



# Aufstieg und Fall 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)

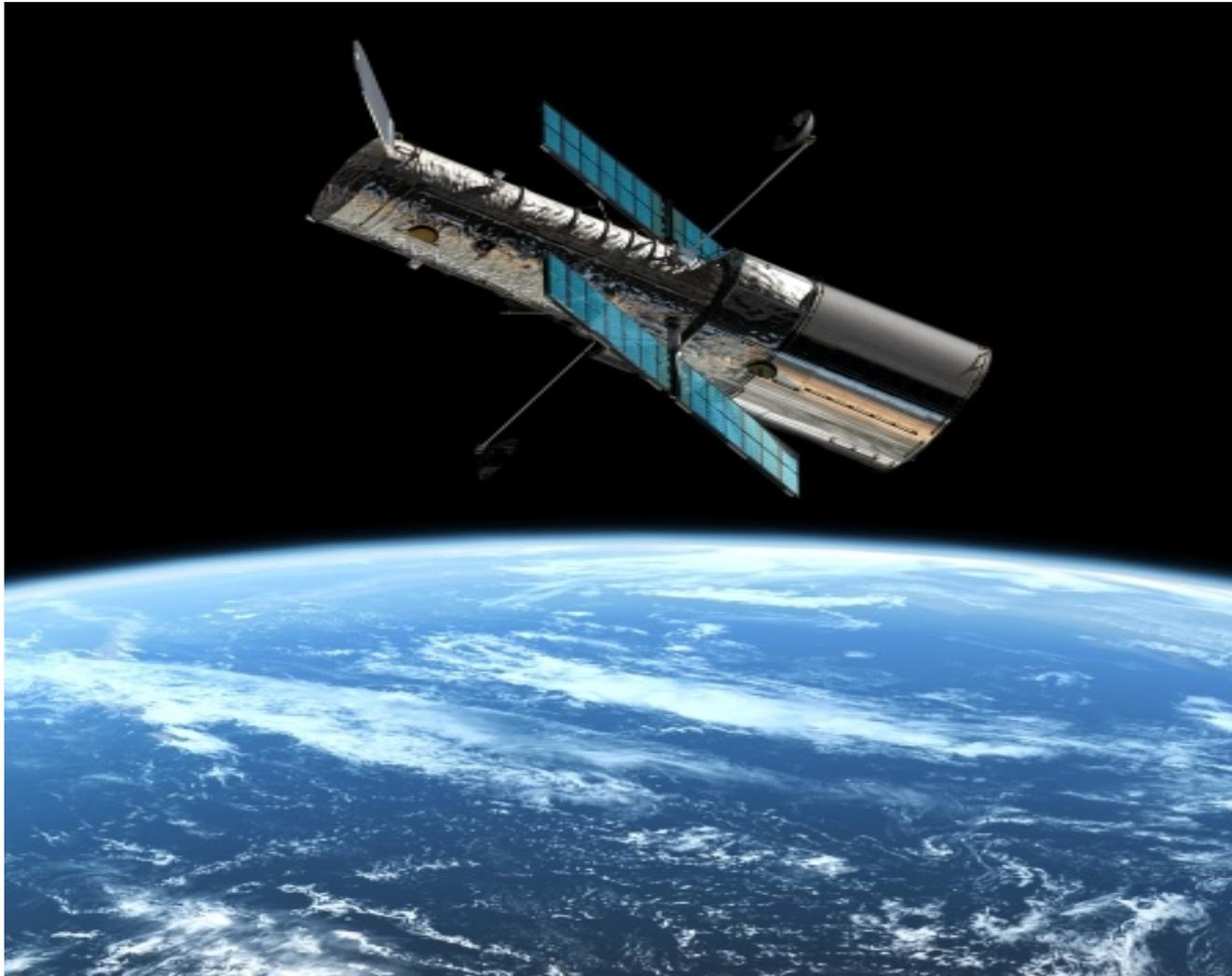
alles Standardphysik, und weiter

- 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.



## Hubble-Teleskop



## Die Sonne ist ein Dutzendstern

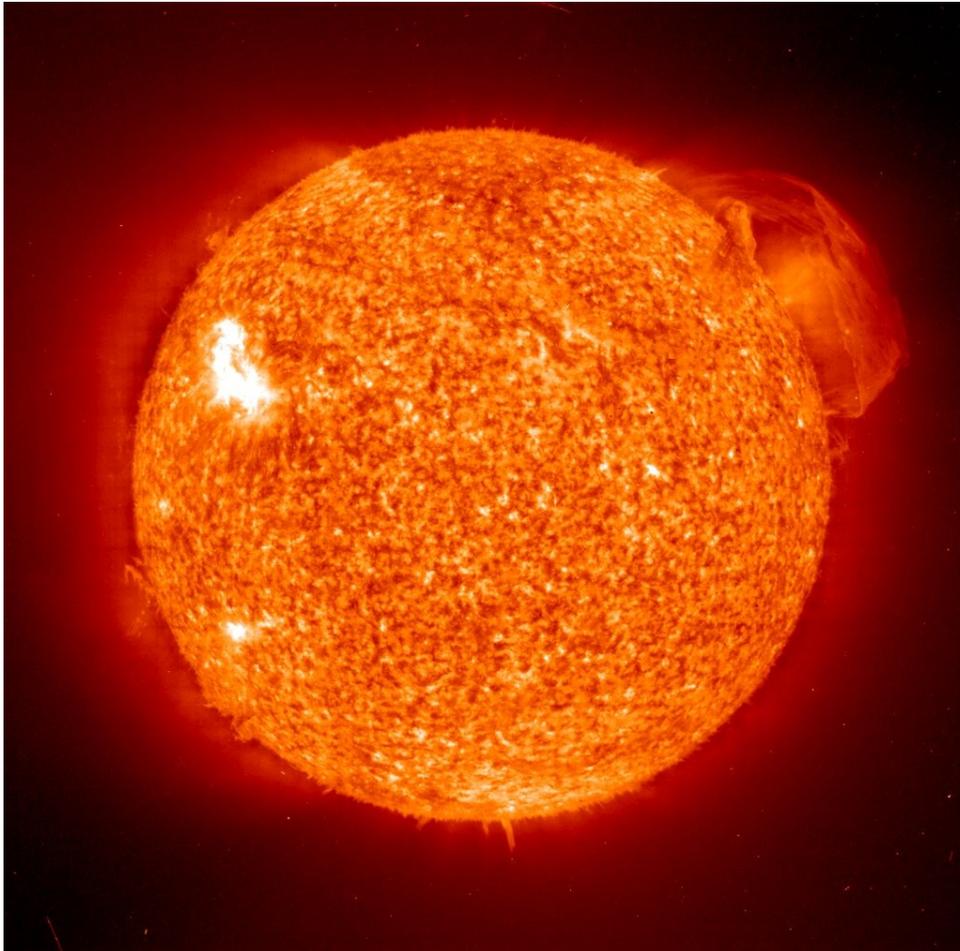
- ❖ einer unter hundert Milliarden in unserer Milchstraße,
- ❖ die wiederum eine unter hundert Milliarden anderen Galaxien darstellt.

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/cm<sup>3</sup>

### 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:**

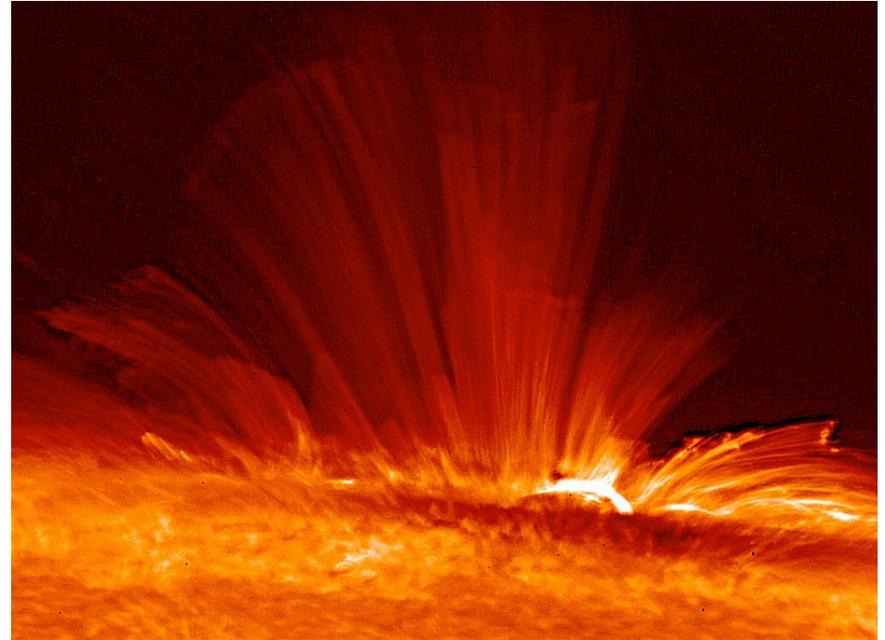
150 000 000 km (1 Astronomische Einheit = 1 AE)

