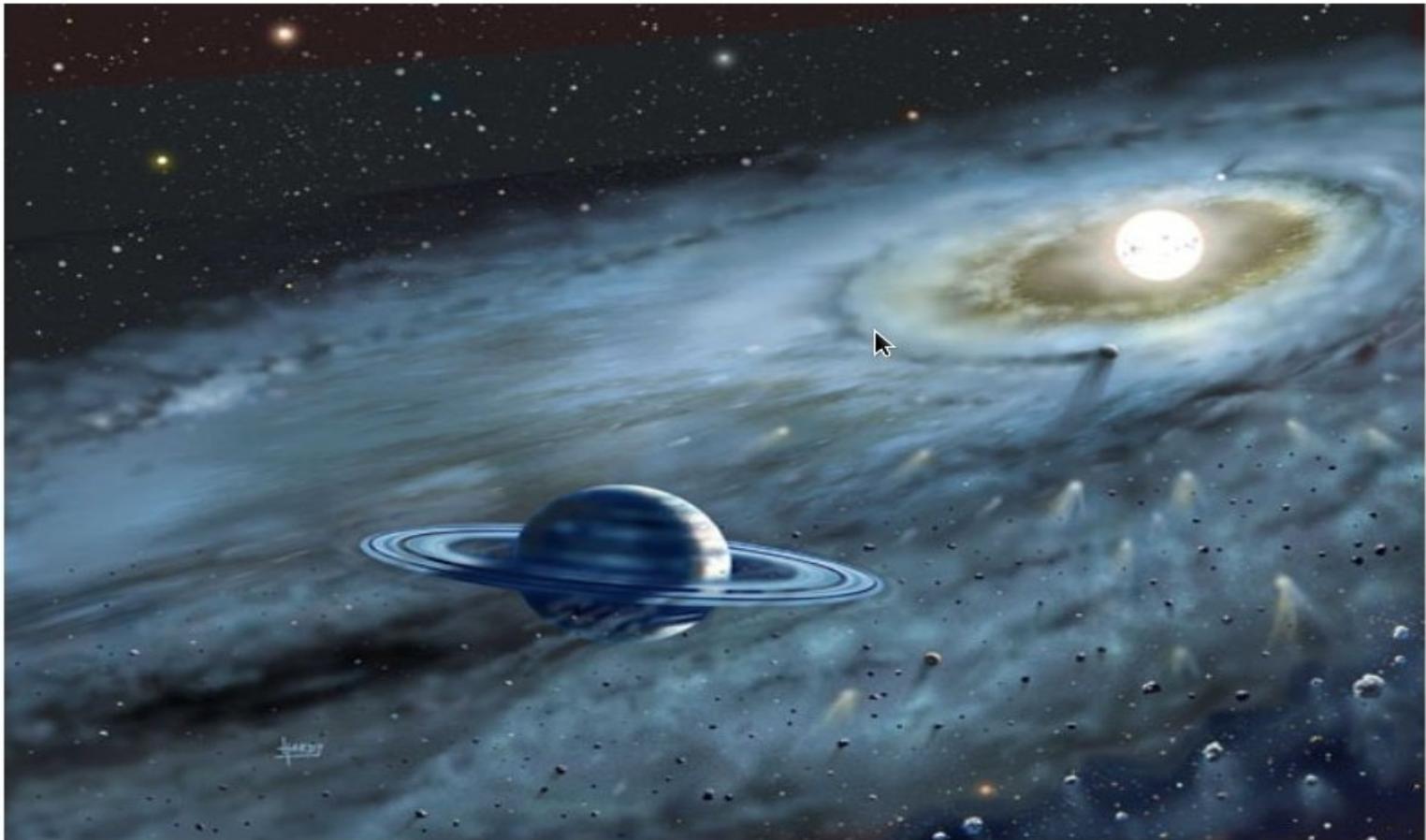


# Sternentwicklung

## Mittwochsakademie Sommer 2017

### Claus Grupen



# Inhalt

Wo entstehen Sterne?

Die Sonne

Supernovae

Pulsare und

Neutronensterne

Schwarze Löcher

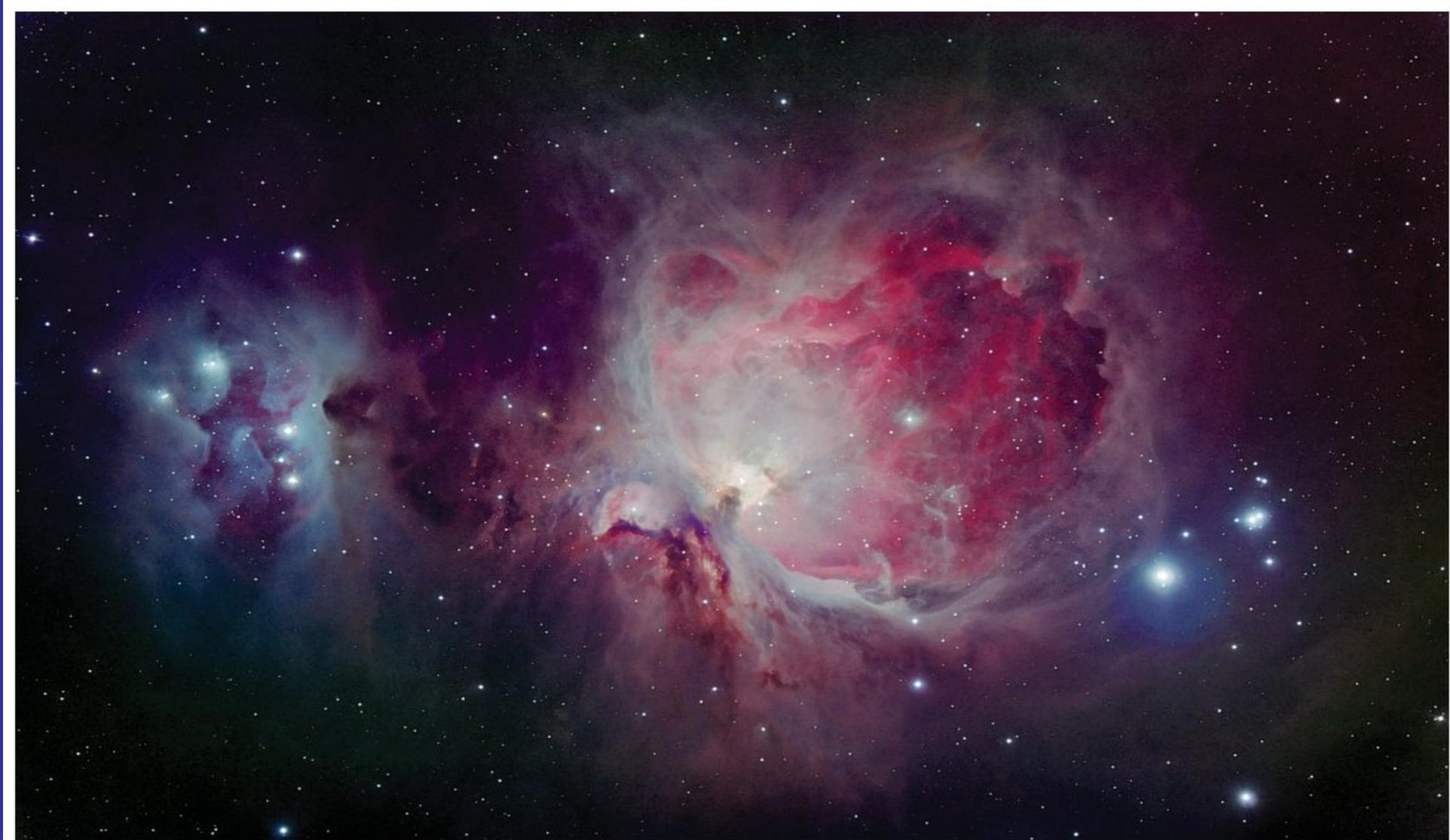
Machos



Roter Riese und Weißer Zwerg

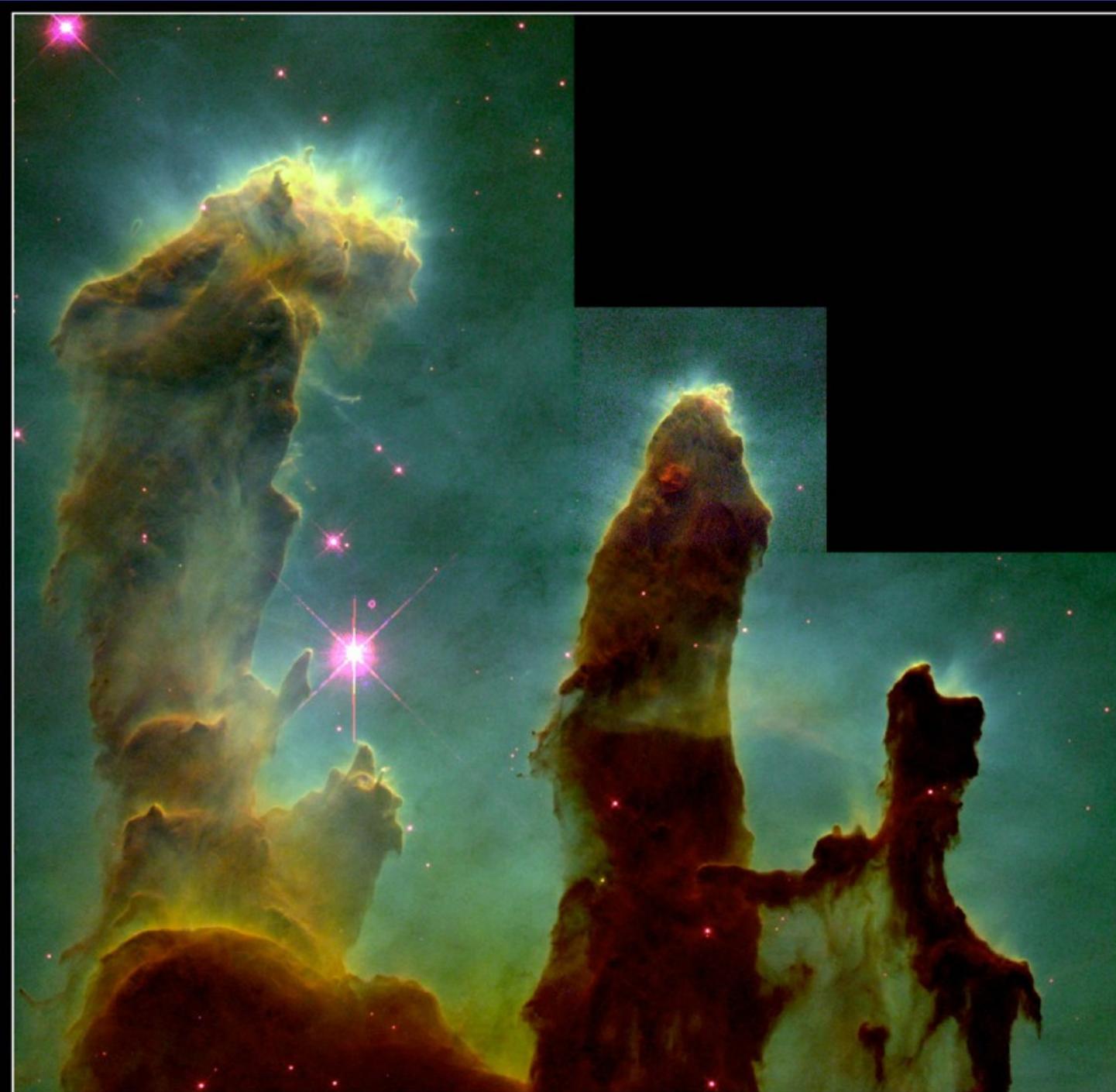
Claus Guppen 2013

# Kreißsaal: Orionnebel





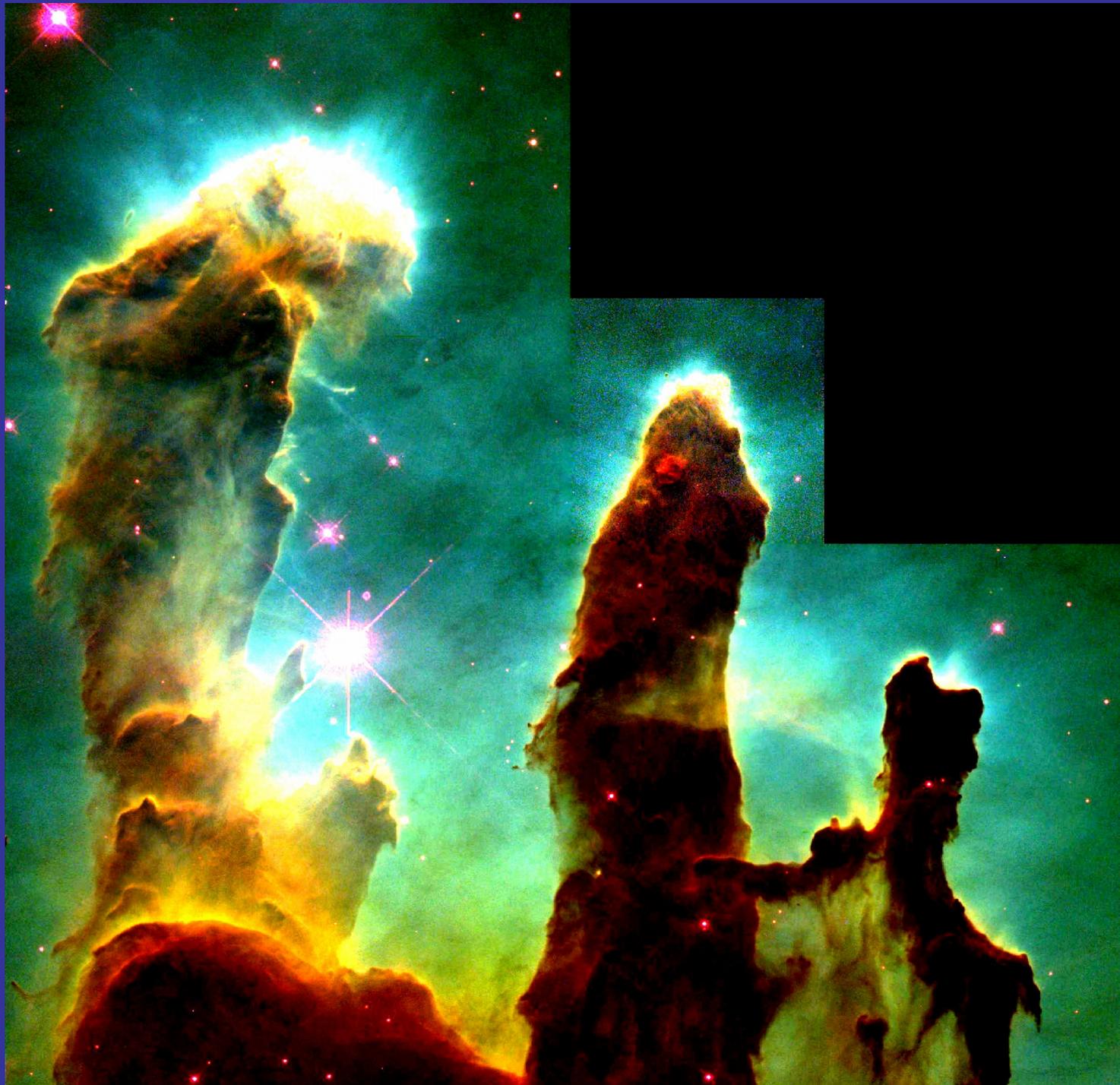
“C.G. Öl auf Leinwand:  
“Teufel ärschlings zur Hölle  
stürzend” 1962

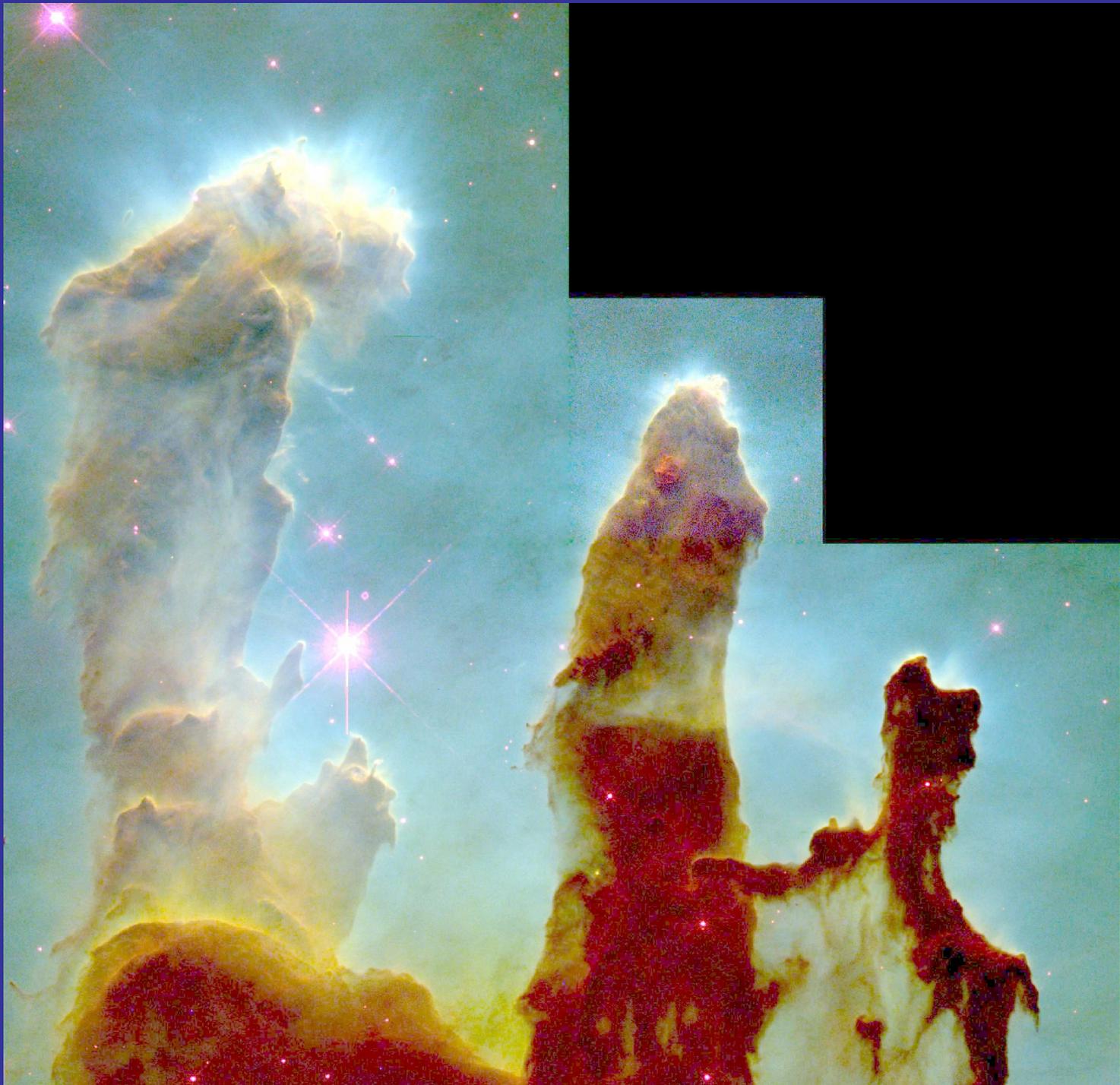


**Adler Nebel**

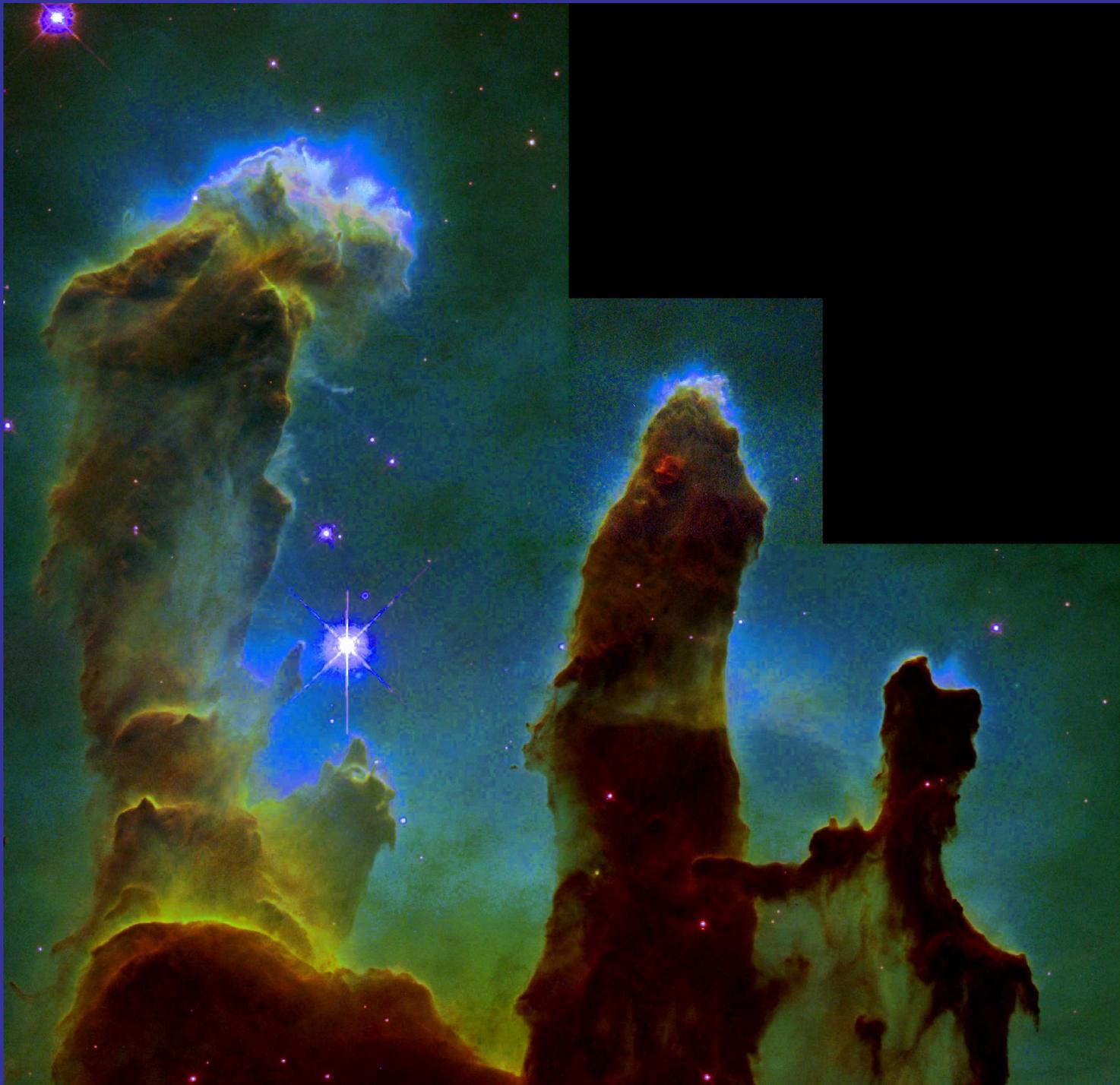
**“Säulen der  
Schöpfung”**

**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*

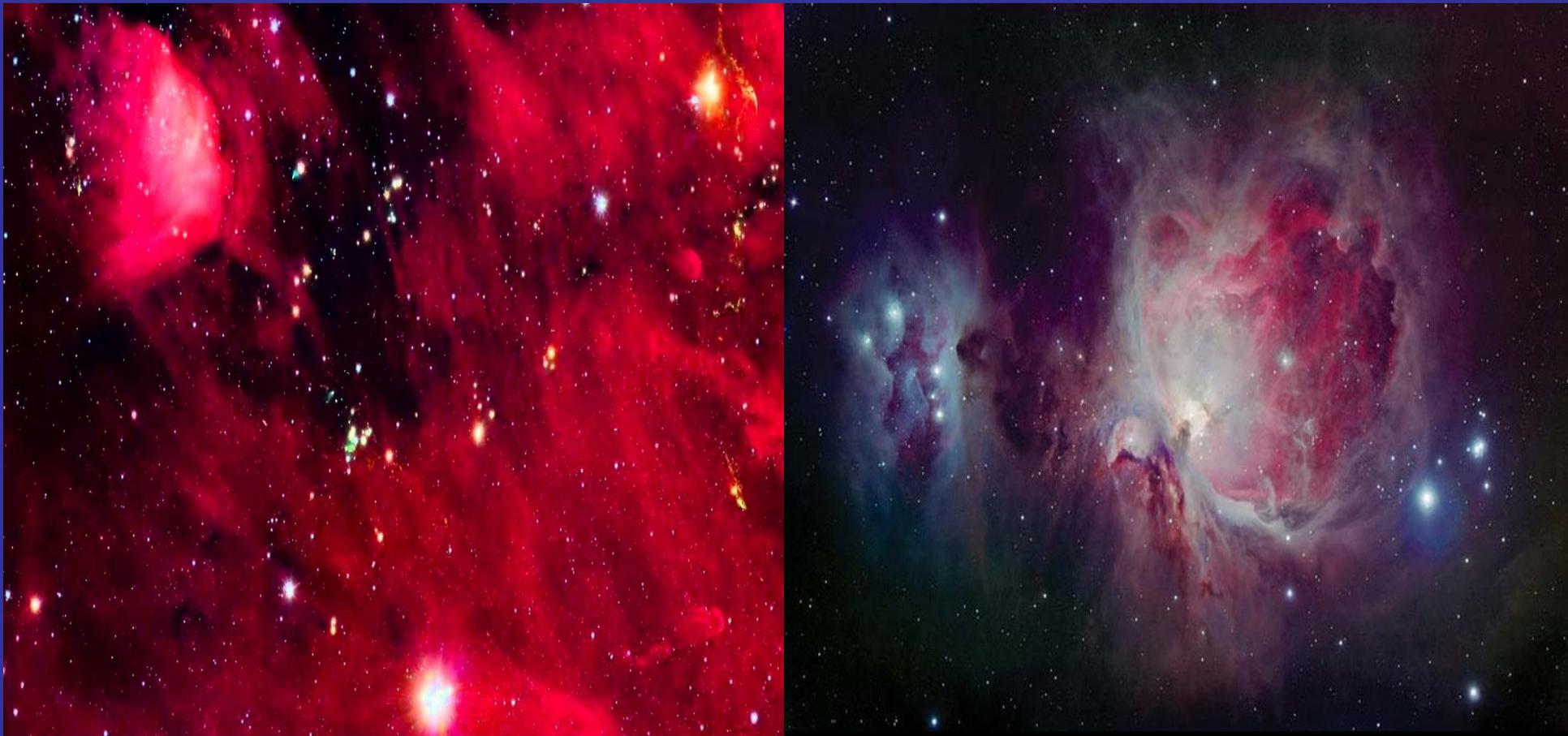
**Carina Nebel**



## 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.

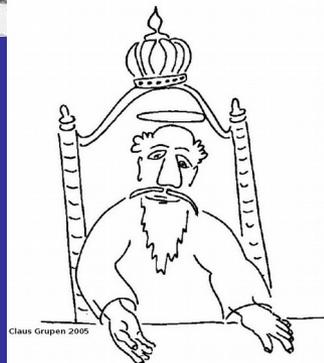
Er verdoppelt sein Astronomen-Team (alles Jesuiten) auf 20 Wissenschaftler. Die Forscher, die bisher im Observatorium des

Vatikans 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-

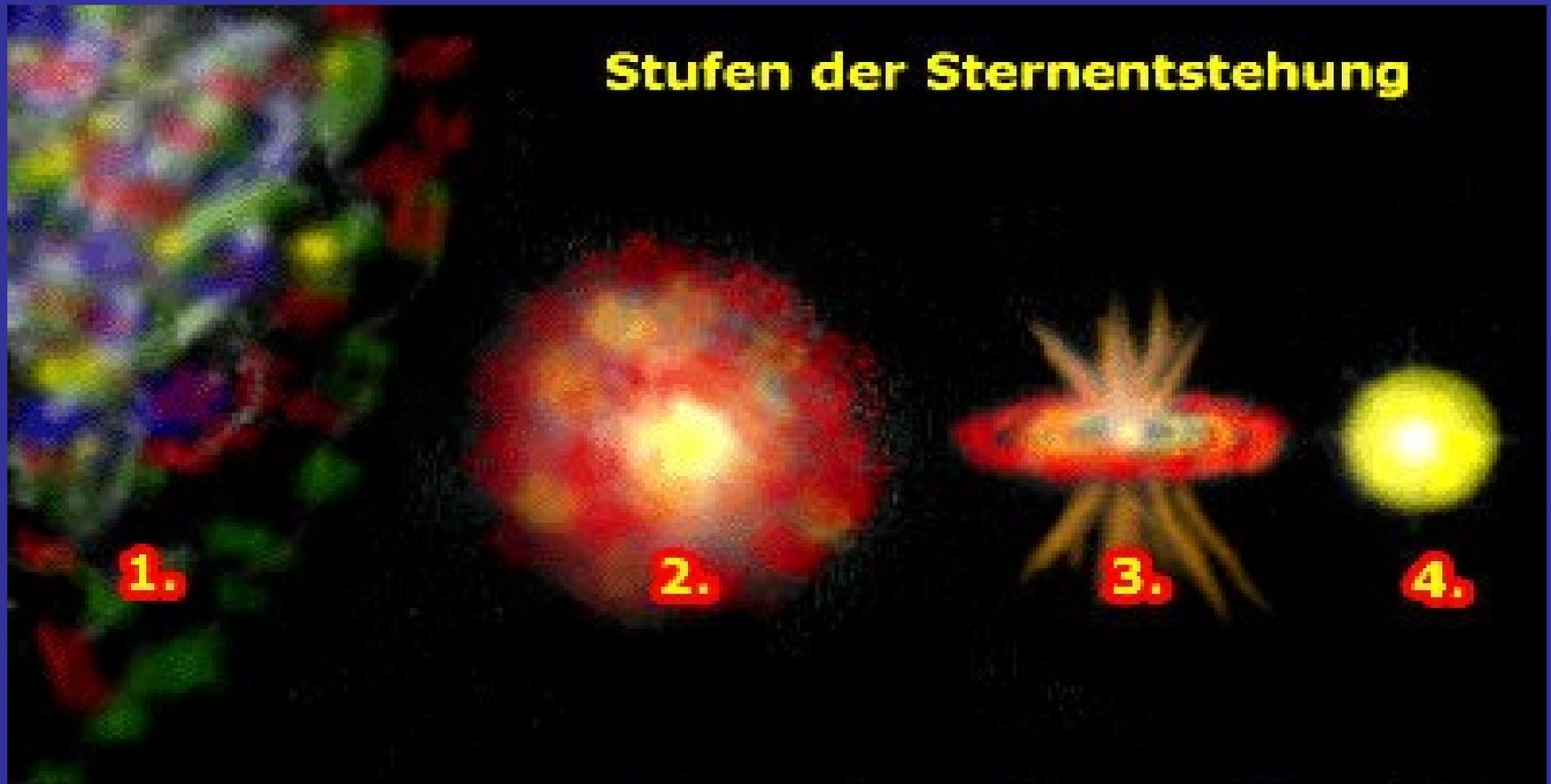
bally, stellvertretender Direktor des Observatoriums: „Wenn es Zivilisationen auf anderen Planeten gibt, würden wir ihnen gerne Missionare senden, um sie zu retten. So wie wir es in der Vergangenheit taten, als neue Länder entdeckt wurden.“





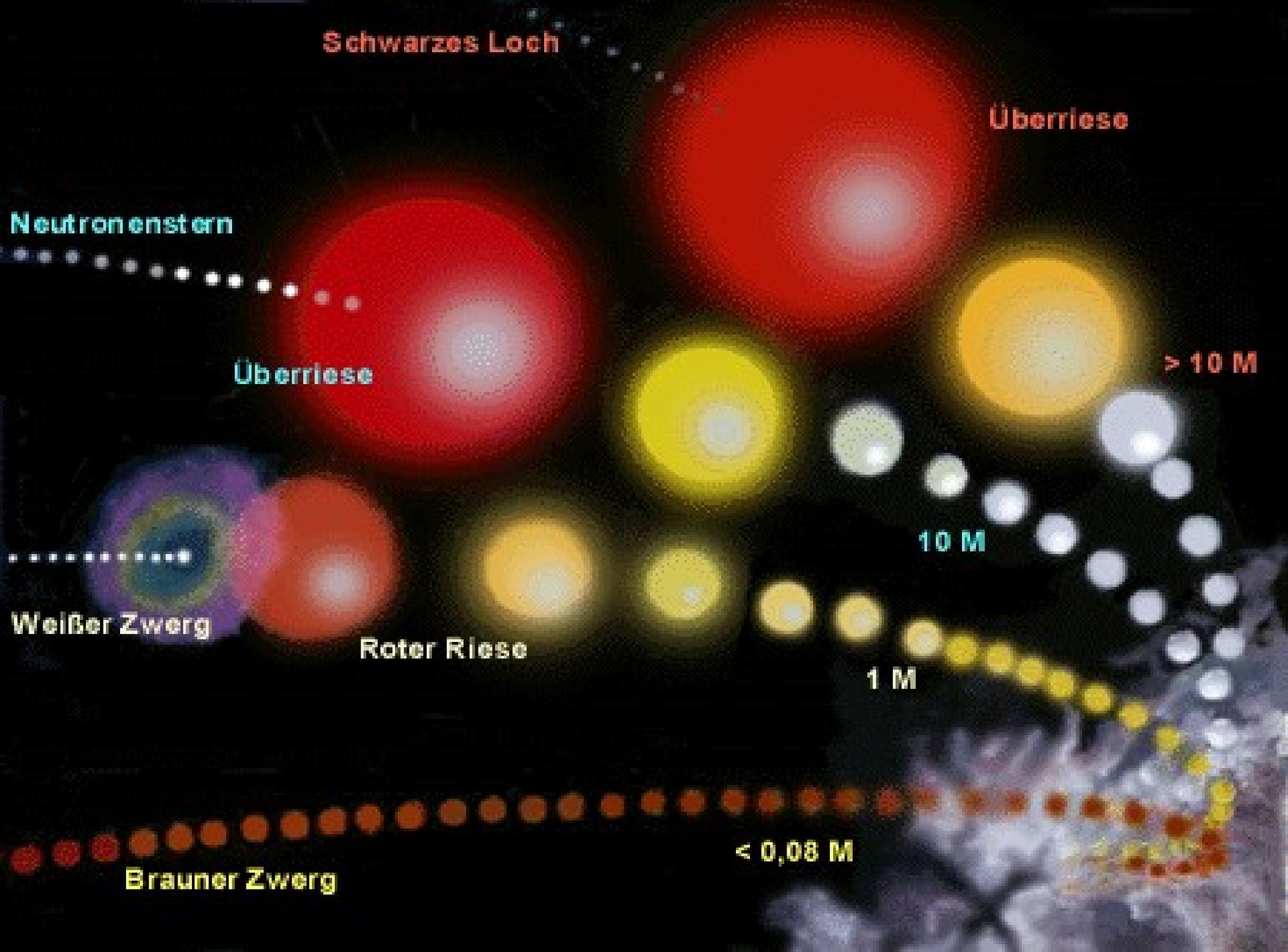
**Feuerrad-Galaxie**  
**170 000 LJ Durchmesser**

## Stufen der Sternentstehung



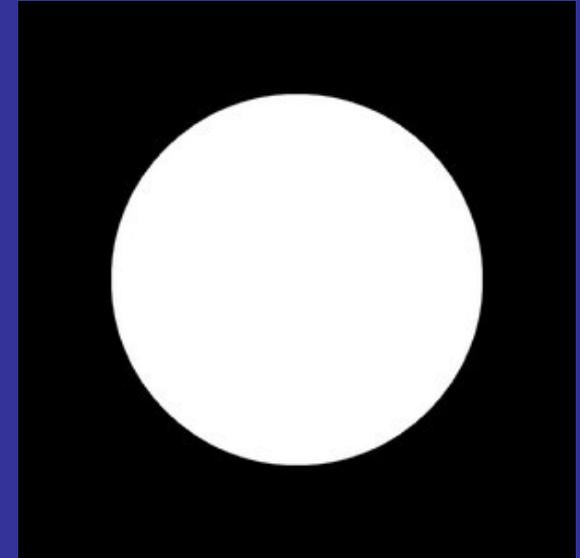
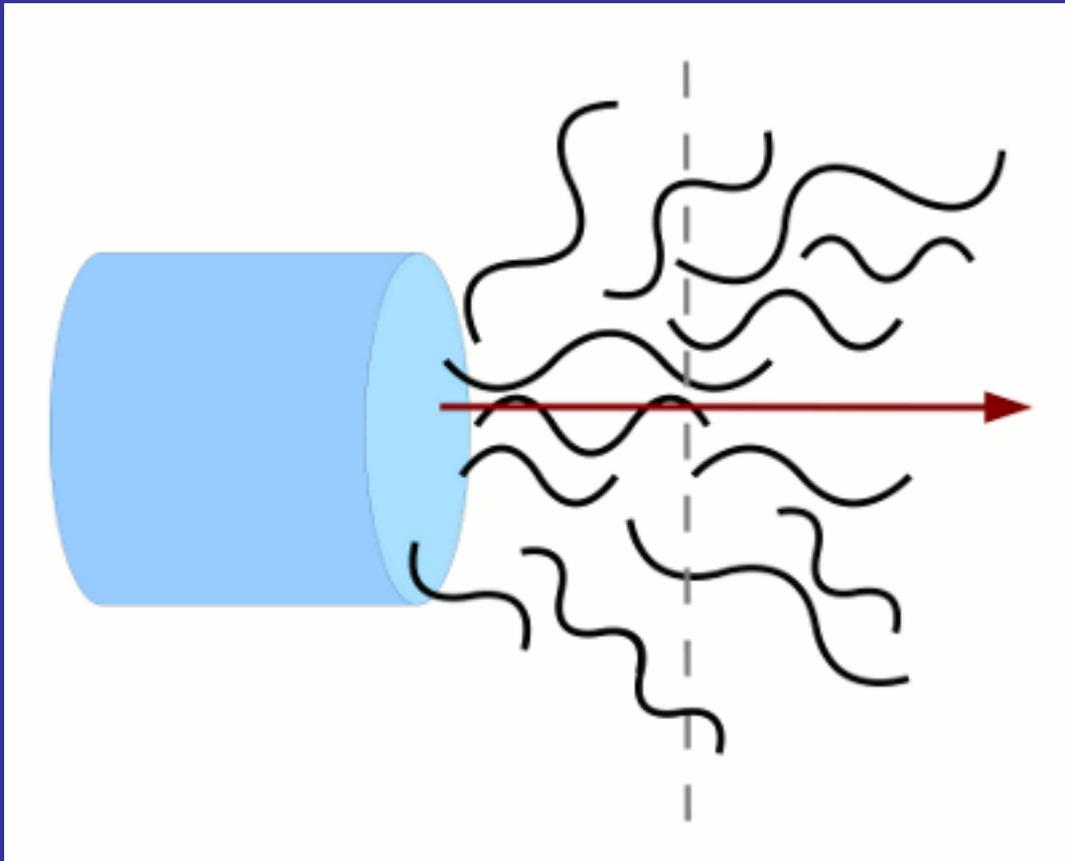
1. Kontrahierende Wolke, 2 Mill. Jahre
2. Masse aufsammeln, 30 000 Jahre
3. T- Tauri- Phase, 100 000 Jahre
4. Vorhauptreihe, 10 Mill. Jahre

**T-Tauri-Phase: junge Sterne mit Akkretionsscheiben**

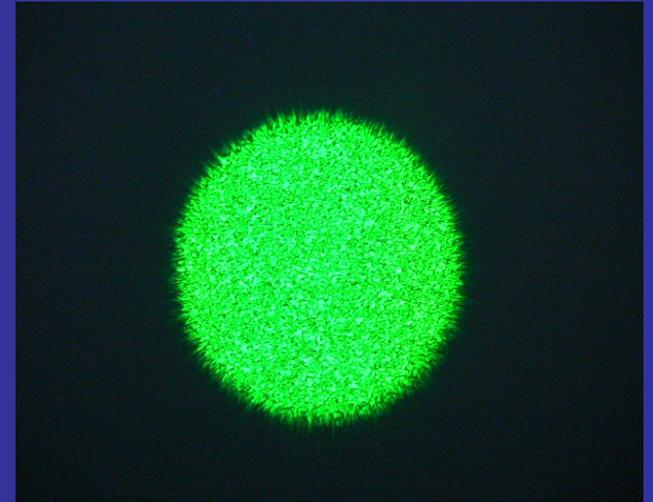
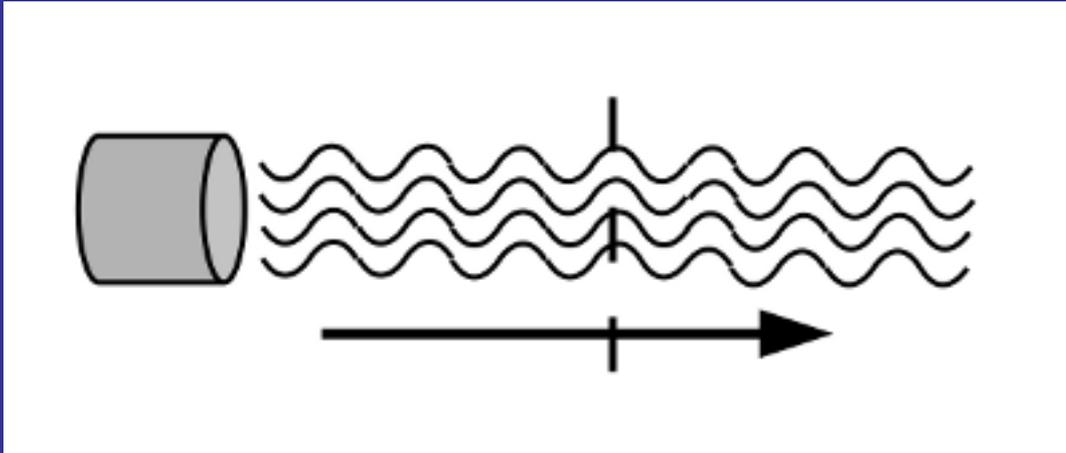




**Protoplanetare Scheibe mit Planetenansätzen**

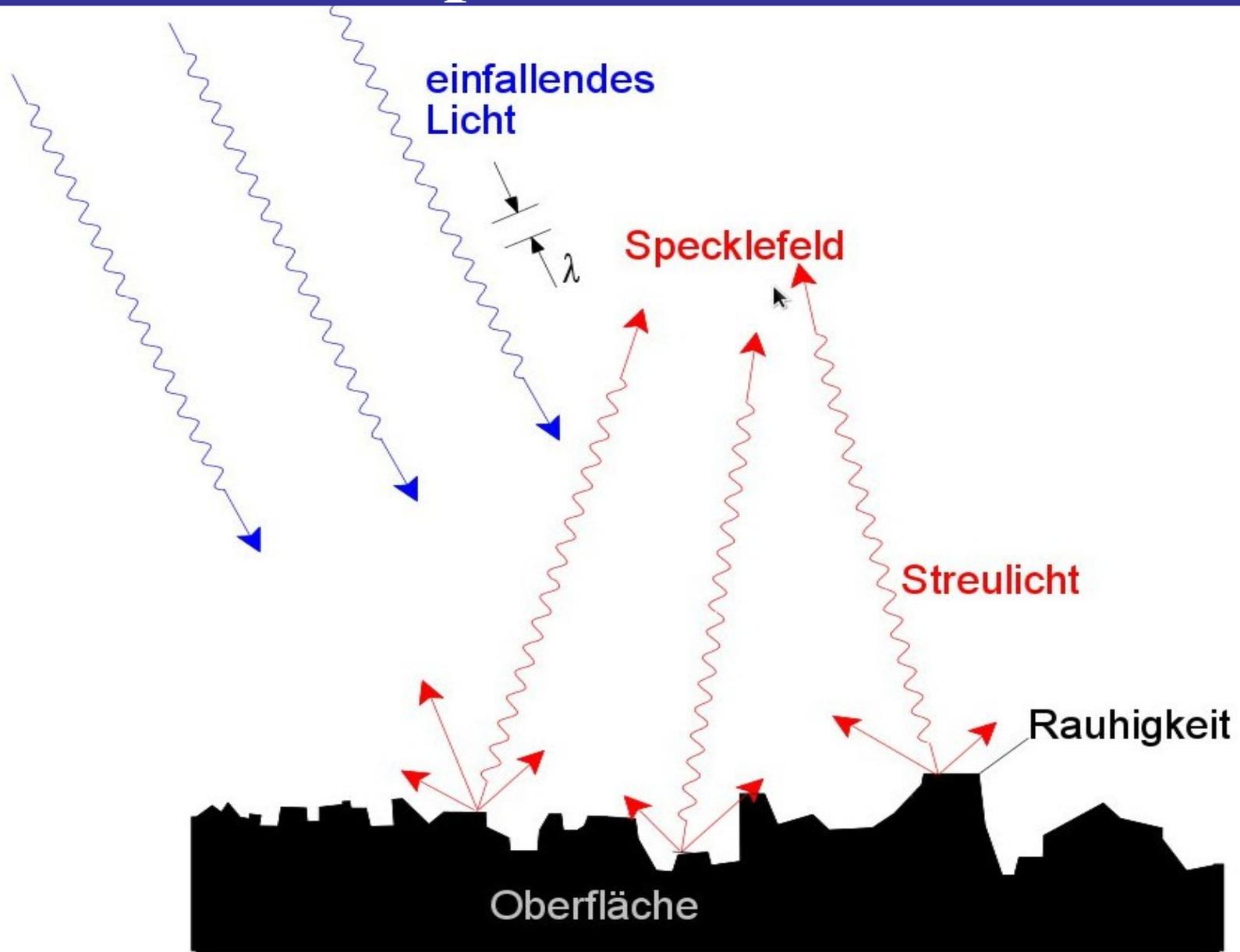


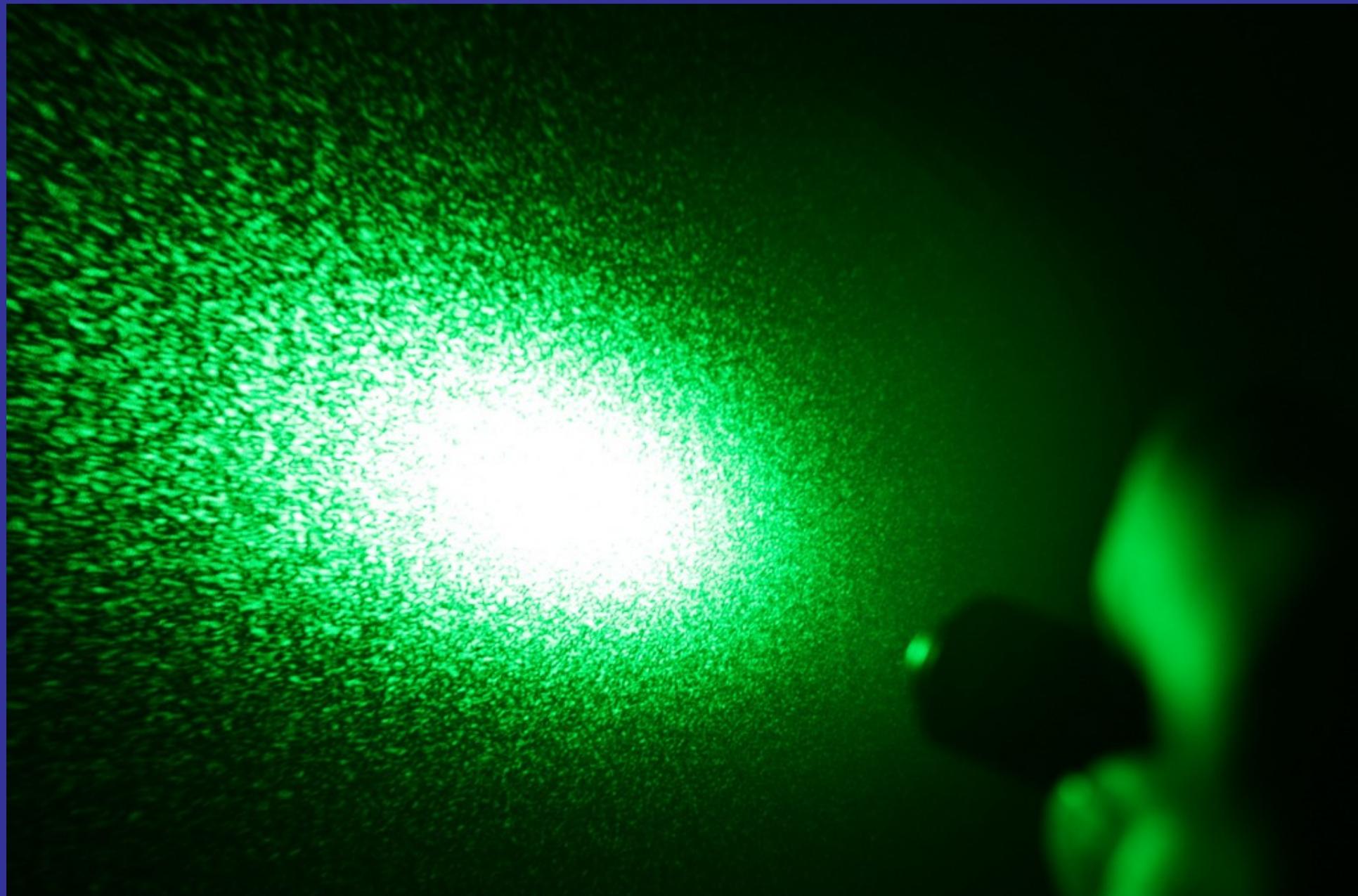
**Inkohärentes Licht einer Taschenlampe: Die Wellenzüge breiten sich in alle möglichen Richtungen aus (das Licht ist nicht parallel); die Wellenzüge sind kurz und haben verschiedene Wellenlängen (das Licht ist nicht monochromatisch).**



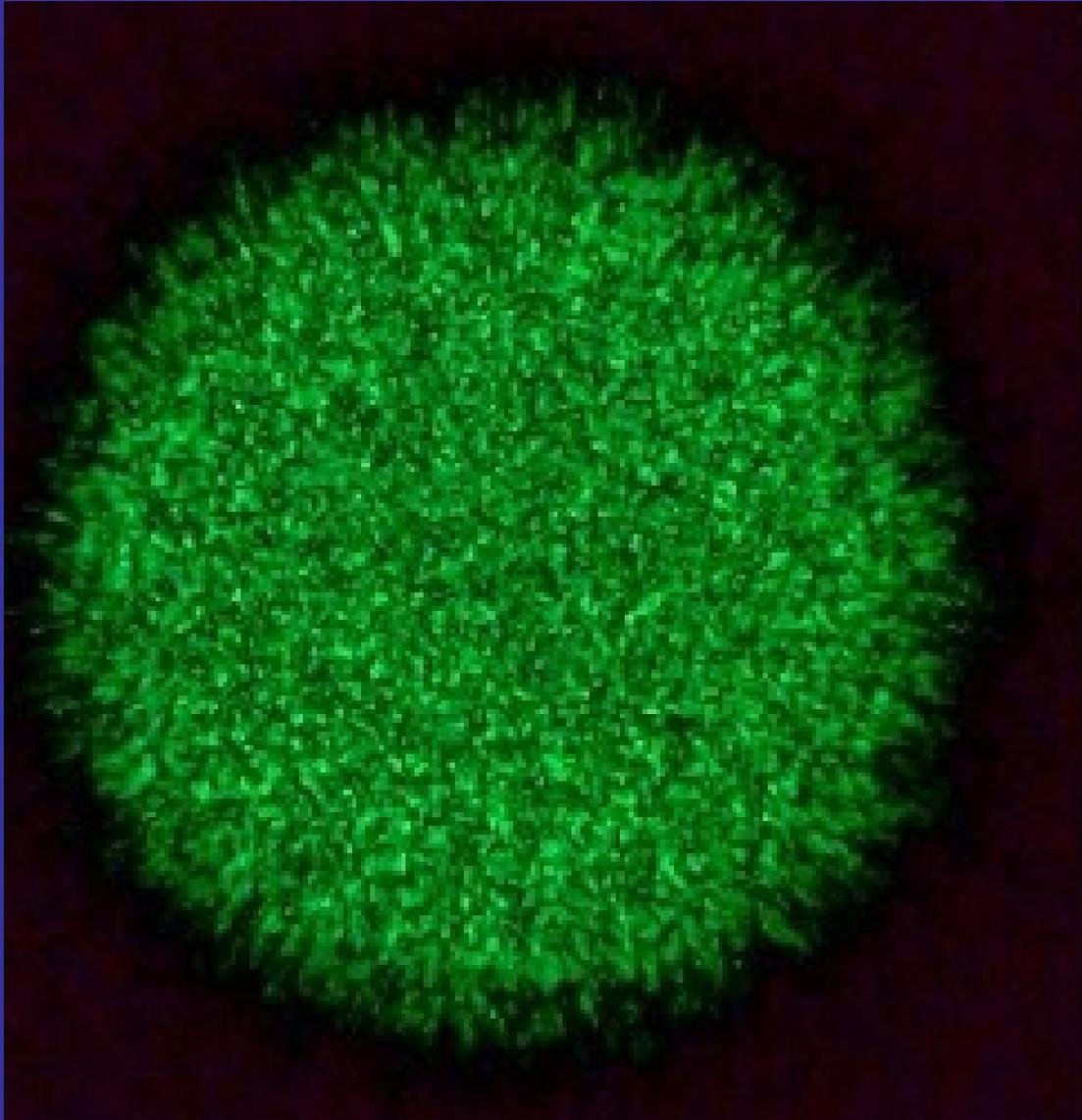
**Zeitlich und räumlich kohärentes Licht eines Lasers, der monochromatisches und paralleles Licht aussendet.**

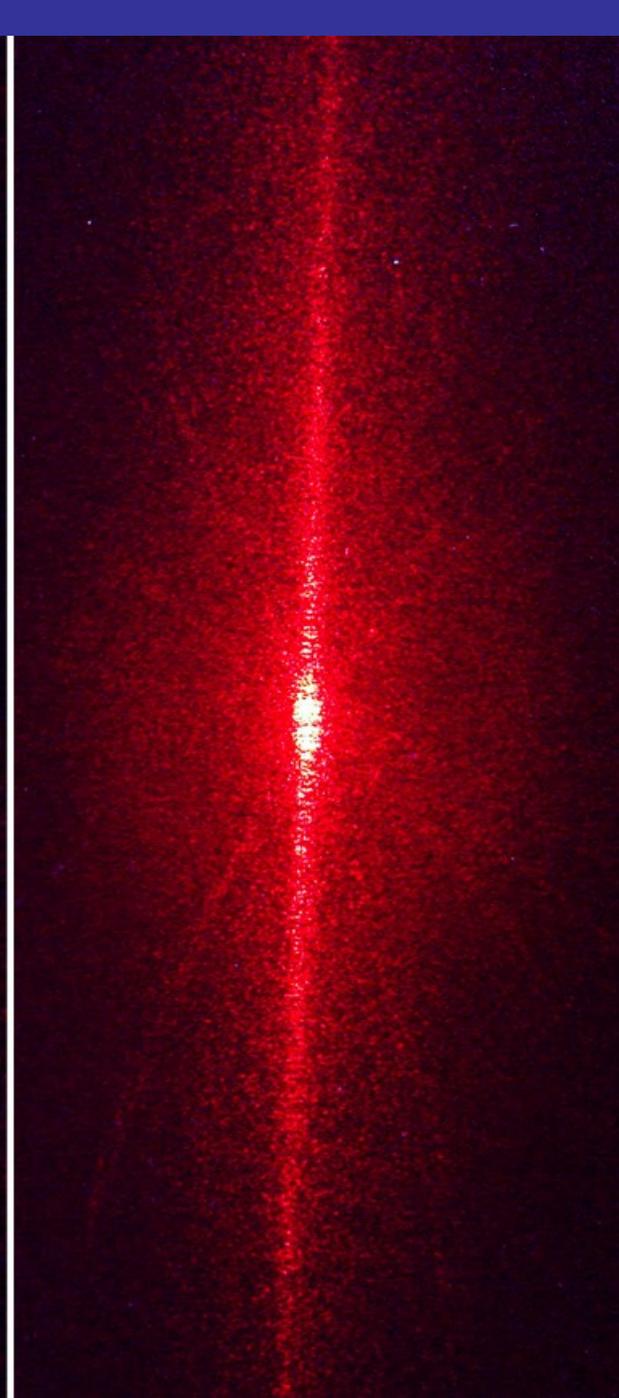
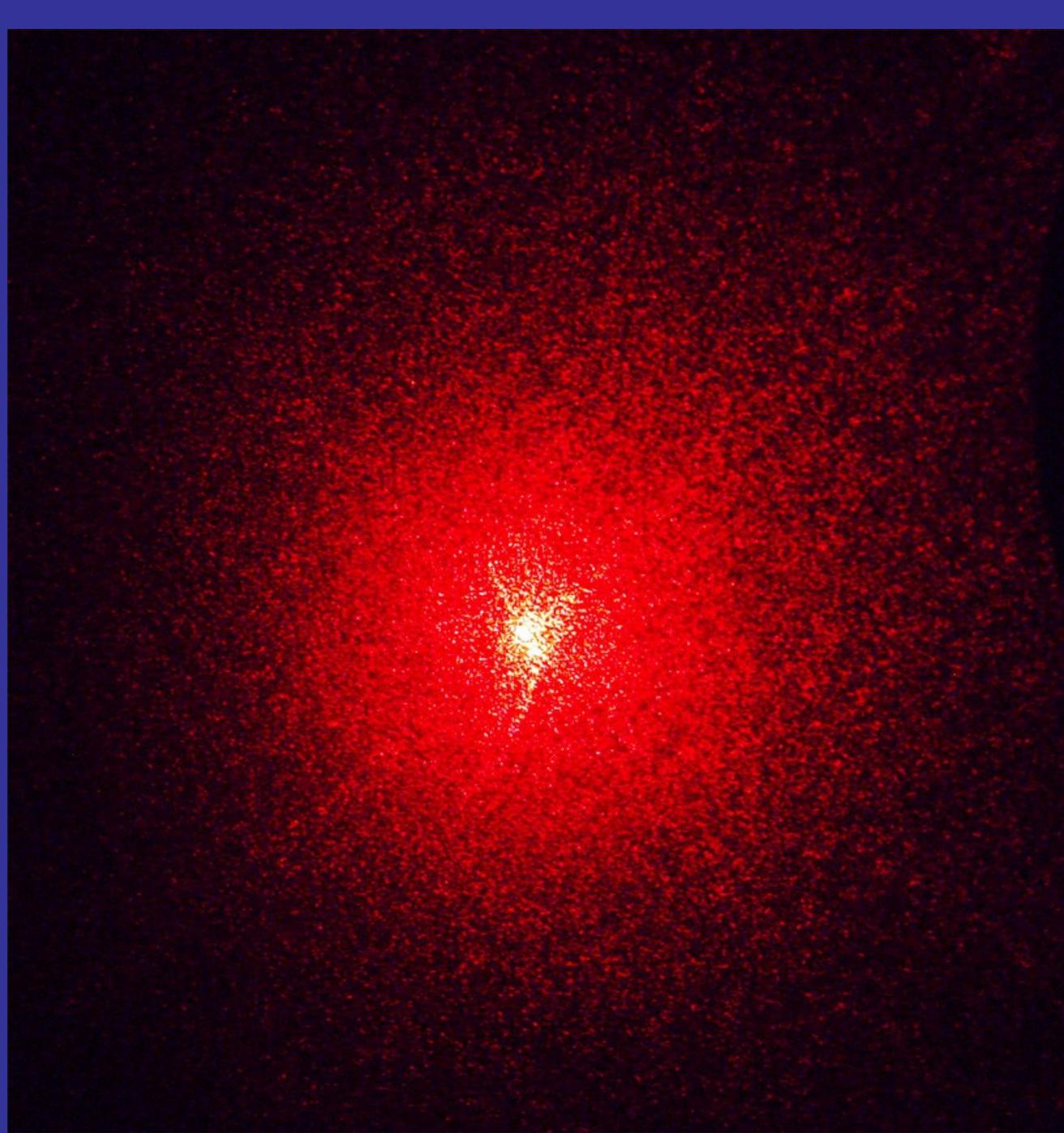
# Speckles

