

## V. Die (Atmosphäre der) Sonne

V.1

- Die "mittlere" oder "ruhige" Sonne (engl. "quiet sun")

Parameter:  $T_{\text{eff}} = 5780 \text{ K}$

$$R_{\odot} = 6.96 \cdot 10^{10} \text{ cm} \approx 700\,000 \text{ km}$$

$$M_{\odot} = 1.99 \cdot 10^{33} \text{ g}$$

$$L_{\odot} = 3.9 \cdot 10^{33} \text{ erg/s}$$

$$\log g = 4.44 \quad [\text{cgs}]$$

## Aufheizung von Chromosphäre und Korona

V.2

durch nicht-radiativen Energietransport:

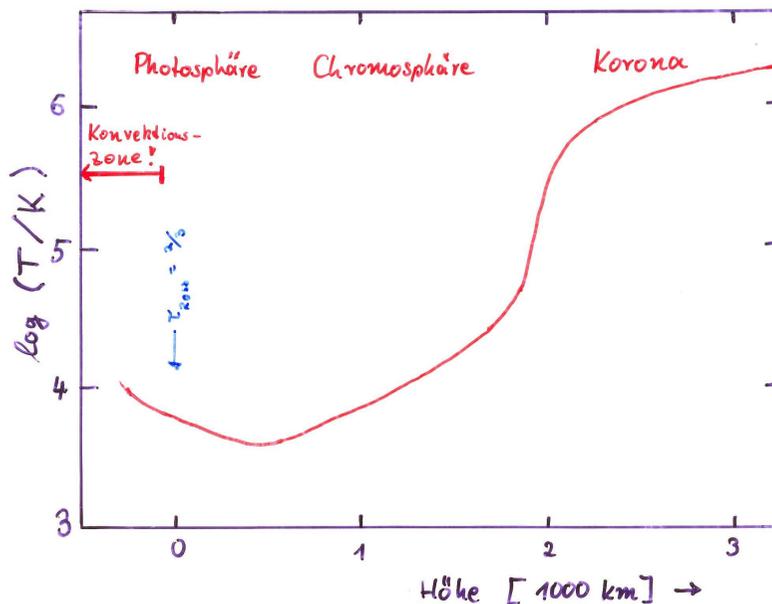
- akustische und magnetohydrodynamische (sog. Alfvén-) Wellen, die in der Konvektionszone angeregt werden;
- induzierte Ströme

### • Dichteschichtung

Skalenhöhe der Photosphäre:

$$H = \frac{kT}{g A m_H} \quad (\text{siehe I.6})$$

### • Temperaturschichtung (schematisch)



mit  $T = 6000 \text{ K}$ ,  $A = 1$  (Wasserstoff, neutral)  
und  $\log g = 4.44$

$$\Rightarrow H \approx 180 \text{ km}$$

Beachte:  $H/R_{\odot} \approx 3 \cdot 10^{-4}$ , also  $H \ll R_{\odot}$

Da die "Dicke der Photosphäre" von der Größenordnung  $H$  ist:

- Planparallele Geometrie ist gute Näherung
- Die Sonne hat einen "scharfen Rand"

(180 km entsprechen von der Erde  $\frac{1}{2}$  Bogensekunde)

## Chemische Zusammensetzung der Sonnenatmosphäre

5-05

solare Häufigkeiten (nach Asplund et al. 2009)

Die „Top Ten“ (Massenbruchteil  $X_i$ )

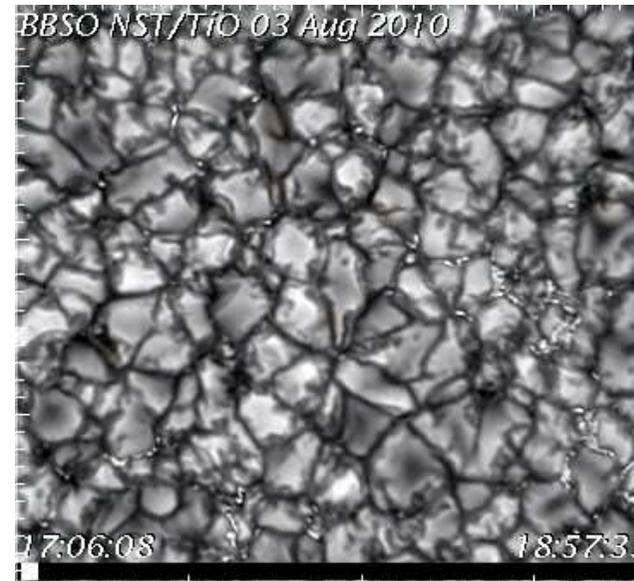
Elem.	$X_i$ [%]	Elem.	$\log X_i$
1. H	74	6. Ne	-2.90
2. He	25	7. Mg	-3.15
3. O	0.57	8. N	-3.16
4. C	0.24	9. Si	-3.18
5. Fe	0.13	10. S	-3.51

Beispiel für ein Element mit Seltenheitswert:

