

# 太陽風の物理

鈴木 建

(名古屋大学 素粒子宇宙物理 **Ta**研)

# 太陽風

---

SOHO/EIT



太陽から吹き出す高温で電離した粒子(プラズマ)。

- 陽子(Hイオン)、電子、Heイオン、その他重元素イオン
  - 流出量：毎秒**100**万トン(1年で太陽質量の**2x10**の**-14**乗倍)
- 地球近傍で
- 速度 **300-900 km/s**
  - 温度 **10-100**万度

# 太陽風の観測

---

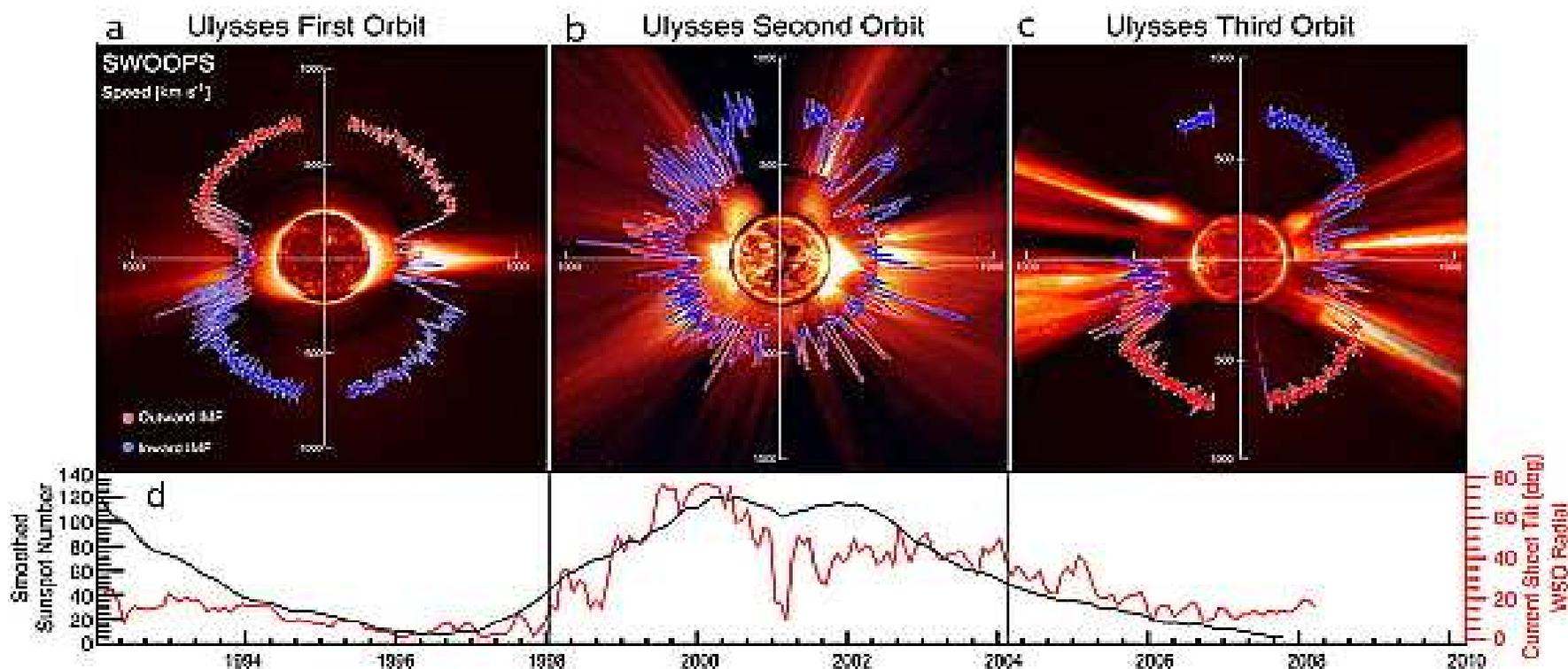
- **Hinode**の観測

  - **Sakao et al.2007**

- **SOHO**の観測

# 太陽風の速度

McComas et al. 2008



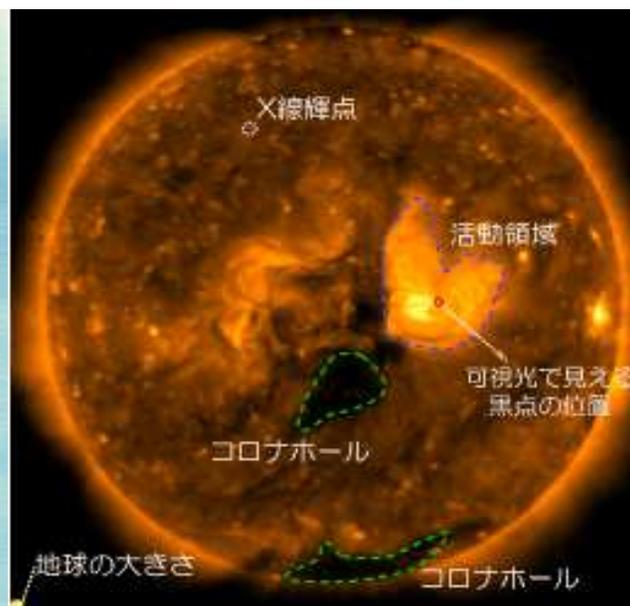
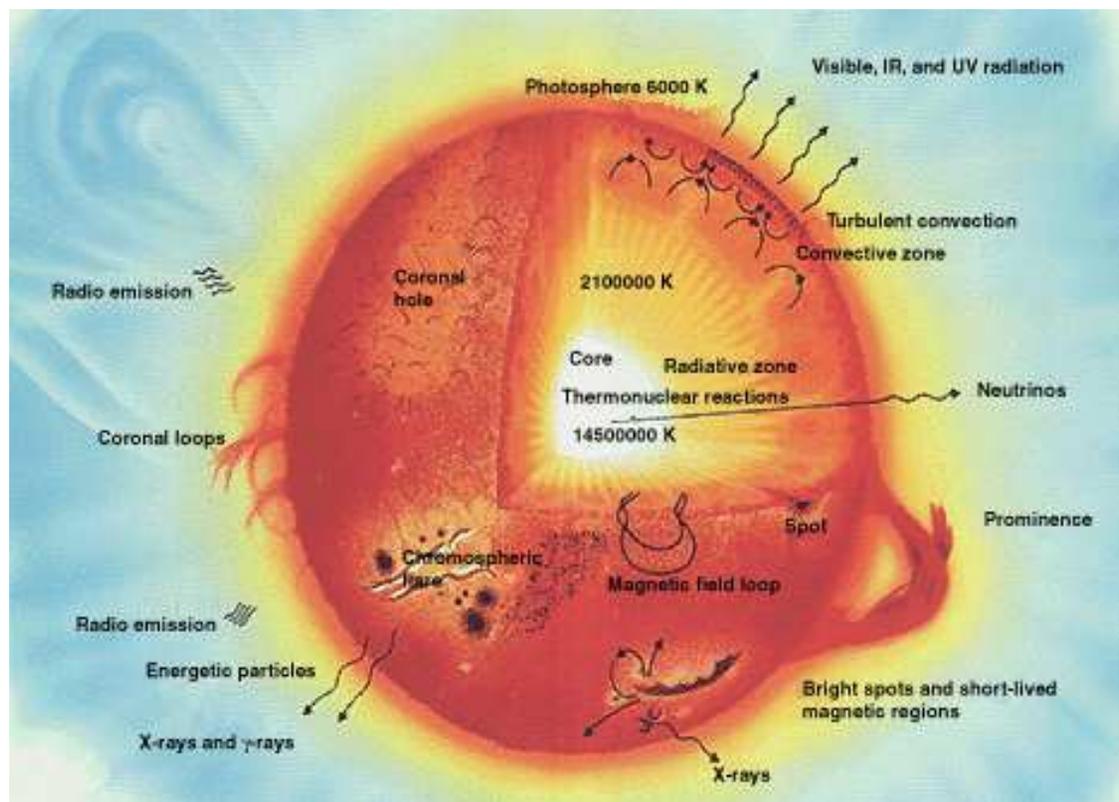
左から **1992-98(極小)**; **1998-2004(極大)**; **2004-2008(極小)**

- 高速風( $\sim 700-800\text{km/s}$ )と低速風( $\sim 300-400\text{km/s}$ )の2種類
- 太陽活動と共に変動

