

次期太陽観測衛星 Solar-C (EUVST)

原 弘久

国立天文台

SOLAR-Cプロジェクト・教授

太陽研究最前線体験ツアー2022

2022年3月17日

講義で使われる言葉

- 太陽大気の構造

- 光球、彩層、コロナ、流出するコロナとしての太陽風
- 粒状斑 …… 光球面の対流現象
- スピキュール …… 彩層を構成するジェット状構造
- コロナループ …… コロナを構成するアーチ構造

- 突発現象

- フレア、コロナ質量放出 (CME)

- 観測装置

- 秒角 …… 角度の単位で、1秒角は $1/3600$ 度
- erg …… $10^7 \text{ erg} = 1 \text{ J}$

コロナ・太陽風・フレア

コロナ

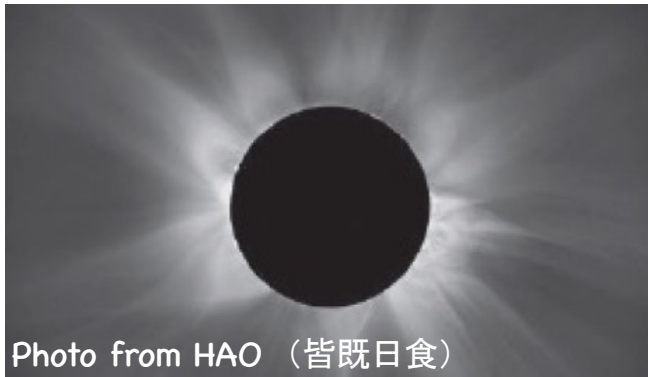
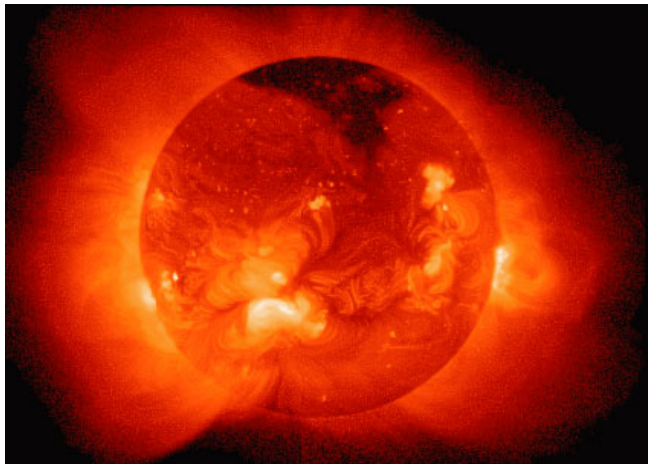


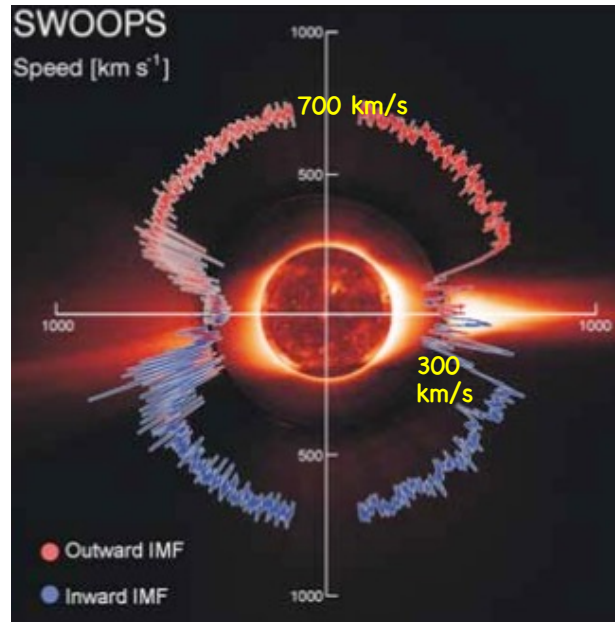
Photo from HAO (皆既日食)

可視光画像



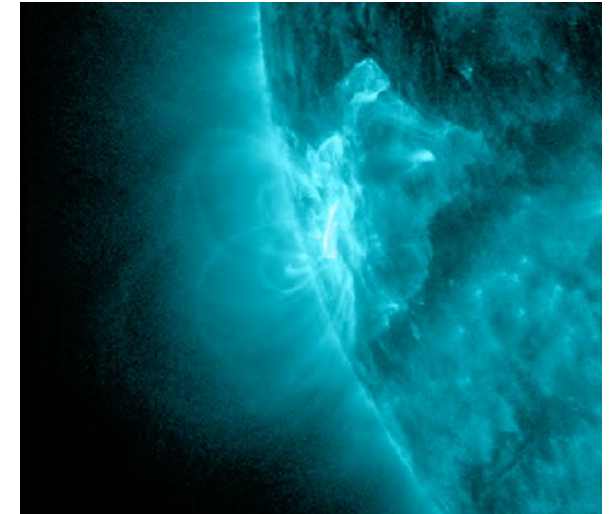
X線画像

太陽風



動径方向に流れ出す太陽風の速度を遠方の探査機で測定し、その速度を太陽中心からの距離で示した図。黒点数が少ない時期は、極領域が速く(高速風)、赤道域が遅い(低速風)。

太陽フレア



極端紫外線画像

数十分から数時間継続する磁気エネルギー解放現象

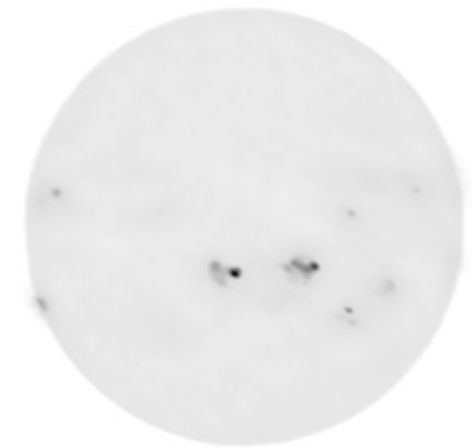
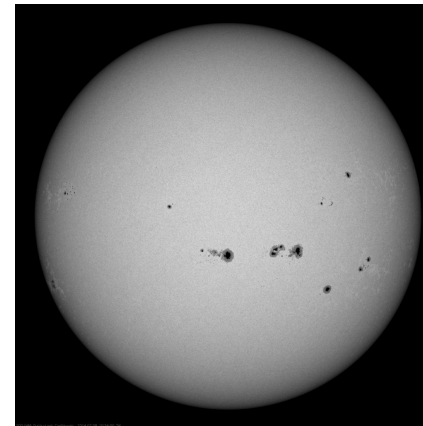
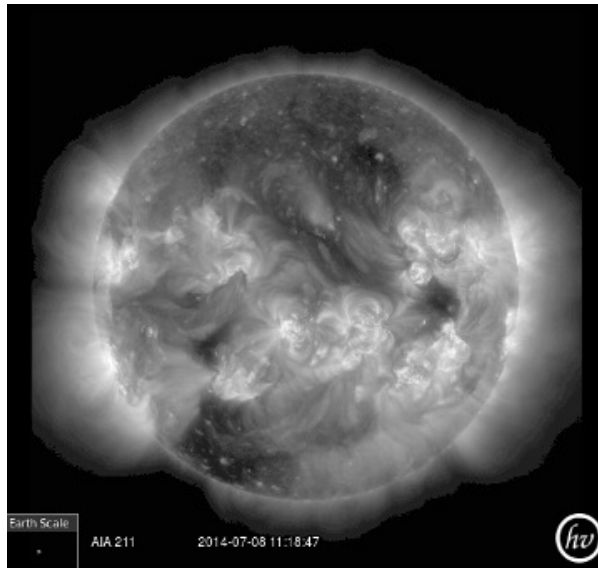
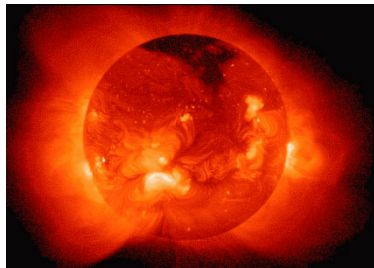
太陽観測に使われる電磁波



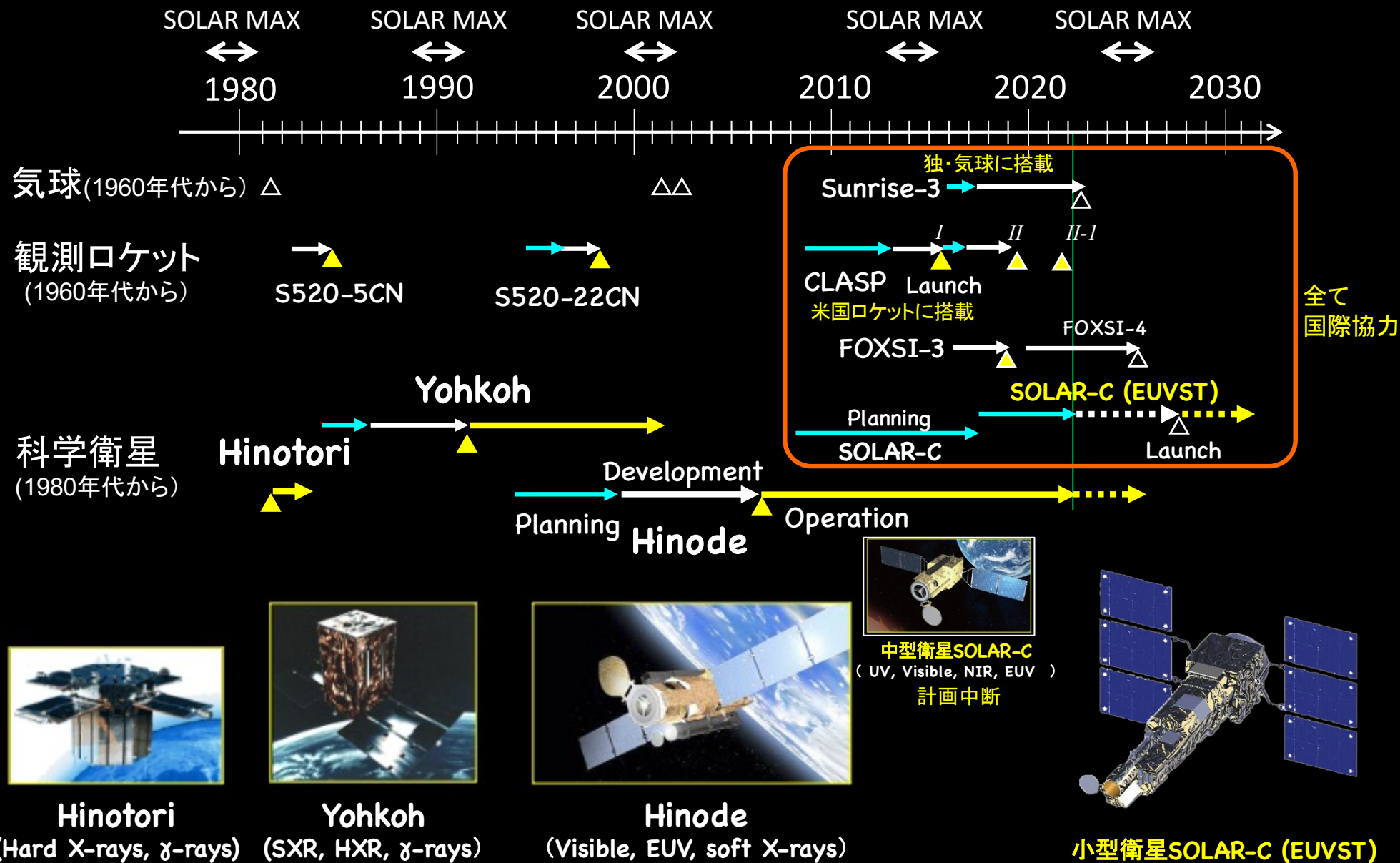
短い

光の波長

長い

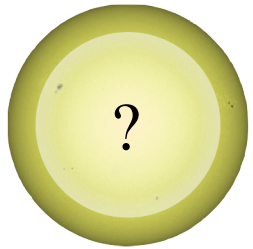


飛翔体による日本の太陽観測実績・計画

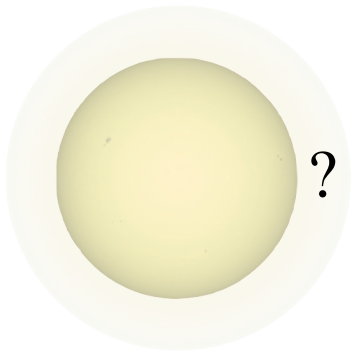


太陽の研究

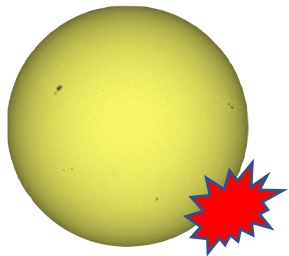
3つの問題



- 約11年で増減する太陽の磁場は、内部でどのように作られているのだろうか？
(星の内部)



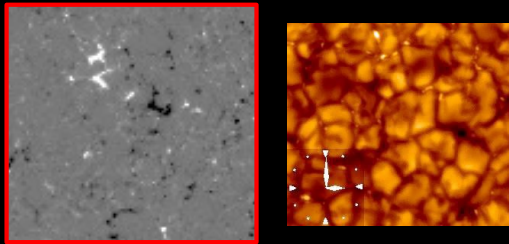
- コロナはどうして100万度もの高温になっているのだろうか？ (星の外層の活動)



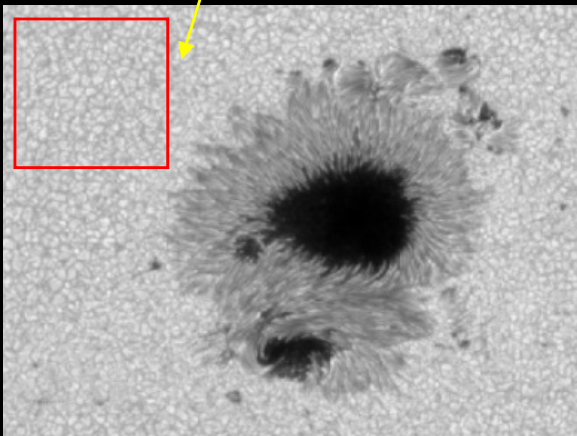
- 爆発現象フレアはどのように発生するのだろうか？ (星の外縁部, 地球への影響)

