
次世代太陽観測衛星の成功に向けて、 若手の方々に希望・期待すること

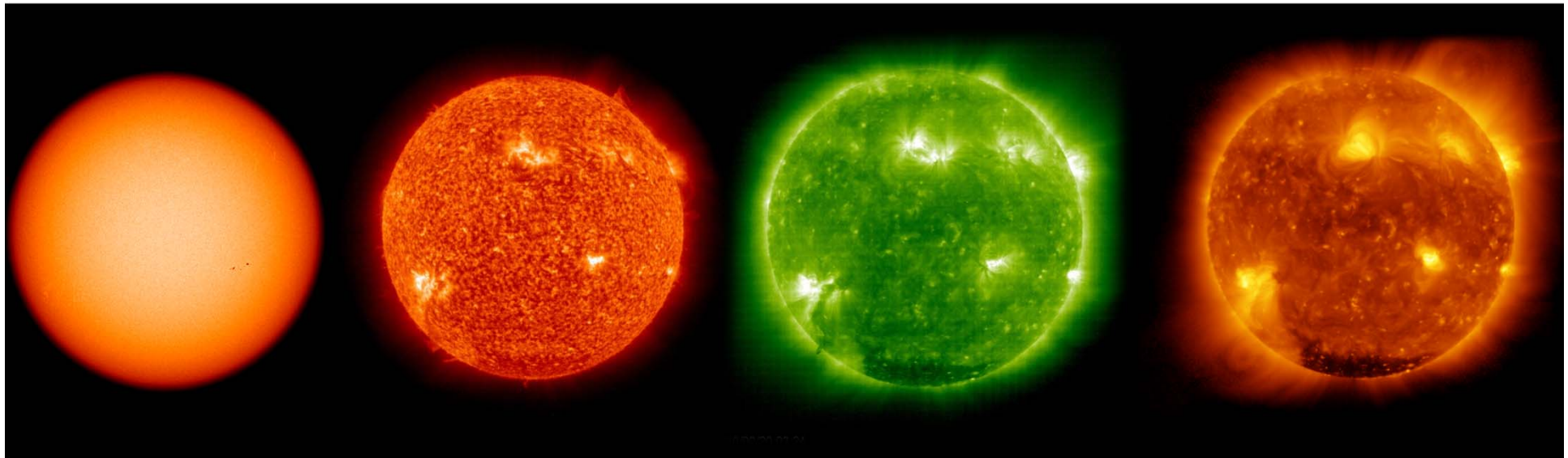
久保 雅仁

国立天文台
「ひので」科学プロジェクト

解明したい太陽物理学の2大問題その1

太陽外層大気加熱・加速問題

- 光球6000度に対して上層大気が100万度
- フレア・ジェットなどの爆発現象発生メカニズム



光球:6千度

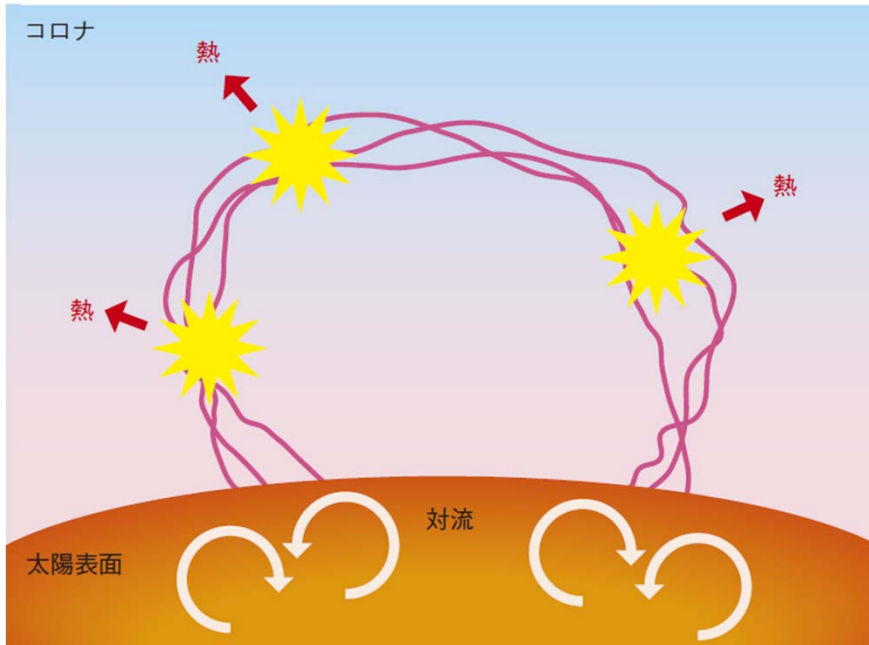
彩層:1万度

遷移層<100万度

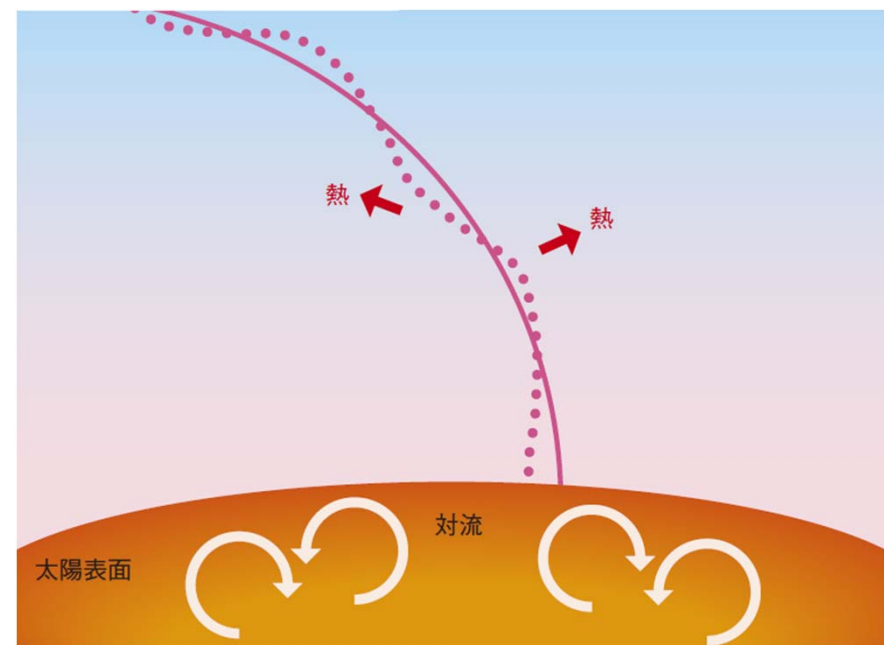
コロナ>100万度

外層大気加熱メカニズム

