

Extrapolare Planeten

Dustin Hanke

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Astro/Teilchenseminar SS2011

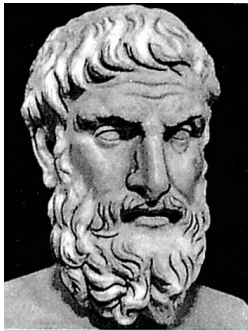
18. Juli 2011

Gliederung

- Einleitung
 - Geschichte
 - Was ist ein Planet?
 - Theorie der Planetenentstehung
- Messmethoden
 - Radialgeschwindigkeitsmethode
 - Transitmethode
- Weltraummissionen
 - CoRoT
 - Kepler
- Zusammenfassung

"Die Welten sind grenzenlos an Zahl, teils unserer ähnlich, teils unähnlich"

Epikur, griech. Philosoph, 4. Jhd. vor Christus



- Antike
Die Planeten Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn sind bekannt (Sonne und Mond werden auch als Planeten bezeichnet) → Wochentage
- 18 Jahrhundert
Entdeckung des Planeten Uranus
- 19 Jahrhundert
Entdeckung des Planeten Neptun
- Späte 70er bis Mitte 80er Jahre
Entdeckung mehrerer Sterne in verschiedenen Stadien: erste Anzeichen zur Planetenbildung
- 1992
Wolszczan und Frail entdecken den Pulsar PSR B1257+12 und konnten zeigen, dass dieser von 2 Planeten von mindestens 3,4 und 2,8 Erdmassen umkreist wird

1995

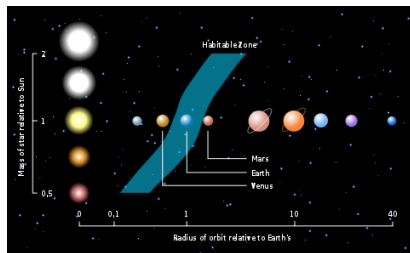
Erster extrasolare Planet 51 Pegasi b wird in einem Orbit um den sonnenähnlichen Stern 51 Pegasi mit Hilfe der Radialgeschwindigkeitsmethode von Michel Mayor und Didier Queloz entdeckt.

Er hat 0,46 Jupitermassen und ist ca. 40 Lichtjahre von der Erde entfernt.



Wieso sind extrasolare Planeten interessant?

Habitable Zone



- Suche nach erdähnlichen Planeten
- Suche nach außerirdischen Leben
- Informationen über die Entstehung von Planeten

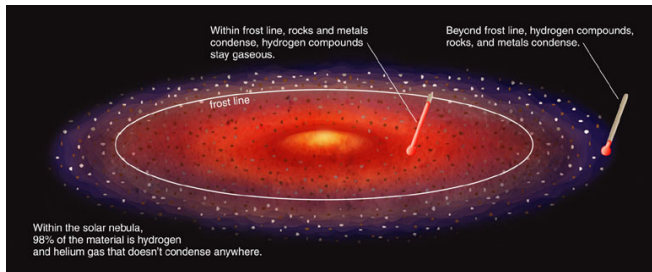
Was ist ein Planet?

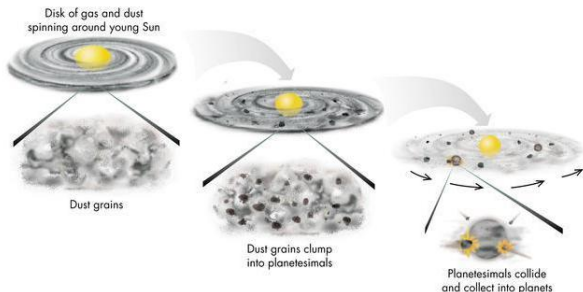
Ein Planet...

- ... ist ein Objekt in einem Orbit um einen Stern oder ein Mehrfachsternensystem
- ... ist nicht im Orbit um einen anderen Planeten
(Schließt Monde aus!)
- ... hat mindestens eine Masse von 10^{22} kg
(Schließt Asteroiden, Kometen und Planetesimals aus!)
- ... hat maximal eine Masse von $13 M_{jup}$
(Schließt braune Zwerge aus!)