Gold:  $\log X_{\text{Au}} \approx -9$

## Granulation

5-07



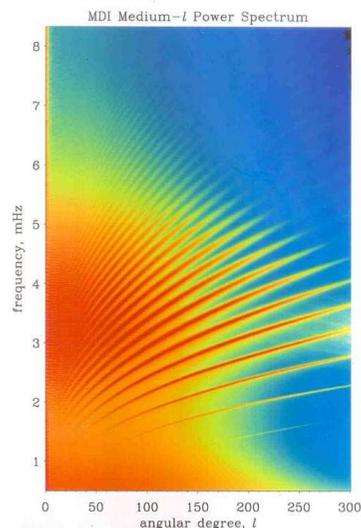
Beobachtung vom  
Big Bear  
Observatory, 65cm-  
Teleskop, in TiO-  
Banden

<http://www.youtube.com/watch?v=0-UjQwTfjGg>

## Helioseismologie - die 5-Minuten-Oszillation der Sonne

5-06

- Oberfläche der Sonne: Wellenmuster mit Amplituden von ~100 km
- viele Perioden < 100 s, besonders bei etwa 5 min



- sphärisch-harmonische Schwingungen hoher Modenzahlen  $\ell, m$  - Abb. rechts:  $\ell = 20, m = 16, n = 14$
- akustische Wellen („p-Moden“)
- im Inneren der Sonne gibt es auch g-Moden (Rückstellkraft: Gravitation)

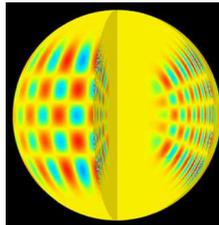


Abb. links: Power-Spectrum der Sonne mit dem *Michelson Doppler Imager* (MDI) an Bord von SOHO

„Körnige“ Struktur der Sonnenoberfläche  
= die sichtbaren Ausläufer der Konvektionszone:

- Größe: 1000 - 2000 km entsprechend  $\approx 1''$
- Lebensdauer typisch 10 min

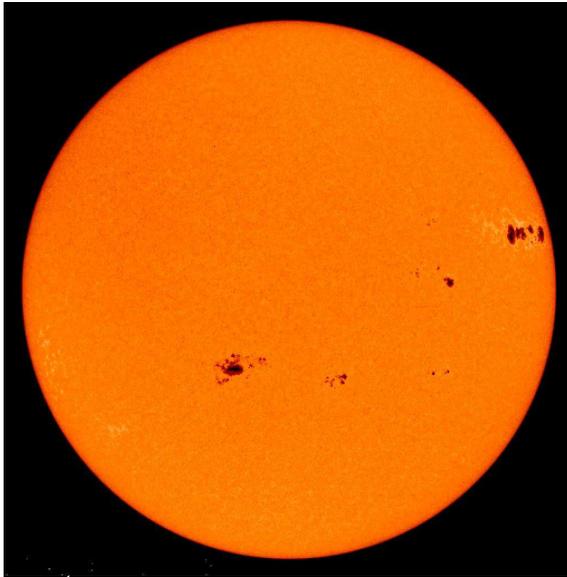
helle Mitte: aufsteigendes, heißeres Material  
dunkle Zwischenräume: absteigendes, kühleres Material

- Geschwindigkeiten typisch  $\pm 1$  km/s
- Temperaturdifferenz bei  $\tau = 1 \approx 500$  K  
(jedoch Sichtiefe in den Zwischenräumen größer  
→ Kontrast-Minderung)
- Helligkeitskontrast: 12-17% (Standardabweichung)  
beobachtbar wg. begrenzte Auflösung nur 5-8%

## Sonnaktivität

5-09

nur zeitweise auftretende Phänomene



### Sonnenflecken

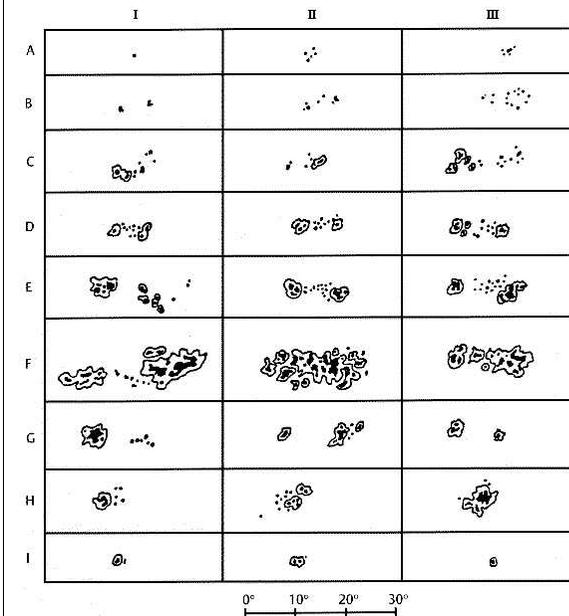
- treten in Gruppen auf
- Teilnahme an der differentiellen Sonnenrotation (siderische Periode zwischen 25<sup>d</sup> am Äquator und >30<sup>d</sup> in hohen Breiten)
- Durchmesser typisch 10 000 km
- Lebensdauer Tage ... Monate

Aktuelle Bilder vom Solar and Heliospheric Observatory (SOHO): <http://sohowww.nascom.nasa.gov>

!

