

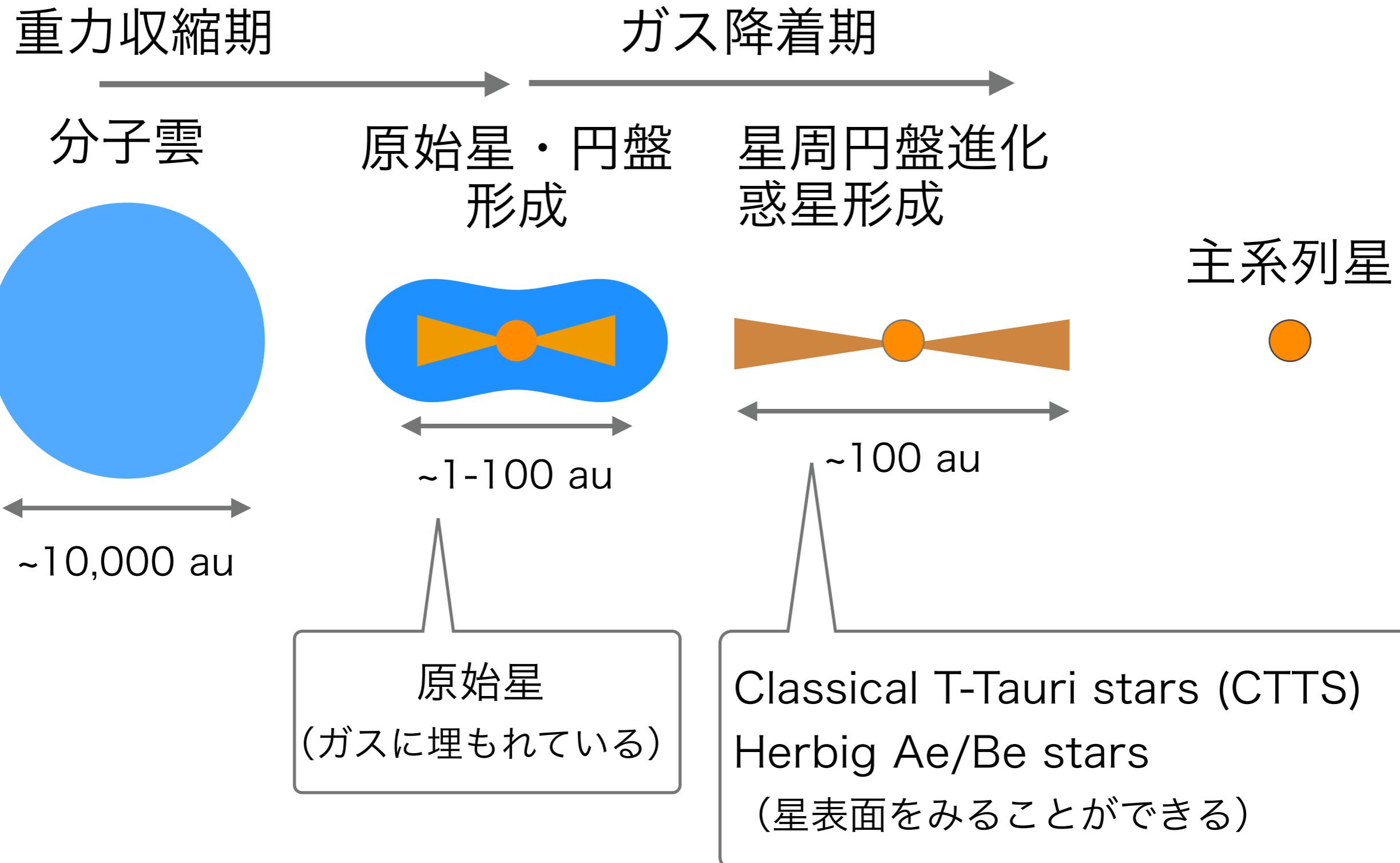


# 太陽・原始星における 磁気活動

---

高棹 真介 (名古屋大学、学振PD)

# 星・惑星ができるまで

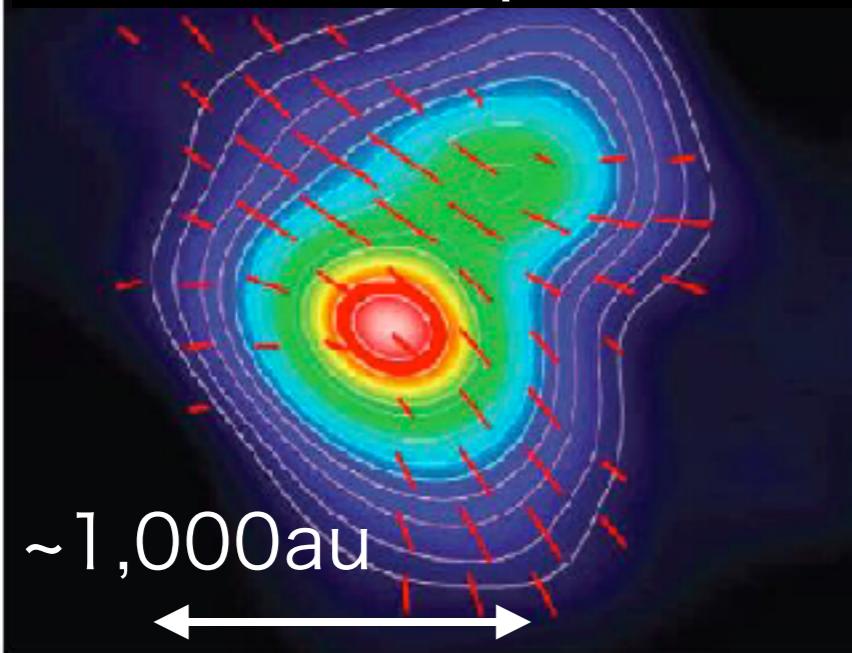


# 磁場観測

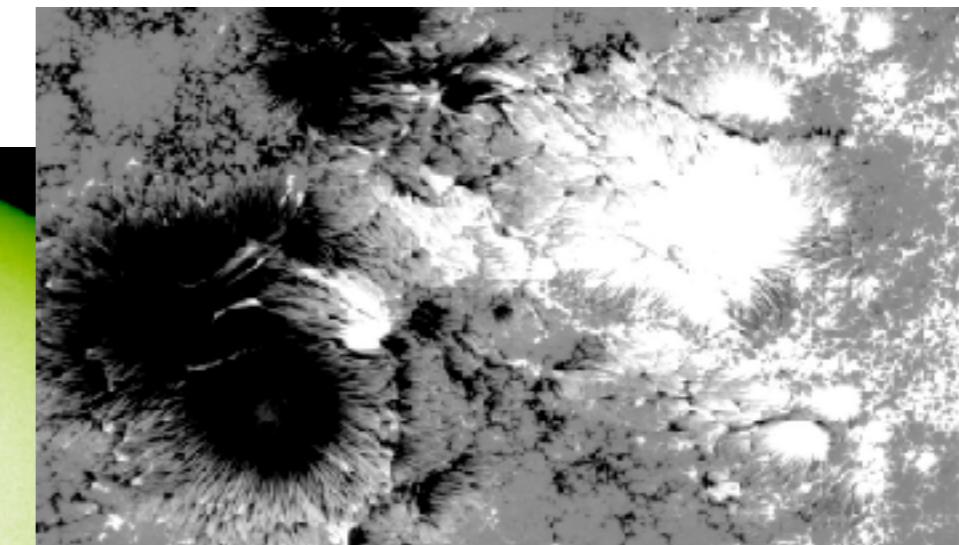
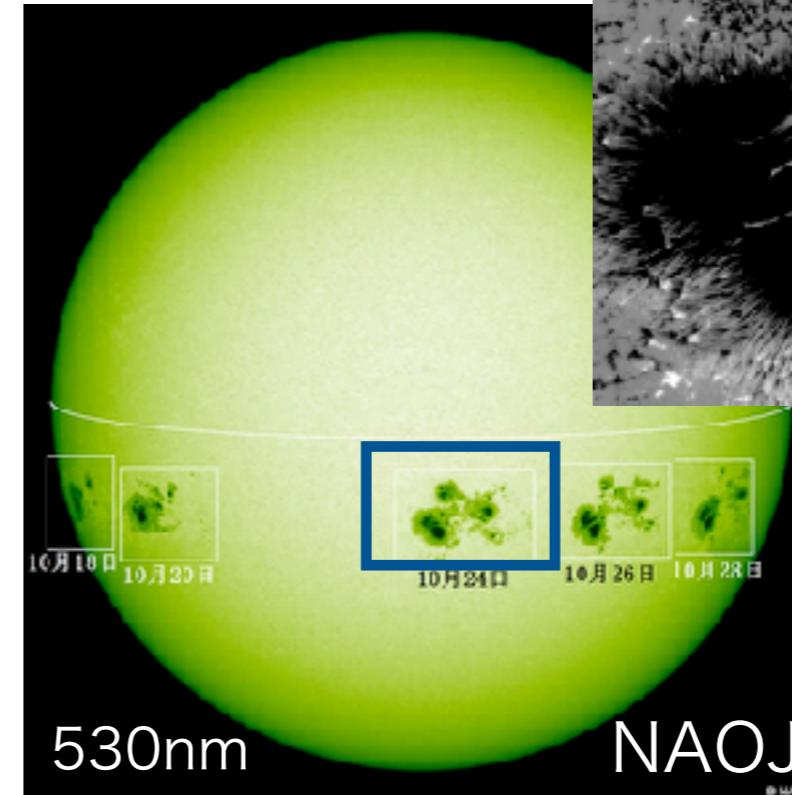
## ダストの偏光観測

Girart et al. 2006

**cloud core**  
(dust emission + polarization)



ゼーマン効果による Stokes V  
observed by Hinode/SOT



磁場は星形成過程、恒星大気で重要な役割

# アウトライン

---

- ▶ イントロ
  - ▶ 太陽・恒星・原始星の磁気活動の概観
  - ▶ 磁気流体力学と磁気リコネクションの基本
- ▶ フレア観測から太陽・恒星コロナを探る取り組み
  - ST+ 2015, ST & Shibata 2016
- ▶ 原始星近傍の理解を進めるための取り組み
  - ST+ 2018

2000/06/05

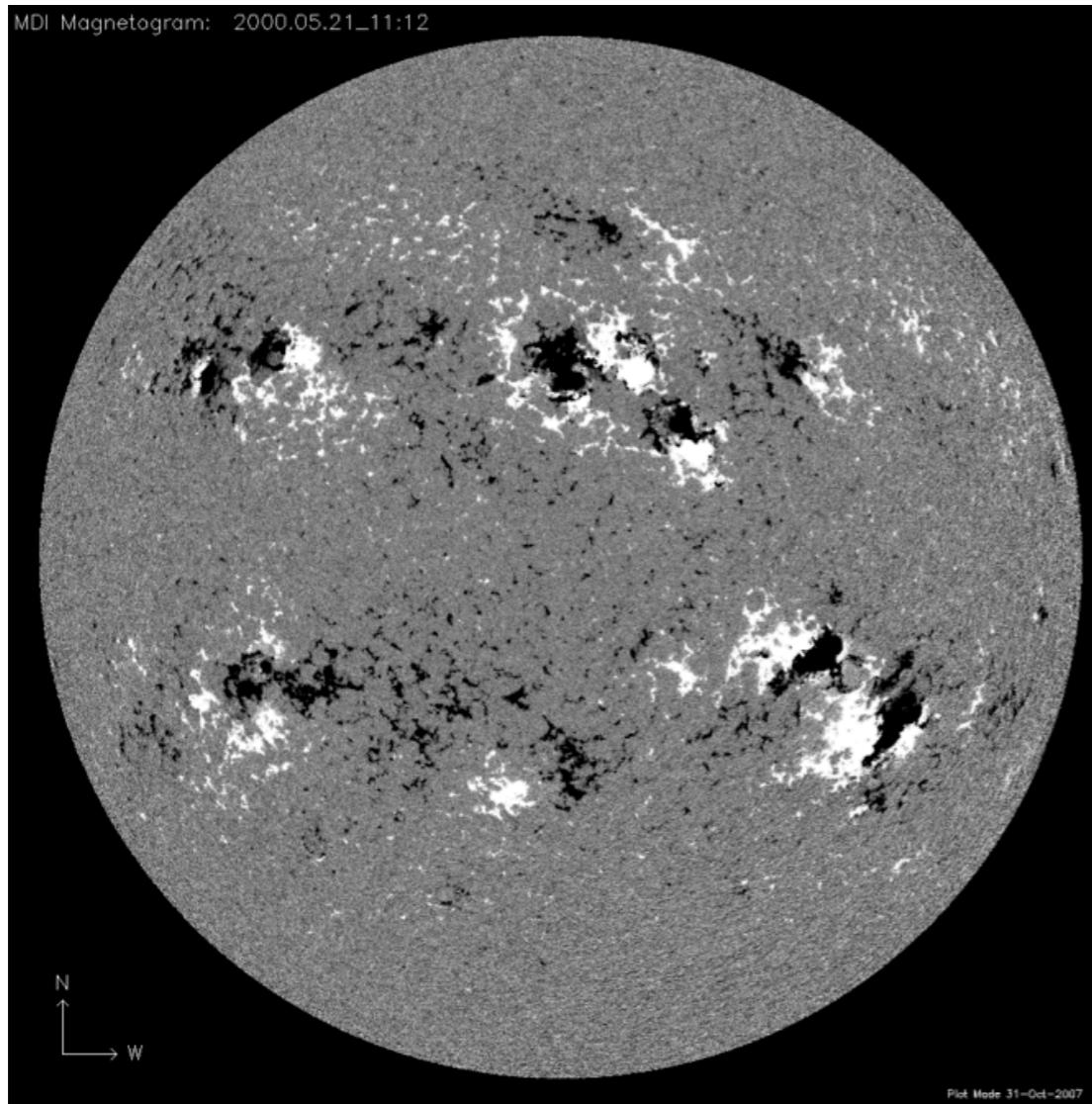
軟X線でみた太陽  
( $> 2 \times 10^6$  K)



Yohkoh / SXT  
Kyoto 4D

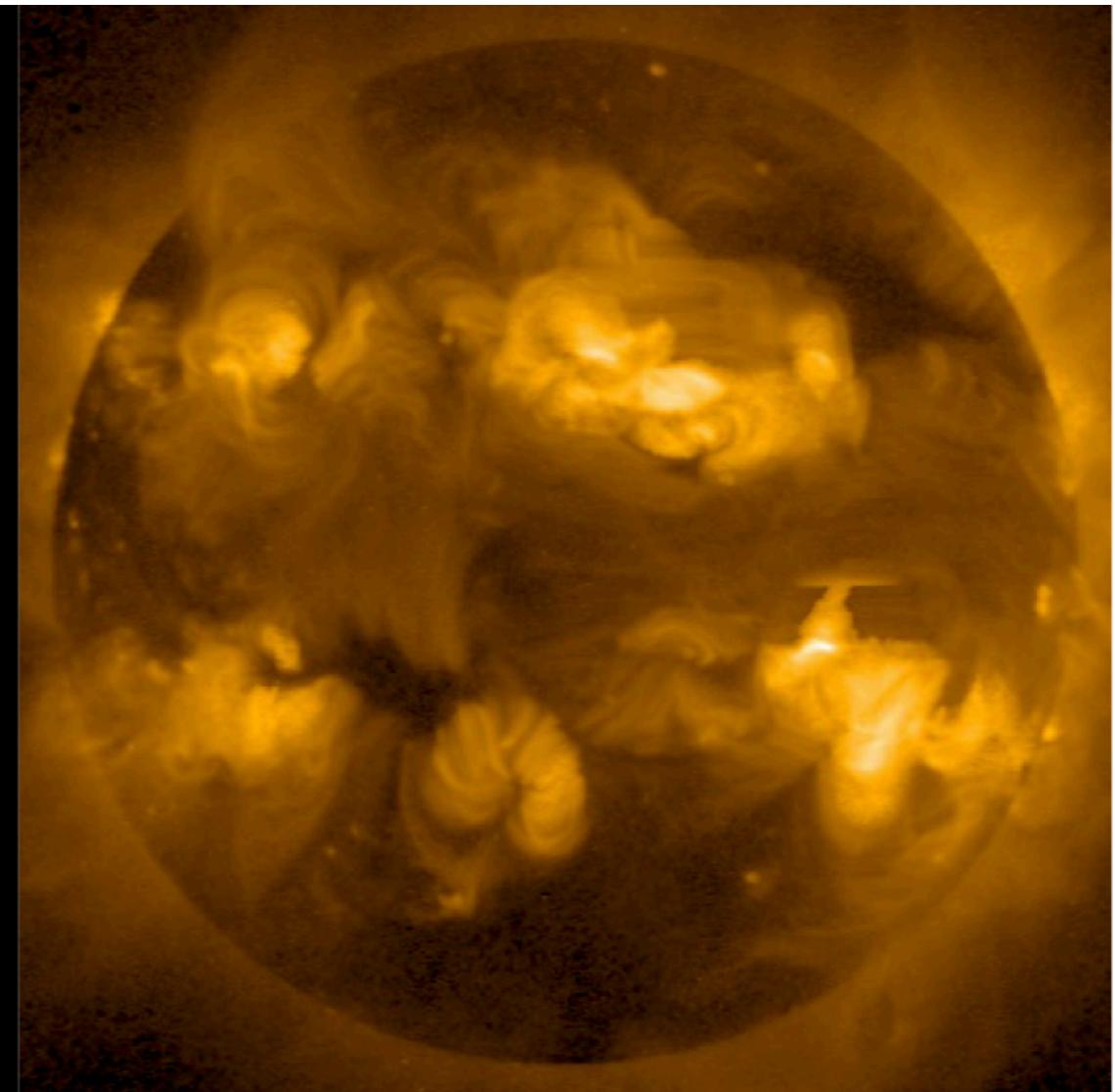
# 磁場と太陽大気構造の関係

Stokes V (~視線方向磁場)



SOHO/MDI

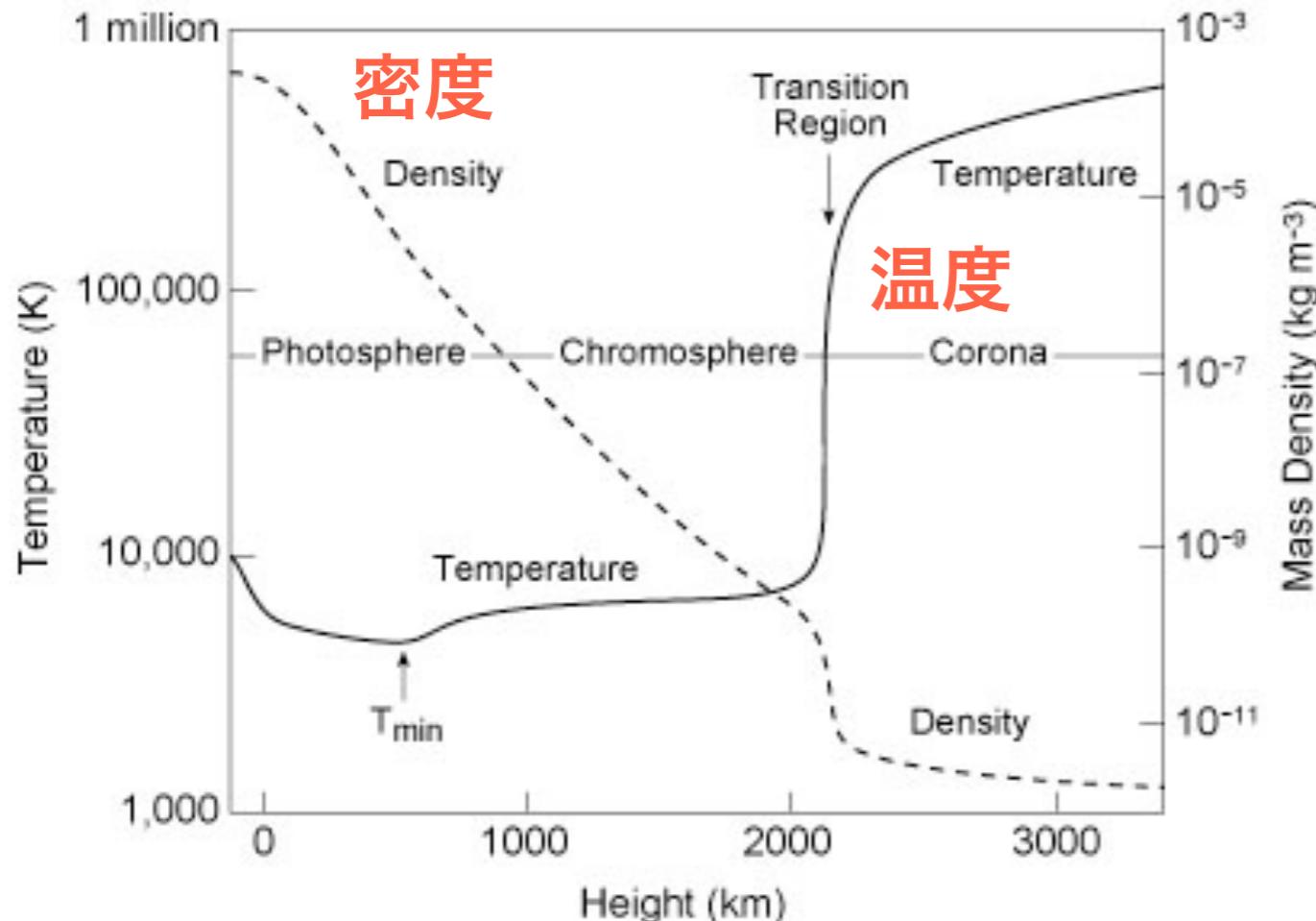
Soft X-ray ( $> 10^6$  K)



Hinode/XRT

磁場が上空大気の重要なエネルギー源

# 磁場は上空で重要になりやすい



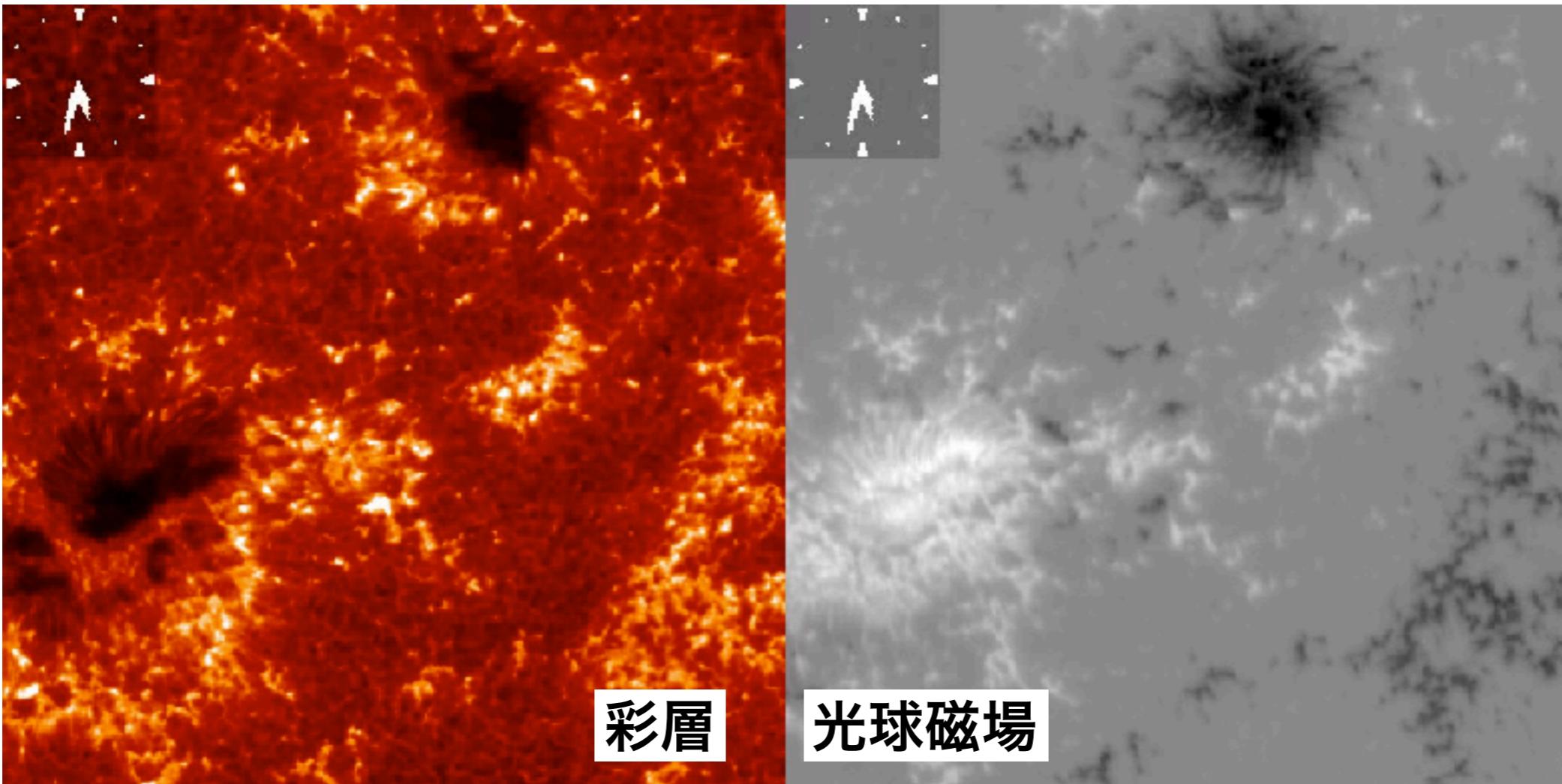
- ガス圧（内部エネルギー）は高さとともに急激に減少（等温なら exponential）
- 磁場のエネルギーの減少はそれよりも十分緩やか（双極磁場なら  $B \propto z^{-3}$ ）
- よって上空では磁場優勢領域が形成 → コロナがその典型

$$\text{太陽コロナ : } \frac{p}{B^2/8\pi} = 0.001 - 0.1 \quad (\text{コロナでは } B \sim 10-100 \text{ G})$$

