

Exit Mundi



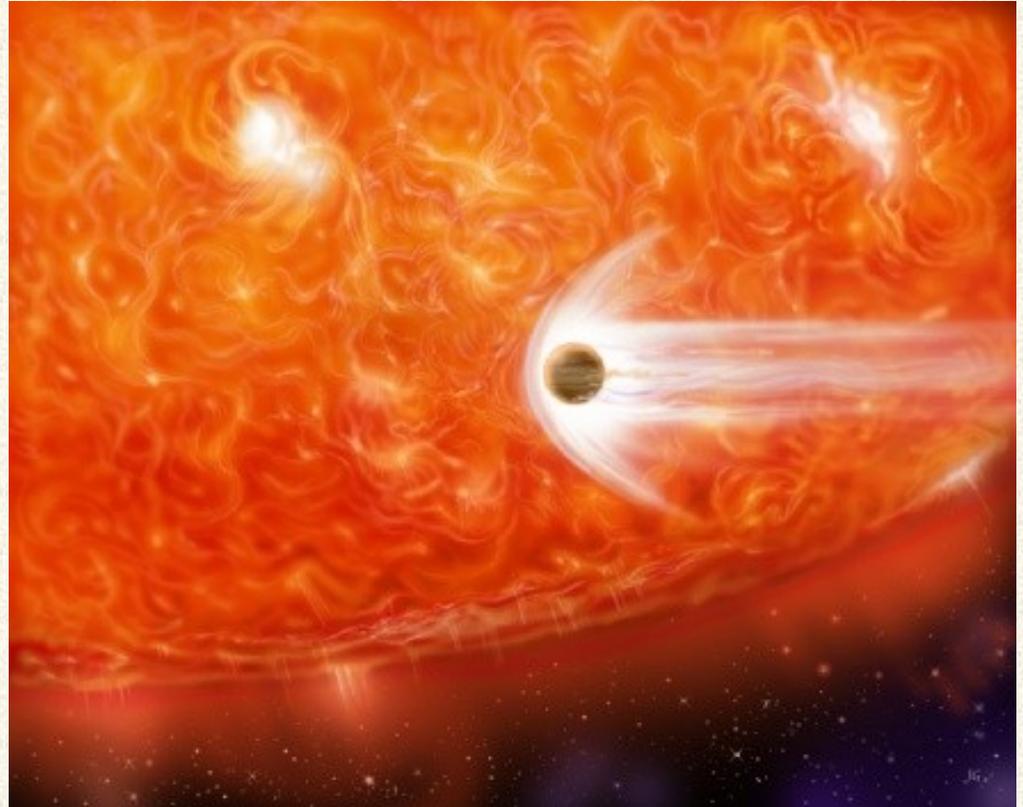
Samuel Colman: "Vor dem Weltuntergang" (1838)

Mögliche, wahrscheinliche und garantierte Weltuntergänge aus physikalischer Sicht

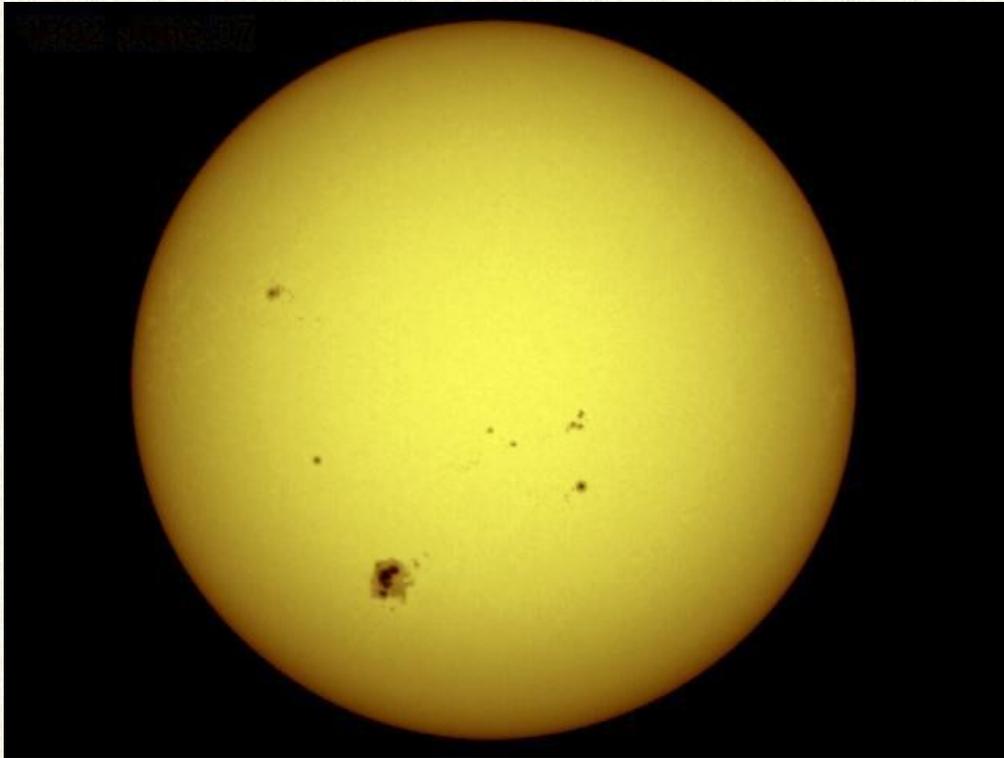
Volker Ossenkopf-Okada, I. Physikalisches Institut, Universität zu Köln

Kandidaten für eine „finstere“ Zukunft

- 1) Die Sonne
- 2) Supernovae
- 3) Gamma-Ray-Bursts
- 4) Stabilität des Sonnensystems
- 5) Deep Impact
- 6) Kosmologie
- 7) Das ferne Ende
- 8) Wahrscheinlichere Enden der Menschheit

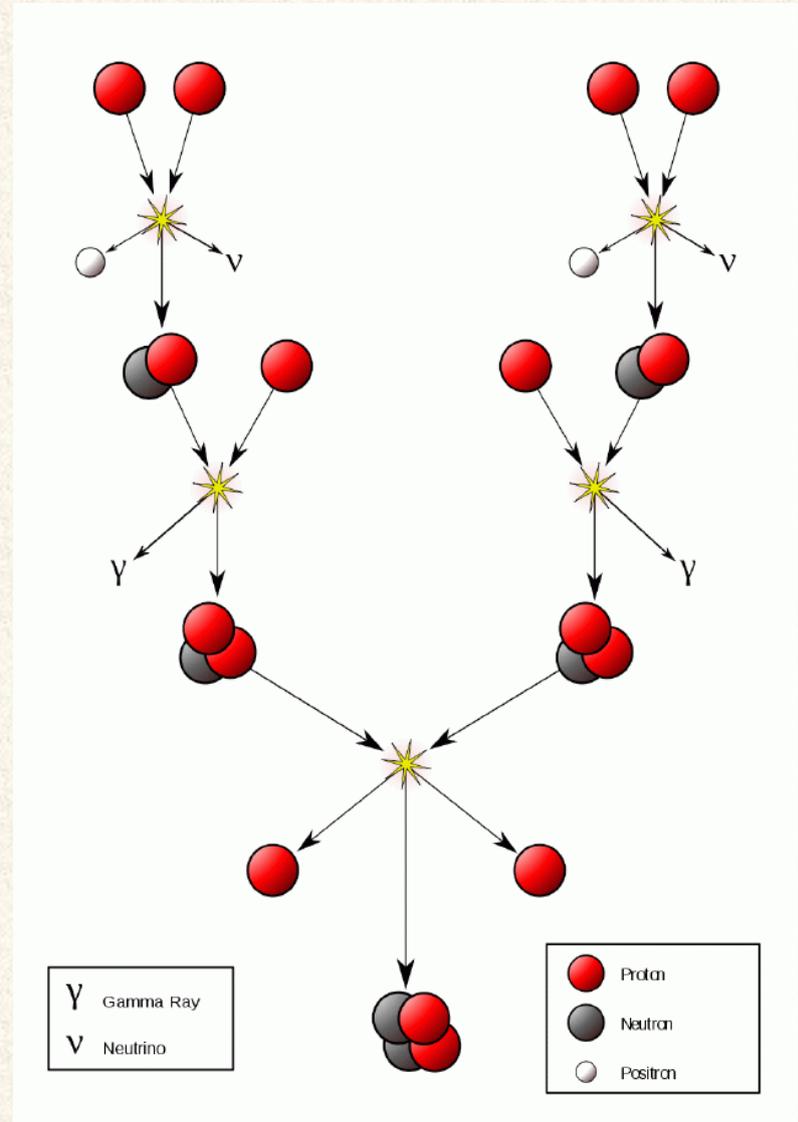


Die Sonne als Todbringer



Energiequelle:

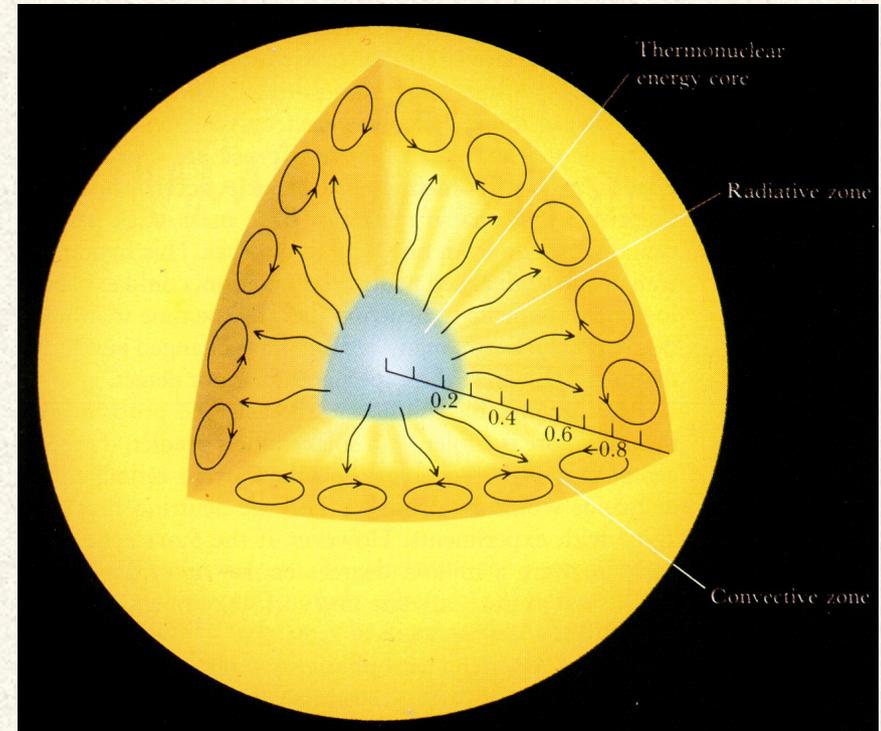
- Kernfusion im Kern: $4 \text{ H} \rightarrow \text{He}$
- Fusion wandert langsam nach außen
- Wasserstoff verbraucht in 5 Mrd. a



Die Sonne als Todbringer

Während der H-Fusion (Hauptreihe):

- Zone des H-Brennens wandert langsam nach außen
- Leuchtkraft der Sonne wächst
 - 1% aller 110Mio a
 - Signifikante globale Erwärmung in 1Mrd a
 - Beschleunigte Verwitterung
 - entfernt CO_2 aus Atmosphäre (Ausfällung als Karbonate)
 - Normale Photosynthese fällt aus,
 - keine O_2 -Produktion durch Pflanzen mehr
 - Pilze und Bakterien überleben



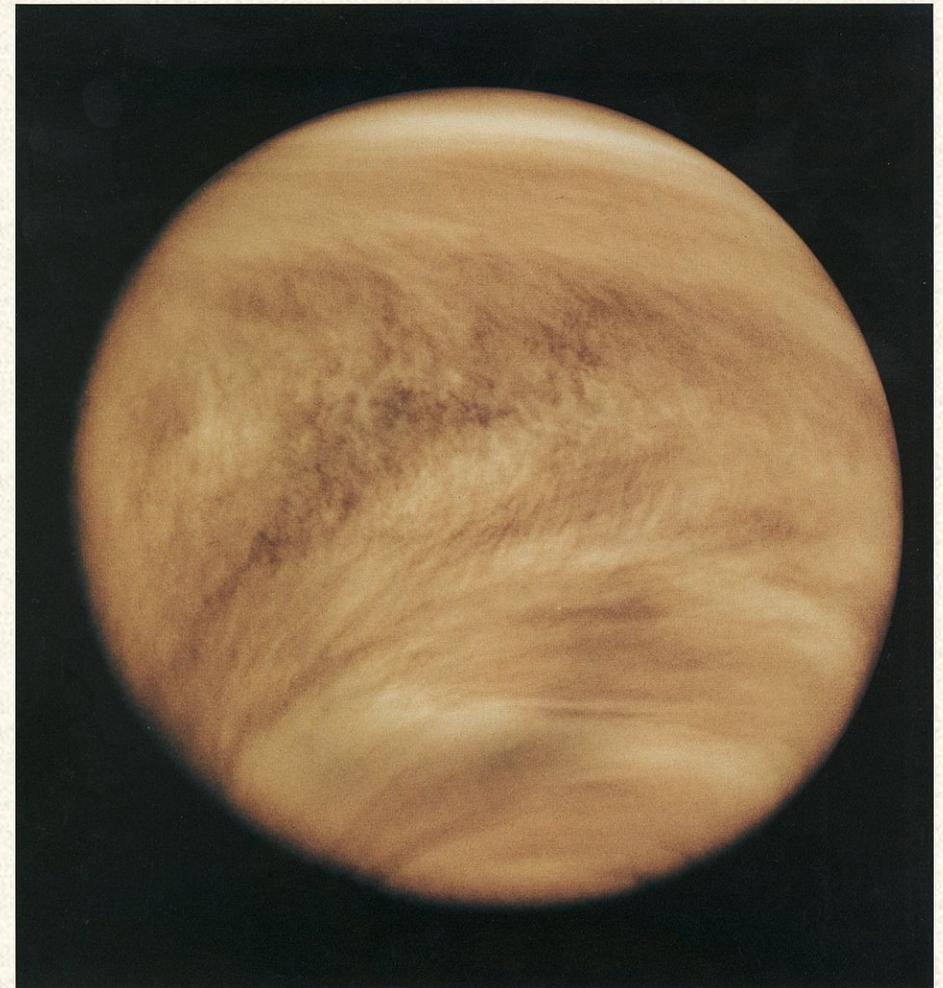
Die Sonne als Todbringer

Weitere Entwicklung:

- Signifikante globale Erwärmung
 - Beschleunigte Verdunstung der Ozeane

- Kritische Temperatur
 - 47°C globaler Durchschnitt
 - nach 1.1 Mrd a
 - Run-Away-Effekt
 - Globales Verdunsten alles Wassers

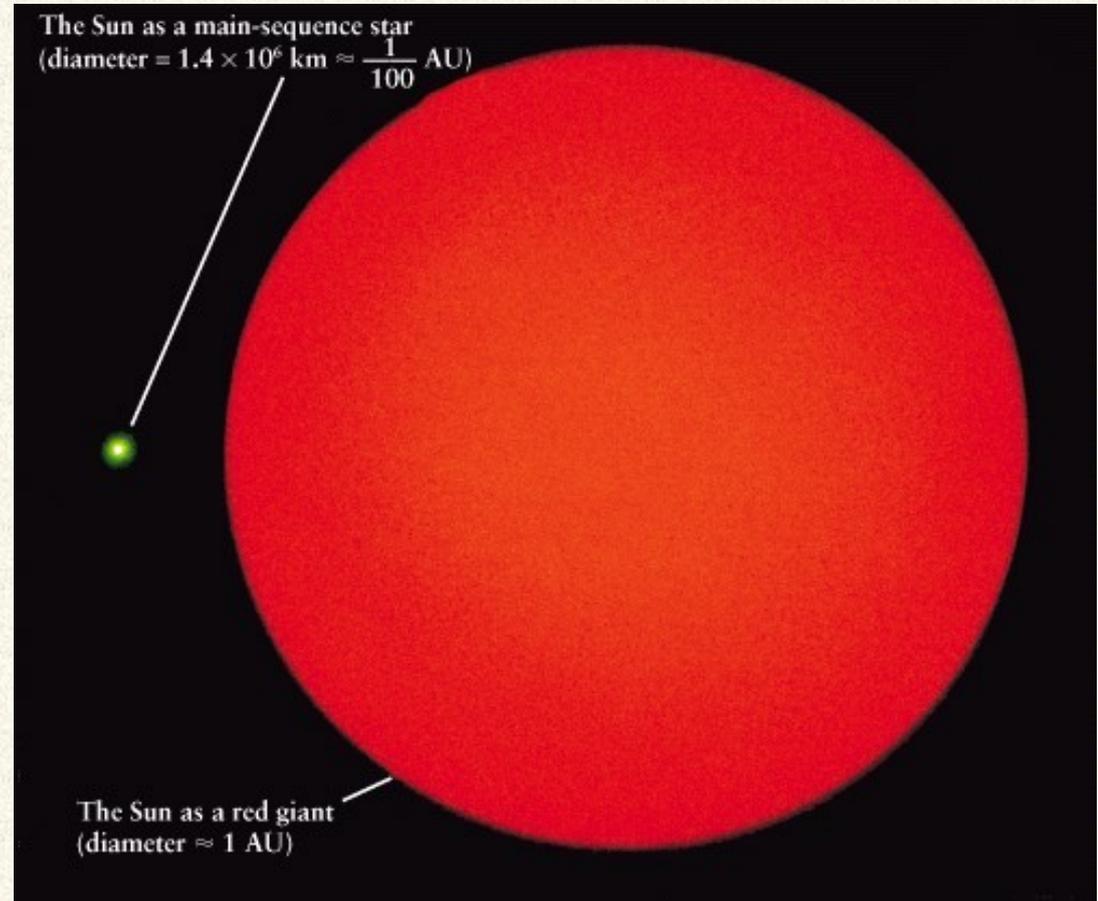
→ Venus-Bedingungen



Weitere Entwicklung

- Nach 5 Mrd a: H verbraucht
- Strahlungsdruck lässt nach
- Sonne kontrahiert
- Druck erhöht Temperatur
- Bei 100Mio K beginnt He-Fusion: $3 \text{ He} \rightarrow \text{C}$
- Weitere Temperaturerhöhung
- Verstärkung der He-Fusion ...

→ **Helium Flash**



- Neu freigesetzte Energie bläht Sonne bis zur Erdbahn auf

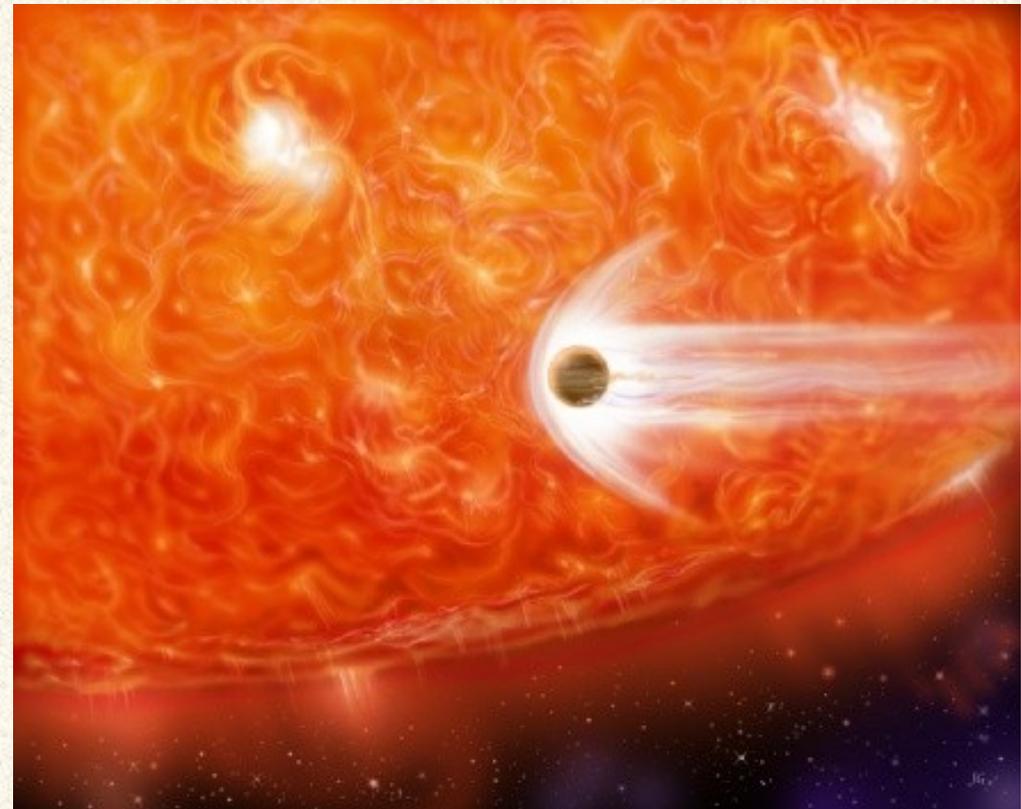
→ **Roter Riese**

- Oberflächentemperatur: $\sim 2500\text{K}$

Die Sonne als Todbringer

Aber: Kepler-70b und c

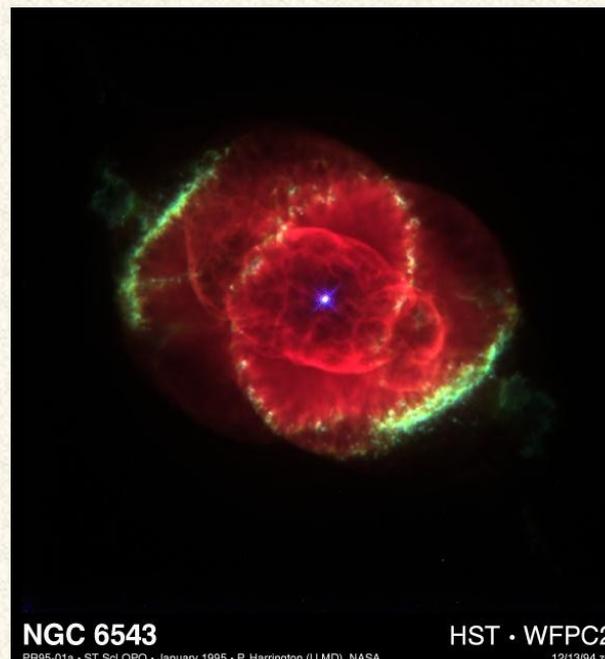
- Haben auf naher Umlaufbahn Riesenstadium des Muttersterns überlebt
- Orbit innerhalb des Radius des Sterns als Riese, d.h. Planeten waren vom Stern “verschluckt”
- Reibung
 - Entfernt Atmosphäre und alle flüssigen Bestandteile vom Planeten
 - Orbit sinkt
 - Erde hätte nicht überlebt, ein Planet wie Saturn schon



Weitere Entwicklung

Der planetare Nebel

- Die äußersten Schalen können nicht mehr gehalten werden.
- Sie werden 'weggeblasen' und bilden einen **planetaren Nebel**



Masseverlust:

- 10 – 40%
- sehr dünnes ionisiertes Gas
- Störung von Magnetfeldern und Atmosphären

Weitere Sternentwicklung

- Alle Fusion erloschen → **Weißer Zwerg**
- **Aber:** falls Restmasse $>$ Chandrasekhar-Masse ($\sim 1.4 M_{\odot}$)
→ Stern kollabiert in 0.2s
- Alle Gravitationsenergie wird auf einen Schlag frei

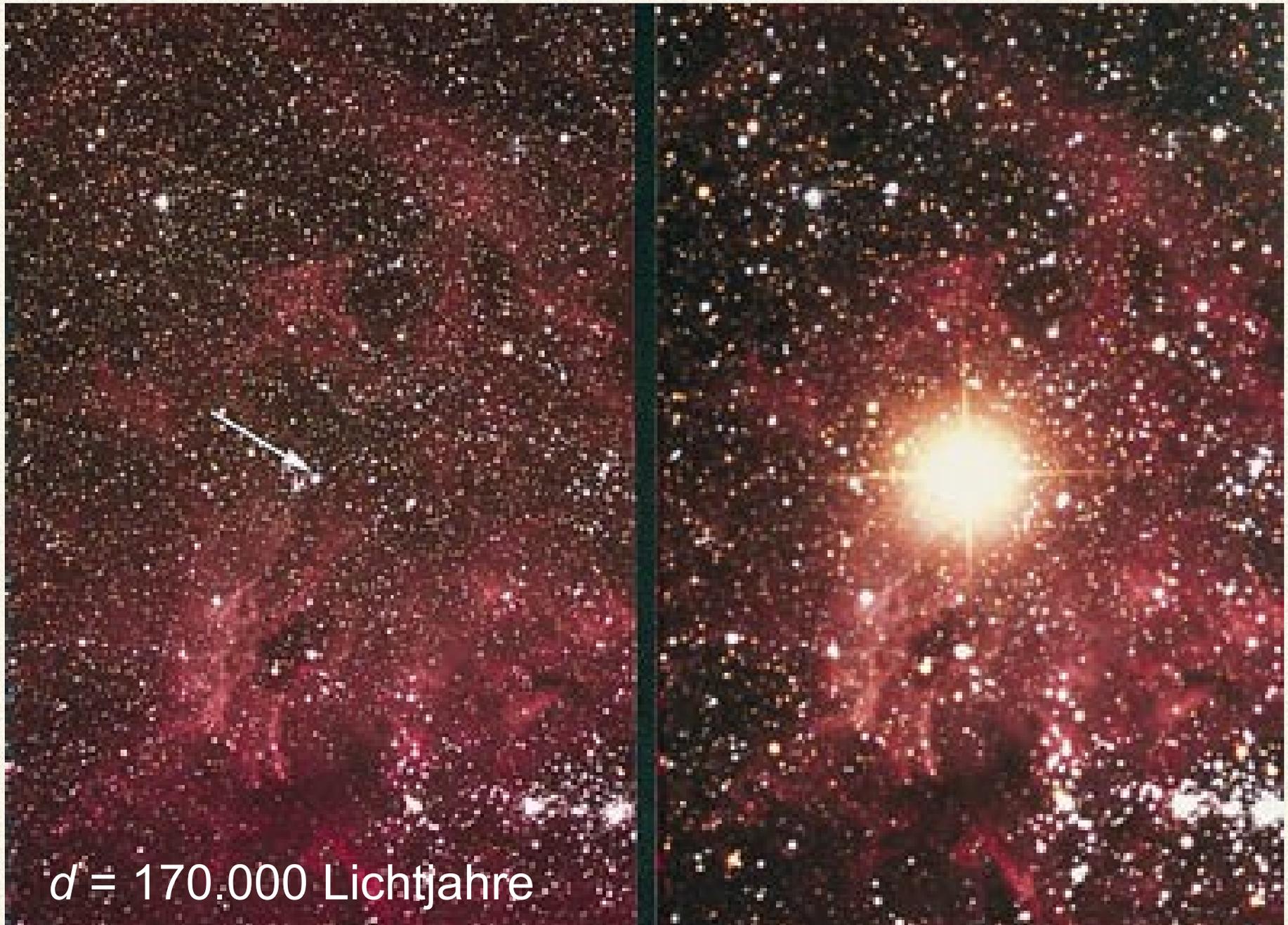
= Gesamtleuchtkraft der Sonne
in 10 Mrd. A

