

# Extrasolare Planeten

Dieter Schmitt  
Max-Planck-Institut für  
Sonnensystemforschung  
Katlenburg-Lindau



Vorlesung  
Einführung in die Physik  
des Sonnensystems  
Uni Göttingen, 26. Mai 2008

# Gliederung

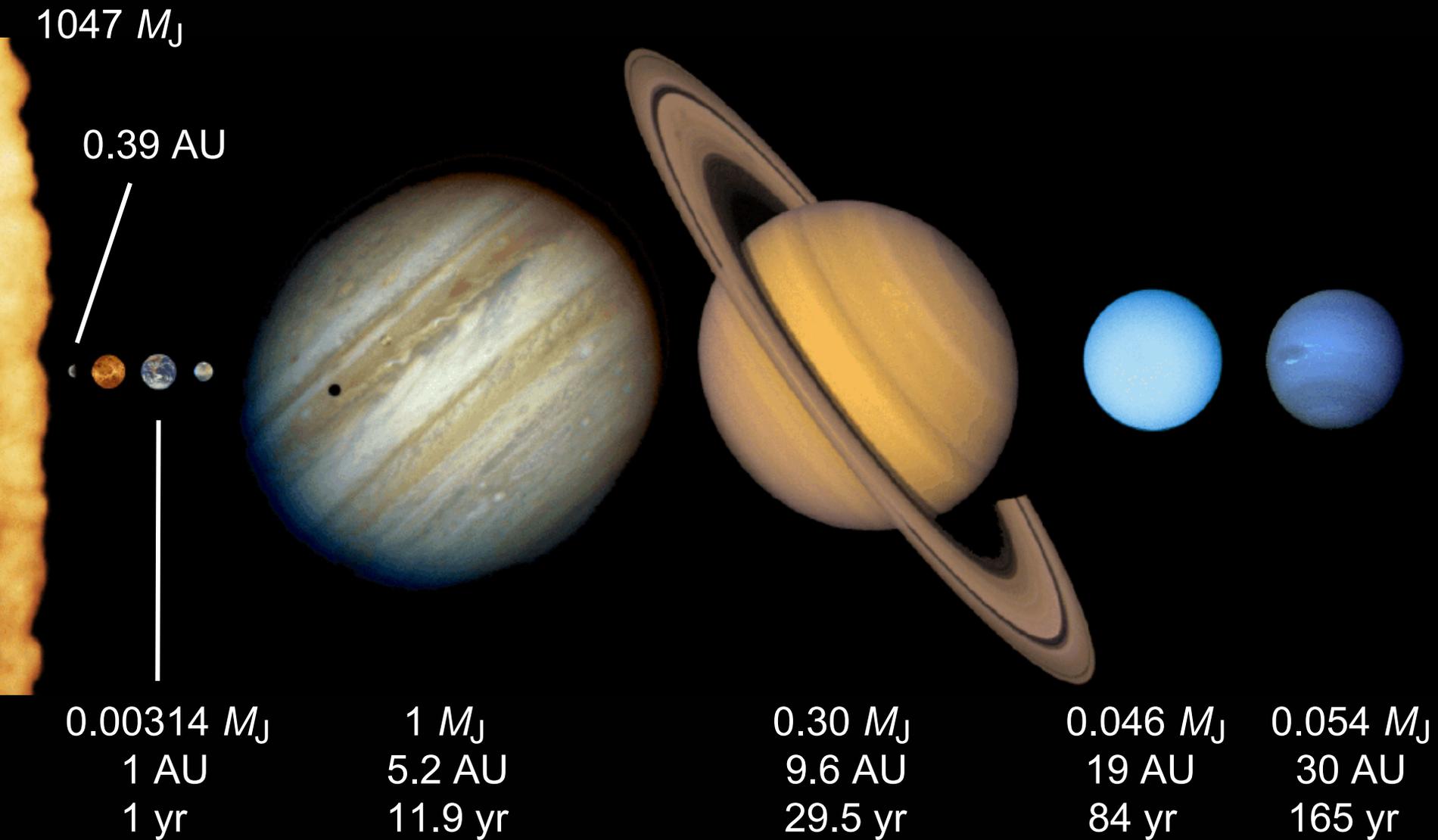


- Historischer Überblick
- Definition Planet
- Detektionsmethoden
- Exoplanetensysteme
- Planeten-Statistik
- Physikalische Eigenschaften
- Habitabilität
- Zukünftige Missionen

# Historischer Überblick

- 1989: Planet / Brauner Zwerg um HD 114762 (Latham et al.)
- 1992: zwei Planeten um Pulsar PSR B1257+12 (Wolszczan & Frail)
- 1995: erster Planet um sonnenähnlichen Stern 51 Peg b (Mayor & Queloz)
- 1999: erstes System mit mehreren (drei) Planeten Ups And (Edgar et al.)
- 2000: erster Planet mit Transitmethode HD 209458 b (Charbonneau et al.)
- 2001: Atmosphäre von HD 209458 b (Charbonneau et al.)
- 2002: Astrometrie angewandt auf Gliese 876 (Benedict et al.)
- 2005: erster Planet per direkter Beobachtung GQ Lupi b (Neuhäuser et al.)
- 2006: erdähnlicher Planet per Mikrogravitationslinseneffekt (Beaulieu et al.)
- 2007: Gliese 581c, bisher kleinster Exoplanet mit ca. 5 Erdmassen (Udri et al.)
- 2007: Gliese 581d, kleiner Exoplanet nahe Habitabilitätszone (Selsis et al.)
- Stand 25. Mai 2008: 293 Exoplaneten in 254 Systemen  
(18 Systeme mit 2 Planeten, 7 mit 3, 1 mit 4 und 1 mit 5)

# Unser Sonnensystem



# Definition Planet

## IAU 2006:

- kreist direkt um Sonne / Stern
- nahezu sphärisch
- Umlaufbahn freigeräumt

## Pluto Kleinplanet, wie Ceres

## Brauner Zwerg:

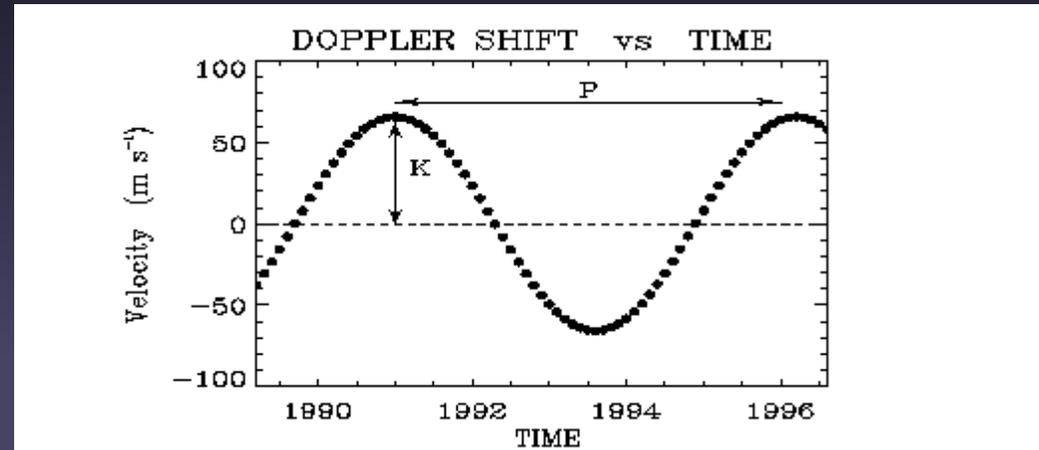
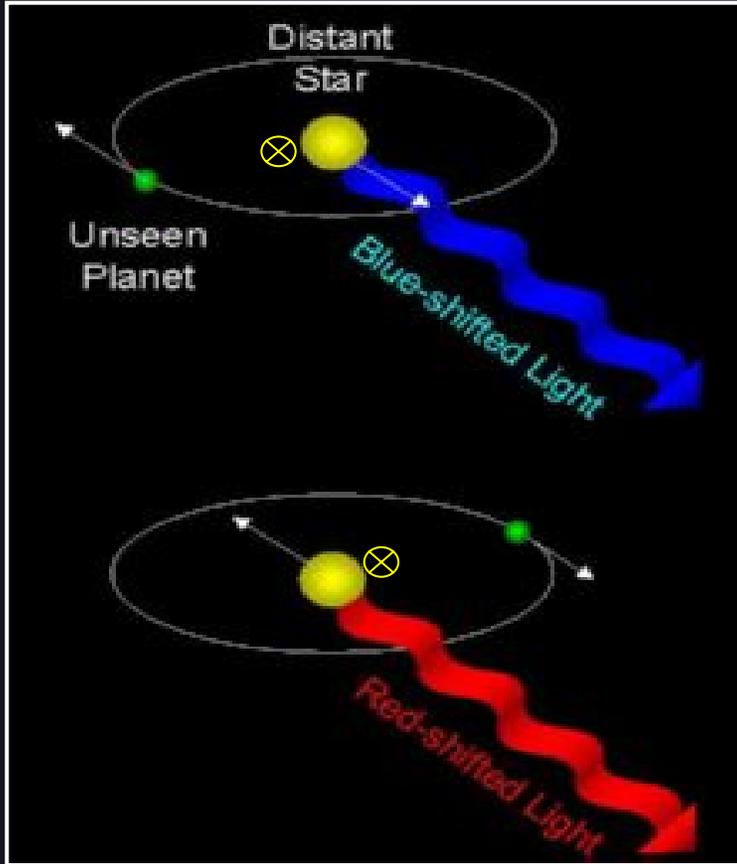
- Masse zwischen  $14 M_J$  und  $80 M_J (= 0.08 M_\odot)$
- voll konvektiv, keine Wasserstofffusion, aber Deuteriumfusion
- darunter Planet, darüber Stern (Roter Zwerg)

# Wie kann man extrasolare Planeten um Hauptreihensterne beobachten?

## Die wichtigsten Methoden:

- Radialgeschwindigkeit
- Astrometrie
- Transit
- Mikrogravitationslensing
- Direkte Abbildung

# Radialgeschwindigkeit

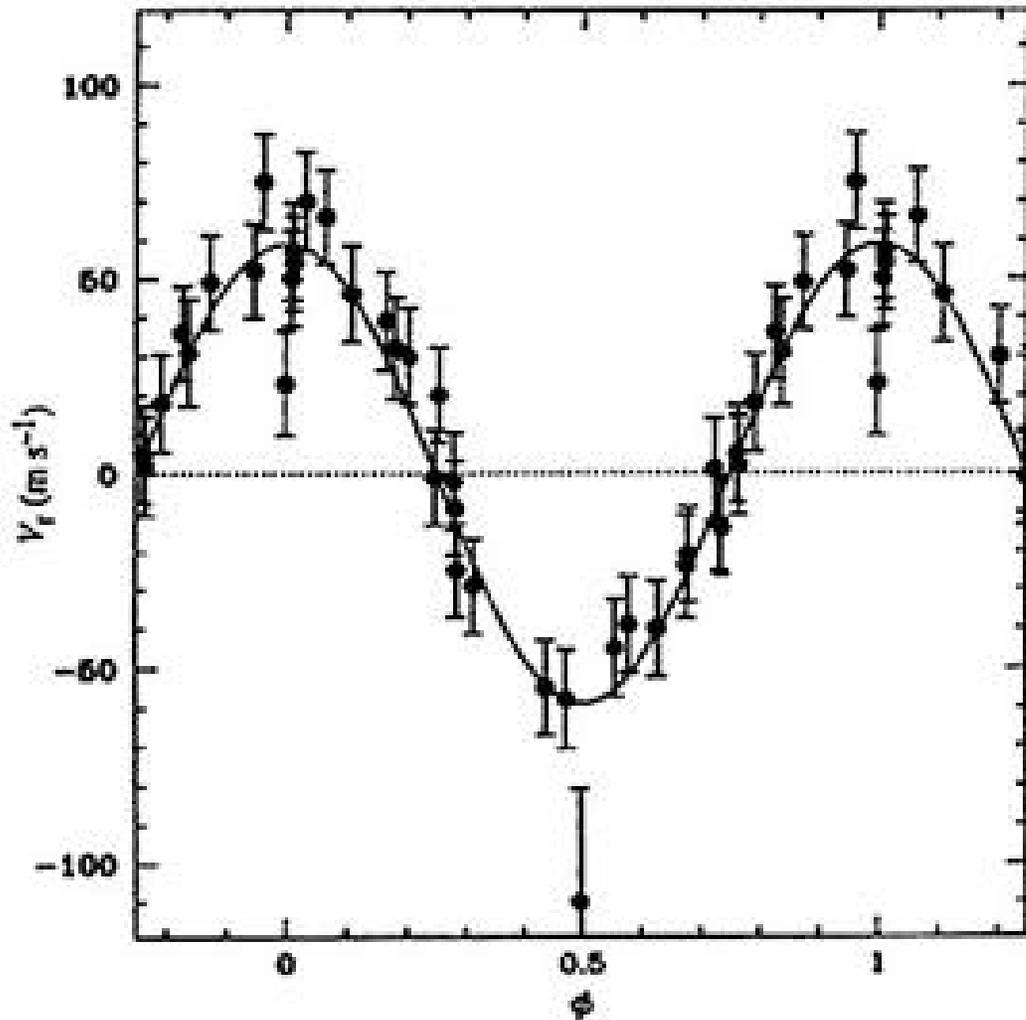


$$\Delta\lambda / \lambda = v_r / c = v_S \sin i / c$$

$$\frac{a_p^3}{P^2} = \frac{GM_S}{4\pi^2} \quad \begin{array}{l} M_p \ll M_S \\ a_p \gg a_S \end{array}$$

$$a_S M_S = a_p M_p \quad a_S = \frac{P v_S}{2\pi} \quad M_p \sin i = v_r \left( \frac{M_S^2 P}{2\pi G} \right)^{1/3}$$

