

Sterne, Galaxien und das Universum

Teil 1: Die Sonne

Peter Hauschildt

yeti@hs.uni-hamburg.de

Hamburger Sternwarte
Gojenbergsweg 112
21029 Hamburg

14. Oktober 2019

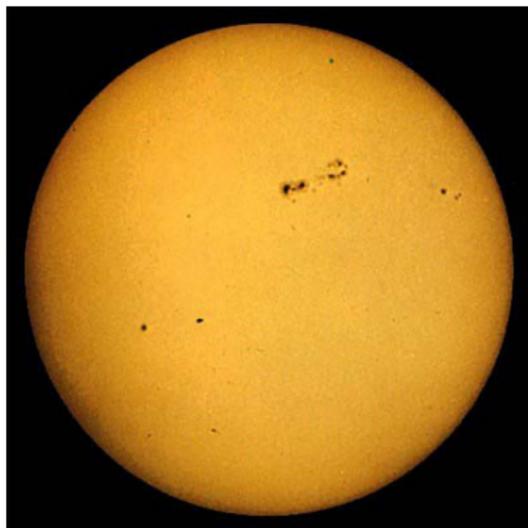
Übersicht

- ▶ Photosphäre
- ▶ Chromosphäre
- ▶ Korona
- ▶ Sonnenflecken und Magnetfeld
- ▶ Energieerzeugung
- ▶ Aufbau der Sonne

Table 18-1 Sun Data

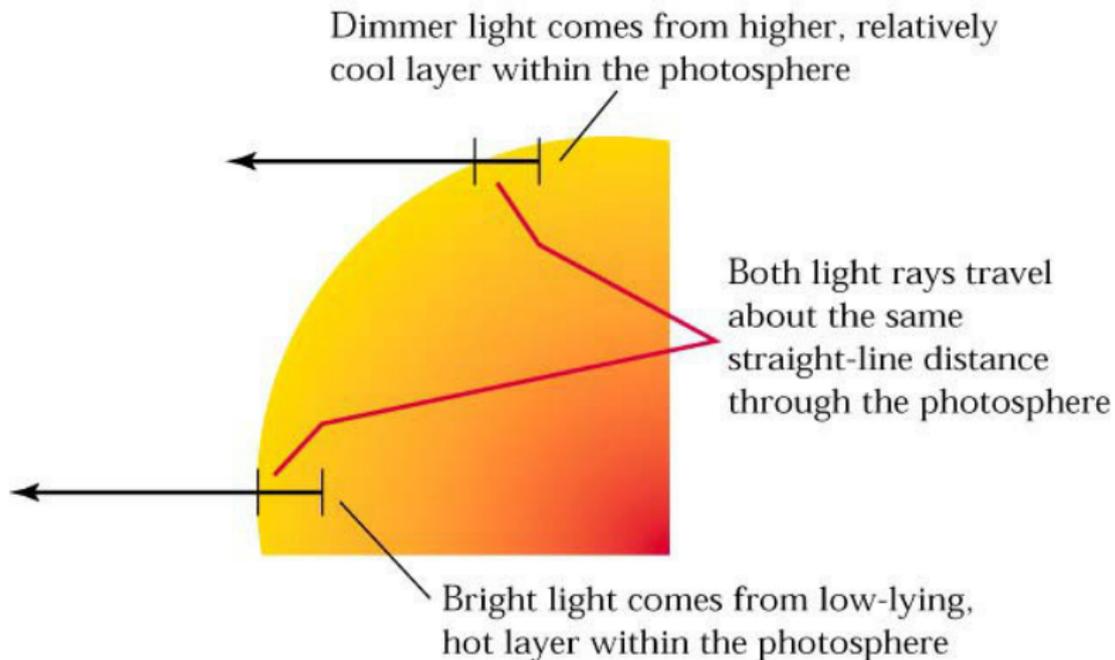
Distance from the Earth:	Mean: 1 AU = 149,598,000 km Maximum: 152,000,000 km Minimum: 147,000,000 km
Light travel time to the Earth:	8.3 min
Mean angular diameter:	32 arcmin
Radius:	696,000 km = 109 Earth radii
Mass:	1.99×10^{30} kg = 3.33×10^5 Earth masses
Composition (by mass):	74% hydrogen 25% helium 1% other elements
Mean density:	1410 kg/m ³
Mean temperatures:	Surface: 5800 K Center: 1.55×10^7 K
Spectral type:	G2
Luminosity:	3.90×10^{26} W
Distance from center of Galaxy:	8000 pc = 26,000 ly
Orbital period around center of Galaxy:	220 million years
Orbital speed around center of Galaxy:	220 km/s

Photosphäre

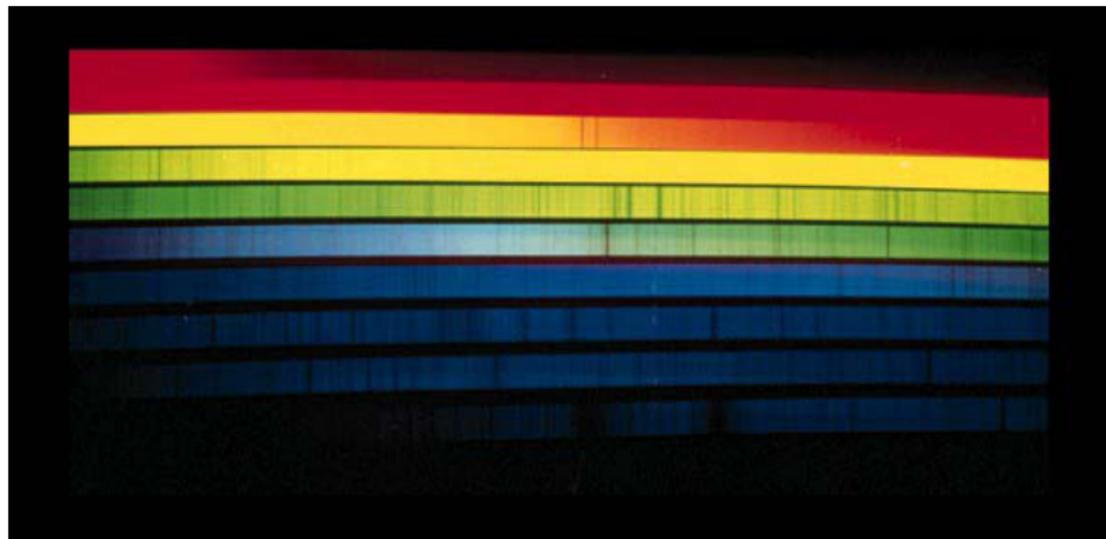


- ▶ Sonne ist ein Gasball
→
- ▶ hat keine Oberfläche
- ▶ Licht kommt aus einer
400 km dicken Schicht
→
- ▶ *Photosphäre*
- ▶ unterste Schicht der
Atmosphäre