Theorie der Planetenentstehung

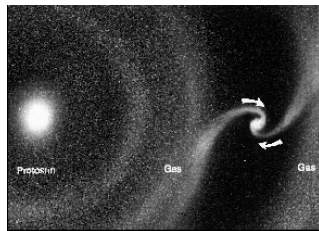
- Planeten formen sich in der Protoplanetaren Scheibe (Gas, ca. 1% Staub), die während der Sternbildung entsteht
- Kondensation: Bildung von Molekülen und Mineralien
- Frostlinie bei ca. 3 AE





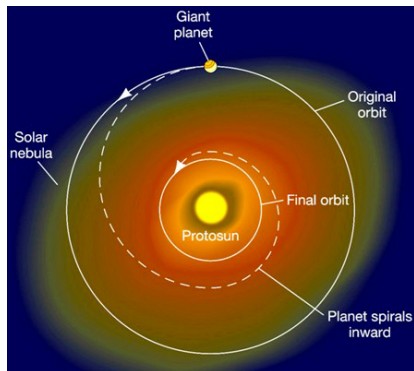
- Teilchen (Größe ca. $10 \mu\text{m}$) prallen aufeinander und verkleben
- Bildung von Planetesimalen
- Zwischen 1 und 10 km fangen die Planetesimale an sich durch ihre Schwerkraft gegenseitig einzufangen
- Entstehung von wenigen Planeten

- Planeten mit mehr als 10 Erdmassen können umliegendes Gas akkretieren
- Bildung von Gasplaneten, aber Bildungsdauer länger als Bestehen der Protoplanetaren Scheibe ($\approx 10^6$ Jahre)
→ Theorie der Migration



Migration der äußeren Planeten:

- Planet deformiert Scheibe → Asymmetrien in der Verteilung des Gases
- Auf den Planeten wirkt ein Drehmoment
- Planet gerät auf innere stabilere Bahn → "Hot Jupiters"



Nennenswerte Merkmale unseres Sonnensystems

- Planetare Orbitale sind circular und coplanar
- Bewegung und die Rotation von der Sonne, Planeten und Monden sind hauptsächlich in einem Sinne
- Systematischen Tendenzen zwischen planetaren Eigenschaften und Distanz zur Sonne
- Große Anzahl an kleinen Objekten (Asteroiden und Kometen) mit Eigenschaften die sich mit der Distanz zur Sonne ändern

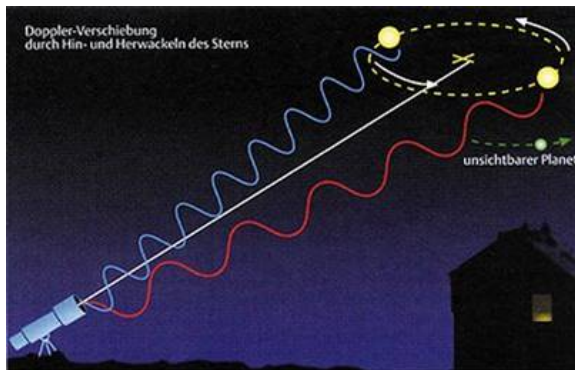
→ Teilen andere Sonnensysteme diese Charakteristiken ?

Methoden zur Entdeckung von Planeten

- Direkte Beobachtung
- **Radialgeschwindigkeitsmethode**
- **Transitmethode**
- Gravitationslinseneffekt
- Interferometrische Detektion
- und viele mehr...

