

# Exoti

## Planety u jiných sluncí

Marie Hrudková

Astronomický Ústav UK, Praha

## Jaké jsou?

- Očekávané

## Jaké jsou?

- Očekávané
  - Strand, Van de Kamp (20. století) – chybná astrometrická měření  $\Rightarrow$  falešné objevy

## Jaké jsou?

- Očekávané
  - Strand, Van de Kamp (20. století) – chybná astrometrická měření  $\Rightarrow$  falešné objevy
- Nečekané

## Jaké jsou?

- Očekávané
  - Strand, Van de Kamp (20. století) – chybná astrometrická měření  $\Rightarrow$  falešné objevy
- Nečekané
  - Wolszczan & Frail (1991) – detekce 1. exoplanety u pulsaru PSR 1257+12

## Jaké jsou?

- Očekávané
  - Strand, Van de Kamp (20. století) – chybná astrometrická měření  $\Rightarrow$  falešné objevy
- Nečekané
  - Wolszczan & Frail (1991) – detekce 1. exoplanety u pulsaru PSR 1257+12
  - Mayor & Queloz (1995): detekce první extrasolární planety u hvězdy podobné Slunci 51 Peg

## Jaké jsou?

- Očekávané
  - Strand, Van de Kamp (20. století) – chybná astrometrická měření  $\Rightarrow$  falešné objevy
- Nečekané
  - Wolszczan & Frail (1991) – detekce 1. exoplanety u pulsaru PSR 1257+12
  - Mayor & Queloz (1995): detekce první extrasolární planety u hvězdy podobné Slunci 51 Peg
- Překvapující

## Jaké jsou?

- Očekávané
  - Strand, Van de Kamp (20. století) – chybná astrometrická měření  $\Rightarrow$  falešné objevy
- Nečekané
  - Wolszczan & Frail (1991) – detekce 1. exoplanety u pulsaru PSR 1257+12
  - Mayor & Queloz (1995): detekce první extrasolární planety u hvězdy podobné Slunci 51 Peg
- Překvapující
  - 51 Peg b: planeta ve vzdálenosti 0,052 AU s periodou 4,23 dne  $\Rightarrow$  první “horký Jupiter”!

## Jaké jsou?

- Očekávané
  - Strand, Van de Kamp (20. století) – chybná astrometrická měření  $\Rightarrow$  falešné objevy
- Nečekané
  - Wolszczan & Frail (1991) – detekce 1. exoplanety u pulsaru PSR 1257+12
  - Mayor & Queloz (1995): detekce první extrasolární planety u hvězdy podobné Slunci 51 Peg
- Překvapující
  - 51 Peg b: planeta ve vzdálenosti 0,052 AU s periodou 4,23 dne  $\Rightarrow$  první “horký Jupiter”!
- Běžné

## Jaké jsou doopravdy?

- <http://exoplanet.eu/>
- 347 exoplanet v 294 exoplanetárních systémech
- 30 %  $P < 10$  days &  $a < 0.1$  AU  $\Leftrightarrow$  “horcí Jupiteri”

## Jaké jsou doopravdy?

- <http://exoplanet.eu/>
- 347 exoplanet v 294 exoplanetárních systémech
- 30 %  $P < 10$  days &  $a < 0.1$  AU  $\Leftrightarrow$  “horcí Jupiteri”
- bylo nezbytné najít teorie formace
  - vznik hvězdy a disku z gravitační zhuštění

## Jaké jsou doopravdy?

- <http://exoplanet.eu/>
- 347 exoplanet v 294 exoplanetárních systémech
- 30 %  $P < 10$  days &  $a < 0.1$  AU  $\Leftrightarrow$  “horcí Jupiteri”
- bylo nezbytné najít teorie formace
  - vznik hvězdy a disku z gravitační zhuštění
  - teorie akrece jader
  - teorie gravitační nestability disku

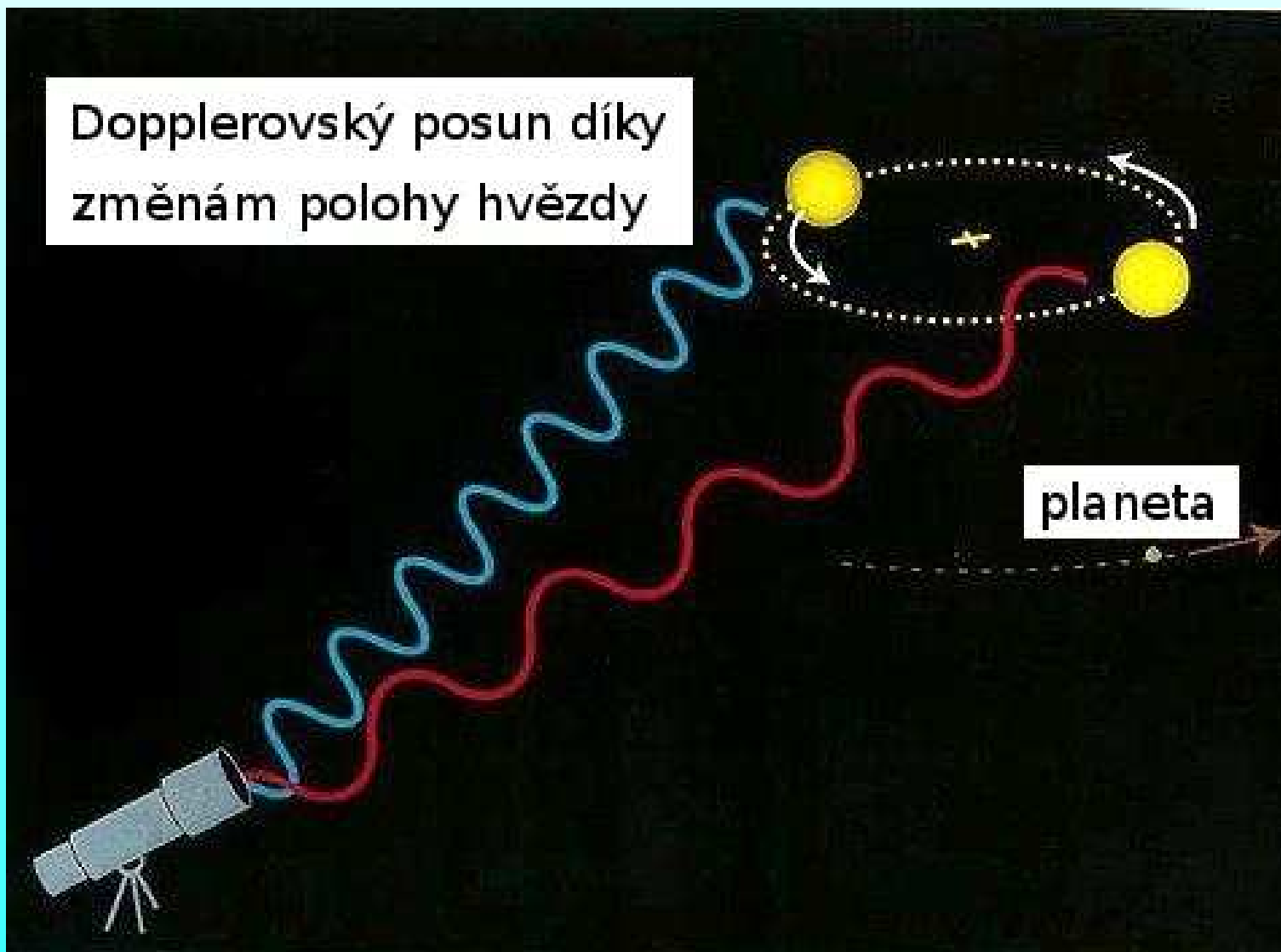
## Jaké jsou doopravdy?

- <http://exoplanet.eu/>
- 347 exoplanet v 294 exoplanetárních systémech
- 30 %  $P < 10$  days &  $a < 0.1$  AU  $\Leftrightarrow$  “horcí Jupiteri”
- bylo nezbytné najít teorie formace
  - vznik hvězdy a disku z gravitační zhuštění
  - teorie akrece jader
  - teorie gravitační nestability disku
- × ani jedna nevysvětluje blízkost planety ke hvězdě!