## Sonnenflecken: phänomenologische Klassifikation

5-11



Schema von Waldmeier, entspricht auch oft der zeitlichen Entwicklung



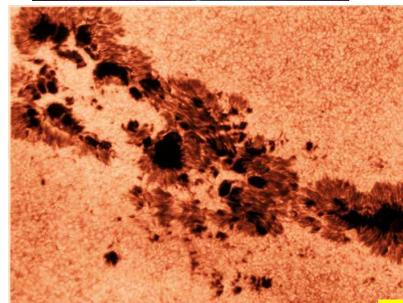
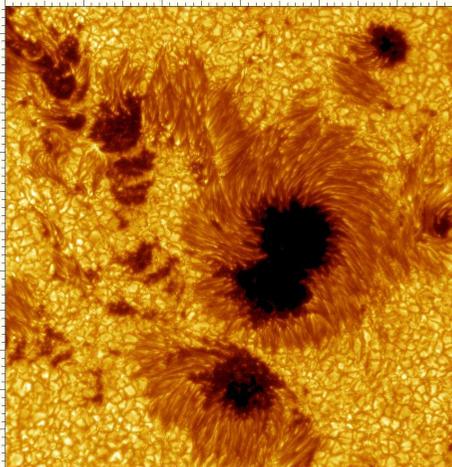
Max Waldmeier, Zürich, 1912 - 2000

!

## Sonnenflecken

5-10

- ~2000 Grad kühler als Umgebung
- Unterscheidung von *Umbra* und *Penumbra*
- starkes Magnetfeld (~10<sup>3</sup> Gauss), meist Bipolar

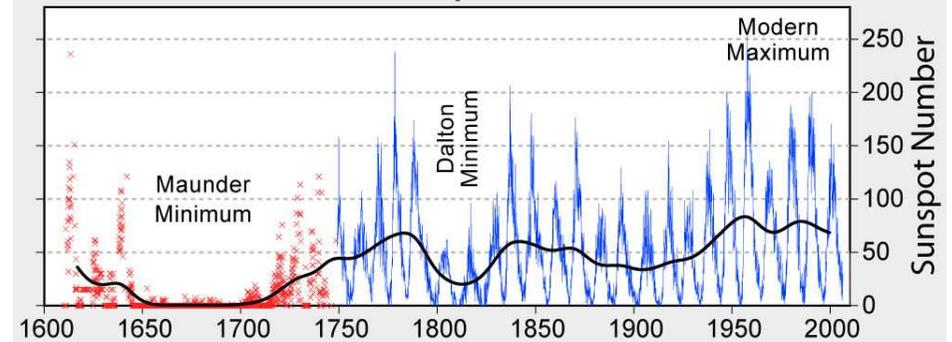


!

## Sonnenflecken-Zyklus

5-12

### 400 Years of Sunspot Observations



Sonnenflecken-Relativzahl:

- Definition: 10 mal Zahl der Gruppen + Zahl der Flecken
- gut korreliert mit dem von Flecken bedeckten Flächenanteil
- zeigt eine etwa 11-jährige Periode
- magnetische Periode: 22 Jahre (wechselnde Orientierung der Feldrichtung)

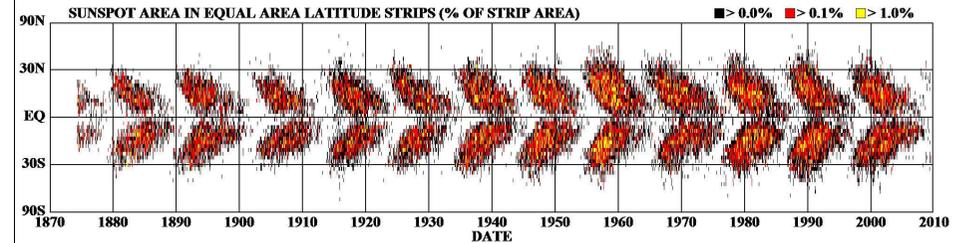
!

... aber nicht völlig gleichmäßig!

- im 17. Jahrhundert:  
fast keine Flecken (sog. Maunder-Minimum)
- seitdem im Mittel zunehmend
- Korrelation des Flecken-Zyklus mit  
kleiner Schwankung ( $< 1\%$ ) der Starkenstunden
- kleine Änderungen im Sonnenspektrum  
(Linien! Kontinuum?)
- Auswirkungen auf das irdische Klima?

:

## „Schmetterlings-Diagramm“



Bevorzugte Breitenzonen:

Beginn des Zyklus:  $\pm 20^\circ$

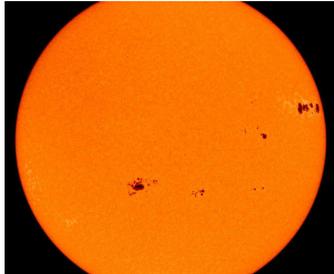
Ende des Zyklus:  $\pm 5^\circ$

Keine Flecken in höheren Breiten als  $\pm 45^\circ$

:

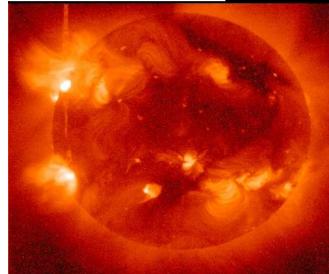
## Sonnenaktivität: Flecken, Fackeln, Eruptionen