**Abstand zum Zentrum unserer Milchstraße:**

28 000 Lichtjahre

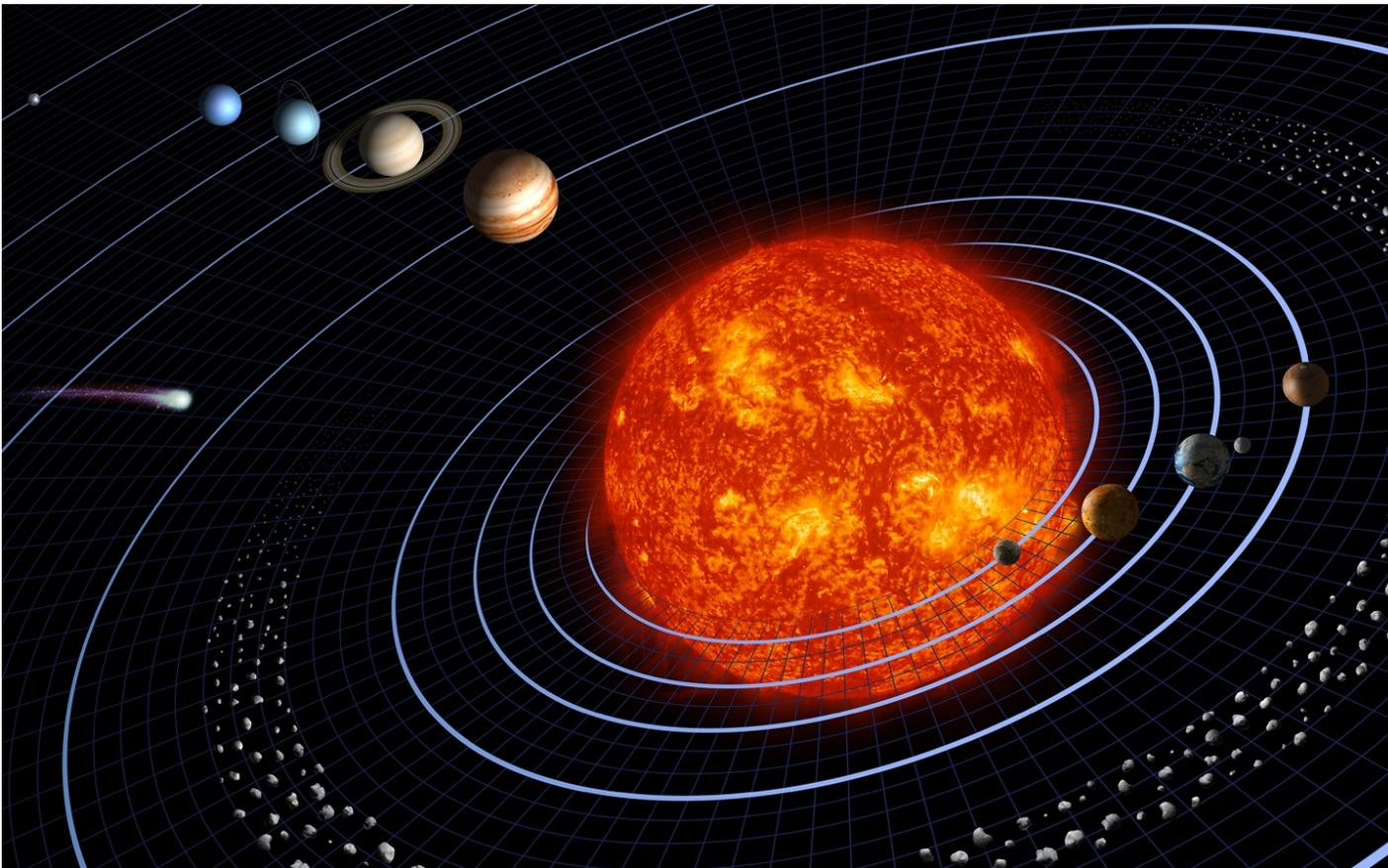
**Umlaufgeschwindigkeit um das Zentrum unserer Milchstraße:**

