

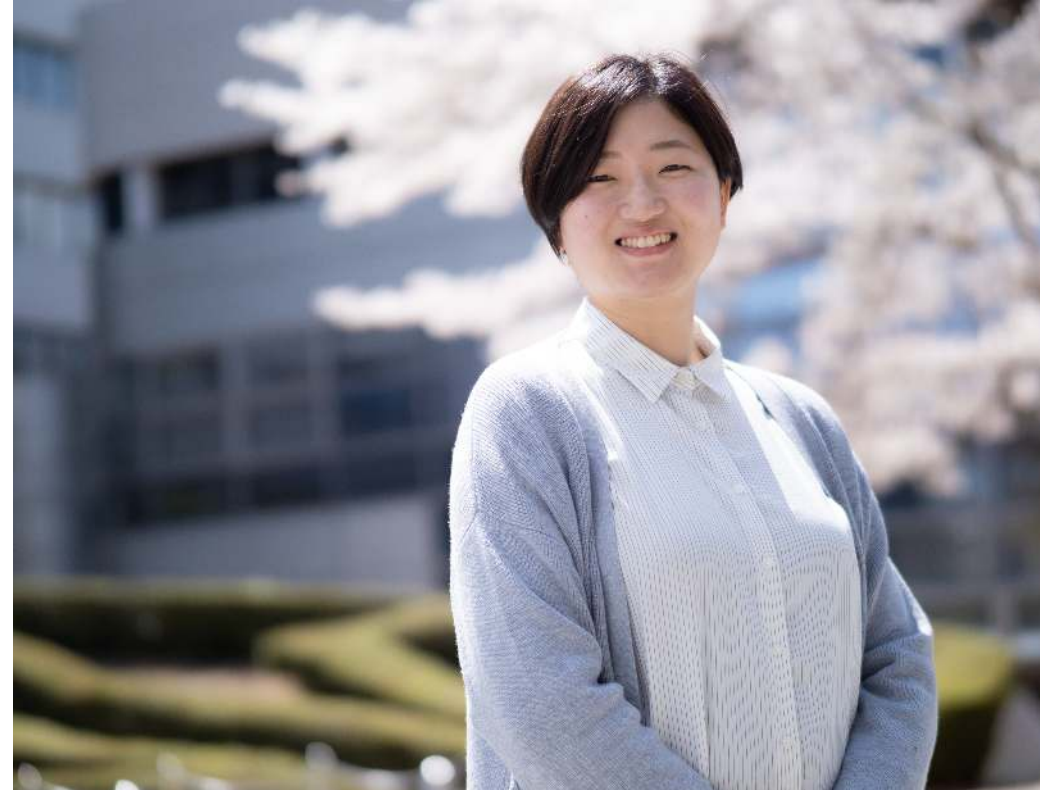
Solar-C (EUVST) 時代の太陽観測研究

鄭 祥子 (ISAS/JAXA)

2022年度 天文・天体物理若手夏の学校
太陽・恒星セッション 招待講演
2022.08.24(水) 14:30-15:30

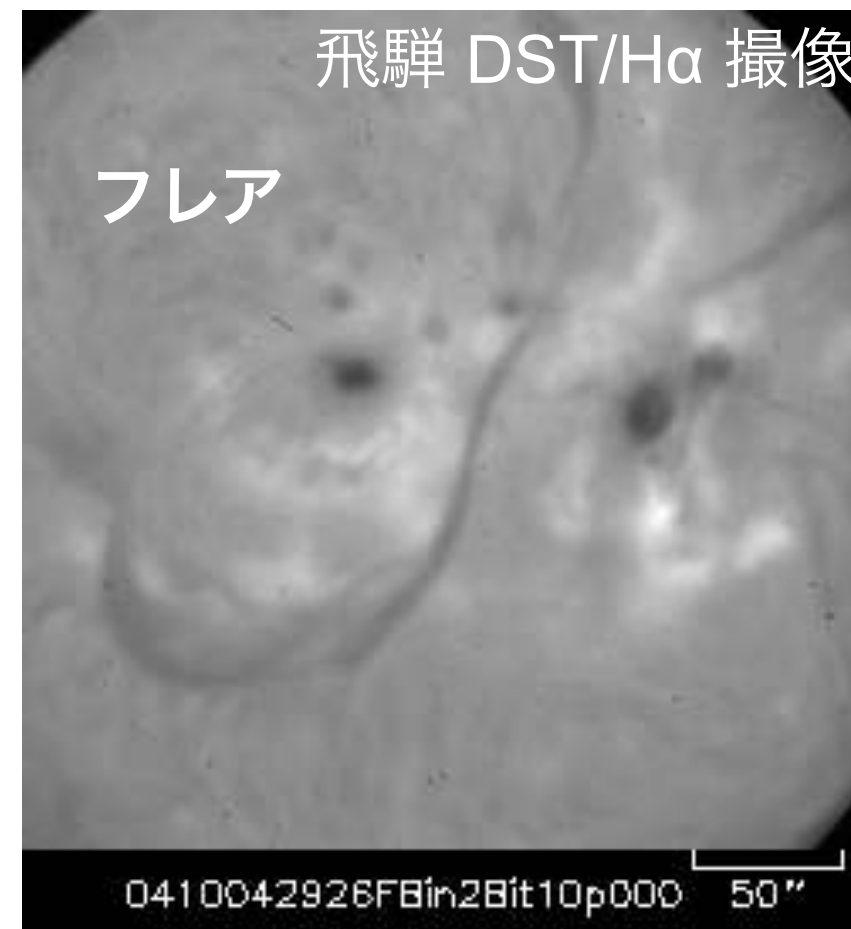
自己紹介

- 研究名 : 鄭祥子 (TEI Akiko)
- 居所 : 大阪 → 大阪/京都 → 東京/神奈川
- 家族構成 : 夫 (研究者)、娘 (0歳11ヶ月)
- 学歴・職歴 :
 - 2007.04 - 大阪府立天王寺高等学校
 - 2011.04 - 京都大学理学部
 - 2015.04 - 京都大学大学院理学研究科
 - 2020.03 学位取得
 - 2020.04 - JAXA 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系 招聘研究員 ←今
 - (2021.09 - 2022.03 産休+育休)
- 夏の学校参加実績 : 2015(M1), 2016(M2)
(2017は@米、2018も@米、2019はたぶん論文に追われてた...)
M1の時はオーラルアワードをもらった。M2は座長団に入った。

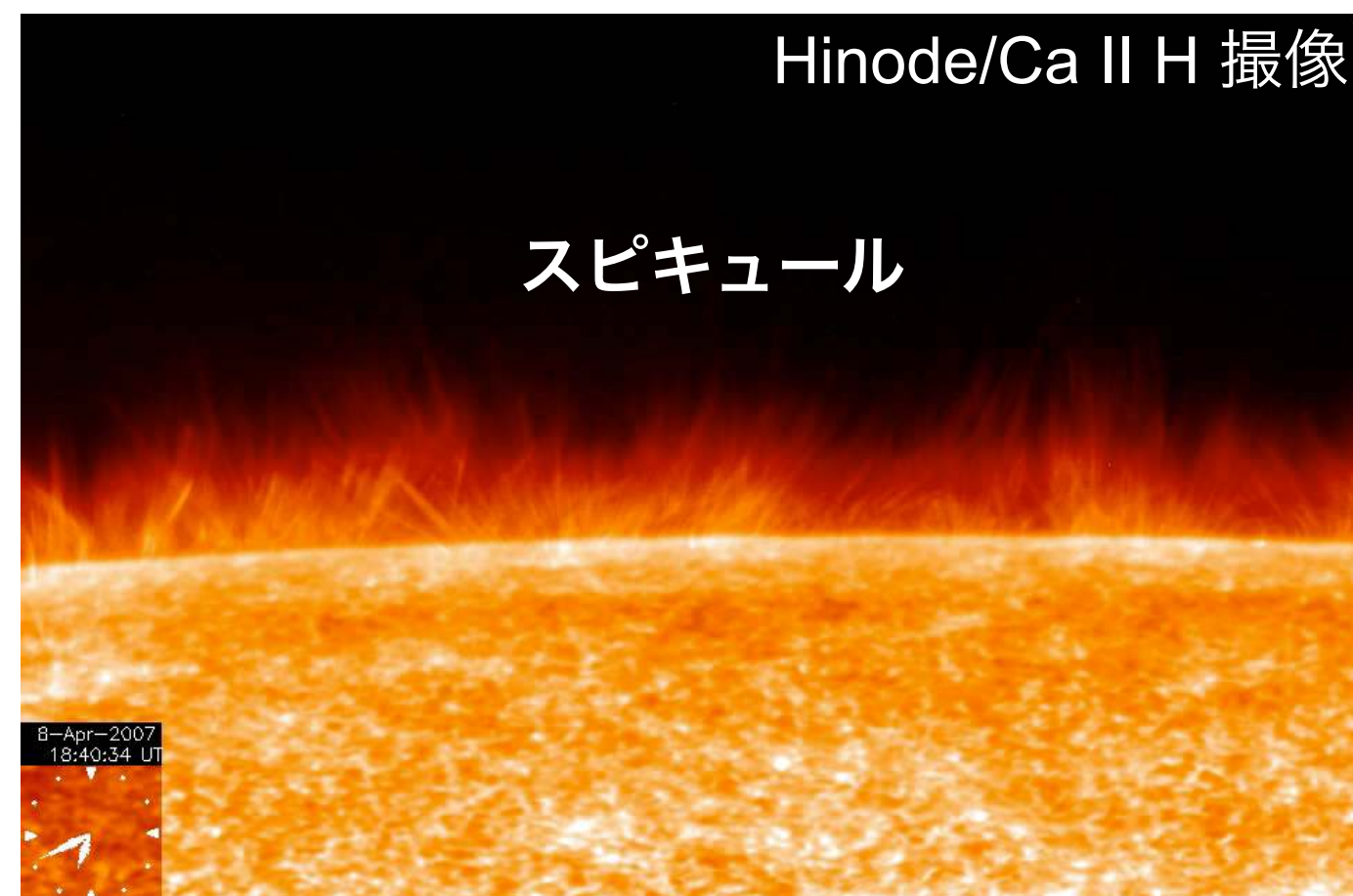


研究テーマ・取り組んでいること

- 太陽フレアのダイナミクス [Tei+18]



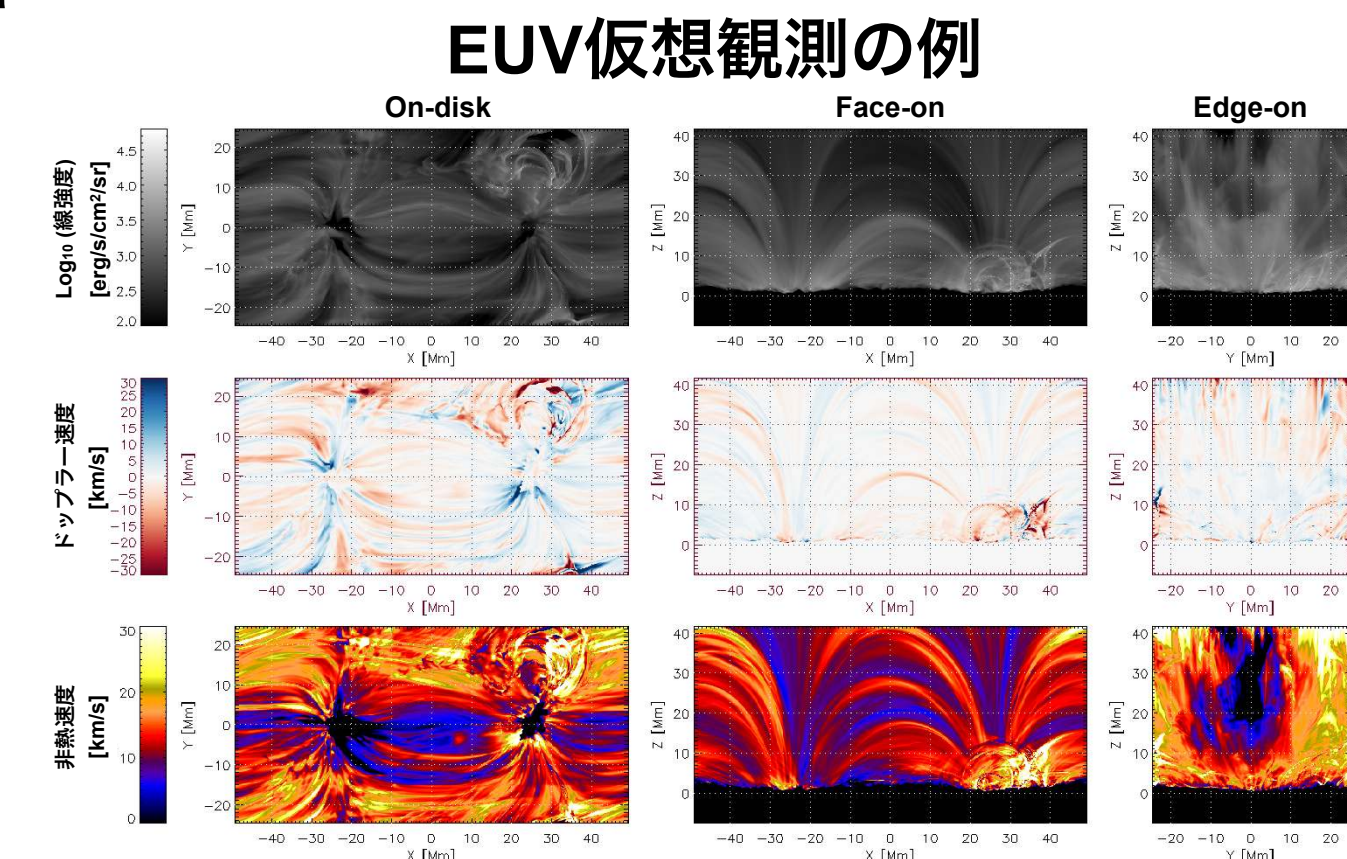
- 太陽スピキュール [Tei+20]



- Solar-C (EUVST) に搭載する超高精度太陽センサ UFSSの開発 → 後ほど紹介



- Solar-C (EUVST) に向けたEUV仮想観測プロジェクト → 後ほど紹介

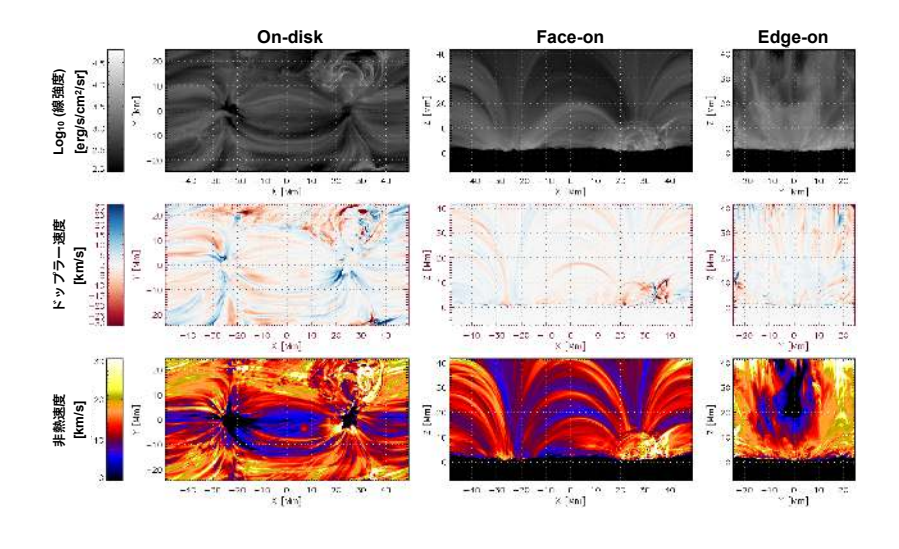
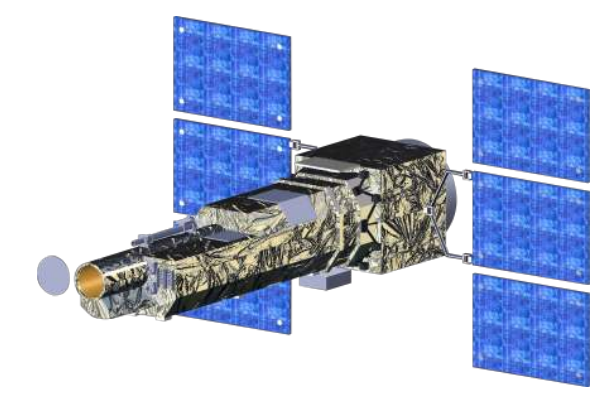


2022年度太陽恒星分科会座長団の皆様からのお題

- ✓ 『Solar-C (EUVST)』の科学目標・戦略やEUV仮想観測について
- ✓ 合わせて、若手としての次期衛星プロジェクトへの携わり方や、これから携わる大学院生に向けての意見等あれば

Outline

1. Solar-C (EUVST) のサイエンス (30m)
 - 科学目標・戦略、衛星・観測装置概観など
2. Solar-C (EUVST) に向けたEUVスペクトル線仮想分光観測 (10m)
3. Solar-C (EUVST) に搭載する超高精度姿勢センサ UFSS の開発 (5m)
 - UFSSの紹介、活動内容 → 話者のプロジェクトへの携わり方
4. 若手としての次期衛星プロジェクトへの携わり方、これから次期衛星プロジェクトへ携わる大学院生に向けての意見等 (2m)



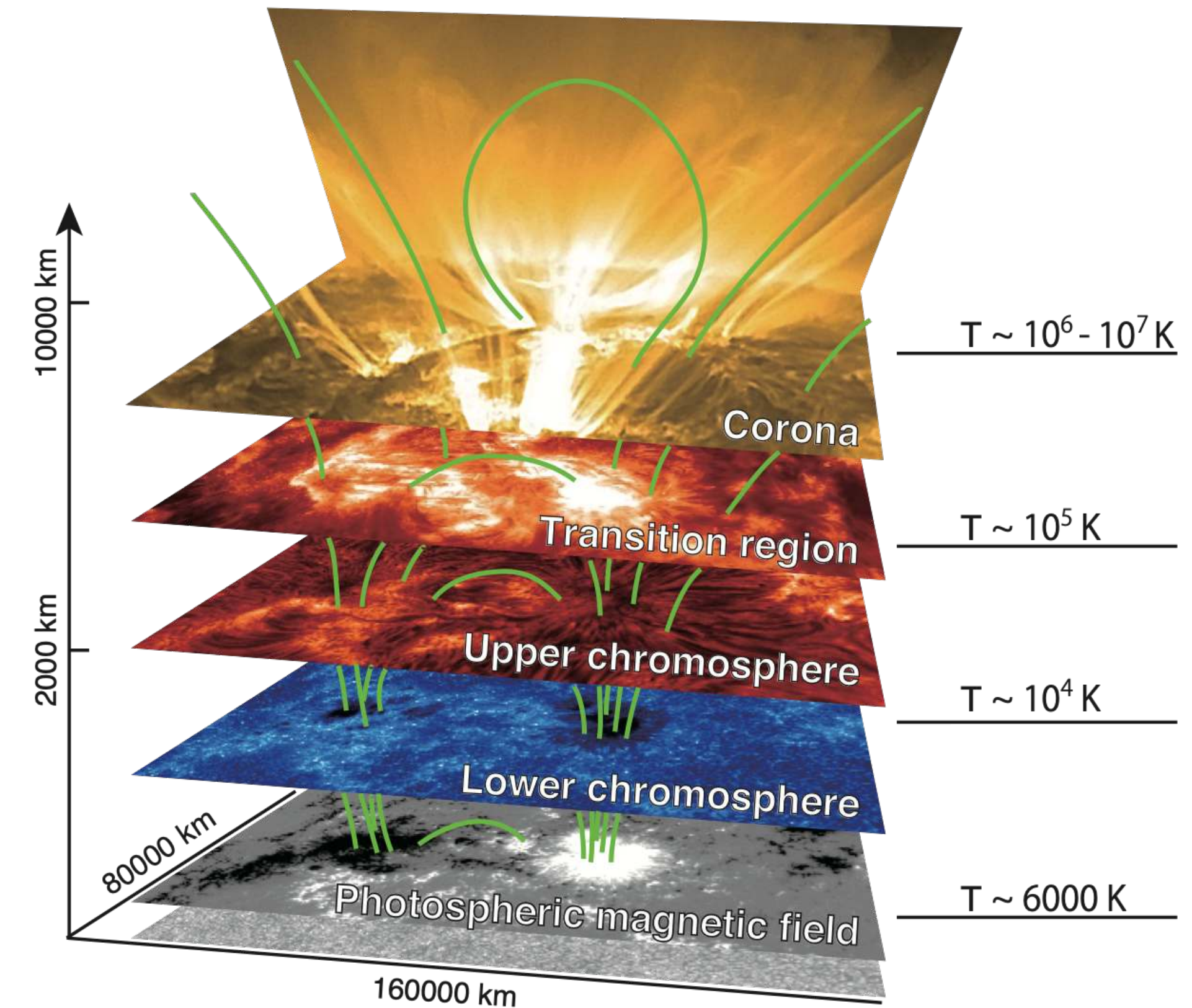
1. Solar-C (EUVST: EUV High-Throughput Spectroscopic Telescope)

のサイエンス

Acknowledgement: Solar-C(EUVST) プリプロジェクト候補チーム

ミッションの概要

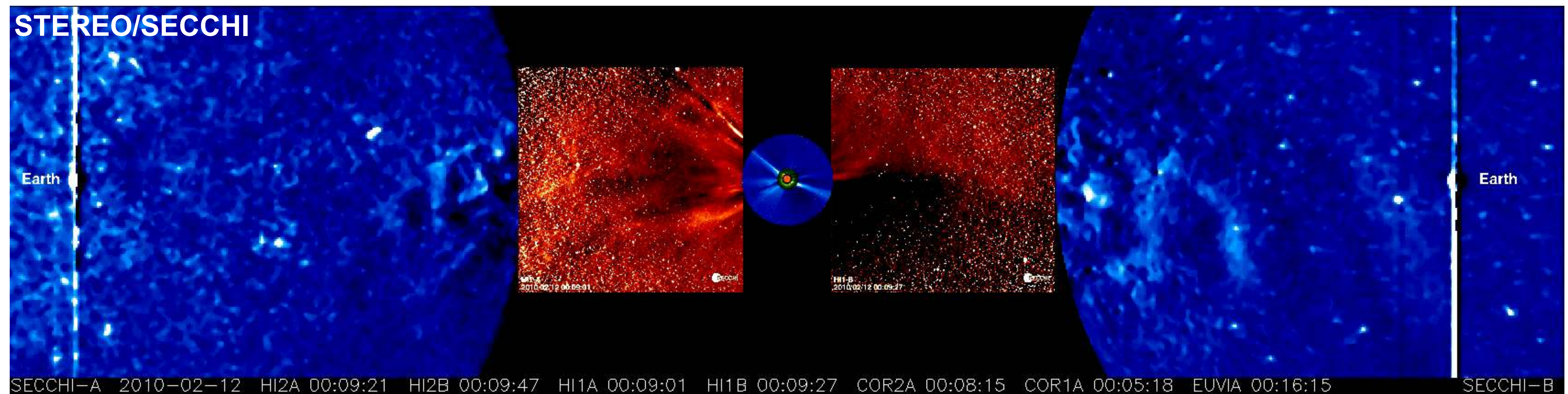
- 宇宙に如何に高温プラズマが作られ、太陽が如何にして地球や惑星に影響を及ぼしているのかという命題に対して、これまでの太陽観測は、太陽大気へのエネルギー入力と最終的なエネルギー解放(出力)の振舞いを明らかにしたが、その中で起きる基礎物理過程はブラックボックスのままである。
- この解明には、**エネルギー・質量の輸送やエネルギー解放の現場を捉え**、何が起きているかを診断できる**極端紫外線(EUV)分光望遠鏡**が有効である。
- EUV分光望遠鏡は、**太陽大気の色層(2万度)から太陽コロナ(100-2000万度)にわたる温度領域を隙間なく観測でき**、以前に較べ約**1桁以上の性能(空間・時間分解能)を向上**してプラズマのダイナミクスに追従できる能力を世界で初めて実現する。
- 太陽極大期 (2027年度に打上) に飛翔させることで、太陽フレアなど宇宙天気に関わる物理的な理解を進める。
- 日本の太陽研究者コミュニティが第一優先で取り組む計画であり、**日本が主導**し米国・欧州の協力を得て実現させる国際プロジェクトである。



Science goals of the mission

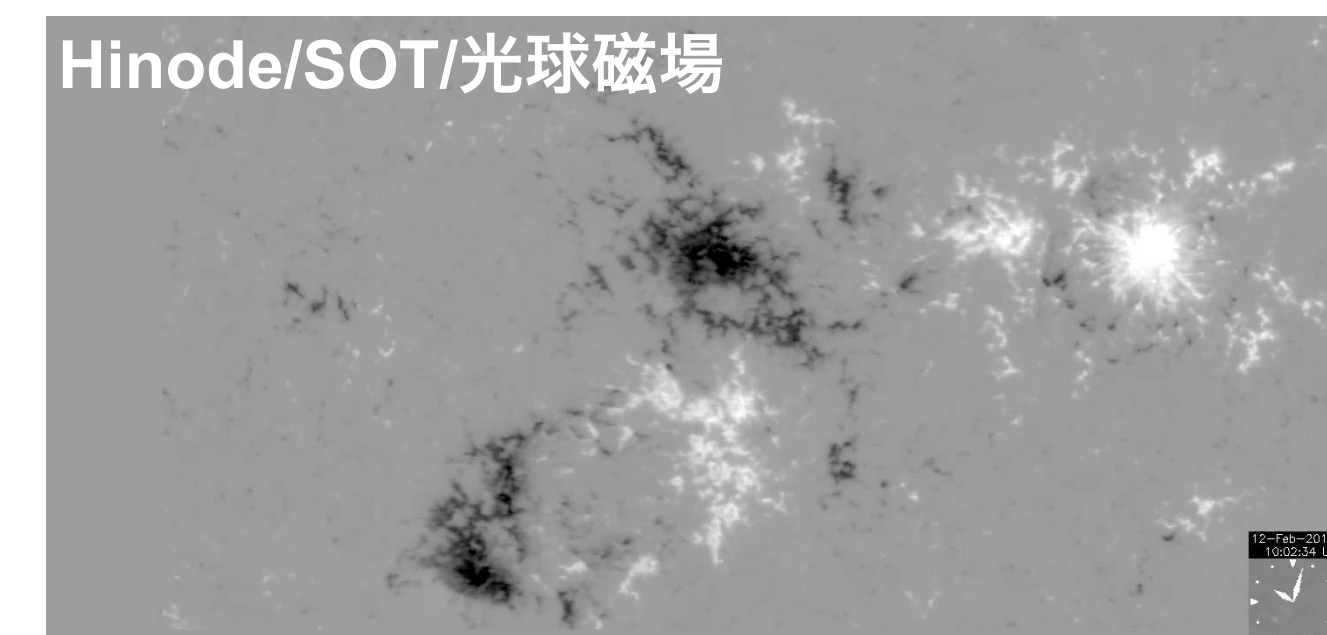
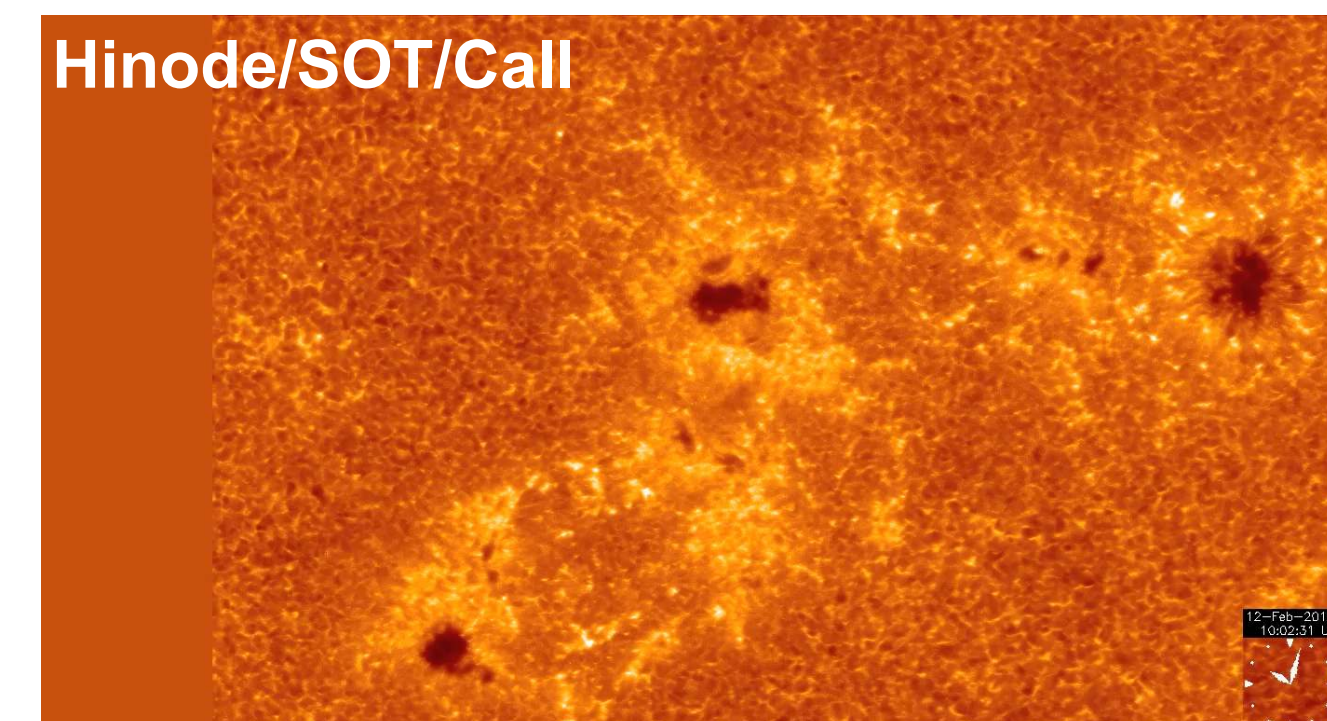
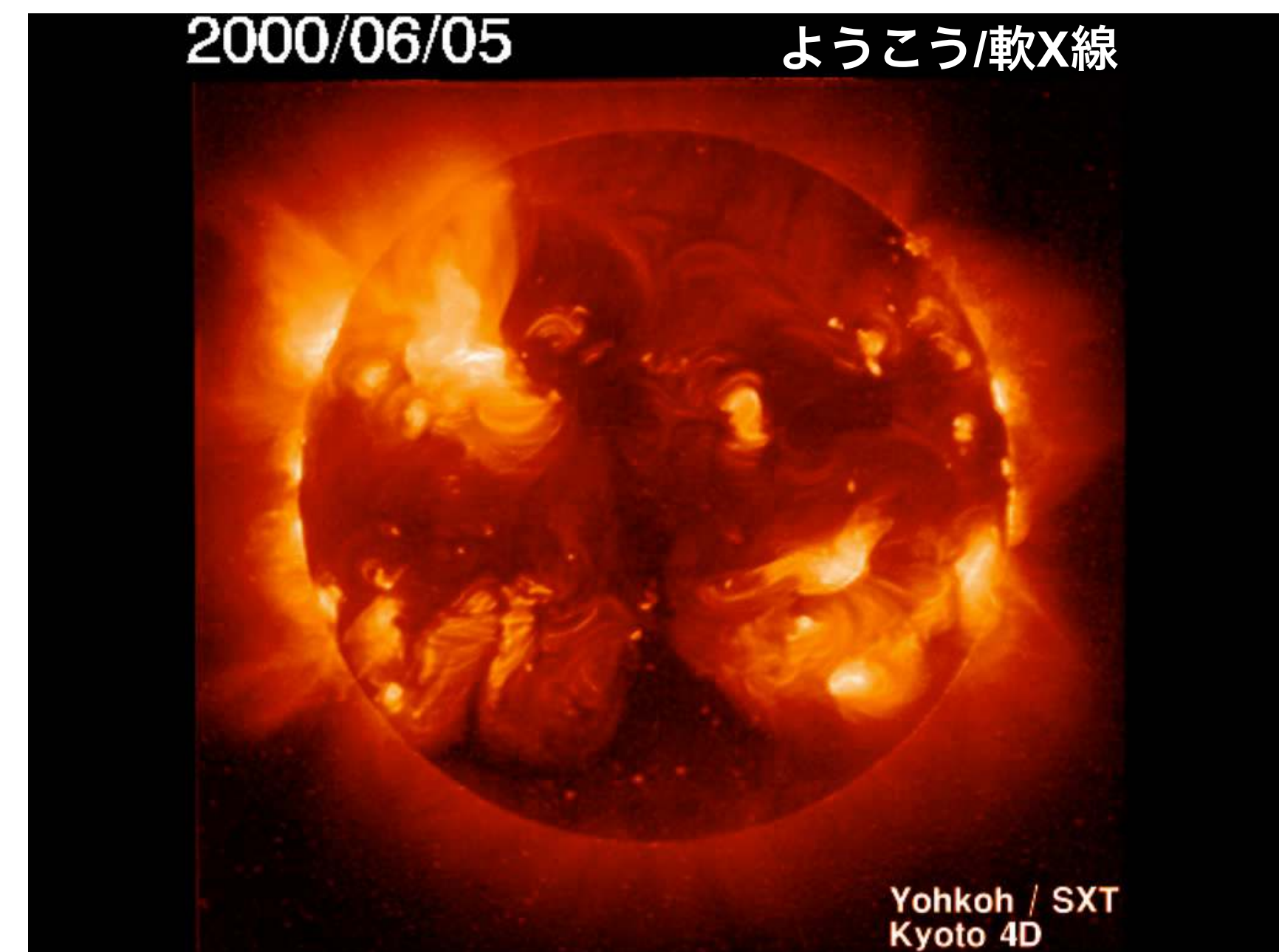
ミッションの意義

