

SOLAR-Cを中心とした 太陽分野の将来計画

太陽研連会長 今田晋亮(東京大学)

太陽研究者連絡会のwebpageに掲載している
「太陽・太陽圏研究領域の目標・戦略・工程表」(2022年版)をもとにしています

太陽物理学の重要課題(3+ α)

- 高温の外層大気・恒星風の形成とダイナミクス
(コロナ加熱・太陽風・彩層ダイナミクス)
- プラズマ爆発現象(フレア・コロナ質量放出・
粒子加速)
- 磁場の起源(ダイナモ)
- 星としての太陽

➔ 宇宙磁気プラズマの基礎過程を理解すること

image: Hinode/XRT

太陽物理学の波及効果

地球・生命圏との
繋がり

宇宙天気
有人宇宙計画
社会的・経済的影響

天文学・惑星科学へ
の研究の展開

惑星探査：惑星圏への影響
アストロバイオロジー
母星天体の系外惑星系への作用

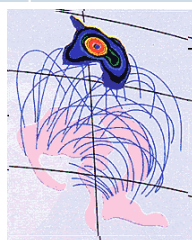
天体物理・プラズマ物理過程
の理解の深化

フレア：磁気リコネクション
太陽風：磁気プラズマ乱流
彩層：部分電離プラズマ

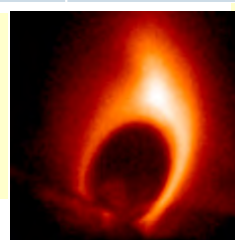
日本における太陽観測衛星の歴史

	Hinotori/ASTRO-A 1981 Feb	Yohkoh/SOLAR-A 1991 Aug	Hinode/SOLAR-B 2006 Sep
科学課題	太陽フレアで発生する高エネルギー粒子の理解	太陽大気(コロナ)の熱的プラズマとそこで起きるフレアに伴う高エネルギー粒子の理解	太陽表面磁場の運動及びそれに伴うコロナ・フレアプラズマの運動・加熱の理解
キーワード	高エネルギー粒子*	磁気再結合(リコネクション)	磁氣的活動
主な搭載観測装置	硬X線撮像装置 X線分光装置	軟X線望遠鏡 硬X線望遠鏡	可視光・磁場望遠鏡 軟X線望遠鏡・極紫外線装置
科学成果 (SOLAR-Cは期待する主な成果)	フレアの初期に発生する高エネルギー粒子の生成過程を理解するために硬X線発生場所を初めて明らかに	太陽フレアは磁気再結合過程であることを確証し、多様な構造・ダイナミックな変動に満ちたコロナを明らかに	コロナ加熱やフレアの主役である磁力線の太陽表面での特性・運動とその出力である振舞いの特性が明らかに
残された課題	熱的プラズマ*と高エネルギー粒子との関係は未解明	フレアやダイナミックなコロナを造る磁氣的起源は未解明	コロナの振る舞いが起きる仕組みやその背景にある基礎物理過程は未解明

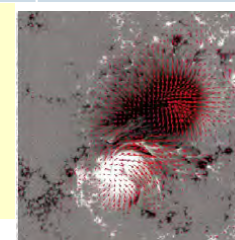
(地上観測による
推定磁力線構造)



爆発初期のX
線像がはじめて
得られた。



太陽フレアの立
体構造とその時
間経過の理解が
大きく深まった。



コロナ加熱・太陽
フレアの主役であ
る磁力線ループの
太陽表面での動き
が初めて見えた。

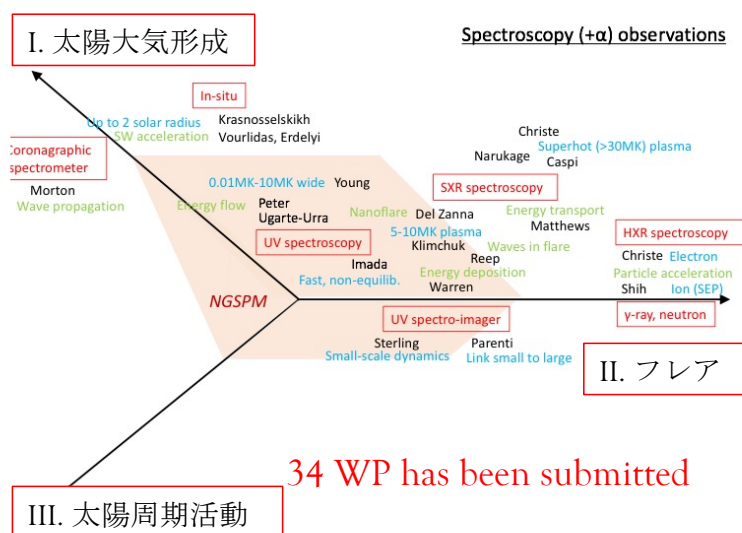
大型地上観測設備として、京都大学飛騨天文台のドームレス望遠鏡 (1979 年完成) と国立天文台三鷹のフレア望遠鏡 (1992 年観測開始) による可視光観測、また名古屋大学の豊川・富士・菅平・木曾に展開された電波望遠鏡群による太陽風の IPS 観測 (1983 年観測開始)、野辺山の電波ヘリオグラフ (1992 年観測開始) などが挙げられる。

