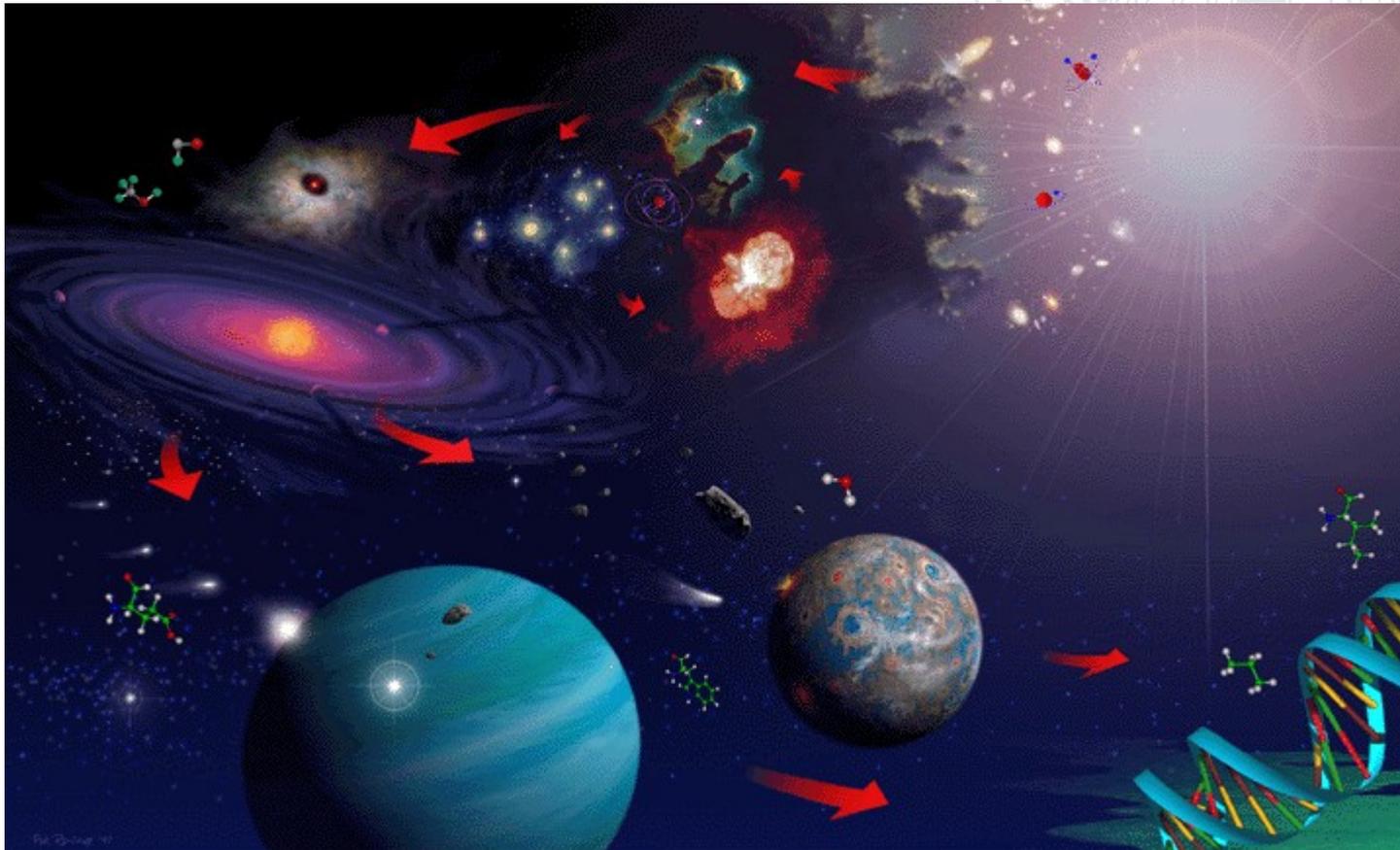


Das Ende der Menschheit

Klimawandel und Artensterben in der kosmischen Perspektive

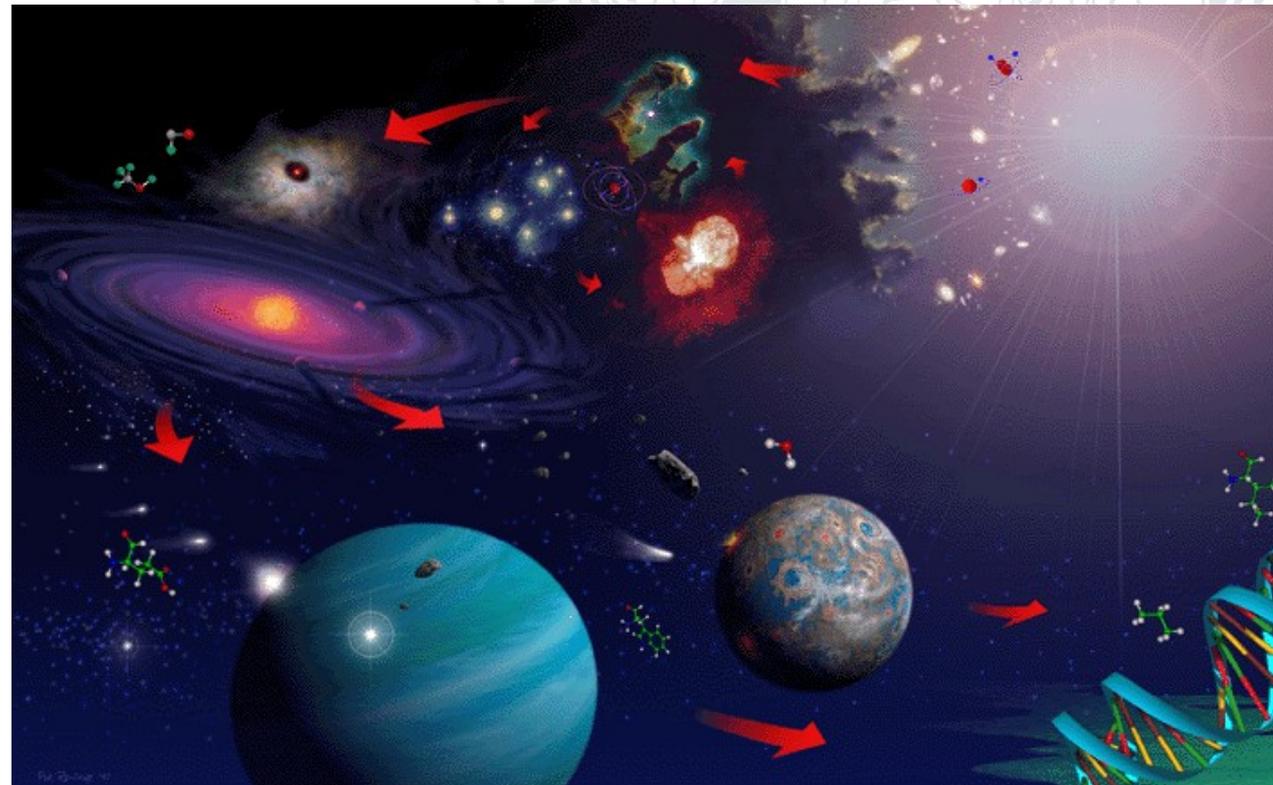


Volker Ossenkopf-Okada, I. Physikalisches Institut, Universität zu Köln

“Wir werden alle sterben!”

Die Frage ist wann ...

- 1) Das Universum
 - Der Kältetod
- 2) Sterne
 - Die Sonne
 - Supernovae
 - Gamma-Ray-Bursts
- 3) Das Planetensystem
 - Die Erdbahn
 - Deep Impact
- 4) Der Mensch

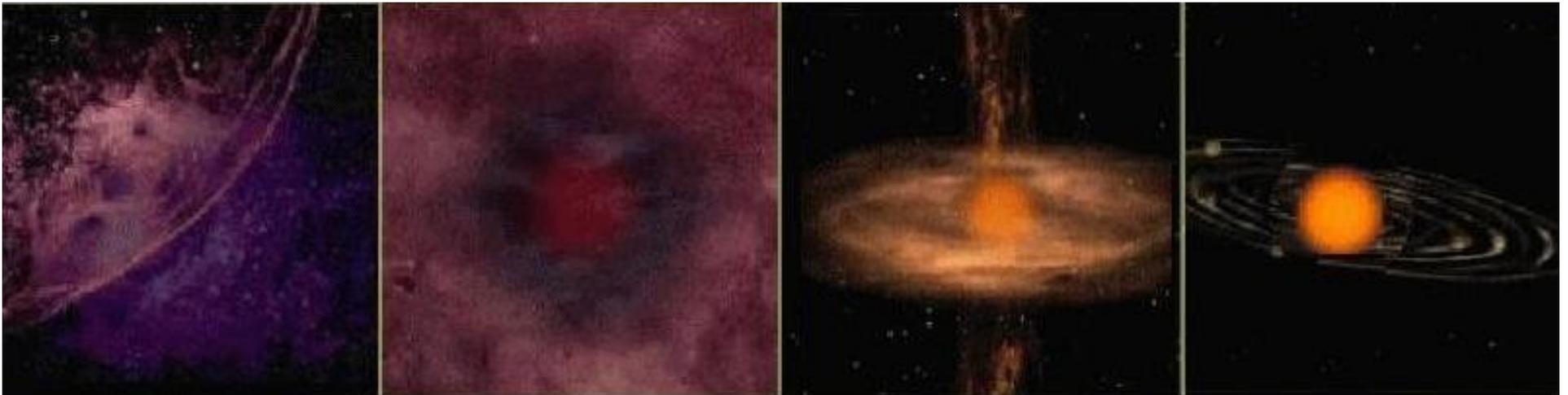


Der kosmische Kreislauf

- Mischung von Gas und Sternen in Galaxien

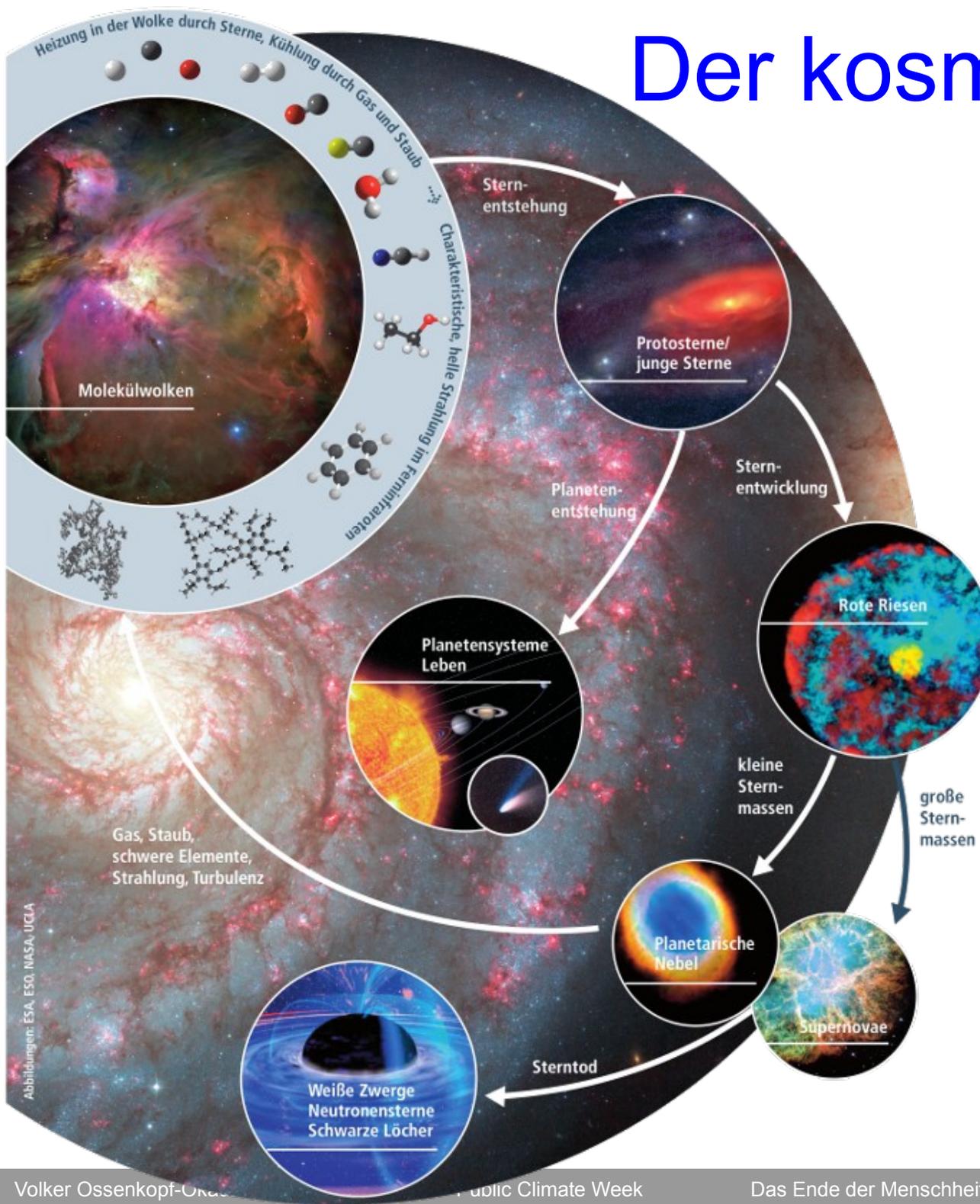


- Interstellares Gas kollabiert unter dem Eigengewicht, bildet neue Sterne



(Schwerpunkt unseres SFB 956 am I. Physikalischen Institut)

Der kosmische Kreislauf

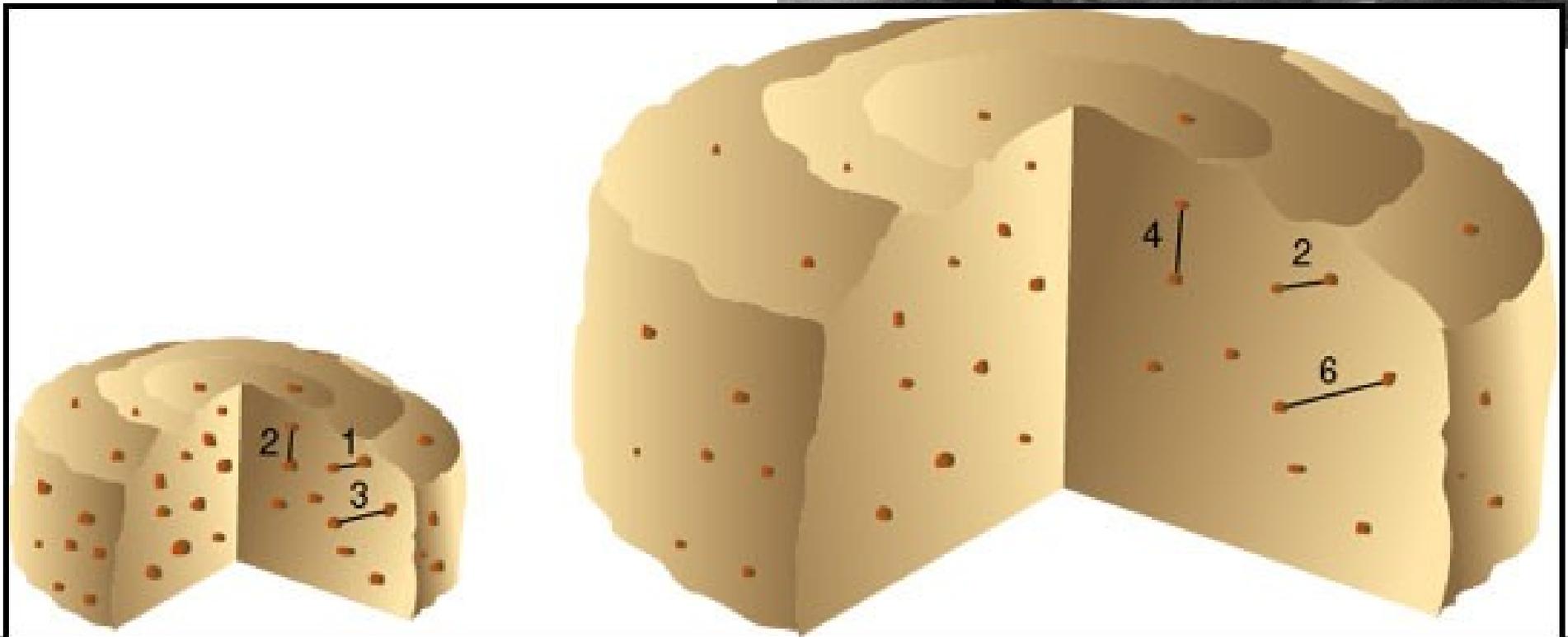


- Interstellares Gas kollabiert, bildet neue Sterne
- Planetare Nebel und Supernovae verwandeln Sternmaterial wieder in interstellares Gas
- Jeder Zyklus entfernt etwas Materie aus dem Kreislauf:
 - Braune Zwerge
 - Weiße Zwerge
 - Neutronensterne
 - Schwarze Löcher

Das Universum

Edwin Hubble (1920):