- Solar-C (EUVST) は
 - プラズマ宇宙がどのように作られ、進化してきたか、
 - 太陽が地球や惑星にどのような影響を及ぼしているか、という命題を探求する。
- 放射線、太陽風、コロナ質量放出、高エネルギー粒子を介して**太陽圏につながる太陽大気を理解することは、太陽系における生命と居住のための条件を確立するために極めて重要**である。



今までの研究状況

- これまでの太陽観測は、
 - 太陽プラズマ大気が
 - ▶ 定常的な成分 (高温コロナ形成と太陽風の流出) と
 - ▶ 突発的な成分 (フレア等爆発的エネルギー解放)で構成されていること、
 - 大気へのエネルギー入力とその解放(出力)の振舞い、を明らかにしてきた。
- その振舞いが起きる仕組みやその背景にある基礎物理過程は、謎のまま、つまりブラックボックスである。
- エネルギー注入と解放の間で、エネルギーや物質がどのように輸送されているか、また解放の現場を捉えて何が起きているかを診断すること、が重要である。



Scientific objectives of the mission

ミッションの科学目標

Solar-C (EUVST) は、太陽物理学の最も基本的な問題

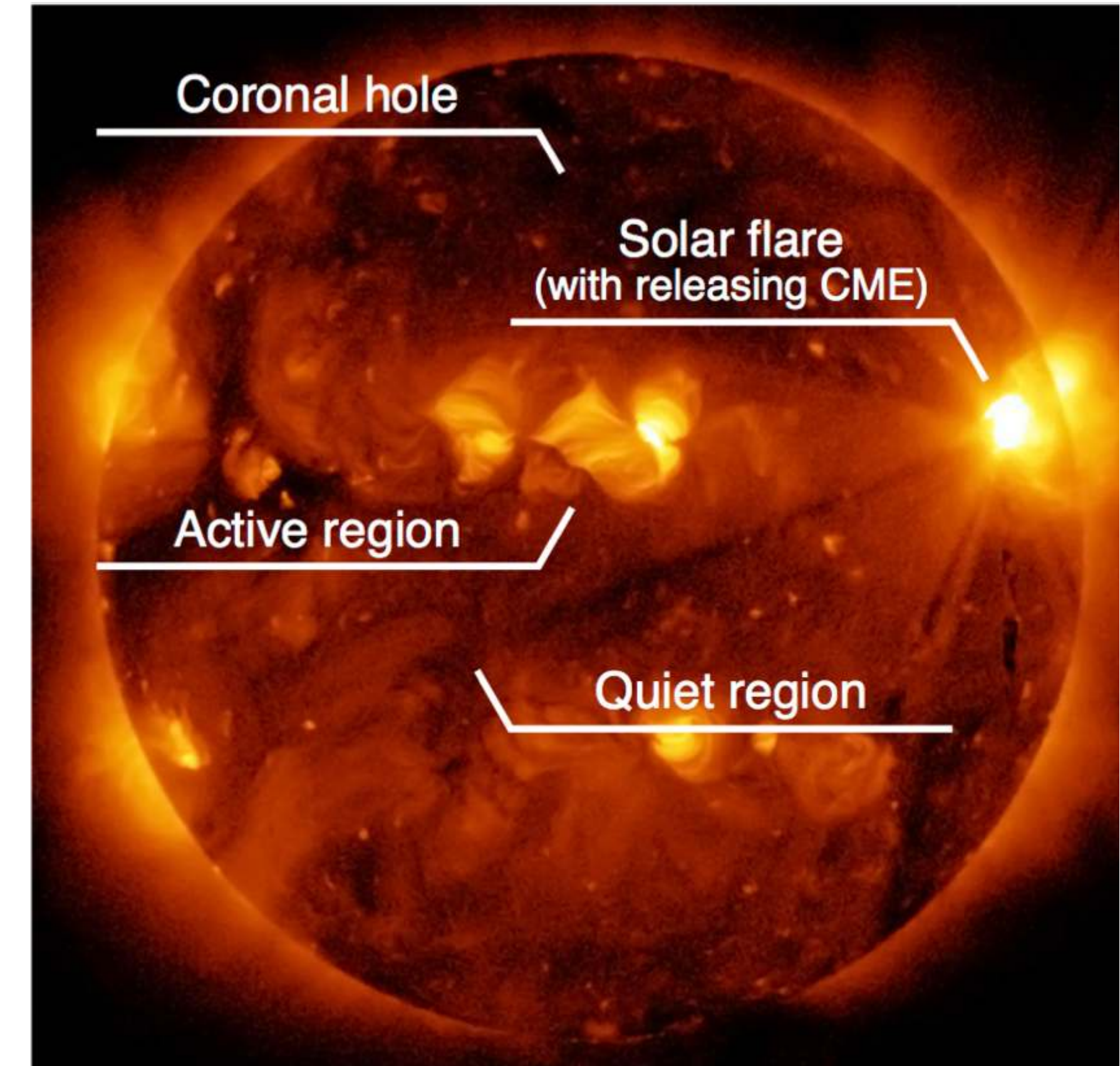
- 「磁場とプラズマの相互作用が如何に太陽活動を駆動するのか」に対する決定的な答えを提供する。

相互作用の最重要例：

- 大気加熱
- フレアやコロナ質量放出(CME)などの爆発的なエネルギー放出

主要な科学目標：

- I. 太陽大気と太陽風の形成に至る基礎物理過程を解明すること。
- II. 太陽大気が不安定化し、フレアやプラズマ噴出を引き起こす物理過程を解明すること。



Scientific objectives of the mission

ミッションの科学目標

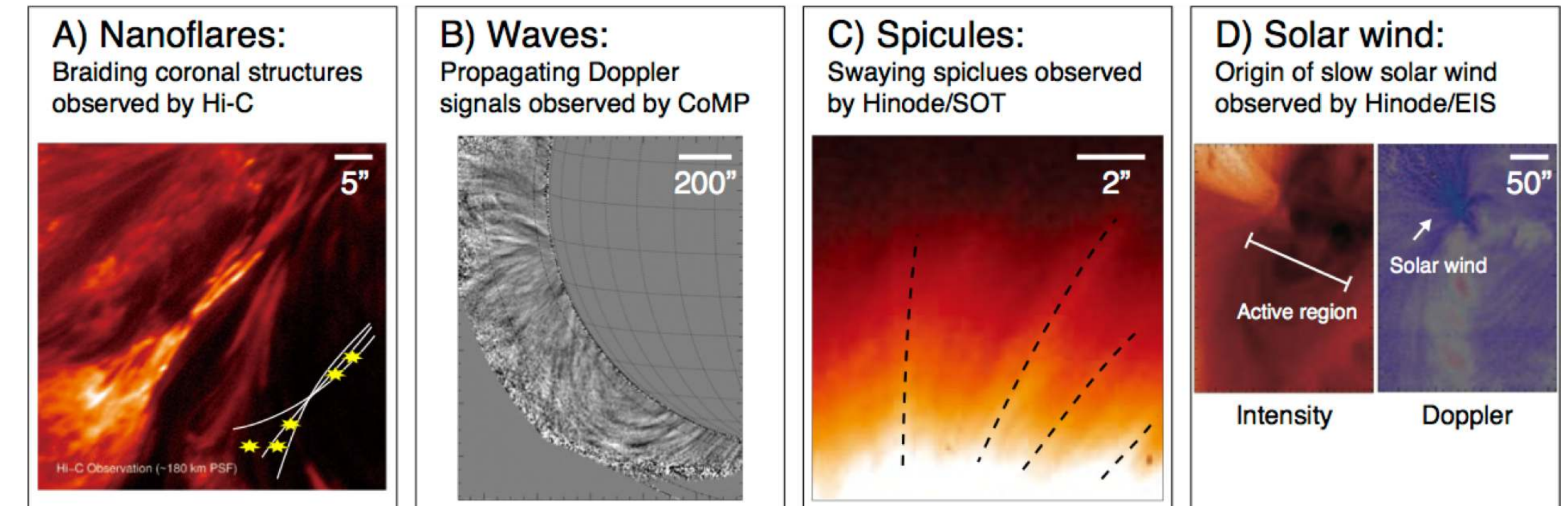
I. 太陽大気と太陽風の形成に至る基礎物理過程の解明

(A) ナノフレアのコロナ加熱への寄与の定量化

(B) 波動散逸のコロナ加熱への寄与の定量化

(C) 彩層微細構造(スピキュール)の形成機構の解明とコロナ加熱への寄与の定量化

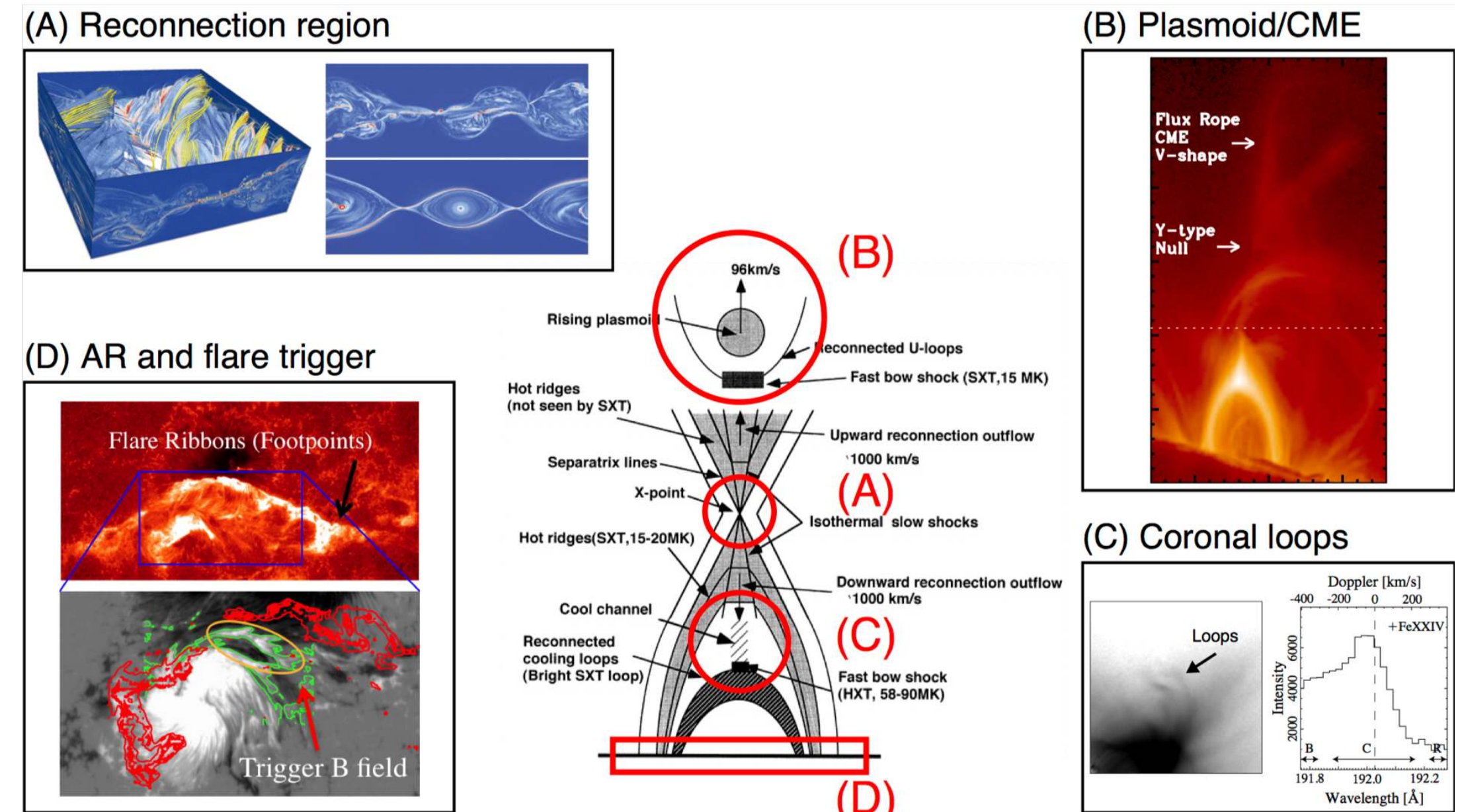
(D) 太陽風の流源と加速機構の解明



II. 太陽大気が不安定化し、フレアやプラズマ噴出を引き起こす物理過程の解明

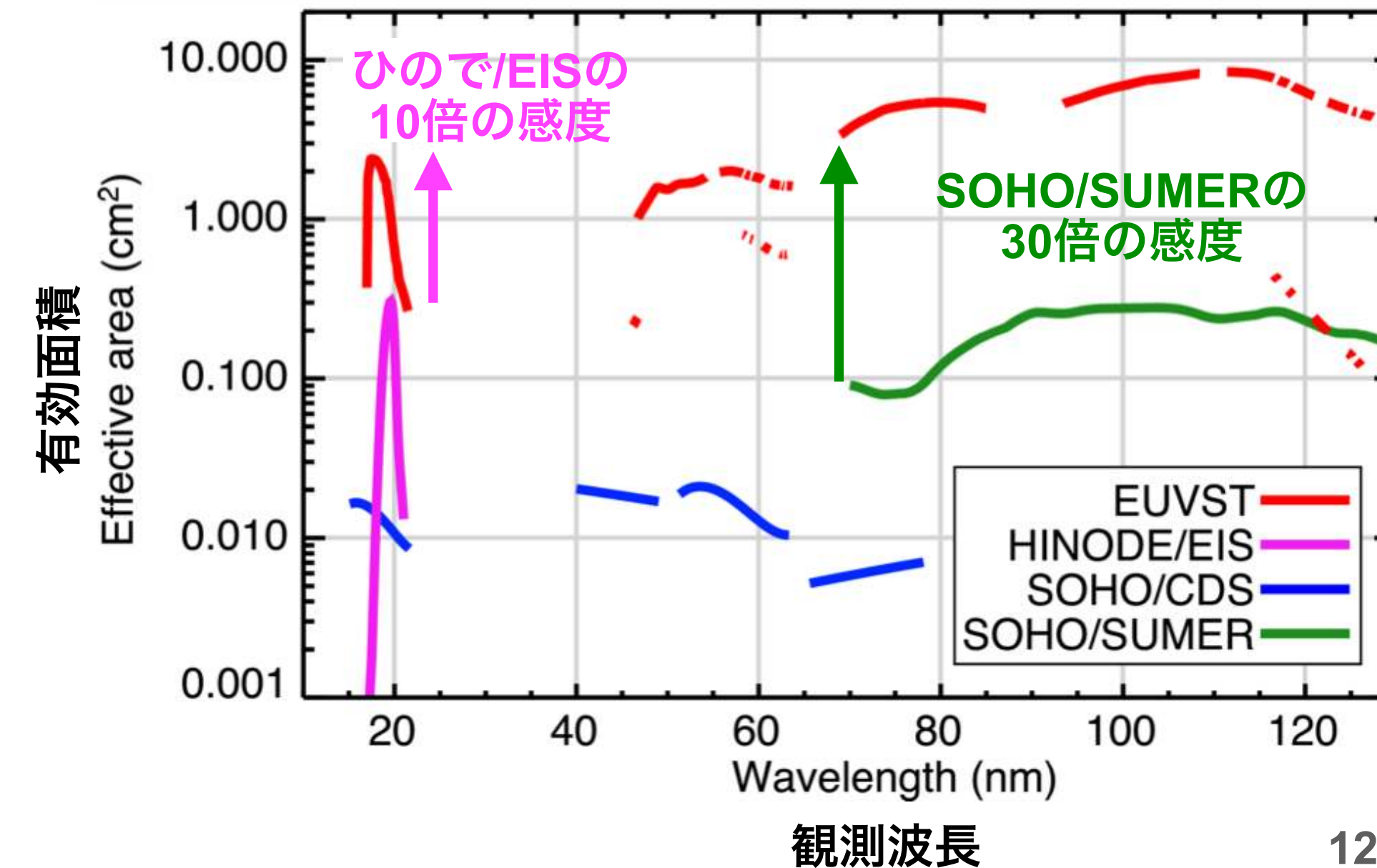
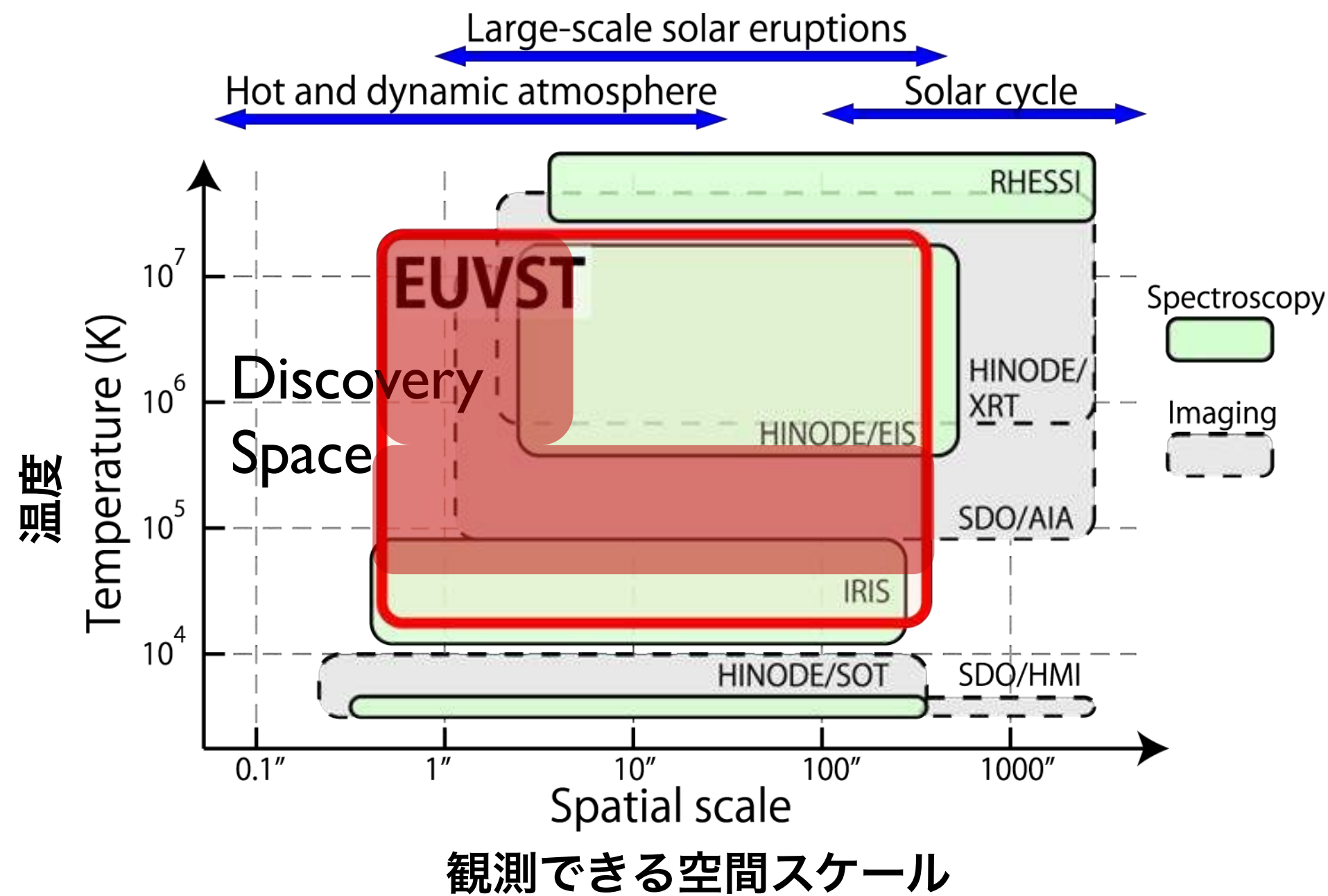
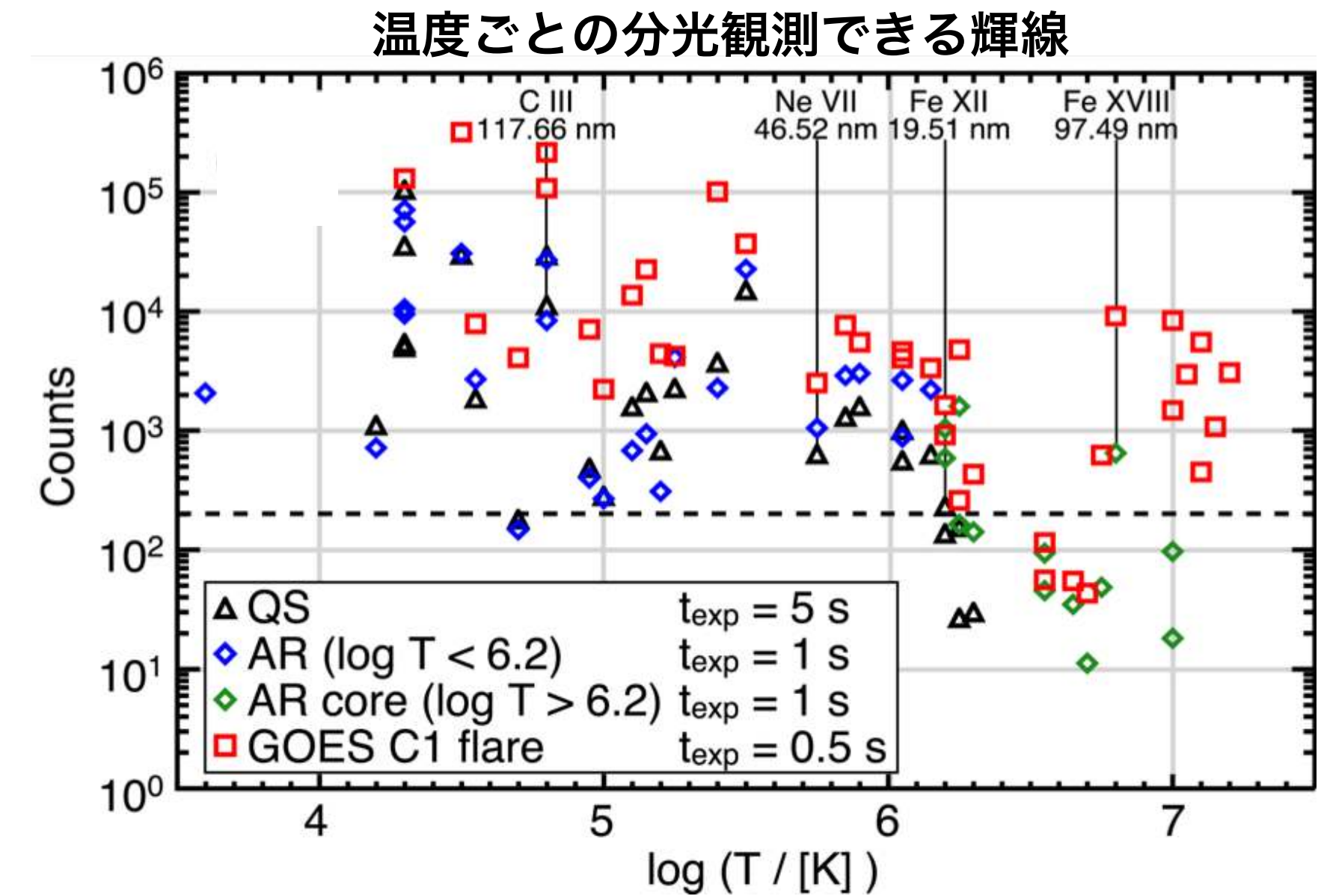
(A), (C) 磁気リコネクション機構の高速化の理解

(B), (D) フレアや噴出に至るエネルギー蓄積とトリガの理解



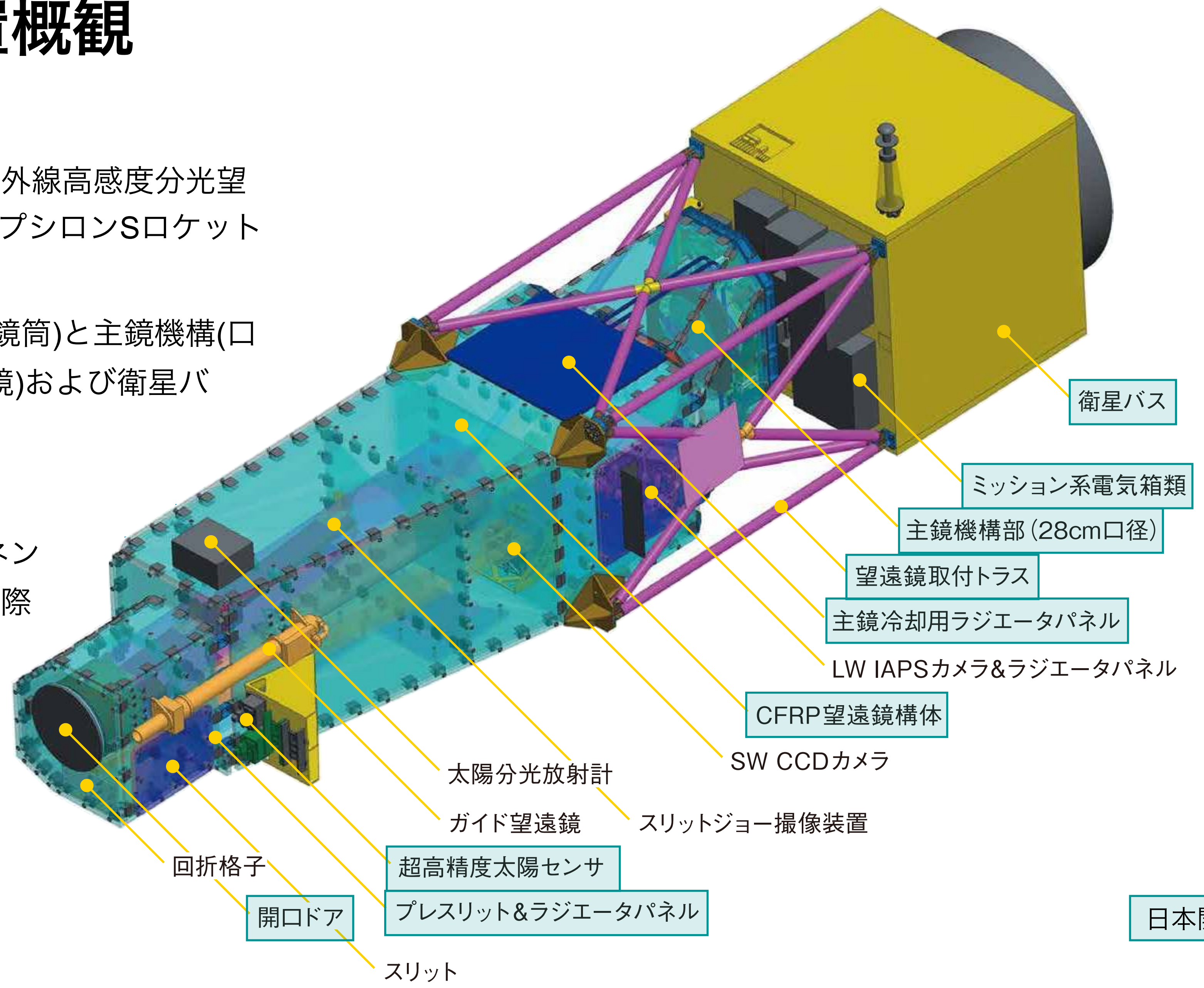
Approaches of the mission ミッションのアプローチ

- ✓ 科学目標達成には以下三要素を同時に実現する世界初の**EUV分光望遠鏡**が有効
- A) **幅広い温度(2万度-2000万度)**にわたるシームレスな観測
- B) **10-30倍の感度向上による**高空間(0.4")・高時間(1s)分解の観測
- C) 高性能の分光観測 (**2km/sを見分けるスペクトル分解能**)



衛星・観測装置概観

- 小型衛星バス上に、極端紫外線高感度分光望遠鏡 EUVST を搭載し、イプシロンSロケットで打上
- 日本は、EUVST全体構造(鏡筒)と主鏡機構(口径28cm指向駆動可能な単鏡)および衛星バス、ロケットを担当
- EUVSTの分光器コンポーネントは、米国・欧州諸国が国際協力のもと担当