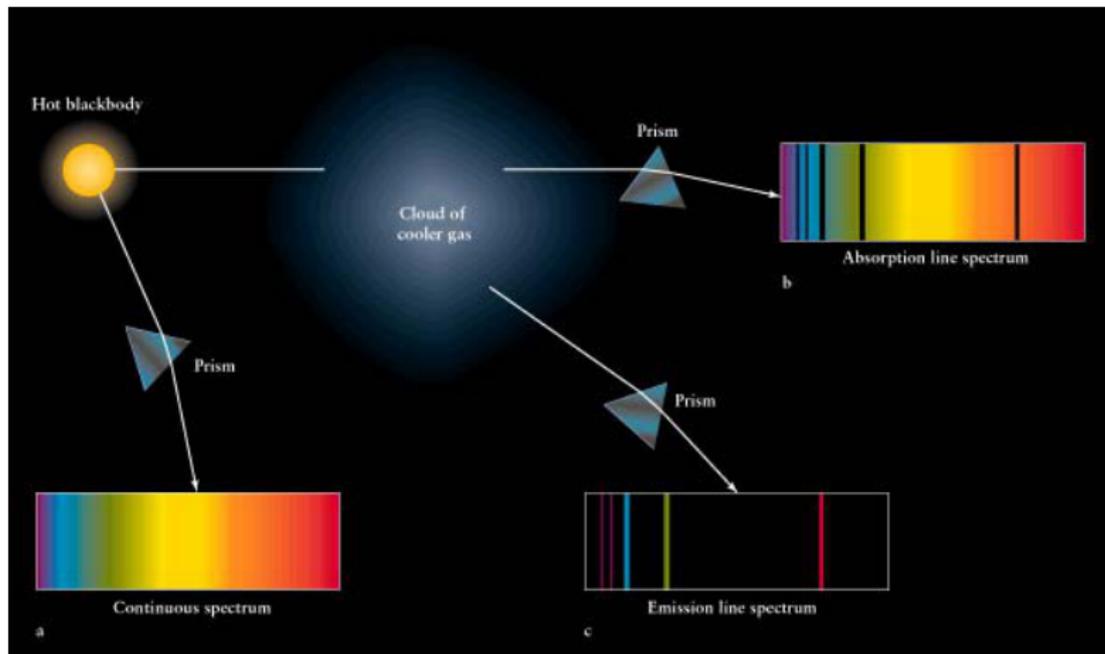
Mitte-Rand Variation



Spektrum der Sonne



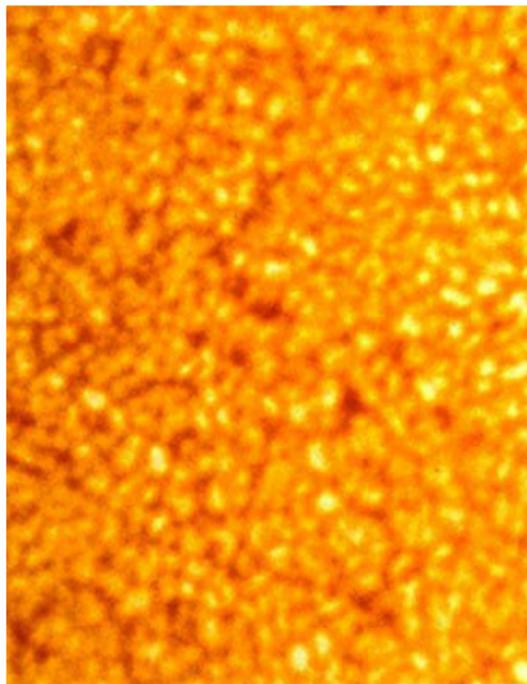
Spektrum der Sonne



Photosphäre

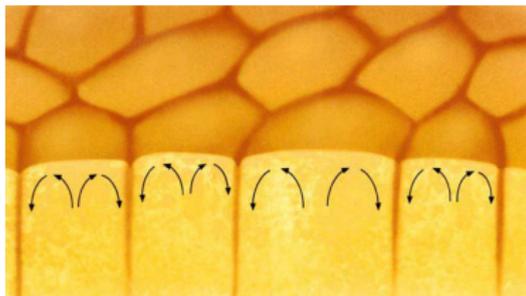
- ▶ Absorptionsspektrum
- ▶ → Temperatur nimmt nach aussen ab
- ▶ mittlere Temperatur: ca. 6000°C
- ▶ Aussentemperatur: ca. 4600°C

Granulation



- ▶ Sonnentelkope →
- ▶ *Granulation*
- ▶ ca. 1000 km Durchmesser
- ▶ ca. 300°C
Temperaturunterschied

Granulation



- ▶ erzeugt durch Konvektion
- ▶ warme Gaszellen steigen auf
- ▶ kalte sinken ab →
- ▶ transportiert Energie nach aussen

Photosphäre

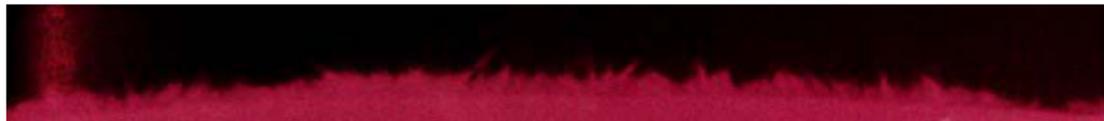
- ▶ erstaunlich undurchsichtig!
- ▶ erzeugt durch H^- :
- ▶ Wasserstoff + 1 extra Elektron
- ▶ sehr schwach gebunden ...
- ▶ aber sehr grosse Absorption von Licht

Chromosphäre



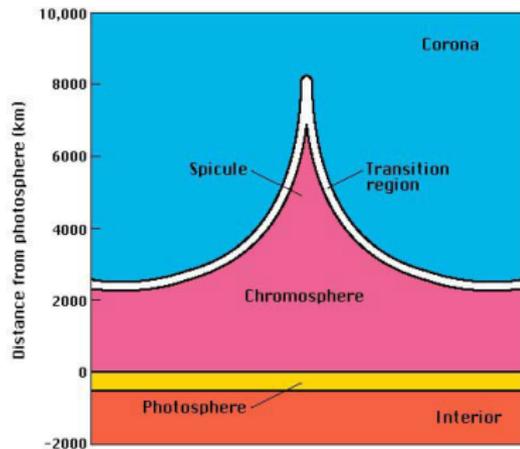
- ▶ oberhalb der Photosphäre
- ▶ bis zu 25000°C heiss
- ▶ aber Dichte nur 10^{-4} der Photosphäre
- ▶ oder 10^{-8} der Erdatmosphäre!
- ▶ darum normalerweise nicht sichtbar

Chromosphäre



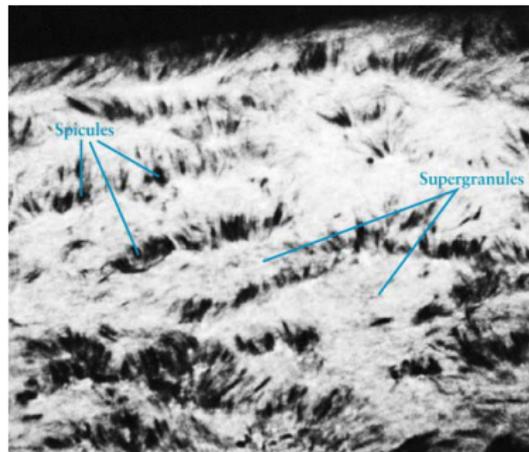
- ▶ rotes Licht: neutraler Wasserstoff ($H\ I$)
- ▶ $\rightarrow H_{\alpha}$ Linie
- ▶ Rand der Sonne im Licht von H_{α} \rightarrow
- ▶ *spicules*

spicules



- ▶ Gasjets die aufsteigen
- ▶ 20 km/s, 10000 km weit
- ▶ 300000 spicules auf der Sonne
- ▶ ca. 1% der Oberfläche

Supergranulation



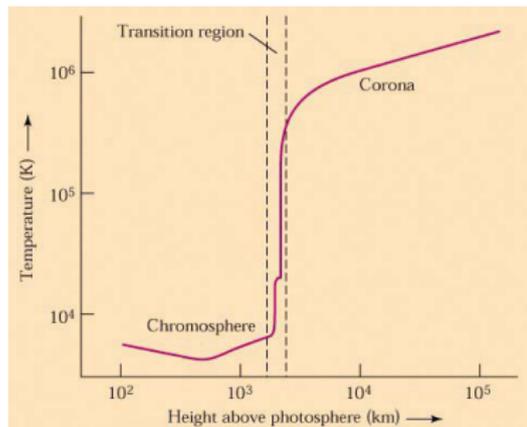
- ▶ spicules sitzen an den Rändern der
- ▶ *Supergranulation*
- ▶ riesige Konvektionszellen
- ▶ 30000 km Durchmesser, 0.4 km/s

