

Das Sonnensystem

Teil 2

Peter Hauschildt

yeti@hs.uni-hamburg.de

Hamburger Sternwarte
Gojenbergsweg 112
21029 Hamburg

24. Januar 2019

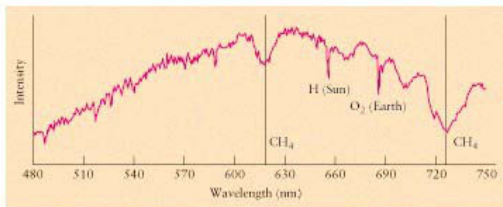
Übersicht Teil 2

- ▶ Entstehung des Sonnensystems
- ▶ Exoplaneten

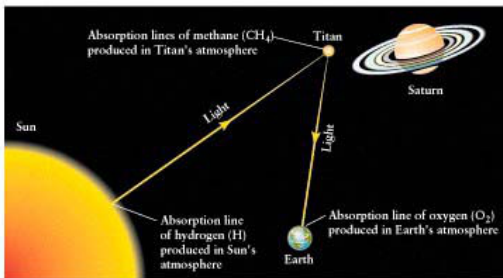
Typen

- ▶ Terrestrische Planeten
 - ▶ 'Felsbrocken'
 - ▶ Merkur, Venus, Erde, Mars
 - ▶ hohe Dichten ($4\text{--}5\text{ g/cm}^3$)
 - ▶ Massen $\leq 1M_{\text{Erde}}$
 - ▶ $a \leq 1.5\text{ AU}$
- ▶ Gasriesen
 - ▶ Gasbälle (mit festem Kern?)
 - ▶ geringe Dichten ($0.7\text{--}1.7\text{ g/cm}^3$)
 - ▶ Massen $14\text{--}317 M_{\text{Erde}}$
 - ▶ $a \geq 5.2\text{ AU}$

Zusammensetzung



a



b

Was muss erklärt werden?

- ▶ Alle Planeten (etc) liegen (fast) in einer Ebene
- ▶ Äquator der Sonne liegt auch (fast) in dieser Ebene
- ▶ → das Sonnensystem ist 'flach'
- ▶ alle Planeten umkreisen die Sonne in derselben Richtung
- ▶ 99.9% der Masse steckt in der Sonne
- ▶ der Rest in Jupiter und Saturn . . .
- ▶ innere Planeten → Felsen
- ▶ äussere Planeten → Gasriesen

Die Grundidee

- ▶ ist eigentlich sehr alt: 18. Jahrhundert!
 - ▶ Kant
 - ▶ Laplace
- ▶ Sonnensystem bildet sich aus Wolke interstellaren Gases
- ▶ davon gibt es in der Milchstrasse sehr viele
- ▶ Massen von $10^5 M_{\odot}$ kommen oft vor!

die Grundidee

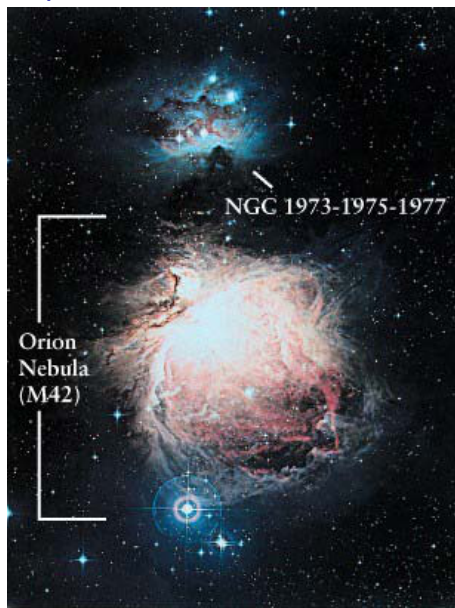
- ▶ kleinere Wolken ($< 10 M_{\odot}$) können instabil werden (Gravitation)
- ▶ → fallen in sich zusammen
- ▶ → Temperaturen erhöhen sich im Zentrum
- ▶ kleine Rotation der Wolke →
- ▶ Rotationsgeschwindigkeit steigt durch Kollaps an
 - ▶ Drehimpulserhaltung
- ▶ → Wolke flacht ab