# 51 Peg b



detected 1995 by  
Mayor & Queloz and  
Marcy & Butler

**51 Peg:**

G2IV,  $V = 5.5$ , 15 pc

**51 Peg b:**

$P = 4.23$  d

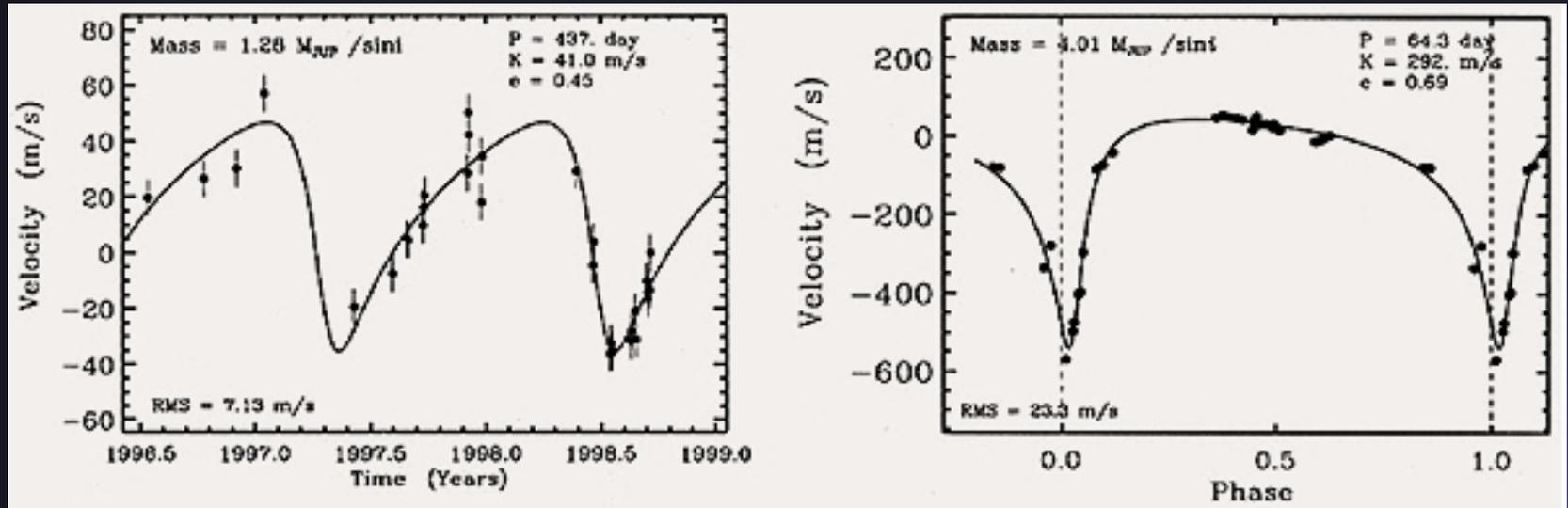
$a = 0.05$  AU

$M \sin i = 0.47 M_J$

# Pegasus



### 3. Parameter: Exzentrizität



### Genauigkeit:

51 Peg b:  $v_r \sim 50$  m/s

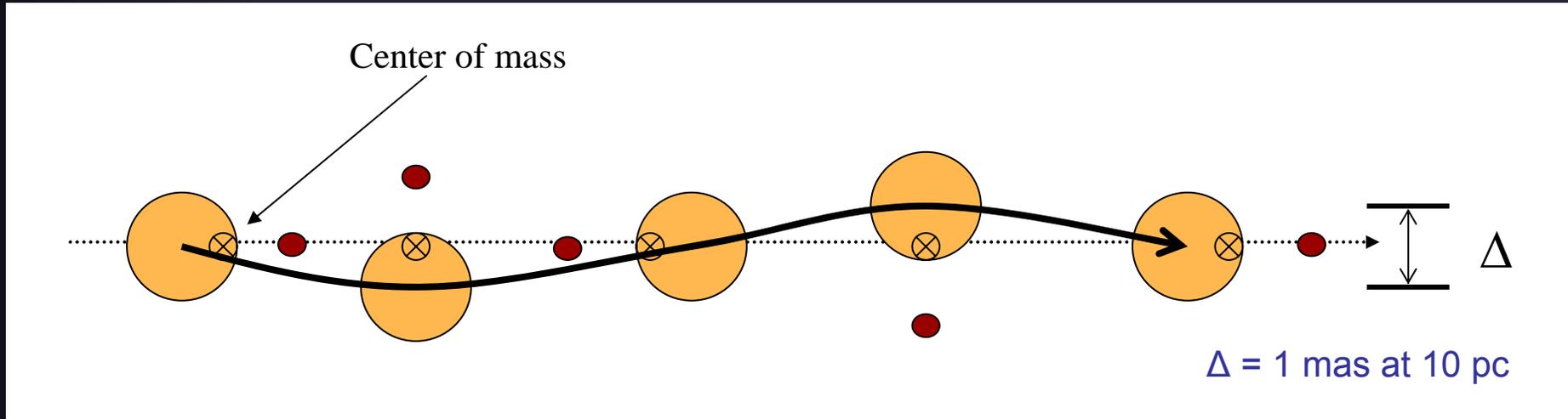
heute:  $\lambda/\Delta\lambda \sim 10^8 \longrightarrow v_r \sim 3$  m/s

theoretisch:  $v_r \sim 1$  m/s (Effekt von Sternflecken)

zum Vergleich: Jupiter um Sonne: 12.5 m/s

Erde 0.05 m/s

# Astrometrie

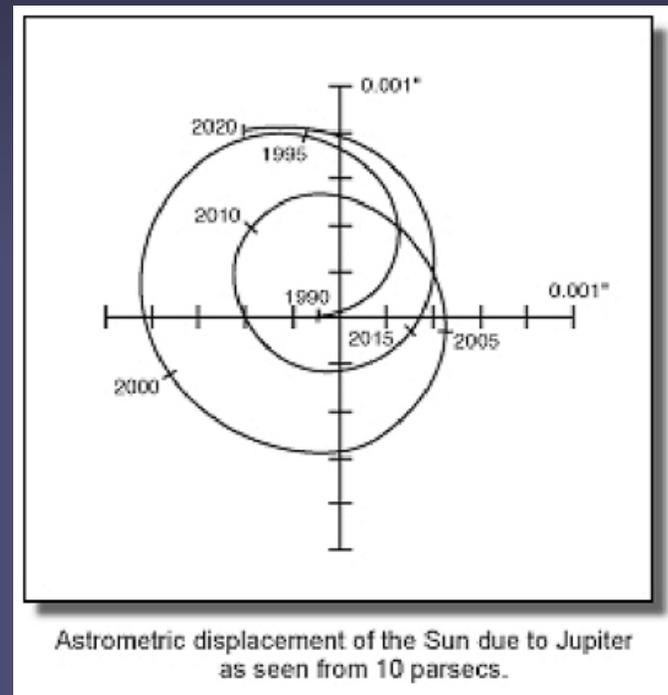
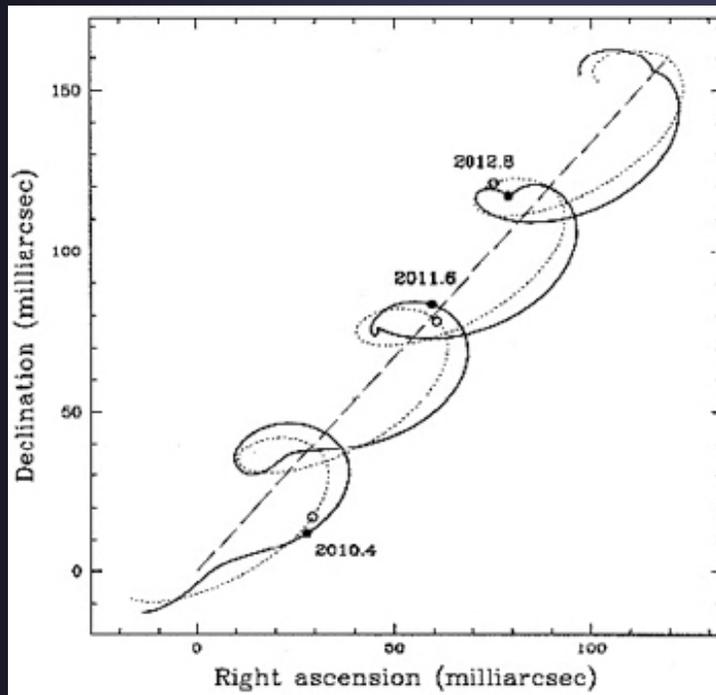


## Messung der räumlichen Bewegung des Sterns um das Massenzentrum vor dem Sternenhintergrund

- $\Delta = (M_P/M_S)(a_P/d)$ : nahe Sterne, grosse Halbachsen
- gegenwärtige Auflösung: 1-2 mas (vom Boden), 0.1 mas (HST)
- **Beispiel: Gliese 876 b (Benedict et al. 2002)**
- zukünftig: Gaia (ESA Mission)

## Simulationen:

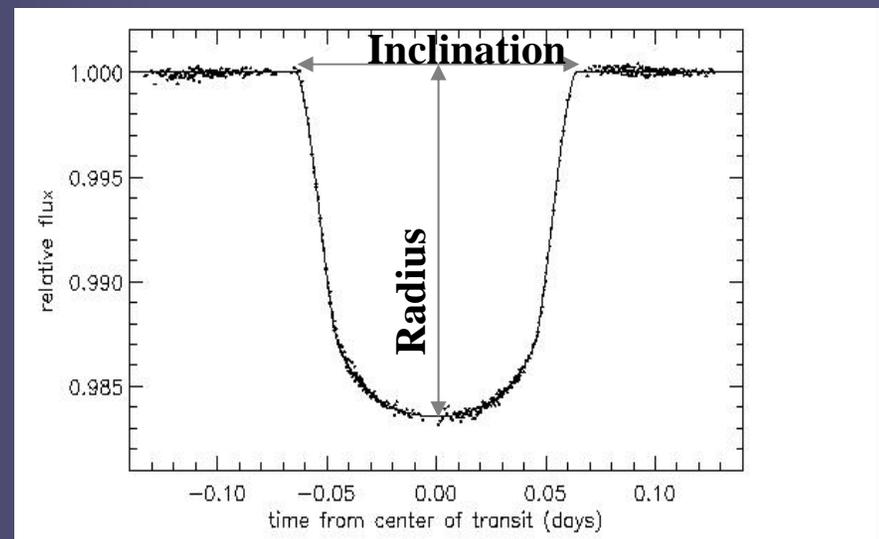
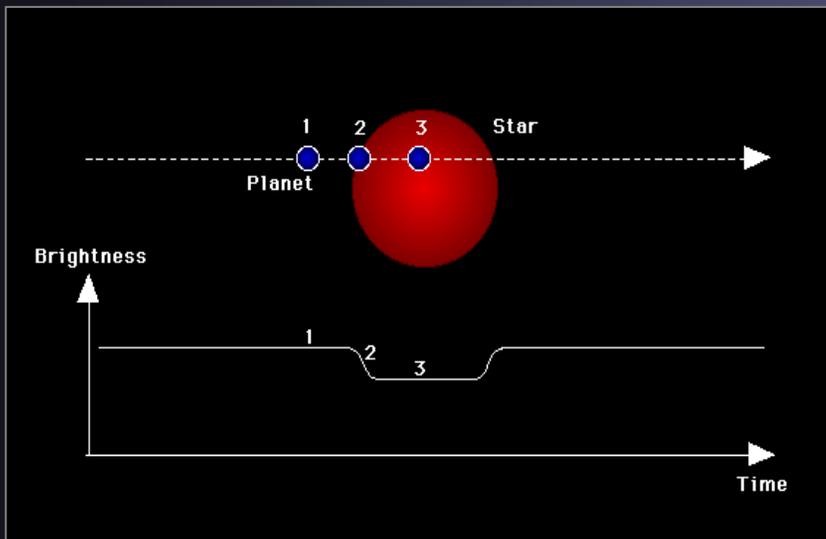
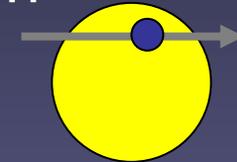
- Stern in 50 pc, Planet mit  $15 M_J$ ,  $a = 0.06$  AU,  $e = 0.2$ , Eigenbewegung 50 mas/yr
- Bewegung der Sonne aus 10 pc Entfernung



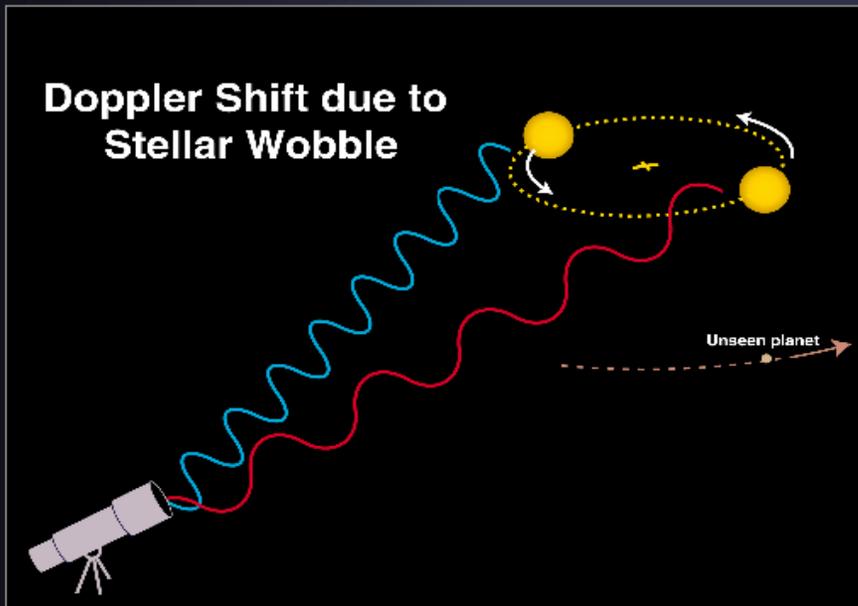
- Messung zweier Geschwindigkeitskomponenten  
→ Bestimmung der Masse unabhängig von  $\sin i$

# Transit

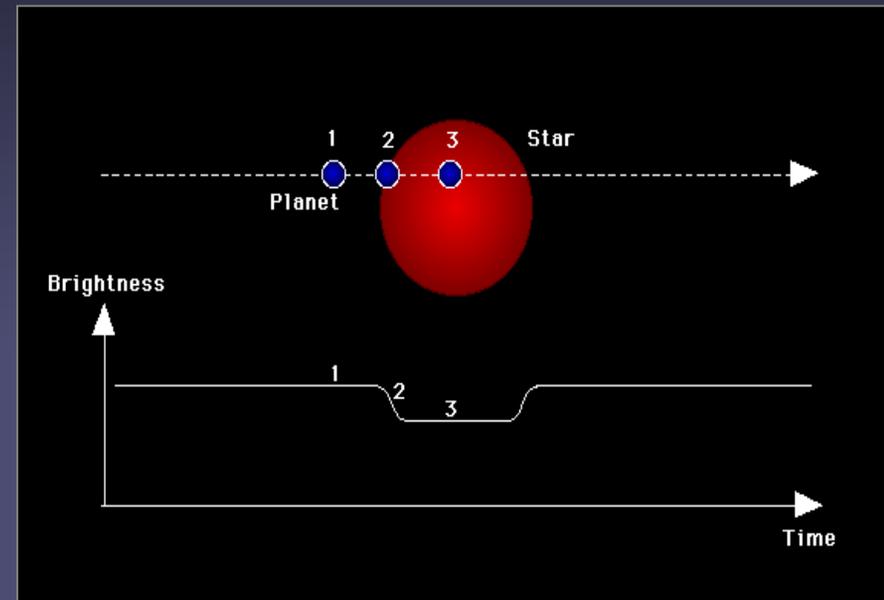
- Amplitude:  $\Delta I / I \sim R_P^2 / R_S^2$   
Jupiter:  $\sim 1\%$ , Erde:  $\sim 0.01\%$
- Wahrscheinlichkeit:  $R_S / a_P$
- Periode: Umlaufzeit, Abstand zum Stern
- Transitdauer: Inklination des Orbits,  $i \sim 90^\circ$
- **HD 209458 b (Charbonneau et al. 2000)**



