

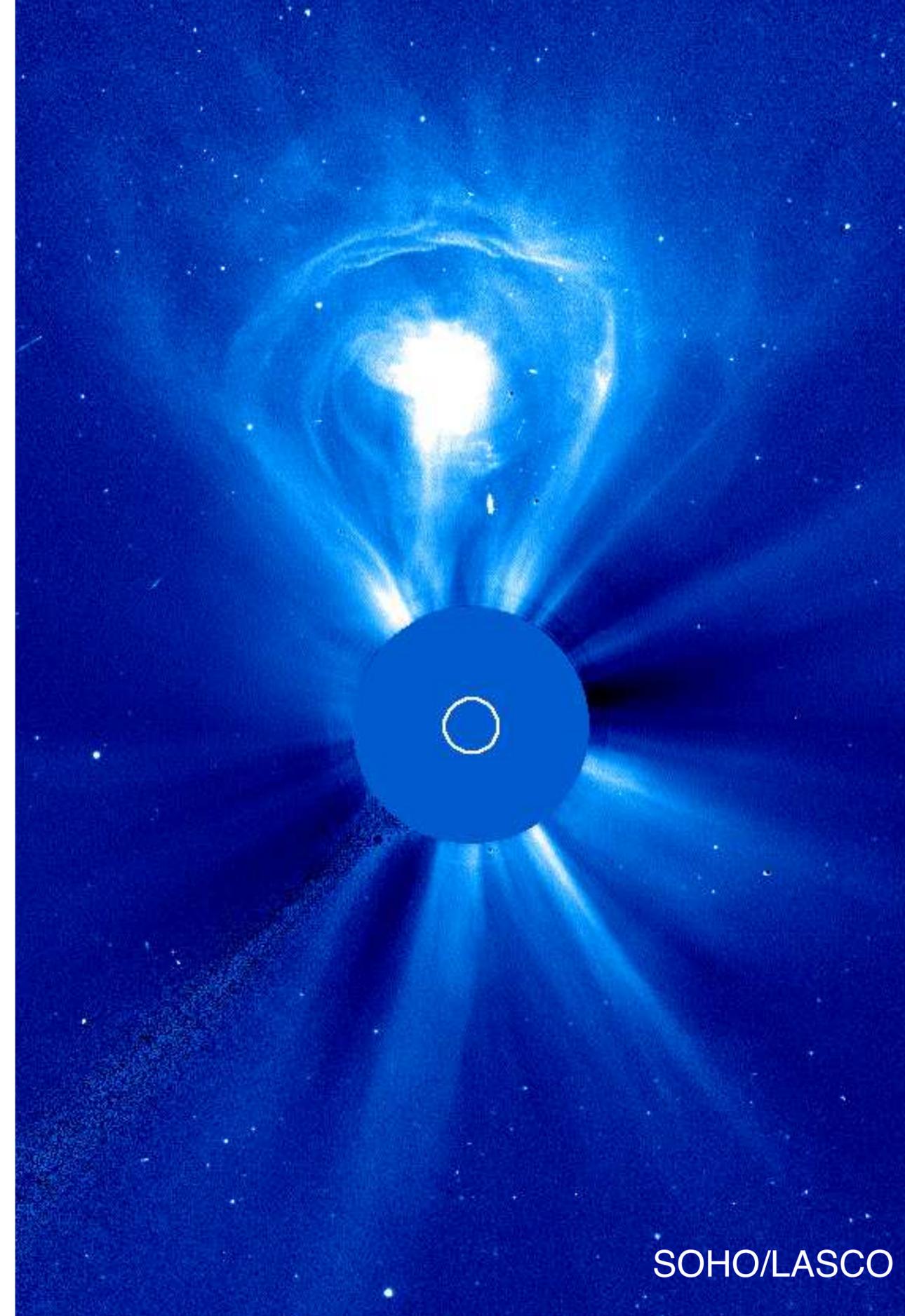
衛星観測データを駆使した太陽の 磁気活動現象の解明

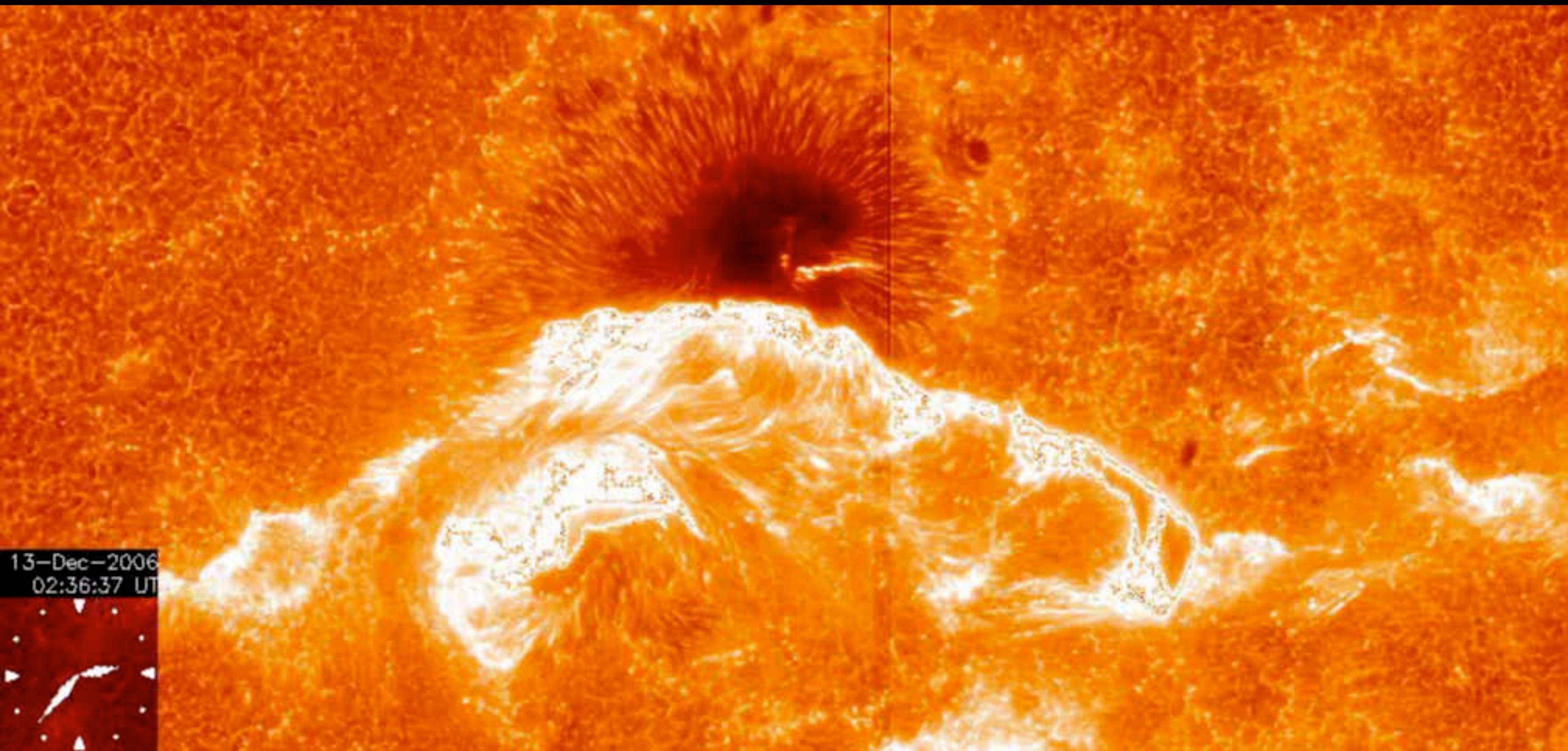
鳥海 森

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

アウトライン

1. 巨大フレアを生じる太陽黒点の発生機構
 - 太陽フレアとは？
 - フレア黒点はどのように形成されるのか？
 - 観測と数値シミュレーションの組み合わせ
2. ひのだからSolar-C、そしてその先へ
 - 高感度太陽紫外線分光衛星 Solar-C (EUVST) 計画
 - 新たなミッションによる太陽内部探査の可能性
3. 太陽と宇宙科学 ～まとめに代えて～

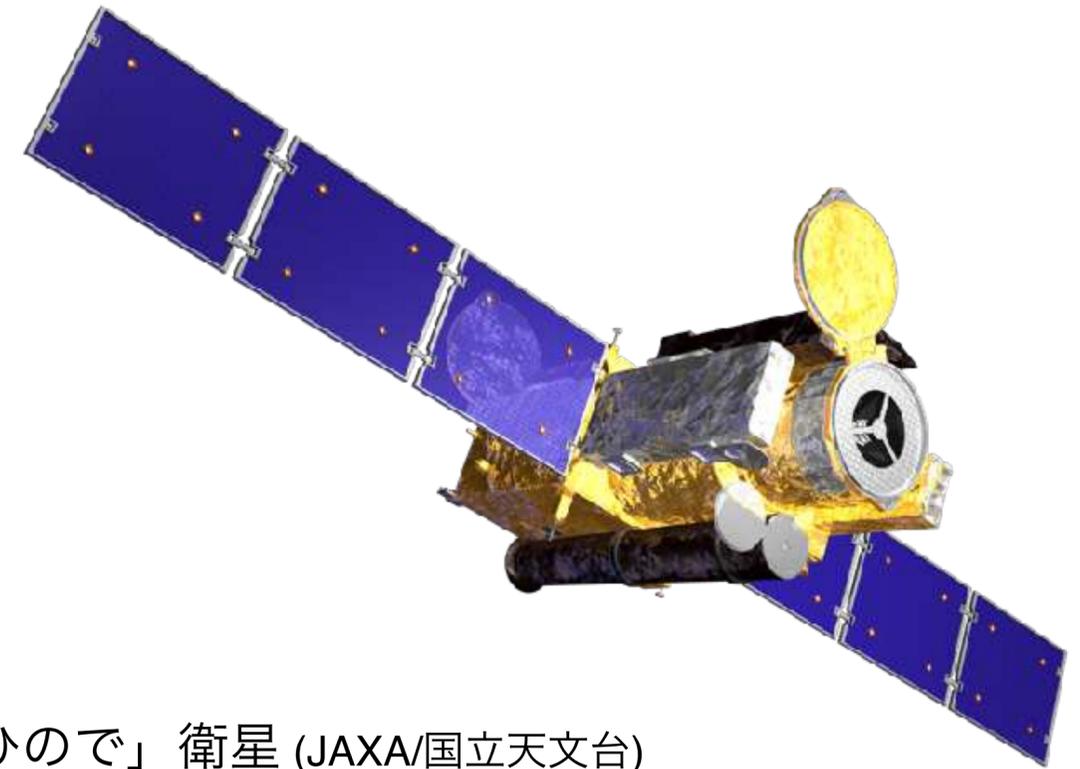




「ひので」衛星が観測した太陽フレア（岡本文典氏提供）

太陽フレアとは？

- 太陽系最大の突発的エネルギー解放現象
- エネルギー規模： $10^{22} \sim 10^{25}$ ジュール
- 時間規模：数10分～数時間
- 温度：数千万度～数億度
- 電磁波・コロナガス(CME)・高エネルギー粒子の放出を通じて惑星環境にも影響を及ぼす
- 太陽に似たほかの恒星でも観測されている



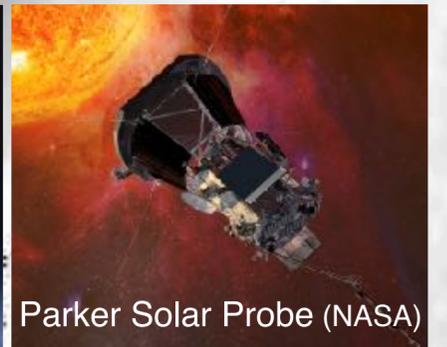
「ひので」衛星 (JAXA/国立天文台)



SDO (NASA)

