

Sternentwicklung

Mittwochsakademie Sommer 2017

Claus Grupen



Inhalt

Wo entstehen Sterne?

Die Sonne

Supernovae

Pulsare und

Neutronensterne

Schwarze Löcher

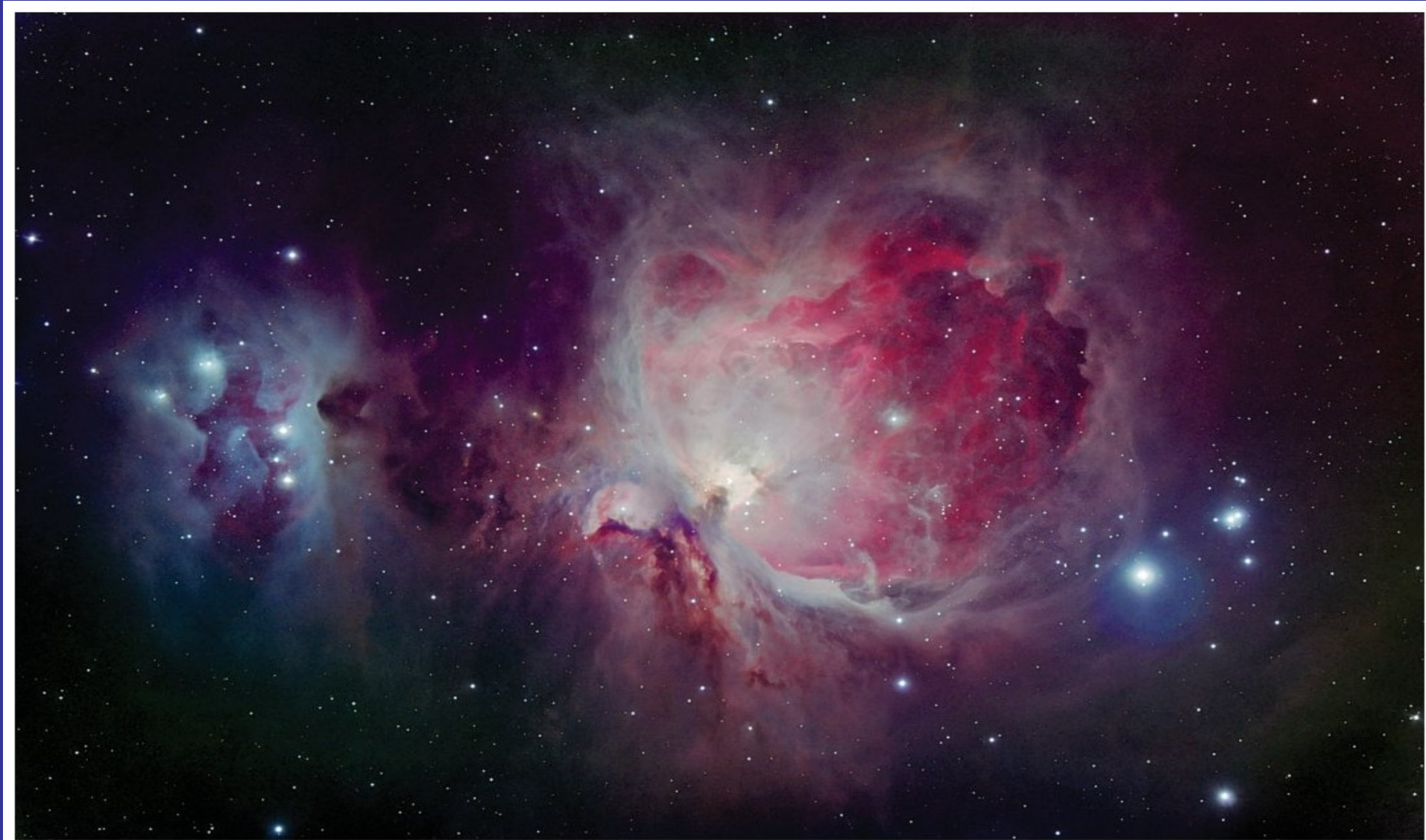
Machos



Roter Riese und Weißer Zwerg

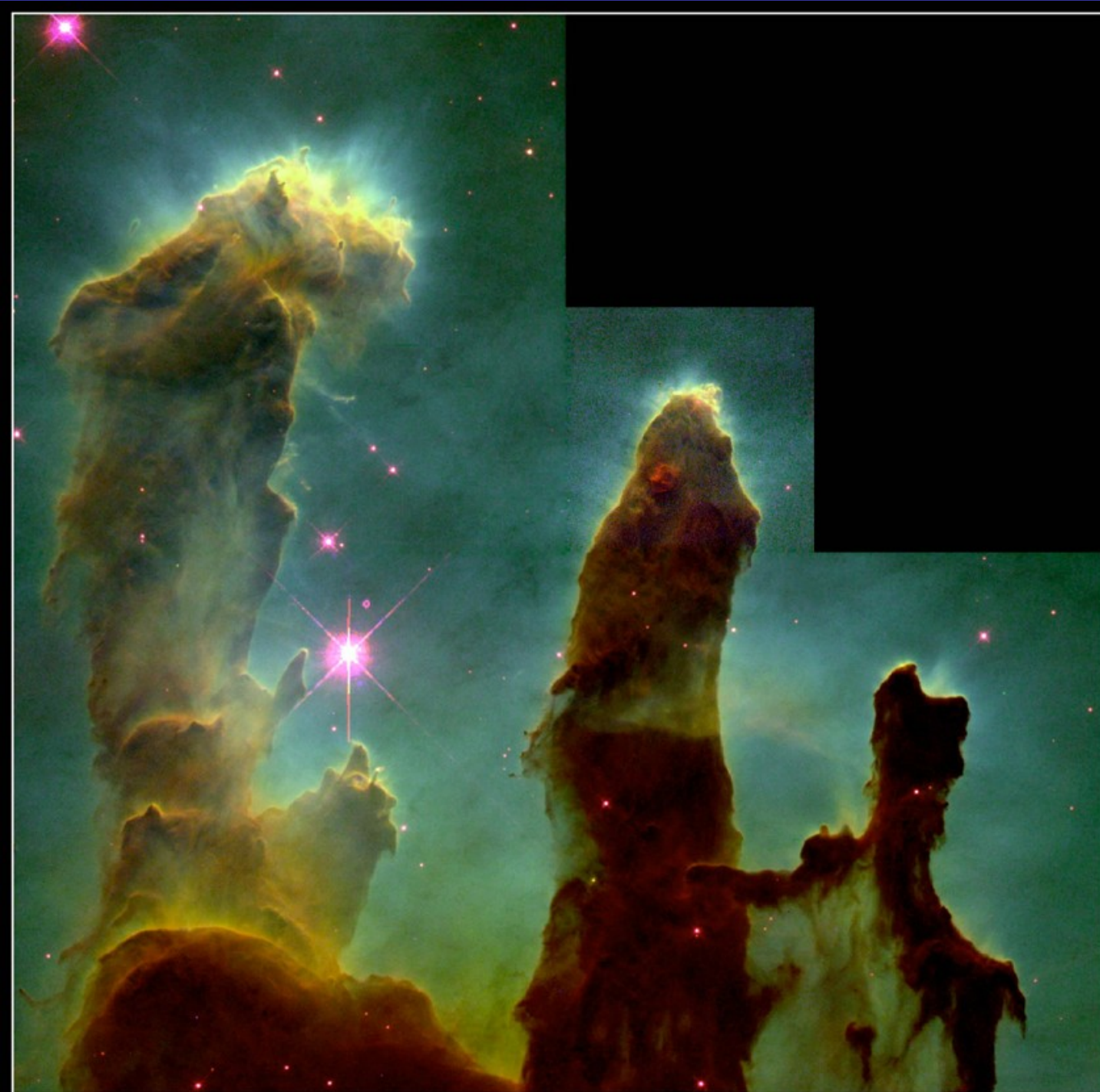
Claus Guppen 2013

Kreißsaal: Orionnebel





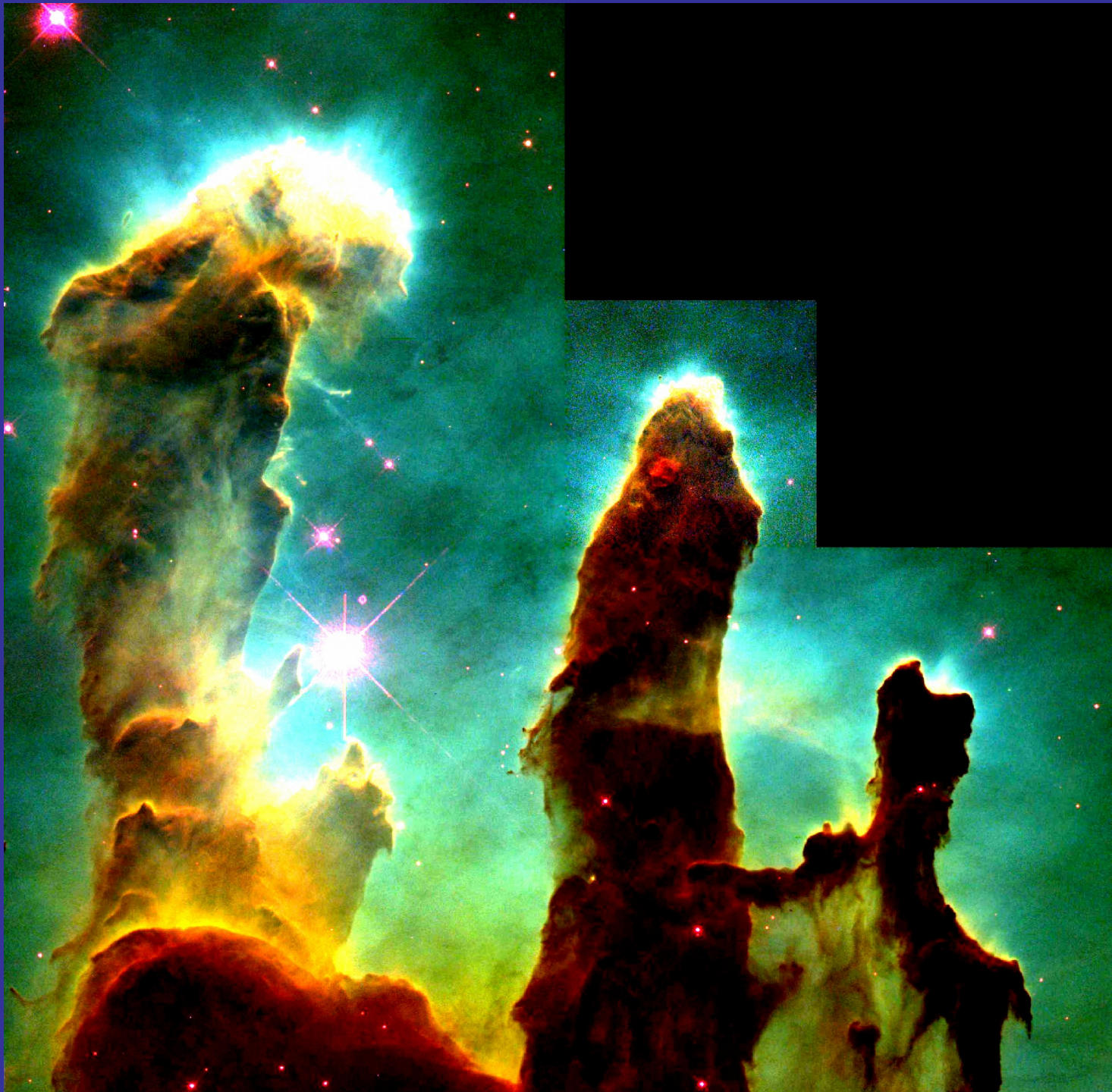
“C.G. Öl auf Leinwand:
“Teufel ärschlings zur Hölle
stürzend” 1962

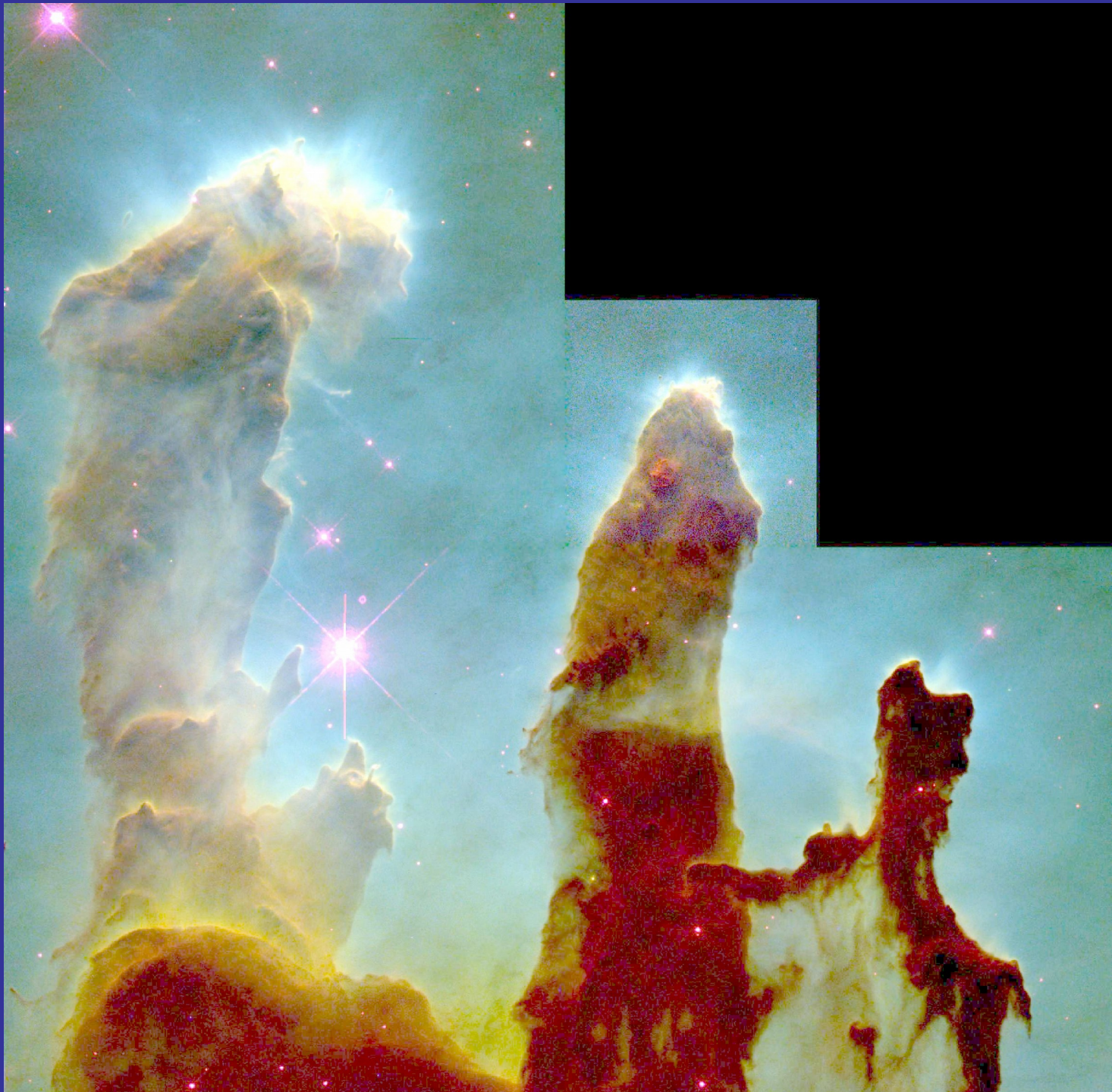


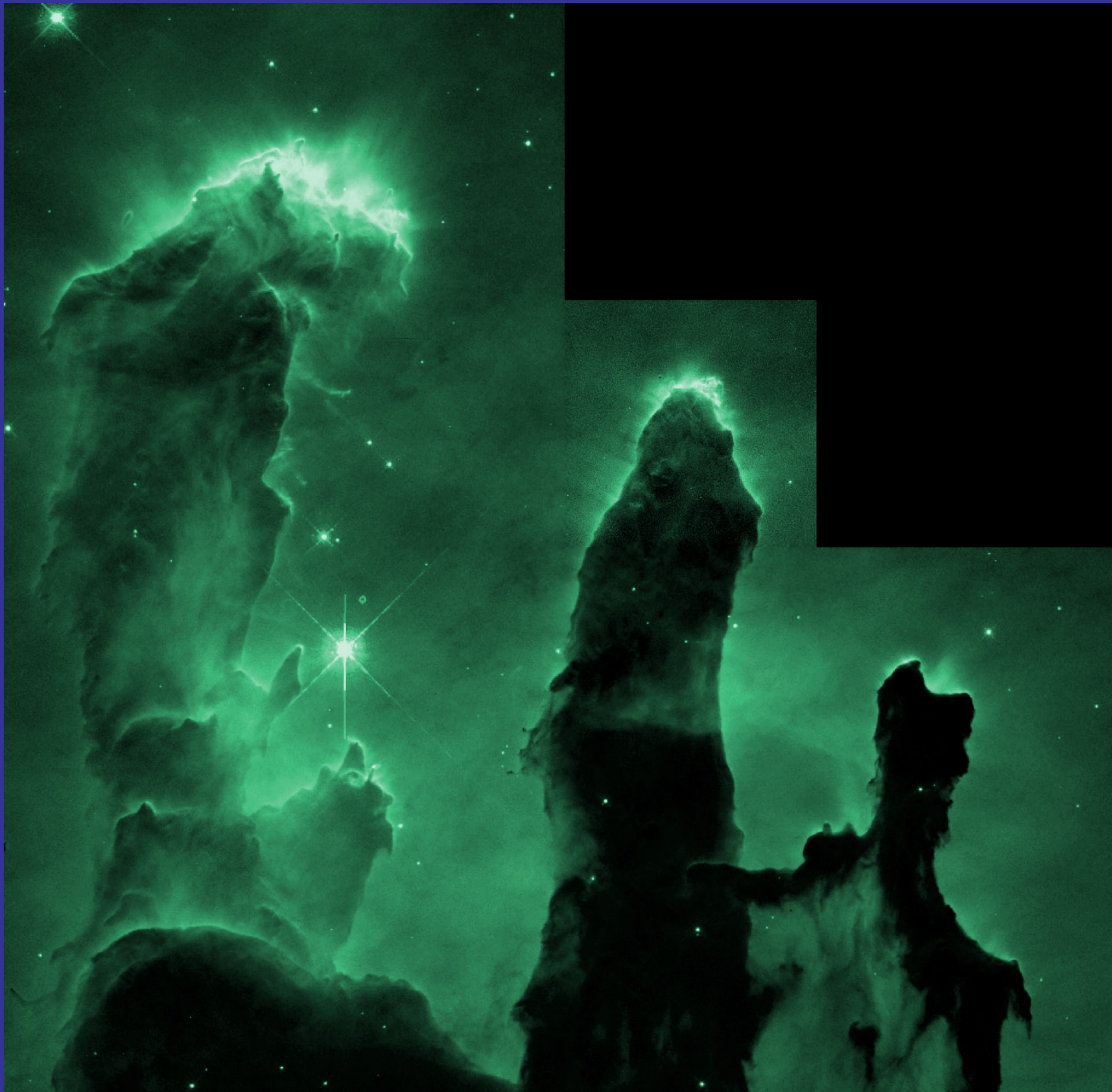
Adler Nebel

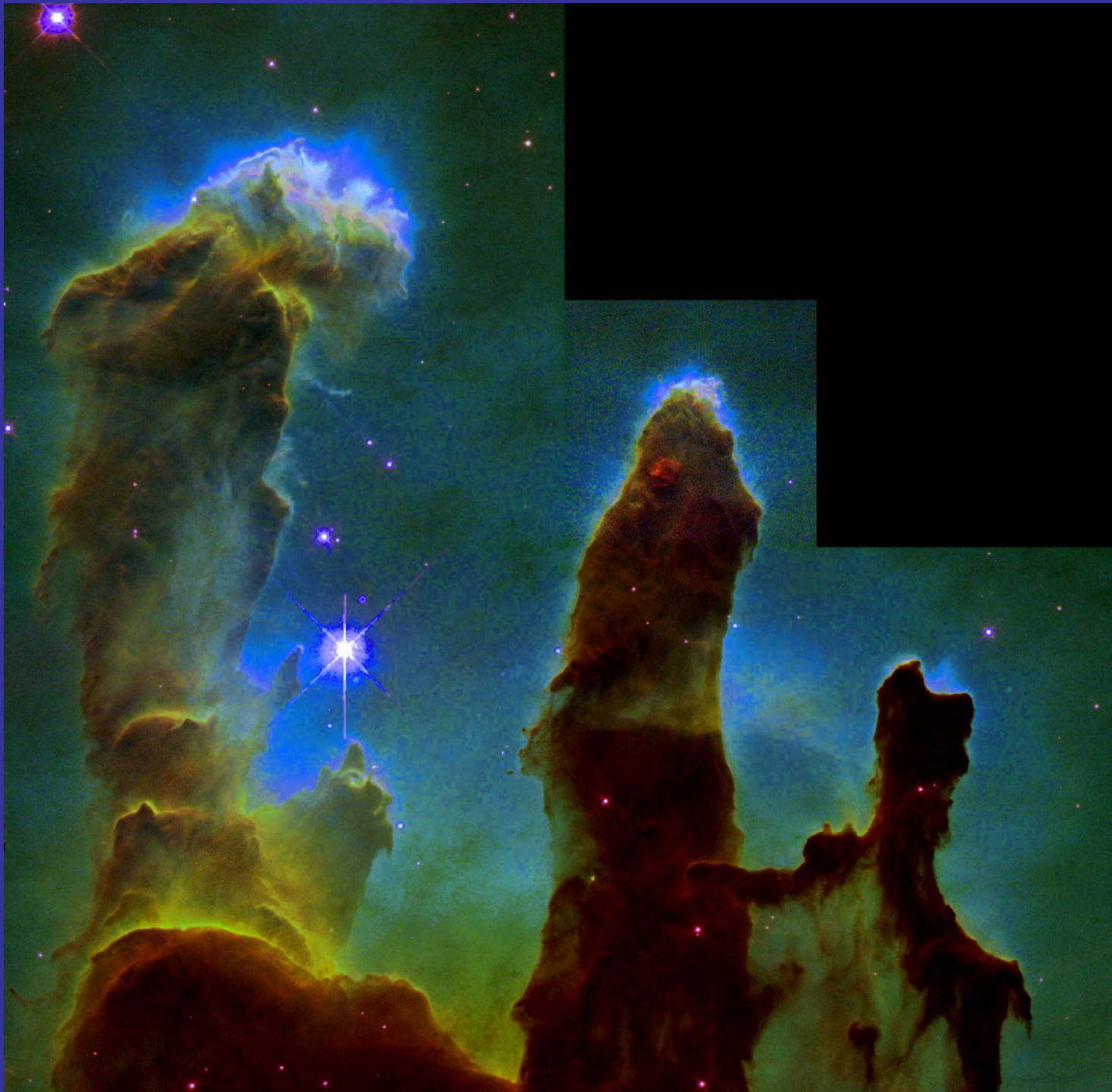
**“Säulen der
Schöpfung”**

**Entfernung
7000 LJ**











Visible



Infrared

Visible vs. Infrared View of Pillar and Jets HH 901/902

6500 – 10000 LJ

Hubble Space Telescope • WFC3/UVIS/IR

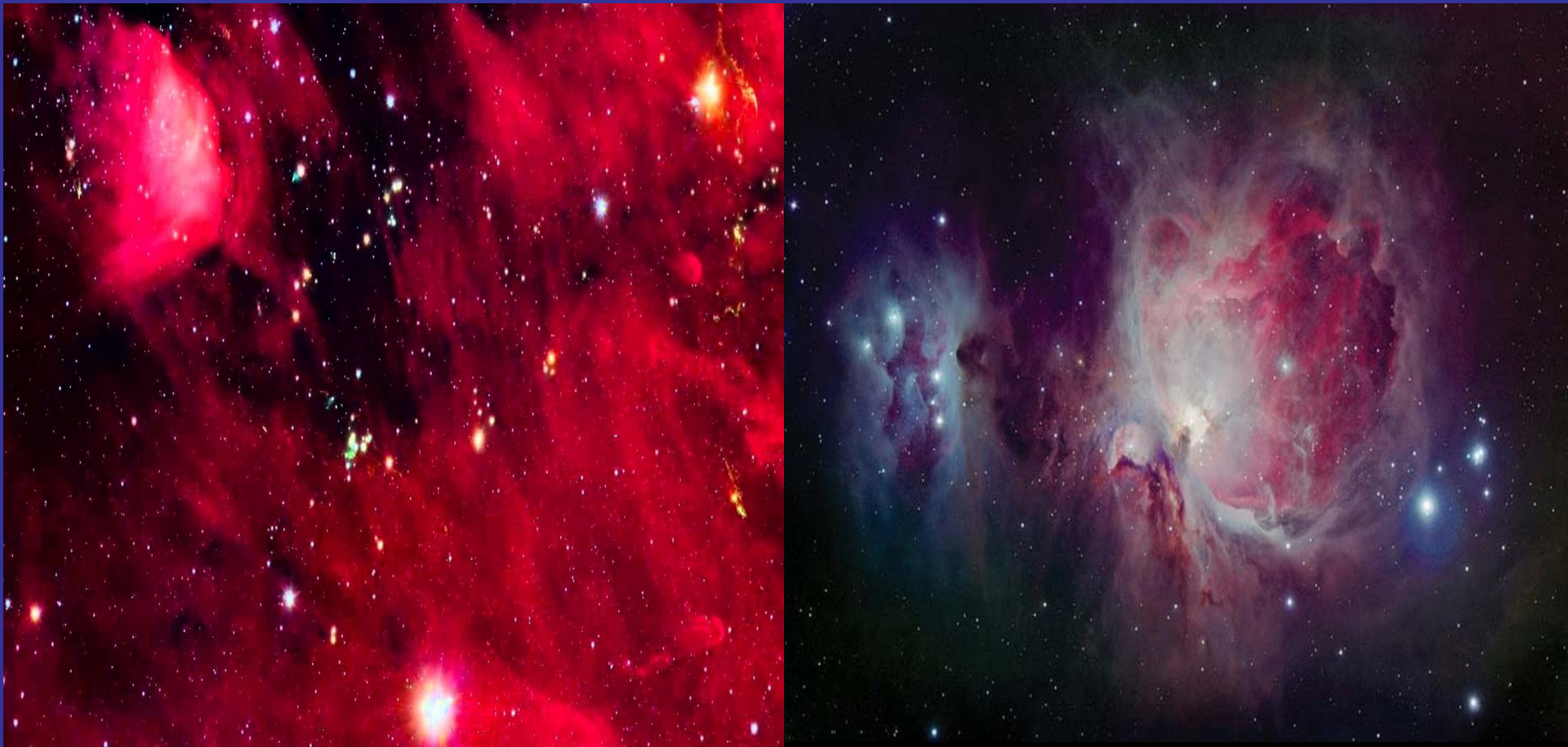
Carina Nebel



Pferdekopfnebel

optisch und im

Infraroten



Sternentstehung im Orion-Nebel
1350 LJ

Papst sucht Gott mit Infrarot-Teleskop

Gott – versteckt sich seine Allmacht hinter Sternennebeln?

Der Papst will ihn mit einem Super-Teleskop suchen lassen.

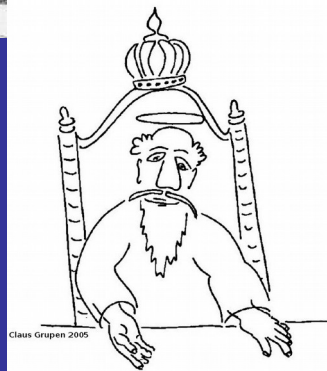
Er verdoppelt sein Astronomen-Team (alles Jesuiten) auf 20 Wissenschaftler. Die Forscher, die bisher im Observatorium des

Vatikan gearbeitet hatten, werden nach Mount Graham in Arizona/USA umziehen.

Dort läßt ihnen der Heilige Vater für 9 Millionen Mark ein Infrarot-Teleskop bauen. Sein Auftrag: Sucht im kosmischen Chaos nach Fingerabdrücken Gottes!

Pater Chris Cor-

bally, stellvertretender Direktor des Observatoriums: „Wenn es Zivilisationen auf anderen Planeten gibt, würden wir ihnen gerne Missionare senden, um sie zu retten. So wie wir es in der Vergangenheit taten, als neue Länder entdeckt wurden.“



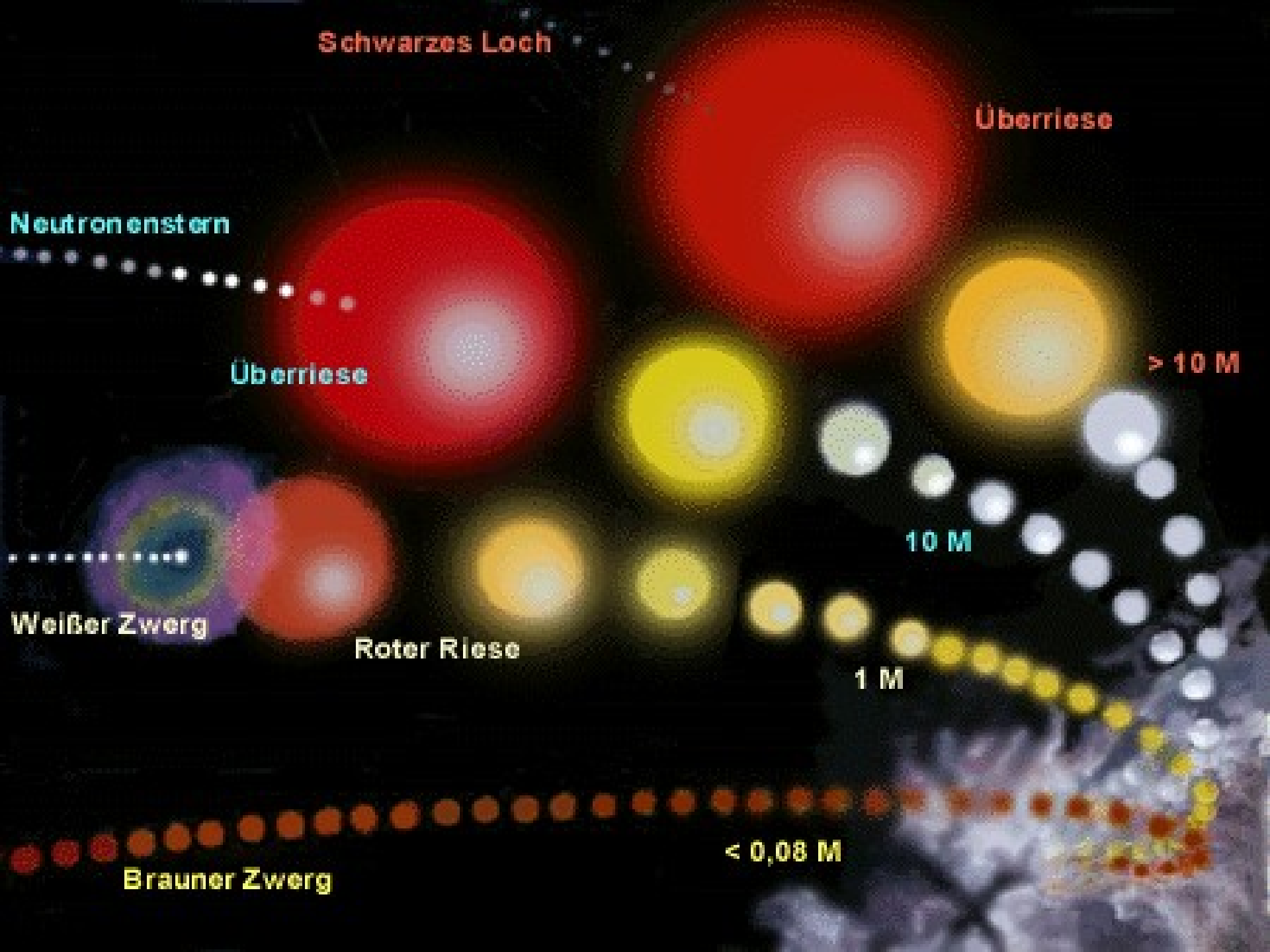


Feuerrad-Galaxie
170 000 LJ Durchmesser

Stufen der Sternentstehung

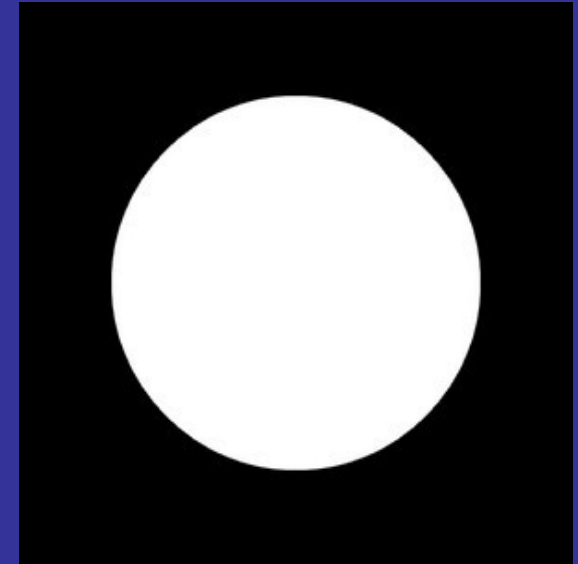
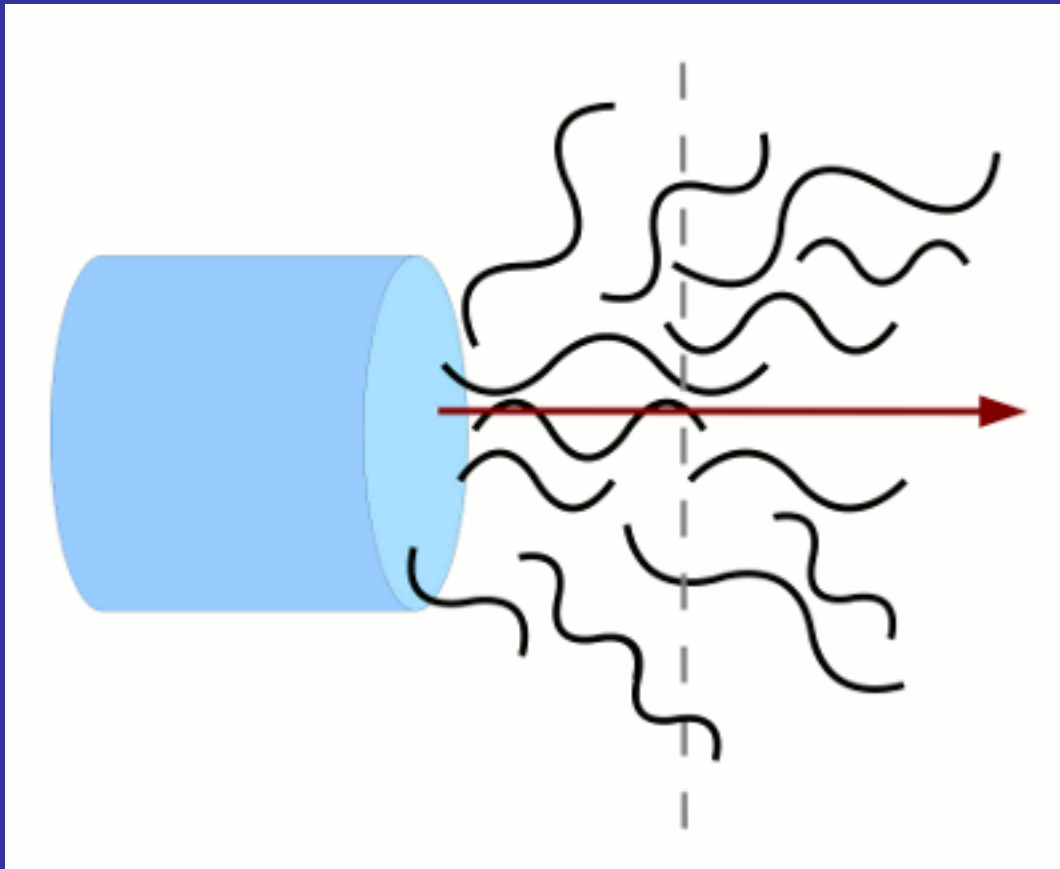


T-Tauri-Phase: junge Sterne mit Akkretionsscheiben

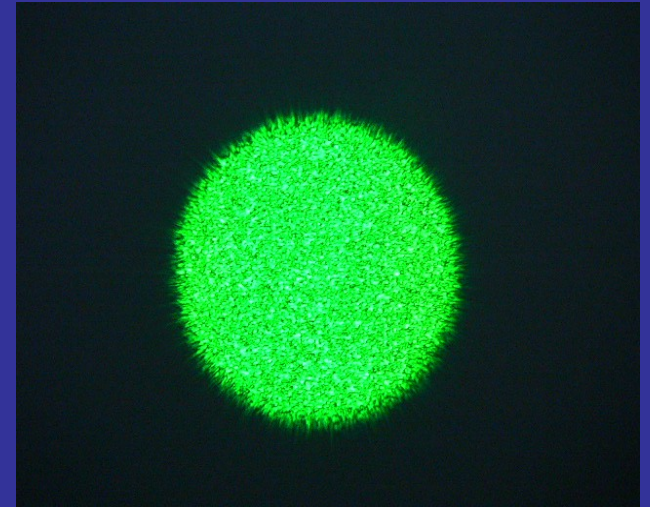
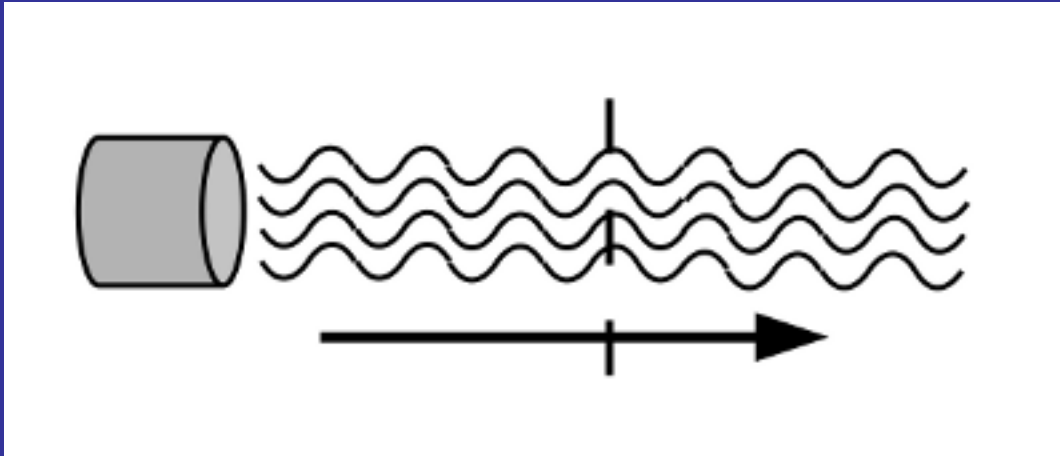




Protoplanetare Scheibe mit Planetenansätzen

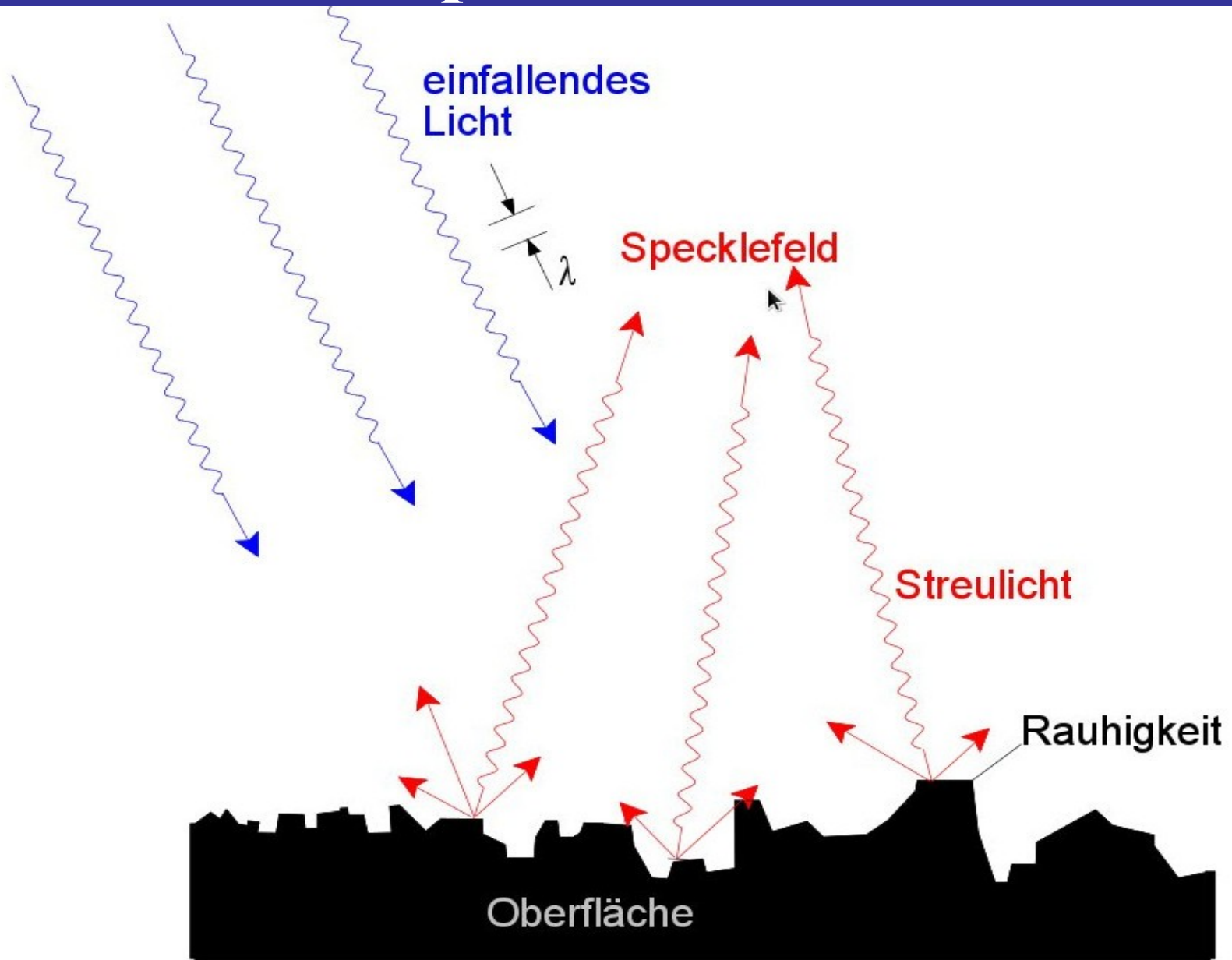


Inkohärentes Licht einer Taschenlampe: Die Wellenzüge breiten sich in alle möglichen Richtungen aus (das Licht ist nicht parallel); die Wellenzüge sind kurz und haben verschiedene Wellenlängen (das Licht ist nicht monochromatisch).



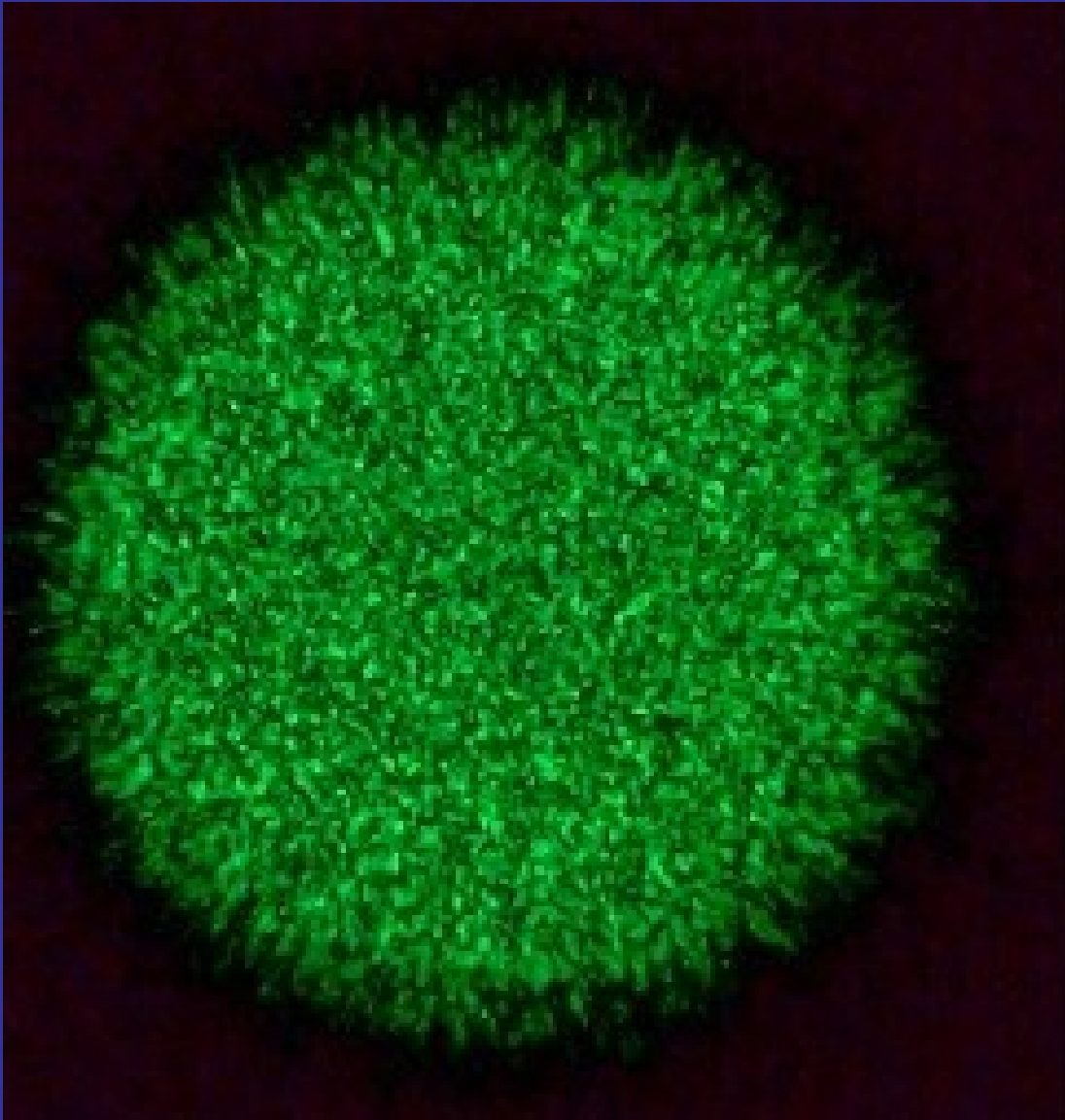
Zeitlich und räumlich kohärentes Licht eines Lasers, der monochromatisches und paralleles Licht aussendet.

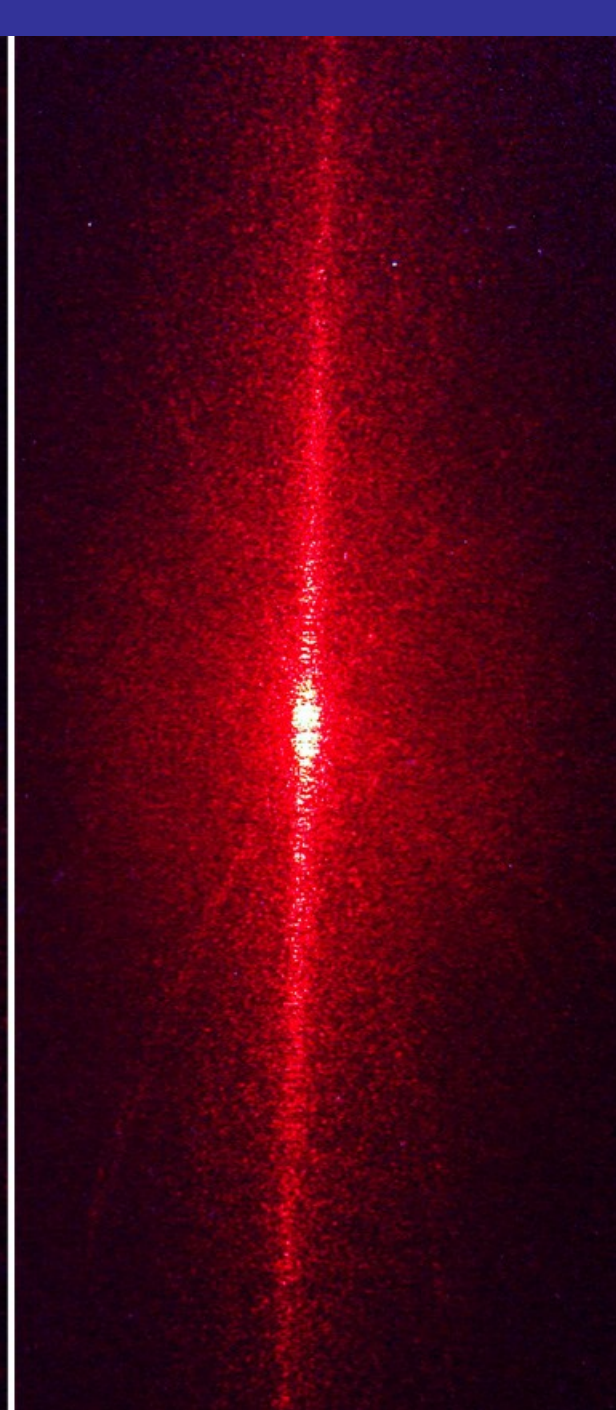
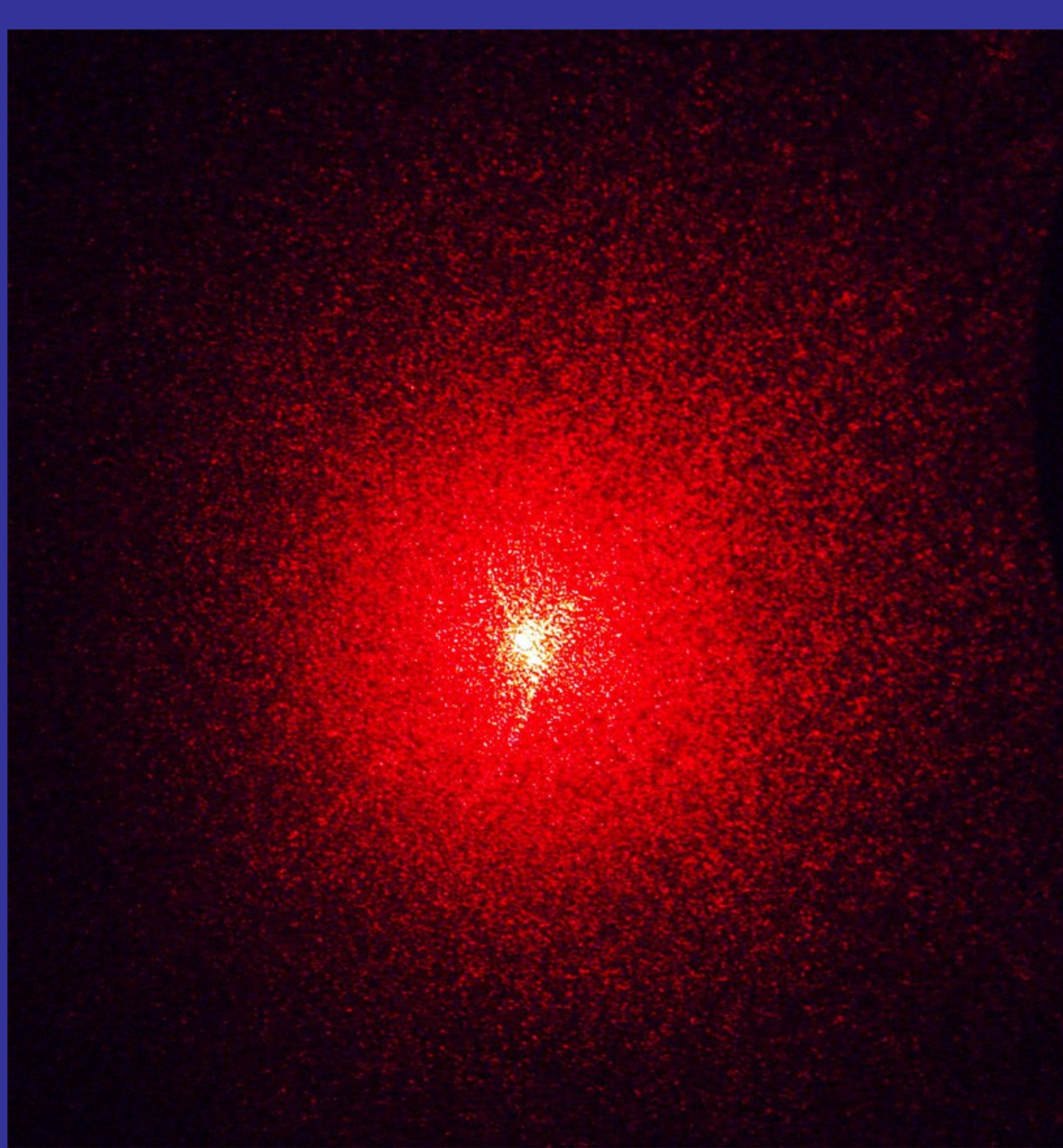
Speckles

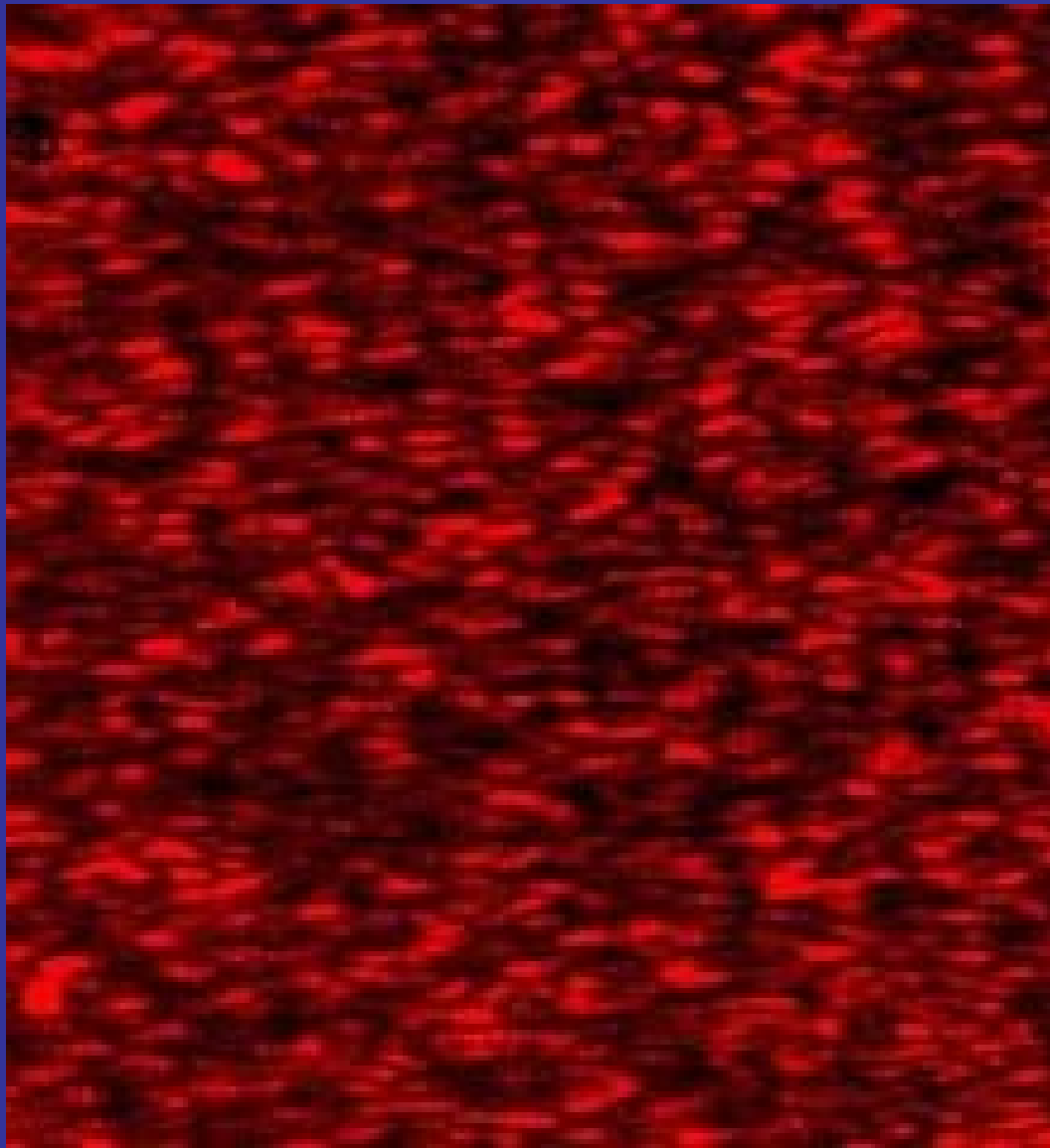




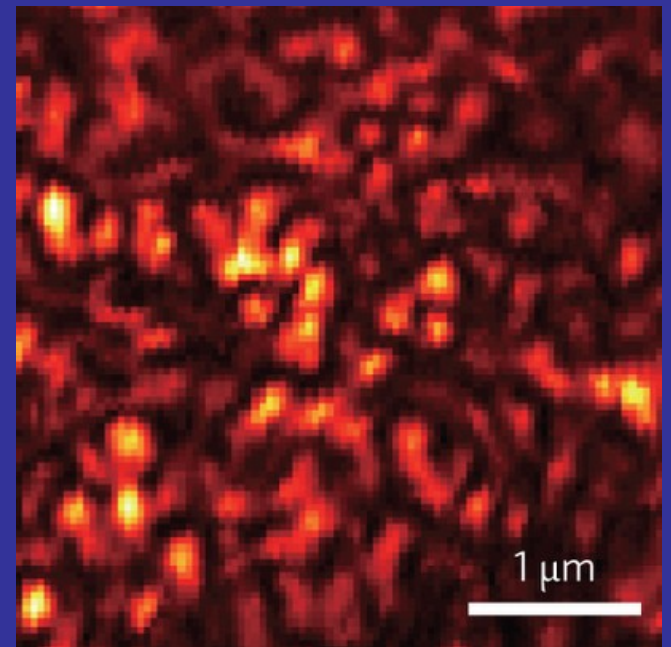
**535 nm,
weiße
Wand**



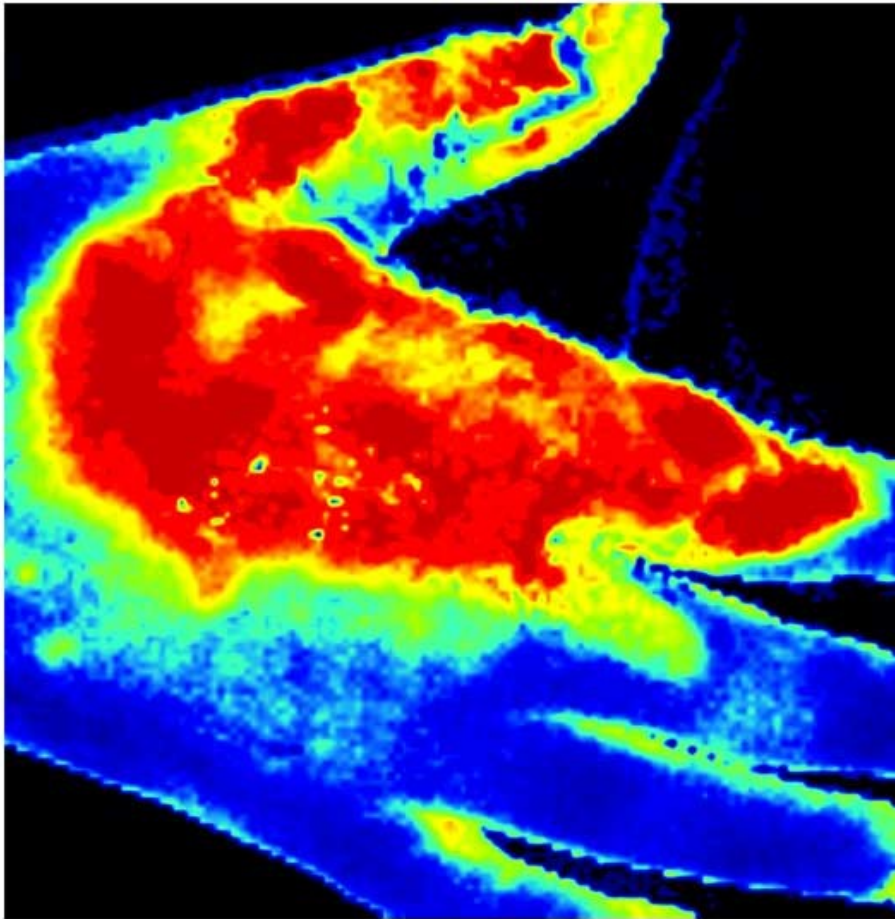




**hochaufgelöstes
Speckle
aufgenommen
mit einer CCD
Kamera**

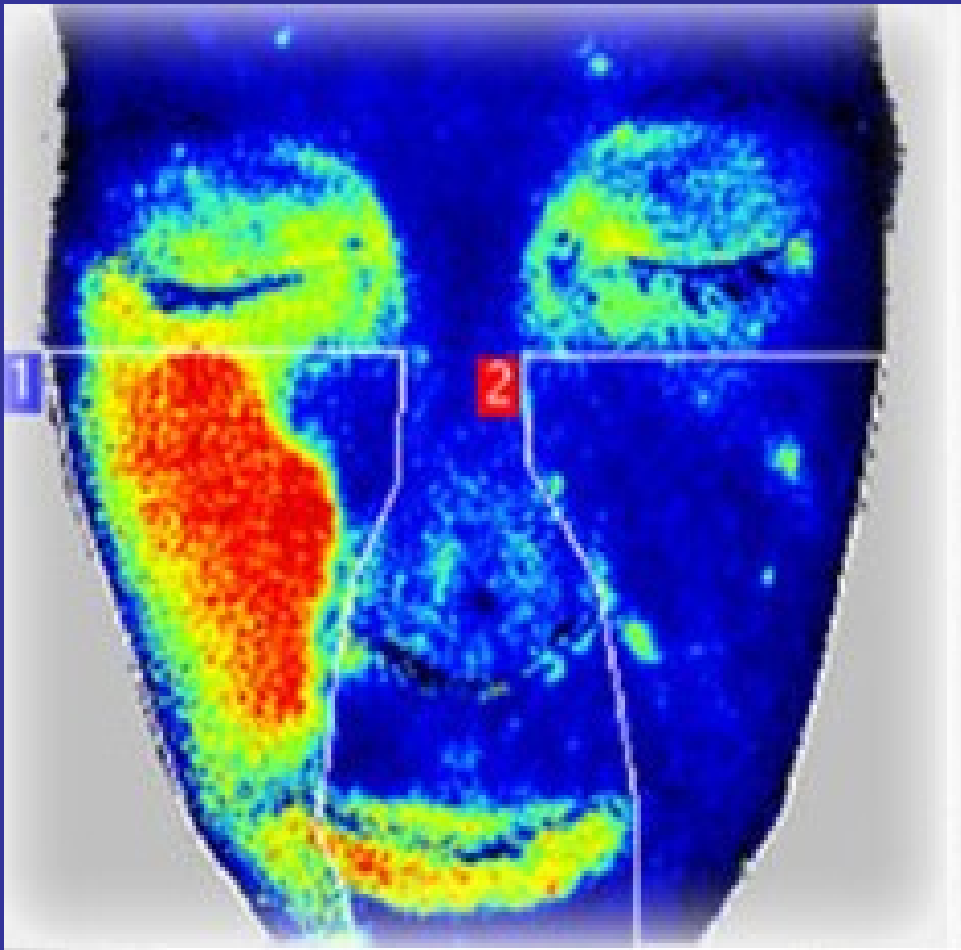


Anwendungen in der Medizin: Durchblutungsstörungen

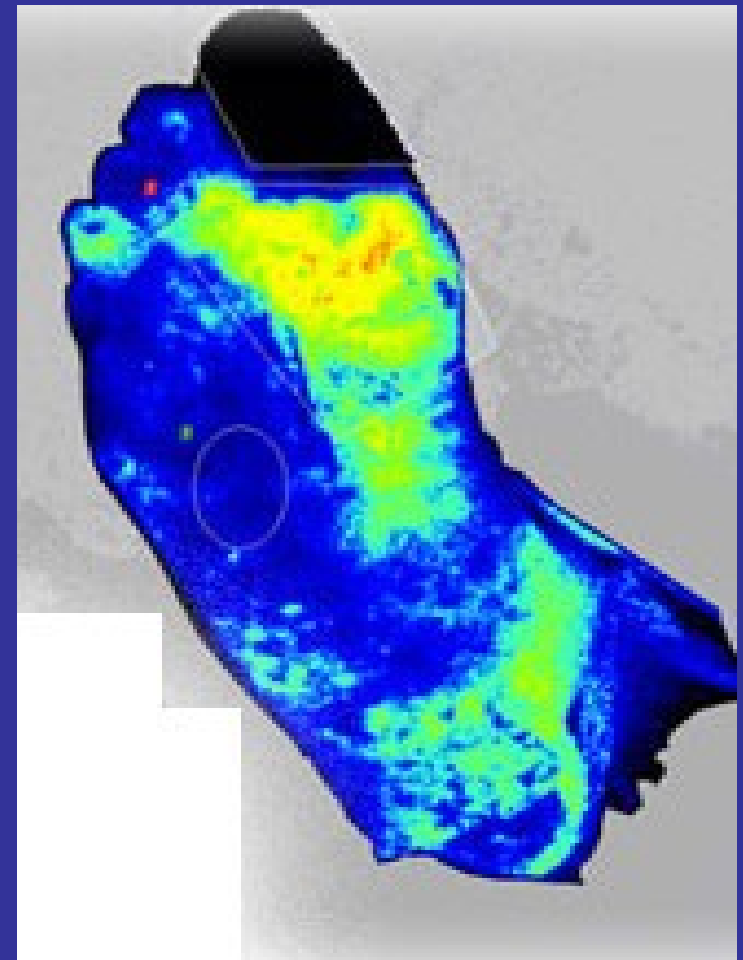


Courtesy of University Hospital Brno, Czech Republic

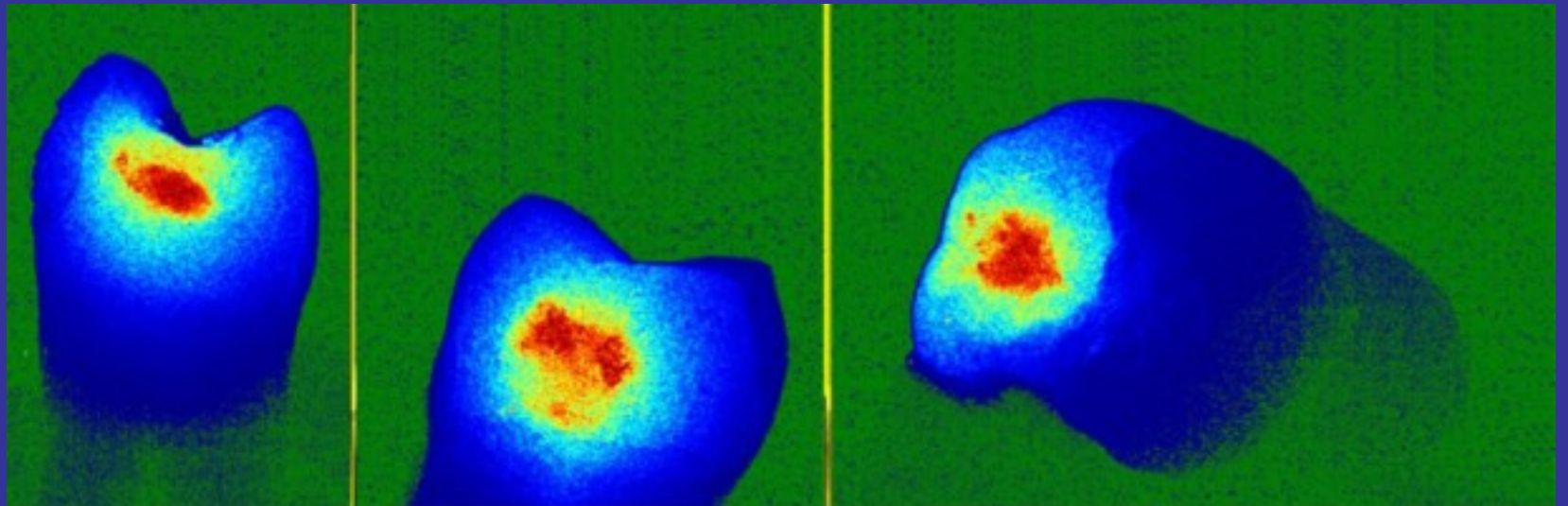
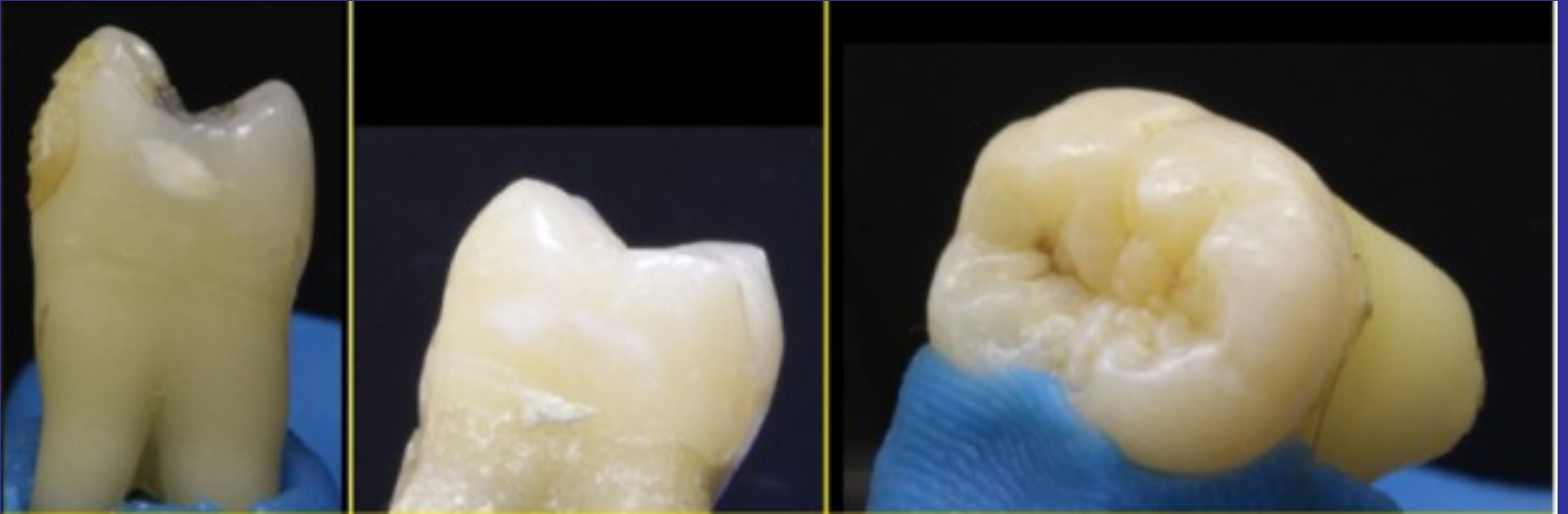
Gewebedurchblutung



