Einführung in die Astronomie I

Teil 3

Peter Hauschildt
yeti@hs.uni-hamburg.de

Hamburger Sternwarte
Gojenbergsweg 112
21029 Hamburg

24. Januar 2019

Übersicht Teil 3

- Physik der Planeten
  - Oberflächentemperaturen
  - Atmosphären
  - Innerer Aufbau
- Roche Grenze
- Monde, Planetoiden, Kometen
- Entstehung des Sonnensystems

Planeten: Typen !!

- Terrestrische Planeten
  - 'rocks'
  - Merkur, Venus, Erde, Mars
  - hohe Dichten (4–5 g/cm^3)
  - Massen $\leq 1 M_{\mathrm{Erde}}$
  - $a \leq 1.5$ AU
- Gasriesen
  - Gasbälle (mit 'rocky core')
  - geringe Dichten (0.7–1.7 g/cm^3)
  - Massen 14–317 $\mathrm{M}_{\mathrm{Erde}}$
  - $a \geq 5.2$ AU

Planeten: Temperaturen !!

- Annahmen:
  - keine internen Energiequellen
  - Sonneneinstrahlung = Abstrahlung
- $\rightarrow$ nicht richtig für Gasriesen!
- Jupiter: Kontraktion
  $\rightarrow$ Abstrahlung $\approx$ doppelte Sonneneinstrahlung
- Saturn: He-Regen (?)
- allg.: Radioaktivität vernachlässigt

Planeten: Temperaturen !!

- Abstrahlung:
  - Planet im thermodynamischen Gleichgewicht $\rightarrow$
  - Abstrahlung wie *Hohlraumstrahler*
  - auch: 'Schwarzer Körper'
- es gelten die Gesetze der Thermodynamik
- $\rightarrow$ Strahlungsgrössen hängen nur von T ab!
- Hier benötigt/brauchbar:
  - Gesamtabstrahlung
  - Wellenlänge des Flußmaximums

Planeten: Temperaturen !!

- Gesamtabstrahlung $\rightarrow$

Stefan-Boltzmann Gesetz

$$F = \sigma T^4$$

  - F: *Strahlungsfluß* (energie/cm^2/s)
  - $\sigma = 5.67 \times 10^{-5}\,\mathrm{erg\,s^{-1}\,cm^{-2}\,K^{-4}} = 5.67 \times 10^{-8}\,\mathrm{Wm^{-2}K^{-4}}$
    $\rightarrow$ Stefan-Boltzmann Konstante
  - T: absolute Temperatur [K]

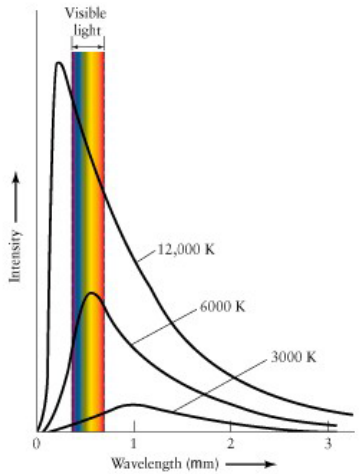
Leuchtkraft !!

- Gesamte abgestrahlte Leistung $\rightarrow$

$$L = F \times A = F \times 4\pi R^2 = \sigma T^4 4\pi R^2$$

für Kugel mit Radius R.

Planeten: Temperaturen !!



- Wellenlänge des Flußmaximums $\rightarrow$

  Wiensches Verschiebungsgesetz

$$\frac{\lambda_{\max}}{1\mathrm{cm}} = \frac{0.29\,\mathrm{K}}{T}$$

  - $\lambda_{\max}$: Wellenlänge bei der Strahlungsfluß $F(\lambda)$ maximal ist
  - T: absolute Temperatur [K]

Planeten: Temperaturen !!

- Eingestrahlter Fluß der Sonne am Ort des Planeten

$$F = \frac{L_\odot}{4\pi a^2}$$

- a: Abstand Sonne–Planet
- nur Bruchteil $1 - A$ absorbiert
- $\rightarrow$ Albedo $0 \leq A \leq 1$: *Reflexionsvermögen*

Planeten: Temperaturen

- hängt vom Planeten, seiner Oberfläche und Atmosphäre ab!
- A groß für dichte wolkige Atmosphären
  Venus: 0.72, Neptun: 0.62, Erde: 0.32
- A klein für Planeten mit geringer/klarer Atmosphäre
  Mars: 0.15, Merkur: 0.06, Mond: 0.07

Planeten: Temperaturen !!

- Fordere Gleichgewicht am subsolaren Punkt (Sonne im Zenit) $\rightarrow$
- Annahme: Kein Energietransport zu kühleren Gebieten!

$$\sigma T_{\mathrm{P}}^4 = (1-A)\frac{L_\odot}{4\pi a^2} = (1-A)\frac{\sigma T_\odot^4 4\pi R_\odot^2}{4\pi a^2}$$

- Daher

$$T_{\mathrm{P}} = (1-A)^{1/4} T_\odot \sqrt{\frac{R_\odot}{a}}$$

Planeten: Temperaturen !!

- Annahme: gleichmäßige Erwärmung
  - schnelle Rotation
  - vollständiger Wärmeaustausch durch Atmosphäre

$$4\pi R_{\mathrm{P}}^2 \sigma T_{\mathrm{P}}'^4 = \pi R_{\mathrm{P}}^2 (1-A) \frac{\sigma T_\odot^4 4\pi R_\odot^2}{4\pi a^2}$$

- Daher

$$T_{\mathrm{P}}' = (1-A)^{1/4} T_\odot \sqrt{\frac{R_\odot}{2a}}$$

Planeten: Temperaturen

- Beispiele
  - Merkur: $T_\mathrm{P} = 625\,\mathrm{K}$, $T'_\mathrm{P} = 440\,\mathrm{K}$, $T_\mathrm{gem} = [103, 623]\,\mathrm{K}$
  - Erde: $T_\mathrm{P} = 361\,\mathrm{K}$, $T'_\mathrm{P} = 256\,\mathrm{K}$, $T_\mathrm{gem} = [183, 333]\,\mathrm{K}$
  - Jupiter: $T_\mathrm{P} = 131\,\mathrm{K}$, $T'_\mathrm{P} = 93\,\mathrm{K}$, $T_\mathrm{gem} = 163\,\mathrm{K}$
  - Neptun: $T_\mathrm{P} = 53\,\mathrm{K}$, $T'_\mathrm{P} = 38\,\mathrm{K}$, $T_\mathrm{gem} = 55\,\mathrm{K}$

Planeten: Temperaturen !!

- Grund: Treibhauseffekt!
  - energetische Strahlung kann Oberfläche erreichen und wärmen
  - IR Strahlung wird von Atmosphäre eingeschlossen
  - $\rightarrow$ Temperatur höher als ohne Atmosphäre
  - Beispiel: Venus
- Grund: interne Energiequellen
  - Kontraktion (Jupiter), 'Regen' (Saturn)

Planeten: Atmosphären !!

- Sehr unterschiedlich von Planet zu Planet!
- ein Grund: kinetische Bewegung der Gaspartikel
- mittlere Geschwindigkeit der Gasteilchen

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = 0.16\,\mathrm{km\,s^{-1}} \sqrt{\frac{T/1\,\mathrm{K}}{m/m_p}}$$

  - k: Boltzmann Konstante
  - m_p: Masse des Protons
  - m: Masse der Gasteilchen

Planeten: Atmosphären !!

- Vergleiche mit der Entweichgeschwindigkeit

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R_\mathrm{p}}}$$

- $\rightarrow$

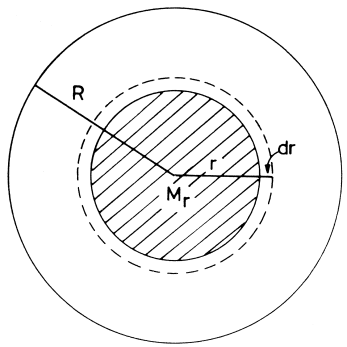
$$\frac{v_e}{\bar{v}} \propto \sqrt{\frac{Mm}{R_\mathrm{P} T}}$$

Planeten: Atmosphären

- $v_e \gg \bar{v} \rightarrow$ Planet kann Gas halten
- leichte Gase entkommen eher als schwere Gase
- niedriges T, hohes M und kleines R_P erlaubt i.A. dichtere Atmosphäre
- $\rightarrow$ leichte Gase (H, He) nur auf Gasriesen!

Planeten: innerer Aufbau !!

- Sphärisch symmetrischer Planet
  $\rightarrow$ alle Größen hängen nur von r ab!
- M_r: Masse innerhalb von r
- Masse einer dünnen Kugelschale dr:



$$dM_r = 4\pi r^2\, dr\, \rho(r)$$

- $\rightarrow$ DGL der Massenverteilung

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$$

Planeten: innerer Aufbau !!

- Planeten alt
  $\rightarrow$ sind im hydrostatischem Gleichgewicht
- Druck = Gewicht der oberen Schichten
- $\rightarrow$ Druckänderung = Gewichtsänderung

$$dP = -g(r)\rho(r)dr$$

- mit $g(r) = GM_r/r^2 \rightarrow$

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM_r}{r^2}\rho(r)$$

- '$-$' da P nach außen hin abnehmen muß

Planeten: innerer Aufbau !!

- $\rho(r)$ verknüpft mit $P(r)$ und $T(r)$ über *Zustandsgleichung (EOS)*
- Wenn EOS bekannt, können Massenerhaltung und Impulserhaltung integriert werden
- Randbedingungen:
  - $r = 0 \rightarrow M_r = 0$
  - $r = R \rightarrow P \approx 0$
- Problem: EOS sehr schwer zu bestimmen
- deutliche Unterschiede Gasriesen–terrestrische Planeten

Planeten: innerer Aufbau

- Beispiel: max. Höhe von Bergen
  - Schwerebeschleunigung $g = GM/R^2$
  - Druck am Boden einer Säule der Höhe h, Dichte ρ

$$P = g\rho h$$

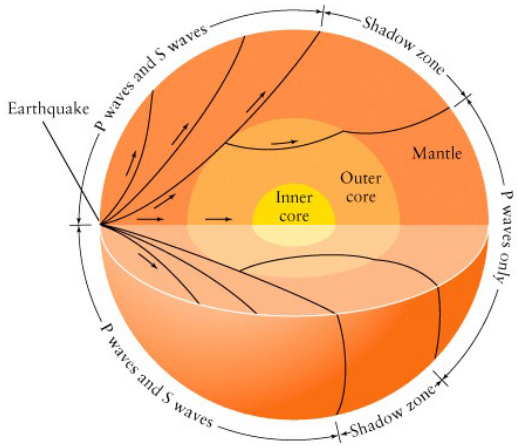
  - Grenzdruck von Stein $S \approx 10^8\,\mathrm{Pa}$
  - $P < S \rightarrow$

$$h < h_0 = \frac{S}{\rho g} = \frac{S}{\rho G}\frac{R^2}{M}$$

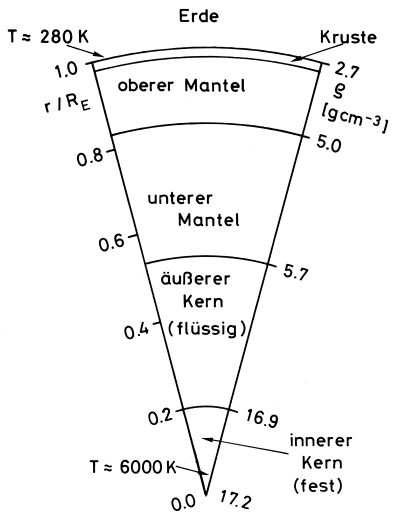
  - $\rho > 1\,\mathrm{g\,cm^{-3}}$ (Wasser)
  - Erde: $h_0 \approx 10\,\mathrm{km}$, Mars: $h_0 \approx 26\,\mathrm{km}$
  - terrestrische Planeten: $h \ll R \rightarrow$ Planet rund!

Planeten: innerer Aufbau der Erde !!