# Kombination Radialgeschwindigkeit und Transit



$M \sin i$

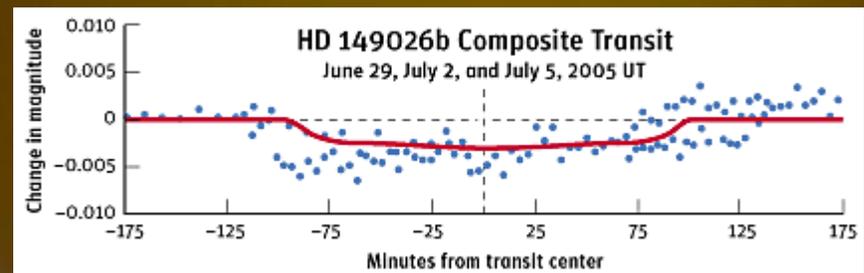


$i, R$

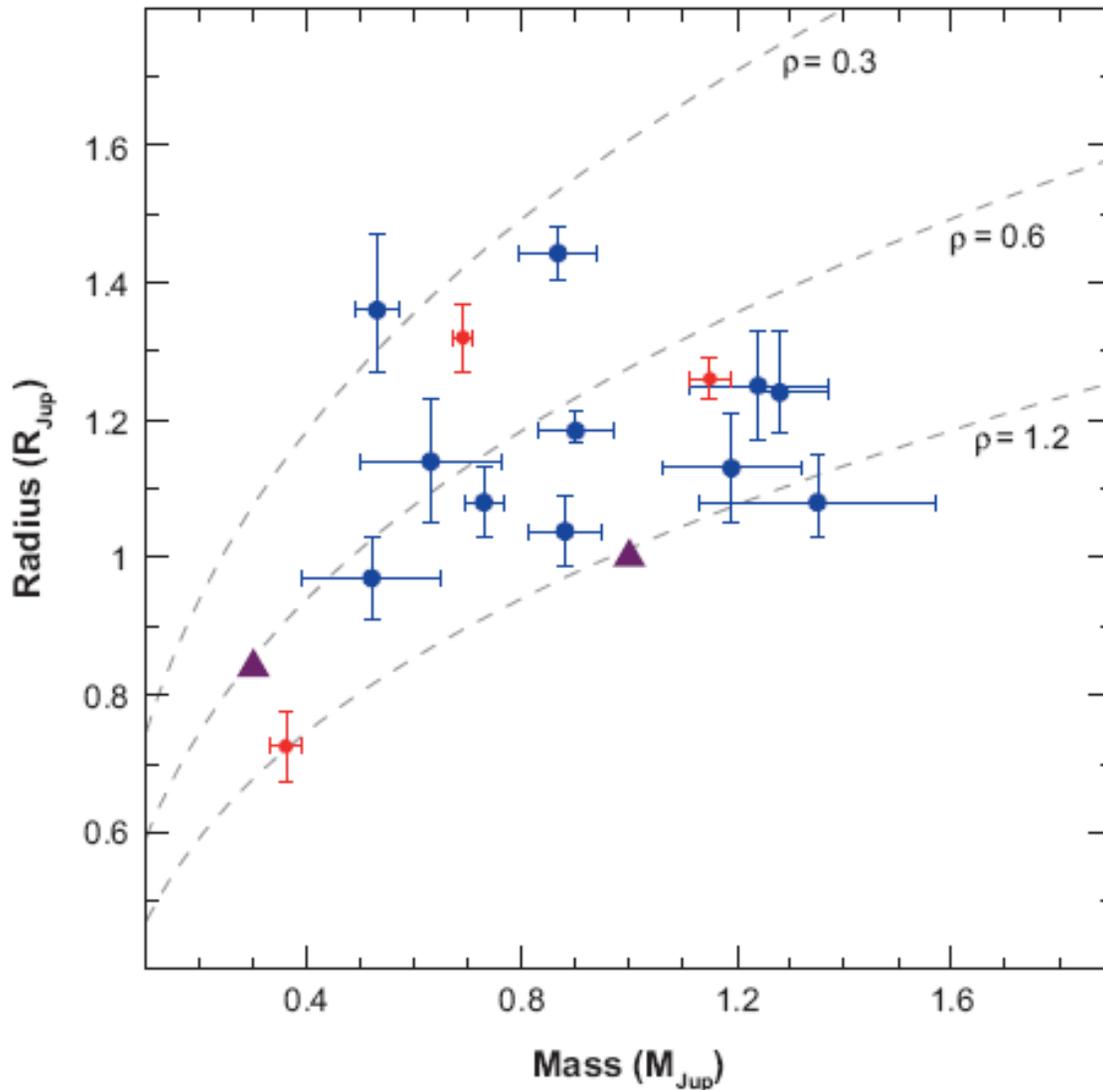
**zusammen:**  $M$ , mittlere  $\rho$

# HD 149026 b

- Entdeckung mit RV durch Sato et al. (2005)
- Transit durch Amateurastronom Bissinger (2005)
- $\Delta m = 0.003$  mag !
- $P = 2.88$  d
- $a = 0.042$  AU
- $M = 0.36 M_J$
- $R = 0.72 R_J$
- $T_{\text{eff}} = 2300 \pm 200$  K



# Masse - Radius - Diagramm



Rot: Planeten nach  
RV Methode  
gefunden

Blau: Planeten nach  
Transit

Dreiecke: Jupiter  
Saturn

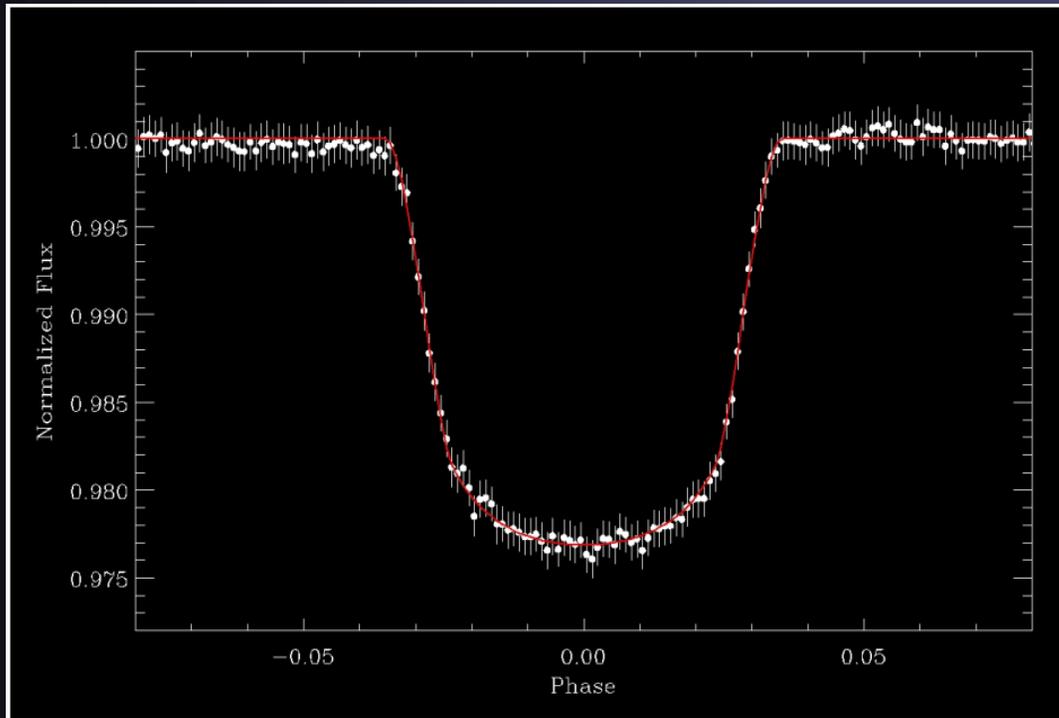
(Udry & Santos 2007)

# CoRoT Mission

Französischer Satellit mit 27cm Fernrohr und CCD Kamera mit  $2.8^\circ \times 2.8^\circ$  Bildfeld

**Ziel:** Auffinden von erdähnlichen Planeten auf engen Orbits

CoRoT-Exo-1b

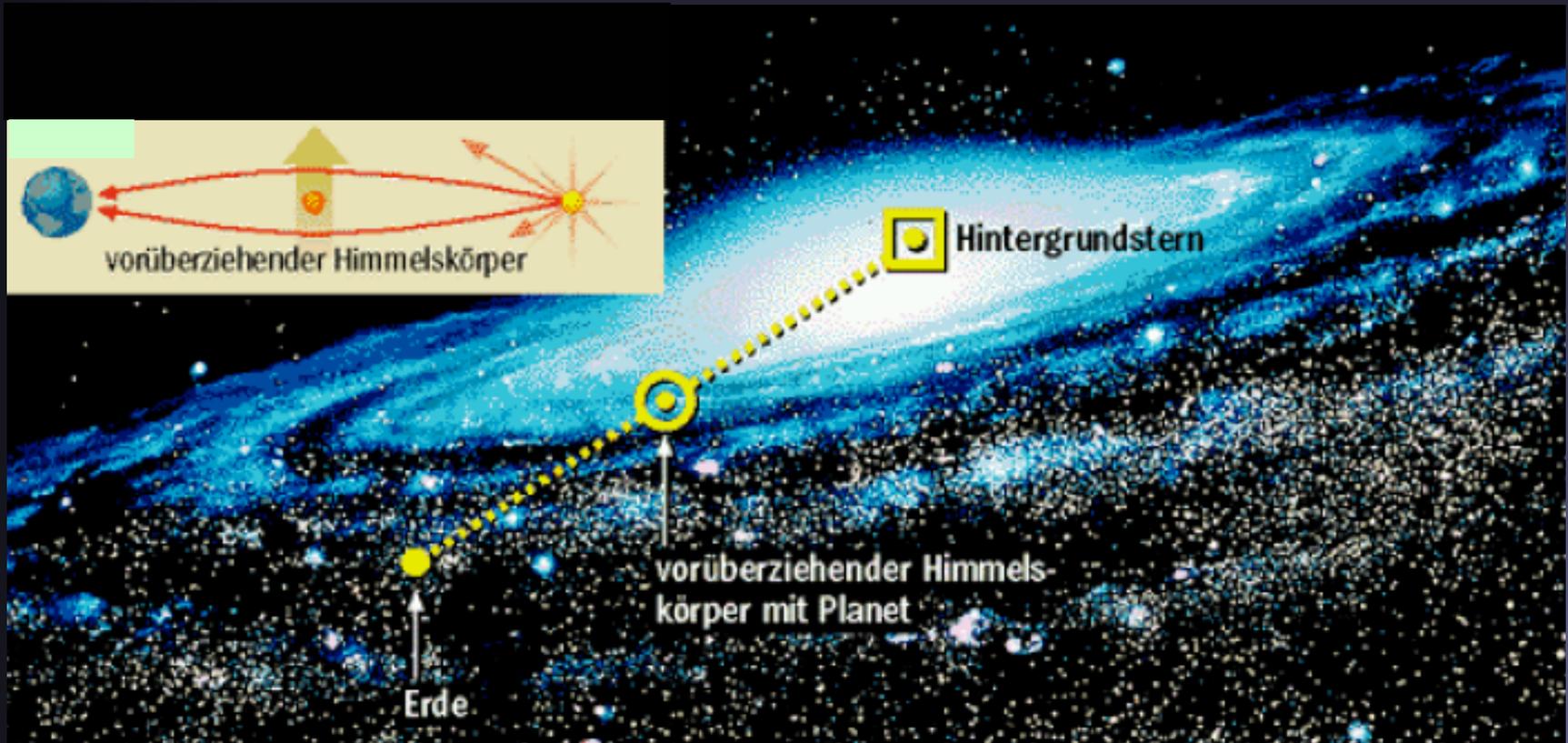


(Barge et al. 2007)



Start: 27. Dezember 2006

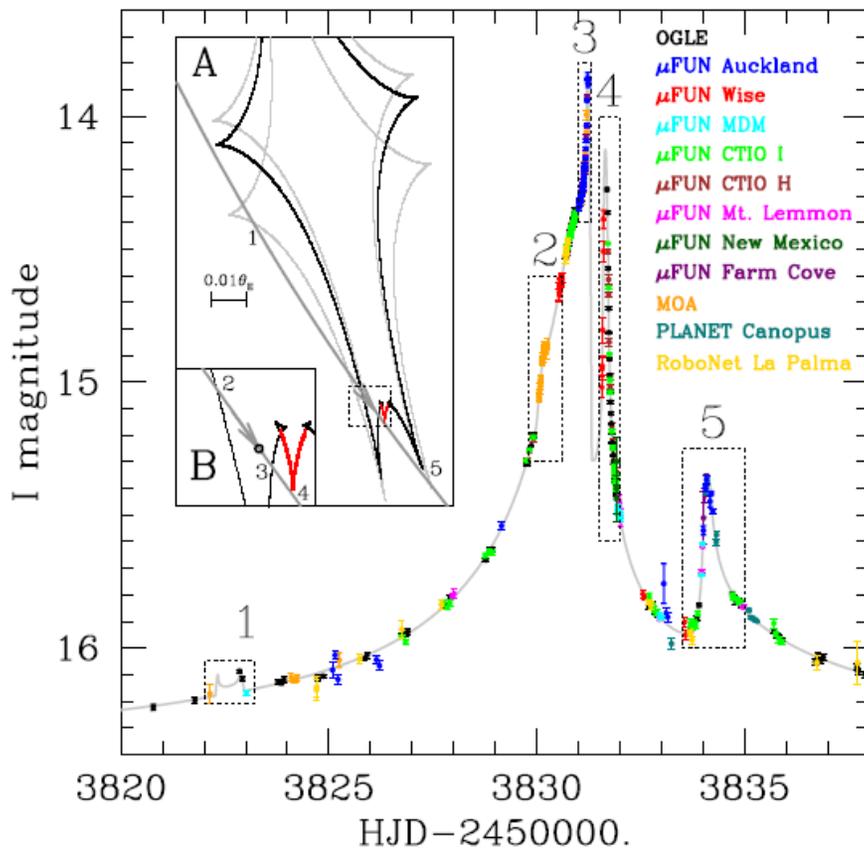
# Mikrogravitationslensing



Stern im Vordergrund agiert als Gravitationslinse und verstärkt die Helligkeit eines Hintergrundsterns. Planet um Vordergrundstern modifiziert das Signal.

