

# Exit Mundi



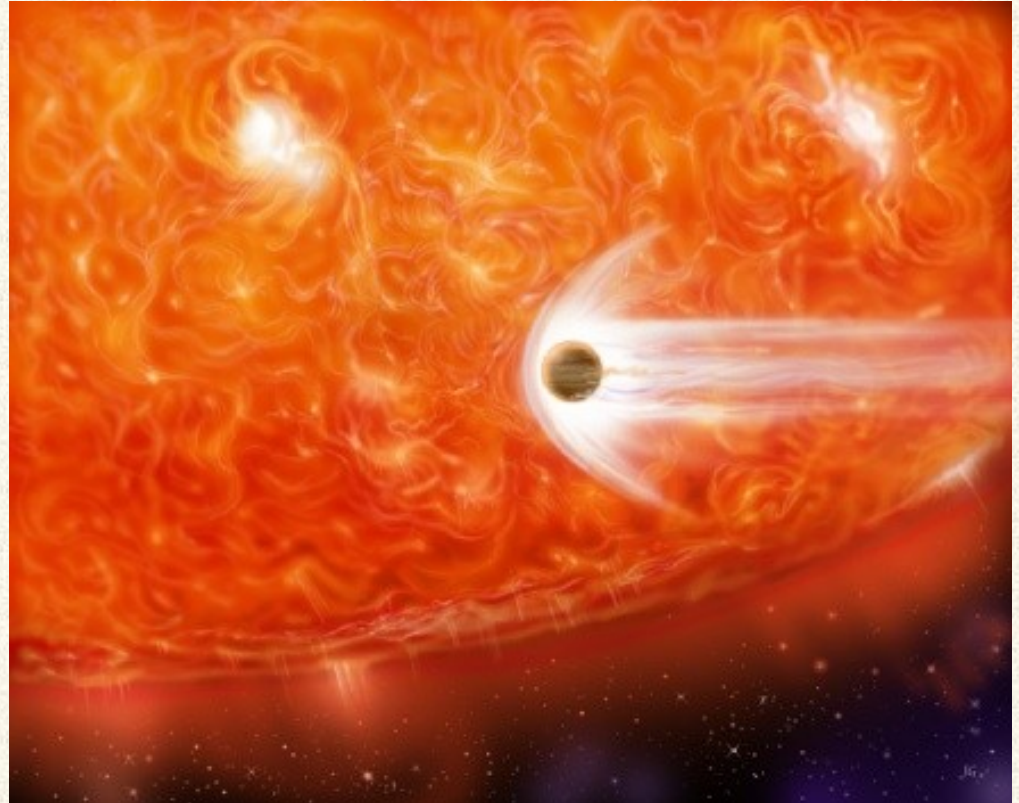
Samuel Colman: "Vor dem Weltuntergang" (1838)

## 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

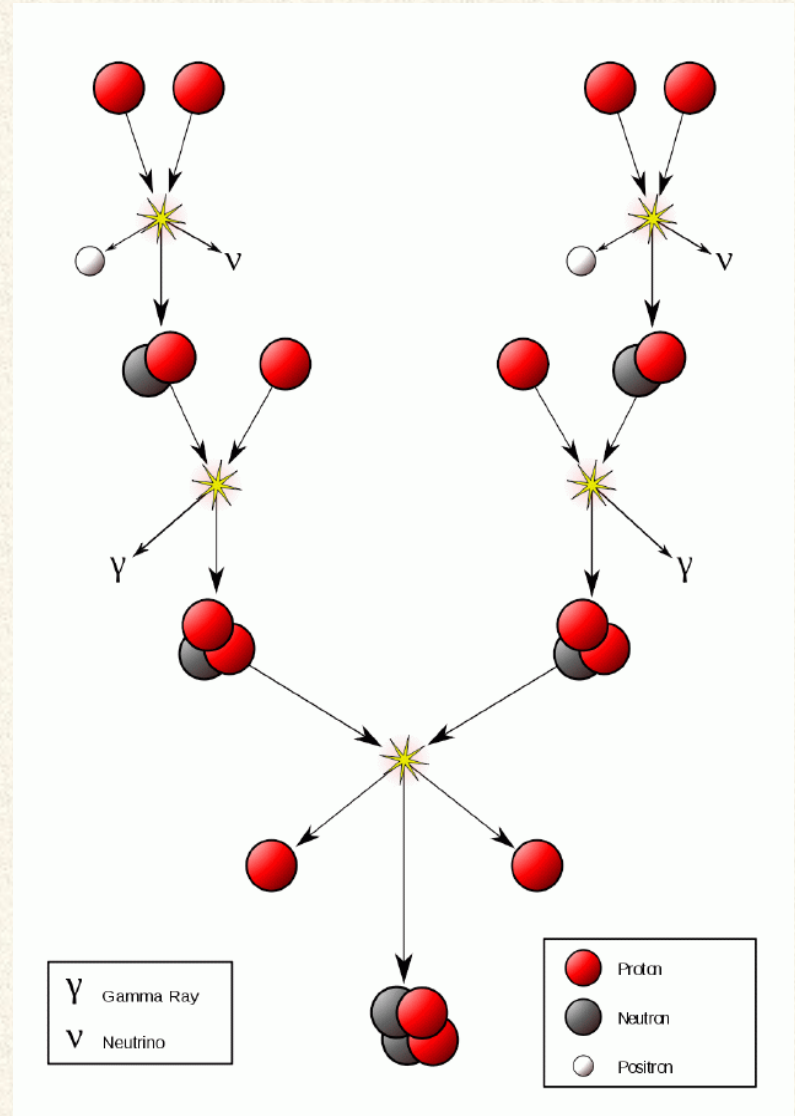


# Die Sonne als Todbringer



## Energiequelle:

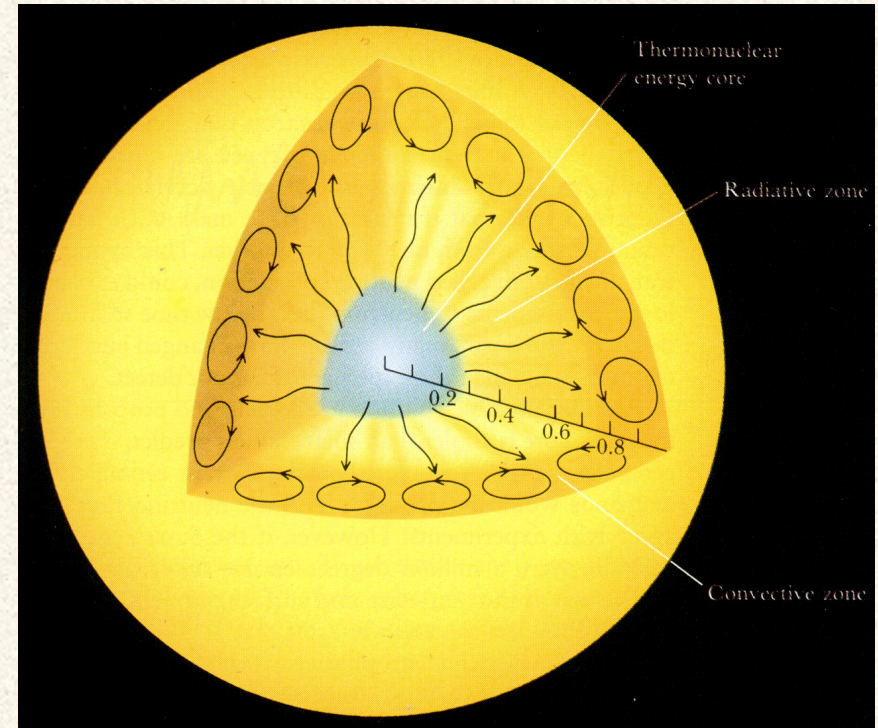
- Kernfusion im Kern:  $4 \text{ H} \rightarrow \text{He}$
- Fusion wandert langsam nach außen
- Wasserstoff verbraucht in 5 Mrd. a



# 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  $\text{CO}_2$  aus Atmosphäre (Ausfällung als Karbonate)
    - Normale Photosynthese fällt aus,
      - keine  $\text{O}_2$ -Produktion durch Pflanzen mehr
    - Pilze und Bakterien überleben