→ **Supernova**



so hell wie ganze Galaxie

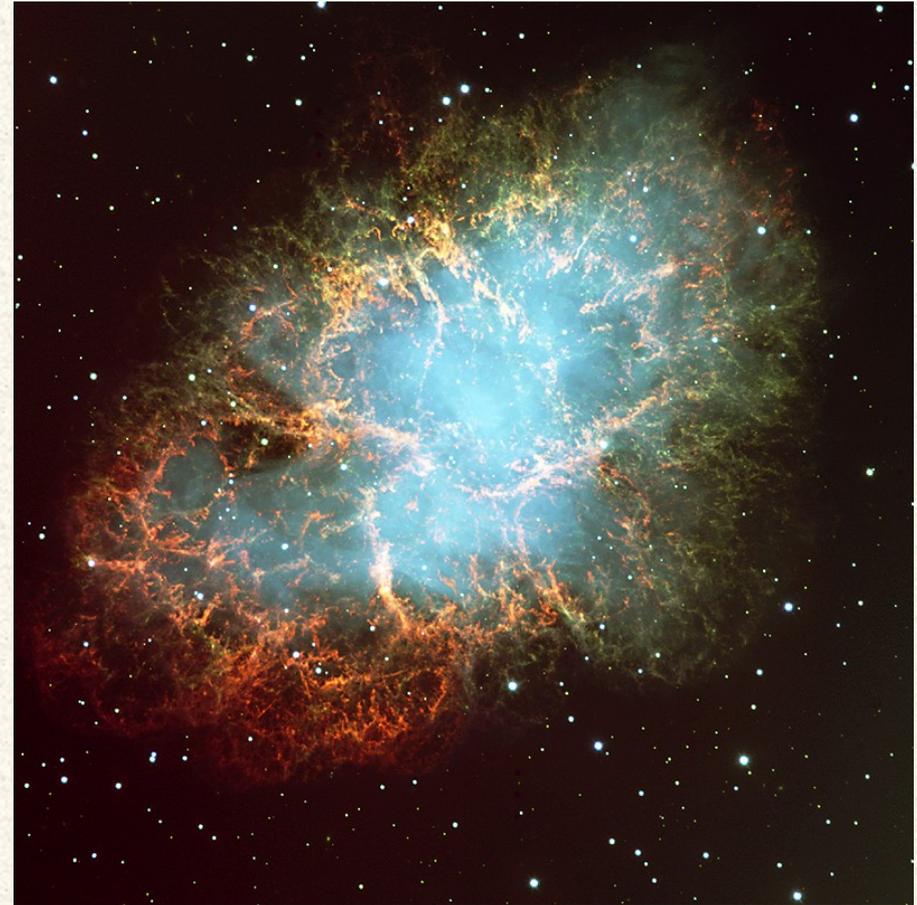
Die Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke (Nachbargalaxie)



Supernovae

Supernova-Explosion in Umgebung:

- Haupteffekt: γ -Strahlen treffen auf Atmosphäre
- Teilweise Zerstörung der Ozonschicht
- Messbarer Effekt für $d < 3000$ Lichtjahre
- 50%-Zerstörung für $d < 25$ Lichtjahre
- Mögliche Ursache für Ordovizisches Aussterben vor 440-450 Mio a
- **Nächster Kandidat: IK Pegasi**
 - $d=150$ Lichtjahre
 - Einige 100 Mio a



The Crab Nebula in Taurus (VLT KUEYEN + FORS2)

ESO PR Photo 40f/99 (17 November 1999)

© European Southern Observatory

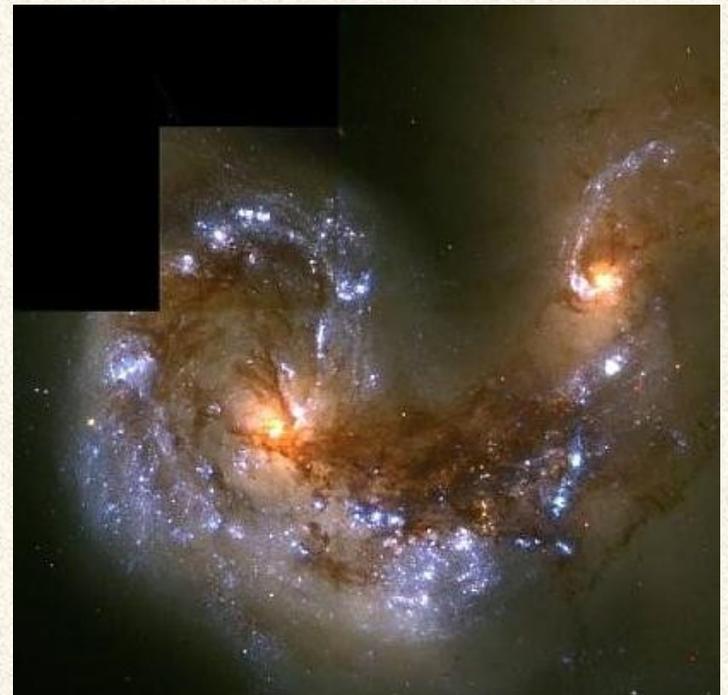


Supernovae

- **Andere Kandidaten:** ρ Cassiopeiae, η Carinae, RS Ophiuchi, U Scorpii, VY Canis Majoris, Betelgeuse, Antares, γ Velorum, WR 104, Quintuplet Cluster: alle > 3000 Lichtjahre Entfernung

Aber: Induzierter Star-Burst möglich:

- Verschmelzen der Milchstraße mit Nachbargalaxien
 - Smith's Wolke: 40 Mio a (gering)
 - Andromeda: 4 Mrd a
- Erhöhte lokale Sternenstehungs- und Supernova-Rate
- Unklar, wo die Sonne nach Stoß mit Andromeda endet
 - Kann nahe am Zentrum sein, oder auch herausgeschleudert



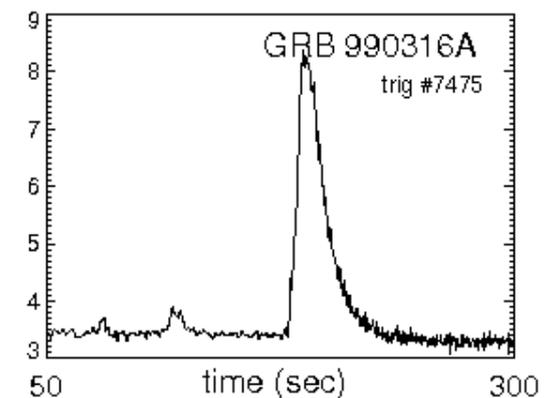
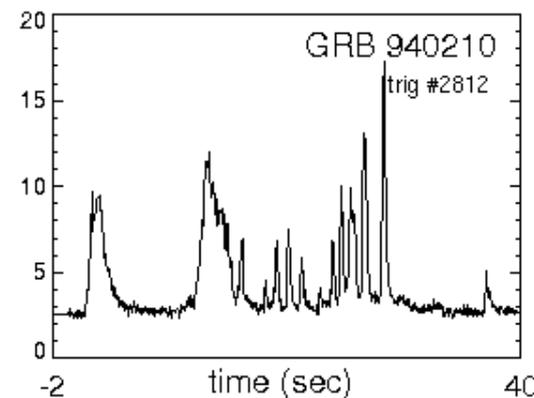
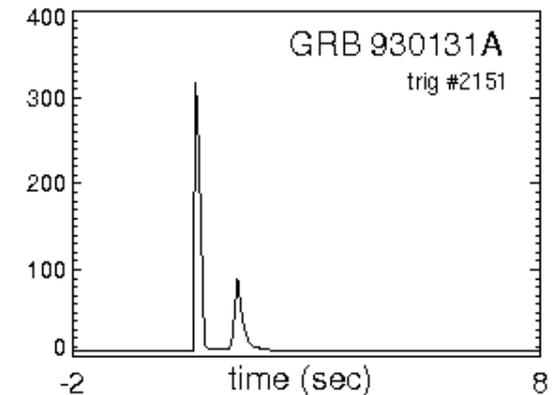
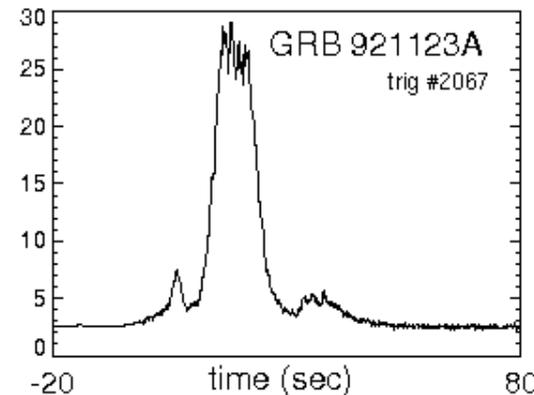
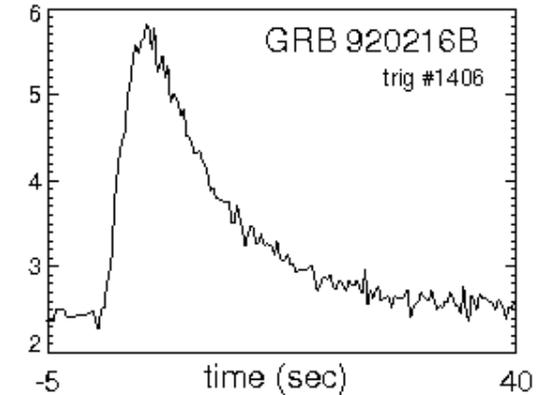
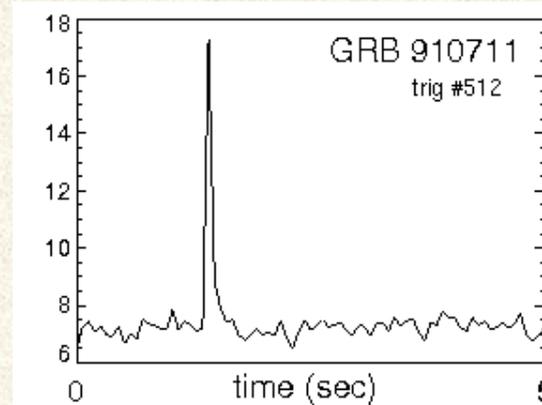
γ -Strahlenausbrüche (GRBs)

Energetisch leistungsstärkste
Ereignisse im Universum:

- $10^{44} - 10^{47} \text{ J} \cong \frac{1}{2000} - \frac{1}{2} M_{\odot}$
- Wahrscheinlich gebündelt
- Kurzzeitig
- Hauptausstoß in γ -Strahlen

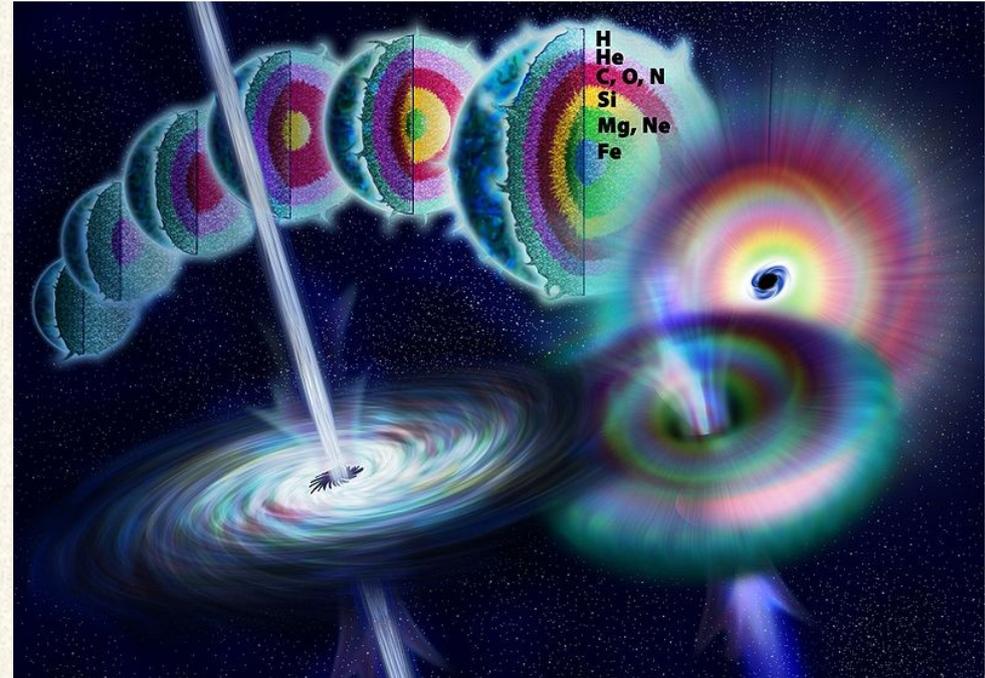
- 3 Typen je nach Dauer
 - Kurze GRBs: $< 2\text{s}$
 - Lange GRBs typisch 100s
 - Ultralange GRBs: Stunden