Kann kleine, terrestrische Planeten detektieren. Geometrie wiederholt sich aber nicht. Daher gut für statistische Studien.

# Entdeckung eines Jupiter/Saturn Analoges durch Mikrolensing



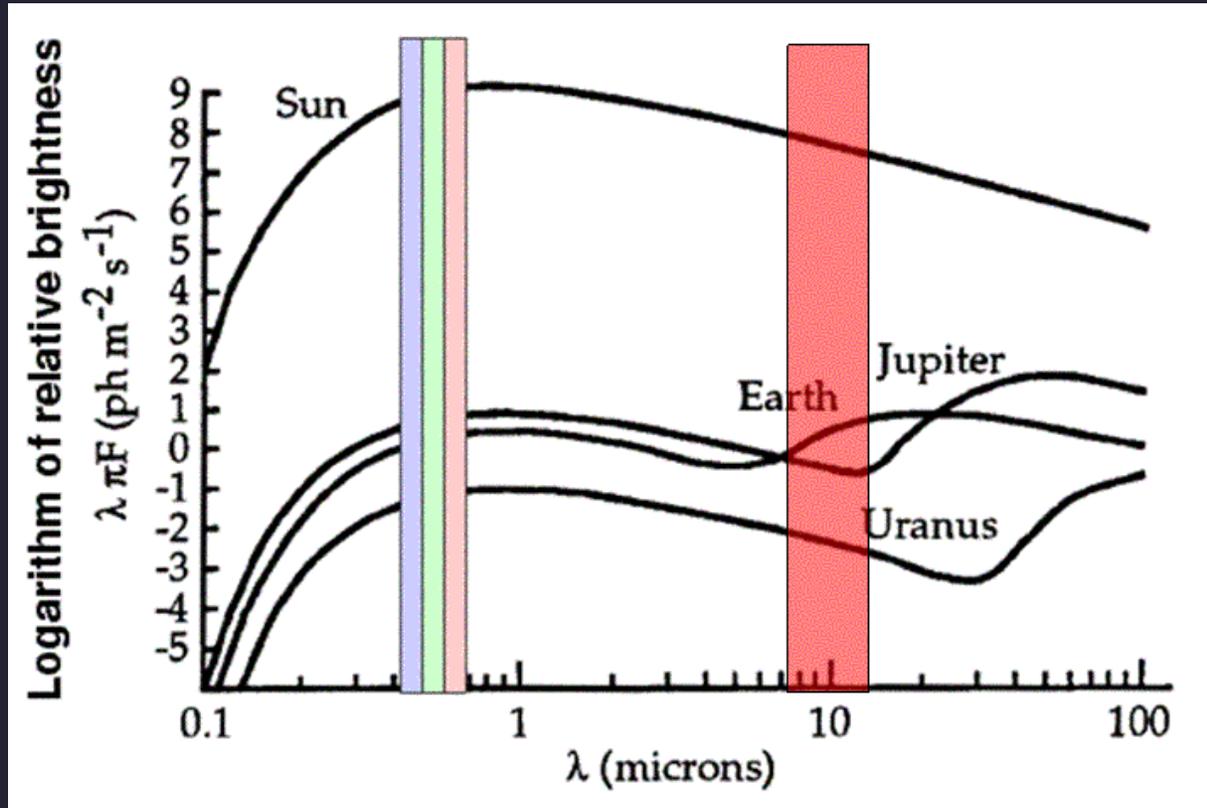
OGLE-06-109L:  $0.5 M_{\odot}$ , 1.5 kpc

Name	OGLE-06 -109L b	OGLE-06 -109L c
Masse	$0.71 M_J$	$0.27 M_J$
Abstand	2.3 AU	4.6 AU
Periode	1825 d	5100 d
Exzentrizität		0.11
Inklination		$59^\circ$

OGLE = Optical Gravitational  
Lens Experiment

(Gaudi et al. 2008)

# Direkte Beobachtung



- Schwierigkeit: Stern viele Größenordnungen heller als Planet
- Besser im infraroten Spektralbereich und für junge, heiße Planeten

# GQ Lupi b, erster direkt beobachteter Exoplanet

ESO VLT-NaCo K-Band

## Begleiter:

6 mag schwächer als Stern

Abstand  $\sim 0.7$  arc sec

$a \sim 100$  AU

$M \sim 1-42 M_J$

## Stern:

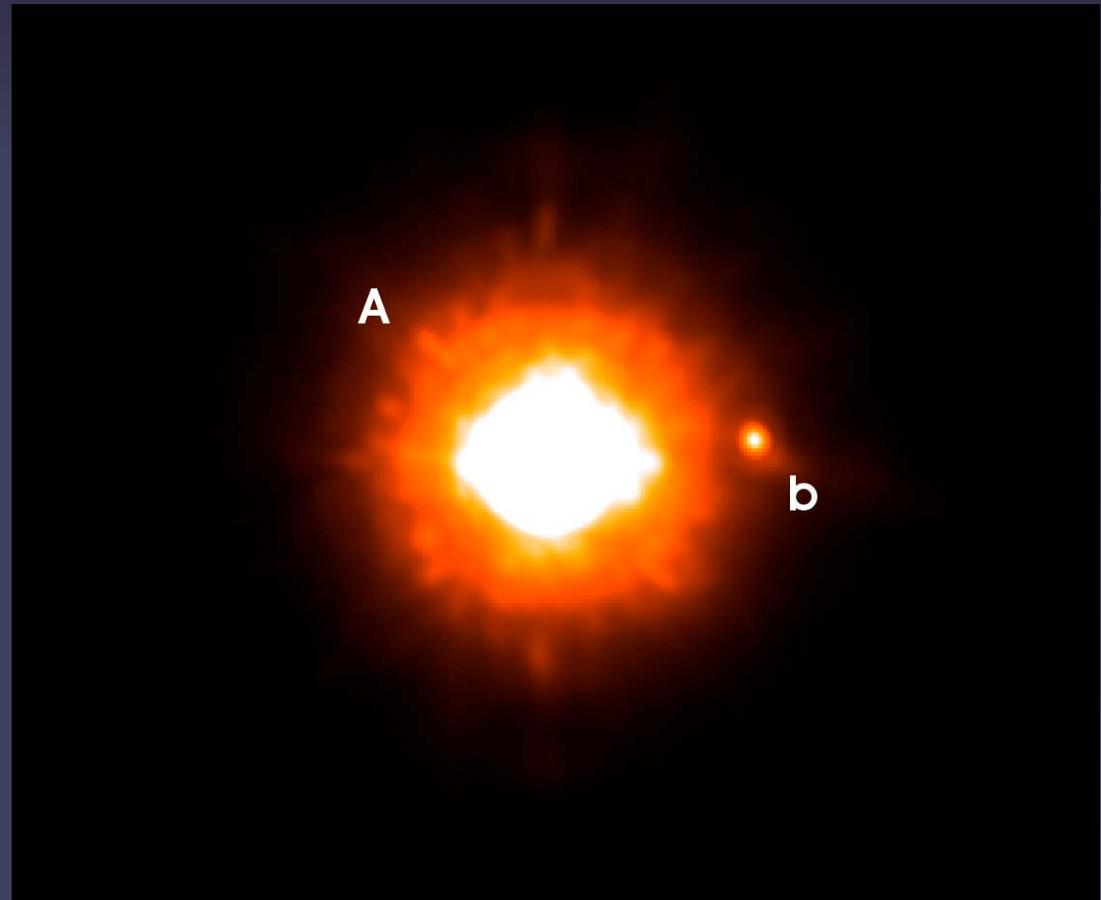
T Tauri Stern (K7eV)

$V \sim 11.4$ ,  $L \sim 1.6 L_\odot$

$M \sim 0.7 M_\odot$

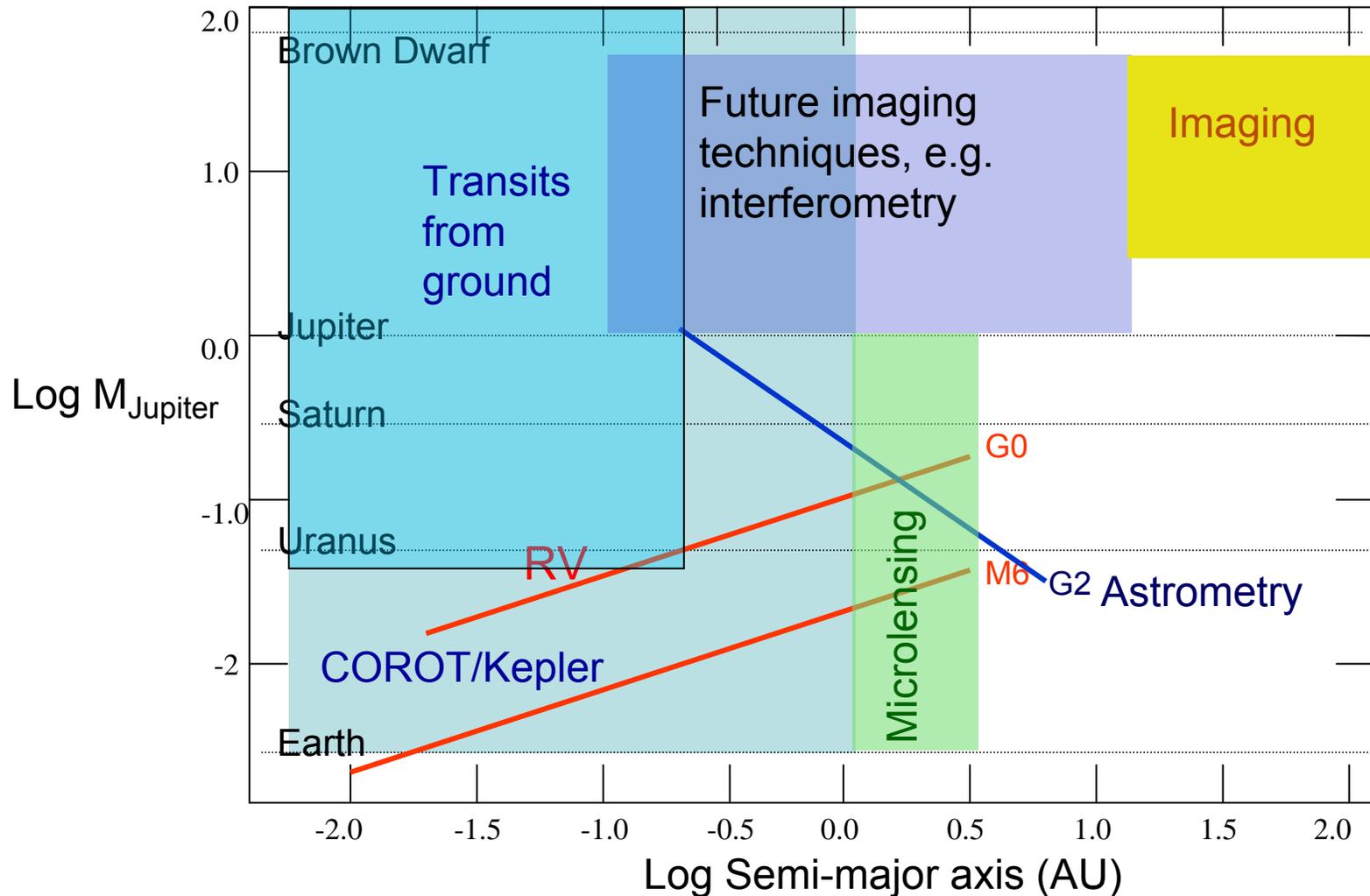
Entfernung  $140 \pm 50$  pc

Alter  $\sim 2$  Mio Jahre



(Neuhäuser et al. 2005)

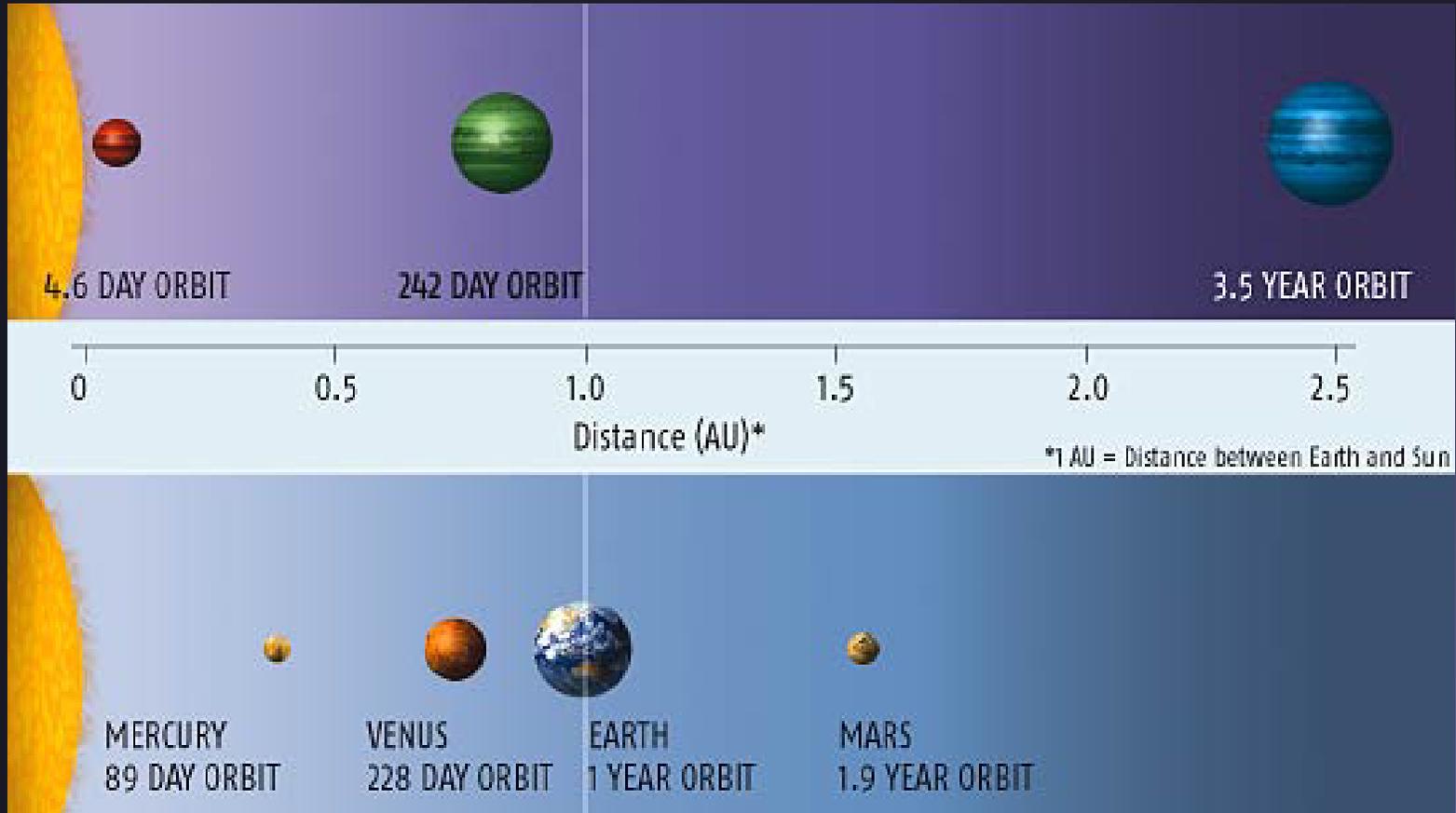
# Beobachtungsbereiche



# Zusammenfassung

- Radialgeschwindigkeit: + effektivste Methode bisher  
+/- nur Massenuntergrenze
- Astrometrie: + langperiodische Planeten  
- nahe Sterne
- Transit: + Radiusbestimmung  
+ in Kombination mit RG:  
Masse und mittlere Dichte  
- Nachbeobachtung
- Mikrogravitationslinse: + kleine Planeten detektierbar  
+/- statistische Aussagen
- Direkte Beobachtung: + direkte Beobachtung  
- nur für entfernte Planeten