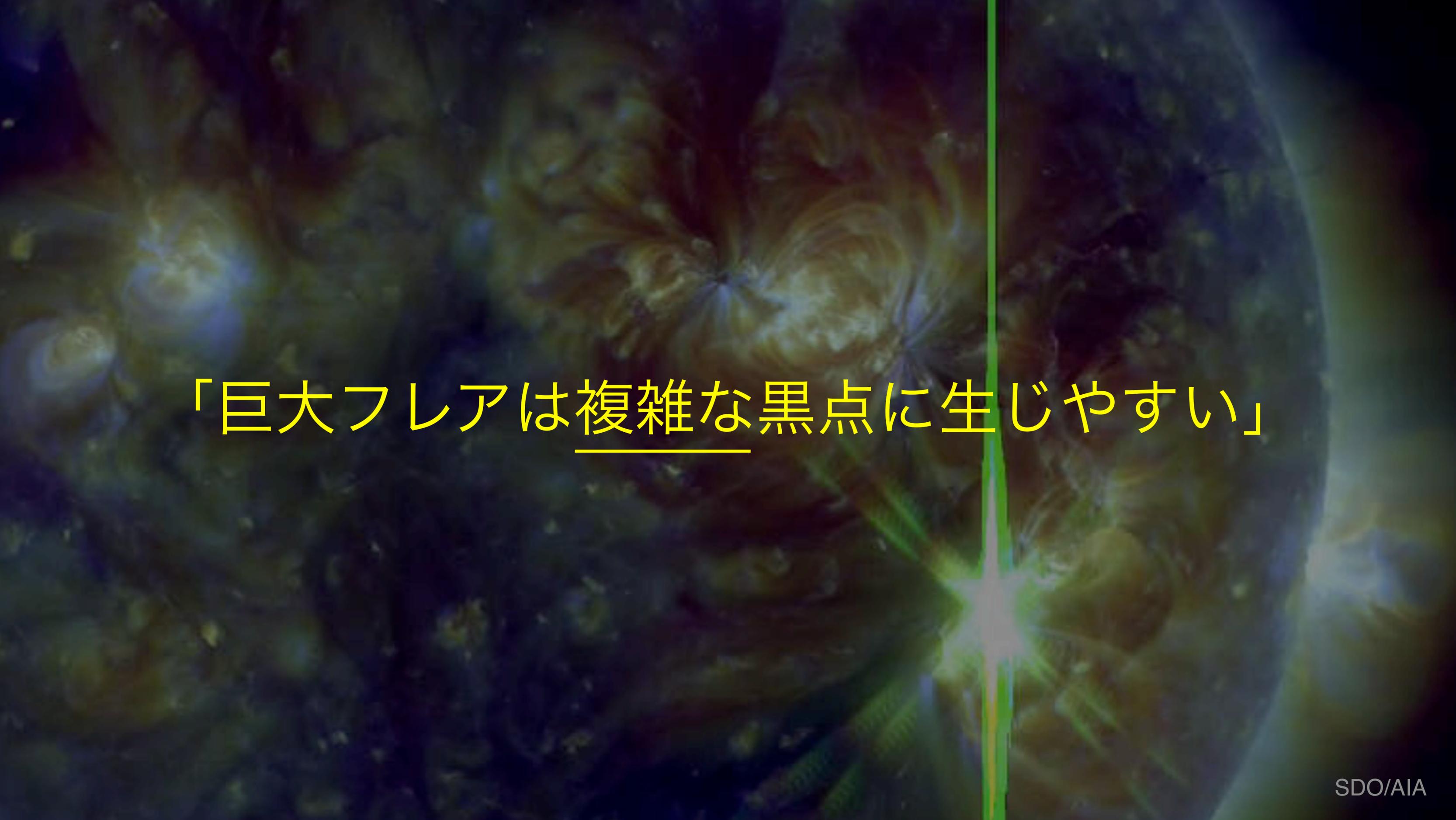


IRIS (NASA)



Parker Solar Probe (NASA)

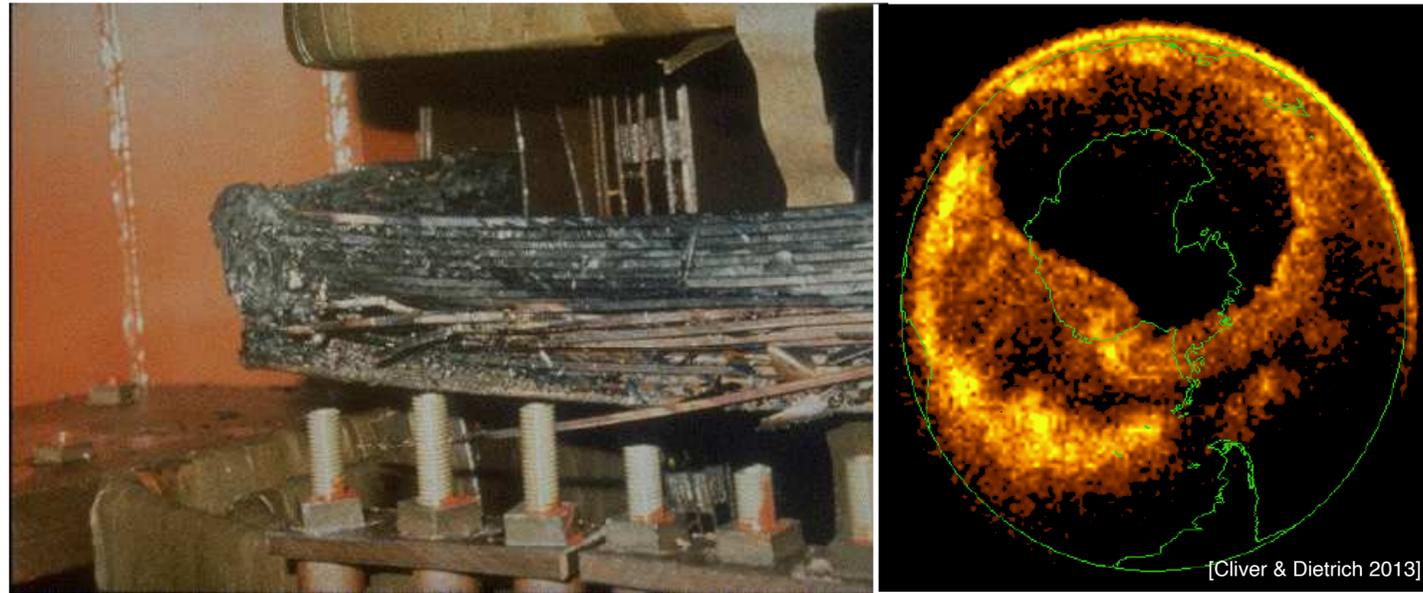
「ひので」衛星が観測した太陽フレア (岡本文典氏提供)



「巨大フレアは複雑な黒点に生じやすい」

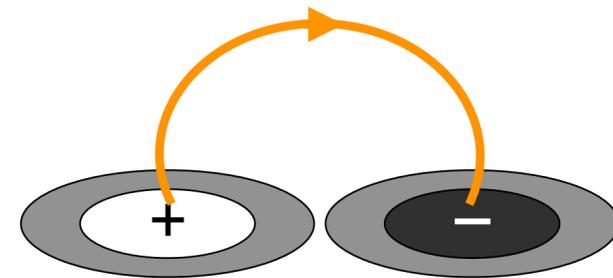
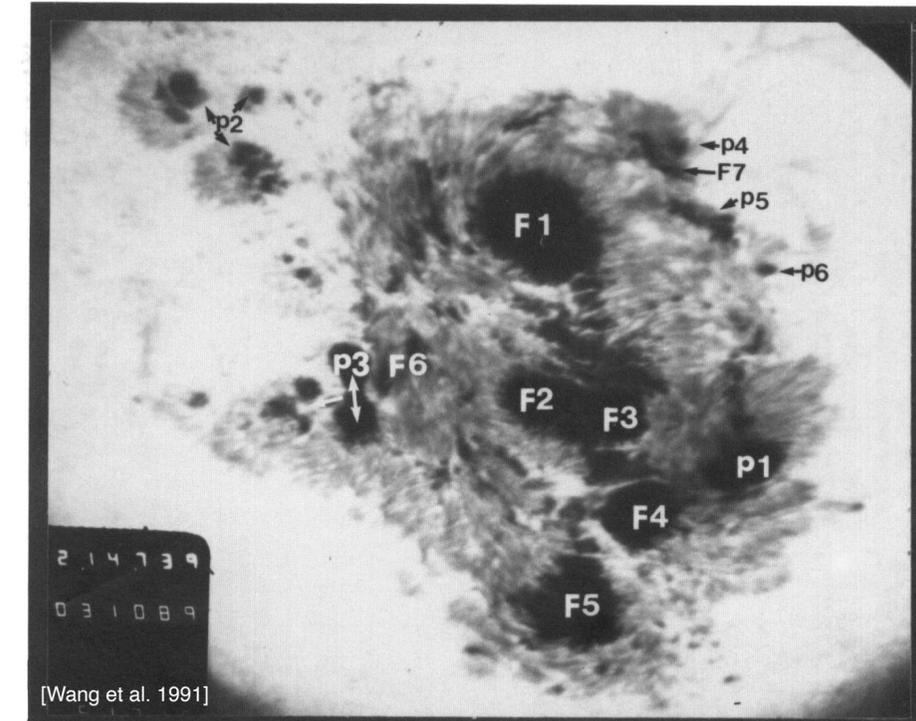
「巨大フレアは複雑な黒点に生じやすい」

1989年3月の磁気嵐



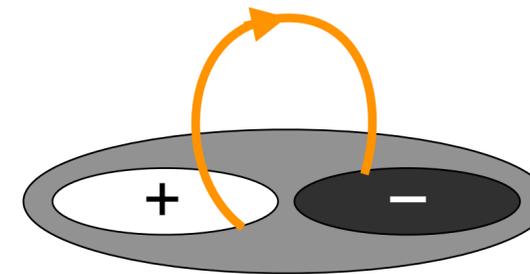
黒点群NOAA5395はX15クラスを含む200以上のフレアを生じた。強烈な磁気嵐によって、カナダ・ケベック州で大停電が発生し、アメリカ・ニュージャージー州では変圧器が故障した