Sonne bei verschiedenen Wellenlängen (Movie)

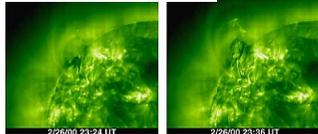


← sichtbar. Licht  
 $304 \text{ \AA}$  →  
entspr. 60 kK

Protuberanzen (Movie)

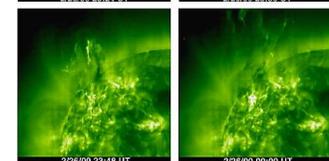
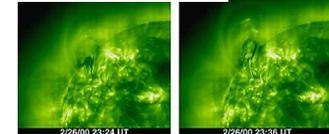


Prominenz (Movie 1)



←  $195 \text{ \AA}$  →  
entspr.  $10^6 \text{ kK}$

Prominenz (Movie 2)

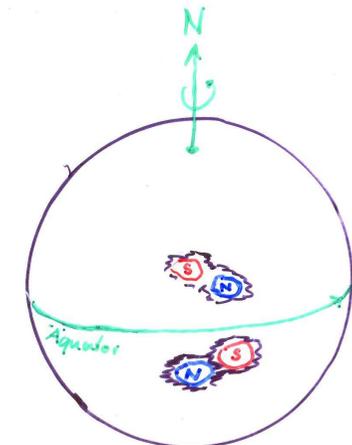


:

Magnetfeld:

Bipolar,  $\approx 10^3 \text{ Gauss}$

- In Rotationsrichtung führt z.B. auf der Nordhemisphäre stets der magnetische Nordpol, auf der Südhemisphäre der magnet. Südpol.
- Im nächsten Zyklus: umgekehrte Polung!



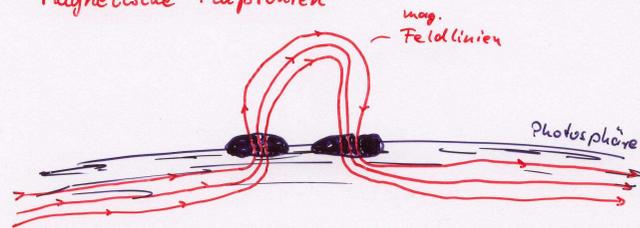
:

## Sonnenflecken: qualitatives Modell

V.8

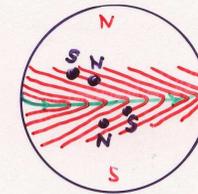
5-17

### "Magnetische Flußröhren"



- Feldlinien  $\approx$  waagrecht unter der Photosphäre
- lokale Verdichtungen des Feldes wg. Konvektions-Störung
- hohe Felddichte  $\rightarrow$  magnetischer Druck  $\rightarrow$  geringere Materie-Dichte  $\rightarrow$  Auftrieb
  - $\rightarrow$  Flußröhre durchbricht die Photosphäre
- in der Flußröhre: Behinderung der Konvektion
  - $\rightarrow$  kleinerer Energiefluß, Abkühlung
  - $\rightarrow$  geringere emergente Intensität  $I^+$  (trotz größerer Sichttiefe)

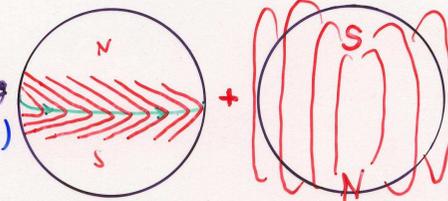
c) stellenweise brechen Flußröhren nach außen durch  $\rightarrow$  Sonnenflecken



d) Höhepunkt des Zyklus:

Netto-Effekt vieler Flecken:

Dipolfeld umgekehrter Richtung (nicht unmittelbar einsehbar!)



e) "Aufwickeln" der entgegengesetzten Feldlinien

$\rightarrow$  Abbau des toroidalen Feldes

f) Überschuß am Ende (Sonnenflecken-Minimum)  $\Rightarrow$  a) mit Umpolung

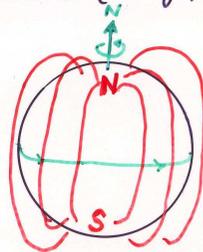
## Flecken-Zyklus: Qualitatives Modell

V.9

5-18

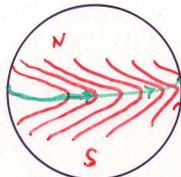
Vorbemerkung: In einem Plasma sind wegen der sehr hohen elektr. Leitfähigkeit die magnetischen Feldlinien praktisch fest mit der Materie verbunden ("eingefroren").

