太陽風の理論と観測

鈴木 建

名古屋大学 大学院理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研

2011 年 8 月 20 日

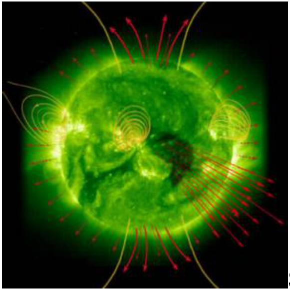
自己紹介

- 名前: 鈴木 建 (すずき たける)
- 所属: 大学院理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻 (理学部物理学科) 理論宇宙物理研究室 (Ta 研) 准教授

  本日の Ta 研からの参加者
  - 松本 琢磨 (日本学術振興会特別研究員)
  - 田中 佑希 (修士課程 1 年)

  Ta 研教授: 犬塚修一郎 (星形成, 星間媒質の物理)
- 研究内容: 太陽物理学に軸足を置いた天体物理学
  - 太陽や恒星からの星風駆動機構
  - 高密度星周囲の輸送現象
  - 原始惑星系円盤での乱流と惑星形成

太陽風



SOHO/EIT

太陽から吹き出す高温の電離した粒子 (プラズマ).

- 陽子 (H イオン), 電子, He イオン, その他重イオン...
- 流失量: 毎秒 100 万トン (1 年で太陽質量の 2×10^{-14} 倍)

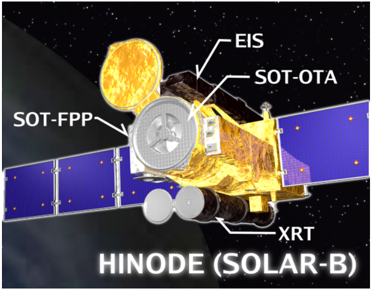
地球近傍で

- 速度: 300 – 900 km/s
- 温度: 10 – 100 万度

太陽風の観測

- HINODE の観測:
  太陽風の根元
- Ulysses の観測:
  人工衛星による ‘その場’ 観測
- 惑星間シンチレーション観測:
  電波によるリモート観測

HINODE 衛星

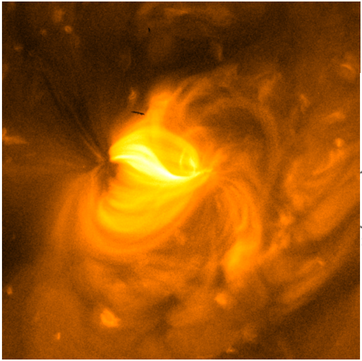


2006 年 9 月 23 日打ち上げ

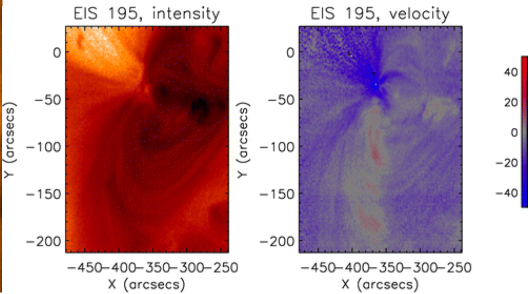
- 可視光望遠鏡: 磁場 (光球) の測定
- X 線望遠鏡: 高温プラズマの観測
- 極紫外撮像分光装置: 太陽大気診断 (速度, 温度, 密度...)

HINODE による太陽風根元の上昇流の観測

Sakao et al.2007 (XRT)



Harra et al.2008 (**主に** EIS)

