

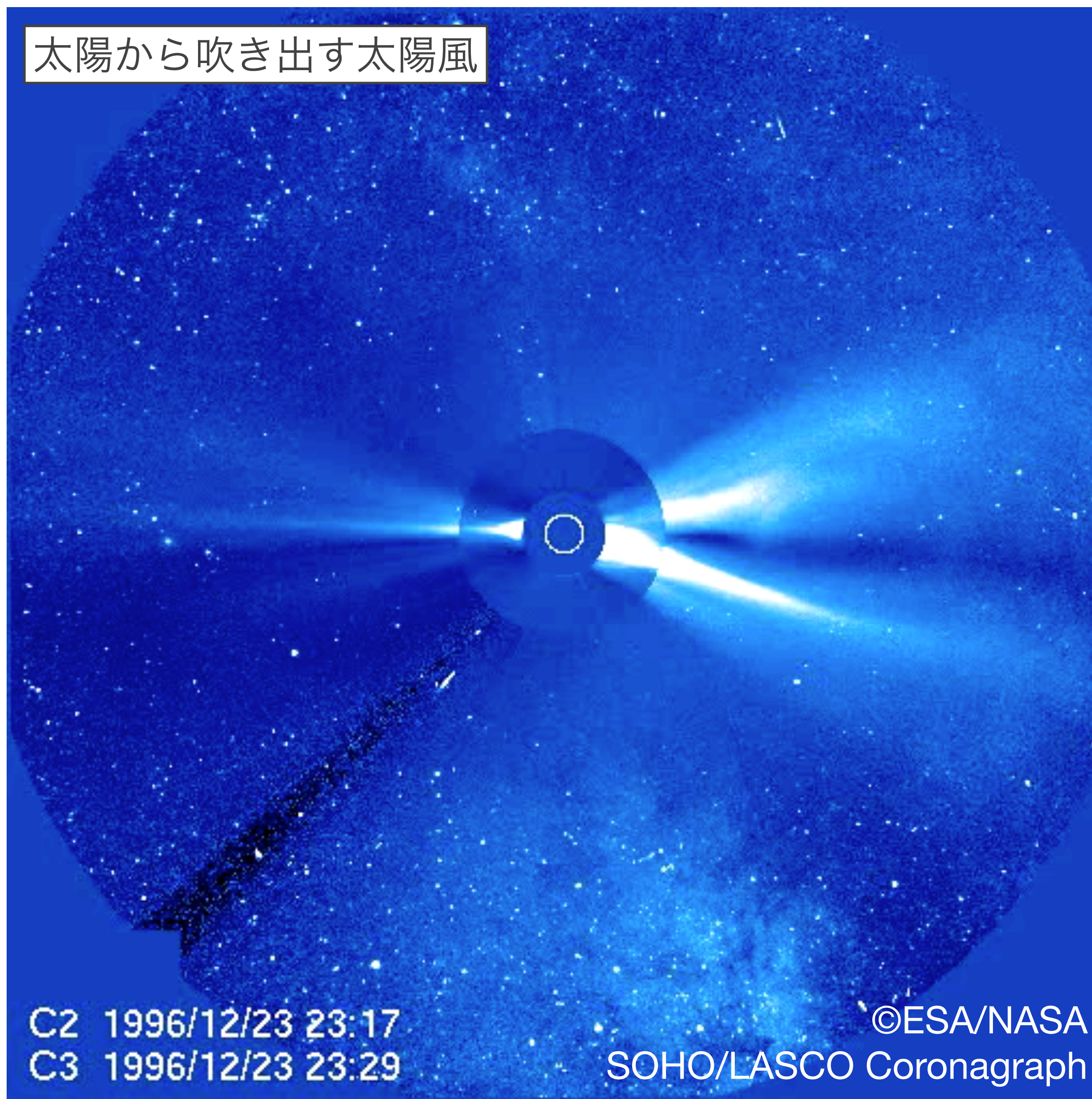
2023.10.27 科学技術計算分科会 2023年度会合 富岳スペシャル4.0 ～広がる応用～ @神戸国際会議場

富岳で迫る太陽風の起源

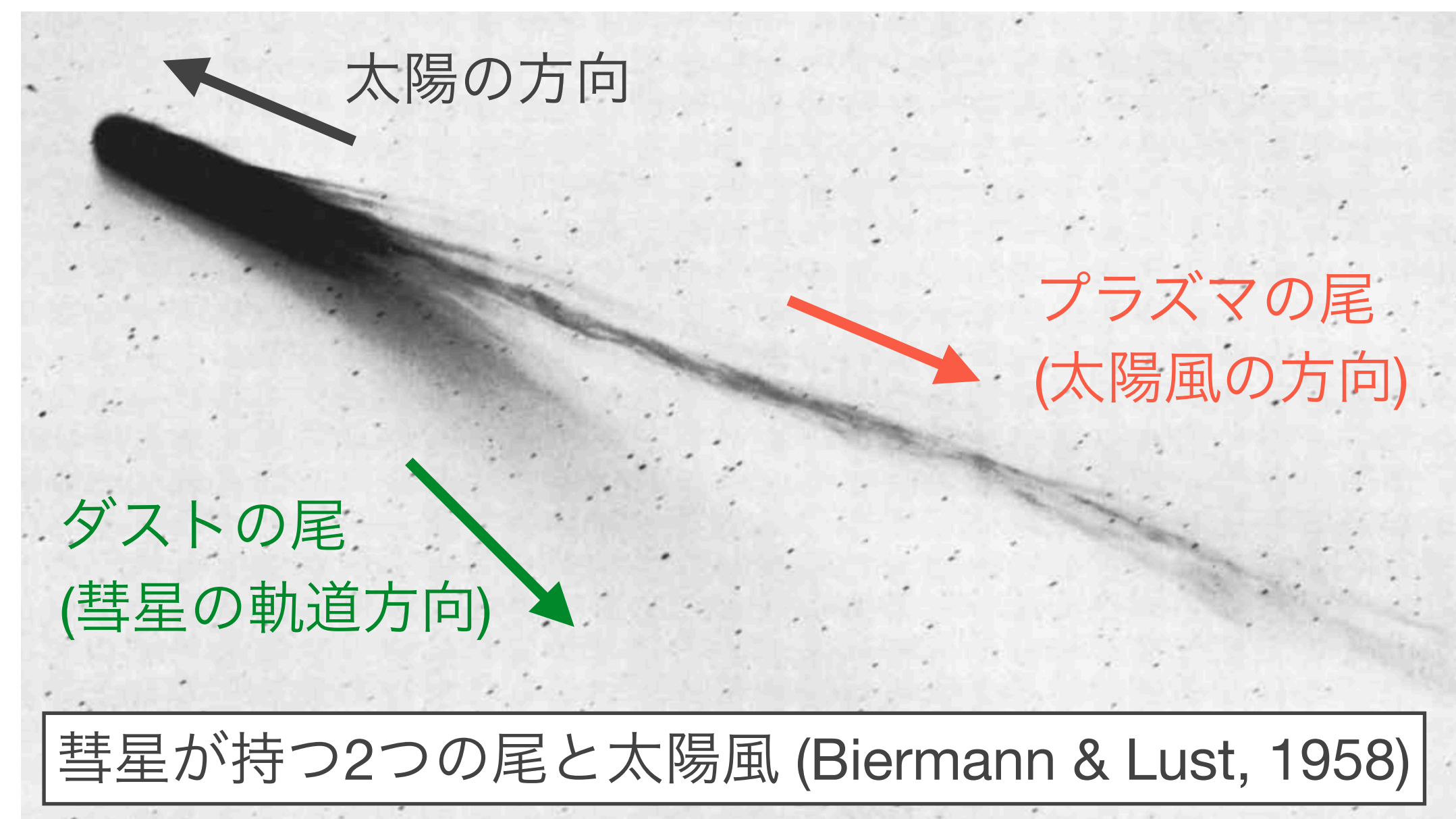
飯島 陽久 名古屋大学 宇宙地球環境研究所/高等研究院

太陽風とは？

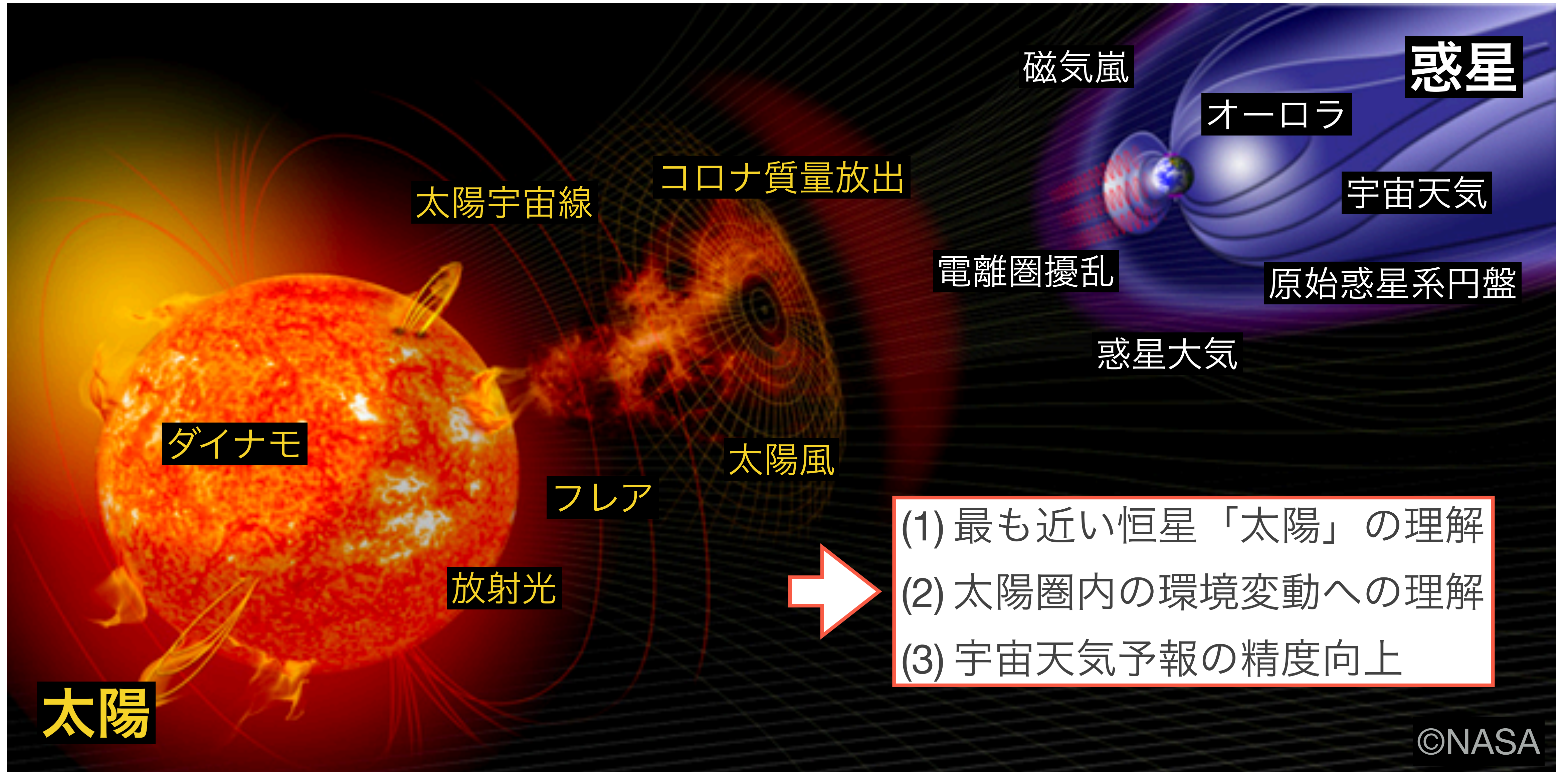
太陽から吹き出す太陽風



- 太陽から吹き出す超音速のプラズマ流
20世紀中ごろに発見
以降、その形成機構が長年の謎



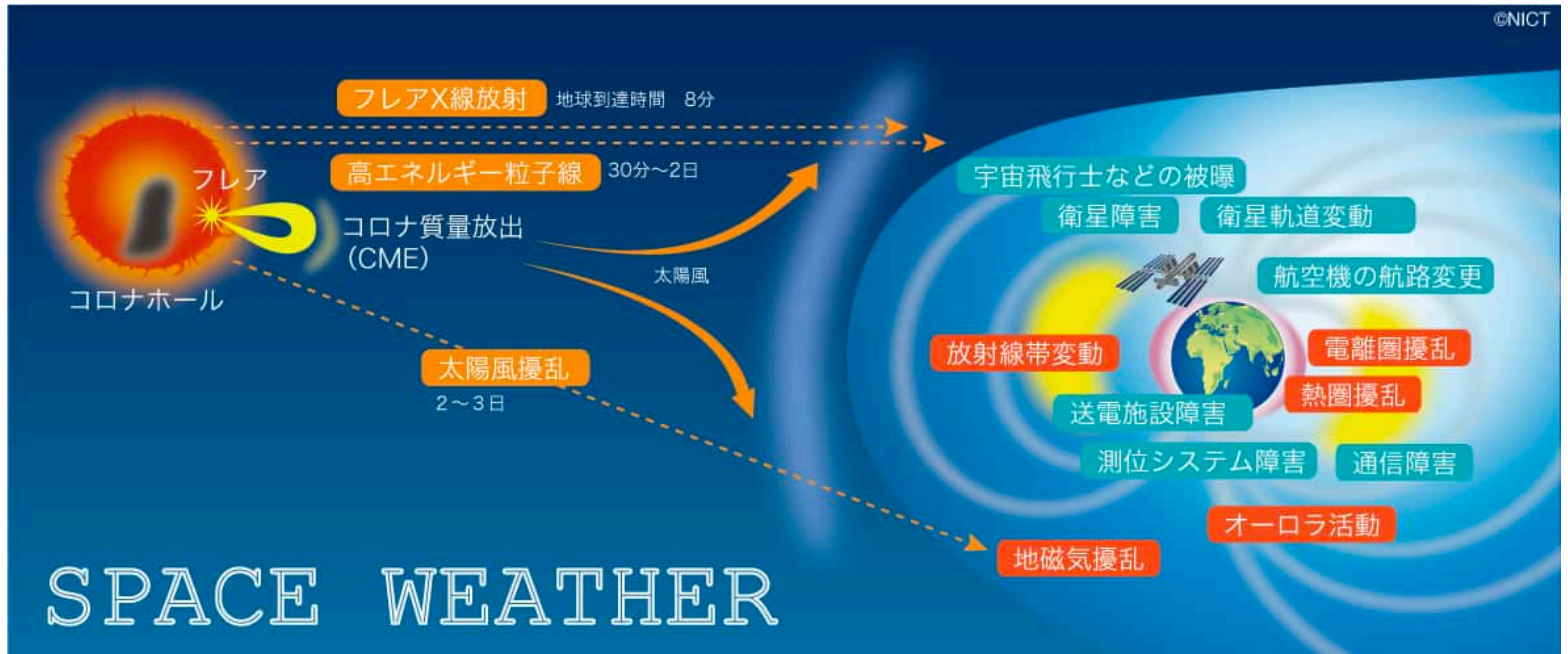
なぜ太陽を研究するのか



宇宙天気とは？

■ 宇宙天気: 太陽活動が生み出す地球磁気圏・電離圏擾乱の総称

電波通信の障害や宇宙線被爆など社会システムへ影響; 予測精度の向上が研究課題



本研究の概要

■ これまでの研究: 太陽風のみ計算

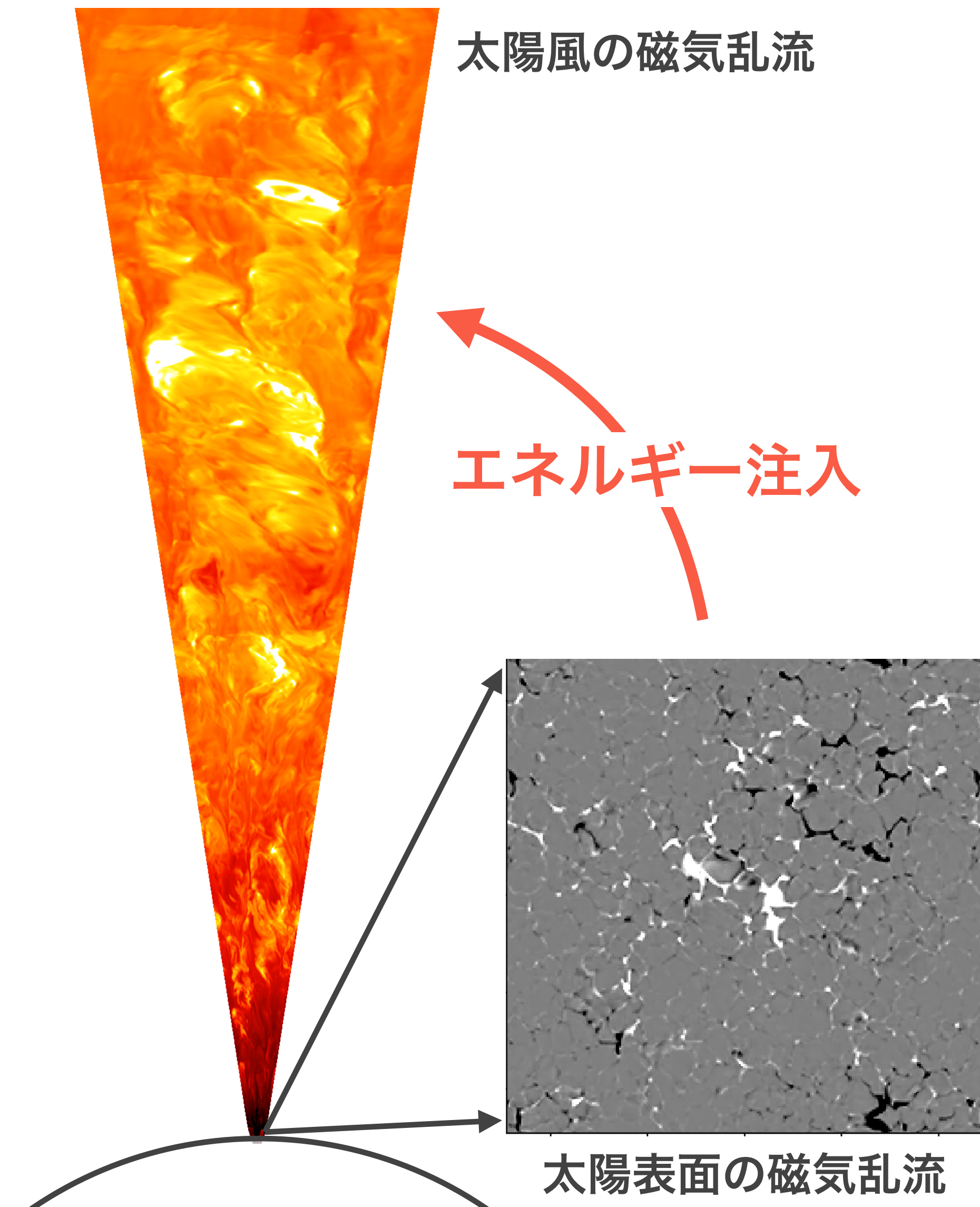
太陽内部(~100 km)から太陽風(~1千万 km)まで
大きな**時間・空間スケールのギャップ**が存在

密度も約20桁変化、**物理量のギャップ**も大きい
磁気乱流を分解するため**格子点数**も必要

⇒ コスト、安定性のため一貫した計算が困難

■ 今回の研究

- (1) エネルギー整合性の高い計算手法を開発と
 - (2) スーパーコンピュータ「富岳」の利用により太陽内部から太陽風までの一貫した計算が実現
- 恣意的な仮定なく観測と整合的な太陽風を再現**



目次

- はじめに
- (1) 計算手法面での工夫: エネルギー整合磁気流体スキーム
- (2) 実装面の詳細: 並列化、高速化
- (3) 科学成果: 「富岳」による太陽風の輻射磁気流体計算
- まとめ