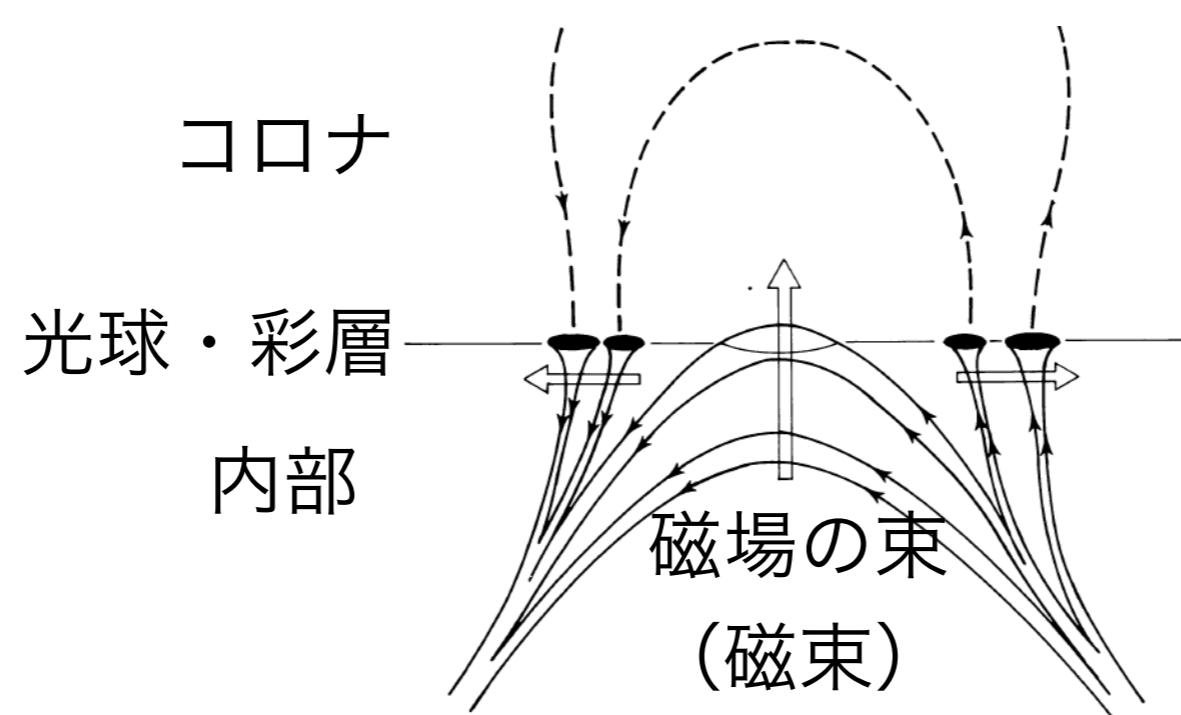
上空で磁場が卓越してくるのは重力成層大気の一般的な性質

- 恒星、地球
- ブラックホール降着円盤、銀河円盤

# 黑点、活動領域



courtesy: T. Shimizu

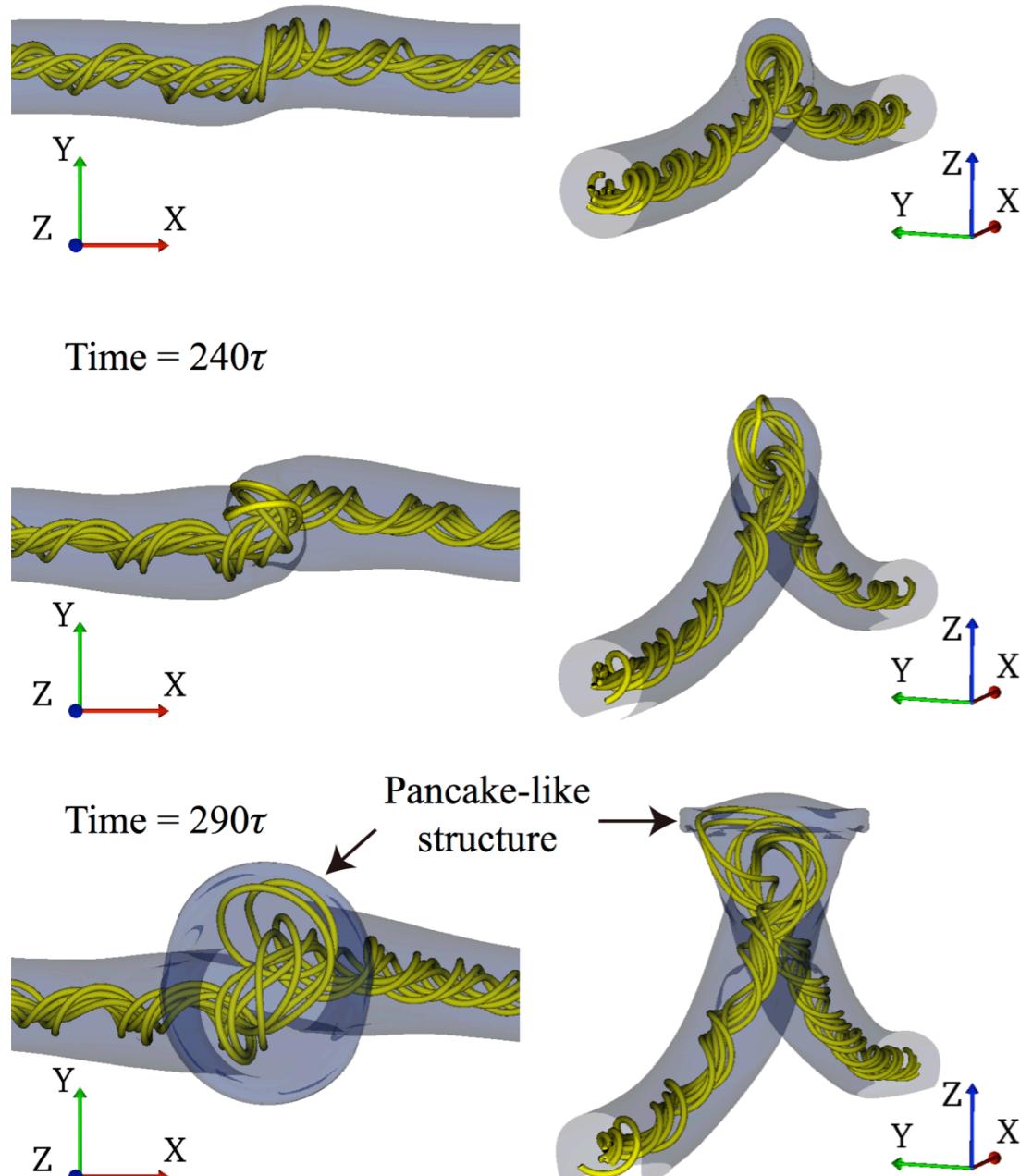


太陽内部から磁場が浮上  
磁束管の断面が黒点

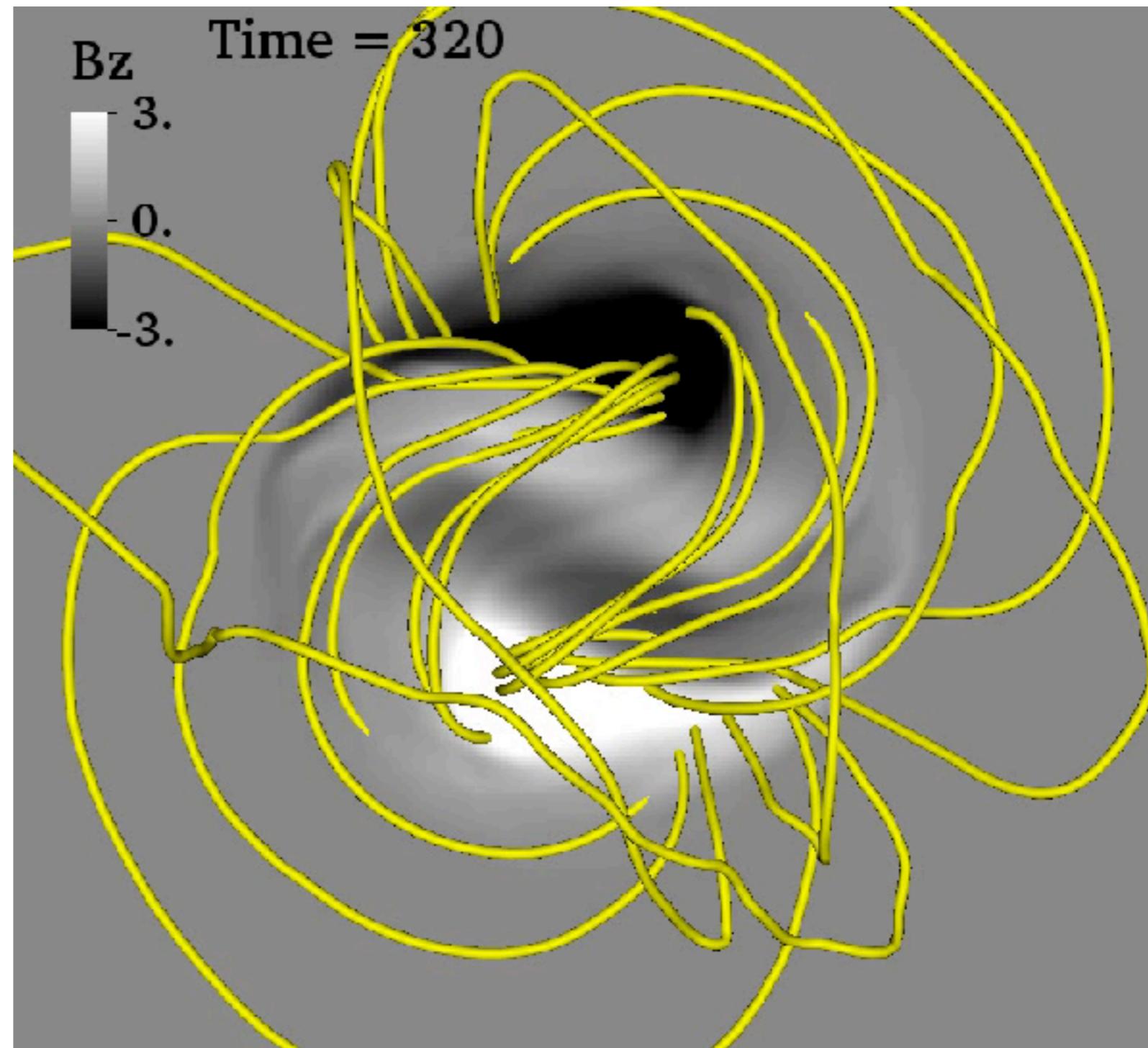
Zwaan 1985

# 磁場浮上過程のシミュレーション

太陽内部の浮上の様子



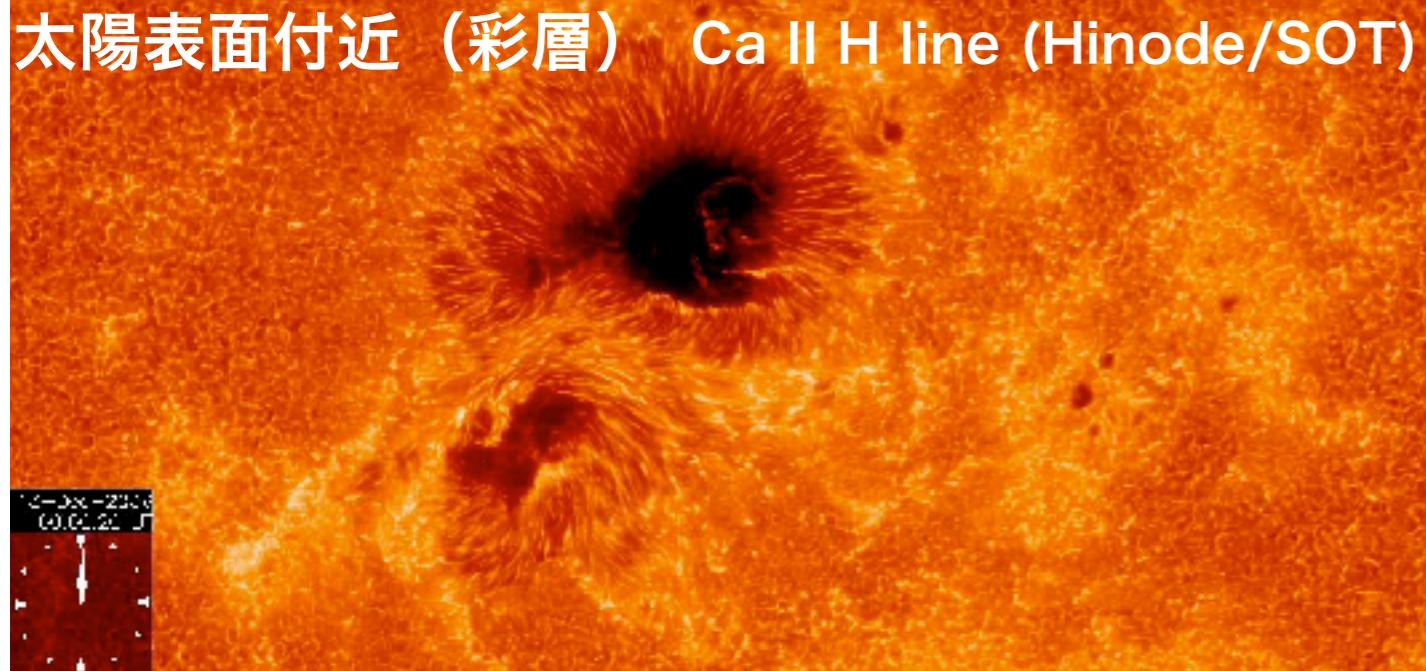
太陽表面上の浮上の様子



# 太陽フレア

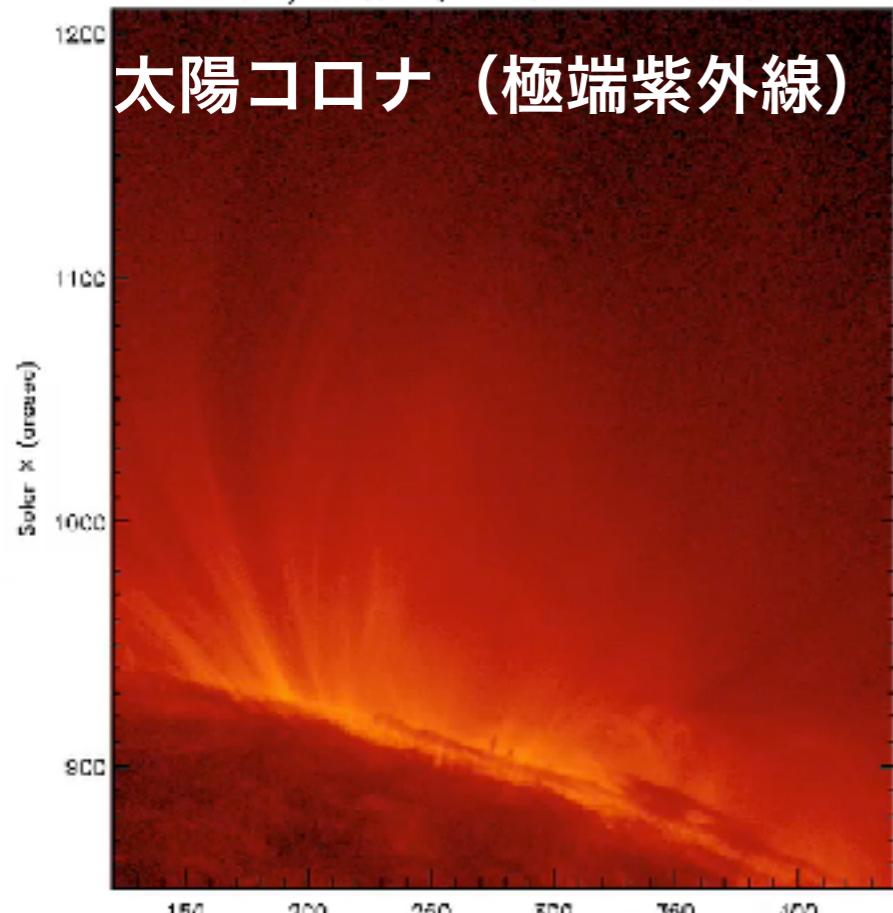
コロナにおける数千万Kの高温プラズマの発生を伴う  
爆發現象

太陽表面付近（彩層） Ca II H line (Hinode/SOT)



SDO/AIA 131 Å, 19-Jul-2012 04:00:21

太陽コロナ（極端紫外線）



courtesy: W. Liu

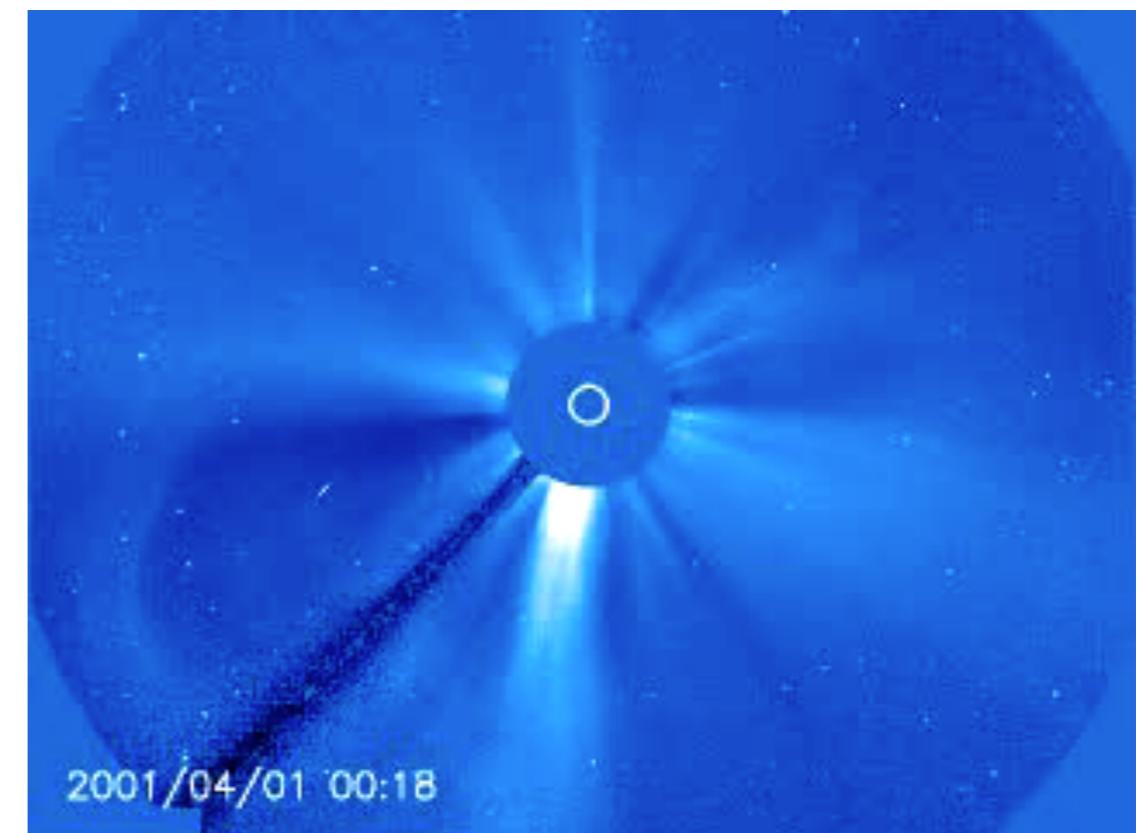
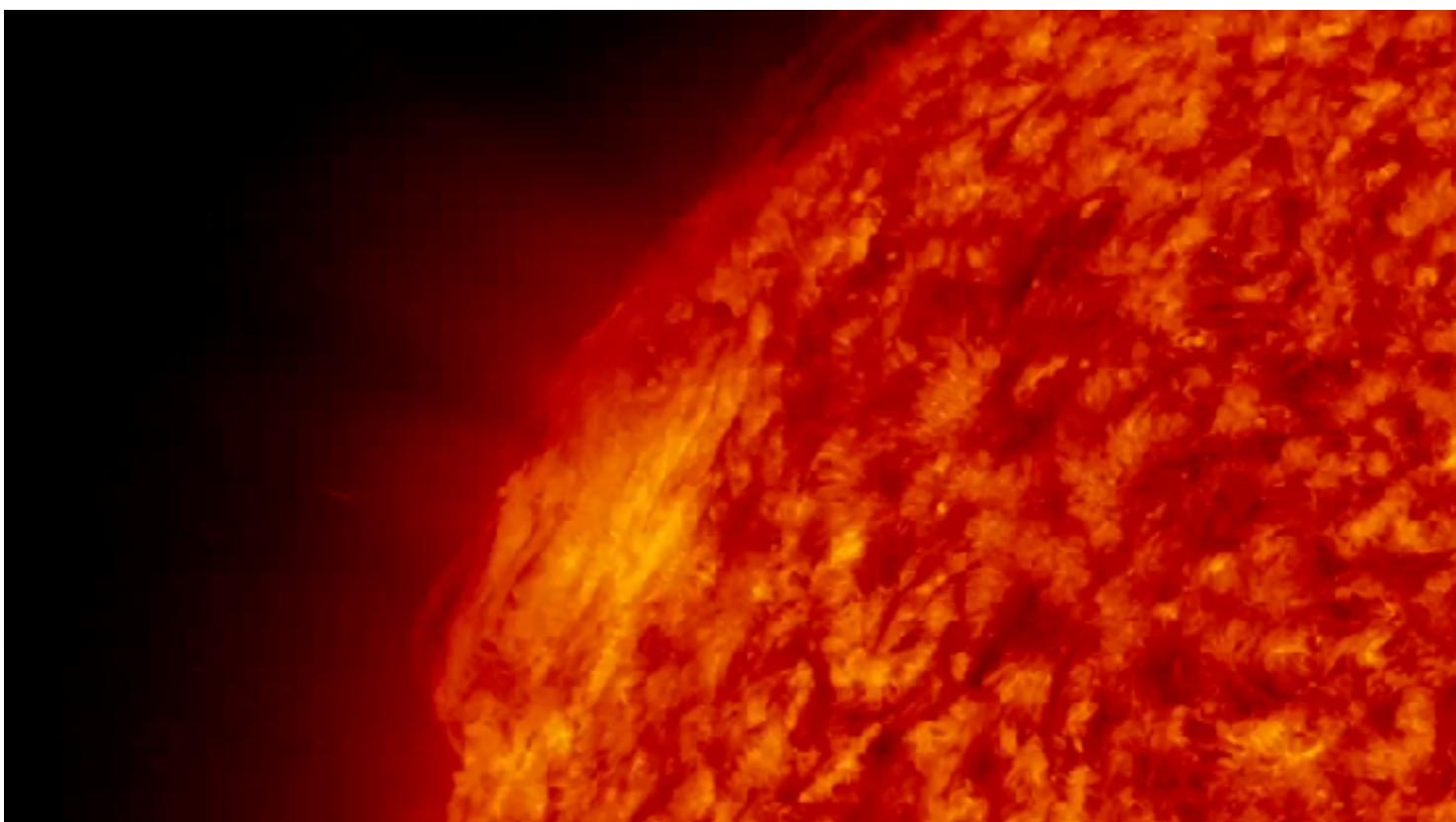
サイズ： $10^9 - 10^{10}$  cm  
エネルギー： $10^{29} - 10^{32}$  erg  
継続時間： $10^2 - 10^5$  s

エネルギー源：  
**黒点近傍の磁気エネルギー**

$$E \approx \frac{B^2}{8\pi} V \\ \approx 10^{33} \left( \frac{B}{10^3 \text{ G}} \right)^2 \left( \frac{L}{3 \times 10^9 \text{ cm}} \right)^3 \text{ erg}$$

最大級の太陽フレアでも  $L_{bol}$  は  $10^{-4}$  しか明るくならない。  
にも関わらず、太陽系内への影響大

# プロミネンス噴出とコロナ質量放出 (CME)



速度 : ~10-1,000 km/s

平均質量 :  $3.5 \times 10^{14} \text{ g} \approx 2 \times 10^{-19} M_{\odot}$

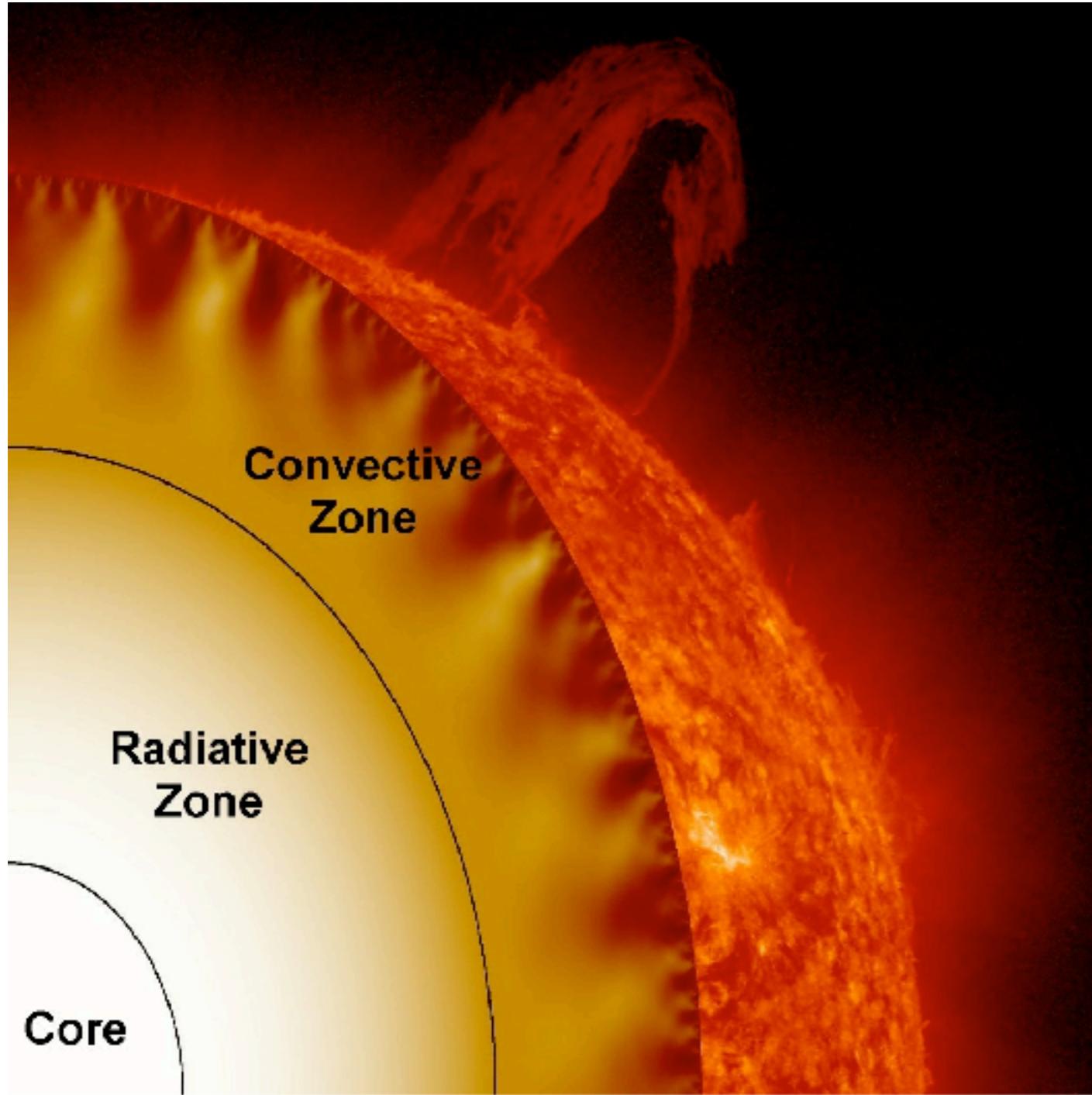
$$\dot{M}_{CME} \approx \frac{4 \times 4 \times 10^2}{\text{1日の平均回数}} \times M_{CME, \text{ave}} \approx \frac{3 \times 10^{-16}}{\text{1年の日数}} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

1日の平均回数      1年の日数

(Gopalswamy+09)

太陽風 ( $\dot{M} = 2 \times 10^{-14} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ) の数 % 程度だが、  
地球への影響大

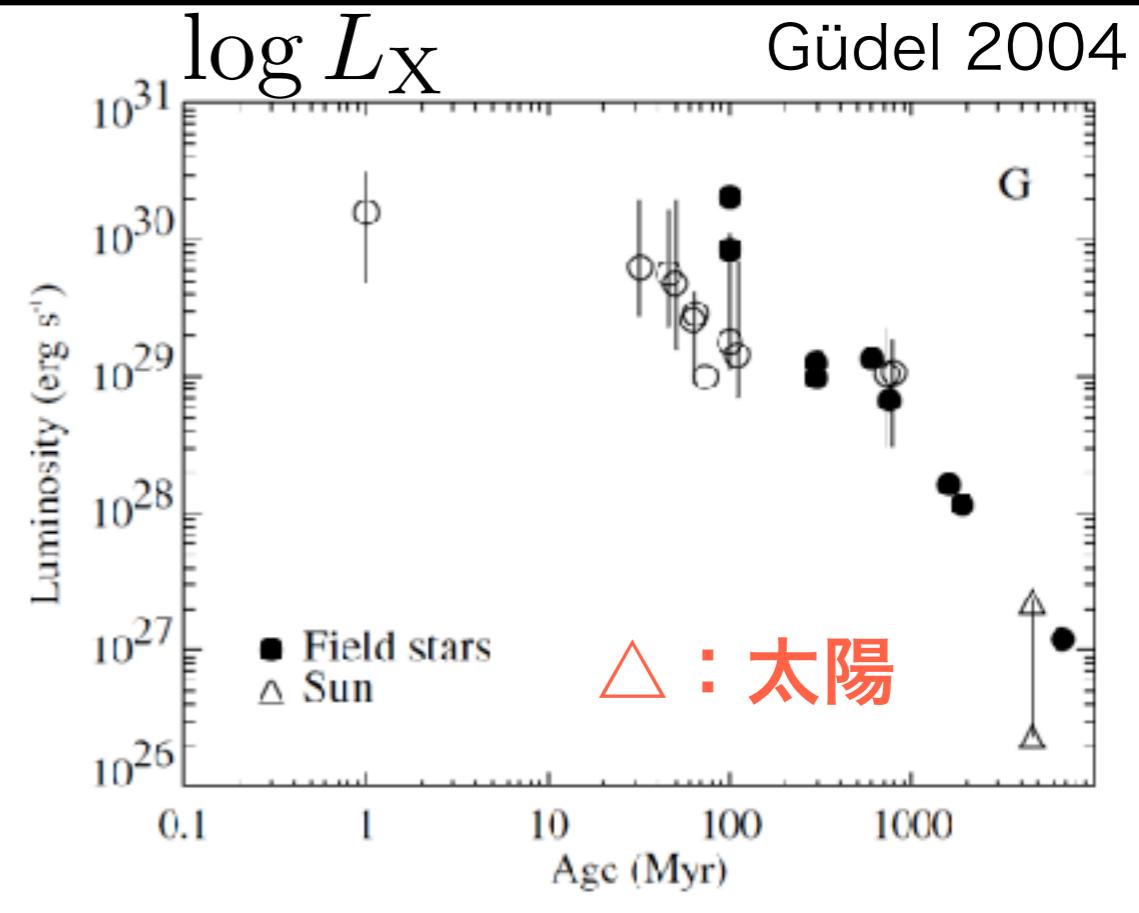
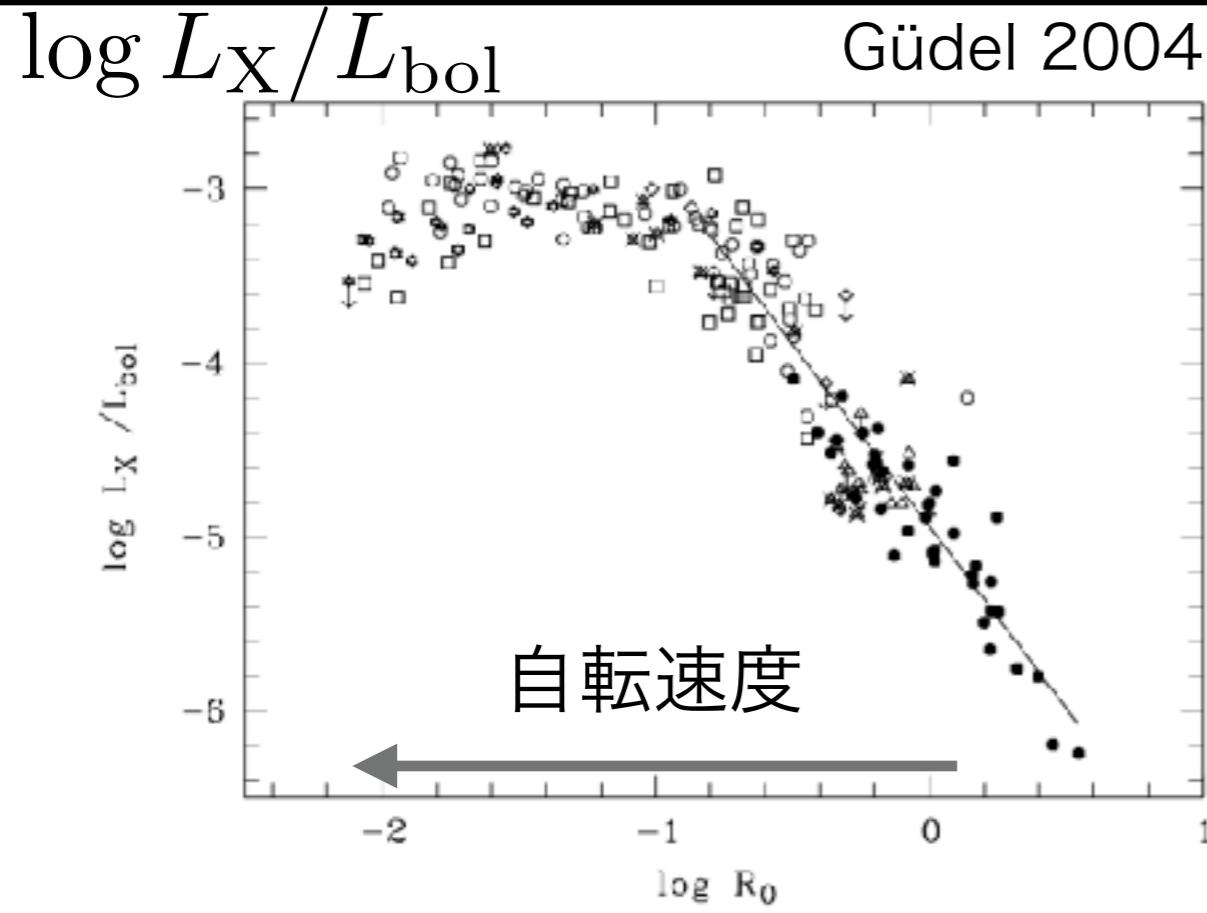
# 表面上の磁場の起源：ダイナモ



放射層からの熱エネルギー  
→ 熱対流の運動エネルギー  
→ 磁場のエネルギーへ転換  
(磁場を引き延ばすなどで増幅)

粗い言い方だが、  
星の自転が速いと磁場增幅に  
使える運動エネルギーが増え、  
磁場生成がより活発になる

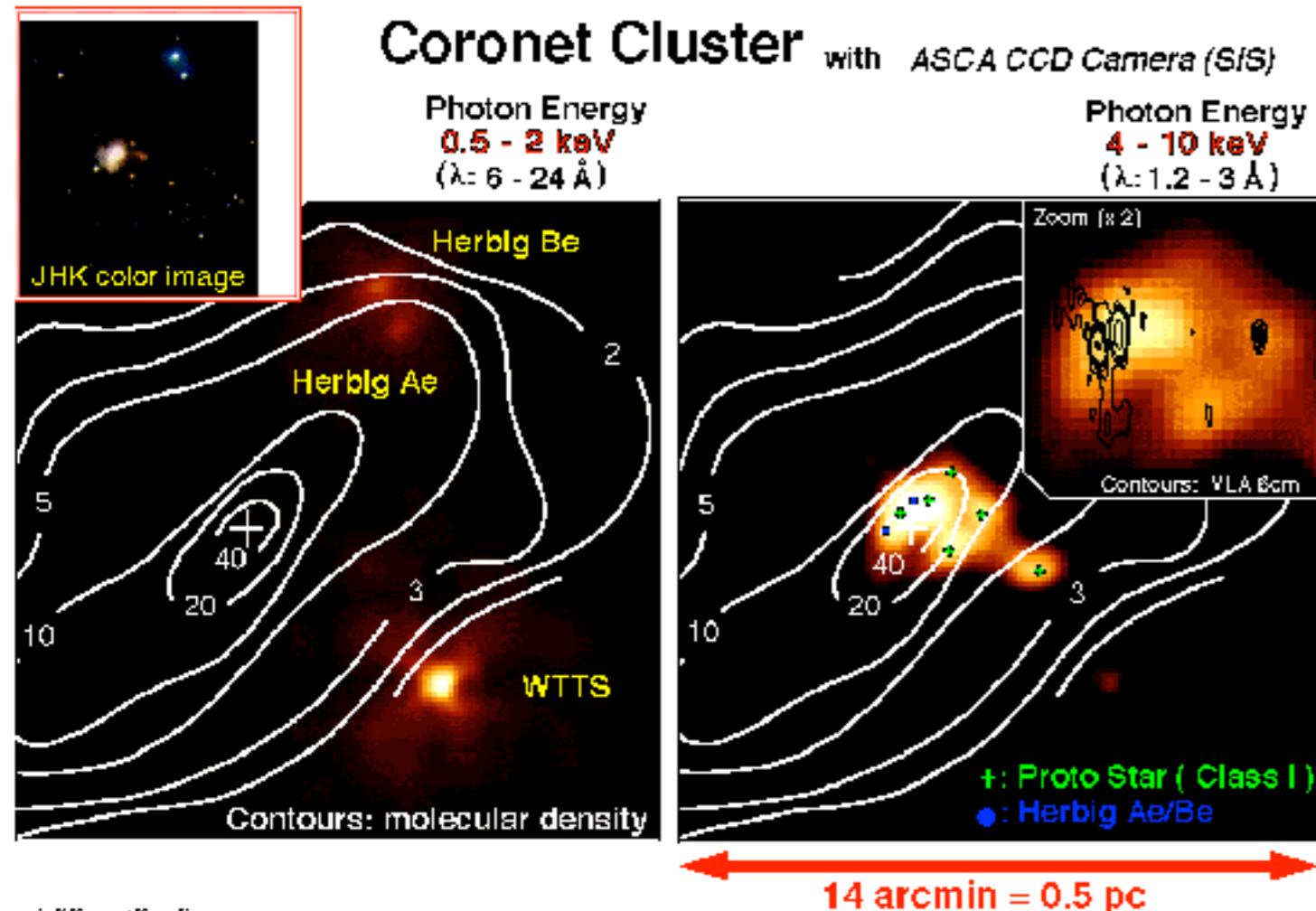
# 恒星の磁気活動



自転が速い → ダイナモ活発 → 黒点を沢山形成 → X線で明るい、フレア多い

- M型星（全体流）はフレア活動が高く、惑星のハビタビリティの議論多い (e.g. Kopparapu+13, 京大スーパーフレアグループ)
- 若い星では  $\dot{M}_{\text{CME}}, \dot{M}_{\text{wind}} > \dot{M}_{\text{wind,present}}$  かも (今田, プラズマ核融合学会誌 2014, Suzuki et al. 2013 PASJ)

# 原始星フレア、前主系列星フレア



エネルギー：

$10^{35} - 10^{37} \text{ erg}$

最大級の太陽フレアの  
 $10^3 - 10^5$  倍！

タイムスケールやエネルギーなどの観点から磁場駆動説が有力

Koyama+96, Tsuboi+00, Montmerle+00

生まれたばかりの星は極めて激しいフレアを起こしている

- ▶ 発生機構は何か？ 星周円盤の役割？
- ▶ 周囲（原始惑星系円盤、惑星大気）への影響は？

# アウトライン

---

- ▶ イントロ
  - ▶ 太陽・恒星・原始星の磁気活動の概観
  - ▶ 磁気流体力学と磁気リコネクションの基本
- ▶ フレア観測から太陽・恒星コロナを探る取り組み
  - ST+ 2015, ST & Shibata 2016
- ▶ 原始星近傍の理解を進めるための取り組み
  - ST+ 2018

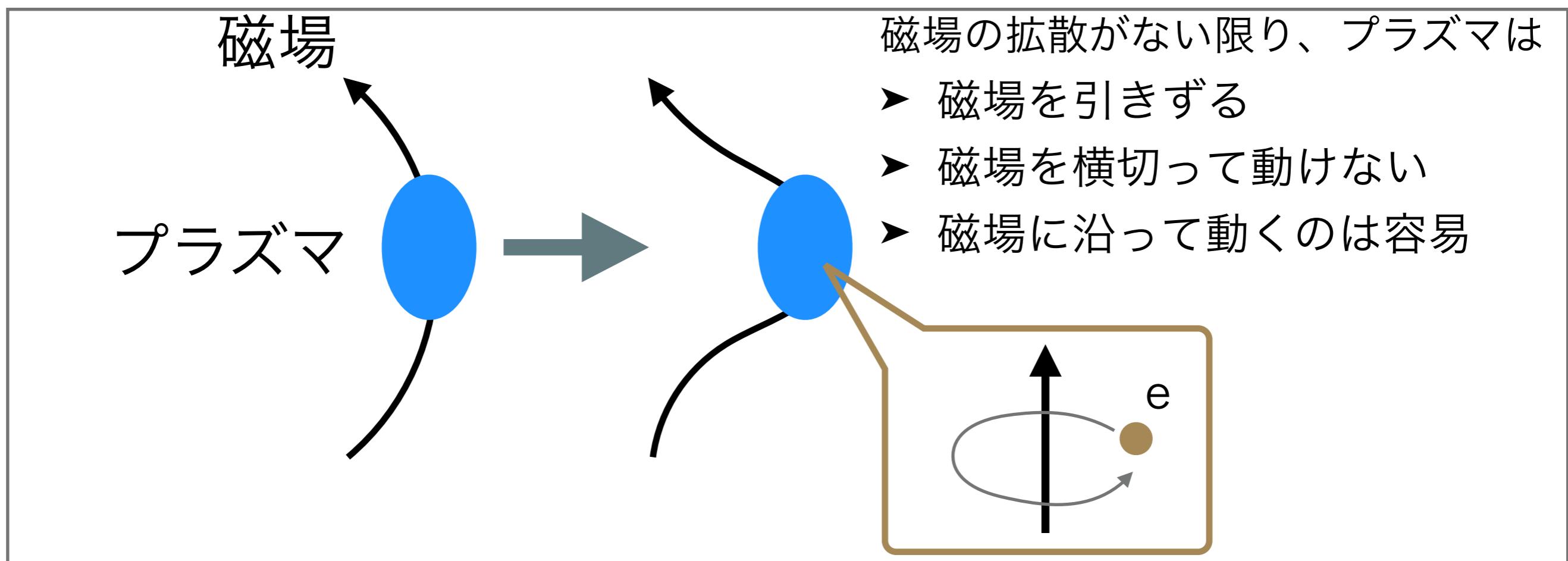
**磁気流体力学：MagnetoHydrodynamics (MHD)**

= 基礎方程式: 流体力学 + Maxwell's eqs.

