

## • Pluto entdeckt: 1930

III. 31

Radius: 1150 km  $\approx$  0.18  $R_{\oplus}$

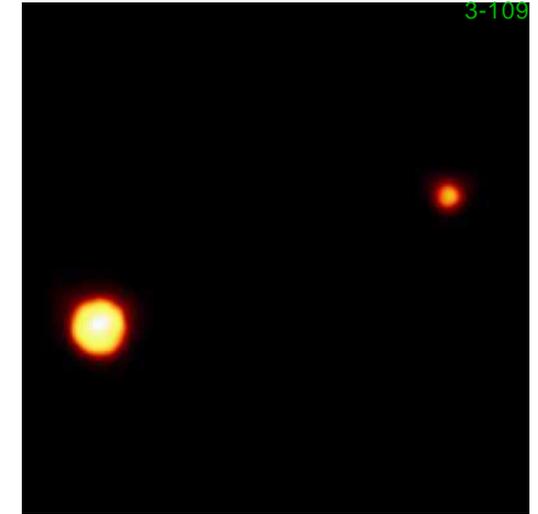
Masse: 0.0022  $M_{\oplus}$

mittl. Dichte:  $\bar{\rho} \approx 2.1 \text{ g/cm}^3$   $\leftarrow$  ziemlich viel Gestein!

- keine Atmosphäre
- Oberfläche: IR-Spektrum  $\rightarrow$  gefrorenes Methan  
Albedo fast 100%

## Pluto (und Charon)

- Exzentrische Umlaufbahn
- kreuzt Neptun-Bahn
- Resonanz:  $U_{\text{Pluto}} = \frac{3}{2} U_{\text{Uranus}}$
- Kollision daher unmöglich



- eigentlich ein Doppelplanet:
- Pluto + Charon (bekannt erst seit 1978)
- feste Körper (kein Gasplanet!)

**Planeten-Status 2006 aberkannt**

## Mond: Charon

- entdeckt 1978

- 1985 - 1987: gegenseitige Bedeckungen mit Pluto

$\rightarrow$  Radius: 600 km (50% von  $R_{\text{Pluto}}$  !)

"Doppel planet" !

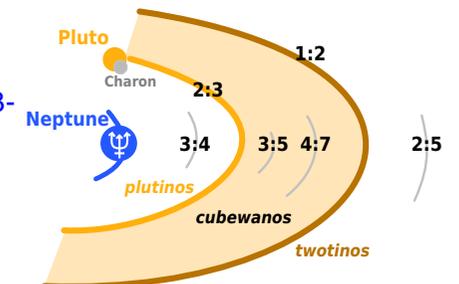
- Halbachse Pluto - Charon: 19700 km
- Umlaufzeit: 6.39 Tage
- gekoppelte Rotation von Pluto und Charon  
(einzigartig im Sonnensystem)
- sehr geringe Dichte (0.1  $\text{g/cm}^3$  ?)

Naherkundung: 3-108  
Sonde "New Horizons"  
Vorbeiflug 2015

## Der Kuiper Belt

- zwischen 30 und ~55 AU
- besteht aus *Planetesimalen*
- *Plutinos* zeigen wie Pluto eine 2:3-Resonanz zum Uranus; etwa 20 bekannt; die größten sind die Zwergplaneten *Orcus* (760km), (208996) 2003 AZ84 (730km), *Ixion* (650km)

## Kuiper belt and orbital resonance



## Die größten bekannten Trans-Neptun-Objekte (TNOs)

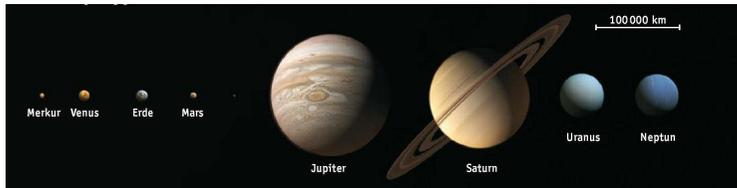


"Zu den 'klassischen KBOs' (*cubewanos*) gehören:

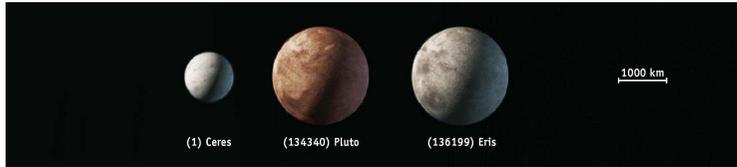
- Eris (2300km Durchmesser), der größte Zwergplanet; Halbachse 68 AU,  $e = 0.44$ , Bahnneigung  $44^\circ$ ; Mond Disnomia
- Makemake (1500 km)
- Haumea (1960 x 1,518 x 996 km, nicht sphärisch)

