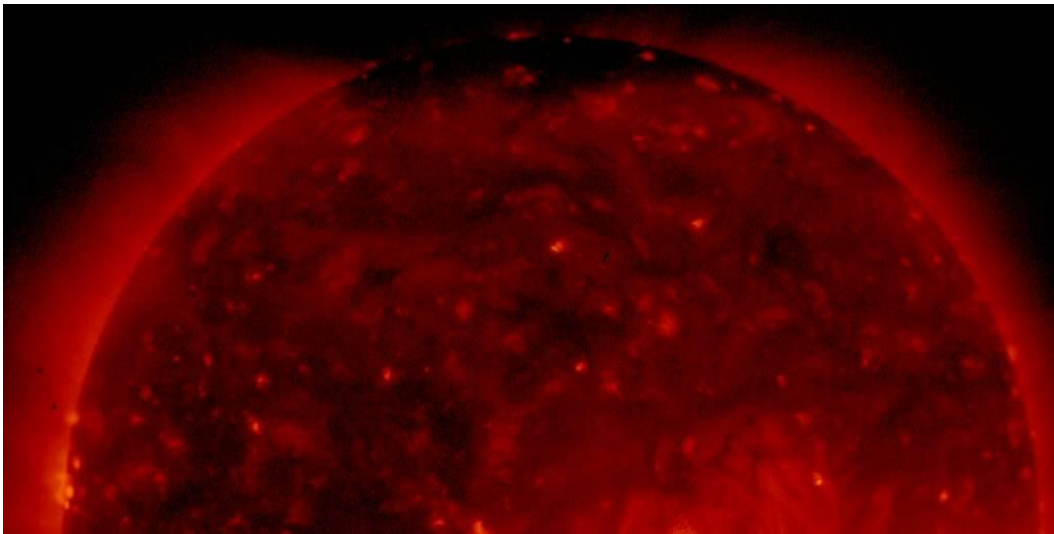


太陽大気でのエネルギー輸送の現状と理解： コロナ加熱と太陽風加速



松本琢磨

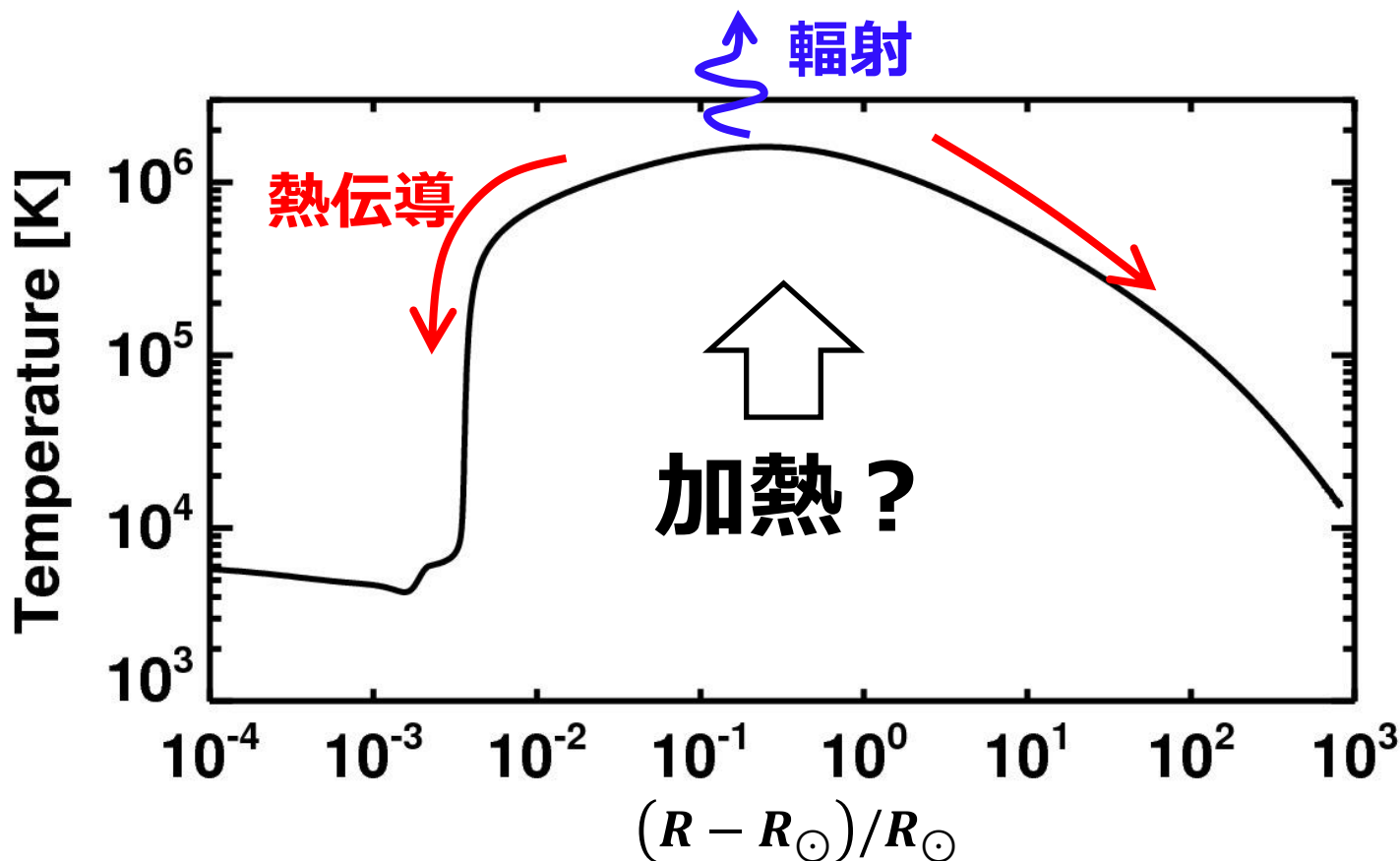
宇宙地球環境研究所

名古屋大学

特任助教

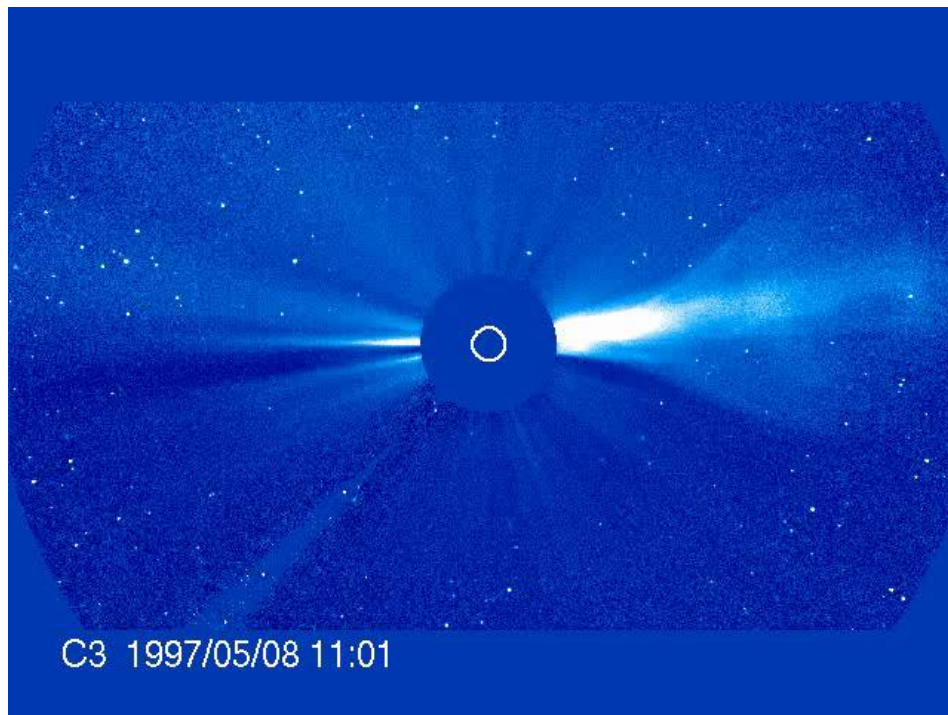
コロナ加熱問題

- 100万度超のコロナを維持するためには
輻射と熱伝導による冷却を補う加熱が必要

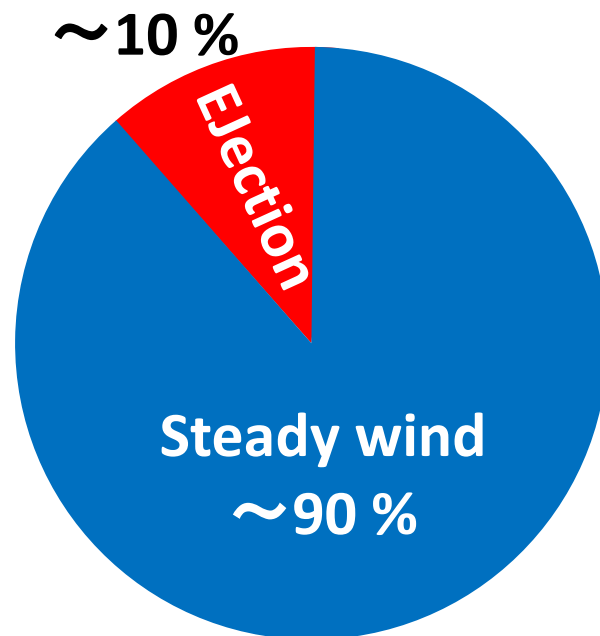


太陽風駆動問題

- 現在の太陽の質量放出率は太陽周期に関わらずほぼ太陽風でまかなわれている



可視光コロナグラフ像 (SOHO/LASCO)

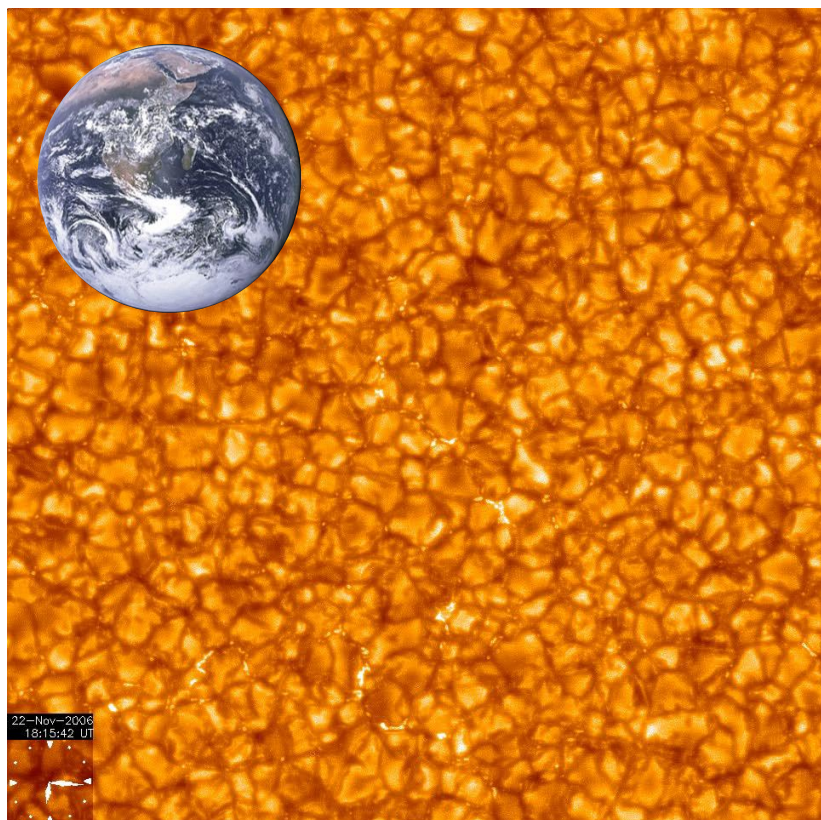


全質量放出率への寄与

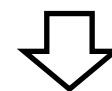
Webb & Howard 1994

エネルギーの源泉

- 太陽コロナを加熱し太陽風を駆動するエネルギーは太陽表面对流が起源



表面密度 $\sim 10^{-7} \text{ g/cm}^3$
対流速度 $\sim 1 \text{ km/s}$
表面音速 $\sim 10 \text{ km/s}$

