

6 Kleinkörper

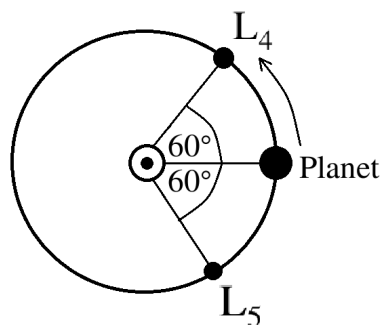
Ein wenig Statistik:

- Abstände: wenige Sonnenradien bis 10^5 AE
- Größen: von $\sim 0,1 \mu\text{m}$ bis $D \approx 2500$ km
- Anzahl: 800 000 derzeit gut bekannt
- Gesamtmasse: $\lesssim 0,1 M_{\oplus}$

6.1 Asteroidengürtel (Hauptgürtel)

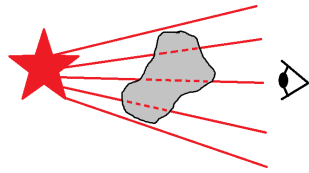
(a) Bahnverteilung

- meiste Asteroiden zwischen 2,1 AE und 3,3 AE
- typische Bahnneigung: $\langle i \rangle \approx 15^\circ$
- typische Exzentrizität: $\langle e \rangle \approx 0,14$
- Bahnresonanzen mit Jupiter verstärken dessen störende Wirkung und führen zu „Kirkwood-Lücken“ (z. B. 4:1, 3:1, 5:2, 7:3, 2:1, ...)
- „Hirayama“-Familien: ähnliche Bahnen + ähnliche (spektrale) Eigenschaften \leadsto gemeinsamer Ursprung als Fragmentwolke
- zwei besondere Populationen:
 - NEO (near earth objects) mit Erdbahnkreuzern: Gesamtzahl ~ 15000 , davon 874 > 1 km ($> 90\%$ bekannt, Stand: 01.2017)
 - Trojaner (in Lagrange-Punkten L_4 und L_5): Jupiter: ~ 5000 , andere Planeten: keine oder wenige



(b) Größenverteilung

- Größenmessung über:
 - direkte Abbildung
 - Photometrie oder Radarquerschnitt
 - Dauer von Sternbedeckungen



- Massenbestimmung über: gravitative Wechselwirkung (nur für einige Dutzend Objekte)
- Gesamtmasse: $5 \cdot 10^{-4} M_{\oplus}$ (davon $\frac{1}{3}$ in Ceres)
- kumulative Größenverteilung:

– Definition:

$$n(> D) \equiv \int_D^{\infty} n(D') dD'$$

– Beispiel Potenzgesetz:

$$n(D) = n_0 \left(\frac{D}{D_0} \right)^{\nu} \propto D^{\nu} \leadsto n(> D) = -\frac{n_0 D_0}{1 + \nu} \left(\frac{D}{D_0} \right)^{1+\nu} \propto D^{1+\nu}$$

– empirisch beobachtet: $N(> D) \propto D^{-2}$, also $\nu = -3$ (für $D \gtrsim 25$ km)

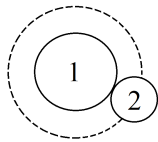
- Verteilung bestimmt durch „Anfangsbedingungen“ (Wachstum) und Kollisionsgleichgewicht (Zerstörung)
- Kollisionsrate je Objekt:

$$R = n_{\text{P(rojektil)}} \sigma v_{\text{rel}}$$

n_{P} ... Volumenanzahldichte der relevanten Stoßpartner

v_{∞} ... Relativgeschwindigkeit (im Unendlichen)

σ ... Wechselwirkungsquerschnitt



$$\leadsto \sigma = \pi \cdot (R_1 + R_2)^2$$

Beispiel Ceres:

$$n_{\text{P}} = \frac{8 \cdot 10^5}{V_{\text{Gürtel}}}$$

$$V_{\text{Gürtel}} = \underbrace{1,2 \text{ au Breite}} \cdot \underbrace{2\pi \cdot 2,5 \text{ au Umfang}} \cdot \underbrace{\frac{15^\circ}{180^\circ} \cdot \pi \cdot 2,5 \text{ au Höhe}}$$

$$v_{\infty} \approx \langle e \rangle v_{\text{Kreisbahn}} \approx 2,5 \text{ km/s}$$

$$\sigma \approx 7 \cdot 10^5 \text{ km}^2 \quad (\text{dominiert von Ceres', da größtes Objekt})$$

$$\leadsto R = 10^{-6} \text{ Jahr}^{-1} \quad (\text{also 1 Kollision in 1 Mio. Jahren})$$