Diabetes

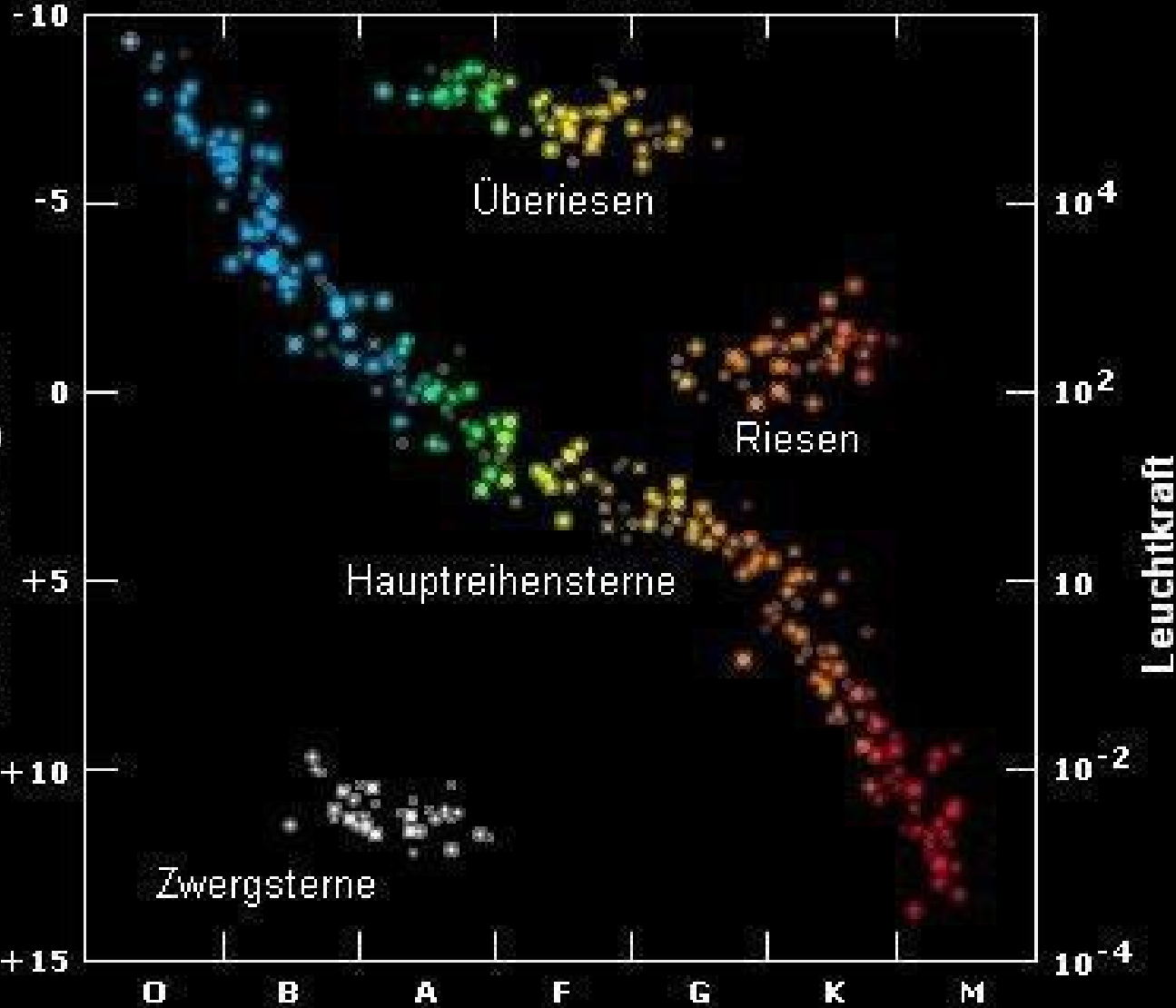


Zahnmedizin: Karies?



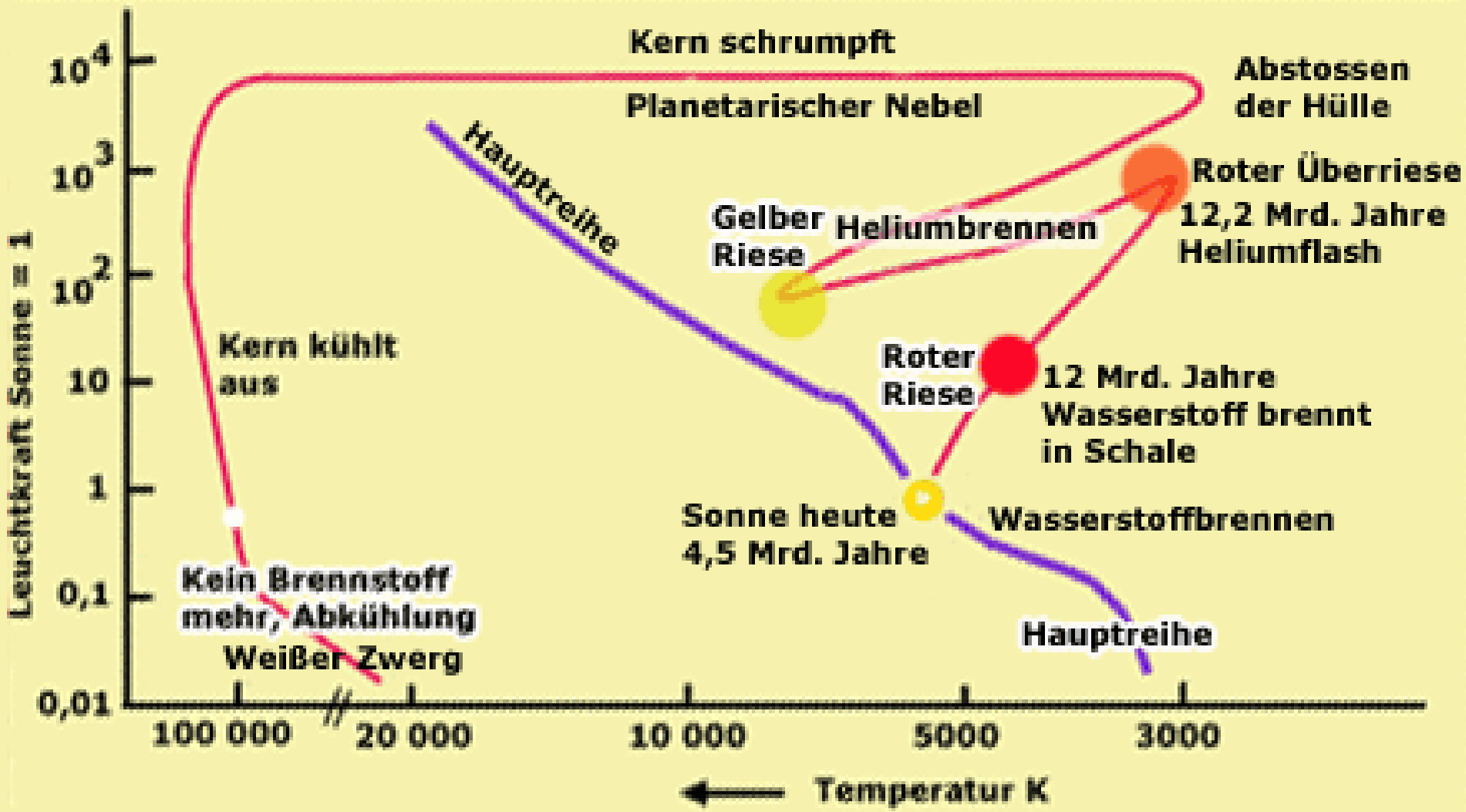
Temperatur

25,000 10,000 6,000 3,000



Hertzsprung-Russel Diagramm

Zeit	~ 9 Mrd. j	~ 1 Mrd. j	~ 100 Mill. j	~ 10 000 j
Phase	Hauptreihe	Roter Riese	Gelber Riese	Planet. Nebel
Sonne	4,5 Mrd. j (jetzt)	12,2 Mrd. j	12,3 Mrd. j	12,3305 Mrd. j
				Weißer Zwerg



Ages of WDs in NGC 6397: 11.5 billion years



Ages of WDs in M4: 12.1 billion years



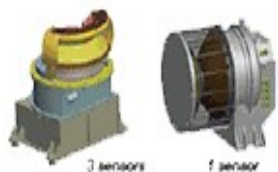
Lebensdauer von Sternen

Sternmasse (in Sonnenmassen)	Zeit (in Jahren)	Spektraltyp
60	3 Millionen	O3
30	11 Millionen	O7
10	32 Millionen	B4
3	370 Millionen	A5
1.5	3 Milliarden	F5
1	10 Milliarden	G2 (Sonne)
0.1	1000's von Milliarden	M7

====> weiße Zwerge können schon sehr alt sein

Instrumente der Jupiter-Sonde Juno

Jovian Auroral Distributions Experiment (JADE)



misst die Verteilung von Elektronen sowie die Geschwindigkeitsverteilung und Zusammensetzung von Ionen

Jupiter Energetic-particle Detector Instrument (JEDI)



zur Messung der Energie u. Winkelverteilung geladener Partikel

Ultraviolett-Spektrograph (UVS)
für Bild-Aufnahmen ultravioletter Strahlung



JunoCam
für Echtfarben-Fotos von Jupiters Wolkendecke



Gravity Science (GS)
Schwerkraft-Studien mittels Doppler-Effekt zur Untersuchung von Jupiters Masseeigenschaften



Jovian Infrared Auroral Mapper (JIRAM)
Infrarot-Kartograph der Jupiter-Auroren



Magnetometer (MAG)

Advanced Stellar Compass (ASC)
hochentwickelter Sternenkompas zur präzisen Ausrichtung des MAG

Fluxgate Magnetometer (FGM)

2 Magnetfeldsensoren zur Messung von Stärke u. Richtung des Magnetfeldes

Microwave Radiometer (MWR)
Mikrowellen-Strahlenmessgerät zur Messung von Wärmestrahlung in verschiedenen Tiefen von Jupiters Atmosphäre

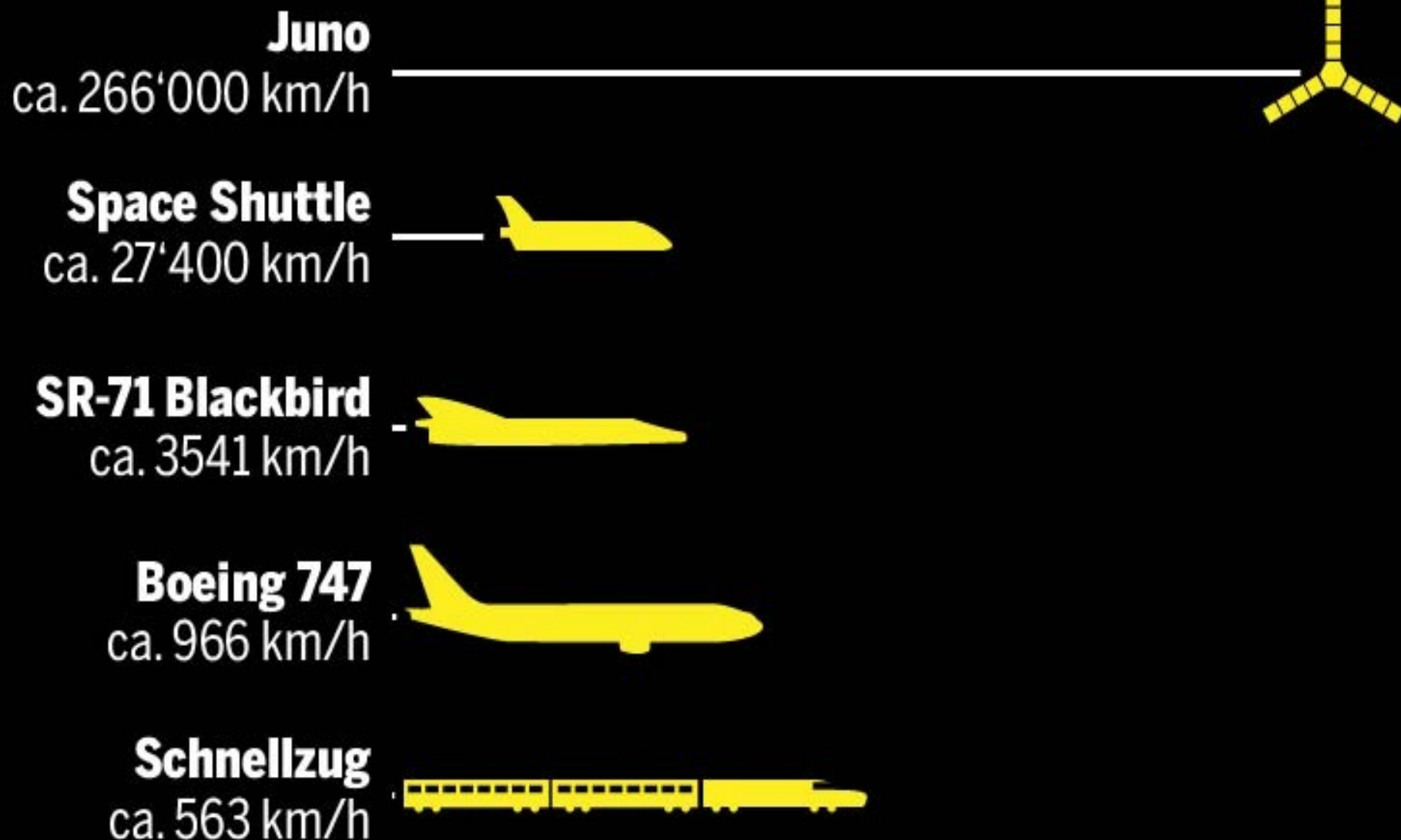


Plasma Waves Instrument (Waves)
zur Messung von Plasma- und Radiowellen in Jupiters Magnetosphäre



Wie schnell ist Juno?

Die Geschwindigkeit der Raumsonde im Vergleich.





Ein paar Daten über Jupiter:

Radius: 69.911 km

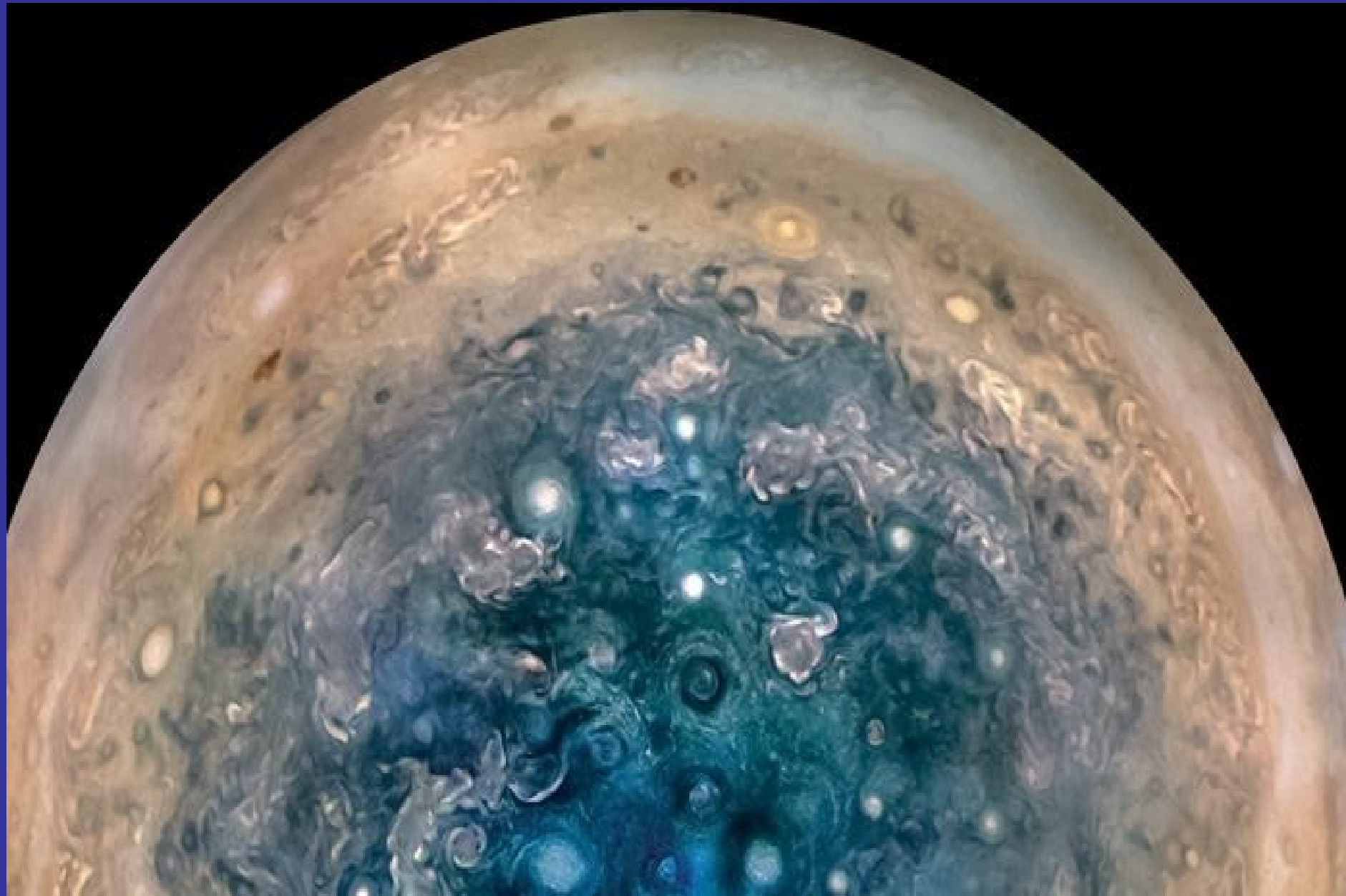
Große Halbachse: 5,203 AE; (778,36 Mio. km)

Kleinster – größter Erdabstand: 3,934 – 6,471 AE

Umlaufzeit: 11 a 315 d

Monde: Europa, Ganymed, Io, Kallisto, Iocaste,

Amalthea,



Blick auf Jupiters Südpol

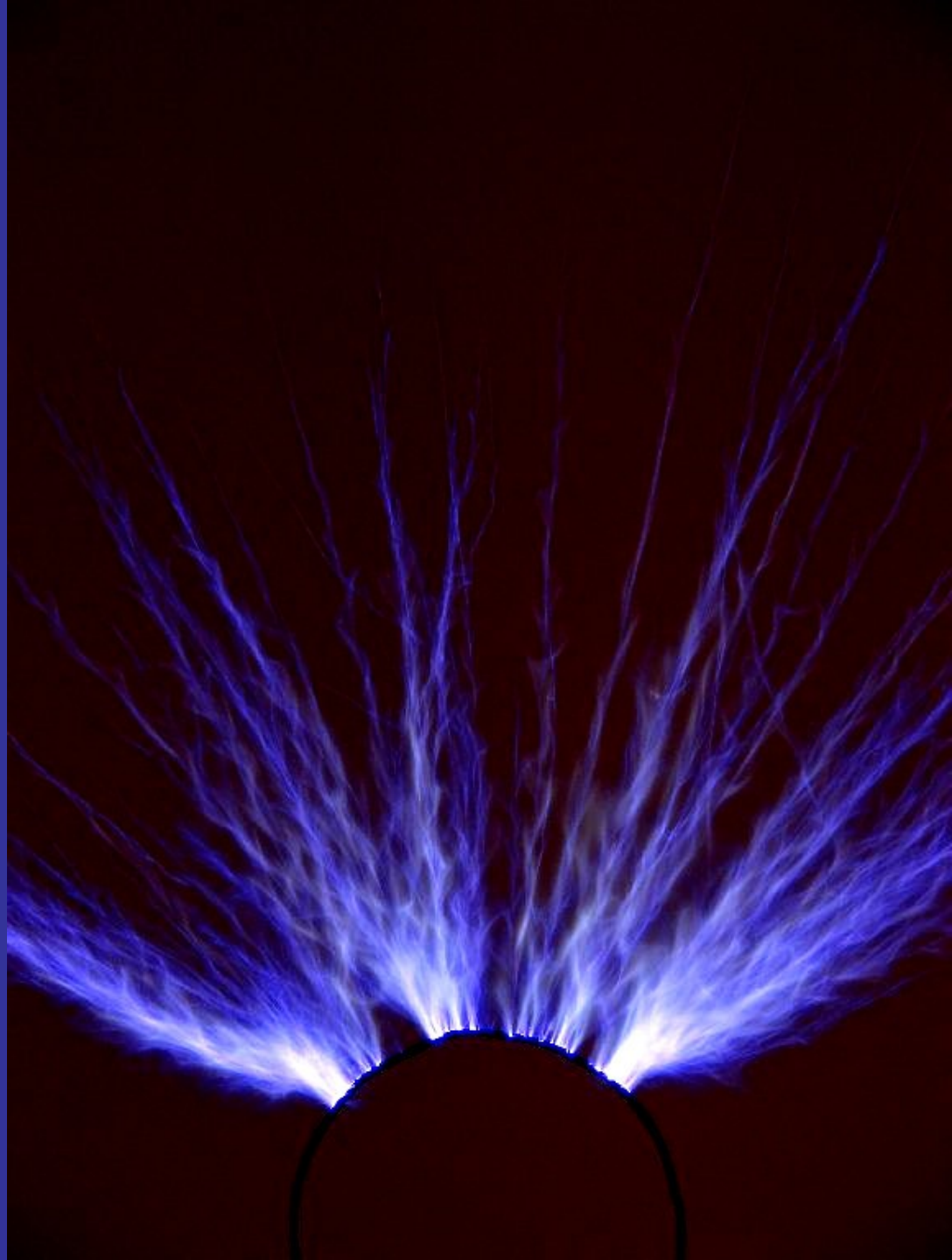


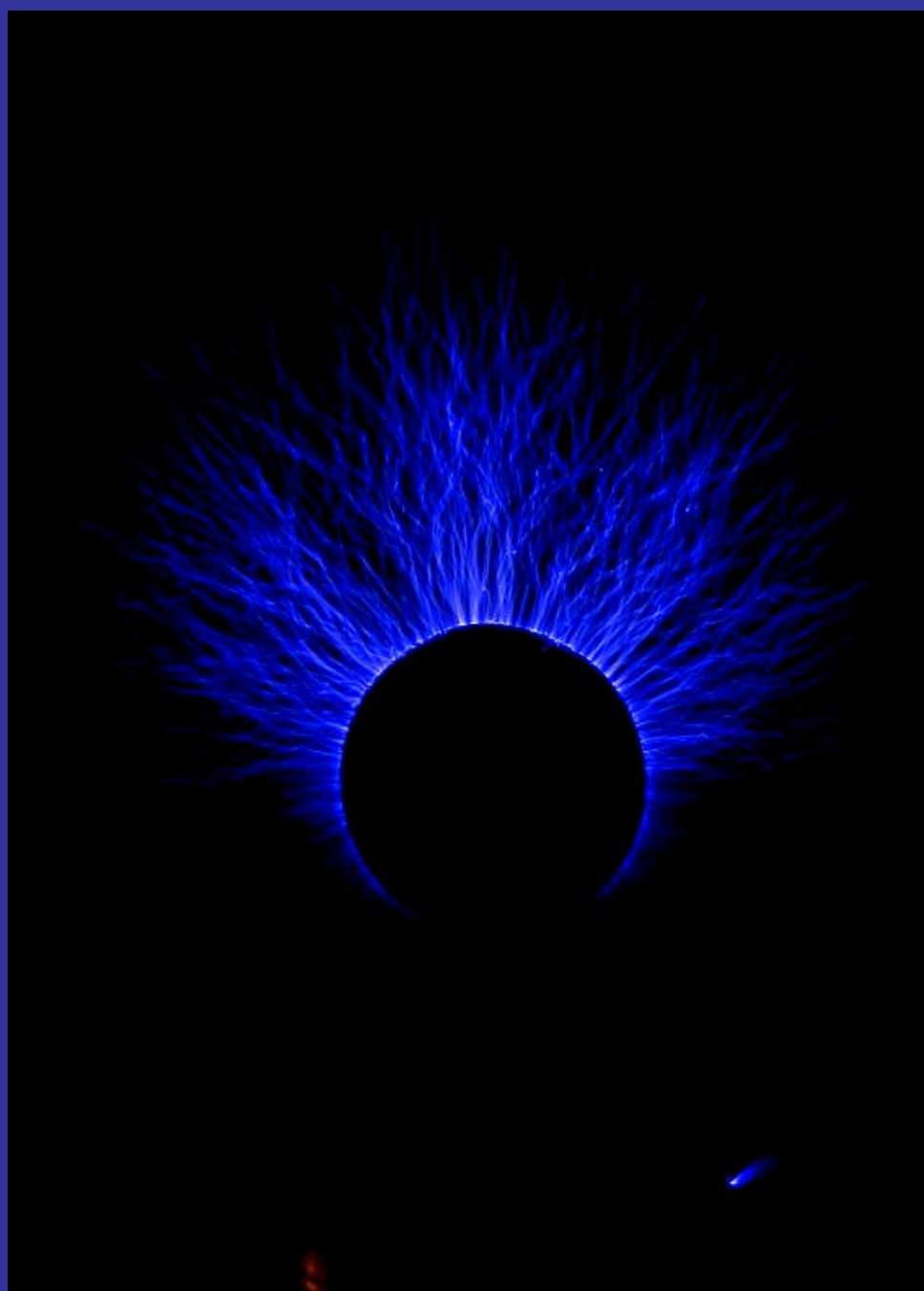
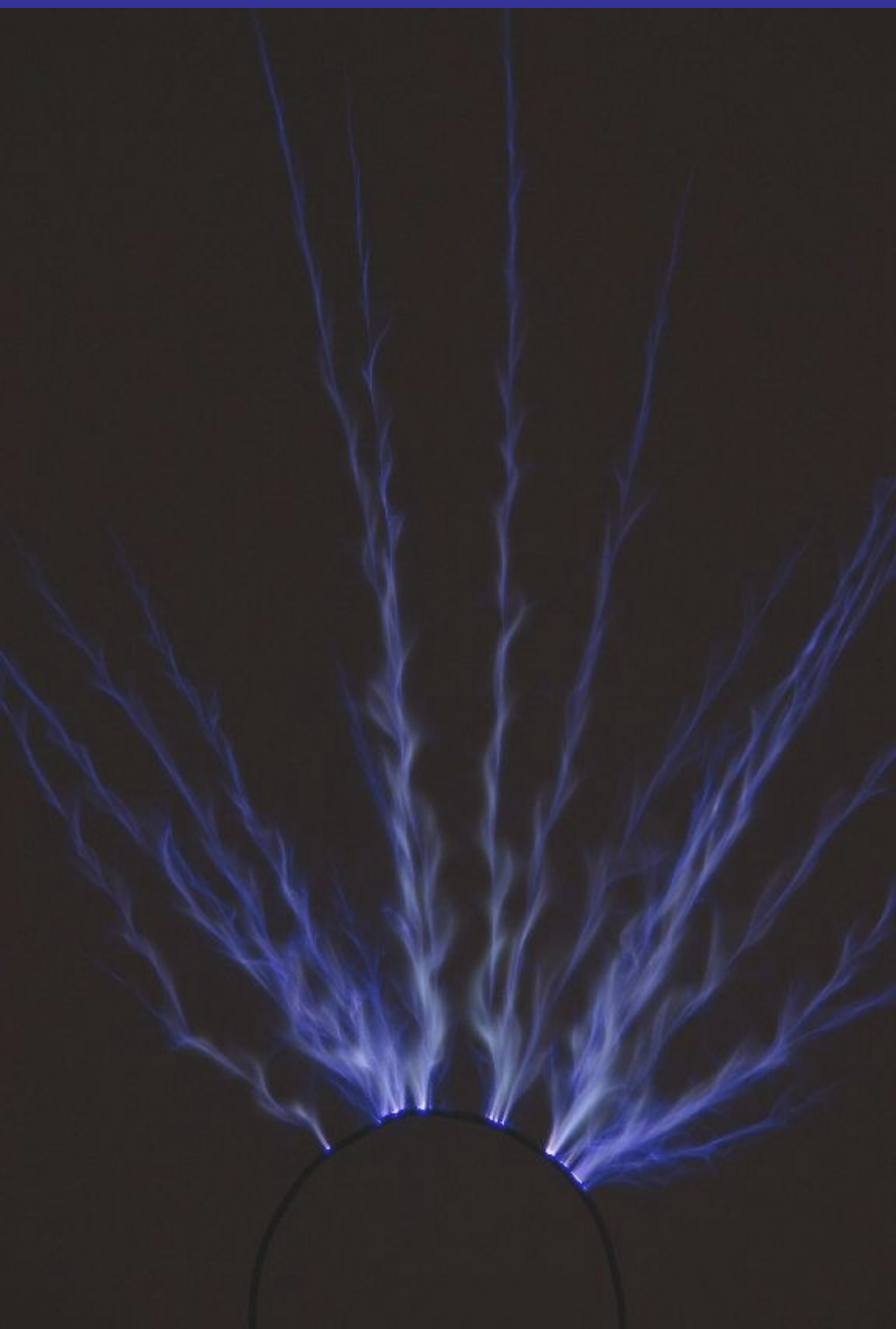
Ammoniaksturm auf Jupiter (ca. 1000 km)

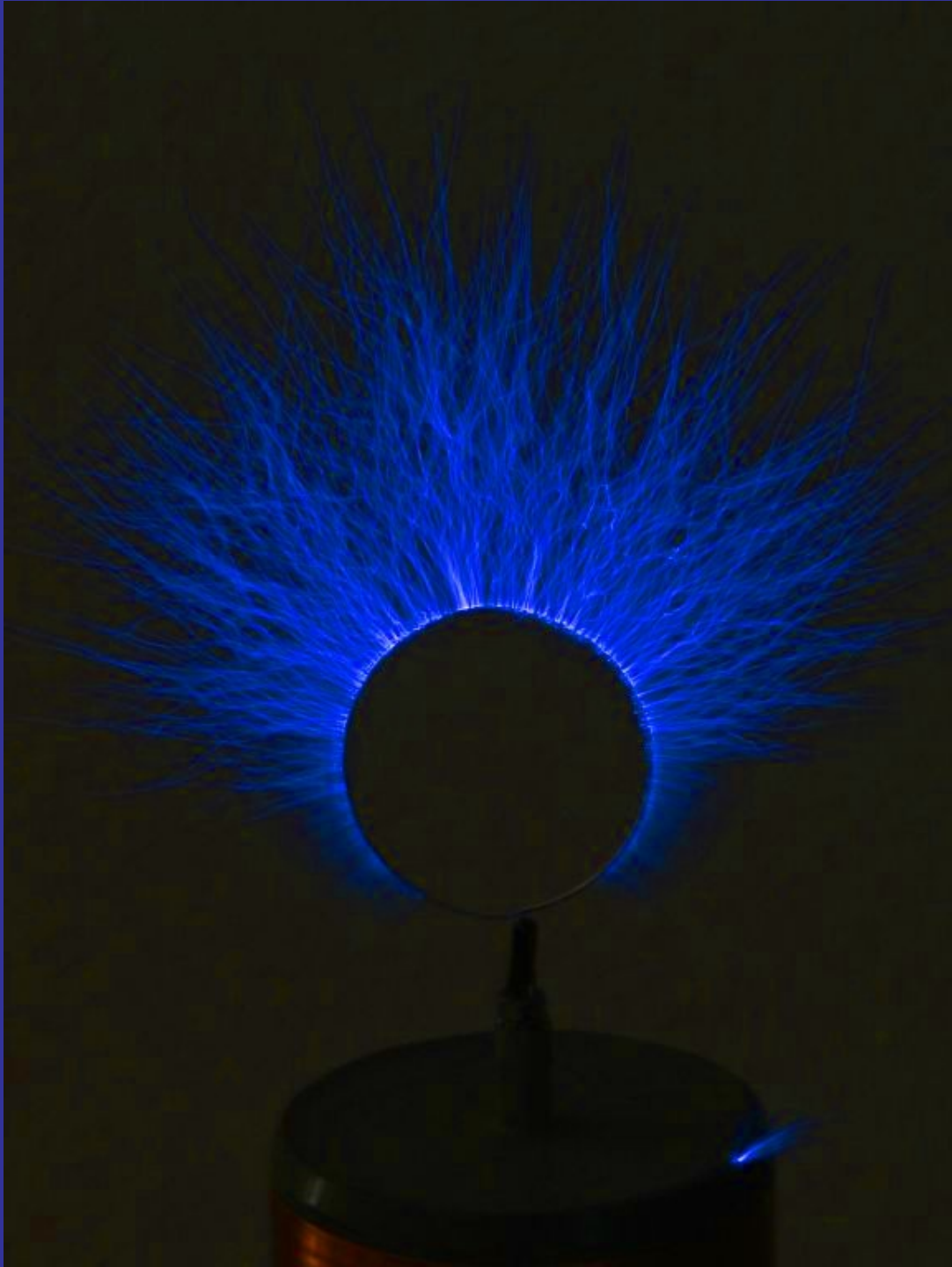




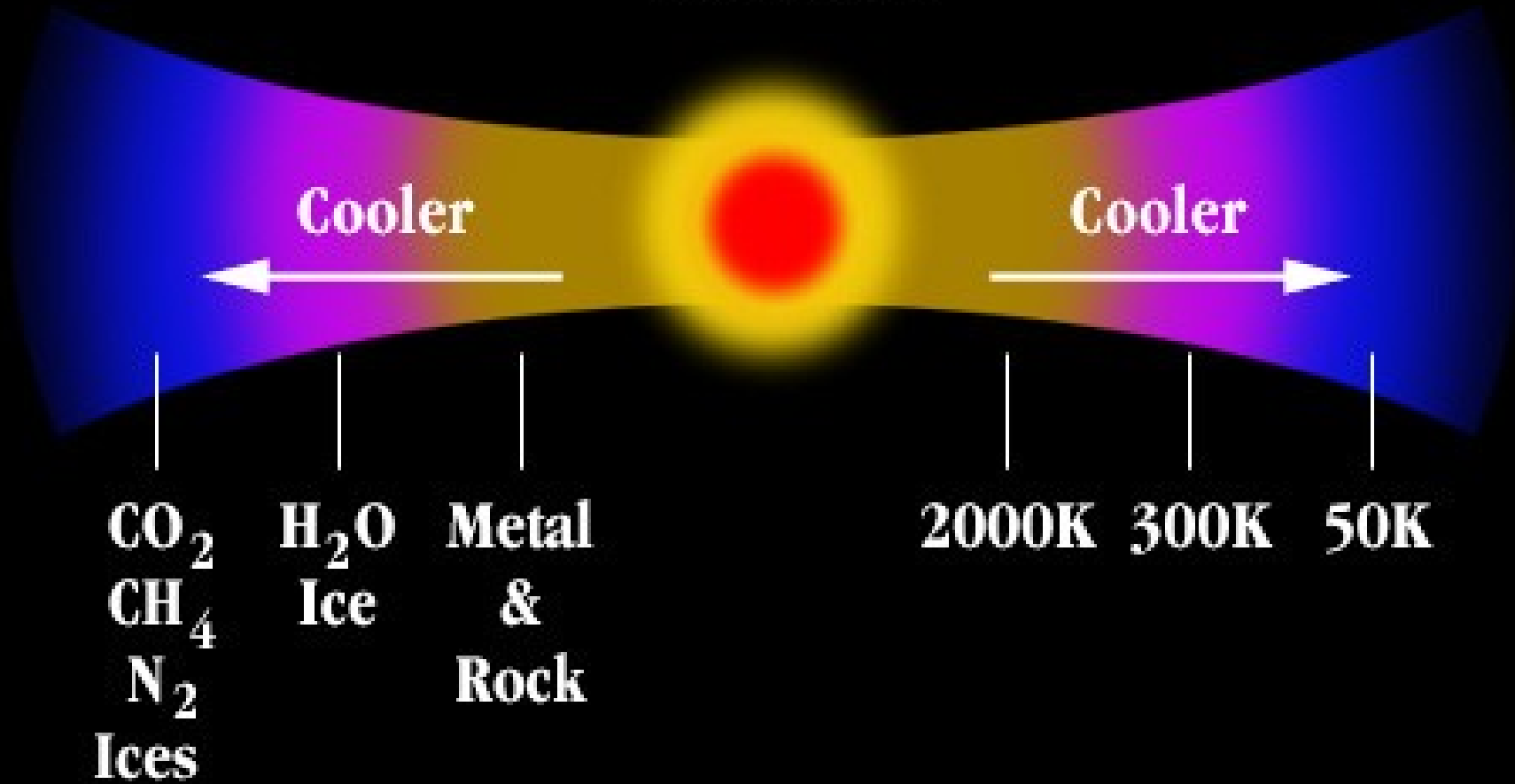
69.00 Euro



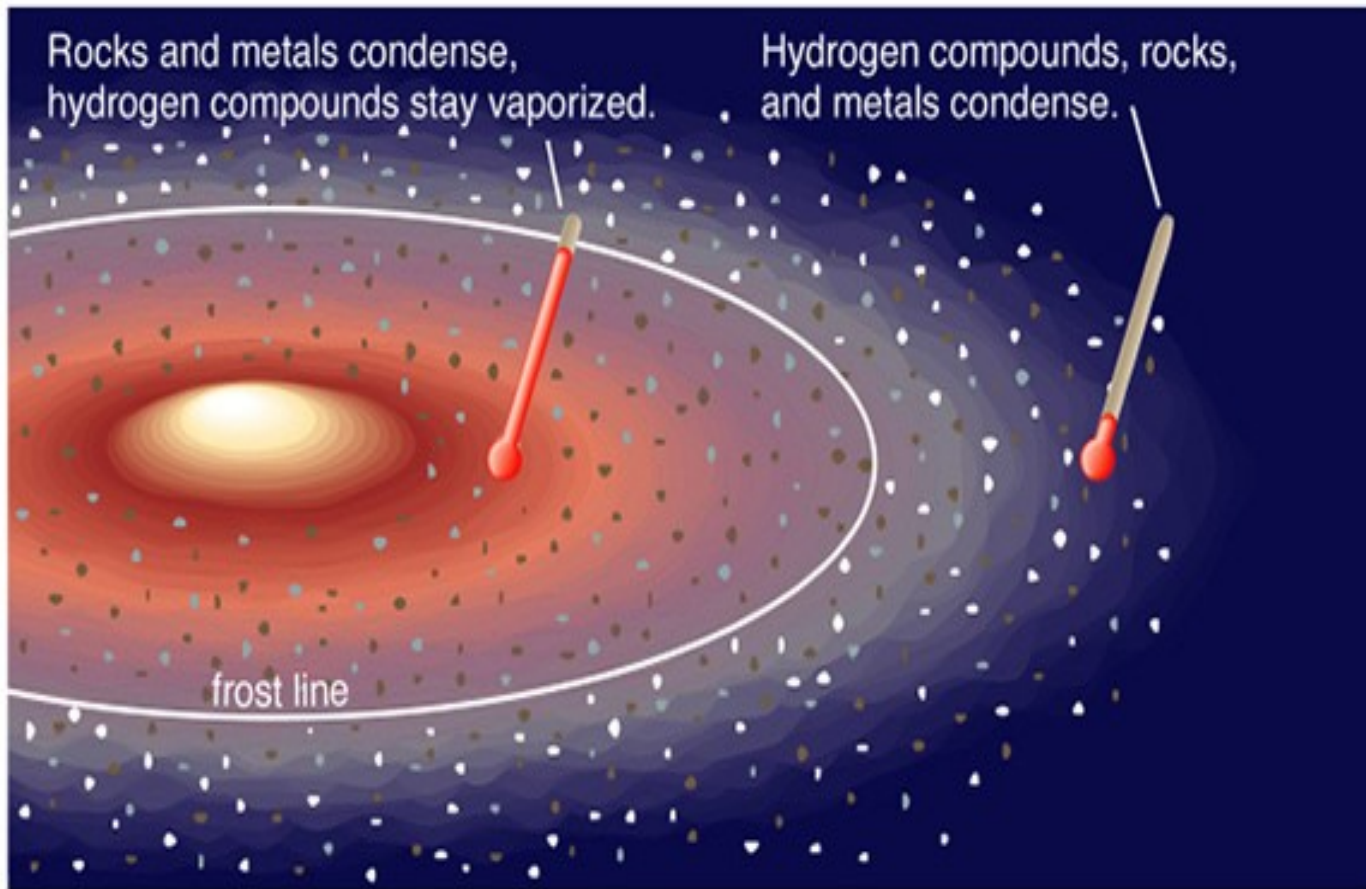




Proto-Sun

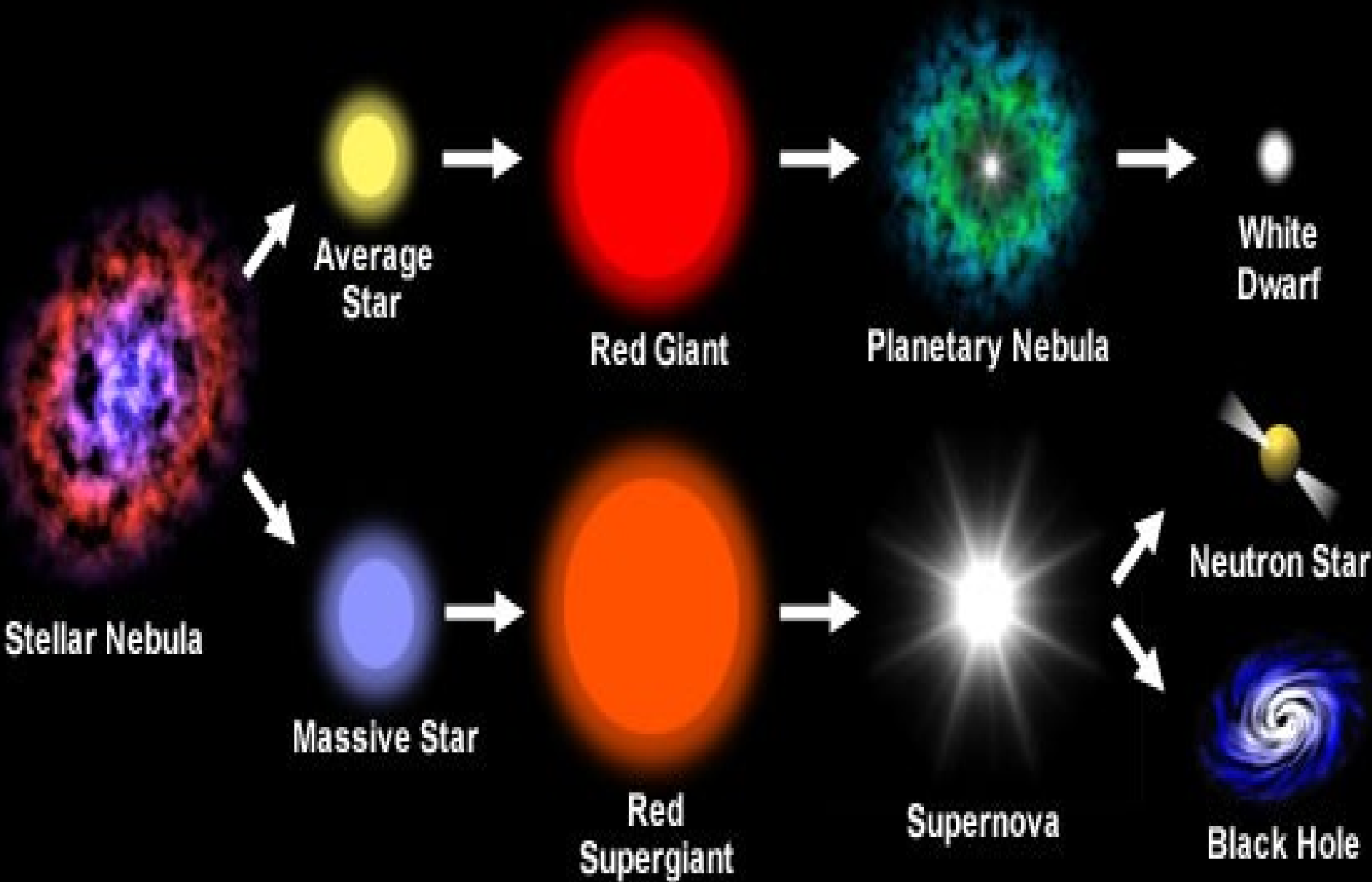


Elementverteilung in der protosolaren Akkretionsscheibe, deshalb sind sonnennahe Planeten Gesteinsplaneten und sonnenferne Planeten Gasplaneten



Metalle und Gestein haben eine hohe Sublimationstemperatur und können sich in der Nähe des Zentrums bilden. Wasser und Wasserstoffverbindungen haben eine niedrige Sublimationstemperatur und können sich nahe der Sonne nicht bilden. Die Frostgrenze liegt zwischen Mars und Jupiter.

Life Cycle of a Star



Die Sonne



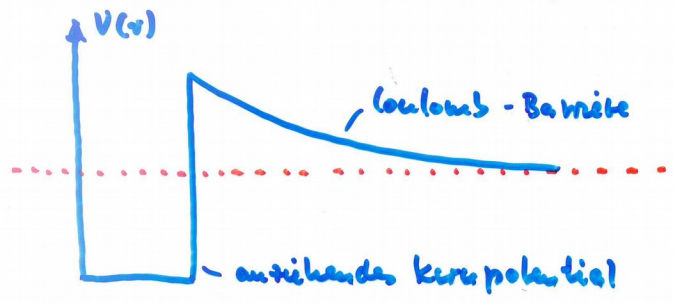
Streuungswirkungsquerschnitt $\sigma \sim \omega^4$

**Die Protosonne wird zu einem Stern,
wenn im Zentrum die Fusion startet.**

**Fusionsreaktionen beginnen, wenn die
Protonen genügend Energie haben, um
zu verschmelzen.**

**Dazu muss die Zentraltemperatur
mindestens 10 000 000 Grad erreichen.**

σ aus der Schrödinger Gleichung



Vorlesungsauszug WS 76/77, C.G.

$$\sigma = \frac{2\pi}{h^2} \frac{1}{\beta} \frac{2\pi z_1 z_2 \kappa}{\beta} \exp \left\{ - \frac{4\pi z_1 z_2 \kappa}{\beta} \right\} |H_{kn}|^2 \frac{dn}{dE}$$

Geweiss-Faktor
Matrixelement für die Reaktion

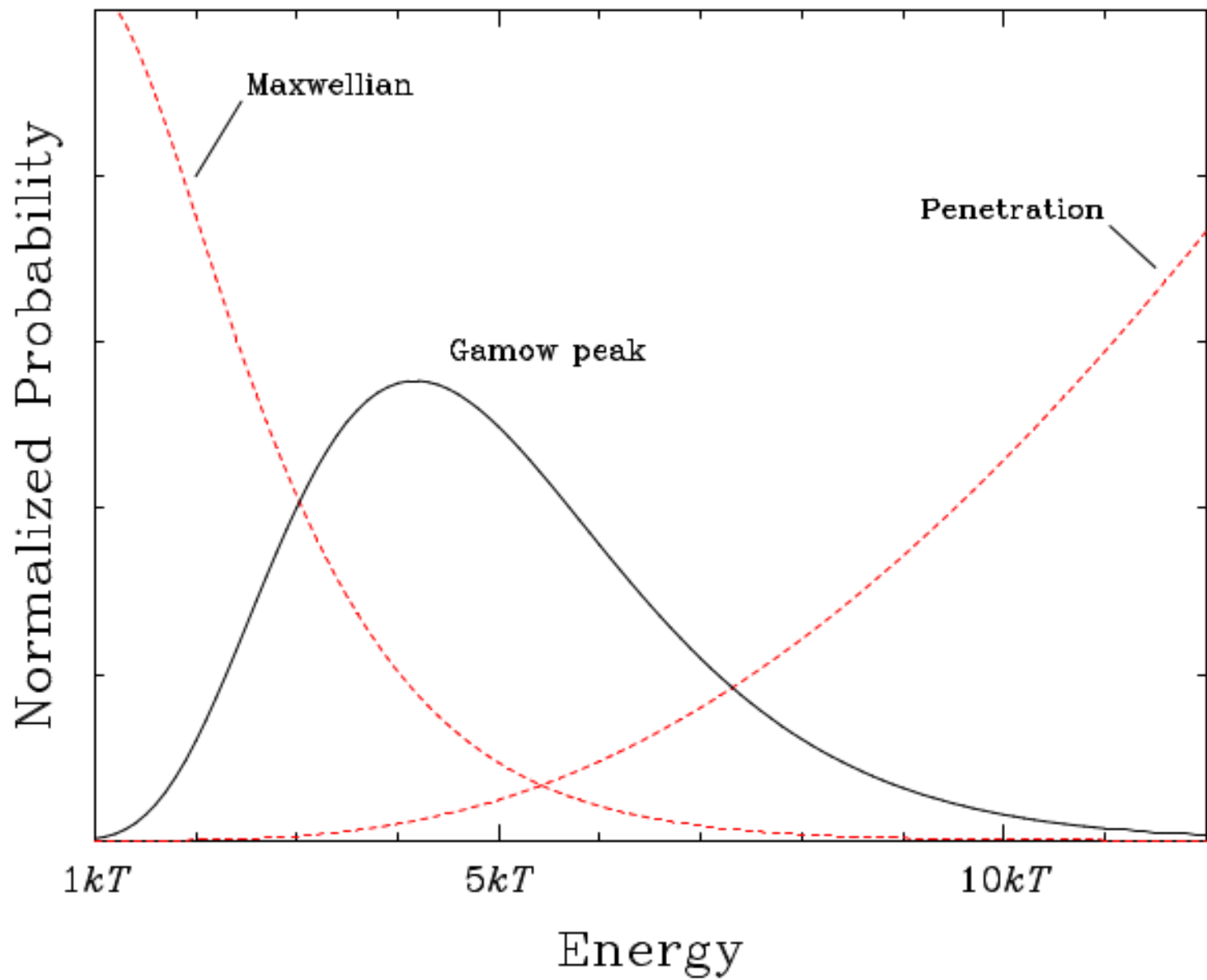
$\frac{dn}{dE}$ - Energiedichte der Zustände i. Phasenraum

Der WQ wird durch das Tunneln beschränkt.

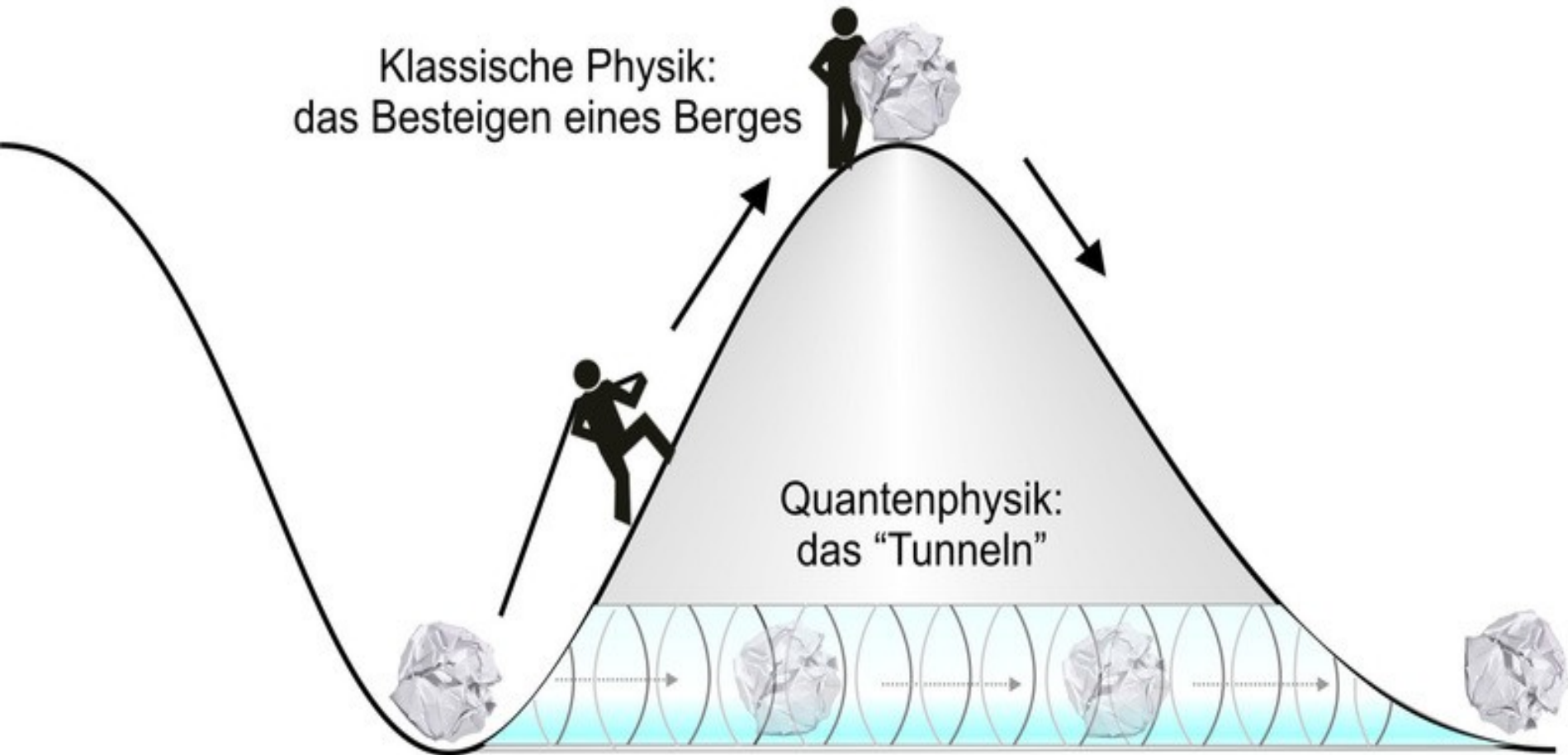
$$\exp \left\{ - \frac{4\pi \cdot 1 \cdot 1 \cdot 10^3}{137} \right\} = 1.5 \cdot 10^{-40} !$$

σ in $\langle \sigma_0 \rangle$ einsetzen





Quantenmechanischer Tunneleffekt: George Gamow

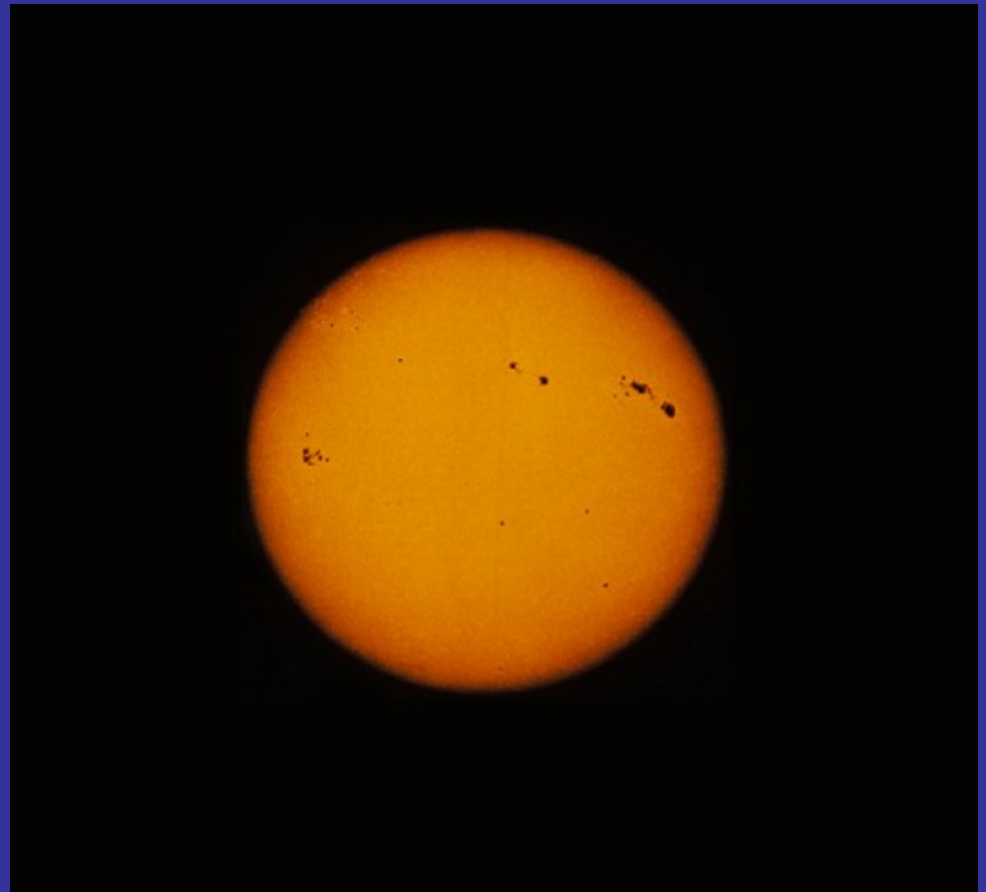


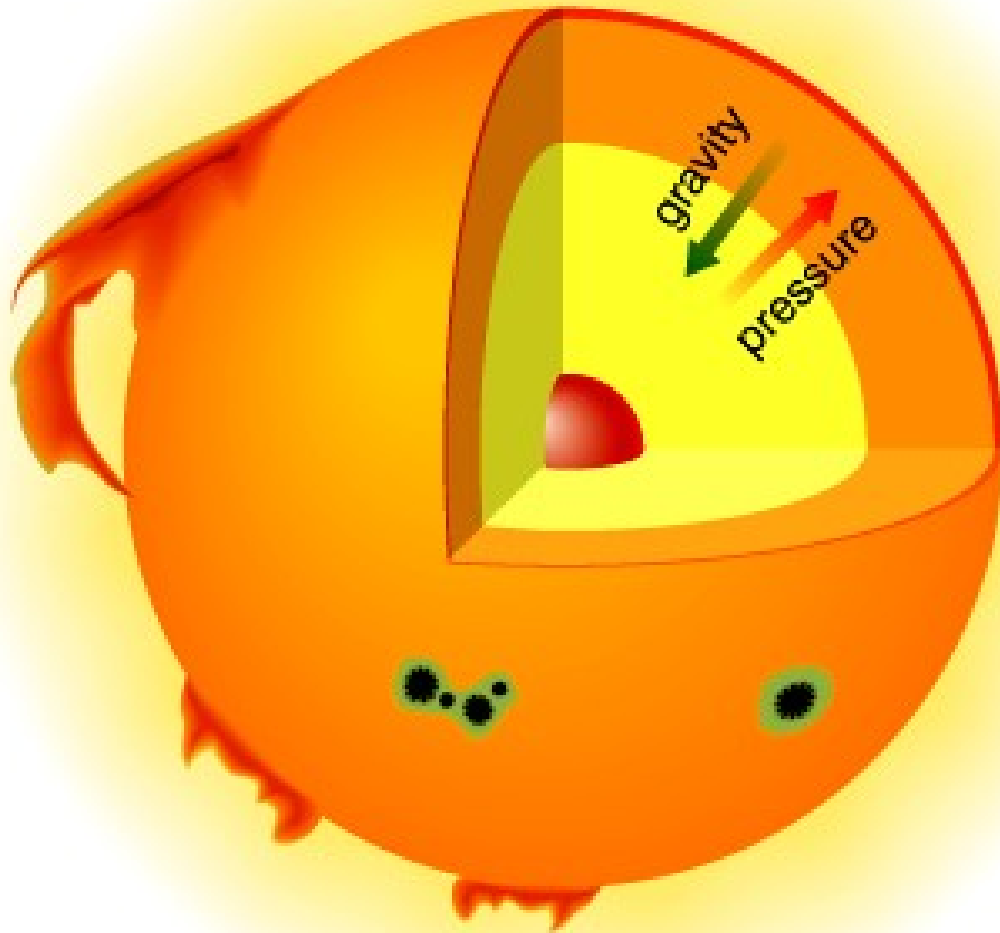


Chris
Peters

**Die Sonne ist fast die
einzige Quelle von
Wärme und Energie
im Sonnensystem.
Sie ist ein ganz
normaler Stern, der
durch
Eigengravitation
zusammengehalten
wird und durch
Kernfusion am
Himmel leuchtet.**

Die Sonne im Sichtbaren

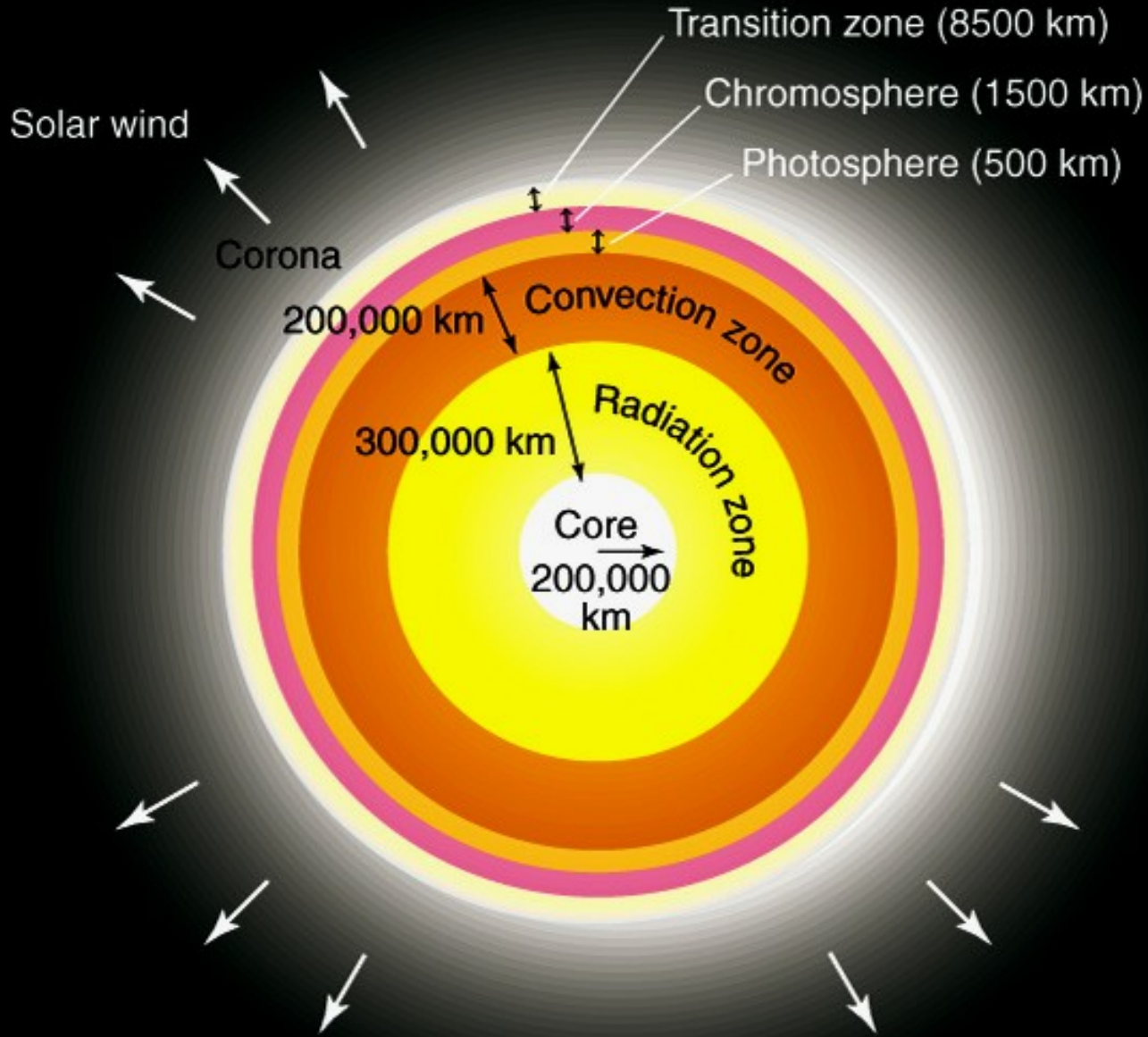




Der nach außen gerichtete Strahlungsdruck und der nach innen gerichtete Gravitationsdruck halten sich die Waage.