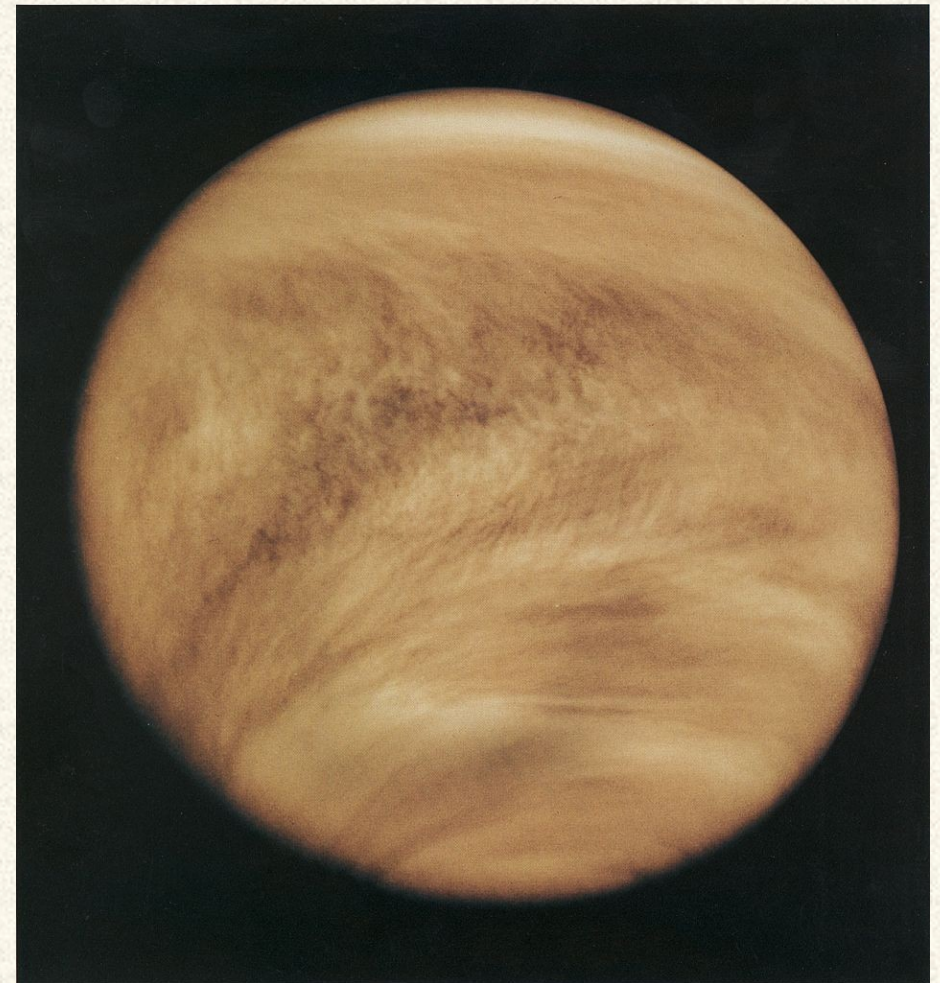


# Die Sonne als Todbringer

## 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

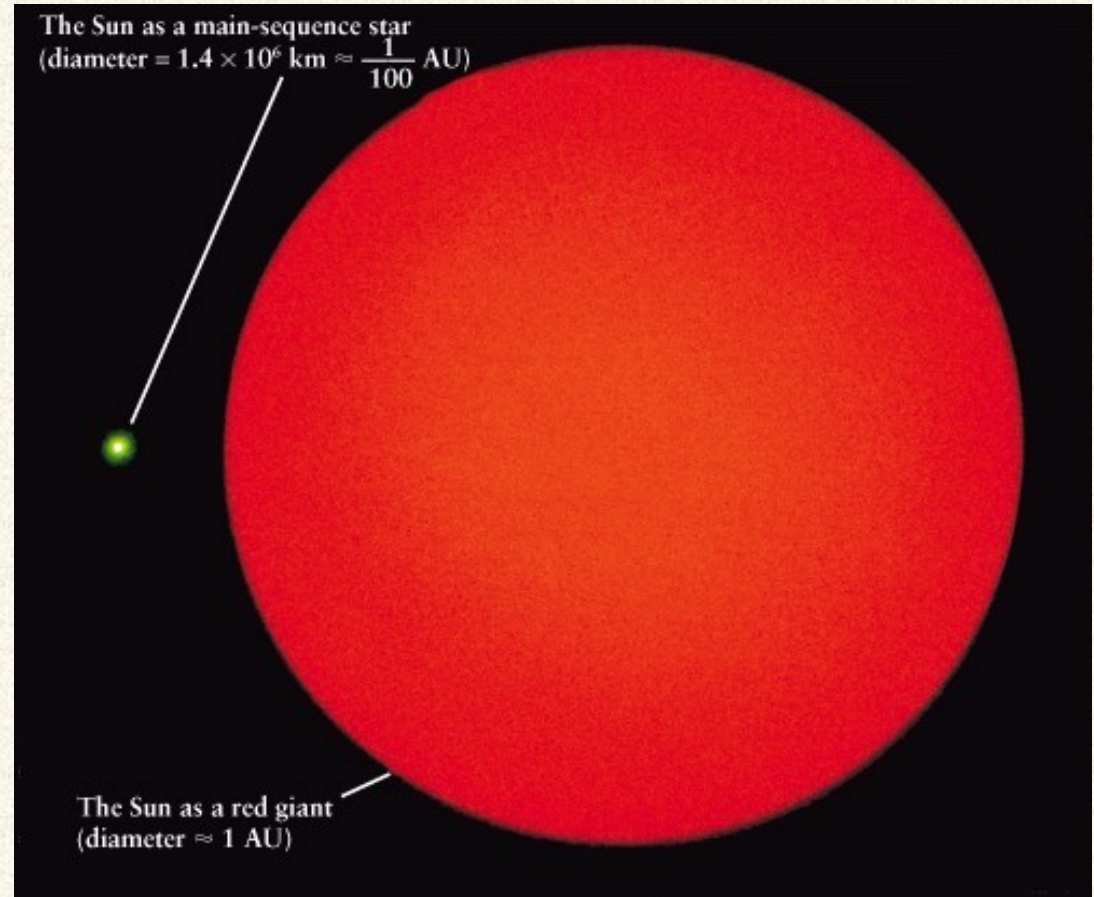
→ Venus-Bedingungen



# 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



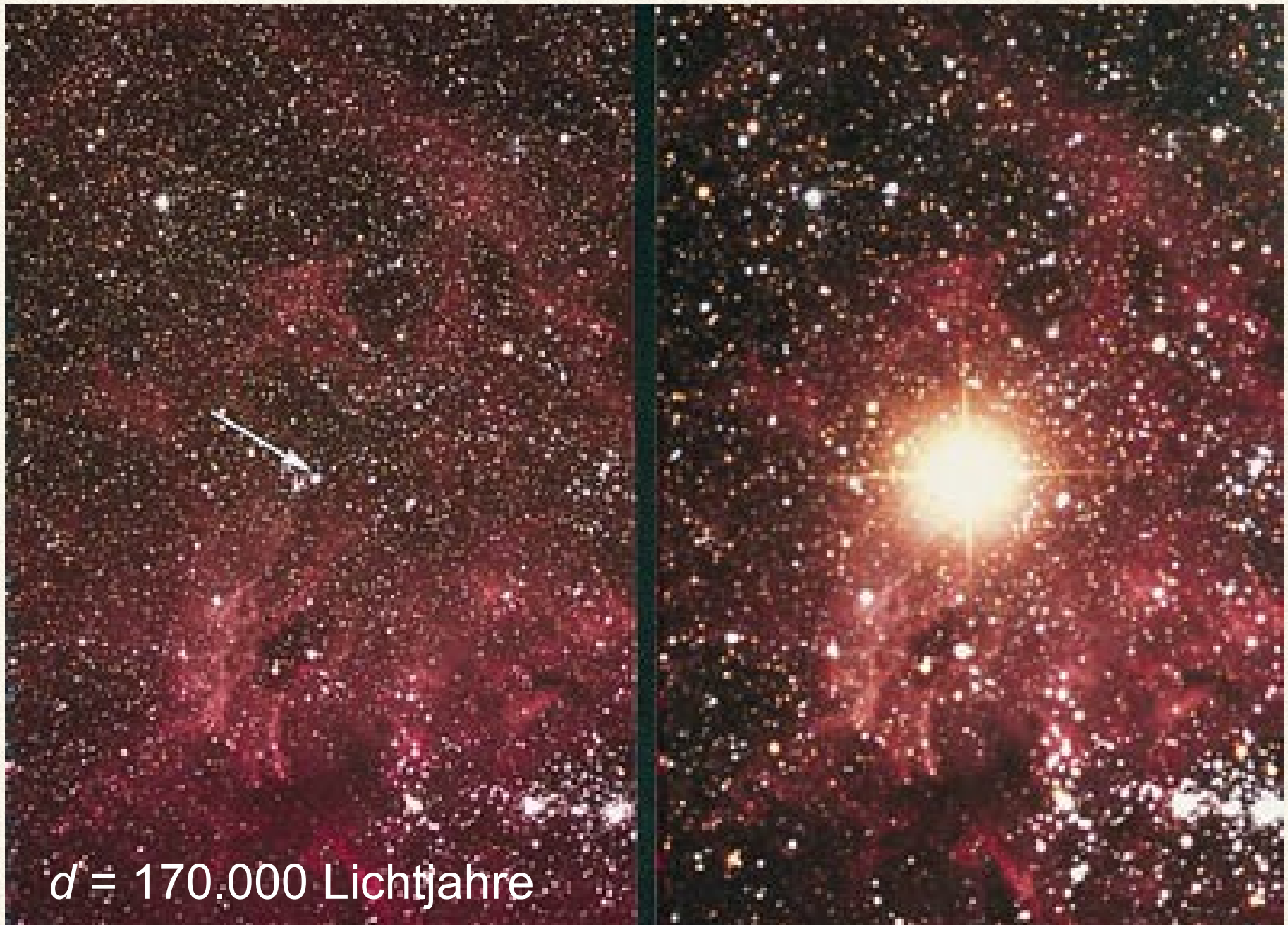
# Weitere Sternentwicklung

- 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:  $\gamma$ -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

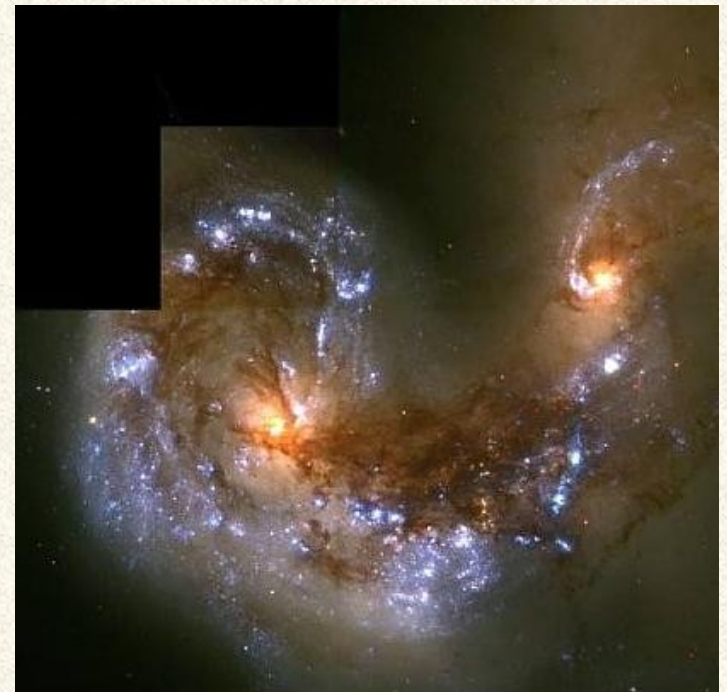


# Supernovae

- **Andere Kandidaten:**  $\rho$  Cassiopeiae,  $\eta$  Carinae, RS Ophiuchi, U Scorpii, VY Canis Majoris, Betelgeuse, Antares,  $\gamma$  Velorum, WR 104, Quintuplet Cluster: alle > 3000 Lichtjahre Entfernung