# 太陽の外観

NASA websiteより

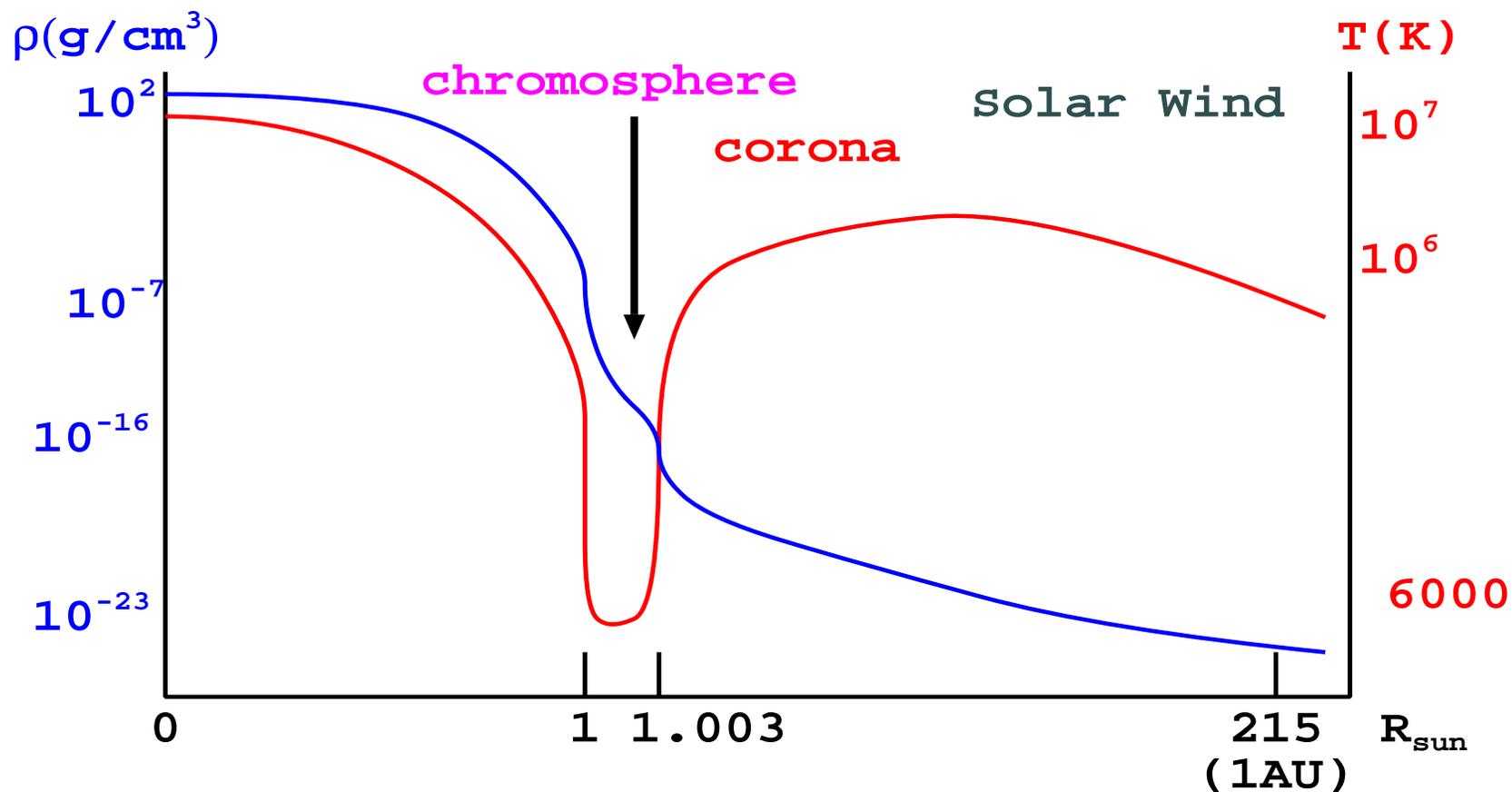
HINODE XRT



- 中心核 約**1500**万度  $4\text{H} \Rightarrow \text{He}$  の核融合でエネルギー生成
- 中心付近に放射層 外側に表面对流層
- 太陽表面(光球) 約**6000**千度
- 外層に高温コロナ(**100**万度以上)と太陽風
  - コロナホールからは(多くの場合)高速の太陽風が吹き出す

# 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

---

表面对流層における磁場の増幅

■ 運動エネルギー  $\Rightarrow$  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)：

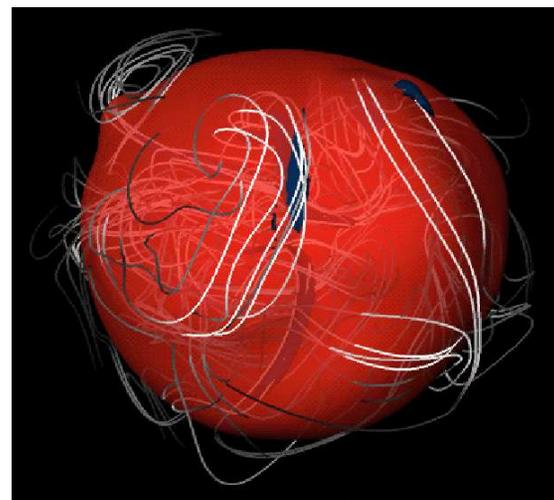
運動エネルギーの**1/100~1/10000**程度

● 但し黒点ではある程度強い磁場

上空(コロナ)では

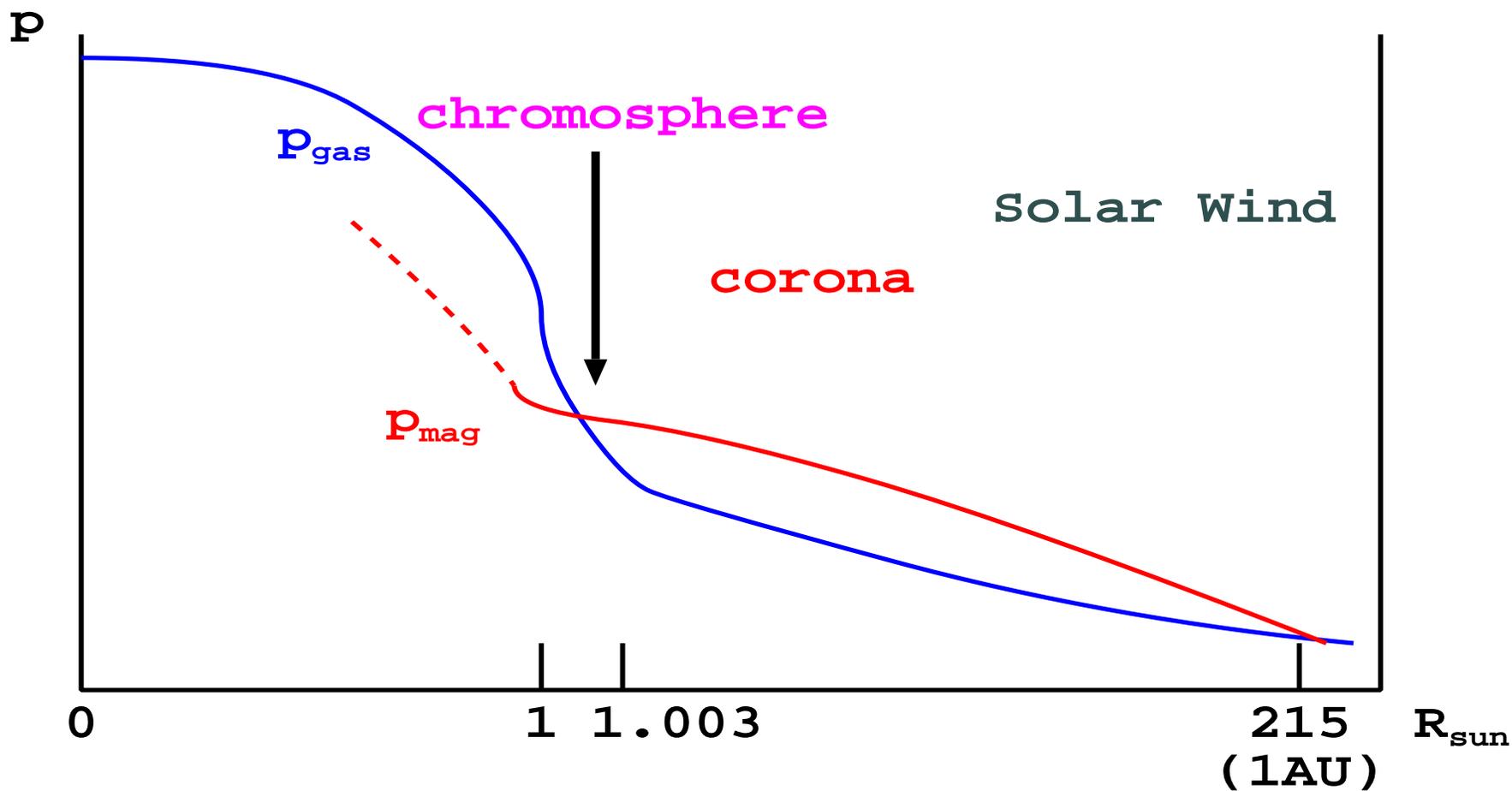
■ 磁場の役割が重要に

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

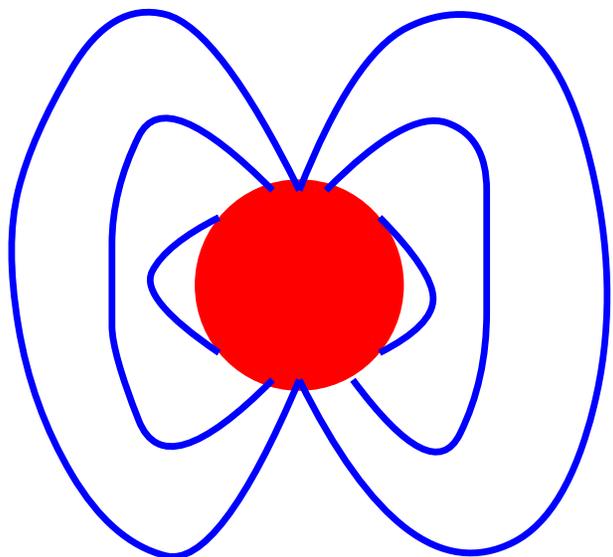
(スケールは厳密ではない)



- 光球の少し上で、磁場とガスが逆転

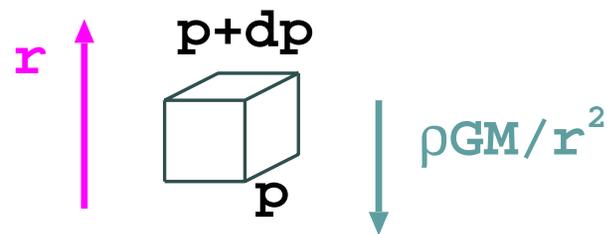
# 磁場と密度の勾配

Star



静水圧平衡を仮定:

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



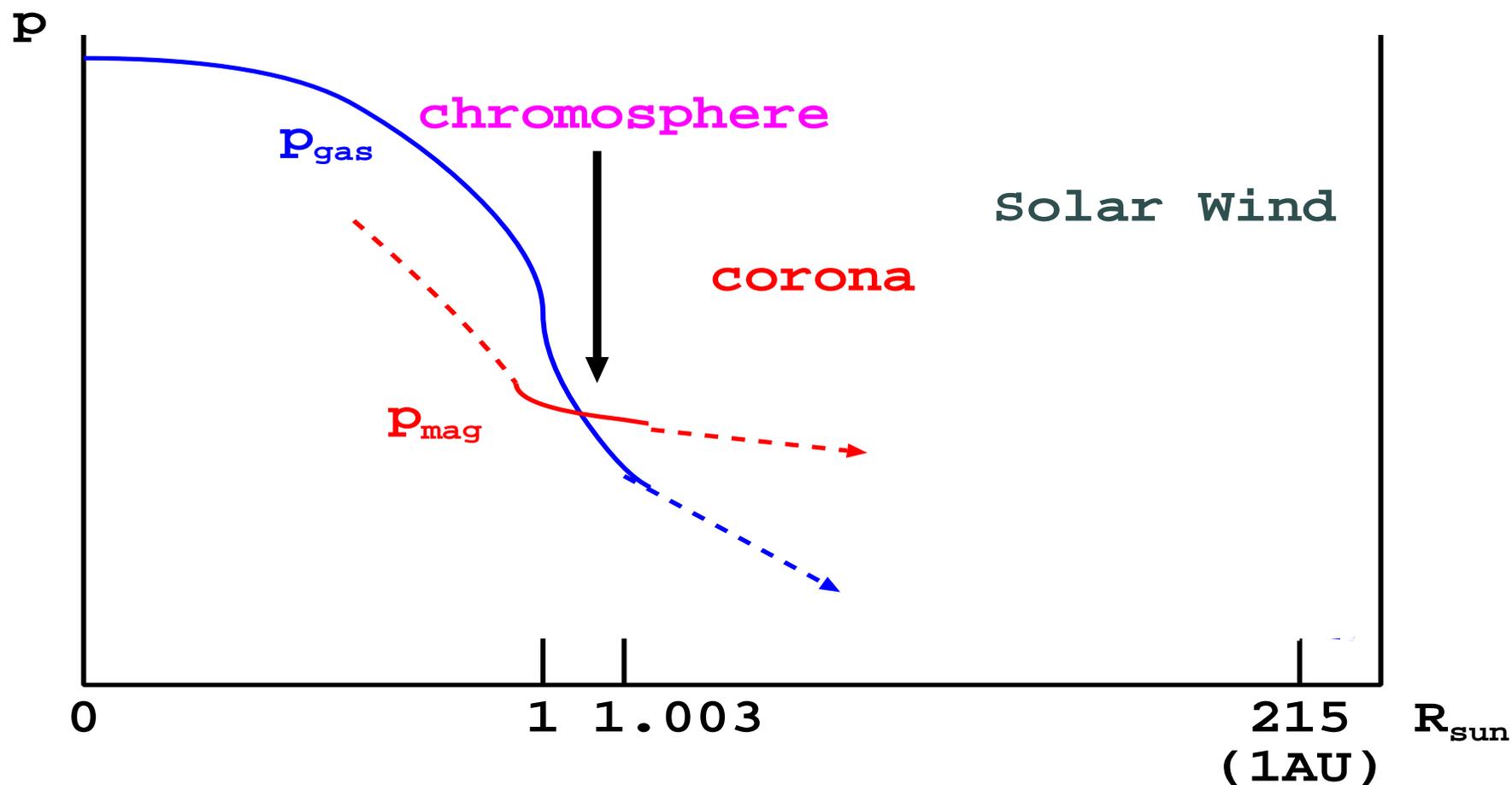
$$\begin{aligned}\rho &= \rho_0 \exp[-(r-r_0)/H^*(r_0/r)] \\ &\sim \rho_0 \exp[-(r-r_0)/H] \\ &(\text{一般的に } H = C_s^2 / (GM/r_0^2) \ll r_0)\end{aligned}$$

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

- 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

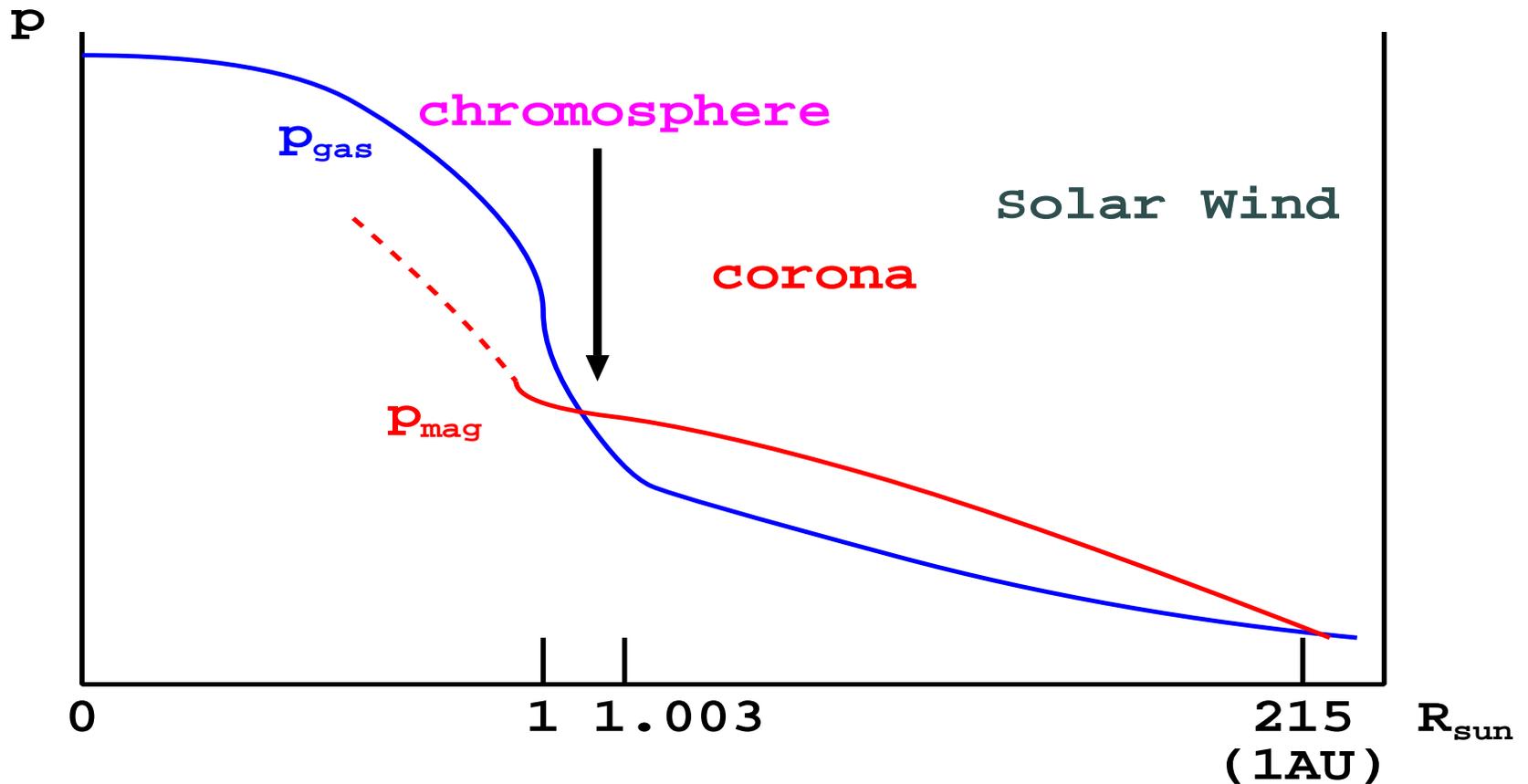
⇒ ガスにとってみると莫大な加熱

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。

# 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るならない

# 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 (内部エネルギー上昇): コロナ加熱
- 加速されたり (運動エネルギー上昇): 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、恒星風加速機構

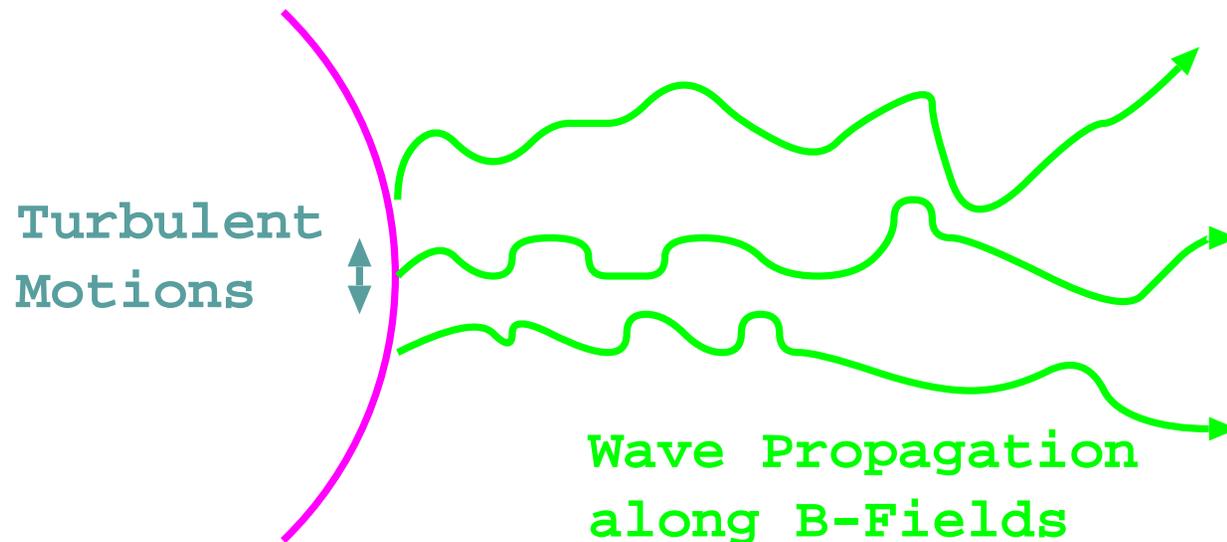
---

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
- 磁力線のつながり変え(フレア)
  - **DC**(直流)加熱