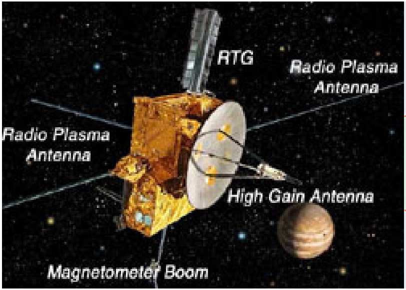


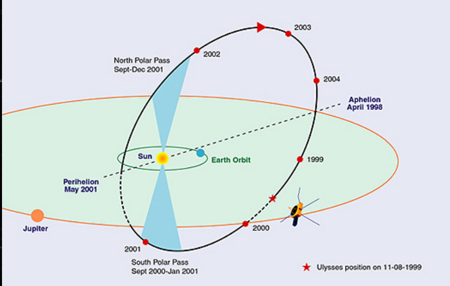
XRT by Sakao et al.2007

同じ場所の観測

ドップラー観測により， $\gtrsim$ 100 km/s **の上昇流**

Ulysses による ‘その場’ 観測

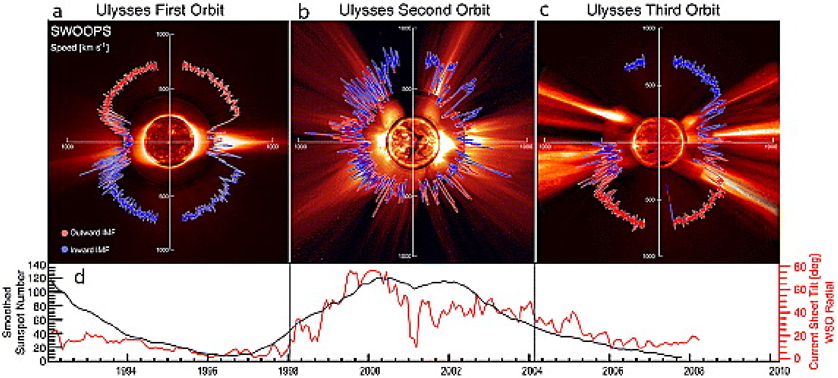




- 太陽風プラズマの物理量 (速度，密度，温度) を直接測定
- その場観測: 他にも ACE(地球近傍から) など

Ulyssesによる観測

McComas et al.2008



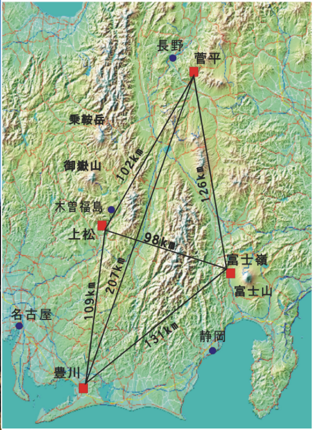
左から 1992-98(**極小**); 1998-2004(**極大**); 2004-2008(**極小**)

- **高速風** (~700-800km/s) **と低速風** (~300-400km/s)
- **太陽活動と共に変動**

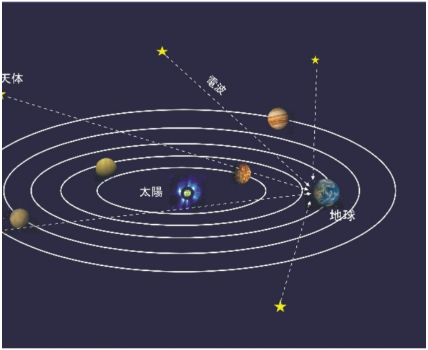
惑星間シンチレーション観測

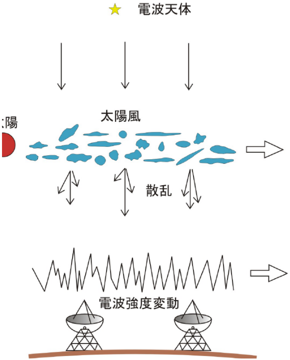
Inter-planetary Scintillation Measurement:

名大 STE 研の電波観測機器



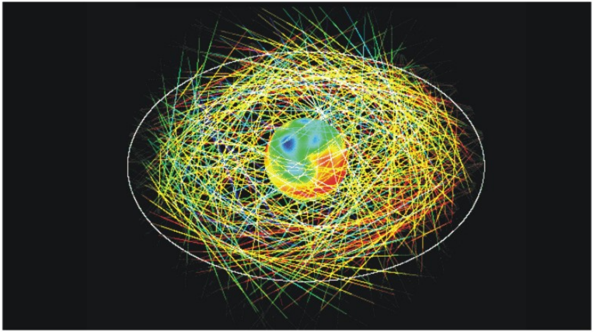
惑星間シンチレーション観測 –続–





光源 (電波星) の手前の太陽風中の擾乱を観測

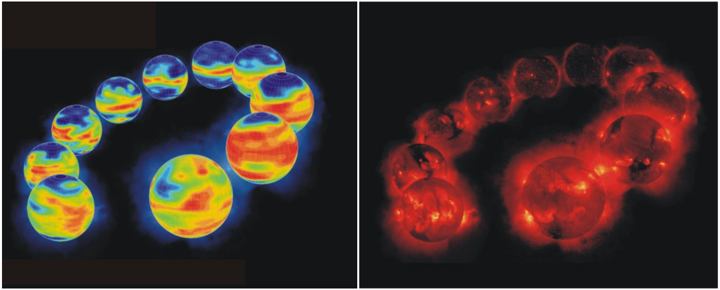
惑星間シンチレーション観測 –続–



色々な電波星を使用し，3 次元太陽風構造を構築．
(詳細は太陽風研究室の方にお聞き下さい)

IPS観測による太陽の周期活動

1991 年 – 2000 年

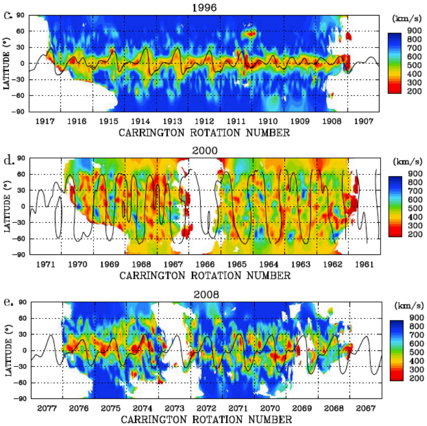


左: 太陽風速度 (青が速い)　　右: Yohkoh による X 線画像

- 活動極小期 (1995-1996): 高速風領域が広く
- 活動極大期: 低速風領域が卓越

IPS観測による太陽風の周期活動

Tokumaru et al.2010



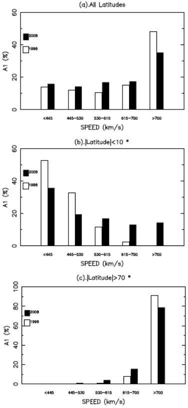
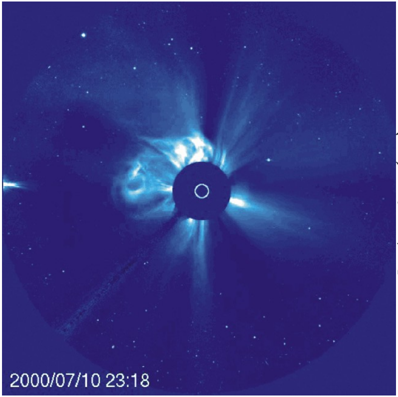


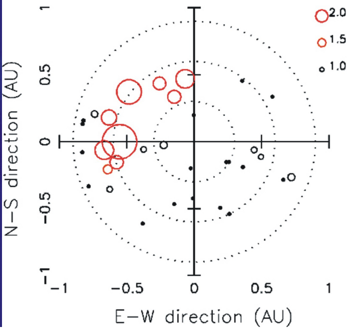
Figure 6. Comparison of A1 for 1996 and 2008 for (a) all latitudes, (b) |latitude| < 10°, and (c) |latitude| > 70°.