「デルタ型」黒点だった



ベータ型黒点

通常の黒点。正極・負極はそれぞれ固有の半暗部を持つ



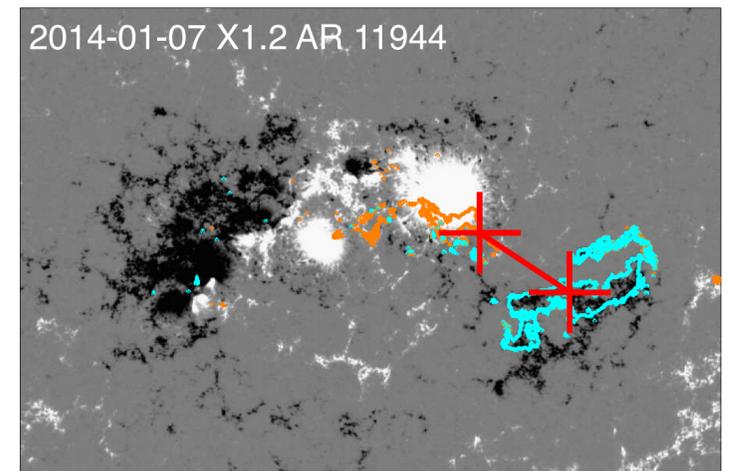
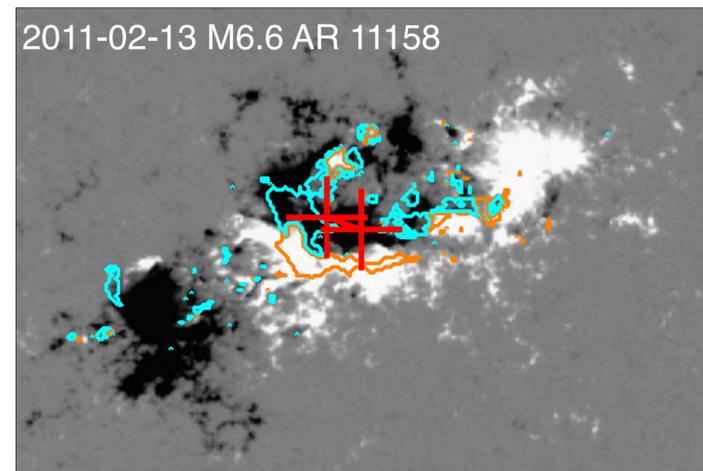
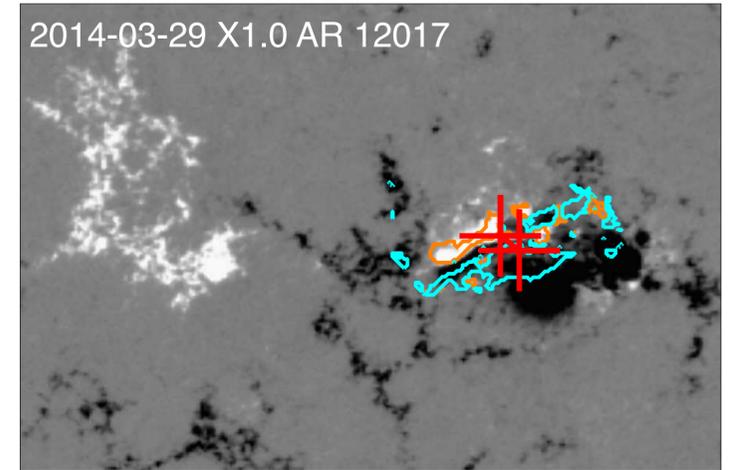
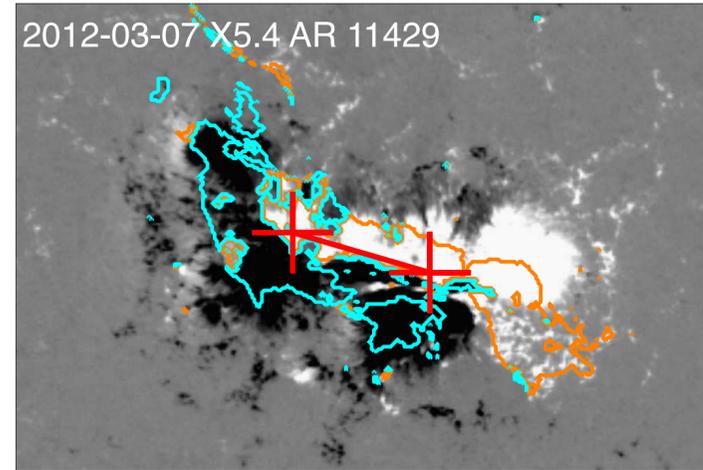
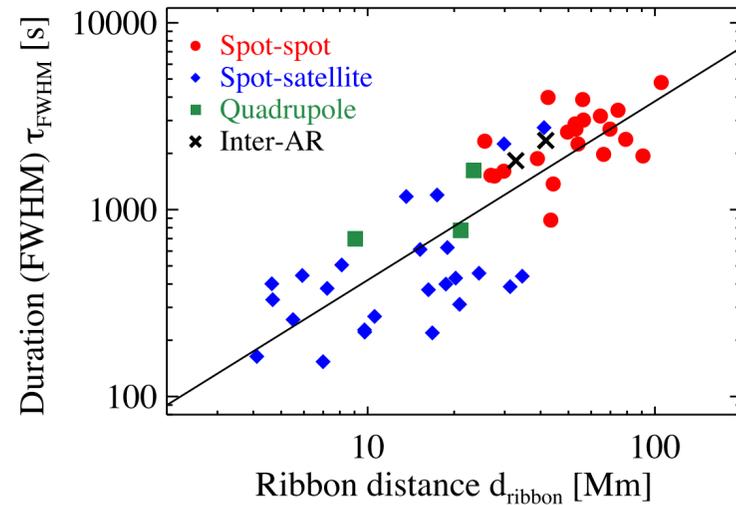
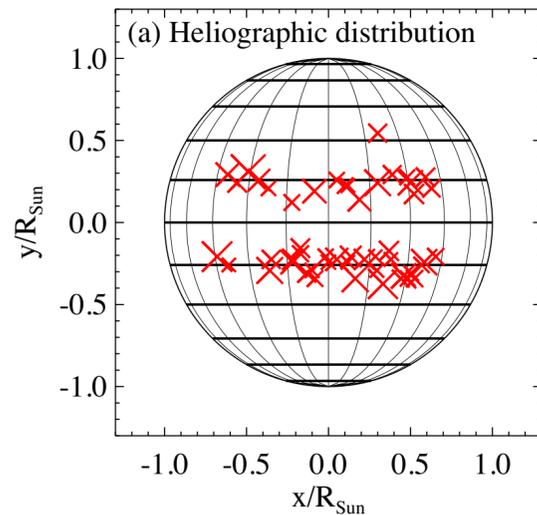
デルタ型黒点

正極・負極が近接し、1つの半暗部を共有。フレア活動度が顕著に高い

「巨大フレアは複雑な黒点に生じやすい」

フレアの統計解析 [Toriumi et al. 2017]

- 2010年以降 M5クラス以上のフレア
- **83%がデルタ黒点**に発生
- デルタ黒点は様々な形成過程を示す



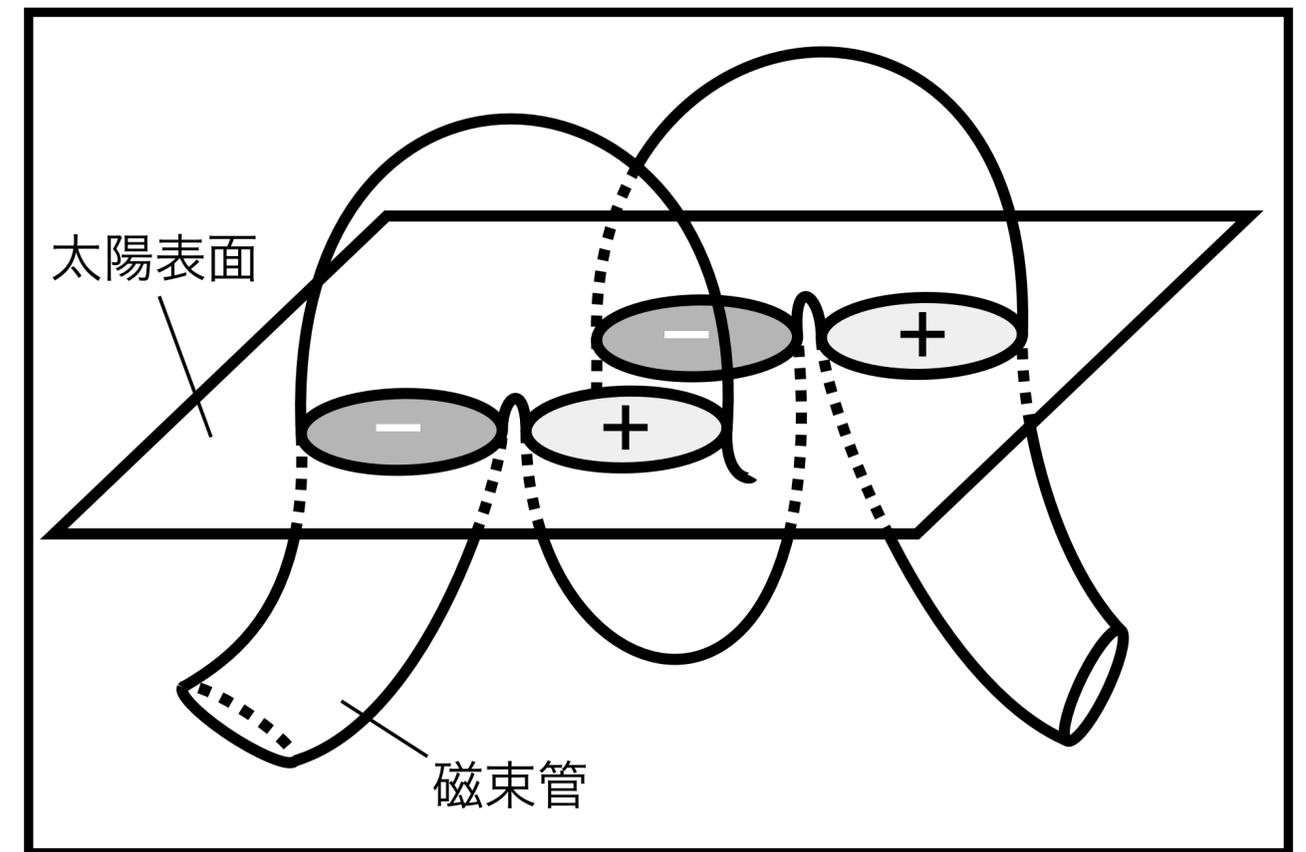
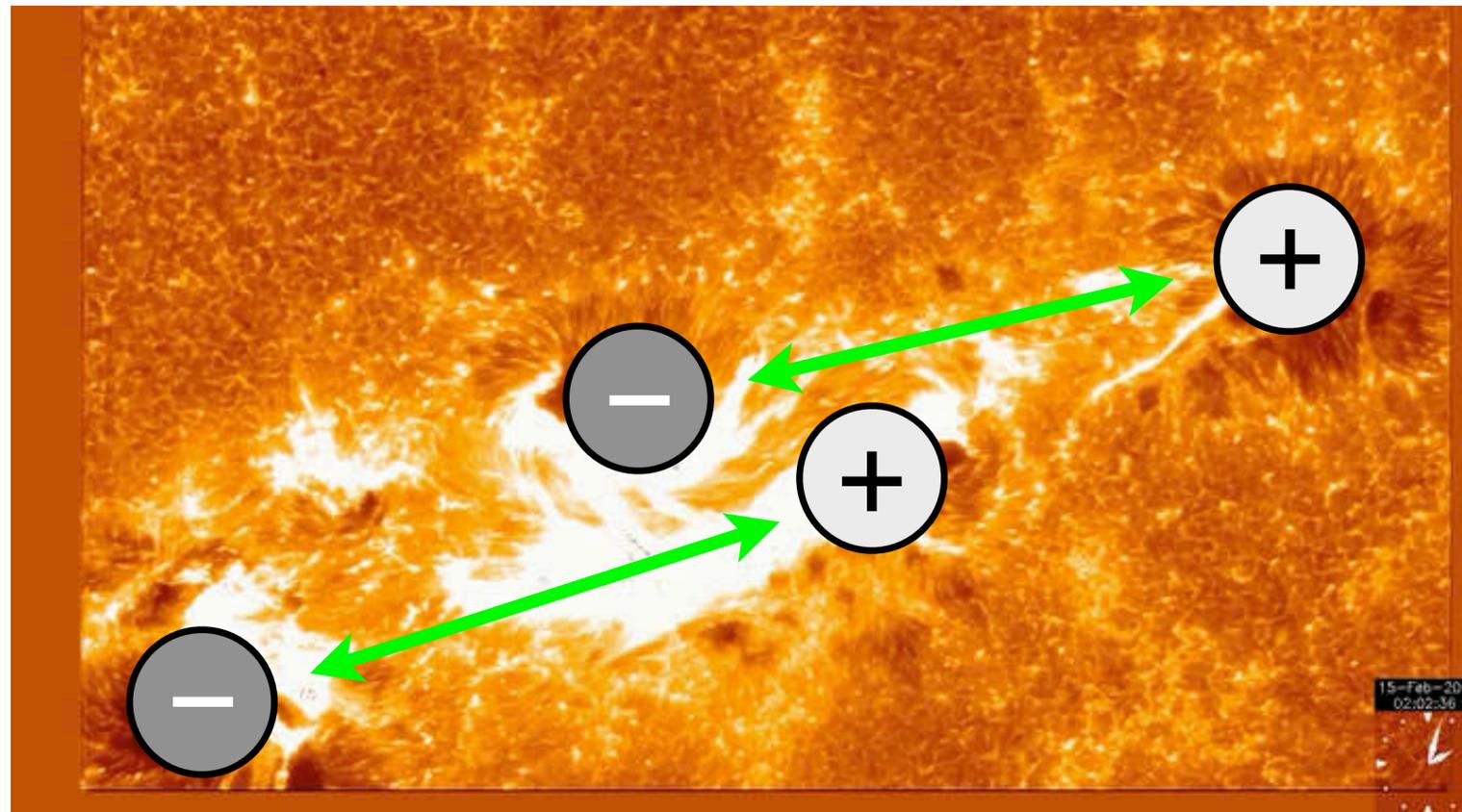
さまざまなデルタ黒点の磁場強度分布
コンターはフレアによる増光範囲を示す

