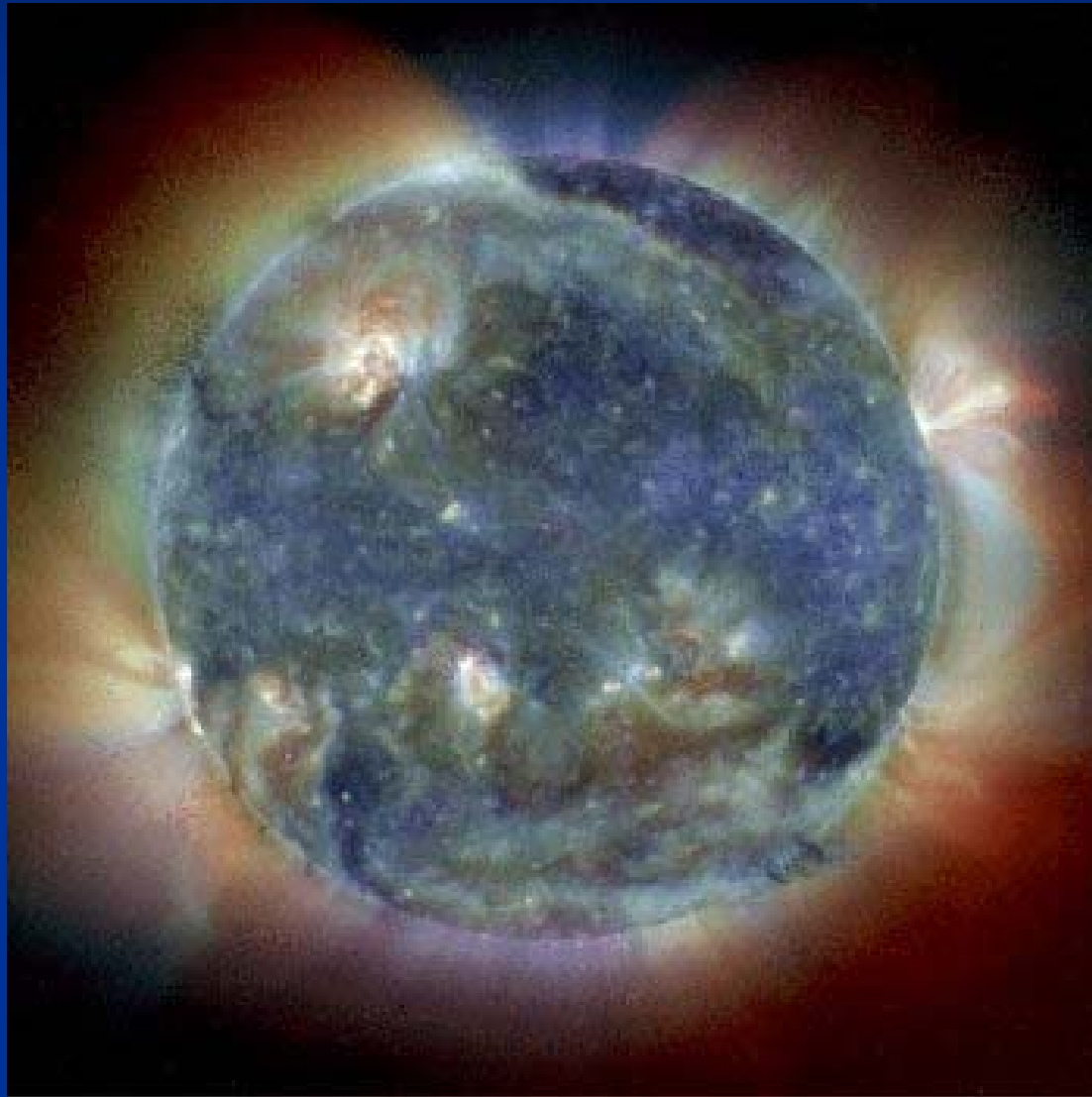


# Das Parkermodell des Sonnenwindes



# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## Gliederung:

- Entdeckung des Sonnenwindes
- Korona
- Das Chapmanmodell
- Das Parkermodell
- Diskussion der Lösungen
- Grenzen des Parkermodells

*S. Bauch, M. Grottemeyer, M. Hack, K. Hochstrate,  
O. Mühlfeld, C. Nölle und J. Zhang, IEAP, CAU, © 2005*

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 1. Entdeckung des Sonnenwindes

### Was ist Sonnenwind?

- Sonnenwind ist ein radial von der Sonne nach außen gerichteter Teilchenstrom.
- Hauptbestandteile sind Protonen, Elektronen und Alphateilchen.
- Die Energie der Teilchen beträgt etwa  $10^6$  K.
- Da der Sonnenwind ausschließlich aus geladenen Teilchen besteht, spricht man von einem Plasma.

