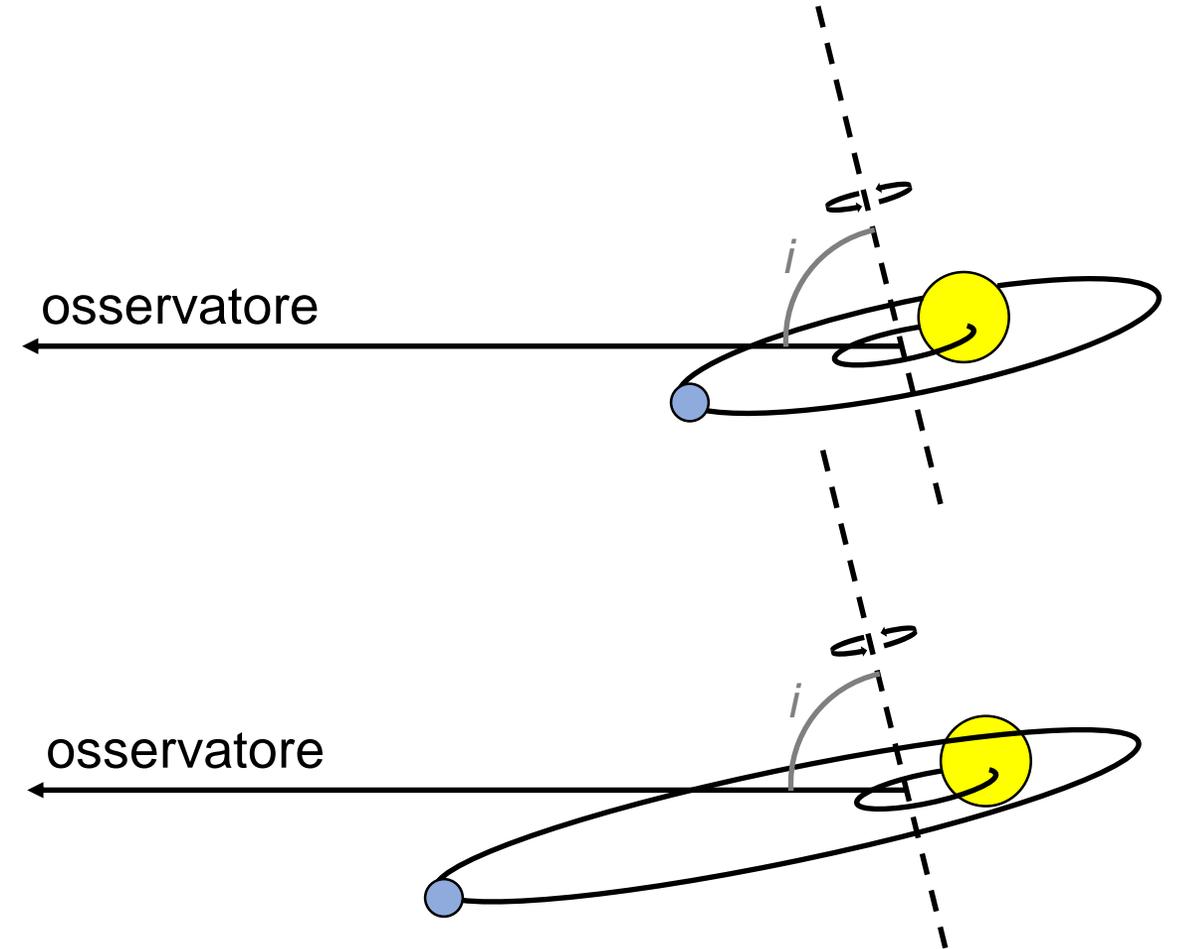
Possibili complicazioni:

## Inclinazione

Se l'inclinazione non è nota si può ricavare solo  $M_p \sin i$  (quindi un limite inferiore della massa del pianeta)

## Eccentricità dell'orbita

## Massa del pianeta non trascurabile



# METODO DELLE VELOCITÀ RADIALI

$$v_* = \frac{M_P}{M_*} v_P; \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{GM_*}}$$

Quali pianeti sono più facilmente rivelabili con il metodo delle velocità radiali?