**(1) 計算手法面での工夫:
エネルギー整合磁気流体スキーム**

エネルギー-整合磁気流体スキームの概要

- 格子を使った微分方程式の数値解法

$$\boxed{f_{j-2}} \quad \boxed{f_{j-1}} \quad \boxed{f_j} \quad \boxed{f_{j+1}} \quad \boxed{f_{j+2}}$$

$$(f'')_j \approx (f_{j+1} - f_{j-1})/2$$

- 従来手法の問題点

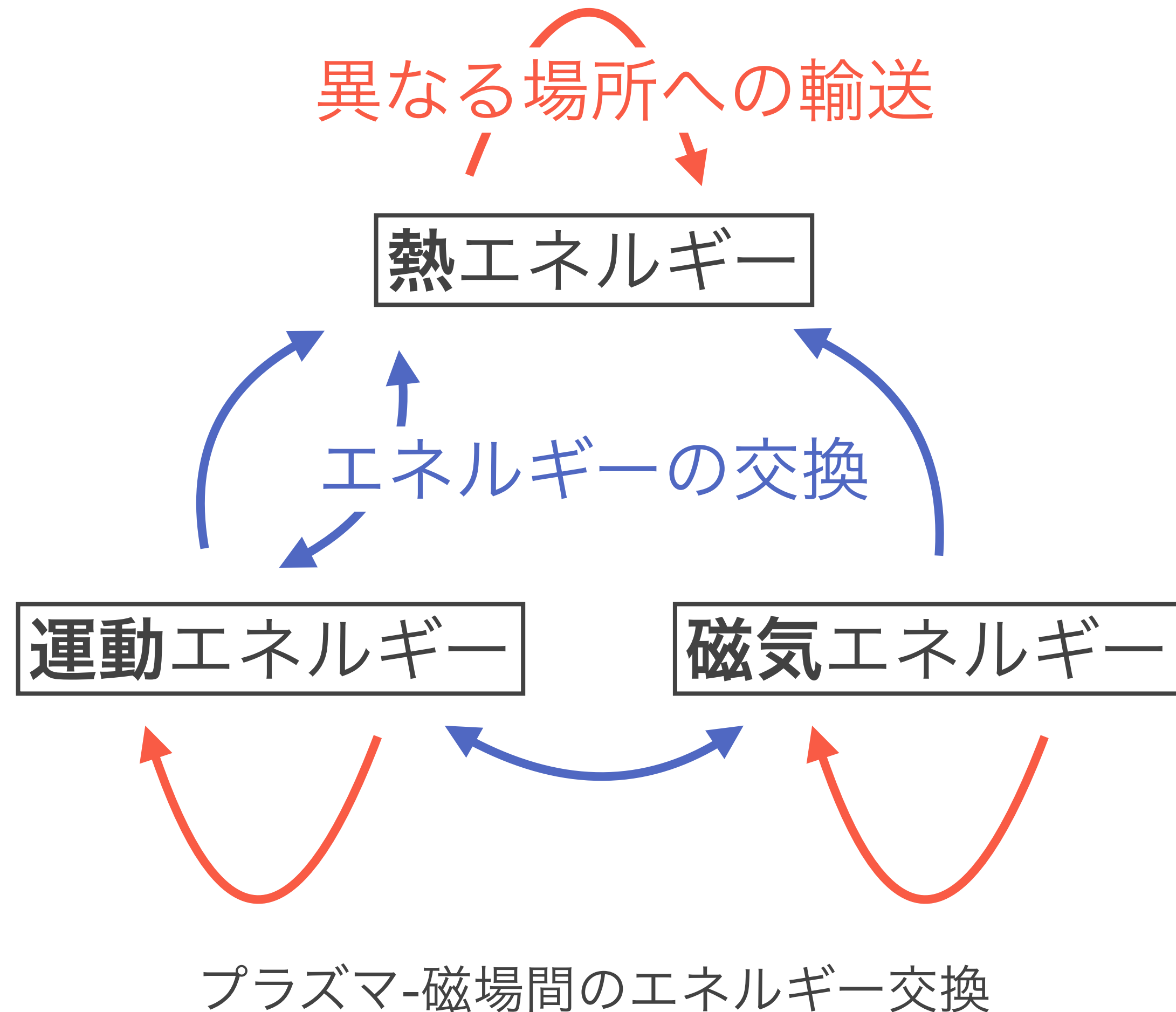
$$(f \cdot g)' \neq f' \cdot g + f \cdot g'$$

⇒ 計算が破綻(温度が負に)

- 提案手法 (Iijima, 2021, JCP)

$$(f \cdot g)' = f' \cdot g + f \cdot g'$$

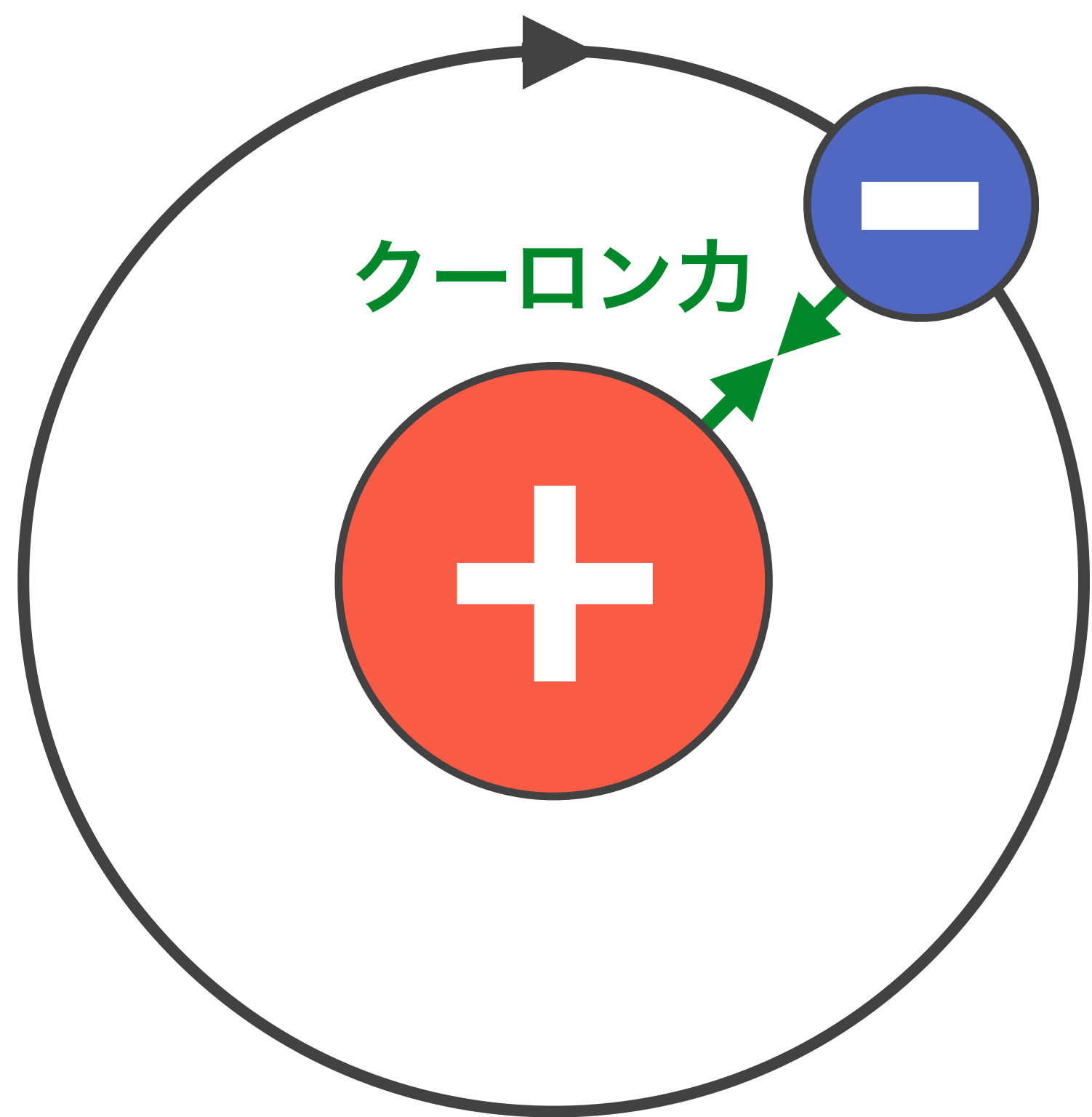
⇒ 整合性・安定性が向上



太陽は巨大なプラズマのかたまり

■ 通常時の原子

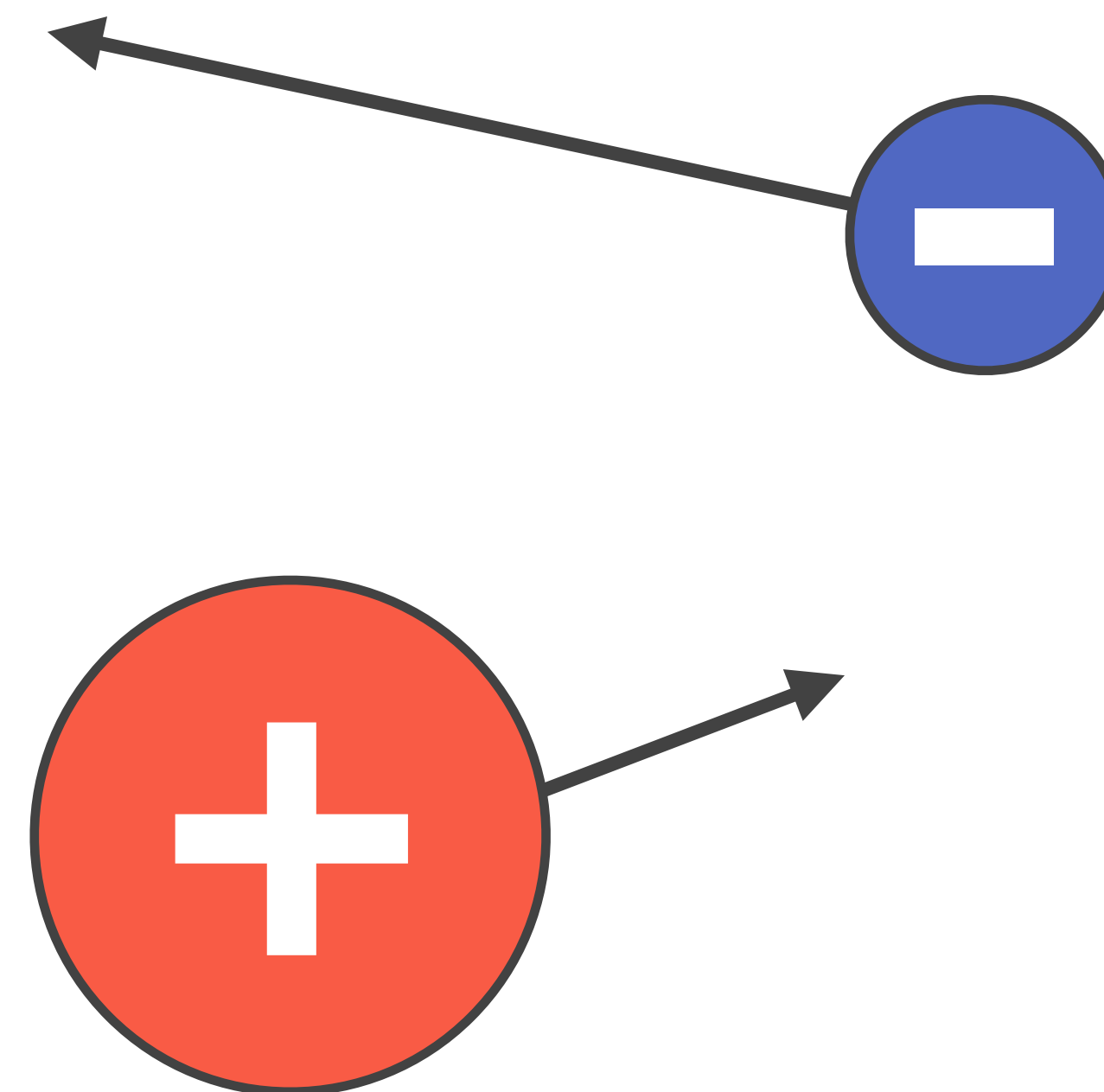
正の電荷を持った陽イオンと負の電荷を持った電子が結合



高温・低圧

■ プラズマ(電離気体)

粒子の持つエネルギーが大きく、陽イオンと電子がバラバラに運動



プラズマの数値モデリング: 粒子 v.s. 流体

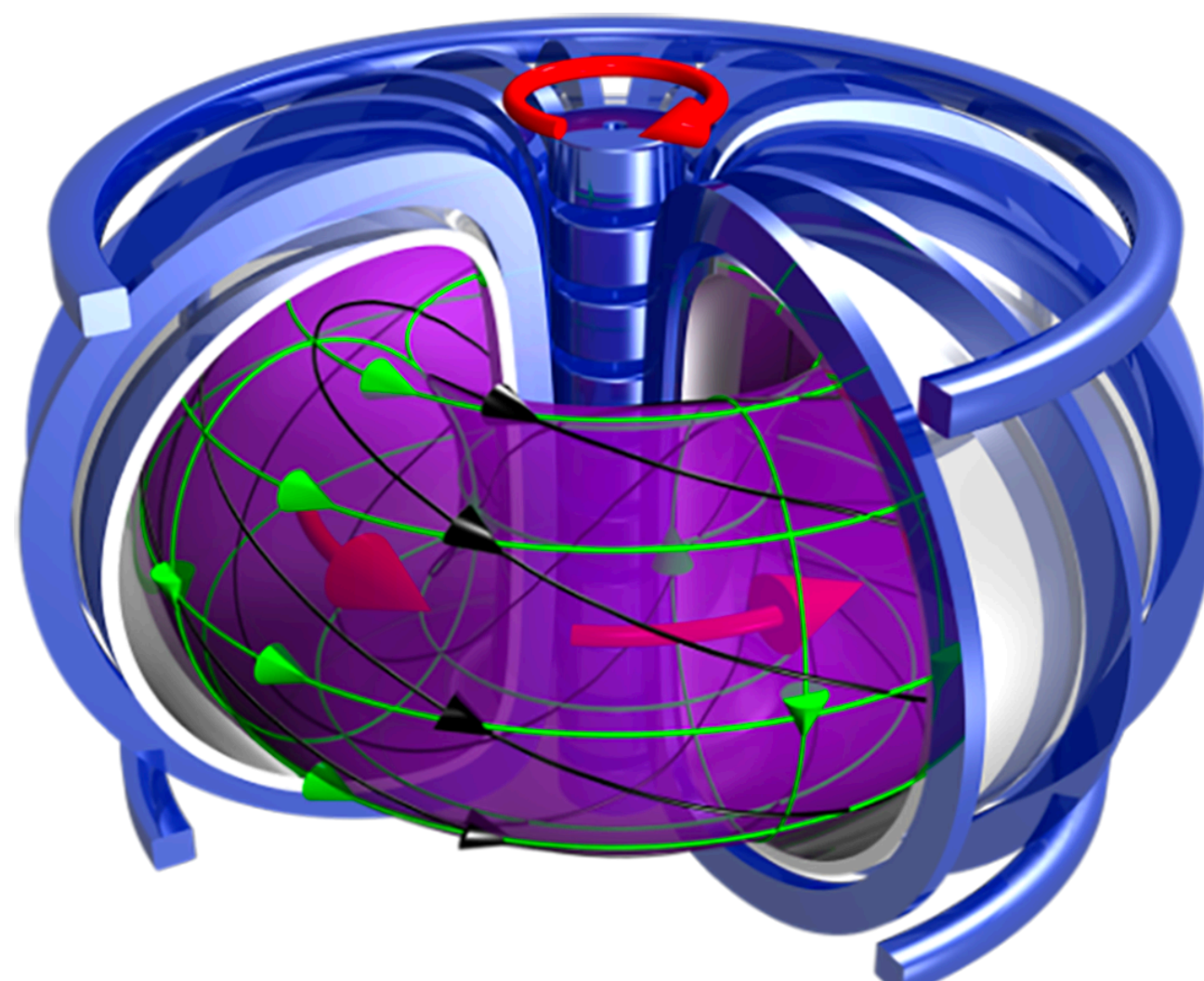
■ プラズマを粒子として近似

短周期のプラズマ波動まで考慮

計算量: 大きい

主な用途: 波の分散性・散逸過程

トカマク型核融合装置



©Max Planck Institute for Plasma Physics

粒子スケール \approx 空間スケール

本研究

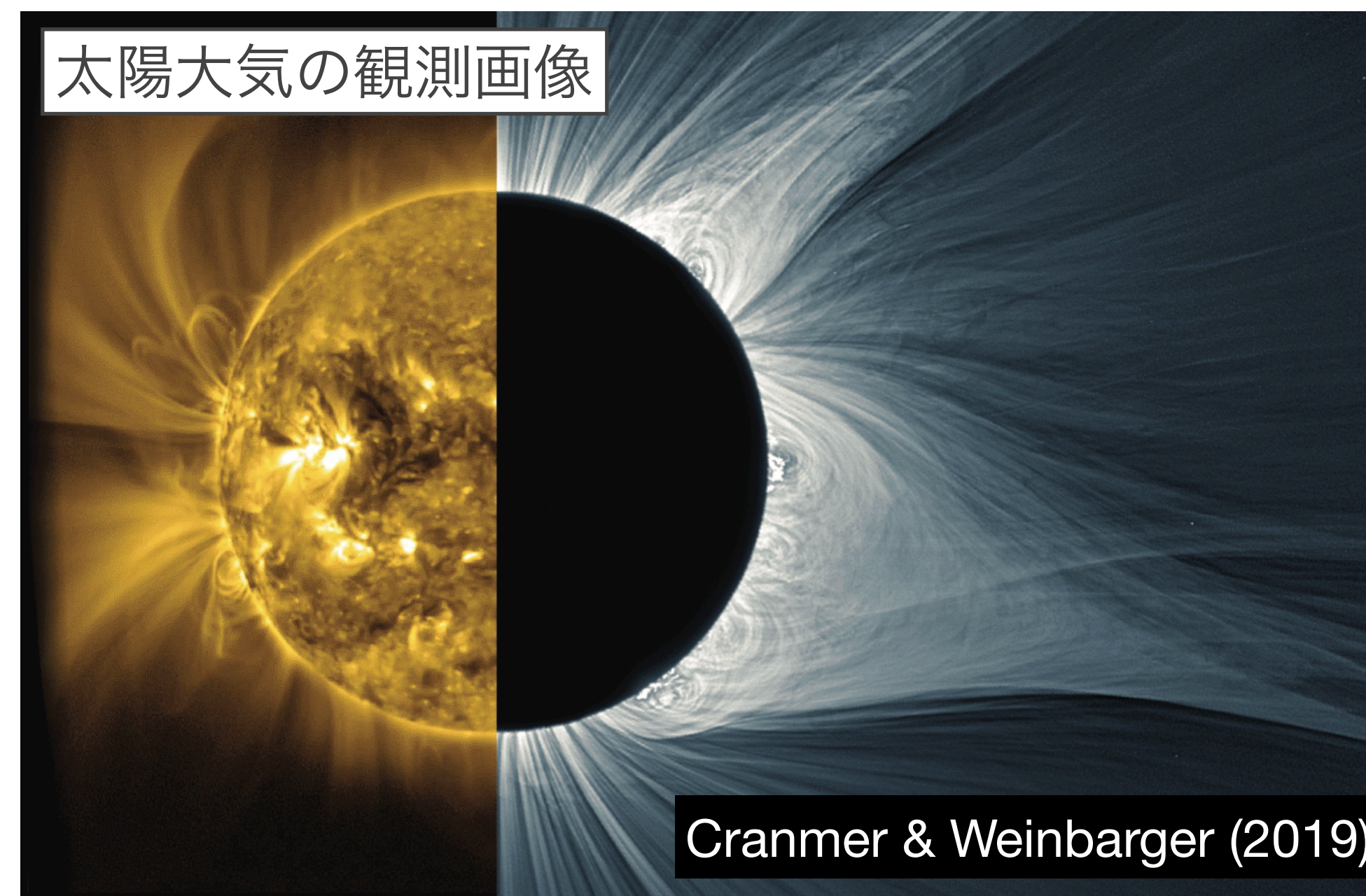
■ プラズマを流体として近似

長周期のプラズマ波動のみ考慮

計算量: 小さい

主な用途: 時空間構造、エネルギー論

太陽大気の観測画像



Cranmer & Weinbarger (2019)

粒子スケール \ll 空間スケール

磁気流体(MHD)方程式: 流体プラズマの基礎方程式

質量保存則: $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$

黒: 通常の流体
赤: 磁気流体

運動方程式: $\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \right) \mathbf{V} = -\nabla P + \mathbf{J} \times \mathbf{B} + \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{V}), \mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{B}$

ローレンツ力 粘性力 アンペールの法則

電磁誘導の法則: $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{E} = 0, \mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B} = \eta \mathbf{J}$

オームの法則

熱エネルギー方程式: $\frac{\partial e_{\text{int}}}{\partial t} + \nabla \cdot (e_{\text{int}} \mathbf{V}) = -P \nabla \cdot \mathbf{V} + \nu |\nabla \mathbf{V}|^2 + \eta |\nabla \times \mathbf{B}|^2$

粘性加熱 ジュール加熱

磁気流体は通常の流体とよく似ている \Rightarrow (圧縮性)流体の数値解法が利用可能

レイノルズ数が非常に高く境界条件が単純な太陽の場合、構造格子上の圧縮性乱流の数値解法が向いている

素直に各保存則を有限差分法・有限体積法等で解くと...

