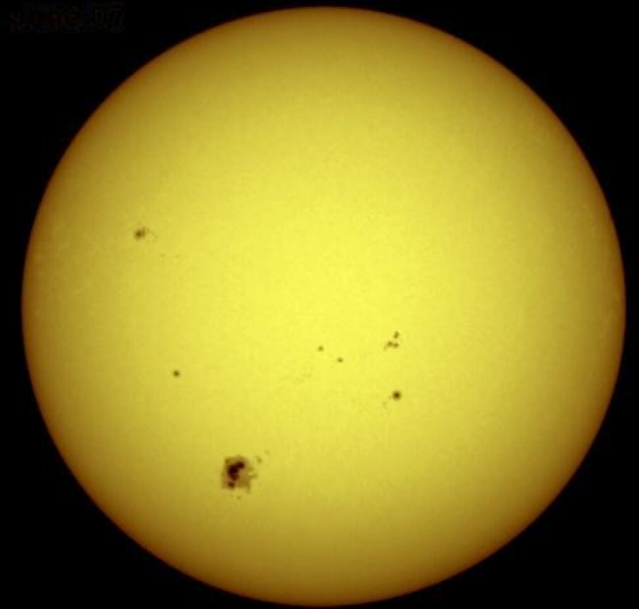


# Die Sonne - ein gewöhnlicher Hauptreihenstern

- Parameter
- Das Sonnenspektrum
- Energieerzeugung
- Innerer Aufbau
- Die Sonnenatmosphäre
- Sonnenaktivität
- Sonnenwind



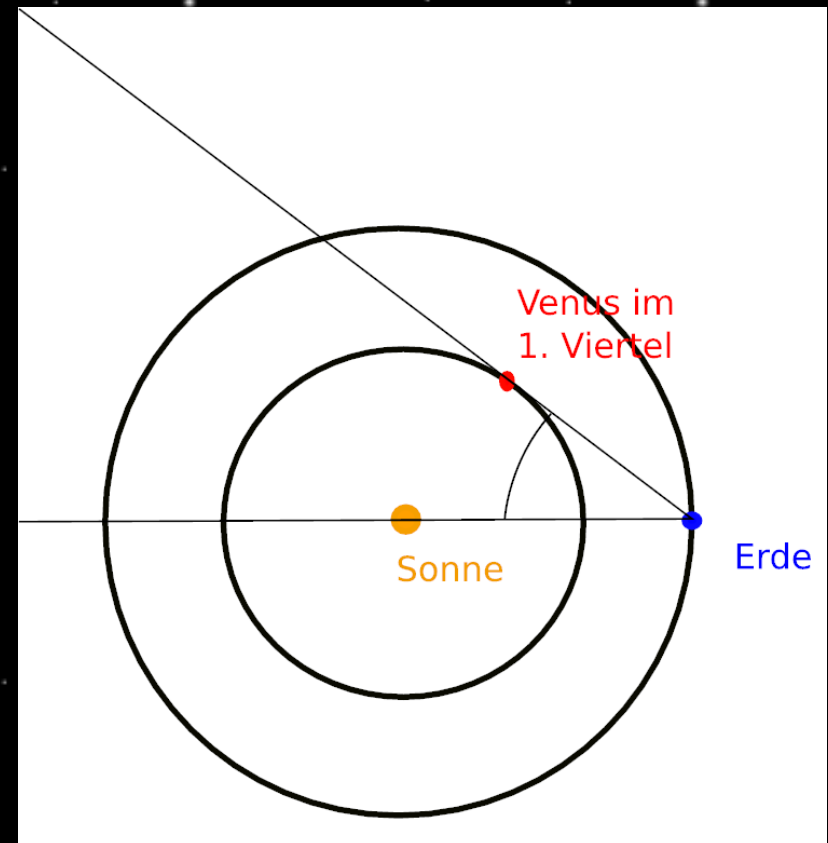
# Parameter

## 1. Entfernung von der Erde

- Aus Umlaufzeiten, gemessenen Winkelabständen im Sonnensystem und dritten Keplerschem Gesetz:

$$\frac{a_{Erde}^3}{T_{Erde}^2} = \frac{a_{Venus}^3}{T_{Venus}^2}$$

- **149.6 Mio km = 1 AU**



# Parameter

## 2. Radius

- Aus beobachtetem Winkeldurchmesser von 16' und Entfernung
- **70000 km** = 109  $R_{\oplus}$



# Parameter

## 3. Masse

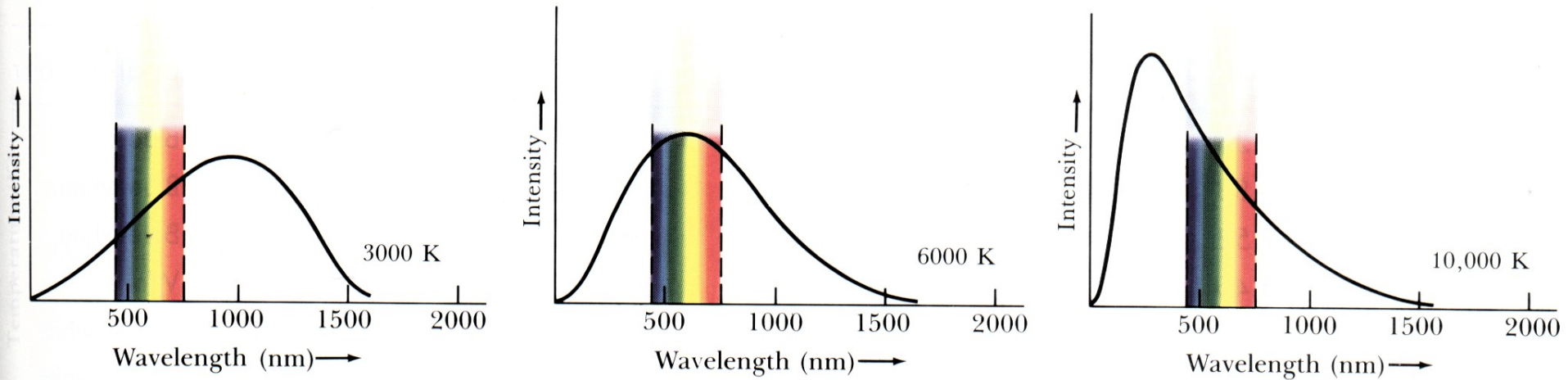
- Bestimmung aus Erdbahn und Gravitationsgesetz

$$\frac{a_{Erde}^3}{T_{Erde}^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_{Sonne} + M_{Erde})$$

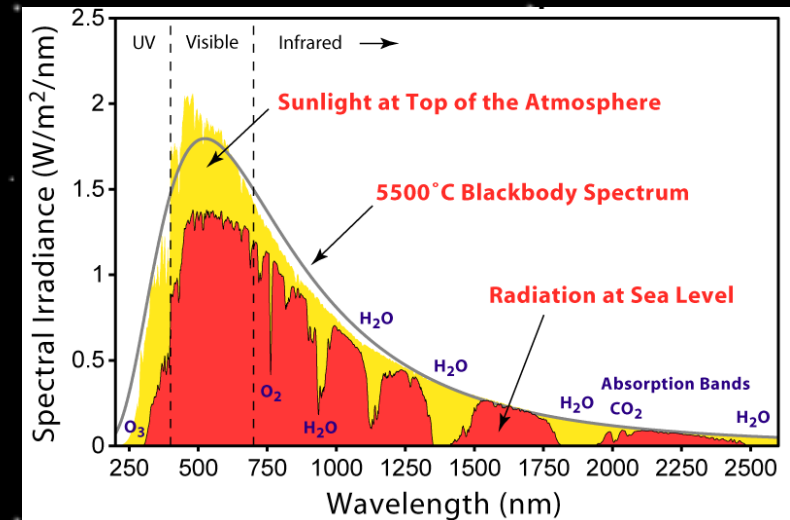
- $2 \times 10^{30} \text{ kg}$  = 700  $M_{\text{alle Planeten}}$   
= 1000  $M_{\text{J}}$   
= 333000  $M_{\oplus}$
- Eindeutiges Gravitationszentrum des Sonnensystems
- $\Rightarrow$  Schwerebeschleunigung an der Oberfläche  
 $274 \text{ m/s}^2 = 28 g_{\oplus}$

# Parameter

## 4. Oberflächentemperatur



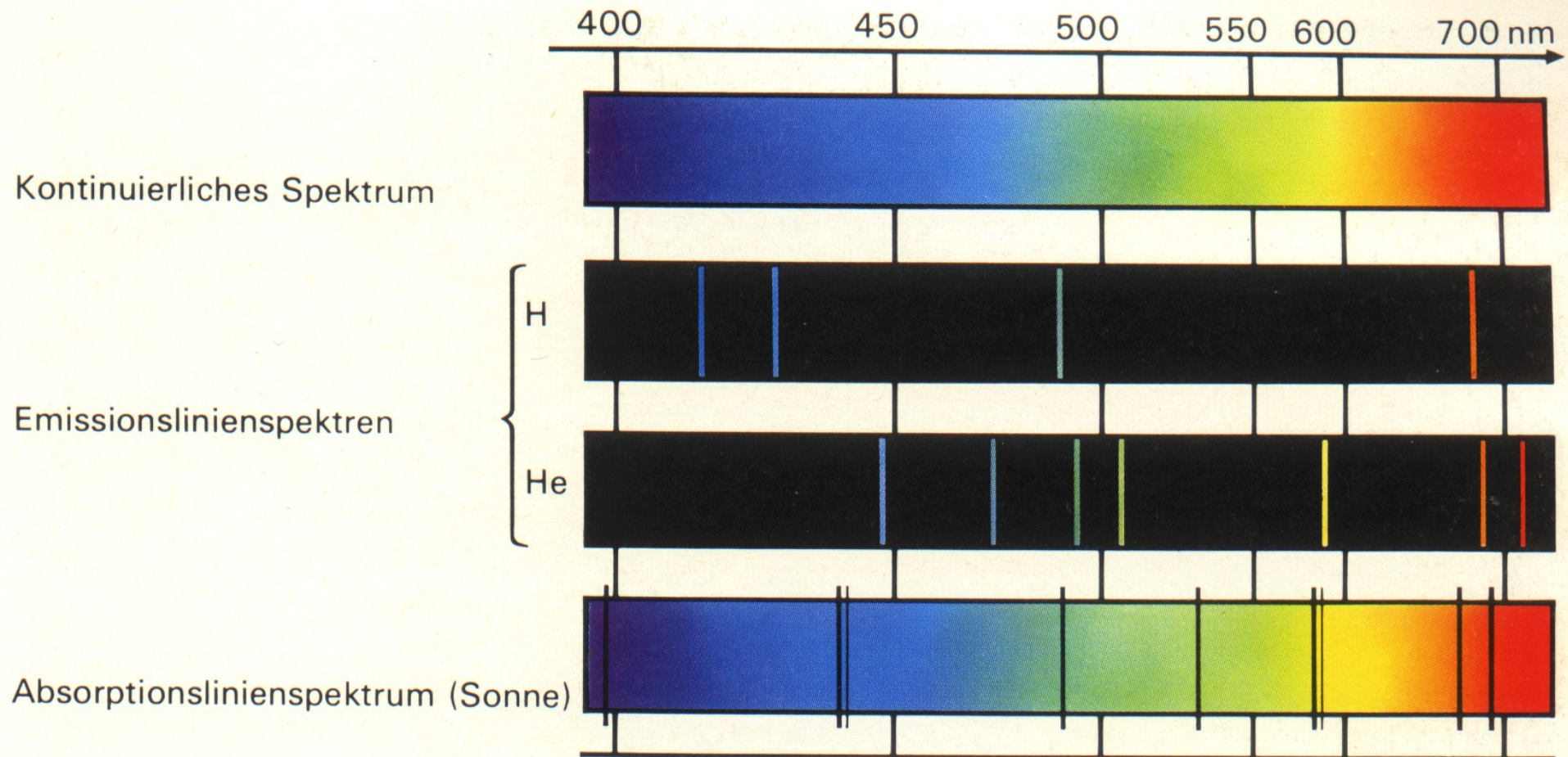
- Bestimmung aus dem kontinuierlichen Spektrum
- **5780 K** = 5500 °C