Korona



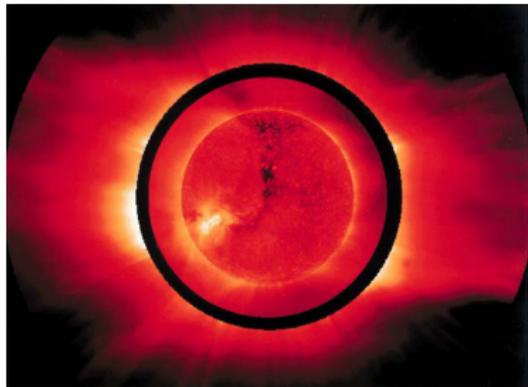
- ▶ oberhalb der Chromosphäre
- ▶ reicht über Millionen km weit raus
- ▶ geht in den *Sonnenwind* über
- ▶ nur 10^{-6} der Helligkeit der Photosphäre
- ▶ → Sonnenfinsternis (oder Koronograph)
- ▶ Emissionslinienspektrum

Korona



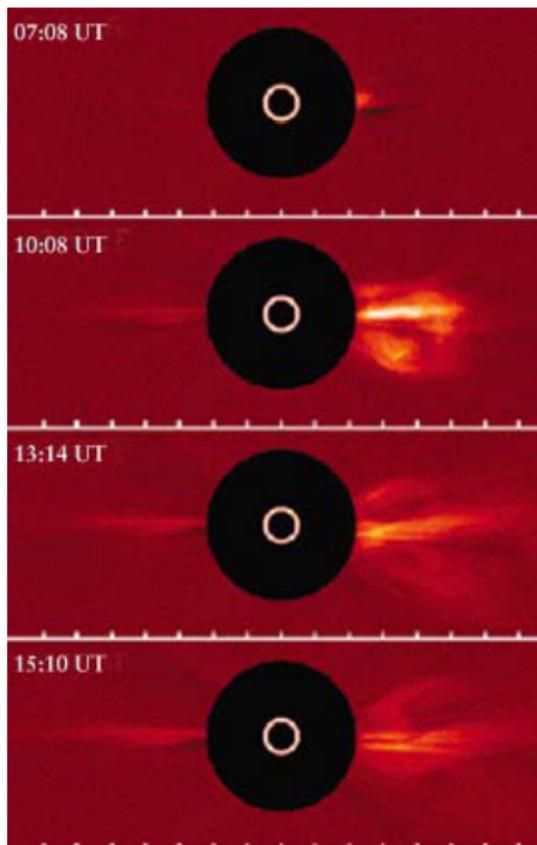
- ▶ 13 fach ionisiertes Eisen gefunden
- ▶ → Temperaturen von 2×10^6 °C!
- ▶ sehr niedrige Teilchendichte:
- ▶ 10^{11} Teilchen/cm³
- ▶ Erdatmosphäre: ca. 10^{23} !
- ▶ → Energiedichte sehr gering!

Korona

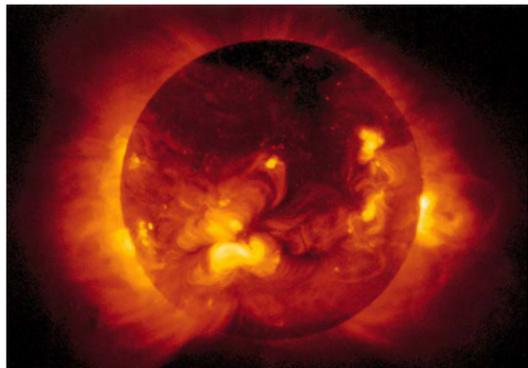


- ▶ composit UV Bild (SOHO)
- ▶ Material strömt von der Sonne ab
- ▶ dunkle Zonen →
- ▶ *koronale Löcher* →
- ▶ geringere Temperatur und Dichte
- ▶ Korridoren aus denen Material abfließt

koronaler Massenauswurf

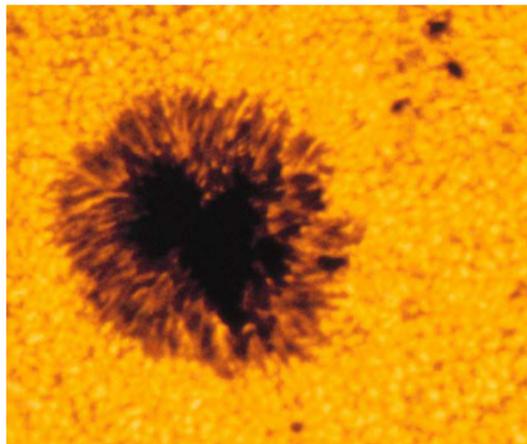


Korona



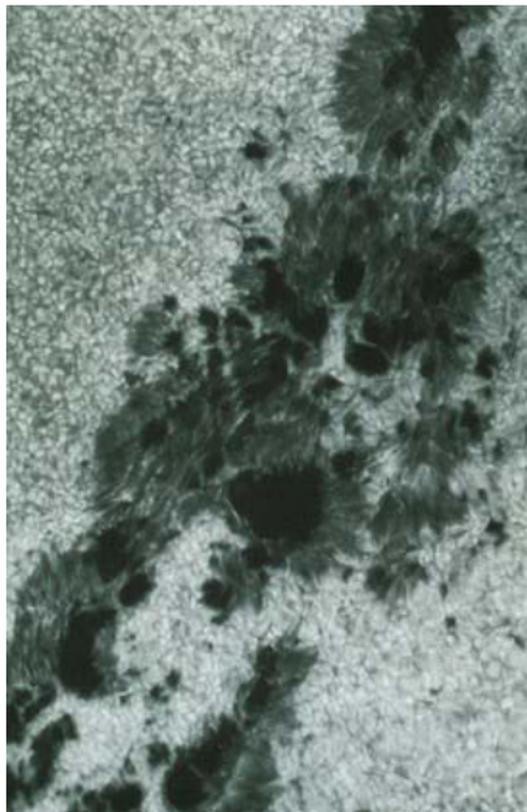
- ▶ 10^{12} kg mit 100's km/s!
- ▶ Wechselwirkung mit Erdatmosphäre!
- ▶ Röntgenbild der Sonne (Yohkoh)
- ▶ höchste Temperaturen: 4×10^6 °C
- ▶ diese liegen oft über den

Sonnenflecken



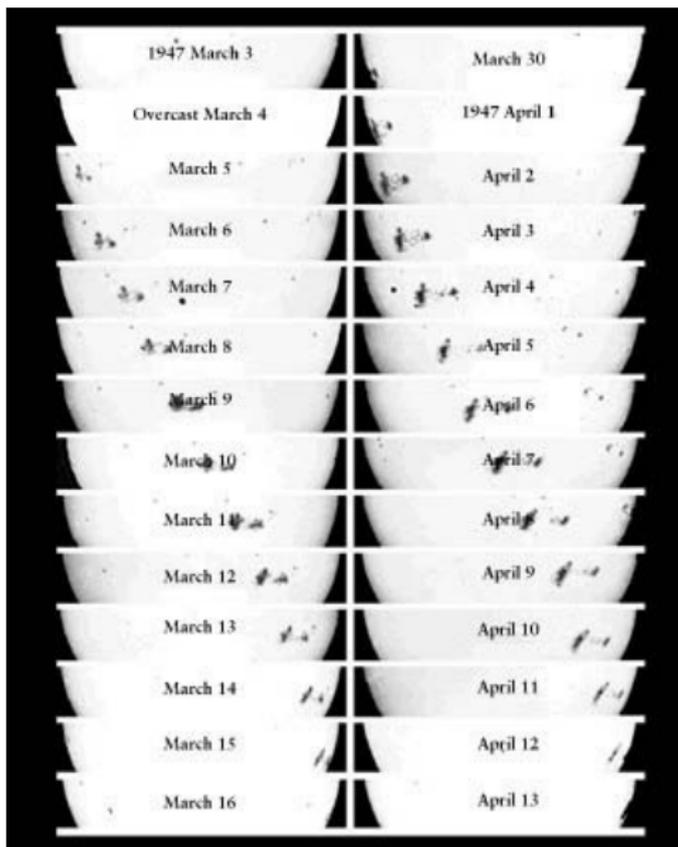
- ▶ dunkle Regionen der Photosphäre
- ▶ Kerngebiet: *Umbra*, 4300°C
- ▶ Randgebiete: *Penumbra*, 5000°C
- ▶ kühler als die Photosphäre!
- ▶ einige 10^4 km Durchmesser
- ▶ sind schon seit 2000 Jahren bekannt!