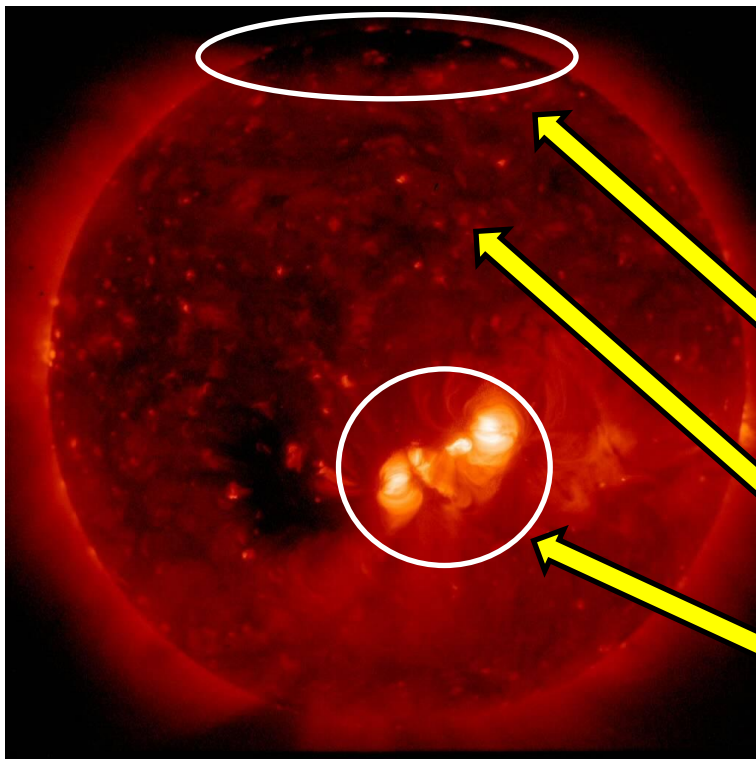


運動エネルギー流束

$$\frac{L_{\text{knt}}^*}{L_{\odot}} \sim 0.01$$

エネルギー収支

- コロナ加熱・太陽風駆動に必要なエネルギー流束は L_{knt} の0.1-10%程度

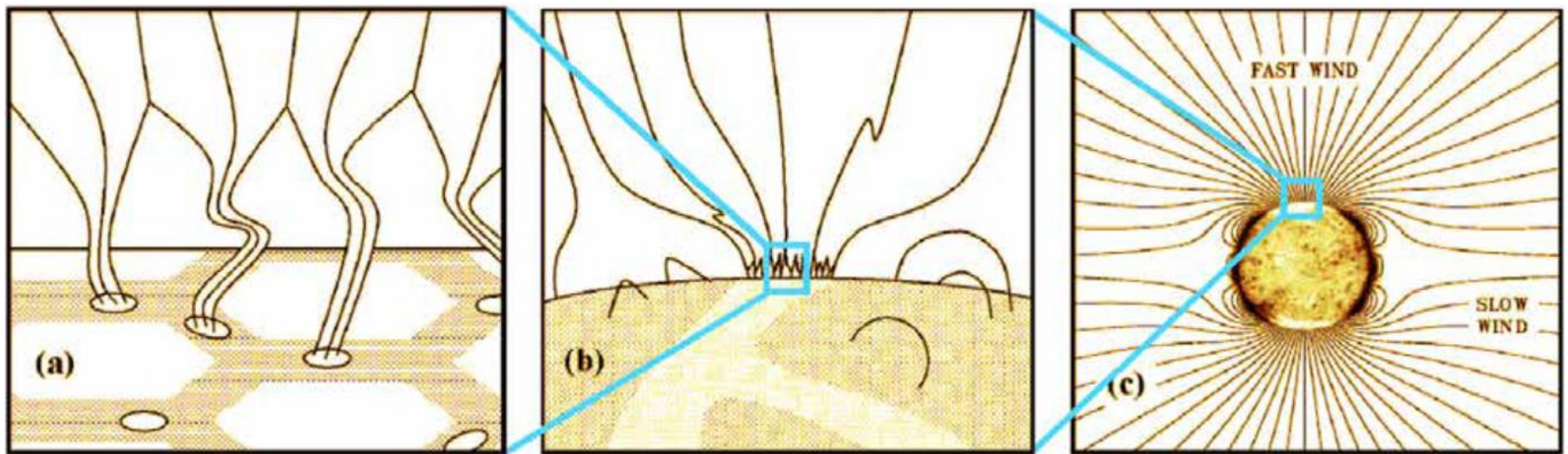


領域名	必要なエネルギー流束 $4\pi R_{\odot}^2 F [L_{\text{knt}}]$
コロナホール	10^{-2}
静穏領域	10^{-3}
活動領域	10^{-1}

太陽の磁場構造

- 表面对流の運動エネルギーは磁場を介して上空に輸送される

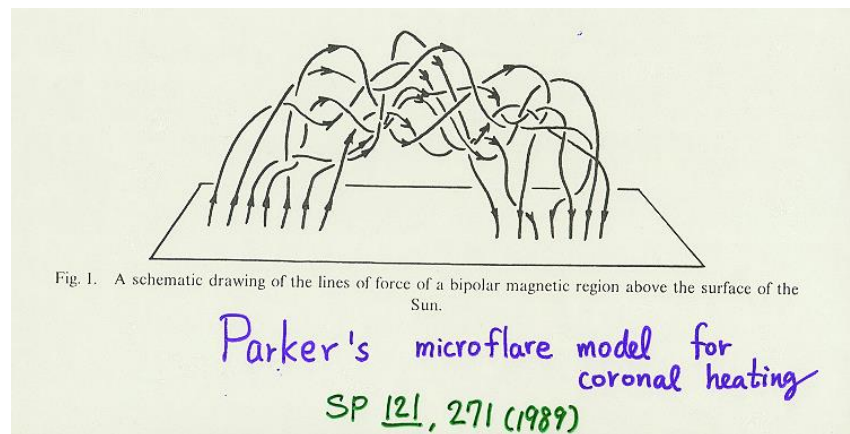
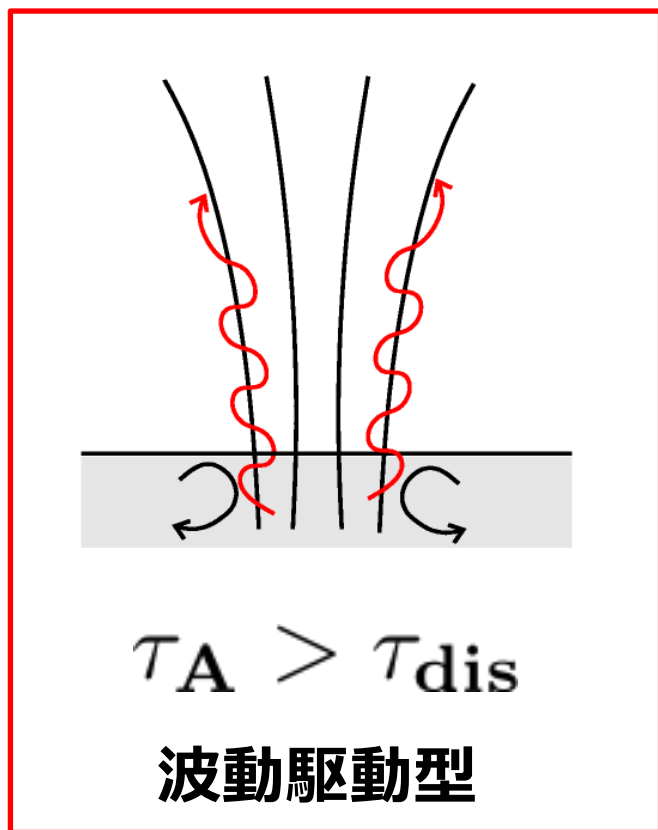
Cranmer+2005



← ~1.5 Mm → ← ~30 Mm → ← ~5000 Mm →

波動駆動型 or ストレス駆動型

- 磁場の散逸はエネルギー注入の時間スケール τ_{dis} と系の動的緩和時間 τ_A の比で大別される



$\tau_A < \tau_{\text{dis}}$
ストレス駆動型

コロナへのエネルギー輸送手段としてのMHD波動

- **Slow waves / Fast waves**

- 圧縮性波動---成層大気中ではすぐに衝撃波に
→数スケール長で減衰 --- 速すぎる
- コロナ加熱に卓越した寄与はできなさそう
 - 彩層、底部コロナへの寄与はあり

- **Alfvén waves**

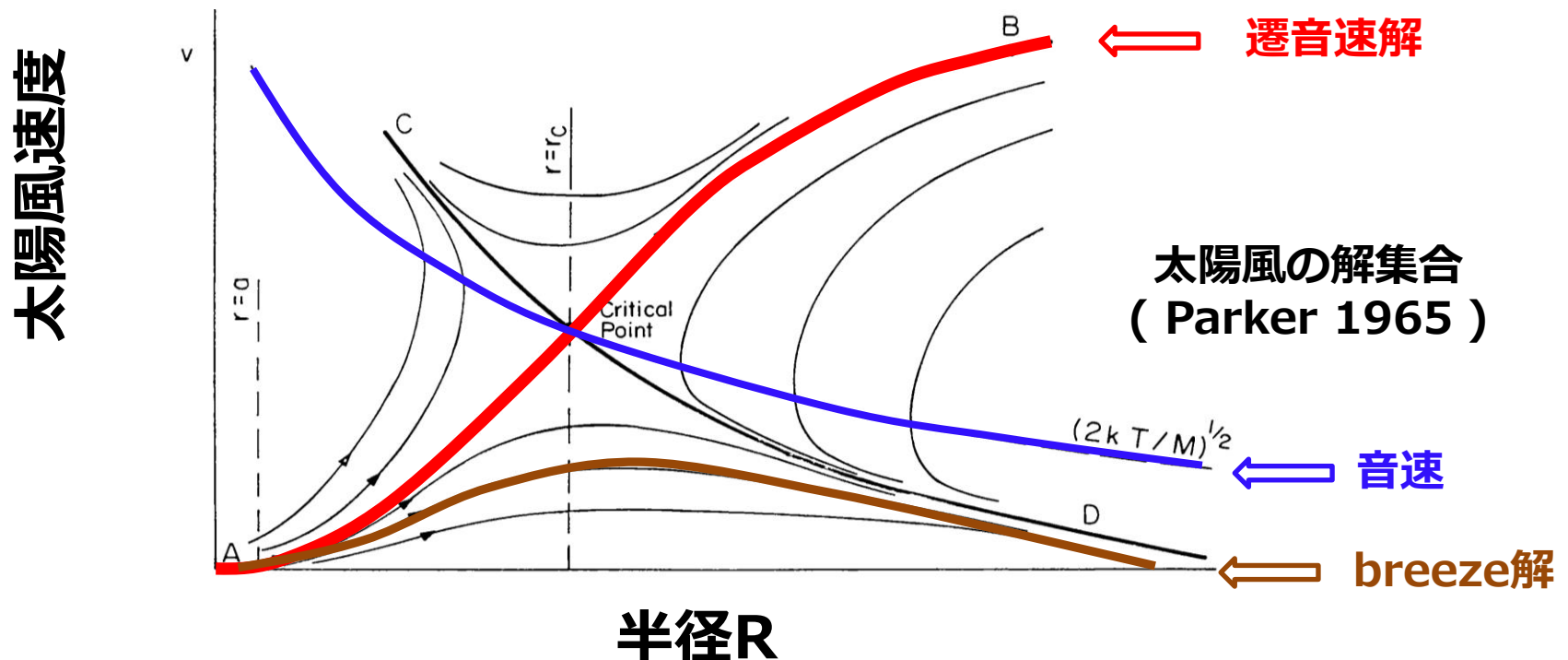
- 非圧縮性波動 --- 減衰が遅い
 - どの減衰過程が最も効果的かは不明
- **コロナ加熱に卓越した寄与が可能**

波動駆動型モデル

- **波動駆動型モデルの散逸機構は背景場の構造に応じて変わる**
 - 成層構造起源
 - MHD shock (Hollweg+1982)
 - MHD turbulence (Matthaeus+1999)
 - 磁力線に垂直方向の構造起源
 - Resonant absorption (Ionson 1978)
 - Phase mixing (Heyvaerts & Priest 1983)

Parker Wind (Parker 1958)

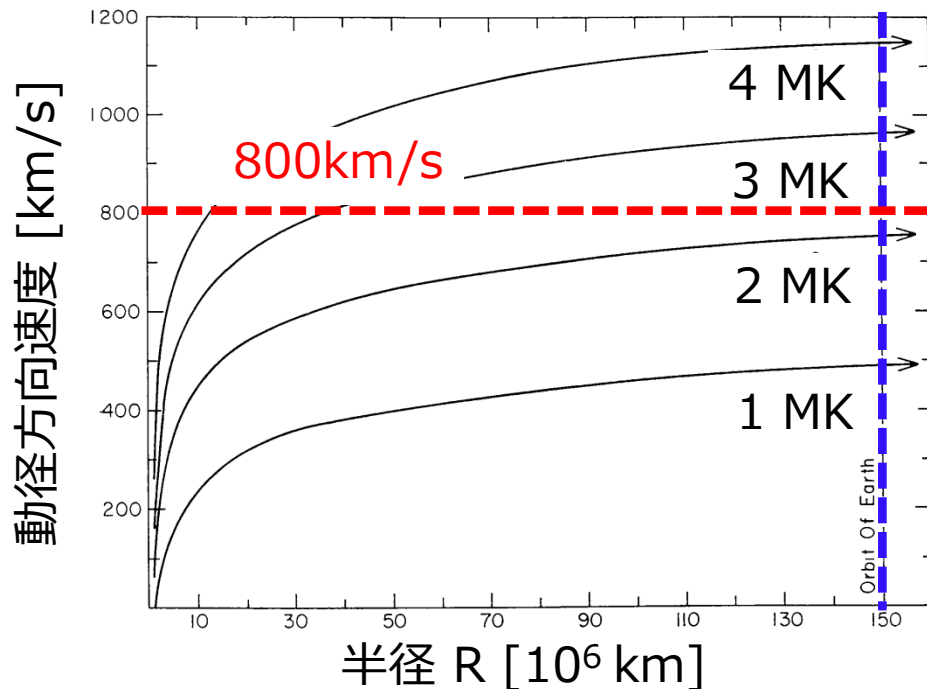
- 高温のコロナからは太陽風が駆動される
 - 高温コロナと低圧の星間空間をつなぐ解は遷音速解だけ