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 1. Entdeckung des Sonnenwindes

- 1859 beobachtet Carrington, dass ein Zusammenhang zwischen Sonnenflares und zeitlich versetzten irdischen Magnetfeldstürmen besteht.
- Um 1900 erklärt Birkeland, dass Polarlichter durch geladene Teilchenströme hervorgerufen werden.

# Das Parkermodell des Sonnenwindes



# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 1. Entdeckung des Sonnenwindes

- 1951 spricht Biermann von *konst. solarer Teilchenstrahlung* und *driftendem Plasma*.



# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 1. Entdeckung des Sonnenwindes

- Chapman greift diese Theorie an und stellt kurz darauf das Modell von einer langreichweitigen, statischen Korona auf.
- 1959 führt Parker die Bezeichnung solar wind ein und liefert die hydrodynamische Theorie des Sonnenwindes.

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 1. Entdeckung des Sonnenwindes

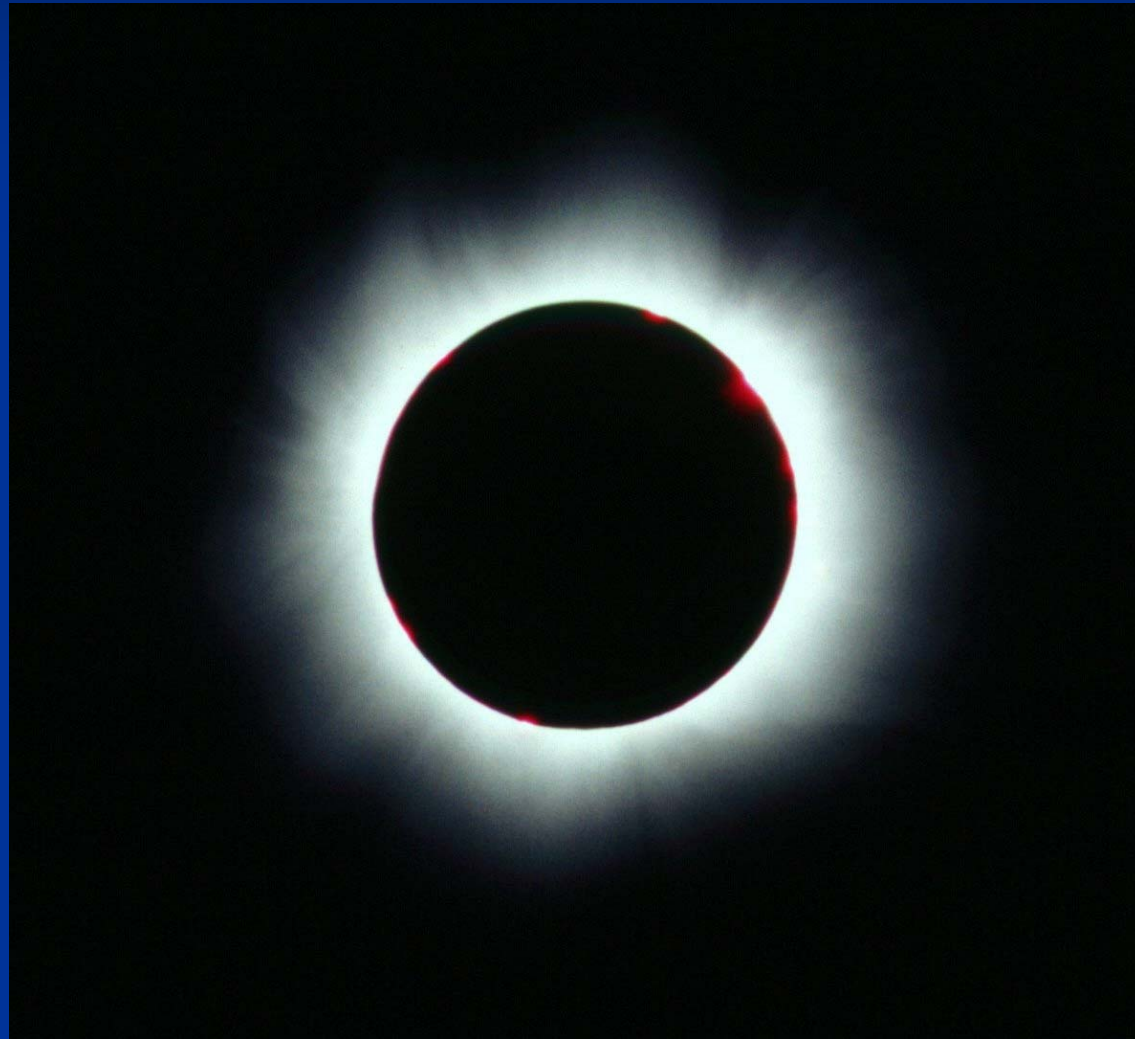
Begriffserklärungen:

- **Korona:** sehr dünne Massenschicht der Sonnenatmosphäre, die bei einer bis auf  $10^7$  Teilchen/cm<sup>3</sup> abnehmenden Gasdichte eine Temperatur von mehr als  $10^6$  K aufweist.
- **Photosphäre:** die 300 bis 400 km dicke Trennschicht zwischen dem inneren und dem äußeren der Sonne; mit einer Temperatur von etwa 6000 K.
- Der Sonnenwind stammt aus den äußeren Schichten der Sonne und hat eine Reichweite von etwa 4 Plutobahnradien.



# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 2. Korona



# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 2. Korona

- Parkermodell: Erklärung des Sonnenwindes durch expandierende Korona
- Thermische Geschwindigkeit der Protonen:  
 $v_{th} \approx 250 \frac{km}{s}$  bei einer Koronatemperatur  $T \approx 10^6 K$
- Benötigte Entweichgeschwindigkeit:  $v_{ent} \approx 500 \frac{km}{s}$
- Trotzdem Expansion der gesamten Korona möglich

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 2. Korona

- Temperatur der Korona

$$T_{\text{Oberfl.}} \approx 5780K \text{ und } T_{\text{Korona}} \approx 10^6 K$$

- Vorgeschlagene Heizungsmechanismen:
  - Schallwellen
  - Magnetoakustische Wellen
  - Alfvénwellen
  - Microflares
  - Strahlung aus der Photosphäre

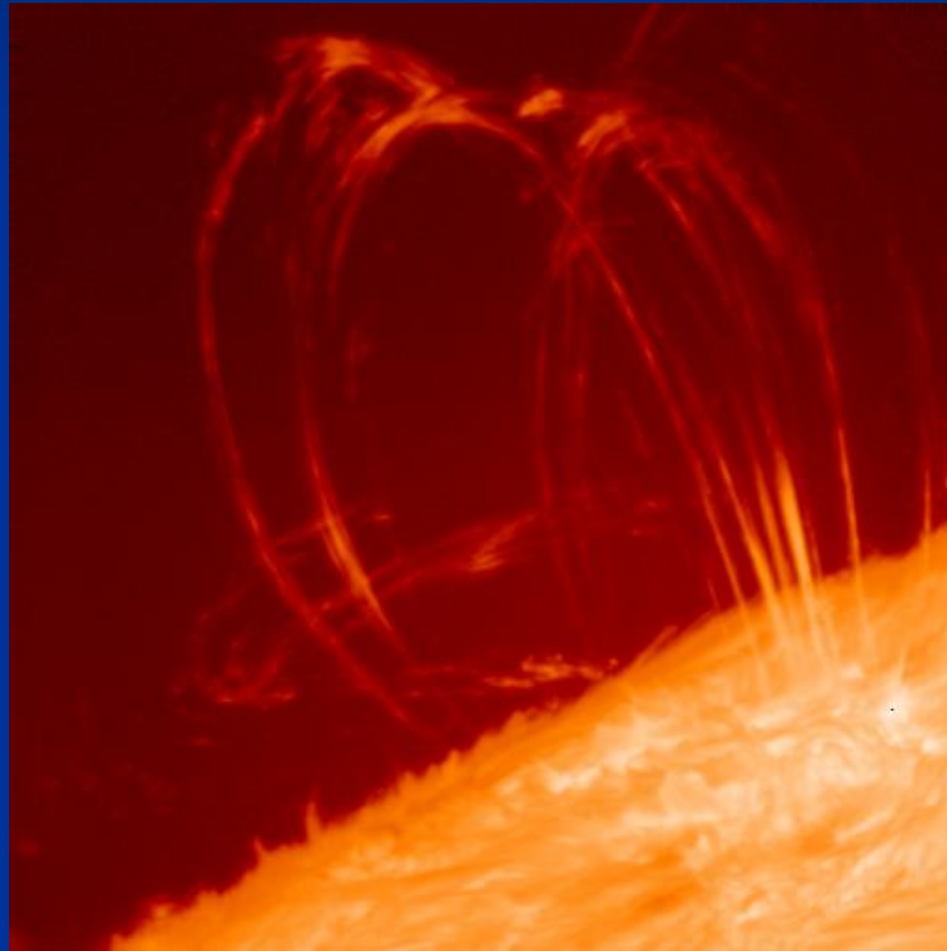
# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 2. Korona

- Hauptmechanismus nicht einfach auszumachen, da zur Koronaheizung nur der  $10^{-4}$ -te Teil des gesamten Energieverlustes der Sonne erforderlich ist.
- Wahrscheinlich: Magnetischer Mechanismus; höchste Koronatemperaturen in magnetischen Loops.

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 2. Korona



# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 2. Korona

### ■ Alfvén Wellen (Ionen-Zyklotron Heizung)

- Transversale MHD-Wellen

- Ausbreitung entlang der (eingefrorenen)

Magnetfeldlinien mit  $v_A = \frac{B}{\sqrt{\mu_0 \rho_m}}$

- Ionen gyrieren um die Feldlinien mit  $\Omega_{ion} = \frac{qB}{m_{ion}}$

- Sind Wellen und Ionen resonant, so werden die Ionen beschleunigt.