何もしていないのに
計算が壊れる



負の温度による計算の破綻

- 多くのMHDコードでは**全(熱+運動+磁気)エネルギー保存則**を解く

$$\frac{\partial (e_{\text{int}} + \rho V^2/2 + B^2/2)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[(e_{\text{int}} + P + \rho V^2/2) V + E \times B \right] = 0$$

- 負の温度が発生する状況: **熱E ≪ 運動E+磁気E**

$$\begin{aligned} e_{\text{int}} &= (e_{\text{int}} + \rho V^2/2 + B^2/2) - (\rho V^2/2 + B^2/2) \\ &= (\text{小さい熱E} + \text{大きい運動} \cdot \text{磁気E}) - (\text{大きい運動} \cdot \text{磁気E}) \\ &= \text{熱Eに対する数値誤差の発生 (負の温度の発生)} \end{aligned}$$

太陽大気では「磁気E ≈ 10⁵ × 熱E」。容易に計算が破綻する。

どのような離散化手法が必要なのか

■ エネルギーを厳密に保存

太陽表面の磁気乱流が持つエネルギーのうち
ほんの10万分の1が太陽風を加速

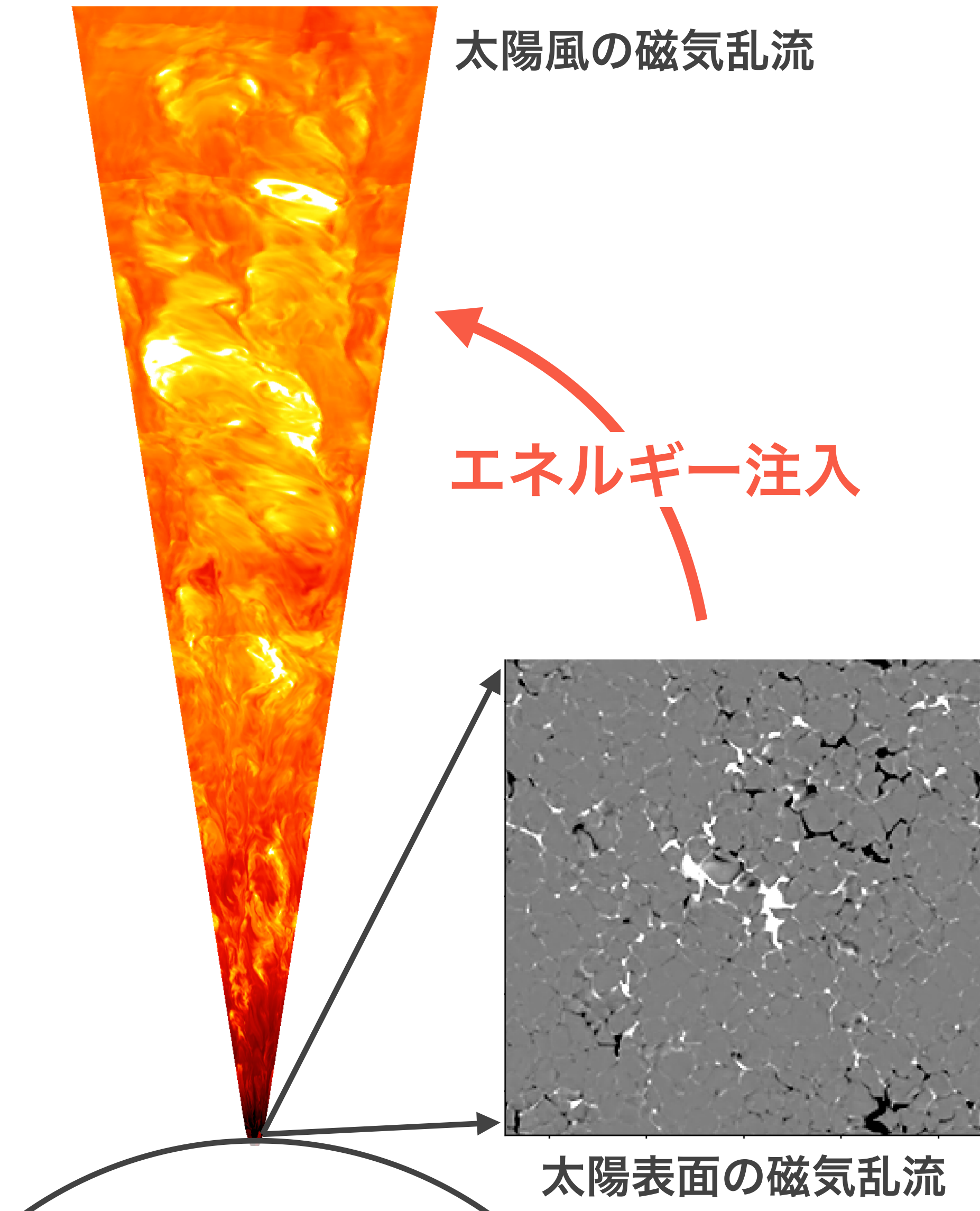
残りは太陽大気を加熱

■ 極限状況でも安定に計算可能

- 低マッハ数 (音速 \gg 流速) の太陽内部
- 強磁場 (磁気E $\approx 10^5$ 熱E) の太陽大気
- 超音速 (音速 $<$ 流速) の太陽風

■ 超高レイノルズ数の乱流を解像

太陽はレイノルズ数 10^{10} 以上、非常に乱流的
表面から太陽風まで伝播する波を散逸せず追跡

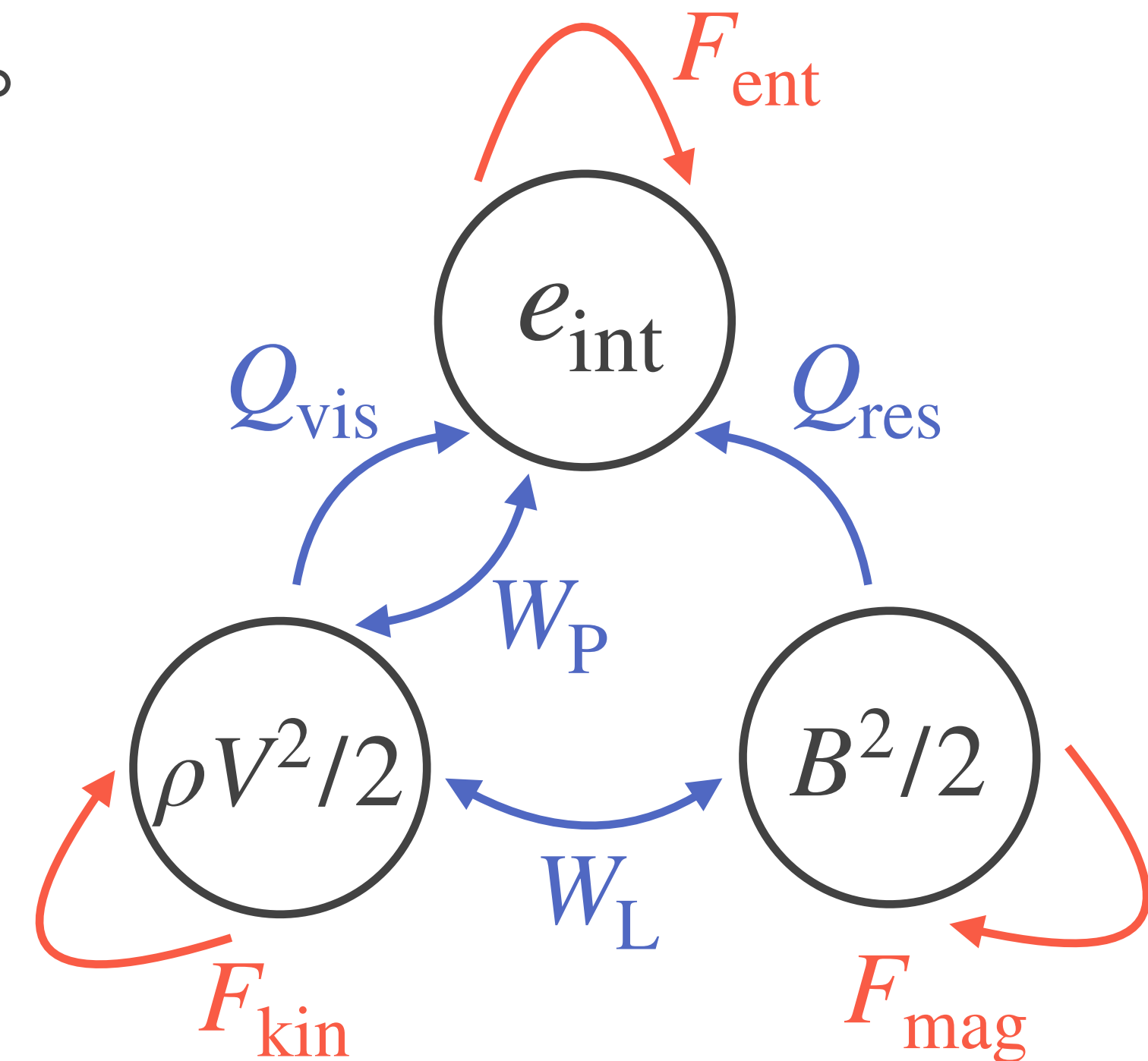


MHD方程式のエネルギー—整合性

磁気流体方程式には、3つの熱・運動・磁気エネルギーが存在。

これらはそれぞれ**輸送項**と**相互作用項**で時間発展。

$$\begin{aligned}\frac{\partial e_{\text{int}}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}_{\text{ent}} &= -W_P + Q_{\text{vis}} + Q_{\text{res}} \\ \frac{\partial \rho V^2/2}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}_{\text{kin}} &= W_P + W_L - Q_{\text{vis}} \\ \frac{\partial B^2/2}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}_{\text{mag}} &= -W_L - Q_{\text{res}}\end{aligned}$$



計算が壊れる原因がエネルギー—整合性の破綻に起因するなら、

エネルギー—整合性を保てる離散化であれば安定に計算出来るはず。

物理的にも良い性質だし、不要な数値拡散も抑えられる。

離散的な積の微分法則とエネルギー保存

- 解析的な積の微分法則:

$$U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial UV}{\partial x}$$

$(UV)_{j+1/2}$ の空間2次精度近似

- 離散的な積の微分法則(2次精度中央差分法版):

$$U_j \frac{V_{j+1} - V_{j-1}}{2\Delta x} + V_j \frac{U_{j+1} - U_{j-1}}{2\Delta x} = \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{U_j V_{j+1} + U_{j+1} V_j}{2} - \frac{U_{j-1} V_j + U_j V_{j-1}}{2} \right)$$

- 線形スカラー一移流方程式の離散的なエネルギー保存則:

$$\frac{\partial U_j}{\partial t} + a \frac{U_{j+1} - U_{j-1}}{2\Delta x} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial U_j^2/2}{\partial t} + \frac{(aU_j U_{j+1}/2) - (aU_{j-1} U_j/2)}{\Delta x} = 0$$

(閉じた境界条件なら) 総エネルギーが保存: $\sum_j (U_j^2/2) \Delta x = \text{cnst.}$

エネルギー-整合MHDスキーム (Iijima, 2021, JCP)

以下の離散化で熱・運動・磁気エネルギー間の整合性を保持可能:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_j \frac{\delta \rho V_j}{\delta x_j} = \sum_j \frac{\delta_1 D_j(\rho)}{\delta_1 x_j}$$

$$\frac{\partial \rho V_i}{\partial t} + \sum_j \left(\frac{1}{2} \frac{\delta \rho V_i V_j}{\delta x_j} + \frac{V_i}{2} \frac{\delta \rho V_j}{\delta x_j} + \frac{\rho V_j}{2} \frac{\delta V_i}{\delta x_j} \right) = -\frac{\delta P}{\delta x_i} - \sum_j B_j \left(\frac{\delta B_j}{\delta x_i} - \frac{\delta B_i}{\delta x_j} \right) + \sum_j \frac{\delta_1 D_j(\rho V_i)}{\delta_1 x_j}$$

$$\frac{\partial e_{\text{int}}}{\partial t} + \sum_j \frac{\delta (e_{\text{int}} + P) V_j}{\delta x_j} = \sum_j V_j \frac{\delta P}{\delta x_j} + Q_{\text{vis}} + Q_{\text{res}} + \sum_j \frac{\delta_1 D_j(e_{\text{int}})}{\delta_1 x_j}$$

$$\frac{\partial B_i}{\partial t} + \sum_j \frac{\delta (V_j B_i - V_i B_j)}{\delta x_j} = \sum_j \frac{\delta_1 D_j(B_i)}{\delta_1 x_j}$$

粘性・ジュール加熱率 $Q_{\text{vis}}, Q_{\text{res}}$ は
 拡散フラックスがある条件を満たすと
 正值性を保つ(熱力学第二法則)

$\delta u / \delta x$: 中央差分演算子(コロケート格子上、任意精度)

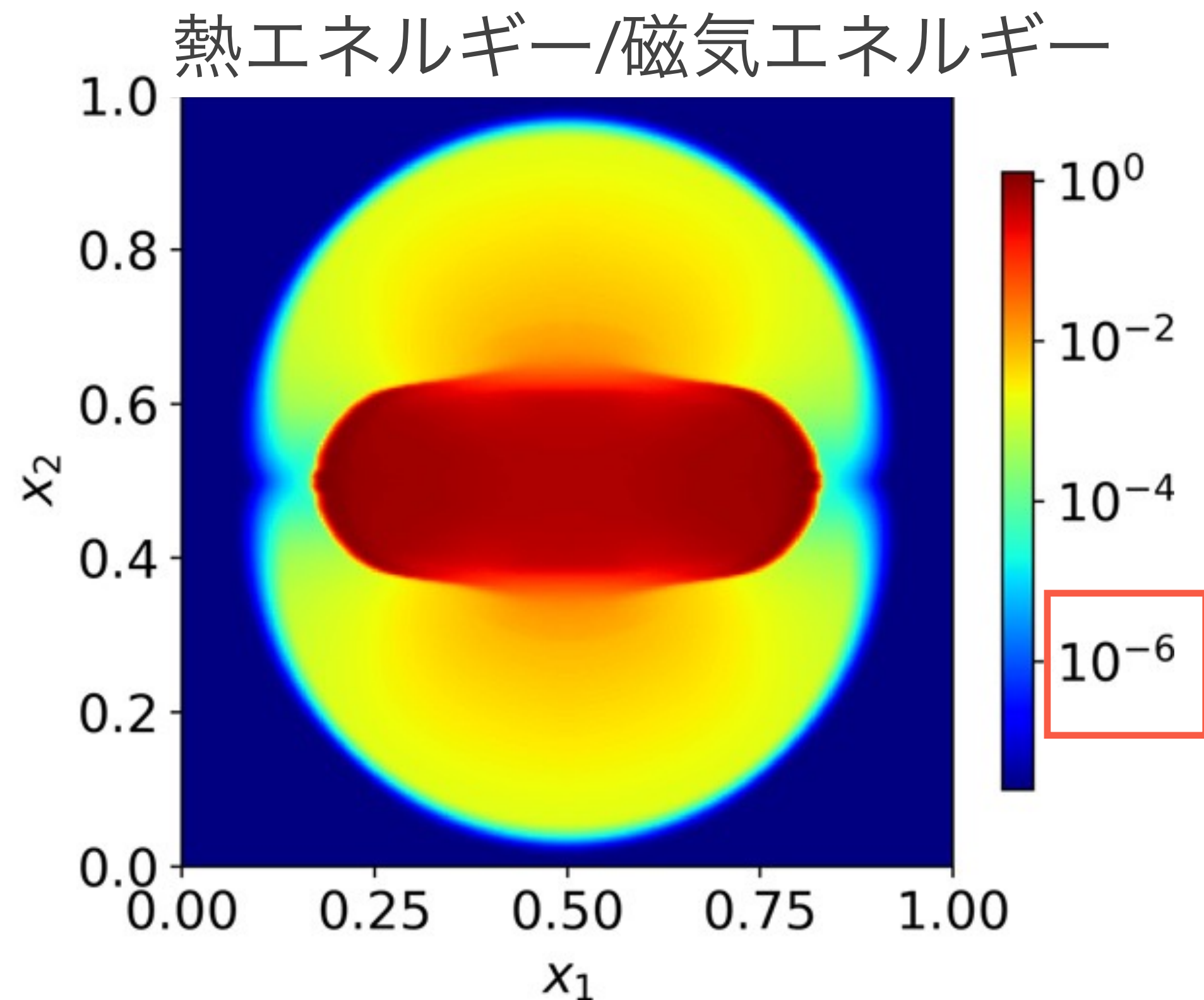
$\delta_1 u / \delta_1 x$: 隣り合うセル境界面で定義された物理量の2次精度中央差分

$D(U)$: セル境界面で定義された物理的・数値的な任意の拡散フラックス

エネルギー整合MHDスキーム: 数値実験結果

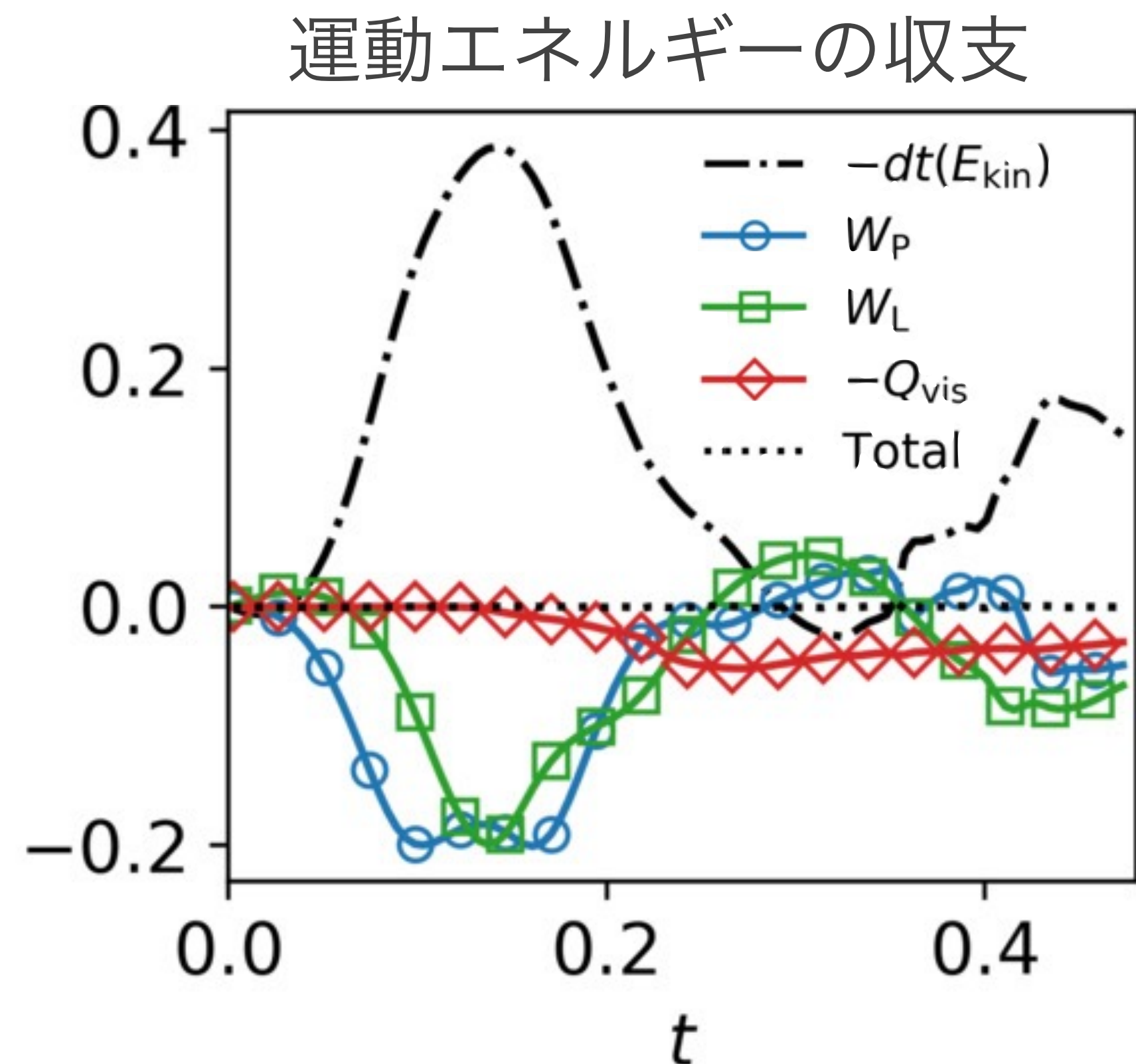
■ MHD点源爆発問題

磁気エネルギー・熱エネルギーの比が
1千万倍以上という極限状況でも安定



■ MHD渦問題

熱・運動・磁気エネルギーの
輸送・交換を**離散化後も厳密**に表現



関連する離散化手法

- 移流項の離散化を工夫することによるエネルギー保存解法は **非圧縮性乱流計算** (Harlow & Welch 1965; Morinishi et al. 1998)で提案:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\nabla P, \quad \nabla \cdot \mathbf{V} = 0$$