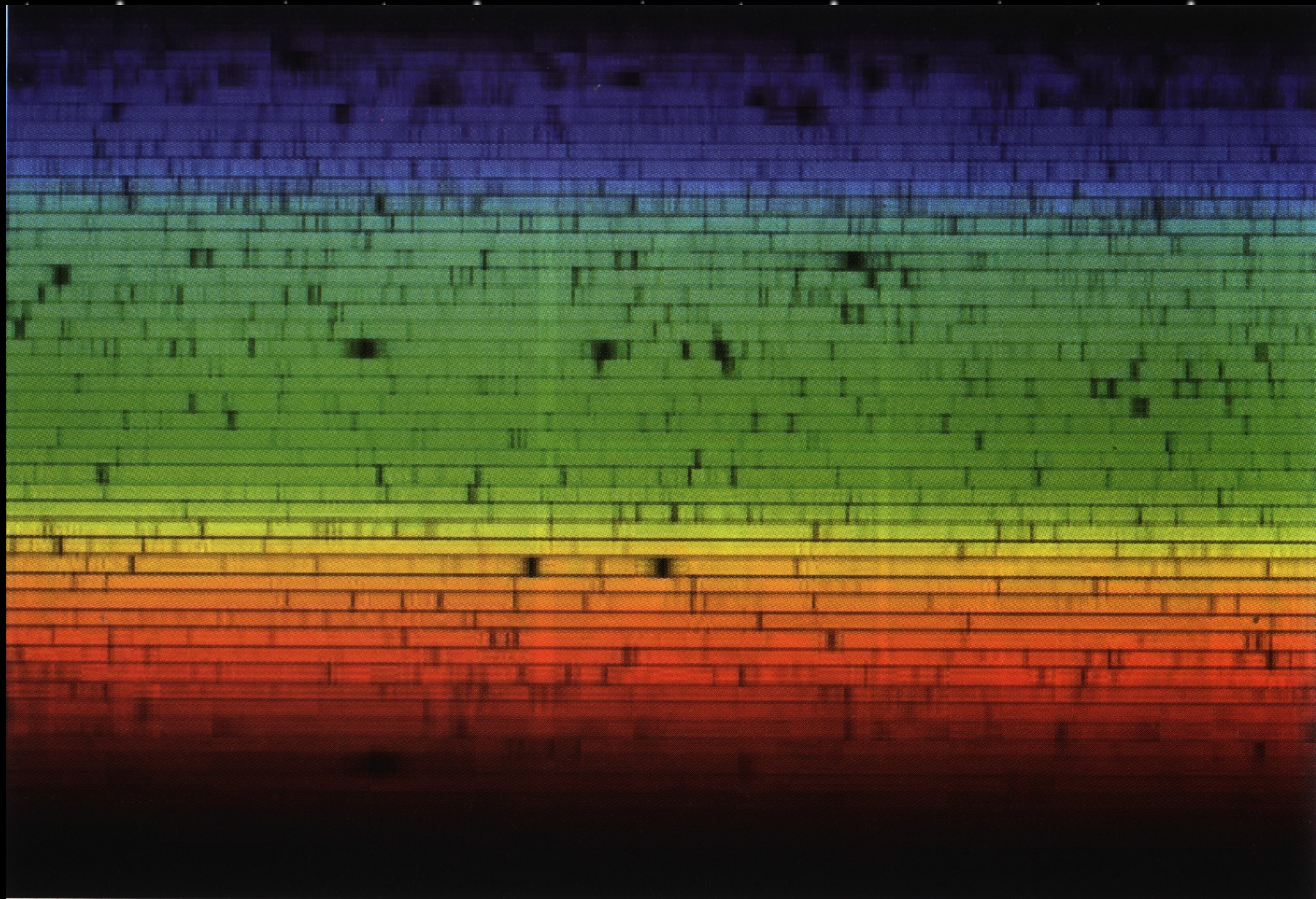


# Parameter

## 5. Zusammensetzung

- Bestimmung aus beobachtetem Linienspektrum



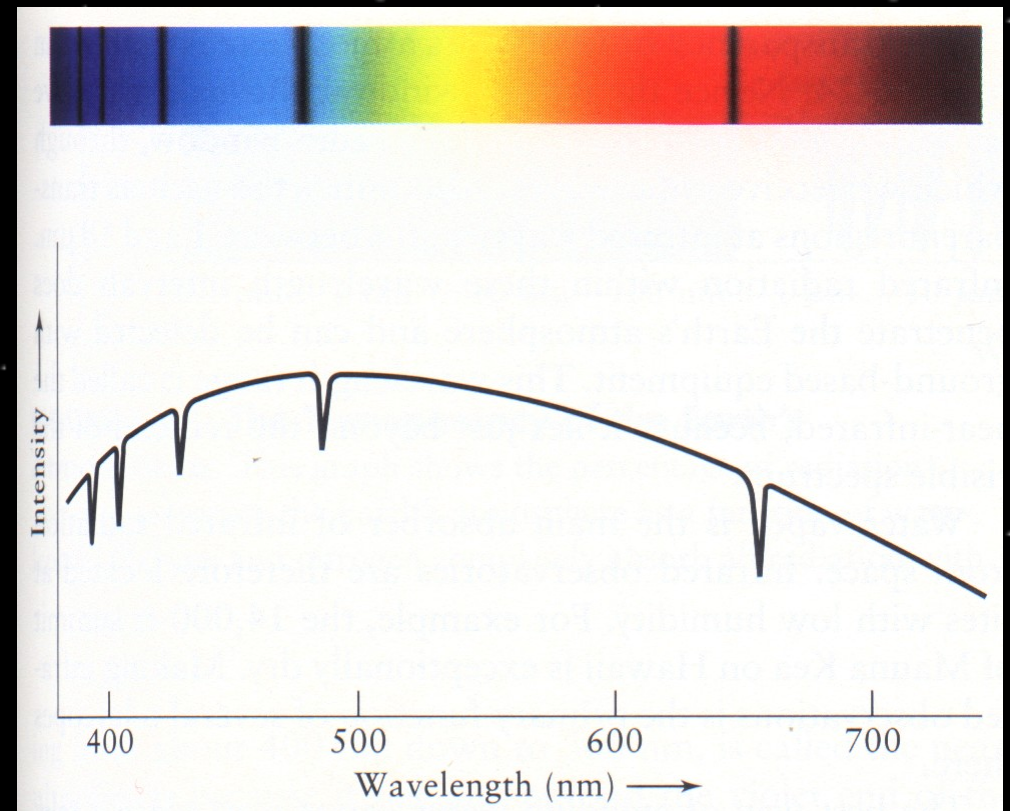


- Hochaufgelöstes volles Sonnenspektrum

# Parameter

## 5. Zusammensetzung

- Bestimmung aus beobachtetem Linienspektrum
- **74.8% H**
- **23.8% He**
- **1.4% "Metalle"**
  - **O (0.8%)**
  - **C (0.3%)**
  - **Ne (0.1%)**
  - **Fe (0.1%)**





# Parameter

## 6. Leuchtkraft

- Bestimmung aus der Solarkonstanten
  - Strahlungsleistung auf der Erde
  - Senkrechter Einfall
  - Außerhalb der Atmosphäre
  - $1.36 \text{ kW/m}^2$ 
    - Nicht vollständig für Energiegewinnung nutzbar
- Isotrope Abstrahlung über Kugel mit 1AU Radius
- **$3.8 \times 10^{26} \text{ W}$**

# Energieerzeugung

- Kernfusion
- Verbrennung von Wasserstoff zu Helium

Proton-proton fusion chain process

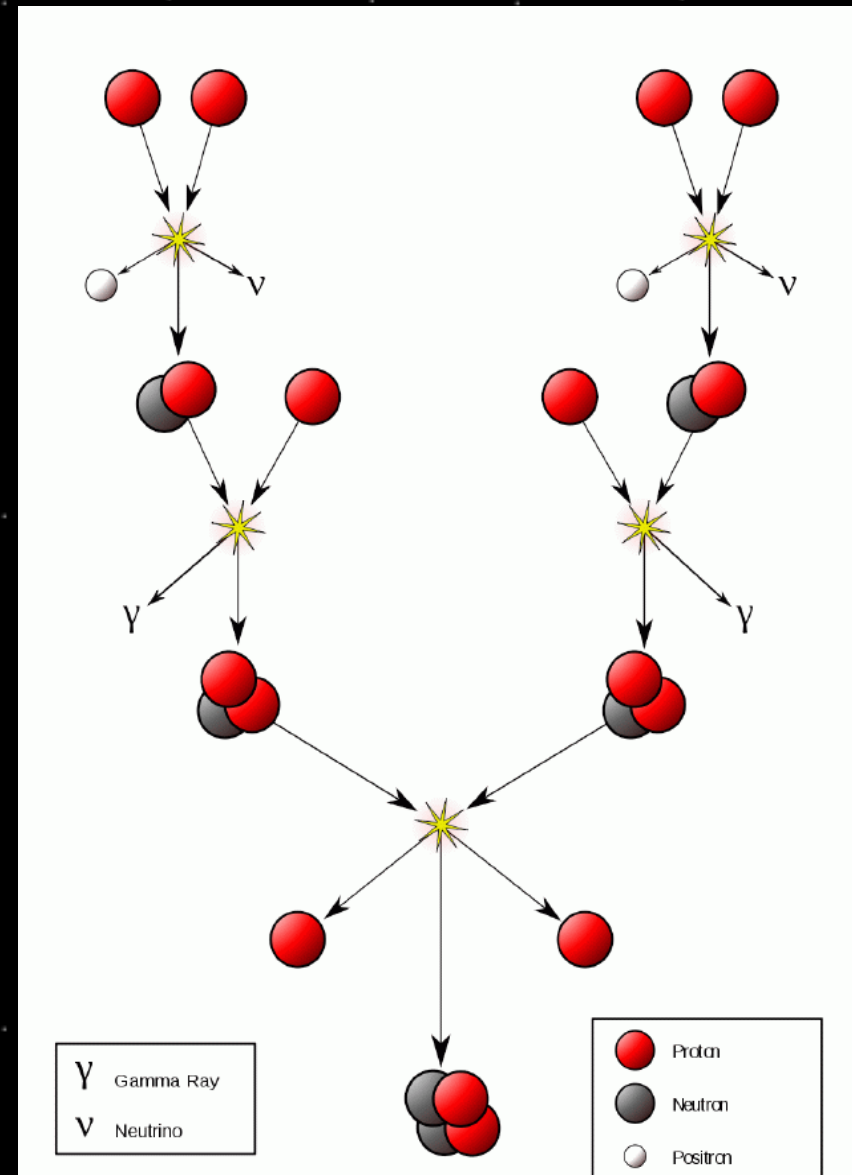


1st step: In two separate reactions, 2 protons in each reaction fuse

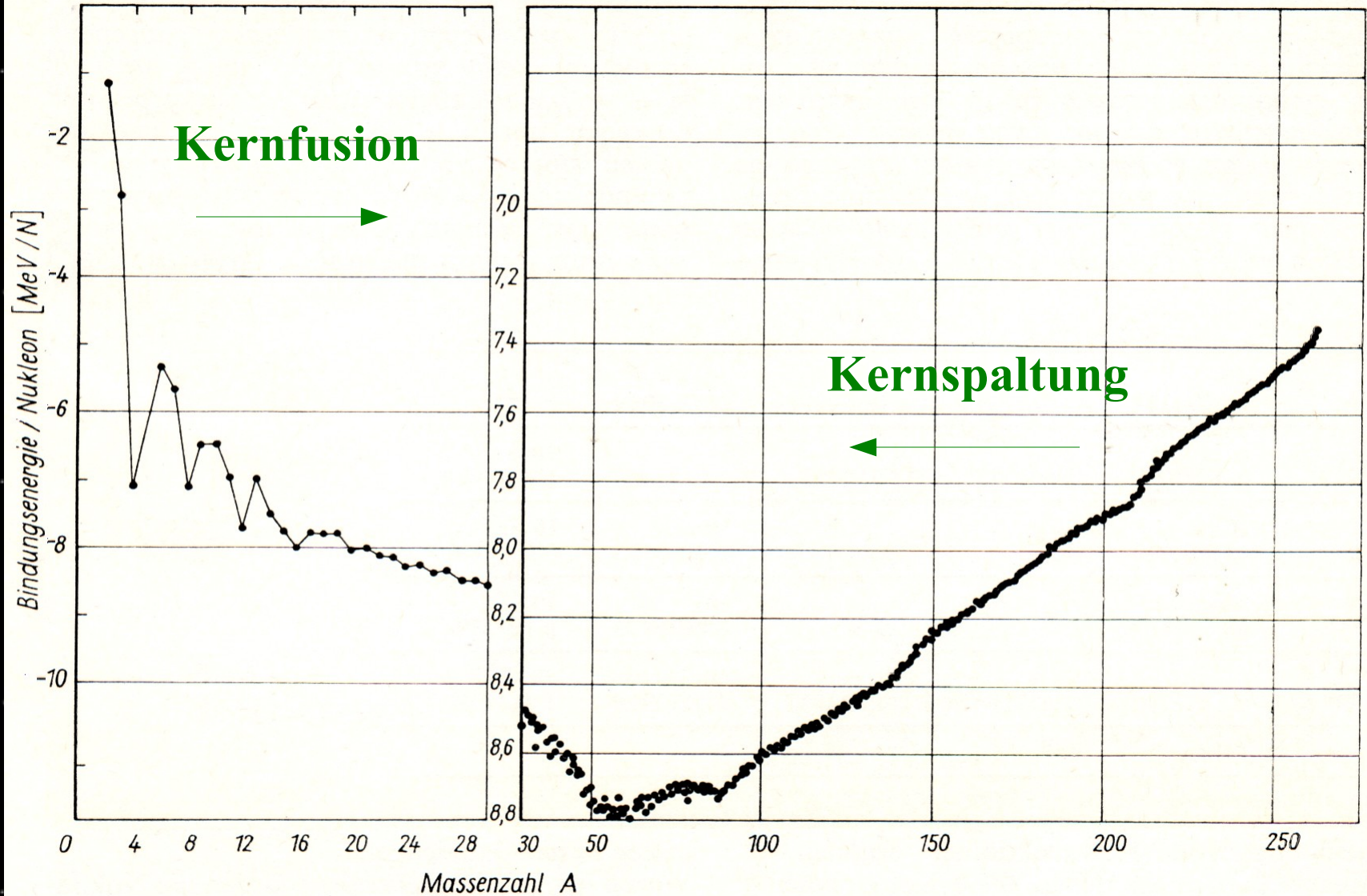
# Energieerzeugung

- Kernfusion
- Verbrennung von Wasserstoff zu Helium
- Prinzip:  
Umwandlung von Materie in Energie

