

Das Ende des Sonnensystems

Claus Grupen
Universität Siegen

Warum drehen sich die Planeten um die Sonne?

Zur Zeit von Kepler glaubten noch einige Leute, dass Engel hinter den Planeten herflogen, die mit ihrem Flügelschlag die Planeten um die Erde trieben.

Heute ist planetare und solare Physik eine Präzisionswissenschaft.



Überblick:

Einleitung

- ☀ Ein paar Fakten zur Sonne
- ☀ Ein paar Informationen zum Sonnensystem, speziell zur Erde
- ☀ Wie wurde die Sonne geboren?
- ☀ Wie funktioniert die Sonne? Kernfusion!
- ☀ Klassifikation von Sternen: unsere Sonne ist ein Dutzendstern
- ☀ Ruhige Jugendzeit
- ☀ Mid-life Krise
- ☀ Ereignisloses Rentnerdasein der Sonne
- ☀ Roter Riese
- ☀ Helium-Brennen
- ☀ Planetarer Nebel
- ☀ Weißer Zwerg
- ☀ Schwarzer Zwerg aus Kohlenstoff und Sauerstoff



Der ägyptische
Sonnengott Amun-Ra

Einleitung

Wie ist es möglich, die sich über viele Milliarden von Jahren erstreckende Geschichte der Sonne im Detail zu verstehen und vorhersagen zu können?

Was braucht man dazu?

- Gravitation
- Hydrodynamik
- Kernphysik
- Elementarteilchenphysik (schwache Wechselwirkung)

alles Standardphysik, und weiter

- Blick in die Vergangenheit: am Himmel gibt es Sterne in allen Entwicklungsstufen

Die Stellare Evolution ist bis ins kleinste Detail verstanden. Noch bestehende Schwierigkeiten wurden in der letzten Dekade ausgeräumt.

Die Sonne ist ein Dutzendstern

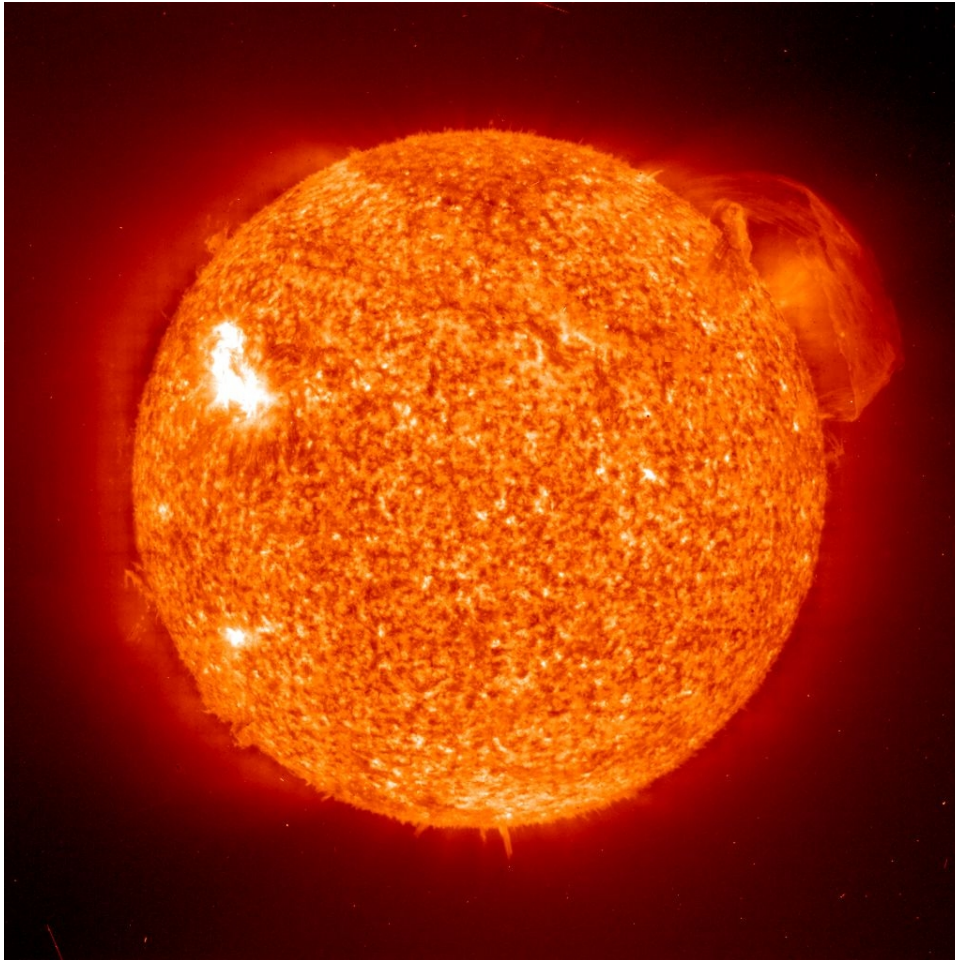
- ❖ einer unter hundert Milliarden in unserer Milchstraße,
- ❖ die wiederum eine unter hundert Milliarden anderen Galaxien darstellt.

Es gibt also 10^{22} Sonnen
(Sterne); davon können
wir mit bloßem Auge
etwa 6000 sehen.

Andromeda-Galaxie



Ein paar Fakten zur Sonne



Masse der Sonne:

$2 \cdot 10^{30}$ kg = 333 000 mal Erdmasse
(entspricht 99,9 % der Masse des
gesamten Sonnensystems)

Radius:

700 000 km

mittlere Dichte:

1,4 g/cm³

Rotationsdauer:

25 (Äquator) bis 36 Tage (Pole)
(differentielle Rotation)

Fluchtgeschwindigkeit:

618 km/s

Oberflächentemperatur:

5800 Kelvin

(0 Kelvin = -273,15 Grad Celsius)

Strahlungsleistung:

$3,8 \cdot 10^{26}$ Watt

an der Erde kommen an: $3 \cdot 10^{17}$ Watt

Weltleistungsbedarf: $2 \cdot 10^{12}$ Watt

gegenwärtiges Alter:

etwa 4,5 Milliarden Jahre

Bestandteile:

92,1 % Wasserstoff

7,8 % Helium

0,1 % "Metalle"

Abstand zur Erde:

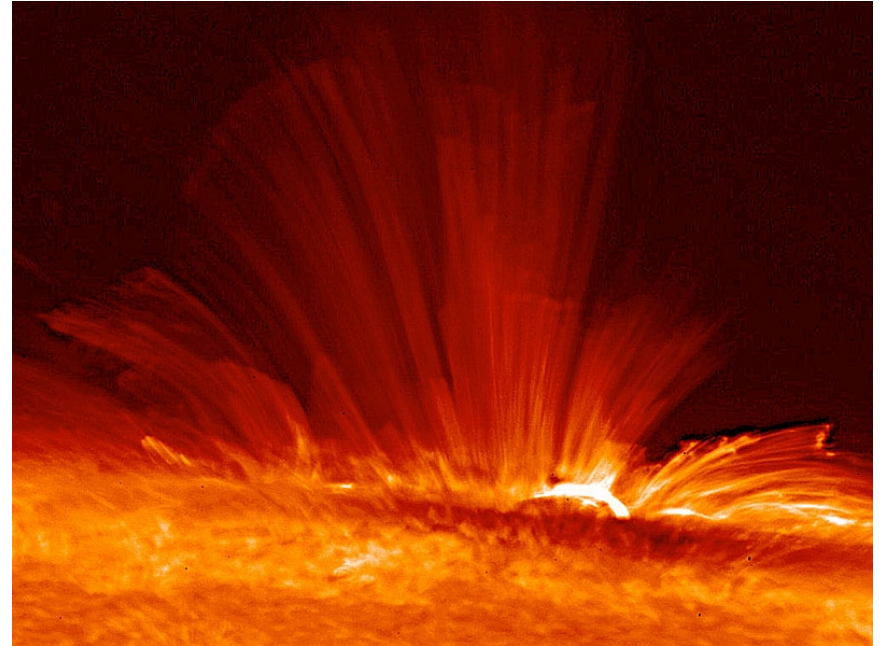
150 000 000 km (1 Astronomische Einheit = 1 AE)

Abstand zum Zentrum unserer Milchstraße:

28 000 Lichtjahre

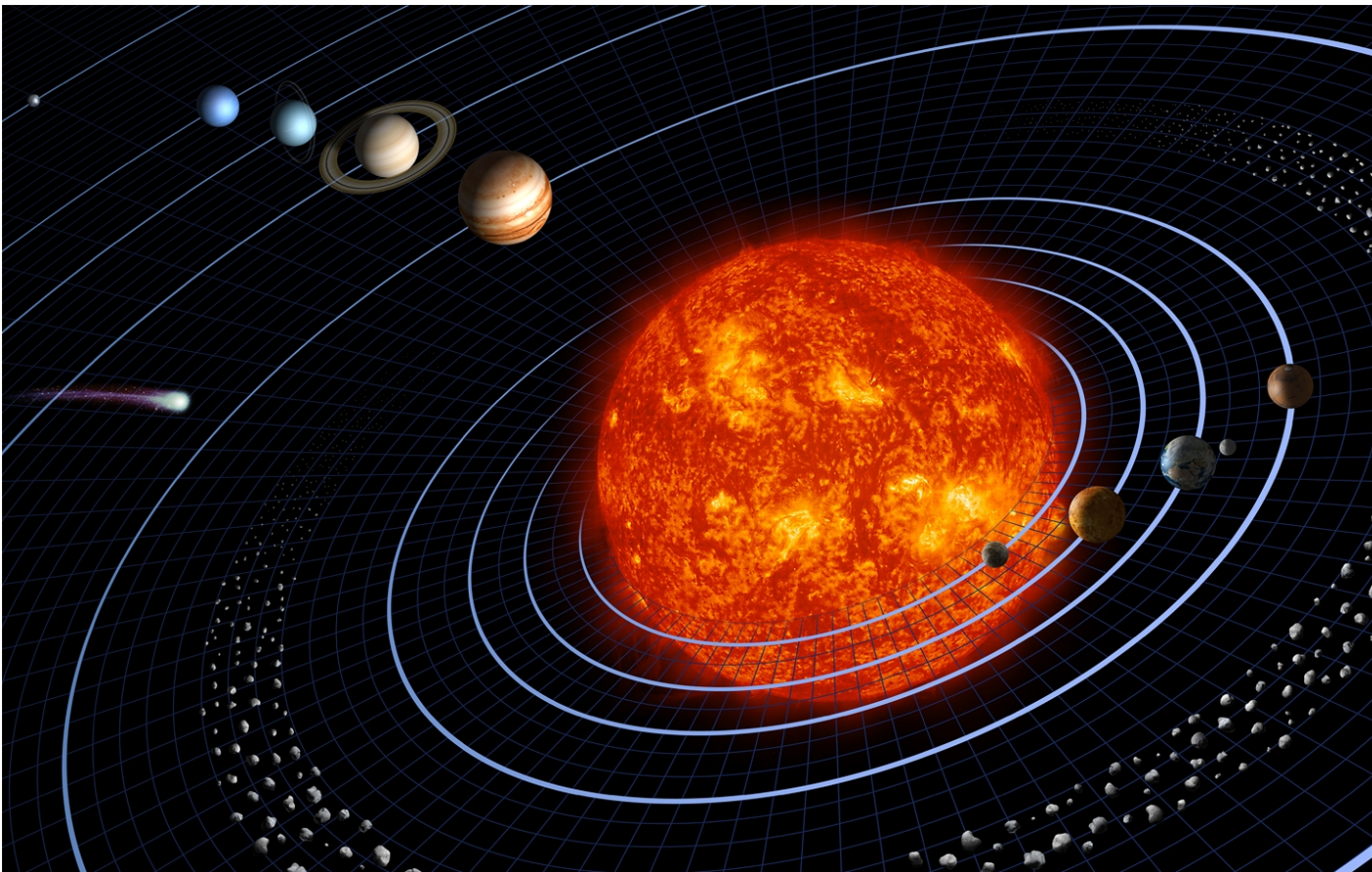
Umlaufgeschwindigkeit um das Zentrum unserer Milchstraße:

250 km/s





Ein paar Informationen zum Sonnensystem, speziell zur Erde



Unser
Sonnen-
system

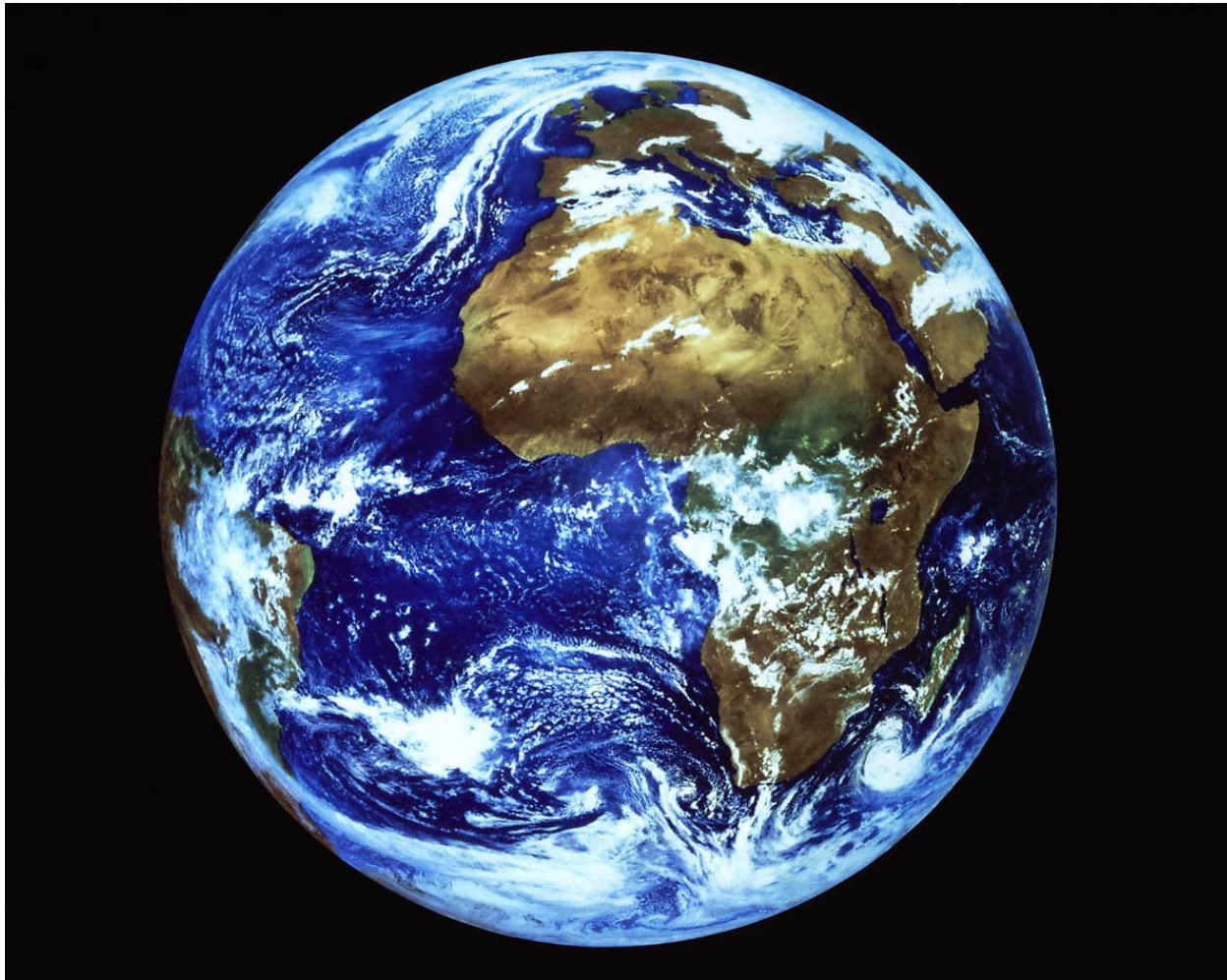


Bild der Erde

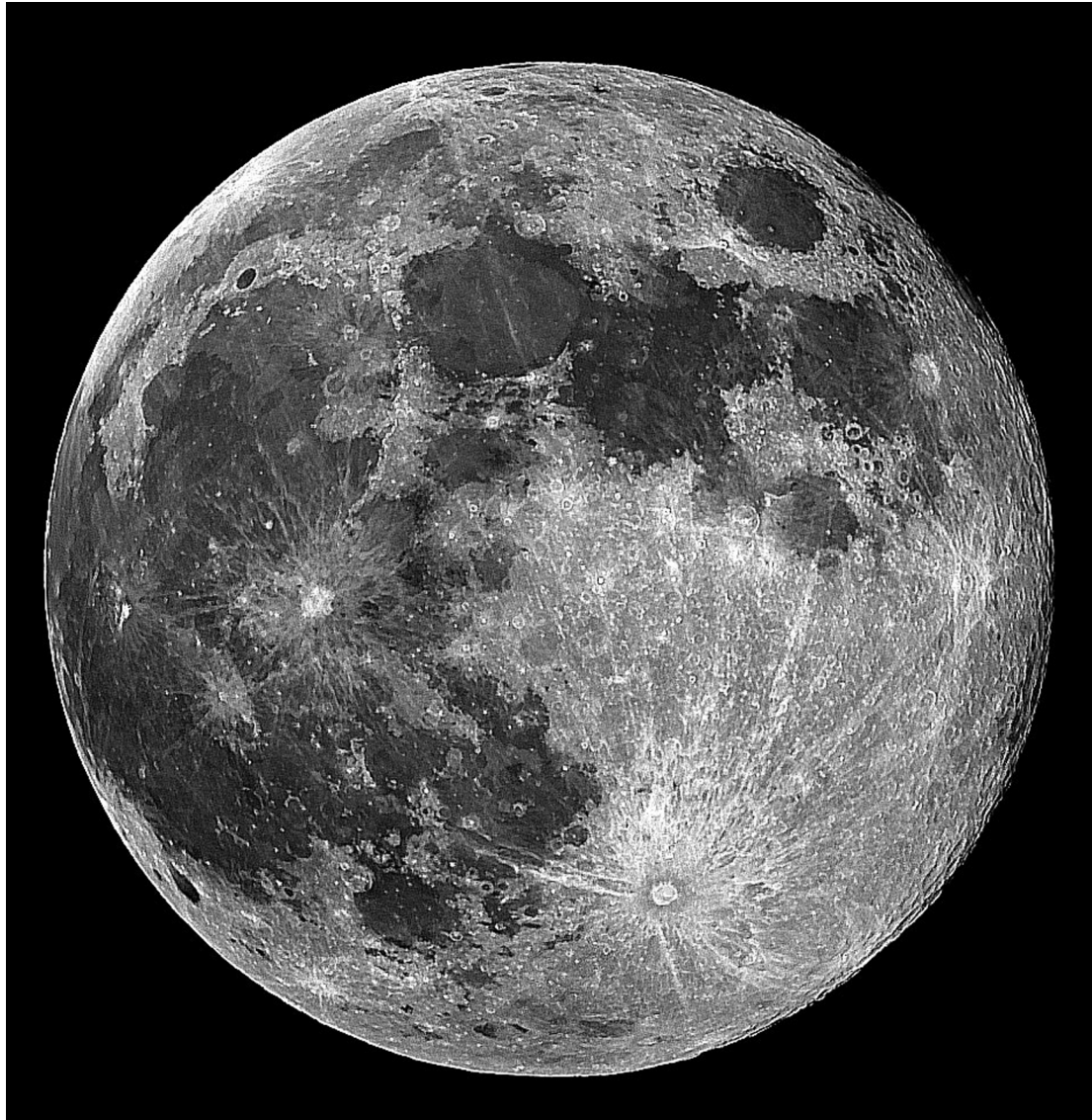


Bild des
Mondes

Ein paar Fakten zur Erde



Sonnenaufgang



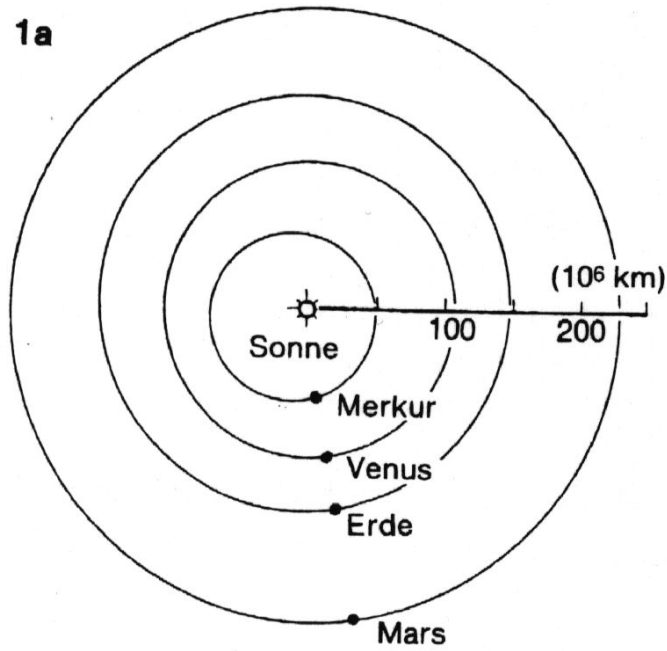
aufgehende Erde
über dem Mond



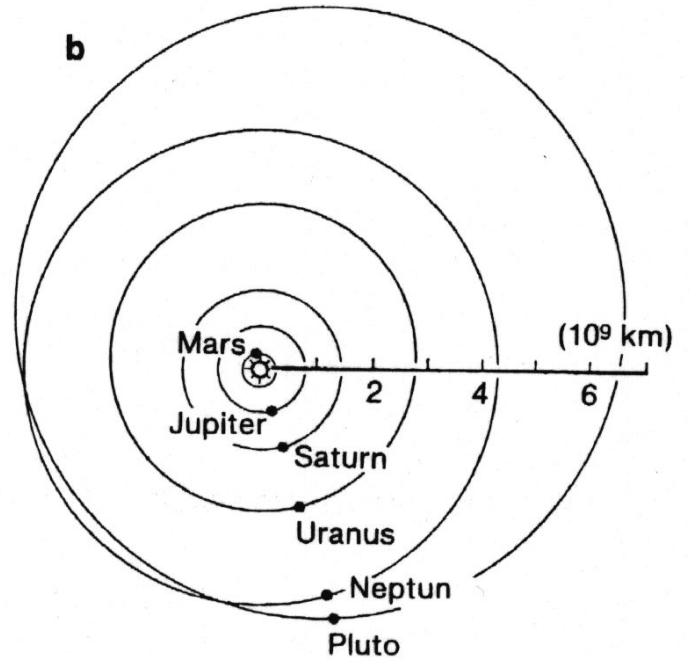
Empfindlichkeit der Erdatmosphäre
(Rayleigh Streuung)



1a



b



2

○ Merkur

○ Venus

○ Erde
(1 Mond)

○ Mars (2 Monde)

Sonnenrand

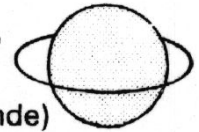
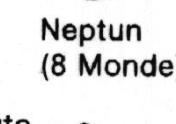
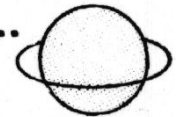
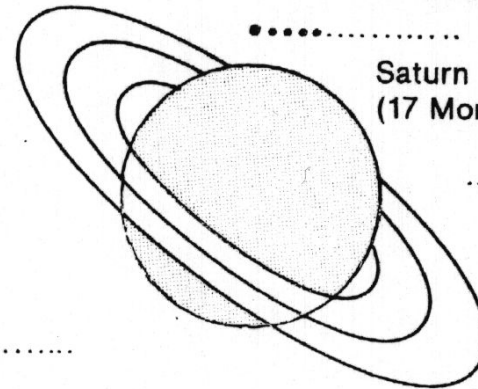
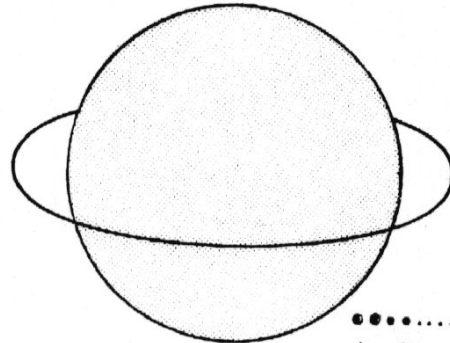
Uranus
(15 Monde)

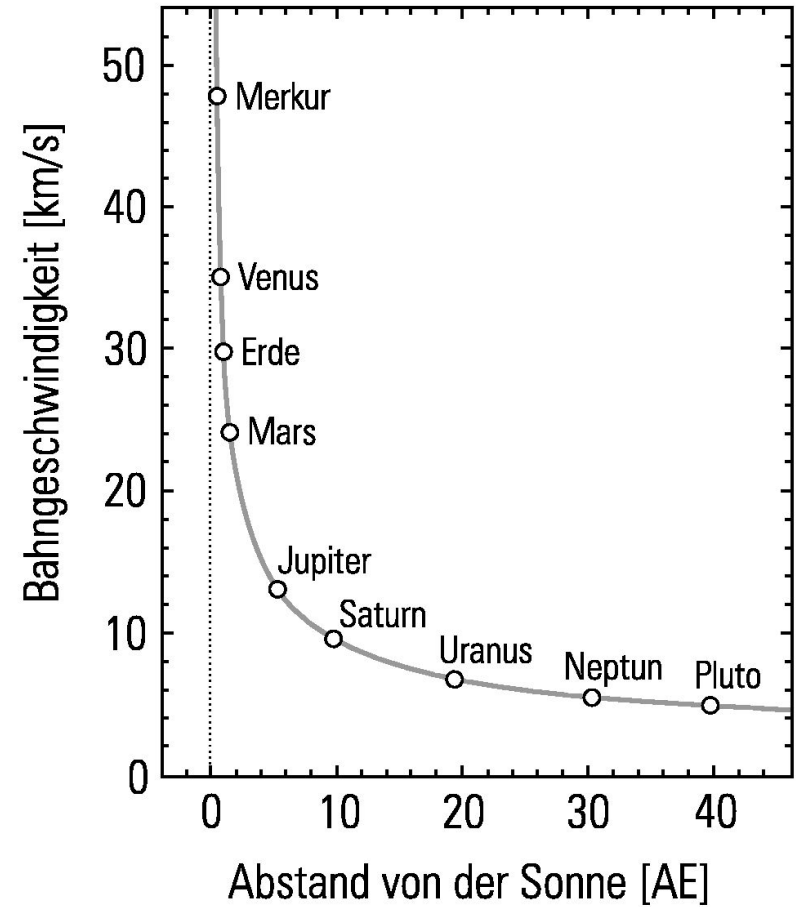
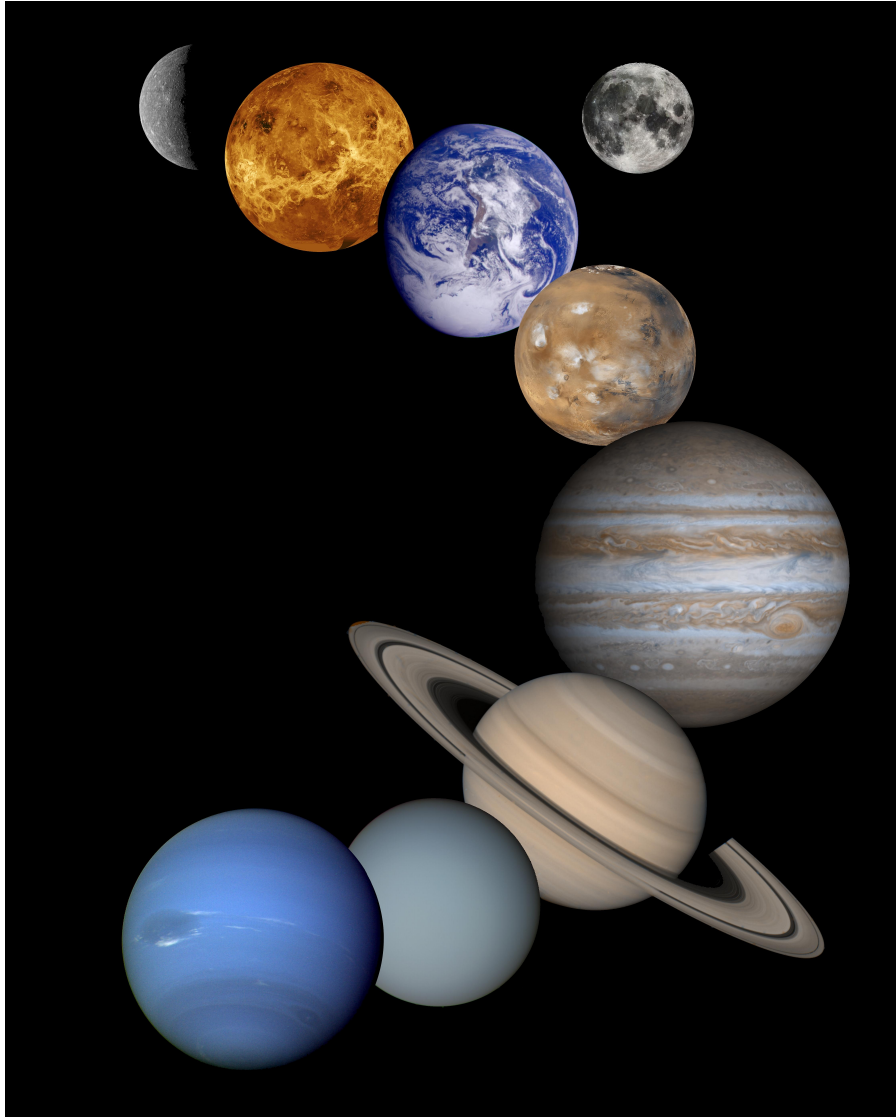
Saturn
(17 Monde)

Neptun
(8 Monde)

Jupiter
(16 Monde)

Pluto
(1 Mond)





