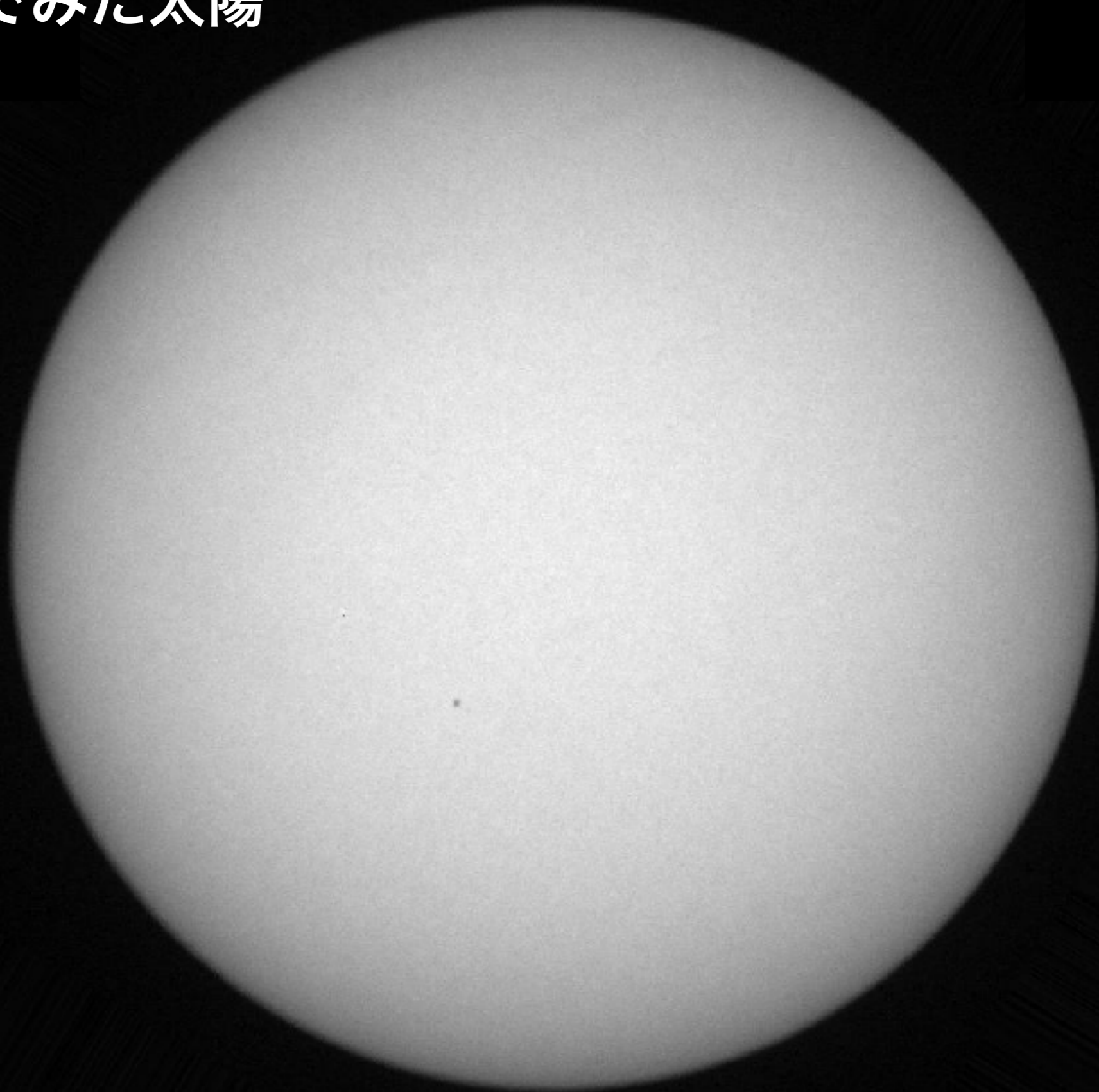


太陽・恒星・星形成領域で見られる 激しい爆発・ジェット現象の 起源について

たかさお しんすけ
名古屋大学 学振PD 高棹 真介

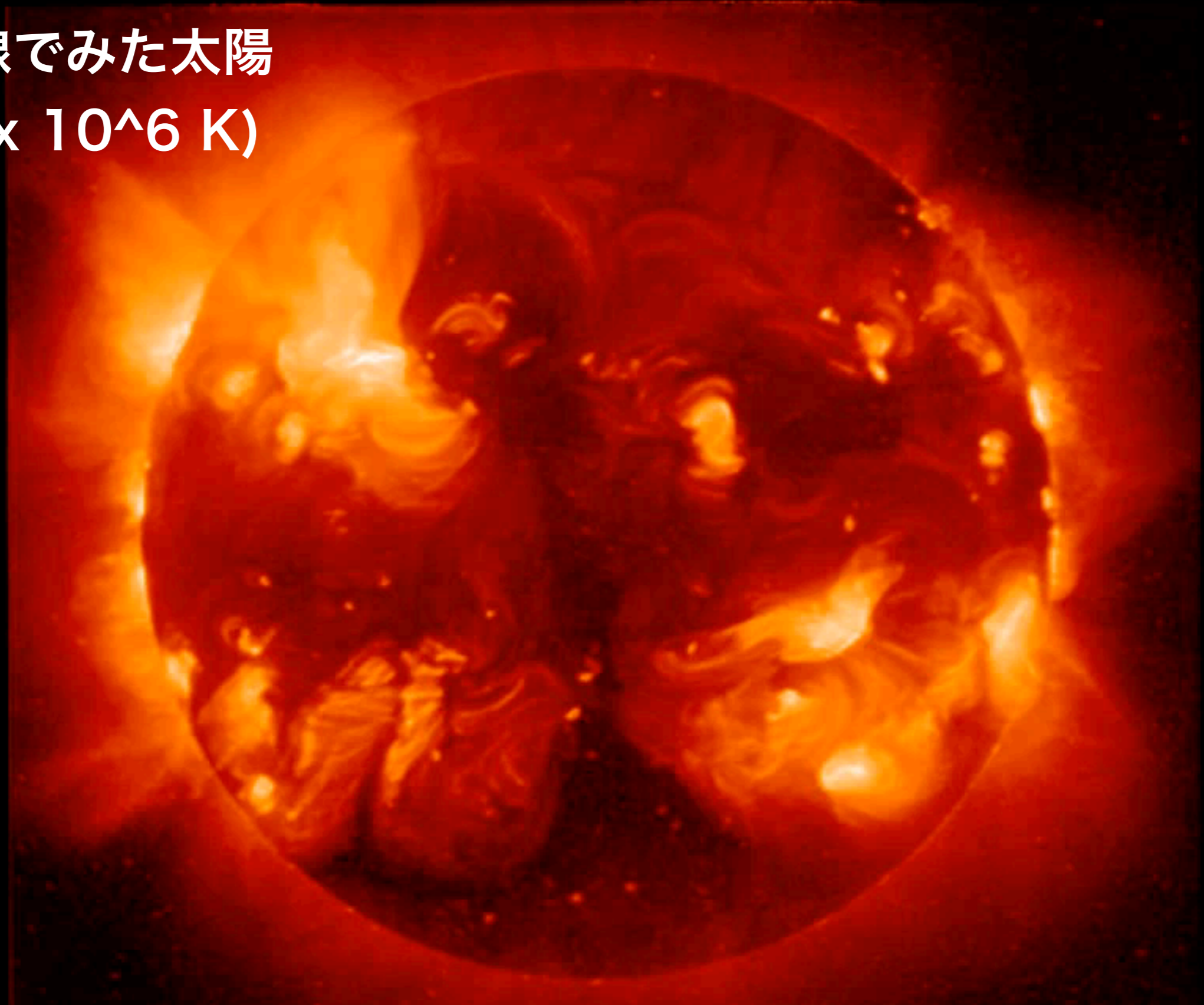
白色光でみた太陽



Big Bear Solar Observatory
2006 09 21 20:54:36 UT

2000/06/05

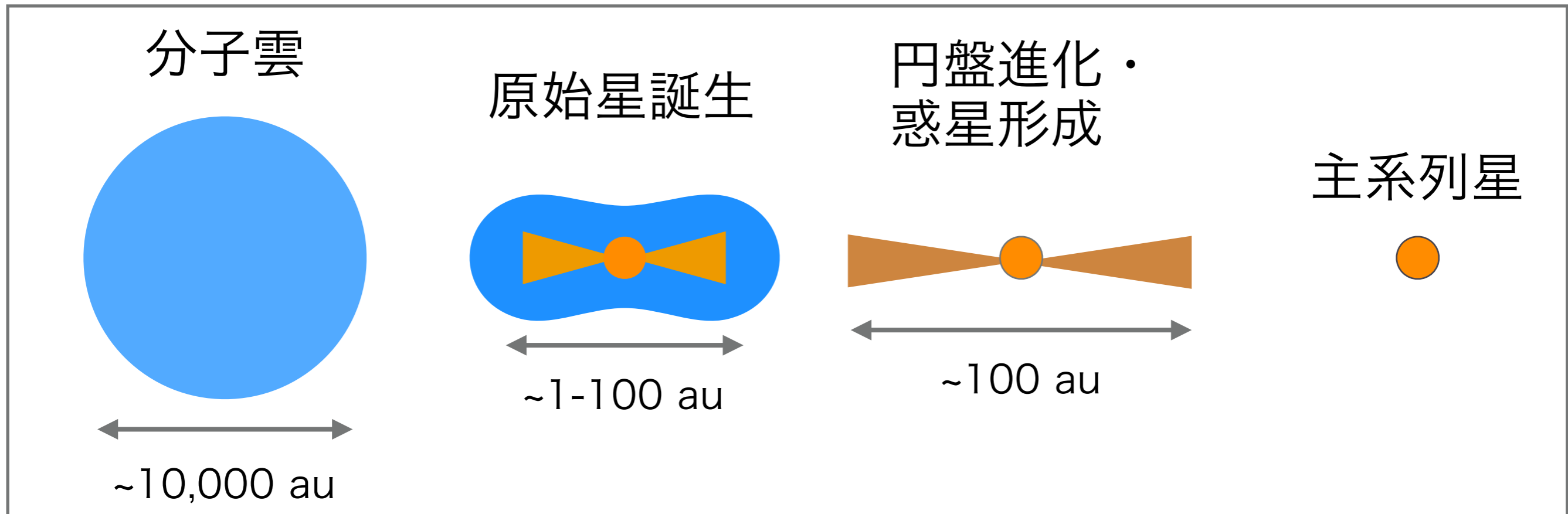
軟X線でみた太陽
($> 2 \times 10^6$ K)



Yohkoh / SXT
Kyoto 4D

私の研究動機

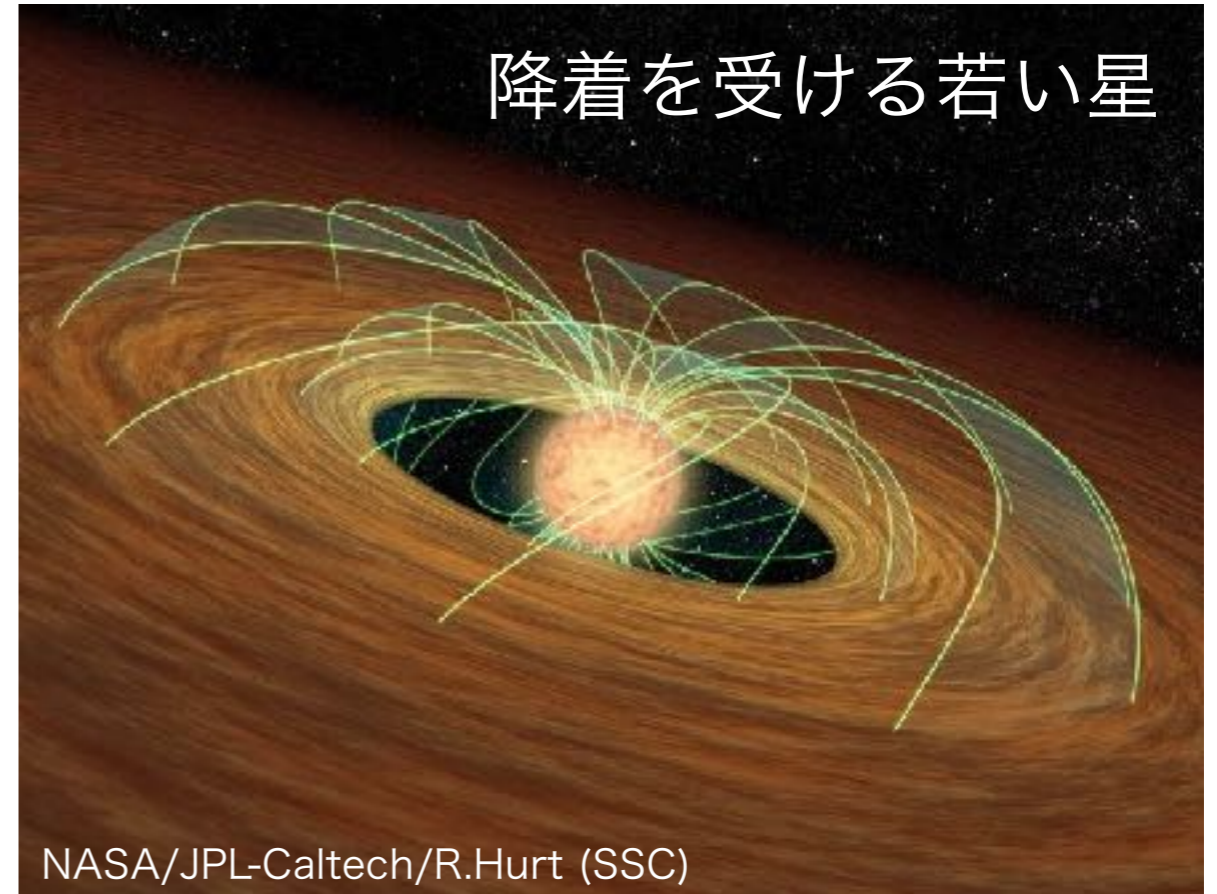
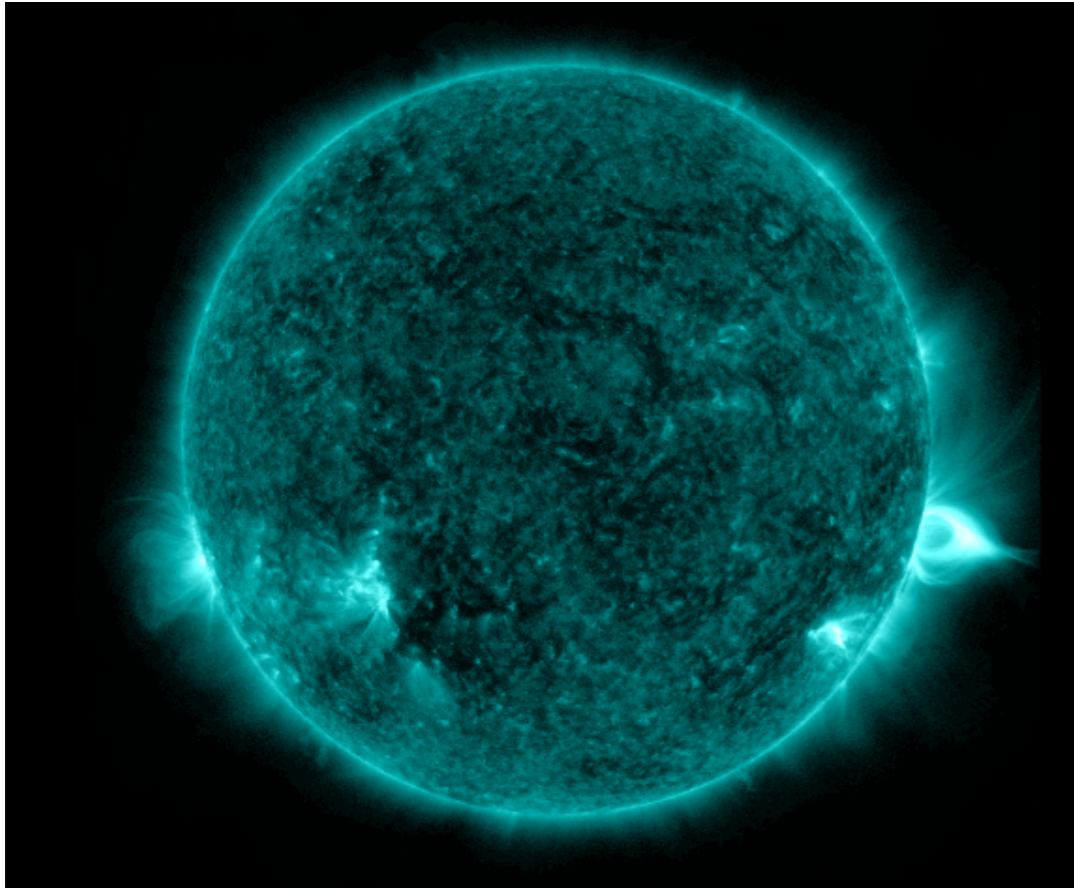
星・惑星の誕生過程が知りたい



星の磁気活動性はシステムに大きな影響を与える
しかし原始星は遠い上にガスに埋もれていて観測が難しい・・・。

なら**太陽の理解から始めよう！**（私の場合）

本講演の目標

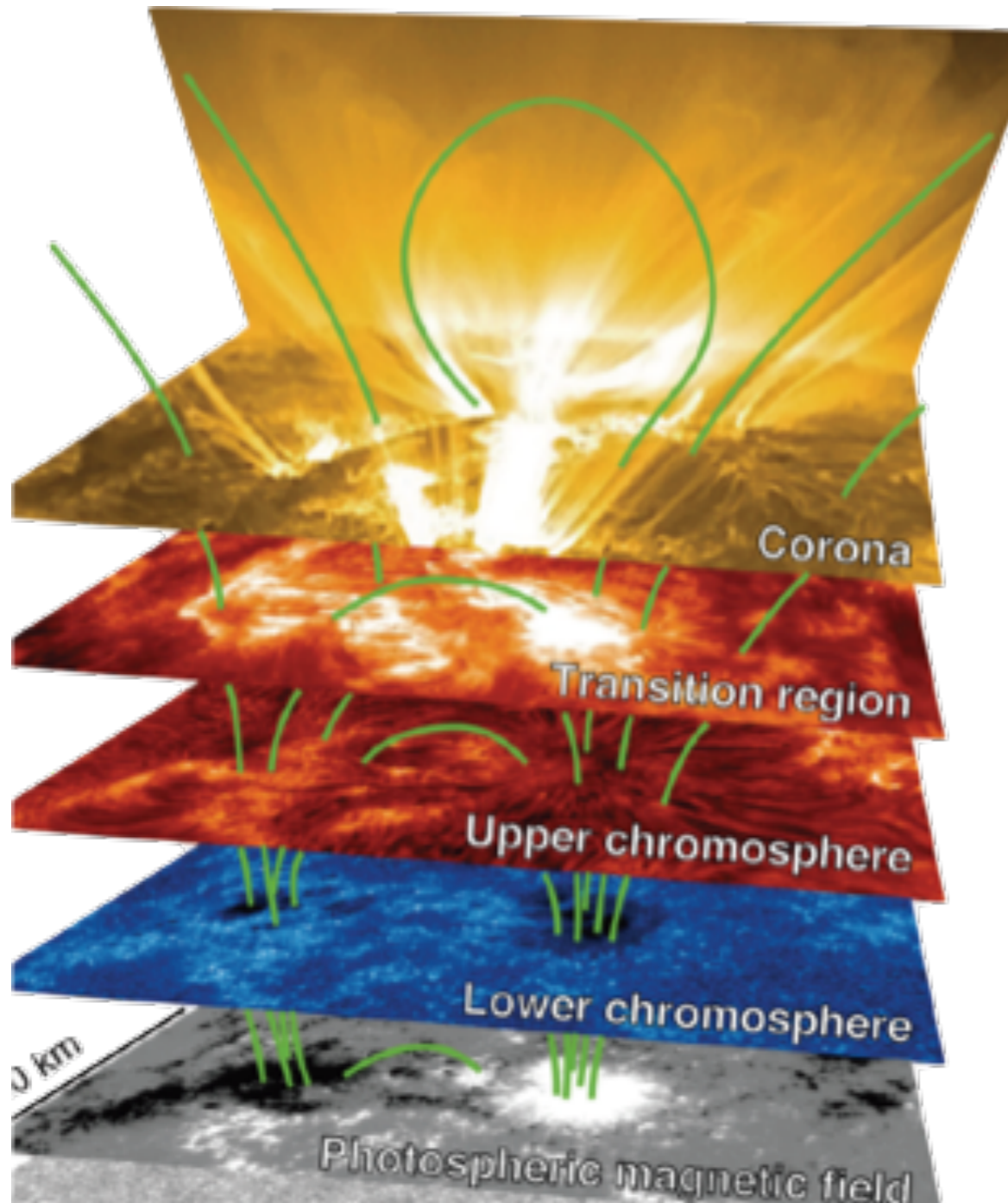


- ▶ 太陽表面上の爆発・ジェットの基本物理を概観
- ▶ 太陽物理と他の恒星・星形成領域のつながりを議論

アウトライン

- ▶ 太陽・恒星・原始星の爆発現象の概観
- ▶ 爆発・ジェットの基本知識・基本物理
- ▶ 太陽物理から挑戦できる宇宙物理の問題

太陽の大気構造



NAOJ/JAXA

太陽は幅広いプラズマパラメータの現象の宝庫

コロナ

$$T \sim 10^6 \text{ K}$$

$$n \approx 10^{8-9} \text{ cc}^{-1}$$

遷移層

彩層

光球

~ 2,000 km

温度：2桁

密度：8桁以上!!

(光球~彩層上部では6桁)

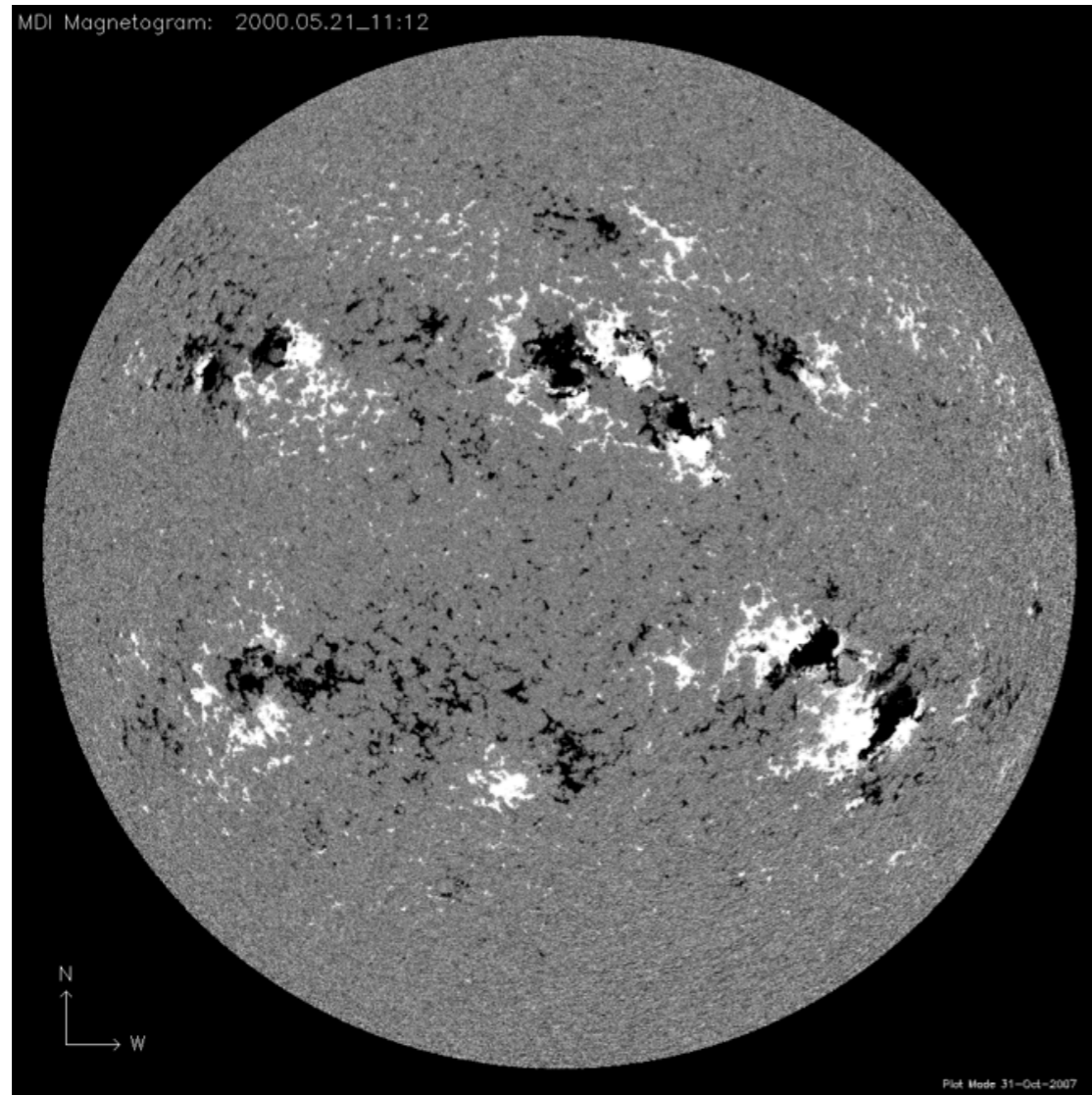
$$T \approx 5600 \text{ K}$$

$$n \approx 10^{17} \text{ cc}^{-1}$$

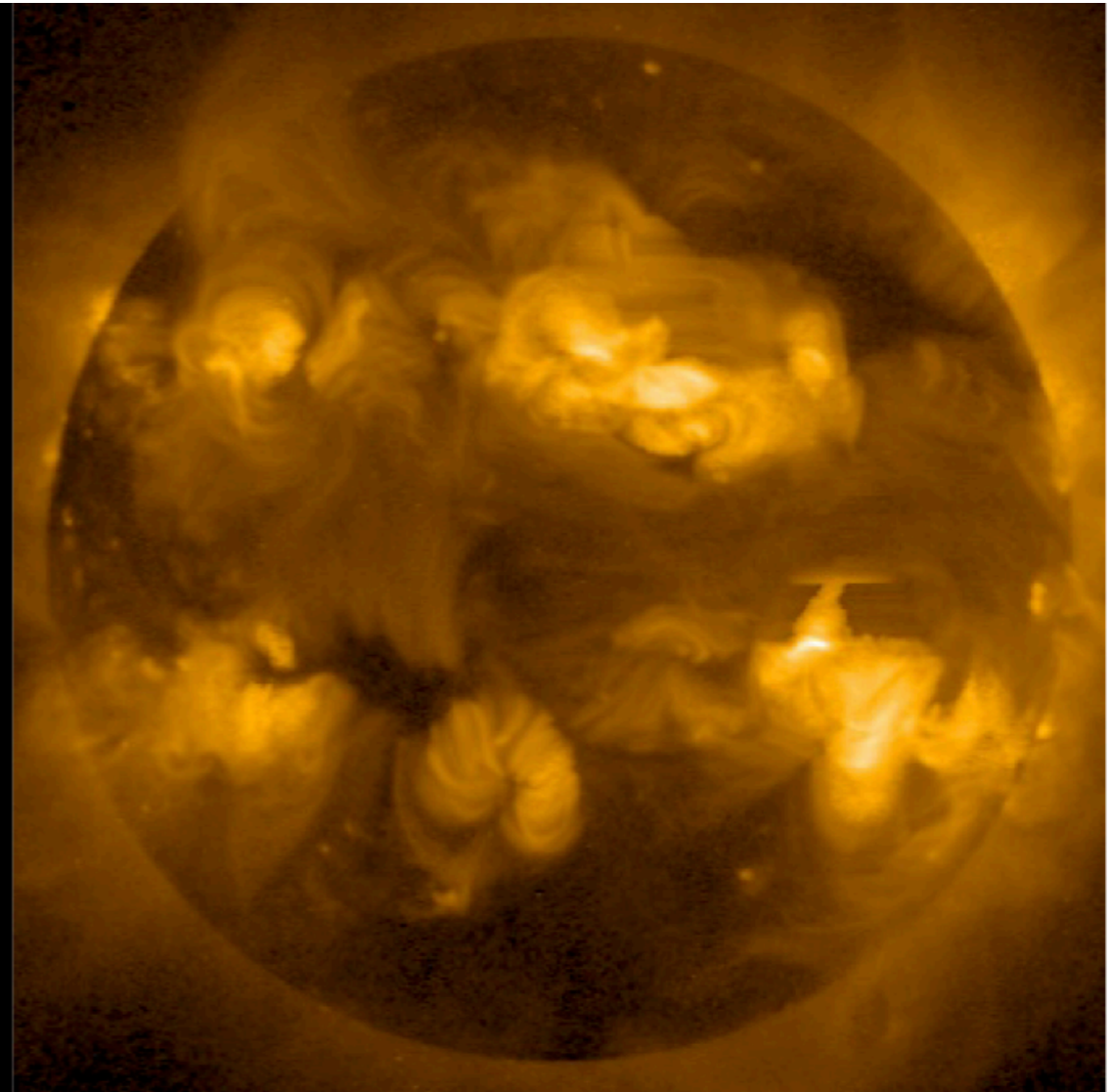
磁場と太陽大気構造の関係

Stokes V (~視線方向磁場)

