

Vorlesung  
Einführung in die Astronomie  
Wintersemester 2009/10

Kapitel:

# Extrasolare Planeten.

Martin Miller

# Extrasolare Planeten

## 0. Motivation

### 1. Wie entstehen Planeten?

### 2. Die erfolgreichste Suchmethode: Dopplerspektroskopie

### 3. Eigenschaften im Vergleich

### 4. Weitere Suchmethoden

### 5. Suche nach erdähnlichen Planeten

## Zusammenfassung

# Extrasolare Planeten

Erstentdeckung 1995  
(Pegasi 51)

Stand: 31-Oct-03:

The extrasolar planets Encyclopaedia:

112 Planetensysteme mit „normalen“ Sternen: 117 Planeten, 13

Mehrfachsysteme

2 Pulsarsysteme

1 „free-floating“ Planet

# Katalog aller extrasolaren Planetenkandidaten (415 Planeten, Stand: Dezember 2009)

Kandidaten welche durch Radialgeschwindigkeiten oder bei  
Astrometrie gefunden wurden

326 Planetensysteme  
385 Planeten  
40 Systeme mit mehreren Planeten

Exoplaneten mit Transit

64 Planetensysteme  
64 Planeten  
3 Systeme mit mehreren Planeten

Kandidaten welche durch 'Microlensing' gefunden wurden

9 Planetensysteme  
10 Planeten  
1 Systeme mit mehreren Planeten

Kandidaten welche durch Bildgebende Verfahren gefunden wurden

9 Planetensysteme  
11 Planeten  
1 Systeme mit mehreren Planeten

Kandidaten welche durch 'Timing' gefunden wurden

6 Planetensysteme  
9 Planeten  
2 Systeme mit mehreren Planeten

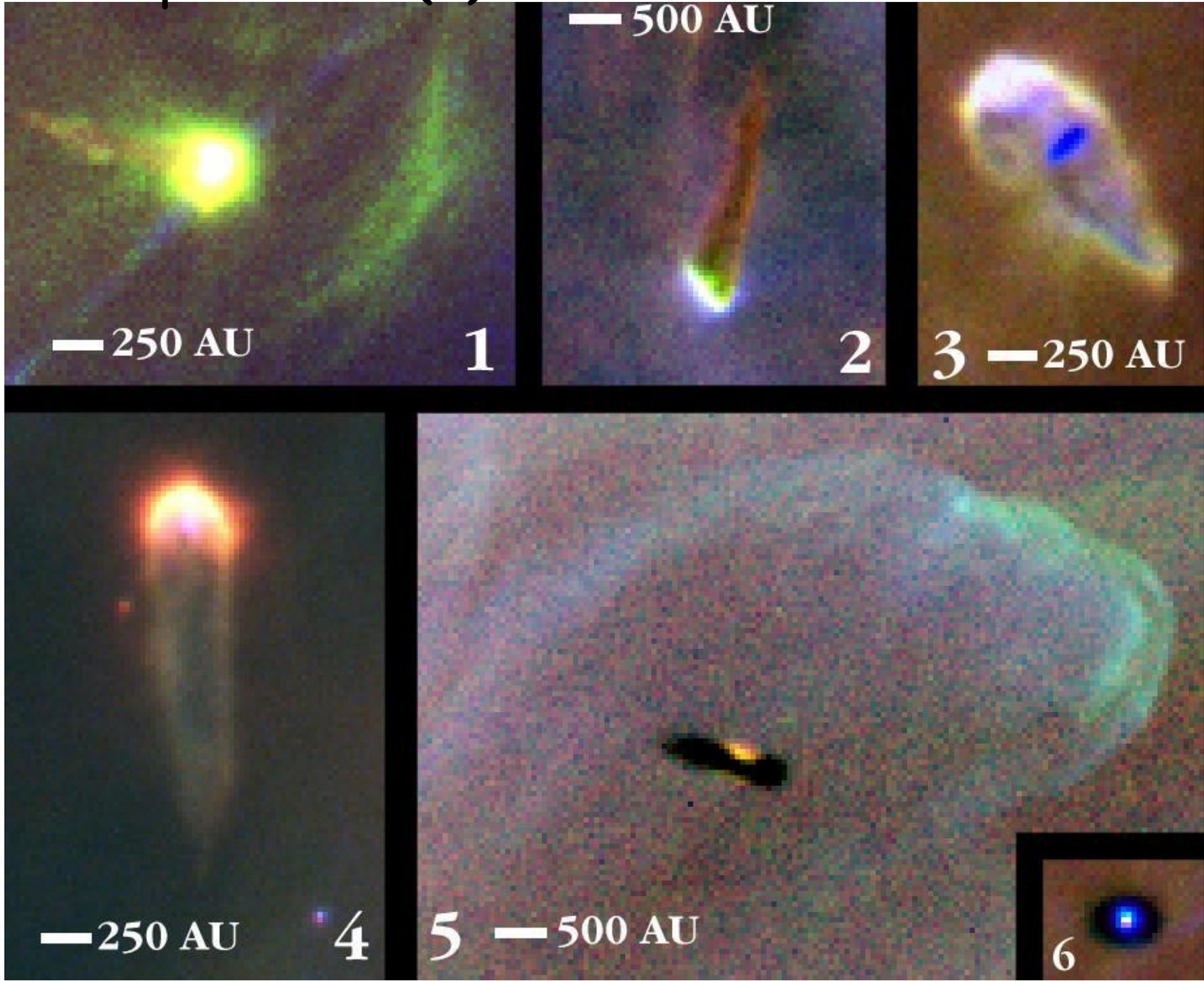
# Stern- und Planetenentstehung im Orion Nebel



**Orion Nebula**

**HST Cycle 4**

# Protoplanetare(?) Scheiben in Orion



# Massenverhältnisse im Sonnensystem

Sonne / Jupiter =  $10^3$       Jupiter / Erde = 330



Planet:  $M < 13 M_J$

Stern:  $M > 80 M_J$

# 1. Was ist ein Planet?

**Entstehung** von Sternen und braunen Zwergen:

in dichten Kernen interstellarer Gas- und Staubwolken  
durch Gravitationskollaps

Entstehung von Planeten:

in Gas- und Staubscheiben um junge Sterne  
durch Akkretion, ...

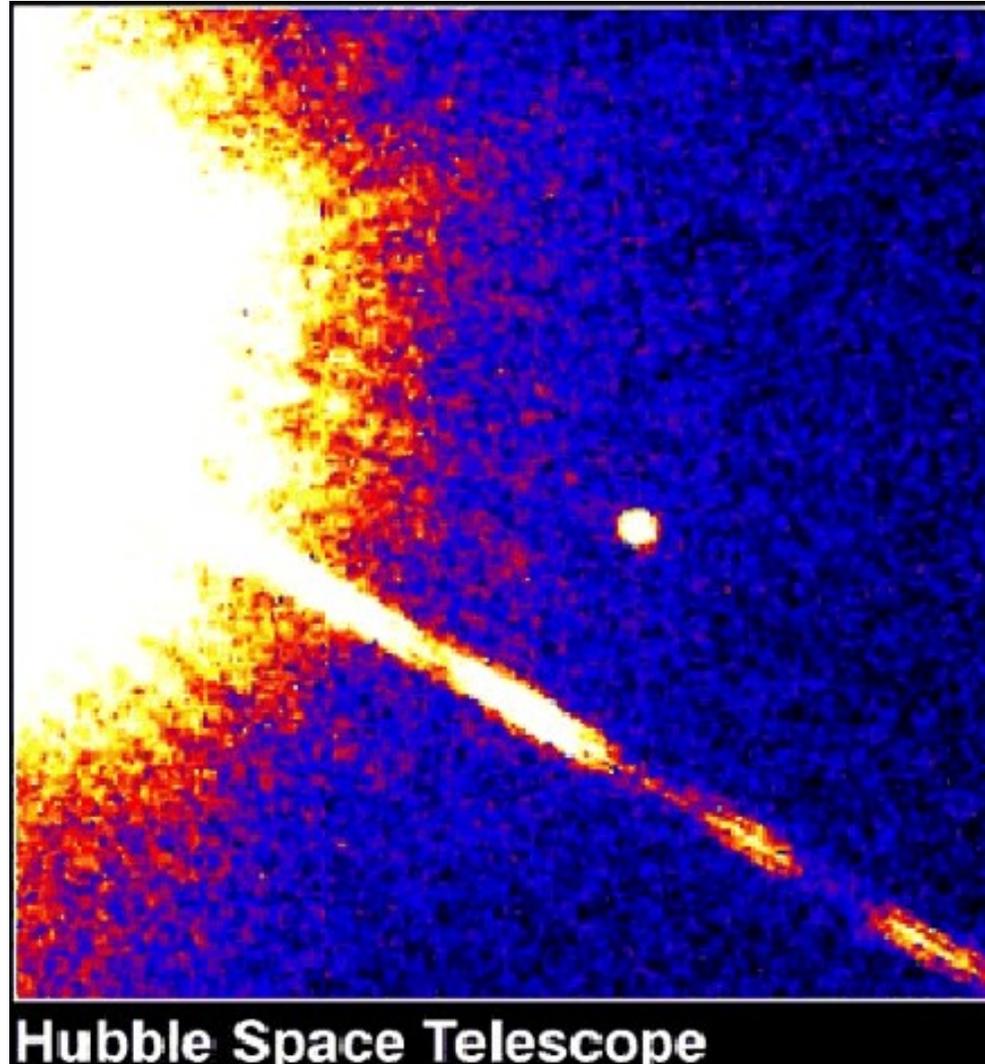
## Masse

Planeten:  $M < 13M_{\text{jupiter}}$  (Keine Fusionsprozesse)

Braune Zwerg:  $13M_{\text{jupiter}} < M < 80M_{\text{jupiter}}$  (Deuteriumbrennen)

Sterne:  $80M_{\text{jupiter}} < M$  (Wasserstoffbrennen)