250 km/s

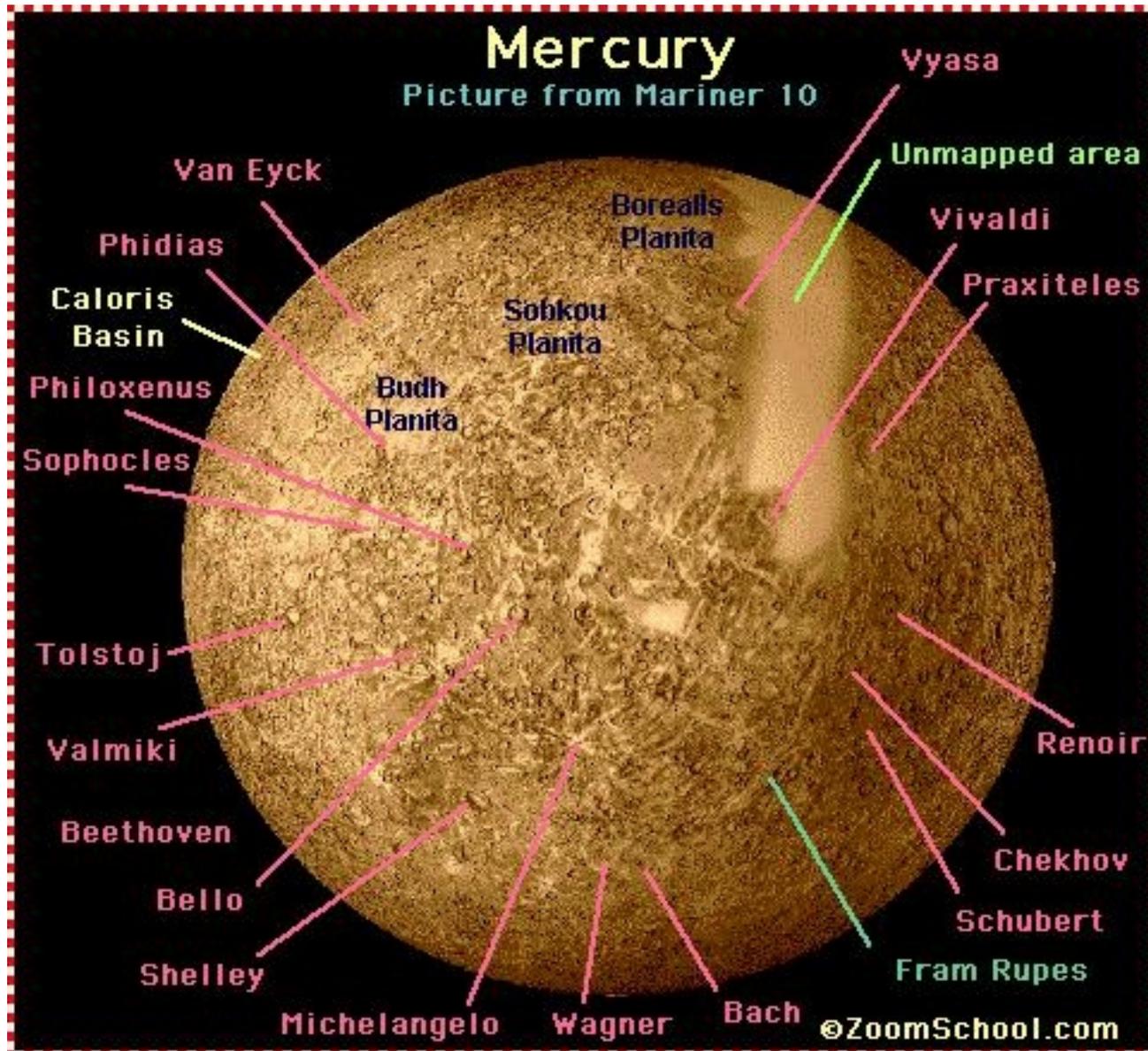




# Ein paar Informationen zum Sonnensystem, speziell zur Erde



Unser  
Sonnensystem





Universität  
Siegen

Fachbereich  