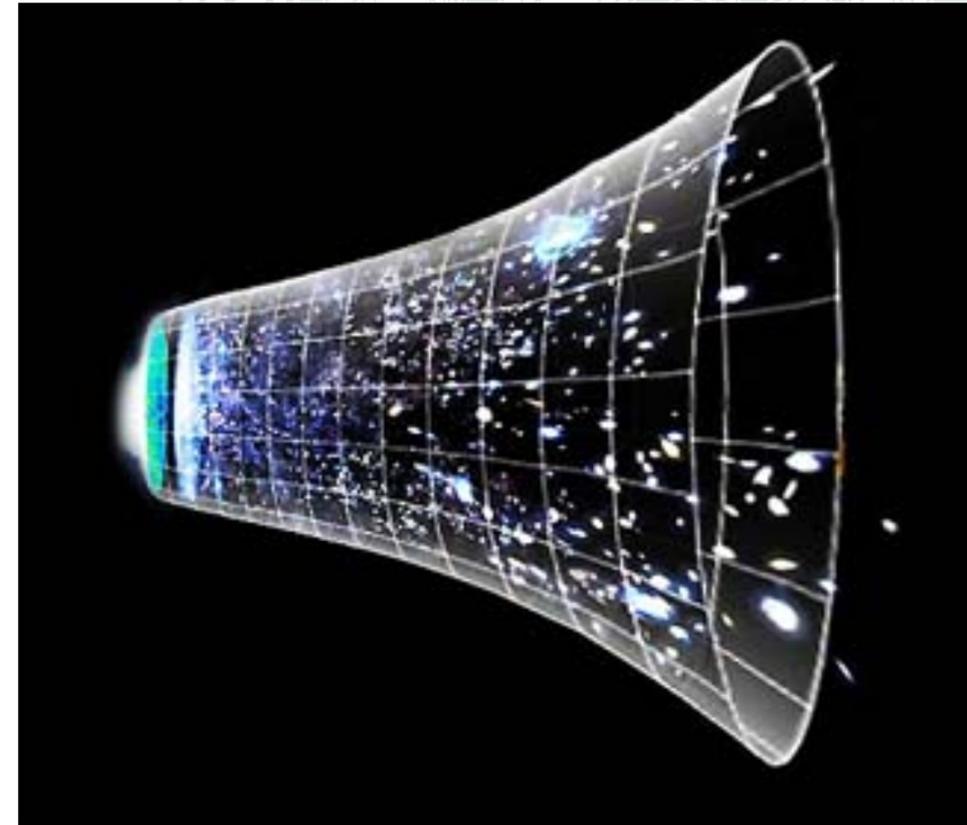
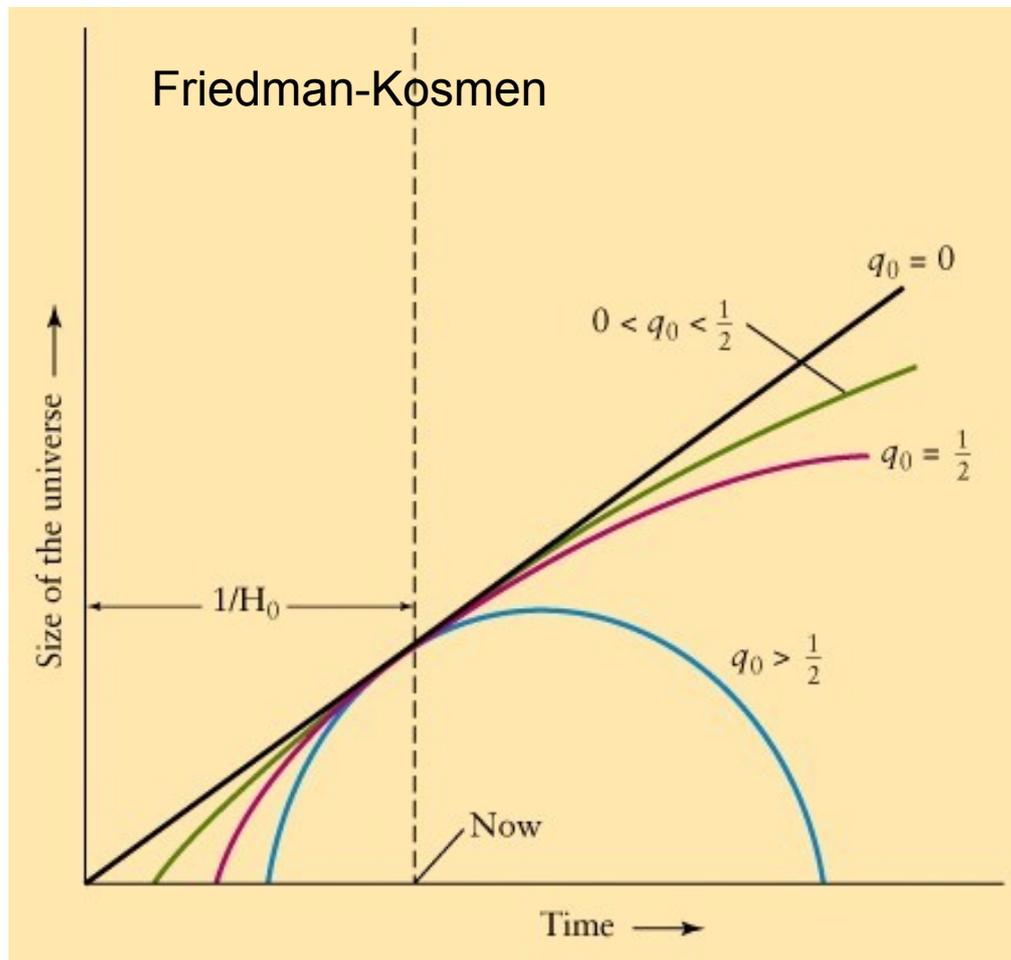
- Alle Galaxien fliegen von uns weg; umso weiter weg, desto schneller.
- Expansion des Universums



Konsequenz

Urknall

Die Galaxien müssen sie in der Vergangenheit unendlich dicht konzentriert gewesen sein



- Zeit für aktuelle Größe:

$$1/H_0 = 13.8 \text{ Mrd a} \approx 10^{10} \text{ a}$$

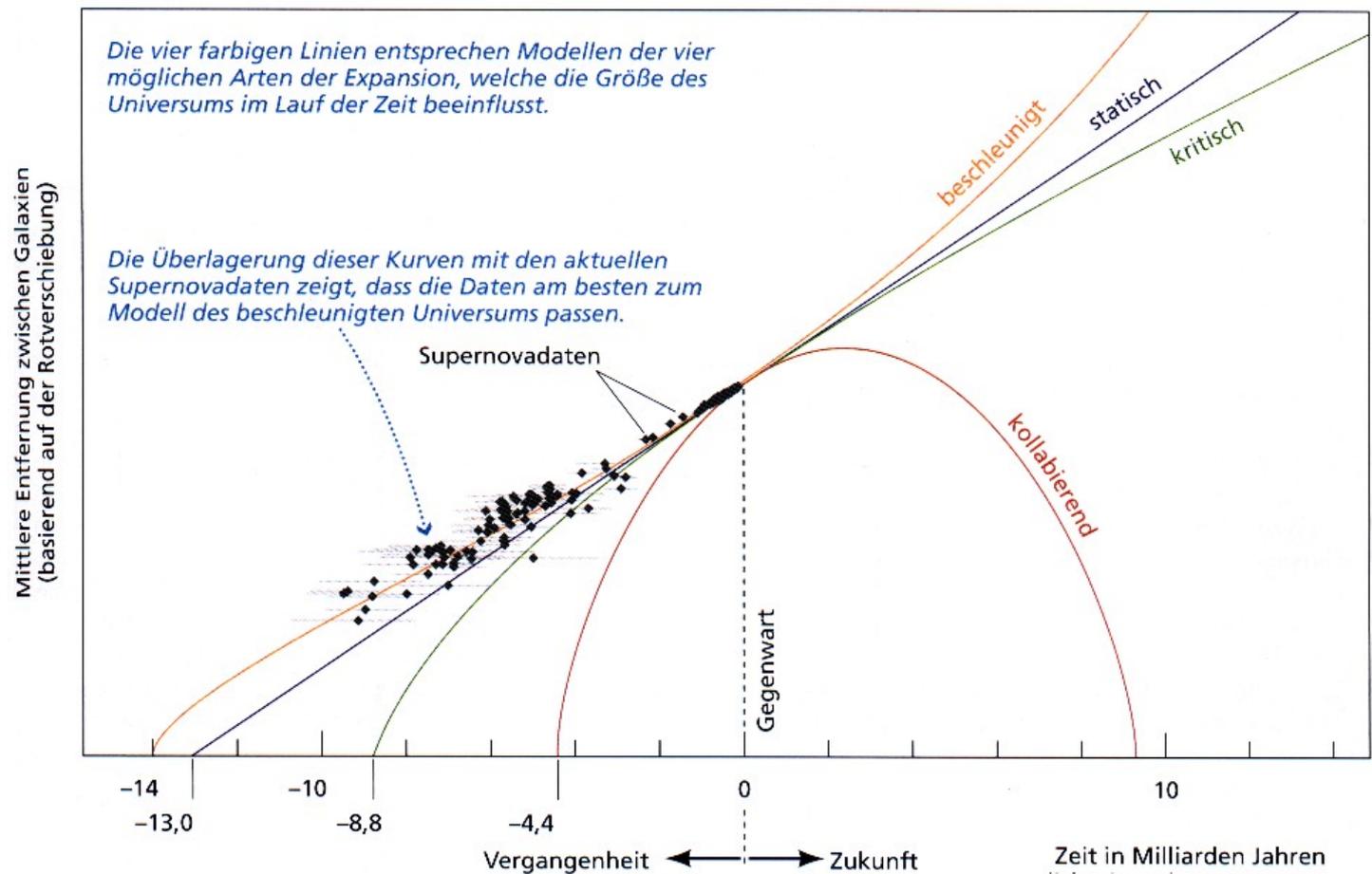
Bei konstanter Expansion

Aber: Gravitation sollte Expansion verlangsamen

Nobelpreis 2011

Messungen mit
Supernova Typ 1a
Entfernungen:

(S. Perlmutter,
B. P. Schmidt,
A. G. Riess)



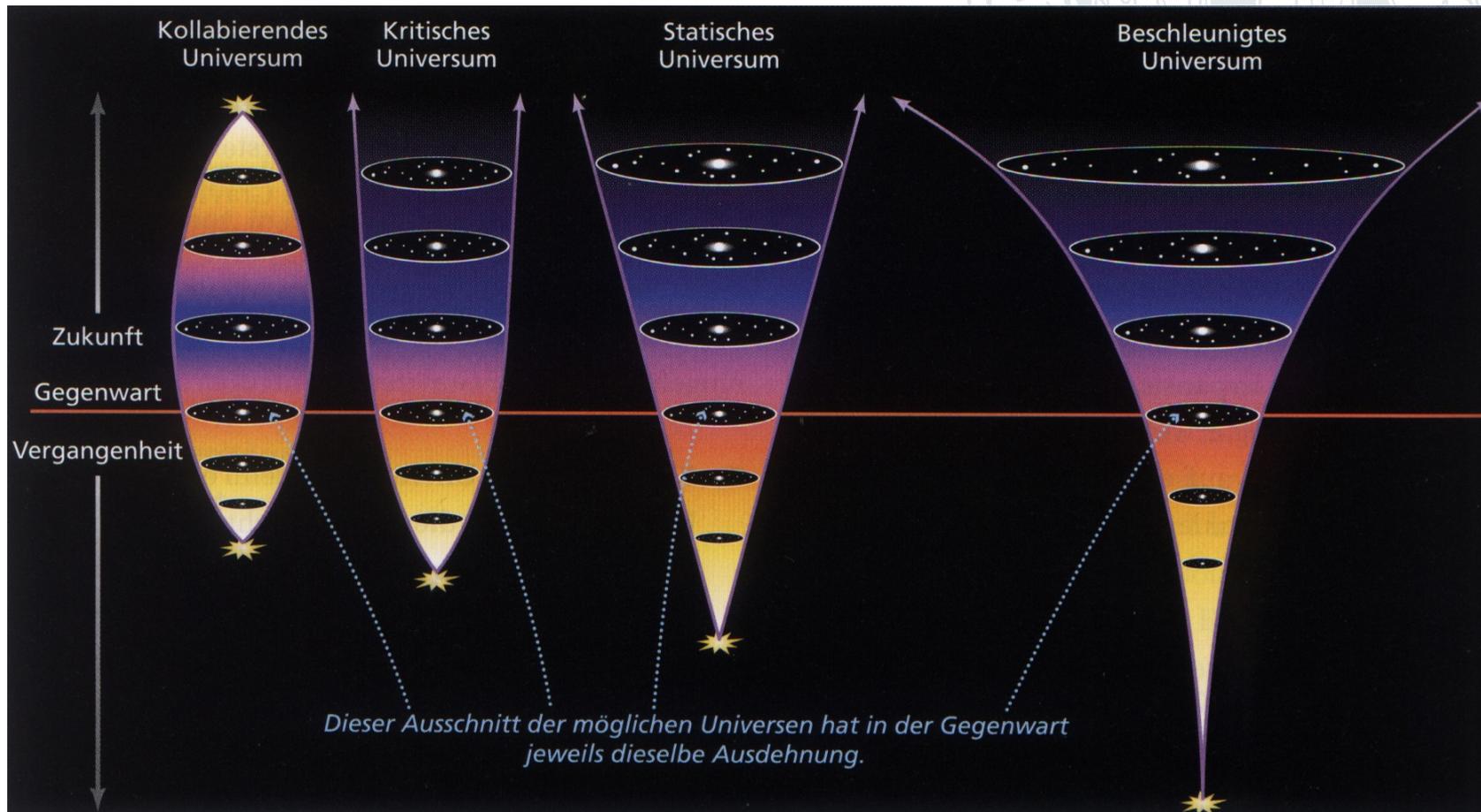
- Die Expansion des Universums ist beschleunigt statt gebremst.
- Ein zusätzlicher innerer Druck muss das Universum aufblähen.

→ **Dunkle Energie**

- Natur: unbekannt

Status

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



- Die Dichte des Universums wird immer weiter absinken

Materieentwicklung

- Die Dichte des Universums nimmt immer weiter ab. Materie wird aus dem kosmischen Kreislauf entfernt
 - 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**

Quanteneffekte

Restmaterie:

- Vorhersage der Grand-Unified-Theories (GUT):
 - 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

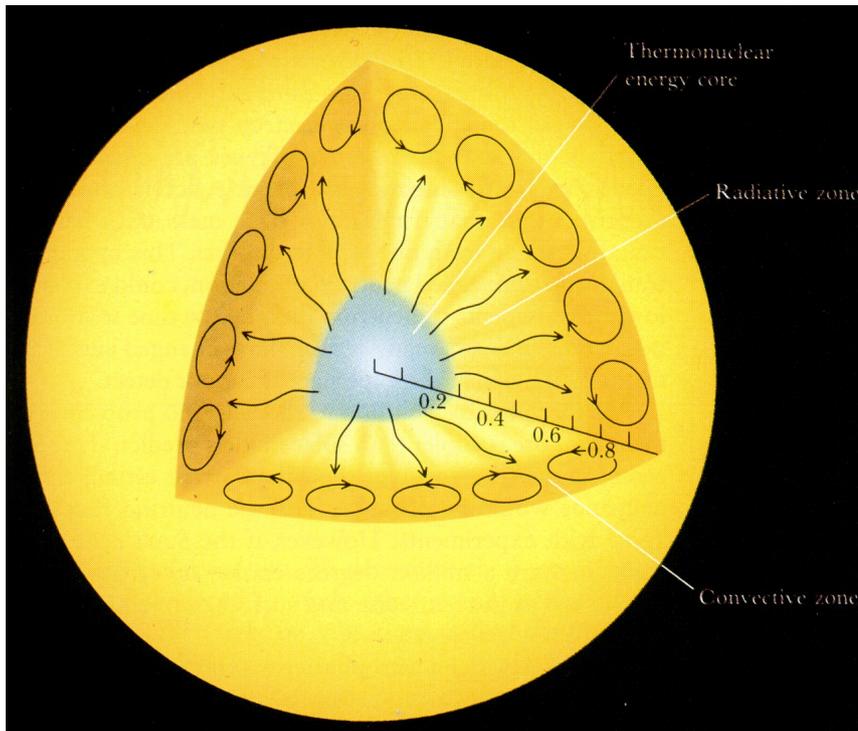
In 10^{100} a nur noch Photonen und subatomare Teilchen.