# Direkter Nachweis eines braunen Zwerges



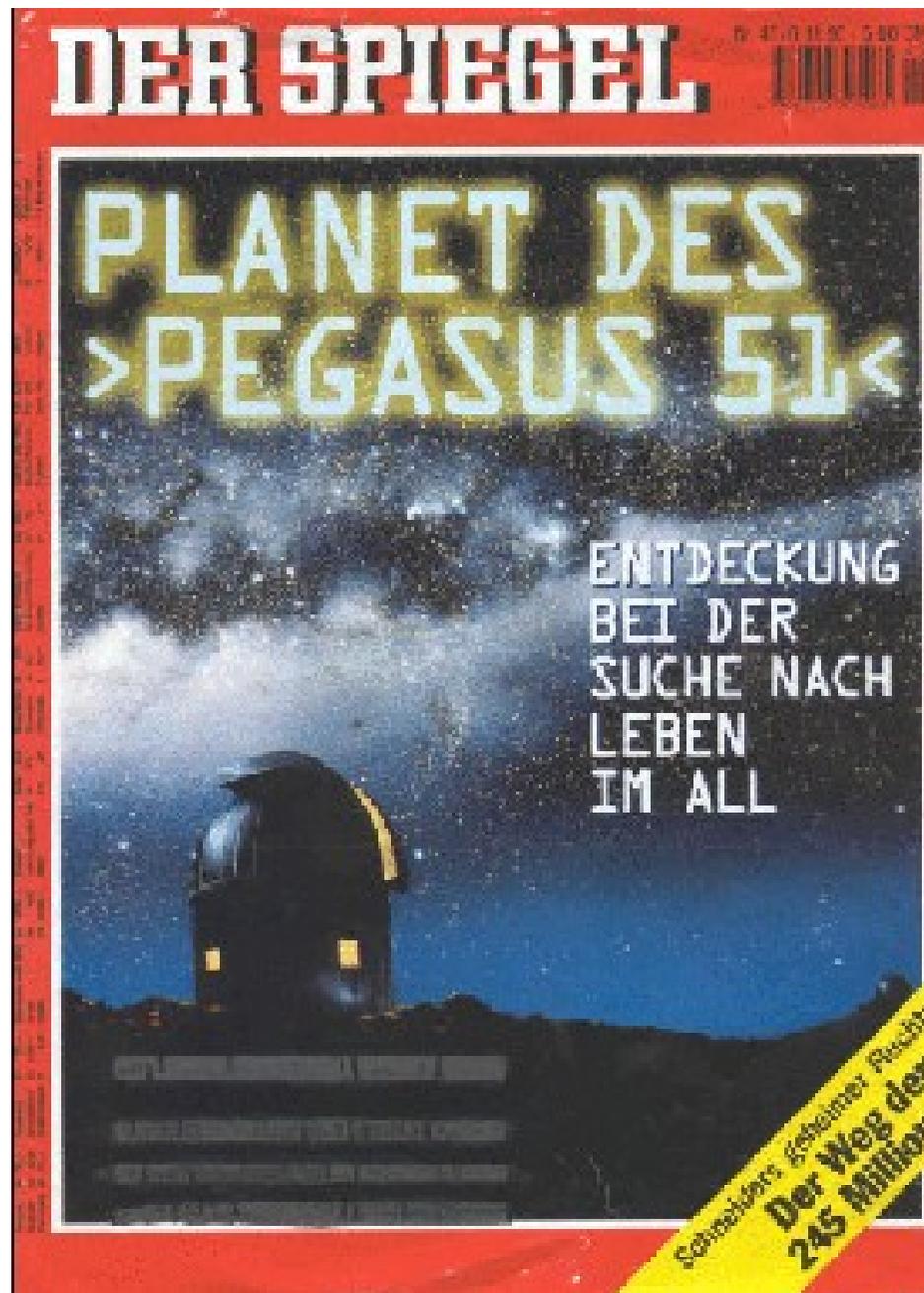
Gliese 229B

5.8pc Entfernung

Kontrast: 5000,  $\alpha=7$  arcsec (40 AE)

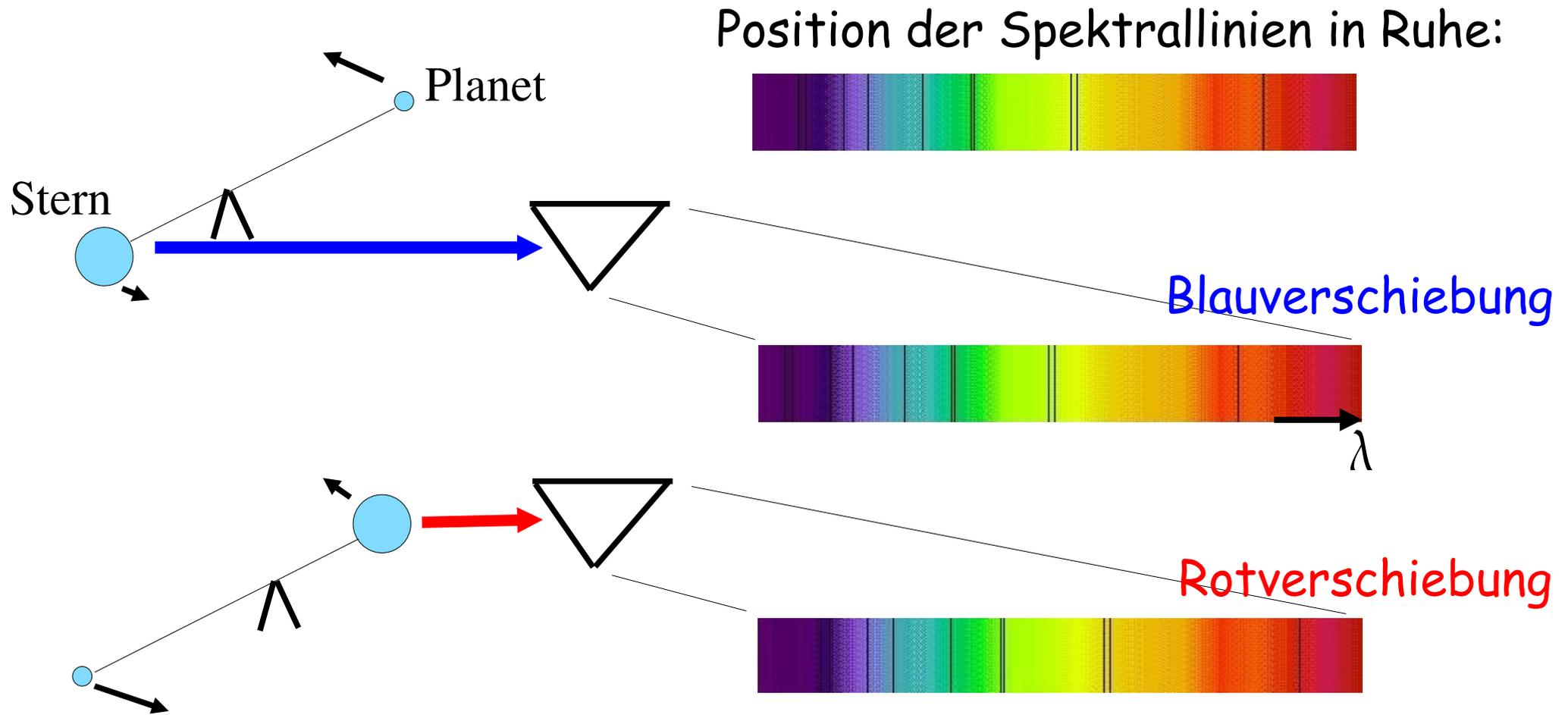
Sonne-Jupiter in 10 pc Entfernung: 0.5 arcsec,

Jupiter 200 000 mal schwächer



1995

## 2. Die Suchmethode: Dopplerspektroskopie

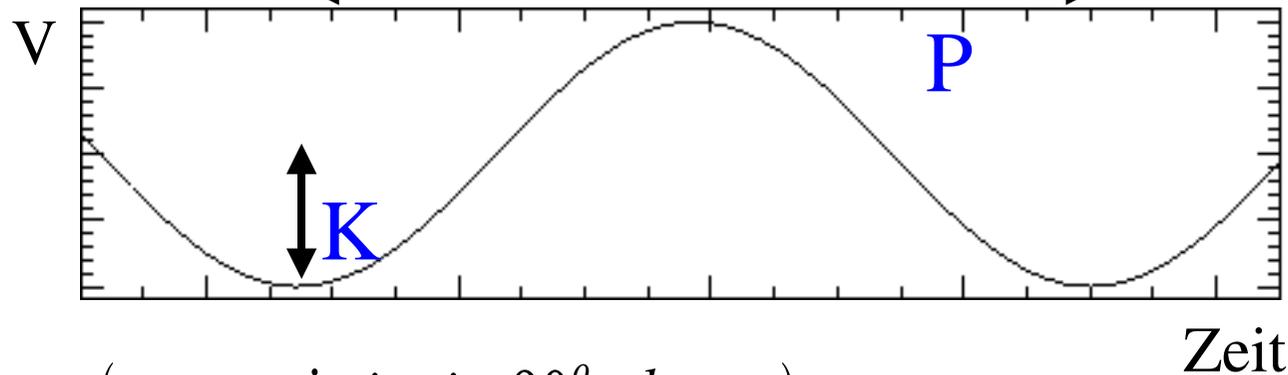


Dopplereffekt:  $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} = 10^{-8} \Rightarrow v = 3 \text{ m/sec}$

## 2. Dopplerspektroskopie

Stern: -Masse aus Sterntyp

-Periode  $P$ , Amplitude  $K$  aus Dopplerspektroskopie



$$(v = v_{ST} \sin i, \quad i = 90^\circ \text{ edge on})$$

Planet:

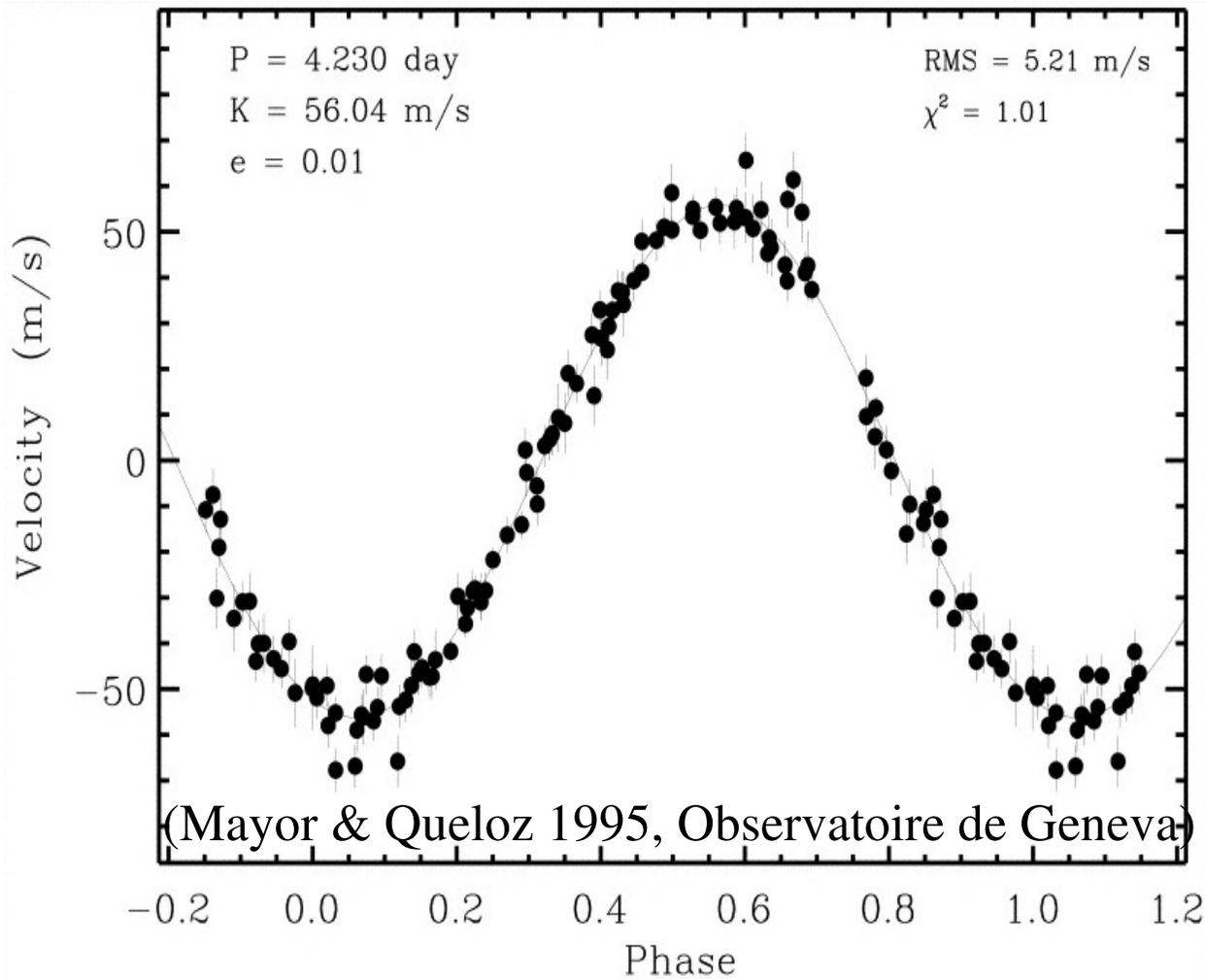
-Bahnradius  $a^3 = \frac{GM_{ST}}{4\pi^2} P^2$