# 加熱、加速機構1：波動

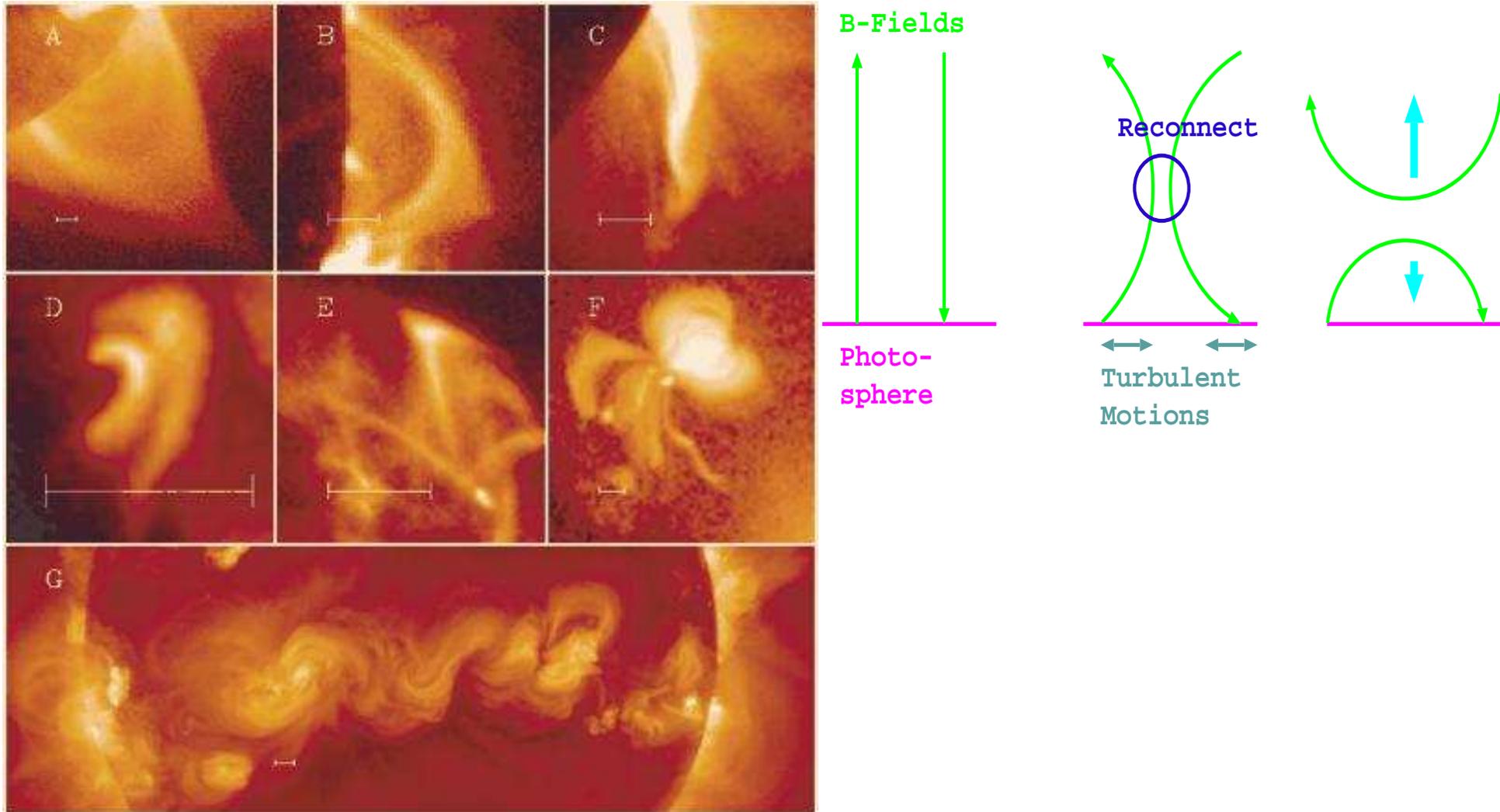
---



- 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：磁力線のつながり変え(フレア)

Yohkoh satellite



■ 乱流  $\Rightarrow$  磁気エネルギー  $\Rightarrow$  熱、運動エネルギー

# 太陽風加速機構の解明のために

---

## 観測研究

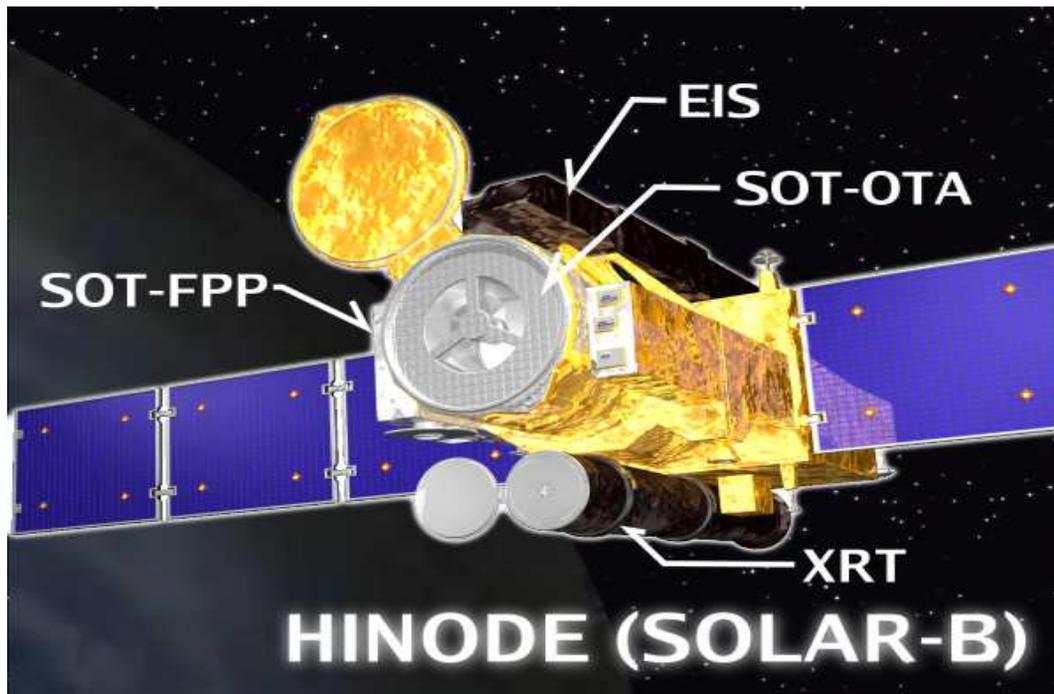
- 太陽風根元の観測
- 地球軌道付近での観測
  - その場観測
  - リモート観測(惑星間シンチレーション)

## 理論研究

- モデル化
- 数値シミュレーション

# Hinode衛星

---

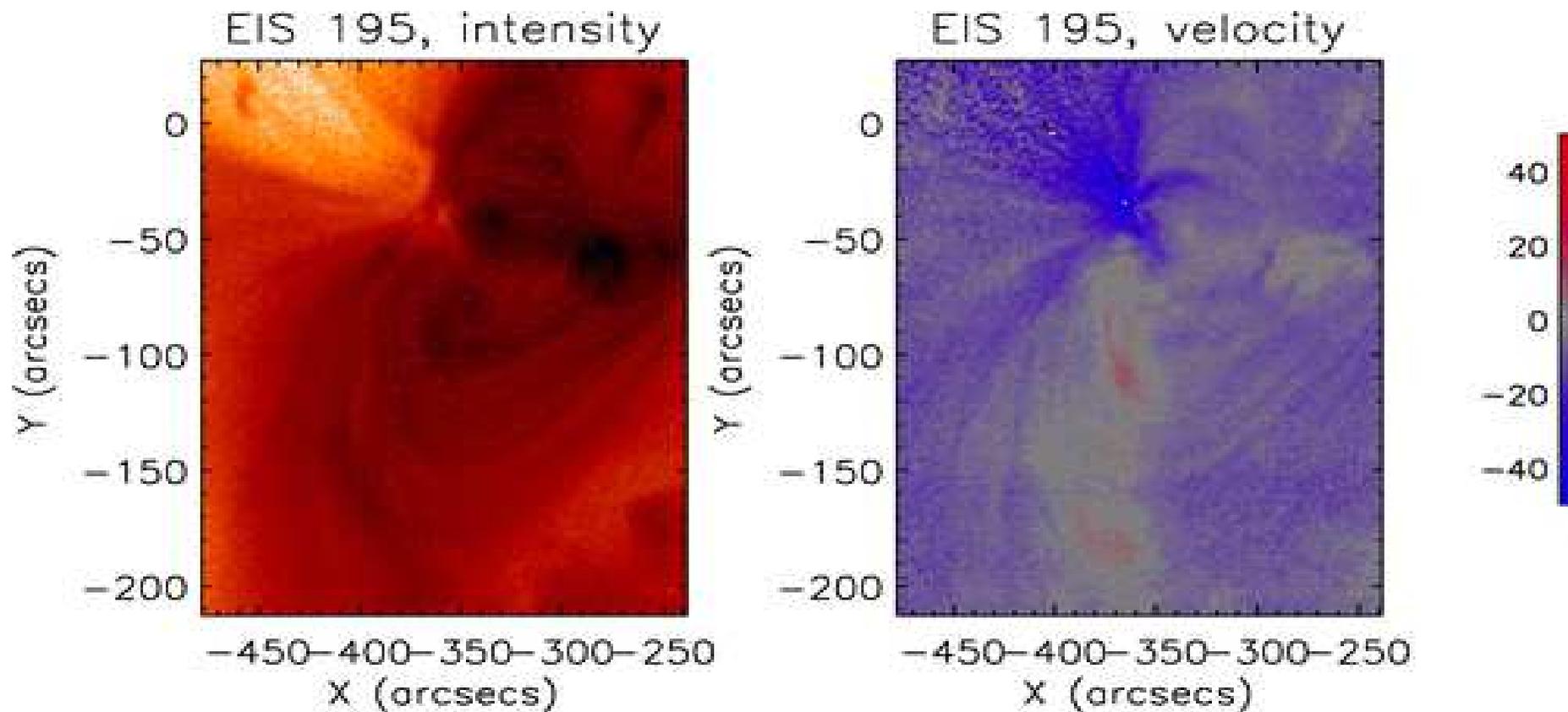


**2006年9月23日**打ち上げ

- 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...)