**Aber:** Induzierter Star-Burst möglich:

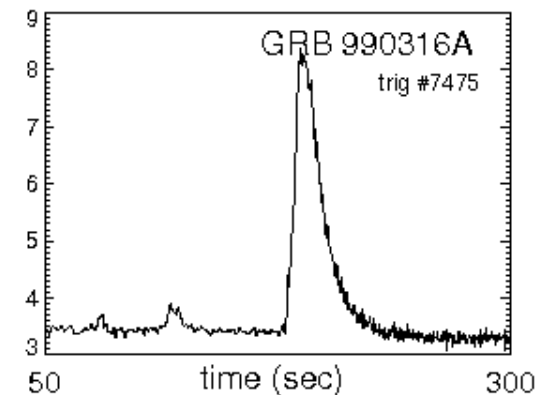
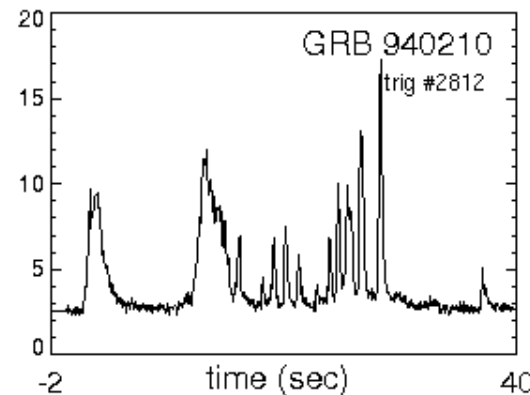
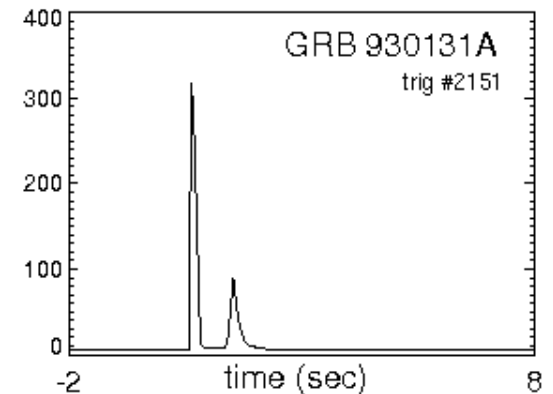
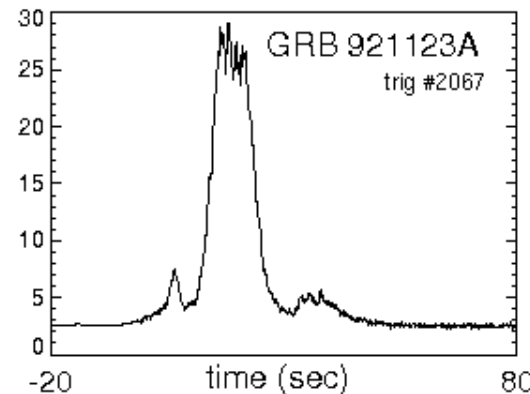
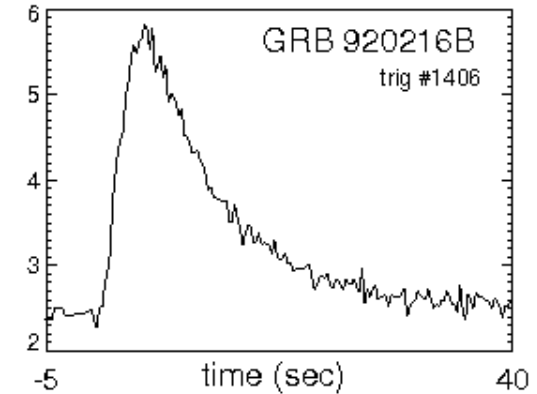
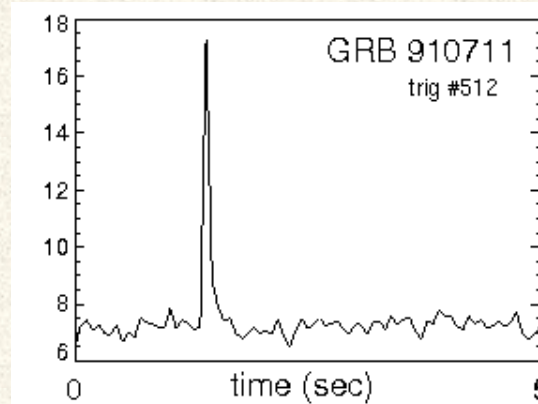
- Verschmelzen der Milchstraße mit Nachbargalaxien
  - Smith's Wolke: 40 Mio a (gering)
  - Andromeda: 4 Mrd a
- Erhöhte lokale Sternenstehungs- und Supernova-Rate
- Unklar, wo die Sonne nach Stoß mit Andromeda endet
  - Kann nahe am Zentrum sein, oder auch herausgeschleudert



# $\gamma$ -Strahlenausbrüche (GRBs)

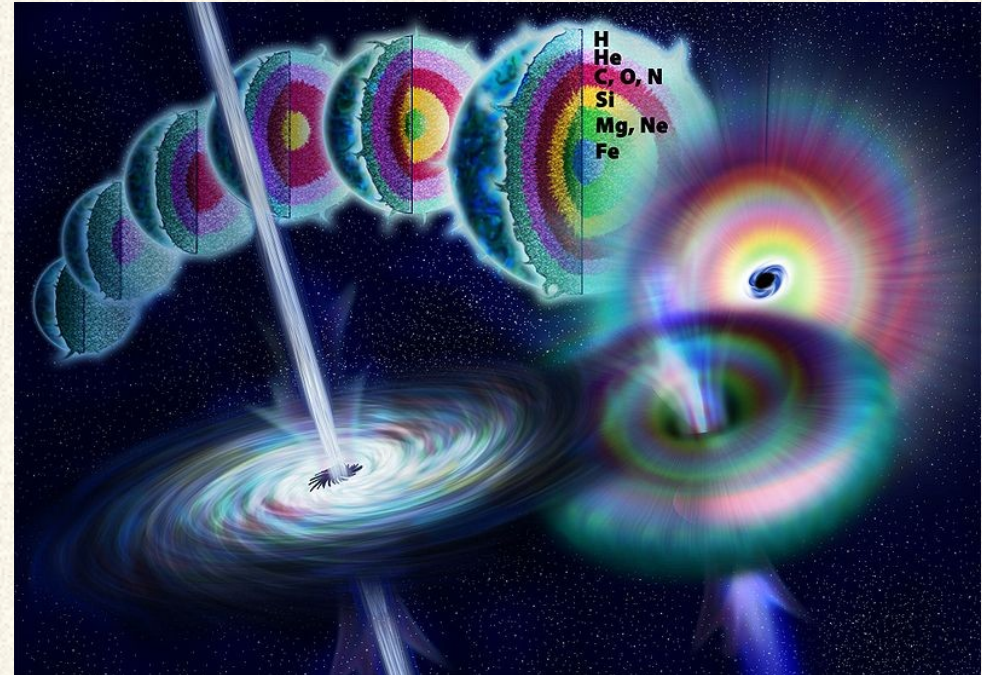
Energetisch leistungsstärkste  
Ereignisse im Universum:

- $10^{44} - 10^{47} \text{ J} \cong \frac{1}{2000} - \frac{1}{2} M_{\odot}$
- Wahrscheinlich gebündelt
- Kurzzeitig
- Hauptausstoß in  $\gamma$ -Strahlen
- 3 Typen je nach Dauer
  - Kurze GRBs:  $< 2\text{s}$
  - Lange GRBs typisch  $100\text{s}$
  - Ultralange GRBs: Stunden
- Energiequelle: Gravitation/  
Kollaps



