

# Einführung in die Astronomie und Astrophysik, Teil I

## Kapitel 1

# Ein astronomischer Blick um uns herum: Eine Erkundungstour durch das Universum

Teil I, 18.10.2012

Cornelis Dullemond  
Ralf Klessen

# Die Erde

# Die Erde



Aufnahme von der  
Apollo 17 Mission  
auf dem Weg zum Mond  
7. Dezember 1972

# Die Erde: einige Fakten

- Masse =  $5.97 \times 10^{27}$  gram
- Radius = 6371 km (am Äquator: 6378 km)
- Durchschnittliche Dichte =  $5.5 \text{ g/cm}^3$
- Grosser Eisen-Nickel-Kern
- Abstand zum Sonnenzentrum =  $1.50 \times 10^{13}$  cm
  - Dies definiert die Längeneinheit „Astronomische Einheit“ (AE), auf Englisch „Astronomical Unit“ (AU):  
 $1 \text{ AU} = 1.49598 \times 10^{13} \text{ cm}$
- Alter =  $\sim 4.5 \times 10^9$  Jahr
- Orbitale Eigenschaften:
  - Exzentrizität:  $e = 0.017$  (d.h. fast, aber nicht ganz Kreisbahn)
  - Inklination:  $i = 1.6^\circ$  (im Bezug auf ganzes Sonnensystem)

# Die Erde: Innerer Aufbau

Kontinentalplatten (~100 km dick)  
Materialdichte =  $\sim 2.7 \text{ g/cm}^3$ . Treibt  
also auf dem Mantel.

Ozeanischen Erdkruste  
(~ 5 bis 8 km dick)  
Materialdichte =  
 $\sim 2.9 \text{ g/cm}^3$ .

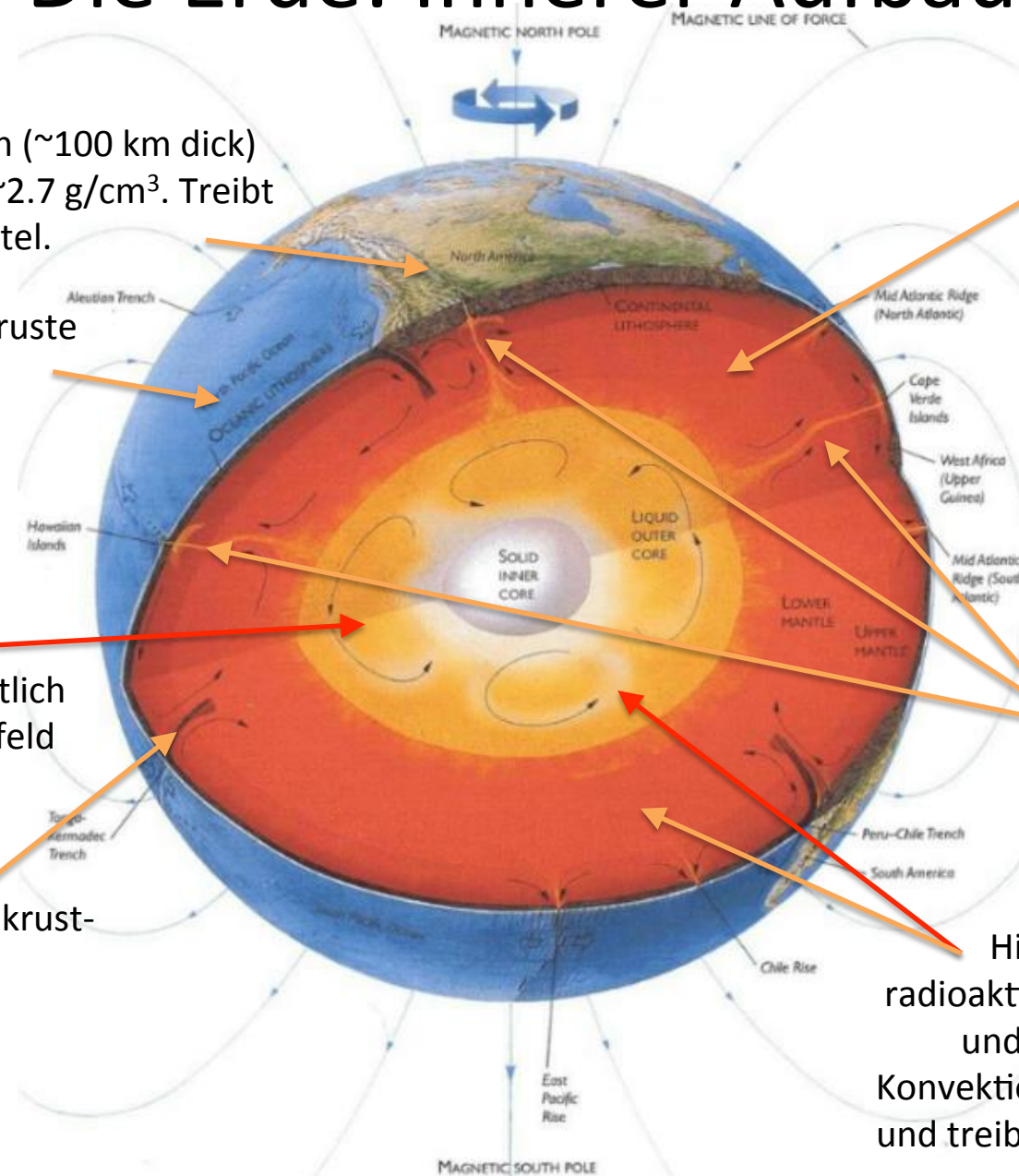
Flüssiger Teil  
des Eisen-Nickel-  
Kerns ist verantwortlich  
für das Erd-Magnetfeld

Subduktion von Erdkrust-  
Material. Meistens  
Ozeanboden.

Mantel = Gestein  
(nicht Magma!),  
aber verhält sich  
als extrem viskose  
Flüssigkeit, wie  
z.B. ein Gletscher.  
Materialdichte =  
 $\sim 3.0 \text{ g/cm}^3$ .

Hotspots, wo heißes  
Mantelmaterial nach  
oben konvektiert,  
dekomprimiert  
und dadurch flüssig  
wird (= Magma)

Hitze produziert durch  
radioaktiven Zerfall von Uran  
und Thorium wird durch  
Konvektion hochtransportiert  
und treibt Plattentektonik an.