Umlaufgeschwindigkeiten der Planeten

die solaren Planeten

Entwicklung von Leben auf der Erde

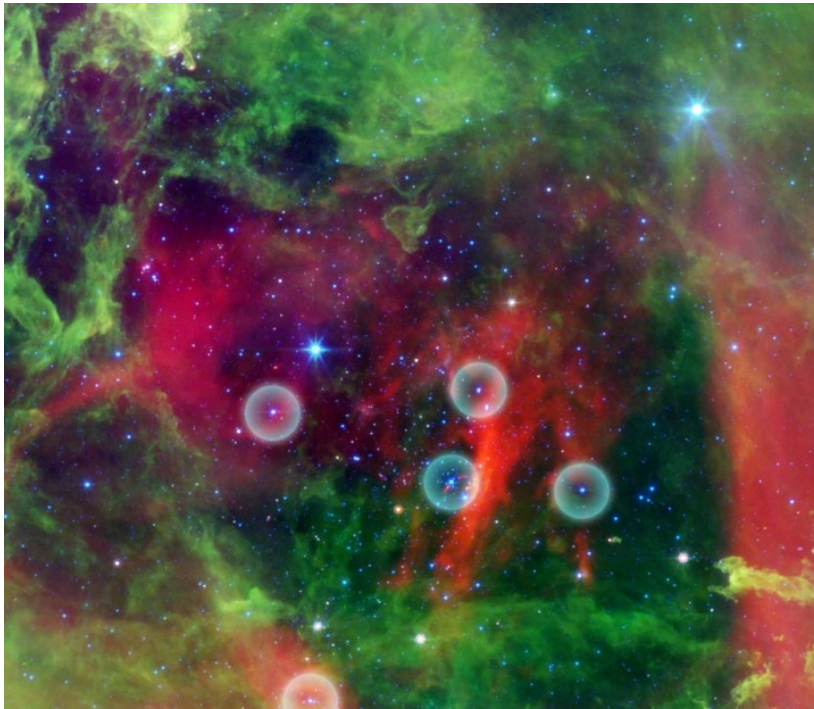
heute $t = 0$




- vor 3,5 Milliarden Jahren
erste Lebensformen
- vor 1 Milliarde Jahren
erste Landlebewesen
- vor 0,2 Milliarden Jahren
Dinosaurier, erste Säuger
- vor 0,1 Milliarden Jahren
erste Primaten
- vor 10 Millionen Jahren
erste Hominiden
- vor 2 Millionen Jahren
Pithecanthropus
- vor 160 000 Jahren
Neandertaler
- vor 100 000 Jahren
Homo sapiens



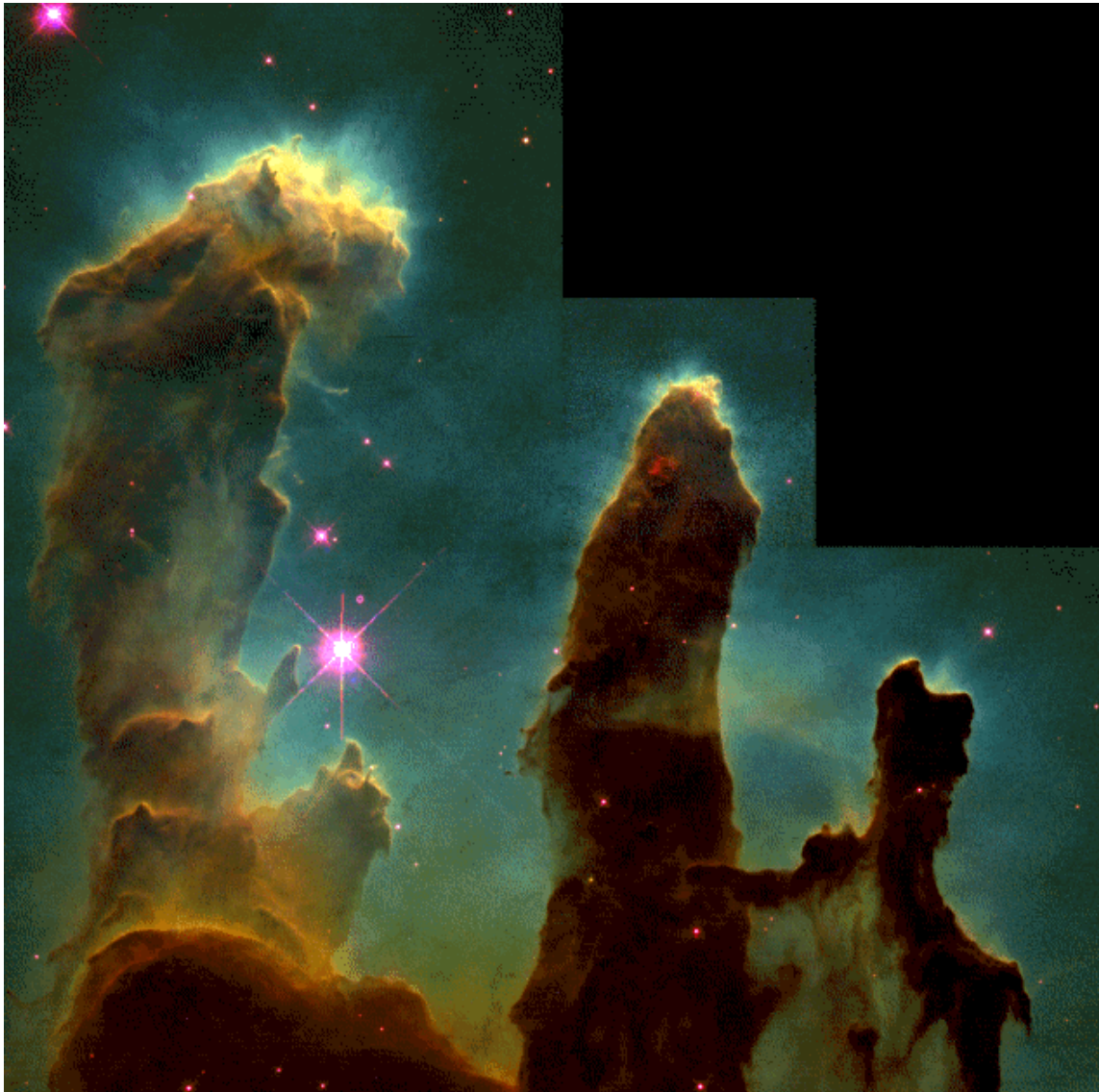
Trilobit

Wie wurde die Sonne geboren?



-  Die Sonne bildete sich aus einer dunklen Wasserstoff- und Staubwolke.
-  Der Wasserstoff und Staub stammte aus einer früheren Supernova-explosion, die Sonne ist also ein Recyclingprodukt eines gestorbenen Sterns.
-  Durch gravitative Instabilität bildete sich eine Protosonne. Dieser Formationsprozess dauerte etwa 50 Millionen Jahre.

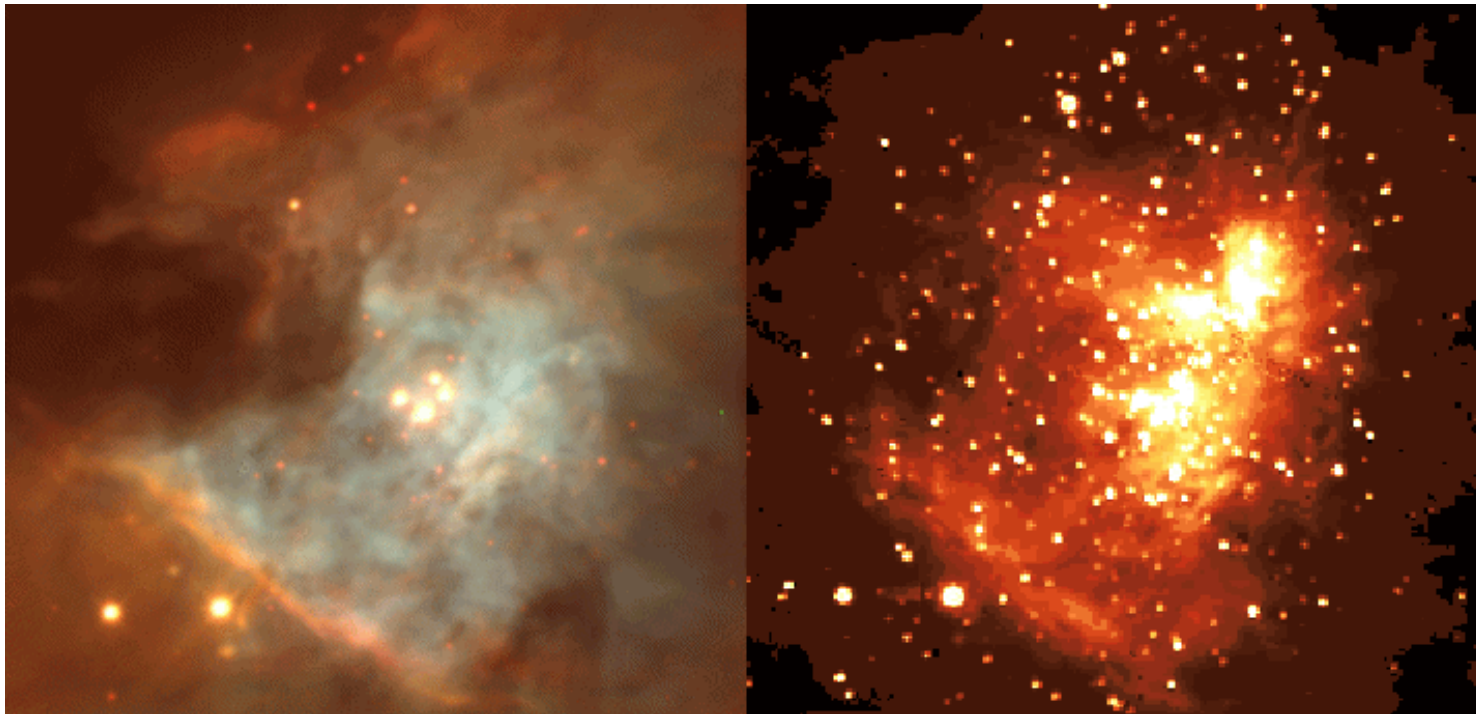
Typische Sternbildungsregion
im Rosetten-Nebel



Kreissaal für Sterne

Protosonne

Die Protosonne war nur im Infraroten von außerhalb sichtbar, da alle anderen Spektralbereiche im Staub absorbiert wurden.