$$E = m c^2$$



# Energieerzeugung

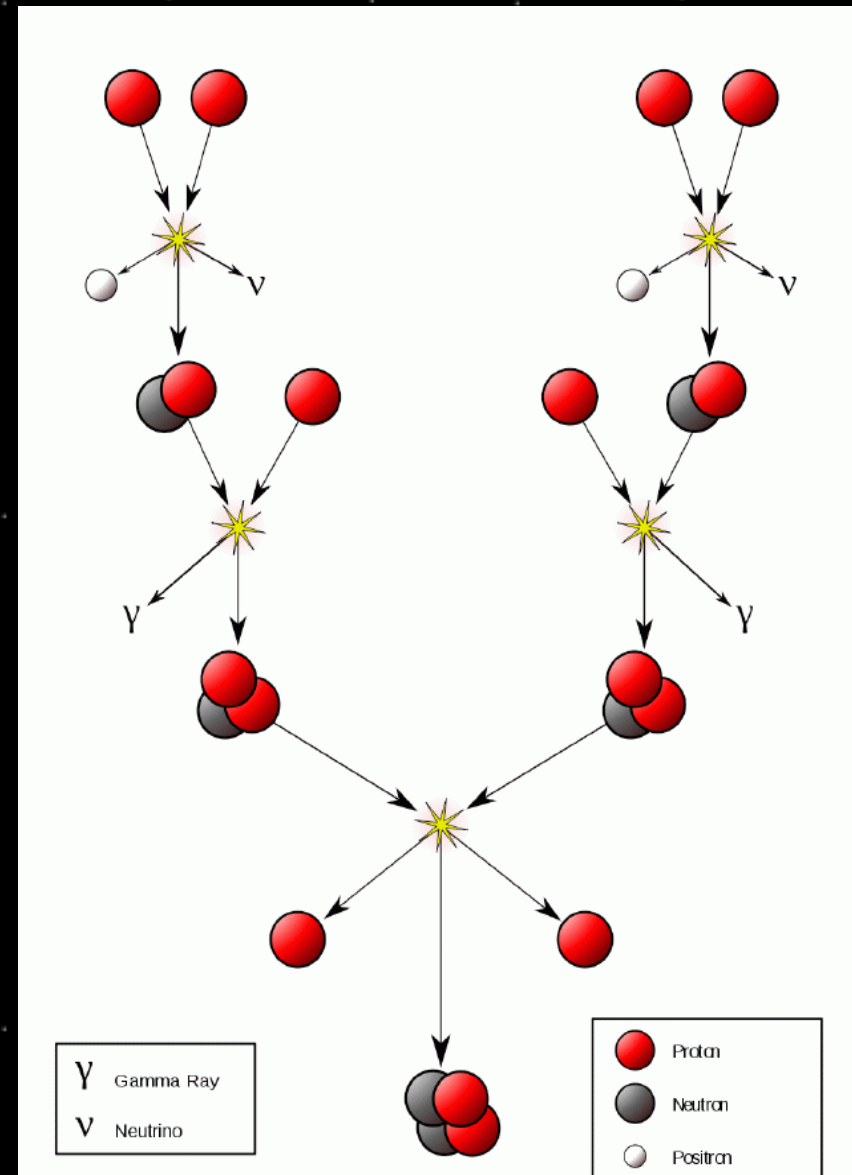


# Energieerzeugung

- Energiefreisetzung bei Fusion  
 $4 \text{ H} \rightarrow \text{He}$
- $4.2 \times 10^{-12} \text{ Ws/He-Kern}$
- Vgl. Gesamtleuchtkraft  $3.8 \times 10^{26} \text{ W}$   
 $\Rightarrow 10^{38} \text{ He-Kerne pro Sekunde}$
- Verbrauch von  $2 \times 10^{19} \text{ kg H pro Jahr}$   
 $\Rightarrow \text{H reicht für 80 Mrd. Jahre}$   
(praktisch nur 10 Mrd. Jahre)

# Nachweis der Fusion

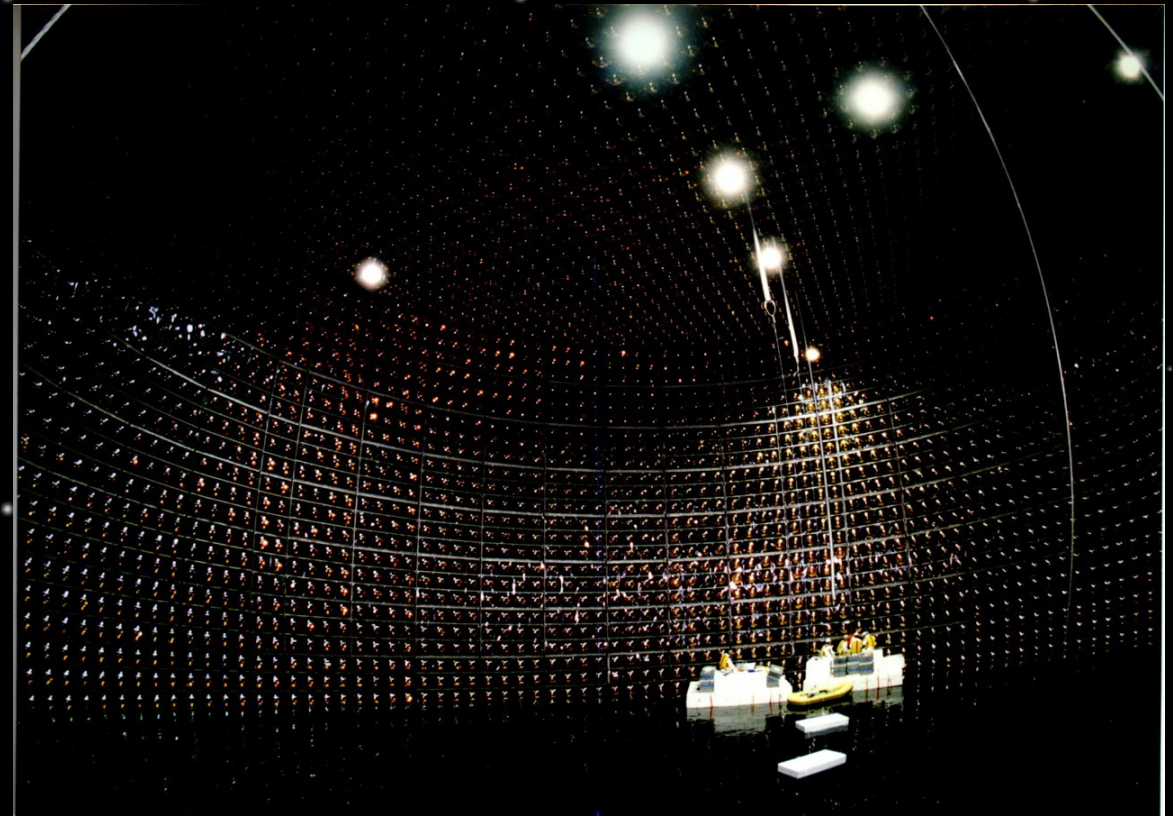
- Neutrinos als Nebenprodukt der Fusion
- Neutrinos durchdringen "alles"
- Verlassen die Sonne direkt
- Sind schwer nachzuweisen



# Neutrinooteleskope

- Unterirdische Teilchendetektoren
- Schauen in der Nacht nach "unten"

Super-  
Kamiokande-  
Neutrino-  
Detektor



# Das Neutrino-Problem

- Die Detektoren messen nur  $1/3$  der erwarteten Neutrinos
- Erklärung: „Neutrino-Oszillationen“
  - Die Neutrinos wandeln sich in „unsichtbare“ Tau- oder Muon-Neutrinos um
  - Impliziert Ruhemasse der Neutrinos  
=> **Revolution der Physik**



# Innerer Aufbau

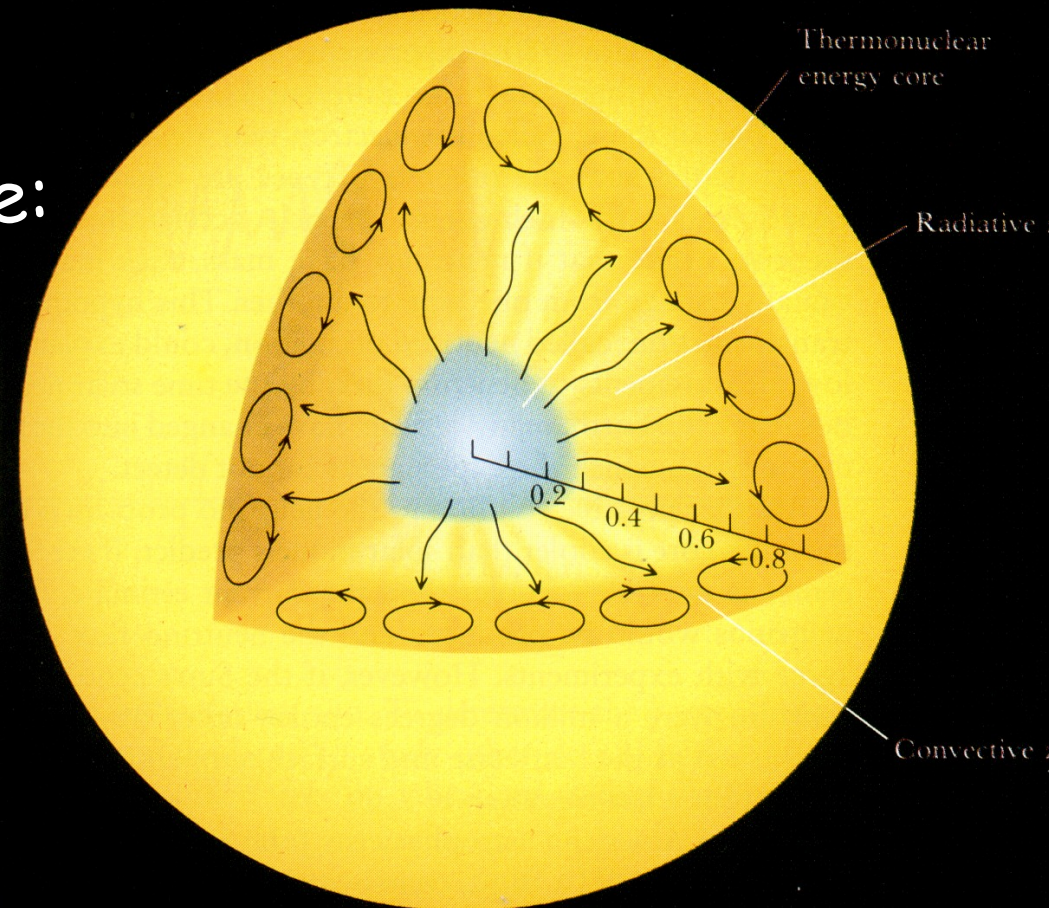
• Bedingungen für Kernfusion in der Sonne:

- Temperatur: 15 Mio K
- Dichte:  $100 \text{ g/cm}^3$

• Vergleiche Oberfläche:

- 5770 K
- $1.4 \text{ g/cm}^3$

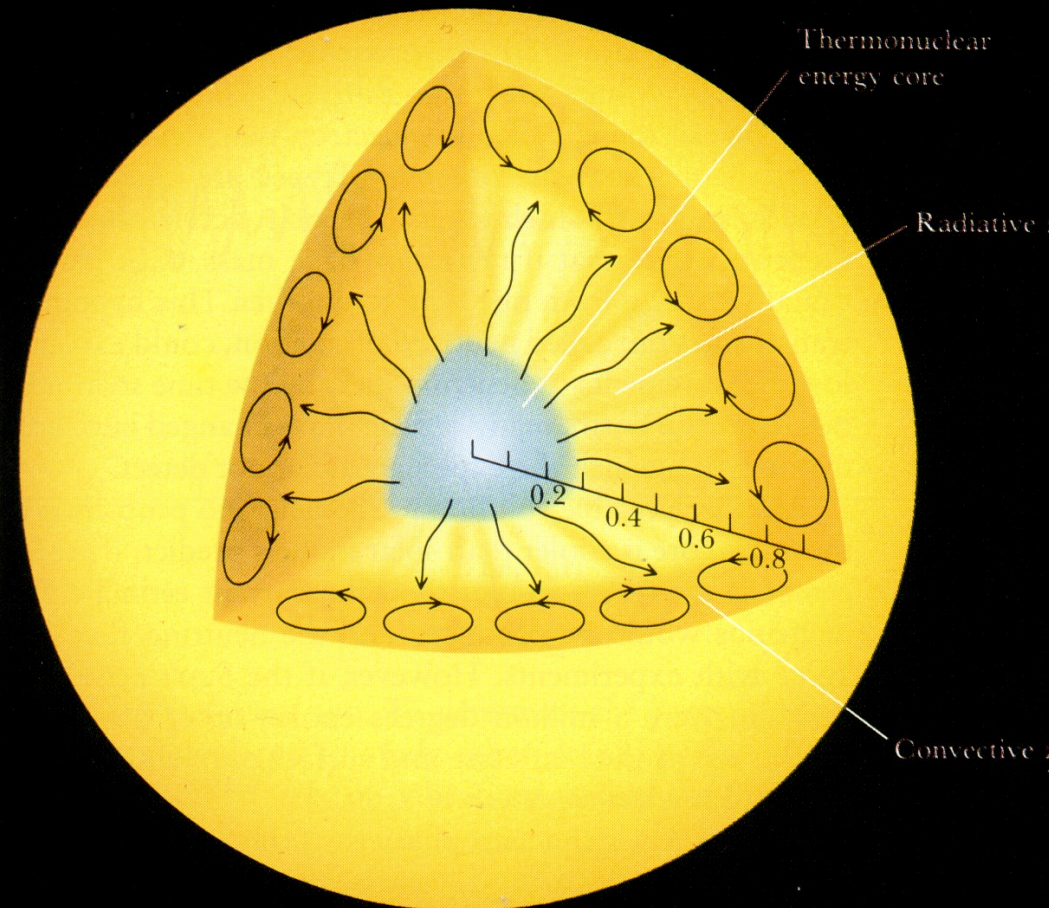
⇒ Schalenstruktur



# Innerer Aufbau

## Physikalische Gesetze für die Stellare Struktur:

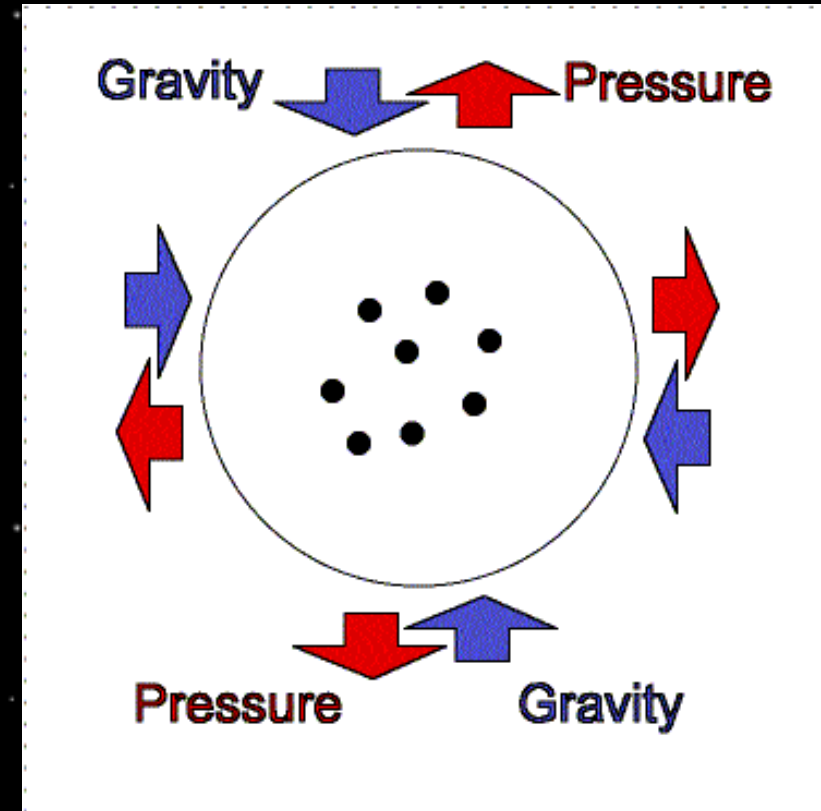
1. Hydrostatisches Gleichgewicht
2. Energietransport
3. Massenerhaltung
4. Energieerhaltung



# Hydrostatisches Gleichgewicht

• Gleichgewicht zwischen Gravitation und thermischem Druck:

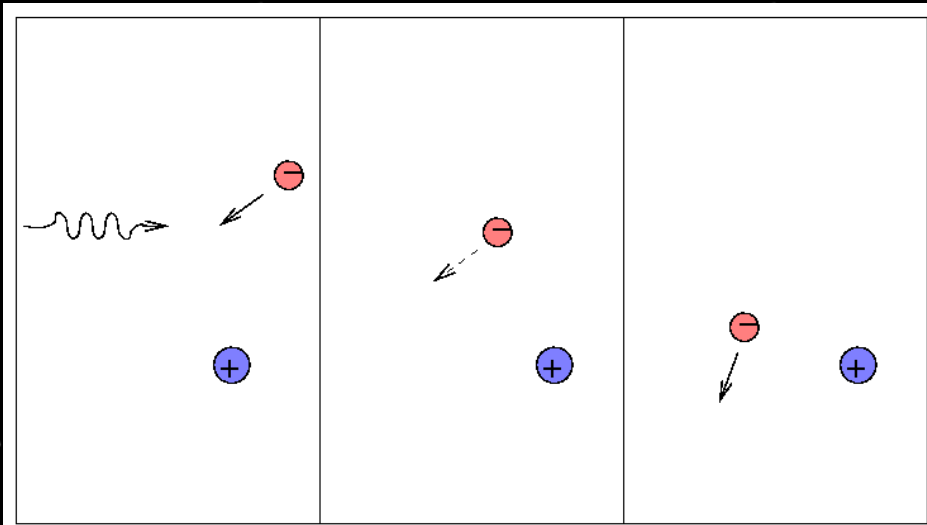
- Wenn der thermische Druck zunimmt expandiert der Stern
- Durch die Expansion sinkt die Temperatur
- Die Schwerkraft führt zu erneuter Kontraktion.



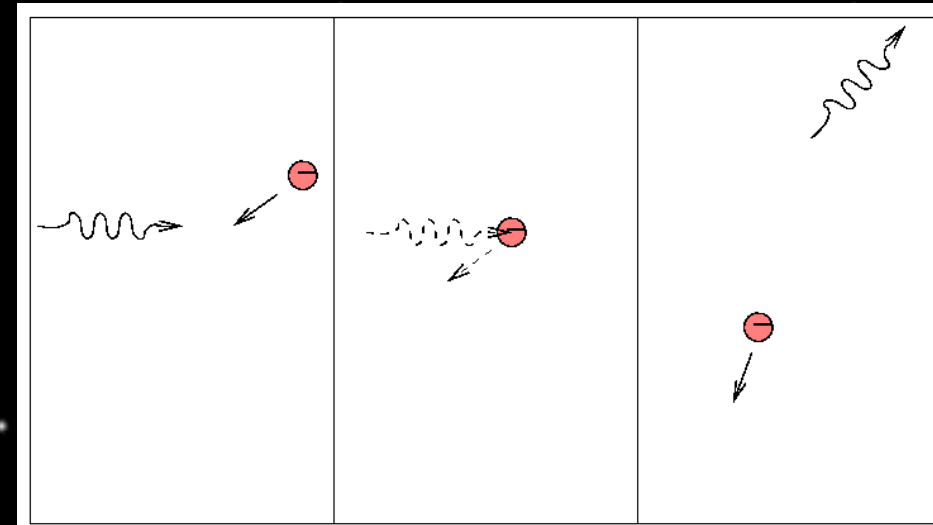
• Gilt nicht nur für den Gesamtstern, sondern für jede innere Schale

# Energietransport durch Strahlung

- Photonen bewegen sich durch Plasma mit Elektronen und Kernrümpfen
- Können jederzeit wieder absorbiert werden
- Werden schnell wieder emittiert



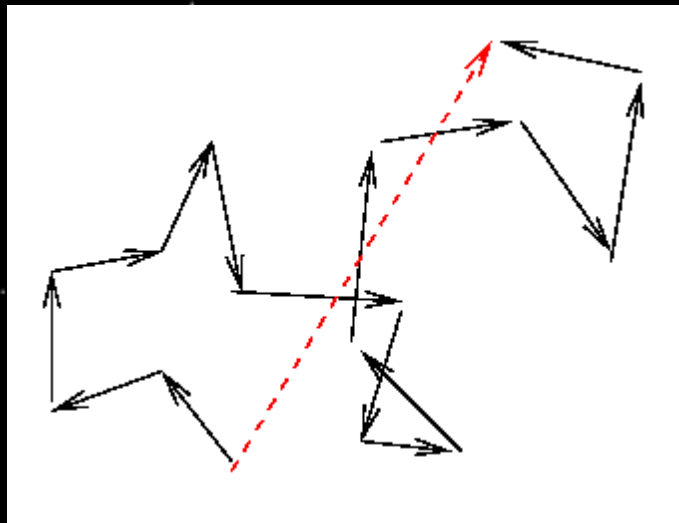
Frei-frei-Absorption



Thompson-Streuung

# Energietransport durch Strahlung

- Mittlere freie Weglänge  $l$  : **wenige cm**
- Random-walk durch die Sonne



$$d = l \sqrt{N}$$

- $10^5$  Jahre, bis das Photon die Oberfläche erreicht hat

# Energietransport durch Strahlung

- Resultierender Abfall der Temperatur  $T$ :

$$\frac{dT}{dr} = - \frac{3}{64 \pi \sigma} \frac{L_r}{r^2 T^3}$$

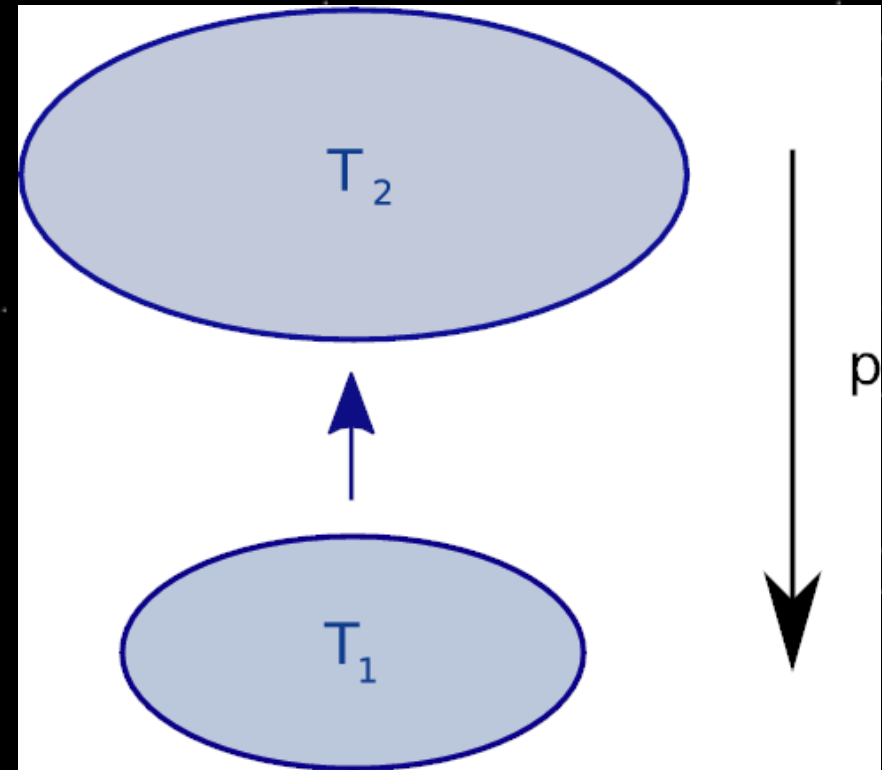
- $r$  - betrachterer Radius
  - $L_r$  - Leuchtkraft innderhalb von  $r$
  - $\sigma$  - Stefan-Boltzmann-Konstante
- Sehr steil im Inneren für kleine  $r$

# Energietransport durch Konvektion

- Aufsteigen von heißen Blasen
- Erfordert Instabilität:

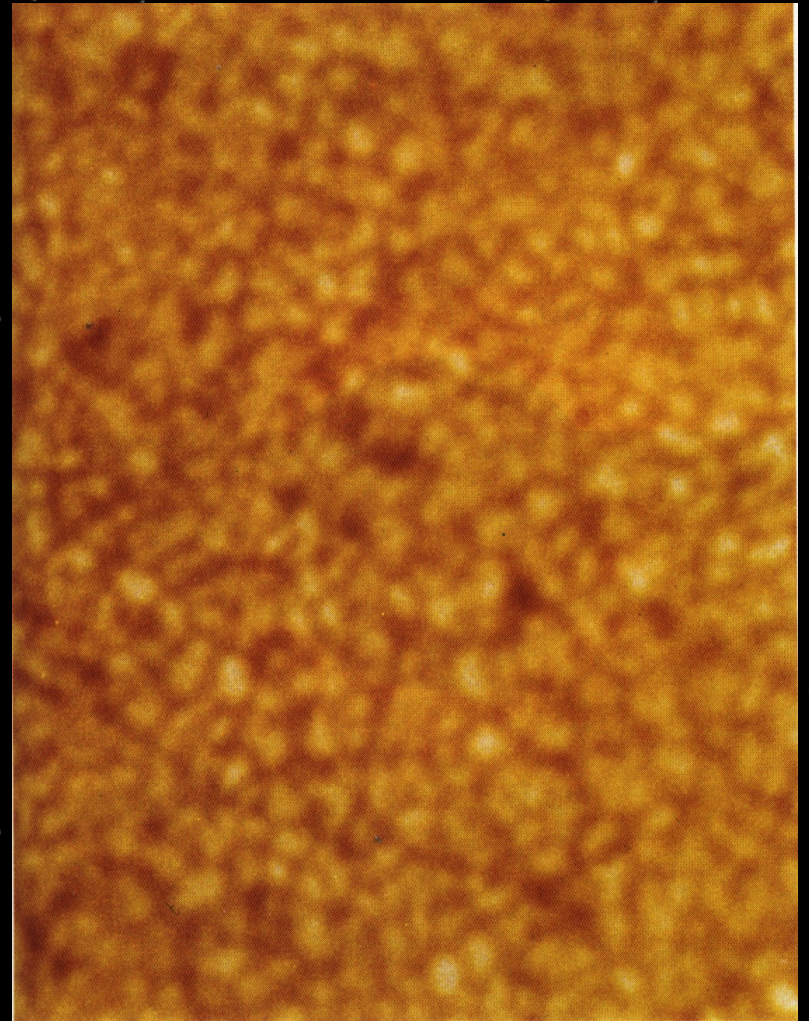
$$\left(\frac{dT}{dr}\right)_{ad} > \left(\frac{dT}{dr}\right)_{env}$$