# $\gamma$ -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

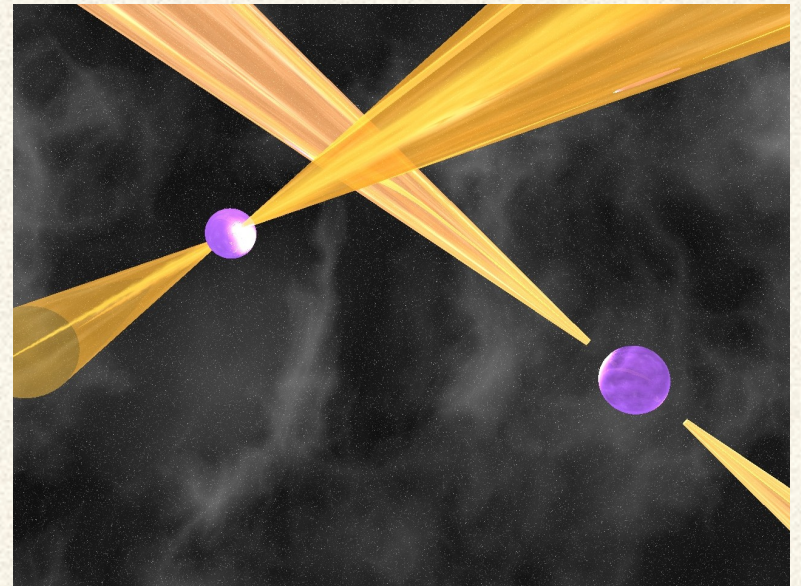


# $\gamma$ -Strahlenausbrüche (GRBs)

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

Nächster Kandidat: **PSR J0737-3039**

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



# $\gamma$ -Strahlenausbrüche (GRBs)

- **Wirkung**

- $\gamma$ -Strahlung reagiert hauptsächlich mit den Atomen der Hochatmosphäre

- Erzeugt sekundäre Teilchen

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

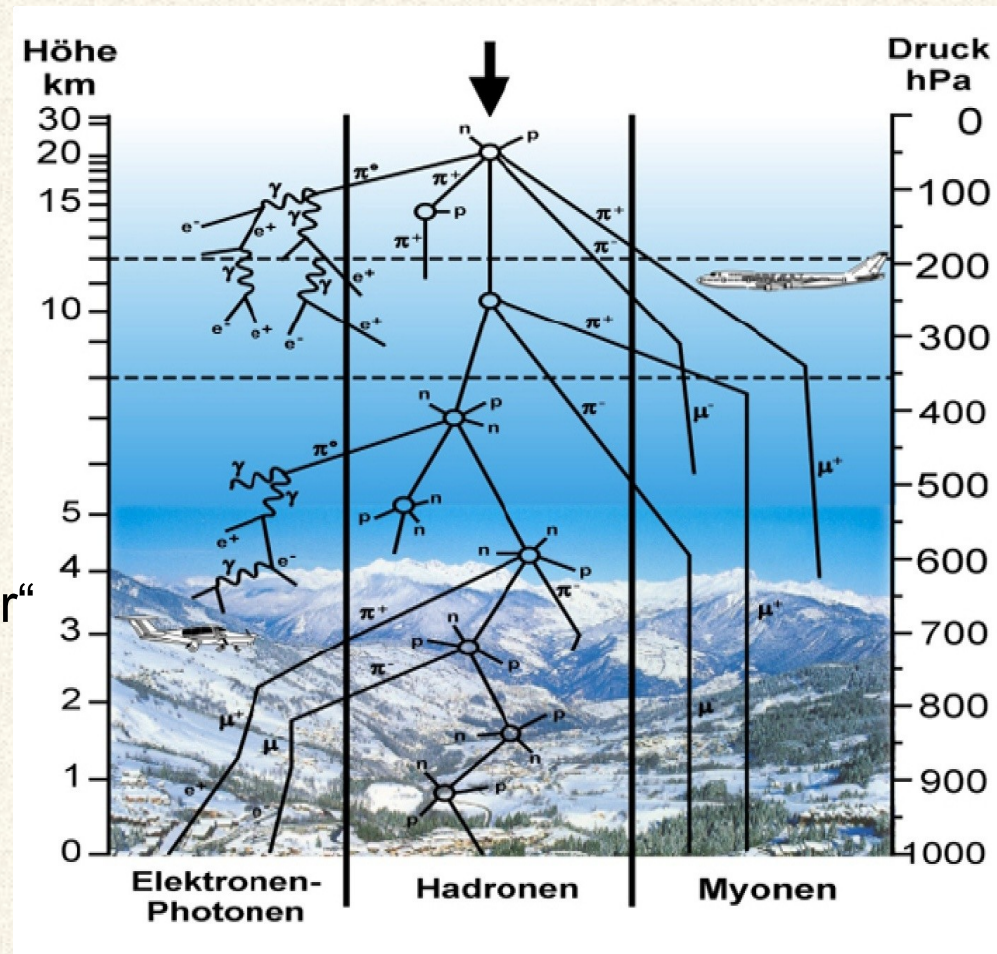
- Intensive UV-Strahlung

- 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**

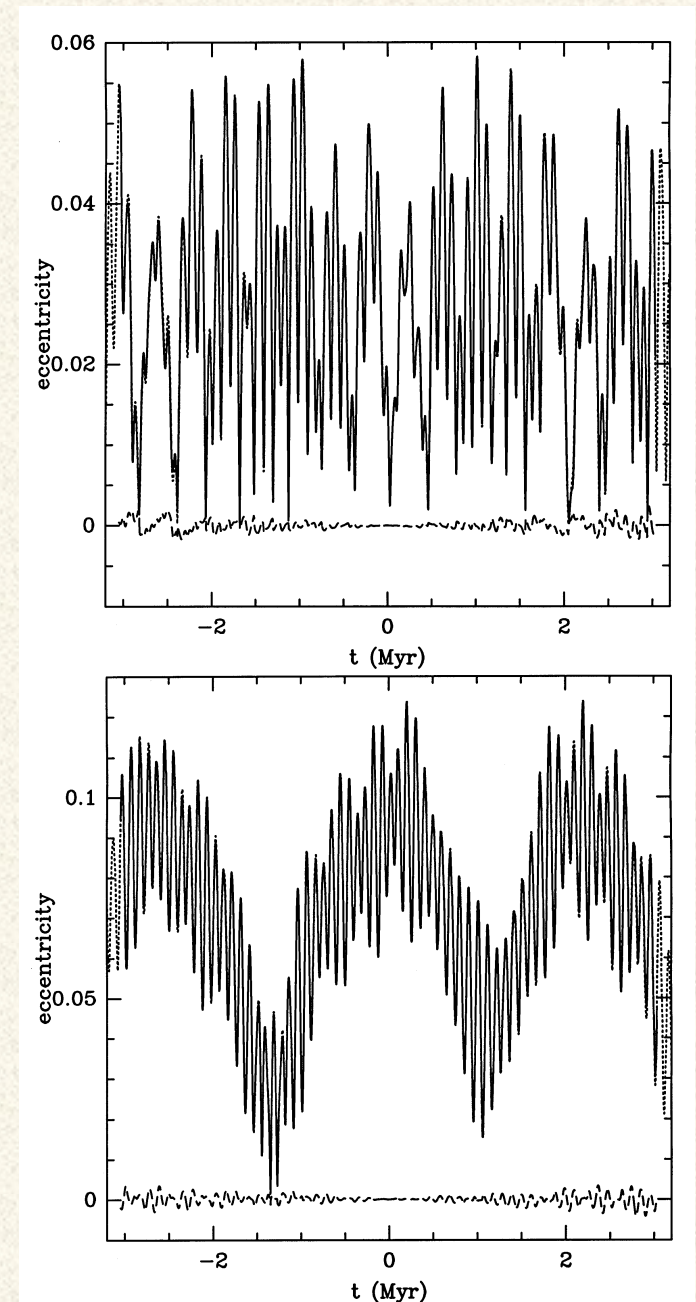




# Die Stabilität des Sonnensystems

- 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

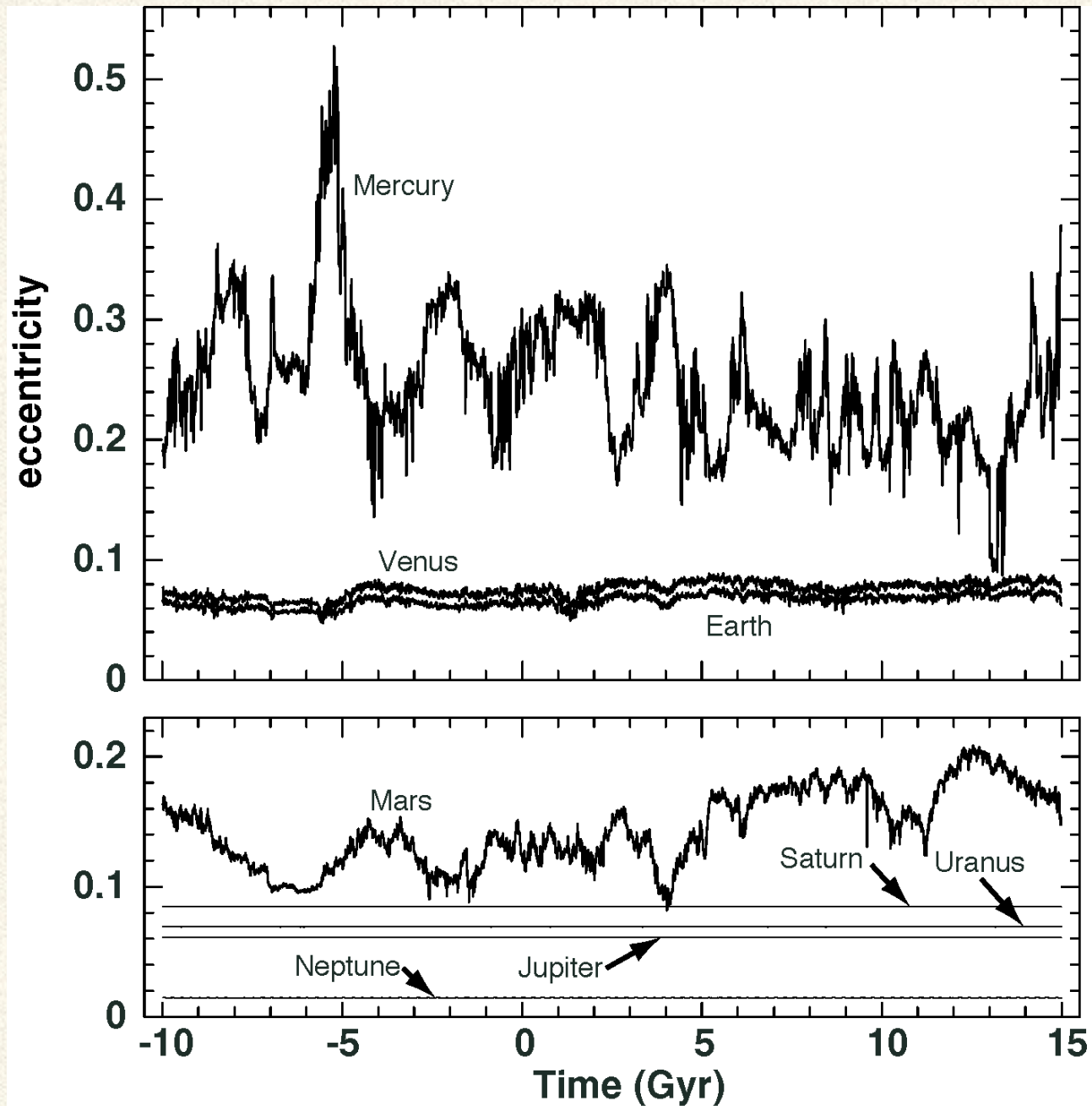