Sonnenflecken

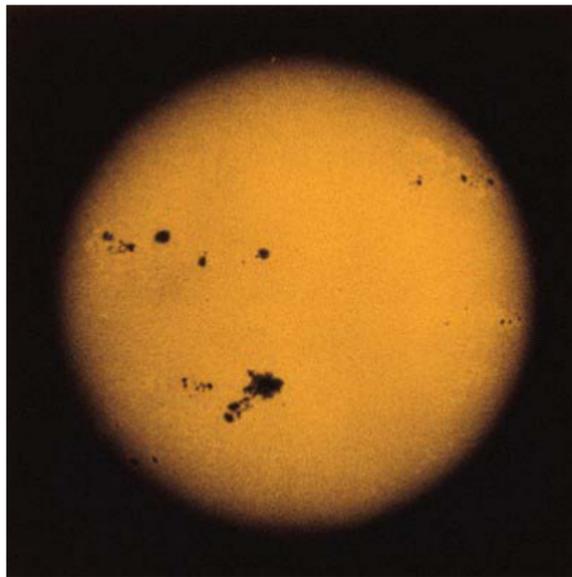


- ▶ treten in Gruppen auf
- ▶ leben ca. Stunden bis einige Monate!
- ▶ → Bestimmung der Sonnenrotation (Galileo)
- ▶ 25 (Äquator)–33 (Pol) Tage differentiell

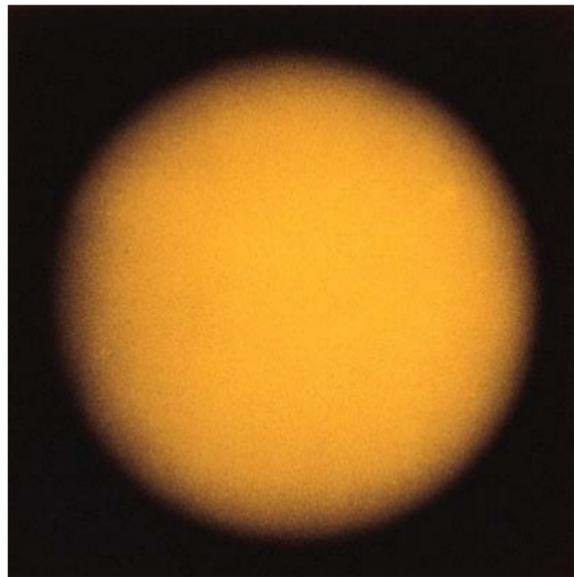
Rotation der Sonne



Sonnenfleckenzyklus

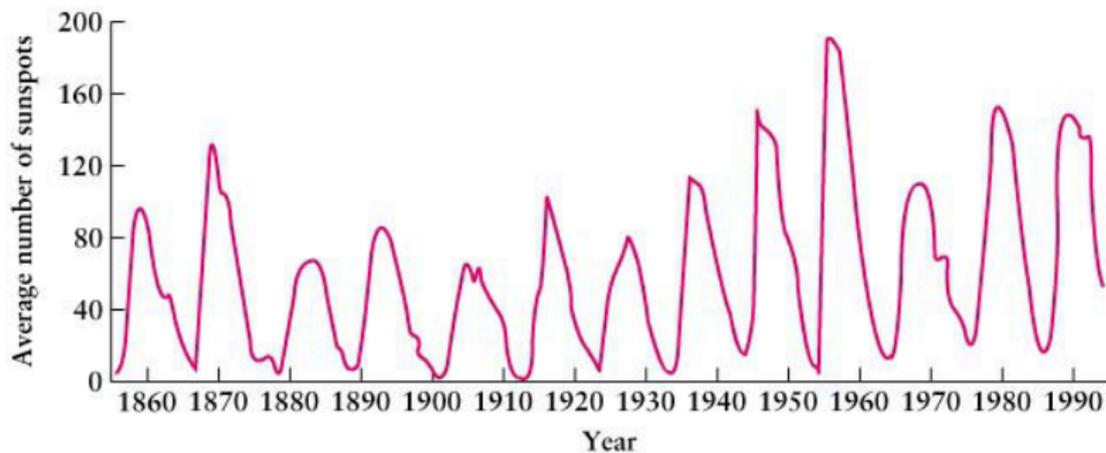


a.



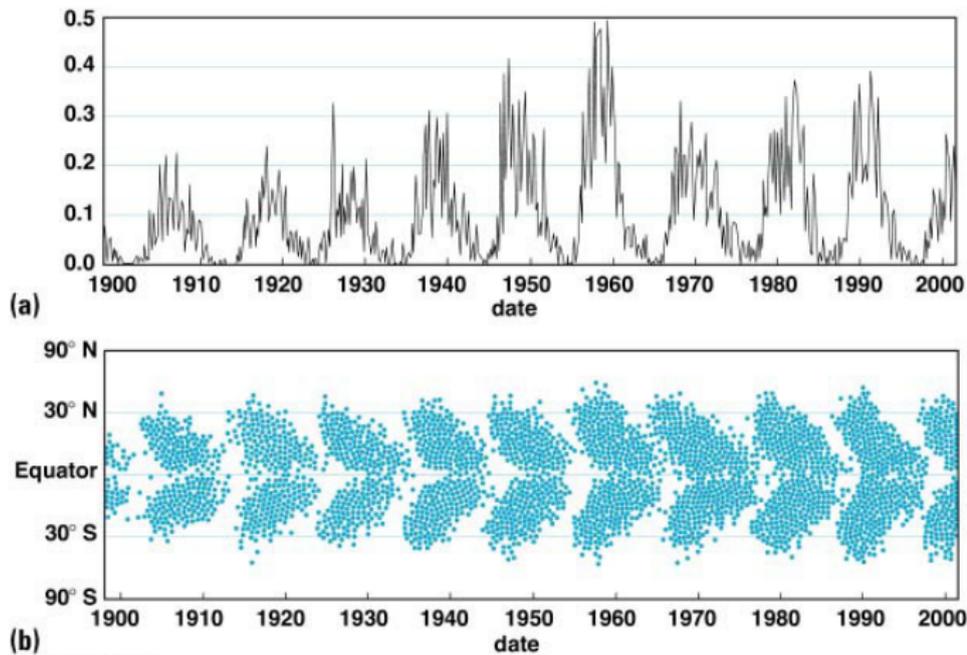
b.