# Das neue Planetensystem

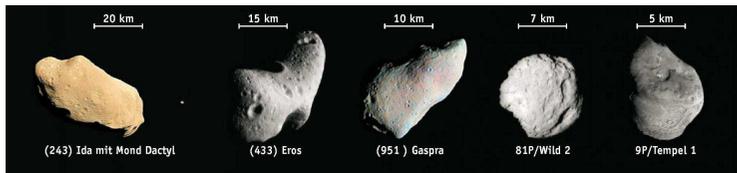
nach den Beschlüssen der IAU General Assembly 2006



Planeten  
rund  
freie Bahn



Zwergplaneten  
rund  
Bahn nicht frei

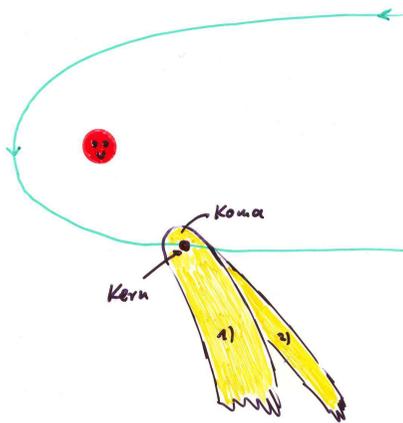


Kleinkörper  
(Planetoiden,  
Kometen)  
nicht rund

## Entwicklung

- Entstehung mit Planetensystem im Bereich  $\approx$  Uranus
- Durch Bahnstörungen: Perihel  $\rightarrow$  50 000 AU  
(verg. Distanz zu  $\kappa$  Centauri: 250 000 AU)  
 $\rightarrow$  Oort'sche Wolke
- gelegentlich ( $\approx 10^5$  Jahre) Störung durch vorbeifliegenden Stern  
 $\rightarrow$  Perihel  $\leq 1$  AU  $\rightarrow$  "neuer" Komet
- evtl. Verkürzung der Aphel-Distanz durch Bahnstörungen  
 $\rightarrow$  (kurz-) periodische Komet
- Auflösung nach  $\approx 1000$  Perihel-Durchgängen

## Kometen



### Langgestreckte Bahnen:

- $e \approx 1$ , alle Raumlagen
- $e \leq 1$ , Ekliptik  
(kurzperiodische Kometen,  
z.B. Halley:  $T = 76$  Jahre)

### Schweif (stumpfe $d \approx 2$ AU)

- 1) Staub, durch Strahlungsdruck beschleunigt
- 2) Ionen, durch Magnetfeld des Sonnenwinds beschl.

Kopf:  $H_2O$ -Eis mit "Staub", dunkle Kruste  
(C-Verbindungen?)  
Durchmesser:  $\approx 10$  km

## Komet C/2000 WM 1 (Foto: Susanne Hoffmann)



### Komet Halley

Foto: Sonde *Giotto* (1986)



3-115



Edmond Halley (1656 - 1742)



Bill Haley and His Comets (1952)  
Marshall Lytle, Johnny Grande,  
Bill Haley, Billy Williamson

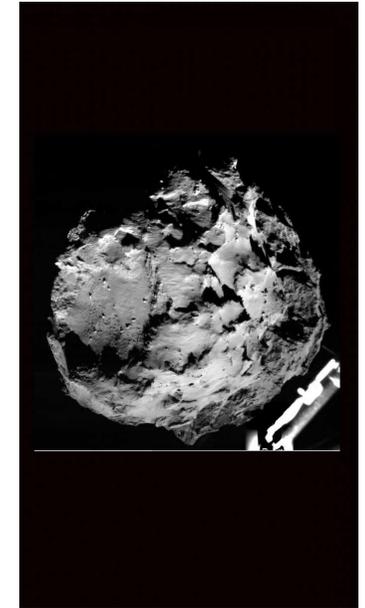
### Erste Landung auf einem Kometen

3-116a

Muttersonde *Rosetta* (ESA)  
gestartet 2.3.2004

Rechts: Komet 67P/Tschurjumow-  
Gerassimenko aus kurzer Distanz  
*Philae* gelandet 12.11.2014