-Bahngeschwindigkeit  $v_{PL} = \sqrt{\frac{GM_{ST}}{a}}$

-Planetenmasse  $M_{PL} = M_{ST} v_{ST} / v_{PL}$

$$M_{PL} \sin i = K \left( \frac{M_{ST}^2 P}{2\pi G} \right)^{1/3}$$

## 2. Ein typisches Beispiel: 51 Pegasi



*Sternmasse*  $0.95 M_S$

*Spektraltyp* G5

*Entfernung* 15.4 pc

*Periode* 4.2 Tage

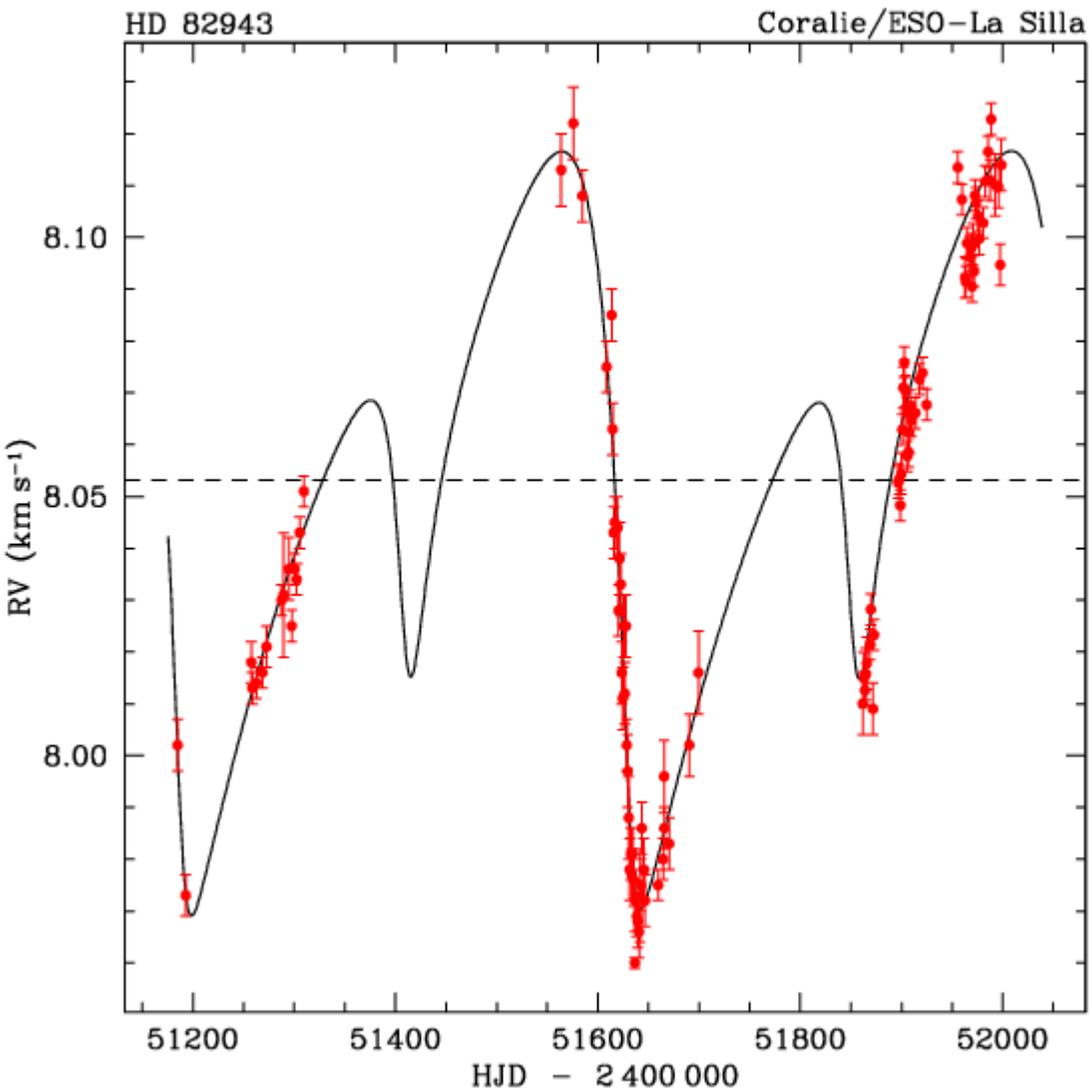
*Amplitude* 56 m/sec

*Bahnradius* 0.05 AE

*Masse*  $M_{PL} \sin i = 0.44 M_J$

*Jupiter*:  $P = 12$  Jahre,  $K = 13$  m/sec,  $a = 5$  AE

*Merkur*:  $P = 88$  Tage,  $K = 10$  cm/sec,  $a = 0.4$  AE,  $M = 2 \cdot 10^{-4} M_J$



## Kompliziertere Leuchtkurven Mehrfachsysteme

Periode Tage	Exzentrizität	Masse Msini Mjupiter	Halbachse Radius AE
444	0.41	1.6	1.2
221	0.52	0.88	0.3

## 2. Dopplerspektroskopie: Anmerkungen

### Observatorium:

- Stabilität des Spektrographen: simultane Messung von Temperaturschwankungen, Vibrationen  
Referenzspektren (zB Argon-Lampe) Genauigkeit: 3m/sec
- Stabilität der Uhren Überwachung, Auffällige Perioden

### Zentralstern:

- Pulsationen des Sterns Periodenlängen
- Rotation des Sterns (Flecken) Auswahl sonnenähnlicher Sterne

### Planeten:

- Exzentrizität der Umlaufbahn
- Mehrfachsysteme

### Auswahleffekte: Dauer & Genauigkeit:

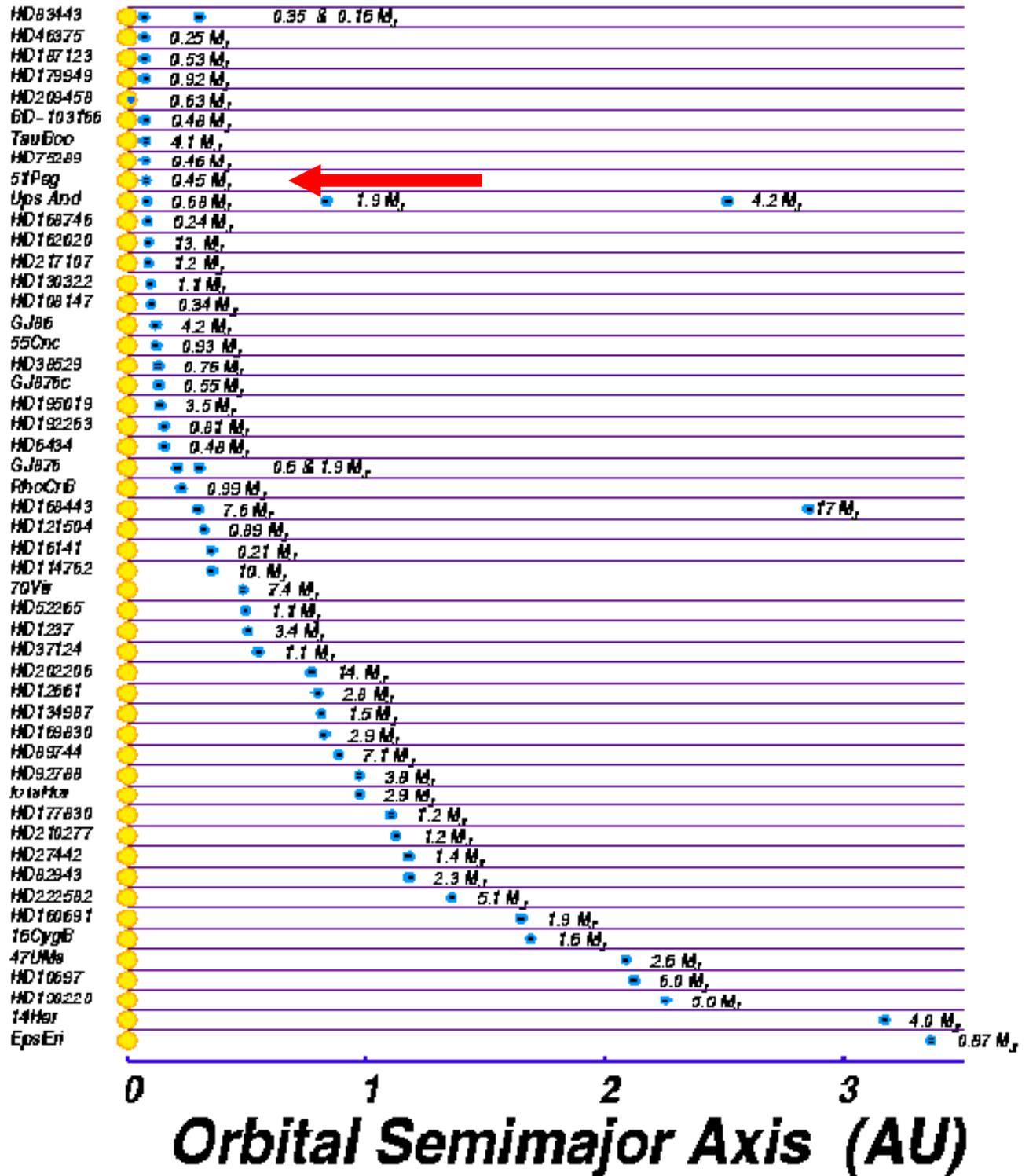
1. Messungen seit ca. 8 Jahren, Größte bisher gemessene Periode: 6 J. (Stand 2003)
2. Die momentane beste Messgenauigkeit von 3 m/sec erlaubt es Planeten mit 0.5  $M_{\text{jup}}$  und Bahnradius  $a=2AE$  zu detektieren.