(ミクロな物理は拡散係数などを通じて方程式に入る)

# MHD の重要な性質

もしガスが（部分的にでも）電離していたら、  
ガスのダイナミクスと磁場のダイナミクスはカップルする



This property is called “**frozen-in**”  
(as if magnetic fields are frozen into the fluid)

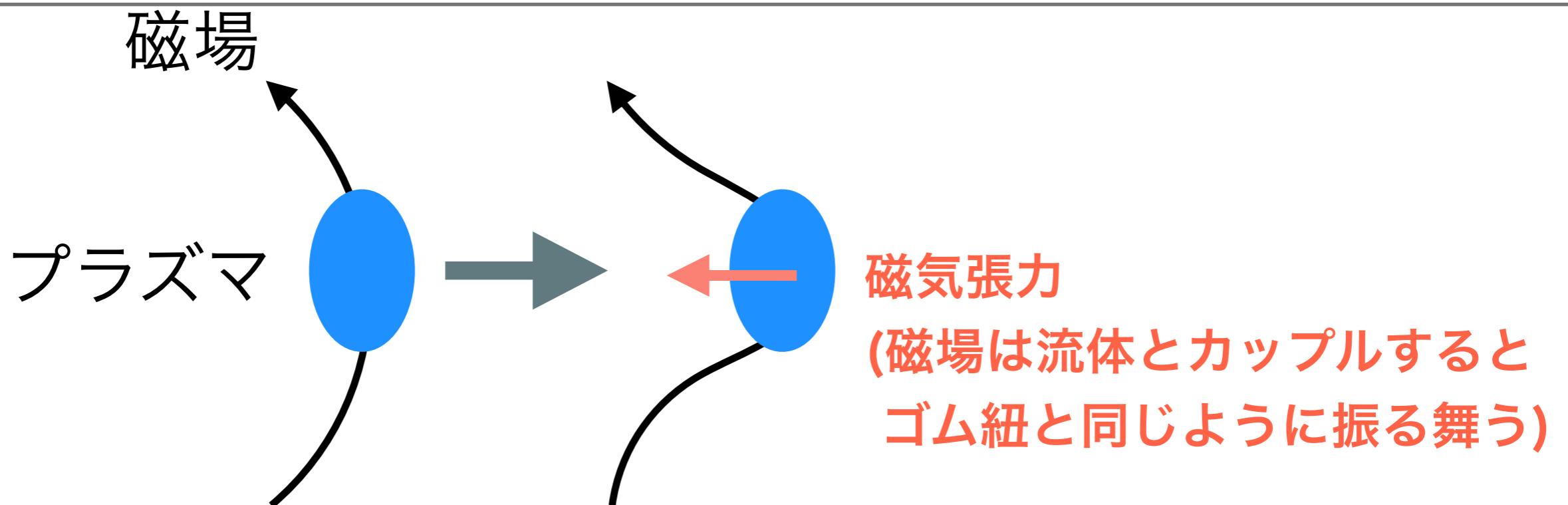
# MHD の重要な性質

## Lorentz force

$$\mathbf{J} \times \mathbf{B} = \frac{1}{4\pi} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} = -\nabla \left( \frac{\mathbf{B}^2}{8\pi} \right) + \frac{1}{4\pi} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}$$

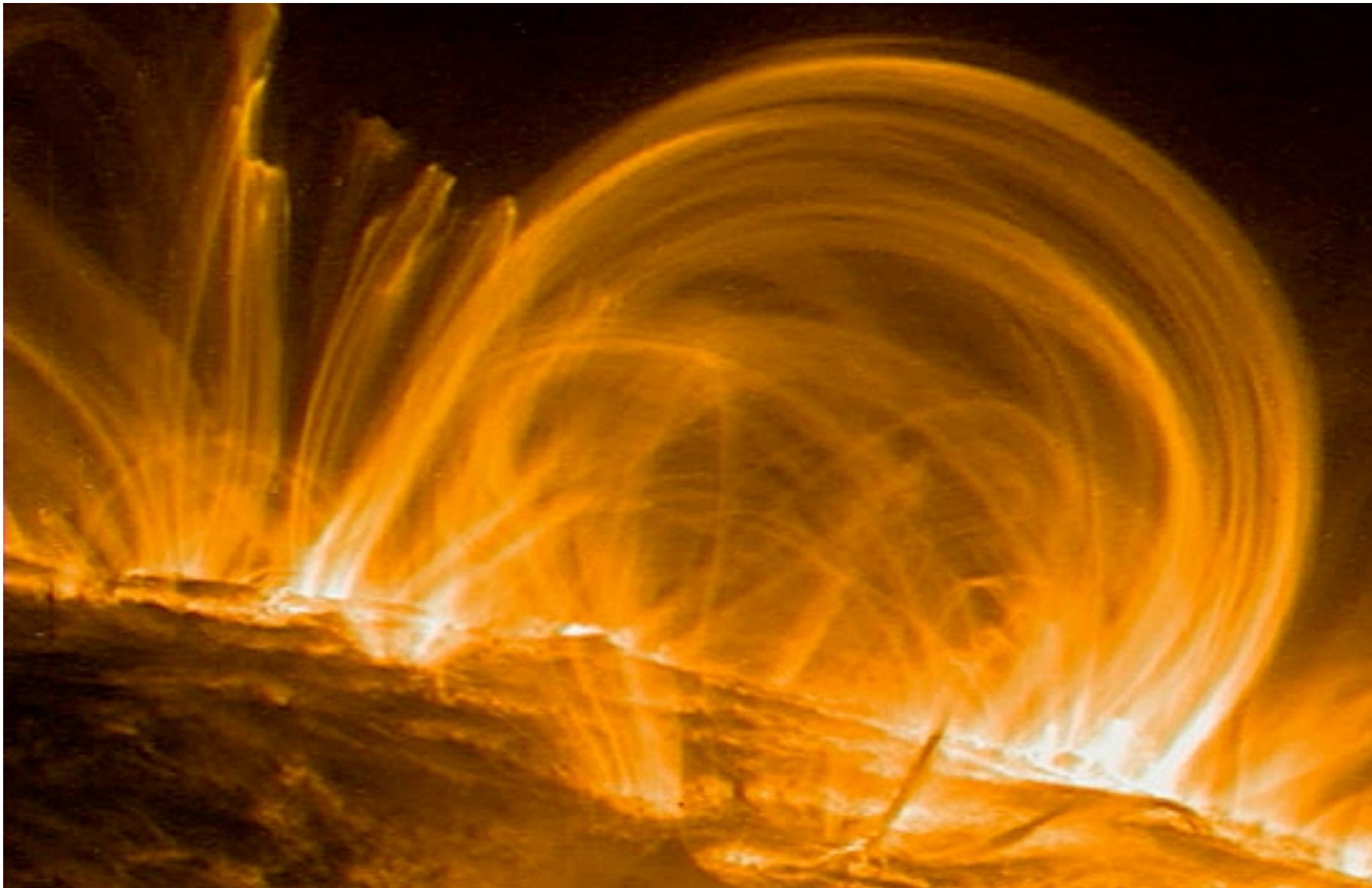
磁気圧勾配力

磁気張力



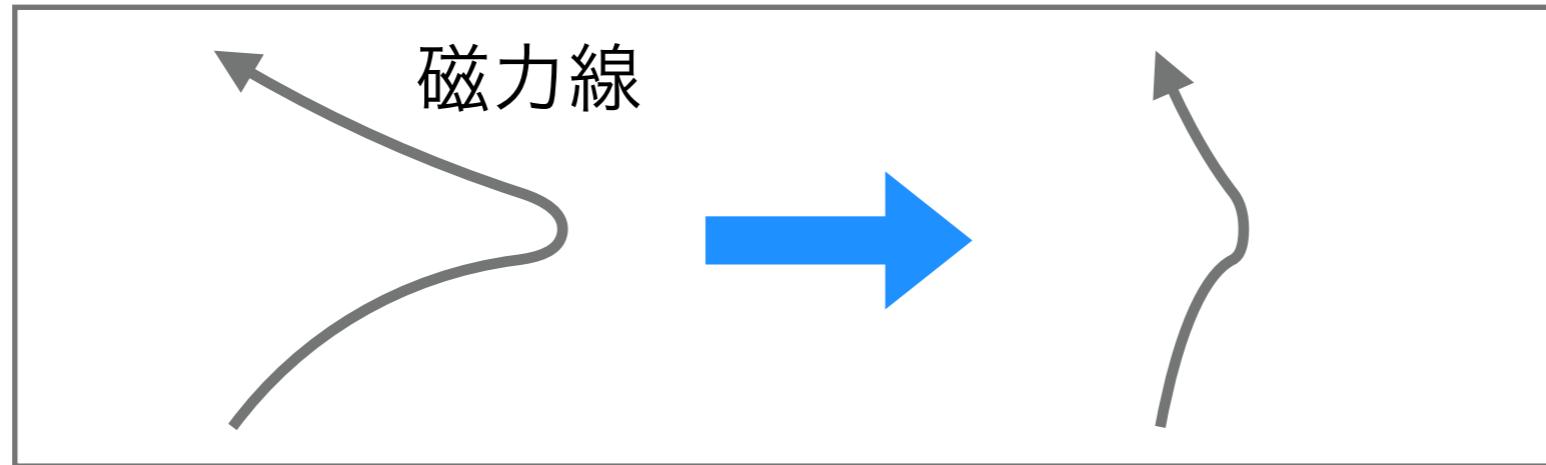
# frozen-in 条件が磁気ループを見やすくする

---



TRACE衛星による極端紫外線によるコロナ画像  
極端紫外線は電子によるイオンの衝突励起による

# 磁場構造の変化とエネルギー解放の関係



$E_m$ : 磁気エネルギー

$$E_m = \int \frac{B^2}{8\pi} dV = \frac{1}{8\pi} \int BdA \left( \int B dl \right) \approx \frac{1}{8\pi} \Phi BL$$

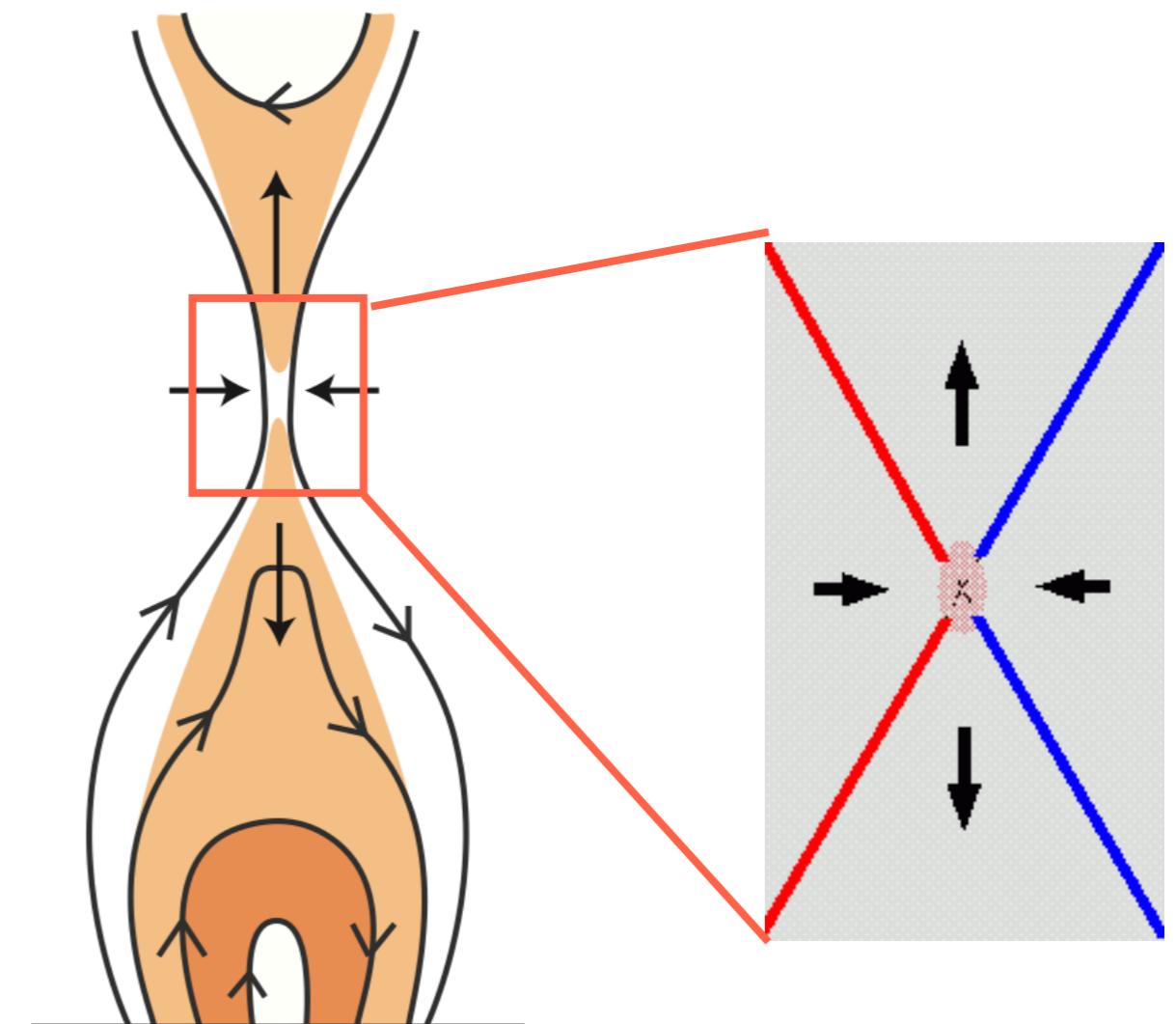
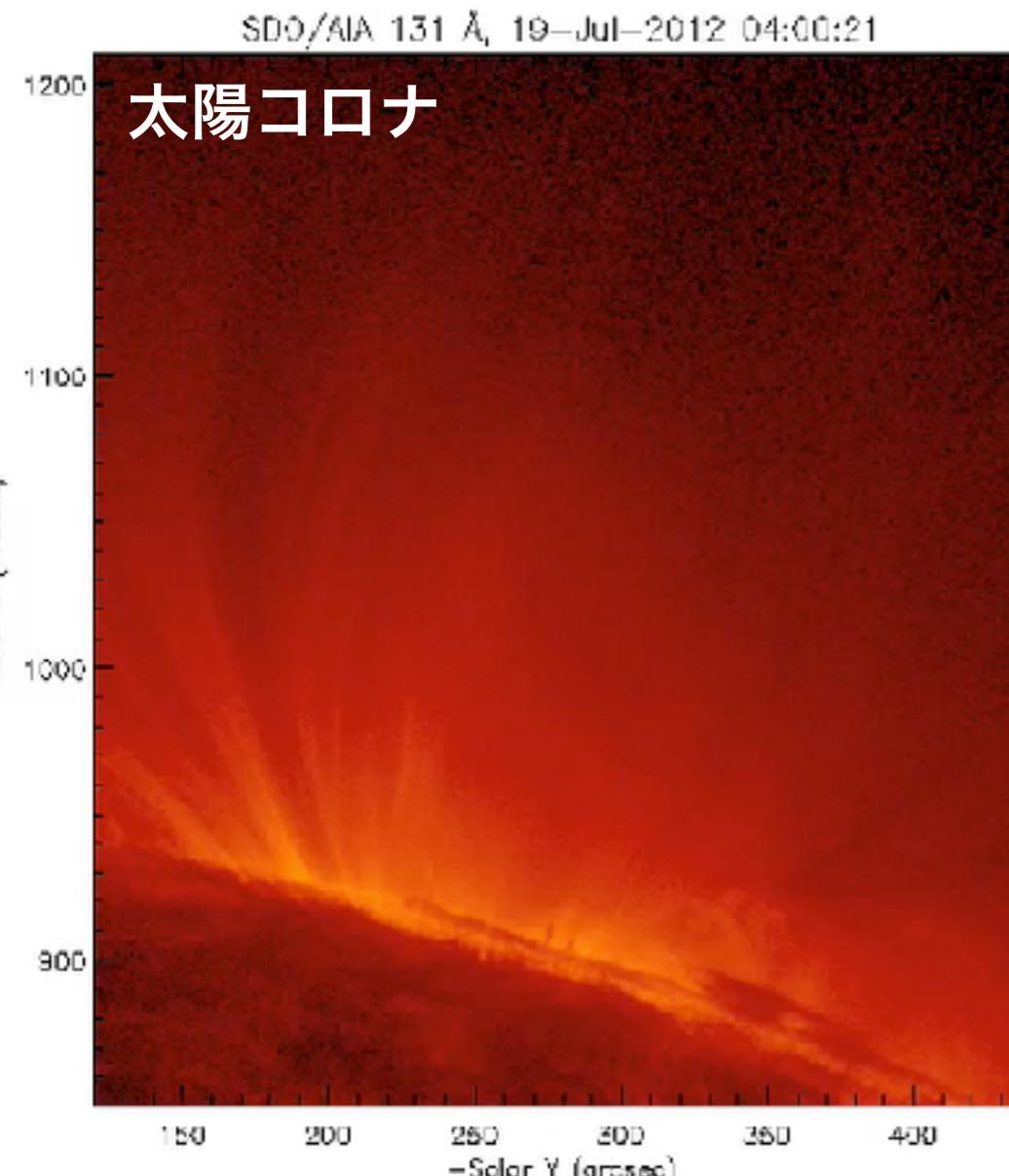
$\Phi$  : 磁束量 (磁気拡散がなければ保存量)

B : 磁場強度

L : 磁力線の長さ

磁力線は磁気張力縮むことでエネルギーを解放できる  
(ここもゴム紐と同じ)

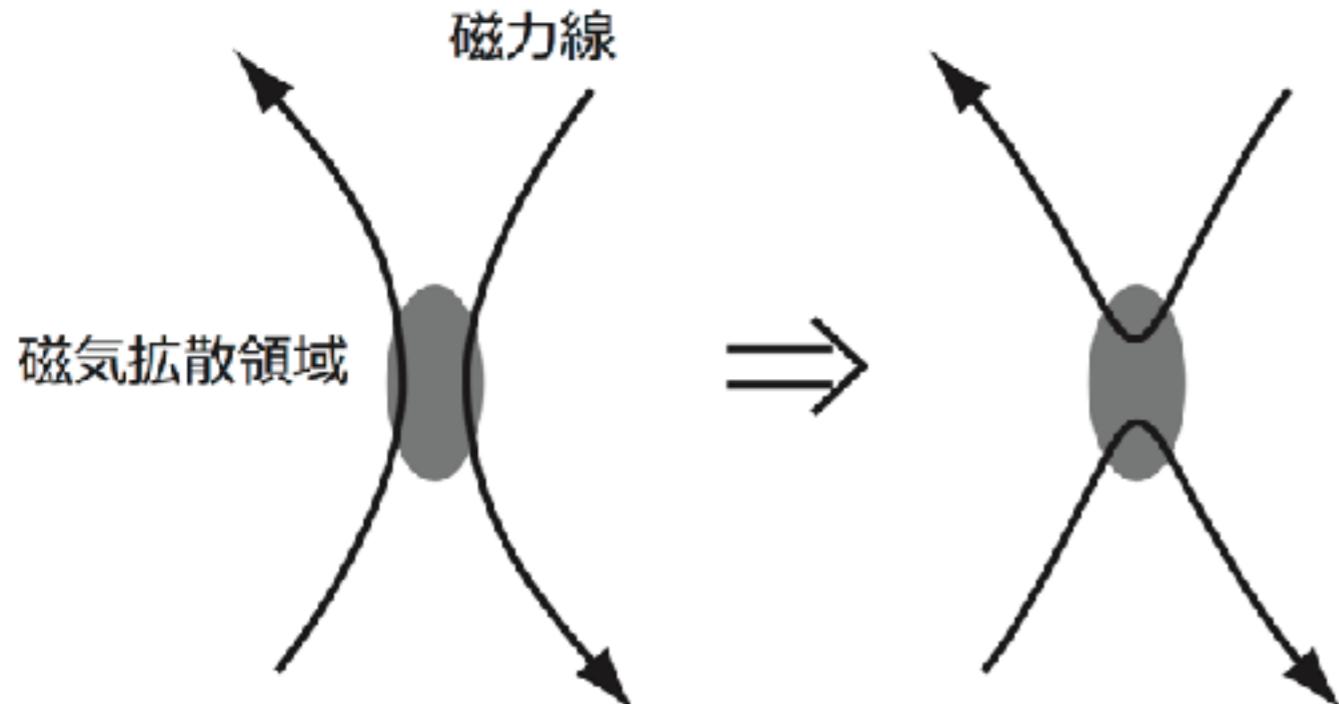
# フレアと磁気リコネクション



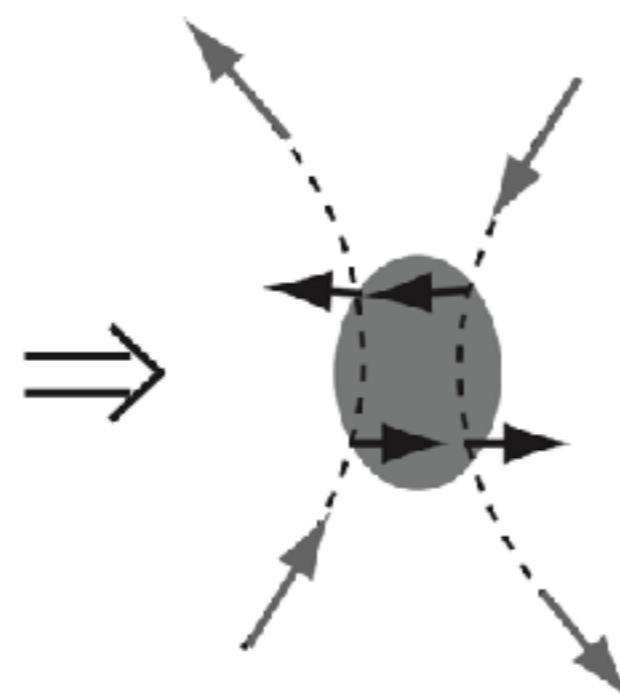
- 何らかの過程で反平行成分を持つ磁場を形成
- 磁力線のつなぎ替え (磁気リコネクション)
  - 磁気張力により磁力線が縮む
  - エネルギー解放 → フレア、コロナ質量放出

# 磁気リコネクションについてもう少し 1/2

磁力線の時間変化



磁場ベクトルの時間変化



磁気拡散の例：

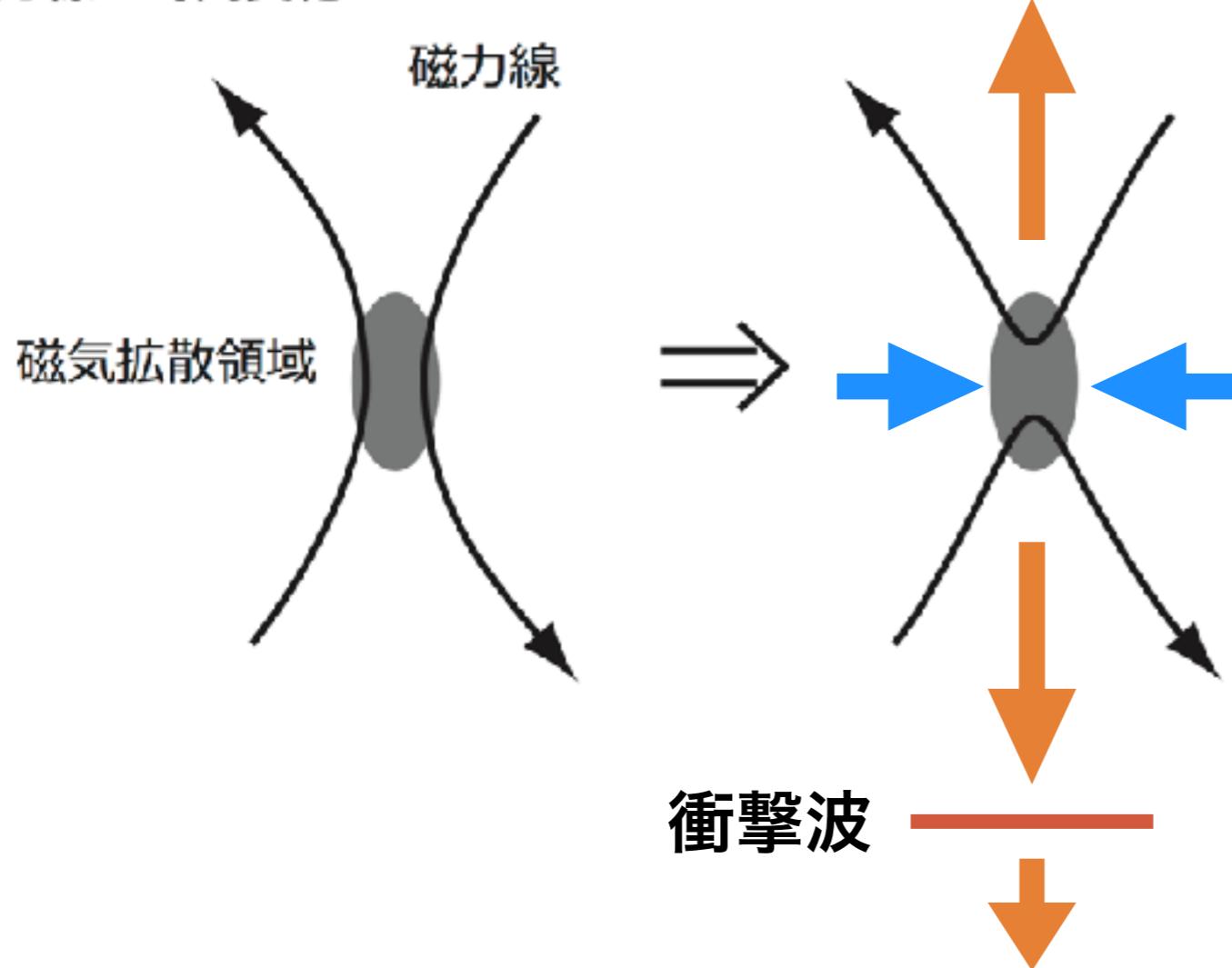
オーム散逸（ジュール加熱）

いきなり磁力線のつなぎ変えを考えるのではなく、一旦磁場をベクトル場にしてから考えるとわかりやすい

流体力学会誌ながれ vol. 36 に  
記事を寄稿

# 磁気リコネクションについてもう少し 2/2

磁力線の時間変化



磁気張力で加速される流れを  
(リコネクション) アウトフロー

アウトフローで抜けた質量を  
補うように入ってくる流れを  
(リコネクション) インフロー

内部エネ/磁気エネ

$$\frac{p}{B^2/8\pi} \approx \left( \frac{c_s}{V_A} \right)^2 \approx 0.01 - 0.1$$

コロナでは容易に  $C_s \ll V_a \rightarrow$  衝撃波形成

フレアにおける高温プラズマの形成、粒子加速(?)