- Kann durch Seismische Wellen 'gesehen' werden!
  - 'P-Wellen' $\rightarrow$ longitudinal Wellen
  - 'S-Wellen' $\rightarrow$ transversal Wellen
- S-Wellen nicht durch Flüssigkeiten!
- Brechungsverhalten $\rightarrow$ Bestimmung des Erdinneren



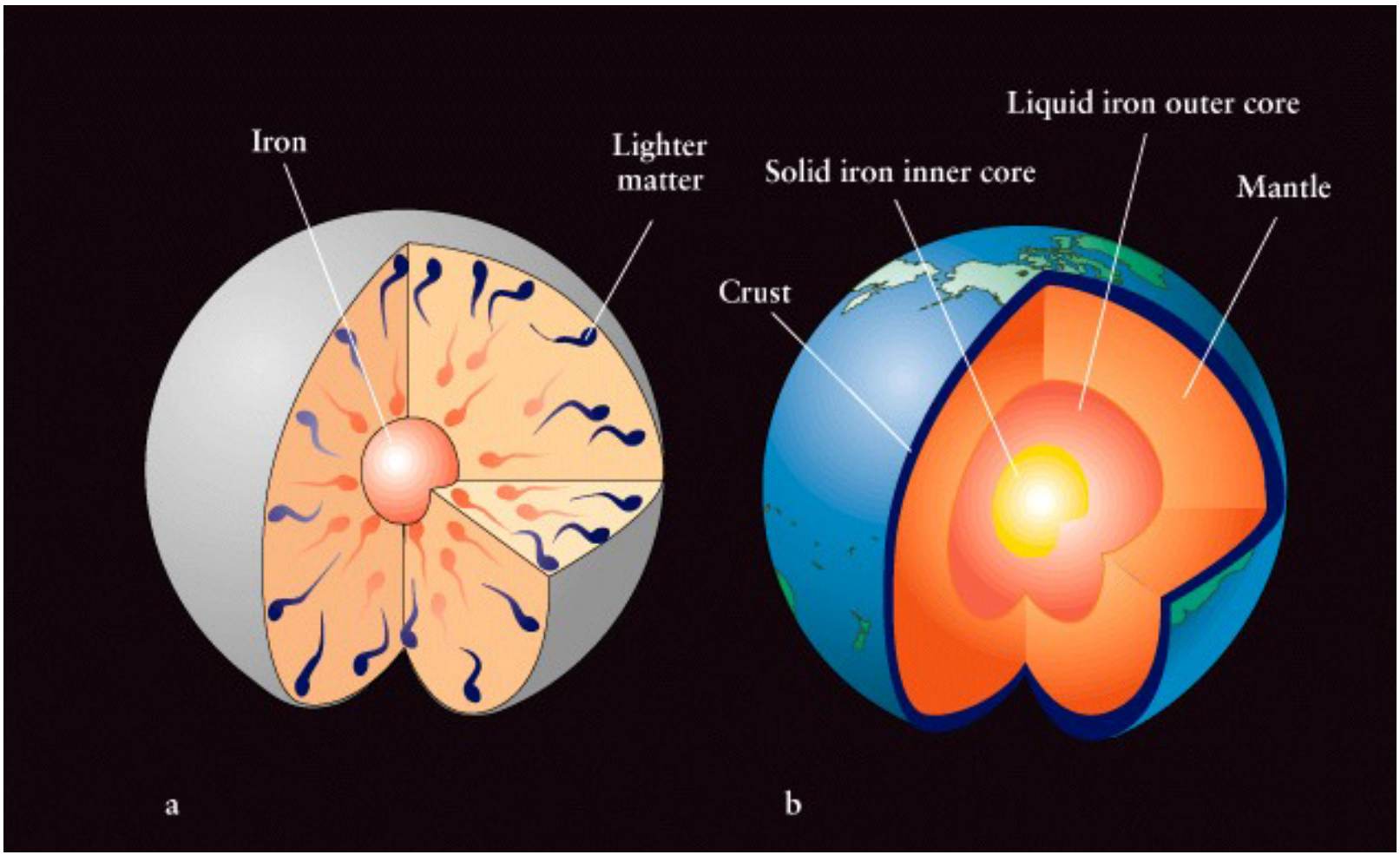
Planeten: innerer Aufbau der Erde



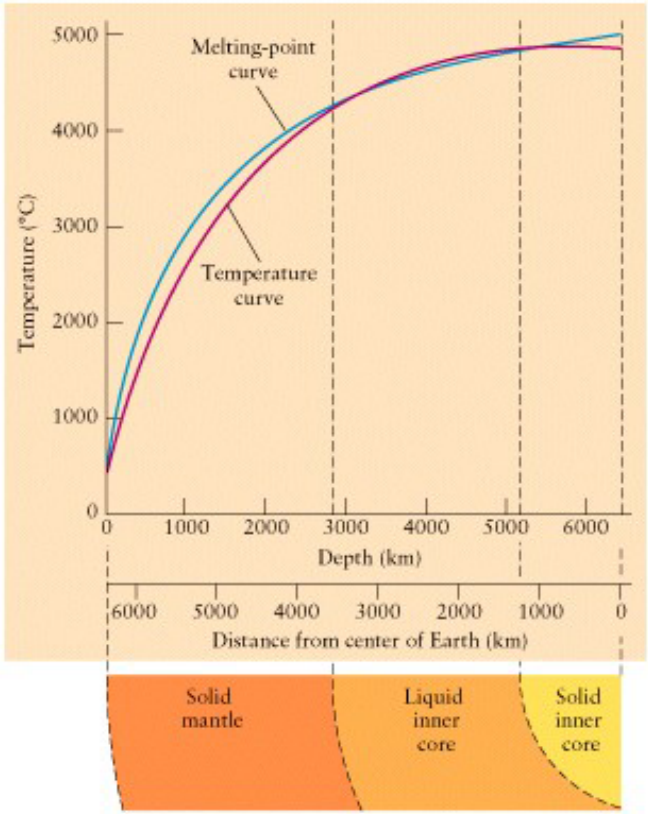
- Zwiebelschalenstruktur mit
  - Kruste
  - Mantel
  - Kern
- Erdinneres chemisch differenziert!

Planeten: innerer Aufbau der Erde

- Junge Erde flüssig
  - schwere Elemente (Fe) sinken
  - leichte (Al, Si) 'schwimmen'

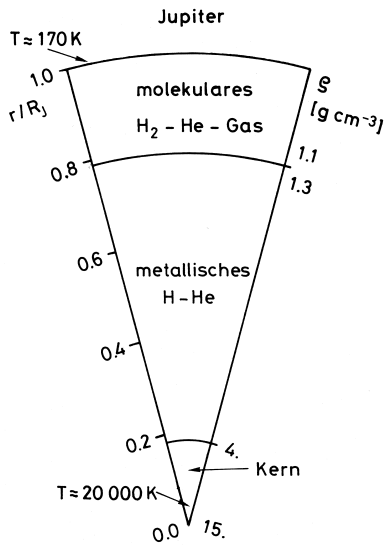


Planeten: innerer Aufbau der Erde !!



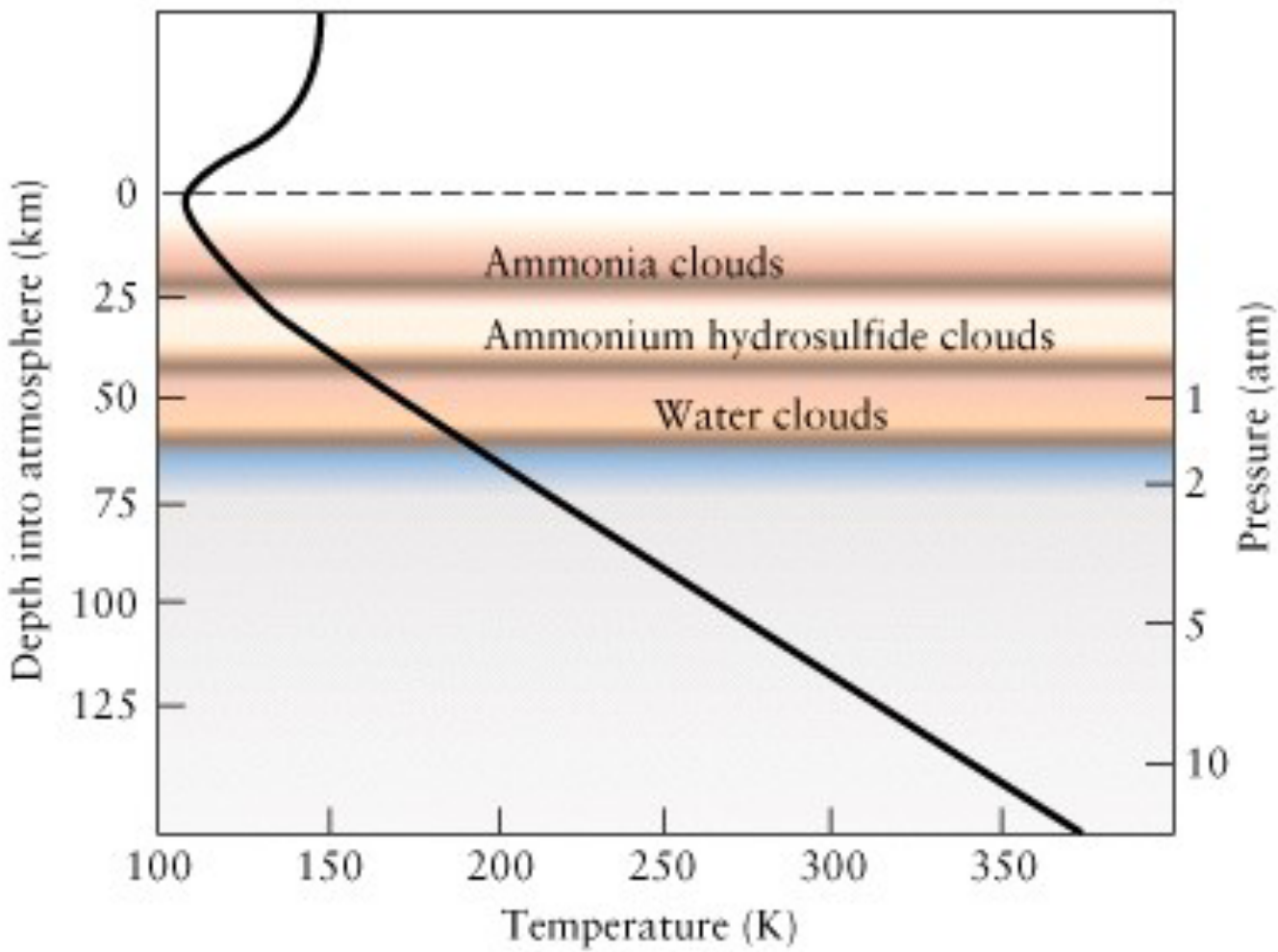
- äußerer Kern flüssig?
- innerer Kern fest?
- Zustandsgleichung!
  - Schmelzpunkt hängt von T *und* P ab

Planeten: innerer Aufbau Jupiter



- Theoretisches Modell
  - dicke Atmosphäre
  - Schicht aus metallischem H
  - erd-ähnlicher Kern ($13 M_{\mathrm{E}}$)

Planeten: Jupiter Atmosphäre

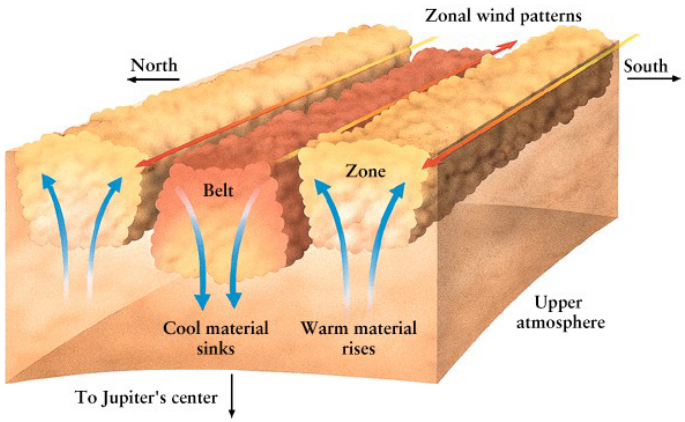


Planeten: Jupiter Atmosphäre

c. *Voyager 1*, March 1979

- Sehr strukturiert
  - dicke Atmosphäre
  - helle 'Zonen'
  - dunkle 'Gürtel'
  - 'Grosser Roter Fleck'