Radialgeschwindigkeitsmethode

Kreisen zwei Körper um das Baryzentrum, so verursacht dies eine Dopplerverschiebung im Spektrum des Sterns



Berechnung der Radialgeschwindigkeit

$$V = \gamma + K_1 (\cos(\nu + \omega) + e \cos(\omega))$$

γ : Radialgeschwindigkeit des Massezentrums des Systems

K_1 : Geschwindigkeitsamplitude

ω : Argument der Periapsis

ν : Wahre Anomalie

Die Zeitabhängigkeit von $\nu(t)$ ist durch die zwei folgenden Relationen gegeben (Keplergleichung):

$$\frac{2\pi}{P}(t - T) = E - e \sin(E)$$

$$\tan\left(\frac{\nu}{2}\right) = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \tan\left(\frac{E}{2}\right)$$

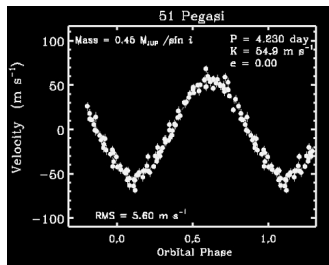
E : Exzentrische Anomalie

Berechnung der Radialgeschwindigkeit

Beispiel Kreisbahn: $e = 0$

$$V = \gamma + K_1 \cos(\nu + \omega)$$

51 Pegasi



Berechnung der Masse

Berechnung der Masse

Große Halbachse um das
Massenzentrum auf K_1 bezogen

$$a_1 \sin(i) = \frac{P}{2\pi} \sqrt{1 - e^2} K_1$$

Drittes Keplerisches Gesetz
wobei $a \equiv a_1 + a_2$

$$a^3 = \left(\frac{P}{2\pi}\right)^2 G(m_1 + m_2)$$

Schwerpunktsatz

$$m_1 a_1 = m_2 a_2$$

→

$$\frac{(m_2 \sin(i))^3}{(m_1 + m_2)^2} = \frac{P}{2\pi G} K_1^3 (1 - e^2)^{\frac{3}{2}}$$

Berechnung der Radialgeschwindigkeit

Handelt es sich um einen Stern und einen Planeten so gilt $m_2 \ll m_1$

$$m_p \sin(i) \approx \left(\frac{P}{2\pi G} \right)^{\frac{1}{3}} K_{\star} m_{\star}^{\frac{2}{3}} \sqrt{1 - e^2}$$

Inklinationswinkel i nicht bekannt \rightarrow Nur minimale Masse m_p kann angegeben werden

Der Jupiter erzeugt eine Änderung der Radialgeschwindigkeit der Sonne von $12,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$!

Dopplereffekt

Durch die Rotation des Sterns um das Baryzentrum wird das Licht des Sterns blau bzw. rot verschoben. Die Stärke der Wellenlängenverschiebung lässt sich berechnen :

$$\Delta\lambda \approx \frac{\Delta V \cdot \lambda}{c}$$

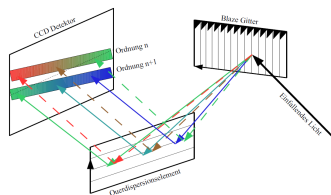
$\Delta\lambda$ kann gemessen werden

→ Bestimmung der Radialgeschwindigkeit V

→ Bestimmung weiterer Parameter der Umlaufbahn des Begleiters

Probleme und Lösungen

- Dopplereffekt ist sehr schwach (vgl Jupiter $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} \sim 10^8$)
→ Sehr hohe Genauigkeit der Instrumente
- Thermische Aufweitung der Linien im Stern (hauptsächlich für leichte Elemente und hohe Temperaturen)
→ Beobachtung kühler Sterne
- Große Anzahl an Linien nötig → Spektren mit vielen Linien
- Lange Umlaufperioden → Lange Messzeiten

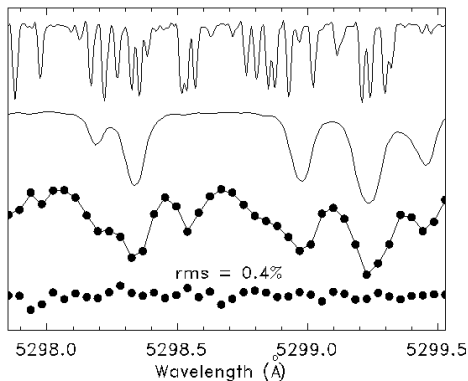
Messung von $\Delta\lambda$ 

- **Gasabsorptionszelle:** Licht wird durch Gas-Absorptionszelle (HF oder I) geschickt wodurch das Sternenspektrum mit den Gasabsorptionslinien überlagert wird
- **Referenzquelle:** Überlagerung des Sternenspektrums mit dem Spektrum einer Referenzquelle (z.B. Thoriumstrahler)

Die heute besten Spektrographen liefern eine Auflösung von

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} \leq 10^8$$

→ Messung von bis zu $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$!