# Die Stabilität des Sonnensystems

- 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

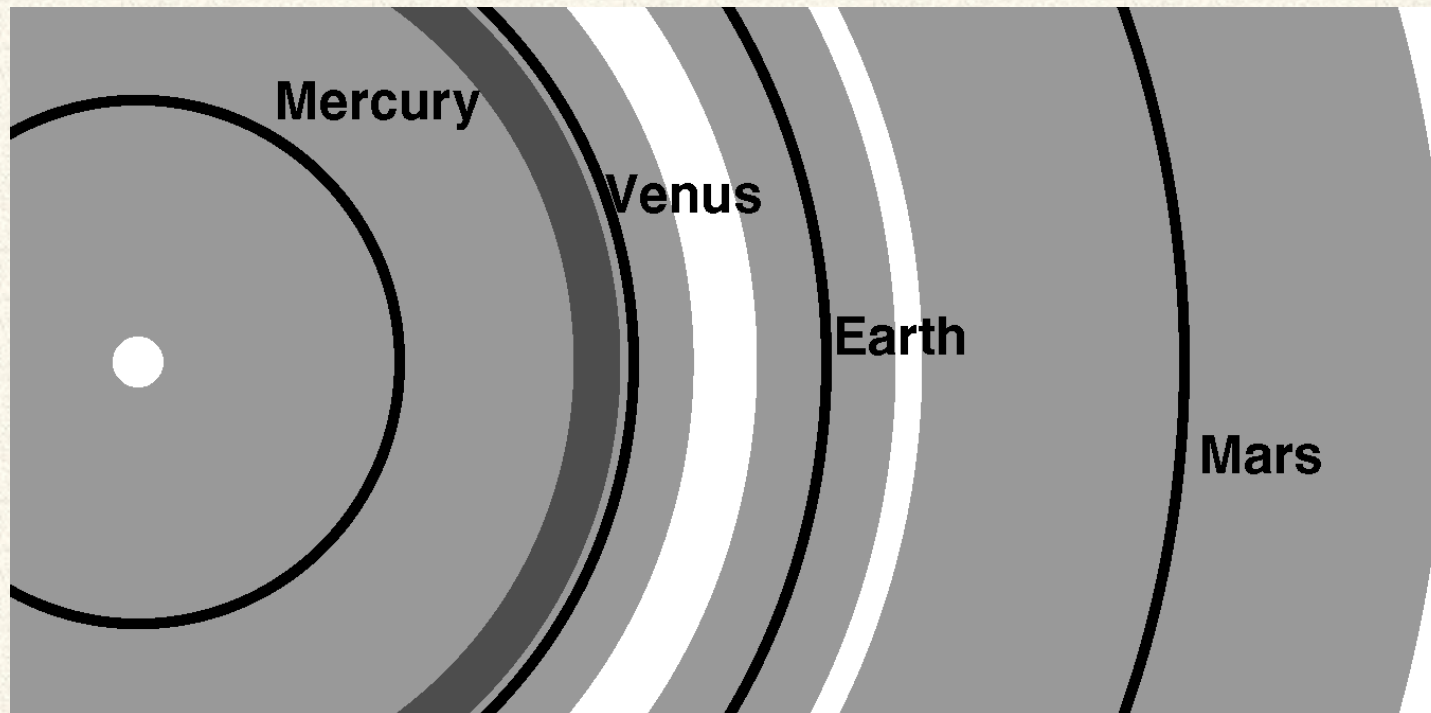
# Die Stabilität des Sonnensystems

- 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

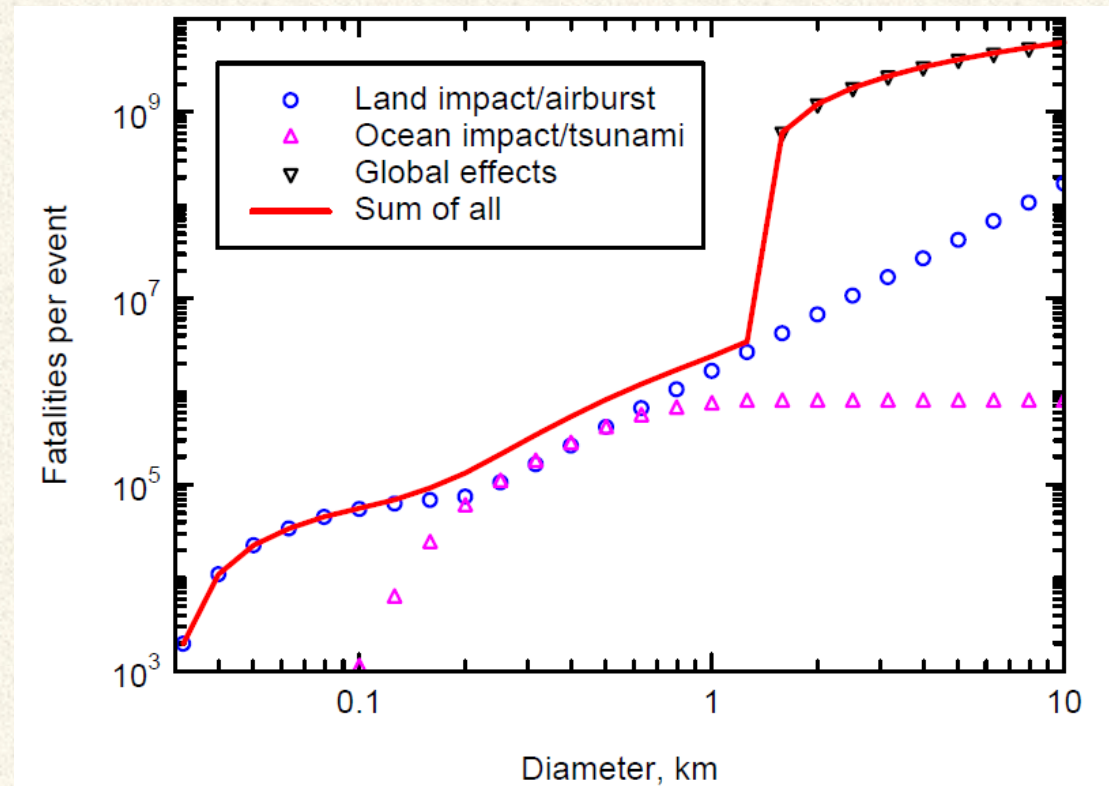


- Bsp: Einschlag von eines 10km-Objektes vor 66.04 Mio a
  - Chixculub-Krater mit 180km Durchmesser
  - Massensterben der Dinosaurier
  - Wahrscheinlich durch Verdunklung durch aufgewirbelten Staub

# 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

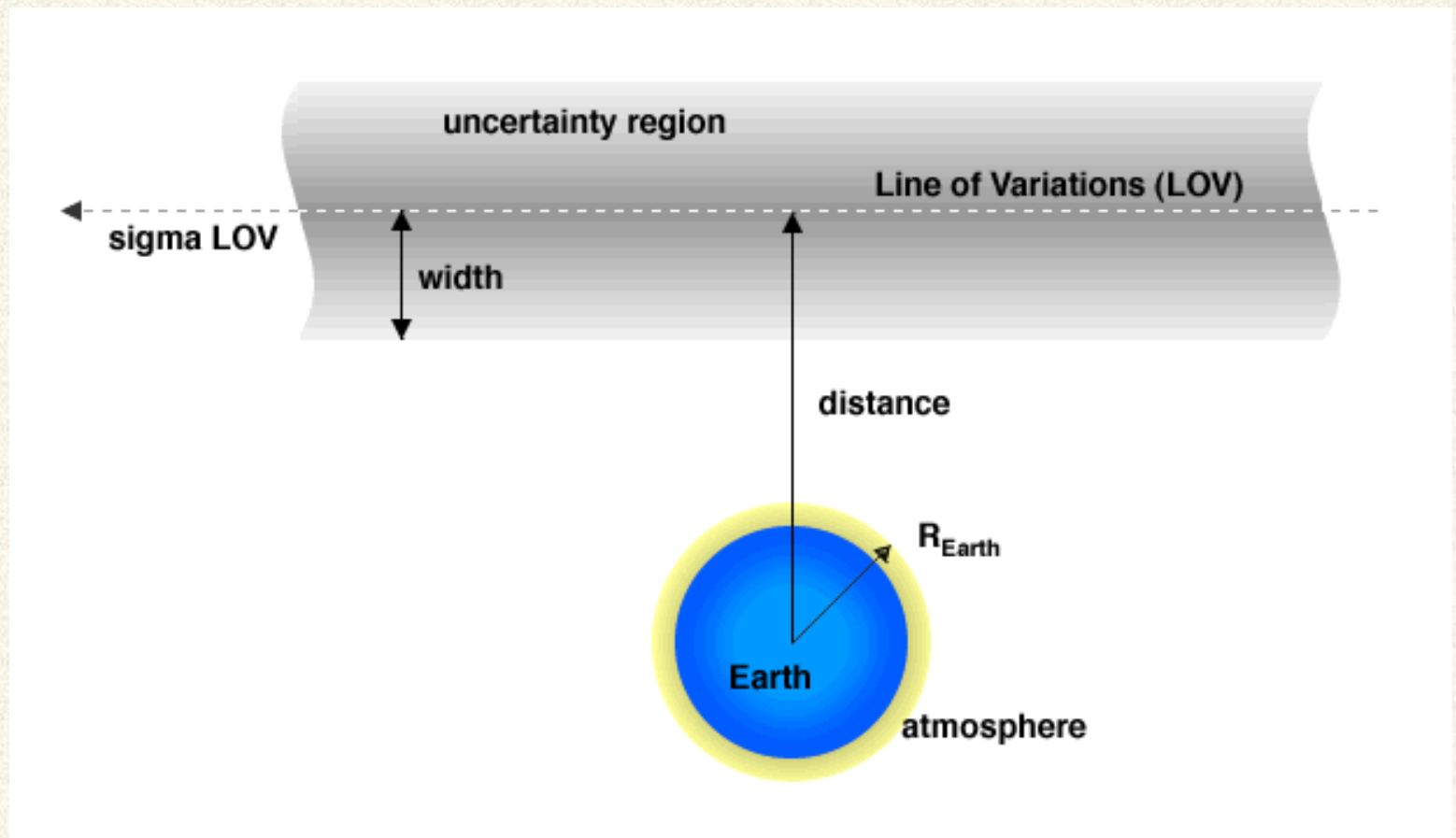
Sort by [Palermo Scale \(cum.\)](#) or by [Object Designation](#)

### Recently Observed Objects (within past 60 days)

Object Designation	Year Range	Potential Impacts	Impact Prob. (cum.)	$V_{\infty}$ (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