Physik





Bild der Erde

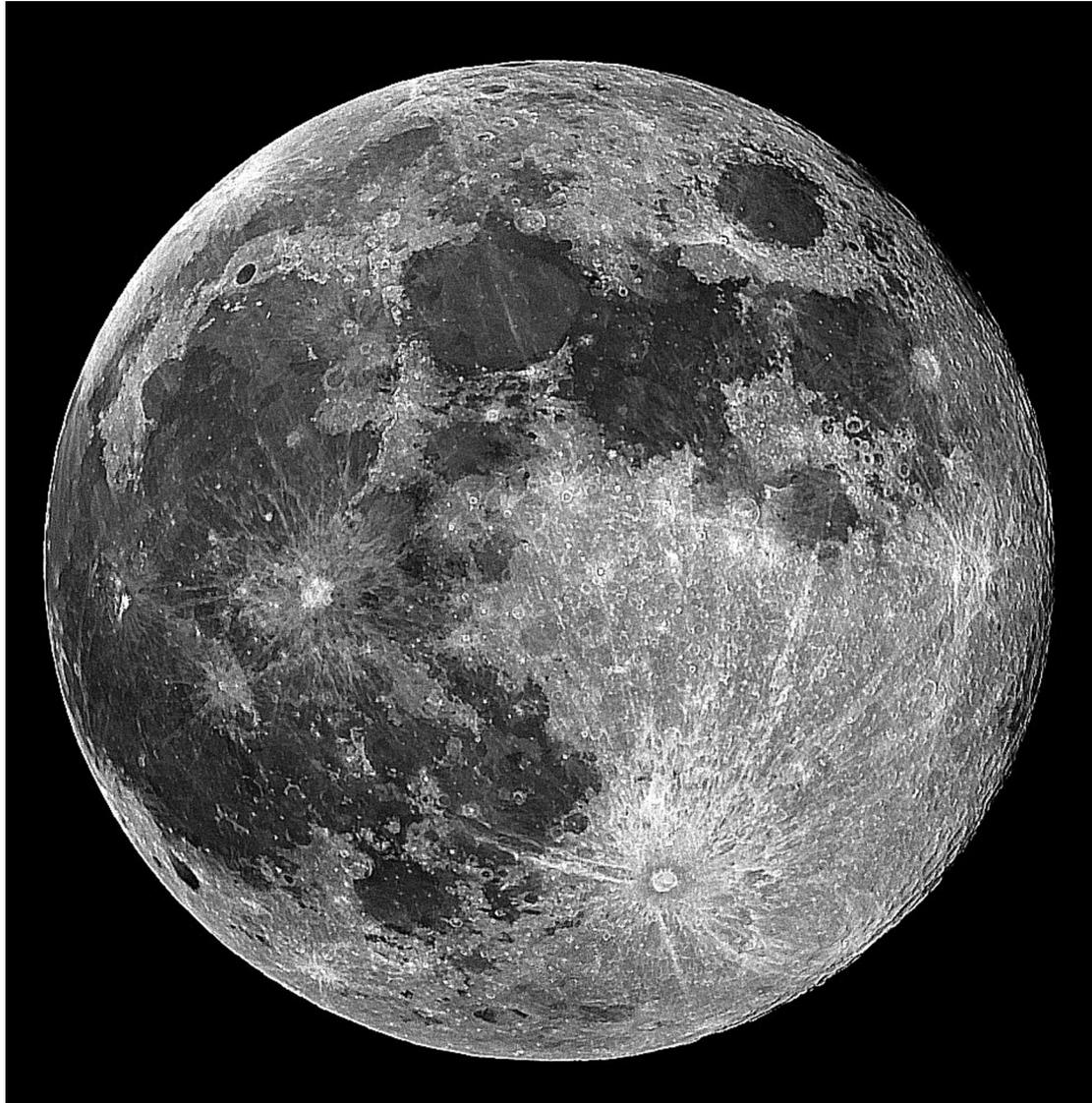
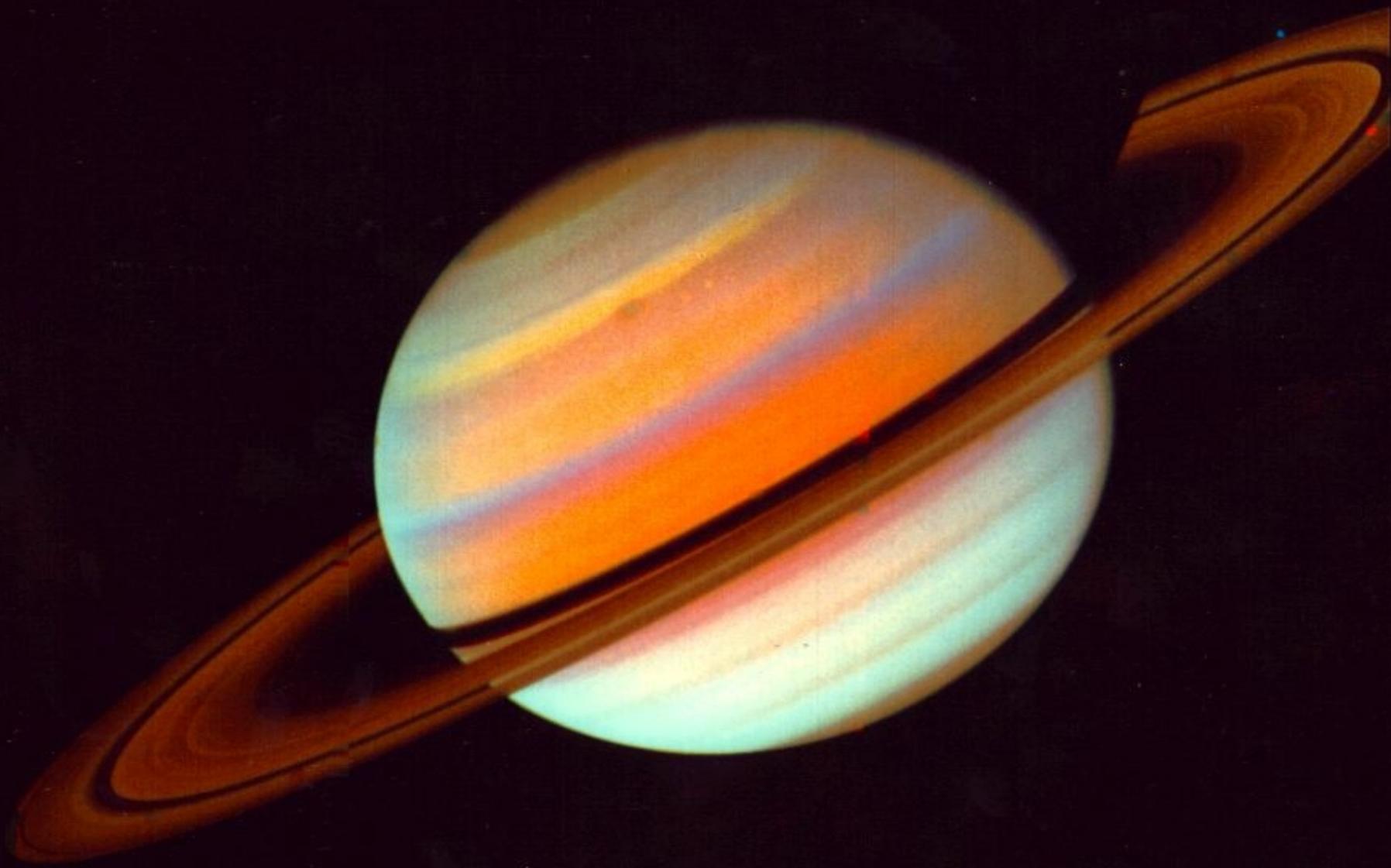
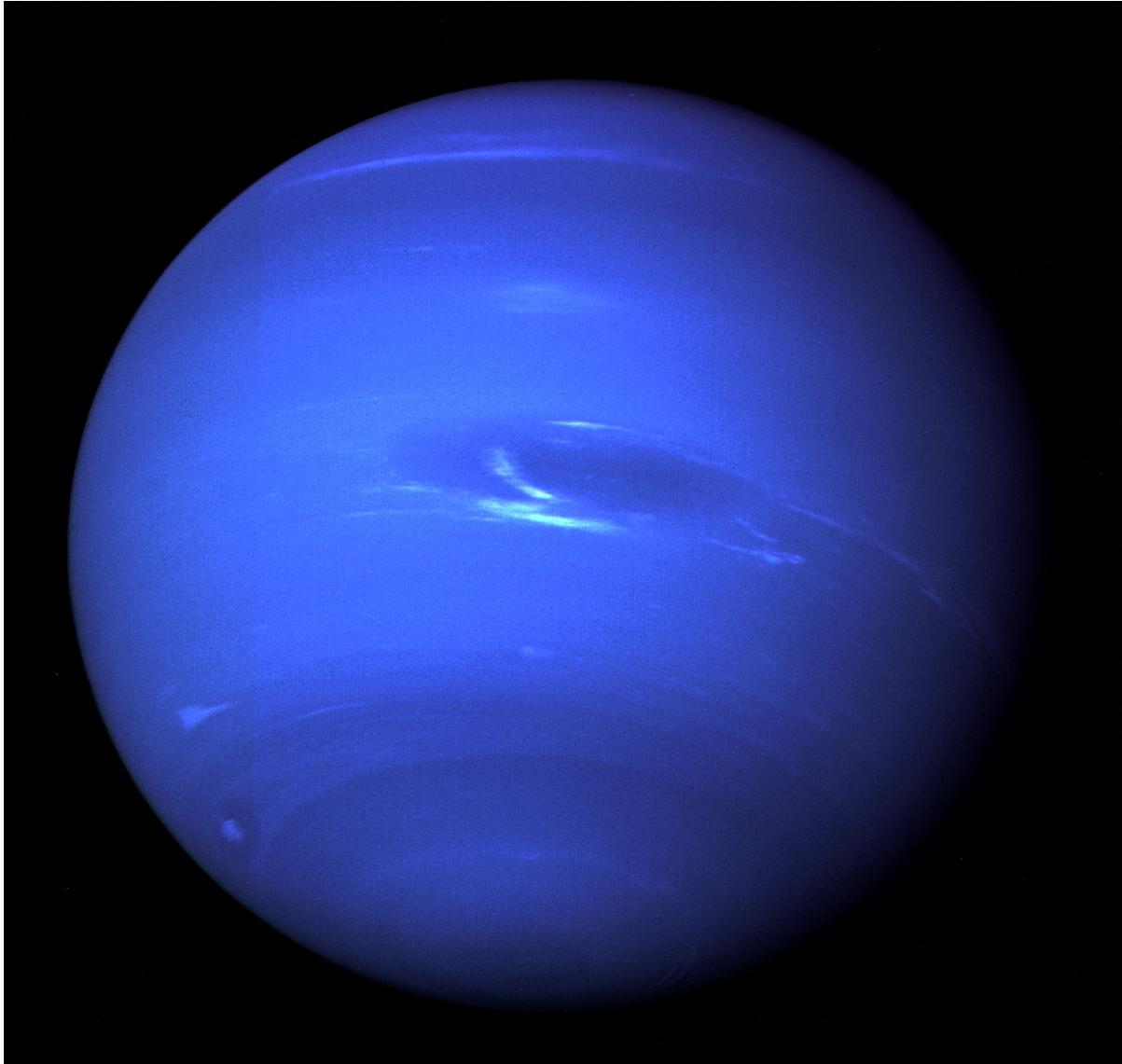
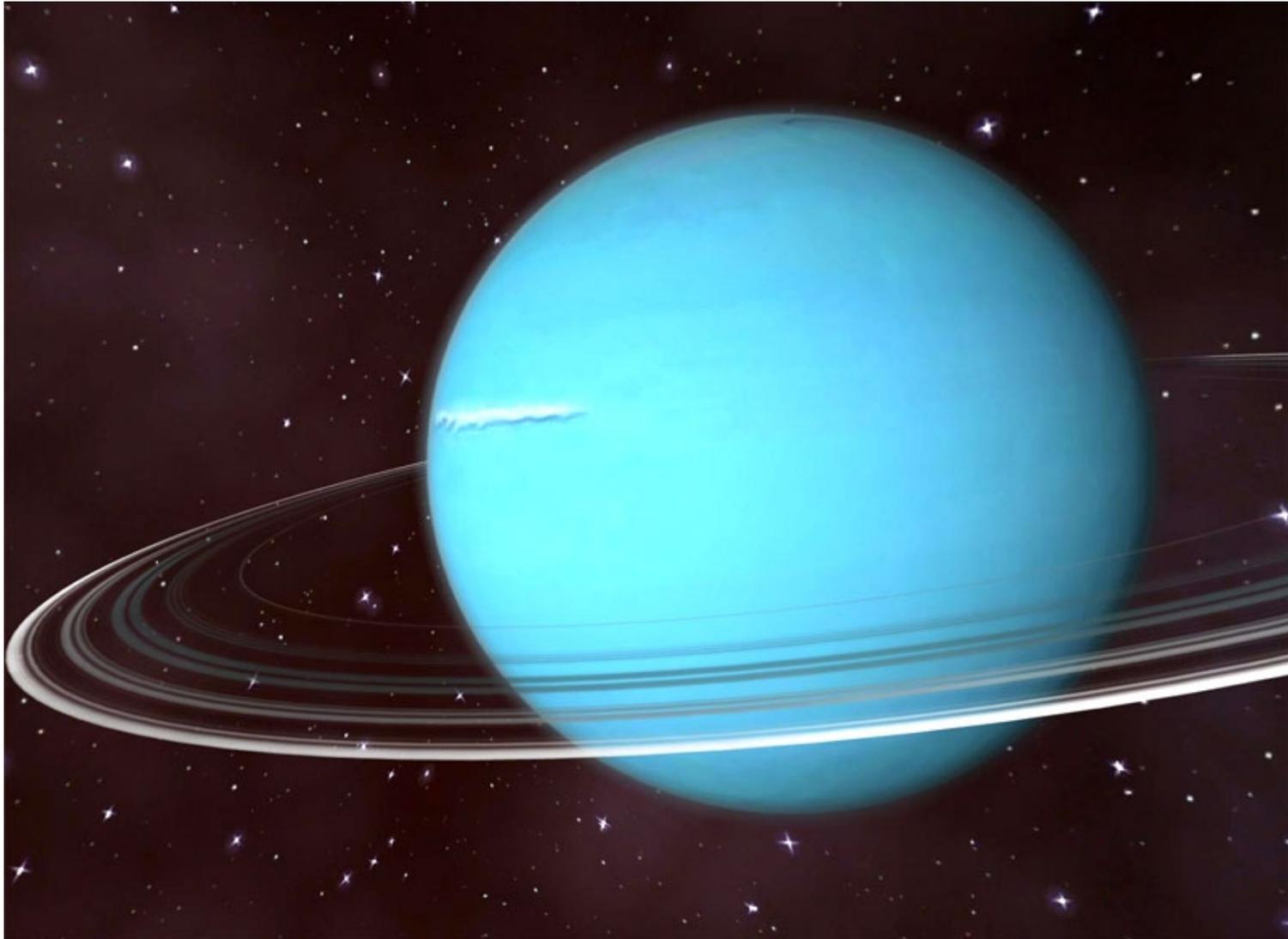