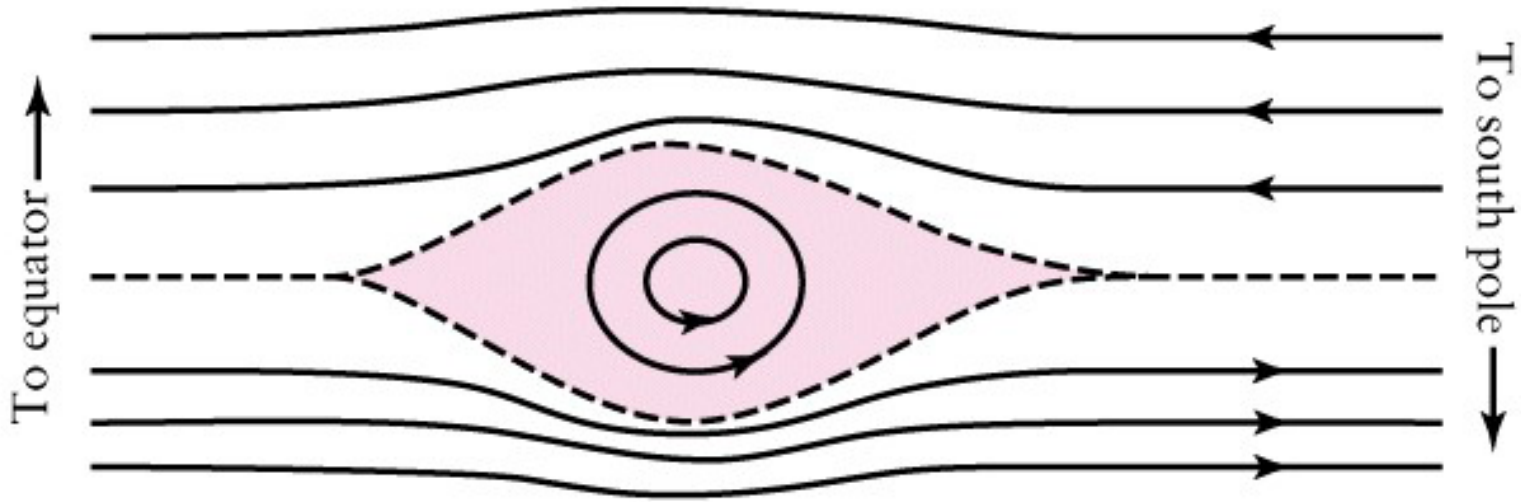
Planeten: Jupiter Atmosphäre



- 'Belts':
  - Kühles Gas/Eiswolken
  - sinken ab $\rightarrow$ liegen tiefer als Zonen
- 'Zones':
  - Warmes Gas/Eis
  - steigen auf $\rightarrow$ liegen höher als Gürtel

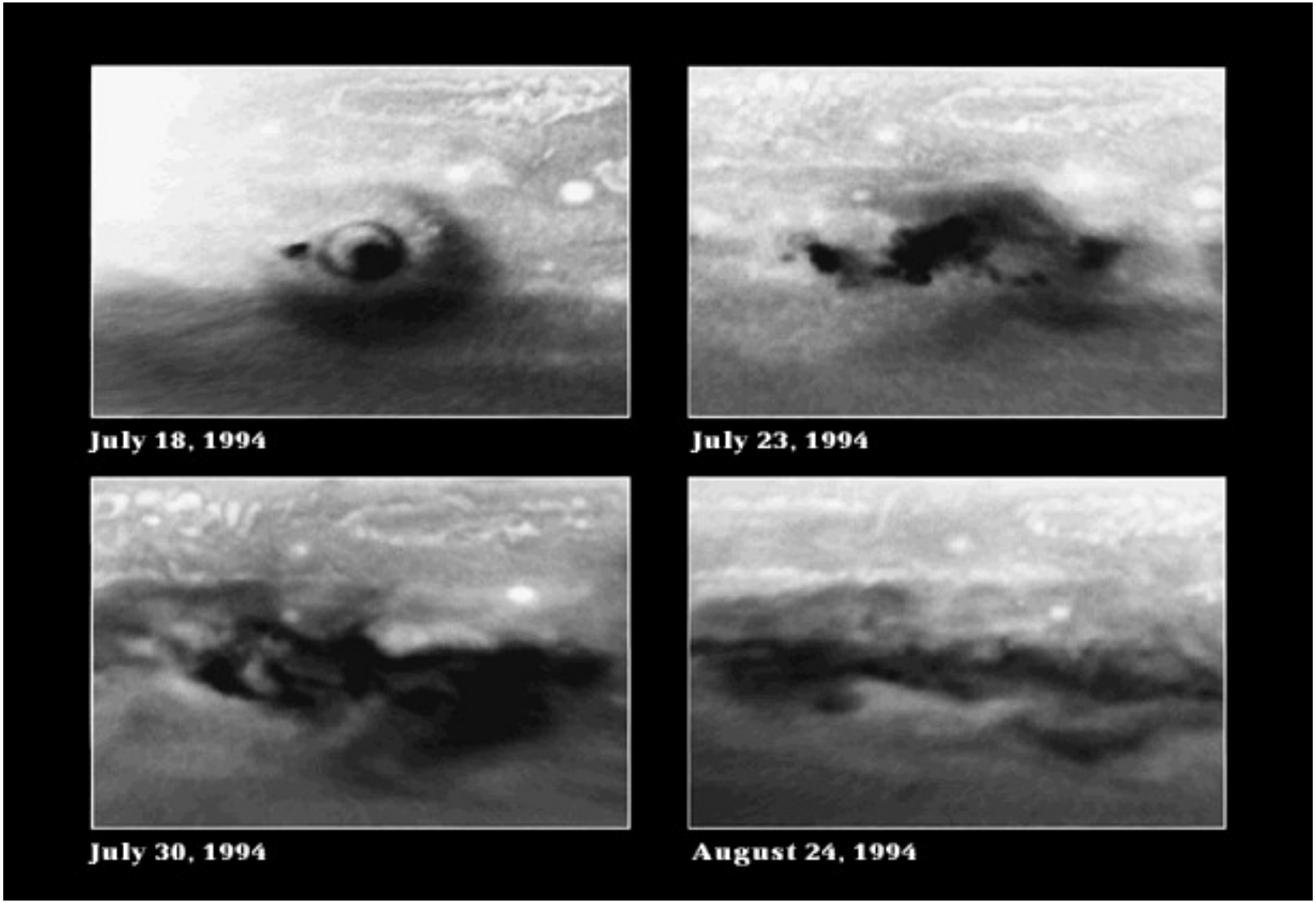
Planeten: Jupiter Atmosphäre

- Grosser Roter Fleck
  - alter (300 Jahre!) Sturm
  - Gas rotiert gegen Uhrzeigersinn
  - umgeben von Turbulenzen



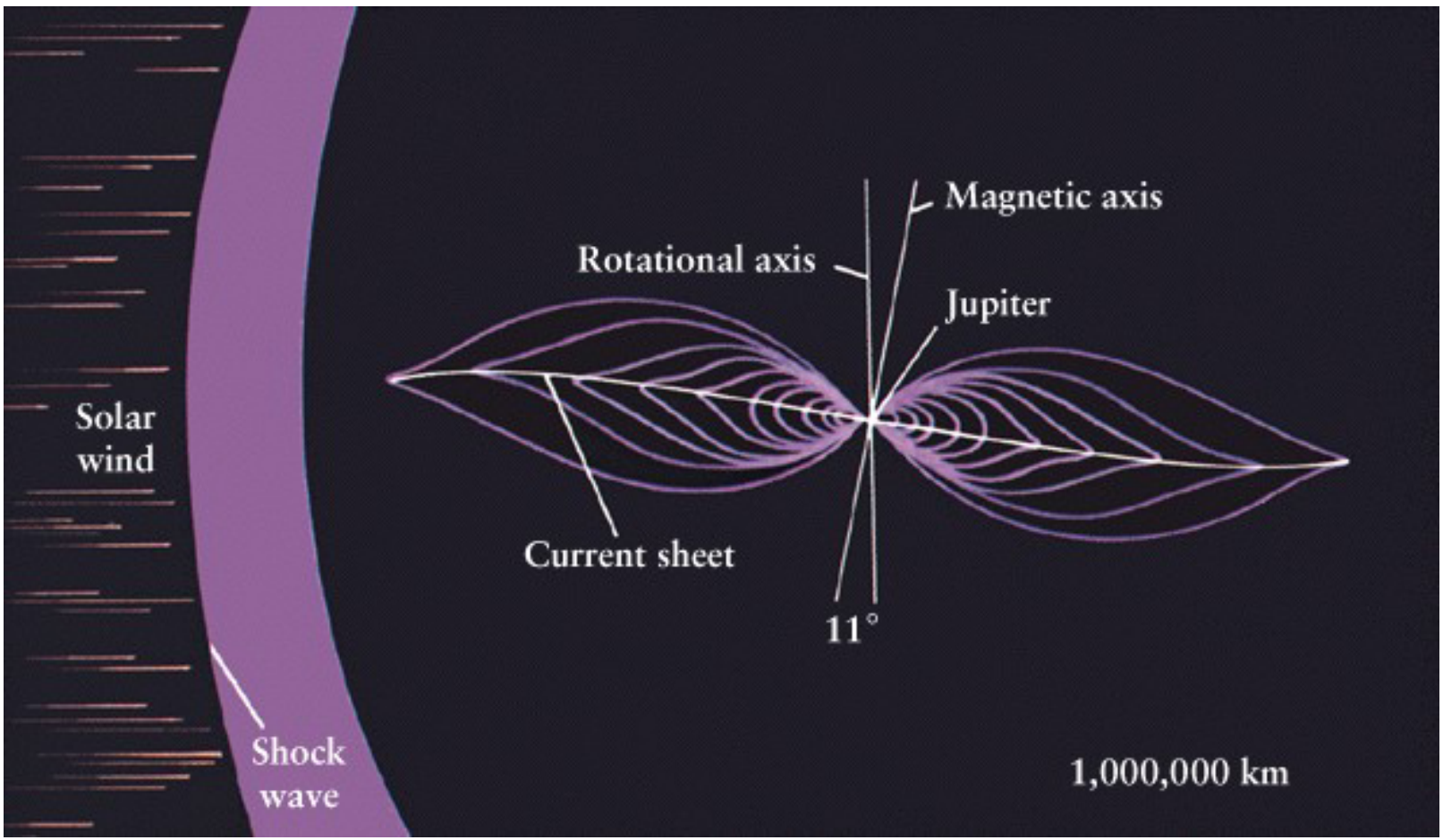
Planeten: Jupiter Atmosphäre

- Impakt Shomaker-Levy 9, Fragment G:

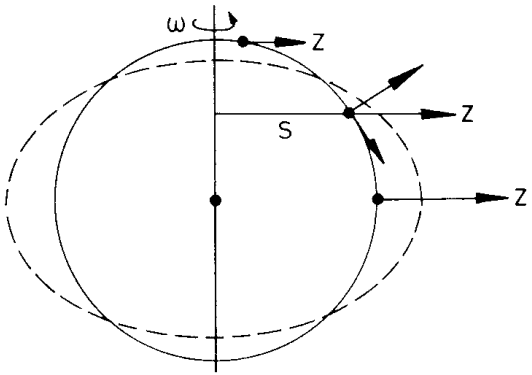


Planeten: Jupiter Magnetfeld

- Flüssiger metallischer Wasserstoff
  $\rightarrow$ sehr guter Leiter!
- schnelle Rotation (9h 50–55m) $\rightarrow$ Dynamo!
- sehr starkes B-Feld



Planeten: Rotation !!



- Zentrifugalkräfte!
- Winkelgeschwindigkeit $\omega = \text{const.} \rightarrow$