- Energiequelle: Gravitation/
Kollaps



γ -Strahlenausbrüche (GRBs)

- 2 bekannte Ursachen:
 - a) SN mit Bildung eines schwarzen Loches
 - Energiefreisetzung, wenn schwarzes Loch innere Schalen “verschlingt”
 - Erklärt lange GRBs
 - Stark gebündelt
 - Geringe Wahrscheinlichkeit, getroffen zu werden
 - Nächster bekannter Kandidat:
 - **WR 104**
 - $d=2300\text{pc}$
 - $M=25M_{\odot}$
 - In weniger als 2 Mio a
 - Rotationsachse wahrscheinlich nicht auf uns gerichtet ($2^{\circ}-16^{\circ}\pm 4^{\circ}$)
→ geringe Wahrscheinlichkeit vom Strahl getroffen zu werden

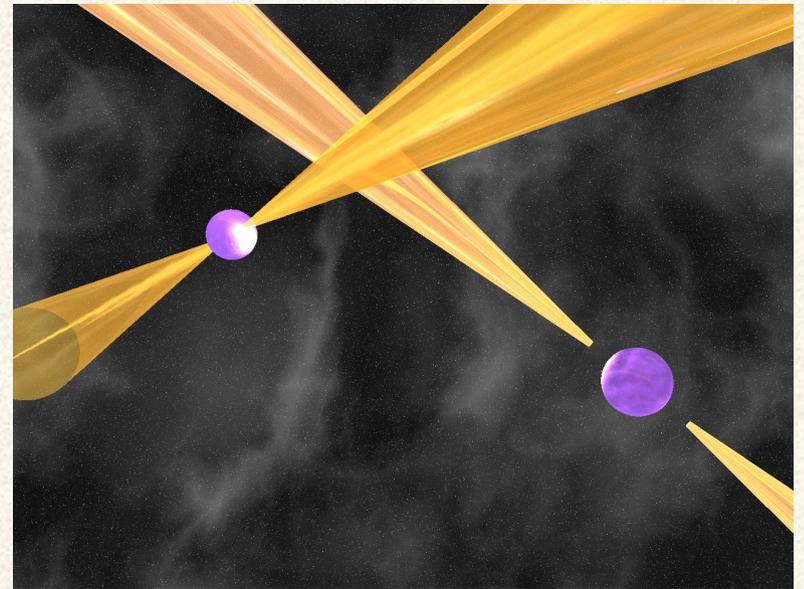


γ -Strahlenausbrüche (GRBs)

- 2 bekannte Ursachen:
 - b) Verschmelzung zweier Neutronensterne zum schwarzen Loch
 - erklärt die kurze GRBs
 - Kollimation unbekannt

Nächster Kandidat: **PSR J0737-3039**

- Binär-Neutronensternsystem (Doppel-Pulsar)
- Verschmelzung durch Abbremsung über Gravitationswellen
- γ -Strahlungsausbruch in 85 Mio Jahren in nur 600pc Entfernung
- Größe des Strahlungskegels unbekannt → hohe Chance getroffen zu werden
- Gesamthäufigkeit: 2-5 alle 1 Mio Jahre in Milchstraße (kollimiert)



γ -Strahlenausbrüche (GRBs)

- **Wirkung**

- γ -Strahlung reagiert hauptsächlich mit den Atomen der Hochatmosphäre

- Erzeugt sekundäre Teilchen

- Zerstörung der Ozonschicht
(WR104 würde 25% allen Ozons zerstören)

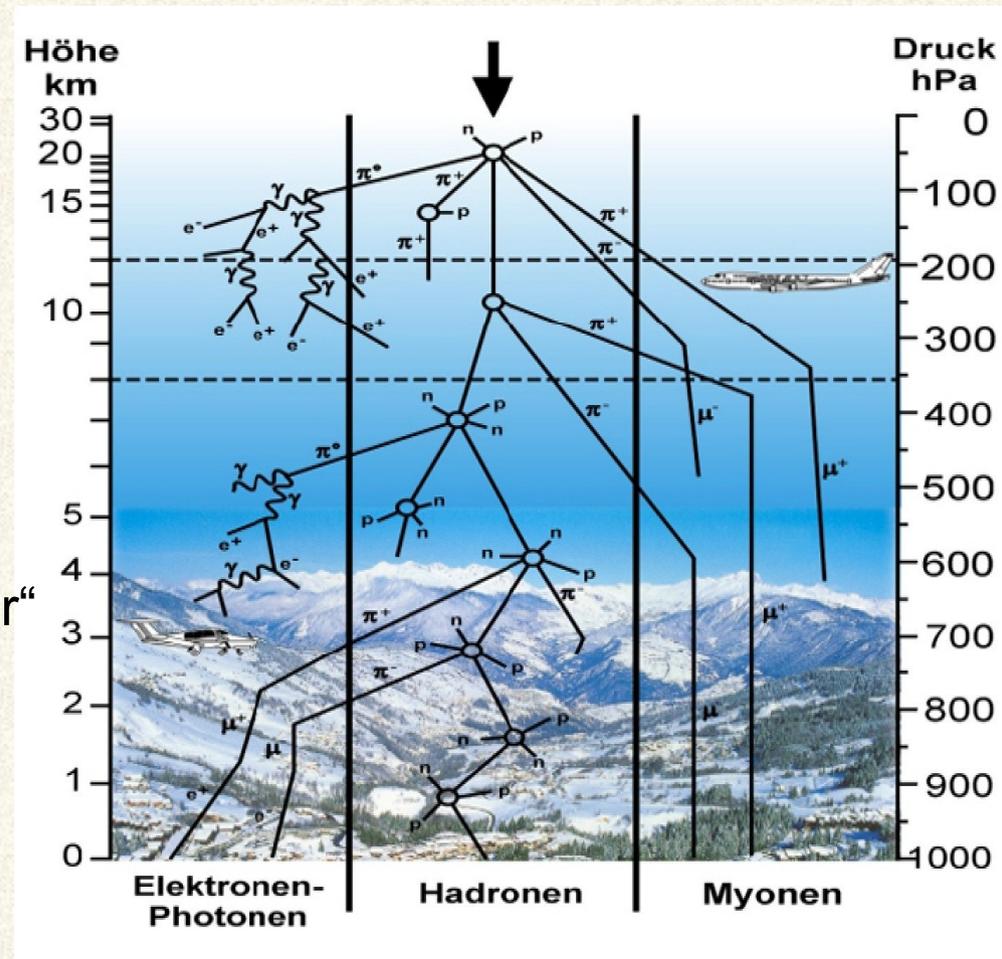
- Intensive UV-Strahlung

- Lebewesen auf der GRB-zugewandten Seite erhalten lethale Strahlungsdosis

- Andere Seite erlebt „kosmischen Winter“ durch chemische Änderung der Atmosphäre

- **Überleben in den Ozeanen möglich**

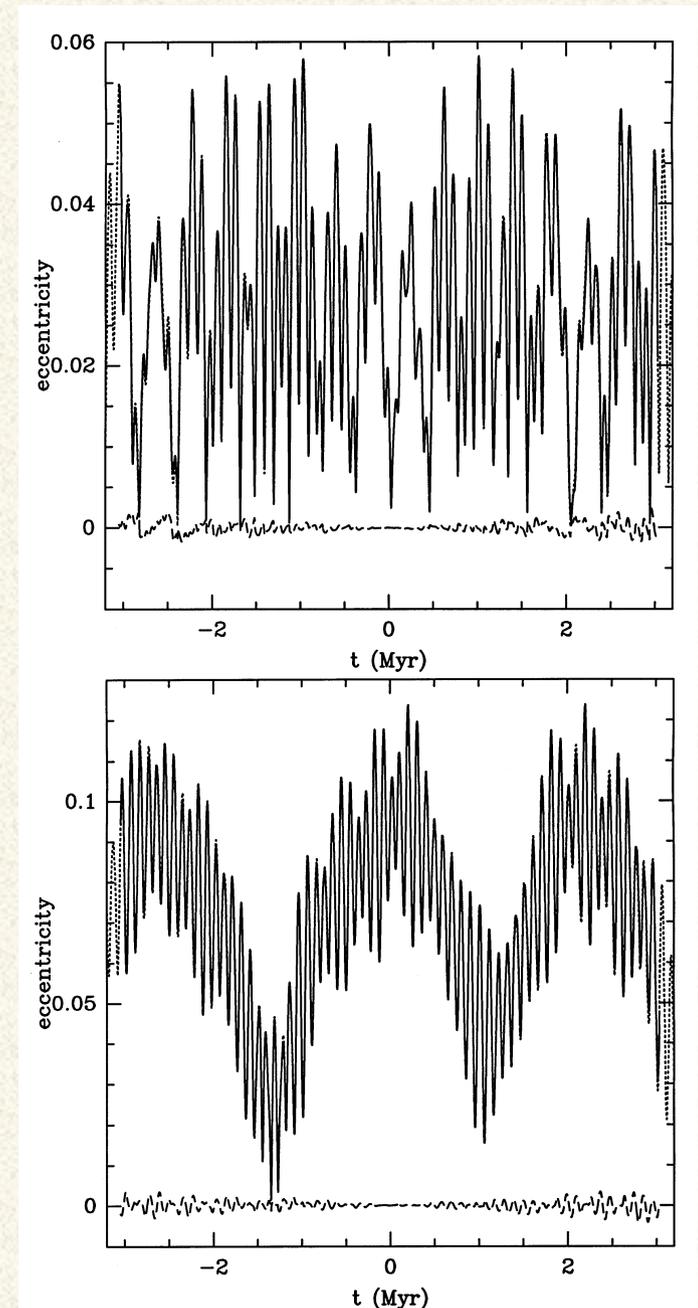
- **Wahrscheinliche Frist: ~ 100 Mio a**



Die Stabilität des Sonnensystems

- Sonnensystem ist Mehrkörperproblem
- Wechselwirkung mit Jupiter bzw. Nachbarplaneten
- Bewegungen keine einfachen Keplerbahnen
- Kepler-artige Bahnen nur auf Zeitskalen von < 1 Mio a

Berechnete Bahnen für Erde und Mars in 6 Ma

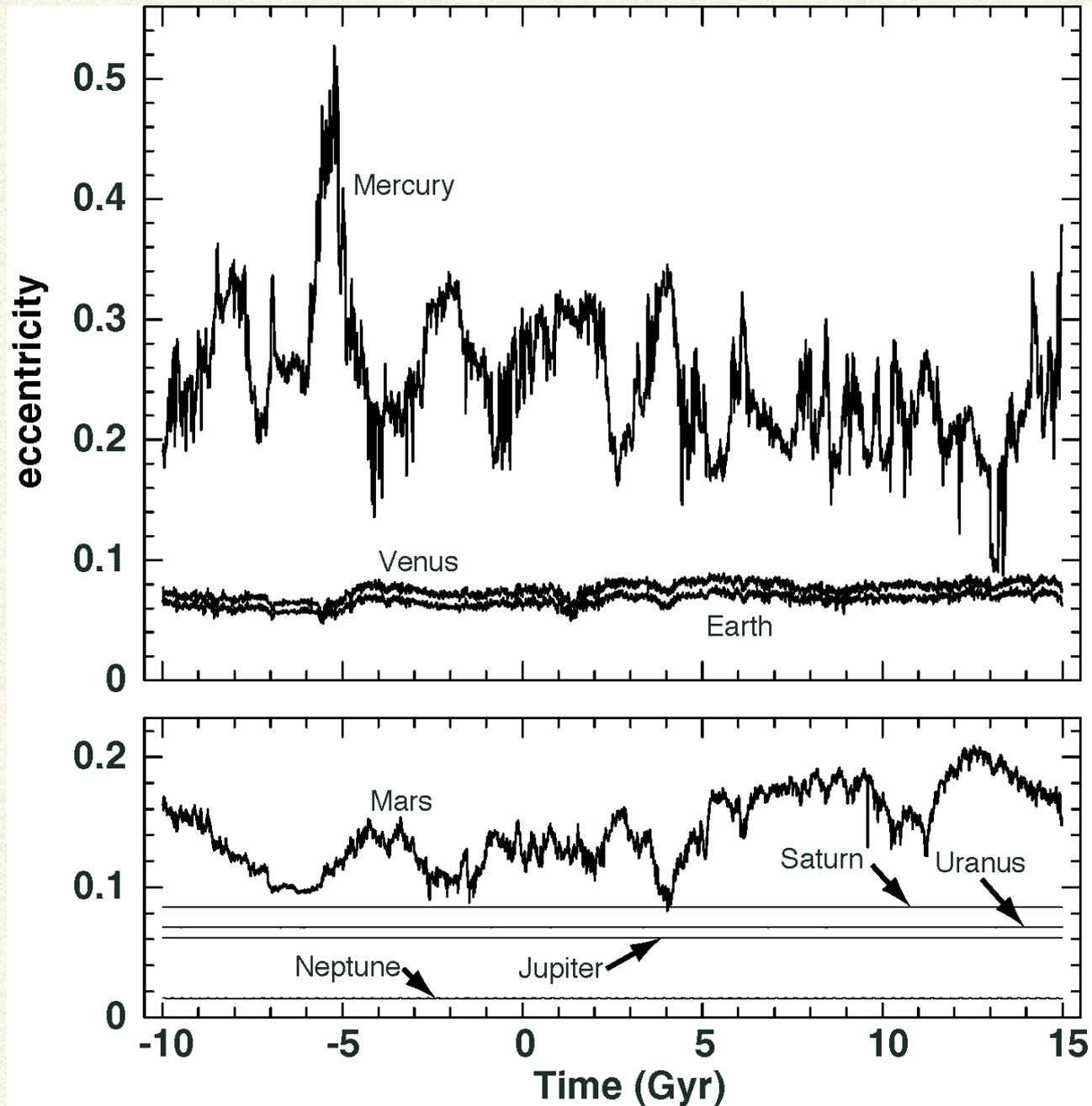


Die Stabilität des Sonnensystems

- Erdorbit:
 - Exzentrizität ändert sich mit Perioden von 100,000 und 400,000a
 - $\varepsilon = 0.01..0.05$
 - = Änderung der kleinen Halbachse von 99.95% auf 99.88% der großen Halbachse
 - erzeugt Kalt- und Warmzeiten
 - Nächste Eiszeit erwartet in 25000a
 - Effekt kleiner, aber wahrscheinlich länger anhaltend als antropogene globale Erwärmung