微小フレア加熱説



波動加熱説



- エネルギー源： 太陽内部や表面での対流運動
- エネルギー輸送の媒介者： 磁力線
- 加熱・加速： 磁気エネルギーの解放（磁気リコネクション、波）

→磁場とプラズマの相互作用が鍵を握る

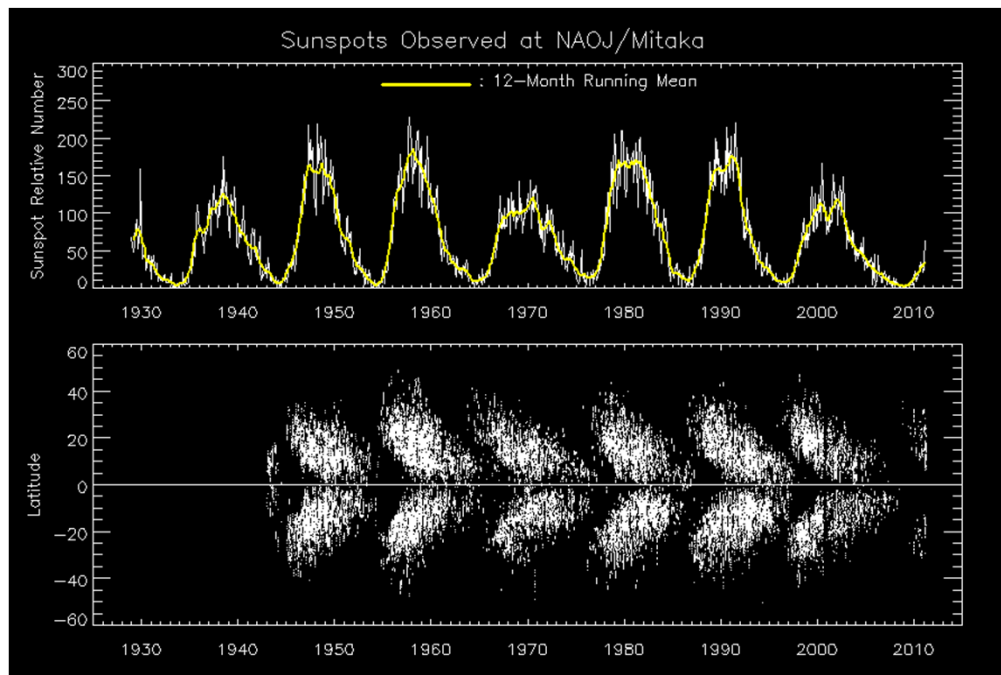
解明したい太陽物理学の2大問題その2

太陽の磁気周期活動

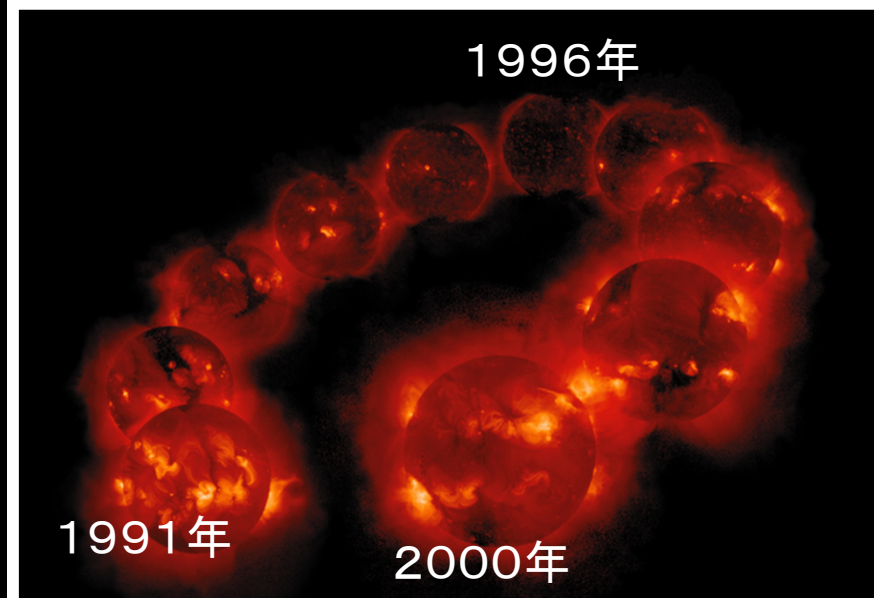
黒点数・太陽活動性・磁場の極性が11年周期で変動する

周期によって黒点数にばらつきがある(全く現れない時期もあった)

黒点の数と位置の年変化(NAOJ)



太陽コロナ活動の年変化
(ようこう衛星)