「巨大フレアは複雑な黒点に生じやすい」

フレアの統計解析 [Toriumi et al. 2017]

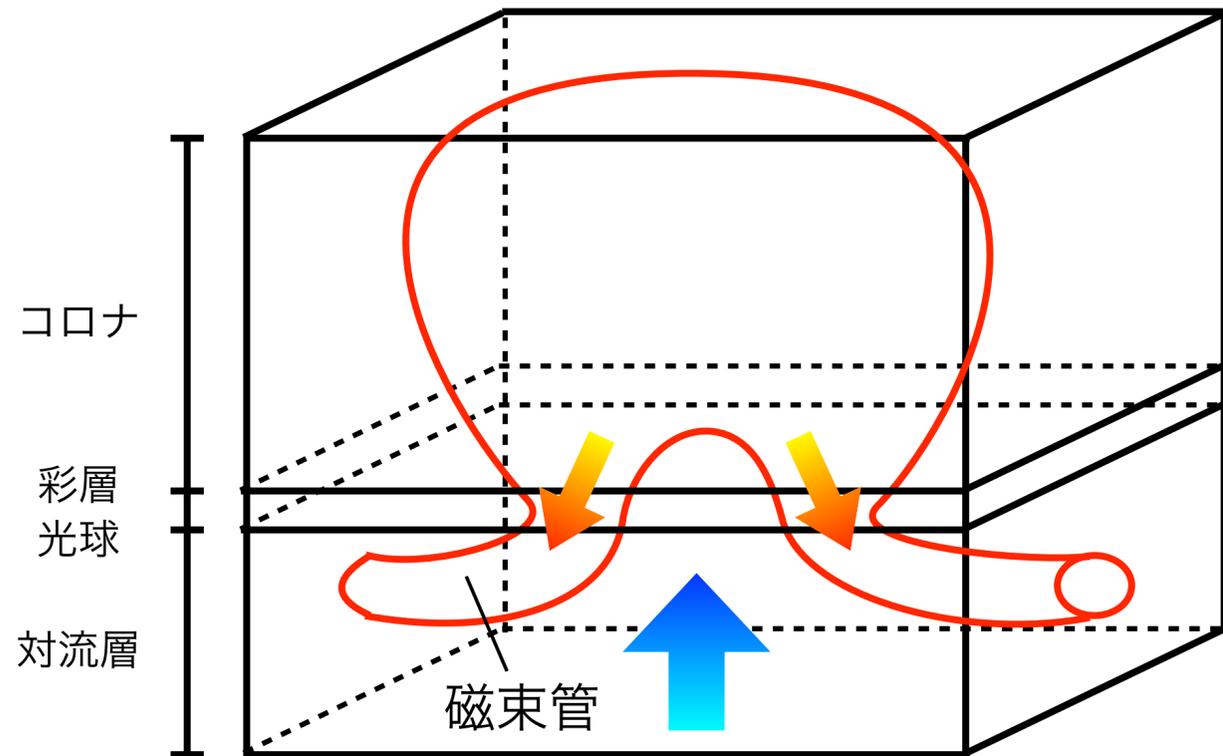
「ひので」カルシウム線画像

黒点形成の想像図



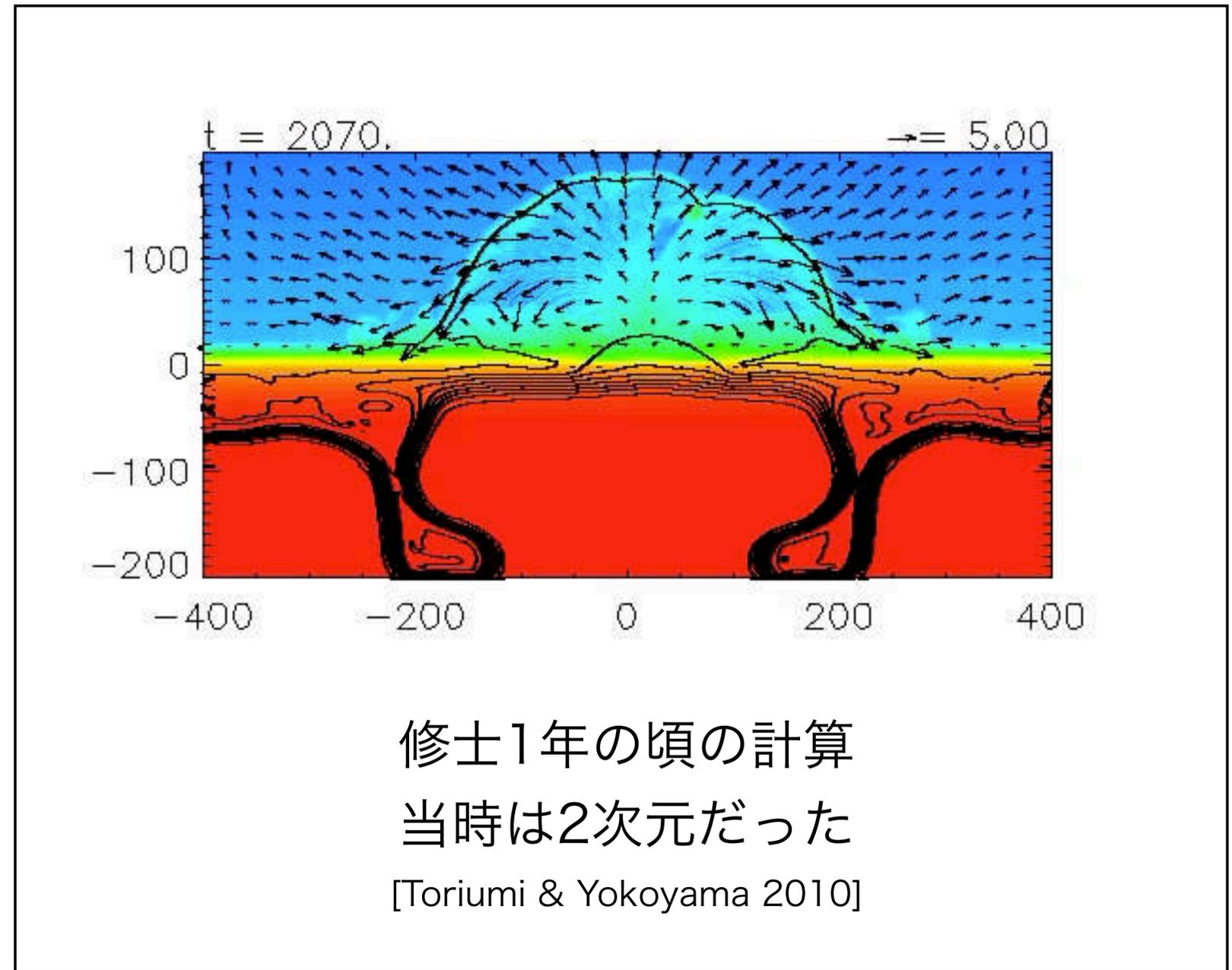
- 四重極型の黒点... 1本の磁束管（磁力線のたば）が2か所で浮上したのではないか？
- しかし、**太陽表面下を光学的に観測することは不可能！**

数値シミュレーションによる再現



浮上磁場シミュレーション

磁気流体力学(MHD)方程式を解くことで、対流層に置かれた磁束管が浮上し、太陽表面に黒点やコロナループを形成するようすを計算する



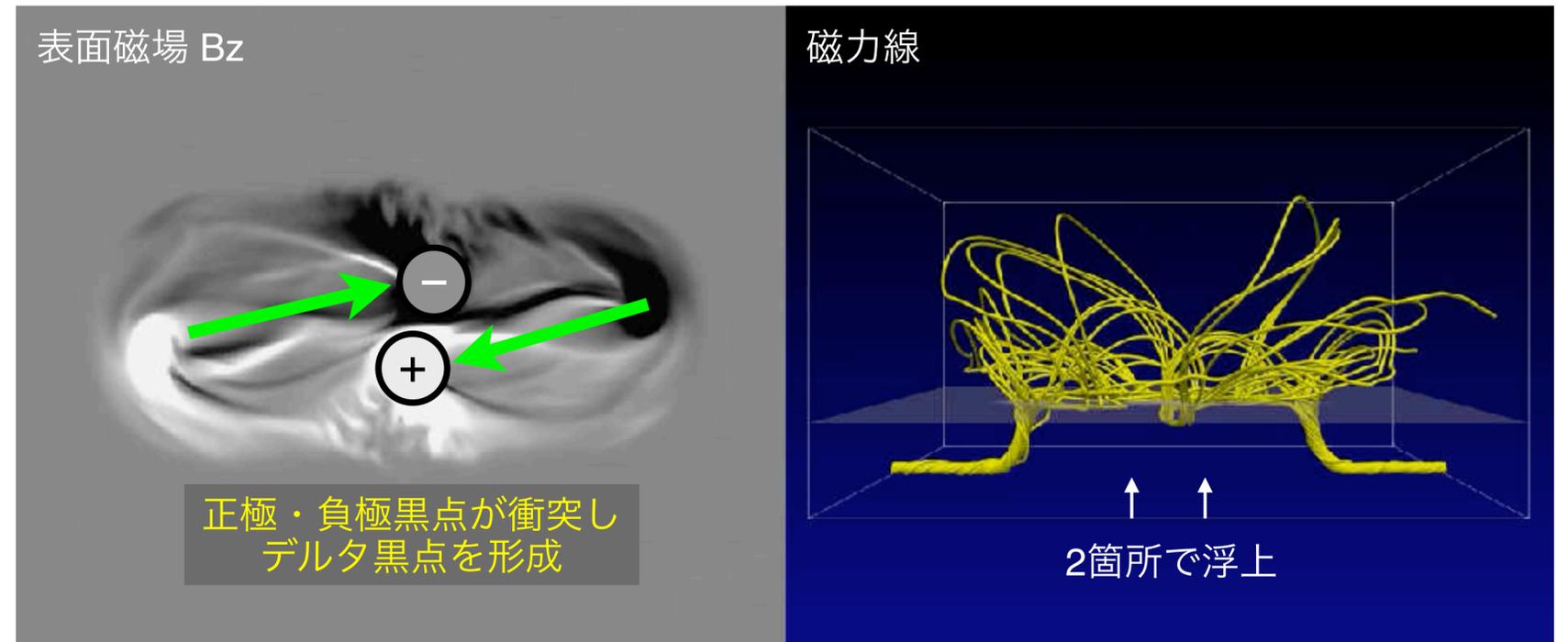
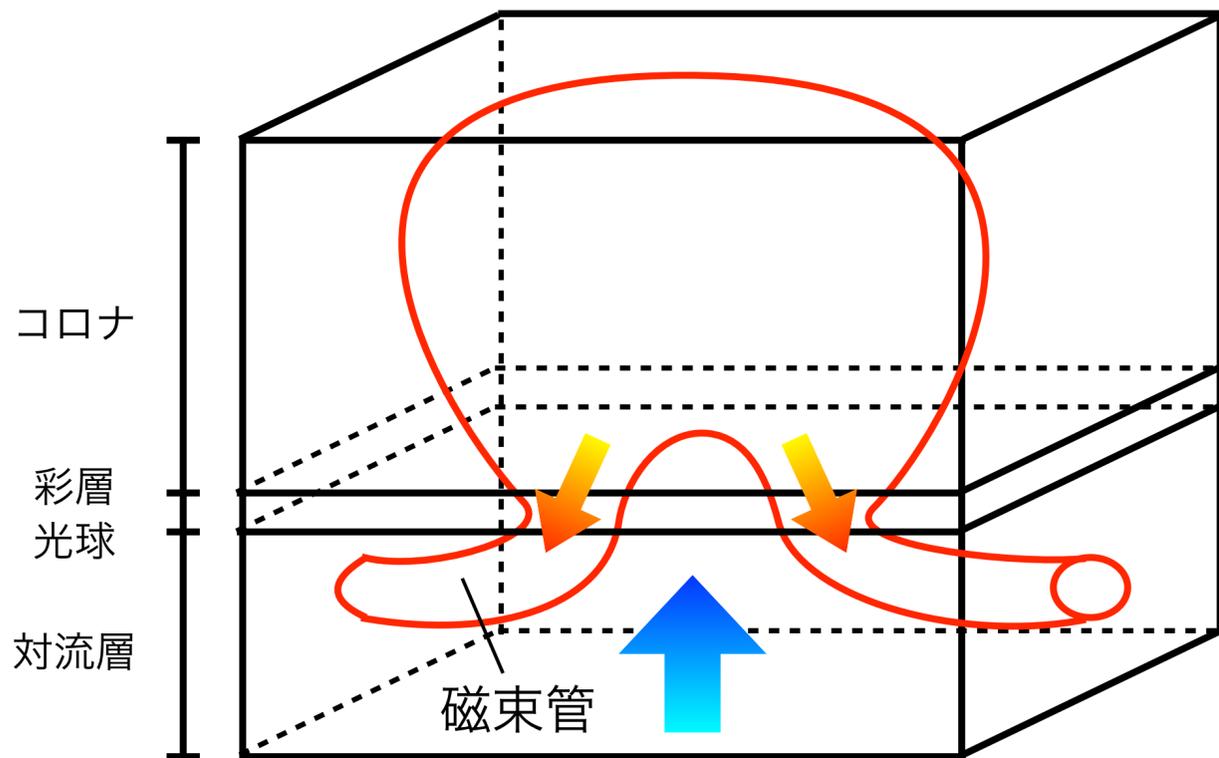
修士1年の頃の計算