# 3. Entdeckte Planeten:

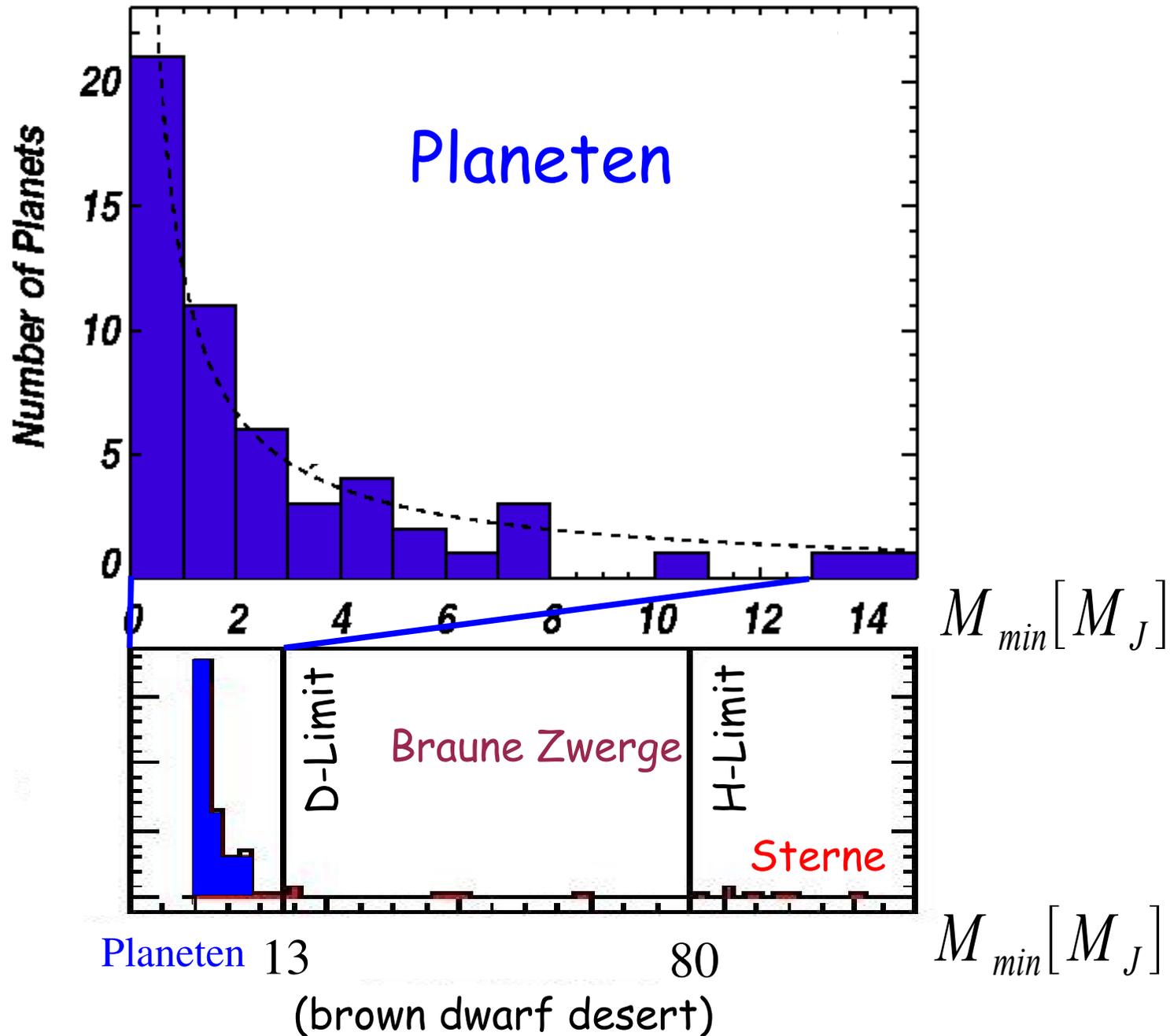
Stichtag: 31 Oktober 2002:  
 87 Planetensysteme  
 101 Planeten  
 11 Mehrfachsysteme

Stichtag: 31 Oktober 2003:  
 102 Planetensysteme  
 117 Planeten  
 13 Mehrfachsysteme

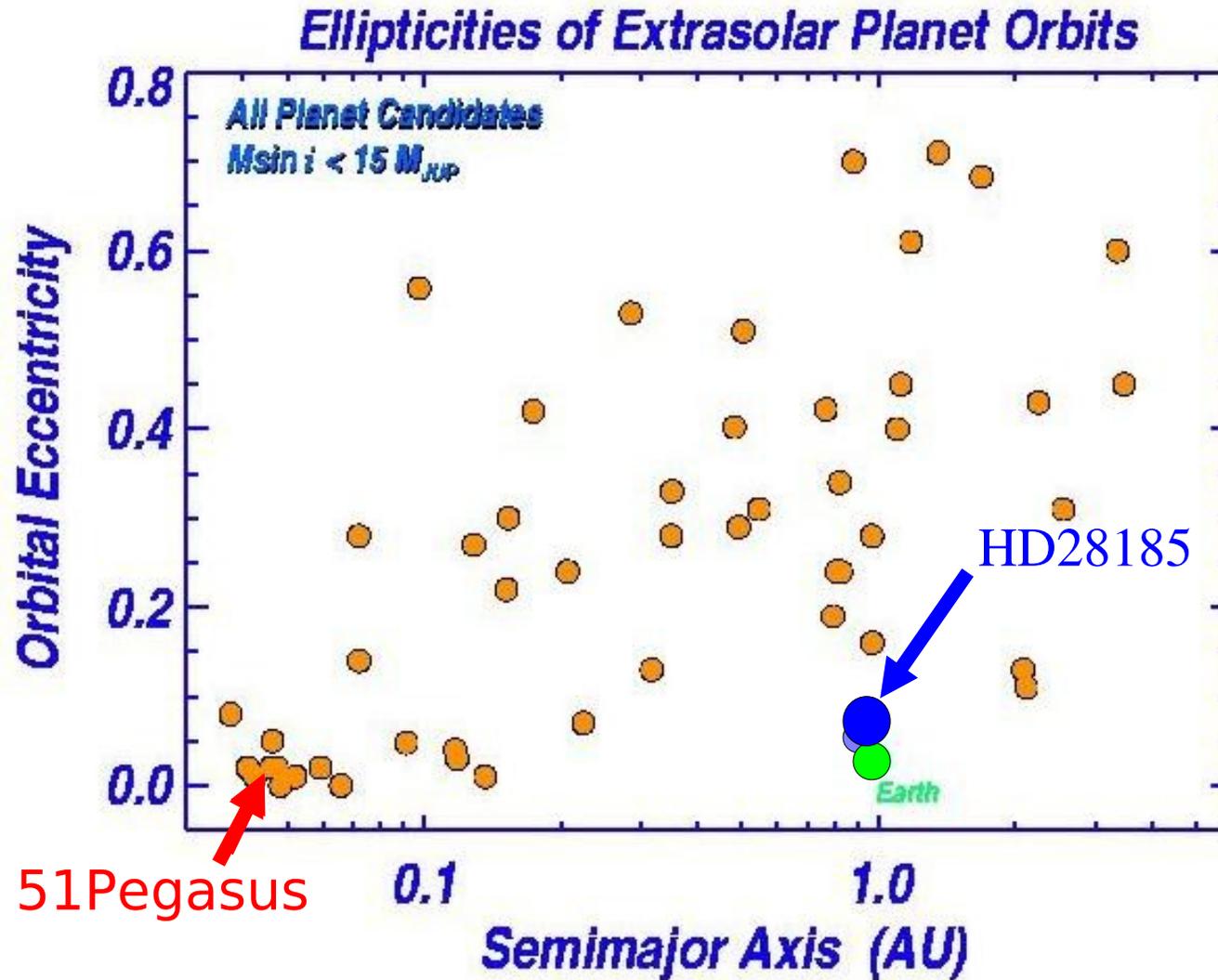
Definition:  
 $M < 13 M_{\text{jup}}$  (kein D-Brennen)



# 3. Eigenschaften: Massen



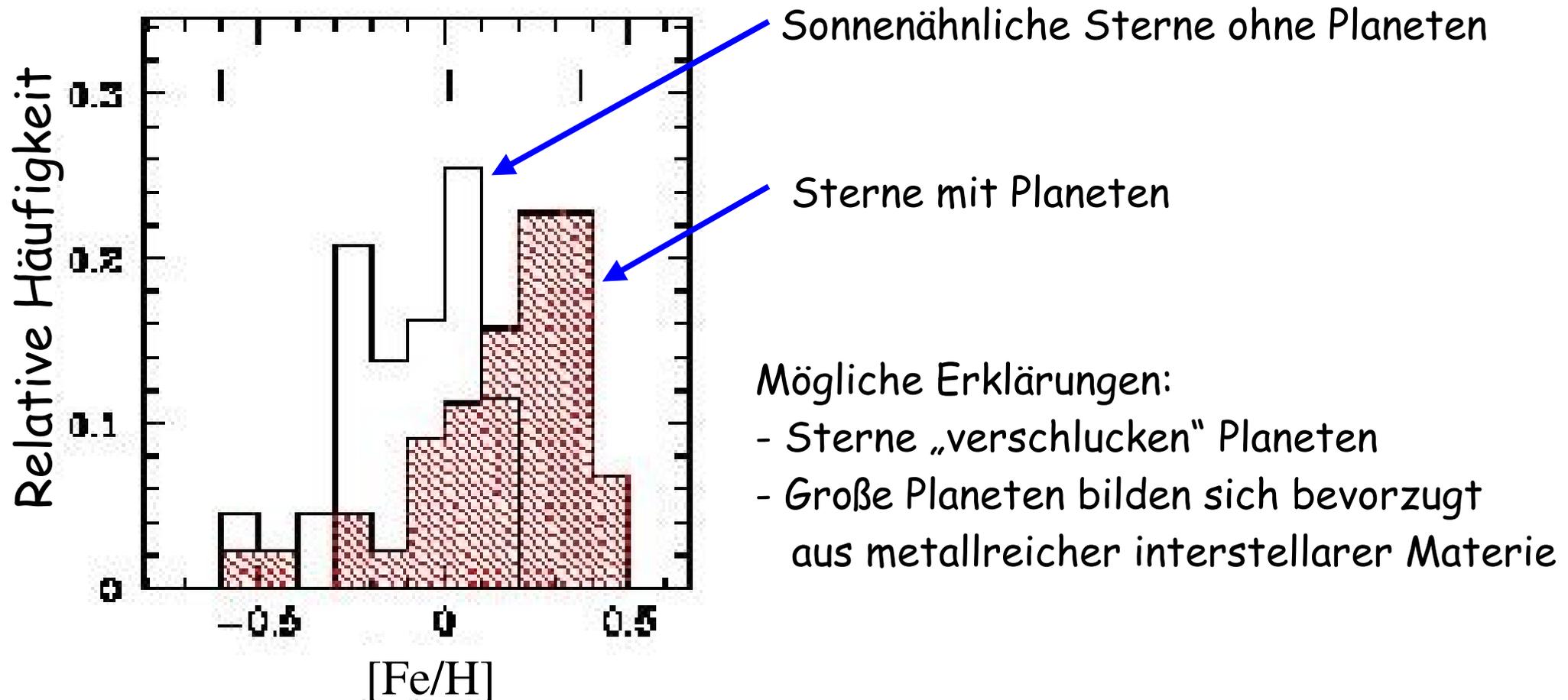
### 3. Eigenschaften der bisher entdeckten Planeten: Orbits



	Extrasolare Systeme	Sonnensystem	$a^3 \propto P^2$ Auswahleffekt!
Bahnradien	0.03 - 2 AE	0.4 - 40 AE	
Elliptizität	0 - 0.8	~0	
Periodenlängen	3 Tage - 7 Jahre	88 Tage - 248 Jahre	

### 3. Eigenschaften der bisher entdeckten Planeten: Metallizität

Viele der bisher entdeckten Planetensysteme sind metallreich im Vergleich zu Sternen der Sonnenumgebung  
(Das ist kein Auswahleffekt!)



## 4. Suchmethode „Timing“, „Planeten“ um Pulsare

- Neutronensterne (schnelle Rotation, B-Feld)
- Rotationsachse und Achse des Magnetfeldes sind nicht parallel  
"Leuchttürme" im Radiobereich
- Spinperioden: Sekunden bis Millisekunden  
Sehr genaue Zeitstandards
- Einige Hundert bekannt
- Die Abstände zwischen den eintreffenden Pulsen variieren,  
wenn Planeten vorhanden sind.