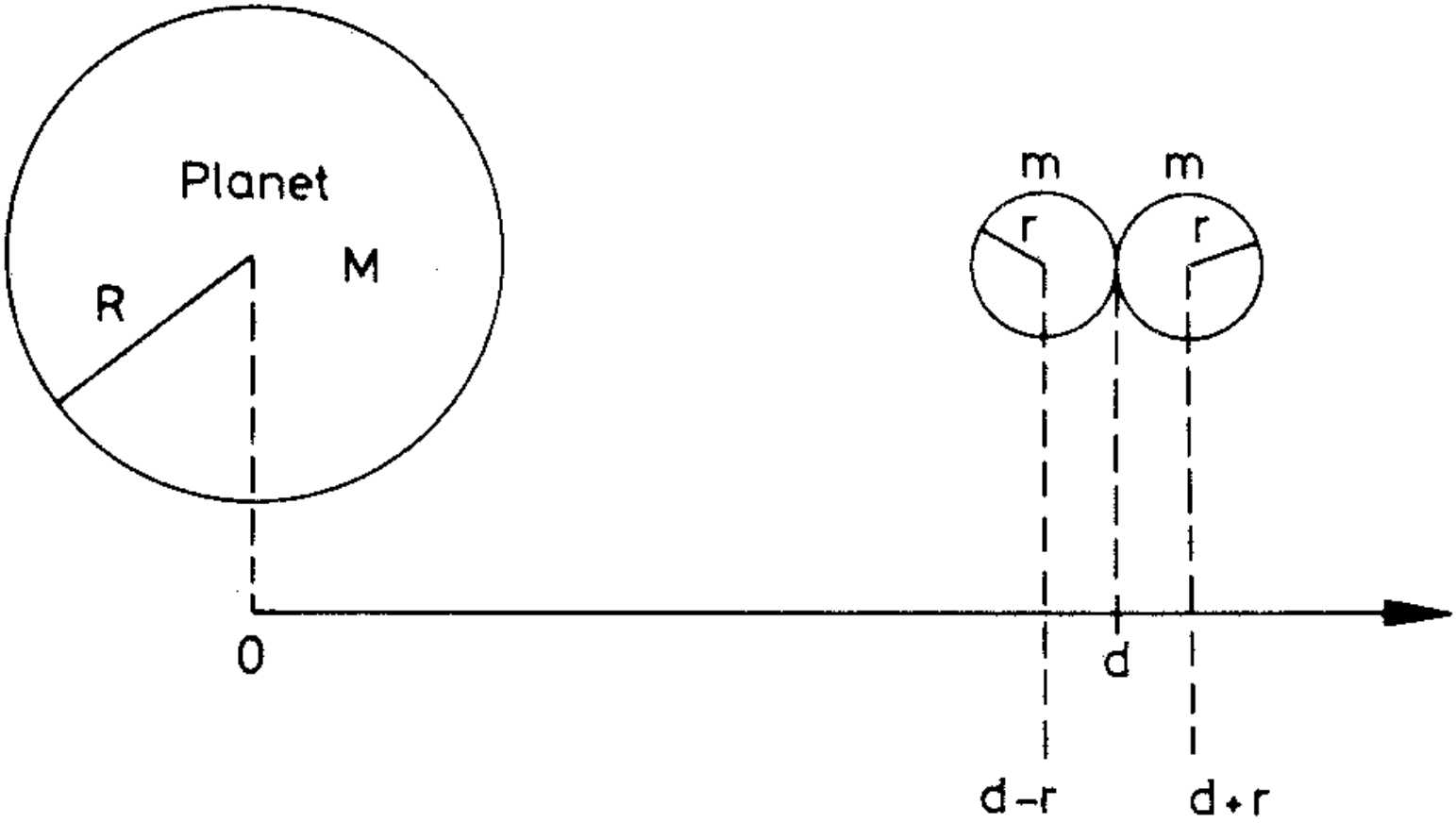
$$Z = s\omega^2$$

- Z: Zentrifugalbeschleunigung
- $Z = 0$ an den Polen
- Z maximal am Äquator
- $\rightarrow$ Abplattung!
- hängt auch von innerem Aufbau ab!

Planeten: Rotation

- Beispiel: Saturn
  - Rot. Periode: 10h 14m
  - $Z_{\mathrm{Aq}} = 0.2g$
  - $g_{\mathrm{Saturn}} = 1.1g$
  - sehr kleine mittlere Dichte $\bar{\rho} = 0.7\,\mathrm{g\,cm^{-3}}$
  - $\rightarrow$ große Abplattung $\Delta R/R = 0.1$!
- Erde: $\Delta R/R = 1/300$

Roche Grenze !!



- Gezeitenkräfte!
- Vorder/Rückseite $\approx$ 2 Einzelmassen m

Roche Grenze !!

- Zusammenhalt $\rightarrow$

$$f = G\frac{m^2}{4r^2}$$

- Gezeitenkräfte = Differenz Anziehungskräfte $\rightarrow$

$$\Delta F = \frac{GMm}{(d-r)^2} - \frac{GMm}{(d+r)^2} = G\frac{Mm}{d^2}\left(\frac{1}{(1-r/d)^2} - \frac{1}{(1+r/d)^2}\right)$$

- Reihenentwicklung für $r/d \ll 1 \rightarrow$

$$\Delta F \approx G\frac{Mm}{d^2}\left(1+2\frac{r}{d} - \left(1-2\frac{r}{d}\right)\right) = 4GMm\frac{r}{d^3}$$

Roche Grenze !!

- Objekt wird zerstört wenn $f < \Delta F$
- $\rightarrow d < d_{\mathrm{R}}$ *Roche-Grenze*
- $f = \Delta F \rightarrow$

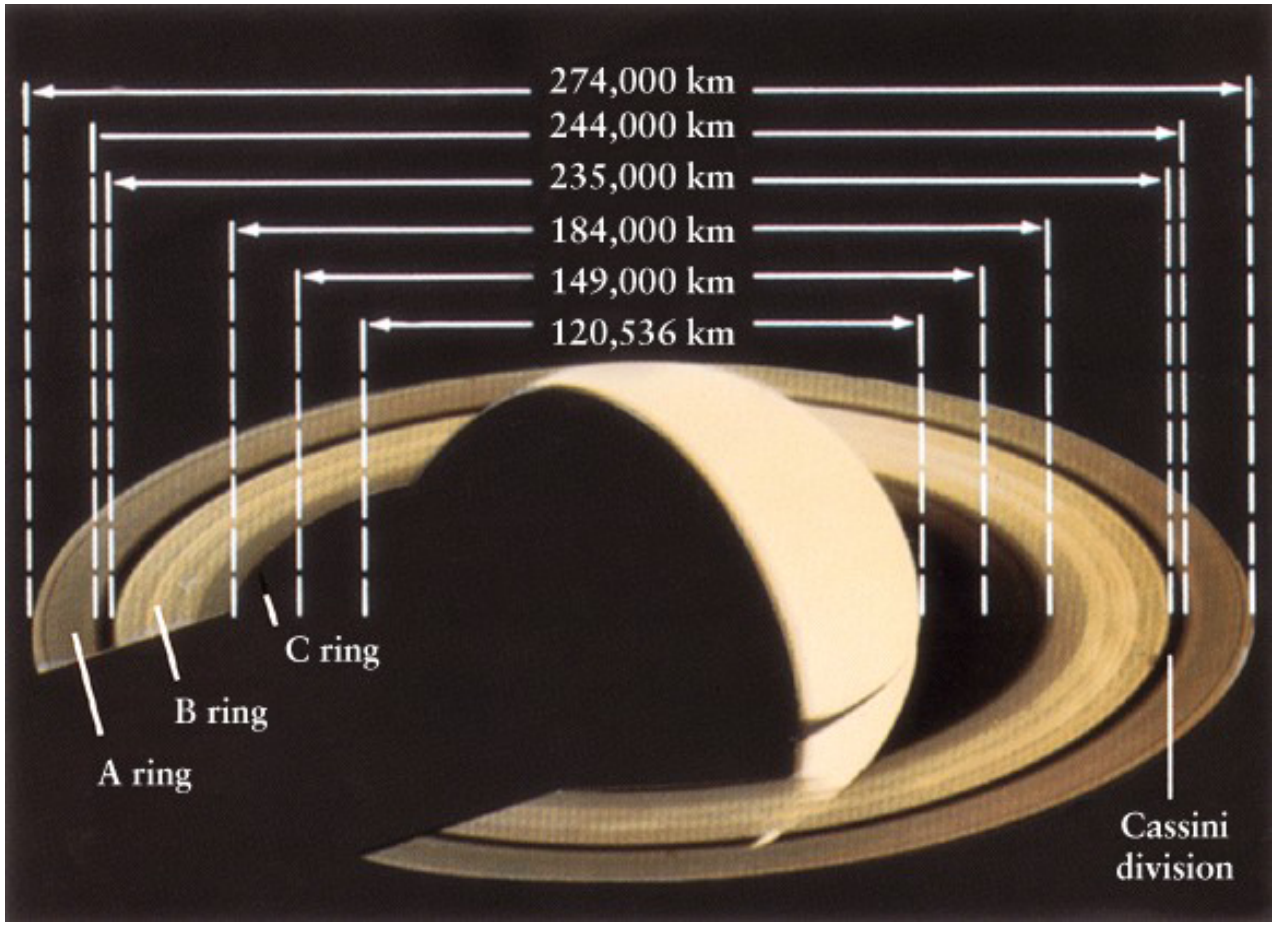
$$d_{\mathrm{R}} = \left(16 r^3 \frac{M}{m}\right)^{1/3}$$

- Vereinfachung durch mittlere Dichten ρ_{P} und ρ_{m}

$$d_{\mathrm{R}} \approx 2.52 R \left(\rho_{\mathrm{P}}/\rho_{\mathrm{m}}\right)^{1/3}$$

Roche Grenze

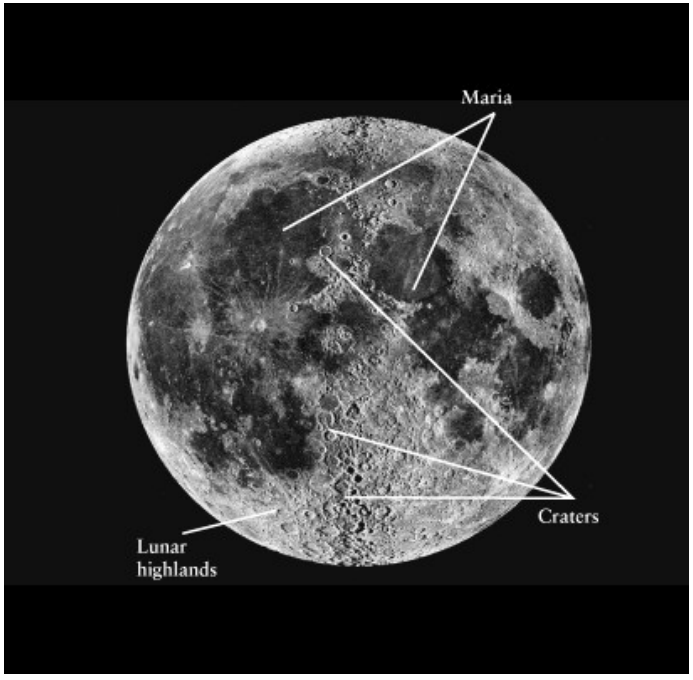
- Beispiel: Ringe des Saturn!
- äußere Kante $\approx 2.3 R_{\mathrm{Saturn}}$



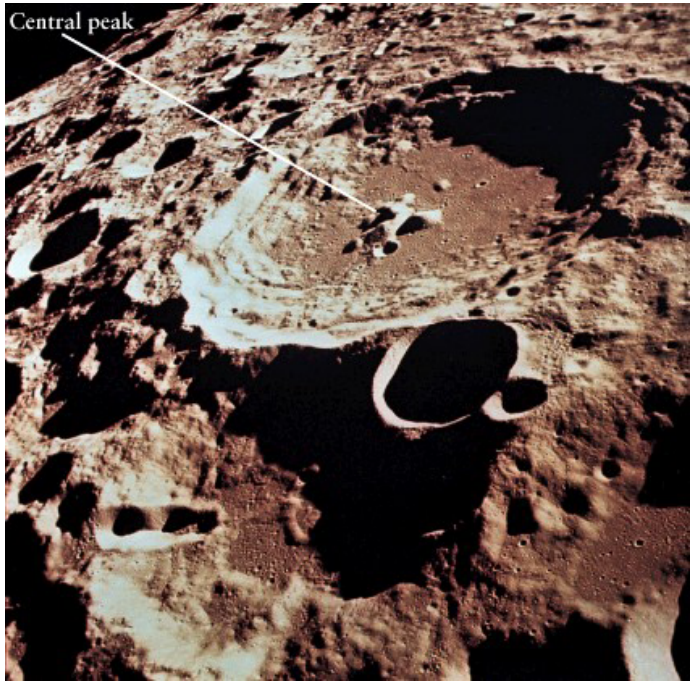
Planetenoberflächen

- Vermessung durch Photos und/oder Radar (Venus)
- Gasriesen haben keine Oberfläche!
- Massearme Objekte (Merkur, Mond):
  - Schnelle Auskühlung
  - $\rightarrow$ dicke Krusten
  - $\rightarrow$ Vulkane sterben
  - $\rightarrow$ Oberfläche durch Einschläge geprägt