太陽大気を光球からコロナまで 1 つのシステムとして捉えることが重要！
次は？

世界的な議論 NEXT GENERATION SOLAR PHYSICS MISSION SCIENCE OBJECTIVE TEAM

Top level 科学課題

- I. 彩層、高温のコロナ、そして太陽風はどのように作られるのか？
- II. 爆発現象フレアは、いつ、どこで、どのようにして起こるのか？
- III. 太陽の周期活動はどのようにして起こるのか？



Executive Summary NGSPM-SOT

1. 0.3" coronal/TR spectrograph
2. 0.2"-0.6" coronal imager
3. 0.1"-0.3" chromospheric/
photospheric magnetograph/
spectrograph

どのような観測が必要か議論されてきた

日本のSOLAR-C衛星計画の検討

- 科学課題やミッションの尖鋭化
 - 太陽研連による一連のシンポジウム討議（年1～2回）
 - 太陽研連運営委員会での議論
 - JAXA-NASA-ESA国際チーム”NGSPM-SOT”の勧告(2017)
- 宇宙研衛星計画ロードマップの状況推移

NGSPM-SOT による優先度

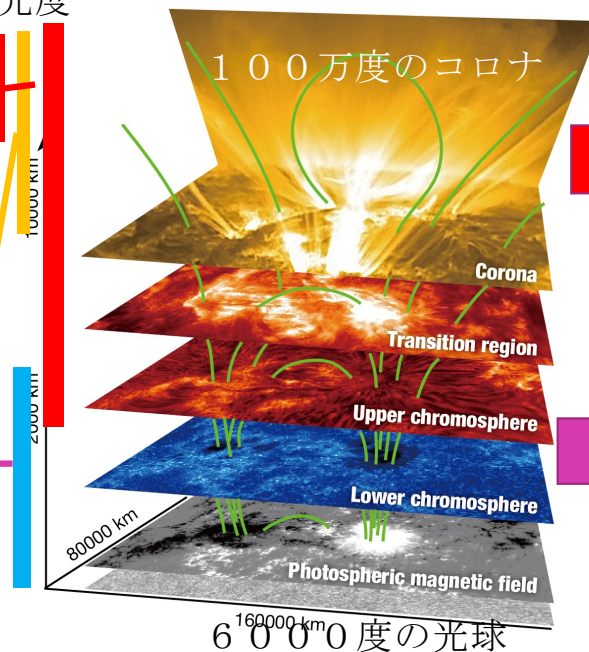
1. 上層大気高感度分光望遠鏡(0.3~0.4")

彩層～コロナをつなぐシームレスなプラズマ診断

2. 高解像度コロナ撮像装置(0.2~0.6")

3. 光球・彩層磁場望遠鏡(0.1~0.3")