- $(dT/dr)_{ad}$  = adiabatischer Temperaturgradient  
produziert durch Abkühlung  
aufsteigender Blasen
- $(dT/dr)_{env}$  = Umgebungsgradient



# Energietransport durch Konvektion

- Instabilität produziert Zellen von aufsteigendem und herabsinkendem Gas
- Dominiert Energie-transport im oberen Drittel der Struktur
- Sichtbar als Granulen an der Oberfläche



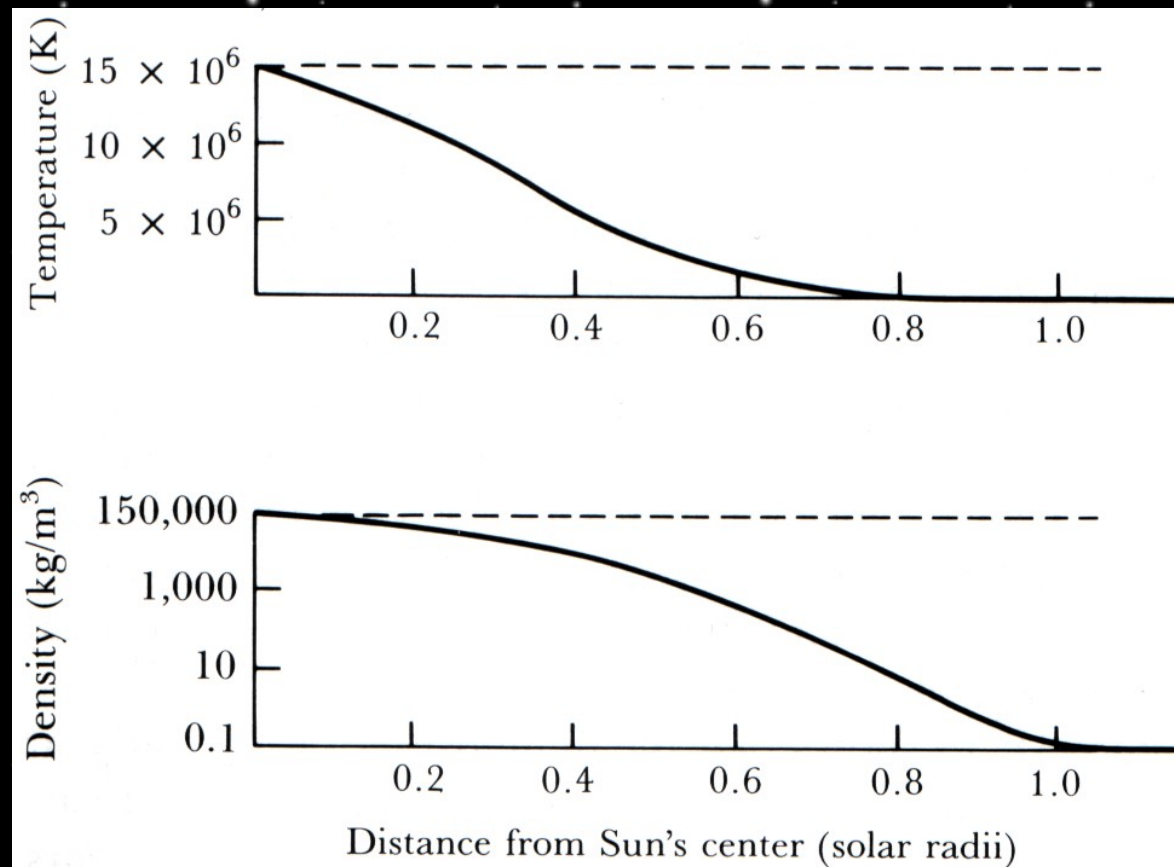


# Innerer Aufbau

- Steiler Temperaturabfall  
=> 3 Zonen (jeweils etwa ein Drittel des Radius):

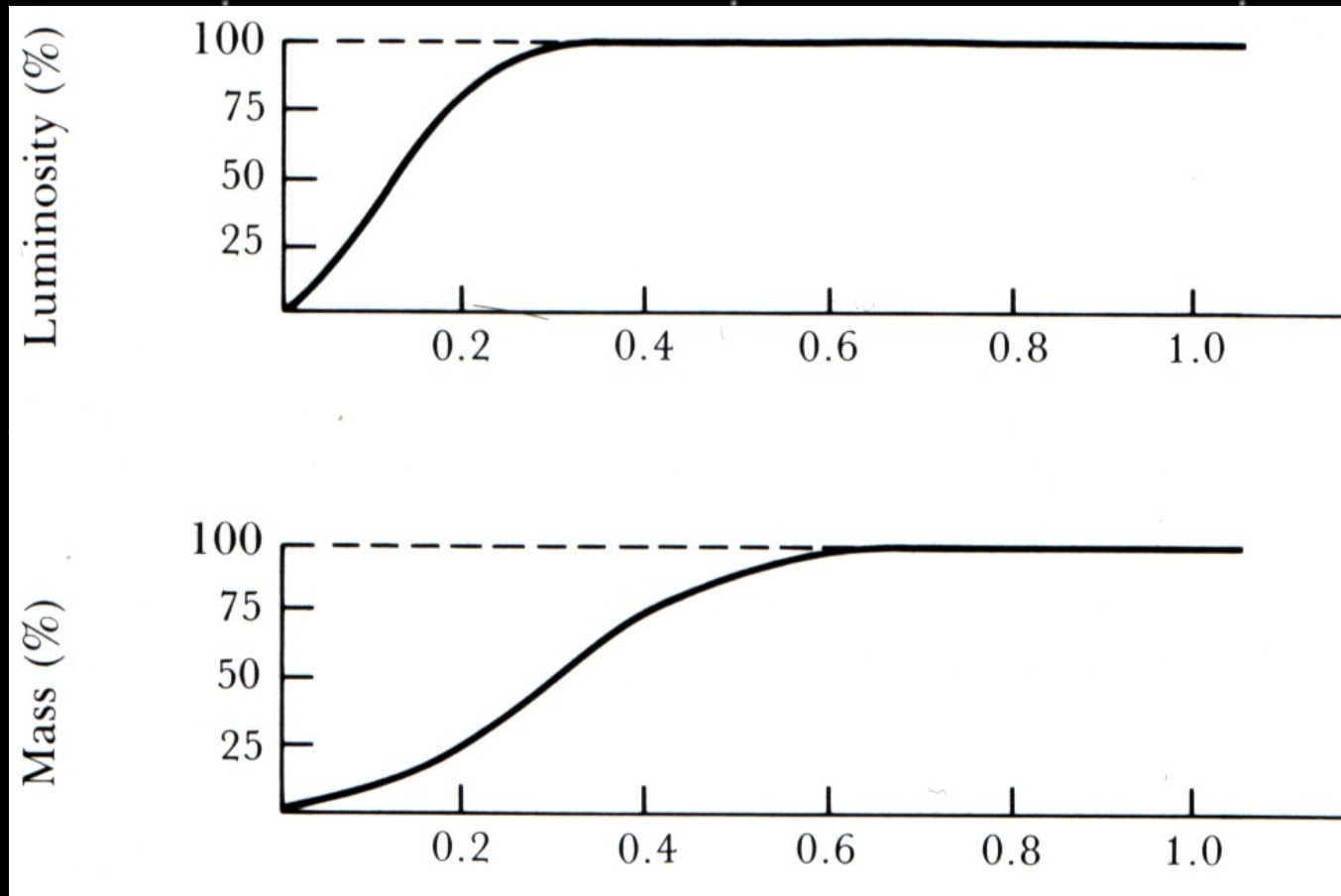
- Fusionszone
- Strahlungszone
- Konvektionszone

- Langsamere Dichteabfall



# Innerer Aufbau

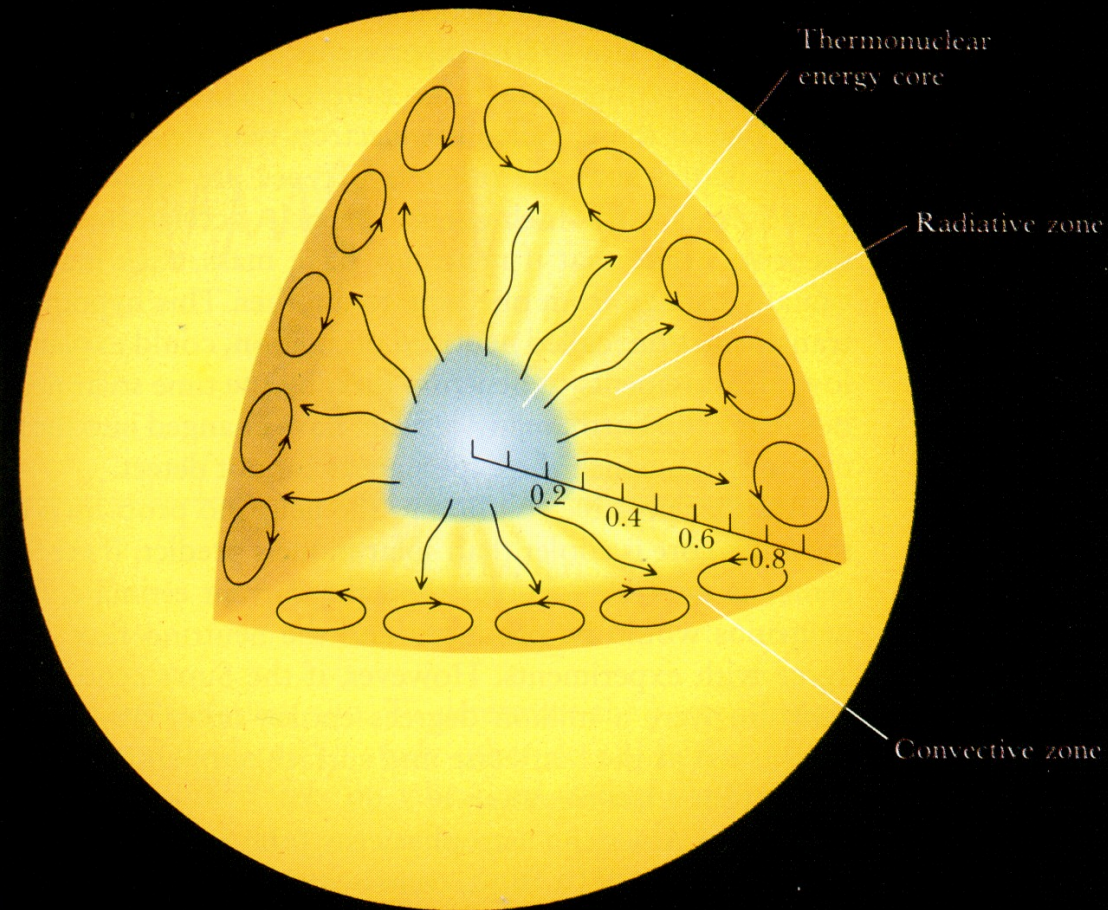
- 96% der Masse in  $0.5 R_{\odot}$
- Fusion/Energieerzeugung nur im inneren Drittel



# Innerer Aufbau

## Überprüfung durch Helioseismologie

- Ausbreitung von Dichtewellen in Sonne
- Die Sonne bebt immer
- Schwingungen mit Perioden von 5min, 3min, und 2.5min.



# Die Sonnenatmosphäre

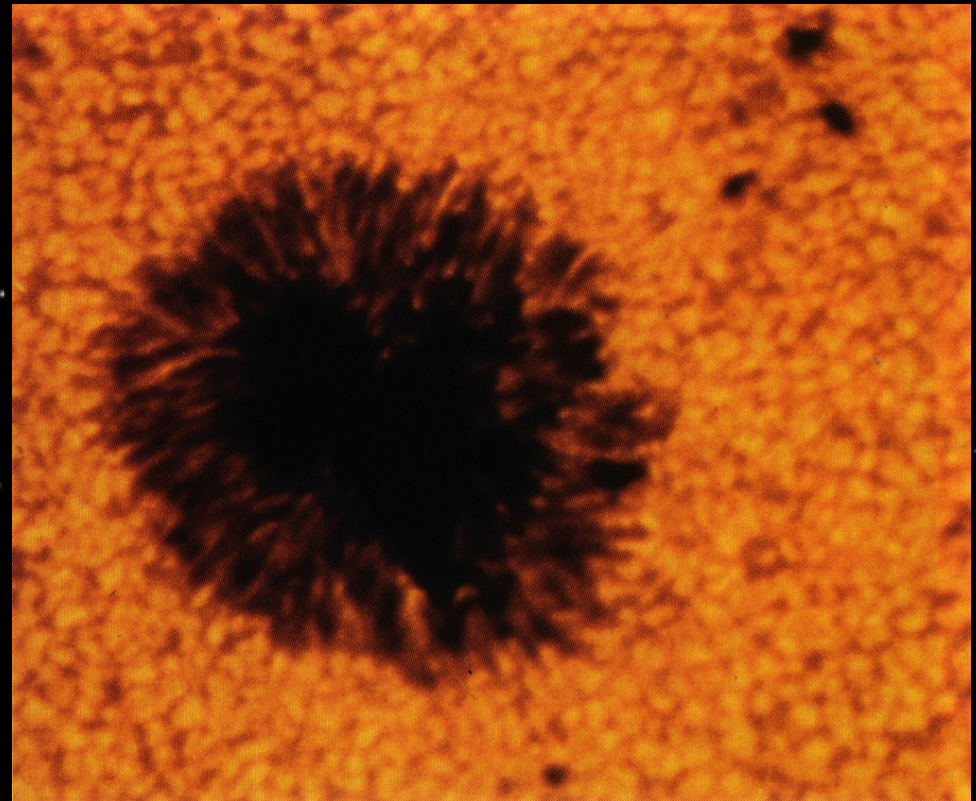
## • Die Photosphäre

- Quelle der sichtbaren Photonen
- Untere Atmosphärenschicht
- Temperaturgradient
  - Randverdunklung
- Veränderlich
  - **Sonnenflecken**