Resonanzbedingung:  $\Omega_{ion} = \omega_A - v_{ion} k_A$

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 2. Korona

- Höhere Temperatur senkrecht zu dem Magnetfeld  
außerdem: Massenabhängigkeit der Temperatur  
gemessen (bei O-VI):  $T_{\perp} \approx 10^8 K$   
 $T_{\parallel} \approx 10^6 K$
- Leichte Teilchen ( $e^{-}$ ,  $p$ ) :  
keine Richtungsabhängigkeit  
→ vielversprechendes Modell

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 2. Korona

- 2 Arten von Sonnenwind:
  - Schneller SW: Entstehung in koronalen Löchern („offene“ Magnetfeldlinien)
  - Langsamer SW: Entstehung über Gebieten geschlossener Feldlinien.





# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 3. Das Chapmanmodell

- Gleichgewichtszustand der Korona

$$\frac{dp}{dr} = -\rho \frac{GM_s}{r^2}$$

- Wärmetransport zwischen der Korona und der Photosphäre

$$Q_H = -4\pi r^2 \chi \frac{dT}{dr}$$

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 3. Das Chapmanmodell

- Wärmetransport durch die Bewegung der Elektronen
- Dichte-Höhe-Abhängigkeit

$$\frac{n}{n_0} = \frac{r^{2/7}}{r_0} \exp \left\{ -\frac{7r_0}{5H_0} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^{-5/7} \right] \right\}$$

- Temperatur-Höhe-Abhängigkeit

$$\frac{T}{T_0} = \left( \frac{r}{r_0} \right)^{2/7}$$

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 3. Das Chapmanmodell

Problem:

- $\rho$  im Übergang zum interstellaren Medium nicht 0
- Temperatur ist nur schwach von der Höhe abhängig.
- T der Photosphäre = 6000 k  
T der Korona > 1 Mk

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 4. Herleitung des Parkermodells

- Hydrodynamisches Modell
- Korona ist nicht im Gleichgewicht
- Korona ist radial symmetrisch
- Korona ist isotherm
- Die Verwendung des Polytropen Ansatzes

➤ Konstant expandierende Korona

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

Ausgangspunkt des Modells:

$$\frac{\partial f(\vec{v}, \vec{r}, t)}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) f(\vec{v}, \vec{r}, t) + (\vec{a} \nabla_v) f(\vec{v}, \vec{r}, t) = \left( \frac{\partial f(\vec{v}, \vec{r}, t)}{\partial t} \right)_{\text{Stoß}}$$

Boltzmann-Gleichung

Die man durch totale Differation der Verteilungsfunktion nach der Zeit erhält

Wobei für die Verteilungsfunktion gilt:

$$\int d^3 v f(\vec{v}, \vec{r}, t) = n(\vec{r}, t)$$

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

Bildung des nullten Moments

$$\frac{\partial f(\vec{v}, \vec{r}, t)}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) f(\vec{v}, \vec{r}, t) + (\vec{a} \nabla_v) f(\vec{v}, \vec{r}, t) = \left( \frac{\partial f(\vec{v}, \vec{r}, t)}{\partial t} \right)_{\text{Sto\ss}}$$

Erhalt man

$$\frac{\partial}{\partial t} \int f(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3 v + \int (\vec{v} \nabla) f(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3 v + \int (\vec{a} \nabla_v) f(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3 v = \frac{\partial}{\partial t} \int f_{\text{Sto\ss}}(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3 v$$

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

Wenn man nun die Produktregel verwendet

$$\nabla(f \vec{v}) = f \nabla * \vec{v} + \vec{v} * \nabla f$$

Gelangt man zu

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int f(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3 v + \nabla \int \vec{v} f(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3 v - \int f(\vec{v}, \vec{r}, t) \nabla \vec{v} d^3 v \\ & + \int \nabla_{\vec{v}} \vec{a} f(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3 v - \int f(\vec{v}, \vec{r}, t) \nabla_{\vec{v}} \vec{a} d^3 v = \frac{\partial}{\partial t} \int f_{\text{Sto\ss}}(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3 v \end{aligned}$$

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

Diese Gleichung kann man nun vereinfachen

$$\frac{\partial}{\partial t} \int f(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3v + \nabla \int \vec{v} f(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3v - \int f(\vec{v}, \vec{r}, t) \nabla \vec{v} d^3v$$
$$+ \int \nabla_{\vec{v}} \vec{a} f(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3v - \int f(\vec{v}, \vec{r}, t) \nabla_{\vec{v}} \vec{a} d^3v = \frac{\partial}{\partial t} \int f_{\text{Sto\ss}}(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3v$$