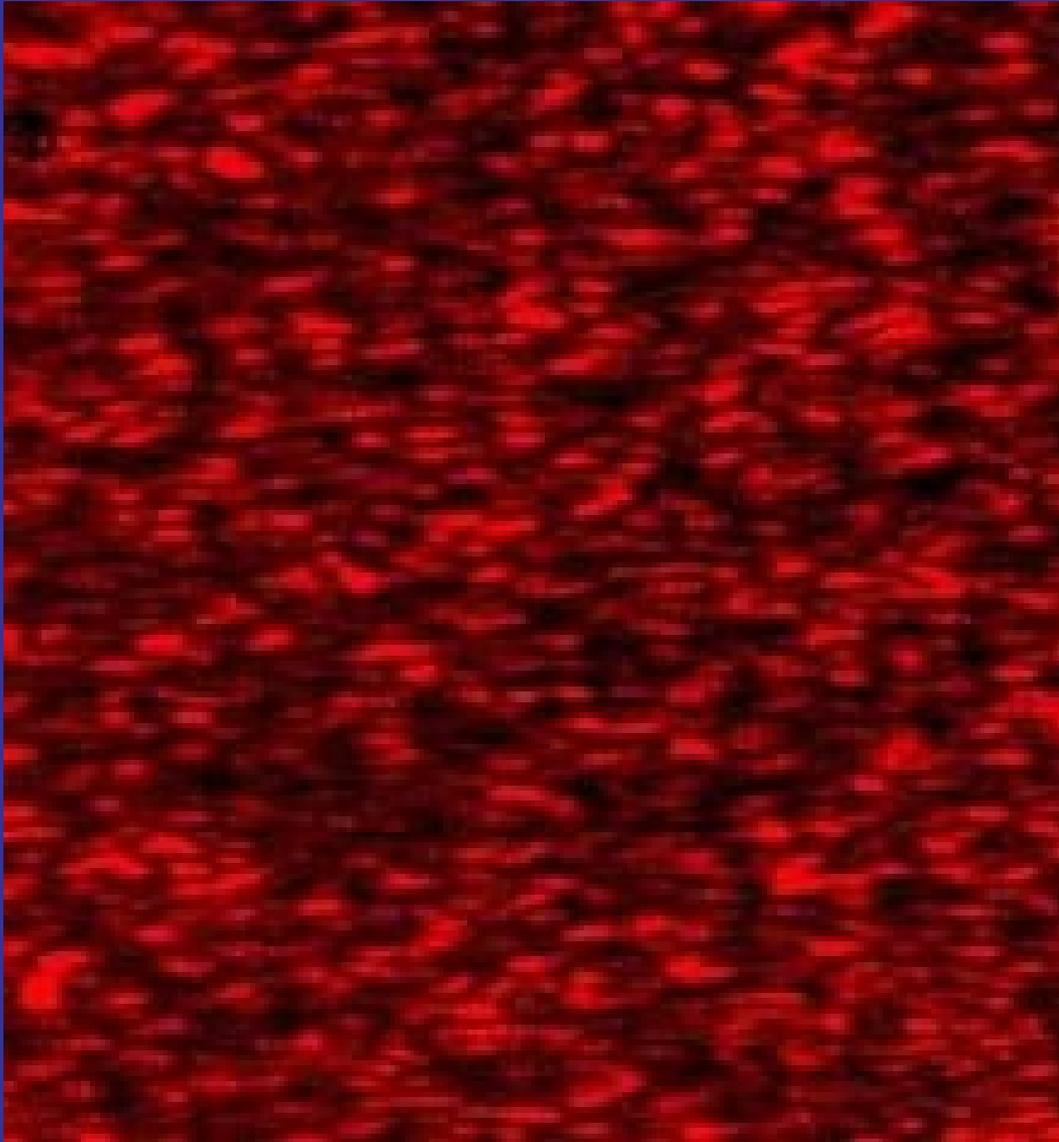




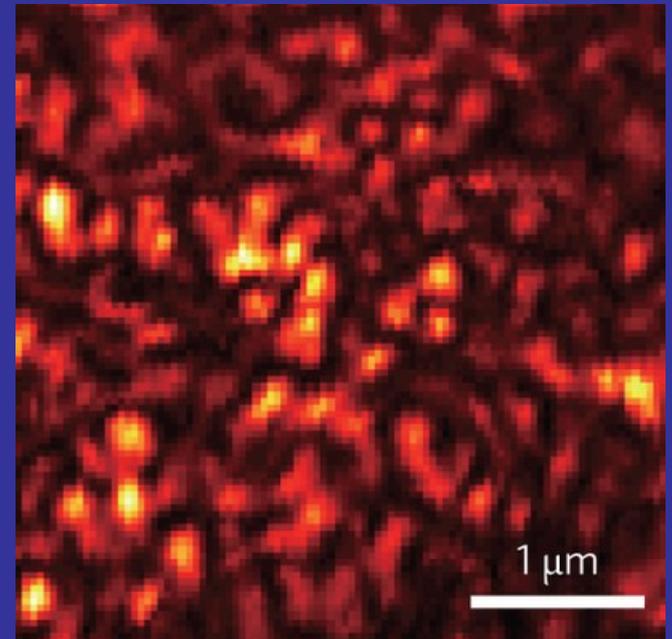
**535 nm,  
weiße  
Wand**



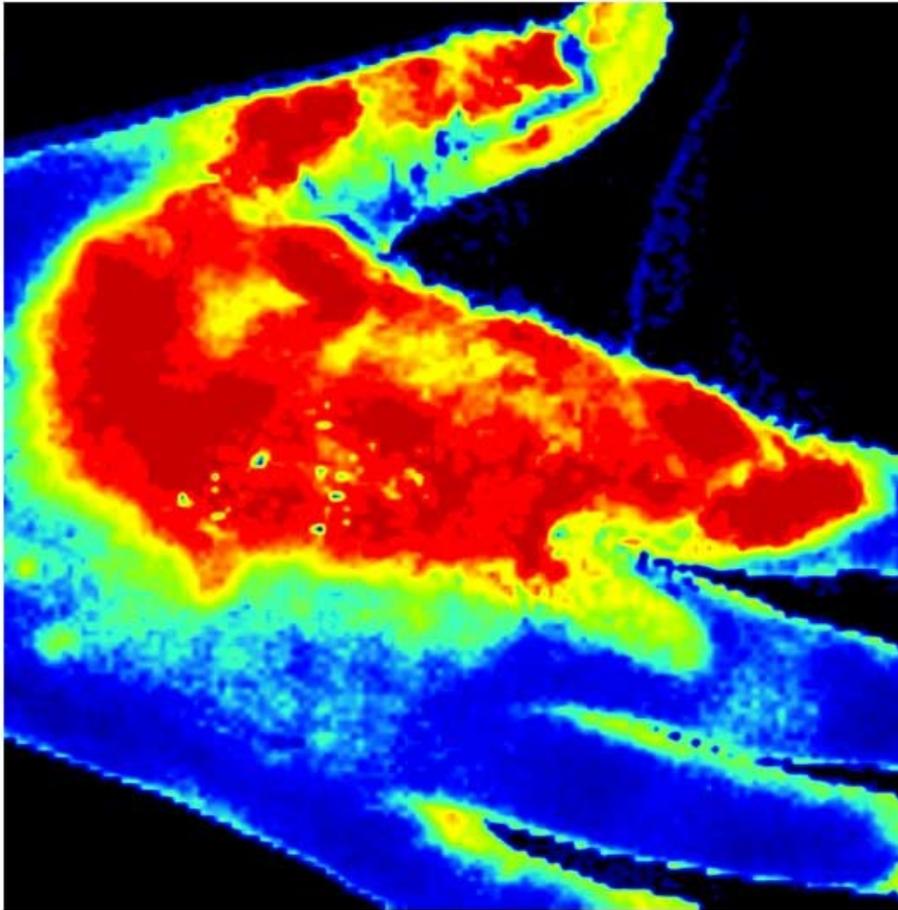




**hochaufgelöstes  
Speckle  
aufgenommen  
mit einer CCD  
Kamera**

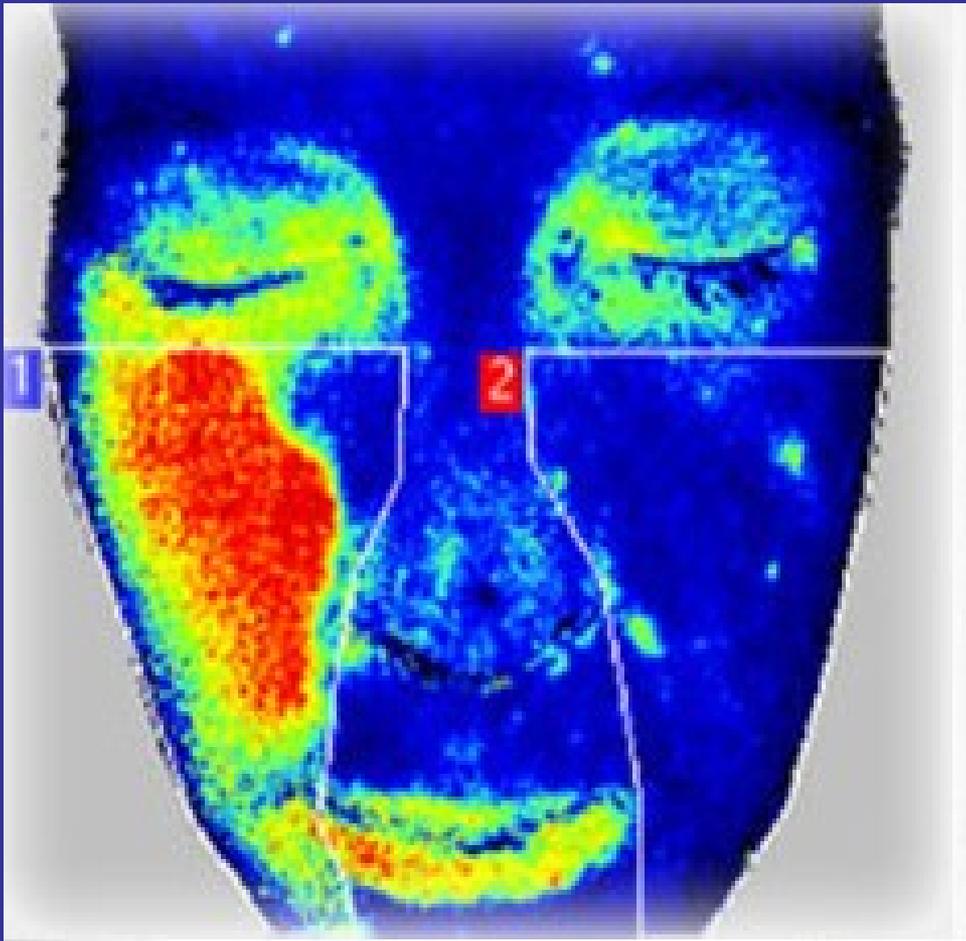


# Anwendungen in der Medizin: Durchblutungsstörungen

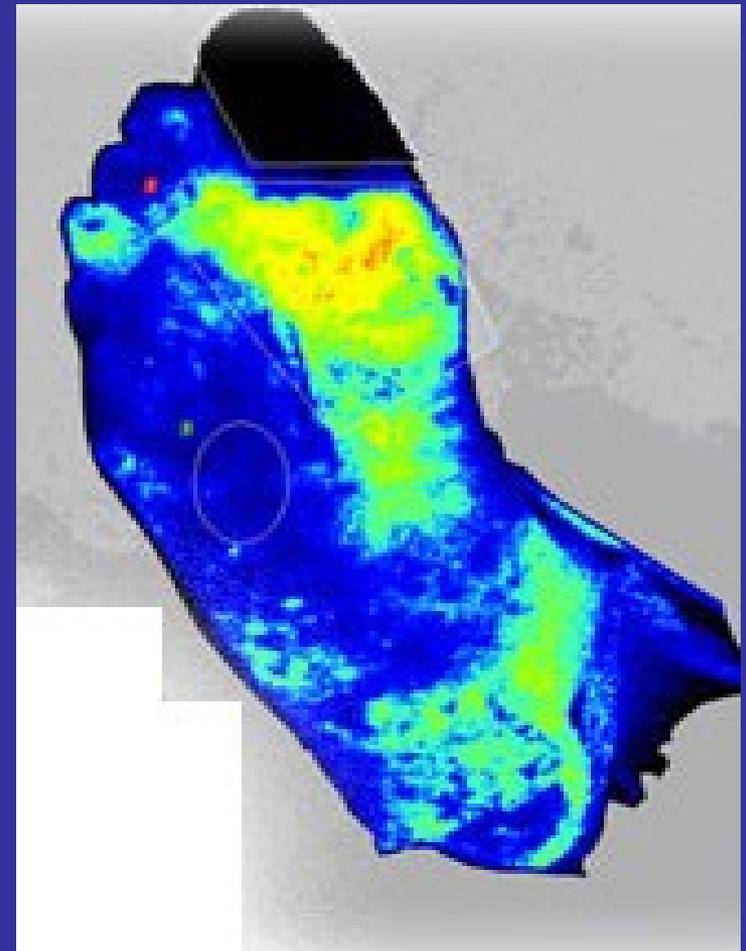


*Courtesy of University Hospital Brno, Czech Republic*

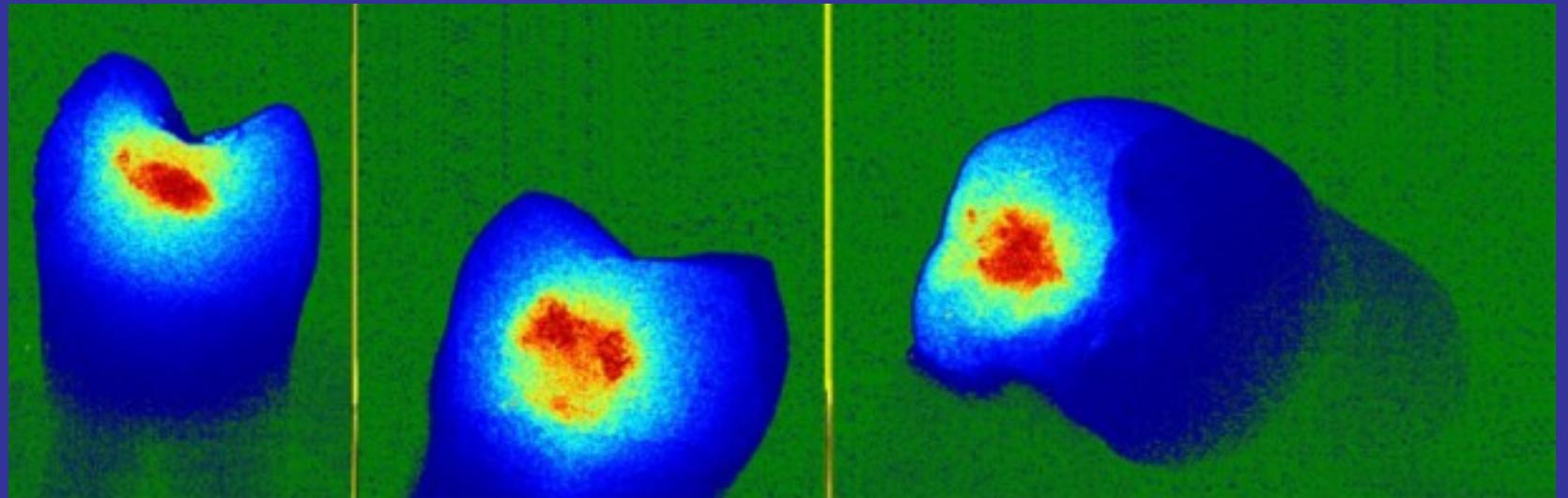
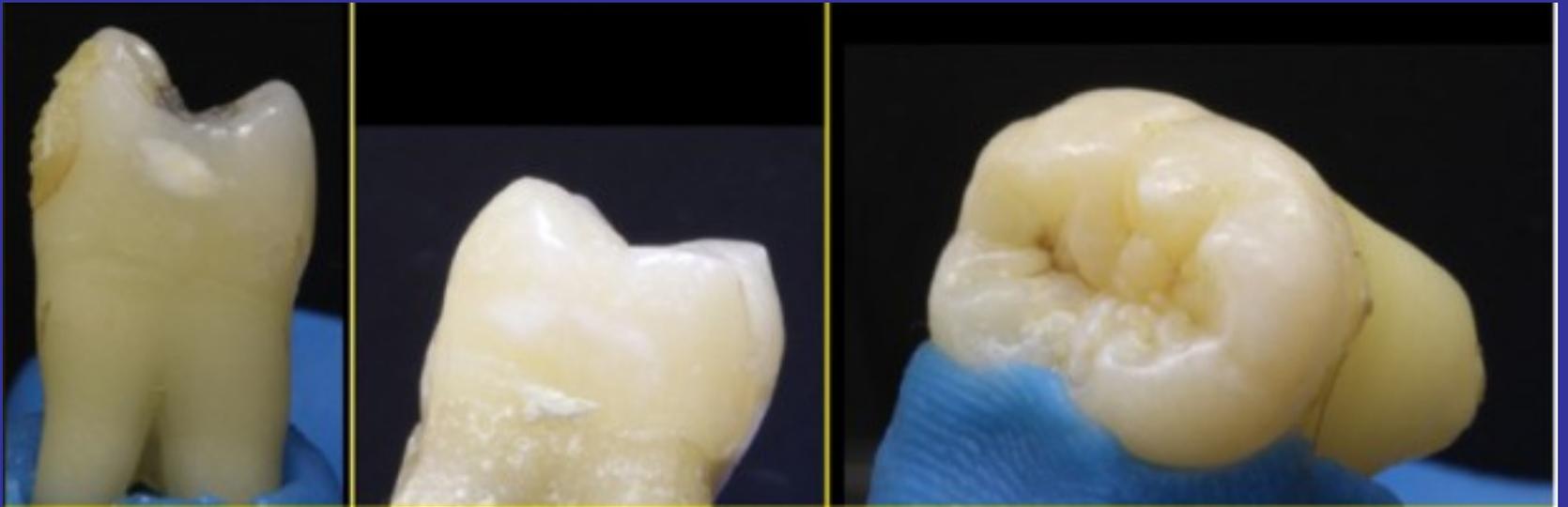
# Gewebedurchblutung



# Diabetes

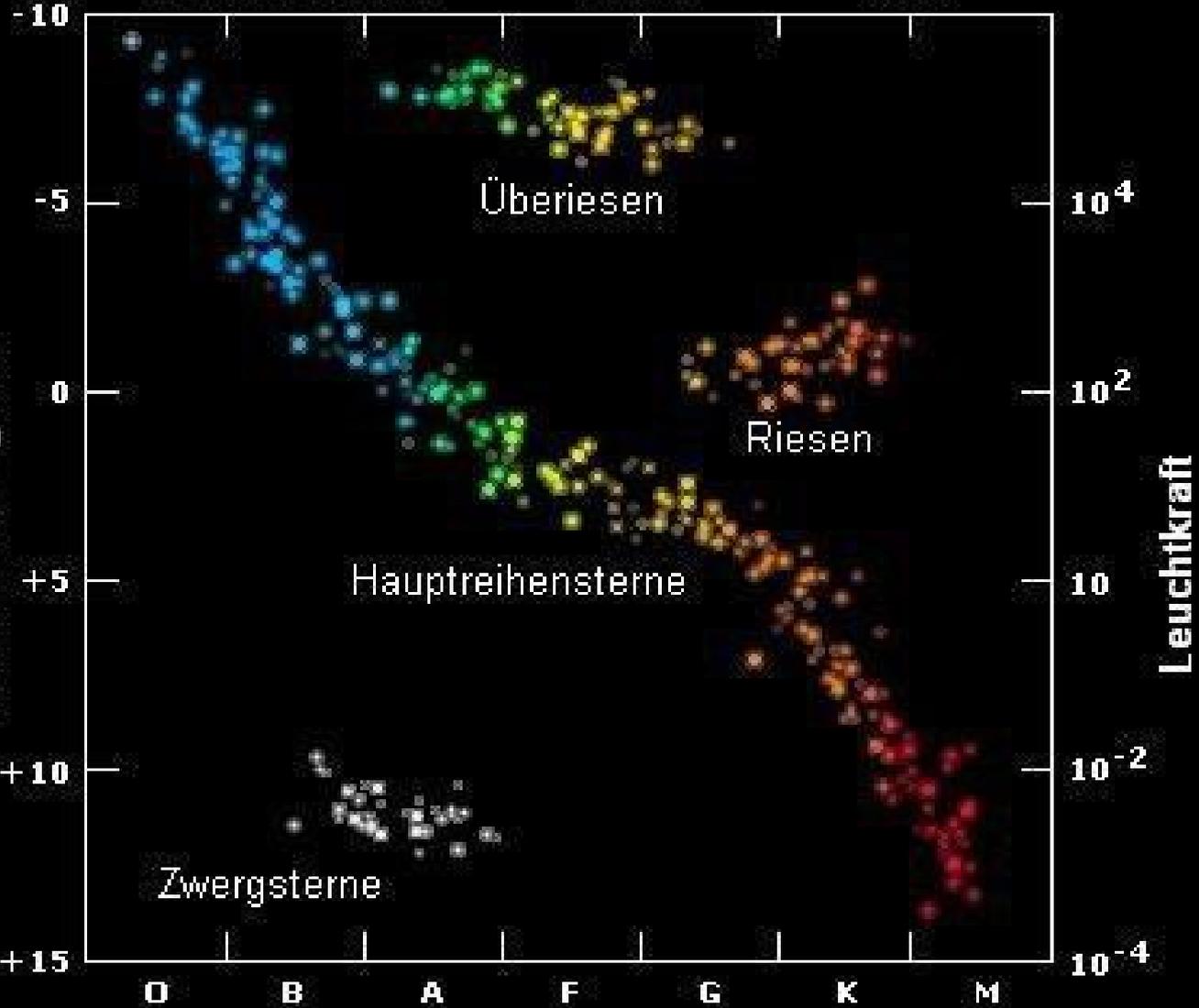


# Zahnmedizin: Karies?



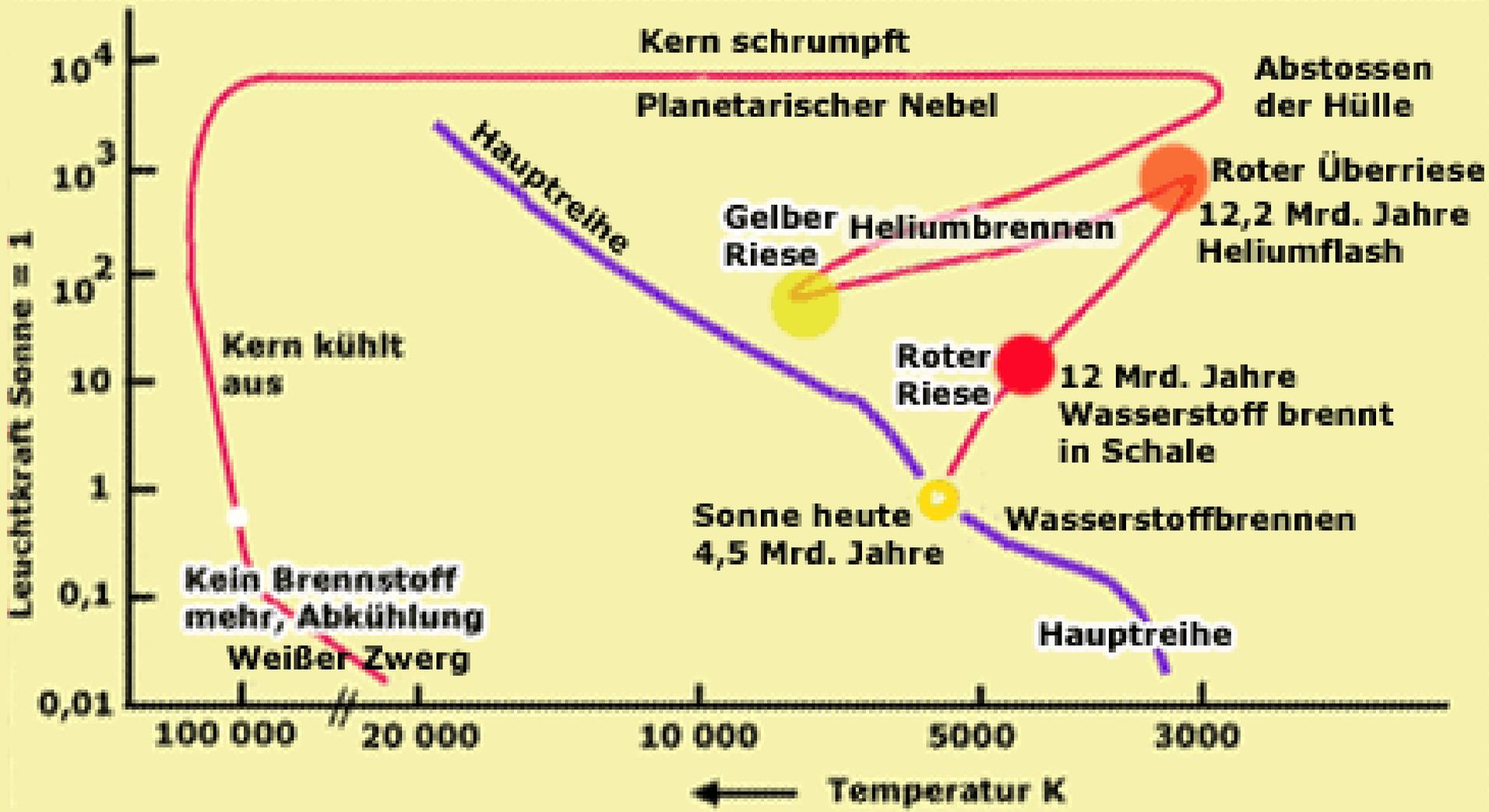
Temperatur

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

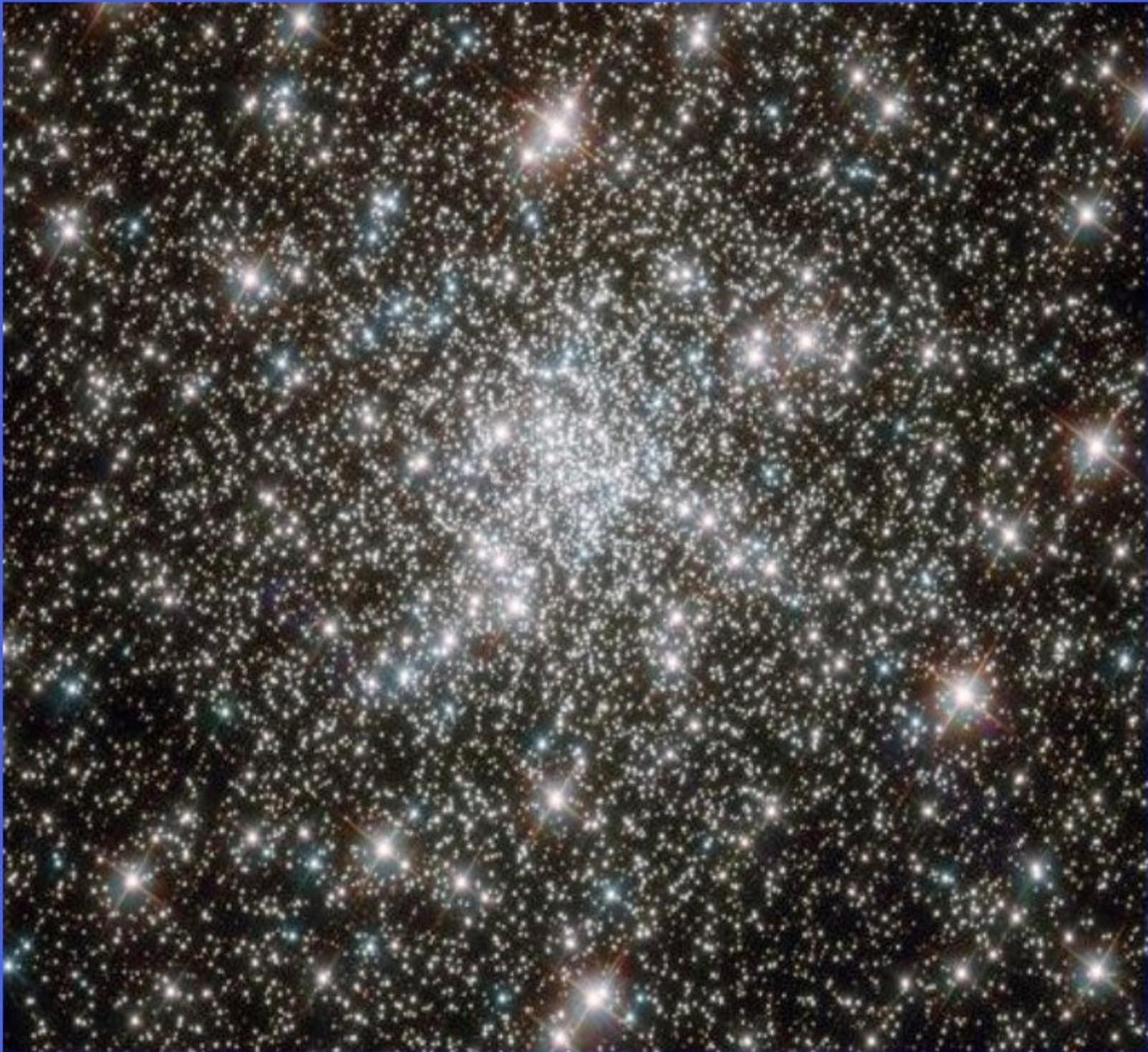


# Hertzsprung-Russel Diagramm

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



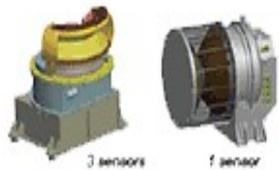
# Lebensdauer von Sternen

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

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

# Instrumente der Jupiter-Sonde Juno

## Jovian Auroral Distributions Experiment (JADE)

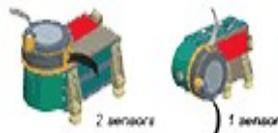


misst die Verteilung von Elektronen sowie die Geschwindigkeitsverteilung und Zusammensetzung von Ionen

## Gravity Science (GS)

Schwerkraft-Studien mittels Doppler-Effekt zur Untersuchung von Jupiters Masseigenschaften

## 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

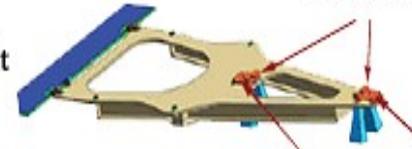


**Jovian Infrared Auroral Mapper (JIRAM)**  
Infrarot-Kartograph der Jupiter-Auroren



**Magnetometer (MAG)**

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

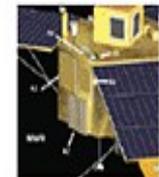


**Fluxgate Magnetometer (FGM)**

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

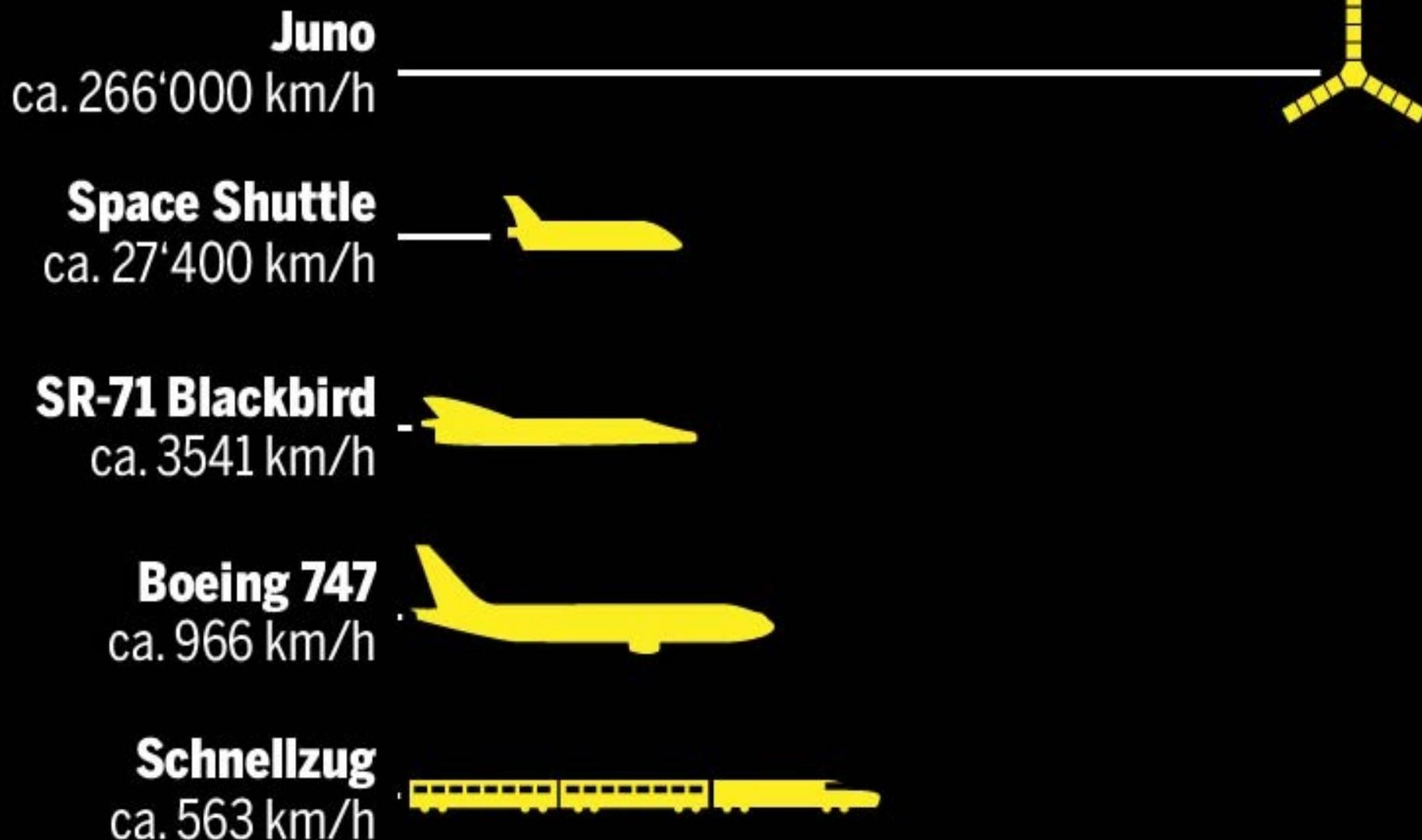


**Plasma Waves Instrument (Waves)**  
zur Messung von Plasma- und Radiowellen in Jupiters Magnetosphäre



# Wie schnell ist Juno?

Die Geschwindigkeit der Raumsonde im Vergleich.





# Ein paar Daten über Jupiter:

**Radius: 69.911 km**

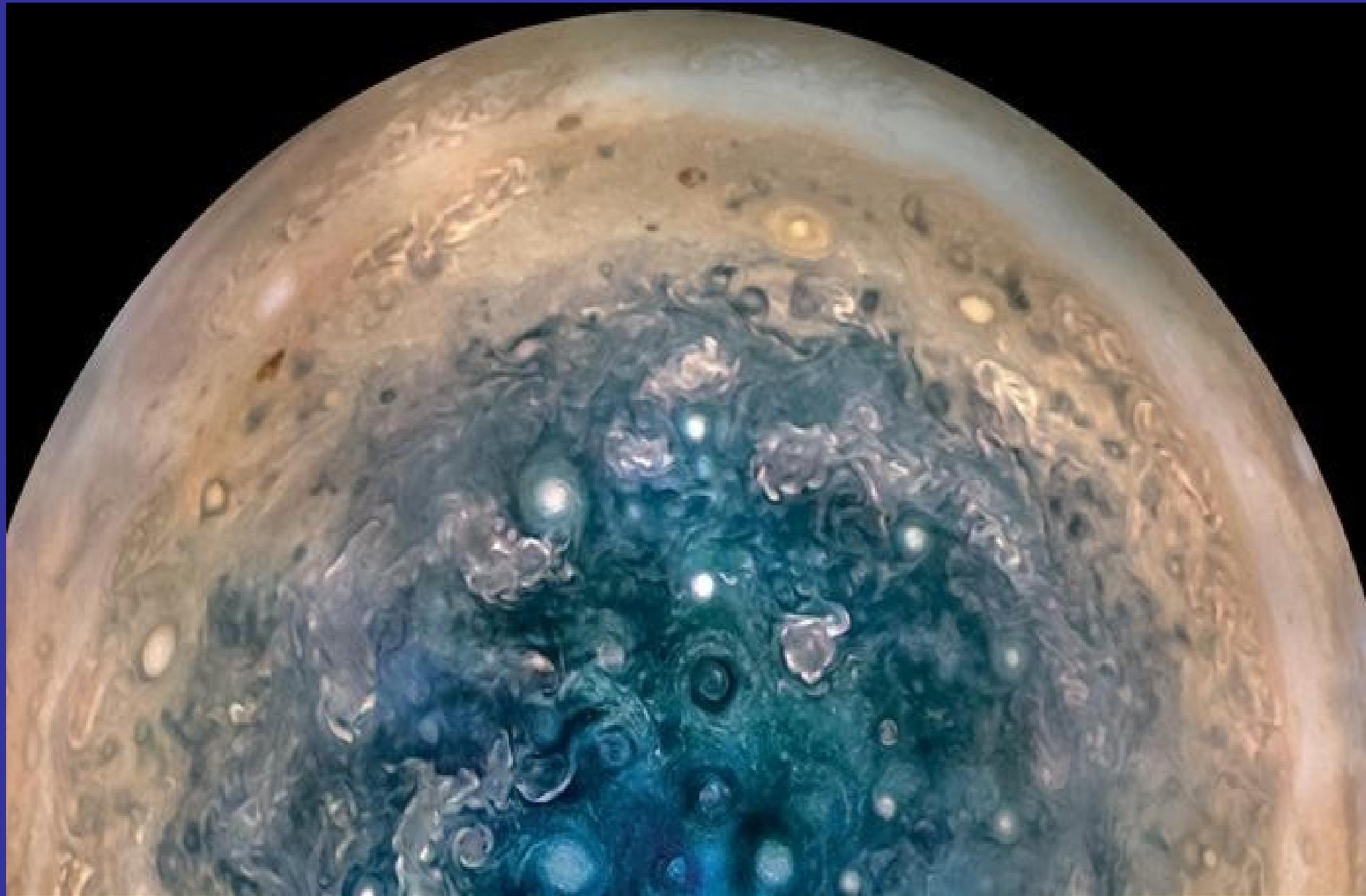
**Große Halbachse: 5,203 AE; (778,36 Mio. km)**

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

**Umlaufzeit: 11 a 315 d**

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

**Amalthea, .....**



**Blick auf Jupiters Südpol**

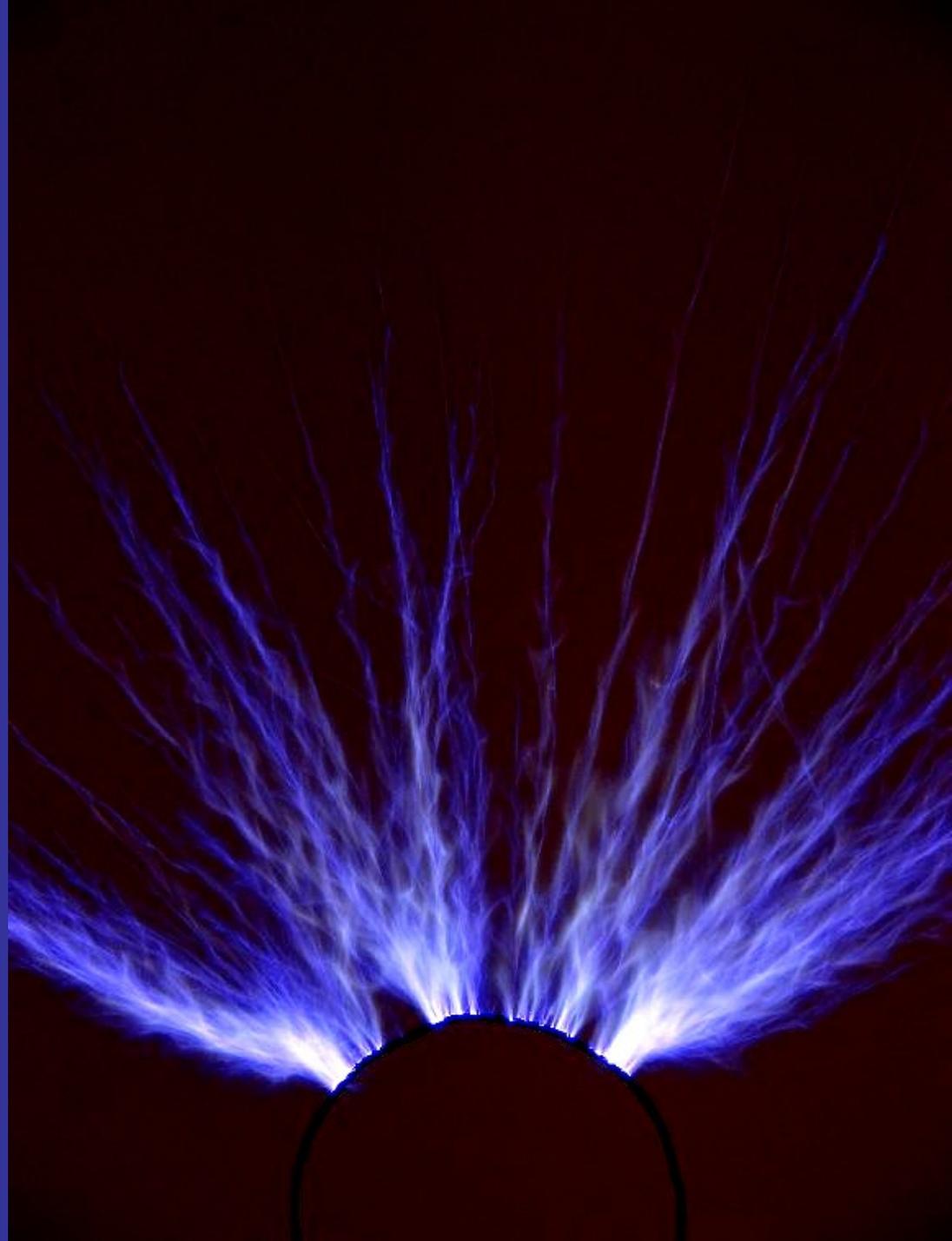


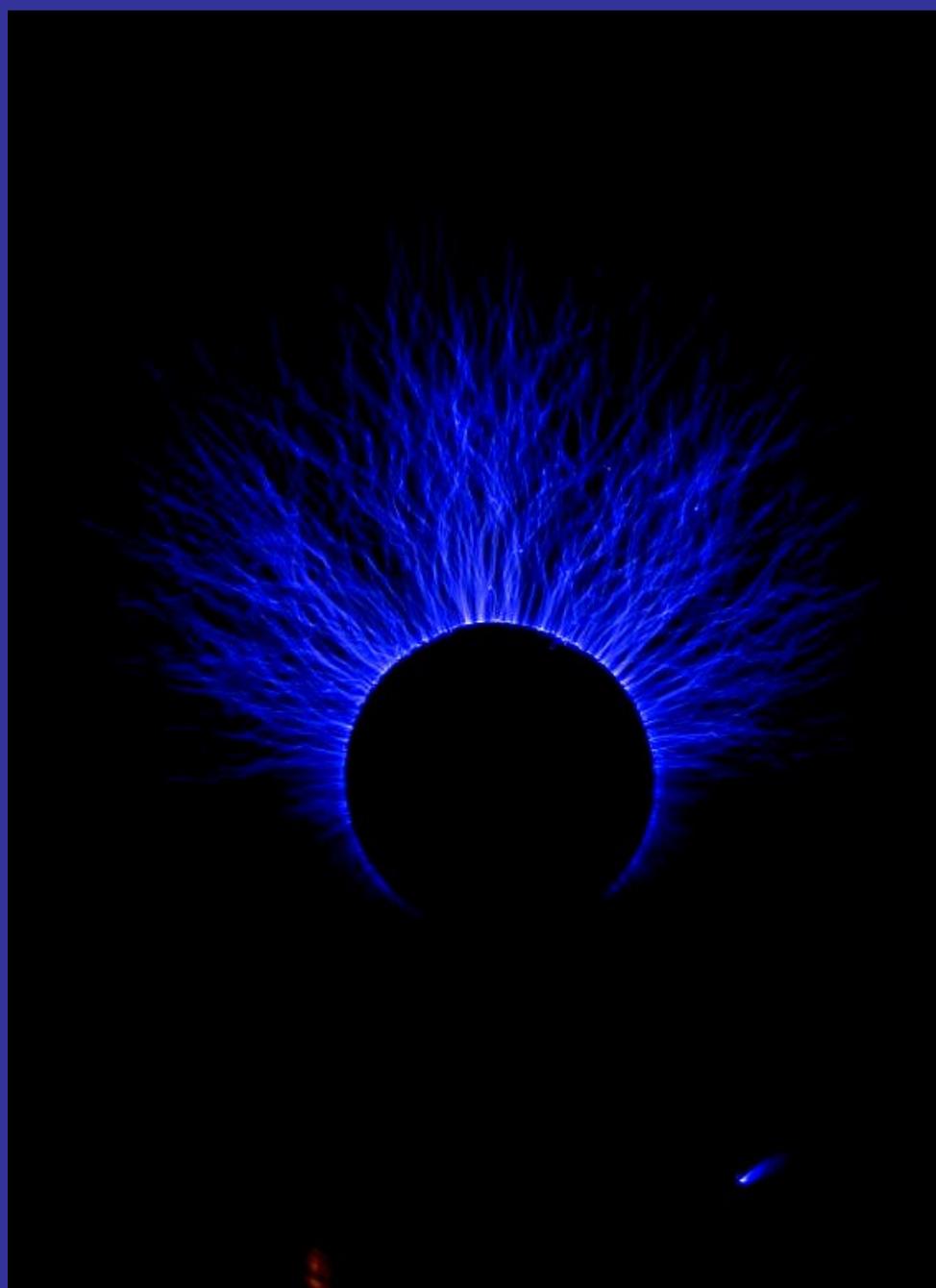
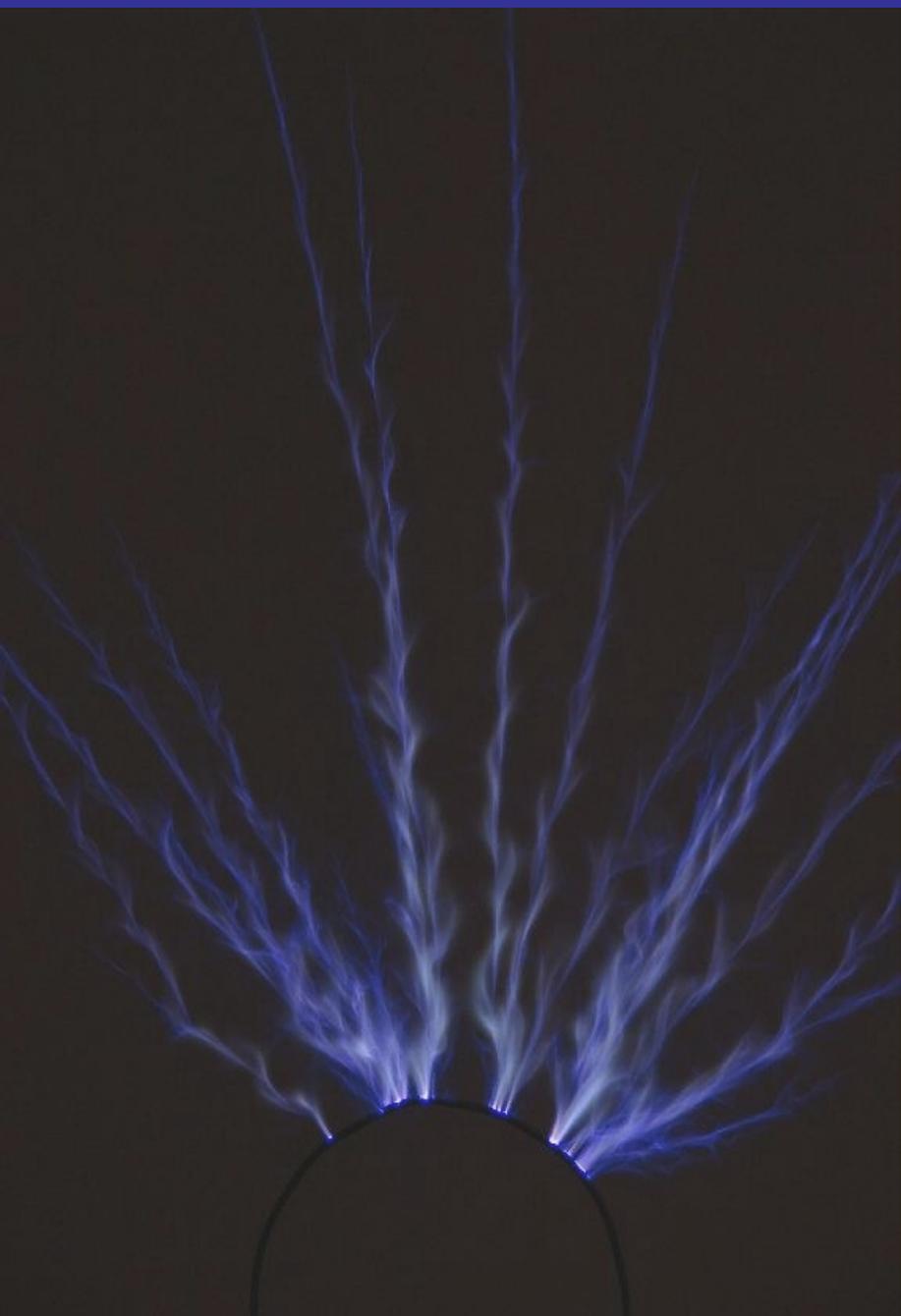
**Ammoniaksturm auf Jupiter (ca. 1000 km)**

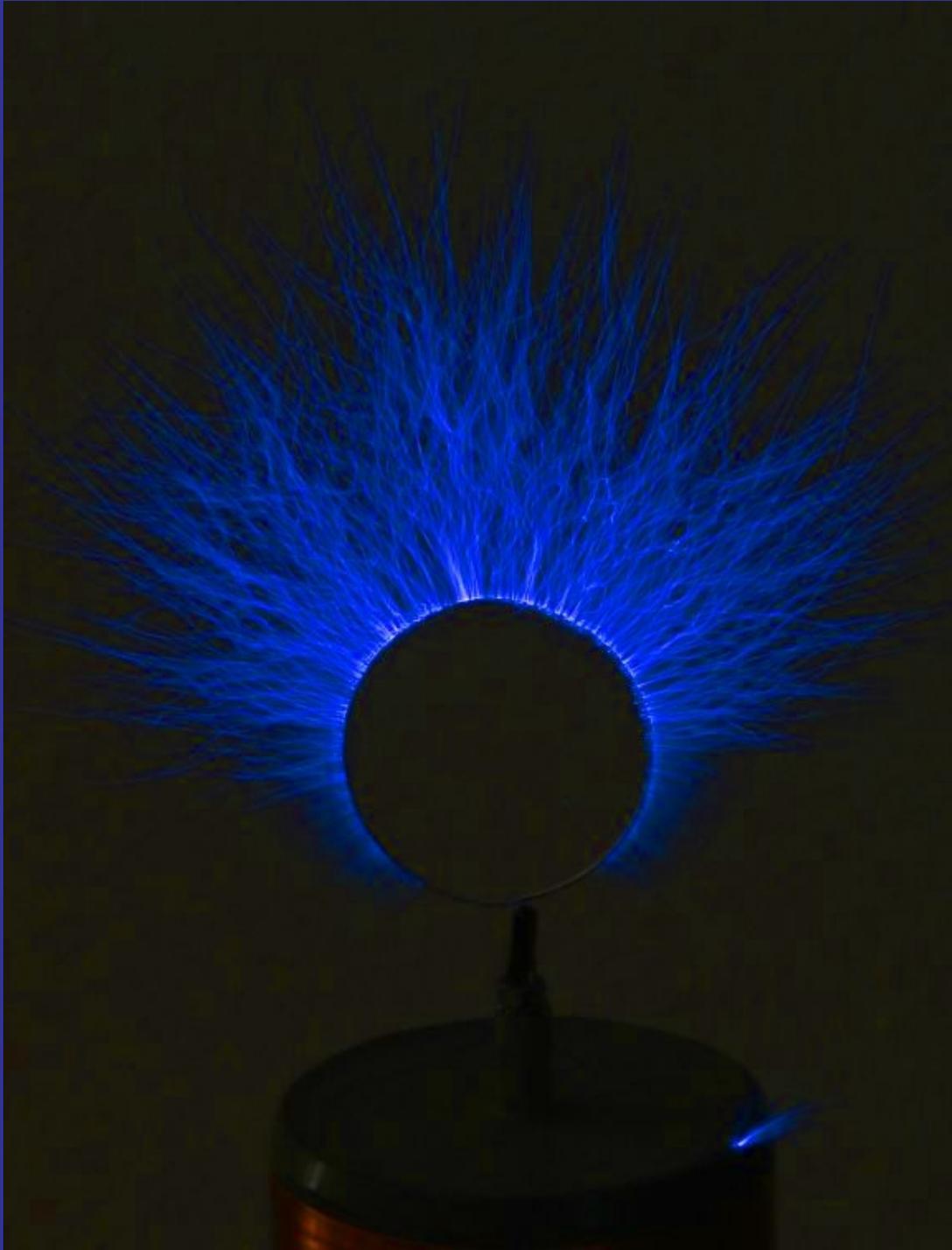




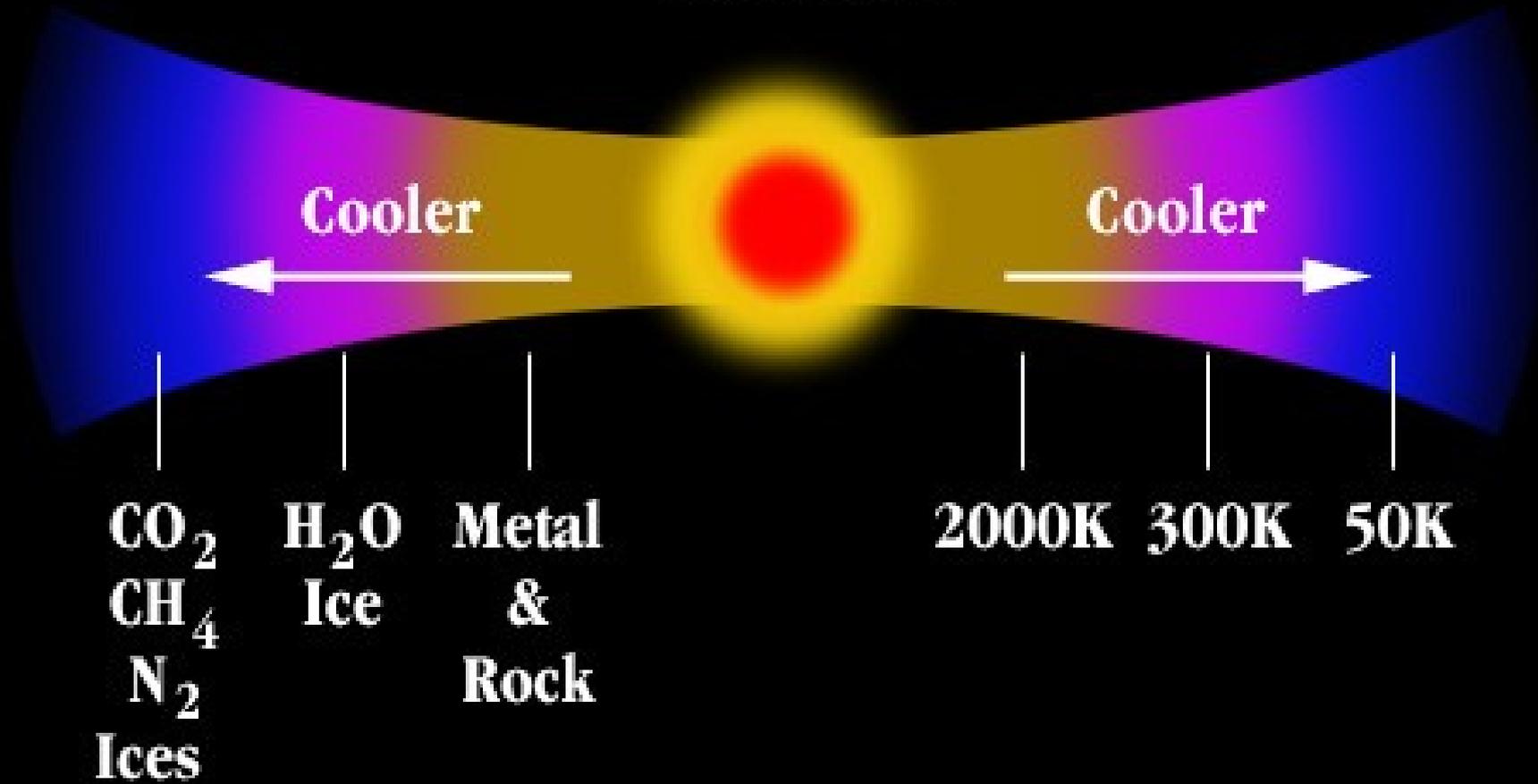
**69.00 Euro**



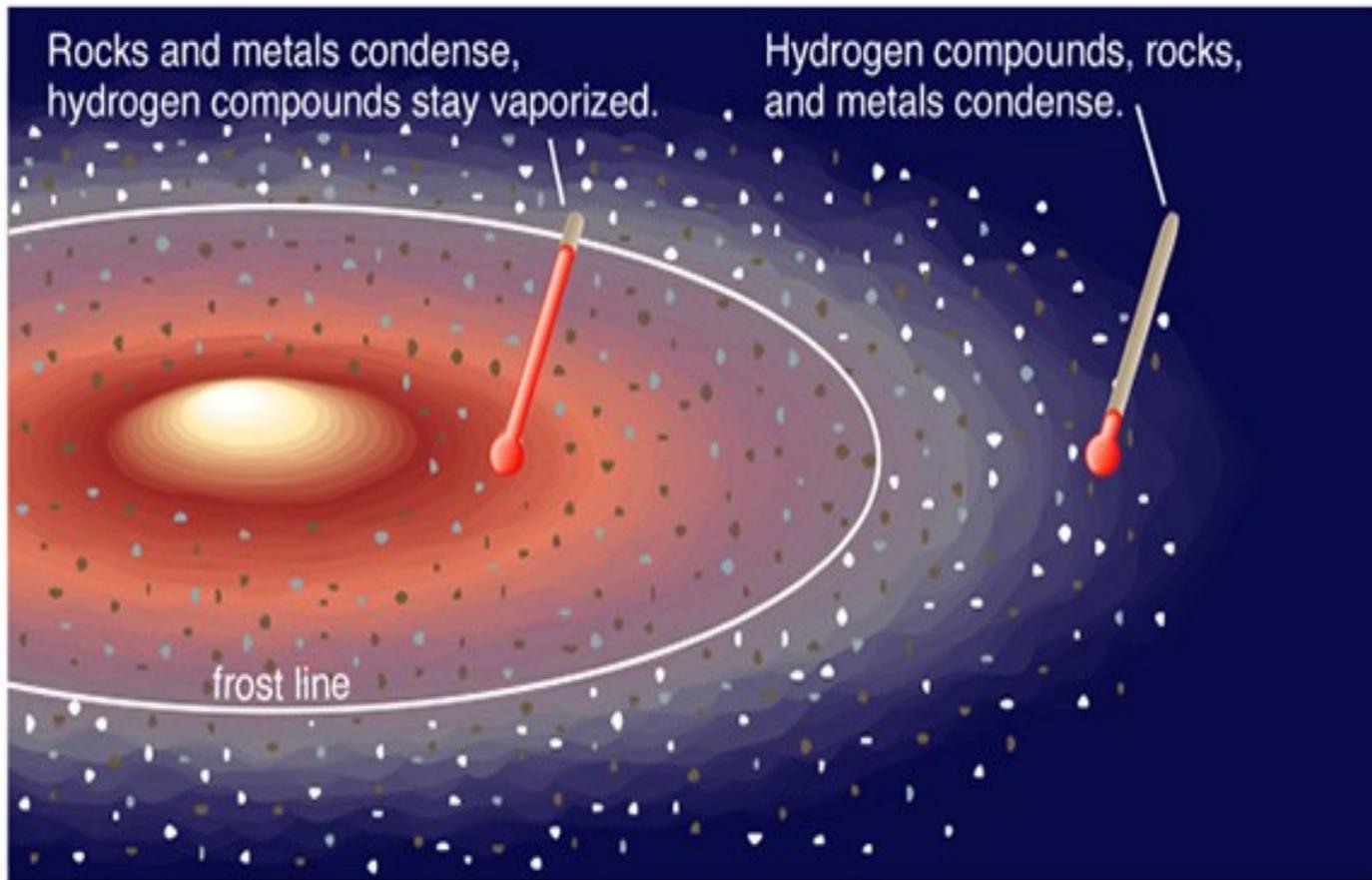




# Proto-Sun

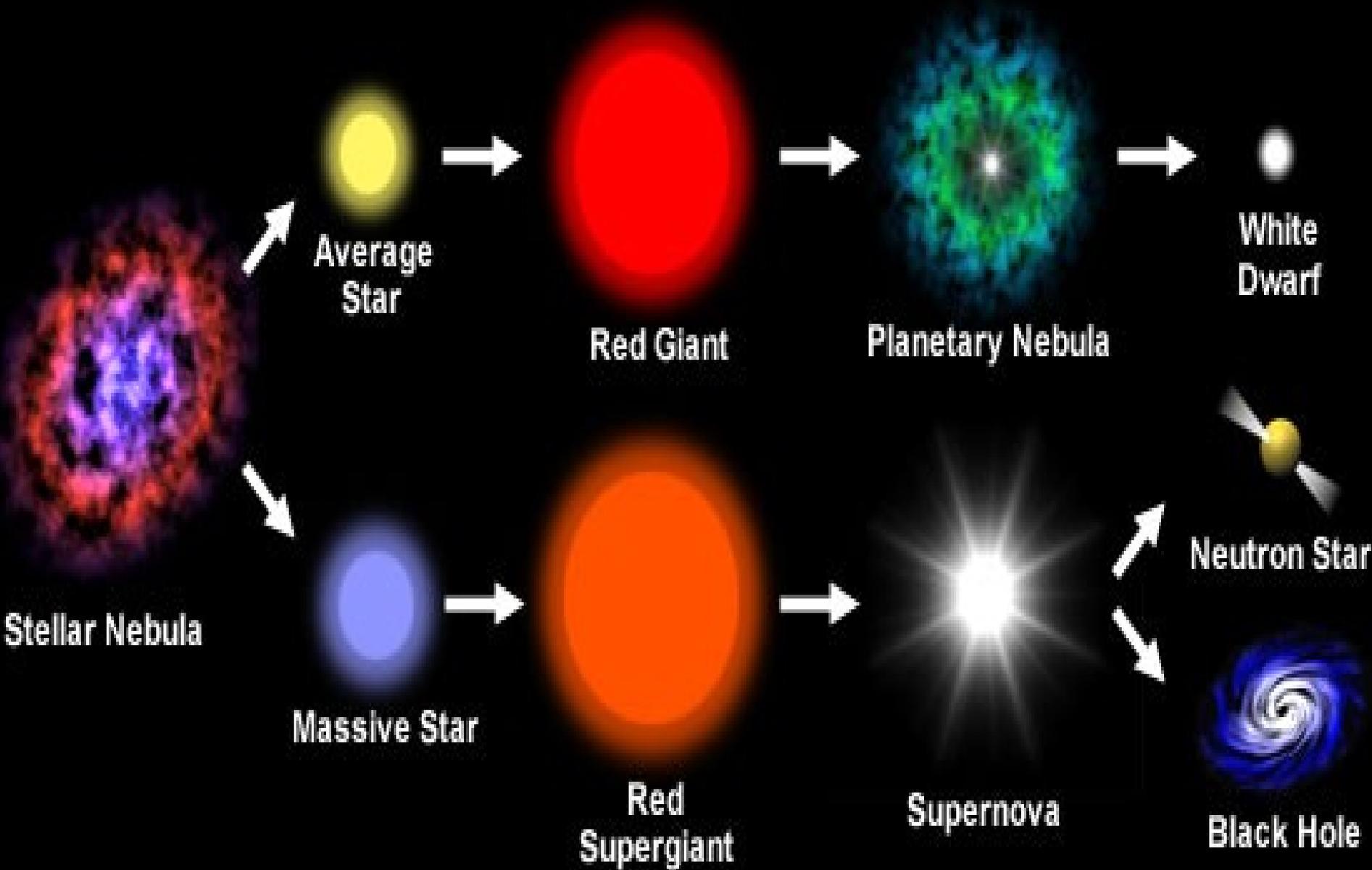


Elementverteilung in der protosolaren Akkretionsscheibe, deshalb sind sonnennahe Planeten Gesteinsplaneten und sonnenferne Planeten Gasplaneten



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



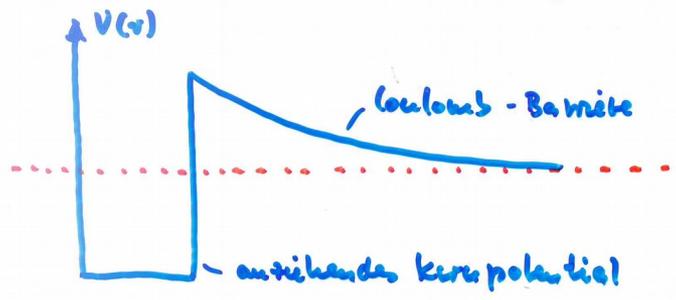
Streuungswirkungsquerschnitt  $\sigma \sim \omega^4$

**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.**

$\sigma$  aus der Schrödinger Gleichung



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

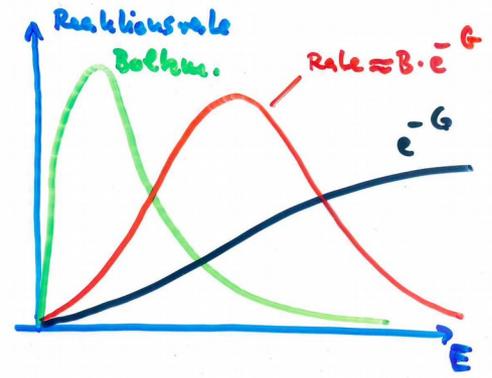
Gegen-Faktor
Matrixelement für die Reaktion

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

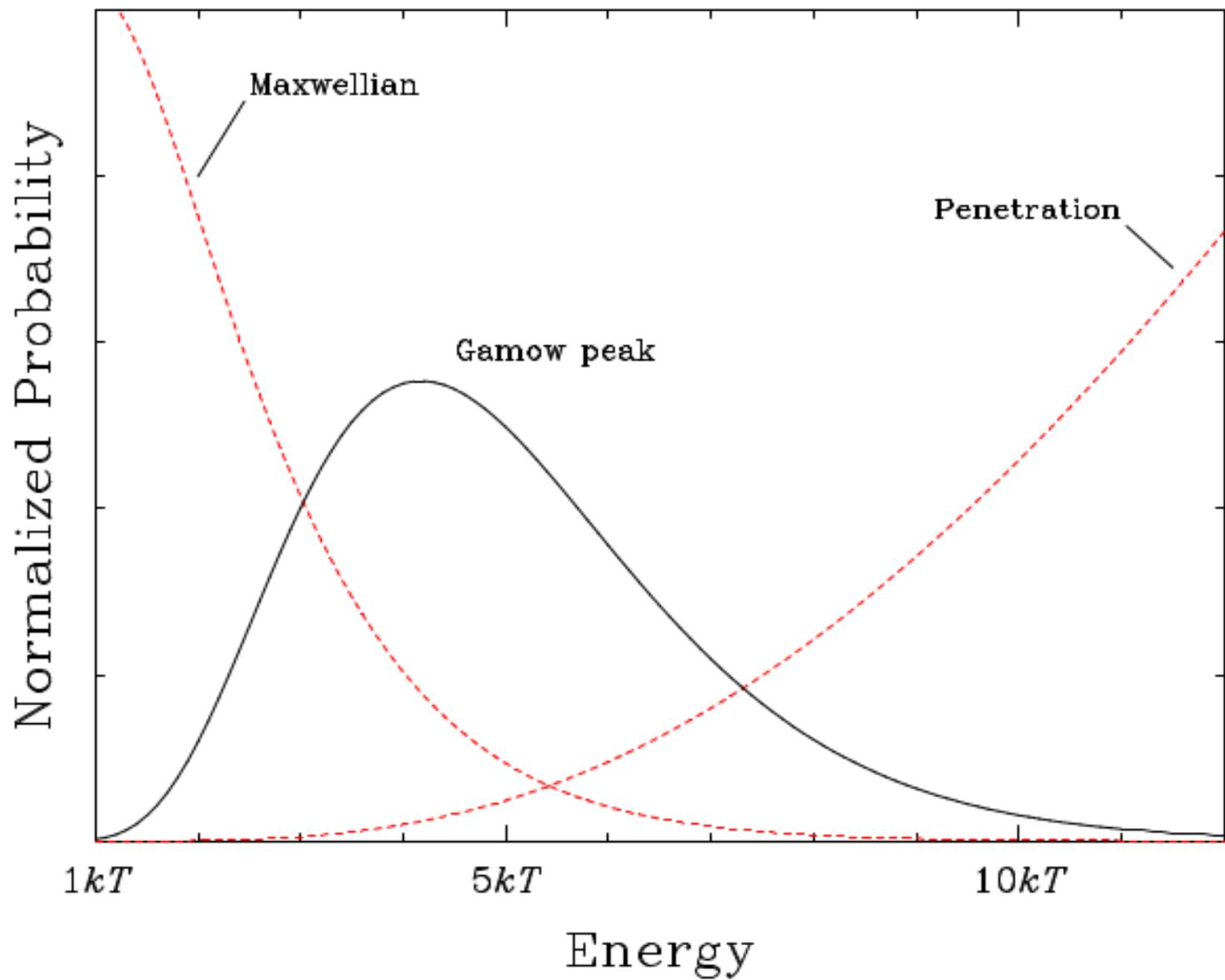
Der WQ wird durch das Tunneln beschränkt.