軟 X 線 ($> 10^6$ K)



SOHO/MDI



Hinode/XRT

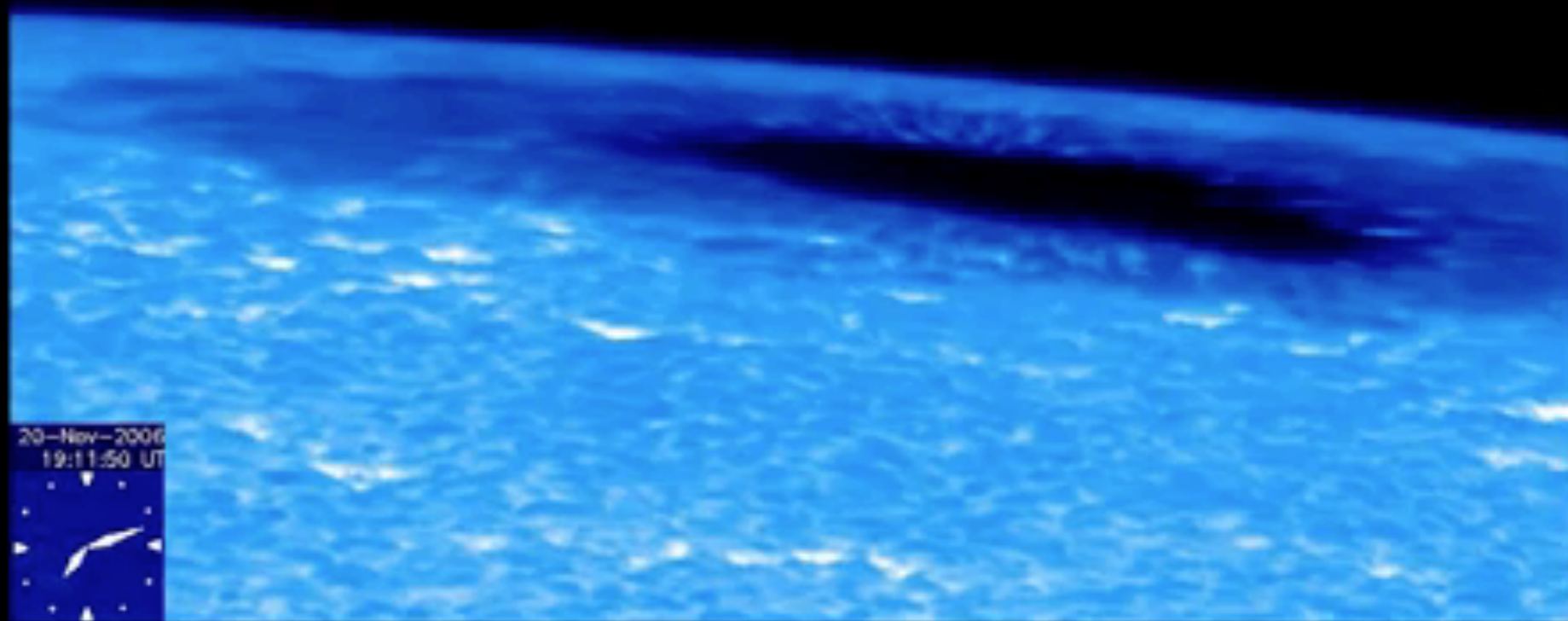
磁場が上空大気的重要なエネルギー源

ダイナミックな彩層

Hinode/SOT
NAOJ/JAXA

青 : G-band (光球)

オレンジ : Ca II H (彩層)



彩層は静かな”層”ではなくジェット of 集合体

Hinode/SOT
NAOJ/JAXA

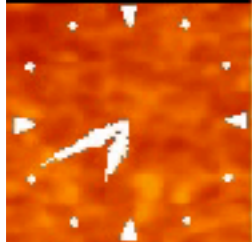
Ca II H 線の画像 (~1万Kのプラズマ)

コロナ

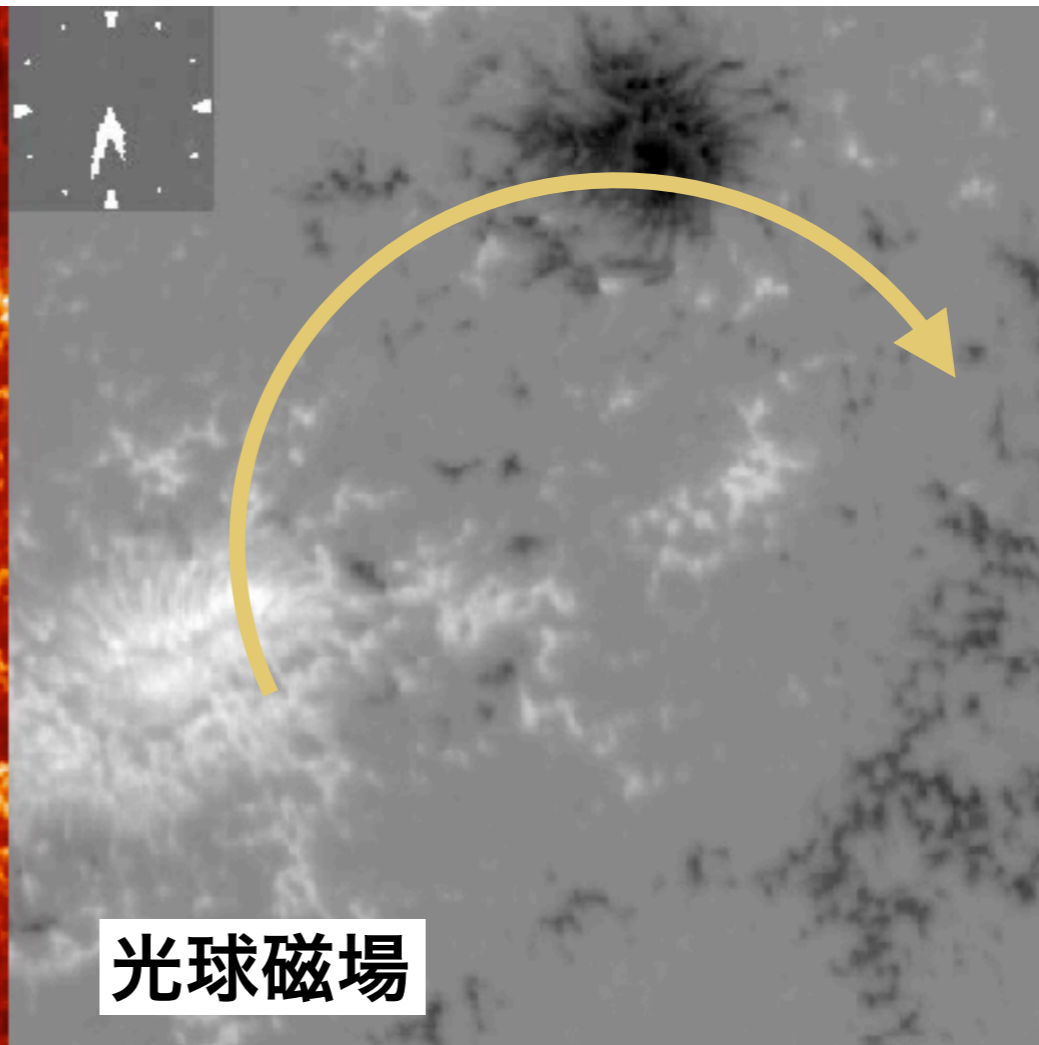
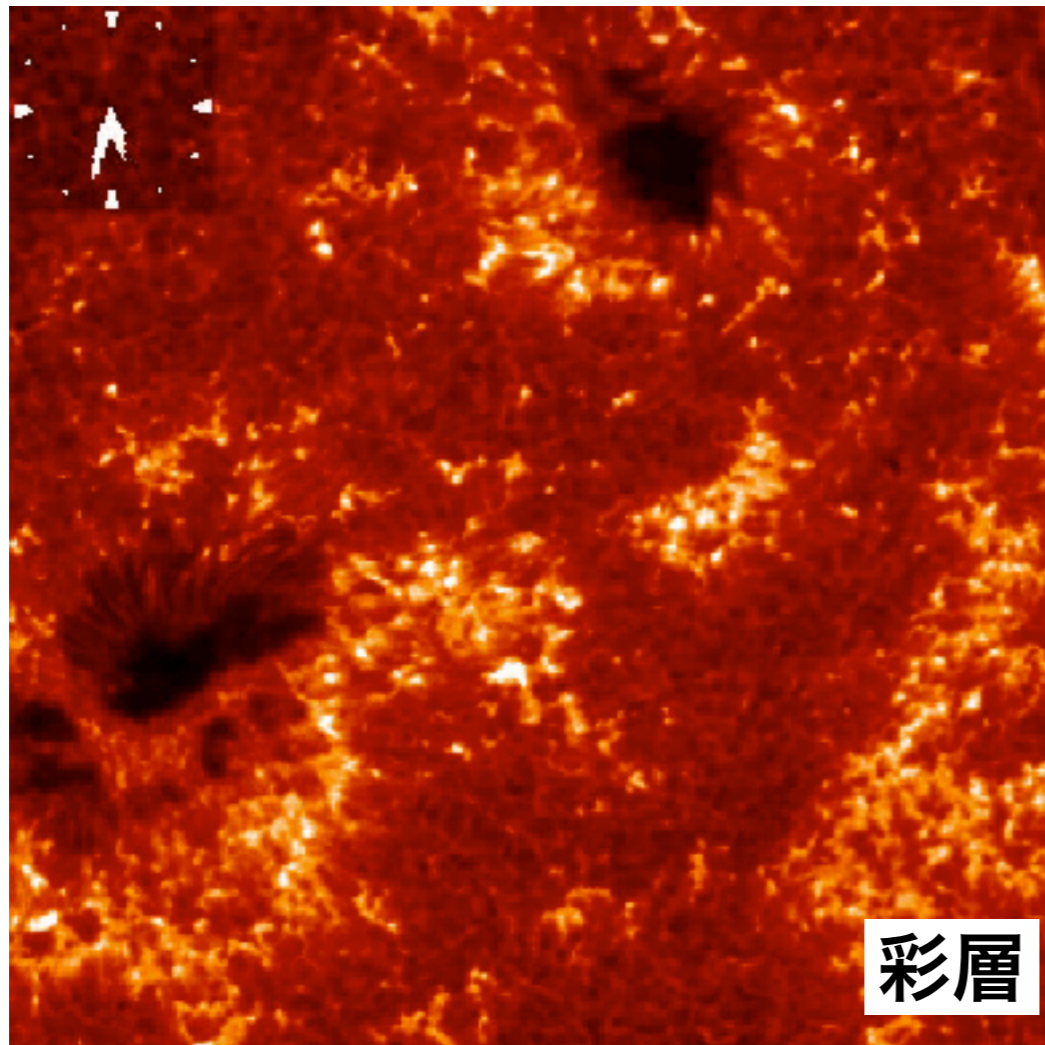
この部分が
いわゆる彩層

彩層はスピキュールと呼ばれるジェット of 集合体。
だから太陽大気を理解するにはジェットについても
知らなければいけない。

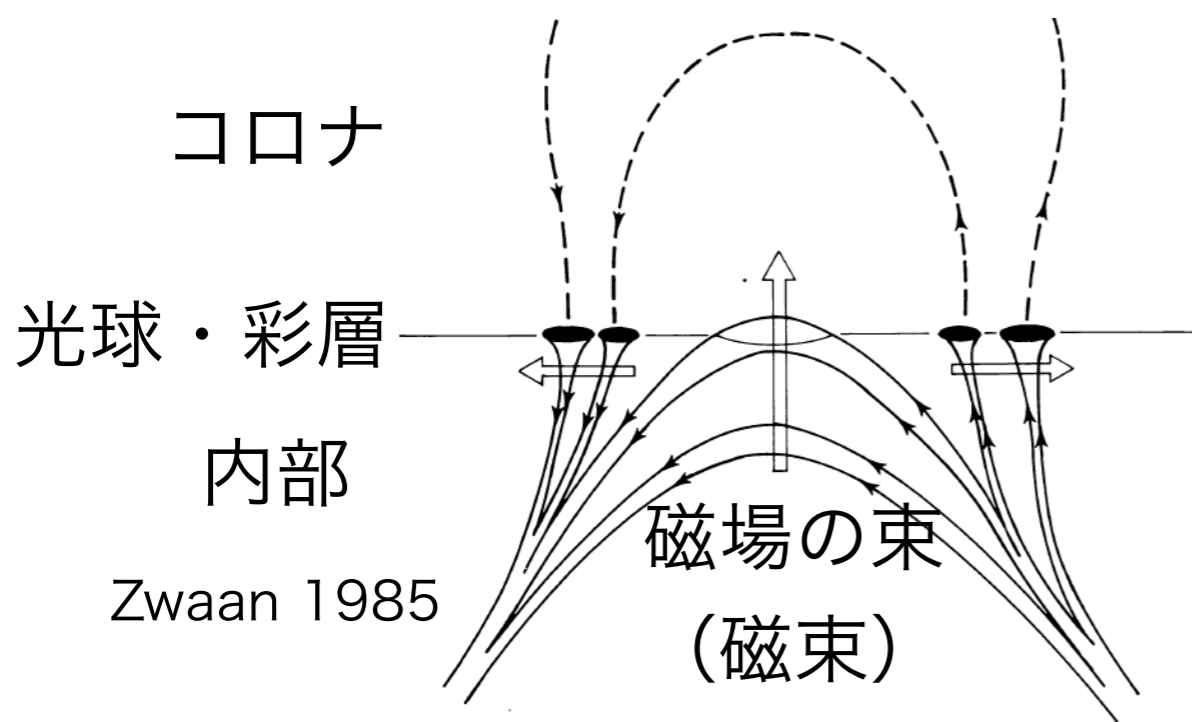
8 Apr 2007
18:40:34 J



黒点、活動領域



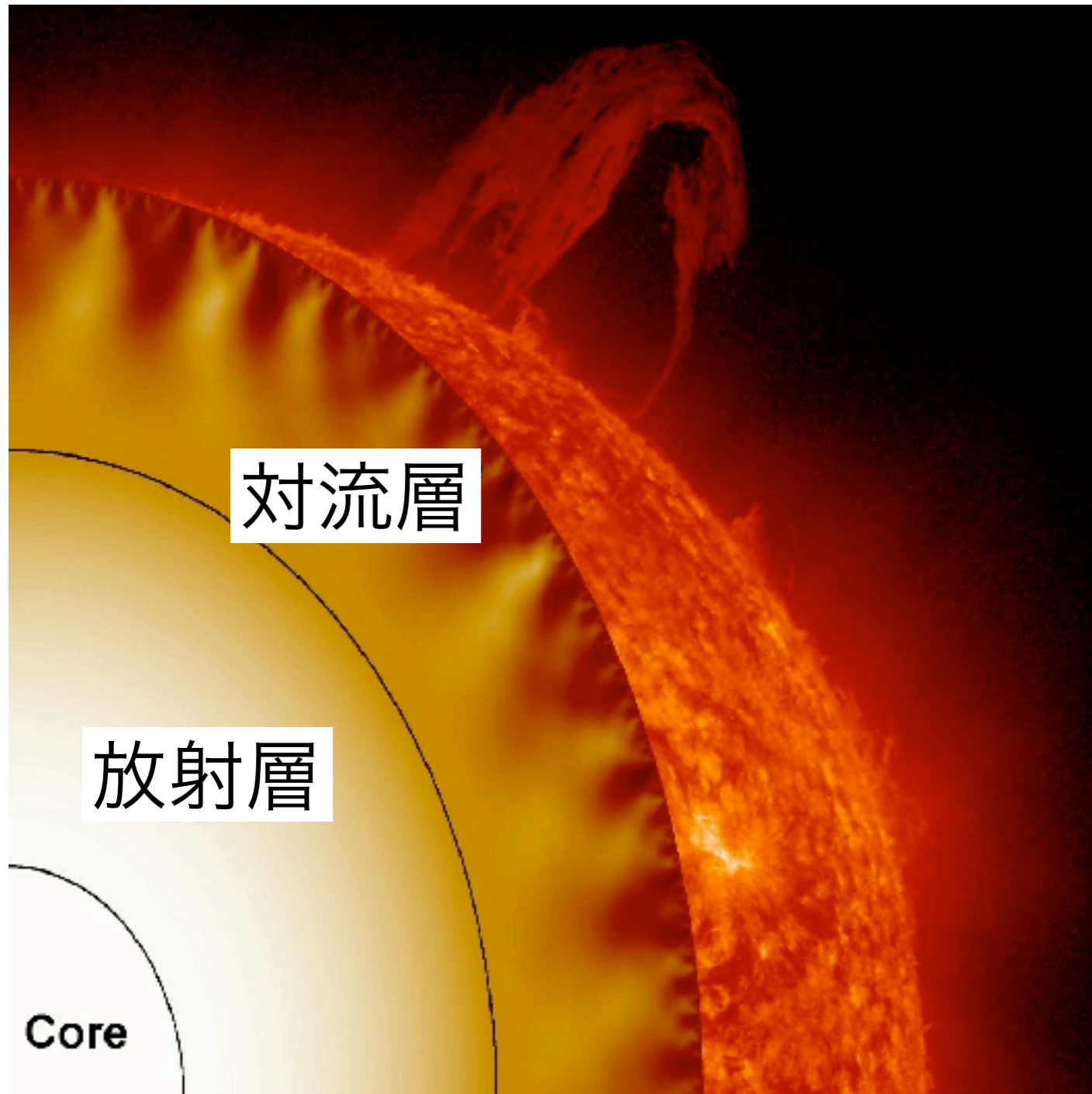
courtesy: T. Shimizu



- 内部から浮上した磁束管の断面が黒点
- 黒点が暗いのは磁場が対流によるエネルギー供給を妨げるから

磁場浮上の3Dシミュレーション
ST+15b, Toriumi & ST 17

表面上の磁場の起源：ダイナモ



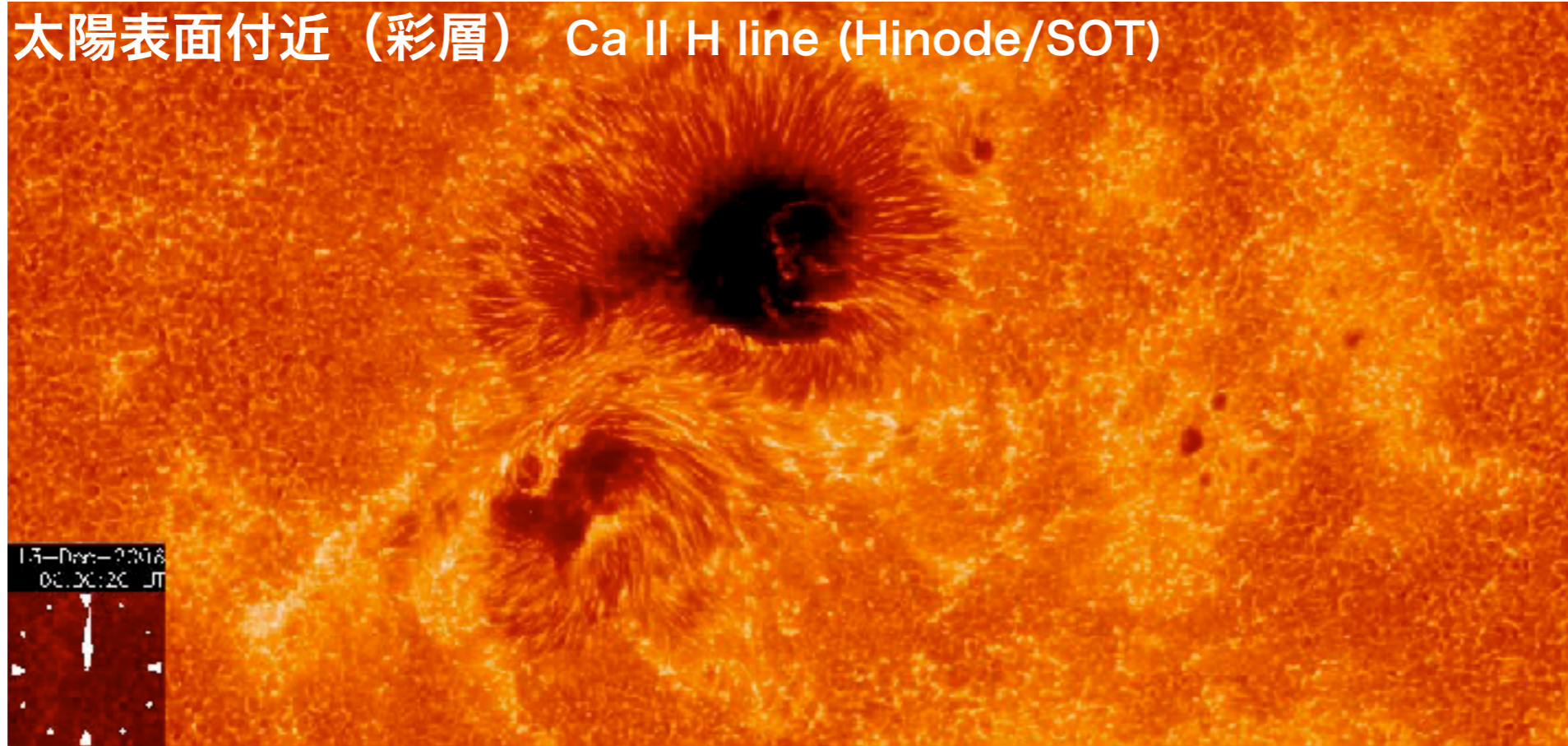
放射層からの熱エネルギー
→ 熱対流の運動エネルギー
→ 磁場のエネルギーへ転換
(磁場を引き延ばすなどで増幅)

この 運動エネ → 磁気エネ
の転換プロセスを一般にダイナモ
と呼ぶ

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
爆発現象

太陽表面付近（彩層） Ca II H line (Hinode/SOT)



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

$$E \approx \frac{B^2}{8\pi} V$$

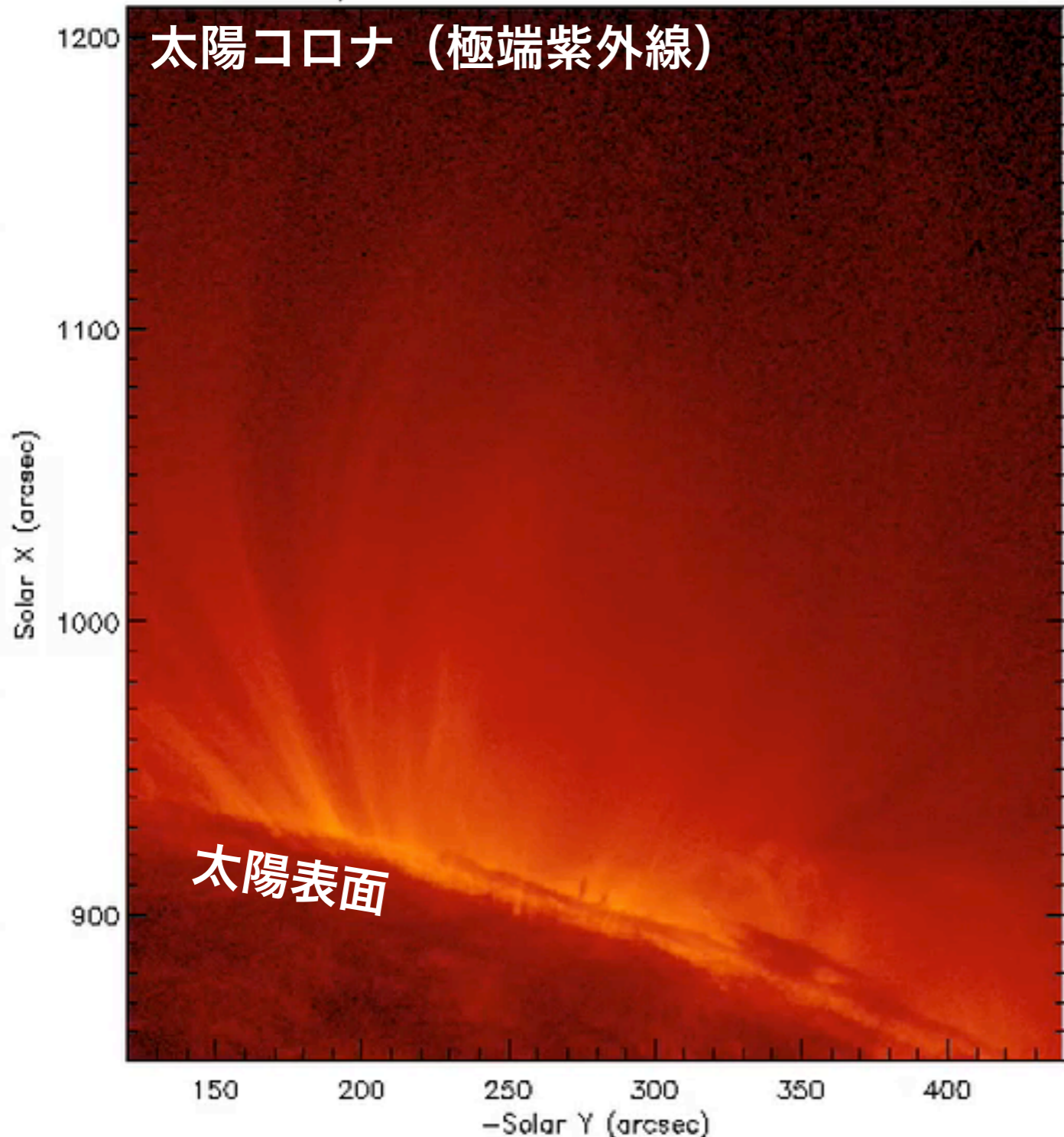
$$\approx 10^{33} \left(\frac{B}{10^3 \text{ G}} \right)^2 \left(\frac{L}{3 \times 10^9 \text{ cm}} \right)^3 \text{ erg}$$