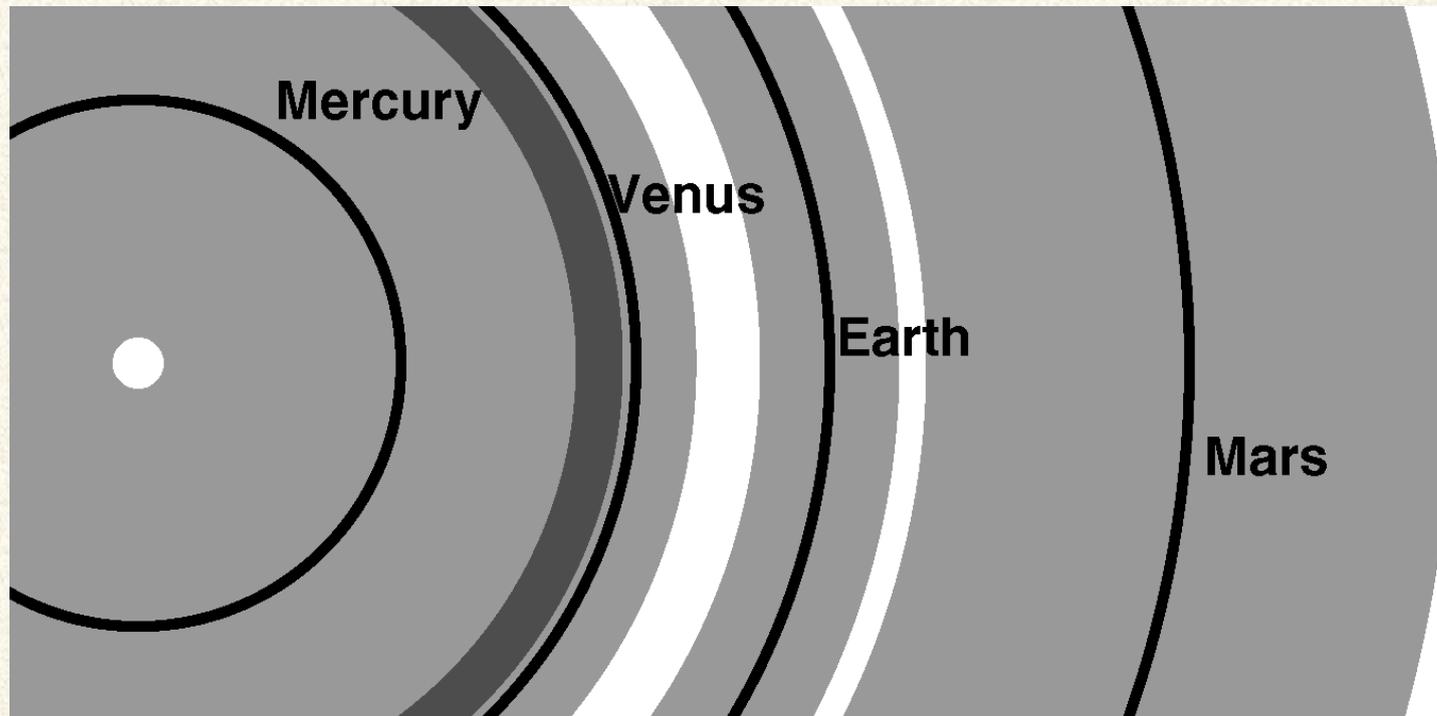
Die Stabilität des Sonnensystems

- Chaotisches Verhalten auf großen Zeitskalen
- Bahnberechnung nur bis ca. 200Mio a möglich
- Danach Beschreibung nur noch über Wahrscheinlichkeiten



Die Stabilität des Sonnensystems

Wahrscheinlichkeitsverteilung für die inneren Planeten



- **Merkur und Venus können kollidieren**
 - erzeugt vermutlich viele Bruchstücke
 - Größter Teil bleibt in inneren Orbits, aber Teil kreuzt Erdbahnradius
 - Erlaubt potentiell Kollision mit 100km Objekt

Deep Impact

- Asteroideneinschlag

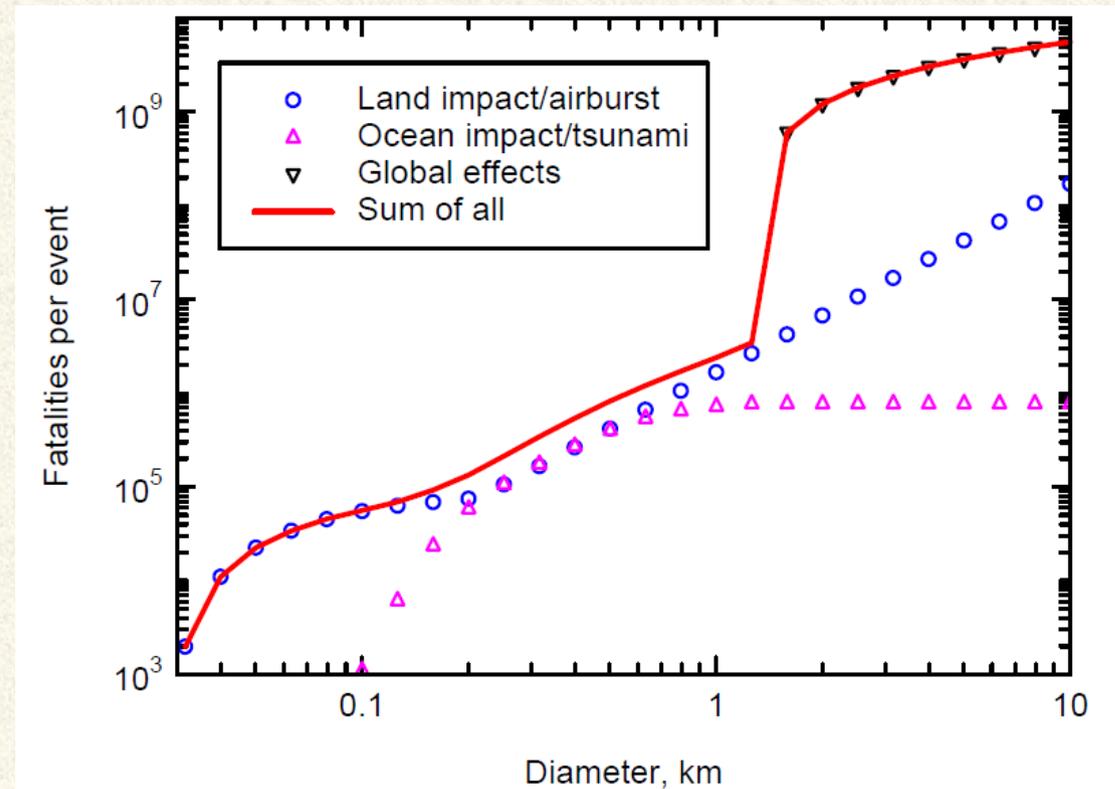


- Bsp: Einschlag von eines 10km-Objektes vor 66.04 Mio a
 - Chixculub-Krater mit 180km Durchmesser
 - Massensterben der Dinosaurier
 - Wahrscheinlich durch Verdunklung durch aufgewirbelten Staub

Deep Impact

Größe	Wirkung
1mm	Sternschnuppe
1m	Lichtball, Boden wird nicht erreicht
10m	Explosion in der Luft, Brocken erreichen Boden, Chelyabinsk 15.2.2013
100m	Energie einer H-Bombe, großflächige Verwüstung, Tunguska 1908
10km	Planetenweite Zerstörung, Massensterben, Chicxulub-Krater vor 66Mio a

- **Potentielle Opferzahlen:**
 - Nur Objekte mit Durchmessern ab ca. 100m sind gefährlich
 - Objekte mit mehr als 10km werden menscheitsbedrohend



Deep Impact

- Überwachung:

- Near-Earth-Object Programm der NASA

- Klassifikation als potenziell gefährliche Objekte (PHOs):

- $d > 150\text{m}$

- Annäherung

- $< 7.5\text{Mio km}$

Sentry Risk Table

- Removed Objects
- Introduction to Impact Monitoring
- Frequently Asked Questions
- Operational Notes

The following table lists potential future Earth impact events that the JPL Sentry System has detected based on currently available observations. Click on the object designation to go to a page with full details on that object.

Sentry is a highly automated collision monitoring system that continually scans the most current asteroid catalog for possibilities of future impact with Earth over the next 100 years. Whenever a potential impact is detected it will be analyzed and the results immediately published here, except in unusual cases where an [IAU Technical Review](#) is underway.

It is normal that, as additional observations become available, objects will disappear from this table whenever there are no longer any potential impact detections. For this reason we maintain a [list of removed objects](#) with the date of removal.

600 NEAs: Last Updated Feb 04, 2016

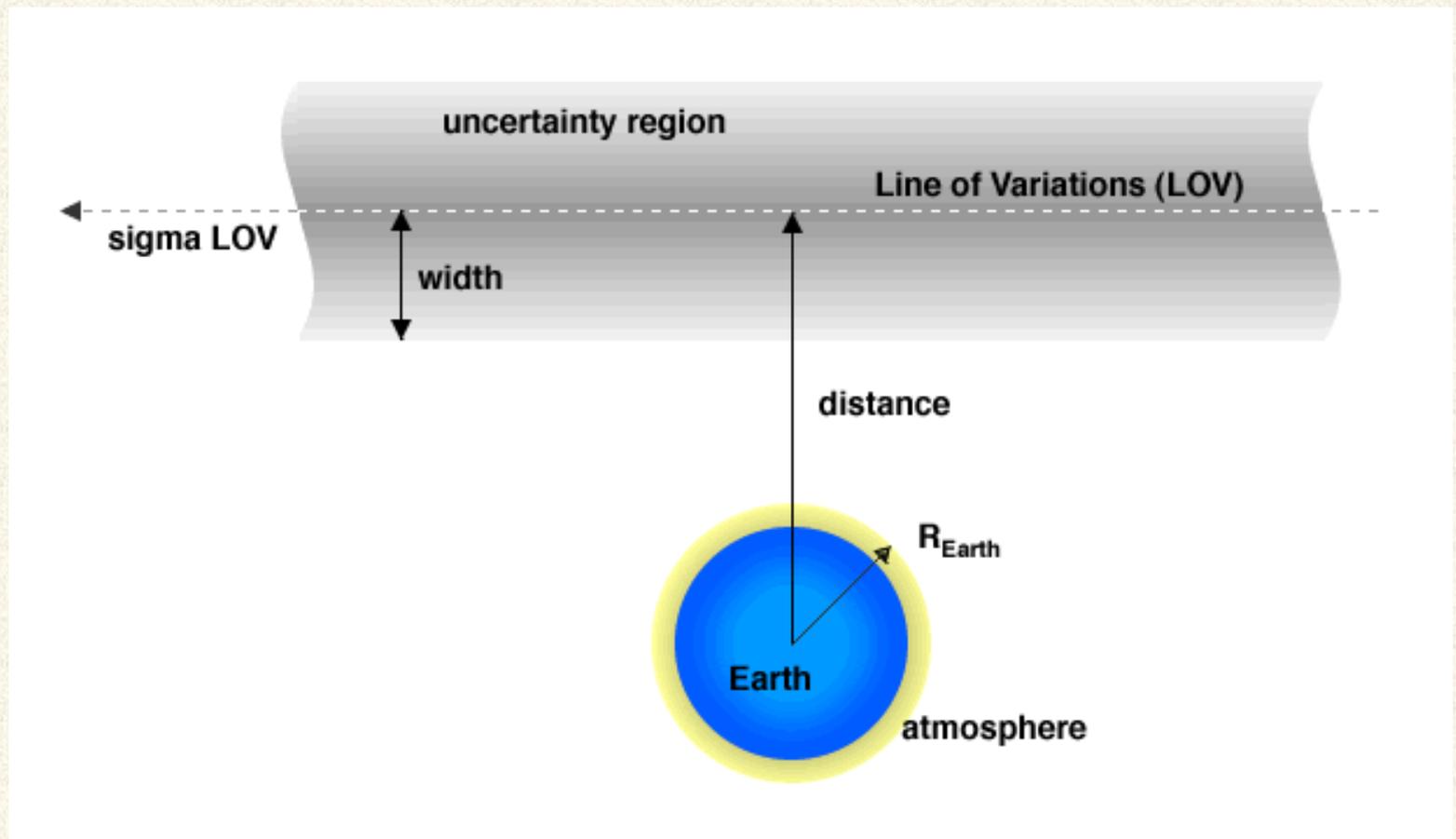
Sort by [Palermo Scale \(cum.\)](#) or by [Object Designation](#)