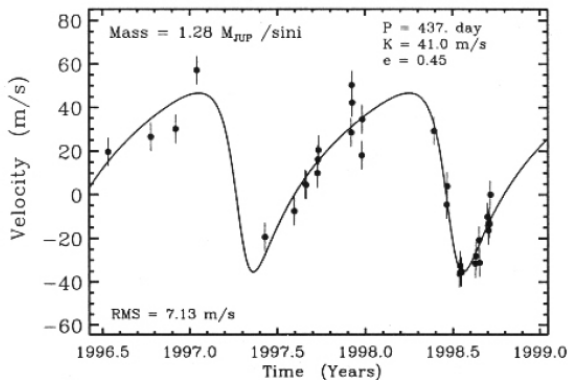
oben: Spektrum von Iod

mittig oben: Spektrum des Sterns

mittig unten: Messpunkte der Überlagerung der beiden Spektren

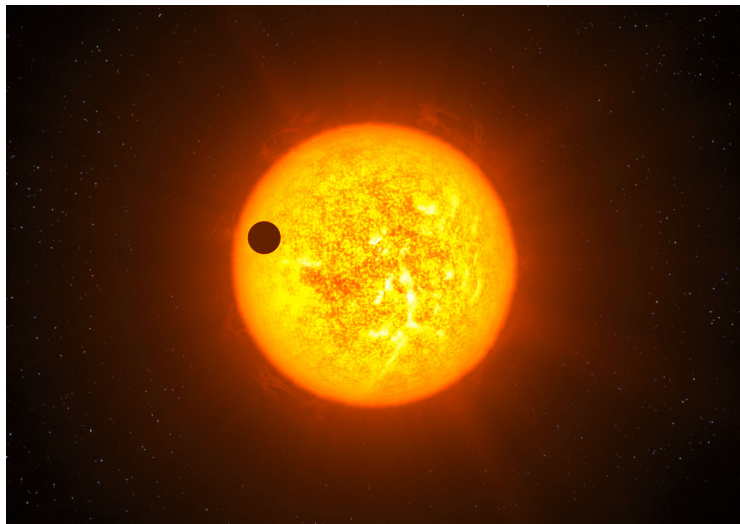
ganz unten: um einen Faktor 10 überhöhte Residuen der Differenz
Messung - Modell

Beispiel HD210277



- Erdähnliche Periode P
- Aber untypische Exzentrizität

Transitmethode



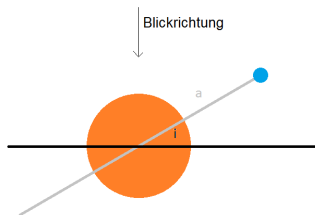
Verdunklung kann nur dann eintreten wenn gilt:

$$a \cos(i) \leq R_{\star} + R_p$$

a : Orbitalradius

i : Inklinationswinkel

R_{\star}, R_p : Radien von Stern bzw. Planet



Wahrscheinlichkeit, dass ein Transit beobachtet werden kann

$$p_{trans} = \frac{R_{\star} + R_p}{a} \approx \frac{R_{\star}}{a}$$

Typische Größenordnungen sind für terrestrische Planeten $\approx 5 \cdot 10^{-3}$ bis $\approx 10^{-4}$ für Gasgiganten.