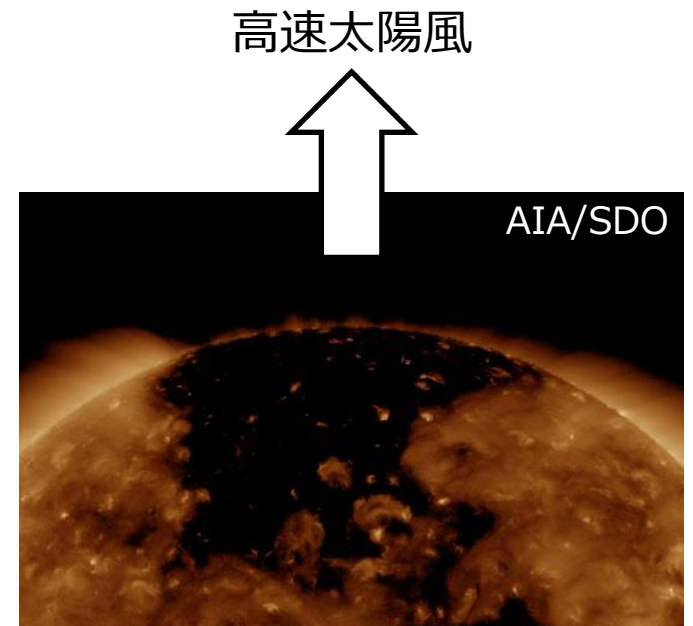
追加熱・加速の必要性

- 高速太陽風（800km/s）を再現するには
コロナ上空で追加熱or加速が必要

地球軌道



コロナ底部の温度を1-4MKまで変えた計算



高速太陽風の源泉である
コロナホールは約 1 MK

コロナ加熱・太陽風駆動理論

- **波動の生成（エネルギー注入）**
- **波動の伝播（エネルギー輸送）**
- **波動の散逸**
- **太陽風の追加加熱・加速**

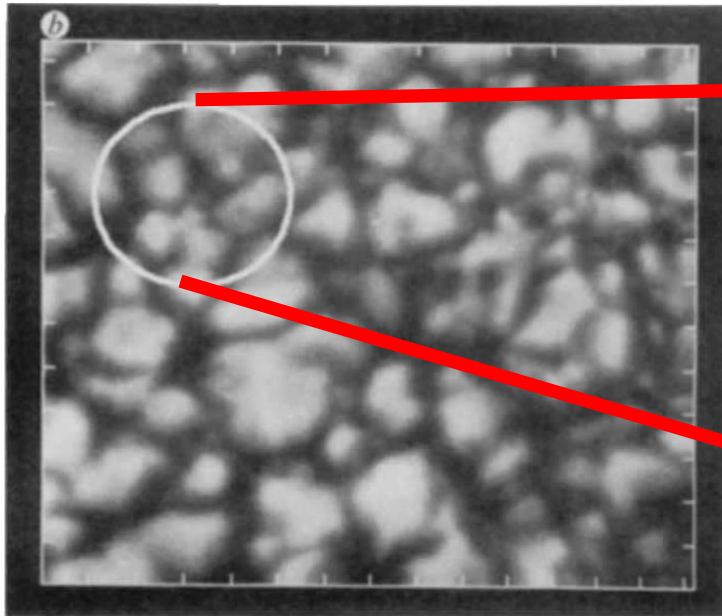
コロナ加熱・太陽風駆動理論

- **波動の生成（エネルギー注入）**
 - 駆動される波動の振幅は？
 - 駆動される波動のモードは？
- **波動の伝播（エネルギー輸送）**
- **波動の散逸**
- **太陽風の追加加熱・加速**

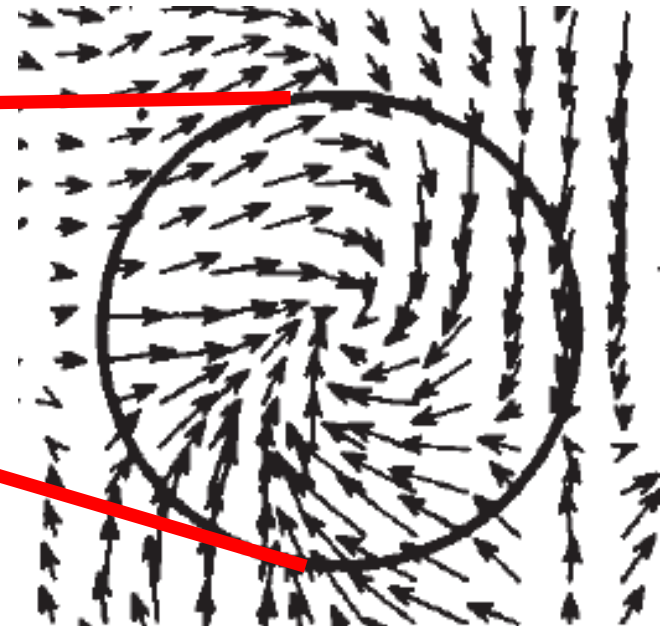
光球での渦運動

- 光球表面では磁束管のラテラルな運動のほかに渦運動も顕著に観測される

Brandt+1988



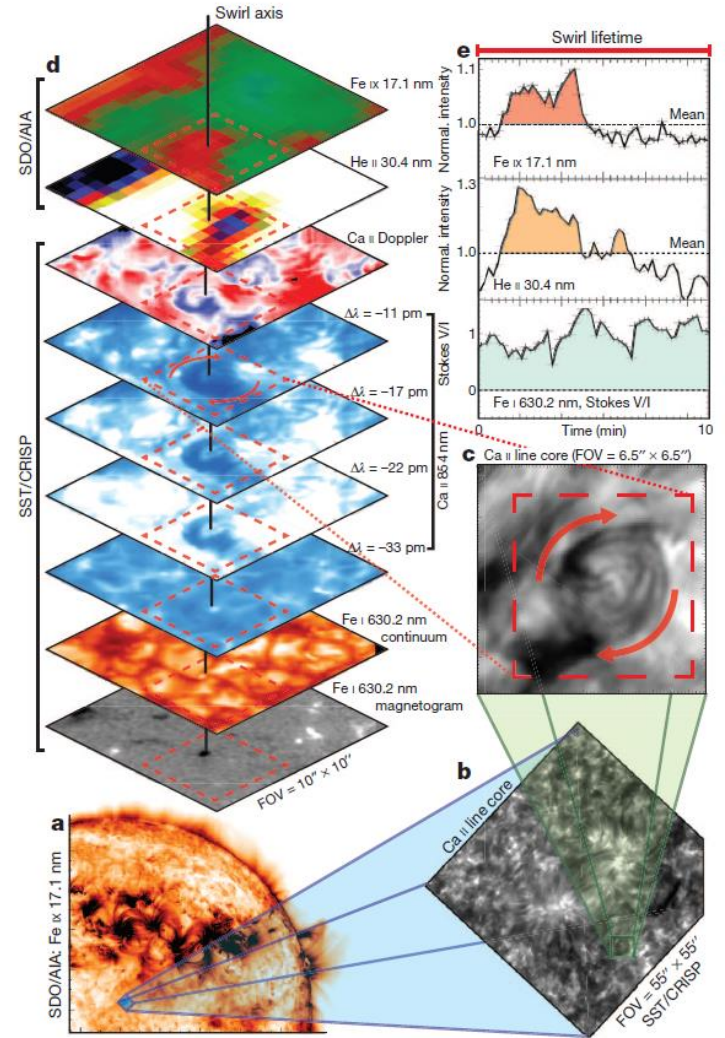
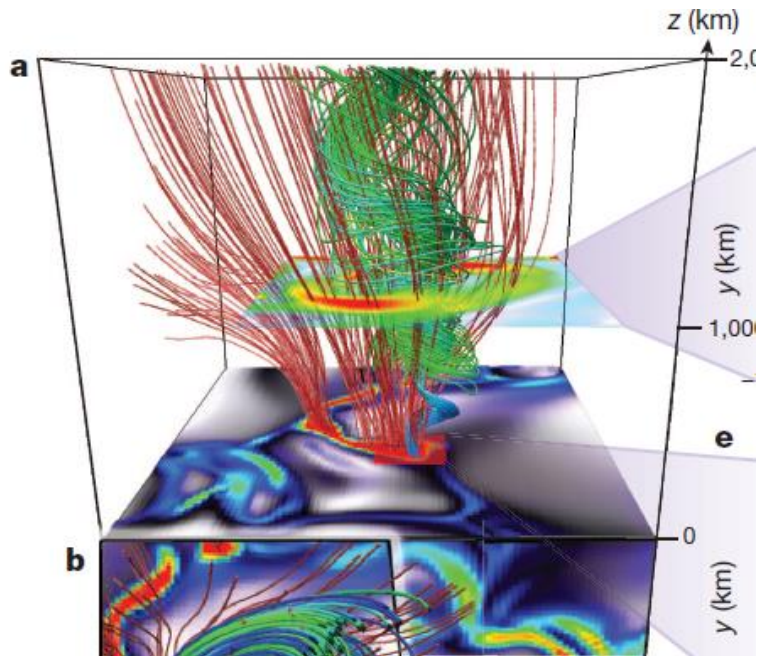
表面对流の可視光像



構造を追跡して求めた水平速度場

渦運動の伝播

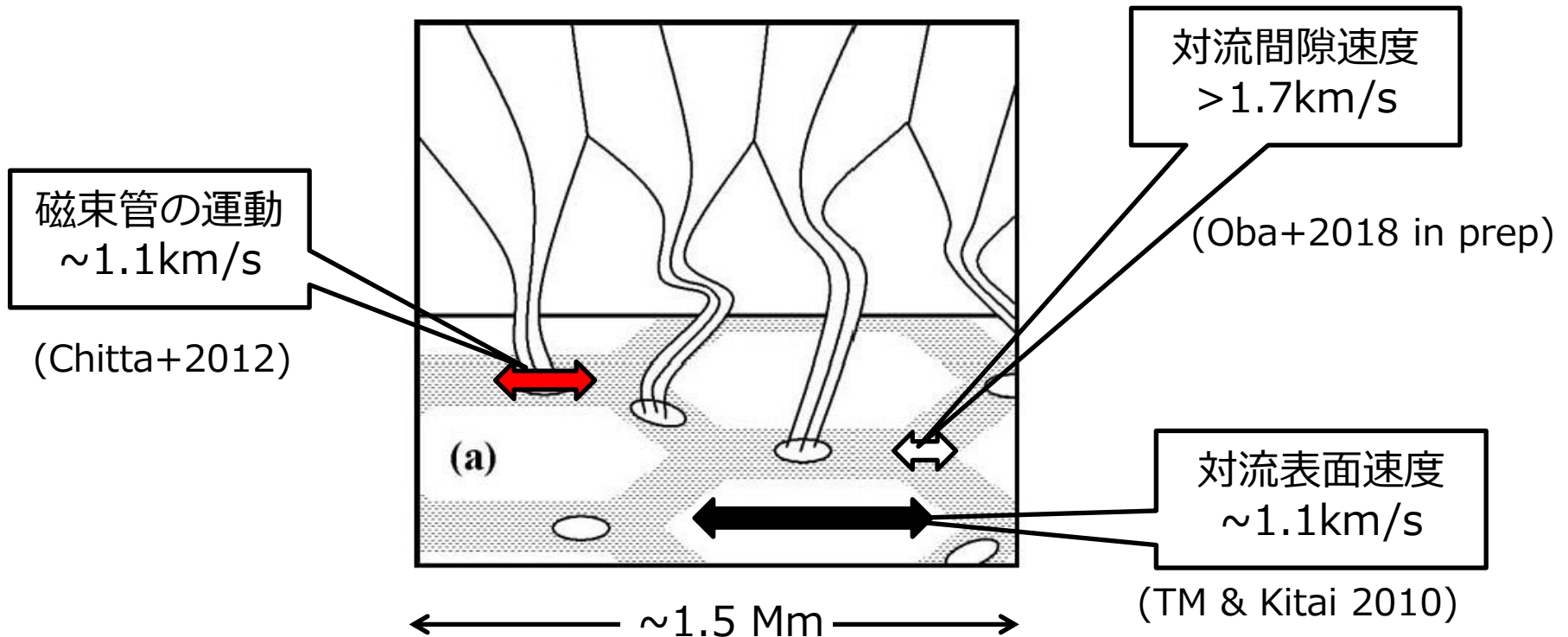
- 光球磁束管中の渦運動は上空にまで輸送され磁気トルネードを引き起こす



対流の水平速度場

- 対流の水平速度場はこれまで観測されてきた速度 (1km/s)より速い可能性あり

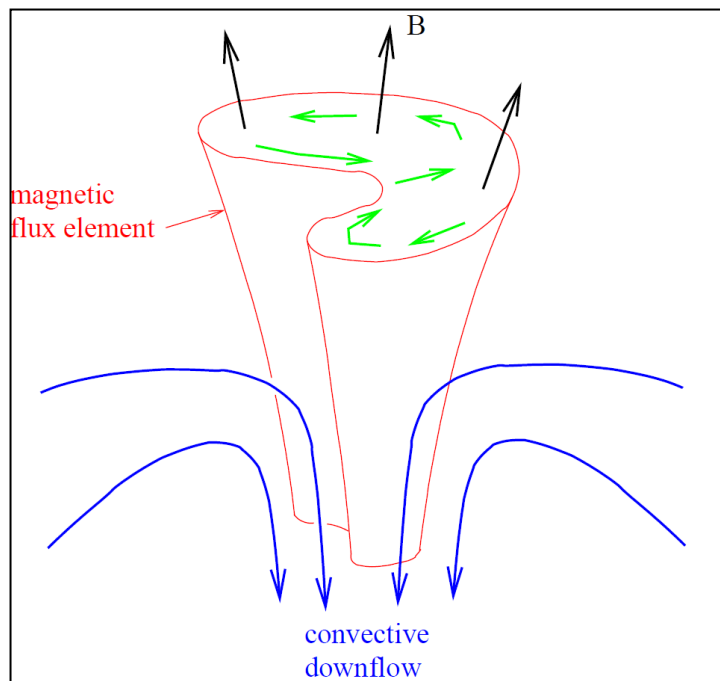
– 速度2倍で \dot{M} が10倍以上に (Suzuki & Inutsuka 2006)



高空間分解能観測

- 口径4mのDKIST*で磁束管内部の構造や運動が分解できるようになるかも

← ~0.5秒角 →



磁束管の構造の模式図

望遠鏡	口径 [m]	空間分解能 [秒角]
ひので	0.5	0.2-0.3
Goode Solar Telescope	1.6	0.06-0.2
DKIST*	4.24	0.02-0.03