- **Erstes entdecktes extrasolares Planetensystem:**

6.2ms Pulsar PSR 1257+12 (500 pc) (Wolszcan & Frail 1992)

Masse    Bahnradius    Periode

2 Planeten: 2.8  $M_{\text{erde}}$      $a=0.47$  AE     $P=98$  Tage

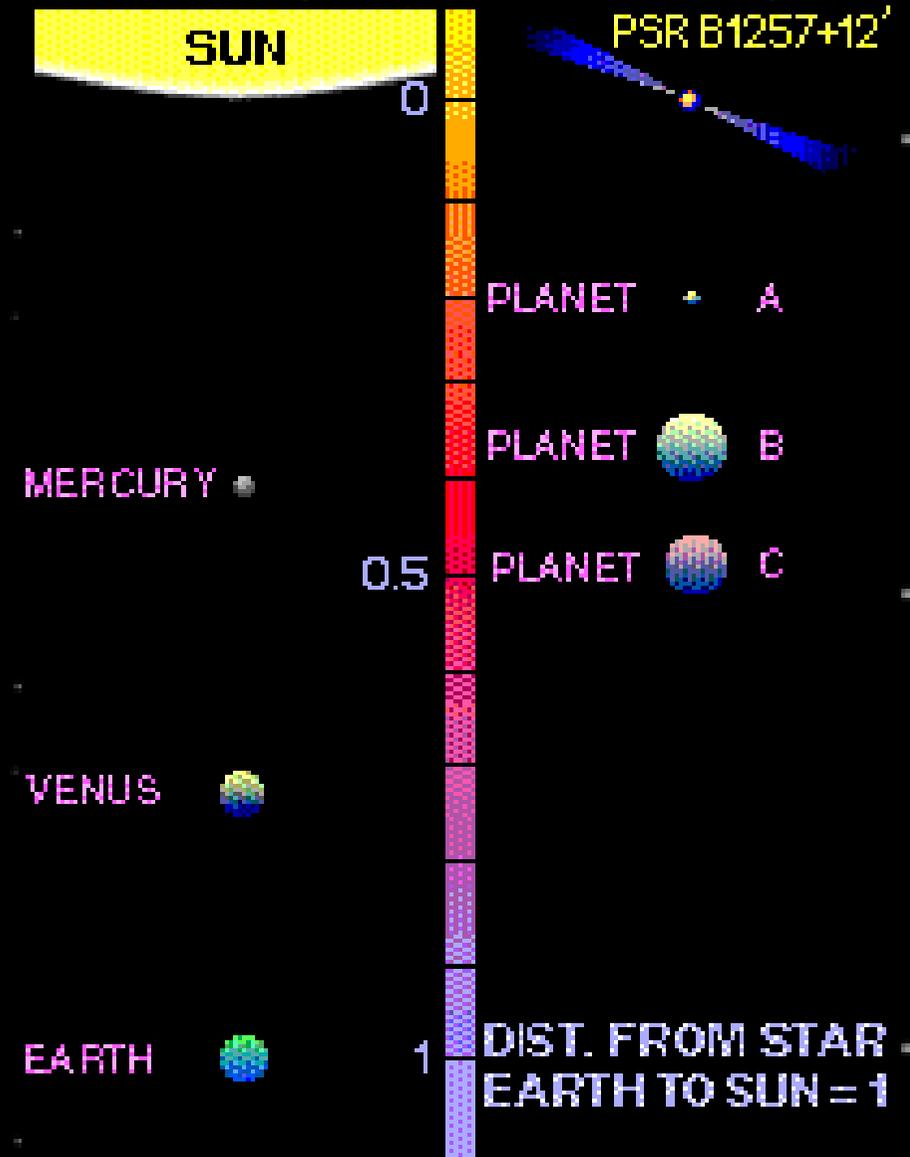
3.4  $M_{\text{erde}}$      $a=0.36$  AE     $P=67$  Tage

# 3 Planeten um den Pulsar PSR 1257+12

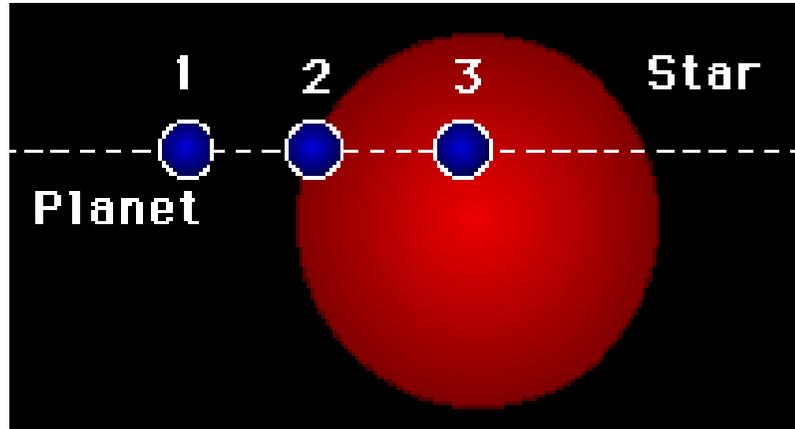
Pulsar Entfernung 1,500 Lichtjahre  
(Sternbild Virgo)

Periode 6.2 Millisekunden

Planeten	a	b	c	d
Masse (Erde=1)	0.015 ?	3.4	2.8	9.5
Halbachse	0.19 ?	0.36	0.47	3.5
Bahnperiode	25.34 d	66.54 d	98.22 d	
d ~170 Jahre				



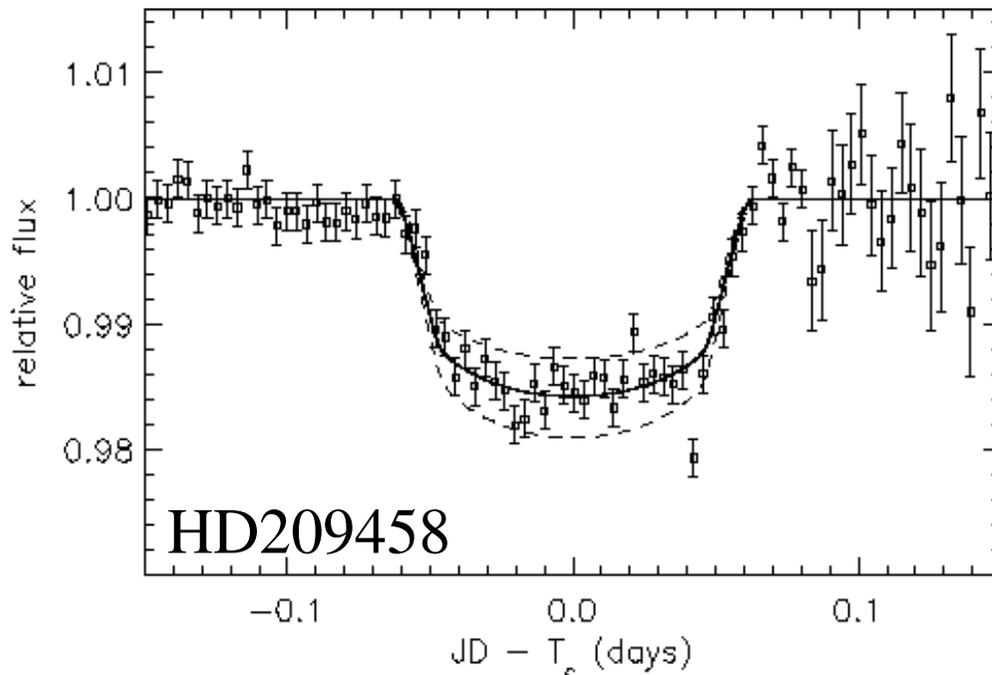
# 4. Suchmethode: Transits



$$\frac{\Delta L}{L_{ST}} = \left( \frac{R_{PL}}{R_{ST}} \right)^2 \rightarrow R_{PL}$$

$$P \rightarrow a$$

Jupiter/Sonne:  $\Delta L/L = 1.2 \cdot 10^{-2}$   
 Erde/Sonne:  $\Delta L/L = 8.4 \cdot 10^{-5}$



**Ein erster Erfolg dieser Methode!**

$$M_{PL} \sin i = 0.63 M_J, \quad i = 90^\circ \text{ (Transit)}$$

$$\Delta L/L$$

$$\rightarrow$$

$$R_{PL} = 1.3 R_J$$

$$M_{PL} = 0.63 M_J$$

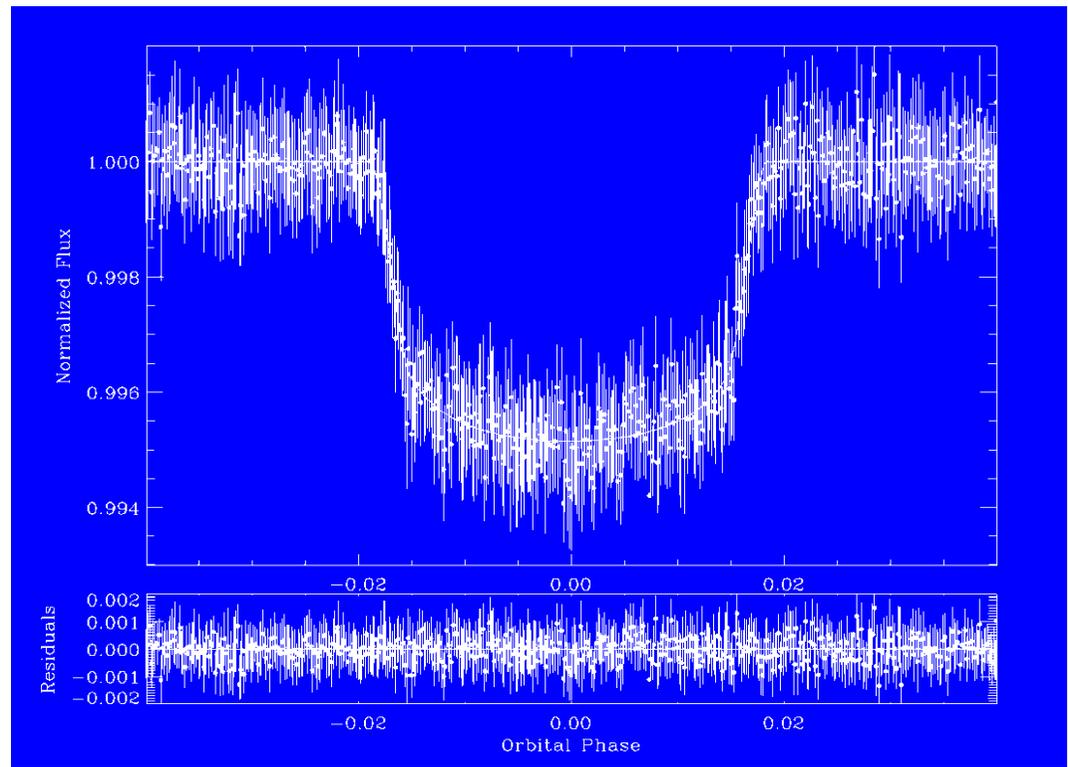
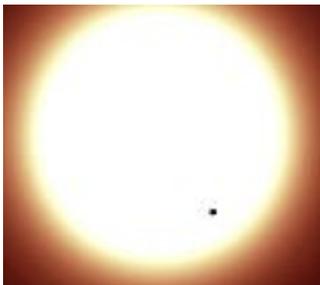
$$\rho = 0.4 \text{ gcm}^{-3}, \quad \rho = 0.3 \rho_J = 0.07 \rho_E$$

# Suchmethode: Transit mit dem Satelliten CoroT

Lichtkurve von CoroT-3b

Entdeckung eines erdgrossen

Planeten: CoroT-7b



Star COROT-7

Constellation Monoceros

Apparent magnitude (mV) 11.7

Distance 489 ly, 150 pc)

Spectral type G9V[1]