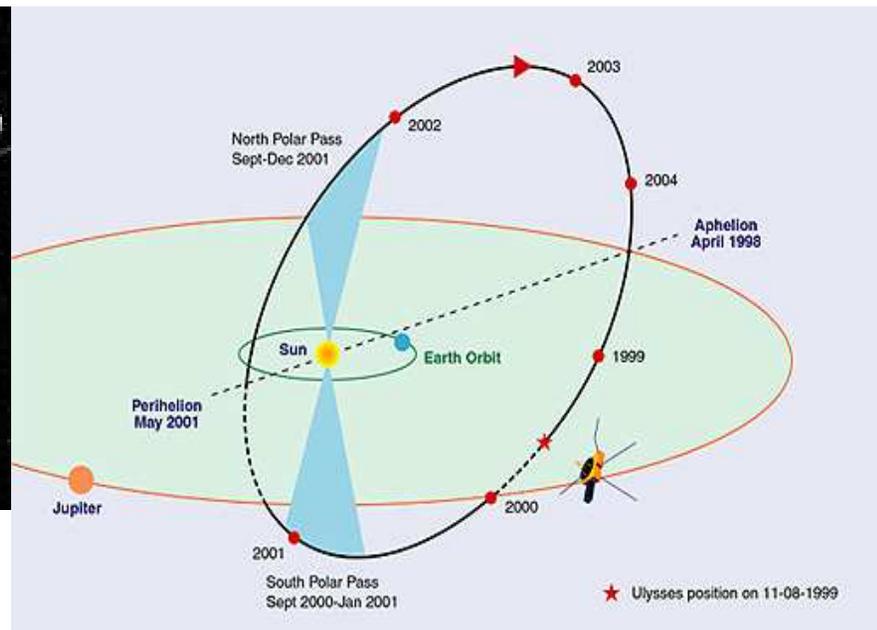
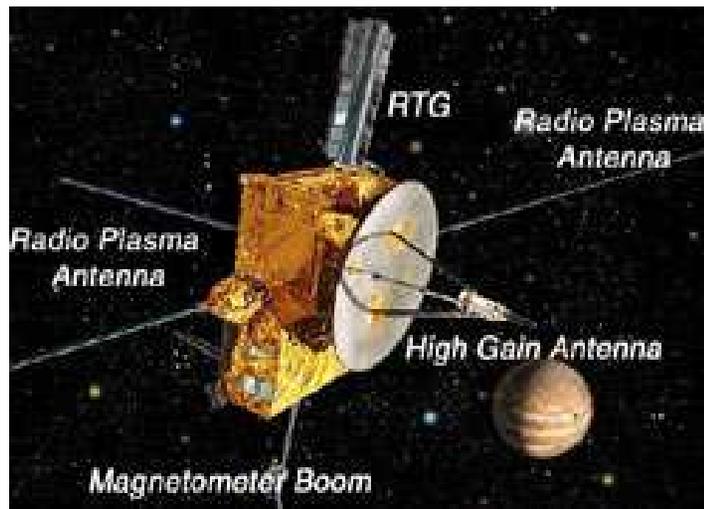
# Hinodeによる観測: 太陽風根元の上昇流