- Pianeti massivi
- Pianeti in orbita attorno a stelle poco massive
- Pianeti vicini alla stella

# CHE RISOLUZIONE SPETTRALE SERVE PER RIVELARE UNA TERRA?

$$v_* = \frac{M_P}{M_*} v_P; \quad v_P = \sqrt{\frac{GM_*}{a}}$$

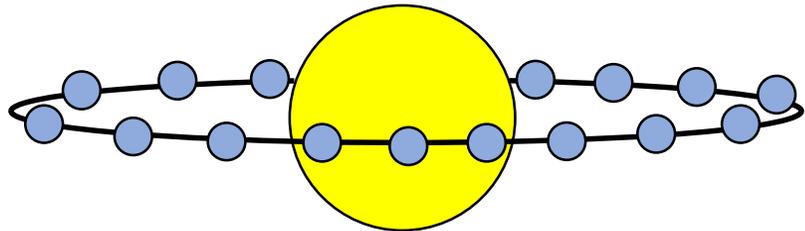
Nel caso della Terra:

$$v_P = \sqrt{\frac{GM_*}{a}} \approx 30 \text{ km s}^{-1}$$

$$v_* = \frac{M_P}{M_*} v_P \approx 8.9 \text{ cm s}^{-1}$$

HARPS-N permette di raggiungere misure di velocità radiale con precisioni di  $\sim 1 \text{ m s}^{-1}$

# METODO DEI TRANSITI



Metodo:

- Misura del flusso di una stella a diversi tempi  $t$
- Ricerca di variazioni tipo *eclisse* (ovvero di transiti)
- Controllo sulla periodicità di questi transiti

La profondità del transito e periodo sono legati alle proprietà del sistema secondo le relazioni