この方程式系ではエネルギー方程式がなく、**離散的なエネルギー保存**が重要

- 類似する構造保存数値解法: ↓ KEEPスキームとして「富岳」で利用
圧縮性流体 (Kok et al., 2009; Morinishi et al., 2010; Kuya et al., 2018),
プラズマ運動論 (Idomura et al., 2007),
非圧縮性MHD (Ni et al., 2007), **二温度流体プラズマ** (Shioto., 2018).
提案手法は、これらの**圧縮性MHD版** (Iijima, 2021)と位置づけられる。

(2) 実装面の詳細: 並列化、高速化

RAMENS (Iijima & Yokoyama, 2015/2017; Iijima et al., 2023)

RAdiation MAgnetohydrodynamics Extensive Numerical Solver

Fortran 2003 + MPI + OpenMP (依存ライブラリ: FFTW)

圧縮性磁気流体(MHD)方程式 on 直交曲線座標系

現実的な状態方程式・不透明度(2次元テーブル化)

多次元輻射輸送(低層大気)+局所輻射損失(高層大気)

磁力線に沿った硬い熱伝導



エネルギー整合MHDスキームによるロバスト性向上 (Iijima, 2021)

6次精度中央差分法 + 人工粘性

4段2次精度Jameson-Baker Runge-Kutta法

彩層・コロナ界面の数値的処方 (Iijima & Imada, 2021)

Super-Time-Stepping法による硬い熱伝導の陽的高速化 (Meyer et al., 2014)

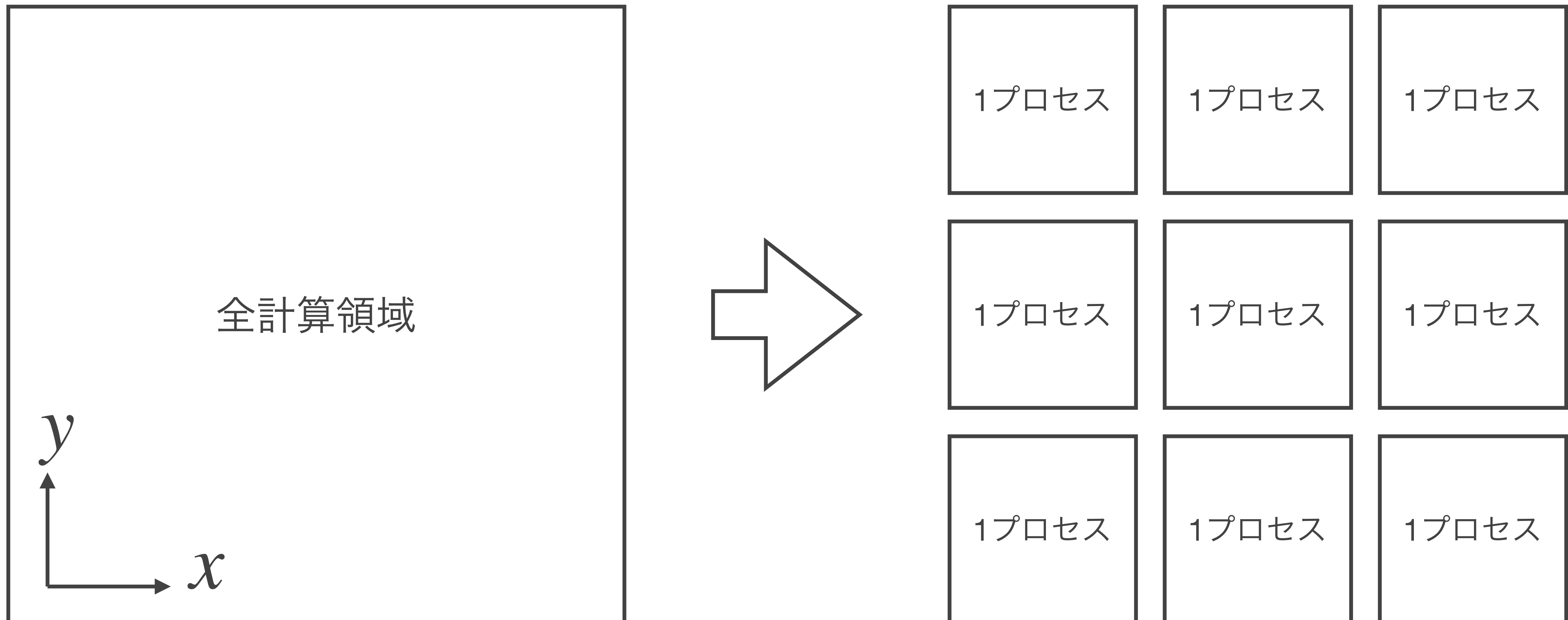
準相対論近似による時間刻みの緩和 (Gombosi et al., 2002; Rempel, 2017)

短い特性線法による空間局所性の高い輻射輸送解法 (Auer & Mihalas, 1973)

プロセス並列化: 空間領域の分割

- プロセスごとに空間領域を3次元分割、袖領域をMPI通信

並列化効率を高く計算したい ⇒ 可能な限り隣接通信のみのアルゴリズムを選択



広いパラメータレンジに由来する位相速度のばらつき

流速

プラズマ波動

熱伝導

	典型速度 [km/s]	陽解法の時間刻み [s]
流速	1-100	10-0.1
プラズマ波動	1000-10000	0.01-0.001
熱伝導	-	$<10^{-5}$

■ 解決策1: 陰解法の利用

流速に合わせて時間刻みを設定
プラズマ波動や熱伝導は陰解法

⇒ グローバル通信の発生(並列化効率の悪化)

■ 解決策2: 位相速度の人工的な抑制

物理的性質を損なわないように
方程式や離散化を変更し位相速度を抑制

⇒ 陽的に積分可能、隣接通信のみでOK

プラズマ波動の位相速度抑制

運動方程式: $\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \right) \mathbf{V} = -\nabla P + (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} + \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{V})$

位相速度の制限: $\xi \rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \right) \mathbf{V} = -\nabla P + (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} + \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{V})$

ξ : 慣性の増幅率(実際にはテンソル形式)

→ 流速

→ 本来のプラズマ波動 →

→ 抑制後のプラズマ波動

■ 慣性の増幅による位相速度抑制

定常解を保ったまま
時間刻みを伸ばすことが可能

非定常解への適用可否は問題依存

「硬い」熱伝導方程式の陽的高速化

離散的性質

計算コスト

↑
良

↑
大

↓
悪

↓
小

- 陰解法: 情報伝達速度 $\rightarrow \infty$ (グローバル通信が必要)

$$\frac{T^{n+1} - T^n}{\Delta t} = \nabla \cdot (\kappa \mathbf{b} \mathbf{b} \cdot \nabla T^{n+1})$$

- **Super-Time-Stepping法**: N段陽解法でCFLを緩和

$$\Lambda = \frac{\Delta t}{T} \nabla \cdot (\kappa \mathbf{b} \mathbf{b} \cdot \nabla T), \quad (\text{計算量: } \mathcal{O}(1/\sqrt{N})\text{倍})$$

$$\operatorname{argmax}_{\mu_1, \dots, \mu_N} \sum_j \mu_j \quad \text{s.t.} \quad \prod_j^N |I - \mu_j \Lambda| \leq 1$$

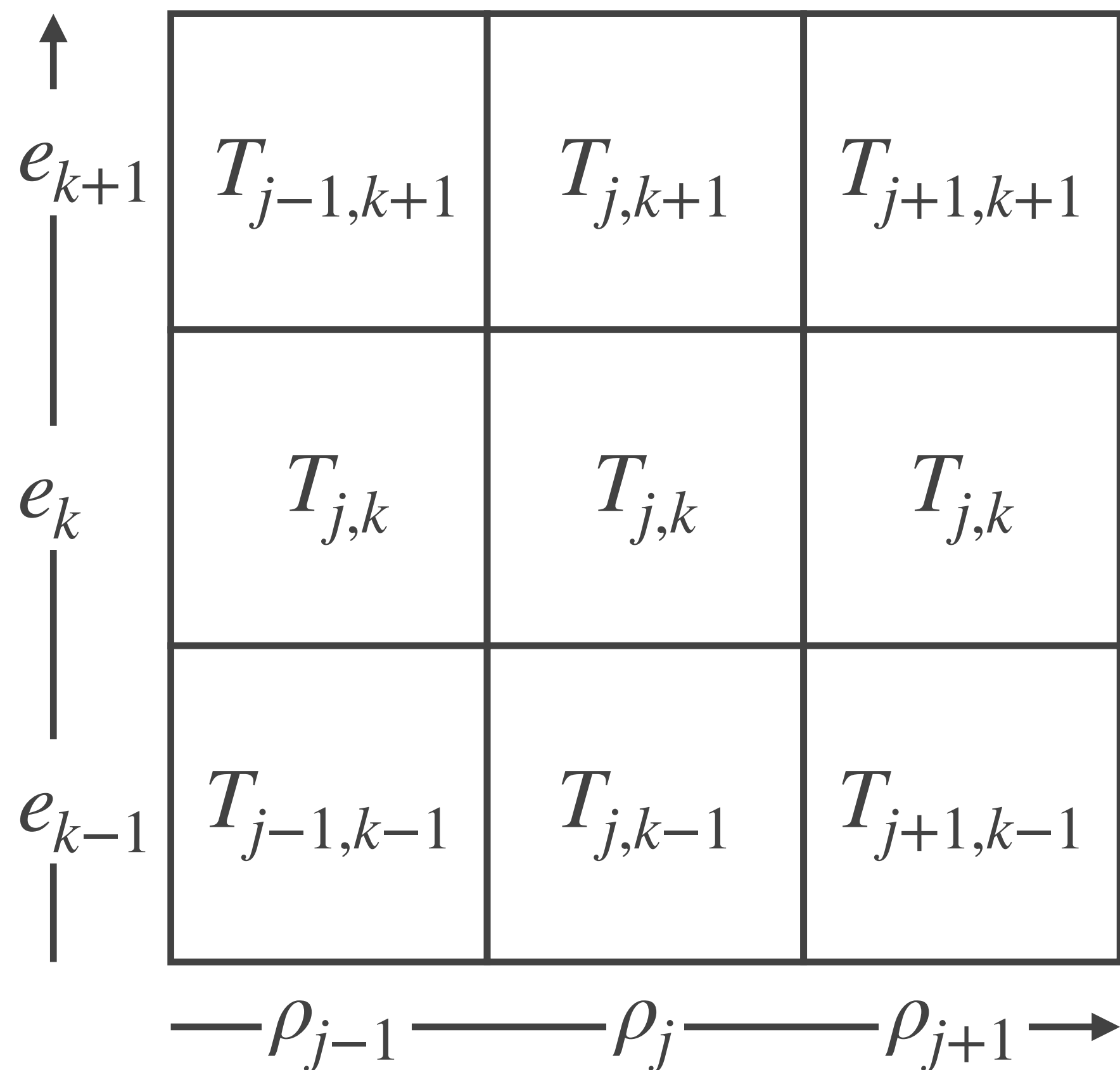
本研究で利用

- 双曲型方程式への変形: 最大位相速度 c で制限

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (q \mathbf{b}), \quad \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{c^2}{\kappa} (\kappa \mathbf{b} \cdot \nabla T - q)$$

熱伝導計算におけるテーブル型状態方程式の回避

- 状態方程式は2次元テーブルを補間



- Super-Time-Stepping法での熱伝導計算

熱伝導式を約30億ステップ計算($\rho = \text{const.}$)

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \nabla \cdot F(T) \Rightarrow \text{状態方程式がボトルネック}$$

- テーブル状態方程式の回避

方程式を連立方程式に変形

状態方程式の評価は初期値の1回のみ

初期値: $T'(t = 0) = T(t = 0)$

$$\text{STS法: } \begin{cases} \left(\frac{\partial e}{\partial T} \right)_\rho \frac{\partial T'}{\partial t} = \nabla \cdot F(T') \\ \frac{\partial e}{\partial t} = \nabla \cdot F(T') \end{cases} \quad \text{注: 右辺は同一}$$

「富岳」に向けたコードの最適化

■ 定番の手法で試行錯誤

「富岳」関連の公開資料、教科書、
コード読み等で勉強・実験の繰り返し

■ 基本形:

xループをベクトル化、yzループをスレッド並列

■ SPILLの回避

必要に応じて一時変数を導入、最内ループを分割

■ 指示行・コンパイラオプション・環境変数

意図どおり解釈されない場合などで利用

■ 最終的な性能

FLOPSピーク性能比: 6-7%

並列化効率: 97.1% (192-768ノード間で弱スケーリング)

```
!$omp parallel do collapse(2) private(...)  
do k = k_begin, k_end  
  do j = j_begin, j_end  
    do i = i_begin, i_end  
      a(i,j,k) = ! 処理  
    end do  
  end do  
end do
```

```
!$omp parallel do collapse(2) private(...)  
do k = k_begin, k_end  
  do j = j_begin, j_end  
    do i = i_begin, i_end  
      tmp1(i) = ! 処理  
    end do  
    do i = i_begin, i_end  
      a(i,j,k) = ! tmp(i)を使った処理  
    end do  
  end do  
end do
```

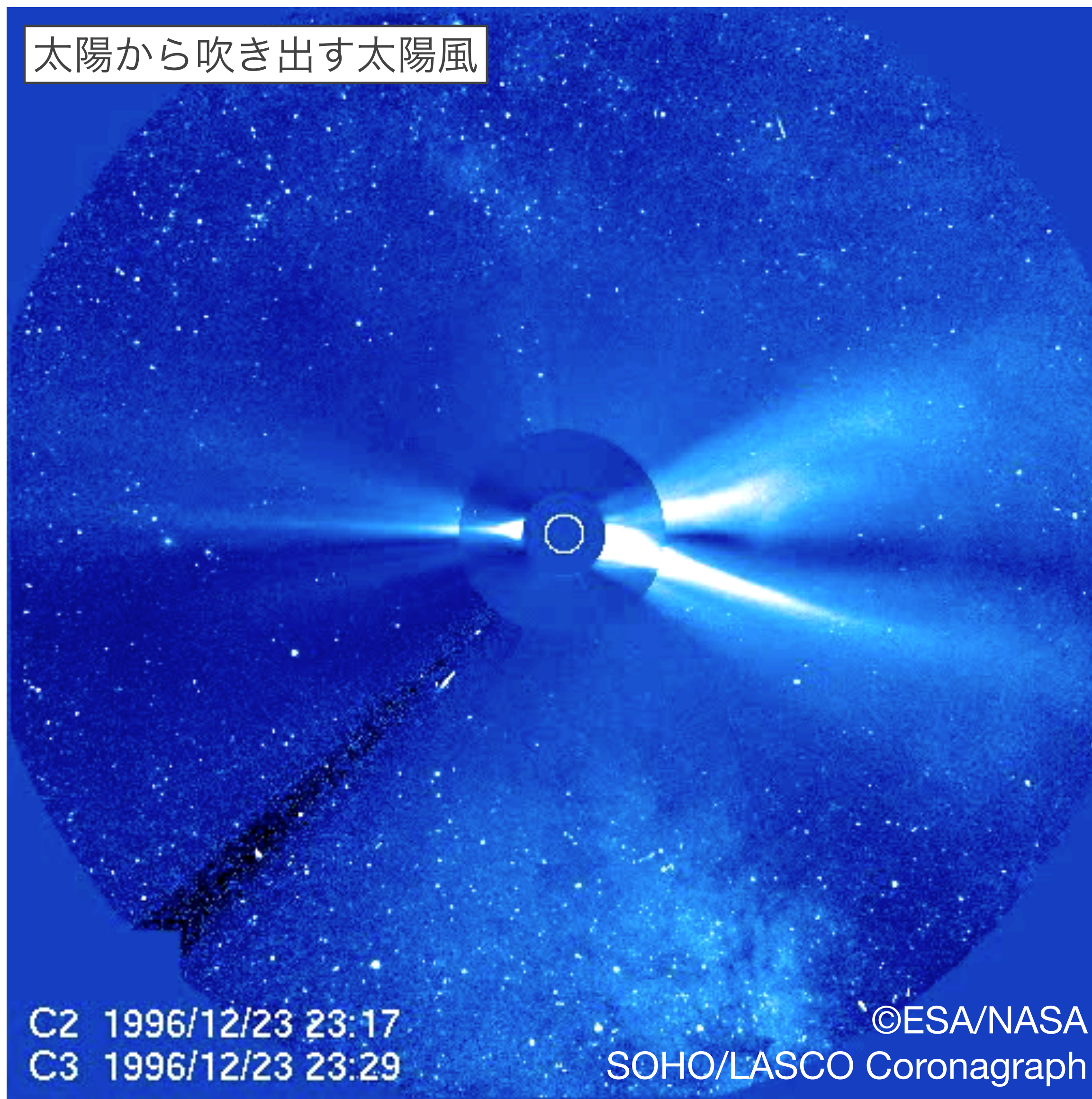
(3) 科学成果:

「富岳」による太陽風の輻射磁気流体計算

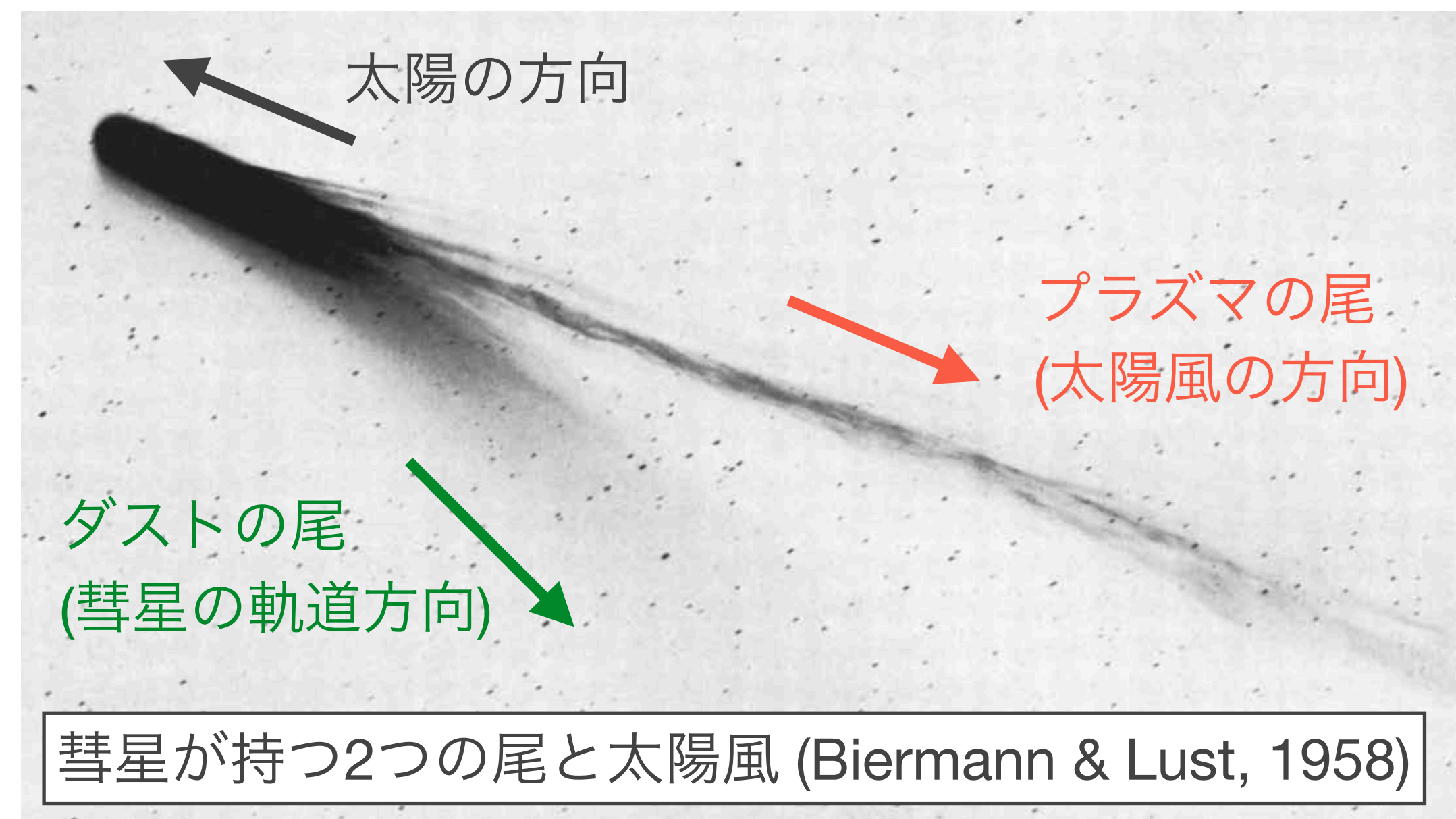
太陽風とは？

再掲

太陽から吹き出す太陽風

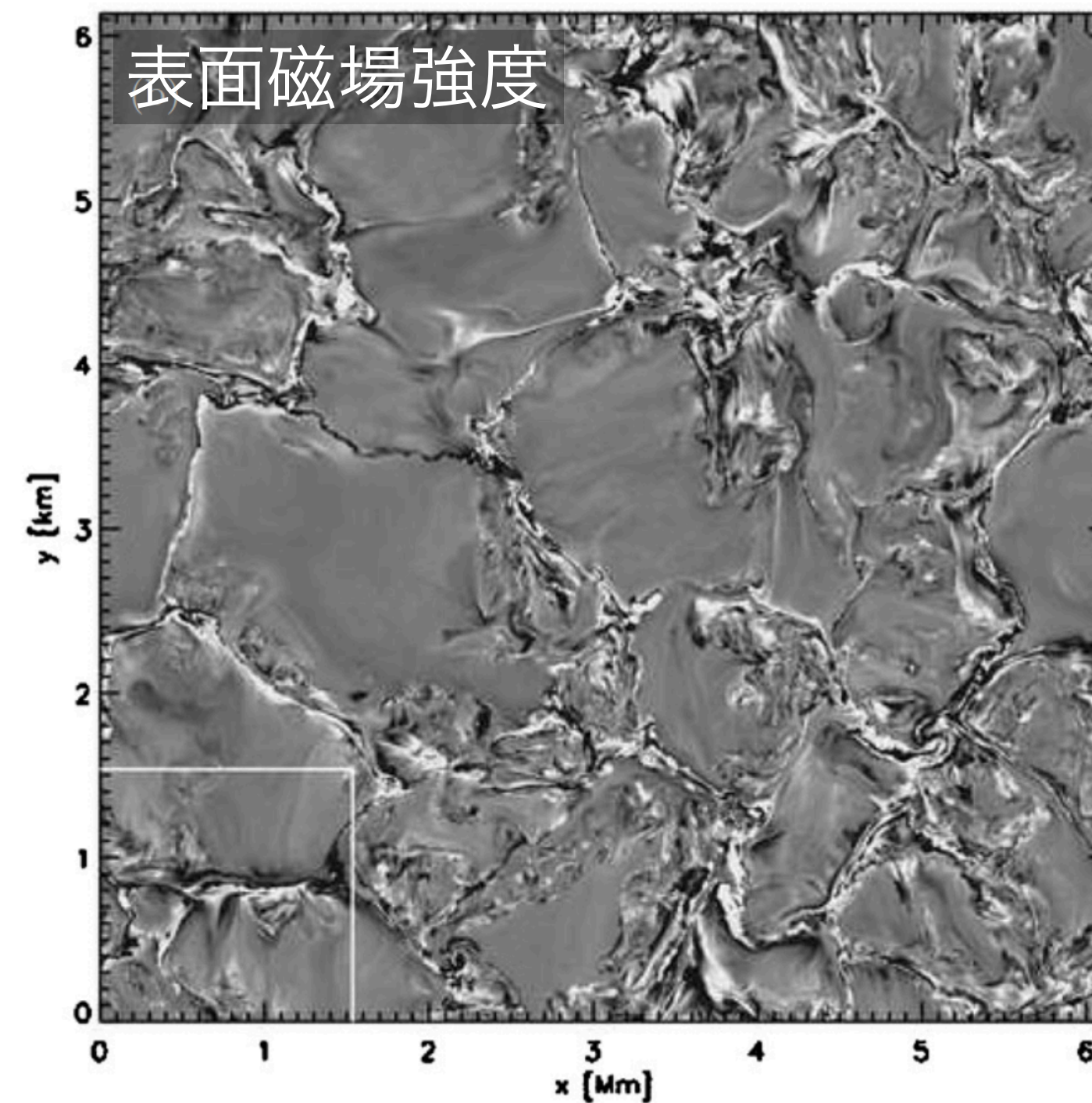
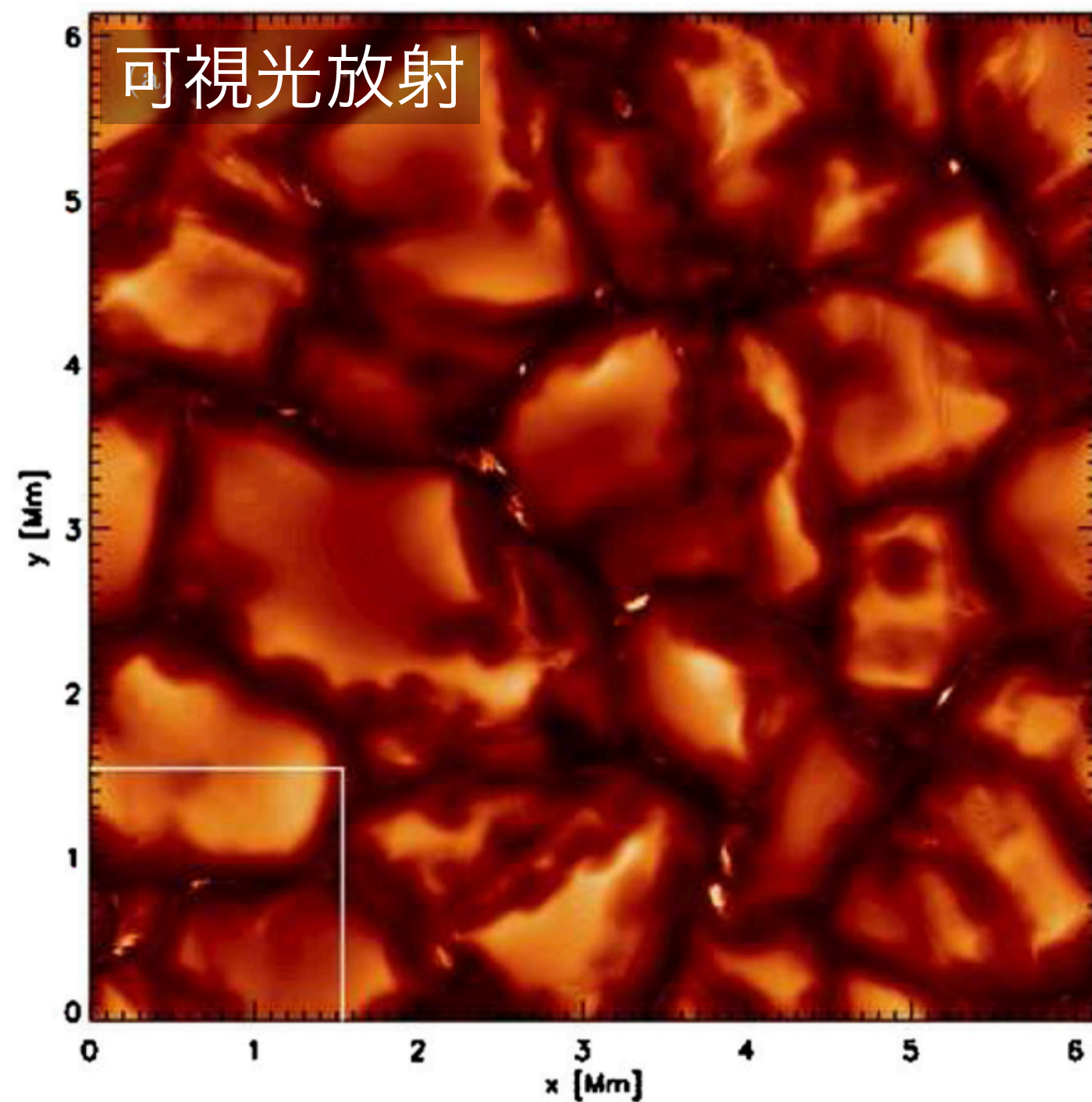


- 太陽から吹き出す超音速のプラズマ流
20世紀中ごろに発見
以降、その形成機構が長年の謎



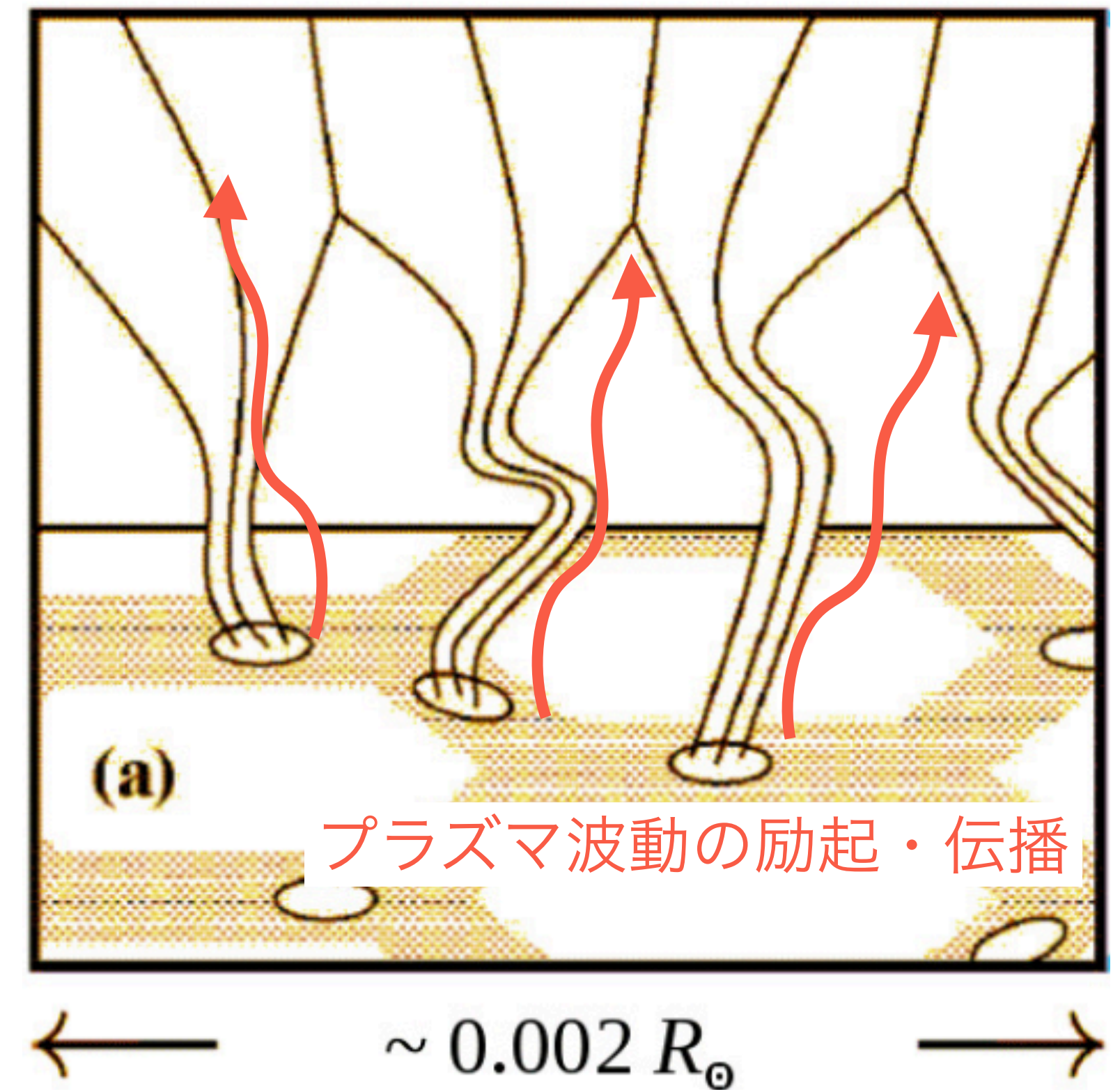
太陽風のエネルギー源 = 太陽内部の熱対流

- 太陽内部の熱対流が持つ2つの役割:
 - (1) ダイナモ作用による磁場構造の形成
 - (2) 各種プラズマ波動の励起



太陽表層のダイナモ作用の数値シミュレーション (Rempel, 2014)

Cranmer & van Ballegooijen (2005)



これまでの研究: 太陽風のみを計算領域とする数値計算

■ 太陽内部から太陽風までのパラメータギャップ

太陽内部から太陽風まで大きな**時間・空間スケール**のギャップが存在

密度も約20桁変化、**物理量のギャップ**も大きい

高レイノルズ数($Re > 10^{10}$)の乱流を分解するため**格子点数**も必要

⇒ 計算コスト、安定性のため一貫した計算が困難

	時間スケール [分]	空間スケール [km]	典型密度 [1/cc]
太陽内部	10^4	10^4	10^{21}
太陽表面	1	10^2	10^{17}
太陽大気	10^3	10^4	10^{10}
太陽風	10^4	10^7	10^2
パラメータギャップ	$\sim 10^4$	$\sim 10^5$	$\sim 10^4$

本研究: エネルギー源である太陽内部からの包括計算

■ 今回の研究

太陽内部から太陽風までの一貫した計算

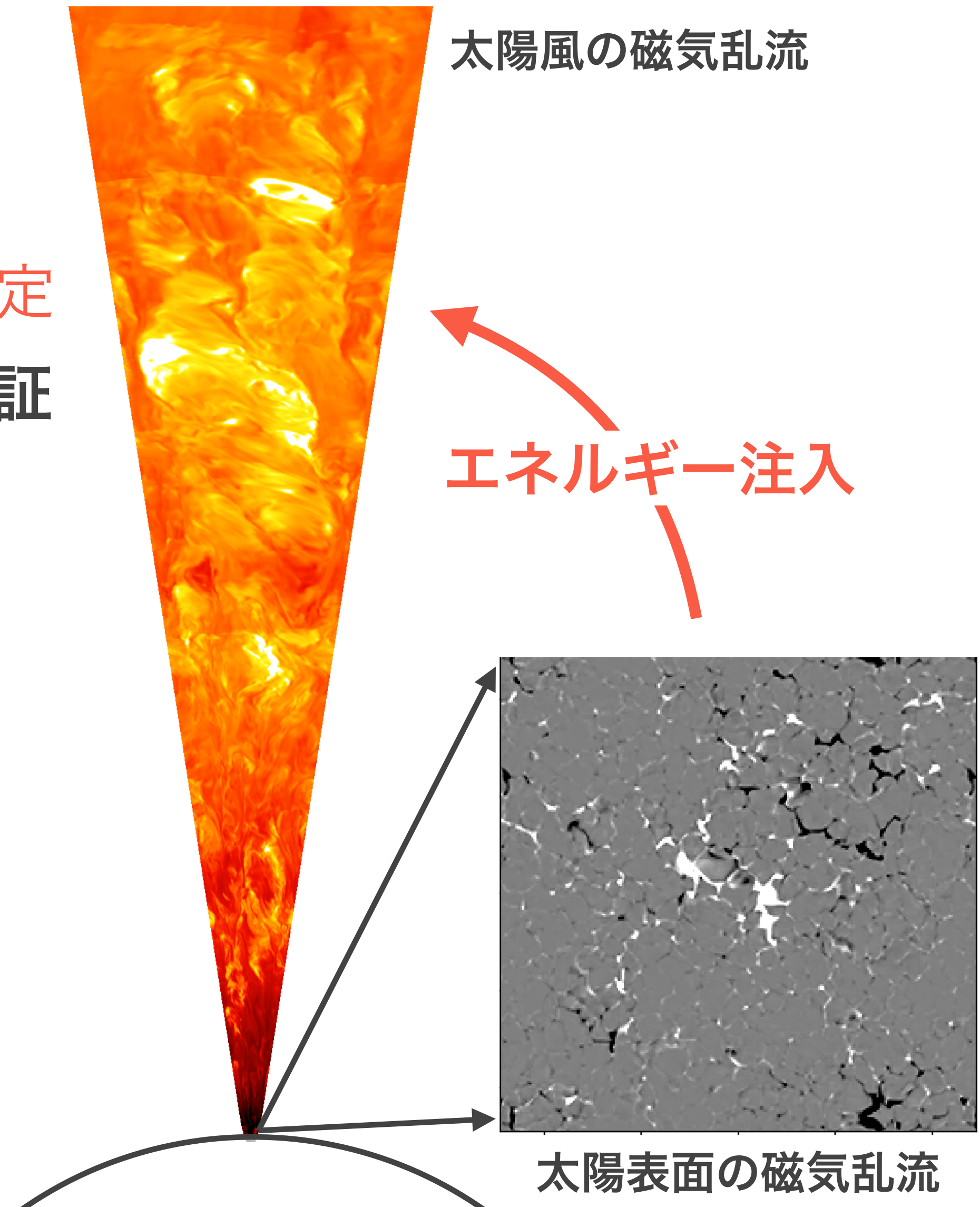
熱対流の性質は太陽の明るさ・重力・元素比が決定
恣意的な仮定を排除して太陽風を再現出来るか検証

■ 利点

- 磁場構造・プラズマ波動が自発的に形成
- 上部境界の悪影響がない(計算領域外への流れ)