# アウトライン

---

- ▶ イントロ
  - ▶ 太陽・恒星・原始星の磁気活動の概観
  - ▶ 磁気流体力学と磁気リコネクションの基本
- ▶ フレア観測から太陽・恒星コロナを探る取り組み
  - ST+ 2015, ST & Shibata 2016
- ▶ 原始星近傍の理解を進めるための取り組み
  - ST+ 2018

星の磁気活動が惑星に与える影響を考える上で  
恒星大気（コロナ）の物理量を得ることは重要

フレアは

- ▶ 様々な波長で増光を示す
- ▶ 恒星大気の磁場と密接な関係

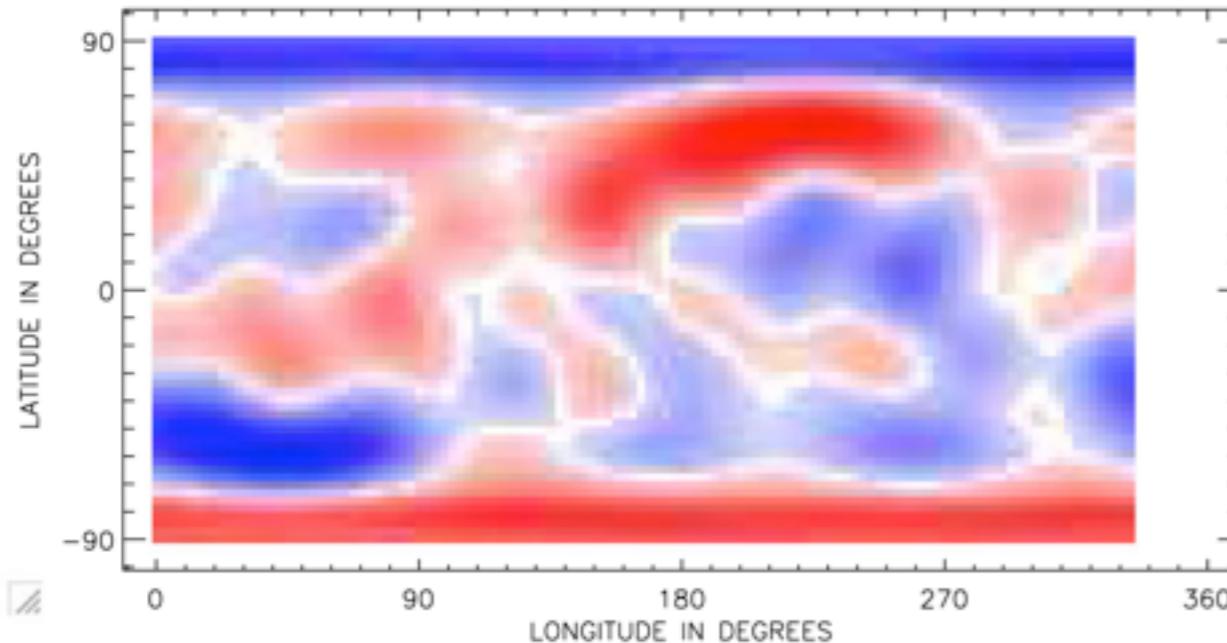
フレアから恒星の磁気活動を調べることができる

どんな理論モデル・観測が必要か？

どんな情報を得ることができるのか？

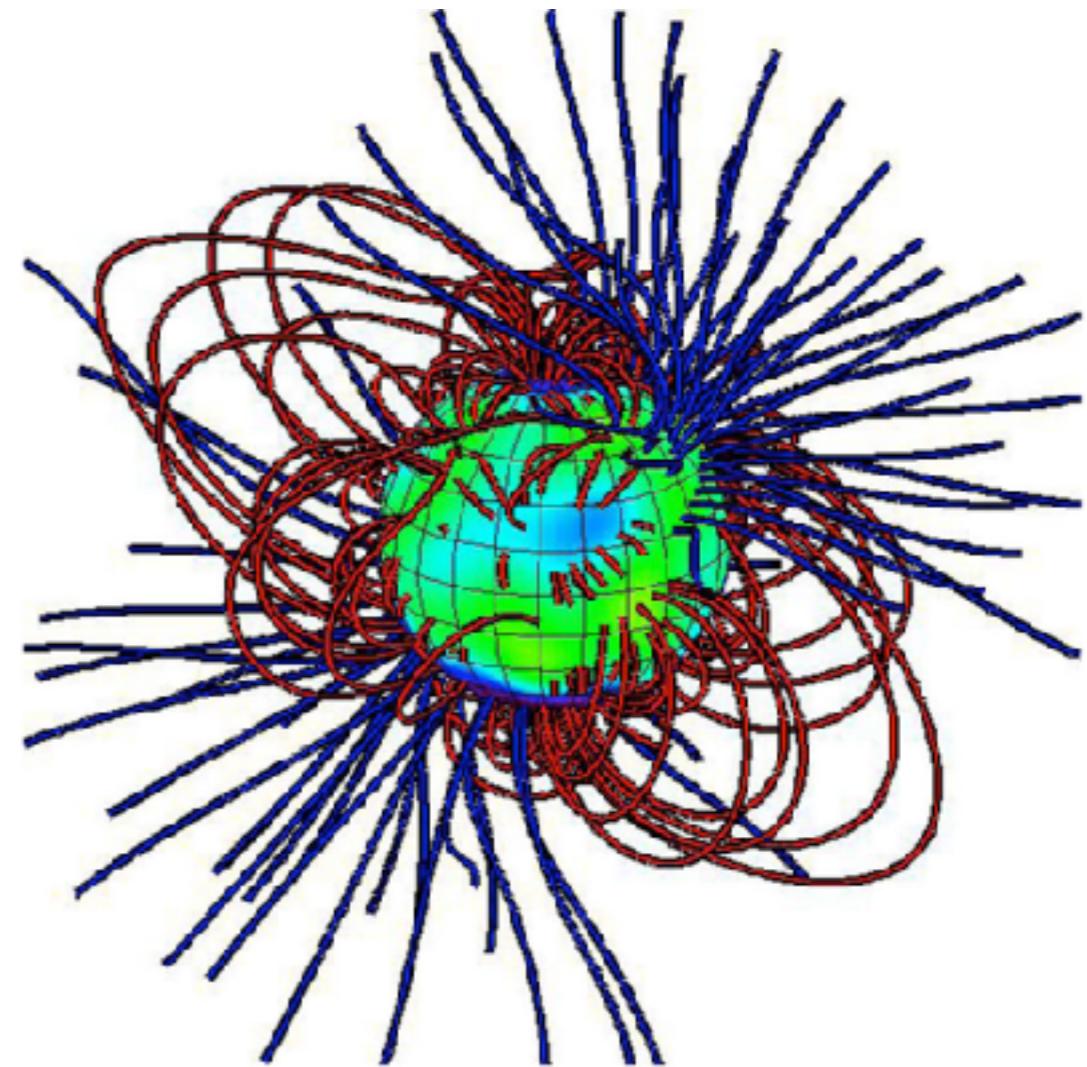
# 磁場を測定する取り組み

Classical T-Tauri型星のゼーマン観測



(b) V2247 Oph

Johnstone+14 (see also a review by Donati 09)



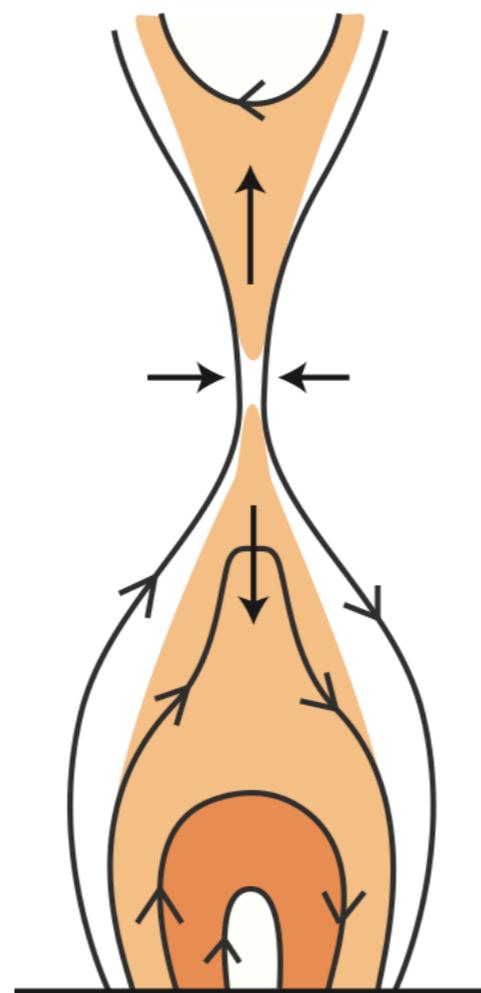
ゼーマン効果を使った観測は解釈に注意が必要

- Stokes V だけだと空間分解できていない小さい磁場は見えない
- Stokes parameter は大気モデルにも依存
- 測ることができるのは星表面で、フレアの起きるコロナではない。

# フレア理論に基づく手法

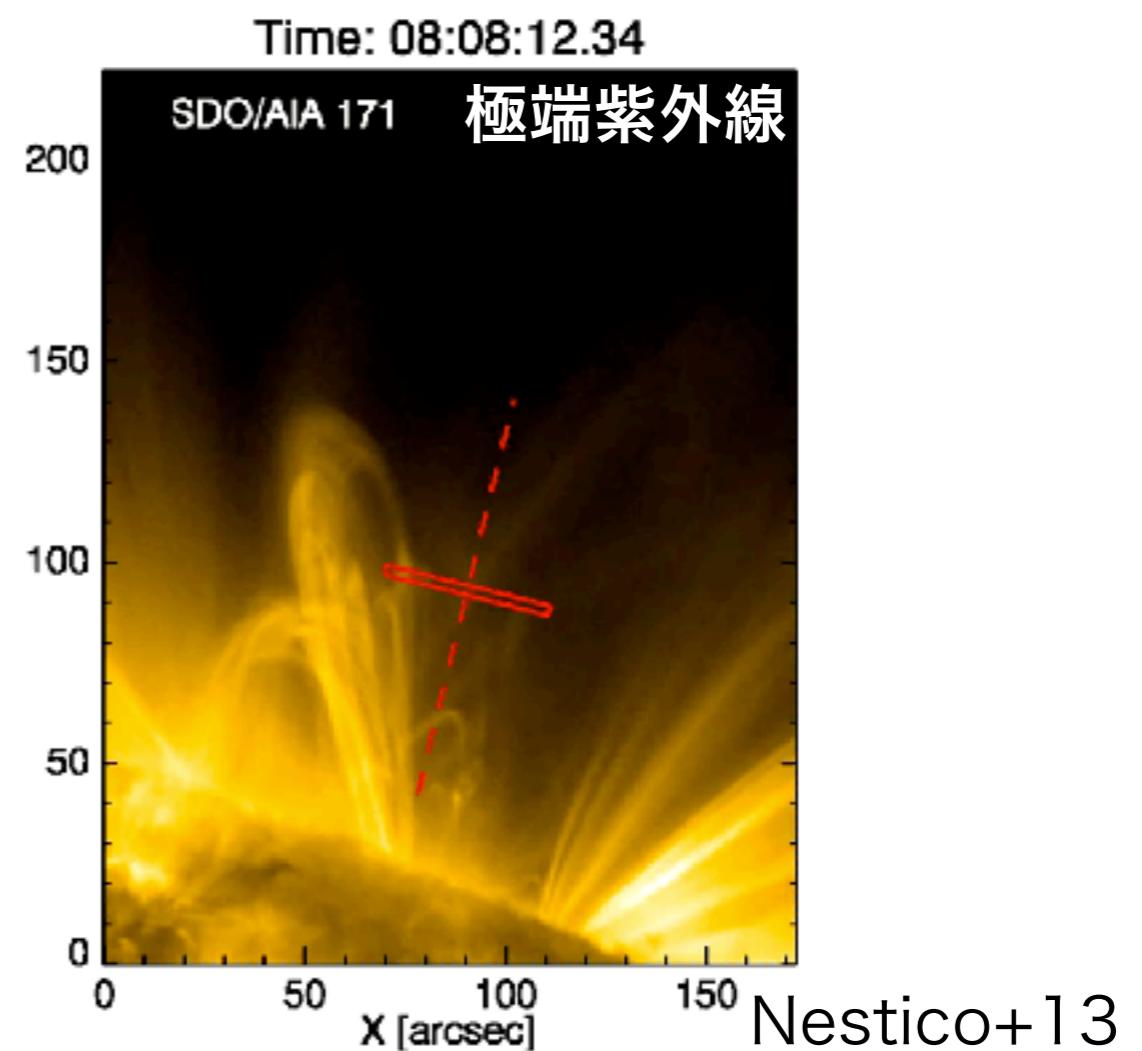
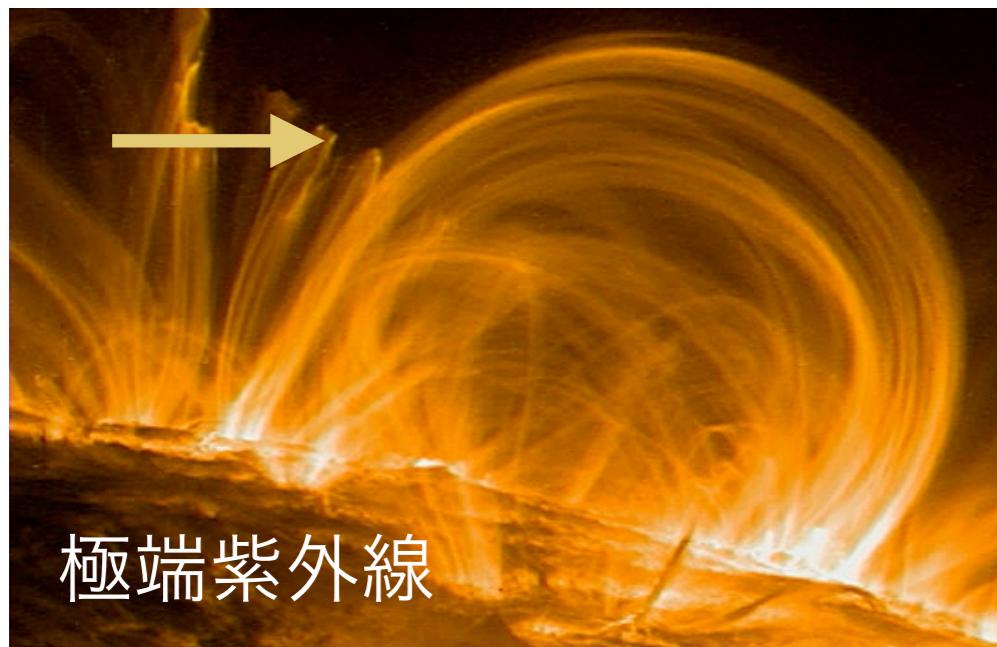
フレア理論を組み合わせてコロナの物理量（磁場強度など）を推定する方法

- フレアループの冷える過程に注目 : Reale et al. 97
- フレアループの力学バランスに注目 : Shibata & Yokoyama 02
- フレア領域の振動過程に注目 : Takasao & Shibata 16, etc



# コロナ振動学 (Coronal seismology)

こういうループを横から見ている

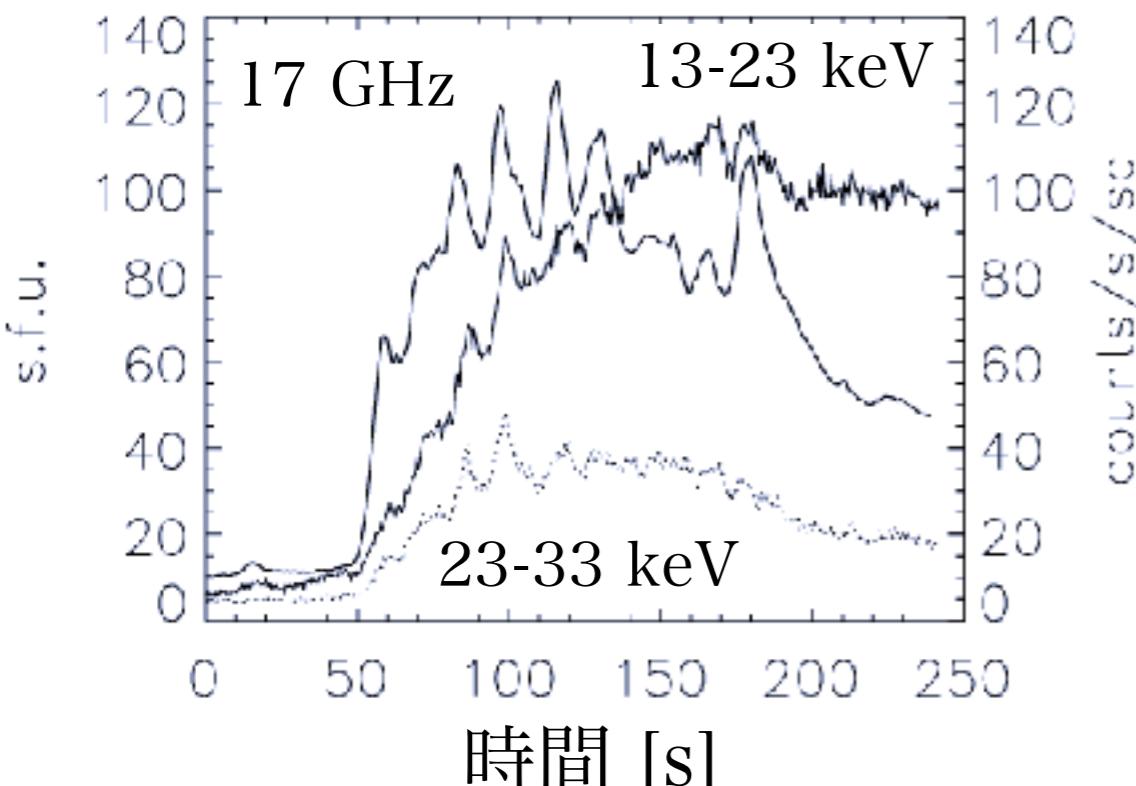


- ▶ コロナ、フレア領域では様々な振動・波動が存在
- ▶ コロナ振動学は、かなりしっかりしたMHD波動理論に基づいた振動・波の観測から定量的に物理量を推定する方法

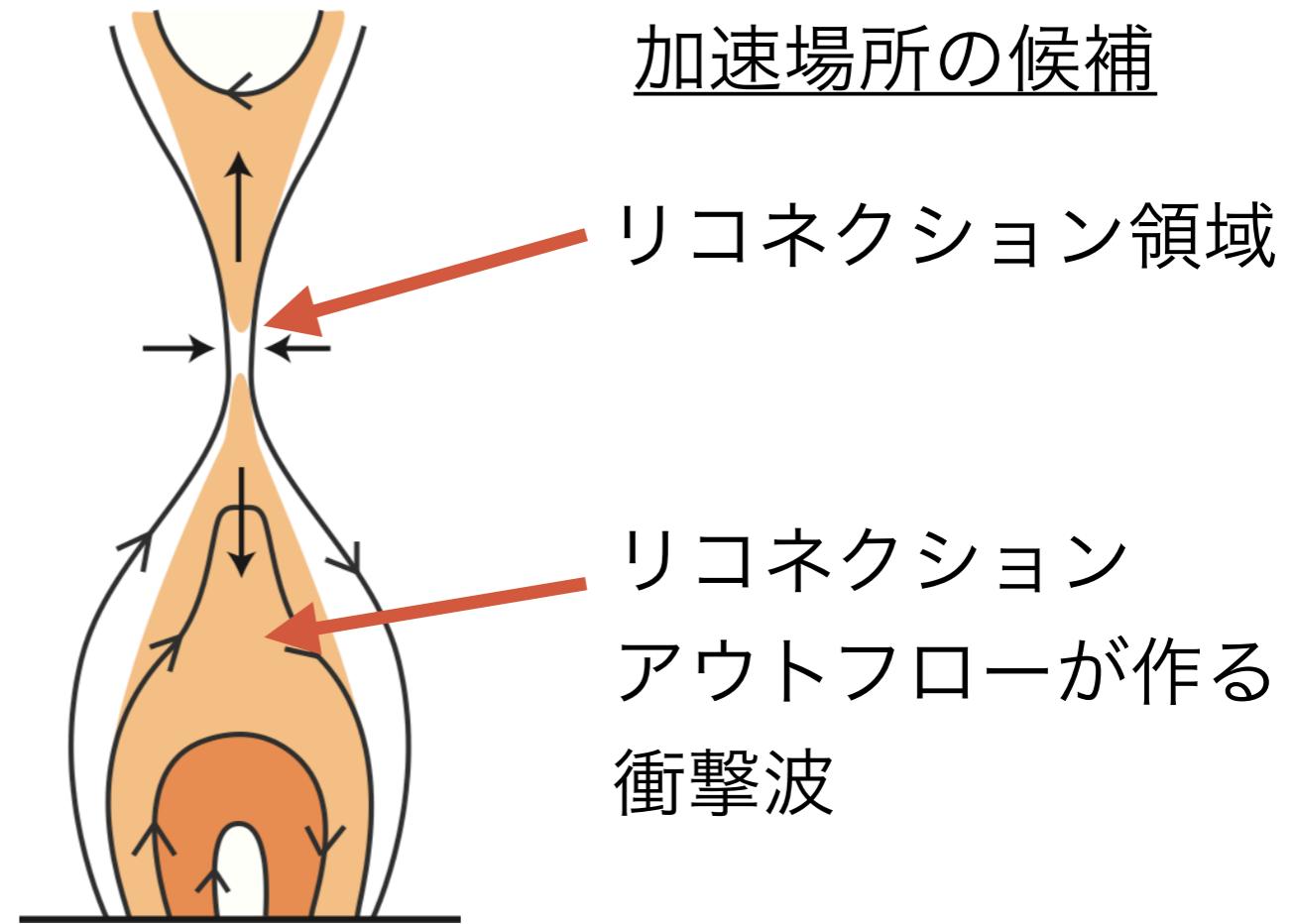
McLaughlin, Nakariakov, Dominique, Jelinek, & ST 2018, Space Sci. Rev.  
Nakariakov & Melnikov 09

# 振動とフレアからの放射

フレアからの非熱的放射



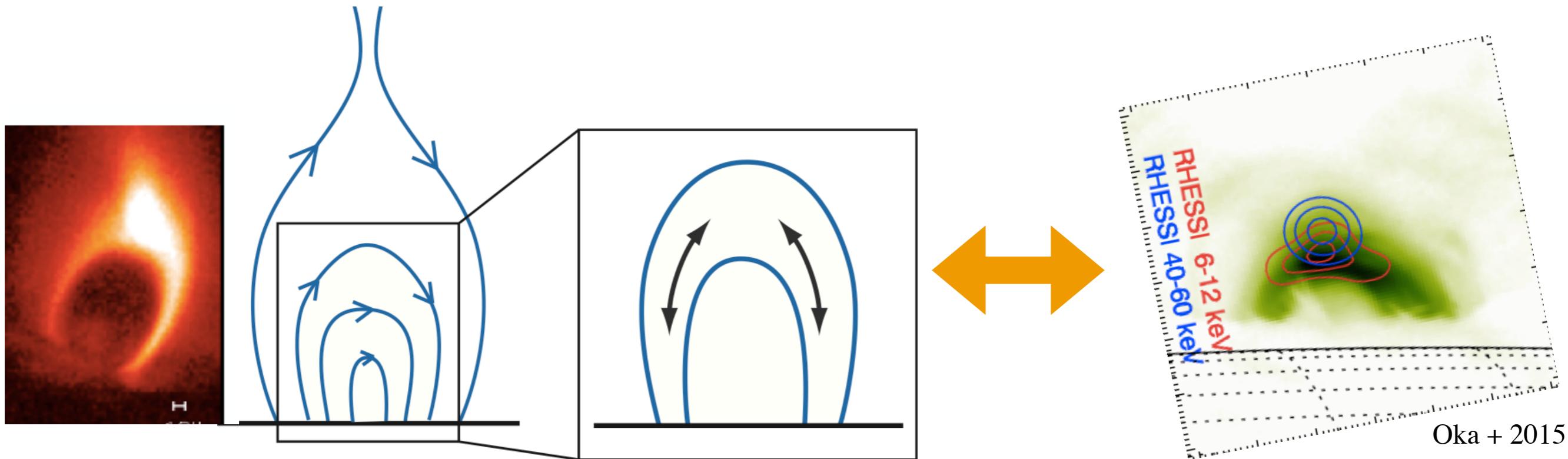
加速場所の候補



- ▶ ほとんどのフレアは高エネルギー電子起源の放射の準周期的変動を示す (e.g. Nakariakov & Melnikov 09) => 振動は普遍的
- ▶ 周期：10 - 100 sec が主要
- ▶ 加速場所 or 放射場所の物理量をMHD 過程が時間変動している？

# これまでの考え方

e.g. Nakariakov+04



フレアループ内に励起された音波が原因の場合

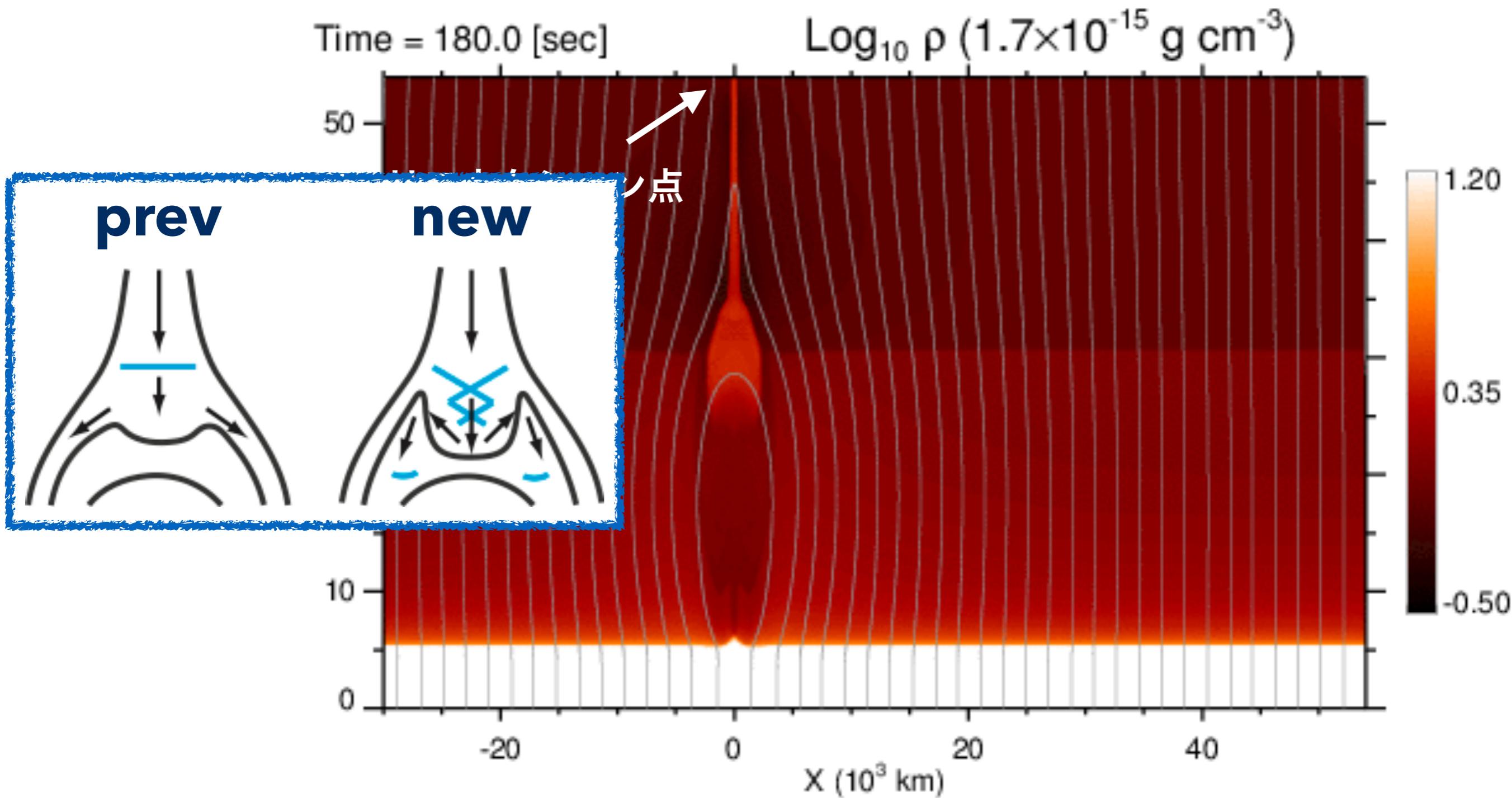
$$P = L/C_s \propto LT^{-1/2}$$

- ▶ これまでフレアループ内の振動・波動が主に注目されてきたが、非熱的放射が強いところはループ上空（離れている）
- ▶ フレアの駆動物理であるリコネクションを考慮してモデリングする必要性

# 時間変動する終端衝撃波

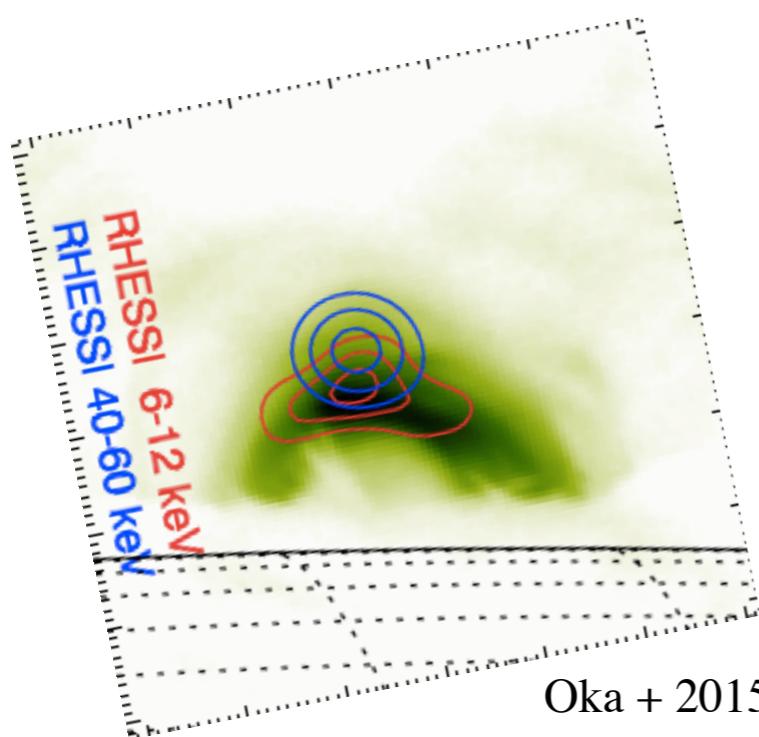
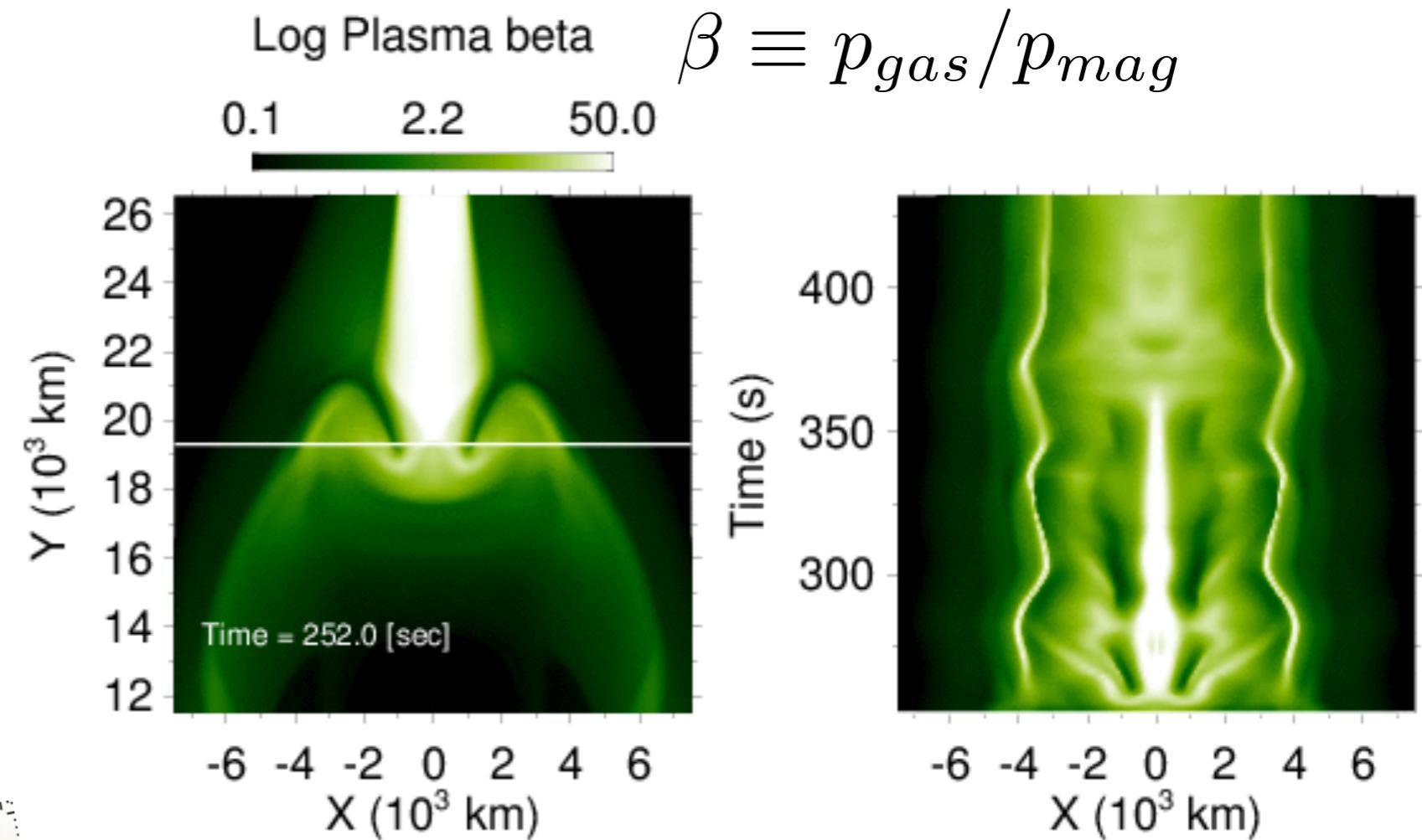
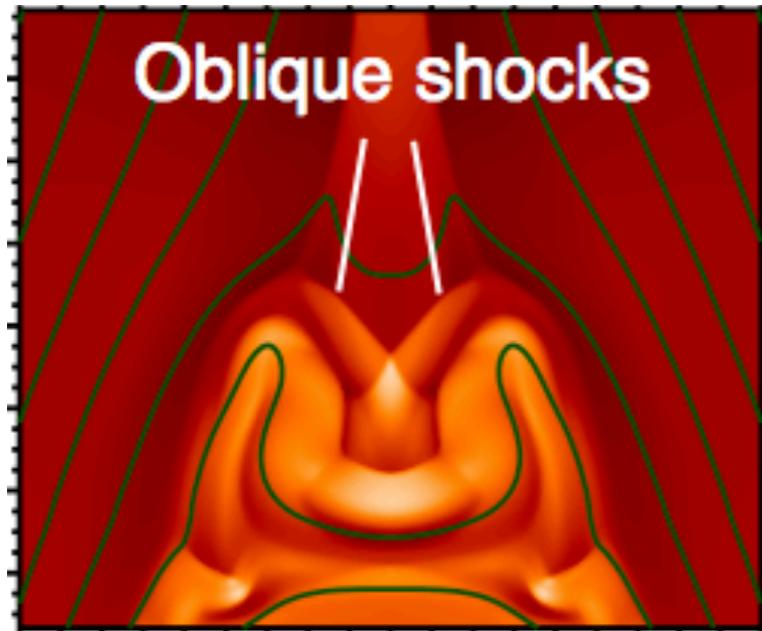
ST+2015, ST & Shibata 2016