Sonnensystem: Entstehung



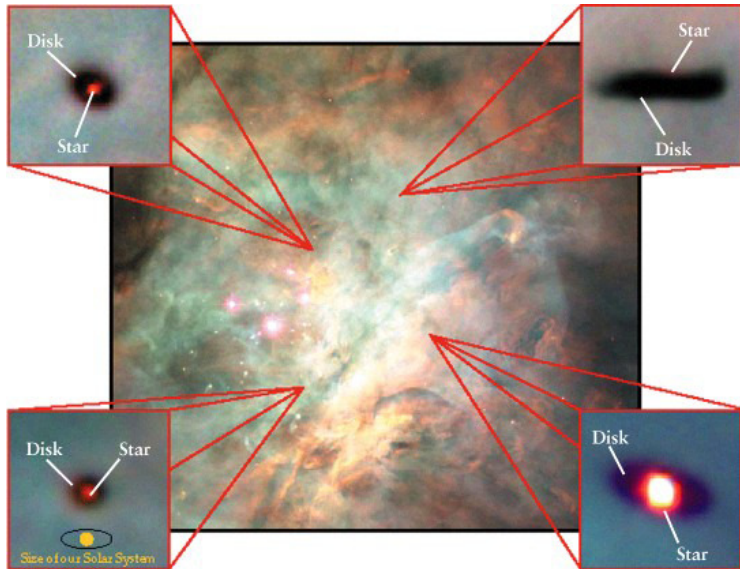
- ▶ Kollaps einer rot. Wolke
- ▶ Drehimpulserhaltung → Scheibe
- ▶ Proto-Sonne durch 'Kelvin-Helmholtz Kontraktion'
- ▶ Accretionsscheibe
- ▶ Proto-planetare Scheibe

Beispiel: Orion Nebula



- ▶ ca. 1500 ly Entfernung
- ▶ dichtes interstellares Gas
- ▶ Region in der sich gerade Sterne bilden
- ▶ angestrahlt von jungen, sehr hellen Sternen

Proplyds im Orion Nebel



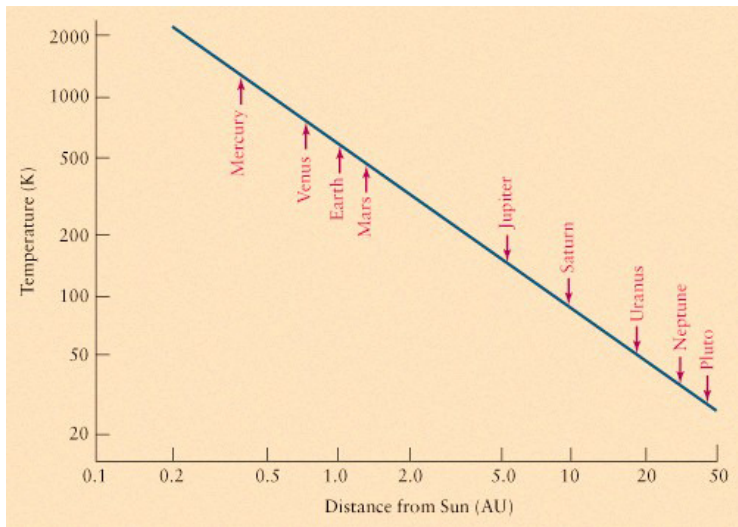
Proplyds im Orion Nebel

- ▶ *Proplyd* = *proto-planetary disk*
- ▶ sehr häufig im Orion Nebel:
 - ▶ 110 Sterne im Nebel untersucht
 - ▶ 56 davon zeigen Proplyds
- ▶ Sonnensysteme/Planeten häufig??
- ▶ → Ja! Extrem häufig...

Sonnensystem: Entstehung

- ▶ Zentrum → *Proto-Sonne*
- ▶ Temperatur im Inneren der Proto-Sonne steigen an
- ▶ nach ca. 10^8 Jahren →
- ▶ Kernfusion beginnt
- ▶ → Sonne ist nun ein Stern
- ▶ ihre Kontraktion hört auf
- ▶ Strahlung der (Proto)Sonne heizt Scheibe/Nebel auf