Sternbildungs-
region
Orion-Nebel

links:
im Optischen

rechts:
im Infraroten

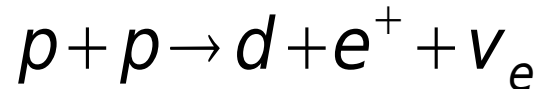
Die Protosonne drehte sich:
es entwickelte sich eine Akkretionsscheibe senkrecht zur Drehachse, aus der
sich die Planeten bildeten.

Wie funktioniert die Sonne?

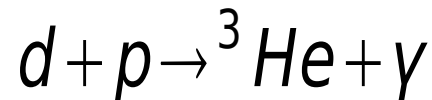


Die Sonne ist ein Kernfusionsreaktor.

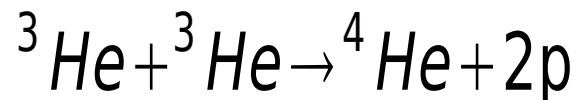
- ★ Wenn die Protosonne sich so weit verdichtet hat, dass eine Zentraltemperatur von 15 Millionen Kelvin erreicht wird, zündet die Wasserstofffusion.
- ★ Die Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium setzt gewaltige Energien frei.
- ★ Die „Zünderreaktion“ ist eine schwache Wechselwirkung (sonst gäbe es uns nicht):



In weiteren Reaktionen wird zunächst ${}^3\text{He}$ erzeugt:



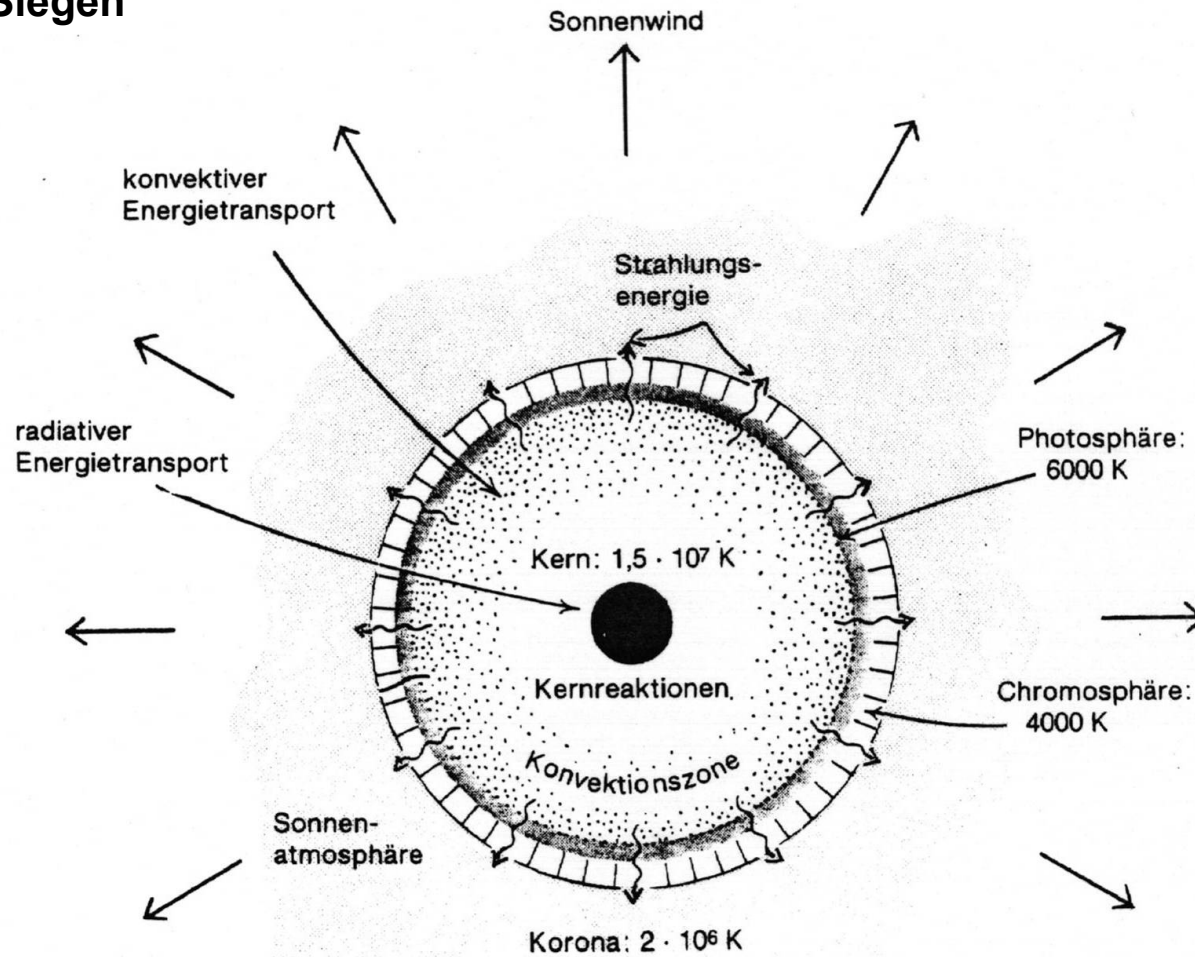
und aus diesem Heliumisotop schließlich



Helium 4 ist etwas leichter als die Summe der Massen seiner Konstituenten (zwei Protonen und zwei Neutronen). Dieser „Massendefekt“ wird nach der berühmten Einsteinschen Beziehung $E = m \cdot c^2$ in Energie umgewandelt.

1 Gramm Wasserstoff hat einen Energiegehalt von 20 000 000 kWh. Mit einer Konversionseffizienz von 0,7 % ergibt das 140 000 kWh. Die Sonne verheizt pro Sekunde 600 Millionen Tonnen Wasserstoff! Diese Menge würde ausreichen, um den gegenwärtigen europäischen Energiebedarf für etwa 4 Millionen Jahre zu decken!












Sonne

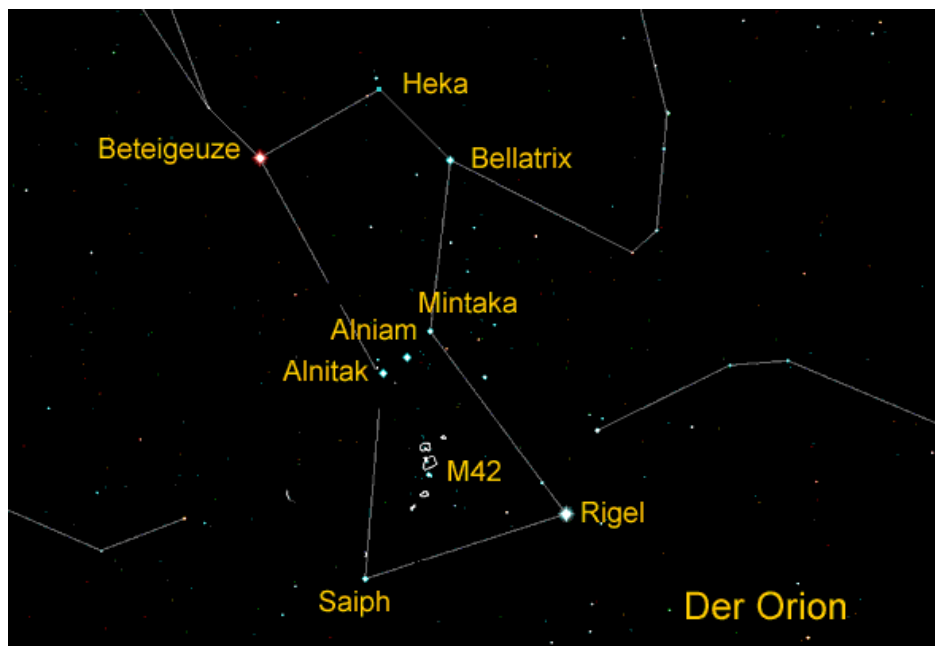
Aufbau der Sonne (schematisch) und ihre Strahlungsprozesse



-  Durch die Fusionsenergie wird ein Strahlungsdruck aufgebaut, der den weiteren gravitativen Masseneinfall stoppt.
-  Die entstehenden hochenergetischen Photonen (γ -Quanten) werden auf ihrem Weg vom Sonnenzentrum zur Oberfläche ständig gestreut, absorbiert und re-emittiert.
-  Das Licht, das wir heute von der Sonne erhalten, wurde im Sonnenzentrum schon vor gut einer Million Jahren erzeugt.
-  Wenn das zentrale Sonnenfeuer jetzt ausginge, würde das erst in einer Million Jahren auf der Erde bemerkt werden.
-  Allerdings: im Neutrinolicht würde man es nach 8 Minuten merken.
-  Die Erde wird ständig von einem intensiven Neutrinofluss getroffen: 70 Milliarden Neutrinos pro Quadratcentimeter und Sekunde. Alles Produkte der Kernfusion. Die Erde ist für Neutrinos aber praktisch transparent.
-  Diese Wasserstoffzündung erfolgte vor etwa 4,5 Milliarden Jahren. Der Wasserstoffvorrat reicht insgesamt für etwa 11 Milliarden Jahre. Ihre relativ geringe Masse und die kleine Wahrscheinlichkeit für Kernfusion ermöglichen eine hohe Lebensdauer der Sonne.

Vor 4,5 Milliarden Jahren war die Sonne noch etwas kleiner ($R=0,90 R_{\text{Sonne}}$; und ein wenig schwächer ($L=0,7 L_{\text{Sonne}}$).

Aus dem Weltraum betrachtet sieht die Sonne eher weiß aus. Ihre gelbliche Farbe von der Erde aus gesehen erhält sie durch das Zerstreuen des blauen Anteils durch Rayleigh-Streuung in der Atmosphäre.