Harra et al.2008



●  $\sim >100\text{km/s}$  の上昇流

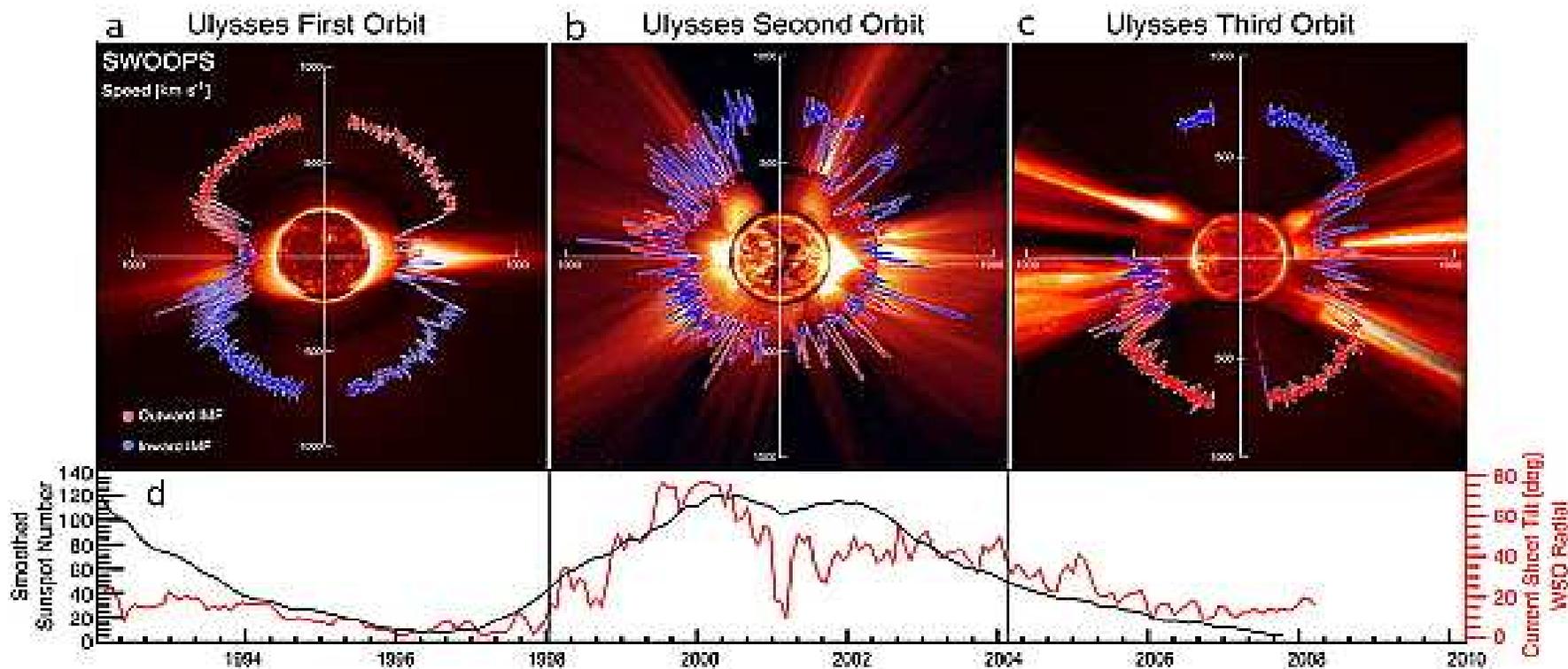
# Ulyssesによる‘その場’観測



- 直接プラズマの物理量を計測する。
  - 太陽風の速度などが分かる。

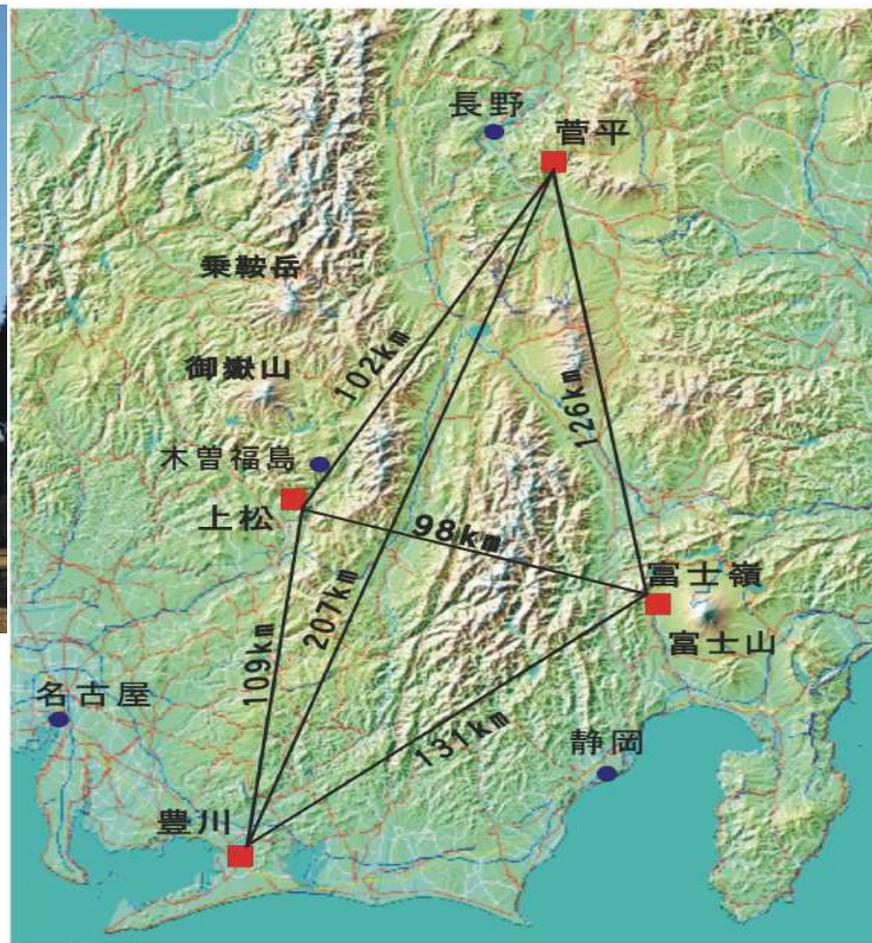
# Ulyssesによる観測

McComas et al. 2008

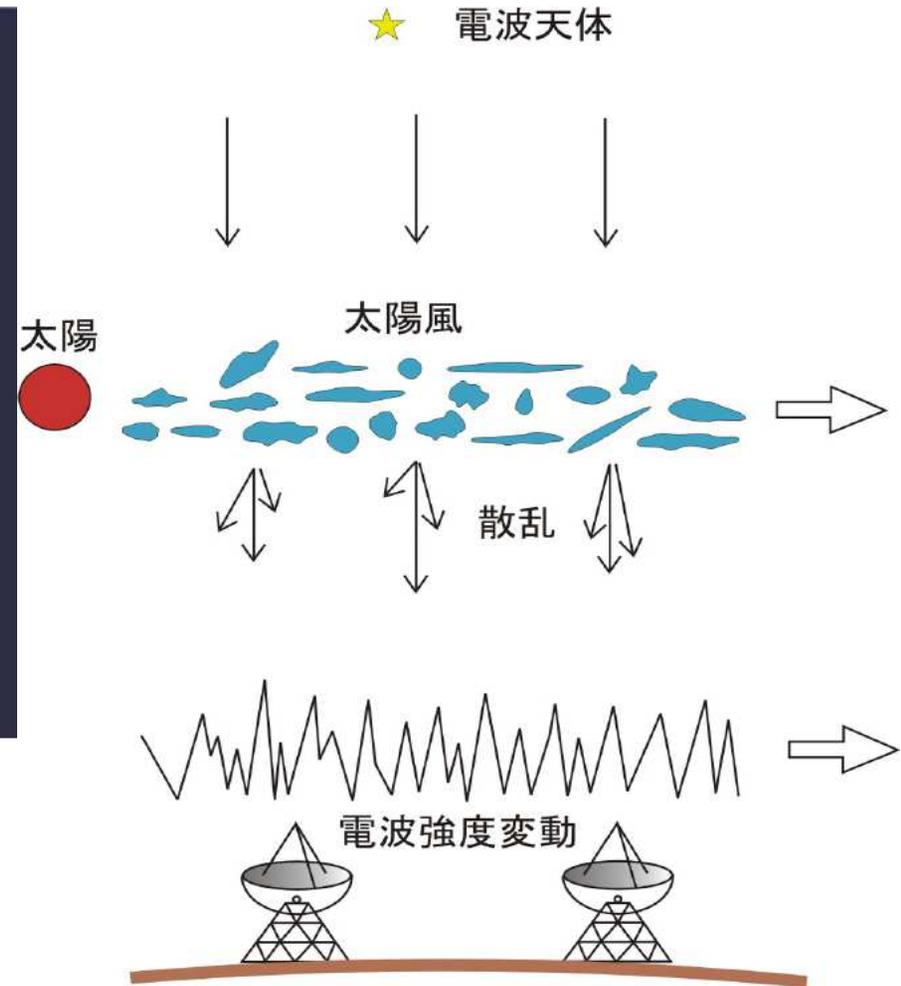
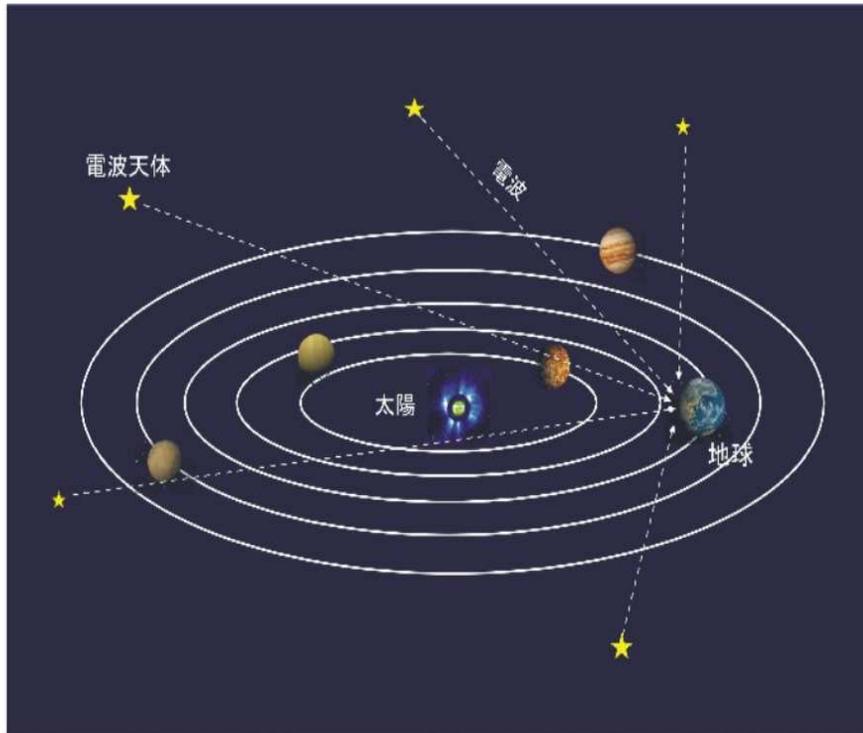


左から **1992-98(極小)**; **1998-2004(極大)**; **2004-2008(極小)**

# 惑星間シンチレーション(IPS)観測 by STE-lab



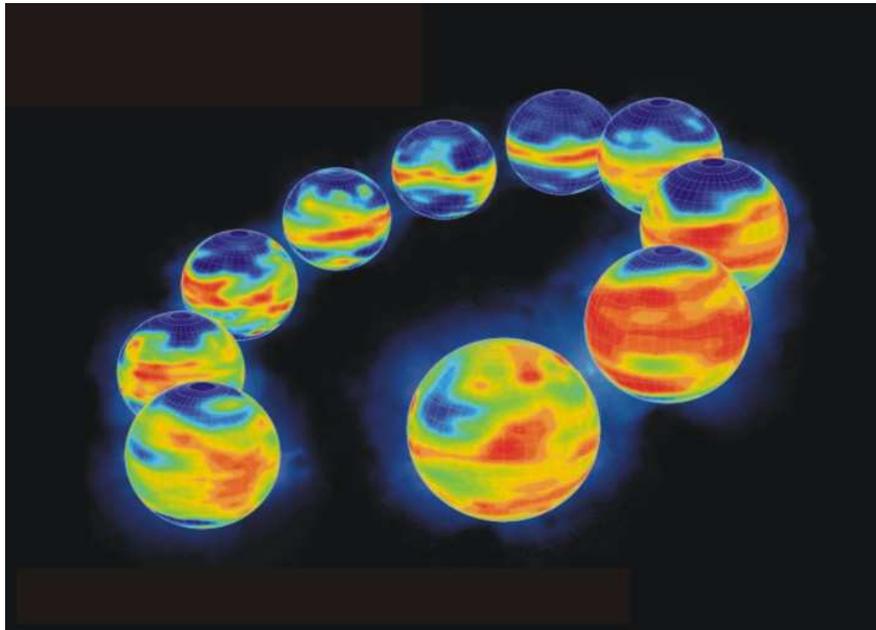
# 惑星間シンチレーション(IPS)観測 by STE-lab



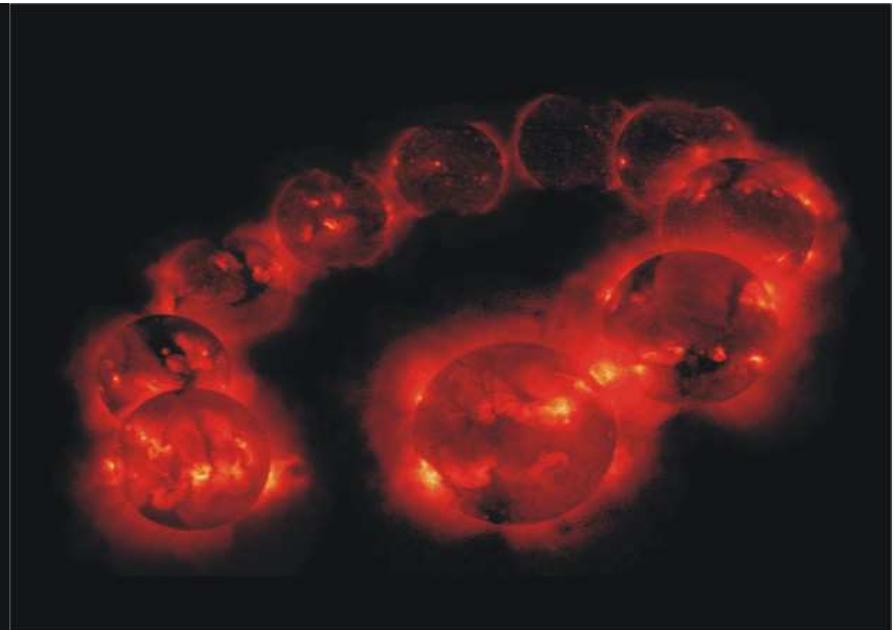
# IPSによる太陽風速度の周期活動

---

1991年から2000年



右: 太陽風速度(青が速い)