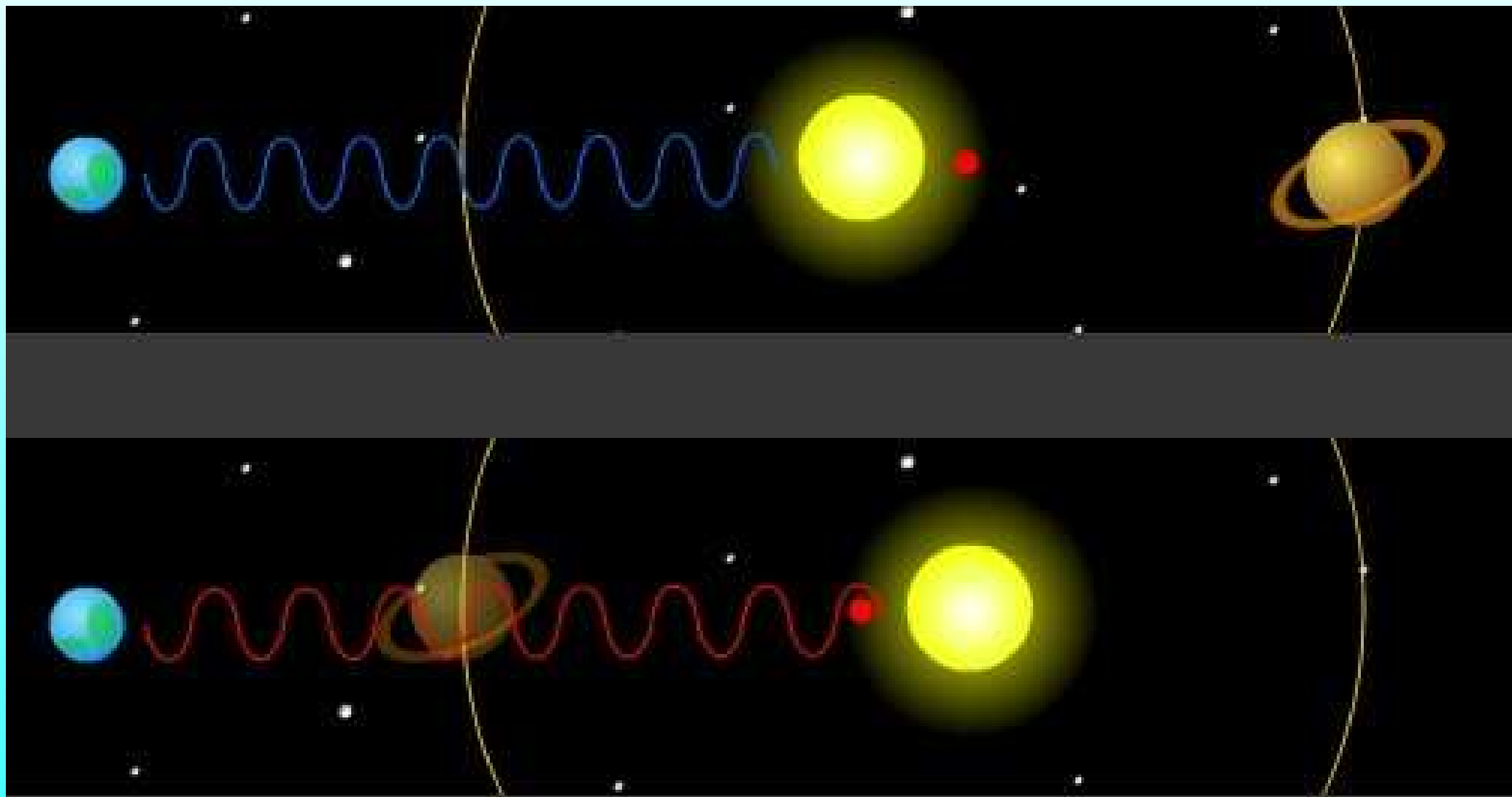
## Jaké jsou doopravdy?

- <http://exoplanet.eu/>
- 347 exoplanet v 294 exoplanetárních systémech
- 30 %  $P < 10$  days &  $a < 0.1$  AU  $\Leftrightarrow$  “horcí Jupiteri”
- bylo nezbytné najít teorie formace
  - vznik hvězdy a disku z gravitační zhuštění
  - teorie akrece jader
  - teorie gravitační nestability disku
- $\times$  ani jedna nevysvětluje blízkost planety ke hvězdě!
- $\Rightarrow$  planetární migrace