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



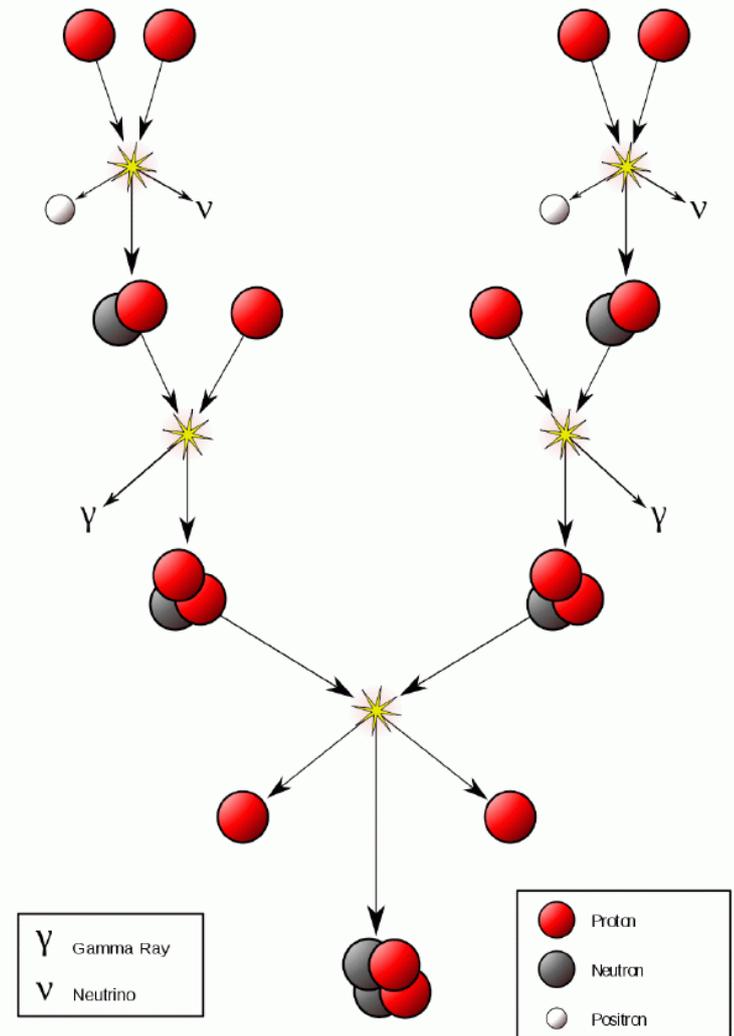
Sterne

- Ähnlicher Aufbau aller Sterne
- Wichtigster und bestbekanntester Stern: die Sonne



Energiequelle:

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



Die Entwicklung der Sonne

Während der H-Fusion (Hauptreihe):

- Zone des H-Brennens wandert langsam nach außen

- Leuchtkraft der Sonne wächst

 - 1% aller 110Mio a

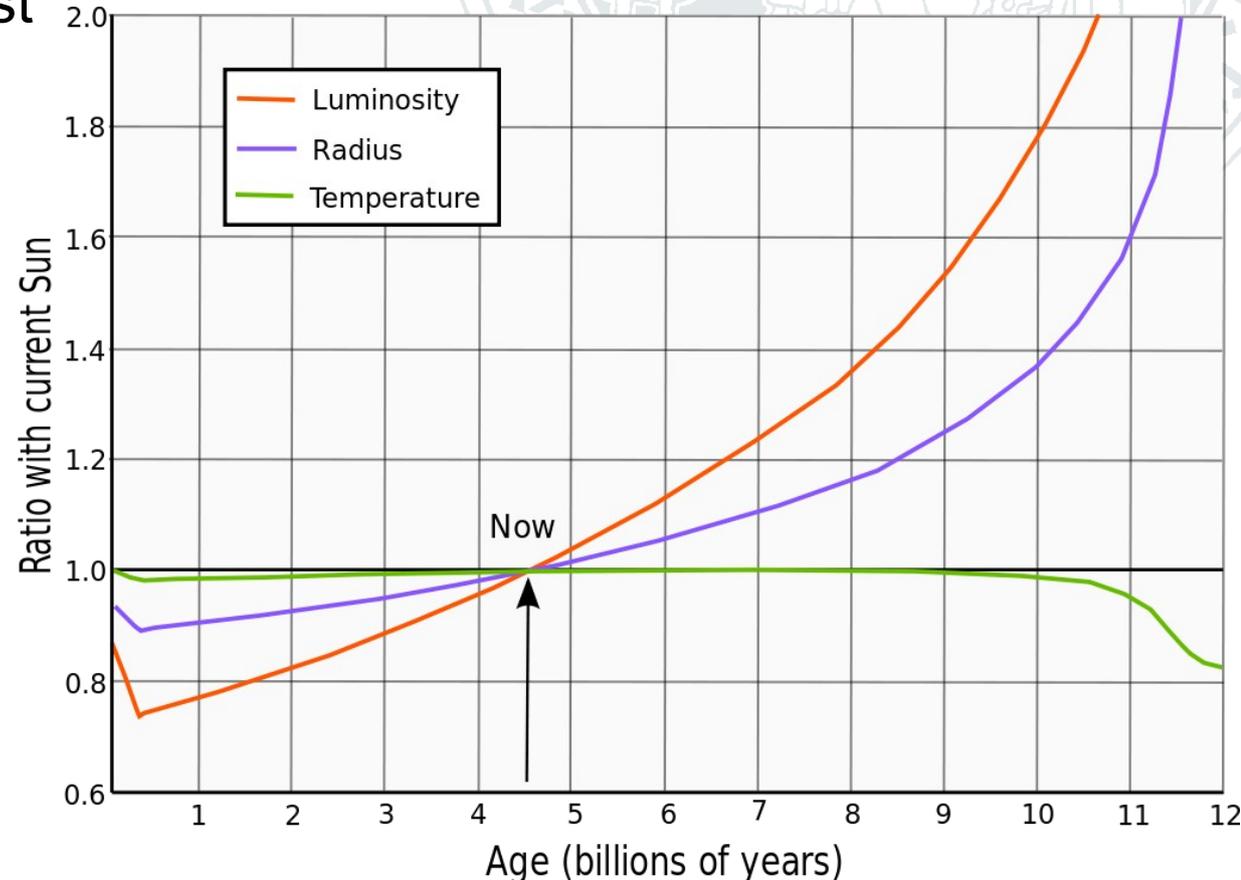
 - Variationen durch 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus und sonstige Variabilität ~ 0.1%

- Problem:

“Schwache Sonne”:

Strahlung vor 3-4Mrd. a zu gering für flüssiges Wasser

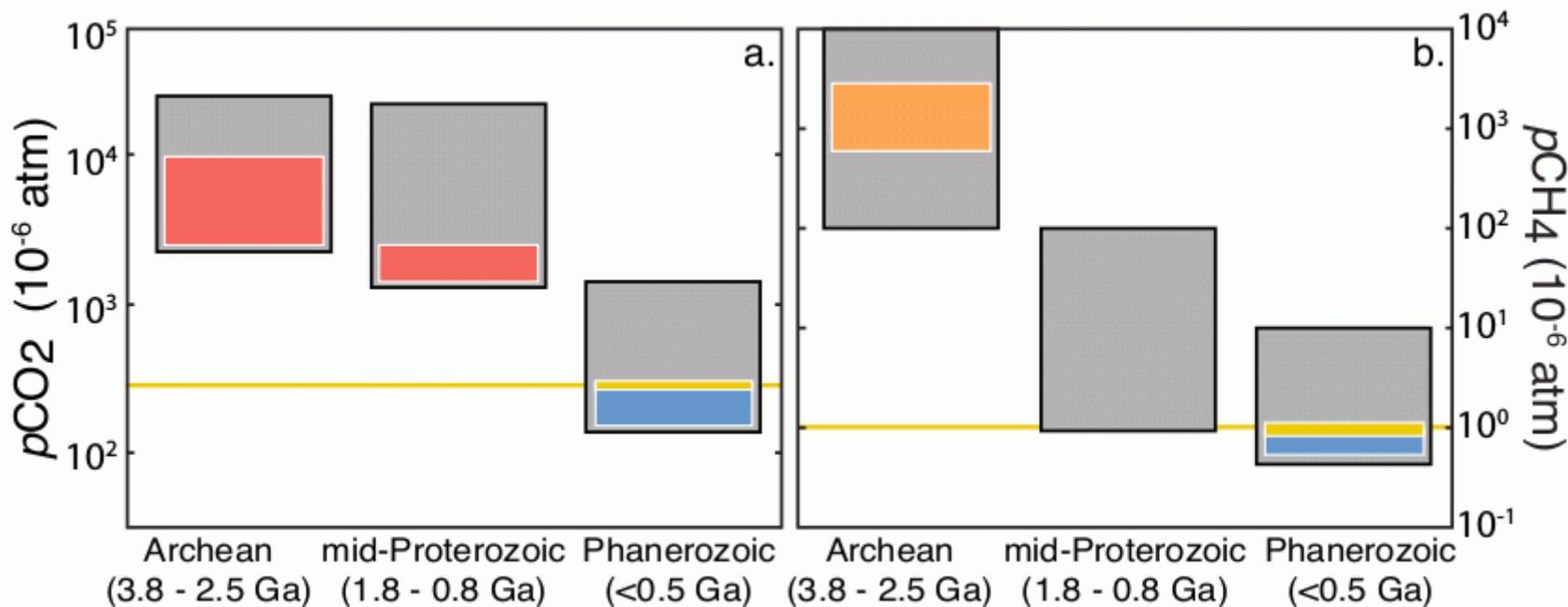
Ribas et al. (2010)



Die „schwache Sonne“

Lösung:

- Verstärkter Treibhauseffekt
- CO₂- und Methankonzentration in der Erdatmosphäre viel höher als heute
 - Drastische Reduktion mit Entwicklung von O₂-produzierendem Leben (Photosynthese) auf dem Lande

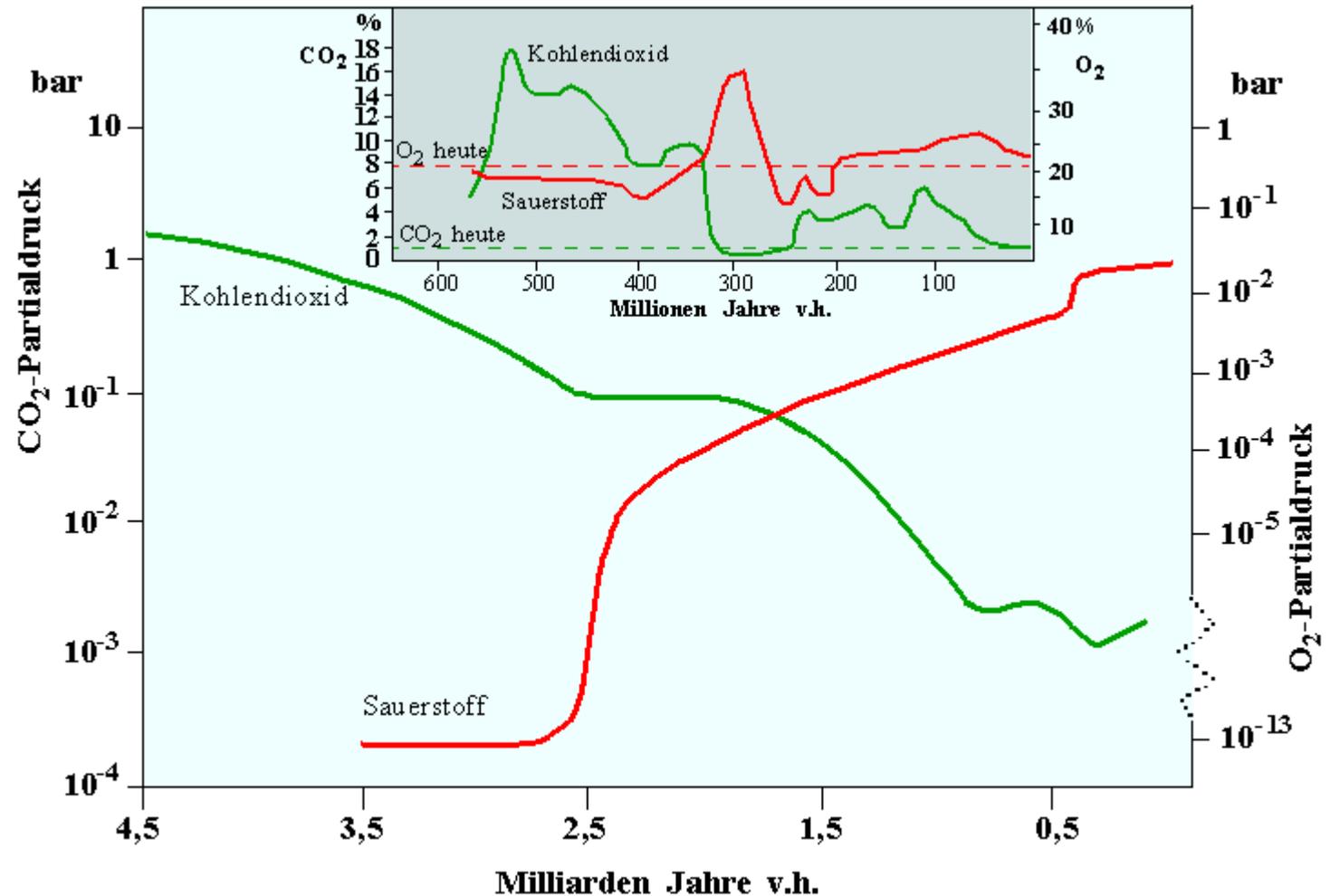


Olson et al.
(2018)

Die „schwache Sonne“

Lösung:

- Verstärkter Treibhauseffekt

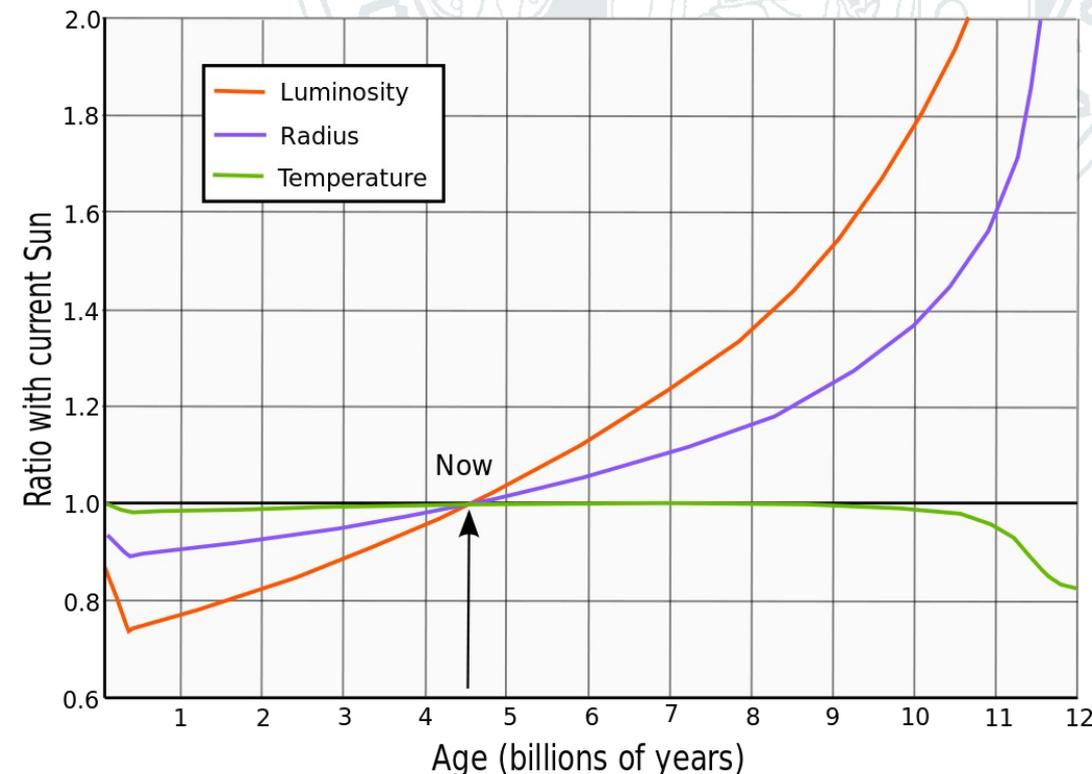


- Fast immer Bedingungen für flüssiges Oberflächenwasser erfüllt
 - Ausnahme: „Schneeerde“ vor 750Mio a.