Der Mond

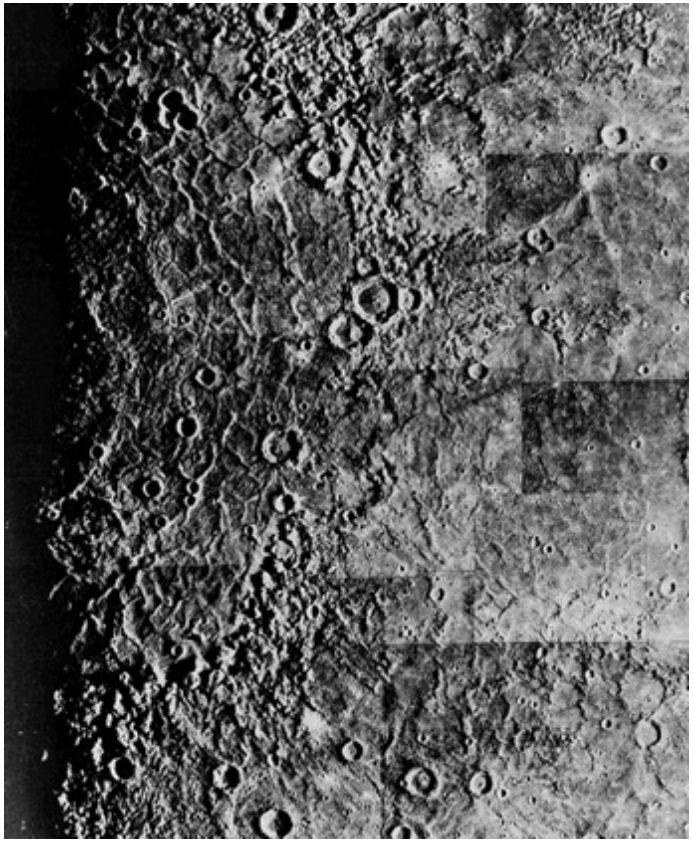


Oberfläche des Mondes

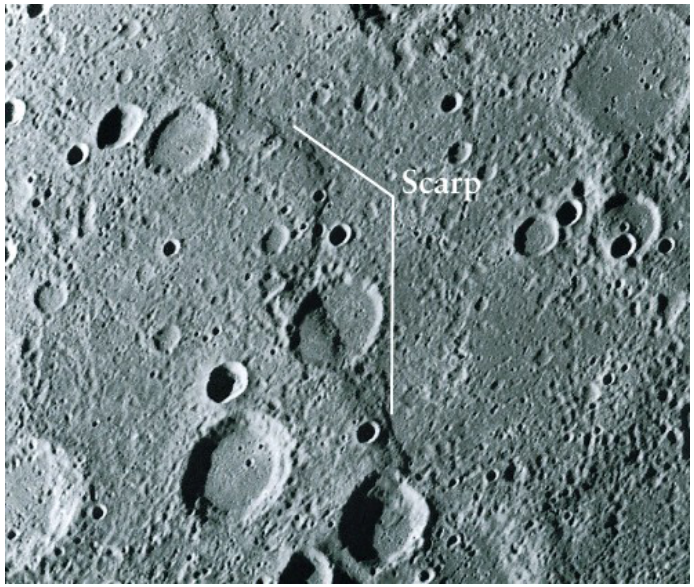


Mondkrater (80 km Durchmesser)

Merkur

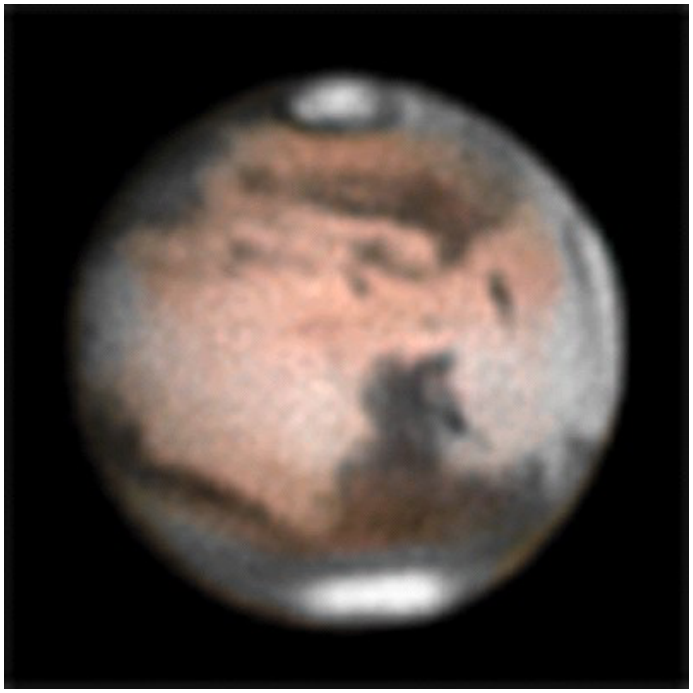


Caloris Basin (1800 km!)

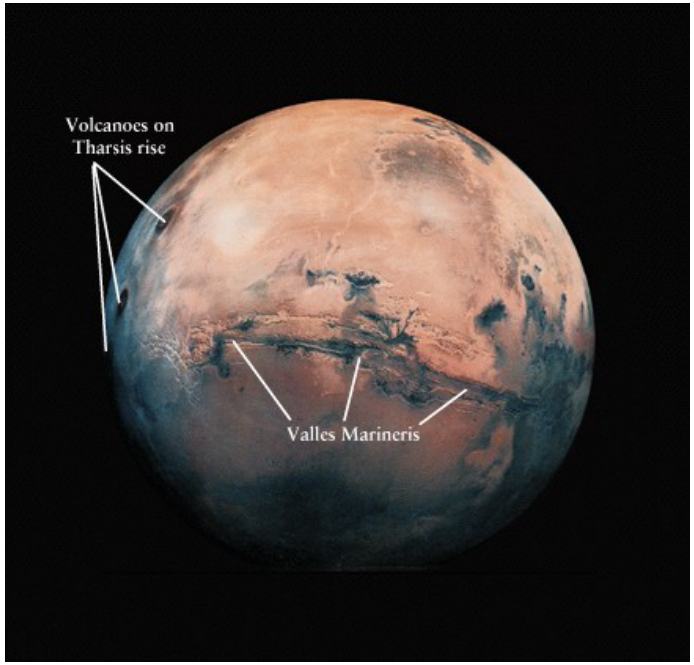


Scarps

Mars



Mars gesehen von Erde



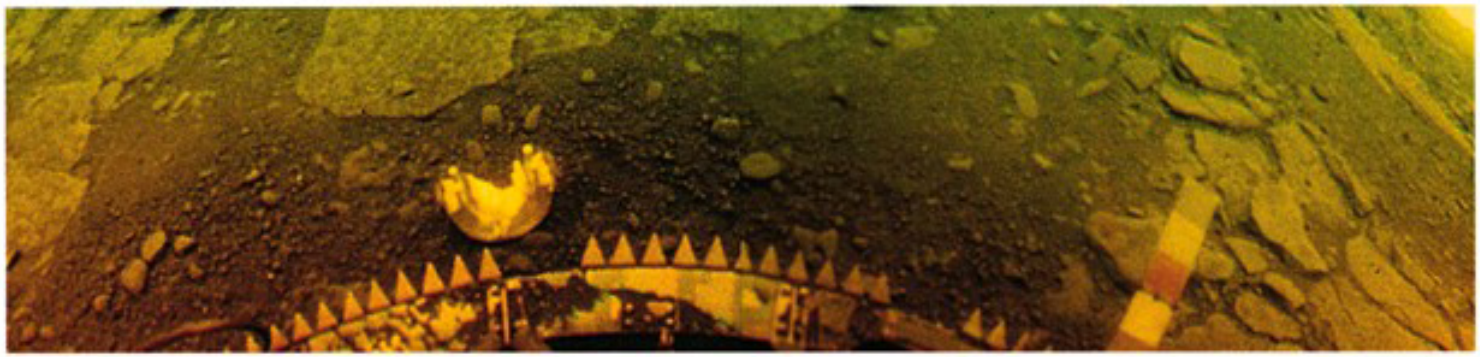
Valles Marineris

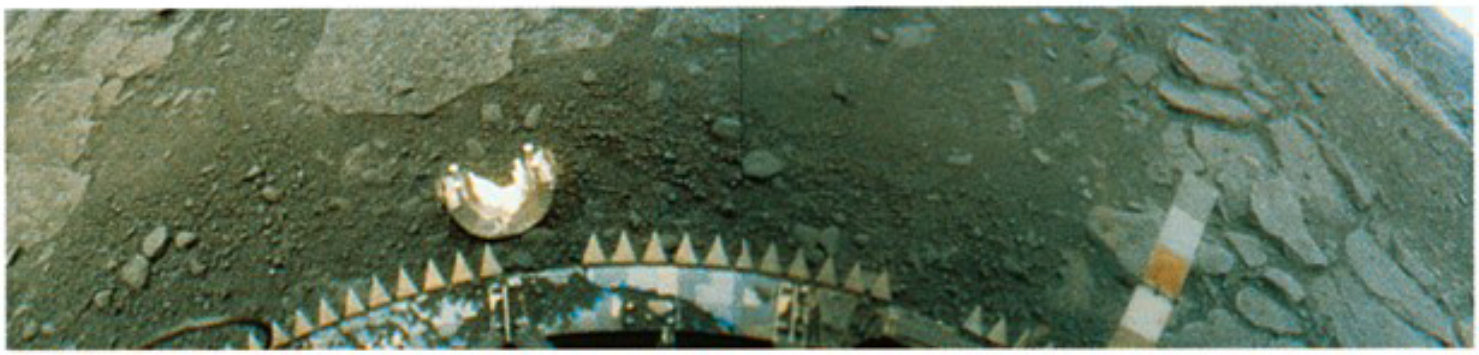
Mars

alter Marsfluß

Überflutungsgebiete (40 km)

Venus



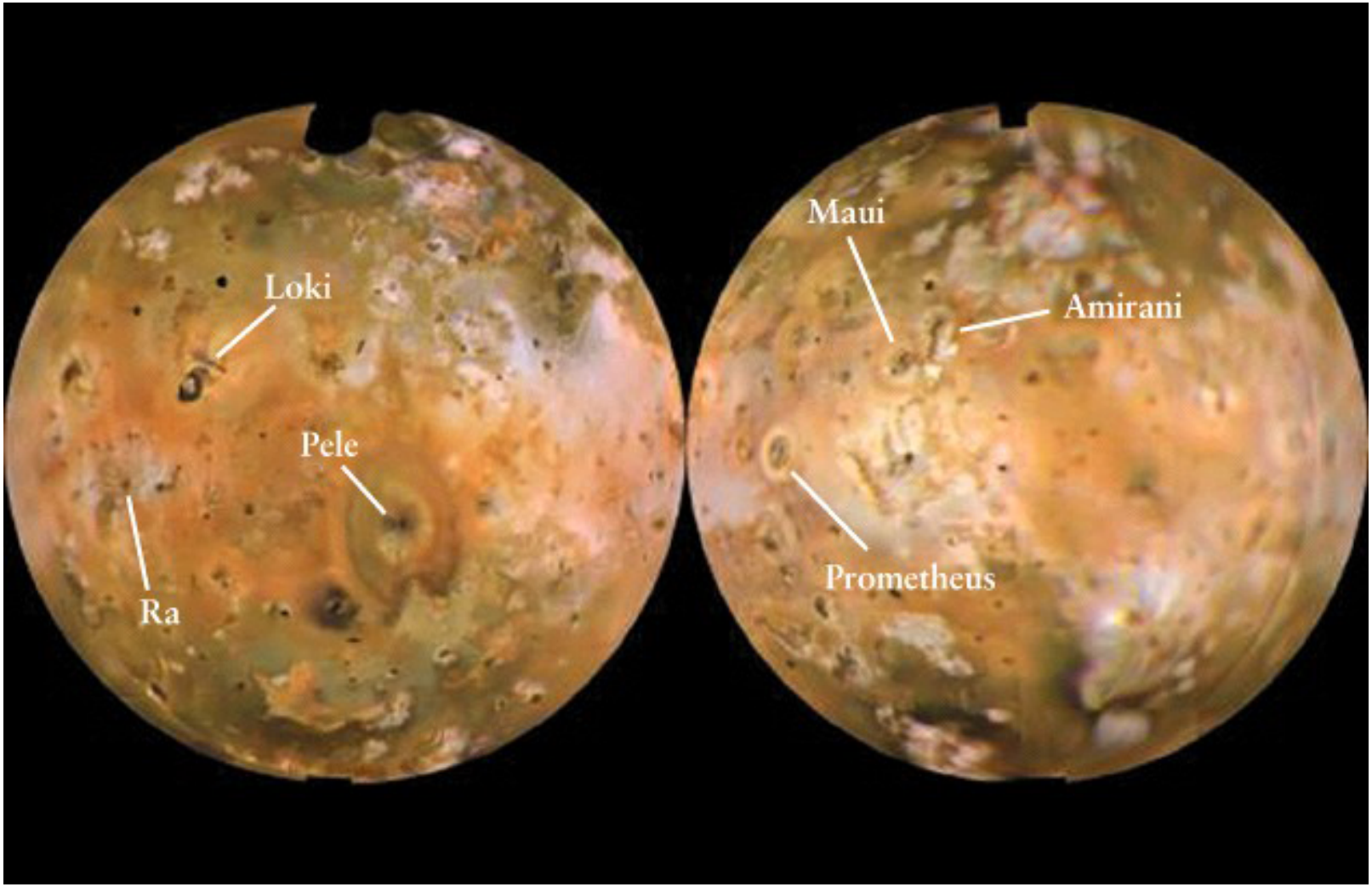


- keine direkte Sicht!
- $\rightarrow$ Radar
- Venera 13 lander (UdSSR 1981)