# Ypsilon Andromedae



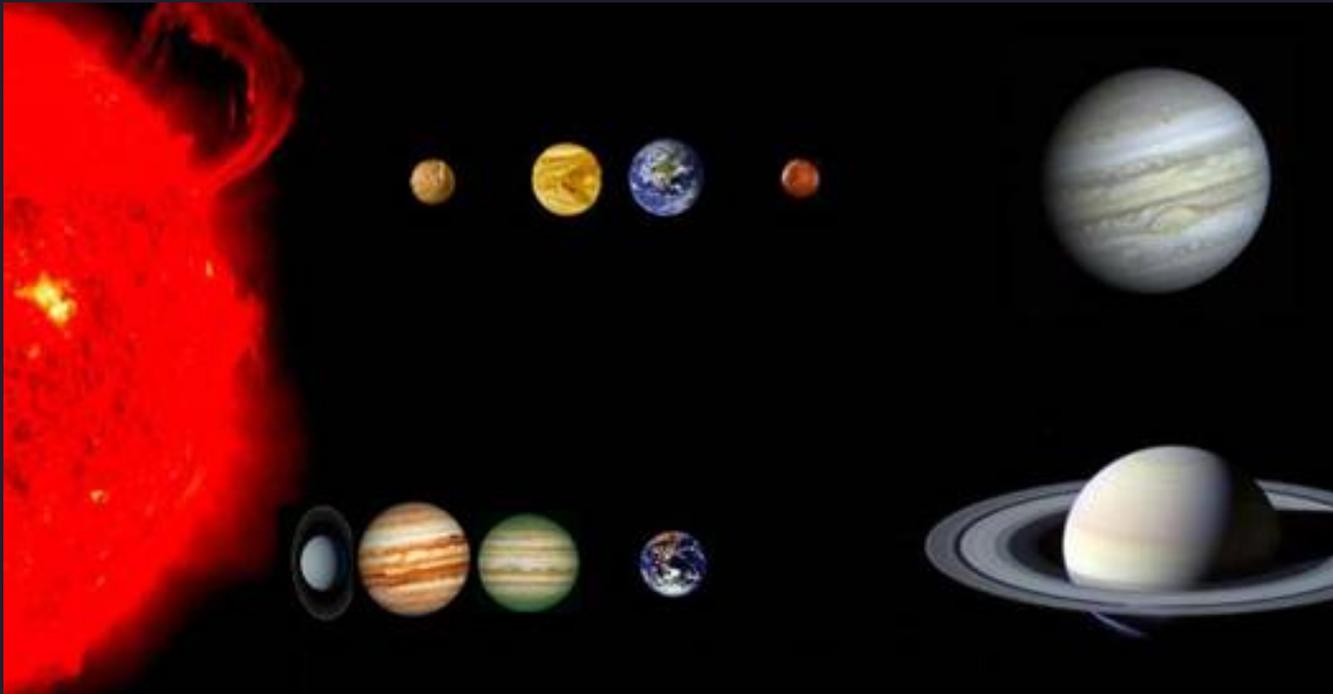
υ And: F8V, 1.27  $M_\odot$ , 1.6  $R_\odot$ , 6200 K, 3.8 Gyr, 13.5 pc

υ And b: 0.06 AU, 4.62 d, 0.69  $M_J$

υ And c: 0.83 AU, 242 d, 1.97  $M_J$

υ And d: 2.54 AU, 1290 d, 3.93  $M_J$

# 55 Cancri



**55 Cnc: G8V, 0.95  $M_{\odot}$ , 0.96  $R_{\odot}$ , 5250 K, 4.5 Gyr, 12.5 pc**

55 Cnc e: 0.038 AU, 2.82 d, 0.03  $M_J$

55 Cnc b: 0.115 AU, 14.6 d, 0.82  $M_J$

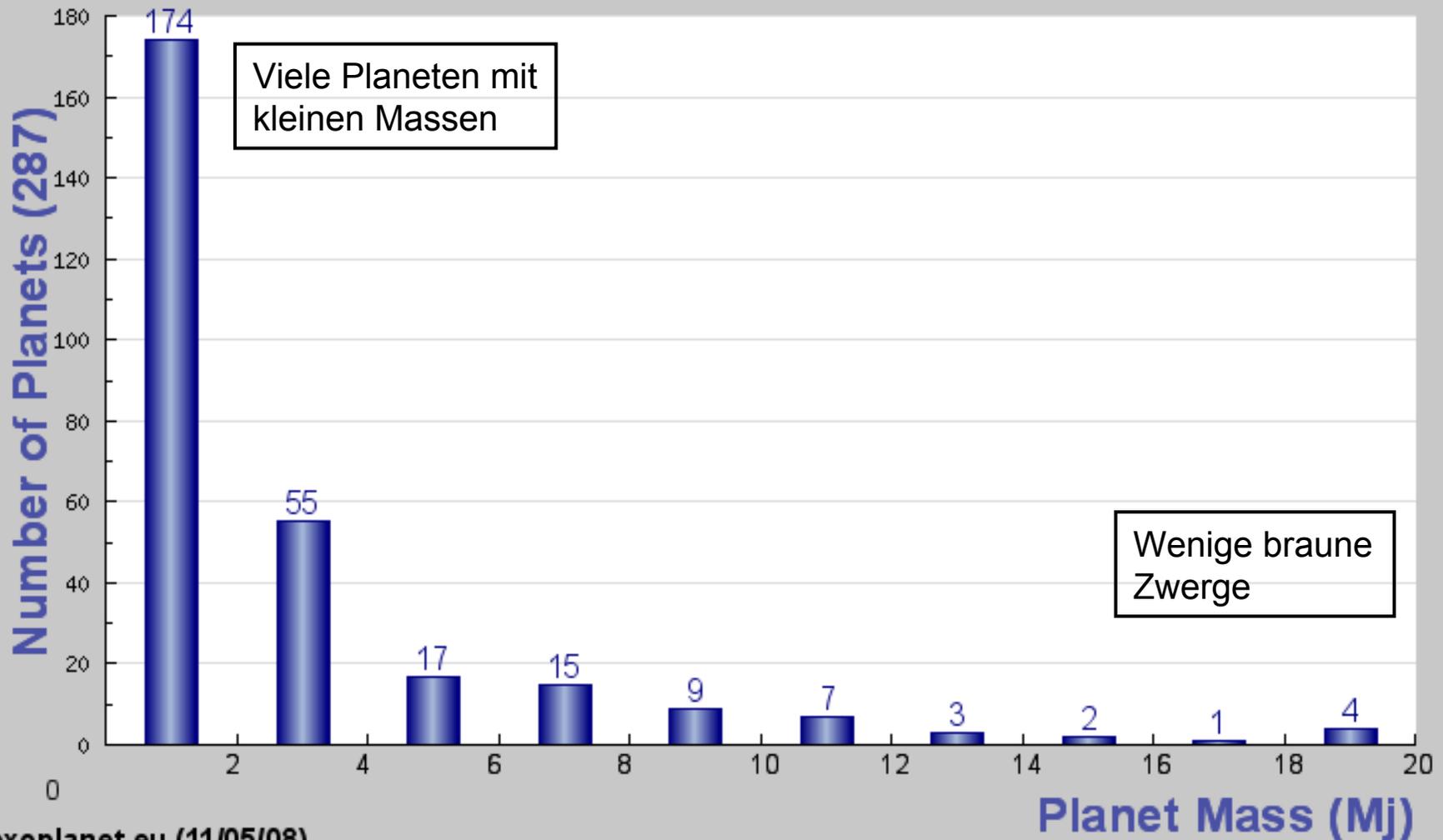
55 Cnc c: 0.240 AU, 43.9 d, 0.17  $M_J$

55 Cnc f: 0.781 AU, 260 d, 0.14  $M_J$

55 Cnc d: 5.77 AU, 5218 d, 3.84  $M_J$

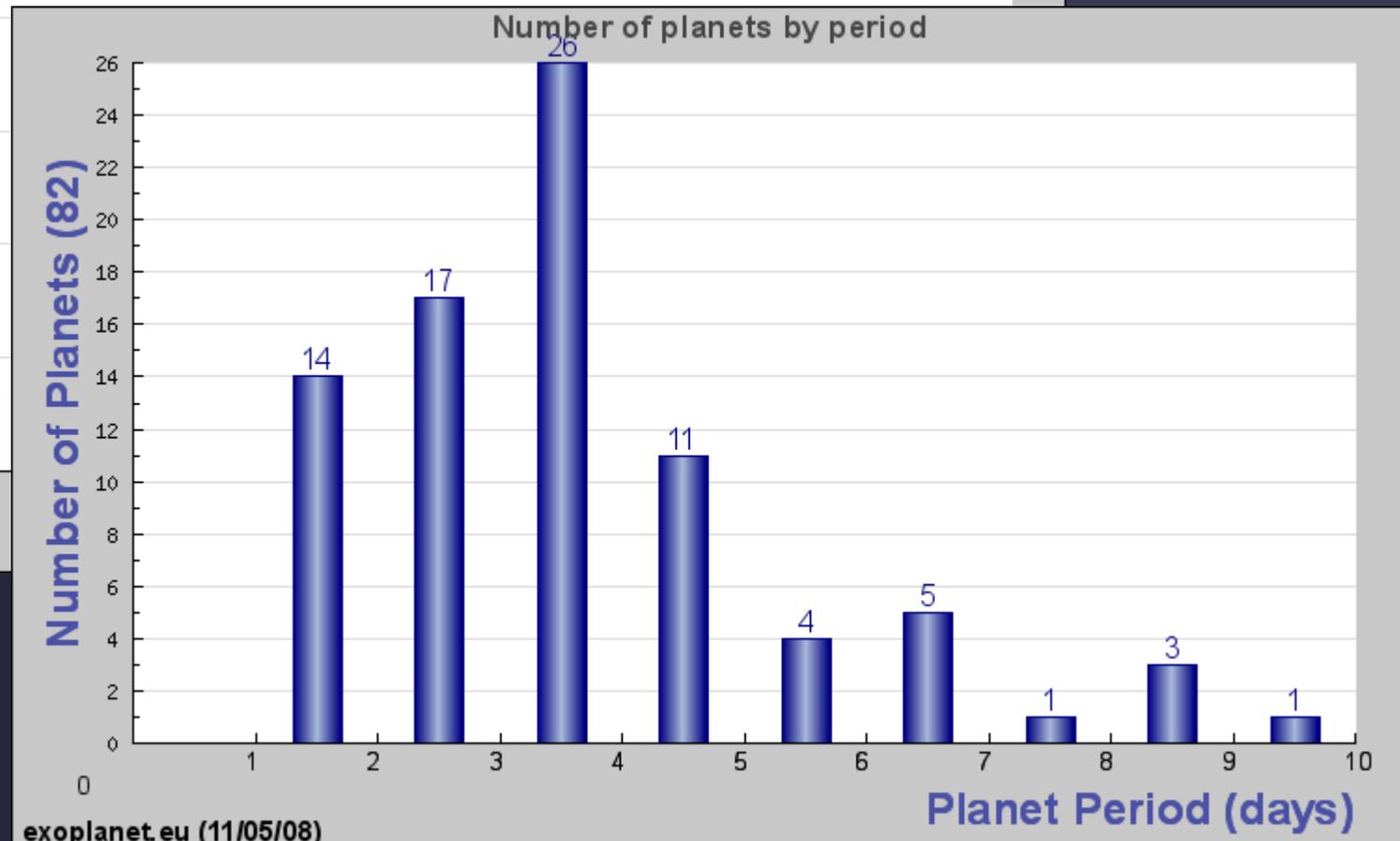
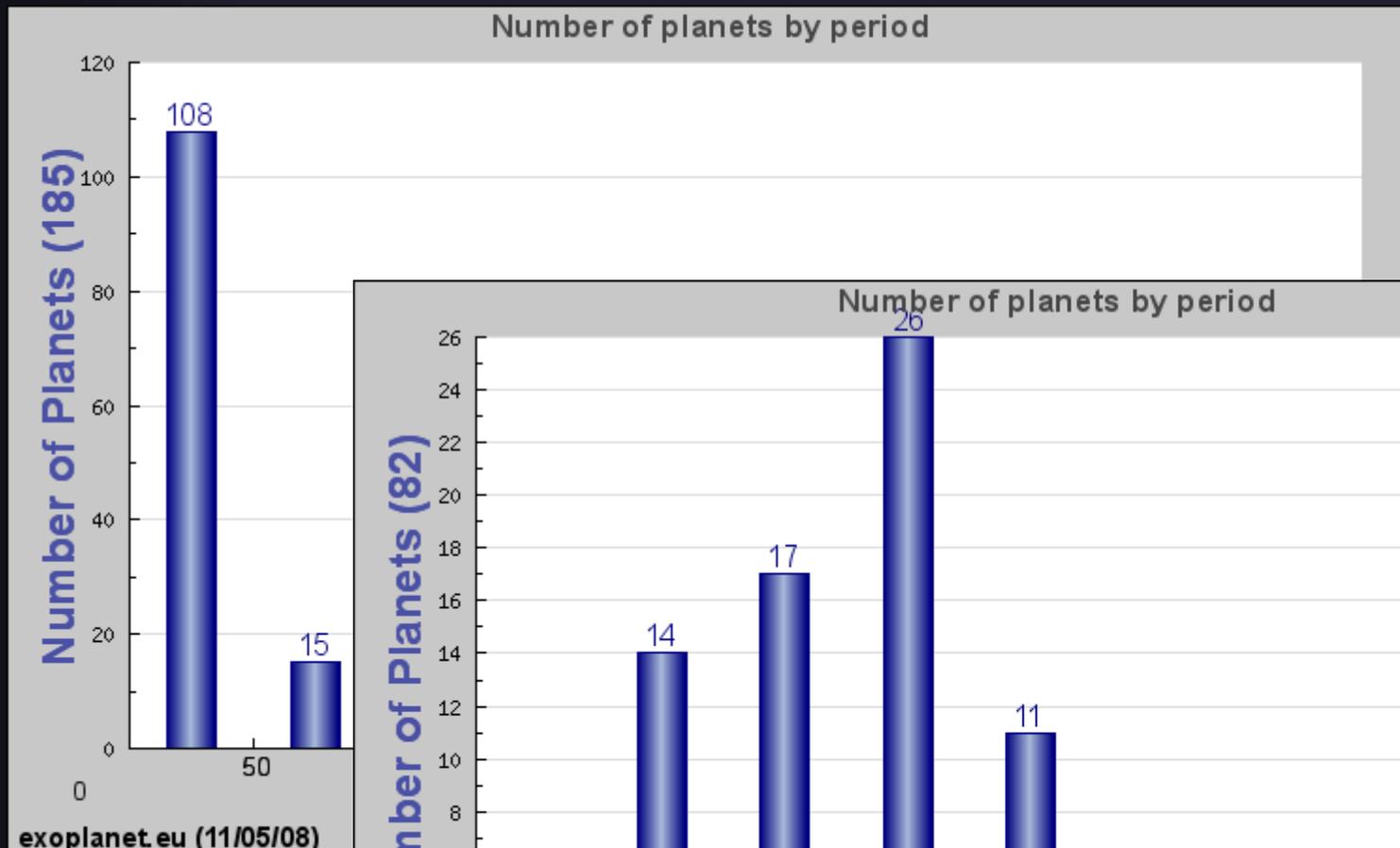
# Planeten-Statistik