Die Sonne als Todbringer

Weiteres Wachstum der Sonnenleuchtkraft:

- 1% aller 110Mio a
- Signifikante globale Erwärmung in 600-800 Mio a
 - Beschleunigte Verwitterung
 - Verschiebung des Karbonat-Silikat-Zyklus
 - entfernt CO_2 aus Atmosphäre (Ausfällung z.B. als CaCO_3)
 - Bei $< 50\text{ppm CO}_2$:
 - Photosynthese fällt aus,
 - keine O_2 -Produktion durch Pflanzen mehr
 - Pilze und Bakterien überleben



Die Sonne als Todbringer

Weitere Entwicklung:

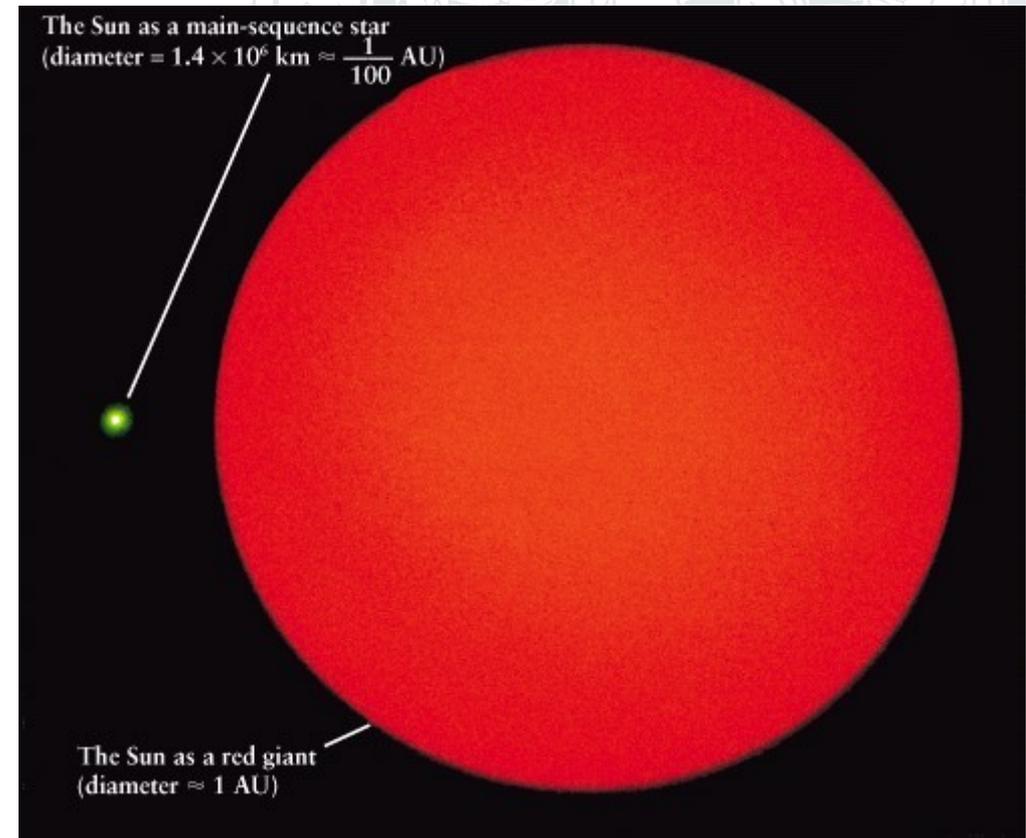
- Signifikante globale Erwärmung
 - Beschleunigte Verdunstung der Ozeane
 - Kritische Temperatur
 - 47°C globaler Durchschnitt
 - Nach 1.1 Mrd a
 - Run-Away-Effekt
 - Globales Verdunsten alles Wassers
- Venus-Bedingungen



Weitere Entwicklung

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

→ **Roter Riese**



- Freigesetzte Energie bläht Sonne bis zur Erdbahn auf
- Oberflächentemperatur: $\sim 2500\text{K}$
- Innere Planeten werden vom Stern “verschluckt”

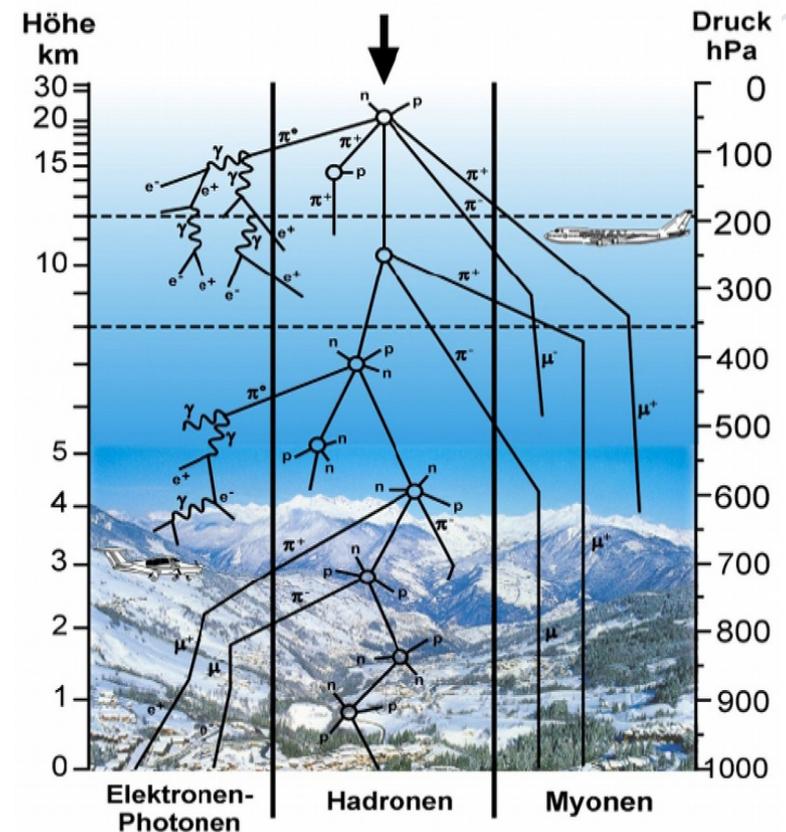
Weitere Sternentwicklung

- 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**
 - so hell wie ganze Galaxie
 - = Gesamtleuchtkraft der Sonne in 10 Mrd. a
→ **Supernova**
 - Hauptteil der Strahlung als γ -Strahlen



Wirkung

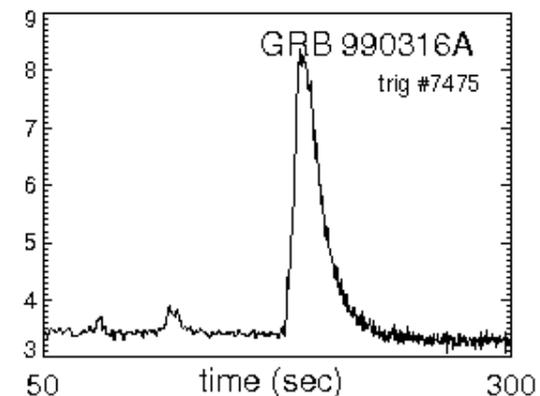
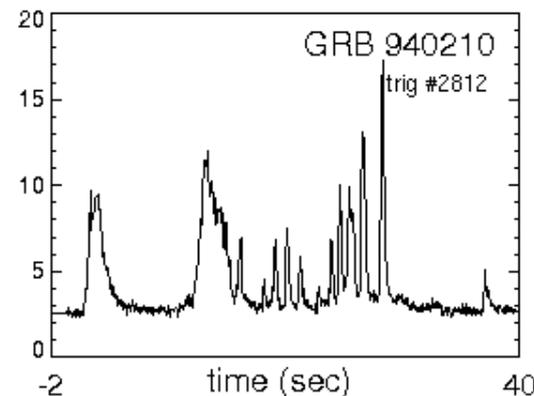
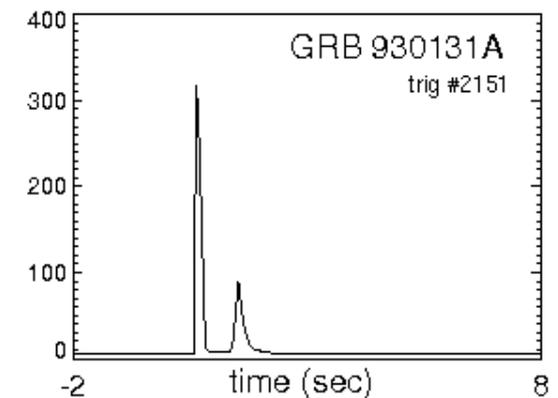
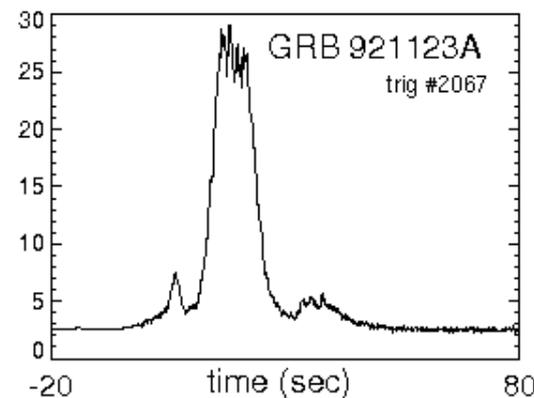
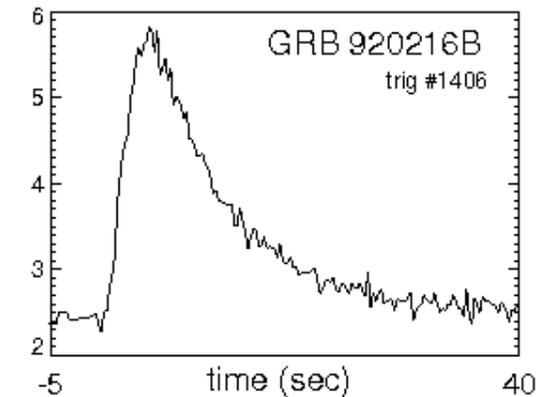
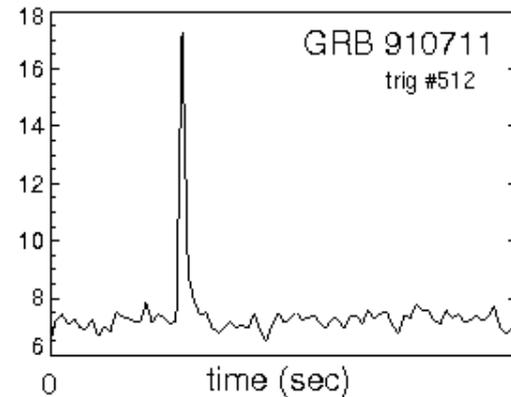
- γ -Strahlung aus Explosion in der Nähe
 - reagiert mit Atomen der Hochatmosphäre
 - Erzeugt sekundäre Teilchen
 - Mögliche lethale Dosis für Lebewesen auf zugewandter Seite
 - Zerstörung der Ozonschicht
 - Messbar für $d < 3000$ Lichtjahre
 - 50%-Zerstörung für $d < 25$ Lichtjahre
 - Intensive UV-Strahlung
 - „Kosmischer Winter“ durch chemische Änderung der Atmosphäre
- Nächster Kandidat: IK Pegasi
 - $d=150$ Lichtjahre
 - Einige 100 Mio a



γ -Strahlenausbrüche (GRBs)

Energetisch leistungsstärkste Ereignisse im Universum:

- $10^{44} - 10^{47} \text{ J} \cong \frac{1}{2000} - \frac{1}{2} M_{\odot}$
- Gebündelt
- 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:

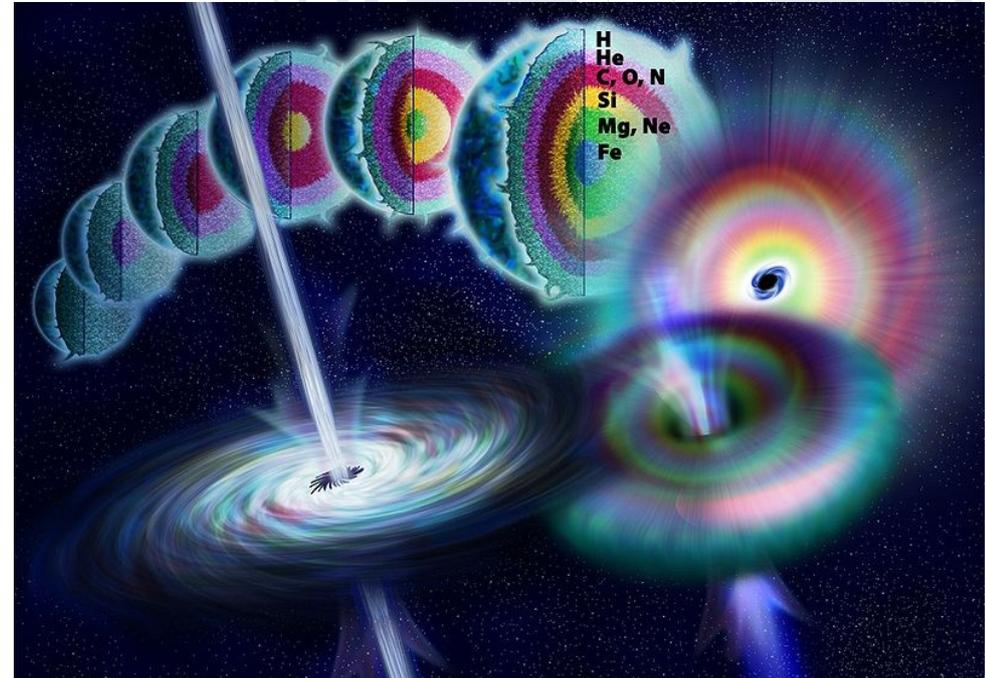
- a) SN mit Bildung eines schwarzen Loches

- Energiefreisetzung, wenn schwarzes Loch innere Schalen “verschlingt”
- Erklärt lange GRBs
- Stark gebündelt
 - Geringe Wahrscheinlichkeit, getroffen zu werden

- Nächster bekannter Kandidat:

- **WR 104**

- $d=2300\text{pc}$
- In weniger als 2 Mio a
- Rotationsachse wahrscheinlich nicht auf uns gerichtet ($2^\circ\text{-}16^\circ \pm 4^\circ$)
→ geringe Wahrscheinlichkeit vom Strahl getroffen zu werden

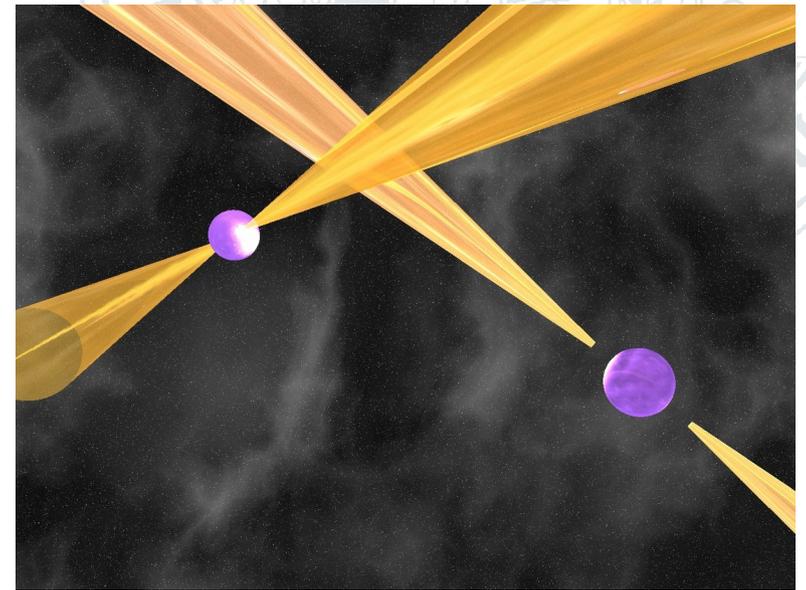


γ -Strahlenausbrüche (GRBs)

- 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 → Chance getroffen zu werden
- Gesamthäufigkeit: 2-5 alle 1 Mio Jahre in Milchstraße (kollimiert)