## Jak je najít? – Měření radiálních rychlostí



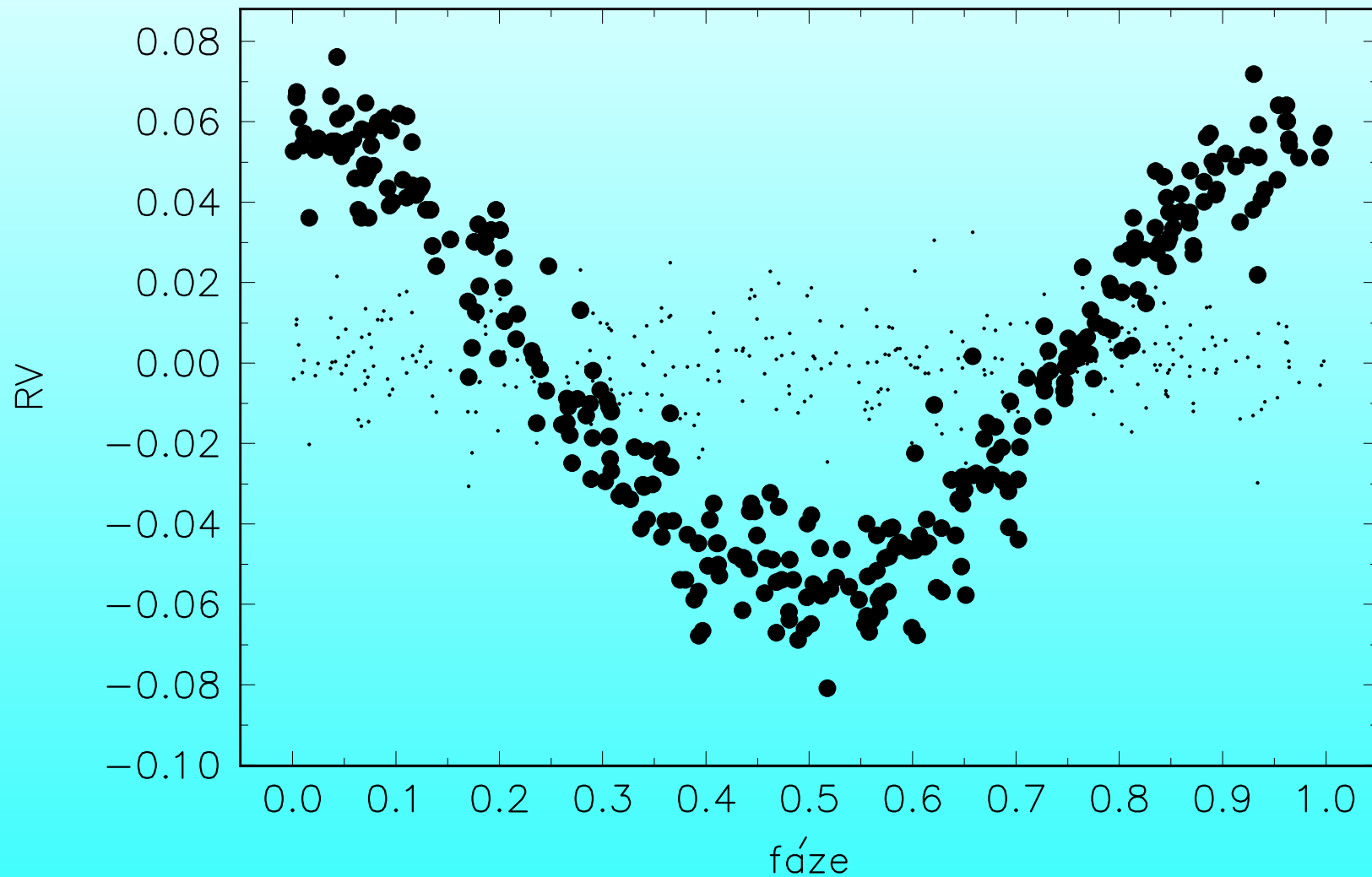
# Měření radiálních rychlostí



# Měření radiálních rychlostí



# Měření radiálních rychlostí – křivka 51 Pegasi



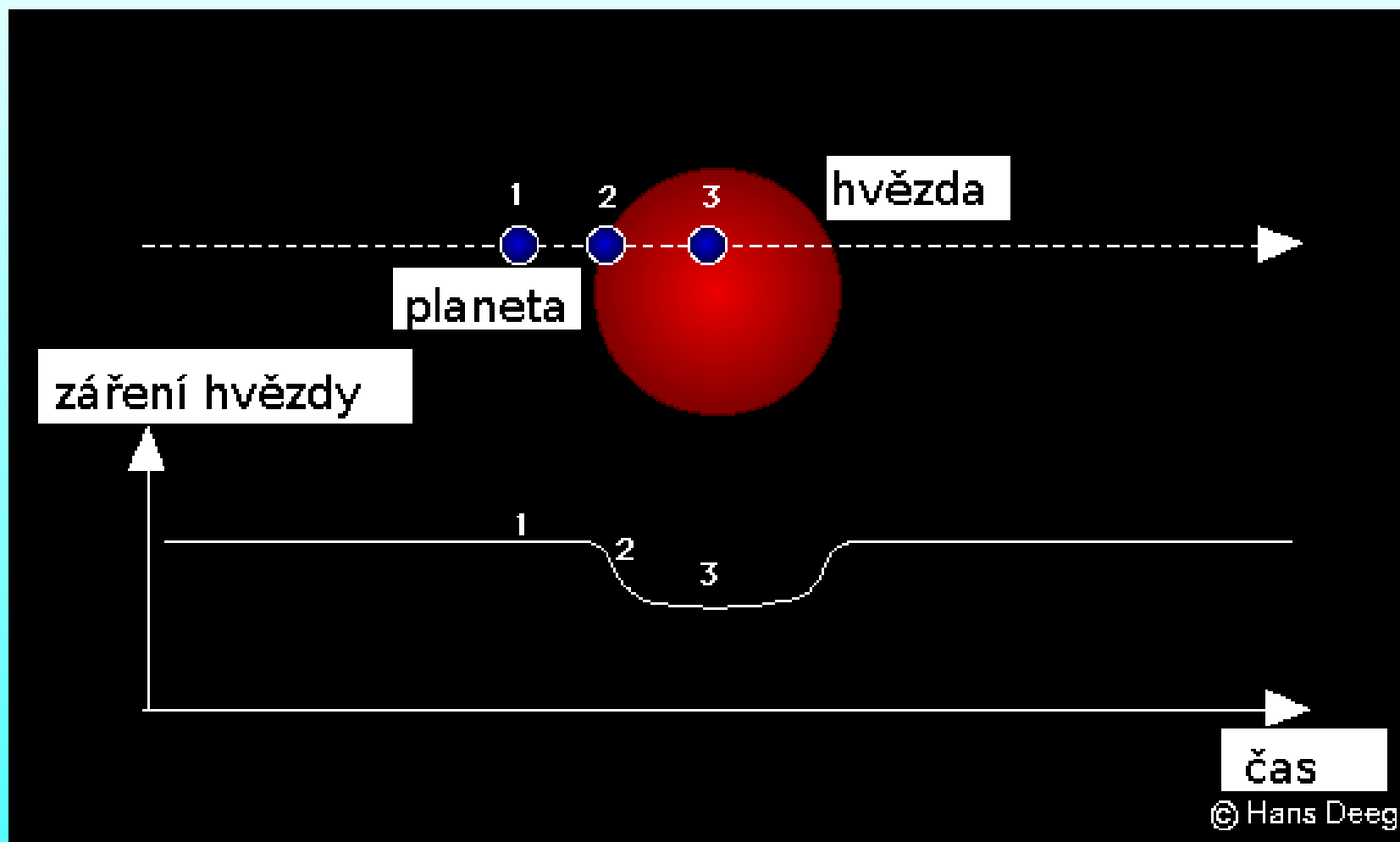
## Měření radiálních rychlostí

- měření Dopplerova posuvu čar ve spektru hvězdy

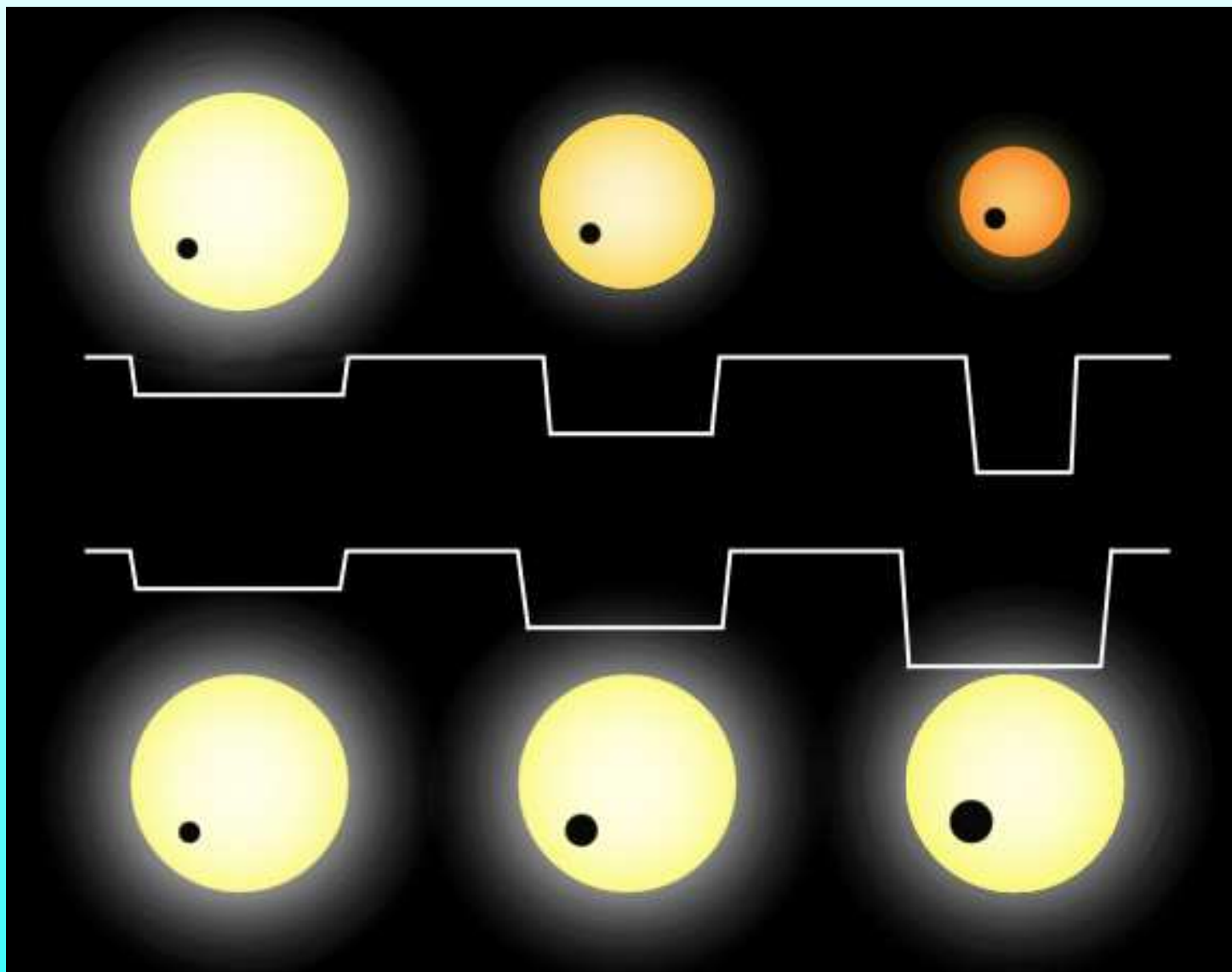
$$K = \left( \frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_p + M_*)^{2/3}} \frac{1}{(1 - e^2)^{1/2}}$$

- $K = 12,5 \text{ m s}^{-1}$  pro Jupiter obíhající kolem Slunce,  
 $K = 0,1 \text{ m s}^{-1}$  pro Zemi ( $K =$  amplituda křivky)
- pouze dolní odhad hmotnosti planety  $M_p \sin i$ , ne přímo  $M_p$  (sklon obecně neznámý)
- systémy s hmotnými planetami a krátkými periodami
- HARPS – přesnosti  $\sim 1 \text{ m s}^{-1}$
- HARPS-NEF – přesnosti  $\pm 5 \text{ cm s}^{-1}$ !!!