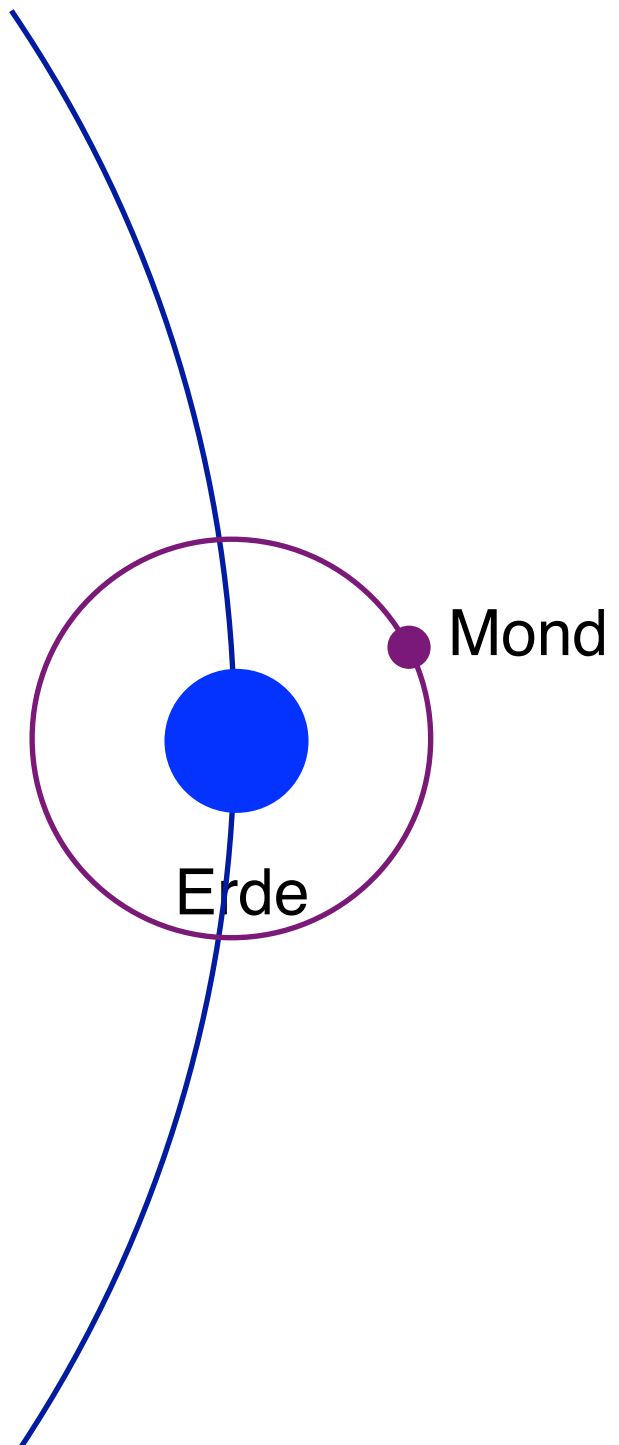
# Der Mond



Credit: David Kleinert

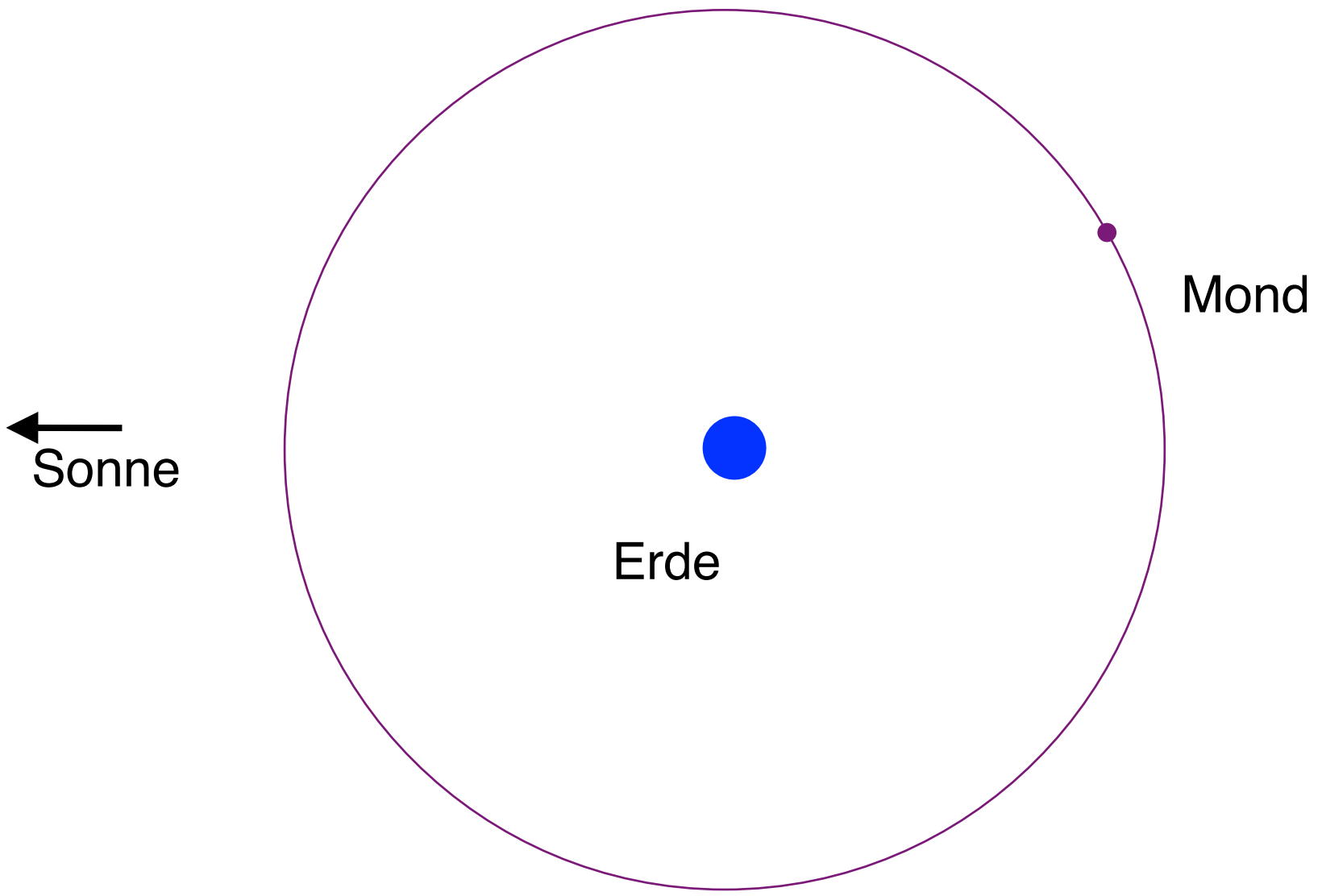


Sonne



Erde

Mond





# Der Mond: Einige Fakten

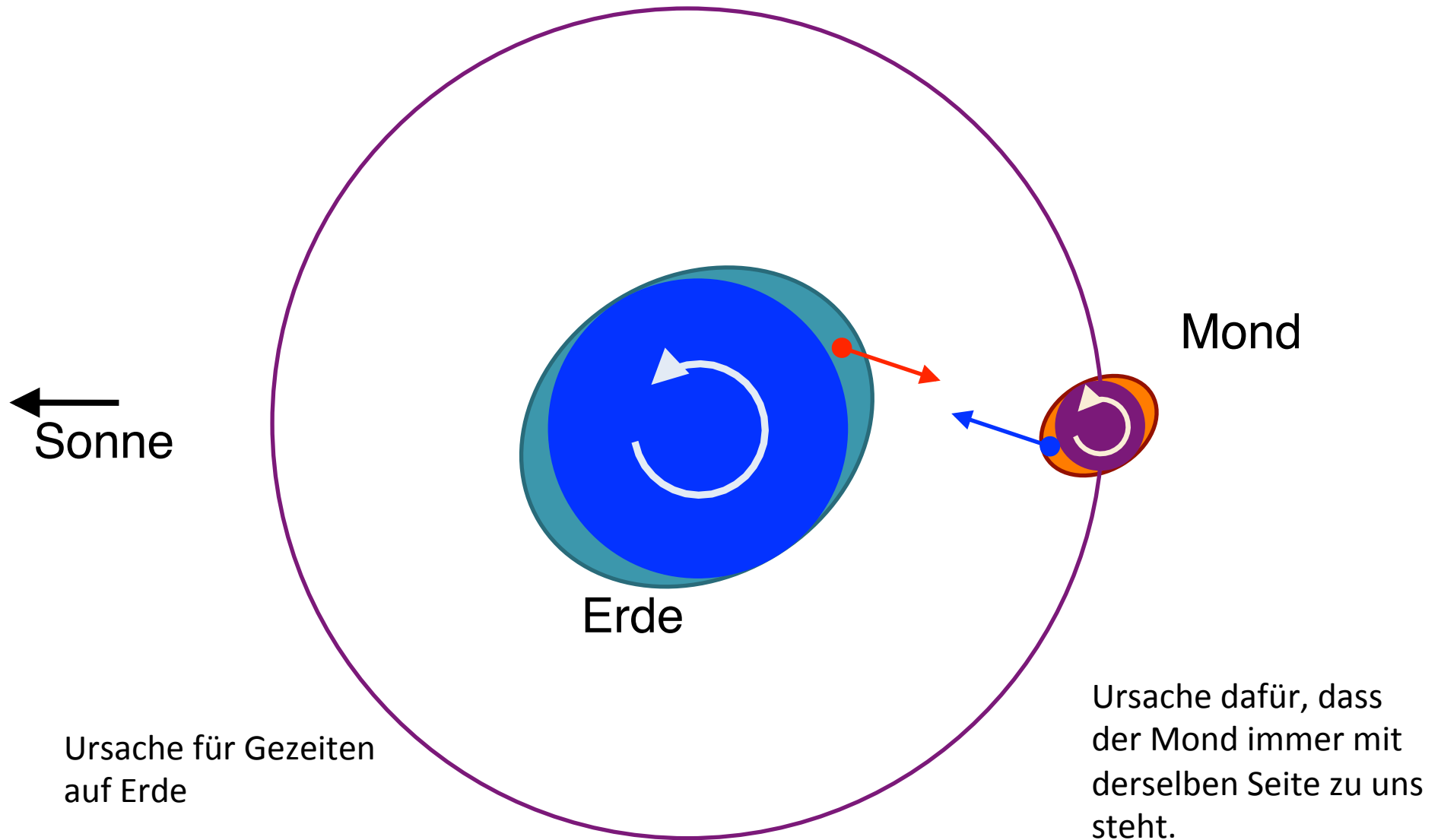
- Masse =  $7,35 \times 10^{25}$  gram =  $0,012 M_{\text{Erde}}$
- Radius = 1738 km =  $0,273 R_{\text{Erde}}$
- Durchschnittliche Dichte =  $3.3 \text{ g/cm}^3$
- Abstand zum Erde-Mond-Zentrum =  $\sim 3,8 \times 10^{10} \text{ cm} = 0.0026 \text{ AU}$
- Alternative Namen: Luna (Latein), Selene (Griechisch)
- Orbitale Eigenschaften:
  - Exzentrizität:  $e = 0.055$

# Erde + Mond fotografiert in 2008 von "Deep Impact" Raumsonde aus 50 million km Entfernung

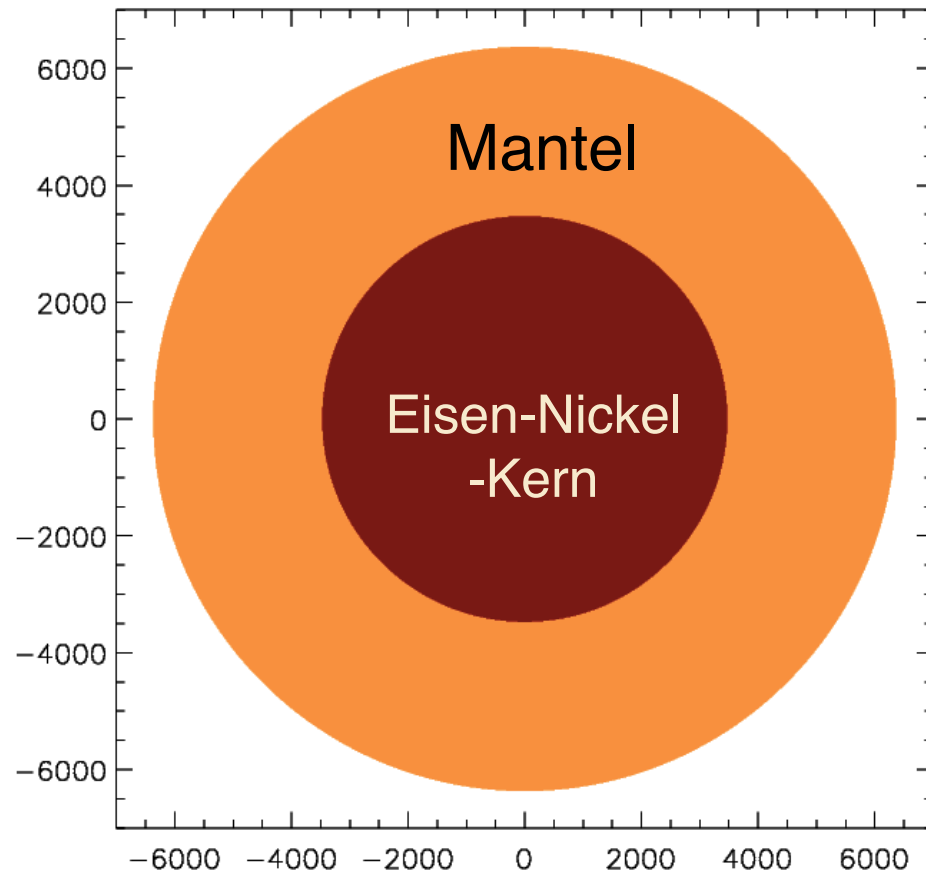


Mond ist also ziemlich dunkelbraun/grau  
Der weiße Mond ist also optische Täuschung