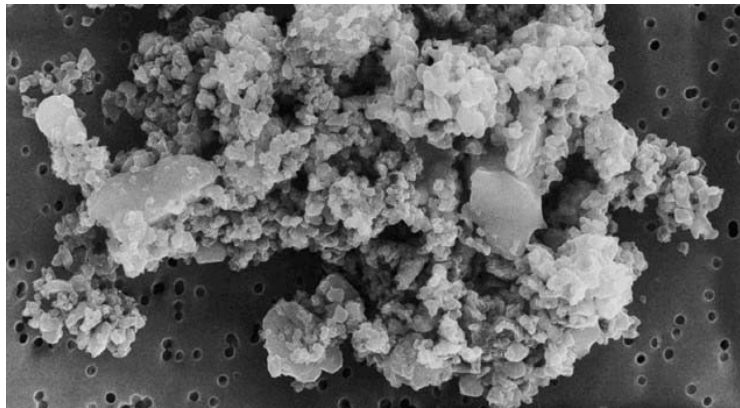
Sonnensystem: Entstehung



Planeten: Entstehung

- ▶ Temperatur $< 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ *und*
- ▶ Dichte in der Mittelebene der Scheibe steigt an
- ▶ → Staubteilchen
- ▶ kann man heute noch finden:

Planeten: Entstehung



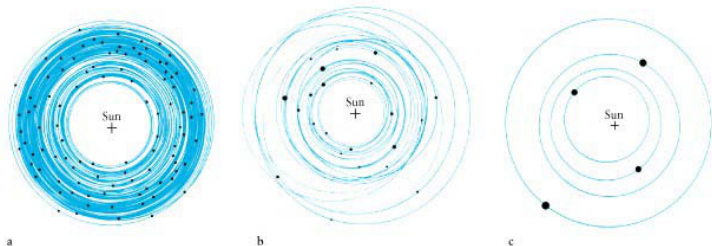
Planeten: Entstehung

- ▶ Temperatur $-200 \dots 0^\circ\text{C}$:
 - ▶ Wasser, Methan, Ammonia kondensieren
 - ▶ \rightarrow Eis
- ▶ äussere Scheibe $\rightarrow -200^\circ\text{C}$
- ▶ leichte Gase (H, He) werden aus dem inneren System geblasen
- ▶ aussen können sie aber überleben
- ▶ \rightarrow innere Planeten haben wenig H, He
- ▶ \rightarrow äussere Planeten bestehen (90%) aus H, He

Planetesimale

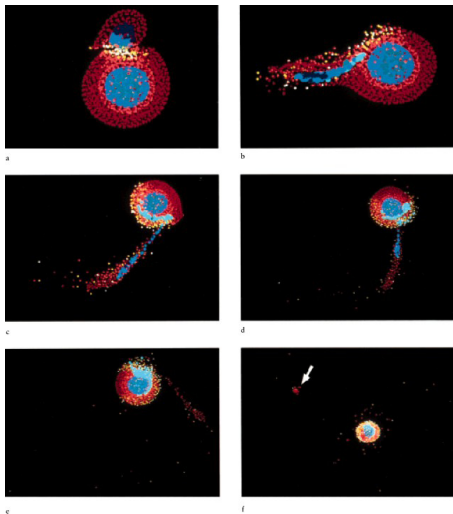
- ▶ Staubteilchen 'kleben' zusammen (Elektrostatik!)
- ▶ → es bilden sich grössere Brocken
- ▶ nach einigen 10^6 Jahren →
- ▶ gross genug damit Gravitation merklich wird
- ▶ → es bilden sich 10 km grosse *Planetesimale*
- ▶ (langsame) Zusammenstösse, Gravitation → *Akkretion*
- ▶ → Protoplaneten (Mondgrösse)
- ▶ letzte Phase: Zusammenstösse der Planetsimale
- ▶ → Planeten bilden sich

Planeten: Entstehung



- ▶ 100 Planetesimale, Gesamtmasse wie inneres Sonnensystem
- ▶ nach 3×10^7 Jahren \rightarrow 22 Protoplaneten (b)
- ▶ nach 8×10^7 Jahren \rightarrow 11 Protoplaneten
- ▶ nach 2×10^8 Jahren \rightarrow 6 Protoplaneten
- ▶ nach 4×10^8 Jahren \rightarrow 4 Planeten (c)

Planeten: Entstehung



- ▶ schwere Kollisionen häufig
- ▶ Venus, Uranus: Rotationsachse gekippt
- ▶ Erde: Mond (s.u.)!
- ▶ starkes Bombardment im frühen Sonnensystem