光球・彩層の精密磁場観測



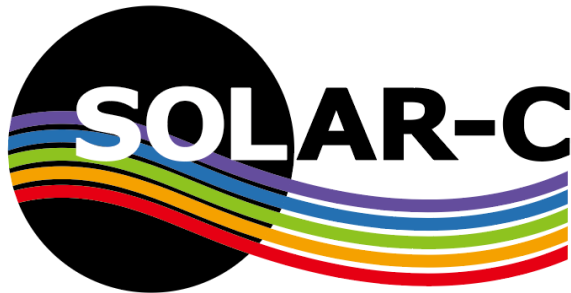
2020年台後半の戦略

上層大気診断のためにSolar-C_EUVST（公募型小型衛星）として早期(～次期極大期)に実現

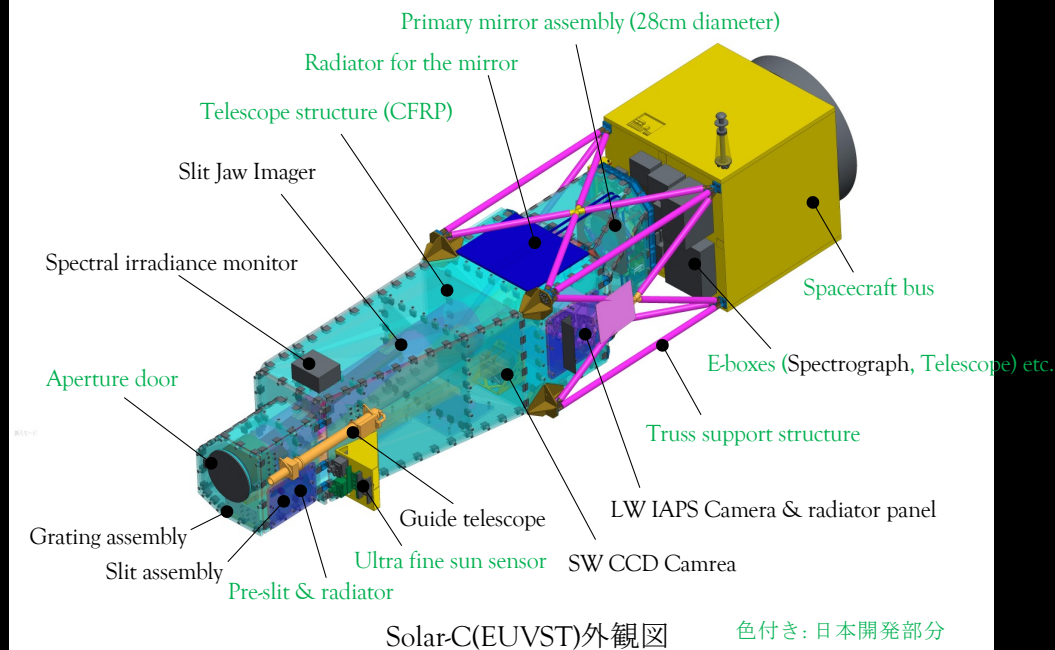
精密磁場観測

- 1) CLASP, Sunrise-3（NAOJ）で新たな手法の開拓
- 2) 海外地上大型望遠鏡(DKIST)に協力、Solar-C_EUVSTと連携

30年代の宇宙望遠鏡観測へ



次世代太陽観測衛星SOLAR-C 極紫外線高感度分光望遠鏡 (EUVST)



観測波長: 17-21.5nm,
46-128nm

→ 1万度~1500万度の全温度層を隙間なくカバー

高空間分解能: 0.4"

観測視野: 280"x280"

高時間分解能: 0.5s (最短)

太陽コミュニティ最優先のミッション

日本が主体となって、
米国、欧州と協力して
2028年に打ち上げる予定
公募型小型4号機に選定された
イプシロンロケットで打ち上げ予定

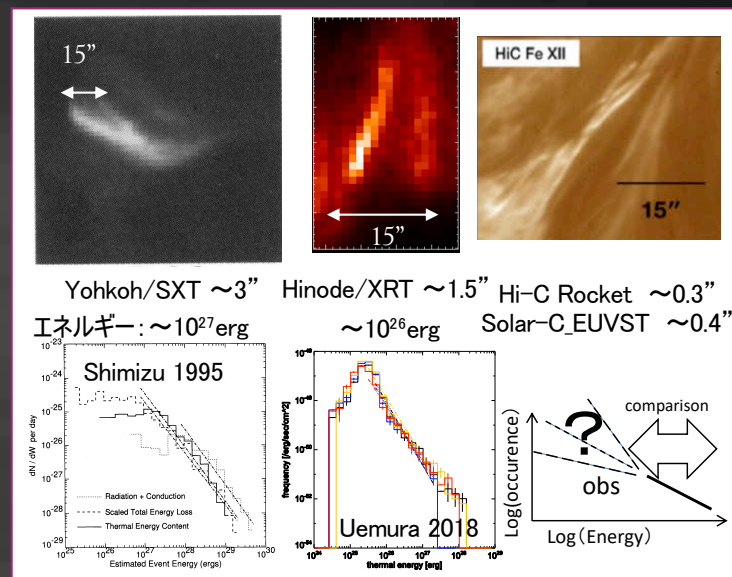
科学課題I: 高温かつダイナミックな太陽大気がどのように形成されるのか？

ひので極紫外分光器(EIS)
分解能 $\sim 3''$

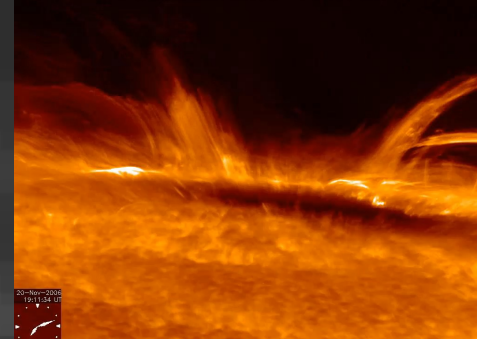
彩層とコロナの構造を0.4秒角の解像度で同時観測し、
密度、速度、温度を観測彩層-コロナの接続とエネルギー
→物質の輸送・散逸過程を定量解析