a) Ausgangslage:  
ein Dipol-Magnetfeld



b) Differentielle Rotation

- $\rightarrow$  "Aufwickeln" der Feldlinien
- $\rightarrow$  Toroidales Feld



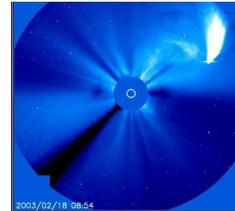
## Korona und Sonnenwind

5-20

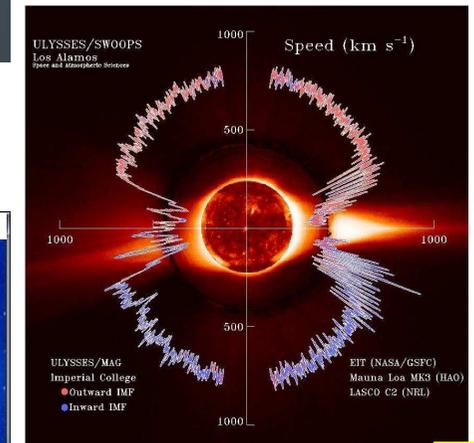
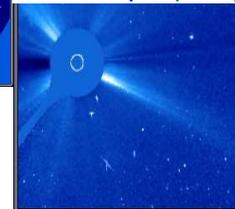


$\leftarrow$  Korona bei Sonnenfinsternis

Sonne und Komet (Movie)

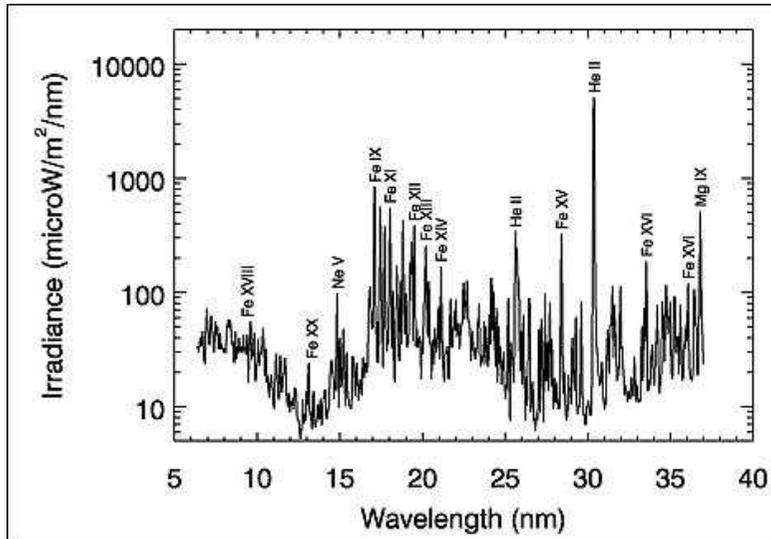


Kometen-Impact (Movie)



## Spektrum der Korona

5-21



im extremen UV:  
Emissionslinien von sehr hohen Ionen, z.B. Fe<sup>15+</sup>

## Sonnenwind erzeugt Polarlichter, treibt Kometenschweife

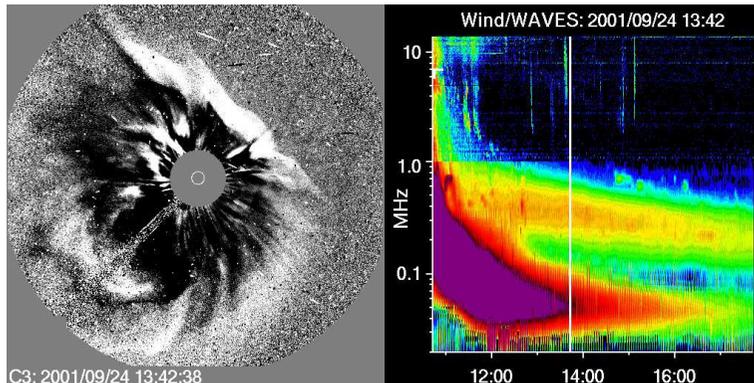
5-23



## Radio-Emission der Sonne

5-22

- stärkste Radioquelle am Himmel
- extrem variabel (Faktor 10<sup>5</sup>) → Radio-Bursts
- Entstehung durch *magnetic reconnection*
- verbunden mit *coronal mass ejection (CME)*
- Wellenlänge korreliert mit Entstehungstiefe (Plasma-Frequenz)
- $\lambda \sim 10$  cm: obere Chromosphäre;  $\lambda \sim 1$  m: Korona



## Der Sonnenwind

5-24

Abschätzung von  $v$  aus Advektion von Kometenschweifen

Winkel zw. Plasma- und Staubschweif

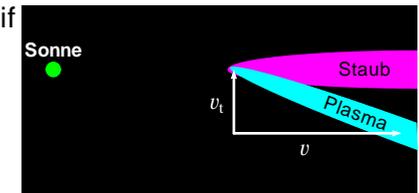
typisch 5° (Hoffmeister 1943)

Plasmaschweif: Sonnenwind ( $B$ )

Staubschweif: Strahlungsdruck

$v_t$  typisch 40 km/s Bahngeschw.