Orbital elements

Semimajor axis (a) 0.0172 AU

Orbital Periode 20.48604 h

Physical characteristics

Mass 4.8  $M_{\oplus}$

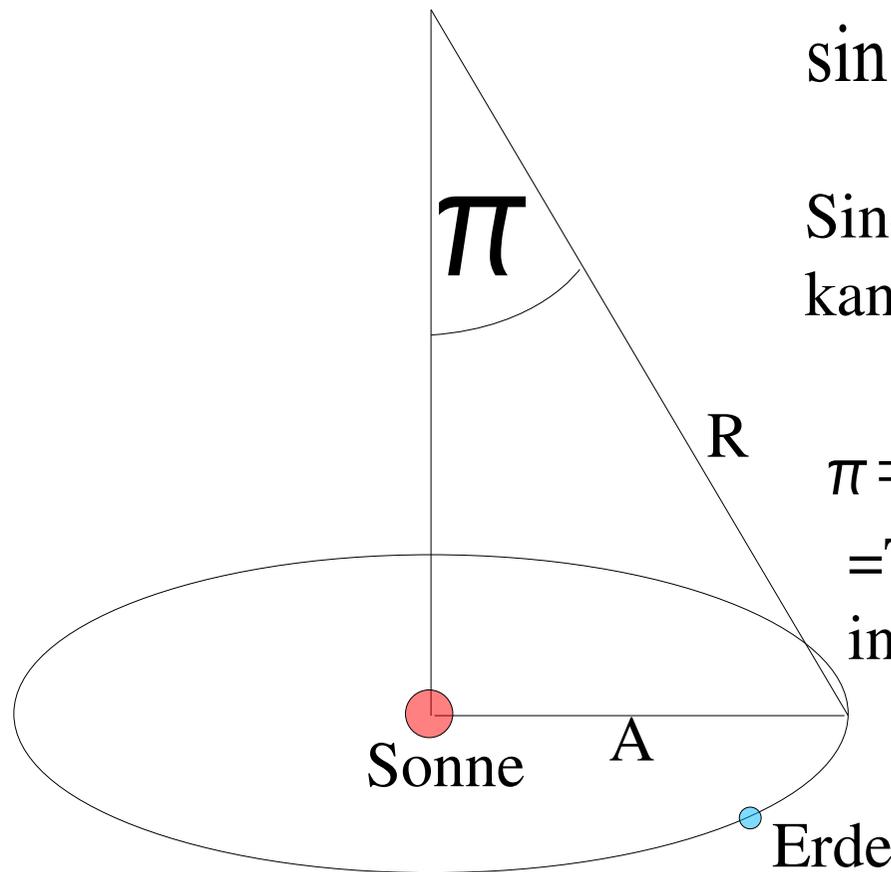
Radius 1.68  $R_{\oplus}$ )

Density ( $\rho$ )  $5.6 \pm 1.3[2]$  kg/m<sup>3</sup>

Surface gravity (g) 2.85 g

Temperature (T) 1300–1800 K

# Wiederholung: Parallaxe



$$\sin \pi = \frac{r}{a}$$

Sind  $\pi$ ,  $a=AE$  bekannt  
kann die Entfernung  $R$  bestimmt werden

$\pi = 1''$ ,  $r = 2 \cdot 10^5 R_{Erde} = 1 \text{ pc} = 3.3 Lj$   
=Typischer Abstand zwischen 2 Sternen  
in Sonnenumgebung

Hipparcos-Satellit:

- 1 milliarcsec Genauigkeit
- Entfernungsbestimmung bis zu einigen 100pc
- 2000 Sterne innerhalb  $R=25\text{pc}$

# 4. Zukünftige Suchmethode: Astrometrie

Sonne aus 10pc Entfernung: Winkeländerung durch Jupiter nur 0.5 milliarcsec  
Hipparcos-Satellit bestimmte Positionen mit 1 milli arcsec Genauigkeit,  
es gelang kein Nachweis, auch nicht für bekannte Systeme

- + Nachweis von Planeten mit großen Bahnradien eher möglich
- Sehr hohe räumliche Auflösungen sind nötig (Space Interferometry)
- Bevorzugt nahe Planetensysteme
- Terrestrische Atmosphäre stört
- Variation des photometrischen Sternzentrums durch Sternflecken

# 4. Zukünftige Suchmethode: Astrometrie

Sonne und Bahn der Sonne  
aus 10pc Entfernung:

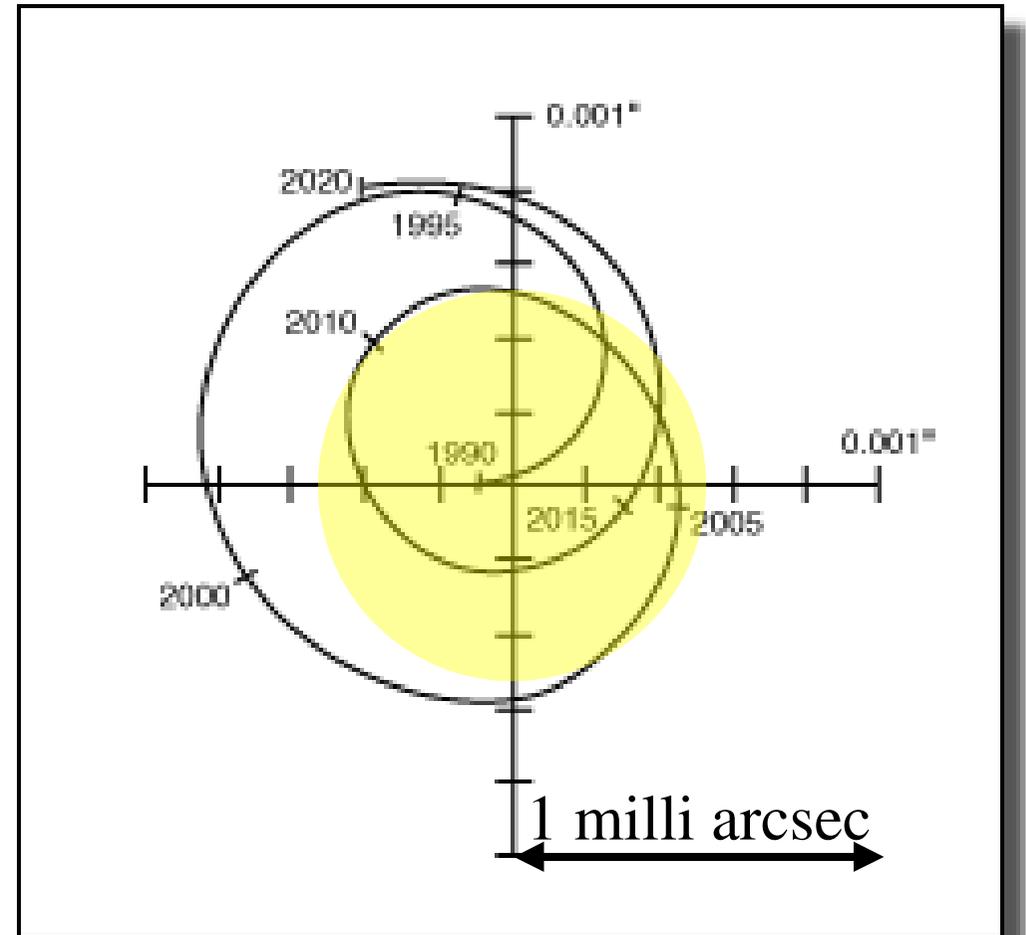
Astrometrie

Doppler-  
spektroskop

$$\alpha = \frac{M_{PL}}{M_{ST}} \times \frac{a_{PL}}{d}$$

Spektraltyp

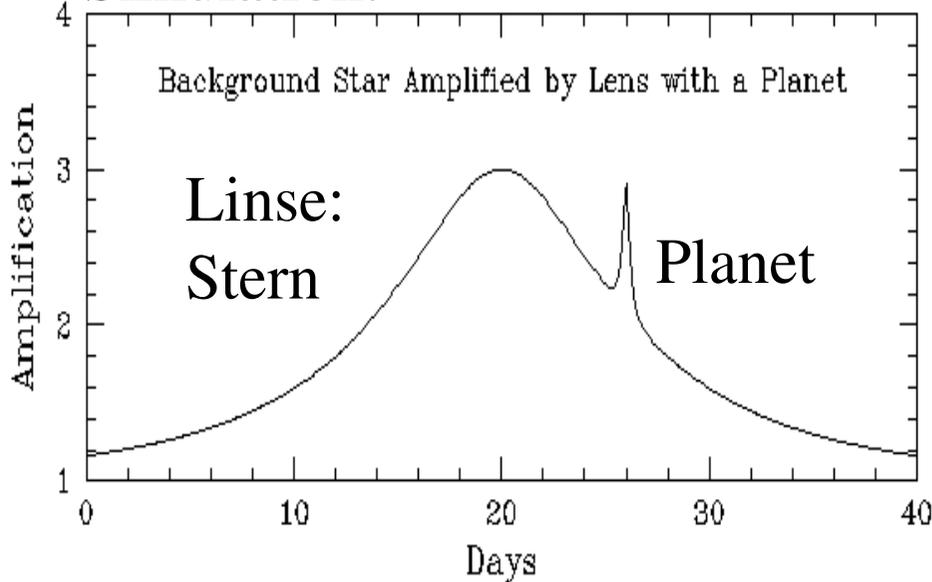
Sternparallaxe



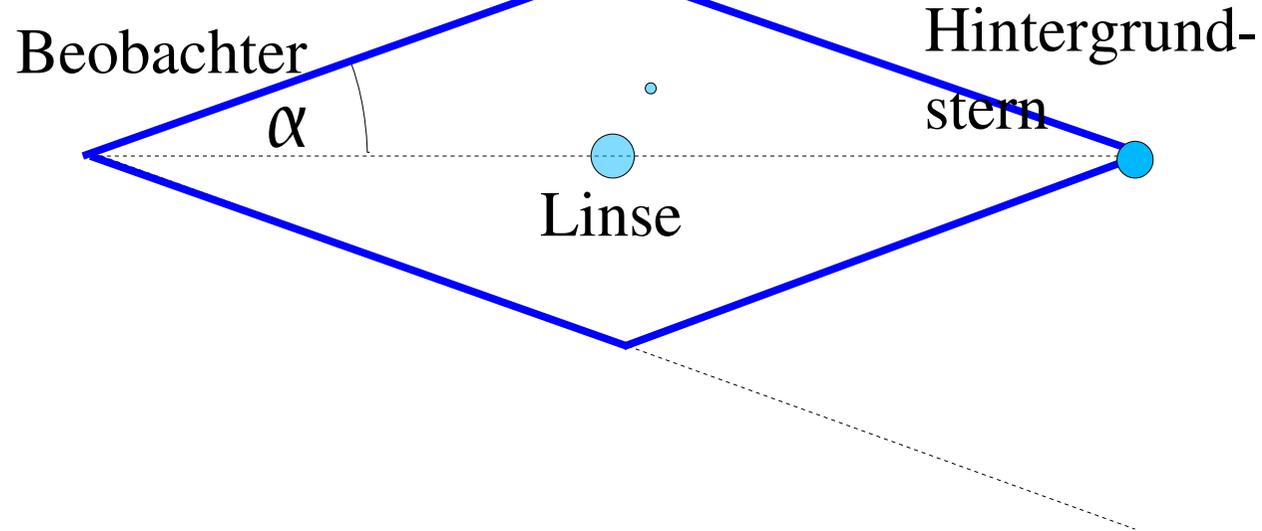
Bestimmung von  $M_{PL}$

# 4. Suchmethode: Gravitationslinse

Simulation:



Skizze:



$$\Delta t \propto \sqrt{M_{planet}}$$

- zufällig
- einmalig
- + erfolgreich (8 Pl. gefunden)
- + Detektion isolierter Planeten
- + Detektion kleiner Planeten

27.7.2001: 6 Objekte  
mit Hubble Space Telescope  
in M22 (d=2.6kpc):

$$\Delta t < 20\text{h} \Rightarrow$$

$$M \approx 80 M_E = 0.3 M_J$$



## 4. Suchmethode: direkter Nachweis im IR Fotos von Planeten

Sonne-Erde (1AE) aus 1pc (3.3Lj)Entfernung:  $\Theta = 1 \text{ arcsec}$

Teleskop-Beugungsscheibe (HST: 2.4m, VLT: 8m):

$$D = 10\text{m}, \lambda = 600\text{nm}, \Theta = \frac{\lambda}{D} = 12 \text{ milli arcsec}$$

**Probleme:** - Luftunruhe:  $\Theta > 200 \text{ milli arcsec}$

(aber: Adaptive Optiken erfolgreich!)