# Sonnenflecken

- Temperatur rund 1000K geringer als Umgebung
- Lebenszeit:
  - Tage - Monate
- Erlauben Messung der Rotation
  - **differentiell:**
  - 25d am Äquator
  - 30d am Pol
  - Mittel: 26d  
(synodisch 27d)

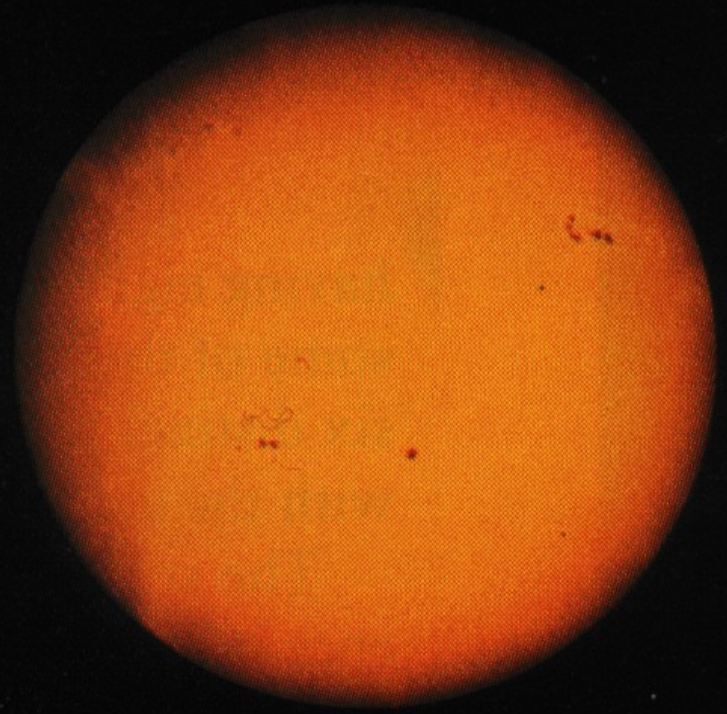
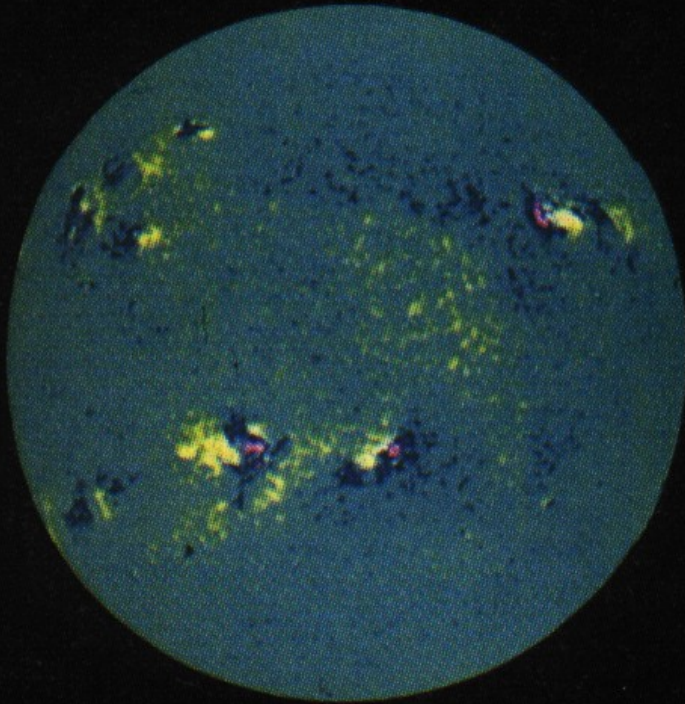


• SOHO:  
30.10.2009



# Sonnenflecken

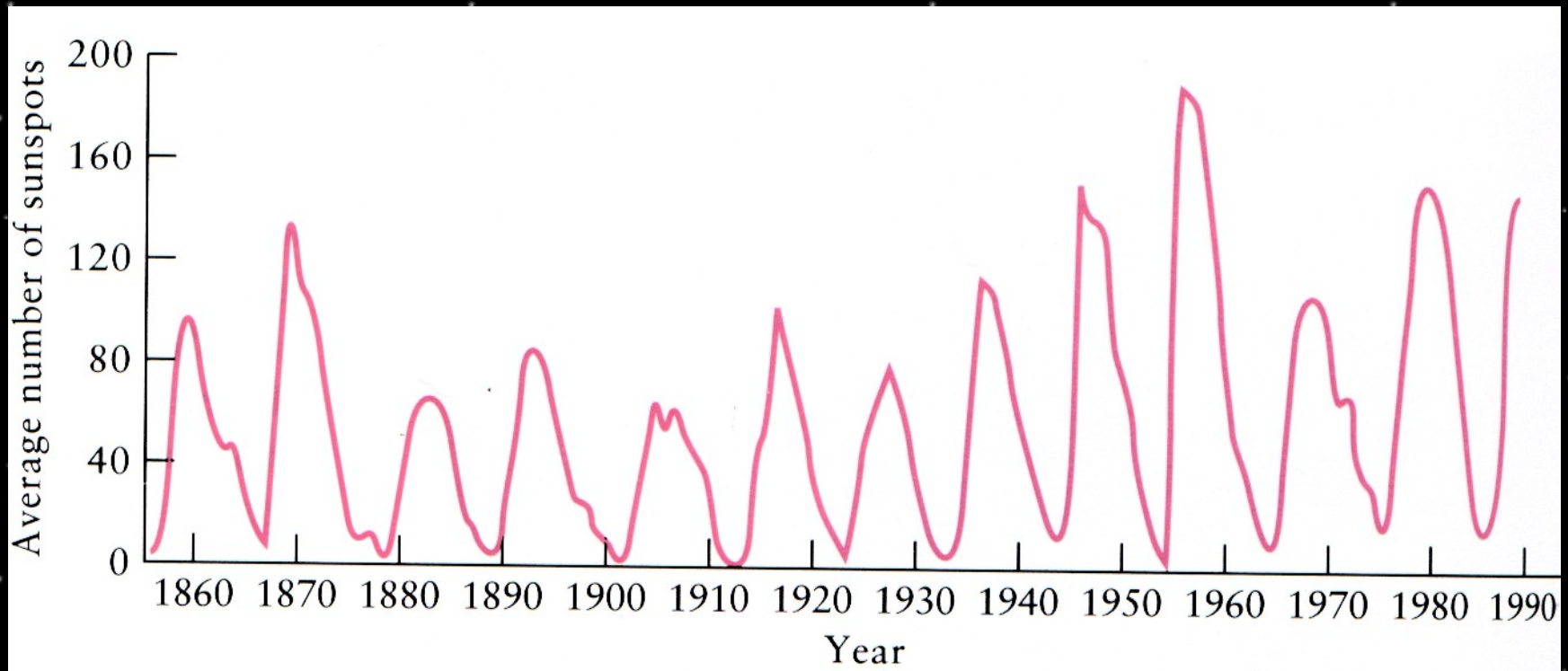
- Gaswirbel um magnetische Pole



Messung des Magnetfeldes durch Zeeman-Splitting von Linien

# Sonnenflecken

- Ausdruck von Sonnenaktivität
  - 11-Jahres-Zyklus (22a Periode)





# Die Chromosphäre

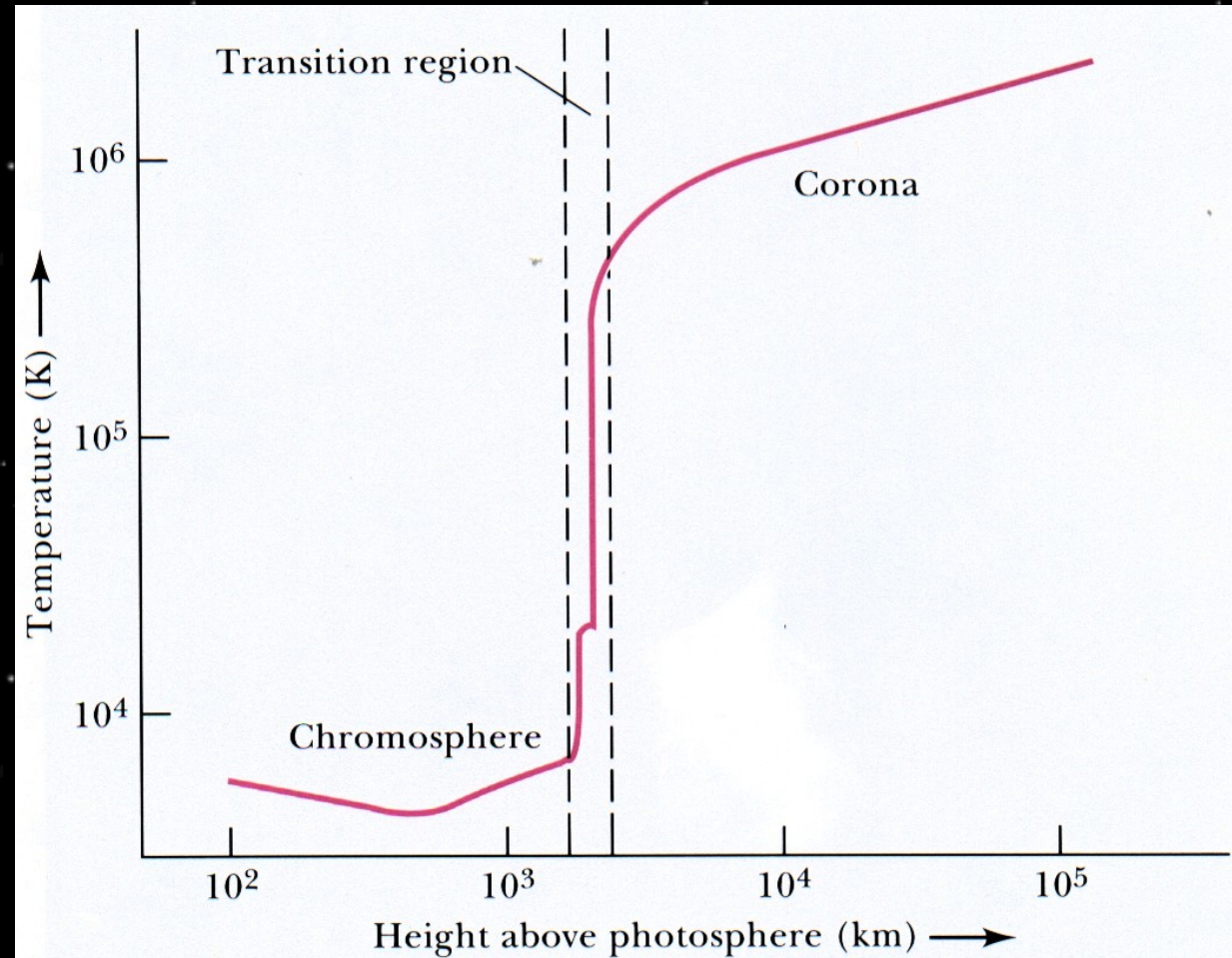
- Nur sichtbar bei Sonnenfinsternissen

- Dicke:

  - ca. 5000 km

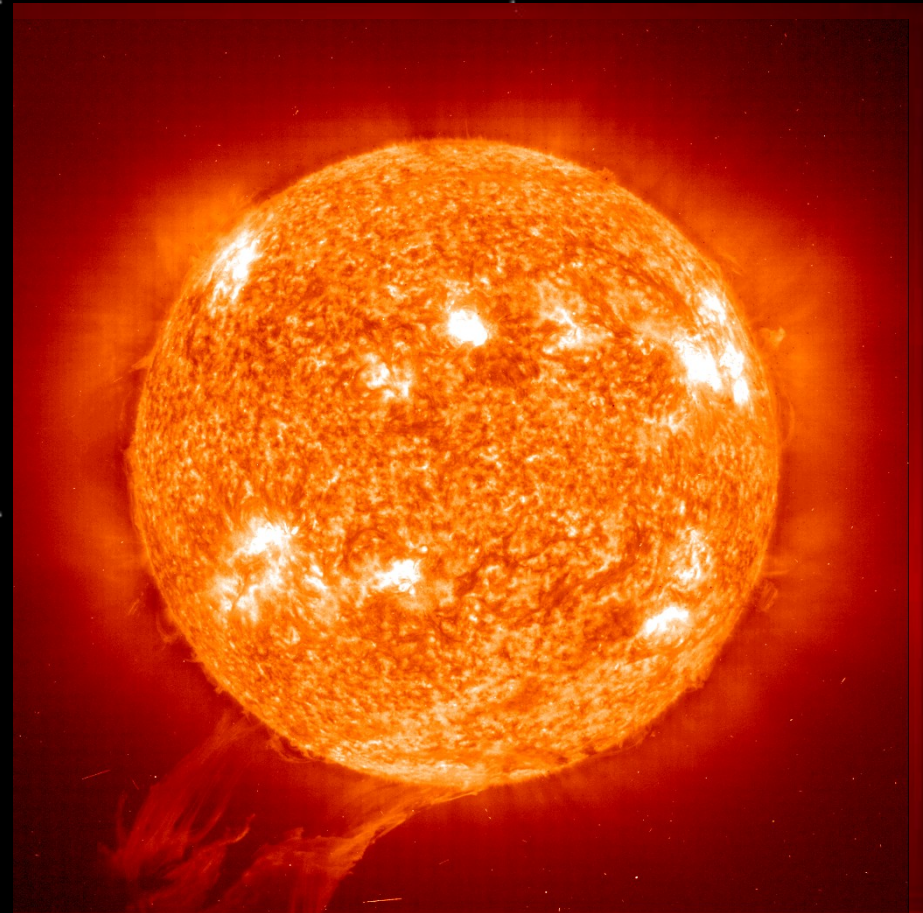
- Temperatur

  - bis  $10^5$  K



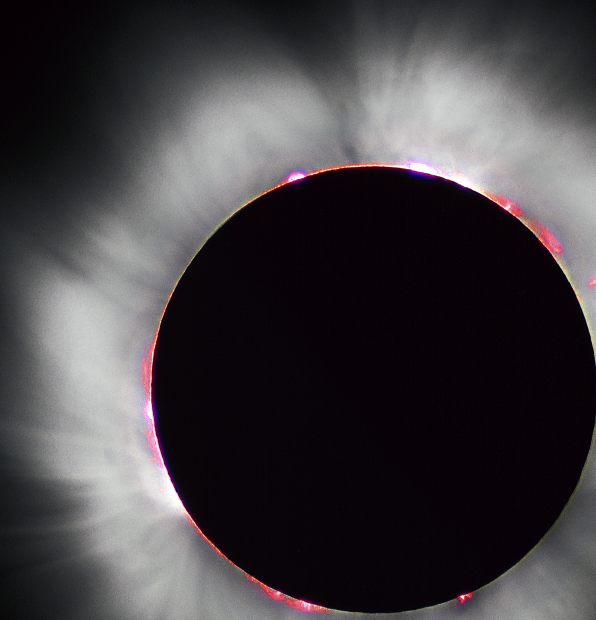
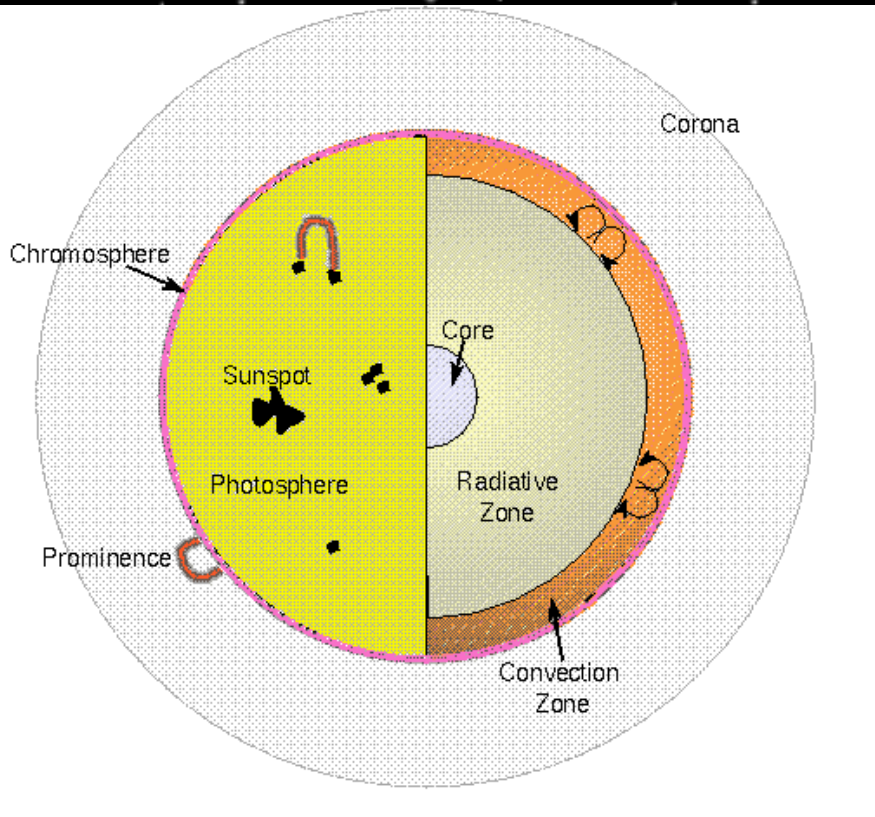
# Die Chromosphäre

- Ursprung von Emissionslinien
- Sonnenaktivität:
  - Protuberanzen
  - Eruptionen



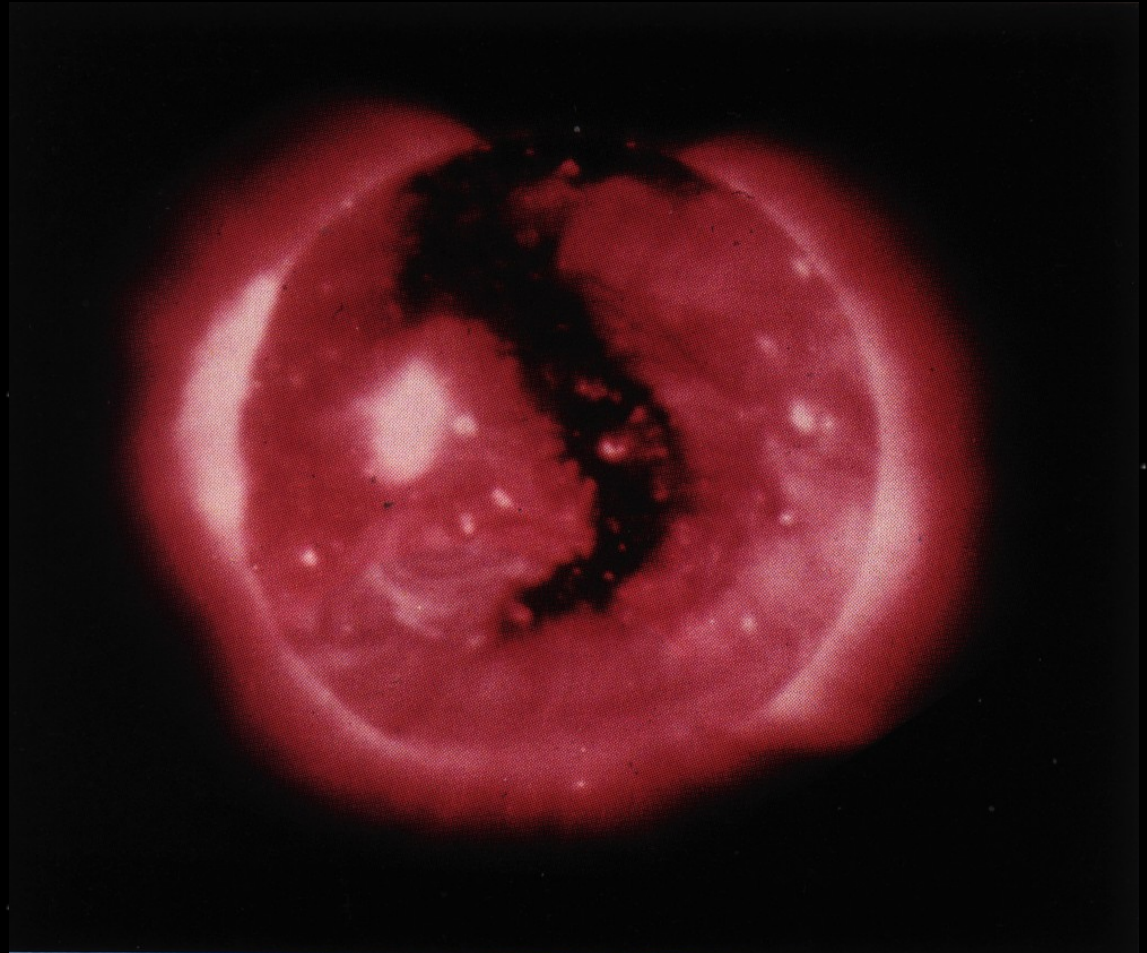
# Die Korona

- Äußerste Atmosphärenschiicht
- Erstreckt sich in den interplanetaren Raum



# Die Korona

- Gastemperatur bis 1 Mio K
- Aber Helligkeit nur  $10^{-6}$  der Photosphärenhelligkeit
- Direkt sichtbar im Röntgenlicht

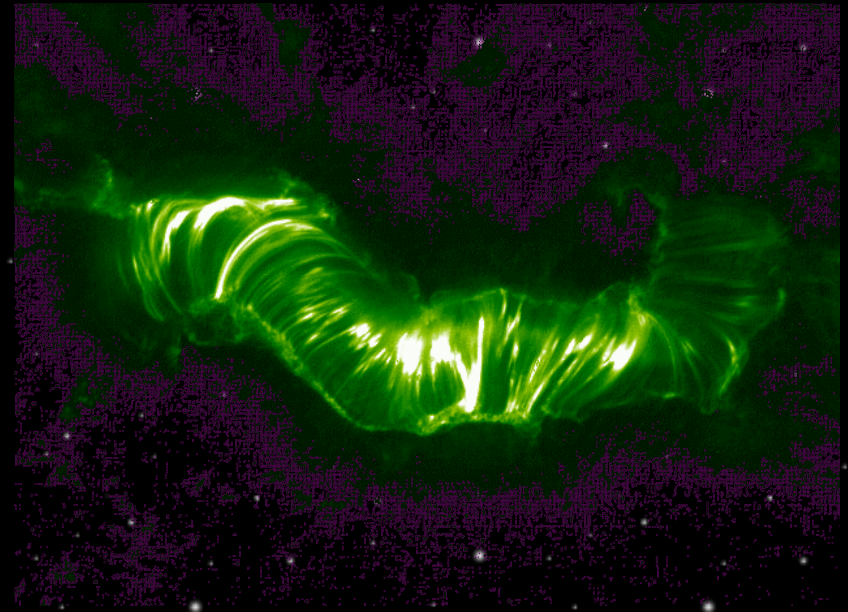


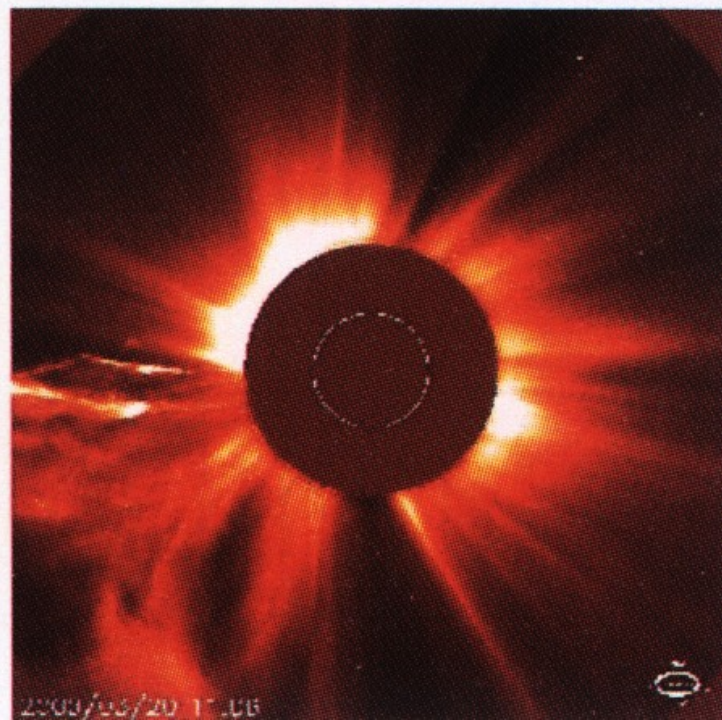
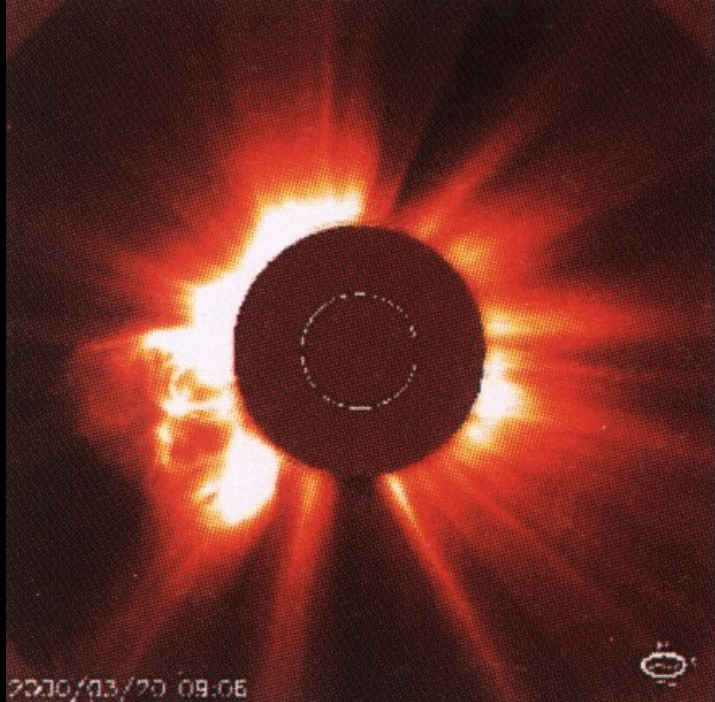
# Die Korona