$\sin 5^\circ = v_t/v \rightarrow v = 400$  km/s



In-situ-Messungen der Helios-Sonden 1974, 1976

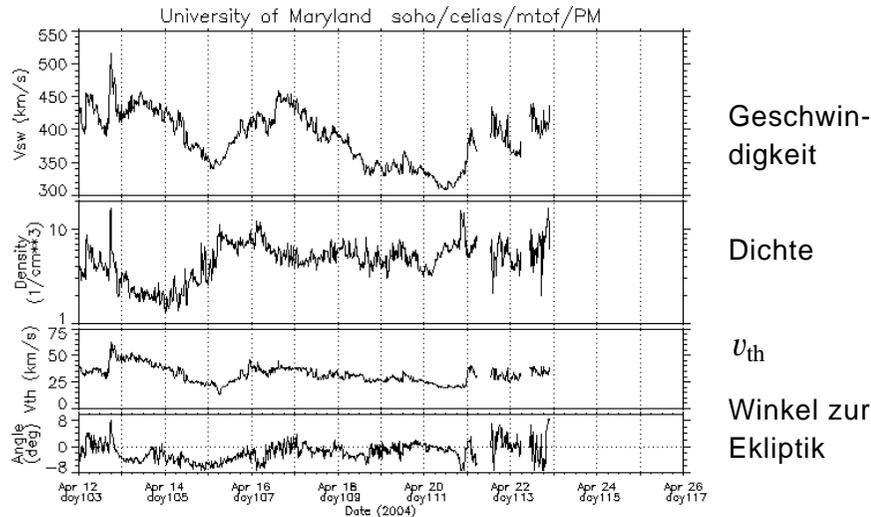
	bei 1 AU	bei 0.3 AU
$v$ [km/s]	500 - 750	500 - 750
Richtung	radial	radial
Protonendichte [cm <sup>-3</sup> ]	3 - 4	20 - 40
Magnetfeld $B$ [ $\mu$ G]	40 - 60	250 - 450
Winkel von $B$ gegen radial	35°	10°
Temperatur [ $10^5$ K]		
- Protonen	1.5 - 2.5	4 - 6
- Elektronen	1.0 - 2.0	1.5 - 2.5

zitiert nach:  
M. Stix:  
"The Sun"  
Springer 1989

## Der Sonnenwind

5-25

Abb.: Daten vom SOHO Proton Monitor („Space Weather“)



Geschwindigkeit

Dichte

$v_{th}$

Winkel zur Ekliptik

## Theorie des Sonnenwinds

5-27

### Heizung der Korona

- $T$  etwa  $10^6$  K
  - Energiebedarf: ca.  $10^{-4} L_{\odot}$  für Chromosphäre,  $10^{-5} L_{\odot}$  für Korona
  - Energiequelle: Wasserstoffkonvektionszone
  - Transport: akustische Wellen<sup>(\*)</sup>, Alfvén-Wellen, elektr. Ströme
- <sup>(\*)</sup> Energie akustischer Wellen  $\propto \rho v_A^2$  ( $v_A$  = Geschwindigkeitsamplitude)  
 energie-erhaltende Welle auswärts:  $\rho$  nimmt ab  $\rightarrow v_A$  nimmt zu  
 wenn  $v_A \rightarrow v_s$ : Stoßwelle (Schock), Energie dissipiert

### Elektrische Leitfähigkeit von Plasma

Def.: Elektrische Leitfähigkeit  $\sigma = \frac{\text{Strom} / \text{Fläche}}{\text{Spannung} / \text{Länge}} \quad [\text{A V}^{-1} \text{m}^{-1}]$   
 $\sigma = e n \mu$  [Gerthsen-Kneser, Kap. 8.4.1]

mit:  $e$  = Ladung der Teilchen

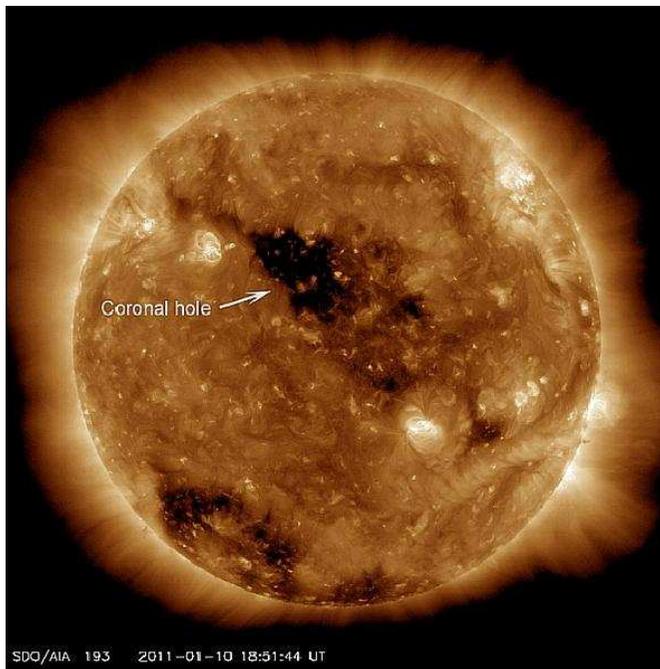
$n$  = Teilchendichte

$\mu$  = „Beweglichkeit“;