Dadurch entsteht ein sphärisches Gebilde.

Die Hauptschalen der Sonne



Eigenschaften der Sonne

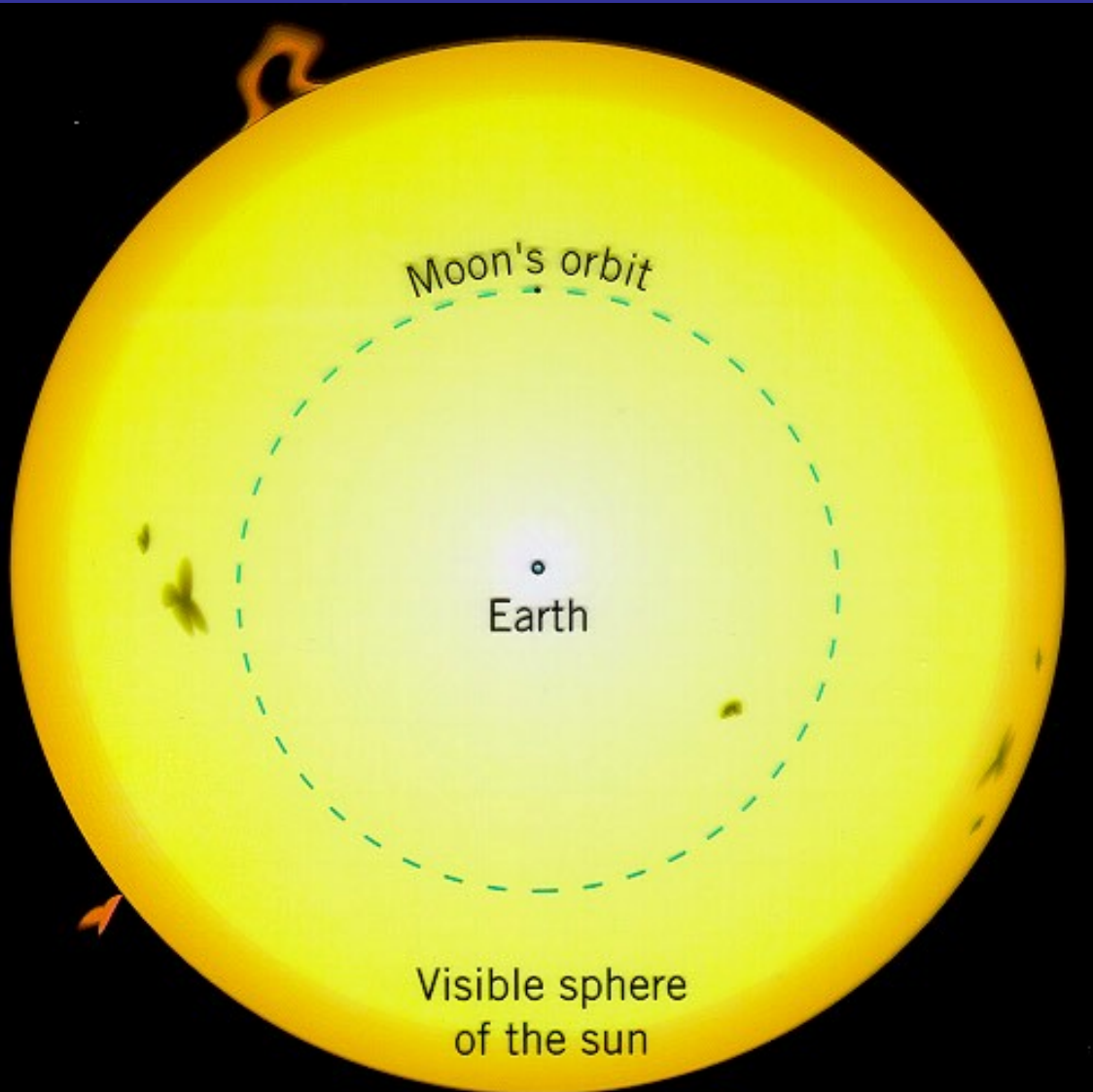
Radius = 696,000 km

Masse = 2×10^{30} kg
(300,000 x Erde)

Mittlere Dichte
= 1,410 g/cm³

Rotations Periode =
24.9 Tage (am Äquator)
29.8 Tage (an den Polen)

Oberflächentemperatur
5780 K



Luminosität der Sonne

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

(gesamte emittierte
Lichtmenge pro
Sekunde)

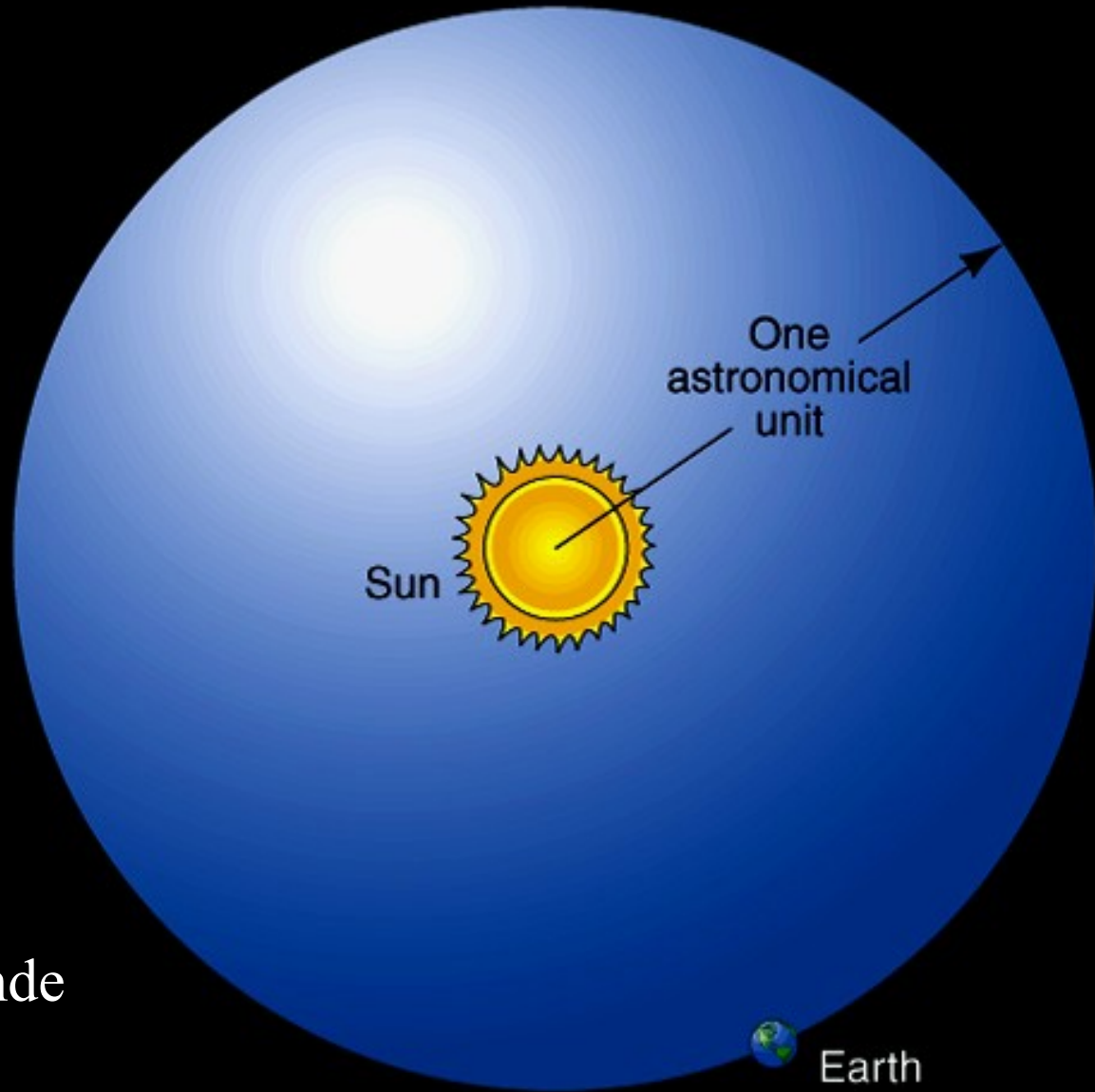
$$\sim 4 \times 10^{26} \text{ W}$$

100 Milliarden
Wasserstoffbomben von
je einer Megatonne!
pro Sekunde.

Solarkonstante:

$$L_{\text{SUN}} / 4\pi R^2$$

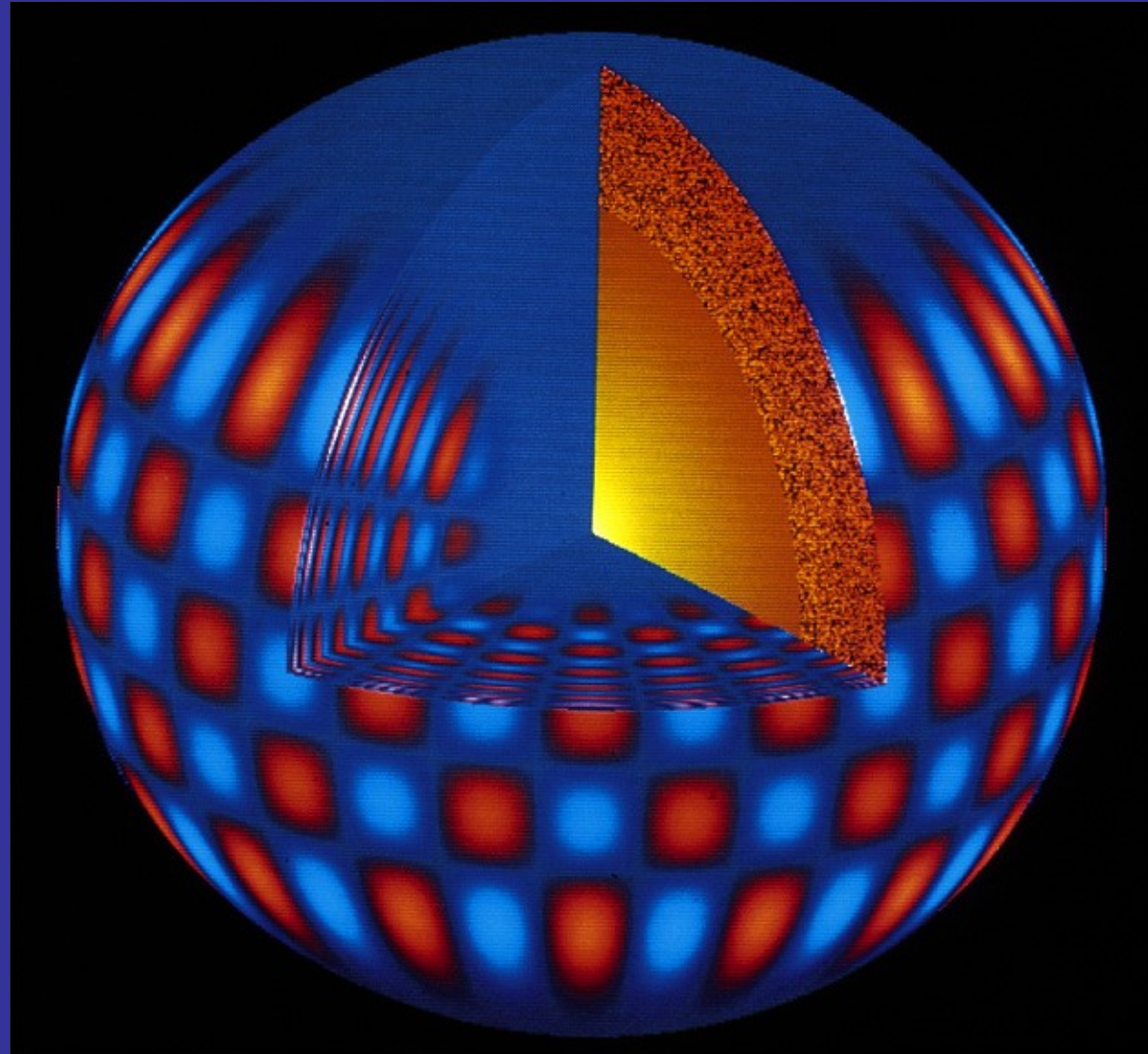
(Energie pro Sekunde
und Fläche an der
Erde: $\sim 1350 \text{ W/m}^2$)



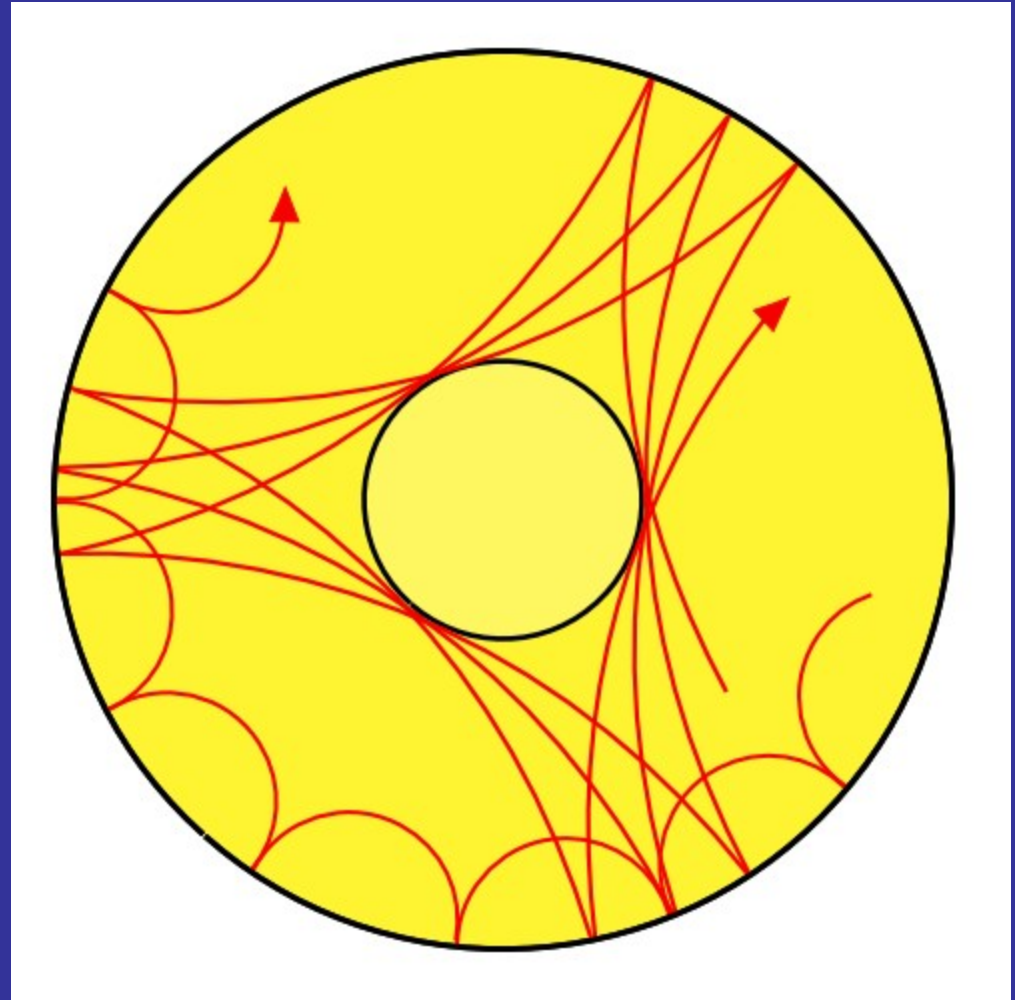
Helioseismologie

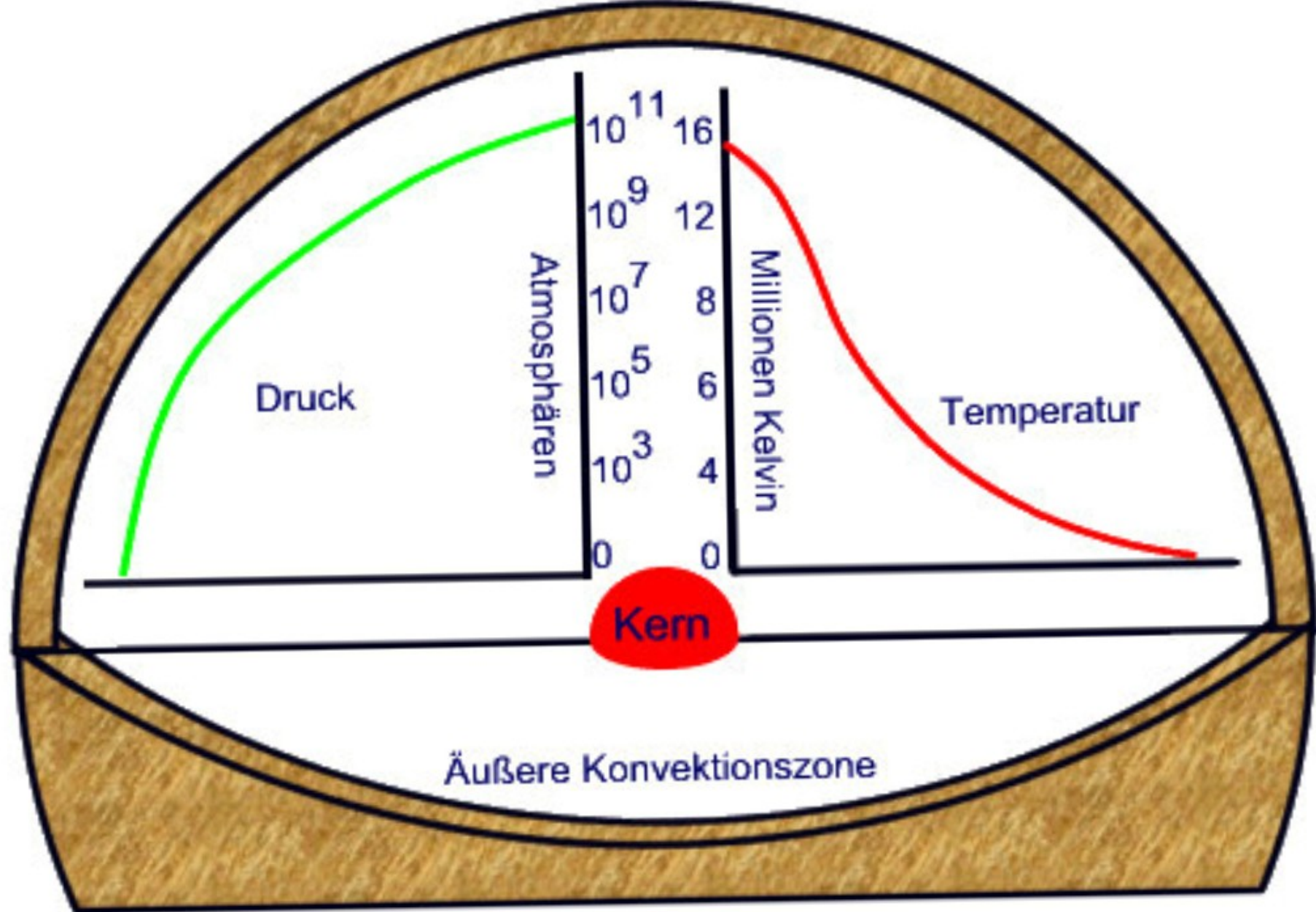
Was weiß man über den inneren Aufbau der Sonne ?

- Die Sonne schwingt wie ein Glocke.
- Innere Druckwellen werden an der Photosphäre reflektiert
- Die Oberflächenmuster dieser Wellen geben Auskunft über das Innere der Sonne



**Die
Druckwellen
erzeugen bei der
Ausbreitung
Muster auf der
Oberfläche, die
von der inneren
Struktur der
Sonne
abhängen.**

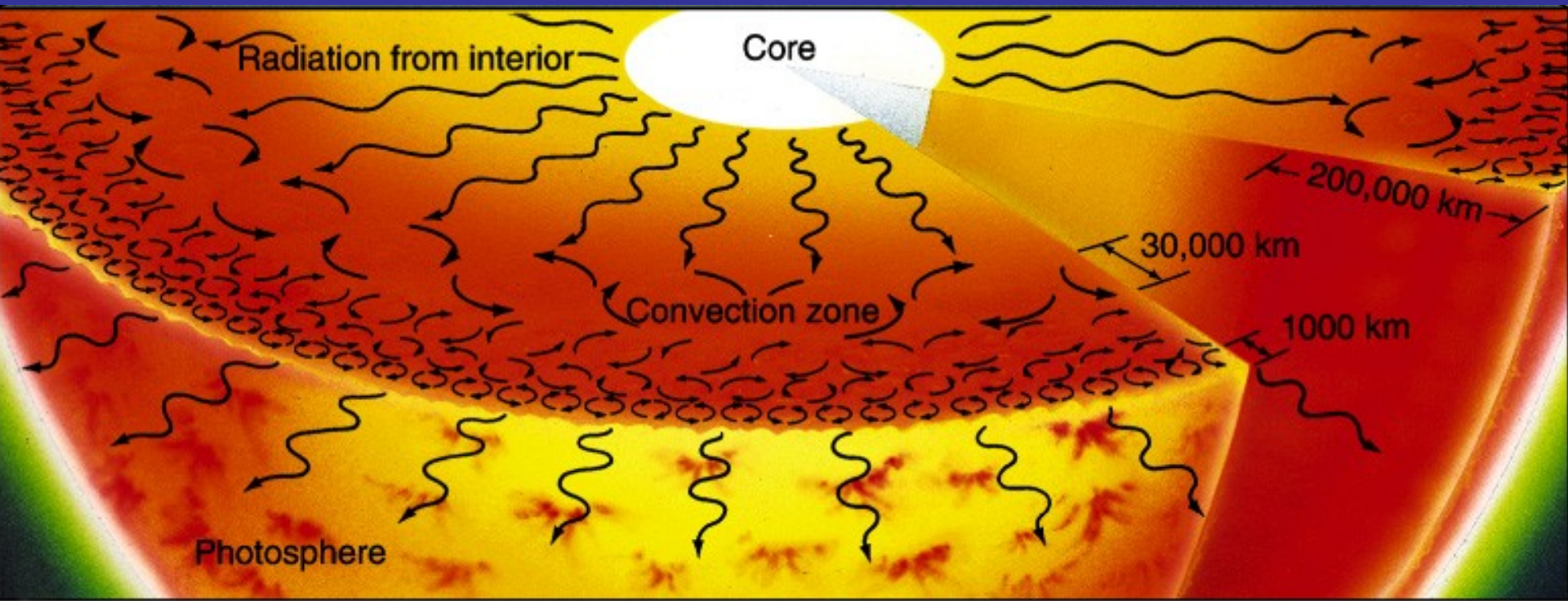




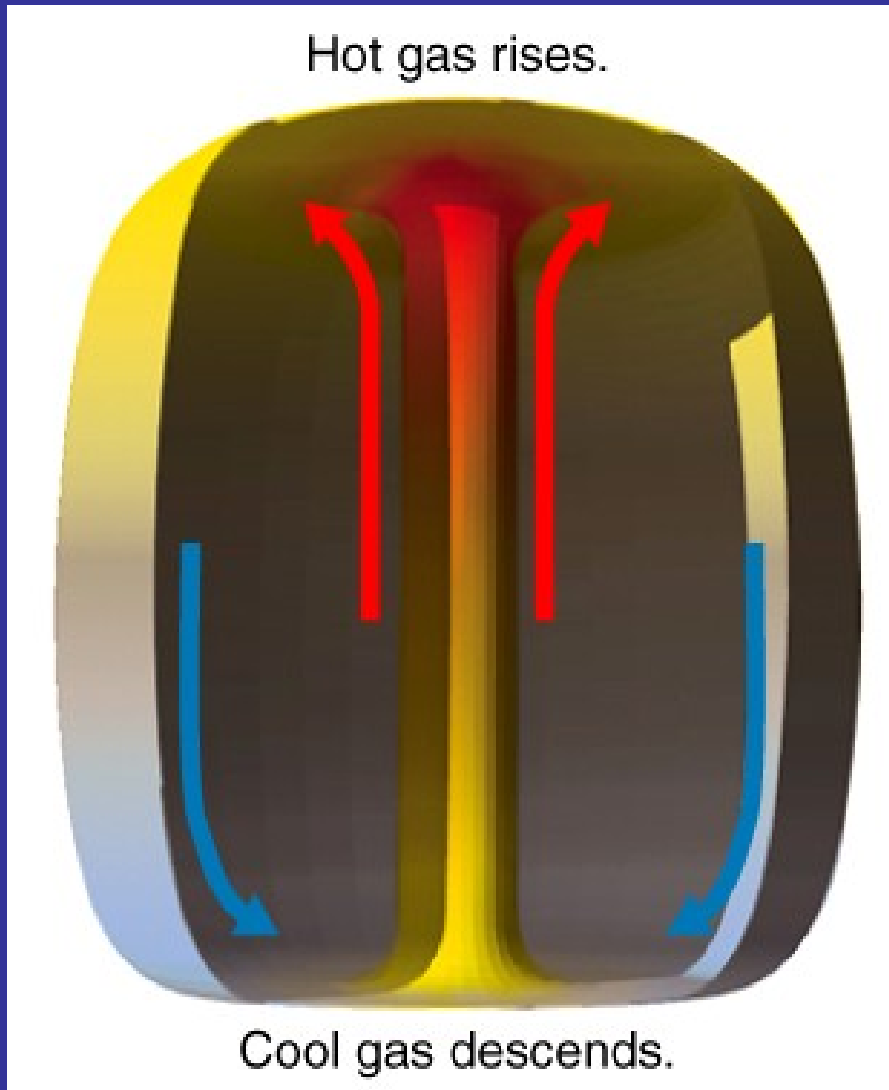
Druck- und Temperaturverlauf im Inneren der Sonne

Energietransport in der Sonne

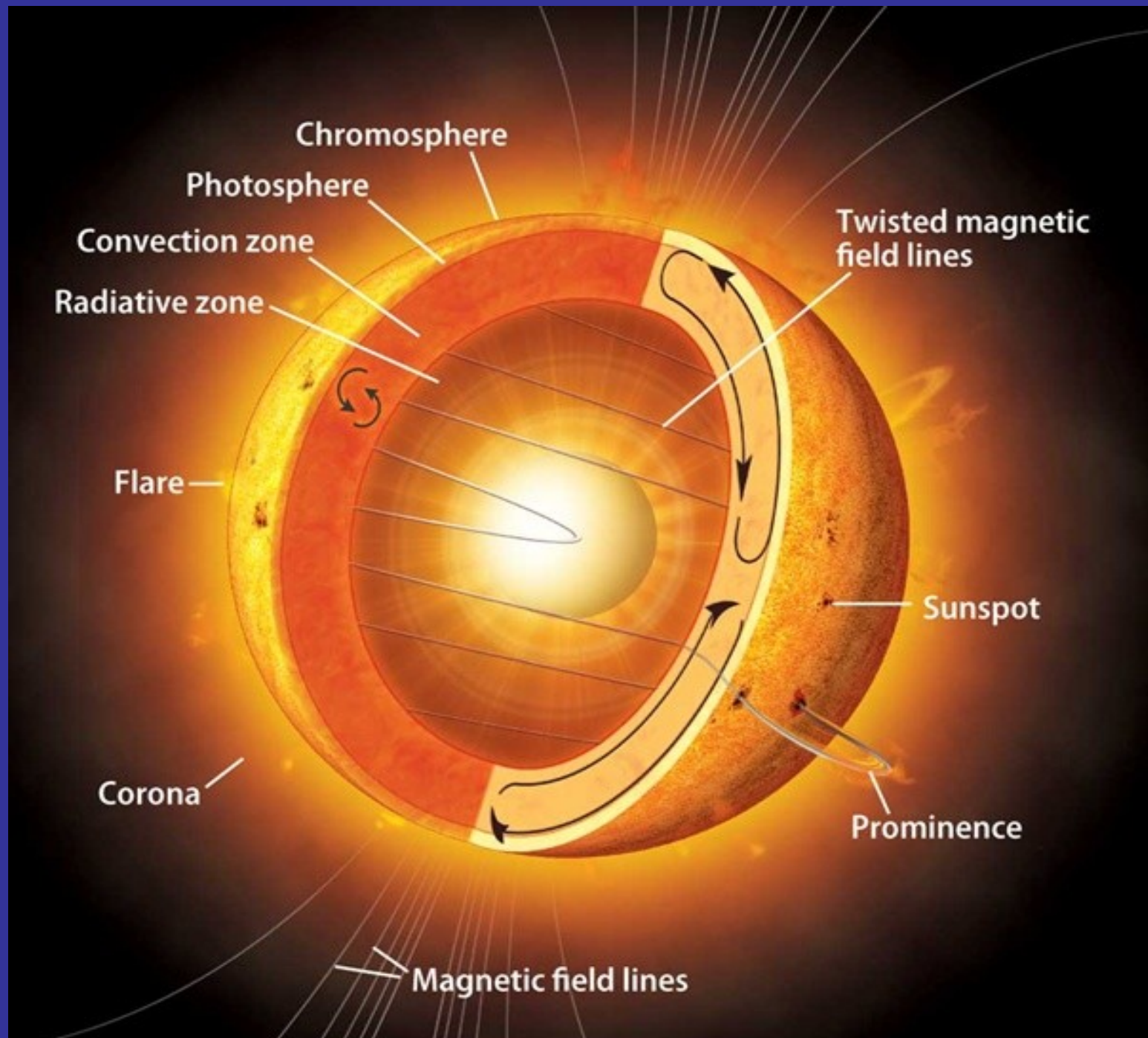
- Im Inneren heißes Gas, das ionisiert ist
- Die Atome haben keine gebundenen Elektronen und können kein Licht absorbieren: das Innere ist durchsichtig (**Strahlungszone**)
- Die Temperatur sinkt nach außen und die Atome können Elektronen binden (**Konvektionszone**)
- In der **Photosphäre** ist die Dichte sehr gering und die Sonne wird wieder durchsichtig.



Konvektion



Konvektion ist das Strömungsverhalten, wenn die Dichte zu groß ist, um Strahlungstransport zuzulassen

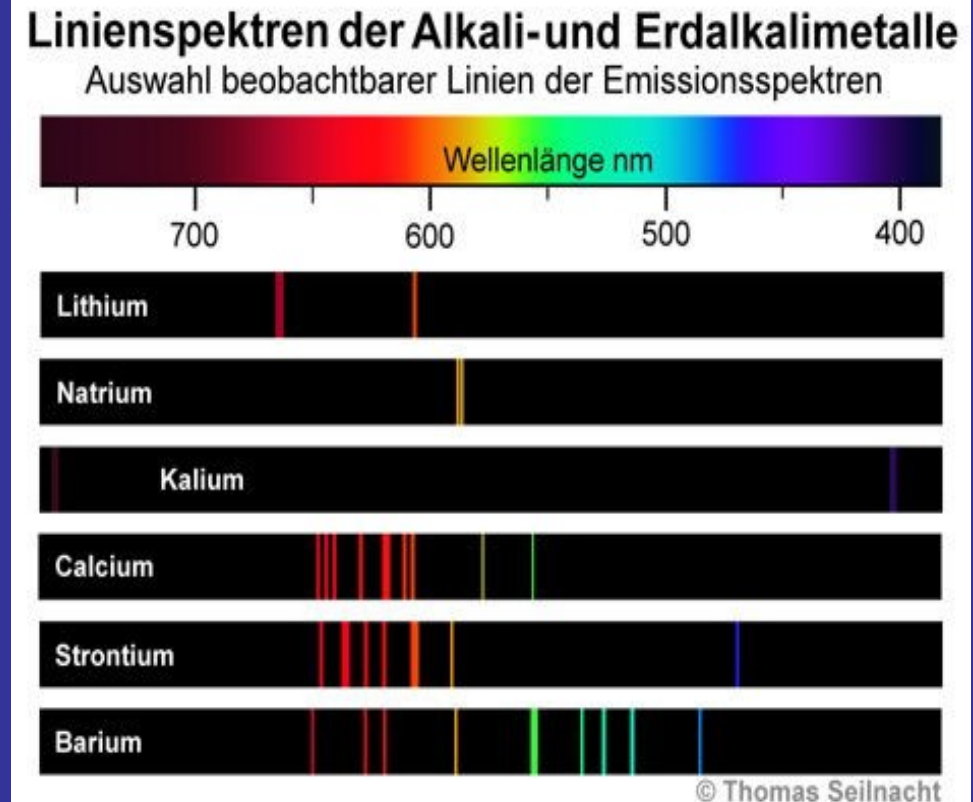


Die Sonnenatmosphäre



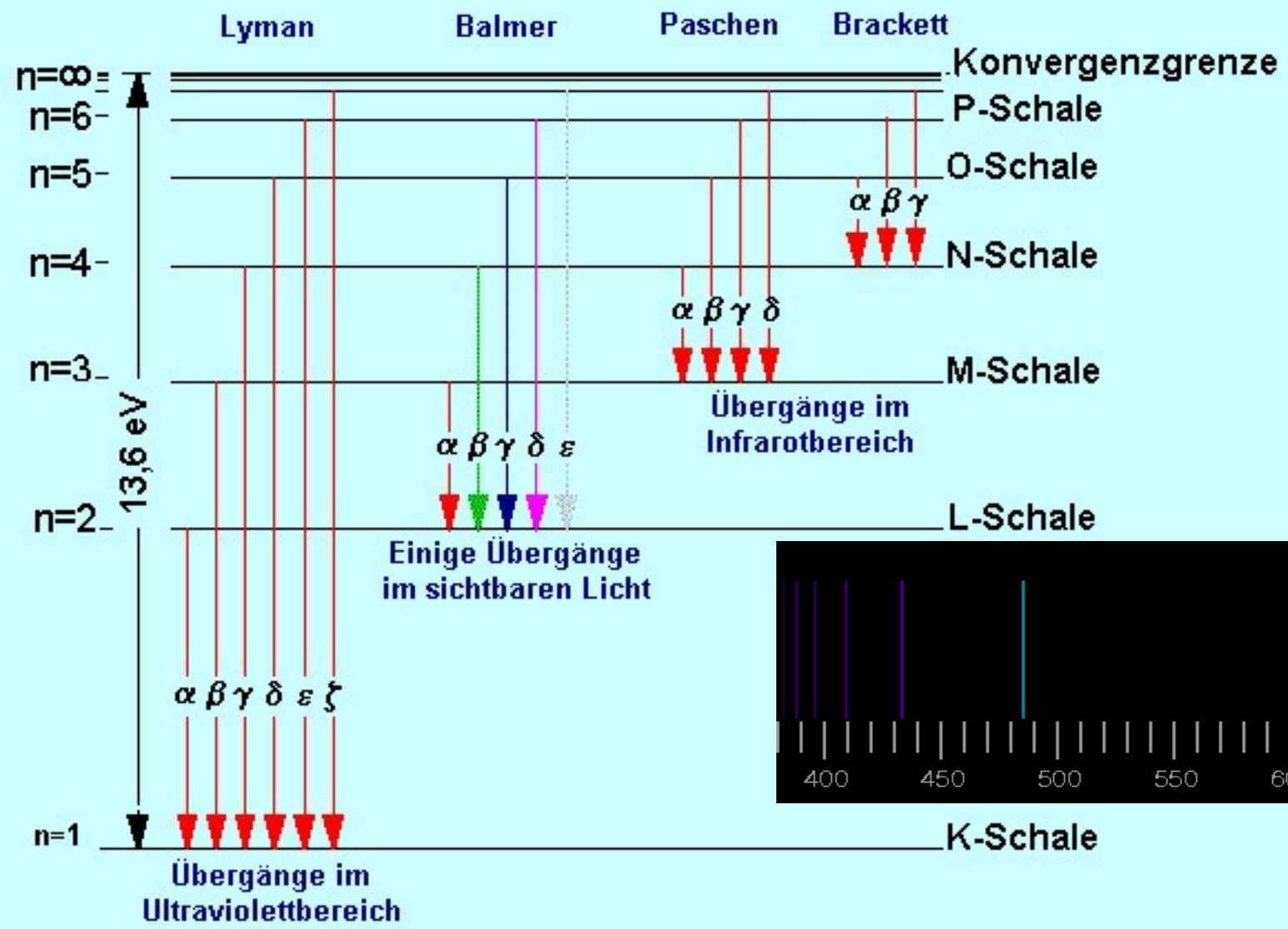
Die Sonnenatmosphäre

- Die Sonnenatmosphäre hat einige Tausend Absorptionslinien
- ca. 70 Elemente sind vertreten
- Wasserstoff ist am häufigsten gefolgt von Helium

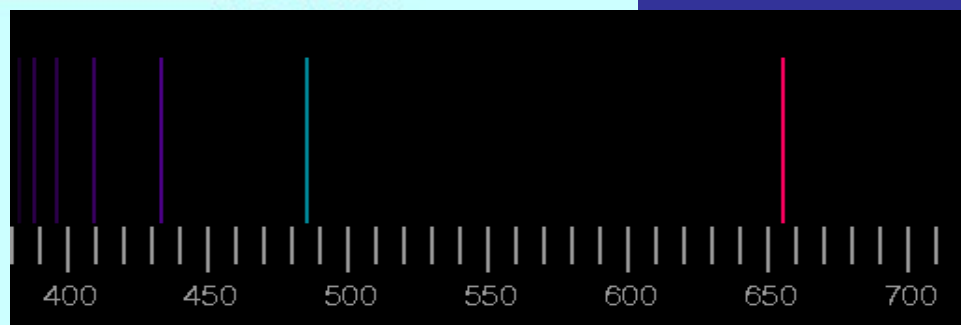


Die Spektrallinien geben Auskunft über die Chemie der Sonne. Es sind Absorptionslinien durch Absorption in den Oberflächenschichten der Sonne.

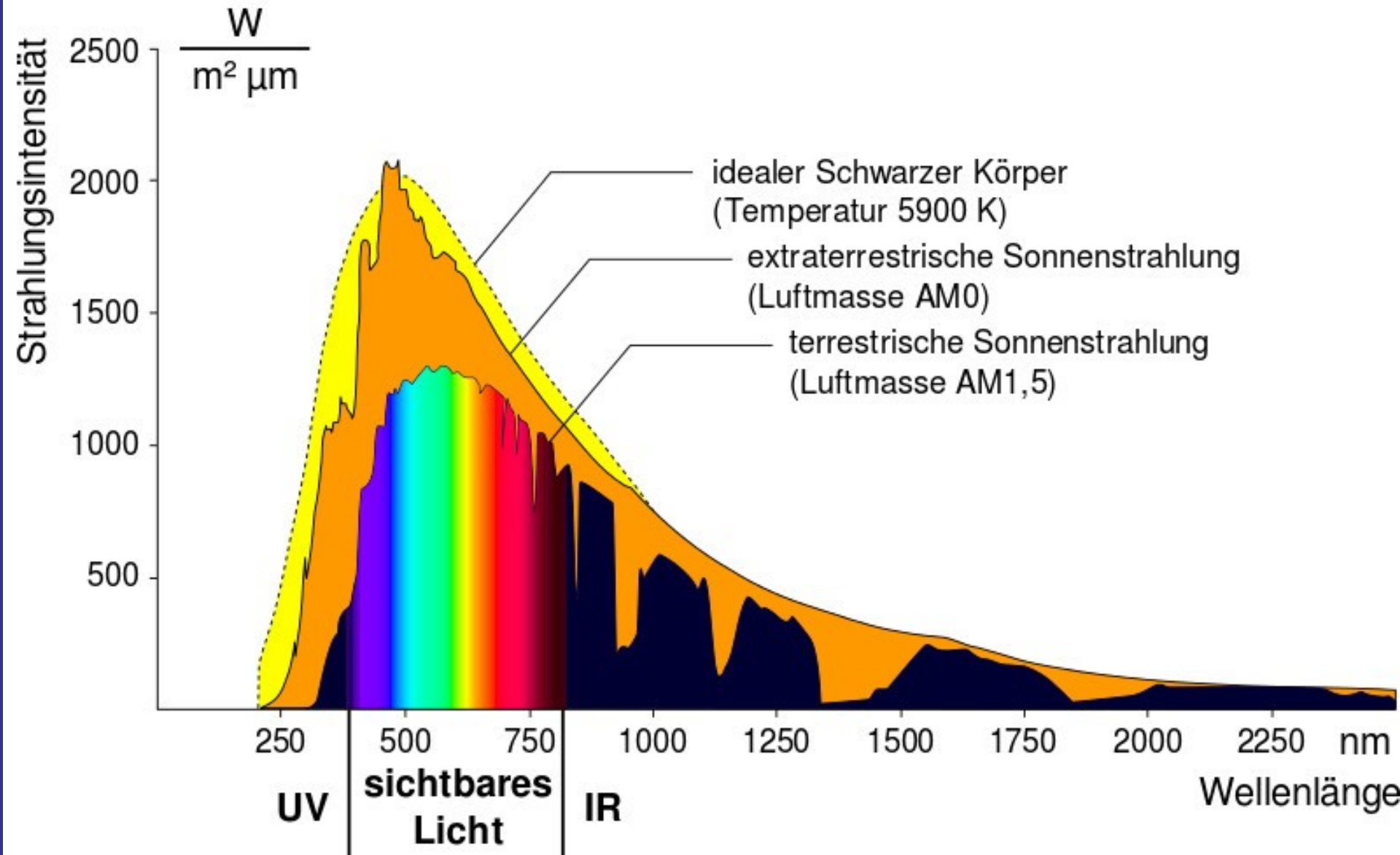
Elektronische Übergänge im Wasserstoffatom



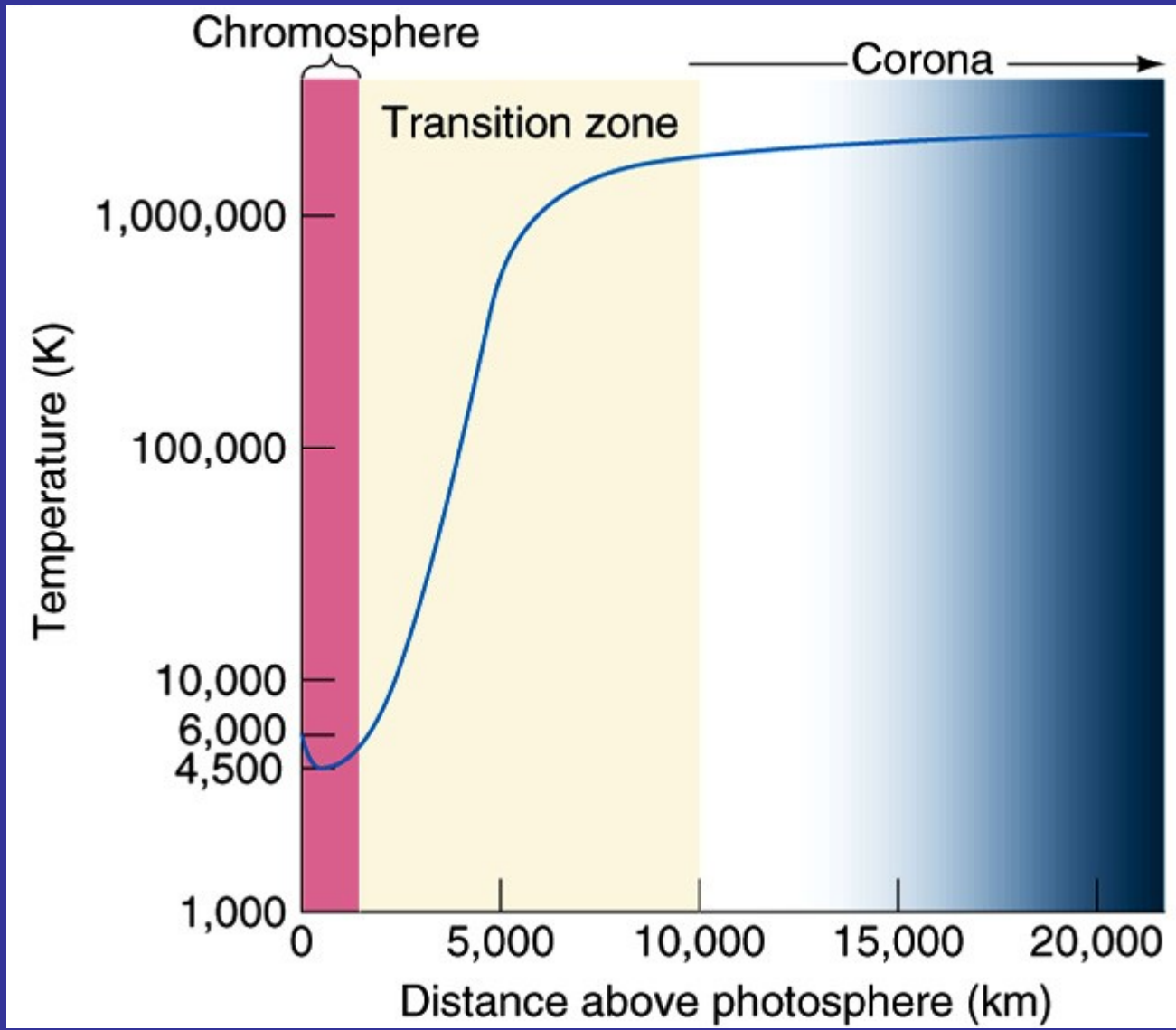
Balmer-Serie



Sonnenspektrum



**Temperaturverlauf
in den obersten
Schichten der
Sonne; geringe
Dichte, etwa eine
Millionen K**



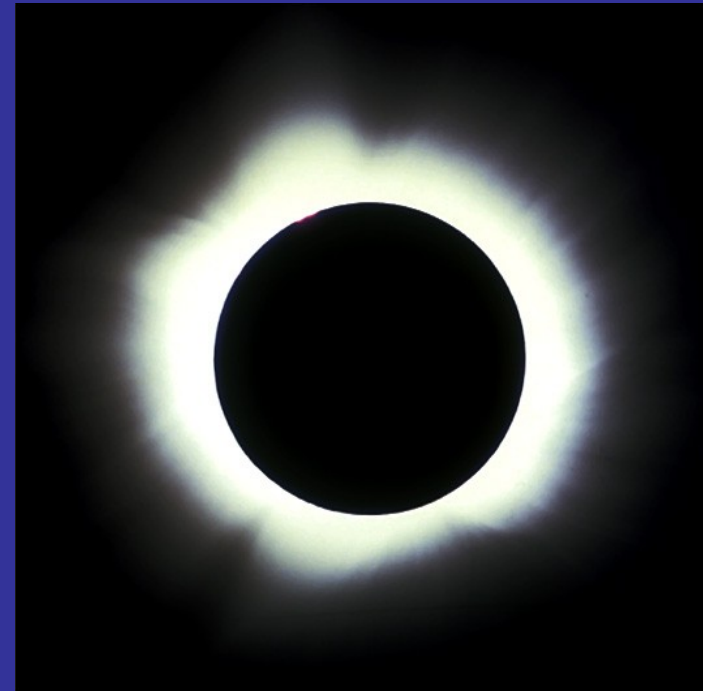
Korona bei einer Sonnenfinsternis

Heißes Gas der
Korona stellt
den Sonnenwind
dar

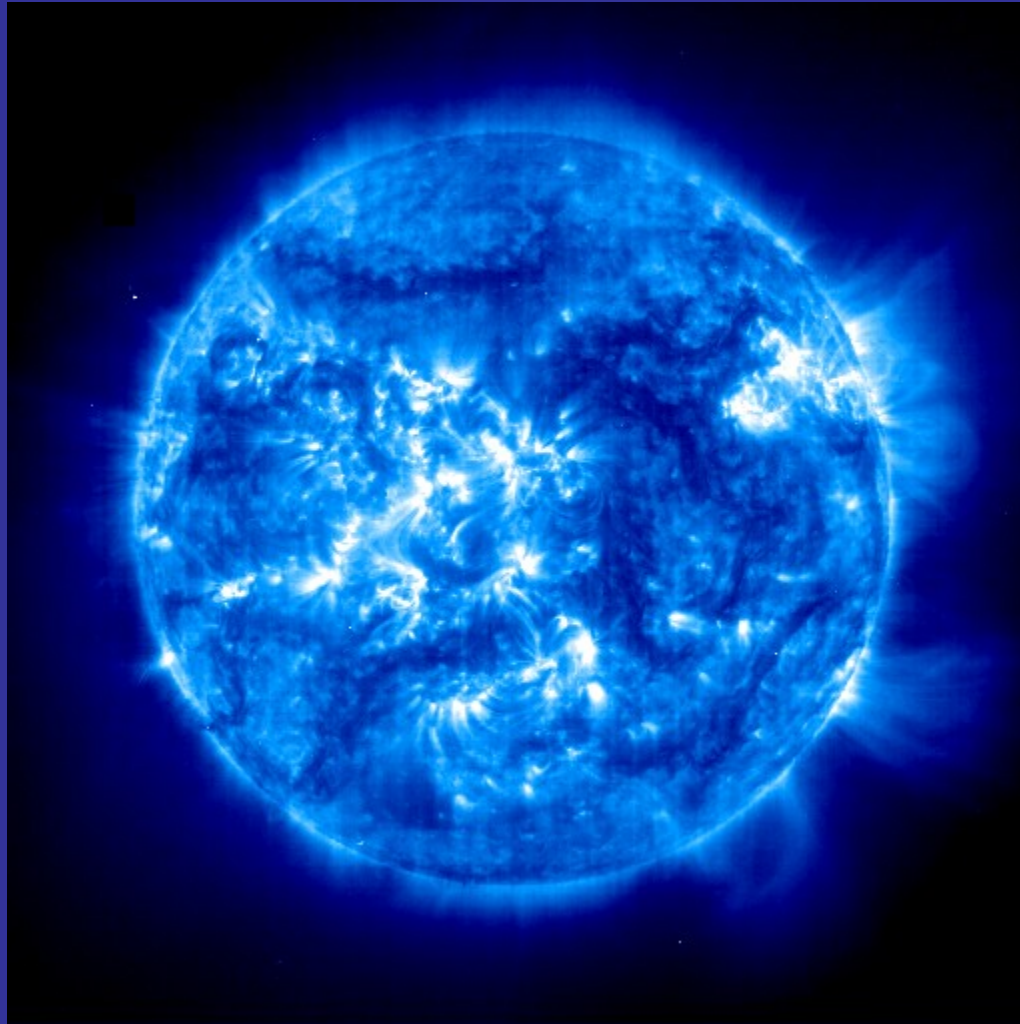


Sonnenwind

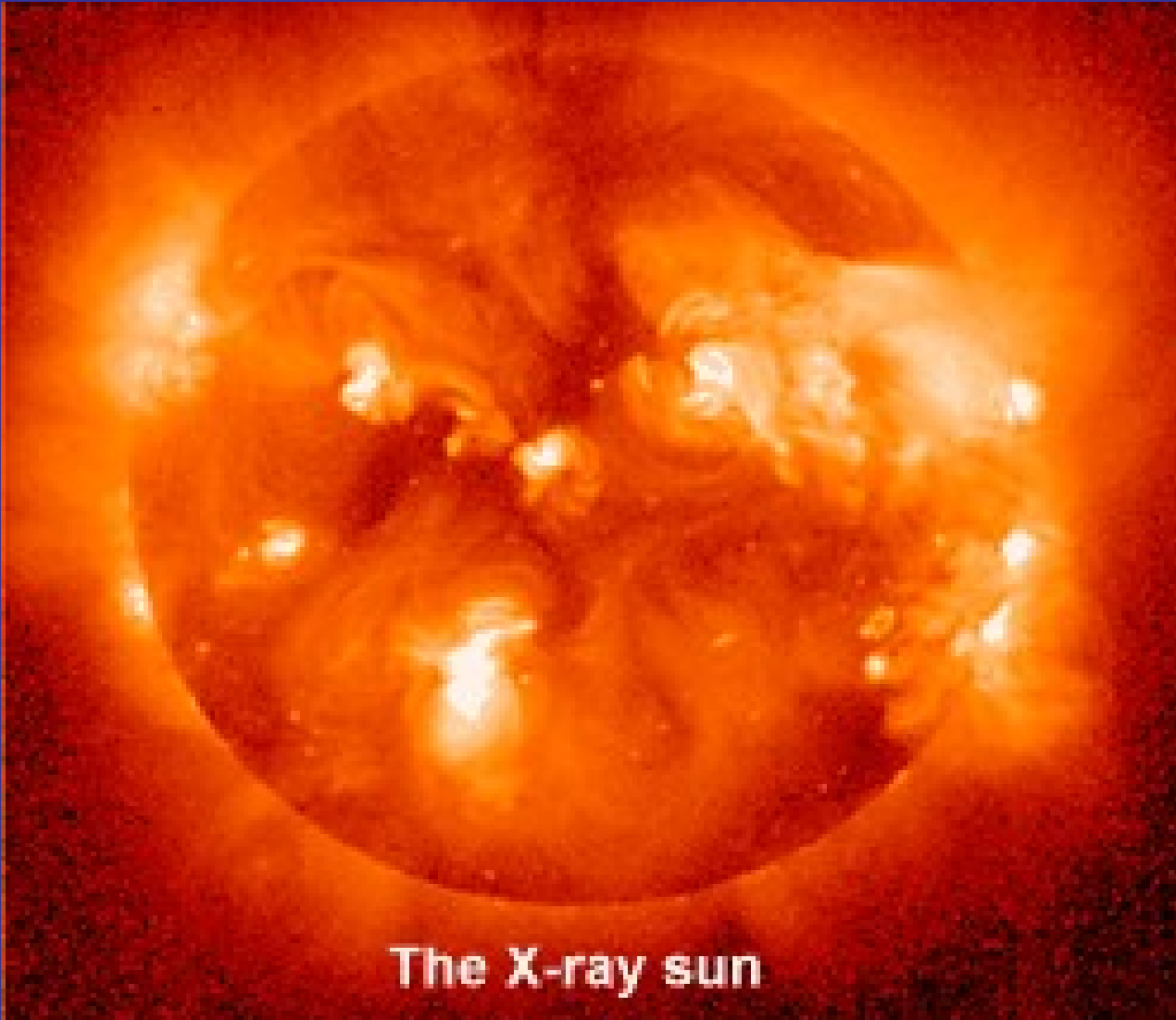
- ❖ Koronales Gas, das heiß genug ist, um gegen die Gravitation der Sonne zu entkommen.
- ❖ Die Sonne 'verdampft' quasi durch den Wind.
- ❖ Typische Geschwindigkeit ~ 500 km/s, erreicht die Erde in ~ 3 Tagen
- ❖ Die Sonne verliert dadurch etwa 1 Million Tonnen pro Sekunde!
- ❖ Das sind aber nur $\sim 0.1\%$ ihrer Masse in der gesamten Lebenszeit der Sonne



Das heiße koronale Gas emittiert im UV (~10 000 K)

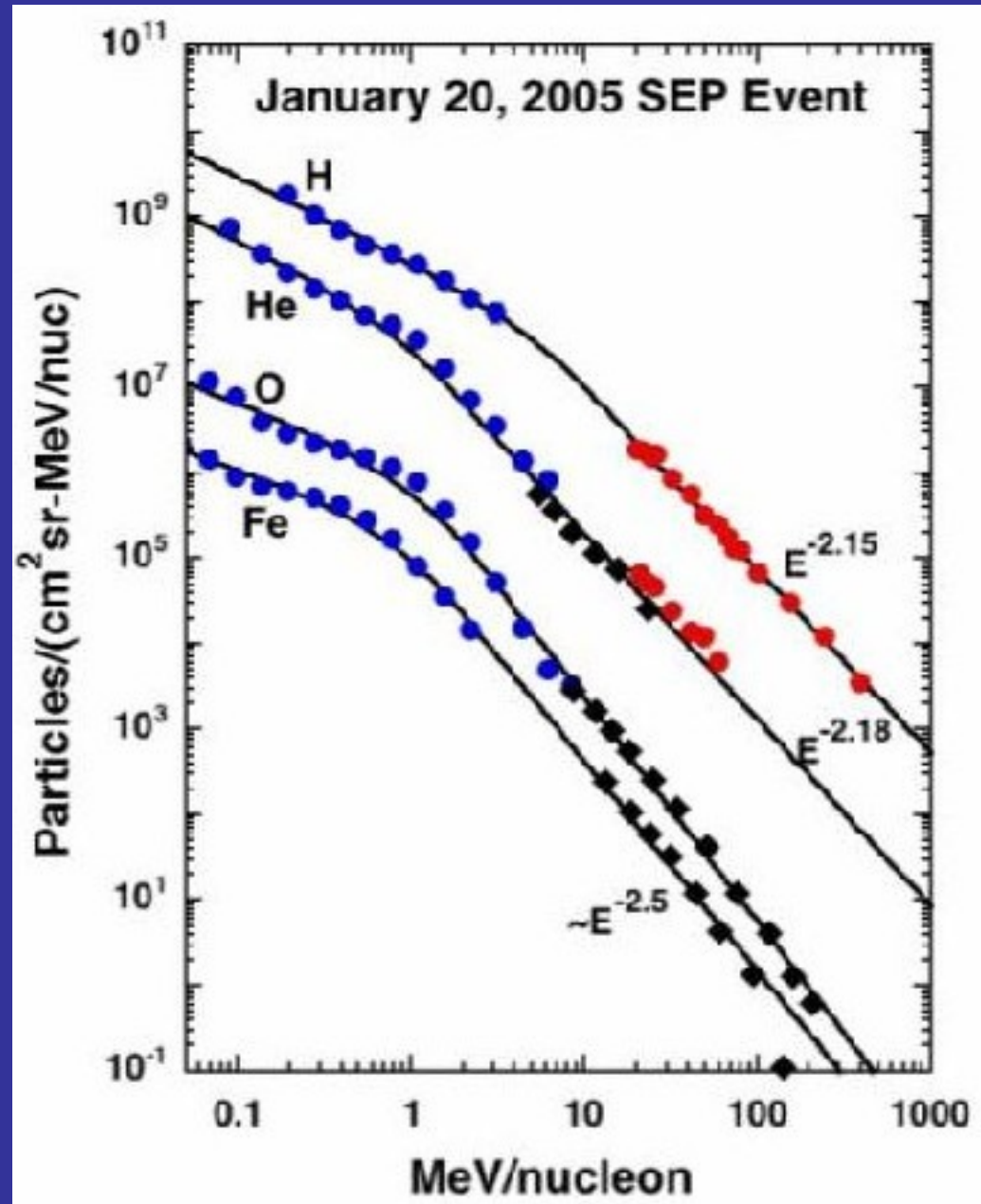


Das sehr heiße koronale Gas emittiert
Röntgenstrahlen



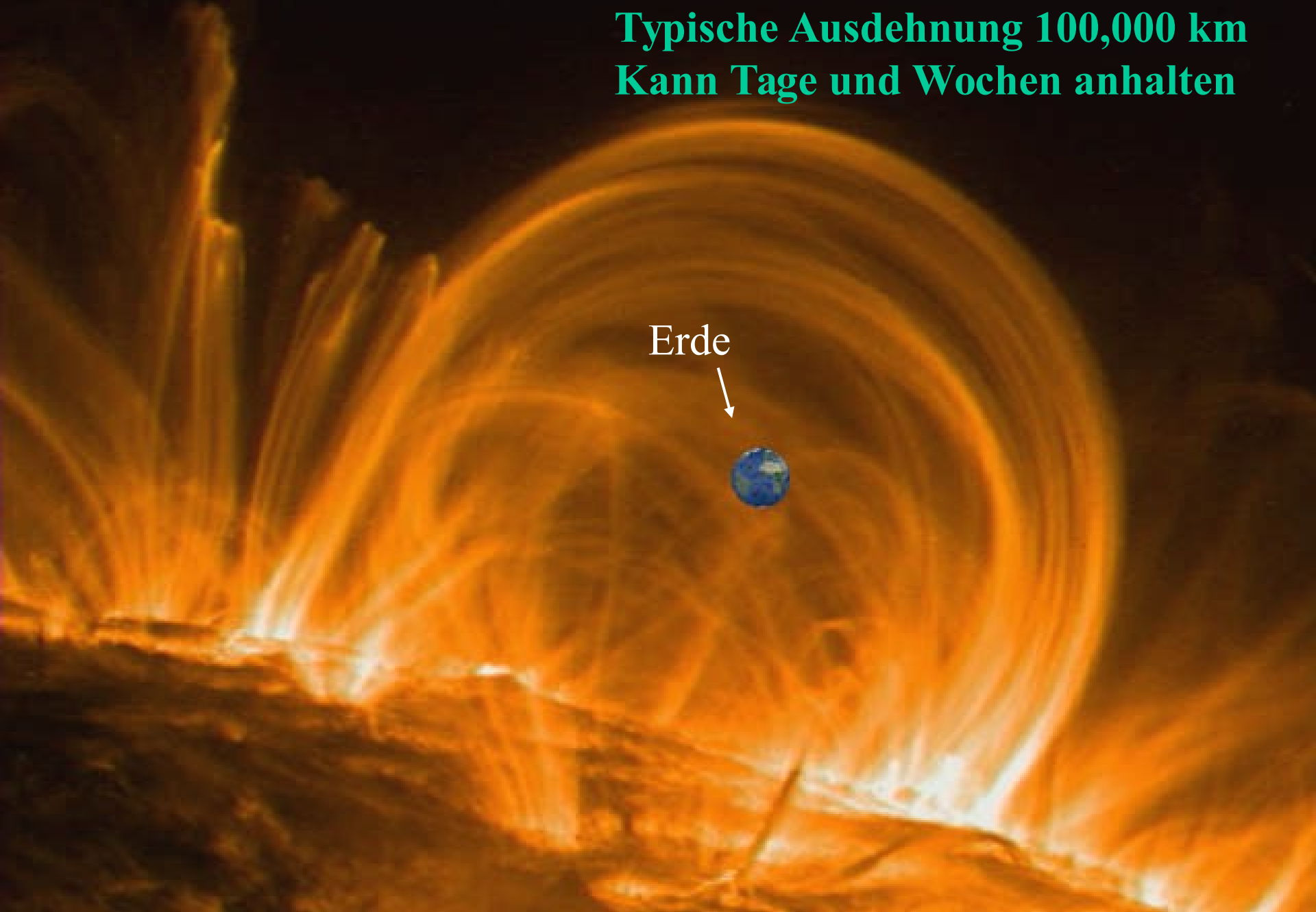
The X-ray sun

Im solaren Wind kommen auch Teilchen vor. Hauptsächlich Elektronen, Protonen und Alpha-Teilchen, aber auch schwere Kerne. 1 GeV pro Nukleon Eisen, heißt 56 GeV Gesamtenergie