大きい黒点ほど大きなフレアを起こすことができる

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
爆発現象

SDO/AIA 131 Å, 19-Jul-2012 04:00:21



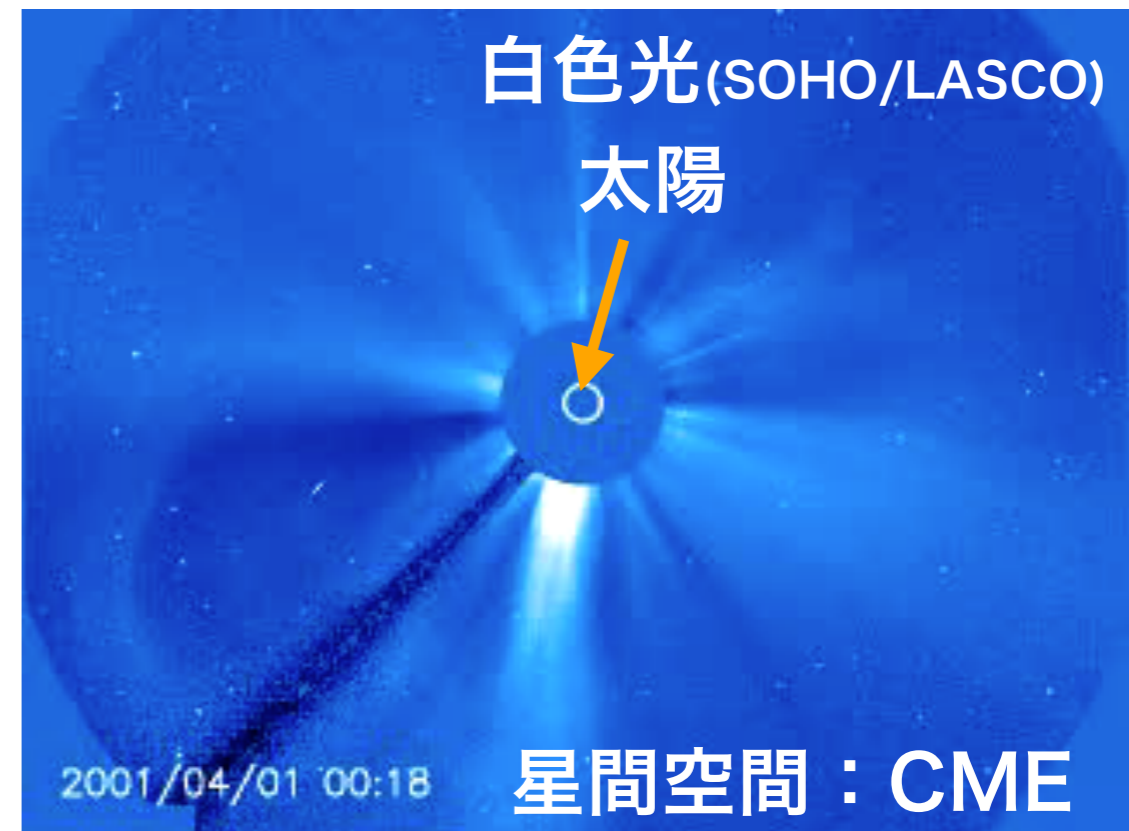
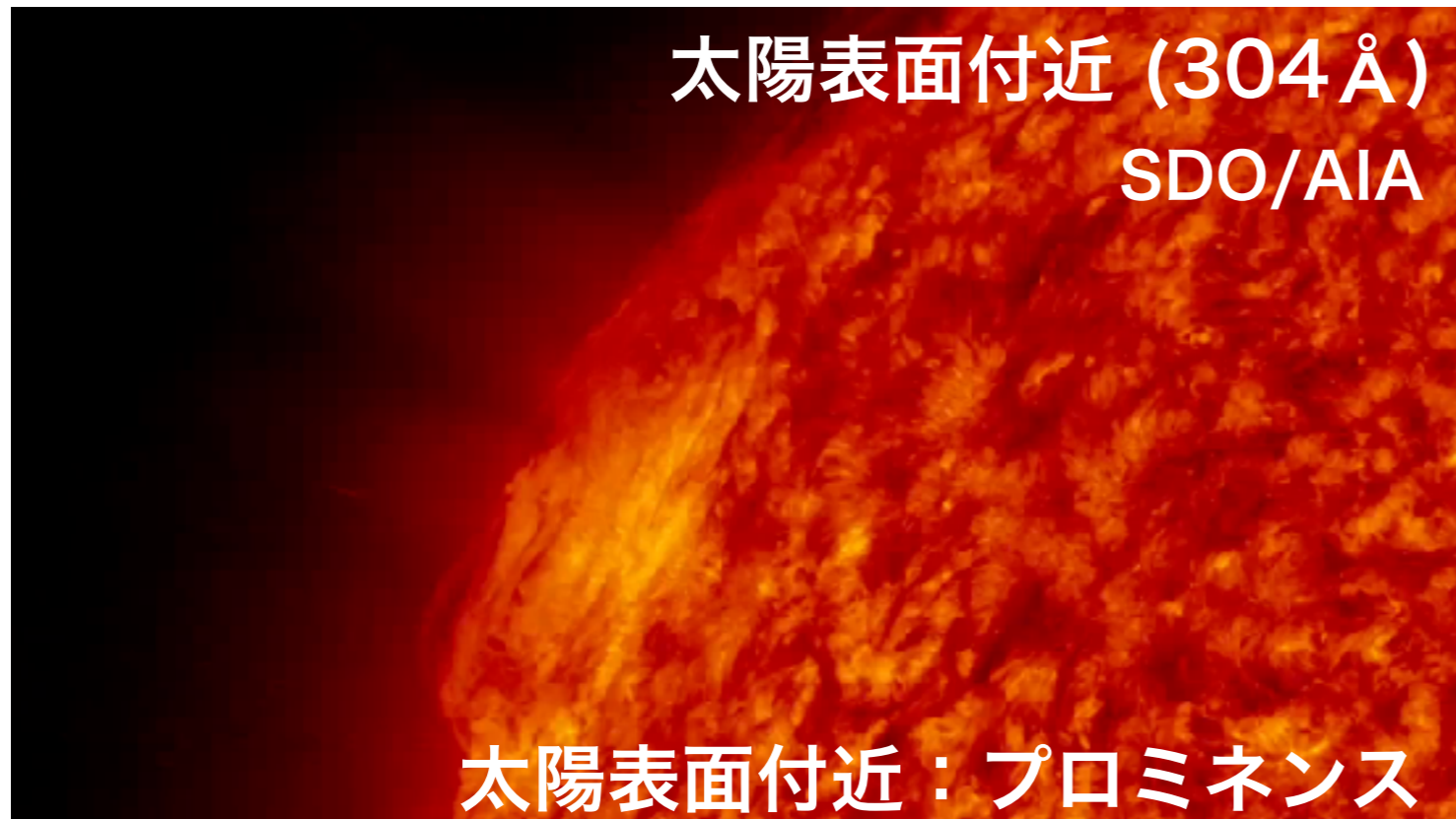
courtesy: W. Liu

- ・ 先端の尖ったアーケードが出現（フレアループと呼ぶ）
- ・ エネルギー解放はループ内ではなく、フレアループの上空で発生（後述）

レビュー：

Shibata & Takasao 2016

プロミネンス噴出、コロナ質量放出 (CME)



速度：~10-1,000 km/s

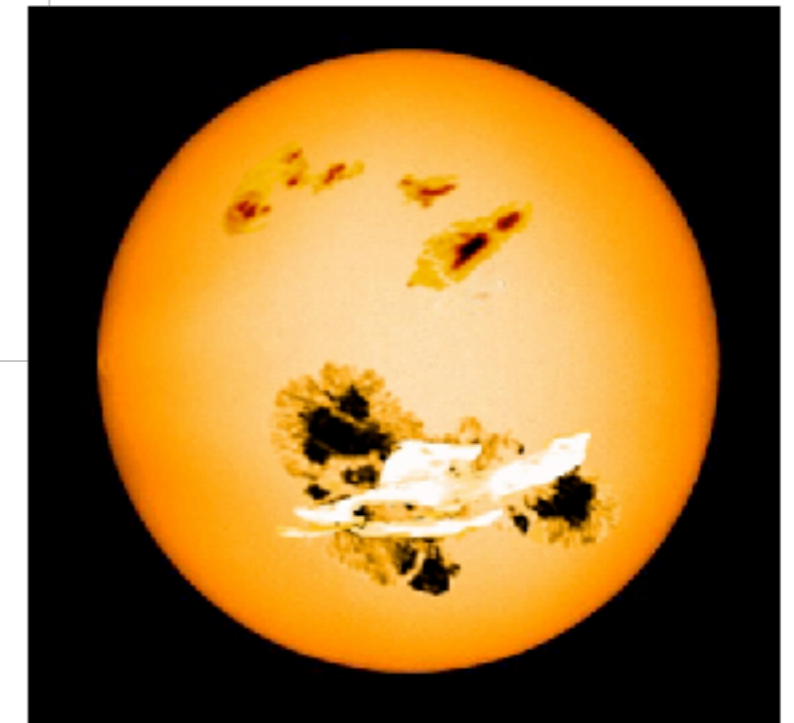
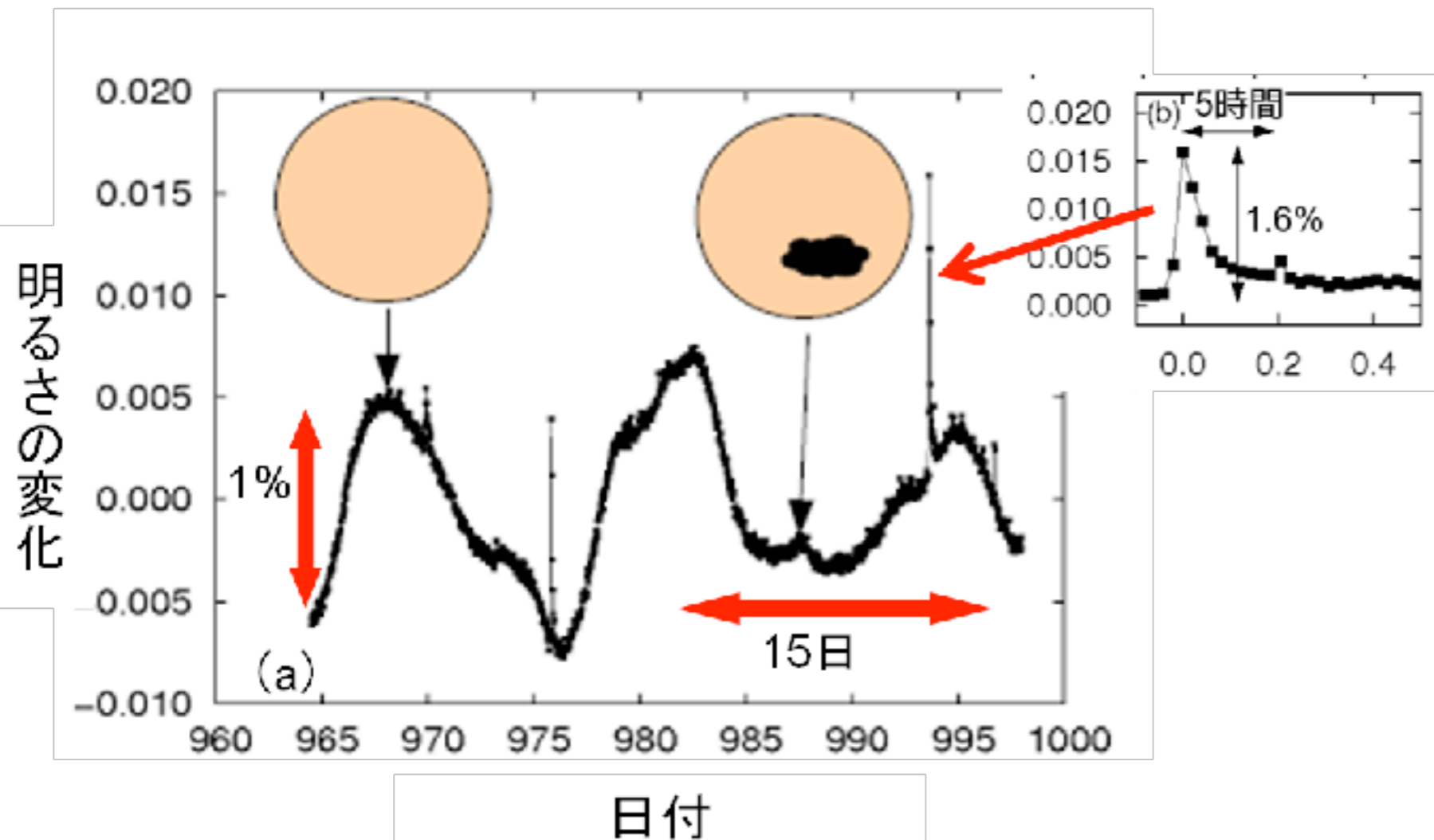
平均質量： $3.5 \times 10^{14} \text{ g} \approx 2 \times 10^{-19} M_{\odot}$ (Gopalswamy+09)

- プロミネンス・CME は宇宙天気研究の主要なターゲット
- CME 前面にできる衝撃波で高エネルギー粒子（宇宙線）を生成
→ 地球に直撃したら影響大、当たらなくても影響あり

恒星フレア

太陽型星のスーパーフレア：太陽フレアの 10-10,000 万倍のエネルギー

クレジット：京都大学



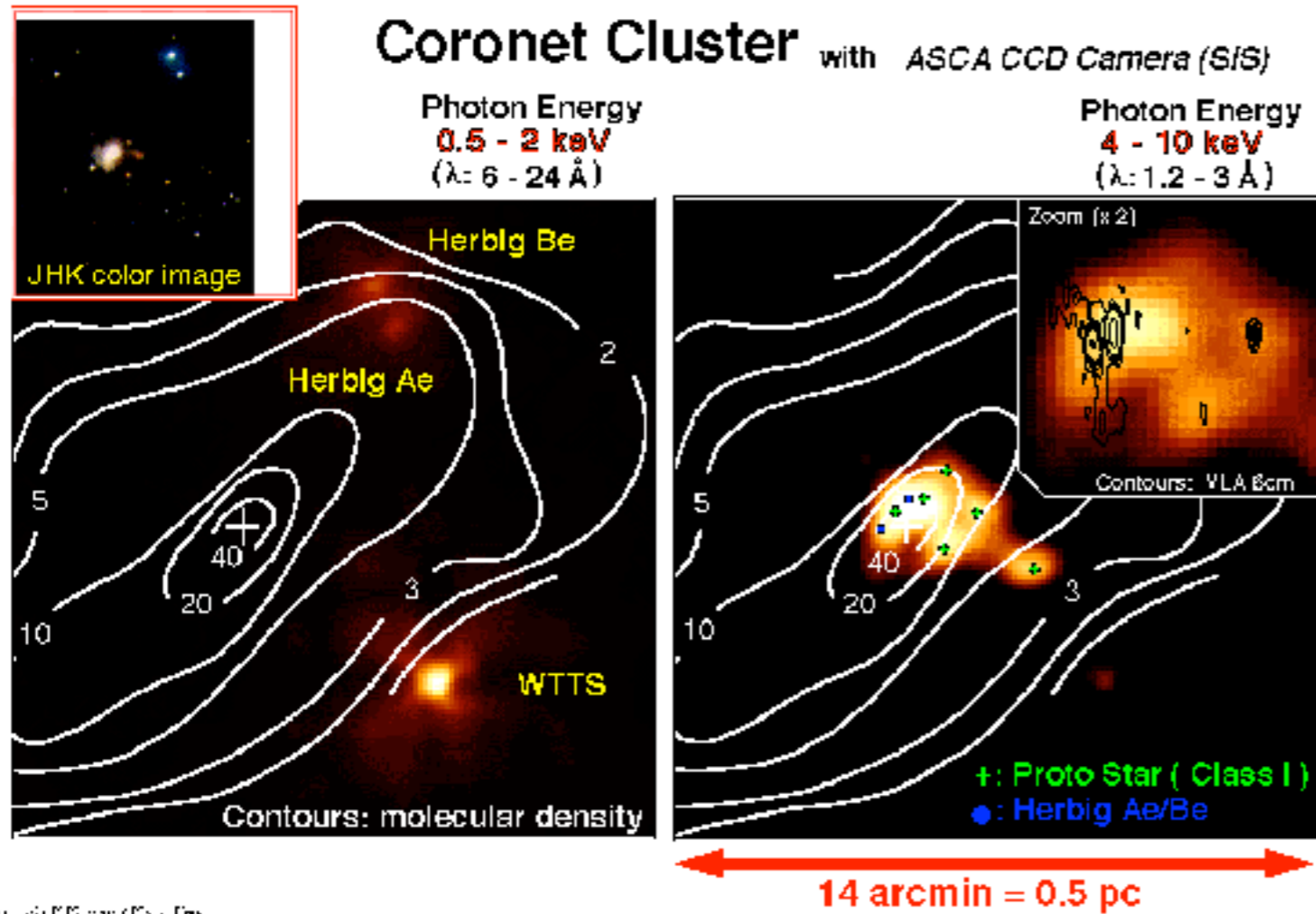
スーパーフレア星
想像図

Maehara+12, Shibayama+13, Notsu, Y. +2015

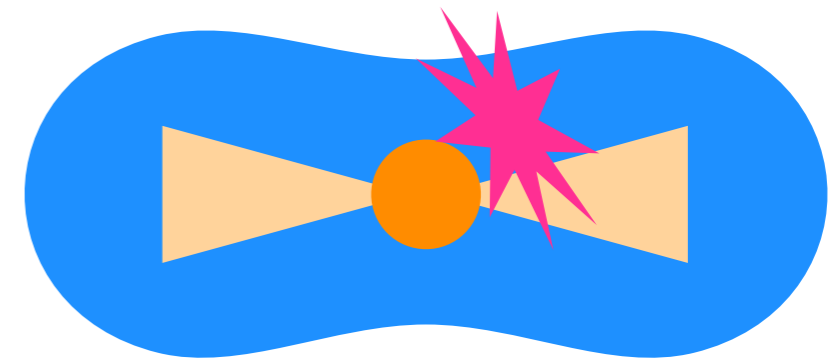
スーパーフレアの問題：

- ▶ 太陽フレアと統一的に理解できるか？ (e.g. Shibata & Yokoyama 02, Tsuboi+16)
- ▶ どうやって大黒点を作るのか (ダイナモ)? (e.g. Shibata+13, Choudhuri 16)

原始星フレア、前主系列星フレア



低温 (10-100K) の
星形成領域で **1億K !!**



Koyama+96, Tsuboi+00, Montmerle+00

エネルギー : 10^{35-37} erg

最大級の太陽フレアの 10^3-5 倍 ! 発生過程は謎

星・惑星の誕生の場は爆発に満ち満ちている

よくある質問

見た目は派手だがマイナーではないか？

エネルギー

$$L_{\odot} = 4 \times 10^{33} \text{ erg/s} \quad \text{太陽光度}$$

$$L_{\text{flare}} \approx \frac{E_{\text{flare}}}{t_{\text{flare}}} \approx \begin{cases} 10^{29} \text{ erg/s} \left(\frac{E_{\text{flare}}}{10^{32} \text{ erg}} \right) \left(\frac{t_{\text{flare}}}{10^3 \text{ s}} \right)^{-1} & \text{最大級の太陽フレア} \\ 10^{32} \text{ erg/s} \left(\frac{E_{\text{flare}}}{10^{36} \text{ erg}} \right) \left(\frac{t_{\text{flare}}}{10^4 \text{ s}} \right)^{-1} & \text{原始星フレア} \end{cases}$$

フレアが起きても星の全放射量はほとんど変わらない

質量損失率

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

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

(Gopalswamy+09)

太陽風 ($\dot{M} = 2 \times 10^{-14} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$) の数%程度

エネルギー・質量的に重要じゃないから宇宙物理学的に無視OKでは？
そんなことはない！（と研究しているなら言い返せないといけない）

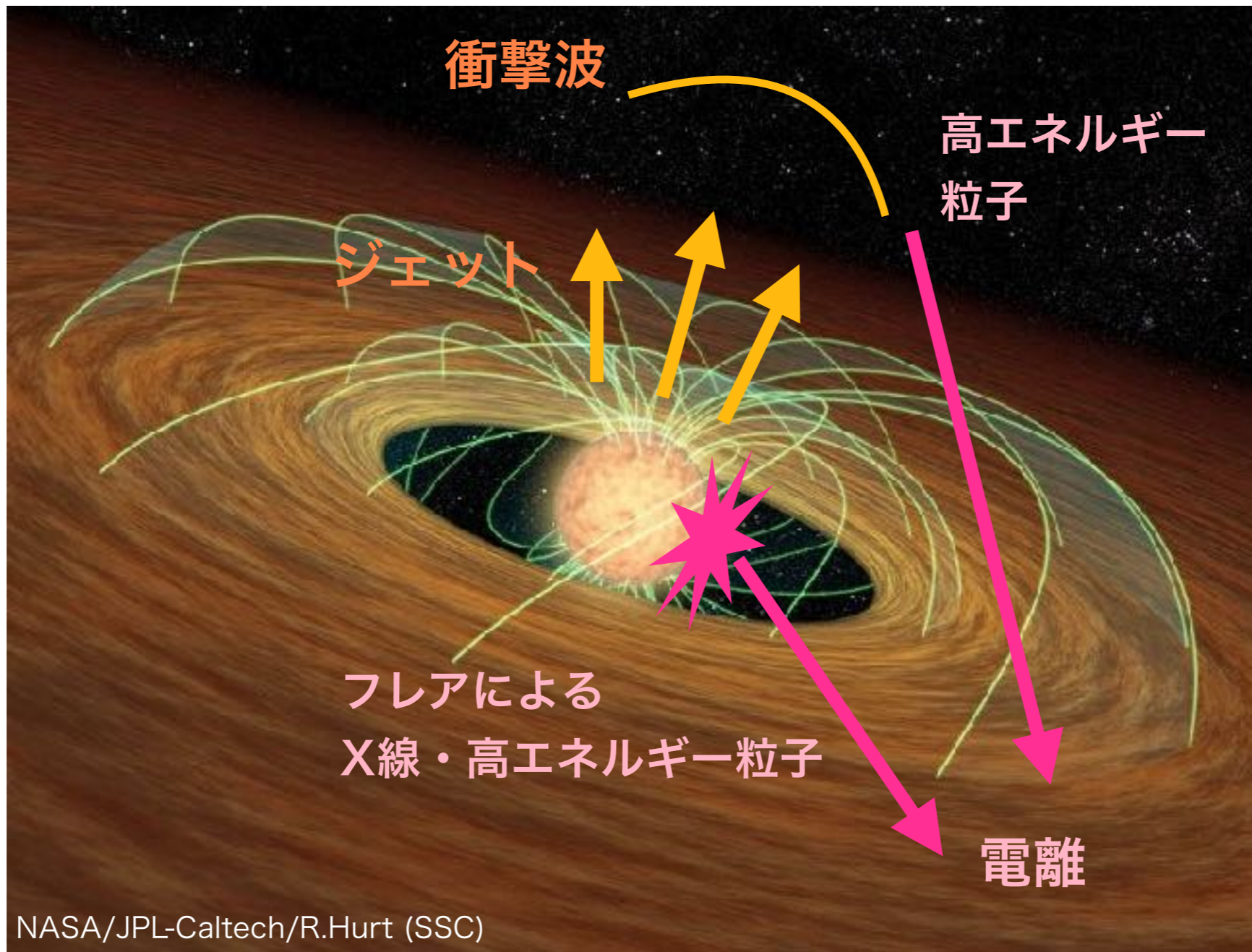
なぜ星のフレア・ジェットなどを研究するか

- ▶ 素過程が宇宙物理学的に普遍的かつ重要だから
 - ▶ フレア : 宇宙の多様な爆発現象のプロトタイプ
 - ▶ 研究のゴール: 「素過程の理解」、
「宇宙ジェットの統一的理解」等
- ▶ 星にとってエネルギー的にはマイナーでも、
自分が注目するシステムに対しては重大な影響を及ぼすから
 - ▶ 地球視点: 宇宙天気
 - ▶ 星形成視点: 低電離ガスの電離度を変え質的变化
 - ▶ 研究のゴール: 「システムへの影響の解明」、
「星からのフィードバックがある系の進化過程解明」等

他分野の人と話すときはこのような形で
モチベーションを説明すると伝わりやすい

例：冷たい星・惑星形成領域におけるフレア・ジェット

星形成領域のガスは低温・低電離でダイナミクスに関わるミクロ物理が電離度に依存



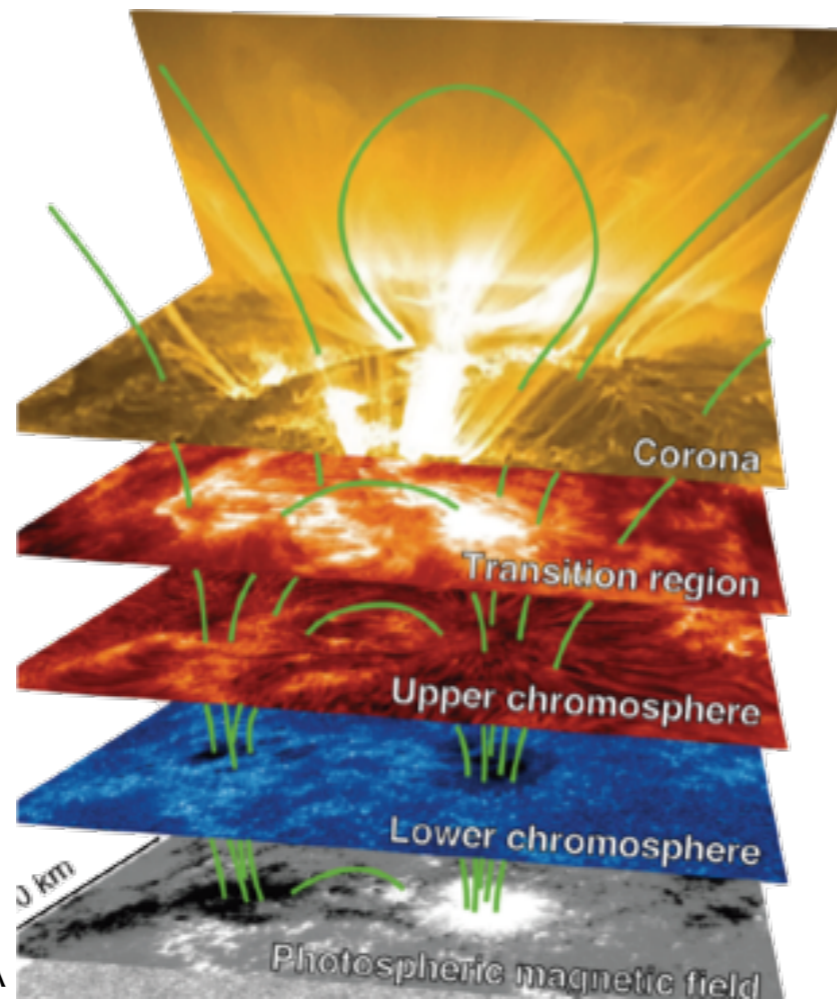
周囲の低電離ガスの電離・化学状態を変化 → 星・惑星形成過程にインパクト
e.g. Padovani+15, Ilgner & Nelson 06