Bild des  
Mondes









## Ein paar Fakten zur Erde



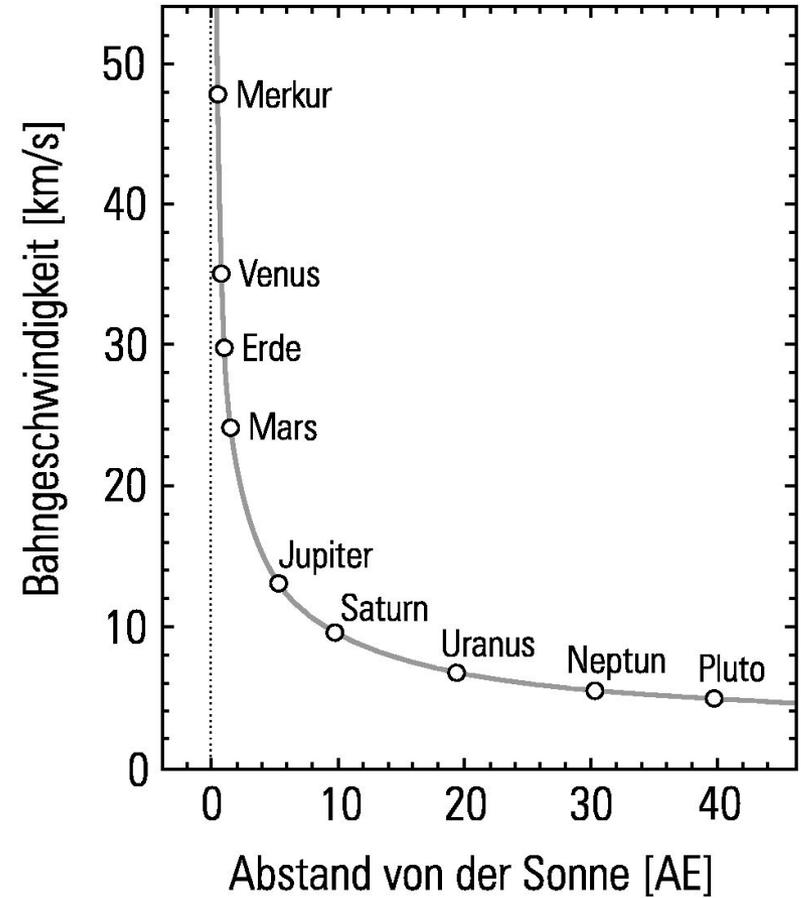
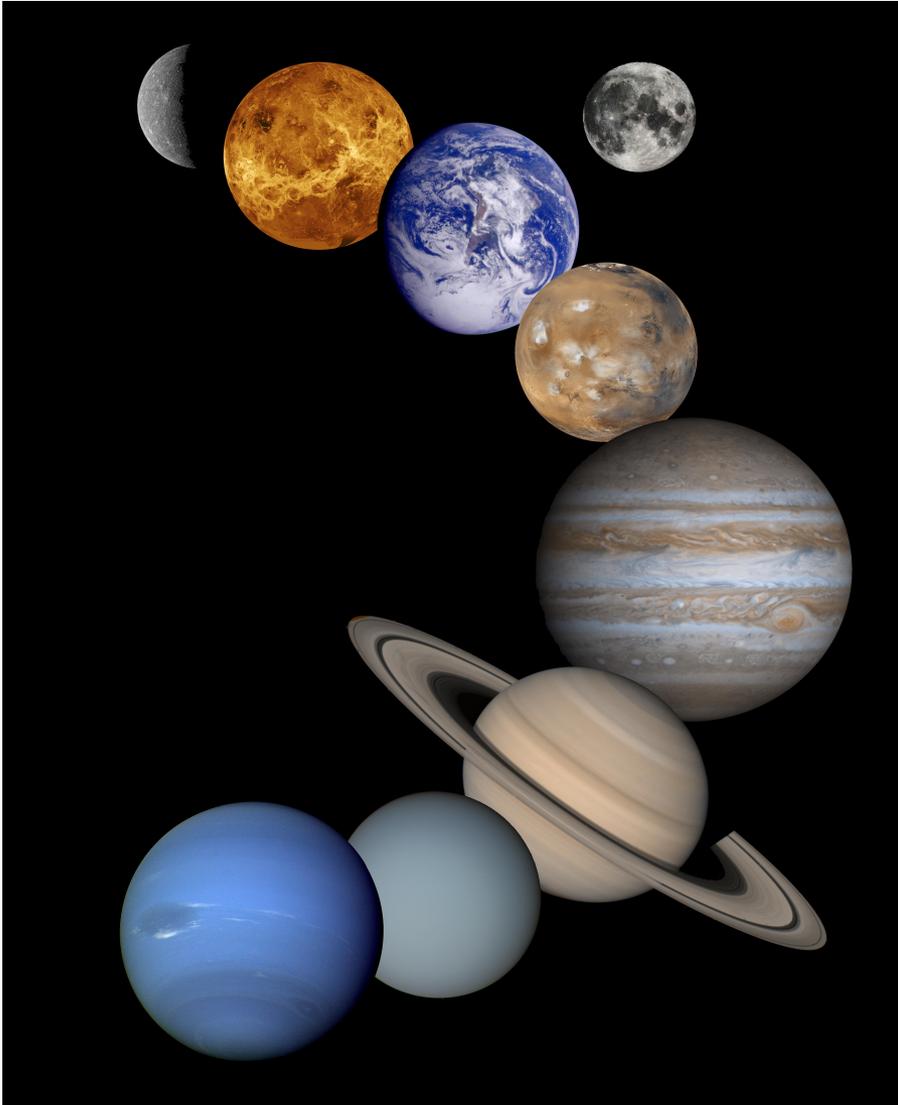
Sonnenaufgang