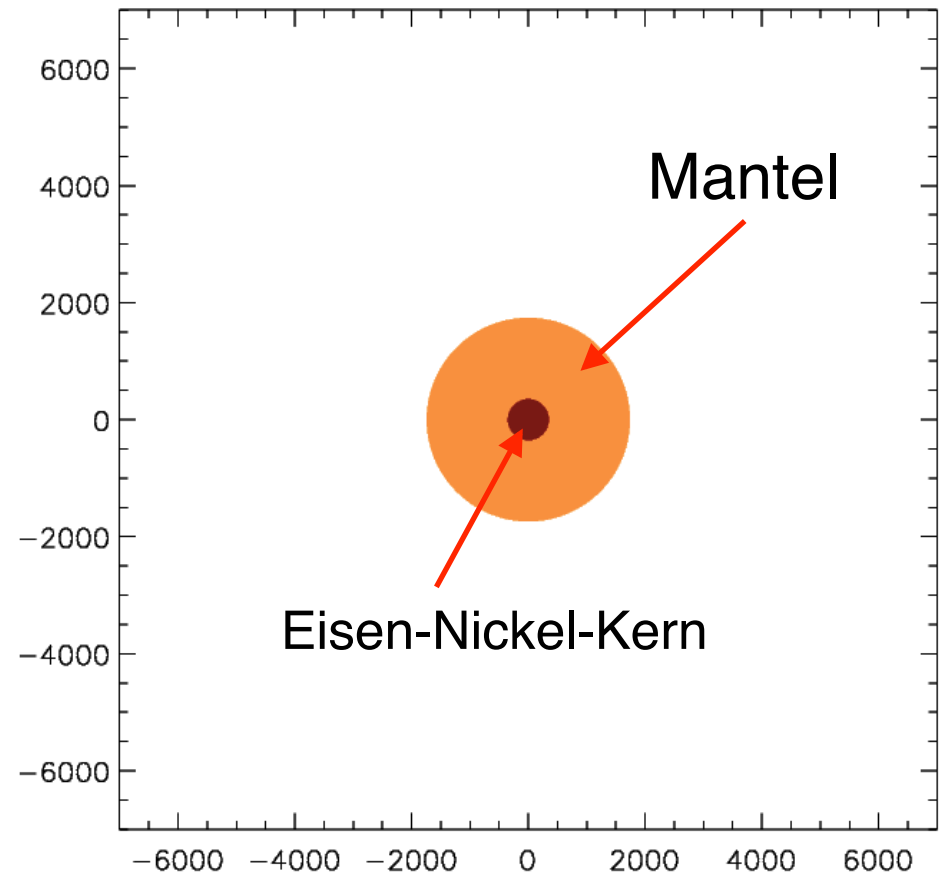
# Gezeiten-Drehmoment



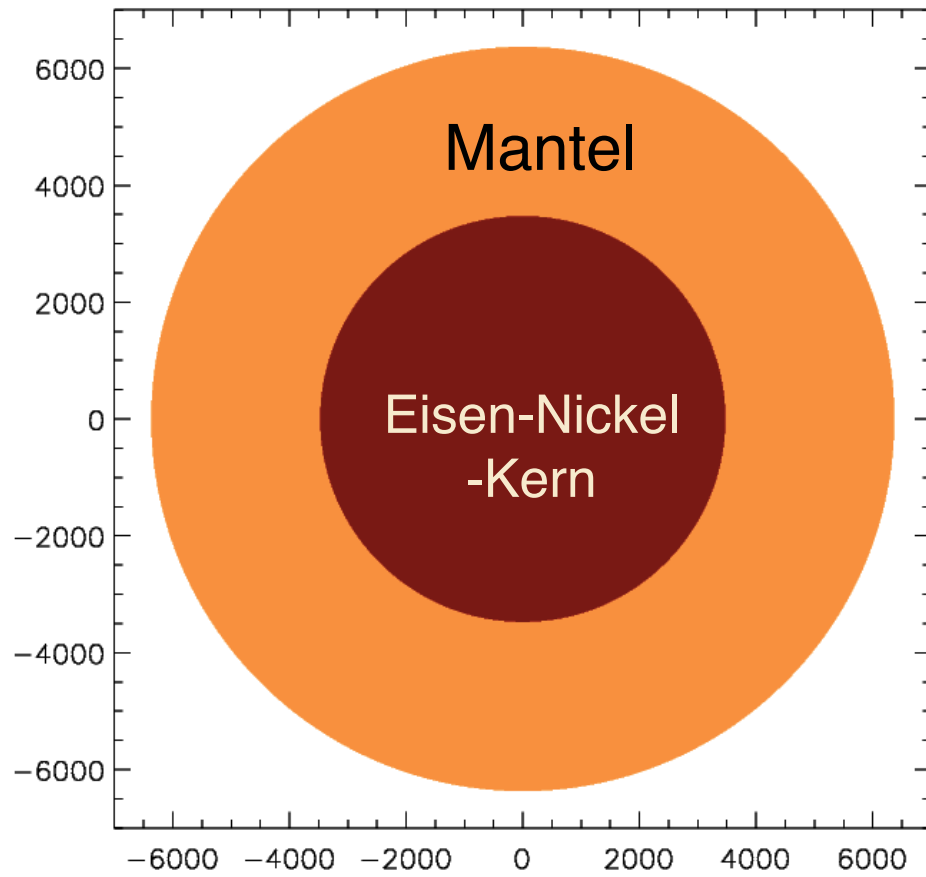
# Erde



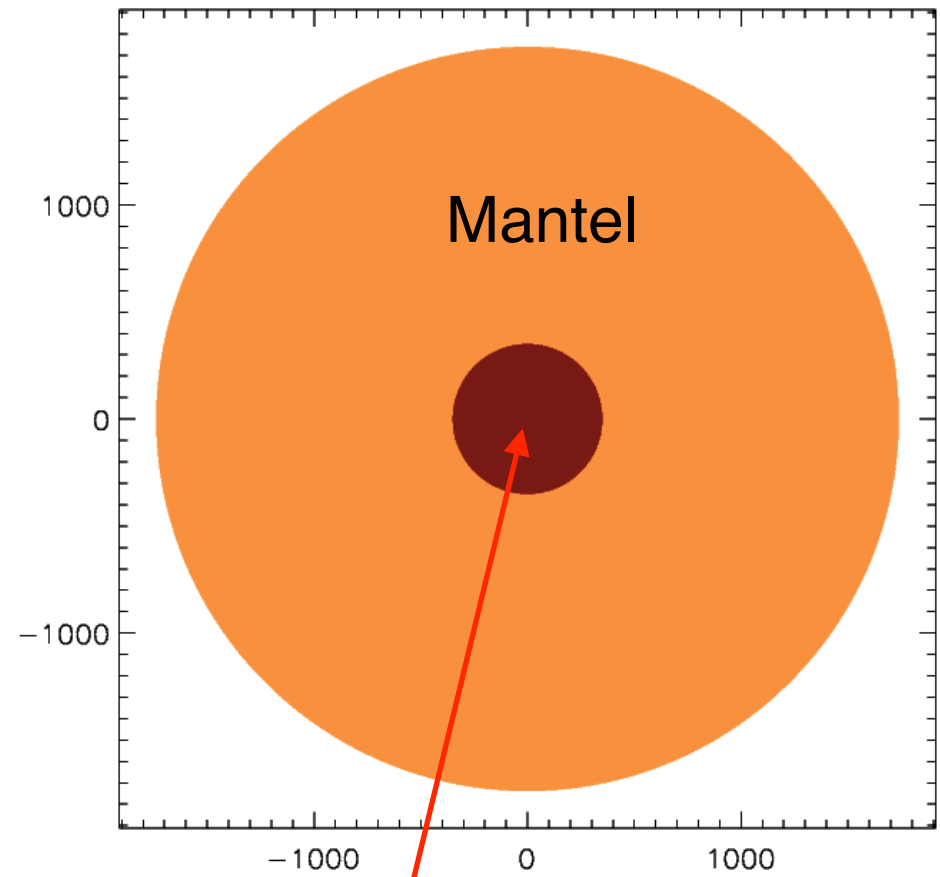
# Mond



# Erde



# Mond (Zoom-in)



# Eisen-Nickel-Kern

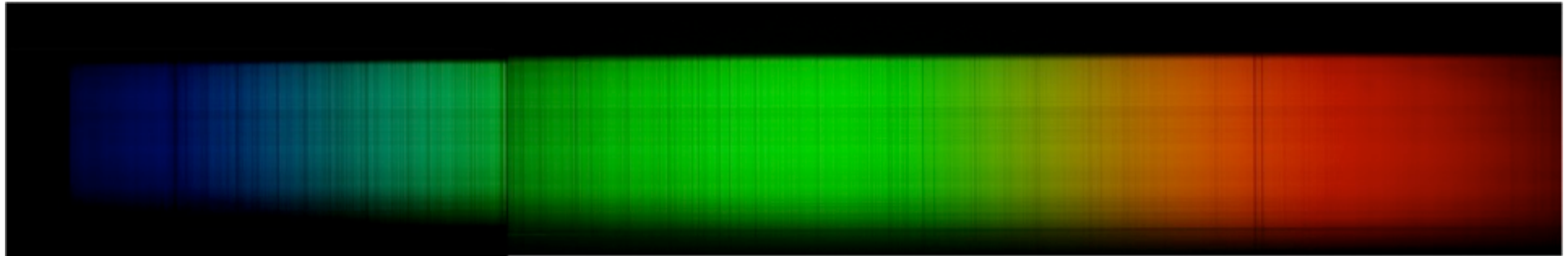
Die Sonne

# Einige Fakten

- Masse =  $1,989 \times 10^{33}$  gram =  $3,33 \times 10^5 M_{\text{Erde}}$
- Radius =  $6,96 \times 10^5$  km =  $109 R_{\text{Erde}}$
- Durchschnittliche Dichte =  $1.4 \text{ g/cm}^3$
- Temperatur
- Alternative Namen: Helios (Griechisch)



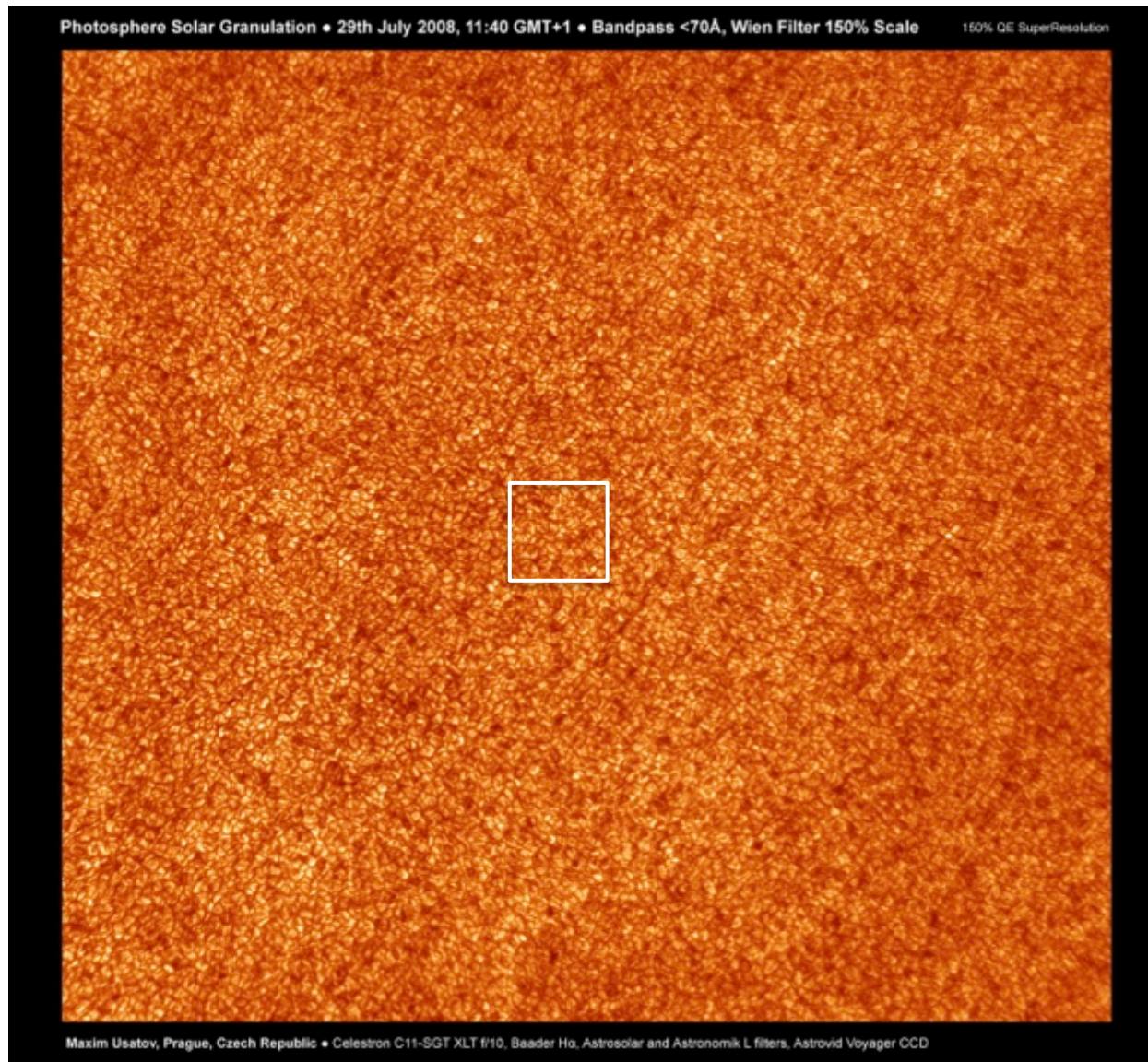
# Spektrum der Sonne: Absorptionslinien



## *Wissenswertes:*

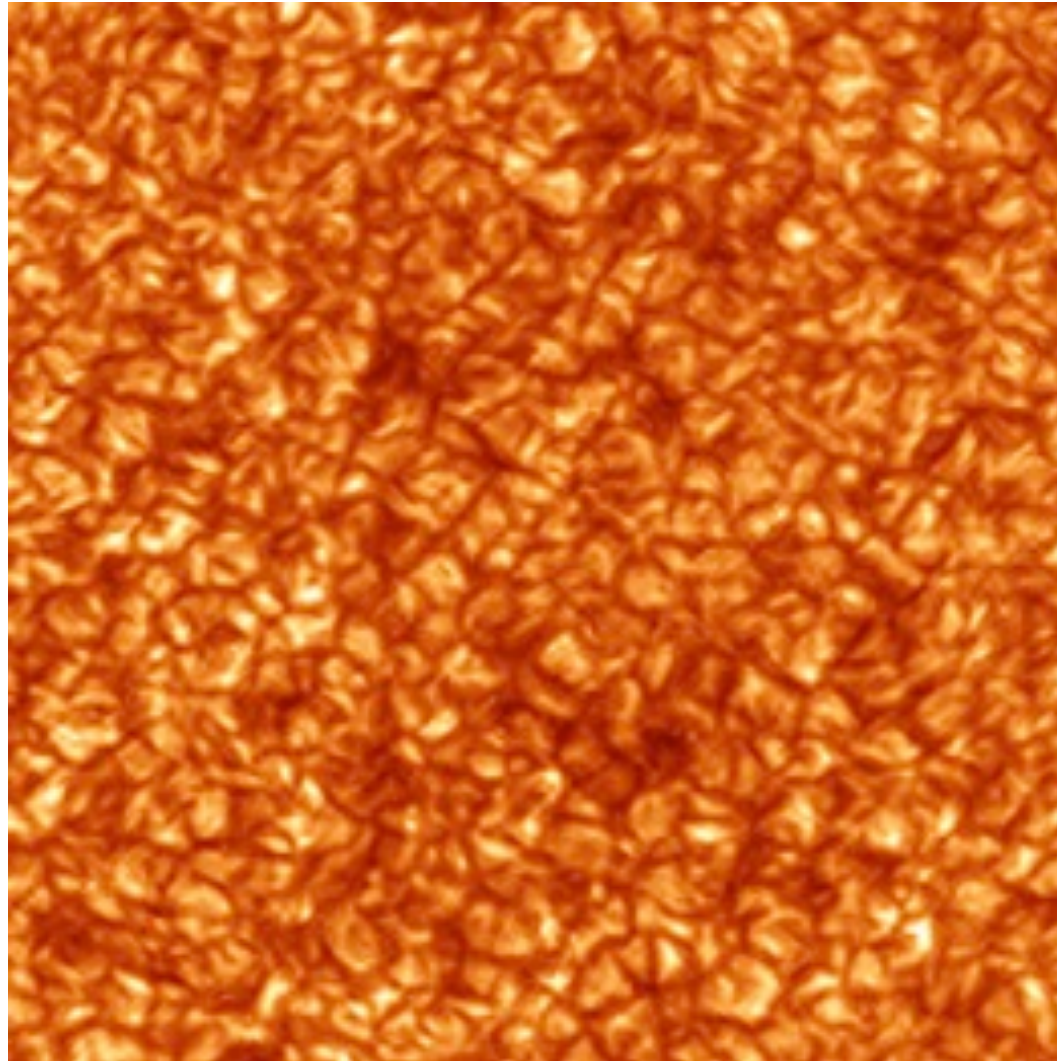
**Kirchhoff & Bunsen** haben als Erste herausgefunden, dass die Absorptionslinien (sogenannte Fraunhofer Linien) mit den chemischen Elementen identifizierbar sind. Damit konnten sie die Zusammensetzung des Gases der Sonne herausfinden. Diese Entdeckung war die Geburt von der astronomischen Spektroskopie. Kirchhoff & Bunsen waren zwei Physiker an der Universität von Heidelberg. In der Heidelberger Hauptstrasse, gegenüber von dem Gebäude der Fakultät für Psychologie ist das Gebäude von dem aus sie die Beobachtungen der Sonne durchgeführt haben. Ein Plakat erinnert daran.