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

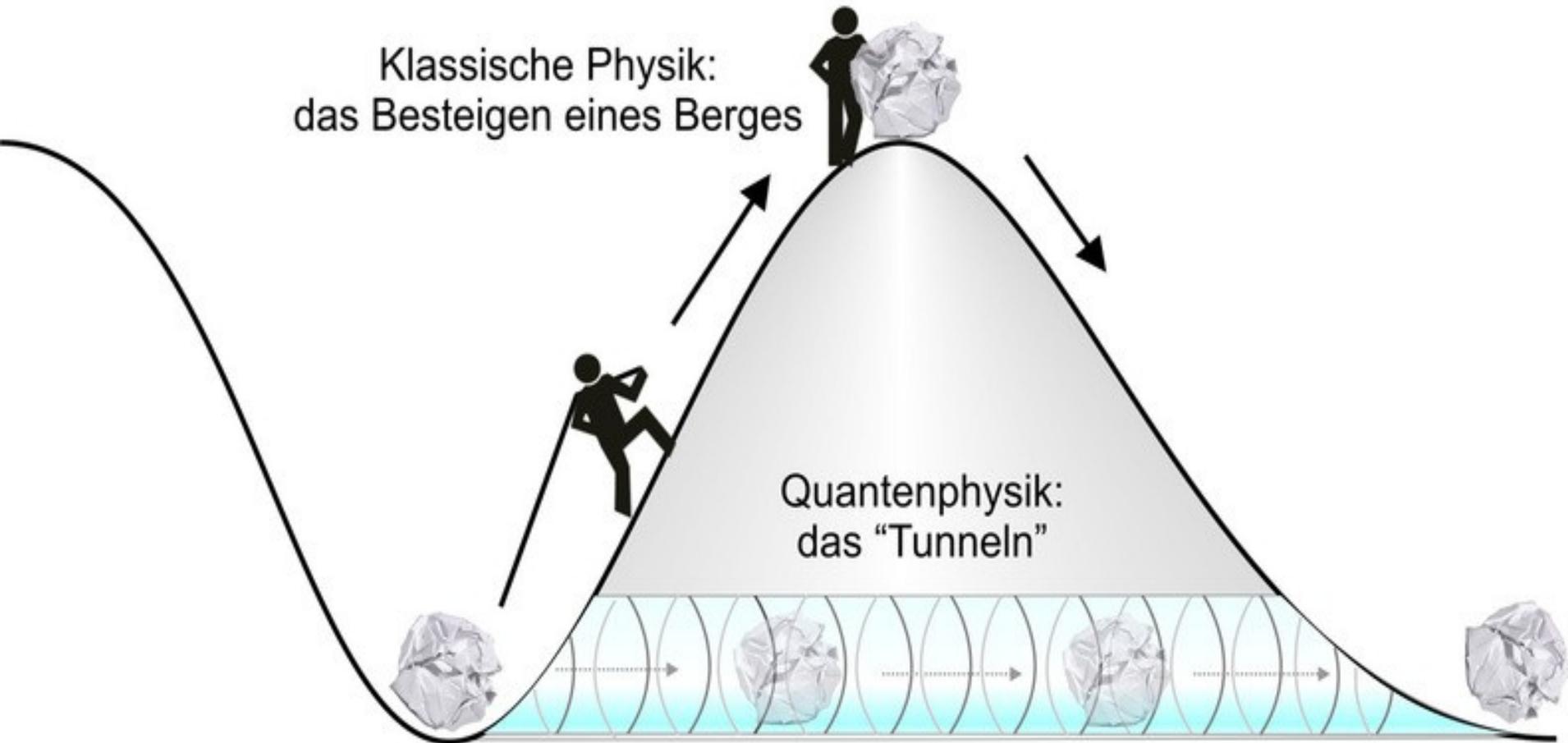
$\sigma$  in  $\langle \sigma_0 \rangle$  einsetzen



# Vorlesungsauszug WS 76/77, C.G.



# Quantenmechanischer Tunneleffekt: George Gamow

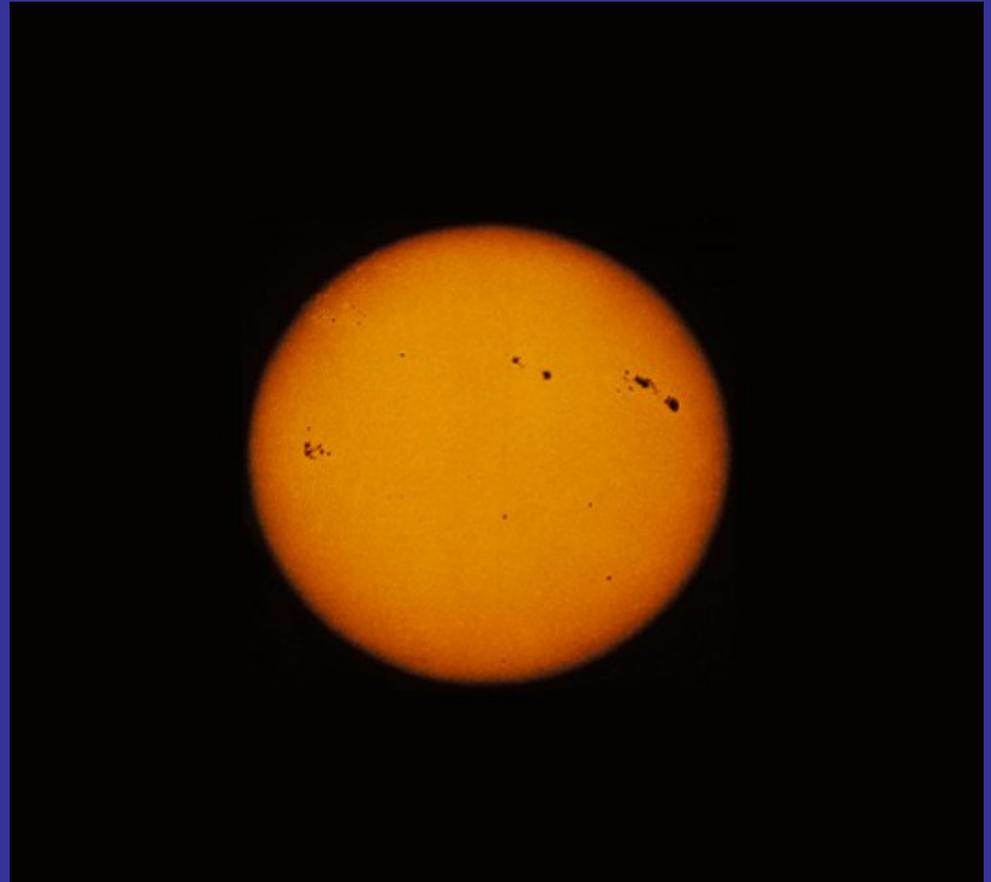


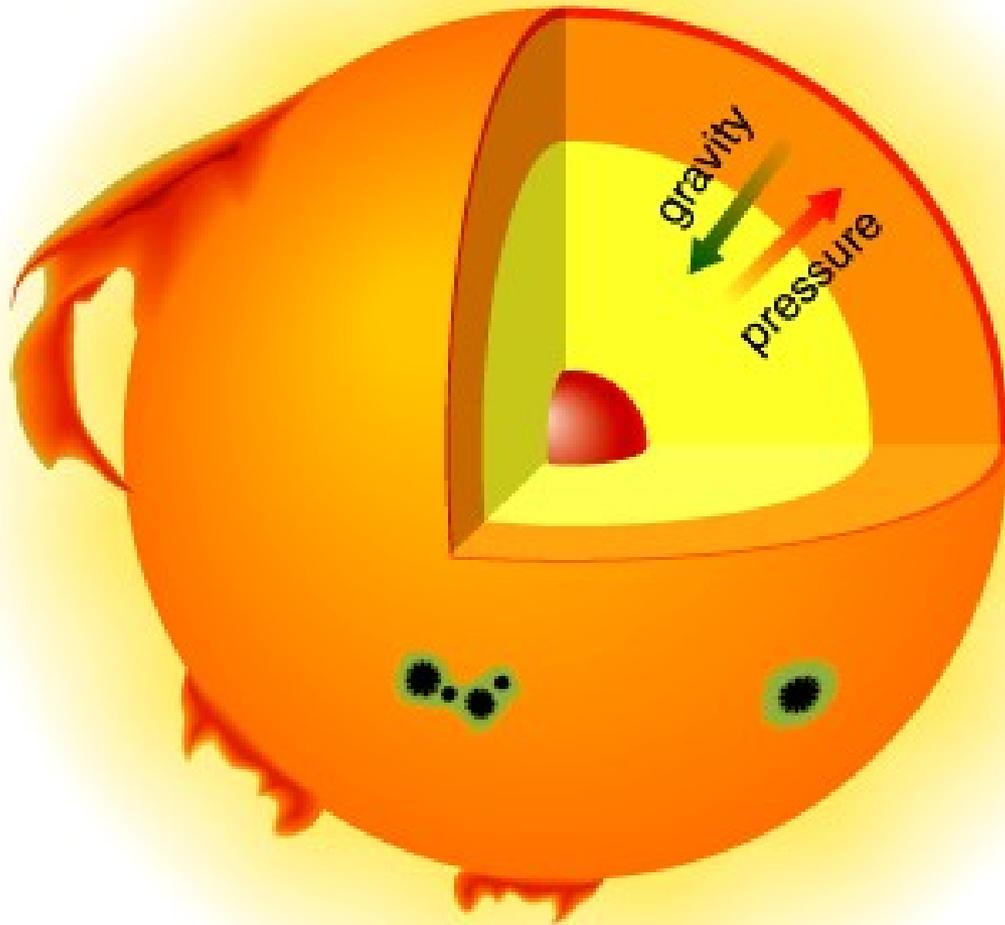


Chris  
Peters

**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

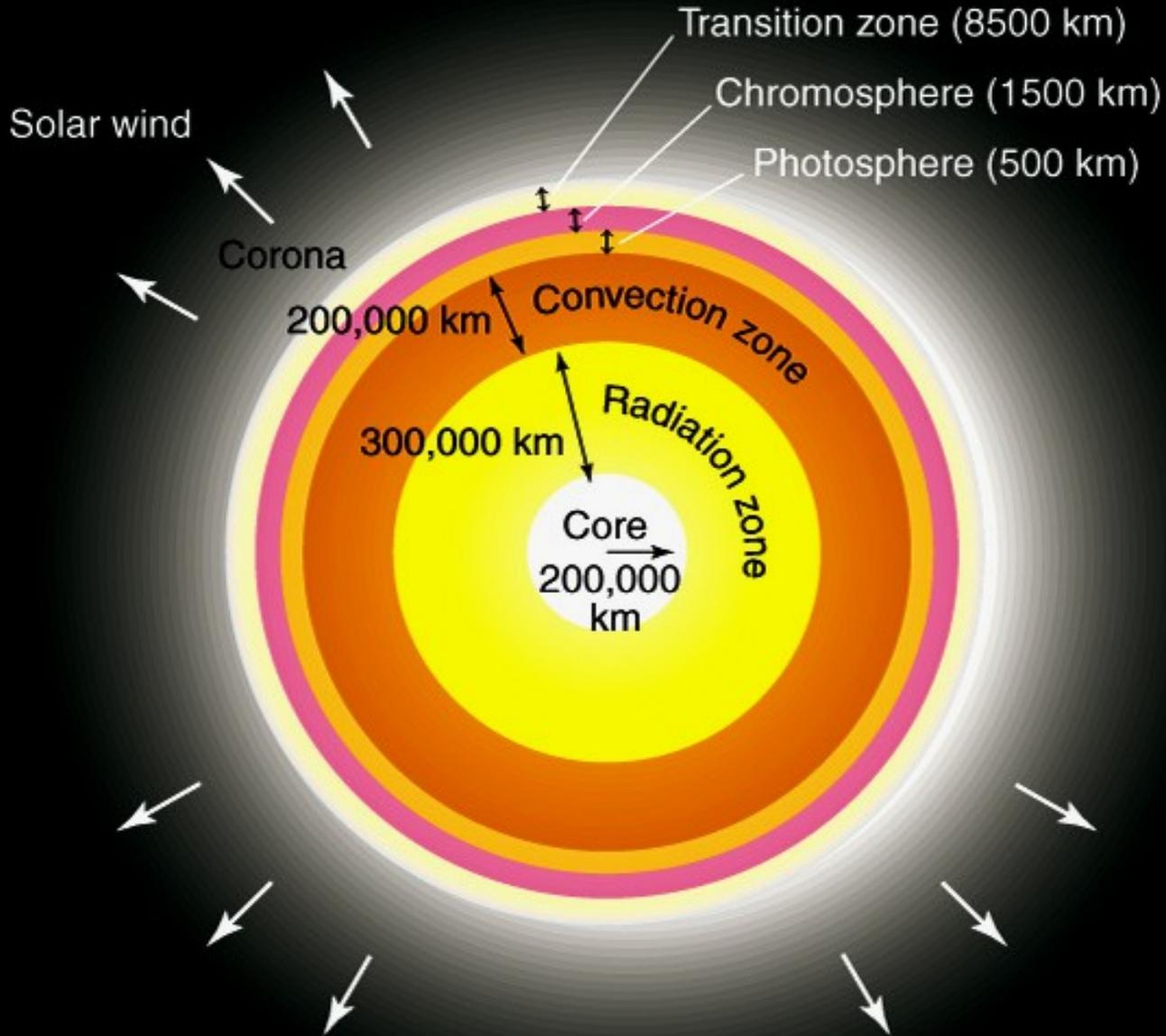




**Der nach außen gerichtete Strahlungsdruck und der nach innen gerichtete Gravitationsdruck halten sich die Waage.**

**Dadurch entsteht ein sphärisches Gebilde.**

# Die Hauptschalen der Sonne



# Eigenschaften der Sonne

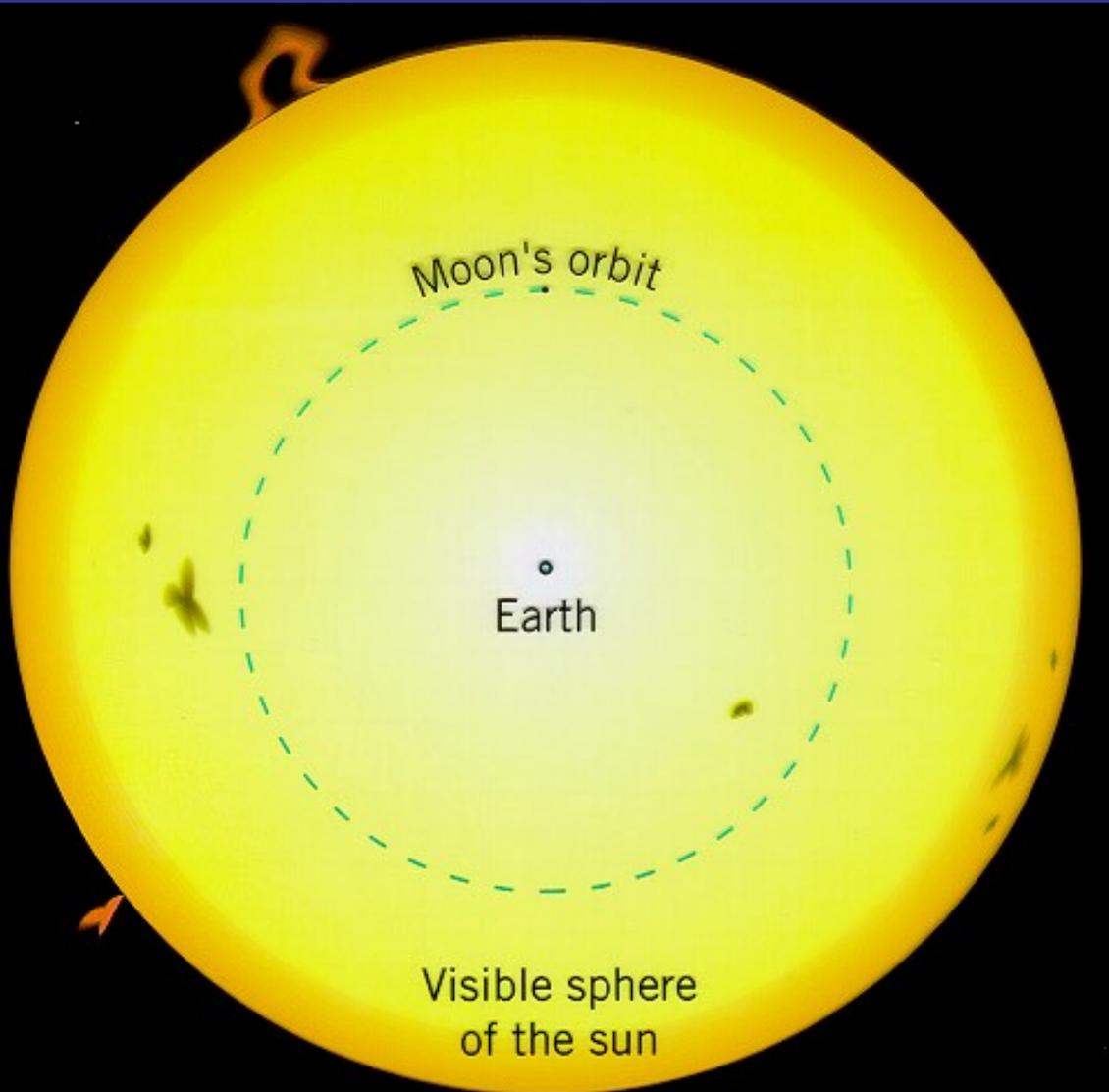
Radius = 696,000 km

Masse =  $2 \times 10^{30}$  kg  
(300,000 x Erde)

Mittlere Dichte  
= 1,410 g/cm<sup>3</sup>

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)

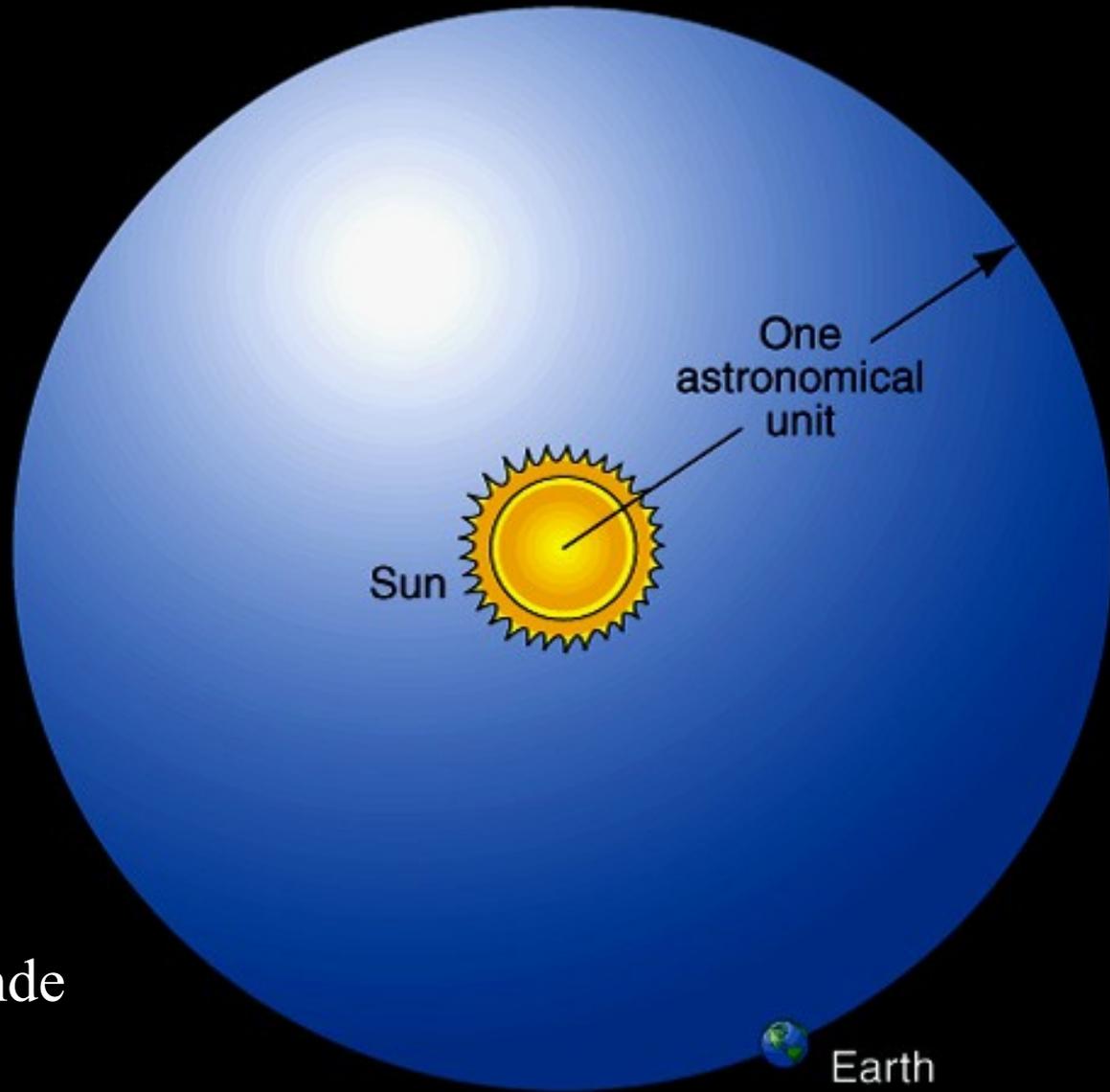
$$\sim 4 \times 10^{26} \text{ W}$$

100 Milliarden  
Wasserstoffbomben von  
je einer Megatonne!  
pro Sekunde.

## Solarkonstante:

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

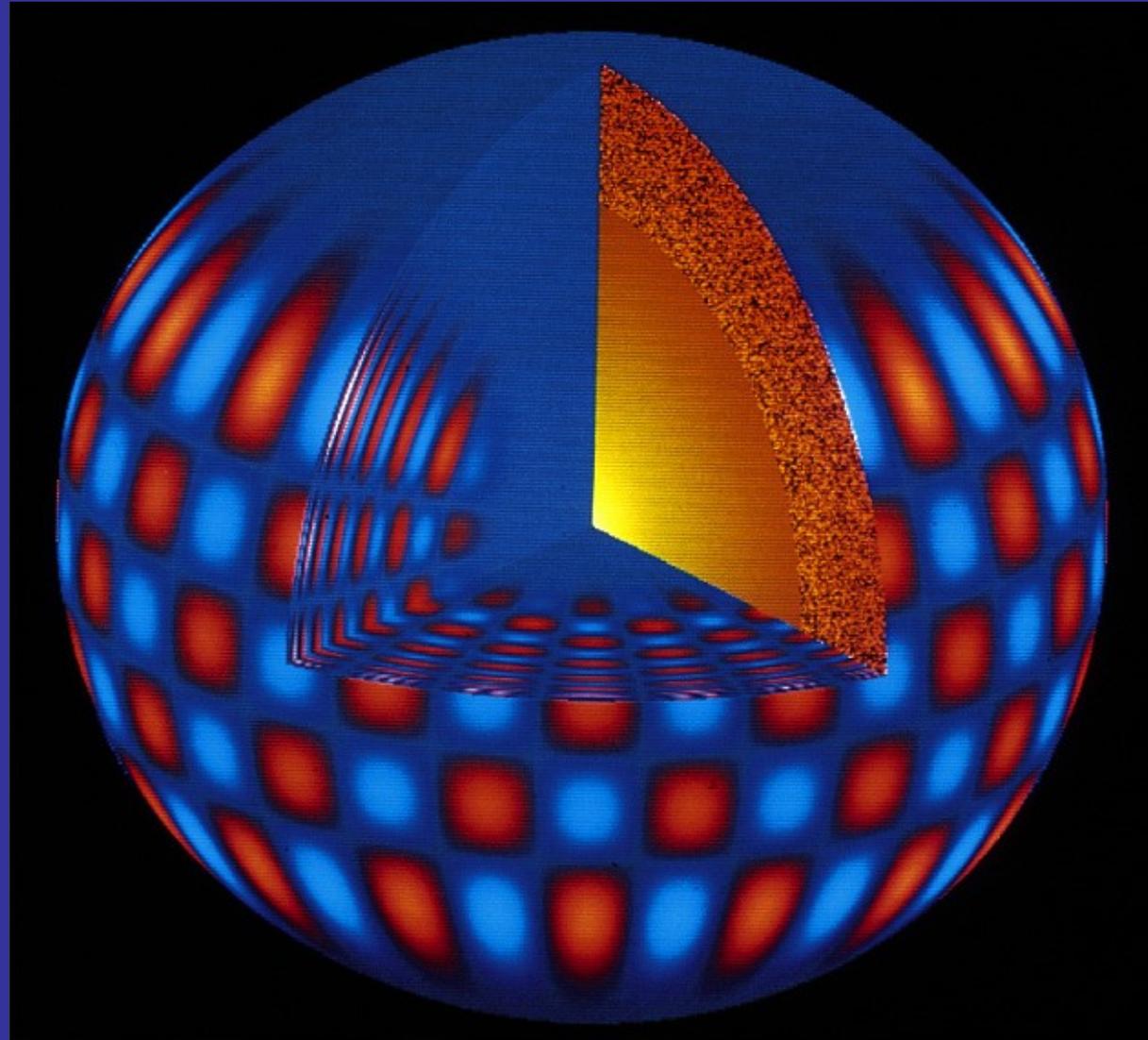
(Energie pro Sekunde  
und Fläche an der  
Erde:  $\sim 1350 \text{ W/m}^2$  )



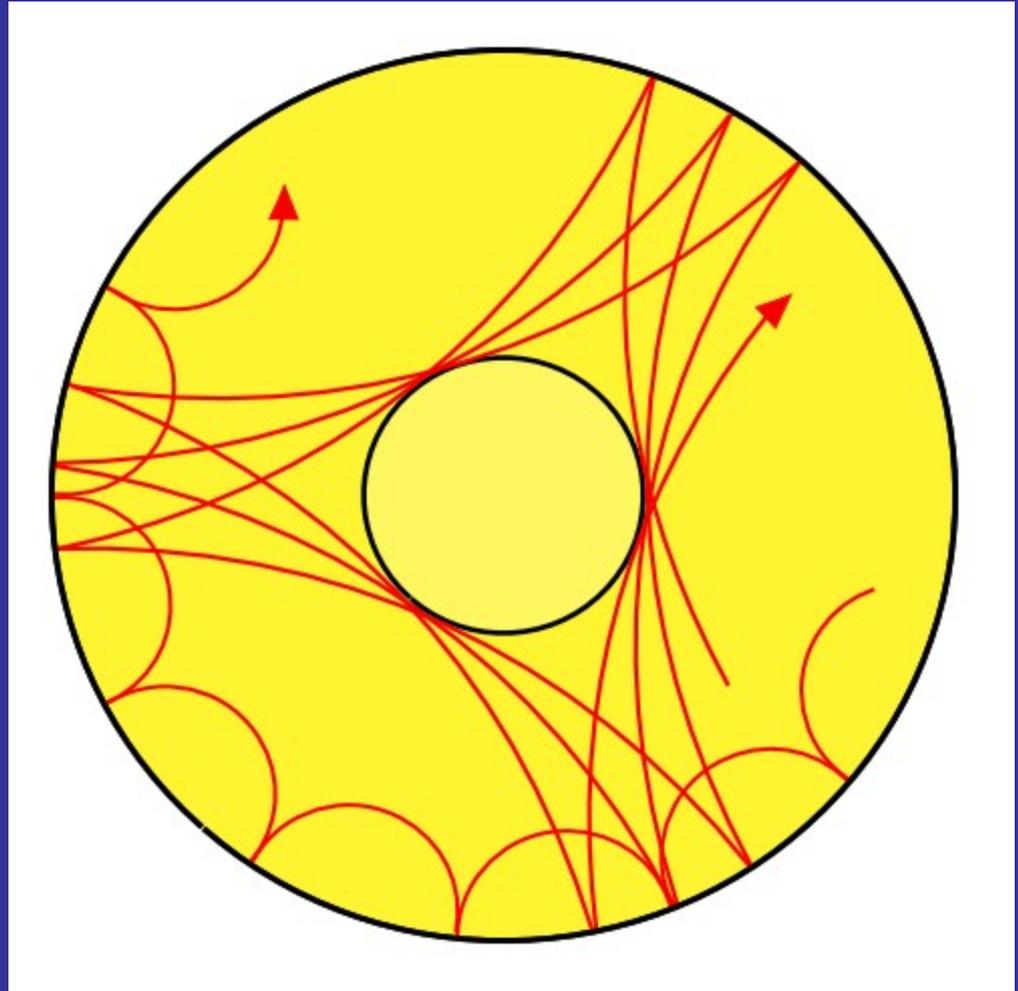
# Helioseismologie

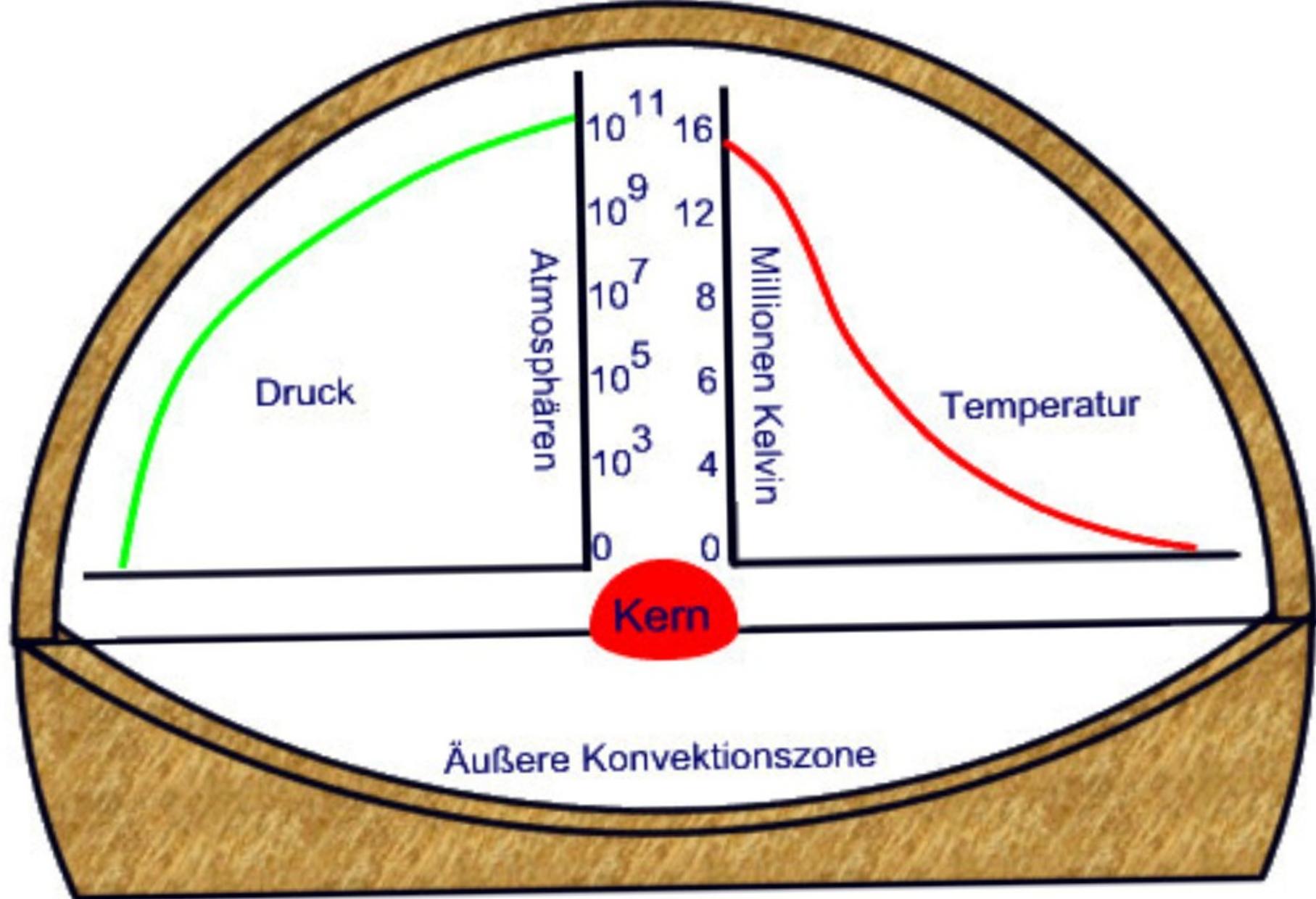
Was weiß man über den inneren Aufbau der Sonne ?

- 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.**

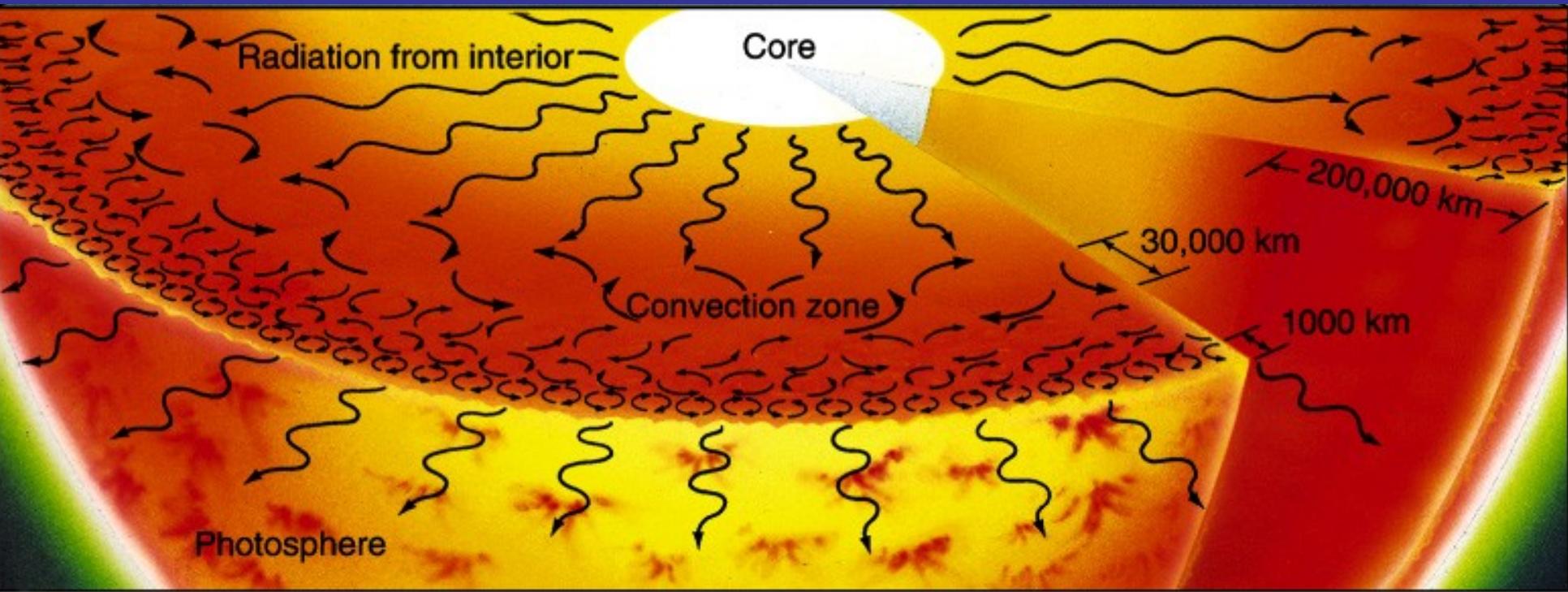




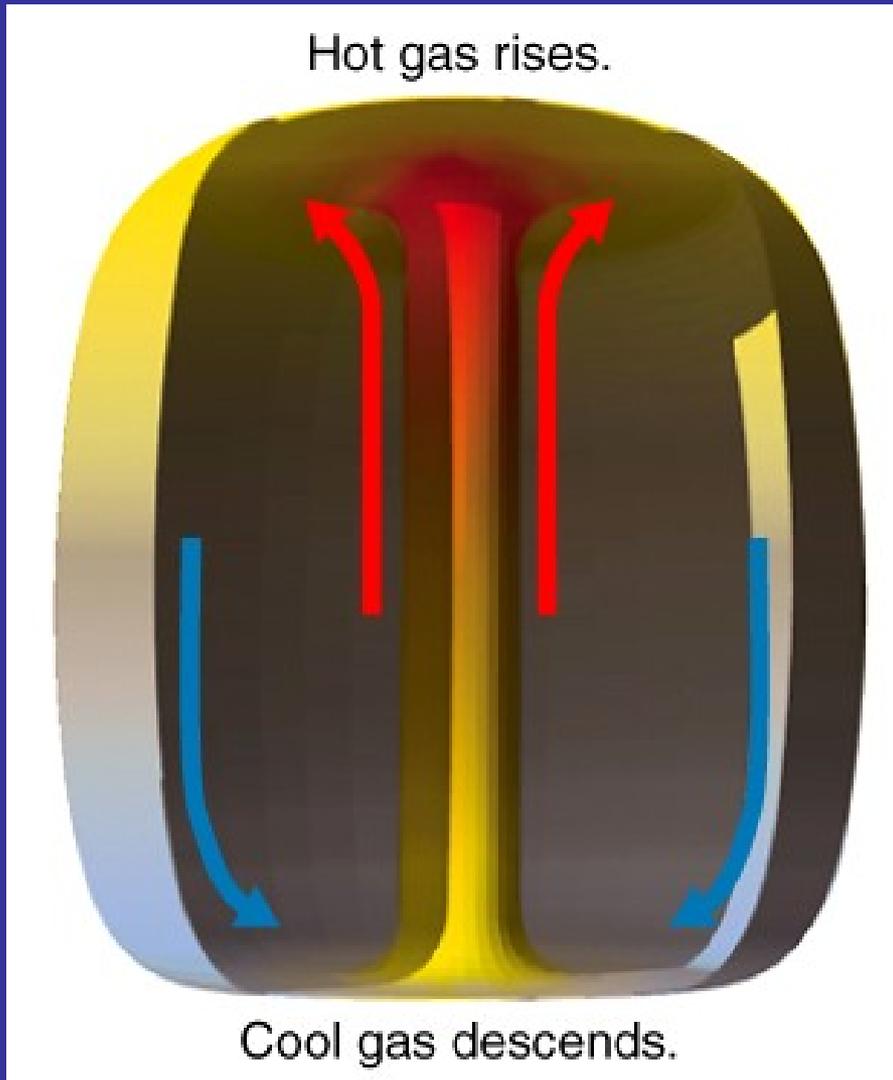
Druck- und Temperaturverlauf im Inneren der Sonne

# Energietransport in der Sonne

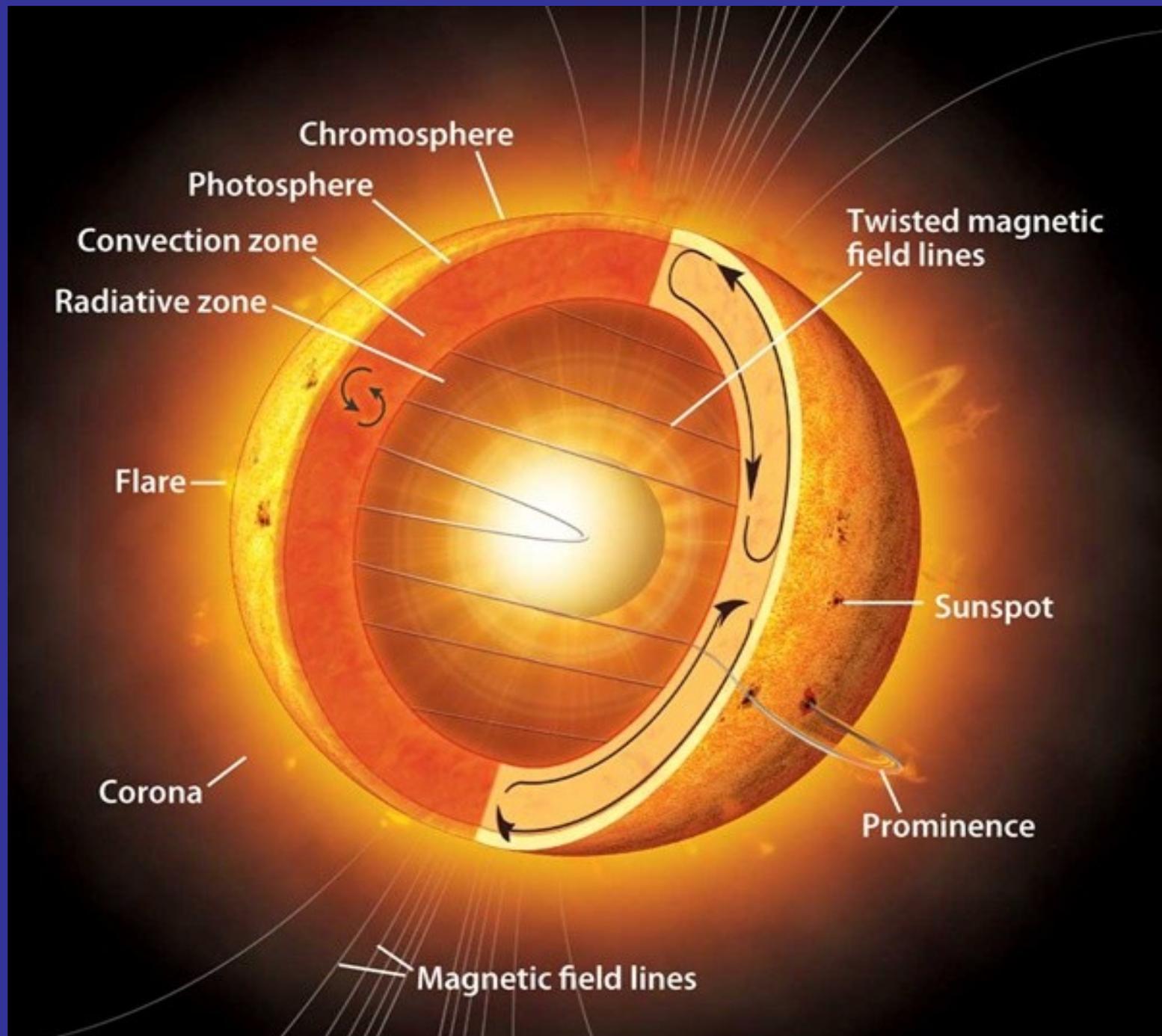
- Im Inneren heißes Gas, das ionisiert ist
- Die Atome haben keine gebundenen Elektronen und können kein Licht absorbieren: das Innere ist durchsichtig (**Strahlungszone**)
- Die Temperatur sinkt nach außen und die Atome können Elektronen binden (**Konvektionszone**)
- In der **Photosphäre** ist die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



# Konvektion



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

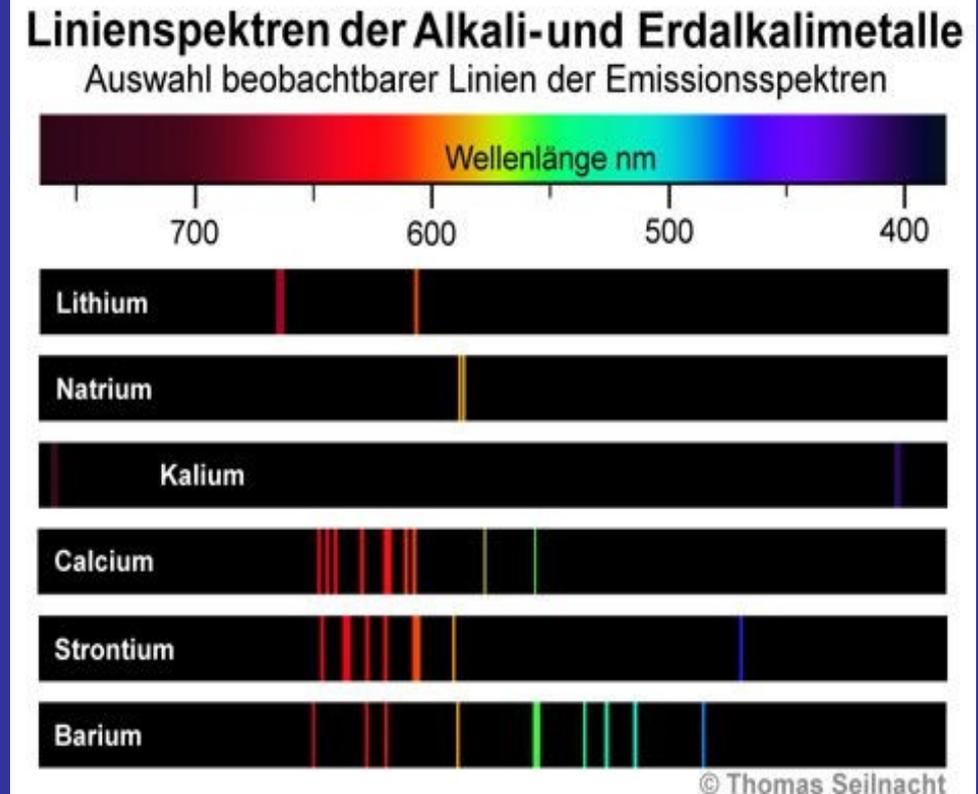


# Die Sonnenatmosphäre



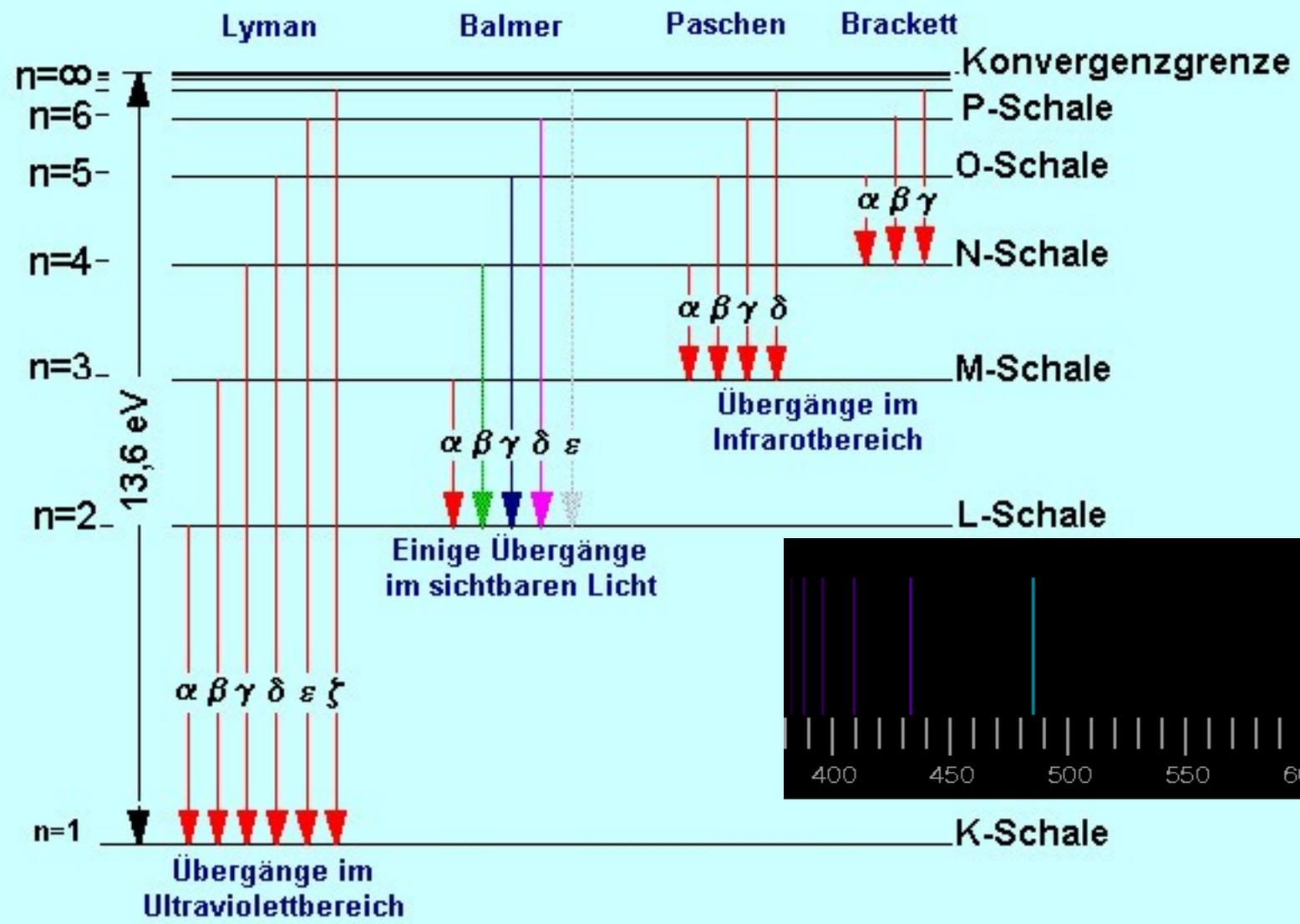
# Die Sonnenatmosphäre

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

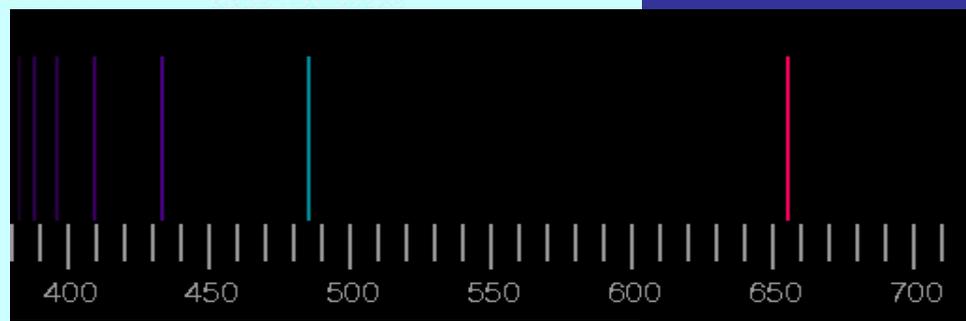


Die Spektrallinien geben Auskunft über die Chemie der Sonne. Es sind Absorptionslinien durch Absorption in den Oberflächenschichten der Sonne.

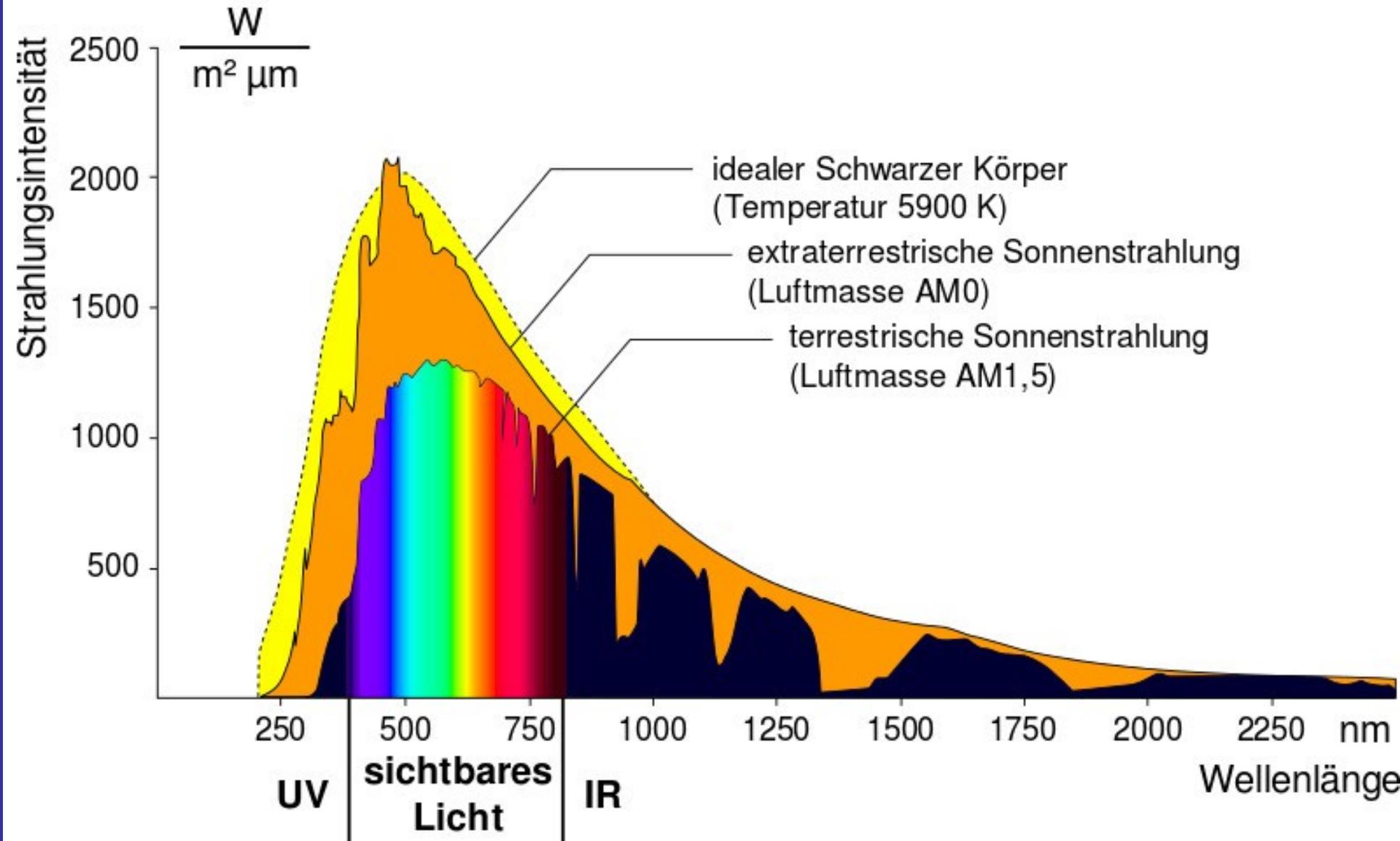
# Elektronische Übergänge im Wasserstoffatom



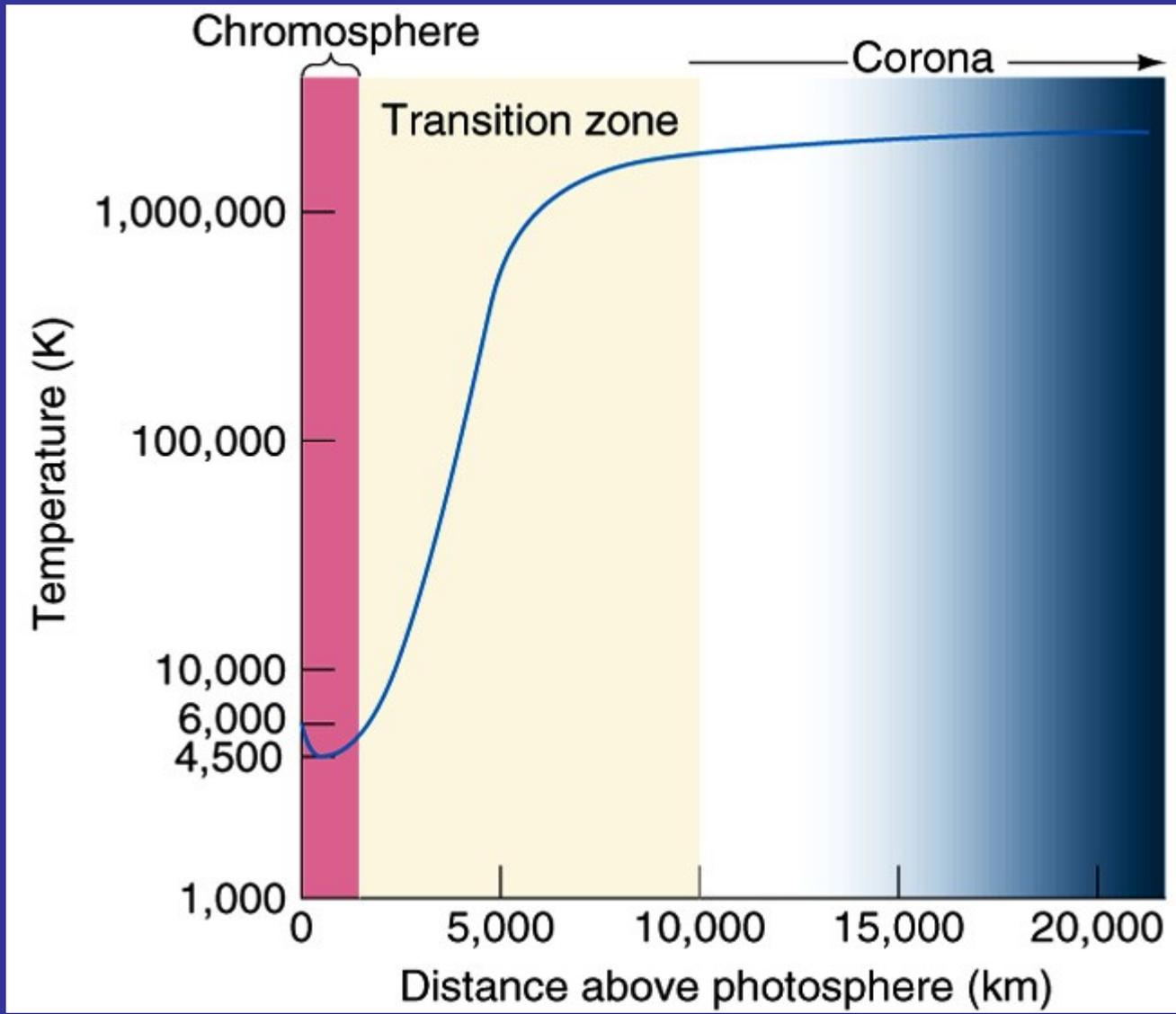
## Balmer-Serie



# 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

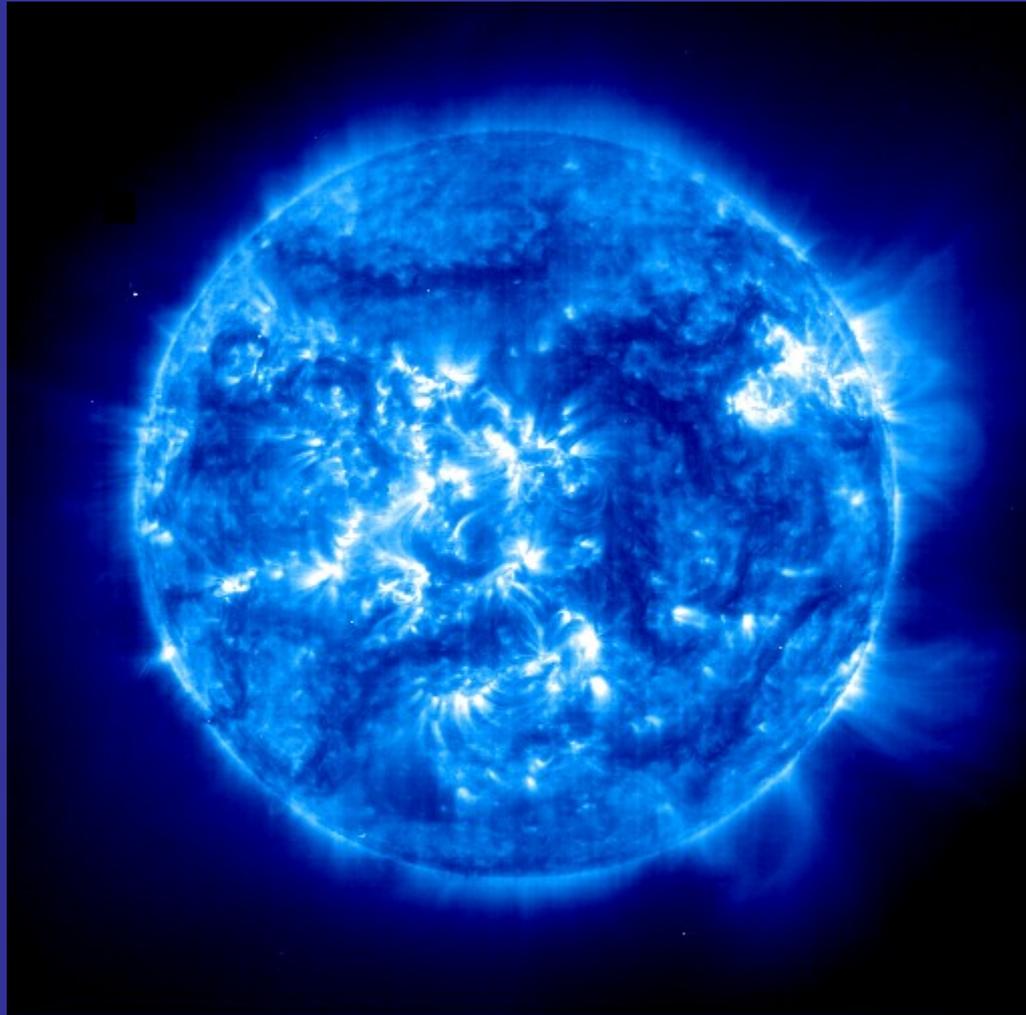


# Sonnenwind

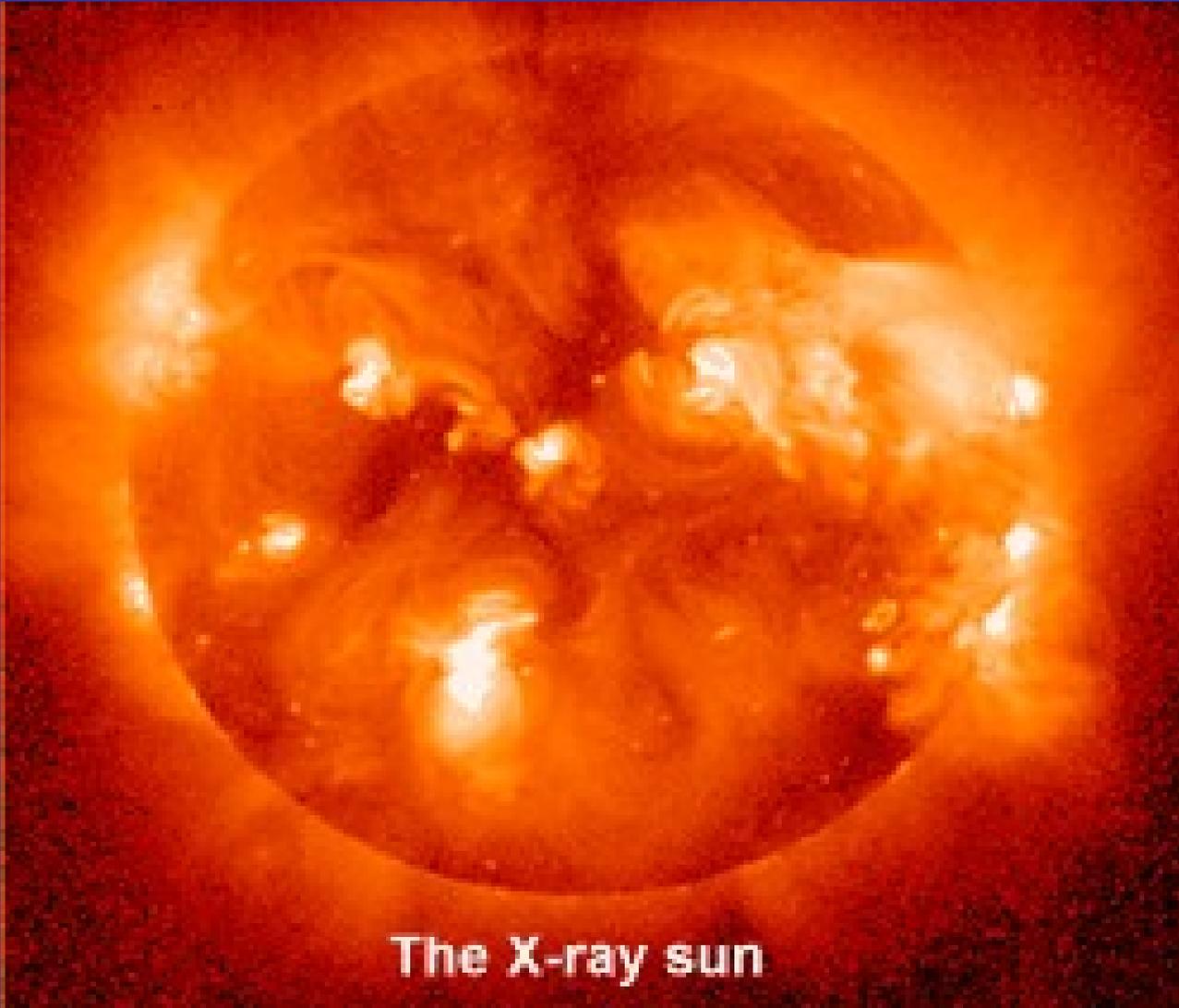
- ❖ Koronales Gas, das heiß genug ist, um gegen die Gravitation der Sonne zu entkommen.
- ❖ Die Sonne 'verdampft' quasi durch den Wind.
- ❖ Typische Geschwindigkeit  $\sim 500$  km/s, erreicht die Erde in  $\sim 3$  Tagen
- ❖ Die Sonne verliert dadurch etwa 1 Million Tonnen pro Sekunde!
- ❖ Das sind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