太陽大気構造

光球磁場 (視線方向)

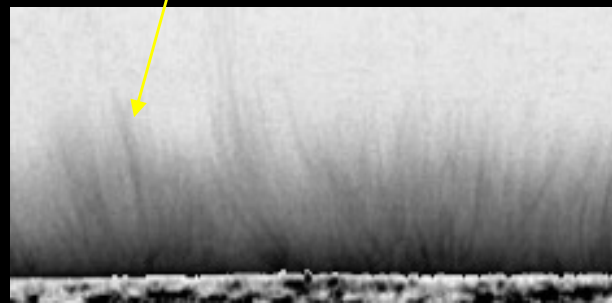


粒状斑 (粒々状の構造)



光球 Photos from Hinode (衛星観測)

スピキュール (ジェット状の構造)



彩層



Photo from HAO (皆既日食)

コロナ (可視光)

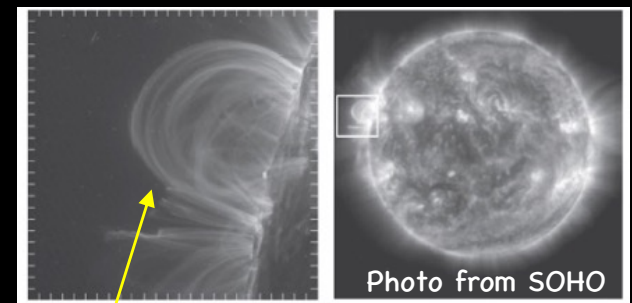
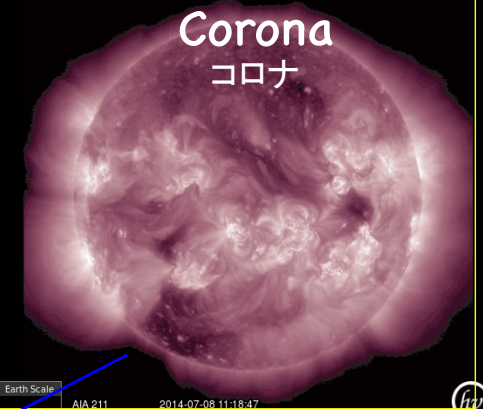
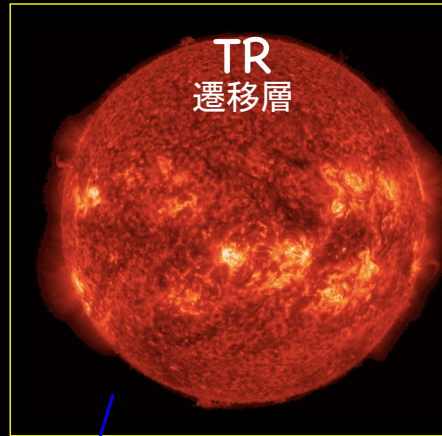
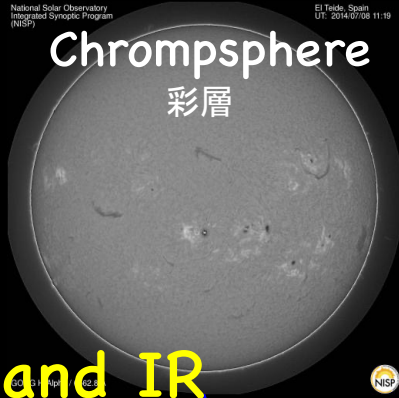
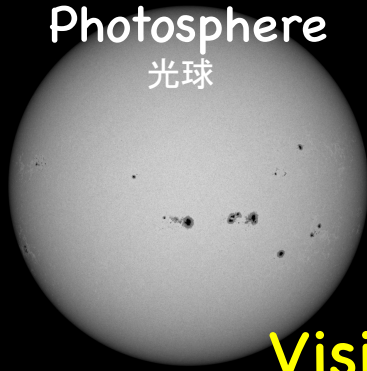


Photo from SOHO

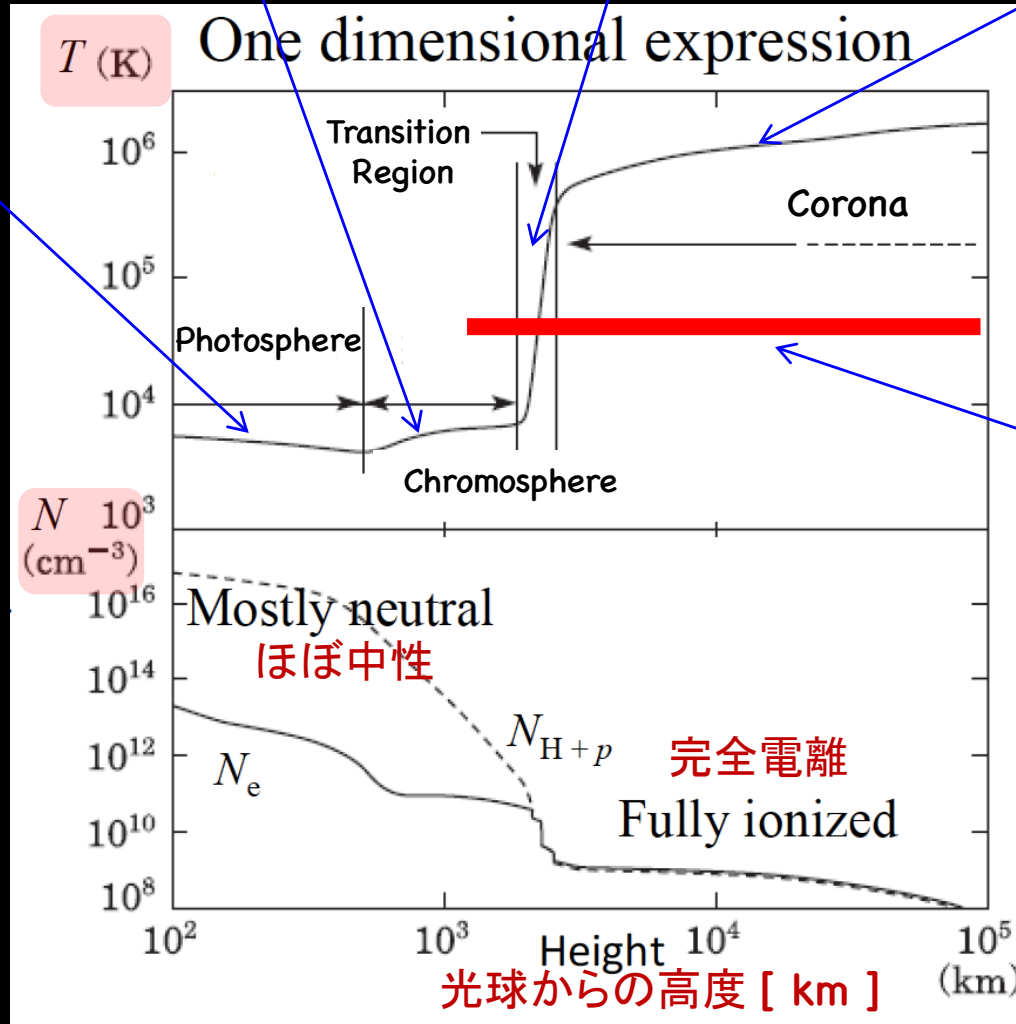
コロナ (極端紫外線)

コロナループ (ループ状の構造)

Photosphere
光球



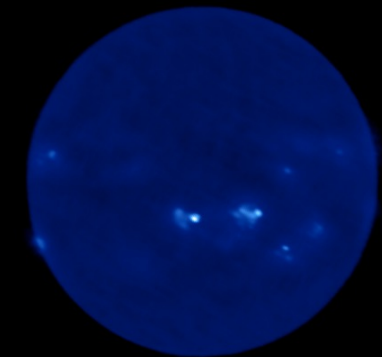
Visible and IR



Observations
from Space

宇宙空間からの観測

Radio
Observations

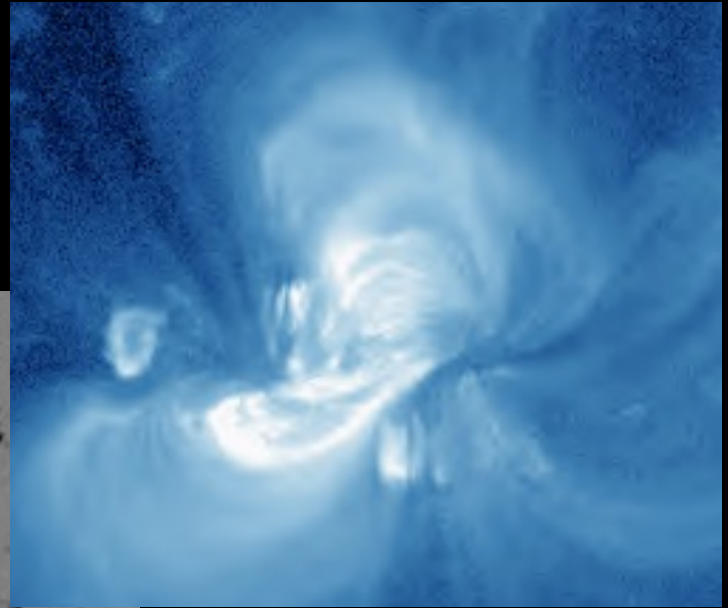


17GHz image
from NoRH

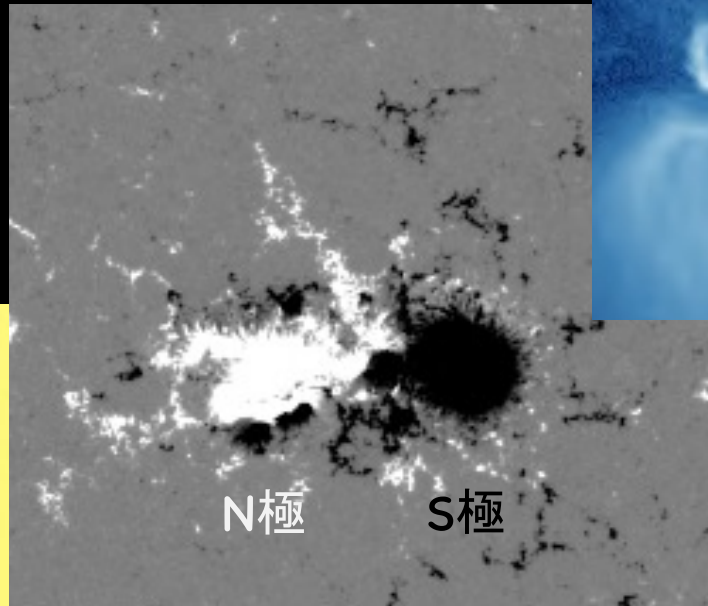
現代の天文学10
Figure 5.1を参照

磁場とコロナの構造との関係

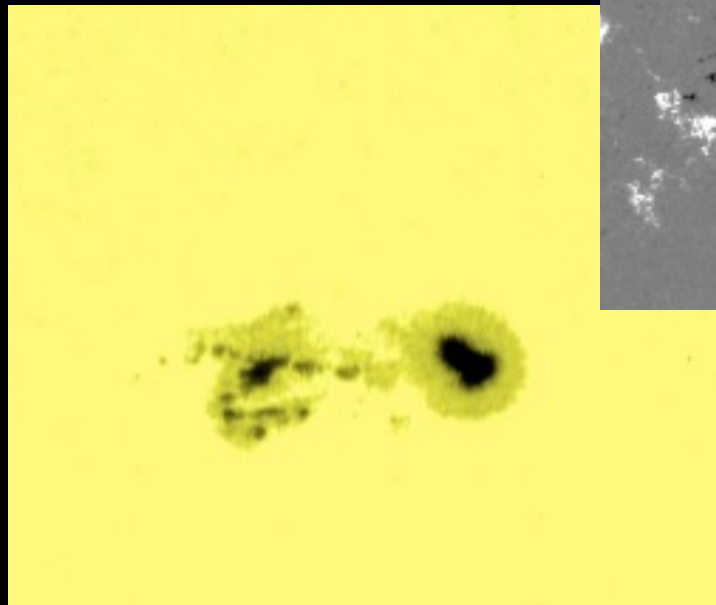
コロナ



表面磁場



表面



コロナの形は上空の
磁場の様子を表す

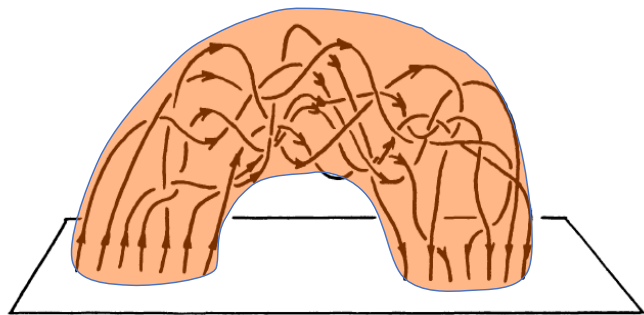
黒点は
磁力線の集まり(磁束管)
の断面

コロナ加熱モデル

DC 加熱

逆向き磁場間でのつなぎ変えで
磁気エネルギーを熱に転換

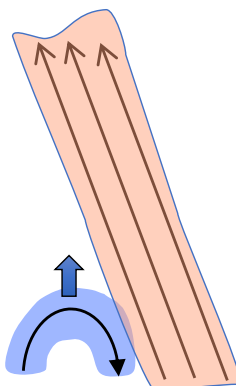
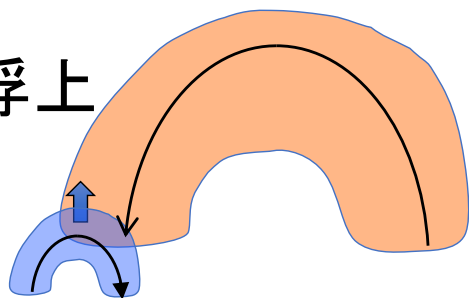
Braiding 組み紐



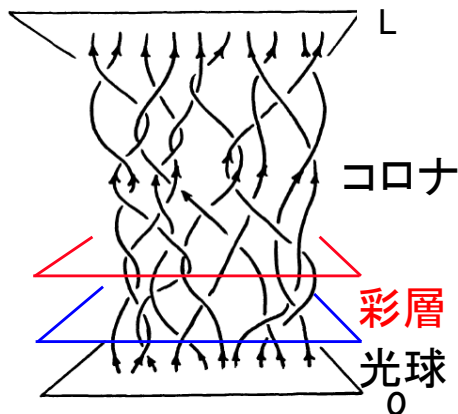
Parker (1972)