→ Geringe Wahrscheinlichkeit Planeten in unbekanntem Sonnensystemen zu entdecken

Ausnahme: "Hot Jupiters"

- Kleiner Orbitradius a
- Kurze Periode P
- Kurze Intervalle zwischen Verdunklungen

Transitdauer

$$t_{trans} = \frac{P}{\pi} \arcsin \left(\frac{\sqrt{(R_{\star} + R_p)^2 - a^2 \cos^2(i)}}{a} \right)$$

Mit $a \gg R_{\star} \gg R_p$ folgt:

$$t_{trans} = \frac{P}{\pi} \sqrt{\left(\frac{R_{\star}}{a}\right)^2 - \cos^2(i)}$$

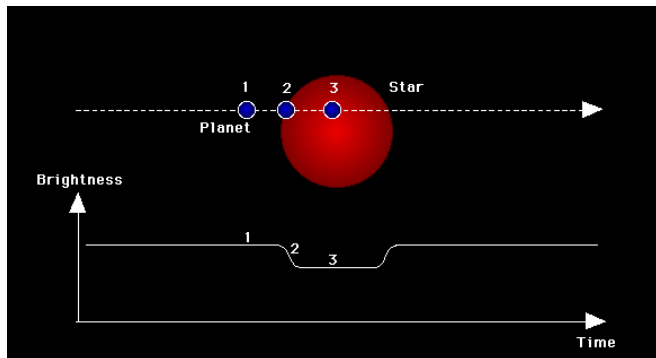
Zum Vergleich das Sonnensystem

Planet	Wahrscheinlichkeit p_{trans}	Transitdauer [h]
Merkur	$1,2 \cdot 10^{-2}$	8
Venus	$6,4 \cdot 10^{-3}$	11
Erde	$4,7 \cdot 10^{-3}$	13
Mars	$3,1 \cdot 10^{-3}$	16
Jupiter	$8,9 \cdot 10^{-4}$	30
Saturn	$4,9 \cdot 10^{-4}$	40
Uranus	$2,4 \cdot 10^{-4}$	57
Neptun	$1,5 \cdot 10^{-4}$	71
Pluto	$1,2 \cdot 10^{-4}$	82

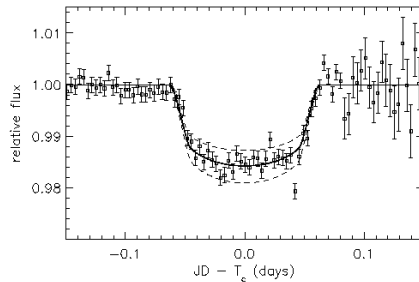
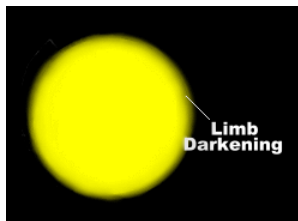
Amplitude A des Transitsignals ist proportional zum Lichtfluss

$$A = \frac{\Delta F}{F} = \frac{\pi R_p^2 B_\star}{\pi R_\star^2 B_\star + \pi R_p^2 B_p} \approx \left(\frac{R_p}{R_\star} \right)^2$$

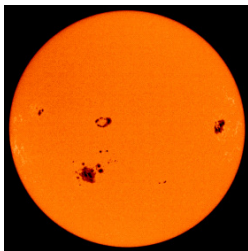
B_\star, B_p : Oberflächenhelligkeiten des Sterns bzw. des Planeten



Kurvenform durch "limb darkening" (Intensität im Zentrum des Sterns höher als außen am Rand)



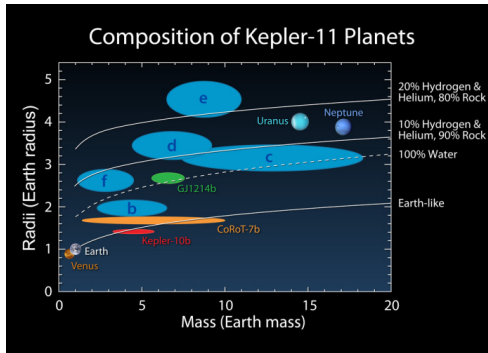
Probleme



- Sternenpulsationen oder Sternenflecke können einen Helligkeitsabfall verursachen
→ Drei periodische Helligkeitsminima zu Bestätigung nötig
- Atmosphärische Störungen → Satelliten
- Rauschen der Messgeräte → Kühlung der Messgeräte