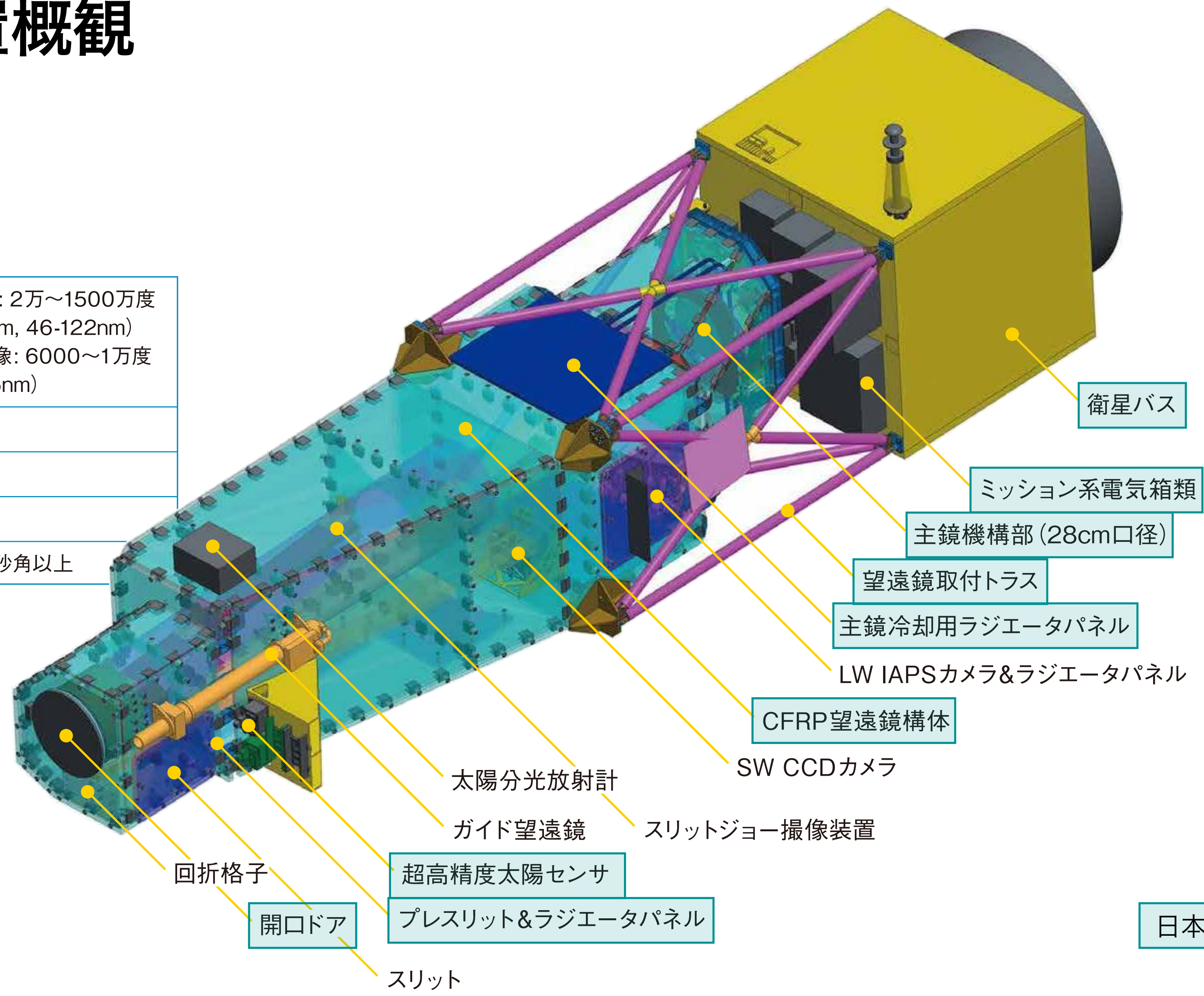
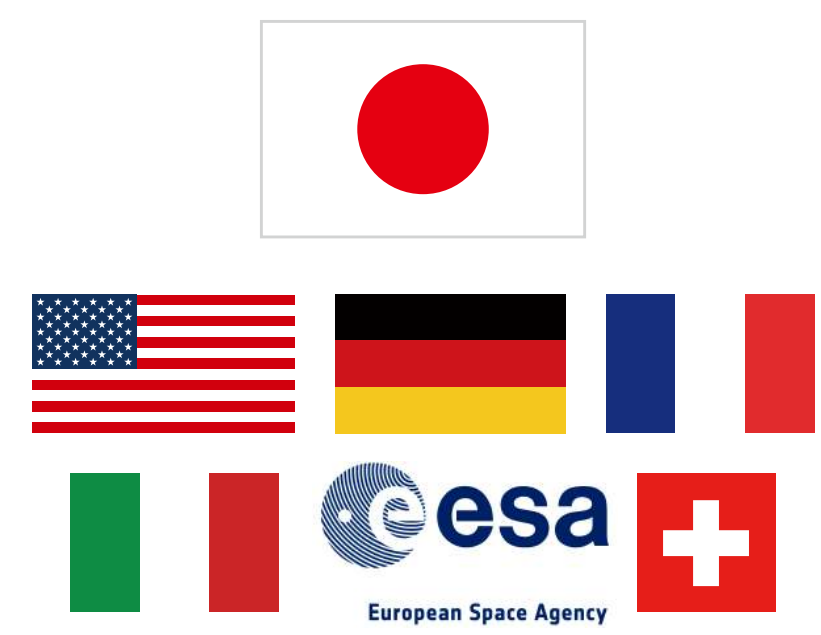
日本開発部分

衛星・観測装置概観

主な観測性能

計測温度範囲	スペクトルデータ: 2万~1500万度 (波長: 17-21.5nm, 46-122nm) スリットジョー画像: 6000~1万度 (波長: 280-285nm)
空間分解能	0.4 秒角以下
時間分解能	0.5 秒 (最短)
ドップラー速度精度	2 km/s
観測視野	280秒角×280秒角以上

EUVSTフライト品開発参加国

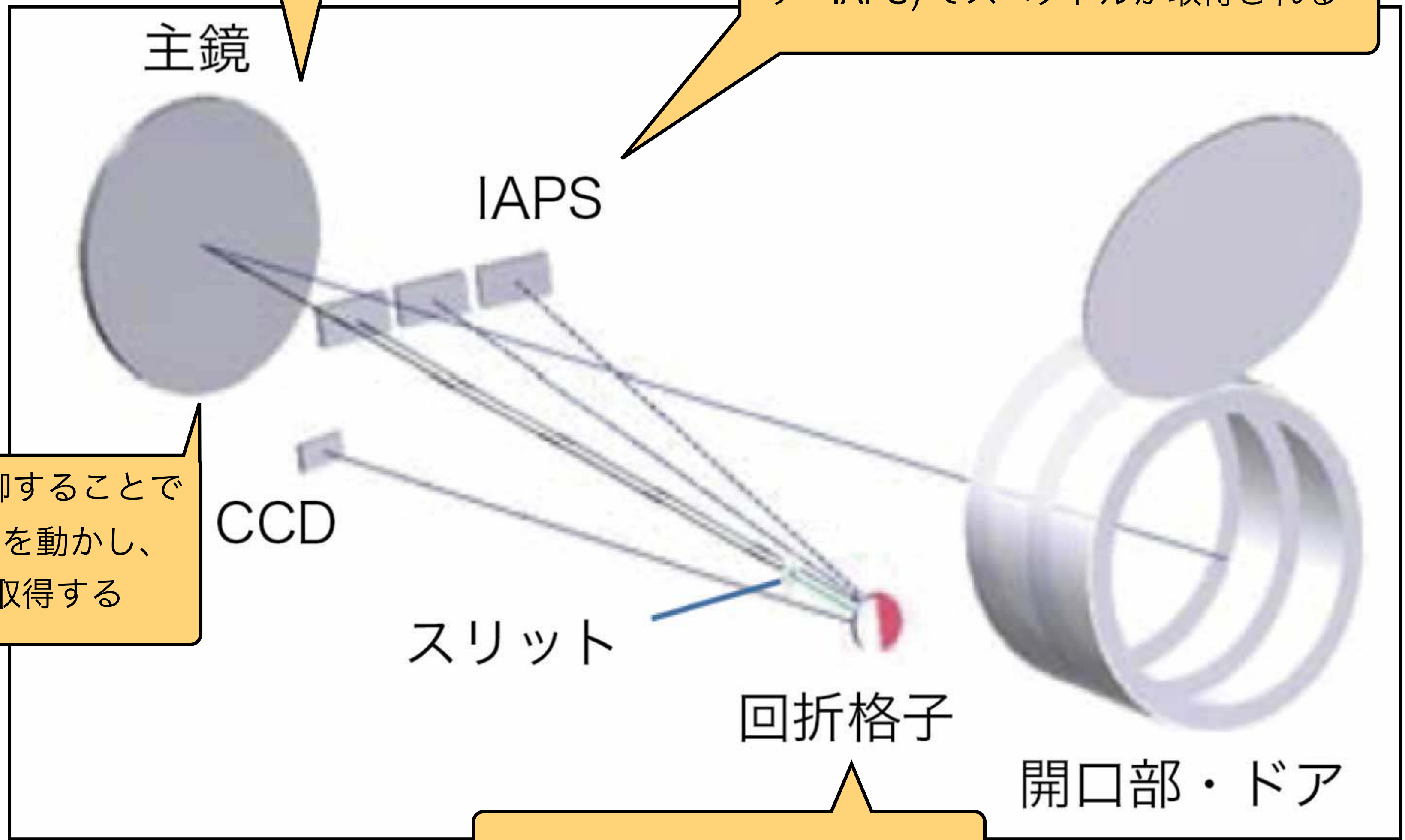


日本開発部分

光学系

① 口径28 cmの主鏡 (軸外し放物面鏡単鏡) で太陽像を分光器部の入口のスリット面に結像する

③ 検出器 (CCDおよび増感撮像センサーIAPS) でスペクトルが取得される

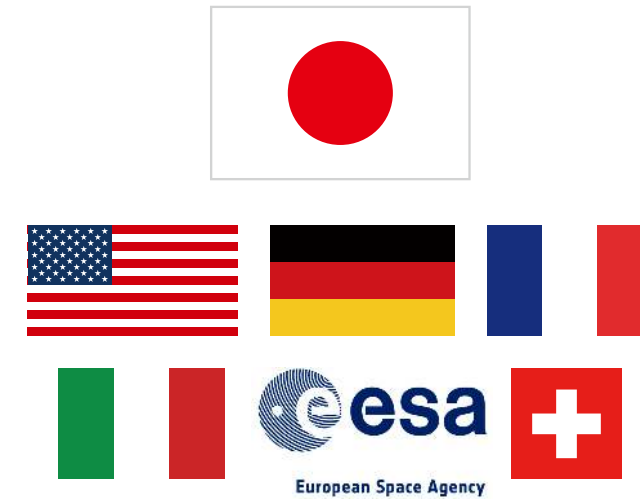


④ 主鏡の角度を制御することでスリット面の太陽像を動かし、太陽の2次元情報を取得する

② スリットから取り込まれた太陽光は回折格子で分散される

JAXA/NAOJ

推進体制



- 日本が主導し、米国(NASA)および欧州諸国(ESAおよび各国宇宙機関)の参加を得て実施
- JAXA宇宙科学研究所(ISAS)と国立天文台が中核となり、衛星および観測望遠鏡EUVSTを開発
- データ解析を行う環境を全国の研究者に提供するサイエンスセンターを名古屋大学宇宙地球環境研究所(ISEE)が運営
- 国内外の大学や研究機関は、データ解析・科学観測運用・地上観測・数値計算などの多面にわたり本計画に参加し、これらは国内外の研究コミュニティの総意を得て推進される

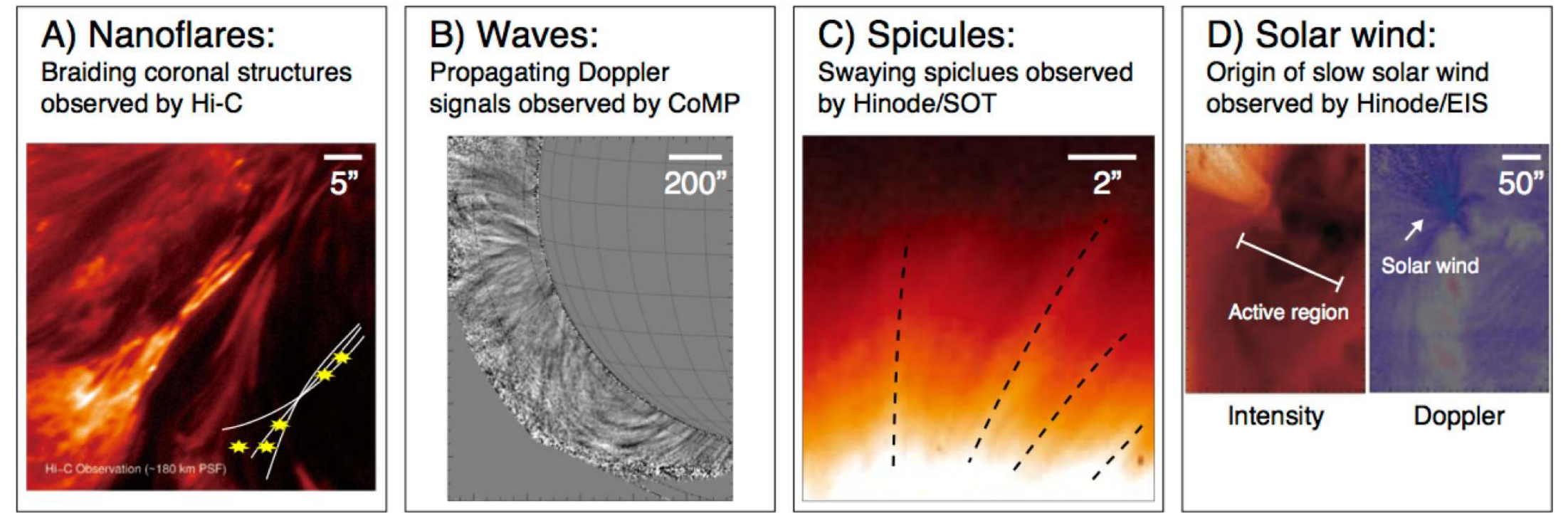


Scientific objectives of the mission

ミッションの科学目標

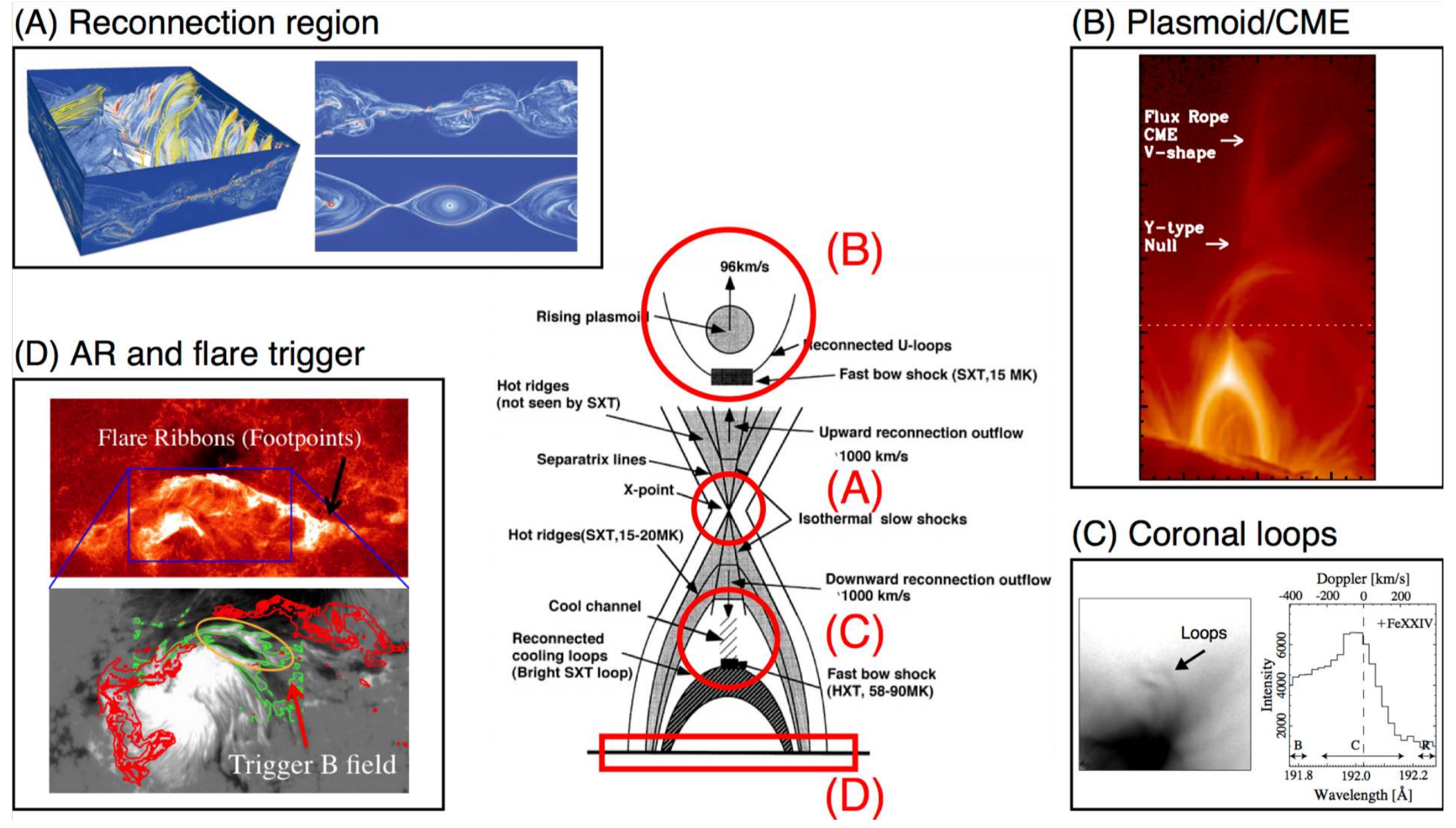
I. 太陽大気と太陽風の形成に至る基礎物理過程の解明

- (A) ナノフレアのコロナ加熱への寄与の定量化
- (B) 波動散逸のコロナ加熱への寄与の定量化
- (C) 彩層微細構造(スピキュール)の形成機構の解明とコロナ加熱への寄与の定量化
- (D) 太陽風の流源と加速機構の解明



II. 太陽大気が不安定化し、フレアやプラズマ噴出を引き起こす物理過程の解明

- (A), (C) 磁気リコネクション機構の高速化の理解
- (B), (D) フレアや噴出に至るエネルギー蓄積とトリガの理解



Scientific objectives of the mission

ミッションの科学目標

I. 太陽大気と太陽風の形成に至る基礎物理過程の解明

(A) ナノフレアのコロナ加熱への寄与の定量化

• ナノフレア仮説:

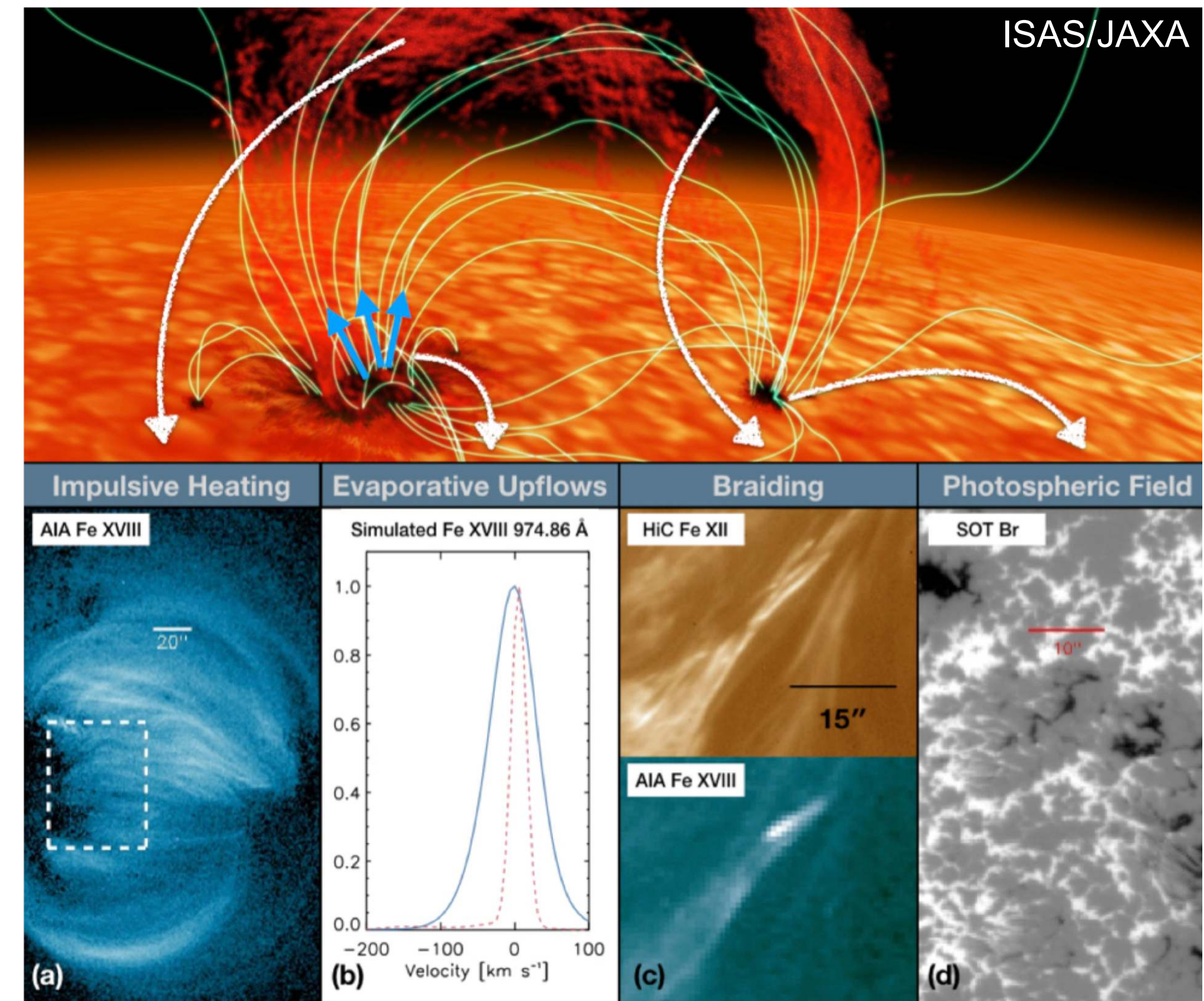
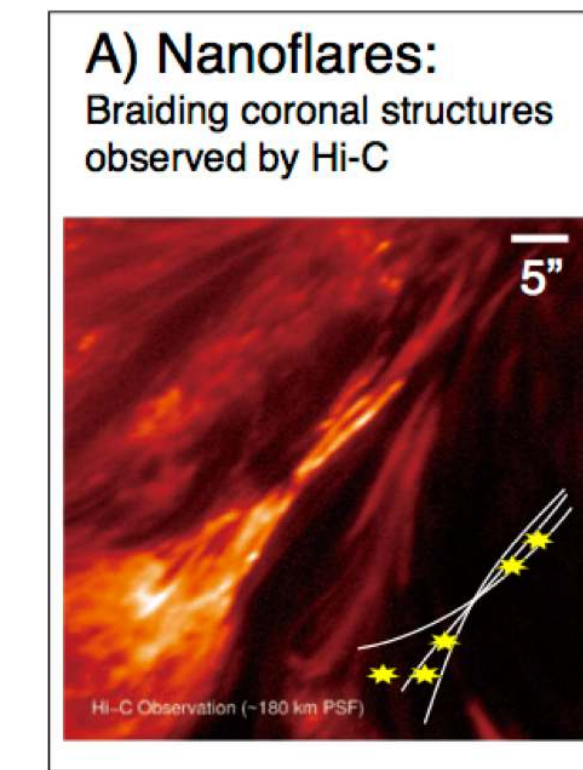
- ナノフレア(微小な磁気リコネクション現象)が放出するエネルギーの総量が大なら、コロナを加熱するメカニズムになりうる
- 小エネルギー加熱現象の発生率の正確な測定が要

✓ 遷移層とコロナで起こる小規模な加熱現象のエネルギーを $\sim 10^{24}-10^{27}$ erg の範囲で測定する

✓ 高速運動を伴う5MK以上のプラズマを発生させる間欠的な過程を観測する

✓ サブアーク秒角の組紐構造を高時間・高空間分解能で観測する

✓ 分光診断と光球・彩層下部との同時観測を比較することにより、ナノフレアの駆動源を特定する



Scientific objectives of the mission

ミッションの科学目標

I. 太陽大気と太陽風の形成に至る基礎物理過程の解明

(A) ナノフレアのコロナ加熱への寄与の定量化

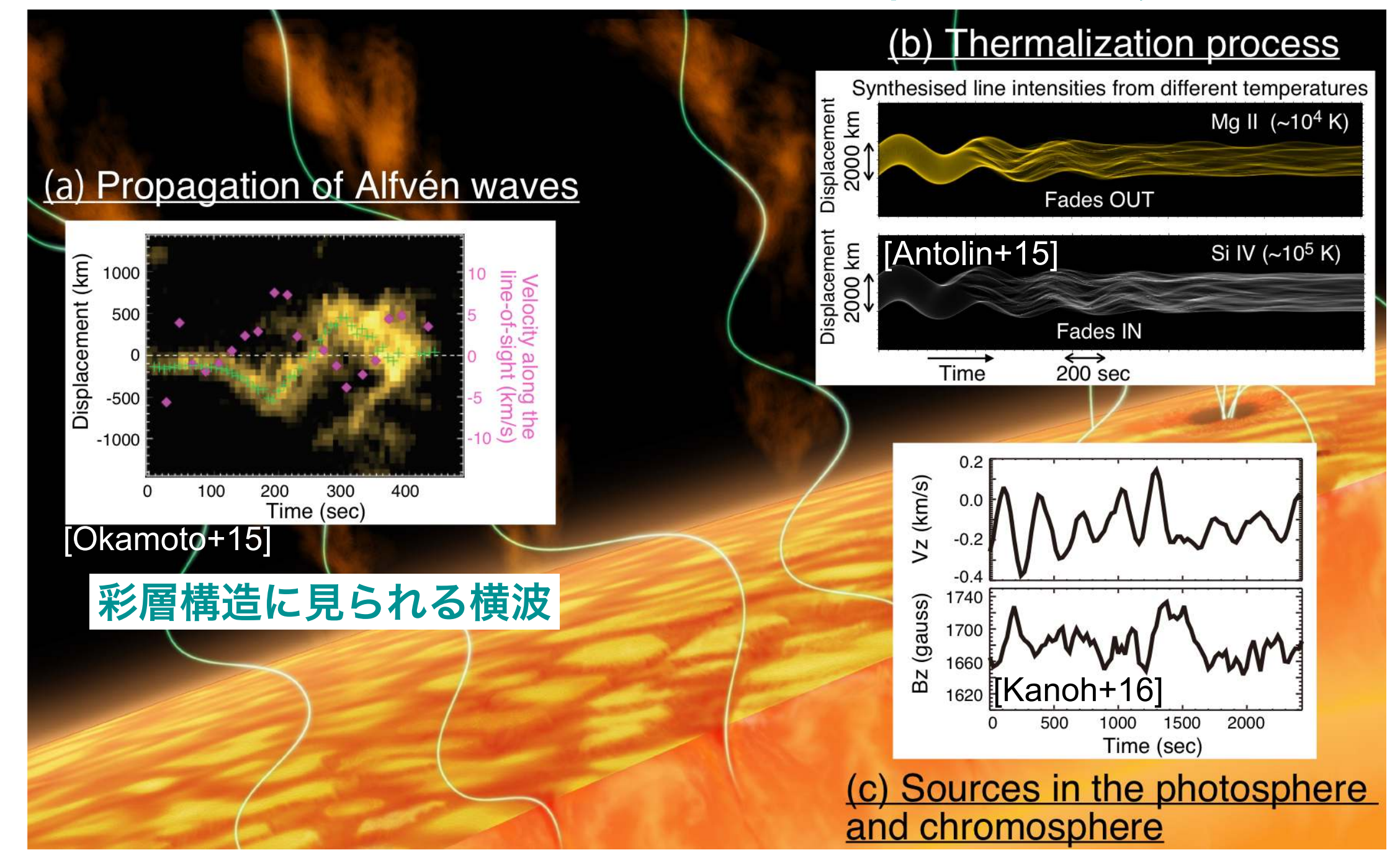
(B) 波動散逸のコロナ加熱への寄与の定量化

• **波動加熱仮説:**

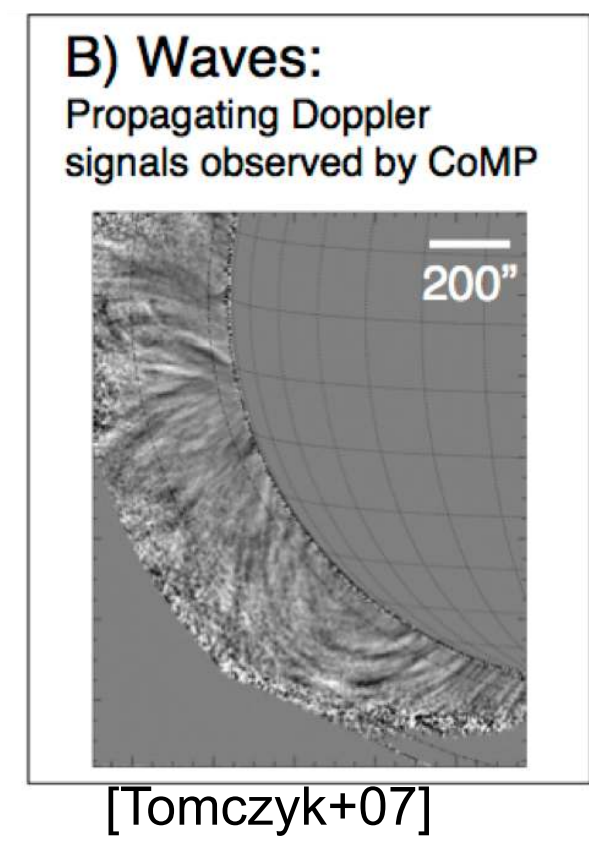
- 電磁流体波、特にアルヴェン波が太陽表面から磁力線に沿って上方に伝播し、そのエネルギーを捨てて大気を加熱する

- ✓ 異なる大気の層を通過する揺らぎの伝搬を測定することで、アルヴェン波を検出する
- ✓ 遷移層やコロナのプラズマが伝播する波に対してどのように応答するかを測定し、熱化過程を観測する
- ✓ 分光診断と光球・彩層下部の同時観測を比較し、上方へ伝播する波の発生源を特定する

アルヴェン波の散逸で高温ラインが見えるか



彩層構造に見られる横波



アルヴェン波の源を光球・彩層で同時観測することも重要

アルヴェン波が十分なエネルギーをコロナに輸送していれば、
~10km/sの速度振幅となるはず
⇔ 観測で得られているコロナでの速度振幅は1km/sと小さい
Solar-Cの高分解能観測ではどうか？