* Daniel K. Inouye Solar Telescope

コロナ加熱・太陽風駆動理論

- 波動の生成（エネルギー注入）
- 波動の伝播（エネルギー輸送）
 - Poynting fluxの量は？
 - 線形or非線形伝播？
- 波動の散逸
- 太陽風の追加加熱・加速

Poynting fluxの観測

- Poynting fluxの発展

$$\rho v_{\perp}^2 V_A A = \text{const.} \quad (\text{Aは磁束管の断面積})$$

- Poynting fluxの観測

- 偏光分光観測@光球 (Fujimura & Tsuneta 2009)

- $2.7 \times 10^6 \text{ [erg/cm}^2\text{/s]}$

- ジェット状構造の横揺れから推定@彩層
(DePontieu+2007, Okamoto & DePontieu 2011)

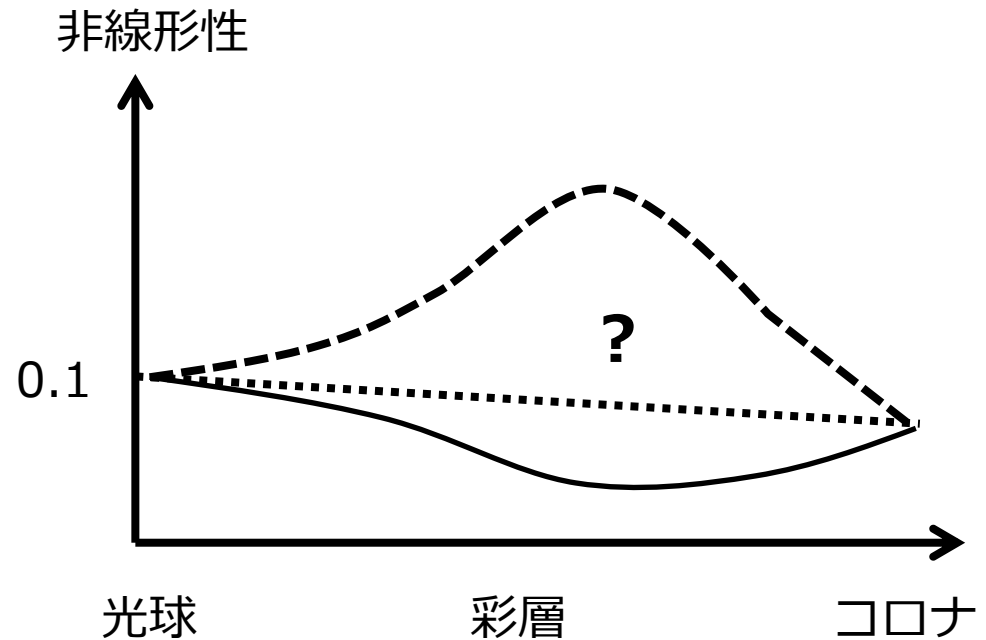
- $2 \times 10^5 \sim 7 \times 10^6 \text{ [erg/cm}^2\text{/s]}$

非線形性の成長

- 彩層での非線形性の程度は、彩層磁場（磁束管構造）の不定性からよくわかっていない

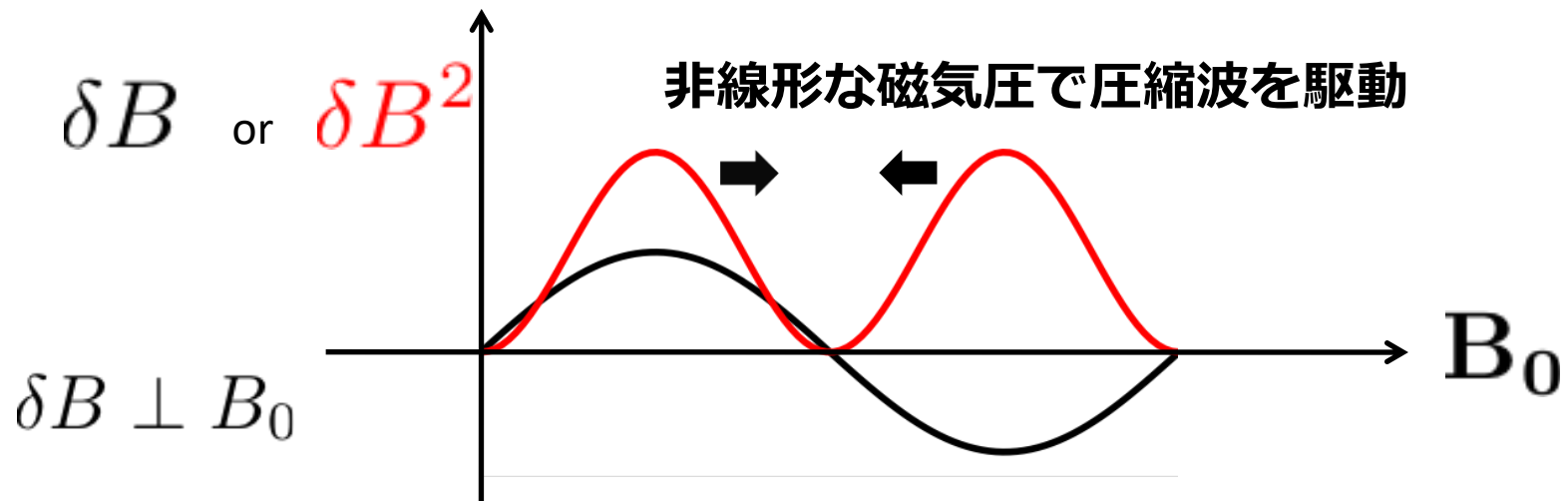
非線形性の成長

$$\frac{v_{\perp}}{V_A} \propto A \rho^{\frac{1}{4}} \propto \frac{\rho^{\frac{1}{4}}}{B}$$



非線形モード変換過程

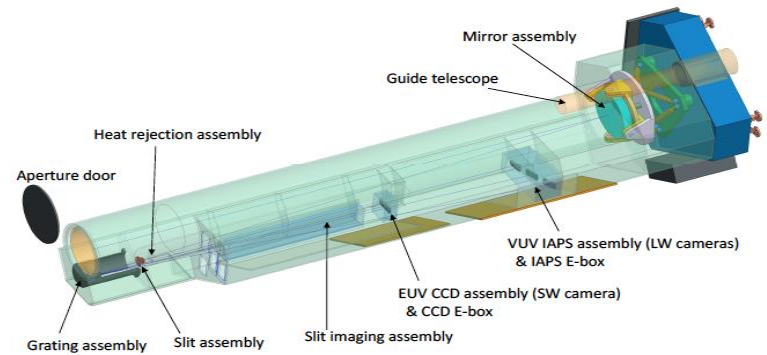
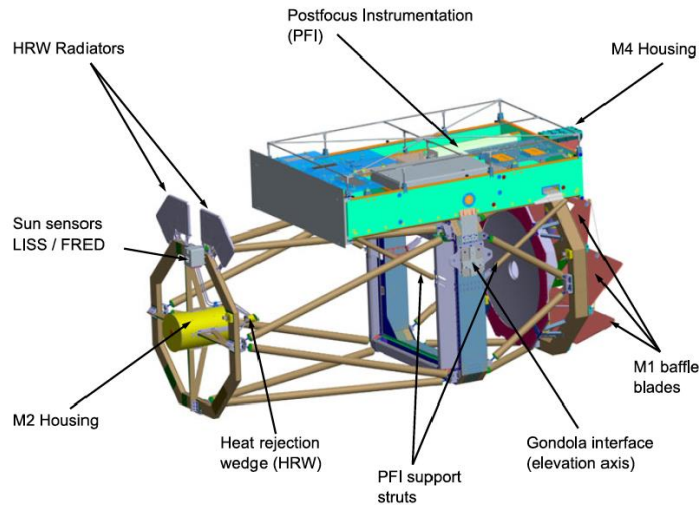
- 非圧縮性のアルフベン波が圧縮性の磁気音波に変換される過程を捉えたい



非線形モード変換で生じた圧縮波が衝撃波になりコロナを加熱(Moriyasu+2004)

Sunrise / EUVST

- 彩層の偏光分光観測や彩層・コロナでの紫外線分光観測でエネルギー輸送を捉えたい



SUNRISE3

光球・彩層の偏光分光観測でエネルギー輸送過程を捉える

EUVST/Solar-C

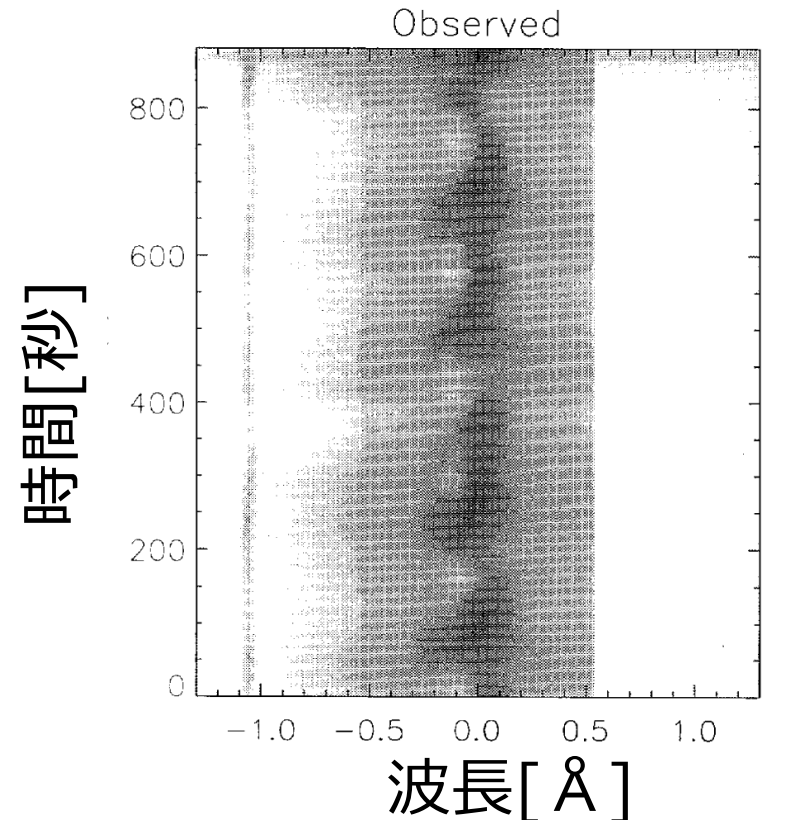
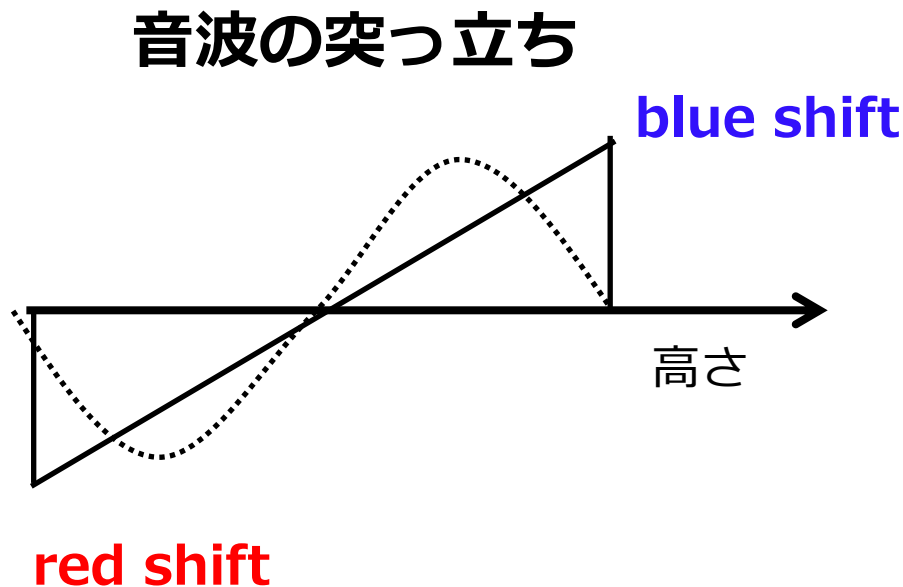
紫外線分光観測で彩層からコロナまでをシームレスに観測