■ 欠点

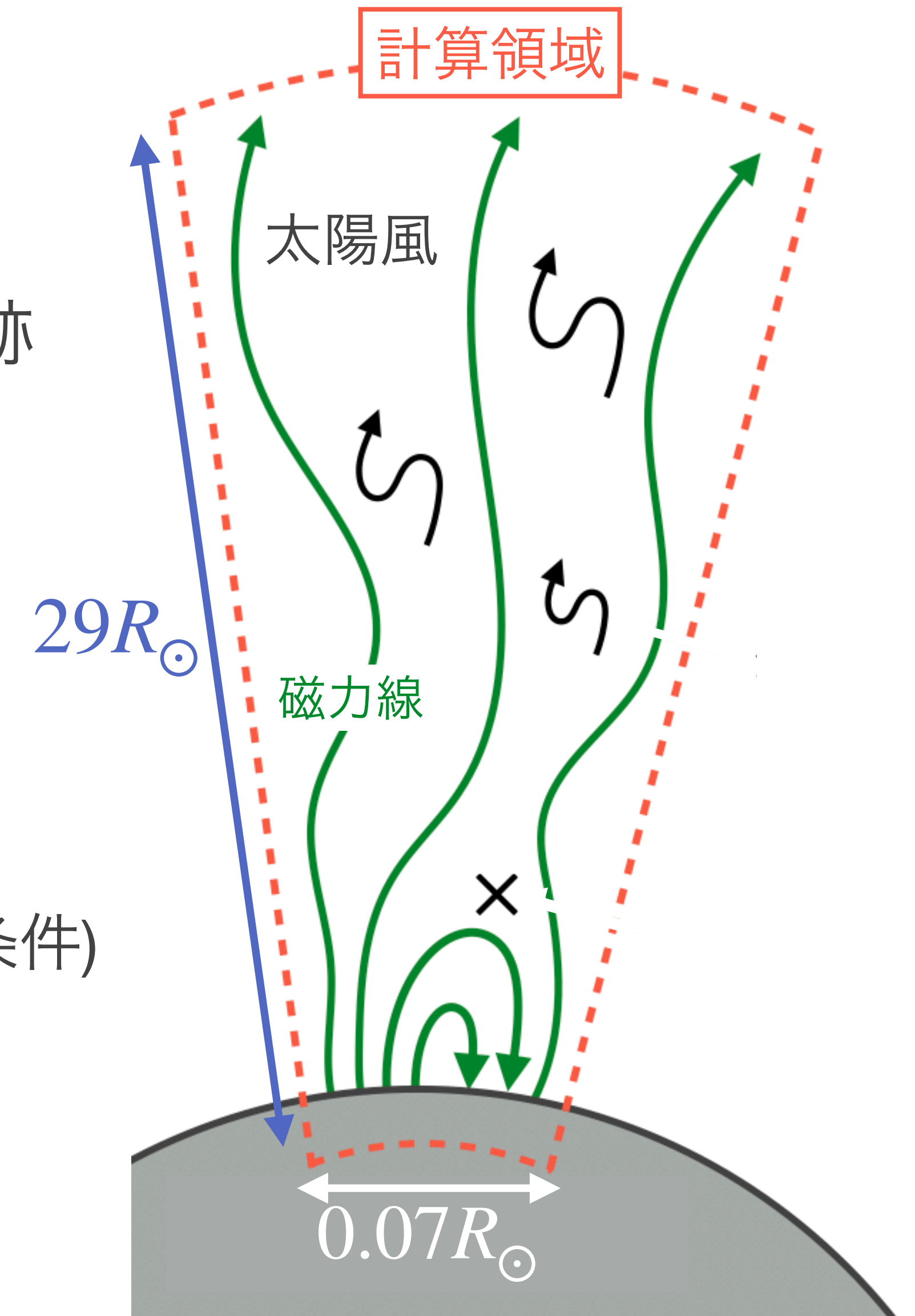
- × 数値計算コストの増大 ⇒ 「富岳」で解決
- × パラメータギャップ ⇒ 計算手法の改良で解決

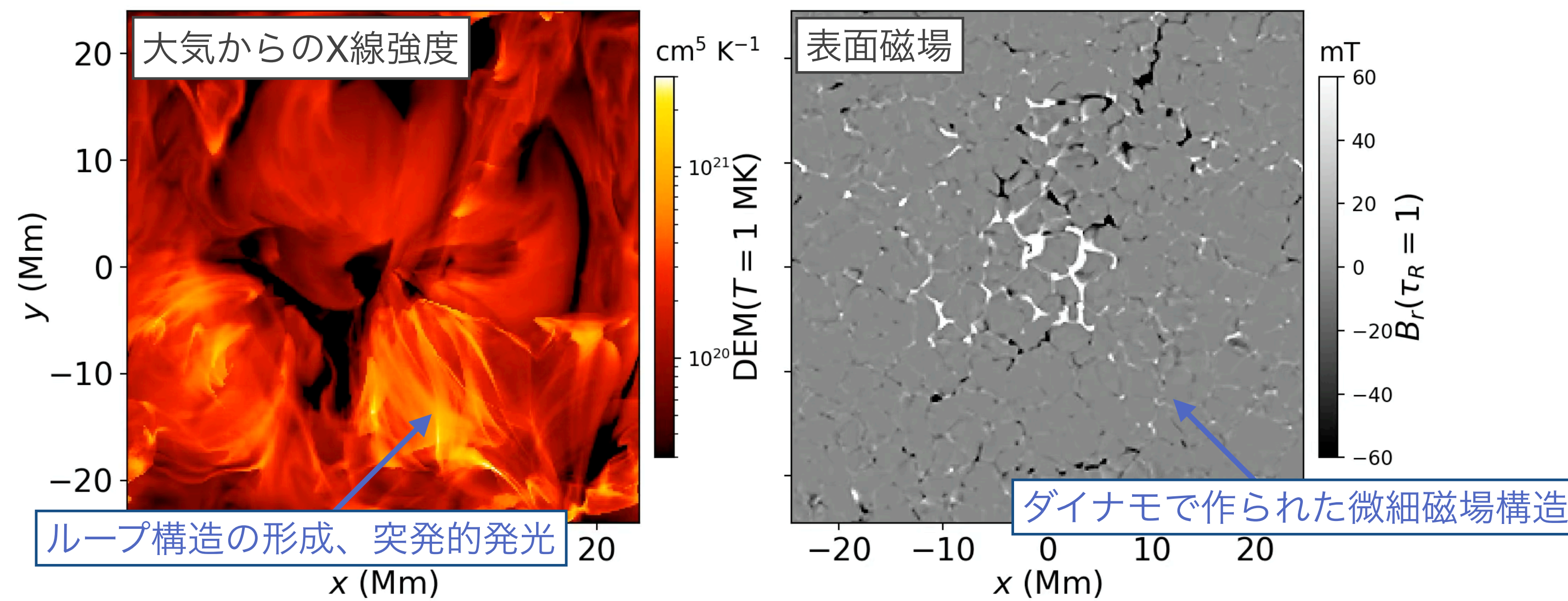
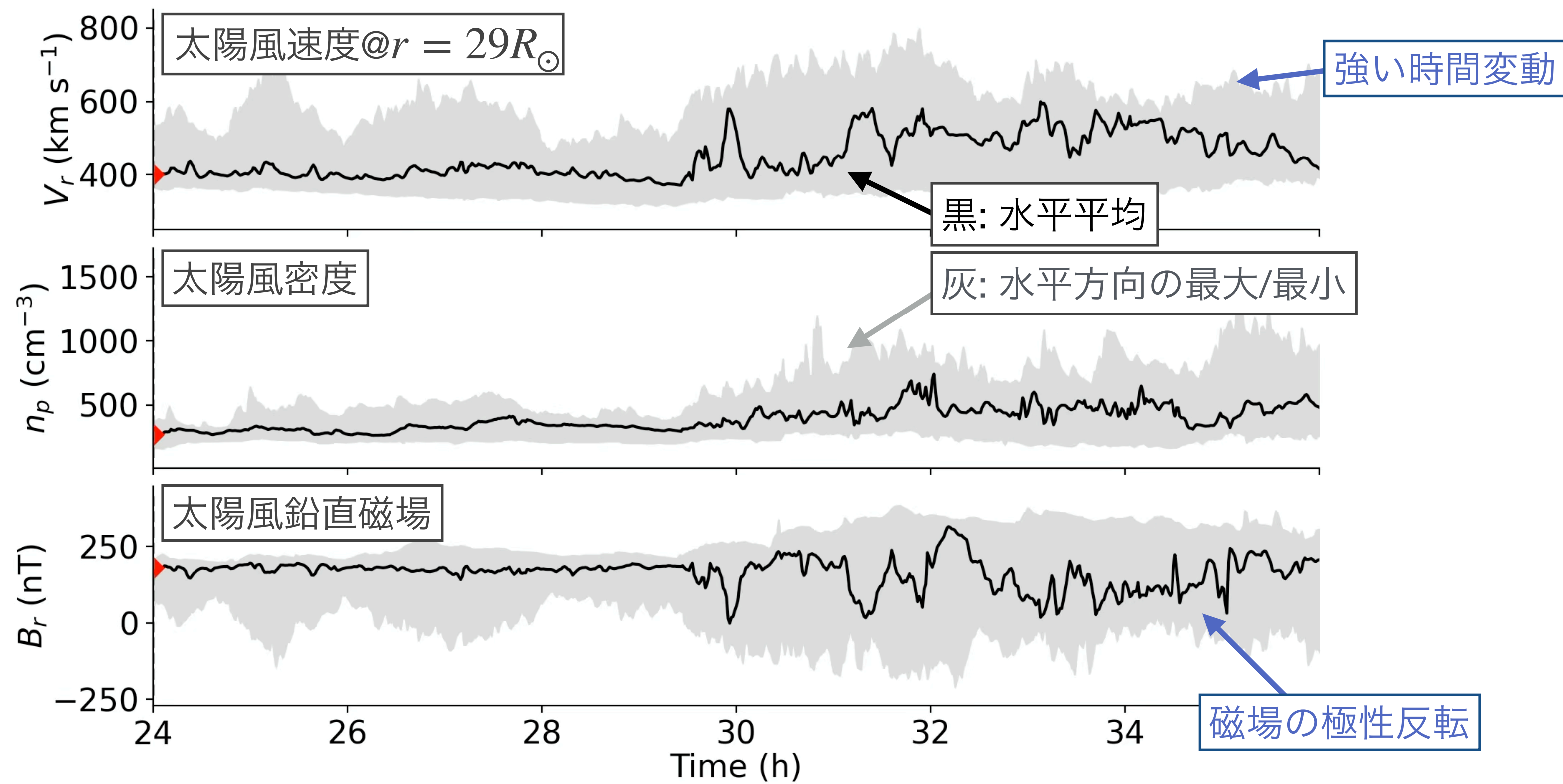
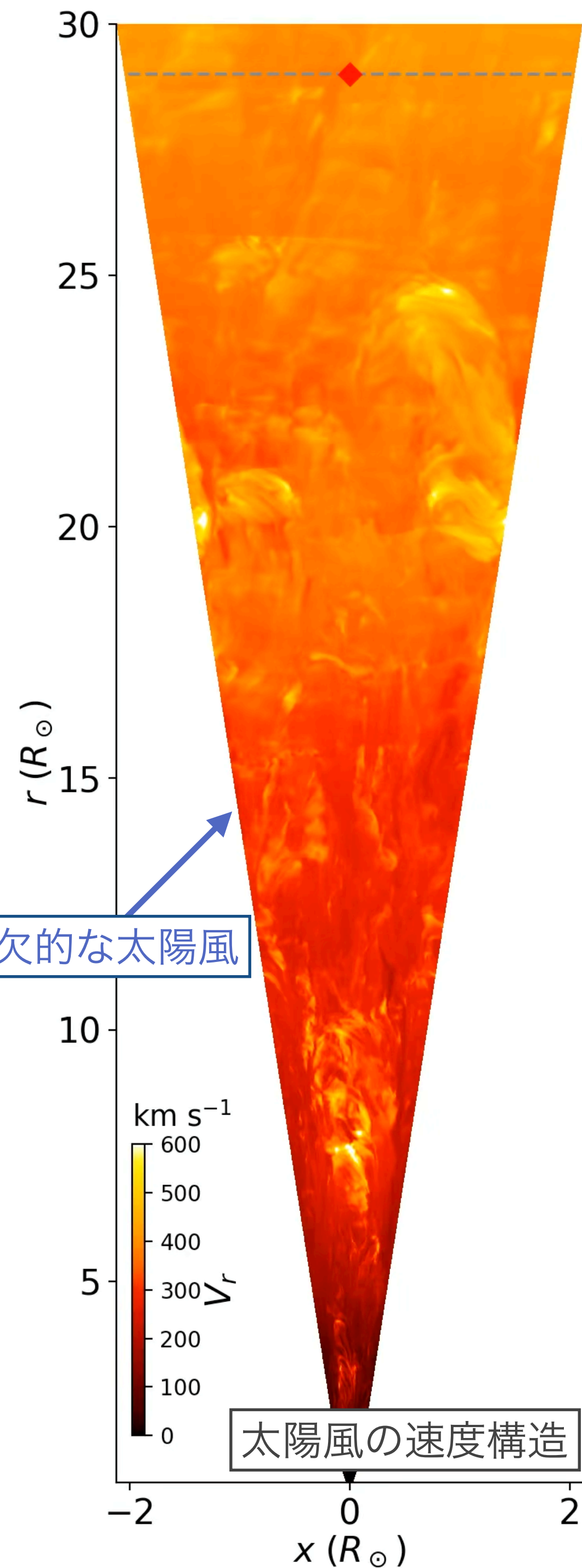


計算設定: 水平方向に局所的、太陽内部から太陽風まで

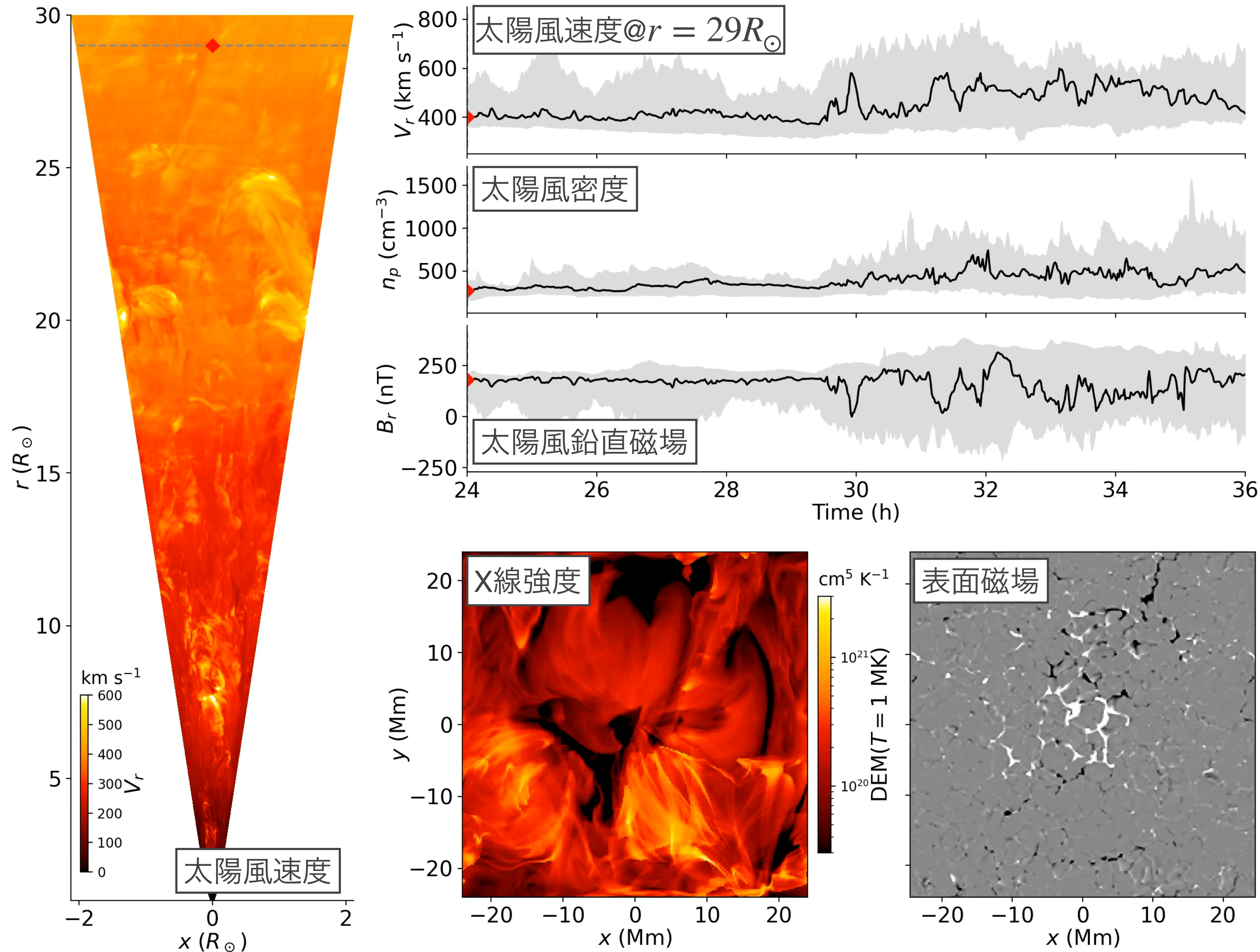
太陽表面の典型的な水平構造を包含しつつ、
対流層上部から太陽風加速の完了までを一貫して追跡

- 格子点数: $256 \times 256 \times 3072$ (~2億)
- 時間ステップ数(MHD): ~2千万
- 時間ステップ数(熱伝導): ~30億
- 計算資源: 富岳, 不老 (名大; 最適化), ATERUI II (NAOJ; 初期条件)
- 利用ノード数(富岳): 768ノード (3072プロセス)

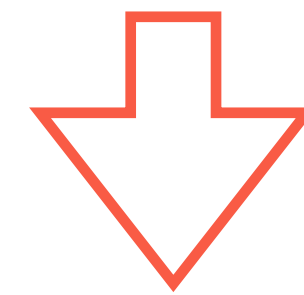




太陽各層における典型統計量をほぼ全て再現



- 表面磁場強度: ~ 50 G
- 大気X線強度: 観測平均値程度
- 太陽風速度: 300-600 km/s
- 太陽風磁極反転の再現
 - 反転の頻度は1桁不足 (おそらく格子点数不足)
- 太陽風質量損失率: 1-4x平均値



恣意的な仮定なく
自発的に太陽風を再現
(世界初の第一原理的計算)