Verwenden der Grundgleichung

$$\int d^3v f(\vec{v}, \vec{r}, t) = n(\vec{r}, t)$$



# Das Parkermodell des Sonnenwindes

Diese Gleichung kann man nun vereinfachen

$$\frac{\partial}{\partial t} n(\vec{r}, t) + \nabla \int \vec{v} f(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3 v - \int f(\vec{v}, \vec{r}, t) \nabla \vec{v} d^3 v$$
$$+ \int \nabla_{\vec{v}} \vec{a} f(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3 v - \int f(\vec{v}, \vec{r}, t) \nabla_{\vec{v}} \vec{a} d^3 v = \frac{\partial}{\partial t} \int f_{\text{Sto\ss}}(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3 v$$

Mit  $u(\vec{r}, t)$  als mittlere  
Geschwindigkeit

$$\nabla \int \vec{v} f(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3 v = \nabla (n(\vec{r}, t) * \vec{u}(\vec{r}, t))$$

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

Diese Gleichung kann man nun vereinfachen

$$\frac{\partial}{\partial t} n(\vec{r}, t) + \nabla(n(\vec{r}, t) * \vec{u}(\vec{r}, t)) - \int f(\vec{v}, \vec{r}, t) \nabla \vec{v} d^3 v$$

$$+ \int \nabla_v \vec{a} f(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3 v - \int f(\vec{v}, \vec{r}, t) \nabla_v \vec{a} d^3 v = \frac{\partial}{\partial t} \int f_{\text{Sto\ss}}(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3 v$$

Mit Hilfe der

Hamiltonmechanik: 
$$\frac{\partial v_i}{\partial r_i} = \frac{\partial \dot{r}_i}{\partial r_i} = \frac{\partial^2 H}{\partial r_i \partial v_i} = - \frac{\partial \dot{v}_i}{\partial v_i} = - \frac{\partial a_i}{\partial v_i}$$

Also ergibt sich

$$\int f(\vec{v}, \vec{r}, t) \nabla \vec{v} d^3 v = - \int f(\vec{v}, \vec{r}, t) \nabla_v \vec{a} d^3 v$$

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

Diese Gleichung kann man nun vereinfachen

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} n(\vec{r}, t) + \nabla \int \vec{v} f(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3 v + \int \nabla_v \vec{a} f(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3 v \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \int \underbrace{f_{\text{Sto\ss}}(\vec{v}, \vec{r}, t)}_{=\text{const}} d^3 v \quad \quad \quad \downarrow \text{Gau\sscher Satz} \end{aligned}$$

$$\int \nabla_v \vec{a} f(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3 v = \int_{\partial V} a f(\vec{v}, \vec{r}, t) dS_v = 0$$

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

Damit erhält man nun:

$$\frac{\partial n(\vec{r}, t)}{\partial t} + \nabla \cdot (n(\vec{r}, t) \vec{u}(\vec{r}, t)) = 0$$

Da wir ein zeitlich unveränderliches Problem haben

$$\frac{\partial n(\vec{r}, t)}{\partial t} = 0$$

Und mit:

$$m * n(\vec{r}, t) = \rho(\vec{r}, t)$$

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

Und gelangt somit wegen der Radialsymmetrie zu

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \rho(r) u(r, t) \right) = 0$$

Kontinuitätsgleichung

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

Aus dem ersten Moment der Boltzmann-Verteilung

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int f(\vec{v}, \vec{r}, t) \vec{v} d^3 v + \int (\vec{v} \nabla) f(\vec{v}, \vec{r}, t) \vec{v} d^3 v + \int (\vec{a} \nabla_v) f(\vec{v}, \vec{r}, t) \vec{v} d^3 v \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \int f_{\text{Sto\ss}}(\vec{v}, \vec{r}, t) \vec{v} d^3 v \end{aligned}$$

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

Erhält man nach längere Rechnung:

$$\frac{\rho(r)}{3} u(r) \frac{du(r)}{dr} = -G \frac{M_s \rho(r)}{r^2} - \frac{dP(r)}{dr}$$

Bewegungsgleichung

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

Aus dem zweiten Moment erhält man

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left[ r^2 \rho u \left( \frac{1}{2} U^2 + \frac{3P}{4\rho} \right) \right] = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 2Pu) - \rho u \frac{GM_s}{r^2} + S(r)$$

Energieflussgleichung

Reihe beliebig weiter fortsetzbar



# Das Parkermodell des Sonnenwindes

In dem man die Polytropennäherung verwendet

$$P = P_0 \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\alpha \quad \alpha = \text{const} = 1$$

Kann man diese unendliche Entwicklung abbrechen

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

Aus diesen 3 Gleichungen

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \rho(r) u(r, t) \right) = 0$$

$$\frac{\rho(r)}{3} u(r) \frac{du(r)}{dr} = -G \frac{M_s \rho(r)}{r^2} - \frac{dP(r)}{dr}$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left[ r^2 \rho u \left( \frac{1}{2} U^2 + \frac{3P}{4\rho} \right) \right] = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 2Pu) - \rho u \frac{GM_s}{r^2} + S(r)$$