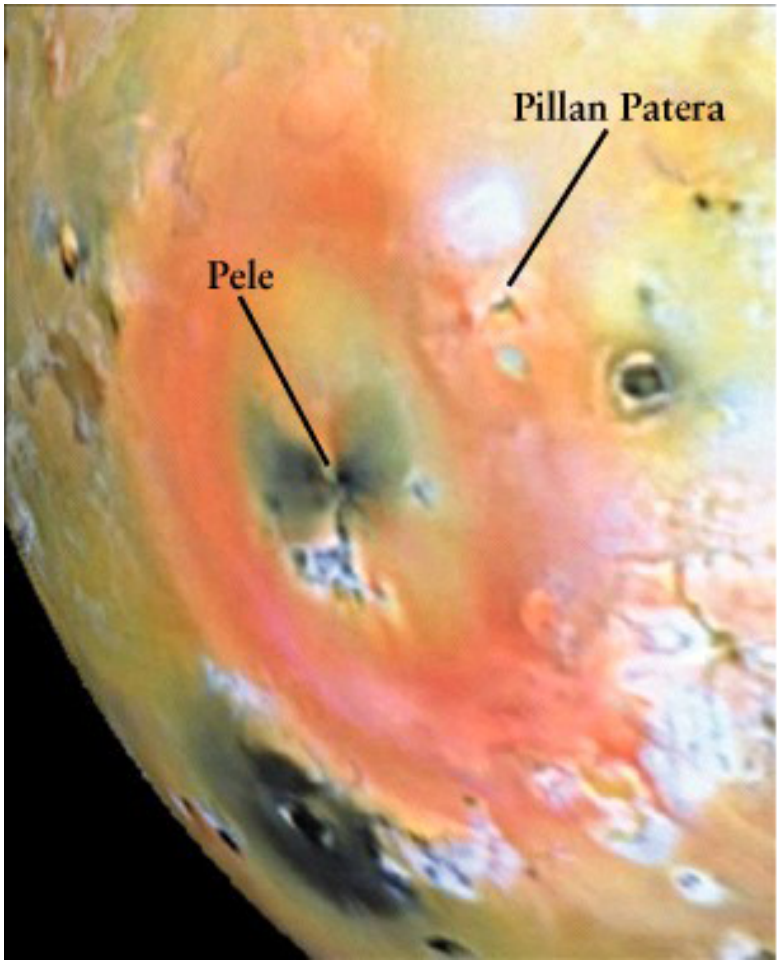
Monde

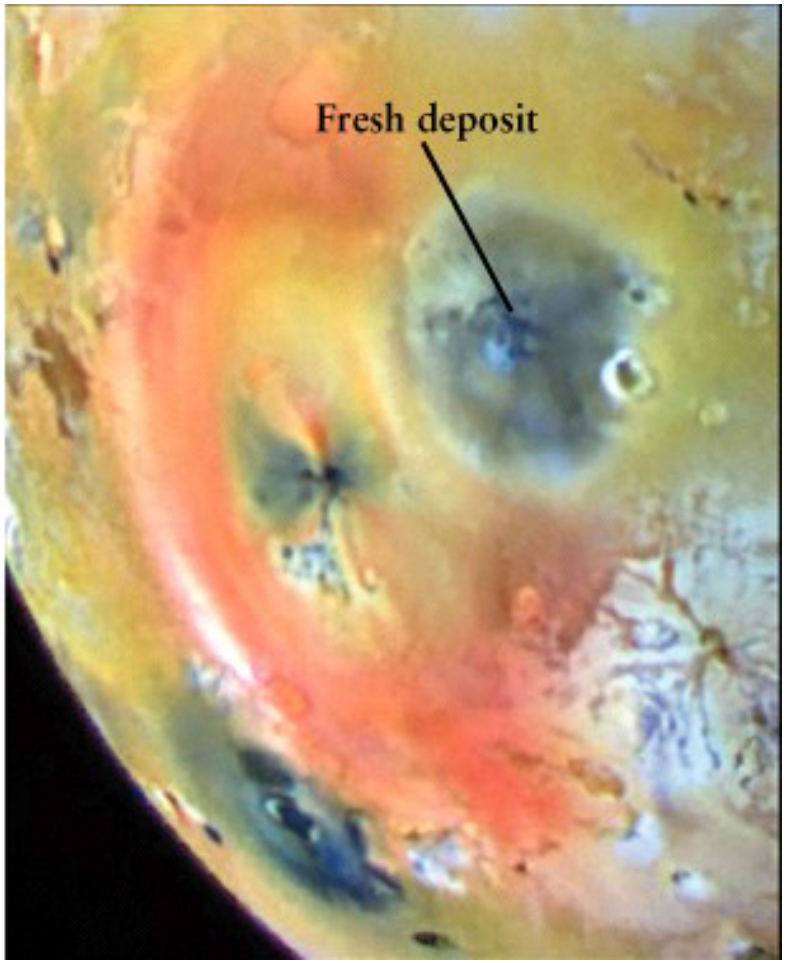
- 7 große Monde:
  - Mond
  - Io, Europa, Ganymede, Callisto [Jupiter]
  - Titan [Saturn]
  - Triton [Neptun]
- Sehr grosse Unterschiede!

Monde: Io

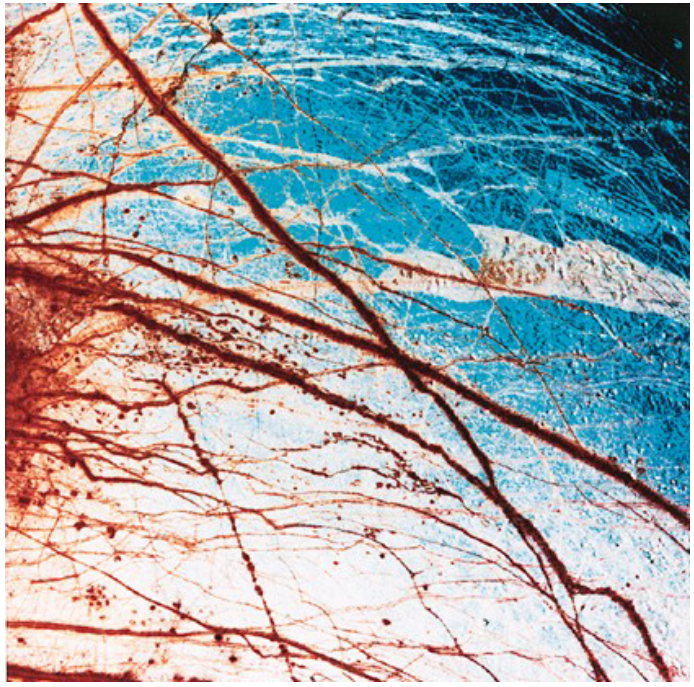


Monde: Io

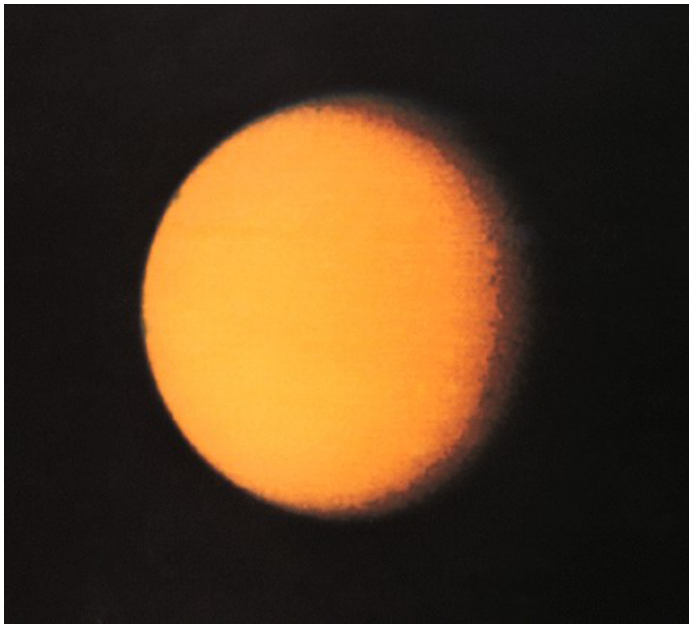




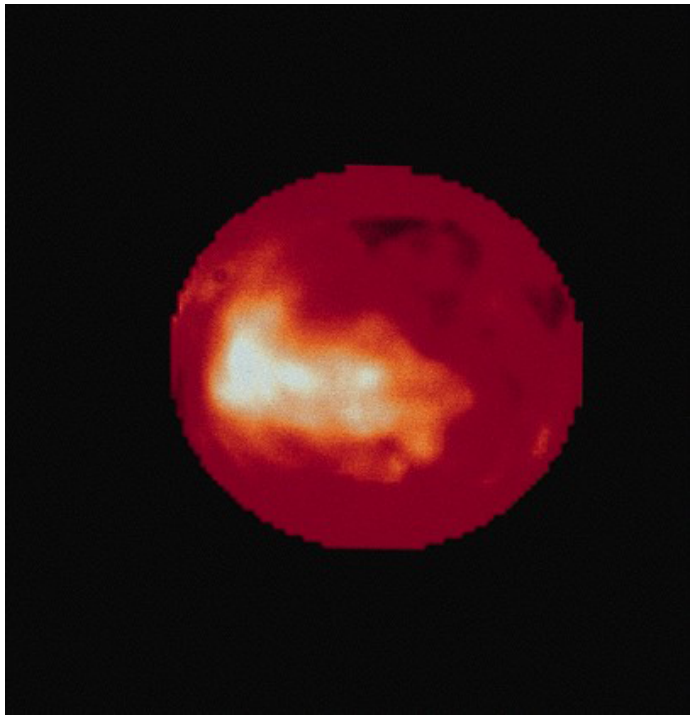
Monde: Europa



Monde: Titan

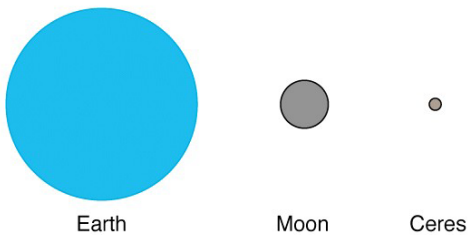


Voyager 2 (aus 4.5×10^6 km Entfernung)



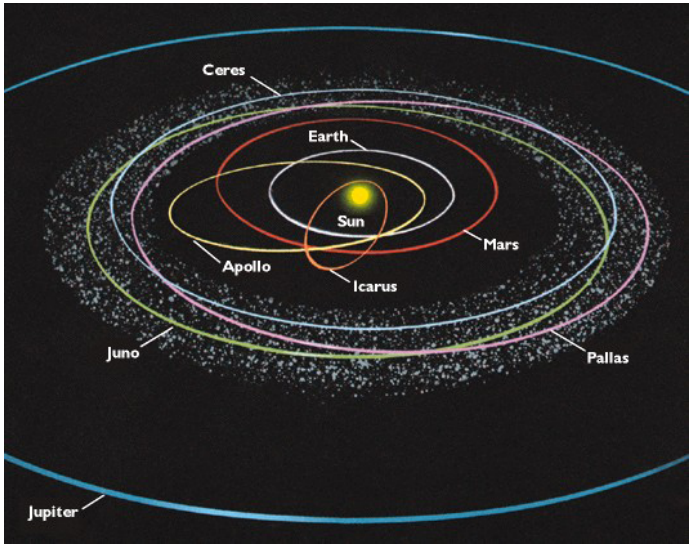
Oberfläche (HST IR)

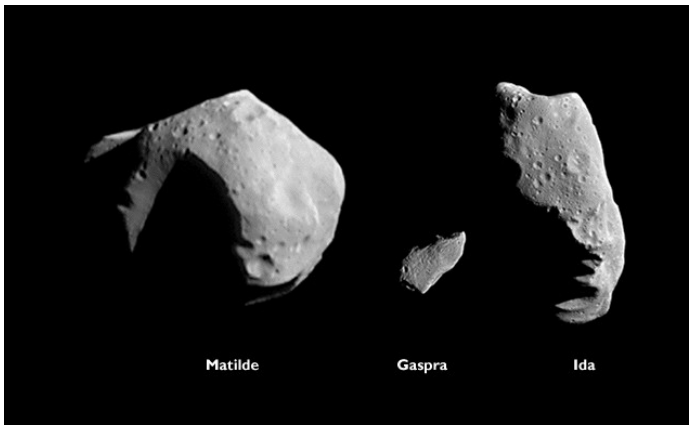
Planetoiden



- gesucht als hypo. Planet (Titius-Bode!)
- gefunden: Ceres (1801)
- zu klein (900 km) für Planeten!
- Pallas (1802)
- Juno (1804)
- Vesta (1807) ...
- Tausende nach Erfindung der Photographie

Planetoiden





- bilden einen Gürtel
- $\Delta a \approx 1.5\,\mathrm{AU}$
- Resonanzen mit Jupiter
- Einige kreuzen Erdbahn ...
- Unregelmäßige Formen
- Doppel-Planetoiden!
- oft reich an Eisen?
- einige aus leichten Elementen

Meteoriten

Barringer Krater (Arizona, 1.2 km d.m., 50kyr)

- tägliche viele Meteore!
- normal: Verglühen in der Atmosphäre
- selten: Erreichen der Erdoberfläche

Meteoriten

- das kann Folgen haben!