足元の磁気構造を移動させて捻るのは粒状斑

磁束浮上



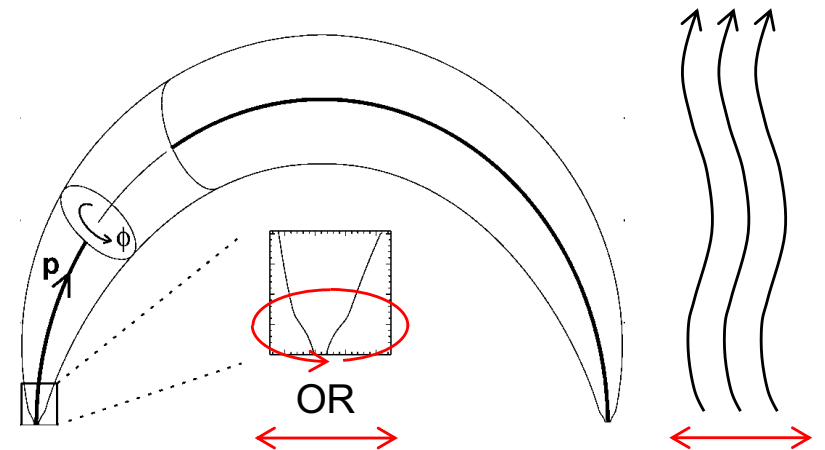
nanoflare
 $E \sim 10^{23}$ erg
($= 10^{32}$ erg / 10^9)



AC 加熱

磁気流体波の減衰により
磁気エネルギーを熱に転換

Wave heating 波動加熱



閉じた磁気構造

足元の磁気構造を
揺らすのは粒状斑

開いた
磁気構造

マイクロフレア



2006/11/11 10:32:53
XRT Al_poly filter exp. 129msec

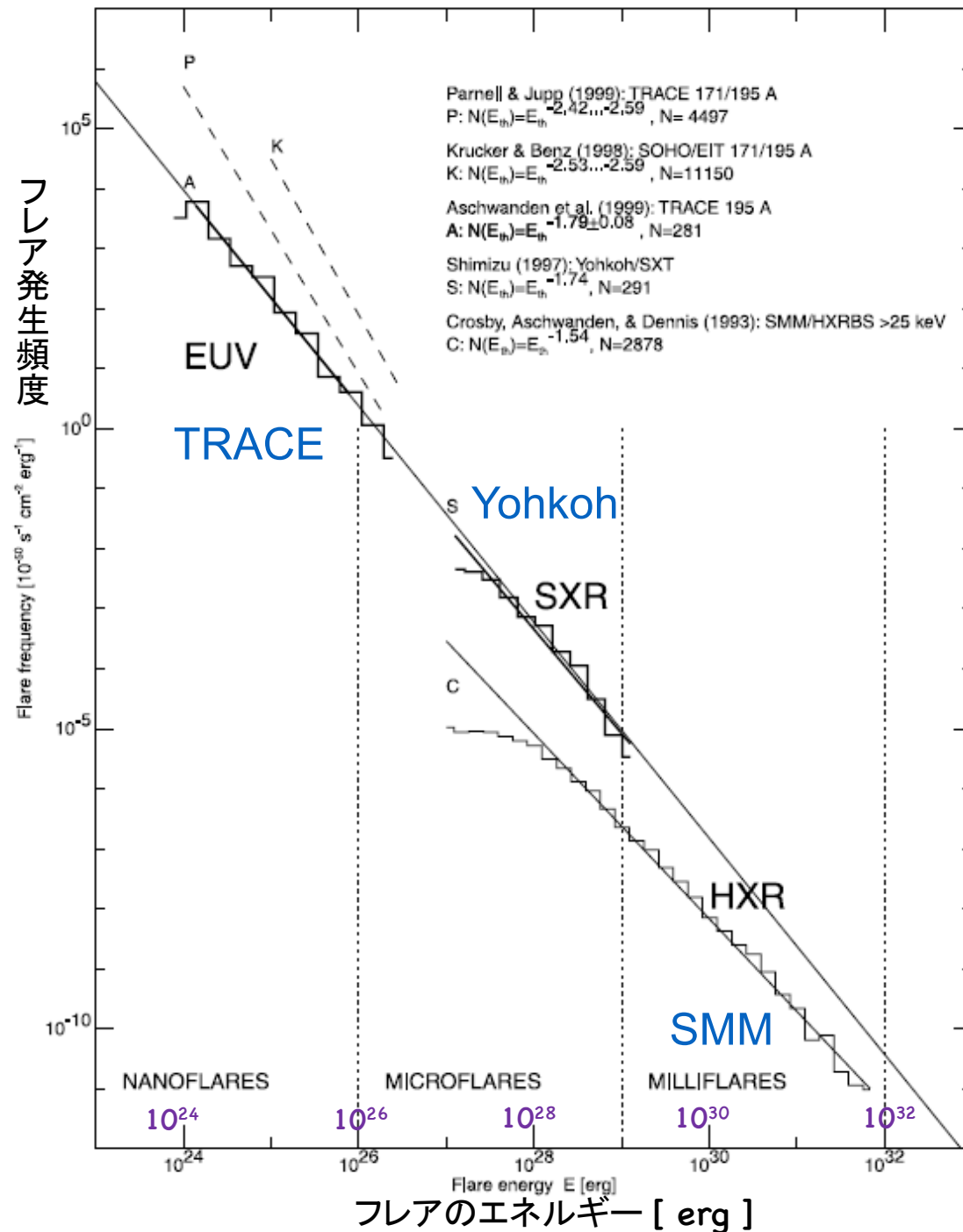
Hinode XRT

微小フレアの統計

フレア発生頻度 $dN/dE \propto E^{-1.8}$

現時点での結論：
ここで定義されているフレア現象を
全て足してもコロナの加熱には
不十分

Aschwanden et al. 2000, ApJ, 535, 1047



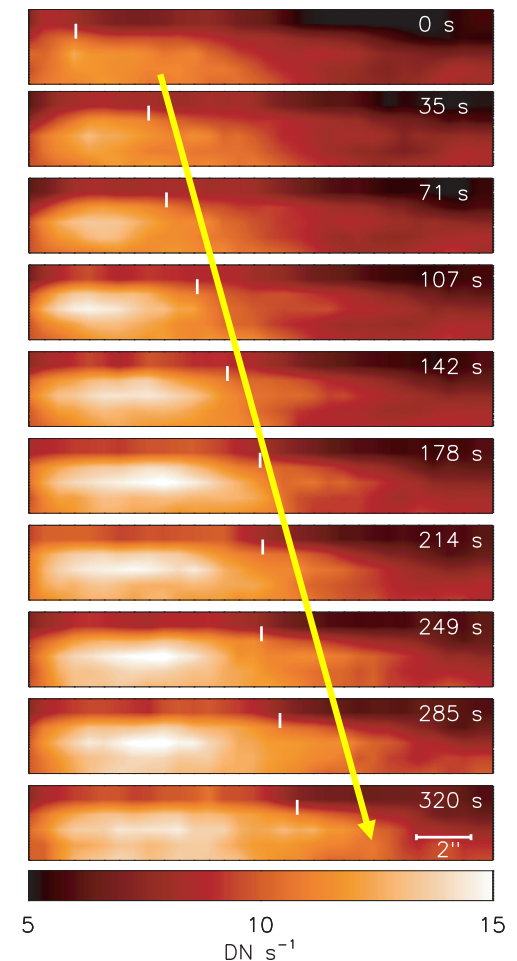
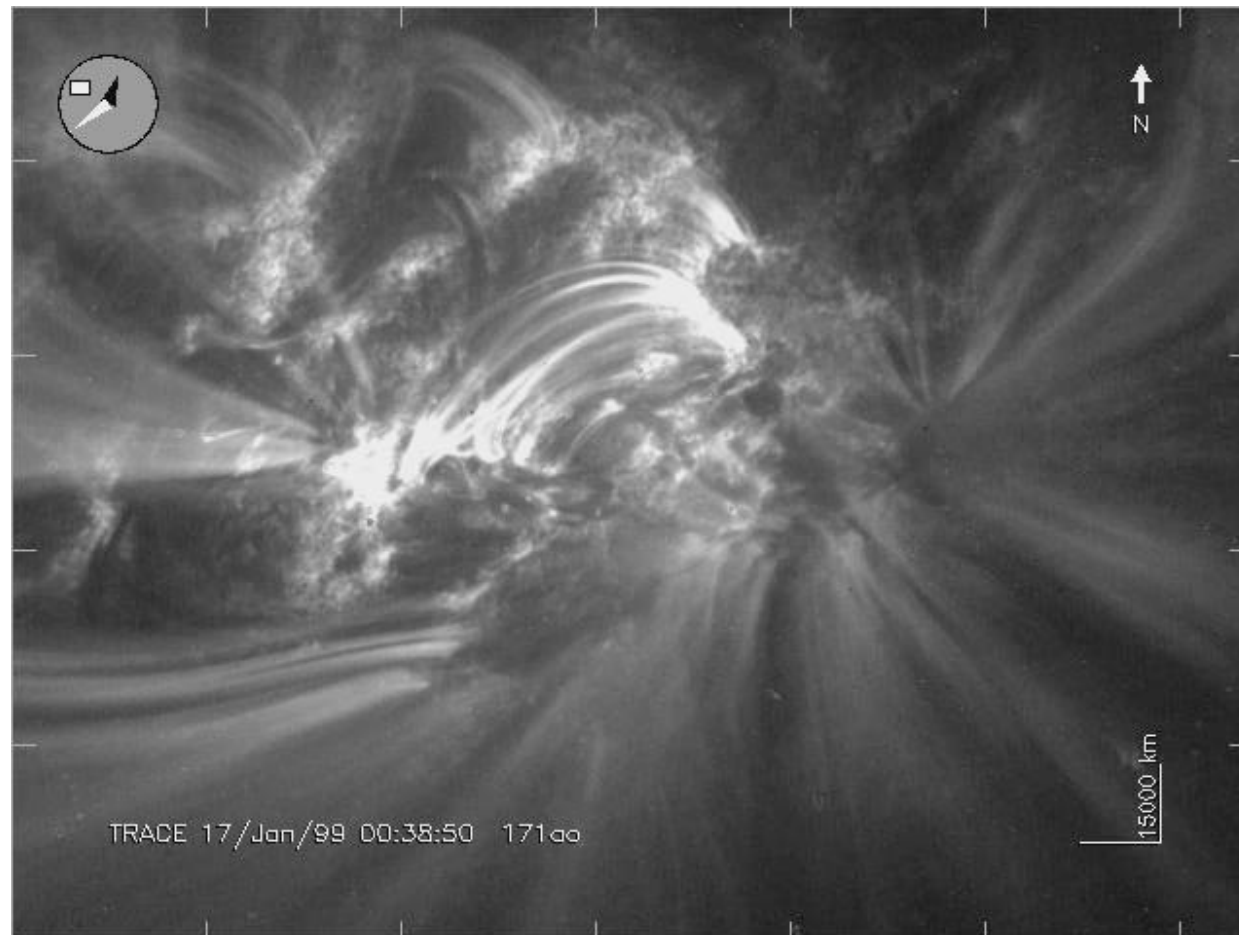
TRACE衛星の画像観測

- ループ構造のひねり具合が小さい
- ループ足下から上昇流のような変化を捉えた
→非一様加熱が起きているという兆候

上方に向けて明るい構造が広がる

コロナループ
足下

上方



From Schrijver+ (1999)