Planeten: Entstehung

- ▶ innerste Planeten (Merkur): schwere Elemente (Fe, Si) häufiger
- ▶ weiter aussen → immer leichtere Elemente (Al, Ca)
- ▶ Kollisionen heizen (Proto)Planeten auf
- ▶ → werden flüssig!
- ▶ → leichte und schwere Elemente trennen sich
- ▶ → Kern aus 'Eisen', Mantel aus leichterem Material

Gasriesen: Entstehung

- ▶ äussere Scheibe:
 - ▶ Kern aus Gestein
 - ▶ niedrige $T \rightarrow$
 - ▶ Eis wird akkretiert
 - ▶ kalt genug für leichte Gase!
 - ▶ \rightarrow akkretiert kaltes H_2 , He Gas
 - ▶ mehr Masse \rightarrow höhere Gravitation
 - ▶ \rightarrow akkretiert mehr Gas ...
- ▶ \rightarrow aussen bilden sich Gasriesen

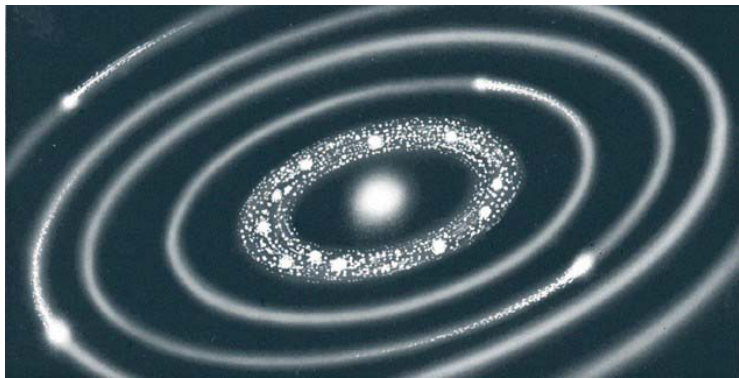
Gasriesen: Entstehung

- ▶ Jupiter war am schnellsten (höhere Gasdichte)
- ▶ → Saturn, Uranus, Neptun konnten nur Restgase 'fressen'
- ▶ Gasriesen bilden sich sehr schnell
- ▶