# Sonnen-Oberfläche: Granulen



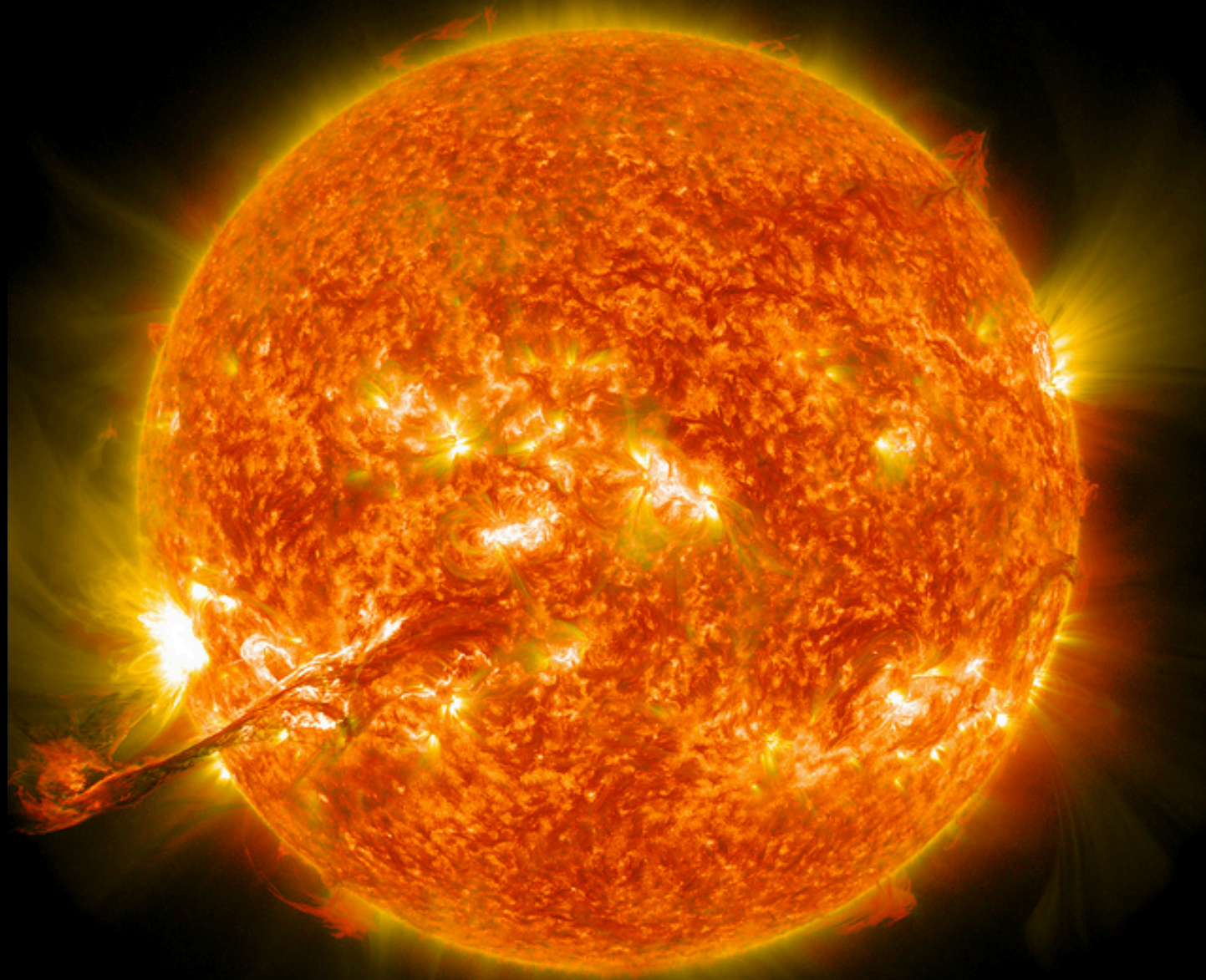
Credit: Maxim Usatov, Prague, Quelle: <http://www.bcsatellite.net/bao/>

# Sonnen-Oberfläche: Granulen



Credit: Maxim Usatov, Prague, Quelle: <http://www.bcsatellite.net/bao/>

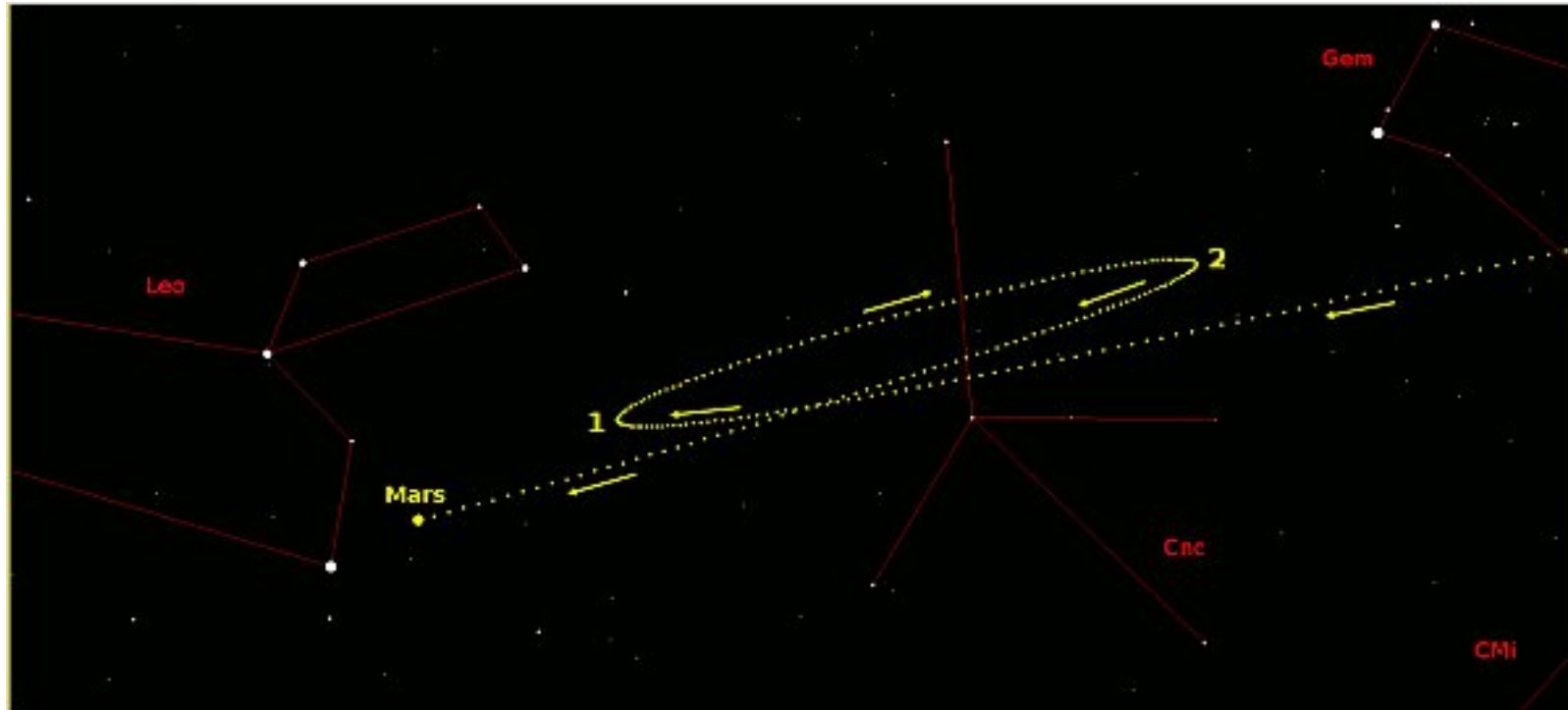




Credit: NASA's GSFC, SDO AIA Team

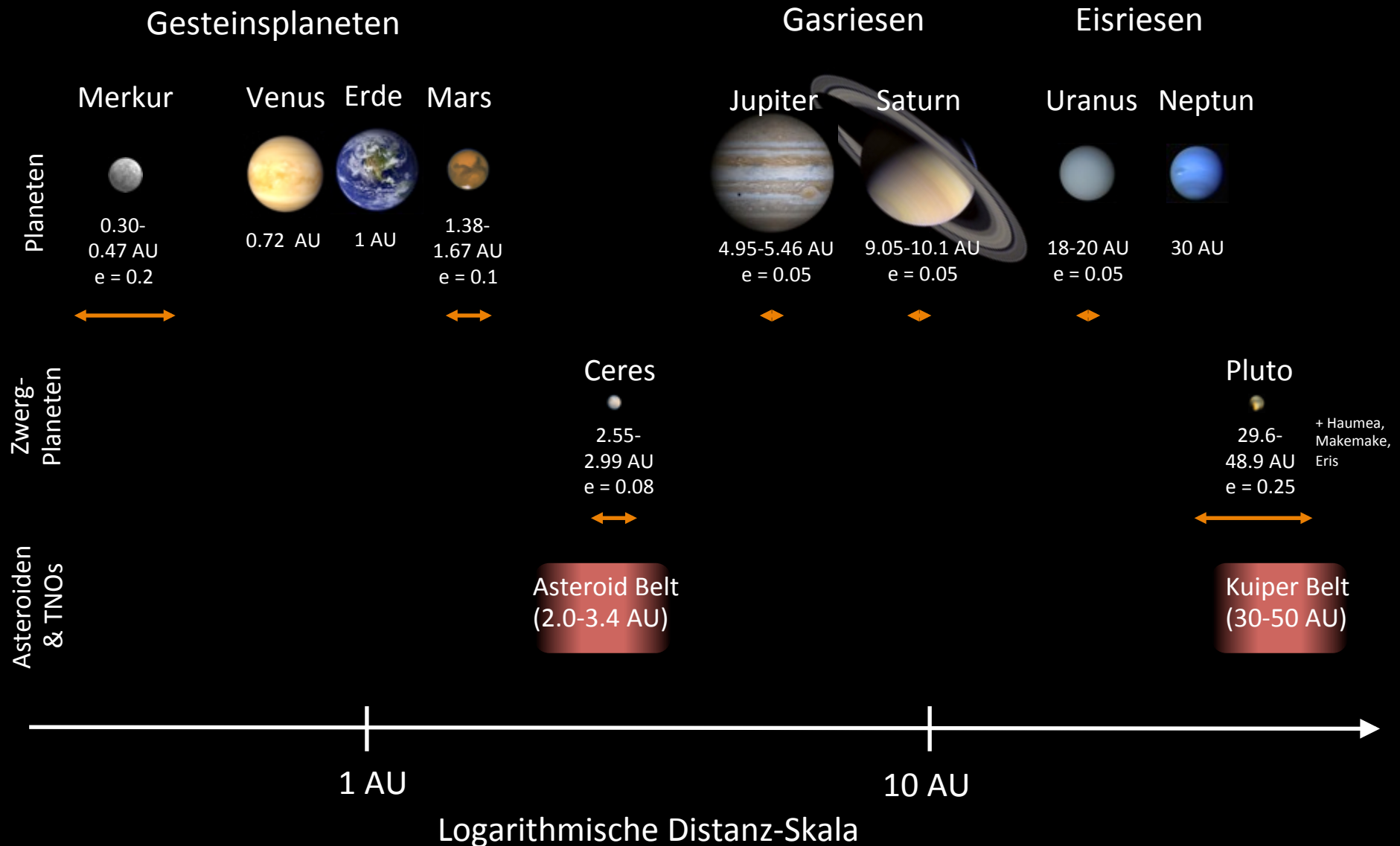
# Das Sonnensystem

# Planeten – „Wanderer“



- Schleifenbewegung durch Relativbewegung Planet (hier: Mars) und Erde.
- Sichtbar als Schleife (nicht nur hin-und-her-Bewegung) wegen unterschiedlichen Umlaufbahn-Inklination.
- Aus dieser Bewegung hat Johannes Kepler die Keplersche Gesetze hergeleitet