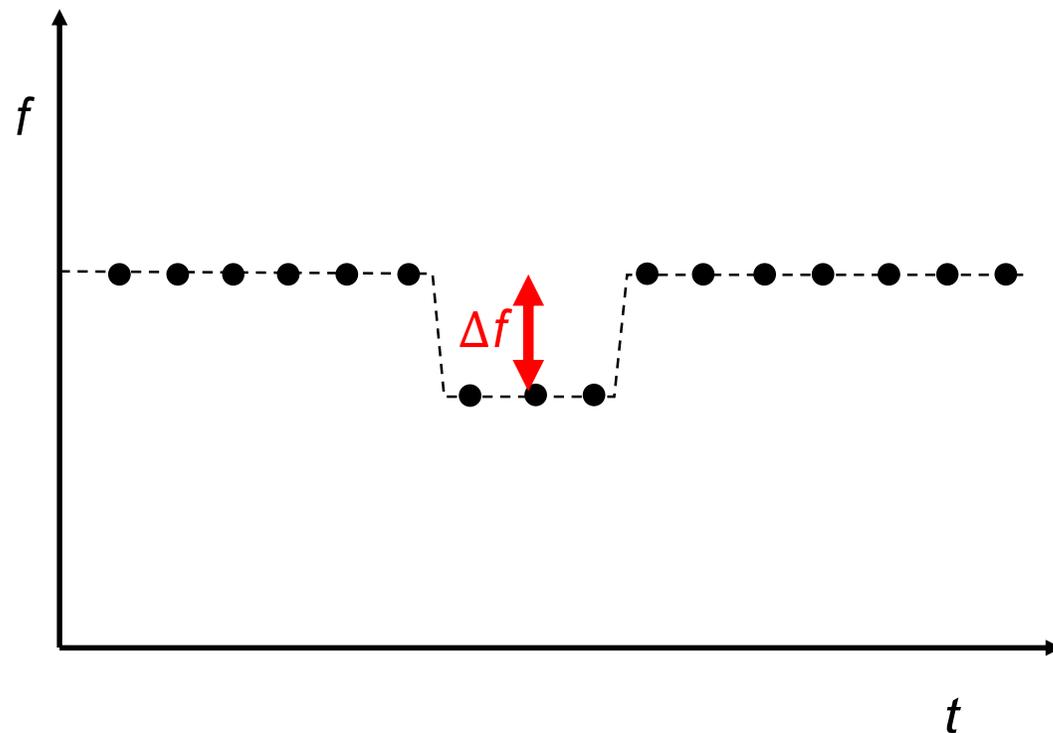
$$\frac{\Delta f}{f} =$$

$R_P$  = raggio del pianeta

$R_*$  = raggio della stella

$M_*$  = massa della stella

$a$  = raggio del orbita



Si misurano  $\Delta f / f$  e  $T$ , si assume noto  $R_*$



Si determinano  $R_P$  e  $a$