アウトライン

- ▶ 太陽・恒星・原始星の爆発現象の概観
- ▶ **爆発・ジェットの基本知識・基本物理**
- ▶ 太陽物理から挑戦できる宇宙物理の問題

磁場は上空で重要になりやすい

- ▶ ガス圧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



NAOJ/JAXA

コロナ $\frac{p}{B^2/8\pi} \ll 1$ 磁場優勢

彩層

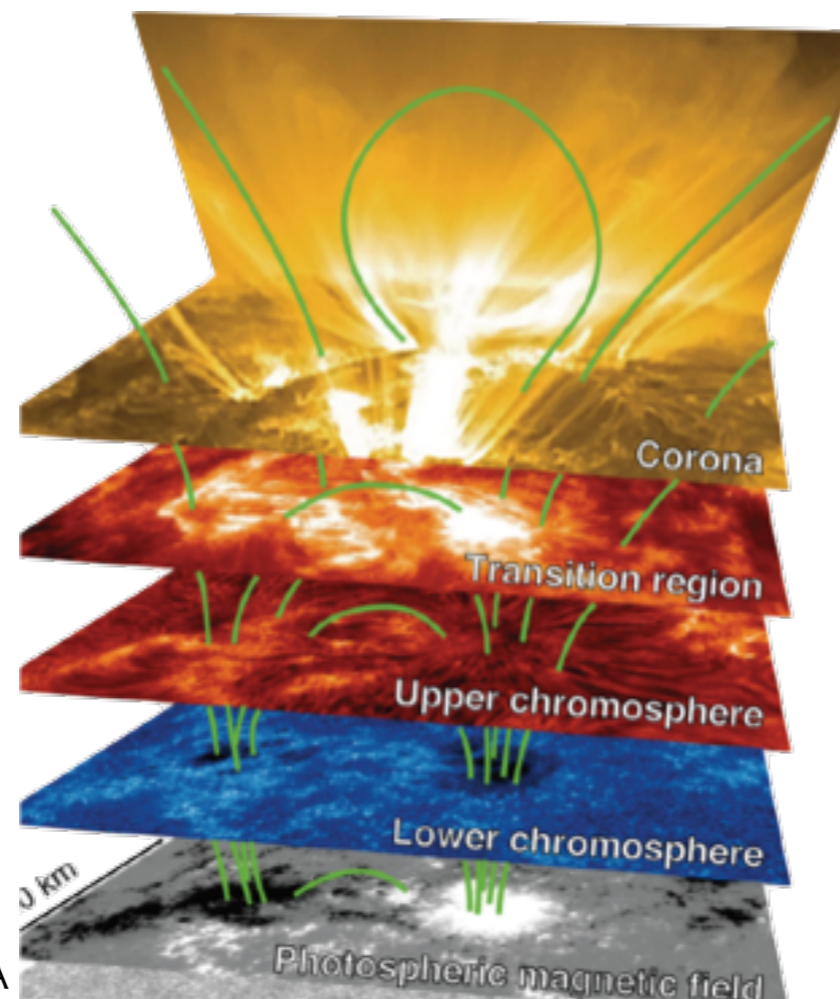
光球 $\frac{p}{B^2/8\pi} > 1$ ガス優勢

- 重力成層大気の一般的性質（恒星・惑星大気、ブラックホール降着円盤 etc）
- だから太陽コロナは磁場による爆発だらけ

磁化したガスを記述する理論：磁気流体力学

磁気流体力学 (MHD)

= 基礎方程式: 流体方程式 + Maxwell 方程式
(ミクロな物理は拡散係数などの輸送係数を通じて入る)



コロナ

彩層

光球

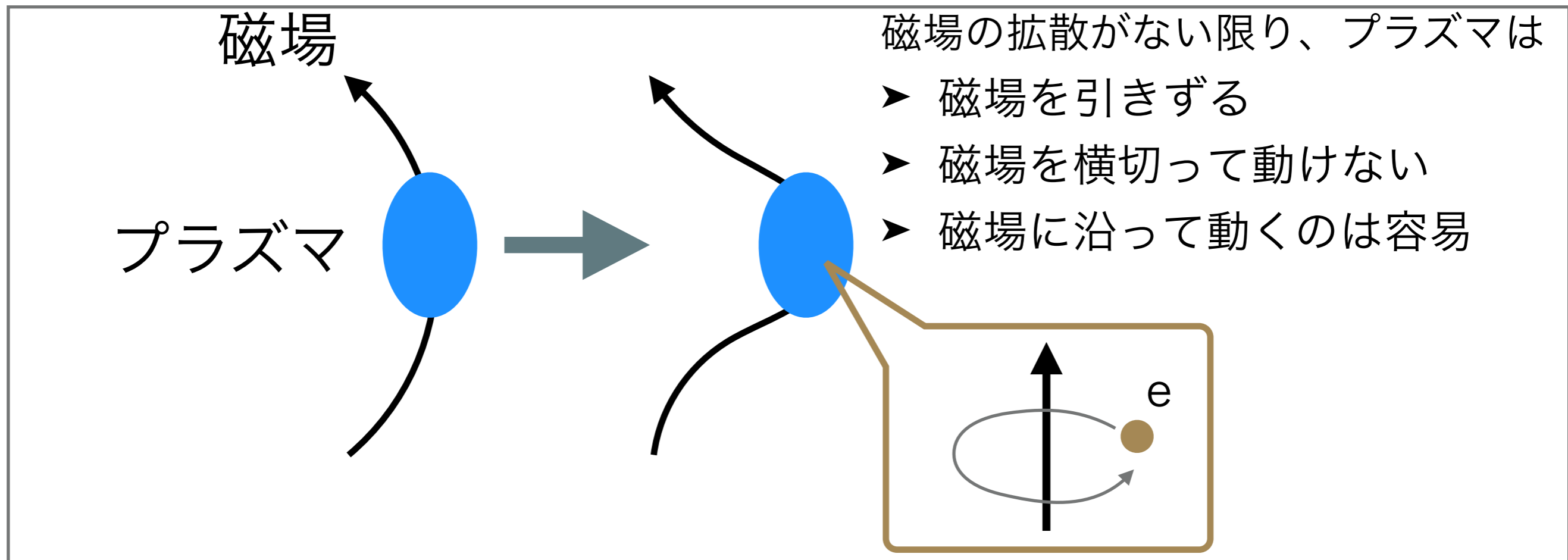
NAOJ/JAXA

わずかでも電離していれば多くの場合 MHD 方程式を使うことができる

参考図書：E. Priest “Solar magnetohydrodynamics”, Kulsrud “Plasma physics for astrophysicists”,
坂下・池内「宇宙流体力学」

MHD の重要な性質

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



この性質は “**frozen-in**” (磁場の凍結) と呼ばれる

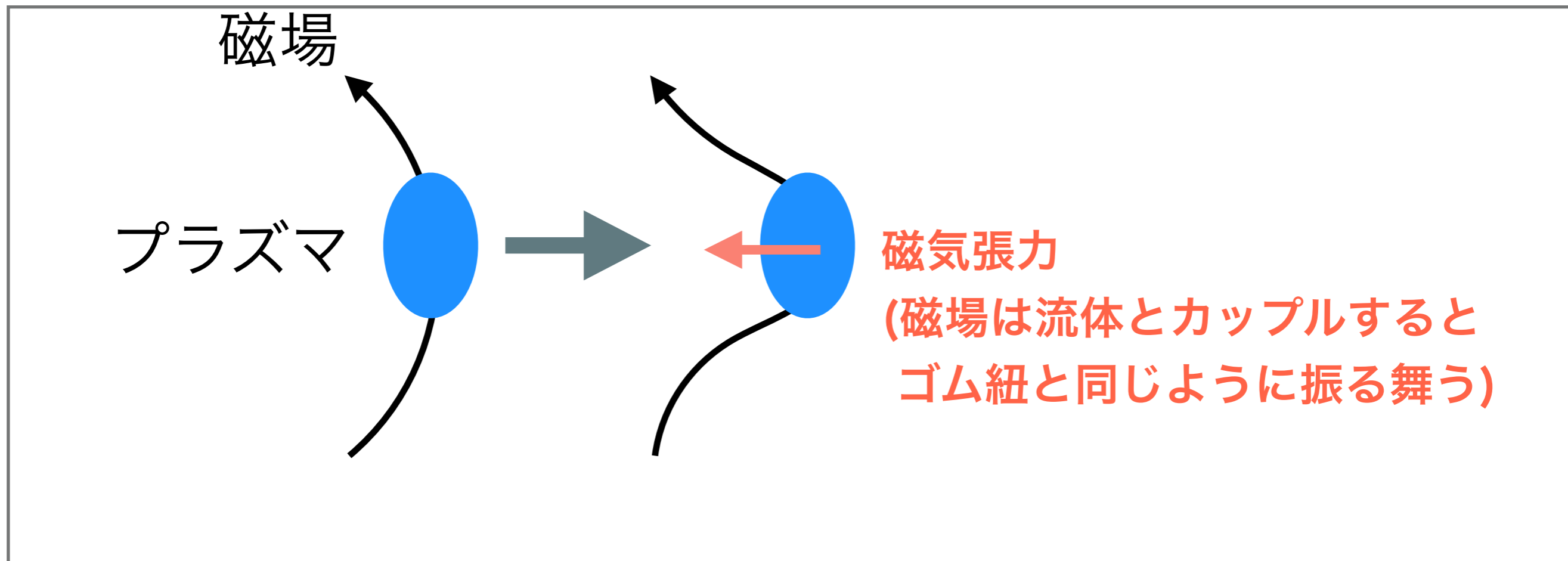
MHD の重要な性質

Lorentz force

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

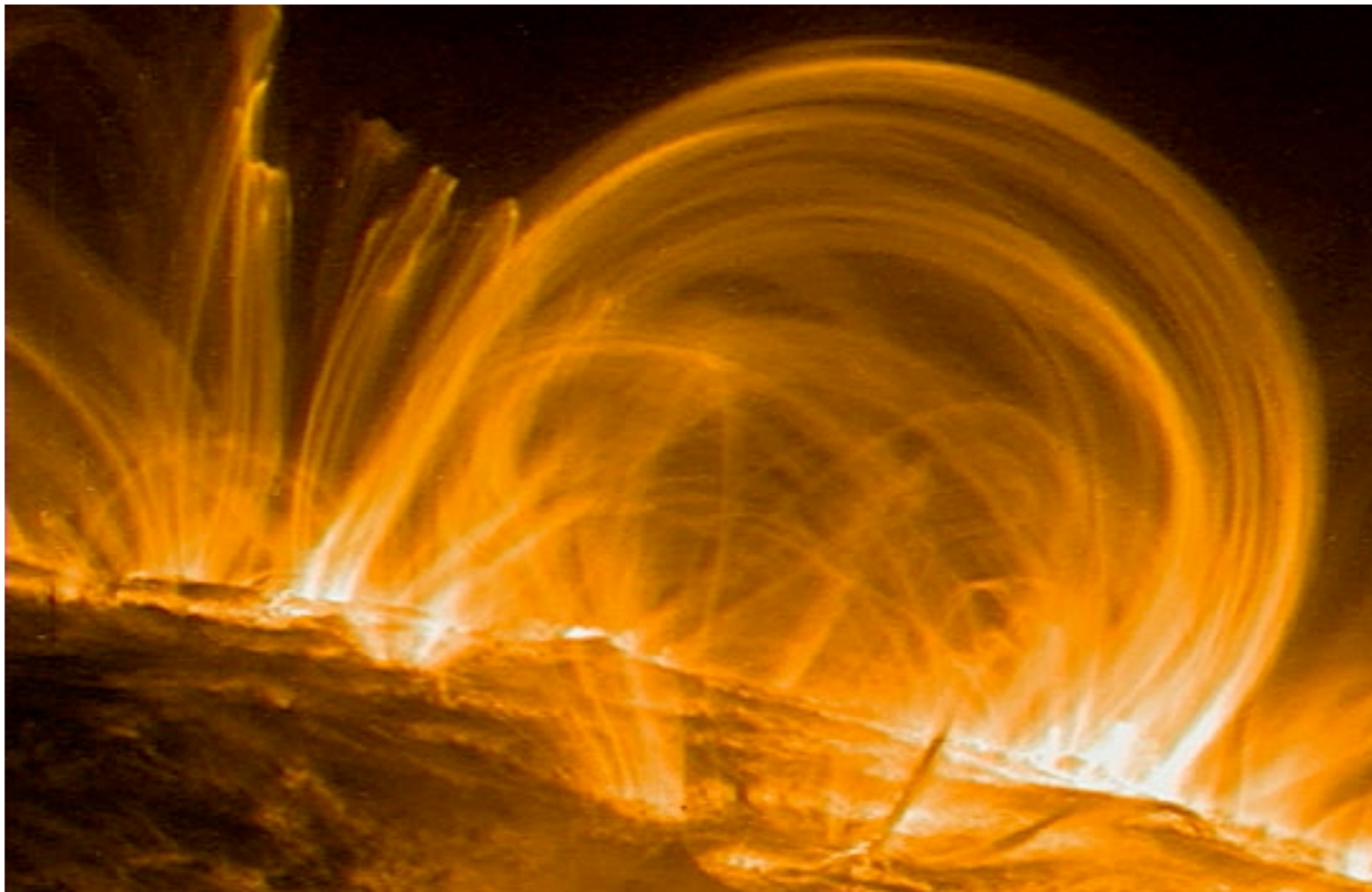
磁気圧勾配力

磁気張力



磁気張力が生じる波動：アルフベン波（非圧縮、磁力線の横揺れ運動）

frozen-in 条件が磁気ループを見やすくする



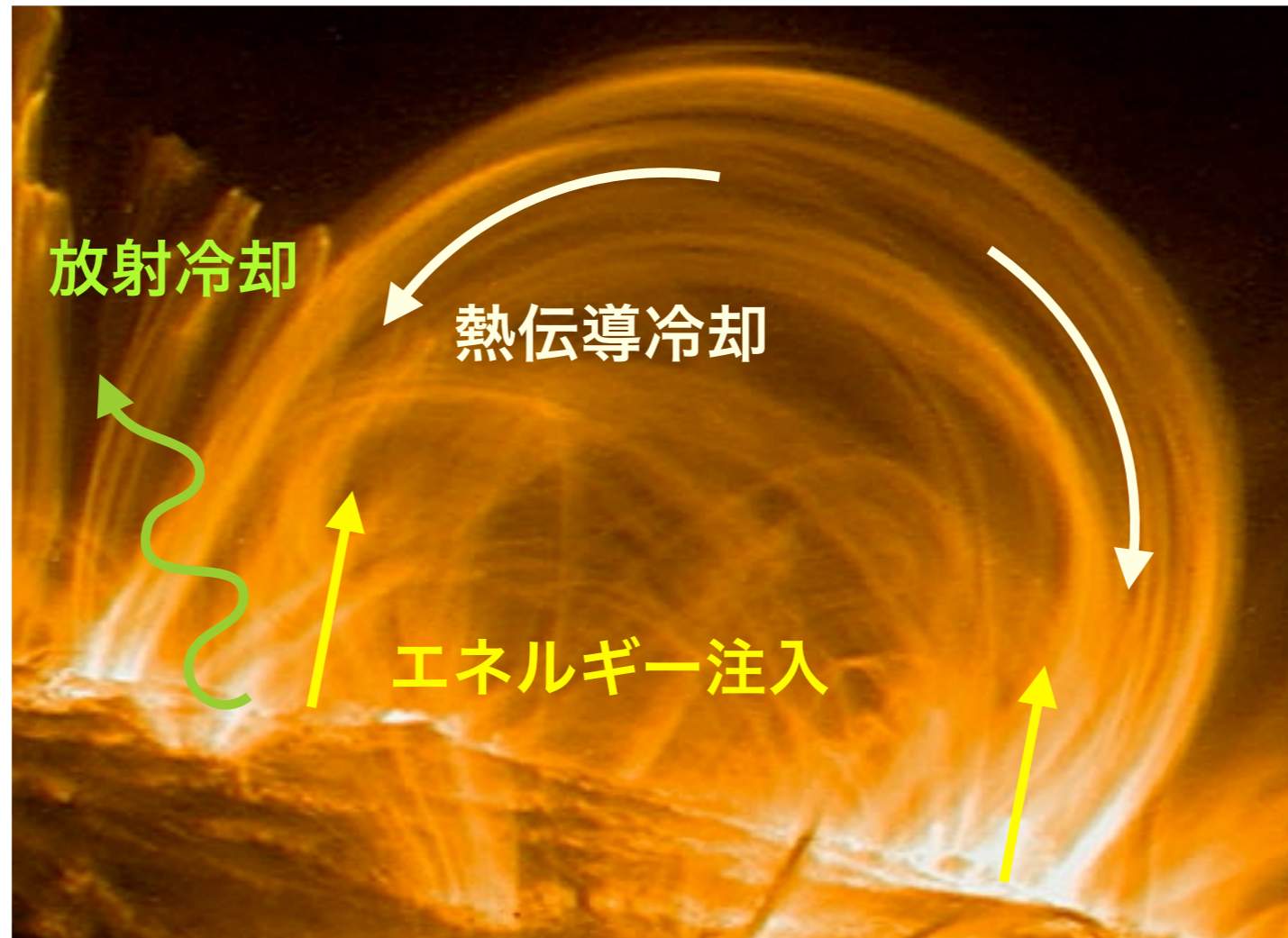
TRACE 衛星による極端紫外線によるコロナ画像

まず定常コロナを理解しよう (超重要)

Rosner + 78 (RTV) : 太陽コロナの温度・密度・ループ長の間には以下の関係

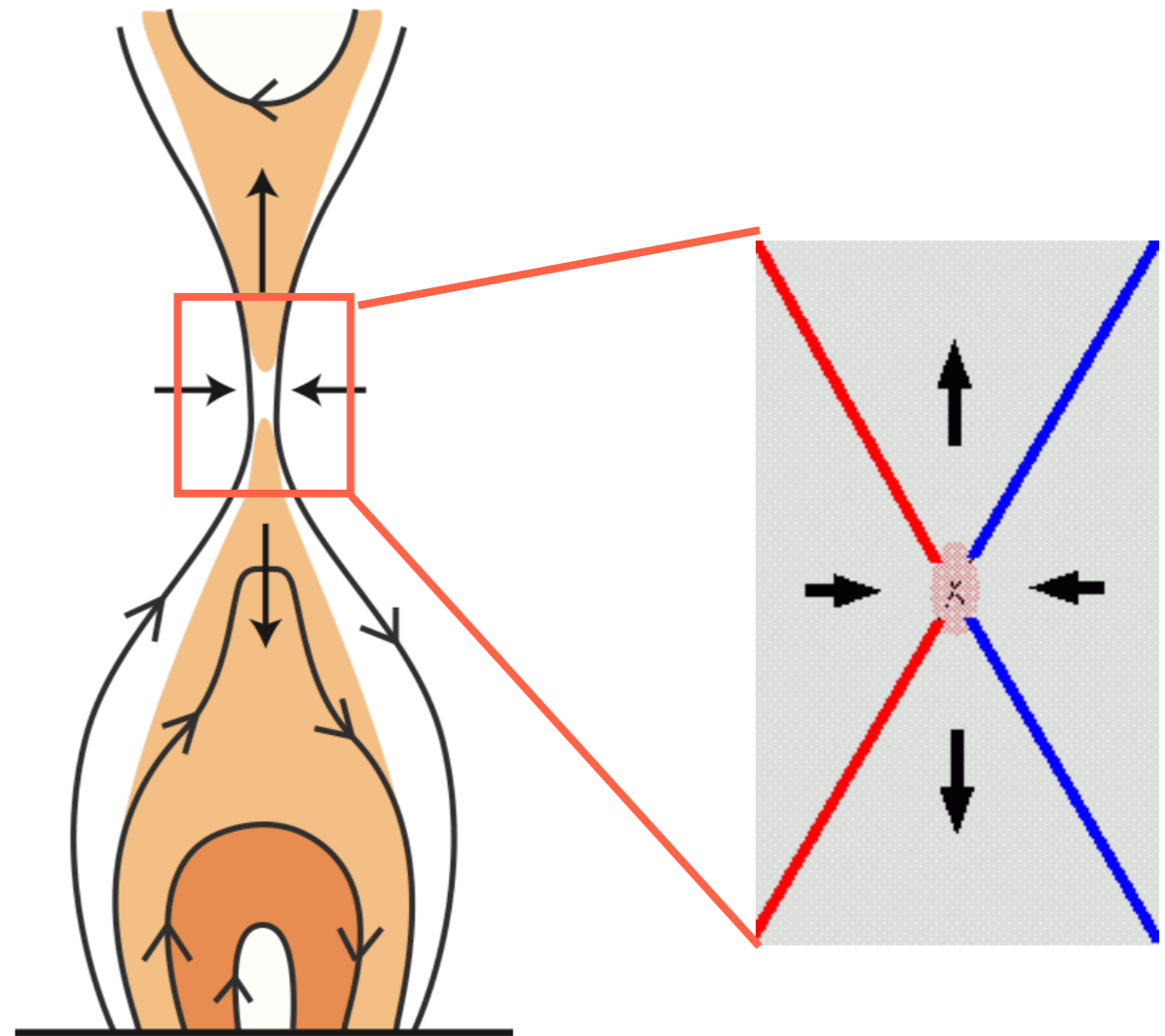
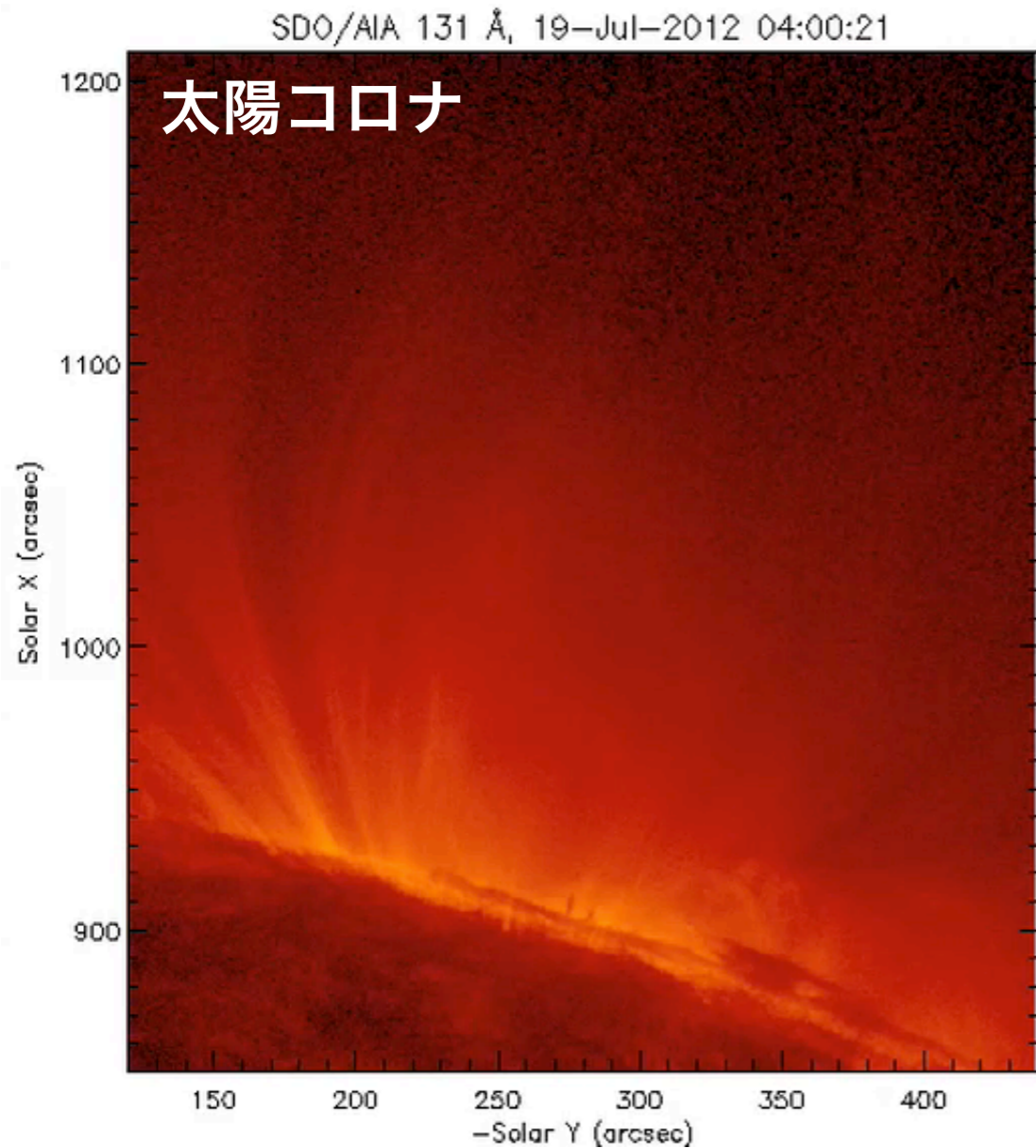
RTV スケーリング: エネルギー注入率 ~ 熱伝導冷却率 ~ 放射冷却率

$$T_{max} \sim 1.4 \times 10^3 (pL)^{1/3} \quad (\text{太陽組成の放射冷却関数のとき})$$



atomic physics で決まる、定常大気を記述する一般的な関係式
太陽以外でも使える : ST+17: 降着円盤大気・ジェットに応用

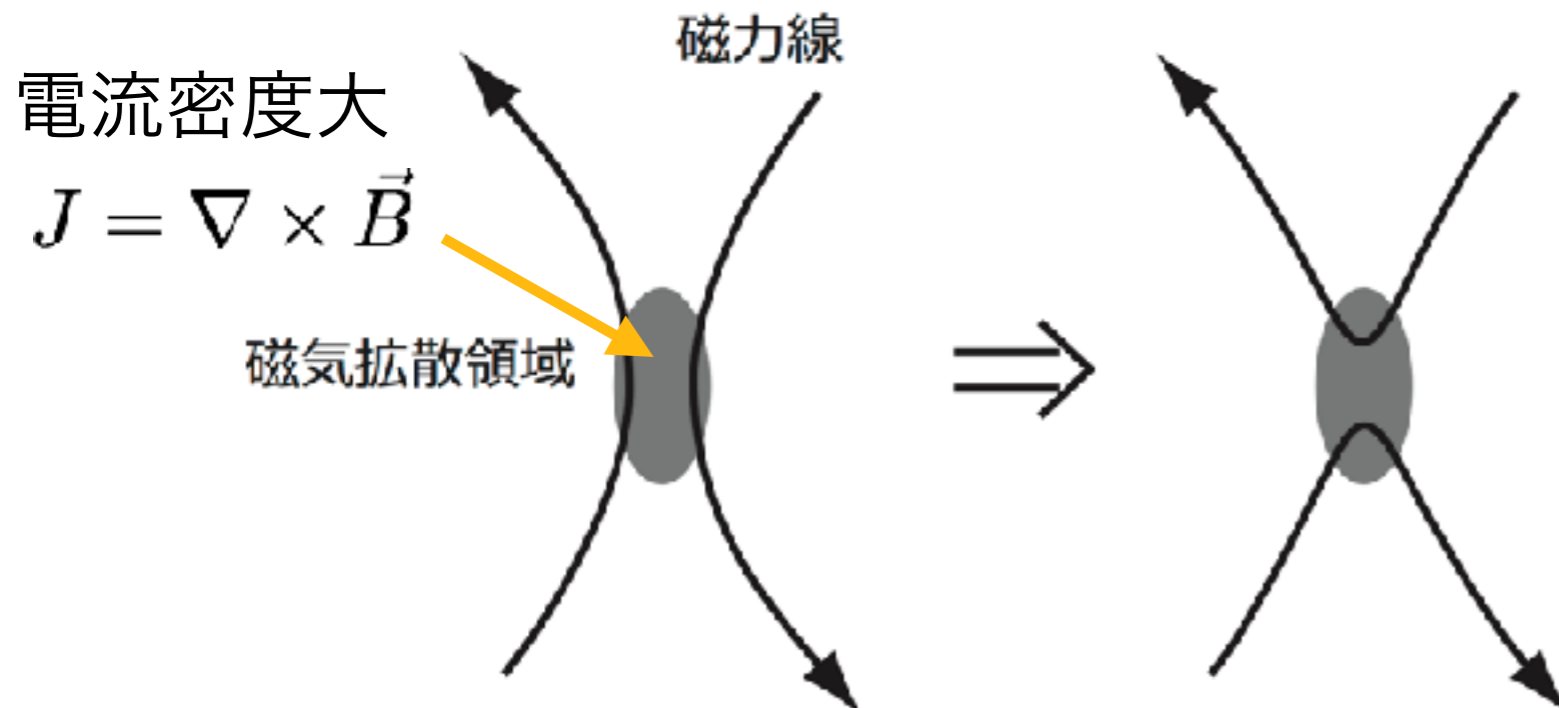
フレアは磁気リコネクションが駆動



- 何らかの過程で反平行成分を持つ磁場を形成
—> **磁力線のつながり変え** (磁気リコネクション)
—> 磁気エネルギーを解放 —> 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