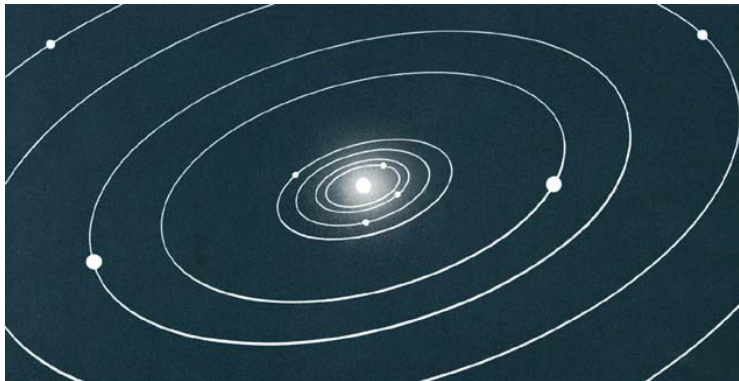
Übersicht



Übersicht: 50 Myr



Übersicht: 100 Myr



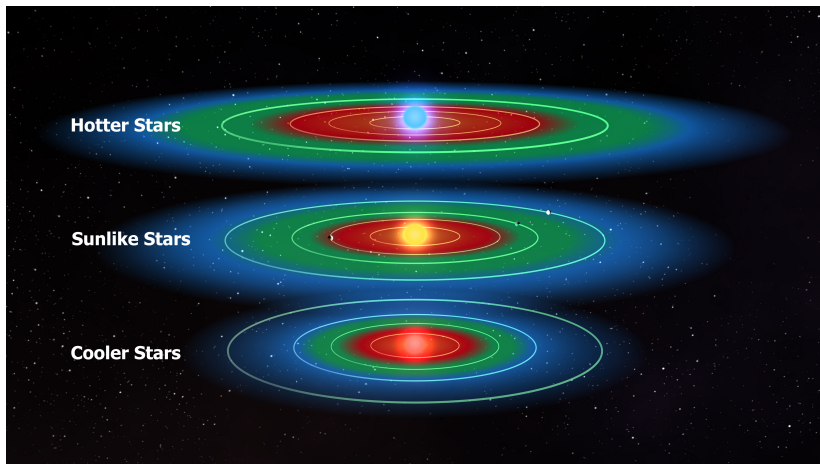
Junge Sterne



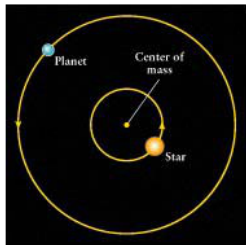
Extrasolare Planeten

- ▶ Ist 'unser' Sonnensystem einzigartig oder normal?
- ▶ diese Frage lässt sich nur durch Beobachtungen beantworten
- ▶ dazu müssen wir andere Sonnensysteme finden!
- ▶ Wie findet man Extrasolare Planeten?

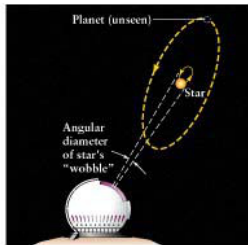
Habitable Zone



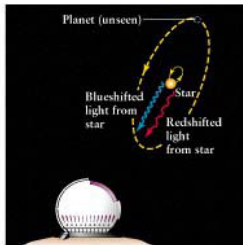
Extrasolare Planeten



a.



b.

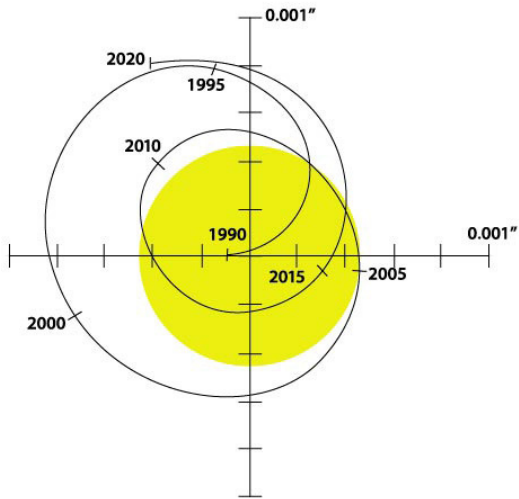


c.

Doppler Methode

- ▶ Geschwindigkeiten: m/s (Gasriesen) bis cm/s (Terrestrisch)
- ▶ Intrinsische Linienbreiten: km/s
- ▶ Rotation: km/s
- ▶ Sternflecken, Variabilität
- ▶ Stabilität der Geräte
- ▶ → Planeten finden sehr schwer!

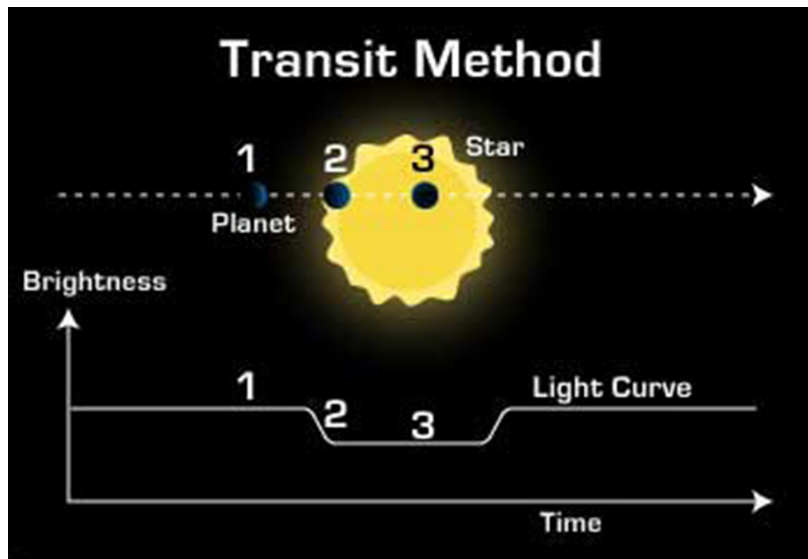
Astrometrische Methode



Astrometrische Methode

- ▶ Sternscheibe viel größer als Effekt
- ▶ Auflösungsvermögen der Teleskope
- ▶ Erdatmosphäre