Winebarger+(2001) 13

加熱された上昇流

「ひので」衛星で発見された上昇流。非定常な加熱がコロナループの足下付近で起こっていることを示している。

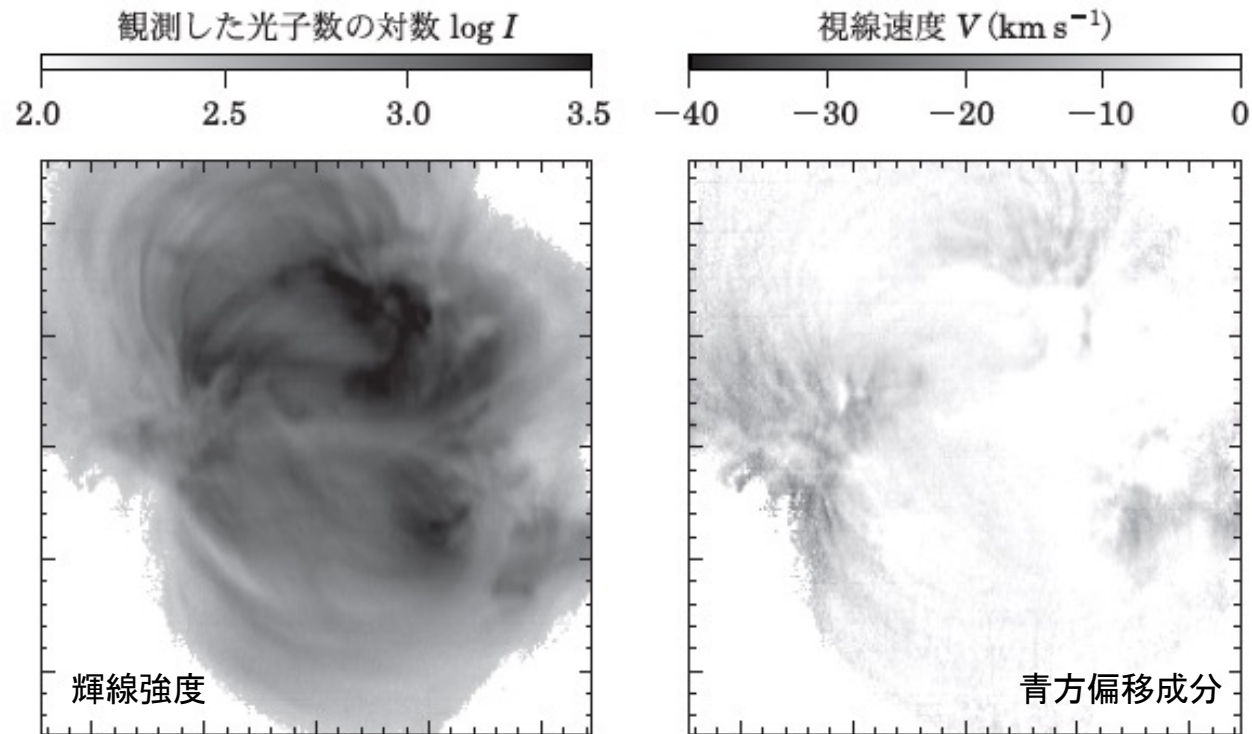


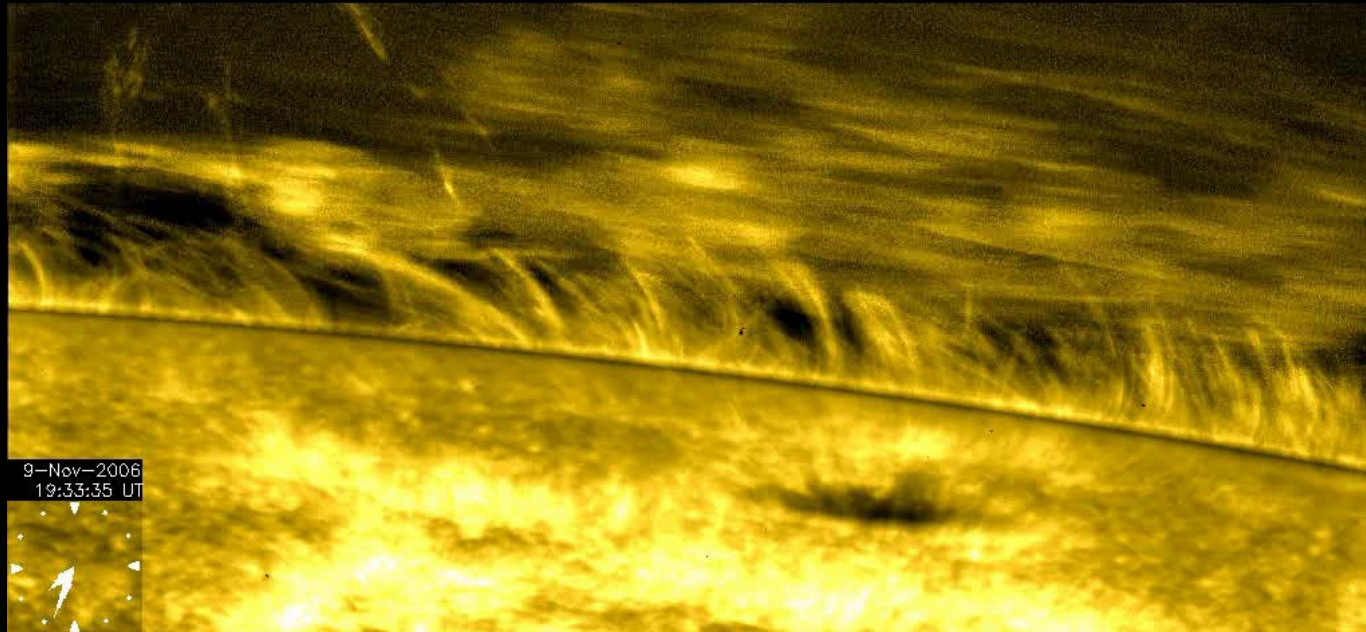
図 5.34 ひので衛星の極端紫外線分光観測より得られた（左）13 階電離した鉄イオンからの輝線の放射強度と（右）輝線のドップラーシフトから得られた視線方向速度（青方偏移のみ表示）。

波動によるコロナ加熱

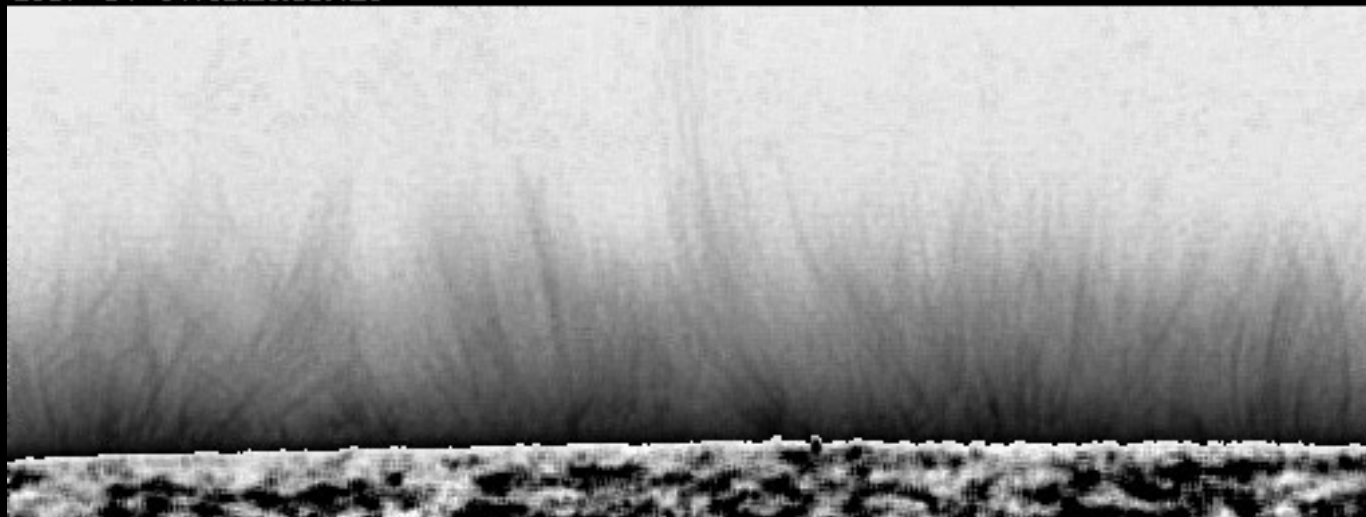
- 波動の発生、波動の伝播、波動の減衰過程
- 光球で発生する音波の衝撃波化でコロナが加熱される機構：
→ X線観測より否定（主要因ではない）。
- 磁場が関わる波動：
 - アルヴェン波（磁場に沿って伝播）、磁気音波
 - 磁場に沿って伝わるアルヴェン波により、エネルギーが輸送されると考えられてきている。
- 観測の状況：
 - ～10年前は、コロナ中の直接的な波動検出は限定的。
 - 地上での高精度観測や、宇宙から行う高い頻度の観測と高解像度観測により、波動が検出されるようになった。
 - 観測された波動エネルギーフラックスで加熱が説明されるまでには至っていない。

コロナ中に延びた構造の波動

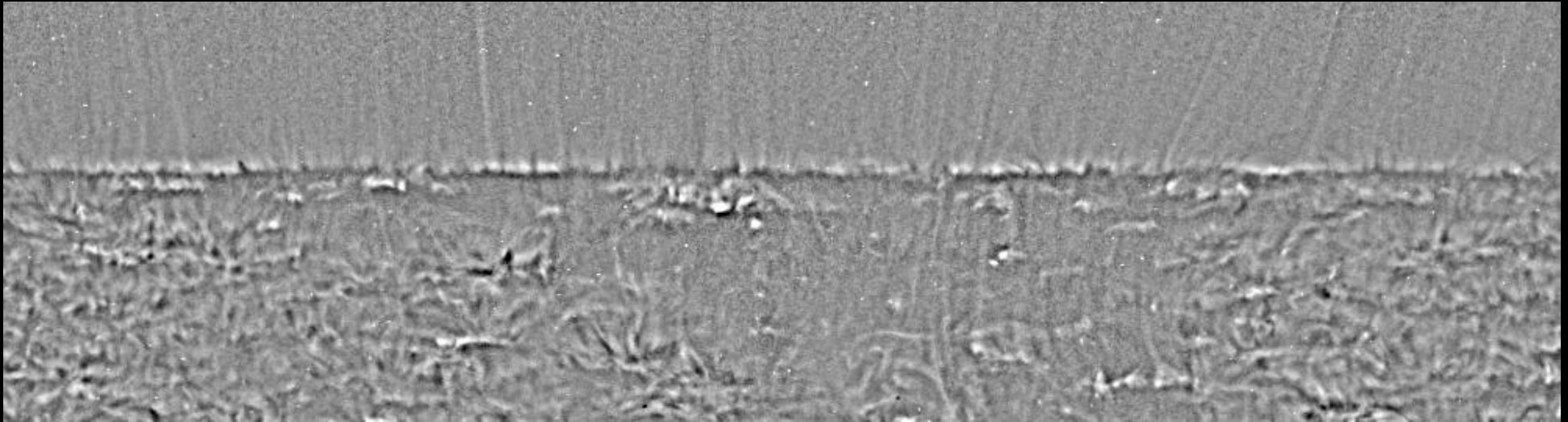
ひので衛星の
可視光観測



2007-04-01T02:20:30.420



極領域コロナでの波動



McIntosh et al., *Nature*, 475, 477 (2011)

SDO/AIA 171

- ・Need confirmation with spectrographs
- ・Energy flux not confirmed by other studies.

分光装置での確認要
エネルギー束量は未確定

コロナ加熱の理解の現状

• DC加熱

- 望遠鏡の解像度が上がったことで、微小フレアが観測されるようになってきている。
- 微小フレア発生により加熱されたプラズマの特徴(形態、温度構造、ダイナミクス)が調べられてきている。
- (黒点近傍の)強磁場領域では有望な機構。

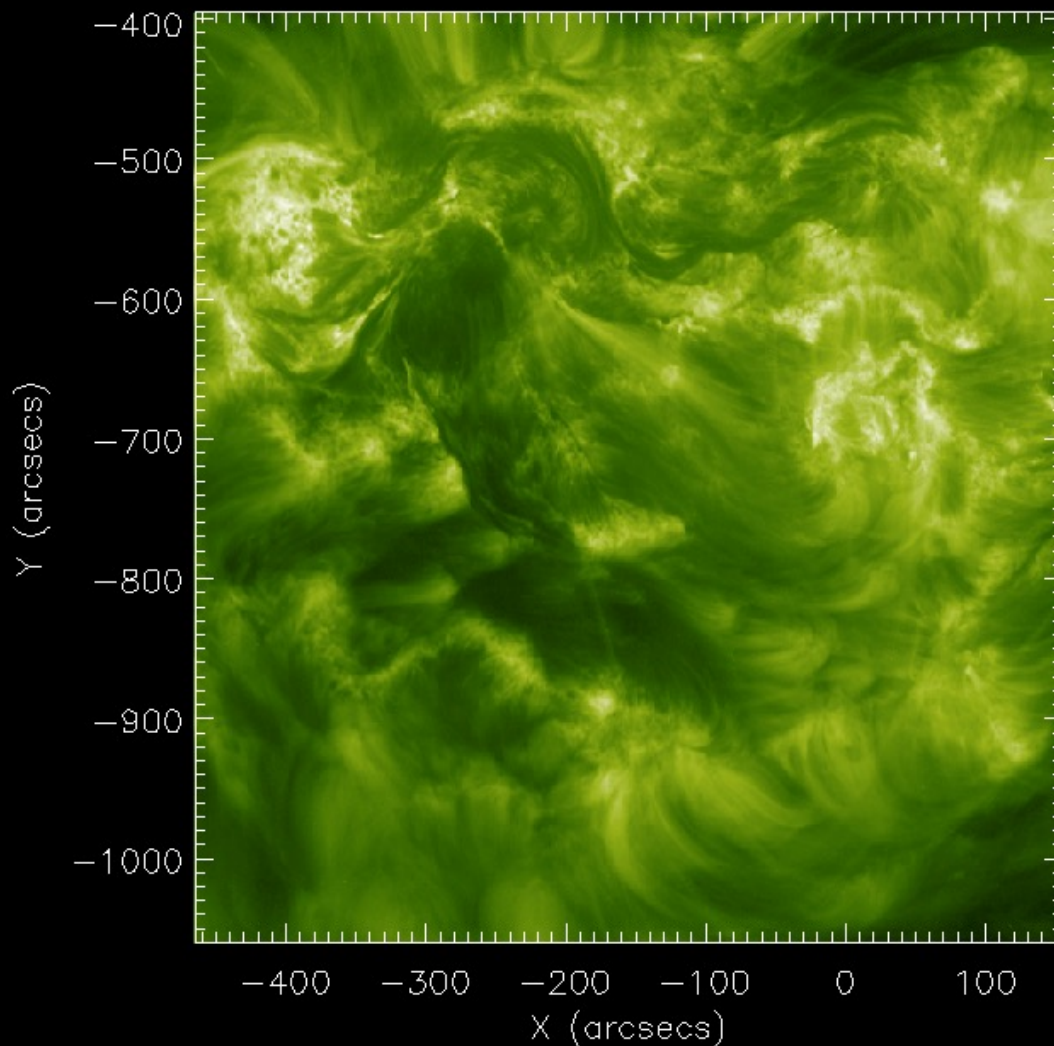
• AC加熱

- 望遠鏡の解像度が上がったことにより、大振幅の磁気流体波がようやく観測できるようになってきた。
 - 3Dシミュレーションと比較するのはまだ難しい段階
 - 開いた弱磁場領域で有望な機構。
- 光球からコロナまでを高い解像力で同時に観測することが望まれている。