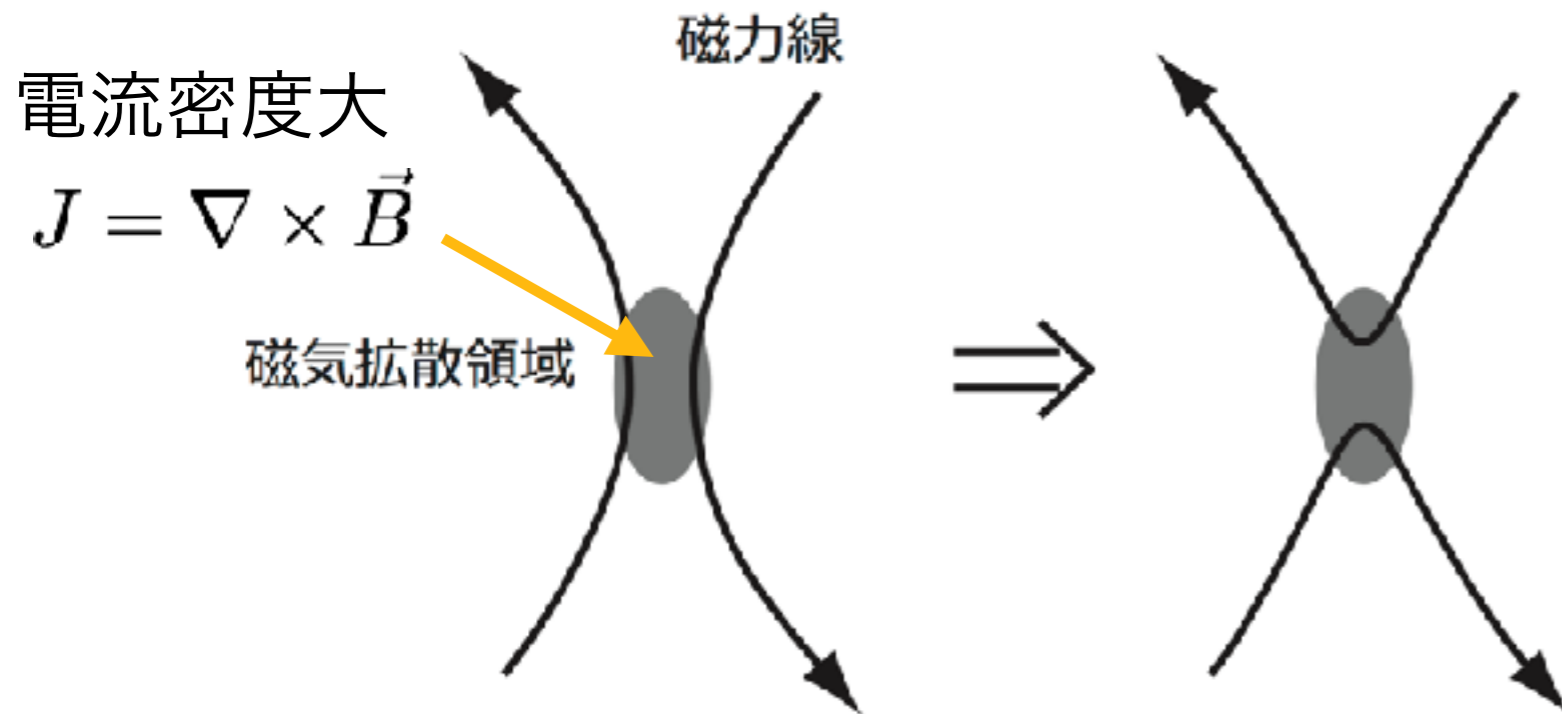


よくある説明：
電気抵抗のせいで電流が散逸。
電流を作る磁場が消えるが
磁力線は途中でブツッと切れて
はいけないのでつなぎ変わる
→ リコネクション

この説明だと理解しにくい・・・

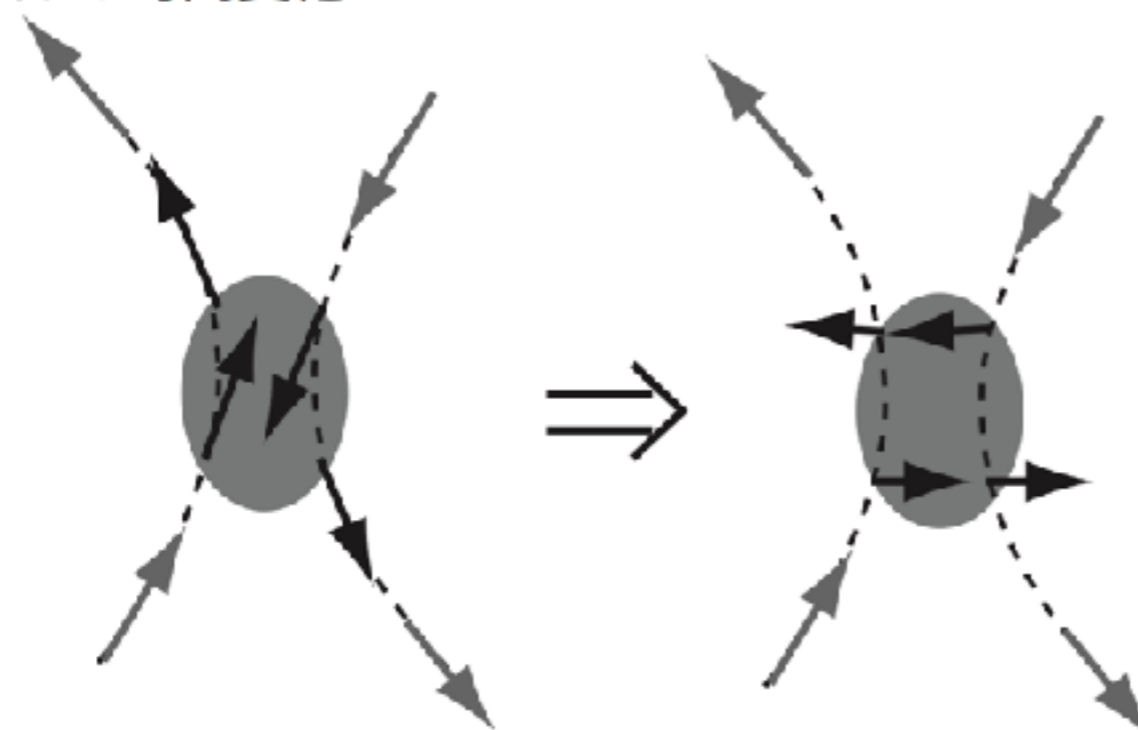
磁気リコネクションについてもう少し 1/2

磁力線の時間変化



よくある説明：
電気抵抗のせいで電流が散逸。
電流を作る磁場が消えるが
磁力線は途中でブツッと切れて
はいけないのでつなぎ変わる
→ リコネクション

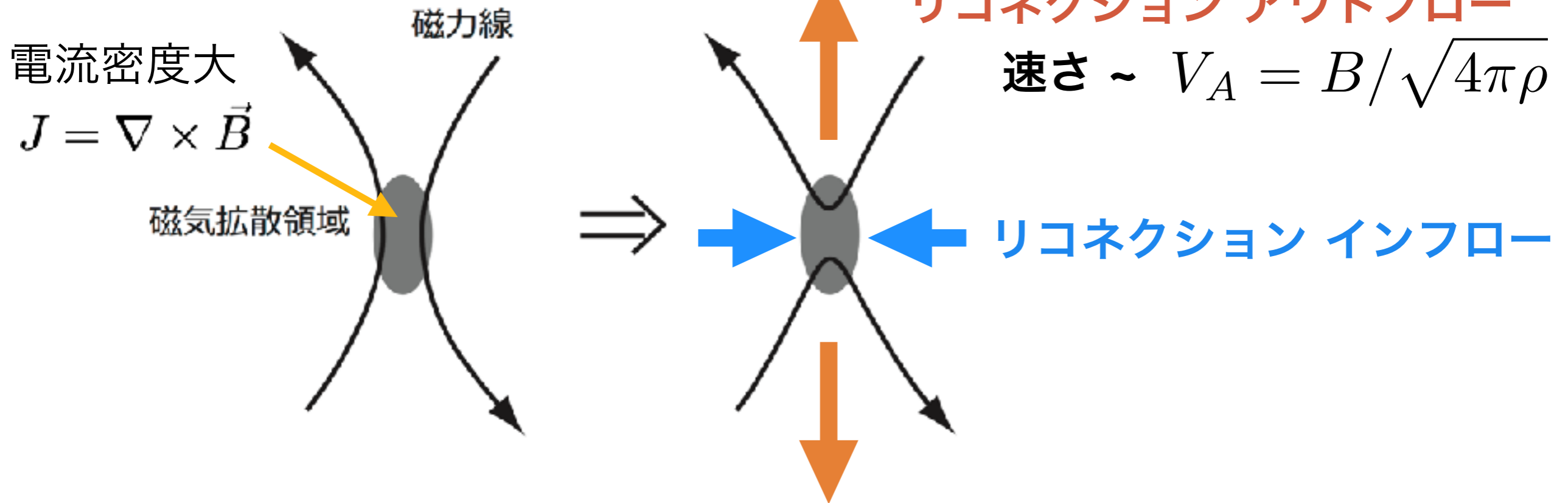
磁場ベクトルの時間変化



ベクトル場での考え方：
**電流を作る磁場の
反平行成分だけが散逸**
→ 横向きの磁場だけ残る
→ このベクトルを元に磁力線
を描くと右上図になる

磁気リコネクションについてもう少し 2/2

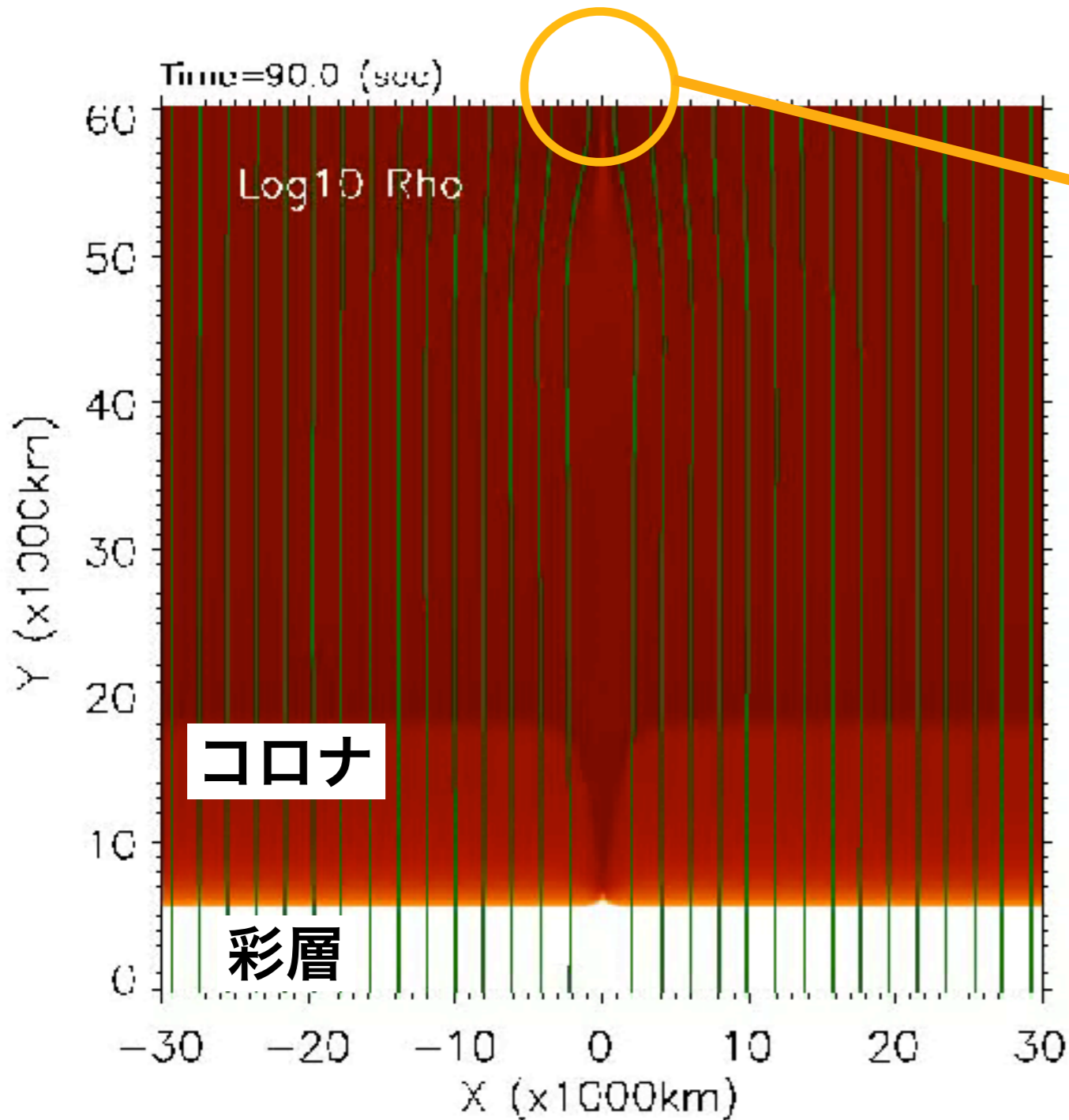
磁力線の時間変化



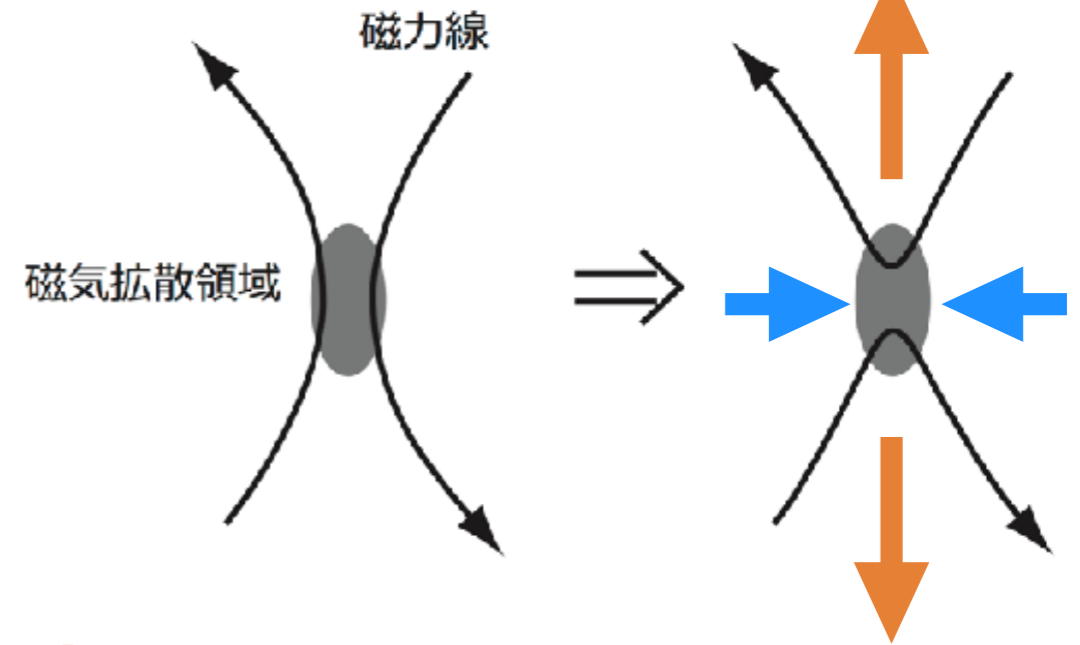
内部エネ/磁気エネ $\frac{p}{B^2/8\pi} \approx \left(\frac{c_s}{V_A}\right)^2 \approx 0.01 - 0.1$

コロナでは容易に $c_s \ll V_A \rightarrow$ アウトフローは衝撃波形成
フレアにおける高温プラズマの形成、粒子加速(?)

太陽フレアのシミュレーション



磁力線の時間変化



アウトフロー：

細いジェットを形成

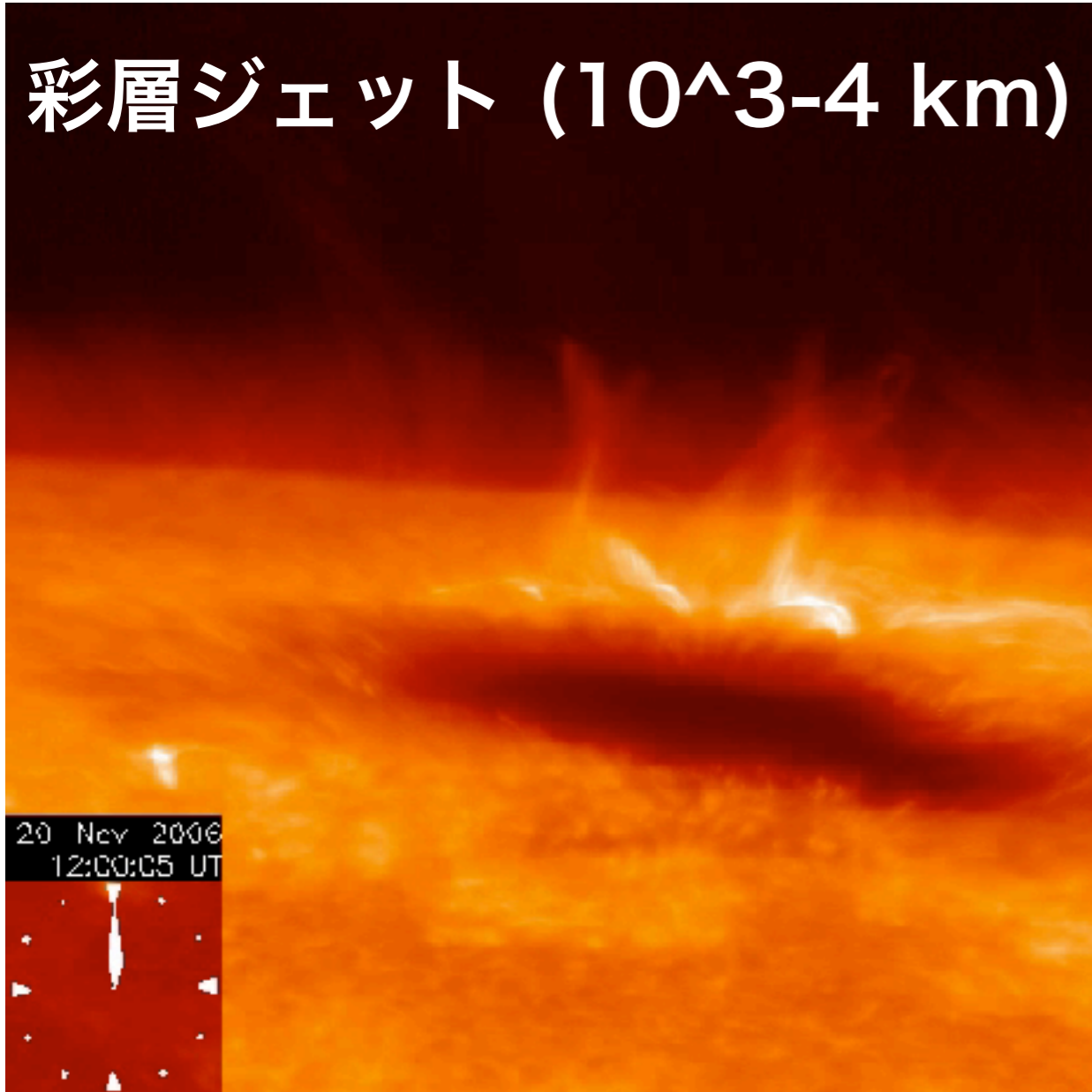
インフロー：

リコネクション領域に磁場を運び

リコネクションを維持

全てのジェット = リコネクションアウトフロー？

彩層ジェット (10^3-4 km)



答えは NO

理由をエネルギーから考えてみる

磁場によって彩層ガスを高さ h 持ち上げるとき
 h はジェットの高さ (10^3-4 km) を説明できるか？

磁気エネルギー 位置エネルギー

$$\frac{B^2}{8\pi} V \sim \rho g h V$$

$$h \sim \frac{B^2}{8\pi} \frac{1}{\rho g} = \frac{B^2}{8\pi p} \frac{R_g T}{g}$$

$$= \frac{H_p}{\beta} \approx 200 \text{ km} \left(\frac{H_p}{200 \text{ km}} \right) \left(\frac{\beta}{1} \right)^{-1}$$

H_p : 圧カスケール長

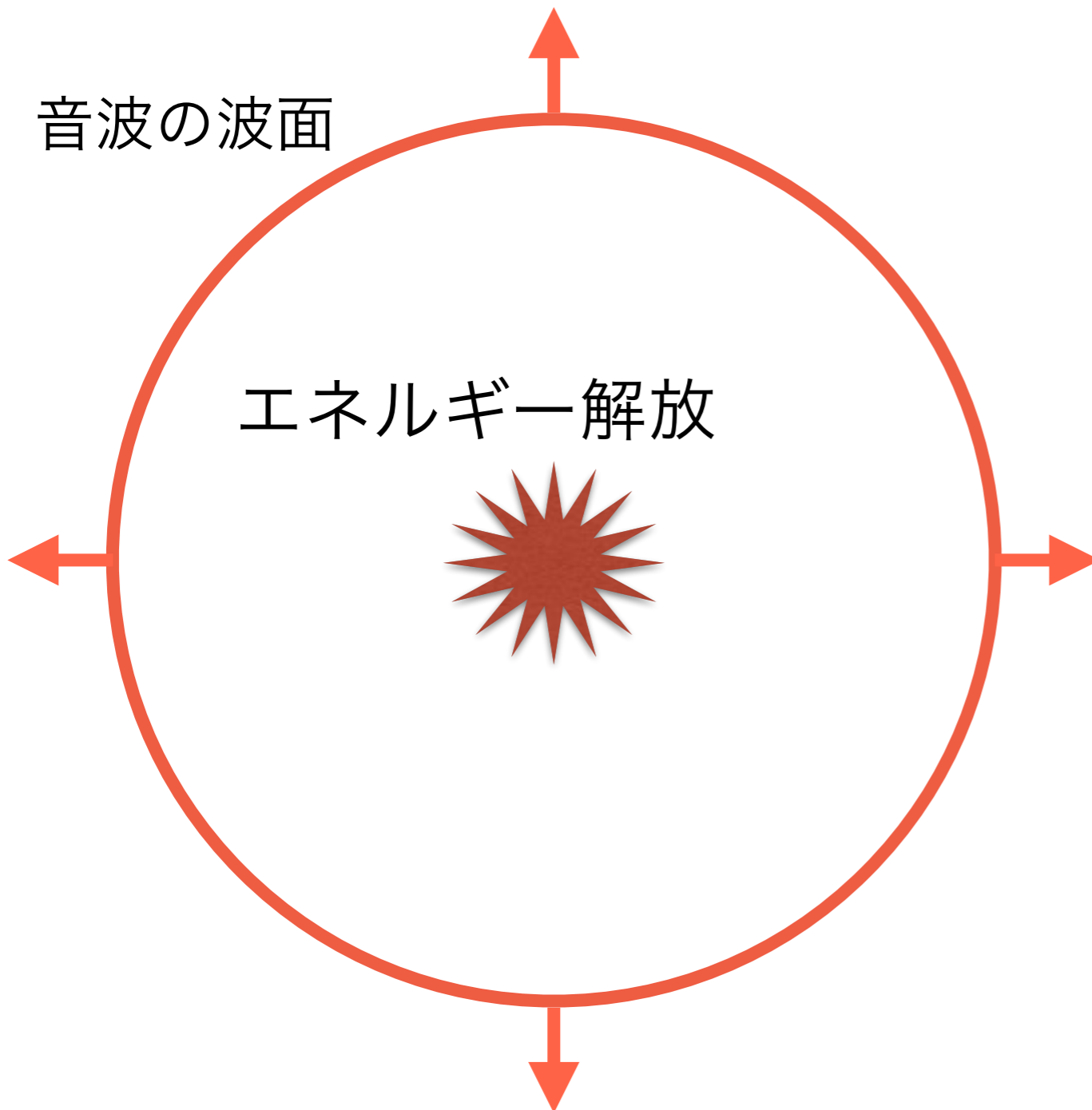
$$\beta = p / (B^2 / 8\pi)$$

全然持ち上がらない！！

彩層ジェットはどう加速されているのか？

エネルギー解放の結果を詳しく考えてみる

爆発 → 音波を発生 → エネルギーを伝搬



伝搬する線形音波の
エネルギー保存を考えてみる

A : 波面の面積

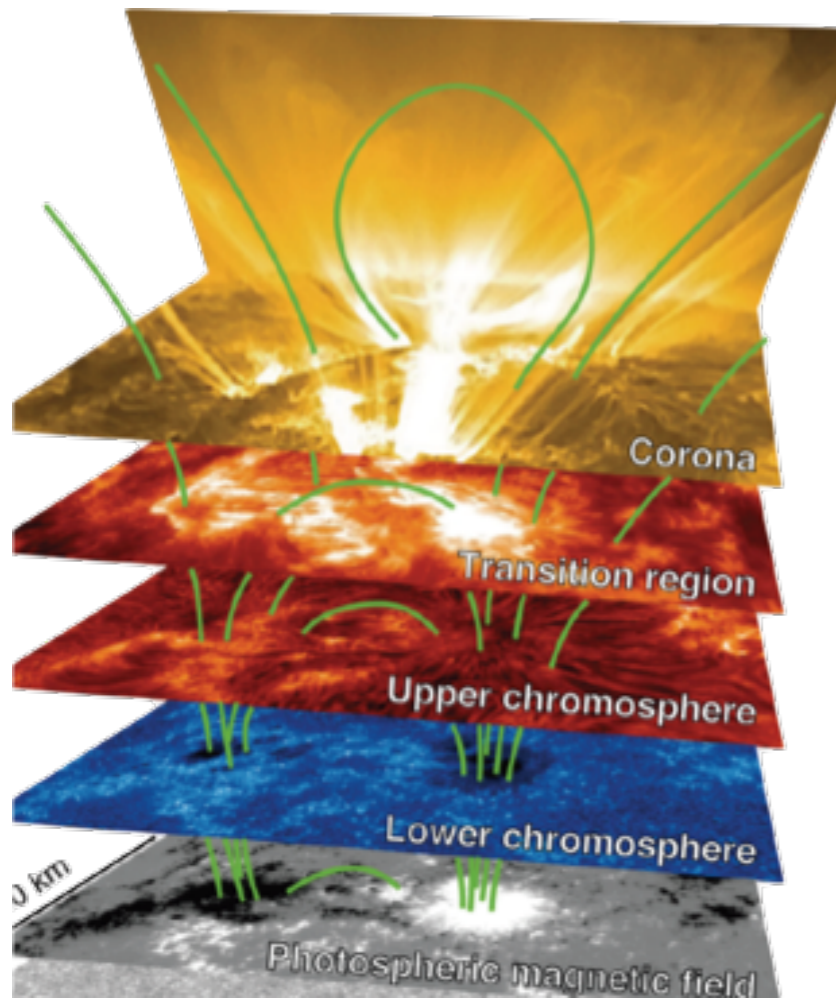
音速 $C_s =$ 一定の場合

$$\rho v^2 C_s A = \text{const}$$

$$v \propto \rho^{-1/2}$$

速度振幅は密度が小さくなるほど増加
→ 重力成層大気では上空のガスほど
簡単に加速できる

彩層でのエネルギー輸送・衝撃波形成



NAOJ/JAXA

$$\rho v^2 C_s A = \text{const}$$

彩層内では音速 $C_s \sim$ 一定

$$\rightarrow v \propto \rho^{-1/2} \propto \exp[+z/2H_p]$$

光球~彩層上部では6桁の密度差
→ 簡単に振幅が増大し非線形化、
 $v \sim C_s$ となると**衝撃波**を形成

彩層下部でエネルギー解放が発生 → 波 (~音波) を形成

→ 上空にエネルギー輸送・衝撃波形成 → ジェット形成

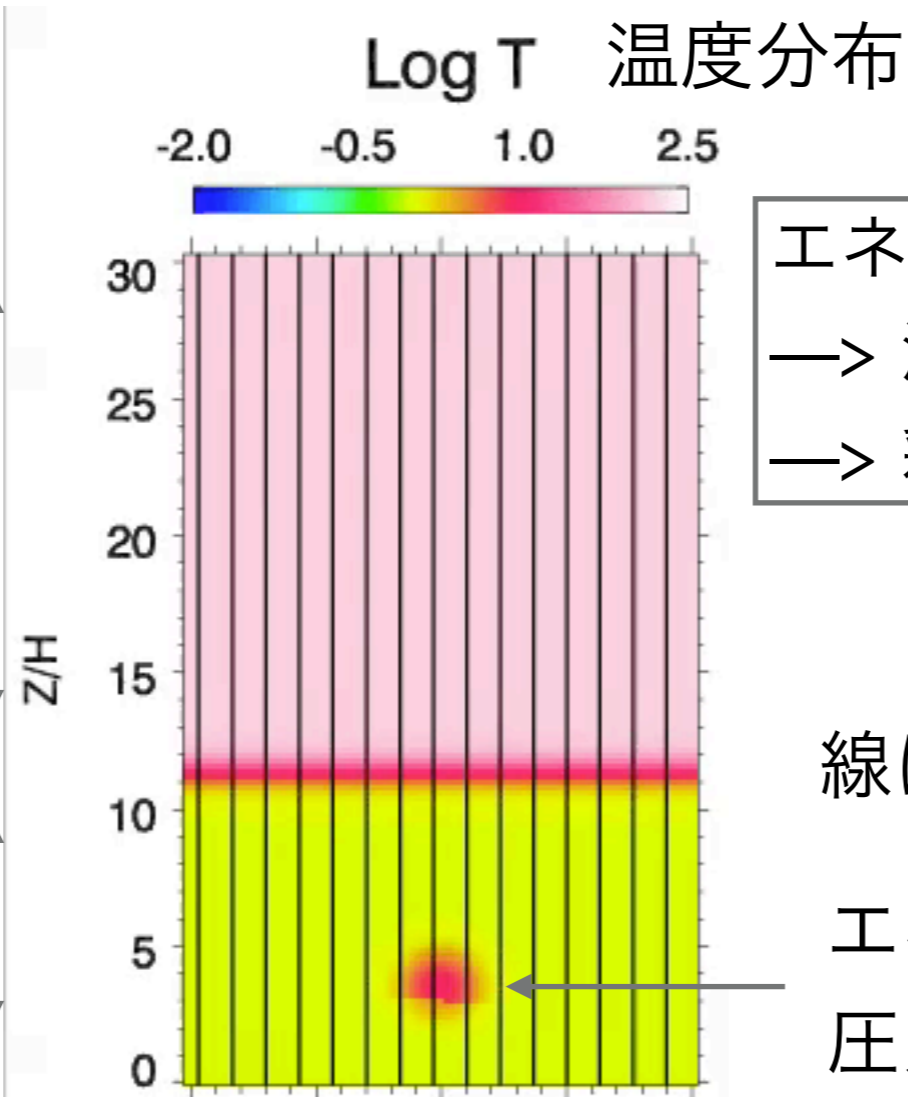
- ・ 彩層上部の**低密度なガスを衝撃波で加速**するので持ち上げが容易
- ・ このような衝撃波形成・ガスの加速は重力成層大気重要な性質
(e.g. 太陽, Shibata+81, ST+13, 超新星爆発, Colgate & White 66)