# Objekte des Sonnensystems





# Kepler Umlaufbahn, Exzentrizität

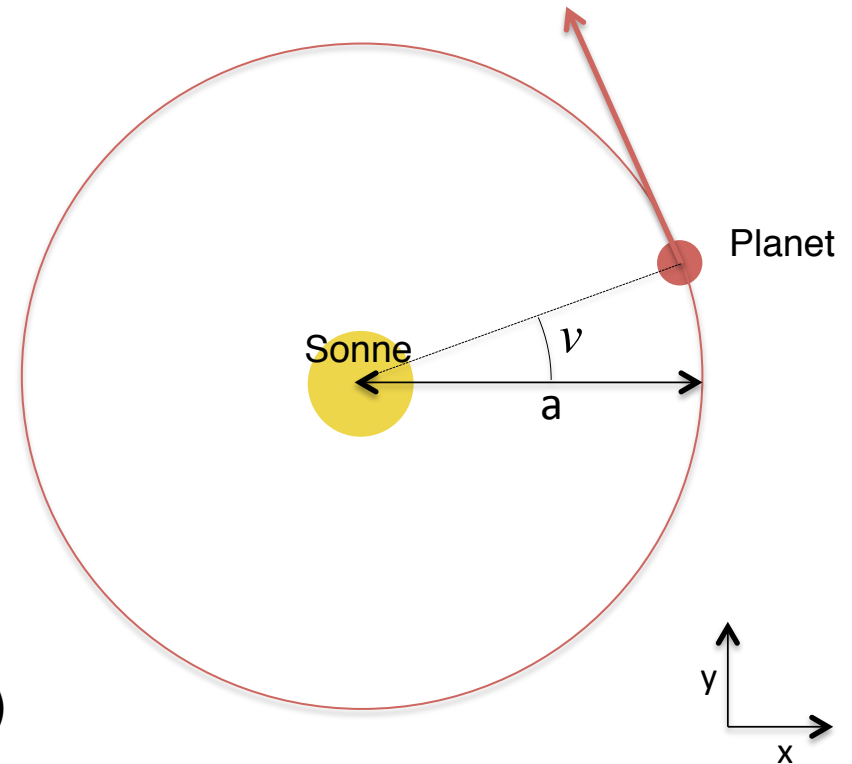
Kreisbahn ( $M_{\text{planet}} \ll M_*$ ):

$$\Omega_K = \sqrt{\frac{GM_*}{a^3}} \quad (\text{Kepler Winkelfrequenz})$$

$$t_{\text{orbit}} = \frac{2\pi}{\Omega_K}$$

$$u_K = \Omega_K a = \sqrt{\frac{GM_*}{a}} \quad (\text{Kepler Geschwindigkeit})$$

$$v(t) = \Omega_K t \quad (\text{„True anomaly“})$$



$$x(v) = a \cos(v)$$

$$y(v) = a \sin(v)$$

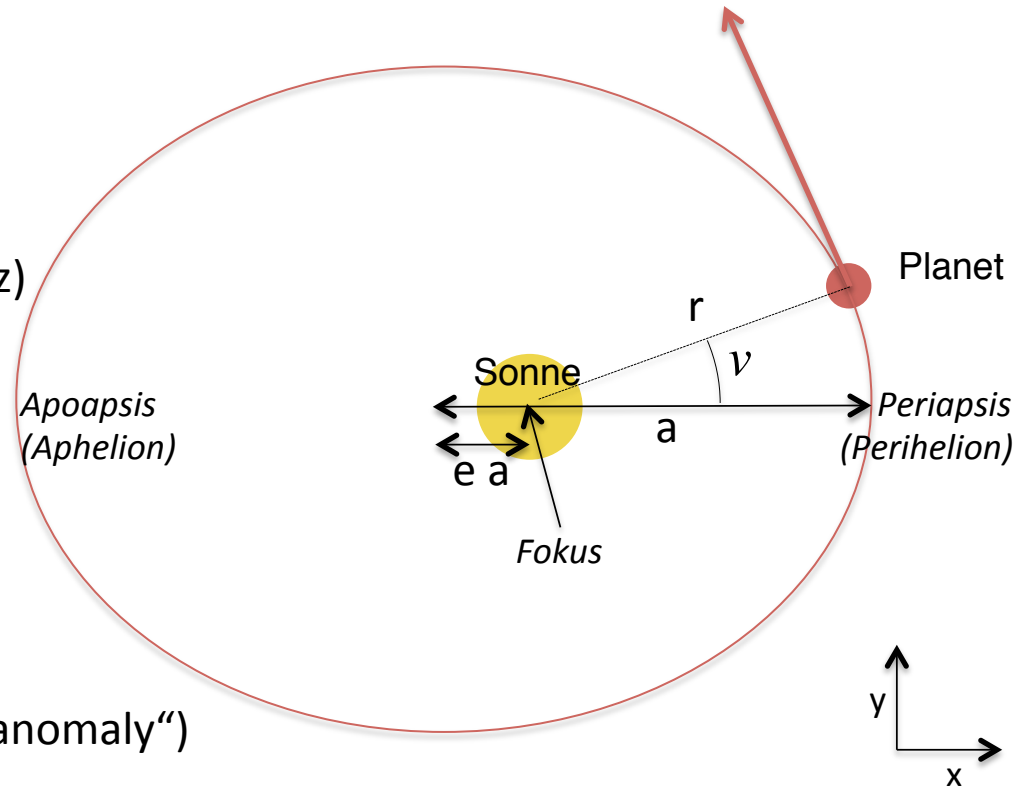
# Kepler Umlaufbahn, Exzentrizität

Ellipsbahn ( $M_{\text{planet}} \ll M_*$ ):

$$\Omega_K = \sqrt{\frac{GM_*}{a^3}} \quad (\text{Kepler Winkelfrequenz})$$

$$t_{\text{orbit}} = \frac{2\pi}{\Omega_K}$$

a („Semi-major axis“)  
e („eccentricity“)



$$M(t) = \Omega_K t \quad (\text{„Mean anomaly“})$$

$$M = E - e \sin(E) \rightarrow E(t) \quad (\text{„Eccentric anomaly“ , solve numerically})$$

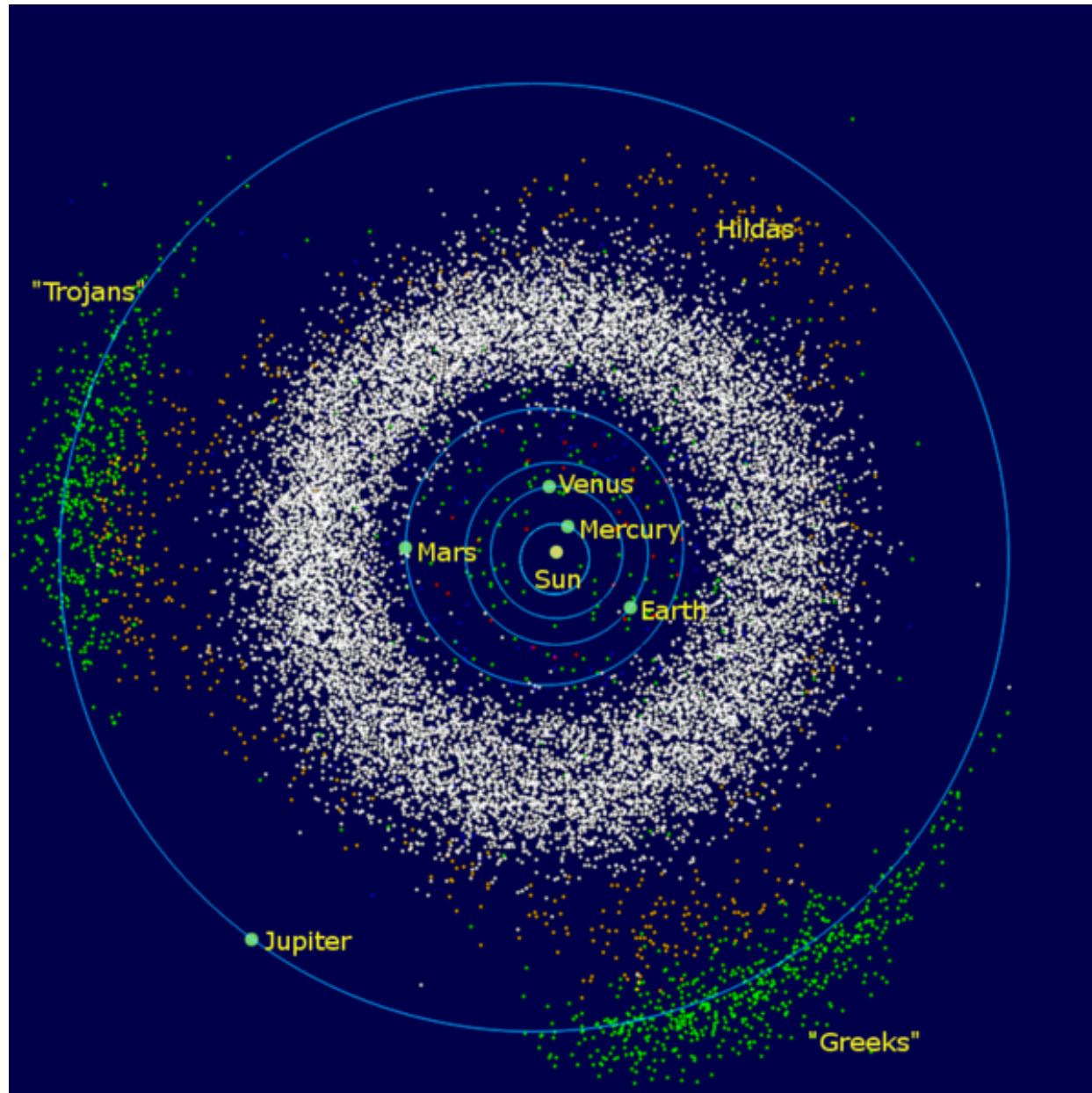
$$\cos(v) = \frac{\cos(E) - e}{1 - e \cos(E)} \rightarrow v(t) \quad (\text{„True anomaly“})$$