コロナ加熱理論を定量的に検証

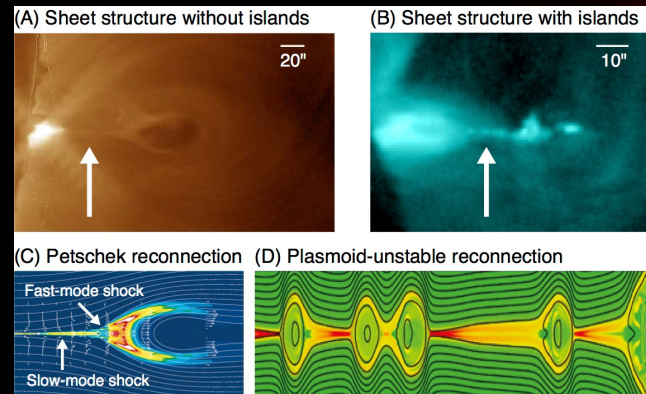
- ・ナノフレア加熱説
- ・波動加熱説



ひので可視光望遠鏡 分解能 $\sim 0.3''$

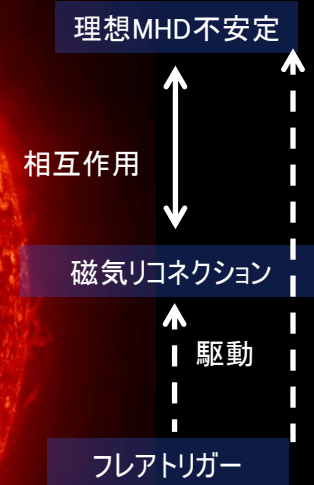
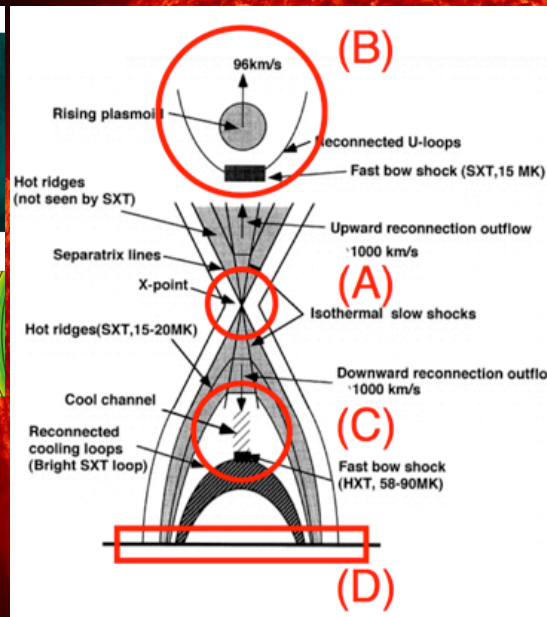


科学課題II: 太陽大気がどのように不安定になり、太陽フレア・コロナ質量放出を起こすのか？



ペチェック v.s. プラズモイドリコネクション

リコネクション領域(厚み数秒角)
の構造を空間・時間分解し、
分光診断する
→加速、加熱、乱流、衝撃波



彩層とコロナの構造を0.4秒角の解像度で同時観測し、フレアトリガー、
磁気リコネクション、理想MHD不安定の3者の関係を明らかにする

次期太陽観測衛星

2028年打ち上げ

先日 Mission Definition Review を終了

Solar-C_EUVST

JAXA Epsilon M-class mission

宇宙空間を満たすプラズマ環境がどのように作られ発展してきたか、さらには太陽が地球環境をはじめとした太陽圏環境にどのような影響を与えるか

Science objectives;

- I. 高温かつダイナミックな太陽大気がどのように形成されるのか？
- II. 太陽大気がどのように不安定になり、太陽フレア・コロナ質量放出を起こすのか？

他分野とのつながり

天文学

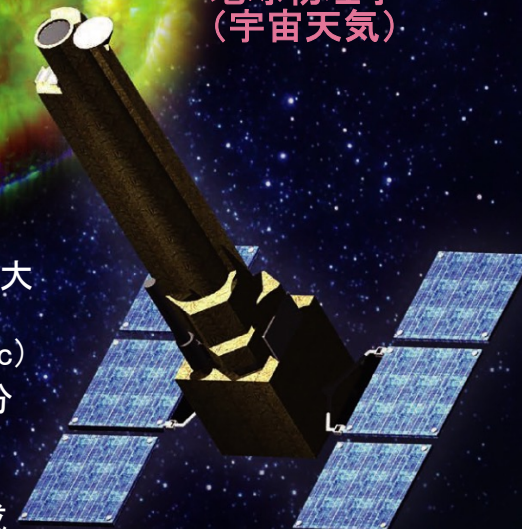
プラズマ物理学

地球物理学
(宇宙天気)