# METODO DEI TRANSITI

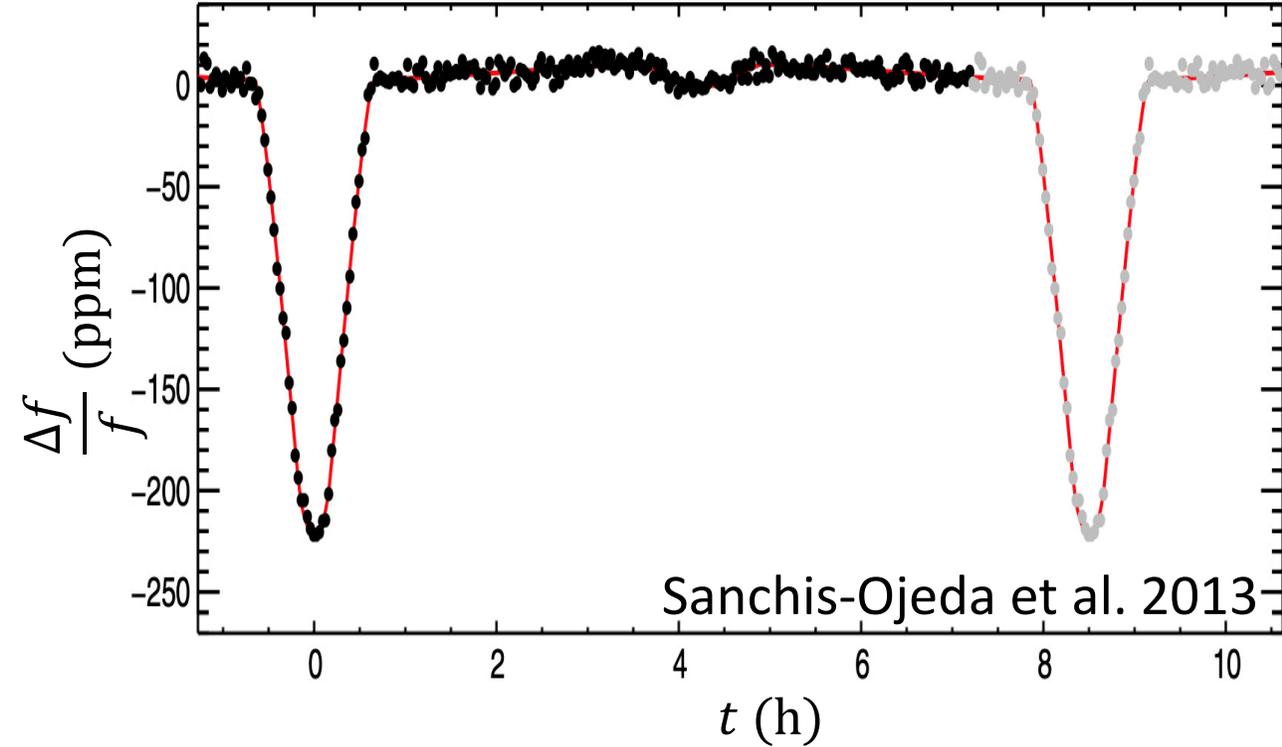
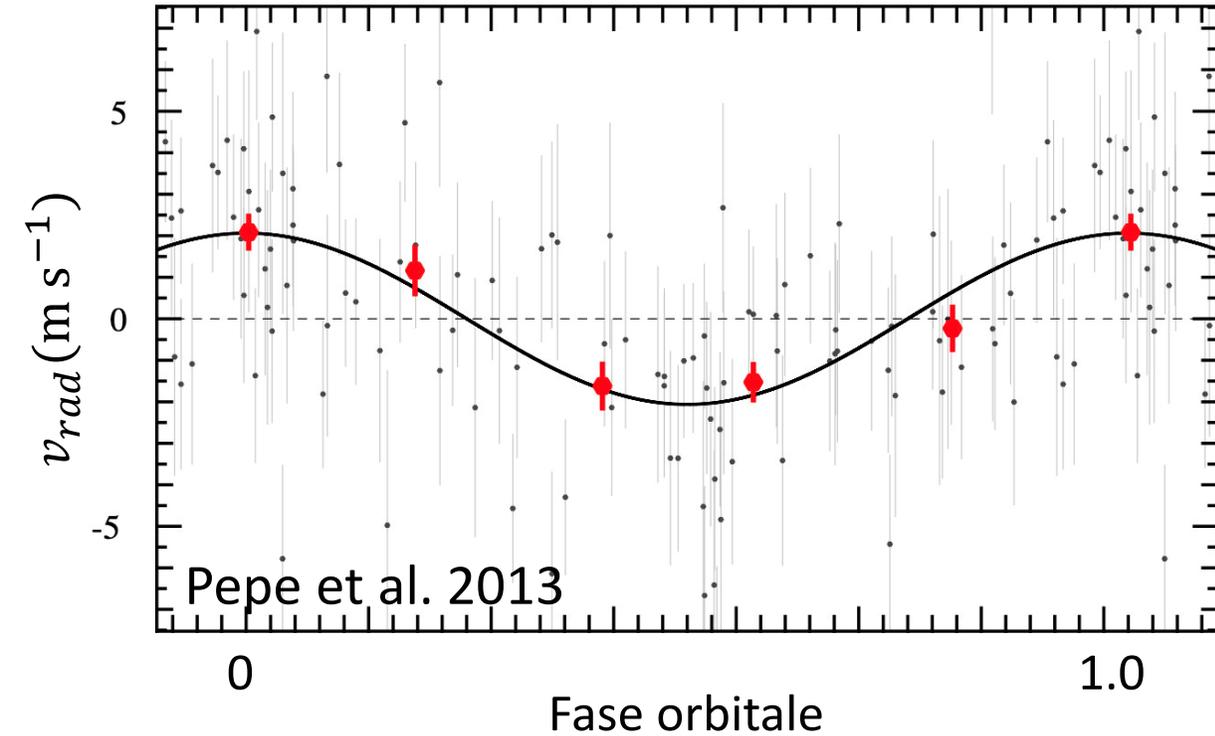
$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{R_p^2}{R_*^2}; \quad \frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{GM_*}{a^3}$$