太陽(グローバル)ダイナモ

- 差動回転

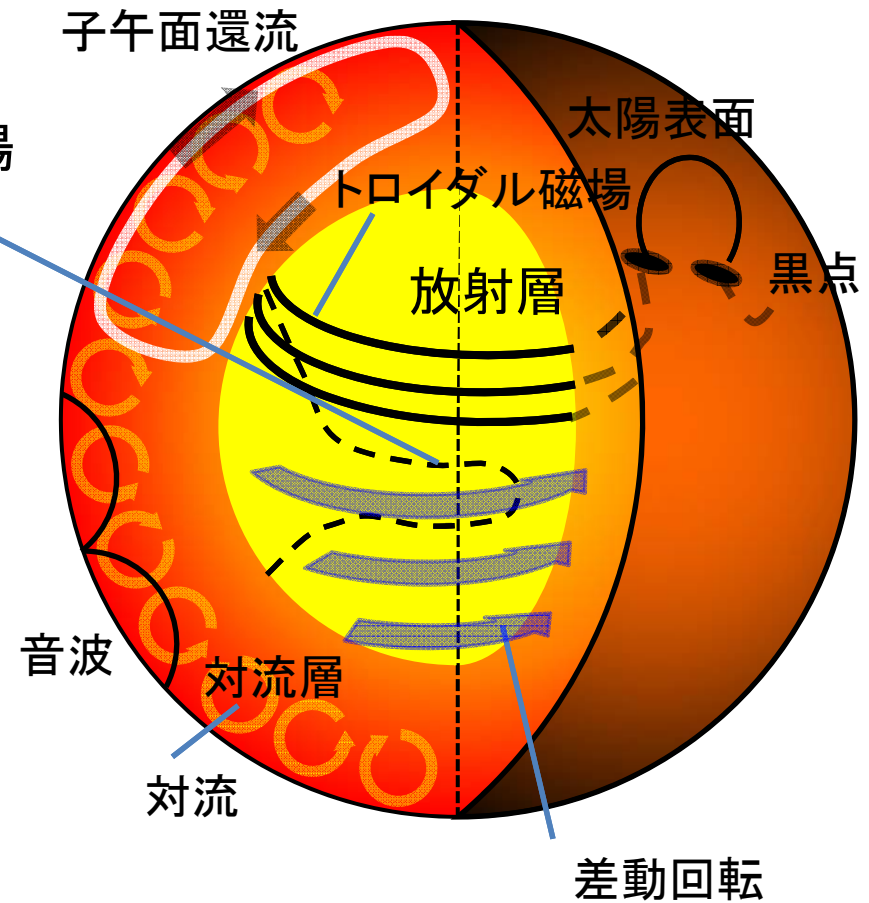
ポロイダル磁場からトロイダル磁場の生成(Ω 効果)

- 子午面(還)流

移流による磁場の赤道
→極への輸送

- 対流

拡散による磁束の輸送



Courtesy of H. Hotta

太陽内部の流れによる磁場の増幅・輸送が鍵

どのように取り組むか(観測的アプローチ)

地上観測のメリット:

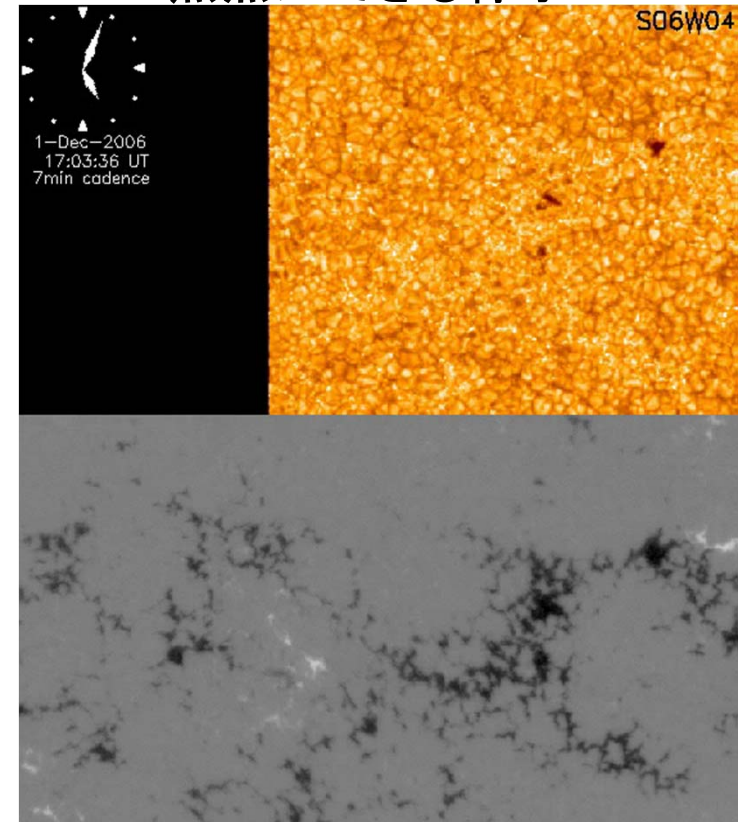
- 先進的な焦点面装置を使った観測
- 後から追加・改修ができる
- 観測の自由度が高い
- 1太陽サイクル以上の変動

衛星観測のメリット:

- 大気の影響を受けない高解像度・高精度観測
- 地上では観測できない波長帯での観測
(X線、極端紫外線)
- 長時間連続観測(太陽では特に大事)
- データ解析が容易