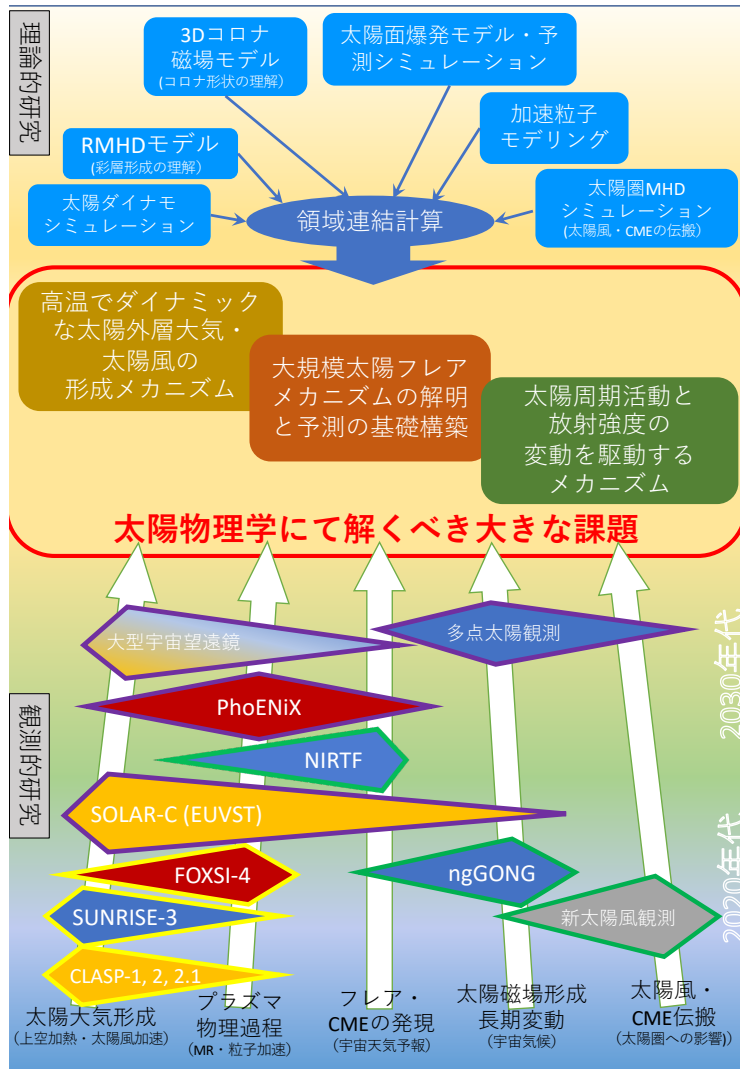
Strategy; エネルギー・質量輸送機構および散逸機構の定量的評価

Key features (not ever done);

- A) **観測温度範囲** (10^4 – 10^7 K)
太陽大気を一つの結合システムとして理解するため、全ての大気層を抜けなく同じ空間分解能で観測する
- B) **高空間・時間分解能** (spatial $\sim 0.4''$, temporal ~ 1 sec)
物理過程を理解するため、太陽大気における基本構造を分解し、そこで起こる現象を追跡する
- C) **物理量診断能力**
分光診断することにより、密度、速度、温度、電離度、組成比などの物理量を定量的に評価する



2020~2030年台の計画



- 大型計画 (衛星計画など>100億円規模の計画)
 - SOLAR-C_EUVST (公募型小型衛星4号機, JAXA-ISAS/NAOJ)
 - ・ 高空間・時間分解能での紫外域撮像分光
 - PhoENIX (公募型小型衛星に応募中, NAOJ/JAXA-ISAS)
 - ・ 軟・硬X線による撮像分光およびγ線偏光分光
- 中型計画 (概算要求が必要であるが、大学で行える研究計画)
 - 次世代太陽風観測装置 (名古屋大学)
 - ・ 電波星のシンチレーション観測による内部太陽圏の太陽風可視化
 - NIRTf (京都大学)
 - ・ DIKST(米国4m太陽望遠鏡)の焦点面に設置する広視野赤外偏光分光観測装置
 - ngGONG (NAOJ)
 - ・ 米国太陽天文台(NSO)が計画している、世界中に設置する太陽望遠鏡計画に参画

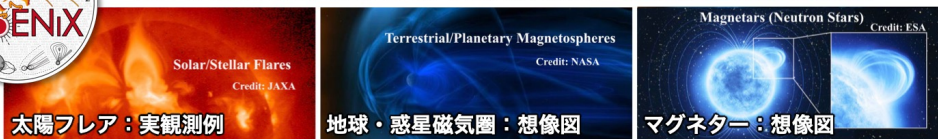
- 小型計画
 - SUNRISE-3気球実験(NAOJ/JAXA-ISAS)
 - ・ 国際共同計画のSUNRISE-3気球実験に、赤外偏光分光装置(SCIP)を提供
 - FOXSI-4(NAOJ/JAXA-ISAS)
 - ・ NASAのX線ロケット実験に軟X線分光検出器等を提供(PhoENIXのパスファインダー)
- アイデアを成熟させている段階の大型計画
 - 太陽多点観測ミッション
 - 次世代大型太陽望遠鏡 (NAOJ/JAXA-ISAS)

PhoENiX (軟・硬X線による撮像分光および γ 線偏光分光)

2030年代での具体化に向けて関連する研究者グループが検討進めている大型計画である PhoENiX 衛星計画。太陽研連では、その検討を支持している。現在ISASにミッション提案中。