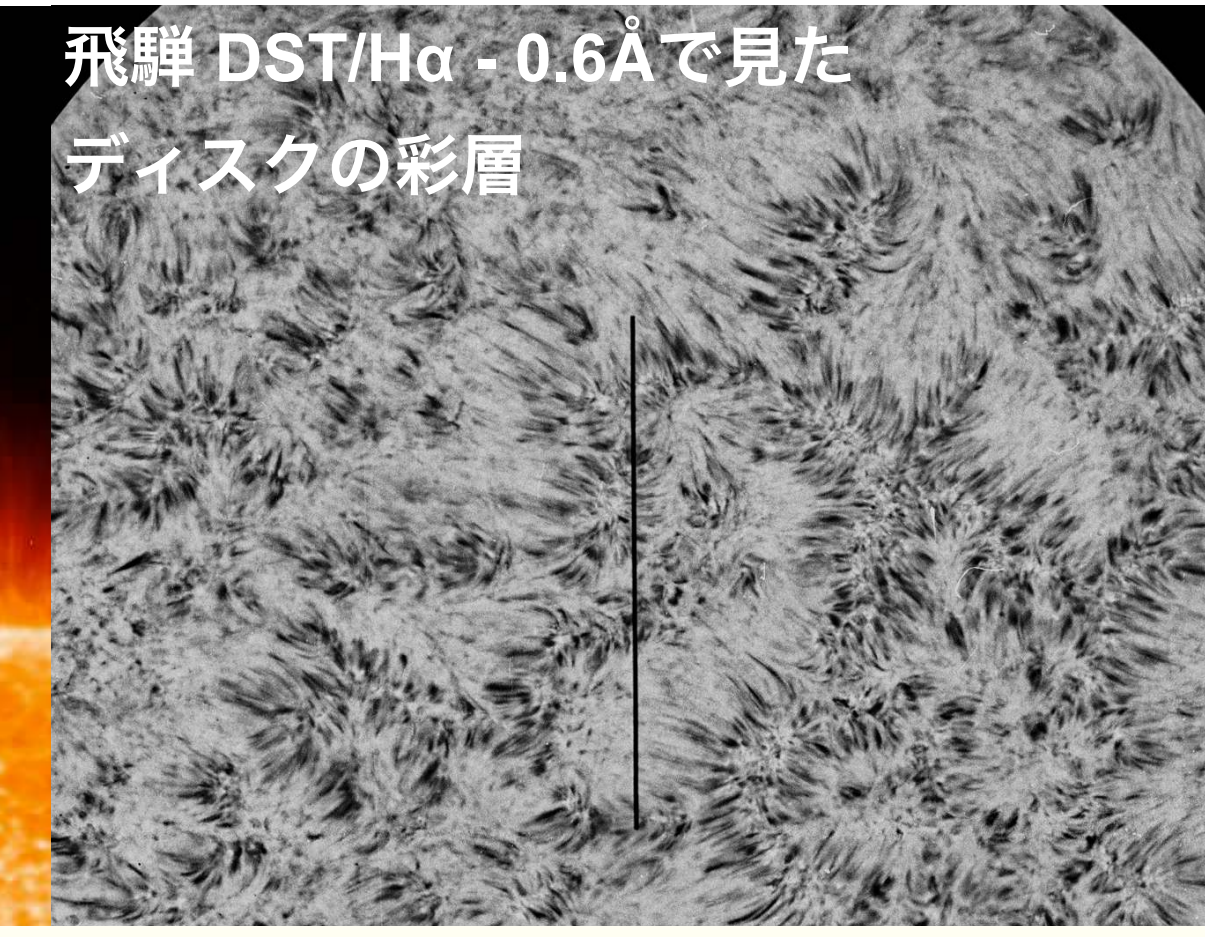
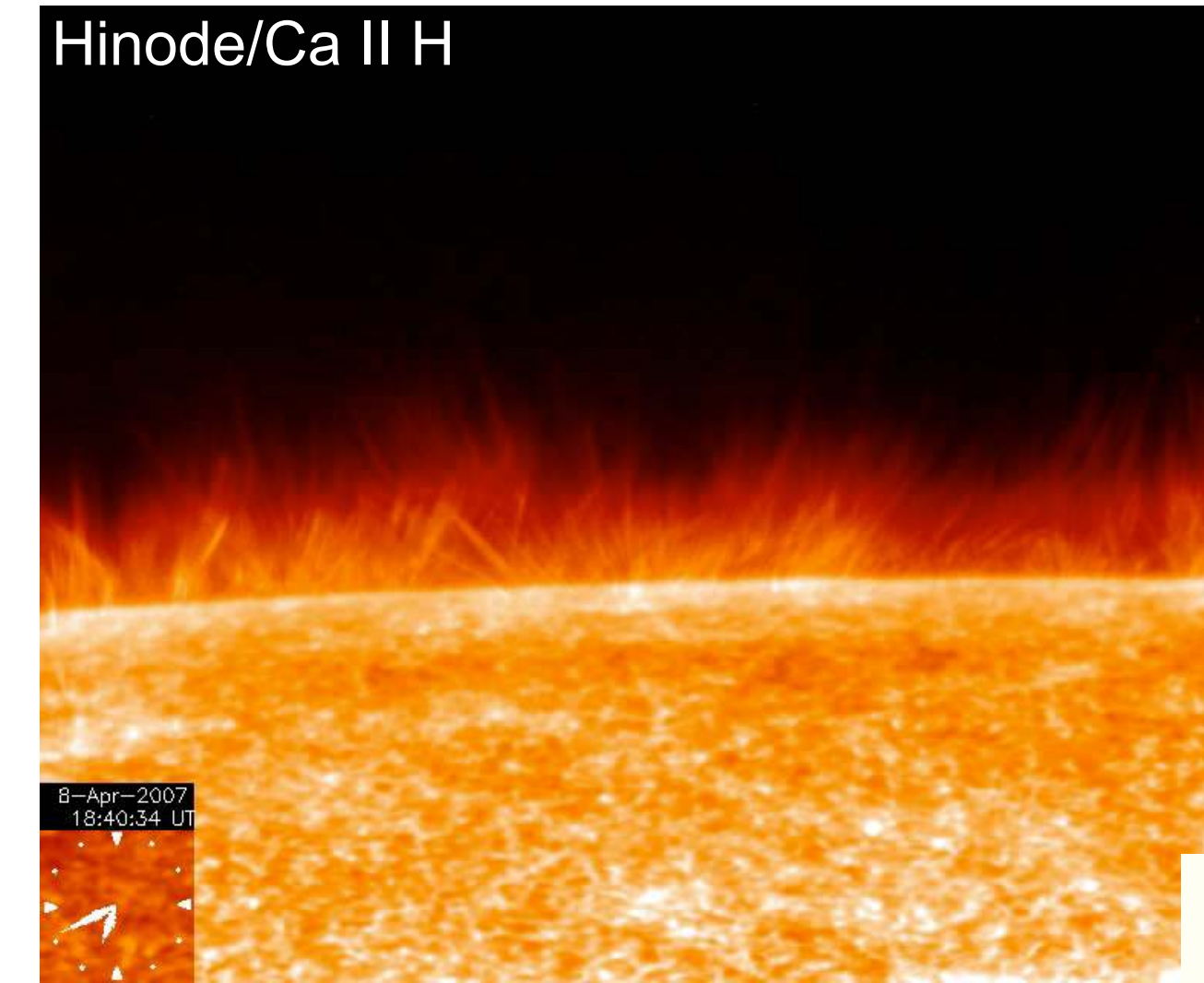
Scientific objectives of the mission

ミッションの科学目標

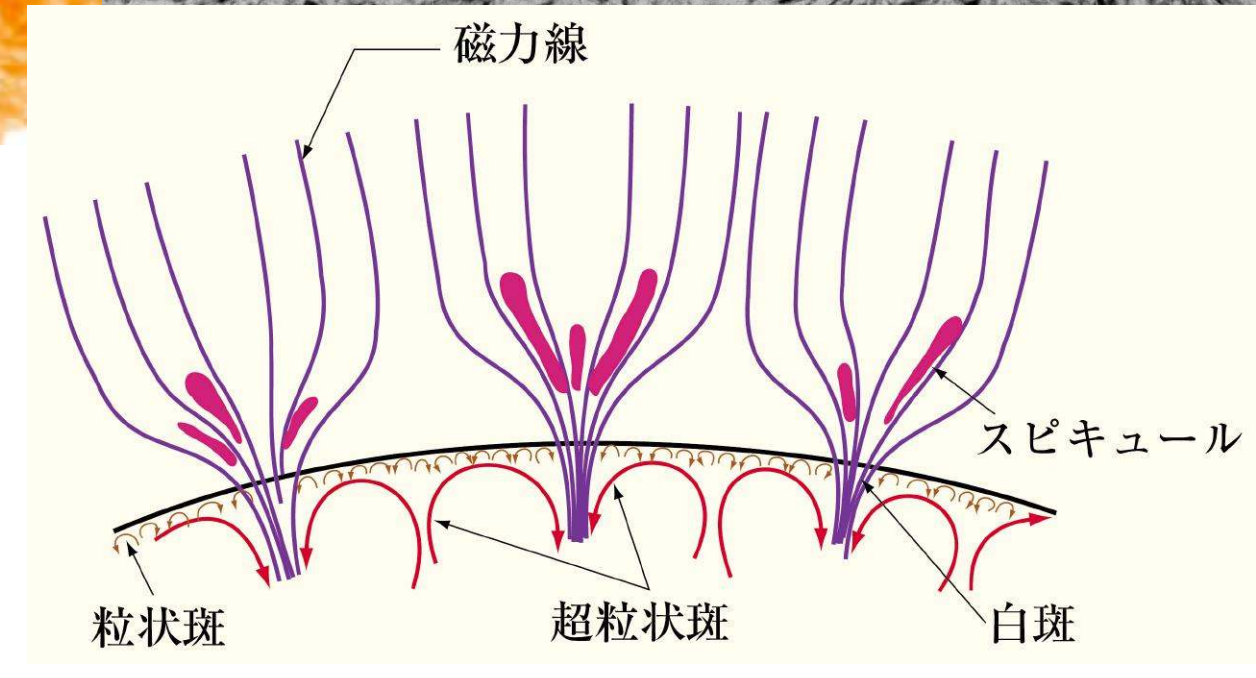
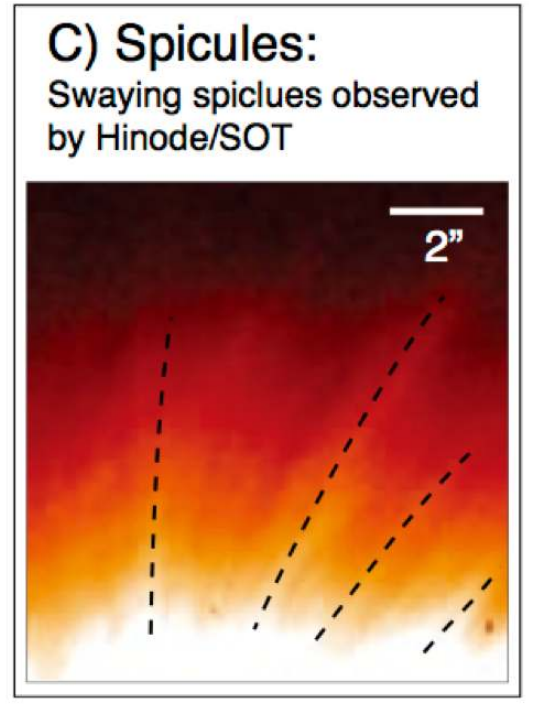
I. 太陽大気と太陽風の形成に至る基礎物理過程の解明

- (A) ナノフレアのコロナ加熱への寄与の定量化
- (B) 波動散逸のコロナ加熱への寄与の定量化

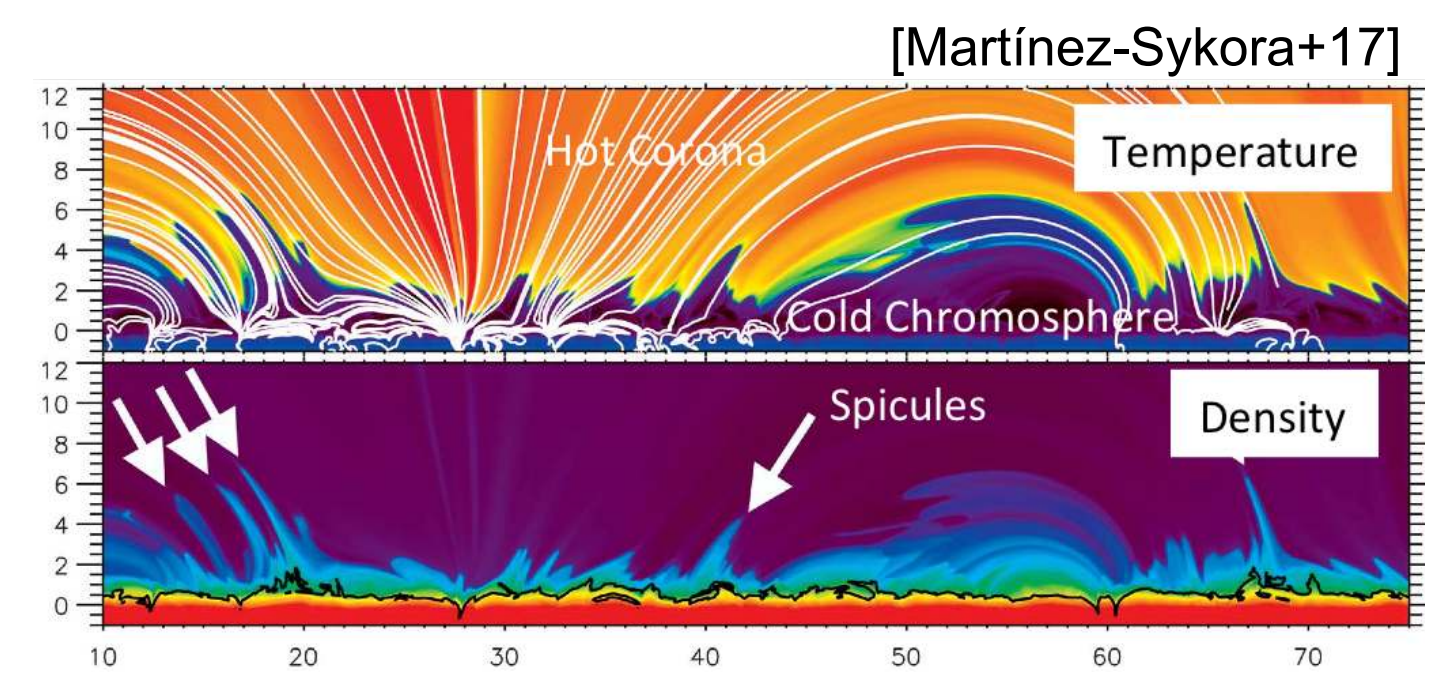
(C) 彩層微細構造(スピキュール)の形成機構の解明とコロナ加熱への寄与の定量化



- スピキュール(幅~0.4") :
 - 彩層における基本的な構成要素
 - 彩層とコロナのチャネリングに重要な役割を果たすと考えられている



- ✓ 分光診断と、光球・彩層下部同時観測との比較により、スピキュールの**駆動機構**を明らかにする
- ✓ 彩層中($2 \times 10^4 \text{K}$)からコロナ中($> 1 \text{MK}$)への熱的進化を観測する。
 - スピキュールが上空に供給する**質量フラックス**を定量的に評価する



RMHD数値計算で得られたスピキュールのような(?)構造

Scientific objectives of the mission

ミッションの科学目標

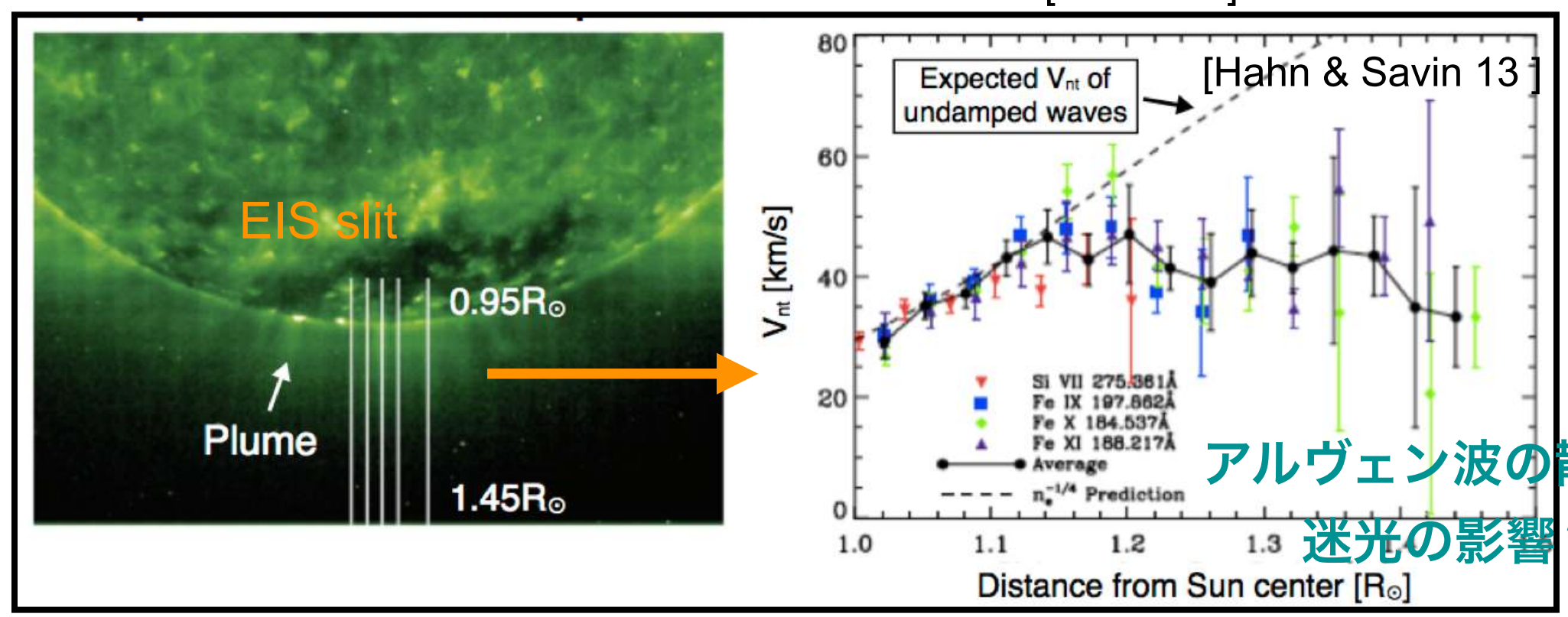
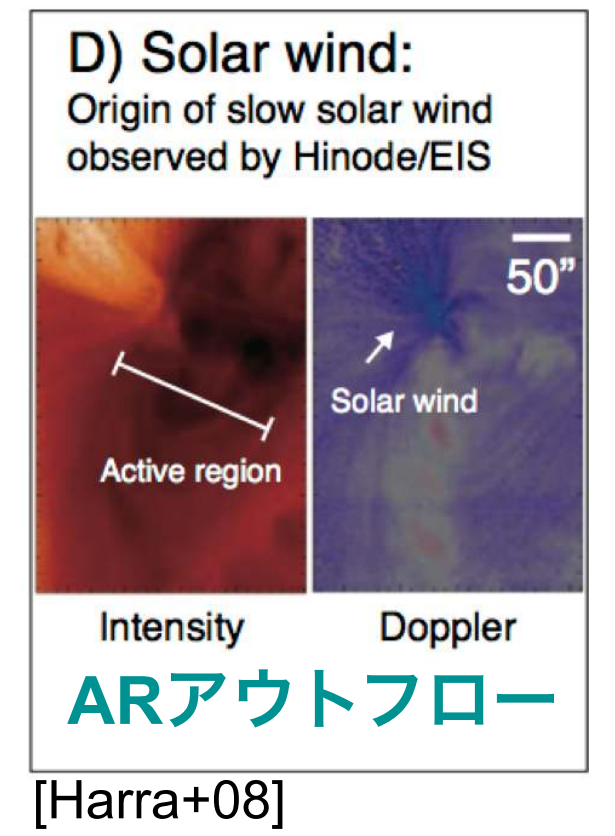
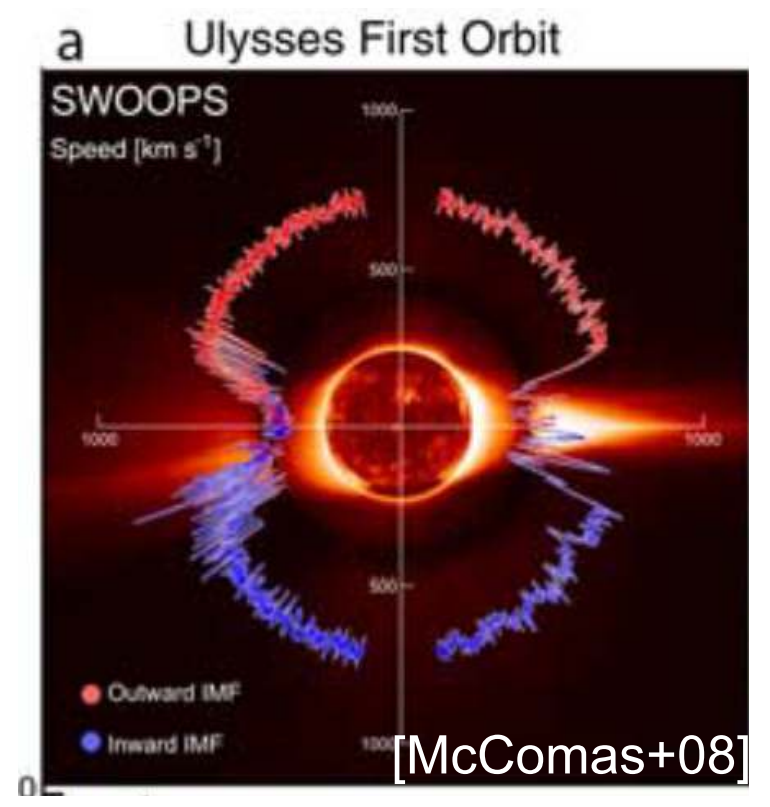
- ✓ 太陽風流源領域の速度、温度、密度構造を観測し、磁場構造との関連を明らかにする
- ✓ プルームやプルーム間領域でコロナアルフベン波の兆候を検出し、その高さ方向のエネルギーフラックスを測定する

I. 太陽大気と太陽風の形成に至る基礎物理過程の解明

- (A) ナノフレアのコロナ加熱への寄与の定量化
- (B) 波動散逸のコロナ加熱への寄与の定量化
- (C) 彩層微細構造(スピキュール)の形成機構の解明とコロナ加熱への寄与の定量化

(D) 太陽風の流源と加速機構の解明

- 太陽風：
 - 太陽の磁場の一部は惑星間空間へ → 太陽風が加熱・加速
 - 速い成分(~800km/s) と遅い成分 (<400km/s) (McComas+98)
 - 高速風の起源：極域コロナホール
 - 低速風の起源：赤道コロナホール、活動領域(AR)アウトフロー、ストリーマーなど候補があるが未確立
 - 速い/遅い太陽風共に加速機構は未特定
 - 太陽風加速が始まる高さ：ある観測では低い(1太陽半径以下、Hahn & Savin 2013)が、理論や他の観測では高い(2太陽半径以上、Gabriel et al.2003, 2005)高さが示唆され未決着
 - 太陽風加速領域は非常に暗いため、高感度な分光観測が必要



アルヴェン波の散逸?
 迷光の影響?

Scientific objectives of the mission

ミッションの科学目標

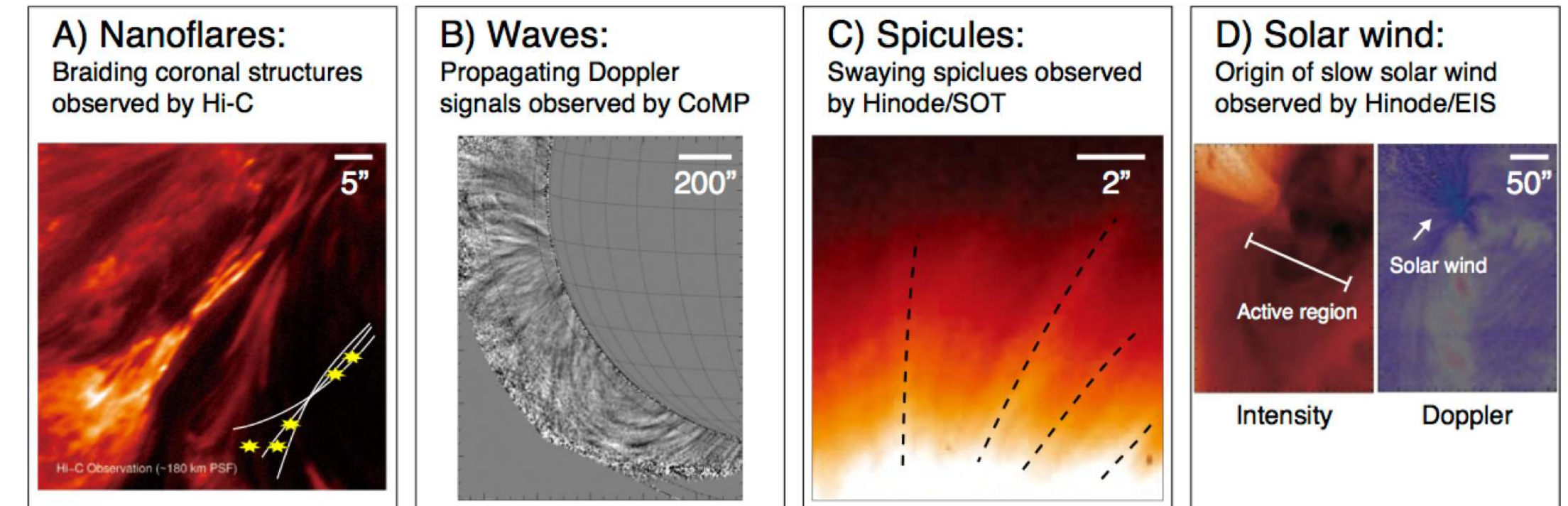
I. 太陽大気と太陽風の形成に至る基礎物理過程の解明

(A) ナノフレアのコロナ加熱への寄与の定量化

(B) 波動散逸のコロナ加熱への寄与の定量化

(C) 彩層微細構造(スピキュール)の形成機構の解明とコロナ加熱への寄与の定量化

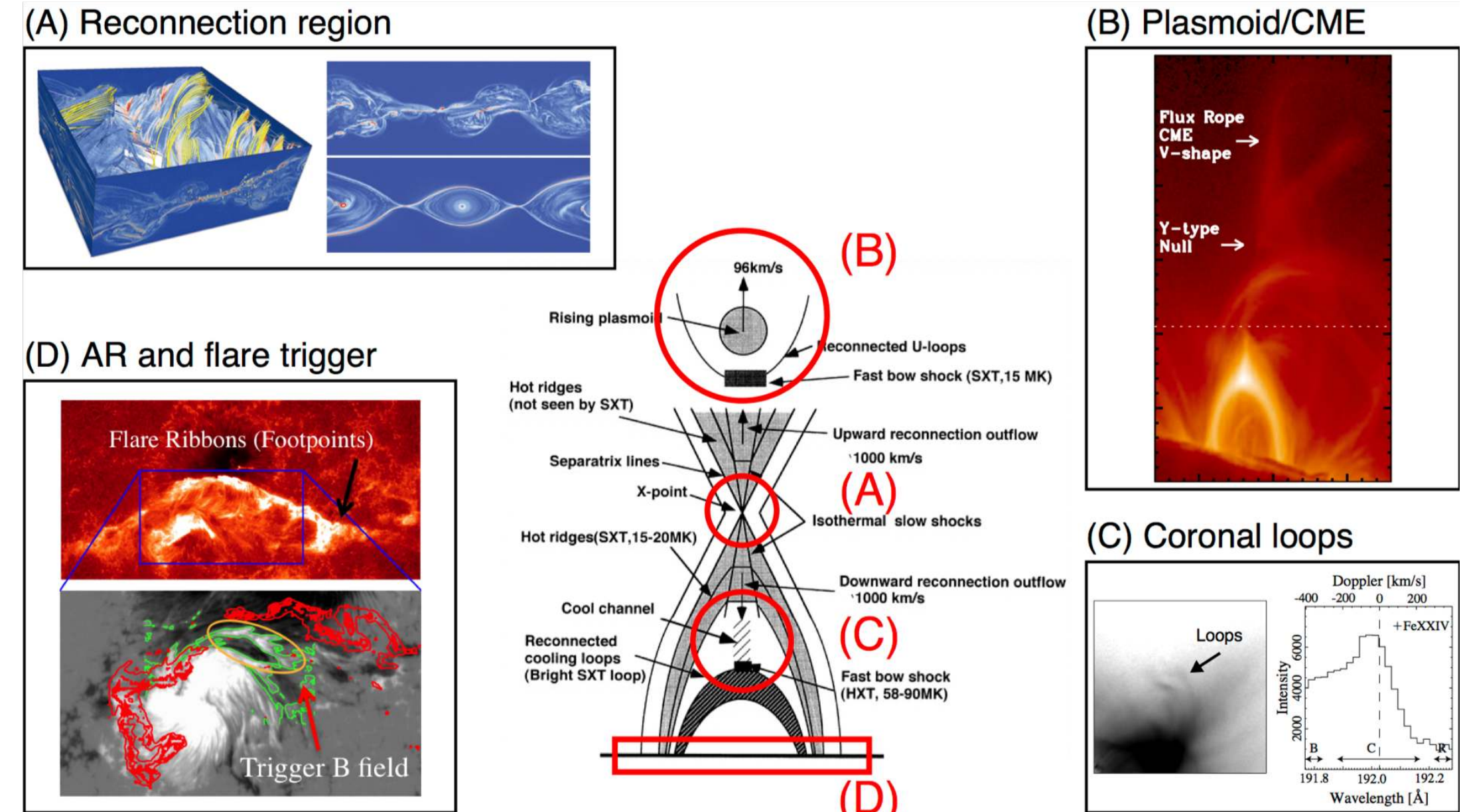
(D) 太陽風の流源と加速機構の解明



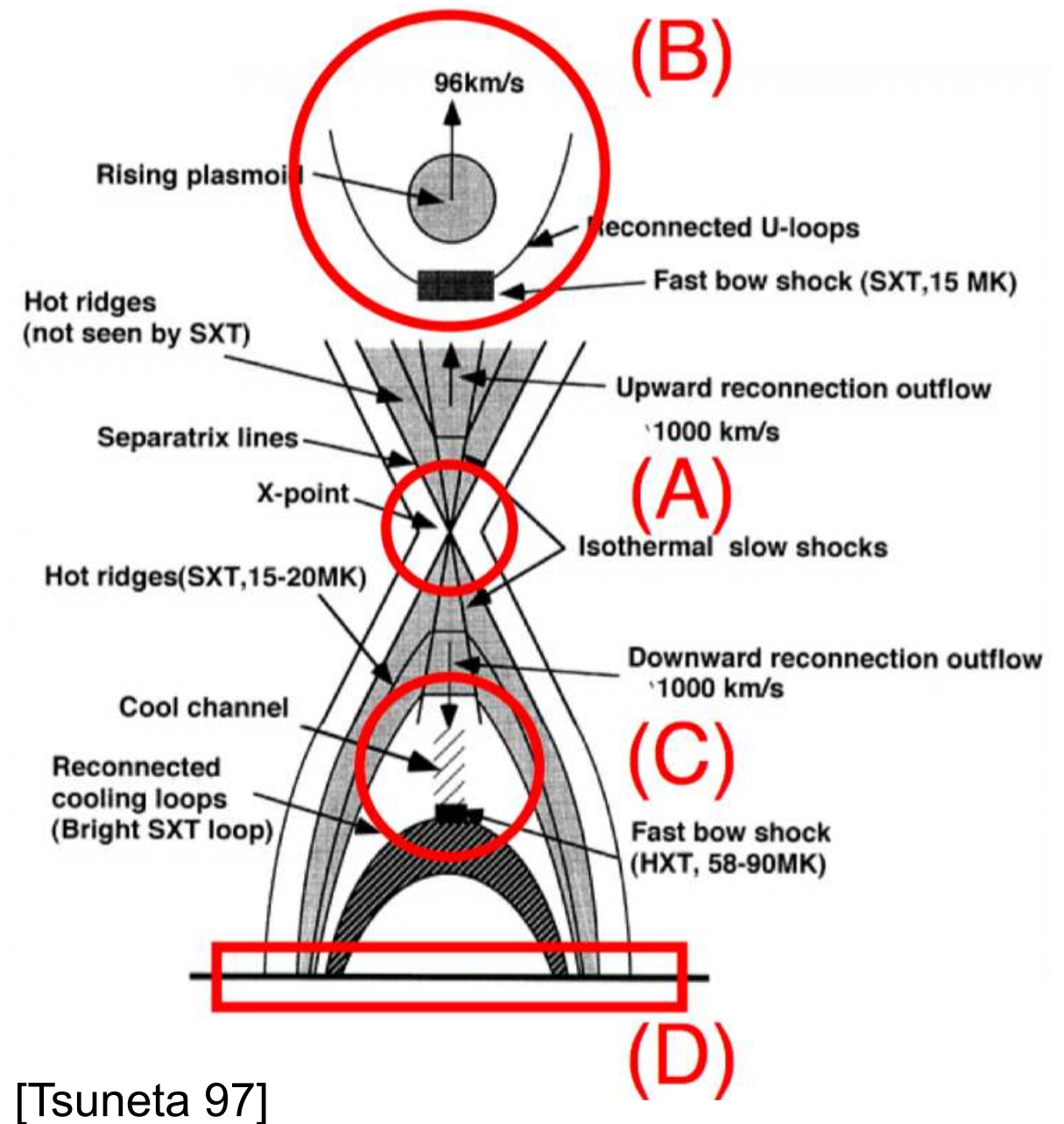
II. 太陽大気が不安定化し、フレアやプラズマ噴出を引き起こす物理過程の解明

(A), (C) 磁気リコネクション機構の高速化の理解

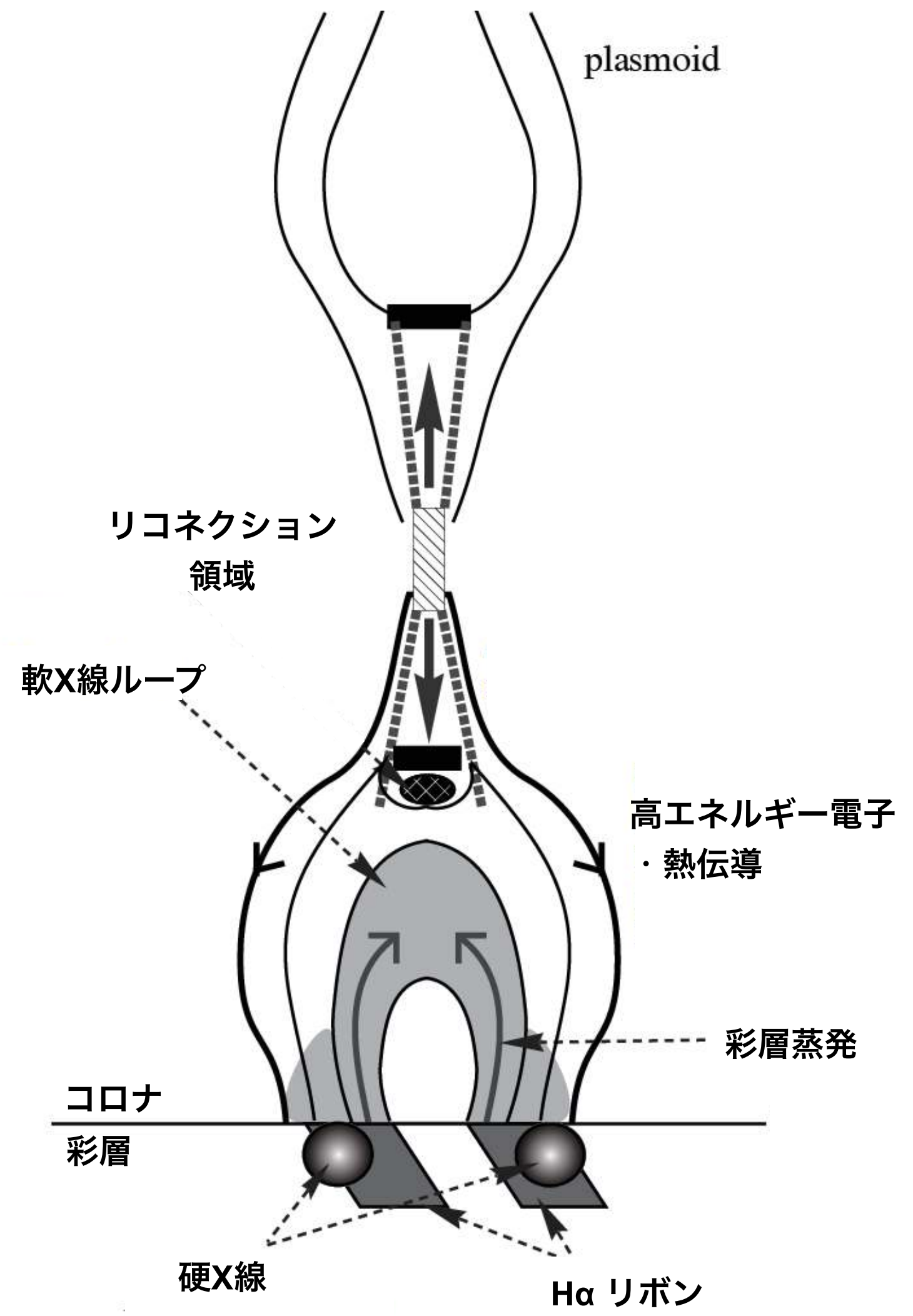
(B), (D) フレアや噴出に至るエネルギー蓄積とトリガの理解



フレアの標準モデル (CSHKPモデル)