直近の極小期 (2008): 太陽活動が非常に弱い; 極磁場が弱い

- 高速風が赤道付近まで侵入
- 極域の高速風が少し遅い

コロナ質量放出のIPS観測





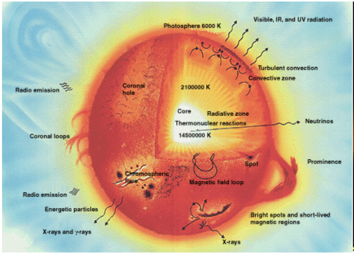
左は SOHO/LASCO **による観測**

右は 2 **日後の** IPS **観測**

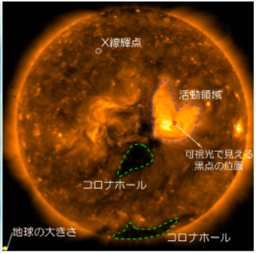
SOHO/LASCO

太陽のエネルギー放出

NASA websize



HINODE/XRT

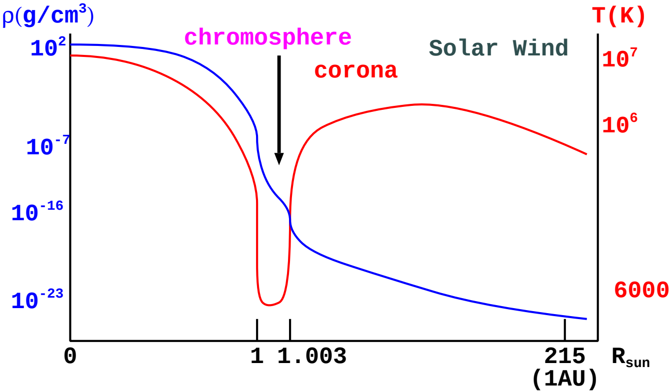


- **中心核 約 1500 万度**
  4H→He **の核融合でエネルギー生成**
- **中心付近に放射層 外側に表面対流層**
- **太陽表面 (光球) 約 6000 度**
- **外層に高温コロナ (100 万度以上) と太陽風**
  コロナホールから高速の太陽風が吹き出す

大部分は輻射でエネルギーを放出; その他ニュートリノ (約 1 割); 太陽風は輻射の 100 万分の 1 程度

密度、温度構造

(スケールは厳密ではない)



- 低温の光球の上に高温コロナ，太陽風
- 熱源 (中心) から離れるのに温度は上昇:
  おかしな状態 ‘コロナ加熱問題’

磁場の重要性

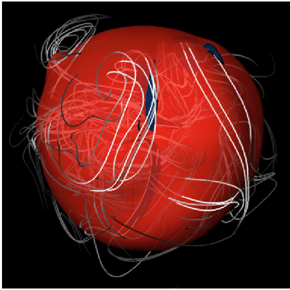
表面対流層における磁場の増幅

- 運動エネルギー ⇒ 磁場エネルギー

結果として，太陽表面は磁場だらけ

- だが、磁場のエネルギー (平均値): 運動エネルギーの 1/100~1/10000 程度
    - 但し黒点ではある程度強い磁場

上空 (コロナ, 太陽風) では磁場の役割が重要に

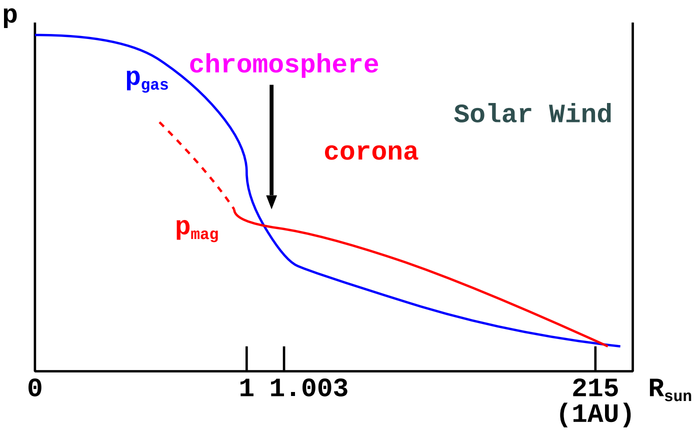


ベテルギウス内部での磁場増幅 (ダイナモ)

Dorch 2004

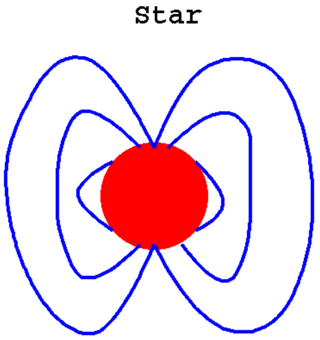
ガス圧と磁気圧

(スケールは厳密ではない)



光球の少し上で，磁場とガスが逆転

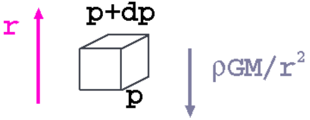
磁場と密度の勾配



$B \sim (r/r_0)^{-3}$ (dipole)

静水圧平衡を仮定:

$dp/dr + \rho GM/r^2 = 0$



$\rho = \rho_0 \exp[-(r-r_0)/H*(r_0/r)]$

$\sim \rho_0 \exp[-(r-r_0)/H]$

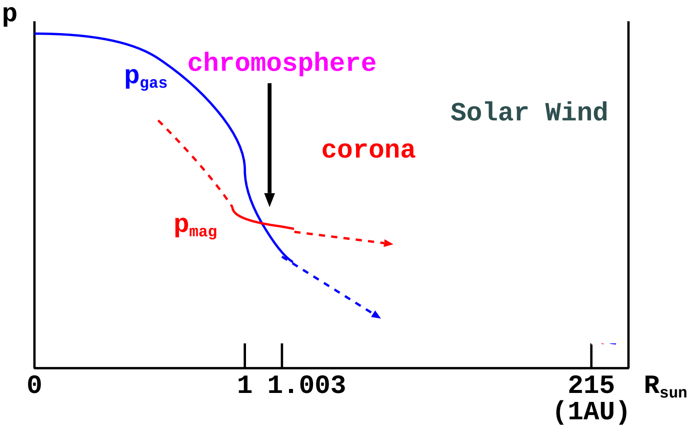
(一般的に $H = C_s^2/(GM/r_0^2) << r_0$)

- 密度は exponential で落ちる.
- 磁場は巾で減少.

⇒ 外側では磁場が卓越せざるを得ない.

ガス圧と磁気圧

(スケールは厳密ではない)



光球の少し上で，磁場とガスが逆転

磁場 E ≪ ガス E になると

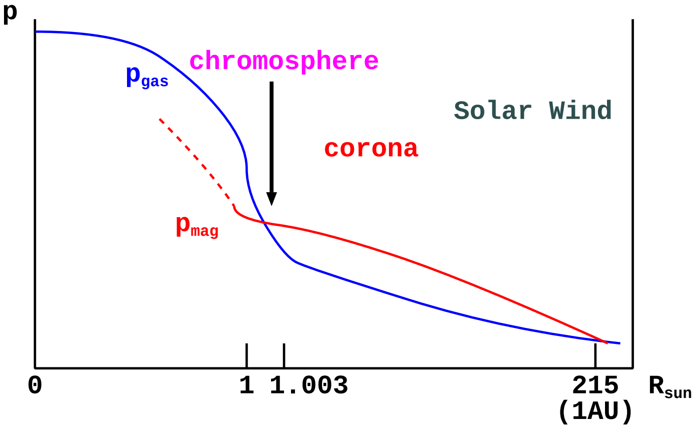
磁場のエネルギーがほんの少し散逸する
$\Rightarrow$ ガスにとってみると莫大な加熱

結局

- ガスが加熱されたり (内部エネルギーへ転化):
  コロナ加熱
- 加速されたり (運動エネルギーへ転化):
  太陽風加速

ガス圧と磁気圧

(スケールは厳密ではない)



コロナ加熱や太陽風加速
⇒ 上空での磁気圧とガス圧の比があまり大きくならない.

磁場E ≪ ガスE になると

磁場のエネルギーがほんの少し散逸する
⇒ ガスにとってみると莫大な加熱

結局

- ガスが加熱されたり (内部エネルギーへ転化): コロナ加熱
- 加速されたり (運動エネルギーへ転化): 太陽風加速

する.