Quali pianeti sono più facilmente rivelabili con il metodo dei transiti?

- Pianeti grandi
- Pianeti in orbita attorno a stelle piccole
- Pianeti vicini alla stella

# VELOCITÀ RADIALI E TRANSITO: KEPLER 78b

È possibile combinare la tecnica dei transiti e delle velocità radiali per uno stesso pianeta.



## Stella Kepler 78

$$M_* = 0.76 M_{\odot}$$

$$R_* = 0.74 R_{\odot}$$

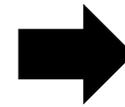
## Pianeta Kepler 78b

$$M_P = 1.86 M_{\oplus}$$

$$R_P = 1.17 R_{\oplus}$$

$$\rho_P = 5.57 g cm^{-3}$$

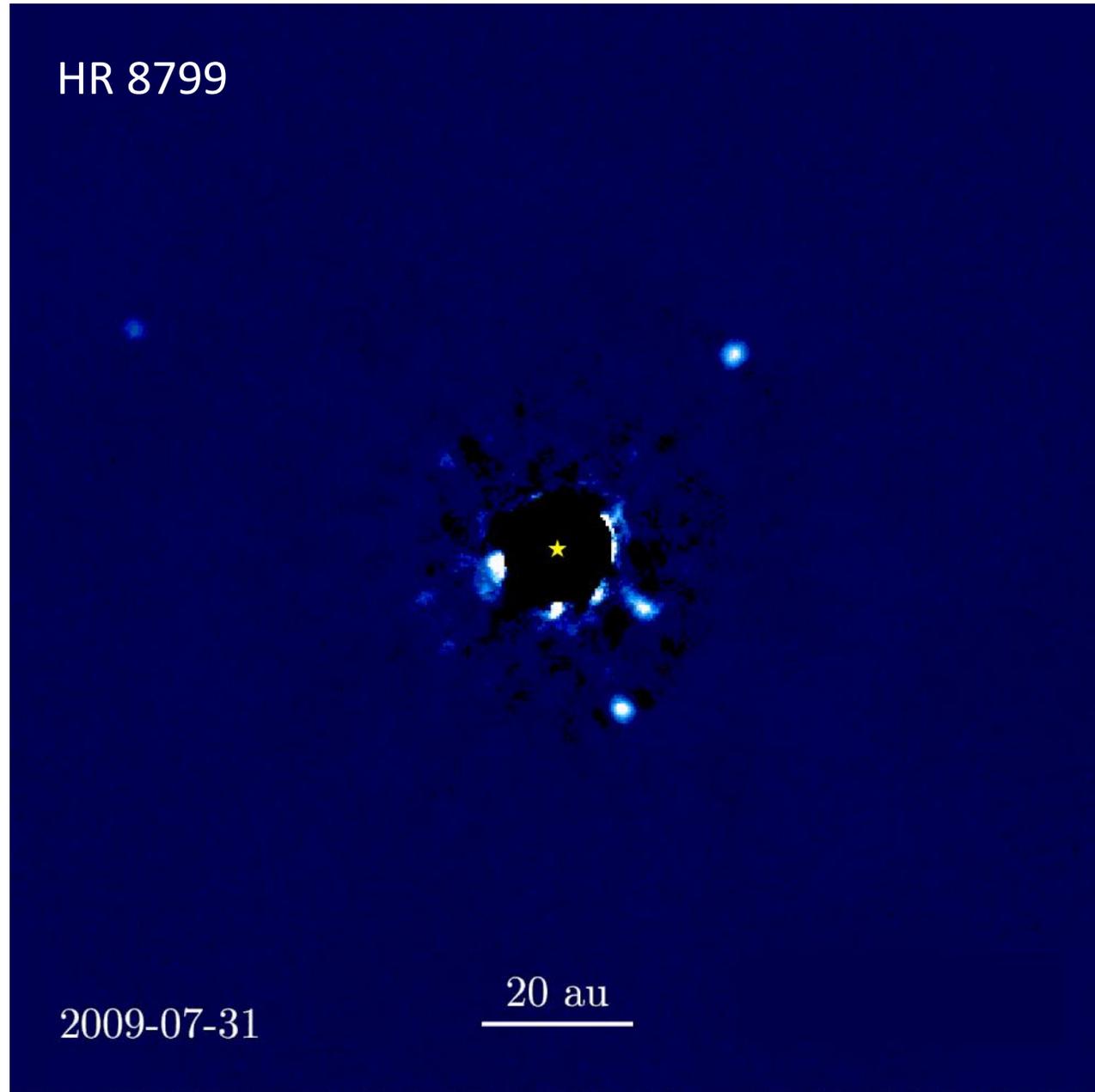
$$a = 3 R_*$$



Composto di ferro e roccia

Temperatura in superficie  $\sim 5000 K$

# METODO DELL'OSSERVAZIONE DIRETTA



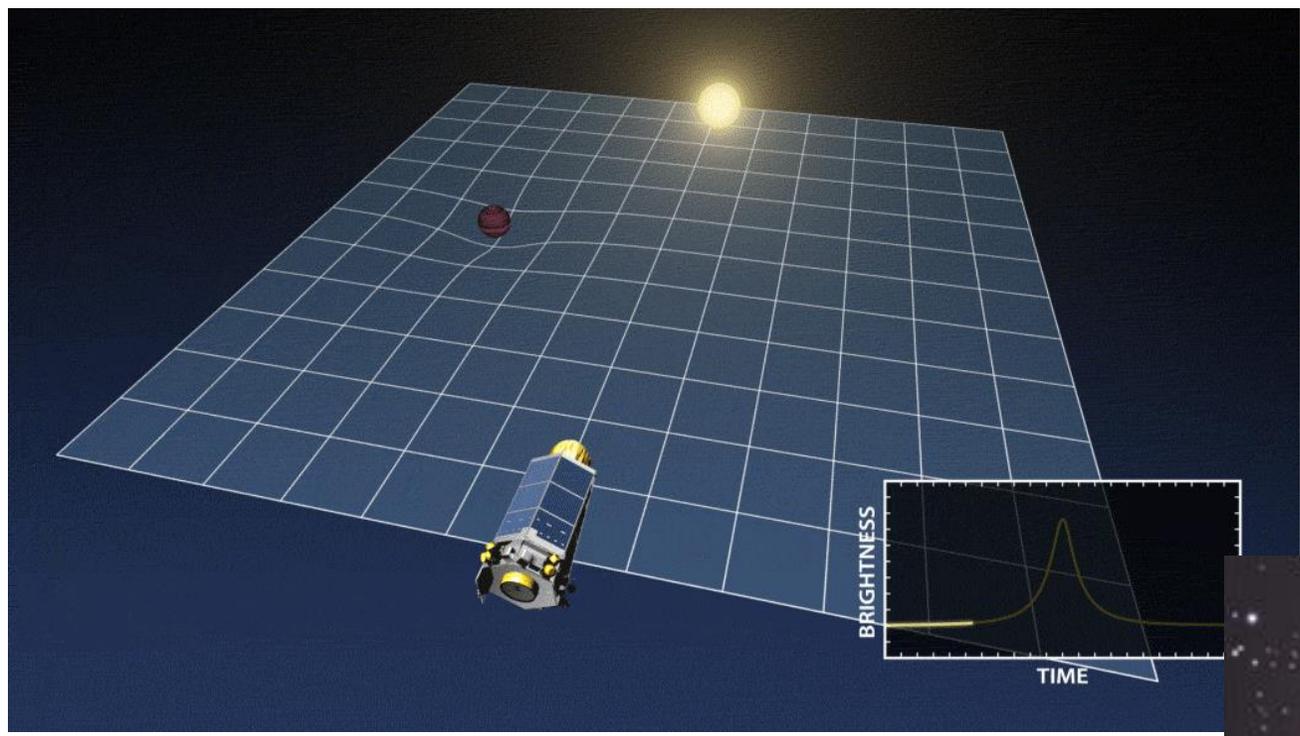
# MICROLENTI GRAVITAZIONALI

## Vantaggi

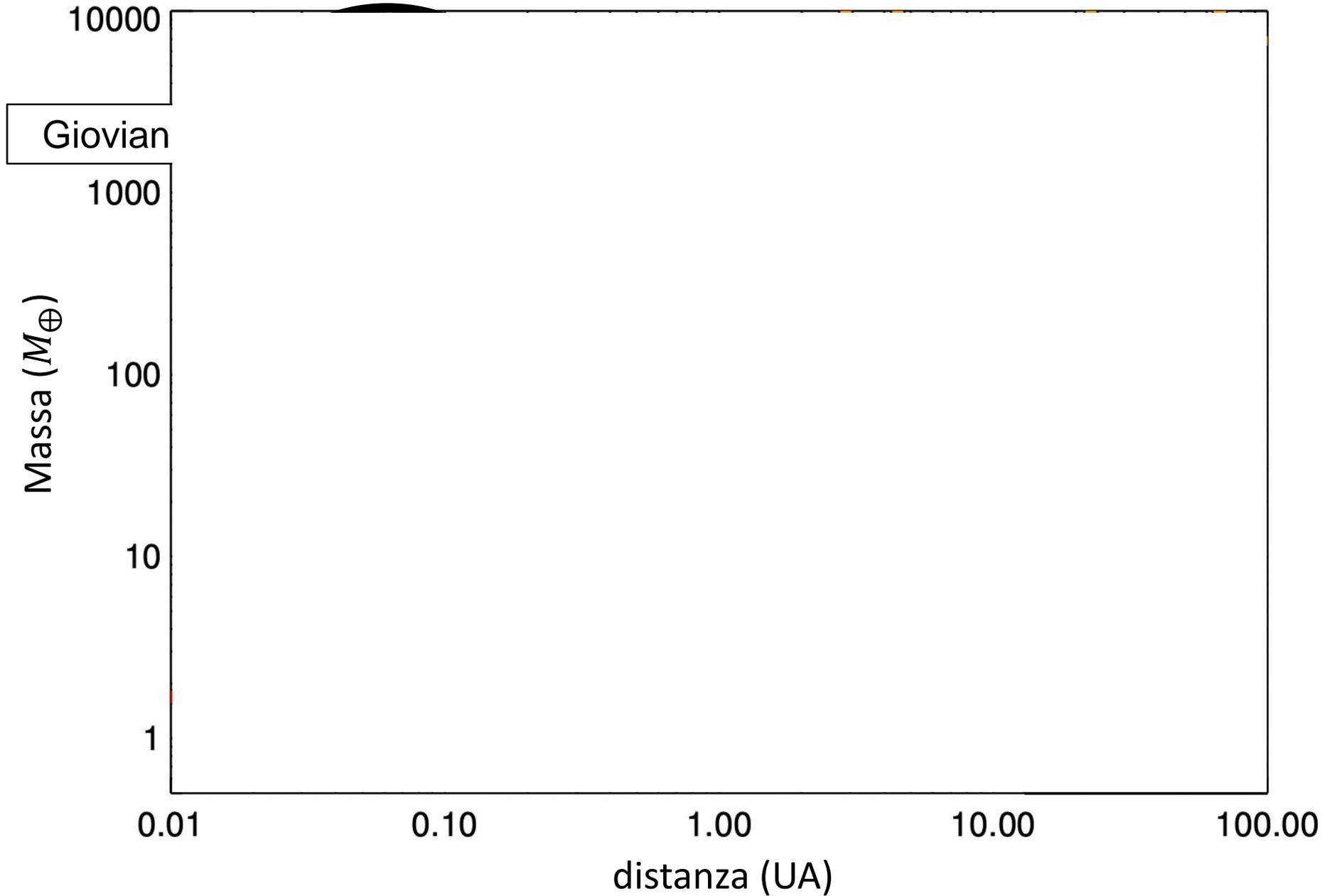
- Possibile rivelare anche pianeti di piccola massa
- Possibile rivelare anche pianeti lontani dalla stella