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

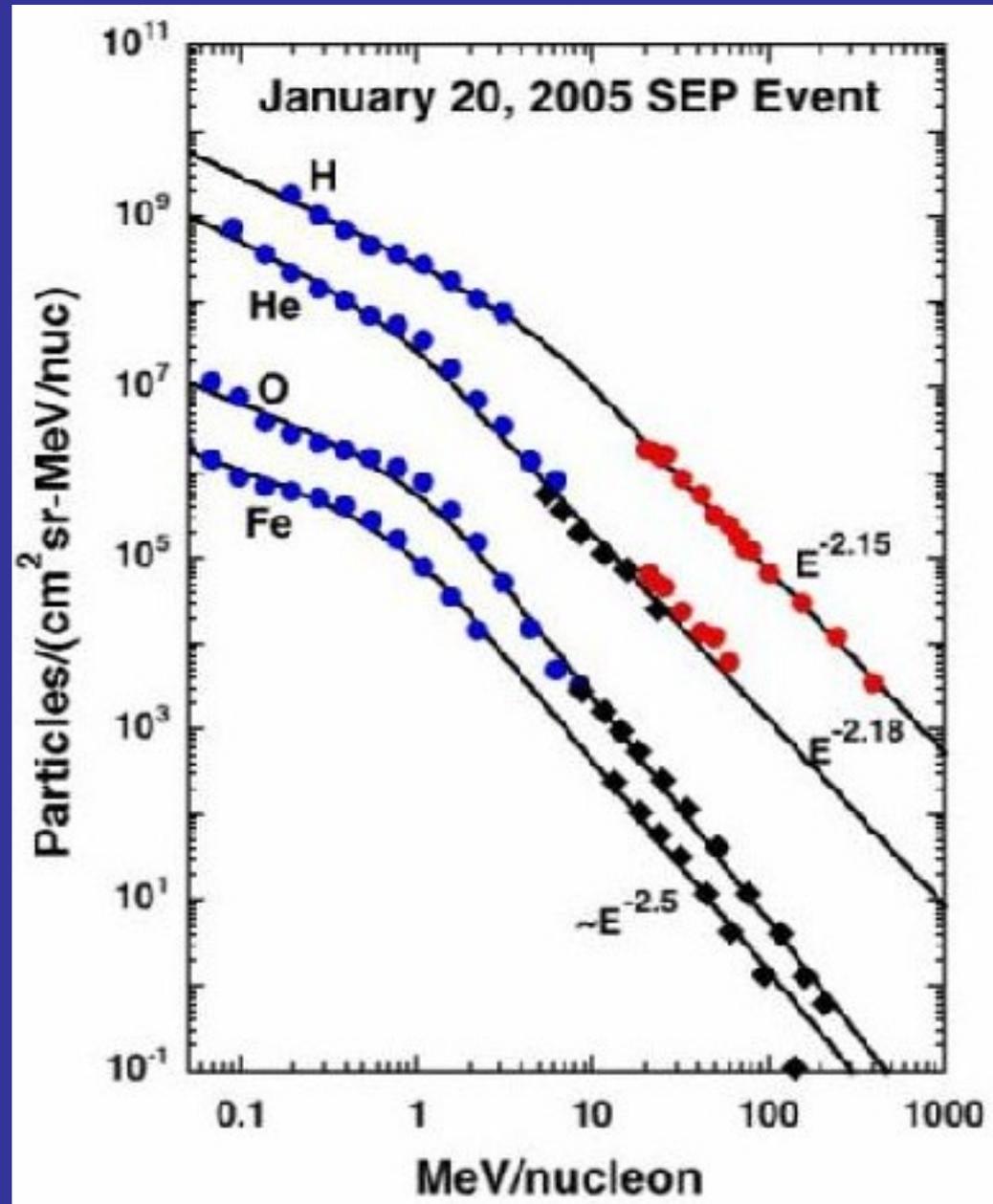


Das sehr heiÙe koronale Gas emittiert  
Röntgenstrahlen



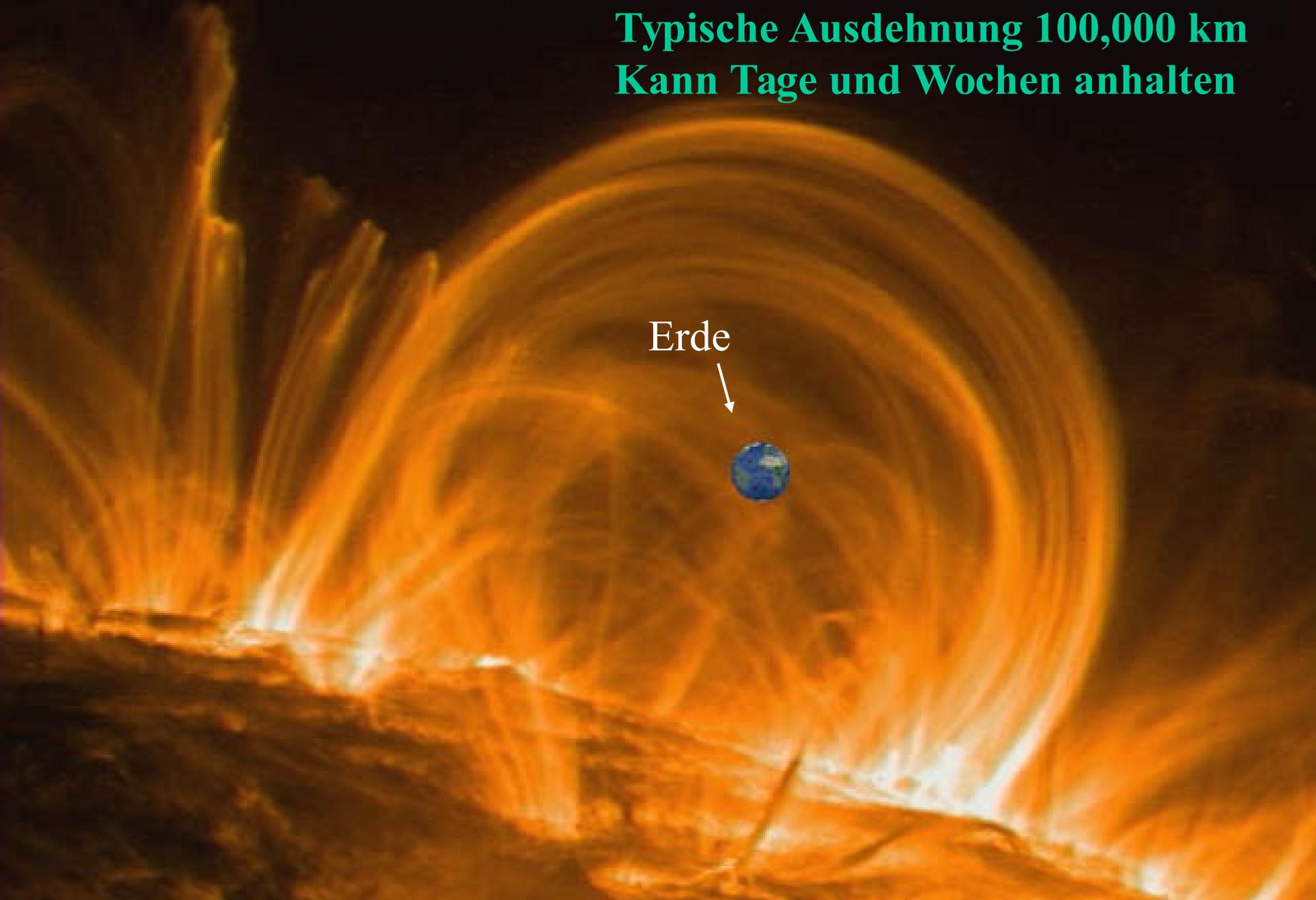
The X-ray sun

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

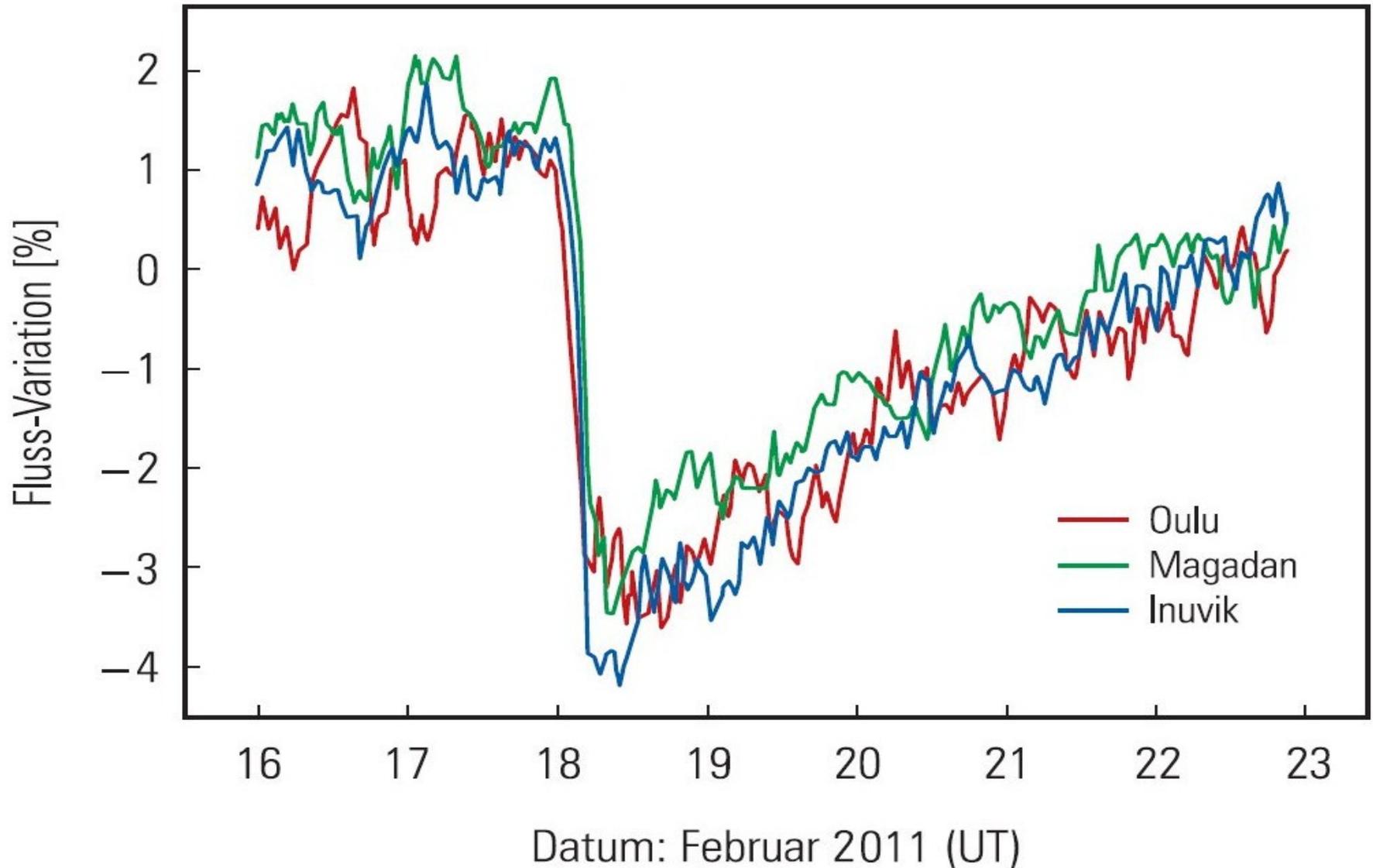
Typische Ausdehnung 100,000 km  
Kann Tage und Wochen anhalten



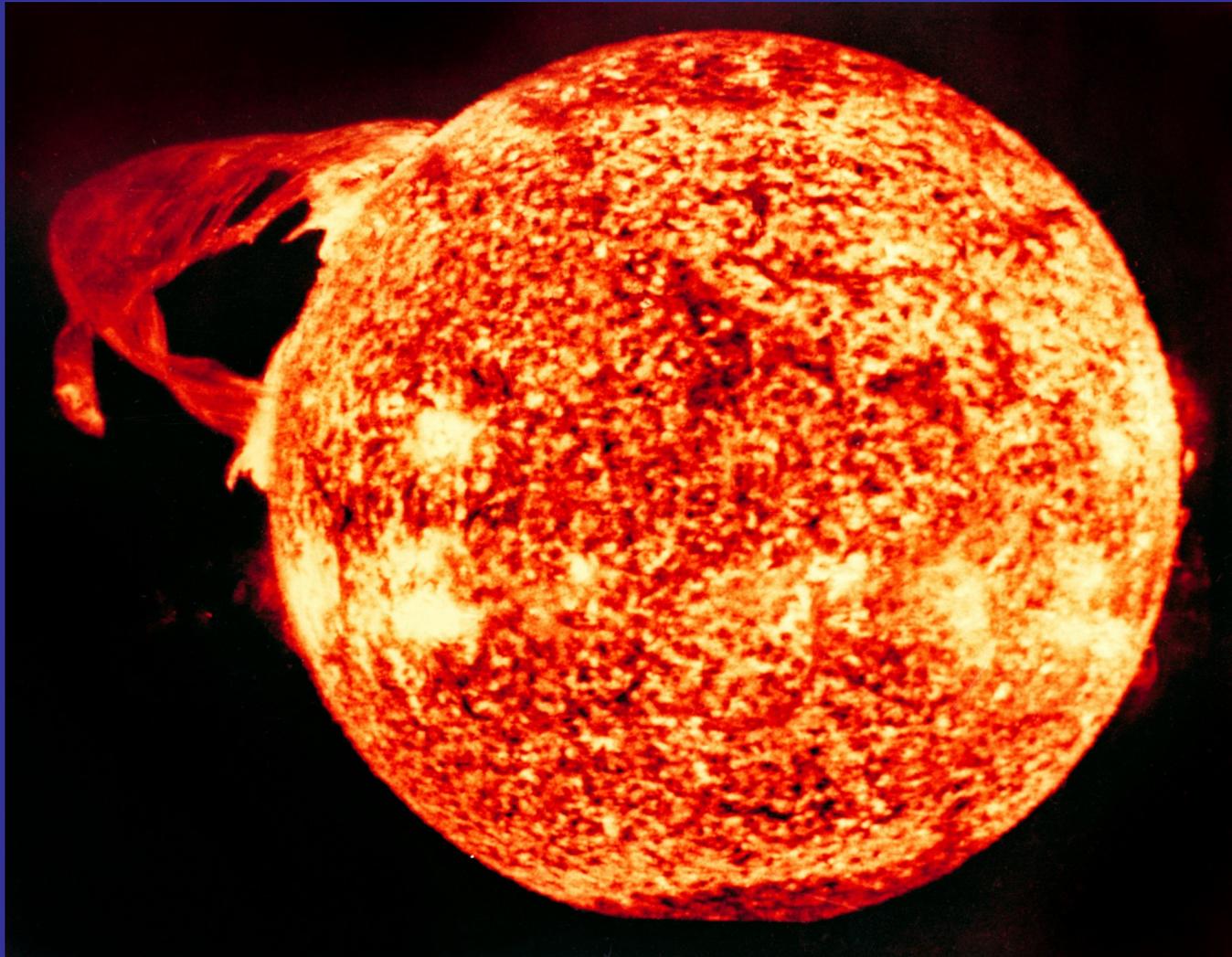
Erde



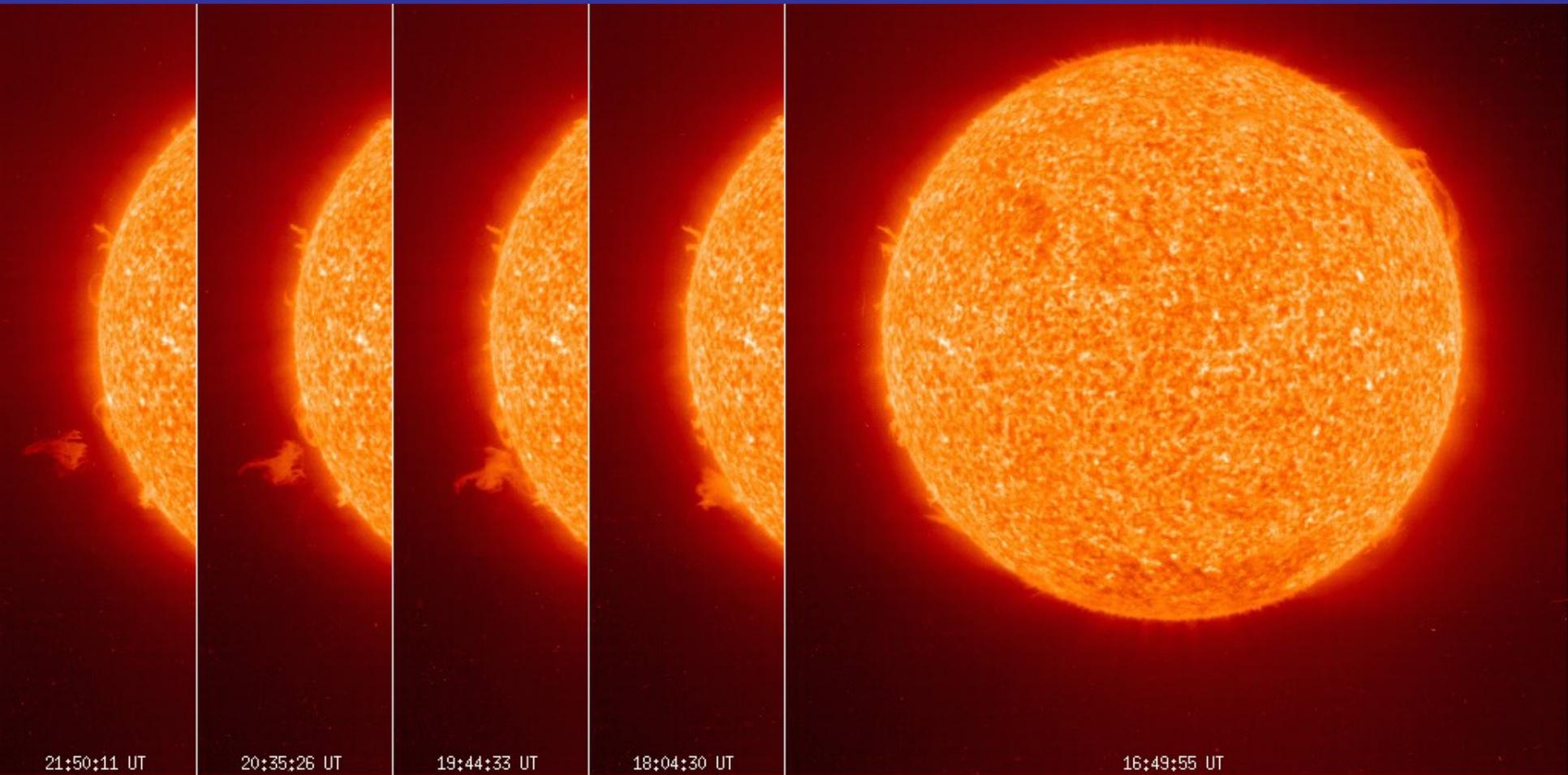
# Reduktion galaktischer kosmischer Strahlung nach einem koronalen Ausbruch



**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.**



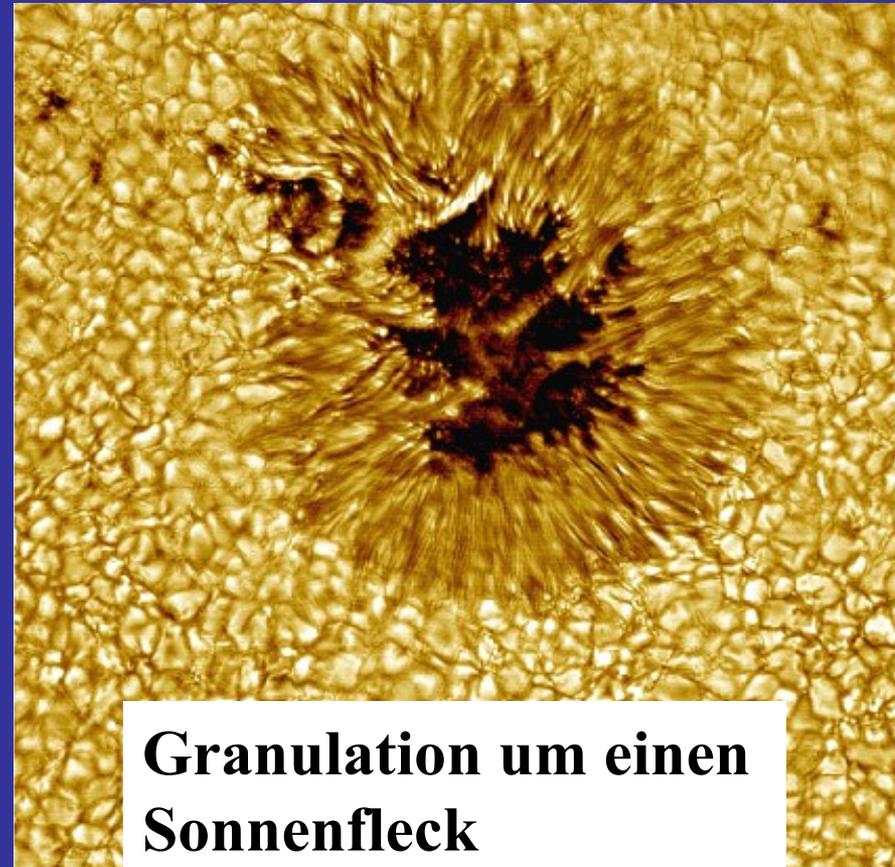
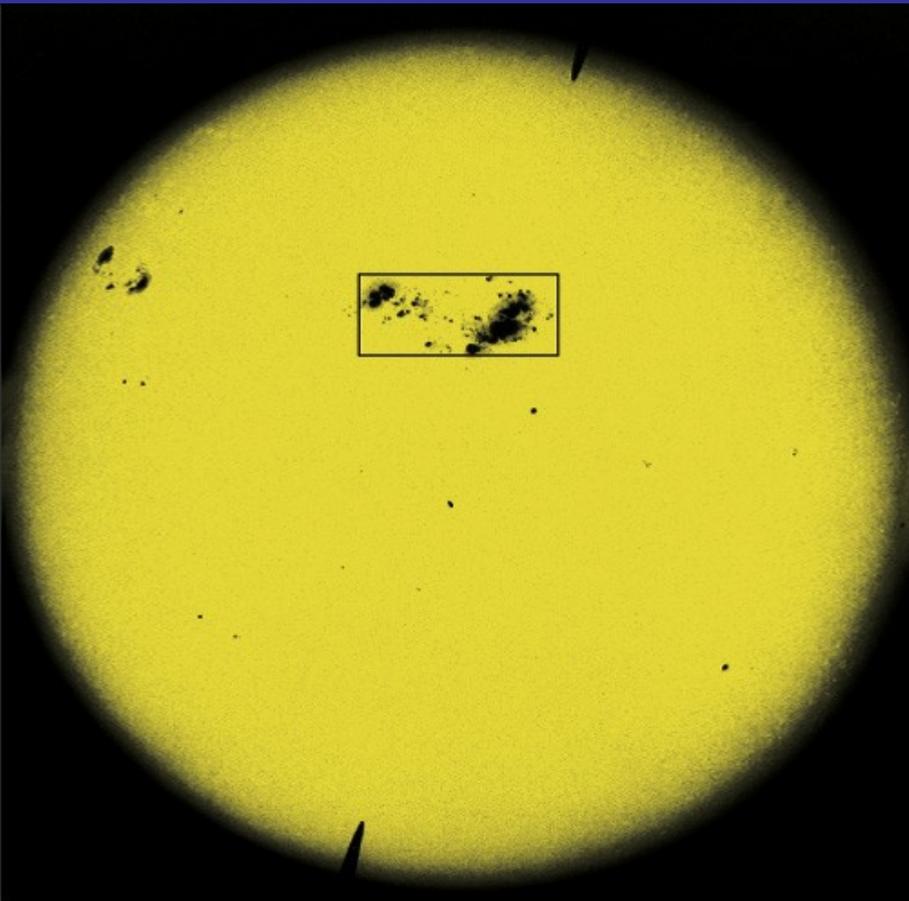
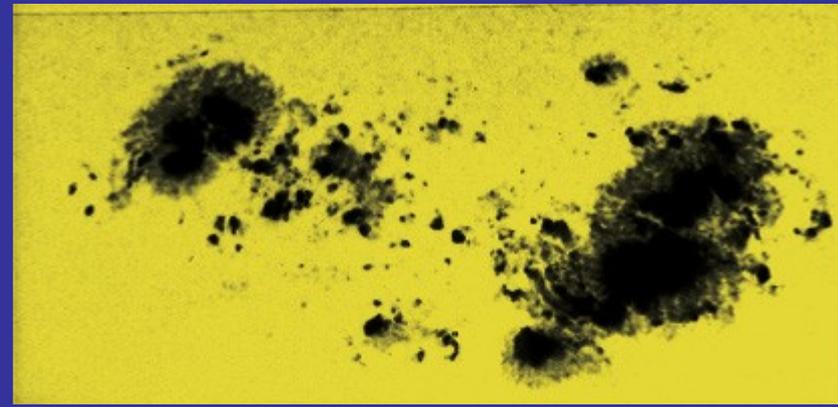
# Solare Flares: sehr energiereich



5 Stunden

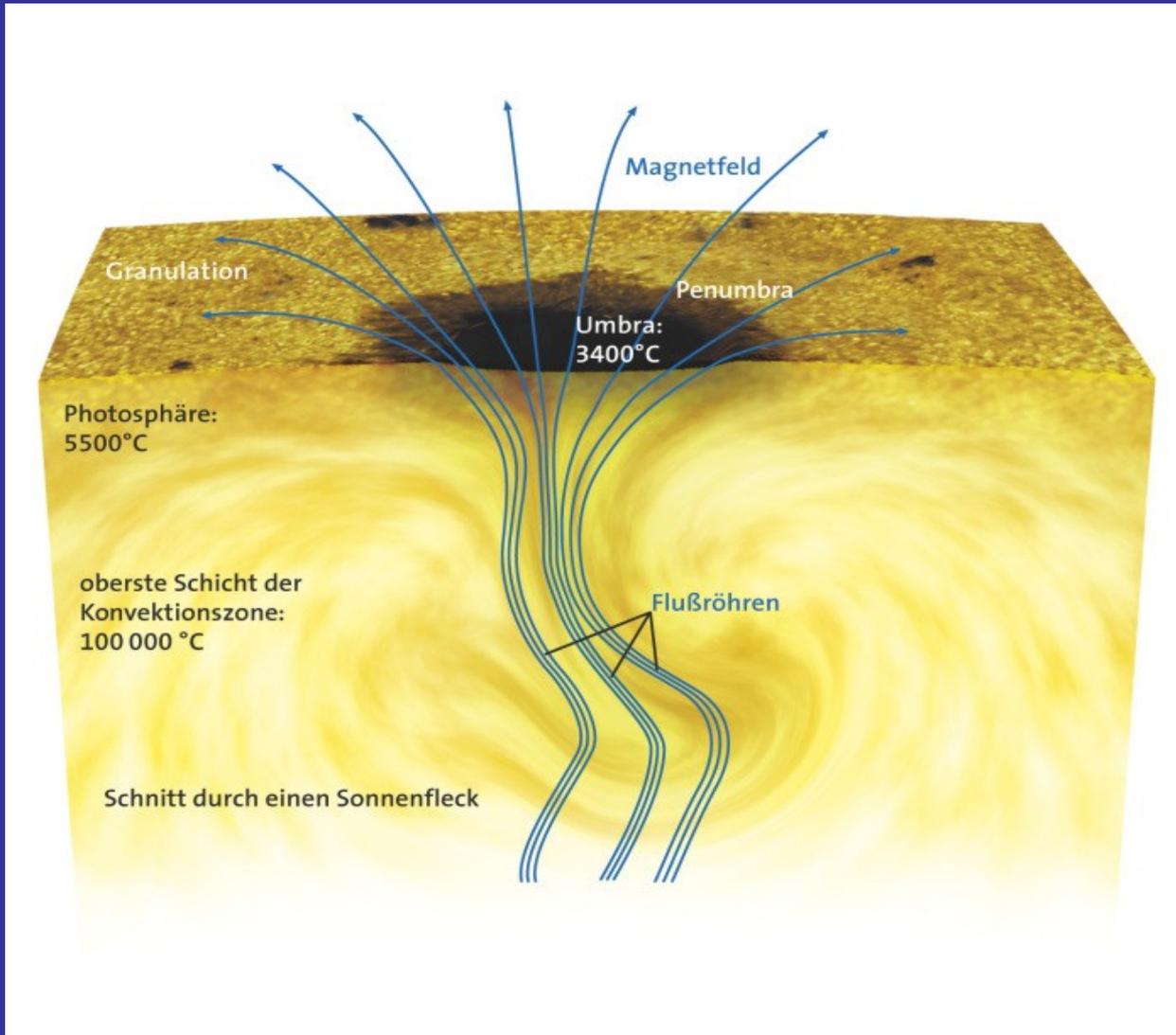
Die solaren Teilchen sind so energiereich, dass das Magnetfeld sie nicht zurückhalten kann: sie verlassen die Sonne als energiereicher Wind.

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



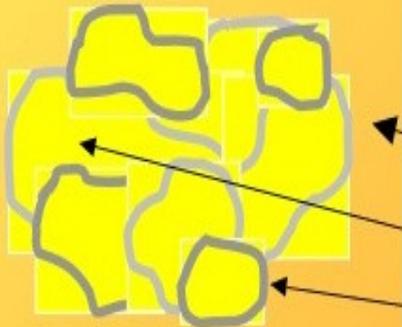
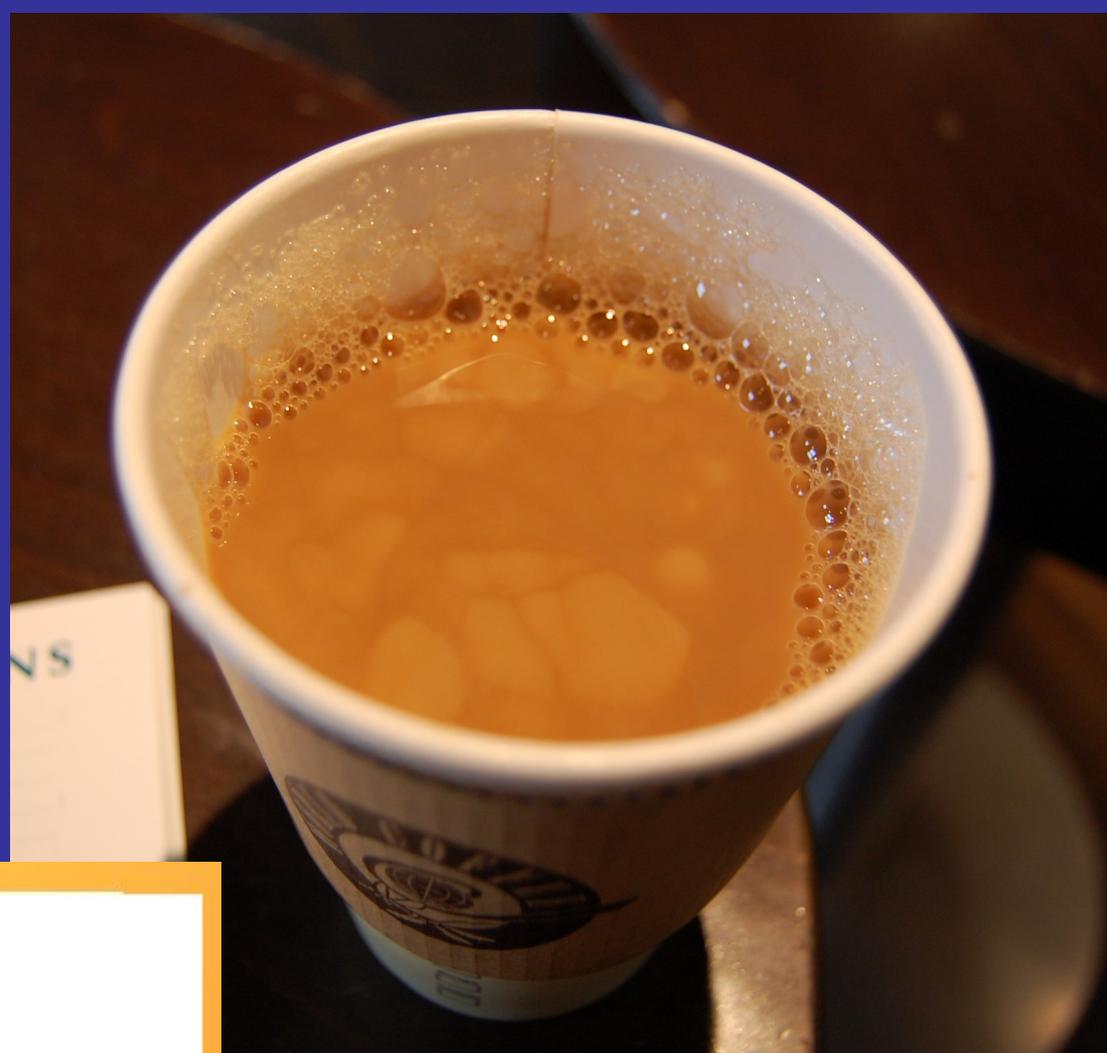
**Granulation um einen Sonnenfleck**

# 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 Kaffee- tasse:durch konvektiven Transport



Granulation

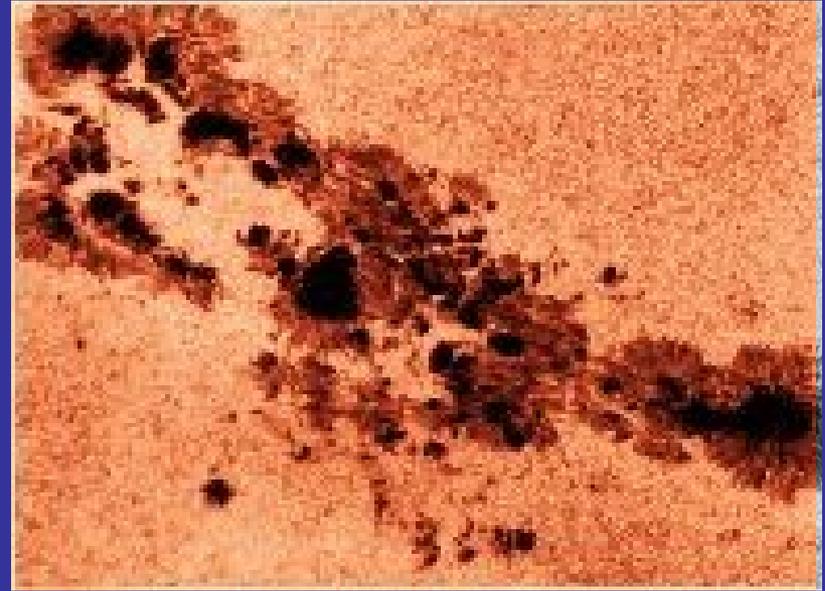
helles, heißes aufsteigendes Gas

dunkles, kaltes absinkendes Gas

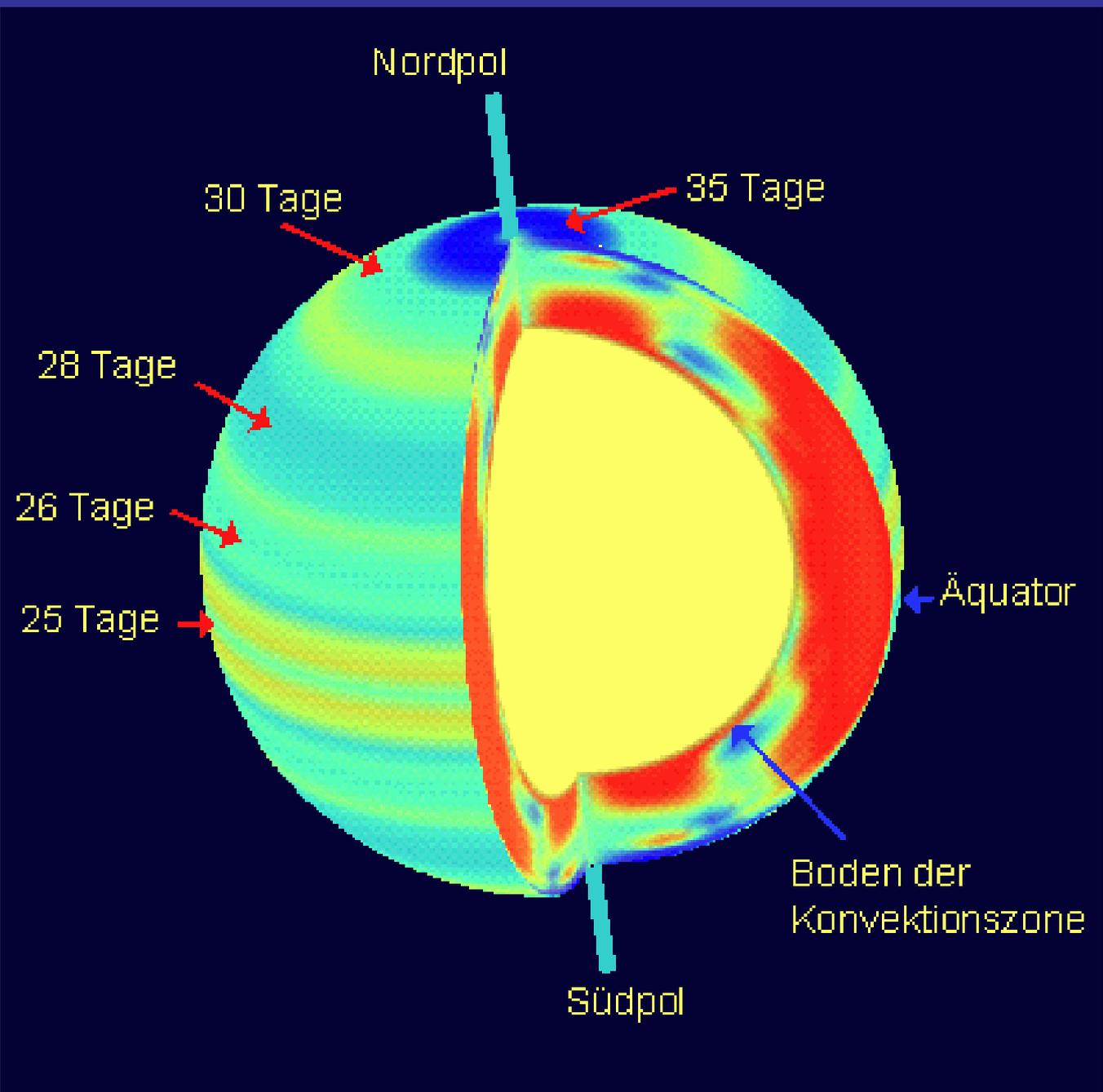
# Sonnenflecken

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

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

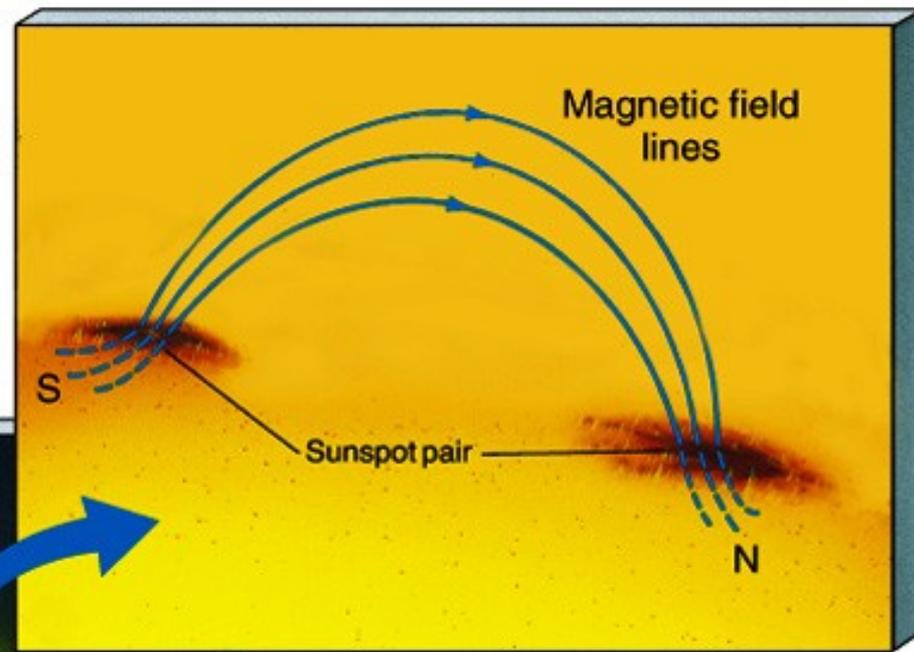
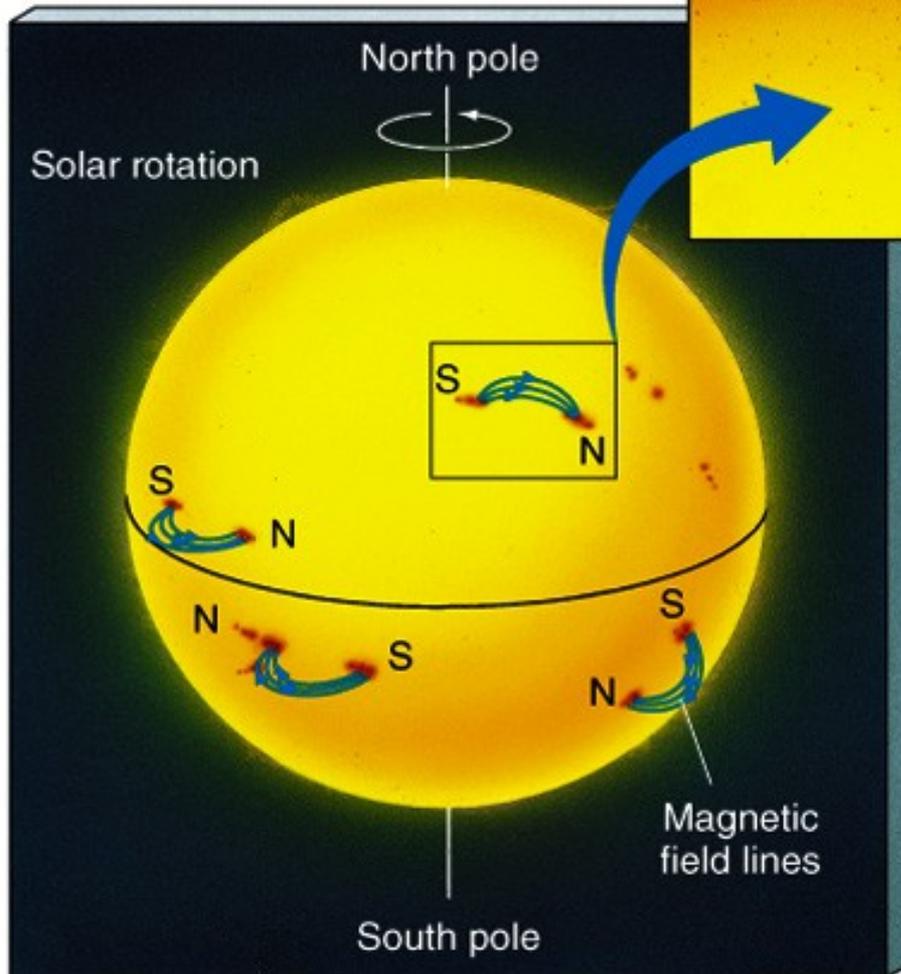


- Dauer; zwischen Tagen und Monaten
- Galileo hat die Sonnenflecken schon beobachtet und gemerkt, dass die Sonne rotiert (schneller an den Polen und langsamer am Äquator)

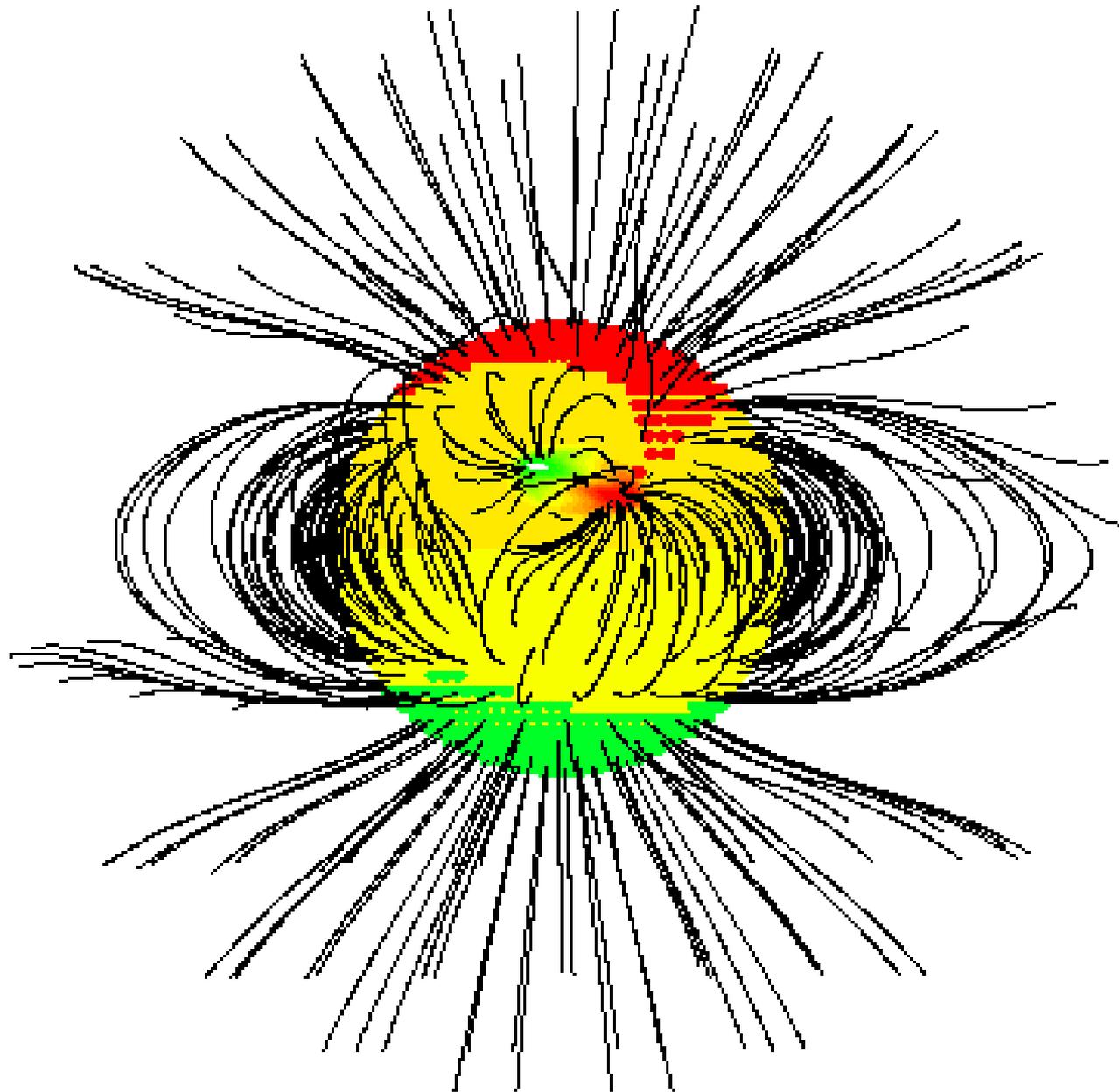


# Differentielle Rotation der Sonne

**Sonnenflecken  
treten häufig  
paarweise auf**



**Magnetfelder  
bis 1 Tesla**



**Magnetfeld  
der Sonne**

**Dipolfeld;**

**Lokale  
Irregularitäten**

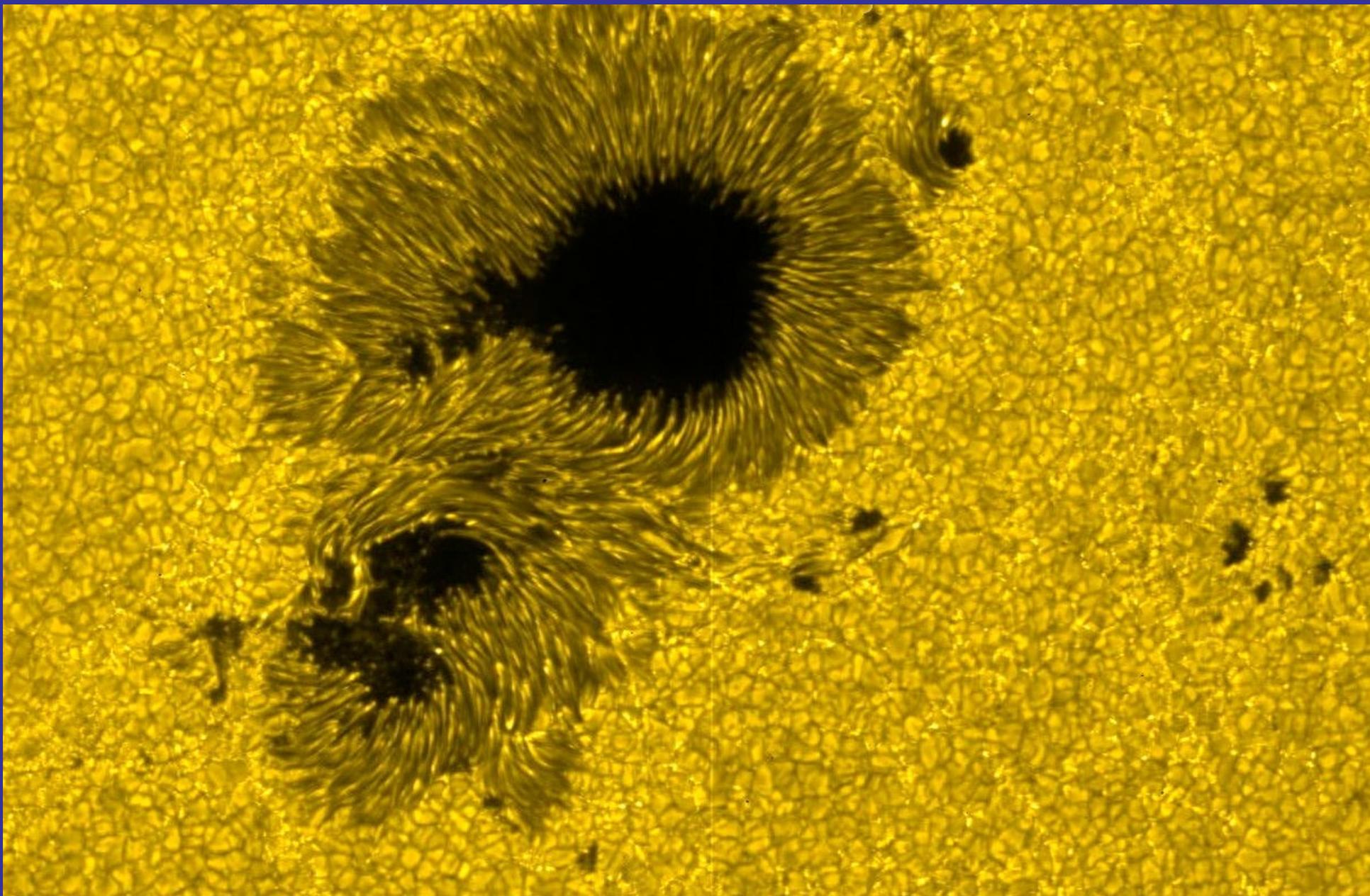
**Sonnen-  
Oberfläche**

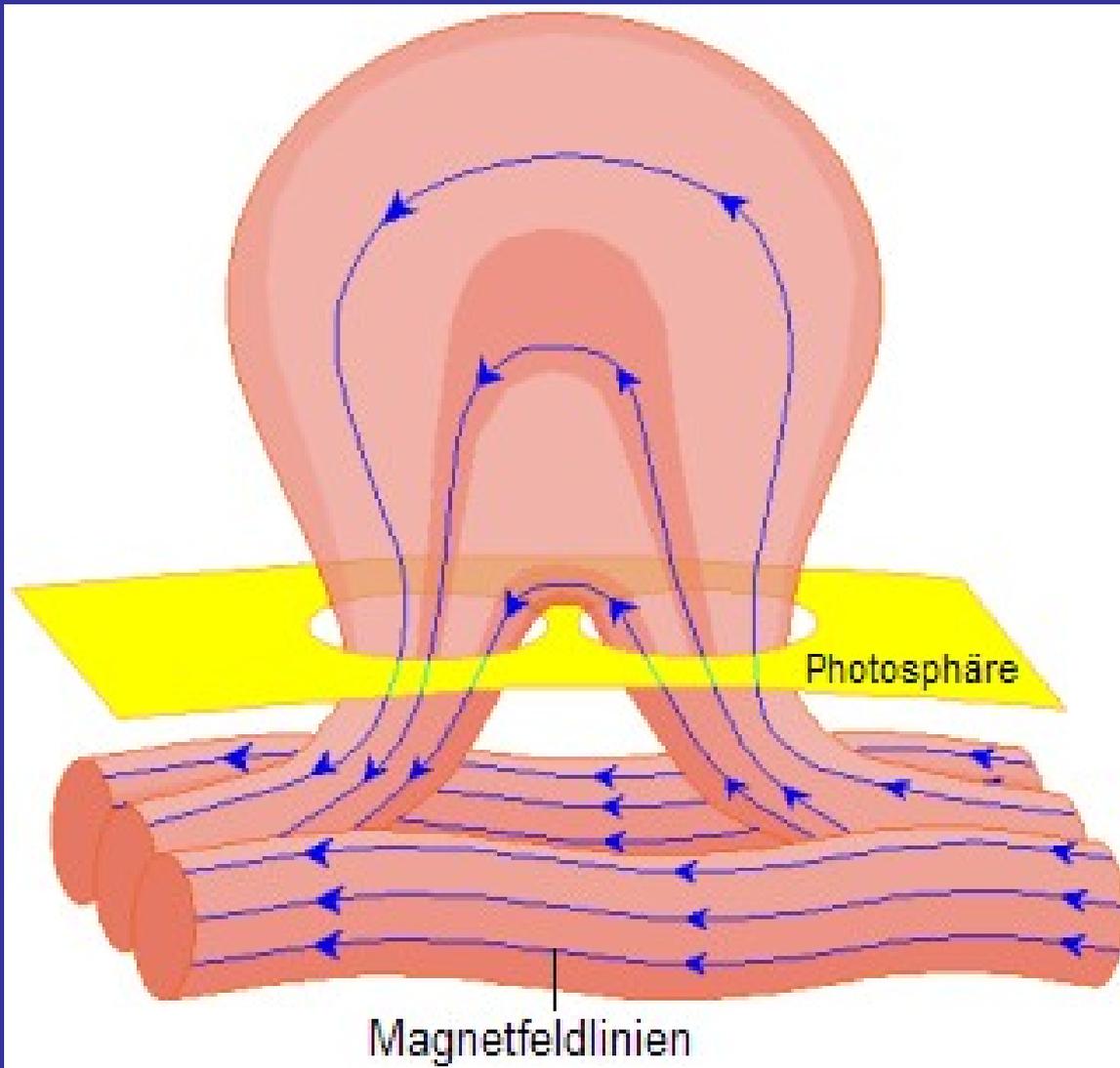
**100  $\mu$ T**

**in Flares**

**0,5 T**

**verursacht  
durch Plasma-  
ströme**





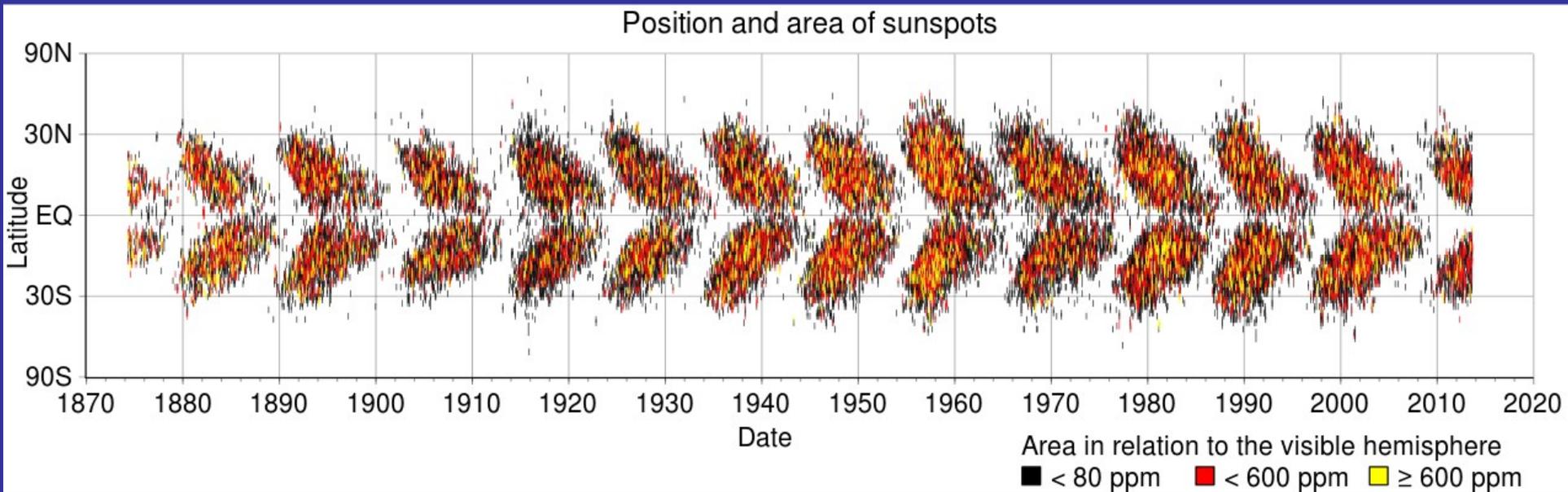
**Bei solaren  
Eruptionen:**

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

**100 000 km groß**

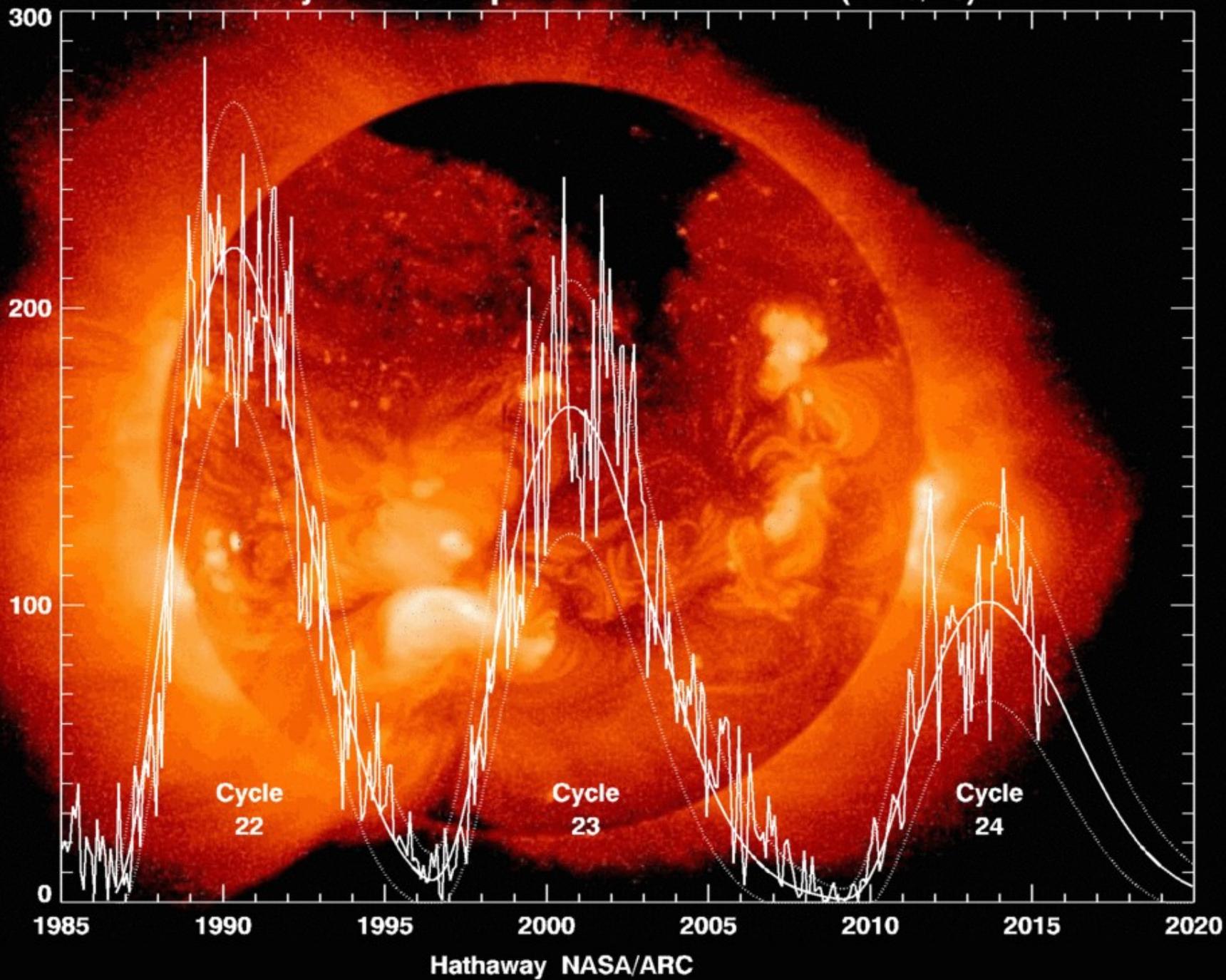
**Einfluss auf  
Funkverbindungen,  
Überlandleitungen,  
Satelliten, ...**