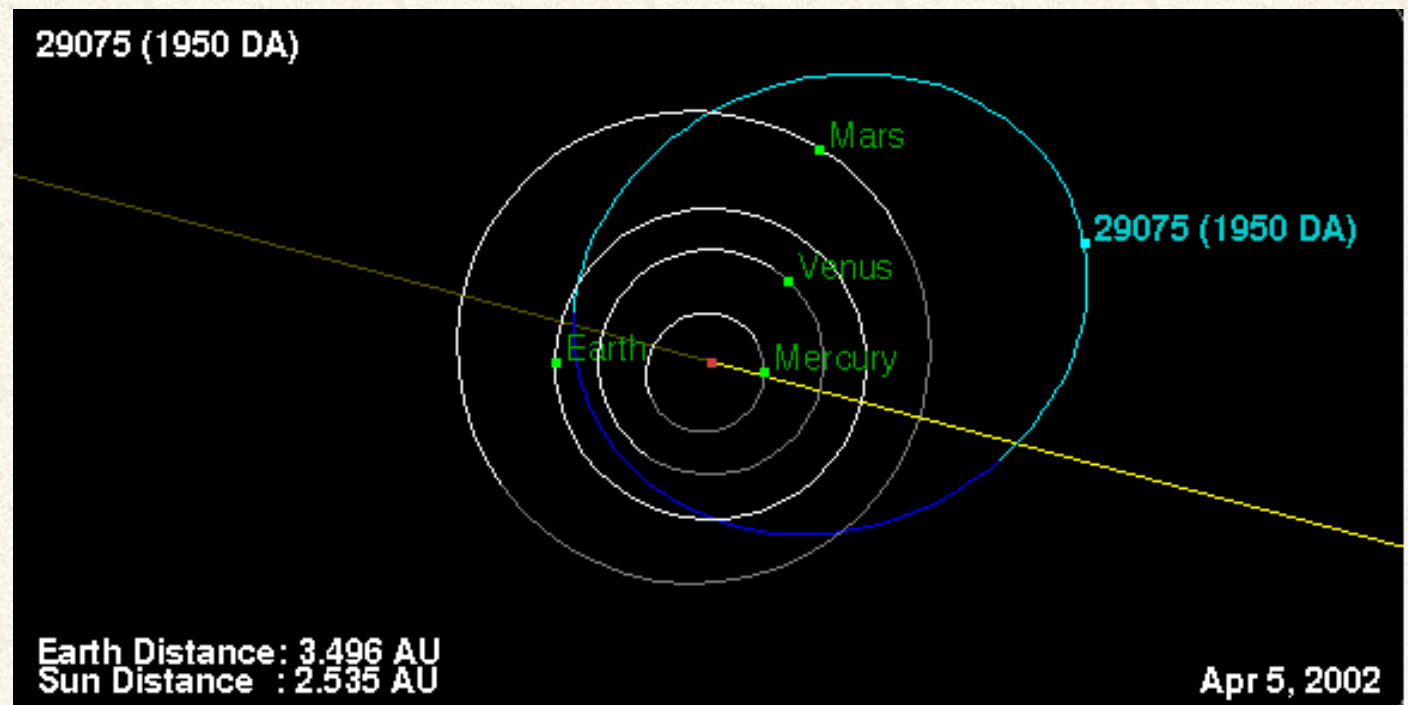
# Deep Impact

- 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



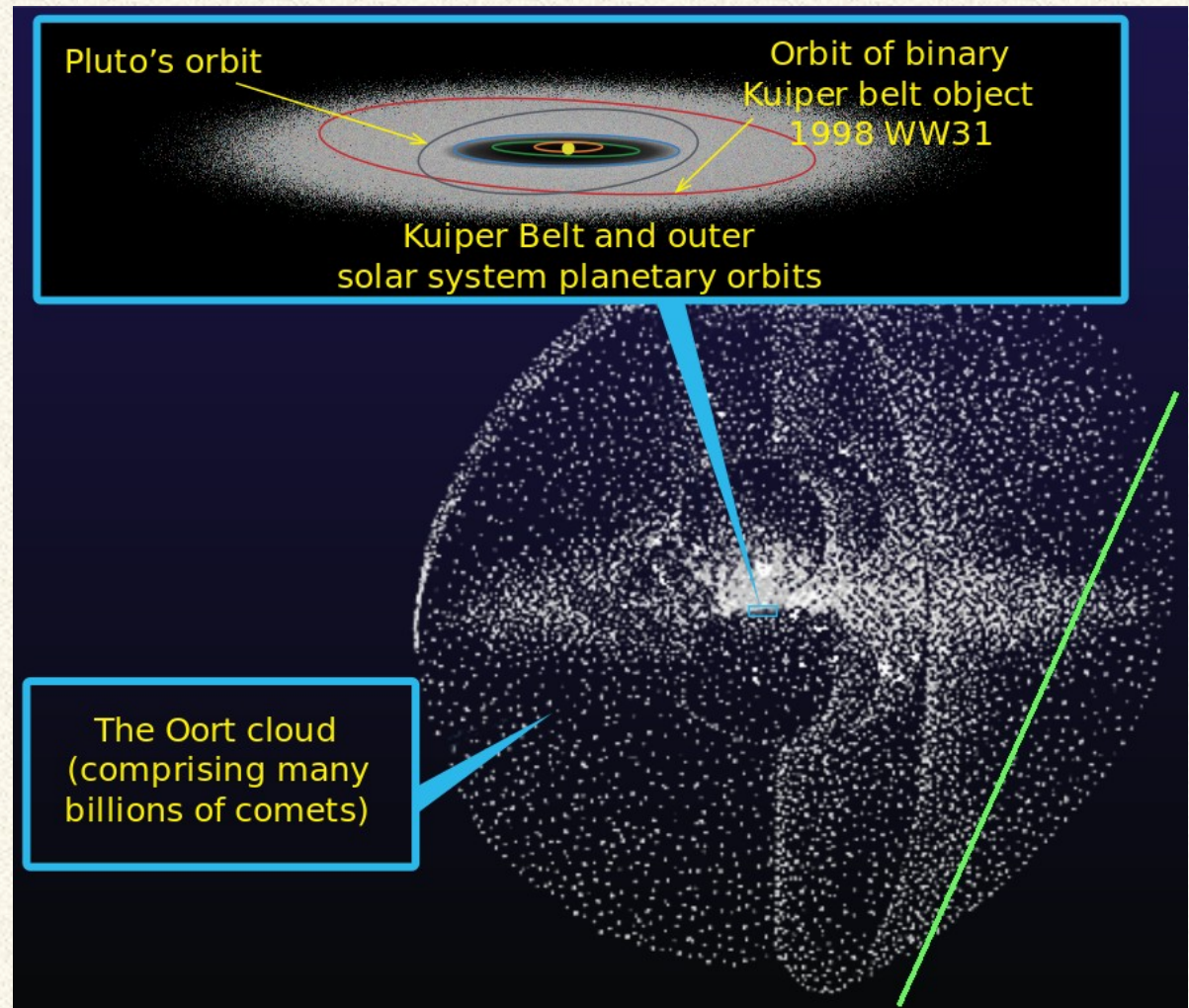
- Aus besser gespeicherter Kraterstatistik auf dem Mond

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  $1.11 \pm 0.55$  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

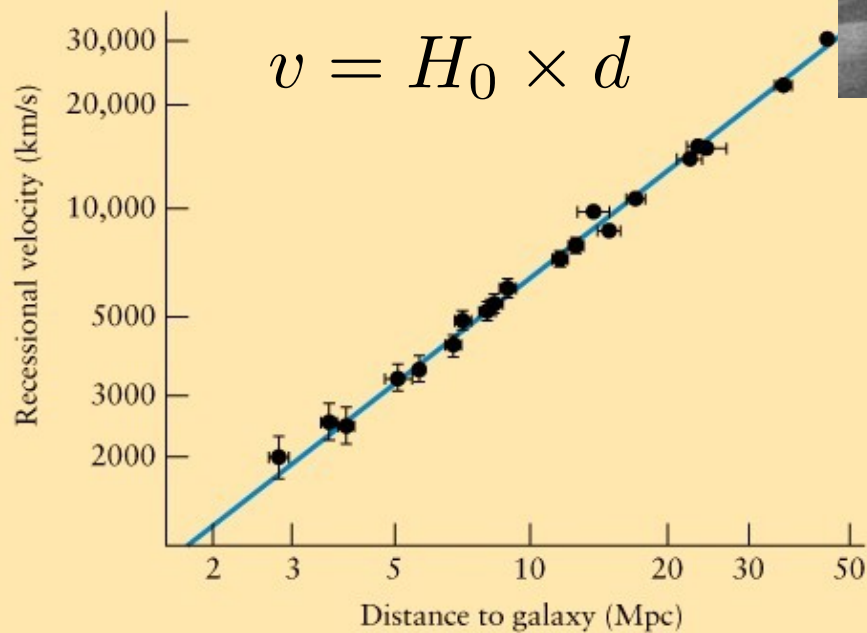
- Interstellares Gas kollabiert unter dem Eigengewicht, bildet neue Sterne
- Planetare Nebel und Supernovae verwandeln Sternmaterial wieder in interstellares Gas

→ **Kosmischer Kreislauf**

# Kosmologie

Edwin Hubble (1920):

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



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

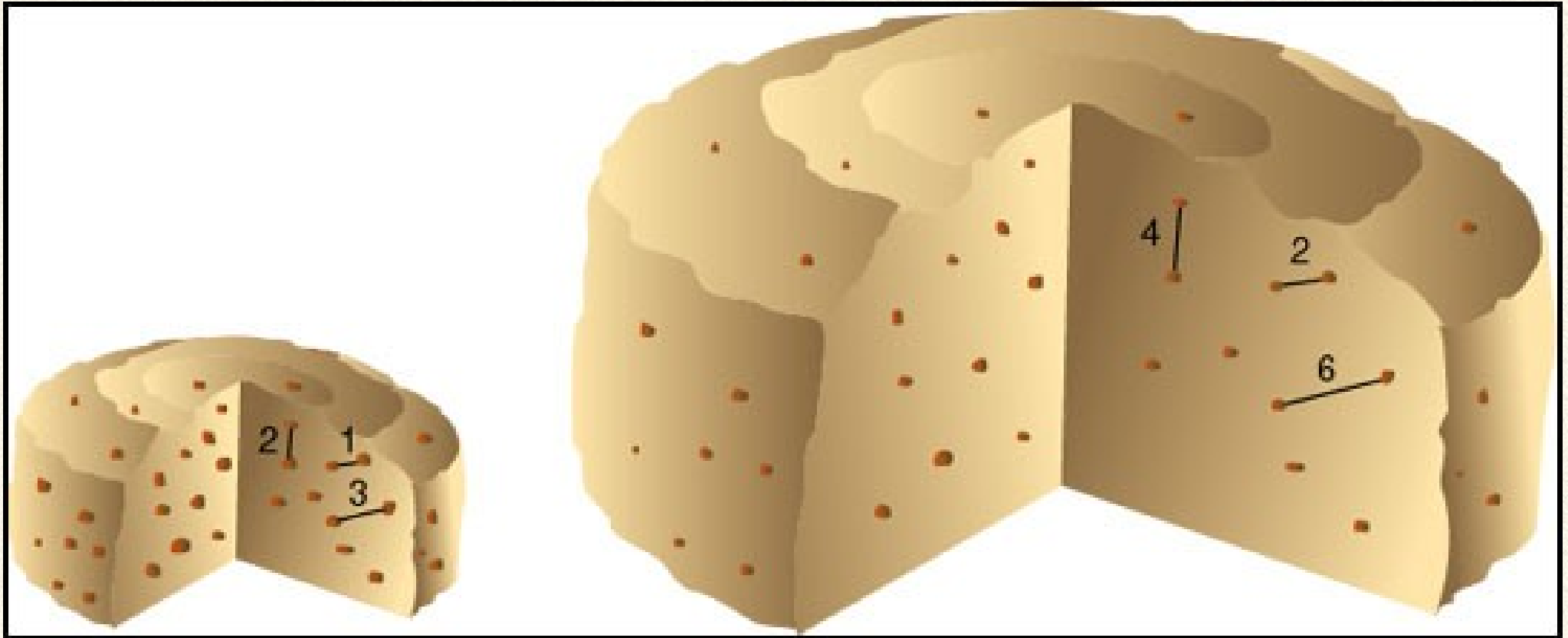
$$= \frac{71 \text{ km/s}}{1000000 \times 3.1 \times 10^{13} \text{ km}}$$