$\mu = v/E$  mit  $v$  = Driftgeschwindigkeit im el. Feld  $E$

5-26

## Der Sonnenwind



der schnelle Sonnenwind kommt vor allem aus den koronalen Löchern

5-28

für die Beweglichkeit  $\mu$  gibt es den Drude-Ansatz:  $\mu = \frac{e l}{2 m v_{th}}$   
 mit der freien Weglänge  $l = \frac{1}{n A}$ , wobei  $A$  = Stoßquerschnitt  
 bei geladenen Teilchen:  $A \approx \pi r_C^2$  mit Coulomb-Stoßradius  $r_C = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 k T}$   
 z.B. bei  $T = 10^6$  K:  $r_C \approx 0.1 \text{ \AA} \rightarrow A \approx 10^{-17} \text{ cm}^2$   
 d.h. bei  $n = 10 \text{ cm}^{-3} \rightarrow$  freie Weglänge  $l \approx 10^{16} \text{ cm} \approx 1000 \text{ AU} \quad \text{!!!}$

... alles einsetzen ...  $\rightarrow n$  kürzt sich raus

$\sigma \propto T^{-1/2} T^2$  durch  $v_{th}$  im Drude-Ansatz und  $T^{-2}$  im Coulomb-Querschnitt

Elektrische Leitfähigkeit von vollständig ionisiertem Wasserstoff:

$$\frac{\sigma}{\Omega^{-1} \text{m}^{-1}} \approx 10^{-3} \left(\frac{T}{\text{K}}\right)^{3/2}$$

z.B. bei  $10^6$  K:  $\sigma = 10^6 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$  - vergl. mit Kupfermetall:  $\sigma = 6 \cdot 10^7 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$

Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ergibt sich aus der elektrischen Leitfähigkeit  $\sigma$ :

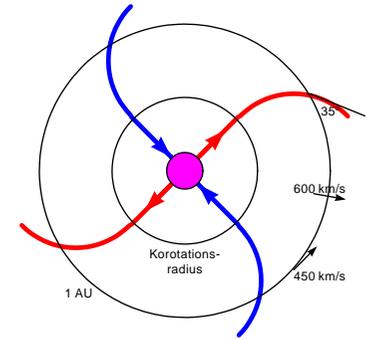
$\lambda = \sigma \frac{3k^2 T}{e^2}$  Wiedemann-Franz-Gesetz [Gerthsen-Kneser 6.4.3]

unter Korona-Bedingungen (nach Spitzer 1962, zitiert bei Stix p. 333)

$$\frac{\lambda}{\text{W K}^{-1} \text{m}^{-1}} \approx 0.92 \cdot 10^{-11} \left(\frac{T}{\text{K}}\right)^{5/2}$$

Vergleiche: Messwerte Magnetfeld im Sonnenwind

	log B [Gauss]
Prominenzen	1 ... 2
Radio-Bursts	0 ... 2
bei 1 AU	≈ -3.5



**Korotation des Sonnenwindes bis ~ 12 R<sub>⊙</sub>**

konsistent mit Messung in Erdnähe:

→  $v_{\varphi}(r = 1 \text{ AU}) \approx 1 \dots 10 \text{ km/s}$

- ohne Korotation zu erwarten: 10 m/s  
(Drehimpulserhaltung →  $v_{\varphi} \propto r^{-1}$ )

- bei Korotation bis 10 R<sub>⊙</sub>: 10<sup>2</sup>-fach höher = 1 km/s  
- bei Korotation bis 33 R<sub>⊙</sub>: 10<sup>3</sup>-fach höher = 10 km/s  
Abb.: Sektorstruktur des B-Feldes in der Ekliptik: meist 2 oder 4 Sektoren

**Korotierender Bereich:**

Feldlinien: radial

$\vec{v}$  = Spirale (im Inertialsystem)  
radial (mitrotierendes System)

**Nicht korotierender Bereich:**

Feldlinien: archimedische Spirale

wegen ( $v_r = \text{const.}, \sin(\text{Winkel}) = v_{\varphi}/v_r$ )  
 $\vec{v}$  = (fast) radial (im Inertialsystem),  
Spirale (mitrotierendes System)

## Plasma im Magnetfeld

„Eingefrorene“ Magnetfelder

Wenn sich Magnetfeld  $\vec{B}$  ändert:

Induktionsgesetz  $\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

Ringspannung  $\pi r^2 \dot{B}$

verteilt auf Kreisumfang  $2\pi r$ :  $E = -\frac{1}{2} r \dot{B}$

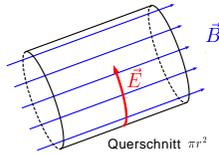
induziert Stromdichte  $j = \sigma E = -\frac{1}{2} \sigma r \dot{B}$  ( $r = 0 \dots R$ )

Strom pro m Schlauchlänge, Radius  $R$ :  $I = \int_{r=0}^R j \, dr = -\frac{1}{4} \sigma R^2 \dot{B}$

Strom → Magnetfeld (vergl. Spule mit  $n$  Windungen:  $B = \mu_0 I n$ )

$$B = -\frac{1}{4} \mu_0 \sigma R^2 \dot{B} \rightarrow \text{DGL für } B(t)$$

Lösung:  $B(t) = B_0 e^{-t/\tau_0}$  mit  $\tau_0 = \frac{1}{4} \mu_0 \sigma R^2$



	T/K	R	$\tau_0$	
Sonnenfleck	5000	10 <sup>4</sup> km	1000 yr	SI: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ V s A}^{-1} \text{ m}^{-1}$
Korona	10 <sup>6</sup>	$R_{\odot} \approx 10^9 \text{ m}$	30 Gyr	Leitfähigkeit $\sigma$ siehe vorige Seite
heißes ISM	10 <sup>4</sup>	1 pc	10 <sup>22</sup> yr	→ Leitfähigkeiten durch Turbulenz stark verringert (Steenbeck & Krause 1969)