Solarer Ausbruch

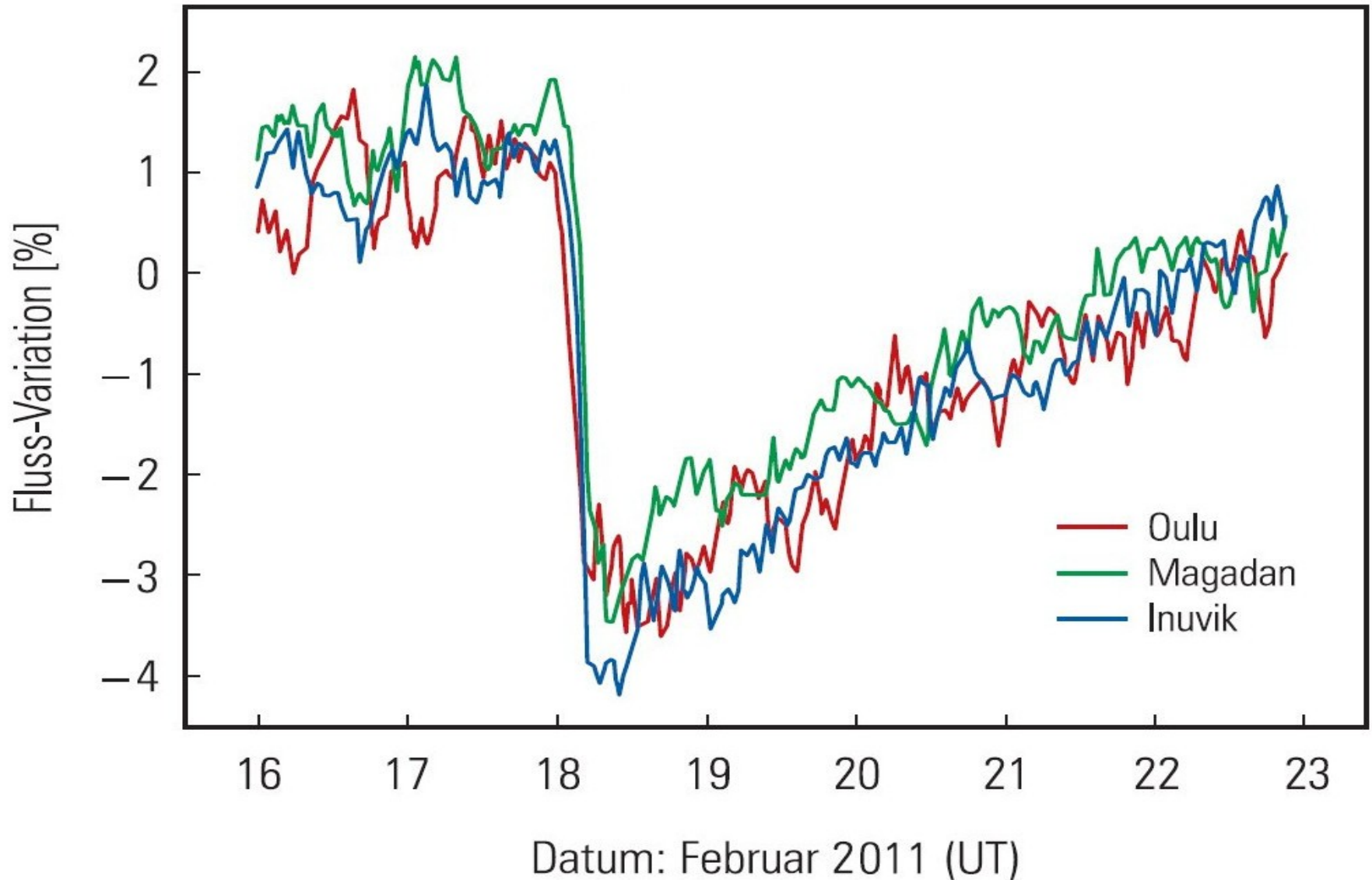
Typische Ausdehnung 100,000 km
Kann Tage und Wochen anhalten



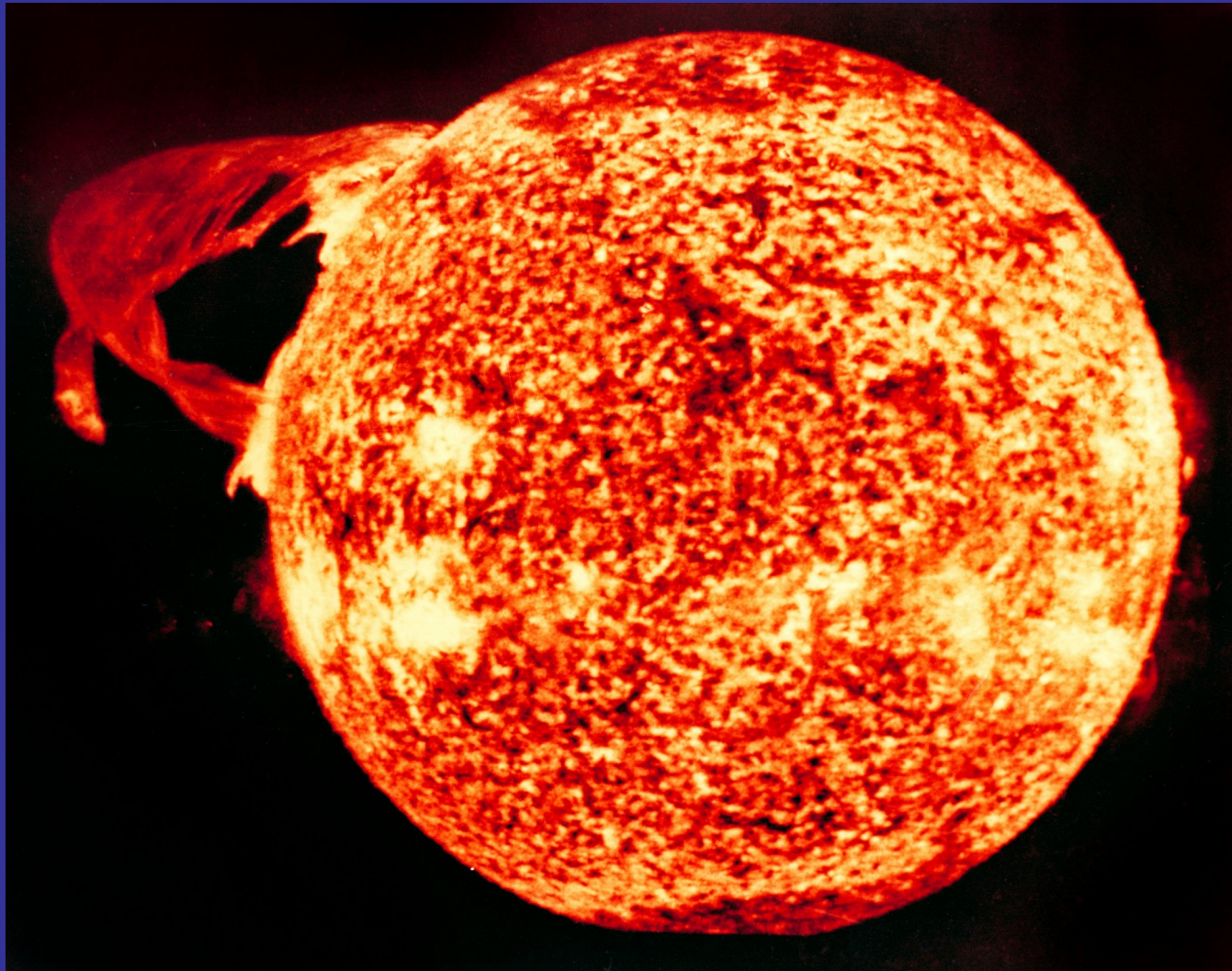
Erde



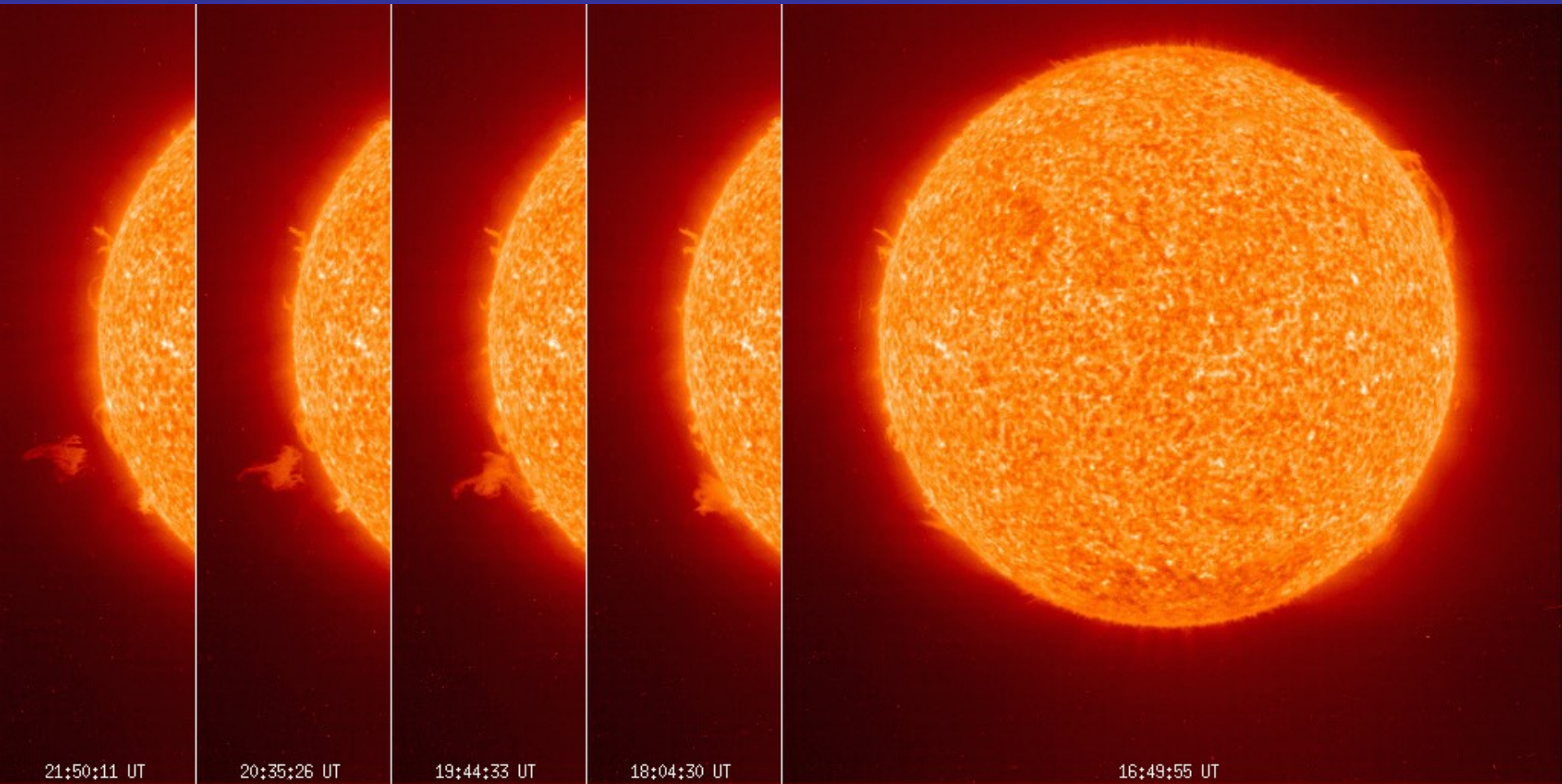
Reduktion galaktischer kosmischer Strahlung nach einem koronalen Ausbruch



Sehr starker Sonnenausbruch (1/2 Million km an der Basis, i.e. 39 x Erddurchmesser) gemessen vom Skylab Satelliten im UV Licht im Jahr 2000.



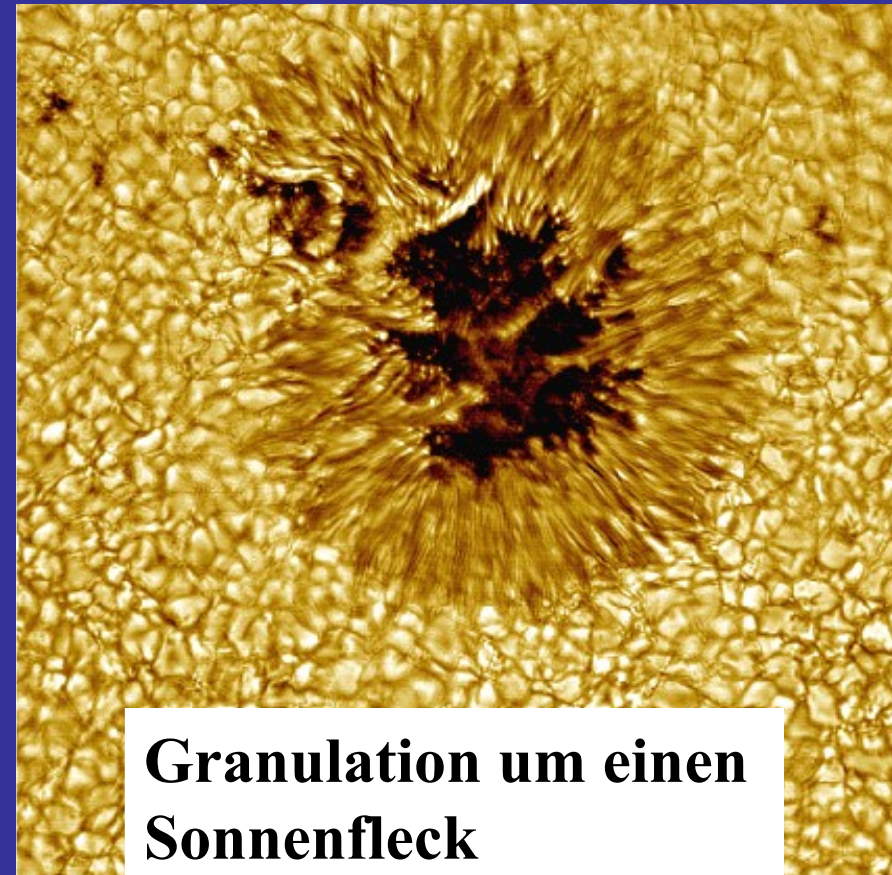
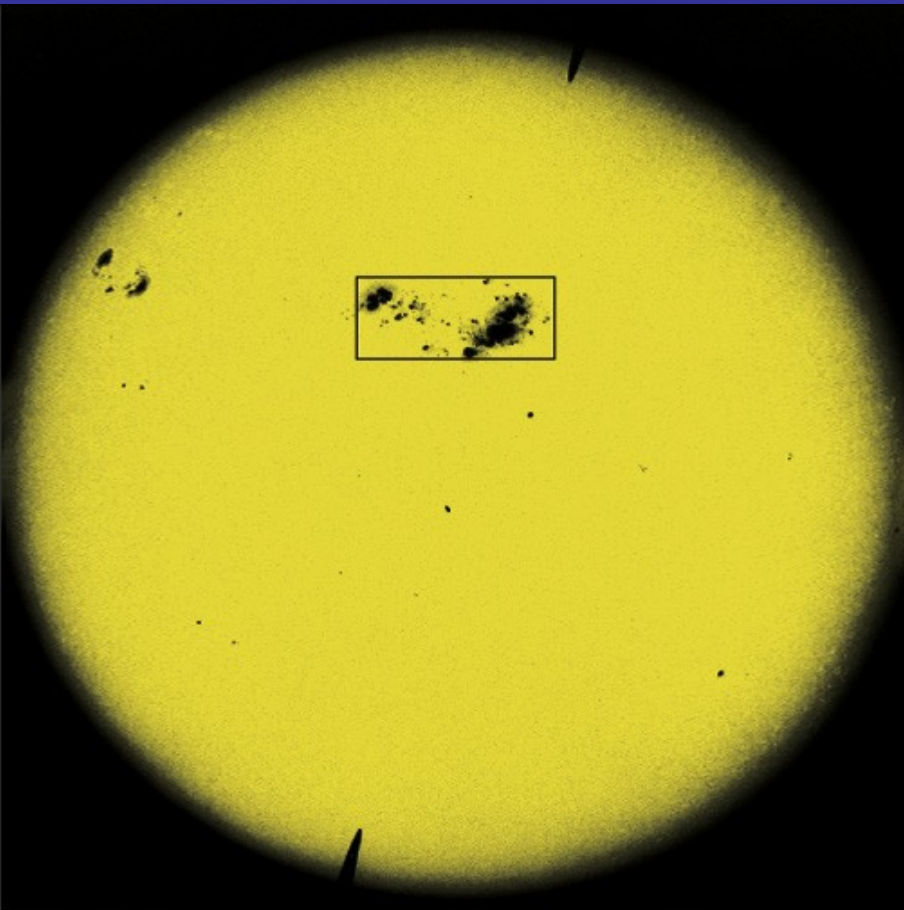
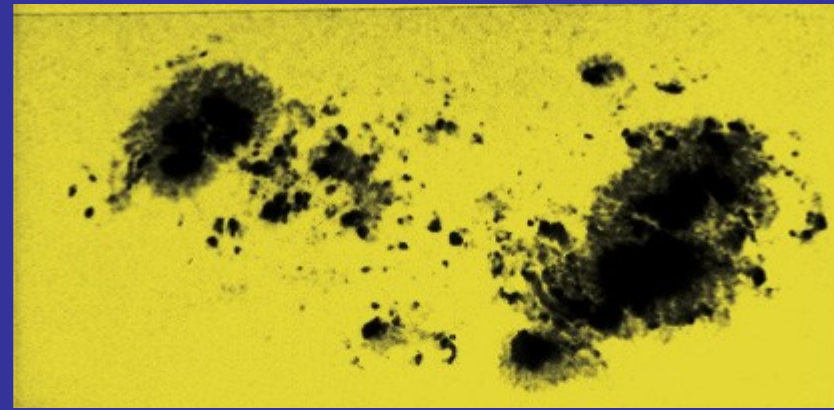
Solare Flares: sehr energiereich



5 Stunden

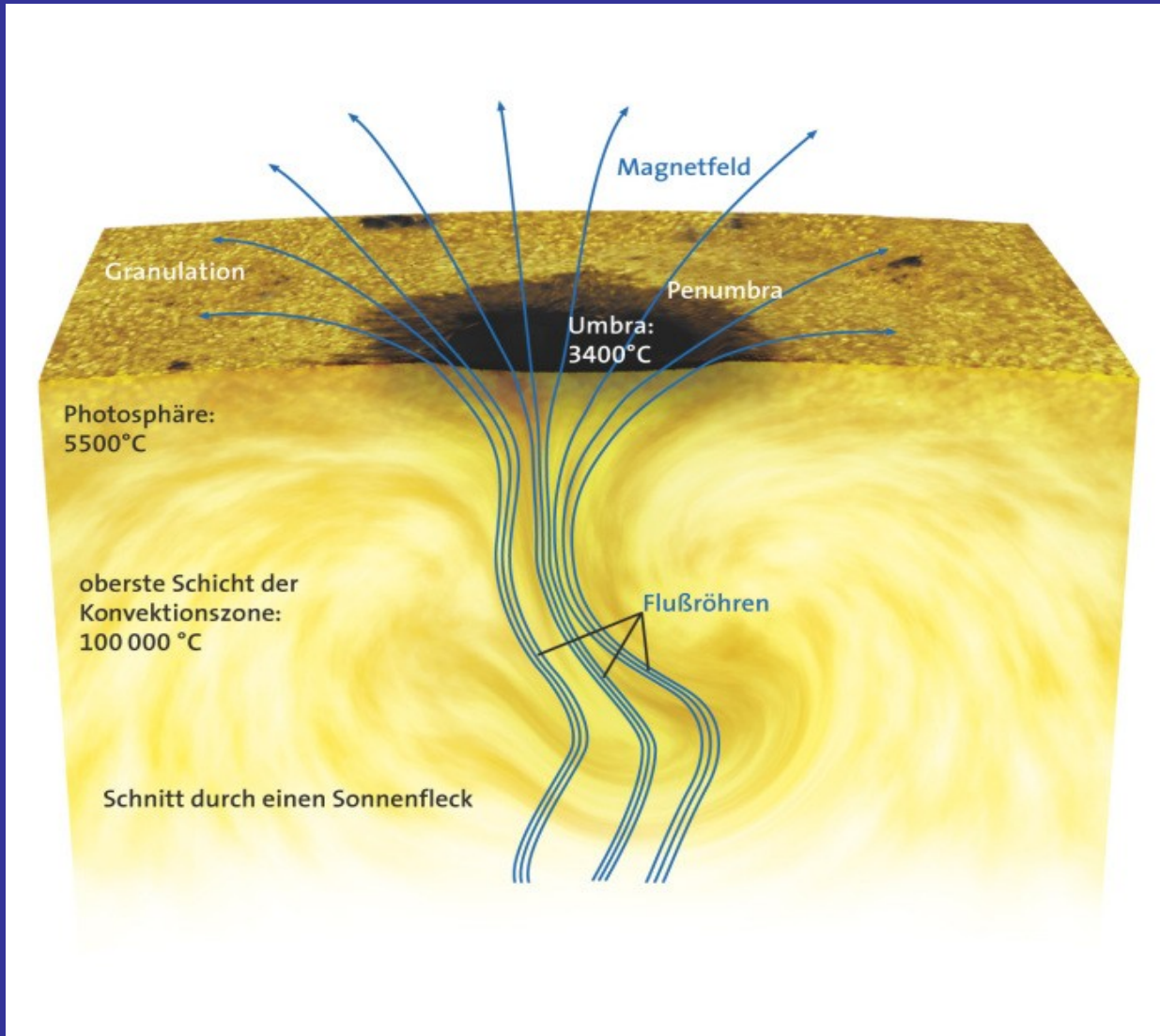
Die solaren Teilchen sind so energiereich, dass das Magnetfeld sie nicht zurückhalten kann: sie verlassen die Sonne als energiereicher Wind.

Sonnenflecken; die thermische Energie ist z.T. in Magnetfeldenergie übergegangen



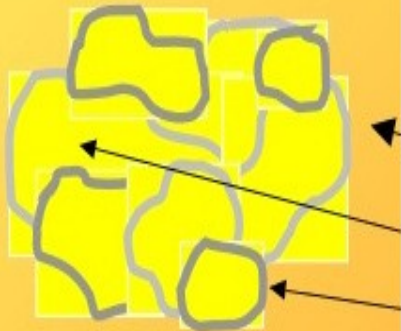
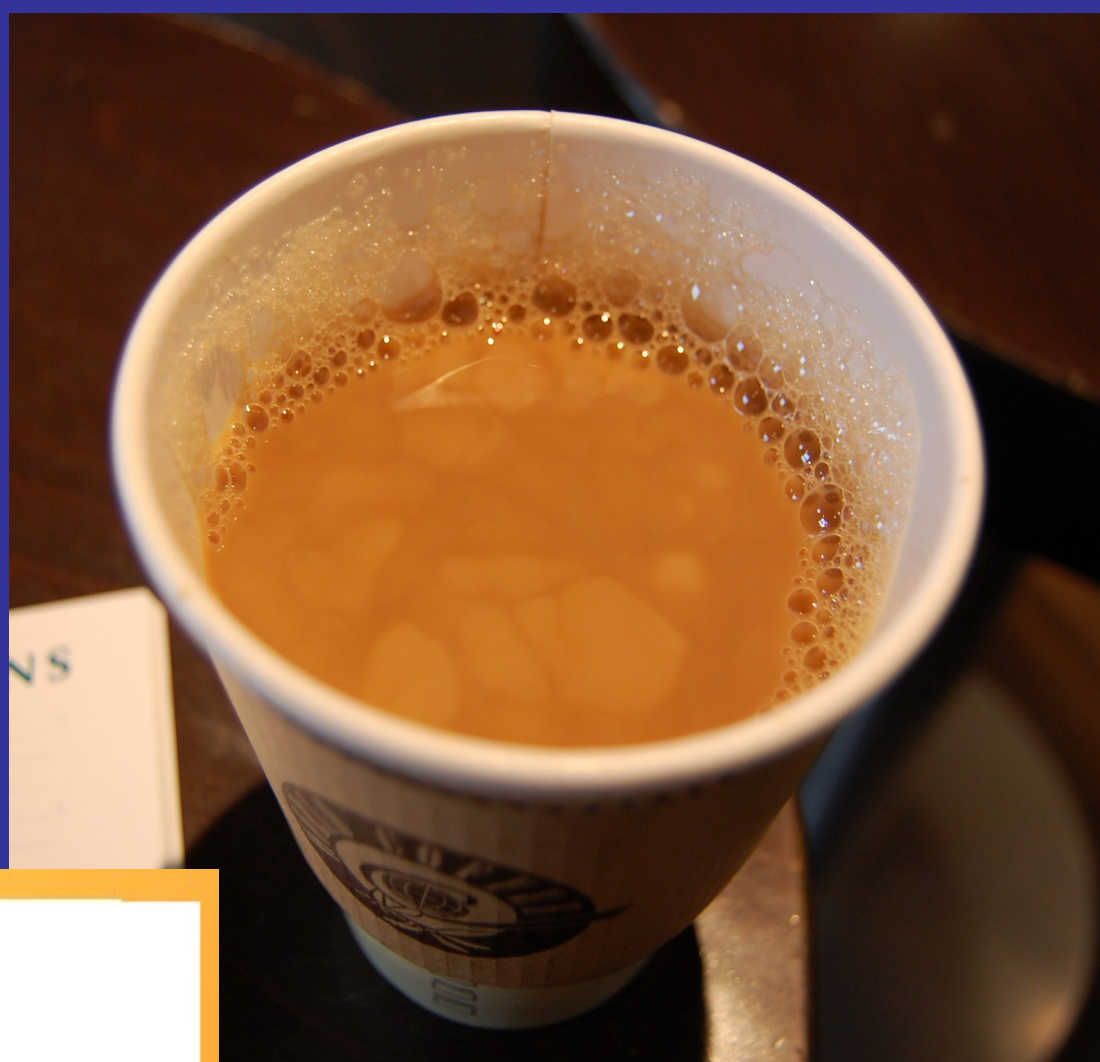
Granulation um einen Sonnenfleck

Granulation



die weniger dichte
Materie strömt
nach oben, kühlt sich
dabei ab und sinkt
wieder in das
Sonneninnere. Das
sieht man auf der
Oberfläche als körnige
Strukturen

Granulation in der Kaffeetasse: durch konvektiven Transport



Granulation

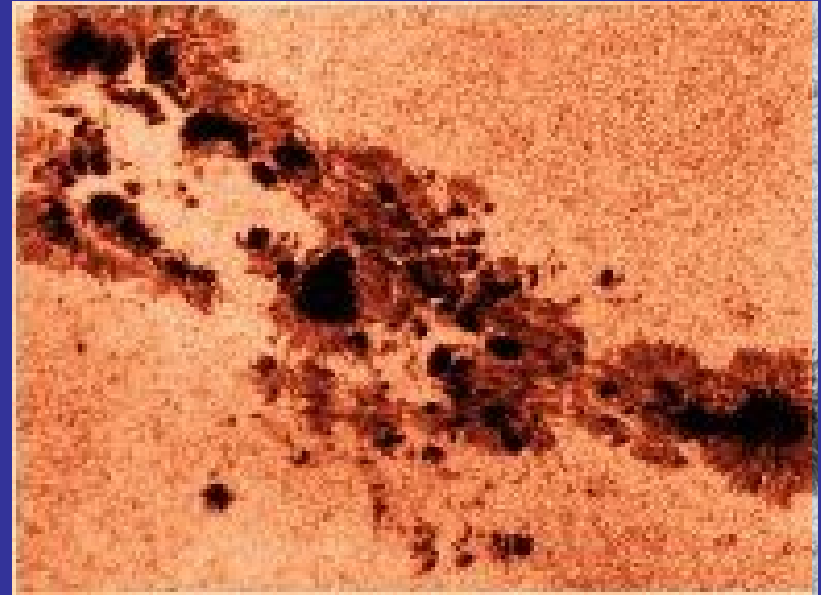
helles, heißes aufsteigendes Gas

dunkles, kaltes absinkendes Gas

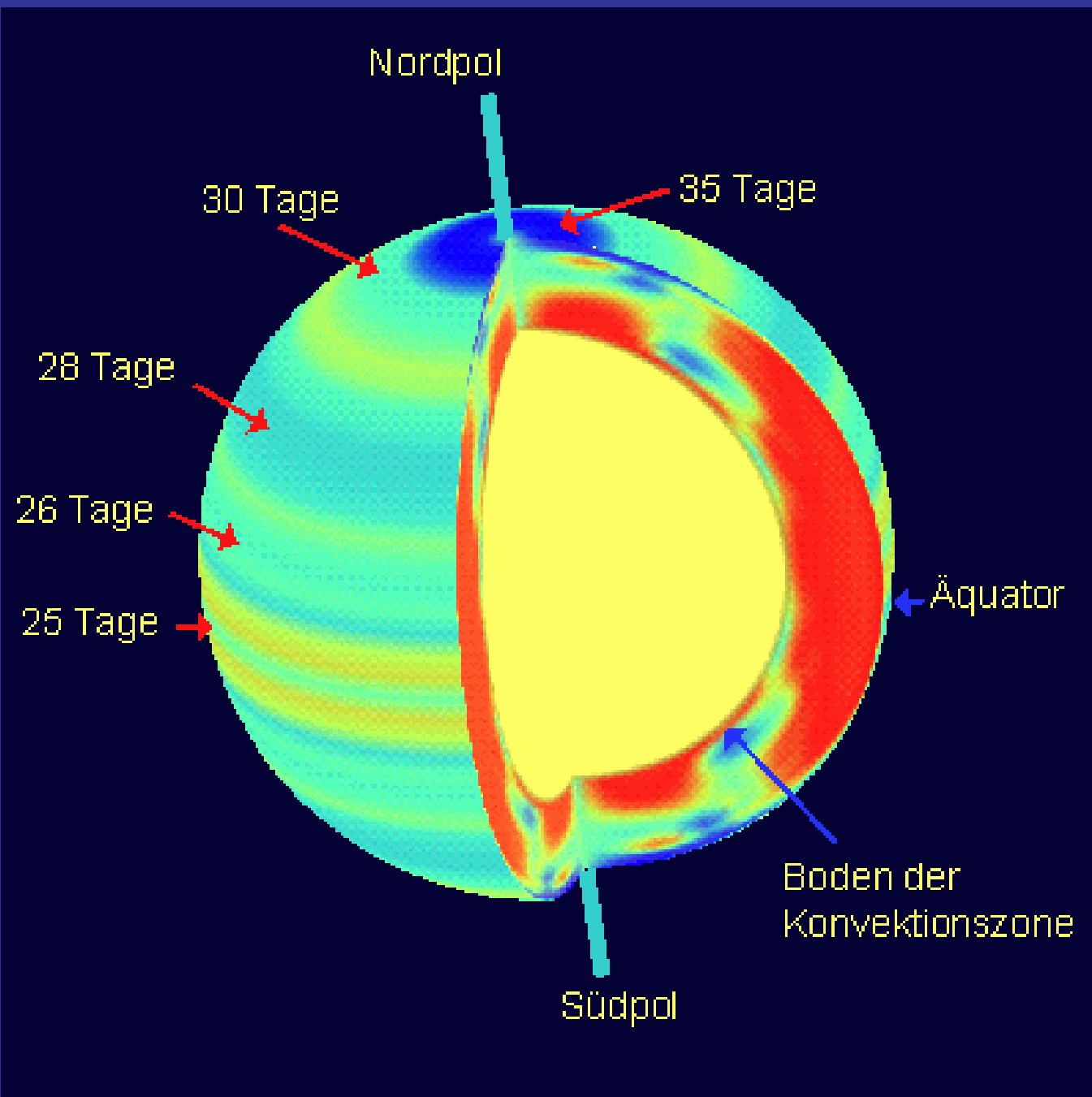
Sonnenflecken

- Größe ~ 10 000 km
- Anzahl: zwischen 100 und Null

Sind dunkel, weil die Temperatur niedriger als in der Photosphäre ist (~4000 K)

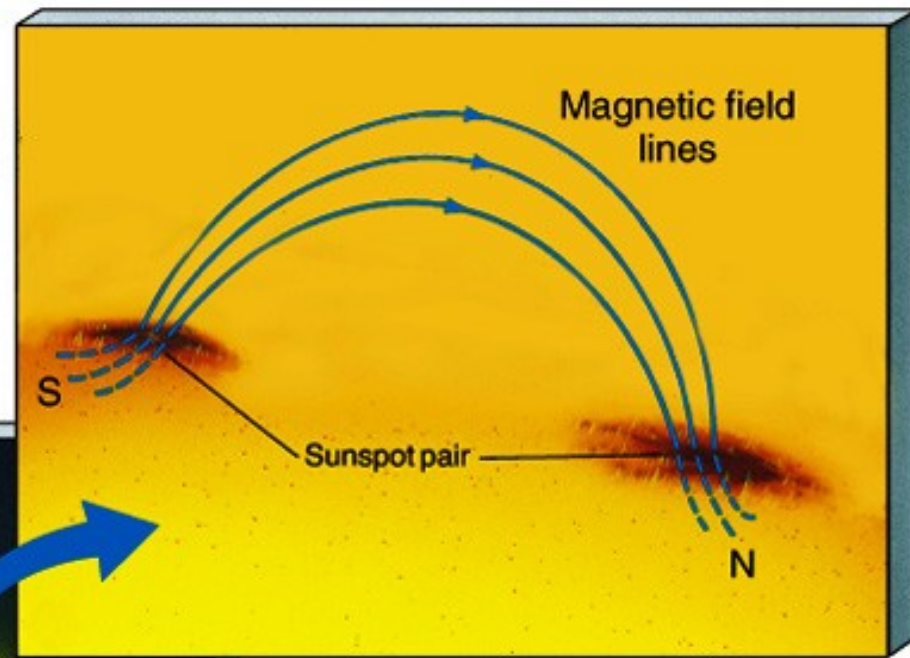
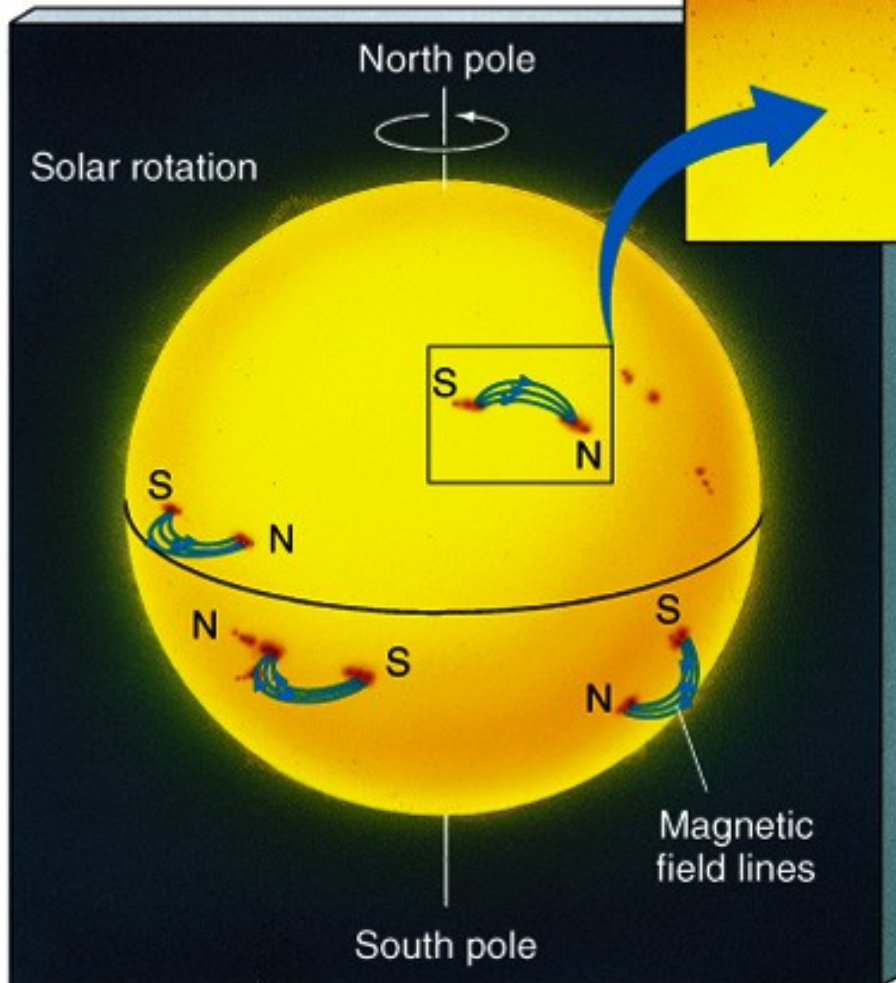


- Dauer; zwischen Tagen und Monaten
- Galileo hat die Sonnenflecken schon beobachtet und gemerkt, dass die Sonne rotiert (schneller an den Polen und langsamer am Äquator)

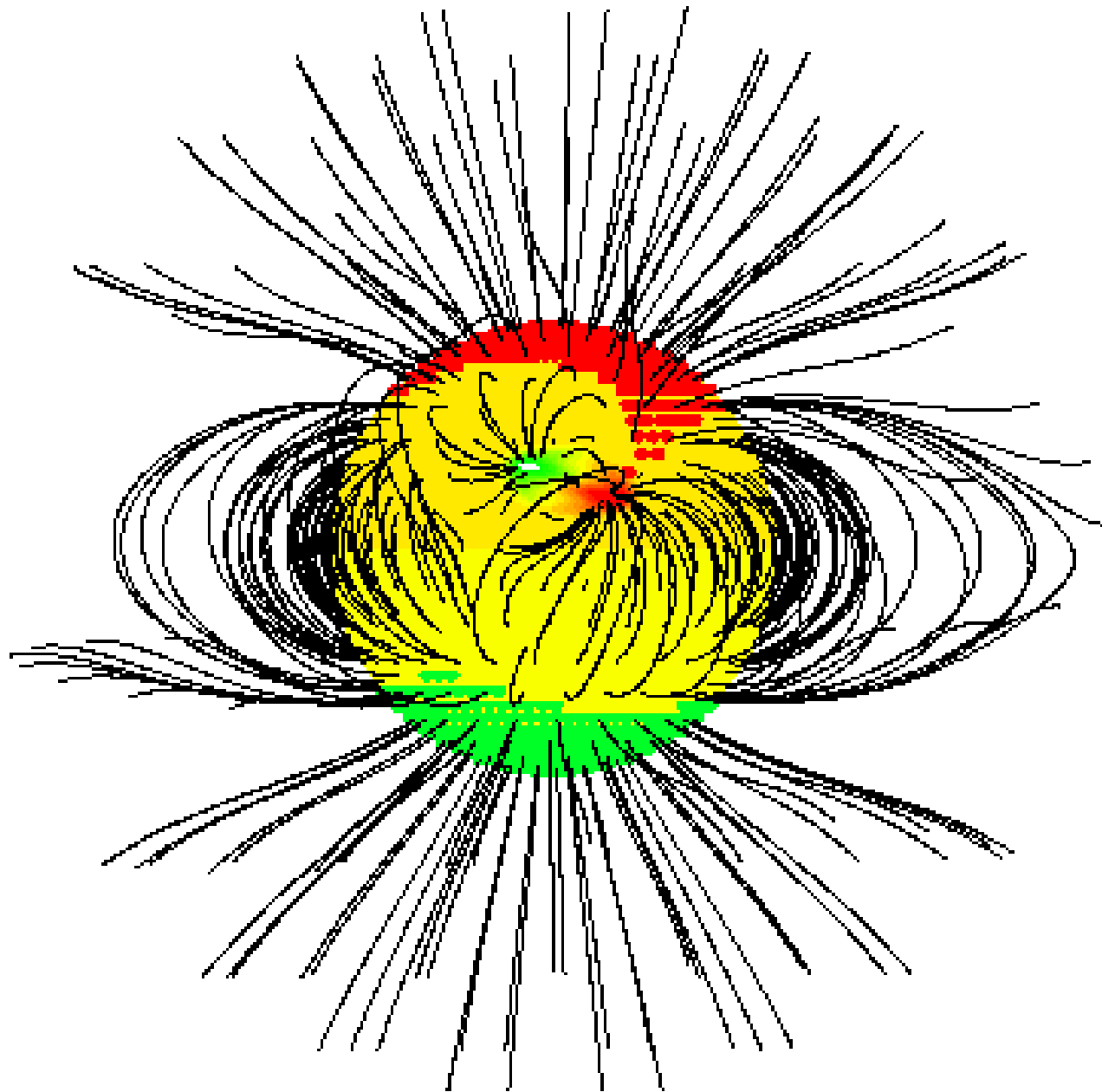


Differentielle Rotation der Sonne

**Sonnenflecken
treten häufig
paarweise auf**



**Magnetfelder
bis 1 Tesla**



**Magnetfeld
der Sonne**

Dipolfeld;

**Lokale
Irregularitäten**

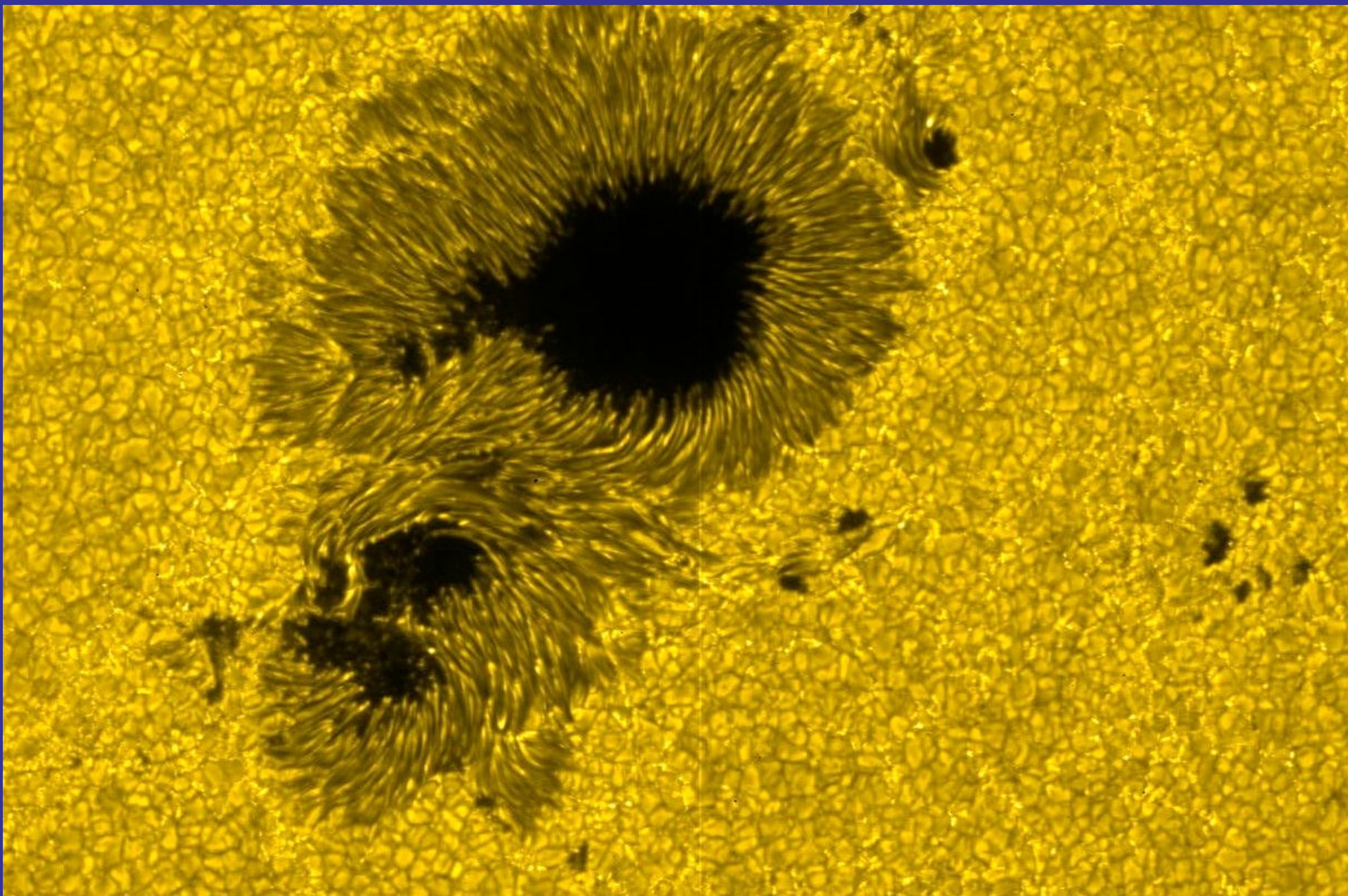
**Sonnen-
Oberfläche**

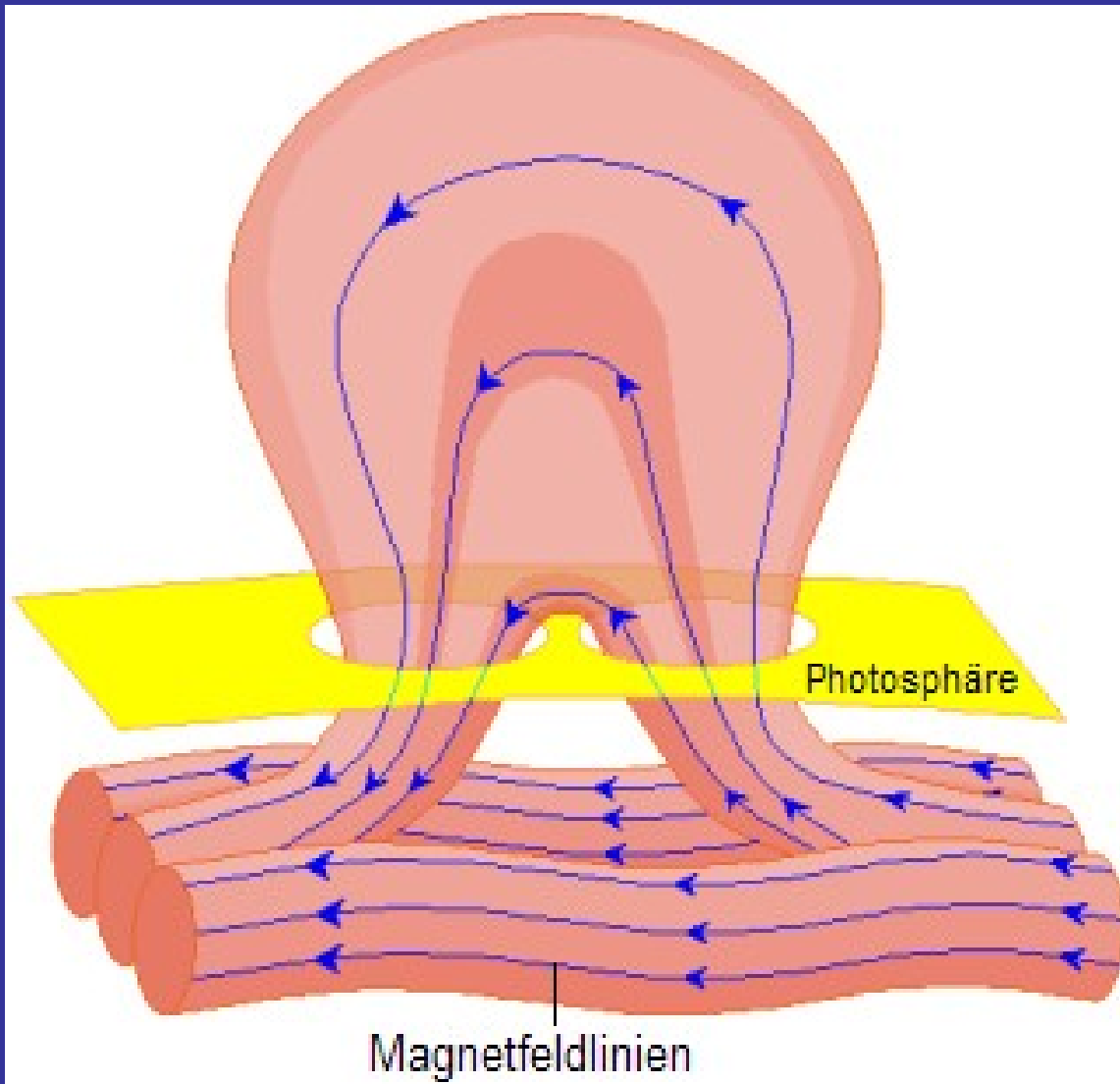
100 μ T

in Flares

0,5 T

**verursacht
durch Plasma-
ströme**





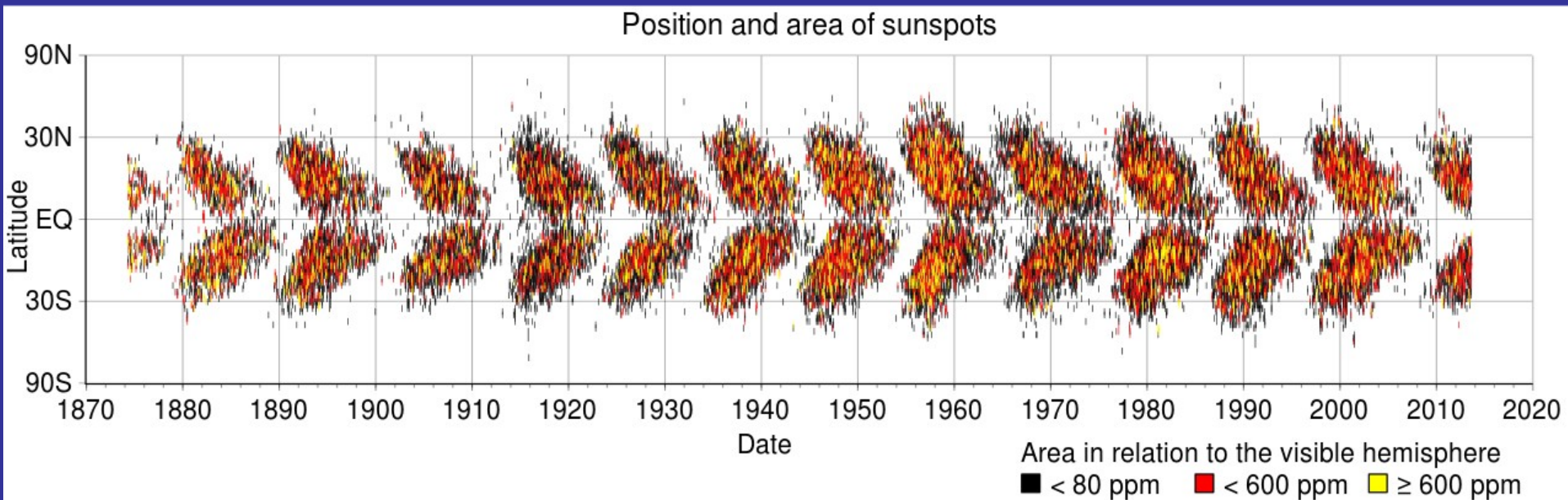
**Bei solaren
Eruptionen:**

**Magnetfelder
typisch 0,1 bis 0,5
Tesla**

100 000 km groß

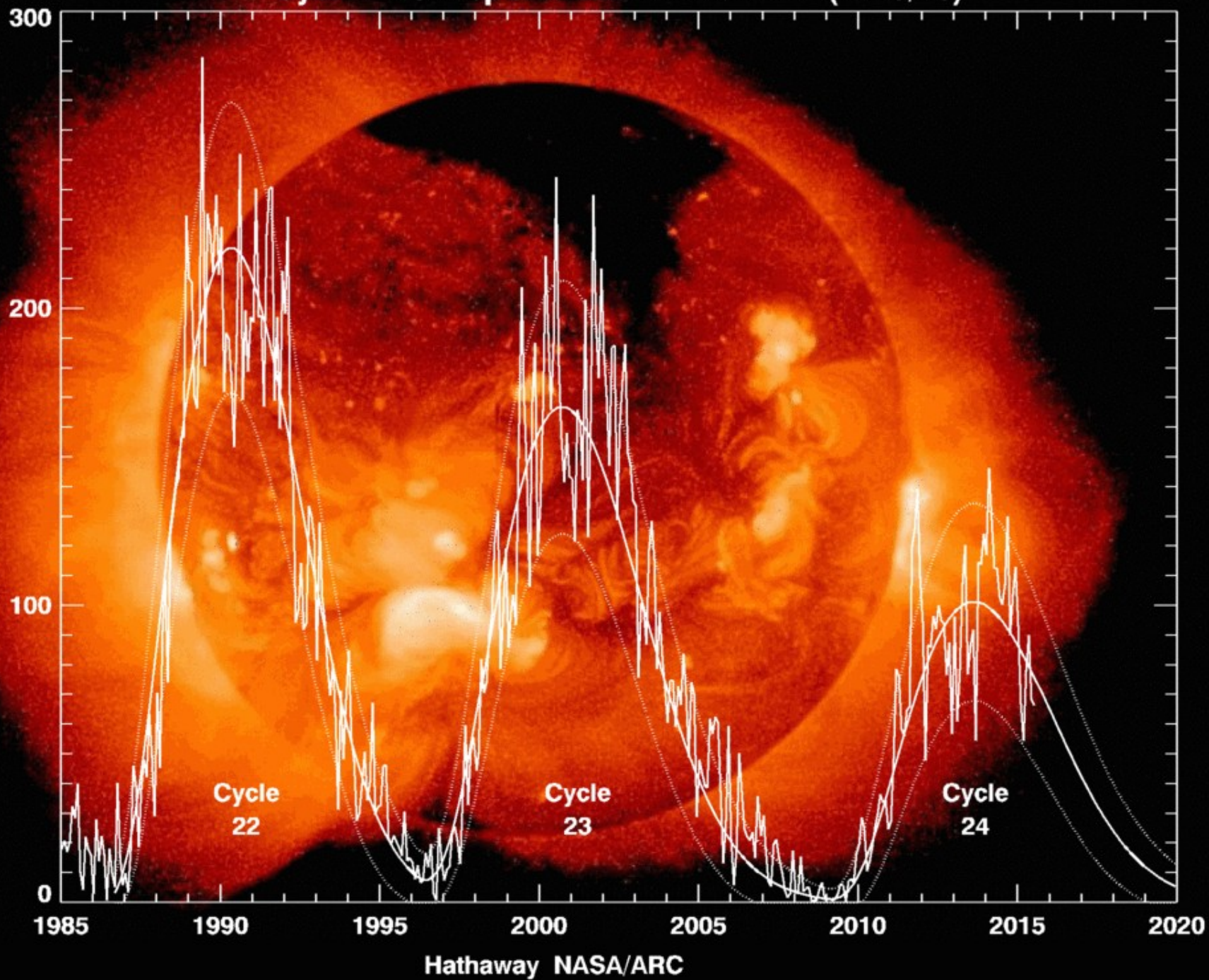
**Einfluss auf
Funkverbindungen,
Überlandleitungen,
Satelliten, ...**

Sonnenfleckenzyklus

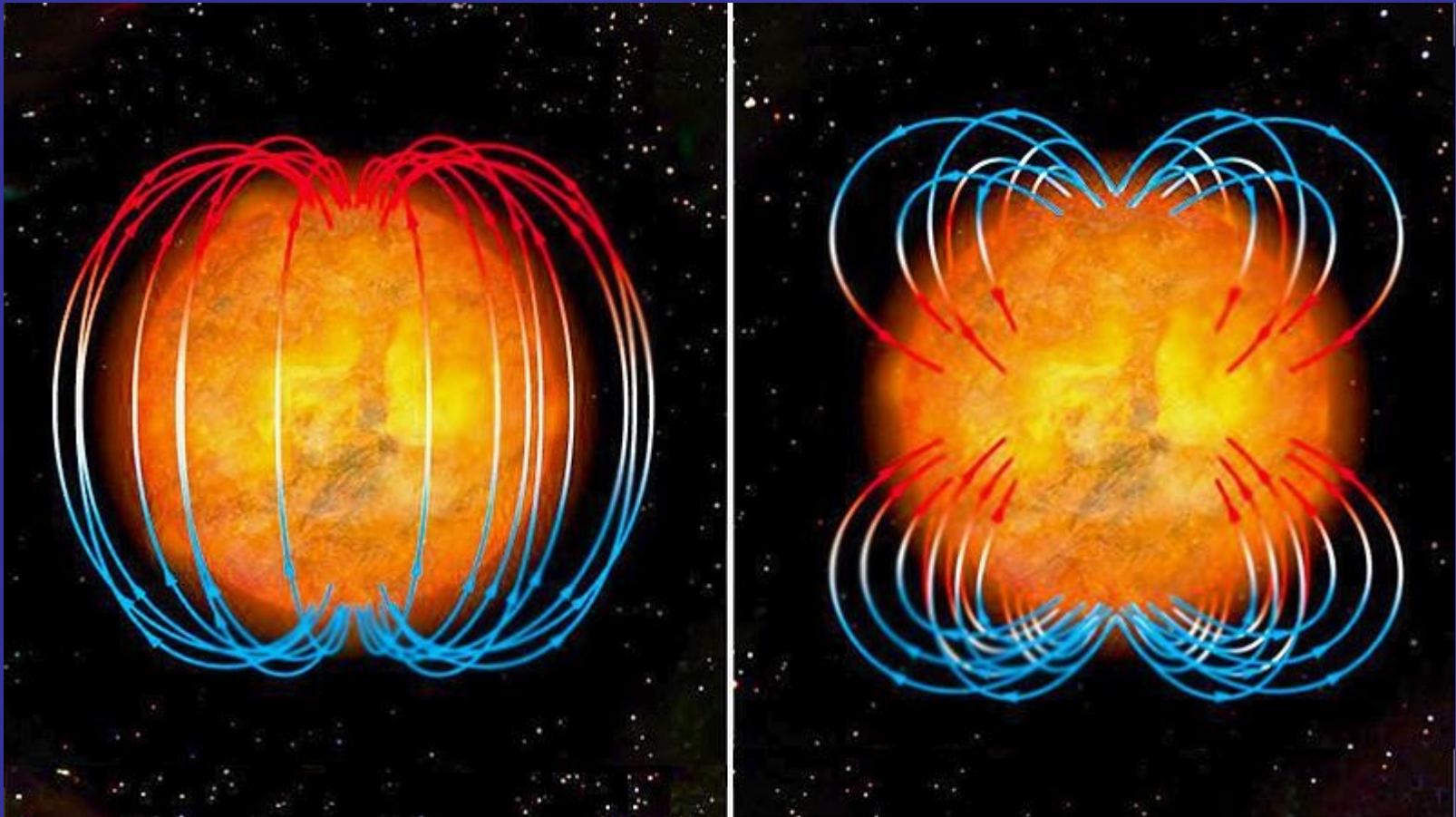


Ursprung ? Breitenabhängige Sonnenrotation?
Die Polarität dreht sich alle 11 Jahre um: Hale-
Zyklus: 22 Jahre

Cycle 24 Sunspot Number Prediction (2015/08)



Magnetfeldumkehr im 22 Jahreszyklus

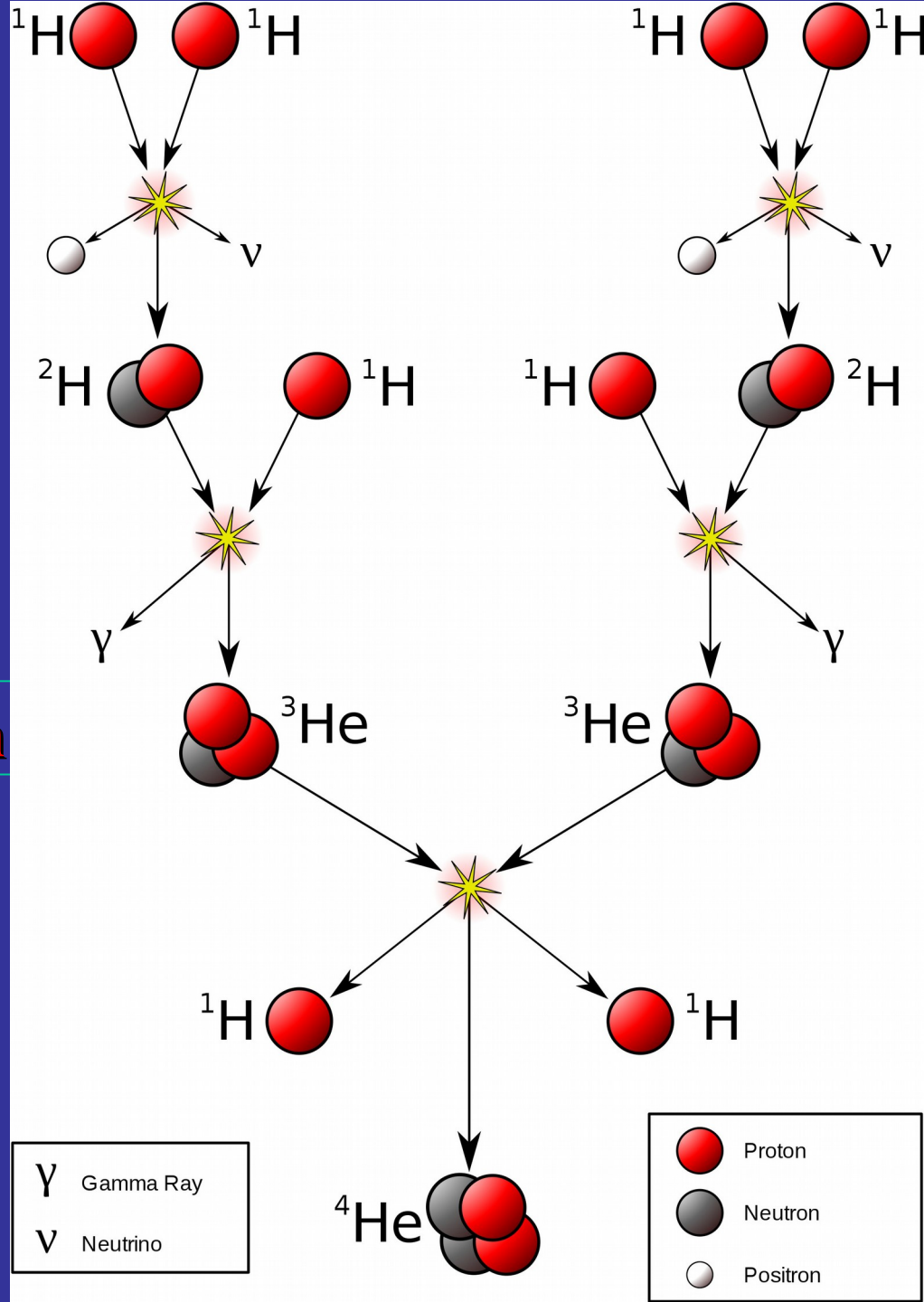
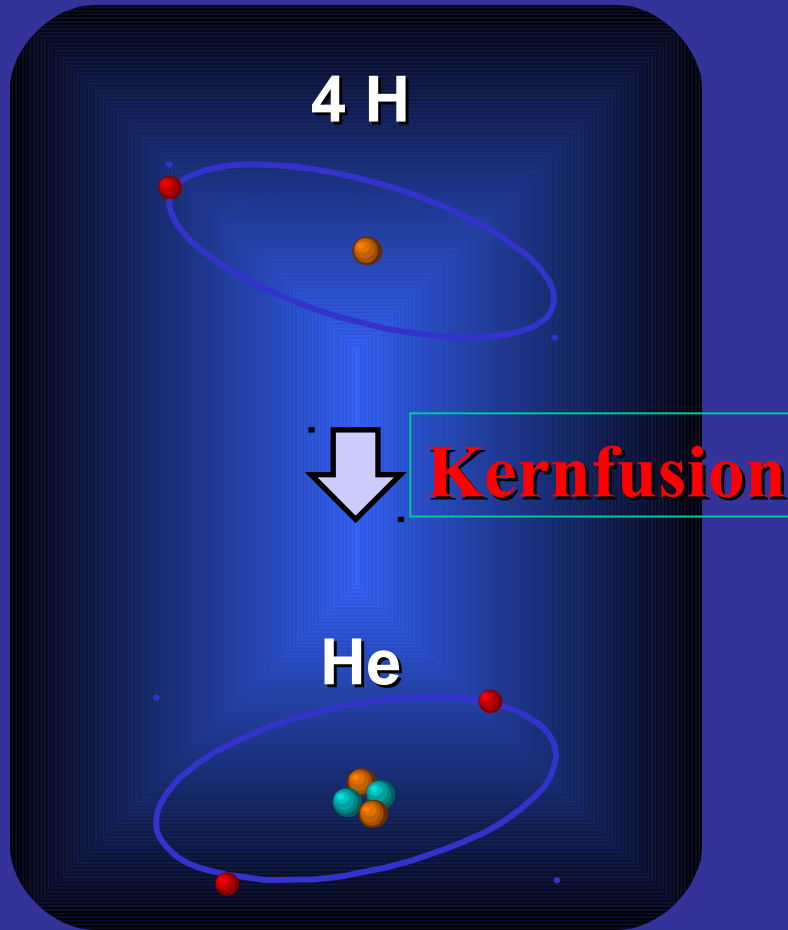


Dipol



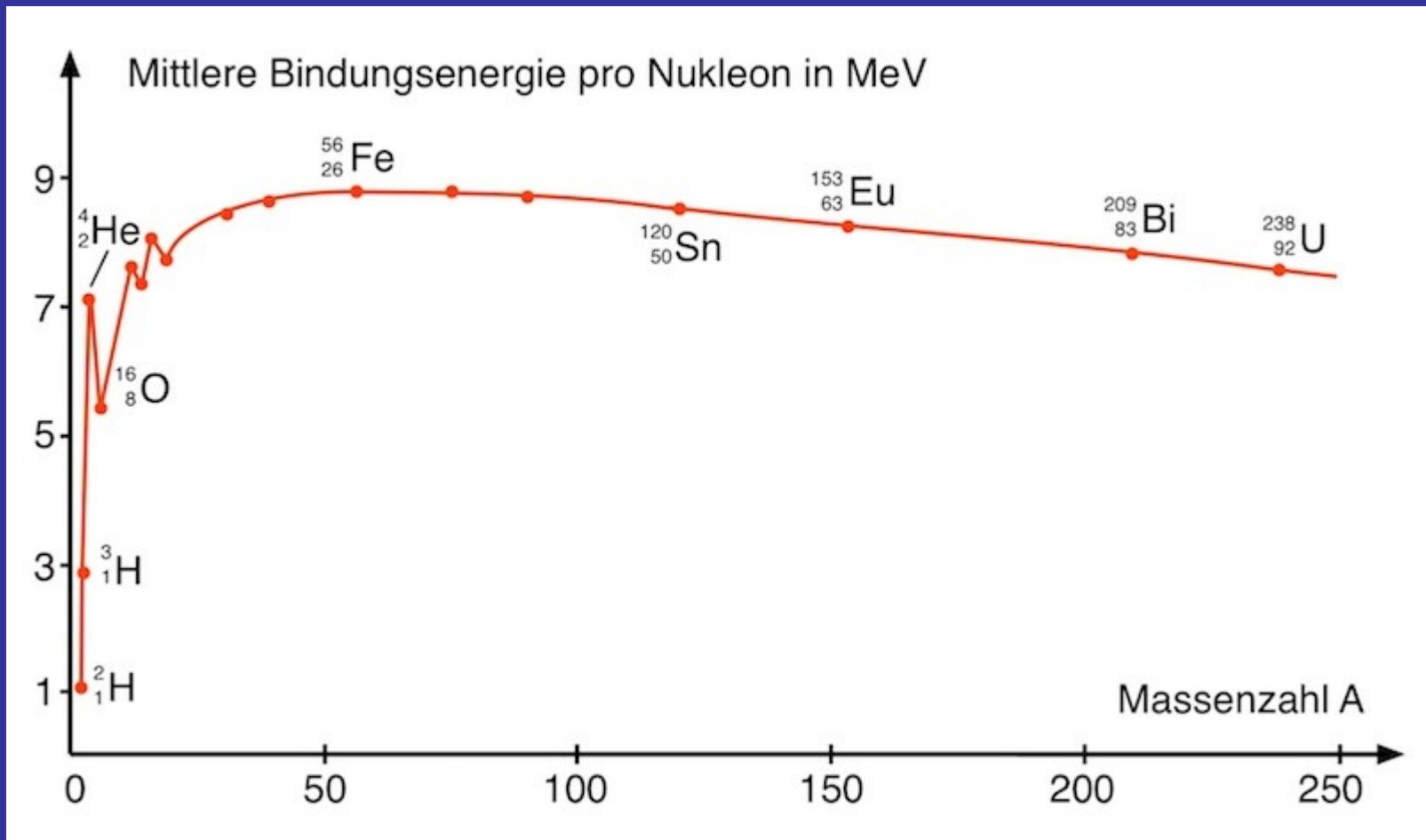
Quadrupol

Woher bezieht die Sonne ihre Energie?