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

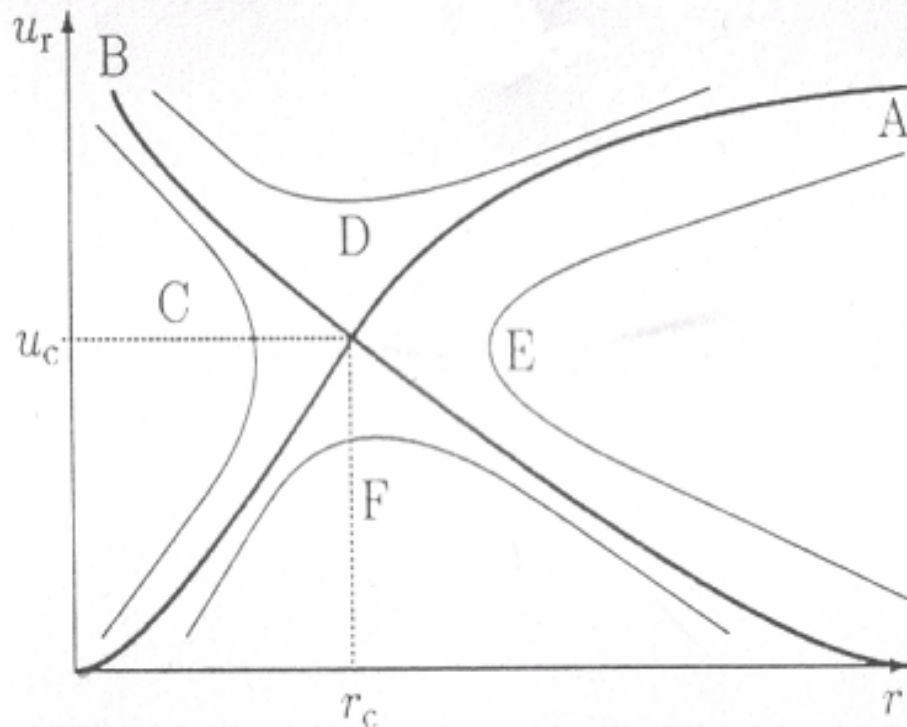
Erhält man dann

$$\frac{1}{u} \frac{du}{dr} \left( u^2 - \frac{2kT}{m} \right) = \frac{4kT}{mr} - \frac{GM_S}{r^2}$$

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 5. Diskussion der Lösungen

### Lösungstopologie des Parker Modells



- exist. 4 eindeutige Lösungsklassen
- 'A' wird beobachtet
- kritischer Punkt bei  $(u_c, r_c)$
- mit:

$$r_c = \frac{GMm}{4k_B T}, u_c = \sqrt{\frac{2k_B T_0}{m}}$$

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 5. Diskussion der Lösungen

gewinnen der Lösungsklassen

$$\frac{1}{u} \frac{du}{dr} \left( u^2 - 2 \frac{kT}{m} \right) = 4 \frac{kT}{mr} - \frac{GM}{r^2}$$

Für  $r > r_c = \frac{gMm}{4kT}$  wird die rechte Seite positiv.

An der Nullstelle  $4 \frac{kT}{mr} = \frac{GM}{r^2}$  muss entweder

$$u_c^2 = 2 \frac{kT}{m} \text{ oder } \frac{1}{u} \frac{du}{dr} = 0$$

Erhalte damit die vier Lösungsklassen.

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 5. Diskussion der Lösungen

### Welche Lösung ist physikalisch?

- 'C' und 'E' wurden bereits ausgeschlossen
- 'B' und 'D':

Thermische Energie nahe der Sonnenoberfläche zu klein

$$E = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} kT$$

- 'F' erlaubt kein Gleichgewicht mit dem interstellaren Medium

es muss gelten  $P(r = \infty) = 0$  da aber andererseits  $P = 2nkT$  gilt, muss bei isothermer Korona für sinnvolle Lösung

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 5. Diskussion der Lösungen

### Betrachtung der Lösung

- Bestimme physikalische Lösung

- Erhalte:

$$\frac{u_r^2}{u_c^2} - \ln \frac{u_r^2}{u_c^2} = -3 + 4 \ln \frac{2u_c^2 r}{\omega r_0} + \frac{2\omega^2 r_0}{u_c^2 r}, \text{ mit } \omega = \sqrt{\frac{GM}{r}} \text{ und } u_c = \sqrt{\frac{2k_B T_0}{m}}$$