## Svantaggi

- Difficoltà nel fare osservazioni di follow-up



# POPOLAZIONI DI ESOPIANETI



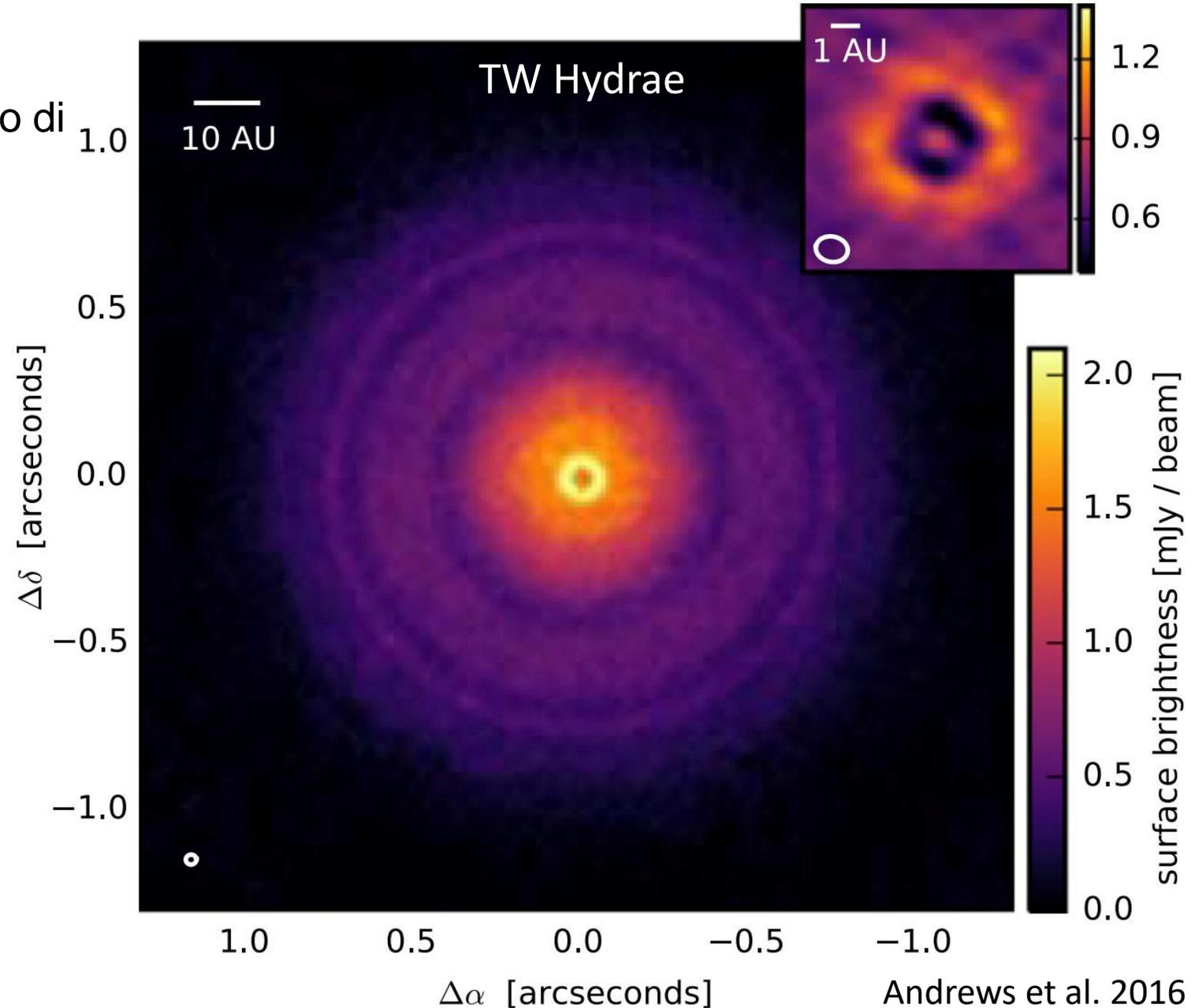
# DISCHI CIRCUMSTELLARI

Le stelle appena nate sono circondate da dischi di polvere e gas, residui del processo di formazione stellare.