加速粒子が観測される様々な天体現象：加速粒子の起源は謎



太陽フレア：実観測例

地球・惑星磁気圏：想像図

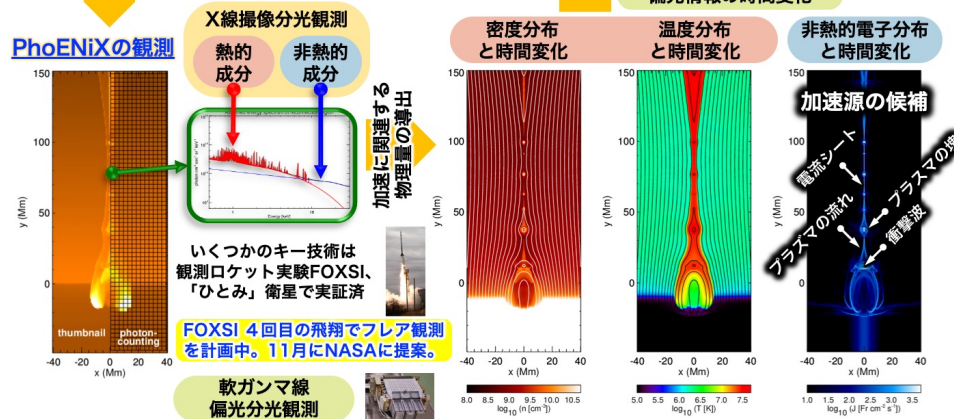
マグネター：想像図

粒子加速領域全体を空間・時間分解できる唯一の天体

PhoENiXの科学目的

- ① 粒子加速場所の特定
- ② 加速の時間発展の調査
- ③ 加速の特徴の把握

偏光情報の時間変化



PhoENiX 衛星計画の大目的は、高エネルギープラズマ現象（加速・加熱）の普遍性と、太陽や恒星におけるそのような現象が惑星の環境と居住可能性に与える影響を理解することである。

そのために、次の3つの問に答えることを科学目標としている。

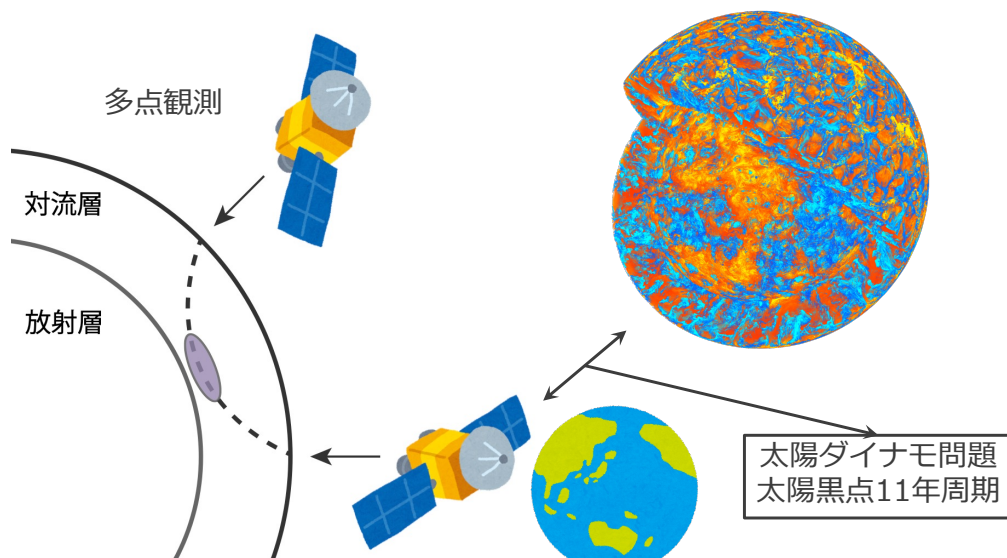
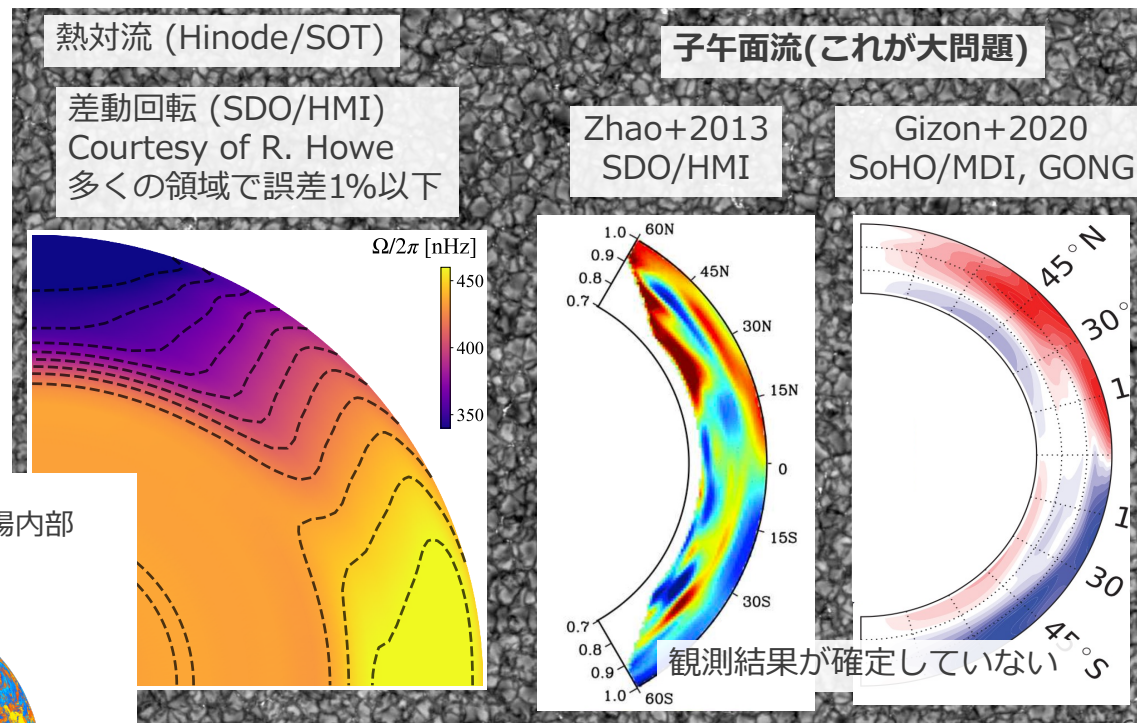
1. 太陽フレアにおいて、プラズマはどのようにして超高温にまで加熱されるのか？
2. 太陽フレアにおいて、粒子はどのようにして加速・輸送されるのか？
3. 太陽フレアにおいて、粒子のエネルギーはどのように熱的・非熱的成分に分配されるのか？