多くの太陽研究者は色々な観測データを組み合わせて
(良いところ取りをして)研究を進めている。

黒点ができる様子



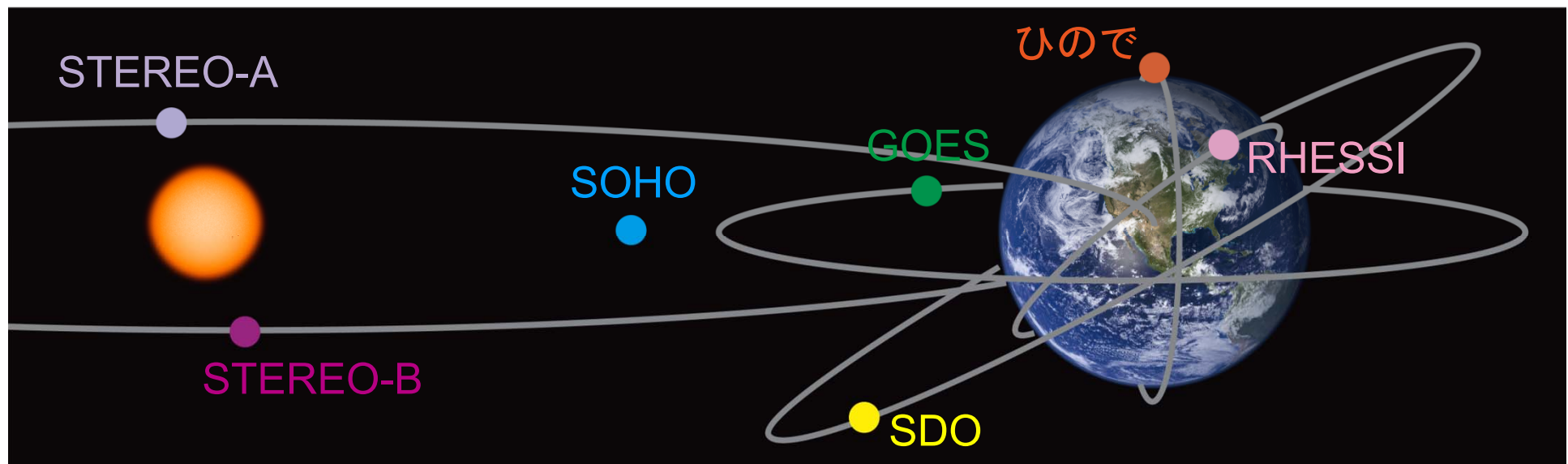
上:太陽表面の明るさ
下:太陽表面の磁場

太陽スペース観測の黄金時代

現在6機の太陽観測衛星が稼働中

- 限られた視野を詳細に見るもの(「ひので」タイプ)から太陽全体をモニター観測するもの(SDOタイプ)までそれぞれの衛星が別の特徴を持つ。
- 太陽の多層(多温度)構造を調べるために、可視・紫外・X線と波長も様々。

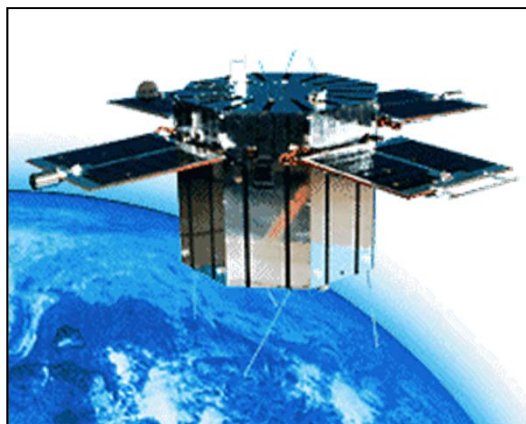
→ 全てのデータが公開されている。



Courtesy of R. Ishikawa

日本の太陽観測衛星の歴史

ひのとり (ASTRO-A)