コロナ加熱・太陽風駆動理論

- 波動の生成（エネルギー注入）
- 波動の伝播（エネルギー輸送）
- **波動の散逸**
 - 観測から散逸機構を特定できるか？
- 太陽風の追加加熱・加速

彩層での衝撃波の生成

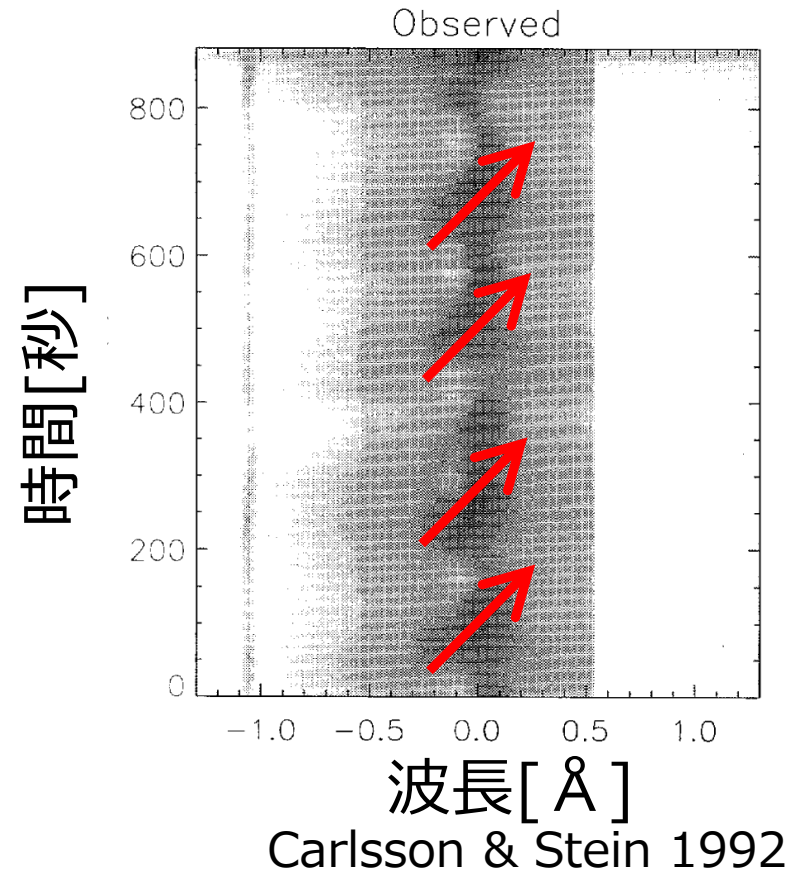
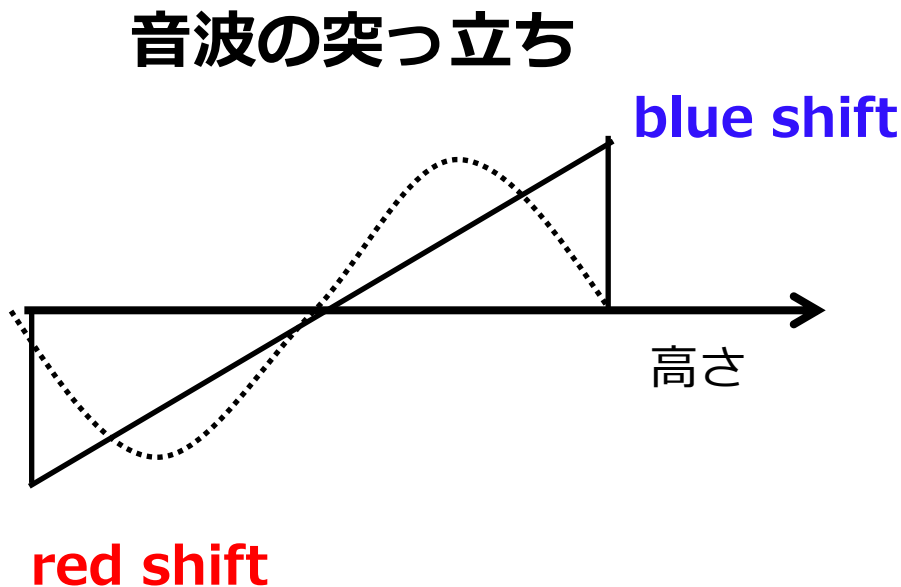
- 振幅の増大と共に発生した衝撃波は彩層の分光観測で捉えることができる



Carlsson & Stein 1992

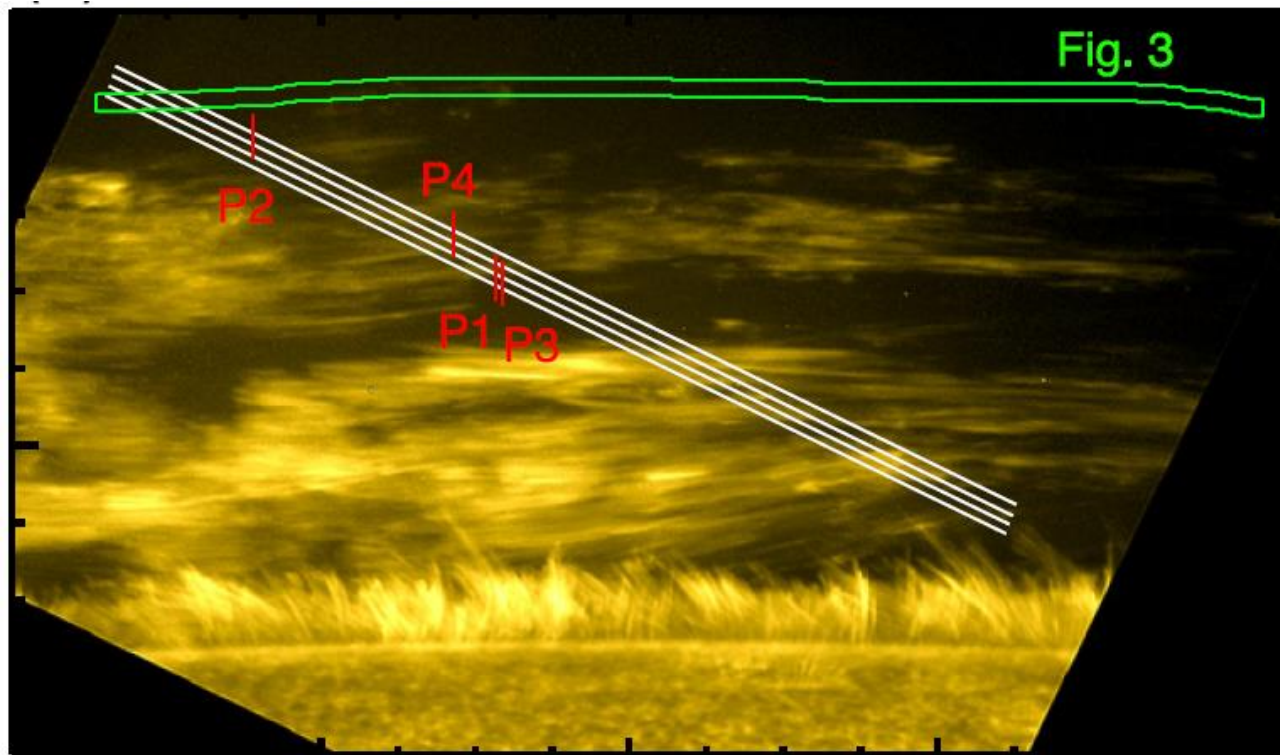
彩層での衝撃波の生成

- 振幅の増大と共に発生した衝撃波は彩層の分光観測で捉えることができる



共鳴吸収

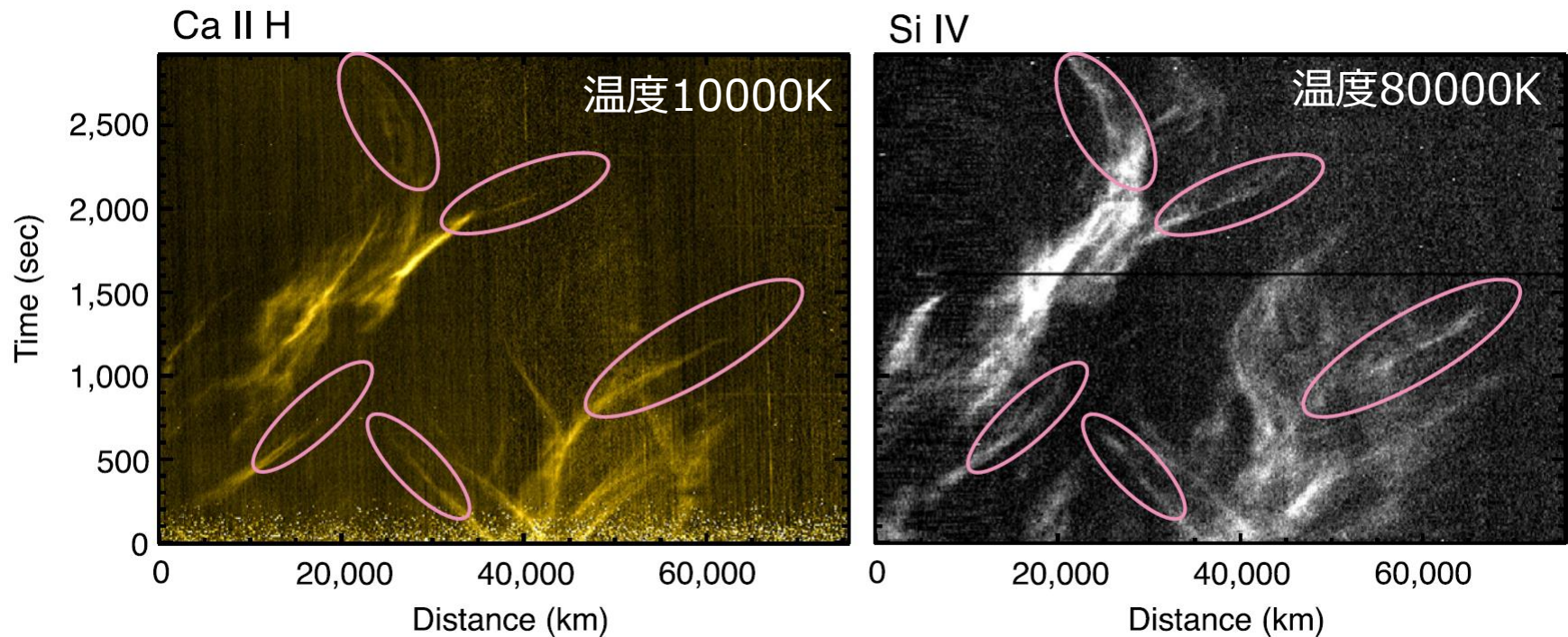
- プロミネンス（彩層物質の雲）の熱化現象



共鳴吸収

• プロミネンス（彩層物質の雲）の熱化現象

- 磁束管を伝わるアルフベン波の共鳴で振幅が増大し散逸していると解釈された（共鳴吸収）

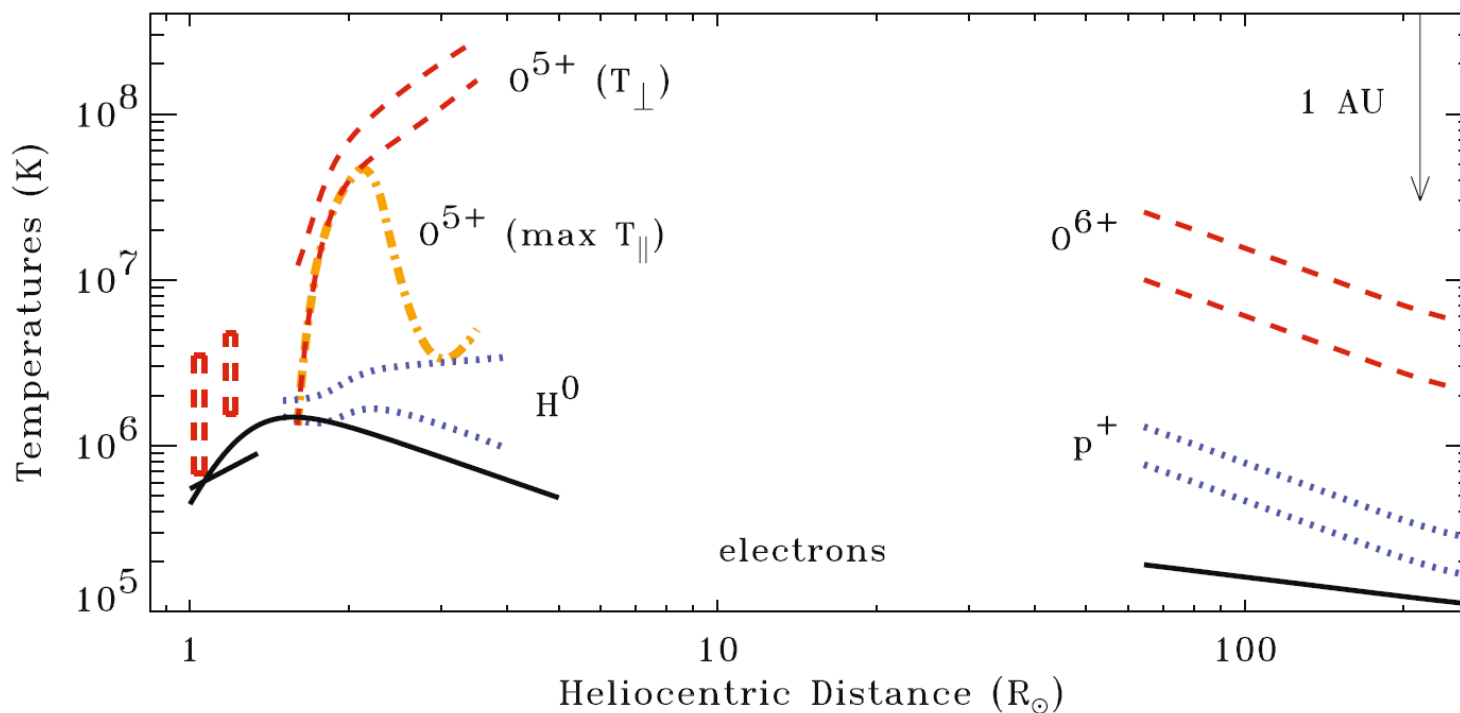


重イオンの選択的加熱・非等方性

- コロナ上空の温度には無衝突性が現れる

$$T_{ion} \gg T_p > T_e \quad T_{\perp} \gg T_{\parallel}$$

イオンサイクロトロン共鳴で散逸？

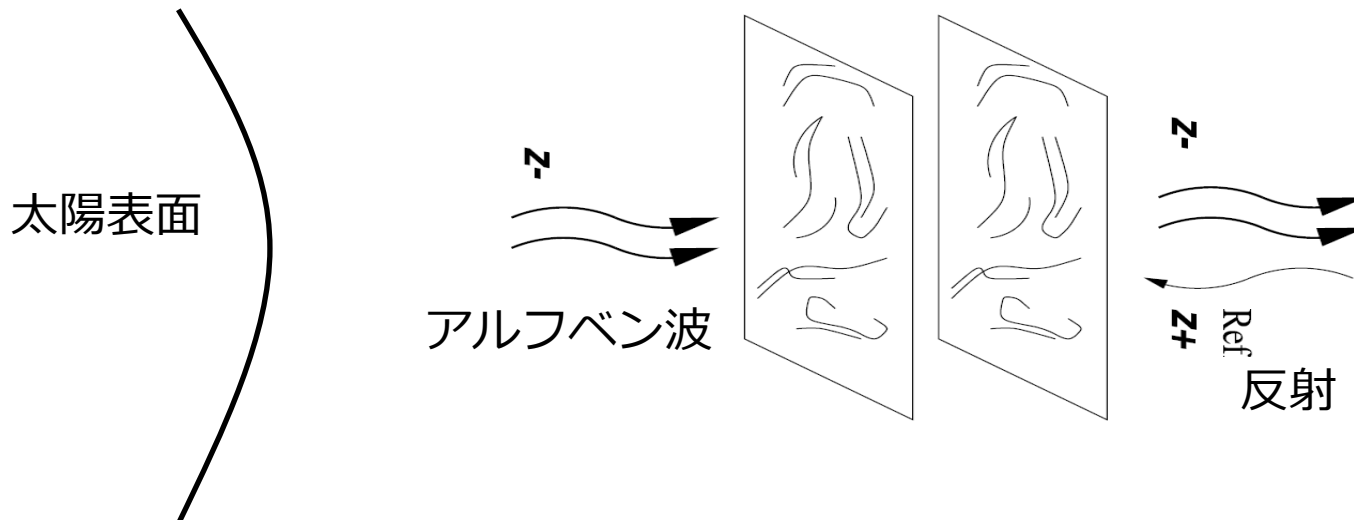


コロナ加熱・太陽風駆動理論

- 波動の生成（エネルギー注入）
- 波動の伝播（エネルギー輸送）
- 波動の散逸
- **太陽風の追加熱・加速**
 - Alfvén乱流の駆動
 - 圧縮性の効果は？