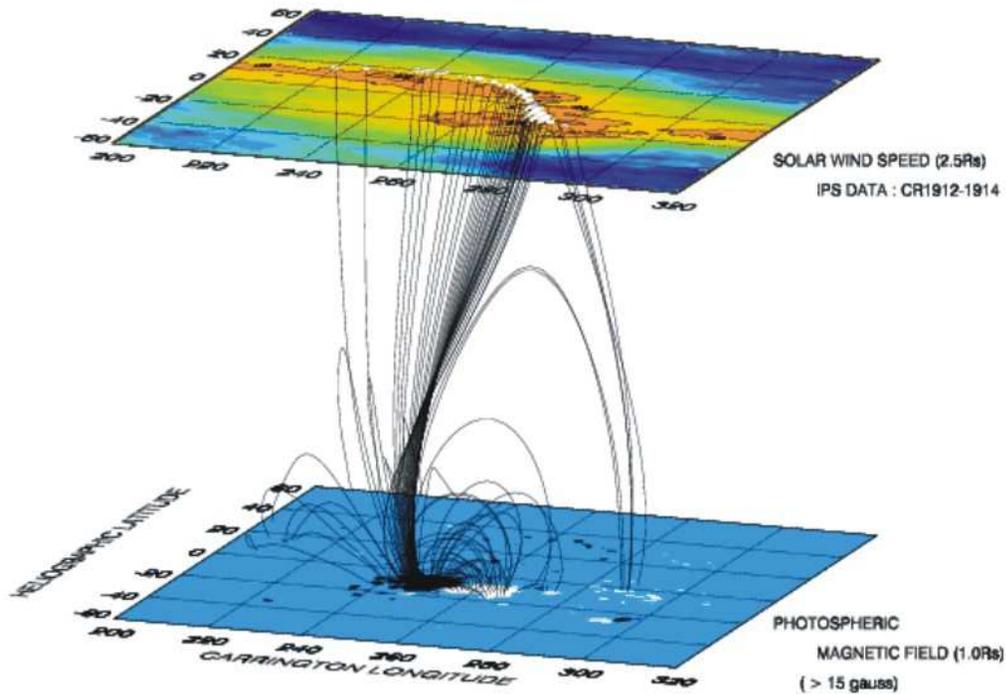


左: YohkohによるX線画像

# 太陽風速度と表面磁場状態の関係

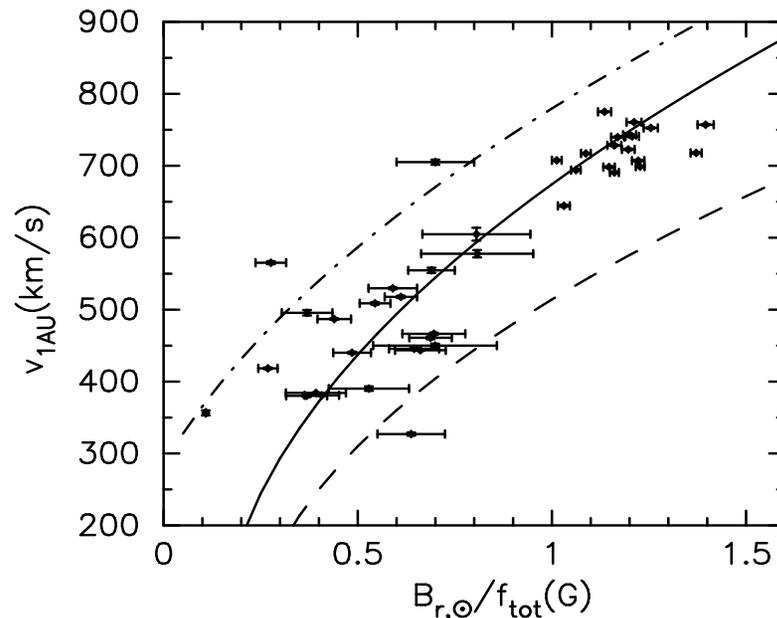
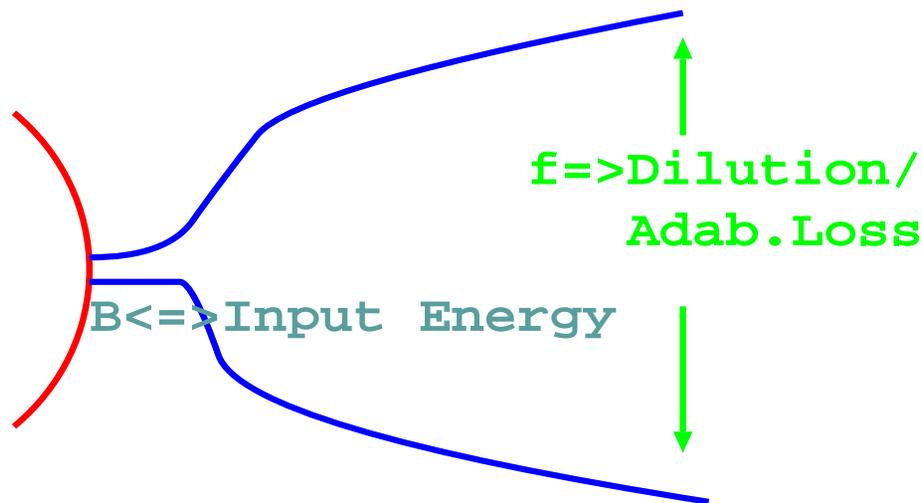
Kojima, Fujiki, Ohmi, Tokumaru, Yokobe 1999

(磁場はKitPeakの地上観測より)



- 大きく広がる磁束管から遅い太陽風

# IPS観測による太陽風速度と表面磁場状態の関係



Kojima et al.2005 (フィッティング線はSuzuki 2006より)

**B/f**が大きい磁束管からは速い太陽風が吹き出している。

# 太陽風加速の理論的研究

---

## Parker(1958)の太陽風解

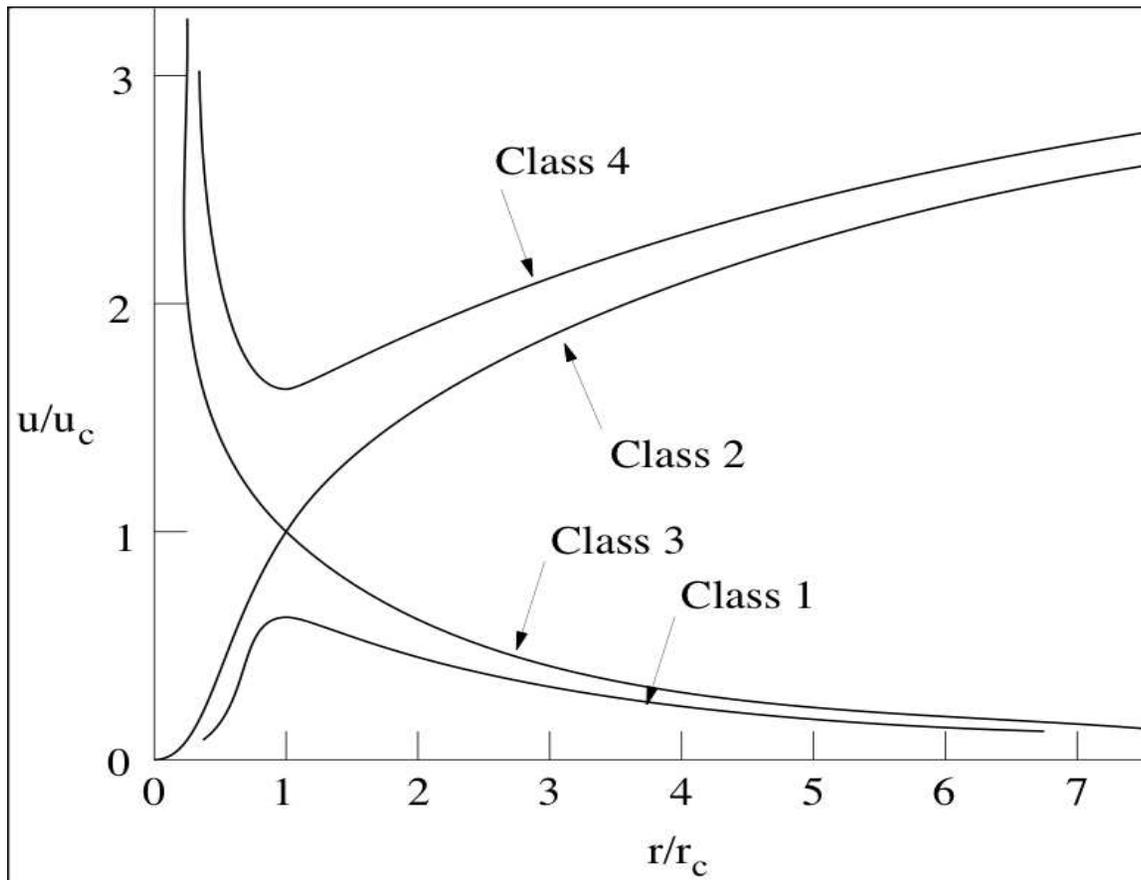
- 太陽コロナのガス圧：周囲の星間物質よりの大きい  
=> コロナガスは流れ出す。

定常状態を仮定 ( $\partial/\partial t = 0$ )

- 質量保存の式： $4\pi r^2 \rho v = \text{const.}$
- 運動方程式： $v \frac{dv}{dr} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} - \frac{GM}{r}$
- 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： $\frac{1}{v} \frac{dv}{dr} = \left[ \frac{2c_s^2}{r} - \frac{GM}{r^2} \right] / [v^2 - c_s^2]$