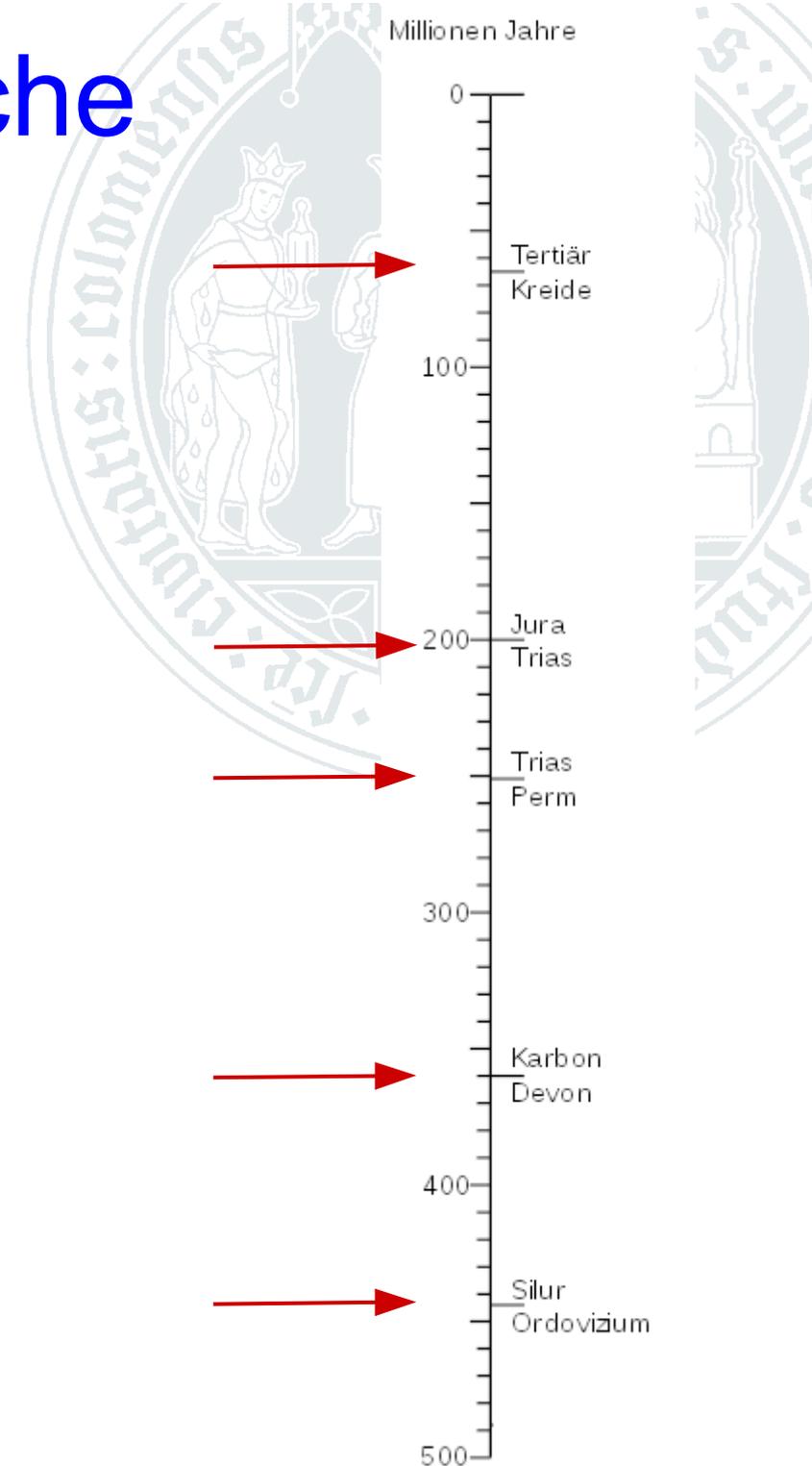
γ -Strahlenausbrüche

- **Wirkung**

- Ähnlich Supernova-Explosion
- WR104 würde 25% allen Ozons zerstören

- **Stellare γ -Ereignisse:**

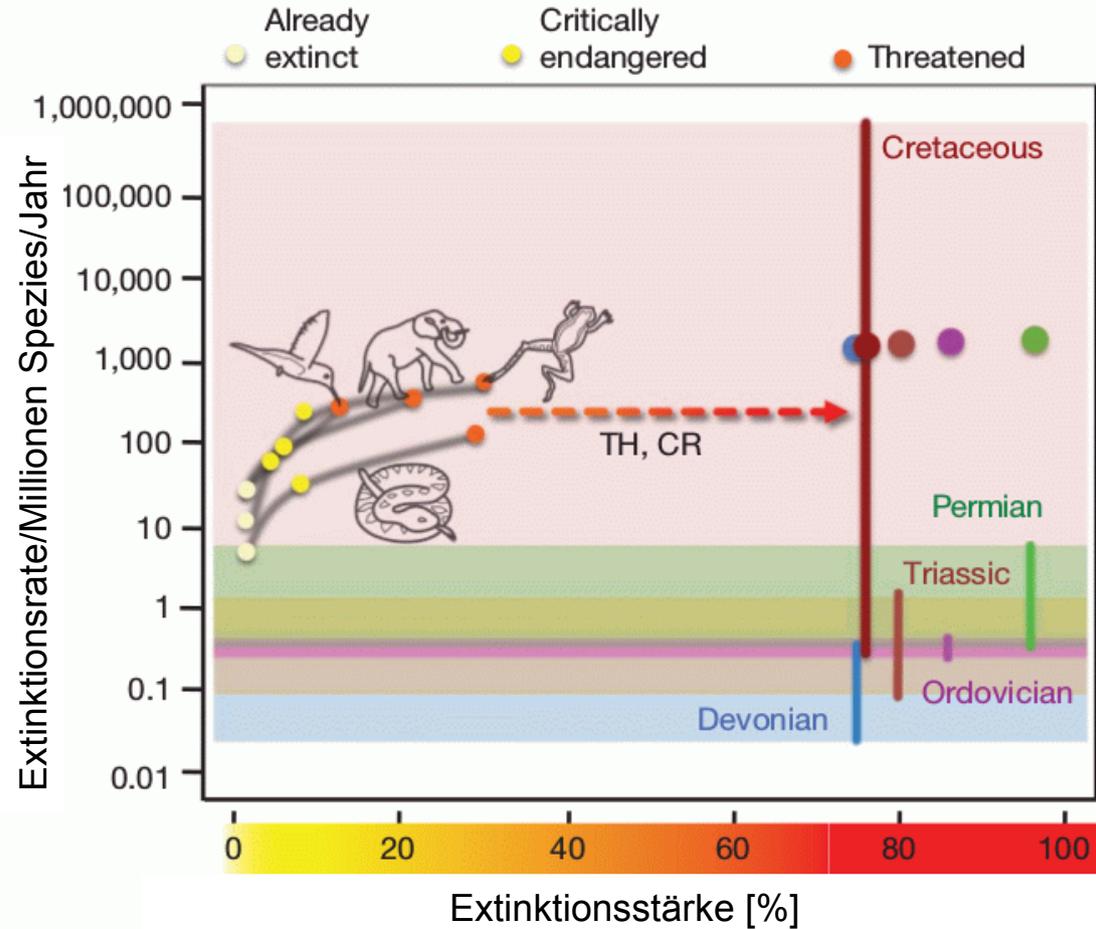
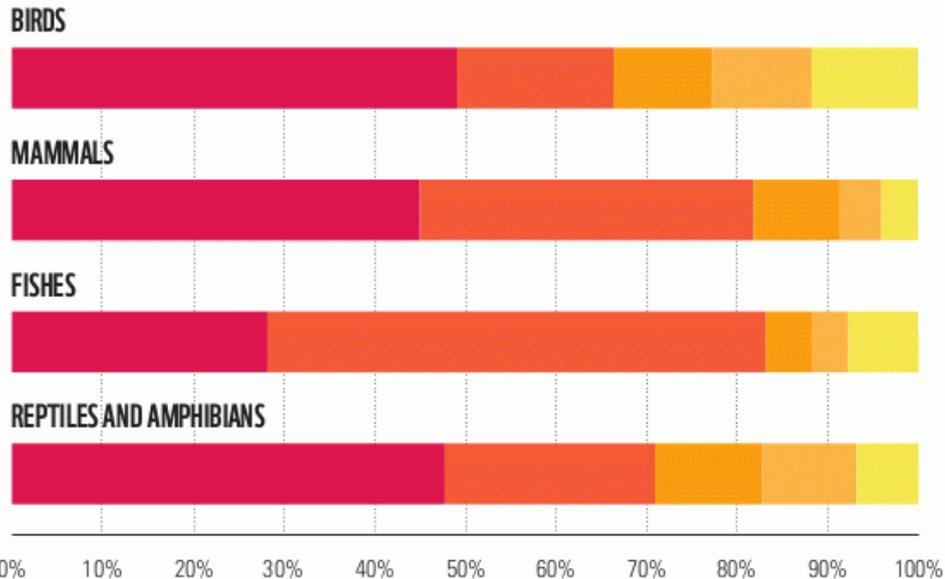
- Statistisch alle 100 Mio a
- Massensterben
 - Mögliche Ursache für Trias-Aussterben vor 200 Mio a (umstritten)
- Überleben in den Ozeanen
- Meistes bisheriges Massenaussterben wahrscheinlich eher durch Kontinentaldrift



Massenaussterben

- **Historisch:**

- Auslöschungstärke 75-95%
 - Maritim 25-50%
- Aktuelles 6. Massensterben
 - Bisher wenige Prozent, aber hohe Rate
 - Ozeane ähnlich betroffen



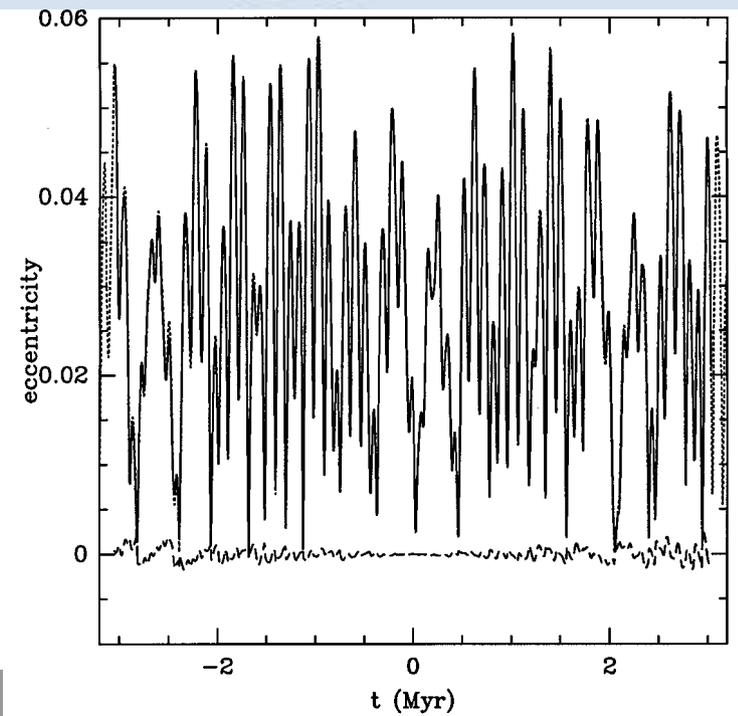
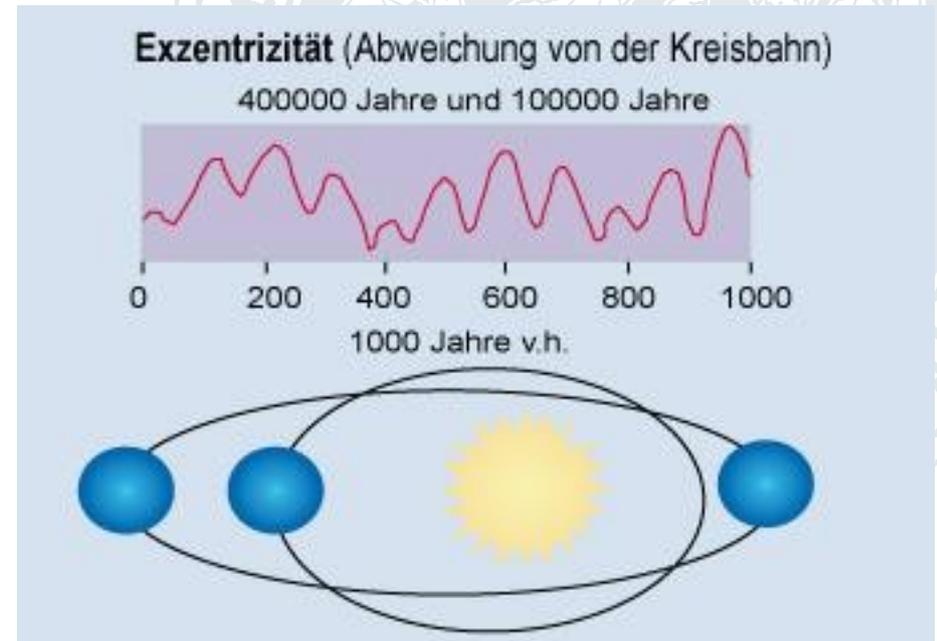
Extinktionsstärken und -raten verschiedenen Massensterbens (Barnosky et al. 2011)

Ursachen: **Verlust von Lebensraum**, **direkte Jagd**, **invasive Spezies**, **Verschmutzung**, **Klimaerwärmung**

Die Erdbahn

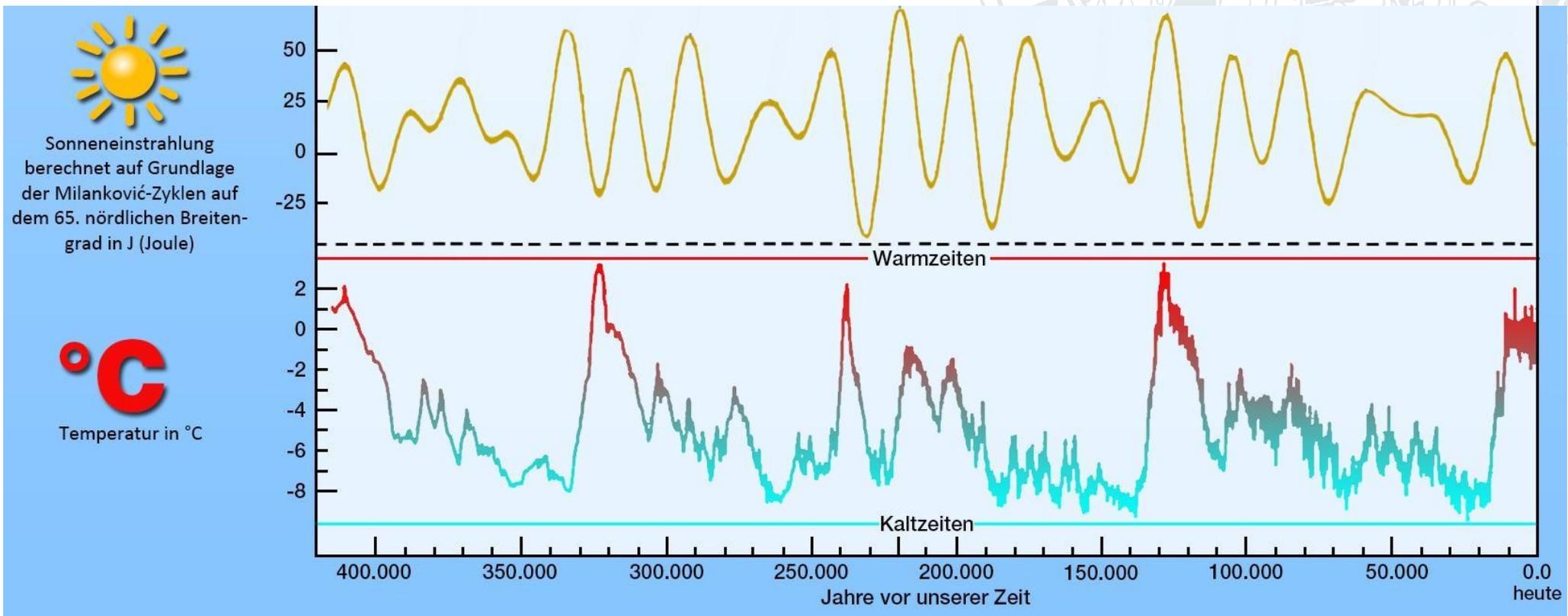
- Sonnensystem ist Mehrkörperproblem
- Wechselwirkung mit Mond, Jupiter bzw. Nachbarplaneten
- Bewegungen keine einfachen Keplerbahnen
- Wichtigster Effekt: Änderung der Bahnexzentrizität
- Liefert Änderung der Sonneneinstrahlung

Berechnete Bahnexzentrizität der Erde über 6 Ma



Die Erdbahn

- Erdorbit:
 - Exzentrizität ändert sich mit Perioden von 100,000 und 400,000a

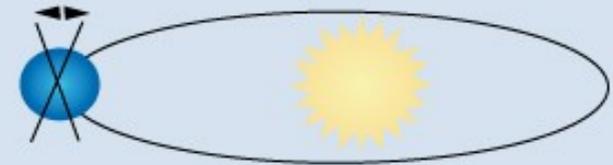
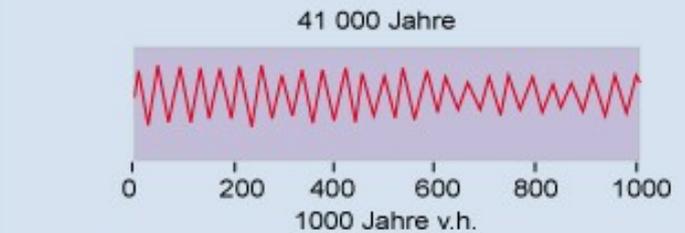


- Keine direkte Übersetzung in Kalt- und Warmzeiten

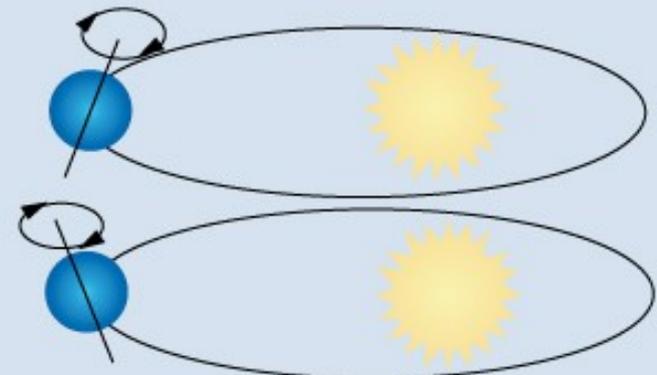
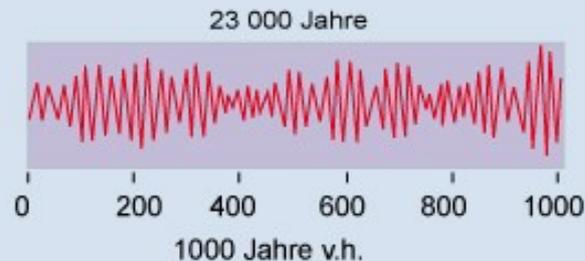
Die Erdbahn

- Weitere Bahneffekte:
 - Präzession, Periode 25800a
 - Erdneigung, Periode 41000a,
21°55'-24°18'
 - Überlagerung liefert "Milankovic-Zyklen"
 - Ändert die **relative Sonneneinstrahlung auf Süd- und Nordhalbkugel**, bzw. verschiedenen Breiten

Obliquität (Neigung der Erdachse gegen die Erdbahnebene)