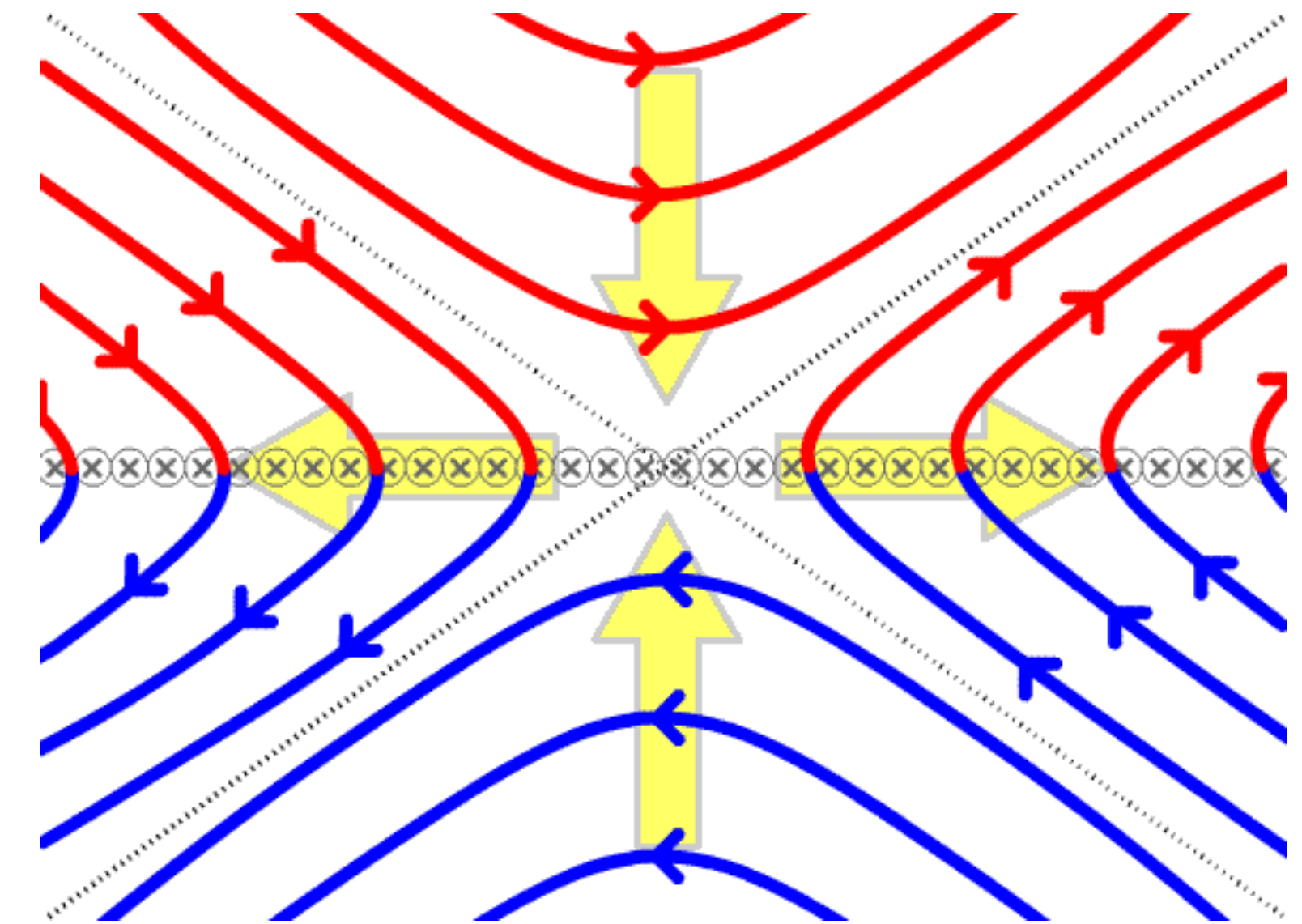
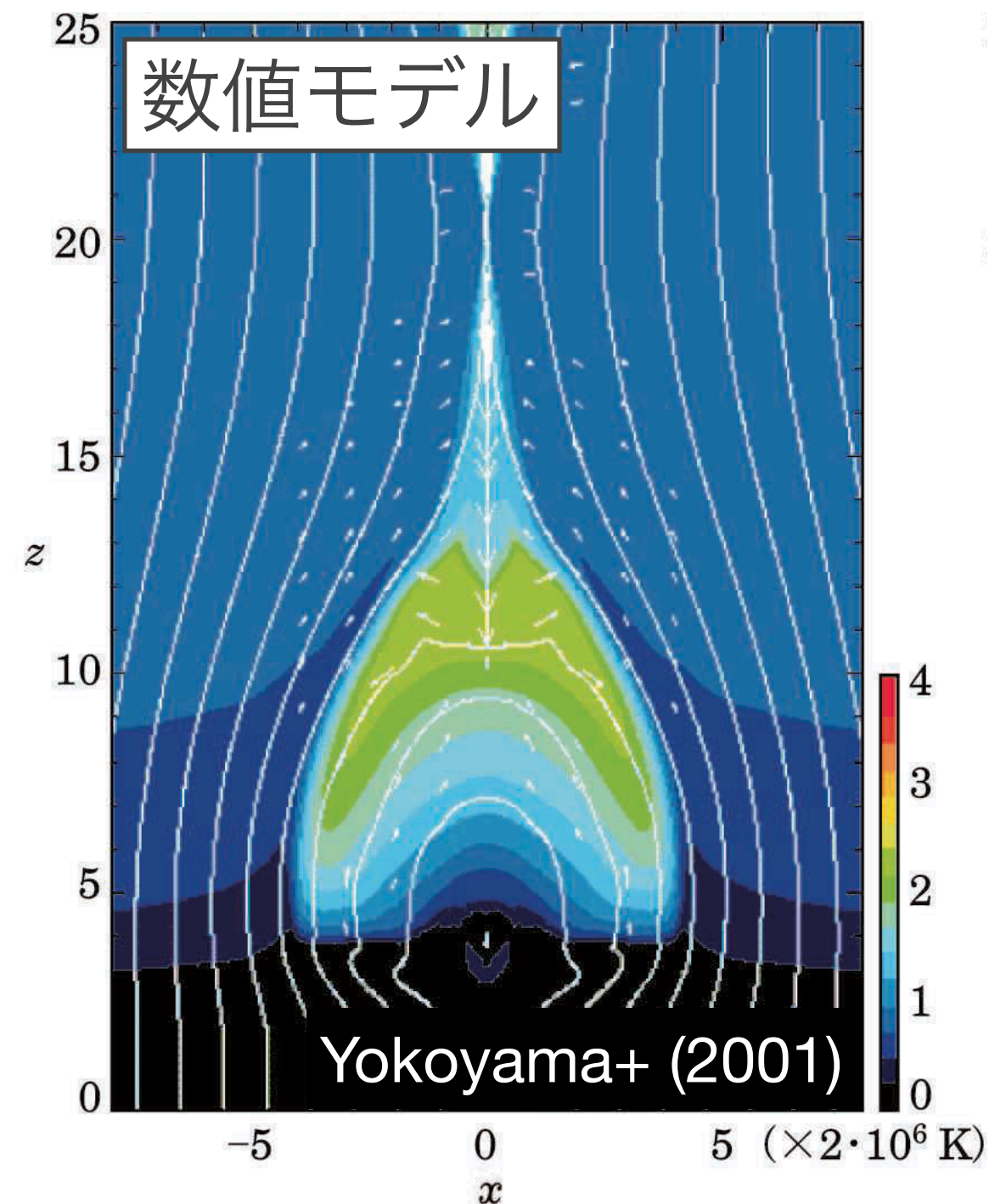
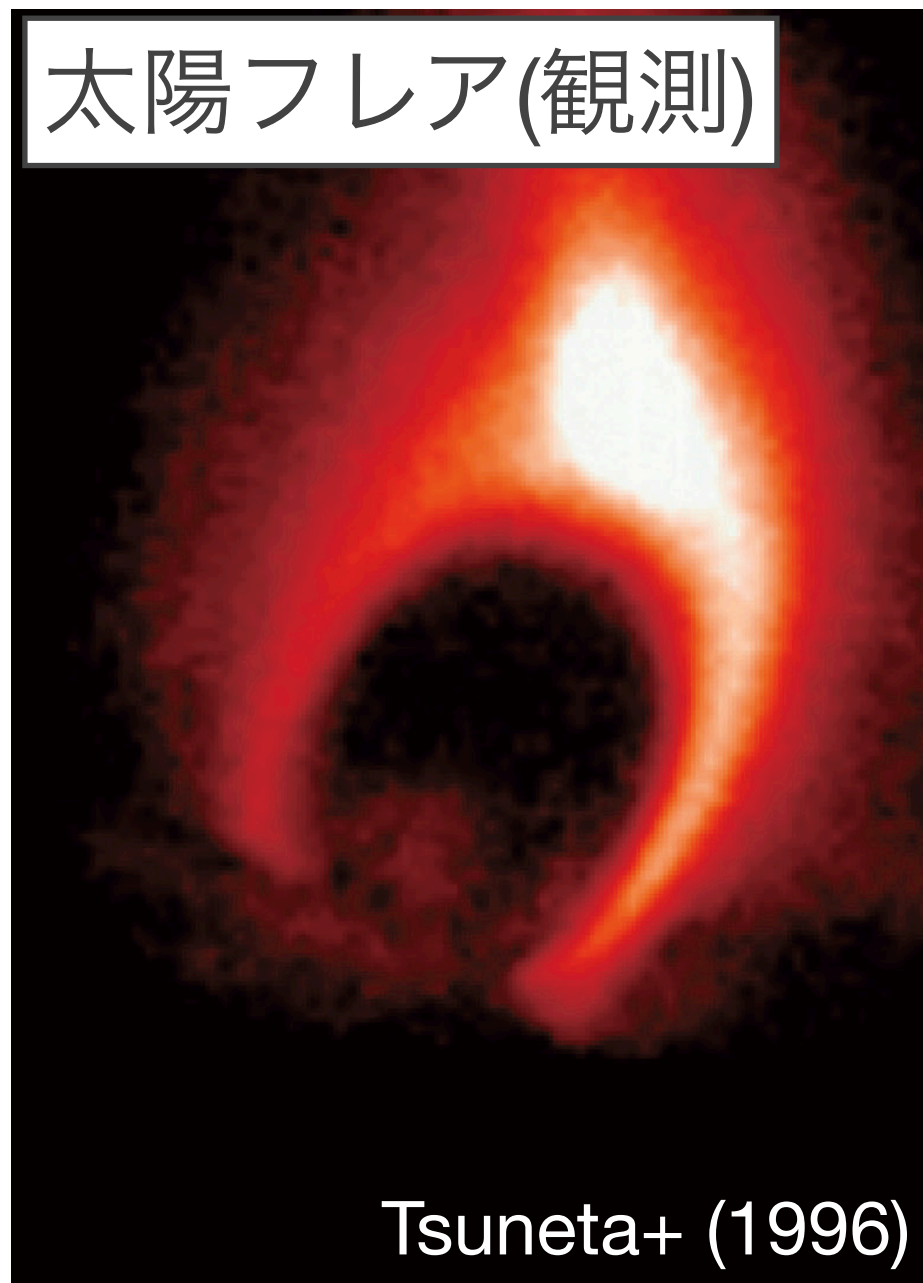
新たな科学的知見: 磁気リコネクションの重要性

■ 磁気リコネクションとは

(電気抵抗がほぼゼロの状態)

反対向きの磁力線が急激につなぎ変わる現象

磁場から熱・運動量への効率的な変換方法



磁気リコネクションの概念図

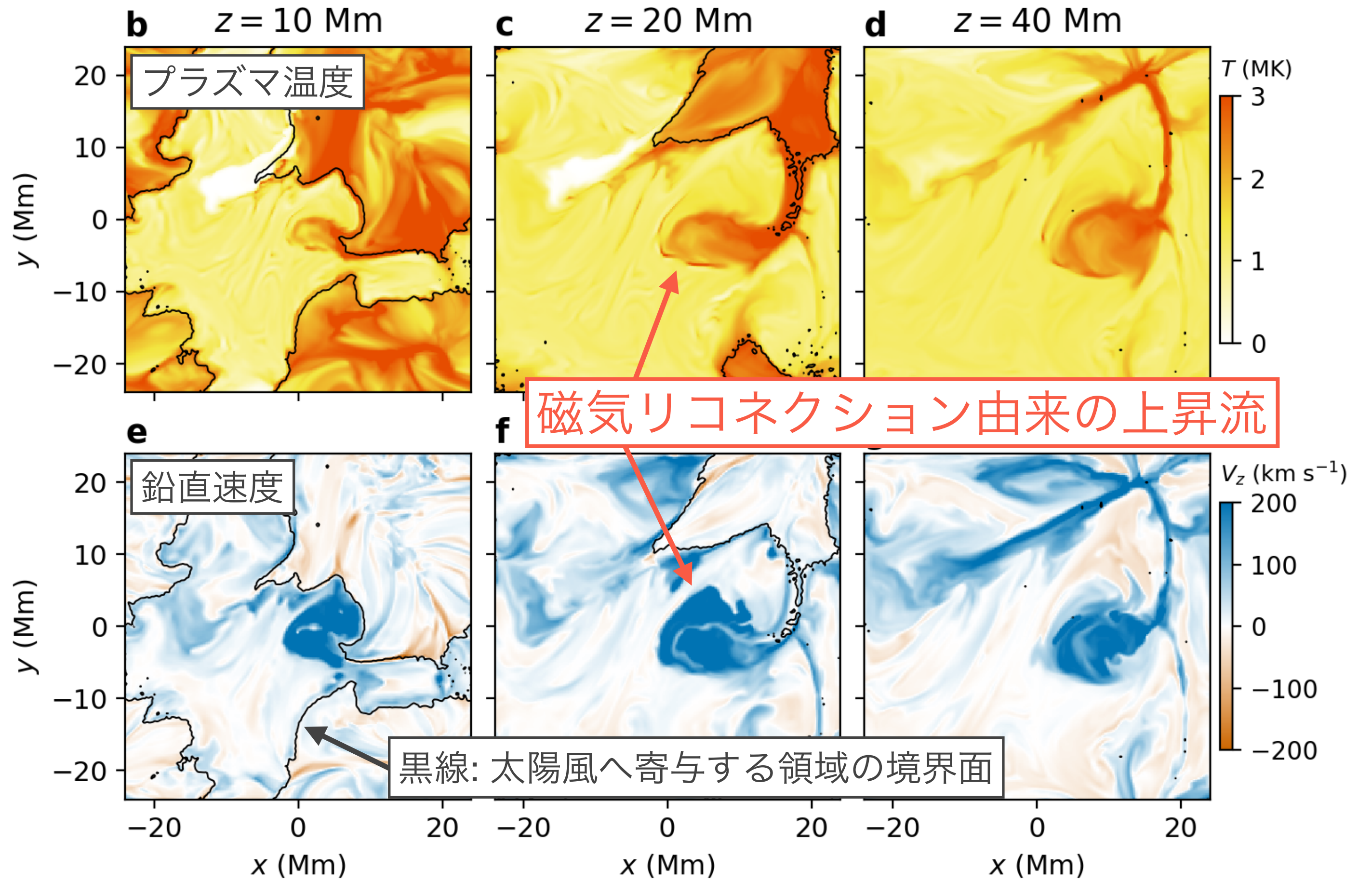
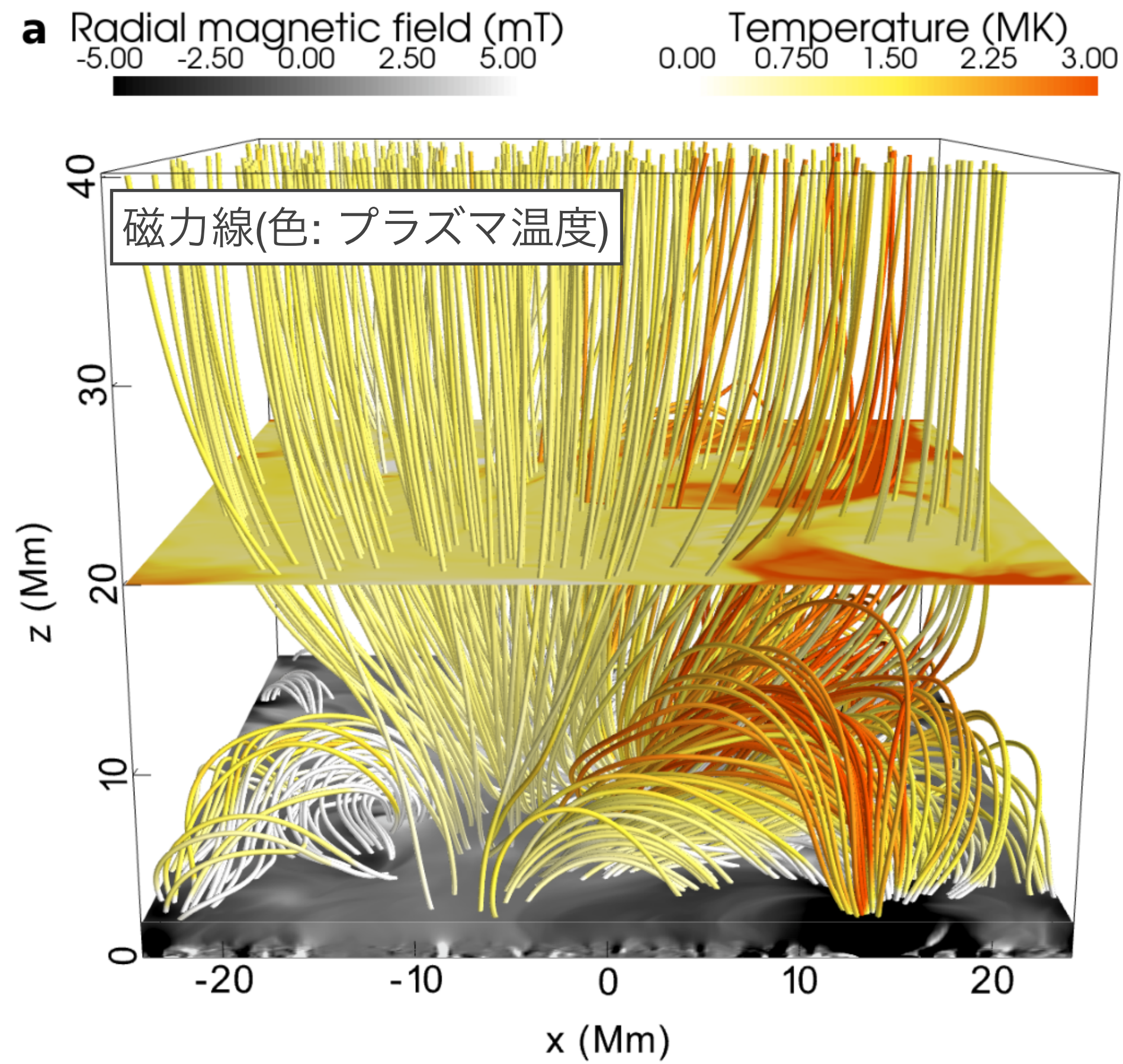
■ 太陽物理における磁気リコネクション