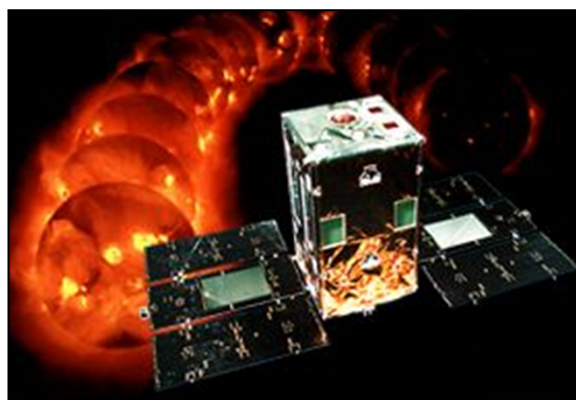


188 kg
1981年2月打ち上げ

フレア中の
高温プラズマ生成
高エネルギー粒子加速

最高空間分解能 ~10秒角

ようこう (SOLAR-A)



390 kg
1991年8月打ち上げ

・フレア中の
高温プラズマ生成
高エネルギー粒子加速
・太陽コロナの加熱
・太陽活動周期

最高空間分解能 ~5秒角

ひので (SOLAR-B)



900 kg
2006年9月打ち上げ

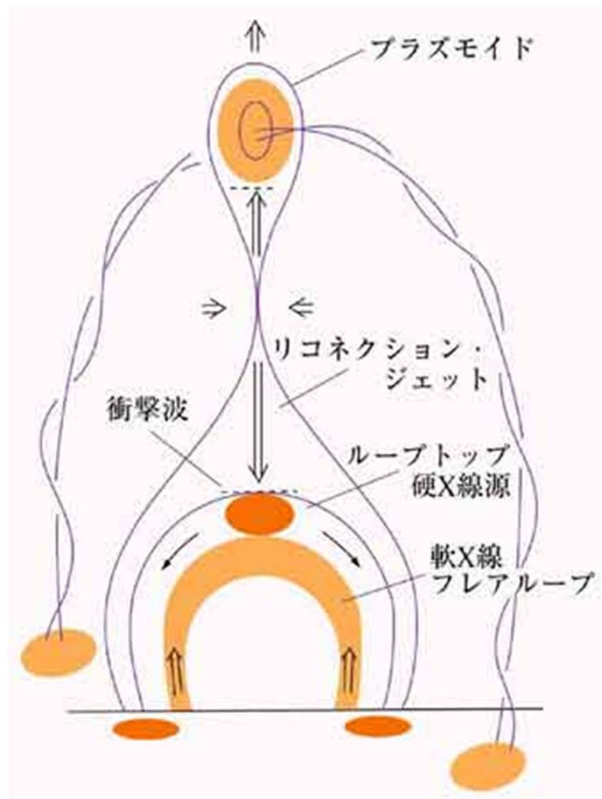
太陽磁気活動全体
・磁場の微細構造
・3次元磁場構造
・太陽彩層・コロナ加熱
・プロミネンス
・太陽活動周期