Landebein von *Philae*



### Giotto di Bondone (1267-1337): Anbetung der Heiligen Drei Könige

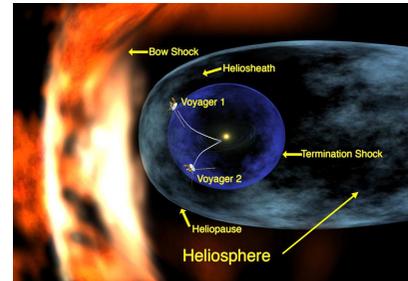
3-116



Fresco, 1304-1306,  
Capella degli  
Scrovegni, Padua,  
Italien. Der Halley'sche  
Komet war Oktober  
1301 im Perihel.

### Die Heliosphäre

3-117



*Voyager*-Sonden beim Verlassen der  
*Heliosphäre*

Start 1977; Vorbeiflug an:

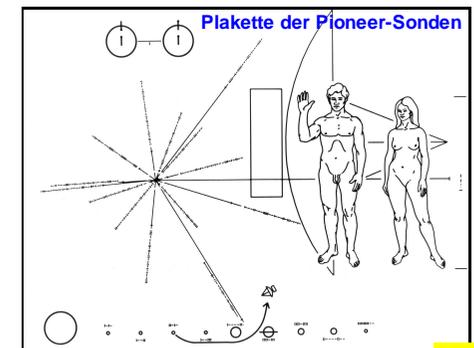
- Jupiter (1979),
- Saturn (1980/81)
- Uranus (V.2, 1986)
- Neptun (V.2, 1989)

jetzt in ~100 AU Entfernung

(zum Vergleich: Pluto in 40 AU)



Schallplatte auf den *Voyager*-Sonden



## • Entstehung des Planetensystems (Kosmogonie)

### • zu erklärende Fakten:

- (fast) alle Bahn- und Eigendrehimpulse (inklusive der Sonne) sind etwa parallel
- Drehimpuls zu 98% in den Planeten, obwohl 99.85% der Masse in der Sonne!

## • Modellvorstellung

vor  $4.6 \cdot 10^9$  Jahren:

- Kollaps der protostellaren Wolke  
Rotation  $\rightarrow$  flache Scheibe
- Bildung der Proto-Sonne
- Drehimpuls-Transport nach außen durch "magnetische Speichen"
- Kondensation von Staub

Temperaturverlauf

$\rightarrow$  chemische Differenzierung nach Kondensations-Temperatur:

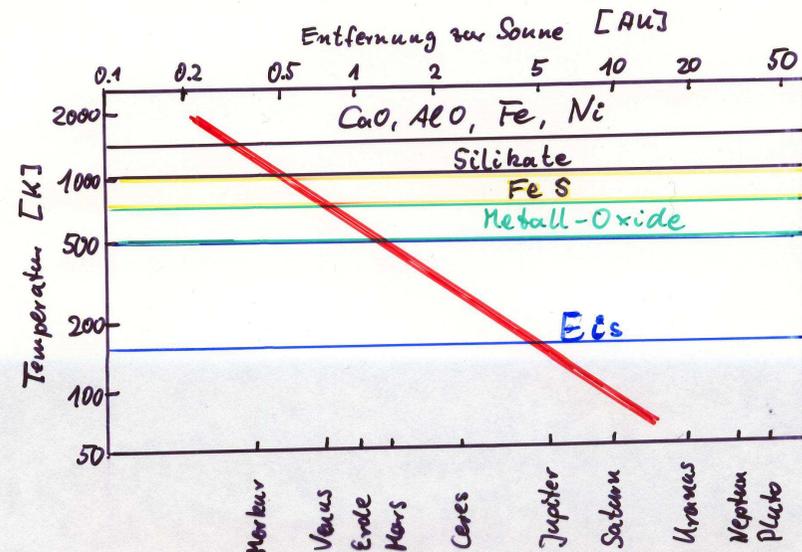
- Bahnradien etwa nach der

### Titus - Bode'schen Reihe

$$a_n / \text{A.U.} = 0.4 + 0.3 \cdot 2^n$$

Planet	$a$ [A.U.] (tatsächlich)	$n$	$a$ [A.U.] (Titus-Bode)
Merkur	0.4	$-\infty$	0.4
Venus	0.7	0	0.7
Erde	1.0	1	1.0
Mars	1.5	2	1.6
Ceres	2.8	3	2.8
Jupiter	5.2	4	5.2
Saturn	9.2	5	10.0
Uranus	19.2	6	19.6
Neptun	30.1		?
Pluto	39.5	7	38.8