$$r(v) = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos(v)}$$

$$x(v) = r(v) \cos(v)$$

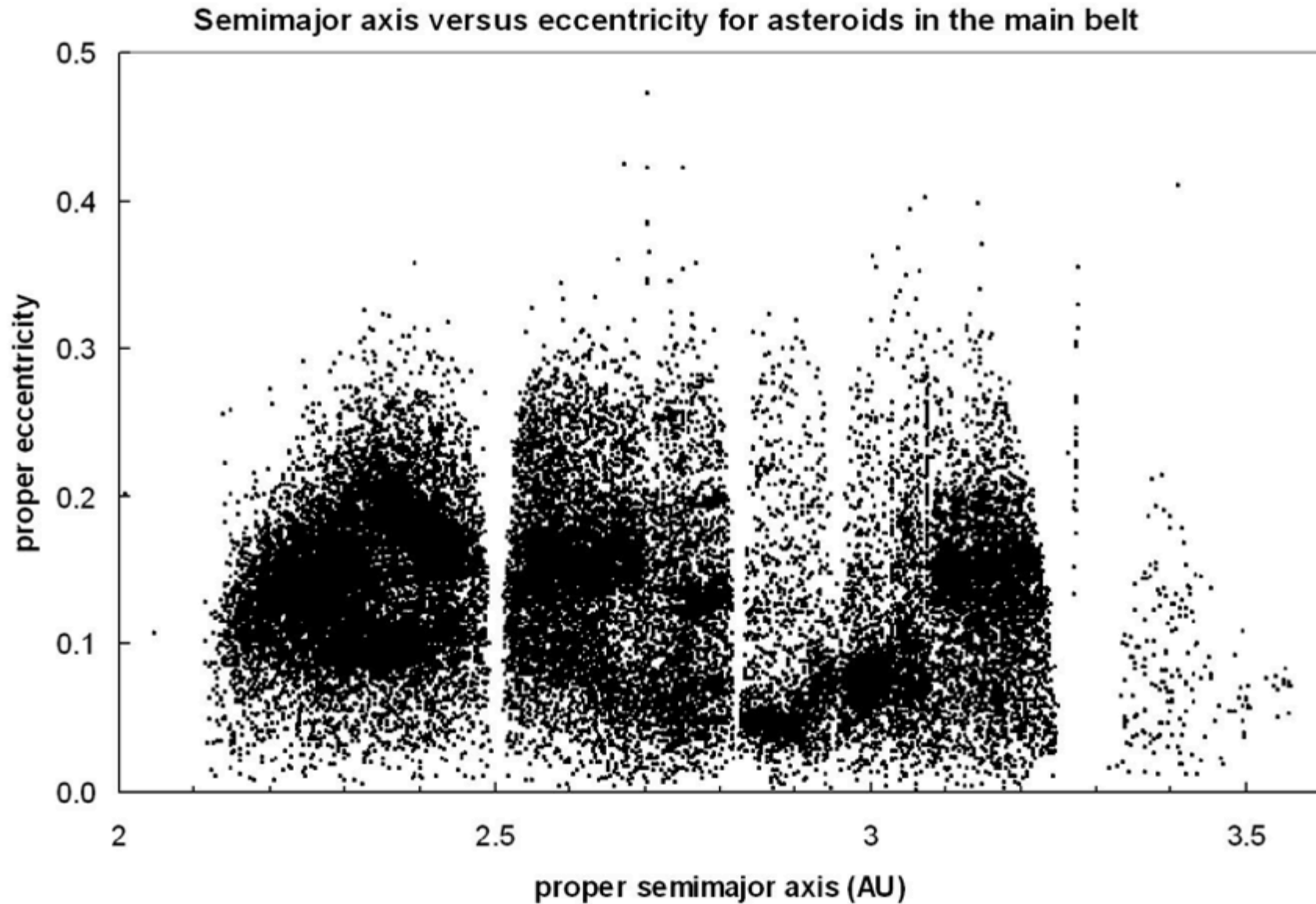
$$y(v) = r(v) \sin(v)$$

# Asteroiden und Trojaner



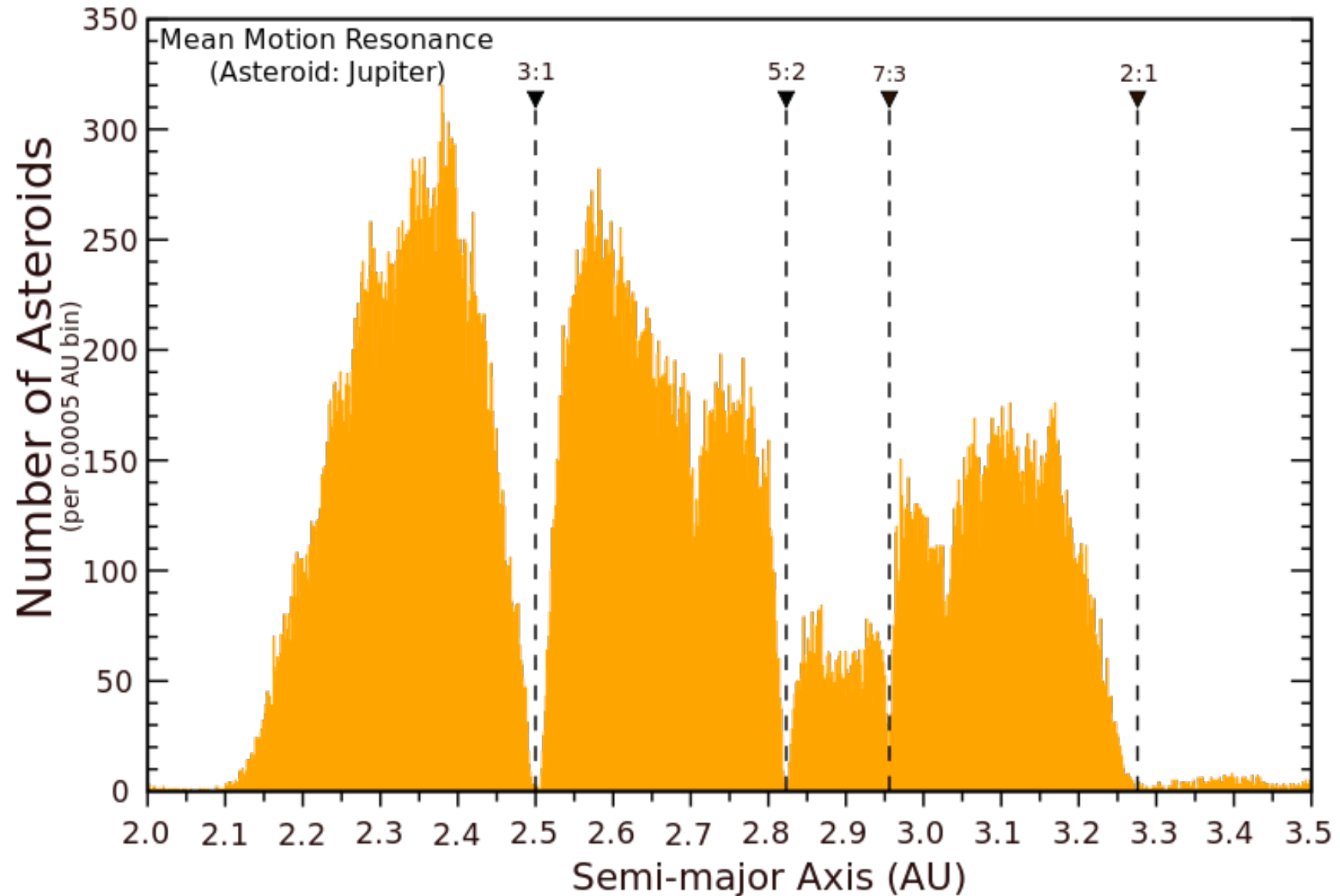


# Orbitale Elemente der Asteroiden



# Resonanzen im Asteroidengürtel

„Kirkwood gaps“

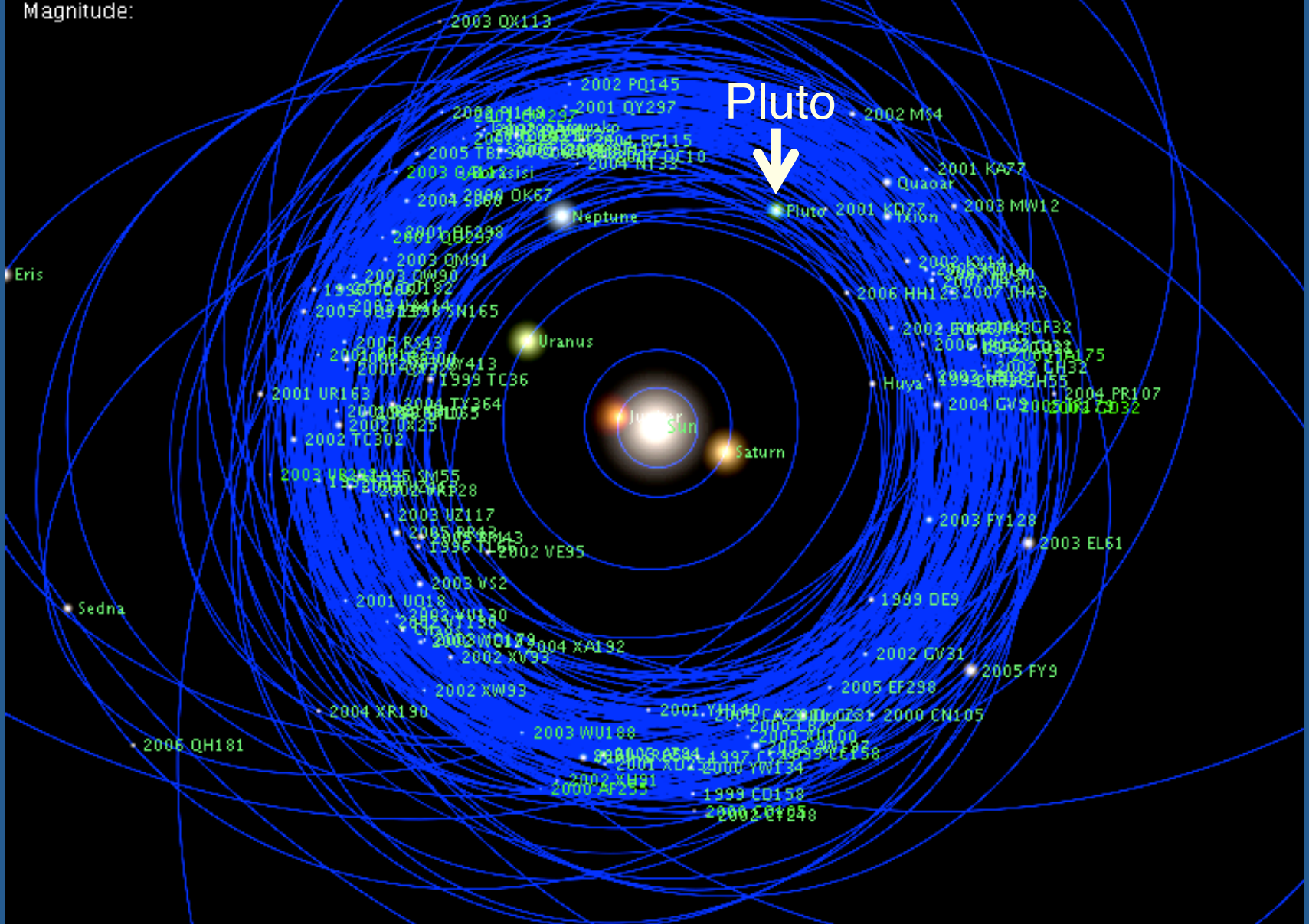




Viewpoint:  
Fixed:  
Selected:  
Distance:  
Magnitude:

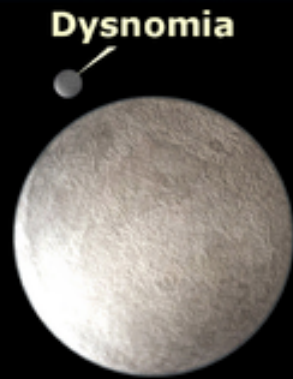
# Das Sonnensystem am 12. Mai, 2011, 12:30

10.359° x 34.865°





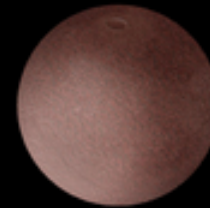
# Largest known trans-Neptunian objects (TNOs)