当時は2次元だった

[Toriumi & Yokoyama 2010]

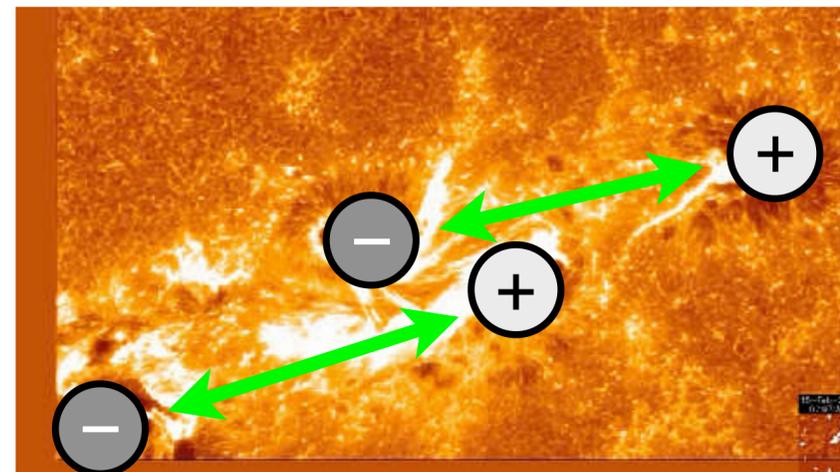
数値シミュレーションによる再現

3次元：磁束管の2か所に浮力を与える



浮上磁場シミュレーション

磁気流体力学(MHD)方程式を解くことで、対流層に置かれた磁束管が浮上し、太陽表面に黒点やコロナループを形成するようすを計算する

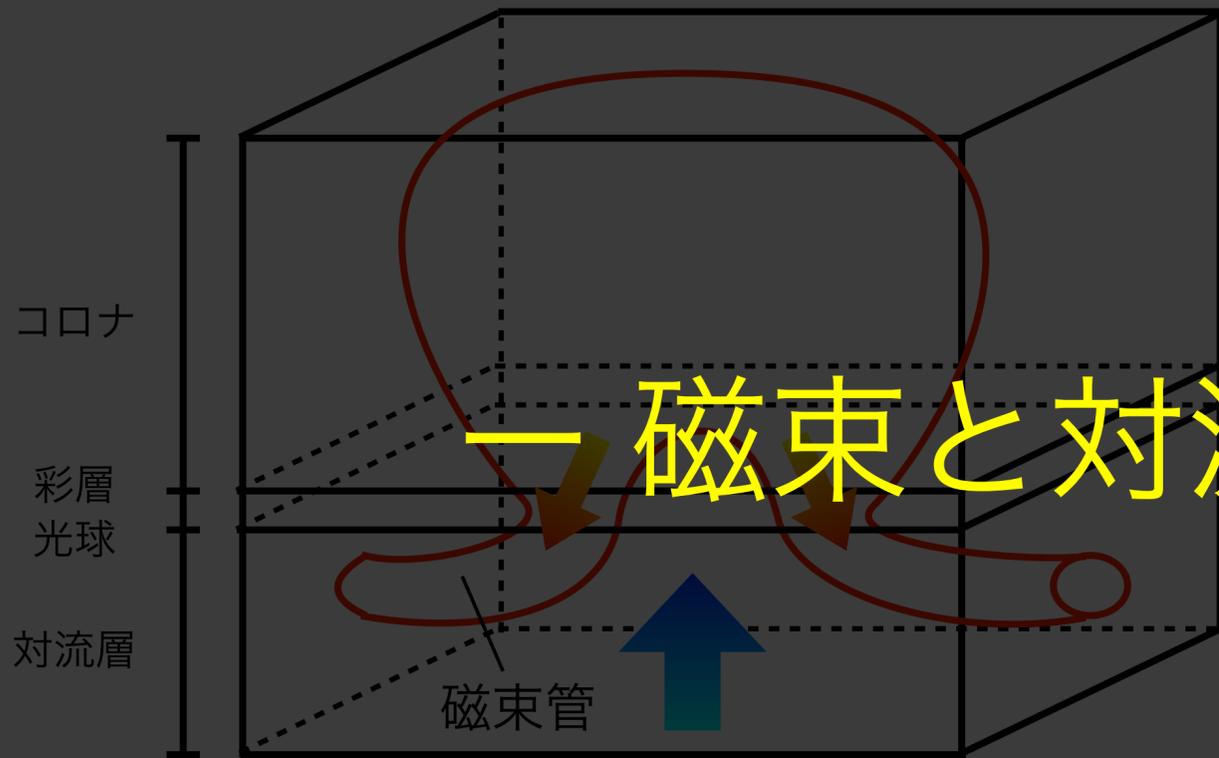


デルタ黒点の再現に成功

表面下の形状が重要
[Toriumi, Kusano, et al. 2014]
[Toriumi & Takasao 2017]

数値シミュレーションによる再現

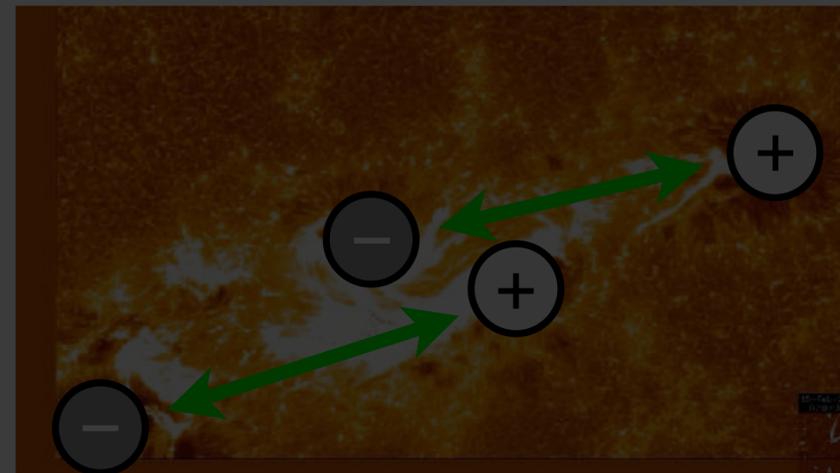
3次元：磁束管の2か所に浮力を与える



— 磁束と対流との相互作用が不明 —

浮上磁場シミュレーション

磁気流体力学(MHD)方程式を解くことで、対流層に置かれた磁束管が浮上し、太陽表面に黒点やコロナループを形成するようすを計算する



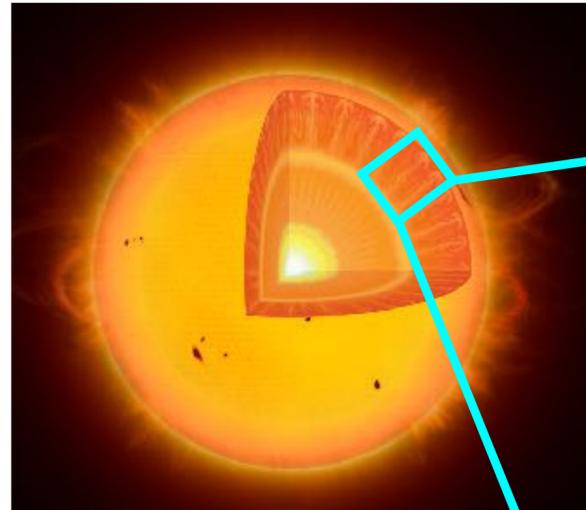
デルタ黒点の再現に成功

表面下の形状が重要

[Toriumi, Kusano, et al. 2014]

[Toriumi & Takasao 2017]

磁気対流計算によるフレア黒点形成

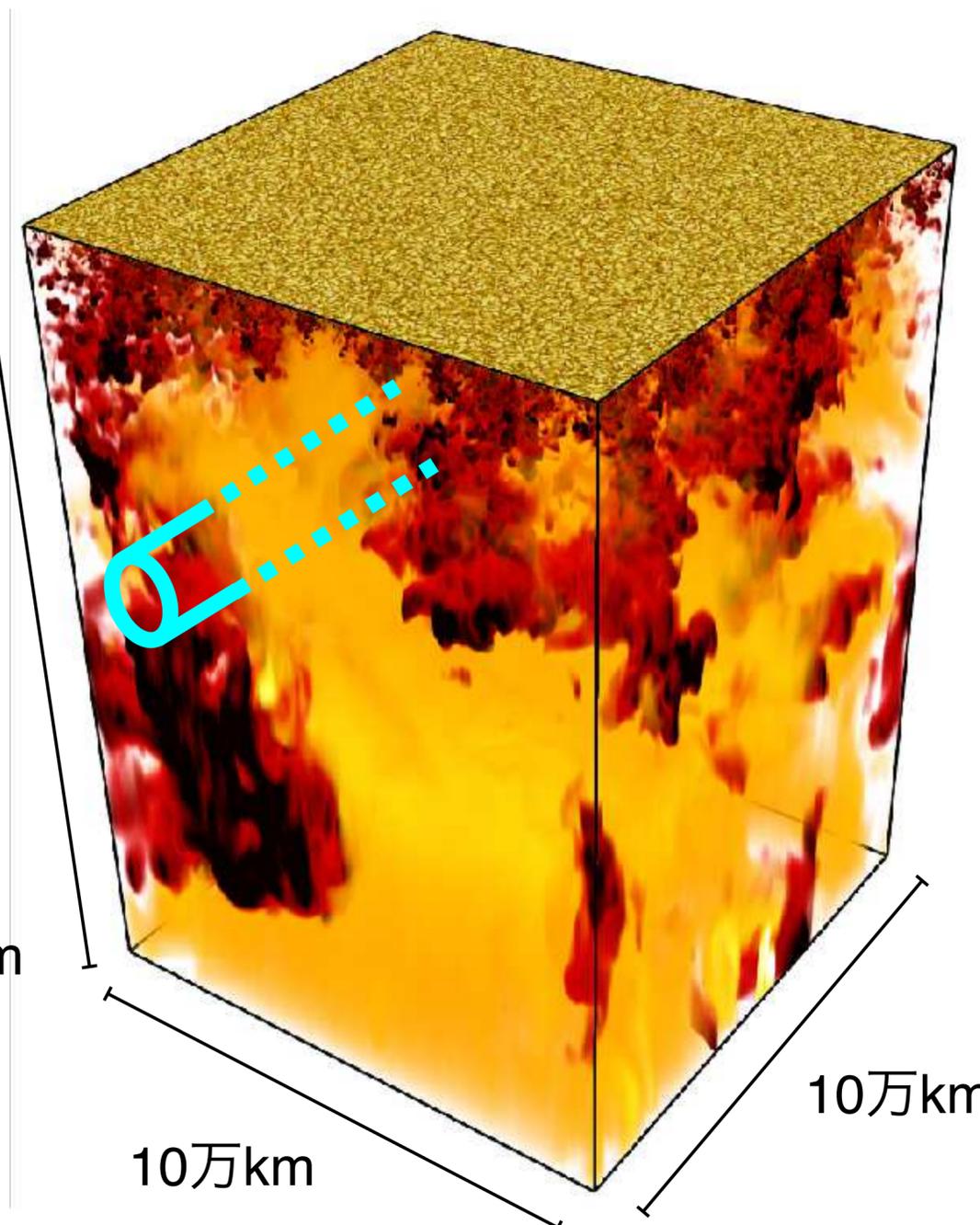


+700 km
0 km
(太陽表面)