## Kondensations-Temperatur:



nach "Fundamental Astronomy", p. 208

- Bildung von "Planetesimalen" (etwa Asteroiden - Größe)
- weitere Zusammenballung zu Proto-Planeten  
himmelsmechanische Wechselwirkungen:
  - Resonanzen → "Titus-Bode'sche Reihe"
  - Proto-Jupiter verdrängt Planeten im Asteroiden-Gürtel
- nach Einsetzen der Sonnen-Strahlung:  
Verlust des unverbundenen Gases und Staubs, nur die jovianischen Planeten können daraus ihre Atmosphären bilden.

→ Überprüfung der Modelle an extrasolaren Planetensystemen

## Nachweismethode 2:

### Doppler-Wobble

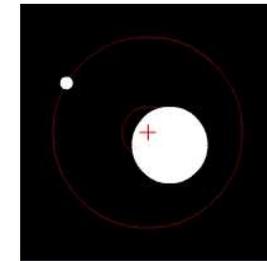
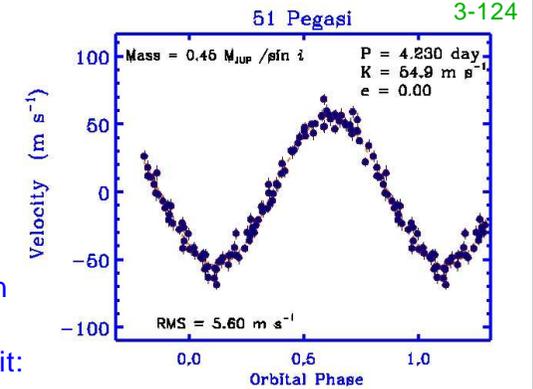
erste Entdeckung:

Planet um 51 Peg  
(Mayor & Queloz 1995)

heute ~500 Systeme detektiert

- Bewegung der Sonne um den gemeinsamen Schwerpunkt
- erforderliche Messgenauigkeit: einige m/s →  $\lambda/\Delta\lambda = 10^5$
- $v_{\text{rad}} \propto M_{\text{planet}} \sin i / \sqrt{a}$
- bevorzugt die Entdeckung schwerer Planeten in kleinem Abstand
- aus gemessenen  $U, v_{*}^{\text{max}}$  und bekannter Sternmasse  $M \rightarrow$  Untergrenze für Planetenmasse  $m$  und Bahnradius

$$\frac{m}{M} = \frac{v_{*}^{\text{max}}}{\sin i} \left( \frac{U}{2\pi GM} \right)^{1/3} \text{ bei Kreisbahn}$$

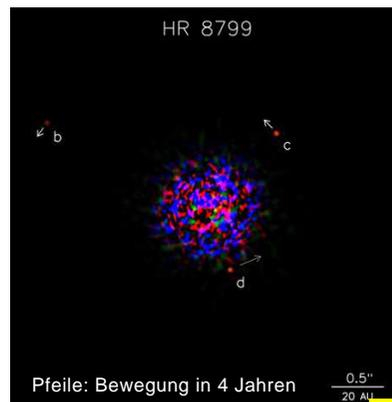
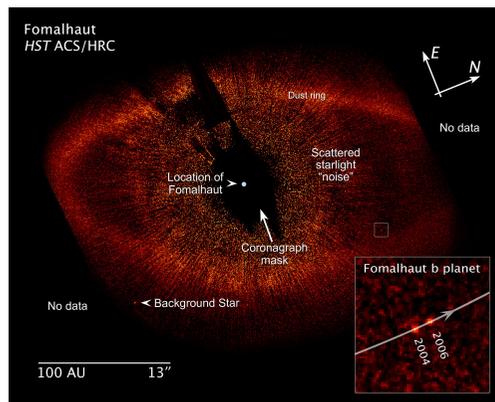