**Eris**



**Pluto**



**Makemake**



**Haumea**



**Sedna**



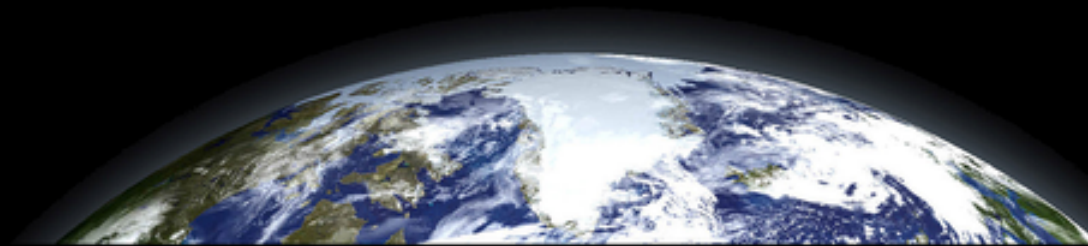
**Orcus**



**2007 OR<sub>10</sub>**



**Quaoar**



# Manche der TNOs sind Kometen

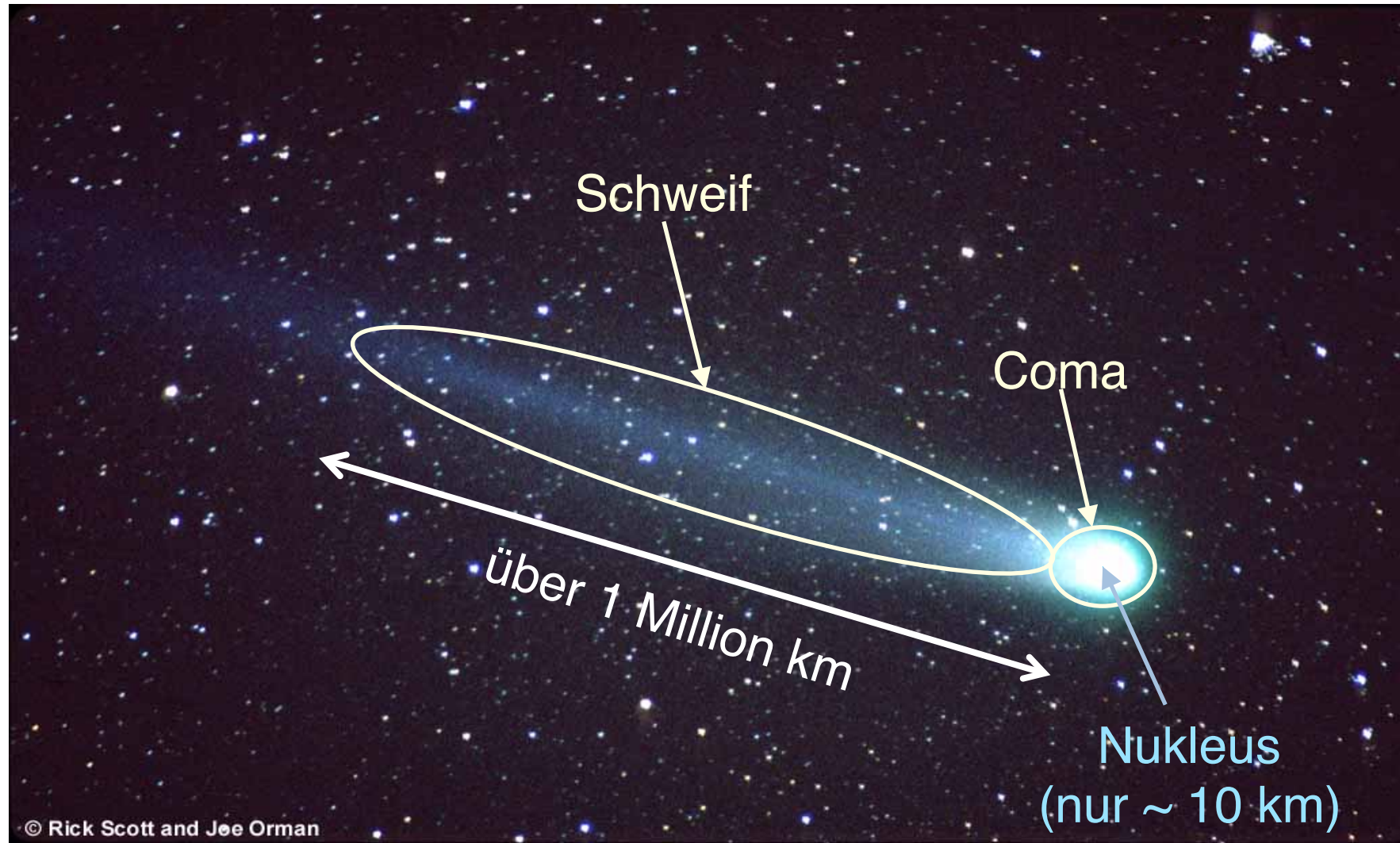
- Wenn ein Eis+Stein Brocken aus dem Kuiper Belt in das Innere Sonnensystem geschleudert wird, dann fängt er an, zu verdampfen.



Komet  
McNaught  
2007



# Komet: Verdampfender Eis+Stein Klotz



# Komet: Verdampfender Eis+Stein Klotz



Komet Halley 1986, besucht von Giotto

# Noch weiter weg

Zwei „Reservoirs“ von Kometen:

- 1) Kuiper belt = short period comets. Periode  $\sim 100$  Jahr..  
Beispiel: Halley
- 2) Oort cloud = long period comets. Periode: Millionen von Jahren (also klar einmalig für die Menschheit)

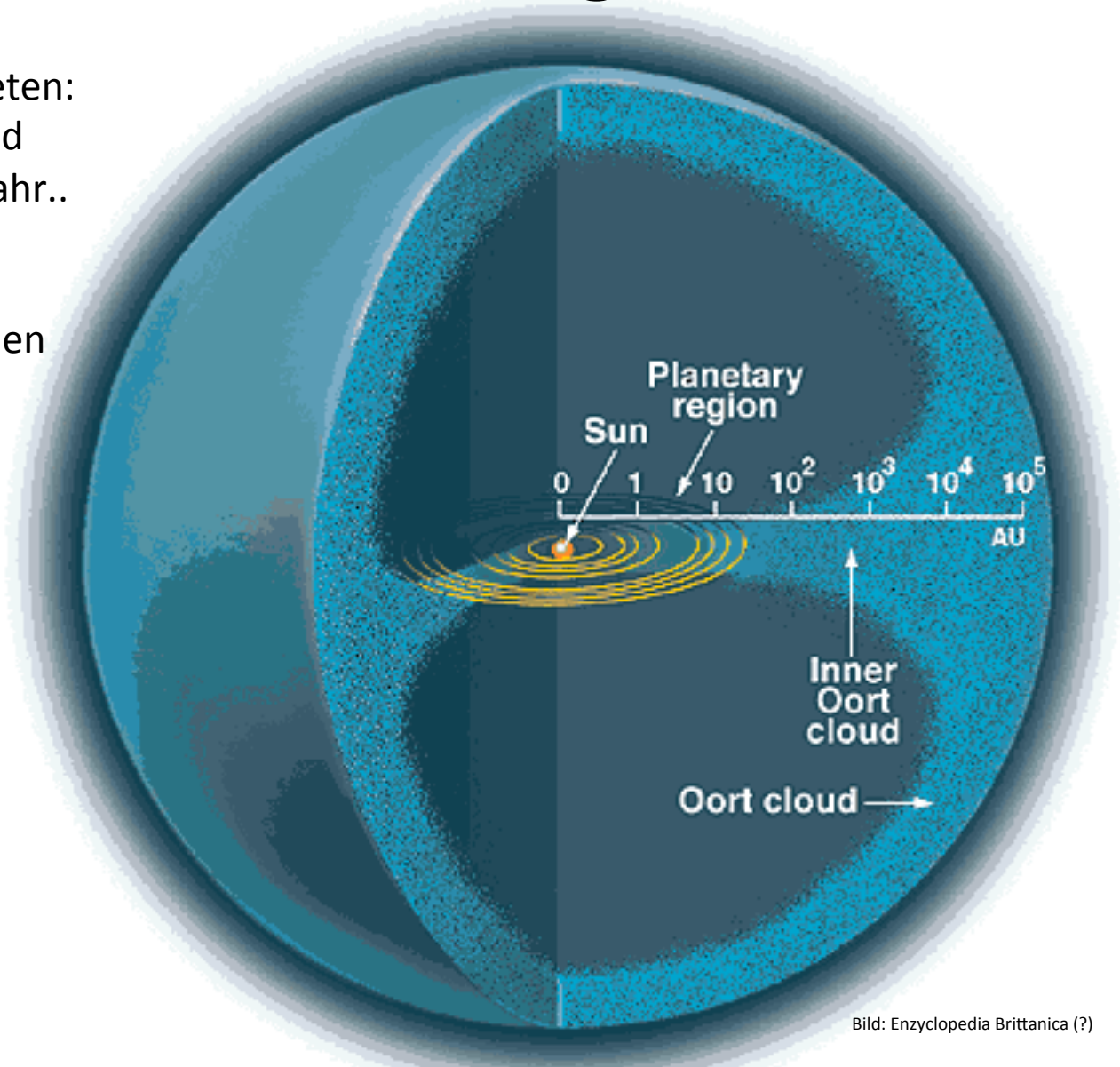


Bild: Encyclopedia Britannica (?)

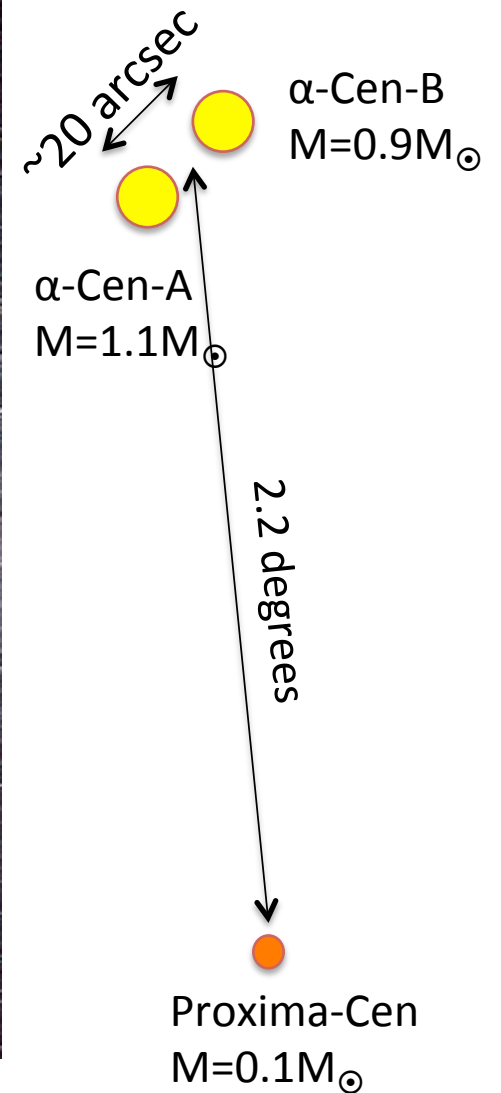
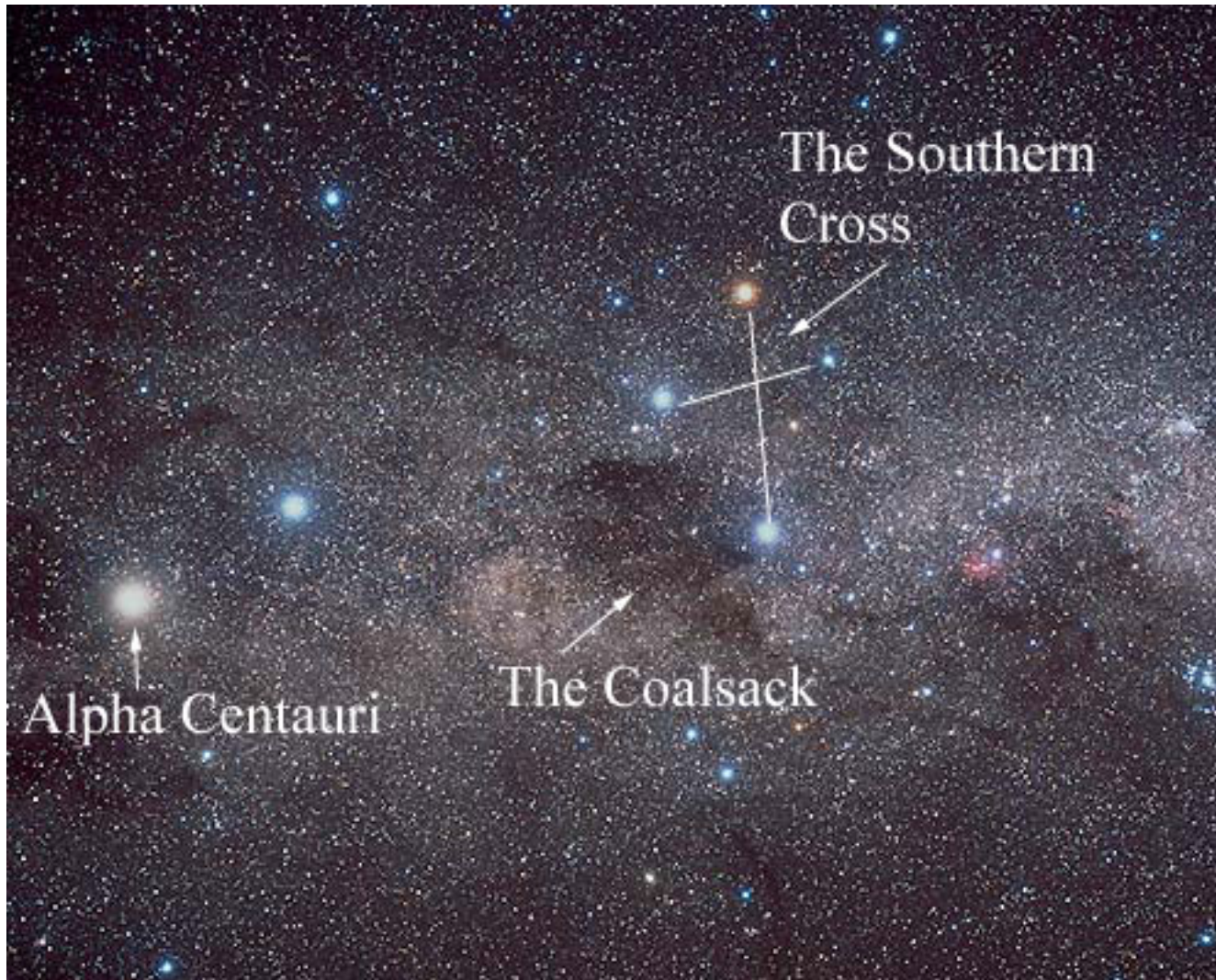
Wichtig: Logarithmische radielle Distanzskala

# Unsere stellare Nachbarschaft



# Das $\alpha$ -Centauri Mehrfachsystem

Die nächsten Sterne





# Winkelmessungen am Himmel

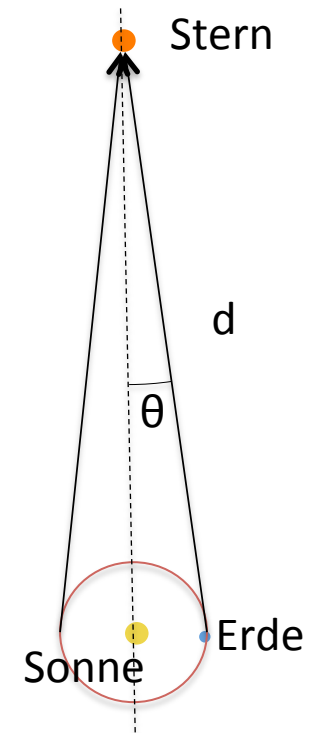
- Winkelmessungen:
  - 1 Grad (1 degree) =  $1/360$  von  $2\pi$
  - 1 Bogenminute (1 arcminute) =  $1/60$  Grad = typische Auflösung des menschlichen Auges
  - 1 Bogensekunde (1 arcsecond) =  $1/60$  Bogenminute =  $4.848 \times 10^{-6}$  radian = typische atmosphärische Winkelverschmierung („seeing“) für optische Beobachtungen ohne Hilfe von adaptiver Optik.
- Verwirrend: Koordinaten am Himmel haben andere „Minuten“ und „Sekunden“: die sind 15x größer! Deshalb wichtig: unterscheide *Bogenminute* von *Minute* und *Bogensekunde* von *Sekunde*. Mehr später...