太陽多点観測ミッション 黄道面脱出&極域ミッション

太陽内部の速度場を理解することがダイナモ
の理解には必須

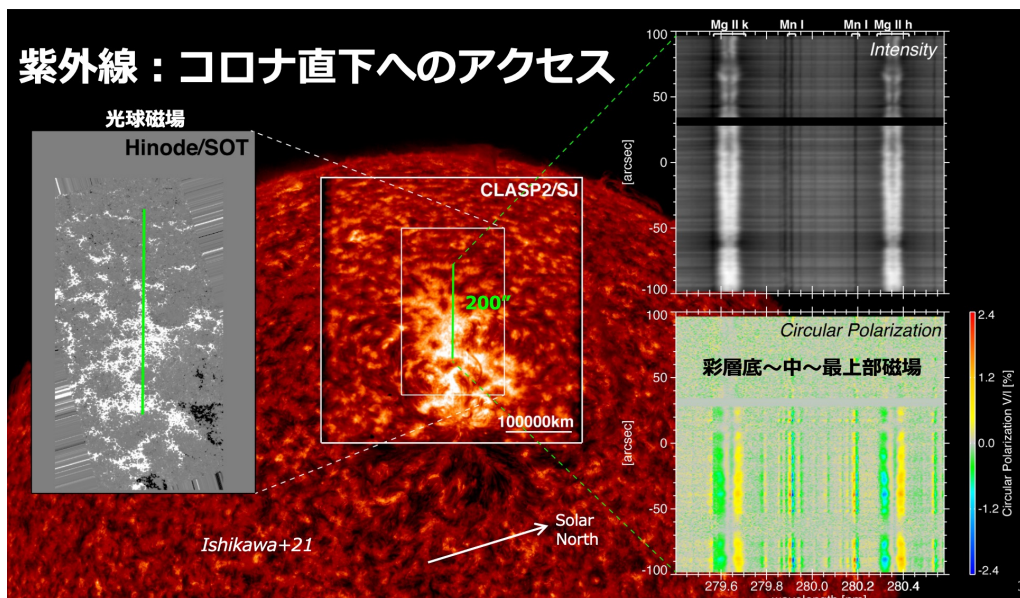
太陽表面の2点の振動を長時間観測することで2
点間の波の伝播時間を求める。伝播時間のモデル
からのずれから太陽内部の音速の擾乱の原因
(温度、流れ、磁場)を推測する。

本ミッションの目的は、多点観測を用いた日震学により太陽内部
の流れ場・磁場生成の現場を測定することである。



ダイナモ研究で興味のある対流層の底の物理量
を推定するためには、太陽表面で、緯度にして
45度以上離れた二点の物理量を観測する必要が
ある。
そのため、黄道面脱出ミッションを提案