Recently Observed Objects (within past 60 days)

Object Designation	Year Range	Potential Impacts	Impact Prob. (cum.)	V_{∞} (km/s)	H (mag)	Est. Diam. (km)	Palermo Scale (cum.)	Palermo Scale (max.)	Torino Scale (max.)
2016 BT39	2019-2113	10	5.6e-08	11.42	19.6	0.410	-3.68	-3.86	0
2015 YJ	2042-2115	56	1.8e-03	16.35	28.3	0.008	-4.11	-4.34	0

Deep Impact

- **Überwachung:**
 - Problem
 - Unsicherheit der Bahnbestimmung und des Bahnverlaufes
 - Gibt Streubereich und damit nur „Wahrscheinlichkeit“ eines Treffers



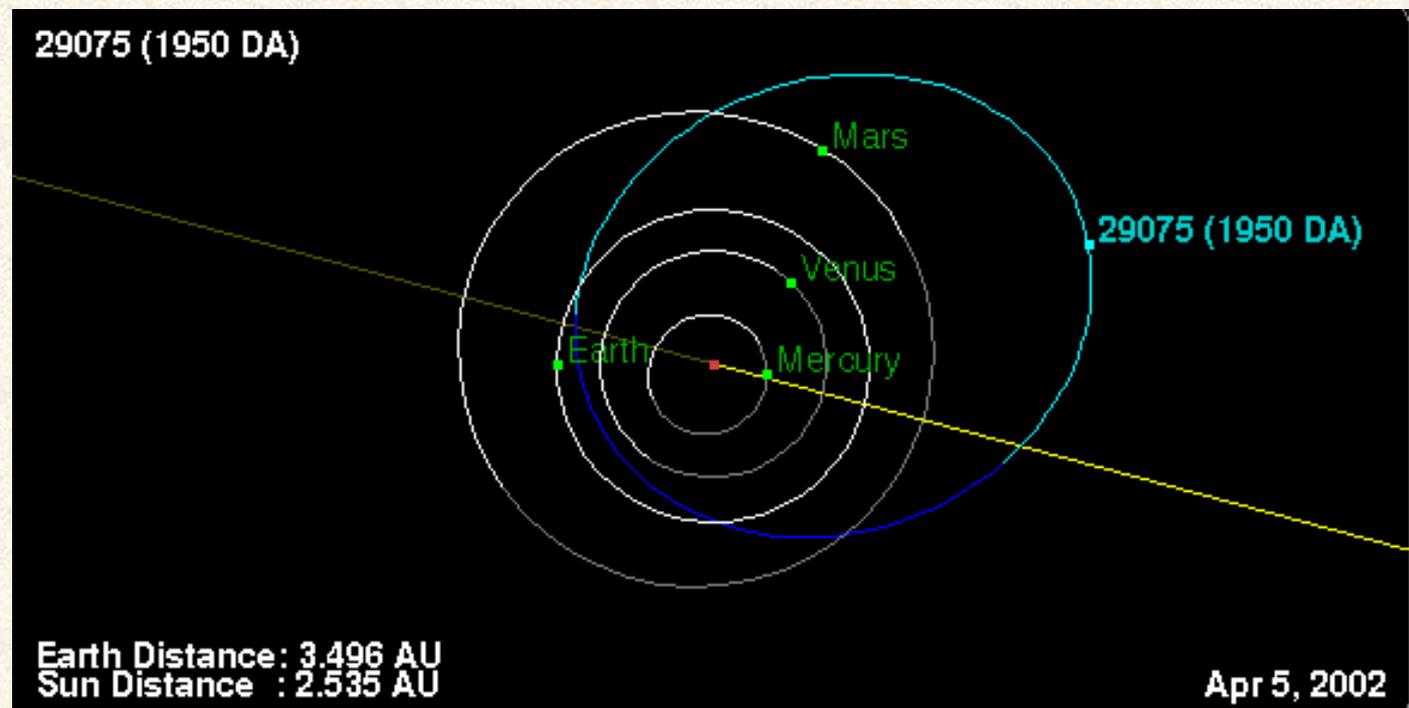
Deep Impact

- Nächste relevante Kandidaten:

- 2013 TX68
 - 28.9.2017
 - $p=1/250\text{Mio}$

- 1950 DA
 - 16.3.2880
 - $p=1/300$

- Einziges wirklich signifikant wahrscheinliches Ereignis über dem langjährigen Hintergrundniveau



Deep Impact

- Langfristige Wahrscheinlichkeiten
- Aus Geschichte der bisherigen Einschläge



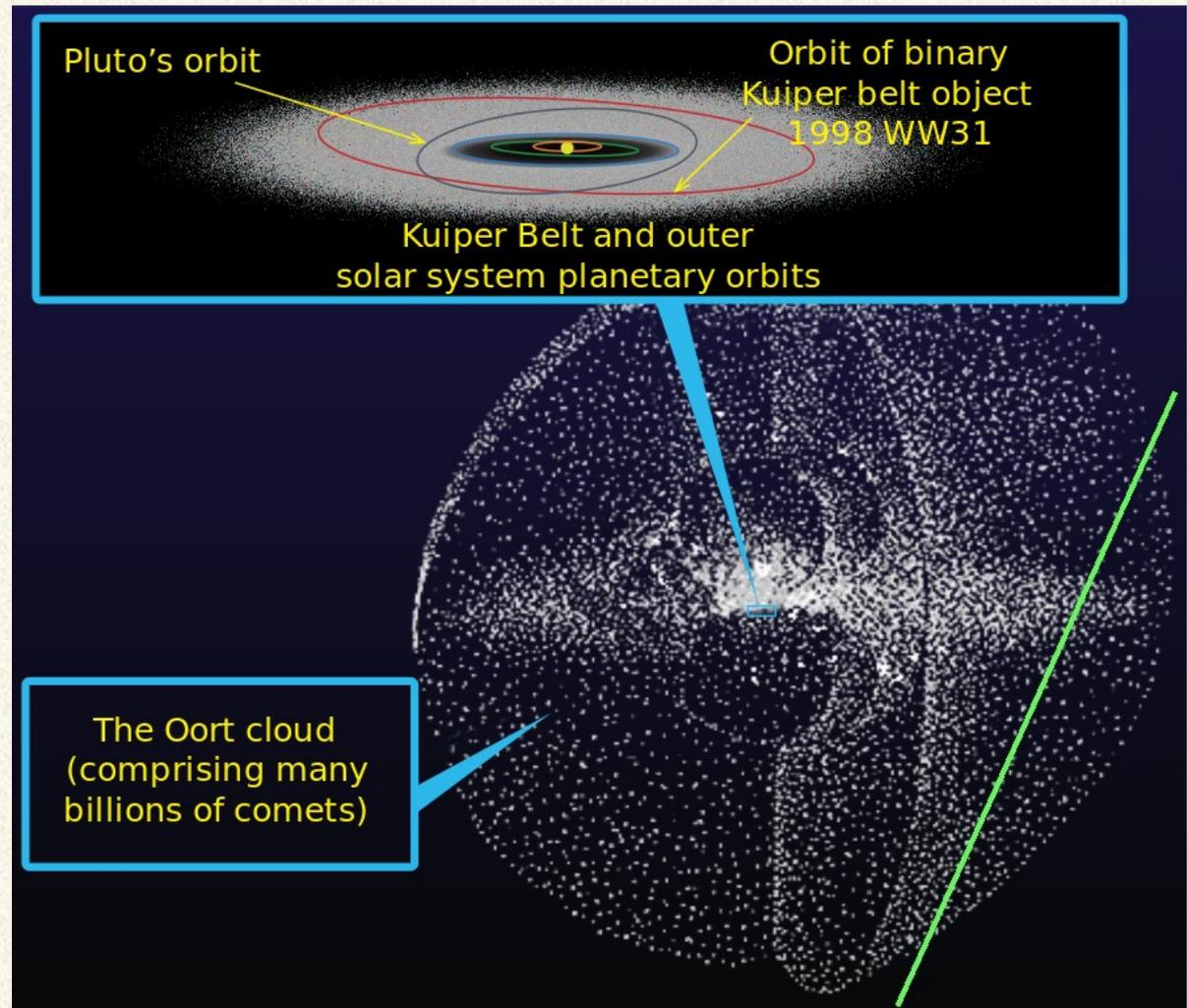
- Aus besser gespeicherter Kraterstatistik auf dem Mond

Größe	Häufigkeit
1mm	1 / 30s
1m	1 / a
10m	1 / 10a
100m	1 / 1000a
10km	1 / 100 Mio a

Externe Trigger

- **Gliese 710**

- Bewegt sich auf Sonnensystem zu
- Wird es in 1.36 Mio a in Entfernung von 1.11 ± 0.55 Lj passieren
 - Innerhalb der Oortschen Wolke

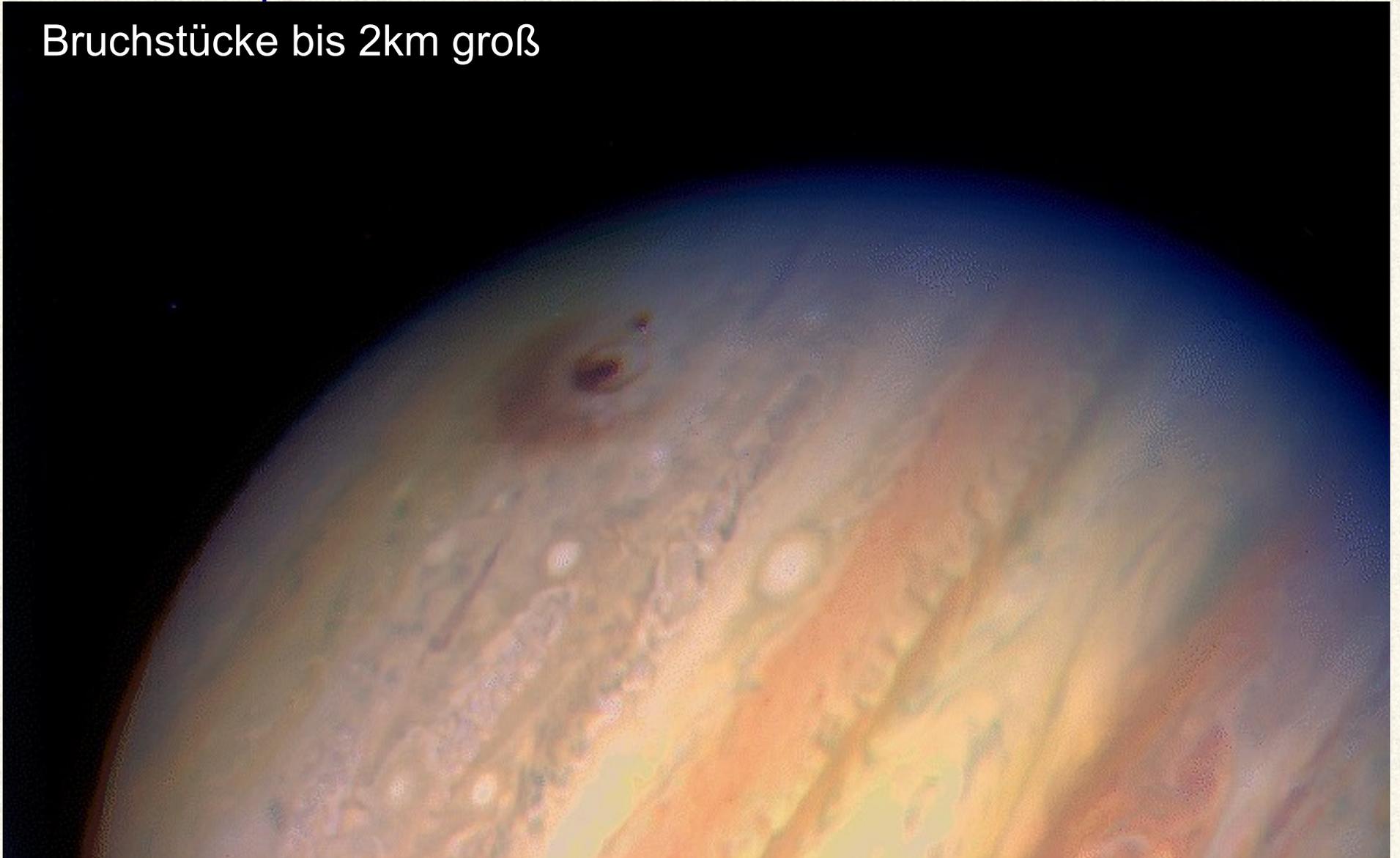


- Signifikante Störung des Solaren Gravitationspotentials
- Wahrscheinlicher Ursprung für viele Schauer von Kometen aus der Oortschen Wolke, einschließlich vieler Körper $> 1\text{km}$