Sonnenfleckenzyklus



- ▶ 11 Jahre langer Zyklus
- ▶ Ort der Flecken variiert mit Phase:
- ▶ nach Minimum: 30 Grad Breite
- ▶ Maximum: Äquator

Sonnenfleckenzyklus

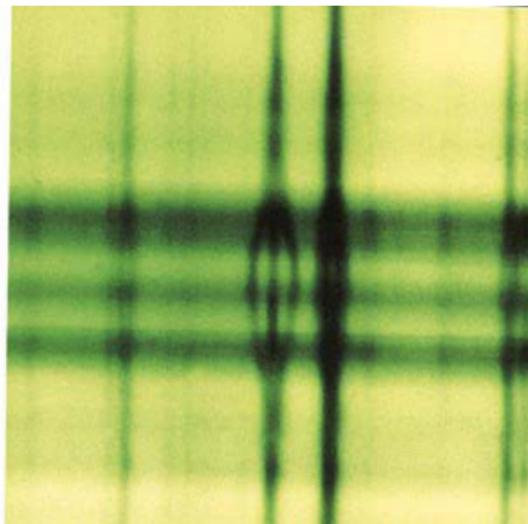
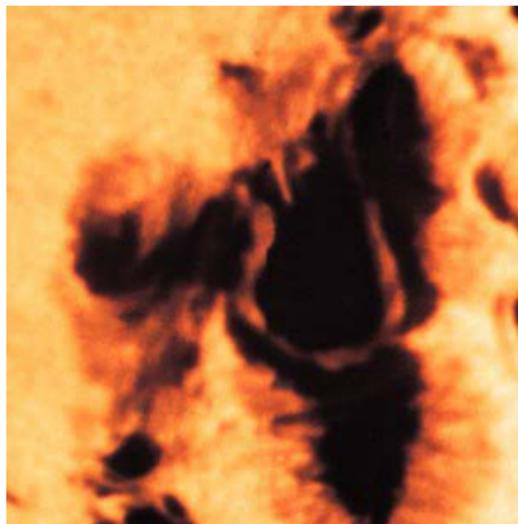


Copyright © Addison Wesley

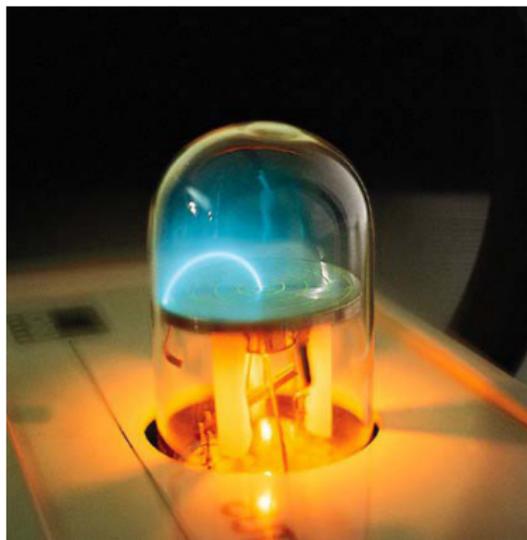
Sonnenfleckenzzyklus

- ▶ Woher kommt der Zyklus?
- ▶ wichtiger Hinweis: George Hale (1908)
- ▶ Flecken sind mit Magnetfeldern verbunden
- ▶ gemessen mit *Zeeman Effekt!*
- ▶ ~ 5000 mal stärker als auf der Erde

Magnetfelder

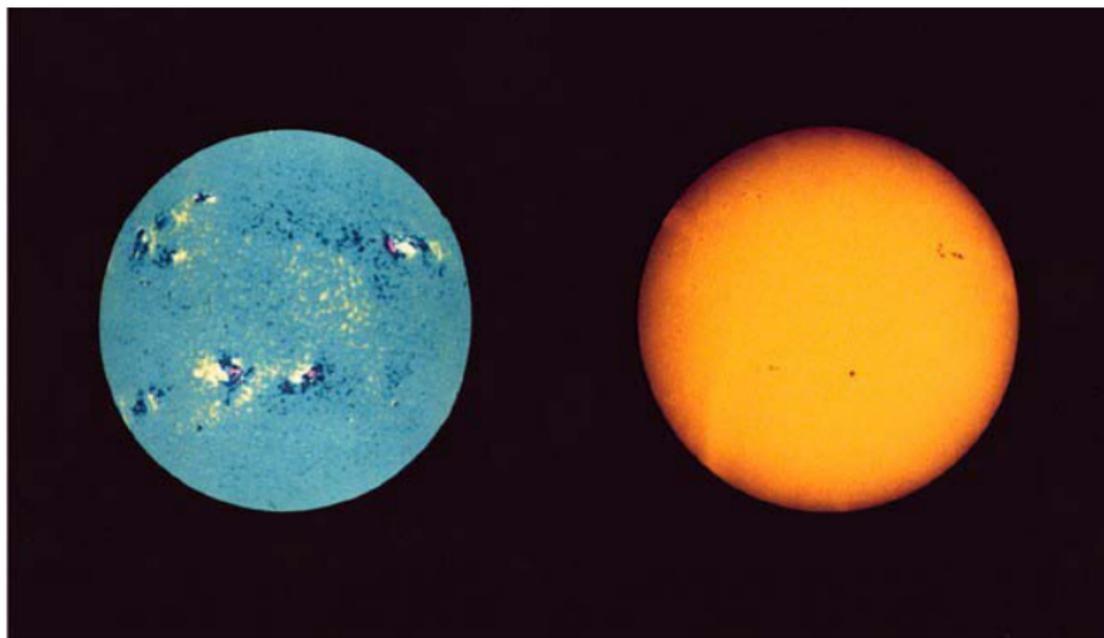


Sonnenfleckenzyklus

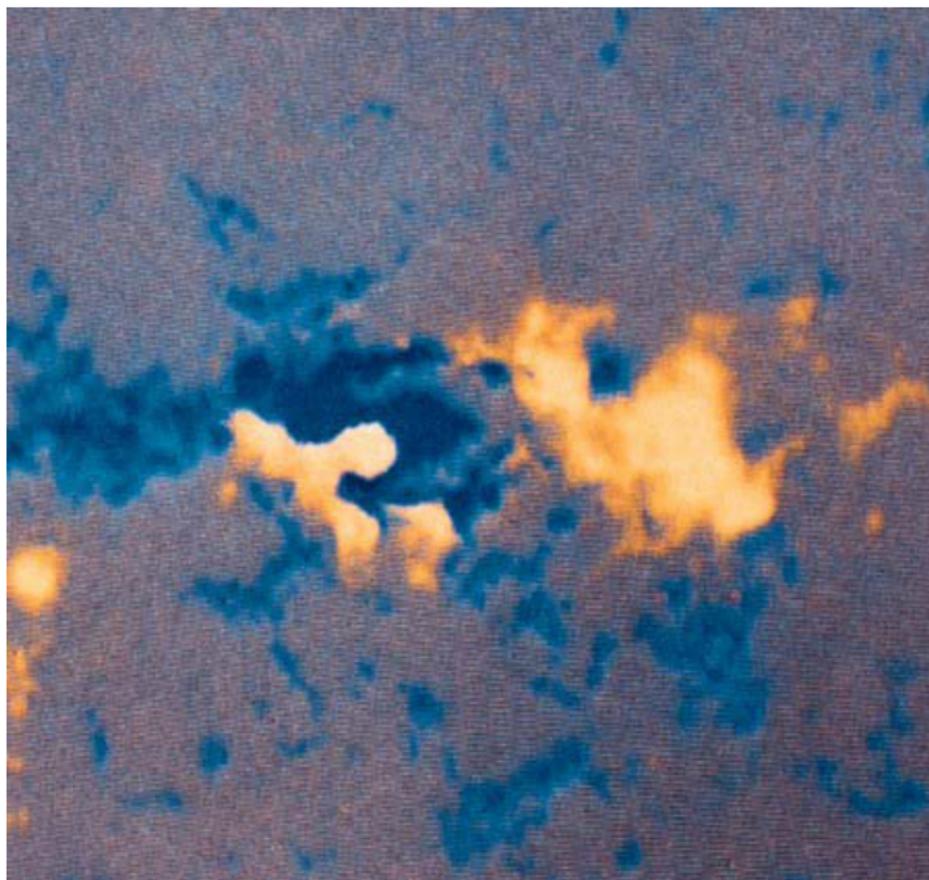


- ▶ heisses Atmosphäregas ist ionisiert
- ▶ → *Plasma*
- ▶ geladene Teilchen werden von B-Feldern abgelenkt
- ▶ Felder stark an einigen Stellen →
- ▶ heisses Gas abgelenkt, kühles bleibt
- ▶ → Sonnenfleck