Alfven波動乱流の駆動

- 互いに逆向きに伝播するAlfven波の相互作用で乱流が駆動される
 - 磁力線垂直方向にカスケード
 - 散逸率は反射波の量に依存



MHD乱流とイオンサイクロトロン波

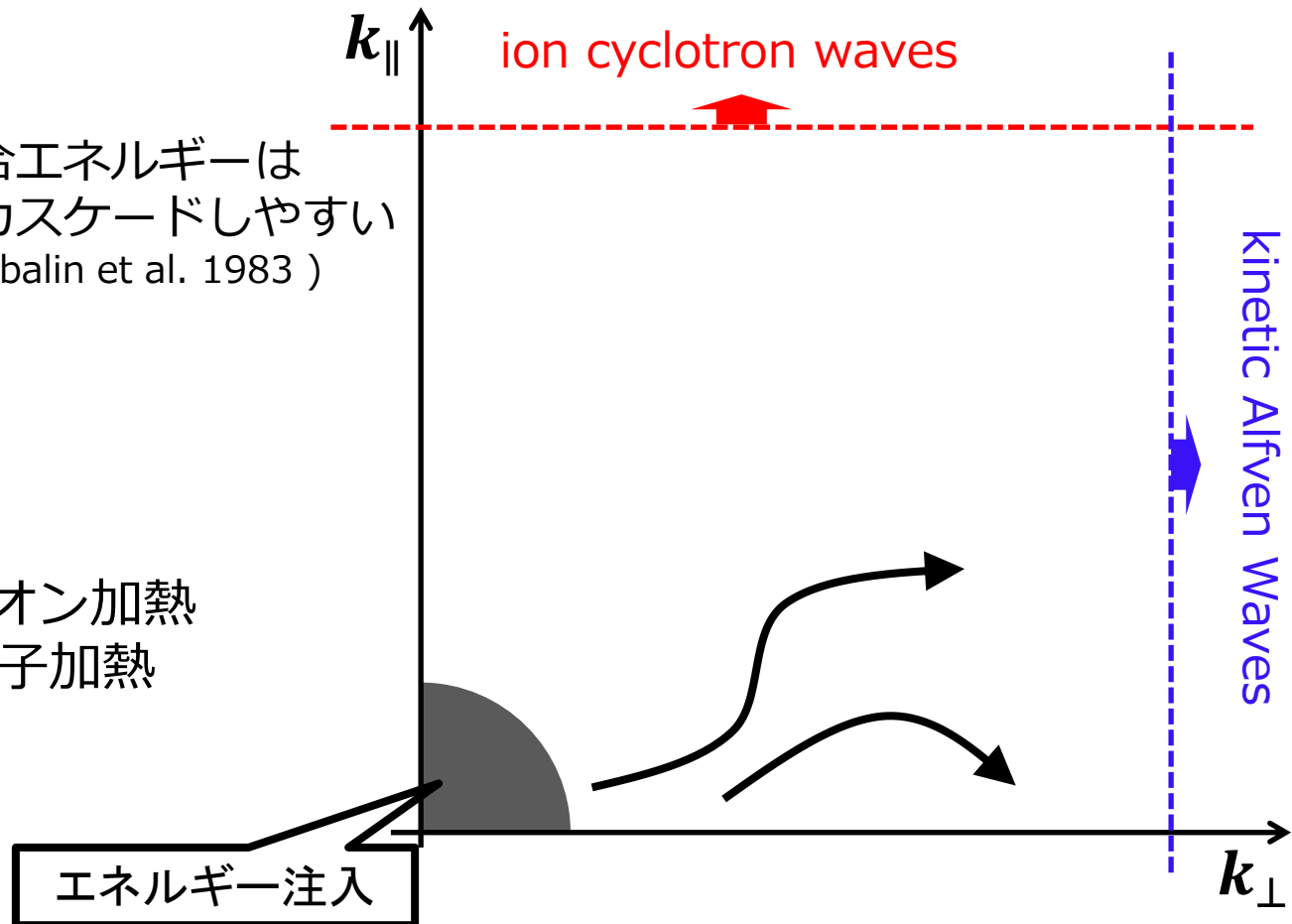
- MHD乱流はイオンの垂直加熱を説明できるか？

背景磁場が強い場合エネルギーは
磁力線垂直方向にカスケードしやすい
(e.g. Straus 1976, Shebalin et al. 1983)

low betaでは、

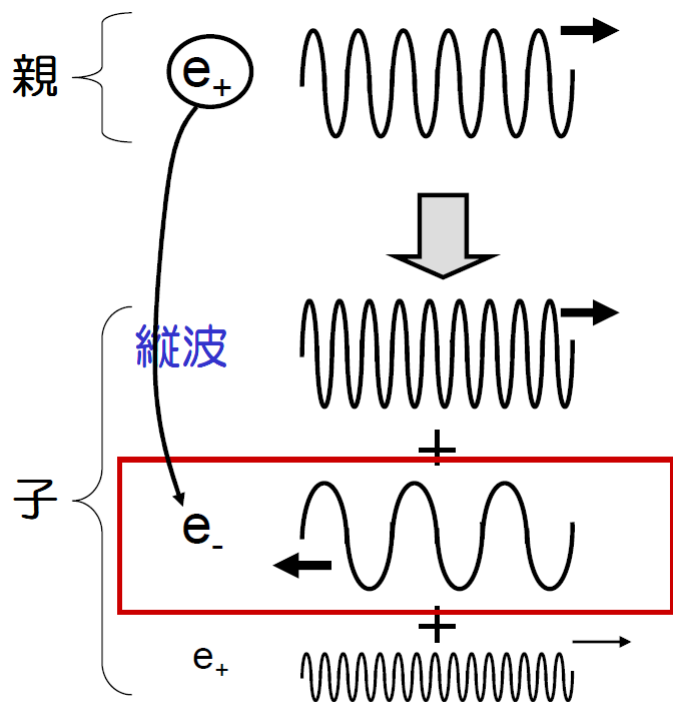
- ICWs → イオン加熱
- KAWs → 電子加熱

(Leamon et al. 1999)

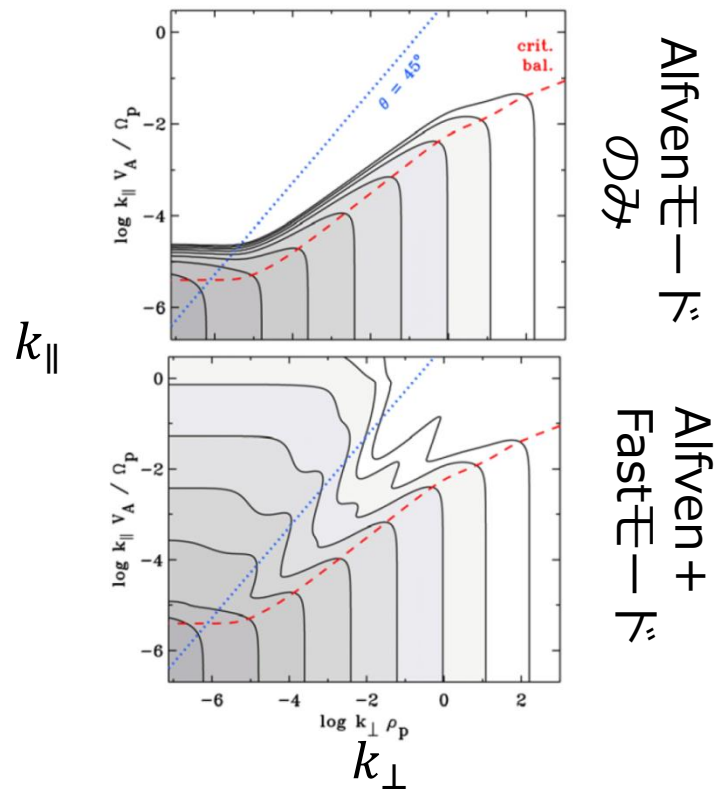


乱流と圧縮性の効果

- MHD乱流に対する圧縮性の効果は？



崩壊不安定 (Terasawa+1986)
反射波を増やす



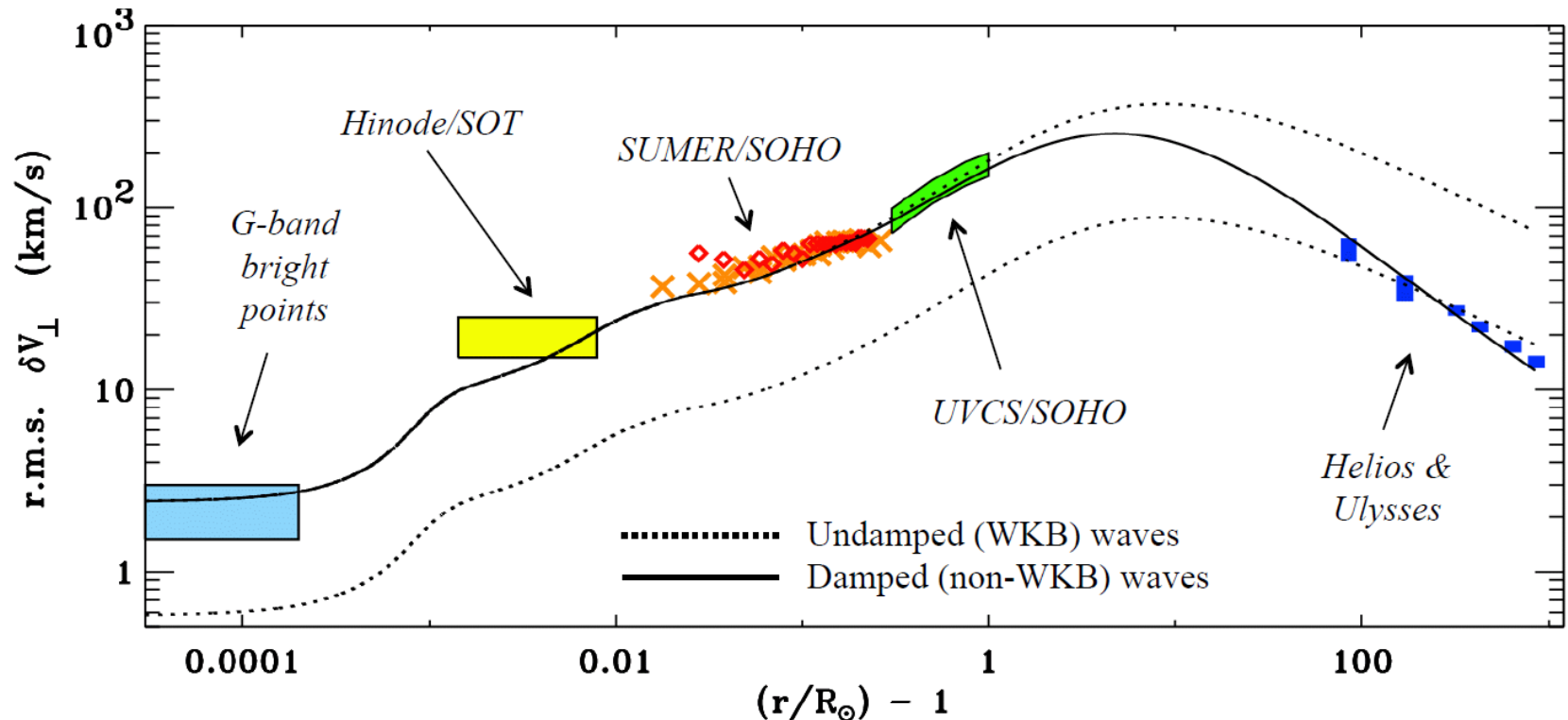
k_{\parallel} 方向にカスケード

圧縮性MHD太陽風モデル

- **光球から太陽風加速領域までを第一原理(MHD)を用いて再現するモデル**
 - Suzuki & Inutsuka 2005, 2006
 - 1D model : 基本的に衝撃波で加熱
 - Cranmer+2007, Shoda+2018
 - 1D model: 衝撃波 + アルフベン乱流
 - TM & Suzuki 2012, 2014
 - 2D model: 衝撃波 + 圧縮性乱流