- Form veränderlich je nach Sonnenaktivität
- Flares - Koronale Massenauswürfe

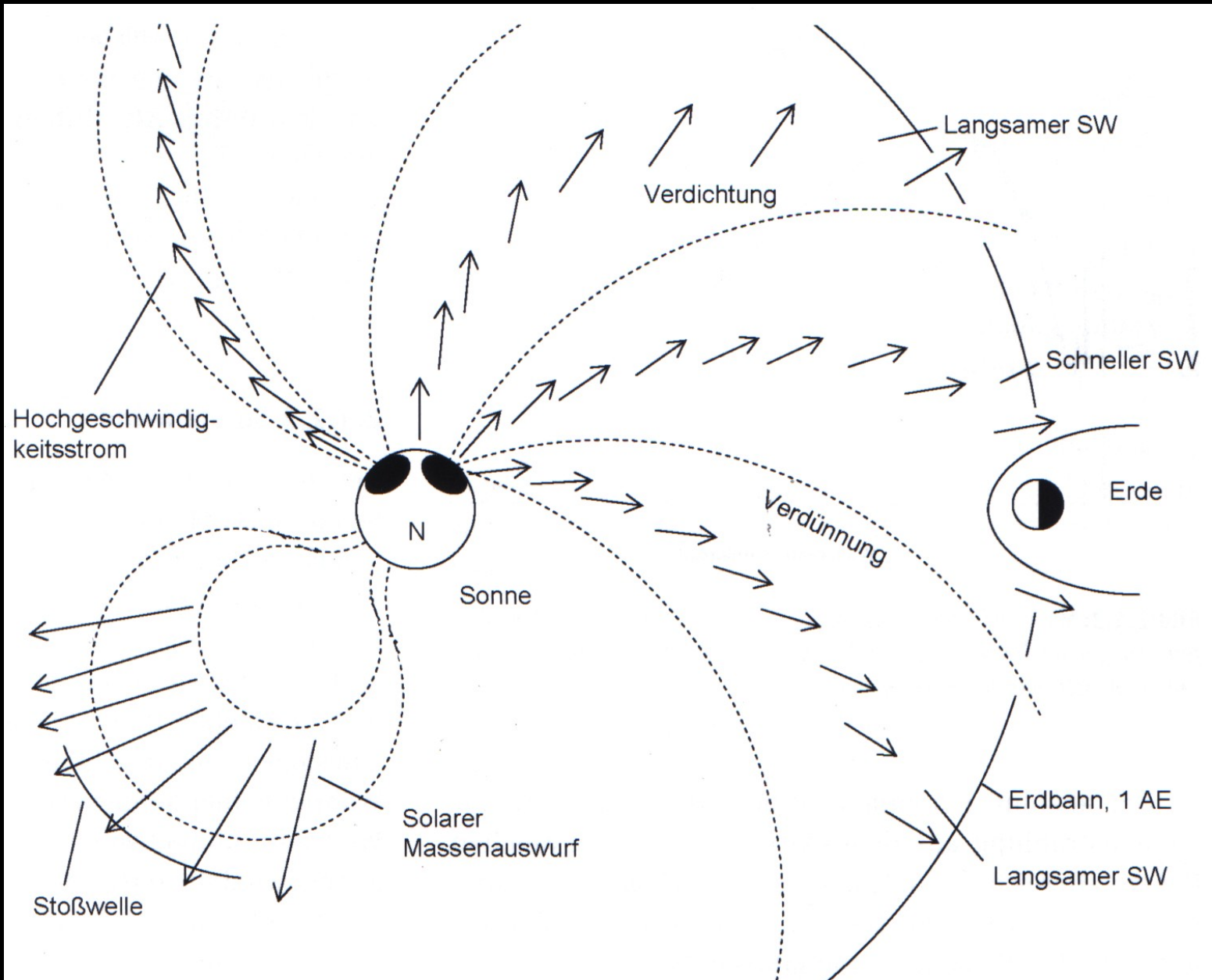
Radiobeobachtungen  
enthüllen Bewegung  
geladener Teilchen in  
Magnetfeldschleifen

- Quelle des Sonnenwindes:
  - langsam 100km/s
  - schnell 500-2000km/s



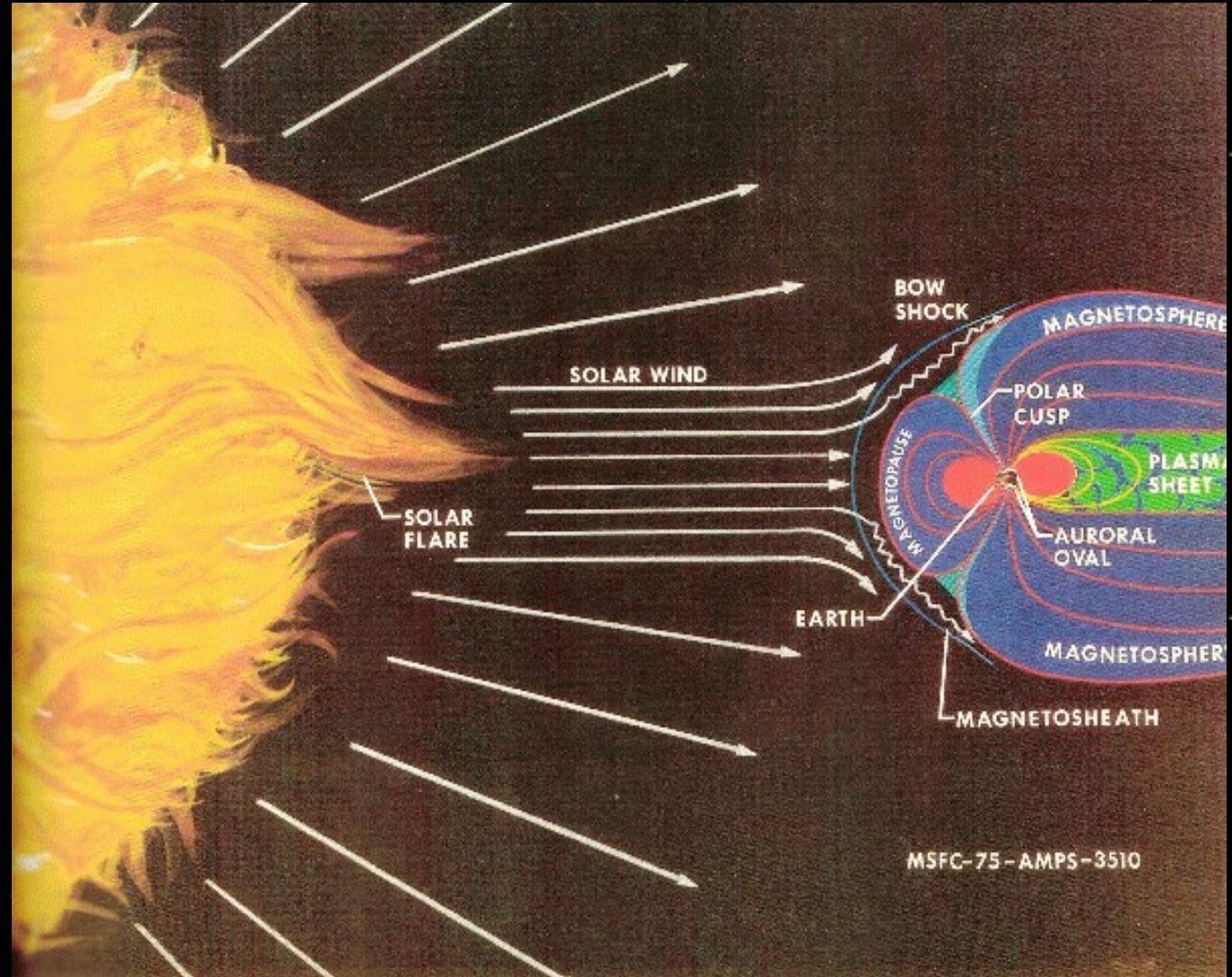


# Der Sonnenwind



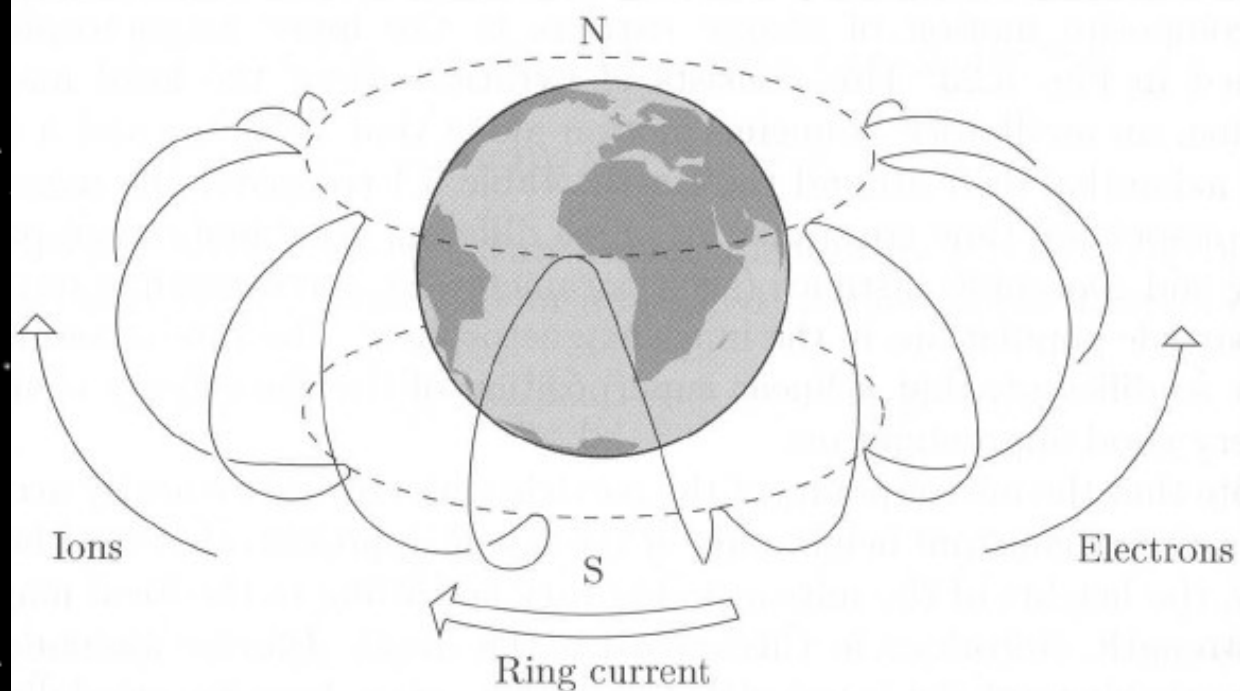
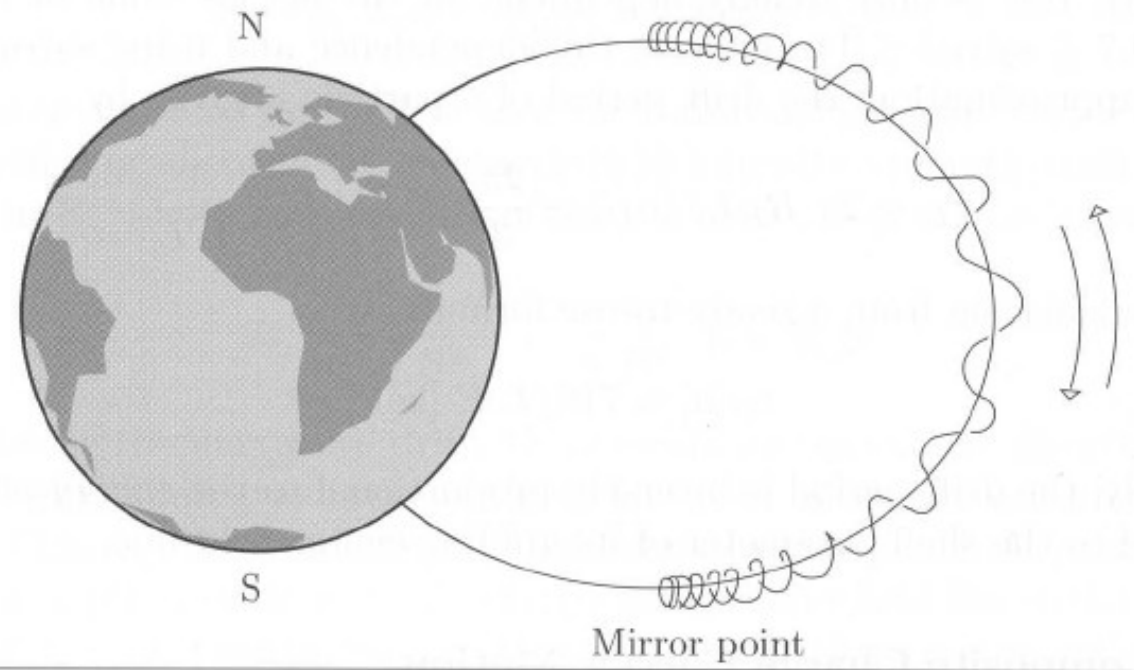
# Der Sonnenwind

“Brechung”  
des Sonnen-  
windes am  
Erdmagnet-  
feld





Elektrisch geladene Teilchen müssen sich in Spiralen entlang der Feldlinien bewegen.





# Der Sonnenwind

- Hohe Strahlenbelastung im van-Allen-Gürtel