Zusammenfassung

- Radialgeschwindigkeitsmethode → Bestimmung der Masse M
- Transitmethode → Bestimmung der Inklination i und des Radius R
- Bestimmung der Dichte



CoRoT

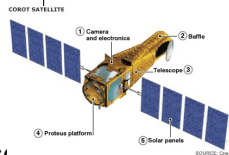


CoRoT (**C**onvection **R**otations and planetary **T**ransits)

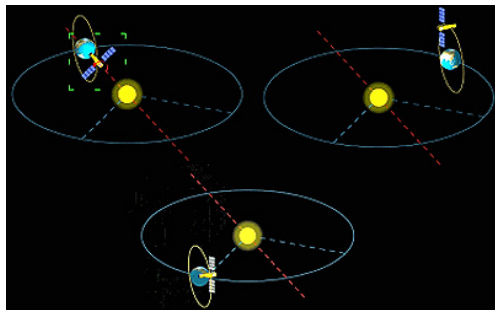
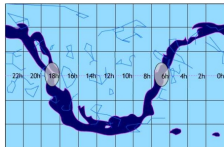
- Satellit der Helligkeitsschwankungen von Sternen misst
 - Entdeckung von Exoplaneten
 - Asteroseismologie
- Weltraummission der franz. Raumfahrtagentur CNES, D, A, B, E, Bra sowie der ESA

CoRot-Daten

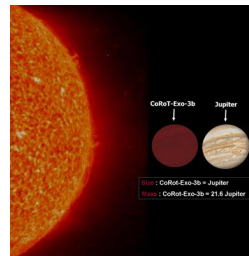
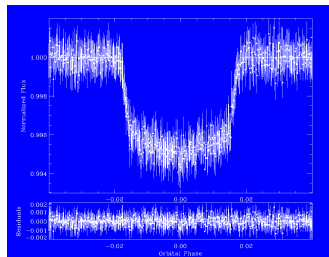
gestartet	27.12.2006
Masse	630 kg
elektrische Leistung	530 W
Datenübertragung	1,5 Gbit/Tag
Speicherkapazität	2 Gbit
Höhe der Umlaufbahn	896 km
Teleskop	27cm Durchmesser
4 CCD	2048x2048 Pixel



CoRoT beobachtet ein Beobachtungsfenster jeweils 150 Tage \rightarrow
max. $P = 50!$



CoRoT-Exo-3b



- $P = 4,23$ Tage
- $M_P = 21,6M_{jup}$

→ Doppelt so dicht wie Blei

→ Unklar ob es sich um einen "neuen" Planeten oder um einen braunen Zwerg handelt → Änderung der Definition "Planet"?

Alle bisher von CoRoT entdeckten Exoplaneten





Kepler

- Misst Helligkeitsschwankungen von Sternen
 - Entdeckung von extrasolaren Planeten (besonders erdähnliche)
 - Beobachtung von veränderlichen Sternen
- Weltraummission der NASA

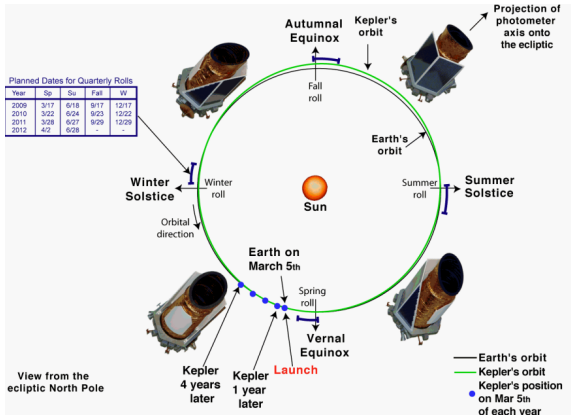
Kepler Daten

gestartet	07.03.2009
Masse	1071 kg
elektrische Leistung	771 W
Telekop	1,4m Durchmesser
42 CCD	2200x1024 Pixel



Keplerorbit

Kepler hat einen eigenen Orbit um die Sonne → Erde stört Beobachtungen nicht!