リコネクション・熱伝導・大気構造を考慮した2次元フレアシミュレーション



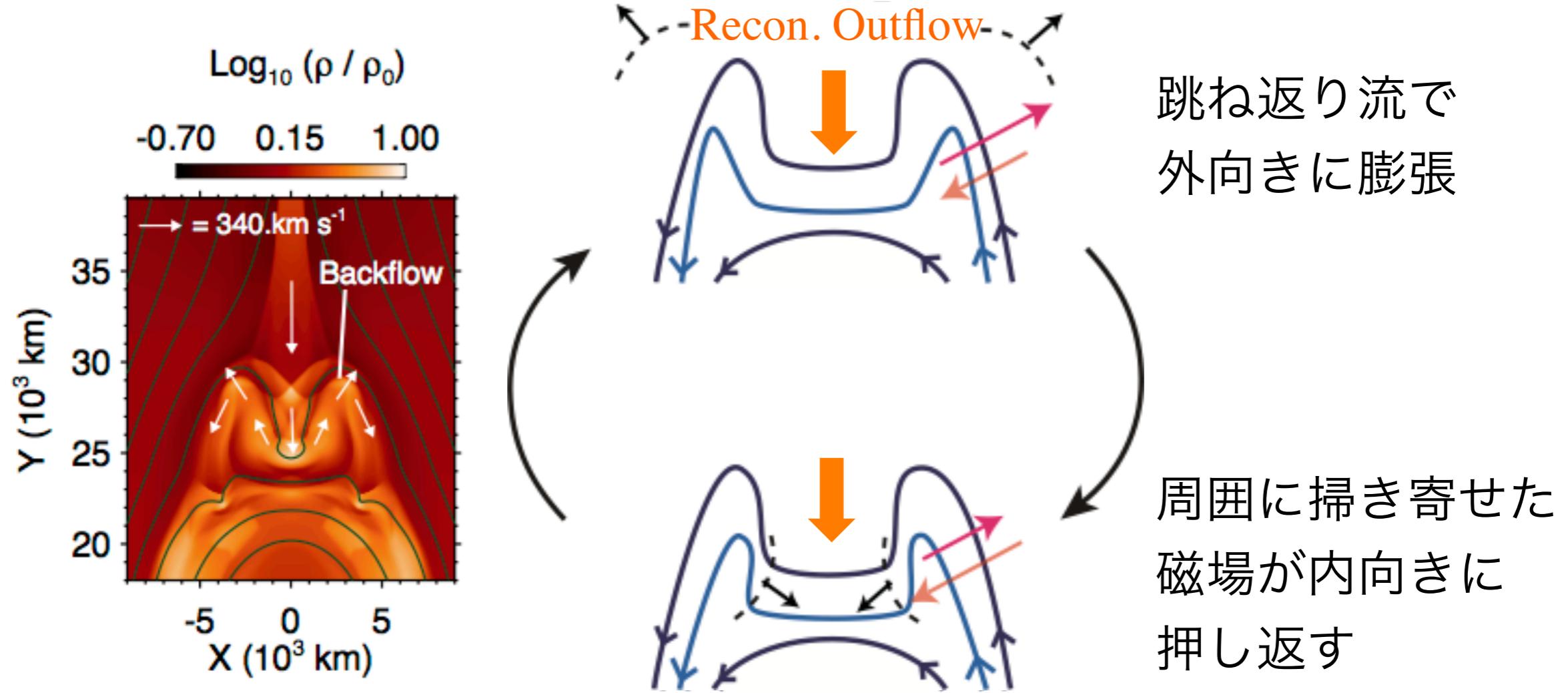
# ループ上空の衝撃波領域の振動

密度分布



観測でもループトップ上空から高エネルギー電子の放射が強い。衝撃波による電子加速が効いているなら  
**衝撃波振動 → 非熱的放射の変動**  
を自然に説明

# 流れが駆動する、音叉的振動

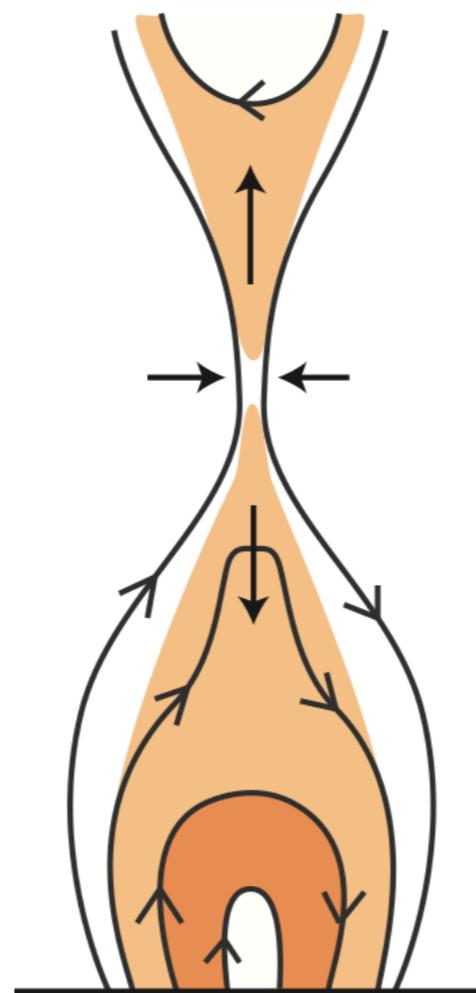


- ▶ 振動周期とフレアサイズ・磁場強度をつなぐスケーリング則を導出  
$$P \propto B^{-3/7} L^{6/7}$$
- ▶ 観測的検証とより現実的なモデリングが今後の課題

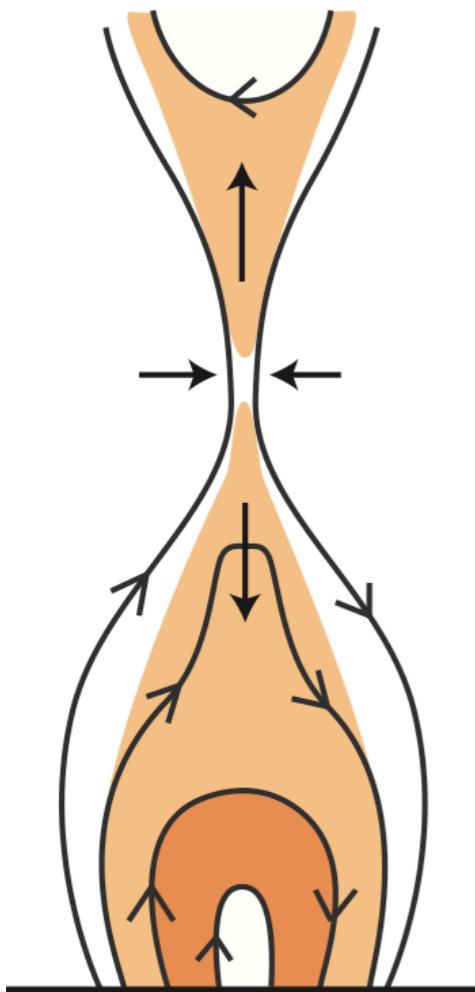
# 恒星の磁気活動性を定量的に探るには

フレア理論を組み合わせてコロナの物理量（磁場強度など）を推定する方法

- フレアループの冷える過程に注目 : Reale et al. 97
- フレアループの力学バランスに注目 : **Shibata & Yokoyama 02**
- フレア領域の振動過程に注目 : Takasao & Shibata 16, etc



# フレア領域の力学・エネルギーバランスを使う



Shibata & Yokoyama 2002

フレアループが構造を保てる条件

(フレアの高圧ガスを磁場で閉じ込められる条件)

$$p_{gas} \sim p_{mag} = \frac{B^2}{8\pi}$$

加熱と冷却のエネルギーバランス

(ポインティングフラックス = 熱伝導フラックス)

$$\frac{B^2}{4\pi} V_A \sim \frac{\kappa_0 T^{7/2}}{L}$$

$$B = 50 \left( \frac{\text{EM}}{10^{48} \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1/5} \left( \frac{n_0}{10^9 \text{ cm}^{-3}} \right)^{3/10} \left( \frac{T}{10^7 \text{ K}} \right)^{17/10} \text{ G ,}$$

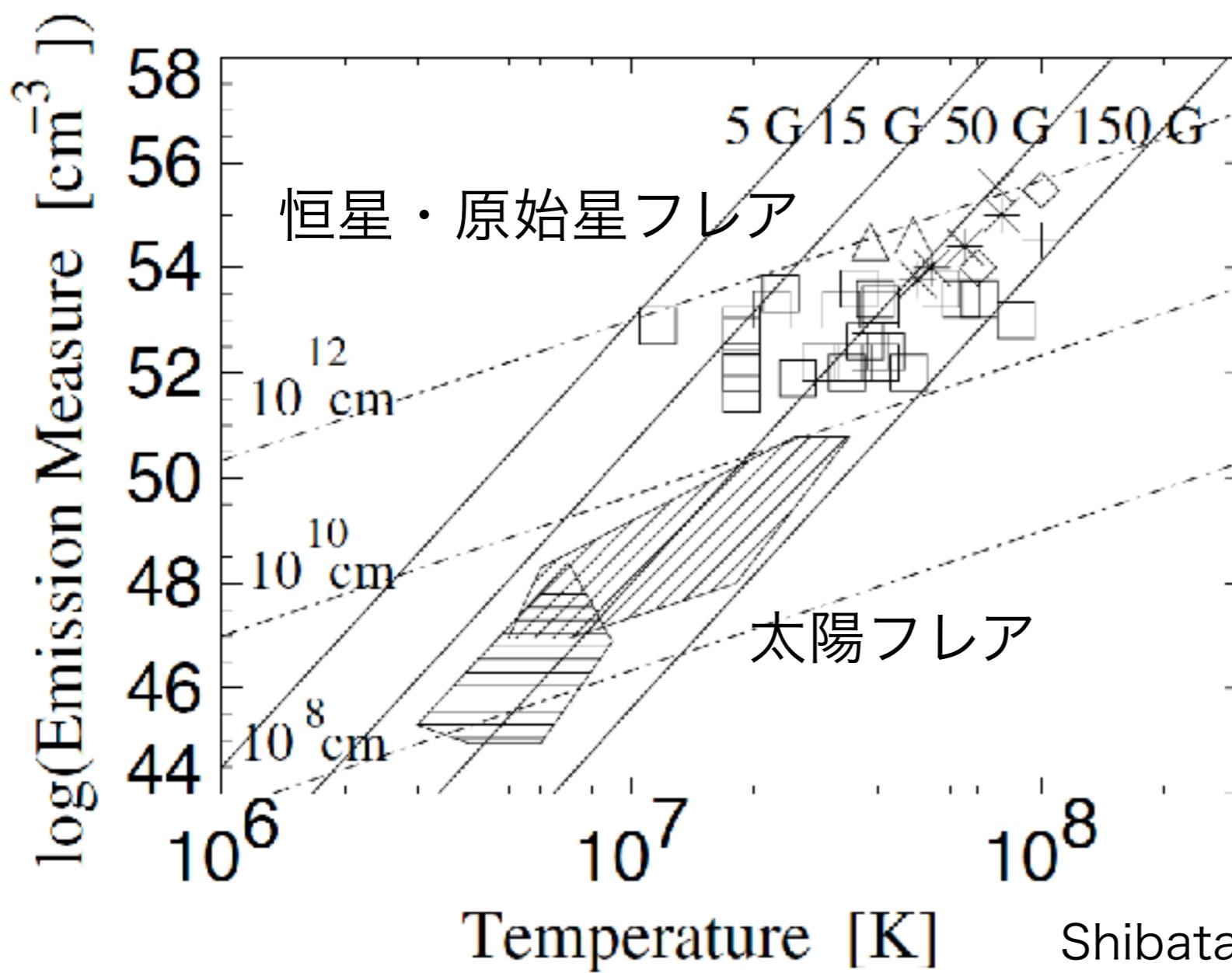
$$L = 10^9 \left( \frac{\text{EM}}{10^{48} \text{ cm}^{-3}} \right)^{3/5} \left( \frac{n_0}{10^9 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-2/5} \left( \frac{T}{10^7 \text{ K}} \right)^{-8/5} \text{ cm .}$$

観測量 (EM: emission measure, T: 温度) から磁場強度、フレアサイズを推定

# 2002年までの観測

$$B = 50 \left( \frac{EM}{10^{48} \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1/5} \left( \frac{n_0}{10^9 \text{ cm}^{-3}} \right)^{3/10} \left( \frac{T}{10^7 \text{ K}} \right)^{17/10} \text{ G},$$

$$L = 10^9 \left( \frac{EM}{10^{48} \text{ cm}^{-3}} \right)^{3/5} \left( \frac{n_0}{10^9 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-2/5} \left( \frac{T}{10^7 \text{ K}} \right)^{-8/5} \text{ cm}.$$

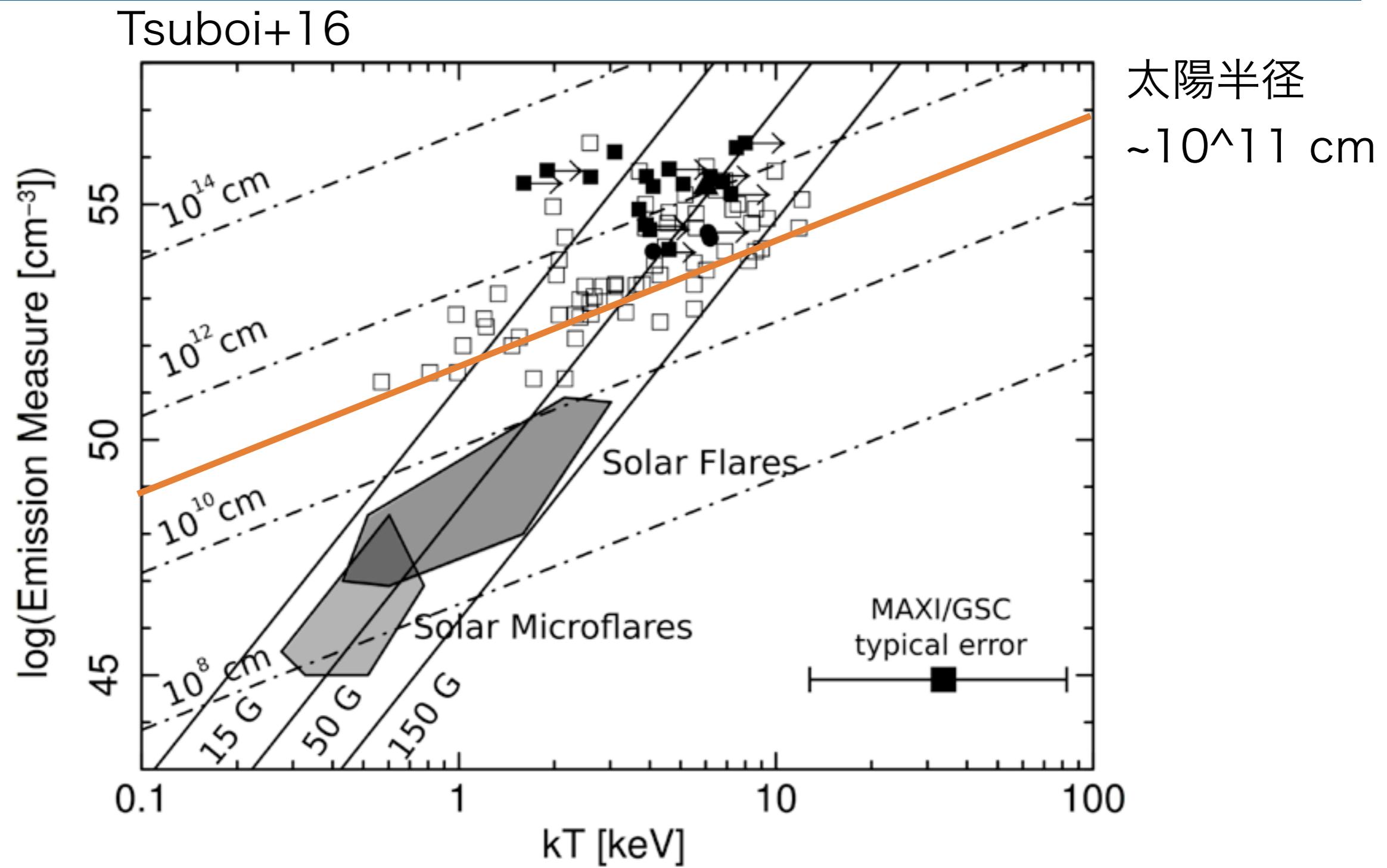


太陽フレアをよく説明し  
太陽・恒星フレアを統一的に  
説明しているように見える

(see also Namekata+17)  
星半径の~10倍以上大きい  
ものも見受けられるが稀?

しかし統計が足りない

# 最近の恒星フレアの観測結果



スケーリングをそのまま適用 → 星半径の10-100倍大きいフレア?  
(バイナリセパレーションより大きいフレアも理論から推定された)

# 巨大フレアの解釈の困難

---

太陽フレア理論をもとにしたモデルで

OK派：

- ▶ 実は本当に巨大なフレアが起きている

理論の発展が必要派：

- ▶ 巨大フレアには通常の理論が適用できない可能性
- ▶ (巨大フレアの多くは原始星フレアであることを踏まえ)  
実は原始星周りの磁場構造（フレアの構造）が予想と違う

# 巨大フレアの解釈の困難

---

太陽フレア理論をもとにしたモデルで

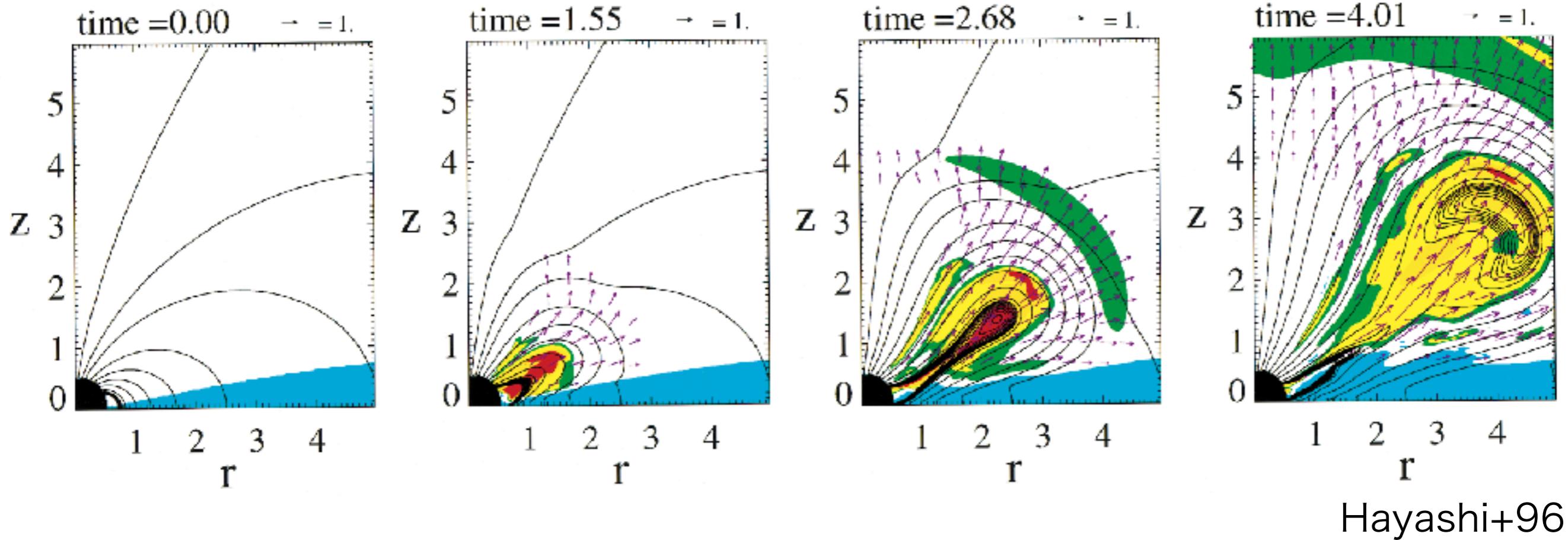
OK派：

- ▶ 実は本当に巨大なフレアが起きている

理論の発展が必要派：

- ▶ 巨大フレアには通常の理論が適用できない可能性
- ▶ (巨大フレアの多くは原始星フレアであることを踏まえ)  
実は原始星周りの磁場構造（フレアの構造）が予想と違う

# 原始星フレアのシミュレーション



円盤の回転エネルギー → 磁気エネルギーを星周囲に蓄積 → 大フレア

- ▶ しかし長時間計算や追試が行われていないのでさらなる研究が必要（シミュレーションが大変）
- ▶ 質量噴出の前面にできる衝撃波はコンドリュールの形成に有効かも  
(Miura & Nakamoto 2006)

# 巨大フレアの解釈の困難

---

太陽フレア理論をもとにしたモデルで

OK派：

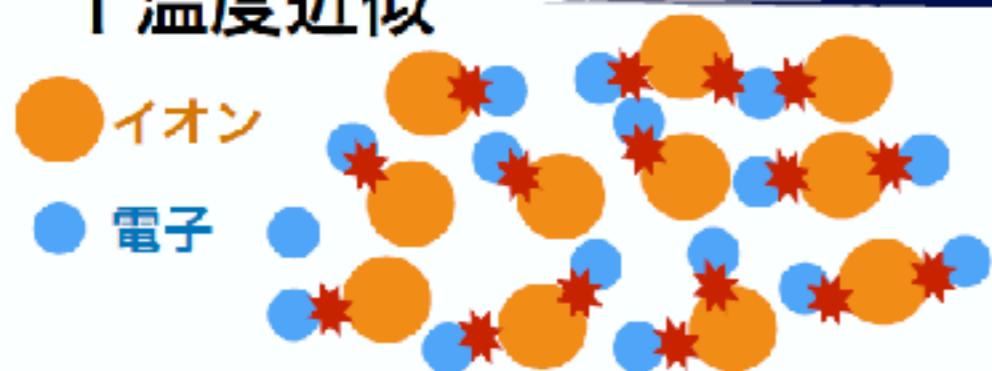
- ▶ 実は本当に巨大なフレアが起きている

理論の発展が必要派：

- ▶ **巨大フレアには通常の理論が適用できない可能性**
- ▶ (巨大フレアの多くは原始星フレアであることを踏まえ)  
実は原始星周りの磁場構造（フレアの構造）が予想と違う

# 1 温度近似の限界

## 1 温度近似



イオンの 熱エネルギー	電子の 熱エネルギー
----------------	---------------

プラズマ全体の熱エネルギー

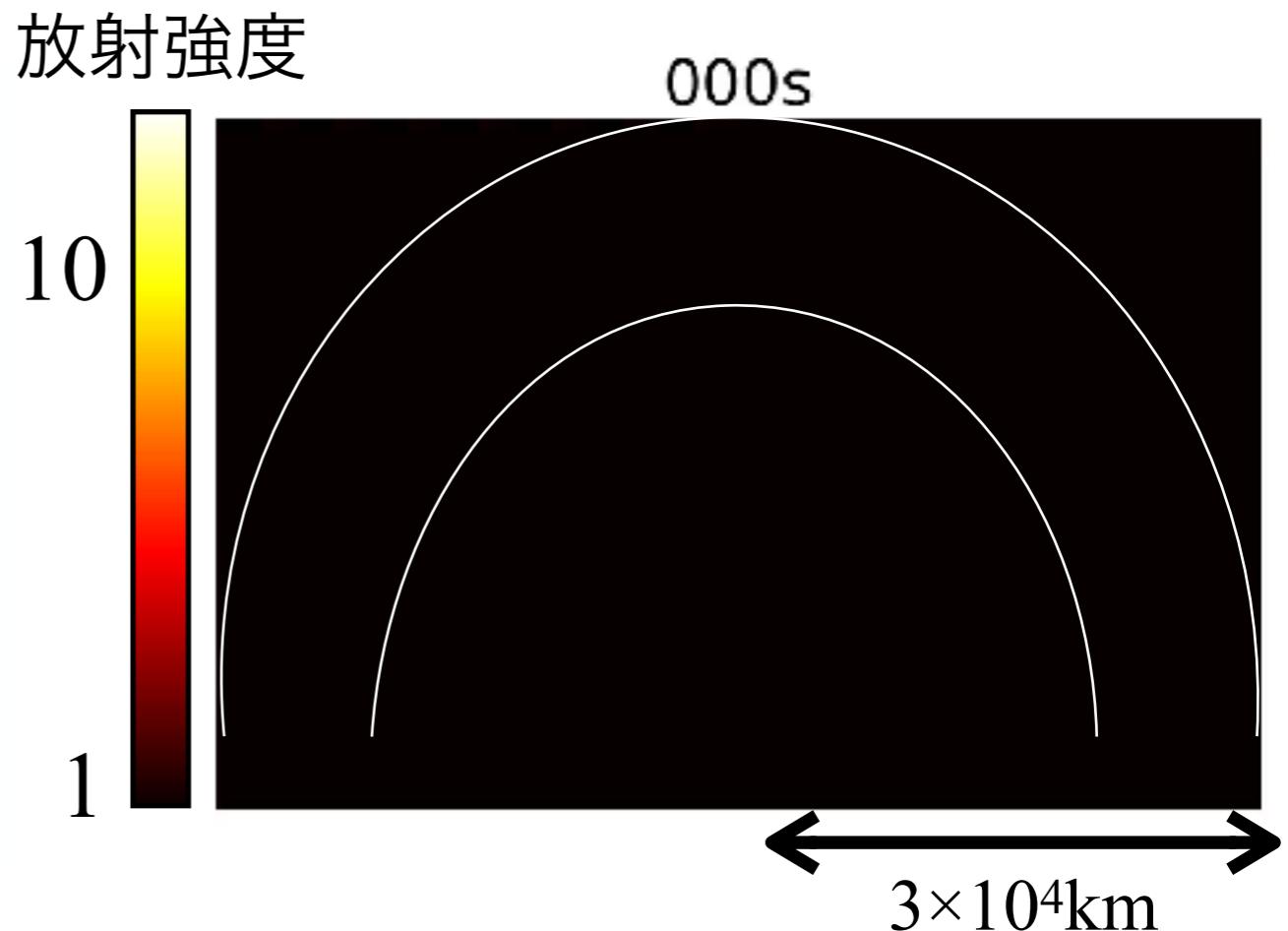
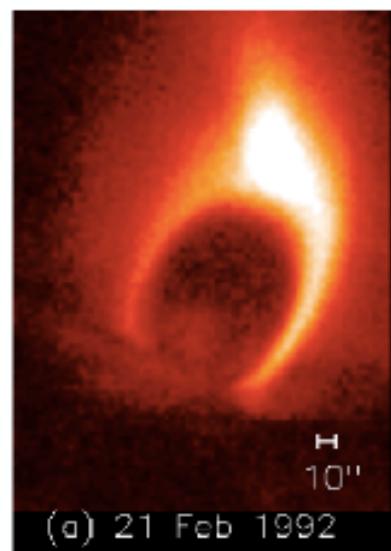
太陽フレアの各磁力線におけるエネルギー解放時間：10-100 s

電子-イオンの衝突緩和時間スケール:  $t_{e,i} = 10^{2-3} \left( \frac{n}{10^9 \text{cm}^{-3}} \right)^{-1} \left( \frac{T}{10^7 \text{K}} \right)^{3/2} \text{s}$