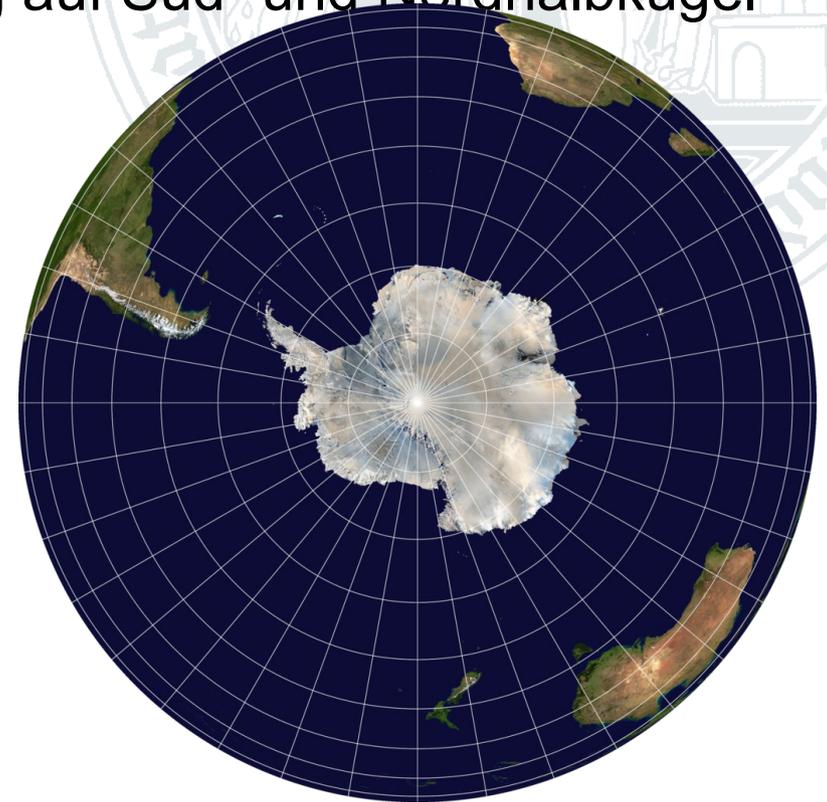
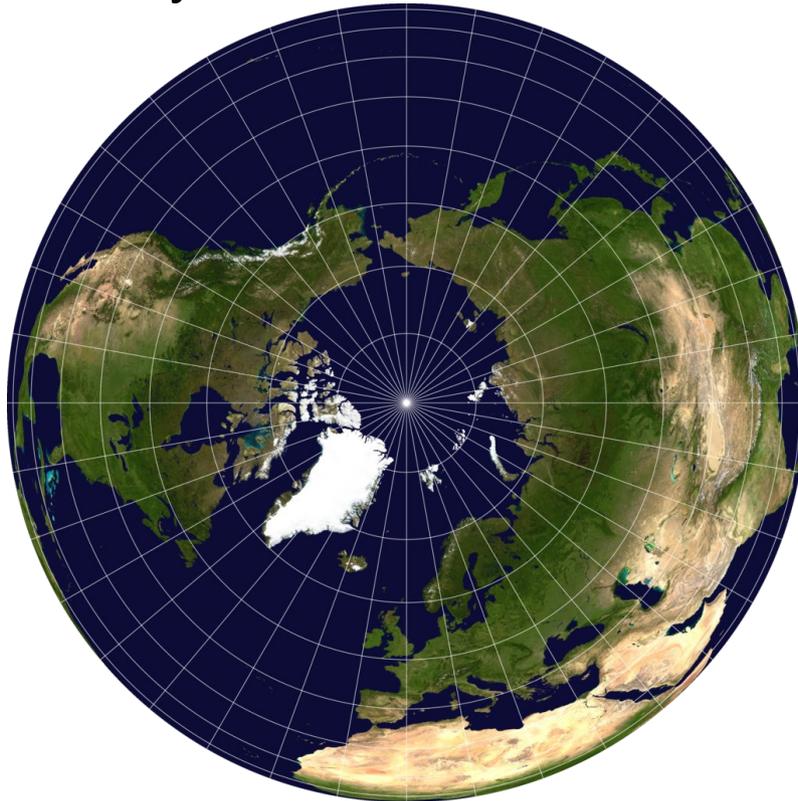


Präzession (Schwingung der Erdachse um die Senkrechte auf der Erdbahnebene)



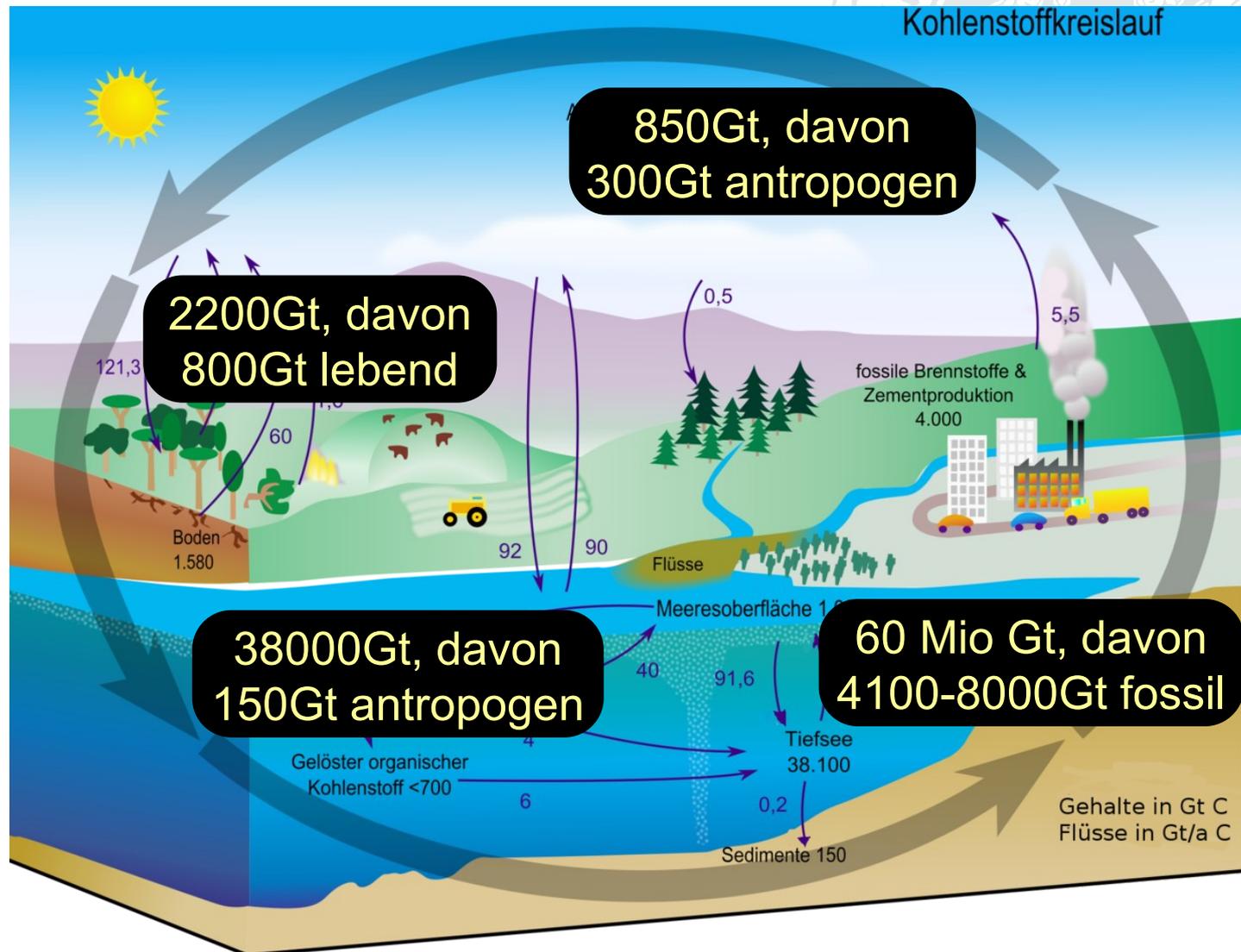
Rückkopplungen

- Weitere Bahneffekte:
 - Milankovic-Zyklen: Sonneneinstrahlung auf Süd- und Nordhalbkugel



- Rückkopplung mit kontinentalen Gletschern
 - Nord-Sommer im sonnenfernem Punkt erlaubt Gletscherwachstum
- Unterschiedliche Wirkung je nach Kontinentaldrift

Treibhauseffekt und C-Zyklus



- Großer Teil des (auch antropogenen) CO_2 im Ozean gebunden
- CO_2 - (+ CH_4 -)Speichervermögen des Ozeans stark temperaturabhängig

Sonnenbedingte Erwärmung

Milankovic-Zyklen:

- Warm- und Kalt-Zeiten nur bei Rückkopplung mit Eis und CO₂-Treibhauseffekt

CO₂

Gehalt Kohlendioxid in ppmv
(Teile pro Millionen)

CH₄

Gehalt Methan in ppbv
(Teile pro Milliarden)

O-18

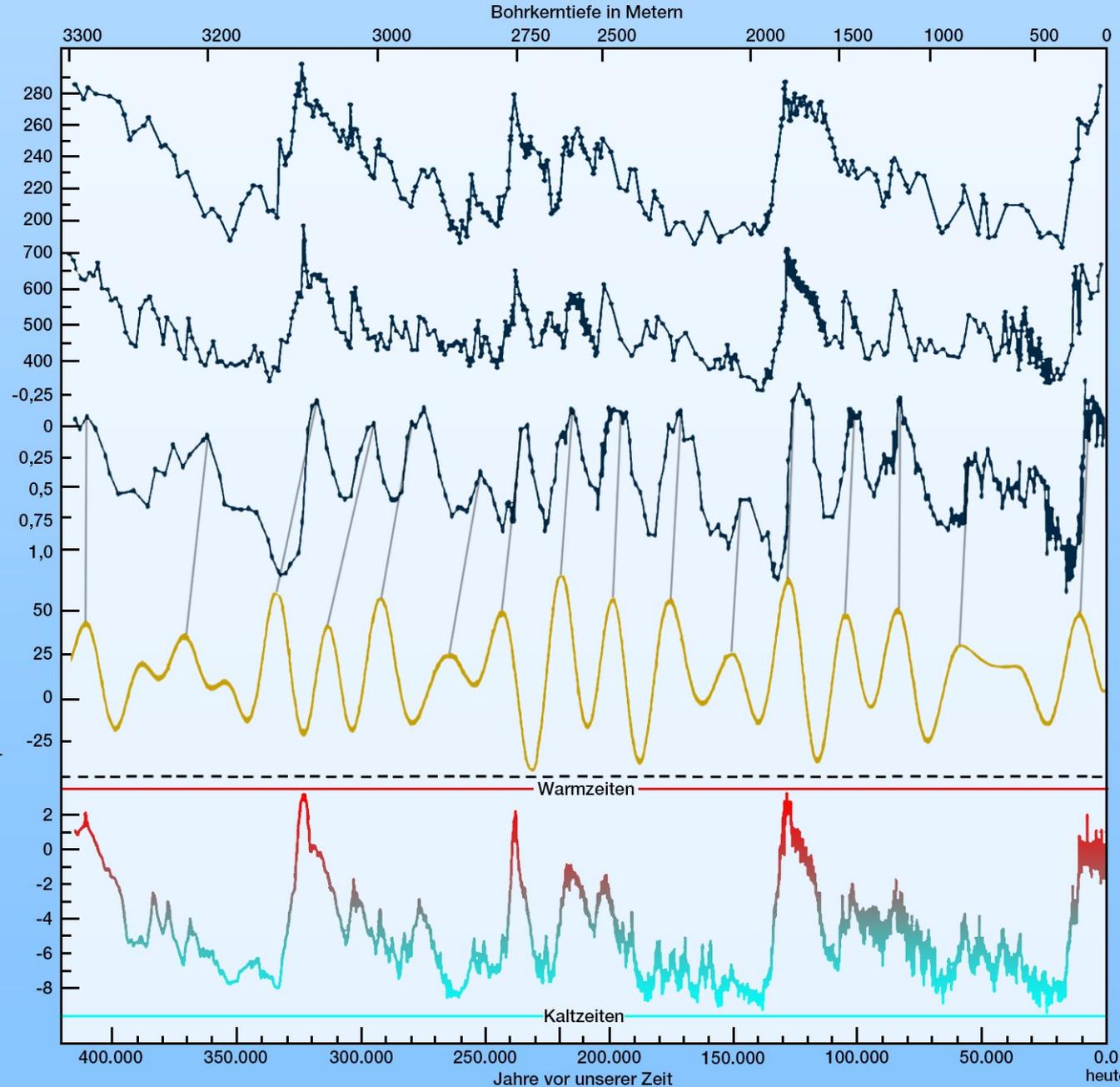
δ-Gehalt Sauerstoff-18 in ‰ (Promille)



Sonneneinstrahlung berechnet auf Grundlage der Milanković-Zyklen auf dem 65. nördlichen Breitengrad in J (Joule)



Temperatur in °C

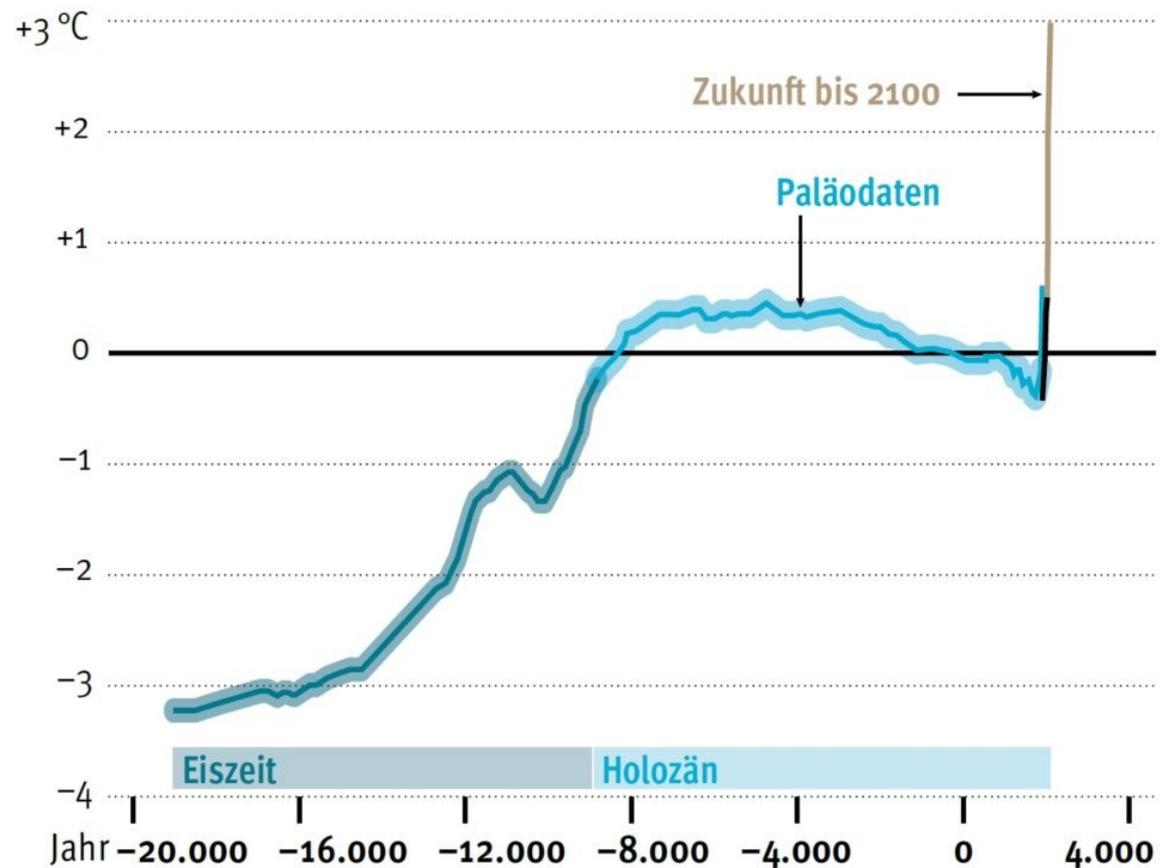


Sonnenbedingte Erwärmung

- Erdorbit:

- Nächste Eiszeit erwartet in 25000a
- Temperaturänderung vergleichbar, aber viel langsamer als antropogene globale Erwärmung
- Würde Anpassung der meisten Spezies durch Wanderung erlauben

Globale Temperaturänderung seit der Eiszeit



Quelle: Nature 2012, Science 2013

Asteroiden

- „Deep Impact“

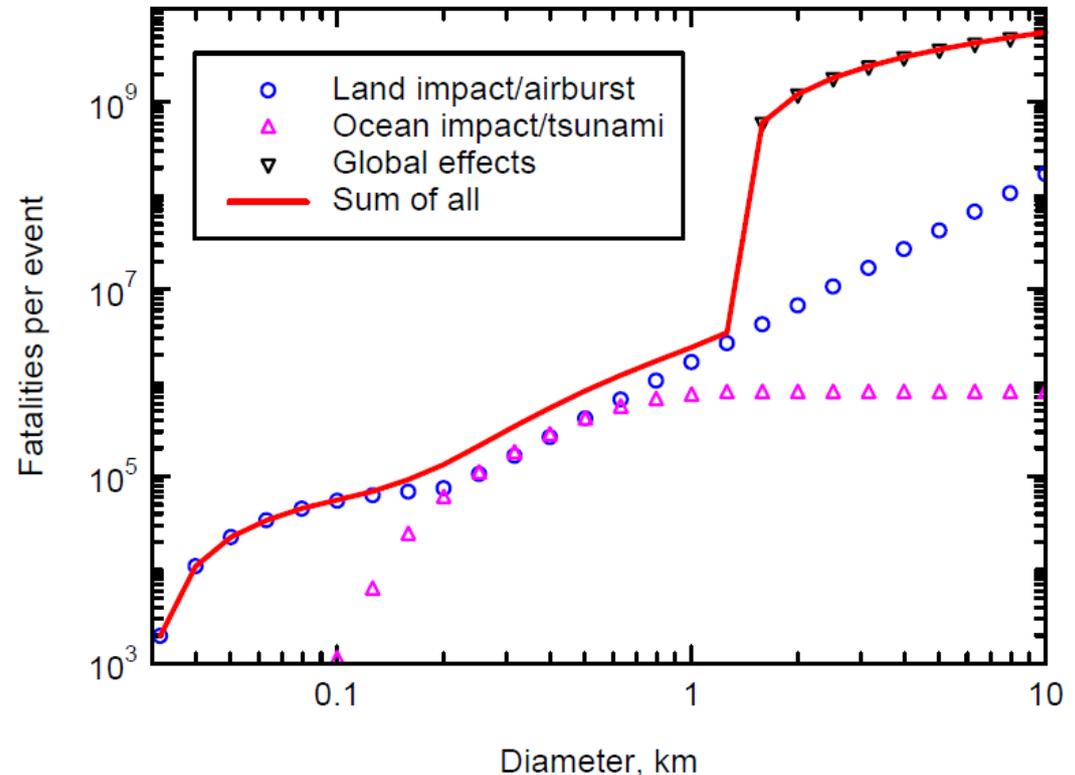


- Bsp: Yucatan-Einschlag eines 10km-Objektes vor 66.04 Mio a
 - Chixculub-Krater mit 180km Durchmesser
 - Kreide-Tertiär-Massensterben der Dinosaurier
 - Wahrscheinlich durch Verdunklung durch aufgewirbelten Staub