[Tsuneta 97]



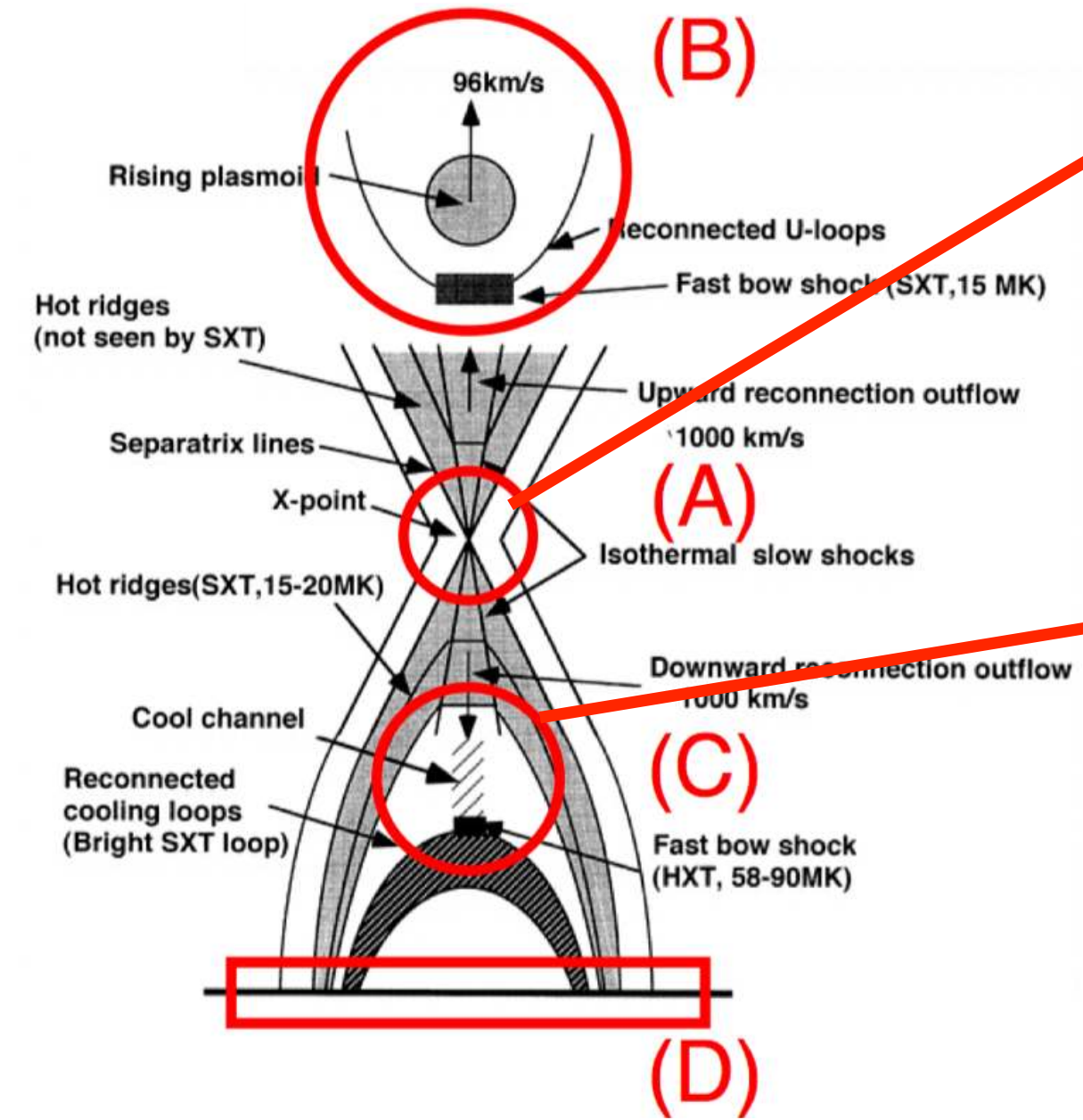
Carmichael (1964)
 Sturrock (1966)
 Hirayama (1974)
 Kopp & Pneuman (1976)

Scientific objectives of the mission

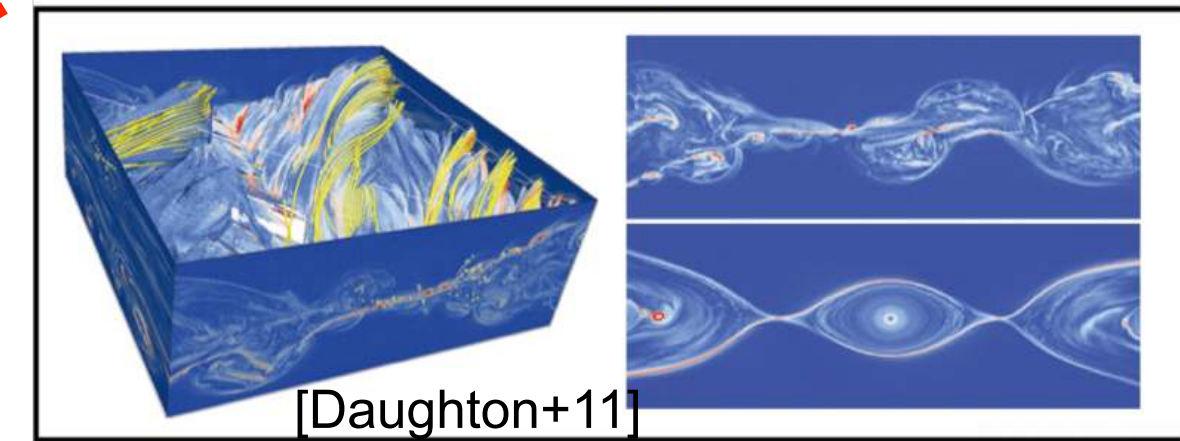
ミッションの科学目標

• 高速磁気リコネクション

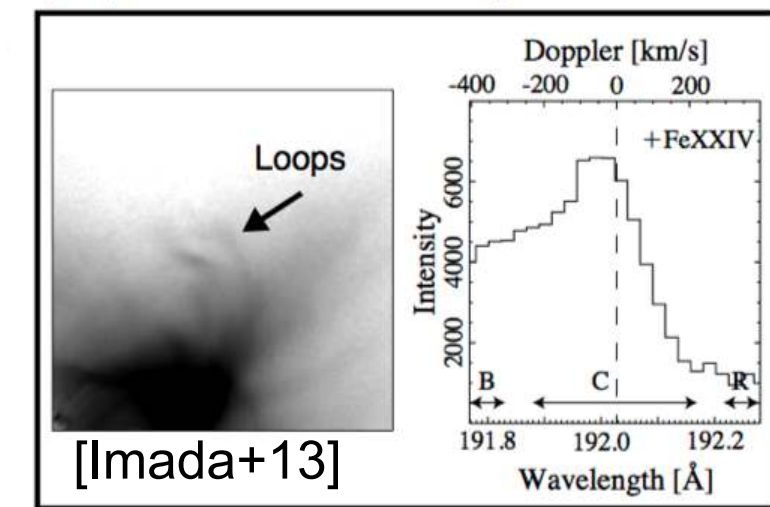
- 観測されるリコネクション現象のリコネクション速度は標準的な磁気リコネクション理論より高速
- 電流シート中の磁気島・プラズモイドが重要か (e.g. Shibayama+15)
- → リコネクション領域の観測が不可欠



(A) Reconnection region



(C) Coronal loops

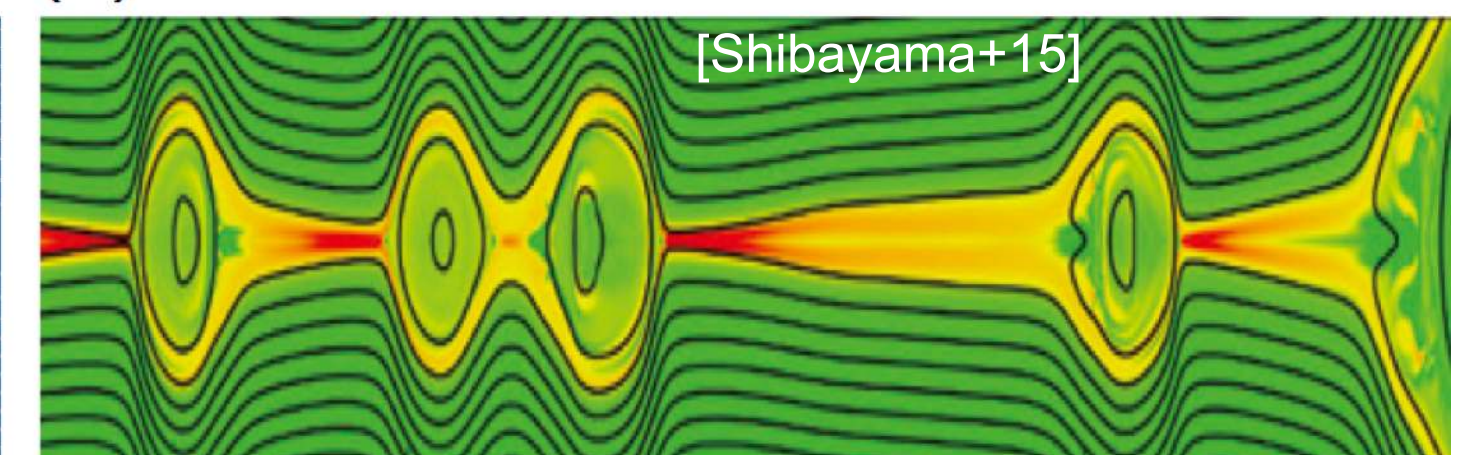
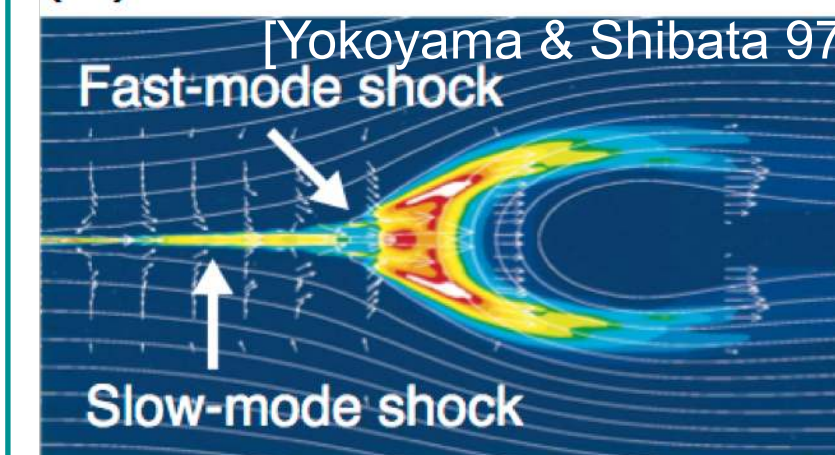


II. 太陽大気が不安定化し、フレアやプラズマ噴出を引き起こす物理過程の解明

(A), (C) 磁気リコネクション機構の高速化の理解

(B), (D) フレアや噴出に至るエネルギー蓄積とトリガの理解

(C) Petschek reconnection (D) Plasmoid-unstable reconnection



高速リコネクションの理論モデルはいくつか提案があるが、その物理は未解明

- ✓ リコネクション領域内のプラズマの状態や構造を調べ、高速リコネクションにおける衝撃波や磁気島が果たす役割を明らかにする
- ✓ リコネクションに対する彩層の応答を非常に高い時間間隔で観測し、エネルギー変換の様子を探る
- ✓ コロナ(完全電離プラズマ)とは異なる彩層・遷移層で発生するリコネクションの物理的性質とダイナミクスを明らかにする

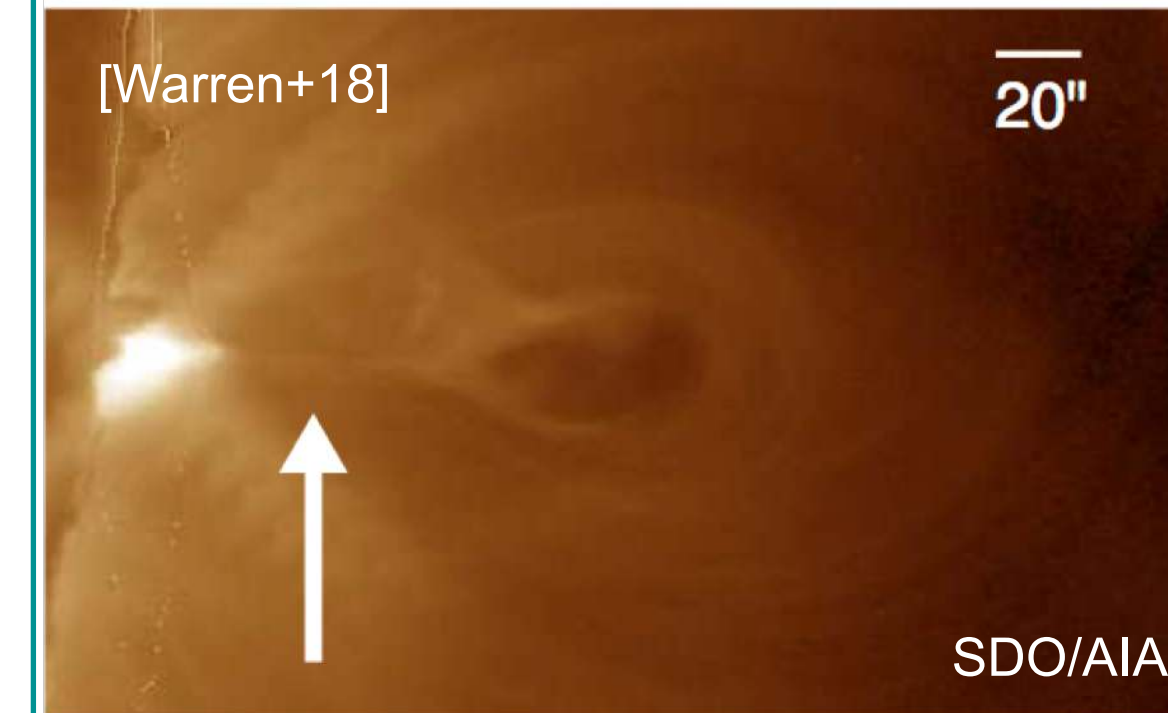
Scientific objectives of the mission

ミッションの科学目標

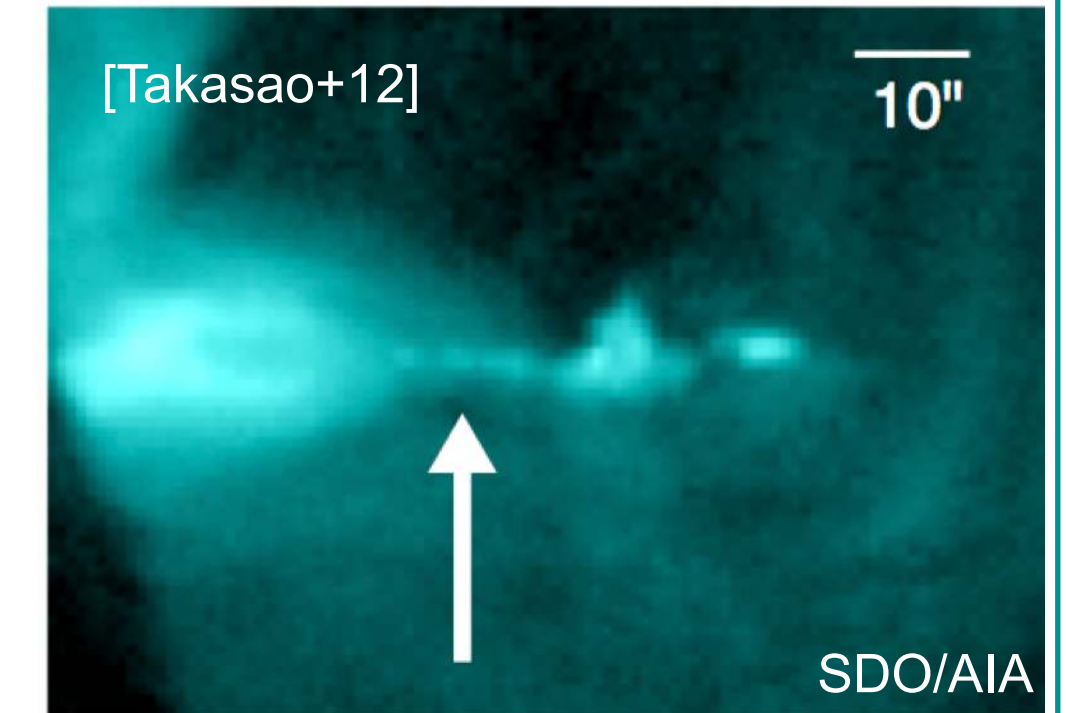
• 高速磁気リコネクション

- 観測されるリコネクション現象のリコネクション速度は標準的な磁気リコネクション理論より高速
- 電流シート中の磁気島・プラズモイドが重要か (e.g. Shibayama+15)
- → リコネクション領域の観測が不可欠

(A) Sheet structure without islands



(B) Sheet structure with islands



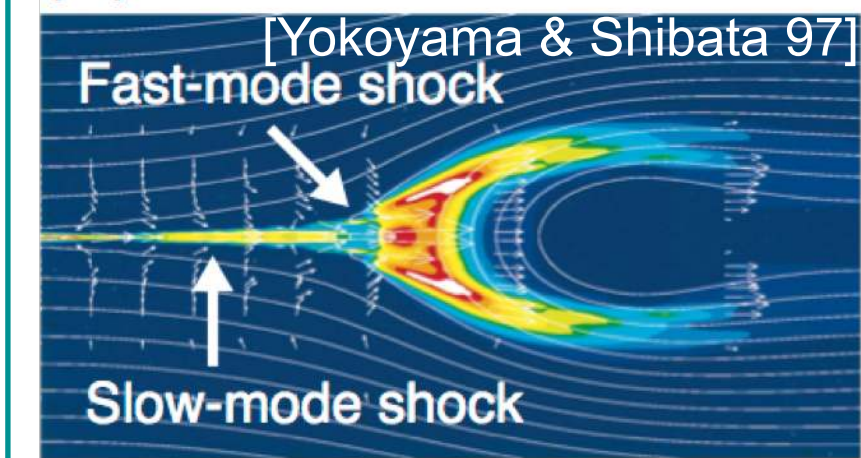
一般にはリコネクション領域は暗く、電流シート・インフロー・衝撃波・高速ジェットはほとんどの場合観測できない

II. 太陽大気が不安定化し、フレアやプラズマ噴出を引き起こす物理過程の解明

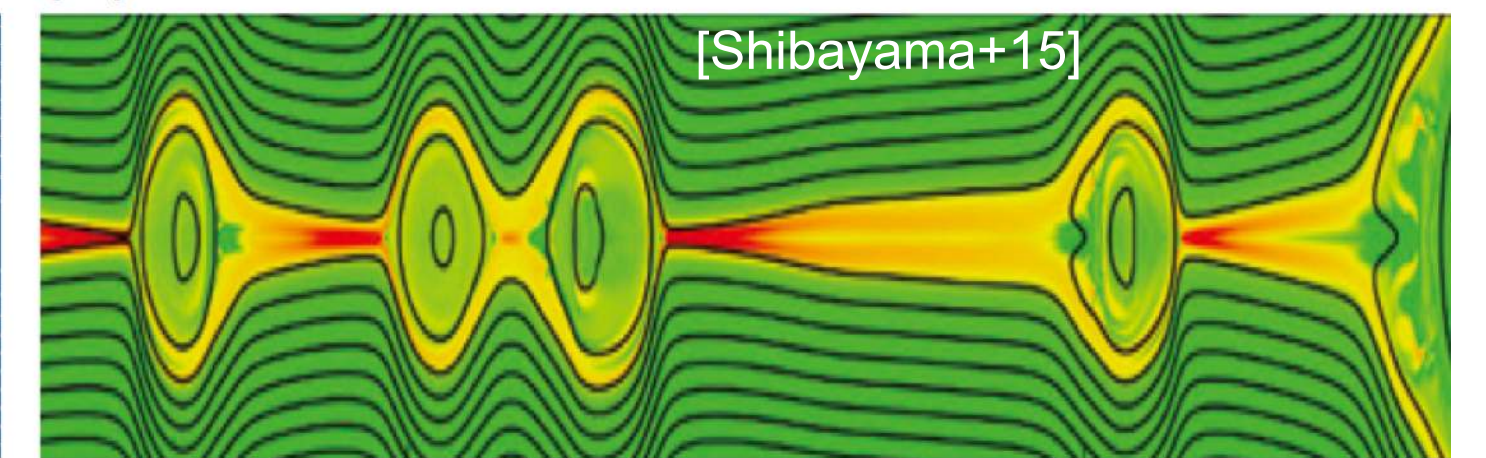
(A), (C) 磁気リコネクション機構の高速化の理解

(B), (D) フレアや噴出に至るエネルギー蓄積とトリガの理解

(C) Petschek reconnection



(D) Plasmoid-unstable reconnection

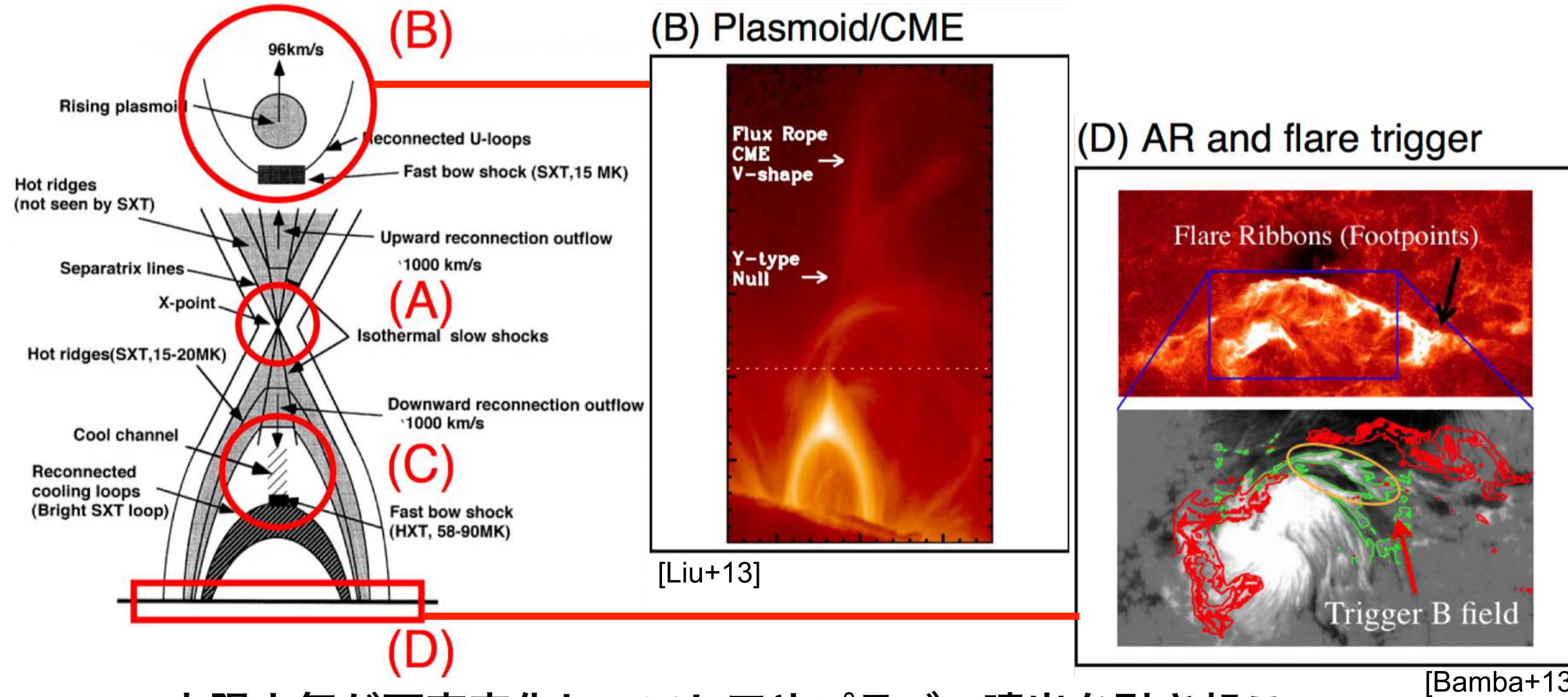


高速リコネクションの理論モデルはいくつか提案があるが、その物理は未解明

- ✓ リコネクション領域内のプラズマの状態や構造を調べ、高速リコネクションにおける衝撃波や磁気島が果たす役割を明らかにする
- ✓ リコネクションに対する彩層の応答を非常に高い時間間隔で観測し、エネルギー変換の様子を探る
- ✓ コロナ(完全電離プラズマ)とは異なる彩層・遷移層で発生するリコネクションの物理的性質とダイナミクスを明らかにする

Scientific objectives of the mission

ミッションの科学目標

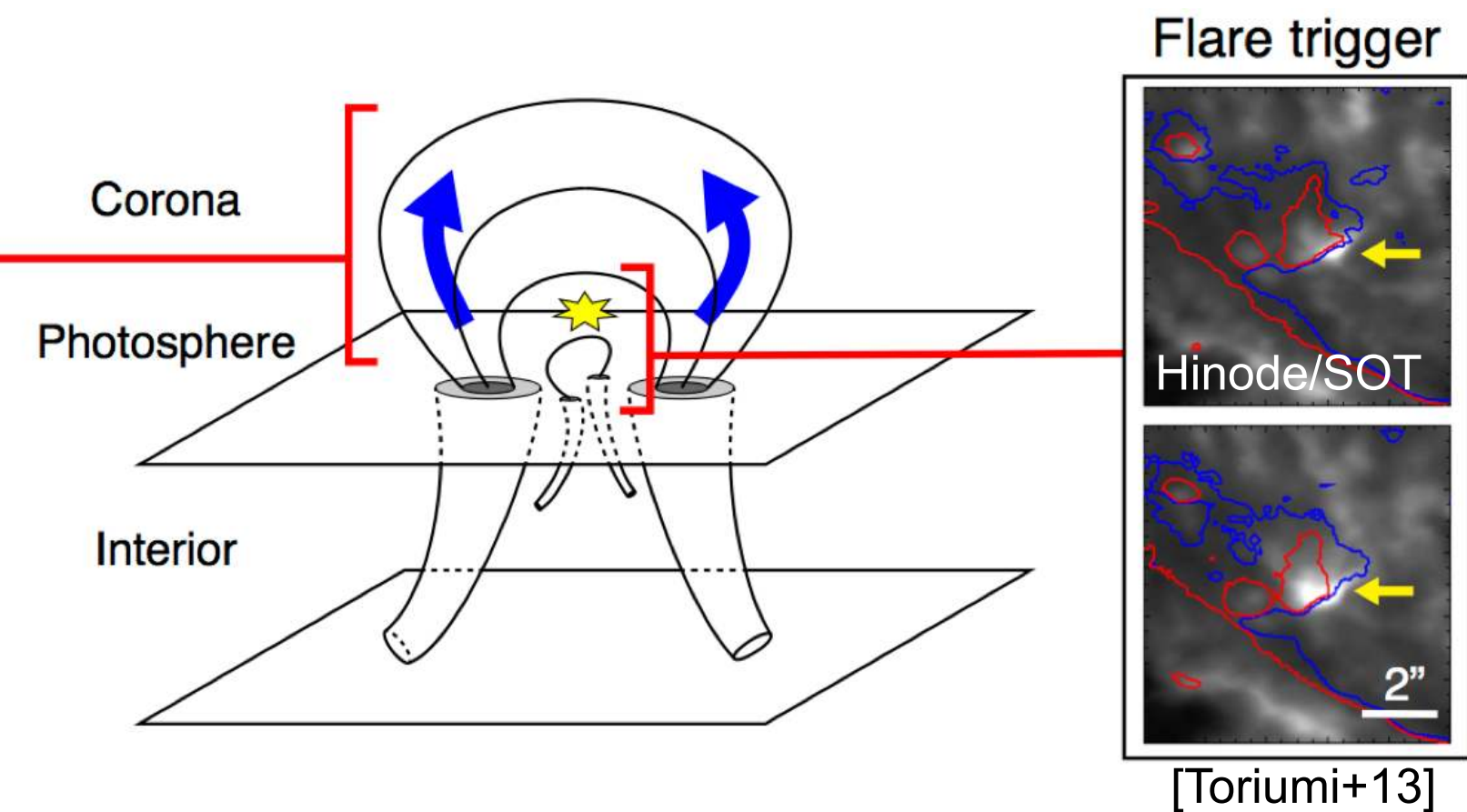
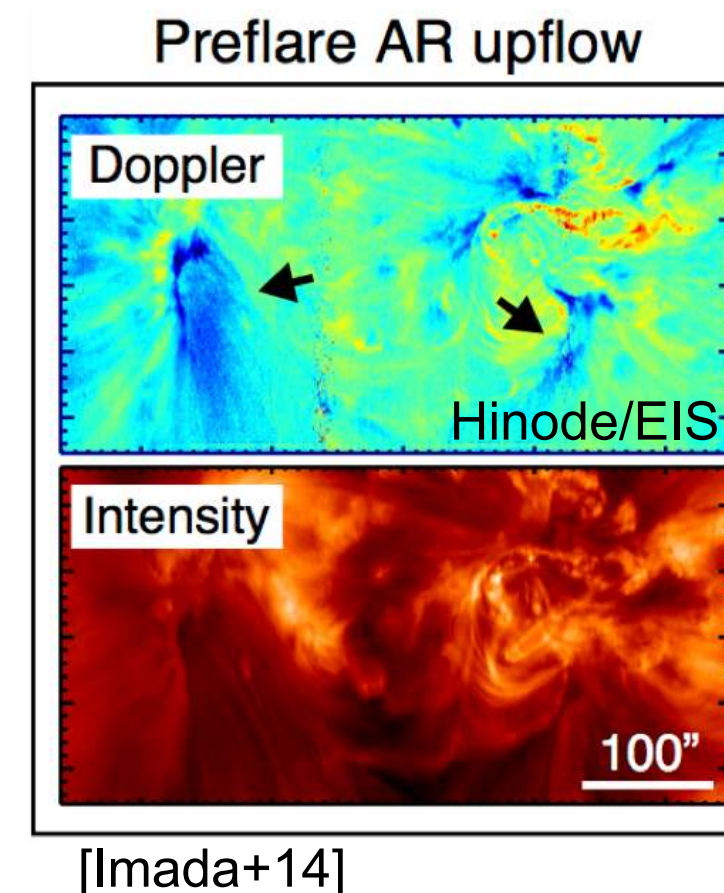