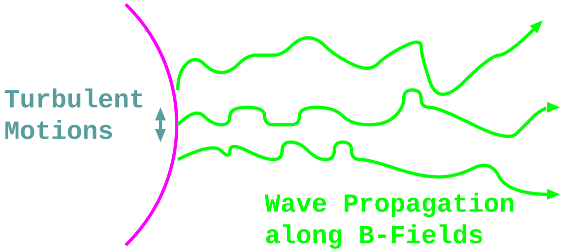
どのようにして磁場が散逸し，加熱，加速過程が起きているのかが謎

コロナ加熱，太陽風加速機構

しばしば、以下のような 2 つに分けられる。

- 磁気流体波動
  AC(交流) 加熱
- 磁力線のつなぎ変え (フレア)
  DC(直流) 加熱

加熱, 加速機構 1: 波動

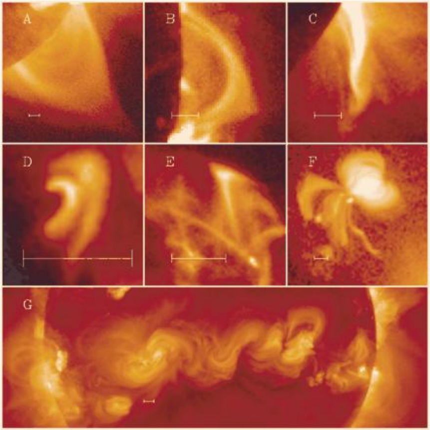


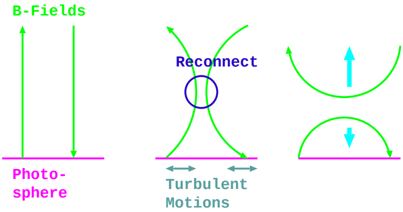
- 乱流運動が，色々なモードの波を励起
- アルフベン波 (磁力線を伝わる横波) が重要視されている．
  波の減衰により，周囲のプラズマを加熱

乱流 ⇒ 波 (磁場) のエネルギー ⇒ 熱, 運動エネルギー

加熱, 加速機構 2: 磁力線のつなぎ変え(フレア)

YOHKOH





乱流 ⇒ 磁気エネルギー ⇒ 熱, 運動エネルギー

太陽風加速の理論的研究

Parker(1958) の太陽風解

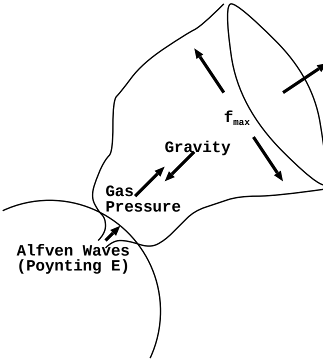
- 太陽コロナのガス圧: 周囲の星間物質よりも大きい
  ⇒ コロナガスは流れ出す.

定常状態を仮定 $(\partial/\partial t = 0)$

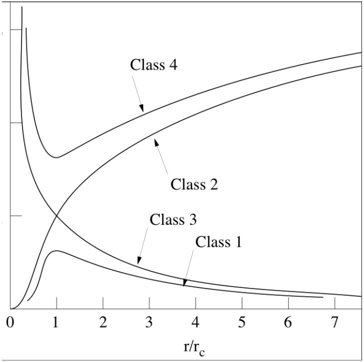
- 質量保存の式 : $4\pi r^2 \rho v =$ const.
- 運動方程式 : $v\frac{dv}{dr} = -\frac{1}{\rho}\frac{dp}{dr} - \frac{GM}{r^2}$
- 等温を仮定 : $p = \rho c_s^2$

最終的に次の常微分方程式を得る :

$$\frac{1}{v}\frac{dv}{dr} = \left[\frac{2c_s^2}{r} - \frac{GM}{r^2}\right] / [v^2 - c_s^2]$$



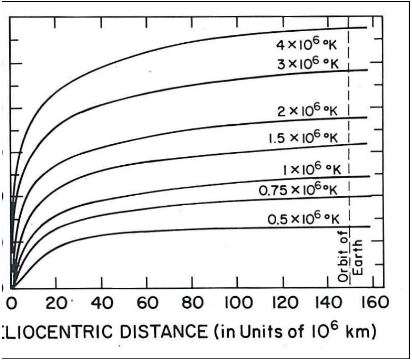
Parker解



- 現実の太陽風は遷音速解になっている．
- 観測されている太陽風をおおざっぱに説明．

Parker解の温度依存性

Parker 1958

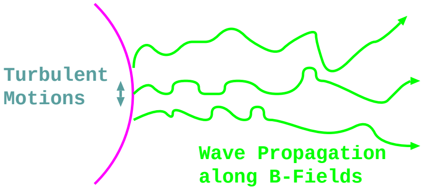


コロナが高温な程, 速い太陽風
⇒ 高速風/低速風の観測とは矛盾
⇒ ガス圧以外の加速項

太陽風のモデルの改良

加速項 (運動量の付加) にガス圧以外を考慮

- 遠心力: 太陽ではあまり重要にならない ⇐ 太陽の自転速度は遅い Waber & Davis 1967
- 音波: あまり重要でない ⇐ 音波は表面付近で減衰 Jacques 1977
- Alfvén 波: 盛んに調べられている ⇐ 減衰が遅く, 遠くまで加速可能 Alazraki & Couturier 1971; Belcher 1971...