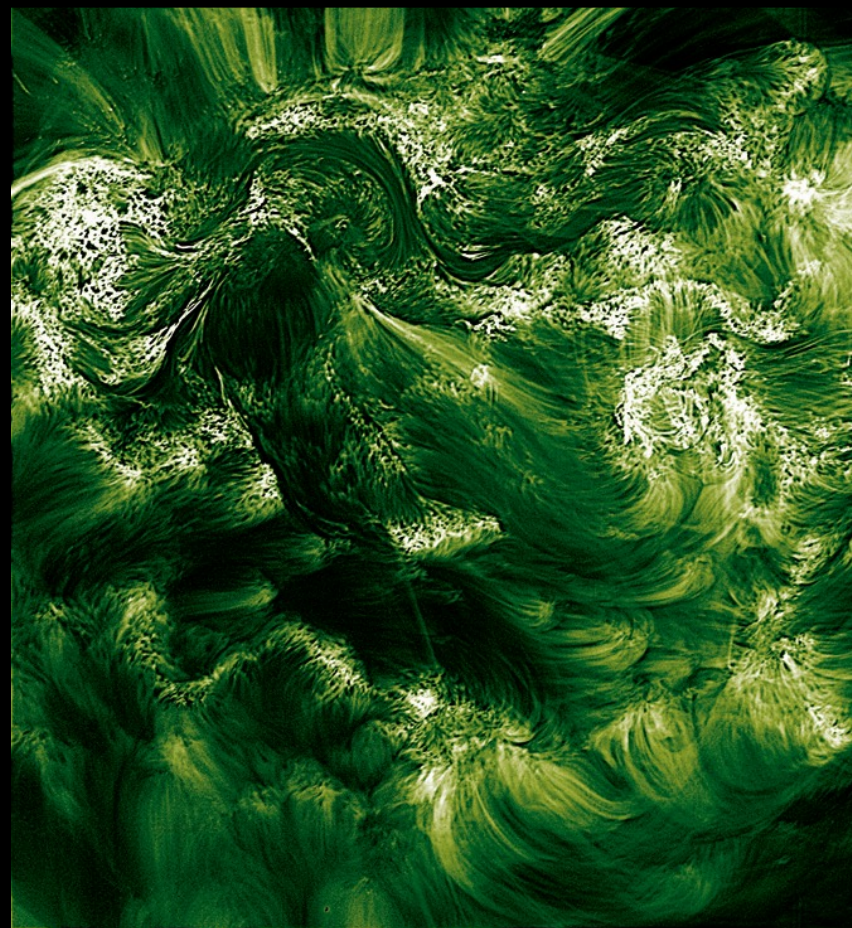
近年の高解像コロナ撮像観測

静止衛星観測
SDO AIA 193Å

11-Jul-2012 18:55:30.840 UT



ロケット観測(5分間飛翔)
HiC sounding rocket 193Å



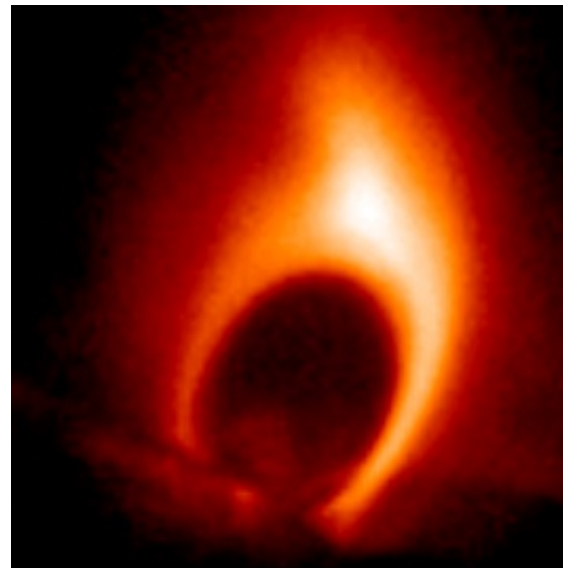
Brooks et al. *ApJ*, 772, L19 (2013)

太陽フレア： 磁気リコネクションによるエネルギー解放過程

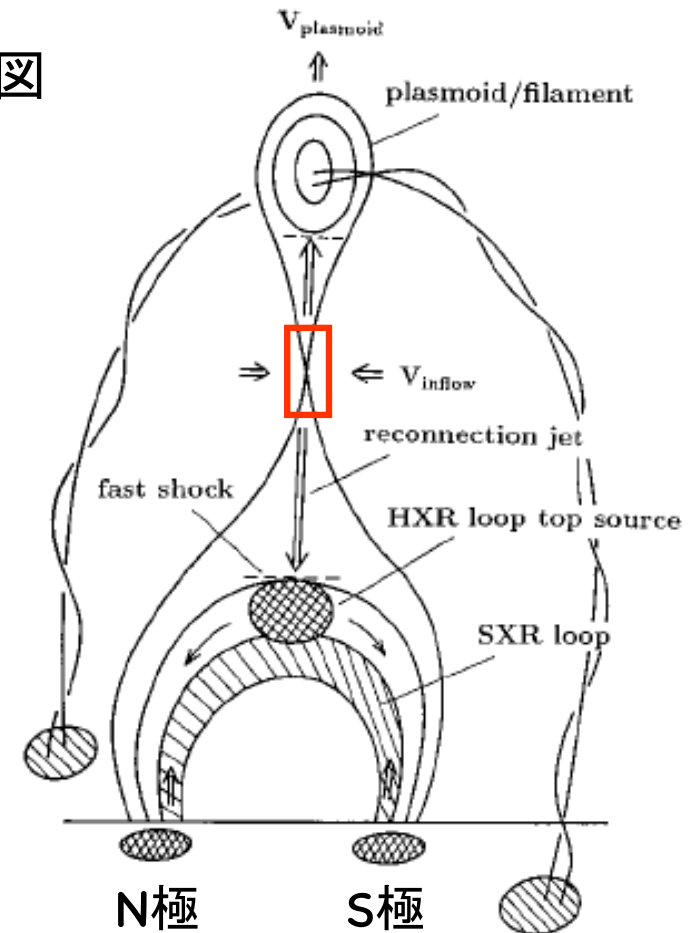
- Yohkoh(ようこう)衛星からは、画像観測から右図のようなモデルが確立
- 分光観測によるプラズマ診断が必要とされた



Ohyama & Shibata (1998)



Tsuneta et al. (1992)

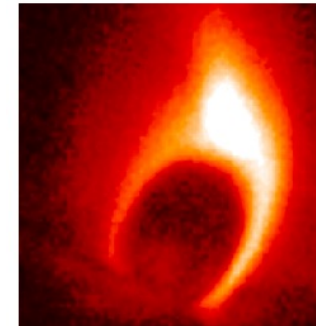


Shibata et al. (1995)

Hinode/EIS分光観測によるプラズマ診断

- 分光撮像観測から発見多数
- しかし、感度不足のため、フレアの変化に追従できていない
 - フレア初期時に短時間現れる構造を捕捉し損ねている
 - 特に磁気リコネクションの起こる近傍領域の調査が難しい

Yohkoh 画像観測



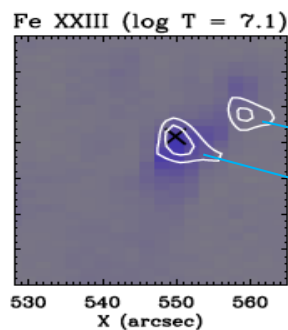
暗く、温度 10^7 K の高速流を検出

Hara et al. (2011), Imada et al. (2013) ほか

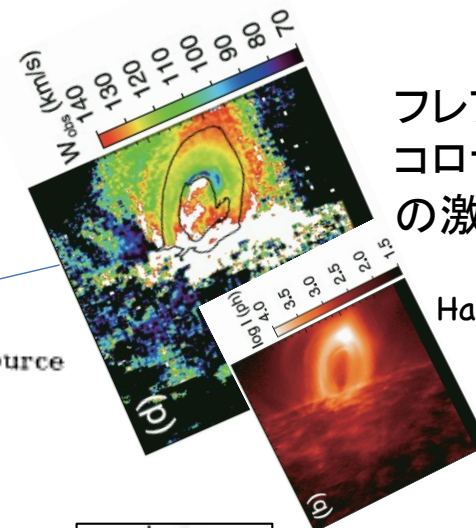
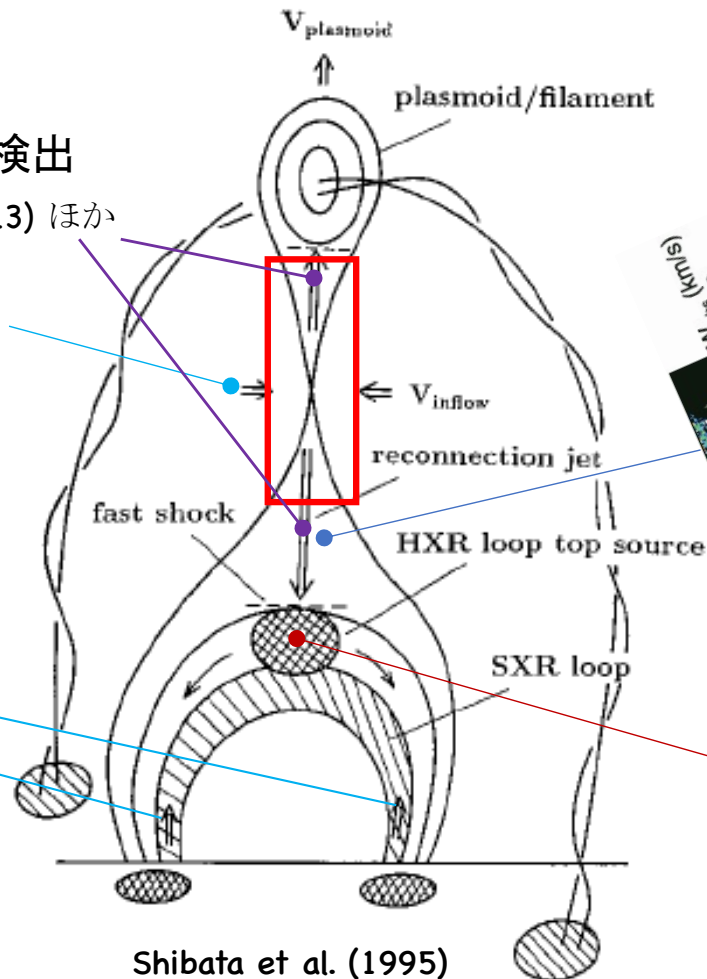
リコネクションインフロー検出