- フレアは大規模なARの発達(コロナへの自由磁気エネルギーの蓄積)の結果、発生
- 光球の進化に対応して、ARコロナはフレアの前段階に分光学的な兆候(非熱幅増大・上昇流など)を示す (Hinode/EIS; Harra+09, Imada+14)
- しかし、このようなコロナの兆候とAR進化との関係の詳細は、十分な空間分解能を持つ長期観測が行われていないため、明らかでない
- 小さな磁気構造がフレアトリガとなる可能性 (Bamba+13)
→ トリガ領域も高分解能分光で調べる必要有
- 得られたデータを数値計算と比較し、MHD不安定モードを特定することで、フレア予測につながりうる

II. 太陽大気が不安定化し、フレアやプラズマ噴出を引き起こす物理過程の解明

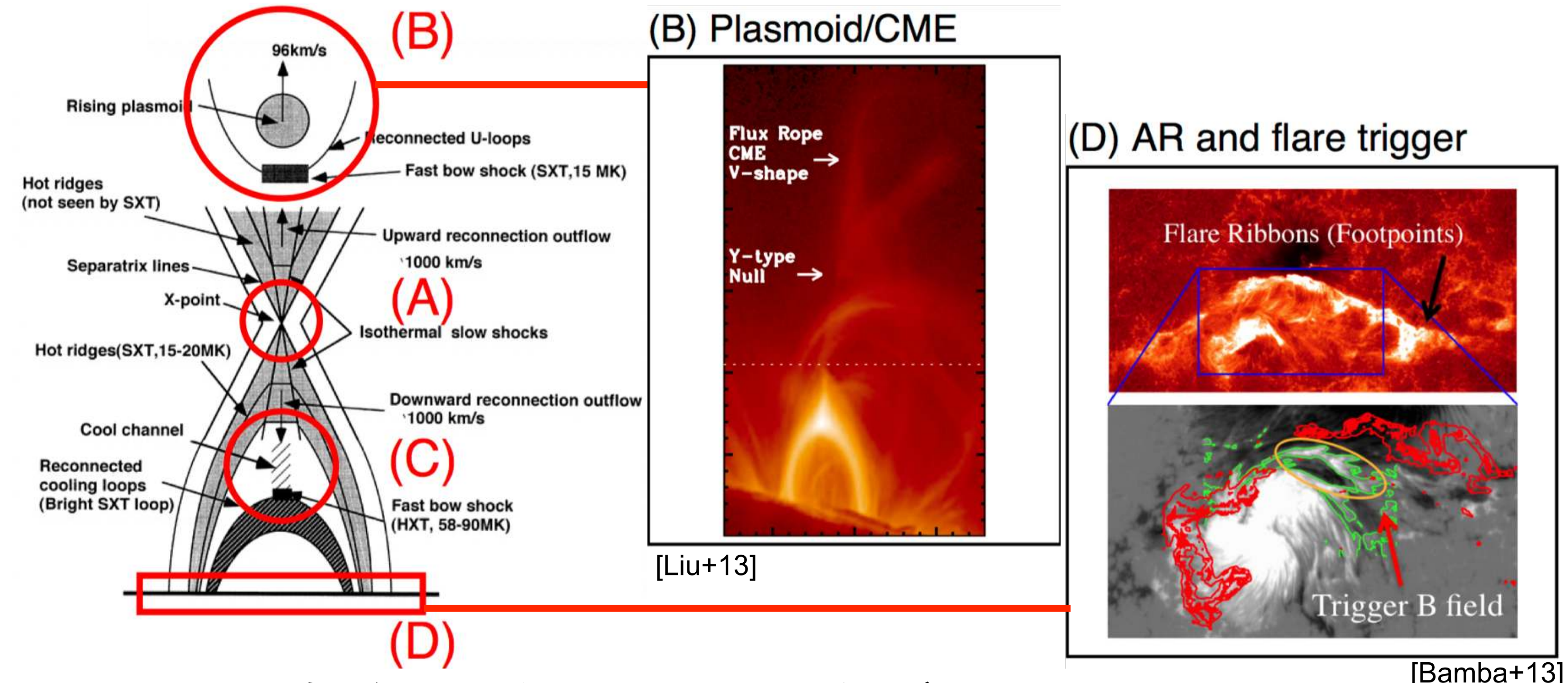
(A), (C) 磁気リコネクション機構の高速化の理解

(B), (D) フレアや噴出に至るエネルギー蓄積とトリガの理解



Scientific objectives of the mission

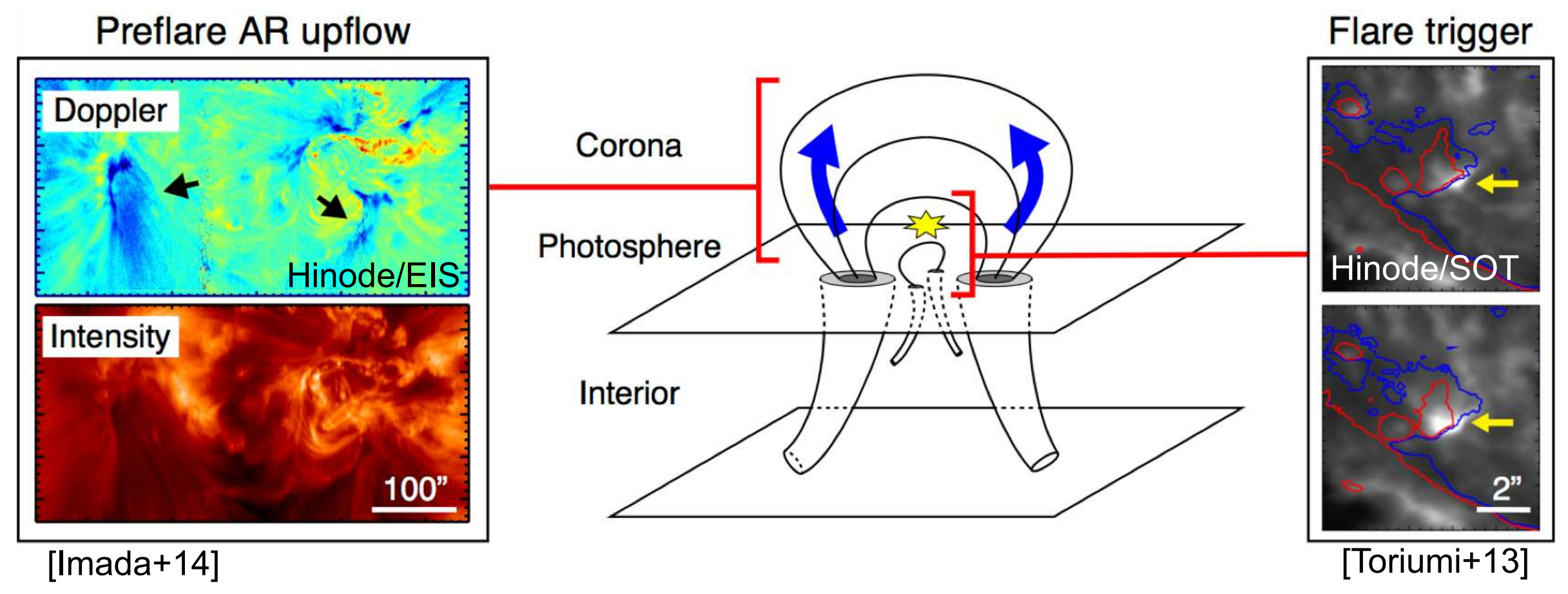
ミッションの科学目標



- ✓ 活動領域の長期的かつ大規模な進化をモニターし、**エネルギーの蓄積を示すものとして、非熱的な上昇流などの分光学的な特徴を同定**する
- ✓ 光球・下部彩層での観測と数値モデルの比較により、**フレア噴出のトリガとなる小規模磁気構造のダイナミクスを明らかにし、MHD(磁気流体力学)不安定モードの同定**を行う

II. 太陽大気が不安定化し、フレアやプラズマ噴出を引き起こす物理過程の解明

- (A), (C) 磁気リコネクション機構の高速化の理解
- (B), (D) フレアや噴出に至る**エネルギー蓄積とトリガ**の理解

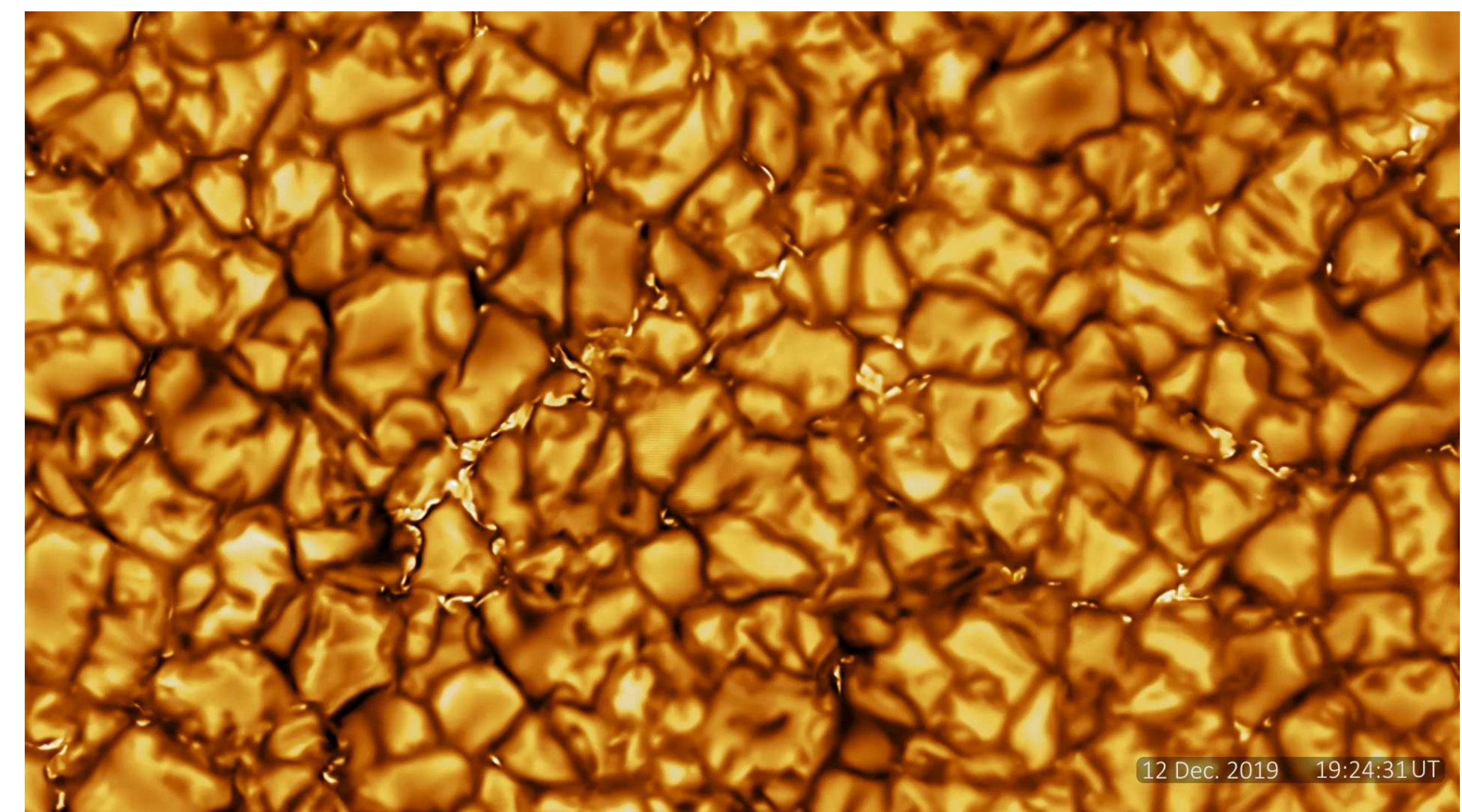
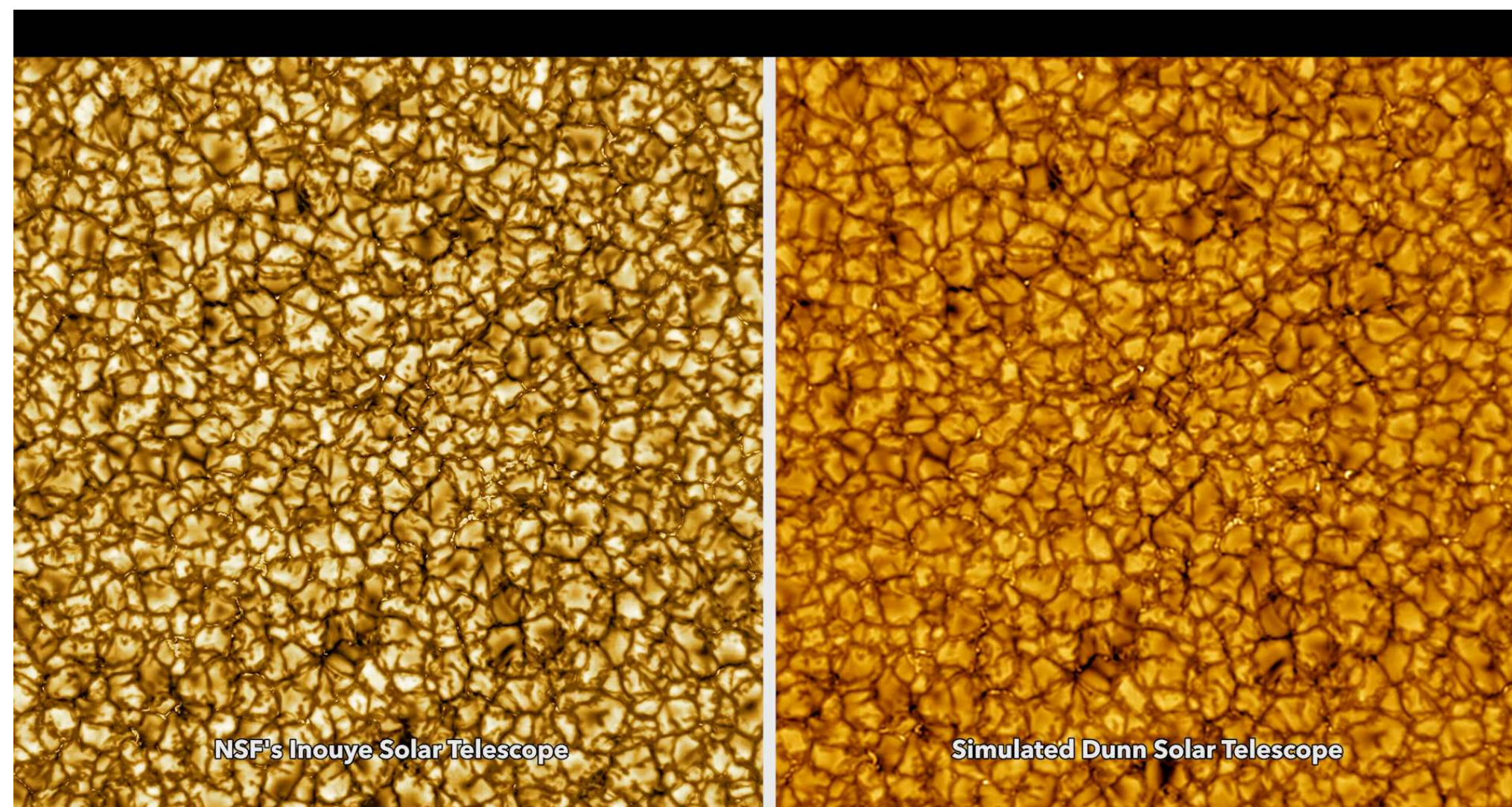


地上観測装置との連携観測

- 科学目標の実現に向けて、太陽大気の異なる層間の物理的なつながりを理解するには、地上観測機関等(DKIST、SST、GST等)と協調し、**光球・彩層の高解像度観測を行う必要がある(特に磁場情報)。**
- ✓ DKIST (Daniel K. Inouye Solar Telescope)
 - 史上最大の太陽望遠鏡 (口径4m), 2020-
 - Science Operations Commissioning Phase

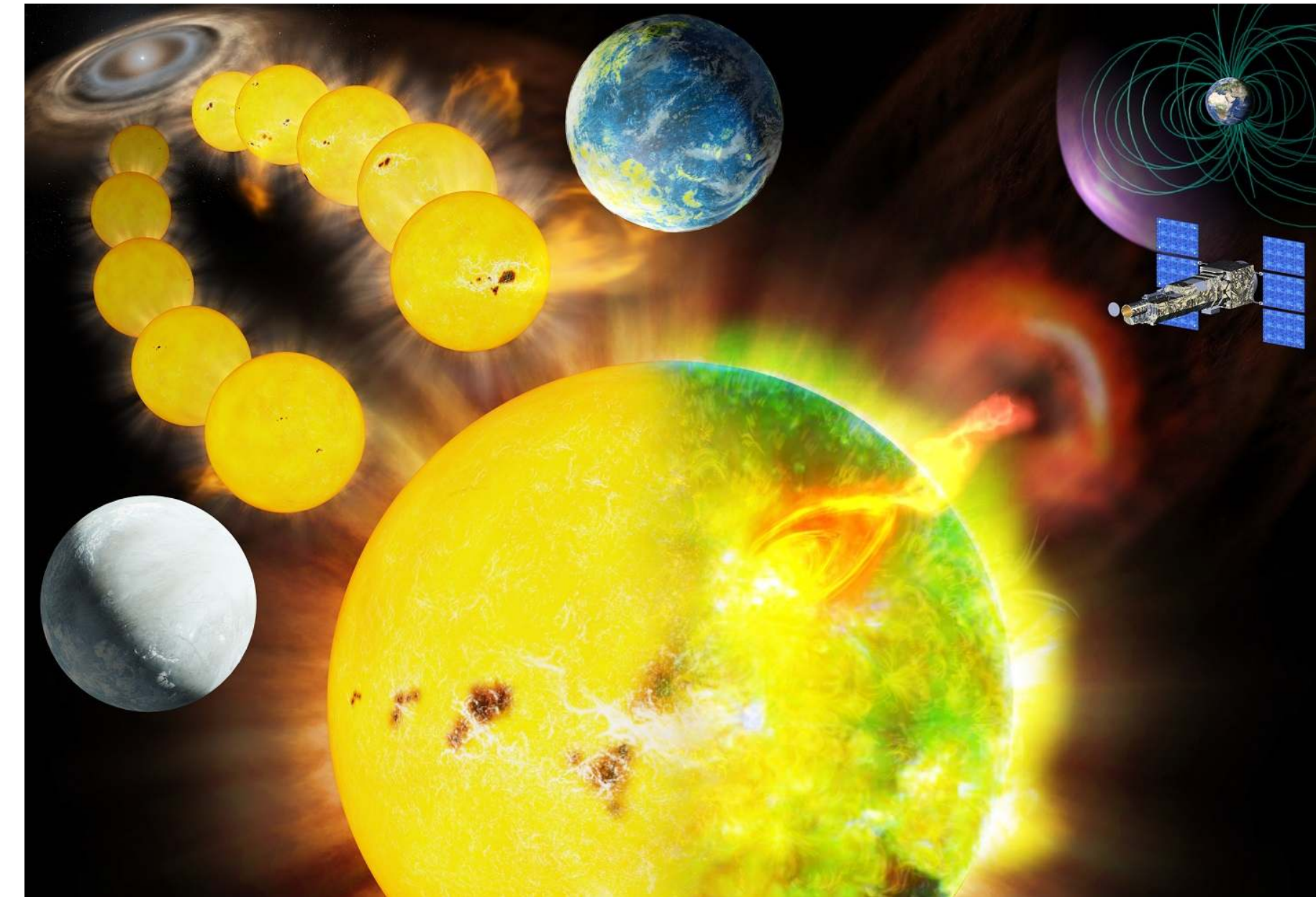


NSO/NSF/AURA



ミッションのアウトカム (波及効果)

- Solar-C (EUVST) の科学課題を推進することは、以下の理解につながる：
 - 太陽大気の形成を解明すること
 - 太陽とは別の環境にある**恒星の大気がどのように作られるか**を理解することにつながる
 - 太陽フレアの発生メカニズムを解明すること
 - 近い将来のフレア予報 (**宇宙天気予報**) につながる
 - 地球上で再現実験のできない太陽の諸現象を観測・解明すること
 - **プラズマ物理や原子物理**など基礎過程の理解や検証につながる
 - 現在の太陽コロナや太陽風、そしてフレア活動を理解すること
 - **生命が地球に誕生した当時の太陽地球環境**を知ること、
さらにはなぜ地球に生命が誕生したのかという謎の解明につながる
 - Solar-C (EUVST) の観測を行うこと
 - **小型衛星を活用した高空間分解能観測技術**の獲得・確立につながる



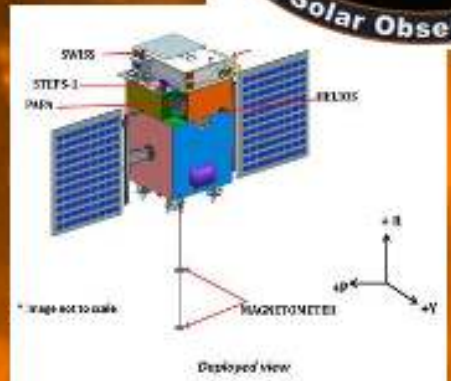
世界における位置付け

✓ Solar-C(EUVST)は、太陽表面の高解像度観測 (DKIST等)と内部太陽圏の探査観測 (Parker Solar Probe, Solar Orbiter, BepiColombo等)を物理的に結び付けることを可能にする分光診断を提供できる唯一のミッション

太陽全面観測



(2022打上予定, 中国)



(2022打上予定, インド)

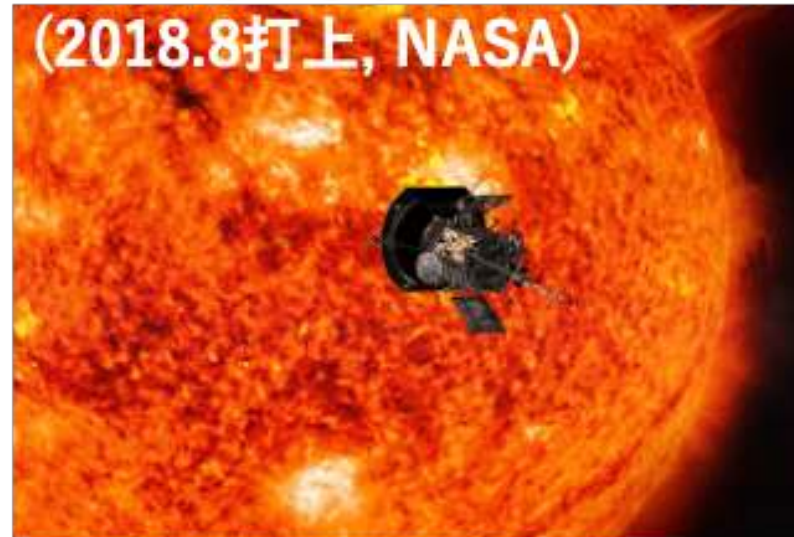
MUSE (2027~, NASA)
分光機能付
コロナ撮像観測

内部太陽圏の探査観測



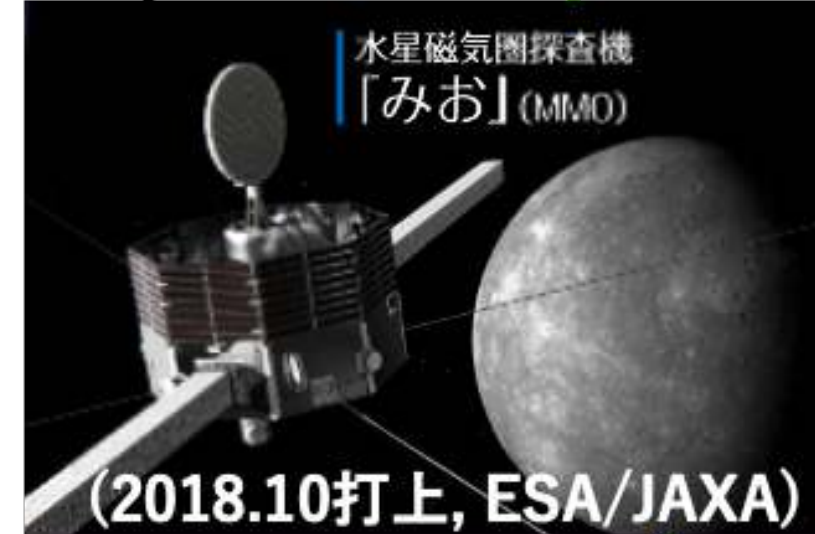
5太陽半径以遠の
コロナ偏光観測

Parker Solar Probe
(2018.8打上, NASA)



8.9Rs
(最接近観測 2025~)

BepiColombo/Mio (MMO)



(2018.10打上, ESA/JAXA)

65Rs-100Rs @水星軌道 (2025~)

“その場”観測

Solar Orbiter
(2020.2打上, ESA/NASA)



60Rs (最接近),
24度傾斜角位置 (2027~)

コロナ撮像・分光、表面磁場観測

(テレメ制限, 低時間分解能)

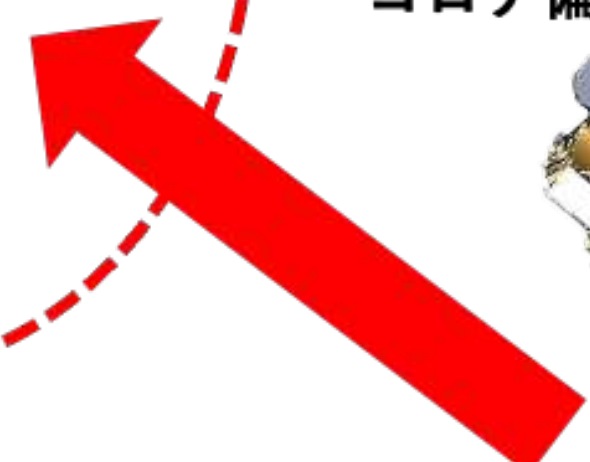
太陽表面磁場の 高解像度観測



DKIST
(2021-, NSF)

Solar-C (EUVST)
(2027~)

観測連携



Solar-C (EUVST) の最新状況

- 2020.04 公募型小型4号機としてミッション選定される
- 2022.07 ミッション定義審査(MDR) ← ミッション要求を確定
- 2022.09 プロジェクト準備審査 (予定)

	Pre-phase A2 ミッション定義 Mission Definition	Phase-A 概念設計 Concept Development		Phase B 計画決定 Project Formulation	Phase C 基本設計 Preliminary Design	Phase C 詳細設計 Final Design	Phase D 製作・試験 Production and Testing		Phase D 射場整備 Launch Operations	Phase E 初期運用 Initial Mission Operations	Phase E 定常運用 Nominal Mission Operations	Phase E 後期運用 Extended Mission Operations	Phase F ミッション終了 Mission End
JAXA経営審査 JAXA Management Review	プロジェクト 準備審査		RFP発出 前審査	提案結果 確認会	プロジェクト 移行審査							終了審査	
部門審査等 Division Review etc	プリプロ候補 ダウセレクション	ミッション定義 審査 MDR	システム要求 審査 SRR	システム定義 審査 SDR	基本設計審査 PDR (システム) (ミッショ (*))	詳細設計審査 CDR (システム) (ミッショ (*))	開発完了審査 PQR/PSR/MRR	打上げ準備 審査 LRR	定常運用 移行審査	定常運用 終了&後期 運用提案 審査	後期利用 運用終了 審査		
NASA審査 NASA Review				K/O	PDR	CDR	SIR PER PSR (TBD) EUVST 輸送前確認	LRR		Senior Review	DR (Decommissioning Review)		
ESA審査 ESA Review				K/O	PDR	CDR	Comp. PSR (TBD) EUVST 輸送前確認	LRR		MEOR (Mission extension operation review)	DR (Decommissioning Review)		

今は、MDR後、
プロジェクト準備
審査前という状況

2. Solar-C (EUVST) に向けた EUVスペクトル線仮想分光観測

鄭祥子¹, 横山央明², 鳥海森¹, 原弘久³, 今田晋亮^{4,5}, 大場崇義³

¹ISAS/JAXA, ²京都大学, ³国立天文台, ⁴名古屋大学, ⁵東京大学

Acknowledgement: Dr. Mark Cheung, Dr. Bart De Pontieu, Dr. Matthias Rempel

CHIANTI is a collaborative project involving George Mason University, the University of Michigan (USA), University of Cambridge (UK) and NASA Goddard Space Flight Center (USA).