Transit Methode



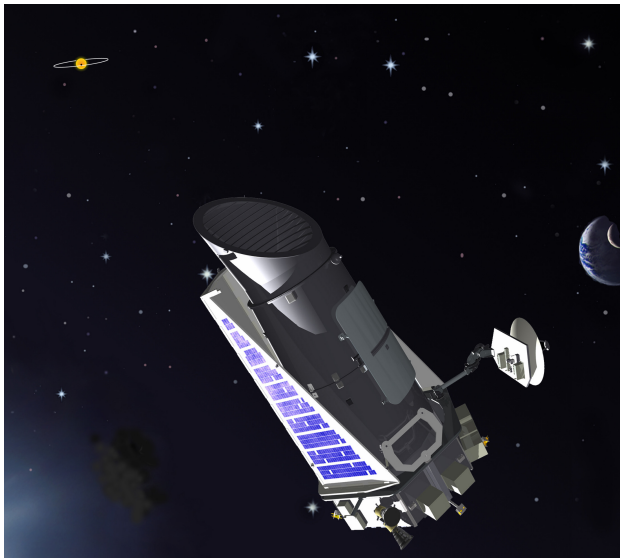
Transit Methode

- ▶ funktioniert mit dem 1.2m OLT der Sternwarte
- ▶ besser mit grösseren Teleskopen
- ▶ kleine Satellitenteleskope noch besser