# Sonnenfleckenzyklus

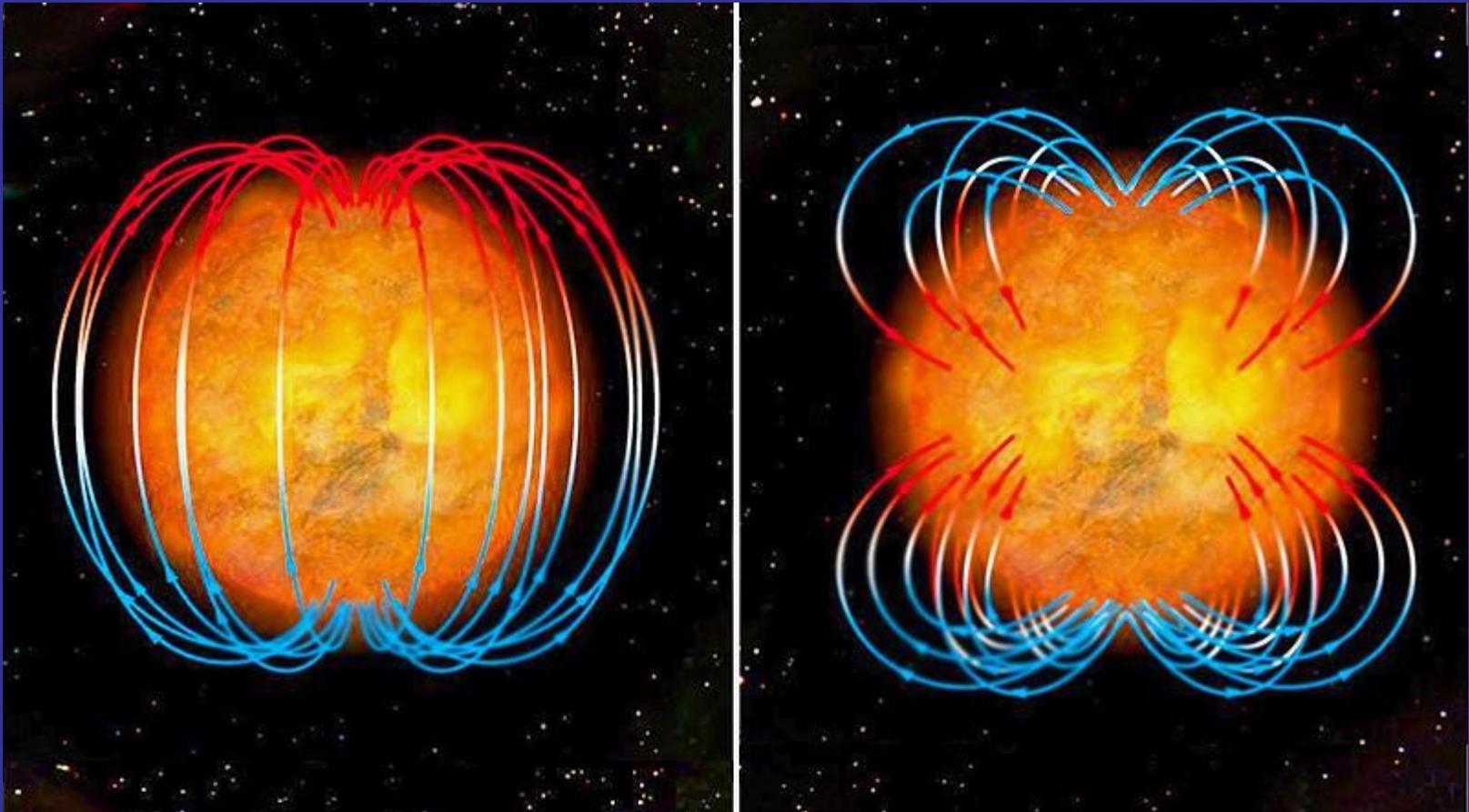


**Ursprung ? Breitenabhängige Sonnenrotation?**  
**Die Polarität dreht sich alle 11 Jahre um: Hale-**  
**Zyklus: 22 Jahre**

# Cycle 24 Sunspot Number Prediction (2015/08)



# Magnetfeldumkehr im 22 Jahreszyklus

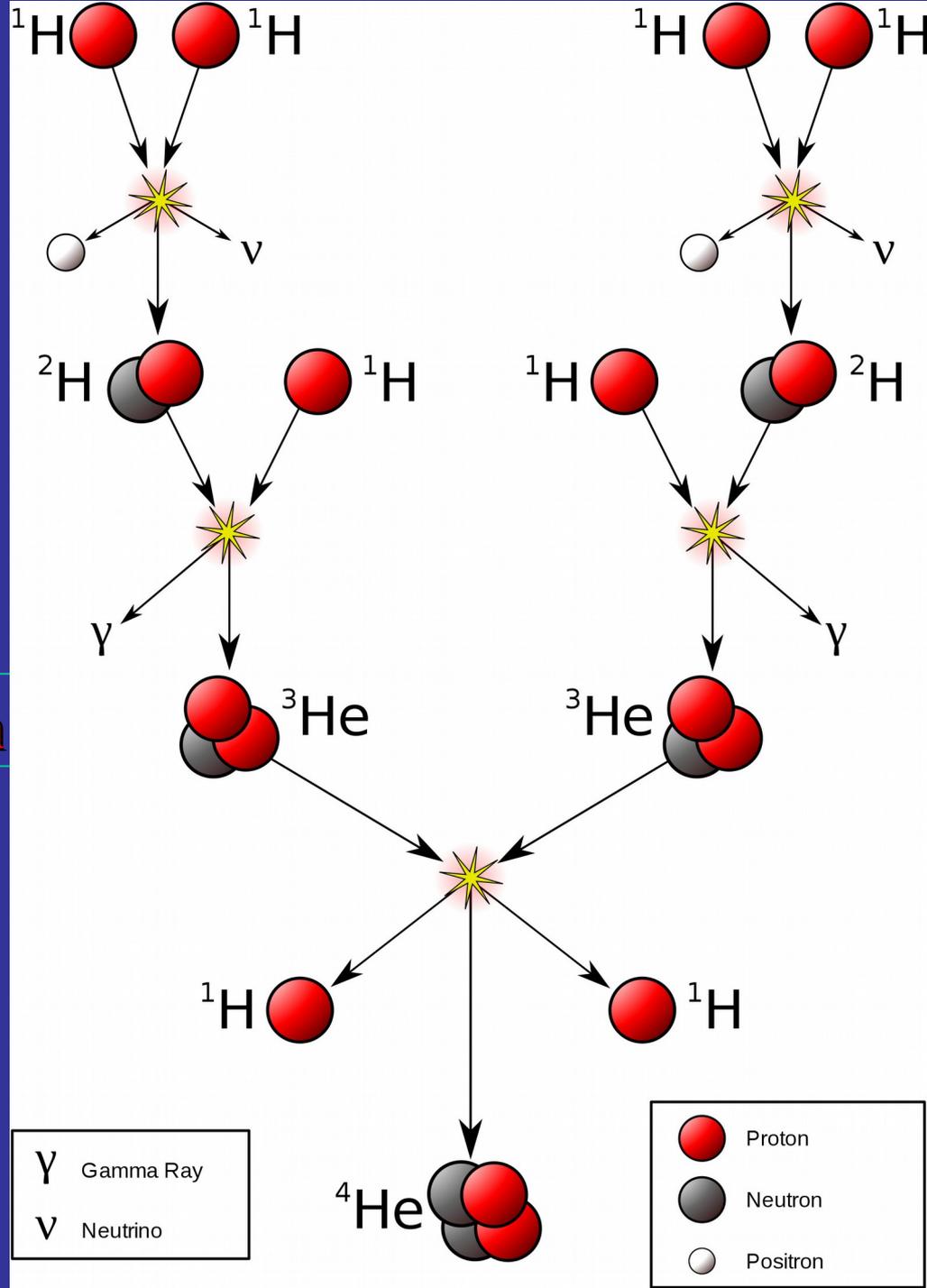
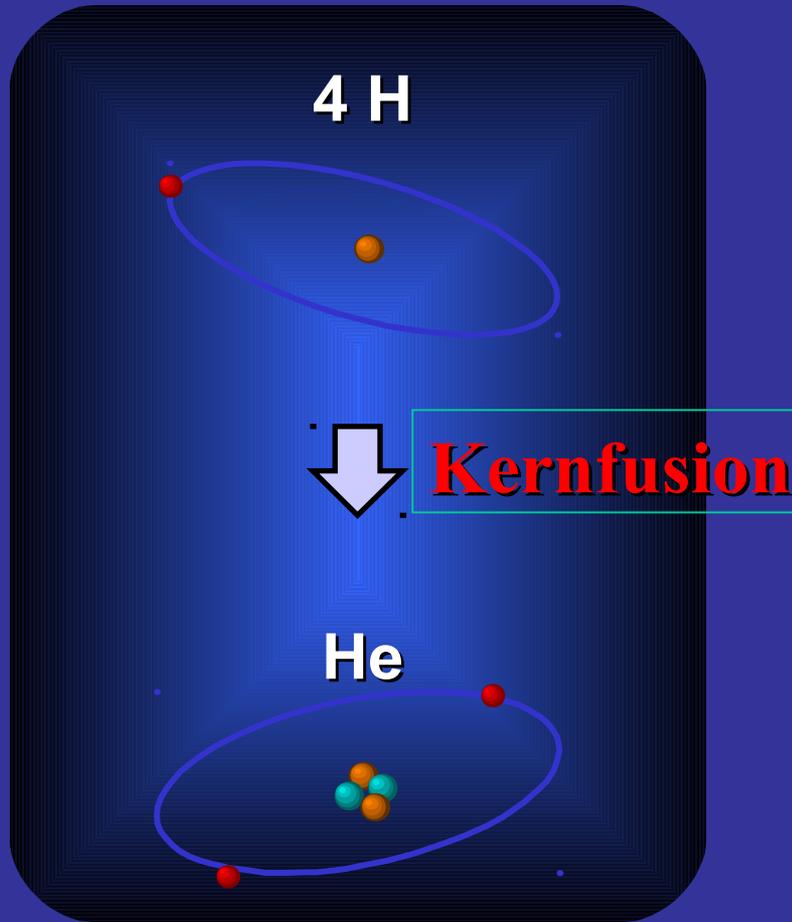


**Dipol**



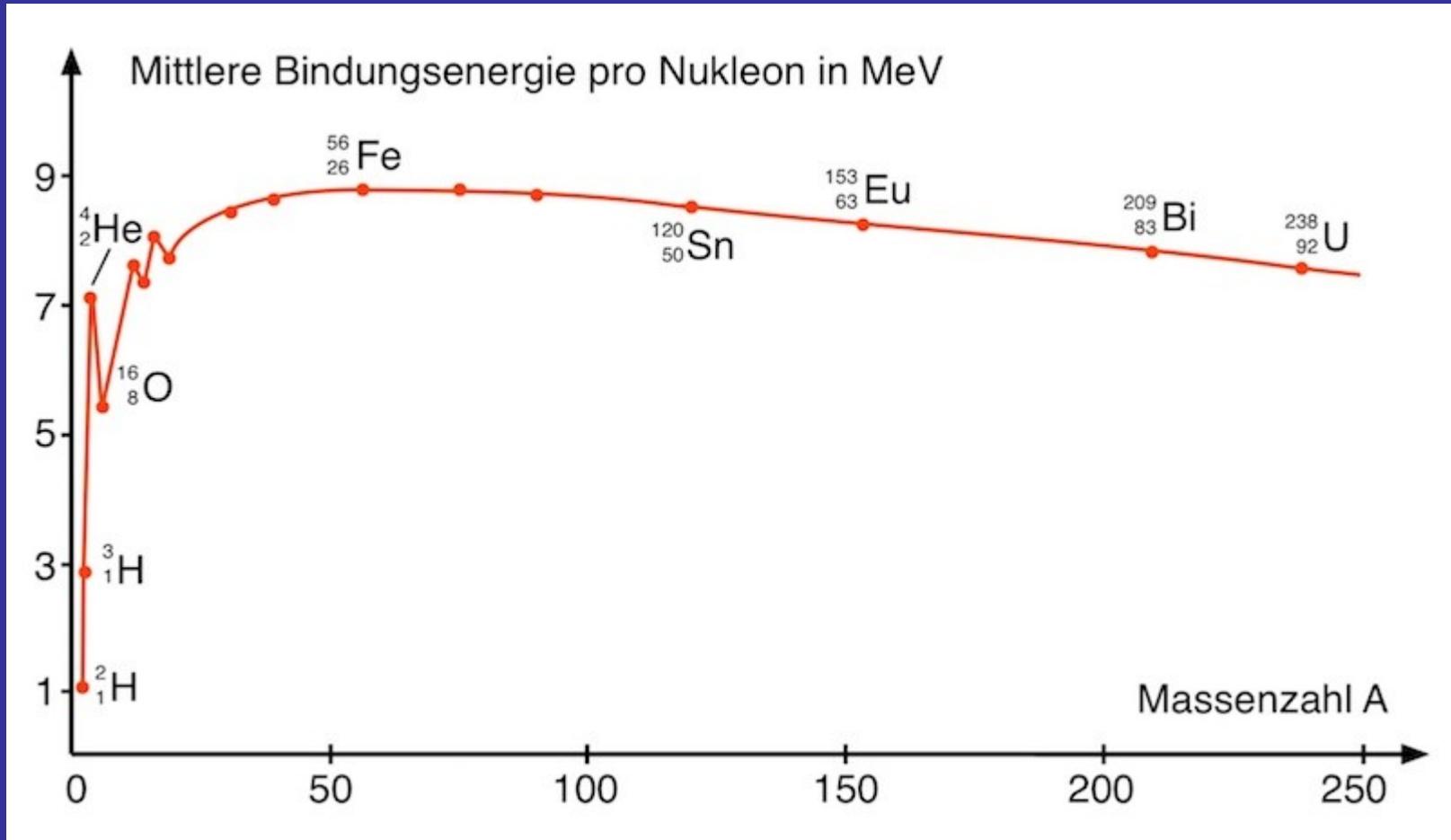
**Quadrupol**

# Woher bezieht die Sonne ihre Energie?



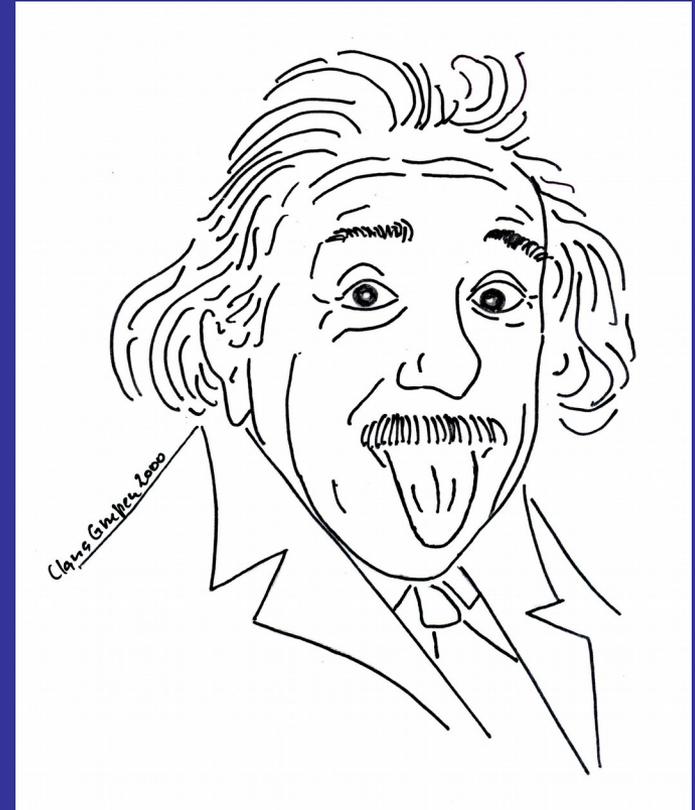
## Fusion in der Sonne

## Kernkraftwerke



$$E = m c^2$$

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



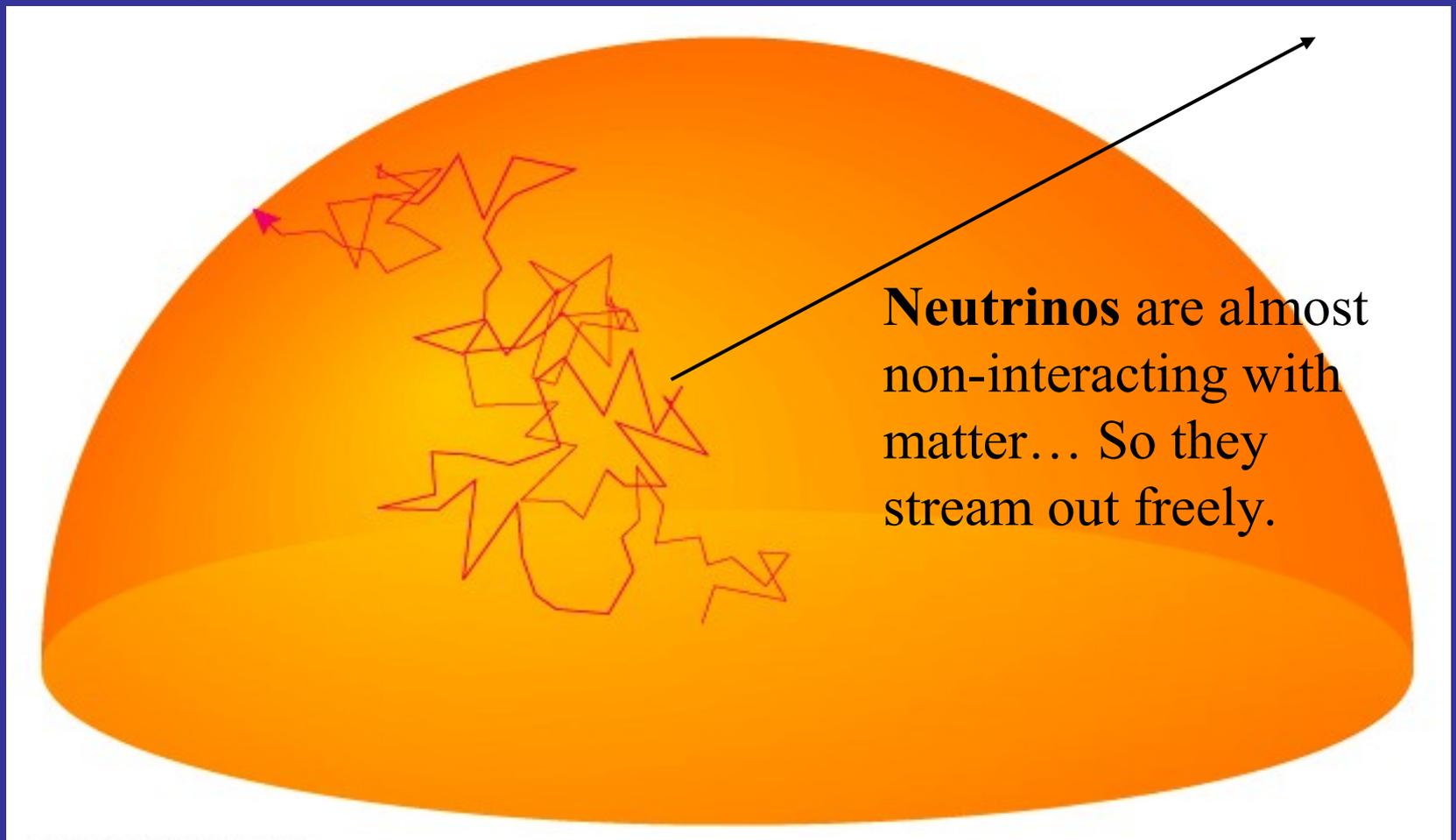
C.G. 2005

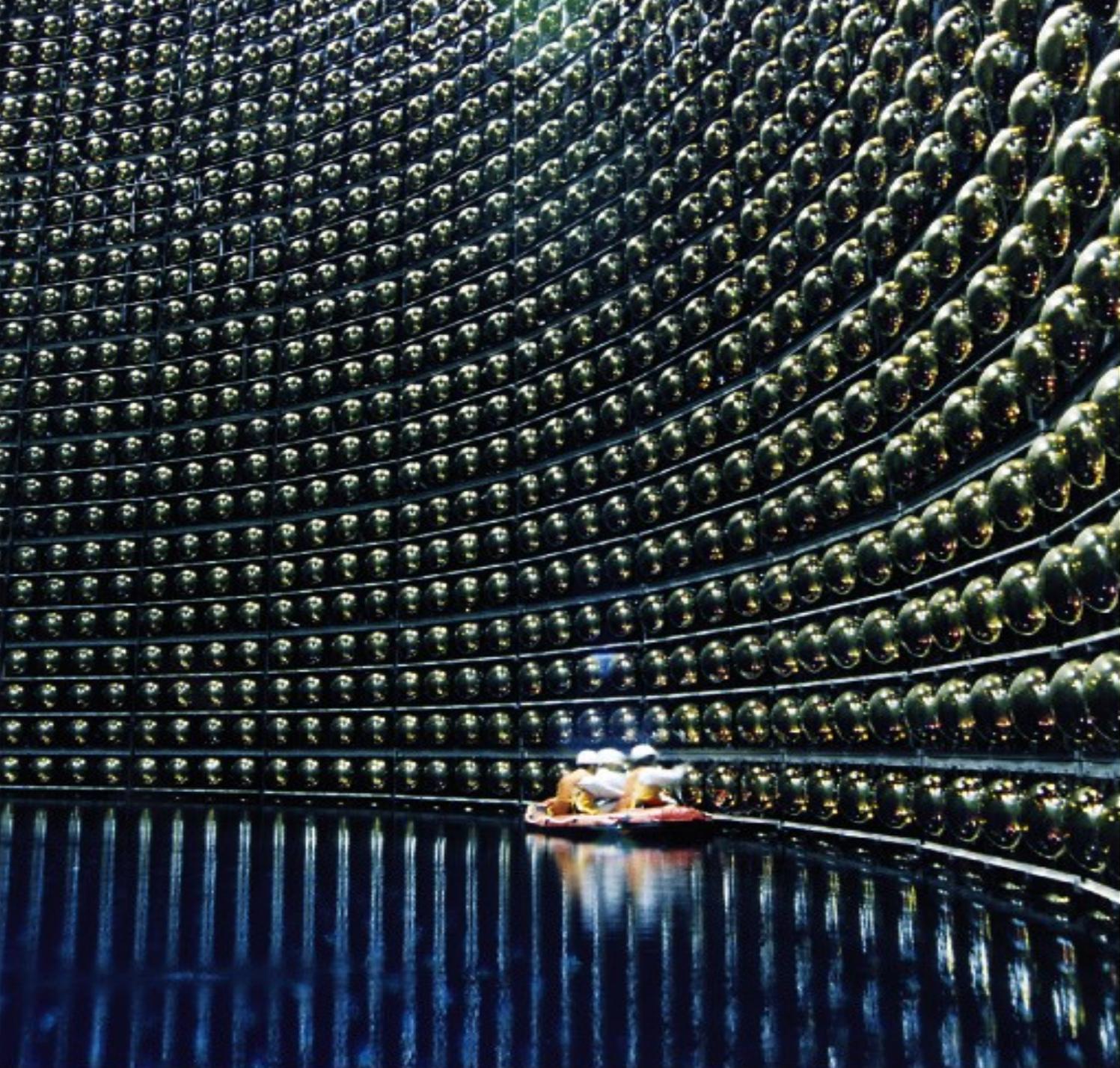
### Beispiel:

- ❖ 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**

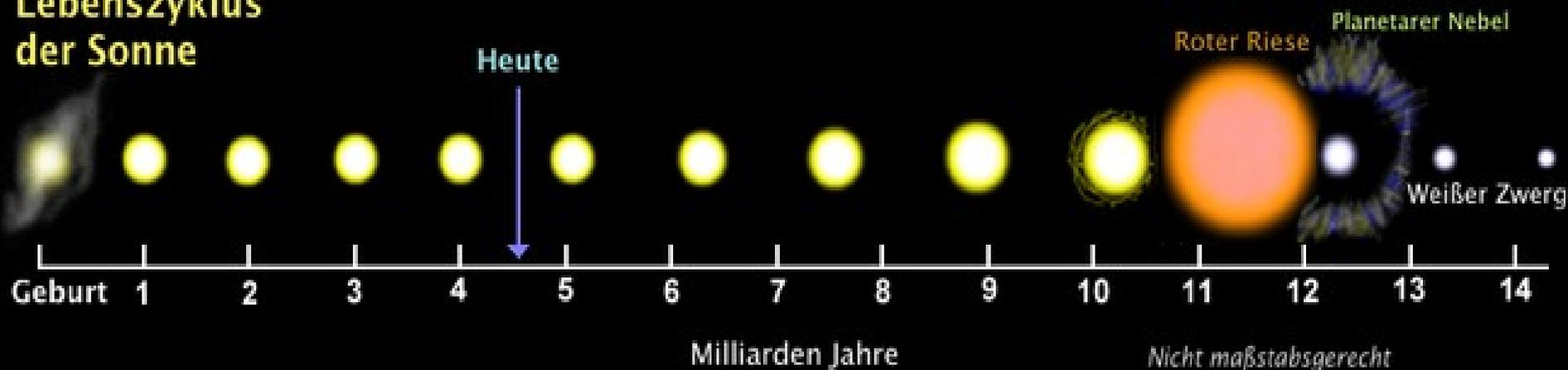
**Neutrino-  
Produktion**

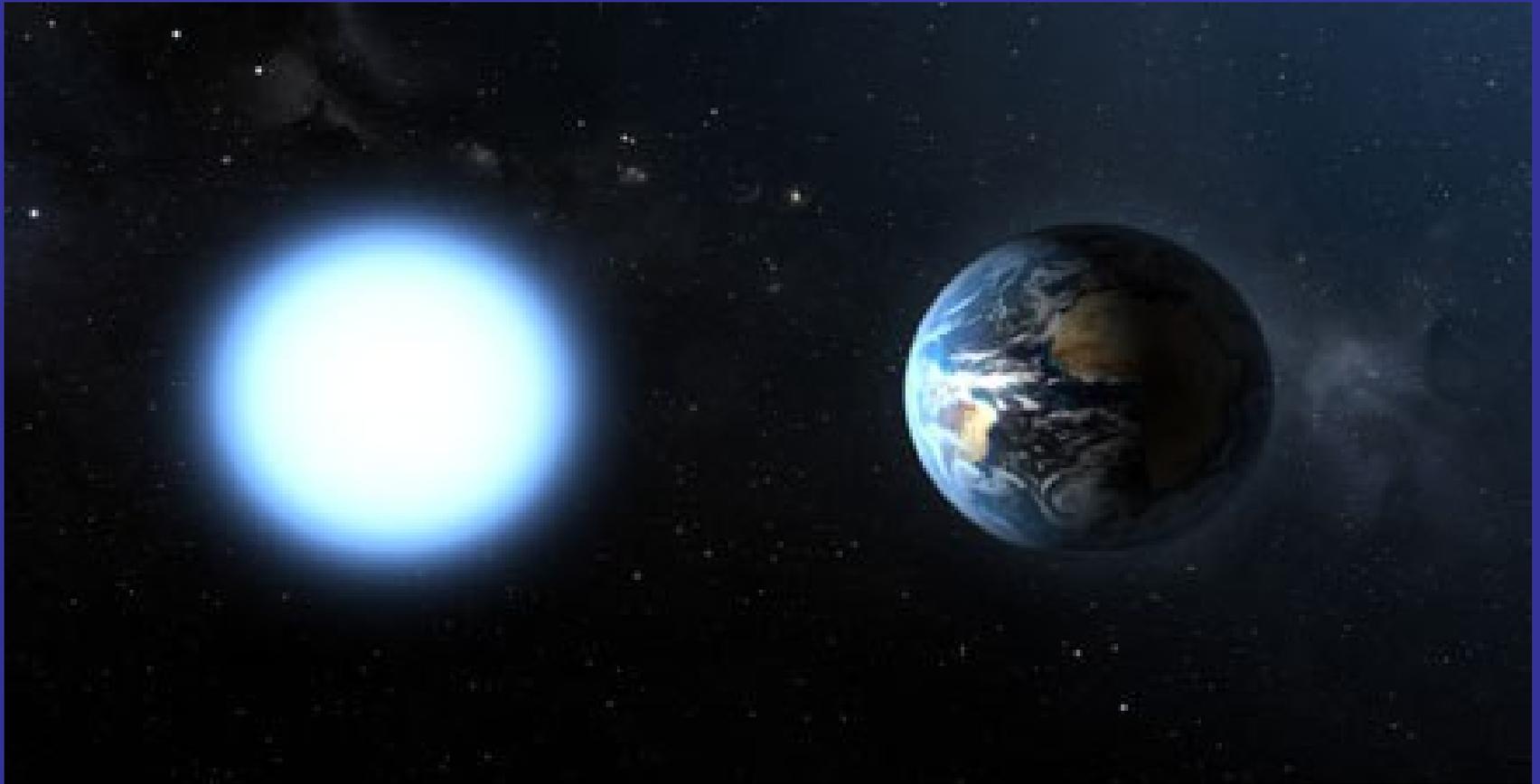
**Neutrino-  
Oszillationen**



# Weitere Entwicklung der Sonne

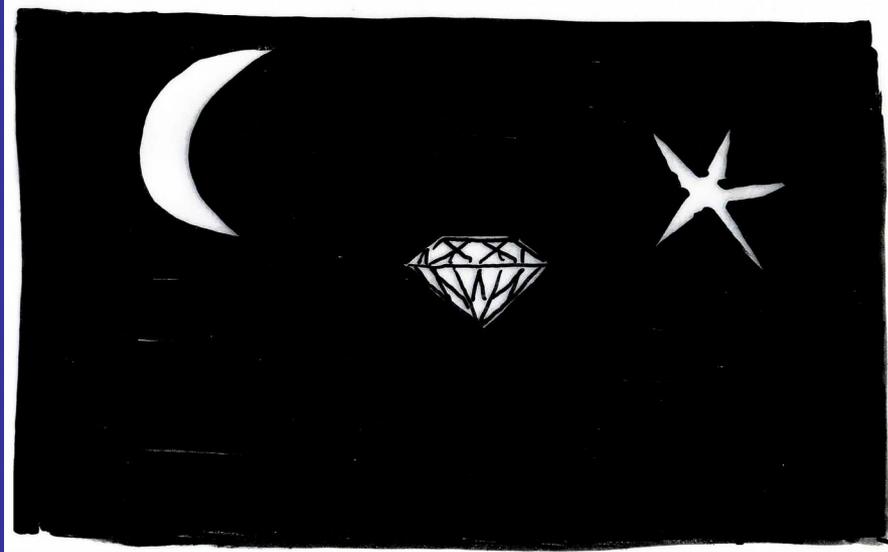
## Lebenszyklus der Sonne



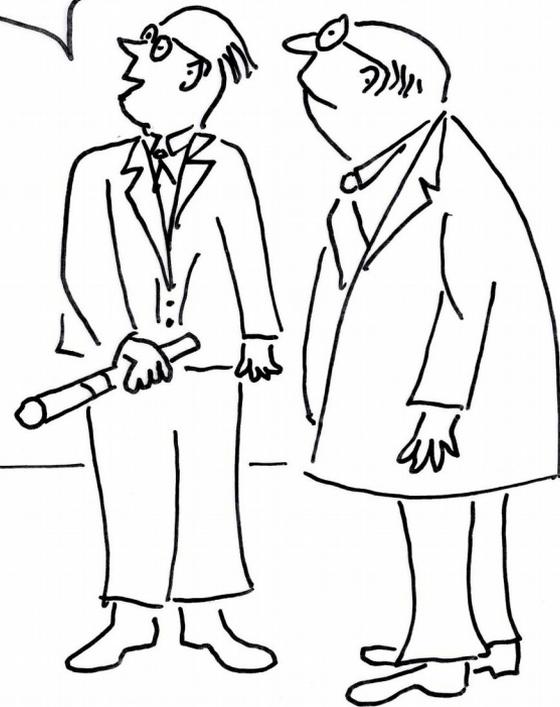


**Sonne als Weißer Zwerg**

**Masse = 300 000 Erdmasse**



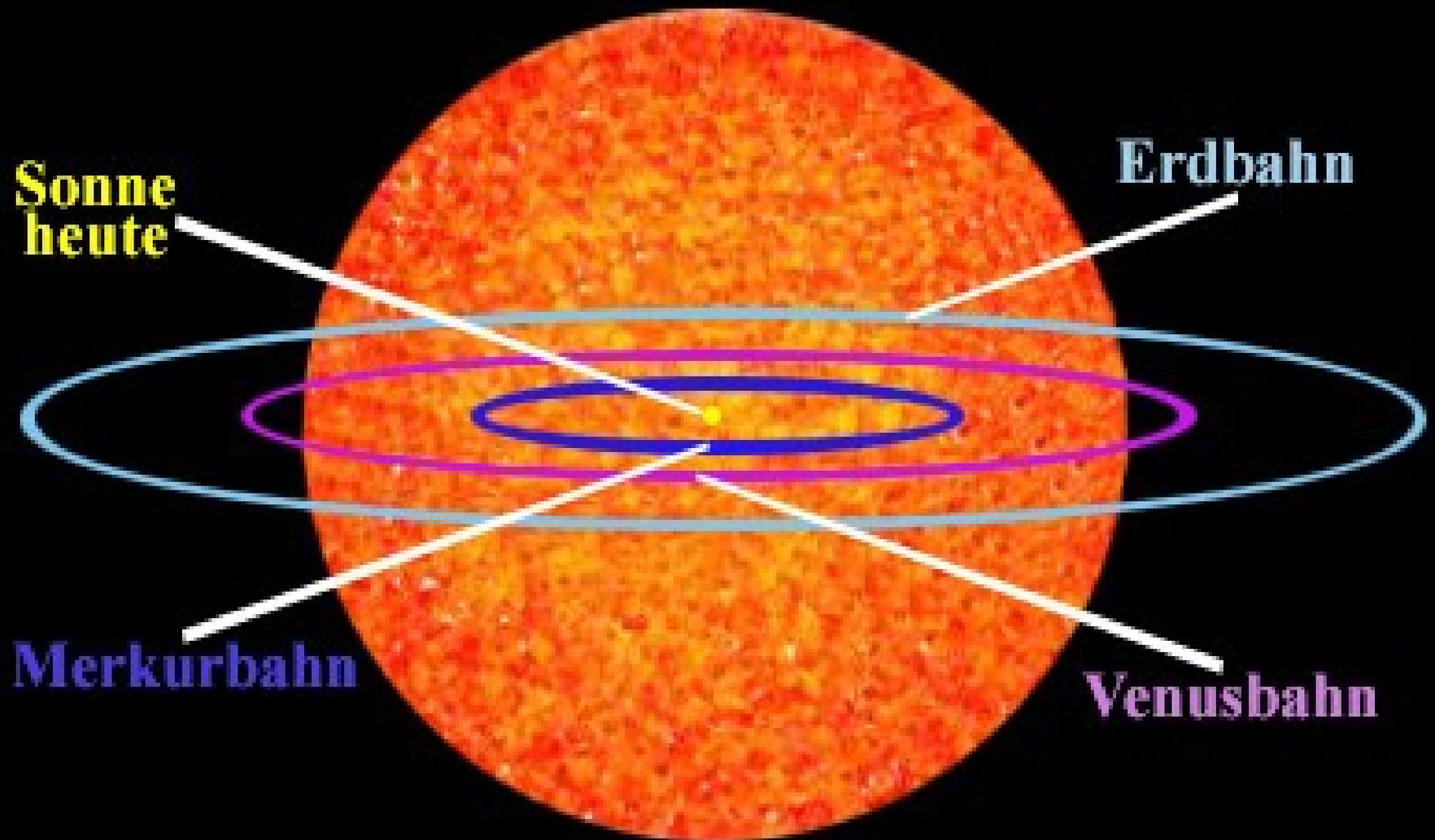
"Look, a white dwarf,  
there are really diamonds  
in the sky!"



Clay Gnipey 2013

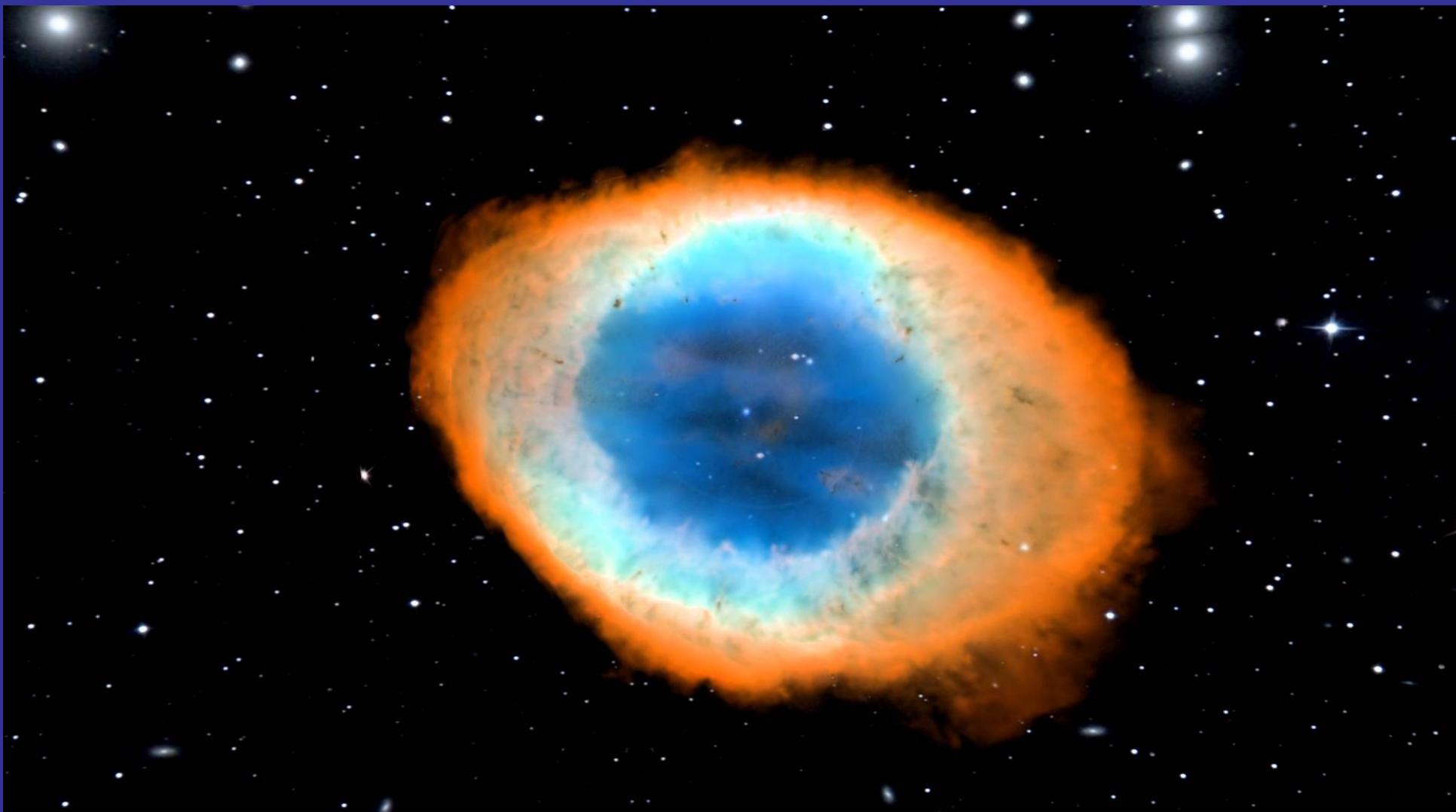


# Entwicklung der Sonne vom *Gelben Zwerg* zum *Roten Riesen*





**Helix-Nebel 700 LJ**



**Ringnebel 2300 LJ**



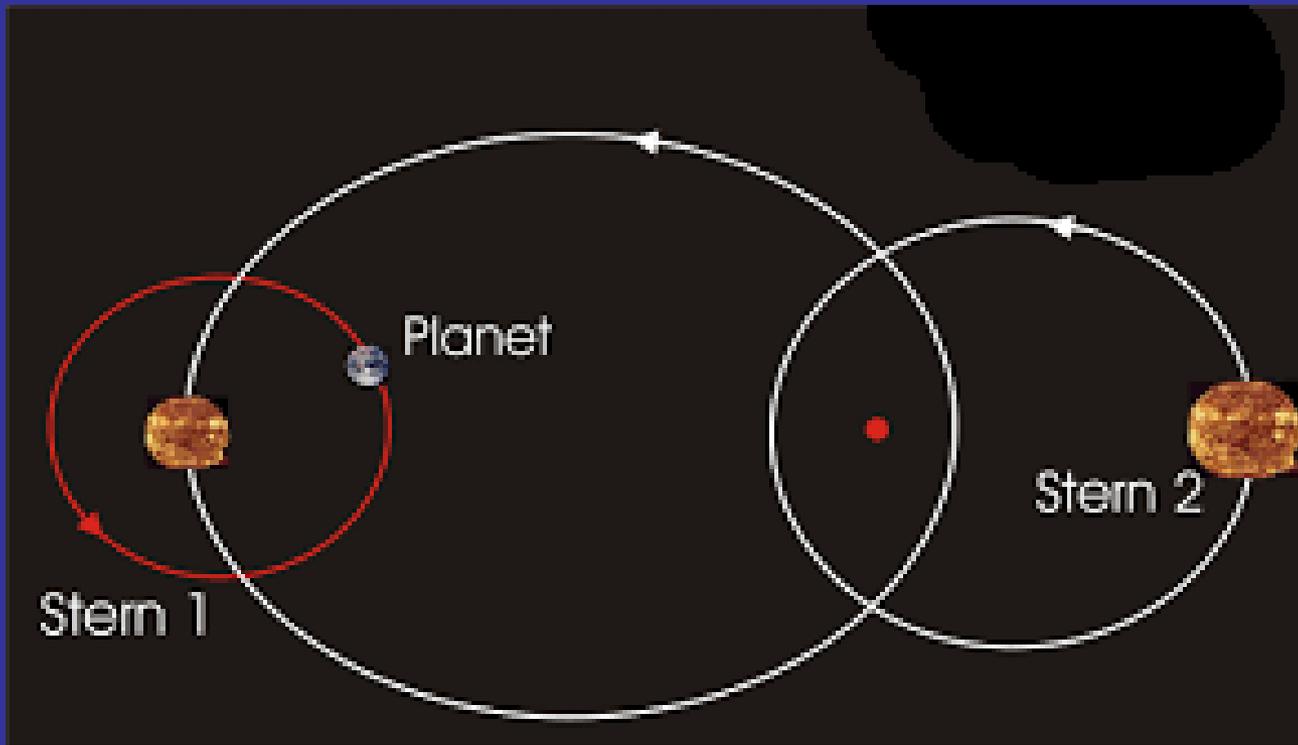
**Katzenaugen-Nebel 3000 LJ**



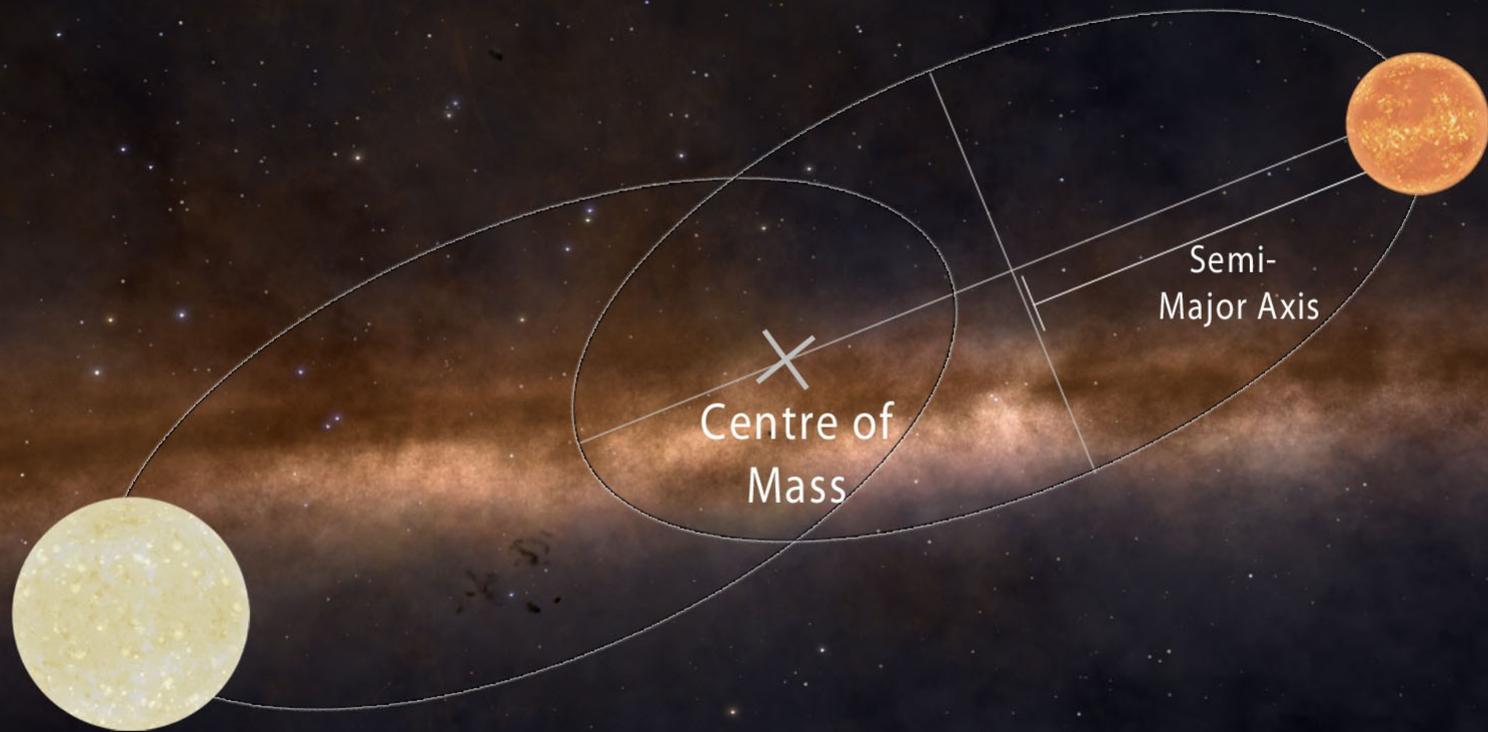
**Planetarer Nebel im Sternbild Winkelmaß 1000 LJ  
mit zentralem Weißen Zwerg ( $\varnothing \sim$  Erdradius)**

# Doppelsternsysteme

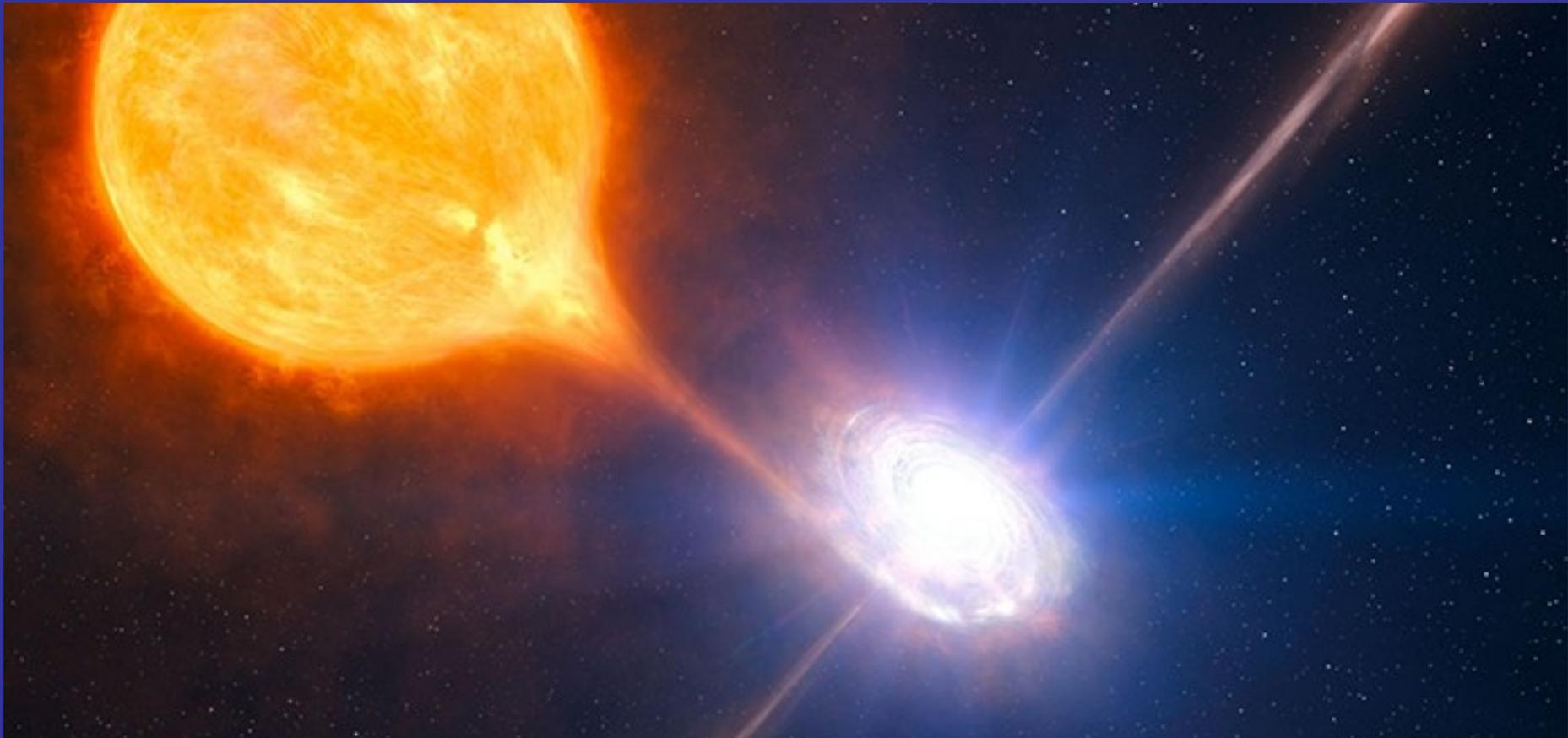
Es wird geschätzt, dass ca. 50% aller Sterne als Doppelsterne vorkommen.



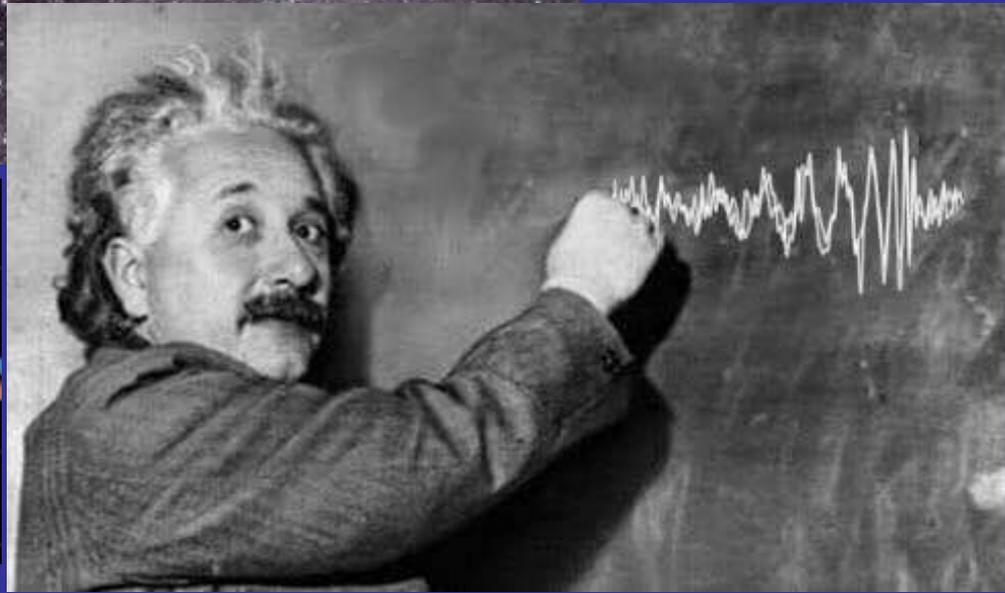
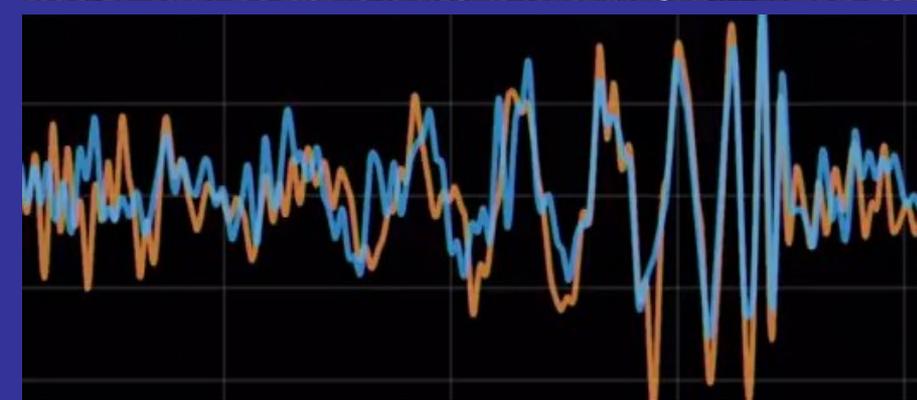
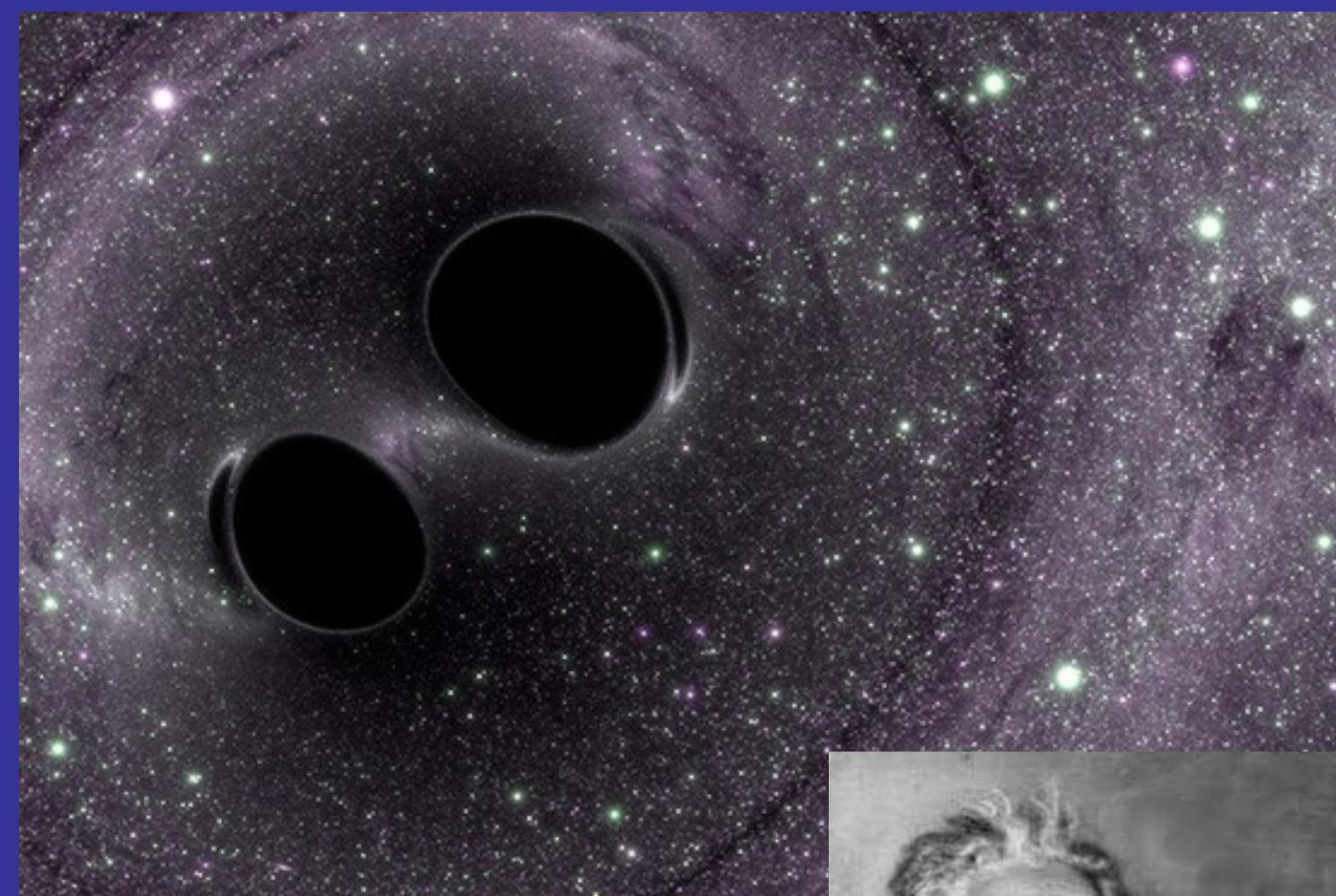
# Zwei normale Sterne umkreisen ihren gemeinsamen Massenmittelpunkt.