衝撃波駆動ジェットの例

太陽大気を模した
重力成層大気

コロナ (100万度)

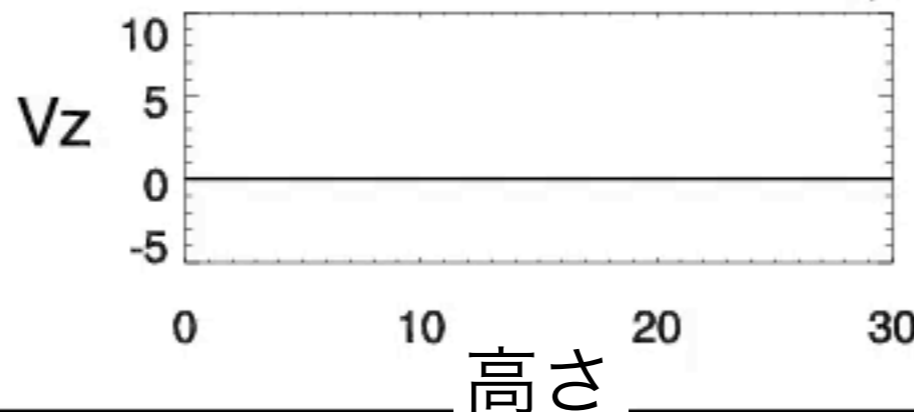
彩層 (1万度)



エネルギー解放
→ 波でエネルギー輸送・衝撃波形成
→ 彩層上部のガスを加速

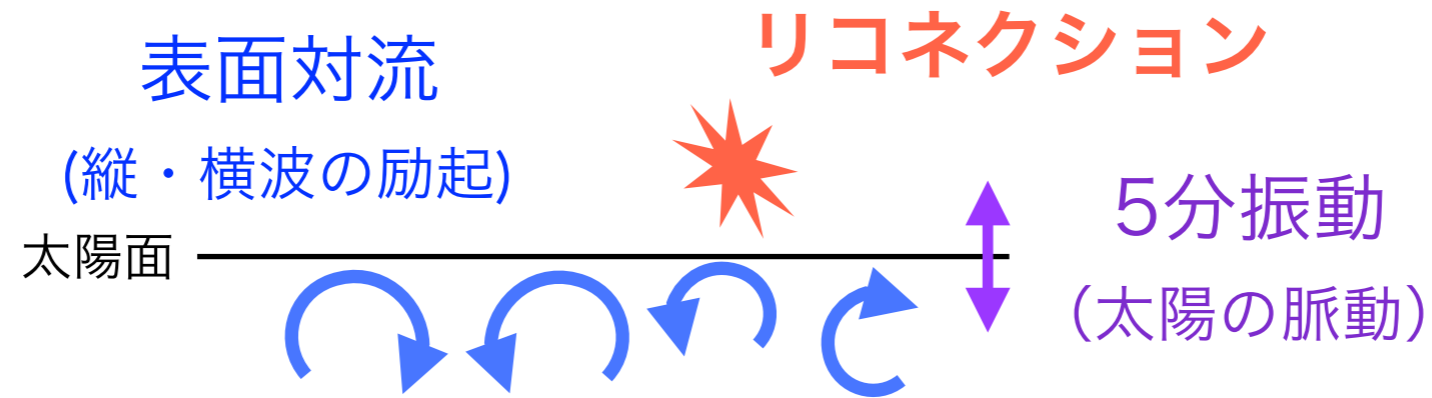
線は磁力線

エネルギー解放を模した
圧力上昇領域



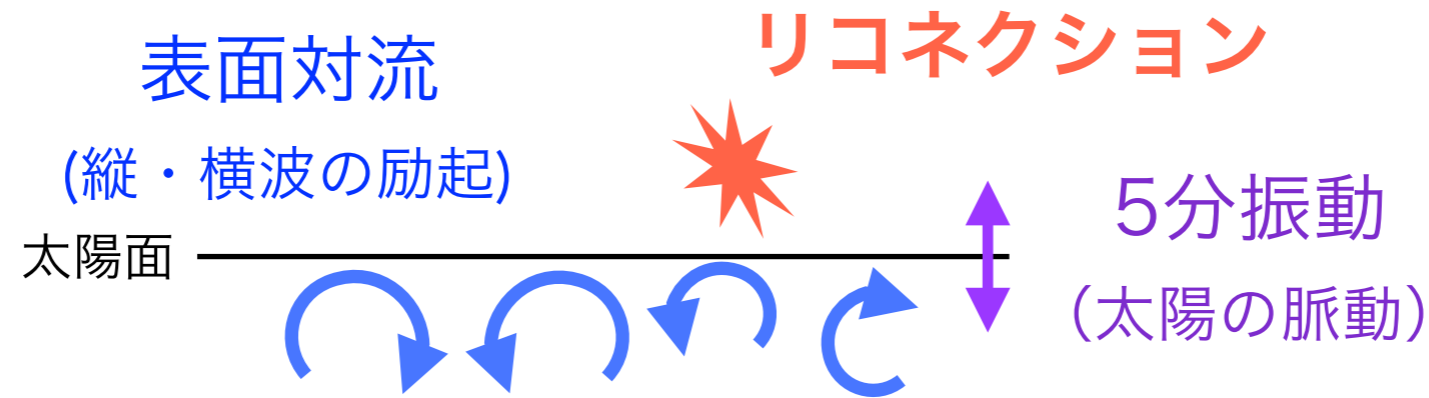
高さ方向の速度
振幅の増大に注目

衝撃波の種を作る機構



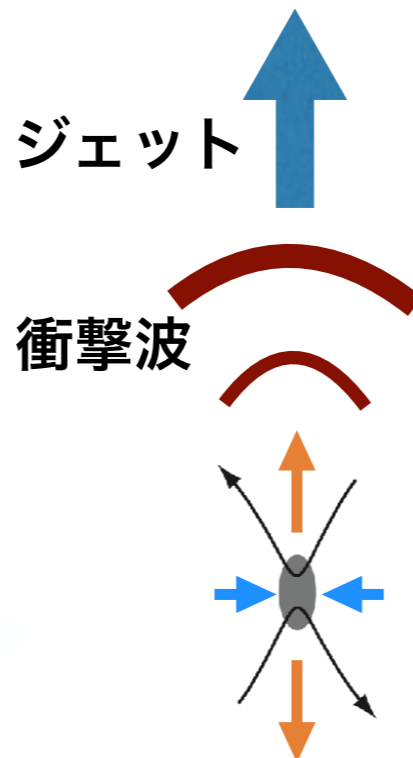
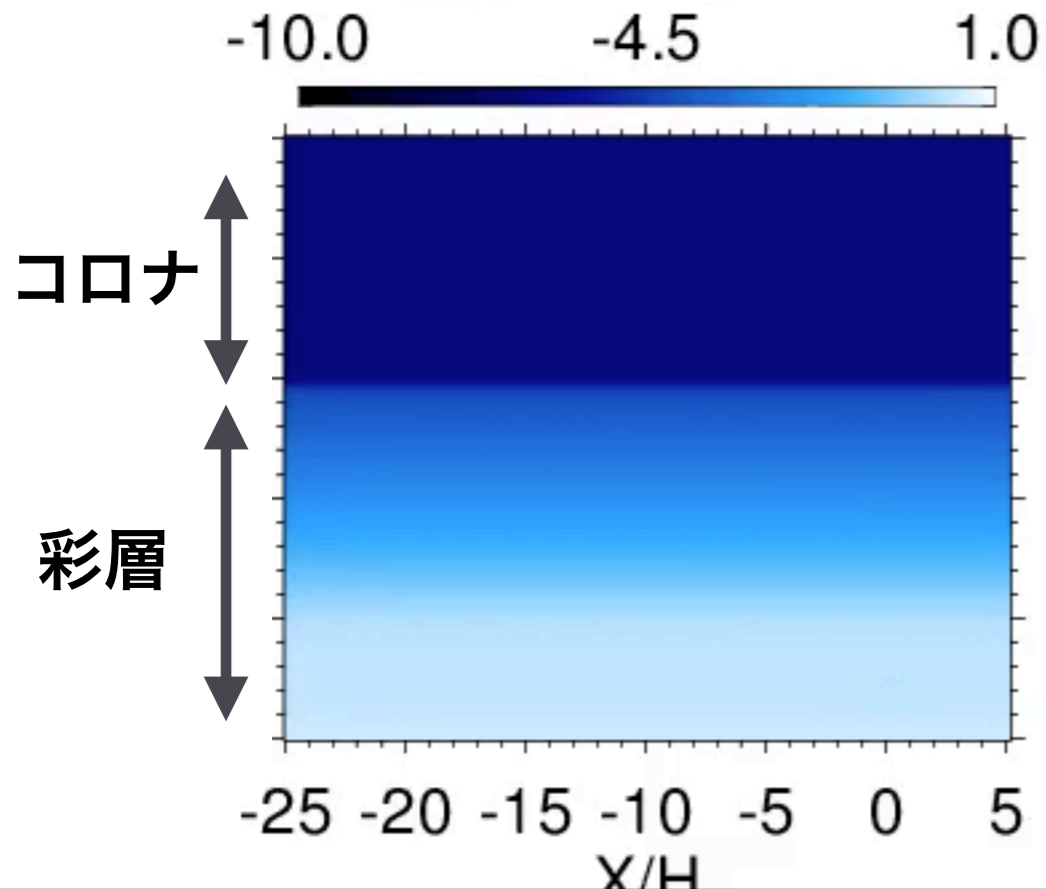
e.g. Kudoh & Shibata 99, De Pontieu+04, Shibata+07

衝撃波の種を作る機構



e.g. Kudoh & Shibata 99, De Pontieu+04, Shibata+07

密度分布

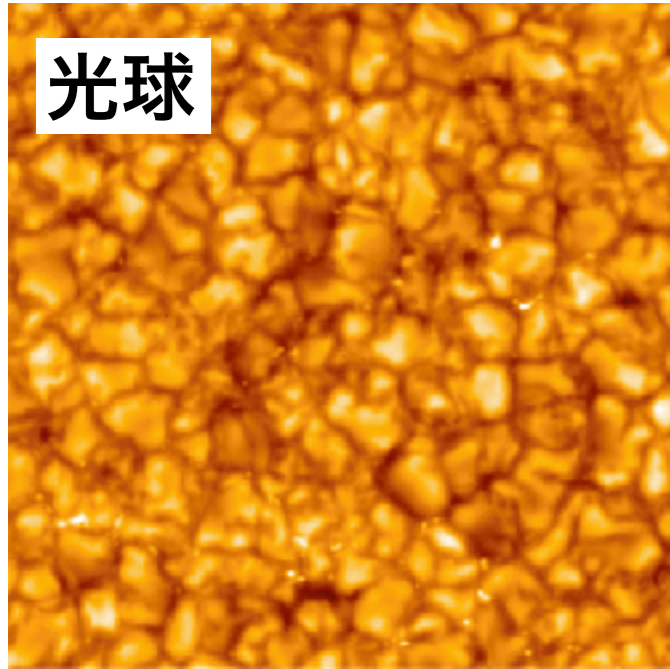


Takasao+13:

彩層リコネクションと
ジェットの関係を説明

(リコネクションアウトフロー
が衝撃波の種を生成)

渦運動が励起する衝撃波駆動ジェット

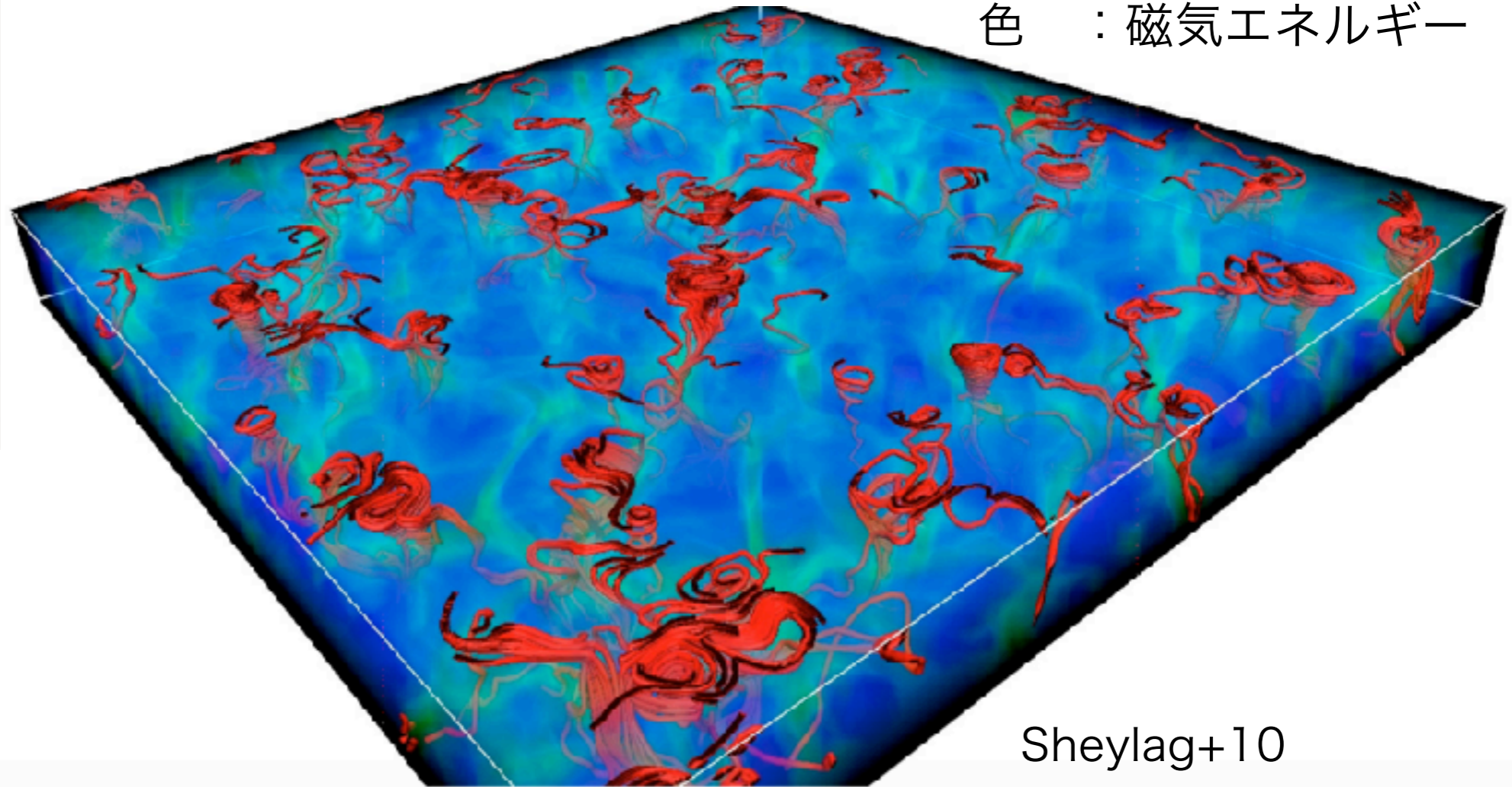


光球

Hinode/SOT, G-band
NAOJ/JAXA

赤線：流線

色：磁気エネルギー

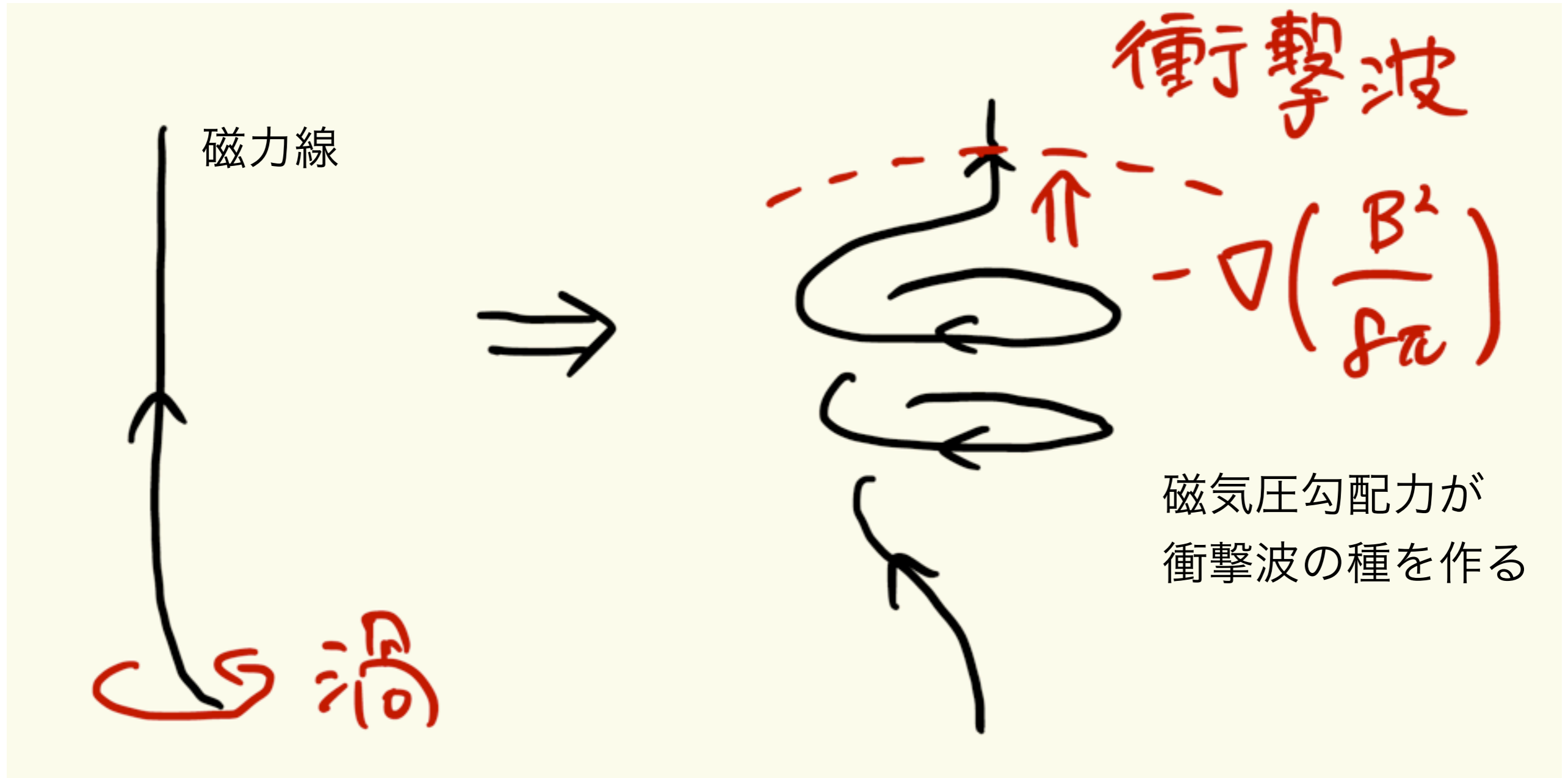


Sheylag+10

渦運動が駆動するアルフベン波の非線形化 → 衝撃波形成 → 彩層ジェット
(スピキュールなどの重要な加速過程： e.g. Kudoh & Shibata 99, Suzuki & Inutsuka 05)

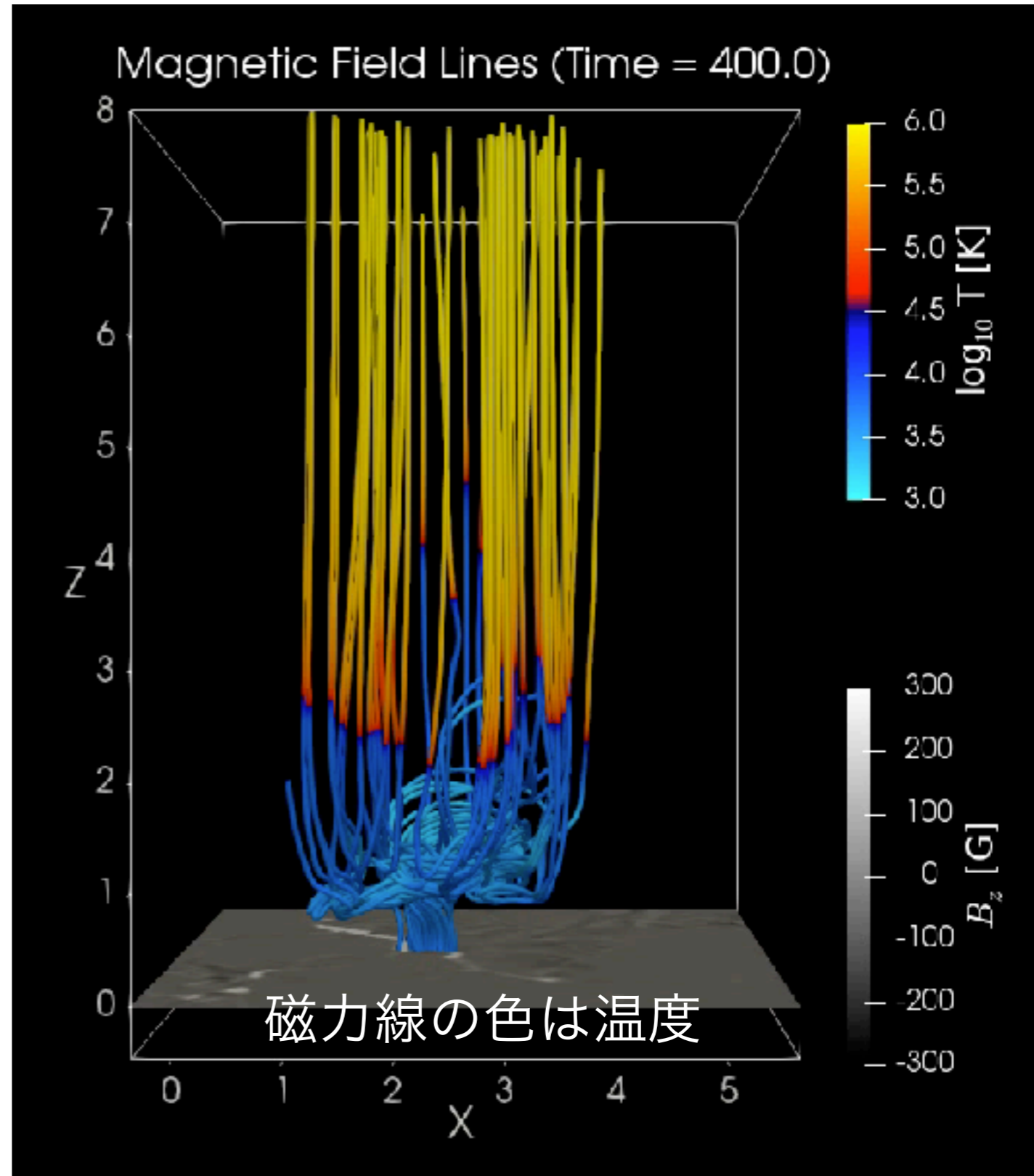
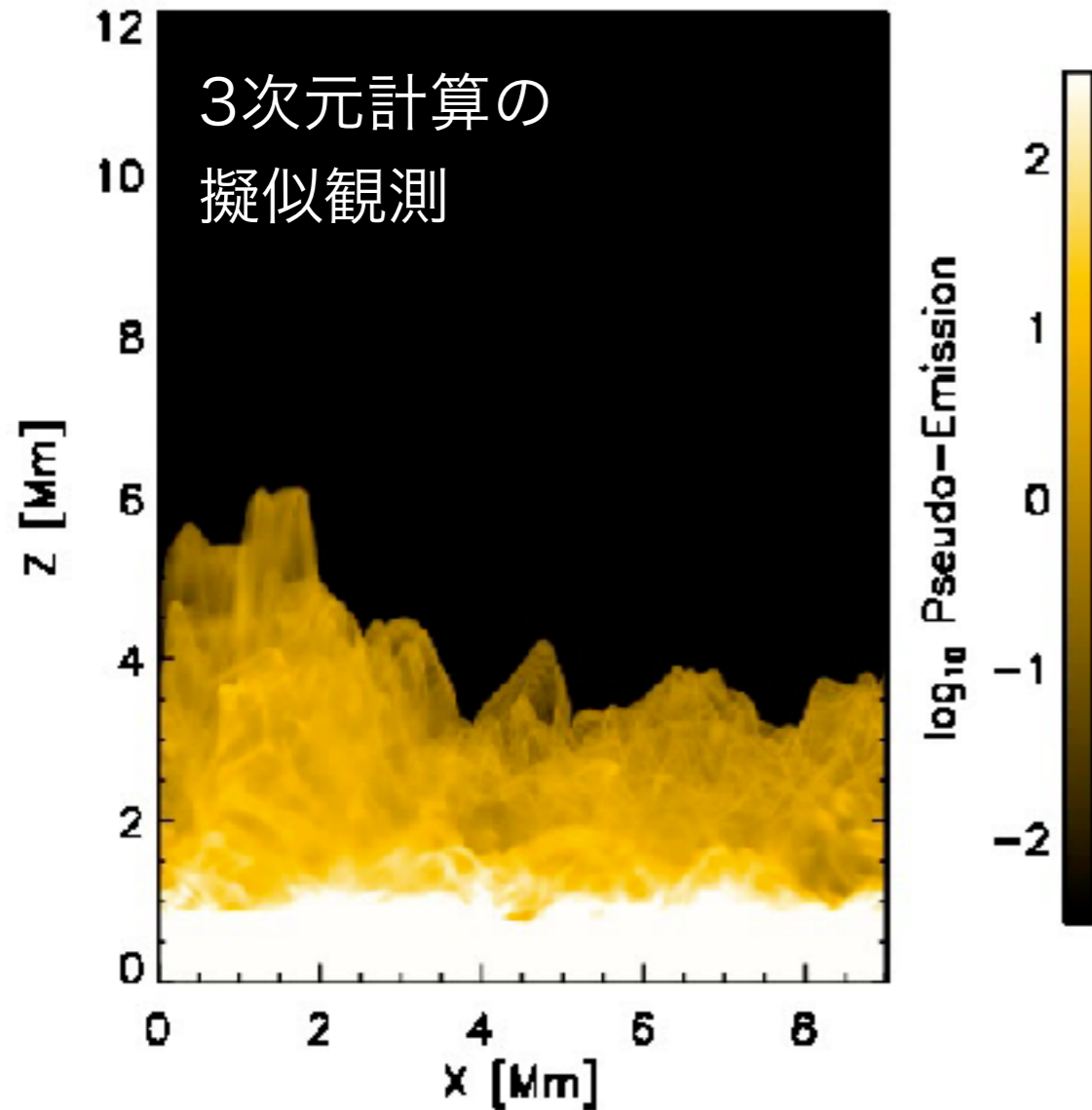
渦運動が励起する衝撃波駆動ジェット