Hara et al. (2011) ほか

高速(300 km/s)の上昇流

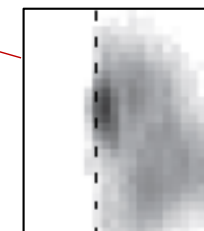


Milligan & Dennis (2009) ほか



フレア上部域で
コロナ構成イオン
の激しい運動を検出

Hara et al. (2008) ほか



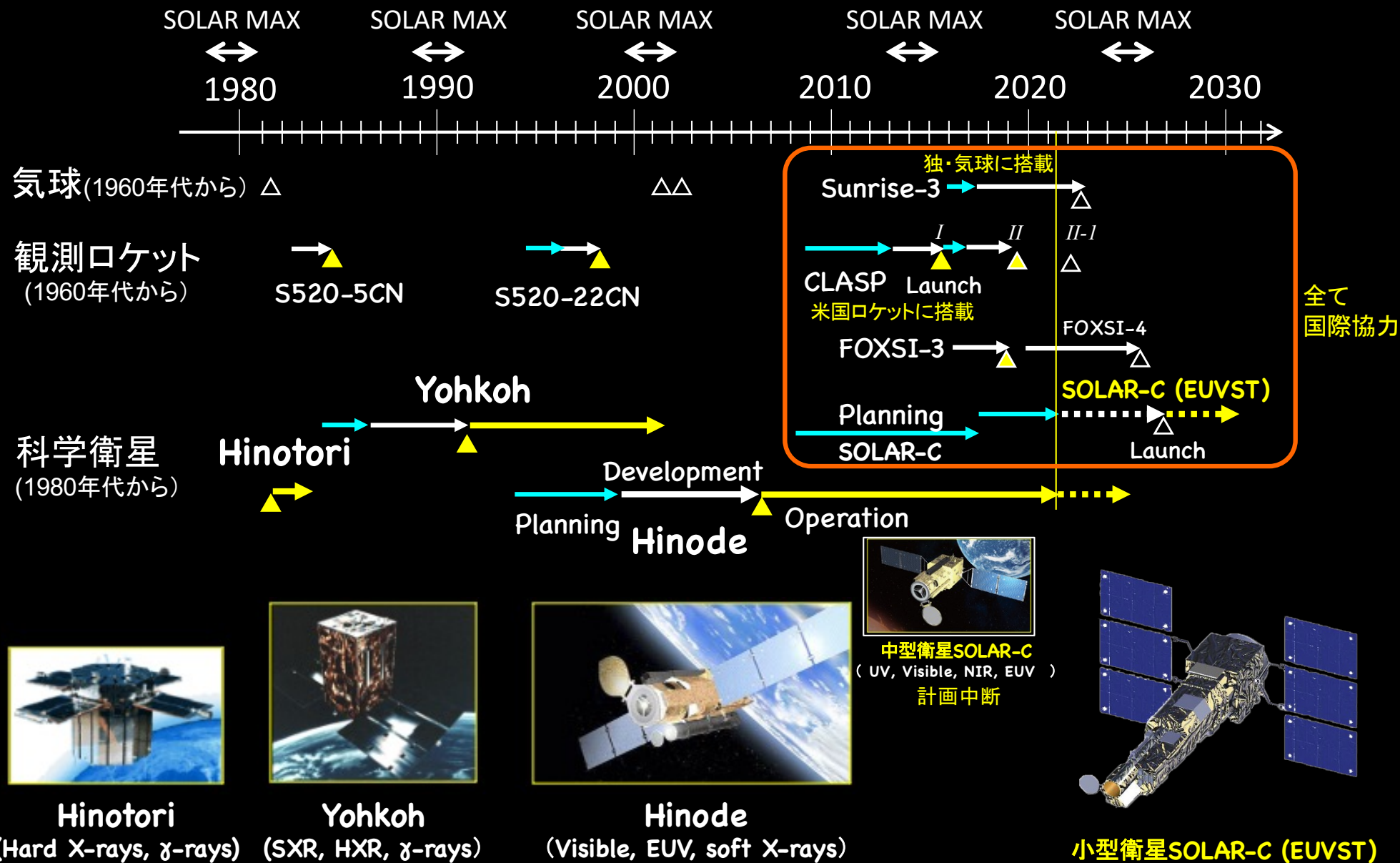
フレア初期に生成される
高密度領域を検出

Hara et al. (2011) ほか

フレアの理解の現状

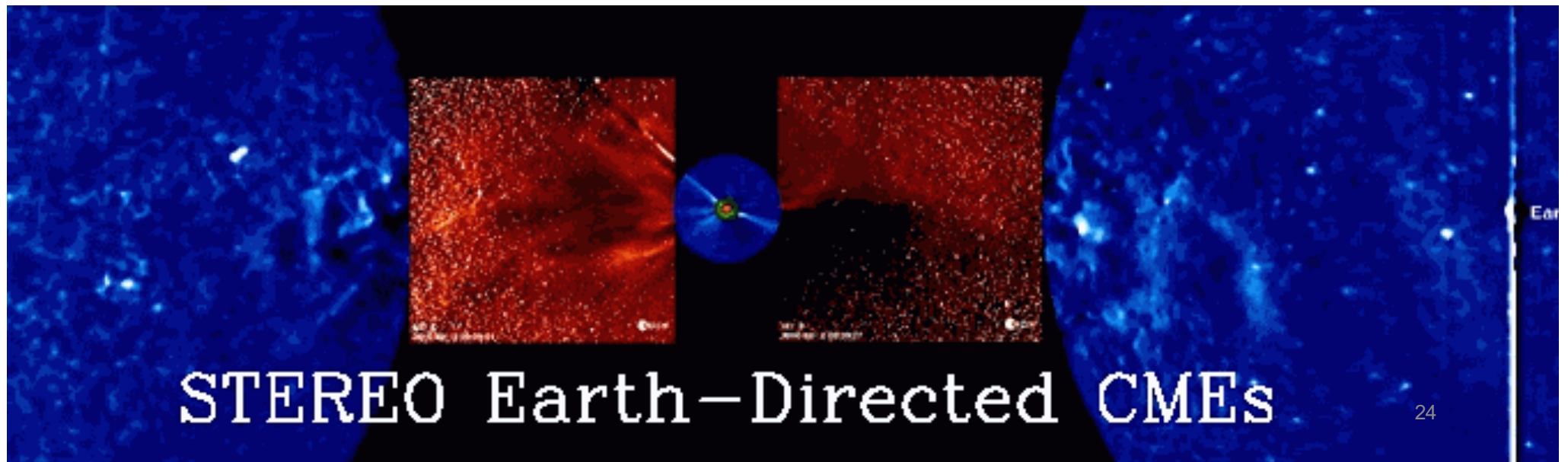
- 磁気リコネクション(磁気エネルギー転換機構)の理解
 - 撮像観測の解像度が上がったことで、エネルギー転換域の微細構造が捕捉
 - モデルの検証が可能となる物理量の取得が可能な状況へと発展
 - しかし、現状の装置では、解像力、感度が不足
- 不安定化を誘発し、フレア発生の契機となる現象の検出
 - 大型フレアの発生のきっかけとなる現象が、分光観測のプラズマ診断でいくつかのケースで捕捉
 - 関連する現象は微小で、短時間のみ出現
 - しかし、現状の装置では、低頻度観測のため検出困難
- 光球からコロナまでを高い解像力で高頻度で観測することが望まれている。

飛翔体による日本の太陽観測実績・計画



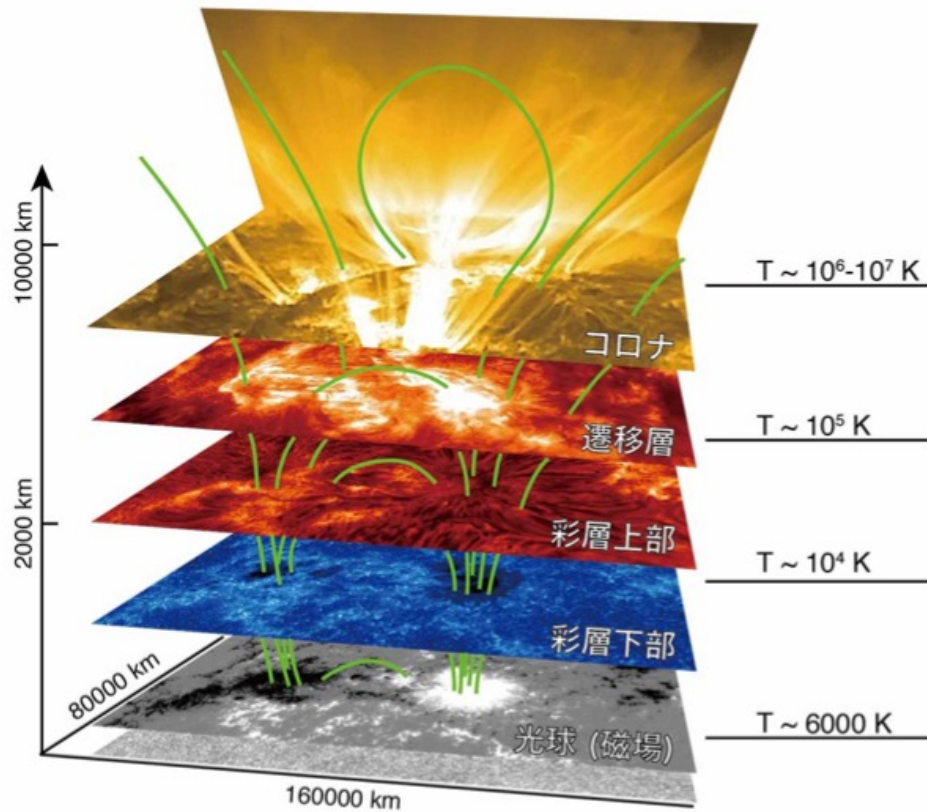
計画の視点

- 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？
 - 質量とエネルギーが太陽大気全体にどのように伝達されるかを包括的に理解
 - 太陽系の生命と居住性の条件を確立するために極めて重要な放射、太陽風とコロナ質量放出、およびエネルギー粒子を介して太陽圏に接続する太陽大気を理解

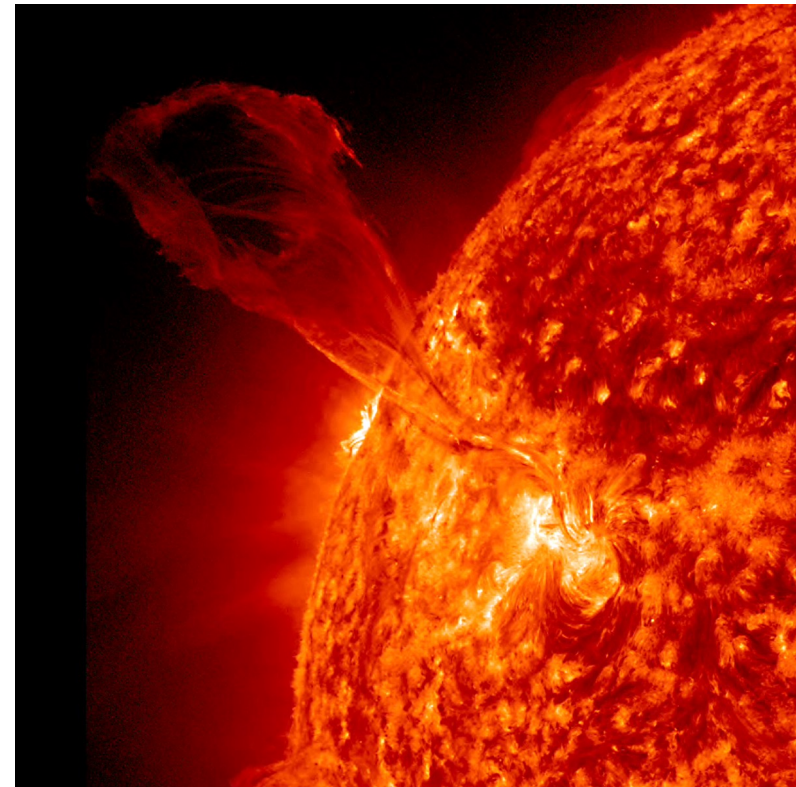


科学目的

1. 高温のコロナや太陽風はどのように作られるのか？
2. 太陽フレアは、いつ、どのようにして起こるのか？



光球より外側に高温のコロナ、流出する太陽風



短時間で莫大なエネルギーを解放するフレア

科学目的 (1)

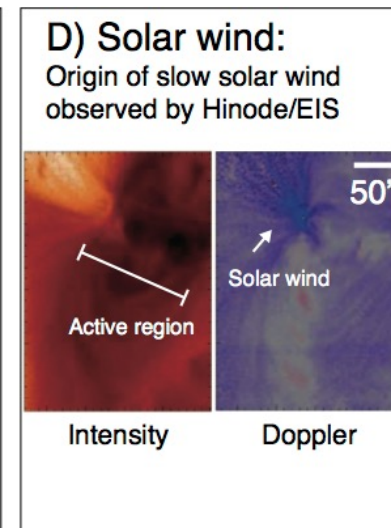
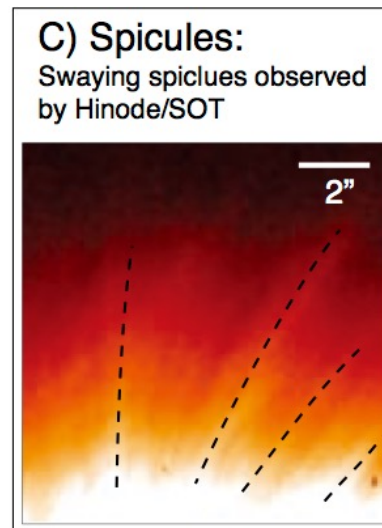
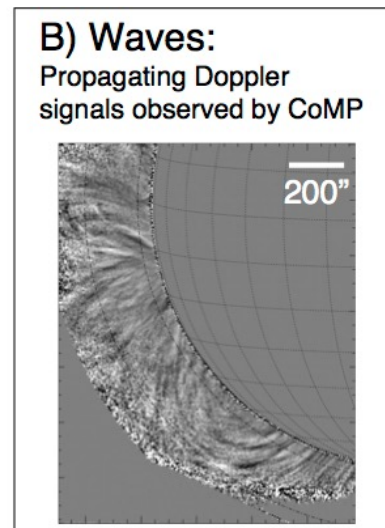
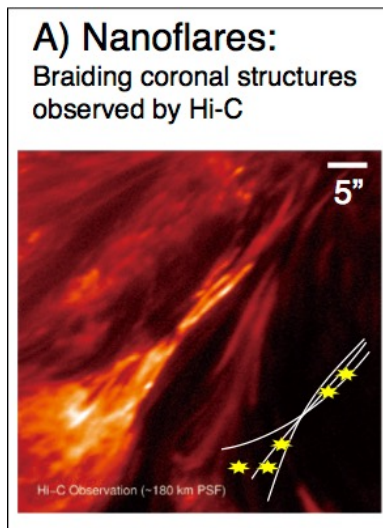
- 太陽大気・太陽風の形成を導く基礎物理過程の解明

A) ナノフレアのコロナ加熱への寄与を定量化

B) 波による散逸のコロナ加熱への寄与を定量化

C) 彩層微細構造(スピキュール)の形成機構とコロナ加熱への寄与を定量化

D) 太陽風の流源と加速機構の理解

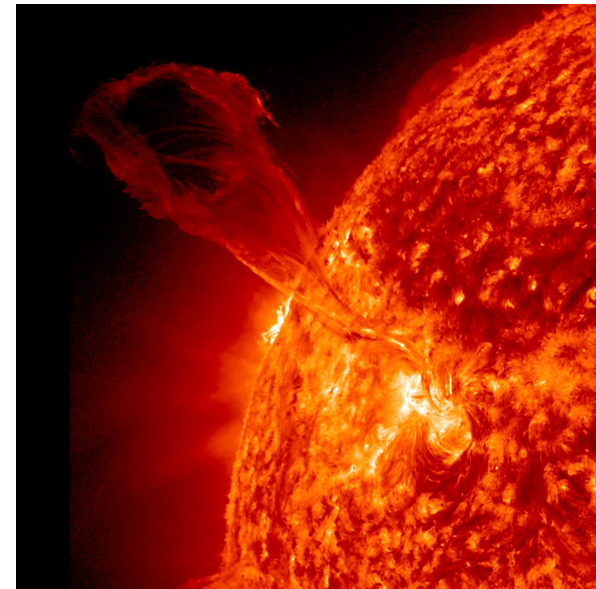
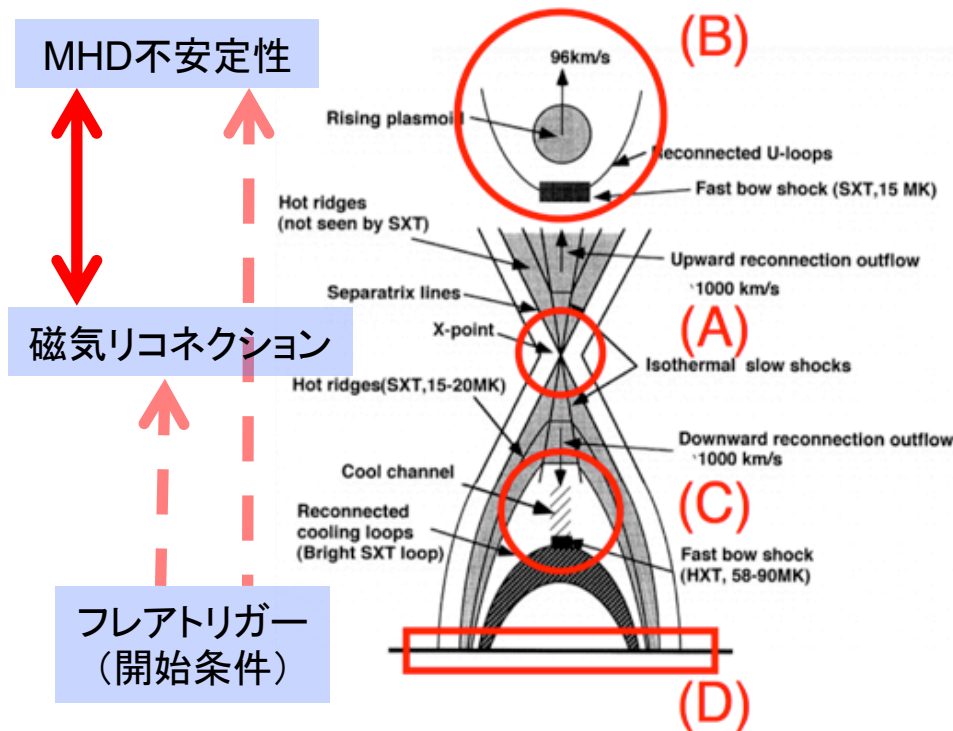


科学目的 (2)