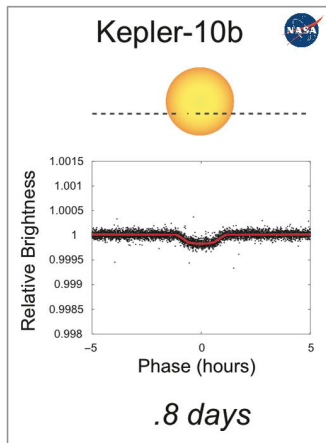


Beobachtungsfenster

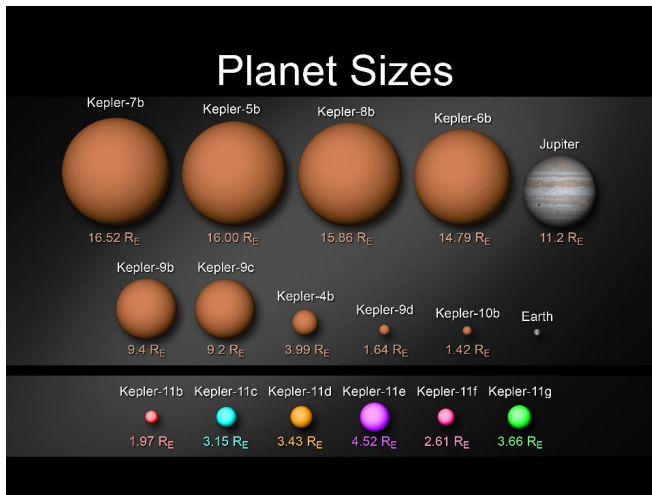


Kepler-10b

- Bisher kleinster entdeckter Planet mit Hilfe der Transitmethode
- $R_P = 1,42R_{Erde}$
- $P = 0,84$ Tage
- $M_P = 4,56M_{Erde}$
- $\rho_{10b} = 8,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
vgl. $\rho_{Erde} = 5,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$



Alle bisher von Kepler entdeckten Exoplaneten



Entdeckungen

- Bisher über 550 Exoplaneten entdeckt
- "Hot Jupiters"
- Hauptsächlich elliptische Systeme
- Planetensysteme (1-6 Planeten)

A.Quirrenbach, P.Cassen, T.Guillot, Extrasolar Planets, Springer, 2005

F.Casoli, T. Encrenaz, The new Worlds Extrasolar Planets, Springer, 2007

R.Dvorak Extrasolar Planets Formation, Detection and Dynamics, Wiley-VCH, 2008

http://keckobservatory.org/images/gallery/press_images/52_138.jpg

<http://www4.nau.edu/meteorite/Meteorite/Book-GlossaryP.html>

<http://eclipse.gsfc.nasa.gov/transit/transit.html>

http://www.matkit.at/studium/sem_planet/fig1moda.gif

<http://www.corot.de/> http://lasp.colorado.edu/education/outerplanets/solsys_planets.php
<http://www.scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/2010/06/27/hd209458-browse.gif&imgrefurl=http://www.scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/2010/06/exoplanetenwetter-auf-osiris-ist-es-windig.php>
http://www.geschichteinchronologie.ch/atmosphaerenfahrt/25_Van-Allen-strahlungsguertel-sonnenflecken-mondstrahlung-Li004-sonnenflecken-n-ausbruch-29-10-2003.jpg
http://www.scienceinschool.org/repository/images/issue13corot4_large.jpg
<http://asymptotia.com/2006/12/29/planet-hunter/>

<http://kepler.nasa.gov/> <http://www.uni-koeln.de/~lcarone/german/Mission/proteus.html>

[http:](http://dc-cdn.virtacore.com/2011/02/exoplanet.jpg.jpeg)

[//dc-cdn.virtacore.com/2011/02/exoplanet.jpg.jpeg](http://dc-cdn.virtacore.com/2011/02/exoplanet.jpg.jpeg)

<http://www.neunplaneten.de/nineplanets/saturn.html>

<http://keynesianismus.files.wordpress.com/2009/01/07111.jpg?w=700&h=350&h=350>