最高空間分解能 ~0.2秒角

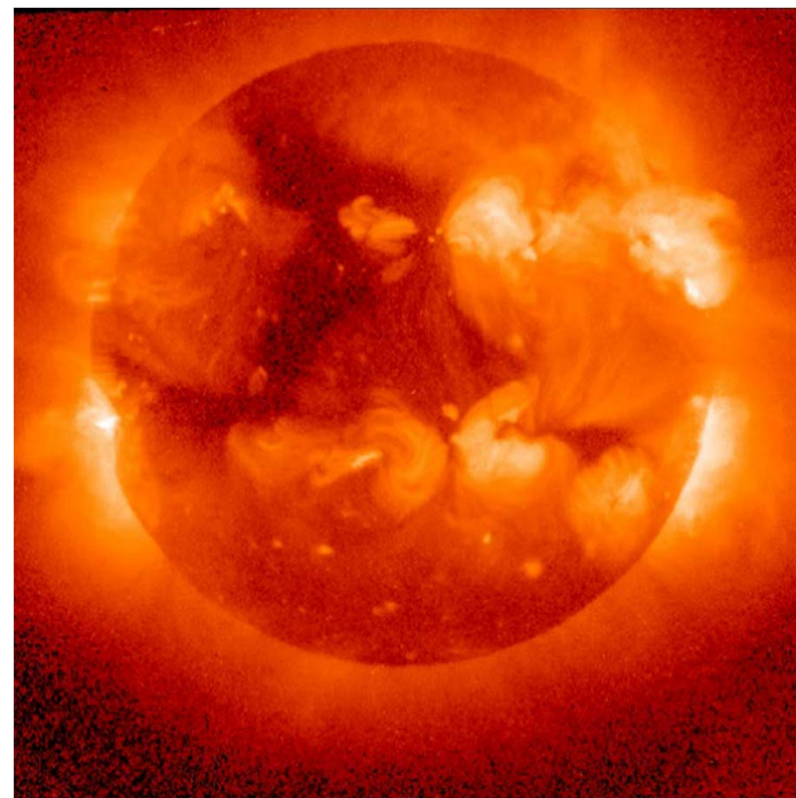
太陽外層大気(特にコロナ)の加熱・加速問題の
理解に大きく貢献してきた。

「ようこう」が捉えたダイナミックな太陽コロナ

コロナで起きる爆発現象（フレア、ジェット、CME,...）は、磁気リコネクションによる磁気エネルギーから運動・熱エネルギーへの転換で起きていることが観測的に証明された。