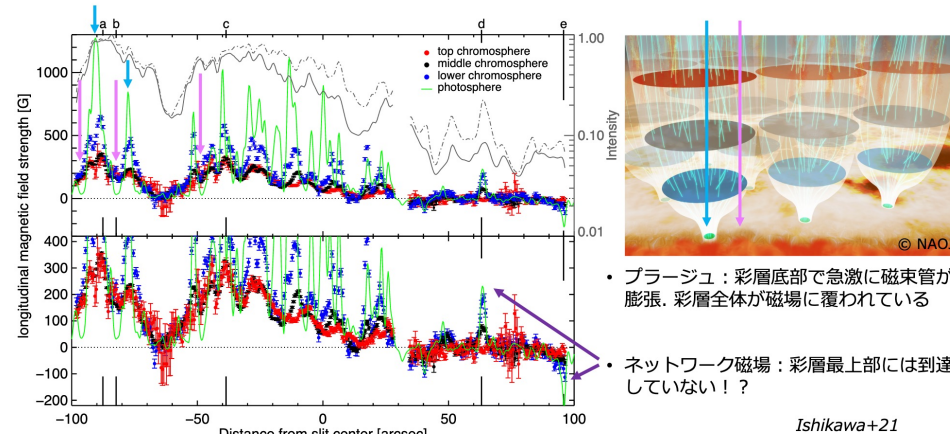
大型宇宙望遠鏡



エネルギー輸送を考える上で、光球～彩層における磁場構造およびその時間変動を理解することが重要。

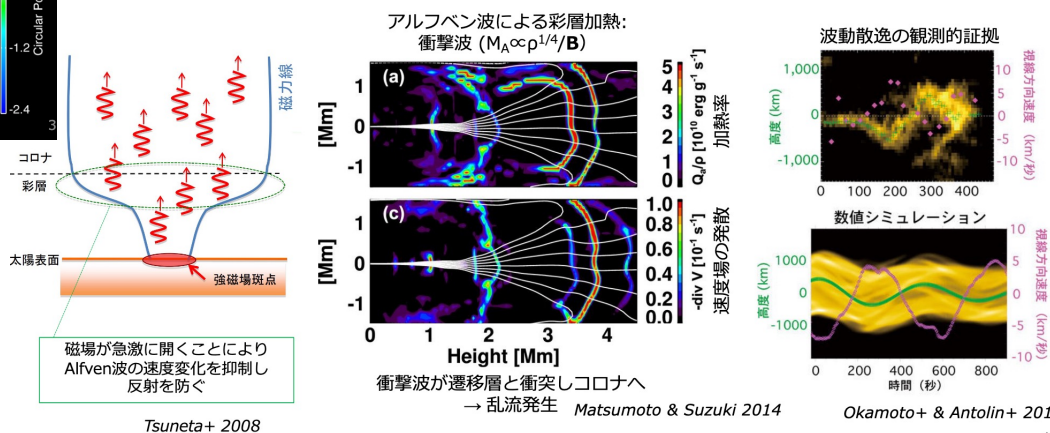
これまで困難であった彩層磁場の詳細観測を行う！

光球～コロナへ広がる磁束管の姿



磁場測定的重要性: $B_0(h)$

- 磁力線の開き具合（プラズマ β の高さ変化）がエネルギー伝搬・散逸を決める



太陽研究分野のロードマップ

観測はより上空へ、磁場診断(偏光分光)かつ温度シームレスに(分光)



ひので 2006 –(2022)
光球での磁場診断



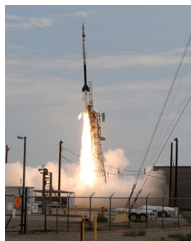
SUNRISE-3 気球実験 (2022)
光球～彩層の3D診断



海外大型望遠鏡(DKIST)への参加 (2020~)

超高解像度
光球・彩層磁場

上空大気の磁場診断
彩層上部・遷移層での手法開拓
CLASP1観測ロケット実験 (2015)
CLASP2観測ロケット実験 (2019)

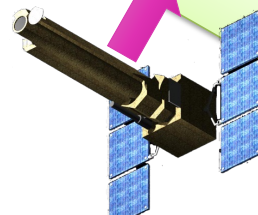


ハンレ効果
紫外線偏光の開拓



現在

観測連携



SOLAR-C以降：多様な方向・可能性
(優先付けは検討課題) 2030以降

- ・ 宇宙からの1m望遠鏡
上空大気磁場精密計測
- ・ 黄道面脱出による太陽極域観測
太陽磁場周期活動の理解
- ・ 公募型小型PhoENiX
MRにおける粒子加速の理解

上空大気のプラズマ診断

公募型小型衛星
SOLAR-C (2028)

紫外線を用いた彩層上部～コロナ
における高解像度の分光観測の実現

Solar-C及びその他の望遠鏡開発を可能にしているのは、ひので等の実績に加えて、**CLASP**や**Sunrise**などの飛翔体観測で国際的にも評価され、また人工衛星搭載装置開発を担える人材(サイエンス、エンジニア含めて)を国立天文台(太陽)は育ててきたことによる。

国立天文台はコミュニティと一体となって大中小様々なミッションを継続的に推進してきた。