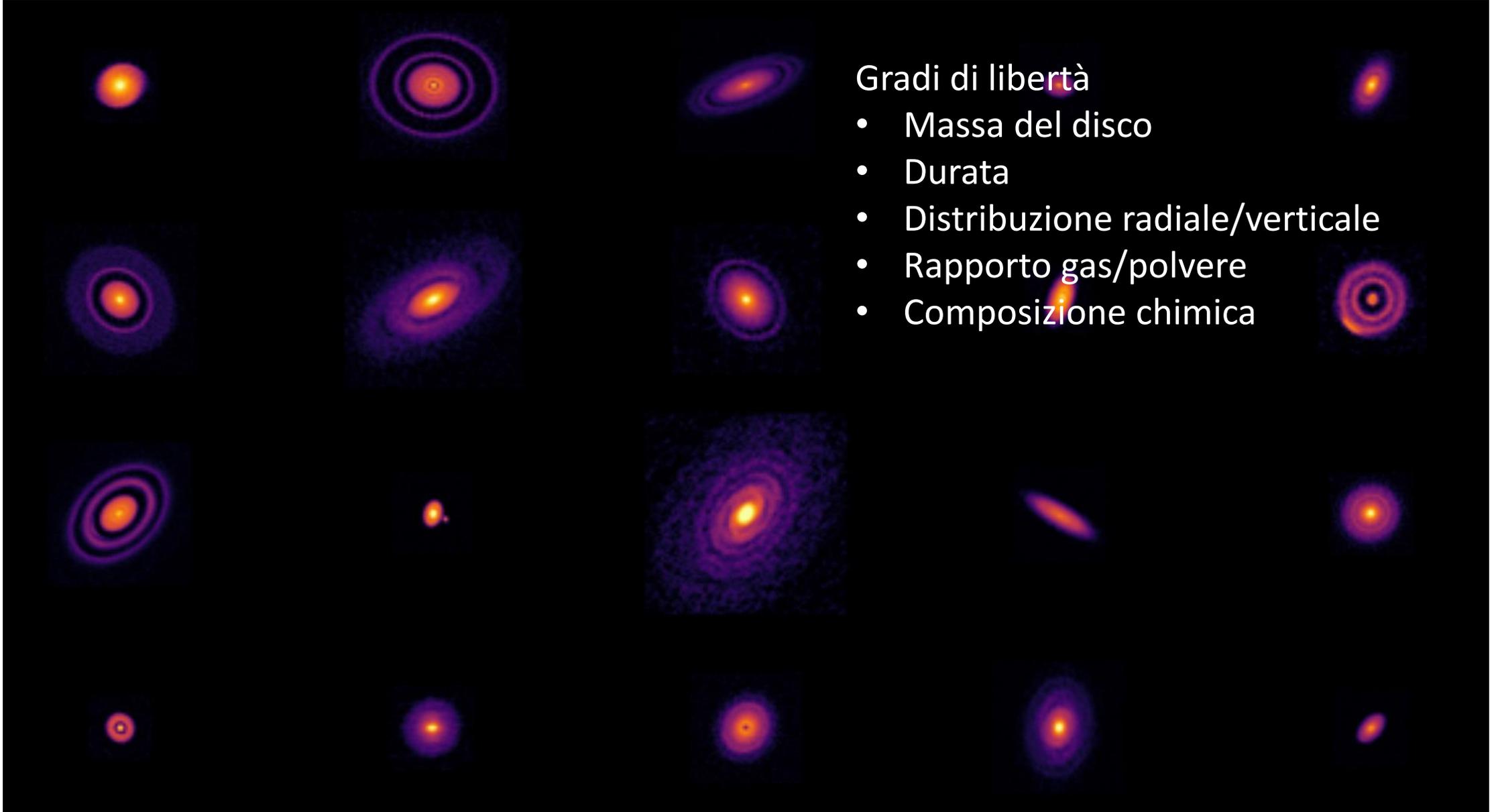
I dischi hanno rotazione kepleriana.

Hanno una vita media breve ( $\sim 1$  Myr).

I pianeti si formano nei dischi.



# DISCHI CIRCUMSTELLARI



## Gradi di libertà

- Massa del disco
- Durata
- Distribuzione radiale/verticale
- Rapporto gas/polvere
- Composizione chimica

# FORMAZIONE DEI PIANETI

Due possibili percorsi:

- Instabilità gravitazionale nel disco (processi top-down)

Deve avvenire su tempi scala brevi

Dovrebbe avvenire preferenzialmente nelle regioni esterne del disco ( $\gtrsim 50$  AU)

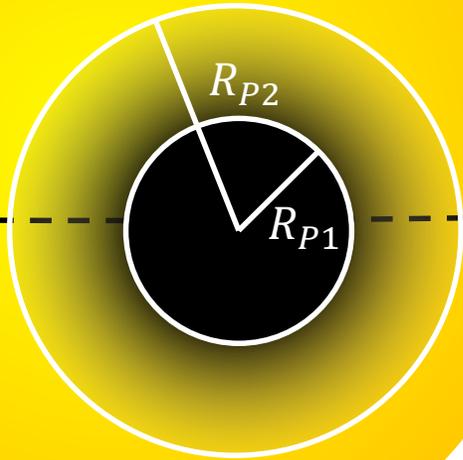
- Aggregazione di particelle (processo bottom-up)

La crescita avviene per collisioni fra particelle che rimangono attaccate

Uno dei pochi sistemi astrofisici che può essere studiato in laboratorio

# STUDIO DELLE ATMOSFERE DEGLI ESOPIANETI

Se il pianeta ha un'atmosfera:



$R_P \rightarrow$  funzione di  $\lambda$

$$\frac{\Delta f}{f} \propto R_P^2 \rightarrow \text{funzione di } \lambda$$

Studiando come cambia  $\frac{\Delta f}{f}$  alle diverse lunghezze d'onda si possono ottenere informazioni su:

- proprietà fisiche
- composizione chimica

dell'atmosfera del pianeta.