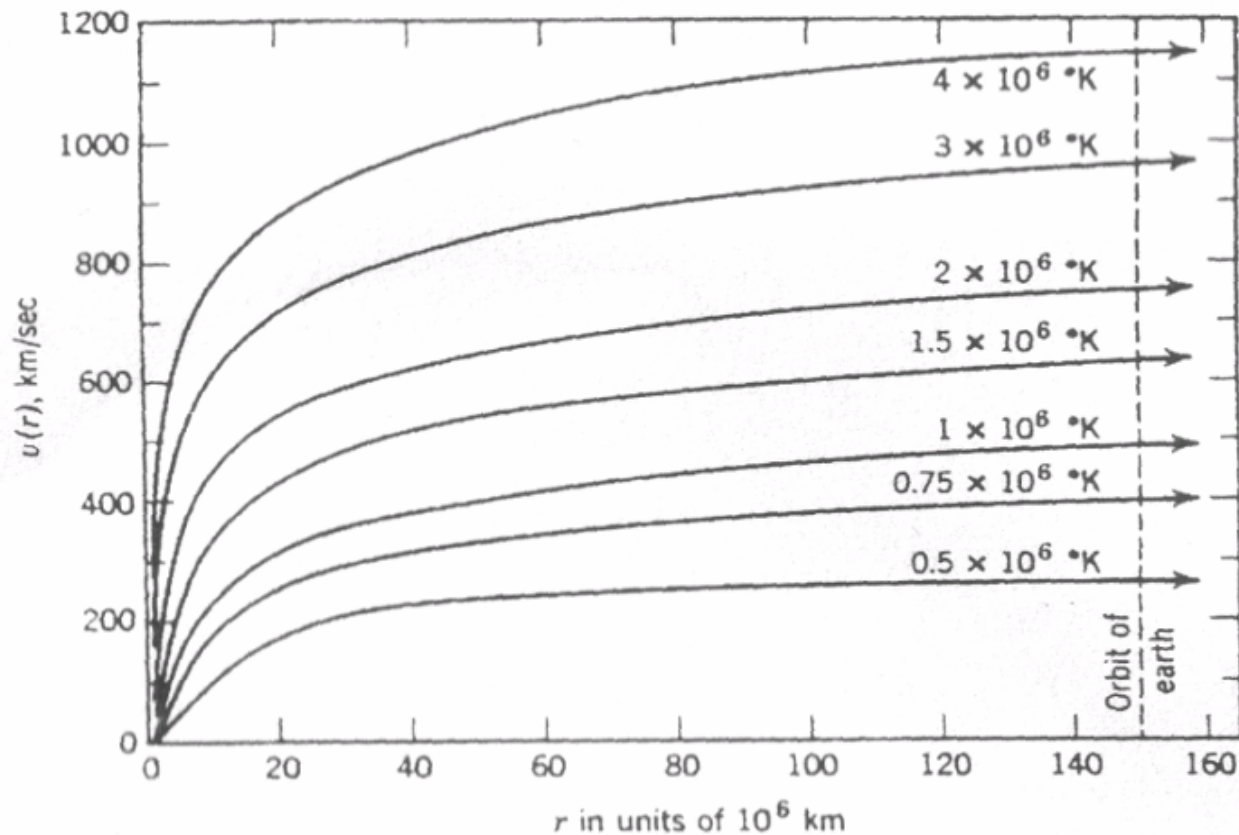
- Gleichung nicht explizit auflösbar -> numerische Behandlung nötig
- Für große  $r$  erhält man  $T$ -abhängige Näherung