Magnetogramm



Magnetogramm



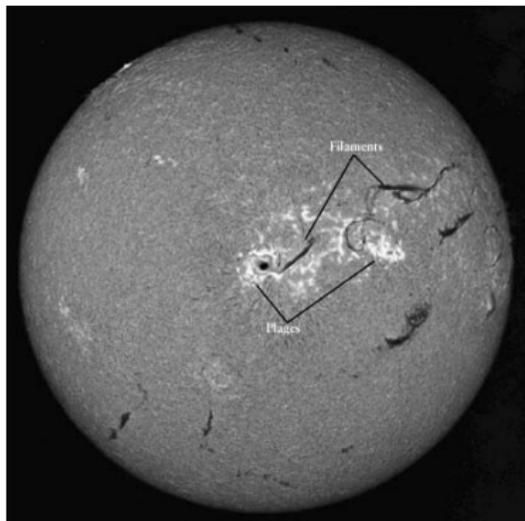
Sonnenfleckenzyklus

- ▶ Sonnenflecken sind oft bipolar
- ▶ wie Stabmagneten!
- ▶ Orientierung unterschiedlich auf Nord/Süd Halbkugel

Sonnenfleckenzzyklus

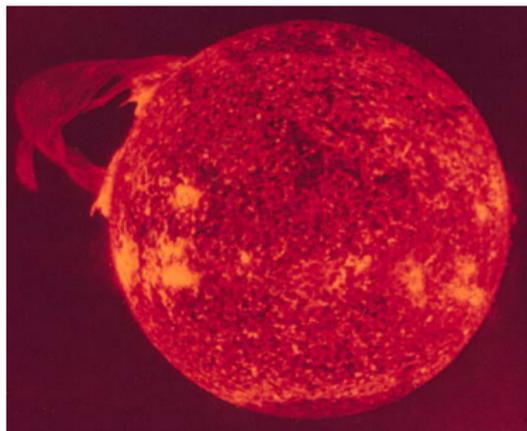
- ▶ Sonnenflecken sind oft bipolar
- ▶ wie Stabmagneten!
- ▶ Orientierung unterschiedlich auf Nord/Süd Halbkugel
- ▶ alle 11 Jahre dreht sich das Muster um →
- ▶ 22 jähriger solarer Zyklus!
- ▶ Erklärung: *Magnetischer Dynamo*
- ▶ Wichtig: differentielle Rotation

Plages und Filamente



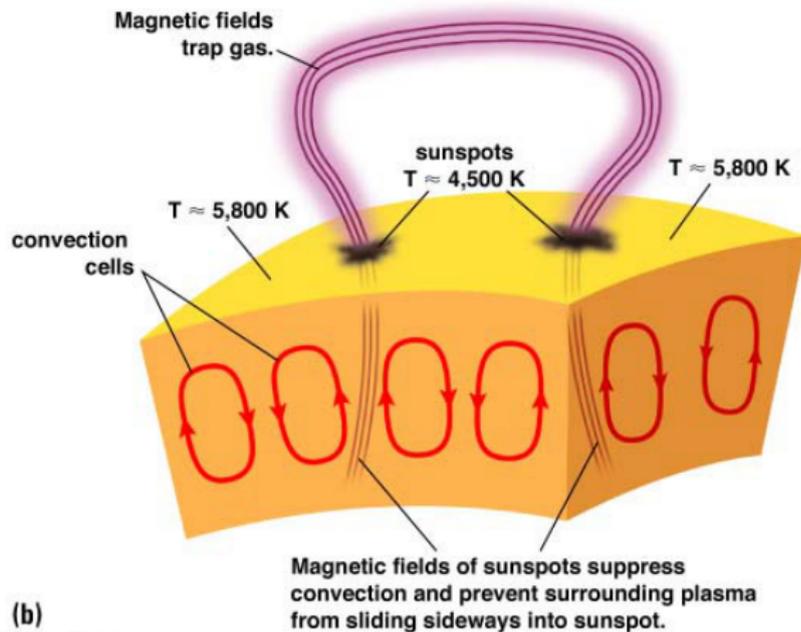
- ▶ Plages: heisse Gebiete
- ▶ kurz bevor sich ein Fleck bildet
- ▶ Filamente: magnetische Schleifen
- ▶ Material kühler

Prominences



- ▶ Filamente am Rand der Sonne!
- ▶ 10000's km über der Oberfläche
- ▶ Flares: grösste Ausbrüche auf der Sonne
- ▶ 10^{14} Mton Energie!

Überblick



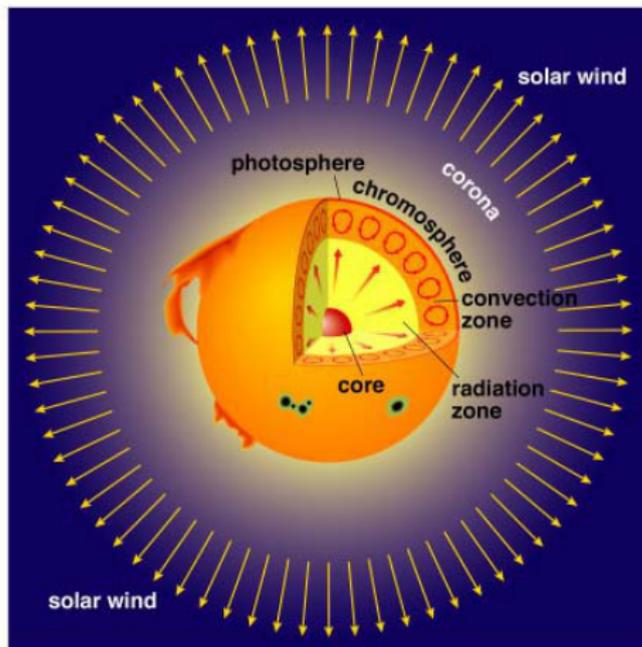
(b)

Copyright © Addison Wesley

Sonnenfleckenzyklus

- ▶ viele Details noch unbekannt
- ▶ Langzeit-Variation ebenfalls nicht bekannt!
- ▶ z.B.: keine Sonnenflecken 1645–1715
- ▶ → *Maunder Minimum*
- ▶ gleichzeitig: Kleine Eiszeit!
- ▶ Hinweise auf ähnliche Effekte in der Vergangenheit

Übersicht



Copyright © Addison Wesley

Energiequellen der Sonne

- ▶ chemische Energie
 - ▶ 10^{-19} J pro Atom
 - ▶ $L = 3.9 \times 10^{26}$ W oder [J/s]
 - ▶ $\rightarrow 3.9 \times 10^{45}$ Reaktionen/s benötigt
 - ▶ Sonne enthält ca. 10^{57} Atome
 - ▶ \rightarrow reicht für 3×10^{11} s \rightarrow 10.000 Jahre

Energiequellen der Sonne

- ▶ thermische Energie
 - ▶ ideales einatomiges Gas
 - ▶ →

$$E_T = \int_0^M \frac{3\mathcal{R}}{2\mu} T dM_r$$

- ▶ \mathcal{R} Gaskonstante
- ▶ μ Mittleres Molekulargewicht
- ▶ Sonne → $E_T \approx 5 \times 10^{41}$ J
- ▶ reicht ca. 10^7 Jahre