Einschlagswirkung

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 ab 10km werden zivilisationsbedrohend



Wahrscheinlichkeit

- Aus Geschichte der bisherigen Einschläge

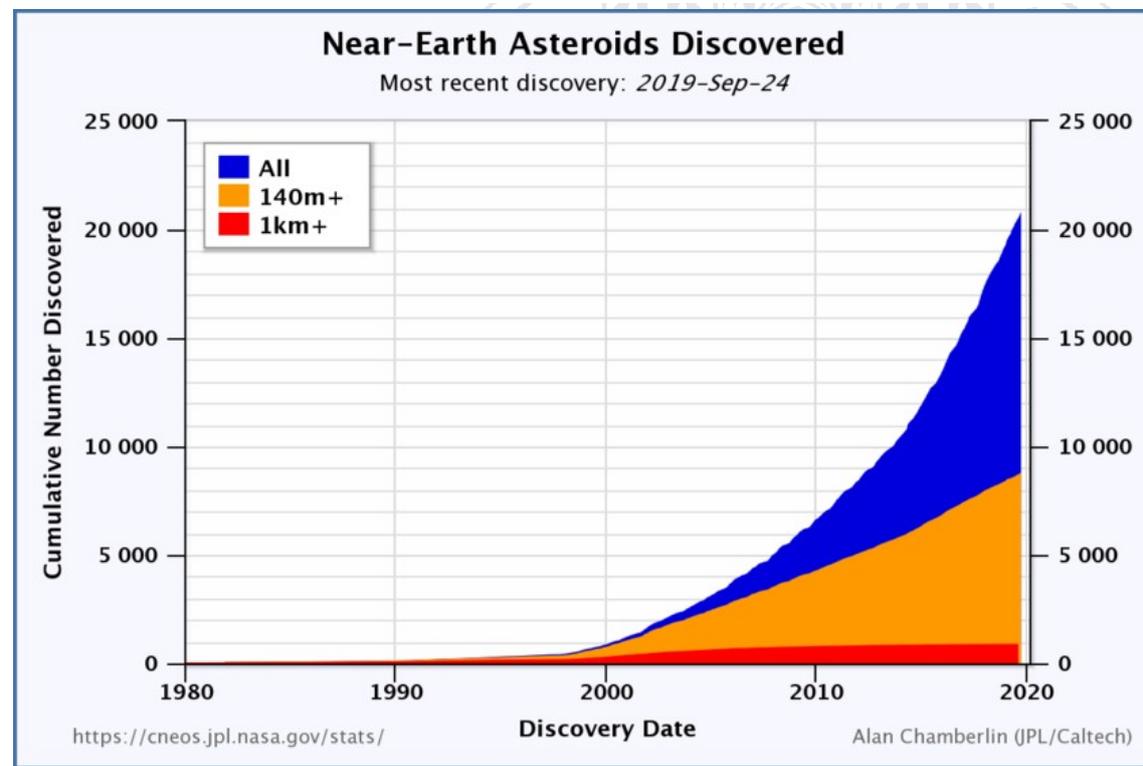


- Aus besser gespeicherter Kraterstatistik auf dem Mond

Größe	Häufigkeit
1mm	1 / 30s
1m	1 / a
10m	1 / 10a
100m	1 / 5000a
10km	1 / 100 Mio a

Überwachung

- Near-Earth-Object Programm der NASA
- Klassifikation als potenziell gefährliche Objekte (PHOs):
 - $d > 140\text{m}$,
Annäherung $< 7.5\text{Mio km}$

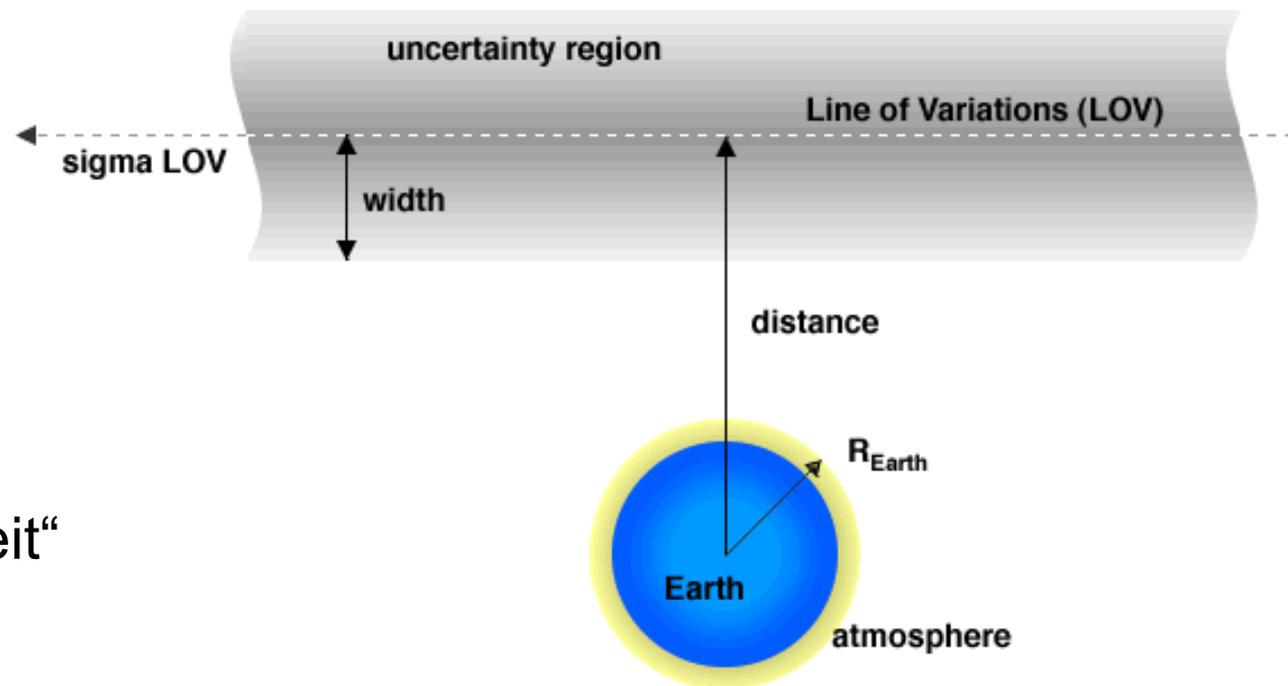


- **Problem**

- Unsicherheit des Bahnverlaufes

Gibt Streubereich

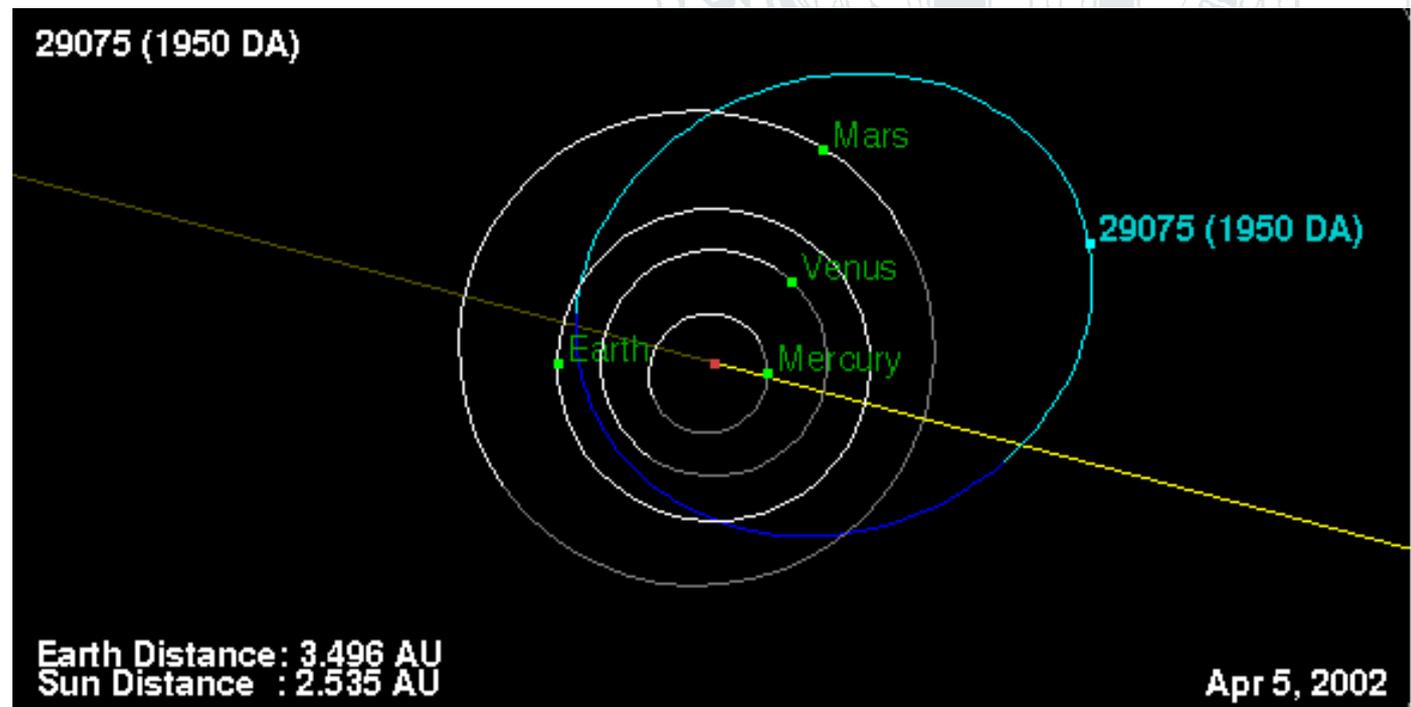
→ „Wahrscheinlichkeit“
eines Treffers



Deep Impact

- Nächste relevante Kandidaten:

- 2010 RF12
 - 5.9.2095
 - $p=1/50$
 - aber $\varnothing=7\text{m}$
- 1950 DA
 - 16.3.2880
 - $p=1/300$
 - $\varnothing=2\text{km}$



- Rest: nur statistisches Risiko entsprechend Häufigkeitsverteilung
 - Planetenweite Katastrophe 1/100Mio a

Asteroidenabwehr

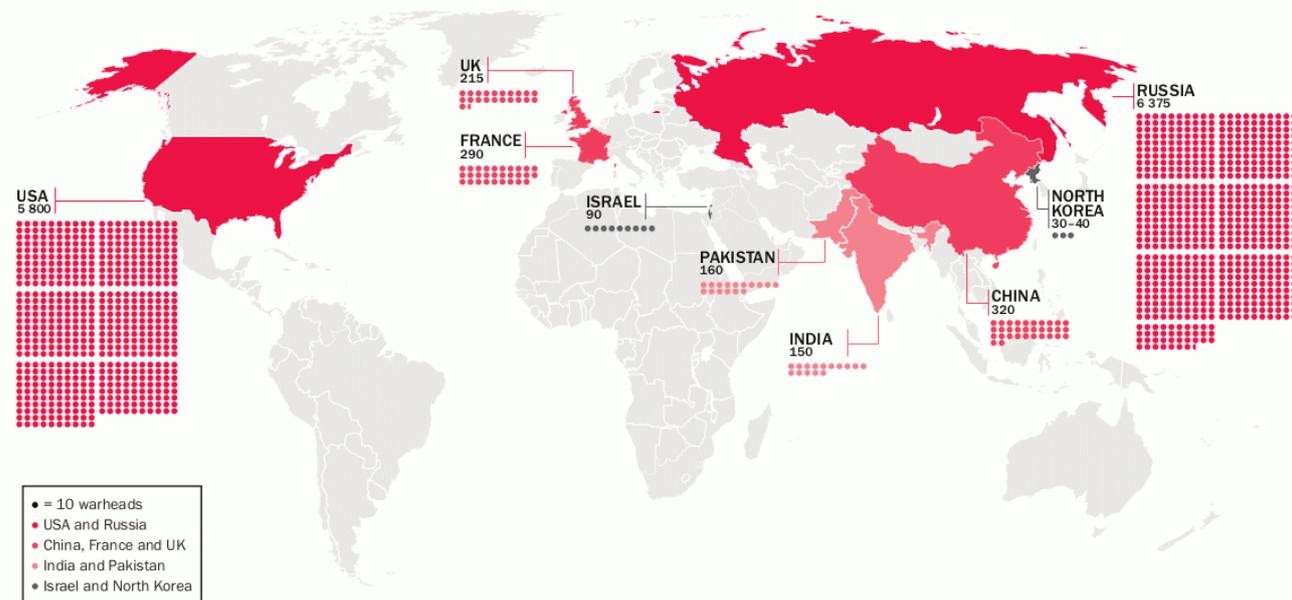
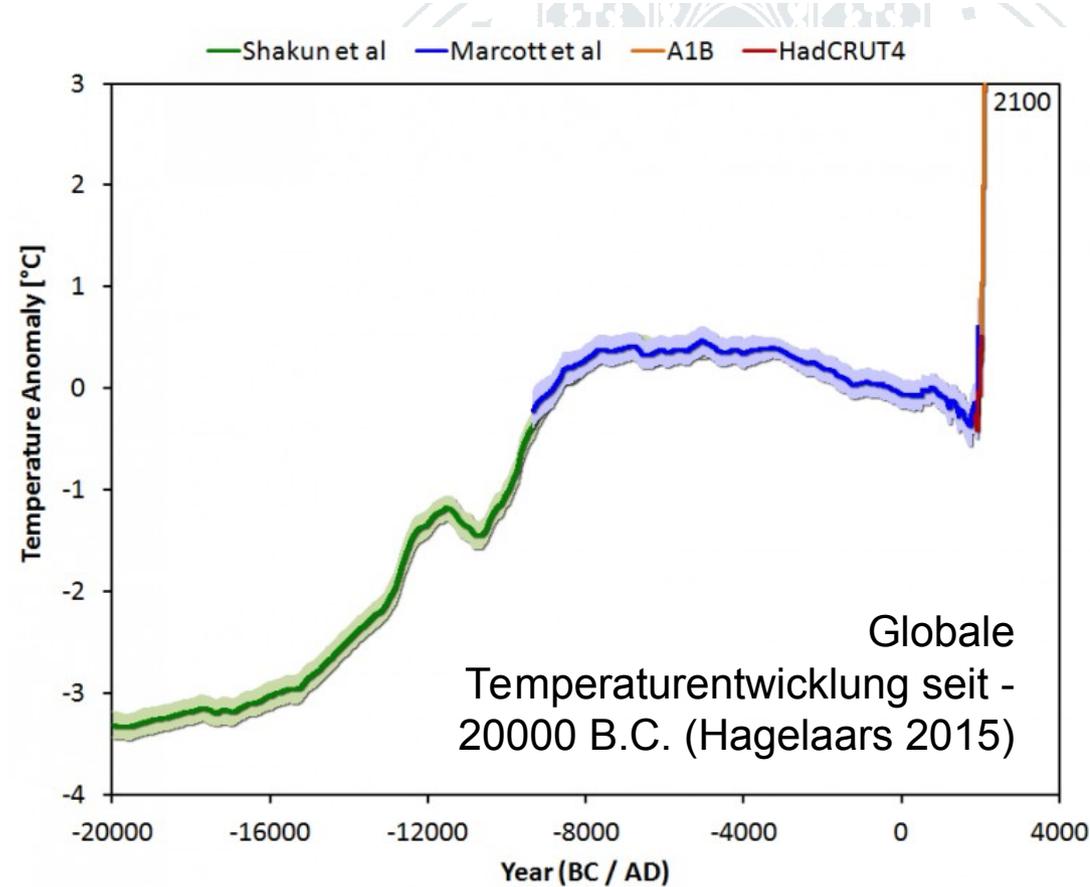
- **NASA:**
 - “Planetary Defense”-Programm
 - Suche nach gefährlichen Asteroiden
 - 2019: 150 Mio \$
 - Osiris-REx-Mission
 - Mission zu potentiell gefährlichem Asteroiden “Bennu” 2016-2021
 - 983.5 Mio \$
 - DART-Mission (Double Asteroid Redirection Test)
 - Start geplant 22.7.2021
- **Vergleich: IPCC 1.5-Grad-Ziel**
 - 69% Wahrscheinlichkeit eine planetenweite Katastrophe noch zu verhindern