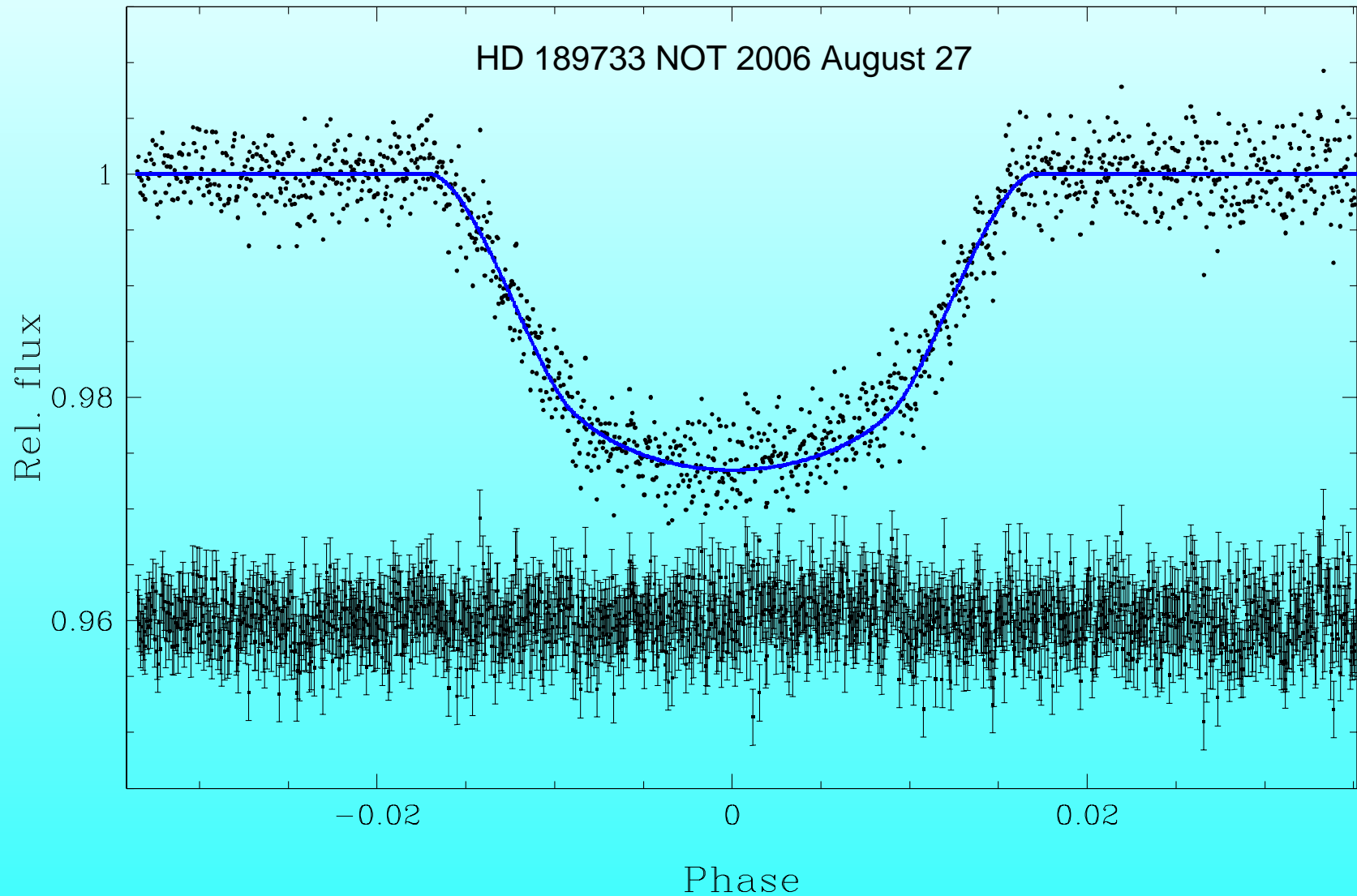
# Tranzitující exoplanety



# Tranzitující exoplanety



# Tranzitující exoplanety



## Tranzitující exoplanety – Proč jsou důležité?

---

- z geometrie tranzitu určíme  $i$ ,  $\frac{R_p}{R_\star} \sim$  hloubce zákrytu  
 $\Rightarrow$  lze určit spolehlivě  $R_p$  a  $R_\star$ , pokud máme křivku s přesností  $\sim$  mmag a lepší

## Tranzitující exoplanety – Proč jsou důležité?

---

- z geometrie tranzitu určíme  $i$ ,  $\frac{R_p}{R_\star} \sim$  hloubce zákrytu  
 $\Rightarrow$  lze určit spolehlivě  $R_p$  a  $R_\star$ , pokud máme křivku s přesností  $\sim$  mmag a lepší
- nedostatečná fotometrická přesnost & systematické chyby (atmosféra, detektor, ...)  
 $\Rightarrow$  degenerace parametrů  $\frac{R_\star}{R_p}$  a  $i$

## Tranzitující exoplanety – Proč jsou důležité?

- z geometrie tranzitu určíme  $i$ ,  $\frac{R_p}{R_\star} \sim$  hloubce zákrytu  
 $\Rightarrow$  lze určit spolehlivě  $R_p$  a  $R_\star$ , pokud máme křivku s přesností  $\sim$  mmag a lepší
- nedostatečná fotometrická přesnost & systematické chyby (atmosféra, detektor, ...)  
 $\Rightarrow$  degenerace parametrů  $\frac{R_\star}{R_p}$  a  $i$
- Řešení:
  - lepší výběr redukční metody
  - pozorování z vesmíru  
(HD 189733 HST – přesnost  $\sim 60 \mu\text{mag}$ )

## Tranzitující exoplanety – Proč jsou důležité?

---

- z geometrie tranzitu určíme  $i$ ,  $\frac{R_p}{R_\star} \sim$  hloubce zákrytu  
 $\Rightarrow$  lze určit spolehlivě  $R_p$  a  $R_\star$ , pokud máme křivku s přesností  $\sim$  mmag a lepší

## Tranzitující exoplanety – Proč jsou důležité?

---

- z geometrie tranzitu určíme  $i$ ,  $\frac{R_p}{R_\star} \sim$  hloubce zákrytu  
 $\Rightarrow$  lze určit spolehlivě  $R_p$  a  $R_\star$ , pokud máme křivku s přesností  $\sim$  mmag a lepší
- další informace: ze spektra  
Dle odhadu  $M_\star$  a znalosti  $i$  dostaneme  $M_p$

## Tranzitující exoplanety – Proč jsou důležité?

---

- z geometrie tranzitu určíme  $i$ ,  $\frac{R_p}{R_\star} \sim$  hloubce zákrytu  
 $\Rightarrow$  lze určit spolehlivě  $R_p$  a  $R_\star$ , pokud máme křivku s přesností  $\sim$  mmag a lepší
- další informace: ze spektra  
Dle odhadu  $M_\star$  a znalosti  $i$  dostaneme  $M_p$   
 $\Rightarrow$  vztah hmotnost–poloměr