aufgehende Erde  
über dem Mond



Empfindlichkeit der Erdatmosphäre  
(Rayleigh Streuung)



Umlaufgeschwindigkeiten der Planeten

die solaren Planeten

## Entwicklung von Leben auf der Erde

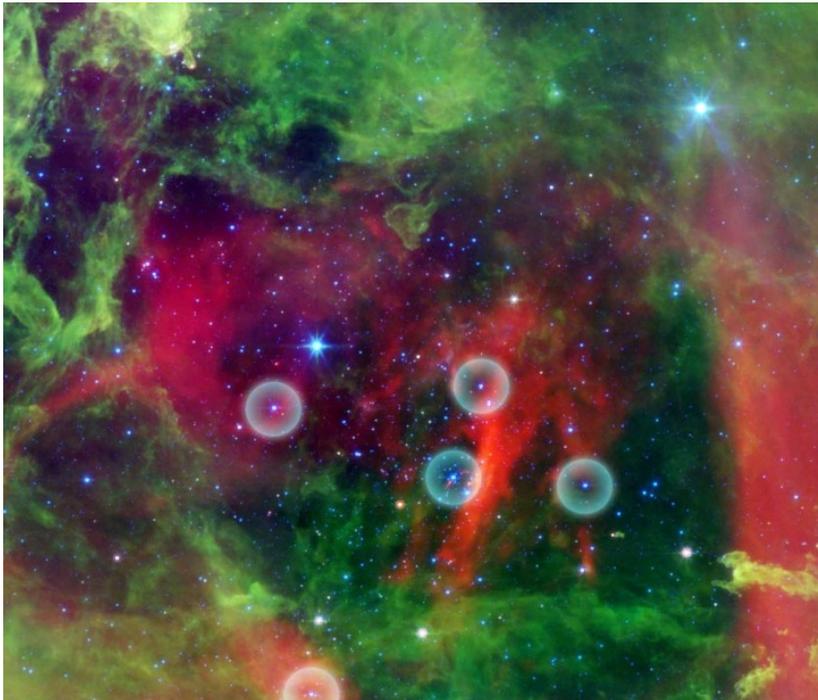
heute  $t = 0$

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



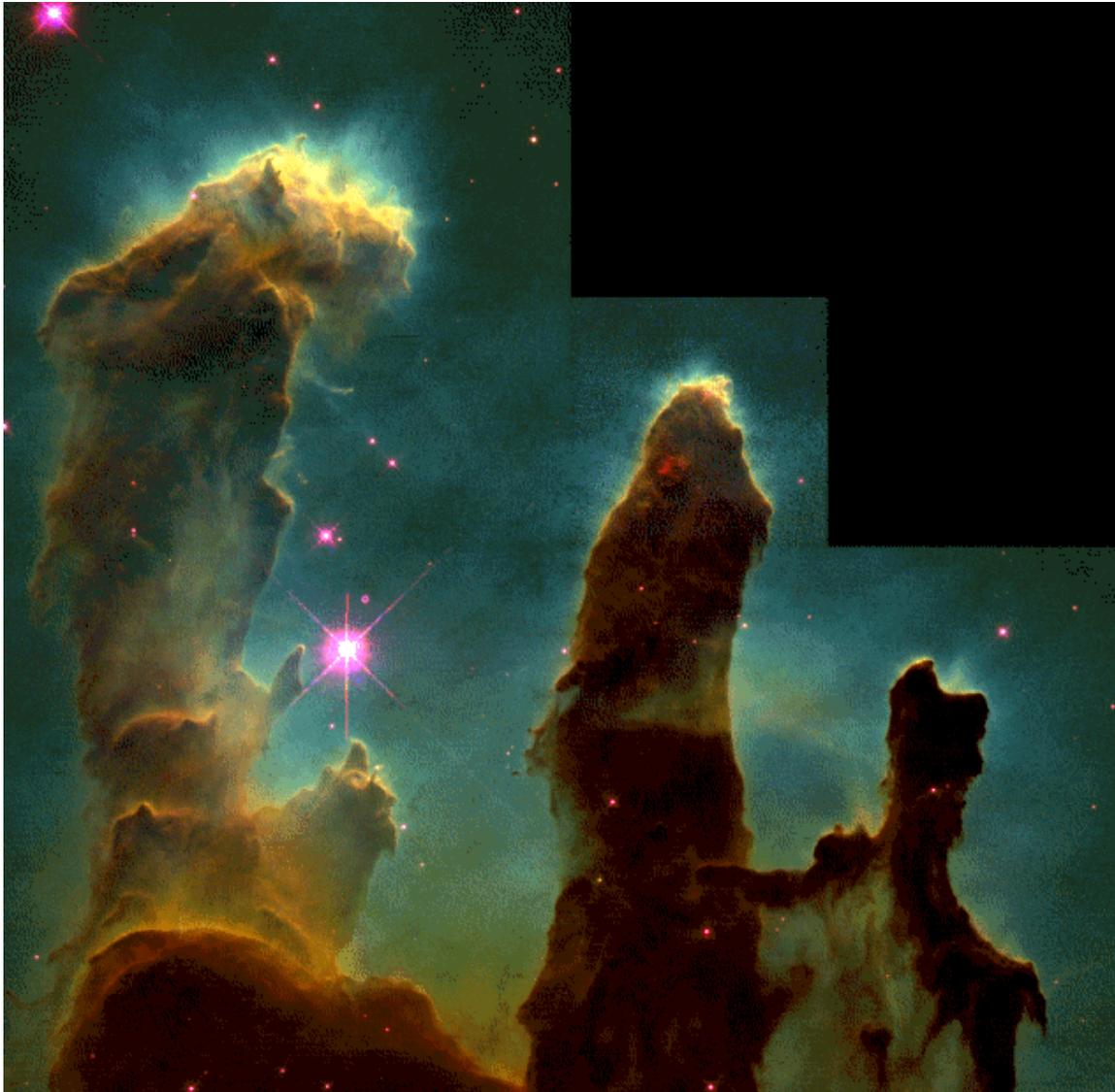
Trilobit

## 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.

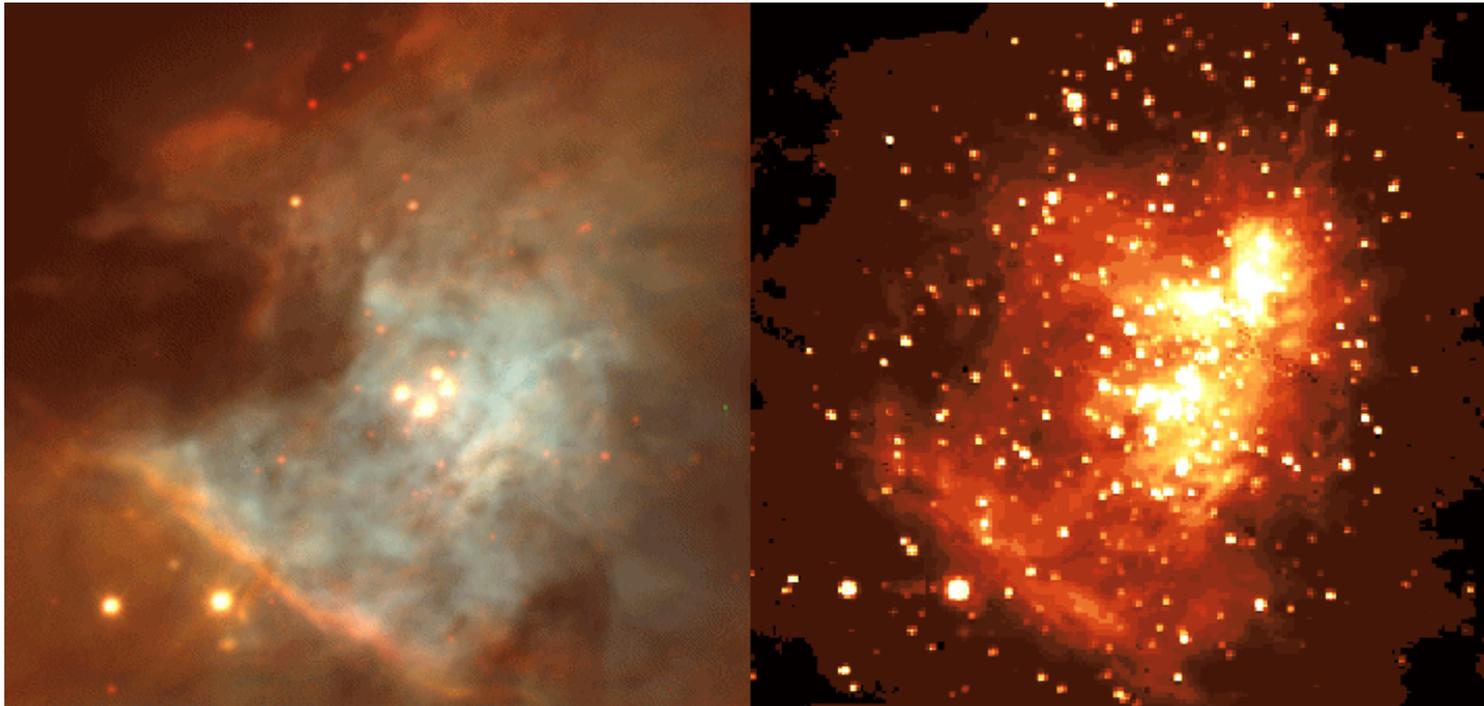
Typische Sternbildungsregion  
im Rosetten-Nebel



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

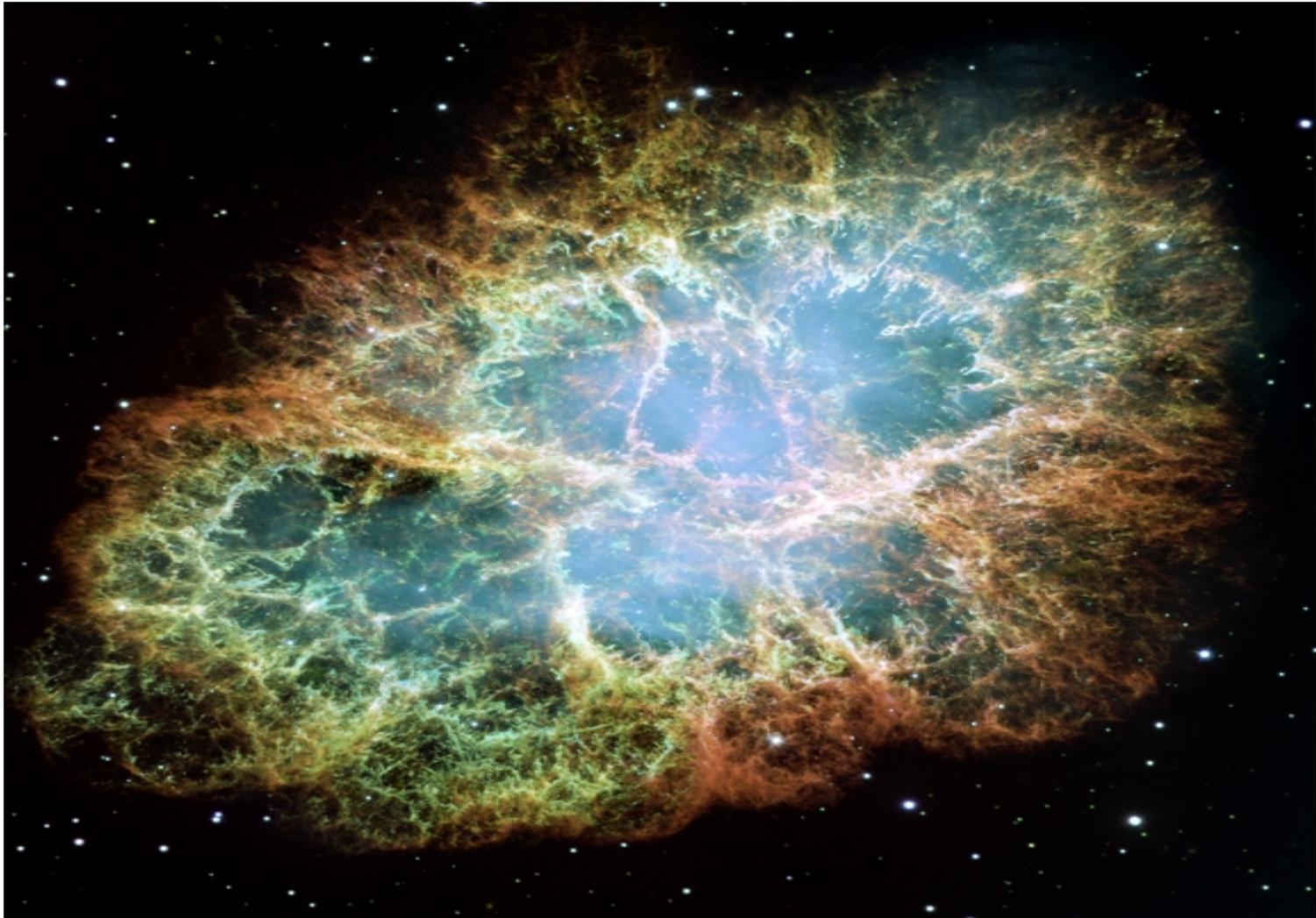
links:  
im Optischen

rechts:  
im Infraroten

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



## Der Krebsnebel





## Supernova-Explosion

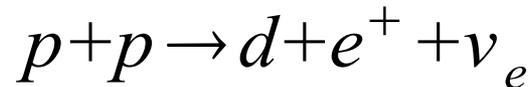


# Wie funktioniert die Sonne?

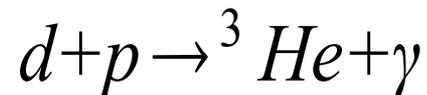


Die Sonne ist ein Kernfusionsreaktor.

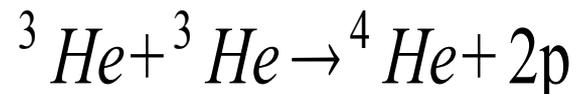
- ★ Wenn die Protosonne sich so weit verdichtet hat, dass eine Zentraltemperatur von 15 Millionen Kelvin erreicht wird, zündet die Wasserstofffusion.
- ★ Die Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium setzt gewaltige Energien frei.
- ★ Die „Zünderreaktion“ ist eine schwache Wechselwirkung (sonst gäbe es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