→ 電子とイオンは常に熱平衡状態と仮定できない

電子温度とイオン温度を独立に解く必要性

# 電子・イオンの2温度流体モデルへ

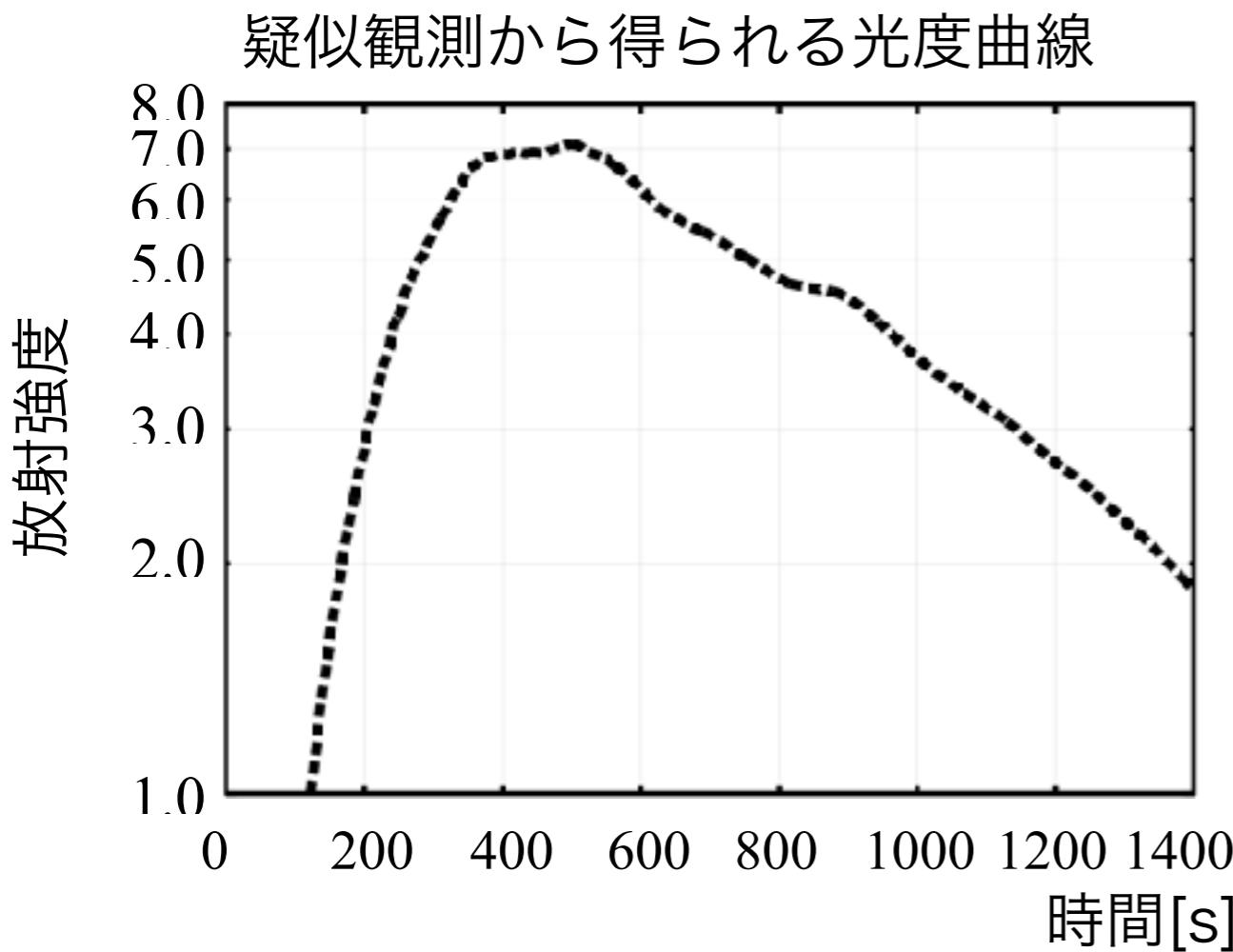


一本一本のループの重ね合わせでフレアループ表現するモデリング

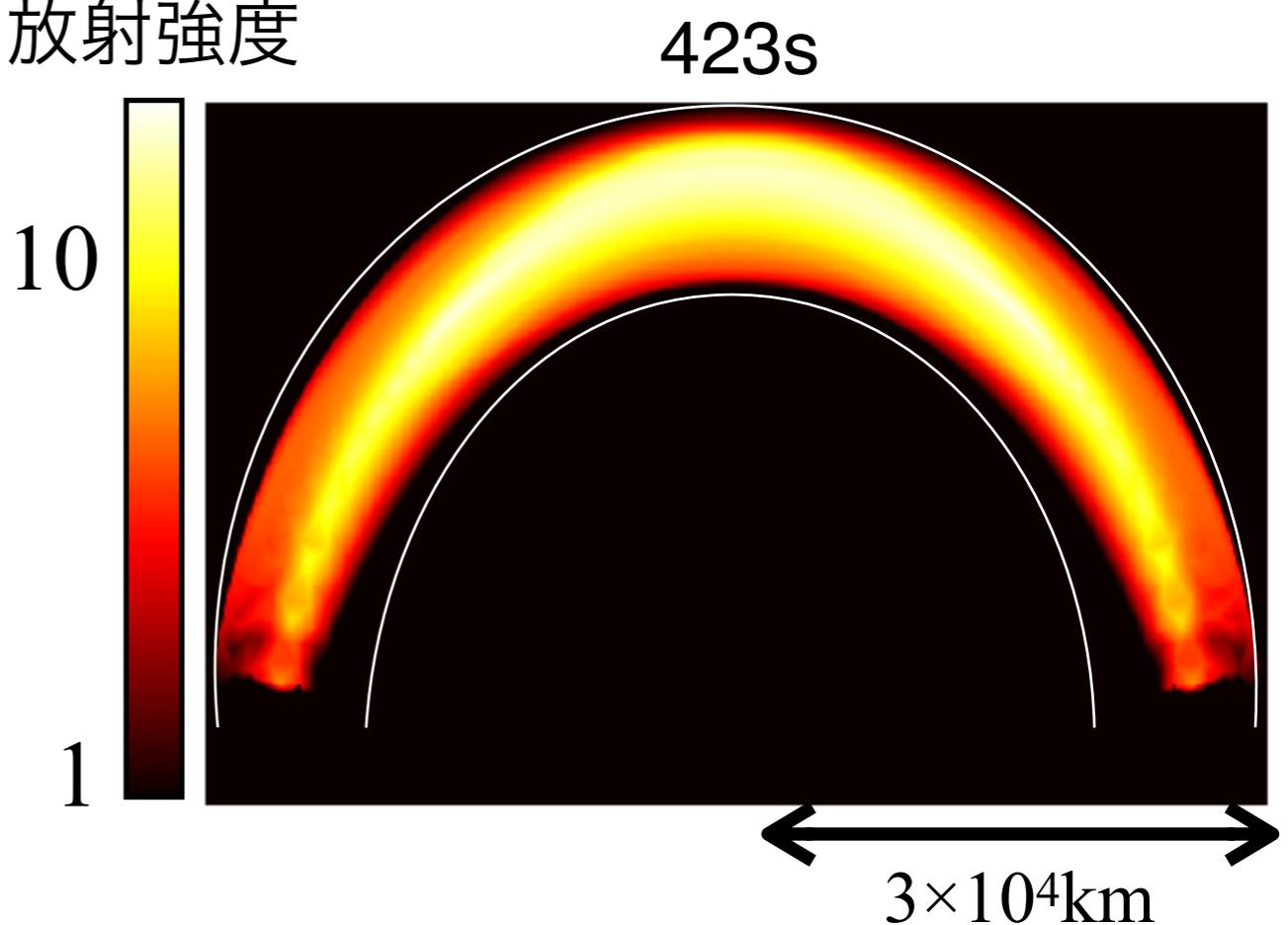
(磁力線に沿った1次元流体の運動を解いた結果を重ね合わせ)

軟X線(0.3-1.3keV)で観測される放射強度を疑似観測

# 電子・イオンの2温度流体モデルへ



放射強度



一本一本のループの重ね合わせでフレアループ表現するモデリング

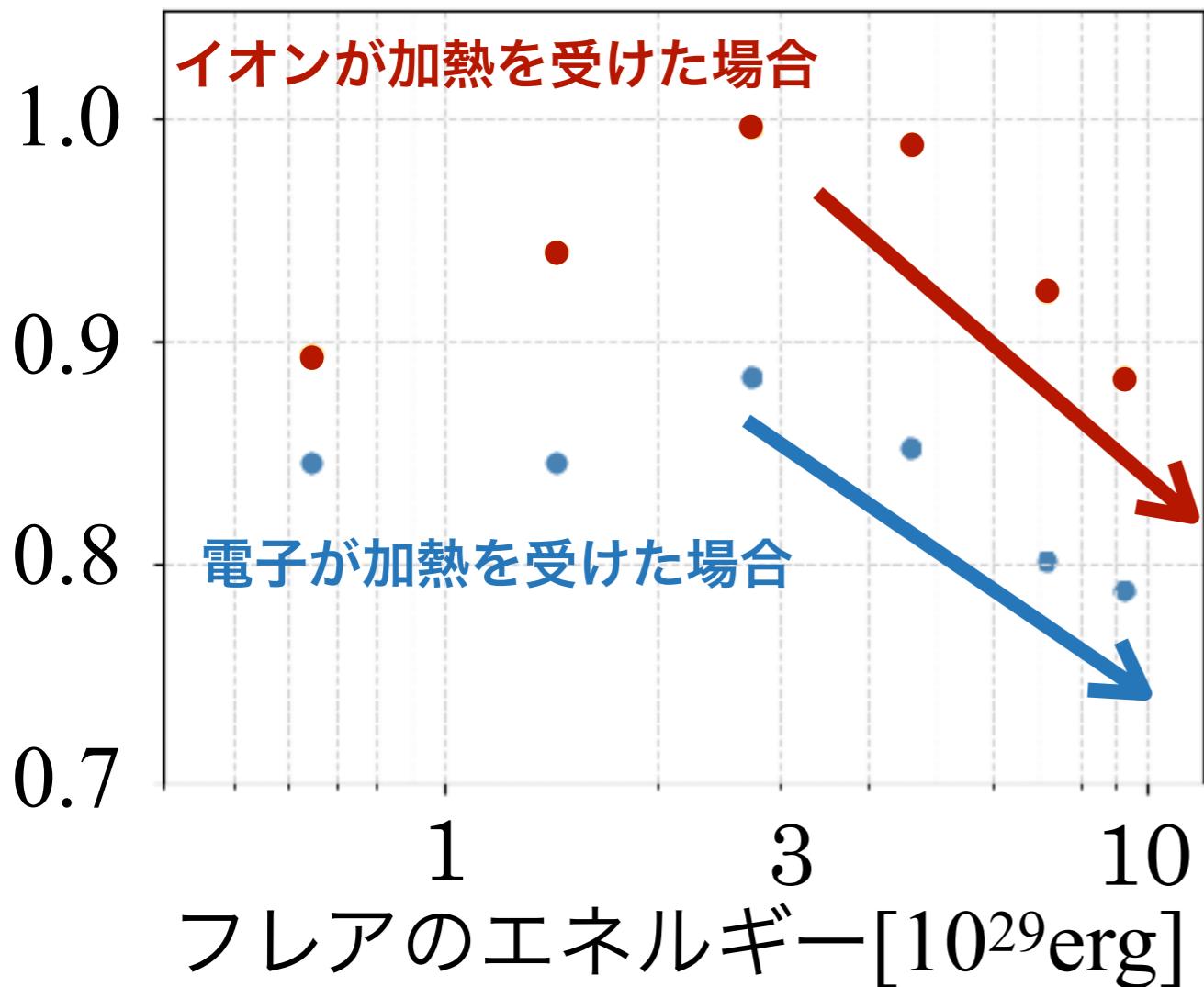
(磁力線に沿った1次元流体の運動を解いた結果を重ね合わせ)

軟X線(0.3-1.3keV)で観測される放射強度を疑似観測

# 観測可能量はどのように変わるか

横澤くん修論（名大）

$$\frac{2\text{ 温度系での } T_e}{1\text{ 温度系での } T_e}$$



- 同じ規模のフレアでも、2 温度系では1 温度近似の場合に比べて電子温度  $T_e$  が小さい
- フレアが大規模になるほど、1 温度近似の結果から大きくずれる

1 温度近似に基づくスケーリング則  
(Shibata & Yokoyama 2002)

$$L_f \propto T_e^{-8/5} EM^{3/5}$$

$T_e$  の依存性が強い

仮に実際の 2 温度系でのフレアの  $T_e = 0.3 \times (1\text{ 温度系で推定される } T_e)$

→ 1 温度近似の理論はフレアサイズを ~10 倍大きく評価してしまう可能性  
スケーリング則を 2 温度系モデルで拡張する必要あり（論文準備中）

# 巨大フレアの解釈の困難

---

太陽フレア理論をもとにしたモデルで

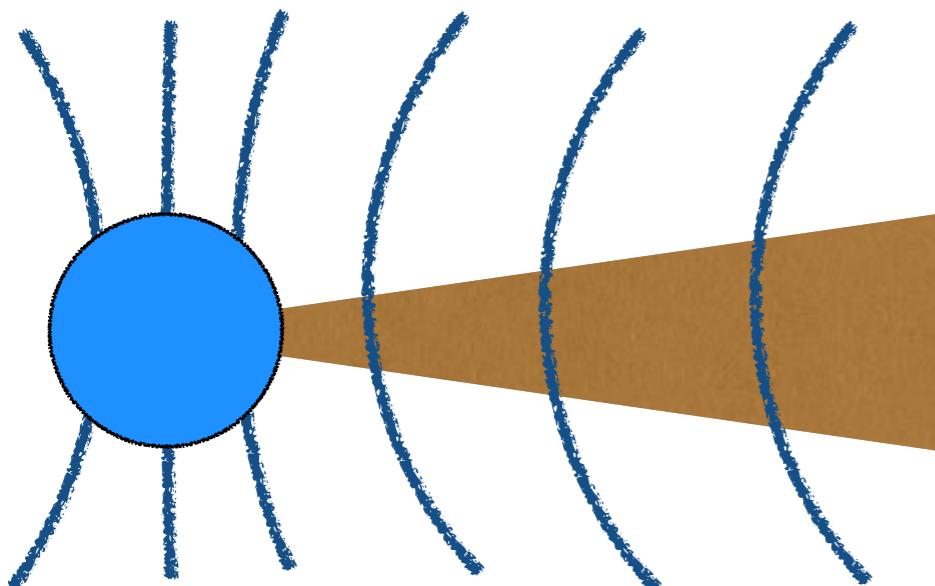
OK派：

- ▶ 実は本当に巨大なフレアが起きている

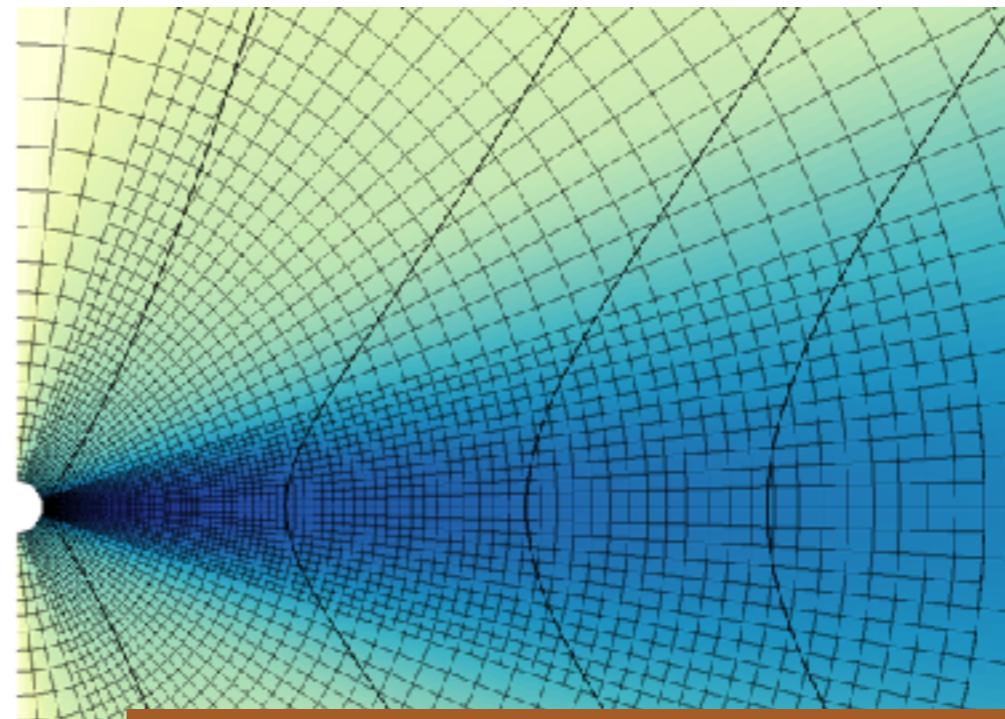
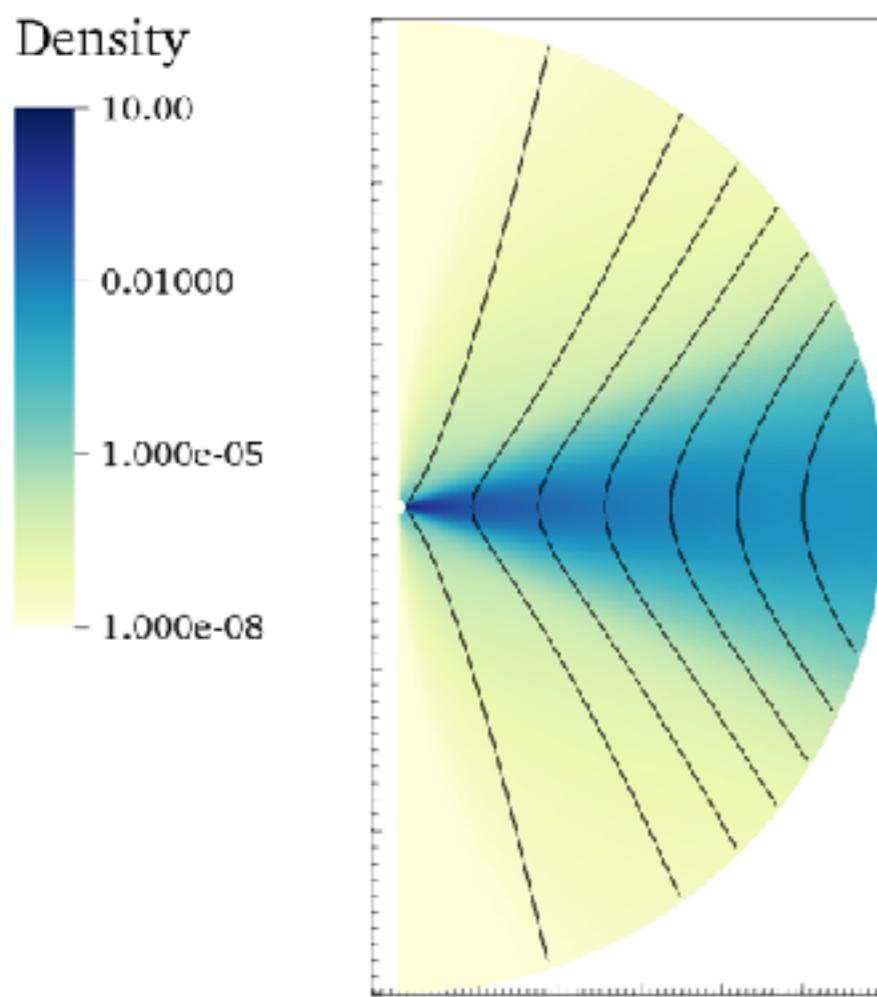
理論の発展が必要派：

- ▶ 巨大フレアには通常の理論が適用できない可能性
- ▶ (巨大フレアの多くは原始星フレアであることを踏まえ)  
実は原始星周りの磁場構造が予想と違う

# 3D MHD Model



- ▶ 降着円盤を持つ原始星周りのモデリングを推進中
- ▶ 原始星が磁気圏を持つかわからぬのでまずは磁気圏なしモデルからスタート



- ▶ 領域サイズは ~0.3 au
- ▶ コードは Athena++ (Stone, Tomida, White in prep)

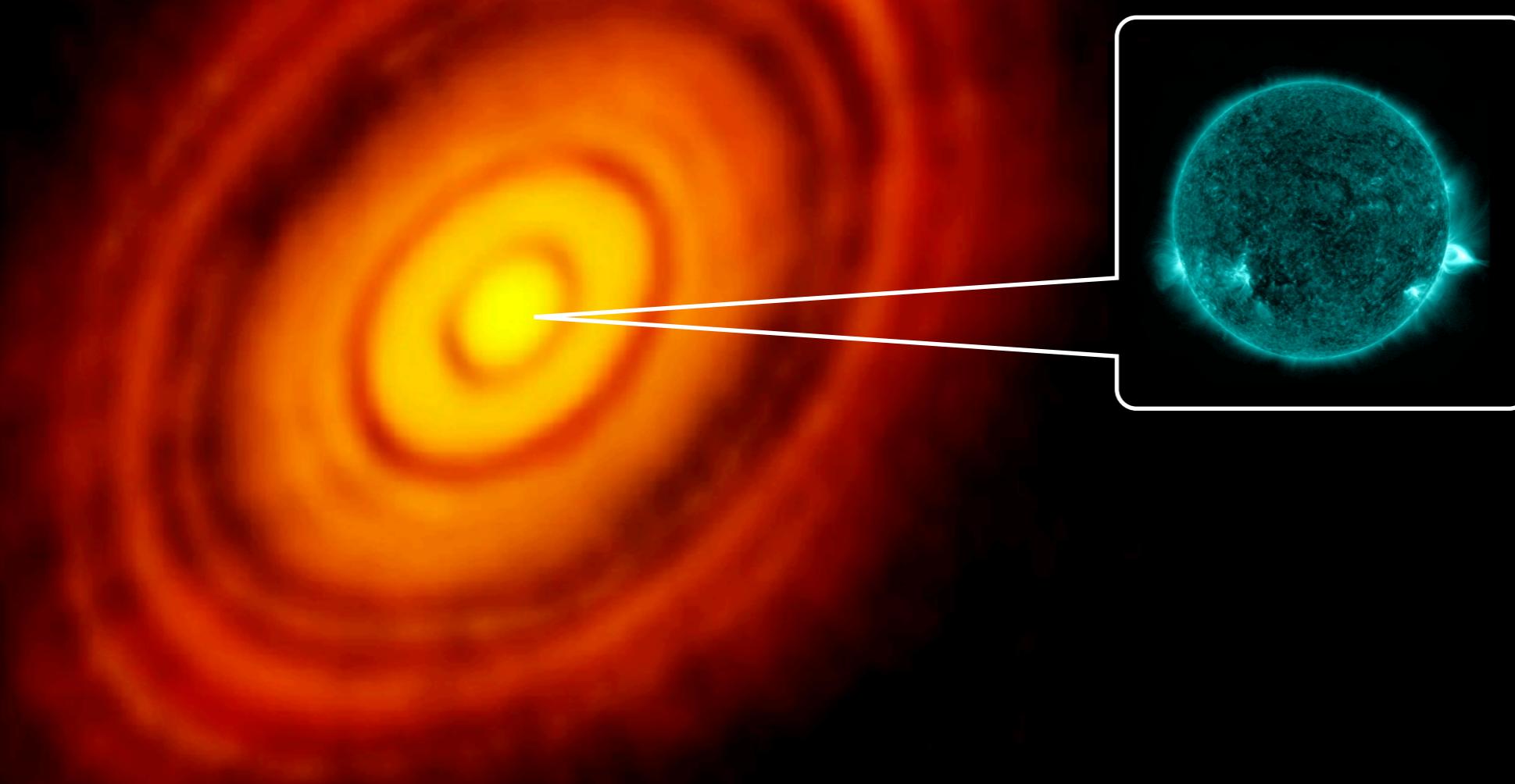


# アウトライン

---

- ▶ イントロ
  - ▶ 太陽・恒星・原始星の磁気活動の概観
  - ▶ 磁気流体力学と磁気リコネクションの基本
- ▶ フレア観測から太陽・恒星コロナを探る取り組み
  - ST+ 2015, ST & Shibata 2016
- ▶ 原始星近傍の理解を進めるための取り組み
  - ST+ 2018

# 原始星・前主系列星の磁気活動が 周囲の環境（特に原始惑星系円盤）に及ぼす影響

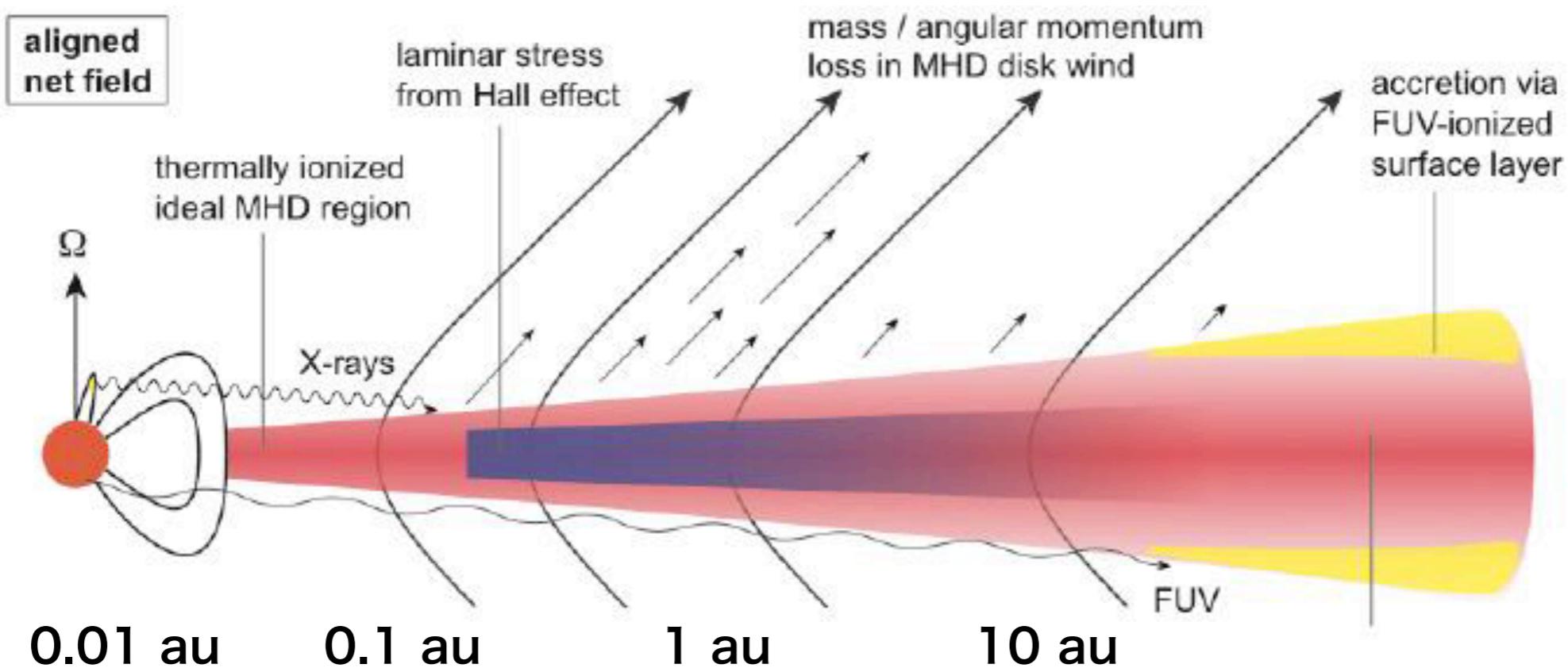


credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

# 原始惑星系円盤

原始惑星系円盤：

- ▶ 低温・低電離ガス
- ▶  $>\sim\text{au}$  スケールでは、**星からの放射が重要な熱源**
- ▶ 星からのUV, X線は円盤ガスの散逸に重要（光蒸発）
- ▶ 円盤乱流の有無に関わる電離度は、宇宙線に大きく影響



Simon+15

# 星の影響

ジェットの作る衝撃波

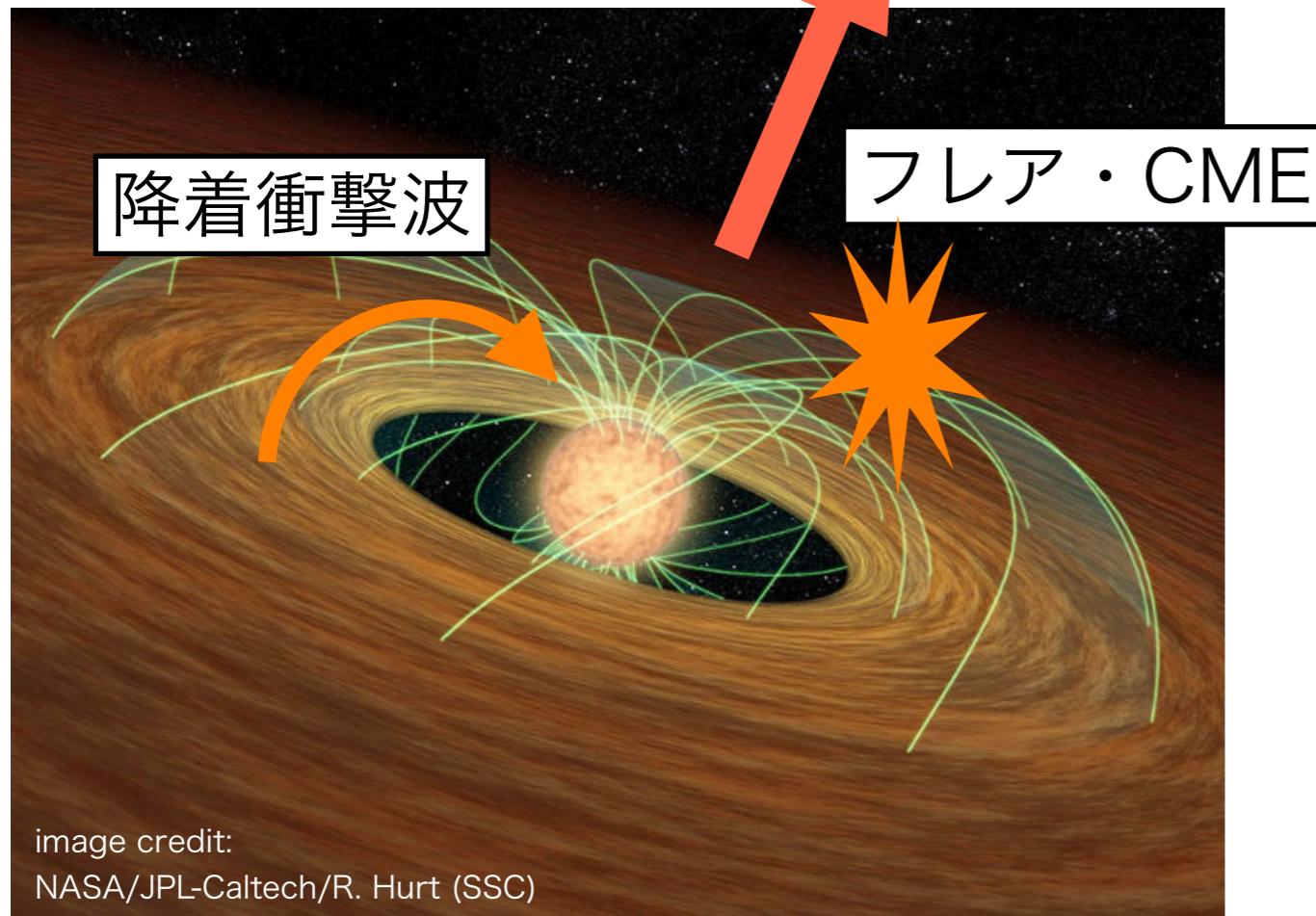


image credit:  
NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC)

- ▶ フレア、降着衝撃波：  
星のUV, X線放射量を決める
- ▶ 降着衝撃波、ジェット、フレア・CME：  
星形成領域内で高エネルギー粒子を生成（銀河由来ではない宇宙線）Padovani+15

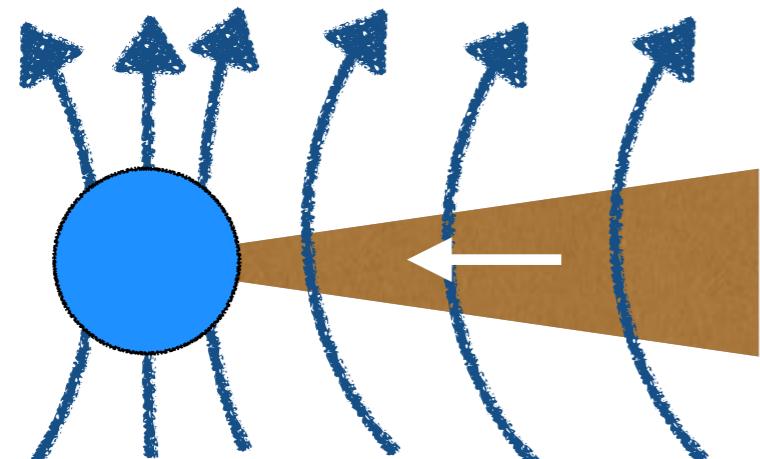
円盤進化を考える上で原始星・前主系列星のモデリングは重要  
特に星・円盤相互作用の部分

# 星近傍の古典的理解

星まで円盤が繋がった状態

(e.g. Machida+ 08)

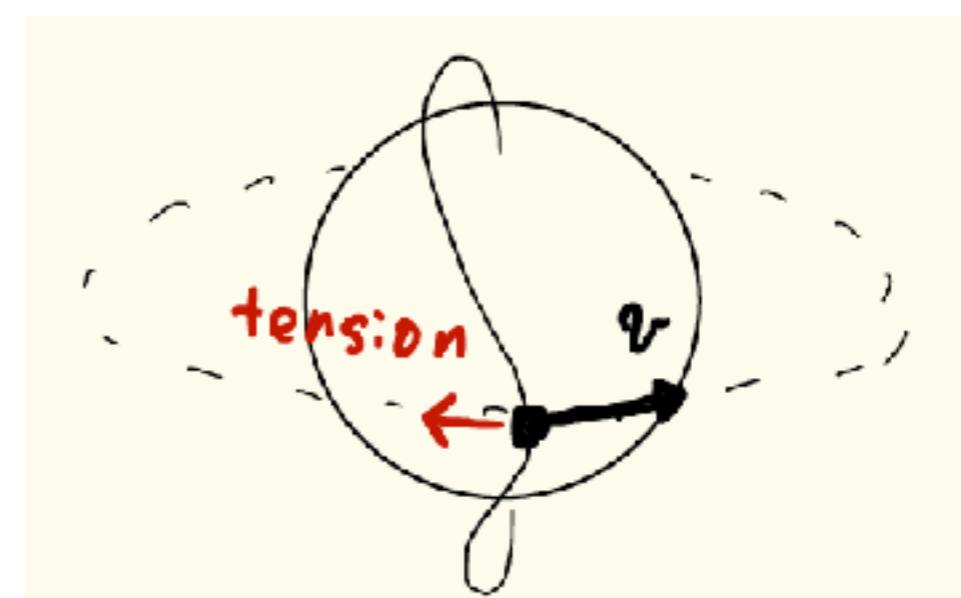
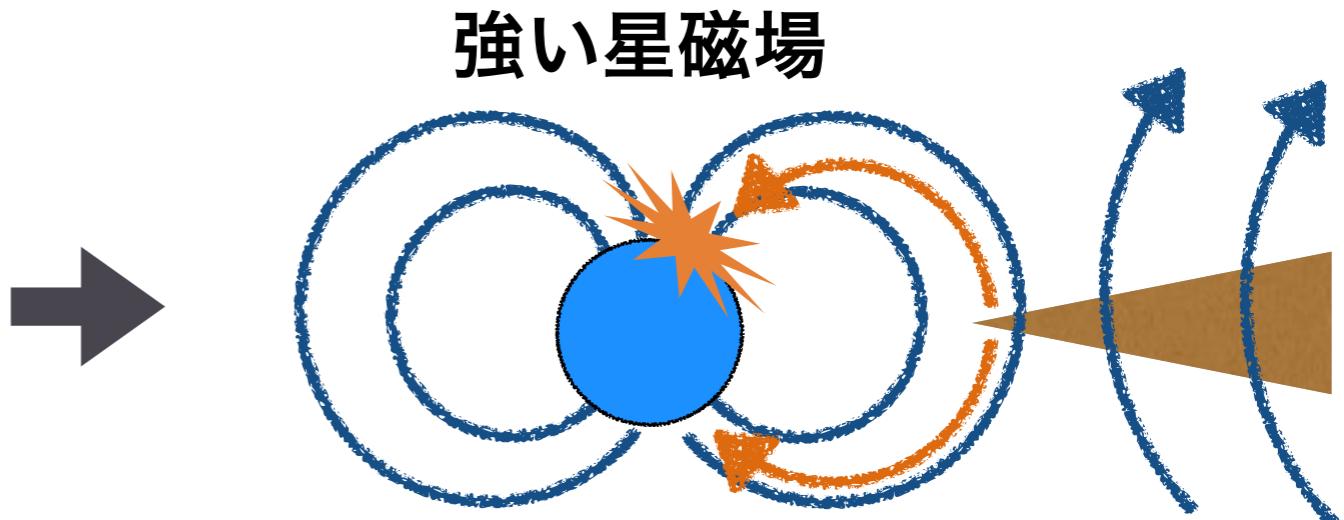
early/late protostars?