## Tranzitující exoplanety – Proč jsou důležité?

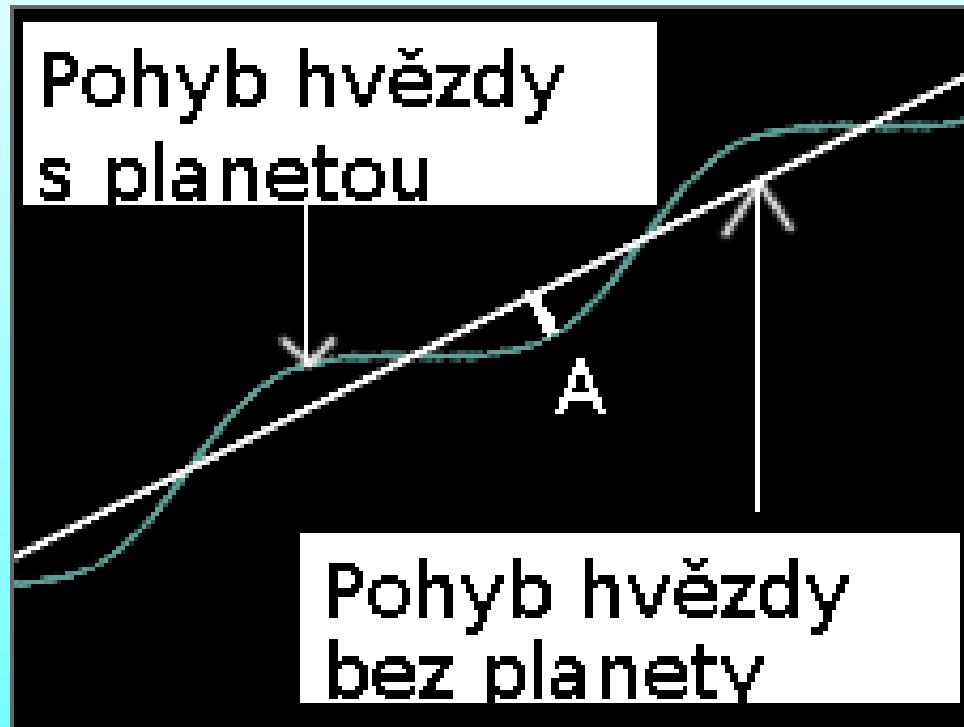
- z geometrie tranzitu určíme  $i$ ,  $\frac{R_p}{R_\star} \sim$  hloubce zákrytu  
 $\Rightarrow$  lze určit spolehlivě  $R_p$  a  $R_\star$ , pokud máme křivku s přesností  $\sim$  mmag a lepší
- další informace: ze spektra  
Dle odhadu  $M_\star$  a znalosti  $i$  dostaneme  $M_p$   
 $\Rightarrow$  vztah hmotnost–poloměr

detekce případných dalších těles v planetárních systémech s tranzitující exoplanetou ze změn očekávaných dob zákrytů

## Tranzitující exoplanety – Proč jsou důležité?

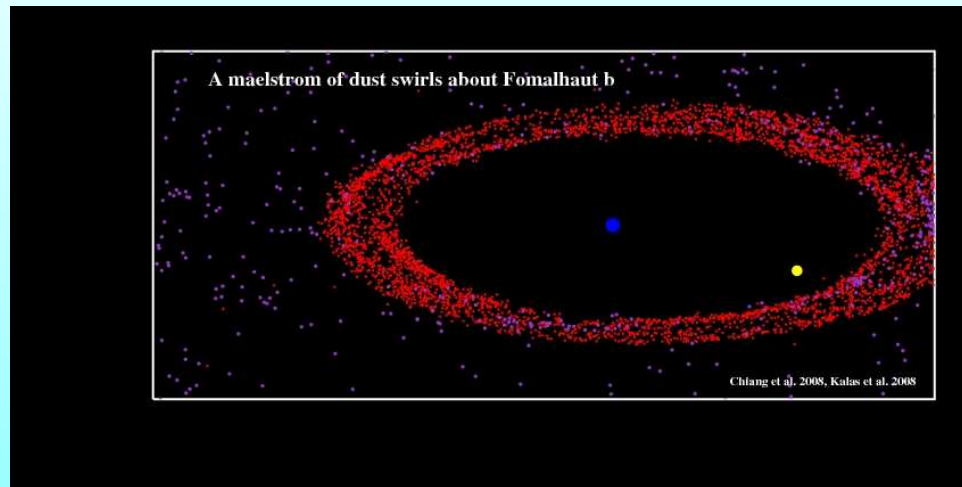
- z geometrie tranzitu určíme  $i$ ,  $\frac{R_p}{R_\star} \sim$  hloubce zákrytu  
 $\Rightarrow$  lze určit spolehlivě  $R_p$  a  $R_\star$ , pokud máme křivku s přesností  $\sim$  mmag a lepší
  - další informace: ze spektra  
Dle odhadu  $M_\star$  a znalosti  $i$  dostaneme  $M_p$   
 $\Rightarrow$  vztah hmotnost–poloměr
- detekce případných dalších těles v planetárních systémech s tranzitující exoplanetou ze změn očekávaných dob zákrytů
- $\Rightarrow$  zlepšit naše znalosti o vnitřní struktuře, formaci a vývoji extrasolárních planet

# Astrometrie = měření pozice hvězdy na obloze

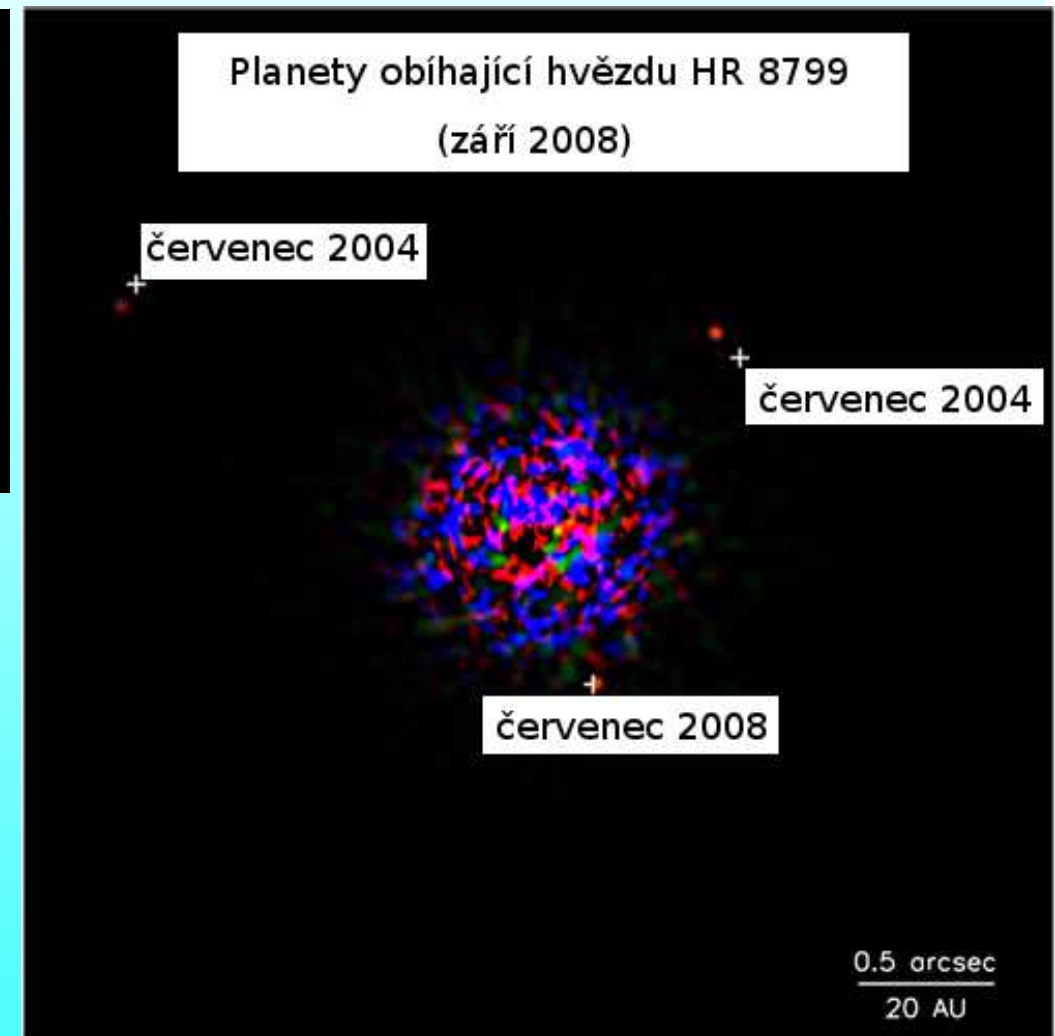


- z 10 pc: pro Jupiter obíhající kolem Slunce amplituda  $A = 500 \mu\text{as}$ , pro Zemi  $A = 0,3 \mu\text{as}$
- dnes přesnosti  $\sim \text{mas}$  (Hipparcos)  
2011 – přesnosti  $\sim \mu\text{as}$  (GAIA)