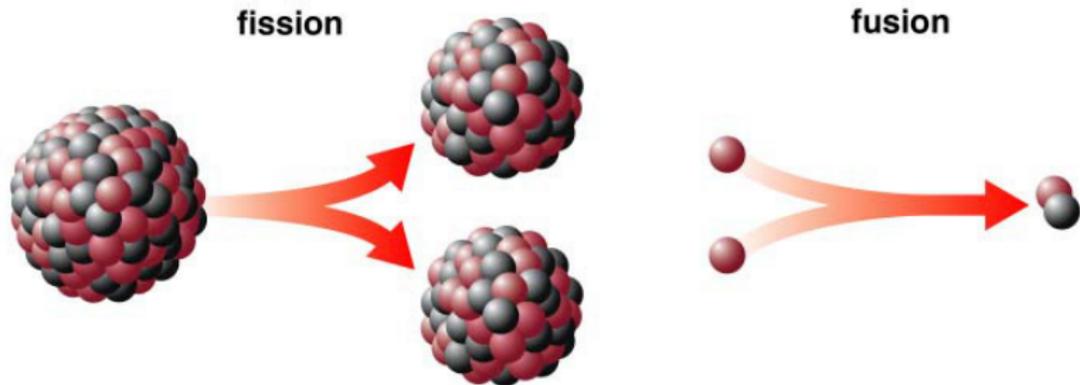
Energiequellen der Sonne

- ▶ Kelvin-Helmholtz Kontraktion
 - ▶ Potentielle Energie (Gravitation)
 - ▶ → Erwärmen durch Zusammenziehen
 - ▶ → Abstrahlung
 - ▶ reicht für ca. 25×10^6 Jahre

Energiequellen der Sonne

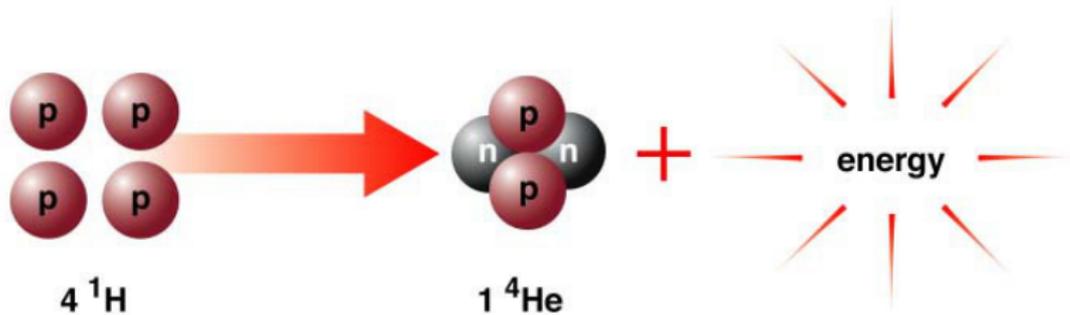
- ▶ Fusion $H \rightarrow He$
 - ▶ $E = mc^2$
 - ▶ 1 kg H wird zu 0.993 kg He
 - ▶ 7 g Materie werden in Energie umgewandelt
 - ▶ das entspricht dem Heizwert von 20.000 Tonnen Kohle
 - ▶ 'verbrennt' 4 Millionen Tonnen / s
 - ▶ reicht Sonne für 10^{11} Jahre...

Kernenergie



Copyright © Addison Wesley

Wasserstoffbrennen

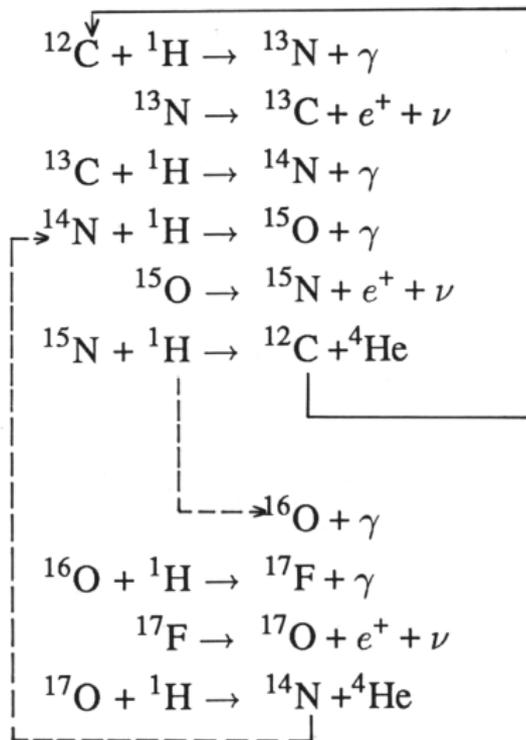


Copyright © Addison Wesley

Proton-Proton Kette

- ▶ pp1: 2 ^3He Pfade
- ▶ restliche 2 Pfade brauchen ^4He als Katalysator
- ▶ Verästelung weil ^7Be mit e^- oder Protonen reagiert
- ▶ freiwerdende Energie hängt vom Zweig ab:
 1. pp1: 26.2 MeV
 2. pp2: 25.67 MeV
 3. pp3: 19.2 MeV

CNO Zyklus



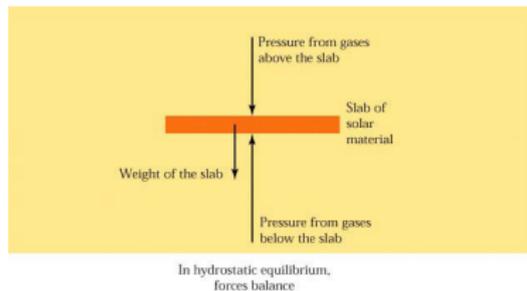
CNO Zyklus

- ▶ Hauptzyklus (oben) fertig wenn ^{12}C hergestellt aus $^{15}\text{N} + ^1\text{H}$
- ▶ mögliche Verzweigung über ^{16}O (muss vorhanden sein) aber nur 10^{-4}
- ▶ verwandelt ^{16}O in ^{14}N !
- ▶ β^+ Zerfallszeit $10^2 \dots 10^3 \text{ s}$
- ▶ niedrige $T \rightarrow$ detaillierte Berechnungen notwendig
- ▶ normalerweise entwickeln sich Sterne langsam und $T > 1.5 \times 10^7 \text{ K} \rightarrow$ Äquilibrium

CNO Zyklus

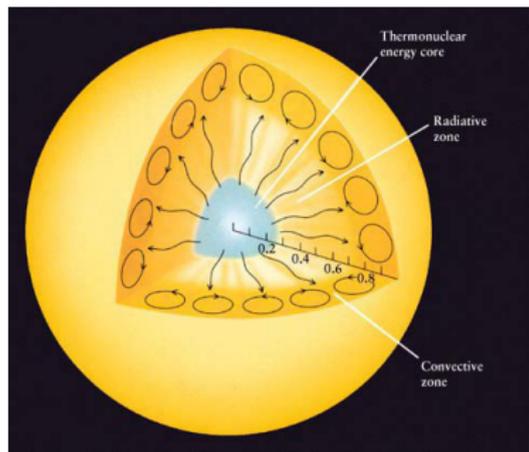
- ▶ langsamste Reaktion: $^{14}\text{N} + ^1\text{H}$ kontrolliert die Energieproduktion
- ▶ alle CNO Kerne werden in ^{14}N umgewandelt
- ▶ Energieproduktion des CNO Zyklus: 24.97 MeV