Orion



Sterne im Orion

Klassifikation von Sternen

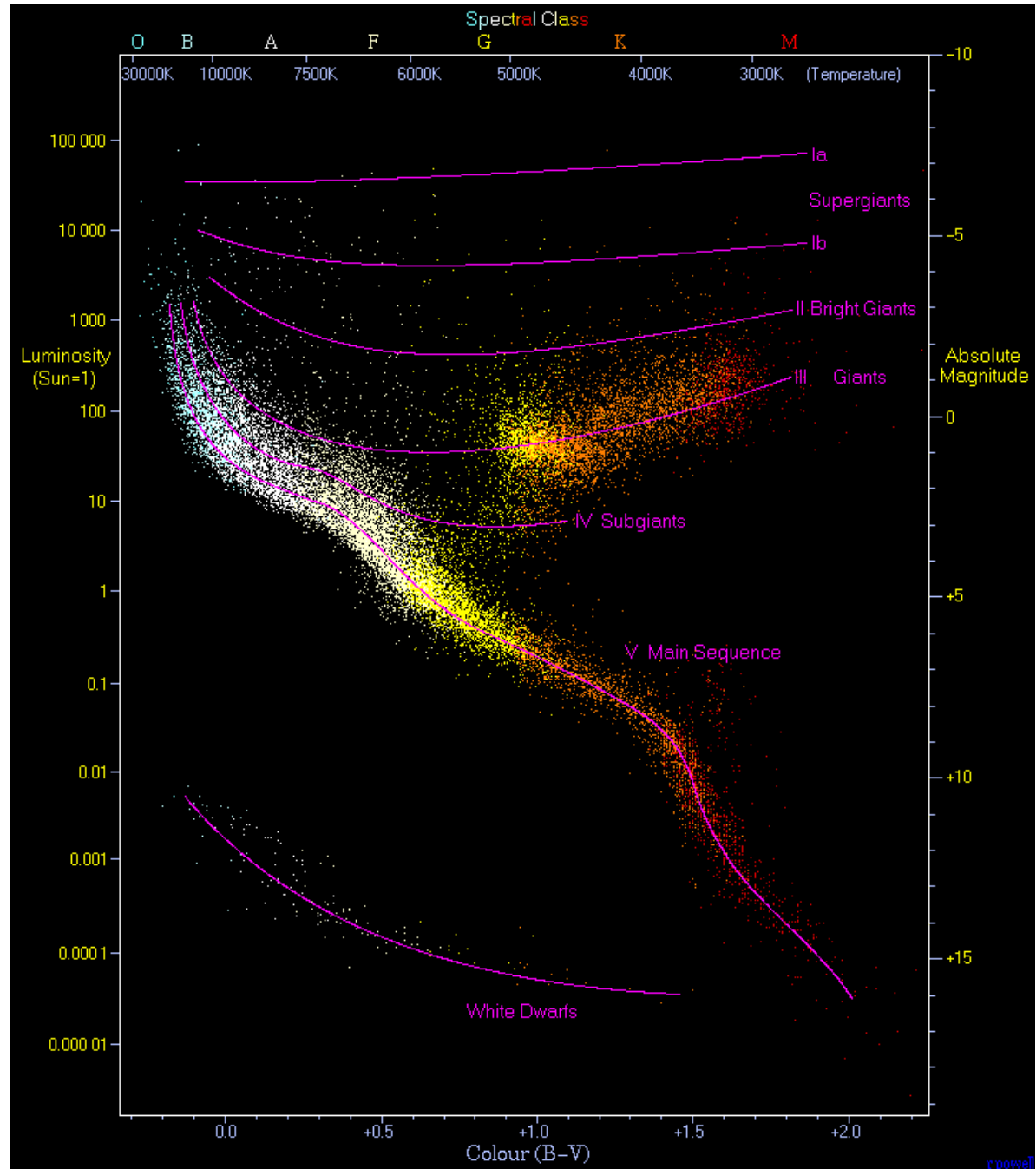
Klassifikation von Sternen nach
der „Farbtemperatur“ (Spektral-
klasse) und Luminosität:

Hauptsequenz,

Rote Riesen und

Weißer Zwerge

Hertzsprung-Russell-Diagramm



Entwicklung der Sonne

heute (t=4,5 Milliarden Jahre): die Sonne hat etwa 50% des Wasserstoffs verbrannt

- ★ Die Sonne wird langsam etwas größer und gelangt zur Mid-Life Krise.
- ★ Sie wird auch etwas heller; nach 5,6 Milliarden Jahren um 10%.
- ★ Es wird wärmer auf der Erde
 - der Wasserdampf aus der Atmosphäre verschwindet in den Weltraum,
 - das Wasser der Ozeane fängt an zu verdampfen,
 - größere Tiere, die auf der Erdoberfläche leben, sterben aus,
 - das Leben im Wasser ist (noch) nicht betroffen,
 - der Mensch (wenn es ihn dann noch gibt) muss sich überlegen, wohin er auswandern möchte (Mars? auf einen Jupitermond?)



das Wasser verdampft

Zeitpunkt: 9 Milliarden Jahre (3,5 von jetzt)

Die Luminosität der Sonne ist um um 40% gestiegen

- ★ auf der Erde herrschen Venus-Verhältnisse,
- ★ Oberflächentemperaturen um 700 Kelvin (etwa 400 Grad Celsius),
- ★ die Ozeane sind ausgetrocknet,
- ★ es gibt kein Wasser mehr auf der Erde,
- ★ Ende jedweder Form von terrestrischem Leben.

Zeitpunkt: 10,9 Milliarden Jahre

- ★ der Wasserstoffvorrat ist verbraucht,
- ★ die Heliumasche wird instabil und kollabiert unter ihrem eigenen Gewicht,
- ★ dabei verdichtet sich das Helium und heizt sich auf,

Zu diesem Zeitpunkt ist die Sonne

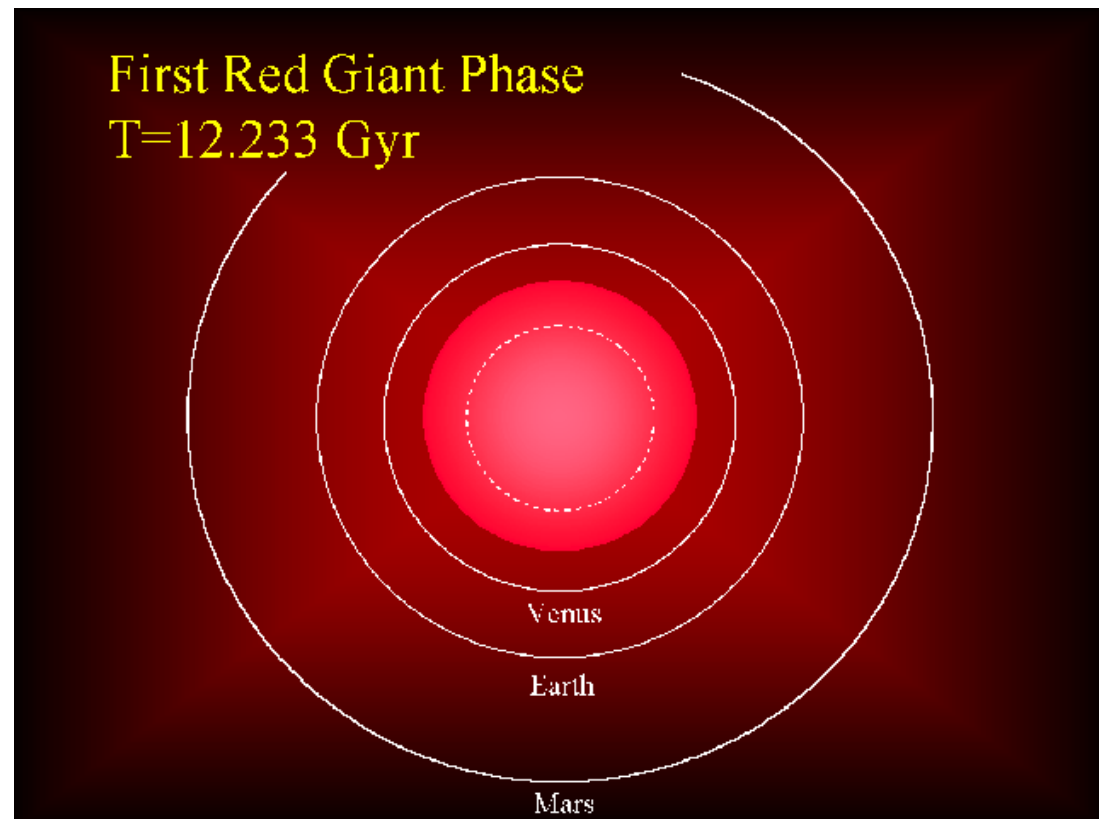
- ★ etwas größer (expandierender Wasserstoff), $R = 1,58 R_{\text{Sonne}}$
- ★ etwas heller, $L = 2,21 L_{\text{Sonne}}$

- ★ Der Gravitationskollaps des Heliums geht weiter.
- ★ Nach 11,6 Milliarden Jahren fängt die Sonne an, 30% ihrer Masse in Form von „Sonnenwind“ abzustrahlen.
- ★ Die Sonne wird leichter, also bewegen sich die Planeten weiter nach außen.
- ★ Die solare Atmosphäre weitet sich aus und verschluckt Merkur.