渦が (torsional) アルフベン波を生成 → 波の非線形化・衝撃波 → ジェット



渦運動が励起する衝撃波駆動ジェット

Iijima & Yokoyama 17
time = 390.0 min



渦の回転エネ → 磁気エネ
→ 磁場で衝撃波形成
→ 彩層ジェット

アウトライン

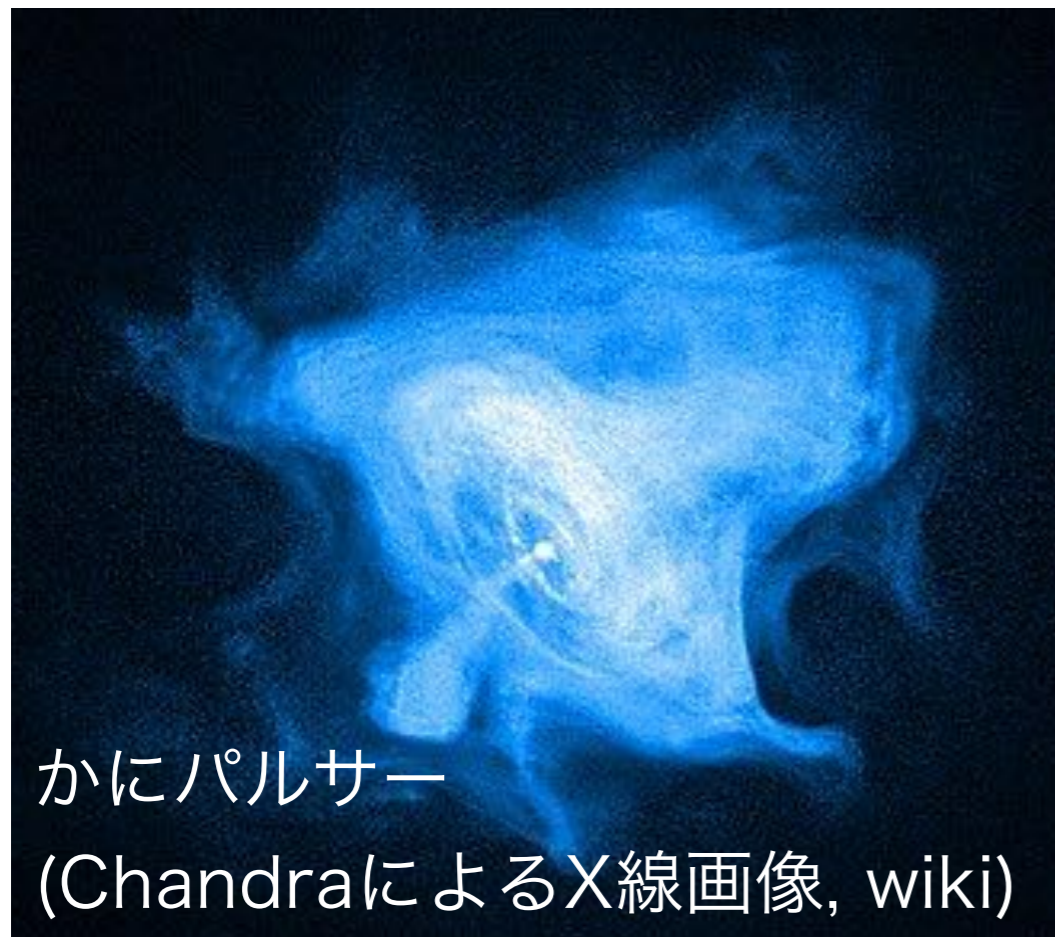
- ▶ 太陽・恒星・原始星の爆発現象の概観
- ▶ 爆発・ジェットの基本知識・基本物理
- ▶ 太陽物理から挑戦できる宇宙物理の問題

今回取り上げる問題

- ▶ 磁気リコネクション、粒子加速機構の解明
- ▶ 標準太陽モデルの完成への挑戦
- ▶ 太陽から迫る原始星・星周円盤進化の解明
- ▶ (大質量星形成の謎の解明)

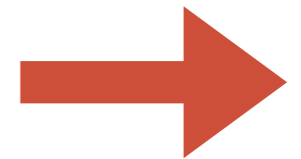
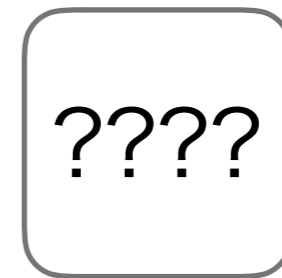
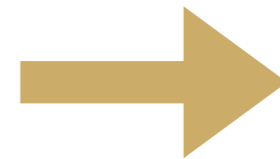
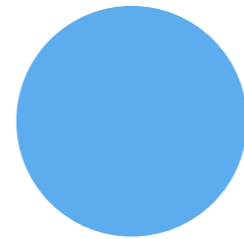
磁気リコネクション、粒子加速

宇宙には急速な磁気エネルギーの散逸・粒子加速を必要とするシステムが無数にある



例：パルサー風

パルサー



磁場で加速
(磁場優勢)

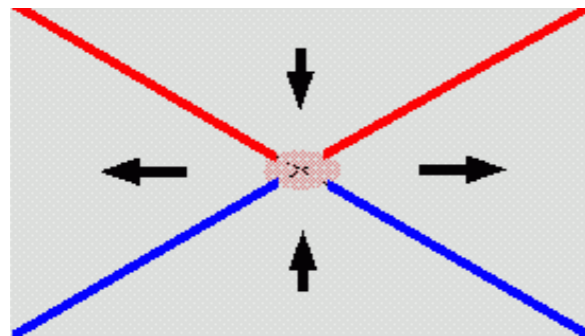
粒子の
運動エネルギー優勢

σ問題と言われ、
AGNジェット、GRBなどでも同様に
超重要未解決問題とされている

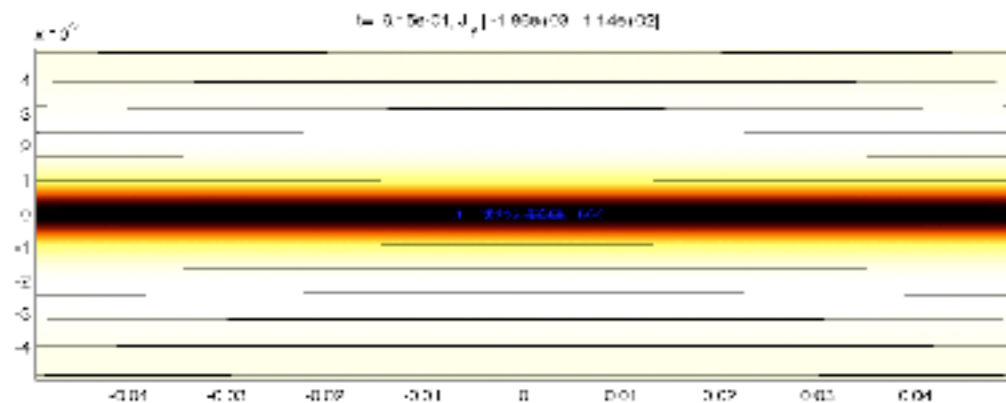
リコネクションの役割が注目を集めている

磁気リコネクション、粒子加速

リコネクションの古典的描像



現在の描像



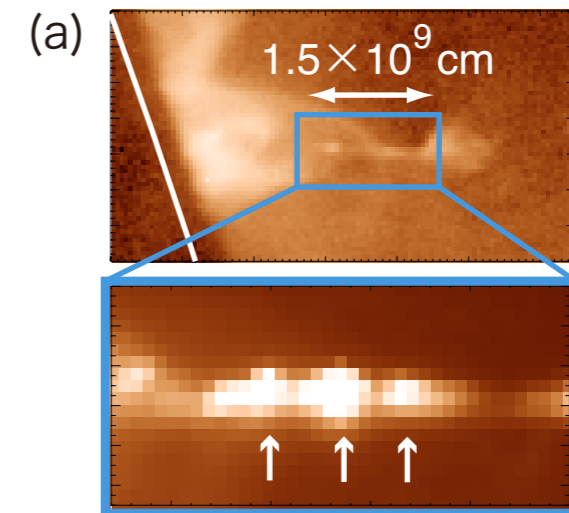
Huang & Bhattacharjee 10

理論予測：リコネクションは乱流的

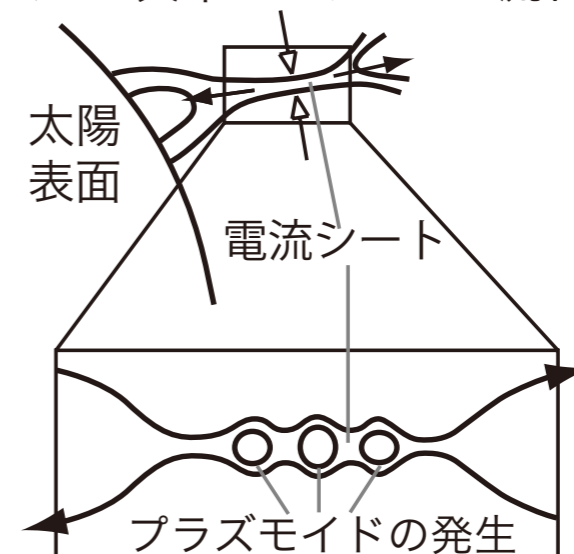
(レビュー：Shibata & ST 16)

プラズモイドの発見 (ST+12)

粒子加速の証拠を発見 (ST+16)



(b) 矢印：プラズマの流れ



太陽フレア研究からリコネクションが関係する現象（ σ 問題など）の理解へ

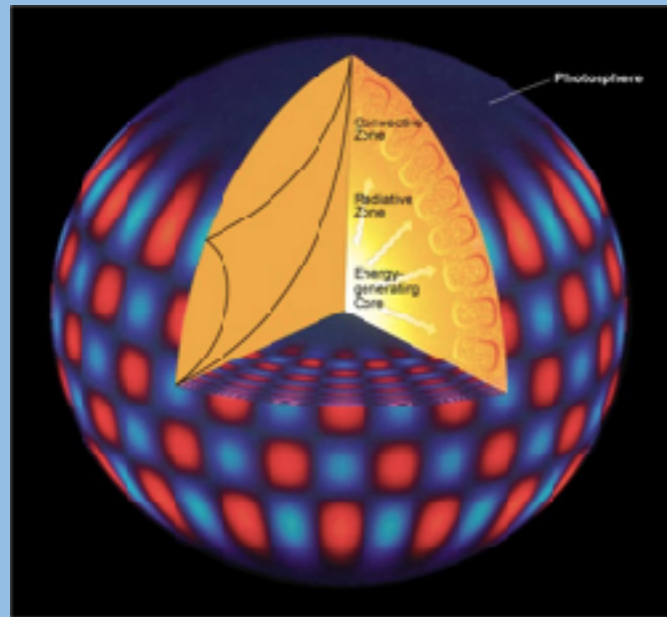
今回取り上げる諸問題

- ▶ 磁気リコネクション、粒子加速機構の解明
- ▶ **標準太陽モデルの完成への挑戦**
- ▶ 太陽から迫る原始星・星周円盤進化の解明
- ▶ (大質量星形成の謎の解明)

揺らぐ基盤：標準太陽モデル

恒星モデルの基盤：標準太陽モデル (see review by e.g. Serenelli 16)

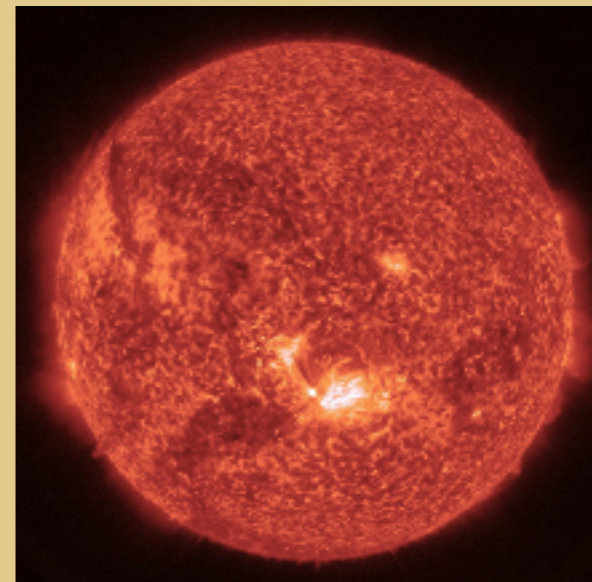
日振学による
星構造推定



credit : John W. Harvey, NOAO

←→
不一致

分光観測による組成決定、
それをもとに星構造を構築



credit : NASA/SDO



<http://kingofwallpapers.com/prism.html>

我々は最も身近な恒星である太陽ですら
十分に理解していない

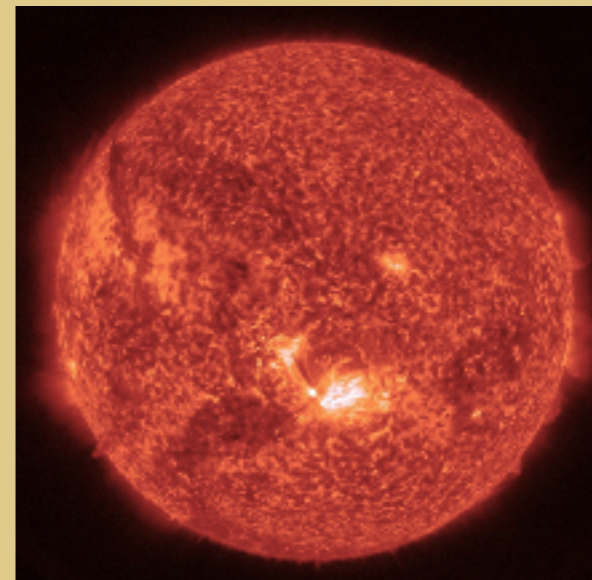
揺らぐ基盤：標準太陽モデル

恒星モデルの基盤：標準太陽モデル (see review by e.g. Serenelli 16)

20年経ってもまだ収束しない

El.	CN93	CS98	AGSS09	C11	AGSS15
C	8.55	8.52	8.43	8.50	—
N	7.97	7.92	7.83	7.86	—
O	8.87	8.83	8.69	8.76	—
Ne	8.08	8.08	7.93	8.05	7.93
Mg	7.58	7.58	7.60	7.54	7.59
Si	7.55	7.55	7.51	7.52	7.51
S	7.33	7.33	7.13	7.16	7.13
Fe	7.50	7.50	7.50	7.52	7.47
$(Z/X)_{\odot}$	0.0245	0.0230	0.0180	0.0209	—

分光観測による組成決定、
それをもとに星構造を構築



credit : NASA/SDO



<http://kingofwallpapers.com/prism.html>

スペクトル解釈の部分に問題？ (天文学的問題)

最深部における不透明度 (opacity) の理論に問題？ (基礎物理学的問題)

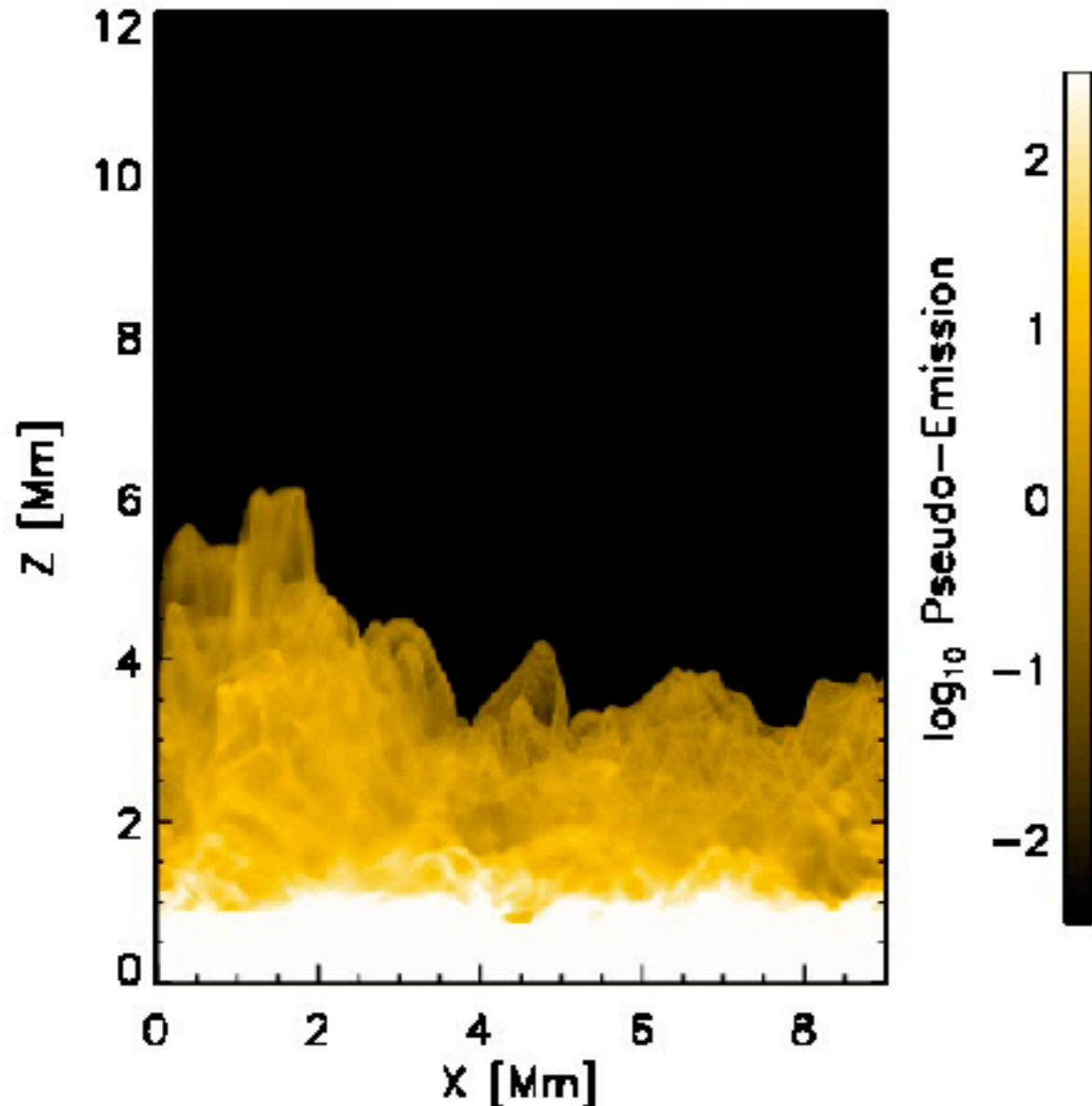
恒星進化モデル、銀河の化学進化、惑星形成過程の理解に多大な影響

標準太陽モデルの完成に向けて

組成決定に使うスペクトル線観測の解釈に必須の**動的な大気構造の理解**が必要
(具体的には**放射輝線のライン幅を決めるガスの速度分散の分布**など)

Iijima & Yokoyama 17 の輻射MHD計算

time = 390.0 min



対流やジェットなどガスの速度分散を生む物理過程の理解が本質的

なぜか太陽分野でこれを真剣に考えている人が意外にいない・・・
表面对流の観測・大気の輻射MHDシミュレーションなどやっている人は是非挑戦してみるべし

参考文献：

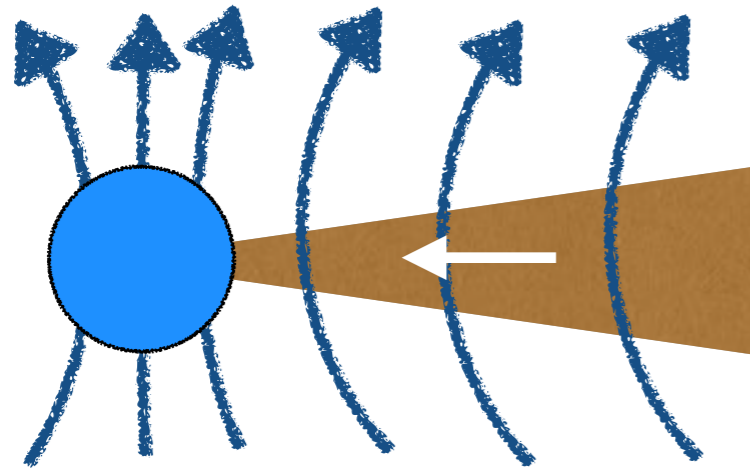
Drake & Testa 05, Beeck+13a,b, 15a,b, Serenelli 16 etc

今回取り上げる諸問題

- ▶ 磁気リコネクション、粒子加速機構の解明
- ▶ 標準太陽モデルの完成への挑戦
- ▶ **太陽から迫る原始星・星周円盤進化の解明**
 - ▶ 降着率の決定、降着衝撃波の宇宙線加速
 - ▶ 原始星周りのガス構造・原始星フレア
- ▶ (大質量星形成の謎の解明)
 - ▶ 私の目指す方向性の1つ、
ただし今日は時間の都合でスキップ

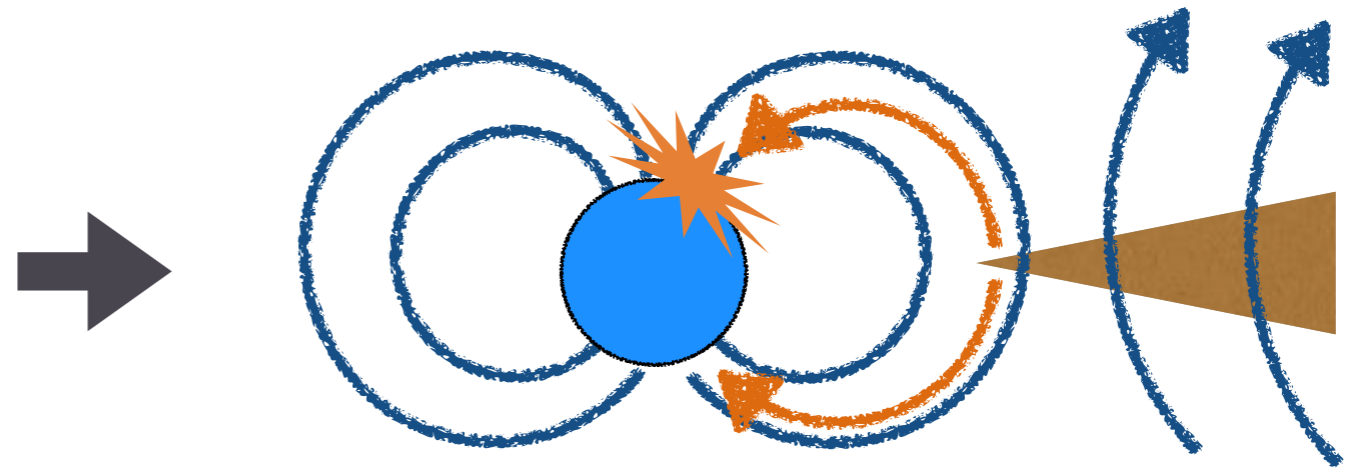
星近傍の古典的理解

原始星初期：円盤赤道からの降着

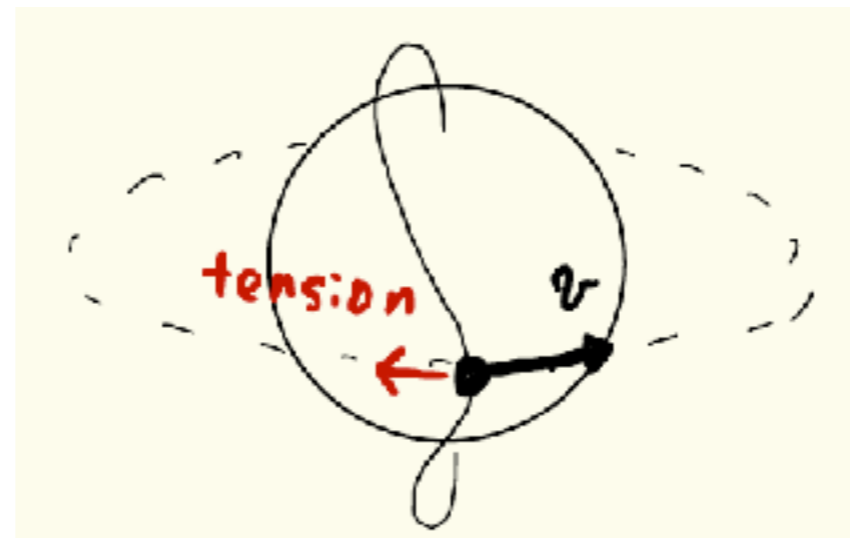


e.g. Machida+08

原始星後期、前主系列星
強い星磁場による磁気圏降着



e.g. Königl 91, Romanova+12

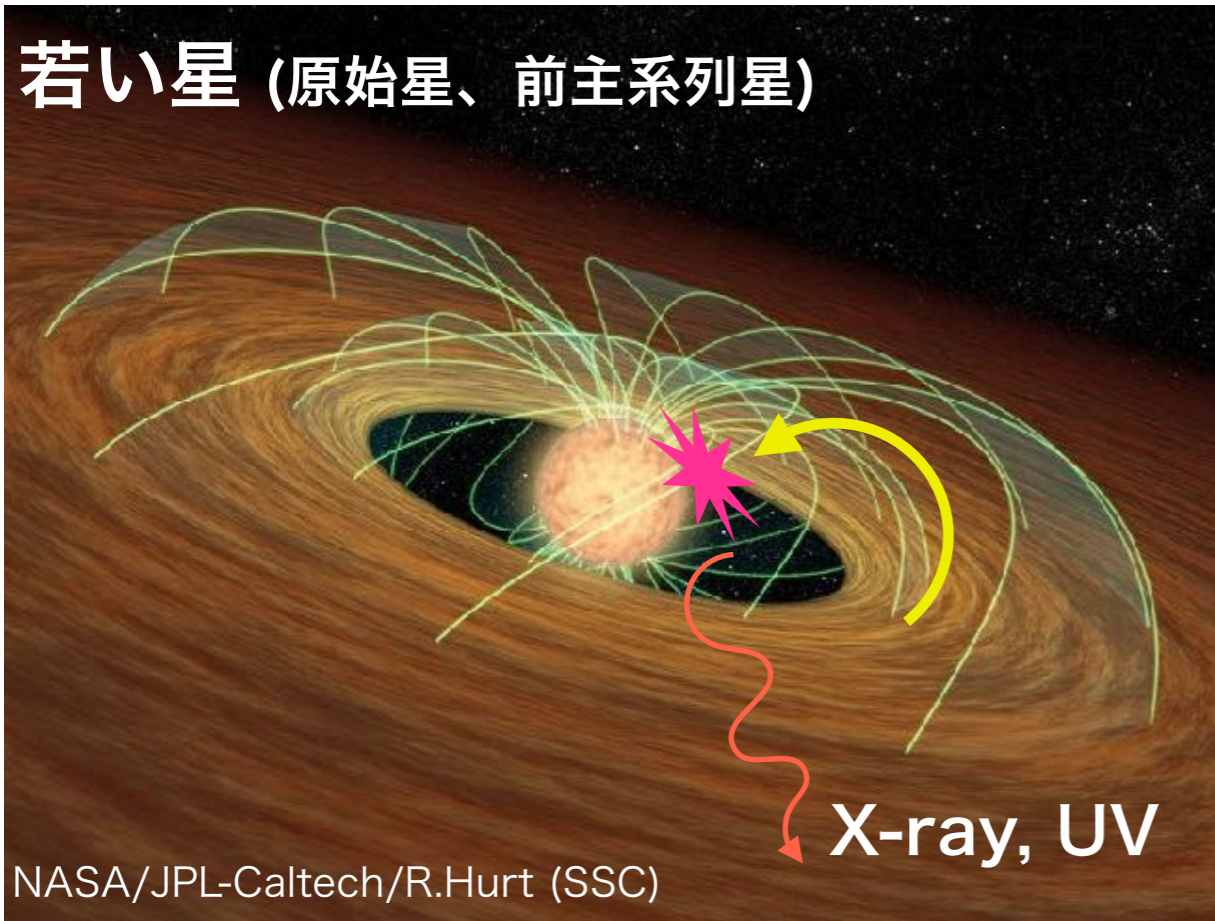


円盤ガスは星磁場で
急ブレーキ、
遠心力を失い自由落下
→ 降着衝撃波

進化段階によって降着形態が異なる。降着の観測的特徴も異なる。

星への質量降着過程の不定性

若い星 (原始星、前主系列星)