# Abstandsmessung: Parallaxe

- **Proxima Centauri** ist nächster Stern:  $d = 4.24$  Lichtjahre entfernt
- Wie wissen wir dies? → Messung der Parallaxe  $\theta$

$$\tan \theta \approx \theta = \frac{1\text{AU}}{d}$$

- Also 2x Messen, mit 3 Monaten dazwischen
- Neue Abstandskala: „Parsec“ (pc) = Abstand so dass  $\theta = 1$  arcsec
- $1 \text{ pc} = 3.086 \times 10^{18} \text{ cm} = 3.26$  Lichtjahre
- Parallax Proxima Centauri:  $\theta = 0.77$  arcsec also ist  $d = 1/0.77 = 1.3 \text{ pc}$
- Astronomen benutzen immer pc!



# Weitere nahe Sterne

- **Sirius**, hellster Stern am Himmel,  $d = 2.6 \text{ pc}$ ,  $M = 2.0 M_{\odot}$ 
  - Bessel entdeckte 1834 dass Sirius etwas „wackelt“. In 1862 entdeckte der Linsenschleifer Alvan Clark per Zufall einen sehr schwachen Begleitstern,  $10^4$  mal schwächer als Sirius, mit  $R=0.9R_{\text{Erde}}$  aber  $M=M_{\text{sun}}$ . Unglaublich große Dichte:  $2 \times 10^6 \text{ g/cm}^3$ ! *Weißer Zwergstern*. Sehr heiß: Oberflächentemperatur = 25000 K (Vergl. Sonne: 6000K)
- **Vega**,  $d = 7.7 \text{ pc}$ ,  $M = 2.0 M_{\odot}$ 
  - Erster Stern der fotografisch beobachtet wurde (1850 Bild, 1872 Spektrum) → *Vega wird als der Standardstern für Helligkeitsmessungen benutzt! (Später Genaueres)*
  - Erster Stern bei dem eine zirkumstellare Staubscheibe entdeckt wurde (1983 von dem IRAS Infrarot Raumteleskop) → Vega ist das Prototyp eines Sterns mit „Trümmerscheibe“ (debris disk)

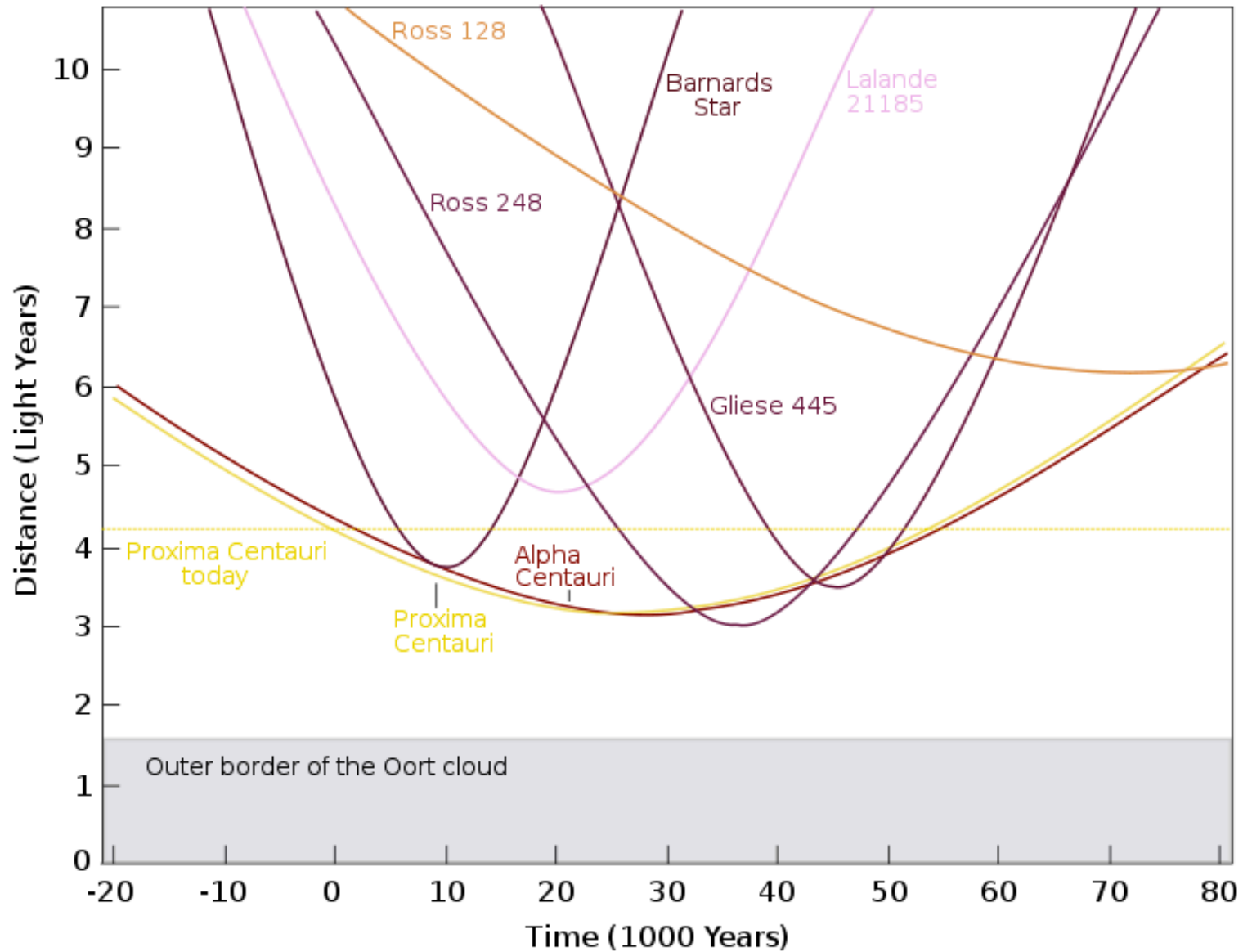
# Weitere nahe Sterne

- **Barnard's Star**,  $d = 1.83 \text{ pc}$ ,  $M = 0.144 M_{\odot}$ 
  - Nach  $\alpha$ -Cen und Proxima-Cen, der nächste Stern
  - Sehr schwach: nicht mit bloßem Auge zu sehen, trotz Nähe
  - Sehr niedrige Masse für einen Stern: „*M-Zwerg*“ (der Buchstabe M steht für die Spektralklasse, mehr dazu später)
  - Sehr hohe „Eigenbewegung“:  $>10 \text{ arcsec / Jahr}$  (schnellste Eigenbewegung aller Sterne, von Erde aus gesehen)
  - Daraus folgt eine Geschwindigkeit  $\sim 100 \text{ km/s}$ .

## *Wissenswertes:*

**Wilhelm Gliese** publizierte den „Catalogue of nearby stars“ (1957, 1969), welcher noch immer häufig benutzt wird. Viele der nahen Sterne sind vor allem bekannt durch ihre Gliesekatalognummer, z.B. Gliese 445. Aber auch Sterne mit anderen Namen haben eine Gliesenummer, z.B. Barnard's star = Gliese 699. Wilhelm Gliese arbeitete am Astronomischen Recheninstitut (ARI) in Heidelberg.

# Weitere nahe Sterne



# Wie weit kann man Parallaxe messen?

- Von der Erde: Beste Parallax  $\theta \approx 0.01$  arcsec
- **Hipparcos Raumteleskop** (1989-1993): Beste Parallaxe  $\theta \approx 0.001$  arcsec für  $10^5$  Sterne. Also Sterne bis 1 kpc.
- **Gaia Raumteleskop** (2013-): Beste Parallaxe  $\theta \approx 0.00002$  arcsec für  $10^9$  Sterne. Also Sterne bis 50 kpc.

# Bewegung der Sterne

- Die Sterne in unserer Umgebung bewegen sich nahezu geradlinig. „Close encounters“, wo Sterne sich so nah kommen, dass sie sich gegenseitig die Bewegungsrichtung verändern, sind so selten, dass man sie de-facto ausschließen kann (siehe nachher).
- Geschwindigkeits-Dispersion  $\Delta v \approx 10 \text{ km/s}$

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{v}_i$$

$$\Delta v^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\vec{v}_i - \langle \vec{v} \rangle|^2$$

- Vergleich: Kepler-Geschwindigkeit Erde  $\approx 30 \text{ km/s}$ ; die von Neptun  $\approx 5.4 \text{ km/s}$ ; die von Oortwolke-Objekten ( $a \approx 10^4 \dots 10^5 \text{ AU}$ )  $\approx 0.1 \dots 0.3 \text{ km/s}$

# Wie oft kollidieren Sterne?

- Stellare Dichte in unsere Umgebung  $N \approx 0.14$  pro  $\text{pc}^3$
- Geschwindigkeitsdispersion  $\Delta v \approx 10$  km/s
- Kollisionsquerschnitt (angenommen, alle haben  $R_* = R_\odot$ ):

$$\sigma = \pi(2R_*)^2$$

- Die Rate von Kollisionen pro Stern (unter Vernachlässigung von „gravitationelle Fokussierung“):

$$\text{Rate} = N \Delta v \sigma = 10^{-20} \text{ pro Jahr} \approx 10^{-10} \text{ seit dem Big Bang}$$



# Gruppen von Sternen

- Sterne entstehen Gruppenweise.
- Junge Sterne sind also noch oft zusammen mit ihren Geschwistern. Beispiel: Pleiaden (mit dem bloßen Auge sichtbar)
- Japan: „Subaru“
- $d = 134 \text{ pc}$
- Alter =  $10^8$  Jahr
- Pleiaden sind gravitationell gebunden
- = „*Open Cluster*“



Credit: Bob Gendler

Von: <http://www.astro.virginia.edu/class/clark107images/image11.html>

# Gruppen von Sternen

- Manche Gruppen sind so *nah*, dass sie schwierig als Gruppe erkennbar sind! Die Sterne sind über einen großen Teil des Himmels verteilt.
- Solche Gruppen kann man identifizieren durch deren gemeinsame Bewegungsrichtung: „*moving groups*“
- Beispiel:  $\beta$ -Pictoris moving group (Alter  $\approx 10..30$  Myr):
  - $\beta$ -Pictoris:  $d = 19$  pc (Hat debris disk und Exoplanet!)
  - $\eta$ -Telescopii:  $d = 48$  pc
  - HD 172555:  $d = 30$  pc (Hat debris disk)
  - $\beta$ -Trianguli Australis:  $d = 10$  pc
  - und viele mehr...
  - Wurde erst 1999..2001 als Gruppe erkannt!

# Gruppen von Sternen

- Es geht auch größer: Globular Clusters
- Viele zehnhunderttausende Sterne, stark gravitationell gebunden.
- Sehr alt: wahrscheinlich so alt wie unsere Milchstraße
- Entstehungsgeschichte ist noch nicht ganz klar
- Interessant: Es sind so viele Sterne, dass man in erster Annäherung diese Objekte „thermodynamisch“ analysieren kann.



Urheber: NASA, The Hubble Heritage Team

M80,  $d \approx 10000 \text{ pc} = 10 \text{ kpc}$