• Langsamere Strömungen von einem Fußpunkt aus erzeugen korotierende Störungsmuster (*Corotating Interaction Regions* Mullan 1984)

• **Drehimpuls-Verlust durch Magnetic Braking**

spezifischer Drehimpuls eines Massenenelementes:  $\vec{j} = \vec{J}/m = \vec{r} \times \vec{v}$   
bei Korotation bis 33 R<sub>⊙</sub> →  $\vec{j}$  1000 mal größer als bei 1 R<sub>⊙</sub>

*Abschätzung für die Sonne*

grobe Annahme:  $\vec{j}$  sei gleichmäßig über M<sub>⊙</sub> verteilt

$$\dot{M} \approx 10^{-14} M_{\odot}/\text{yr} \rightarrow \dot{J} \approx 10^{-11} J_{\odot}/\text{yr}$$

→ 10% Drehimpuls-Verlust in 10 Gyr

→ Abbremsung der äußeren Schichten → differentielle Rotation

→ Effekt in jungen Sternen größer (mehr Rotation → stärkeres Magnetfeld) ??

• **Magnetic Rotator Theory** (ausführlich bei Lamers & Cassinelli)

- Korotation erzeugt Zentrifugalkraft

- Lösung von Bewegungs- und Energie-Gleichung zusammen mit elektrodynamischen Gleichungen (in der Äquatorebene)

→ liefert einen "kritischen Punkt" am „Alfvén-Radius“  $r_A \approx$  Korotations-Radius

- Sonne ist ein *Slow Magnetic Rotator* (radiale Komponente kaum beeinflusst)

- *Fast Magnetic Rotators* können Winde treiben, besonders in Verbindung mit anderen Kräften („Hybrid Models“), z.B. *Luminous Magnetic Rotators*

## Die Alfvén-Bedingung

Maximale Diffusionsgeschwindigkeit geladener Teilchen senkrecht zu den Feldlinien des B-Feldes:  $v \approx R/\tau_0$

Wenn eine Bewegung gegen ein Magnetfeld läuft, gewinnt der Stärkere:

Vergleiche Energiedichten: kinetisch:  $\frac{1}{2} \rho v^2$  magnetisch:  $\frac{1}{2\mu_0} B^2$

$$\frac{1}{2\mu_0} B^2 > \frac{1}{2} \rho v^2 \rightarrow \text{Magnetfeld bestimmt die Bewegung}$$

Diese Bedingung ist in vielen kosmischen Plasmen erfüllt

### Korotation

Korotationsgeschwindigkeit am Radius  $r$  (Äquator-Ebene):  $v_{\varphi} = 2\pi r/P_{\text{rot}}$

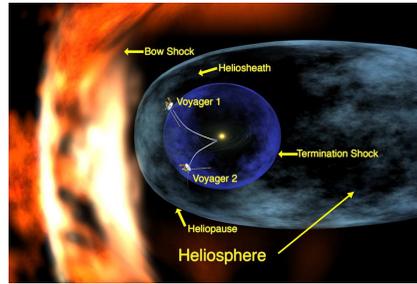
Dichte am Radius  $r$  aus Kontinuitätsgleichung  $\dot{M} = 4\pi r^2 \rho v_r$

$$B > \sqrt{\frac{\pi \mu_0 \dot{M}}{v_r}} / P_{\text{rot}} \rightarrow \text{Korotation}$$

Sonne:  $\dot{M} = 10^{-14} M_{\odot}/\text{yr}$   
 $v_r = 500 \text{ km/s}$   
 $P_{\text{rot}} = 25^{\text{d}}, v_{\varphi}(R_{\odot}) = 2 \text{ km/s}$   
 → Korotation für  $B > 10^{-2.5} \text{ Gauss}$

# Die Heliosphäre

5-33



Wechselwirkung Sonnenwind ./.  
Interstellares Medium (ISM)

Heliopause: Sonnenwind- Staudruck  $\approx$   
Druck des ISM,  $\frac{1}{2}\rho v_r^2 \approx \rho_{\text{ISM}} v_{\text{th}}^2 \rightarrow \text{shock}$

- von Voyager 1 2003 bei 90 AU erreicht

Die Magnetosphäre der Sonne

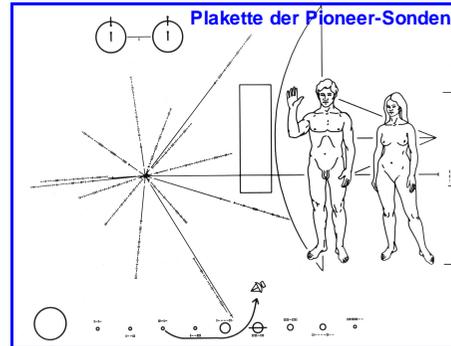
- endet an der magnetosheath

- Abschirmung kosmischer Strahlung

- theor. weniger wirksam an den Polen



Schallplatte auf den Voyager-Sonden



Plakette der Pioneer-Sonden

?