Parker Solar Probe (PSP)

- PSPのその場観測から $R \sim 10R_{\odot}$ 付近の速度・磁場・密度擾乱や温度の情報が補完される
 - $R \sim 10R_{\odot}$ は恐らく反射や散逸が最も活発な場所



まとめ

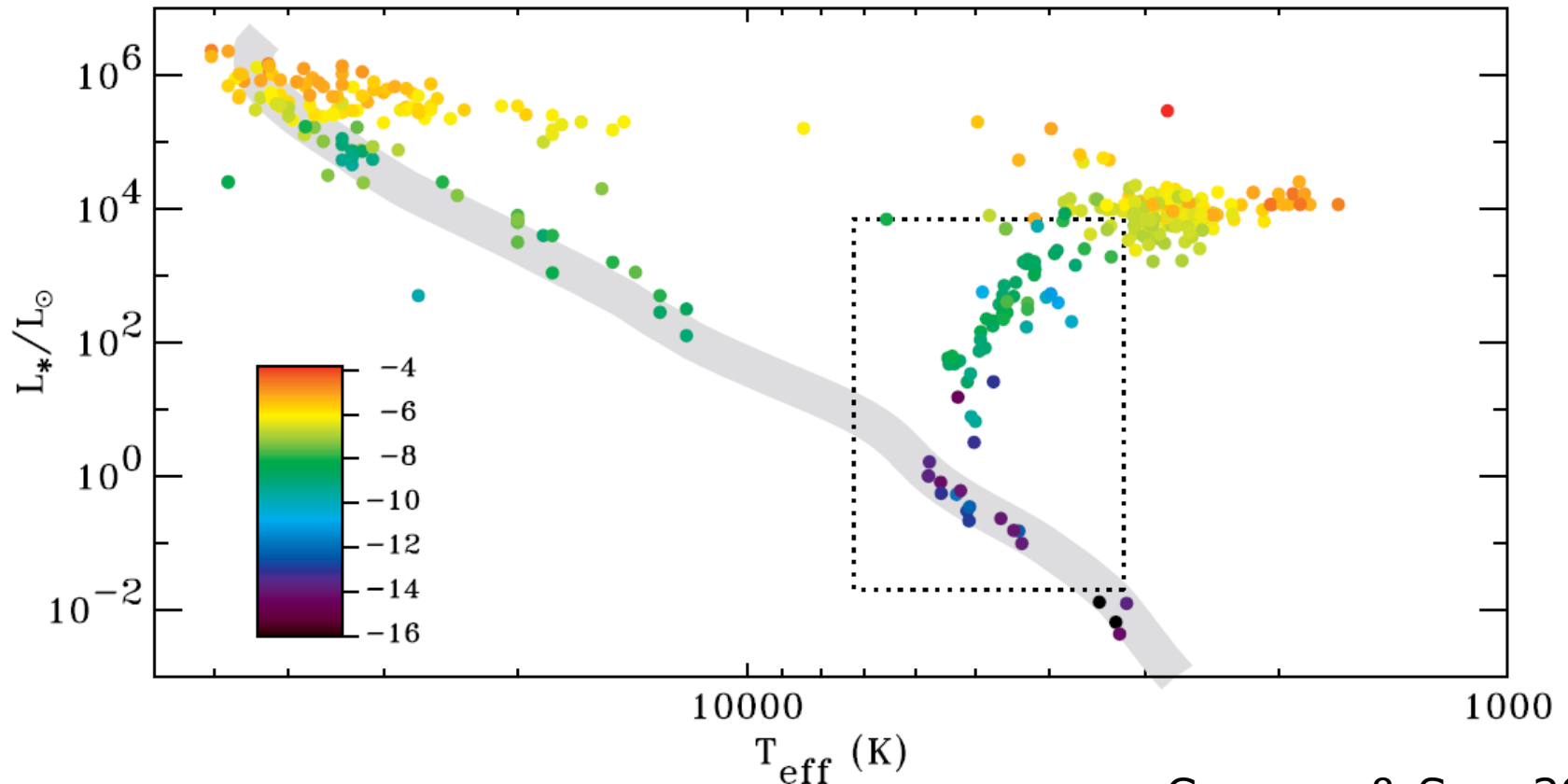
- **波動の生成（エネルギー注入）**
 - 磁束管内部の渦・シア運動
- **波動の伝播（エネルギー輸送）**
 - Poynting flux・非線形性の発展
- **波動の散逸**
 - 散逸過程の観測から加熱機構を推定
- **太陽風の追加熱・加速**
 - アルフベン乱流と圧縮性

天文学へのインパクト

- **太陽（恒星）からの質量損失率の影響**
 - 星自身の進化
 - magnetic braking
 - Faint young sun paradox (Sagan & Mullen 1972)
 - 星周辺の惑星系
 - 原始太陽系内惑星の大気散逸 (Wood 2006)
 - 銀河中のガス・ダスト進化