- 太陽大気が不安定化してフレア・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ーの理解



必要とされる観測

- 科学目的達成には、以下の3つの要素を同時に実現する観測が必要

A) 3桁以上の温度帯域 (彩層 [2万度] からコロナ [100-200万度])にわたる太陽大気的全温度層を同時に隙間なく観測できる能力

B) 10-30倍の感度向上により、観測する現象を高空間・時間分解能で追隨できる能力

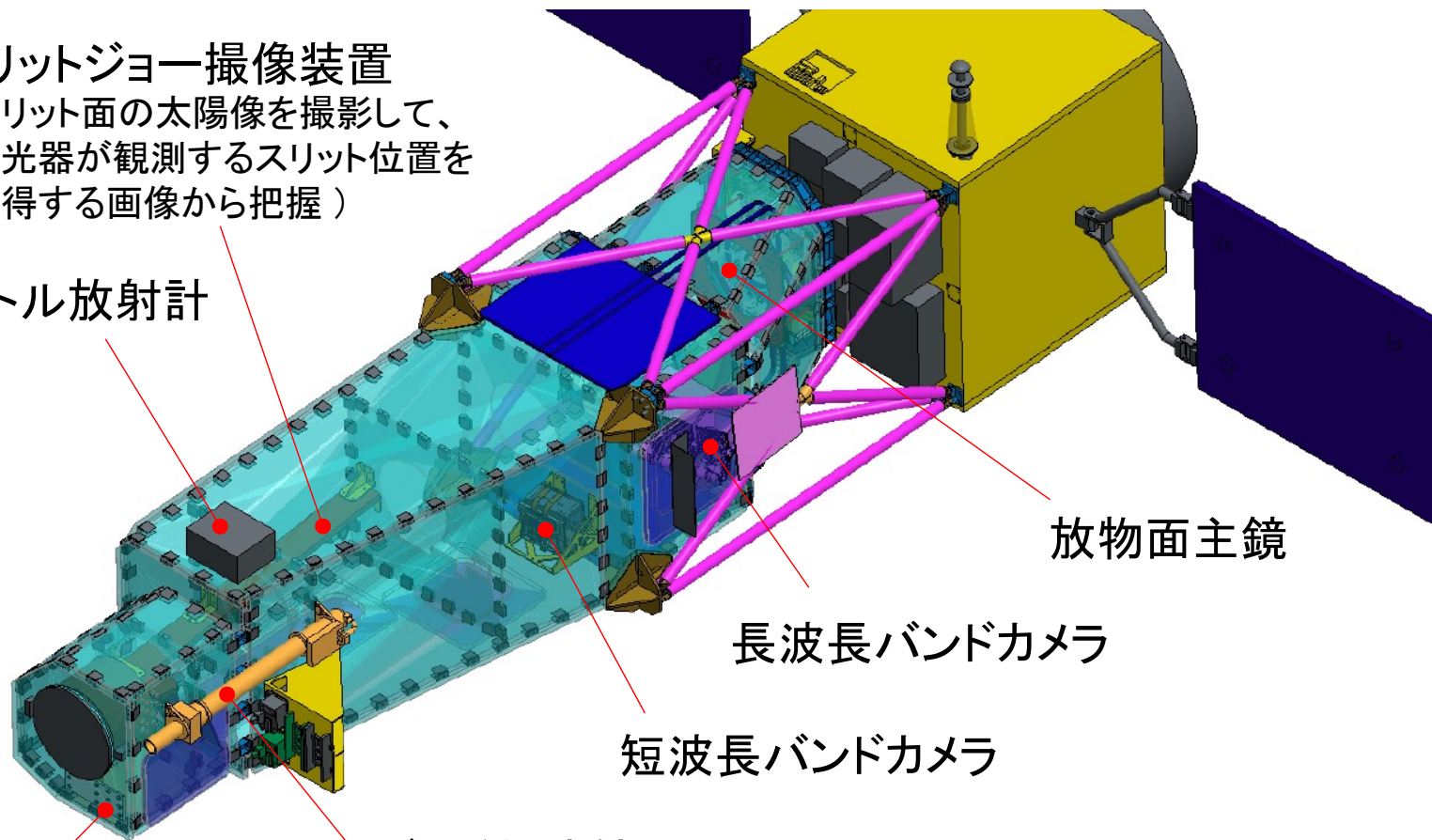
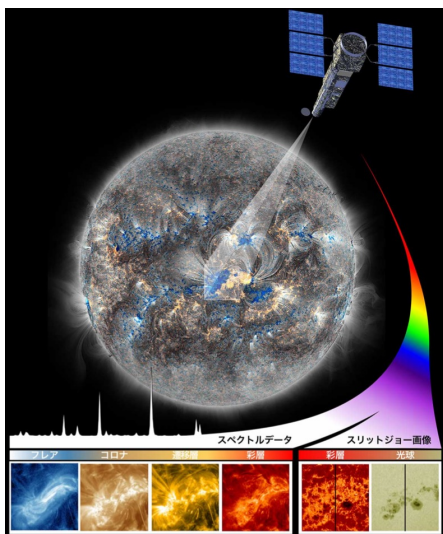
(太陽面で約300 kmを解像)

C) 基礎物理過程を診断できる分光情報 (速度, 温度, 密度等)を獲得できる能力

Solar-C (EUVST) 衛星

スリットジョー撮像装置
(スリット面の太陽像を撮影して、
分光器が観測するスリット位置を
取得する画像から把握)

太陽スペクトル放射計



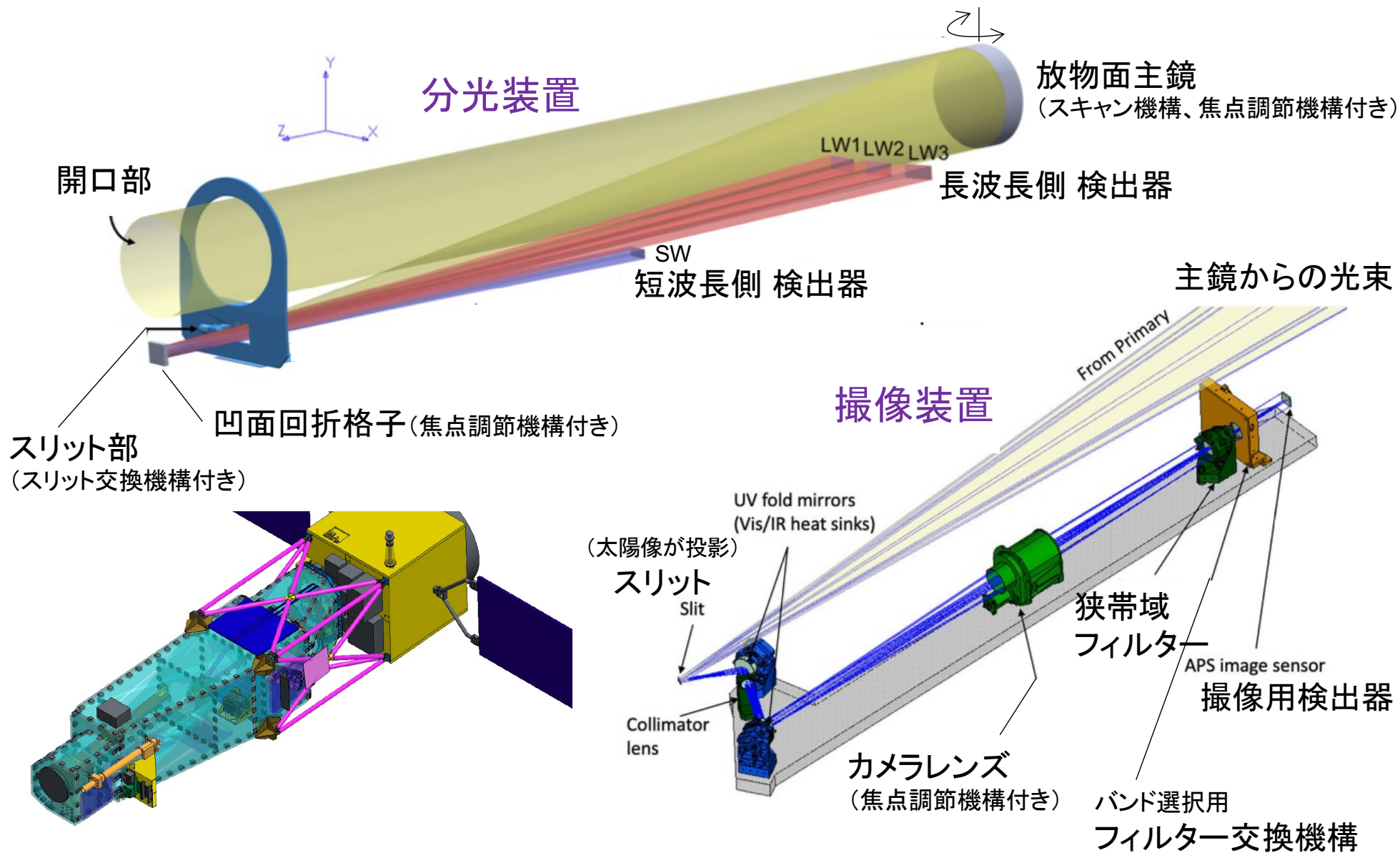
ガイド望遠鏡

(望遠鏡部の微小揺れを検知して、主鏡角度を調整し、
スリット面の太陽像を静止させることに使用)

凹面回折格子

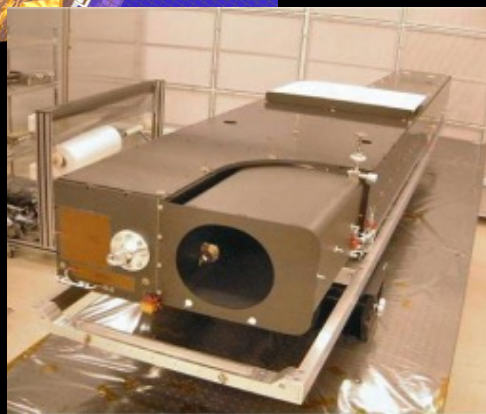
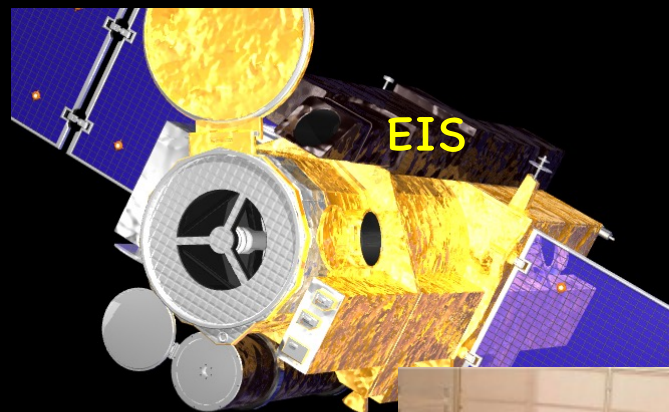
(スリット上の各点からの光を分光して、検出器面に再結像)