-14万km

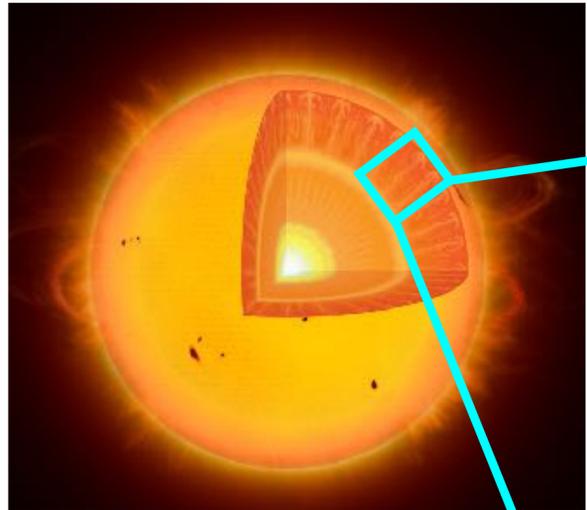
10万km

10万km



- ✓ 対流層全体をカバーする巨大な計算ボックス
- ✓ スケールの異なるリアリスティックな対流場を生成
- ✓ 埋め込まれた磁束管は背景対流によって“勝手に”浮上する
- ✓ R2D2コード：音速抑制法により実装 [Hotta+2019; Hotta & Iijima 2020]

磁気対流計算によるフレア黒点形成

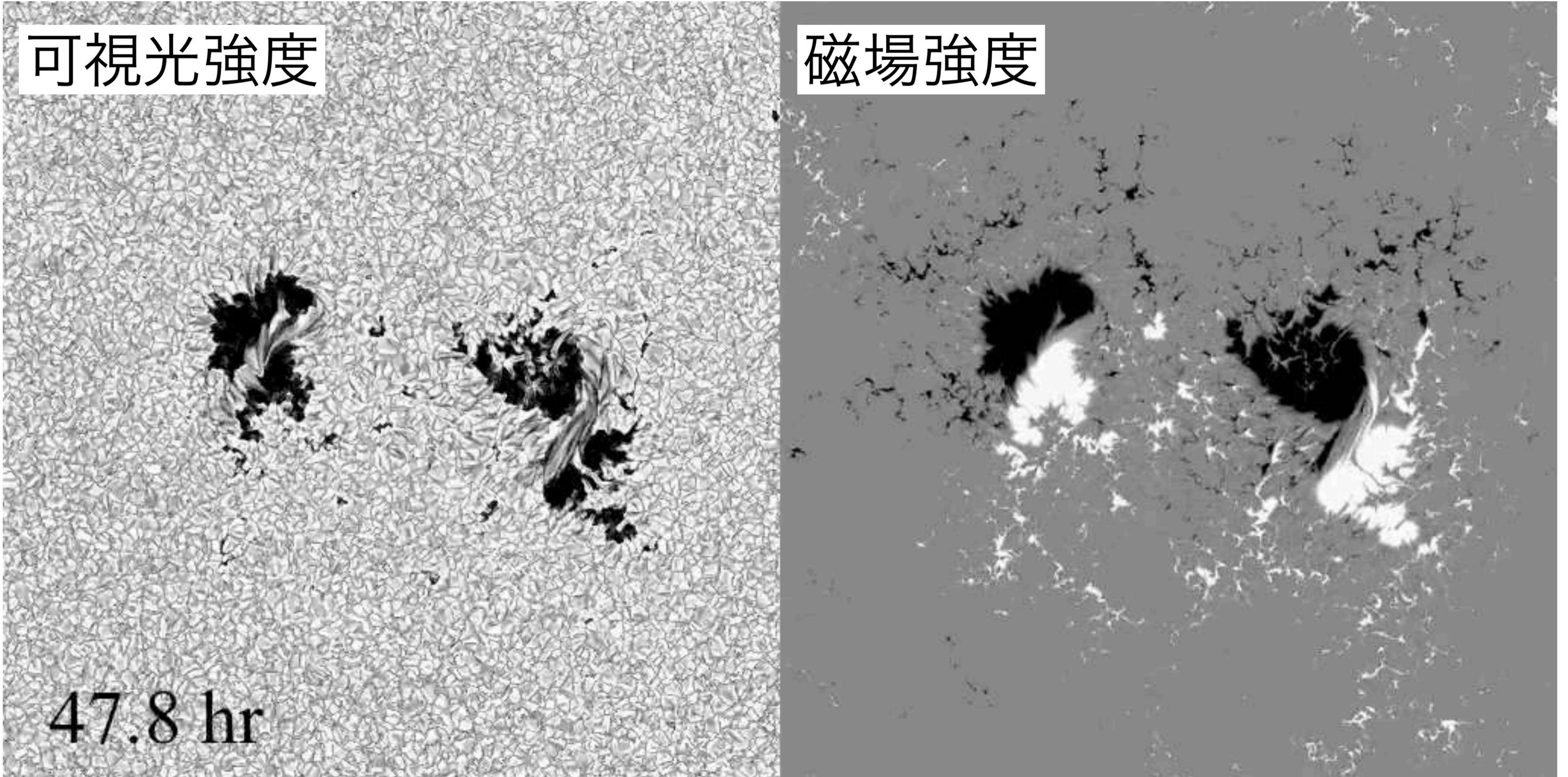


- ✓ 対流層全体をカバーする巨大な計算ボックス
- ✓ スケールの異なるリアリスティックな対流場を生成
- ✓ 埋め込まれた磁束管は背景対流によって“勝手に”浮上する
- ✓ R2D2コード：音速抑制法により実装 [Hotta+2019; Hotta & Iijima 2020]