Shoemaker-Levy 9

- Crash in Jupiter 1994

Bruchstücke bis 2km groß



Das große Bild

- Mischung von Gas und Sternen in der Milchstraße



M i l k y W a y G a l a x y

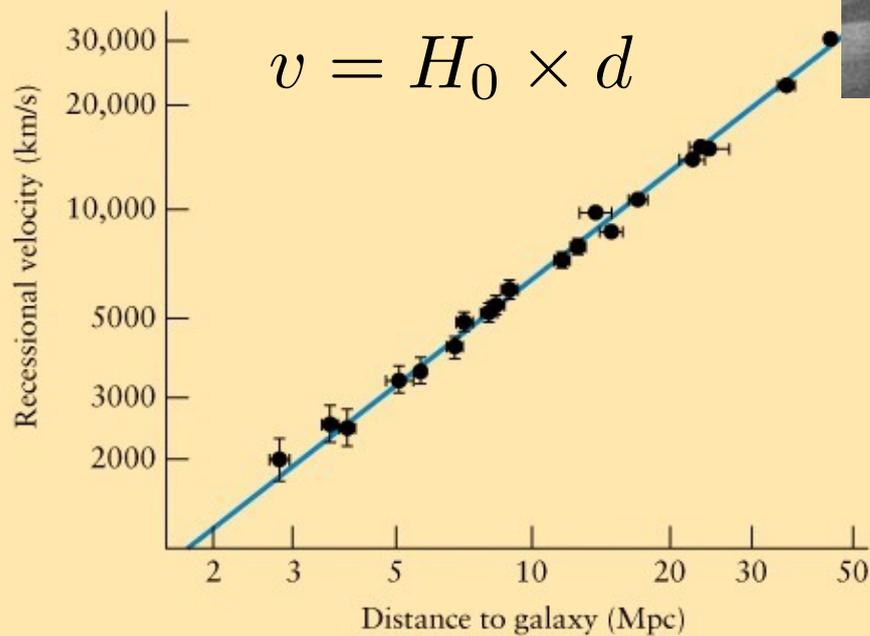
- Interstellares Gas kollabiert unter dem Eigengewicht, bildet neue Sterne
- Planetare Nebel und Supernovae verwandeln Sternmaterial wieder in interstellares Gas

→ **Kosmischer Kreislauf**

Kosmologie

Edwin Hubble (1920):

- Alle Galaxien fliegen von uns weg; umso weiter weg, desto schneller.



$$H_0 = 71 \text{ km/s / Mpc}$$

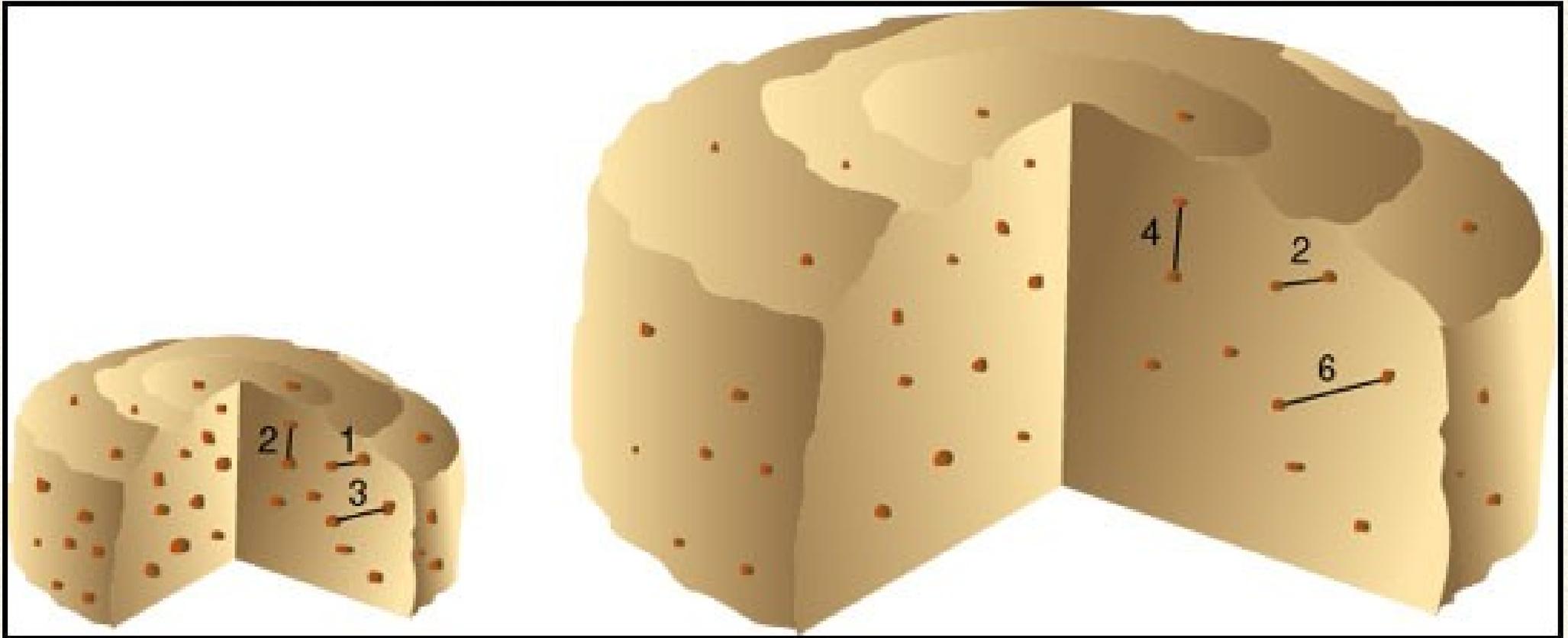
$$= \frac{71 \text{ km/s}}{1000000 \times 3.1 \times 10^{13} \text{ km}}$$

$$= 2.3 \times 10^{-18} \text{ 1/s}$$

$$= 1/13.8 \text{ Mrd a}$$

Erklärung

- Expansion des Universums



Hubble-“Konstante“ bedeutet konstante Expansionsgeschwindigkeit

Konsequenz

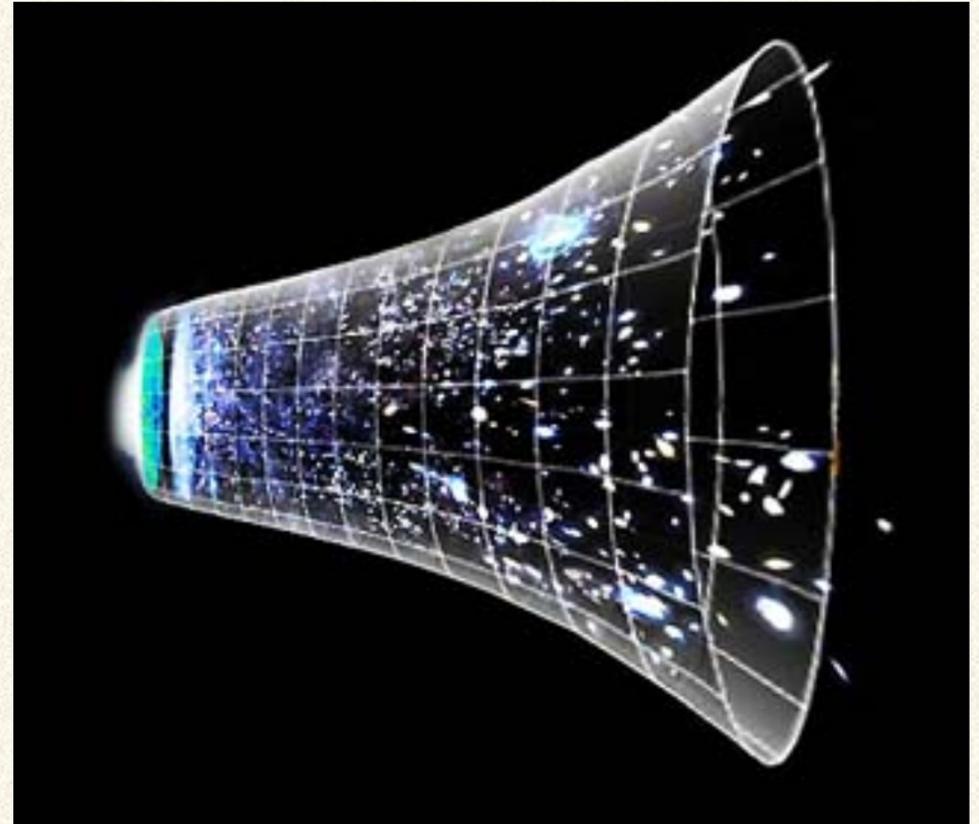
- Big Bang

Wenn alle Galaxien voneinander wegfliegen, müssen sie in der Vergangenheit unendlich dicht konzentriert gewesen sein

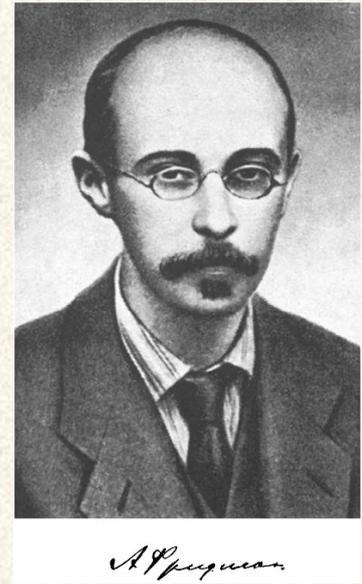
- Zeit die nötig war, um die aktuelle Größe zu erreichen:

$$1/H_0 = 13.8 \text{ Mrd a} \quad \rightarrow \text{Alter des Universums}$$

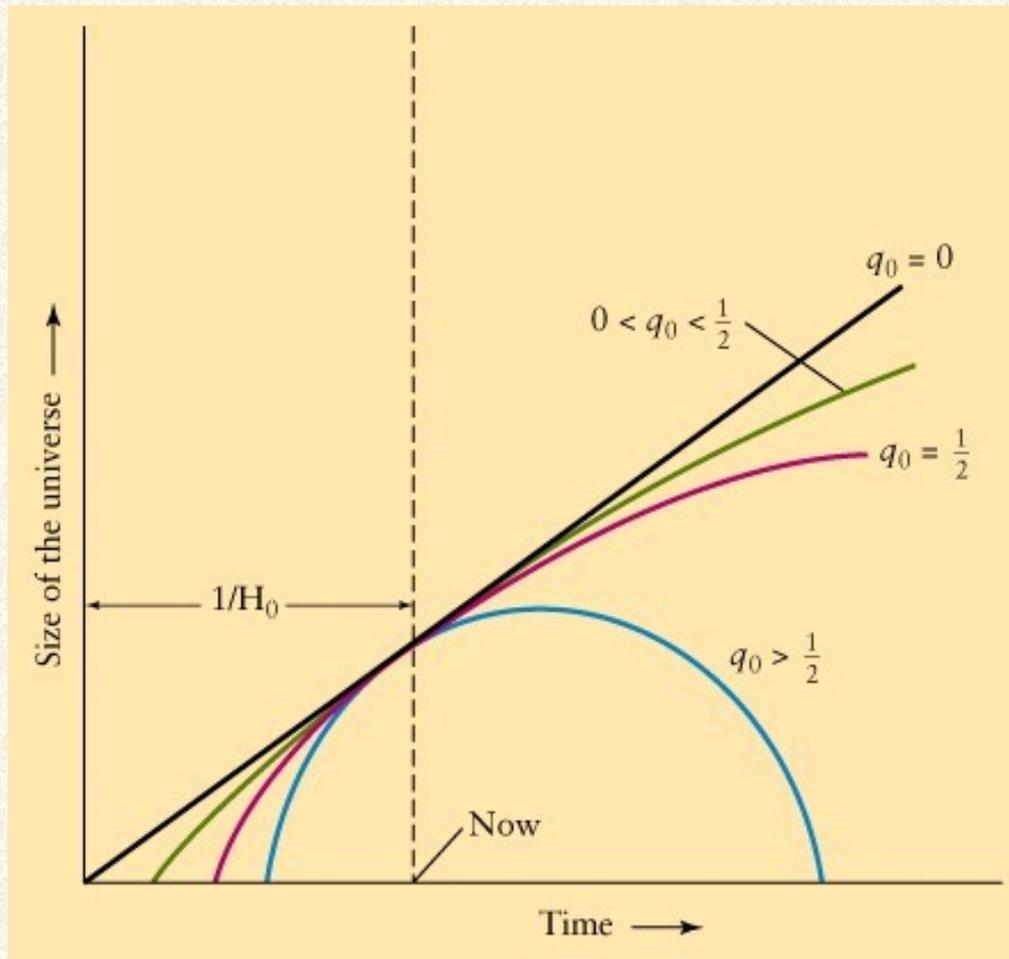
Annahme: Expansionsgeschwindigkeit ist/war konstant!
Aber: Gravitation sollte die Expansion verlangsamen



Friedmann-Universen



- Lösungen der Einstein-Gleichungen für verschiedene Massedichten
- Massedichte \rightarrow Bremsfaktor $q_0 =$ Abweichung von konstanter Hubble-Expansion