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

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

# Erklärung

- Expansion des Universums



Hubble-“Konstante“ bedeutet konstante Expansionsgeschwindigkeit

# Konsequenz

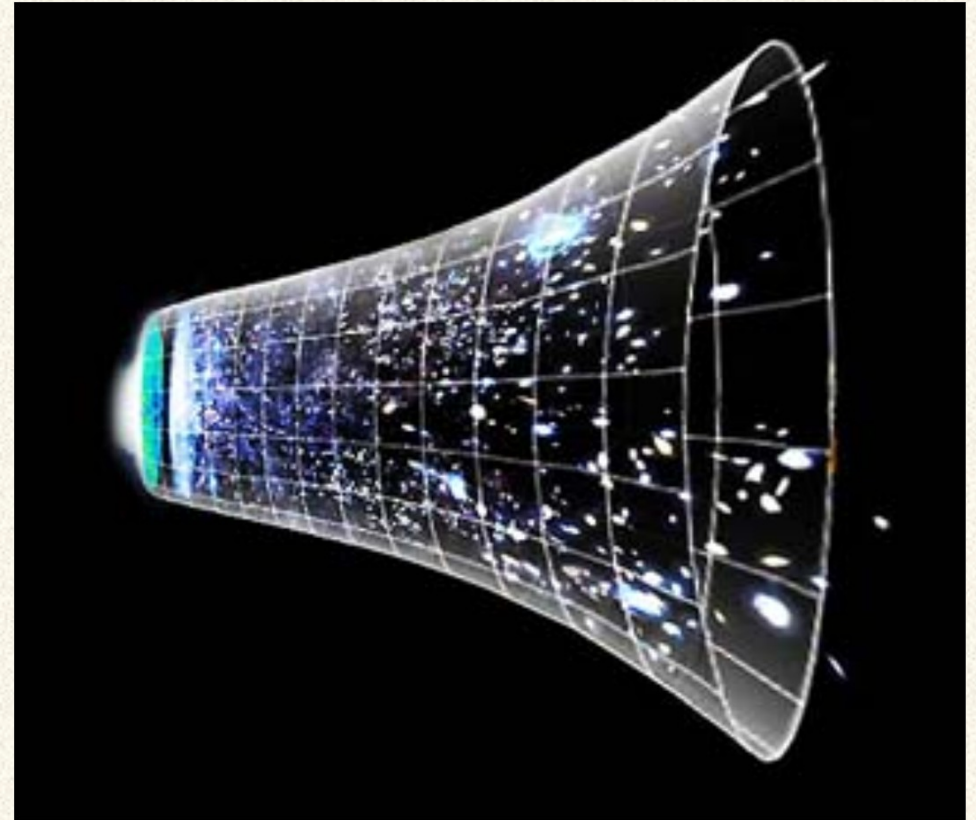
- Big Bang

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:

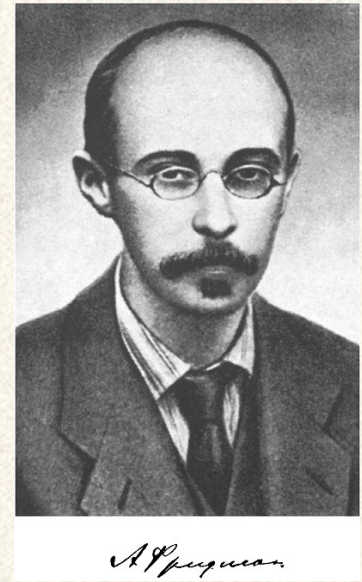
$$1/H_0 = 13.8 \text{ Mrd a} \quad \rightarrow \text{Alter des Universums}$$