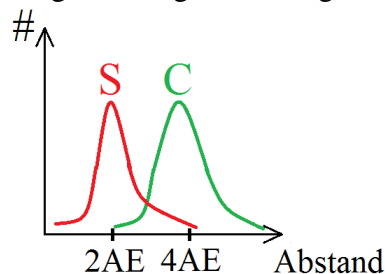
- $\gtrsim 10\%$ aller Asteroiden sind binär (bekannt aus Abbildungen und aus Zahl doppelter Einschlagskrater)

(c) Zusammensetzung und Struktur

- typische Gestalt:
 - Kugel für große (da hydrostat. Gleichgewicht),
 - „Knochen“ für kleine \rightarrow zusammengesetzt aus mindestens zwei Bestandteilen
- mittlere Dichten ($1\text{--}3 \text{ g cm}^{-3}$) geringer sind als bei vergleichbaren Meteoriten \leadsto teils nennenswerte Porosität

→ die meisten Asteroiden sind eher lose Schutthaufen (engl. „rubble pile“)

- 3 spektrale Hauptklassen:
 - C: * kohlige Oberfläche (Silikate mit Kohlenstoffbeimischung)
 - * Albedo $\approx 5\%$; dunkelgrau
 - * 75 % aller Hauptgürtelasteroiden
 - * eher im äußeren Bereich des Hauptgürtels
 - S: * „steinig“ (Silikate ohne nennenswert Kohlenstoff)
 - * Albedo 15% – 25%; rötlich, da stärkere Absorption bei $\lambda \lesssim 0,7 \mu\text{m}$
 - * $\sim 20\%$ aller
 - * eher im inneren Bereich des Hauptgürtels
 - M: * „metallisch“ (kaum Silikate)
 - * Albedo 10–20 %; leicht rötlich
 - * eventuell hoher Fe-Ni-Gehalt \leadsto Kernfragmente differenzierter Mutterkörper?
- daneben weitere Besonderheiten und Mischungen
- Diversität durch unterschiedliche Anfangsbedingungen sowie folgende Differenzierung und Fragmentierung der Mutterkörper



- Ursache: Kohlenstoffverbindungen (hauptsächlich CO) leichter flüchtig, daher in Sonnennähe weniger häufig
- auf Oberfläche liegt Regolith (wie auf dem Mond): dünne Schicht (mit grobem Material) auf kleinen, dickere Schicht (mit feinerem Material) auf großen Asteroiden

6.2 Entferntere Objekte

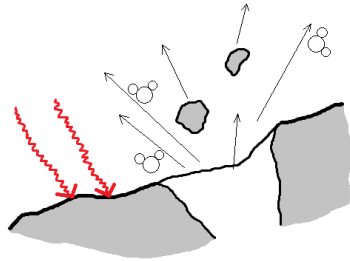
- je weiter entfernt, desto kühler und langlebiger \leadsto mehr flüchtiges Material, ursprünglicher

(a) Kometen

- ca. 1 pro entdeckt (i. d. R. kleine Kometen sehr nah an der Sonne, hauptsächlich „Sungrazers“)
 - Reservoir: $\sim 10^{12}$ Kometen mit $D \gtrsim 1 \text{ km}$ (z. B. aus: 200 Kometen/Jahr für 5 Mrd. Jahre)
- Oort'sche Wolke mit $R \sim 10^5 \text{ AE} \leadsto 10^{-3} \text{ Kometen/AE}^3$
- oft unterteilt in kurzperiodische (Umlaufzeit $P < 200$ Jahre, d. h. große Halbachse $a \lesssim 34 \text{ AE}$) und langperiodische ($P > 200$ Jahre)
 - gemessene Bahnexzentrizitäten: bis 1,06 für Objekte solaren Ursprungs (die aber gerade von einem Planeten herausgeworfen wurden), bzw. $\gg 1$ für das einzige bisher (Ende 2017) bekannte interstellare Objekt
 - Inklinationen: 0–90° (für 30–90° gleichverteilt)