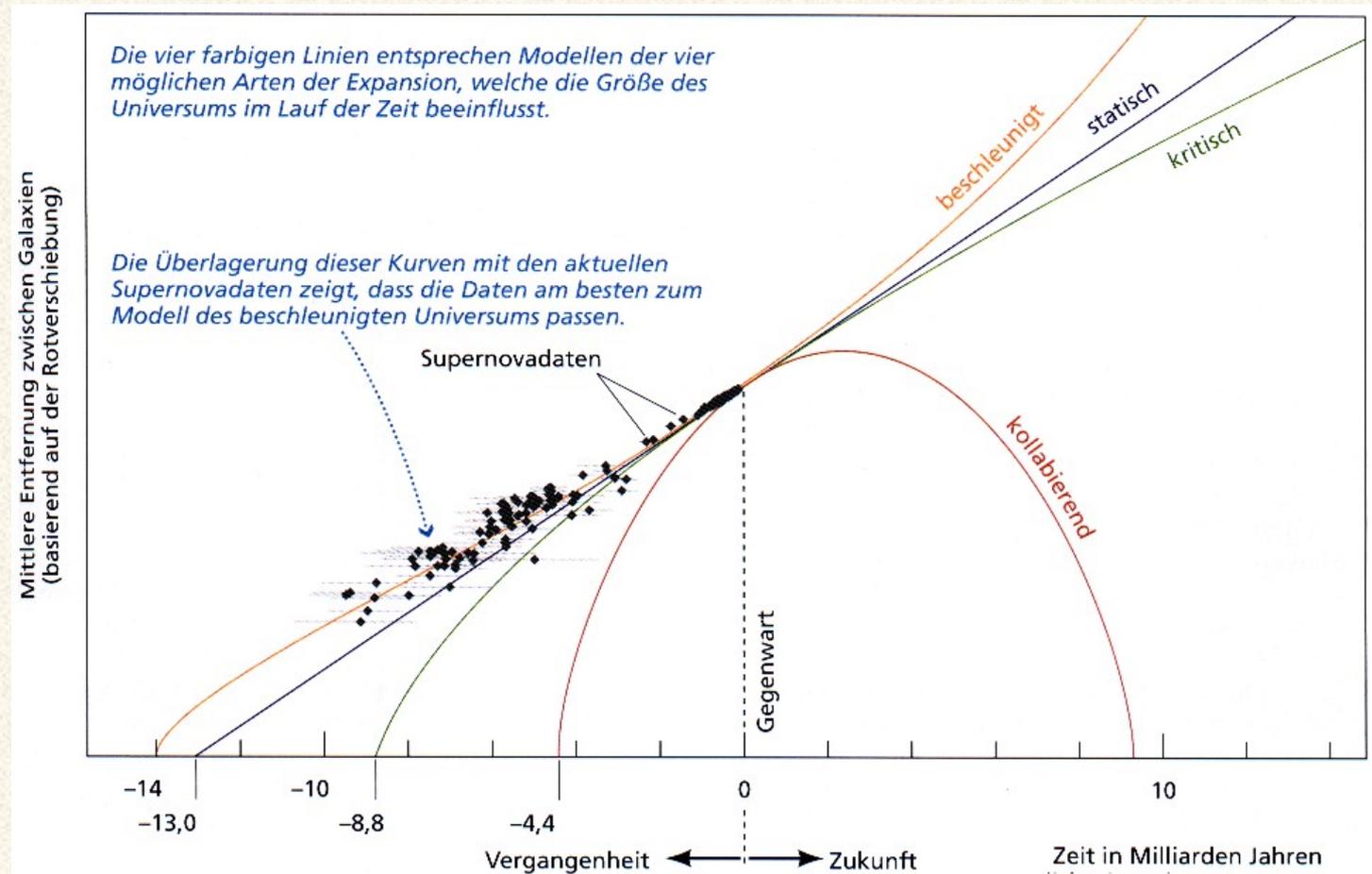


- $q_0 = 0 \rightarrow H$ konstant
- $q_0 = \frac{1}{2} \rightarrow$ kritische Dichte
$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} = 9.5 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3 = 5.7 H/\text{m}^3$$
- $q_0 > \frac{1}{2} \rightarrow$ “big crunch”
- $0 < q_0 < \frac{1}{2} \rightarrow$ ungebundene Expansion
- $q_0 < 0 \rightarrow$ extra Beschleunigung

Friedmann-Universen

Messungen mit
Supernova Typ 1a
Entfernungen:

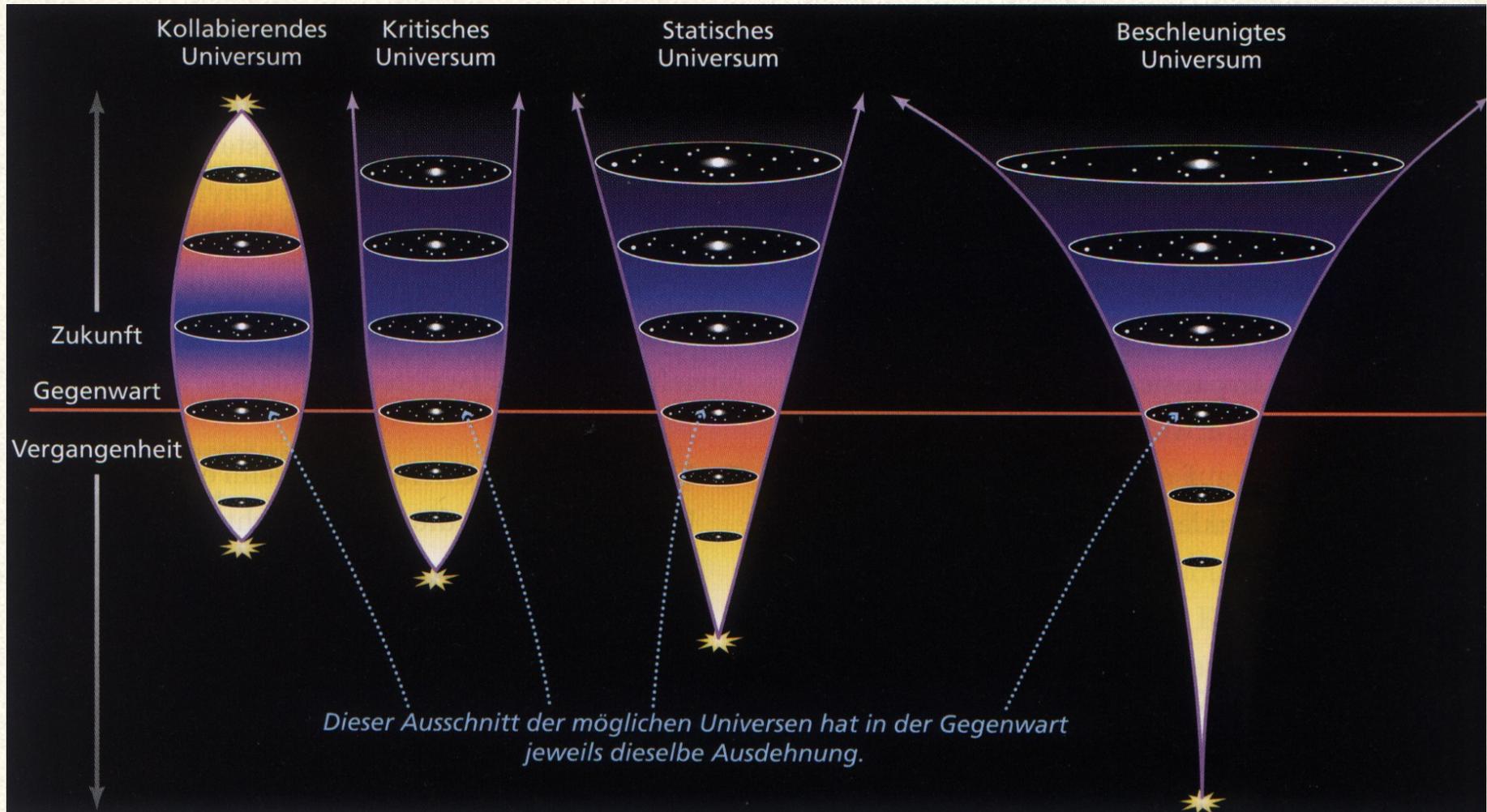
(Nobelpreis 2011)



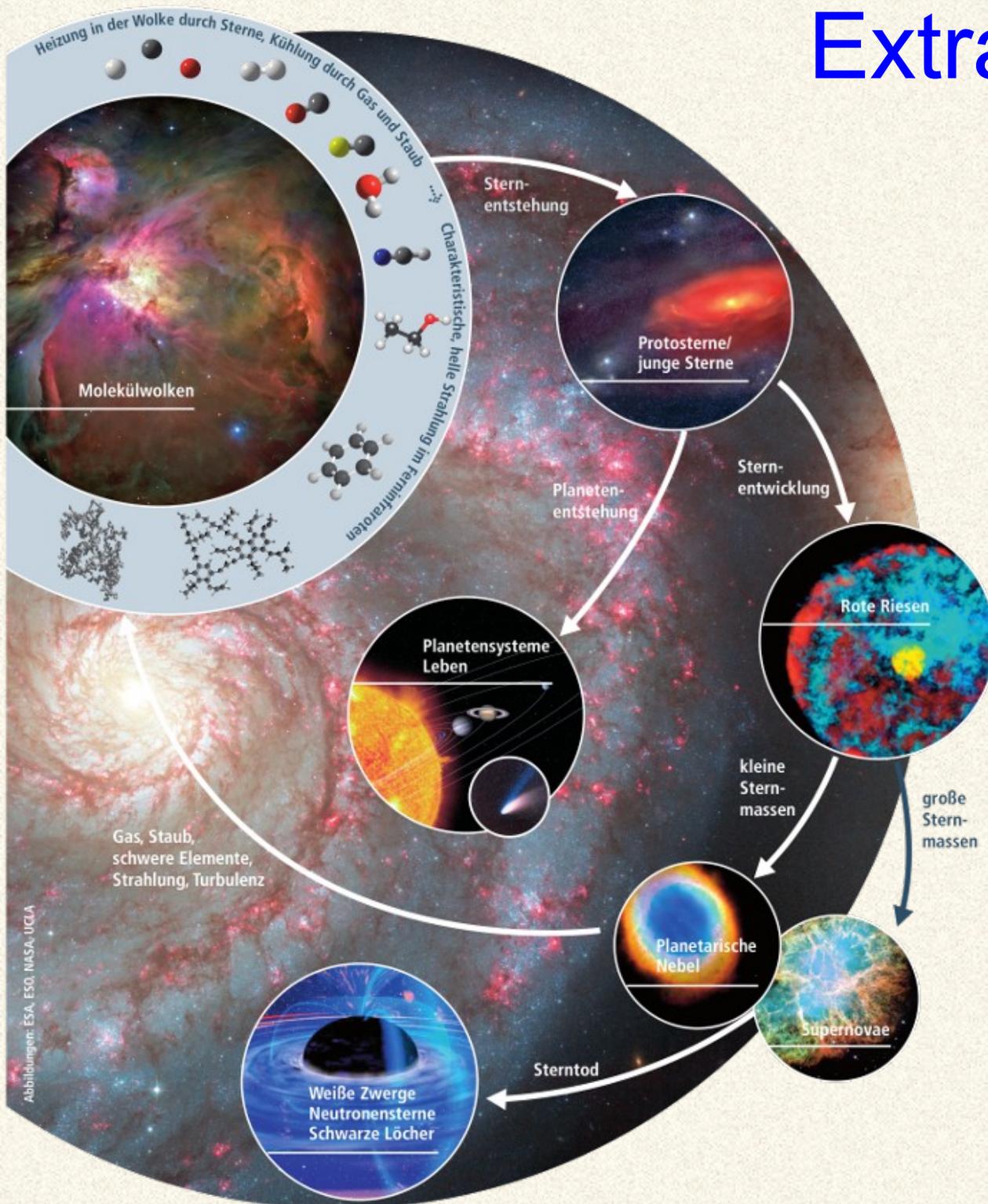
- Die Expansion des Universums ist beschleunigt statt gebremst.
- Ein zusätzlicher innerer Druck muss das Universum aufblähen.
→ **Dunkle Energie**
- Natur: unbekannt

Status

- Big Crunch kann ausgeschlossen werden.
- Weitere mindestens leicht beschleunigte Expansion des Universums



Extrapolation



- Jeder Stern-Gas-Stern-Zyklus entfernt Materie aus dem kosmischen Kreislauf
 - Braune Zwerge
 - Weiße Zwerge
 - Neutronensterne
 - Schwarze Löcher
- Die Sternentstehungsrate nimmt ab.

Extrapolation

- Die Sternentstehungsrate nimmt ab.
- Nach wenigen Billionen Jahren (10^{12} a) ist praktisch alles interstellare und intergalaktische Gas verbraucht.
- Ca. 1 Billion Jahre später verlöschen auch die masseärmsten Sterne. → **Es wird dunkel.**
 - Keinerlei permanente Entropie- (Energie-)Quellen mehr nutzbar
- **Sternstöße:** Weiße Zwerge stoßen im Mittel alle 10^{15} a
 - Kurzzeitige γ -Strahlen-Ausbrüche als Energiequellen
 - nach 100000 Stößen (10^{20} a) sind nur noch schwarze Löcher übrig

Extrapolation

Restmaterie:

- Vorhersage der Grand-Unified-Theories:
 - Protonen sind nicht stabil, sondern zerfallen mit einer Halbwertszeit zwischen 10^{33} und 10^{40} a
 - Umwandlung aller Materie in subatomare Teilchen, Strahlung und Neutrinos

Schwarze Löcher:

- Verdampfen an Oberfläche (Hawking Strahlung):
 - Massereichste Schwarze Löcher leben 10^{100} a

In 10^{100} a nur noch Photonen und subatomare Teilchen.

→ **Ende aller Wechselwirkungen = Ende der Zeit**

Die relevante Zukunft?

- **Menschengemachte Selbstzerstörung:**
 - **Pandemien** durch
 - Menschengemachte Viren
 - Neue Ausbreitungswege durch globale Erwärmung
 - Geschwächte Abwehr durch Reduktion der Biodiversität und Verteilungskämpfe
 - Übernahme der Entwicklung durch **Robotik**
 - Hängt kritisch von Energieeffizienz ab
 - Mensch bleibt im “Zoo” der alten Spezies
- **Alternative Szenarien:** Maarten Keulemans “Exit Mundi”