Number of planets by mass

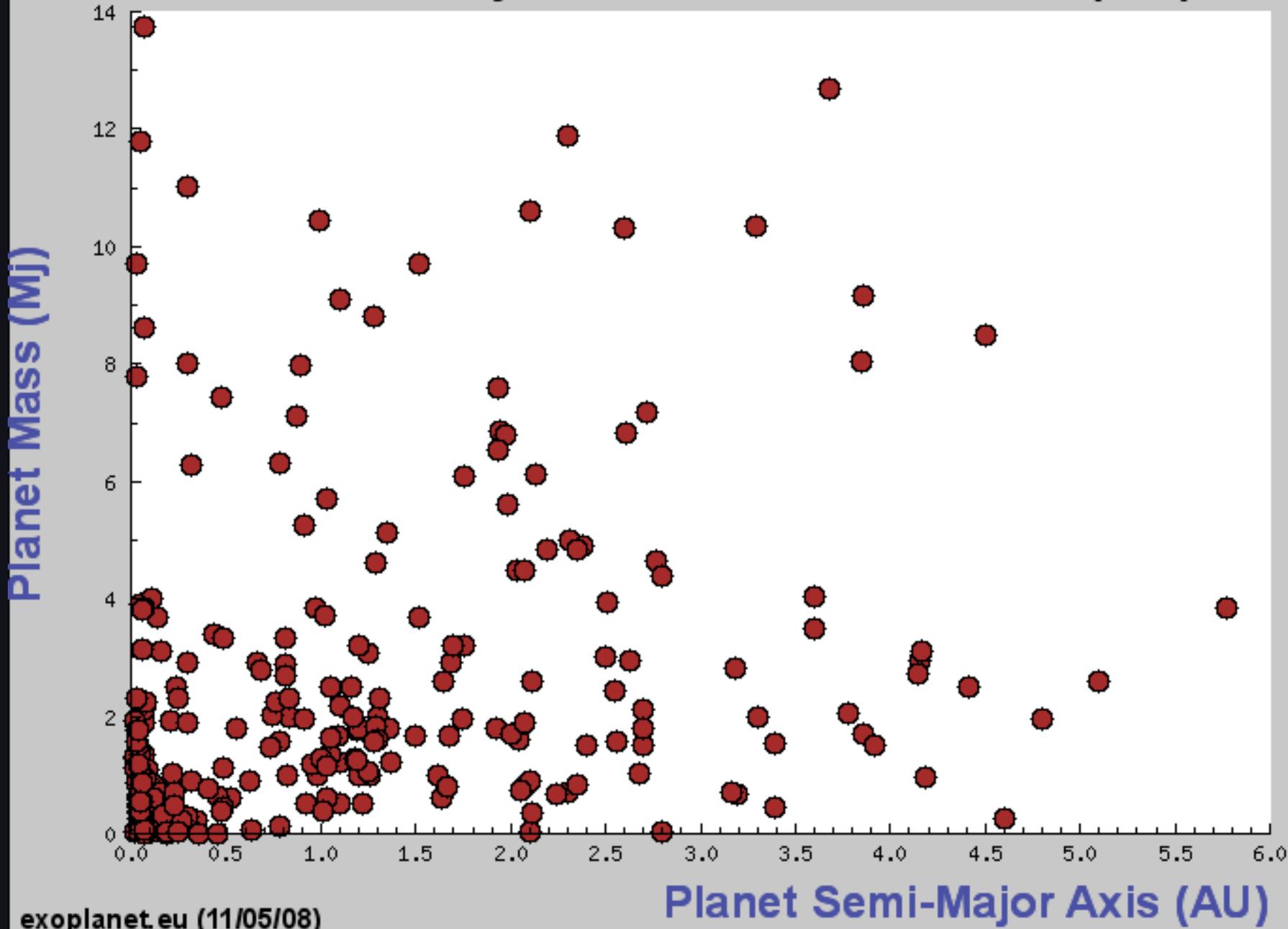


# Die meisten gefundenen Planeten haben kurze Umlaufzeiten

→ Auswahleffekt

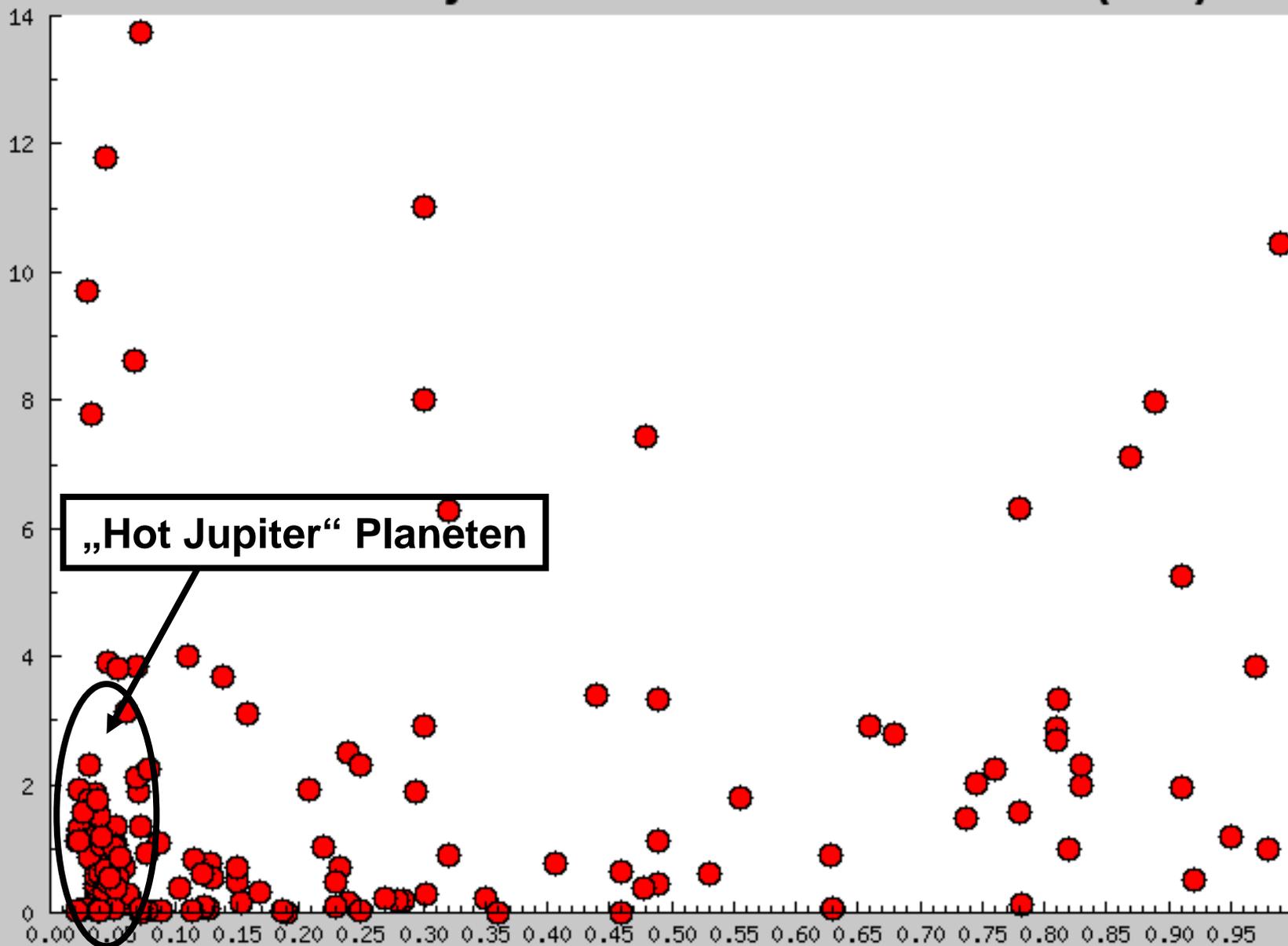


# "Planet Semi-Major Axis" vs "Planet Mass" (273)



# "Planet Semi-Major Axis" vs "Planet Mass" (156)

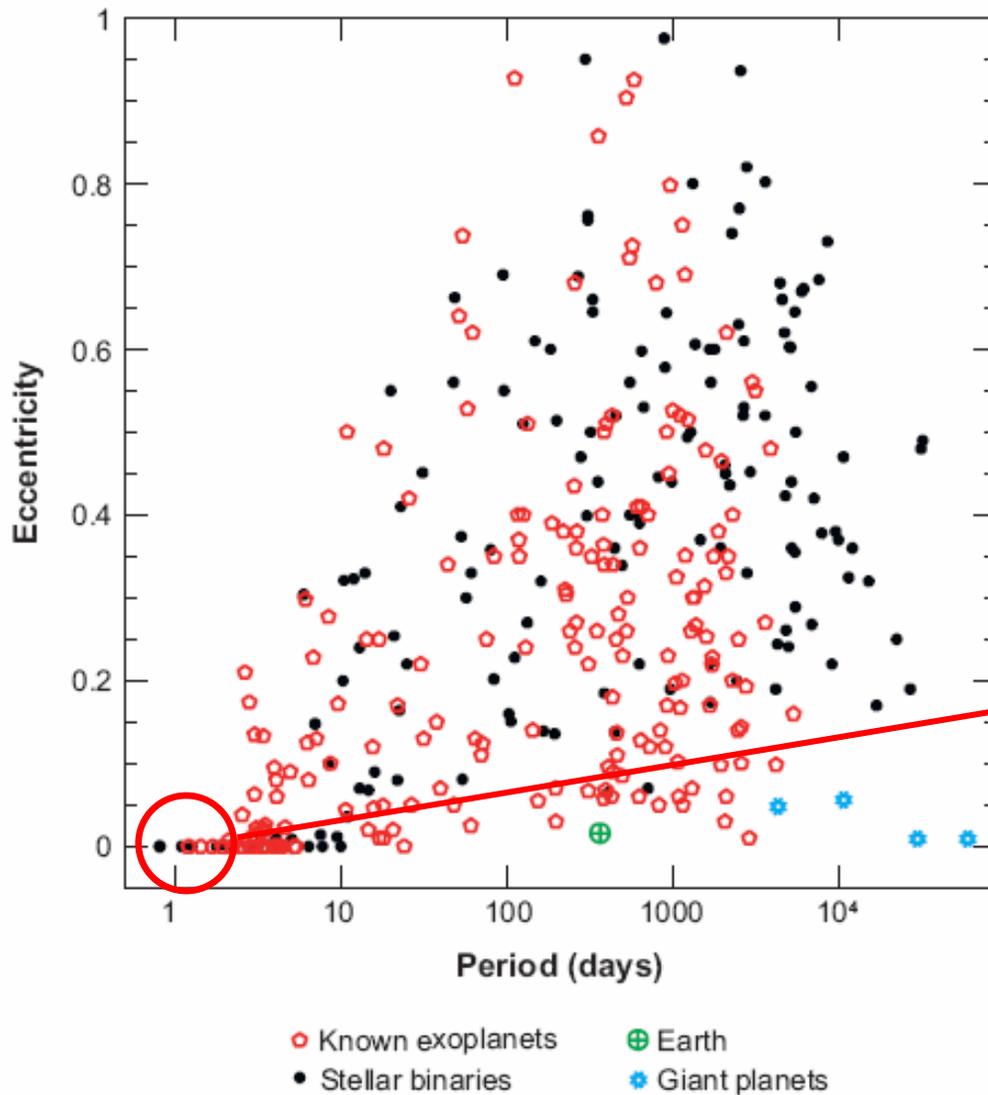
Planet Mass (Mj)



„Hot Jupiter“ Planeten

Planet Semi-Major Axis (AU)

# Bahnexzentrizität



Exzentrizitäten ähnlich wie bei Doppelsternen.