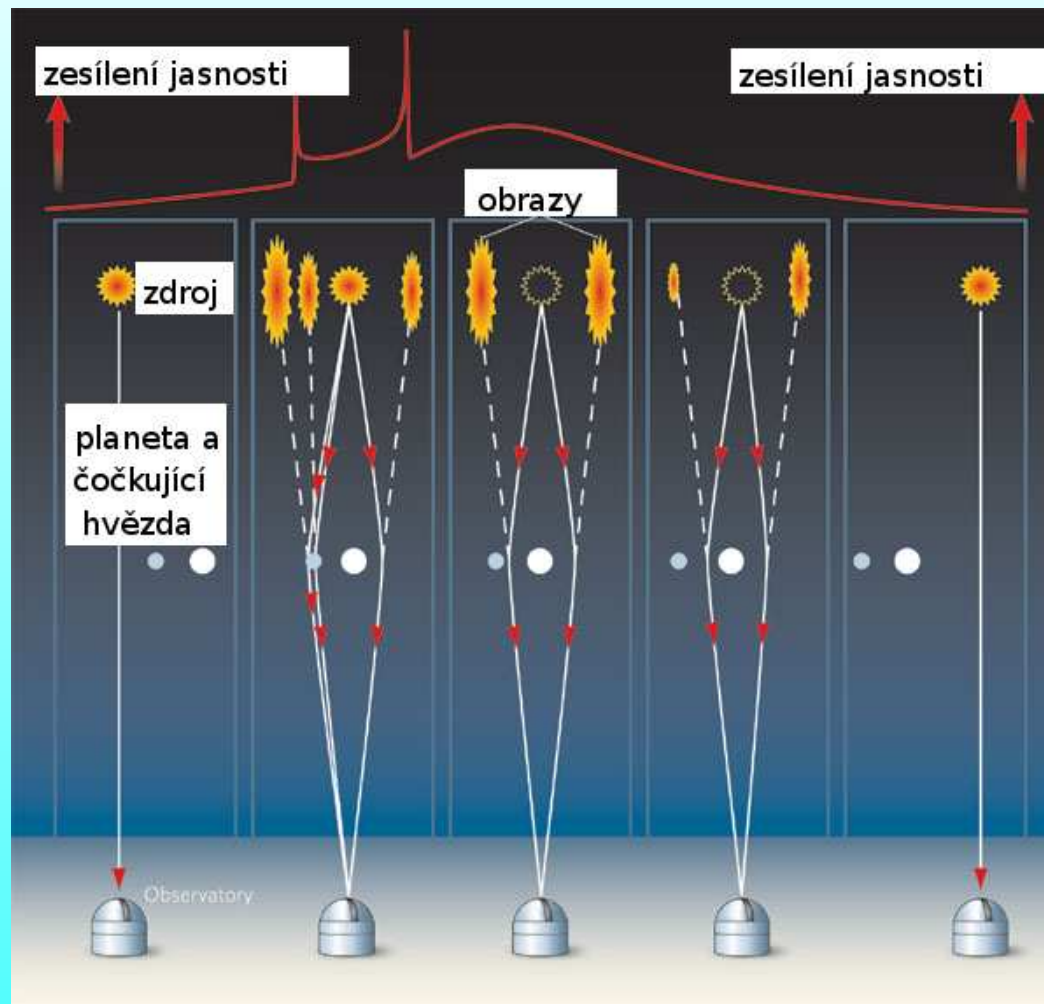
# Přímé zobrazení



- Zář 2008:  
HR 8799  
(Keck, Gemini)  
Fomalhaut (HST)  
 $\beta$  Pic (VLT/NACO)

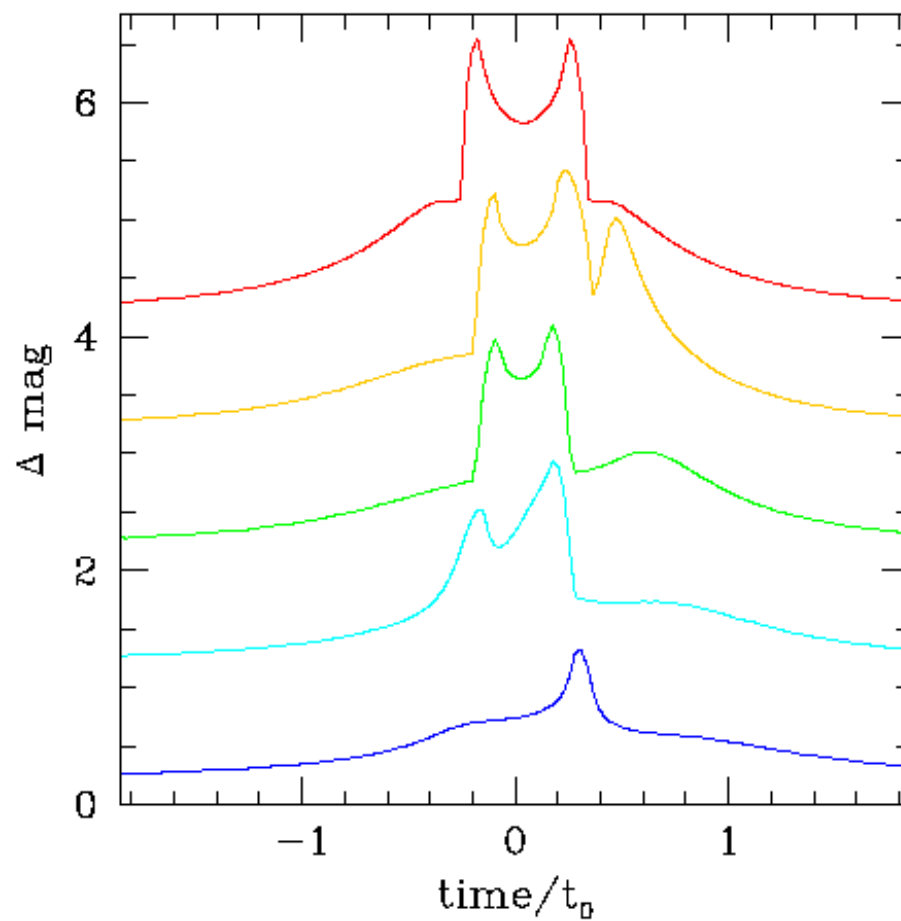
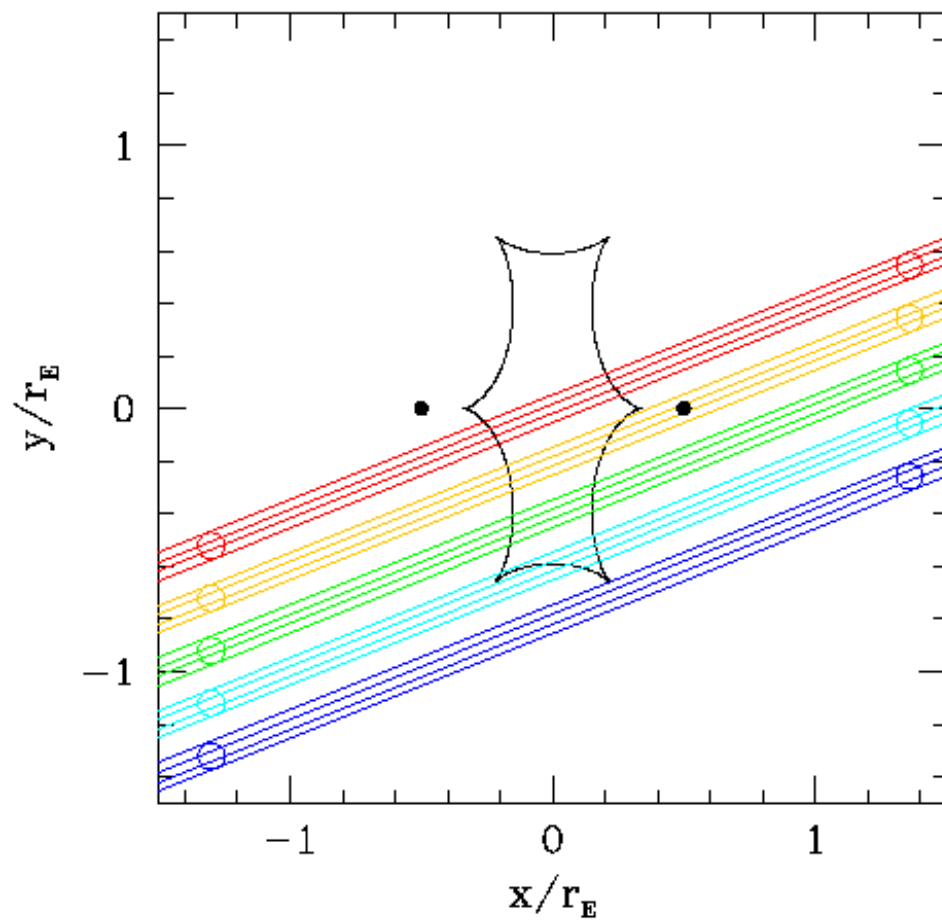