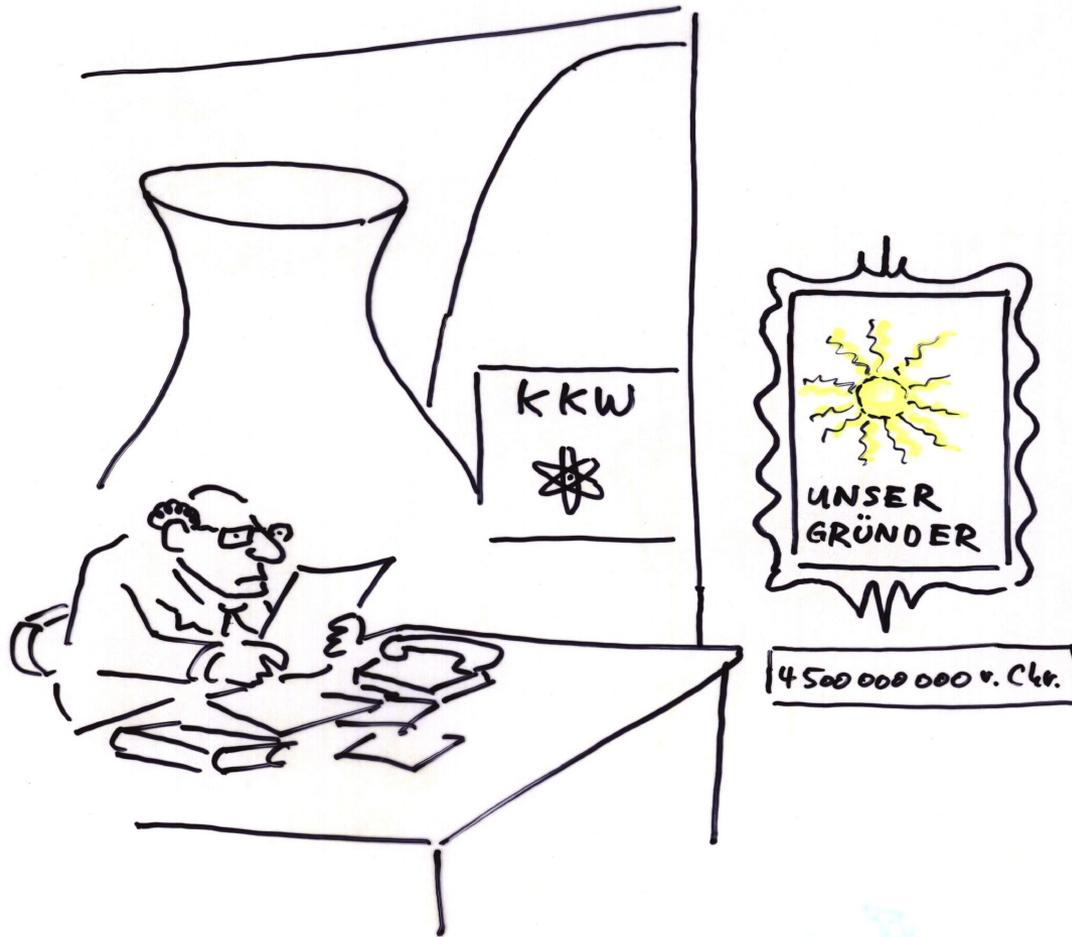


In weiteren Reaktionen wird zunächst  ${}^3\text{He}$  erzeugt:



und aus diesem Heliumisotop schließlich

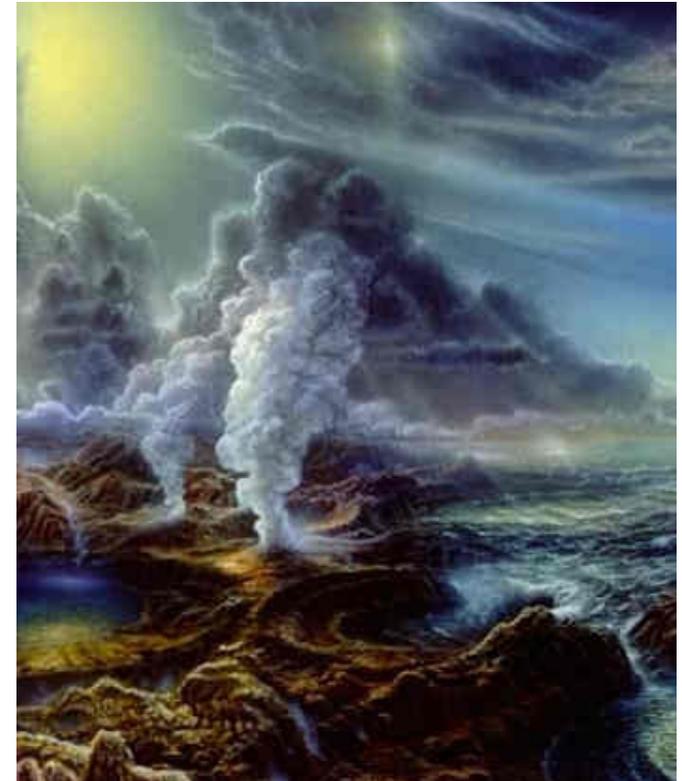




# Entwicklung der Sonne

**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

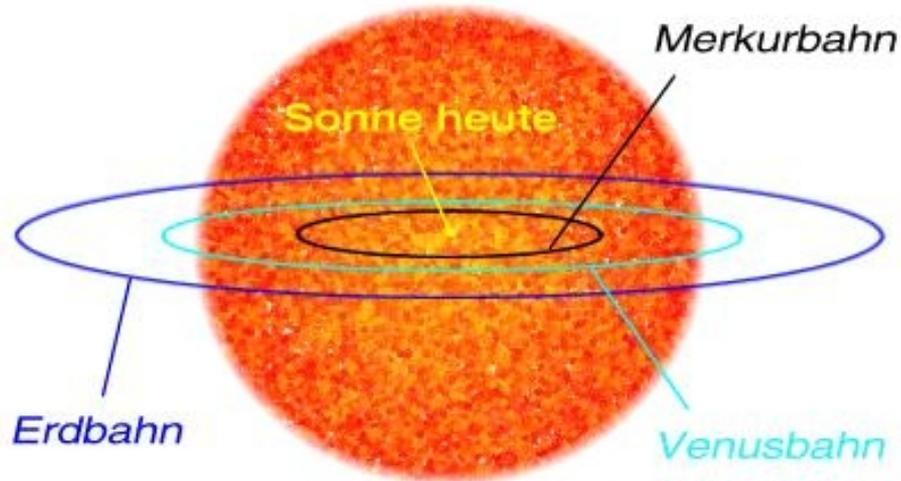
- ★ der Wasserstoffvorrat ist verbraucht,
- ★ die Heliumasche wird instabil und kollabiert unter ihrem eigenen Gewicht,
- ★ dabei verdichtet sich das Helium und heizt sich auf,

Zu diesem Zeitpunkt ist die Sonne

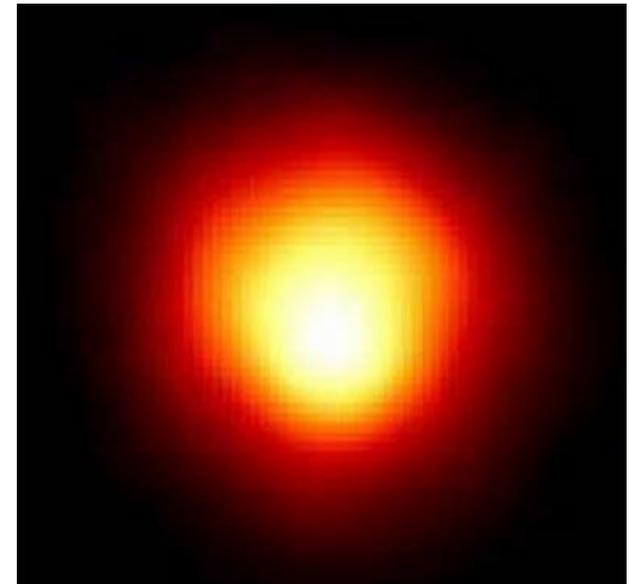
- ★ etwas größer
- ★ etwas heller

## 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.

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.

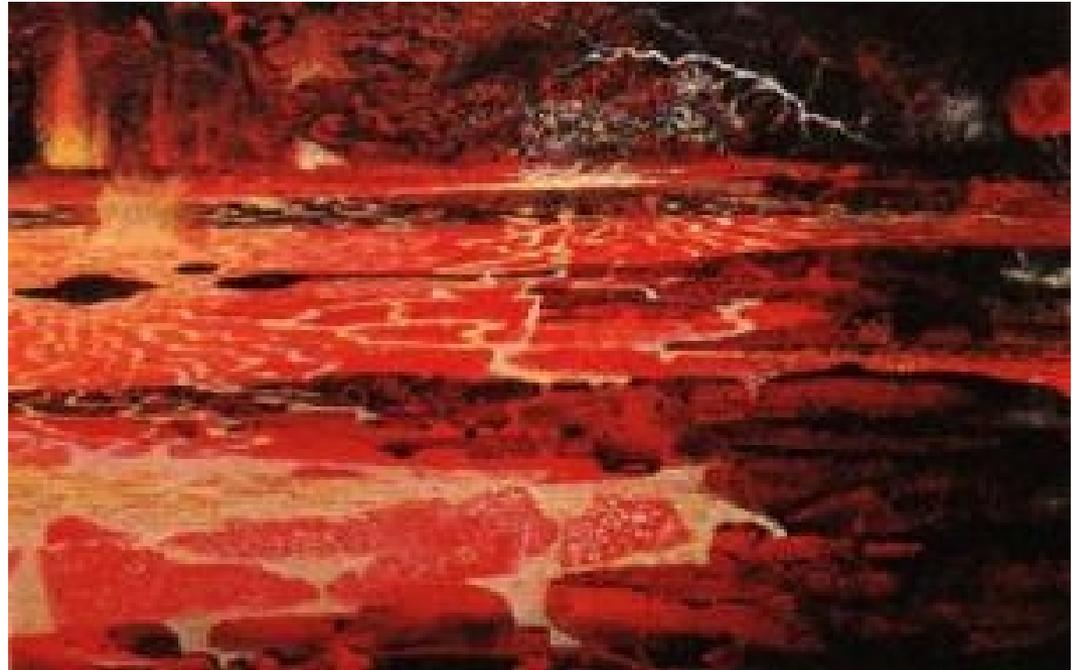
★ Die Phase des Heliumbrennes dauert etwa 110 Millionen Jahre

★ 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 Erdbahnhalfmessers entkommt die Erde der völligen Vernichtung.