降着率：星・円盤進化を特徴付ける基本量

星への質量降着率の推定：

降着衝撃波から出る放射を利用

主な波長は X線、UV

(e.g. Calvet & Gullbring 98, Muzerolle+98)

現状の降着衝撃波モデルでは降着率を統合的に説明できていない

例：X線で見積もった降着率 \ll UV で見積もった降着率

(e.g. Gullbring+98, Muzerolle+00, Curran+11)

太陽から何かわからないか？

降着を受ける星としての太陽

SDO/AIA 171 Å (~60万K)



Reale+13

- ・ 太陽フレアの際、一度持ち上がったプラズマの大部分は重力で落下
 - ・ 星表面にぶつかる時に増光
- 星表面で衝撃波… **降着衝撃波!**

太陽観測・モデリングから得られた

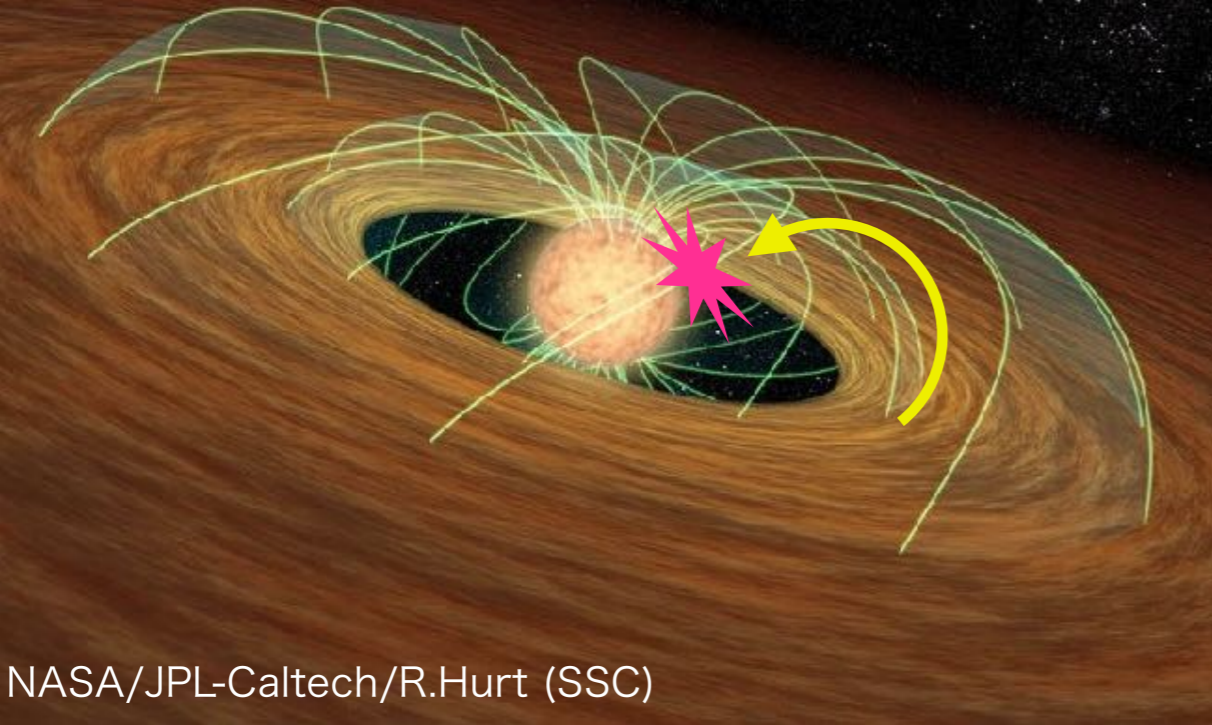
1つの成果:

衝撃波周りの彩層プラズマなどによる
吸収の波長依存性 (Reale+13)

**時空間分解 & 多波長観測ができる
太陽観測の利点を活かした研究成果**

降着衝撃波は電離源になり得るのか？

若い星 (原始星、前主系列星)



NASA/JPL-Caltech/R.Hurt (SSC)

星形成領域における電離源に関する話は
星形成理論の大きな不確定要素

これまで：銀河宇宙線が主要な電離源

現在：星周囲での宇宙線加速も重要では!?

例：降着衝撃波による宇宙線加速

(e.g. Padovani+15)

太陽では空間分解・多波長観測が可能

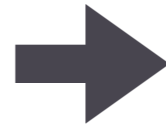
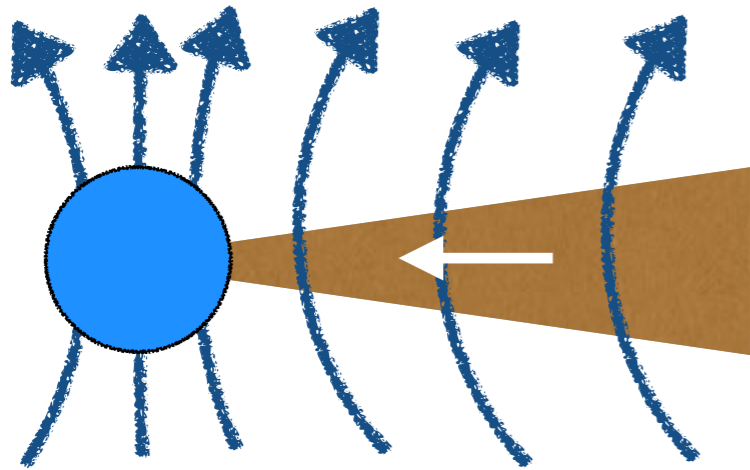
降着衝撃波からの高エネルギー放射を調査 → 粒子加速効率に制限

まだ誰もやっていないので一緒に考えてみませんか？

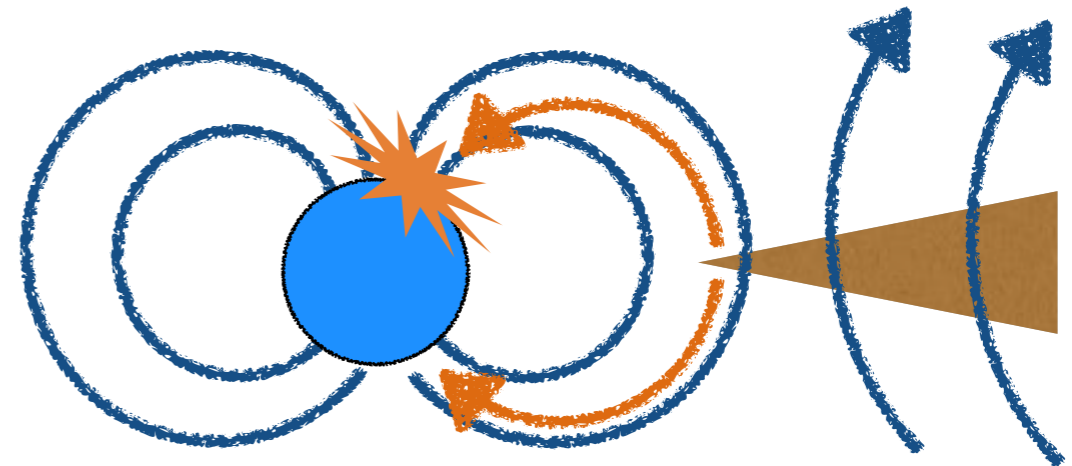
そもそも我々は降着流構造をどのくらい理解しているのか？

降着構造の古典的理解

原始星初期：円盤赤道からの降着



原始星後期、前主系列星
強い星磁場による磁気圏降着

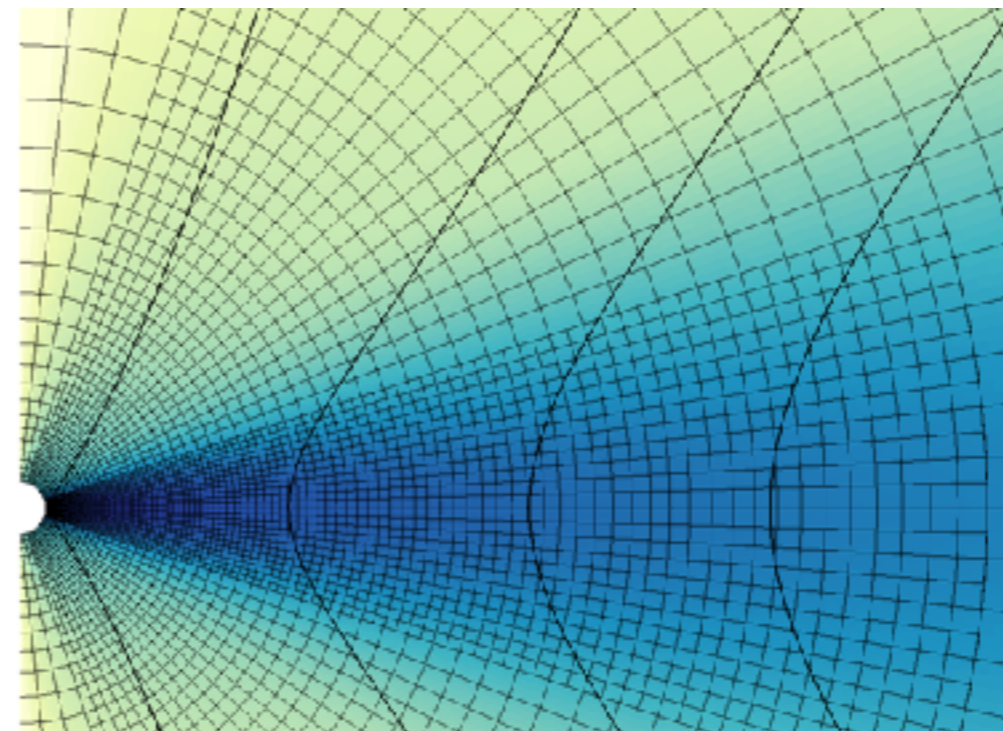
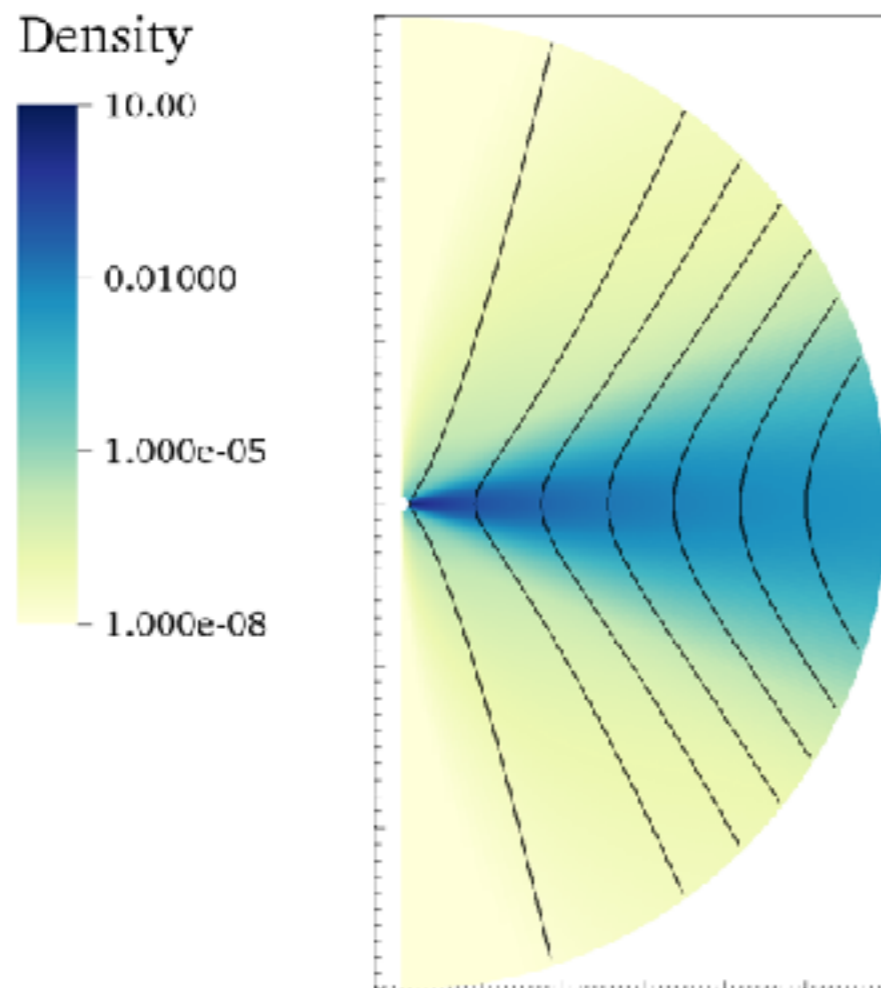
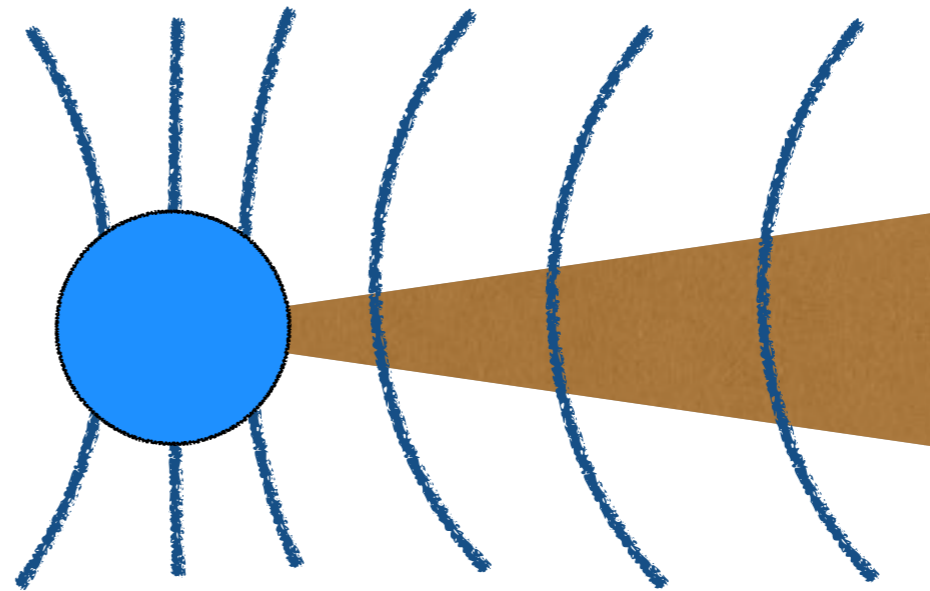


しかしこの2つに分類できない天体が多数：我々の理解はまだまだ不十分
(e.g. **磁場が弱いのに降着衝撃波**を示す星が沢山ある, Cauley & Johnstone 14)

3D MHD モデル

Takasao+18

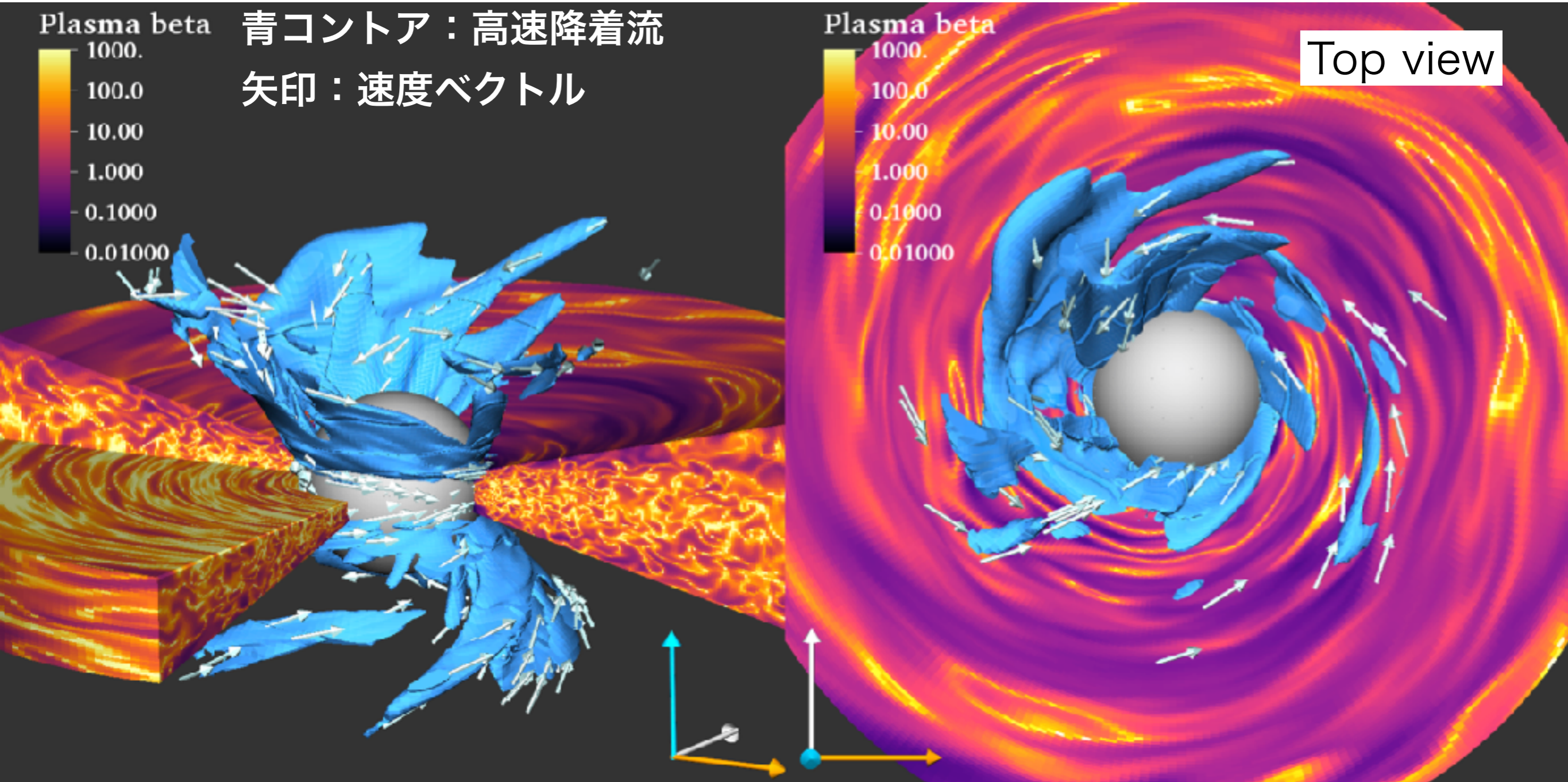
磁気圏なしで
星磁場が弱いモデルを仮定し、
降着・磁場構造を再検討



領域サイズ: 60 R_{star} ~ 0.7 au
物理時間: ~300 rot ~ 0.2 yr
(Herbig Ae の場合)

新しい降着モードの発見

Takasao+18



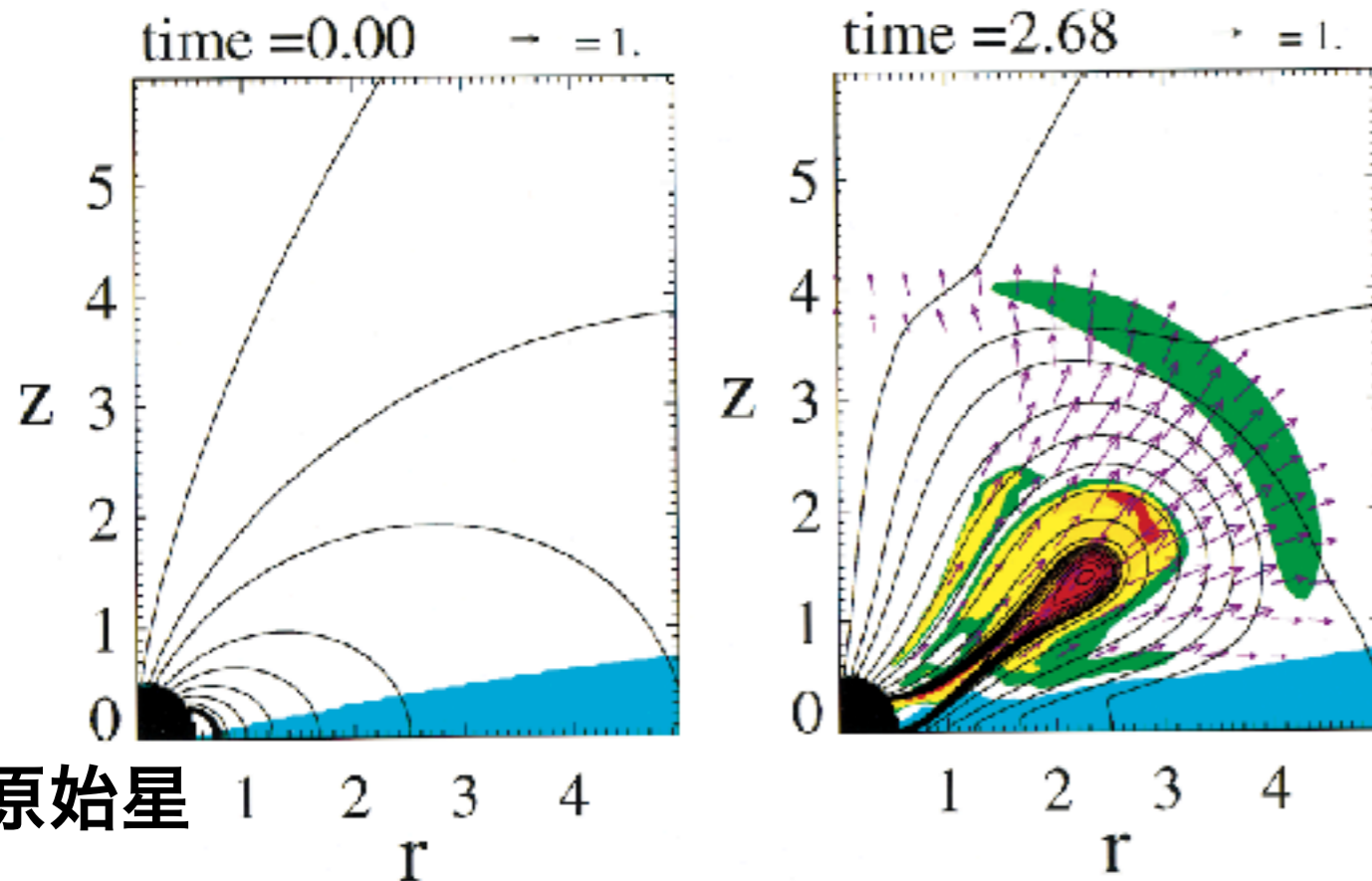
- ▶ 円盤降着 + 上空からの降着という新しいモードを発見
- ▶ 星磁場が弱くても降着衝撃波を形成 → 宇宙線加速の可能性 (Padovani+15)

原始星フレアの起源も未解明

エネルギー： 10^{35-37} erg $\longleftrightarrow E = \frac{B^2}{8\pi} V$

$$E \approx 4 \times 10^{36} \text{ erg} \left(\frac{B}{1000 \text{ G}} \right)^2 \left(\frac{L}{10^{11} \text{ cm}} \right)^3$$

フレアのサイズが星半径スケール程度である必要性（非常に巨大！）



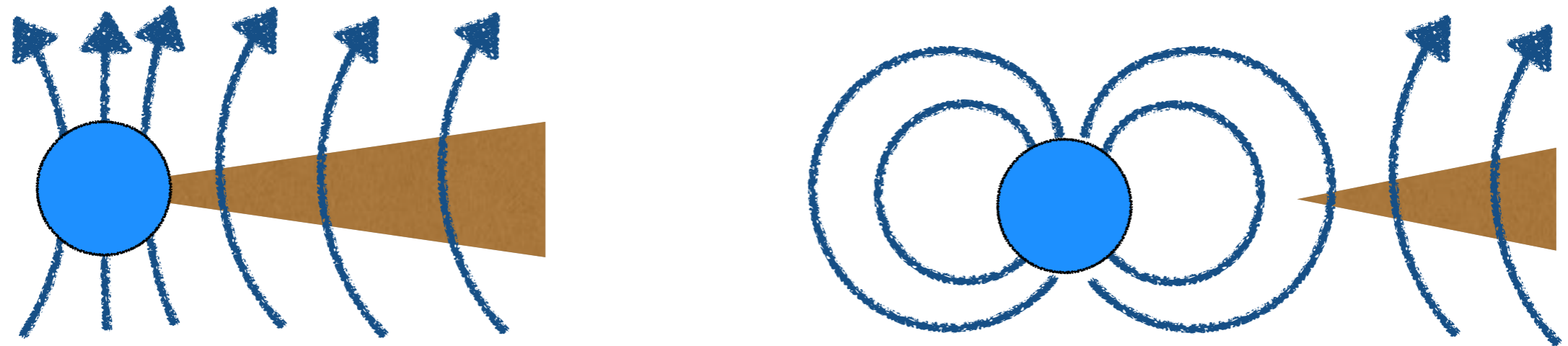
現在の有力な説 (Hayashi+96)

- 円盤の回転エネ
- 磁気圏の磁場をねじって
磁気エネを増加
- 星のサイズ以上のスケールで
大フレア

原始星フレアの起源も未解明

降着率が高い (円盤密度が高い) と磁気圏は潰れてできない

磁気圏形成の条件：
$$\frac{B^2}{8\pi} > \frac{1}{2}\rho v_K^2$$



進化段階的に

こっちにいる可能性も十分ある

磁気圏由来のフレア以外の可能性も考える必要がある

新しい原始星フレアのモデル

未出版の結果なので削除させていただきます

おわりに

以下私見：近年観測や理論の進展で研究対象が多様化し、お互いの興味・問題意識を共有しにくい状況になっている。しかしそれでは分野の細分化と先細りを助長し建設的ではない。

- ・ その研究はなぜ面白いのか、なぜ重要なのか
 - ・ 宇宙物理学の大きな潮流の中でどこに位置づけられるのか
 - ・ 先10年後にはどう展開していくのか、いきたいのか
- これを考え続け、狭い世界に閉じこもらない姿勢が大事だと感じる

面白い研究を一緒に進めていきましょう！