Osiris-REx bei Bennu (NASA)

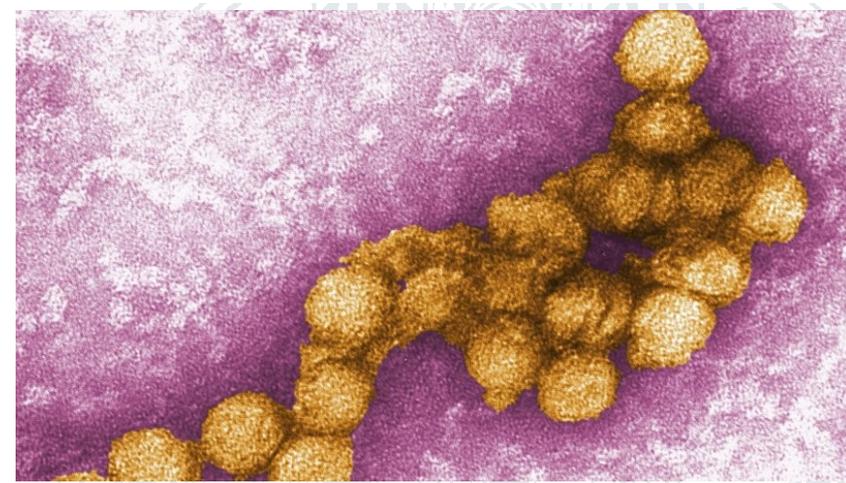
Das Risiko auf der Erde

- **Menschengemacht:**
 - Globale Erwärmung führt zu neuen Verteilungskämpfen
 - **Massenvernichtungsmittel** weiterhin menscheitsbedrohend



Aktueller Kernwaffenbestand (SIPRI-Report 2020)

Das Risiko auf der Erde



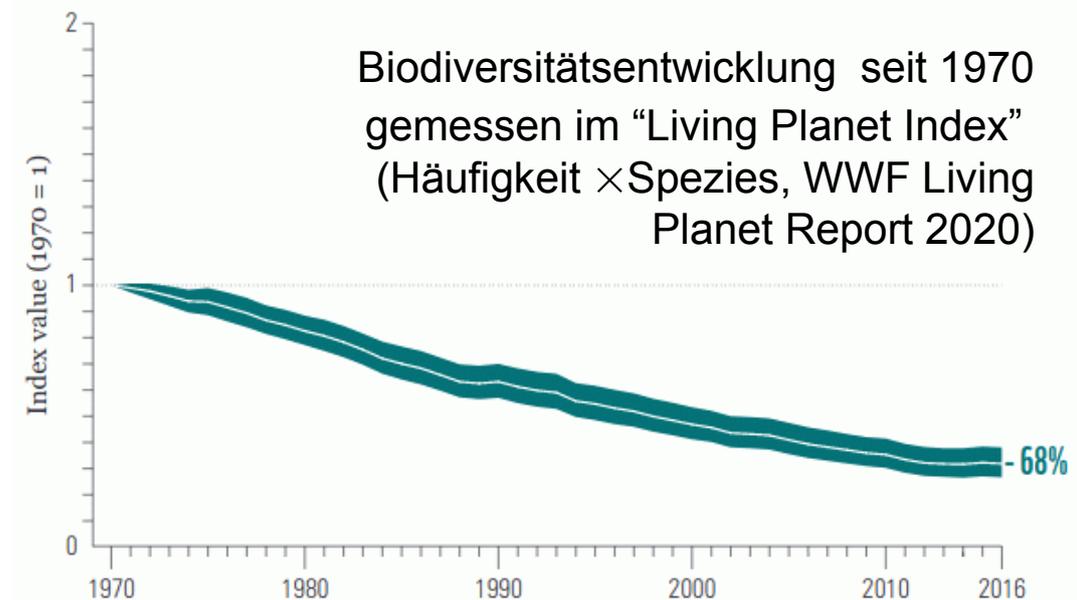
West-Nil-Fieber-Virus
seit 2019 in
Deutschland

- **Menschengemacht: Pandemien**

- Neue Erreger durch intensiviertete Tiernutzung (COVID-19)
- Ausbreitung durch globale Produktionsketten und **Klimaerwärmung**
- Geschwächte Abwehr durch Verteilungskämpfe und **Reduktion der Biodiversität**



Biodiversität
essenziell für
Bandbreite der
Behandlungs
möglichkeiten



Historische Parallelen?

- Zivilisation der Osterinseln
 - Hat sich durch Raubbau an natürlichen Ressourcen (Wald) selbst vernichtet



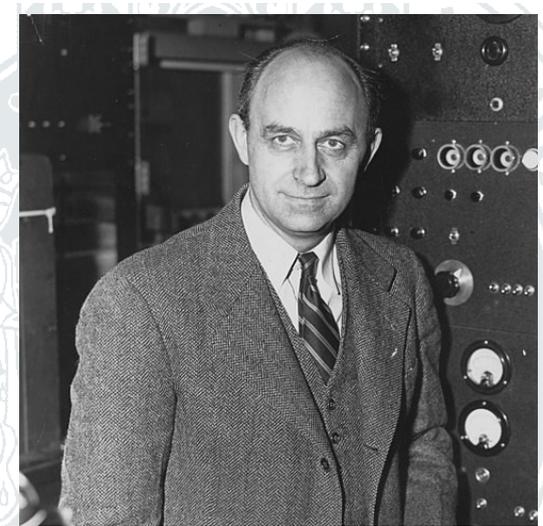
Isla de Pascua

Der große Filter

- Fermi-Paradoxon (eigentlich Hart-Tipler-Paradoxon)

- “Wo sind sie denn alle?”
- Bei Milliarden Planetensystemen in der Milchstraße müssten wir doch häufigen Besuch bekommen haben.
- Verschiedene Erklärungen
 - u.a. „Der große Filter“

Star-Wars-Aliens



Der große Filter

- **Entwicklungssequenz für interstellare Intelligenzen**

- 1) Geeignete Bedingungen im Planetensystem
(Sterncharakteristik, chemische Häufigkeiten)
- 2) Reproduktive Moleküle (RNA)
- 3) Prokariotische Einzeller
- 4) Eukariotische Einzeller
- 5) Sexuelle Reproduktion zur Genmodifikation
- 6) Mehrzeller
- 7) Werkzeugbenutzung („Intelligenz“)
- 8) Interstellare Raumfahrt und Kommunikation

Einer dieser Schritte ist so unwahrscheinlich, dass kaum eine Spezies ihn überwindet: **“der große Filter”**. Diesen könnten wir gerade selbst gebaut haben.

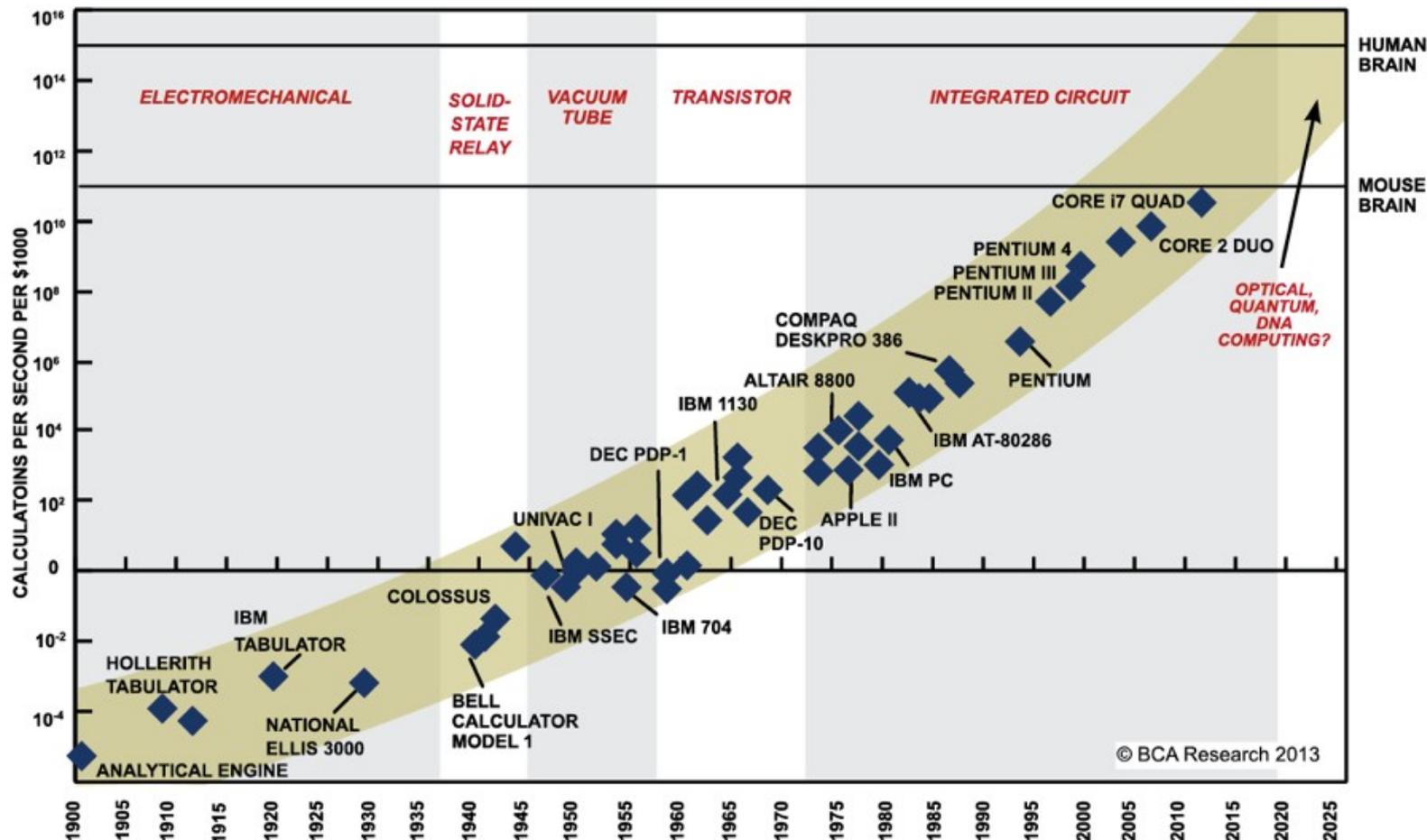
- Bisher gibt es keinen Hinweis, dass “Intelligenz” langfristig nützlich ist.

Ein „positives Ende“ (?)

- „Technologische Singularität“

- Übernahme der Entwicklung durch Robotik

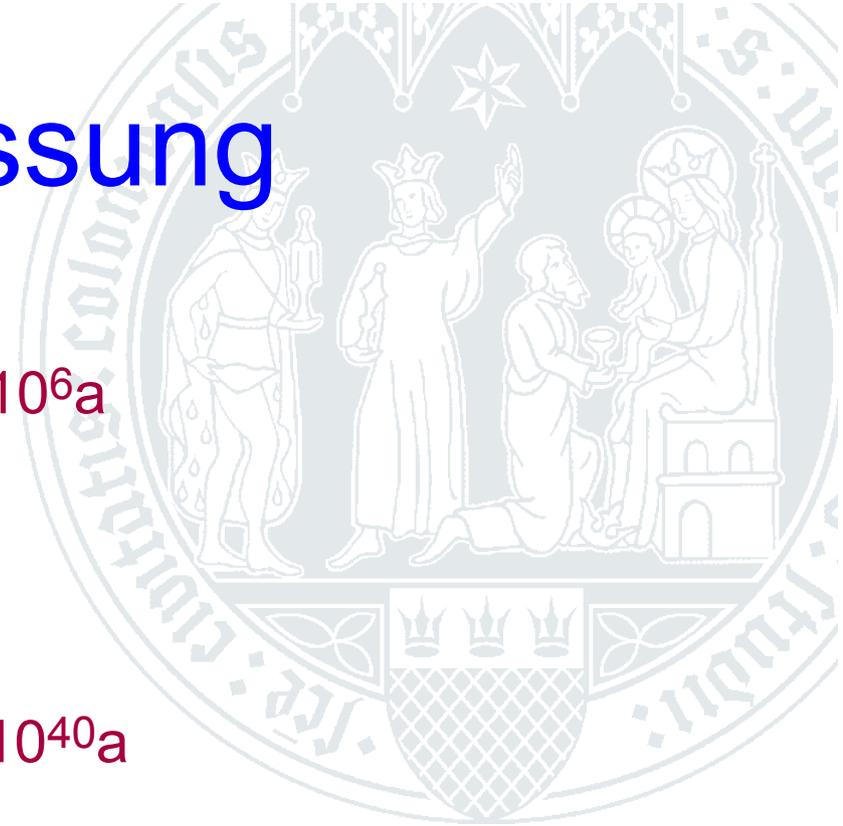
- Mensch wird vor sich selbst geschützt im “Zoo” der alten Spezies



Hofmann (2016)
basierend auf
Kurzweil (2005)

Zusammenfassung

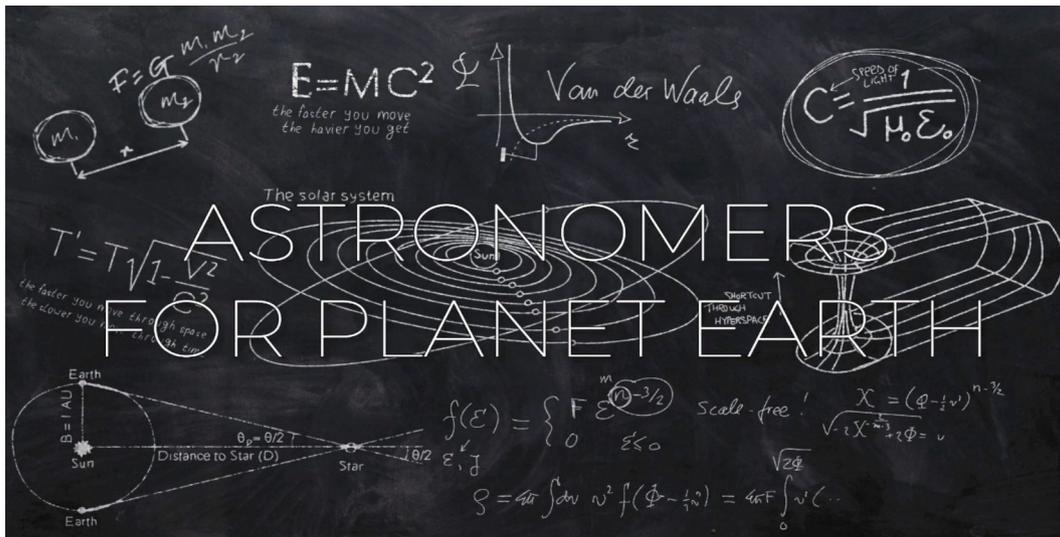
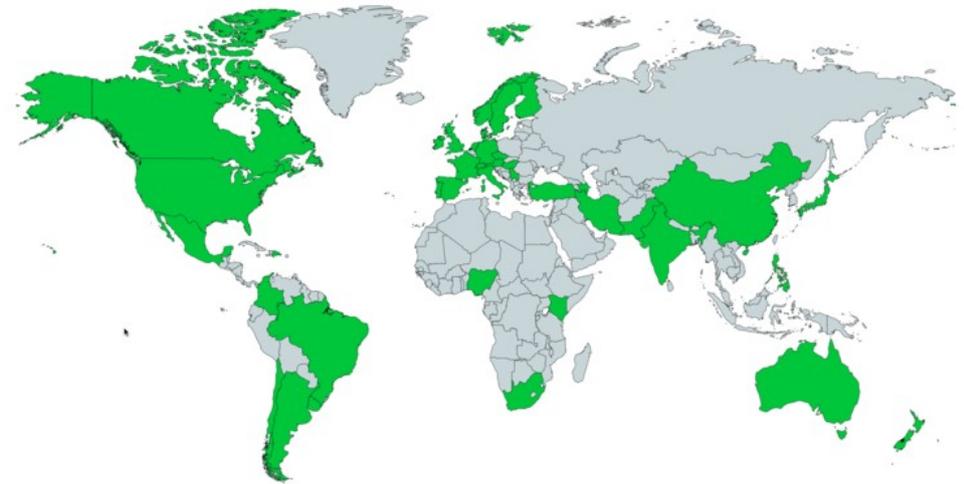
- Bisherige Menschliche Geschichte: $10^4 - 10^6 \text{a}$
- Sicheres Ende: Kältetod 10^{100}a
- Ende des Atom-basierten Lebens: $10^{15} - 10^{40} \text{a}$
- Ende der Erde: $5 \times 10^9 \text{a}$
- Ende des Sauerstoff-basierten Lebens auf der Erde: 10^9a
- Natürliche Ereignisse, die Massensterben auslösen:
GRBs, Supernovae, „Deep Impact“ > 10km: $10^6 - 10^8 \text{a}$
- Menschengemachtes Massensterben: $30 - 10^3 \text{a}$



Astronomers for Planet Earth



**Astronomen aus mittlerweile
41 Nationen**



“Es gibt keinen Planeten B!”

<https://astronomersforplanet.earth/>