~0.01 au

磁気圏降着 (e.g. Königl 90)

late protostars, CTTS?

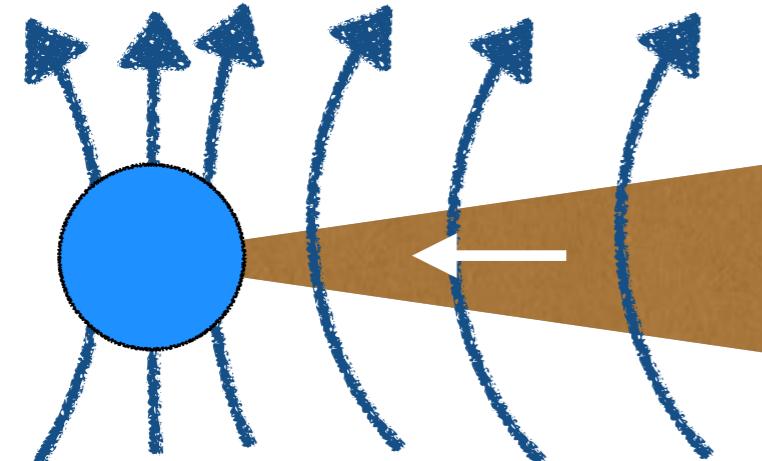


# 星近傍の古典的理解

星まで円盤が繋がった状態

(e.g. Machida+ 08)

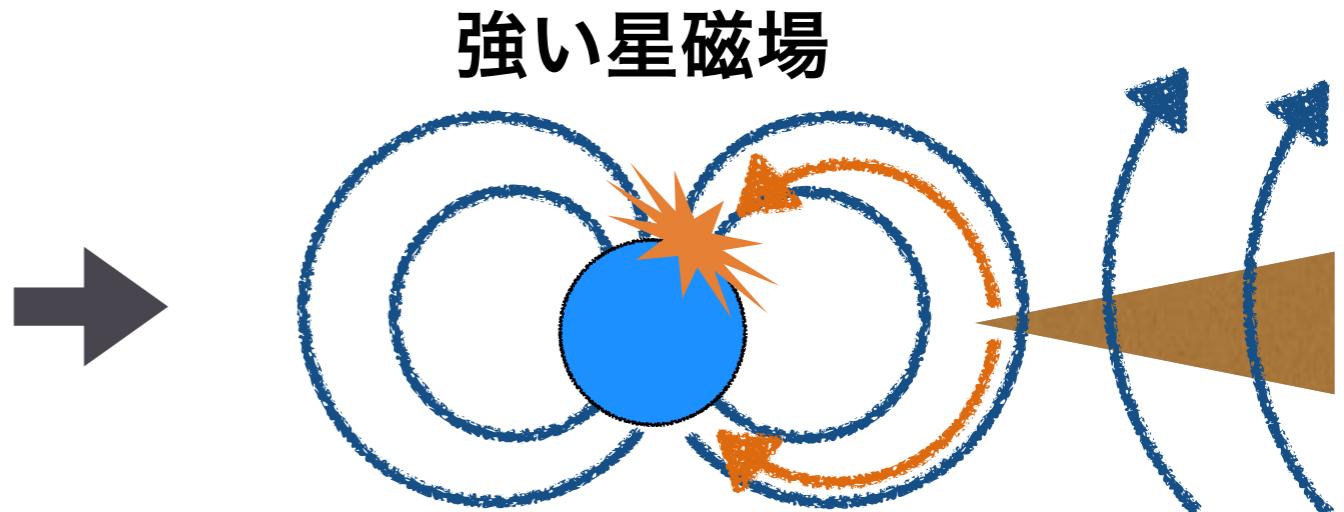
early/late protostars?



~0.01 au

磁気圏降着 (e.g. Königl 90)

late protostars, CTTS?



高緯度に降着衝撃波

通説：

高速な降着・降着衝撃波が観測で見えたなら

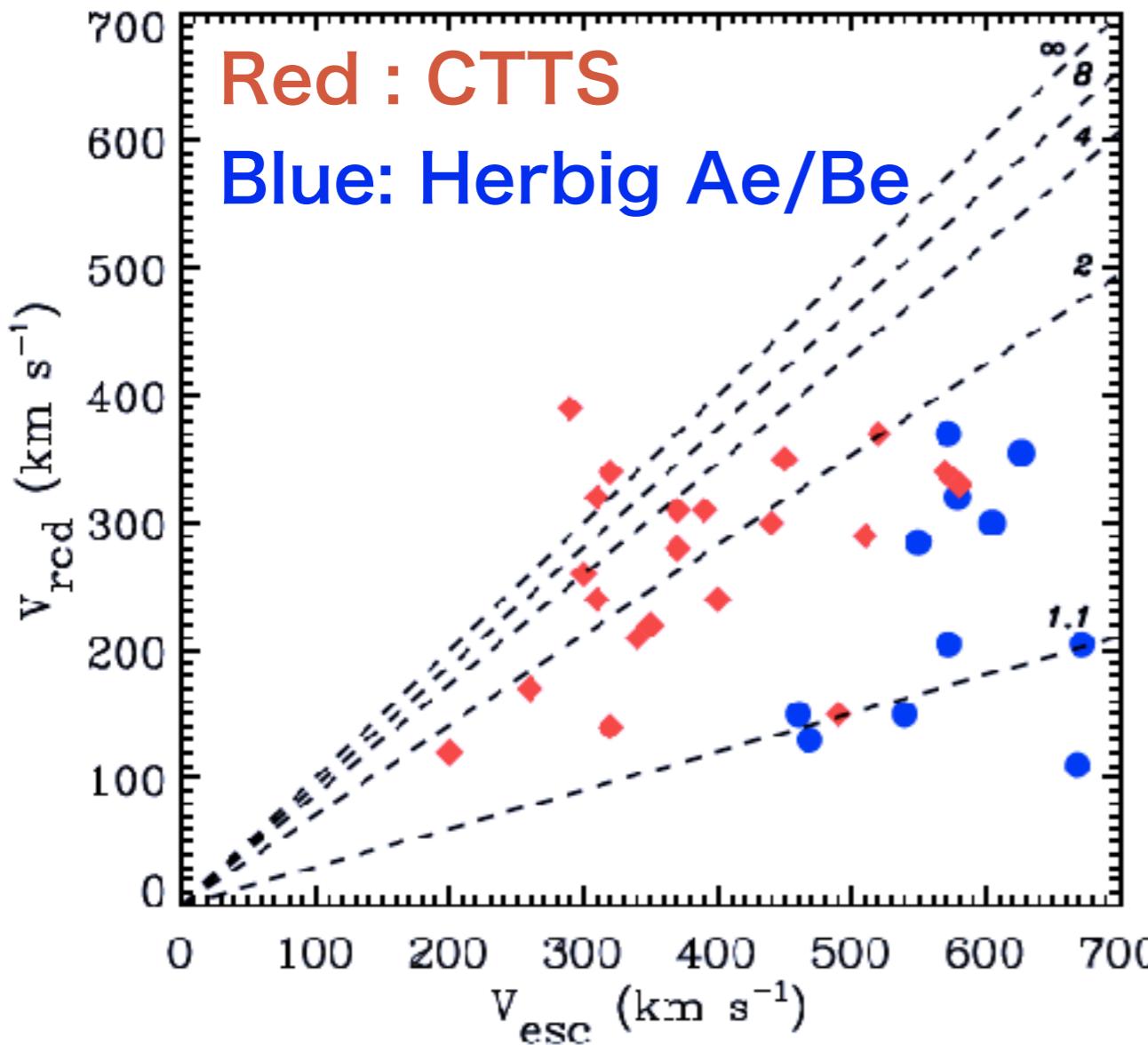
「星は強い磁気圏を持っていて磁気圏降着が起きている」と解釈。

過去の原始星フレアのモデルもこれが前提

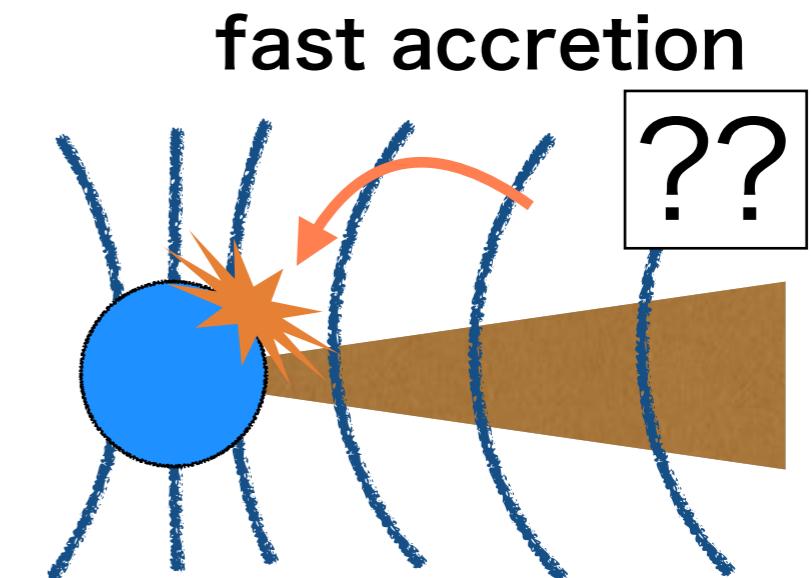
# 磁場が弱くても高速な降着

Herbig Ae/Be: 前主系列段階にある中質量星. 磁場を持つ星 ( $> \sim 100\text{G}$ ) の割合は高々  $\sim 10\%$  (Wade+2007)

→ 磁気圏降着は期待できないはず（高速降着はないはず）



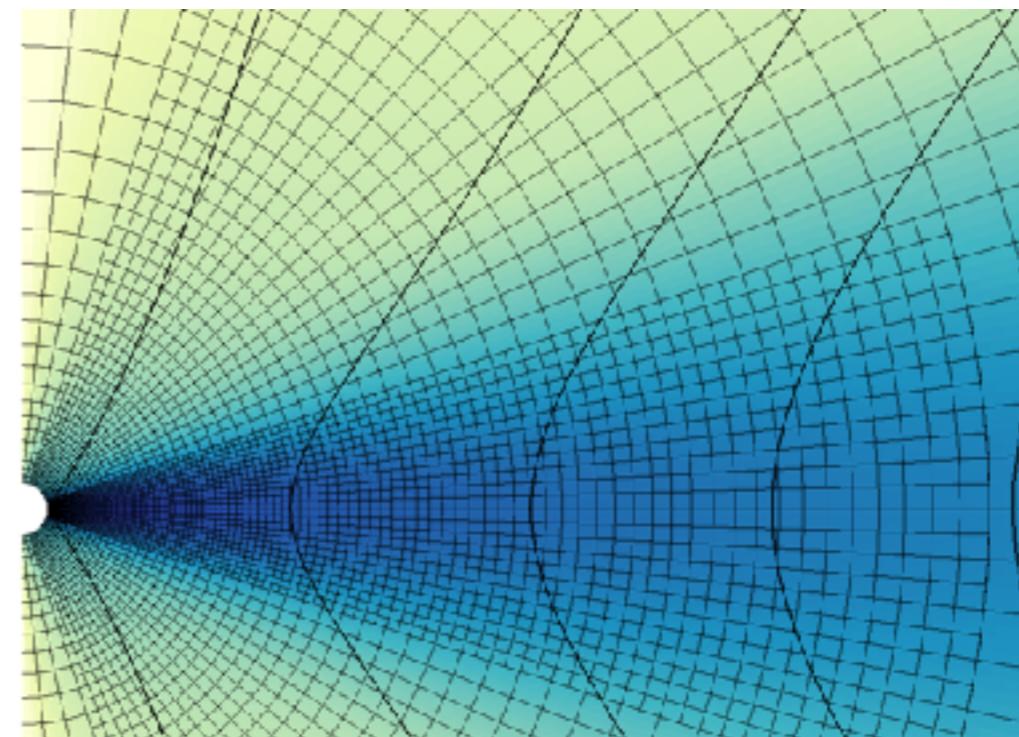
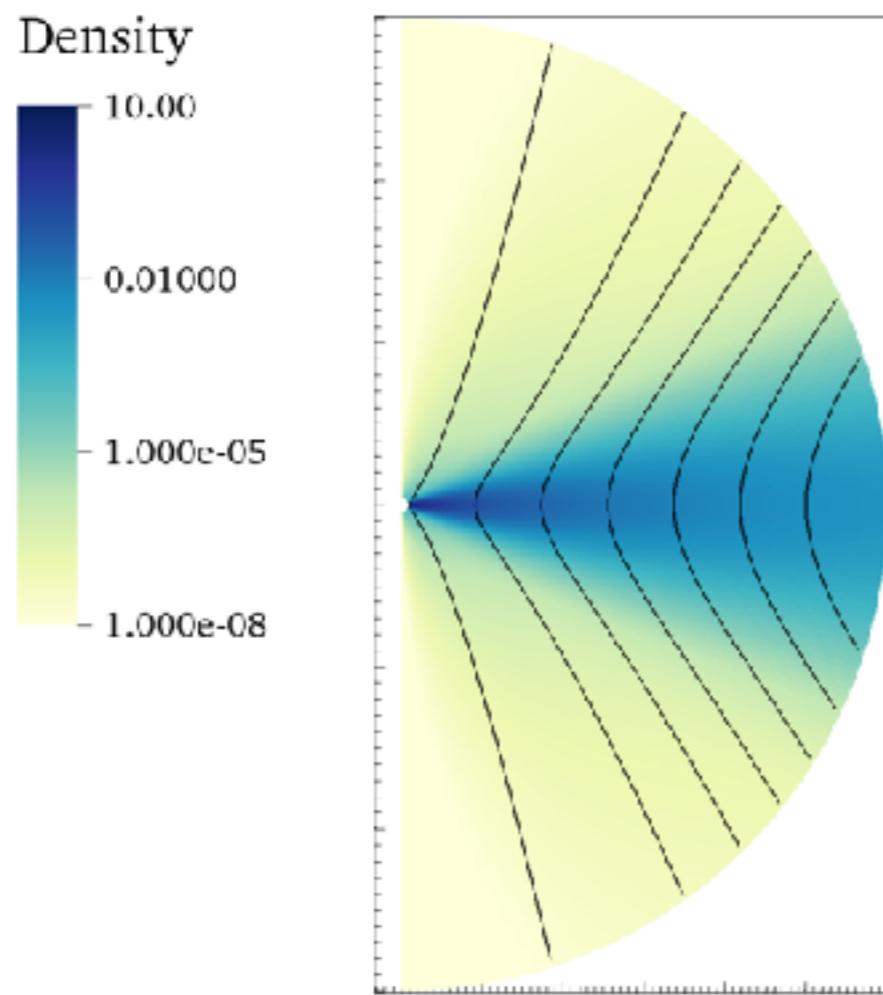
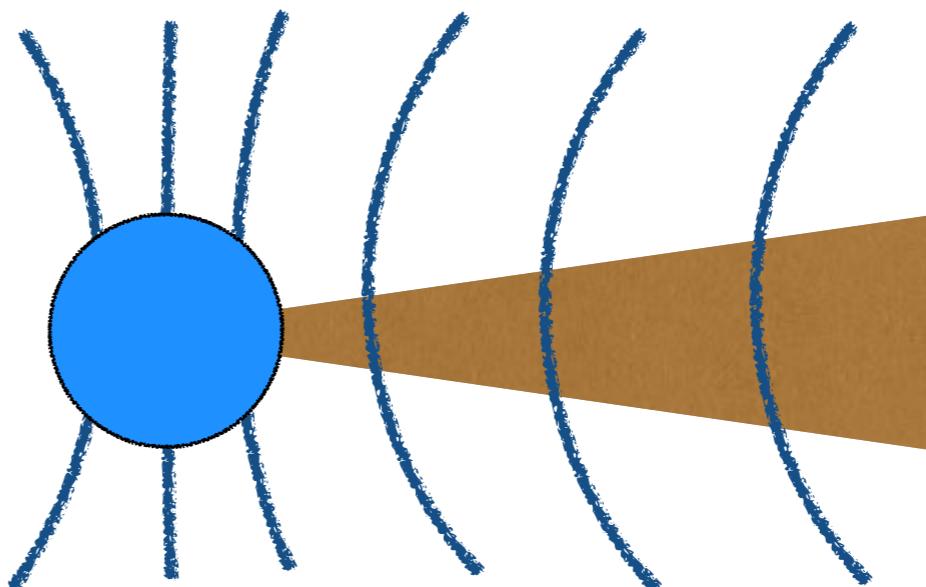
しかし高速な降着 ( $> 100\text{km/s}$ ) が  
観測されている (Cauley & Johns-Krull 14)  
(円盤を通じた降着なら  $\sim \text{数m/s}$ )



# 3D MHD Model

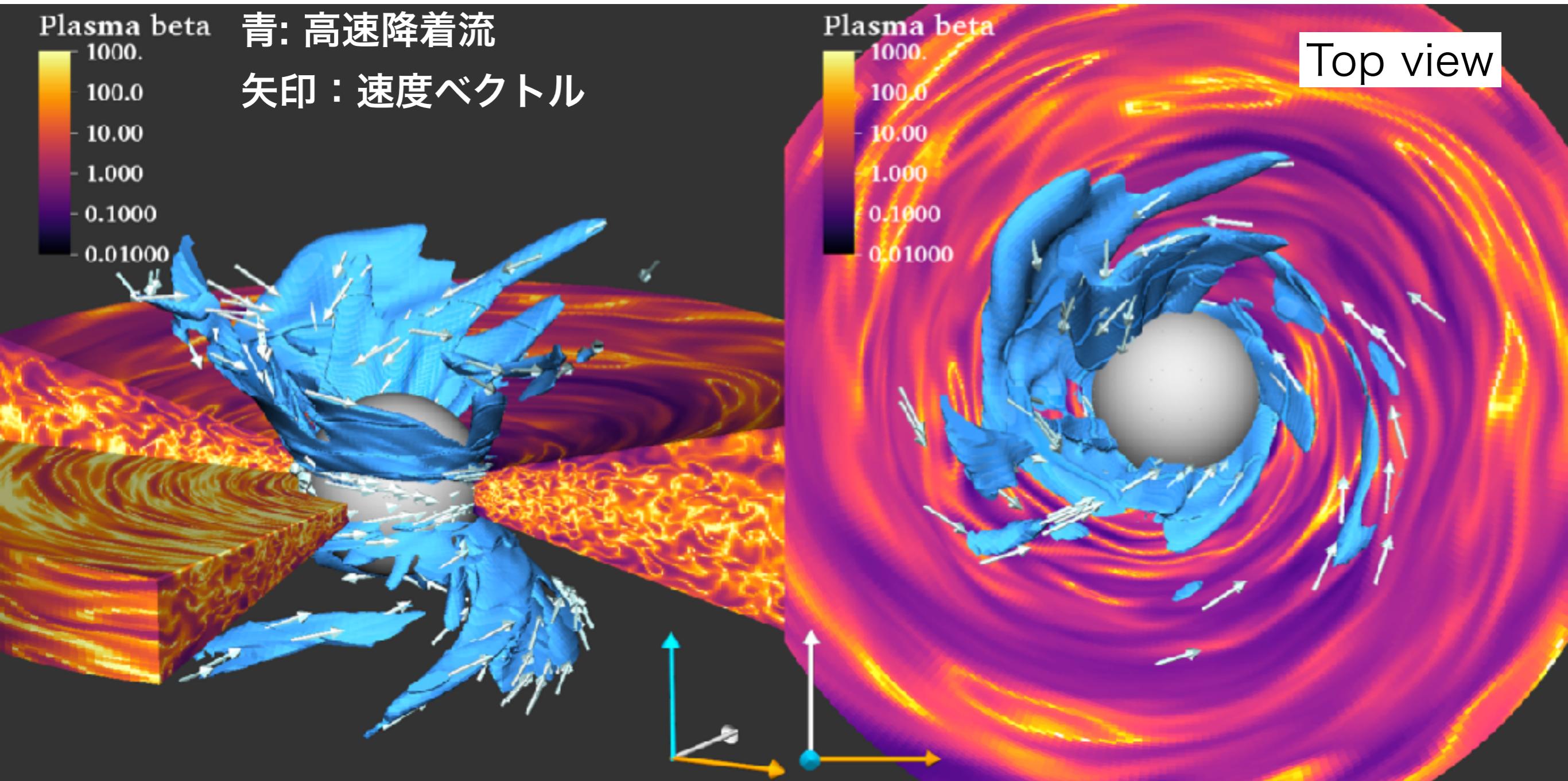
Takasao, Tomida, Iwasaki & Suzuki 18

磁気圏なしで  
星磁場が弱いモデルを仮定し、  
降着・磁場構造を再考



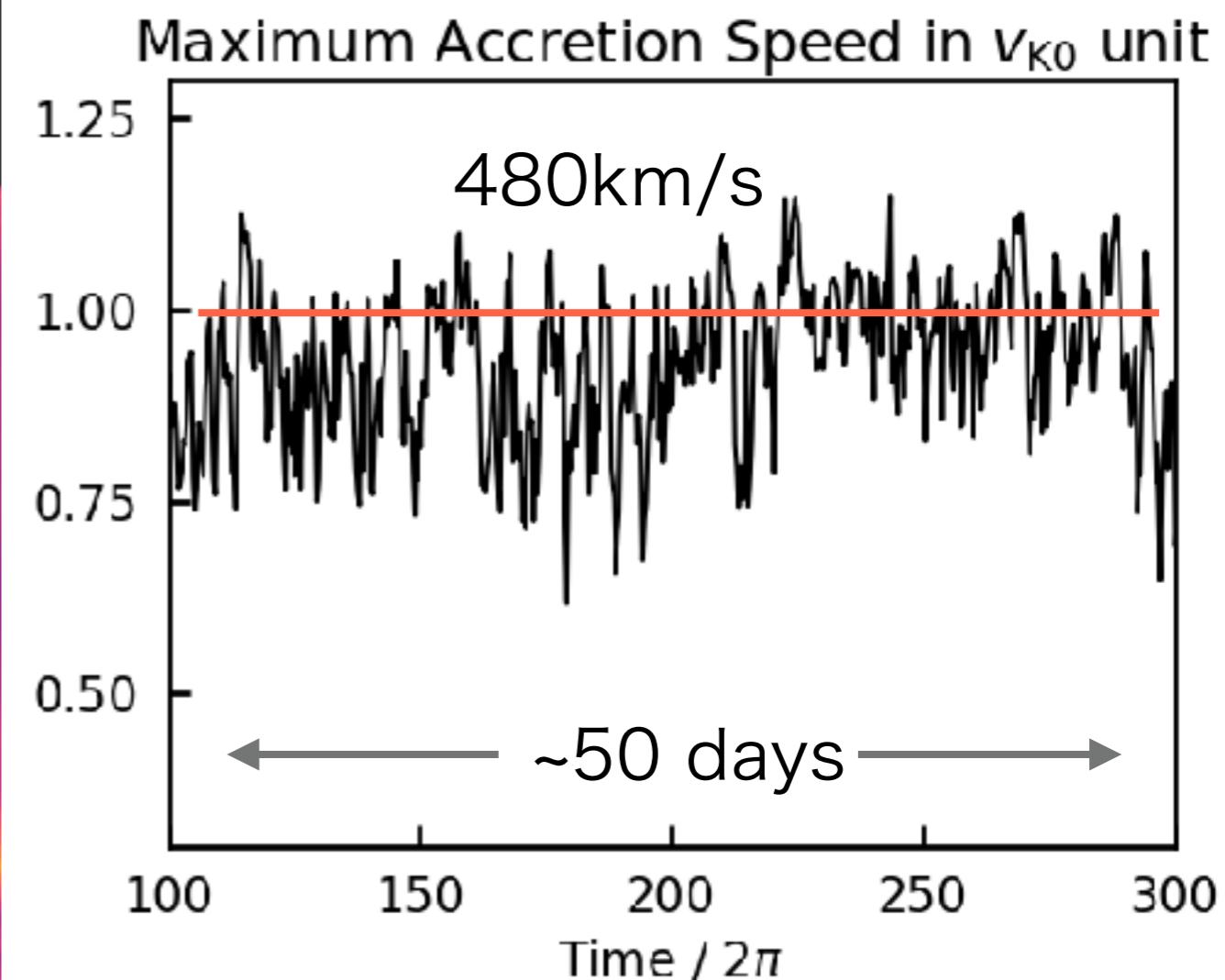
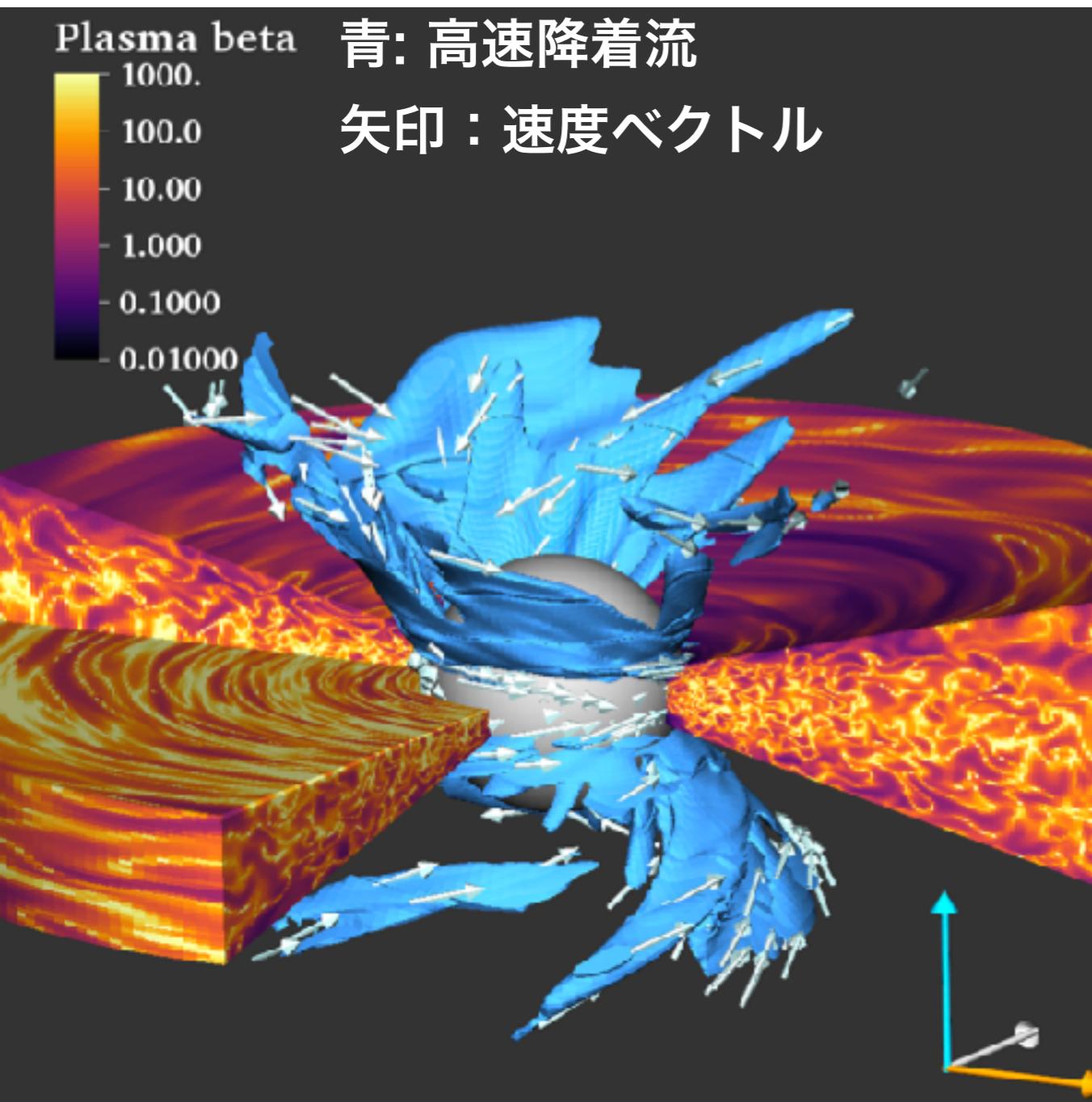
Domain size: 60 Rstar ~ 0.7 au  
Physical time span: ~300 rot ~ 0.2 yr  
for Herbig Ae

# 3D structure (< 0.1 au scale)



- 磁気圏がなくとも高緯度に高速降着流が形成
- 円盤赤道面からの降着と上空からの高速降着が共存  
(降着率は赤道面からの方が1桁弱大きい)