→ **Die Sonne ist ein Roter Riese geworden**

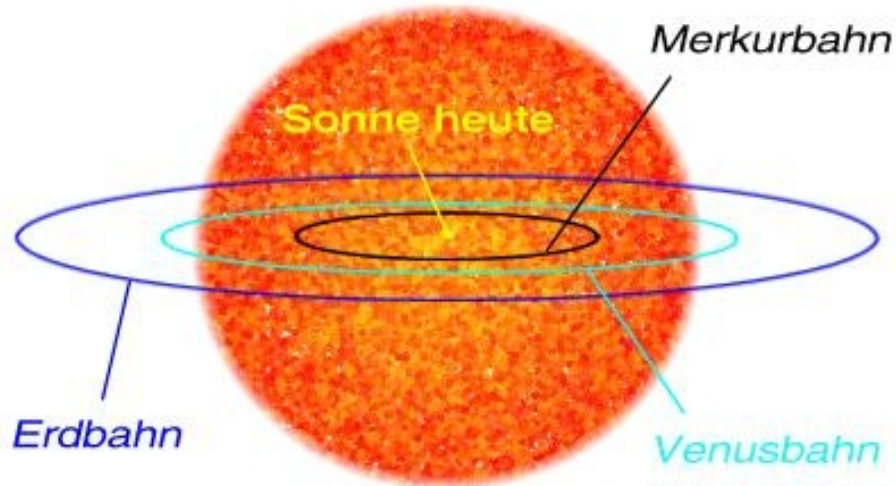
Zu diesem Zeitpunkt ist die Sonne

- viel größer $R = 166 R_{\text{Sonne}}$
- viel heller $L = 2350 L_{\text{Sonne}}$
- etwas kälter $T = 3107 \text{ Kelvin}$



Roter Riese

Sonne in einigen Mrd. Jahren



Die Sonne im Zustand als
Roter Riese erfüllt etwa 50%
des Himmels

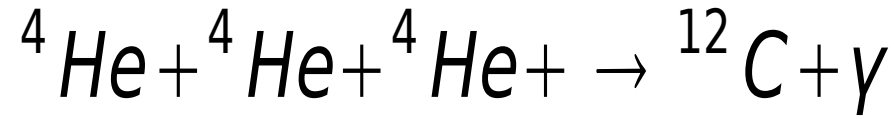


Beteigeuze

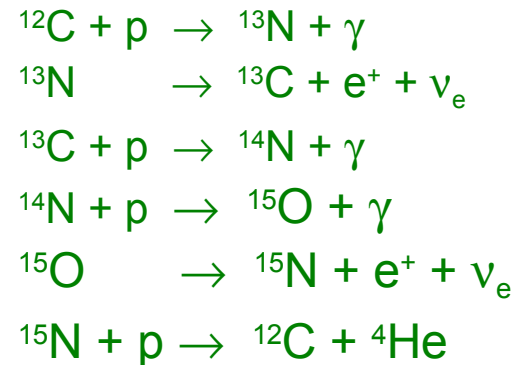
künstlerische Vorstellung der Sonne als Roter Riese

Zeitpunkt: 12,233 Milliarden Jahre:

Das verdichtete Helium zündet und verbrennt zu Kohlenstoff und Sauerstoff.



Bethe-Weizsäcker-Zyklus (CNO-Zyklus)
auf Sparflamme:



Die Sonne hat jetzt extreme Werte
angenommen:

- ★ Zentraltemperatur 100 Millionen Kelvin
- ★ Nachdem sie ihre Hülle weitgehend abgestoßen hat, verhält sie sich in der Phase des Heliumbrennens relativ stabil.

★ Die Phase des Heliumbrennes dauert etwa 110 Millionen Jahre

In diesem Zustand stabilisieren sich die Sonnenparameter auf

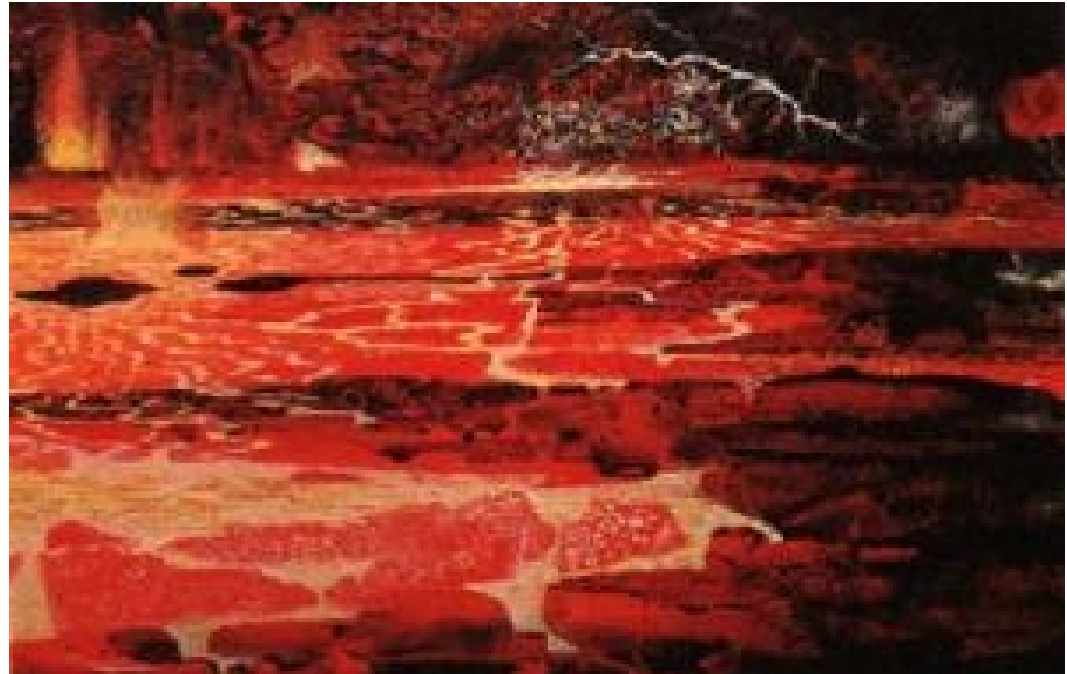
★ $R = 18 R_{\text{Sonne}}$

★ $L = 110 L_{\text{Sonne}}$

★ $T = 4450 \text{ Kelvin}$

★ Gegen Ende dieser Phase verlagert sich das Heliumbrennen in die Außenbezirke der aufgeblähten Sonne.

★ Die Erdoberfläche schmilzt und wird zur Lava.



Sieht so die biblische Hölle aus?

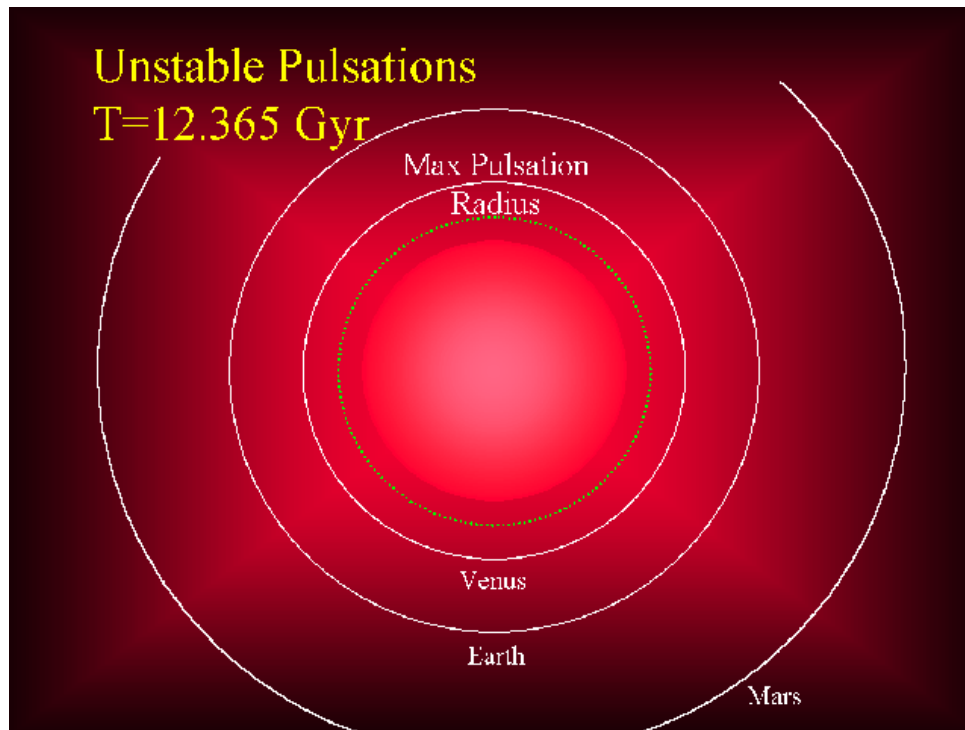
Nur durch die Zunahme des Erdbahnhalmessers entkommt die Erde der völligen Vernichtung.

Die Erde wird gebacken

Zeitpunkt: 12,344 Milliarden Jahre

- ★ Der Heliumvorrat ist aufgebraucht.
- ★ Der C-O Kern kollabiert schnell.
- ★ Das verglimmende Helium-Feuer wird in die Außenbereiche der Sonne abgedrängt und führt zu einem Aufblähen der Sonne.
- ★ Der kollabierende C-O Kern erreicht nicht die zum Kohlenstoffbrennen erforderliche Temperatur. Dafür ist die Sonne zu leicht. (Man bräuchte die vierfache Sonnenmasse dafür.)
- ★ Die kollabierende Sonne kommt in einen kritischen Zustand.
- ★ Sie verliert dauernd an Masse.

Alterszittern: die Sonne wird instabil



pulsierende Sonne

- ★ Sie hat 50% ihrer Masse verloren.
- ★ Venus und Erde haben sich von der Sonne entfernt.
(Abstand Sonne-Erde = 1,7 AE)
- ★ Die Sonne fängt an zu pulsieren und wird viel größer.