# Massentransfer und Jet-Bildung in einem Doppelsternsystem



# LISA



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

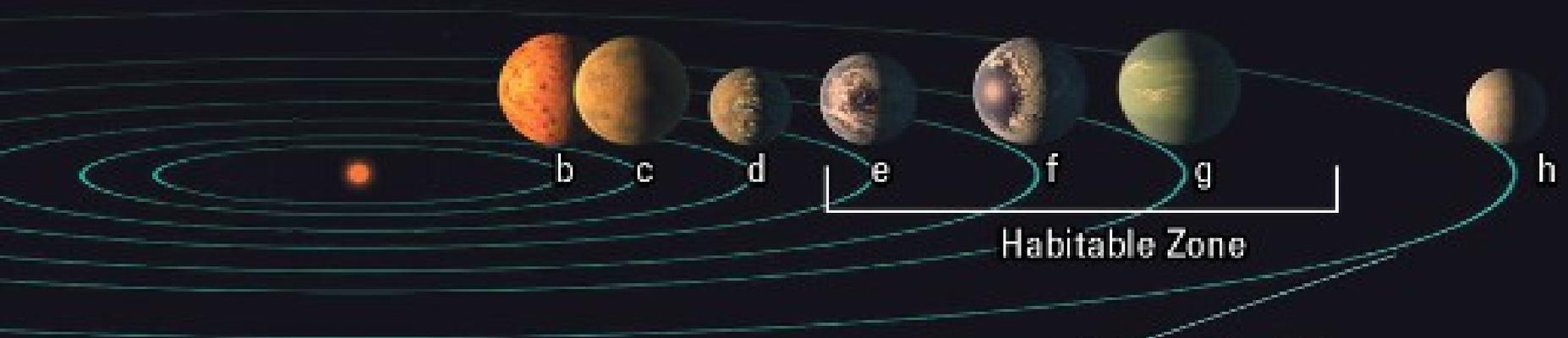


etwa 3000

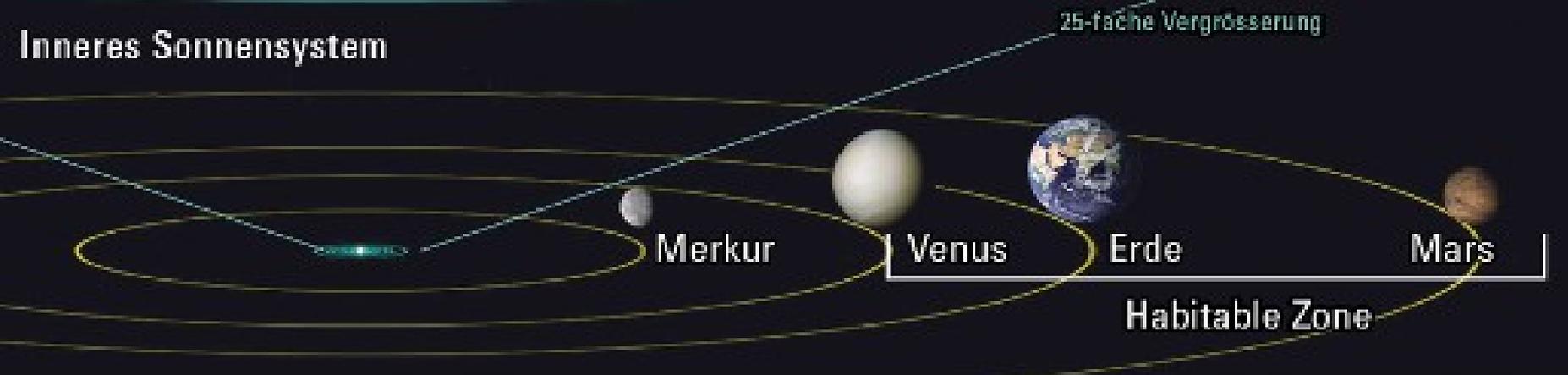


Himmelscheibe von Nebra

# Trappist-1-System



# Inneres Sonnensystem

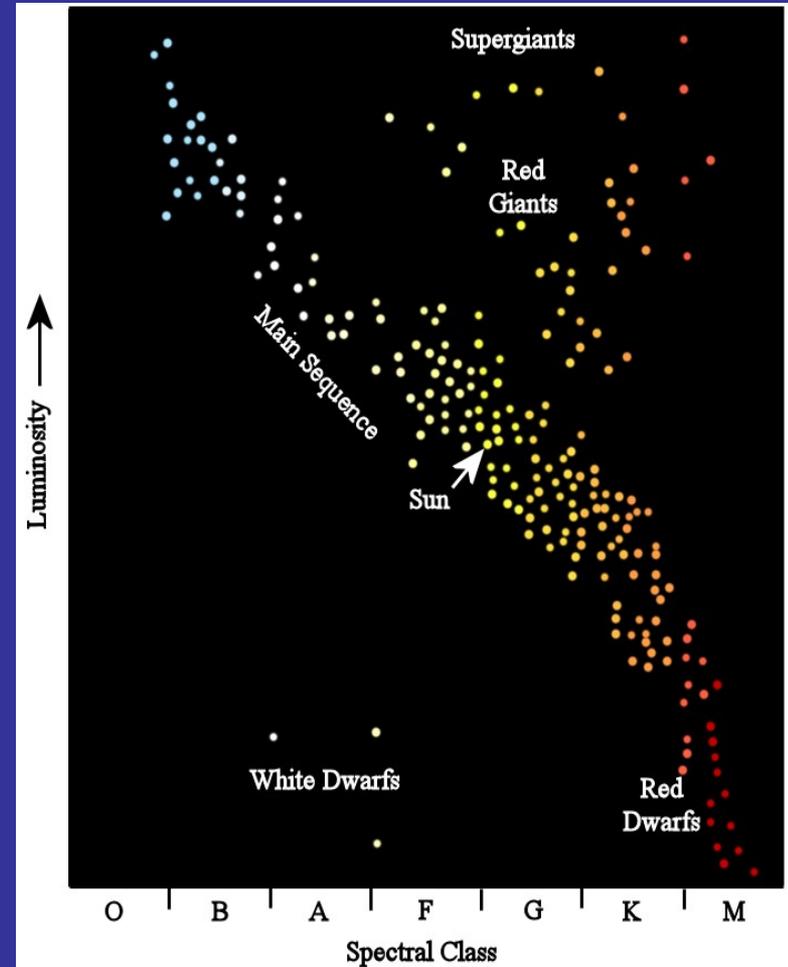


**Trappist 1: sieben erdähnliche Planeten um einen roten Zwerg. 40 LJ Entfernung, moderate Temperaturen, aber ko-rotierende Planeten.**

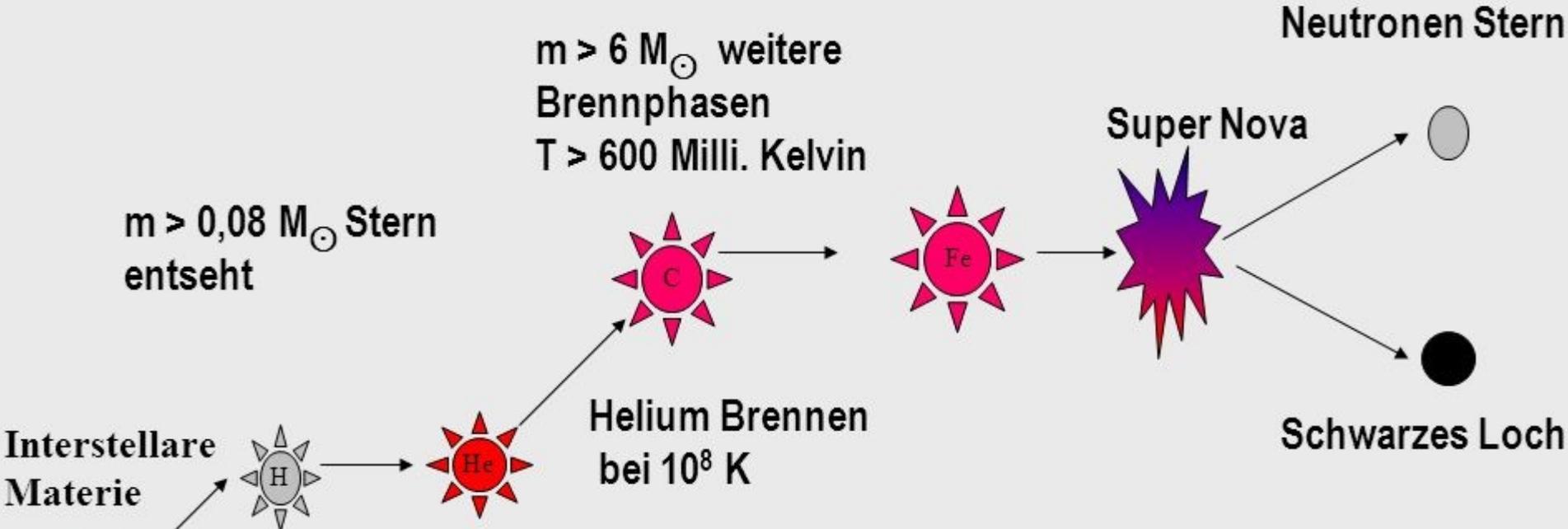
# Supernovae

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



$m > 6 M_{\odot}$  weitere  
Brennphasen  
 $T > 600$  Milli. Kelvin

Neutronen Stern

Super Nova

Schwarzes Loch

Helium Brennen  
bei  $10^8$  K

Zwei Ausgänge nach Supernova;

- Neutronenstern für 1 M ist der Radius 10 km

- schwarzes Loch:

  - Schwarzschildradius für 1M bei 3 km

  - alles wird absorbiert

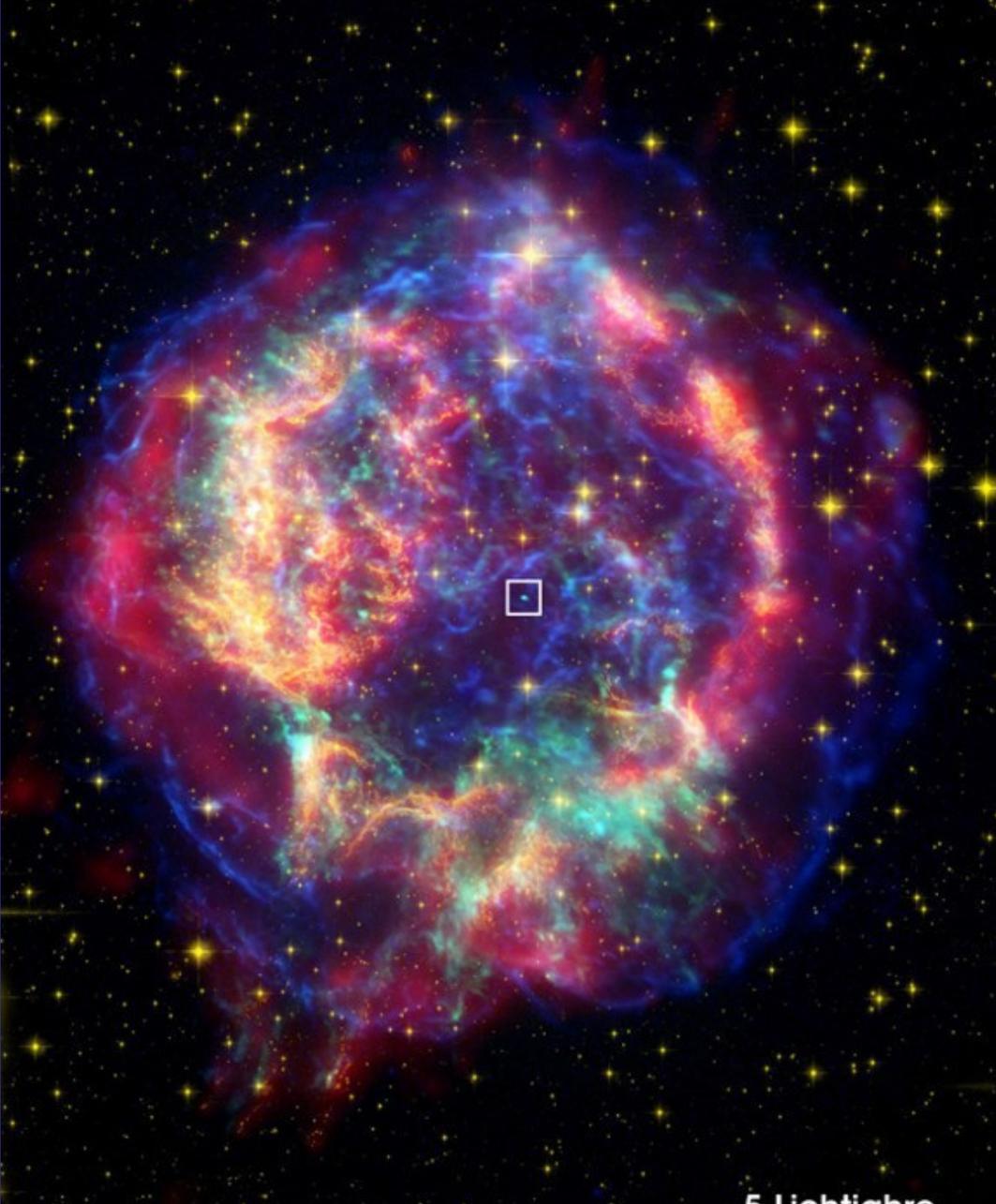
$m < 0.08 M_{\odot}$   
Brauner Zwerg

**Ejekta mit einem  
weißen Zwerg**

**Supernova-  
Überrest**

**Cassiopeia-A  
11 000LJ**

**kein planetarer  
Nebel**



**5 Lichtjahre**

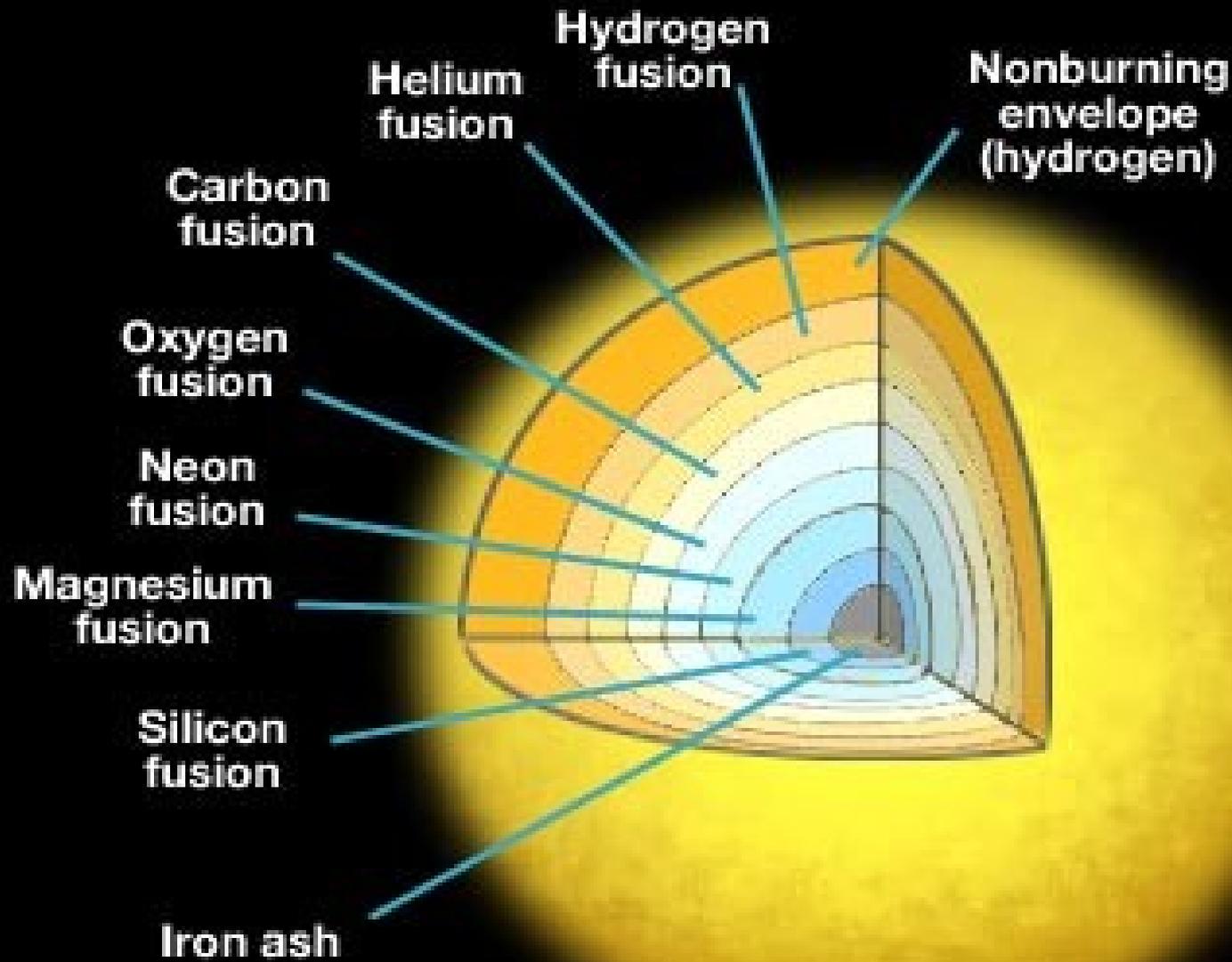
**Sterne wie unsere Sonne stoßen in ihrer Endphase etwa 50 % ihrer Masse ab und eizieren sie ins interstellare Medium (ISM). Es bleibt ein Planetarer Nebel übrig, in dessen Zentrum ein weißer Zwerg sitzt.**

**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:**

<b>Kohlenstoffbrennen</b>	<b>bei 600 Millionen K</b>
<b>Neonbrennen</b>	<b>bei 1,2 Milliarden K</b>
<b>Sauerstoffbrennen</b>	<b>bei 1,5 Milliarden K</b>
<b>Siliziumbrennen</b>	<b>bei 3 Milliarden K</b>



**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.**

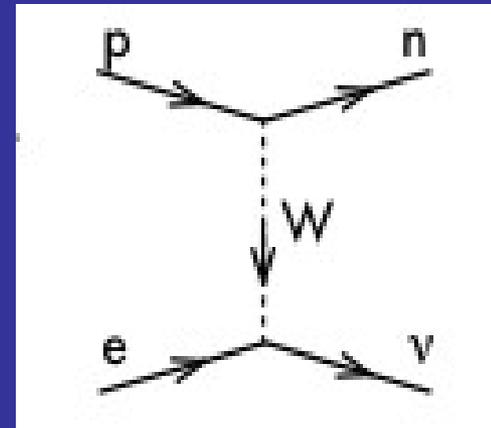
**Die Eisenatome sind so dicht, dass sie sich in Bruchteilen einer Sekunde in Protonen und Neutronen 'zerlegen'.**

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



**Dichte  $\sim 10^{15}$  g/cm<sup>3</sup>**

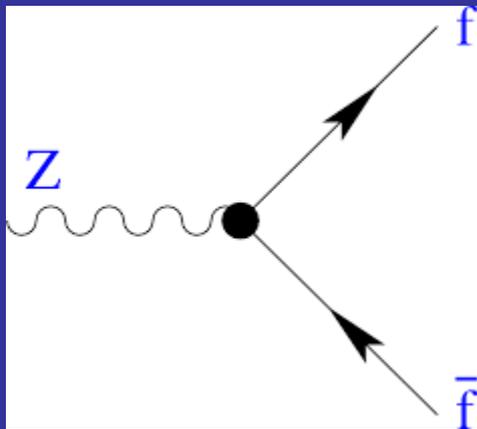
**Magnetfeld  $\sim 10^8$  Tesla**



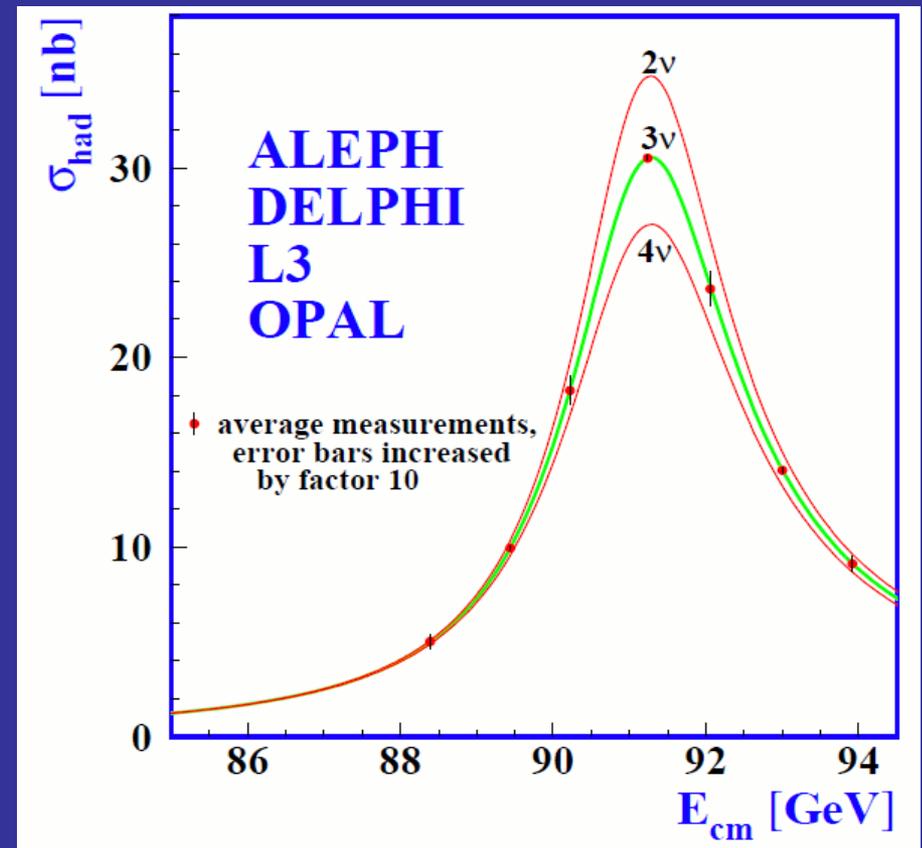
**Bei diesem Elektron-Proton-Einfang entsteht eine Flut von Neutrinos, genauer von Elektron-Neutrinos: ca.  $10^{58}$  bei einer Supernova wie SN 1987A.**

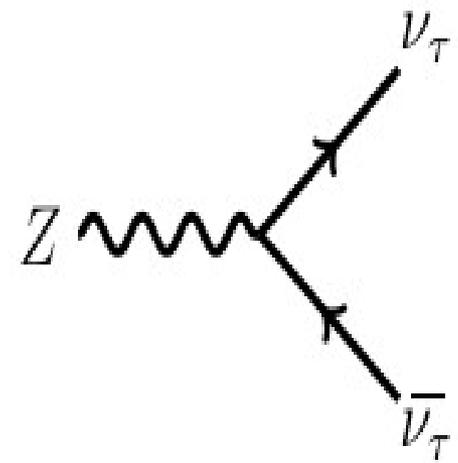
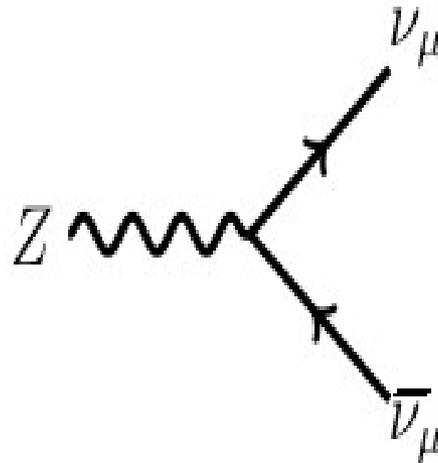
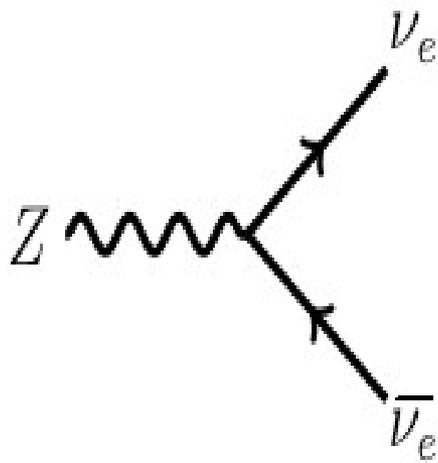
**Diese Neutrinos üben einen enormen Druck auf den 'Eisenstern' aus, und es werden schließlich größere Mengen von Sternmaterie mit fast Lichtgeschwindigkeit abgestoßen.**

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:



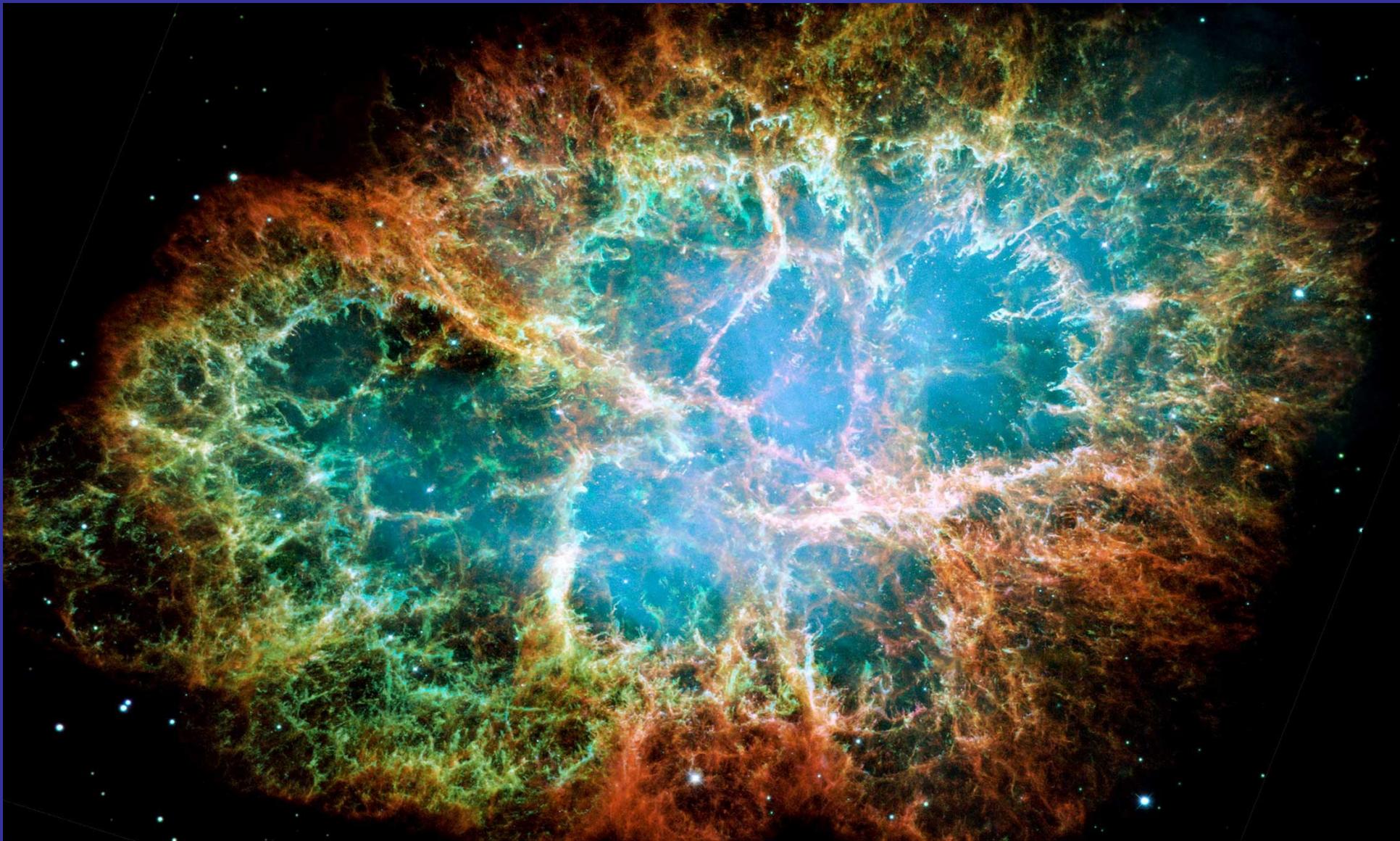
'f' steht für Fermion, also für alle Quarks und Leptonen, also auch für Neutrinos





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

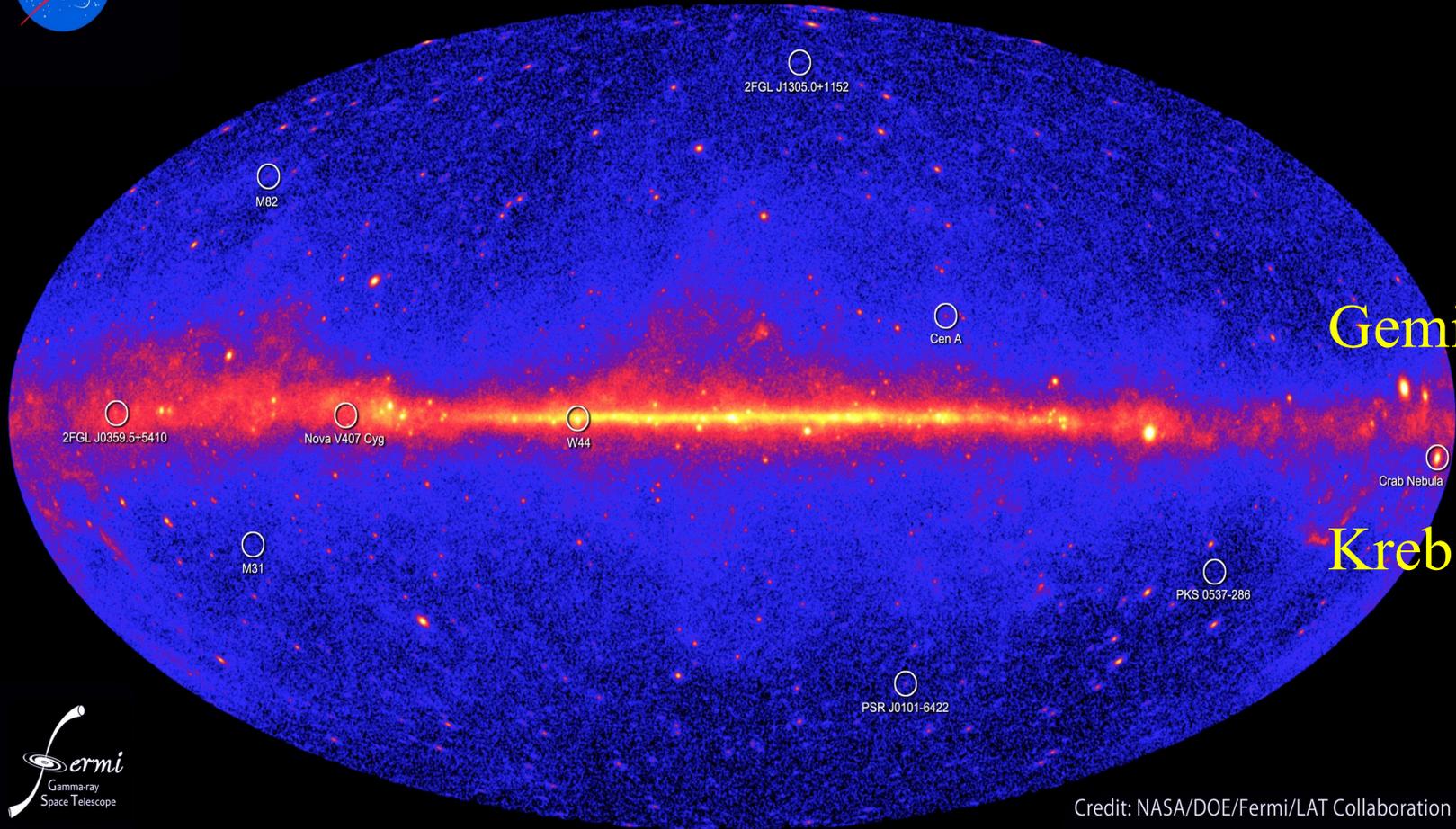
Flare State

April 2011

**Gamma-Ausbruch vom Pulsar im Krebsnebel**



# Fermi two-year all-sky map



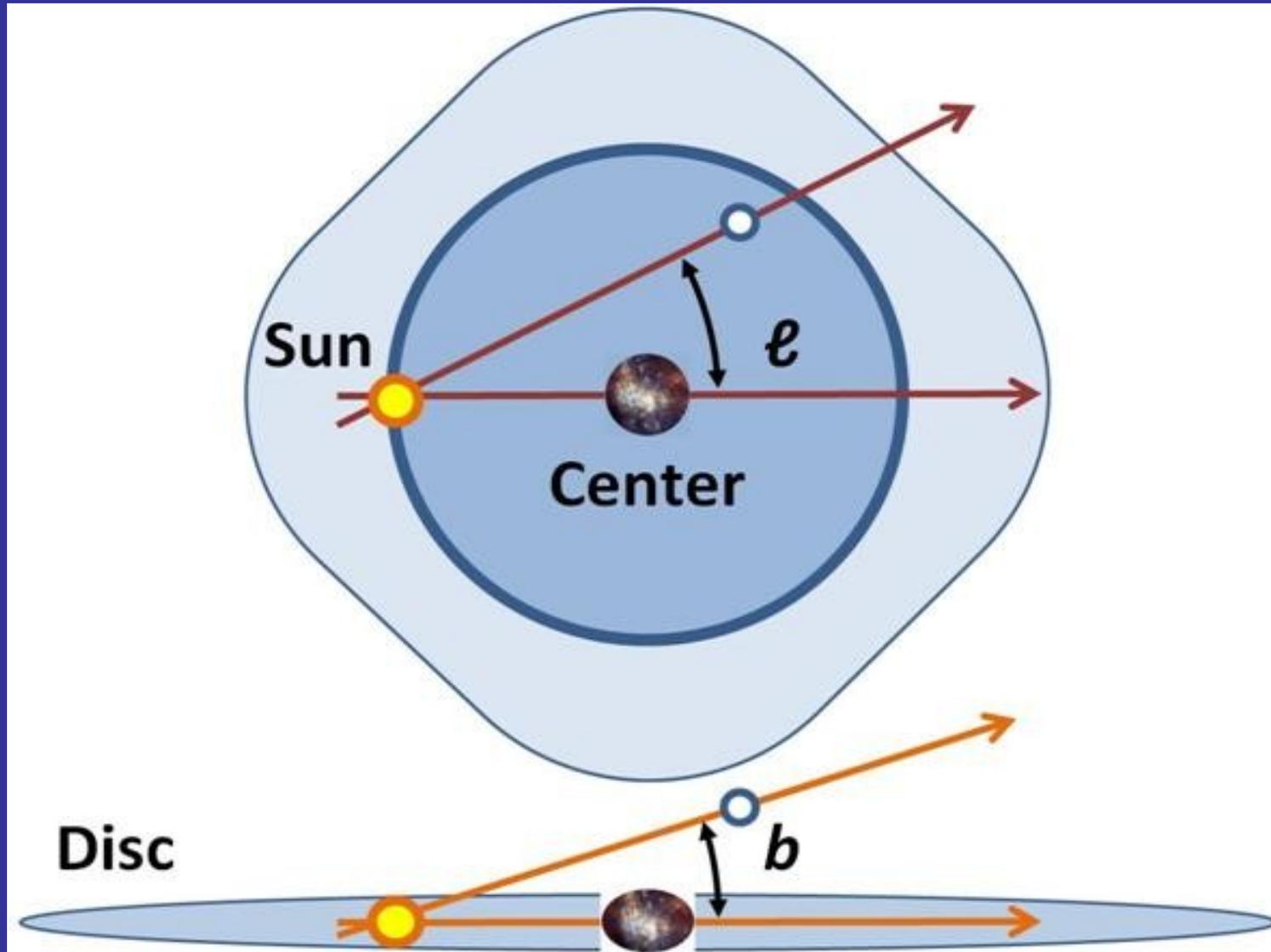
Geminga

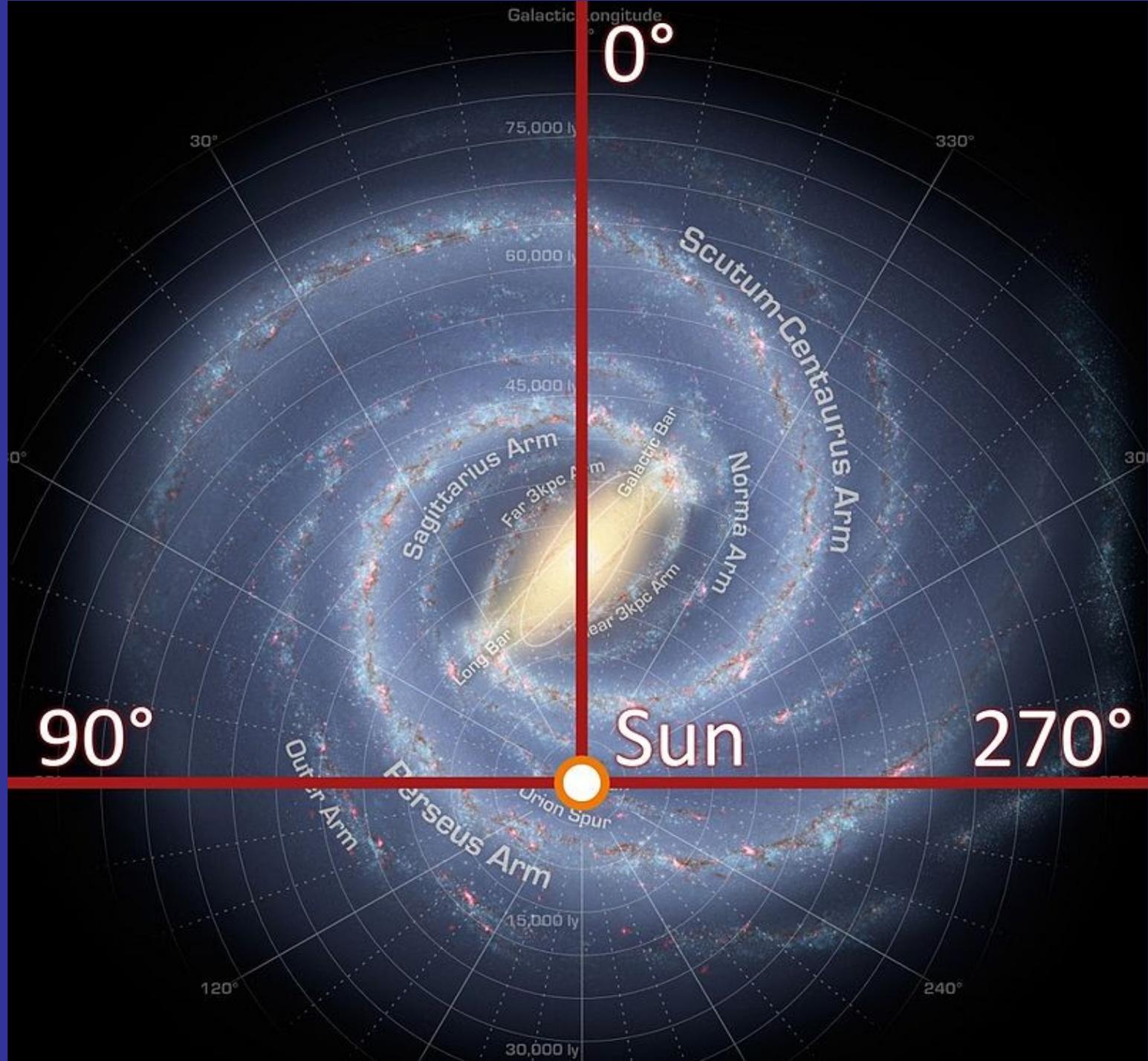
Krebspulsar



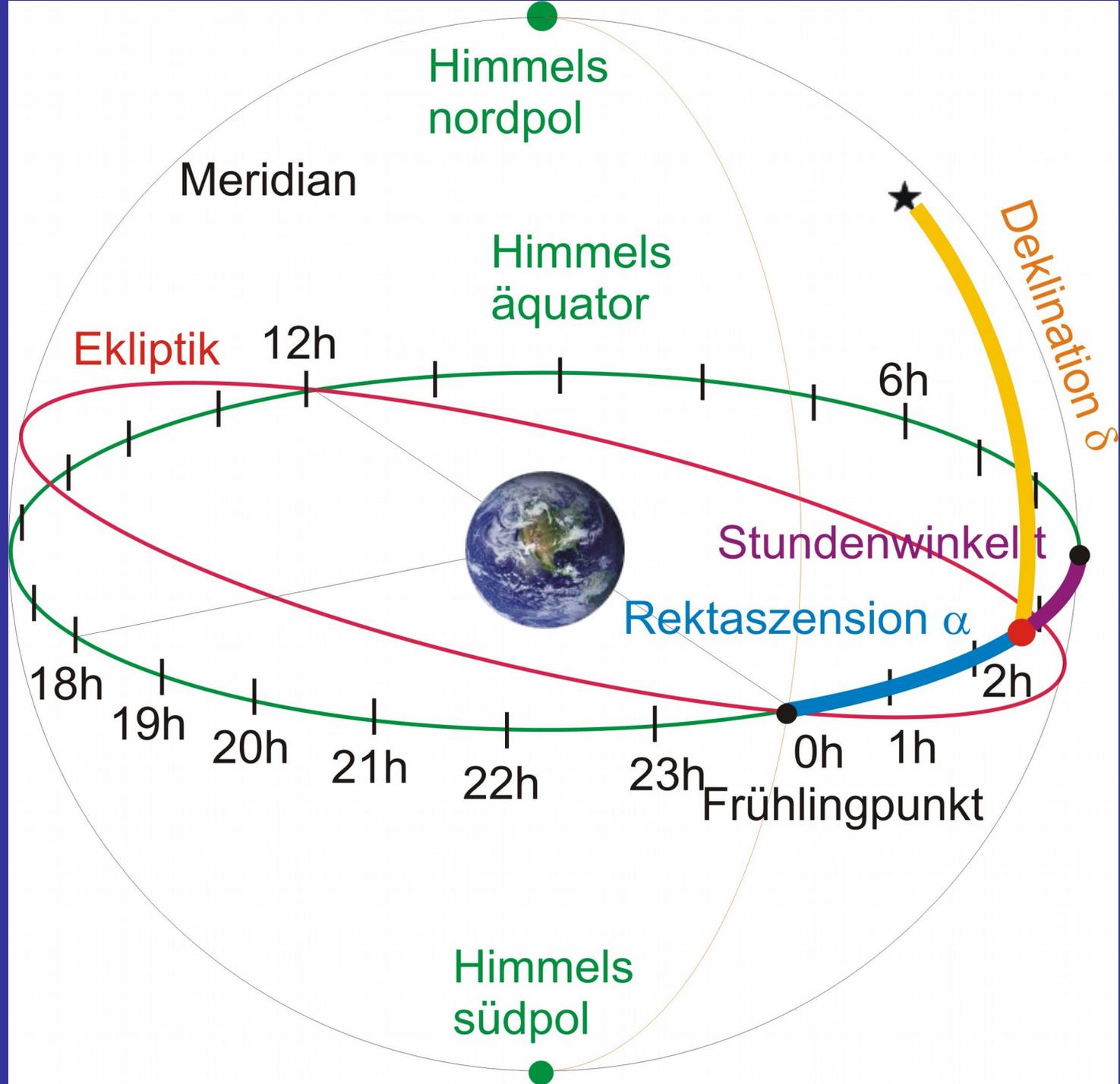
Credit: NASA/DOE/Fermi/LAT Collaboration

# Galaktisches Koordinatensystem





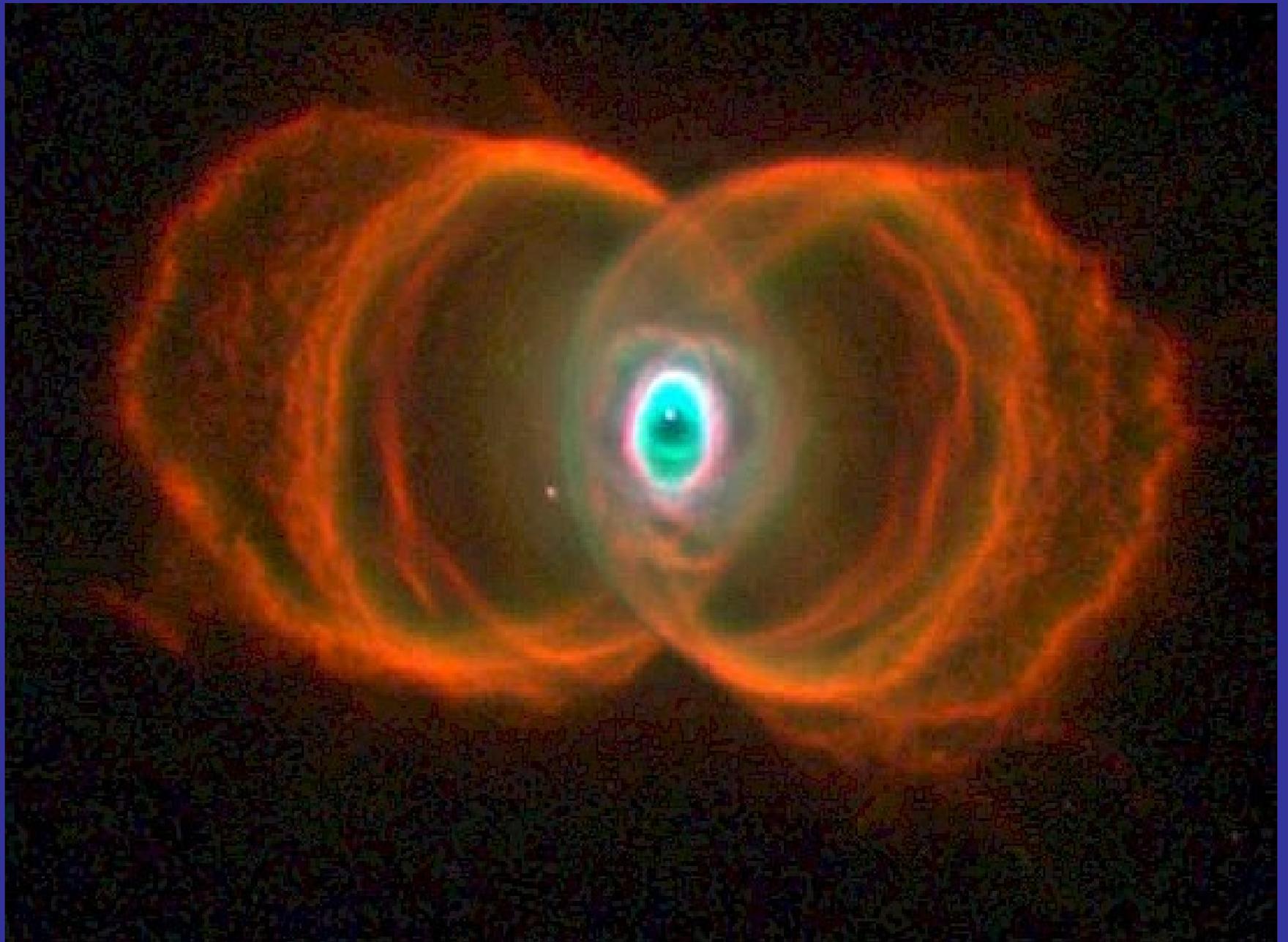
**Astronomisches  
Koordinaten-  
system**



# SN 1987A



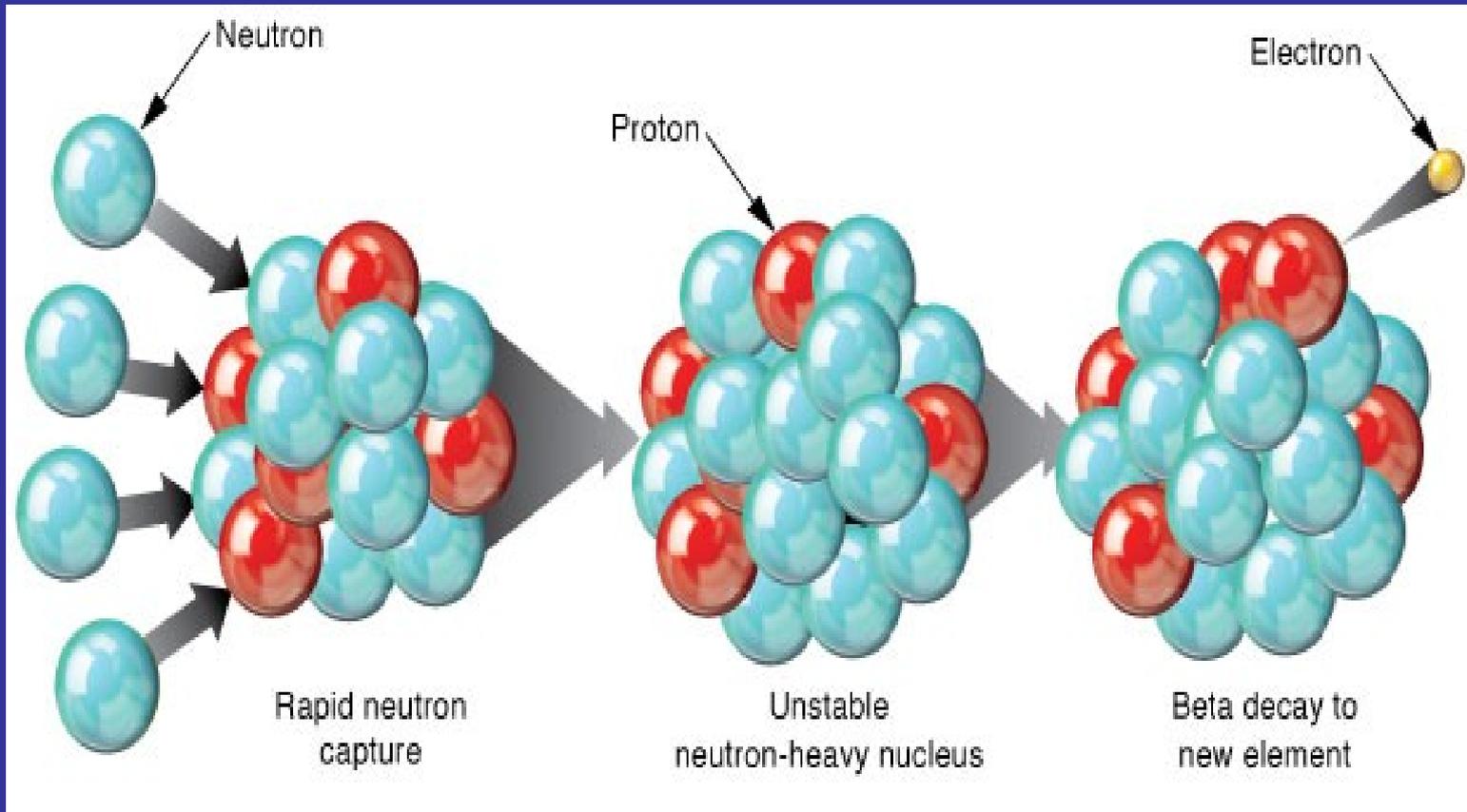
© Anglo-Australian Observatory



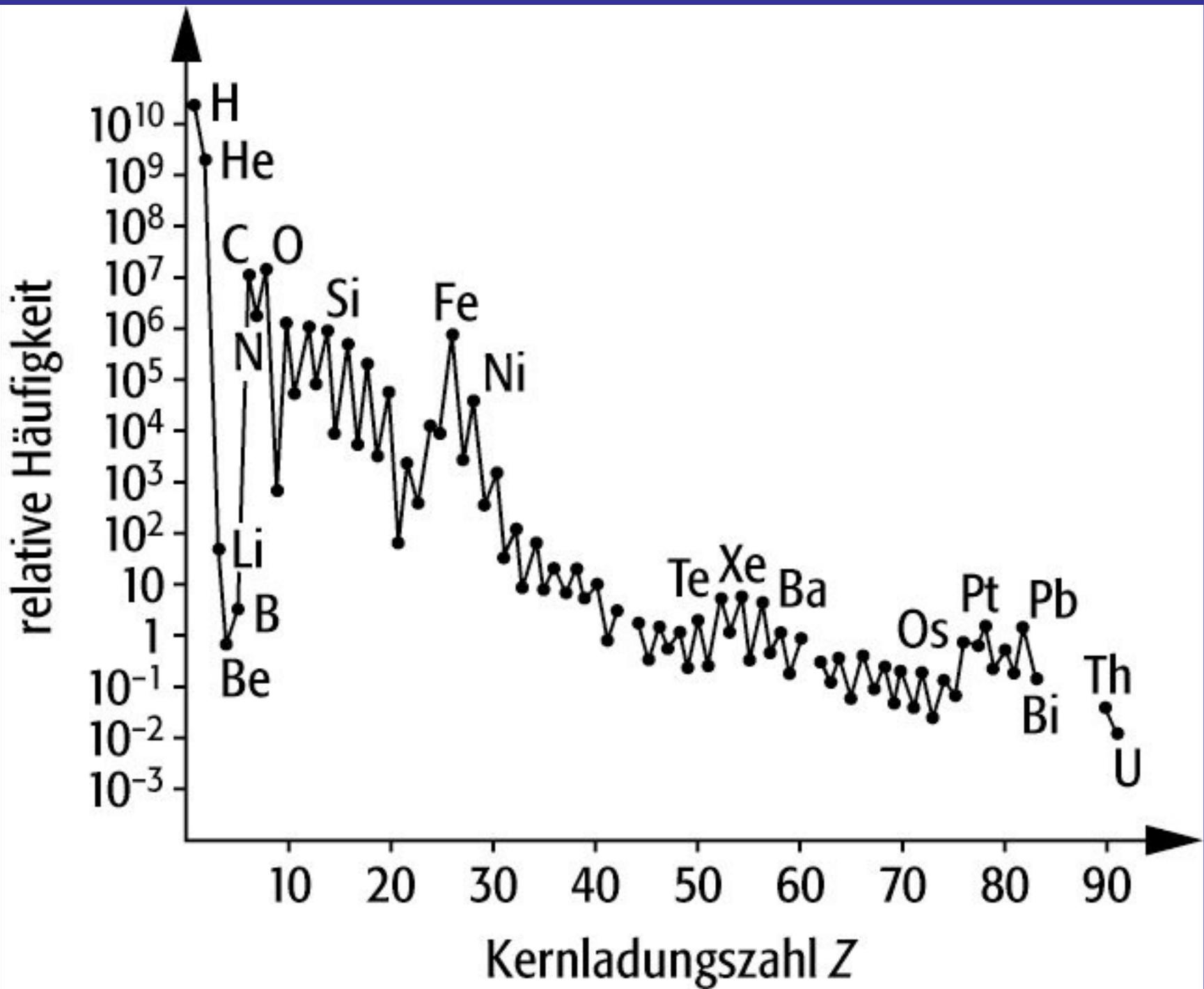
**Nach diesem Ausbruch verbleibt ein Neutronenstern (wenn er rotiert: ein Pulsar). Wenn die Masse des Reststerns größer als 1,4 Sonnenmassen ist, kollabiert er zu einem Schwarzen Loch.**

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

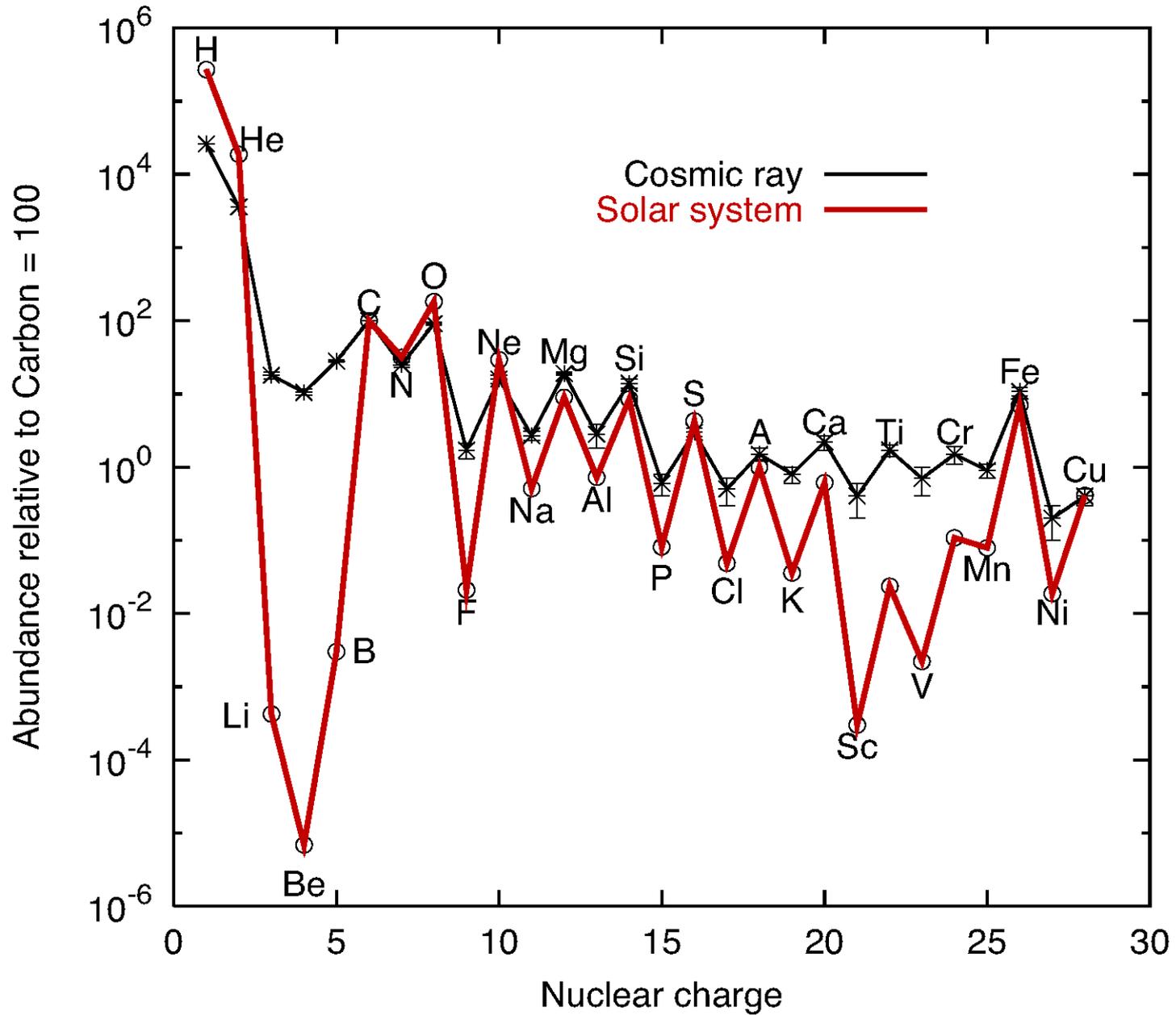
# Bildung schwerer Elemente in Supernovae







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,

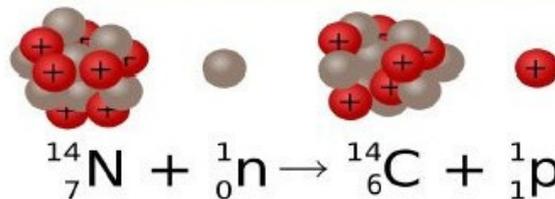
z.B. Rubidium 87, Kalium 40 und Uran 238

Mit einer aktuellen Prise von Kohlenstoff 14:

Insgesamt 9000 Becquerel pro Person!

**87 Rb**  
86.909186  
27.84%  
 $t_{1/2} = 48.8$  billion yrs

Radioactive



**92**  
**U**  
238.03

# Primordiale Elemente

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

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**

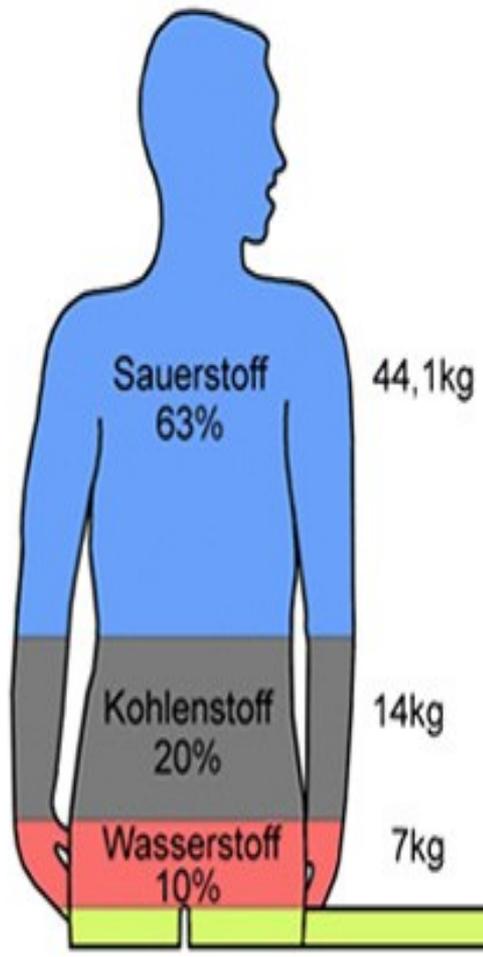
**Magnesium für Gehirn, Niere, Herz**

**Iod für Schilddrüse**

**Platin für Herzschrittmacher , .....**

# Supernova- 'Asche' im menschlichen Körper

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



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,...)		