$$u_r \approx 2u_c \sqrt{\ln\left(\frac{r}{r_0}\right)}$$

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 5. Diskussion der Lösungen

### Temperaturabhängigkeit der Lösung

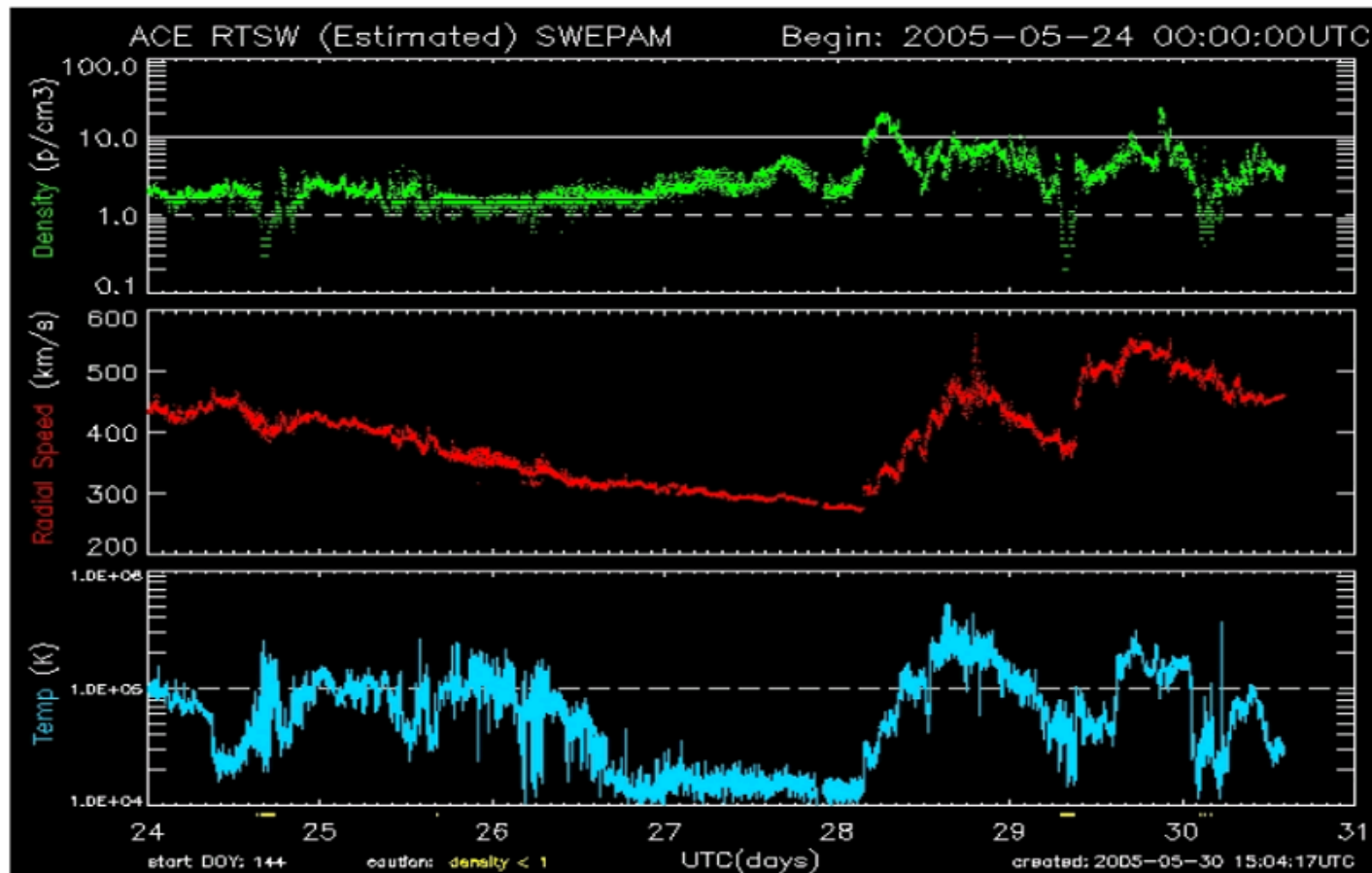




# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 5. Diskussion der Lösungen

### aktuelle Daten



# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 5. Diskussion der Lösungen

### Eigenschaften der Lösung

- Beschleunigung bis  $r = 40$  Sonnenradien
- Danach  $v$  ungefähr konstant mit 500 km/s
- Kontinuierliche Dichteabnahme  $\sim$  bis 100 AE
- dort Schockfront vorhergesagt, da Druck des interstellaren Mediums größer (Heliopause)

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 6. Grenzen des Parkermodells - Näherungen

### 1. Teilchenart

Realität: Sonnenwind besteht aus verschiedenen Teilchen, z.B. Elektronen,  $\alpha$ -Teilchen,...

Näherung: ausschließlich Betrachtung von Protonen

Fehler: Windgeschwindigkeit des Modells zu hoch

### 2. Temperatur

Realität: abhängig von Dichte, Radius und Teilchenart

Näherung: konstant

Fehler: nur in der Nähe der Sonne eine gute Näherung

### 3. Druck

Realität: abhängig vom Radius, Temperatur Winkel und Magnetfeld

Näherung: abhängig vom Radius

Fehler: nur in der Nähe der Sonne eine gute Näherung

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 6. Grenzen des Parkermodells – unbeachtete Einflüsse

- **Struktur der Sonne**

  - Vorteil: Modell ist radialsymmetrisch

  - Nachteil: kleinräumige Prozesse bleiben unberücksichtigt

- **Magnetfeld und Plasmacharakter des Sonnenwindes**

  - Vorteil: Modell ist rein hydrodynamisch

  - Nachteil: ziemlich großer Fehler in der Beschreibung des Sonnenwindes

- **Ursache der Heizung der Korona**

  - Vorteil: extrem hohe Temperatur der Korona wird als gegeben vorausgesetzt, das Modell vereinfacht sich

  - Nachteil: bietet keine Erklärung für dieses Phänomen

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## 6. Grenzen des Parkermodells – kuriose Folgerungen

- niedrige Sonnenaktivität → hohe Windgeschwindigkeiten  
hohe Aktivität → niedrige Geschwindigkeiten
- Durch die angenommenen Nährungen müsste der schnelle Sonnenwind besser approximiert werden als der langsame. Beobachtungen widerlegen dies aber!

# Das Parkermodell des Sonnenwindes

## Quellen:

- E. M. Parker AAS 1958
- M.-B. Kallenrode, Space & Physics, Springer Verlag 1998
- R. F. Wimmer-Schweingruber Vorlesungsskript 2004
- NASA SWEPAM (Graphiken)
- SOHO (Graphiken)
- L. Golub & J.M. Pasachoff The Solar Corona

Danke für die  
Aufmerksamkeit.