Alfvén 波による加圧

運動方程式：

$$v\frac{dv}{dr} = -\frac{1}{\rho}\frac{dp}{dr} - \frac{1}{\rho}\frac{dp_A}{dr} - \frac{GM}{r^2}$$

ここで $p_A = \frac{B_\perp^2}{8\pi}$ (波の圧力)

波の振幅が大きい程太陽風速度が大きくなる.

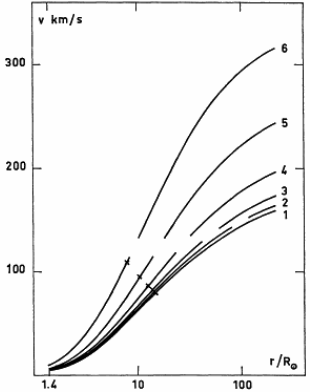


Fig. 1a. The flow velocity as a function of the logarithm of the radial distance for six values of ε_0^2 ranging from 0 to 10^{-5} J/m³. The coronal temperature is 1.7 10^{6}° K. Break in the curves indicates the limit of validity of the linear description. The critical point is indicated by an asterisk. The labelling of the curves is given by Table 1

Alazraki & Couturier 1971

現在までの研究の進展

Alfvén 波: 主要な過程としてよく調べられている.

- 太陽表面での波の励起 (波の強度) は ?
  観測も簡単ではない。
  - 表面対流層が直接?
  - 表面付近でのフレアなどが波をたてる?
- 実際の波の減衰過程 ?
  - Alfvén 波 ⇒ 圧縮性波 ⇒ 衝撃波 ⇒ 散逸
  - Alfvén 波 ⇒ 乱流 ⇒ 散逸

上記の過程: 非線形現象

- 最近では数値実験 (シミュレーション) が盛んに行なわれる.

数値実験

磁場存在下の流体 (プラズマ) として扱う.

⇒ 磁気流体力学がしばしば用いられる.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

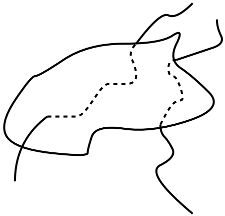
$$\frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{1}{\rho}\nabla(p + \frac{B^2}{8\pi}) - \frac{(\vec{B}\cdot\nabla)\vec{B}}{4\pi\rho} = 0$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B})$$

$$\rho\frac{de}{dt} = -p\nabla \cdot \vec{v}$$

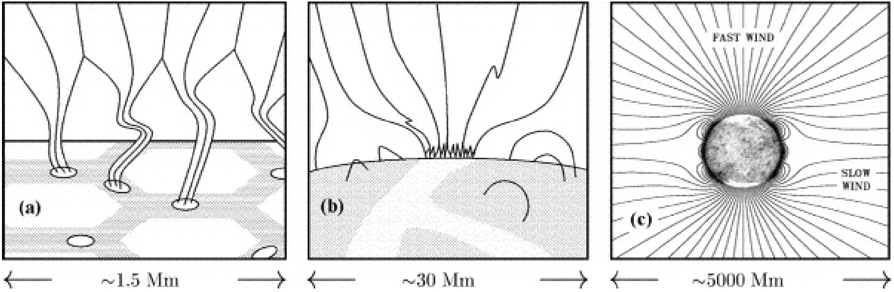
$\vec{v}$:速度; $\vec{B}$:磁場; ρ:密度; p:圧力; e:内部エネルギー (質量当り)

餅 (流体) の中のゴム紐 (磁力線) に例えられる。



数値実験

Cranmer & van Ballegooijen 2005



- 磁力線上を１本１本細かく解像して解く.
- 大局構造を解く.

松本さんのシミュレーション ▸ Simulation by Matsumoto

まとめ

太陽風: 太陽から吹き出す高温プラズマ．

- 様々な観測手法
  - リモート観測: X 線，紫外線，可視光，電波
  - その場観測によるプラズマの直接診断
- 最近の弱い太陽活動 ⇒ 太陽風もこれまでと少し違う
- 太陽風駆動: コロナのガス圧 $+\alpha$ (Alfvén 波などの磁気波動)
  - 減衰過程: 乱流，衝撃波生成などなど; 実際の所何が重要かは未解明

太陽風の観測で色々な事実が判明するのに対し，
理論は後手後手に回っている印象
(研究する題材が沢山あることの裏返し．)