- Helligkeitskontrast im Optischen:  $10^9$

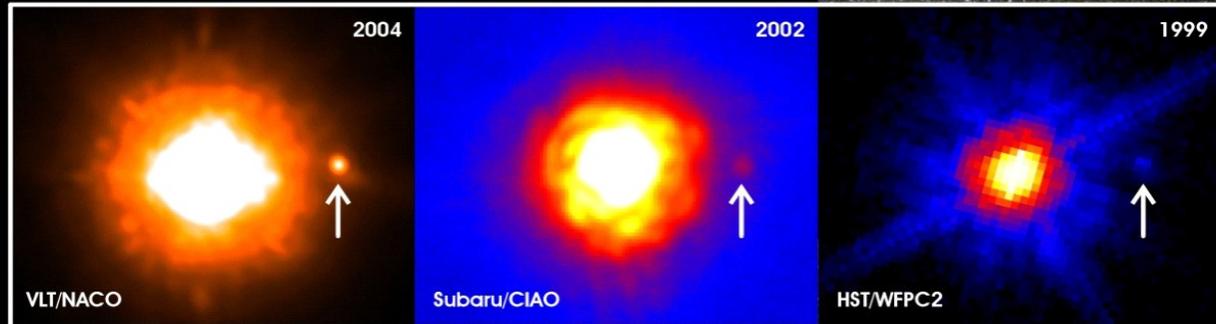
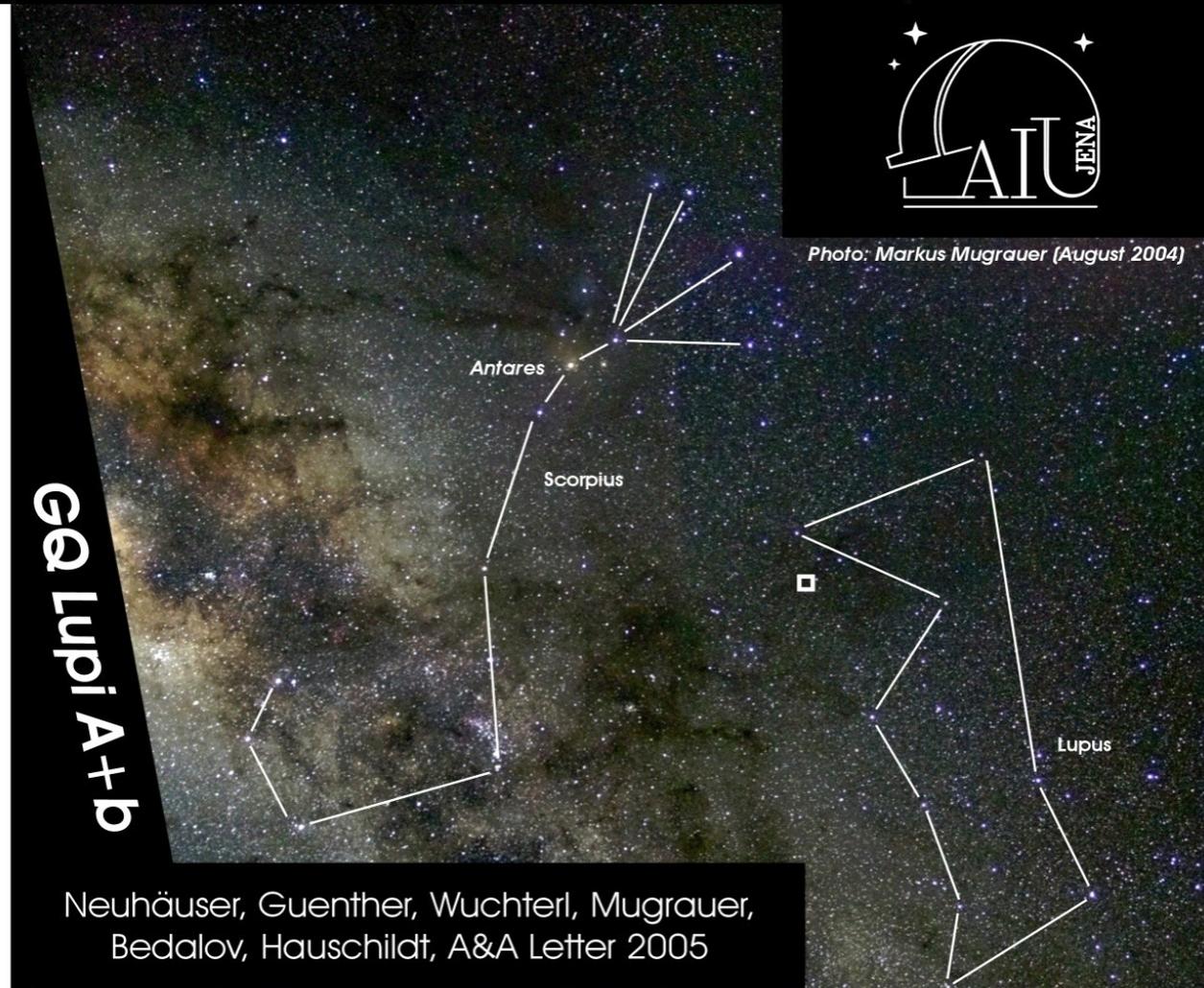
(aber: sehr viel kleiner im NIR-Bereich)

# Heißer Planet umläuft GQ Lupi

Entdecker: R. Neuhäuser,  
Universität Jena  
Mit 8m VLT

Oberflächentemp. 2000 K  
Radius 2x Jupiter  
Masse 1-42 x Jupiter

GQ Lupi A+b



# 3 Planeten um den Stern HR 8799

Entdecker:

C. Marois

10 m Keck -  
Infrarotteleskop

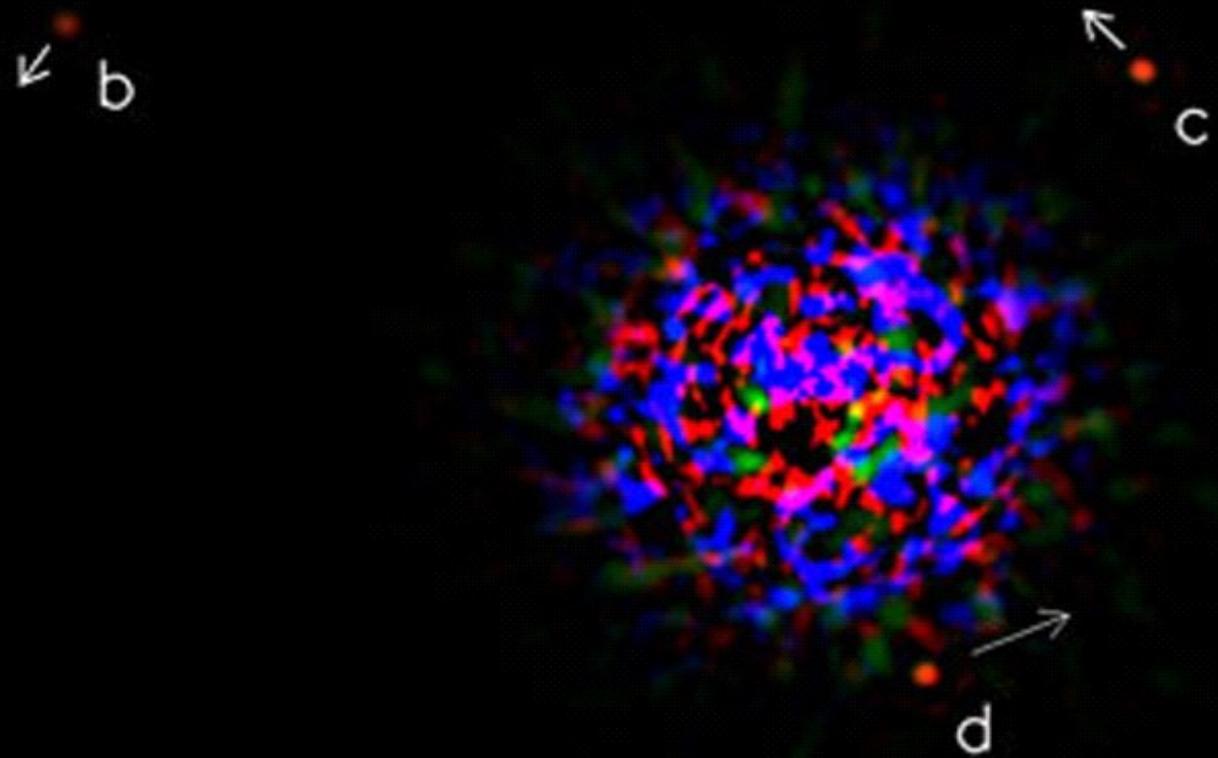
(Hawaii)