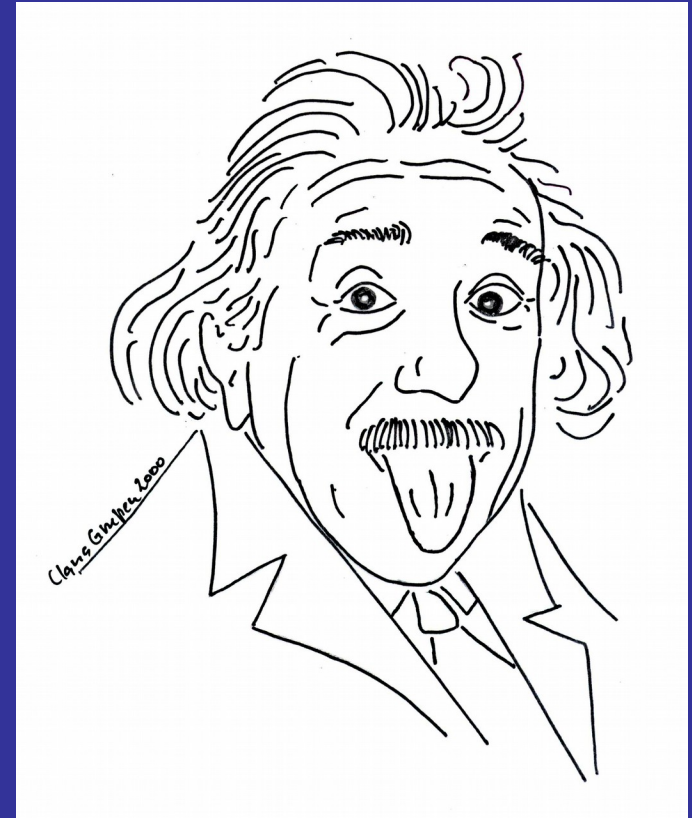
Fusion in der Sonne

Kernkraftwerke



$$E = m c^2$$

- ❖ c^2 ist eine sehr große Zahl
- ❖ wenig Masse bringt sehr viel Energie.



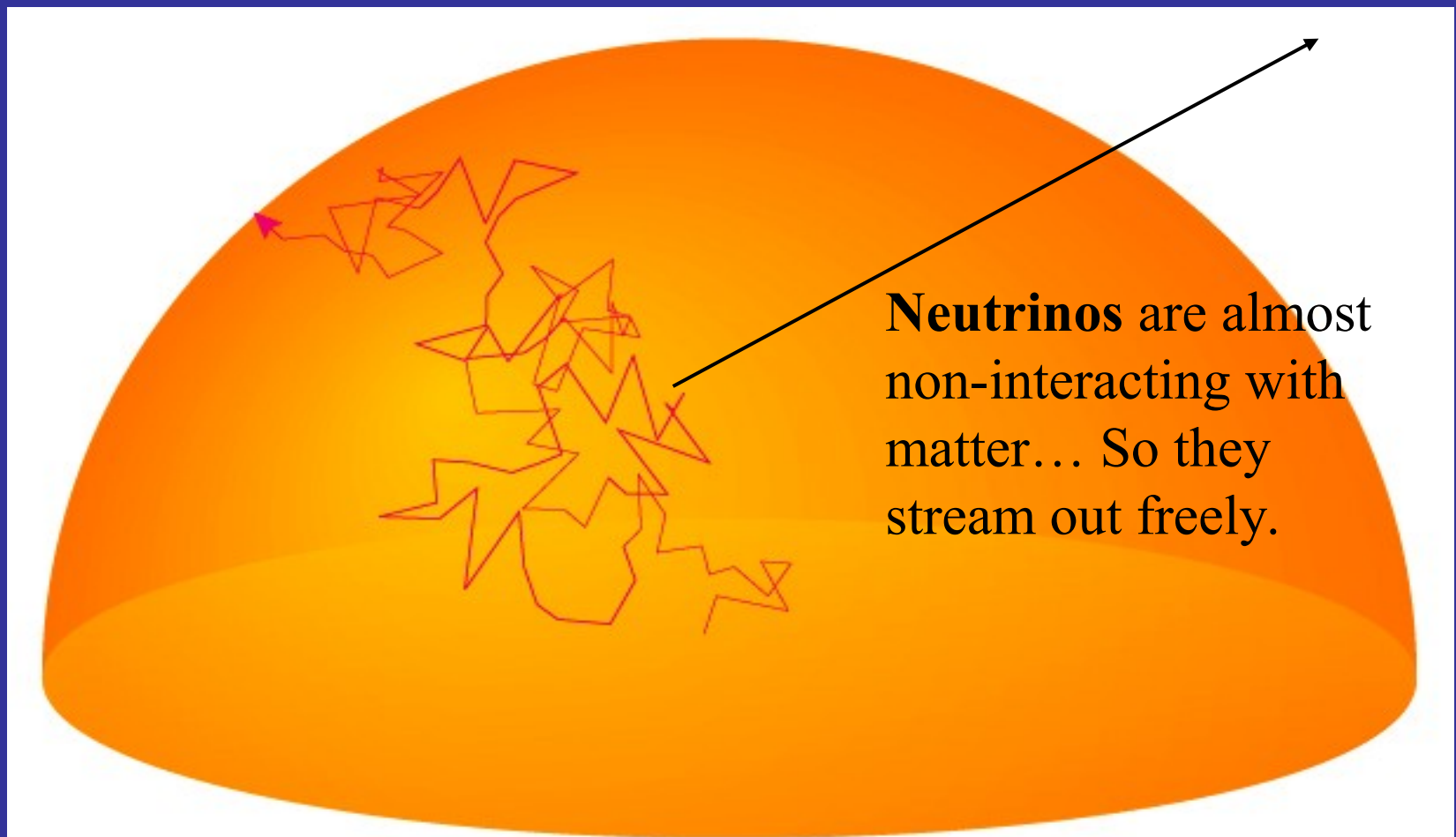
C.G. 2005

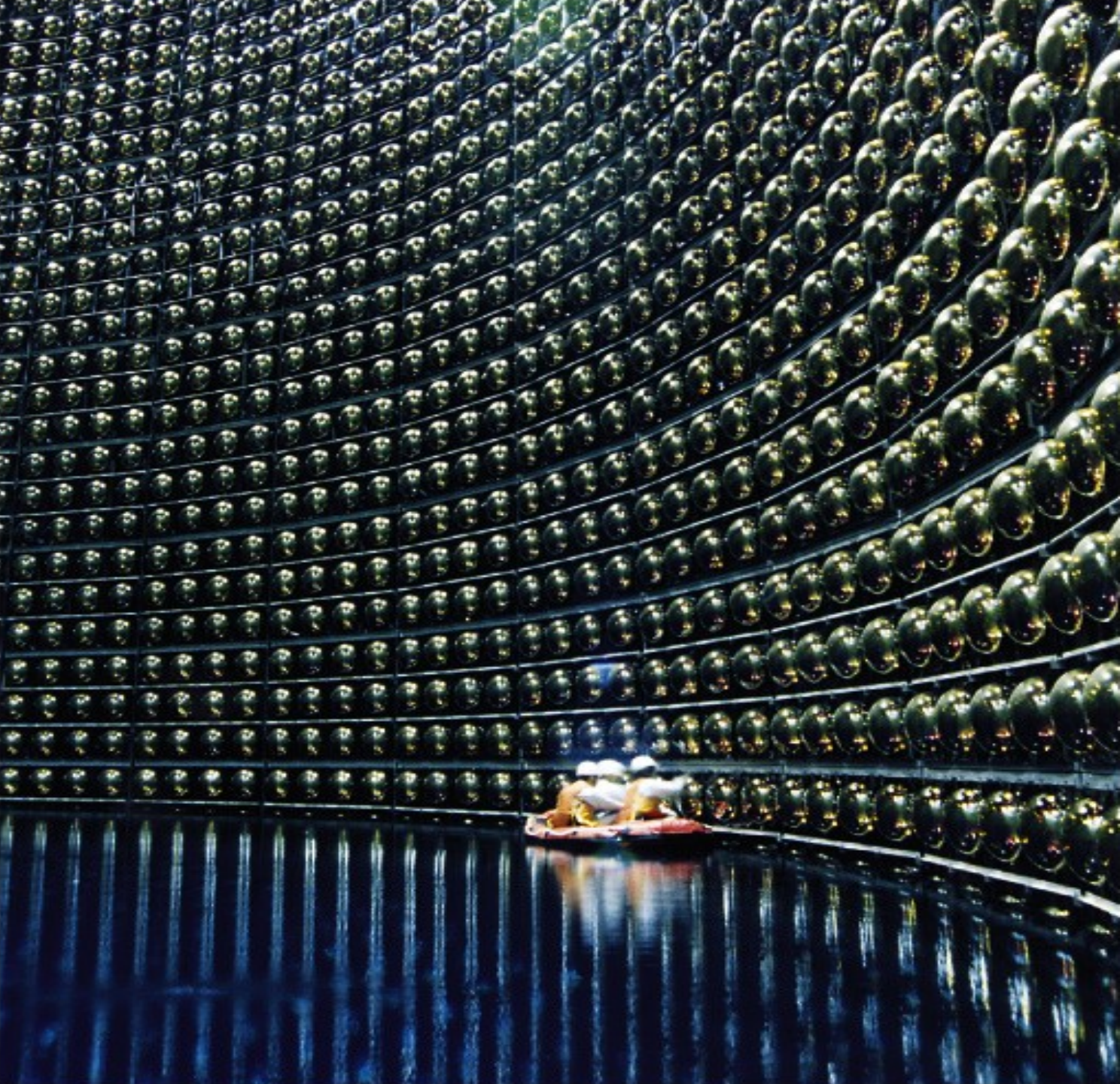
Beispiel:

- ❖ Gramm Materie $\Rightarrow 10^{14}$ Joule (J)
- ❖ Genug, um eine 100 Watt Lampe 32,000 Jahre brennen zu lassen!

Die Sonne verschmilzt 564 Millionen Tonnen Wasserstoff pro Sekunde und bildet dabei 560 Millionen Tonnen Helium. Die Differenz wird als Energie abgestrahlt. Das reicht noch für 5 Milliarden Jahre.

Die Energie der Sonne wird primär als Gammastrahlung erzeugt. Auf dem Weg vom Zentrum zur Oberfläche werden die Gammastrahlen in UV und letztlich in sichtbares Licht umgewandelt. Die bei der Kernfusion erzeugten Neutrinos zu messen ist schwer. Die Messung stellt aber einen wichtigen Test der Kernphysik dar.





**Superkamio-
kande**

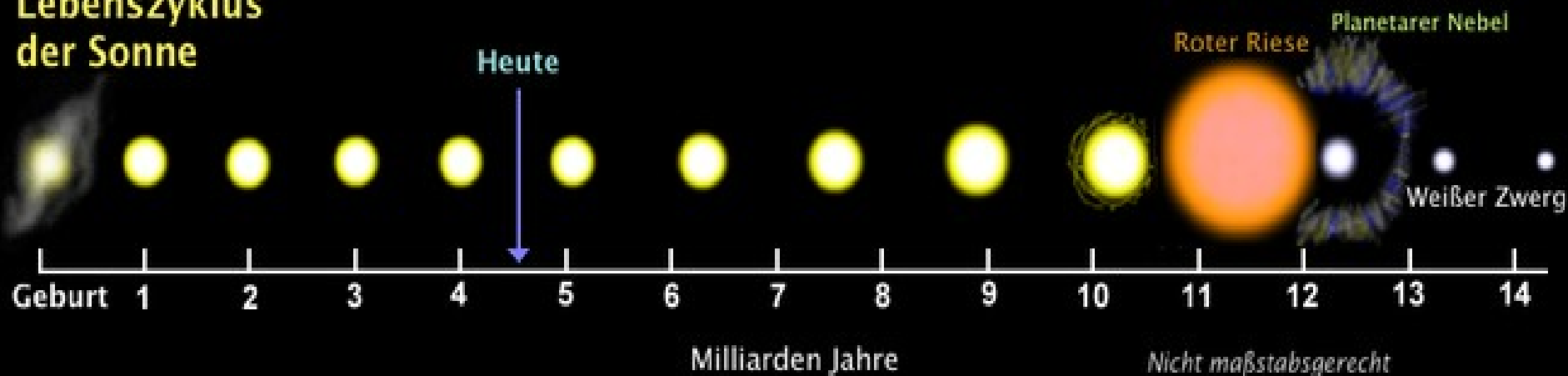
**Neutrino-
Produktion**

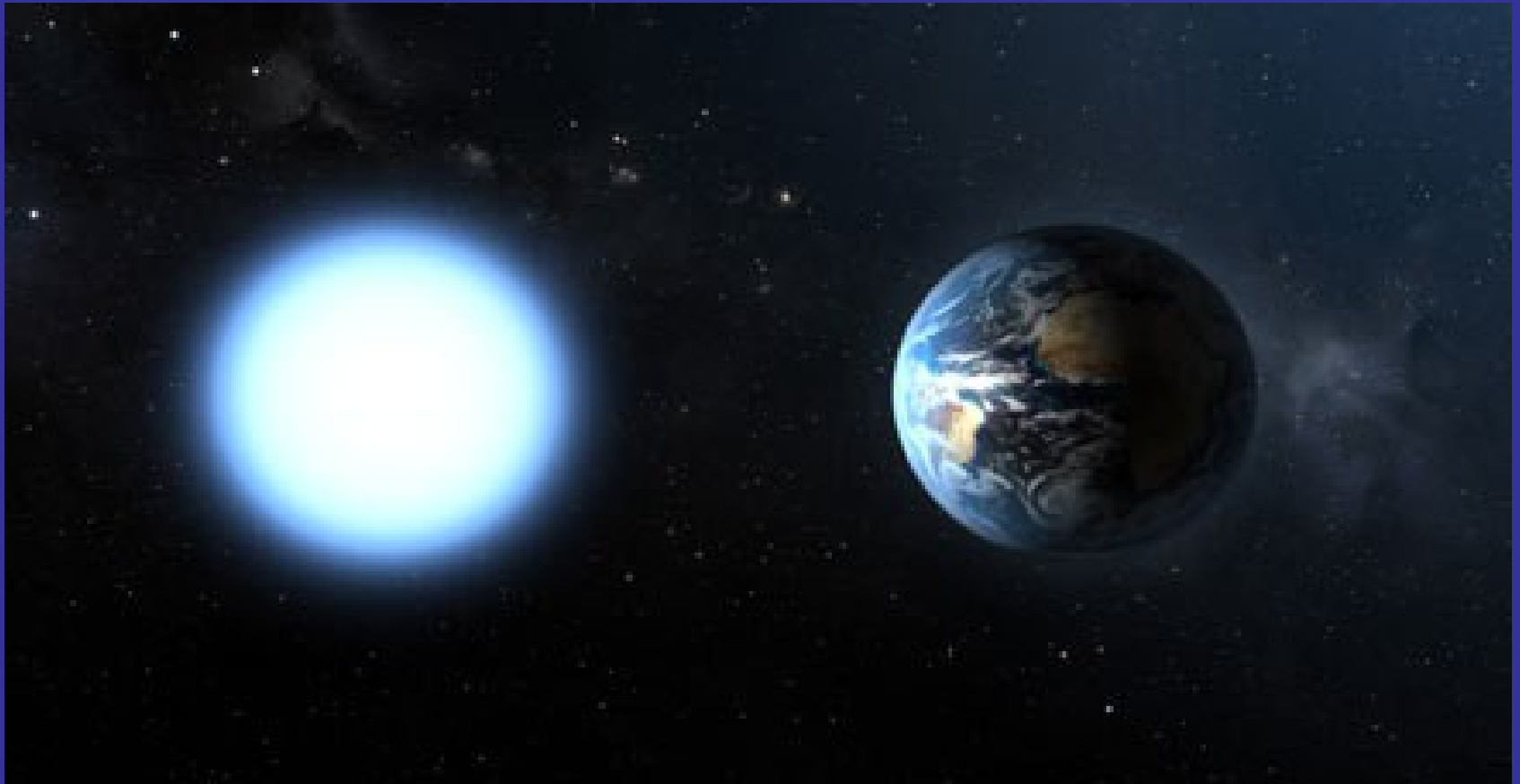
**Neutrino-
Oszillationen**



Weitere Entwicklung der Sonne

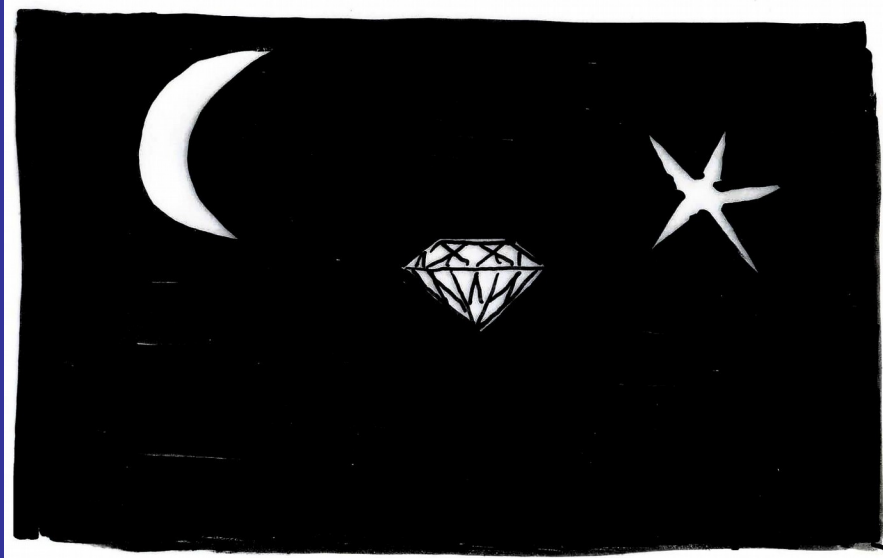
Lebenszyklus der Sonne



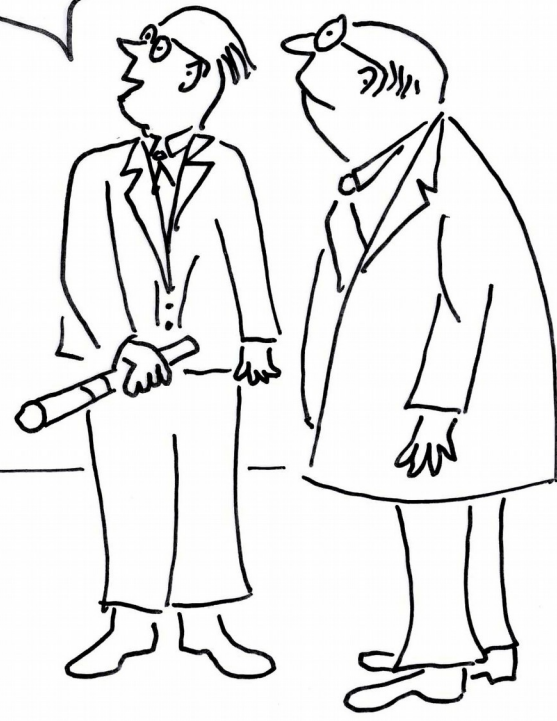


Sonne als Weißer Zwerg

Masse = 300 000 Erdmasse



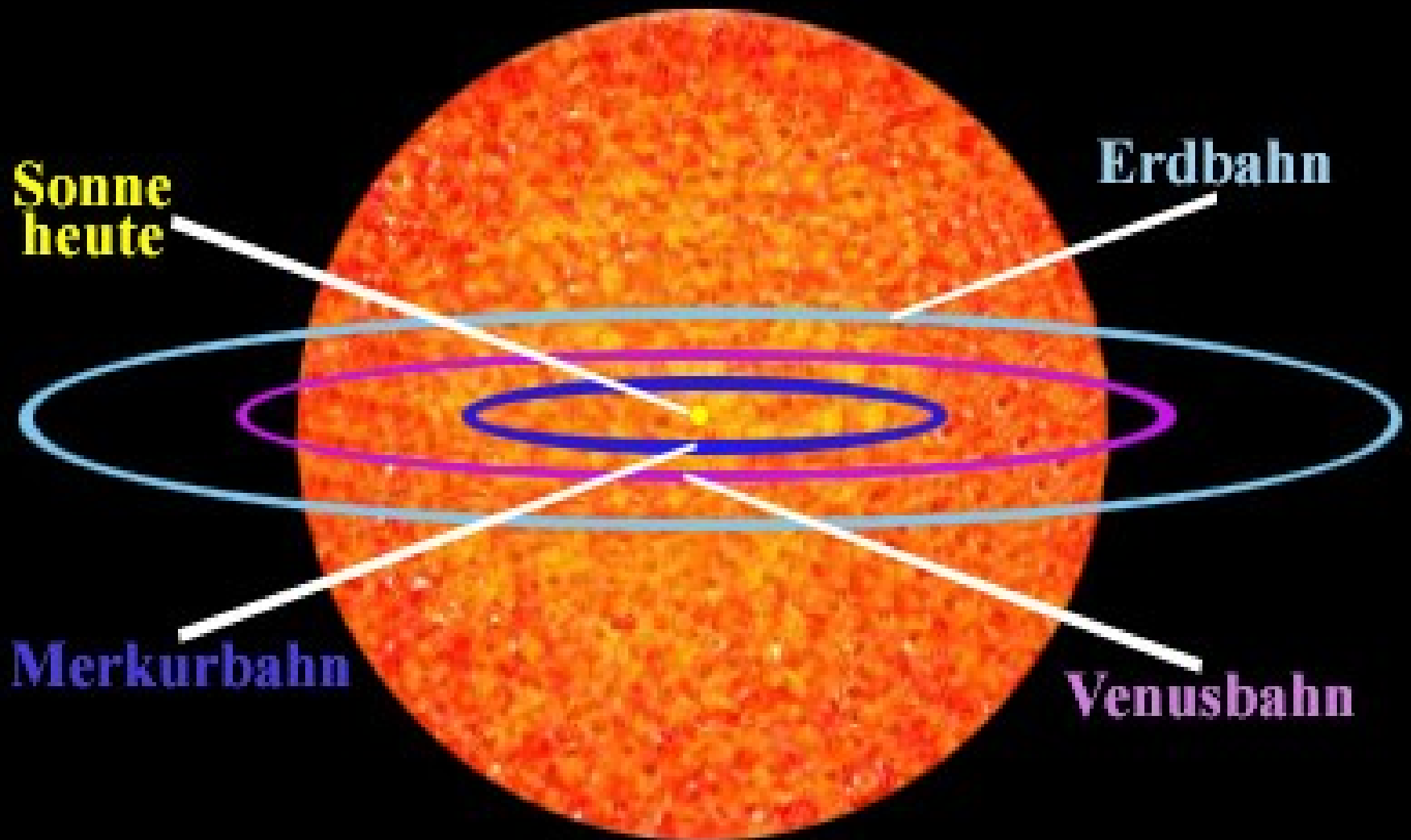
"Look, a white dwarf,
there are really diamonds
in the sky!"



Clay Gnipey 2013



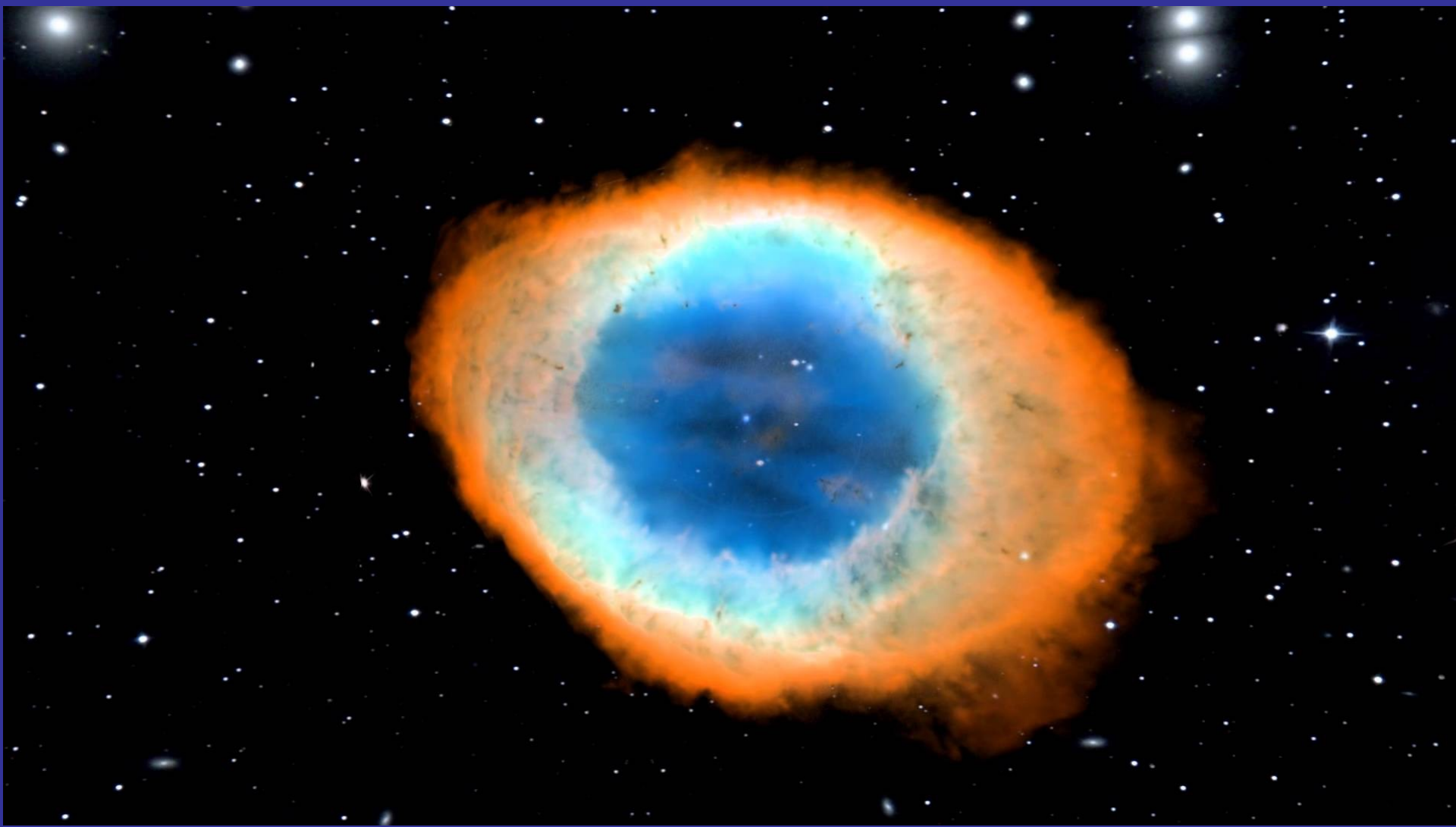
Entwicklung der Sonne vom *Gelben Zwerg* zum *Roten Riesen*





© Anglo-Australian Observatory

Helix-Nebel 700 LJ



Ringnebel 2300 LJ



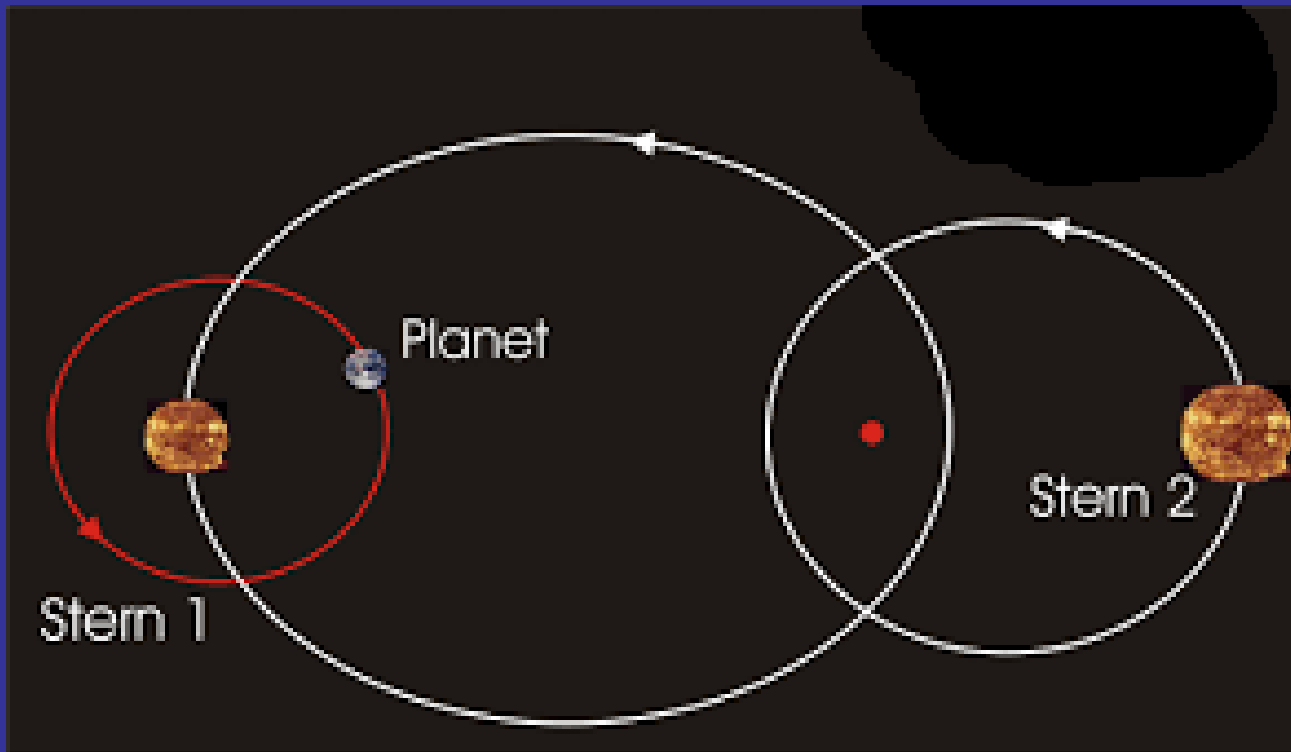
Katzenaugen-Nebel 3000 LJ



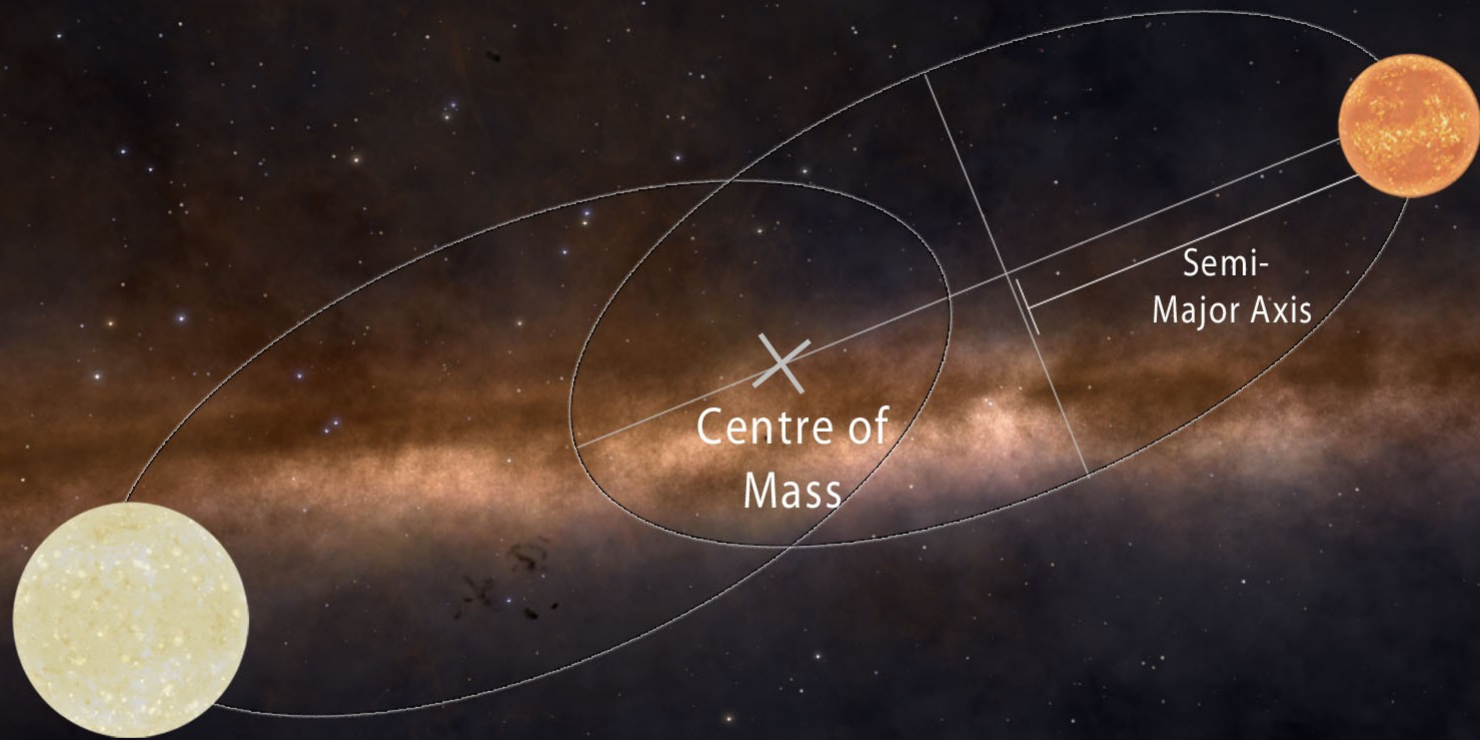
**Planetarer Nebel im Sternbild Winkelmaß 1000 LJ
mit zentralem Weißen Zwerg ($\varnothing \sim$ Erdradius)**

Doppelsternsysteme

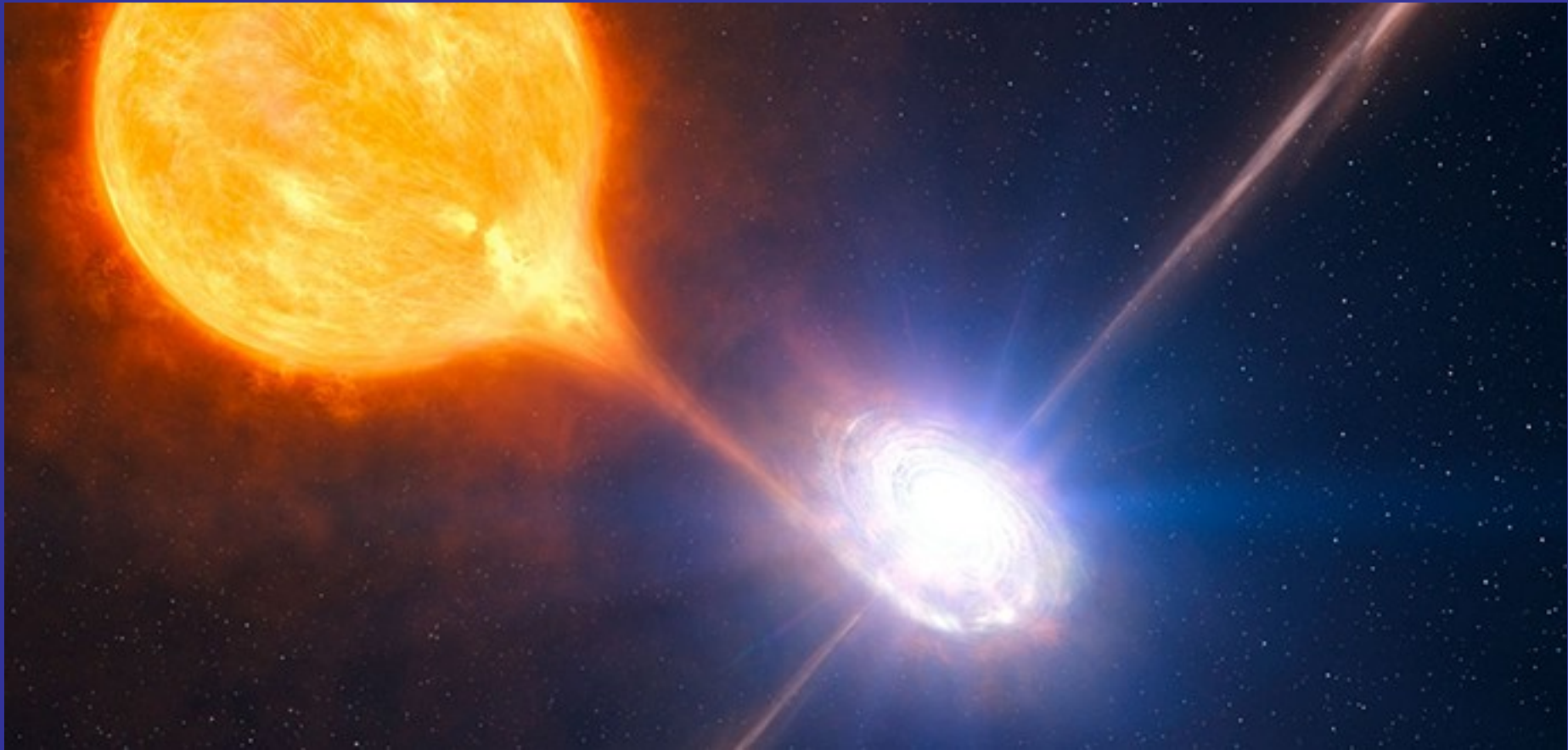
Es wird geschätzt, dass ca. 50% aller Sterne als Doppelsterne vorkommen.



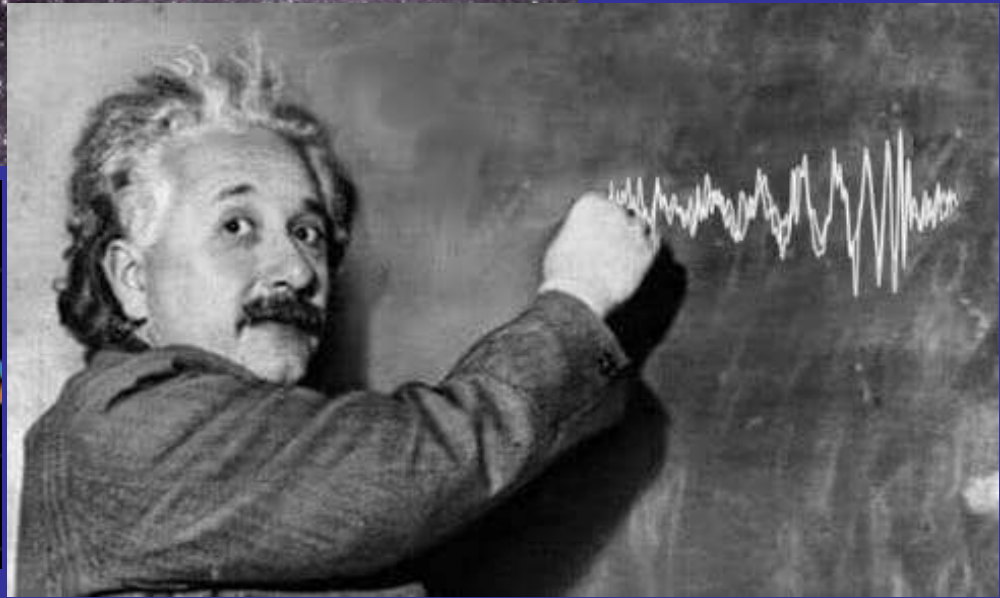
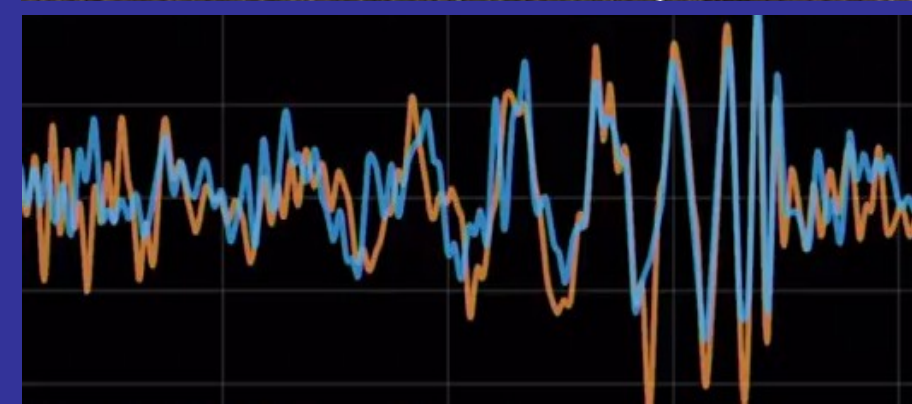
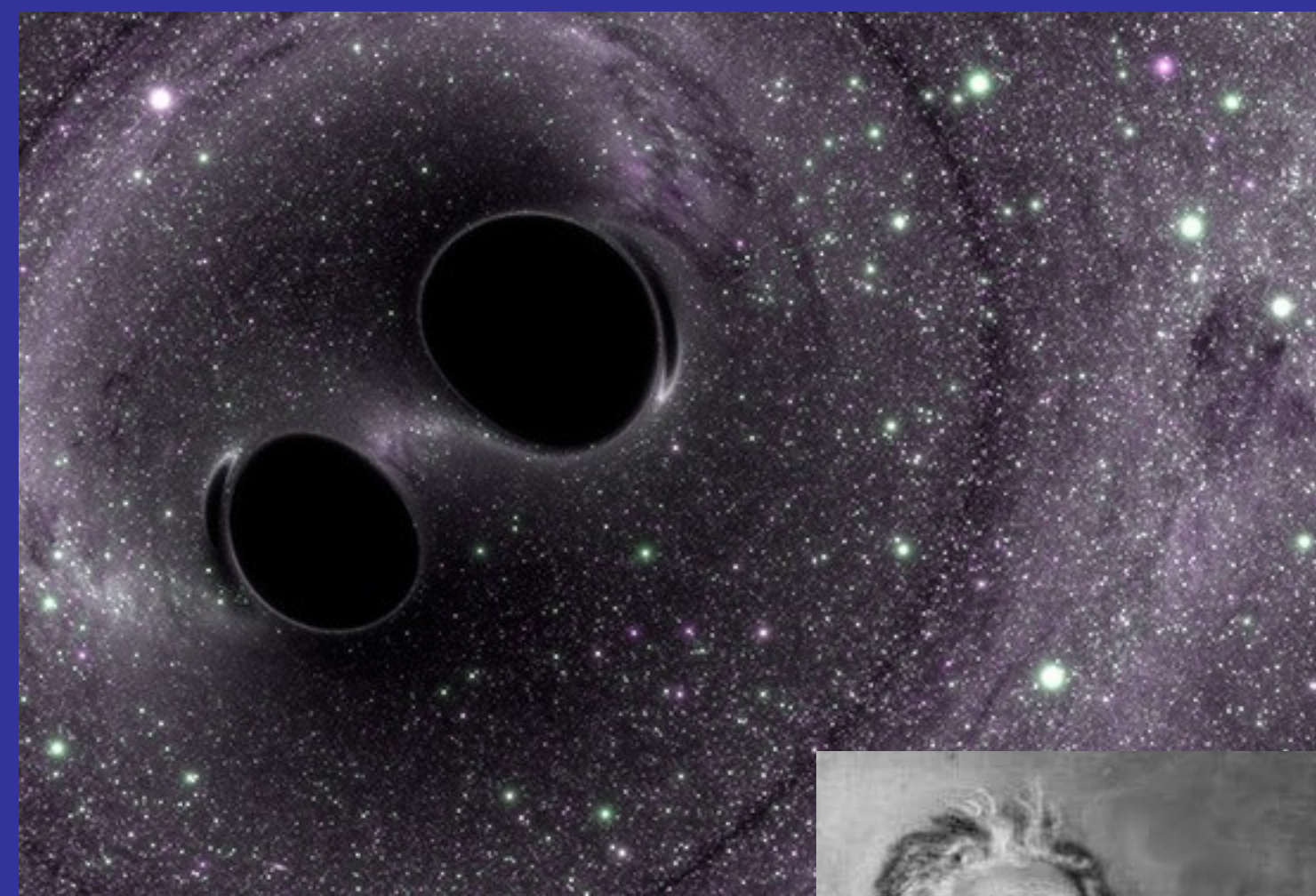
Zwei normale Sterne umkreisen ihren gemeinsamen Massenmittelpunkt.



Massentransfer und Jet-Bildung in einem Doppelsternsystem



LISA



**Plejaden, kein Mehrfachsternsystem, sondern ein
Sterncluster: Siebengestirn, Subaru: 7 oder 6 Sterne?**

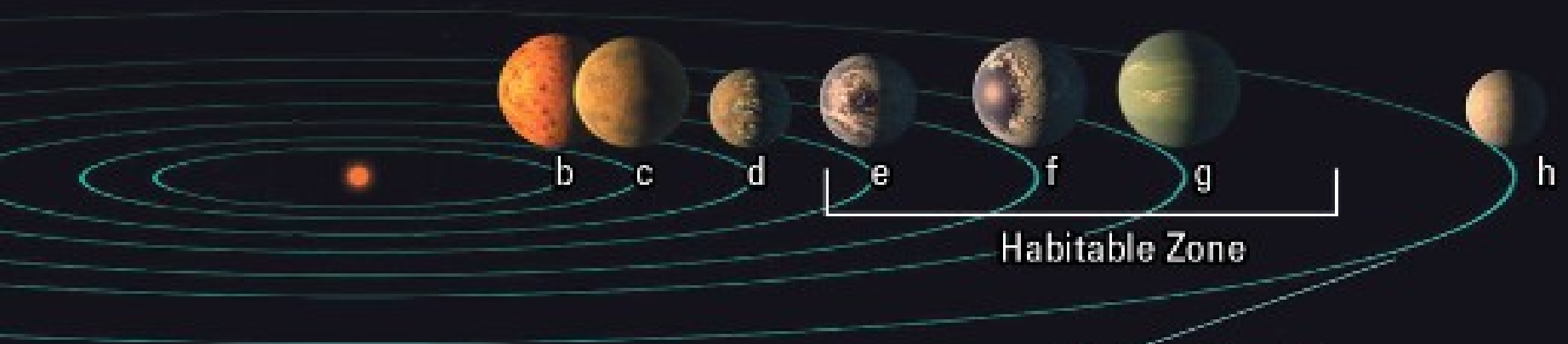


etwa 3000

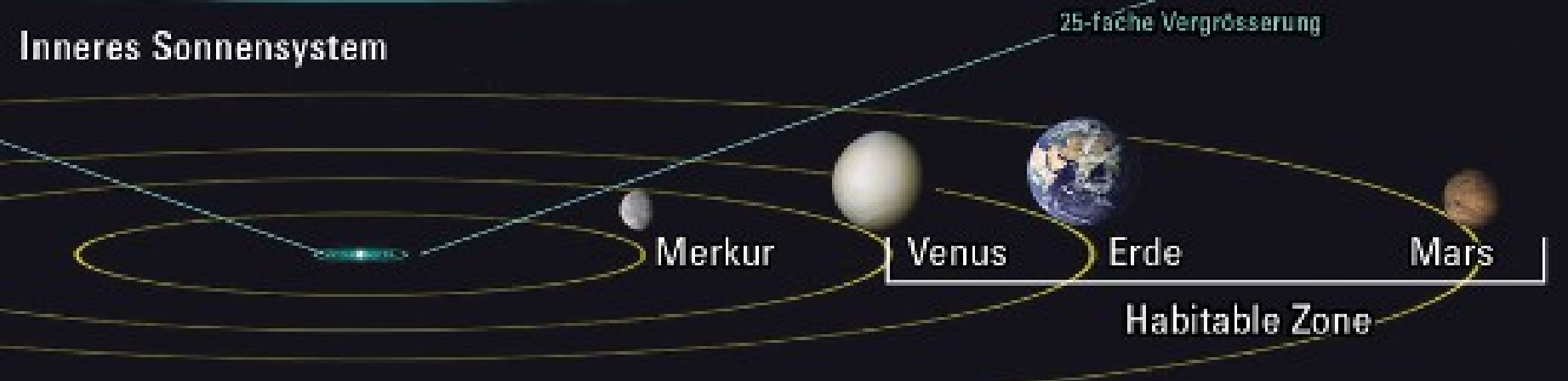


Himmelscheibe von Nebra

Trappist-1-System



Inneres Sonnensystem

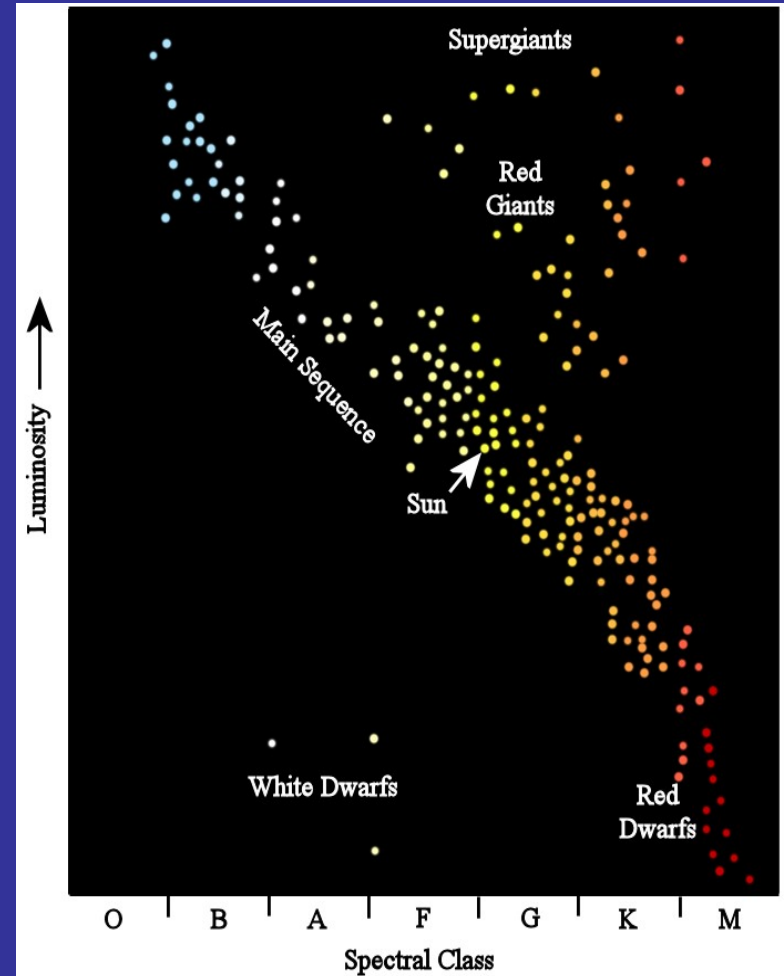


Trappist 1: sieben erdähnliche Planeten um einen roten Zwerg. 40 LJ Entfernung, moderate Temperaturen, aber ko-rotierende Planeten.

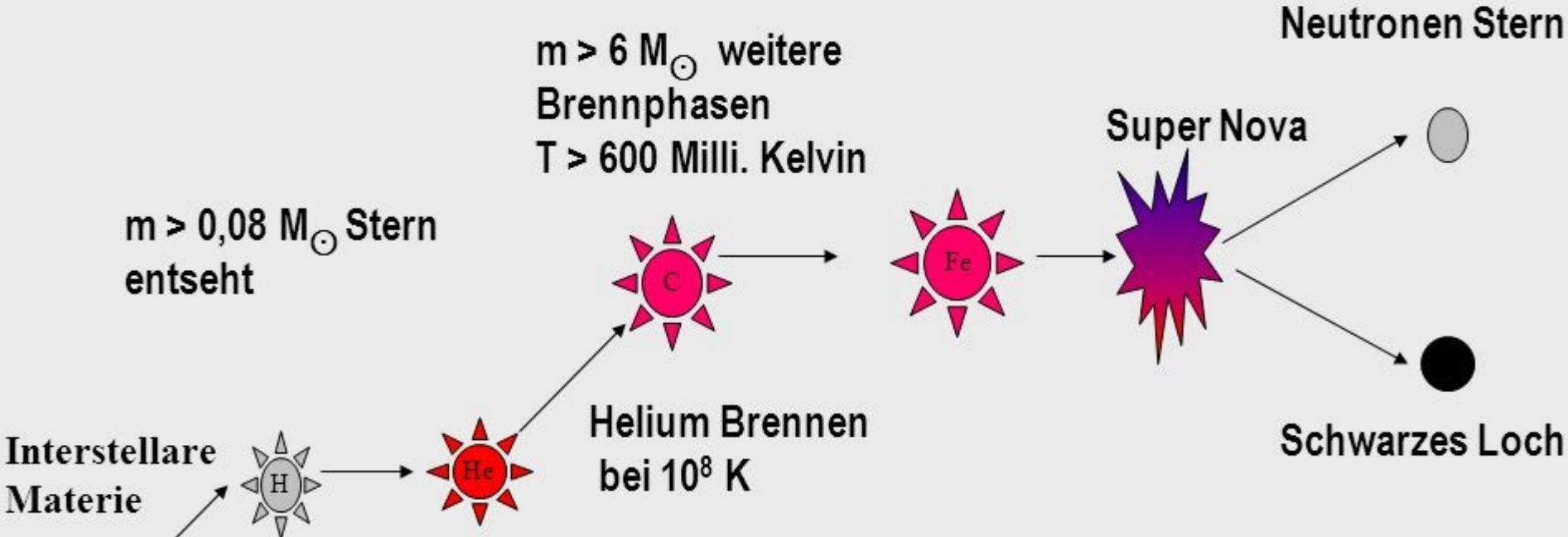
Supernovae

Supernovae sind das Schicksal von Sternen mit Massen größer als 9 Sonnenmassen.

Es betrifft hauptsächlich O und B Sterne.



Sternenleben im zeitlichen Verlauf, die Möglichkeiten: Supernova



Zwei Ausgänge nach Supernova;

- Neutronenstern für 1 M ist der Radius 10 km

- schwarzes Loch:

 - Schwarzschildradius für 1M bei 3 km

 - alles wird absorbiert

$m < 0.08 M_{\odot}$
Brauner Zwerg

**Ejekta mit einem
weißen Zwerg**

**Supernova-
Überrest**

**Cassiopeia-A
11 000LJ**

**kein planetarer
Nebel**



5 Lichtjahre

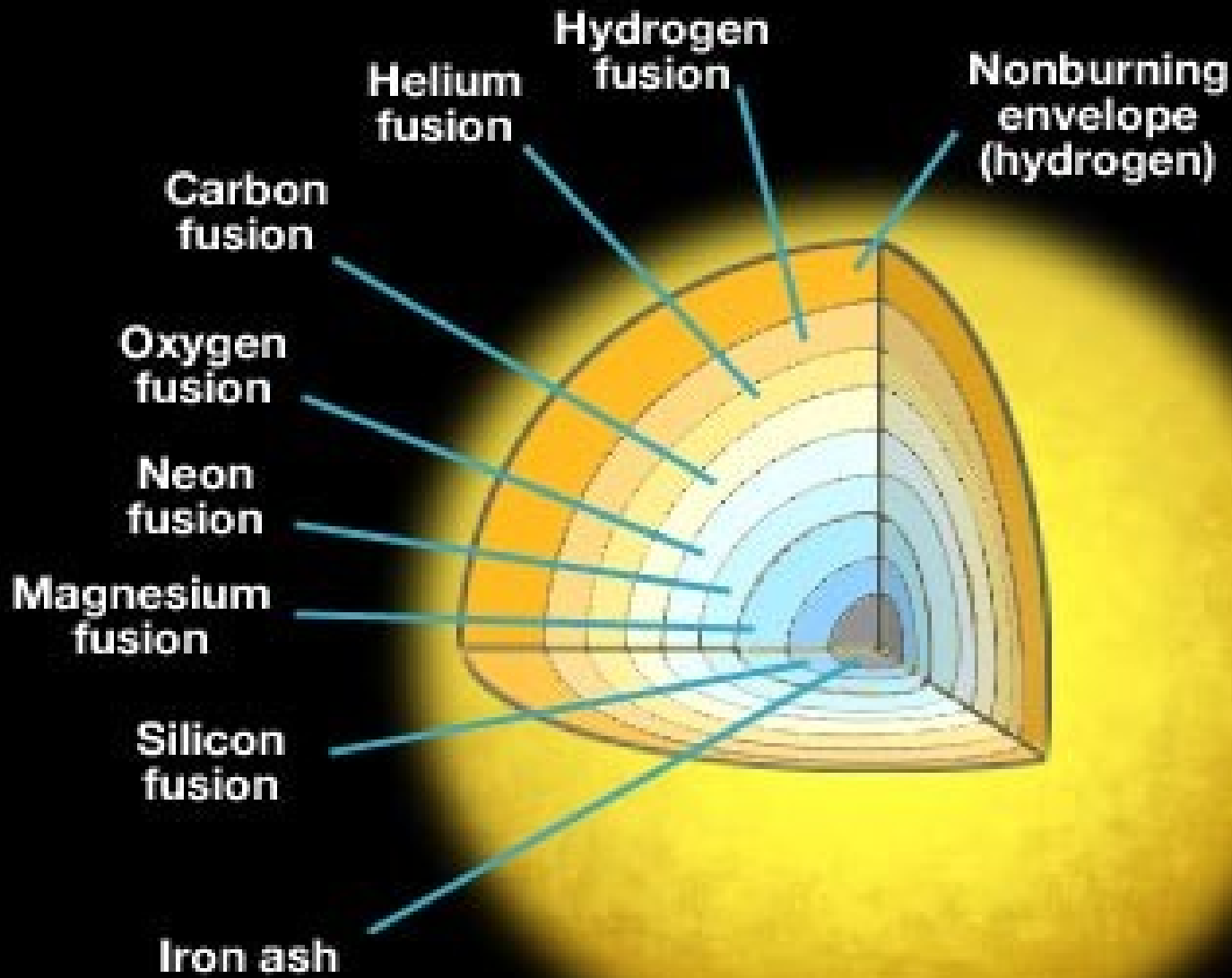
Sterne wie unsere Sonne stoßen in ihrer Endphase etwa 50 % ihrer Masse ab und eizieren sie ins interstellare Medium (ISM). Es bleibt ein Planetarer Nebel übrig, in dessen Zentrum ein weißer Zwerg sitzt.

Hauptreihensterne (hauptsächlich O und B Sterne) geben in einer Supernova-Explosion 95 % ihre Masse an das ISM ab. Übrig bleibt ein Neutronenstern oder ein Pulsar.

Sterne wie die Sonne verschmelzen Wasserstoff zu Helium. In der Endphase setzt Heliumbrennen ein und sie hinterlassen einen Weißen Zwerg, der hauptsächlich aus Kohlenstoff besteht (“Diamanten am Himmel”).