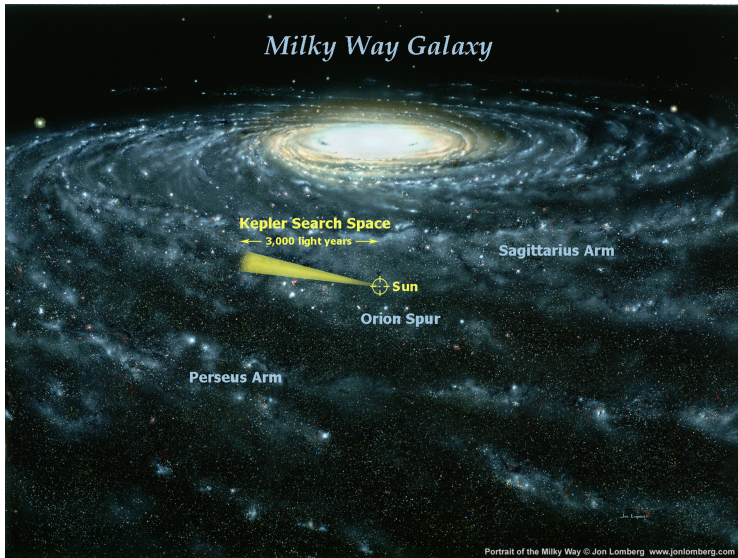
CoRoT



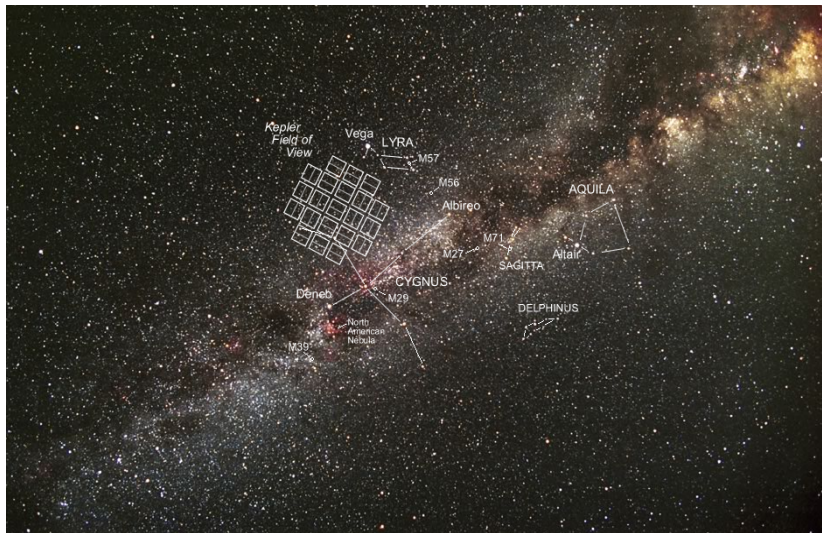
KEPLER



KEPLER

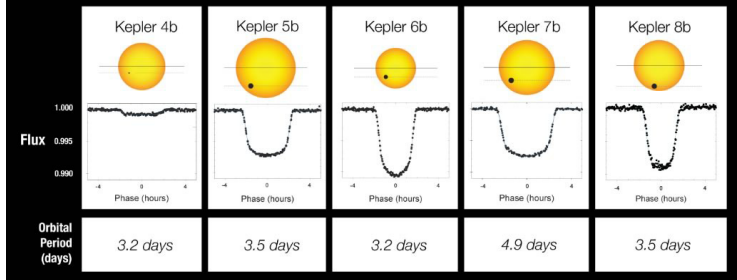


KEPLER

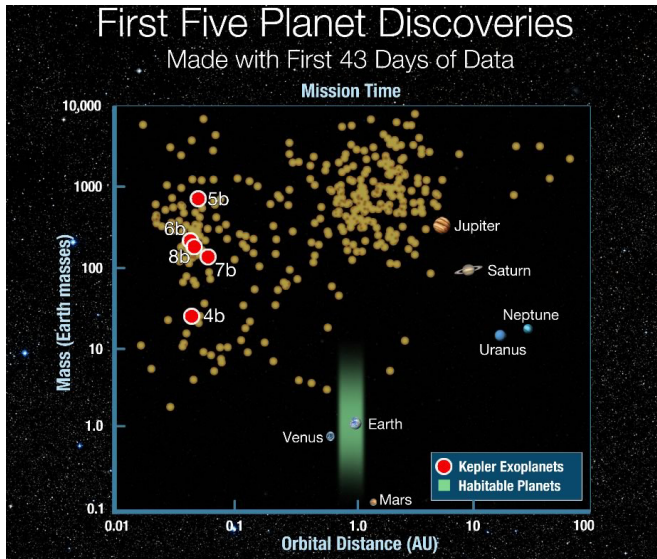


KEPLER's erste 5 Planeten

Transit Light Curves



KEPLER's erste 5 Planeten



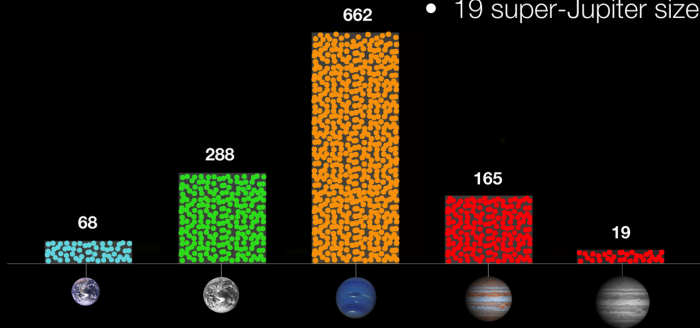
KEPLER: Feb 2011

- ▶ 156 453 Sterne beobachtet
- ▶ 1235 Planeten Kandidaten gefunden:
 - ▶ in 997 Sternen
 - ▶ 19 super-Jupiter
 - ▶ 165 Jupiter
 - ▶ 662 Neptun-ähnlich
 - ▶ 288 super-Erden
 - ▶ 68 Erd-ähnlich
- ▶ insgesamt 54 Kandidaten in der Habitable Zone
- ▶ davon 5 Erd-ähnlich