HR 8799: Stern mit

1.5 facher Sonnenmasse

Die Planeten haben mehrere  
Jupitermassen,

Der innerste Planet hat  
etwa den Abstand Sonne-  
Neptun vom Zentralstern

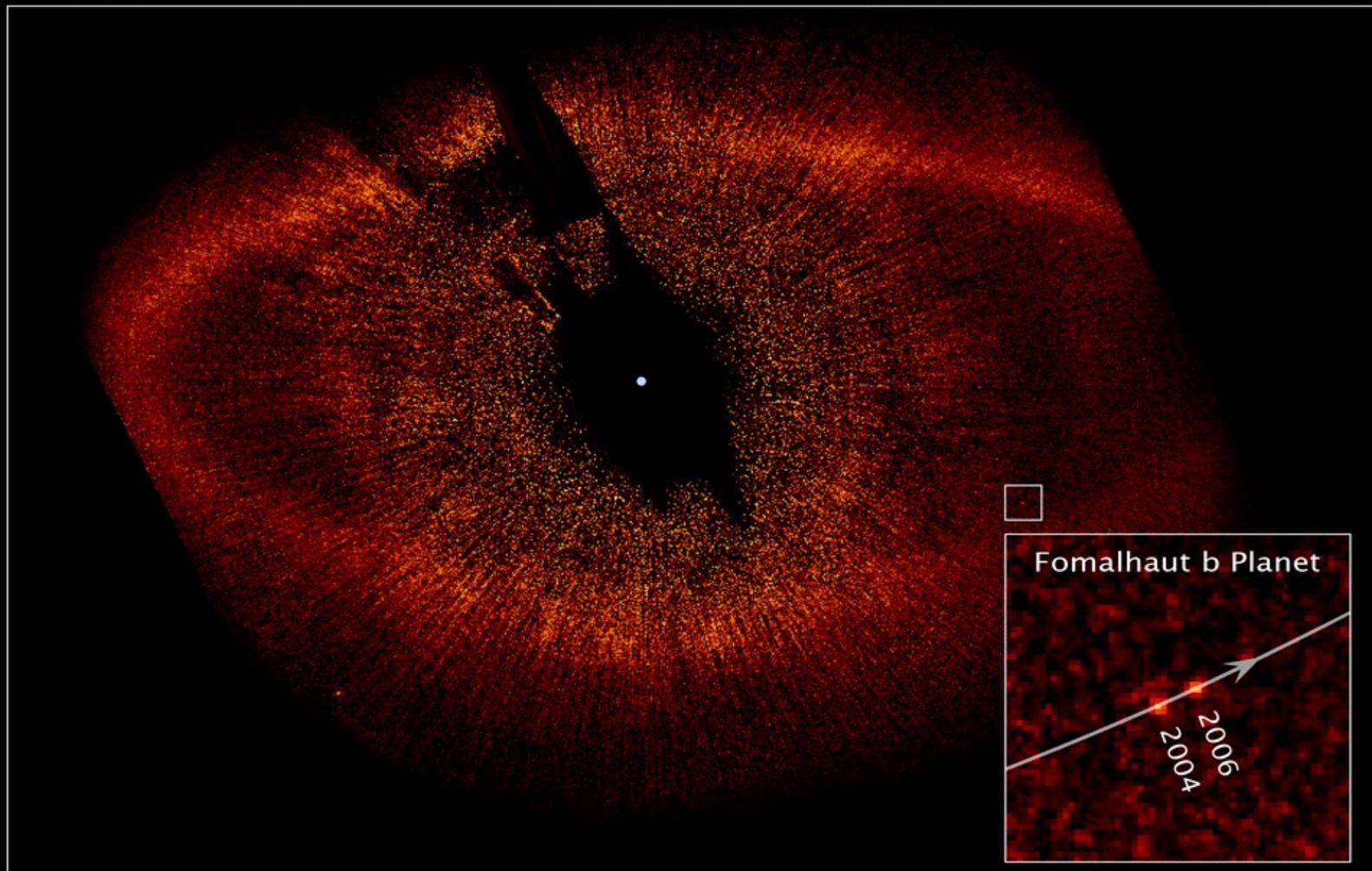


# Planet im Staubring von Fomalhaut

Erster direkter  
Nachweis eines  
Exoplaneten

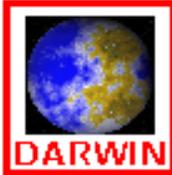
Entdecker:  
Paul Kalas

Masse > 3 x Jup.  
(mit Ringsystem)  
U etwa 870 J



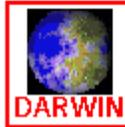
**Fomalhaut System**  
*Hubble Space Telescope • ACS/HRC*

# 5. Suche nach erdähnlichen Planeten

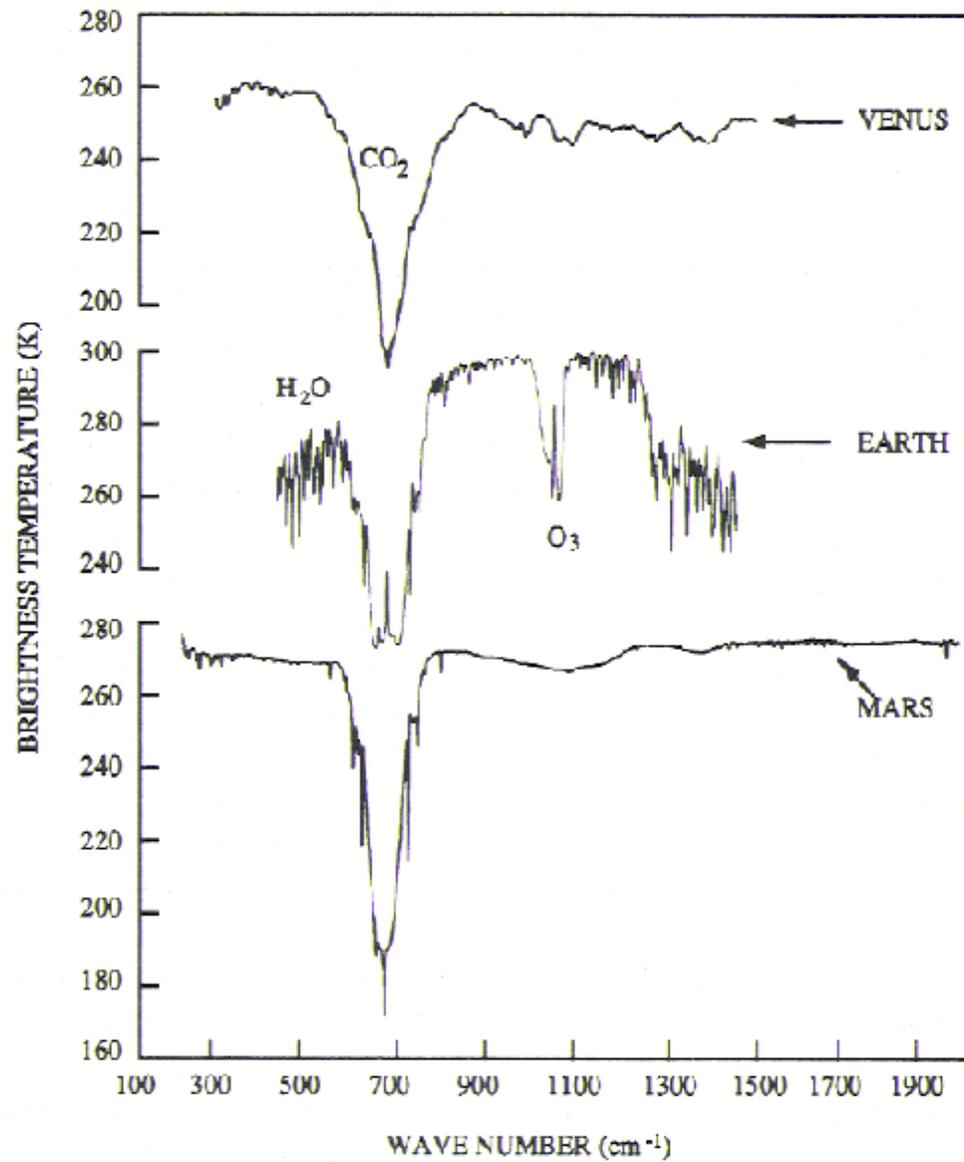


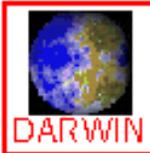
## Characterisation of Terrestrial Planets

- Are there any Earth-size planets in the Habitable Zones?
- Do any of these have an atmosphere?  $\text{CO}_2$
- Can any of these support life?  $\text{H}_2\text{O}$
- Are there signatures of life?  $\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$

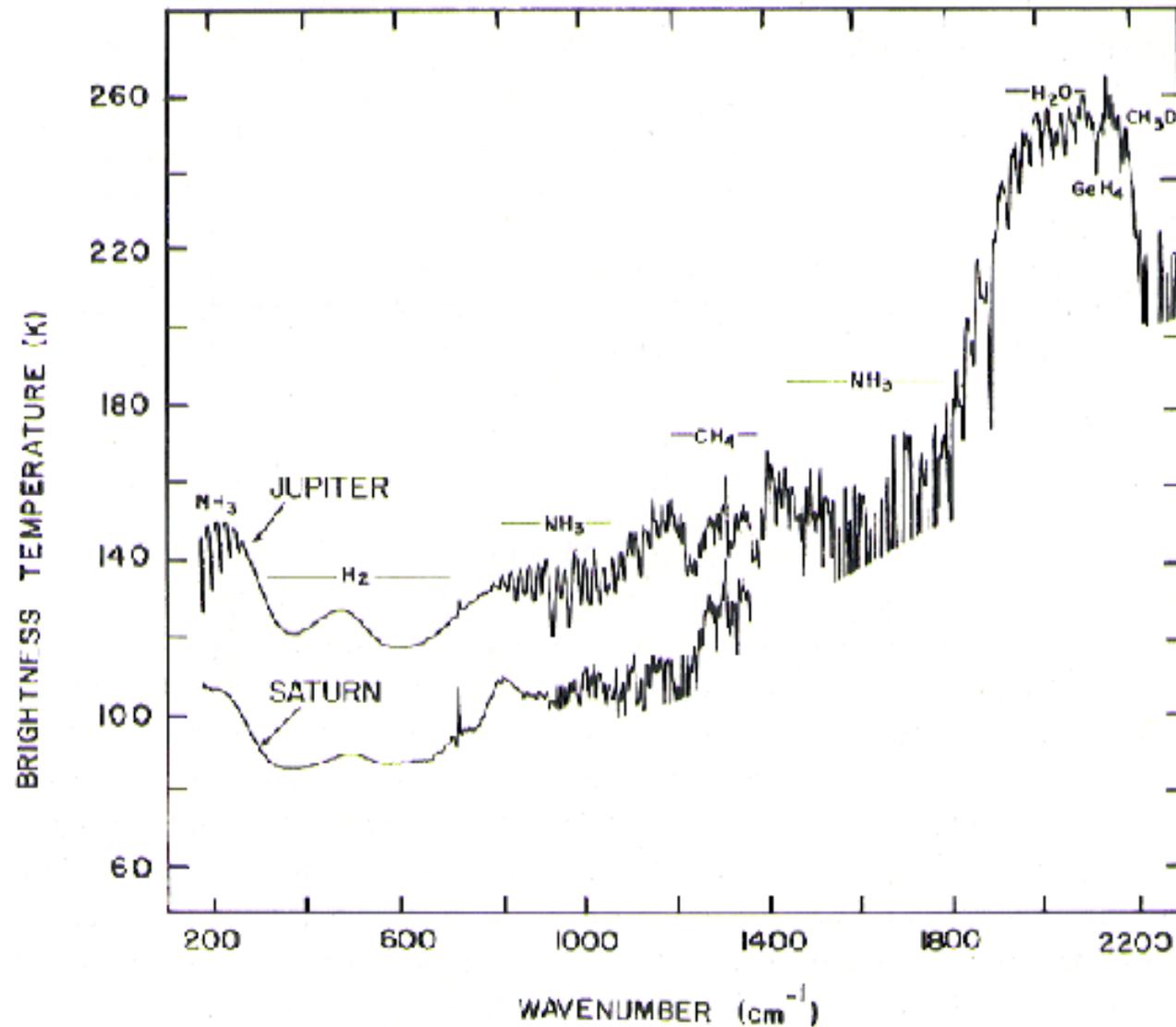


# Terrestrial Planetary IR Spectra





# Gas Giant Planetary IR spectra



# Die Suche hat gerade erst begonnen!

## Methoden im Überblick

### I. Indirekte Suchmethoden

1. Dopplerspektroskopie
2. Astrometrie
3. Zeitmessung periodischer Signale
4. Transit-Photometrie
5. Gravitationslinse

### II. Direkte Detektion (z.B. mit VLTI)

# Extrasolare Planeten Zusammenfassung

(Stand Dez. 2009)

- mehr als 325 Planetensysteme, davon 40 Mehrfachsysteme im Umkreis von  $\sim 25$  pc, ca. 5% aller Sterne
- erfolgreichste Nachweistechnik: Dopplerspektroskopie
- Große Unterschiede zum Sonnensystem:
  - jupiterähnliche Planeten in engen, elliptischen Bahnen
- erfolgreiche neue Suchtechniken
- Geplante Missionen: GAIA, Kepler, GEST, TPF, Darwin, ...
- Am Horizont:
  - Nachweis von  $H_2O$ ,  $O_3$ , ... in Planetenatmosphären