磁気対流計算によるフレア黒点形成

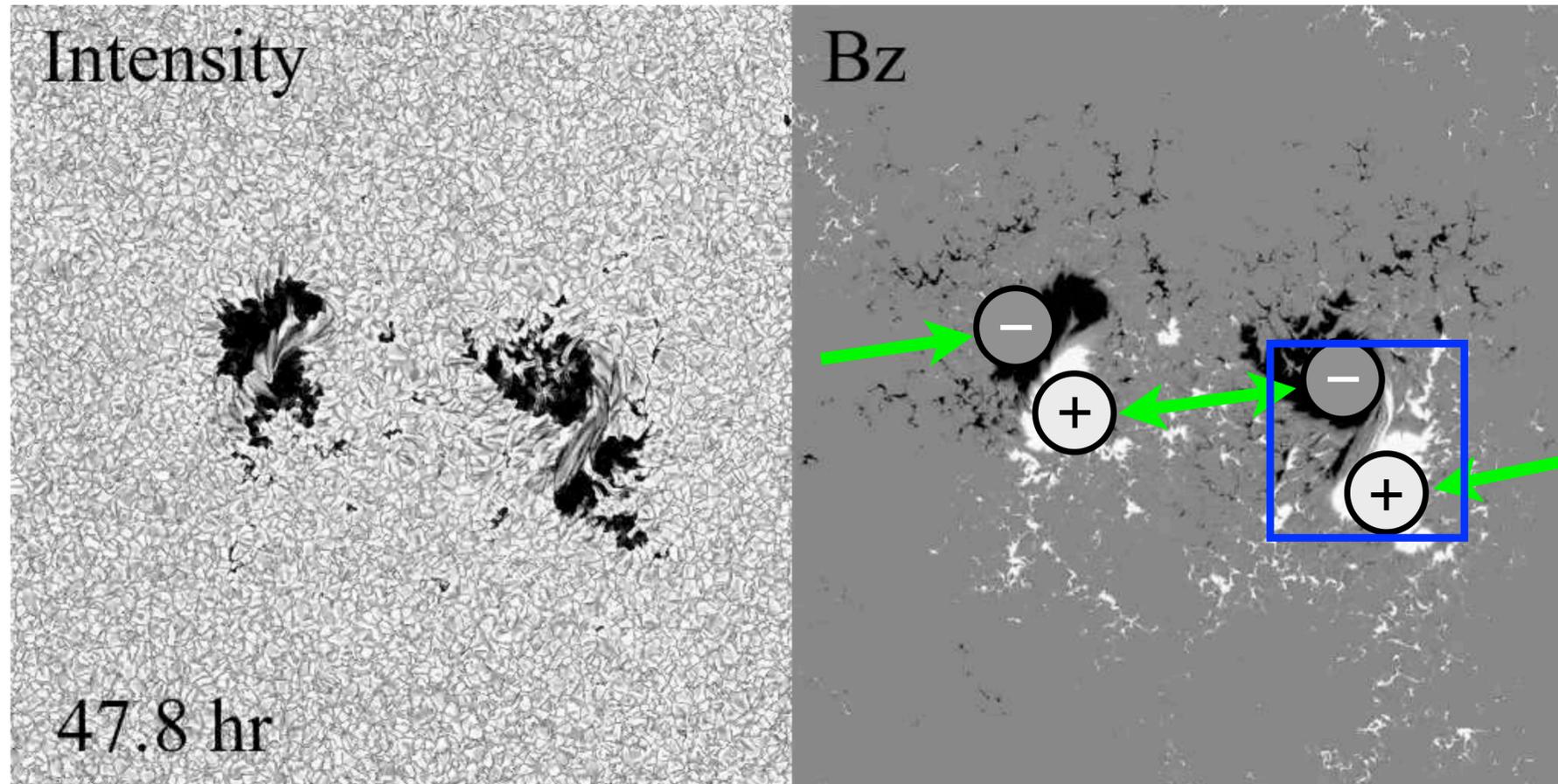
可視光強度

磁場強度

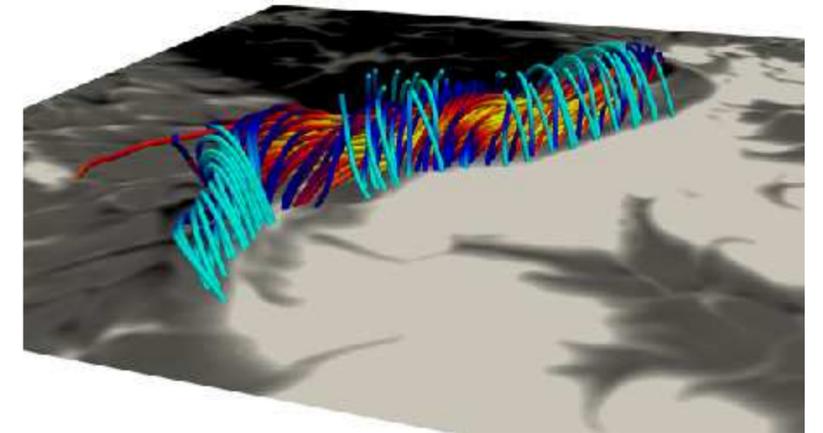


47.8 hr

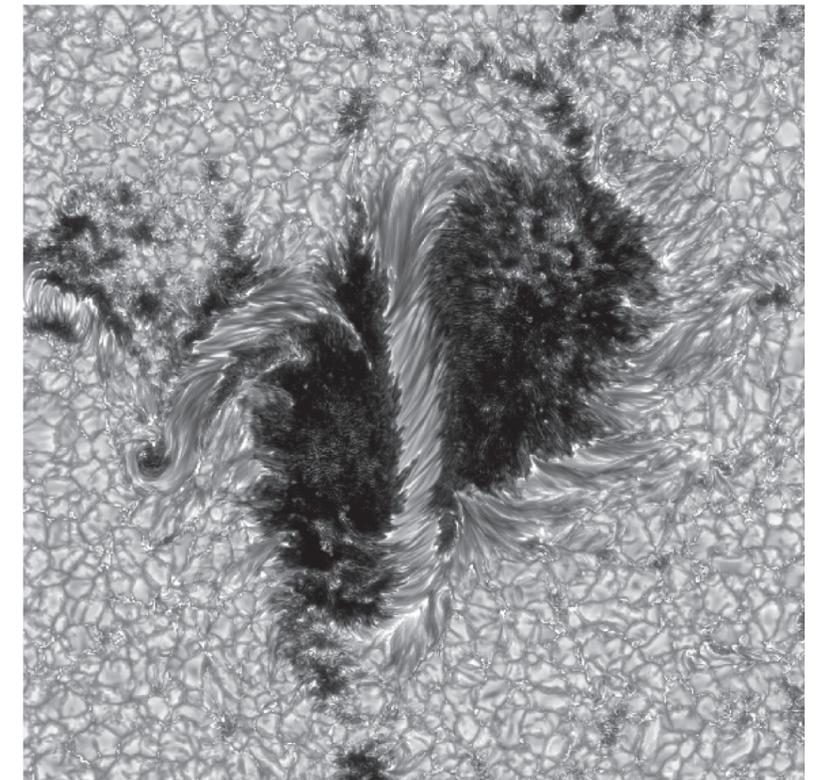
磁気対流計算によるフレア黒点形成



上空の磁場
(フラックスロープ)



超高解像度計算



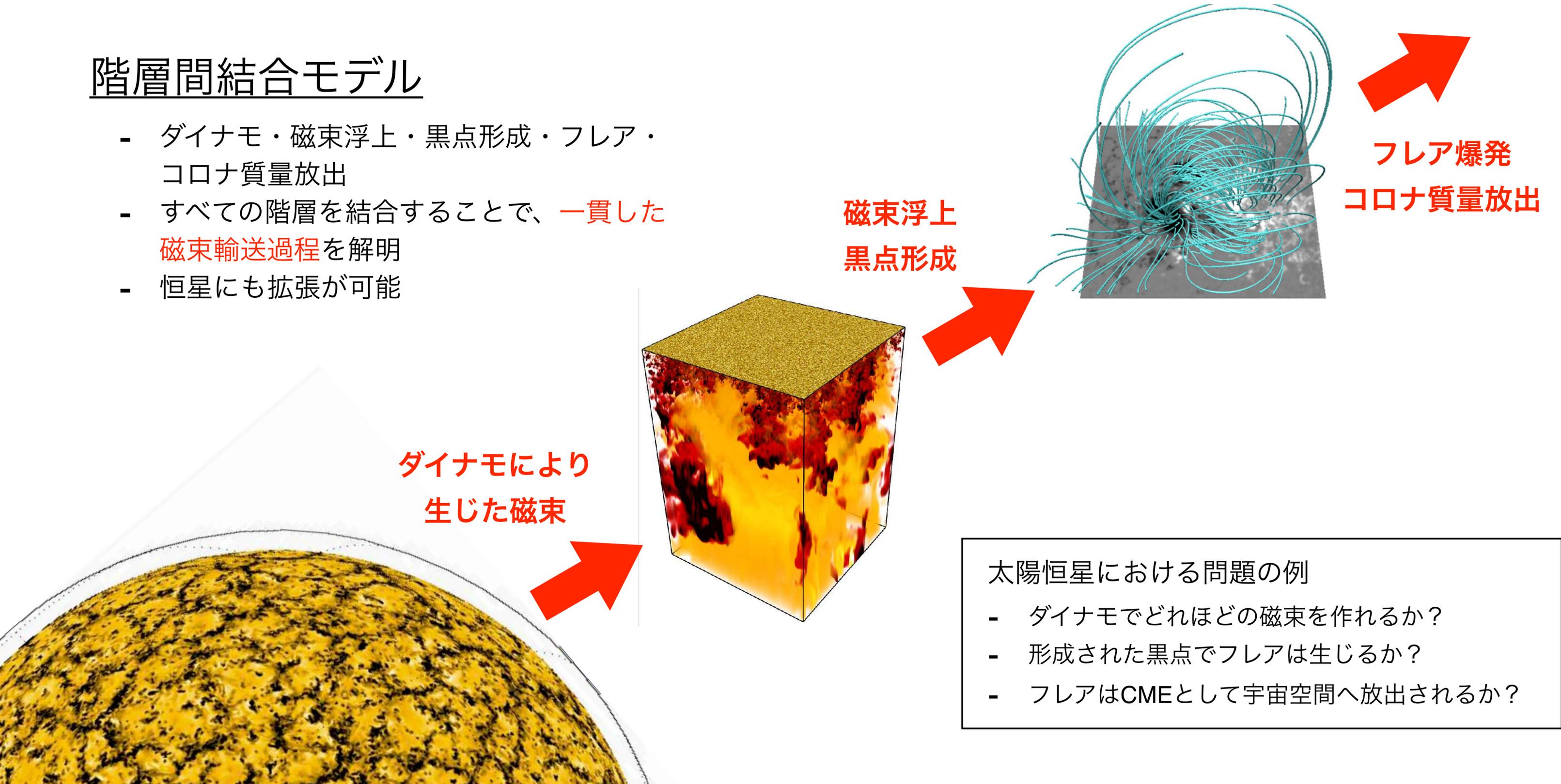
磁束管が2か所で浮上し、デルタ黒点を形成
フレア爆発に伴って宇宙空間へ放出されるねじれた
磁場 (フラックスロープ) などを再現

磁束が対流と相互作用し、フレア黒点を自発的に形成

太陽恒星における一貫した磁束輸送過程の解明

階層間結合モデル

- ダイナモ・磁束浮上・黒点形成・フレア・コロナ質量放出
- すべての階層を結合することで、一貫した磁束輸送過程を解明
- 恒星にも拡張が可能



太陽恒星における問題の例

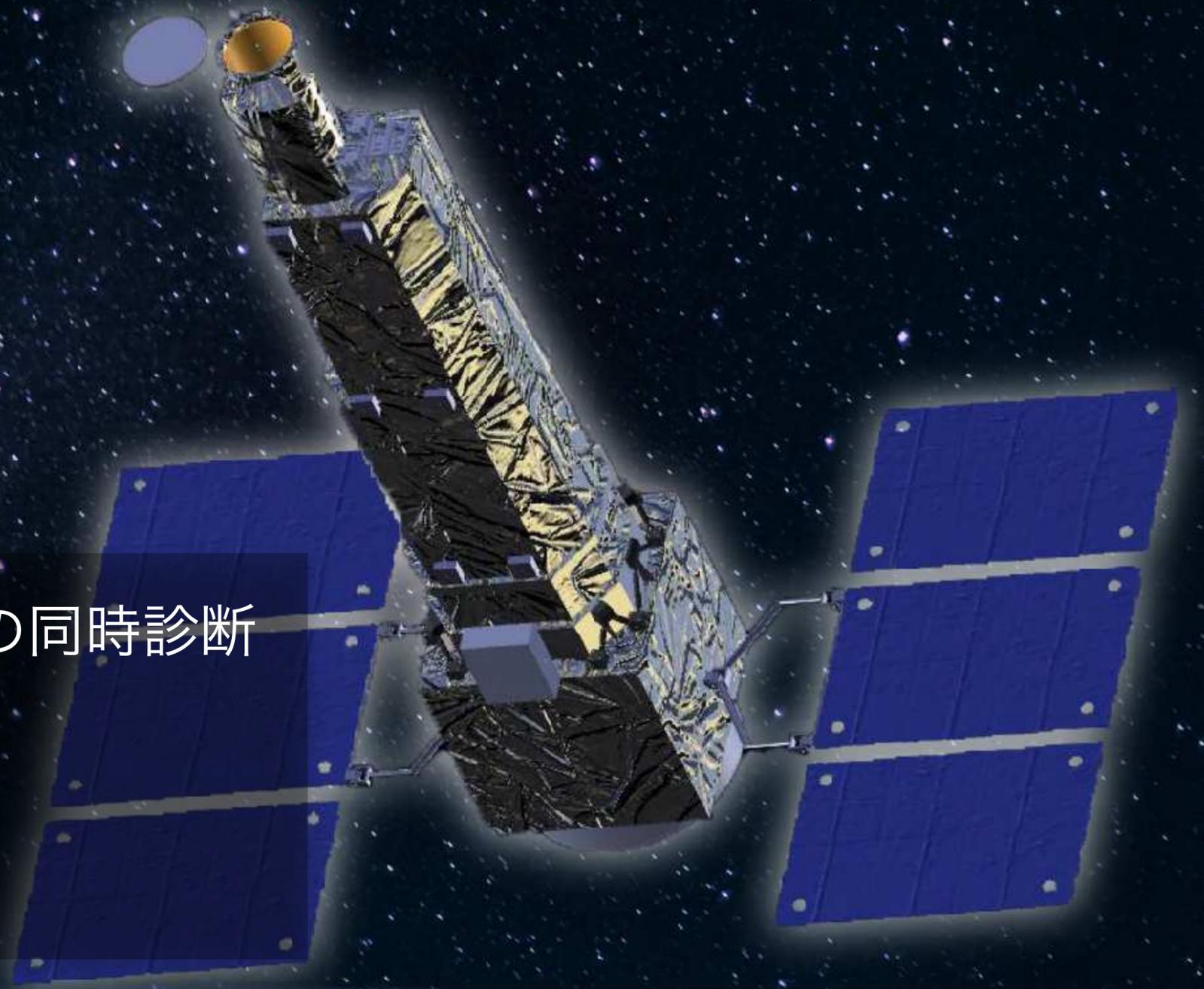
- ダイナモでどれほどの磁束を作れるか？
- 形成された黒点でフレアは生じるか？
- フレアはCMEとして宇宙空間へ放出されるか？

高感度太陽紫外線分光観測衛星 Solar-C (EUVST)

高時間・高空間・高精度な幅広い温度帯の同時診断

2つのサイエンスを推進

- ▶ 大気加熱・太陽風加速の起源
- ▶ フレアのエネルギー蓄積・変換・解放機構



高感度太陽紫外線分光観測衛星 Solar-C (EUVVST)