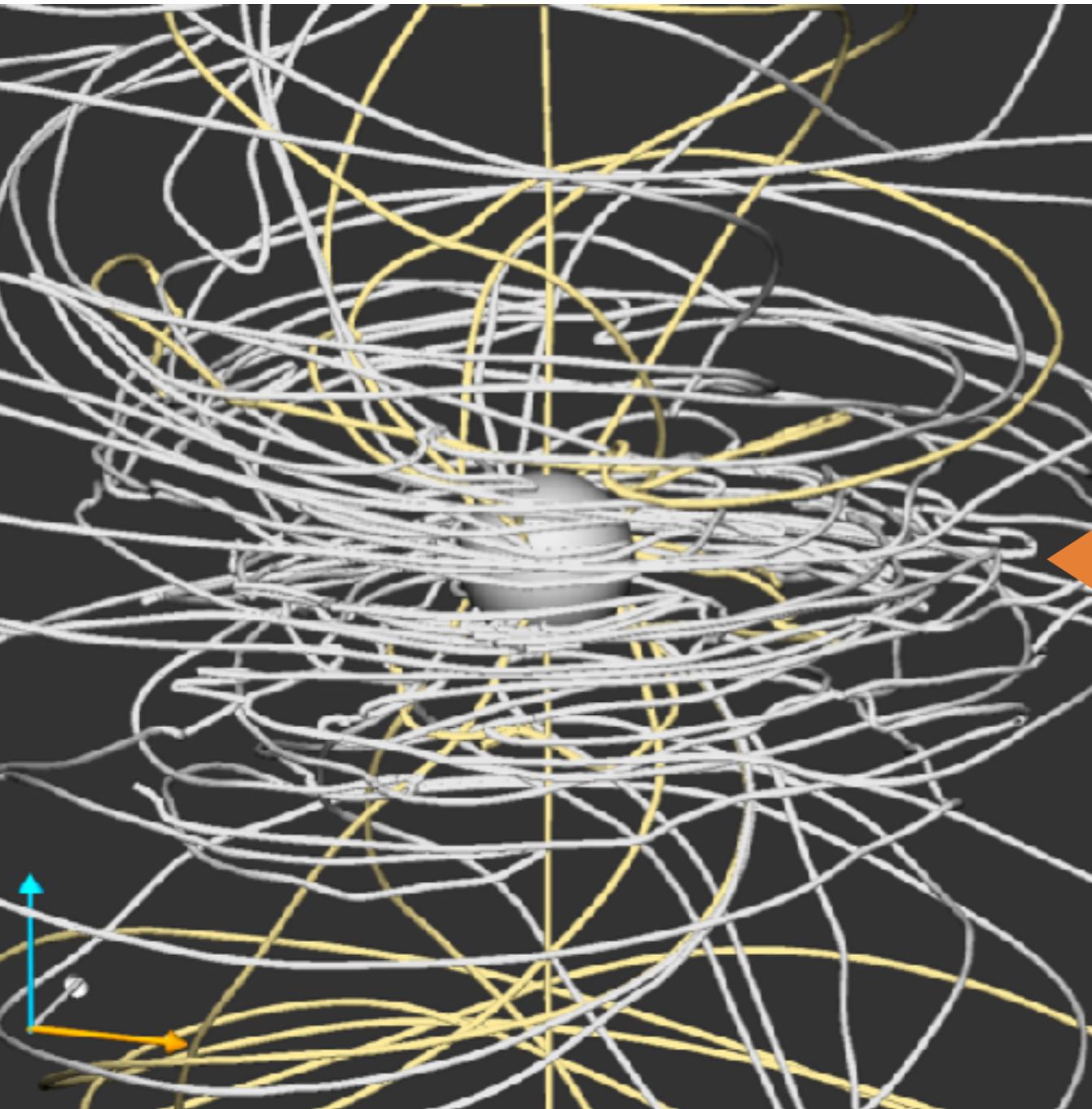
# 3D structure (< 0.1 au scale)



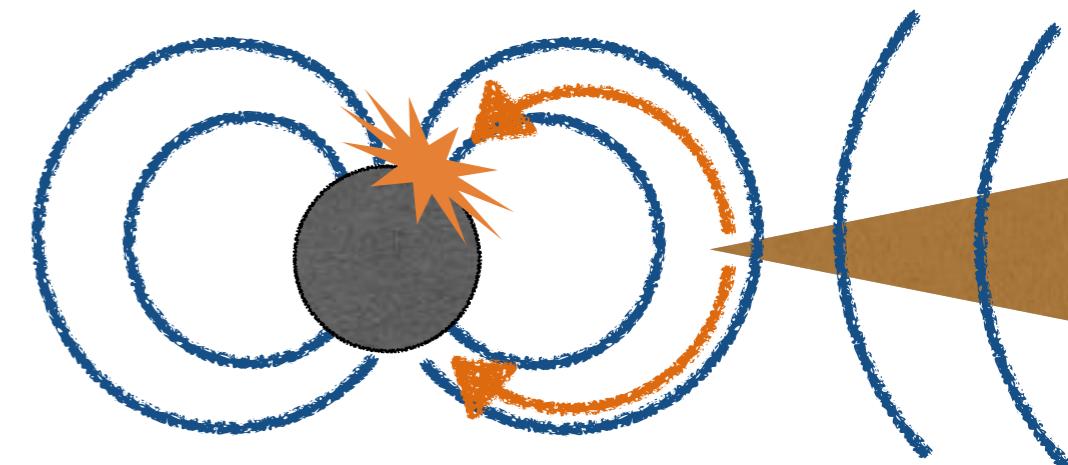
- 速度は観測と整合的
- 降着衝撃波を十分形成可能

高エネルギー粒子を作り得る降着衝撃波は  
磁気圏がなくともできる

# 3次元磁場構造

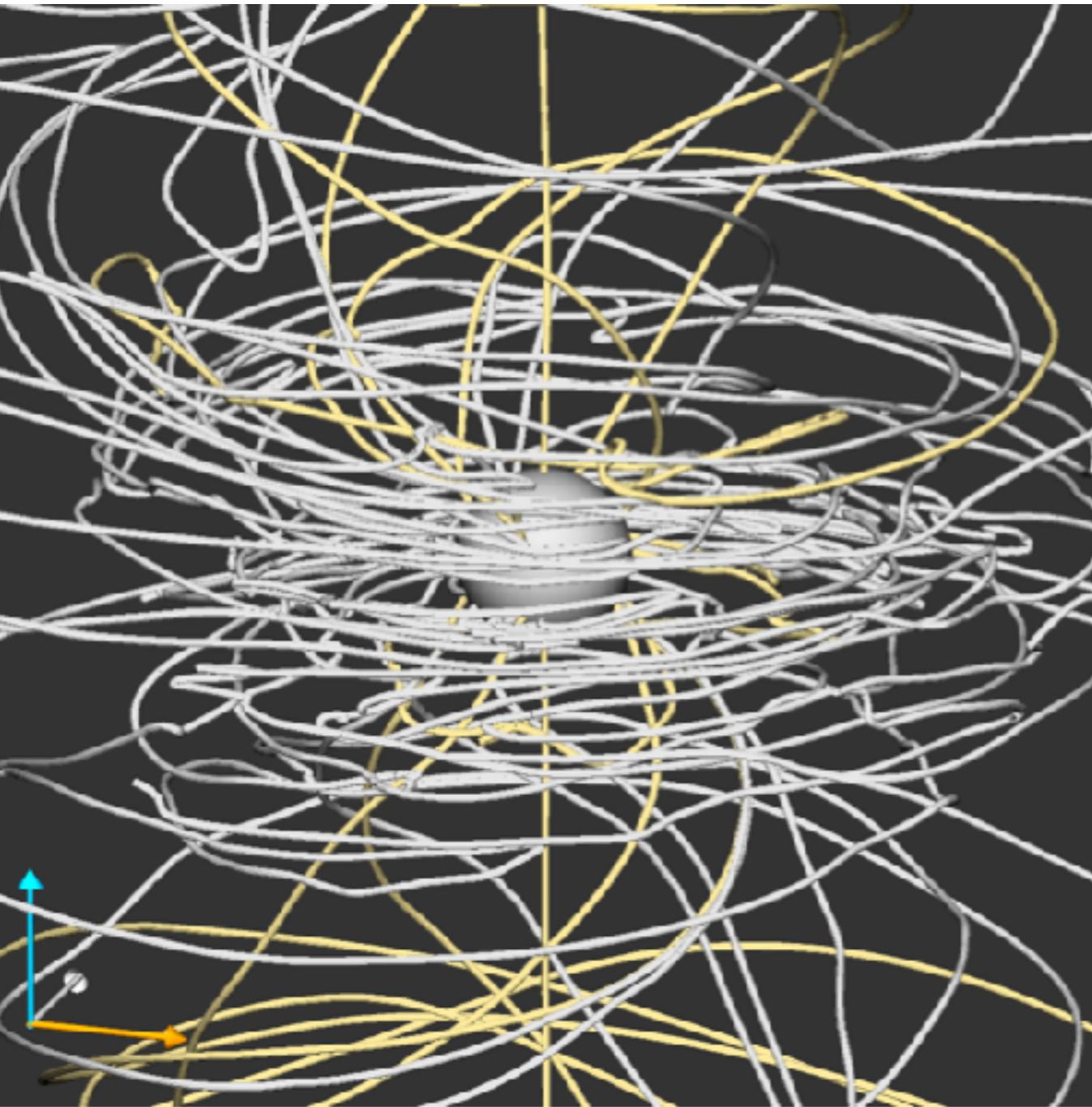


磁気圏降着モデル

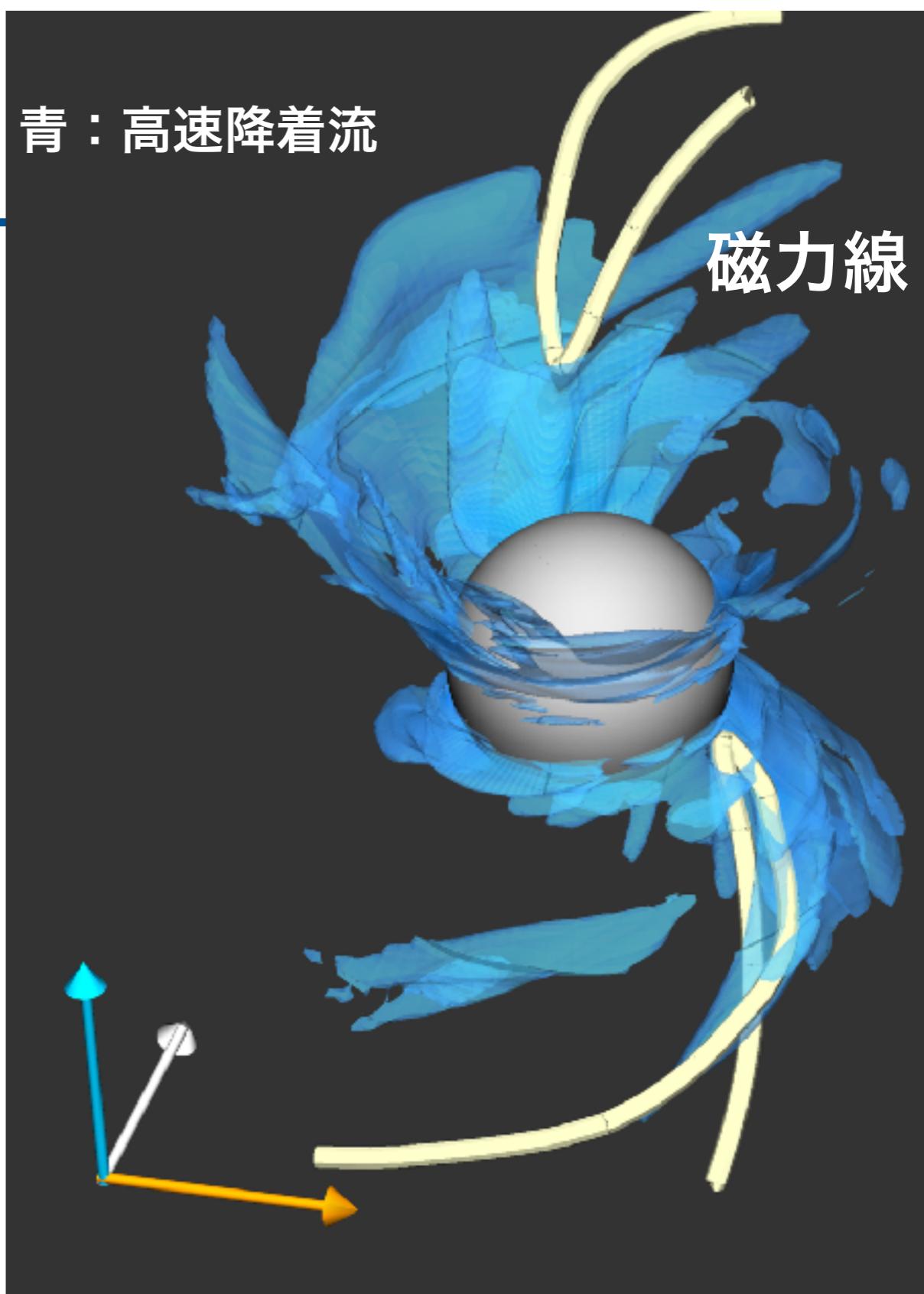


円盤の回転で強くねじられた構造  
降着流は磁力線にガイドされていない

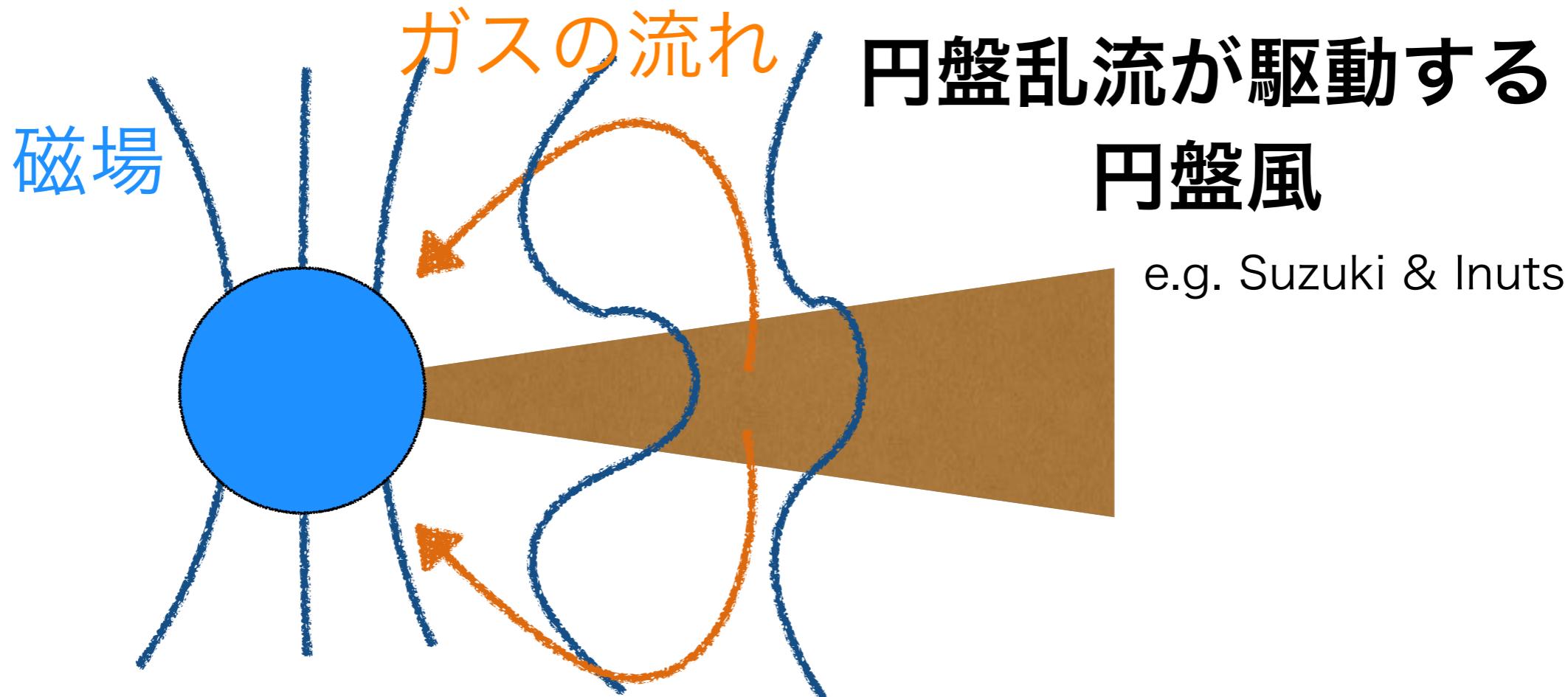
# 3次元磁場構造



円盤の回転で強くねじられた構造  
降着流は磁力線にガイドされていない  
(磁場を引きずりこみながら降着)



## 新たに見つかった上空の降着過程



ガスは円盤風として一度持ち上がるが  
上空で磁場に角運動量を抜かれて星に落下

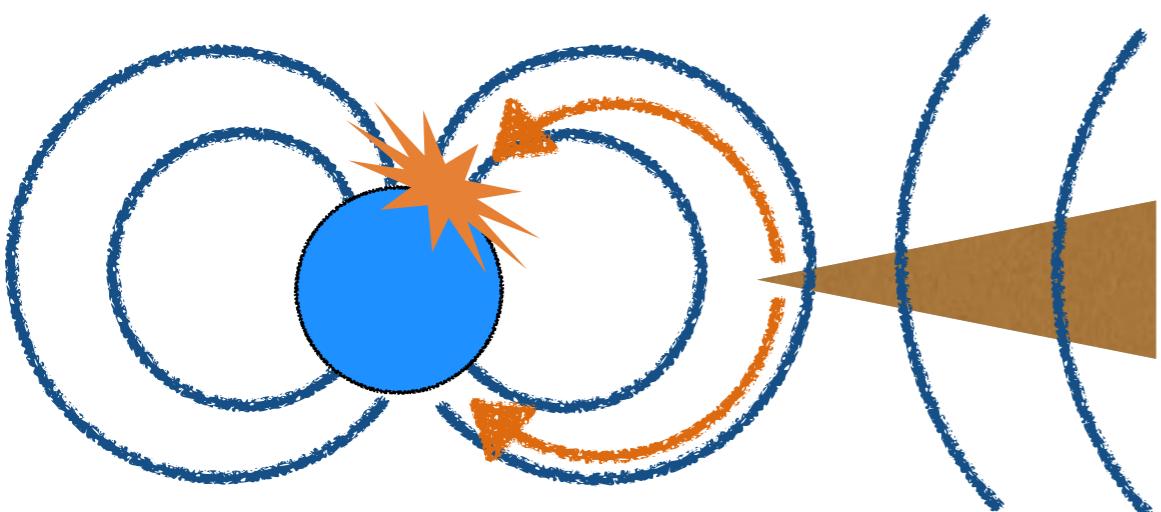
なぜ高速になるのか？

# なぜ星磁場がなくとも高速降着？

かなり簡単化した答え

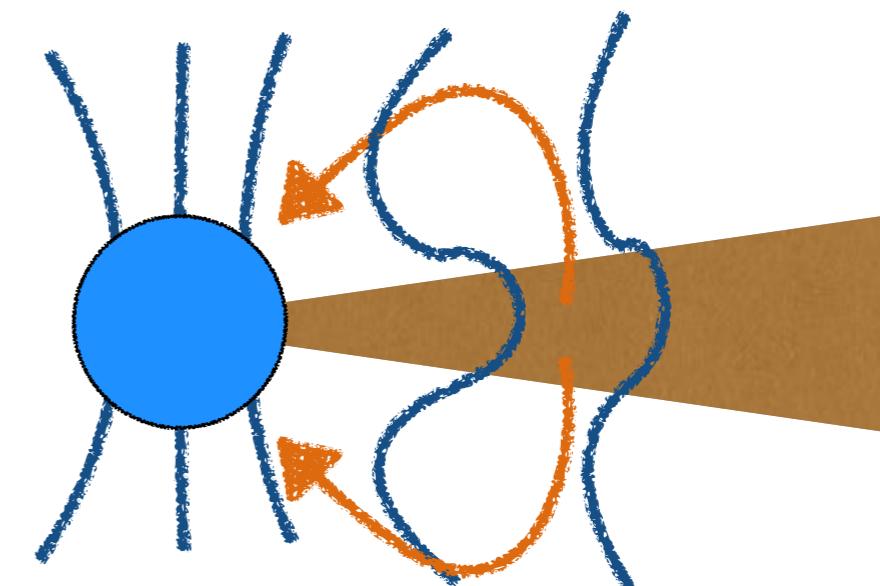
$$v_{\text{acc}} \approx \frac{B^2/8\pi}{\rho v_K^2/2} v_K \quad \text{密度依存性に注目}$$

磁気圏降着



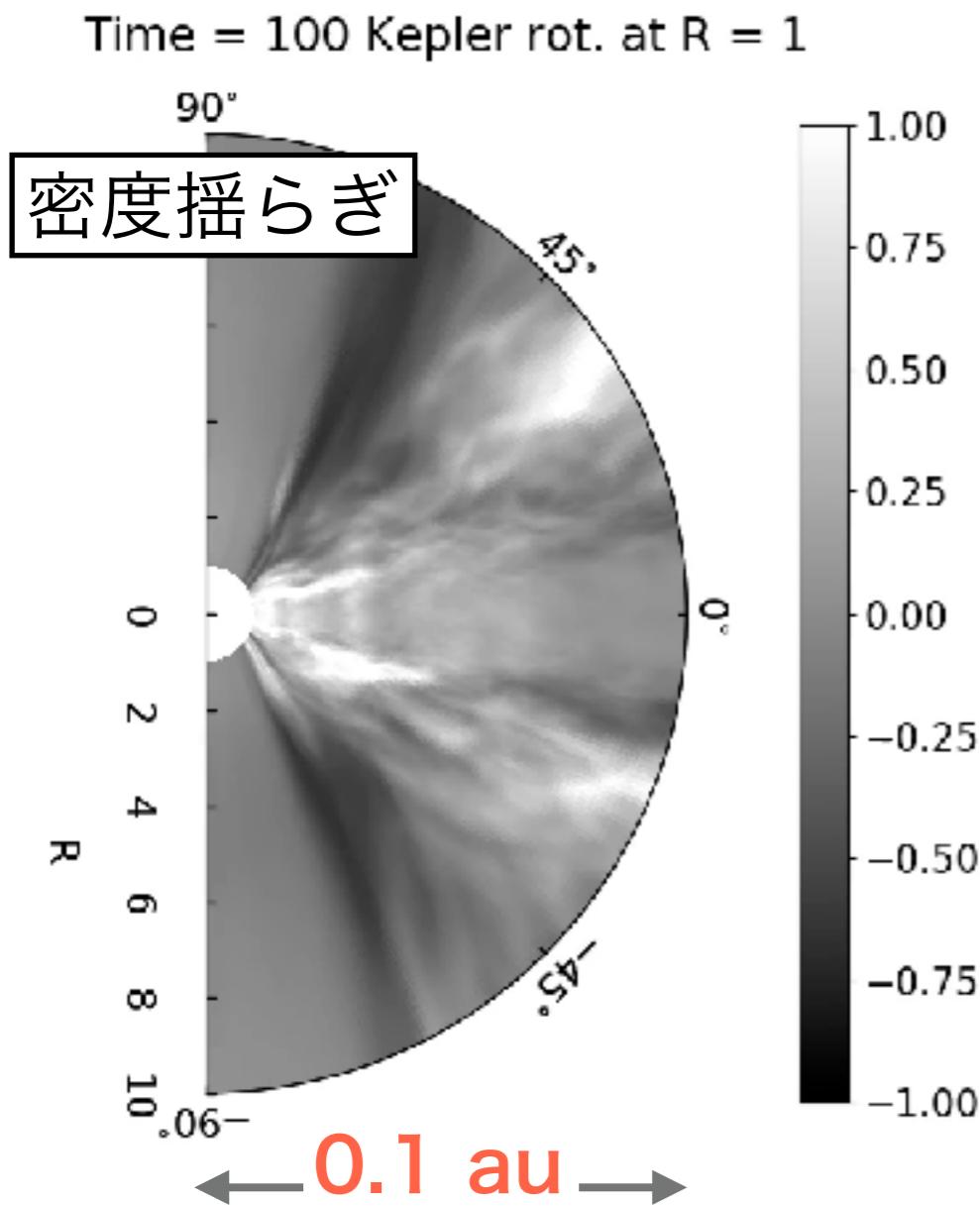
磁場は円盤赤道面の高密度ガスの  
回転運動を減速しなければいけない  
→ 強い磁場が必要

今回見つかった新しい降着



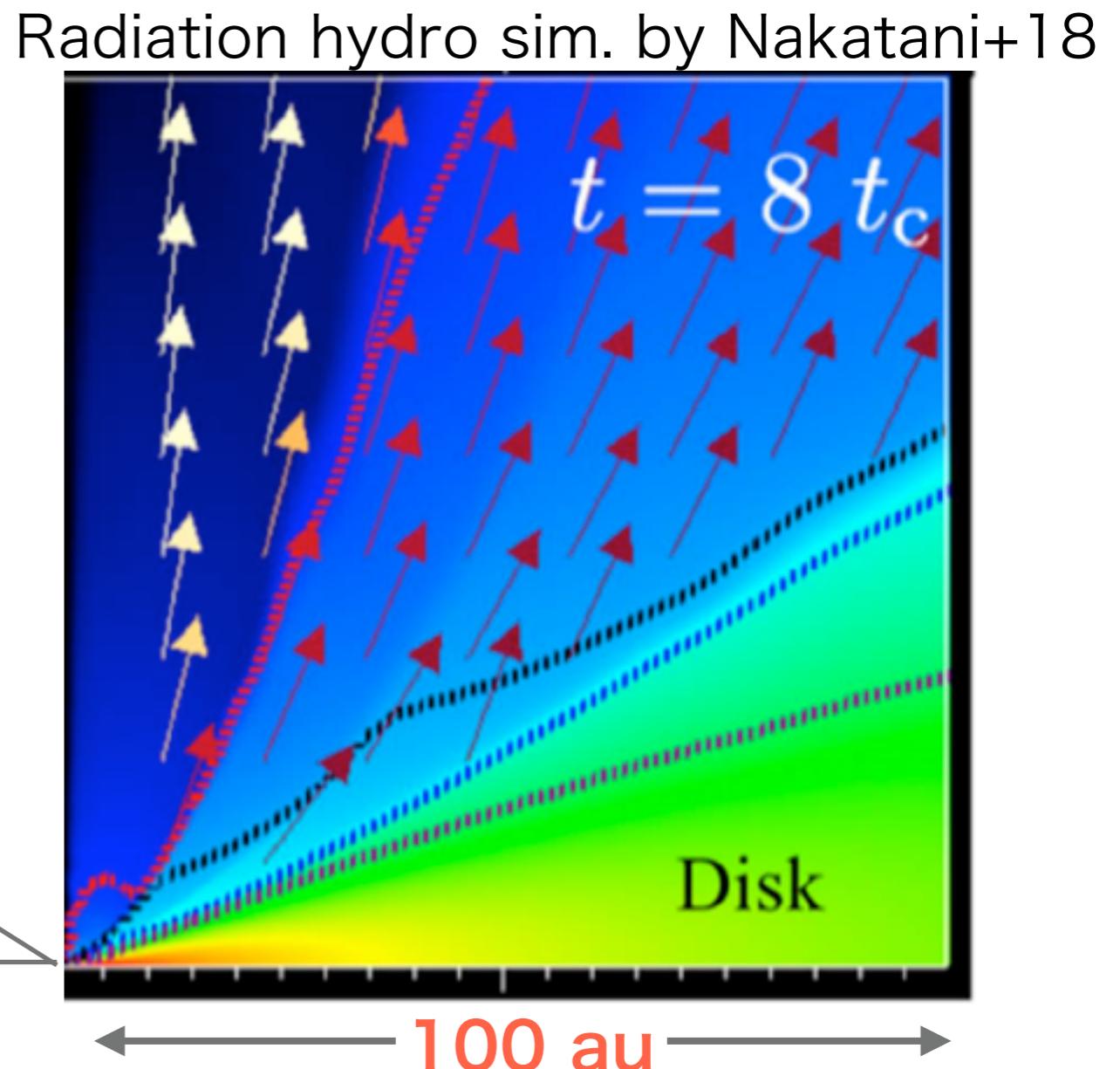
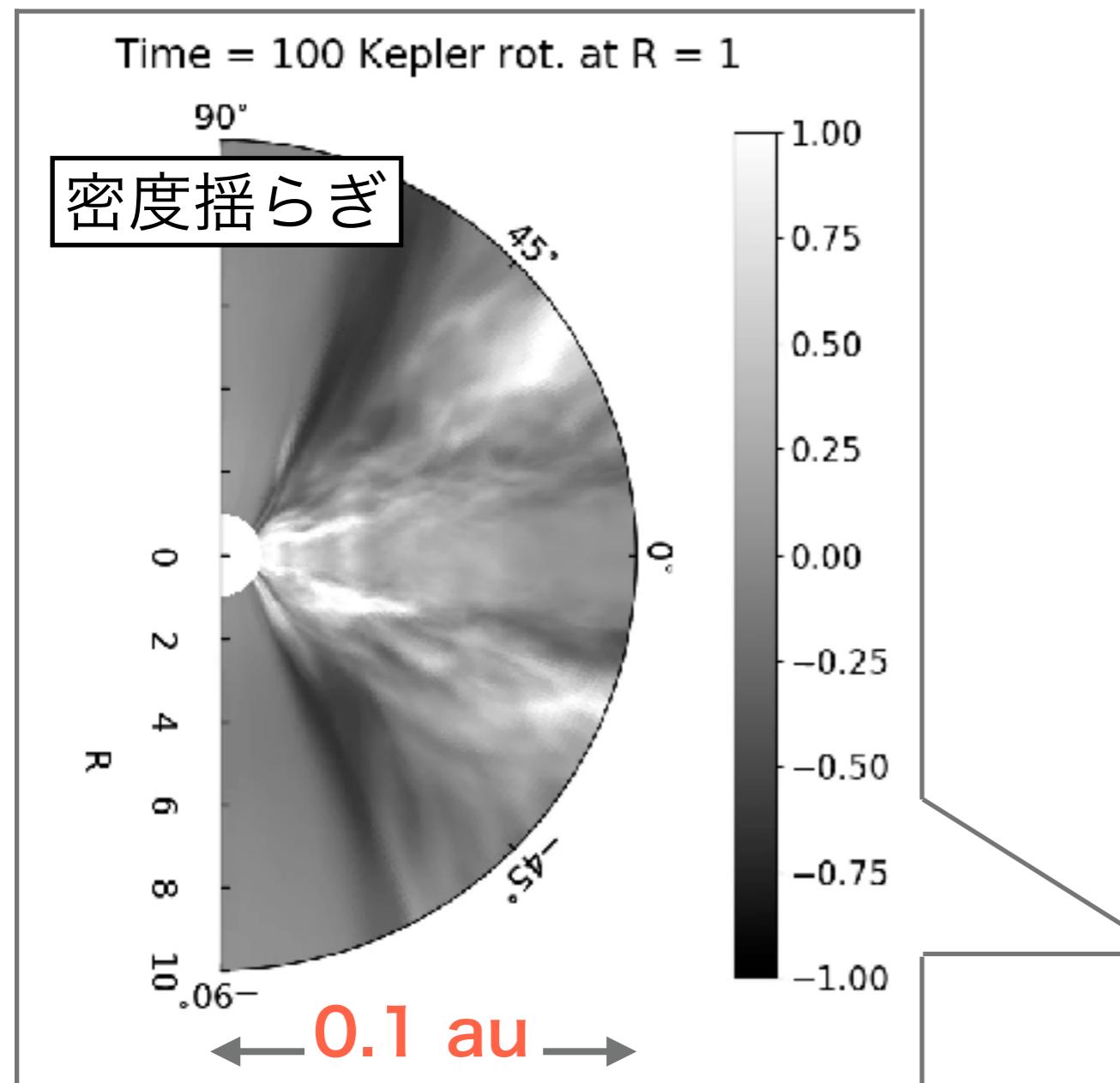
磁場は円盤風で運ばれた  
上空の低密度ガスを減速すればよい  
→ 強い磁場は必要ない

# 円盤風の他の役割：星の光を遮蔽



円盤風で巻き上げられたガスにより  
星の光が遮られてしまう

# 円盤風の他の役割：星の光を遮蔽



円盤風で巻き上げられたガスにより  
星の光が遮られてしまう

星からの UV, X-ray は円盤ガスを散逸  
させる役割 (光蒸発、photoevaporation)

両者のスケールをつなぐ研究が今後重要

# まとめ

---

- ▶ 太陽・恒星・原始星の磁気活動の基本物理について概観
- ▶ 太陽・恒星・原始星フレアを統一的に説明できる理論が提案されているが、まだまだ発展の余地があるかもしれない
  - ▶ 基礎方程式の拡張（1 温度近似 → 2 温度系）
  - ▶ システムごとの磁場構造の違い
- ▶ 原始星・前主系列星、円盤内縁が円盤へ与える影響
  - ▶ フレア、ジェット、降着衝撃波、円盤風
  - ▶ シミュレーション・観測の発展で  
まだまだ過去の描像が変わるかもしれない