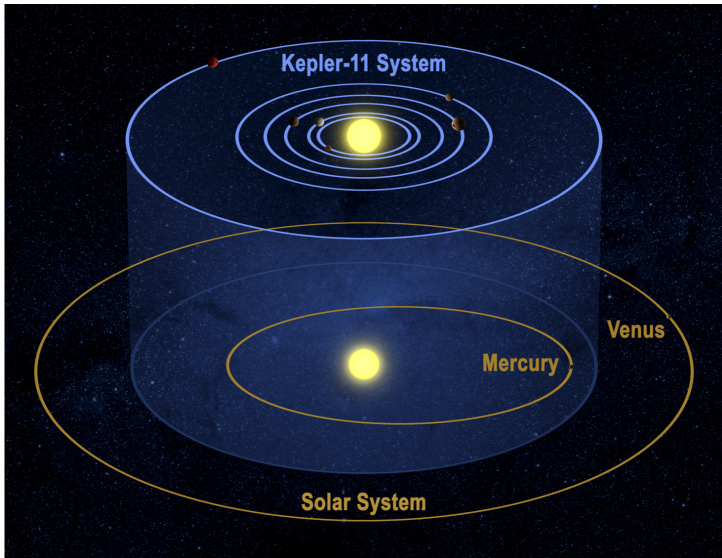
Graphische Verteilung

Numbers of Planet Candidates

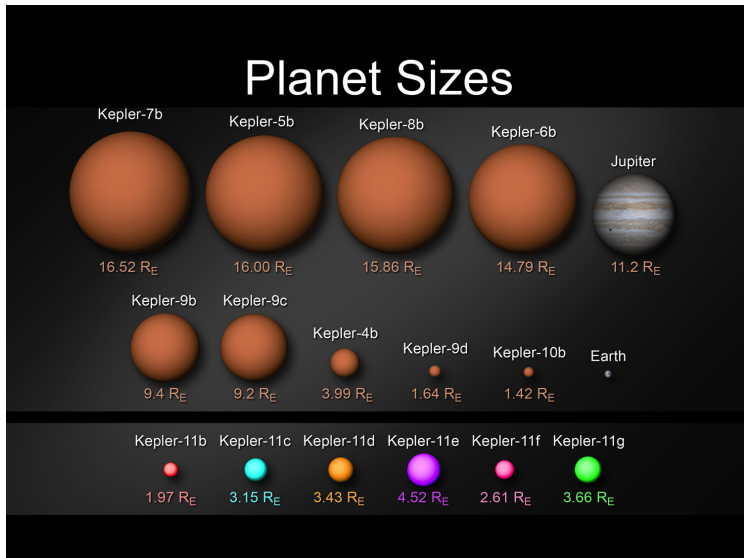
- 68 Earth-size
- 288 super-Earth size
- 662 Neptune size
- 165 Jupiter size
- 19 super-Jupiter size



Kepler 11

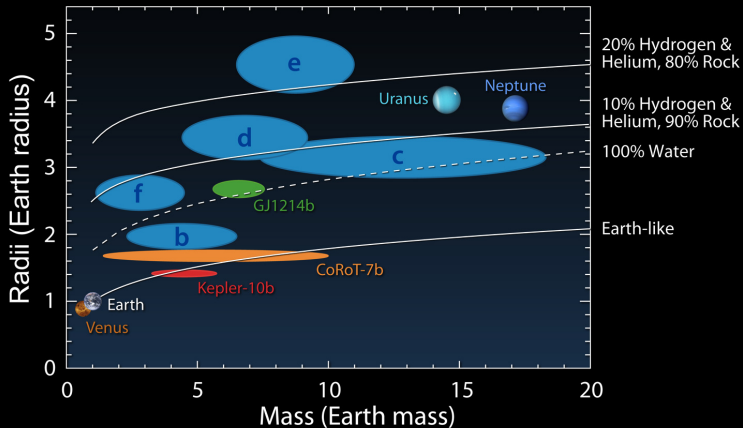


Kepler 11



Kepler 11

Composition of Kepler-11 Planets



Wieviele Planeten gibt es?

- ▶ von allen Sternen haben:
 - ▶ 4% mit Jupiter-ähnlich
 - ▶ 17% mit Neptun-ähnlich
 - ▶ 7% mit super-Erden
 - ▶ 6% mit Erd-ähnlichen Planeten
 - ▶ 17% Planetensysteme

Wieviele Planeten gibt es?

- ▶ Es gibt ca. 100 Milliarden Sterne in der Milchstrasse
- ▶ → es könnte 50 Milliarden Planeten in der Milchstrasse geben
- ▶ → davon 500 Millionen in der Habitable Zone...

Astrobiologie

- ▶ Exakt ein Planet mit Leben bekannt!
- ▶ weitere Kandidaten im Sonnensystem:
 - ▶ Mars
 - ▶ Europa
- ▶ absolut keine Hinweise auf Leben ausserhalb des Sonnensystems
- ▶ 'intelligentes' Leben in der Milchstraße extrem unwahrscheinlich?
- ▶ vielleicht sogar in der Lokalen Gruppe (von Galaxien)
- ▶ Wahrscheinlichkeit von 'einfachem' Leben?
- ▶ → Indikatoren müssen bekannt sein!