本研究の目的

- 太陽極端紫外線分光観測衛星 Solar-C (EUVST)
 - ✓ → 高感度・高分解能
 - ➡ **Solar-C (EUVST) が観測から物理情報を引き出す能力の定量的検討**
- 現状：
 - 数値計算で得た3Dモデル大気に対して、Solar-C (EUVST) が観測する光学的に薄いスペクトル線を用いた**仮想分光観測**を実施（計算コードを整備）
 - **空間分解能**に依るモデル大気の見え方の違いを検証
 - 科学課題検討に向け、コロナループ頂上と足元に注目し、**観測と仮想観測を比較**

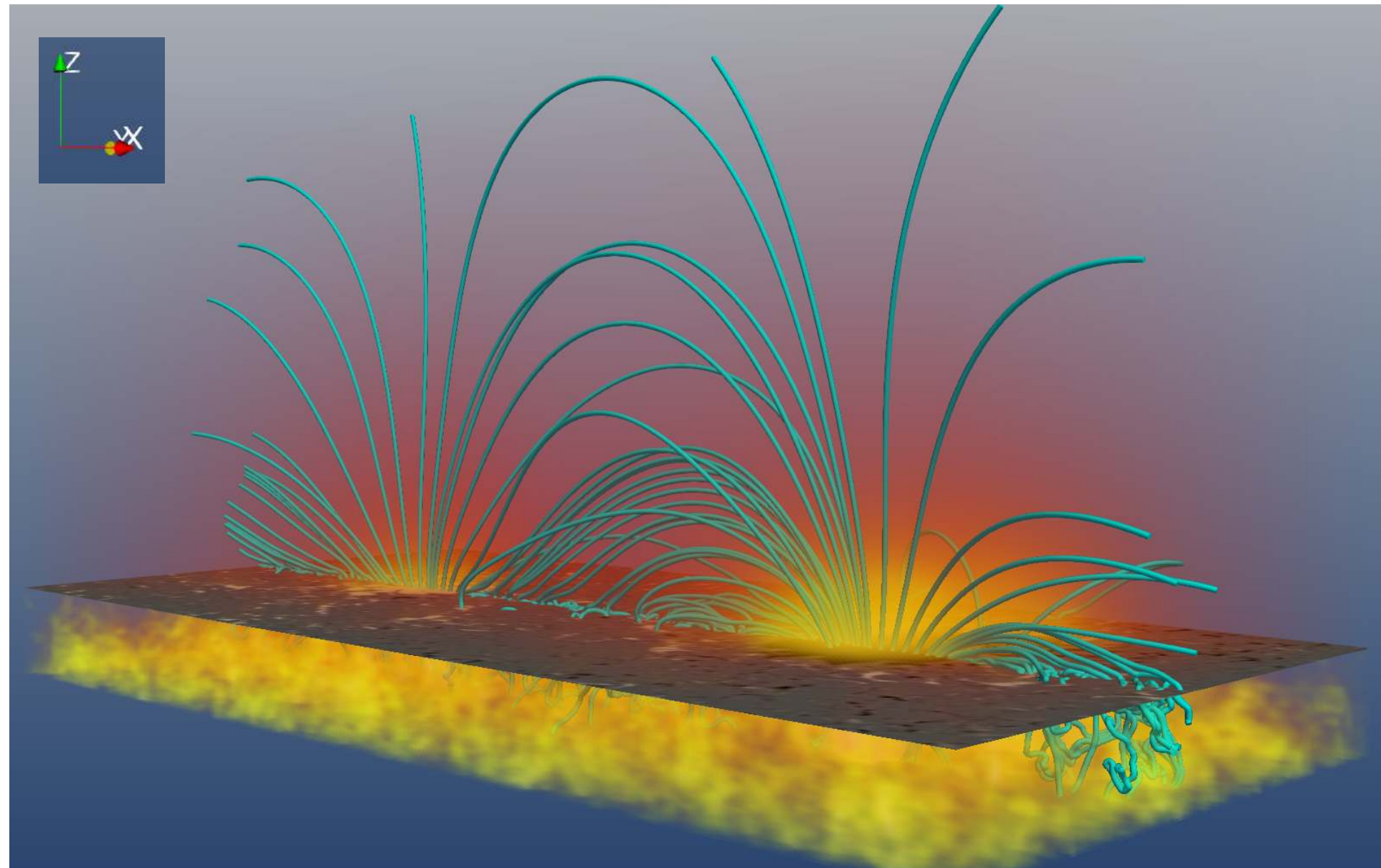
Solar-C (EUVST) の観測波長域にある主なスペクトル線

Ion	Wavelength [Å]	Log T [K]	Radiance [erg/s·cm ² ·sr]			Channel (order)
			QS	AR	Flare (GOES C1.1)	
H _I	1163.85	3.60	—	193 ^(a)	—	LW-3
Si II	1264.74 (2 lines)	4.20	149 ^(b)	480 ^(b)	>AR	LW-3
H I	1215.67	4.30	65000 ^(b)	220000 ^(b)	>AR	LW-3
H I	1025.72	4.30	793 ^(a)	6253 ^(b)	>AR	LW-2
H I	972.58	4.30	139 ^(a)	1452 ^(b)	>AR	LW-2
He I	584.34	4.30	580 ^(b)	5080 ^(b)	140000 ^(a)	LW-3 (2)
Si III	1206.502	4.50	695 ^(b)	3560 ^(b)	74000 ^(b)	LW-3
C II	1036.340	4.55	40 ^(a)	290 ^(b)	1690 ^(b)	LW-2
O II	718.506 (2 lines)	4.70	9.8 ^(a)	40 ^(a)	2229 ^(b)	LW-1
C III	977.020	4.80	804 ^(a)	3666 ^(b)	58700 ^(b)	LW-2
C III	1176.0 (6 lines)	4.80	221 ^(a)	823 ^(a)	21310 ^(b)	LW-3
O III	703.854	4.95	30 ^(b)	123 ^(a)	4380 ^(b)	LW-1
S IV	1072.974	5.00	5.5 ^(a)	26 ^(a)	434 ^(b)	LW-2
N IV	765.147	5.10	67 ^(a)	142 ^(a)	5750 ^(b)	LW-1
O IV	790.199 (2 lines)	5.15	83 ^(b)	184 ^(b)	8900 ^(b)	LW-1
S V	786.470	5.20	27 ^(a)	61 ^(a)	1760 ^(b)	LW-1
N V	1238.823	5.25	61 ^(b)	549 ^(b)	1130 ^(b)	LW-3
O V	629.732	5.40	335 ^(b)	1019 ^(b)	90900 ^(a)	LW-3 (2)
O VI	1031.914	5.50	328 ^(a)	2460 ^(b)	8110 ^(b)	LW-2
Ne VII	465.22	5.75	120 ^(b)	989 ^(b)	4760 ^(b)	LW-2 (2)
Ne VIII	770.428	5.85	54 ^(b)	600 ^(b)	3170 ^(b)	LW-1
Fe IX	171.073	5.90	892 ^(a)	8400 ^(a)	30600 ^(b)	SW
Fe X	174.531	6.05	406 ^(a)	5320 ^(a)	16300 ^(b)	SW
Mg X	624.962	6.05	51 ^(a)	398 ^(b)	4190 ^(b)	LW-3 (2)
Fe XI	180.408	6.15	251 ^(a)	4380 ^(a)	13300 ^(b)	SW
Fe XII	195.119	6.20	174 ^(a)	3890 ^(a)	12300 ^(b)	SW
Fe XII	1241.950	6.20	3.7 ^(a)	79 ^(a)	247 ^(b)	LW-3
Fe XIII	202.044	6.25	41 ^(a)	1248 ^(a)	3960 ^(b)	SW
Si XII	520.666	6.25	22 ^(a)	1130 ^(a)	6790 ^(b)	LW-2 (2)
Fe XIV	211.317	6.30	73 ^(a)	1720 ^(a)	10500 ^(b)	SW
Ca XIV	193.974	6.55	—	312 ^(a)	766 ^(b)	SW
Ca XIV	943.587	6.55	—	7.3 ^(a)	18 ^(b)	LW-2
Ca XV	200.972	6.65	—	239 ^(a)	751 ^(b)	SW
Ca XVI	208.604	6.70	—	122 ^(a)	946 ^(b)	SW
Ca XVII	192.858	6.75	—	147 ^(a)	3780 ^(b)	SW
Fe XVIII	974.860	6.80	—	88 ^(a)	2500 ^(b)	LW-2
Fe XIX	592.236	7.00	—	9.3 ^(a)	1530 ^(b)	LW-3 (2)
Fe XIX	1118.07	7.00	—	8.6 ^(a)	1500 ^(b)	LW-3
Fe XX	721.559	7.05	—	—	1580 ^(b)	LW-1
Fe XXI	786.162	7.10	—	—	178 ^(b)	LW-1
Fe XXII	845.57	7.10	—	—	2180 ^(b)	LW-1
Fe XXIII	1079.414	7.15	—	—	205 ^(b)	LW-2
Fe XXIV	192.03	7.20	—	—	18100 ^(b)	SW

コロナループ

3次元モデル大気

Cheung & Rempel et al. 2019, NatAs, 3, 160;
Cheung et al. 2019, ApJ, 882, 13;
De Pontieu et al; 2020, ApJ, 888, 3



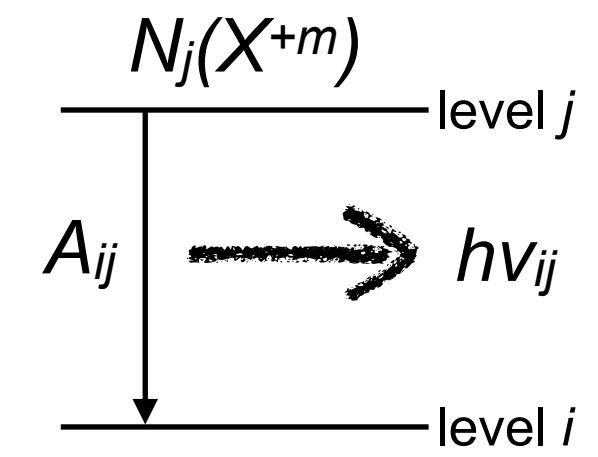
- ✓ 輻射電磁流体コード **MURaM**
Vögler + 2005; Rempel 2017
 - 太陽内部の磁気対流、光球の3次元輻射輸送
 - コロナへの拡張 → 光学的に薄い放射損失、磁場に沿った熱伝導
- ✓ **双極子黒点の一方への磁気浮上** → フレア
- ✓ 本研究では公開データの最初のスナップショット (#02700000) を使用 → フレア前
- ✓ **仮想観測では温度 T , 密度 ρ , 視線速度 v_{LOS} を入力**

- グリッドサイズ: **192 km** (水平), **64 km** (垂直)
 - グリッド数: **512 × 256** (水平) × **768** (垂直)
 - 計算領域サイズ: **100 Mm × 50 Mm** (水平) × **50 Mm** (垂直)
- 対流層 7.5Mm + 上空大気

EIS 空間分解能: ~ 2" (1500 km)
EUVST 空間分解能: ~ 0.4" (300 km)

仮想分光観測

CHIANTI ver. 8.0.2 (Dere + 1997; Del Zanna + 2015)



- ✓ スペクトル線が**光学的に薄い**ことを仮定
- ✓ モデル大気に対する**視線方向**を与え、**温度, 密度, 視線速度 (T, ρ, v_{LOS})**を入力

イオン X^{+m} のレベル j の数密度 [cm^{-3}]

$$N_j(X^{+m}) = \frac{N_j(X^{+m})}{N(X^{+m})} \frac{N(X^{+m})}{N(X)} \frac{N(X)}{N(H)} \frac{N(H)}{N_e} N_e$$

$$= 0.83 \text{ Ab}(X) n_j(\mathbf{x}) F(T(\mathbf{x})) N_e(\mathbf{x})$$

“H”-“e” number density ratio abundance relative population ionization fraction electron number density

$N_e = \frac{1}{\mu_a m_0} \rho$
 中性ガスの平均分子量 原子質量単位

放射強度 [$\text{erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}^{-1}$]

$$I_{ij}(\Delta\lambda) = \int_{LOS} \frac{h\nu_{ij}}{4\pi} N_j(X^{+m}) A_{ij} f(\Delta\lambda, T(\mathbf{x}), v_{LOS}(\mathbf{x})) dh$$

変数を $\Delta\lambda$ としてドップラーシフト マクスウェル分布

$$f(v_x) = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \exp\left(-\frac{mv_x^2}{2kT}\right)$$

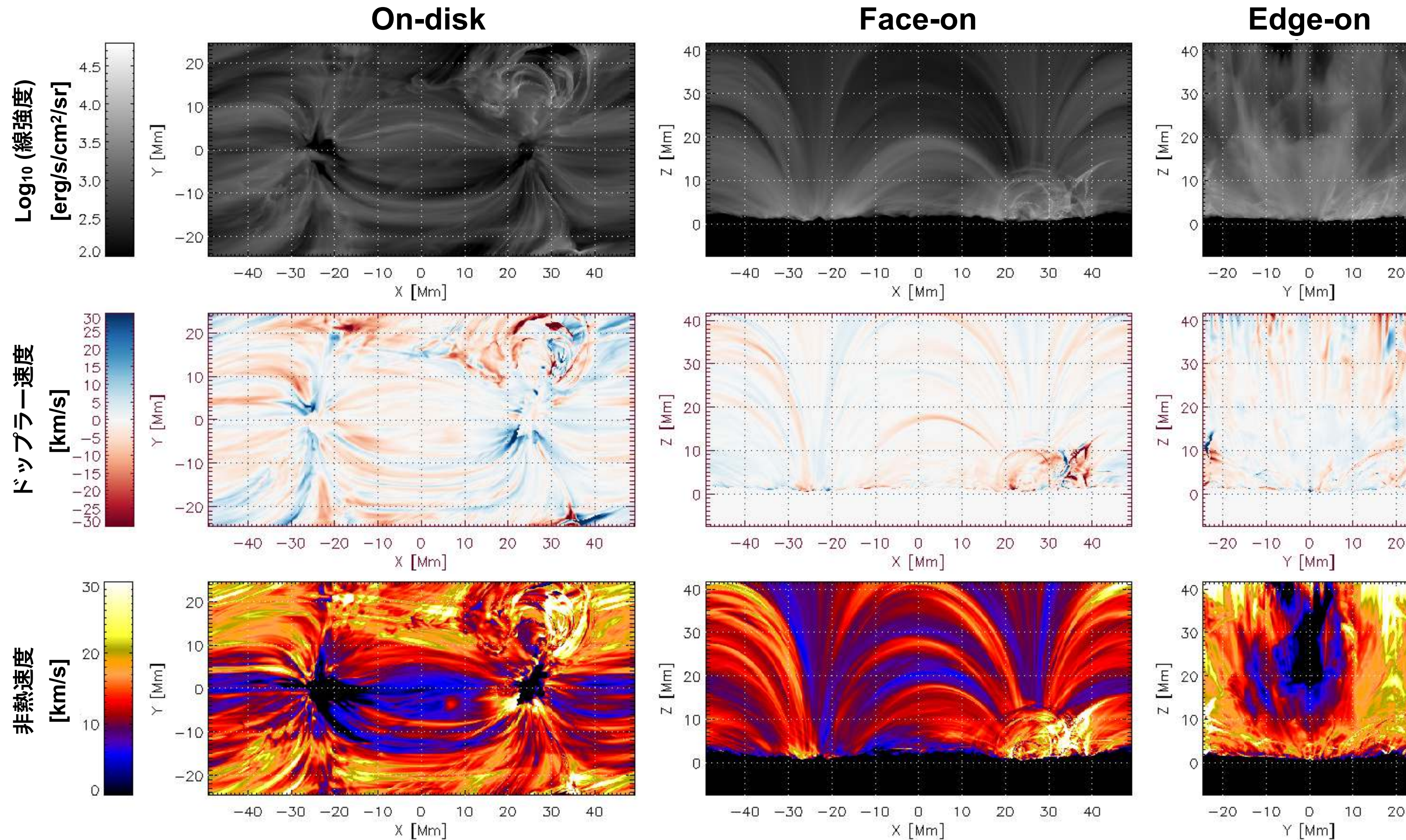
G(T, N_e) 関数 (g_of_t.pro w/ options)

$$= \int_{LOS} \frac{1}{4\pi} \left\{ \underbrace{0.83 \text{ Ab}(X) h\nu_{ij} A_{ij}}_{\text{定数}} \underbrace{n_j(\mathbf{x}) F(T(\mathbf{x})) \frac{1}{N_e(\mathbf{x})}}_{T \text{ と } N_e \text{ の関数}} \right\} N_e(\mathbf{x})^2 \times f(\Delta\lambda, T(\mathbf{x}), v_{LOS}(\mathbf{x})) dh$$

モデル大気の仮想分光観測

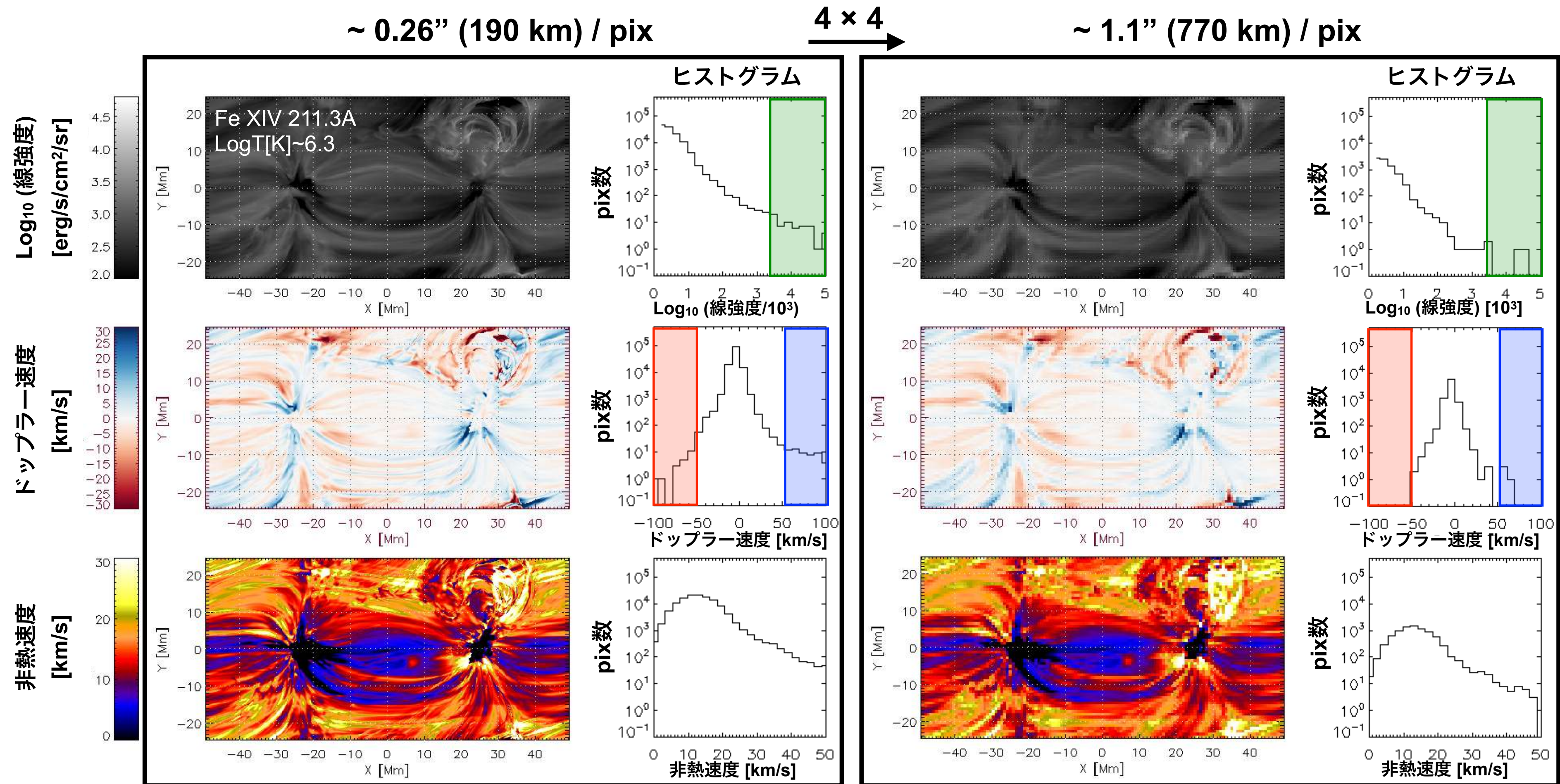
@ Fe XIV 211.3Å (Log T [K] ~ 6.3)

→ Single Gaussian Fitting → ドップラー速度・非熱速度



EIS 空間分解能: $\sim 2''$ (1500 km)
 EUVST 空間分解能: $\sim 0.4''$ (300 km)

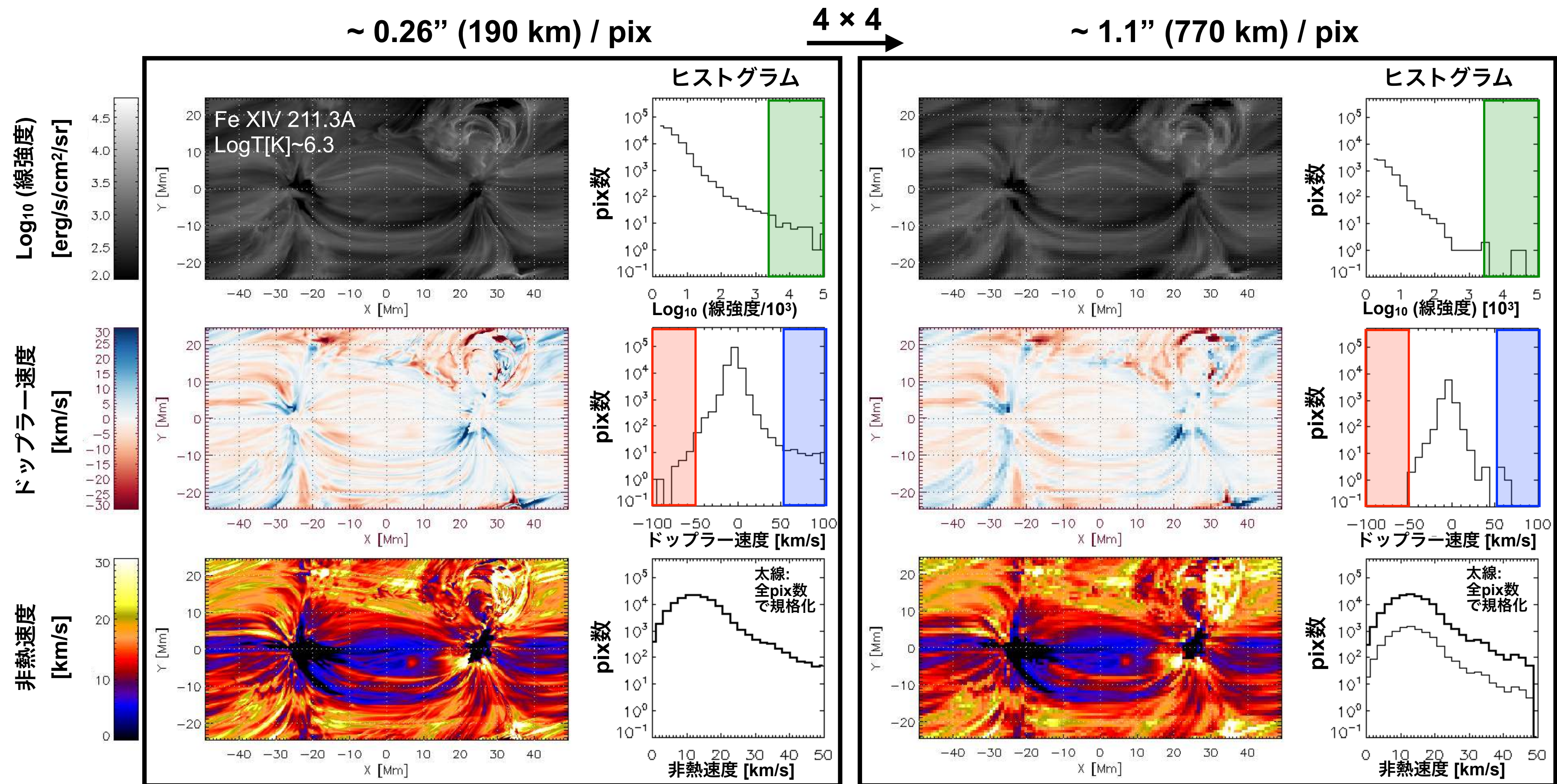
空間分解能の影響



従来の空間分解能(e.g. EIS $\sim 2''$ (1500 km))では解像できない微小スケールの高速成分 (> 50 km/s) が検出可
 \rightarrow ナノフレア・彩層蒸発・プラズモイドなど、高速成分を伴う微小な活動現象について、
 定量的なエネルギーの見積もり精度向上に寄与

EIS 空間分解能: $\sim 2''$ (1500 km)
 EUVST 空間分解能: $\sim 0.4''$ (300 km)

空間分解能の影響

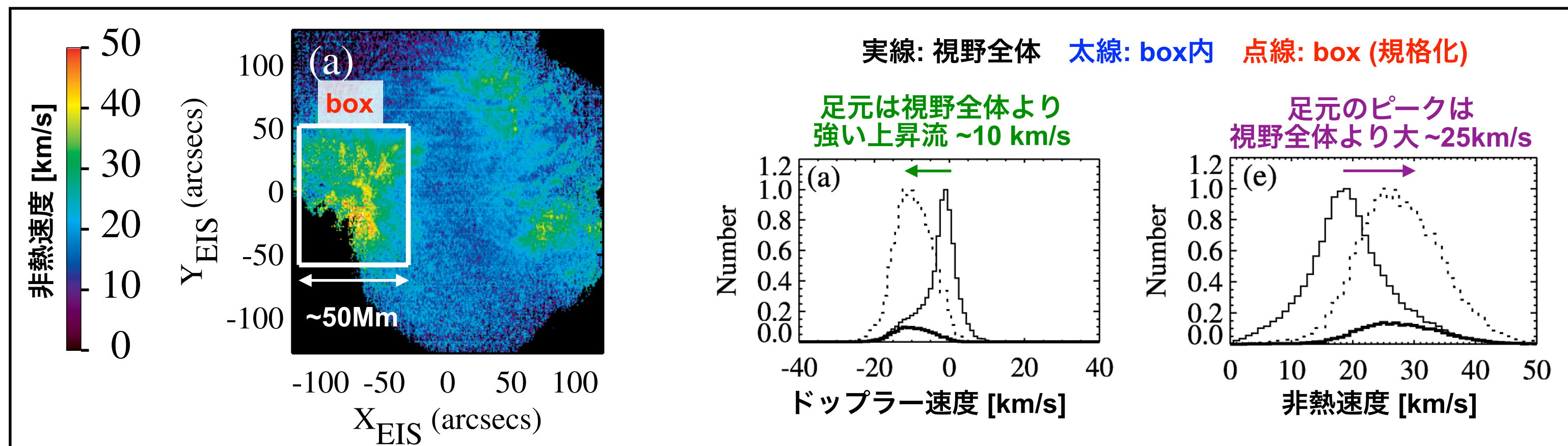


非熱速度の分布は分解能を上げてても大きくは変わらない
 → 視線方向の非一様性の影響と考えられる (De Pontieu et al. 2015)

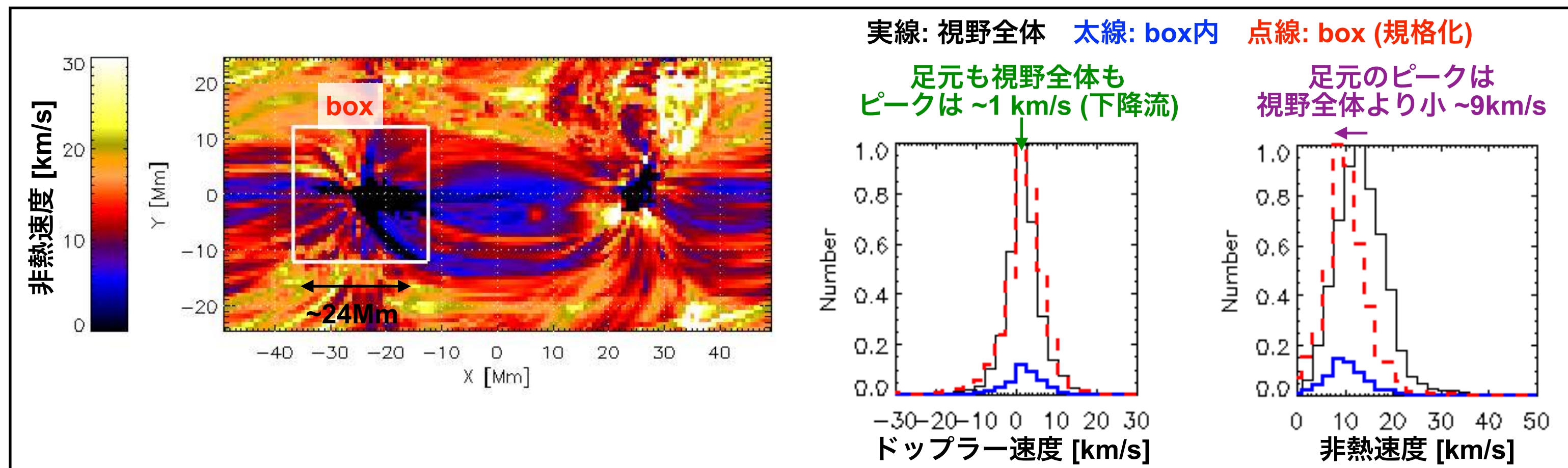
観測と仮想観測の比較:

コロナループ足元のドップラー速度と非熱速度 @ディスク

観測 in Fe XIV 274Å (EIS, Hara + 2008)