# Gravitační čočkování



- planeta ve světelné křivce zesíleného objektu

# Gravitační čočkování



## Další metody

- Planety u pulsarů
  - 1) planety přežijí výbuch supernovy
  - 2) planety z akrečního disku

## Čím je najít?

<b>Metoda</b>	<b>Pozemské</b>	<b>Družice</b>
Spektroskopie	ELODIE, SOPHIE, CORALIE, HARPS	Spitzer(2003)
Tranzity	SuperWASP, TrES, XO, HATNetwork	MOST (30.6.2003), CoRoT (27.12.2006), Kepler(7.3.2009), GAIA (2011)
Gr. čočky	MACHO, OGLE	
Astrometrie	Keck, VLT	GAIA(2011)
Imaging	ALMA, GEMINI, Keck, VLT	Spitzer (2003), JWST (2013)

# SuperWASP projekt



# Kepler



Mise NASA  
ke hledání planet  
velikosti Země a  
menších

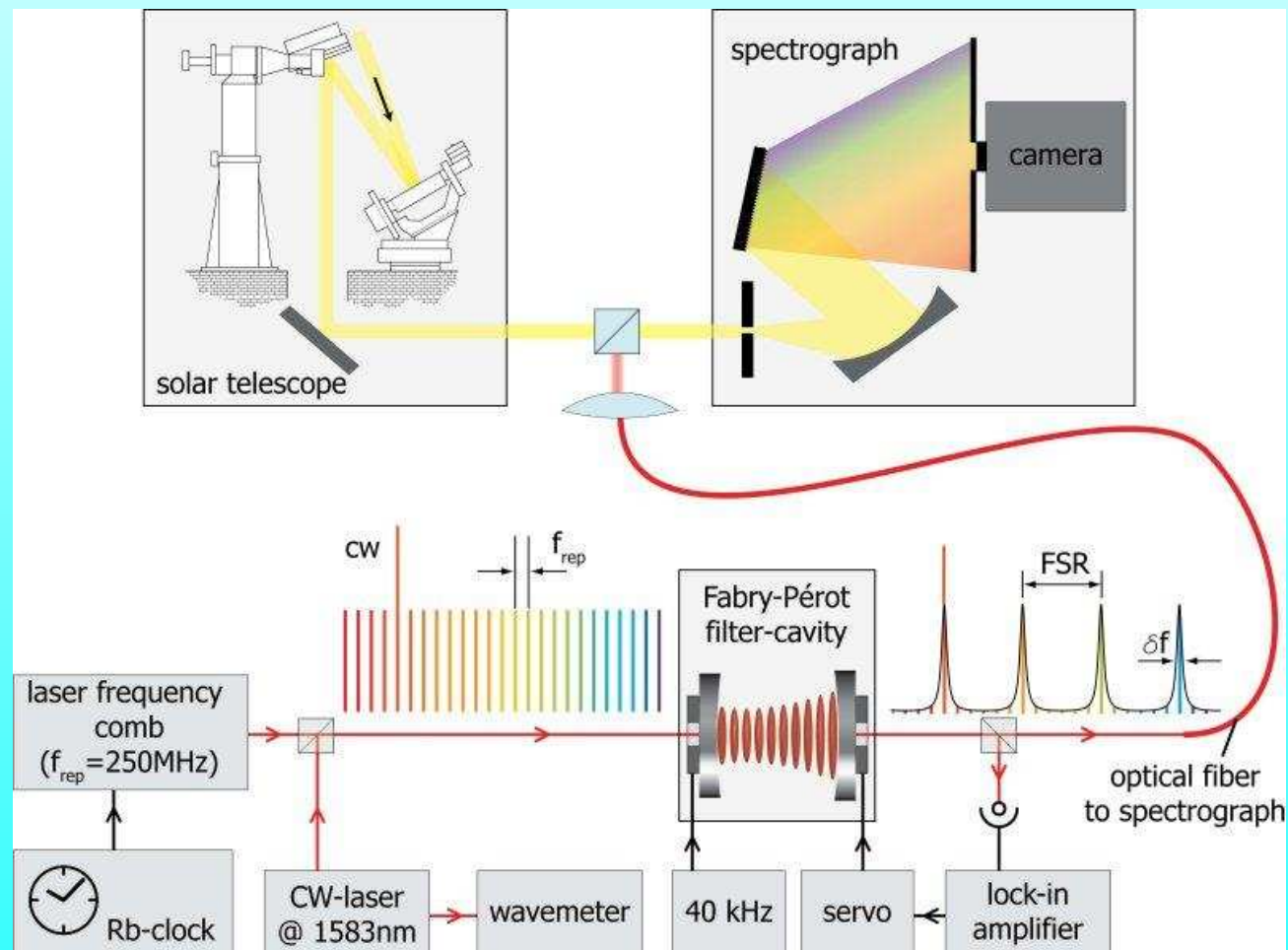
# William Herschel Telescope

---



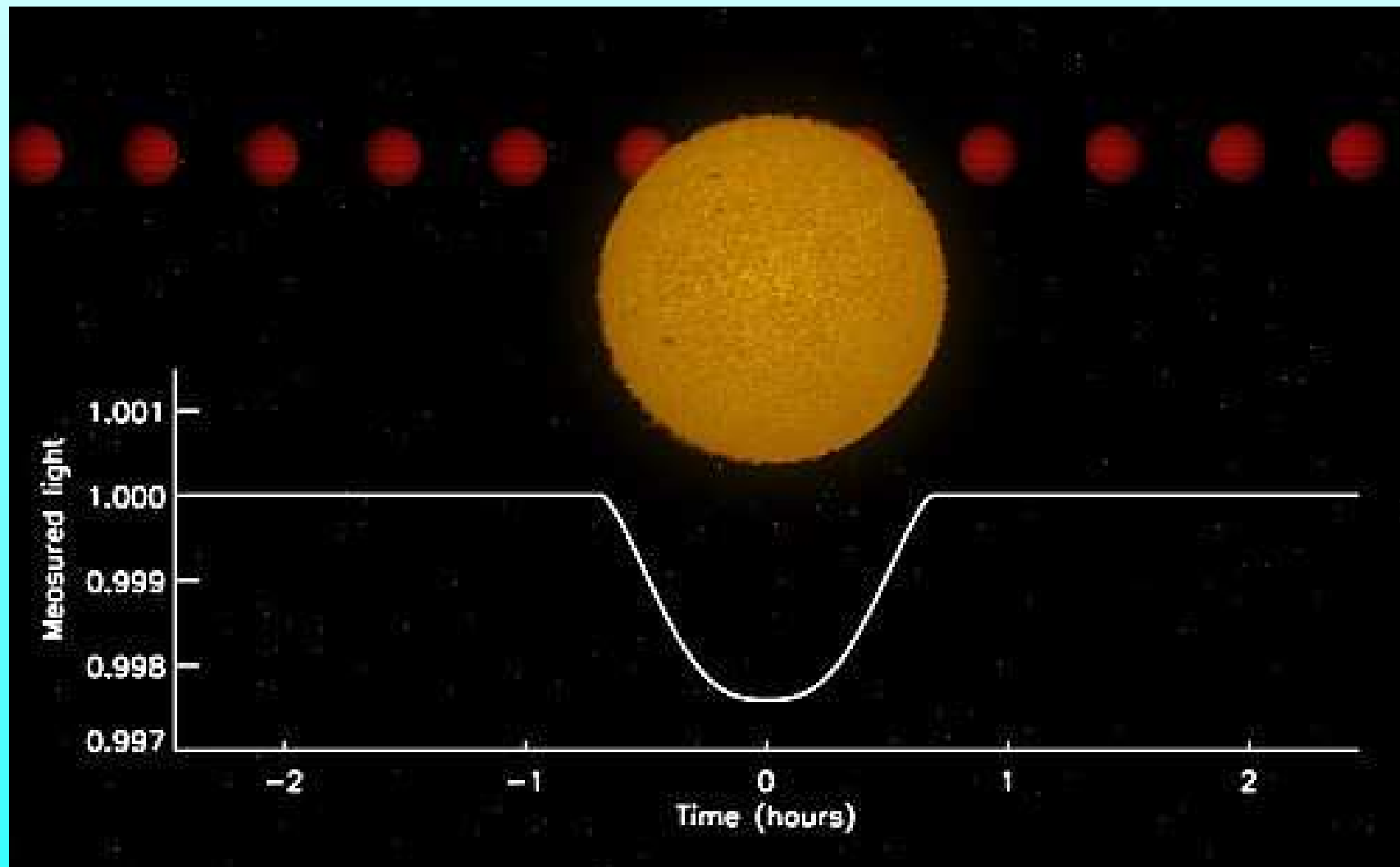
# HARPS-NEF – 2010 WHT

- High-Accuracy Radial-velocity Planet Searcher of the New Earths Facility

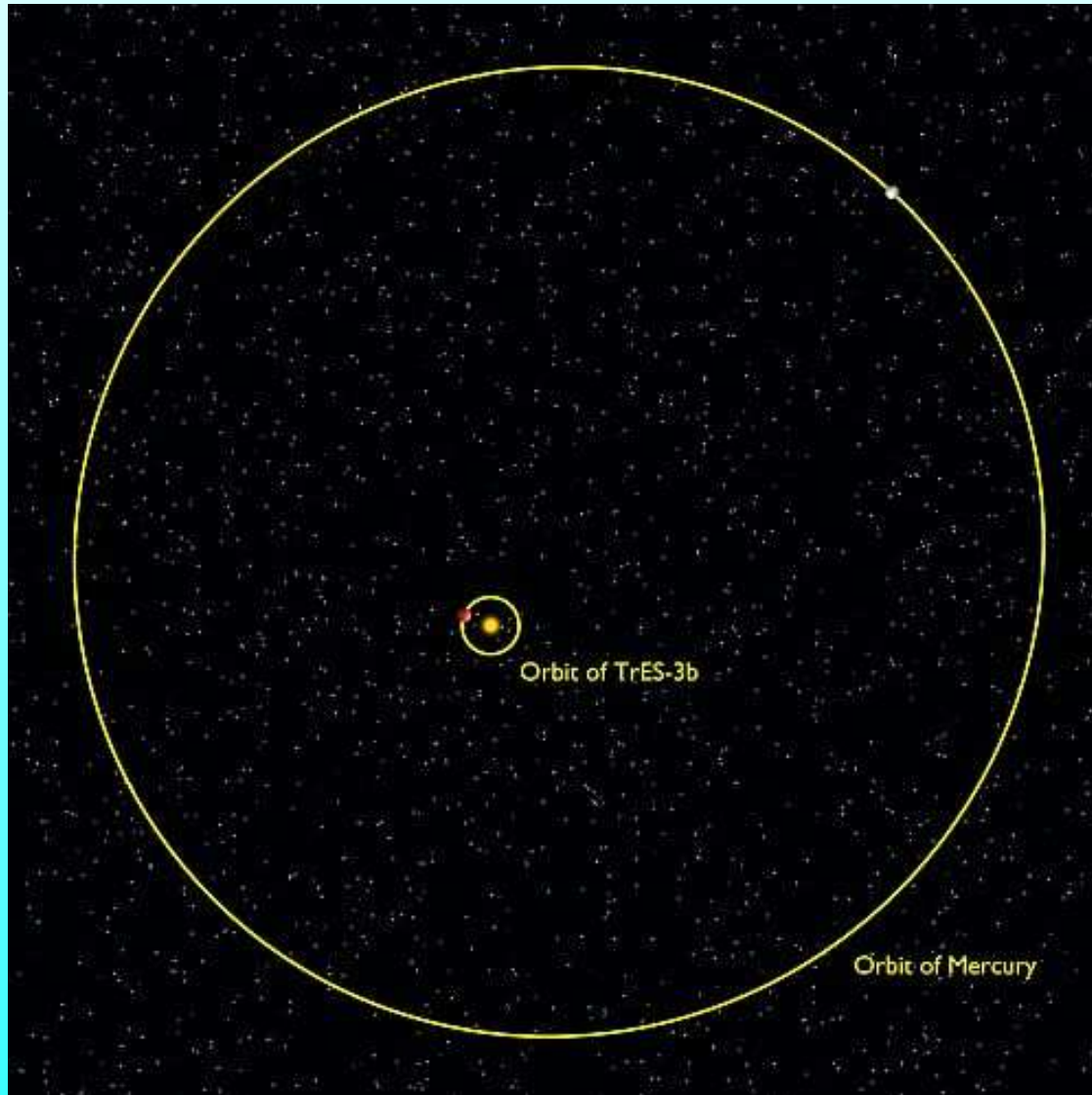


## Detekce atmosfér exoplanet ze Země

- Sekundární zákryt – zákryt planety hvězdou

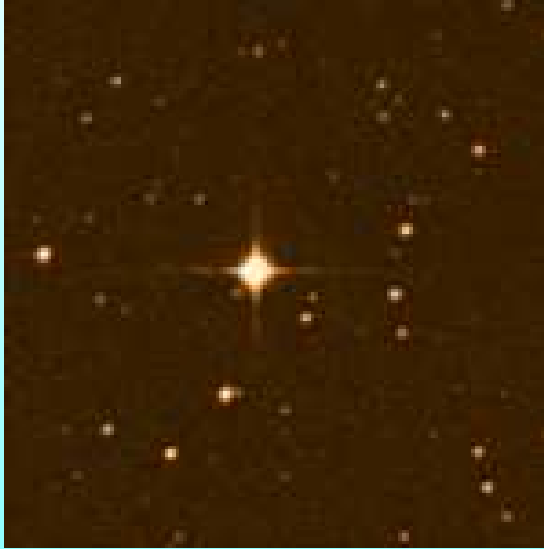


# Detekce atmosfér exoplanet ze Země



- TrES-3
  - WHT a UKIRT
  - De Mooij & Snellen
  - near-IR
- OGLE-TR-56
  - VLT a Magellan
  - Sing & López-Morales
  - z-band
- inverzní vrstva v atmosféře