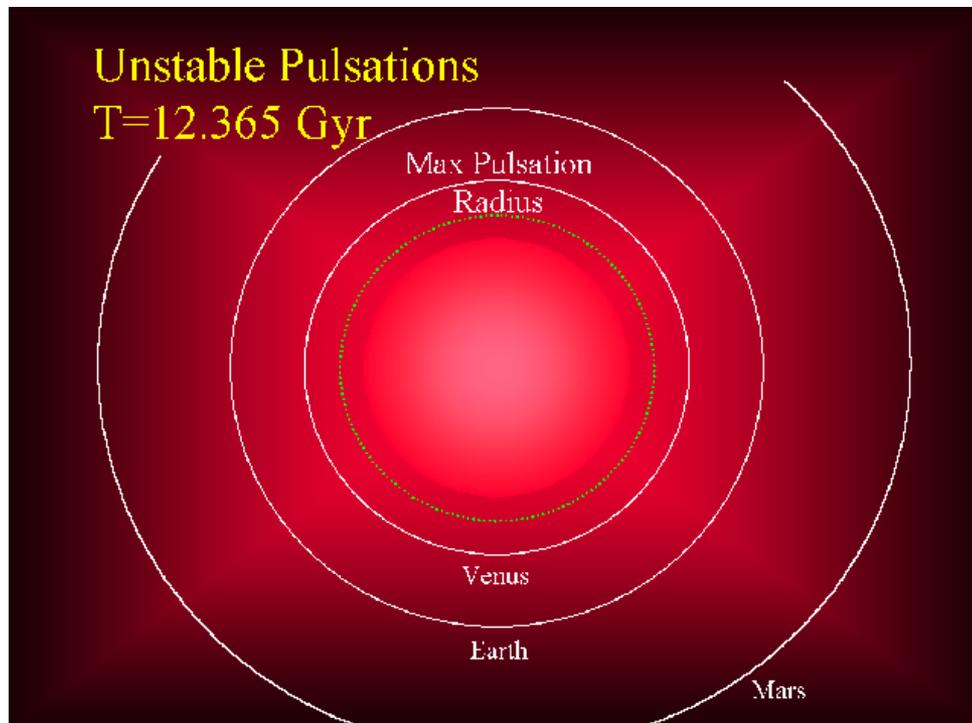


Die Erde wird gebacken

## 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.
- ★ 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

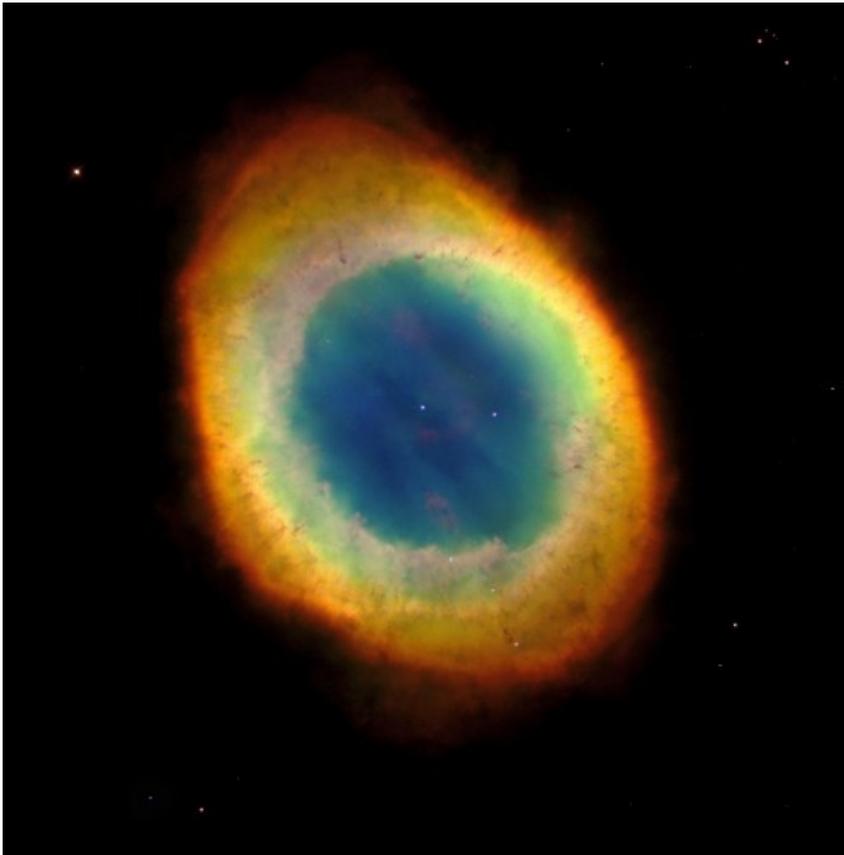


Helix-Nebel



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
- ★ Der weiße Zwerg leuchtet aufgrund seiner (hohen) Temperatur; er wird immer dunkler.

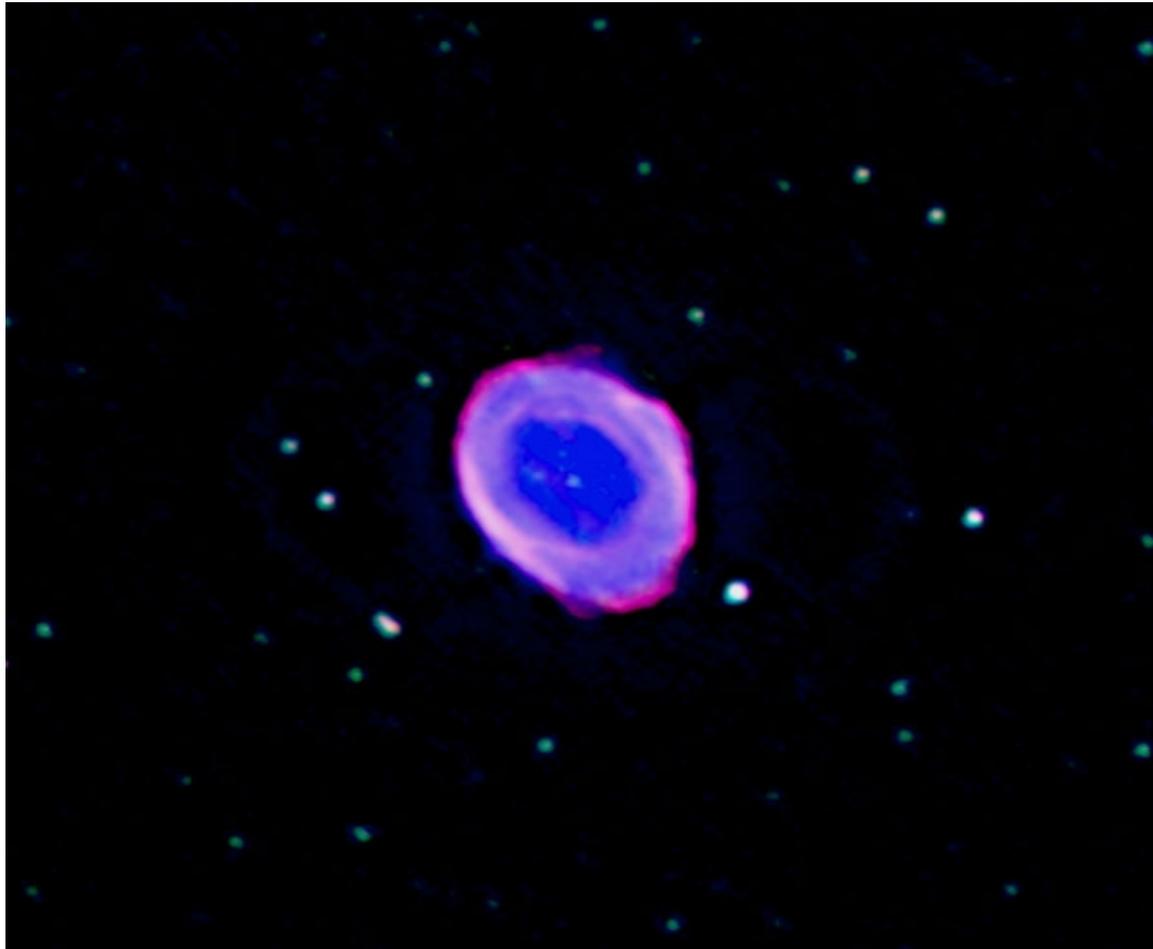
## Weißer Zwerg

- ★ 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



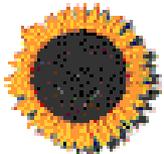




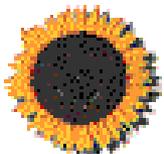
**Nach vielen Milliarden Jahren wird die Sonne von der Bildfläche verschwinden.**



**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.**