高時間・高空間・高精度な幅広い温度帯の同時診断

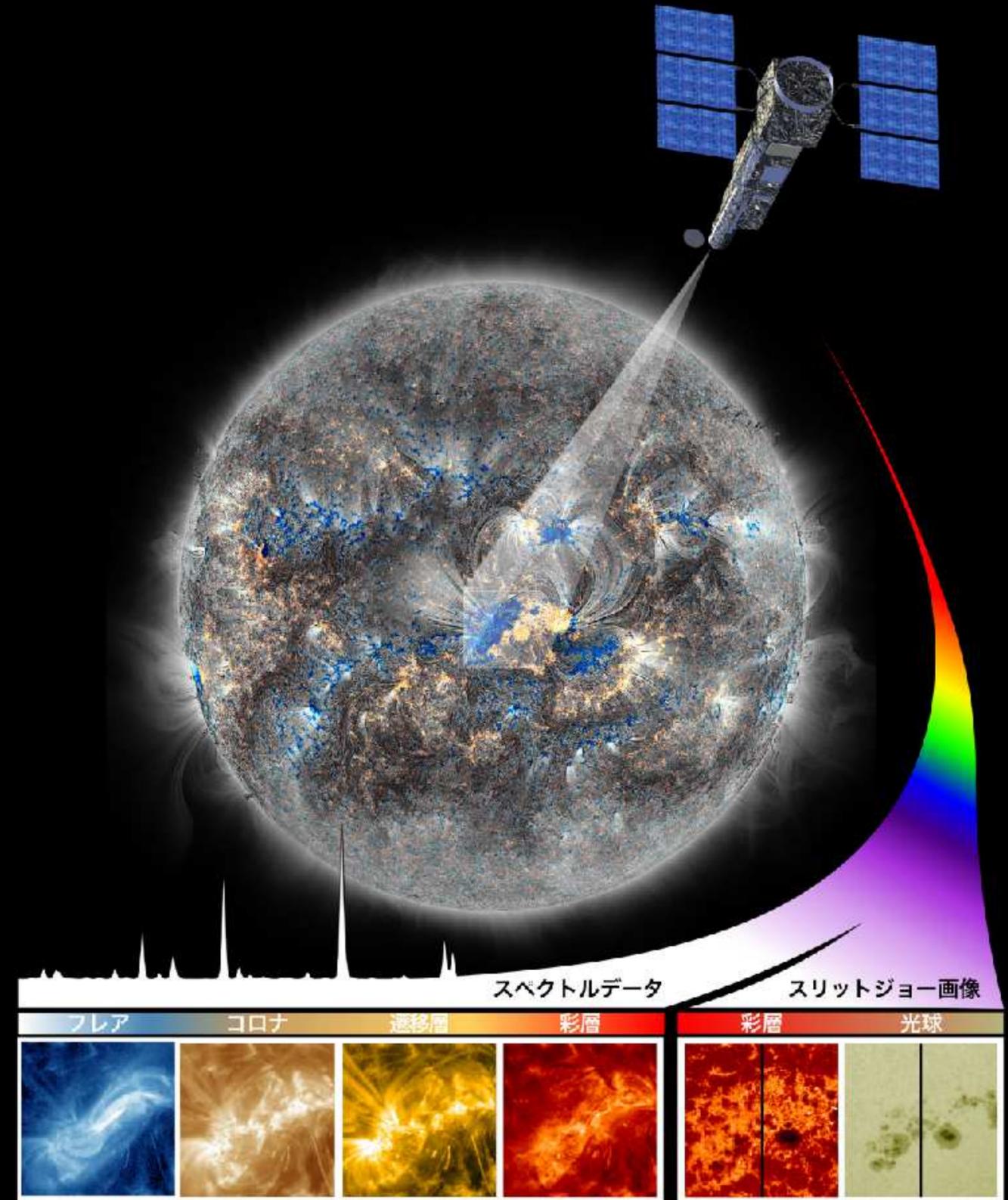
2つのサイエンスを推進

▶ 大気加熱・太陽風加速の起源

- 6000度の太陽表面に比べて高温な100万度超のコロナや1万度の彩層はいかにして作られるのか？
- 太陽圏を満たす太陽風はいかに加速・流出するのか？

▶ フレアのエネルギー蓄積・変換・解放機構

- 太陽フレアを説明する高速な磁気リコネクションはいかに実現されるのか？
- 磁気エネルギーは黒点領域にいかん蓄積されるのか？

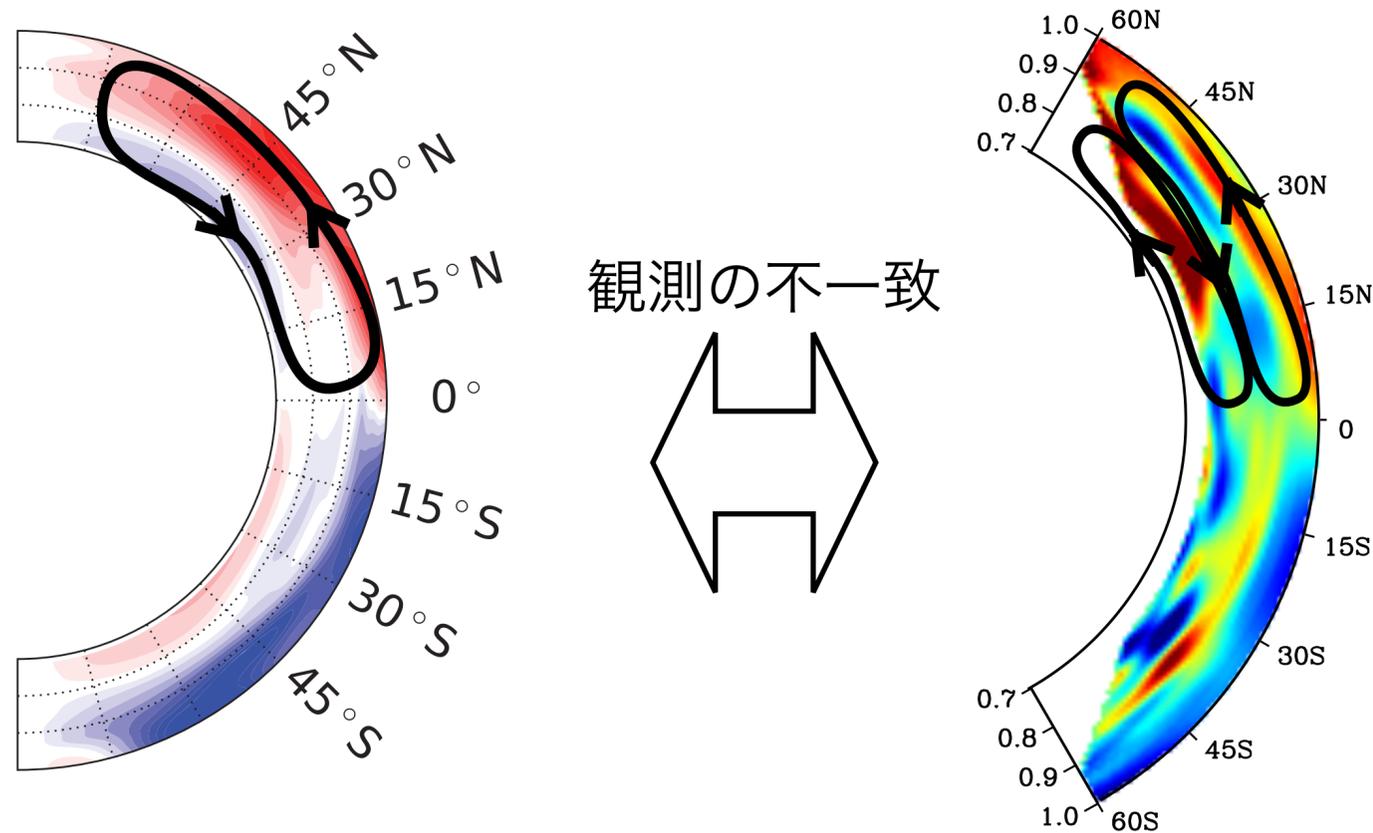


JAXA 公募型小型4号機 2020年代中頃打ち上げ

Solar-Cのその先へ...

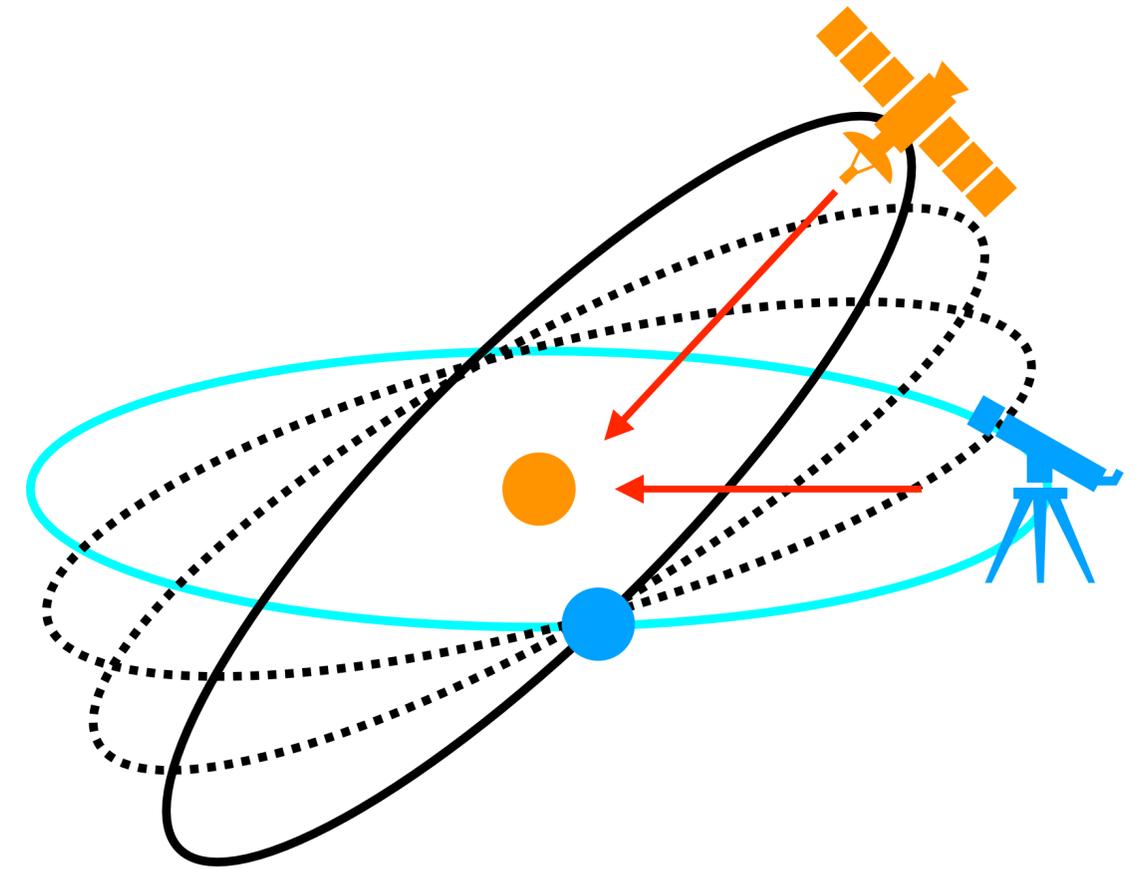
太陽の磁束生成を司るダイナモ機構

- ✓ 太陽内部の流れ場が不明なため機構を確定できない
- ✓ 従来とは異なる新たな「ステレオ日震学」観測が必要



対流層の底で**赤道**向き
[SOHO+GONG: Gizon+ 2020]

対流層の底で**極**向き
[SDO: Zhao+ 2013]



黄道面離脱ミッション

- ✓ 高緯度と地球軌道からの2方向同時観測を実施
- ✓ 太陽深部に達する音波を検出し、太陽内部の流れ場を測定
- ✓ 太陽恒星における究極の謎であるダイナモに迫る

日本の探査技術のヘリテージを活用し、実現できないか？

太陽と宇宙科学 ～まとめに代えて～

太陽はもっとも詳細に観測可能な恒星

- 日本の「ひので」衛星を筆頭に、各国の衛星・探査機による観測が行われている
- 詳細な観測結果を理論的に説明するため、精密な数値シミュレーションが開発されている
- 太陽は観測と理論の融合が実現できる理想的な対象である

フレアなどを通じて地球と密接に関わる

- 太陽地球系科学・惑星科学における主要なプレイヤー
- 太陽-恒星連携を軸に、太陽物理学は系外惑星科学にも貢献可能



新たな衛星計画や理論研究を通じて宇宙科学の未来を切り拓きたい

Thank you for your attention!