Aufbau



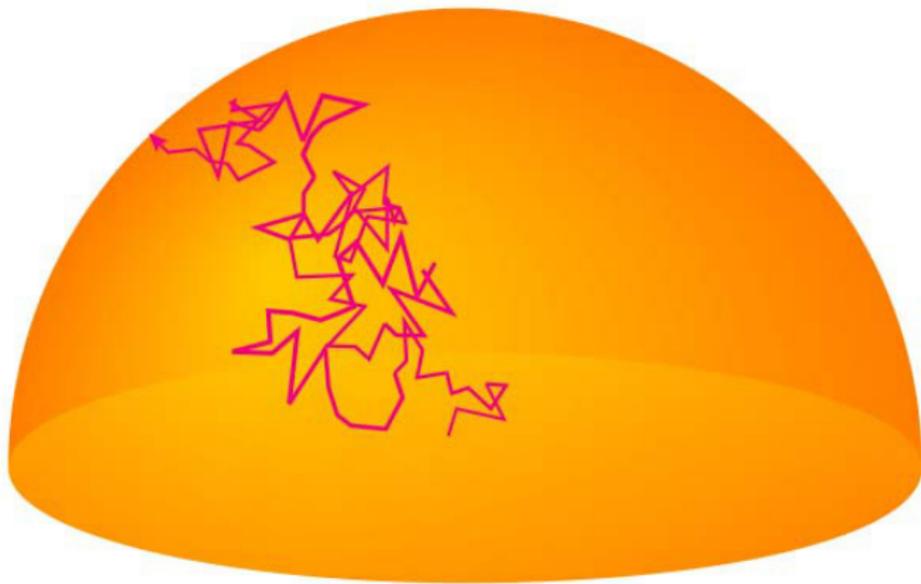
- ▶ wo laufen die Fusionsprozesse in der Sonne ab?
- ▶ Modell der Sonne:
- ▶ hydrostatisches Gleichgewicht
- ▶ thermisches Gleichgewicht
- ▶ Strahlungstransport, Konvektion, Wärmeleitung

Aufbau



- ▶ → Strukturgleichungen
- ▶ Lösung auf Computern
- ▶ Energieerzeugung nur im Kerngebiet
- ▶ dort wird Energie durch Strahlung transportiert: 0.1mm/h
- ▶ es dauert 170000a für die Energie an die Oberfläche zu kommen
- ▶ Konvektionszone unter der Oberfläche

Photonenweg



Copyright © Addison Wesley

Table 18-2 A Theoretical Model of the Sun

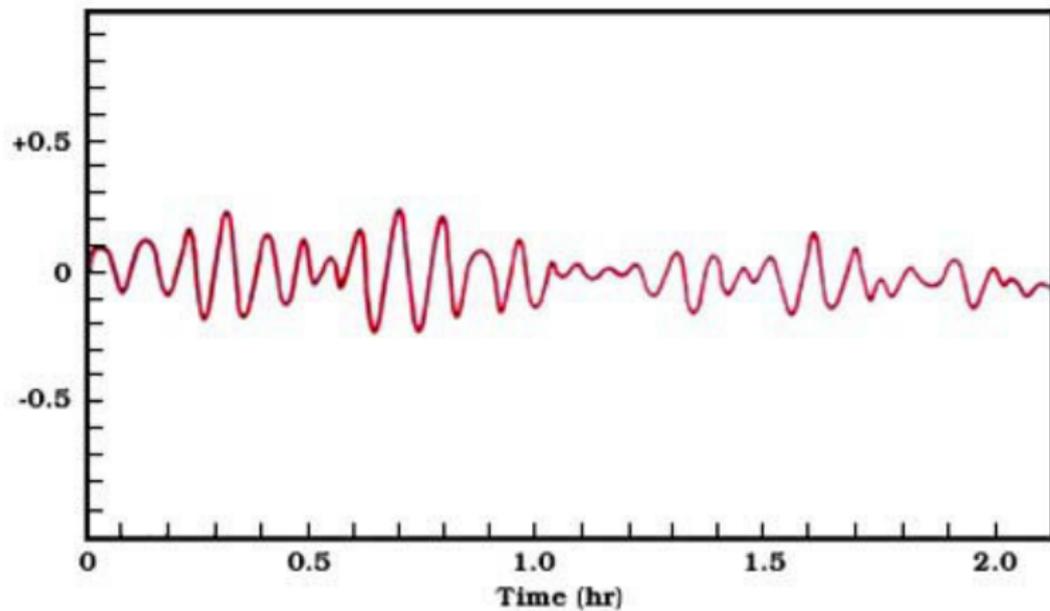
Distance from the Sun's center (solar radii)	Fraction of luminosity	Fraction of mass	Temperature ($\times 10^6$ K)	Density (kg/m^3)	Pressure (relative to pressure at center)
0.0	0.00	0.00	15.5	160,000	1.00
0.1	0.42	0.07	13.0	90,000	0.46
0.2	0.94	0.35	9.5	40,000	0.15
0.3	1.00	0.64	6.7	13,000	0.04
0.4	1.00	0.85	4.8	4,000	0.007
0.5	1.00	0.94	3.4	1,000	0.001
0.6	1.00	0.98	2.2	400	0.003
0.7	1.00	0.99	1.2	80	4×10^{-5}
0.8	1.00	1.00	0.7	20	5×10^{-6}
0.9	1.00	1.00	0.3	2	3×10^{-7}
1.0	1.00	1.00	0.006	0.00030	4×10^{-13}

Note: The distance from the Sun's center is expressed as a fraction of the Sun's radius. Thus, 0.0 is at the center of the Sun and 1.0 is at the surface. Fraction of luminosity is what portion of the Sun's total luminosity is produced within each distance from the center; this is equal to 1.00 for distances of 0.25 or more, which means that all of the Sun's nuclear reactions occur within 0.25 of a solar radius of the Sun's center. Fraction of mass is what fraction of the Sun's total mass lies within each distance from the Sun's center. The pressure is expressed as a fraction of the pressure at the center of the Sun.

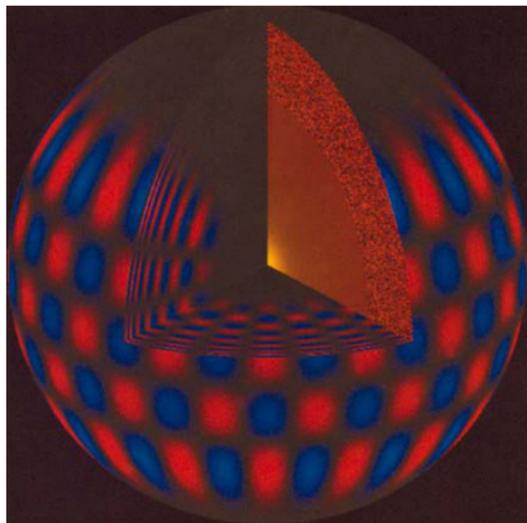
Helioseismologie

- ▶ kann man den Aufbau der Sonne 'sehen'?
- ▶ nicht direkt (nur die Photosphäre)
- ▶ aber indirekt
- ▶ Sonne schwingt ähnlich wie eine Glocke!
- ▶ stärkste Frequenz: 0.003Hz

Helioseismologie

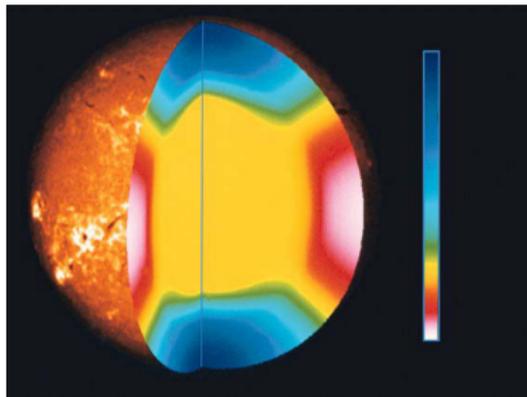


Helioseismologie



- ▶ stehende Wellen!
- ▶ genaue Verteilung der Schwingungen
- ▶ → Aufbau der Sonne
- ▶ z.B. He Gehalt des Kerns
- ▶ Dicke der Übergangszone

Helioseismologie



- ▶ Rotation der Sonne
- ▶ ändert sich mit Tiefe!

Neutrinos



- ▶ Neutrinos entstehen bei der Fusion
- ▶ können die Sonne ungehindert verlassen
- ▶ auf der Erde nachweisbar (sehr schwer)
- ▶ Trockenreiniger
- ▶ nur 50-60% der erwarteten Neutrinos gefunden
- ▶ → unerwartete Neutrinoeigenschaften