太陽フレア(爆発的発光)をはじめとして

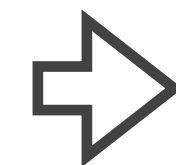
磁気リコネクションが重要とされる現象は多い

しかし、**太陽風に寄与するかは未解明だった**

本数値モデル内では磁気リコネクションが頻繁に発生

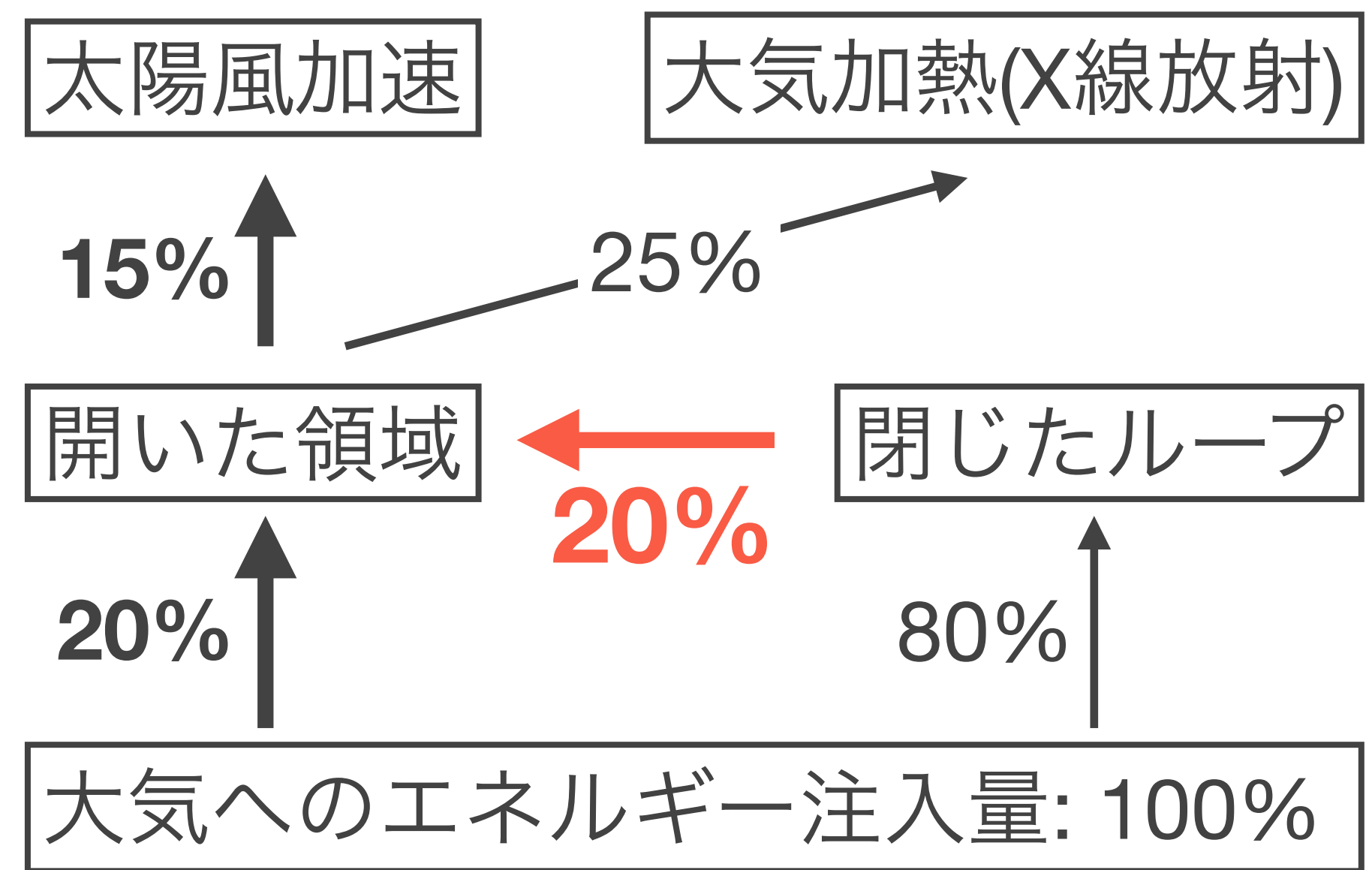
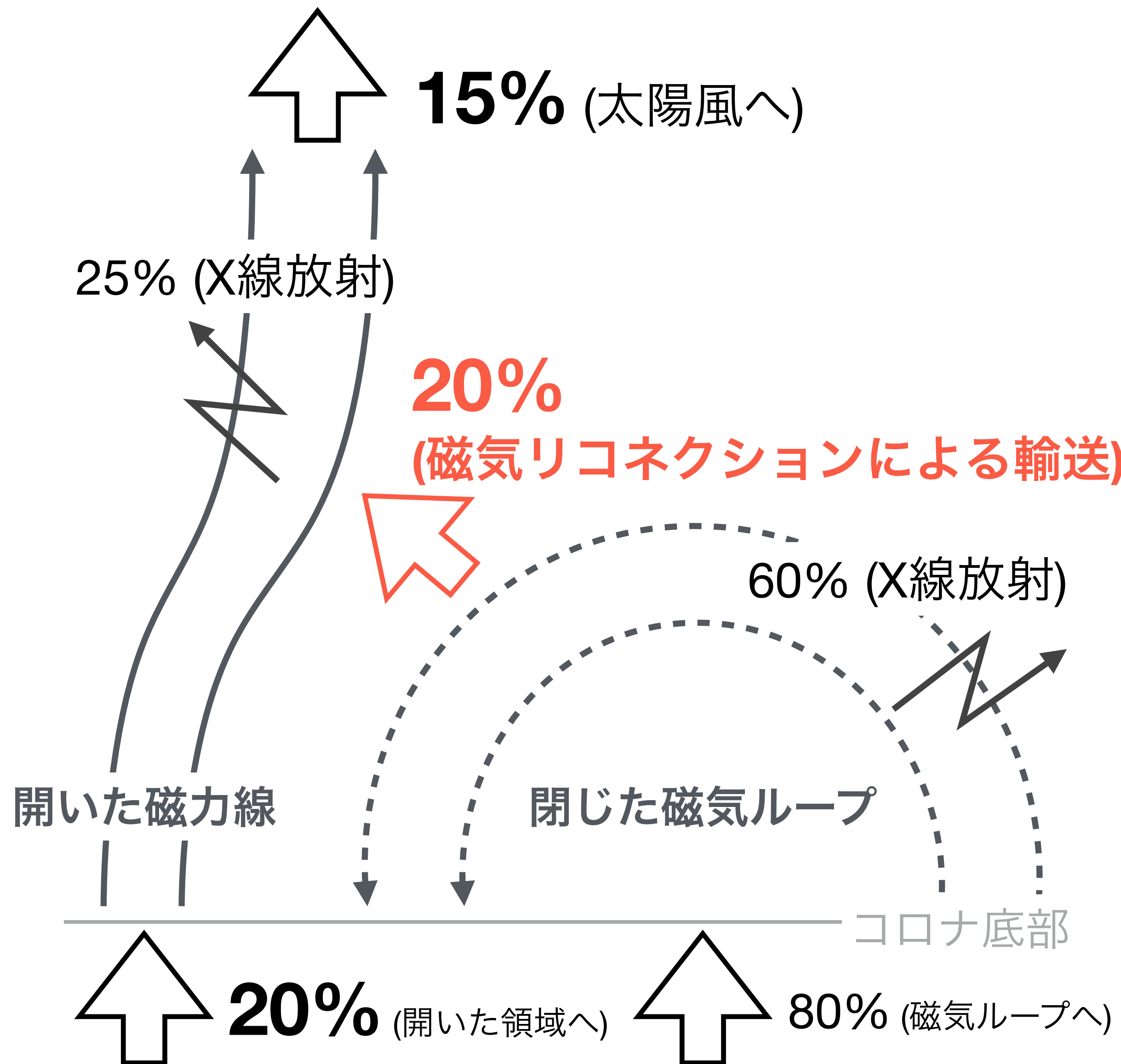


ダイナモによる磁気ループ構造形成



磁気ループと開いた磁力線の間でリコネクション

数値モデル全体でのエネルギー収支



- 太陽風が持つエネルギーの約半分が磁気リコネクション由来

今後の展開: 太陽全体としての太陽風形成過程の理解

■ 現在進行中のプロジェクト

高解像度化と小スケール構造の寄与

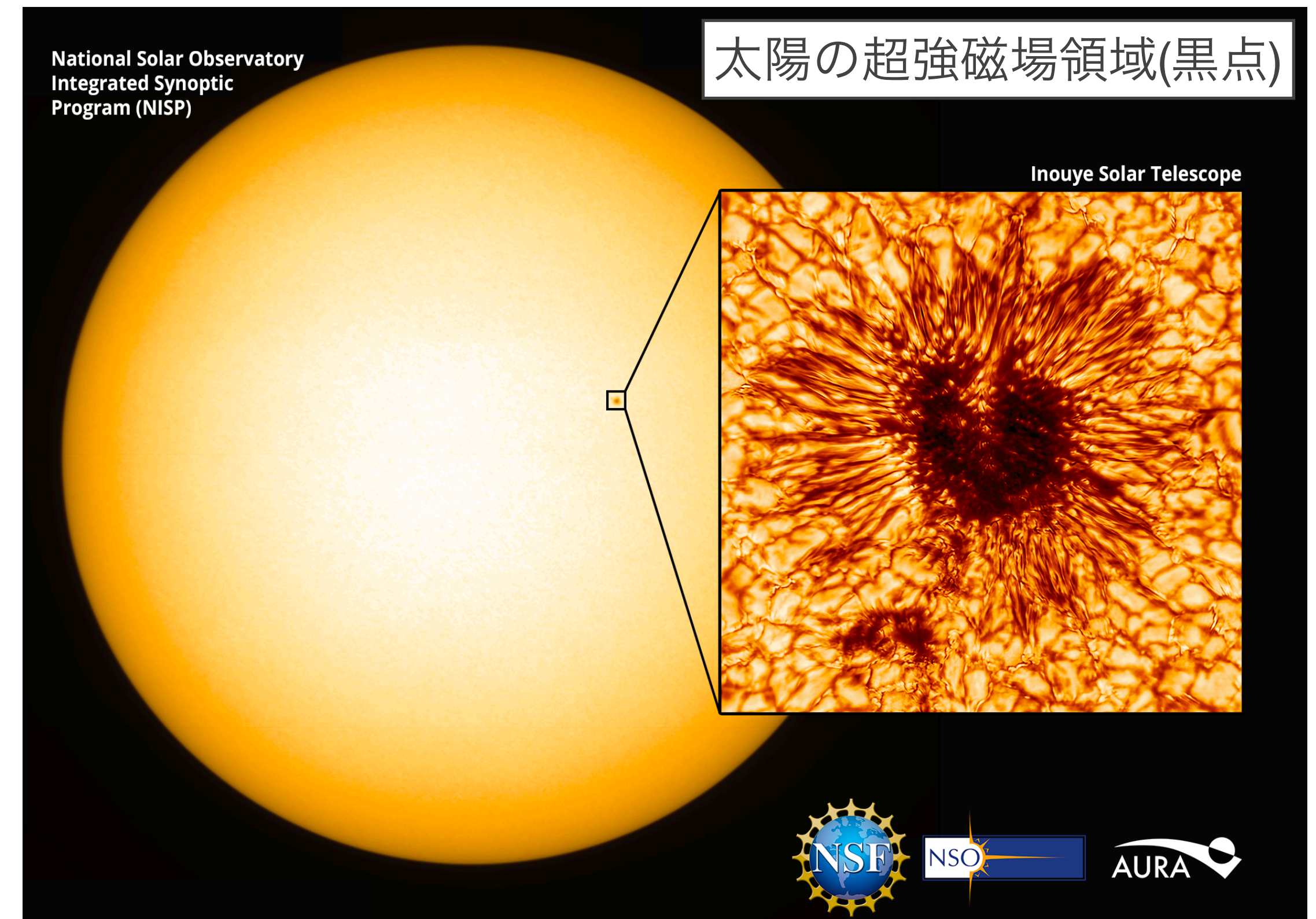
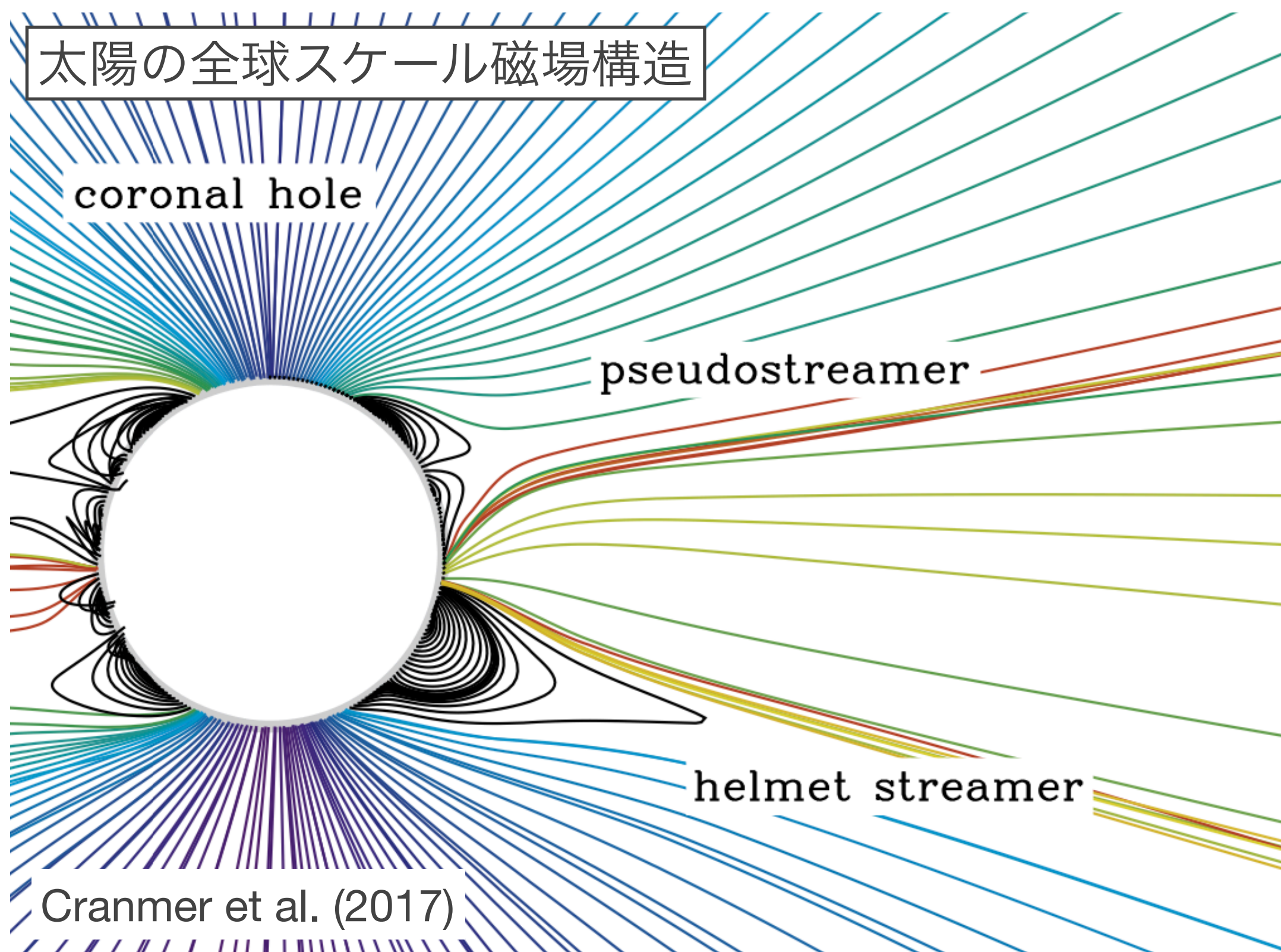
全球スケール磁場構造の影響

黒点(超強磁場領域)からの太陽風

(1) 太陽全球での太陽風形成過程の理解

⇒ (2) 過去の太陽、他の恒星への応用

(3) 宇宙天気予報の精度向上

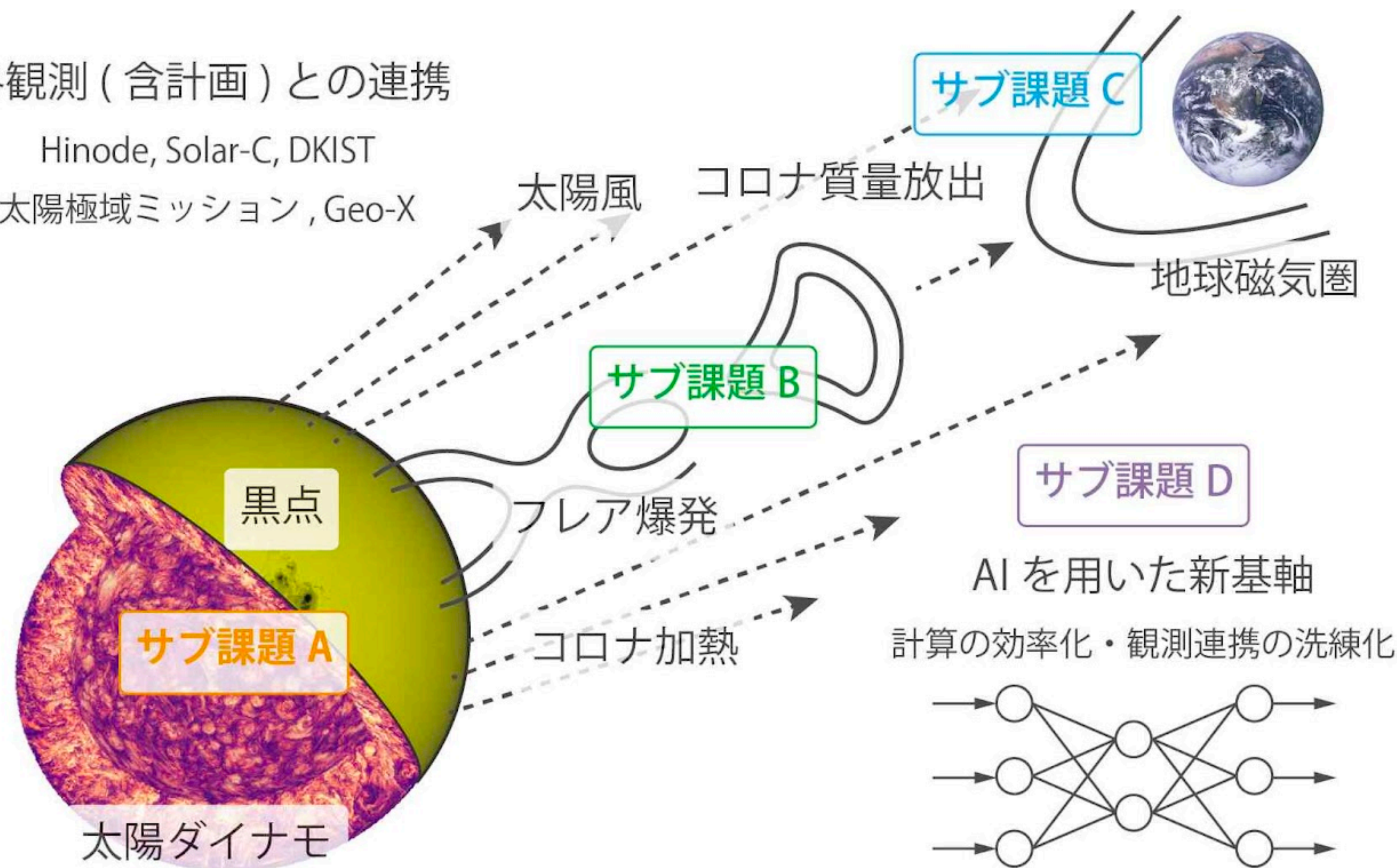


「富岳」成果創出プログラム「シミュレーションとAIで解き明かす太陽地球環境変動」

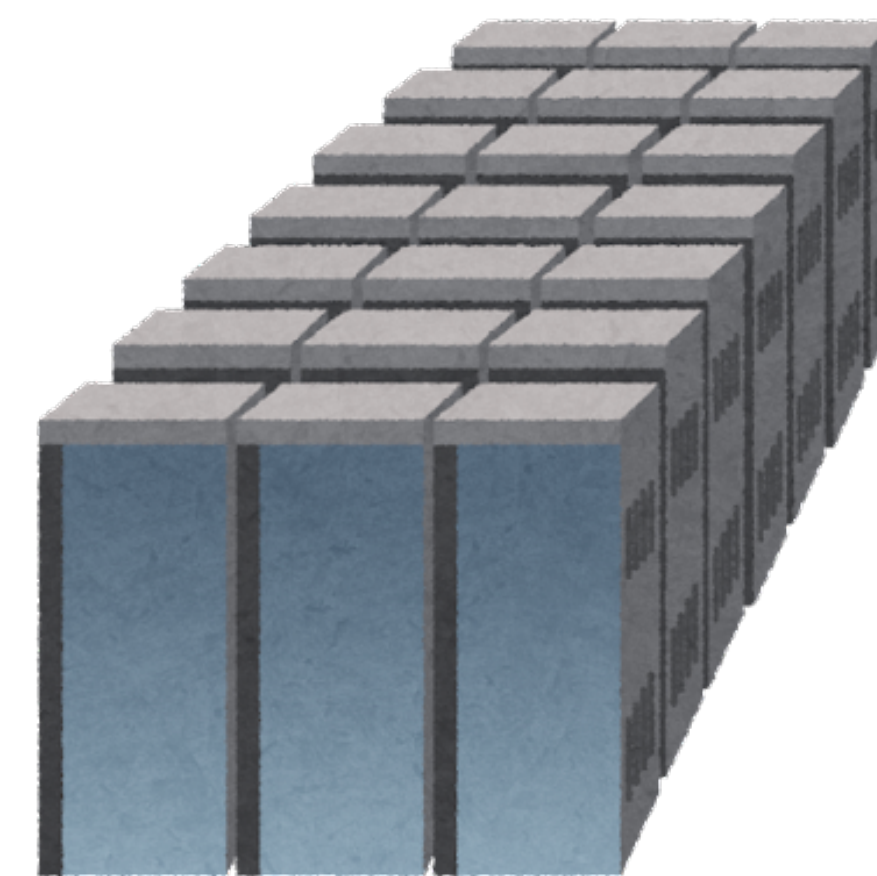
- 大規模シミュレーションと機械学習を連携させて計算を高速化・パラメータ空間充填

各観測（含計画）との連携

Hinode, Solar-C, DKIST
太陽極域ミッション, Geo-X



期間: 2023~2025年度
飯島はサブ課題B代表



まとめ: 富岳で迫る太陽風の起源

- **計算手法面での工夫: エネルギー整合磁気流体スキーム**

離散的な「積の微分法則」を利用して方程式間の整合性向上
磁気エネルギーが熱エネルギーの1千万倍という極限状況で安定

- **実装面の詳細: 並列化、高速化**

パラメータギャップにより「硬い」方程式が出現
方程式レベル・離散化レベルでの実効位相速度抑制による陽解法での高速化

- **科学成果: 「富岳」による太陽風の輻射磁気流体計算**

恣意的な仮定を置かずに観測と整合的な太陽風を再現(世界初の第一原理的計算)
太陽風が持つエネルギーの約半分が磁気リコネクション由来であることを発見