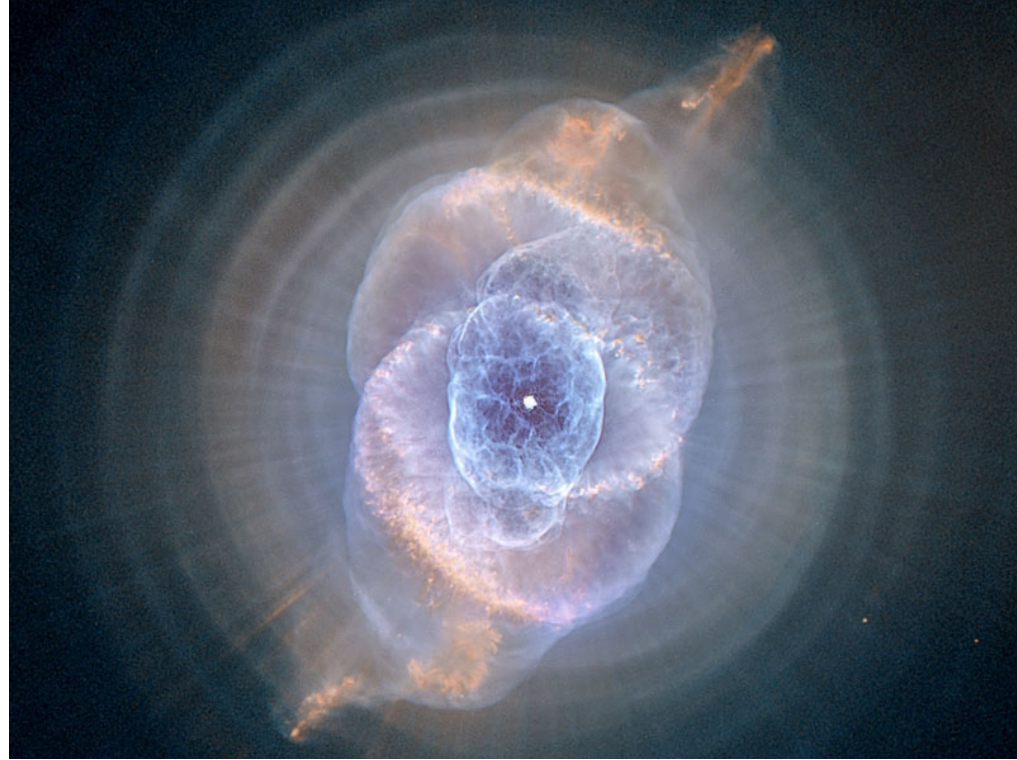
$$R = 213 R_{\text{Sonne}} = 1 \text{ AE}$$

$$L = 5200 L_{\text{Sonne}}$$

- ★ Sie stößt noch mehr Masse ab und ejiziert schließlich ihre ganze Hülle.
- ★ Die Hülle wird zu einem planetaren Nebel.
- ★ Das von der heißen Rest-Sonne emittierte UV-Licht wechselwirkt mit der abgestoßenen Hülle und ionisiert und erleuchtet das Gas als planetaren Nebel.



Katzenaugen-Nebel

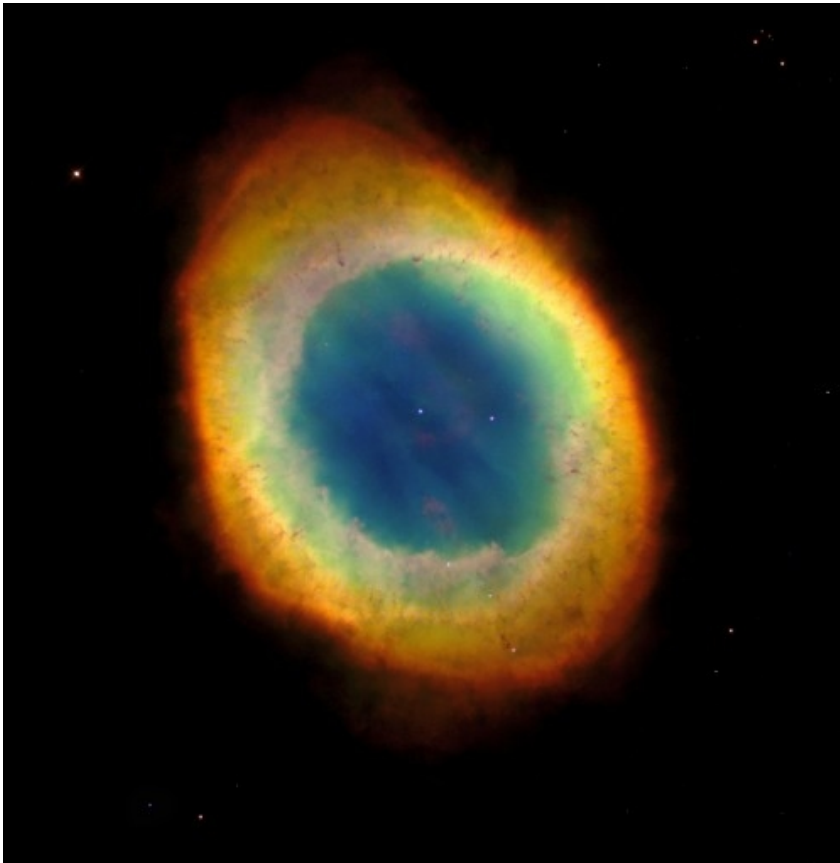


Helix-Nebel



Lagoon-Nebel

Phase des Planetaren Nebels



Lyra-Nebel

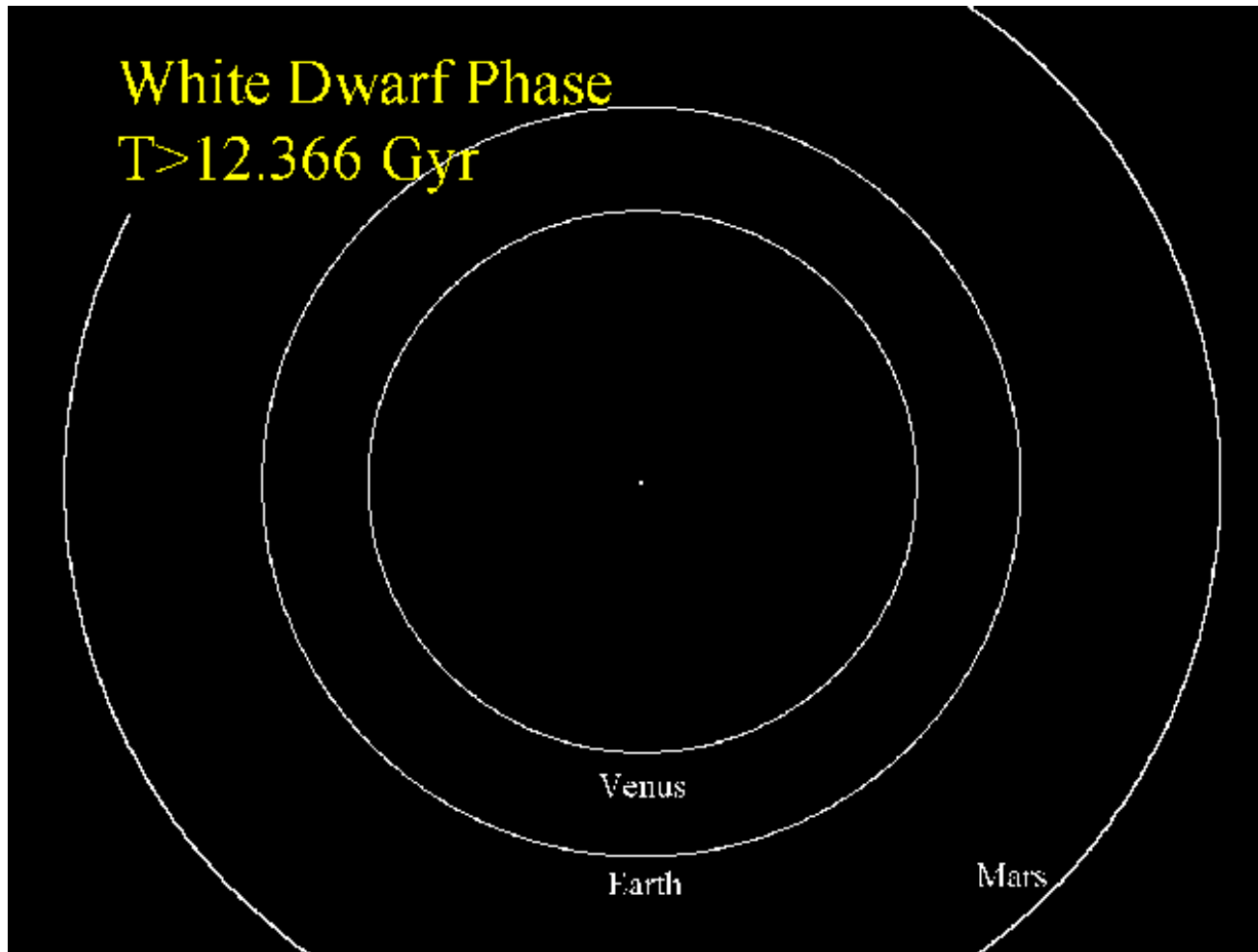
- ★ Der nackte C-O Kern liegt frei.
- ★ Für weitere Fusionsprozesse reicht die Temperatur nicht aus.
- ★ Die Helligkeit der Sonne fällt schnell ab.
- ★ Das zentrale Gestirn wird zu einem weißen Zwerg.
 $M = 0,4 M_{\text{Sonne}}$
- ★ Der weiße Zwerg leuchtet aufgrund seiner (hohen) Temperatur; er wird immer dunkler.

Weißer Zwerg

- ★ Der weiße Zwerg ist recht klein (ungefähr Erdgröße) und strahlt sehr ineffizient, kühlt sich also nur langsam ab.
- ★ Das Universum ist noch nicht alt genug, um sagen zu können, wie lange weiße Zwerge noch leuchten können.
- ★ Man vermutet, dass weiße Zwerge 100 Milliarden von Jahren (kümmerlich) leuchten können, bis sie zu einem schwarzen Zwerg werden.



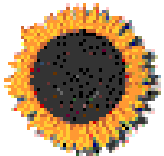
Altersheim weißer Zwerge



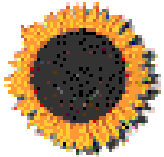
Das Sonnensystem
hat seine
Endfiguration
erreicht:

- Venus bei 1,34 AE
- Erde bei 1,85 AE
- Mars bei 2,8 AE

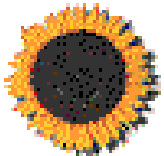
Endstadium des Sonnensystems



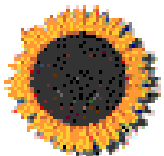
Nach vielen Milliarden Jahren wird die Sonne von der Bildfläche verschwinden.



Aus dem Staub des planetaren Restnebels wird sich aber wieder durch Gravitation eine neue Protosonne entwickeln, die sich bis zur Wasserstoffzündung verdichtet.



Die Brocken, die nicht in der neuen Sonne landen, werden Planeten, und auf einem erdähnlichen Planeten kann sich eventuell wieder Leben entwickeln.



Genauso wie wir aus dem Sternenstaub einer früheren Sonnengeneration gemacht sind, werden wir wieder als Sternenstaub für eine spätere „Reinkarnation“ von neuem Leben bereit stehen.