仮想観測 in Fe XIV 211.3Å

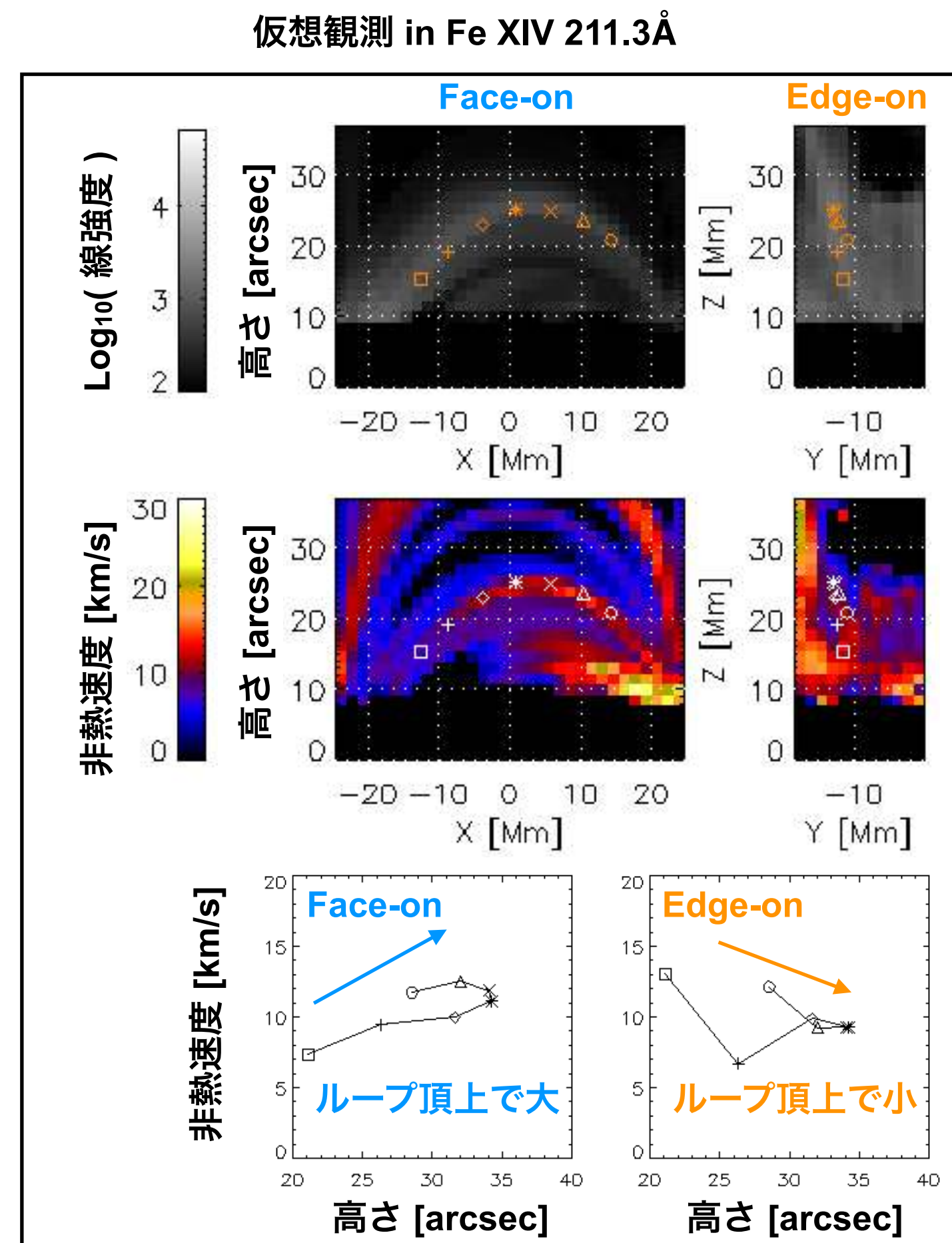
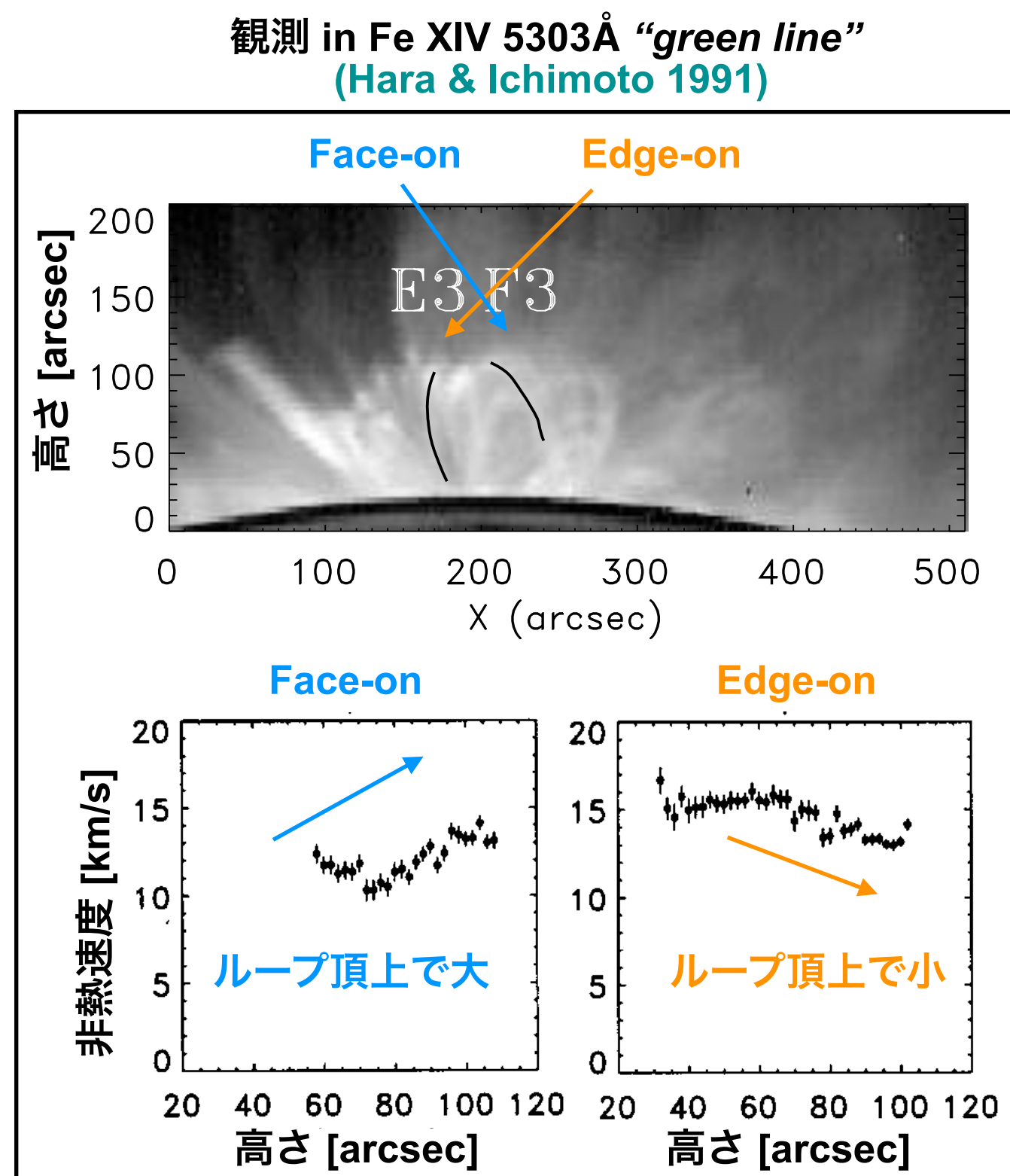


ループ足元は、観測：強い上昇流 (~10 km/s)、非熱速度 大 (~25 km/s)

仮想観測：弱い下降流 (~1 km/s)、非熱速度 小 (~9 km/s)

この違いは何に起因するか？ → フレアのないモデル大気仮想観測でさらに解析中

観測と仮想観測の比較: コロナループ頂上の非熱速度



観測でも仮想観測でも、Face-on / Edge-on ループ頂上で非熱速度 大 / 小
 非熱速度の起源は何か？(ループに沿ったアルヴェン波？)
 → フレアのないモデル大気仮想観測でさらに解析中

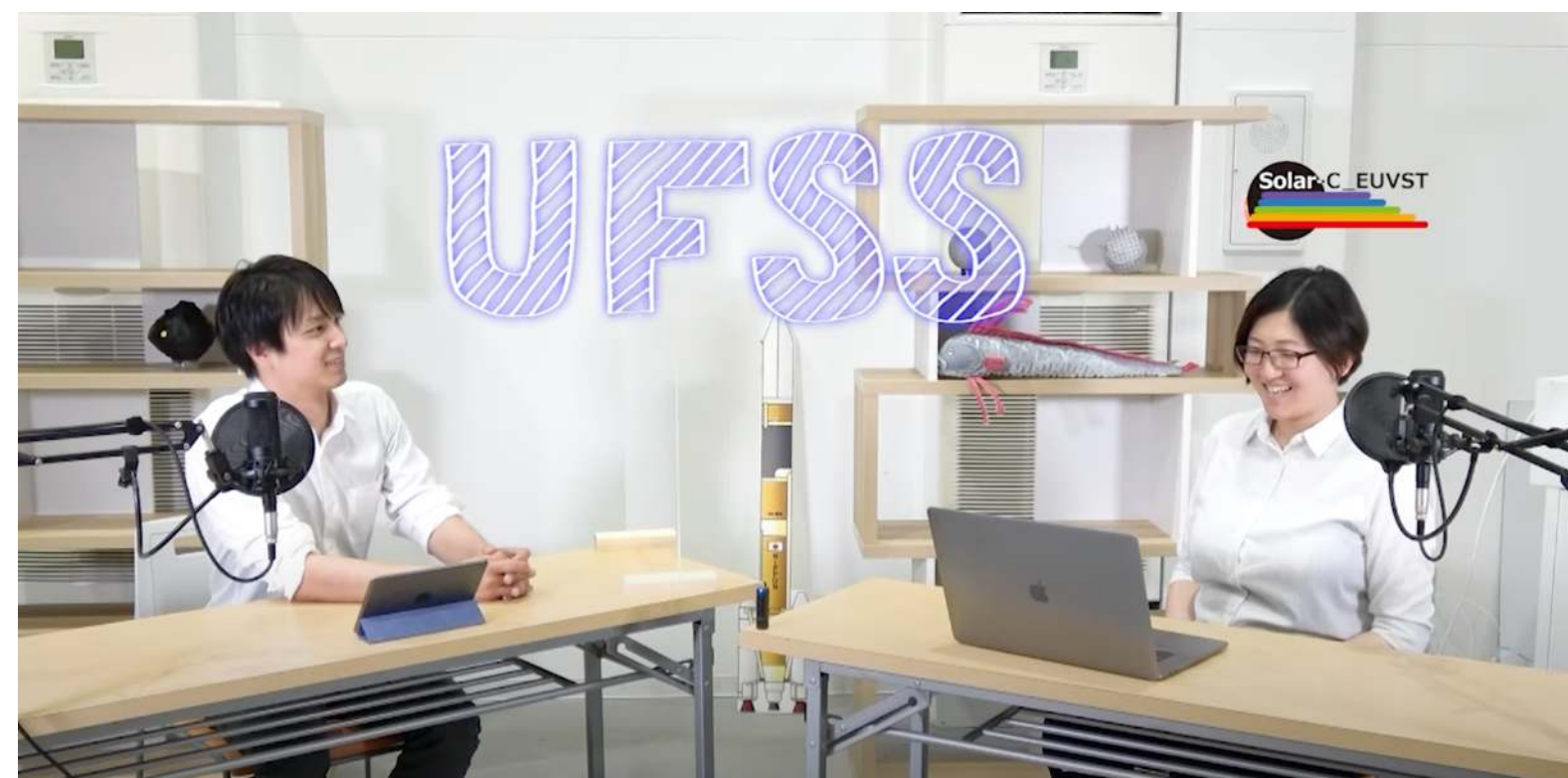


Solar-C (EUVST) に向けた EUVスペクトル線仮想分光観測 現状まとめ

- 目的：EUVSTが観測から物理情報を引き出す能力の定量的検討
- 手法：3Dモデル大気 (MURaM) に対して、輻射輸送計算 (光学的に薄い, CHIANTI) を実施
- ✓ 従来の空間分解能では解像できない微小スケールの高速成分 ($> 50 \text{ km/s}$) が EUVST 分解能で検出可
 - ➡ 高速成分を伴う微細な活動現象について、定量的なエネルギーの見積もり精度向上に寄与
- ✓ 非熱速度の分布は分解能を上げて大きくは変わらない → 視線方向の非一様性の影響か
- ✓ 科学課題検討に向けた取組み
 - コロナループの足元や頂上領域のドップラー速度・非熱速度について、過去の観測と同様に解析して比較
 - フレアのないモデル大気仮想観測でさらに解析中
- ▶ 興味のある方はお声がけください！

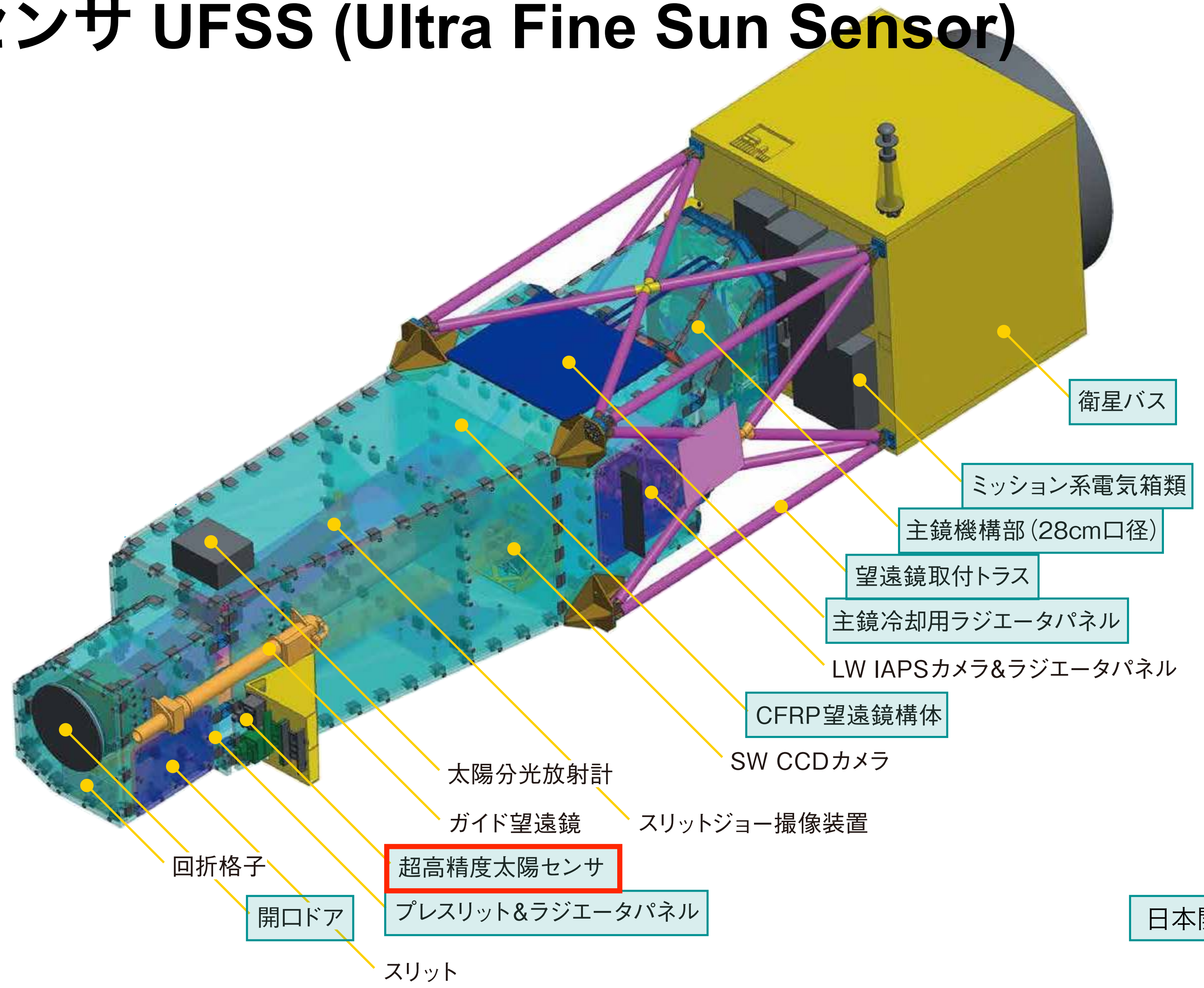
3. Solar-C (EUVST) に搭載する 超高精度姿勢センサ UFSS の開発

で垣間見る、話者のプロジェクトへの携わり方



Solar-C (EUVST) オンラインリレートーク第5回
鳥海さん(ISAS/JAXA)とUFSSについて対談する様子
<https://www.youtube.com/watch?v=K6Ju5YchAHU>

超高精度姿勢センサ UFSS (Ultra Fine Sun Sensor)



日本開発部分

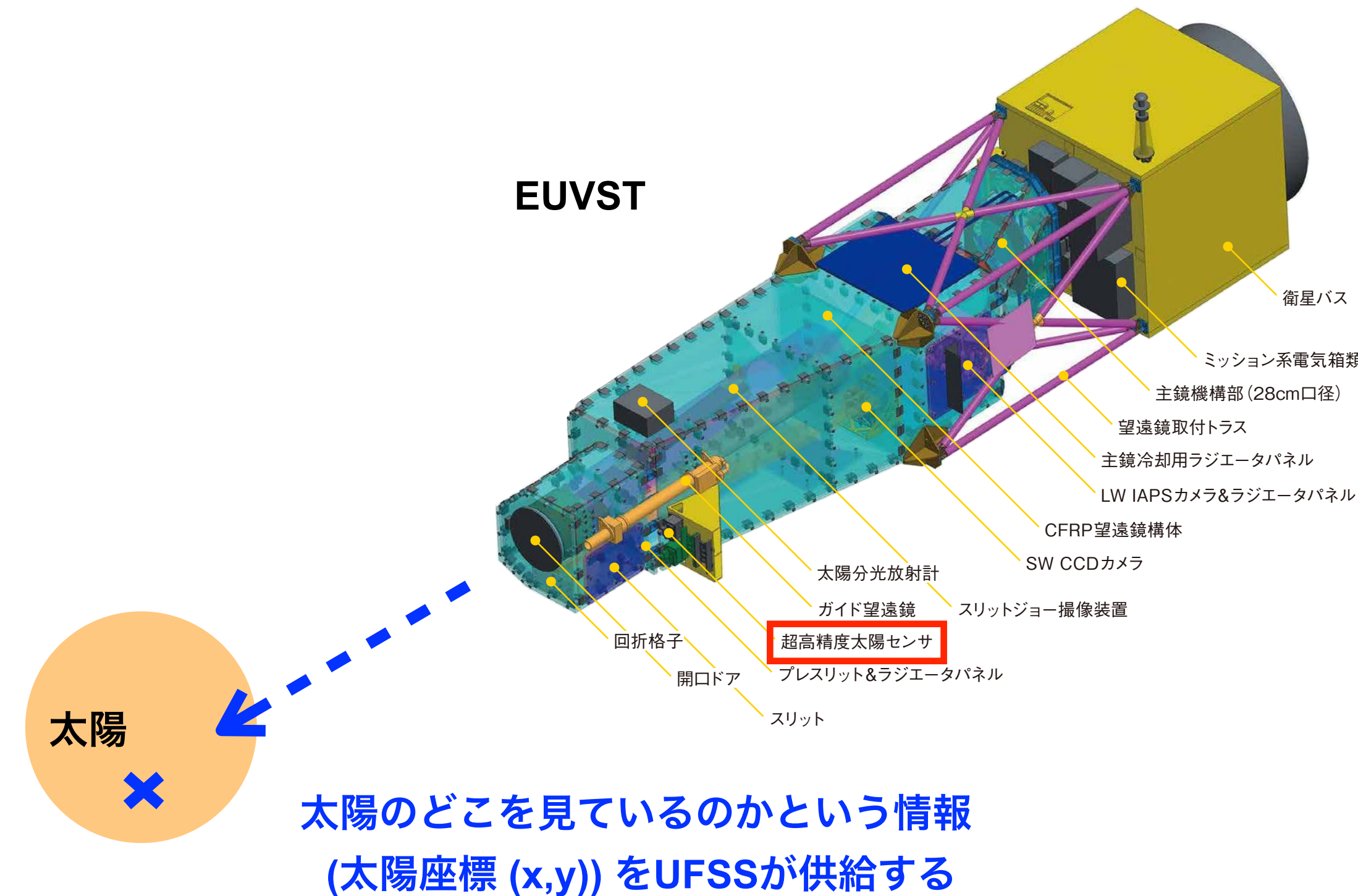
超高精度姿勢センサ UFSS (Ultra Fine Sun Sensor)

太陽の方向 (角度) を高精度で検知する2次元検出器

✓ 次期太陽観測衛星 Solar-C (EUVST)

解像度~0.4"

- ➡ これまでにない高感度・高分解能の太陽紫外線分光観測
- ➡ 衛星姿勢制御の高精度指向安定 (サブ秒角) が必須
- ➡ これに十分な精度で太陽指向角度を検出する太陽センサ UFSS がキー技術
- 軌道上で15年以上稼働する「ひので」搭載のUFSSとほぼ同じ設計であるが、別メーカーによる開発。
- 高精度太陽シミュレータ+2軸ジンバル試験装置 (ISAS C棟)等を用いて、BBM品のランダム誤差・バイアス誤差の性能把握をISASにて行い、その結果を開発企業にフィードバックすることで性能向上を行ってきた。

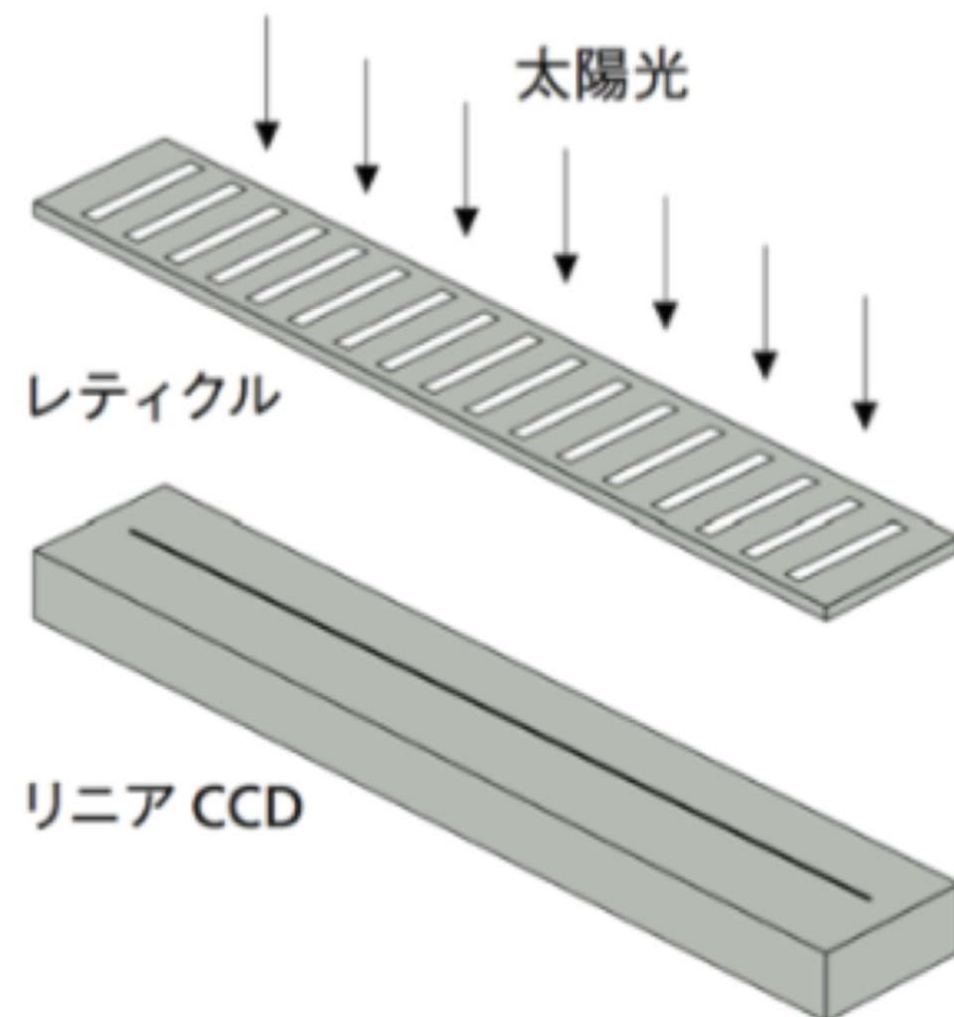


UFSS の原理

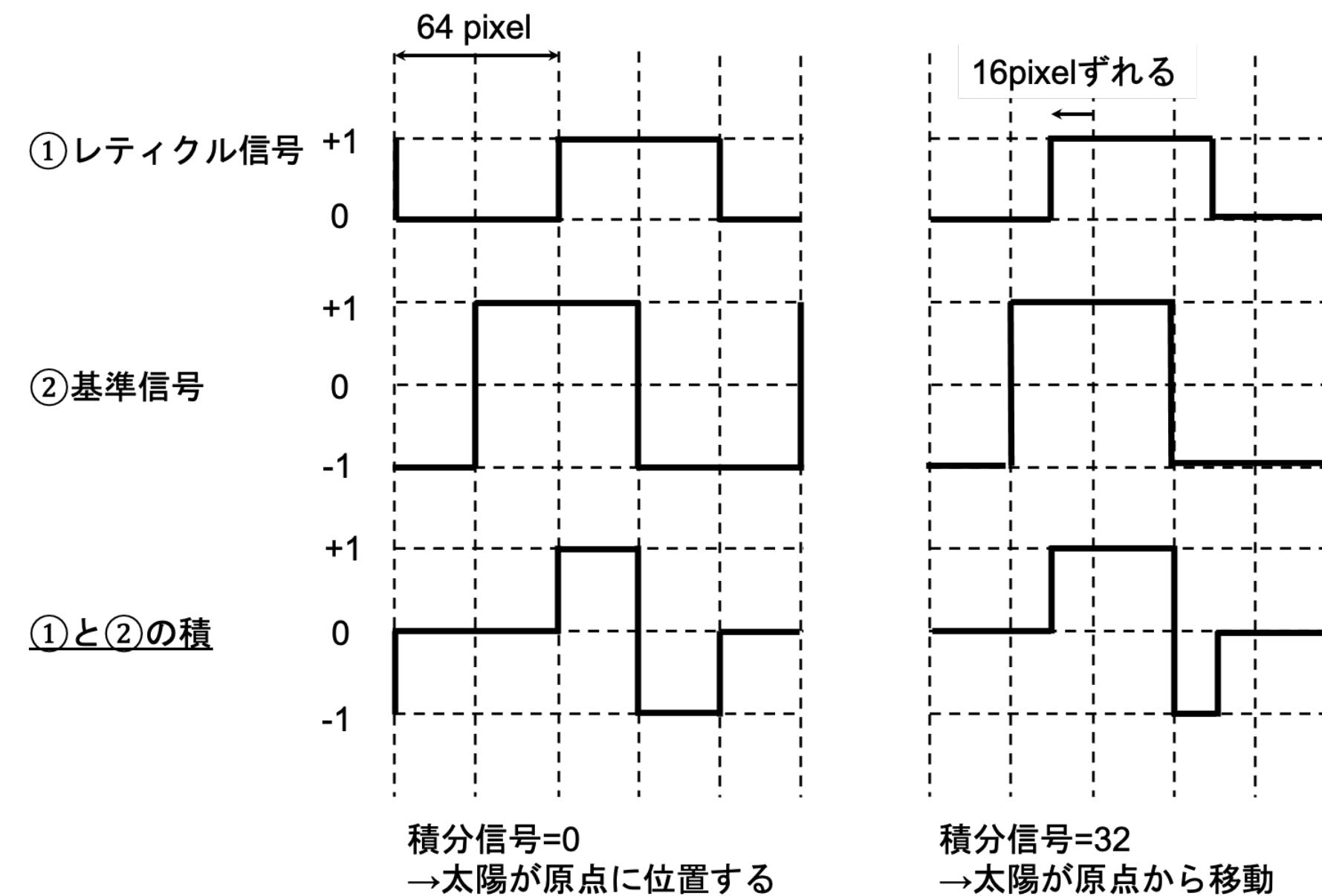
① 1次元センサの基本原則：

詳細は [Tsuno et al. 2019, SPIE, 11180E, 40](#) を参照

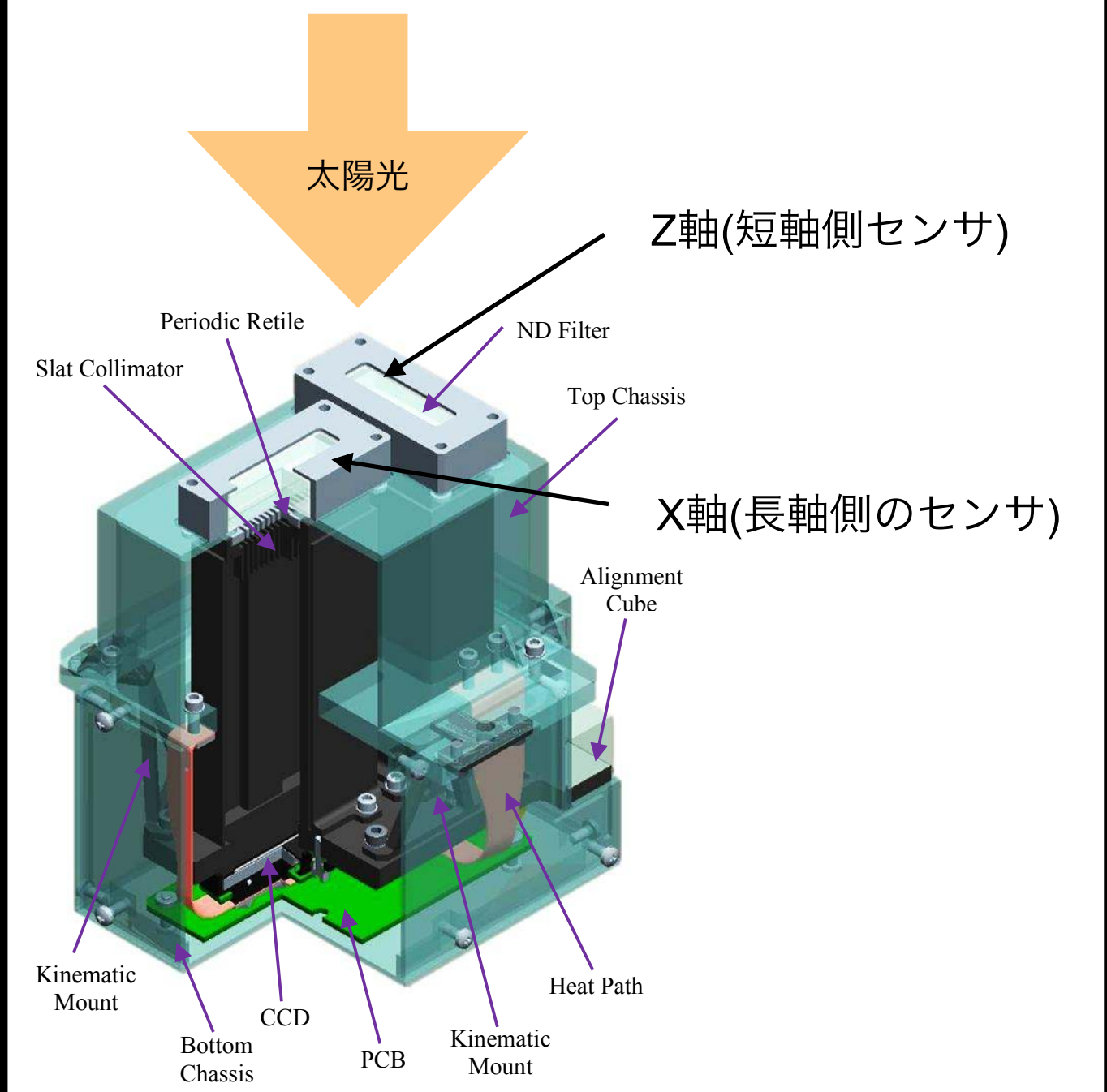
(i) レティクルが生み出す太陽光の明暗模様をリニア CCD で検出



(ii) レティクル信号と基準信号が一定の位相差になるように基準信号の位相を調整することで太陽角度を導出



② 2つの1次元センサを直交に配置して太陽方向を検出



③ UFSS を衛星に搭載し、検出した太陽角度を衛星の姿勢制御系に入力することで指向安定を図ることができる

UFSSの開発における活動内容

- 試作品(BBM)の性能評価活動（ランダム誤差・バイアス誤差・測定系評価）
 - 評価・検証方法の考案
 - クリーンルームでの測定実験
 - 実験データの解析・報告書作成
- メーカーとの各種調整の窓口、会合の設定・司会・リード
- Solar-Cチーム全体会合(毎週1回)にて進捗状況を共有
- 装置開発経験ほぼなしでポストドクになり、UFSS開発に関わり始めた。
- 最初は本当に何も分からないところからスタート。。
 - ネジの締め方？ 電子回路？ オシロスコープってどう使うん？ etc...
- やりながら勉強したり教えてもらいうちに少しずつ分かる/できるようになってきた(が、まだ道のりは長い)。
- 答えのないこと対して、工夫して答えを得る点では科学研究と似ているのかもしれない。

これから次期衛星プロジェクトへ携わる 大学院生に向けての意見いろいろ

- 注：以下は全て私の個人的意見です。
- 私は、ポスドクになってから衛星開発に関わり始めました。
- とても楽しく、とても難しく、とても奥が深いです。
- 人との関わり合いが多いです。(なんでもそうですが、)
- 1+1=2のような感覚で積み重ねていくことが好きは人はハマるかもしれません。
- 今の時代、大きな衛星はしょっちゅうは打ち上がりません。
- 今の大学院生は(学年にもよるが)、開発・打上・運用というさまざまなフェーズを見ることができる世代なのでは。

若手としての次期衛星プロジェクトへの携わり方

- 注：以下は全て私の個人的意見です。
- Solar-C (EUVST) にご興味を持っていただけたなら、どのような形にせよぜひ一緒に活動できればと思います。
- 関わり方はおそらく様々あり、Solar-C自体の開発やSolar-Cを用いた観測研究だけでなく、数値計算・仮想観測・他の観測装置との連携など、ほぼ全ての研究手法によりSolar-Cに関連した研究が可能です。
- 紹介した科学目標にない面白い/新しい研究ももちろん大ありです。
- Solar-C (EUVST) をうまく使って、楽しい研究ライフを。
- Solar-C (EUVST) についてもっと知りたい・議論したい・関わりたい等という方は気軽にご連絡ください。(→ Slack)



SOLAR-Cプリプロジェクト候補チーム長 清水敏文先生(ISAS/JAXA)から 学生のみなさんへのメッセージ

宇宙科学・探査は、宇宙に飛び出して観測等の研究を行うことにより、世界の先端で研究活動が発展できます。一方、そのような頻度は多くないです。現在プロジェクトとして進捗を始めたSOLAR-C(EUVST)には、そのチャンスがあります。どんな形でも良いので関わることは、皆さんの考えるサイエンスを発展させる有用な機会となると思います。是非興味のある方は、積極的に関係する先生や先輩に相談して見てください。