Sterne, die mehr Masse als die Sonne haben, setzen die Fusionsprozesse fort:

Kohlenstoffbrennen	bei 600 Millionen K
Neonbrennen	bei 1,2 Milliarden K
Sauerstoffbrennen	bei 1,5 Milliarden K
Siliziumbrennen	bei 3 Milliarden K



Bei diesen sukzessiven Fusionsprozessen entsteht ein kompakter Kern von ungefähr 2 Sonnenmassen mit einem Radius von 500 km.

Die Hülle hat sich dabei zu einem Durchmesser von 5 astronomischen Einheiten aufgebläht (“Supernova”).

Der Eisenkern ist so dicht, dass er durch die Eigengravitation kollabiert.

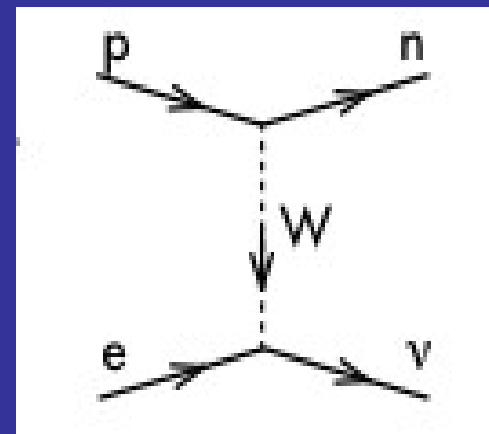
Die Eisenatome sind so dicht, dass sie sich in Bruchteilen einer Sekunde in Protonen und Neutronen 'zerlegen'.

Die Protonen und Neutronendichte ist so groß, dass die Elektronen in die Protonen hineingequetscht werden:



Dichte $\sim 10^{15}$ g/cm³

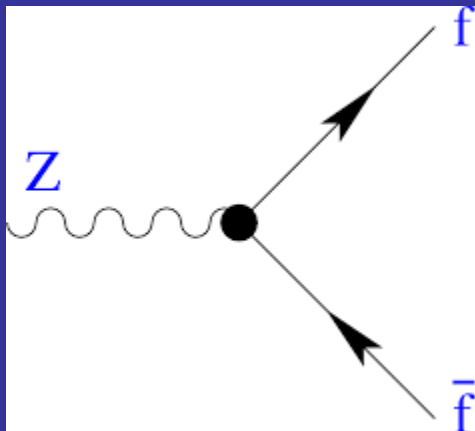
Magnetfeld $\sim 10^8$ Tesla



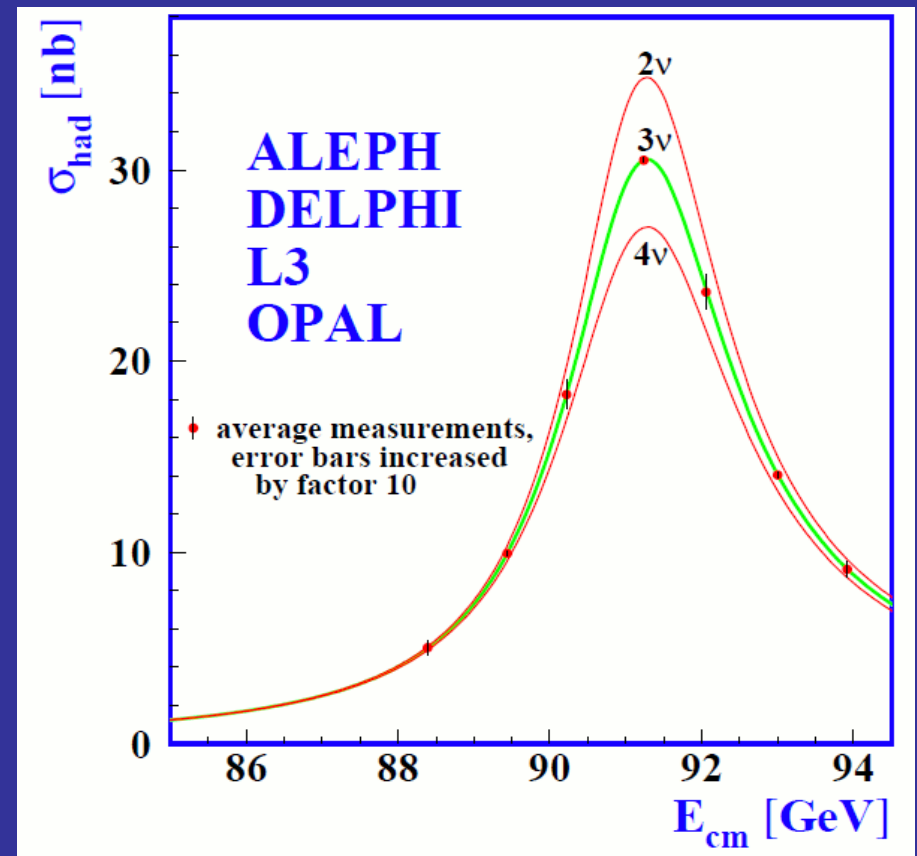
Bei diesem Elektron-Proton-Einfang entsteht eine Flut von Neutrinos, genauer von Elektron-Neutrinos: ca. 10^{58} bei einer Supernova wie SN 1987A.

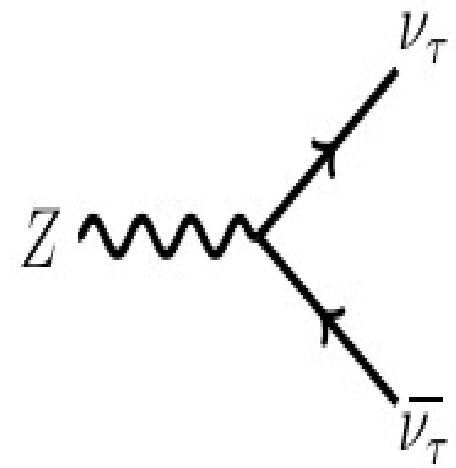
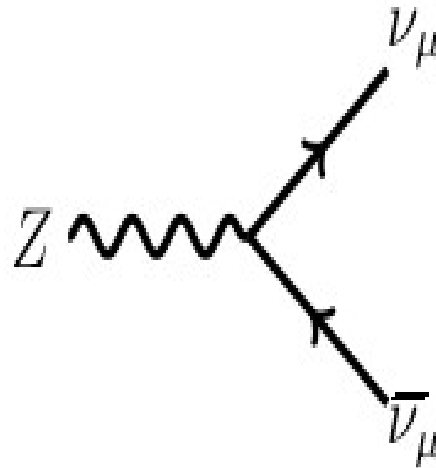
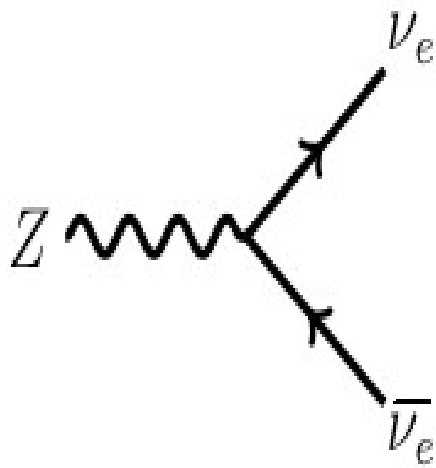
Diese Neutrinos üben einen enormen Druck auf den 'Eisenstern' aus, und es werden schließlich größere Mengen von Sternmaterie mit fast Lichtgeschwindigkeit abgestoßen.

Neben den Deleptonisations-Elektron-Neutrinos (aus der Proton-Elektron-Verschmelzung) entstehen bei der hohen Temperatur demokratisch auch noch alle anderen Neutrino-Flavours; und zwar sowohl Neutrinos als auch Antineutrinos:



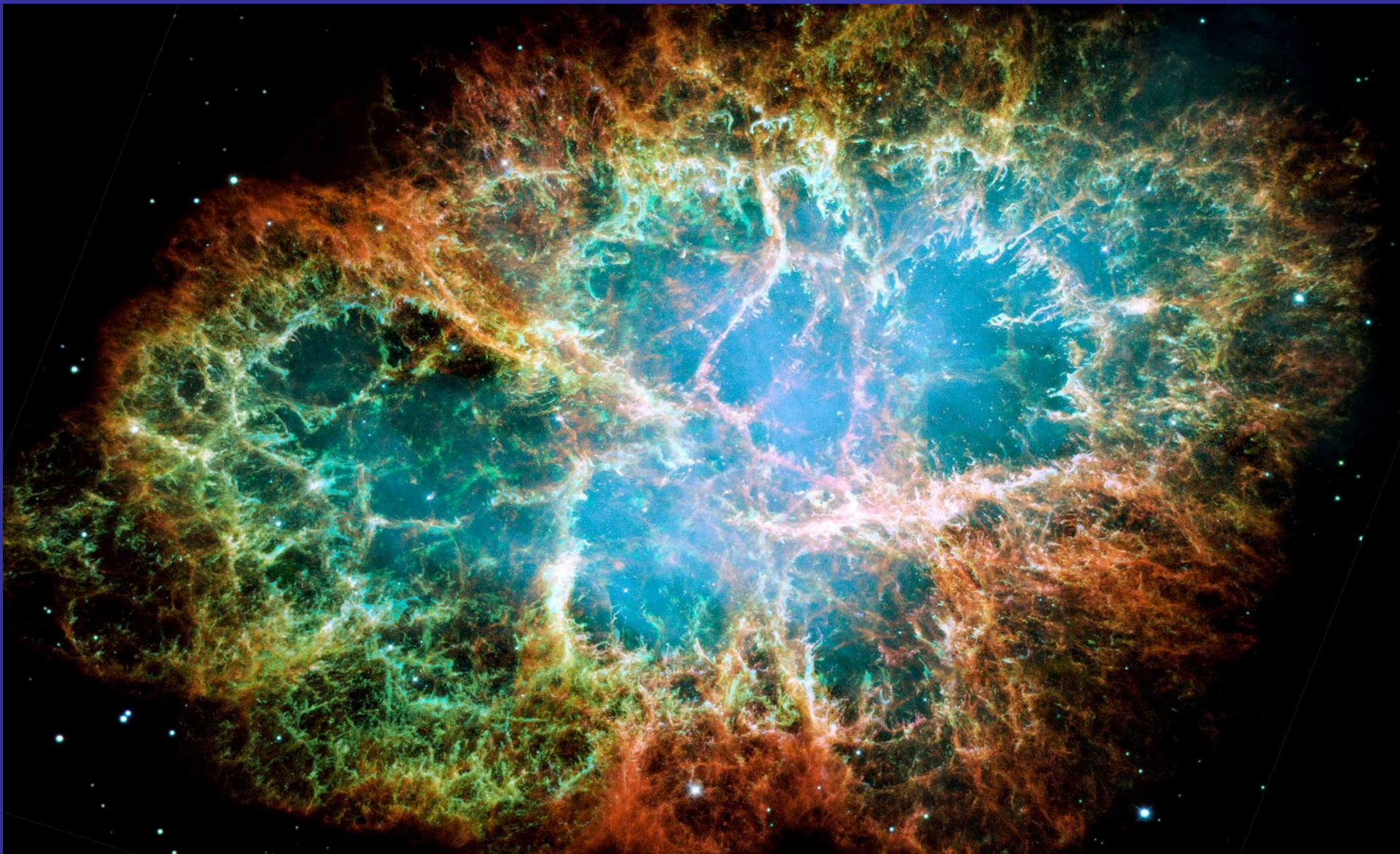
'f' steht für Fermion, also für alle Quarks und Leptonen, also auch für Neutrinos





Zerfälle des Z-Bosons in Neutrino-*paare*:
Die Detektoren für solare Neutrinos sind nur empfindlich für Elektron- und Elektron-Antineutrinos, weil die Energie für die Bildung der anderen Neutrino-Flavours nicht ausreicht.

Krebsnebel



Normal

Crab Nebula

Geminga pulsar

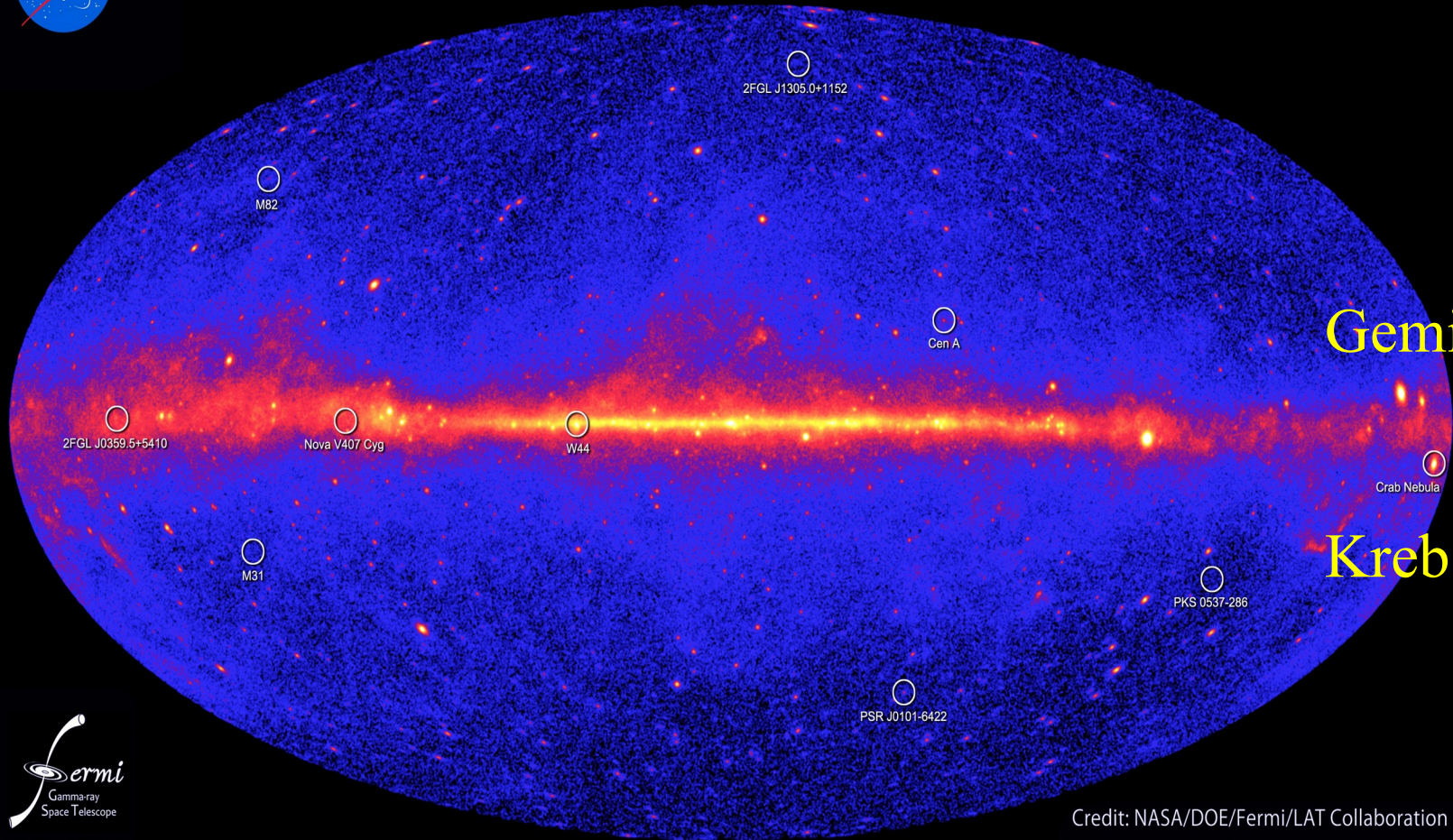
Flare State

April 2011

Gamma-Ausbruch vom Pulsar im Krebsnebel

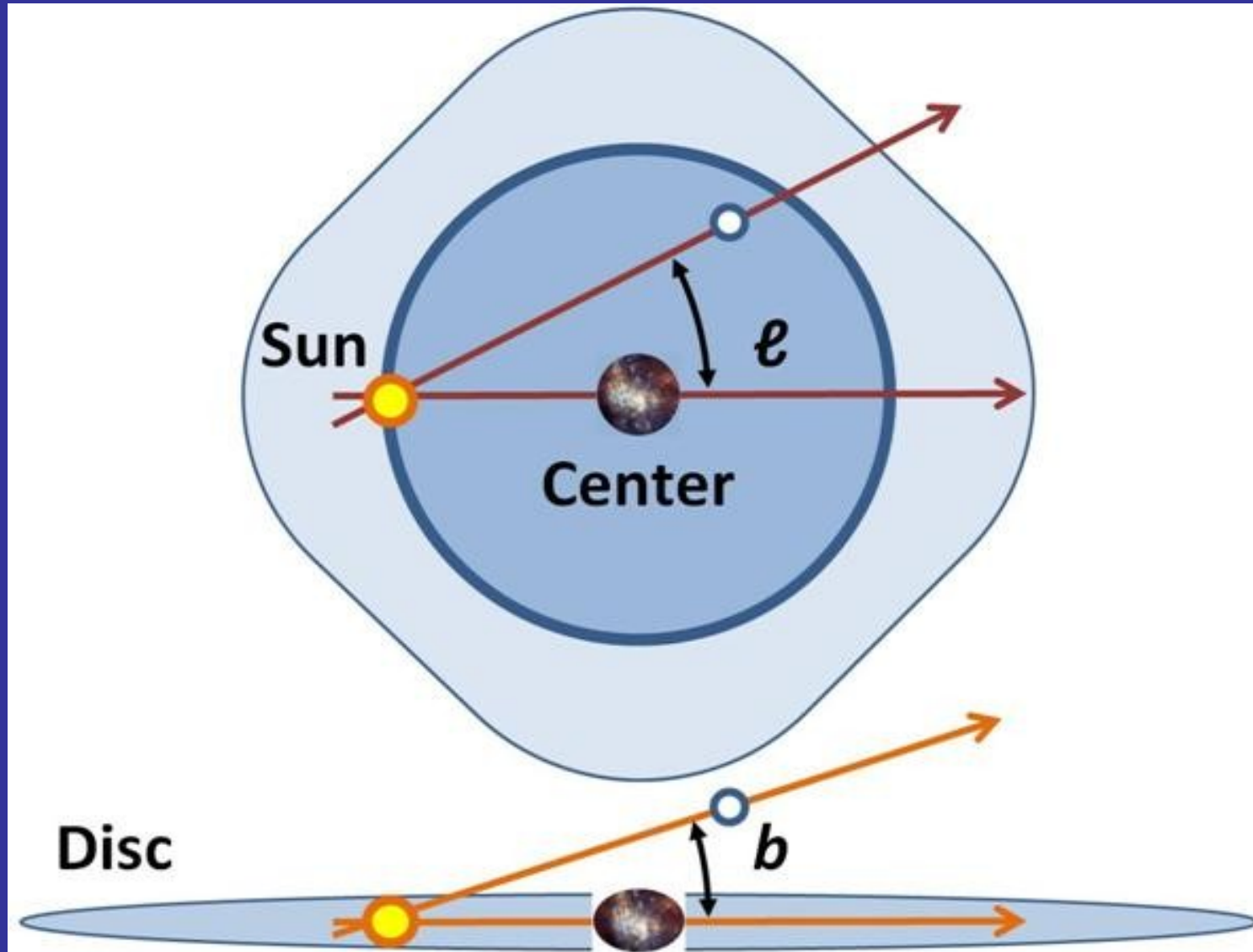


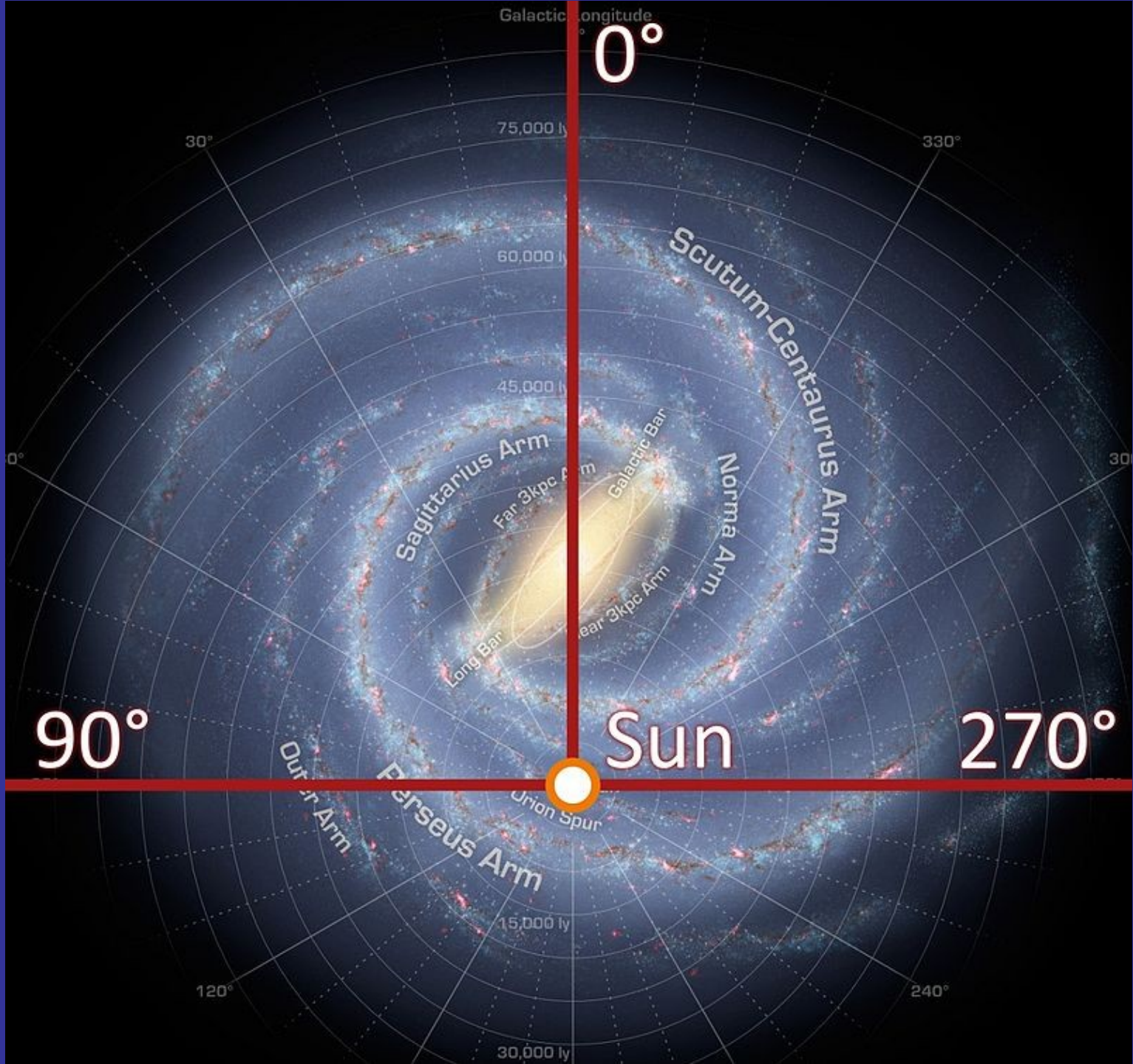
Fermi two-year all-sky map



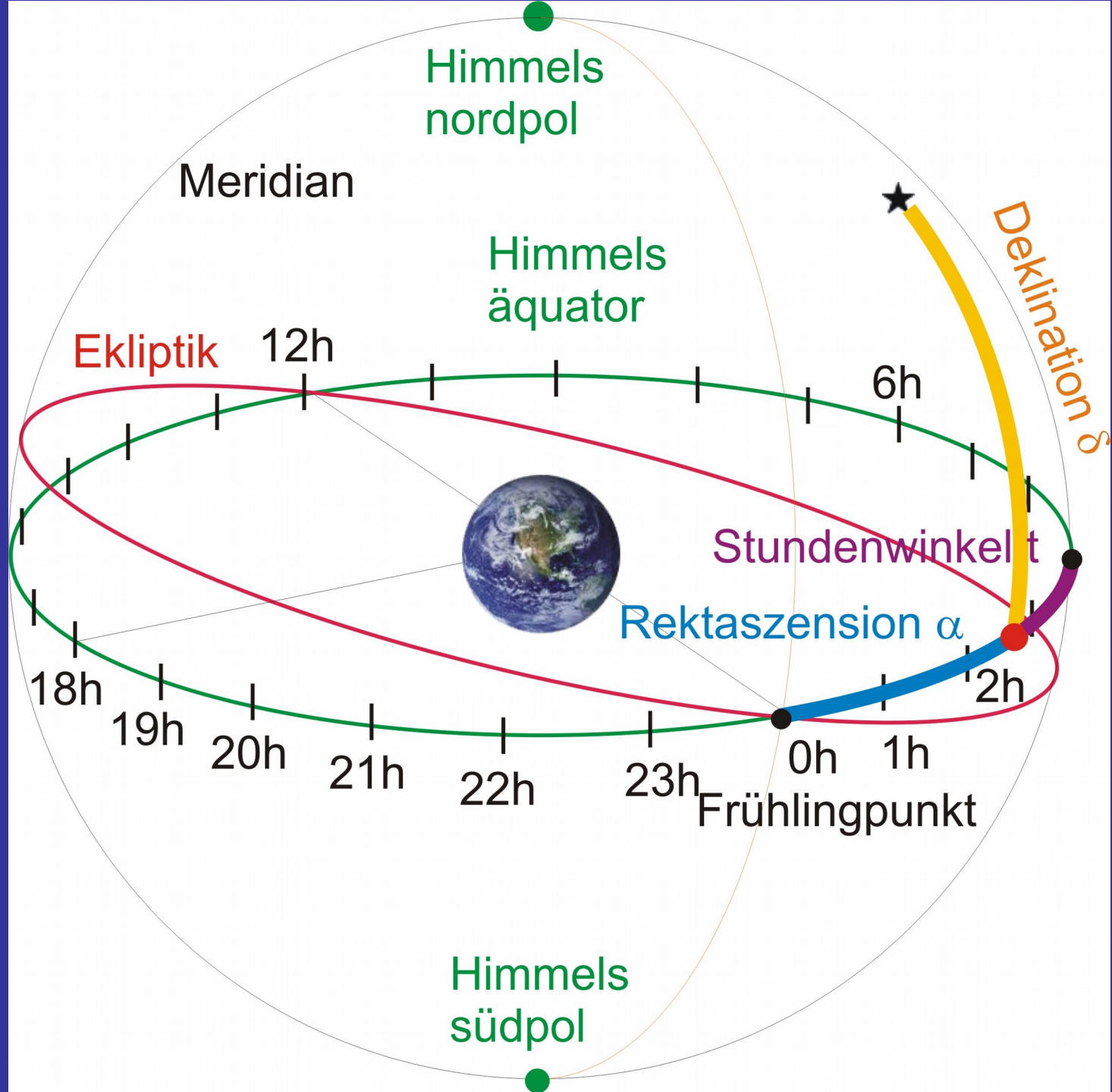
Credit: NASA/DOE/Fermi/LAT Collaboration

Galaktisches Koordinatensystem





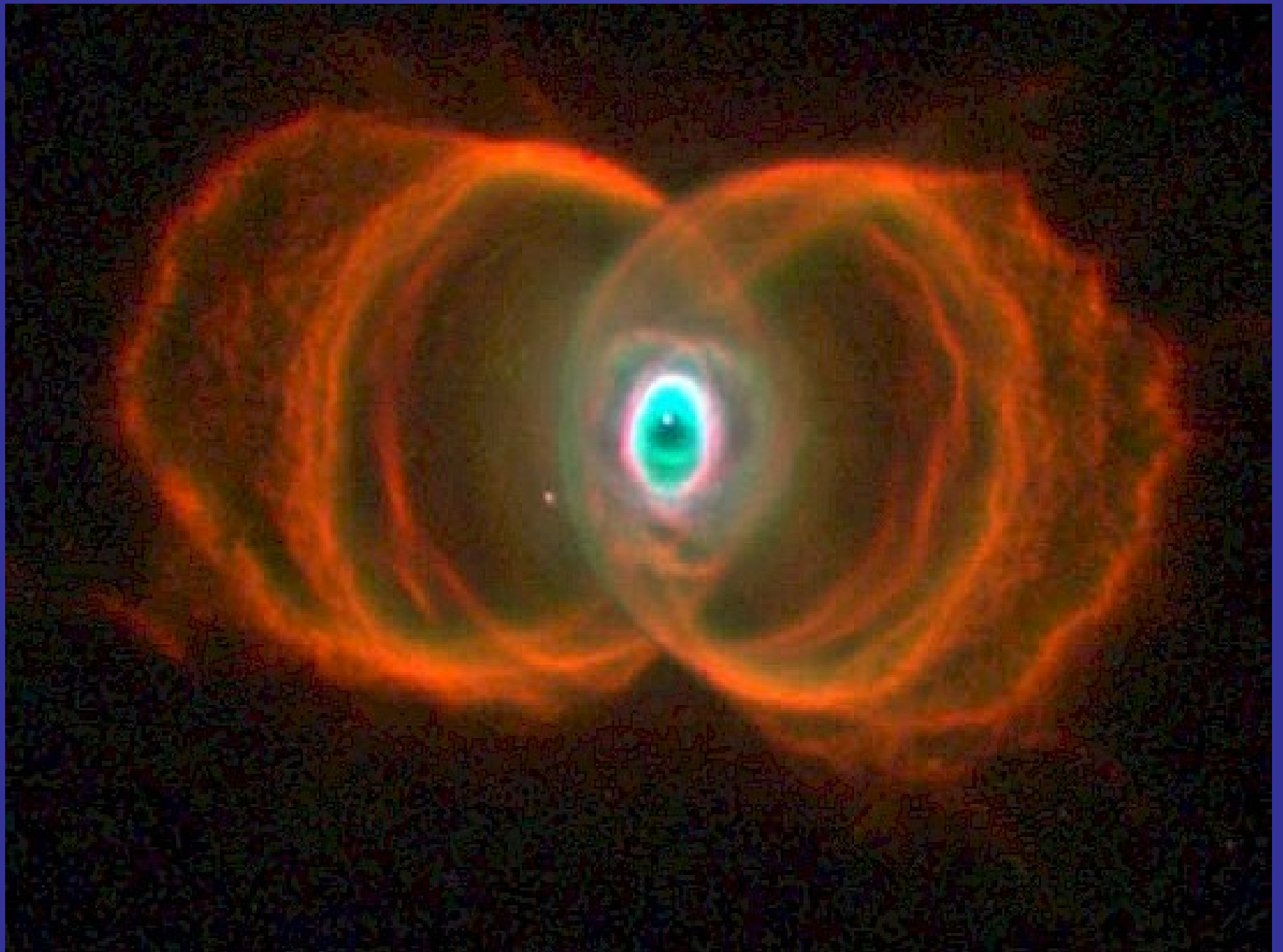
Astronomisches Koordinatensystem



SN 1987A



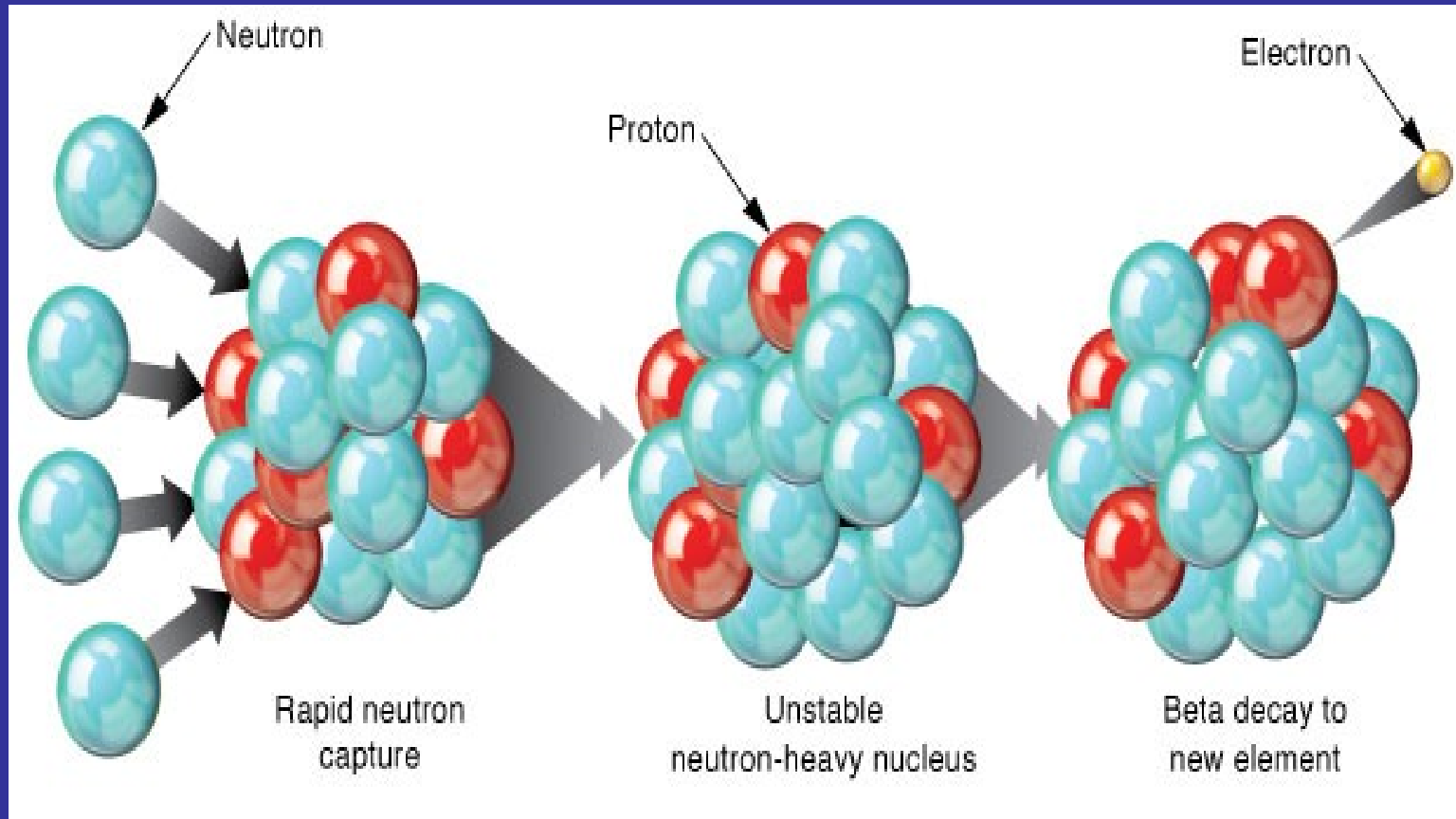
© Anglo-Australian Observatory



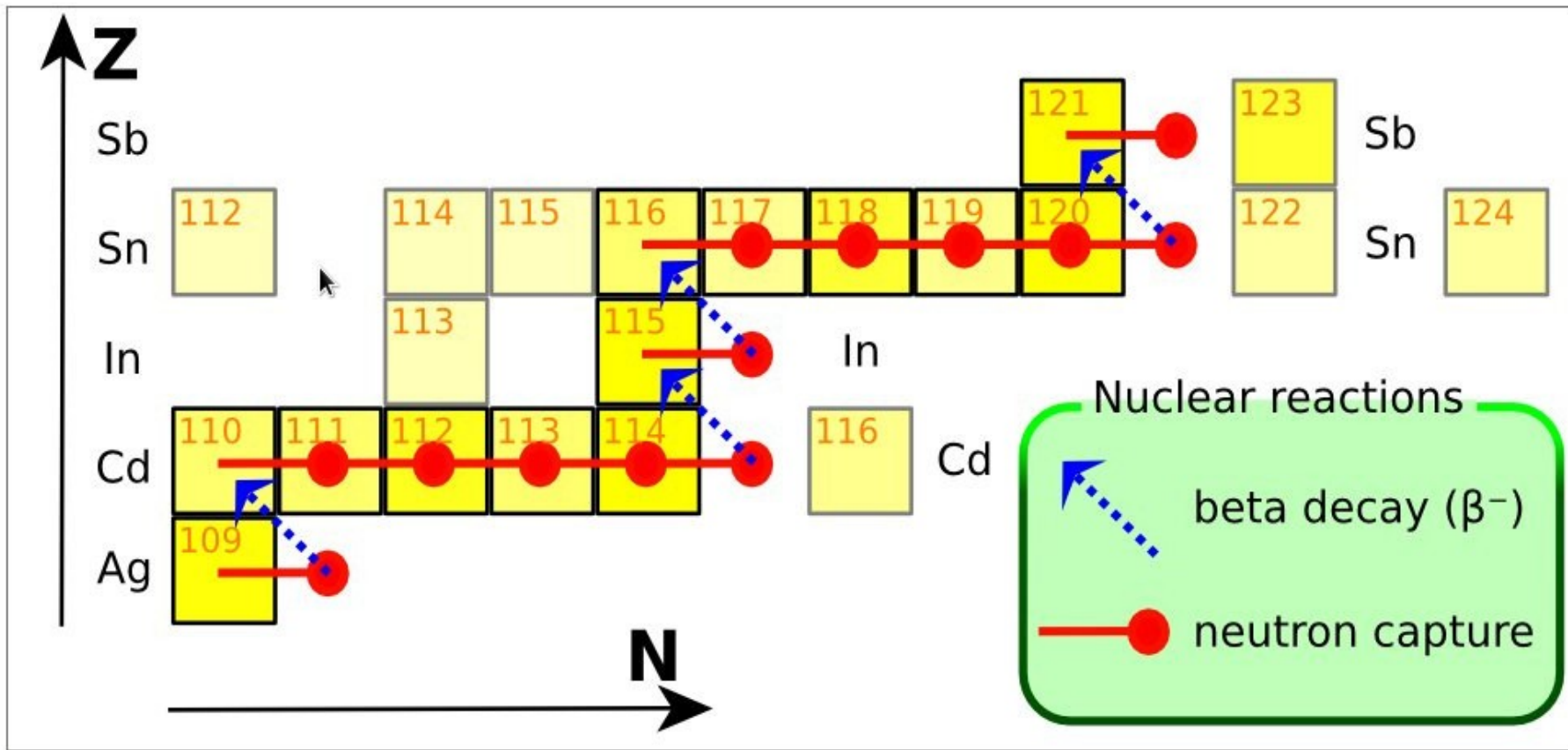
Nach diesem Ausbruch verbleibt ein Neutronenstern (wenn er rotiert: ein Pulsar). Wenn die Masse des Reststerns größer als 1,4 Sonnenmassen ist, kollabiert er zu einem Schwarzen Loch.

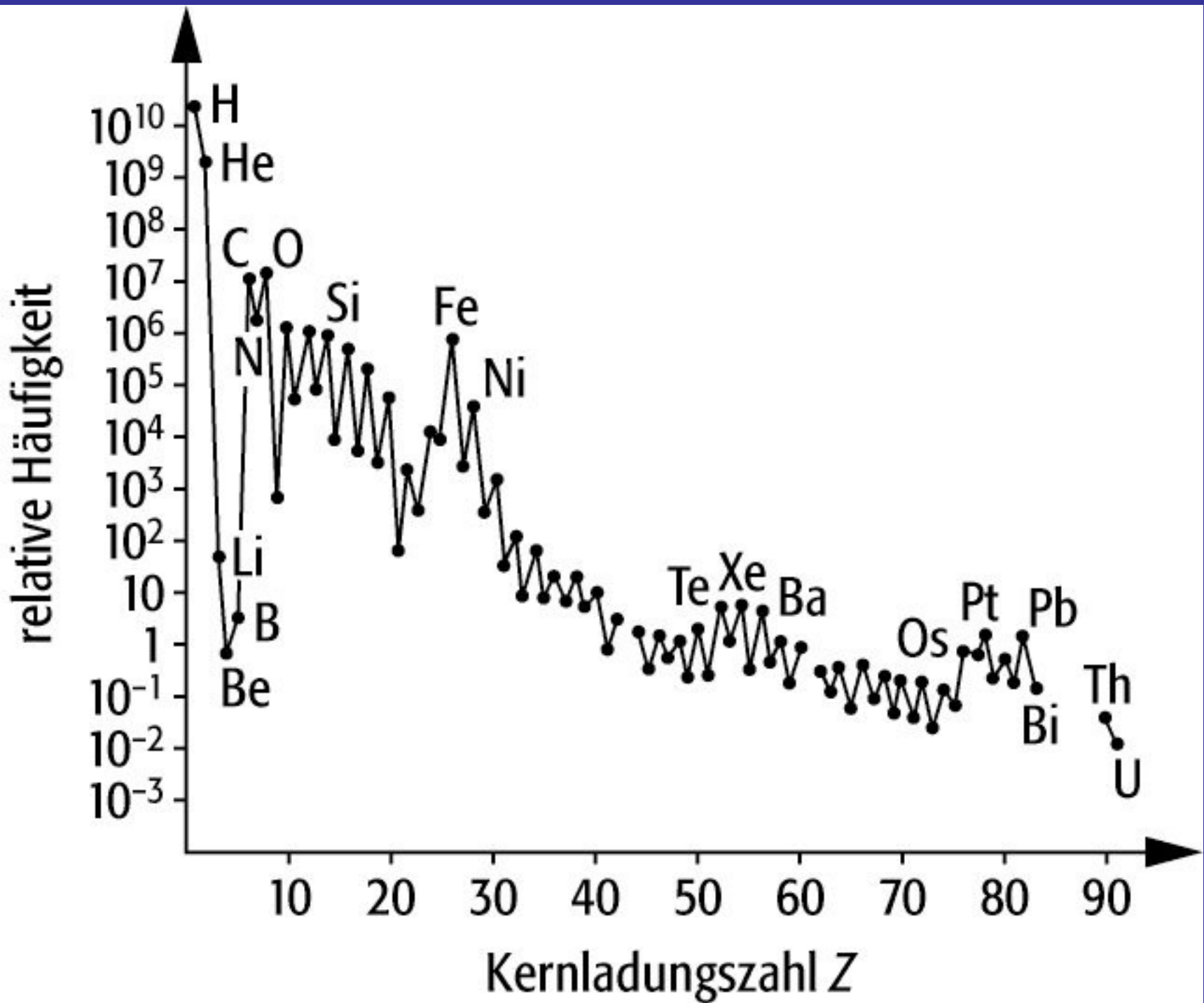
Der Neutronenstern emittiert keine Strahlung. In der expandierenden Hülle des Sternes werden schwere Elemente durch Neutronenanlagerung synthetisiert.

Bildung schwerer Elemente in Supernovae

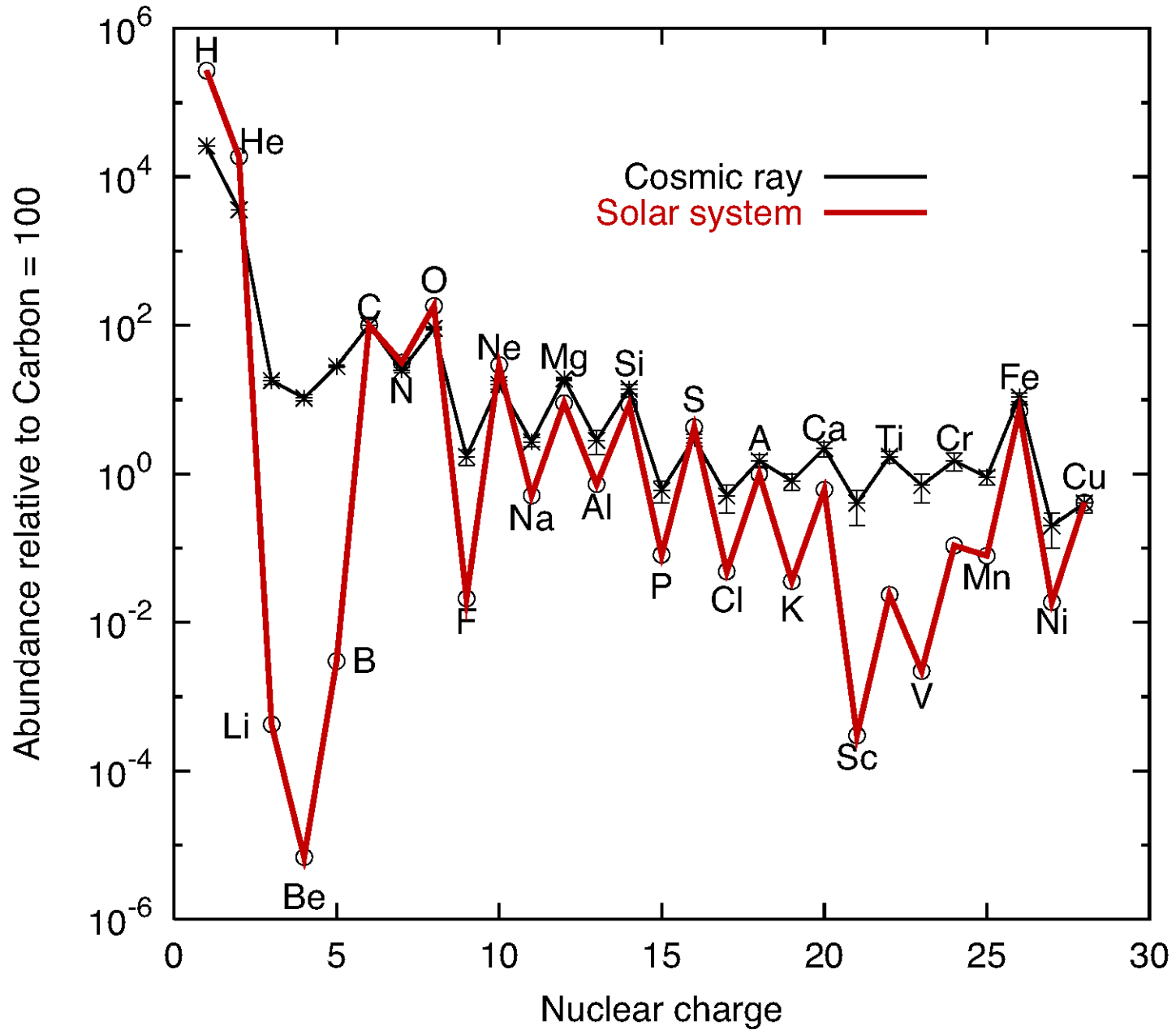


Beispiele für die Bildung schwerer Elemente in der Astrophysik





Nuclear abundance: cosmic rays compared to solar system

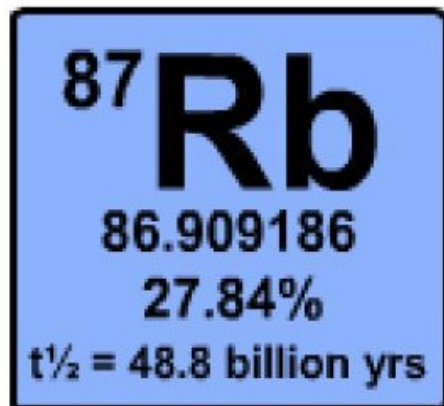


Wir sind tatsächlich nicht nur aus Sternenstaub gemacht, sondern enthalten auch die sämtlichen langlebigen radioaktiven Abfälle, die dabei entstehen,

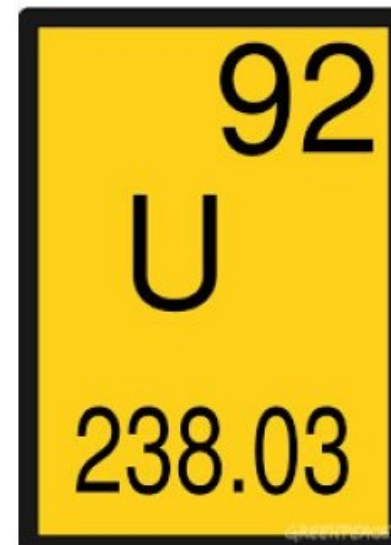
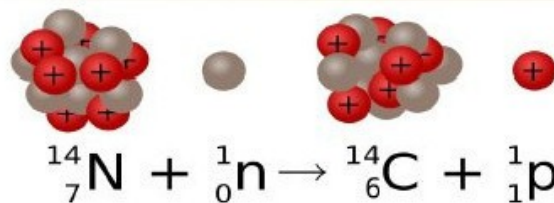
z.B. Rubidium 87, Kalium 40 und Uran 238

Mit einer aktuellen Prise von Kohlenstoff 14:

Insgesamt 9000 Becquerel pro Person!



Radioactive



Primordiale Elemente

..... ^{190}Pt , ^{147}Sm , ^{138}La , ^{87}Rb ,
 ^{187}Re , ^{176}Lu , ^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K ,
 ^{235}U , ^{244}Pu , ^{146}Sm .

alle Elemente, deren Halbwertszeit größer als 50 Millionen Jahre ist, die man also noch mit empfindlichen Methoden auf der Erde nachweisen kann.

Aus der von der Supernova ejizierten Hülle können neue Sterne, Planeten, Menschen, ... entstehen. Die von der Supernova erzeugten Elemente braucht man für

Sauerstoff für Wasser

Kohlenstoff für Proteine und Stoffwechsel

Calzium für Knochen und Zähne

Eisen für Hämoglobin

Silizium für Haut, Haar und Nägel

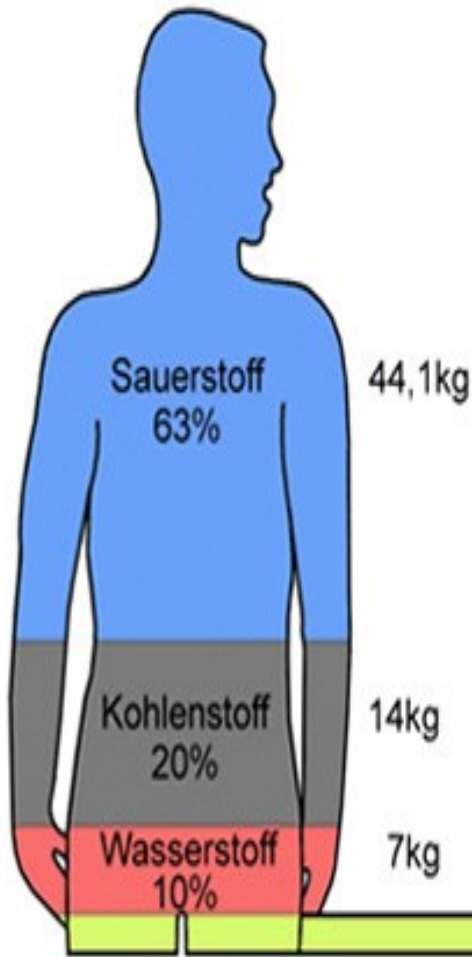
Magnesium für Gehirn, Niere, Herz

Iod für Schilddrüse

Platin für Herzschrittmacher ,

Supernova- 'Asche' im menschlichen Körper

Anteile (ca.) in Prozent und in Masse bei 70kg Körpergewicht



© Thomas Seilnacht

Anteil	in %	Masse
Stickstoff	3	2,1kg
Calcium	1,5	1,05kg
Phosphor	1	0,7kg
Kalium	0,25	175g
Schwefel	0,2	140g
Chlor	0,1	70g
Natrium	0,1	70g
Magnesium	0,04	28g
Eisen	0,004	2,8g
Zink	0,002	1,4g
Kupfer	0,0005	0,35g
Mangan	0,0002	0,14g
Iod	0,00004	0,03g
+ weitere (B, Co, Se, Cr, Mo,...)		

Helligkeit von Sternen

Werden für zwei Sterne die Strahlungsströme s_1 und s_2 gemessen, so haben die scheinbaren Helligkeiten eine Differenz von

$$m_1 - m_2 = 2,5^m \lg(s_1/s_2)$$

Ein Helligkeitsunterschied von 1^m bedeutet also, dass sich die Strahlungsströme um $10^{0,4} = 2,512$ unterscheiden. Zur Feststellung des Nullpunkts der Skala ordnet man dem Polarstern eine Helligkeit von $2,12^m$ zu.

Helligkeit von Sternen

Also, nochmal

$$m_1 - m_2 = 2,5^m \lg(s_1/s_2)$$

Ein Helligkeitsunterschied von 1^m bedeutet also, dass sich die Strahlungsströme um $10^{0,4} = 2,512$ unterscheiden. Einer Differenz von 5^m entspricht dann ein Verhältnis im Strahlungsstrom von $2,512^5 \approx 100$; oder einfacher $10^2 = 100$.

In dieser (verrückten) Skala hat die Sonne $m = -27,73$, der Mond $m = -12,73$, die Venus $m = -4,67$; Hubble kann bis zu $m = 32$ 'sehen'.

Absolute Größenklasse M

$$M = m - 5 (\lg d - 1) = m - 5 (\lg d/10 \text{ pc})$$

M ist die absolute Helligkeit und
d der Abstand in parsec,


Beispiel:

Rigel hat $m = 0,12$ und $d = 860 \text{ LJ}$

$$\text{Also } M = 0,12 - 5 (\lg 860/3,26 - 1) \approx -7$$

Die absolute Helligkeit einer Supernova
vom Typ Ia ist $M = -17$

Supernovae vom Typ Ia sind alle gleich
hell ('Standardkerzen')



"Die Sterne sind romantisch, aber ich bevorzuge unsere Standardkerze!"

Claus Gumpen 2013

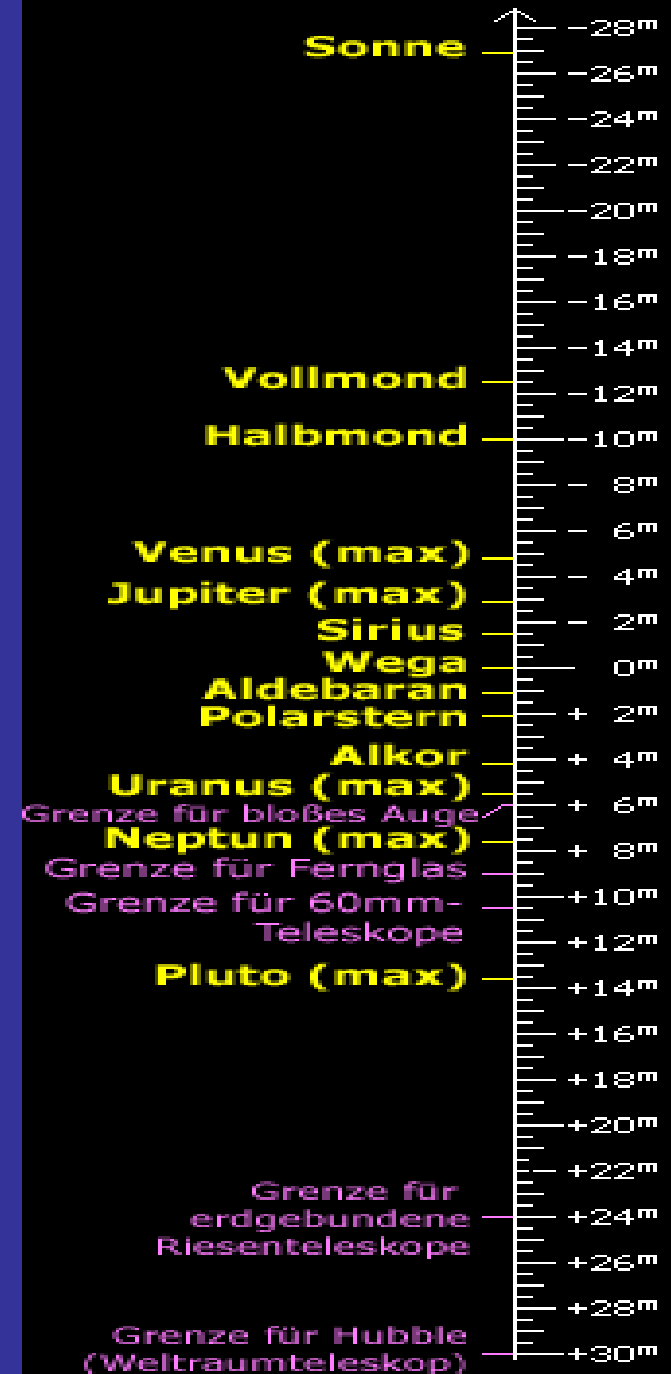
Welche Magnitudo hat eine
Supernova bei einem
bestimmten Abstand?

bei 1 Mpc $m = 8$

bei 1 kpc $m = -7$
(heller als die Venus)

bei 100 pc $m = -12$
(so hell wie der Mond)

Helligkeitsskala



Neutronensterne und Pulsare

Dichte: 1 Milliarde Tonnen pro cm^3

Durchmesser: 10 bis 20 km

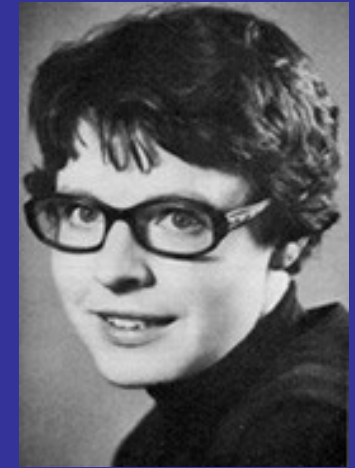
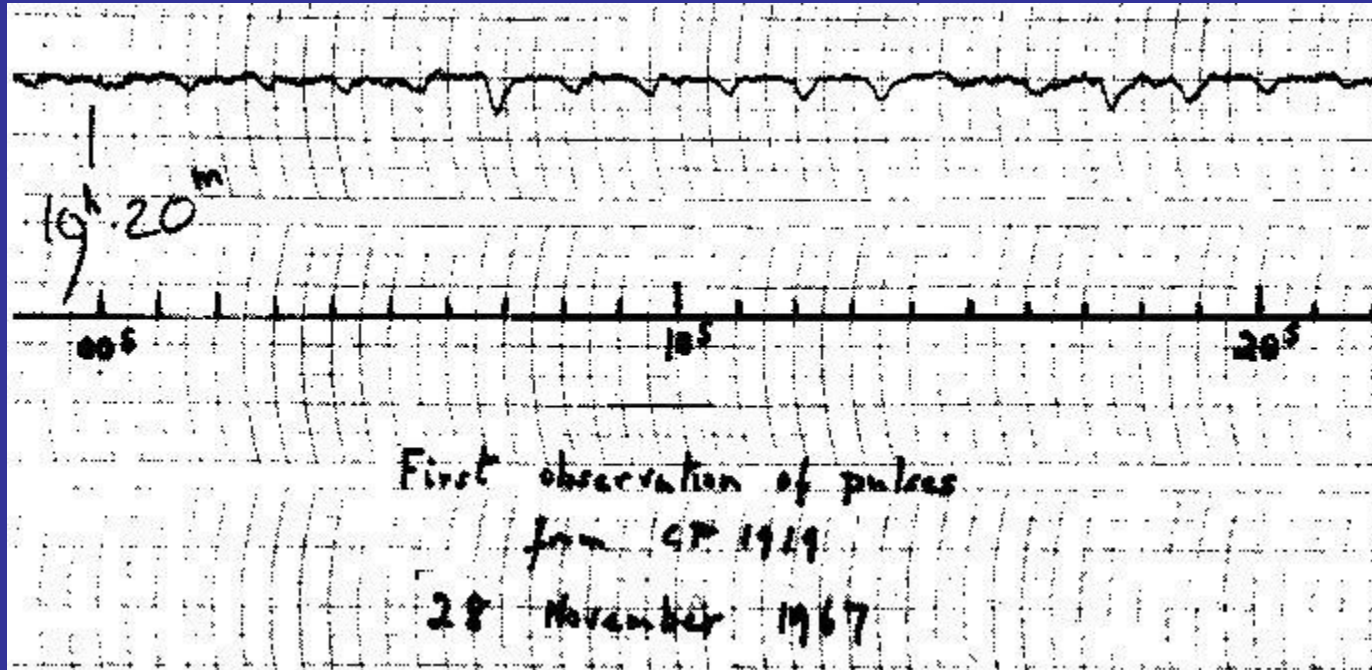
Masse: 1,4 bis 3 Sonnenmassen

**Gravitationsfeld: 2×10^{11} so stark wie das
Erdfeld**

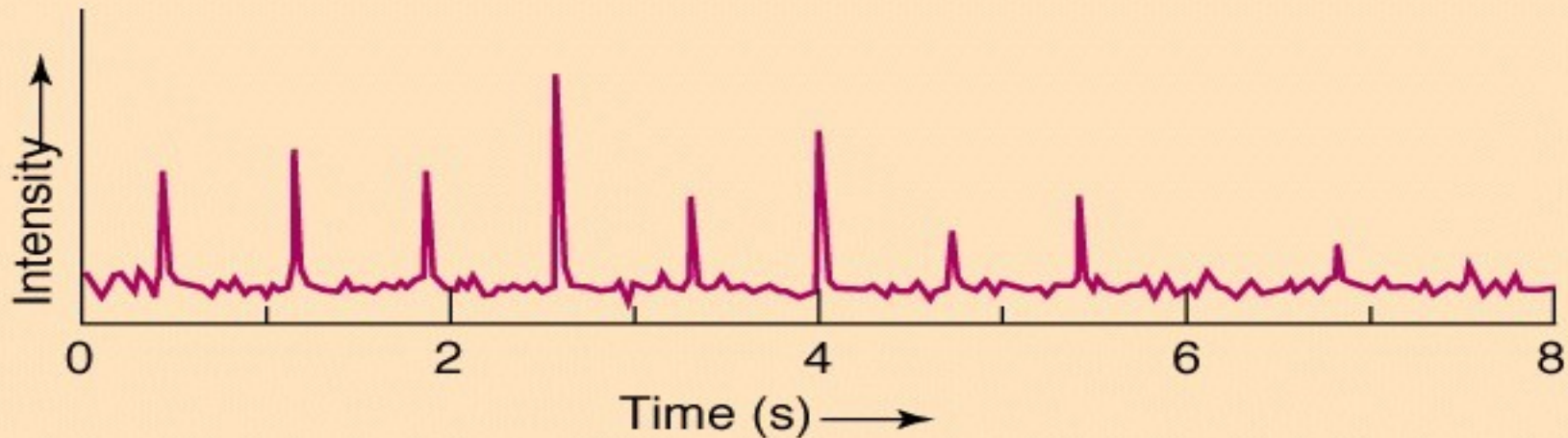
Temperatur: anfänglich 100 Milliarden K

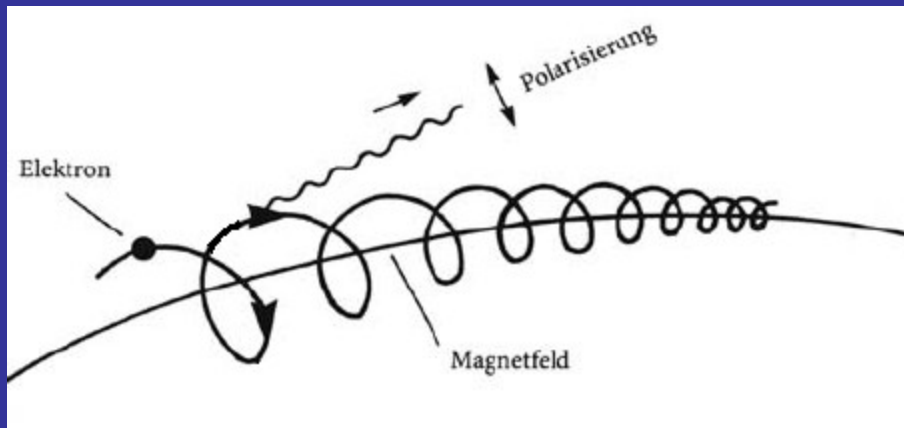
Magnetfeld: bis 10^{11} Tesla

Pulsar-Entdeckung: Jocelyn Bell 1967



1,337 s





Synchrotron-Strahlung

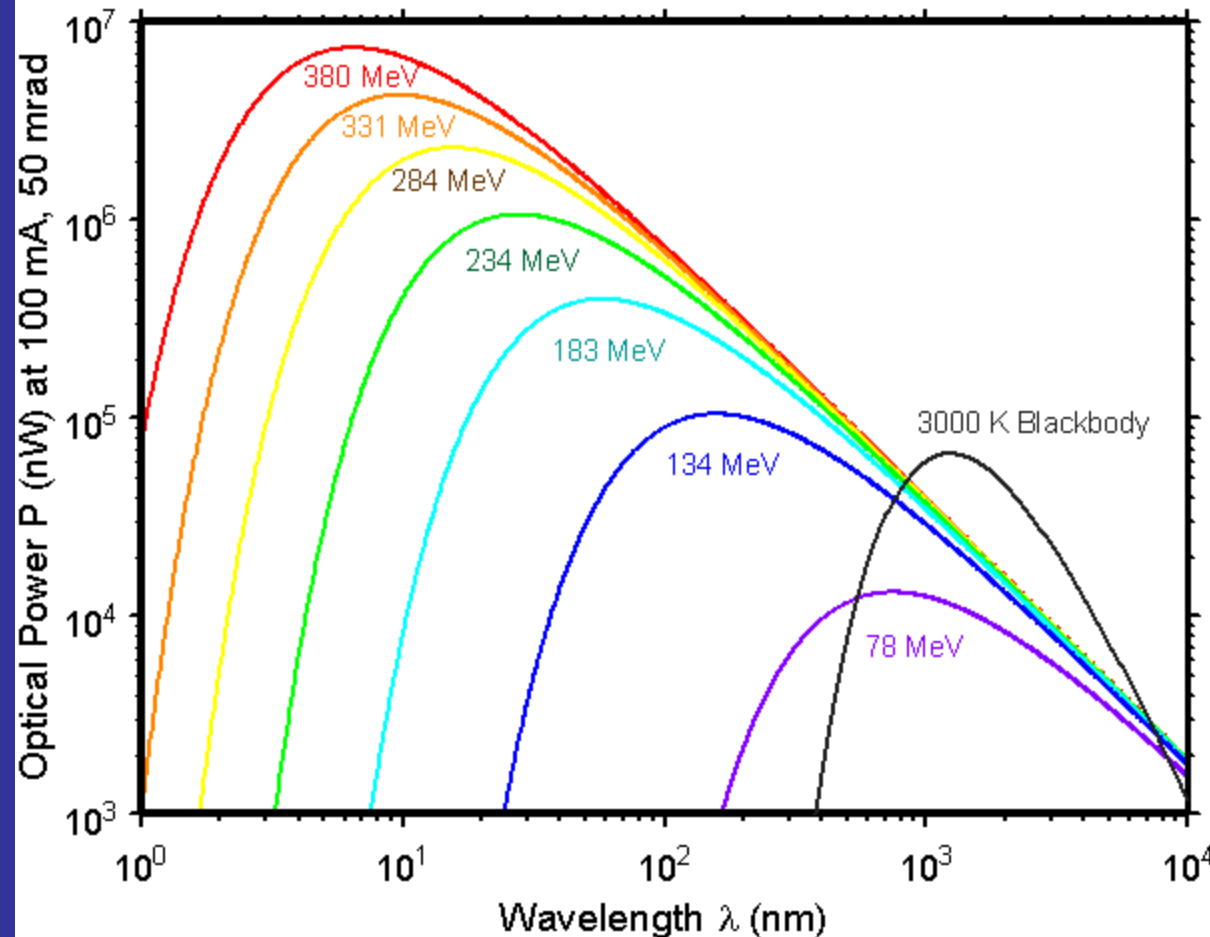
Beispiel: 300 MeV

$$\lambda = 10 \text{ nm}$$

$$\nu = 3 \times 10^{16} \text{ /s}$$

$$E = h \nu$$

$$= 124 \text{ eV}$$



Pulsarperioden aus der Drehimpulserhaltung

Θ – Trägheitsmoment

ω - Rotationsfrequenz

$$\begin{aligned}\Theta_{\text{Stern}} \cdot \omega_{\text{Stern}} &= \Theta_{\text{Pulsar}} \cdot \omega_{\text{Pulsar}} , \\ \omega_{\text{Pulsar}} &= \frac{R_{\text{Stern}}^2}{R_{\text{Pulsar}}^2} \cdot \omega_{\text{Stern}}\end{aligned}$$

entsprechend Pulsarperioden von

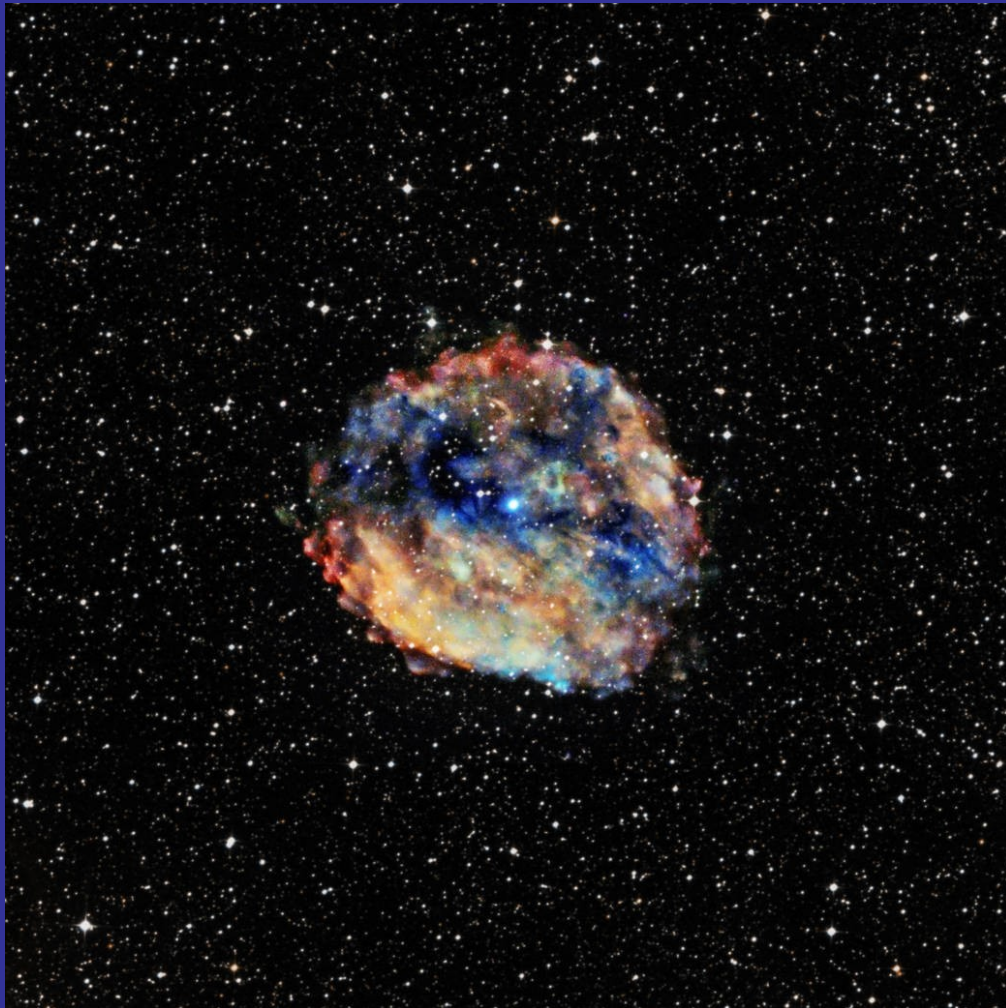
$$T_{\text{Pulsar}} = T_{\text{Stern}} \cdot \frac{R_{\text{Pulsar}}^2}{R_{\text{Stern}}^2} .$$

Mit $R_{\text{Stern}} = 10^6$ km, $R_{\text{Pulsar}} = 20$ km und $T = 1$ Monat erhält man

**schnellster
Pulsar 1,4 ms**

**langsamster
Pulsar 6,67 h**

$T \approx 1$ ms



Langsamster

Pulsar $T = 6,67$ h ?