© Thomas Seilnacht

# 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!"**

Welche Magnitudo hat eine  
Supernova bei einem  
bestimmten Abstand?

bei 1 Mpc  $m = 8$

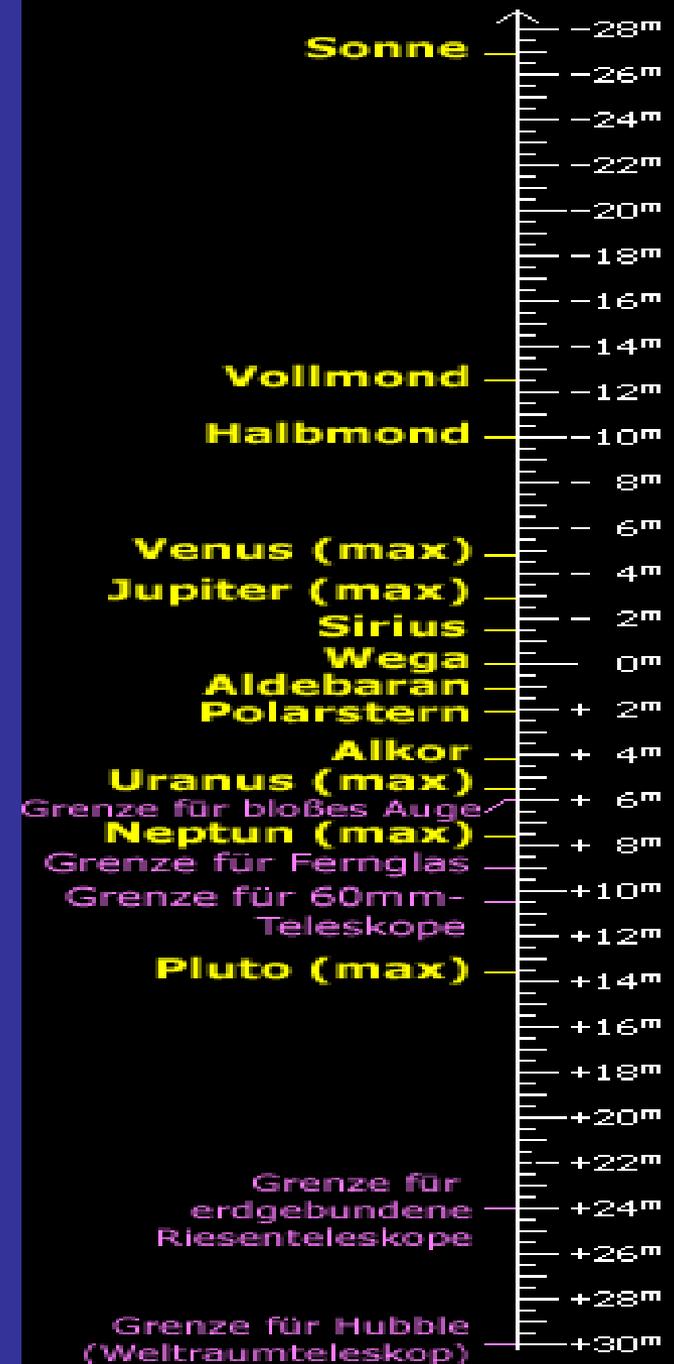
bei 1 kpc  $m = -7$

(heller als die Venus)

bei 100 pc  $m = -12$

(so hell wie der Mond)

## Helligkeitsskala



# Neutronensterne und Pulsare

**Dichte: 1 Milliarde Tonnen pro  $\text{cm}^3$**

**Durchmesser: 10 bis 20 km**

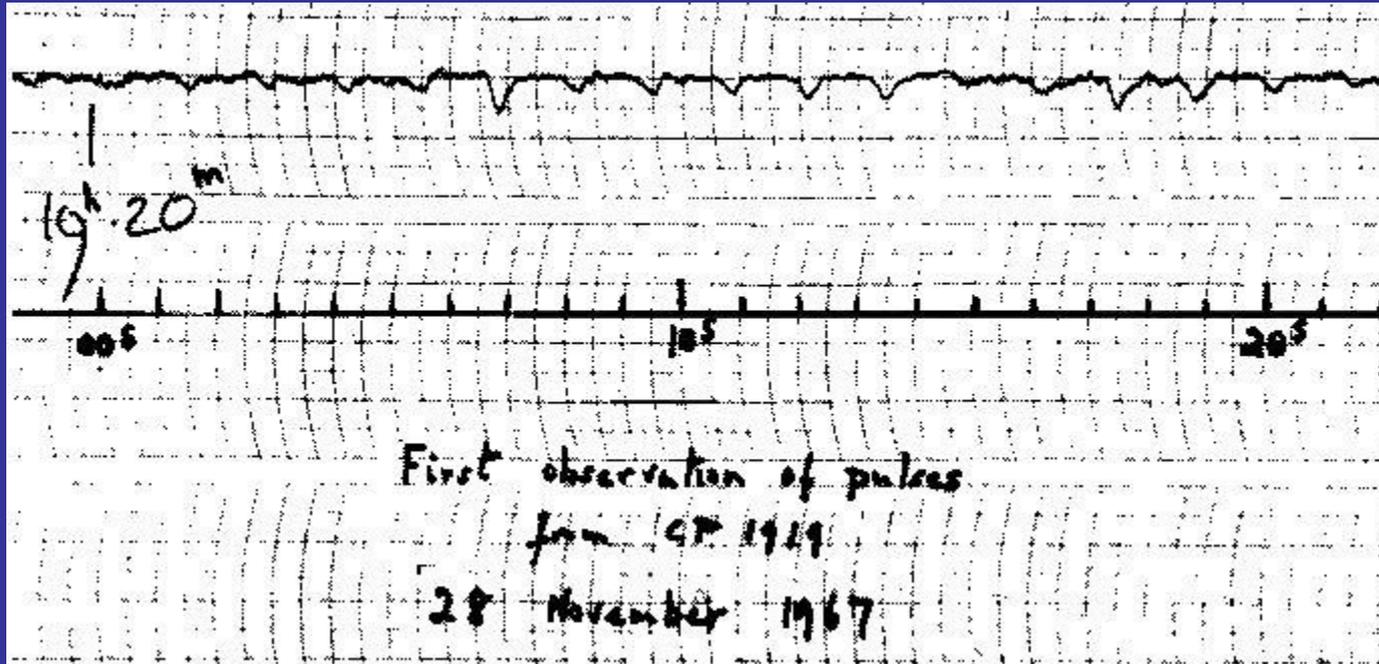
**Masse: 1,4 bis 3 Sonnenmassen**

**Gravitationsfeld:  $2 \times 10^{11}$  so stark wie das  
Erdfeld**

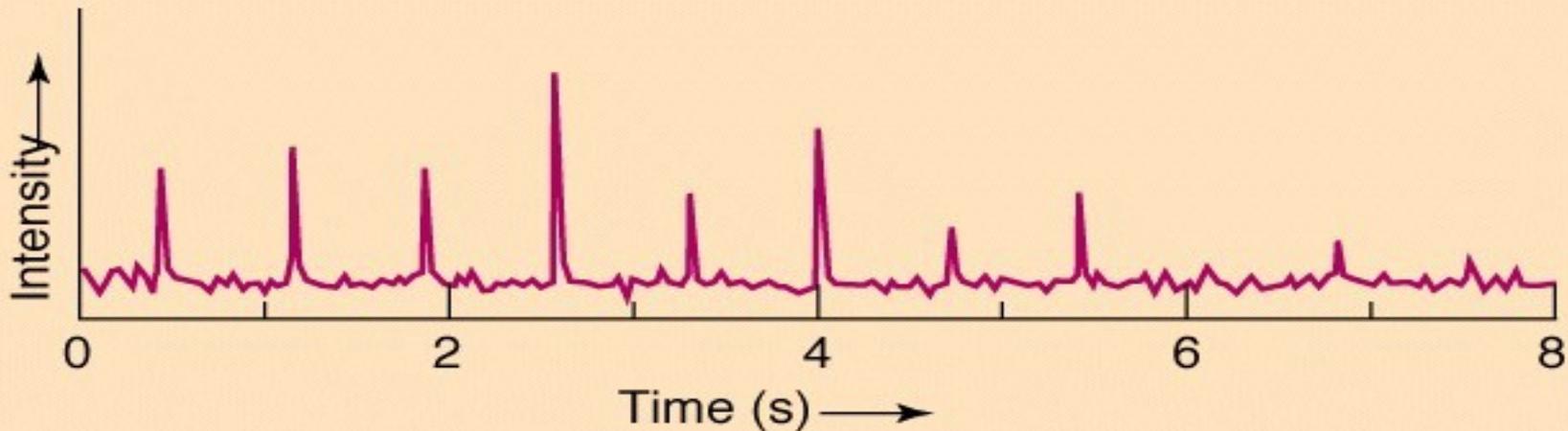
**Temperatur: anfänglich 100 Milliarden K**

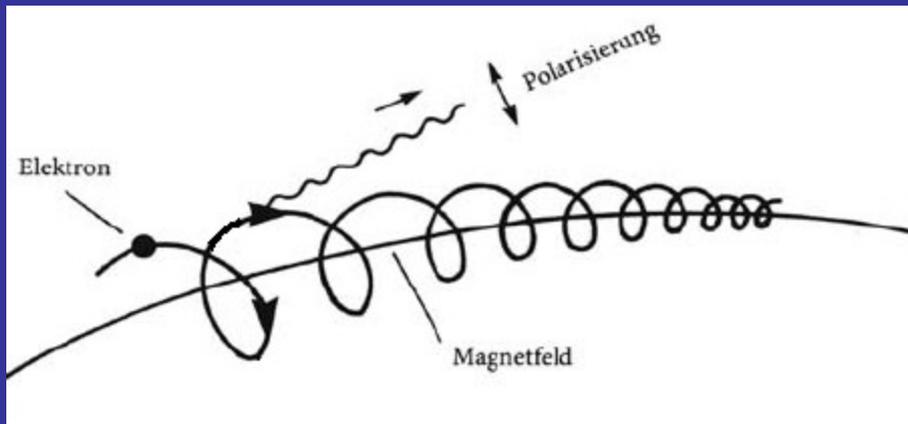
**Magnetfeld: bis  $10^{11}$  Tesla**

# Pulsar-Entdeckung: Jocelyn Bell 1967



1,337 s





# Synchrotron-Strahlung

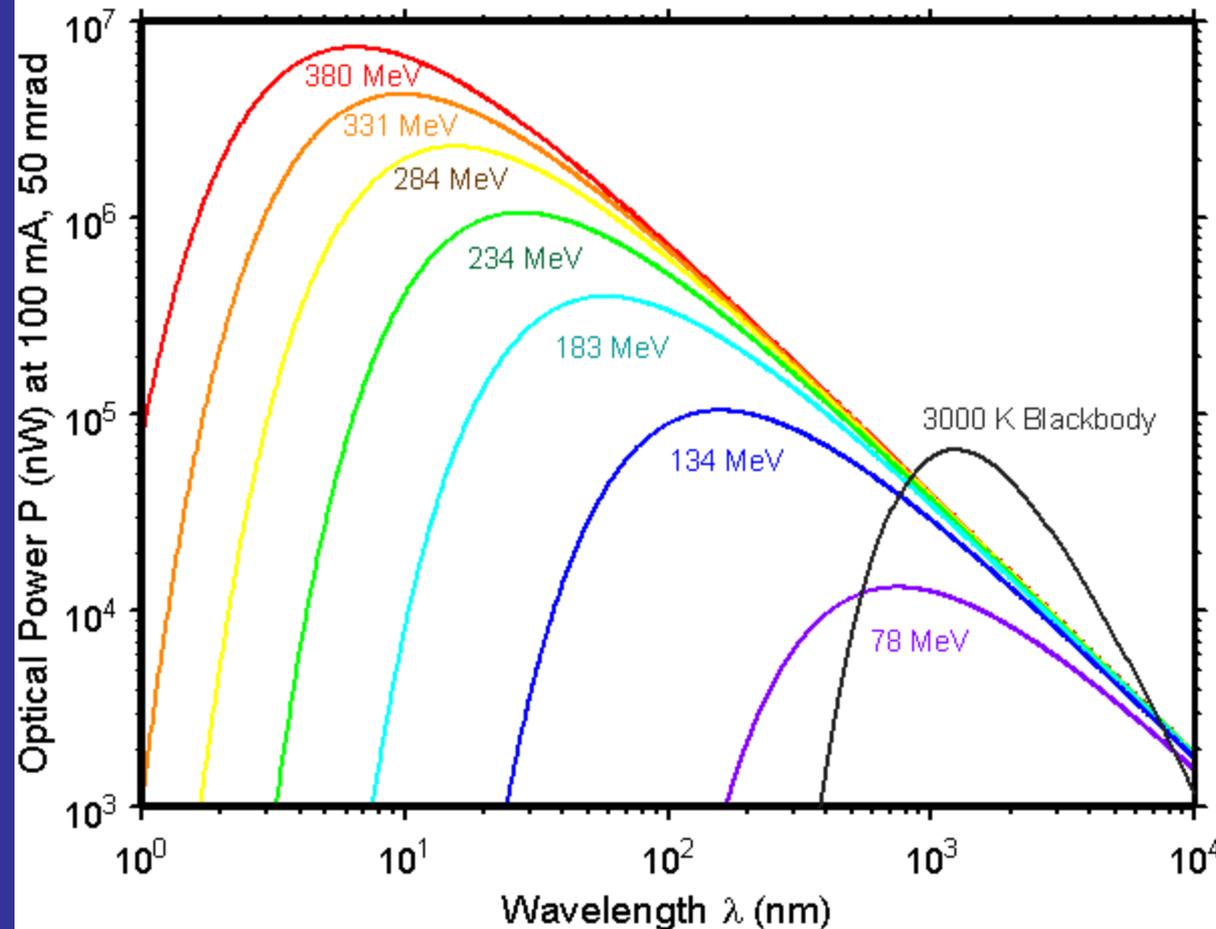
**Beispiel: 300 MeV**

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

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

$$E = h \nu$$

$$= 124 \text{ eV}$$



# Pulsarperioden aus der Drehimpulserhaltung

$\Theta$  – Trägheitsmoment

$\omega$  - 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

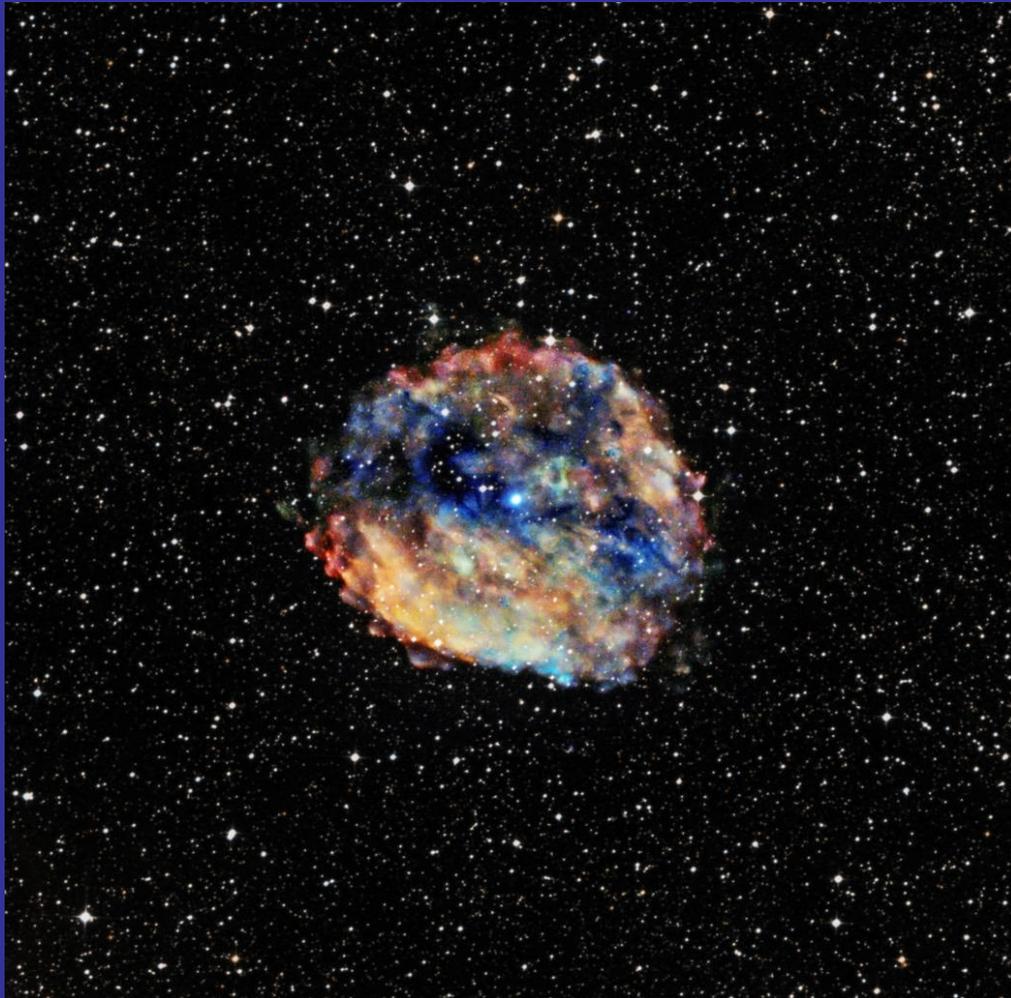
$$T_{\text{Pulsar}} = T_{\text{Stern}} \cdot \frac{R_{\text{Pulsar}}^2}{R_{\text{Stern}}^2} .$$

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 ?**

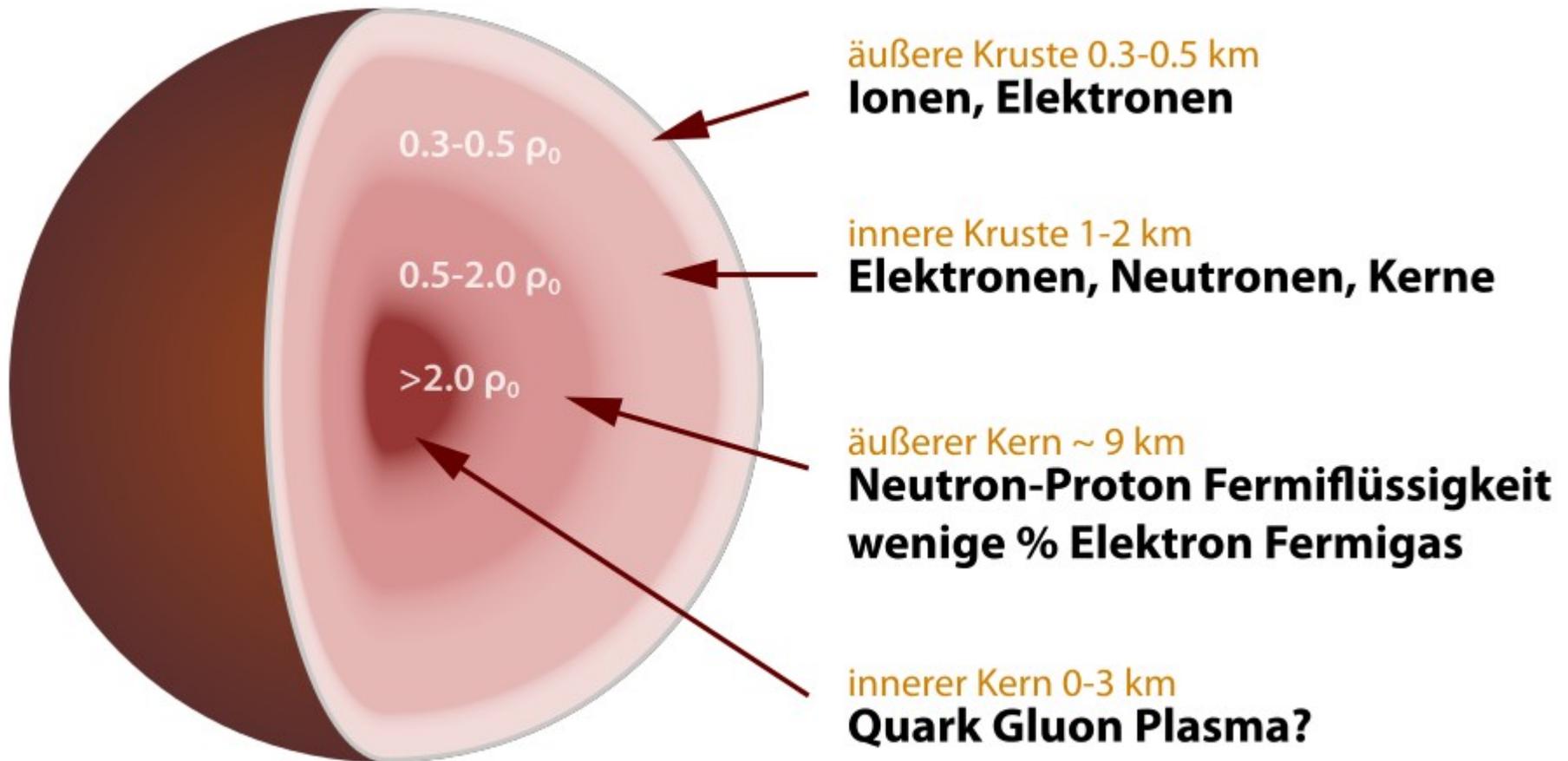
**T 1613**

**9000 LJ entfernt**

**Chandra**

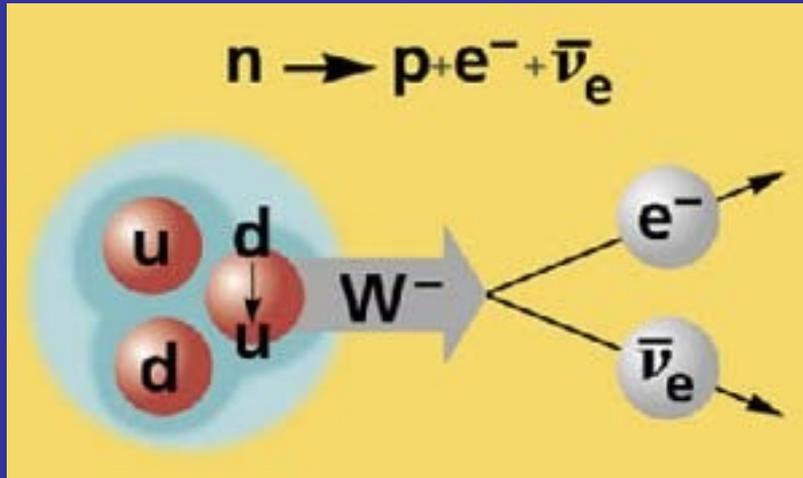
**Röntgenaufnahme**

# Innerer Aufbau eines Neutronensterns



$\rho_0$  – mittlerer Druck

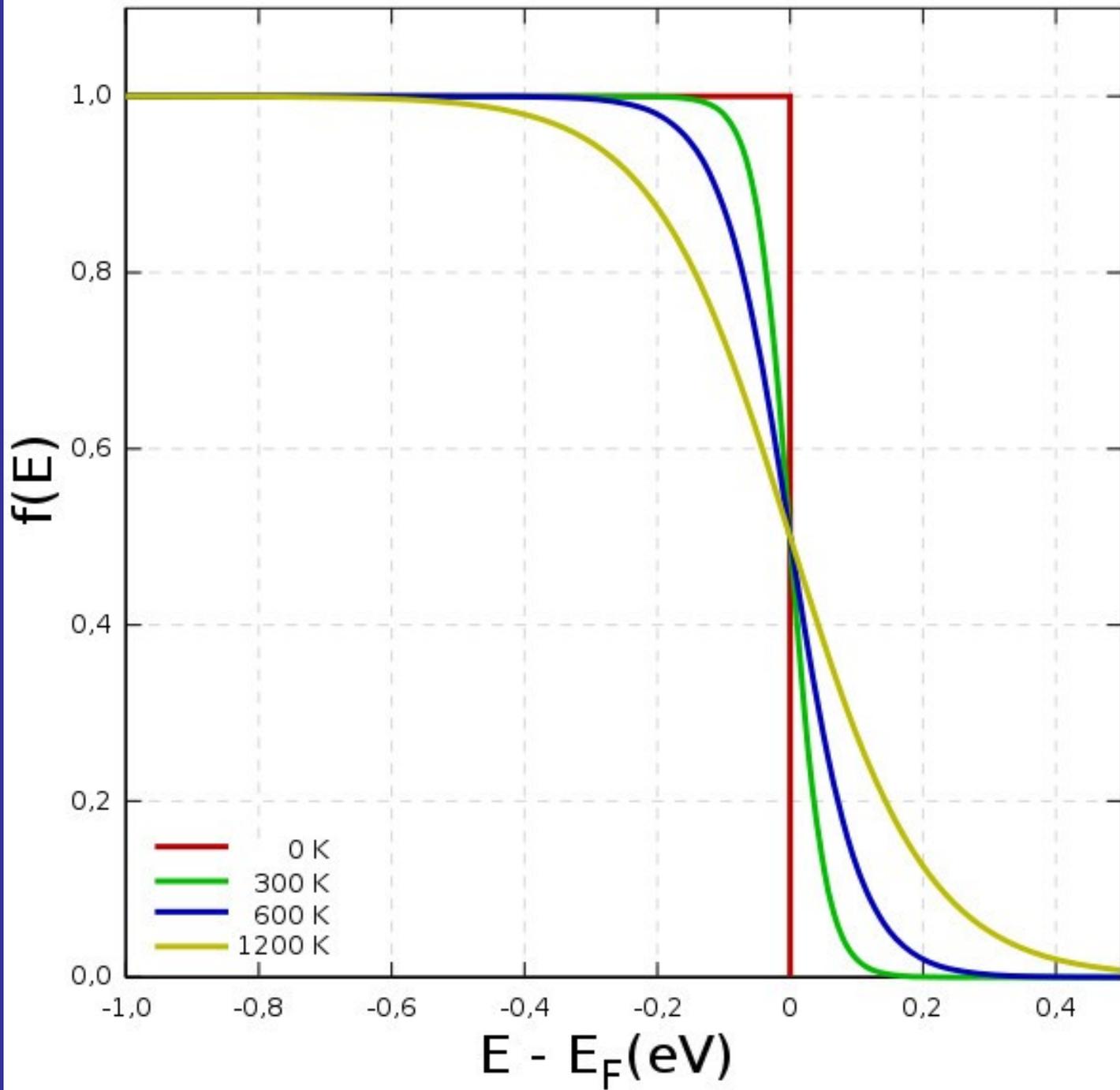
# Warum zerfallen die Neutronen in einem Neutronenstern nicht?



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

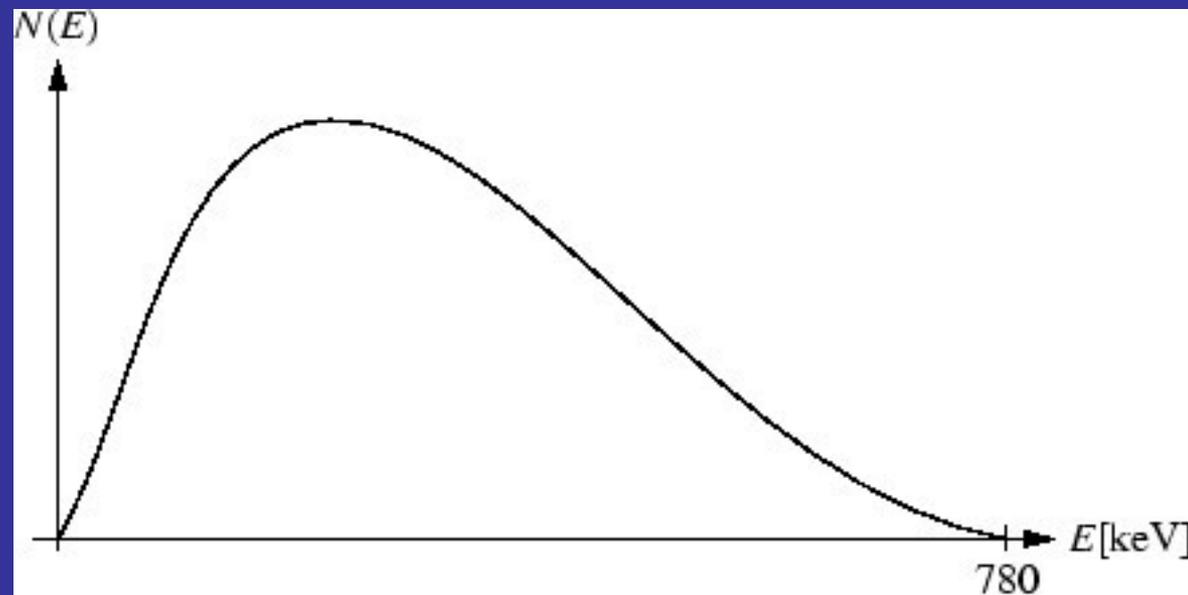
$$f(E) = \frac{1}{e^{(E - E_F)/kT} + 1}$$

**Fermi-Dirac-Verteilung**



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

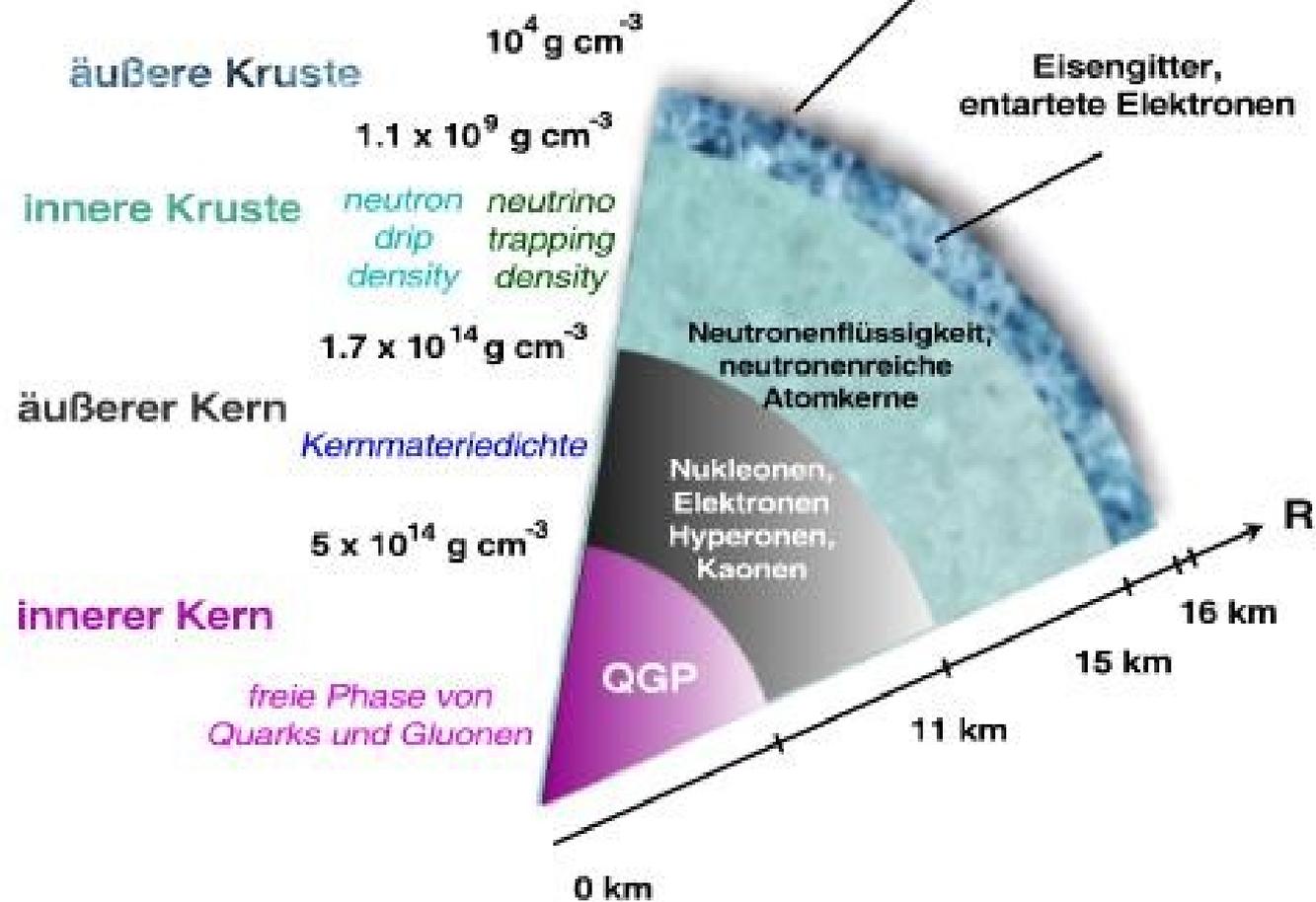
**Auch die Neutronen in unserem Körper zerfallen nicht, weil die Endzustandselektronen und -protonen keine energetisch freien Plätze finden (Protonen sind auch Fermionen).**



Elektronenspektrum beim  $\beta$ -Zerfall

# Neutronenstern

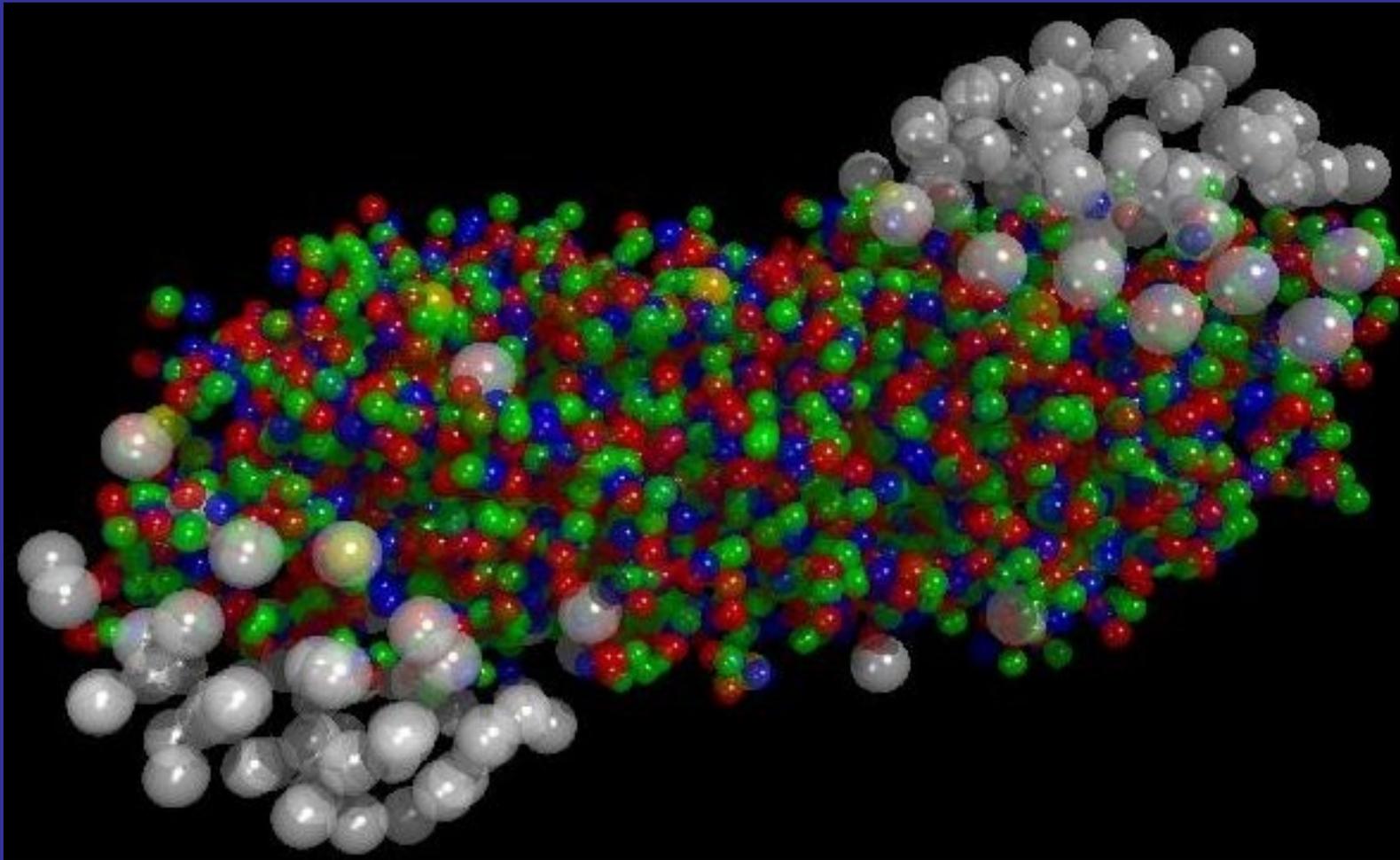
Schalenstruktur und Materiedichten



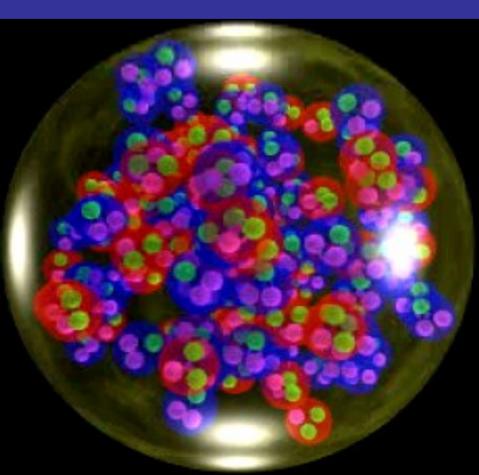


**Neutronenstern mit Rest-Akkretionsscheibe und sehr geringer Abstrahlung (Temperaturstrahlung)**

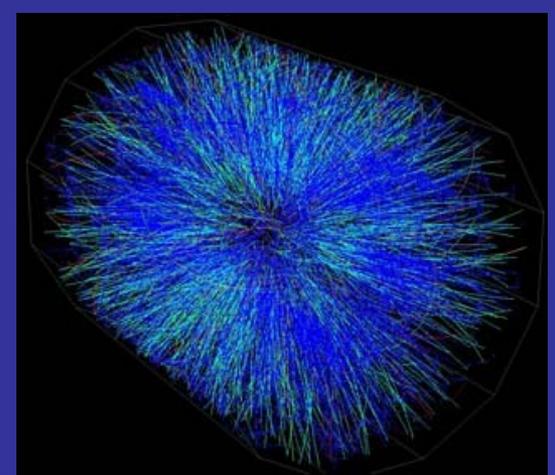
# In Inneren eines Neutronensterns: Quark-Gluon-Plasma



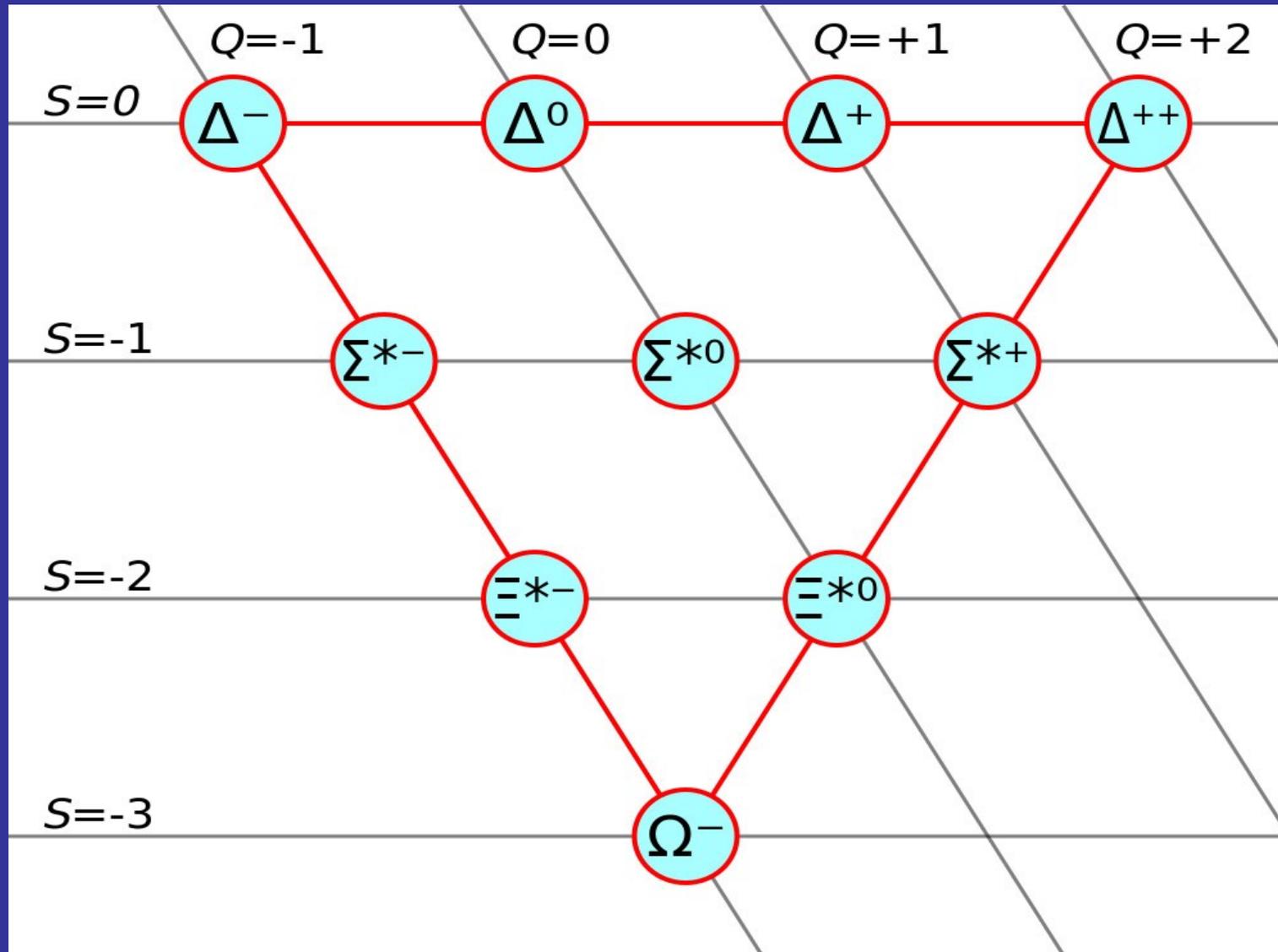
Wechselwirkung zweier schwerer Ionen mit  
Bildung eines Quark-GluonPlasmas



# Quarksterne?



# Hyperonen im Kern des Neutronensterns

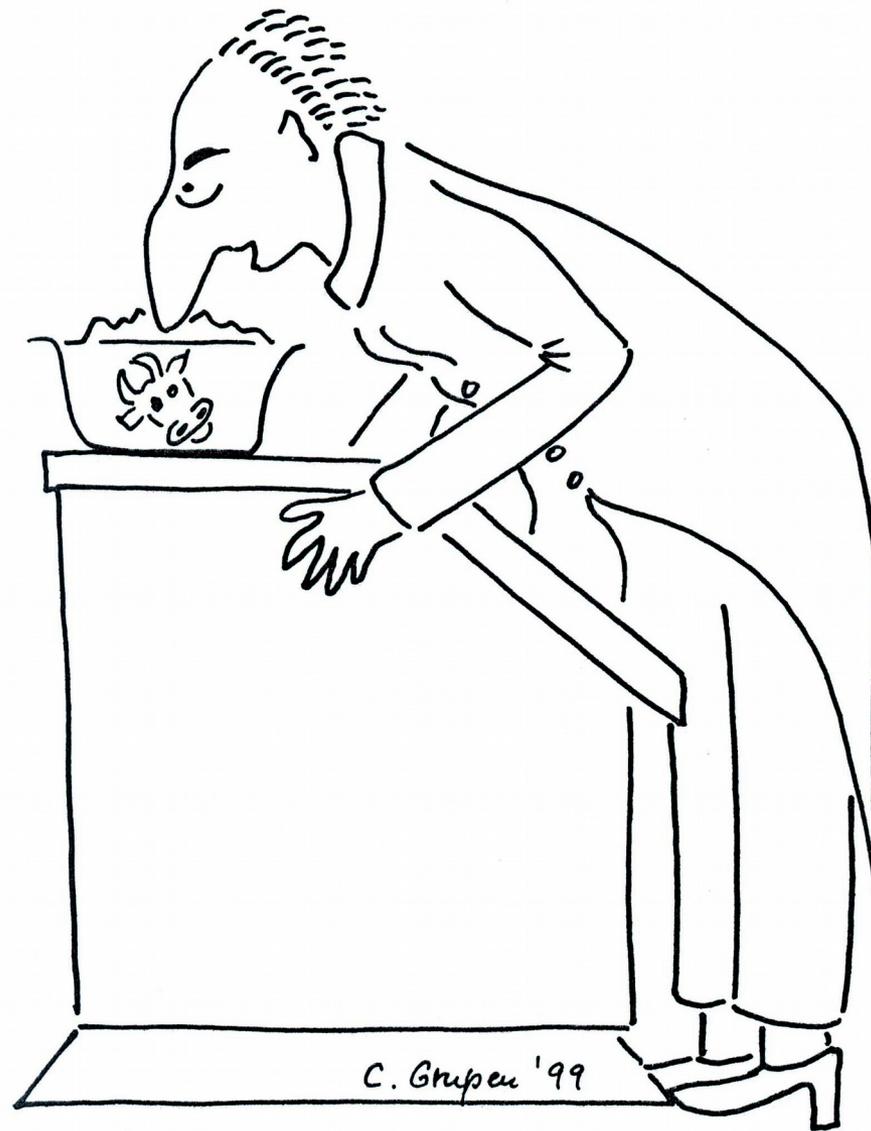


**Q -  
Ladung**

**S -  
Seltsam-  
keit**

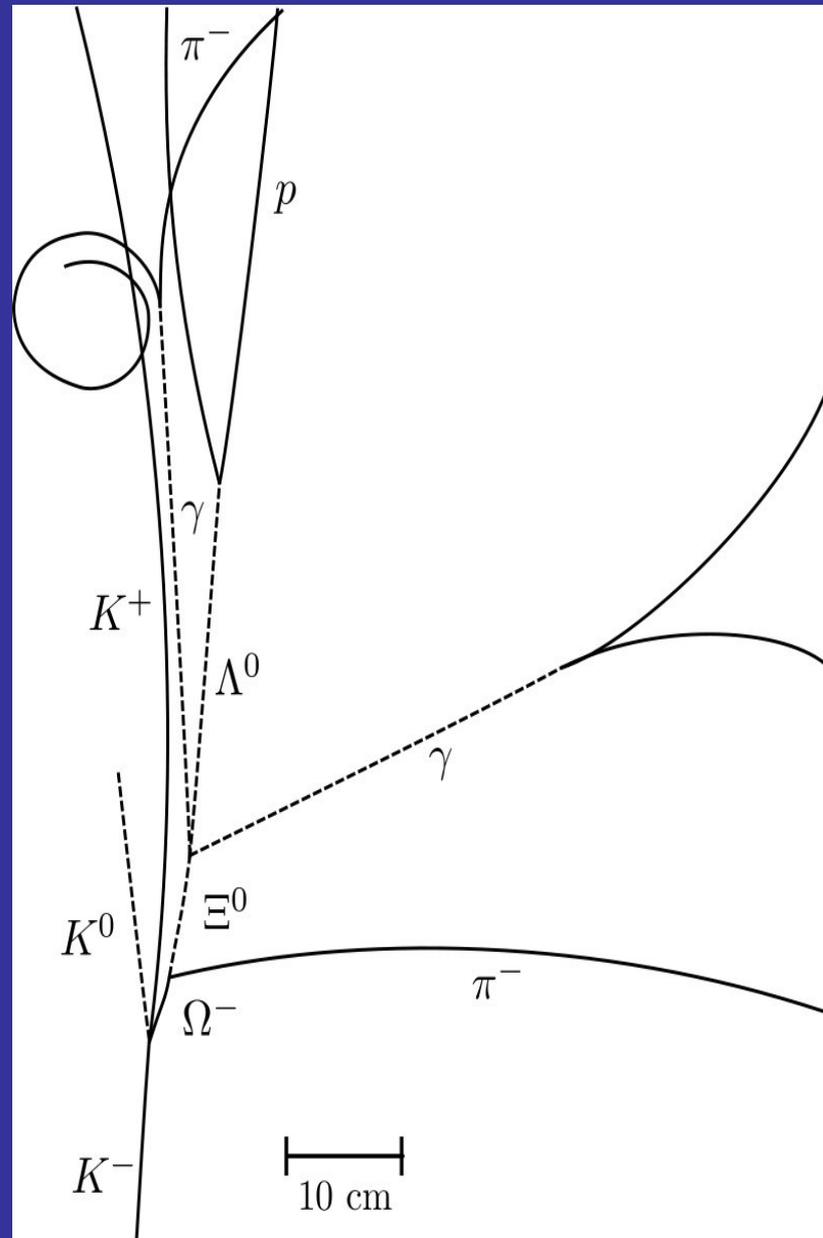
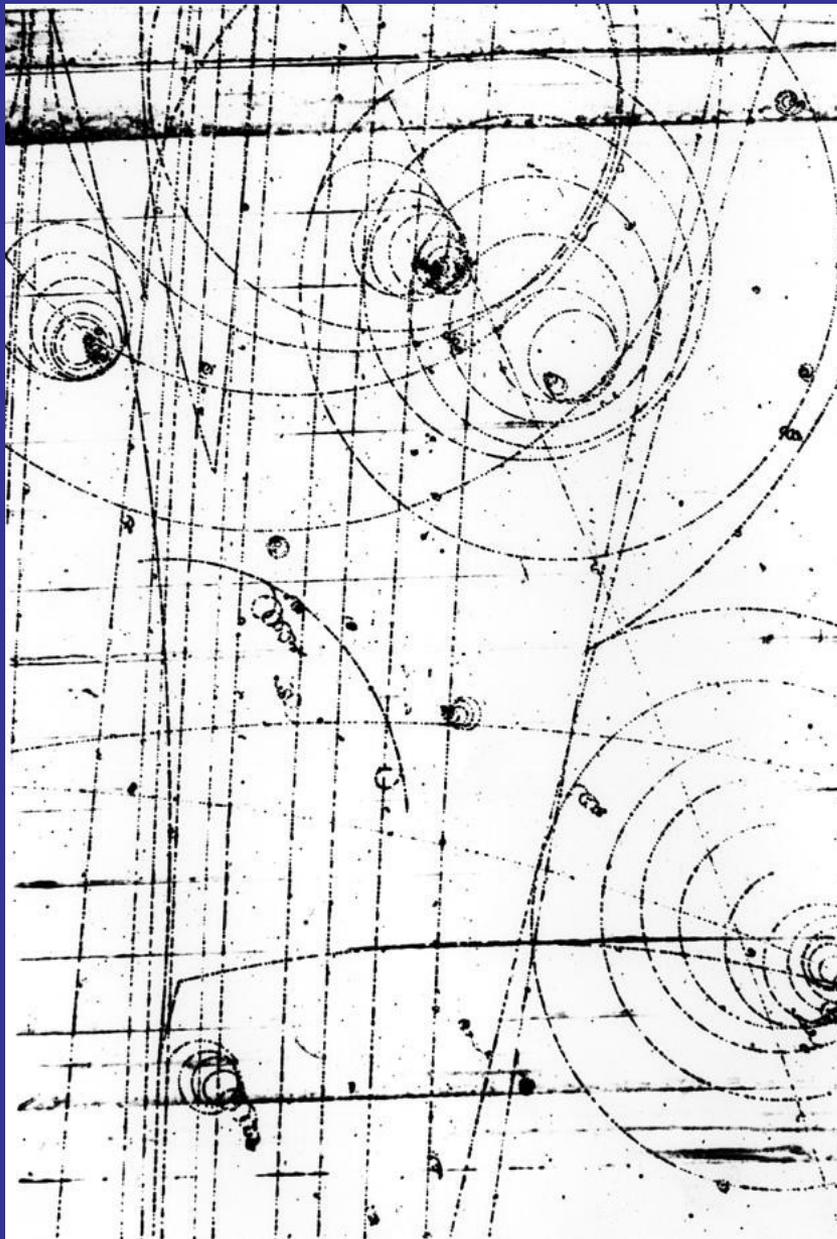
$\Delta^{++} =$   
**uuu**

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

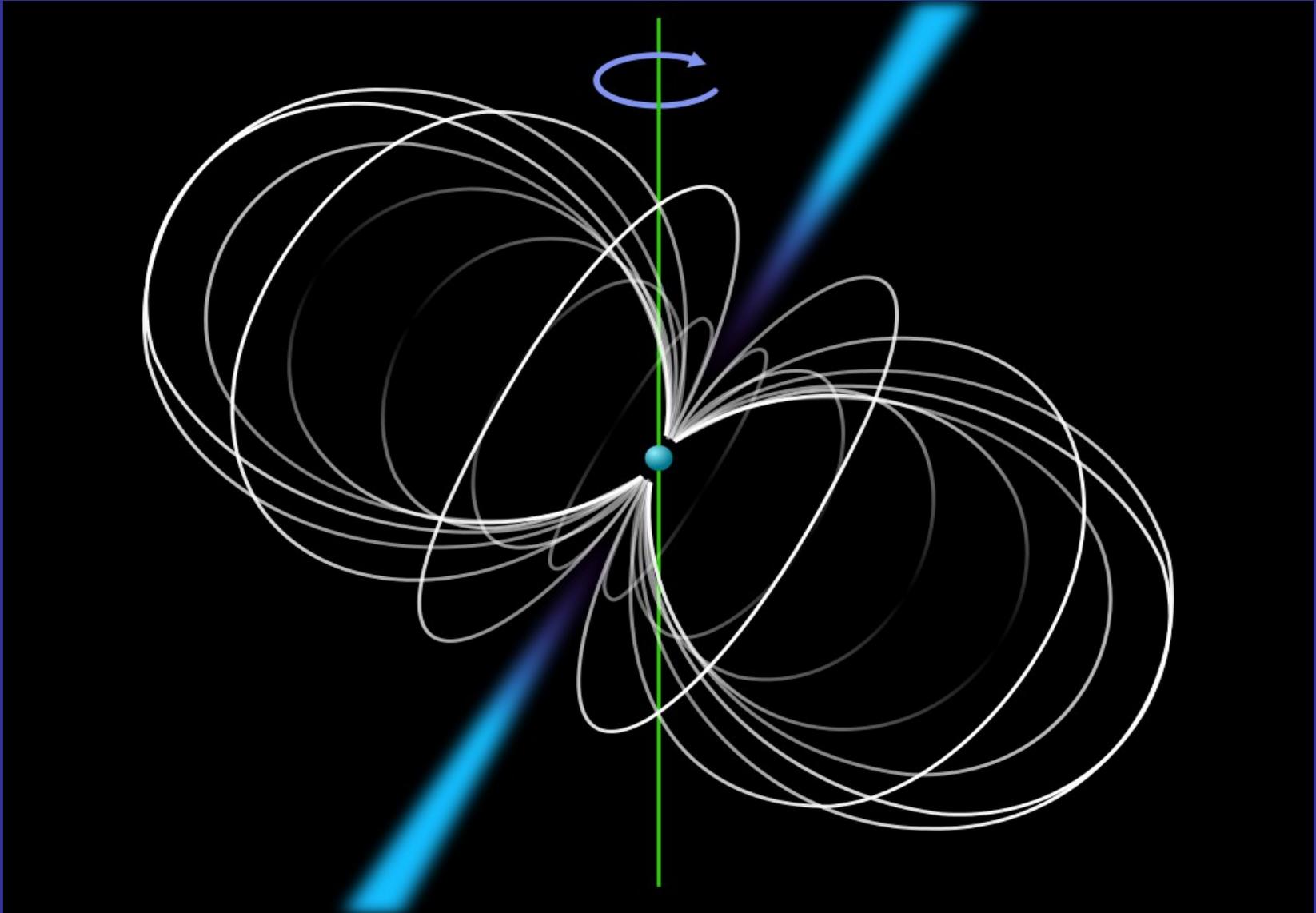


..... in jeden Quark begräbt er  
seine Nase!

# $\Omega^-$ Produktion und Zerfall



# Pulsare: rotierende Neutronensterne



# Teilchenbeschleunigung im Pulsar

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

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

$\Phi$  = 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

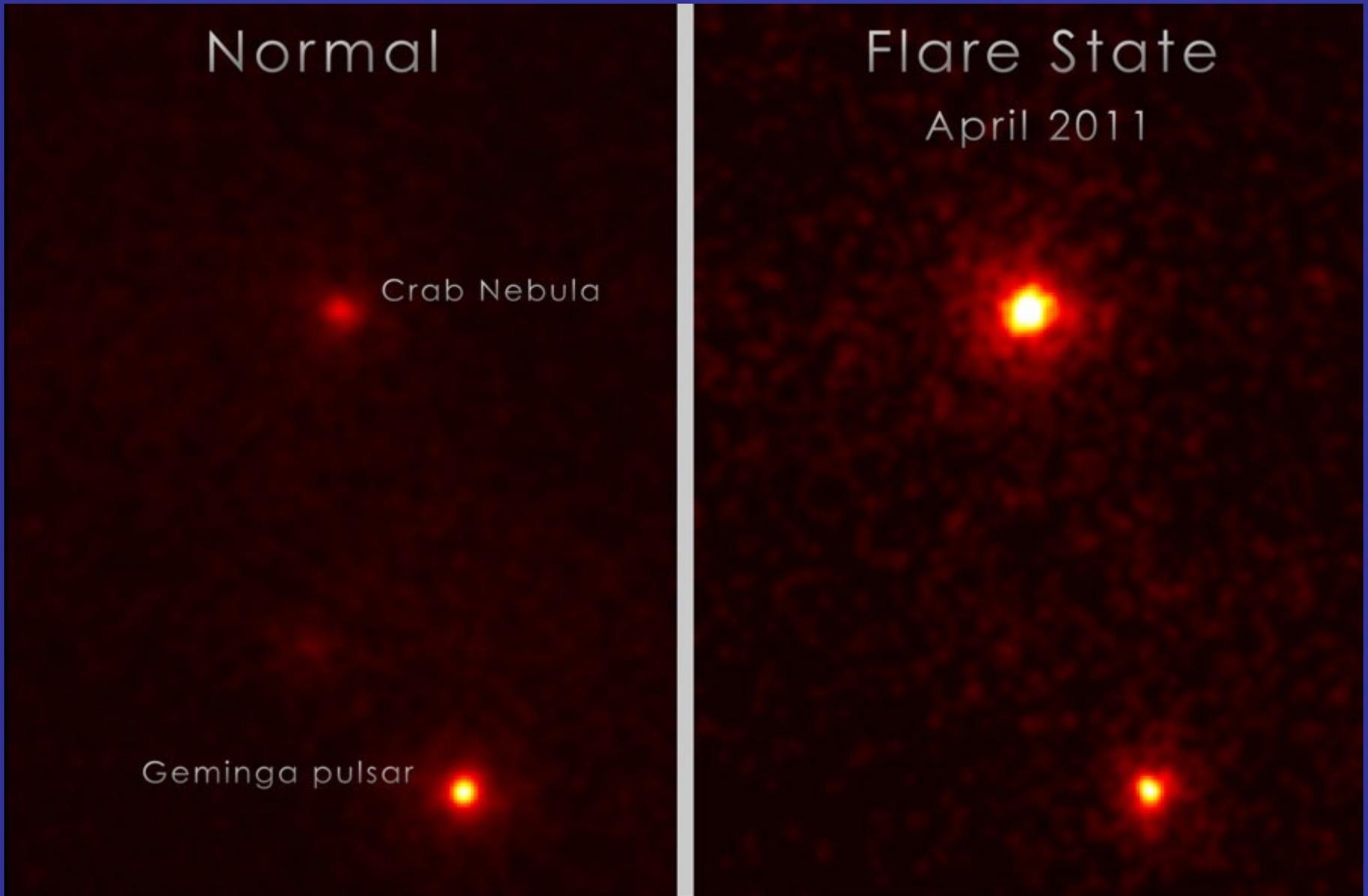
Crab Nebula

Geminga pulsar

Flare State

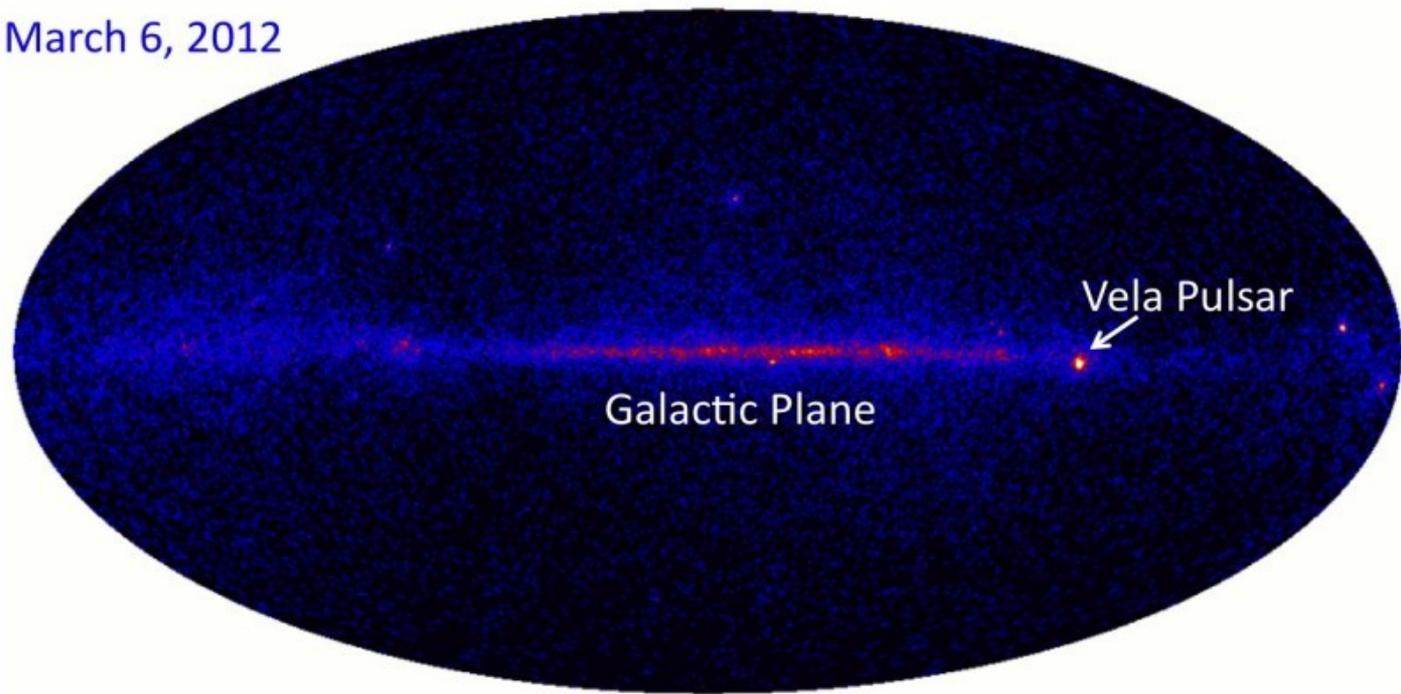
April 2011

**Gamma-Ausbruch im Krebsnebel**

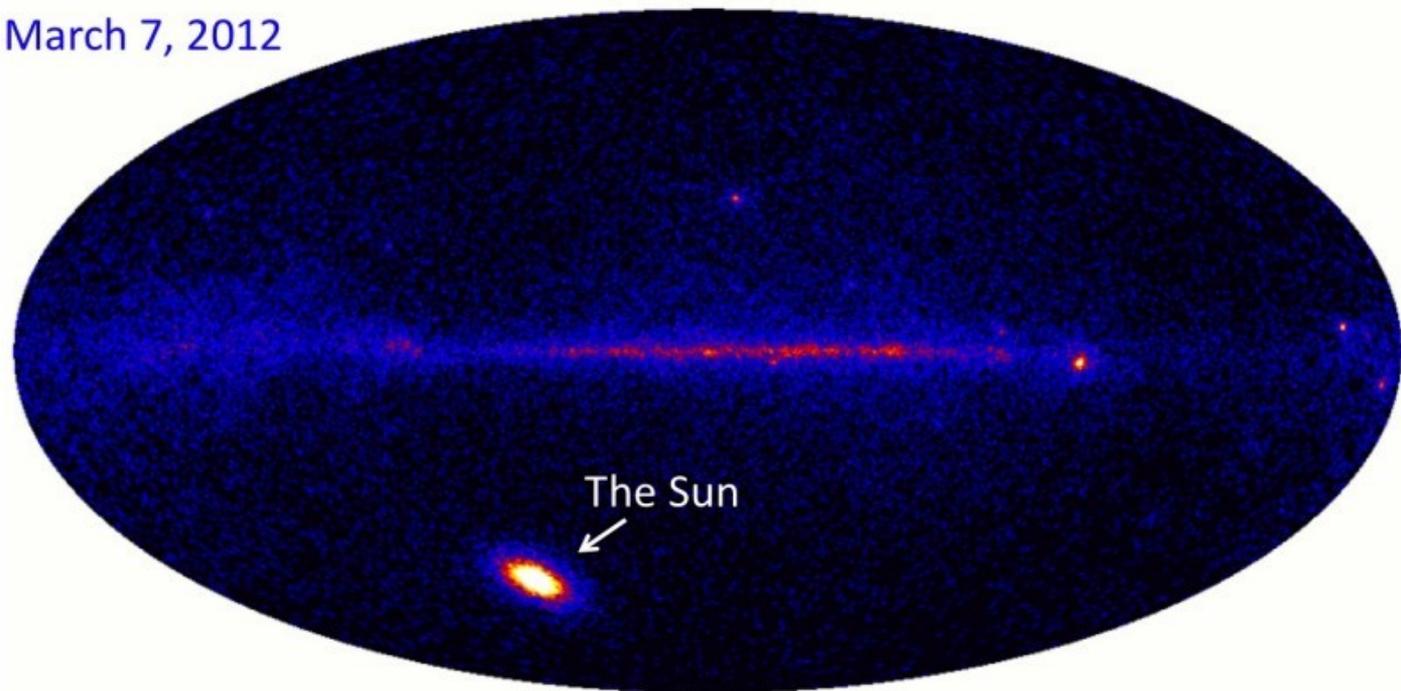


**Solarer  
Gamma  
und  
Röntgen-  
Ausbruch:  
tödliche  
Gefahr für  
Astro-  
nauten.  
Aufnahme:  
Fermi-  
Satellit**

March 6, 2012

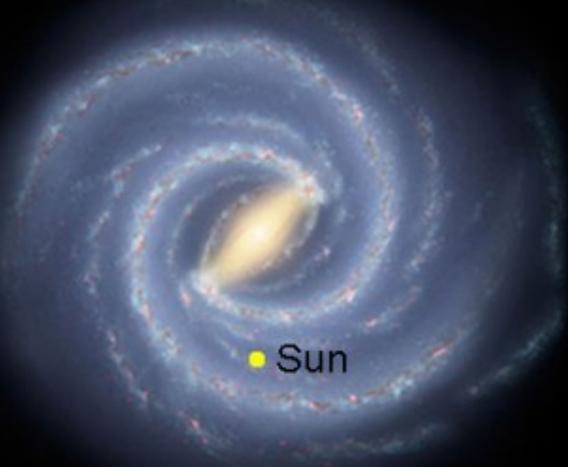


March 7, 2012



# Sonne in galaktischen Koordinaten

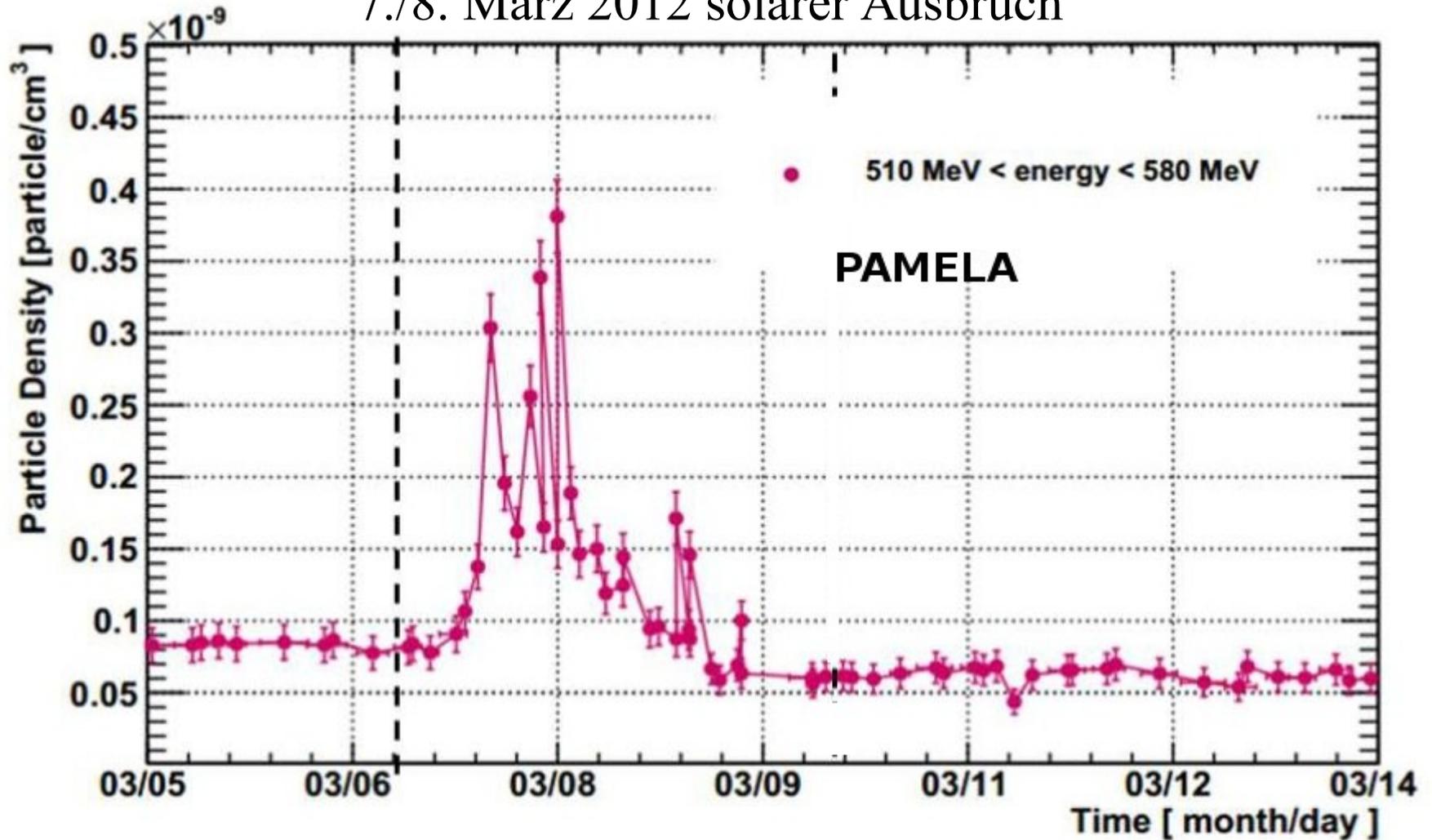
Face-on view of Milky Way



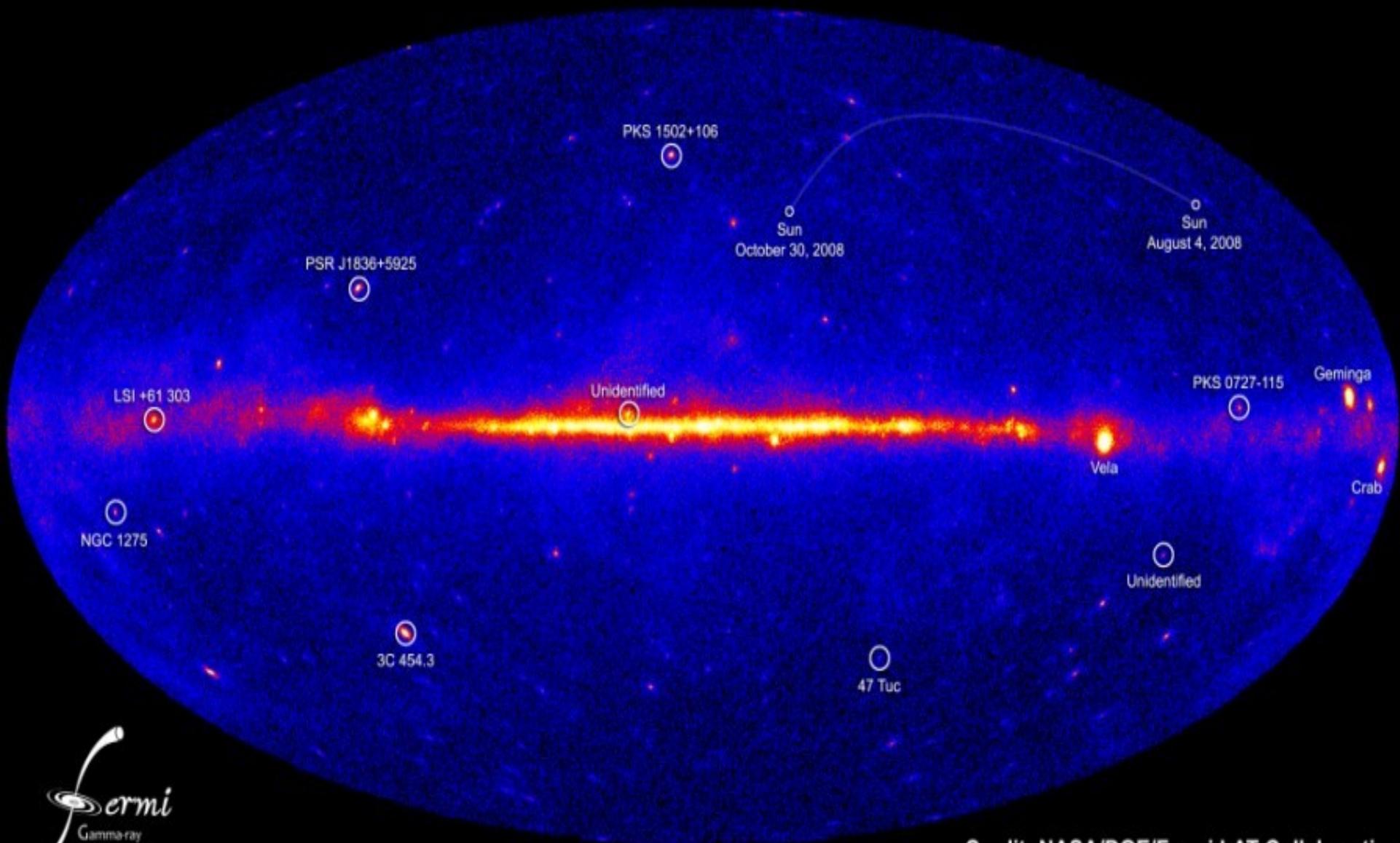
Edge-on view



## 7./8. März 2012 solarer Ausbruch



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

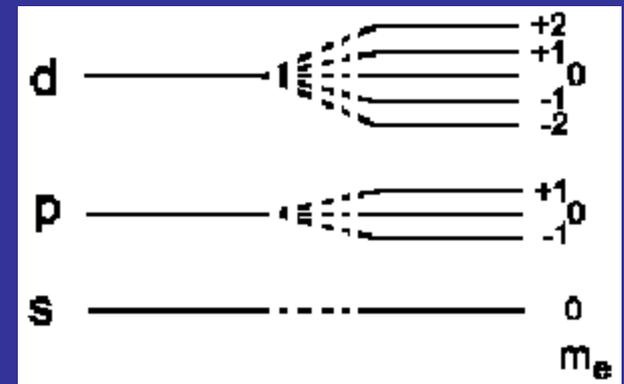


# Magnetfeld von Pulsaren und Neutronensternen

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

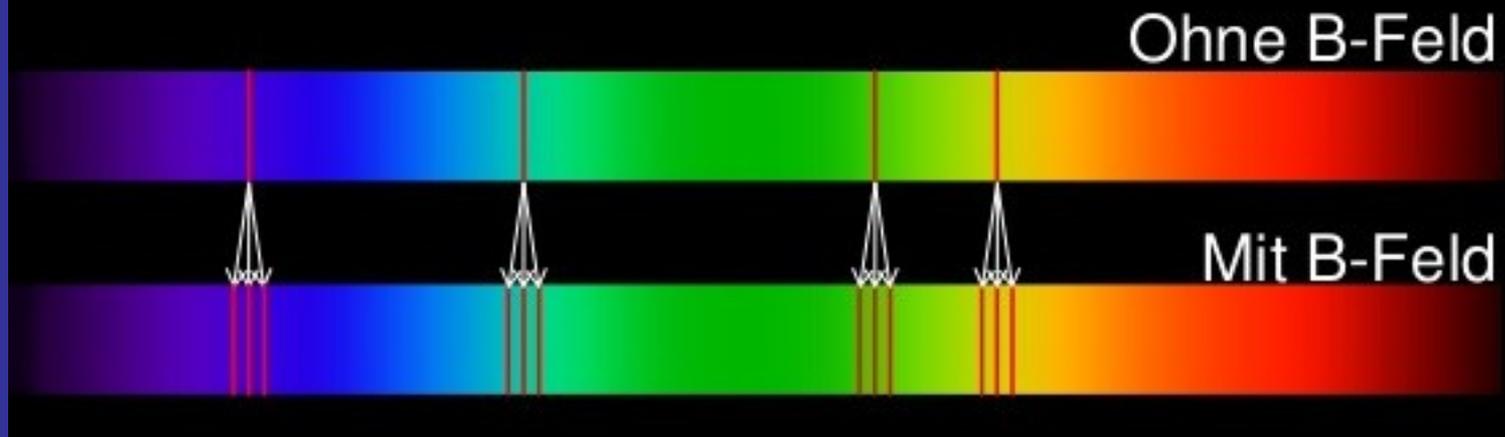
Für  $B_{\text{Stern}} = 1000$  Gauß ergeben sich magnetische Felder des Pulsars von  $2,5 \cdot 10^{12}$  Gauß =  $2,5 \cdot 10^8$  T!