分光装置と撮像装置



Solar-B (ひので) と Solar-C の違い

Solar-B



15cm口径 EIS

3秒角解像力のコロナ観測

50cm口径 可視光望遠鏡

0.3秒角解像力の磁場観測等

Solar-C

Solar-C衛星では磁場の観測ができない



28cm口径
EUVST

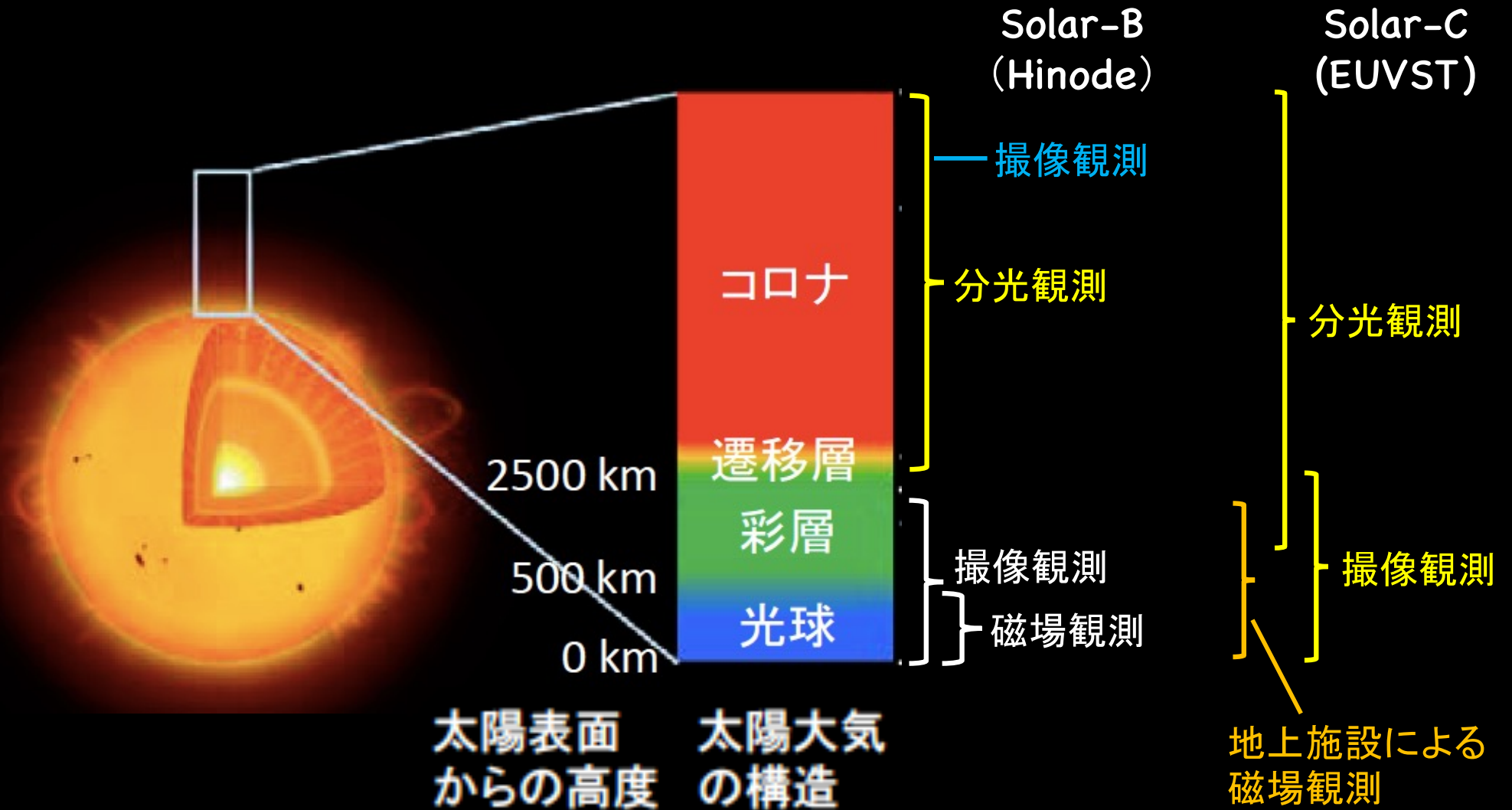
0.4秒角解像力
のコロナ観測



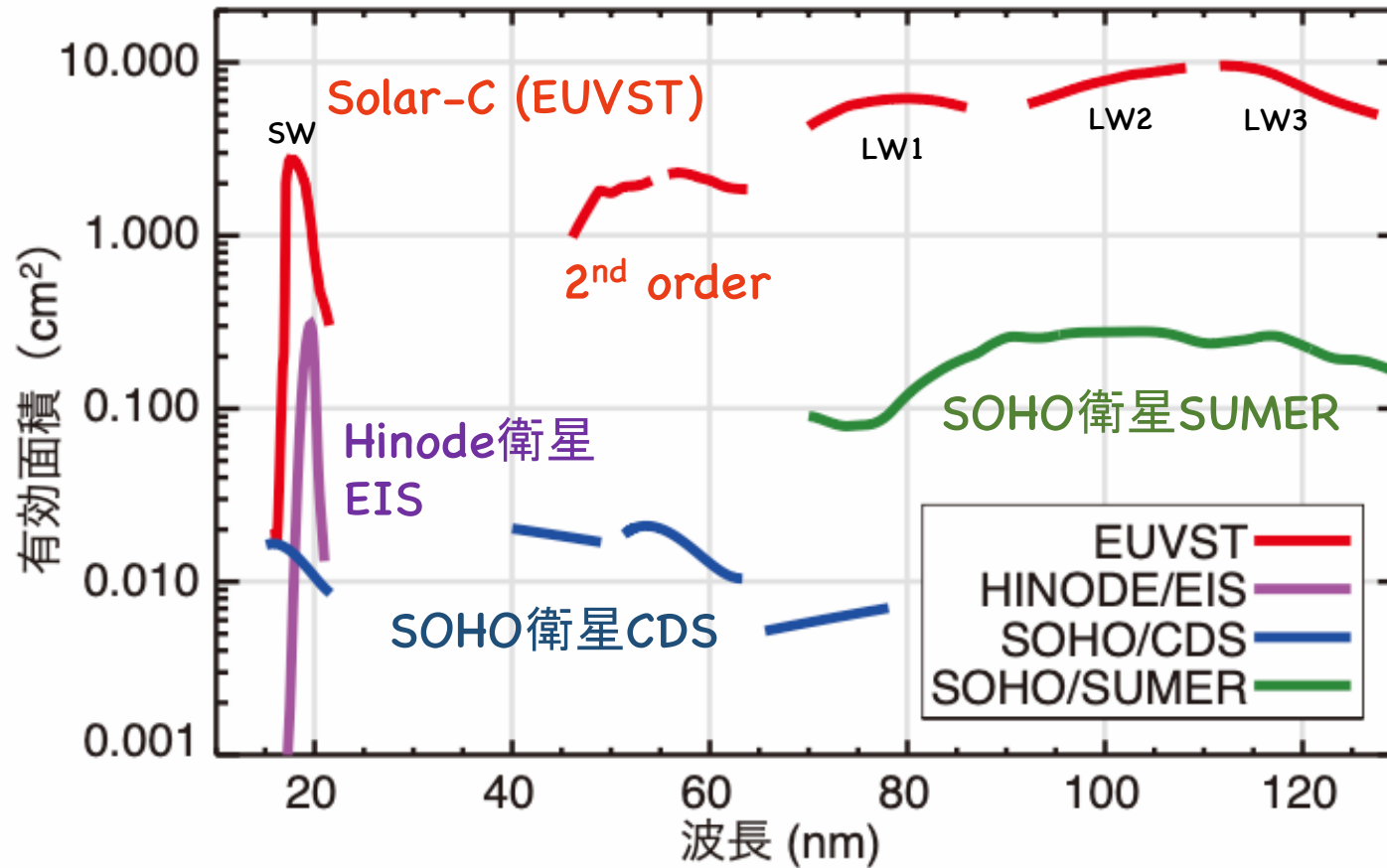
4m口径 DKIST太陽望遠鏡

~0.1秒角解像力の磁場観測等

目指す太陽大気の三次元的観測



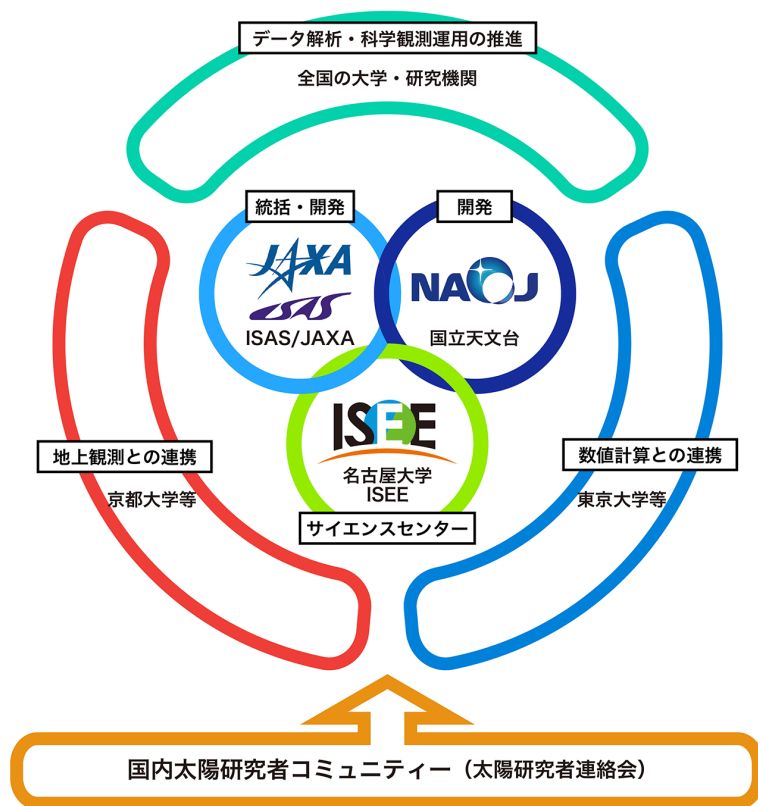
観測装置の感度



Solar-C_EUVST 計画の立案・海外協力

- 国内・海外協力国の研究者が協力して推進する計画

海外協力国：
 (ここでは装置開発協力国のみ記載)
 米国
 欧州各国(独、仏、伊、英、スイス)



国内体制図: Solar-C (EUVST) HPより転載

Proposal of a space science mission concept
 宇宙科学ミッションコンセプト提案書

In reply to 2017 Announcement of Opportunity for competitive M-class missions
 提案機会: 公募型小型 2017 年度公募

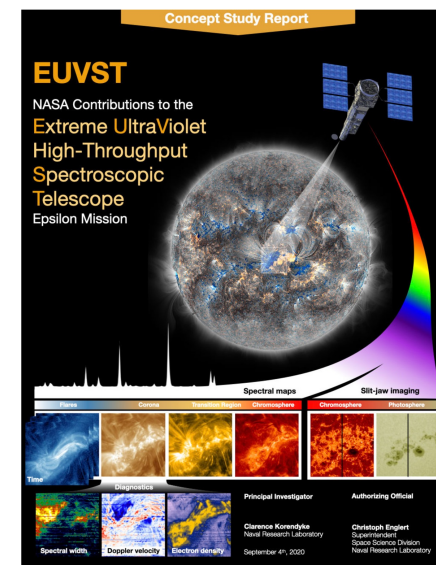
submitted on 29 Jan 2018

Summary	
Mission name	
(English)	Solar-C EUV High-Throughput Spectroscopic Telescope (Solar-C_EUVST)
(Japanese)	公募型小型衛星搭載高感度 EUV/UV 分光望遠鏡 (Solar-C_EUVST)
Proposing working group (WG)	
Under the advisory committee of	Science
Name	SOLAR-C Working Group
Principal Investigator (PI)	
Names	Shimizu, Toshifumi
Affiliations	Institute of Space & Astronautical Science/JAXA
e-mail addresses	
Co-Investigators (Co-I)	shown in the next pages

Science goals and objectives (<200 words)
 ミッションの意義と科学的目標 (200 語未満)

As a fundamental step for answering how the plasma universe is created and evolves, and how the Sun influences the Earth and other planets in our solar system, the mission is designed to comprehensively understand the energy and mass transfer from the solar surface to the solar corona and interplanetary space, and to investigate the elementary processes that take place universally in cosmic plasmas. Understanding the solar atmosphere, which connects to the heliosphere via the radiation, the solar wind and coronal mass ejections, is pivotal for establishing the conditions for life and habitability in the solar system. Thus, the two scientific objectives for Solar-C_EUVST are: (I) to Understand how fundamental processes lead to the formation of the solar atmosphere and the solar wind, and (II) to Understand how the solar atmosphere becomes unstable, releasing the energy that drives solar flares and eruptions. The main instrument is an EUV spectrometer that will observe the solar atmosphere from the chromosphere up to the corona with seamless temperature coverage. The instrument capabilities (the spatial, spectroscopic and temporal resolutions) will supersede those of previous instruments by an order or magnitude in order to achieve the timescales of plasma dynamics throughout the solar atmosphere.

JAXAへの提案書



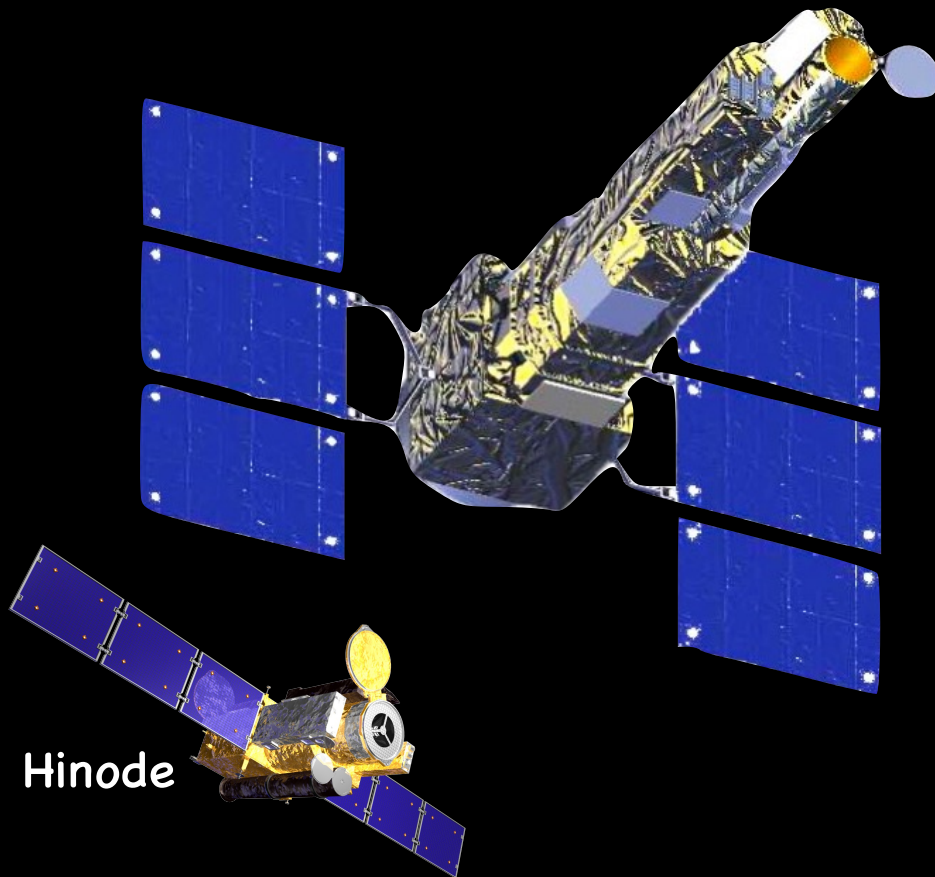
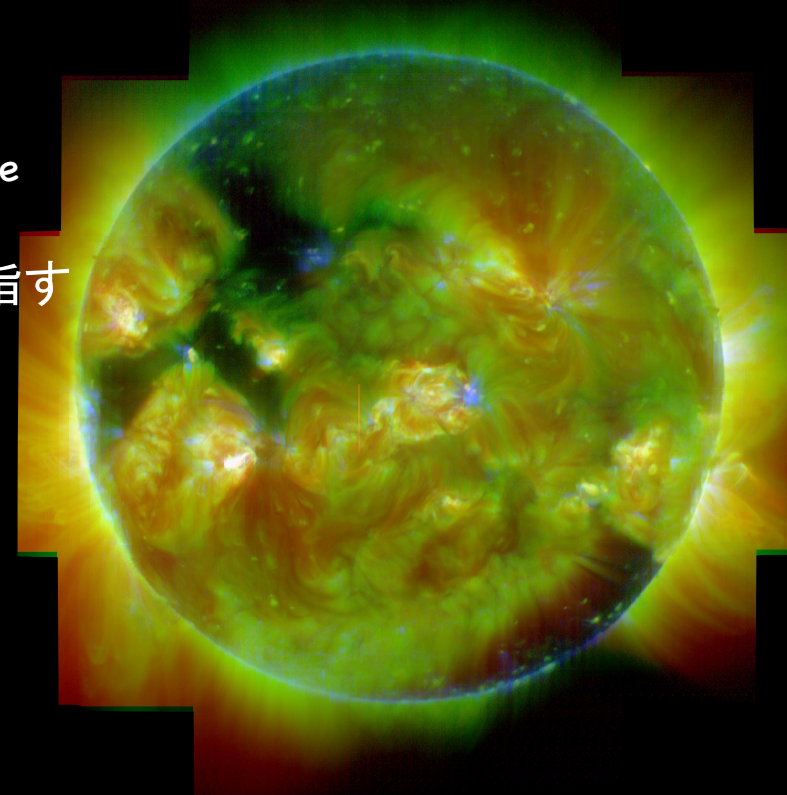
米国NASAへの提案書

Solar-C (EUVVST): 高感度EUV分光観測装置

EUVVST:

Extreme Ultra-Violet high-throughput Spectroscopic Telescope

- 2018年にJAXAへ提案、2027年頃の打ち上げを目指す
- 2020年5月に JAXAの小型衛星計画4号機に選定



Hinode

- 高い空間分解能 (Hinode に対して x8)
- 高感度 (Hinode に対して x10 以上)
- 彩層からコロナまでの広温度域をカバー (0.02-20 MK)