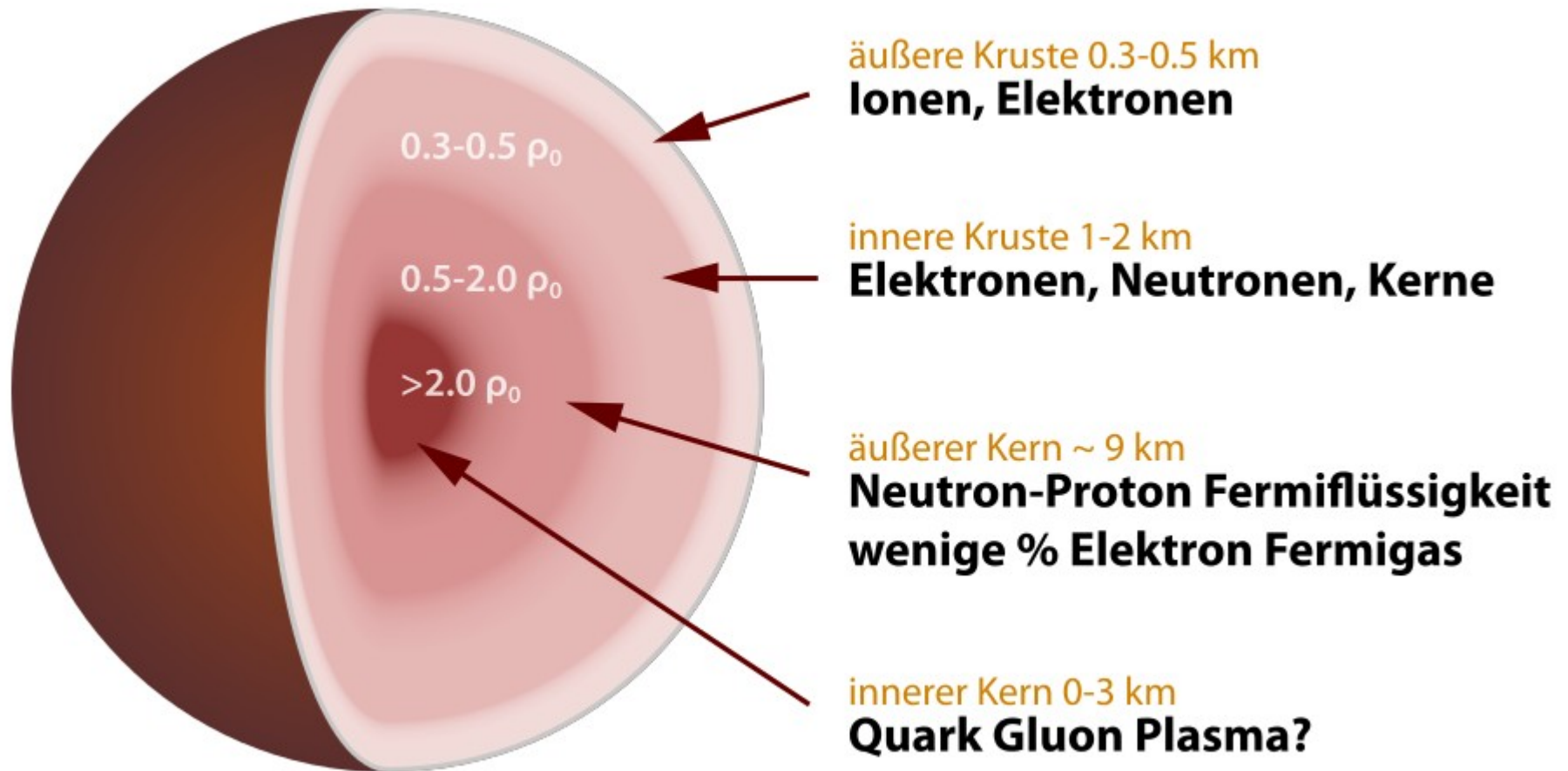
T 1613

9000 LJ entfernt

Chandra

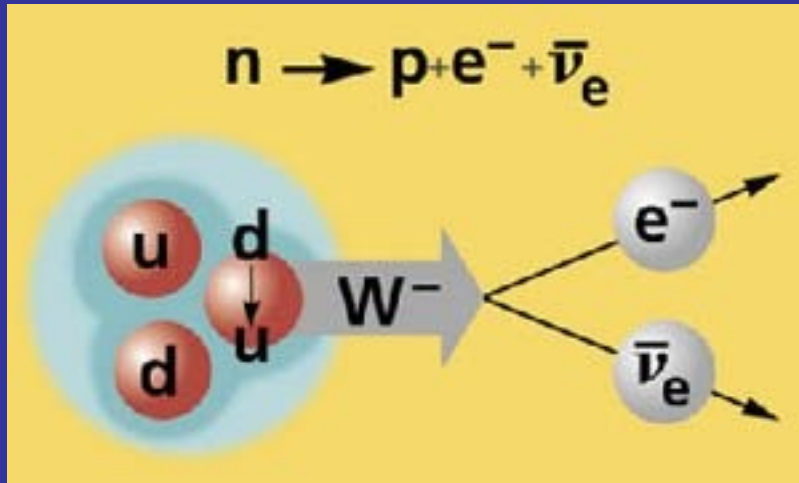
Röntgenaufnahme

Innerer Aufbau eines Neutronensterns



ρ_0 – mittlerer Druck

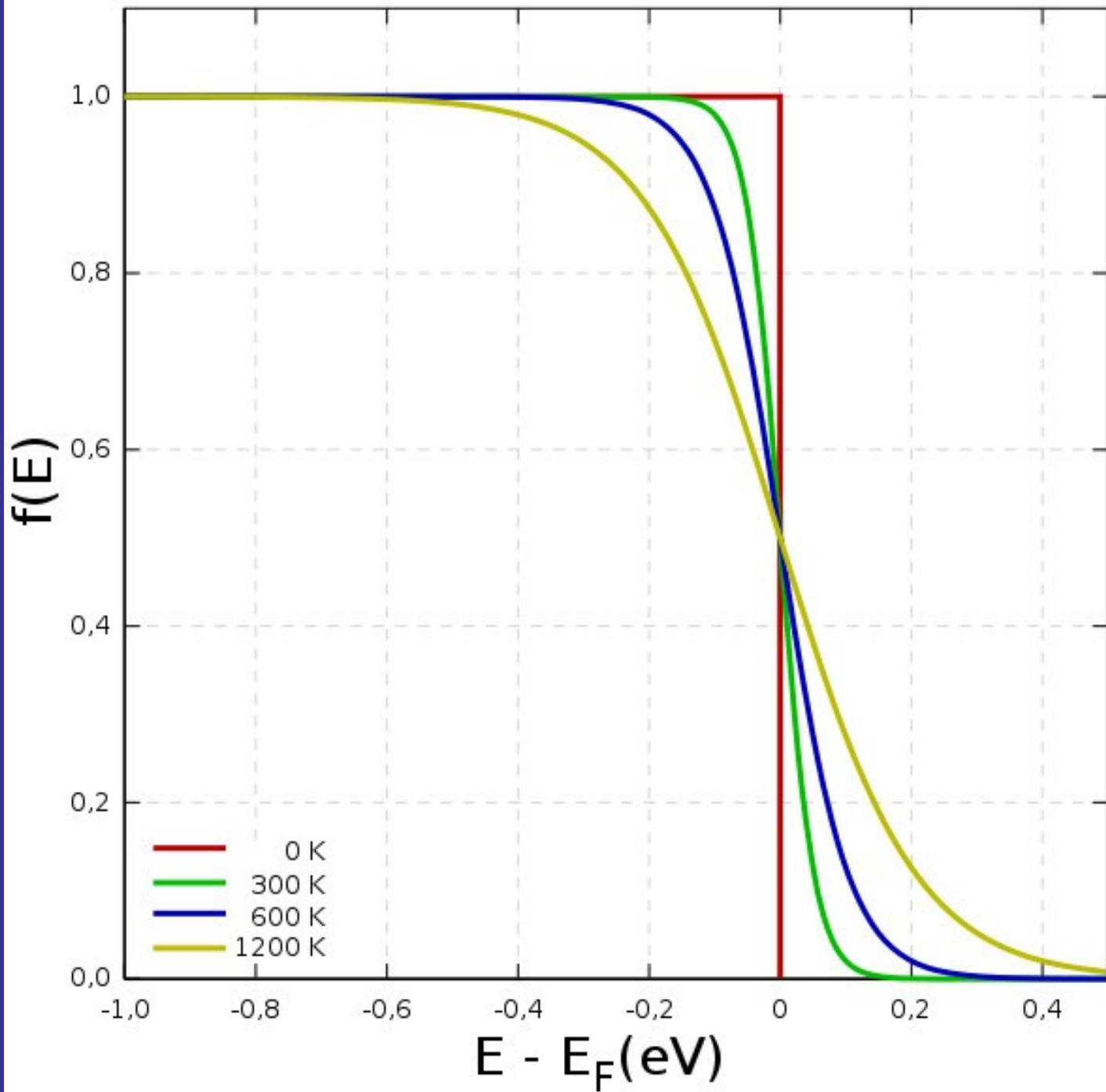
Warum zerfallen die Neutronen in einem Neutronenstern nicht?



Lebensdauer 882 s
Halbzeit 611 s
für freie Neutronen
Zerfallsenergie 0,78 MeV

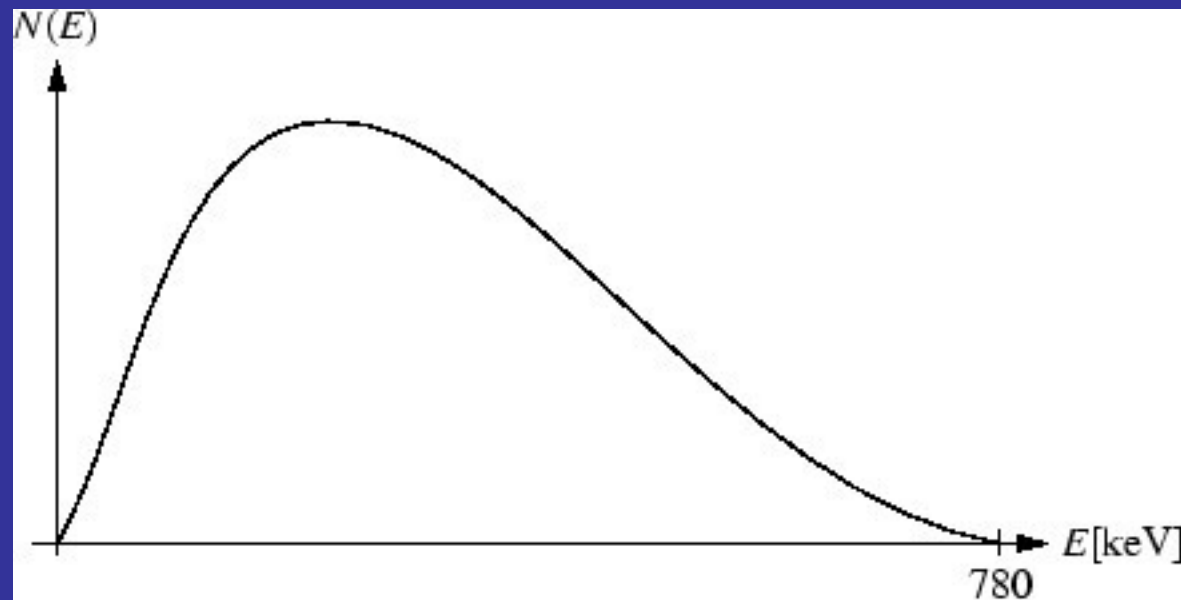
$$f(E) = \frac{1}{e^{(E - E_F)/kT} + 1}$$

Fermi-Dirac-Verteilung



Die Fermi-Energie der Restelektronen in einem Neutronenstern ist einige 100 MeV: alle möglichen Endzustände sind schon besetzt!

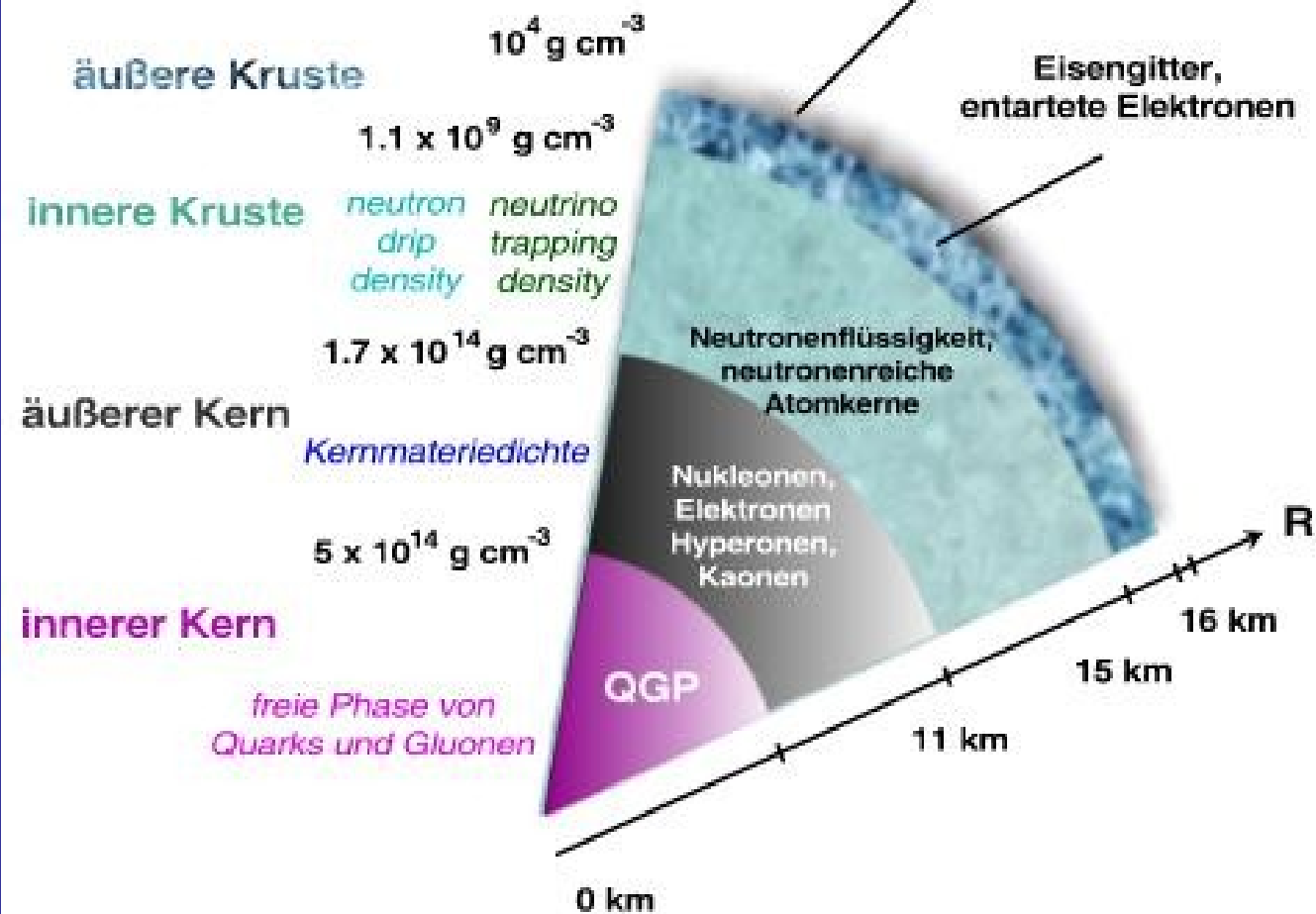
Auch die Neutronen in unserem Körper zerfallen nicht, weil die Endzustandselektronen und -protonen keine energetisch freien Plätze finden (Protonen sind auch Fermionen).



Elektronenspektrum beim β -Zerfall

Neutronenstern

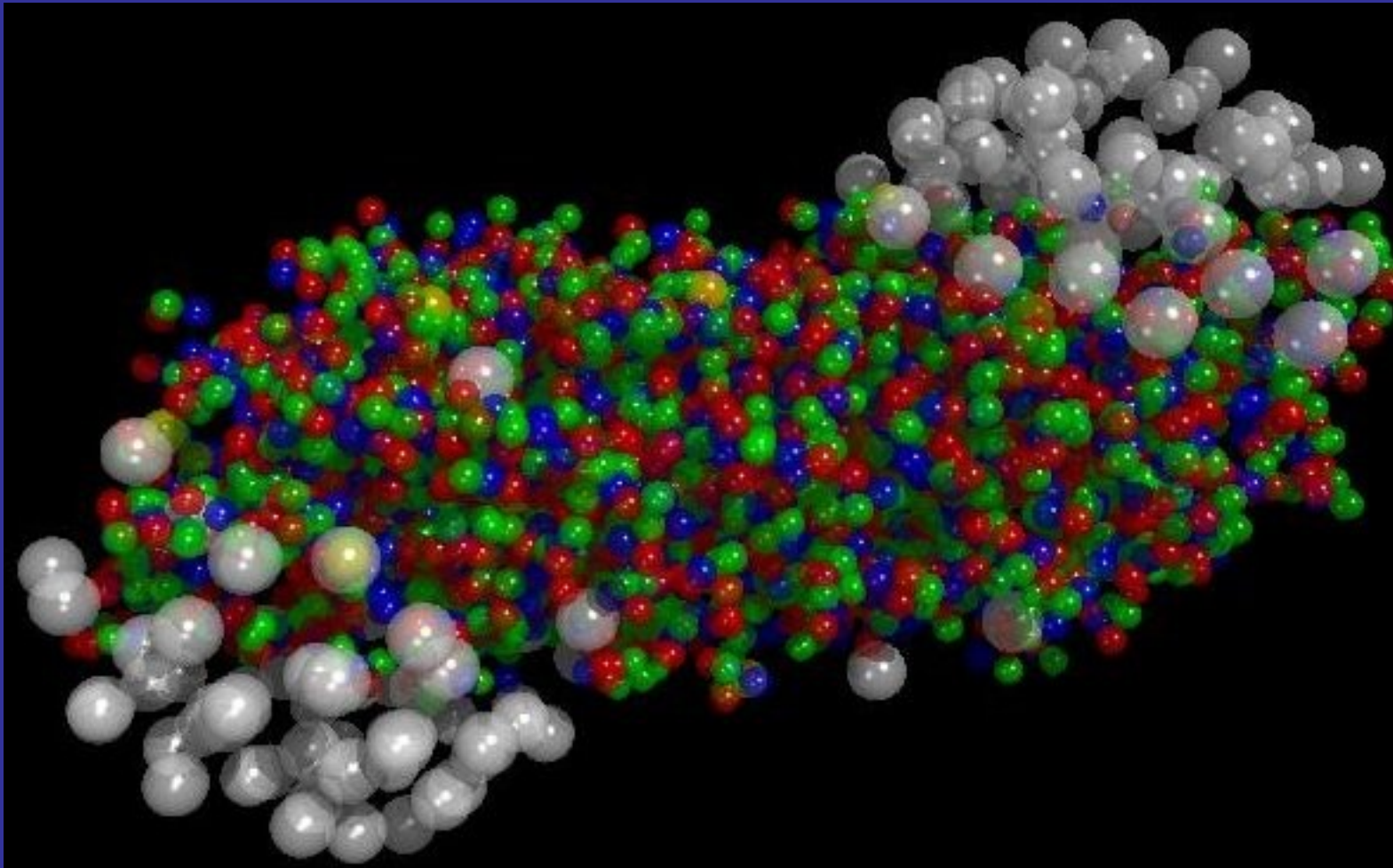
Schalenstruktur und Materiedichten



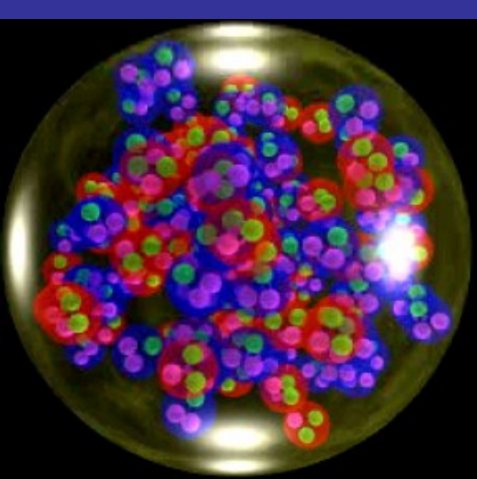


Neutronenstern mit Rest-Akkretionsscheibe und sehr geringer Abstrahlung (Temperaturstrahlung)

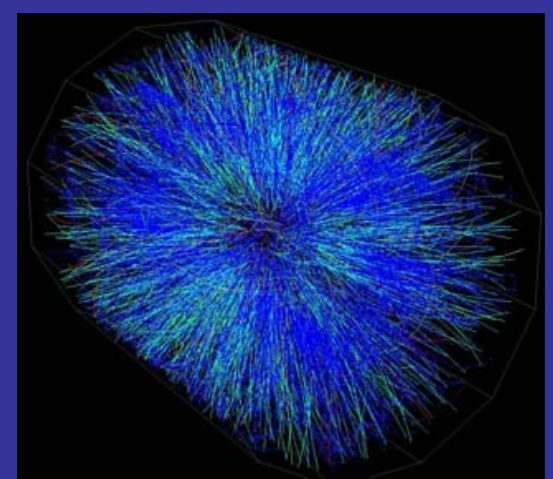
In Inneren eines Neutronensterns: Quark-Gluon-Plasma



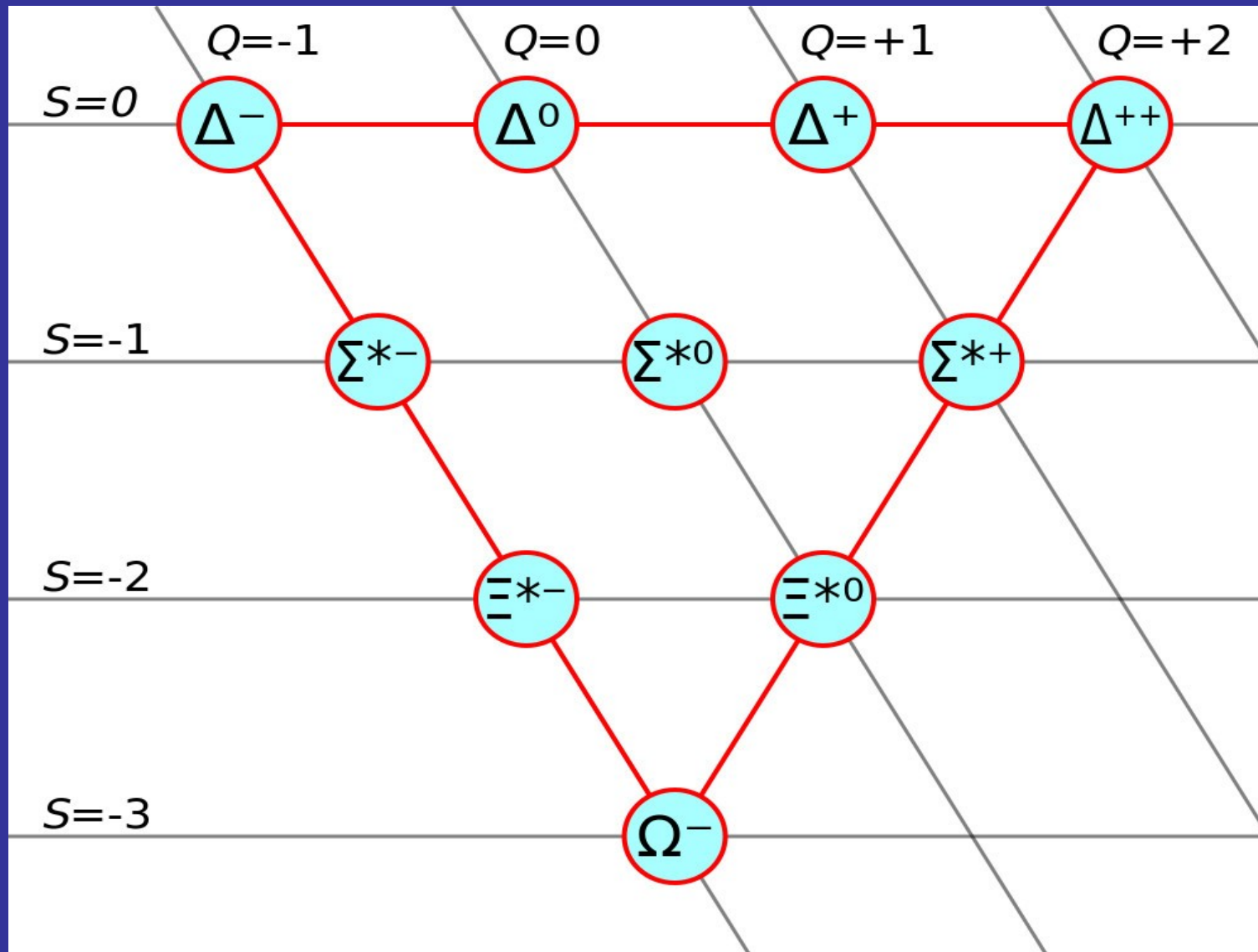
Wechselwirkung zweier schwerer Ionen mit
Bildung eines Quark-GluonPlasmas



Quarksterne?



Hyperonen im Kern des Neutronensterns

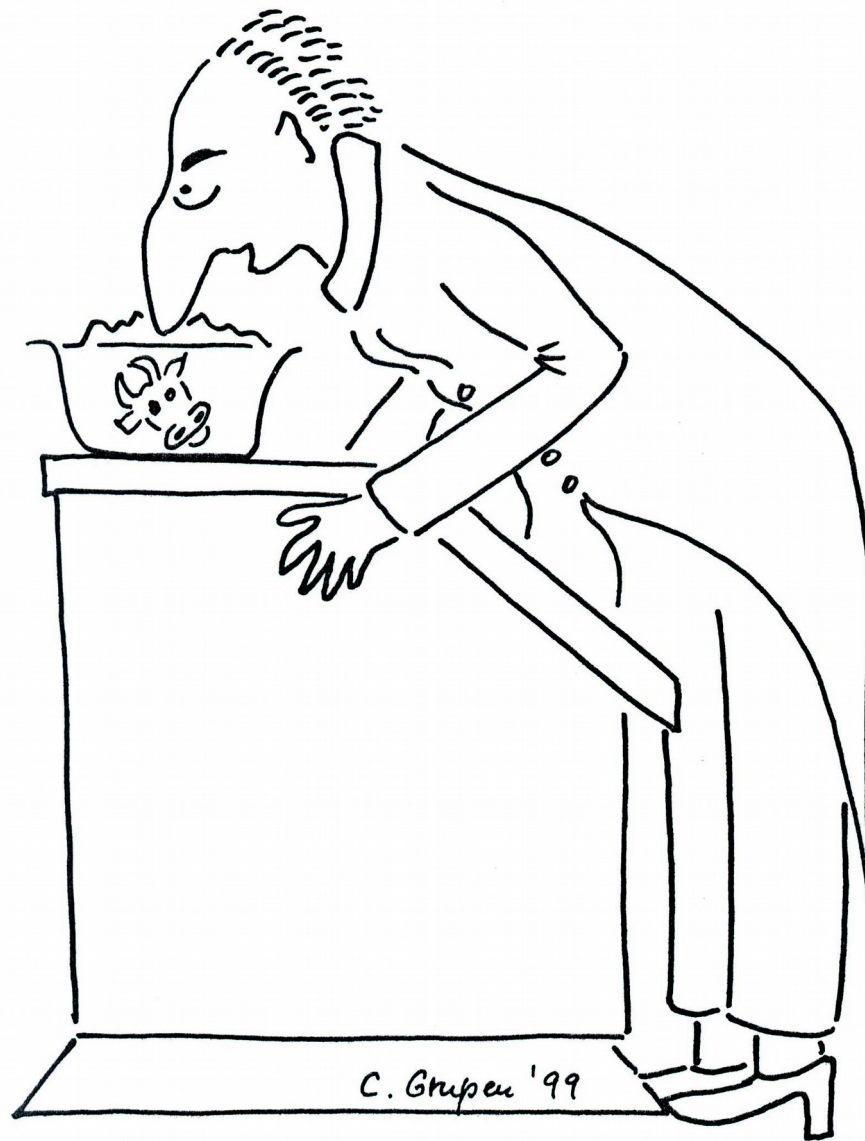


Q -
Ladung

S -
Seltsam-
keit

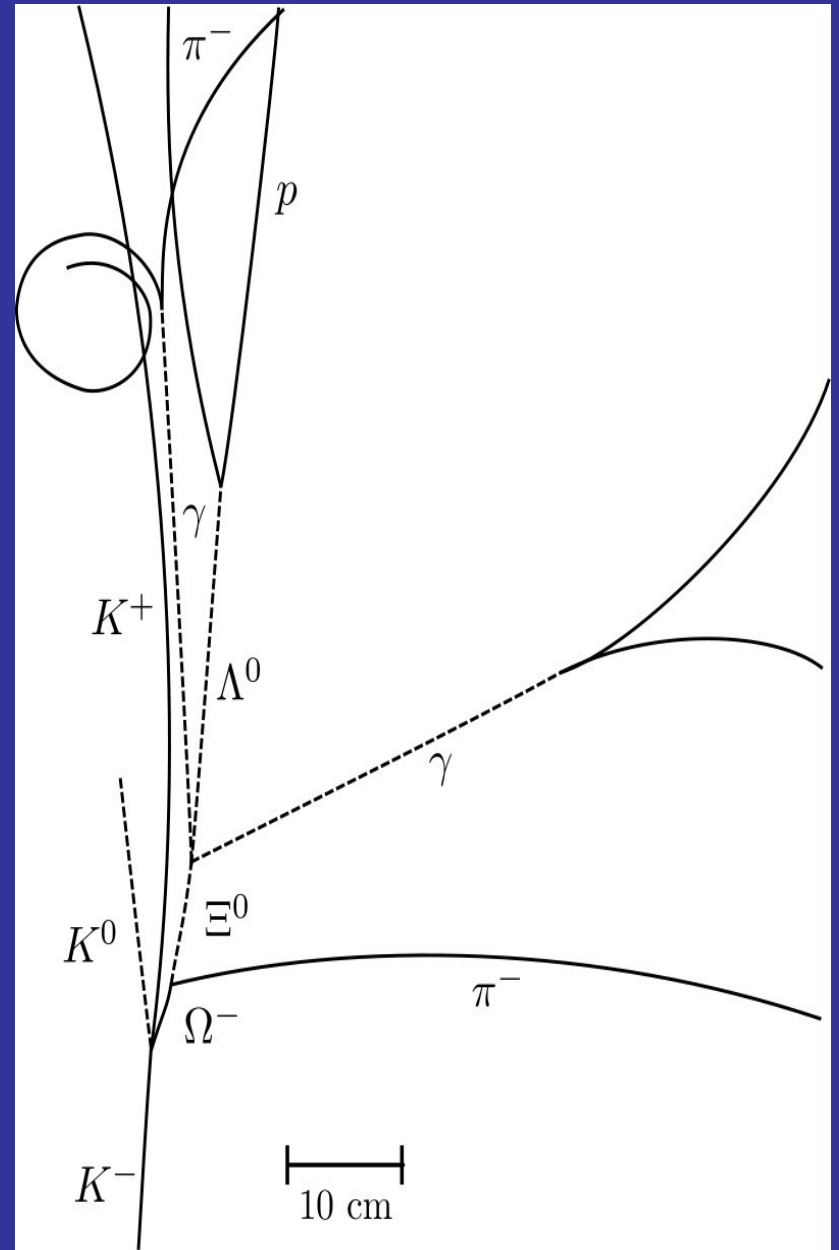
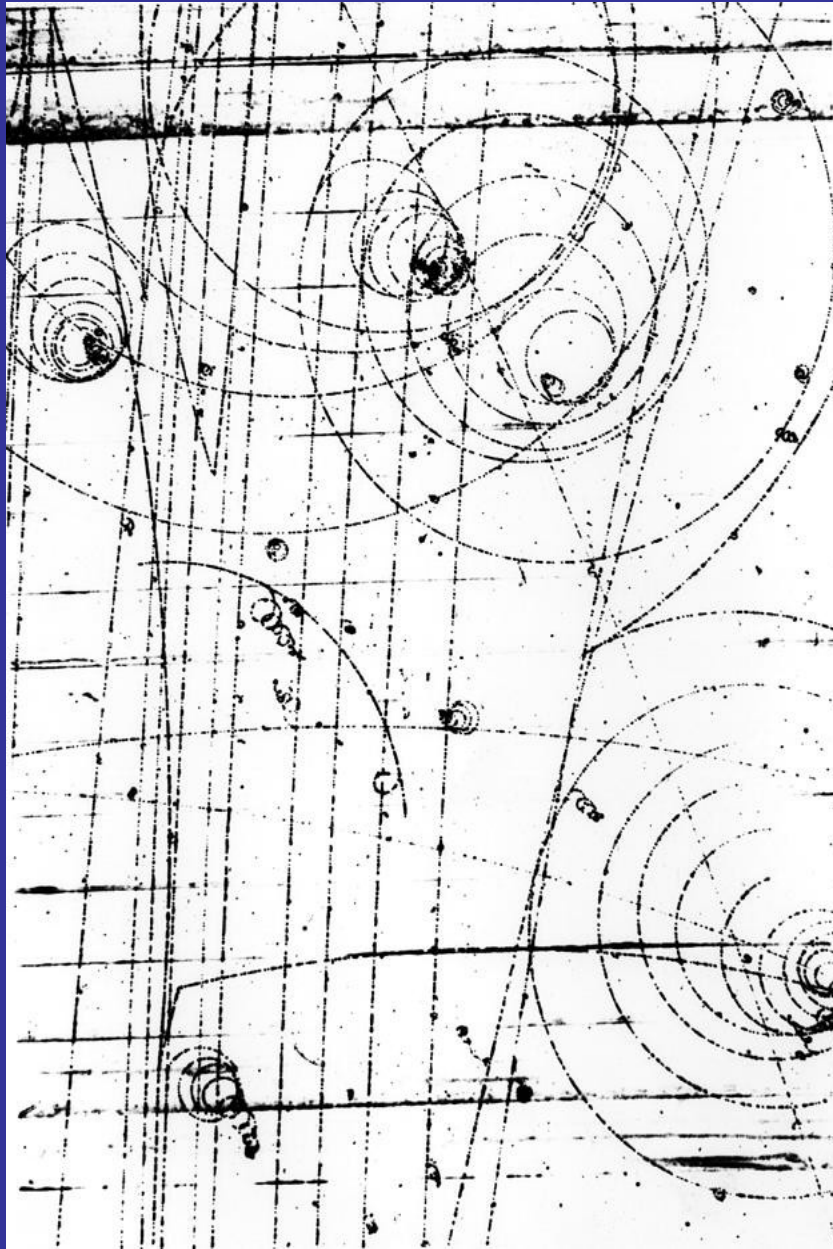
$\Delta^{++} =$
uuu

$\Omega^- =$ **sss**

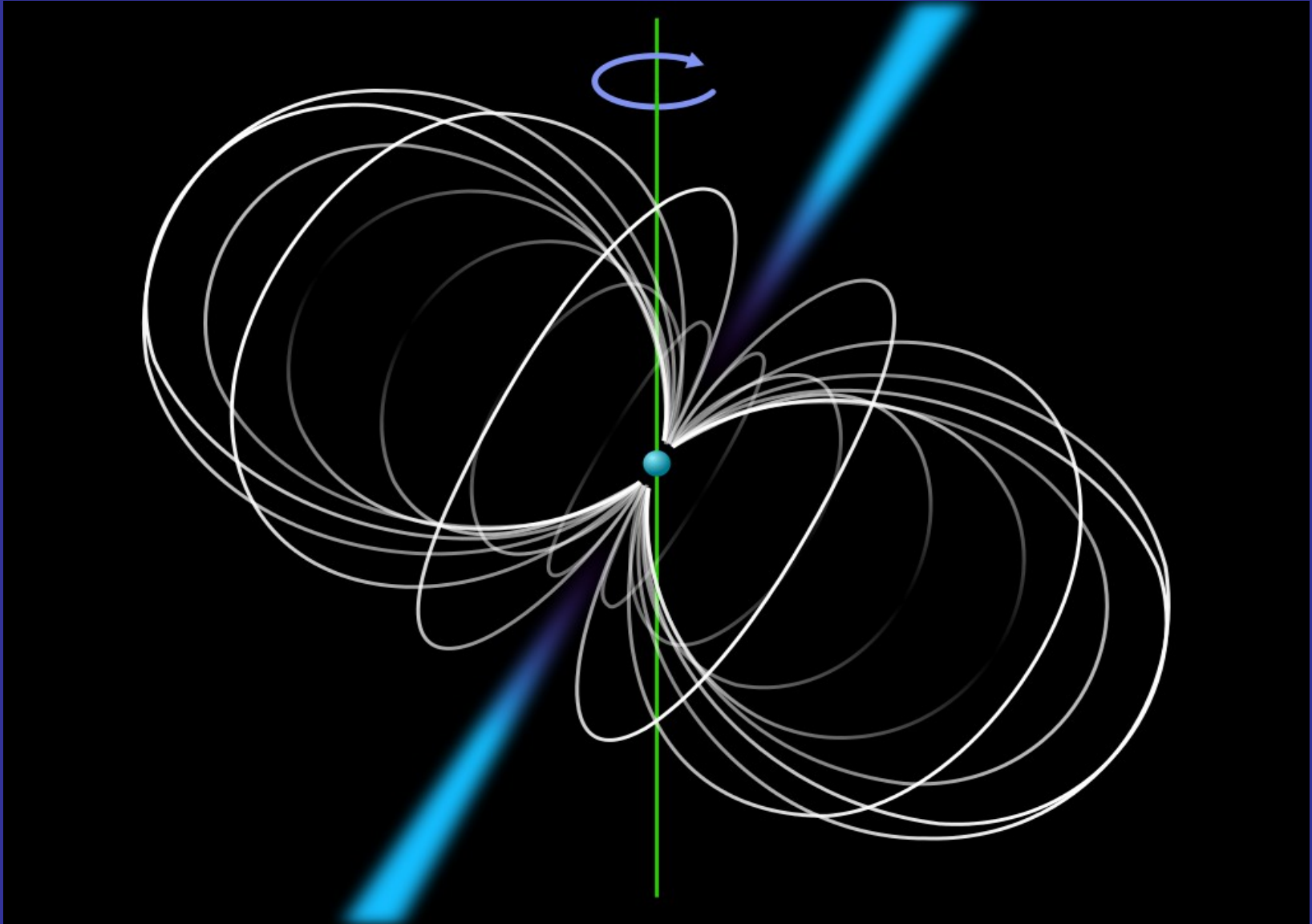


..... in jeden Quark begräbt er
seine Nase!

Ω^- Produktion und Zerfall



Pulsare: rotierende Neutronensterne



Teilchenbeschleunigung im Pulsar

$$-\frac{d\phi}{dt} = \oint E \cdot ds = U$$

$$\phi = \int B \cdot dA = B\pi R^2 ,$$

Φ = magnetischer Fluss

E = elektrisches Feld

U = Spannung

B = Magnetfeld

A = Fläche

Teilchenenergie $E^* = e U = e \pi R^2 dB/dt$

Mit $B = 2000$ Gauß; $dB/dt = 2000$ Gauß/Tag

und $r = 10^7$ m erhält man $E^* = 0,7$ GeV für einen

Stern. Für einen Pulsar (10^8 Tesla, 10^8 Tesla/s und

$r = 10$ km) erhält man $E^* = 30$ PeV!



**Krebsnebel-
Pulsar im
Optischen
und
Röntgen-
bereich**

Normal

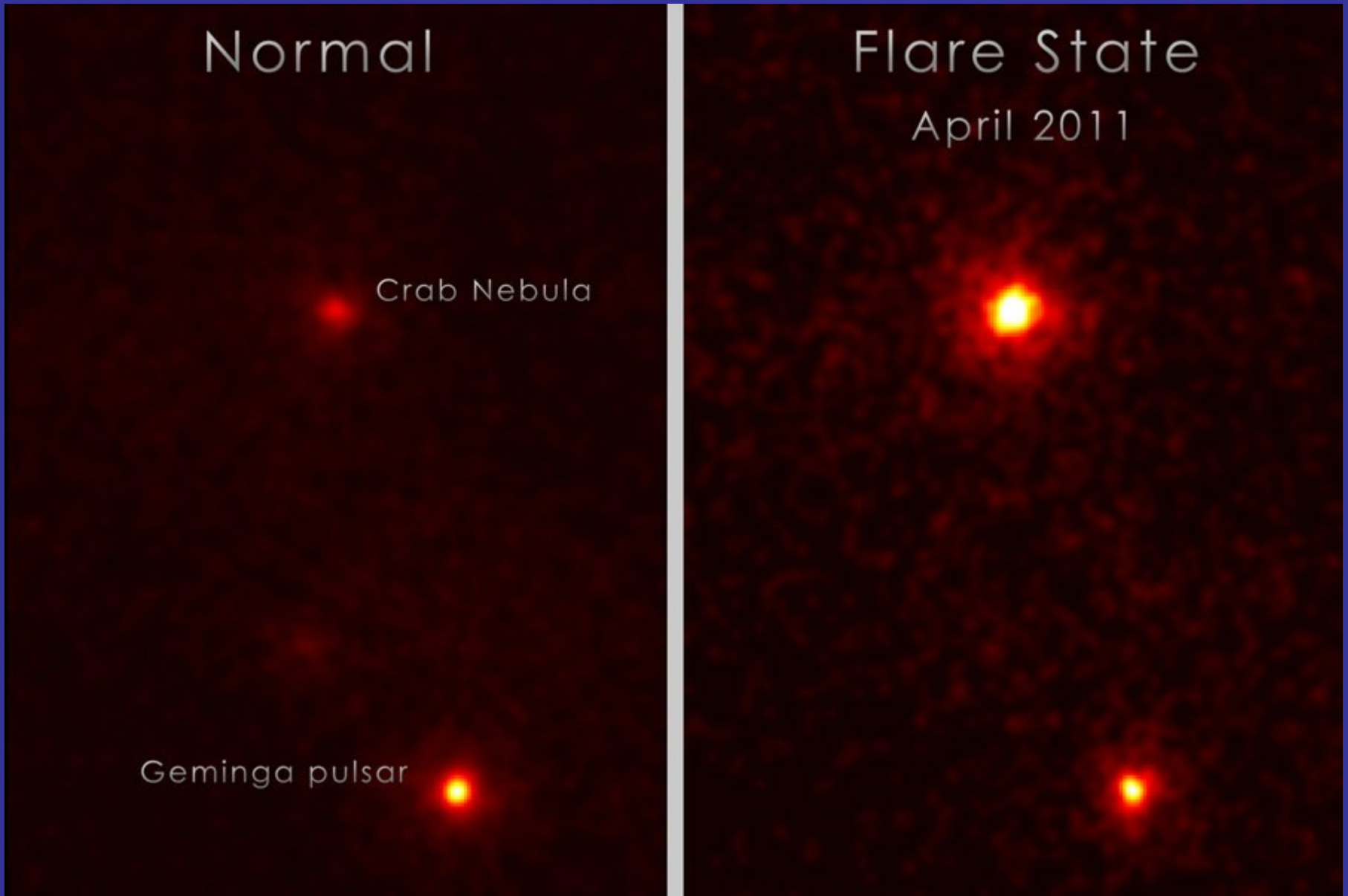
Crab Nebula

Geminga pulsar

Flare State

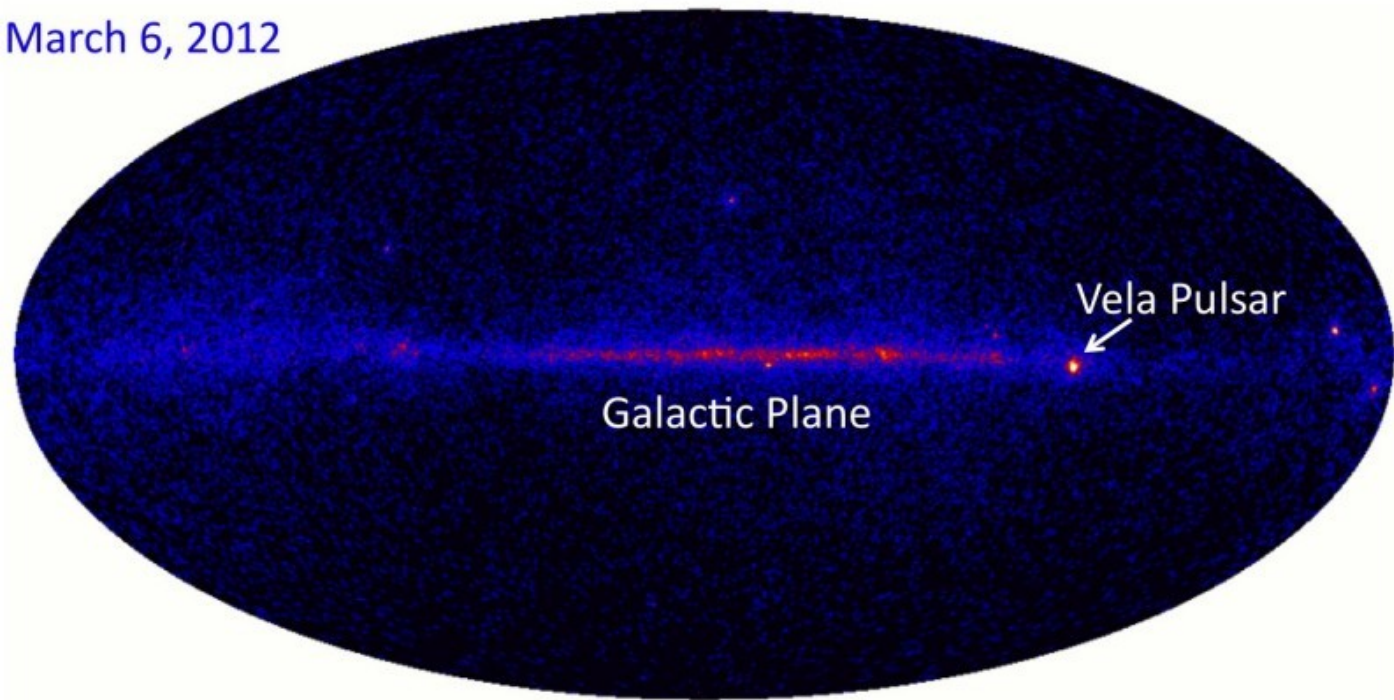
April 2011

Gamma-Ausbruch im Krebsnebel

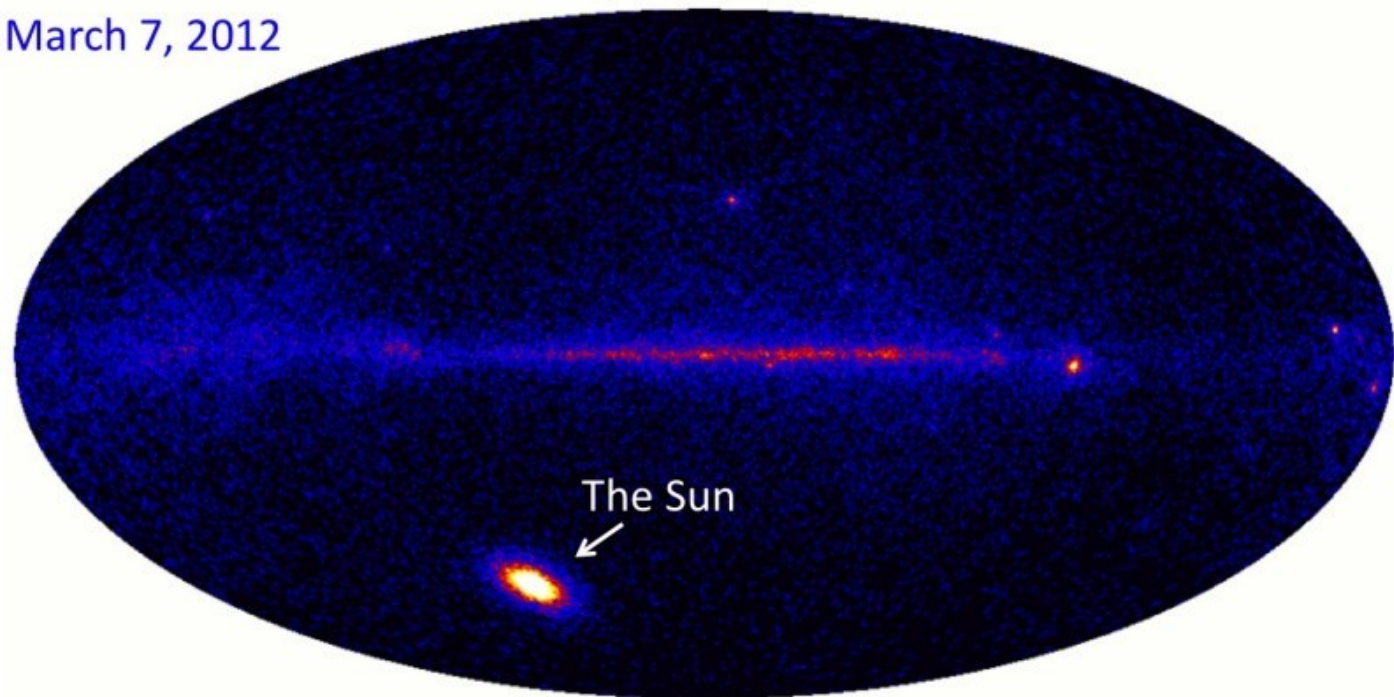


**Solarer
Gamma
und
Röntgen-
Ausbruch:
tödliche
Gefahr für
Astro-
nauten.
Aufnahme:
Fermi-
Satellit**

March 6, 2012



March 7, 2012



Sonne in galaktischen Koordinaten

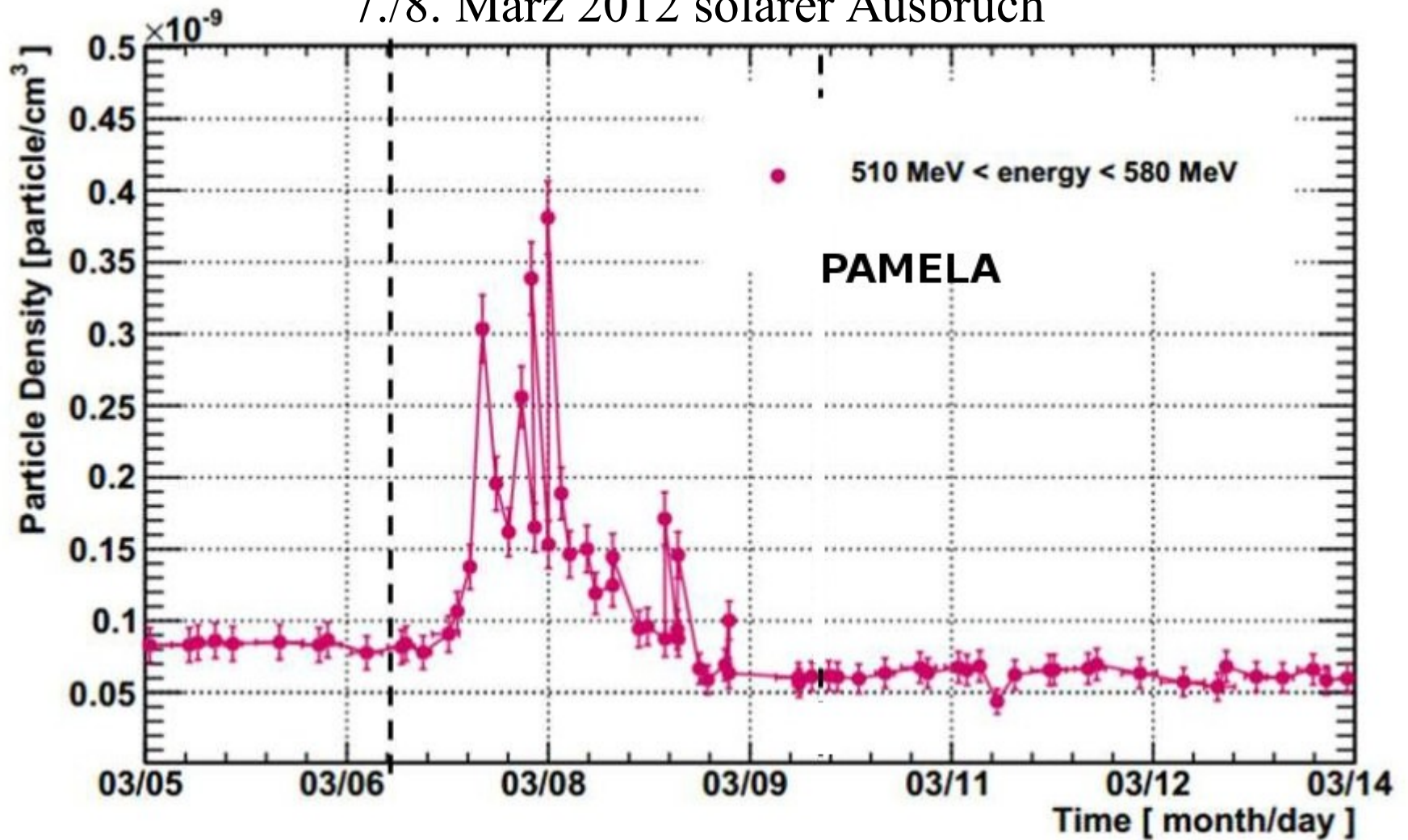
Face-on view of Milky Way



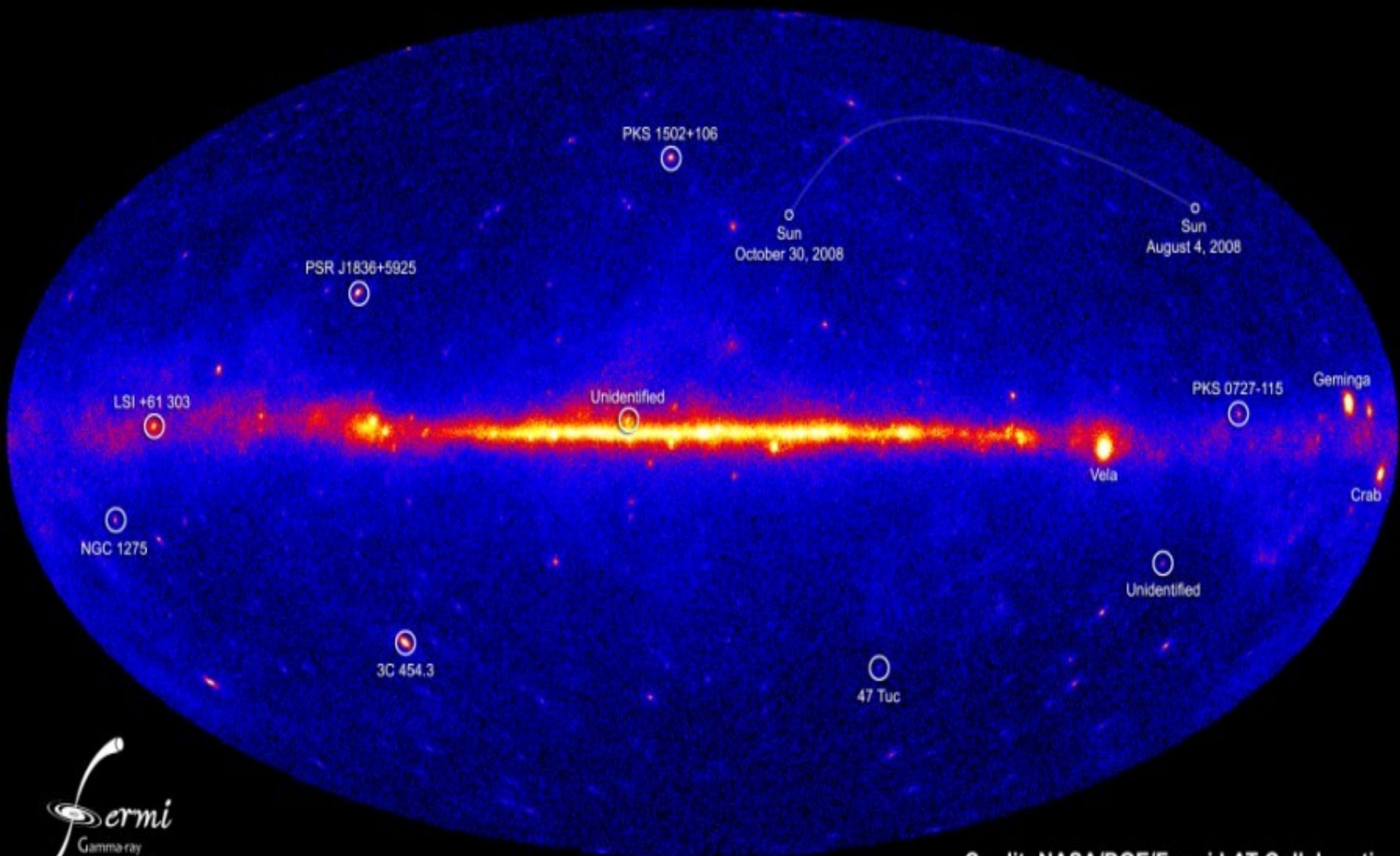
Edge-on view



7./8. März 2012 solarer Ausbruch



NASA's Fermi telescope reveals best-ever view of the gamma-ray sky

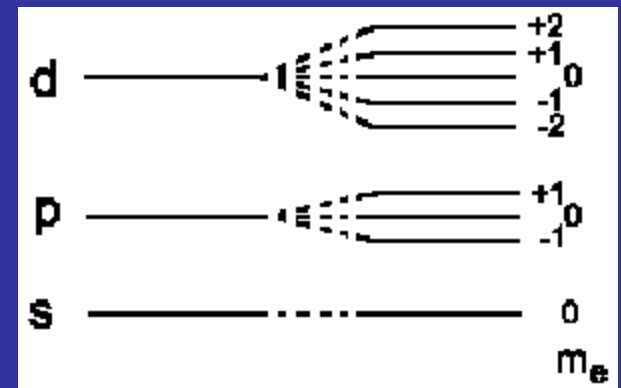


Magnetfeld von Pulsaren und Neutronensternen

$$\int_{\text{Stern}} \mathbf{B}_{\text{Stern}} \cdot d\mathbf{A}_{\text{Stern}} = \int_{\text{Pulsar}} \mathbf{B}_{\text{Pulsar}} \cdot d\mathbf{A}_{\text{Pulsar}},$$
$$B_{\text{Pulsar}} = B_{\text{Stern}} \cdot \frac{R_{\text{Stern}}^2}{R_{\text{Pulsar}}^2}.$$

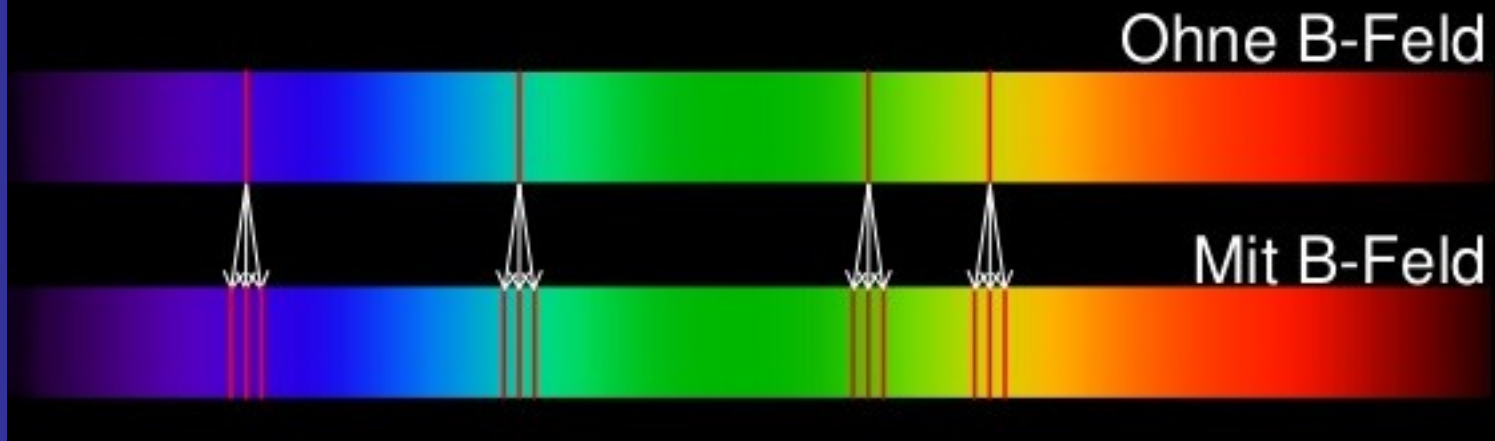
Für $B_{\text{Stern}} = 1000$ Gauß ergeben sich magnetische Felder des Pulsars von $2,5 \cdot 10^{12}$ Gauß = $2,5 \cdot 10^8$ T!