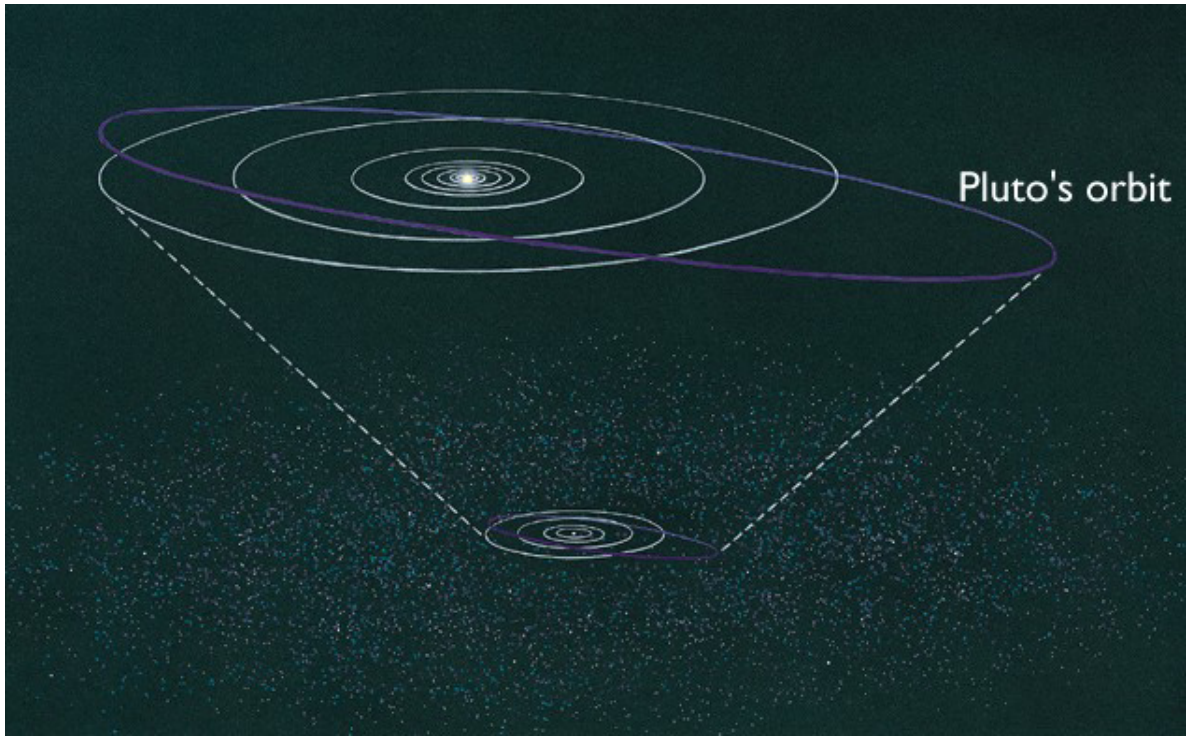
Kometen

Komet Hyakutake (1996)

- $0.1 \leq e \leq 1$
- $2\,\mathrm{AU} \leq a \leq 4 \times 10^4\,\mathrm{AU}$
- $P < 200\,\mathrm{yr}$: *kurzperiodische Kometen*
- $P > 200\,\mathrm{yr}$: *langperiodische Kometen*

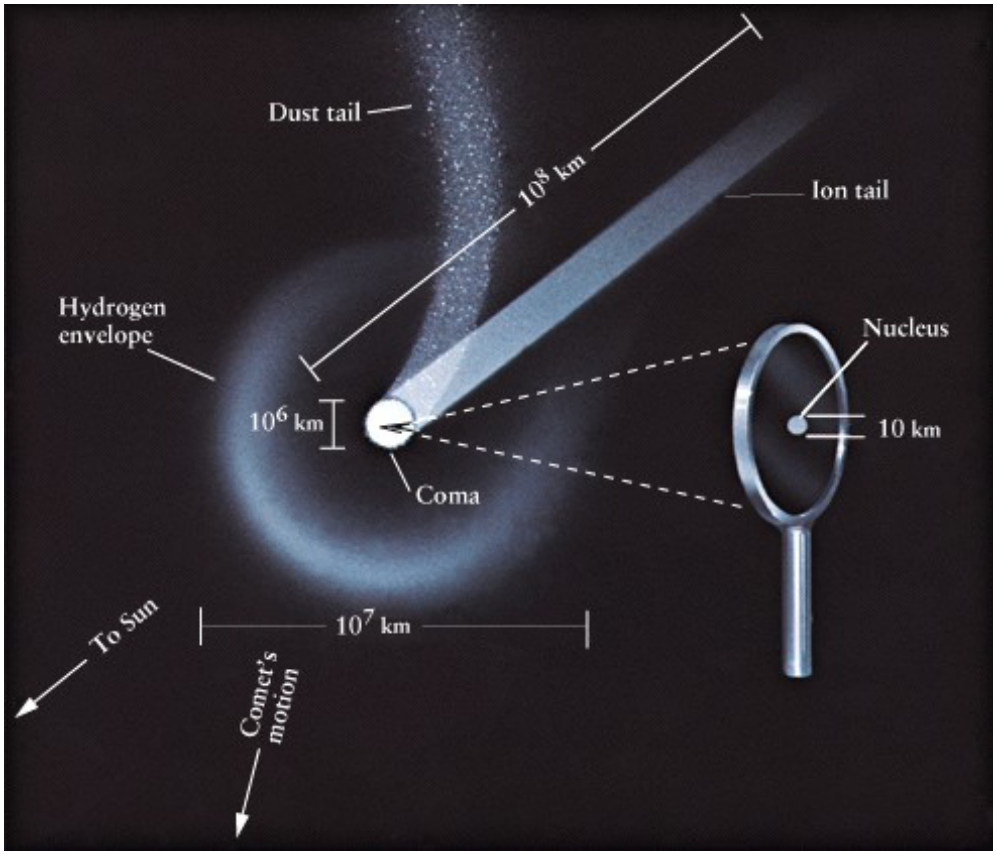
- ca. 10 neuentdeckte Kometen/yr
- ca. 1 großer Komet/10yr

Kometen



- stammen meistens aus dem *Kuiper-Belt*
- Bahnstörung durch Jupiter $\rightarrow$ kurzperiodischer Komet

Kometen

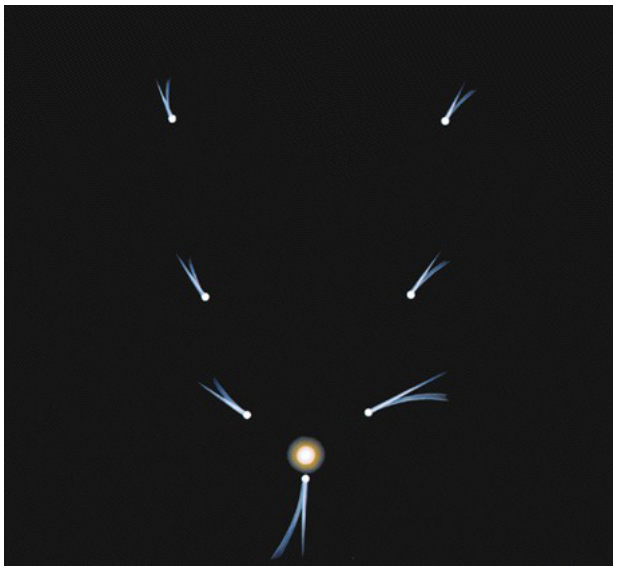


- Aufbau eines Kometen nahe der Sonne
- Kern: H_2O, NH_3, CH_4, CO_2, C_2N_2, Staub

Kometen

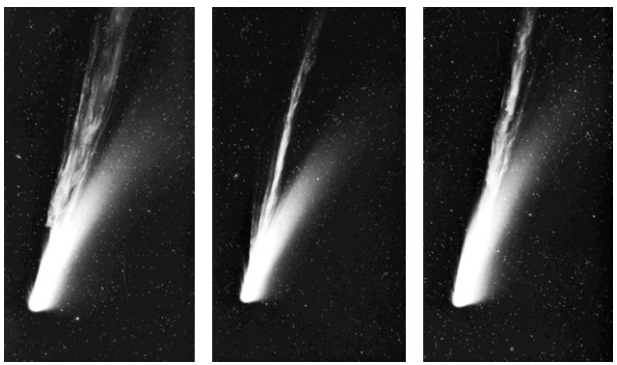
- Nucleus von Komet Halley
- aufgenommen von Giotto 1986
- 15 km $\times$ 8 km

Kometen

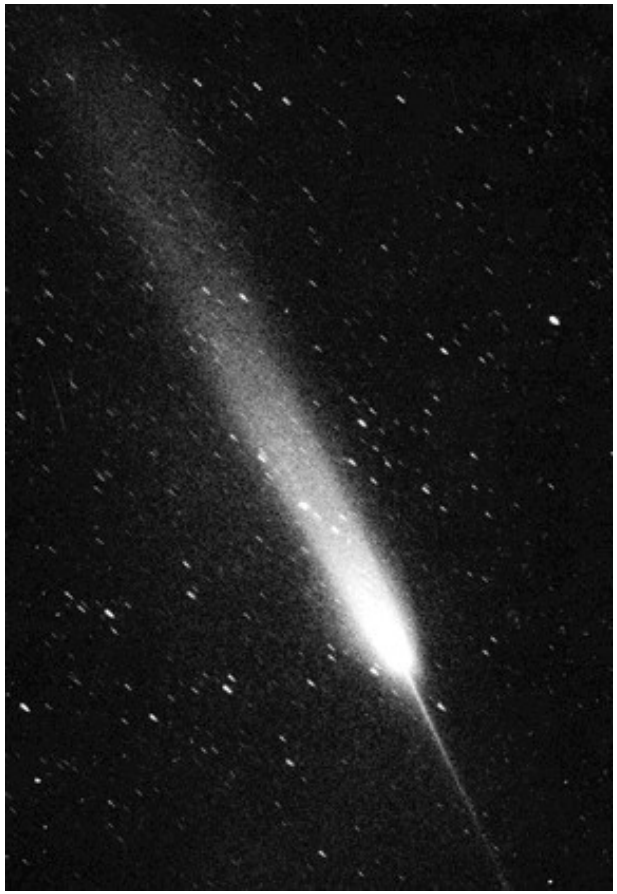


- Schweif zeigt immer weg von der Sonne
- nur für $d < 2\,\mathrm{AU}$
- besteht aus Ausgasungen des Kerns
- Strahlungsdruck der Sonne $\rightarrow$ Schweif
- sehr unterschiedlich von Komet zu Komet!
- Ionen $\rightarrow$ B-Felder $\rightarrow$ höhere Beschl.