## Extrasolare Planeten

### Nachweismethode 1: Direkte Abbildung

z.B. Sonnensystem in der Entfernung von  $\alpha$  Centauri

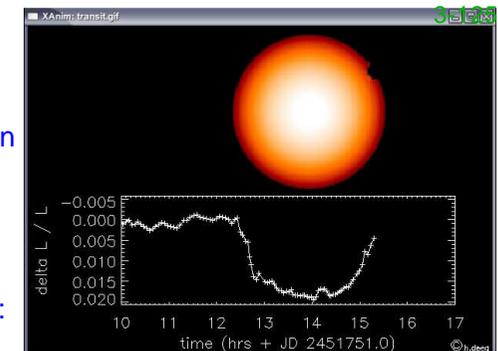
- Abstand Sonne - Jupiter 4.5"
- Visuelle Helligkeit Sonne 4.8 mag, Jupiter 25 mag  
→ überstrahlt um Faktor  $2.5 \cdot 10^8$
- günstigere Relation im Infrarot und "hot Jupiters"



## Nachweismethode 3:

### Transit-Photometrie

- Planet verdeckt zeitweise einen Teil der Sternscheibe
- sehr genaue photometrische Beobachtungen nötig: nur geringer Helligkeitsabfall um  $(R_{\text{Planet}}/R_{\odot})^2$  (z.B. durch Erde:  $10^{-4}$ , durch Jupiter 1%)
- Transits nur aus passender Richtung beobachtbar (z.B. Erde nur aus 0.5% aller Raumrichtungen); Chance größer f
- je größer die Umlaufzeit, umso seltener Transits
- Methode bevorzugt daher große Planeten auf engen Orbits
- leicht falscher Alarm (z.B. durch Sternflecken); Bestätigung durch mindestens 3 Transits erforderlich
- spezielle Satellitenobservatorien: COROT (kaputt), Kepler
- Transit-Planeten eröffnen die Möglichkeit differentieller Spektroskopie



## Extrasolare Planeten: die ersten 100 (heute ~1000)

Labels/Größe: Masse in  $M_{\text{Jupiter}}$

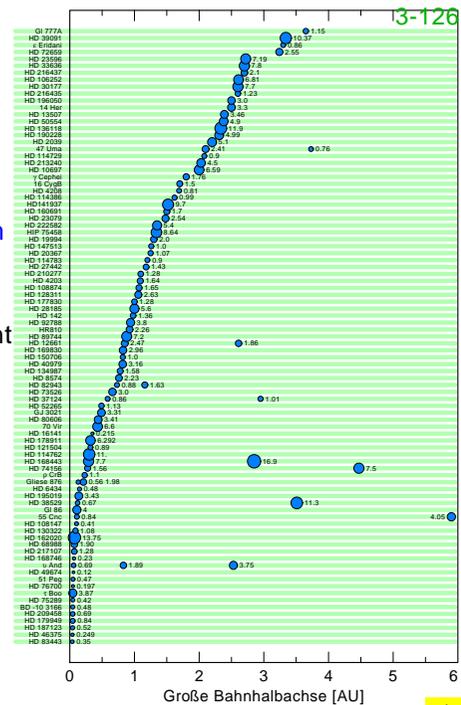
- fast alle entdeckten Planeten sind Gasriesen
- alle Bahnradien sind kleiner als beim Jupiter

→ nur durch Auswahleffekt ?

Gasriesen („hot Jupiters“) könne nicht so dicht am Stern entstehen

Theorien zur *Migration*:

- Wechselwirkung der Proto-Planeten mit der protoplanetaren Scheibe
- Ausbildung extremer Bahnexzentrizität, Energieverlust im Periastron durch Gezeitenreibung → kreisförmiger Orbit mit  $U < 10$  d
- bei Migration durch die habitable Zone wurde diese wahrscheinlich leergeräumt



## Ist unser Sonnensystem speziell ?

3-127

Simulation (*Nizza-Modell*)

- beschreibt Migration der Planeten nach Auflösung der protoplanetaren Gasscheibe
- betrachtet nur die Riesenplaneten
- anfangs gibt es noch viele Planetesimale mit insgesamt 35 Erdmassen
- Riesenplaneten streuen Planetesimale heraus, wodurch Saturn, Uranus und Neptun langsam nach außen und Jupiter langsam nach innen wandern
- Nach einigen  $10^8$  Jahren kommt es zu einer 2:1-Resonanz zwischen Jupiter und Saturn; dadurch destabilisiert sich das System; die Planetesimale werden zerstreut; Uranus und Neptun tauschen die Position
- das Modell erklärt viele beobachtete Eigenschaften des Sonnensystems, braucht aber recht spezielle Wahl der Anfangsbedingungen
- das Modell wird wahrscheinlicher, wenn man anfangs einen 5. Riesenplaneten annimmt, der aus dem System gekickt wird