## Gl 581



- Mayor a kol. oznámili v dubnu 2009 objev nejméně hmotné exoplanety u Slunci podobné hvězdy
- hmotnost  $\sim 2$  hmotnosti Země
- $P \sim 3$  dny
- lehčí jen planeta PSR 1257+12 b u pulsaru
- + zpřesněna dráha planety Gl 581 d nacházející se v obyvatelné zóně

# CoRoT



- CONvection, ROTation & planetary Transits
- start 27. prosinec 2006
- celkem 7 exoplanet
- CoRoT-7 b
  - exoplaneta s nejmenším průměrem ( $\sim 2$  Země)
  - hmotnost  $\sim 11$  Zemí
  - oběžná perioda 20 hodin
  - kamenná planeta!

# Život na extrasolárních planetách?

- Obyvatelná zóna

# Život na extrasolárních planetách?

- Obyvatelná zóna
- Co je to život?

# Život na extrasolárních planetách?

- Obyvatelná zóna
- Co je to život?
- Co hledáme?

# Život na extrasolárních planetách?

- Obyvatelná zóna
- Co je to život?
- Co hledáme?
- Jak se zachováme, až to najdeme?

# Život na extrasolárních planetách?

- Obyvatelná zóna
- Co je to život?
- Co hledáme?
- Jak se zachováme, až to najdeme?
- Je vůbec možné najít život?

## A pro ty, co to opravdu zaujalo...

- <http://www.exoplanety.cz/>
- <http://var2.astro.cz/ETD/>
- <http://www.astro.cz/gliese>
- <http://exoplanet.eu/>
- <http://exoplanets.org/>
- <http://www.superwasp.org/>