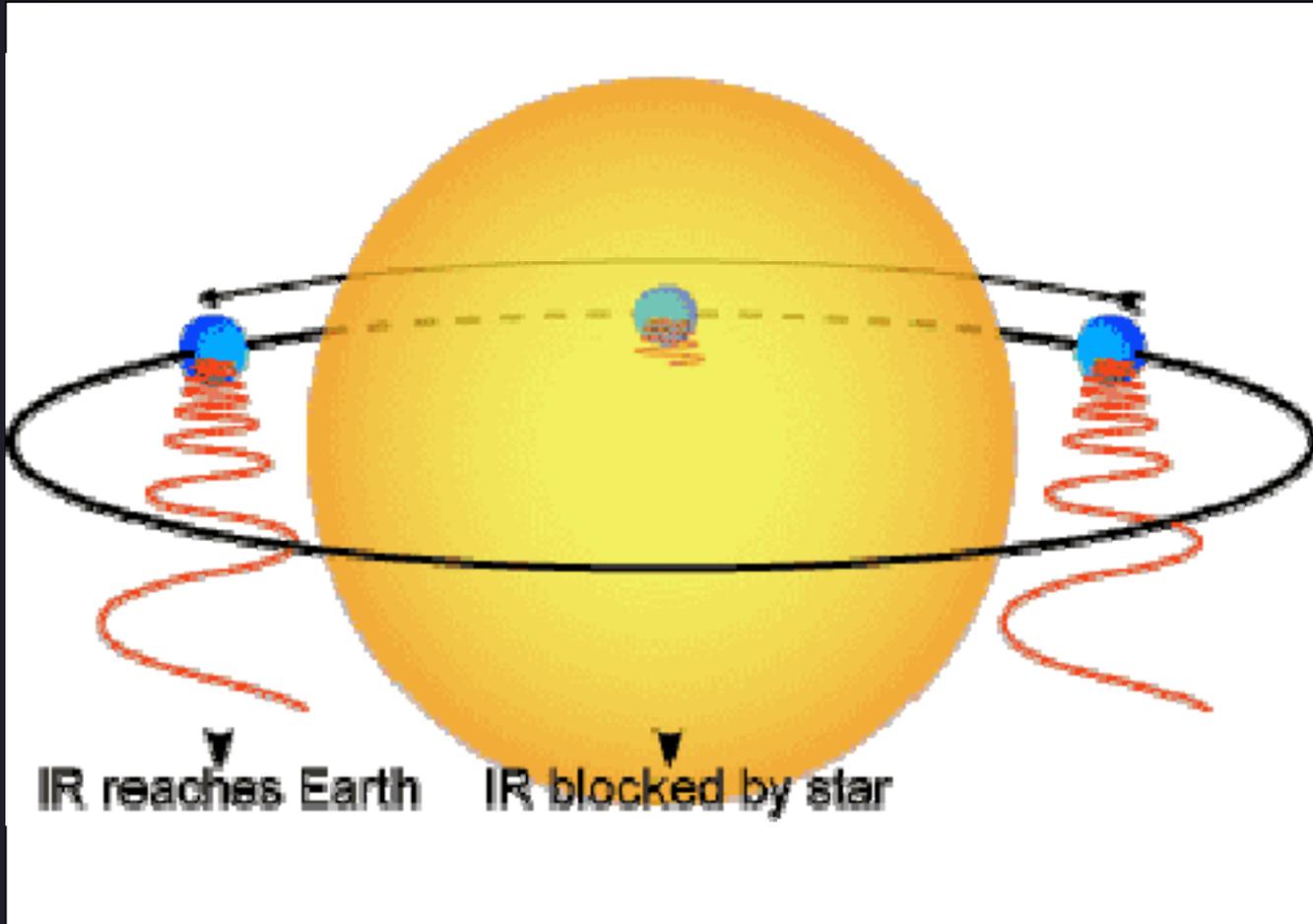
Enge Planetenorbits sind kreisförmig aufgrund von Gezeitenwechselwirkung zwischen Stern und Planet.

(Udry & Santos 2007)

# Physikalische Eigenschaften

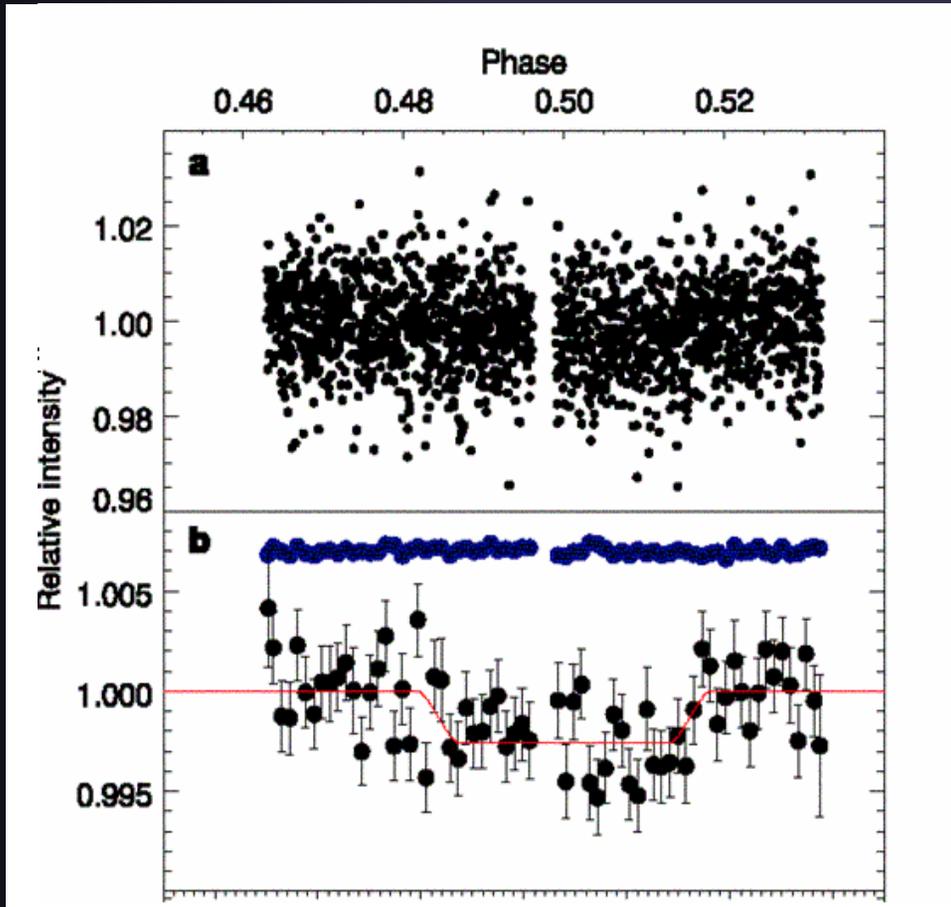
- Relativ wenig bekannt
- Beobachtung von „heißen Jupitern“ mit HST und Spitzer bei Transits:
  - Bestimmung der effektiven Temperatur
  - Chemische Zusammensetzung der Atmosphäre
- Theoretische Studien:
  - Planetenentstehung
  - Innerer Aufbau
  - Atmosphäre
  - Magnetosphäre und Plasmawechselwirkung mit Sternwind und Magnetfeld
  - ...

# Messung der Temperatur



während des sekundären Transits im Infraroten

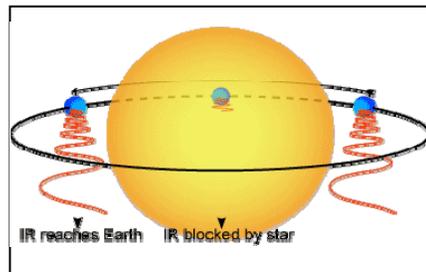
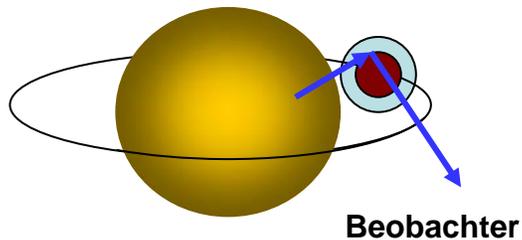
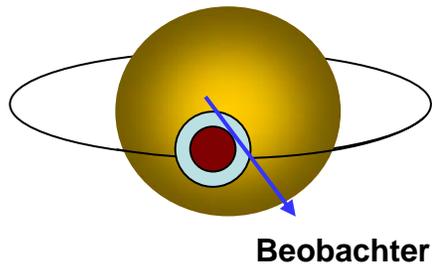
# Sekundärer Transit von HD 209458 b



24 micron (Deming et al. 2005)

- Umlaufzeit = 3.52 Tage
- Radius =  $1.3 R_J$
- Masse =  $0.63 M_J$
- Dichte =  $0.3 - 0.5 \text{ g cm}^{-3}$
- $T_{\text{eff}} = 1130 \pm 150 \text{ K}$
- Zum Vergleich:  
Jupiter  $T_{\text{eff}} = 124 \text{ K}$
- Aufheizung wegen des geringen Abstands zum Stern

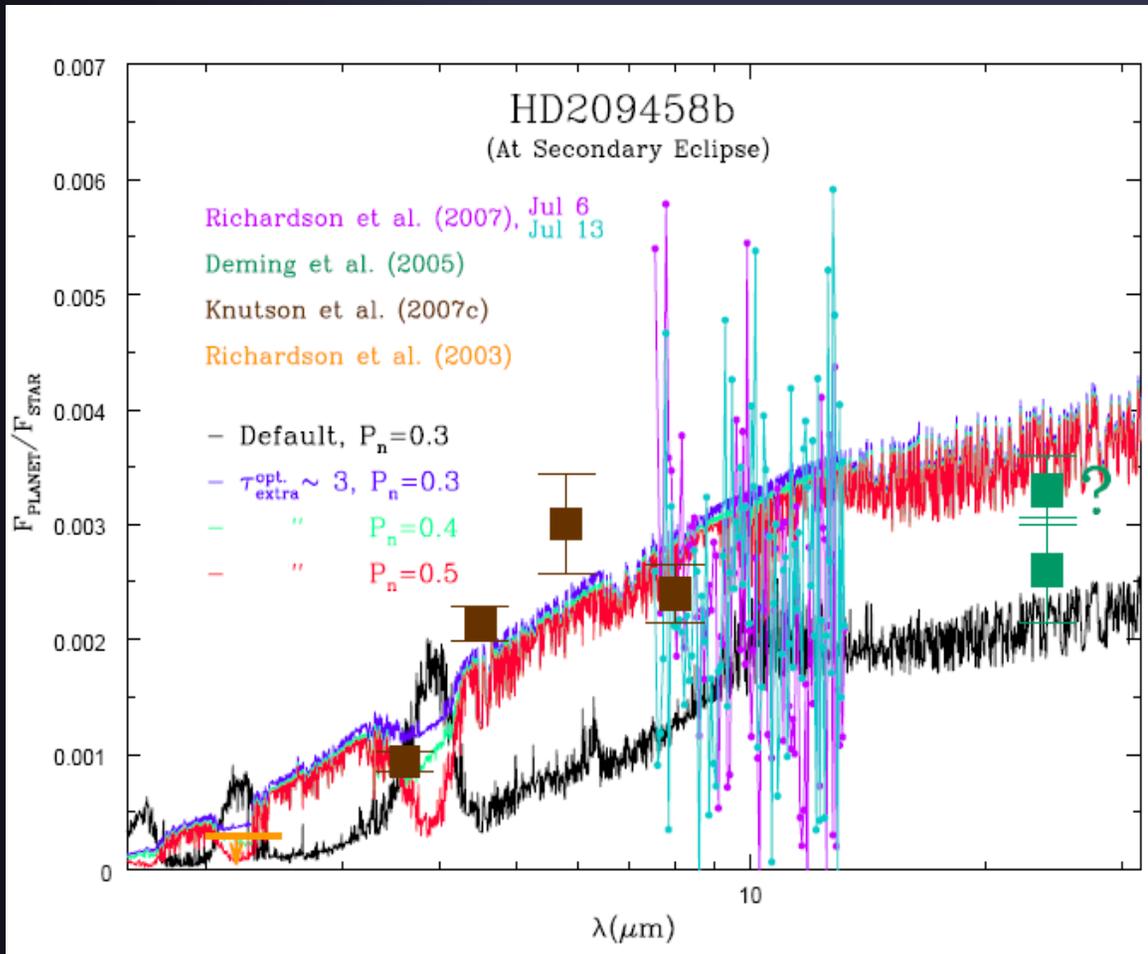
# Messung der atmosphärischen Zusammensetzung



- Messung des stellaren Lichts, das durch die planetare Atmosphäre während eines Transits läuft
- Messung des stellaren Lichts, das an der planetaren Atmosphäre gestreut wird
- Messung der infraroten Strahlung der planetaren Atmosphäre

# Wasserdampf in der Atmosphäre von HD 209458 b ?

Spektroskopie des vom Planeten reflektierten Sternlichts mit dem Spitzer IR Satellit

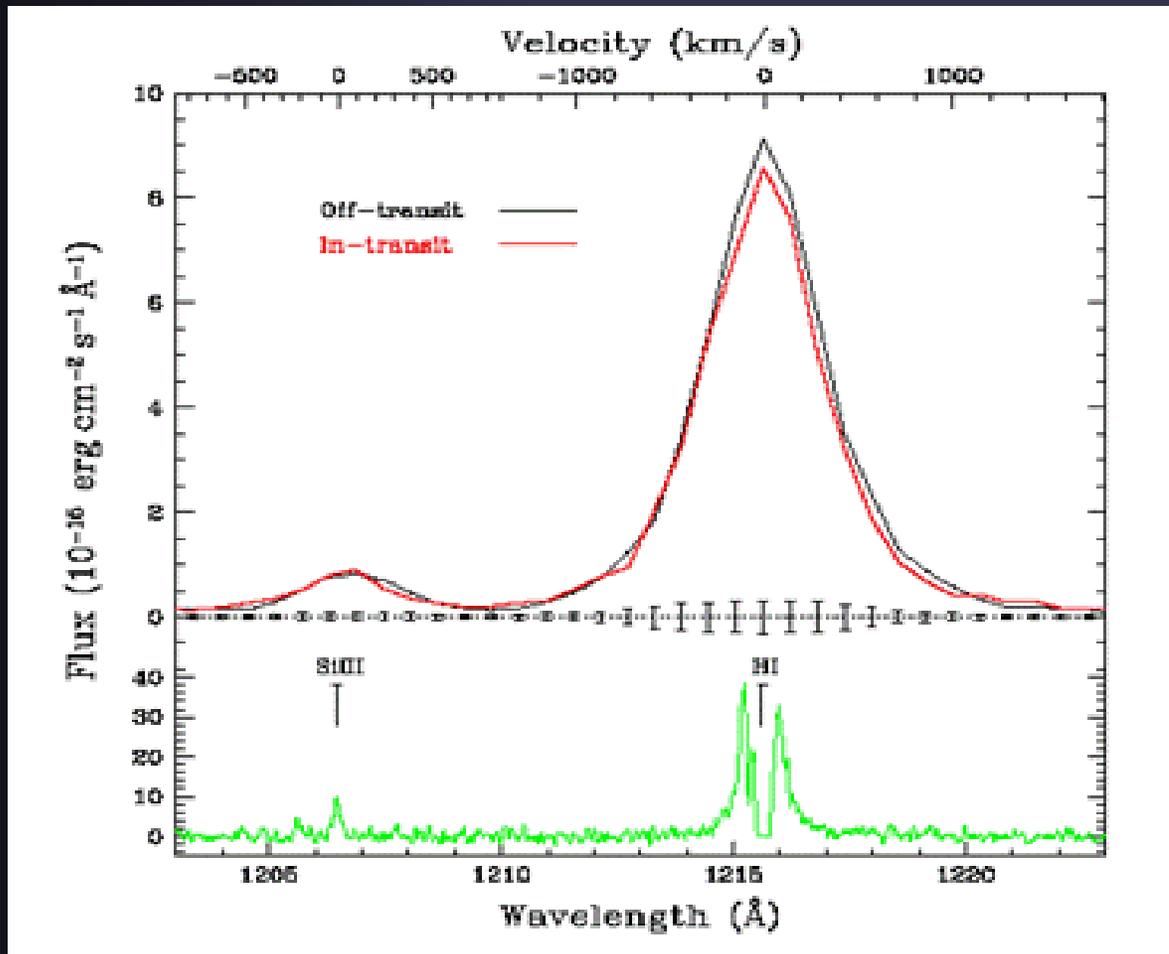


Modellierte  
Spektren

(Burrows et al. 2007)