太陽風理論が適用可能な天体

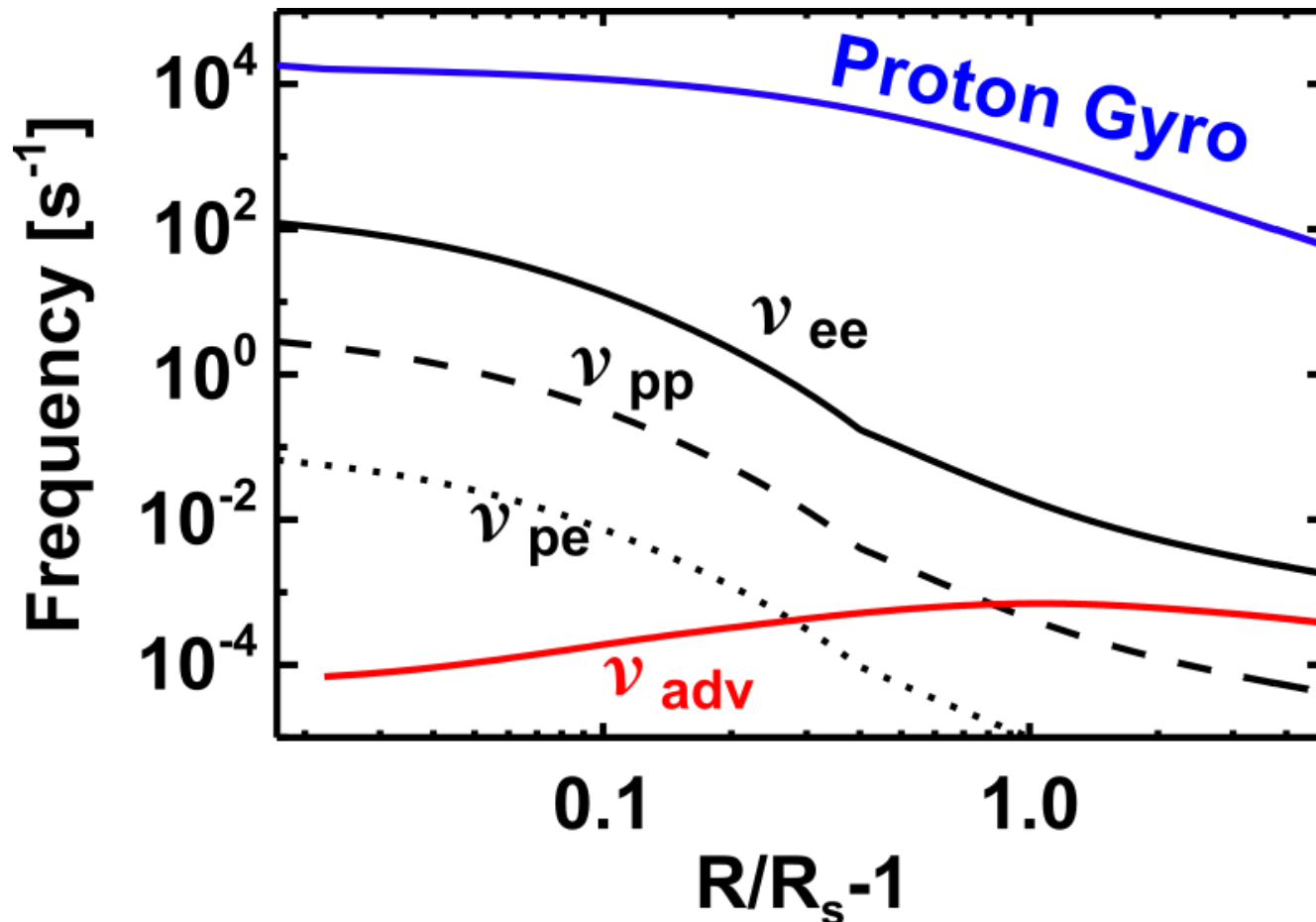
- 対流が励起する磁気擾乱で駆動される天体には太陽風モデルが適用できるはず



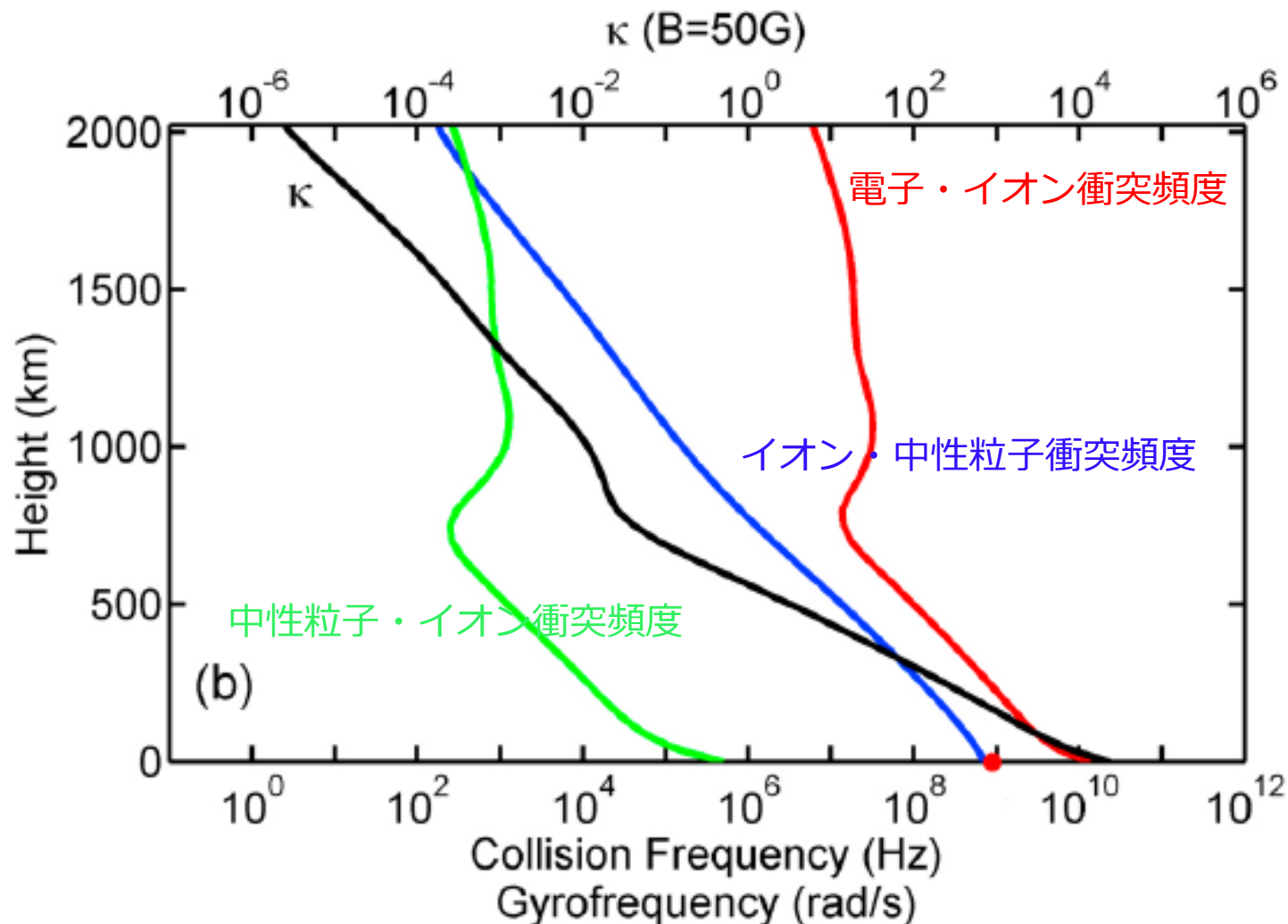
backup

太陽風中の時間スケール

- コロナホール上空の典型的な時間スケール

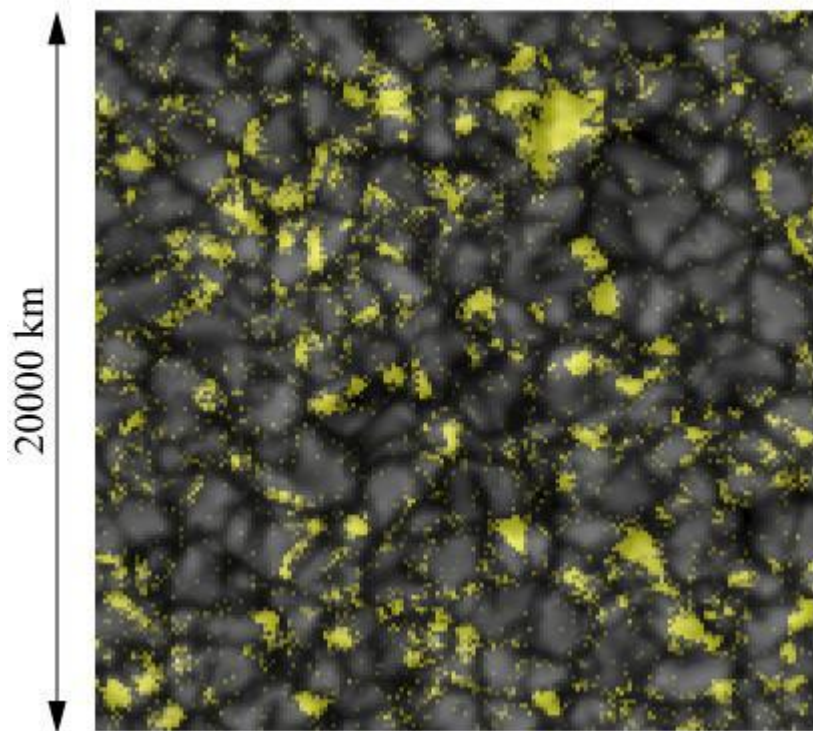


光球・彩層の時間スケール

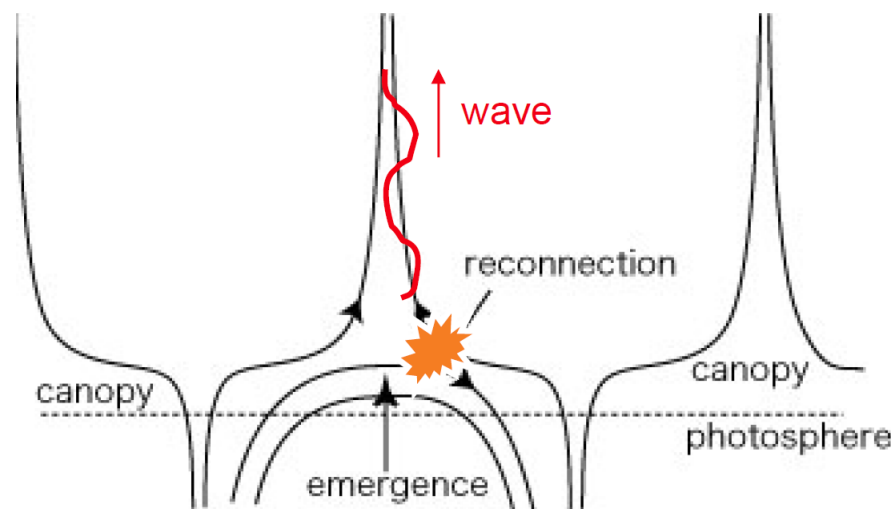


微細浮上磁場とリコネクション

- 微細な浮上磁場と周囲の磁場とのリコネクションで高周波波動が駆動される？



表面对流と水平磁場強度 (黄)
(Ishikawa+2009)



微細水平磁場と周囲の磁場
とのリコネクション

太陽物理の主な課題

- **コロナ加熱・太陽風駆動問題**

- どうして太陽の外側の大気は熱いか？
- 太陽の質量放出率はどのように決まるか？

- **太陽フレア**

- フレアトリガー・粒子加速・質量放出など

- **太陽ダイナモ**

- 磁場の起源・周期性

弱電離の効果

- 誘導方程式

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times \left[V_n \times B - \frac{J \times B}{en_e} + \frac{(J \times B) \times B}{c\nu_{ni}\rho_n} - \frac{4\pi\eta}{c} J \right]$$

Hall > Advection

$$t < \frac{1}{\omega_{ci}} \frac{n_n}{n_i} \frac{V_{na}^2}{V^2}$$

光層で0.1-1秒

Ambipolar > Advection

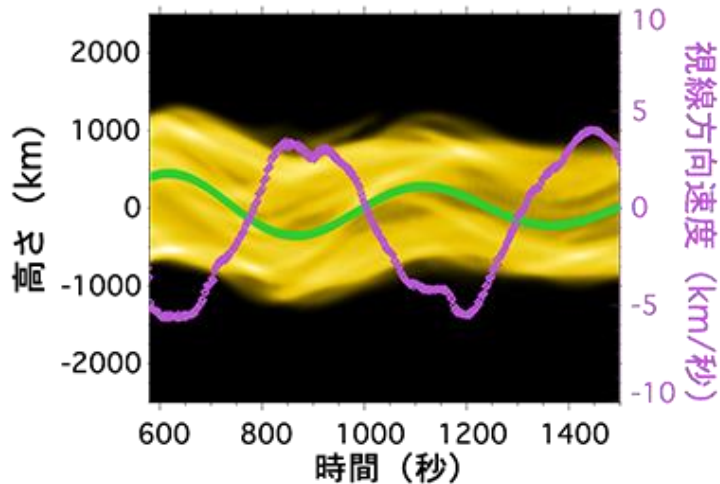
$$t < \frac{1}{\nu_{in}} \frac{n_n}{n_i} \frac{V_{na}^2}{V^2}$$

彩層で0.1-1秒

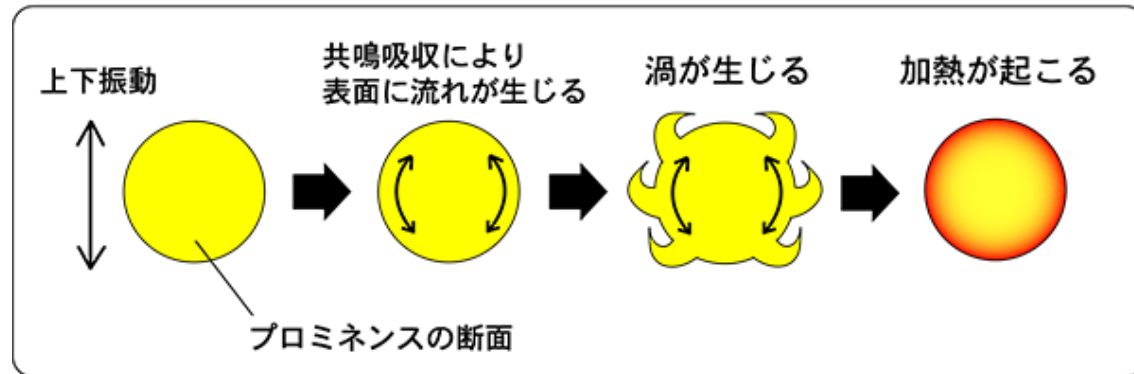
共鳴吸収

- プロミネンスとアルフベン波が共鳴することでエネルギーが散逸する様子が観測された

スリット上を通過するプロミネンスの動き
(数値シミュレーション)



振動に伴う加熱の仕組み



Okamoto+2015, Antolin+2015

衝撃波による波動の散逸長

～衝撃波形成距離

• 音波

$$L_d \sim \frac{1}{2(\gamma + 1)} \left(\frac{C_S}{\delta v} \right) \lambda$$

• Alfvén波

$$L_d \sim \left(\frac{B_{\parallel}}{\delta B_{\perp}} \right)^2 \lambda$$

L_d : 衝撃波形成距離

λ : 波長

C_S : 音速

δv : 音波の速度振幅

B_{\parallel} : 磁場強度

δB_{\perp} : Alfvén波の磁場振幅

太陽風の追加熱・加速

- 太陽風の追加熱・追加加速は遷音速点よりも外側で行われるべき

質量損失率を予言できる？

RLO型

インバランス乱流

プラントル数

太陽のプラズマ環境

- 密度・温度・ジャイロ・プラズマ・デバ
イ、、、

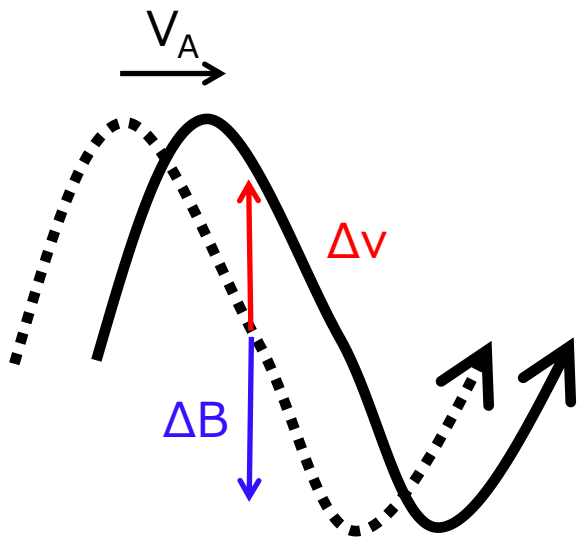
時間の比較

3次元輻射流体MHD

弱乱流と強？乱流の違い

波動の観測

- 速度・磁場擾乱の位相関係を使ってアルフベン波のエネルギー流束が求められる



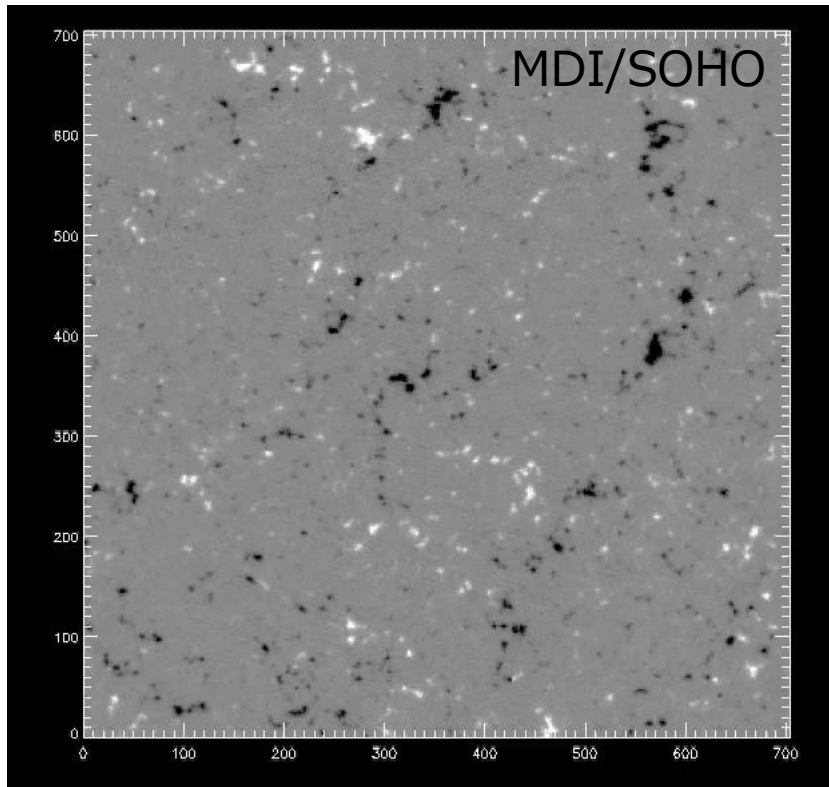
SOT/Hinodeの
分光偏光観測から
アルフベン波の
エネルギー流束は光球で
 $2.7 \times 10^6 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$
と見積もられた

磁力線と
アルフベン波の伝播

磁束運動の相関時間

Chitta+2012

- 磁束管が対流で動かされる時、その相関時間は**約20-30秒**程度になる



磁束管の運動（白黒がN極S極を表す）

活動領域の動的緩和時間

$$\frac{\text{活動領域の大きさ}}{\text{アルフベン速度}} \sim \mathbf{20-100\text{秒}}$$

コロナホールの動的緩和時間

$$\frac{\text{密度スケール長}}{\text{アルフベン速度}} \sim \mathbf{100\text{秒以上}}$$

非線形性の成長

- アルフベン波の非線形性はエネルギー保存則

$$\rho v_{\perp}^2 V_A A = \text{const.}$$

から $\frac{v_{\perp}}{V_A} \propto A \rho^{\frac{1}{2}} \propto \frac{\rho^{\frac{1}{2}}}{B}$

磁束管構造と波動振幅

- 表面で駆動された速度擾乱は、密度成層のため上空に輸送されると増幅する



エネルギー流束一定
(波の散逸無し) とすると

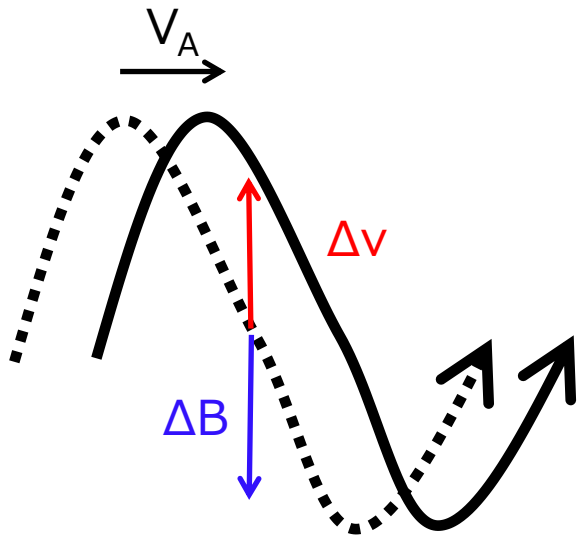
$$\rho v_{\perp}^2 V_A A = \text{const.}$$

$$\text{速度擾乱} : v_{\perp} \propto \rho^{-1/4}$$

$$\text{非線形性} : \frac{v_{\perp}}{V_A} \propto A \rho^{1/2} \propto \frac{1}{B}$$

波動の観測

- 速度・磁場擾乱の位相関係を使ってアルフベン波のエネルギー流束が求められる



磁力線と
アルフベン波の伝播

Alfvén波のPoynting flux@光球
 $= 4 \times 10^6 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$

Fujimura & Tsuneta 2009

彩層でのPoynting fluxは？

コロナで必要なPoynting flux
 $< 8 \times 10^5 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$

Withbroe & Noyes 1977

アルフベン波のエネルギー流束

- アルフベン波の非線形性はエネルギー保存則

$$\rho v_{\perp}^2 V_A A = \text{const.}$$

から

Alfven波動乱流の駆動

- 互いに逆向きに伝播するAlfven波の相互作用で乱流が駆動される