**Experimentell bestätigt durch
Zeemann-Aufspaltung:
Energieniveaus mit Drehimpuls l
spalten im Magnetfeld in $2l + 1$
Niveaus auf (Bahndrehimpuls
und Spin abhängig)**



Zeemann-Effekt

Äußeres Magnetfeld vervielfacht die Spektrallinien



Schwarze Löcher

Lösungen der Einstein-Gleichung

Karl Schwarzschild

Schwarzschildradius $r_s = 2GM/c^2$



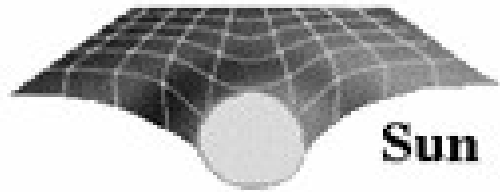
$$r_{\text{sonne}} = 3 \text{ km}$$

$$r_{\text{Erde}} = 9 \text{ mm}$$

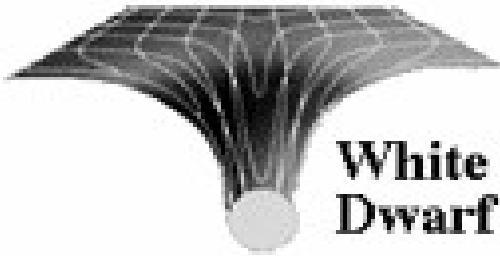
$$r_{\text{Proton}} = 10^{-54} \text{ m}$$

Schwarzschild Radius

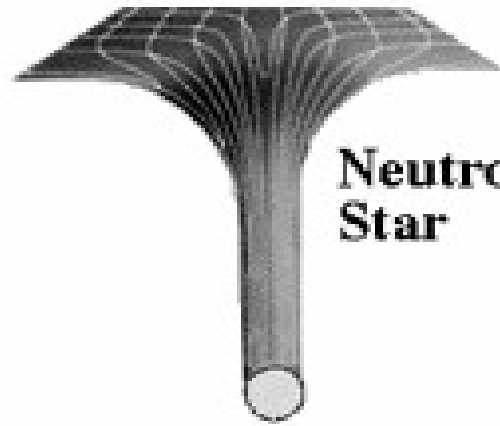
Object	Mass	Schwarzschild Radius	Density (g/cm³)
Hydrogen atom	2×10^{-24} g	3×10^{-44} A	10^{130}
Human being	7×10^4 g	1×10^{-15} A	10^{73}
Earth	6×10^{27} g	0.9 cm	2×10^{27}
Sun	2×10^{33} g	3 km	2×10^{16}
Galaxy	$10^{11} M_{\text{sun}}$	0.03 ly	2×10^{-6}
Cluster of galaxies	$10^{14} M_{\text{sun}}$	30 ly	2×10^{-12}
Closed universe	$10^{22} M_{\text{sun}}$	3×10^9 ly	2×10^{-28}



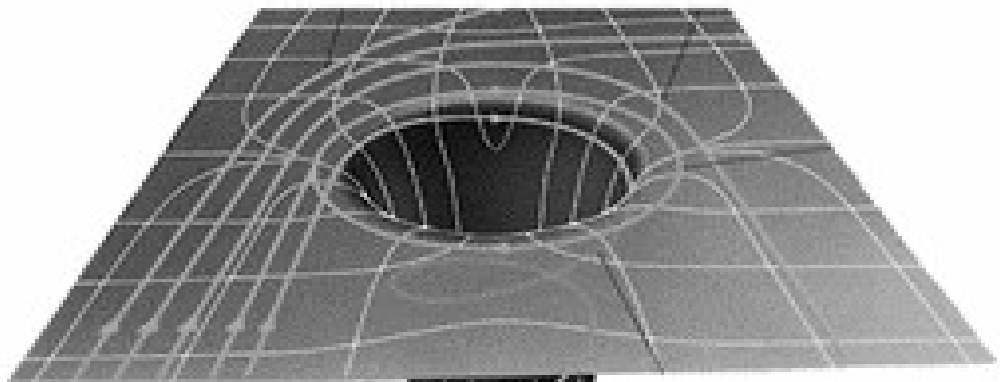
Sun



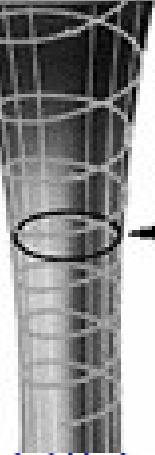
White Dwarf



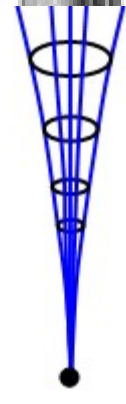
Neutron Star



Black Hole



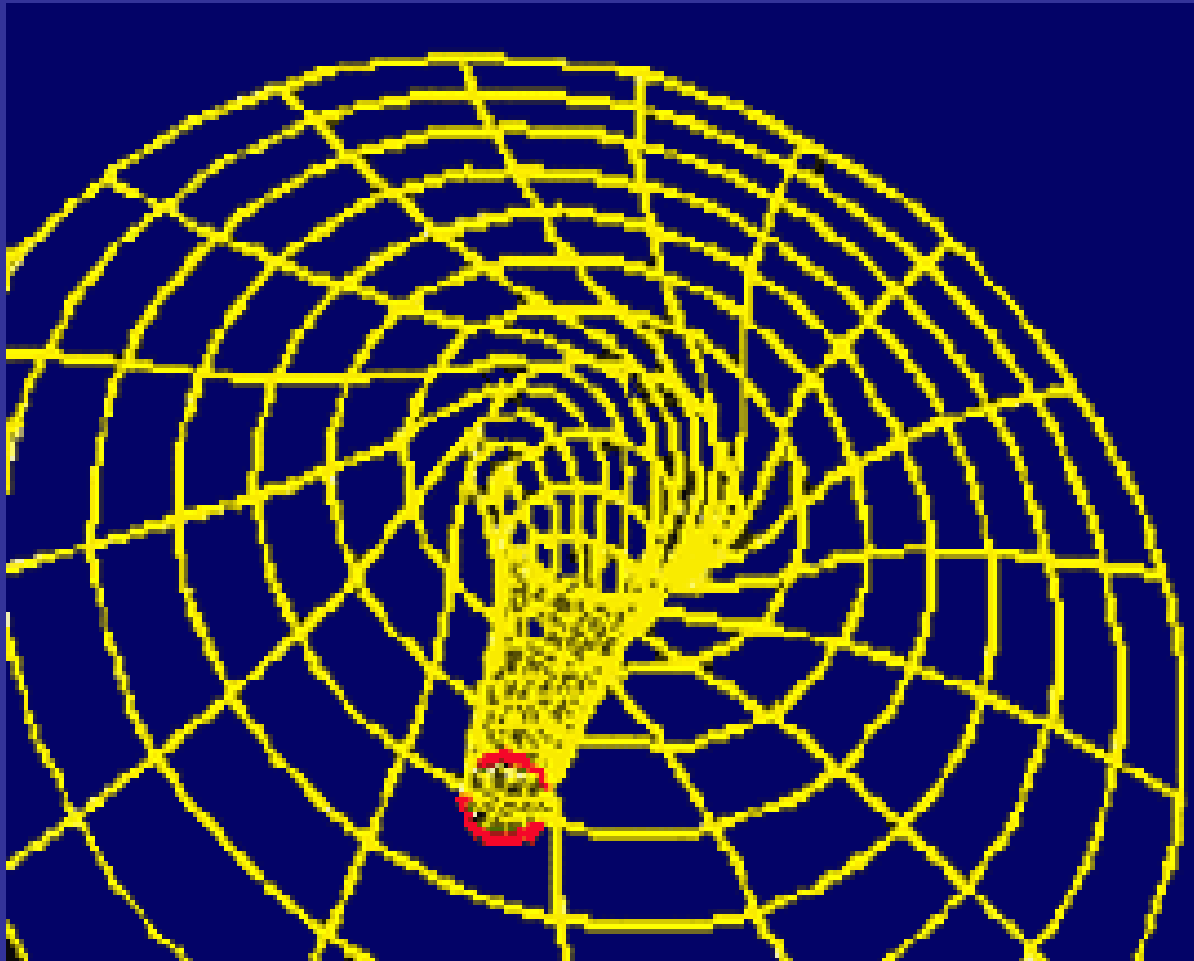
Event Horizon

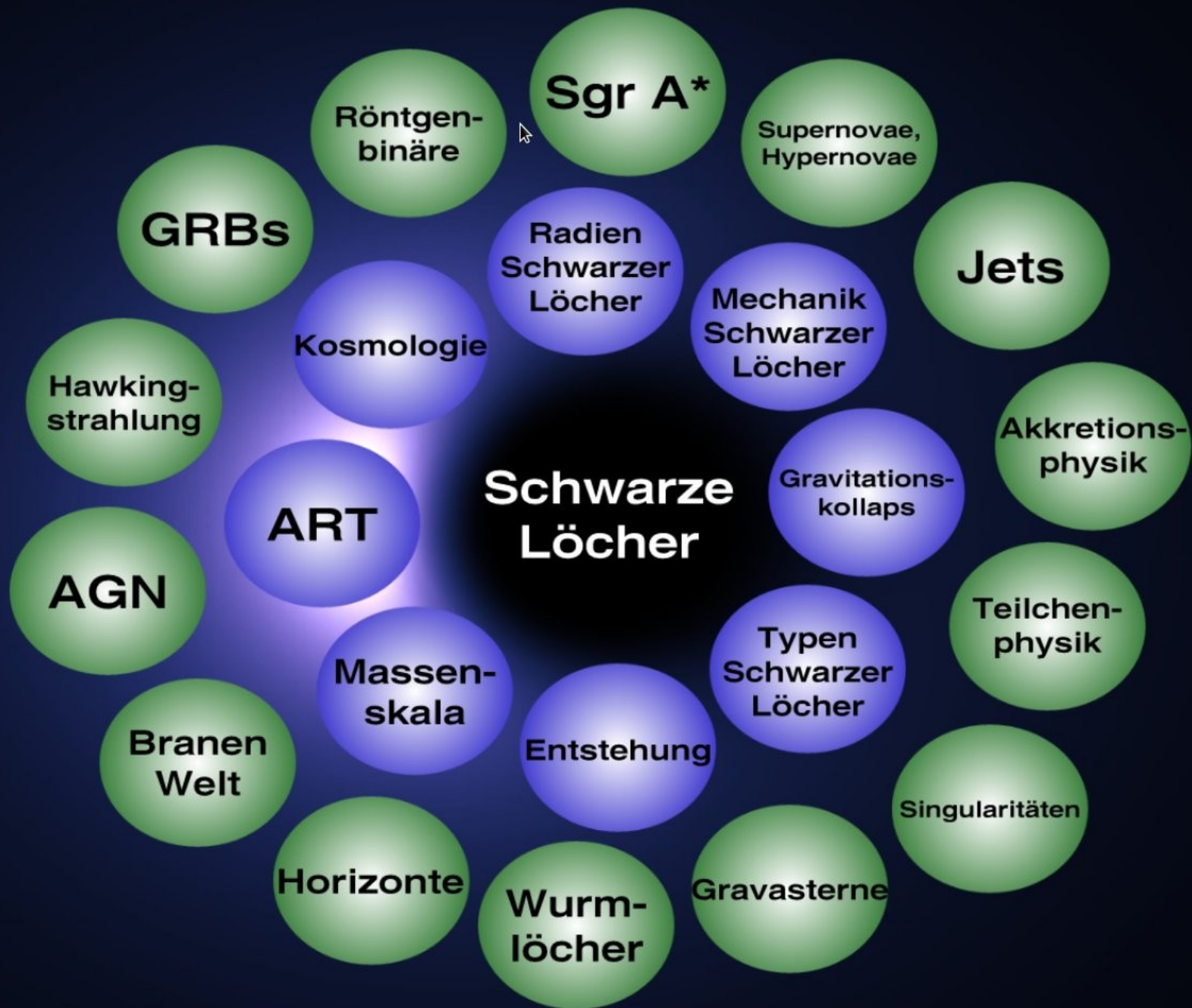


Singularität



Rotierende und elektrisch geladene Schwarze Löcher





Schwarze Löcher haben keine Haare!



maximal set:

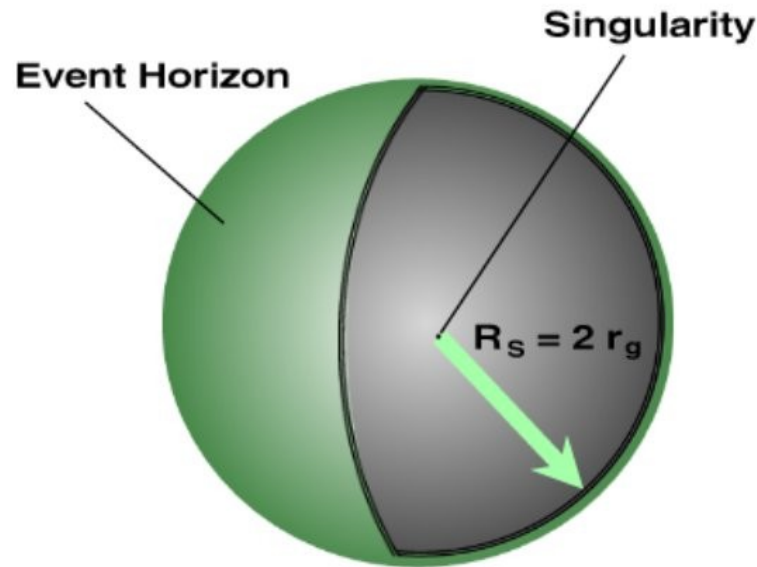
$\{M, a, Q\}$

- Schwarzschild
 $\{M\}$
- Reissner-Nordstrom
 $\{M, Q\}$
- Kerr
 $\{M, a\}$
- Kerr-Newman
 $\{M, a, Q\}$

*Wheeler:
Keine-Haare Theorem*

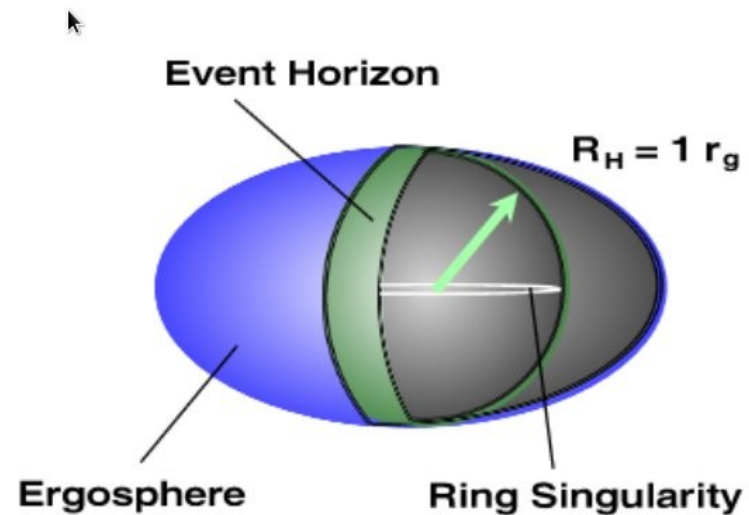
Statik vs. Rotation

Black Holes



Schwarzschild

$$a = 0$$



Kerr

$$a = 1$$

Ergoshäre: im Prinzip kann man Energie von dort extrahieren

Bei rotierenden Schwarzen Löchern ist die Situation kompliziert. Die Singularität ist nicht mehr punktförmig sondern ringförmig.

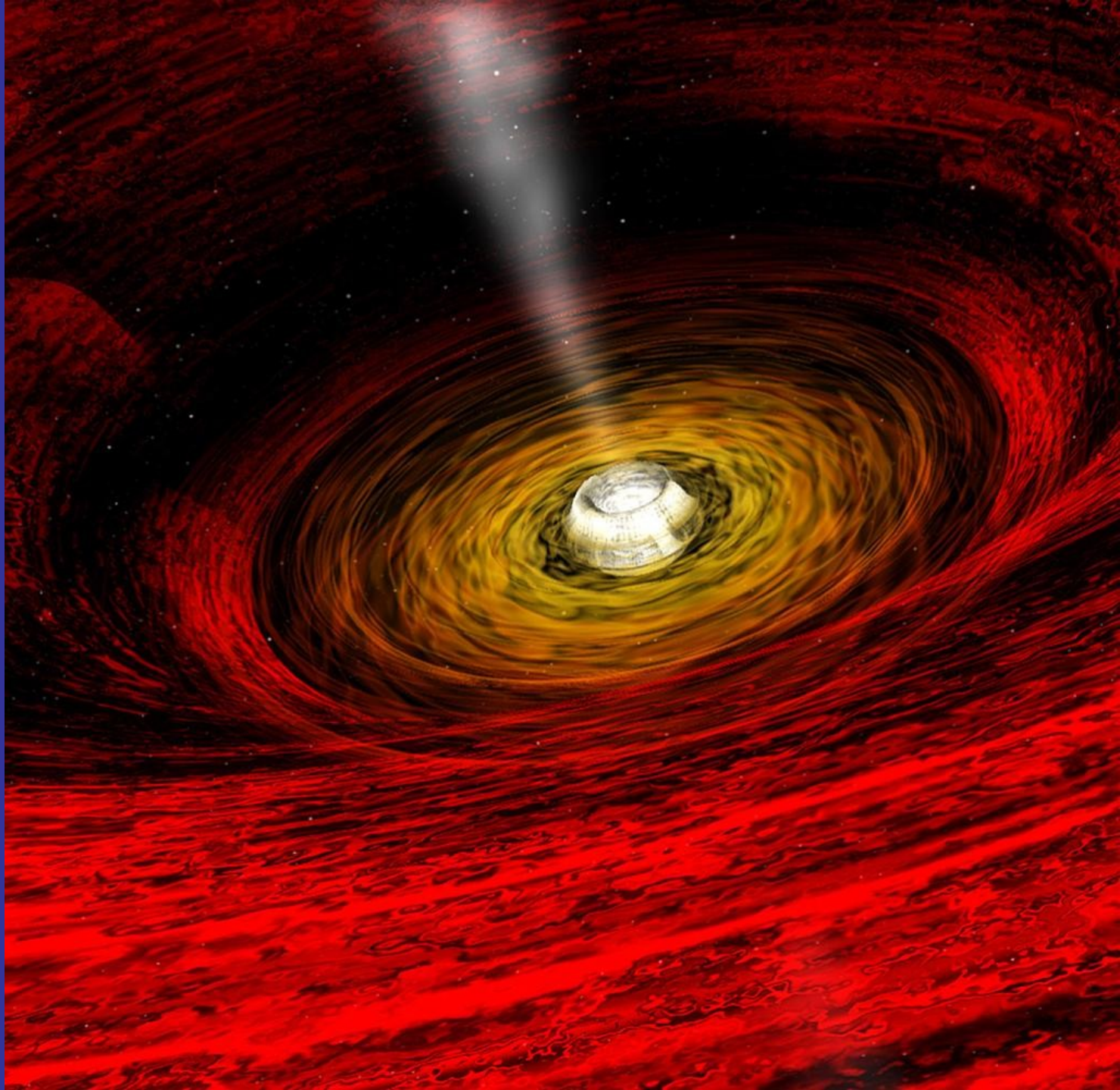
Die Raumzeit ist nun nicht mehr nur gekrümmt, sondern wird auch von der Rotation mitgerissen.

Es gibt einen 'äußeren Ereignishorizont', der dem nicht-rotierender Schwarzer Löcher entspricht.

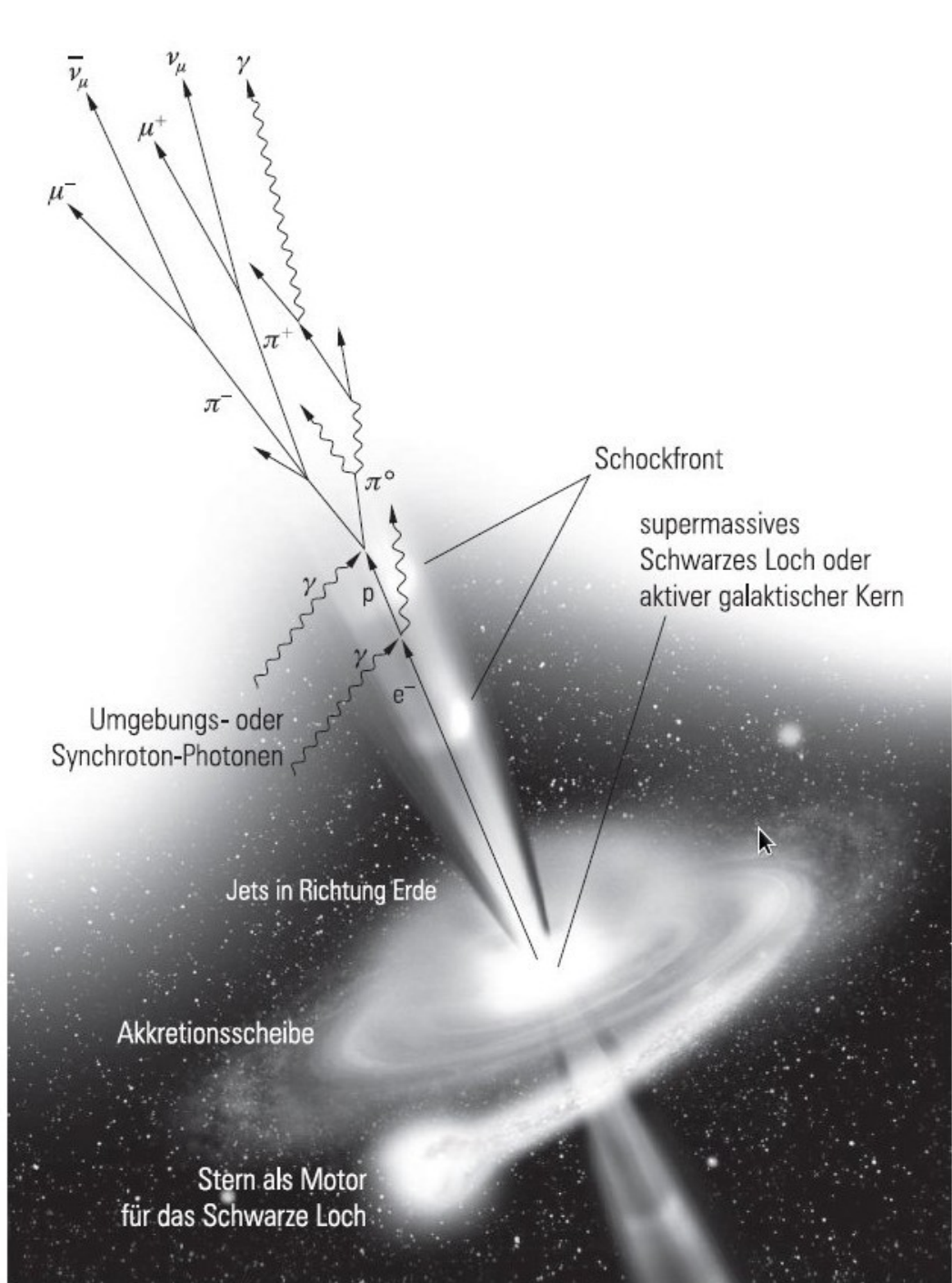
Darunter gibt einen von außen nicht sichtbaren inneren Ereignishorizont.

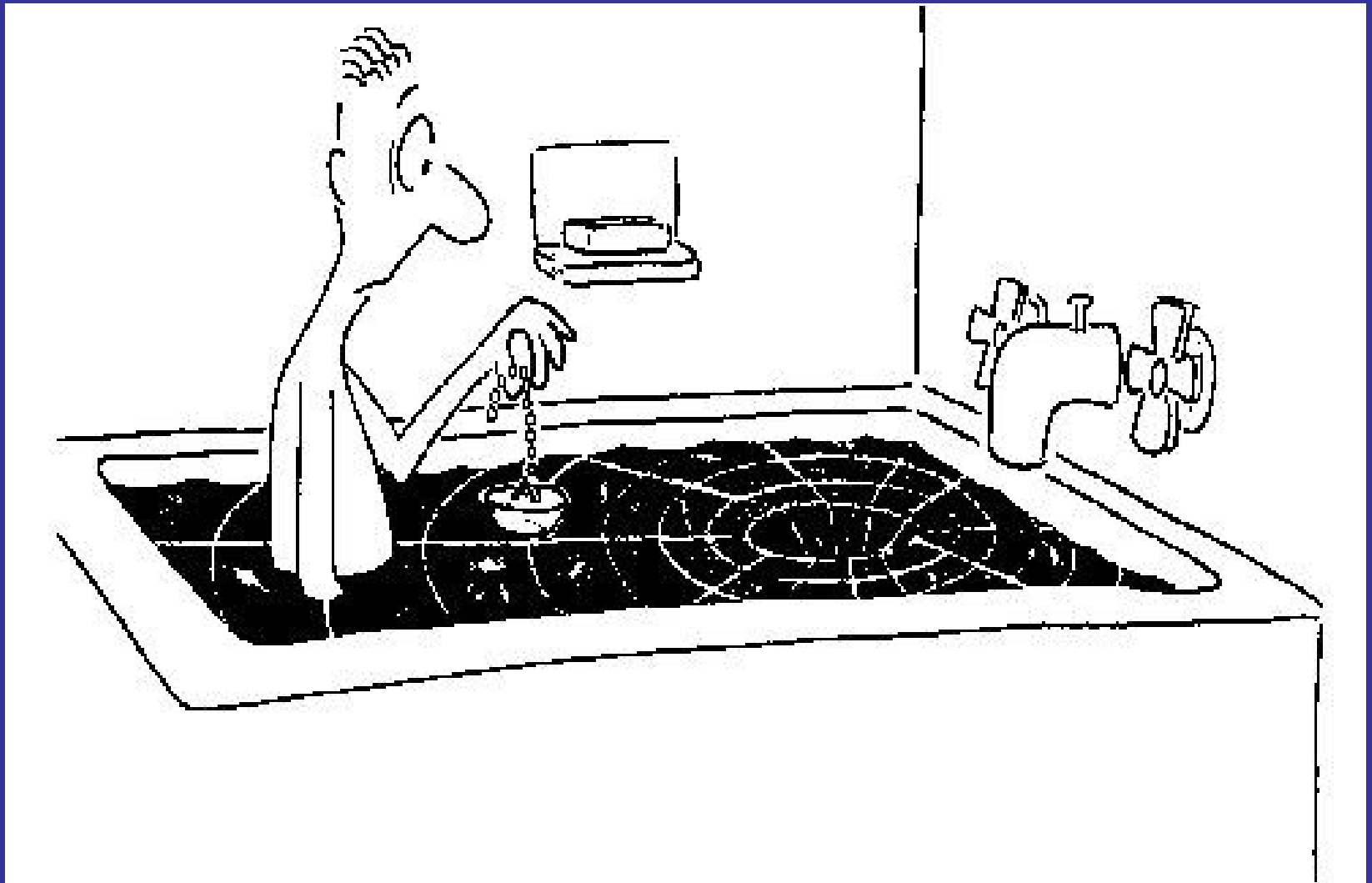
Objekte innerhalb des äußeren Ereignishorizontes fallen nicht unbedingt gleich in die ringförmige Singularität. Alles rotiert mit dem Schwarzen Loch.

Gut, dass man von außen davon nichts mitbekommt.

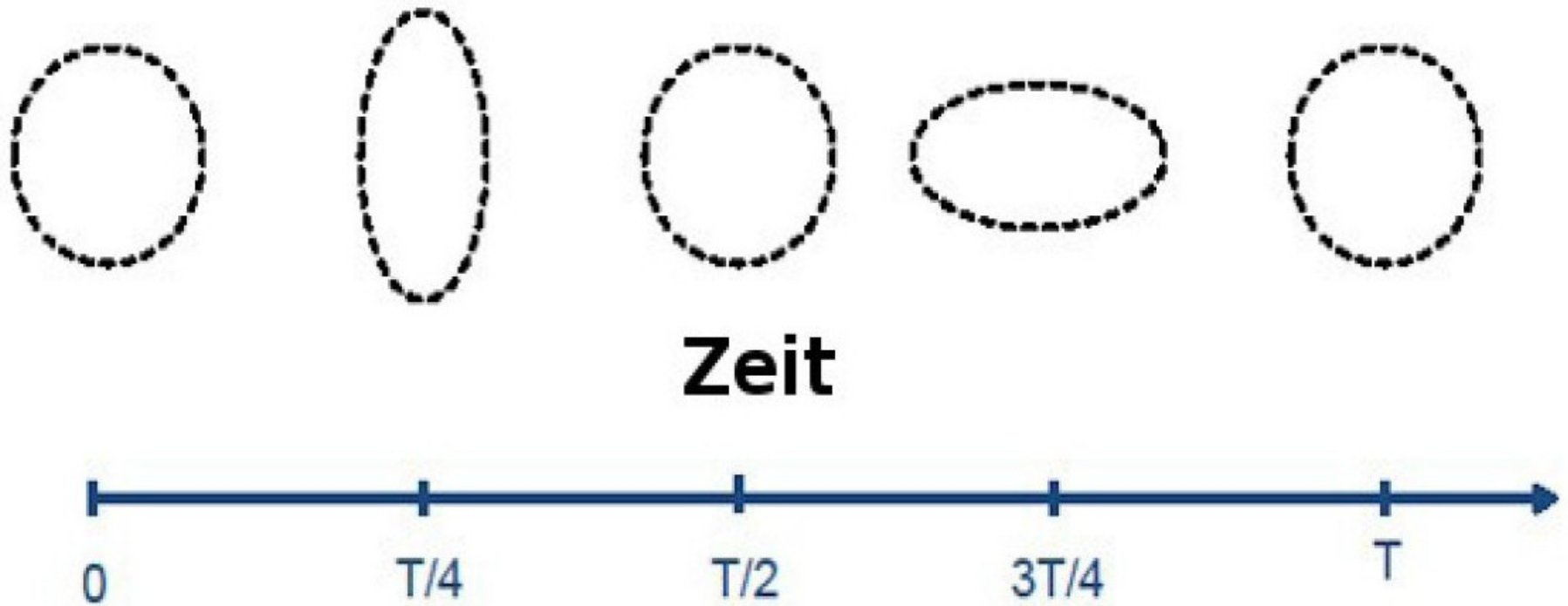


Jet-Erzeugung aus den Akkretions- scheiben Schwarzer Löcher

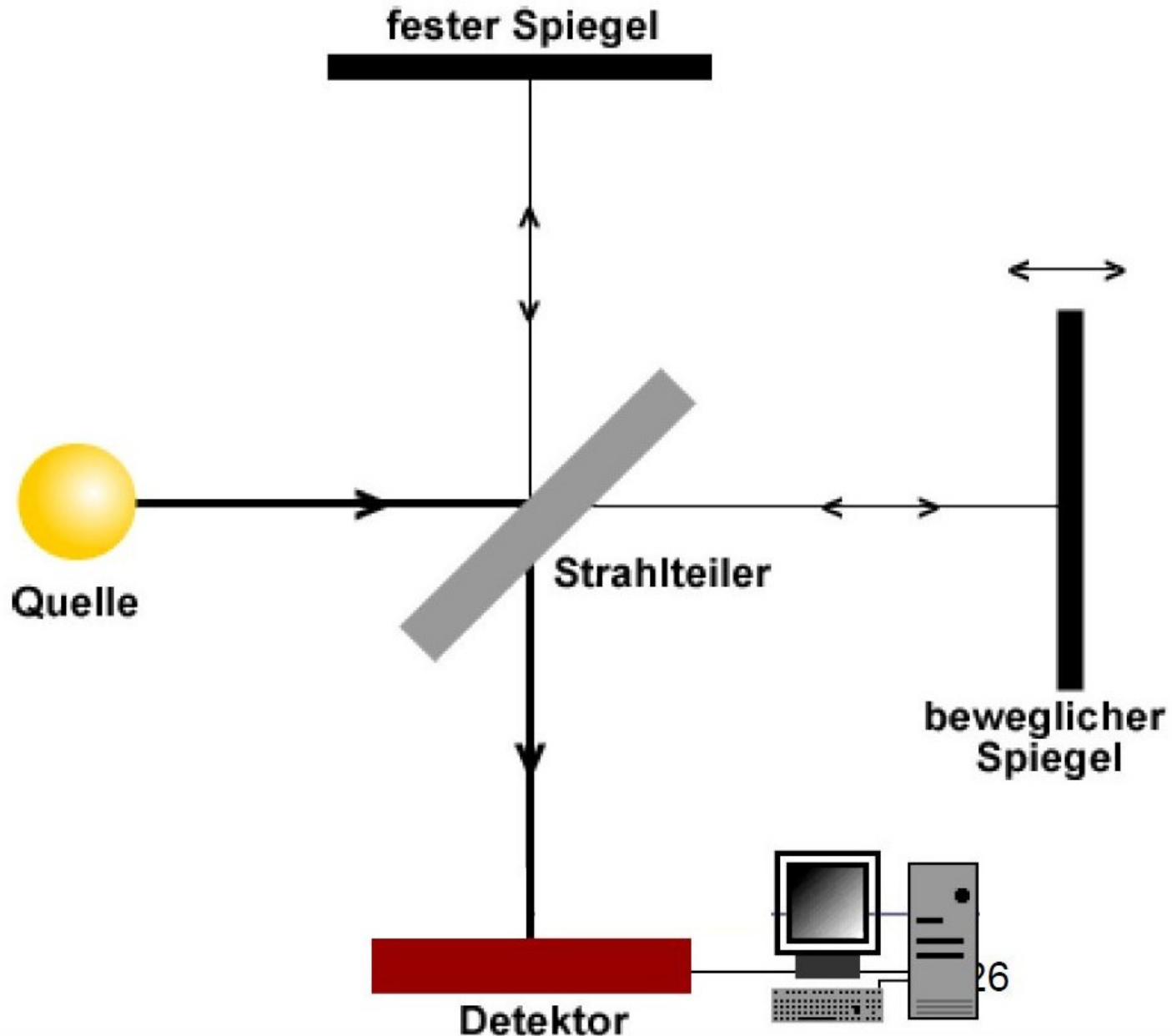




Gravitationswellen



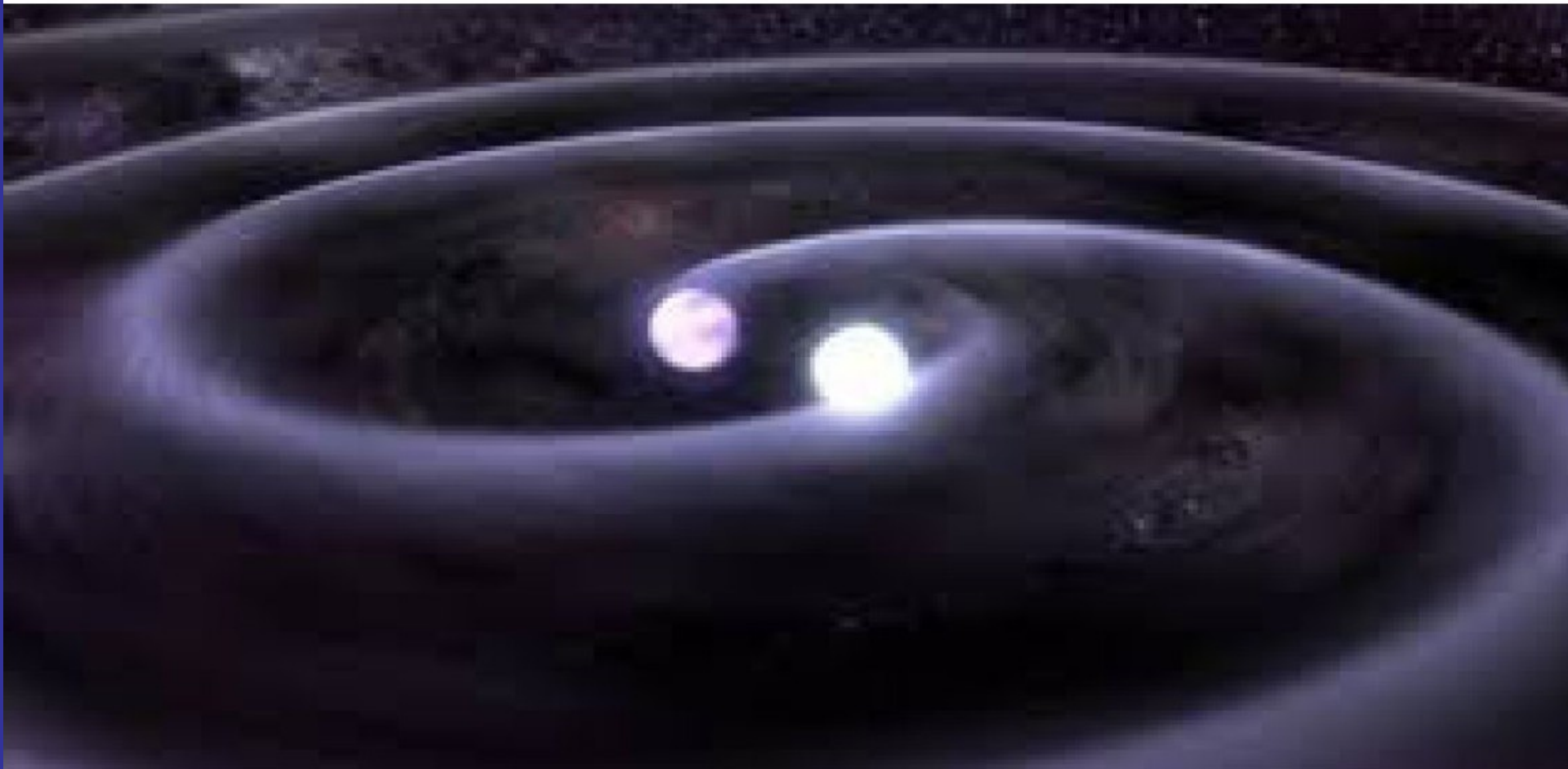
Michelson-Interferometer



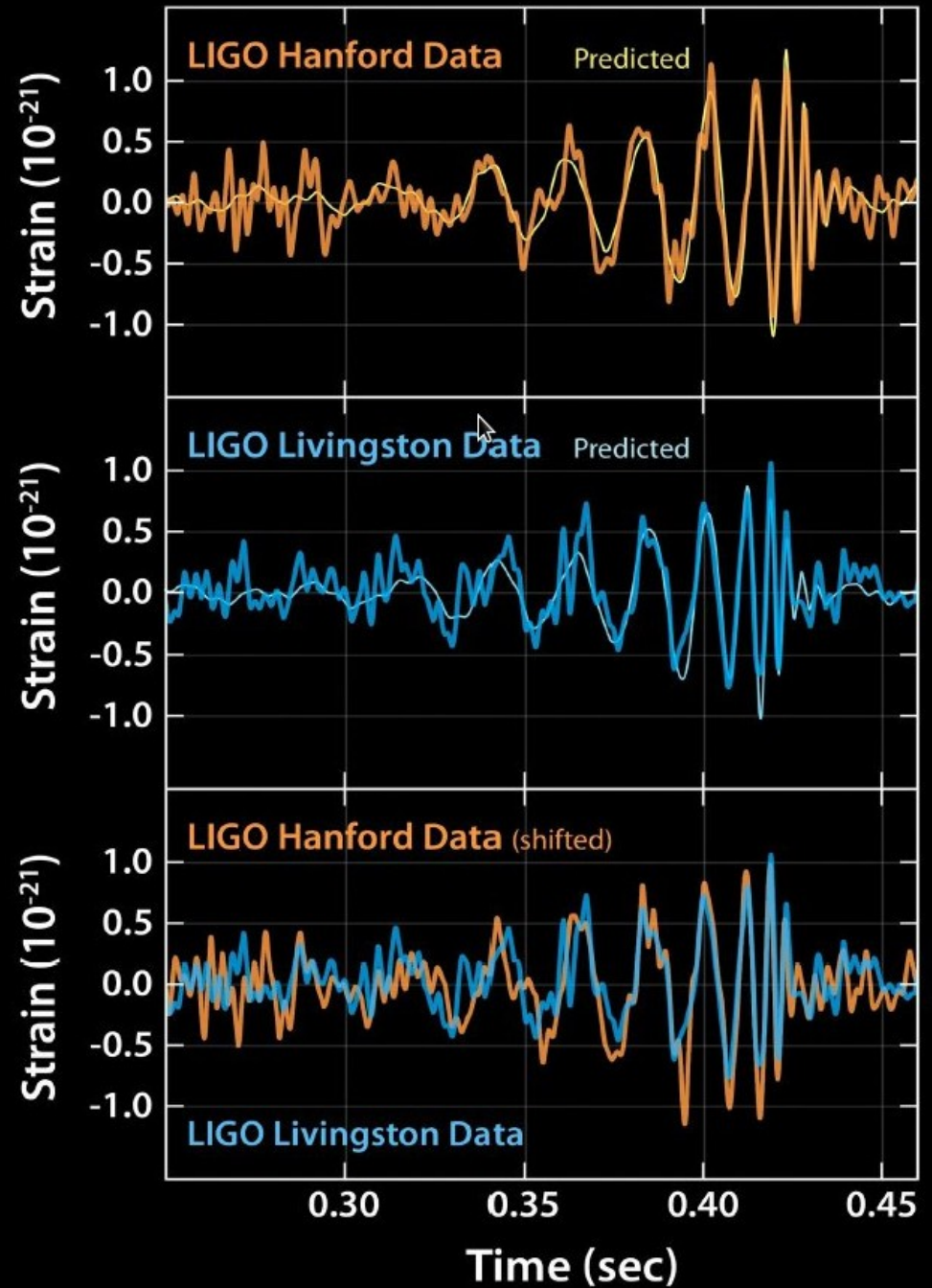
Gravitationswellen



Gravitationswellen

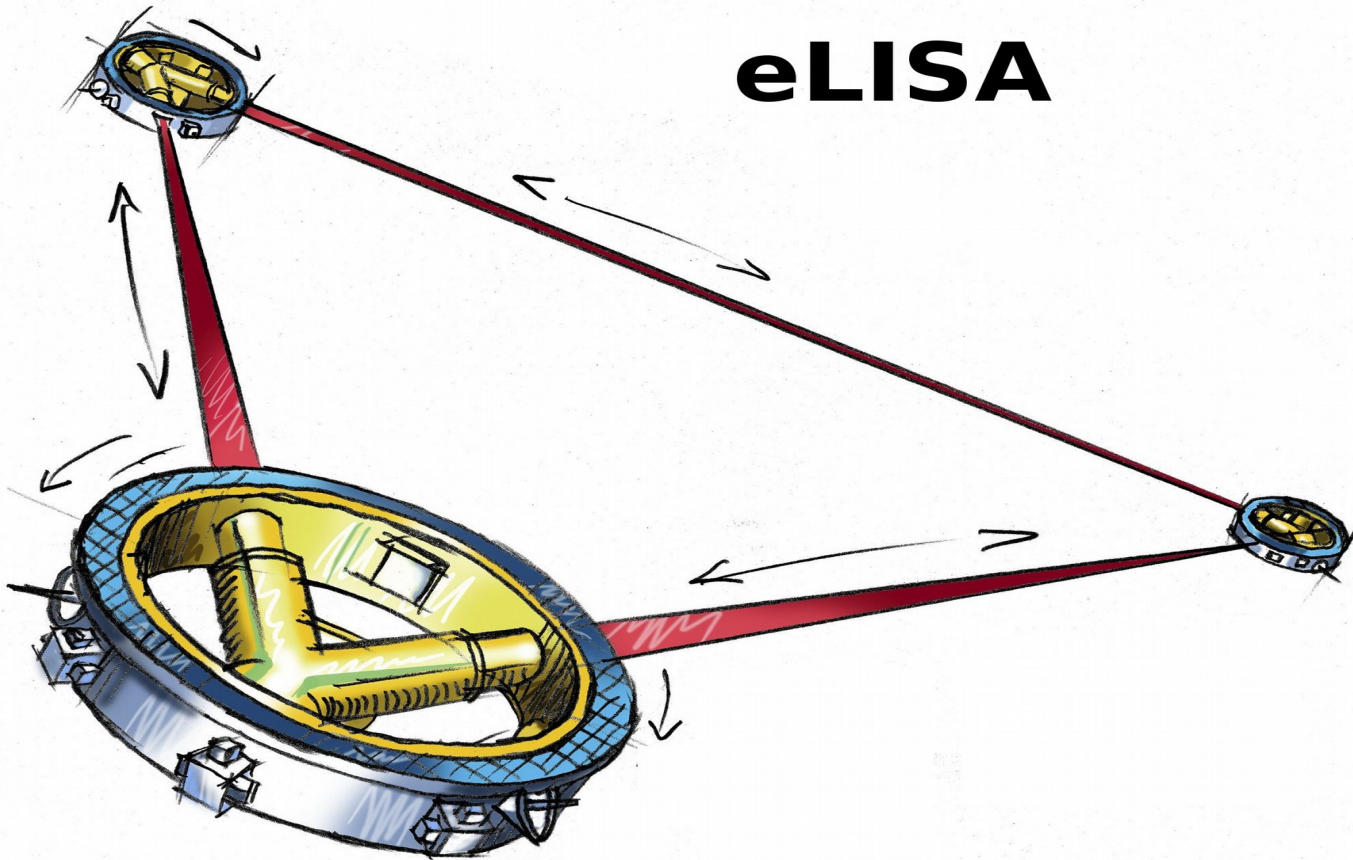


Gravitationswellen



ELISA

evolved Laser Interferometer Space Antenna



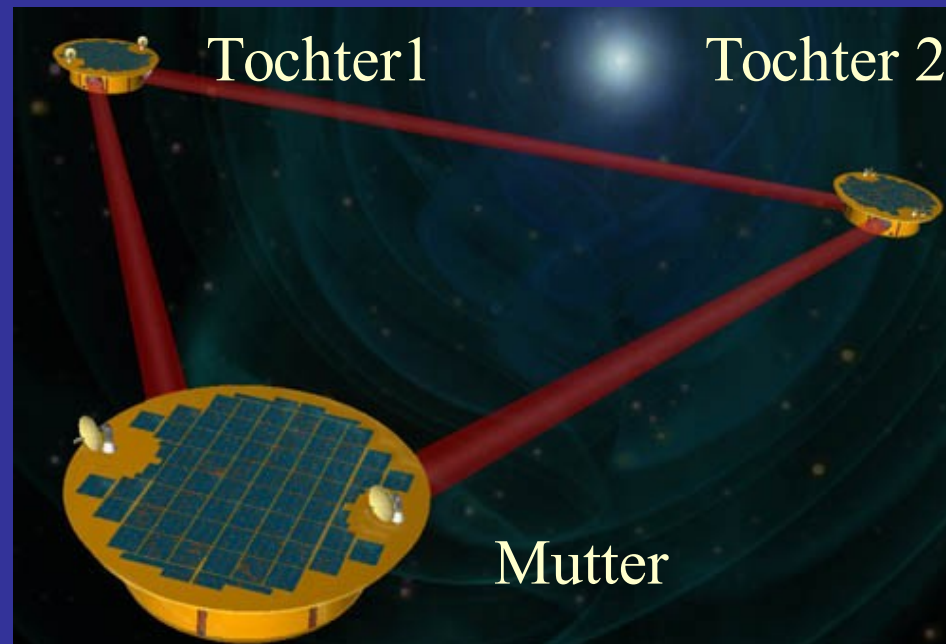
gleich-
seitiges
Dreieck
mit
1 Million km
Seitenlänge

Start 2034

LISA ist ein Gemeinschaftsprojekt der ESA und NASA seit 1995: NASA ist aus Geldgründen ausgestiegen: eLISA = NGO (New Gravitational Wave Observatory)

Statt der ursprünglich geplanten Seitenlänge von 5 Millionen km sind jetzt nur noch 1 Million km geplant.

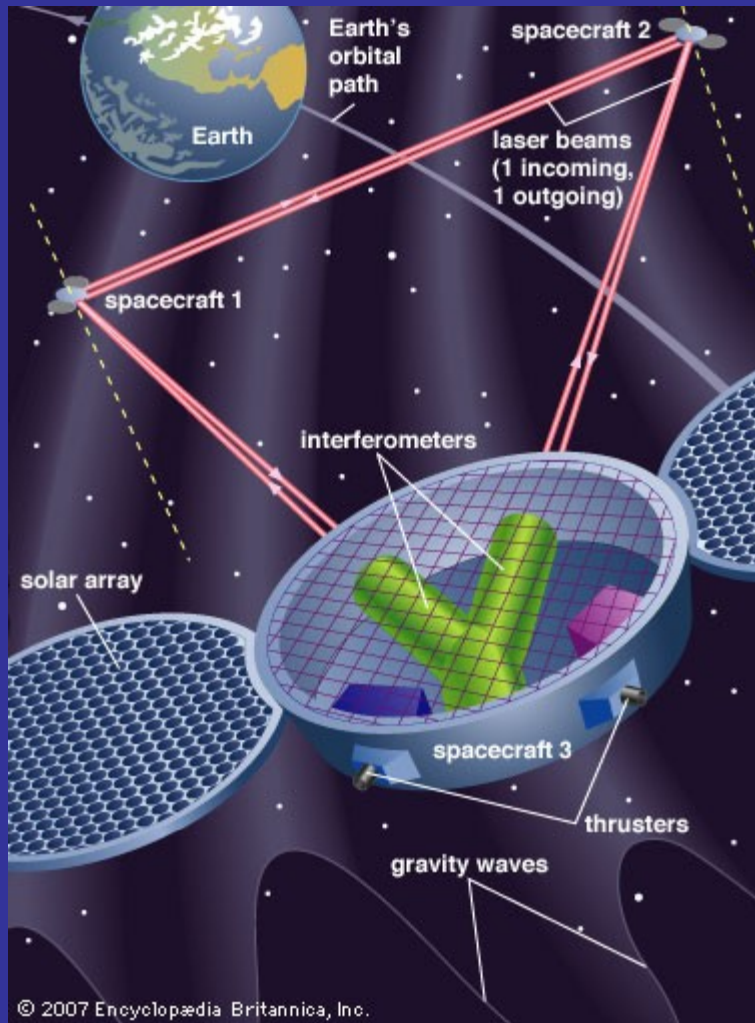
50 Millionen km von der Erde entfernt





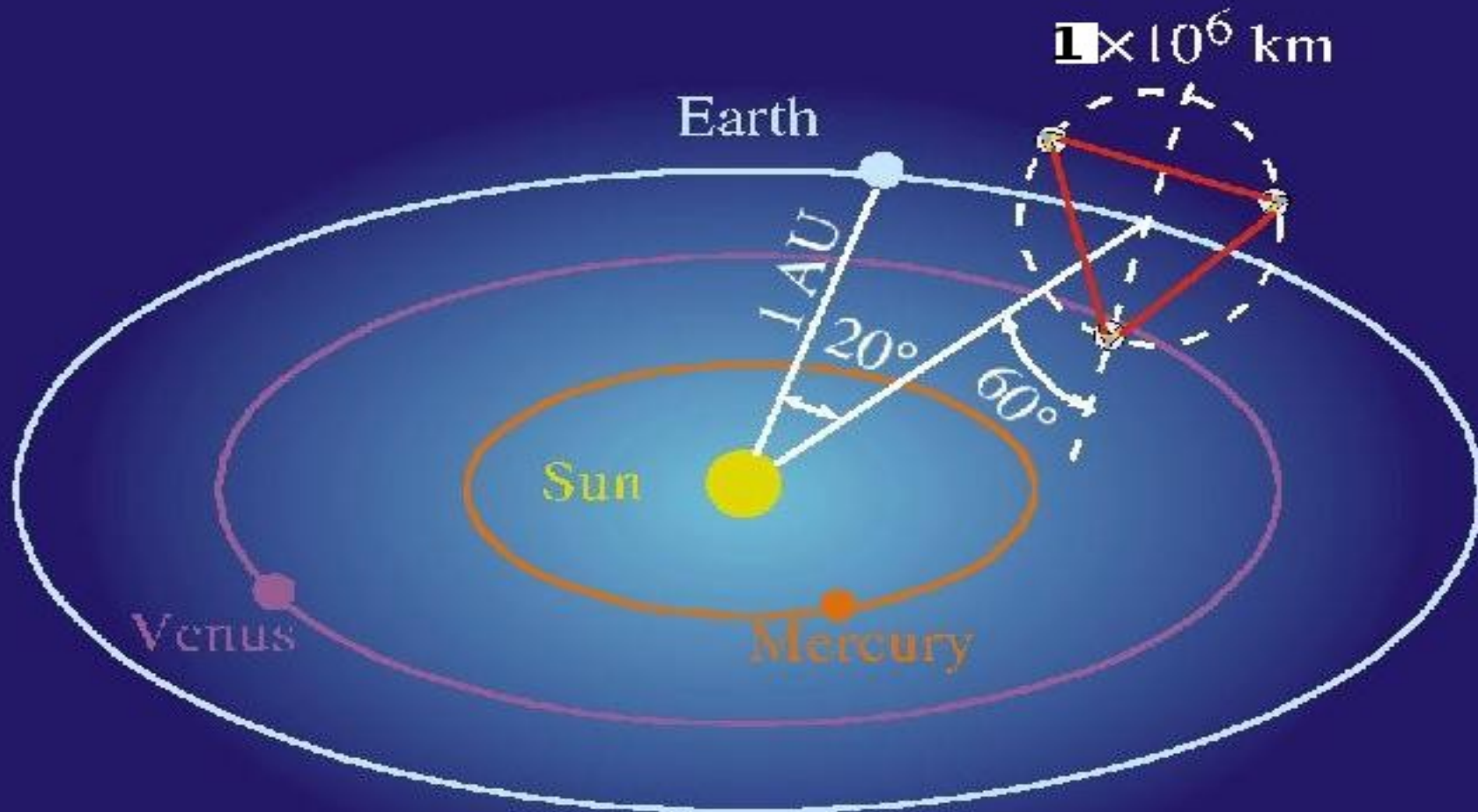
Die “Mutter” emittiert je zwei Laserstrahlen in Richtung der “Töchter”. Wegen der großen Entfernung kann das Gerät nicht als normales LASER-Interferometer arbeiten: es würde nicht genügend

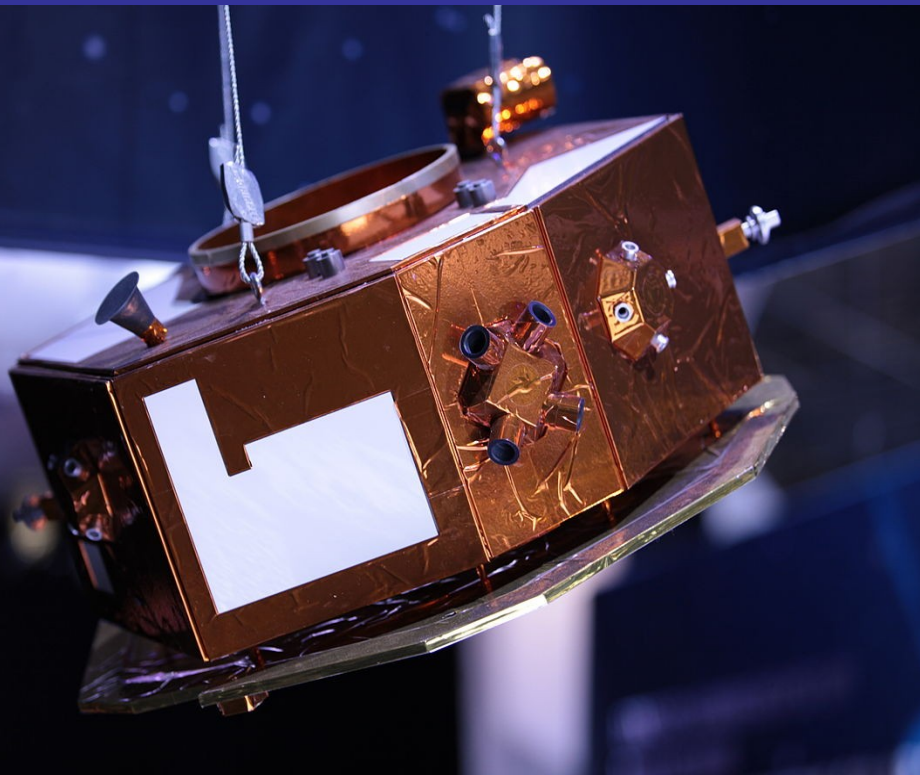
Licht reflektiert werden. Also hat man zwei separate Laserstrahlen. Die Töchter senden selbst aktiv ein Lichtsignal aus, sobald das Muttersignal ankommt. Die Laufzeitdifferenz der Signale in den beiden Armen dient als Messsignal. Die Messgenauigkeit ist besser als ein Pikometer.



Wirkungsweise des eLISA Interferometers: Strahllänge 1 Millionen km

Relative Position eLISA – Erde - Sonne





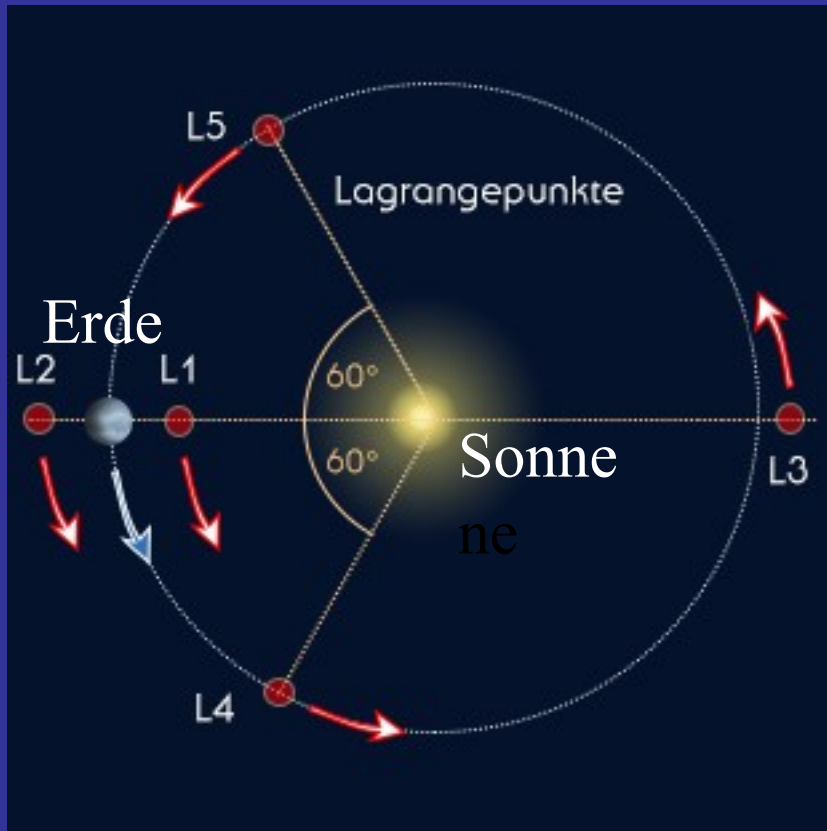
Die Messgenauigkeit wurde mit dem Pathfinder (SMART 2) getestet. Start 2015.

Statt 1 Mill. km vermisst SMART 2 den Abstand zweier Referenzkörper

im Abstand von 38 cm! Ergebnis 2016: besser als das 5-fache der geplanten Anforderungen

Der Pathfinder steht schwebefrei im Lagrangepunkt L1 und bietet höchste Stabilität.

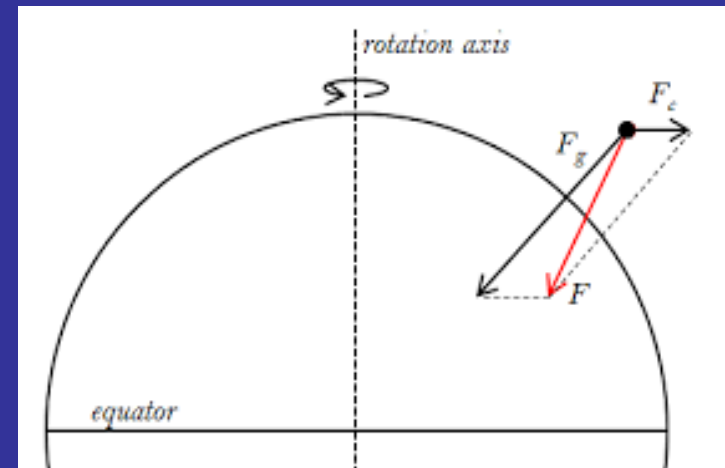
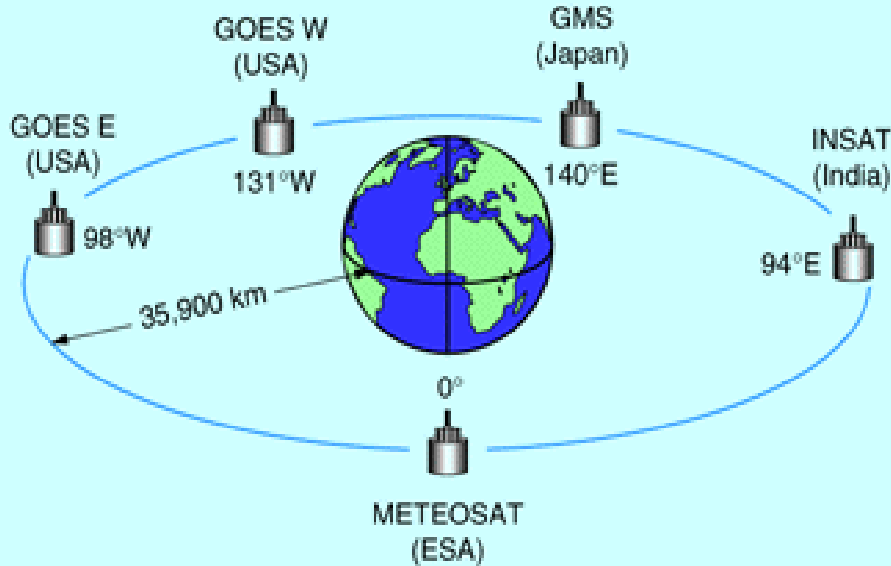
Lagrangepunkte (Librationspunkte)



Die Lagrangepunkte sind Orte des Gleichgewichts. Hier heben sich die Anziehungskräfte zweier Körper und die Zentrifugalkräfte ihrer Bewegungen gegenseitig auf. Gerät ein wesentlich kleinerer Körper an einen solchen Punkt wird er von beiden Körpern gleichartig angezogen und verbleibt, wo er ist.

angezogen und verbleibt, wo er ist.

Einfache Erklärung für stabile Positionen im All geostationäre Satelliten



Solche Satelliten können nur über dem Äquator stehen, weil sich nur dort Massenanziehung und Zentrifugalkräfte kompensieren.

Zukunft ?

Future fates of the dark-energy universe