# H, O, C und Na in der Atmosphäre von HD 209458 b

Spektroskopie im optischen und ultravioletten Licht während eines Transits (mit dem HST)



(Charbonneau 2002,  
Desert 2003,  
Vidal-Madjar et al. 2004)

# Habitabilität



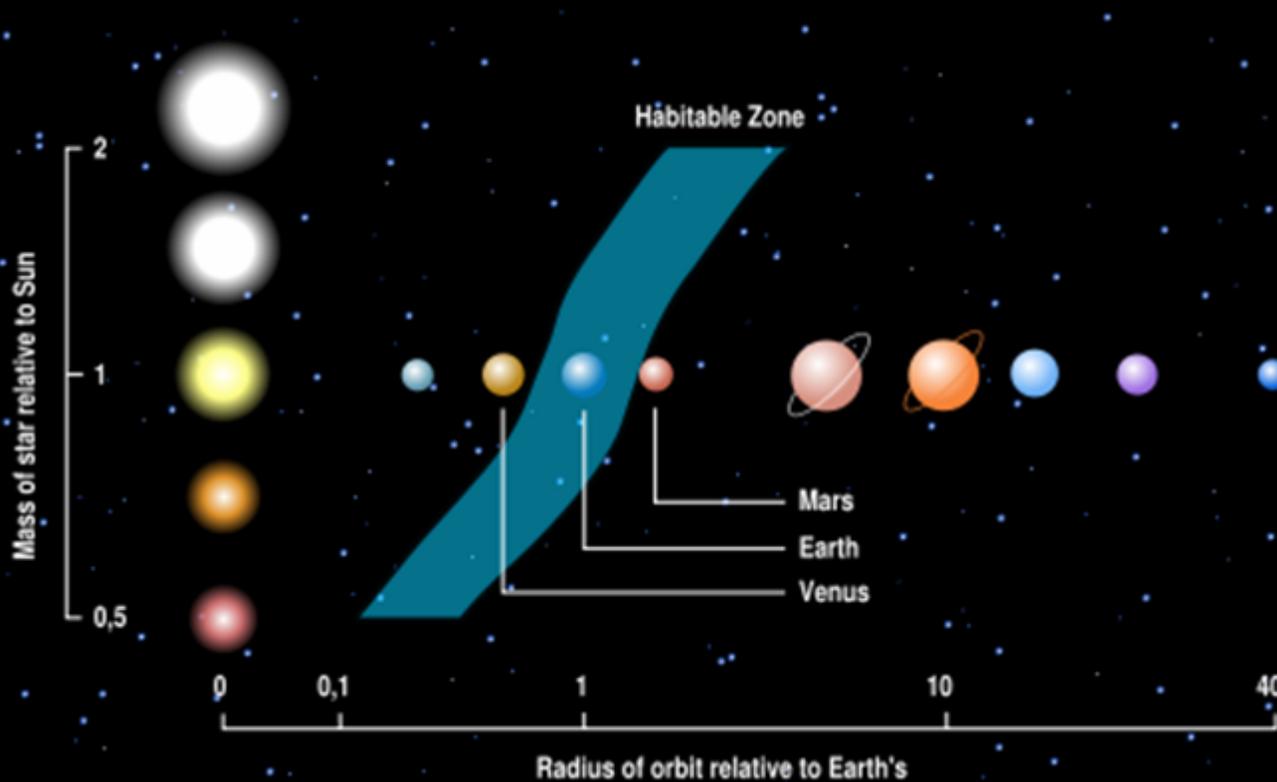
Potential eines Planeten, Leben zu entwickeln und zu erhalten

## Voraussetzungen:

- Energiequelle
- flüssiges Wasser auf Oberfläche
- Umwelt in der sich komplexe organische Moleküle bilden können

# Habitable Zone

Abstand zum Stern, bei dem flüssiges Wasser auf der Oberfläche eines terrestrischen Planeten existieren kann



Habitable Zone abhängig von Leuchtkraft des Sterns

- Innere Grenze: instabiler Treibhauseffekt, Verlust von Wasser in Weltraum
- Äussere Grenze: bestimmt durch Anteil Treibhausgase ( $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$ )

# Anforderungen an Stern

- Hauptreihenstern, Spektraltyp F - K
  - genügend lange Lebensdauer
  - UV Strahlung für atmosphärische Dynamik und Chemie
  - habitable Zone im Abstand ohne gebundene Rotation, spricht gegen M-Sterne
- Stabilität der habitablen Zone
  - langsame Sternentwicklung
  - keine Gasriesen in Nähe der habitablen Zone
- Geringe stellare Variabilität, rote Zwerge oft sehr aktiv
- Hohe Metallizität wegen Planetenbildung

# Anforderungen an Planet

- terrestrisch
- genügend Masse
  - für ausreichende Atmosphäre
  - für heißen Kern und geologische Aktivität
  - für Eisenkern, Dynamo, magnetischer Schutzschirm vor Sternwind und kosmischer Strahlung
- geringe Bahnexzentrizität, moderate Rotation, moderate Achsneigung für Jahreszeiten
- Chemie: C, H, O, N — Aminosäuren
- gegebenenfalls Satelliten von Gasriesen

# Venus – Erde – Mars



**$T = 457^{\circ}\text{C}$**   
 **$p = 90 \text{ bar}$**

Atmosphäre:

96%  $\text{CO}_2$

3,5 %  $\text{N}_2$

instabiles Treibhaus



**$T = 15^{\circ}\text{C}$**   
 **$p = 1 \text{ bar}$**

Atmosphäre:

77%  $\text{N}_2$

21 %  $\text{O}_2$

1 %  $\text{H}_2\text{O}$



**$T = - 80^{\circ}\text{C}$**   
 **$p = 0.007 \text{ bar}$**

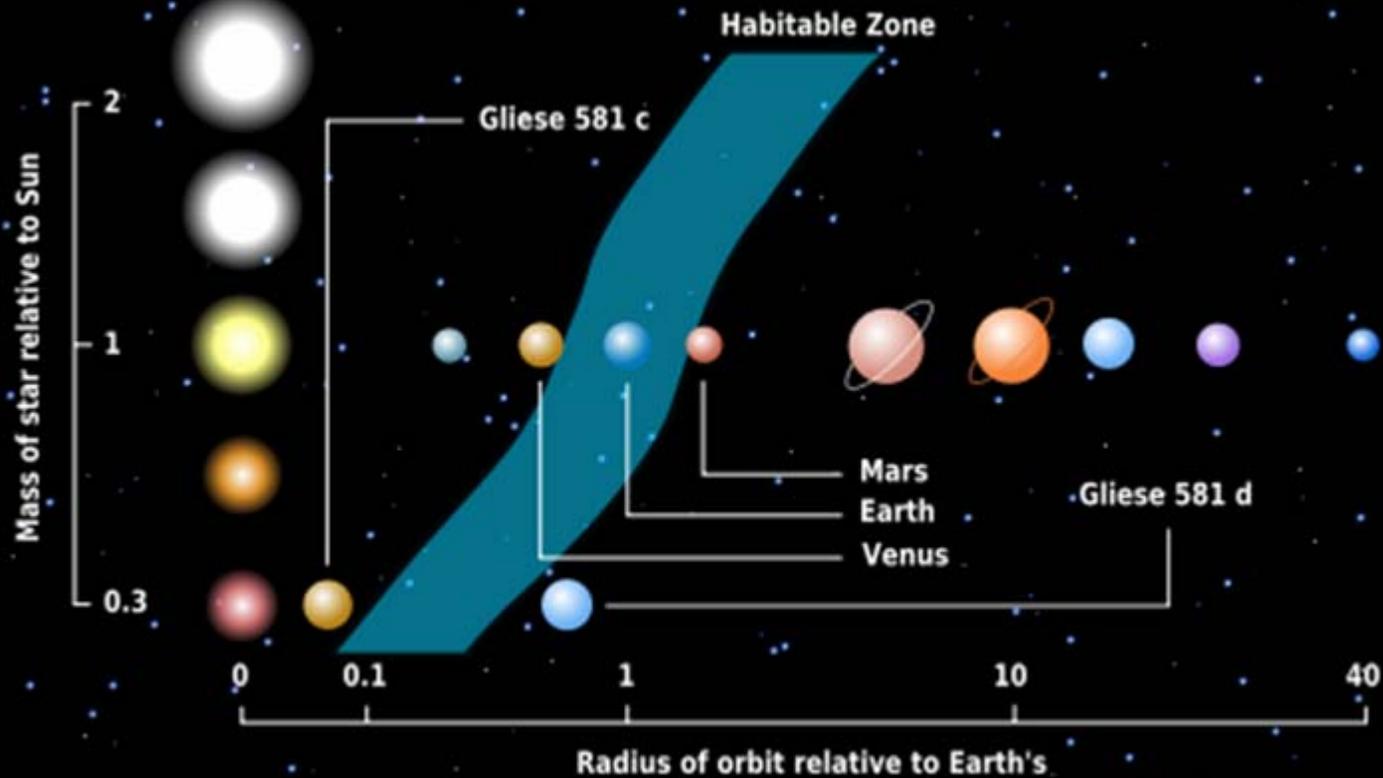
Atmosphäre:

95%  $\text{CO}_2$

2,7 %  $\text{N}_2$

Eisschrank

# Gliese 581 c,d



**Gliese 581: M3V, 0.31  $M_{\odot}$ , 6.3 pc**

Gliese 581 c: 0.073 AU, 12.9 d, 5  $M_{\oplus}$

Gliese 581 d: 0.25 AU, 84 d, 7.7  $M_{\oplus}$

# Zukünftige Missionen

2006

**CoRoT** (CNES)

Transits:

„Hot“ Earths

2009

**Kepler** (NASA)

Transits:

Earth-like planets

2012

**Gaia** (ESA)

Astrometry:

Statistics of gas giants

2017

**Plato?** (ESA)

Transits:

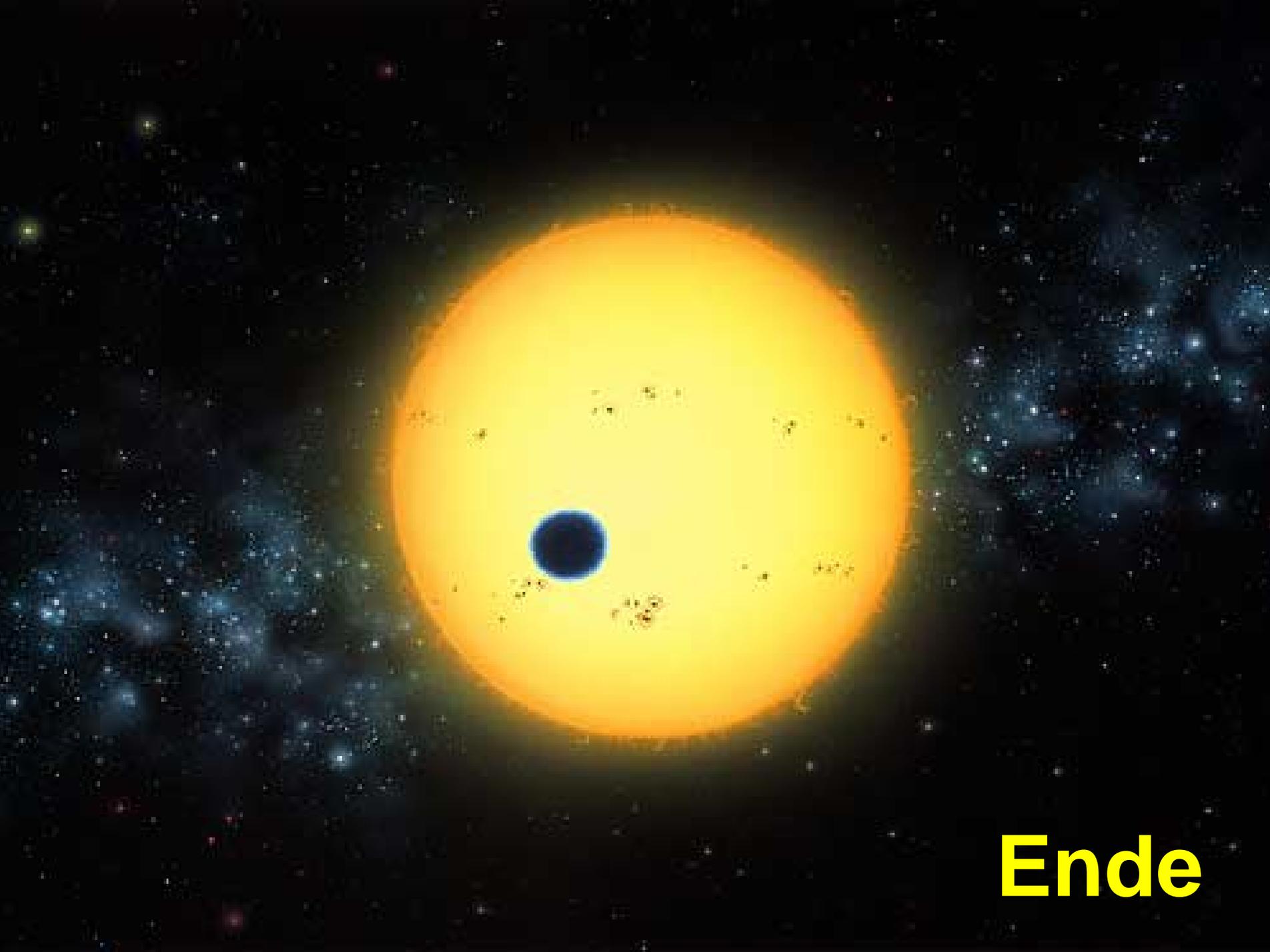
Earth-like planets

2020+

**Darwin?** (ESA)

Direct imaging:

Search for biomarkers



**Ende**