Kometen

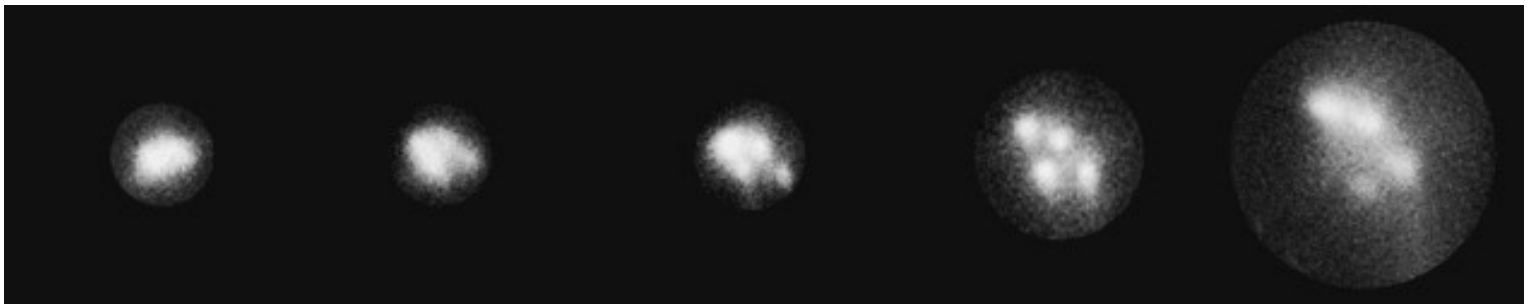


Komet Mrkos 1957



Komet Arend-Roland 1957

Kometen



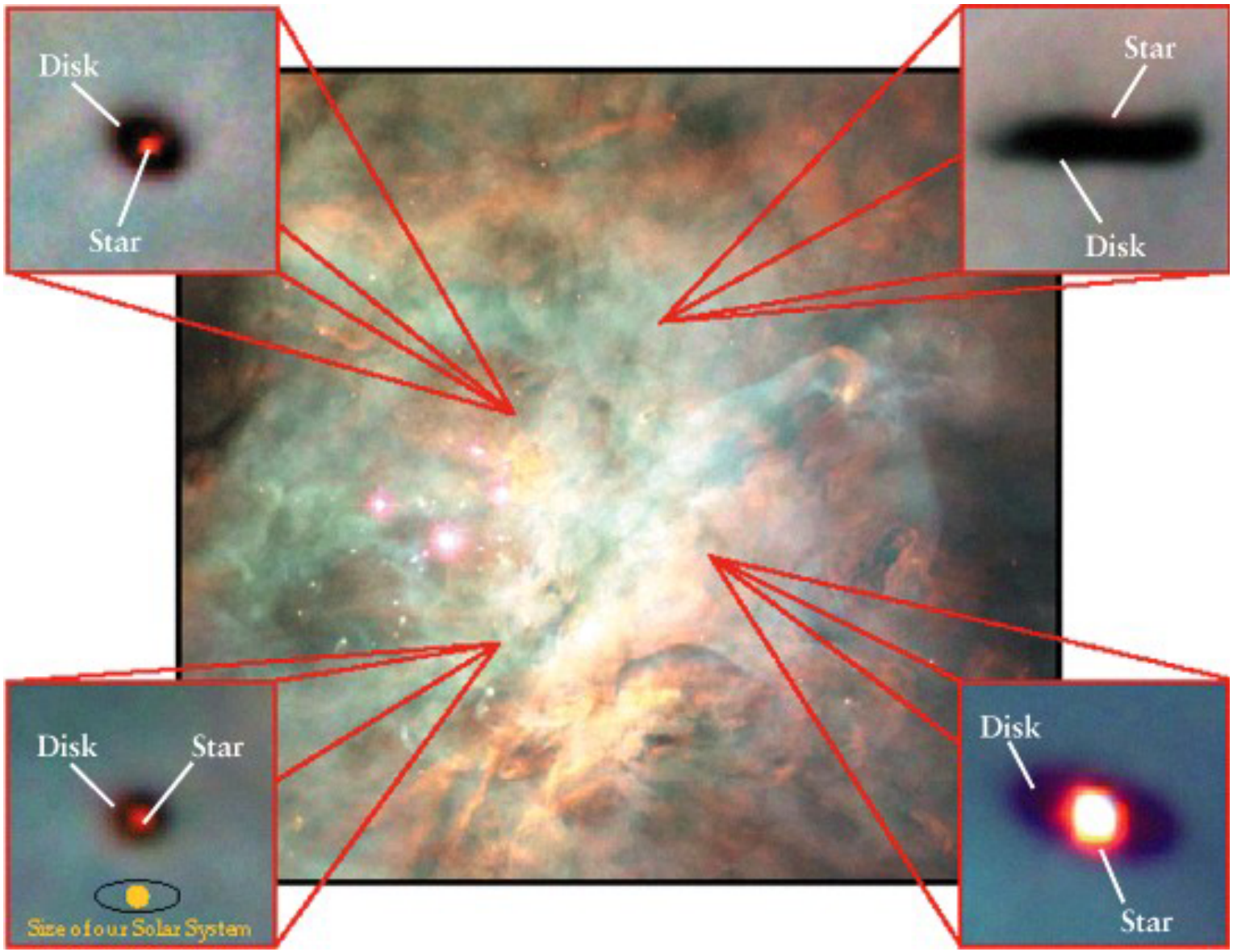
Komet West 1976

- endliche Lebensdauer!
- $0.5 - 1\%$ Verlust pro Orbit
- $\rightarrow$ Komet überlebt ca. 100 Orbits
- produziert Meteoritenschwarm

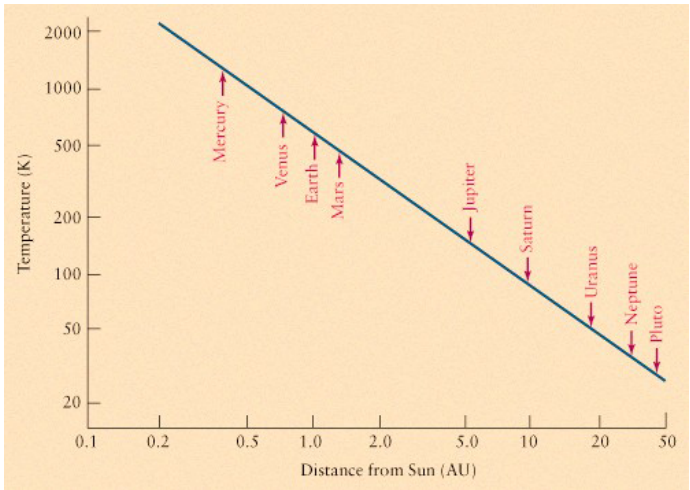
Sonnensystem: Entstehung !!

- Kollaps einer rot. Wolke
- Drehimpulserhaltung $\rightarrow$ Scheibe
- Proto-Sonne durch Kelvin-Helmholtz Kontraktion
- Accretionsscheibe
- Proto-planetare Scheibe

Proplyds im Orion Nebel

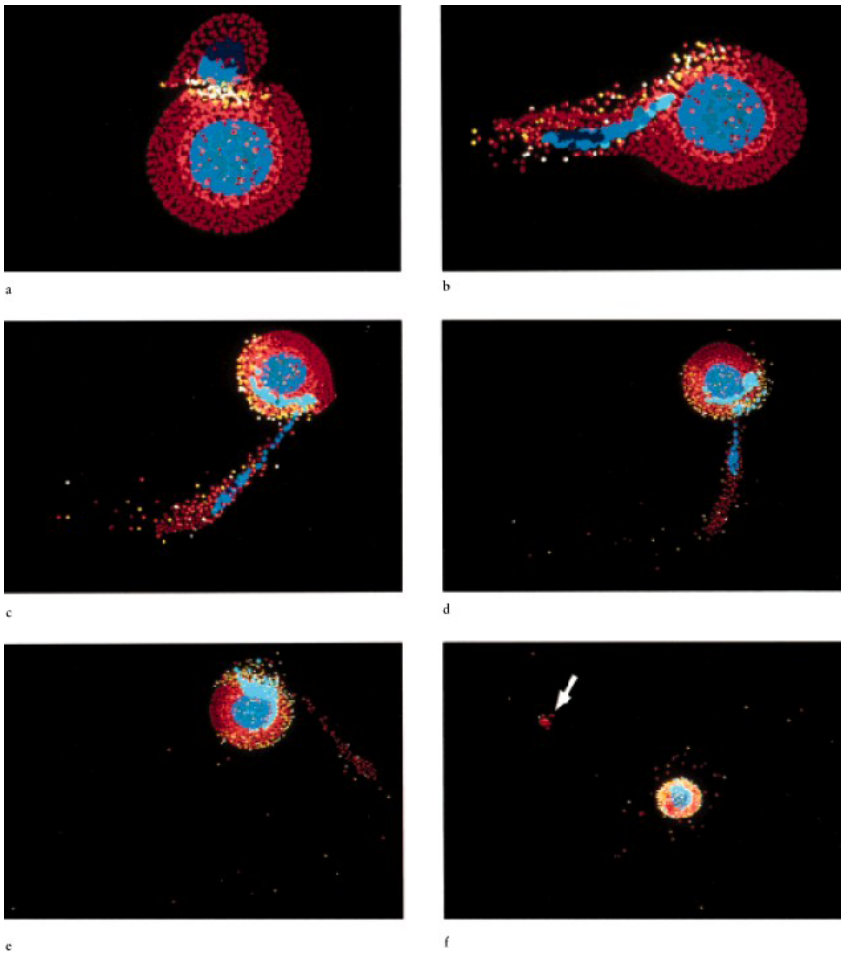


Sonnensystem: Entstehung !!



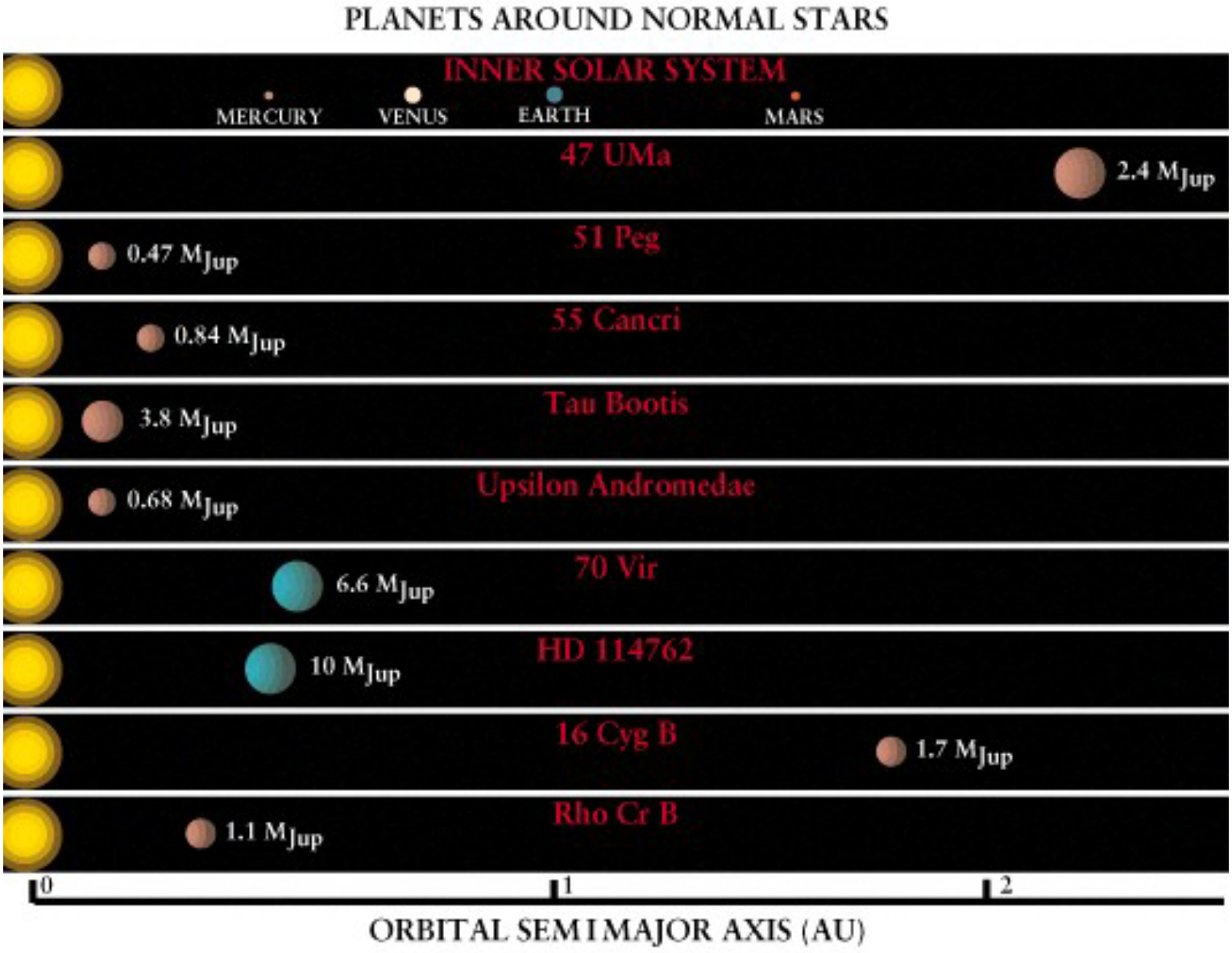
- Temperaturen bestimmen Kondensation
- terrestrische Planeten $\rightarrow$ nahe Proto-Sonne
- Gasriesen $\rightarrow$ äußeres Sonnensystem
- hierarchisches bottom-up Modell?
- Planetesimale $\rightarrow$ Planeten

Sonnensystem: Entstehung



- Kollisionen sehr häufig
- Venus, Uranus: Rotationsachse gekippt
- Erde: Mond!
- starkes Bombardment im frühen Sonnensystem

Sonnensystem: Entstehung

- Gasriesen
  - Kern aus Gestein
  - niedrige $T \rightarrow$
  - akkretiert kaltes H_2, He Gas
  - mehr Masse $\rightarrow$ höhere Gravitation
  - $\rightarrow$ akkretiert mehr Gas ...

Extrasolare Planeten