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

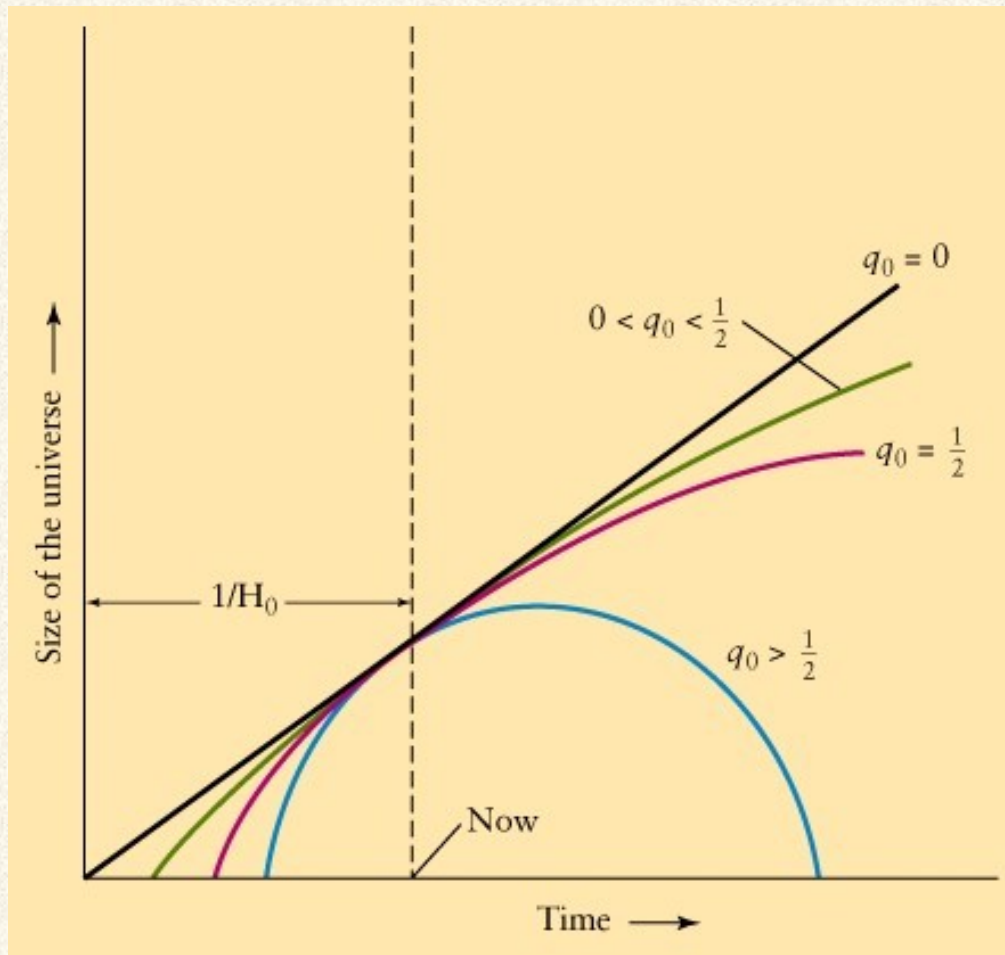




# Friedmann-Universen



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

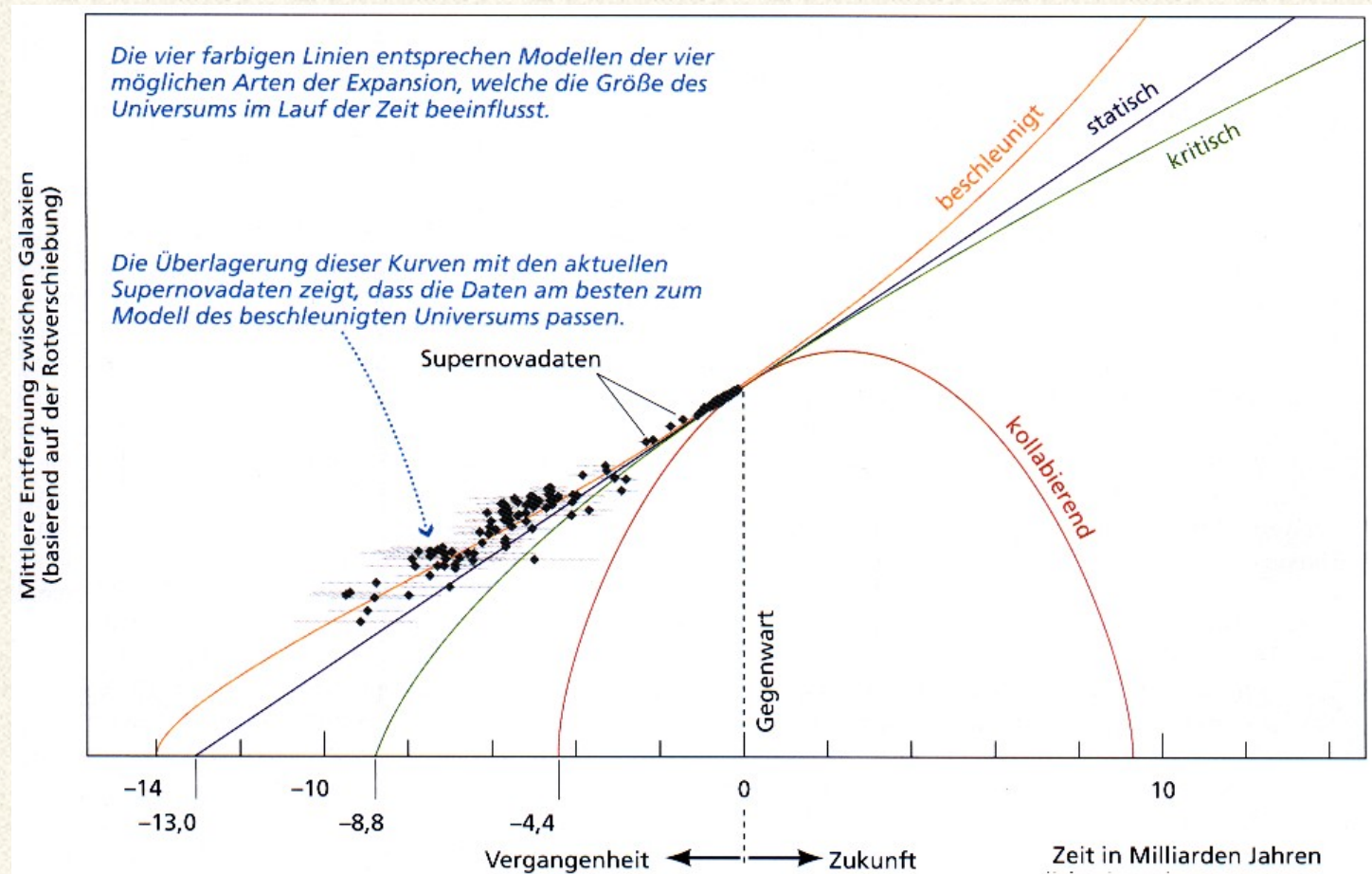


- $q_0 = 0 \rightarrow H$  konstant
- $q_0 = \frac{1}{2} \rightarrow$  kritische Dichte
$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} = 9.5 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3 = 5.7 H/\text{m}^3$$
- $q_0 > \frac{1}{2} \rightarrow$  “big crunch”
- $0 < q_0 < \frac{1}{2} \rightarrow$  ungebundene Expansion
- $q_0 < 0 \rightarrow$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

# Friedmann-Universen

Messungen mit  
Supernova Typ 1a  
Entfernungen:

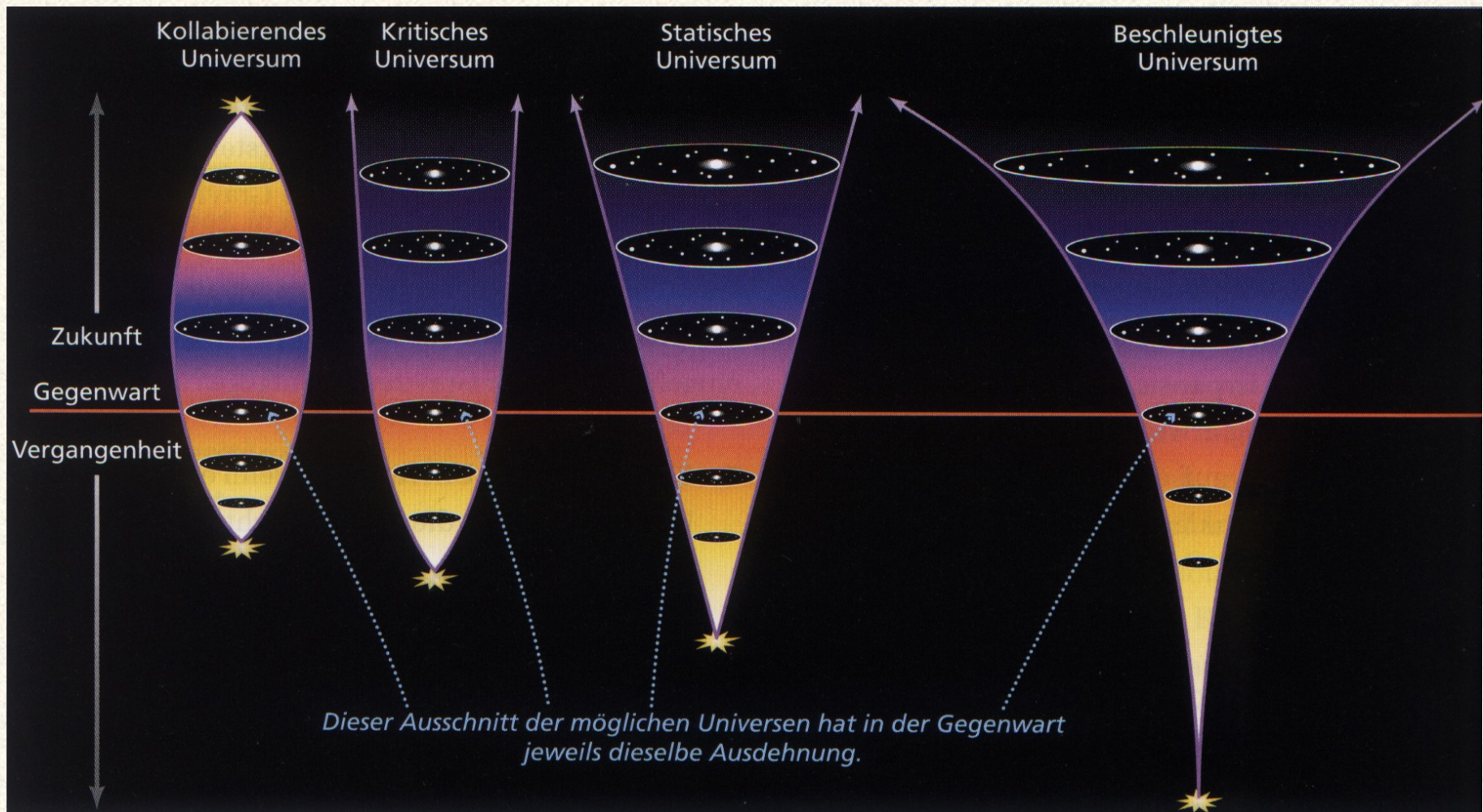
(Nobelpreis 2011)



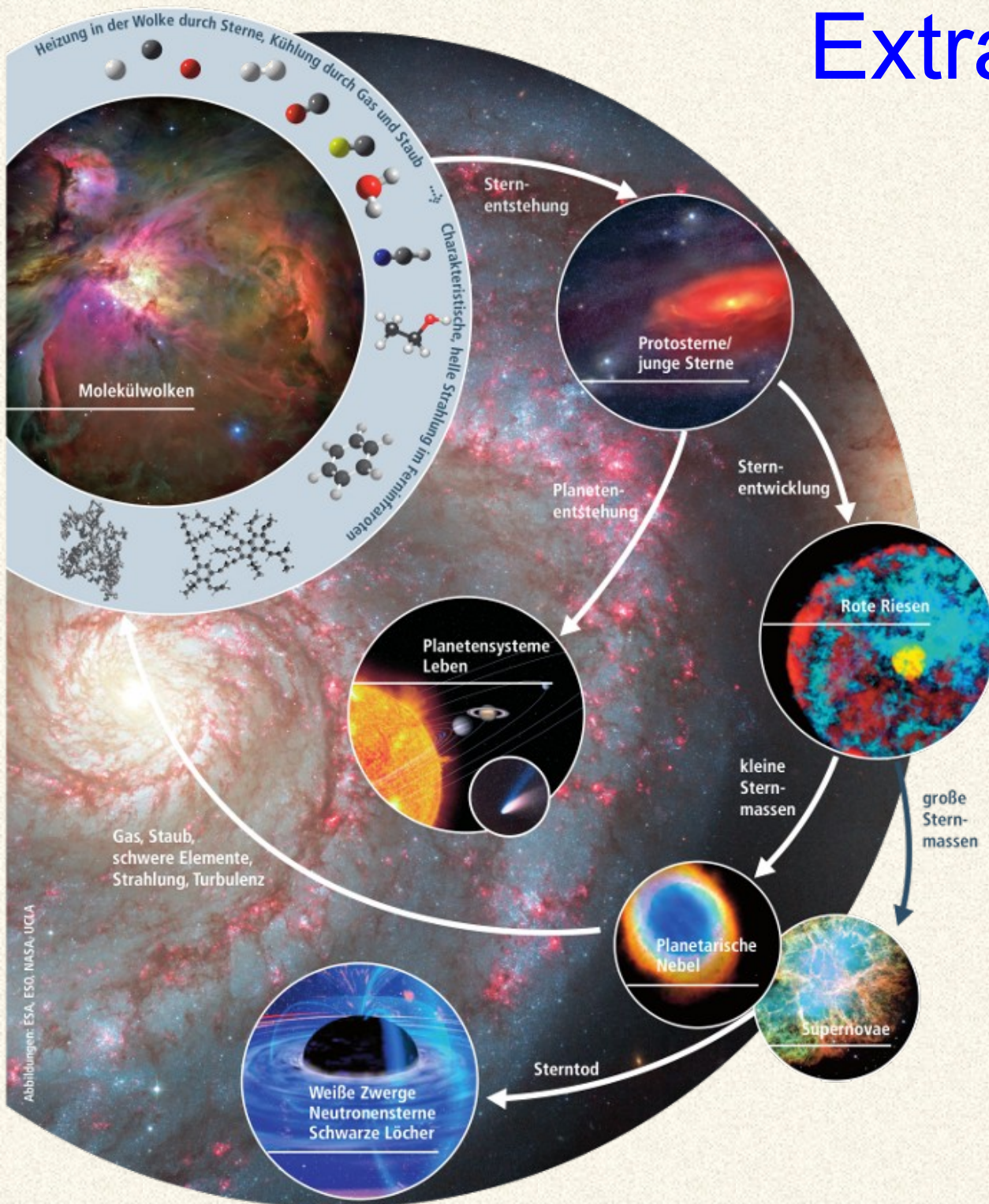
- Die Expansion des Universums ist beschleunigt statt gebremst.
- Ein zusätzlicher innerer Druck muss das Universum aufblähen.  
→ **Dunkle Energie**
- Natur: unbekannt

# 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  $\gamma$ -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”