**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  $r_s = 2GM/c^2$



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

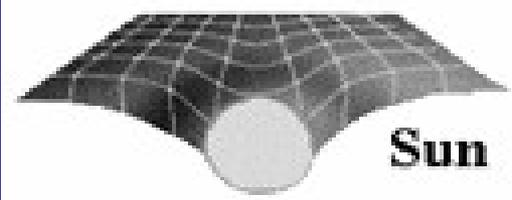
$$r_{\text{Erde}} = 9 \text{ mm}$$

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

# *Schwarzschild Radius*

---

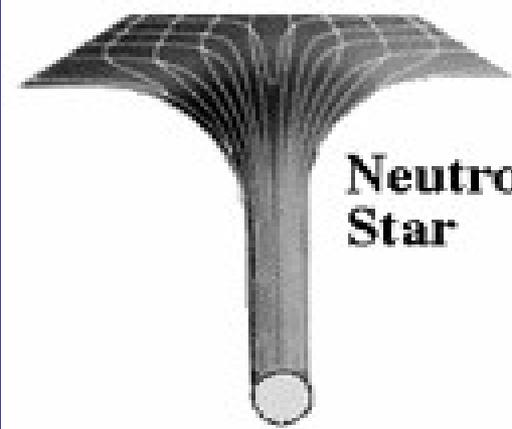
<b>Object</b>	<b>Mass</b>	<b>Schwarzschild Radius</b>	<b>Density (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Hydrogen atom	$2 \times 10^{-24}$ g	$3 \times 10^{-44}$ A	$10^{130}$
Human being	$7 \times 10^4$ g	$1 \times 10^{-15}$ A	$10^{73}$
Earth	$6 \times 10^{27}$ g	0.9 cm	$2 \times 10^{27}$
Sun	$2 \times 10^{33}$ g	3 km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



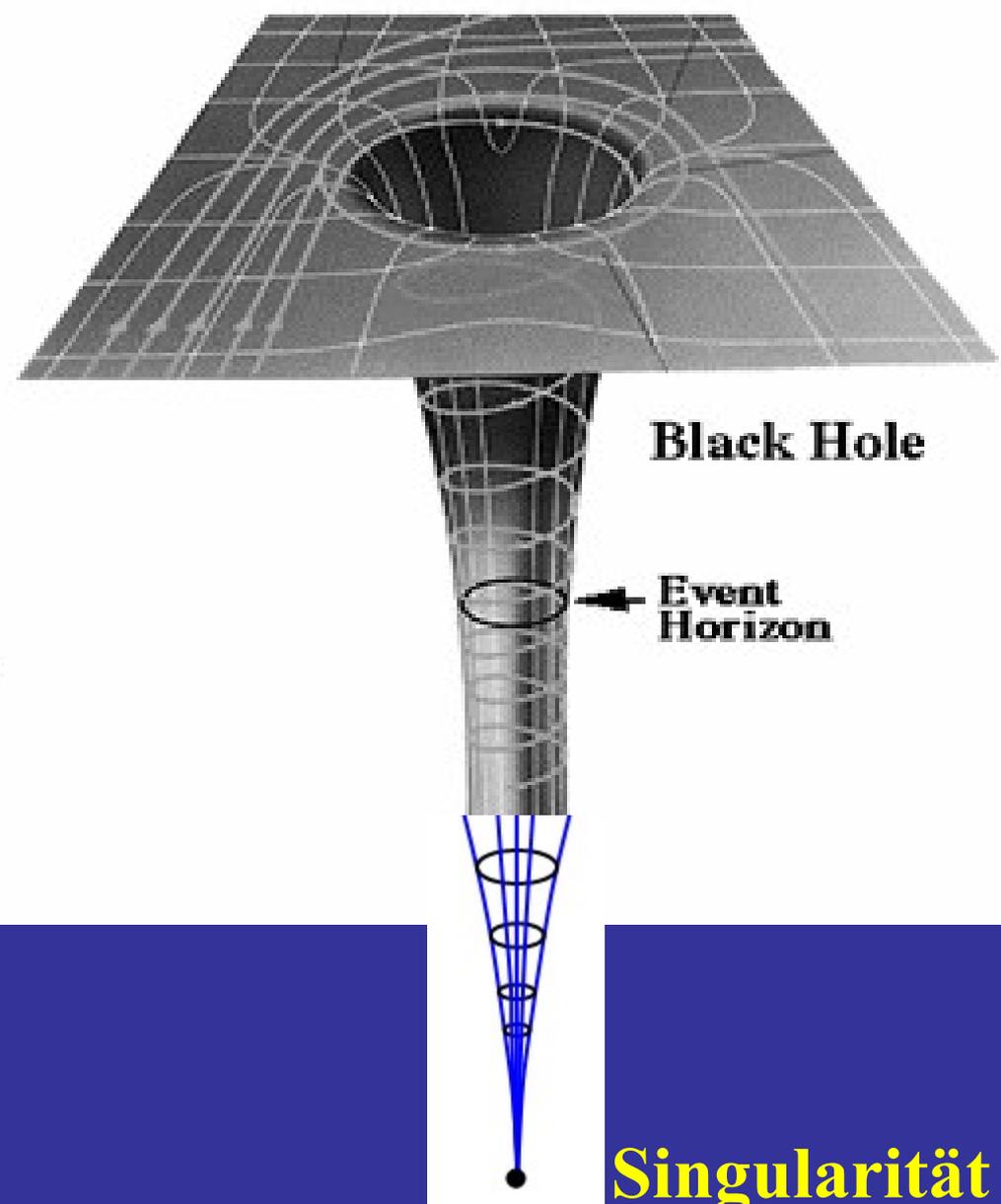
**Sun**



**White Dwarf**



**Neutron Star**



**Black Hole**

**Event Horizon**

**Singularität**







# Schwarze Löcher haben keine Haare!



*maximal set:*

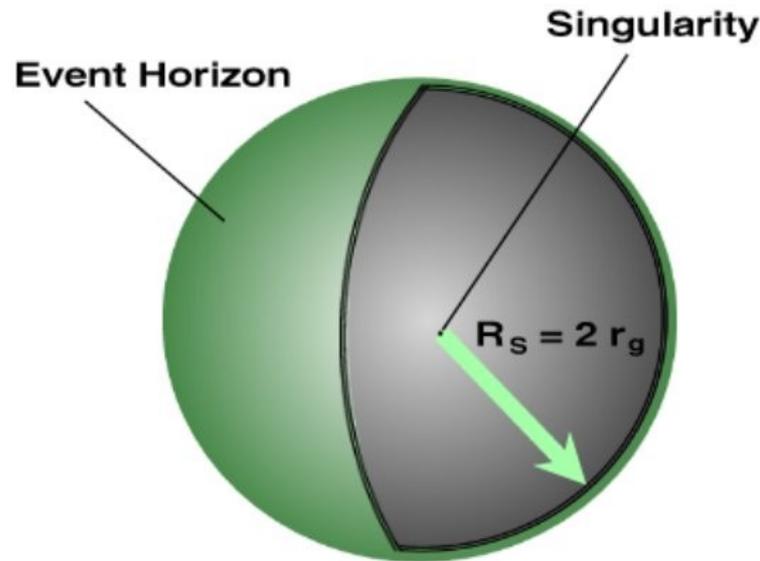
**$\{M, a, Q\}$**

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

*Wheeler:  
Keine-Haare Theorem*

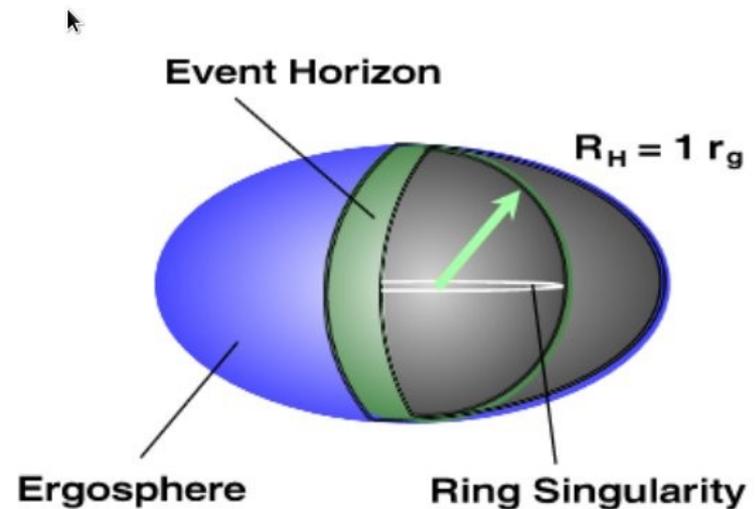
# Statik vs. Rotation

## 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.**

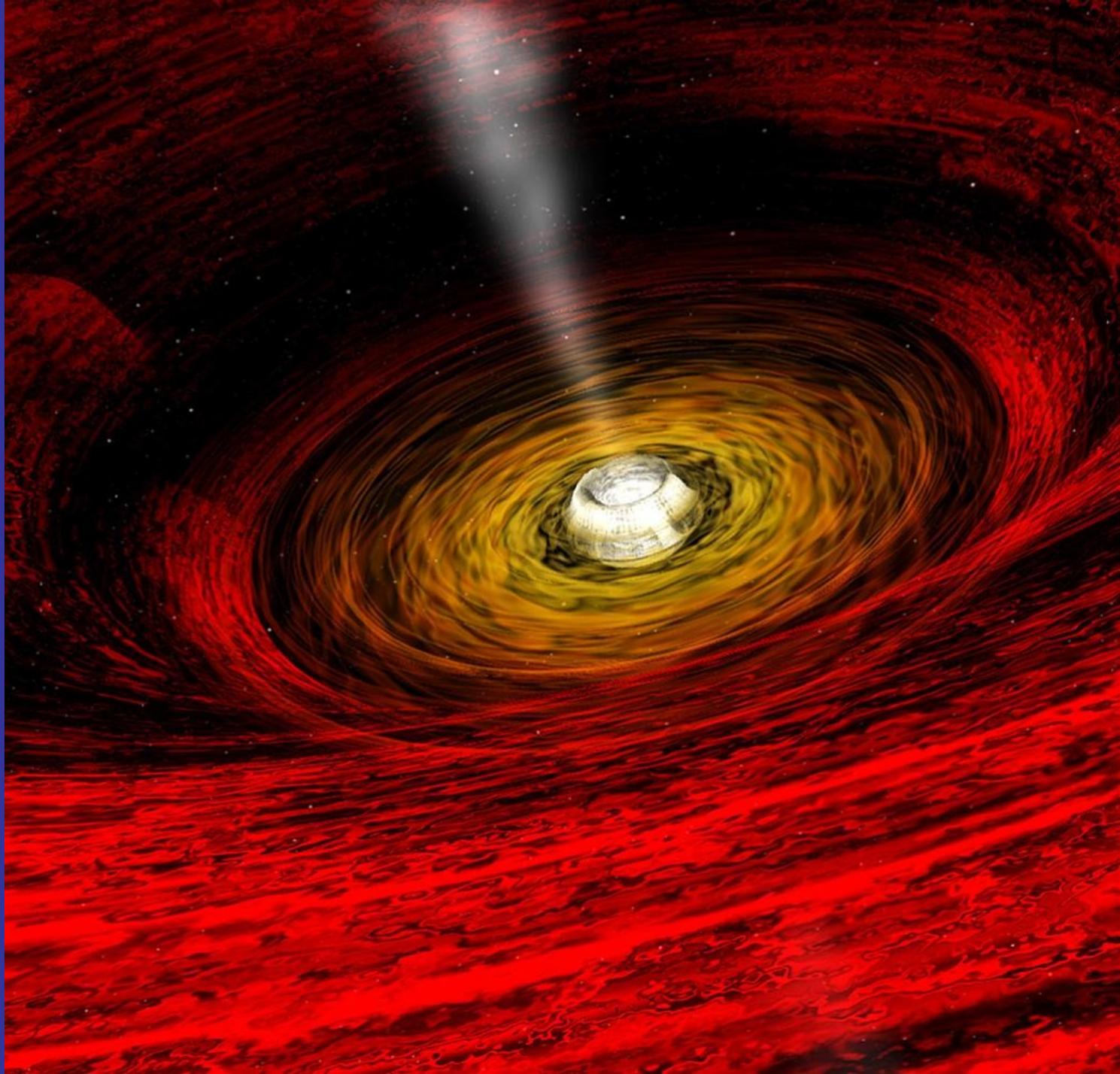
**Die Raumzeit ist nun nicht mehr nur gekrümmt, sondern wird auch von der Rotation mitgerissen.**

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

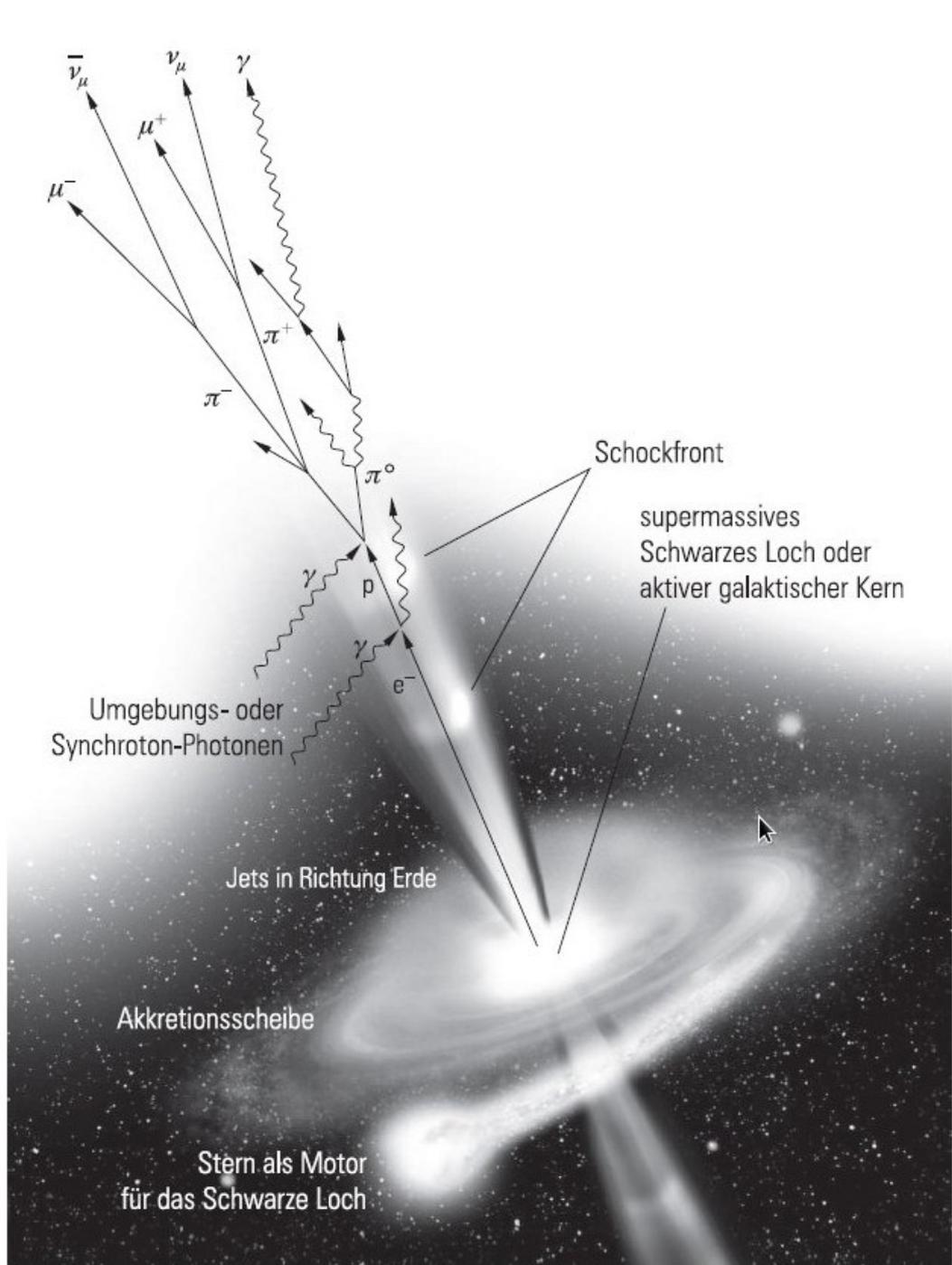
**Darunter gibt einen von außen nicht sichtbaren inneren Ereignishorizont.**

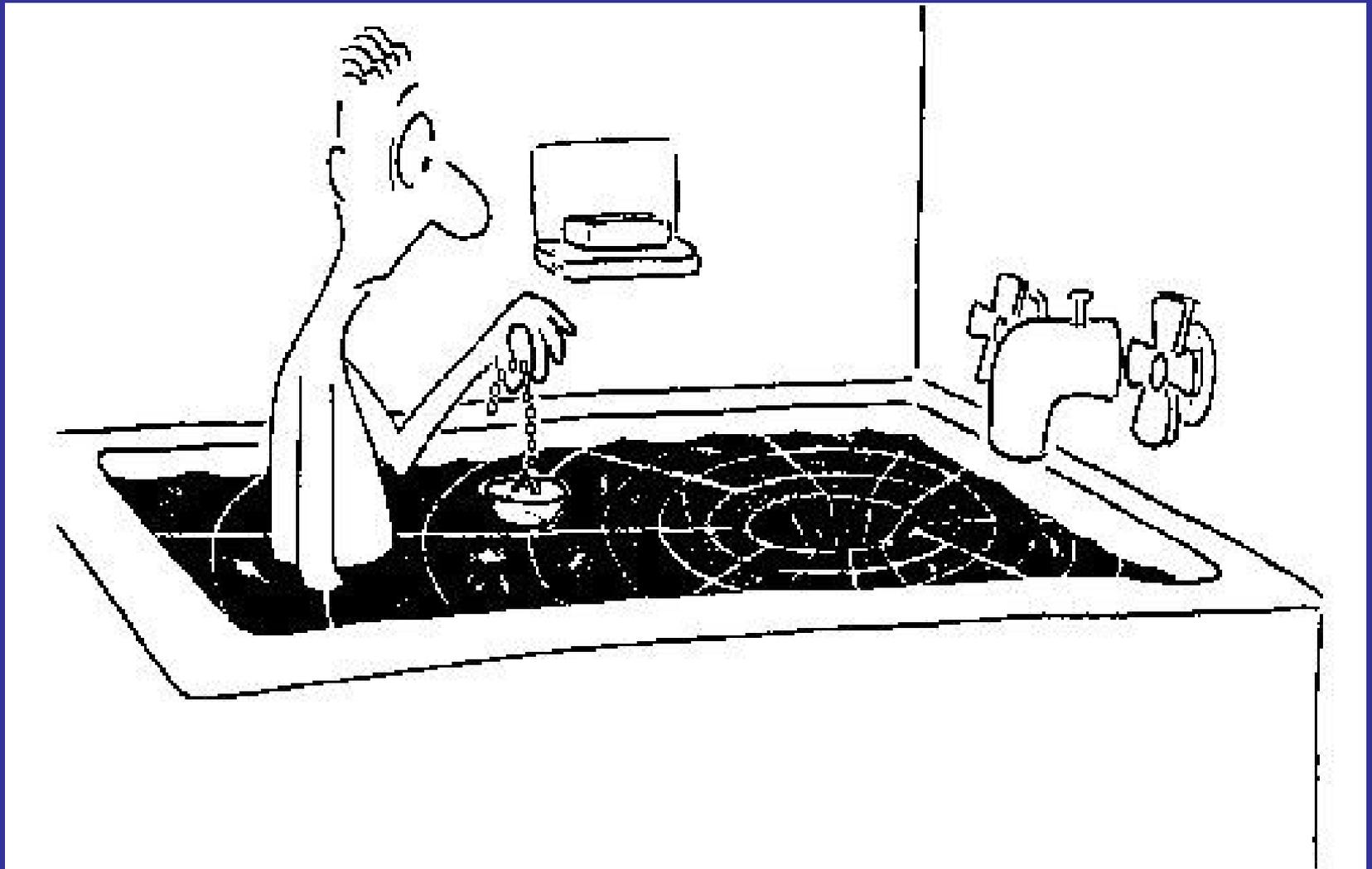
**Objekte innerhalb des äußeren Ereignishorizontes fallen nicht unbedingt gleich in die ringförmige Singularität. Alles rotiert mit dem Schwarzen Loch.**

**Gut, dass man von außen davon nichts mitbekommt.**

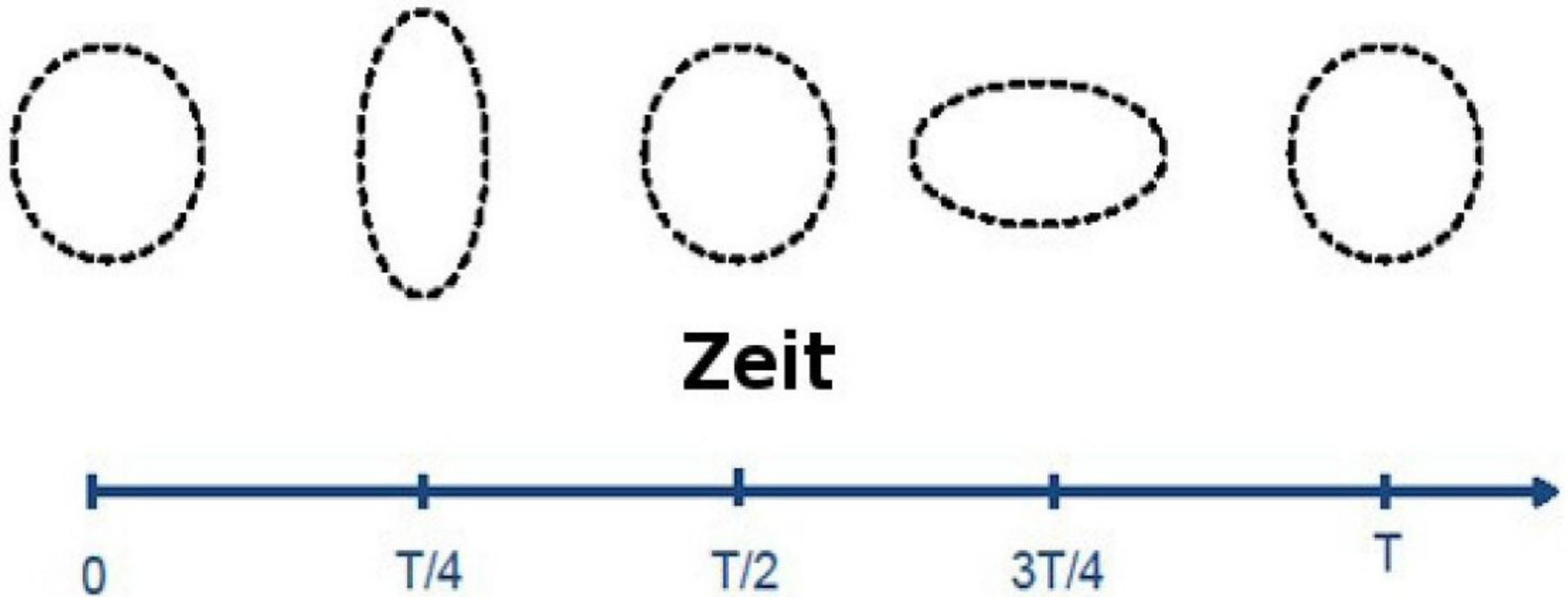


# Jet-Erzeugung aus den Akkretions- scheiben Schwarzer Löcher

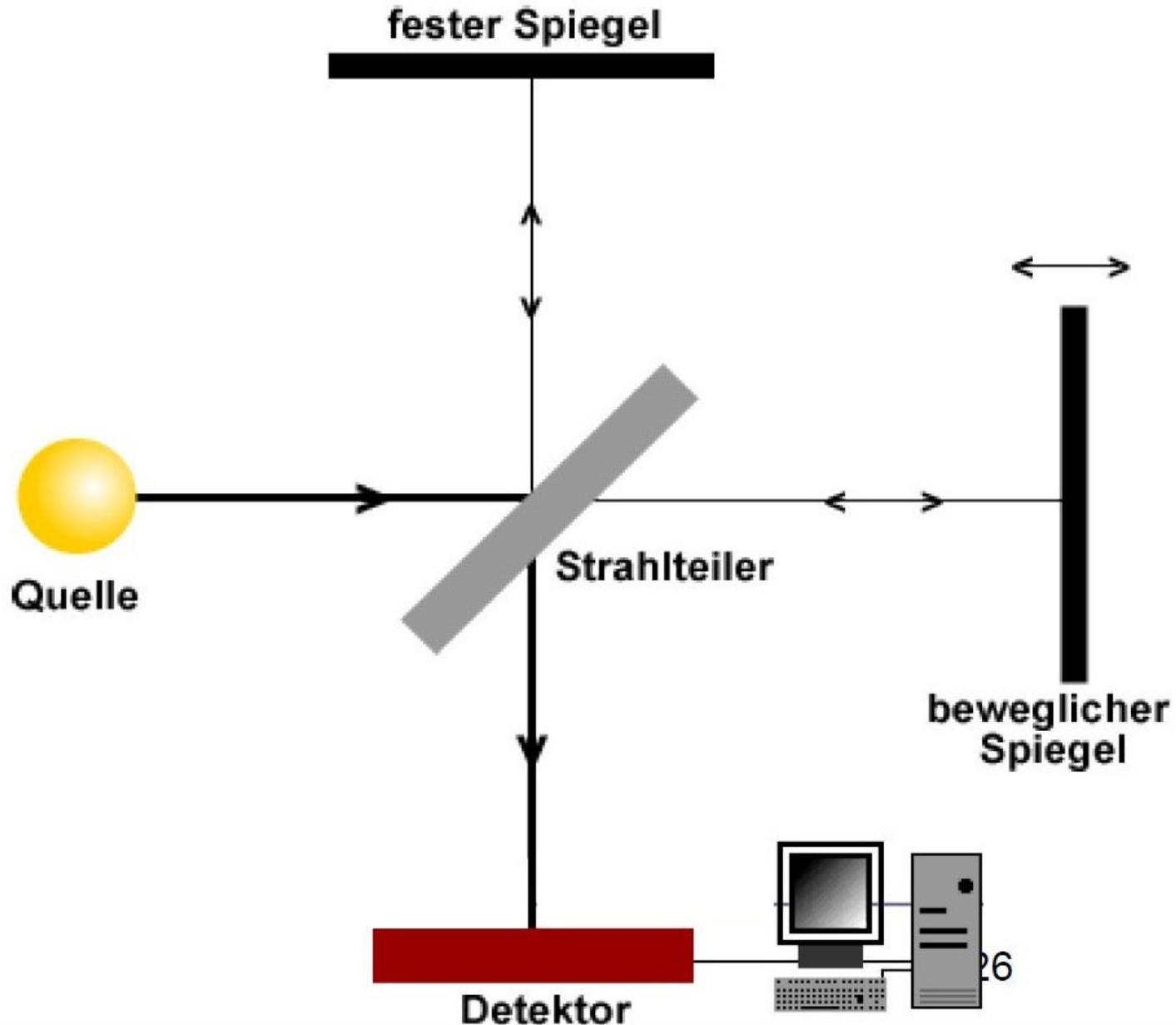




# Gravitationswellen



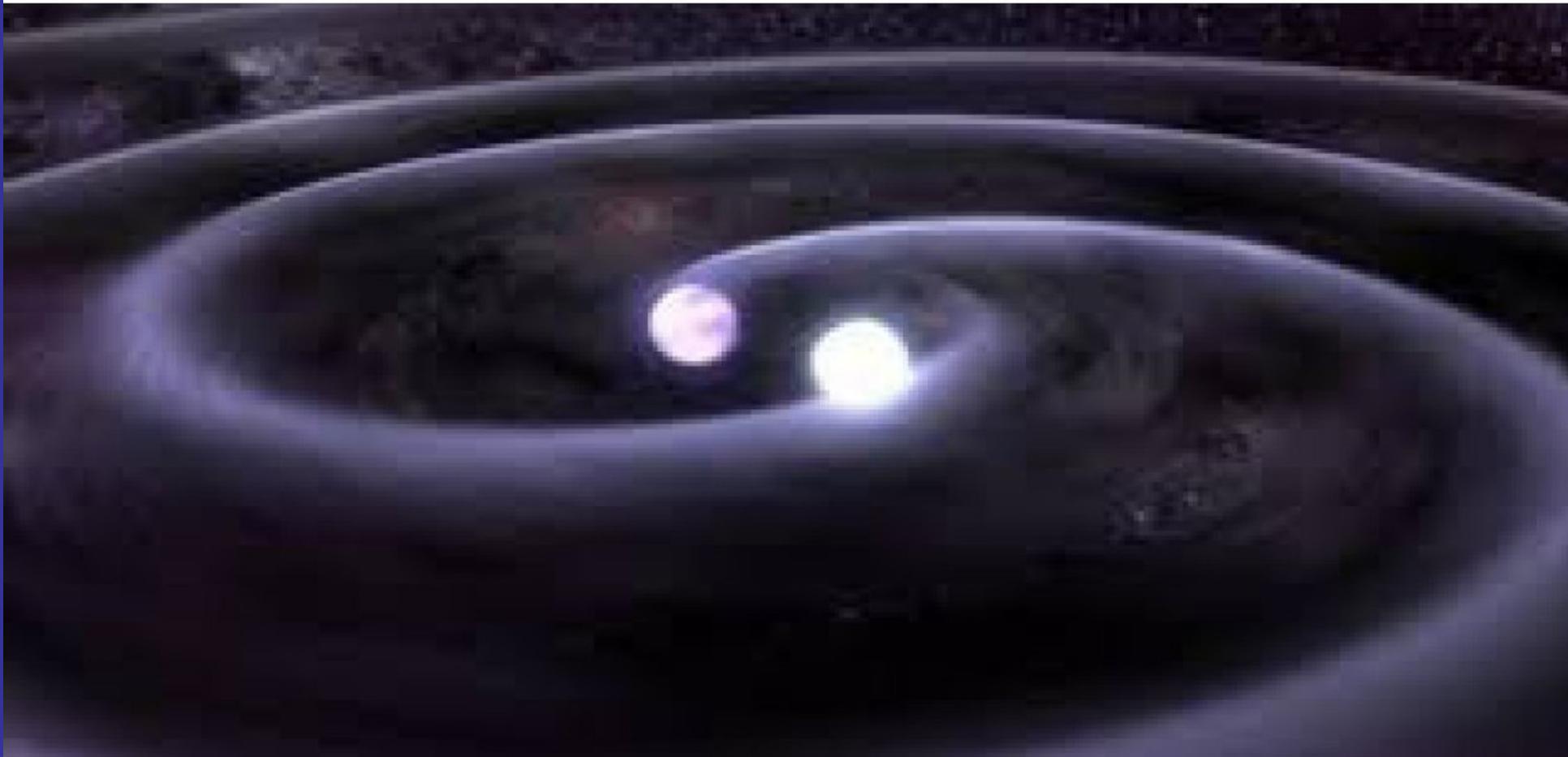
# Michelson-Interferometer



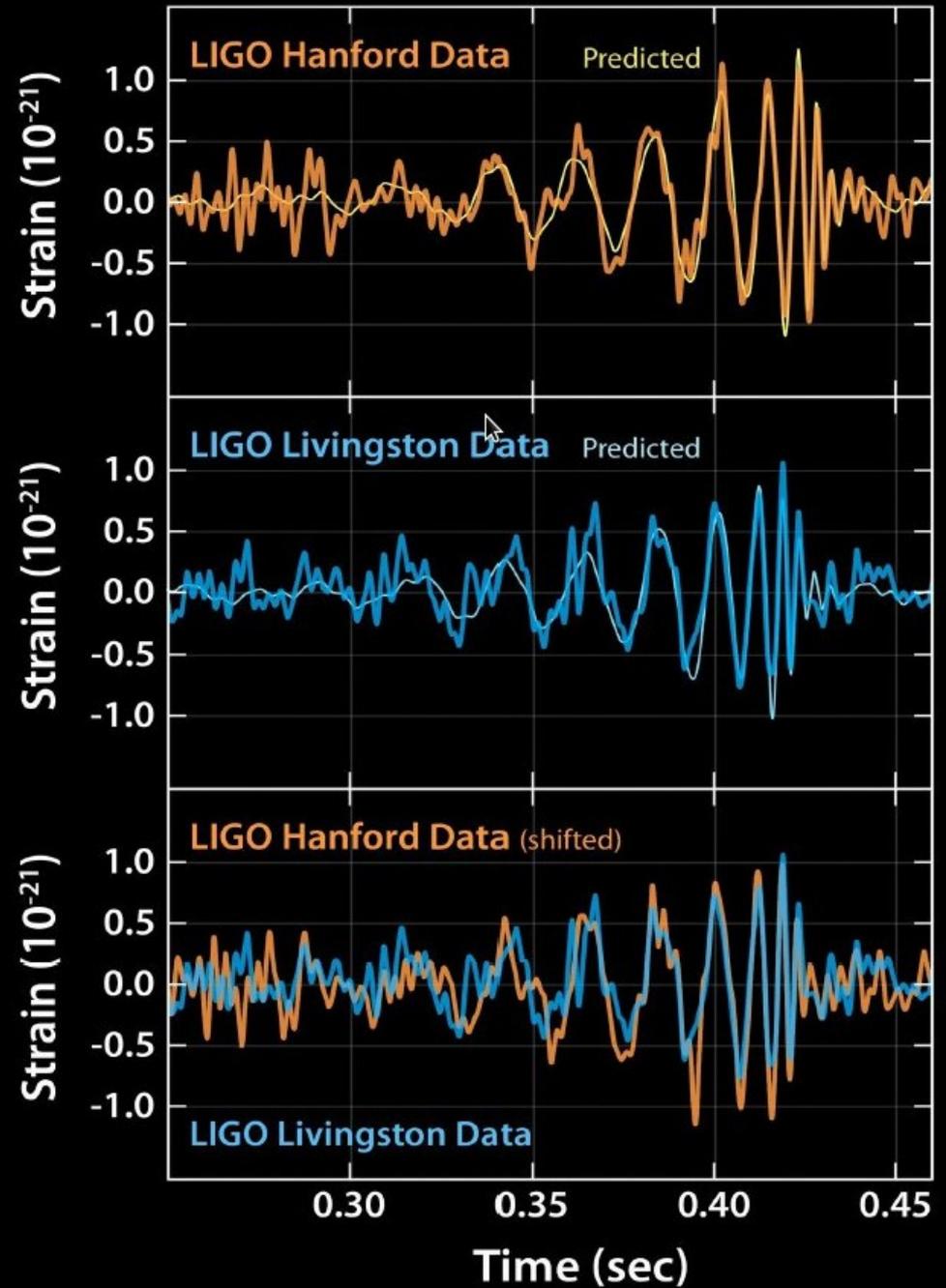
# Gravitationswellen



# Gravitationswellen

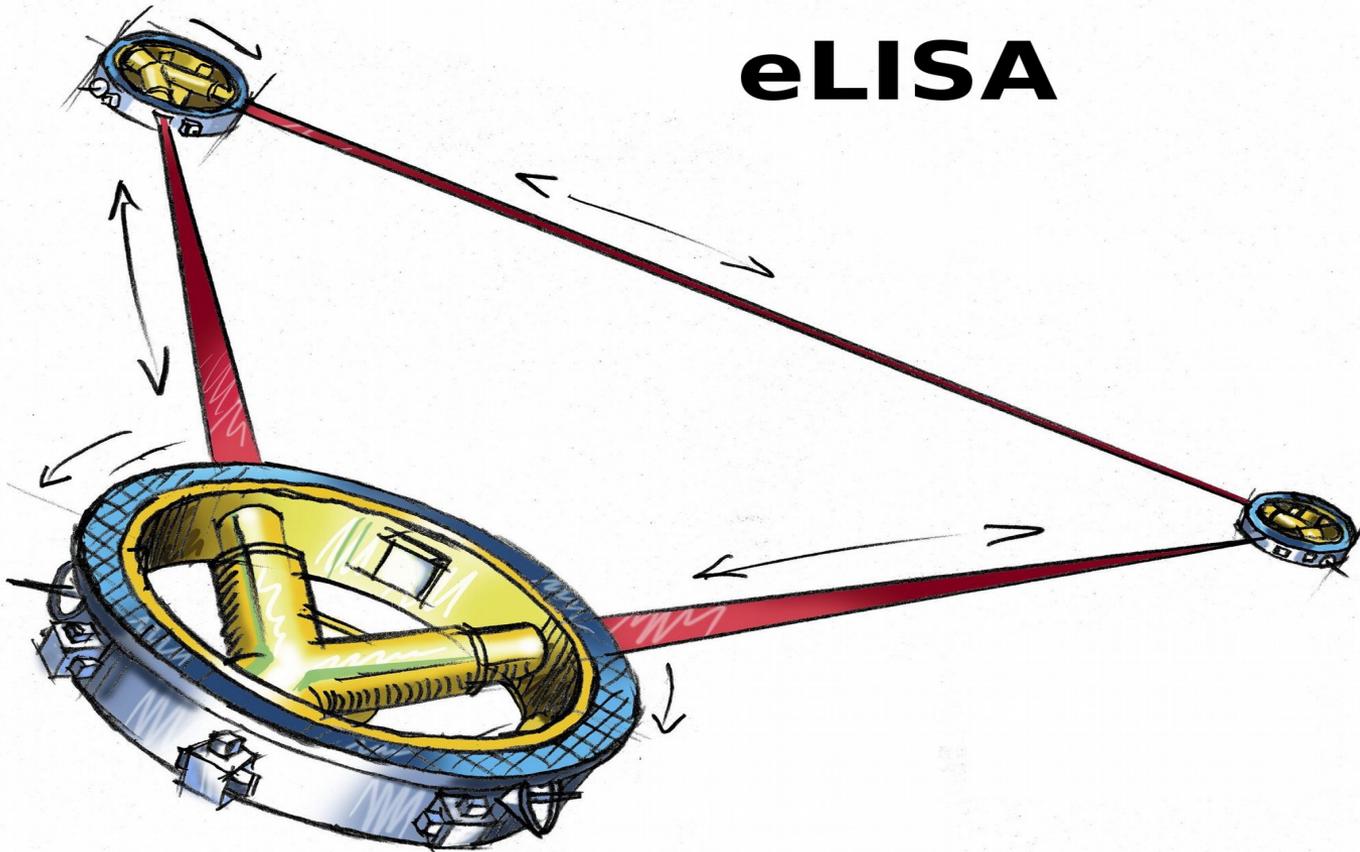


# Gravitationswellen



# ELISA

evolved Laser Interferometer Space Antenna



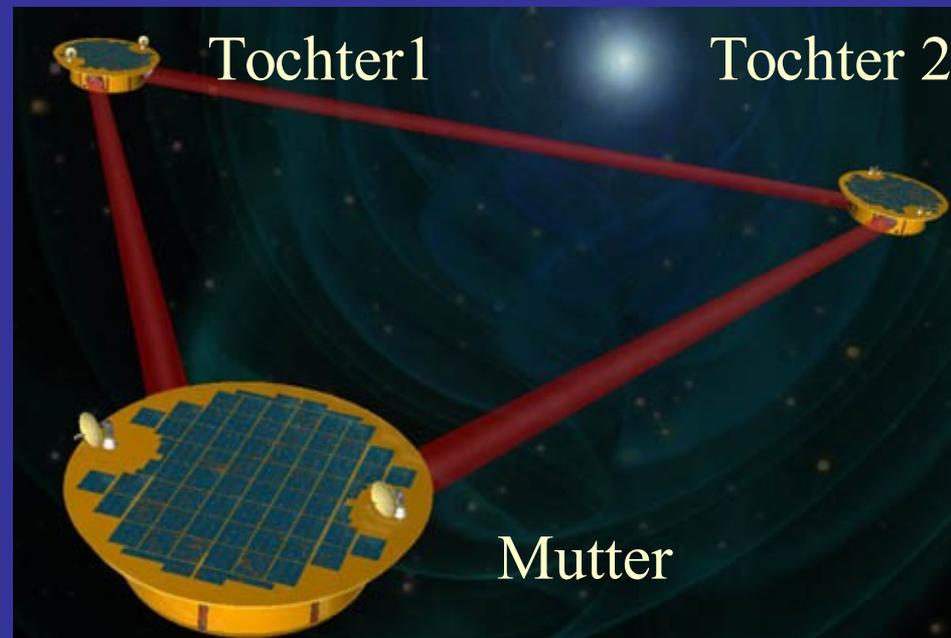
gleich-  
seitiges  
Dreieck  
mit  
1 Million km  
Seitenlänge

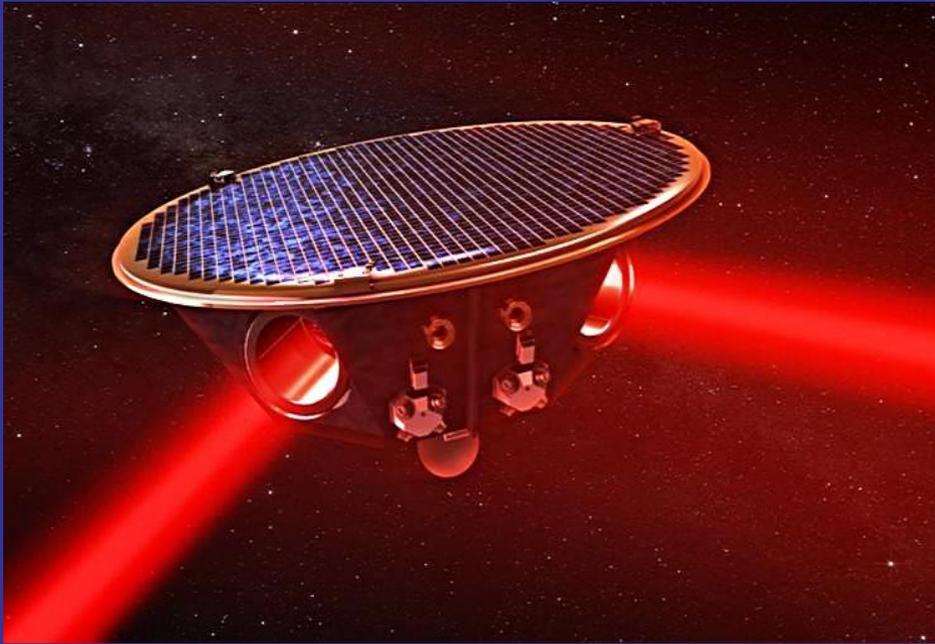
Start 2034

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.

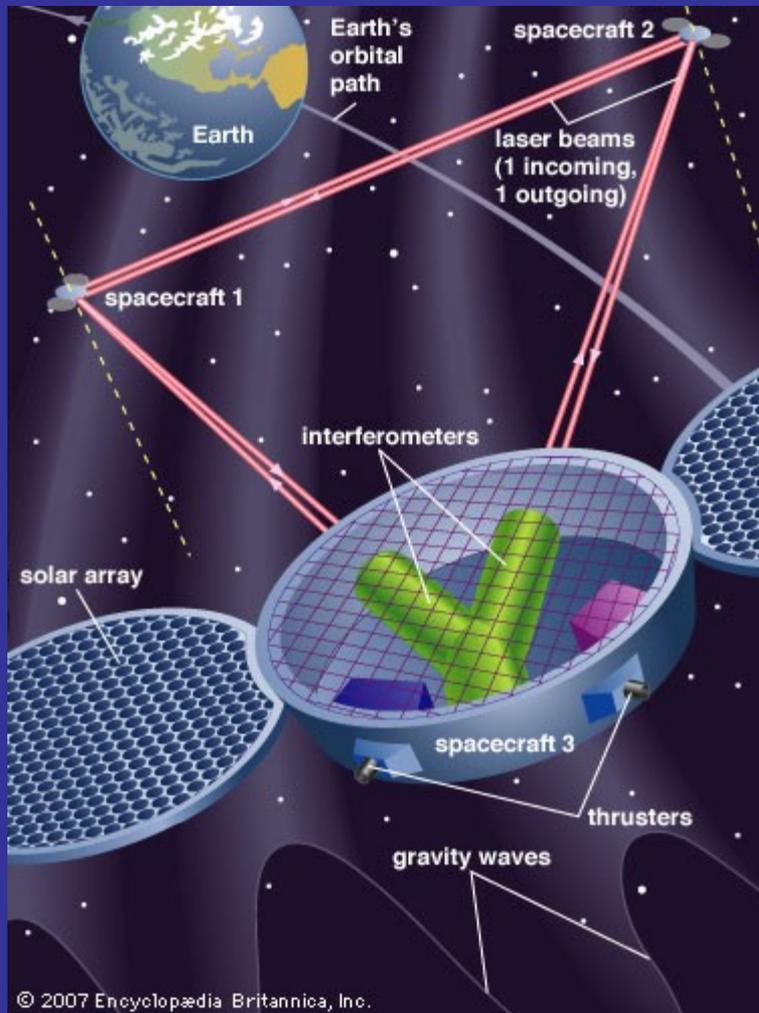
50 Millionen km von der Erde entfernt





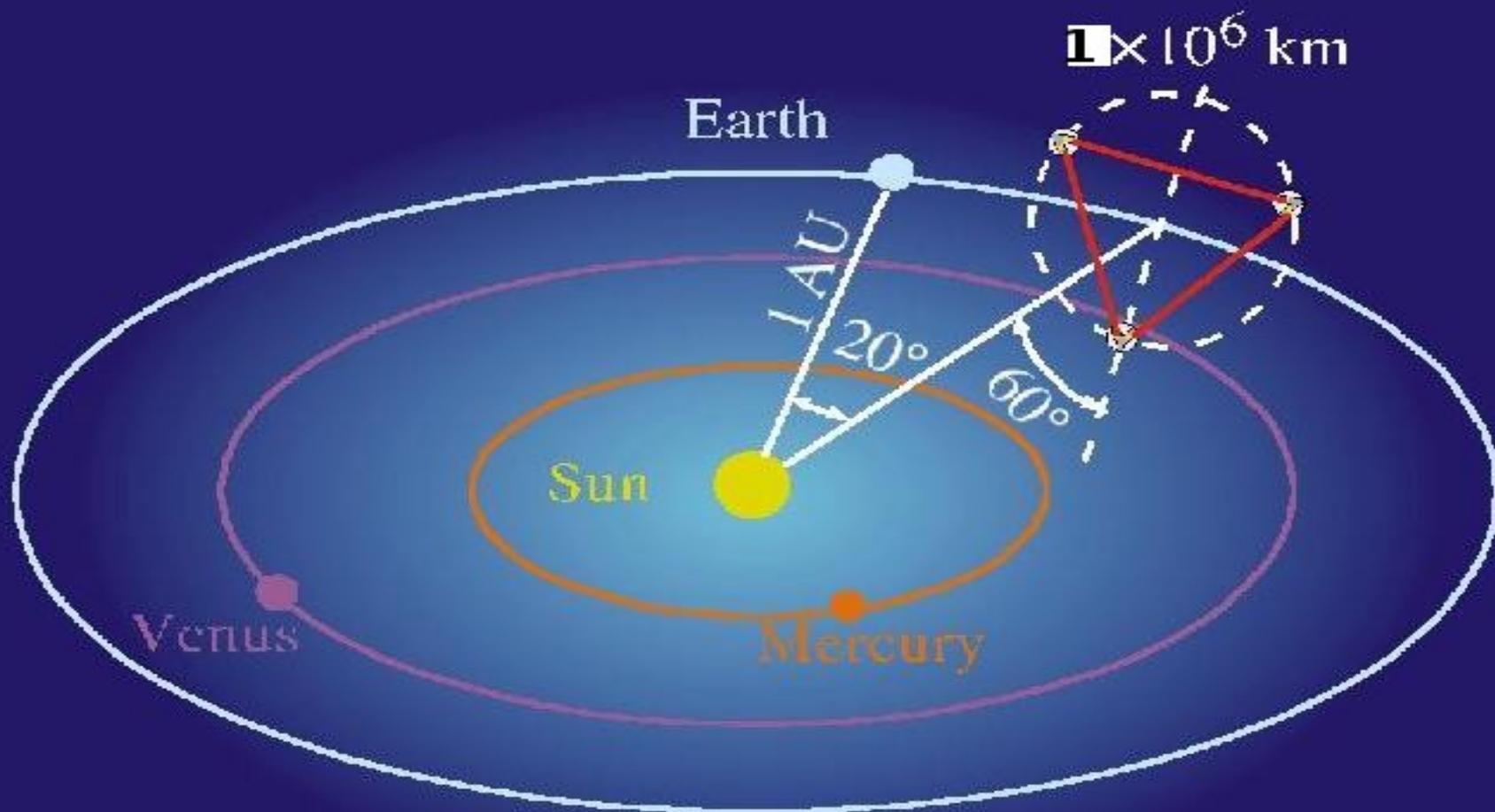
Die “Mutter” emittiert je zwei Laserstrahlen in Richtung der “Töchter”. Wegen der großen Entfernung kann das Gerät nicht als normales LASER-Interferometer arbeiten: es würde nicht genügend

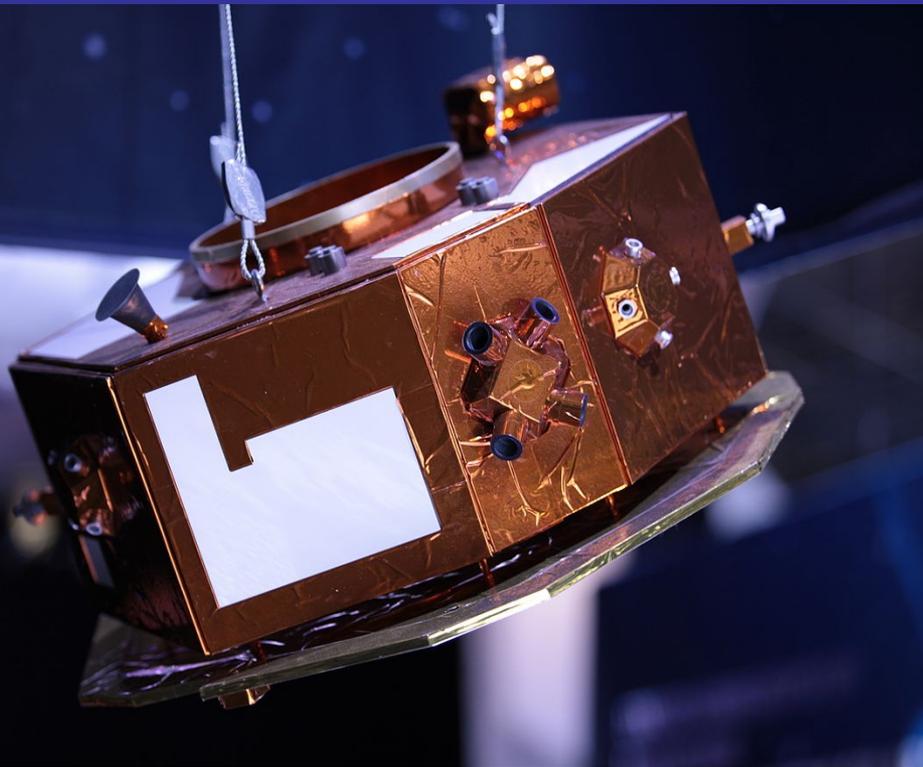
Licht reflektiert werden. Also hat man zwei separate Laserstrahlen. Die Töchter senden selbst aktiv ein Lichtsignal aus, sobald das Muttersignal ankommt. Die Laufzeitdifferenz der Signale in den beiden Armen dient als Messsignal. Die Messgenauigkeit ist besser als ein Pikometer.



# Wirkungsweise des eLISA Interferometers: Strahllänge 1 Millionen km

# Relative Position eLISA – Erde - Sonne





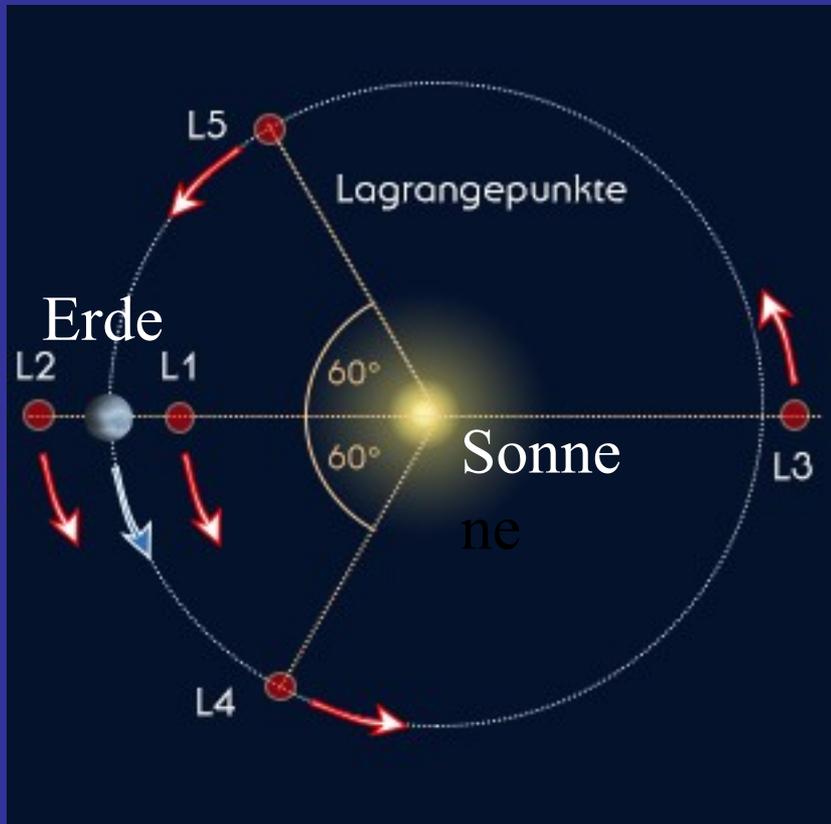
Die Messgenauigkeit wurde mit dem Pathfinder (SMART 2) getestet. Start 2015.

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.

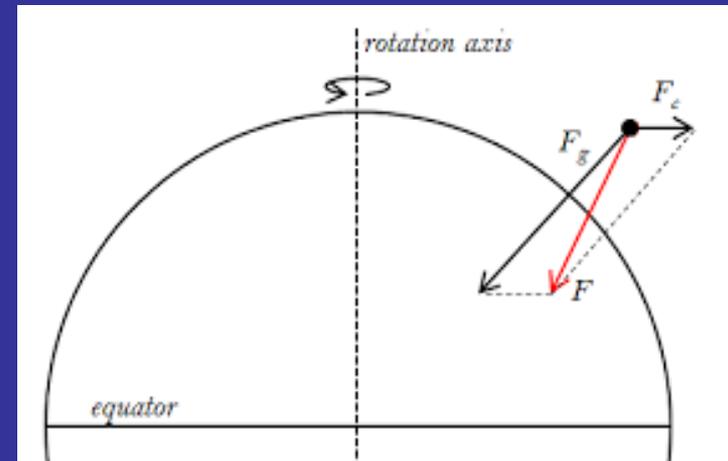
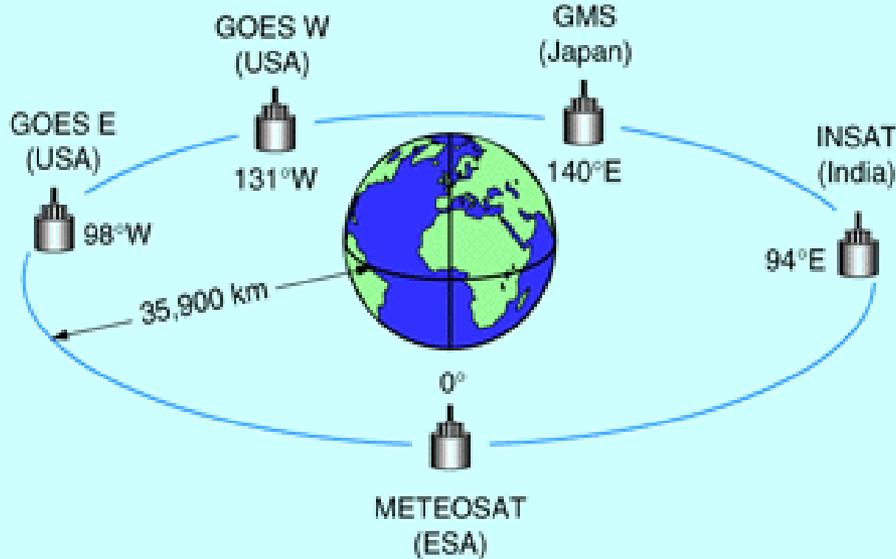
# Lagrangepunkte (Librationspunkte)



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