- Materialverlust:

- Gas (überwiegend OH [aus H₂O] und CO) sublimiert durch Erwärmung
- kann unter Umständen Staub mitführen

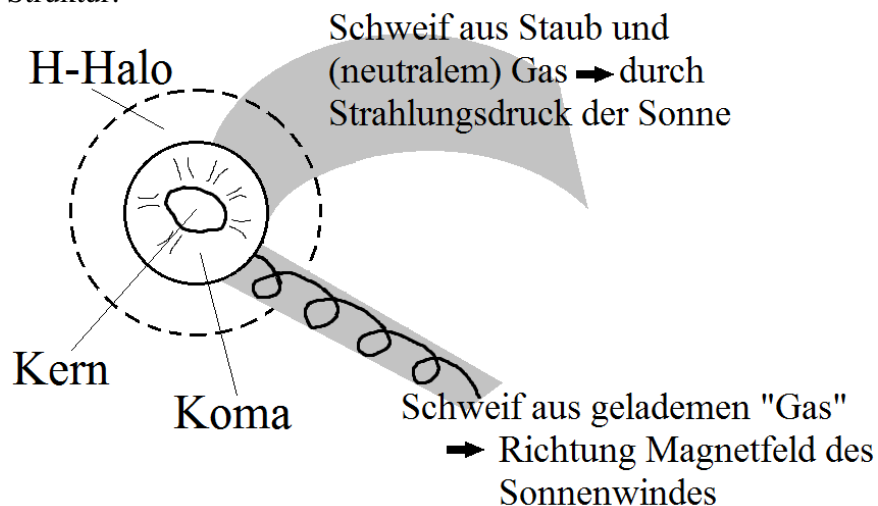


- Effizienz abhängig von: Temperatur (Ort), Dicke der nicht-flüchtigen Schicht, Wärmeleitfähigkeit
- junge Kometen bereits weiter draußen aktiv, dafür weniger abrupt
- Gasproduktionsrate empirisch:

$$Q \propto \begin{cases} r_{\odot}^{-2} & \text{für größere Abstände} \\ r_{\odot}^{-4 \dots -5} & \text{für } r \lesssim 1,5 \text{ AE} \end{cases}$$

$$Q_{\text{H}_2\text{O}} \approx 1,2 \cdot 10^{18} \text{ Moleküle/s} \cdot \pi \cdot \left(\frac{R \text{ [km]}}{r_{\odot} \text{ [AE]}} \right)^2$$

- Struktur:



- Kern: 1–50 km
- Koma: 10⁴–10⁵ km
- Halo: bis zu 10⁶–10⁷ km
- Schweif: bis mehrere AE

- Zusammensetzung:

- mehr C-H-O-N-basierte Substanzen, d. h. mehr flüchtige Elemente als bei Asteroiden
- Deuterium/H-Verhältnis größer als bei Sonne, Gasriesen und Erde → aus etwas anderer Materialquelle bzw. Mischung entstanden

(b) Transneptunische Objekte

- erste Entdeckungen: Pluto (1930) dann 1992QB1 (1992)
- wichtige Populationen:
 - „Cubewanos“: klassischer Kuipergürtel bei 40–48 AE, benannt nach 1992QB1, unterteilt in
 - „kalt“: Bahninklinationen $i < 12^\circ$, überwiegend rötliche Oberflächen
 - „heiß“: $i > 12^\circ$, farblich durchmischt (d. h. rote und graue Objekte)
 - Resonante Objekte: solche in äußerer Bahnresonanz mit Neptun, mit generell relativ hoher Inklination
 - „Plutinos“: wie Pluto in 3:2-Resonanz (bei etwa 40 AE)
 - „Twotinos“: in 2:1-Resonanz (bei etwa 48 AE)
- Zusammensetzung: kometenähnlich