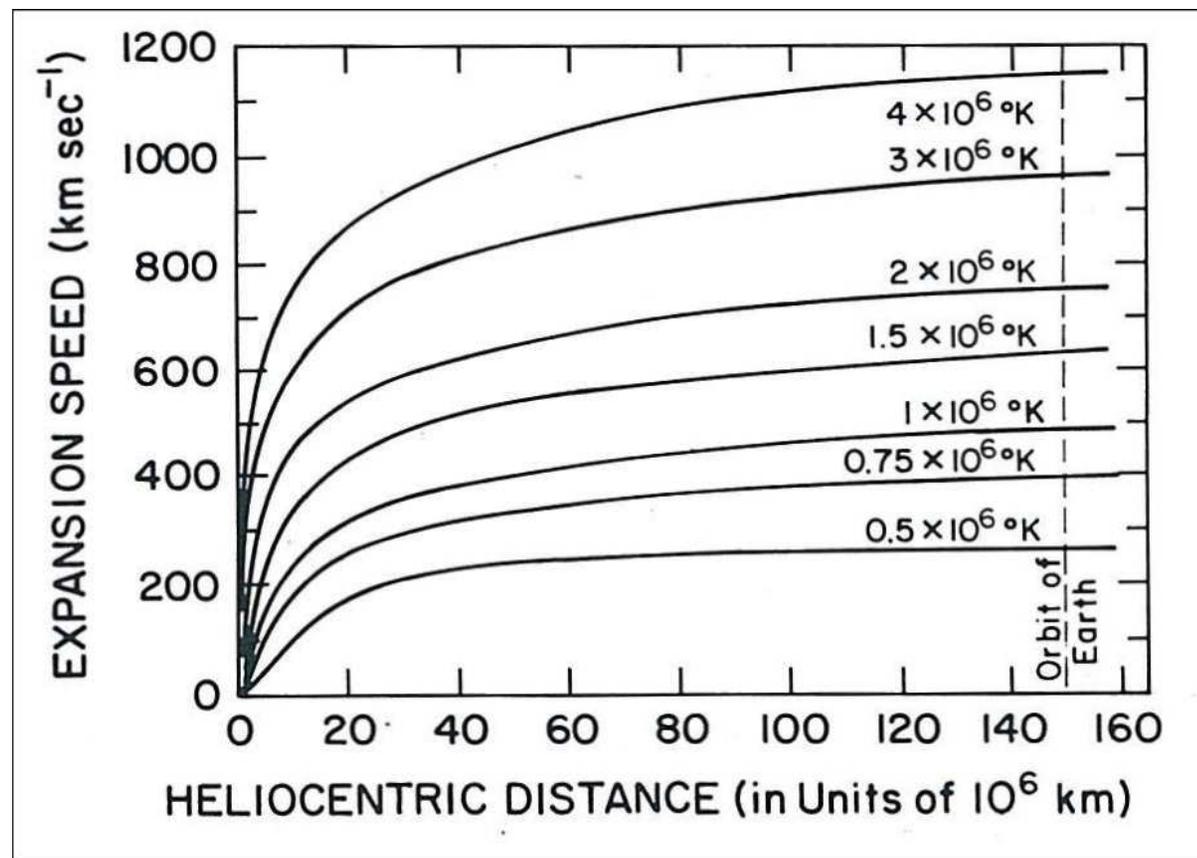
# Parker解



- 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

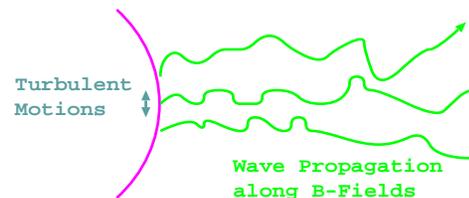
- あまり重要でない <= 音波は表面付近で減衰

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...



# Alfven波による加圧

■ 波の圧力項が付加される。

$$\text{運動方程式} : v \frac{dv}{dr} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} - \frac{1}{\rho} \frac{dp_A}{dr} - \frac{GM}{r^2}$$

$$\text{ここで } p_A = \frac{B_{\perp}^2}{8\pi}$$

波の振幅が大きい程  
太陽風速度が大きくなる。

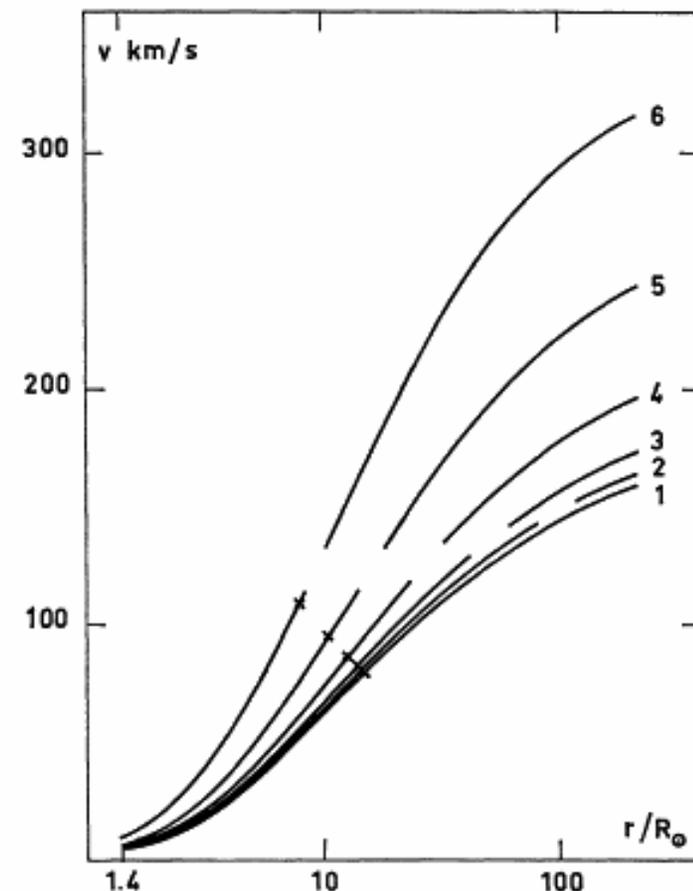


Fig. 1 a. The flow velocity as a function of the logarithm of the radial distance for six values of  $\epsilon_0^2$  ranging from 0 to  $10^{-5} \text{ J/m}^2$ . The coronal temperature is  $1.7 \cdot 10^6 \text{ K}$ . Break in the curves indicates the limit of validity of the linear description. The critical point is indicated by an asterisk. The labelling of the curves is given by Table 1

# 現在までの研究の進展

---

**Alfven**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)？ 観測も簡単ではない。
  - 表面对流層が直接？
  - 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？

他の過程はどの程度寄与するのか？

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

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

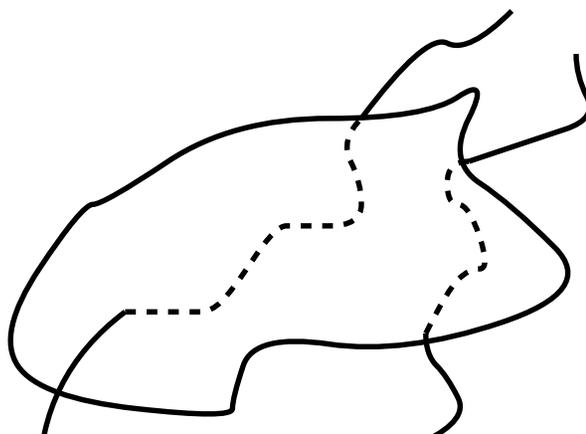
$$\frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{1}{\rho} \nabla (p + \frac{B^2}{8\pi}) - \frac{(\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B}}{4\pi\rho} = 0$$

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

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

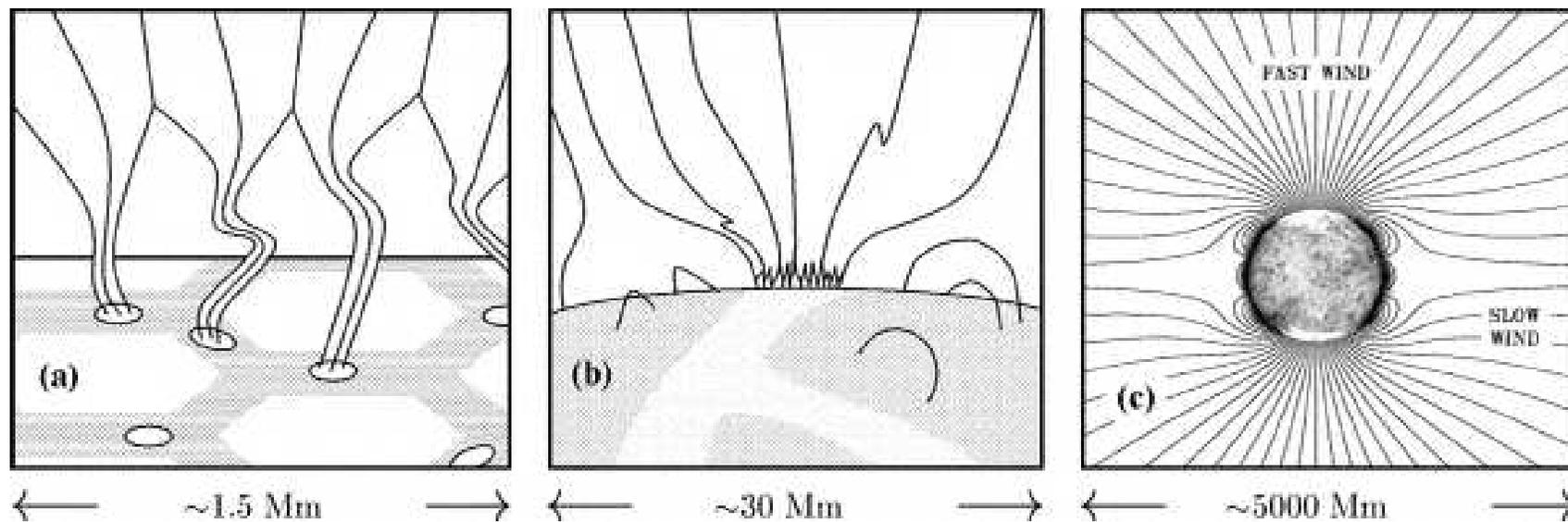
$\vec{v}$ :速度;  $\vec{B}$ :磁場;  $\rho$ :密度;  $p$ :圧力;  $e$ :内部エネルギー (質量当り)

■ 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



■ 1本の磁力線上を細かく解像して解く。

● 我々の方法

■ 大局構造を解く。

● 次の草野先生の講義(?)=>

# まとめ

---

太陽風: 太陽から吹き出す高温プラズマ。

太陽風駆動機構の大枠の理解

おおもとのエネルギー: 中心核での核融合

- 大部分は輻射へ

- 一部(表面对流層を通じて)磁場 => 外層の高温コロナ、太陽風

具体的なエネルギー輸送過程: 未解明部分が多い

- **Alfven**波は重要そう

現在

- 高解像度観測

- 大規模数値実験

により、太陽風駆動の定量的理解を目指している。

# Ta研の紹介

---

理学部物理(大学院理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻)にある

■ 犬塚修一郎 教授

- 星形成、惑星形成

■ 鈴木 建 准教授

- 太陽風、恒星風、降着円盤風、乱流

■ 岩崎 一成 学振研究員

- 星形成

■ 奥住 聡 学振研究員

- 惑星形成

■ 松本琢磨学振研究員

- 太陽風、太陽表面活動(理論だけでなく観測も)

■ 修士課程院生**3**名