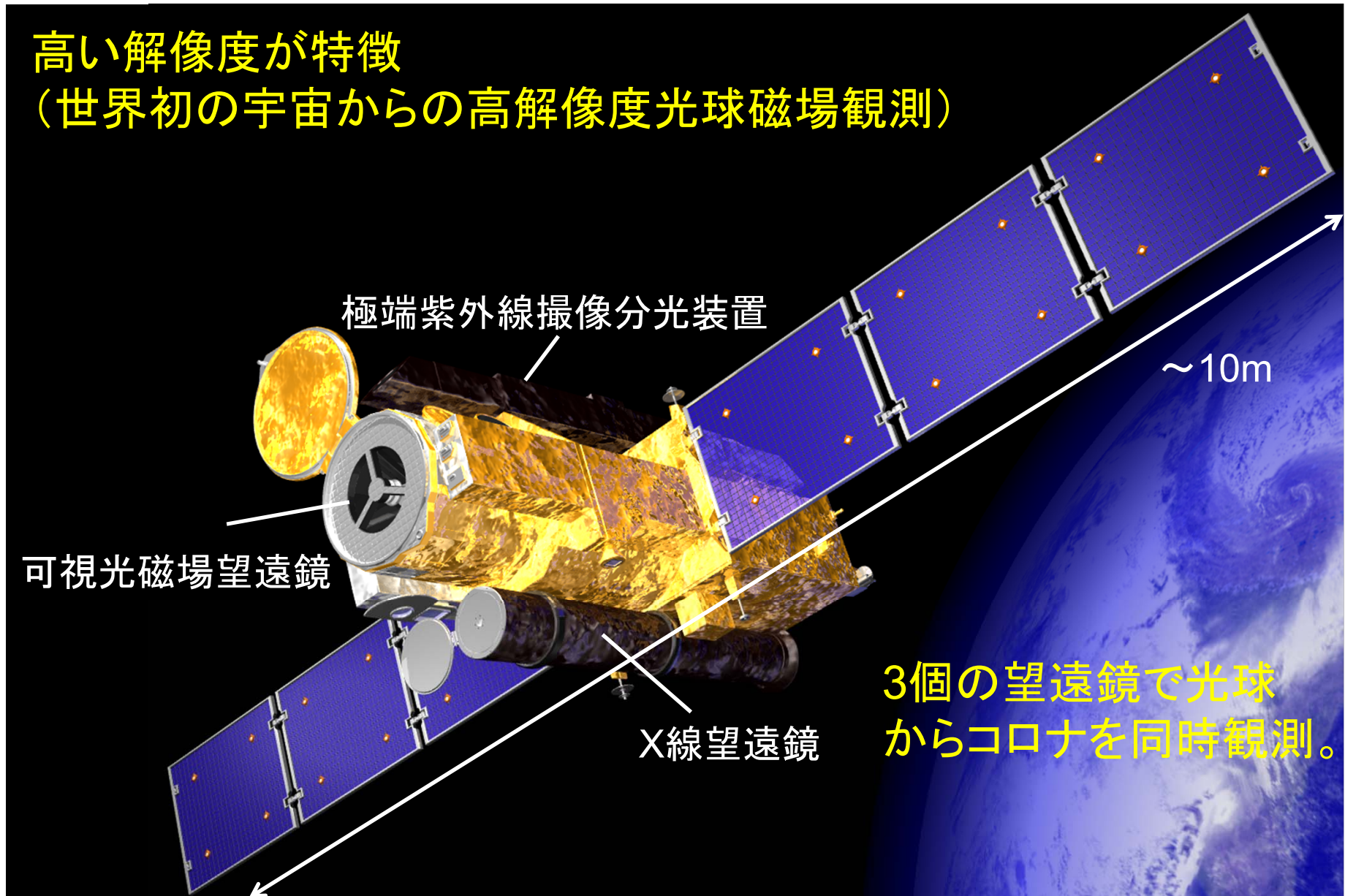


極大期の太陽コロナ
(ようこう軟X線望遠鏡)

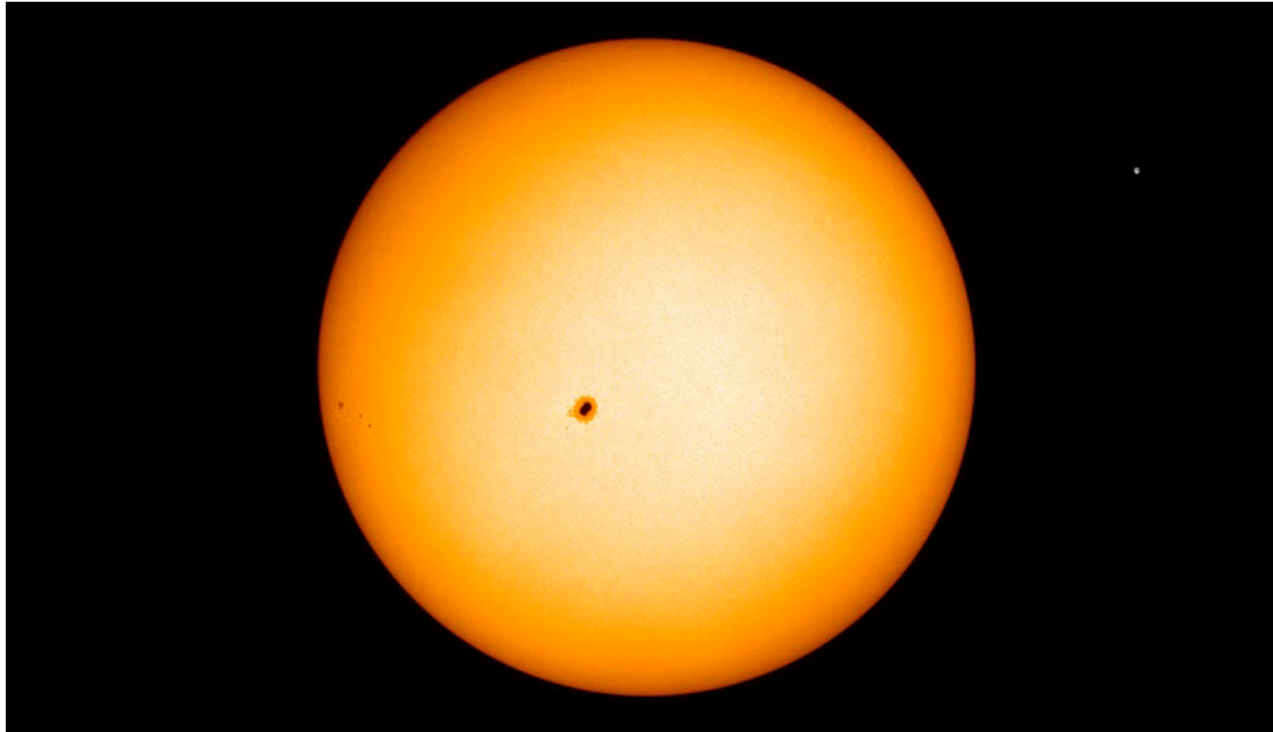


「ひので」衛星

高い解像度が特徴
(世界初の宇宙からの高解像度光球磁場観測)



「ひので」の“顕微鏡”観測



courtesy of
T.J Okamoto

可視光磁場望遠鏡
(0.2秒角~200km)

数万km規模の黒点も200km程度の微細磁束管の集まり

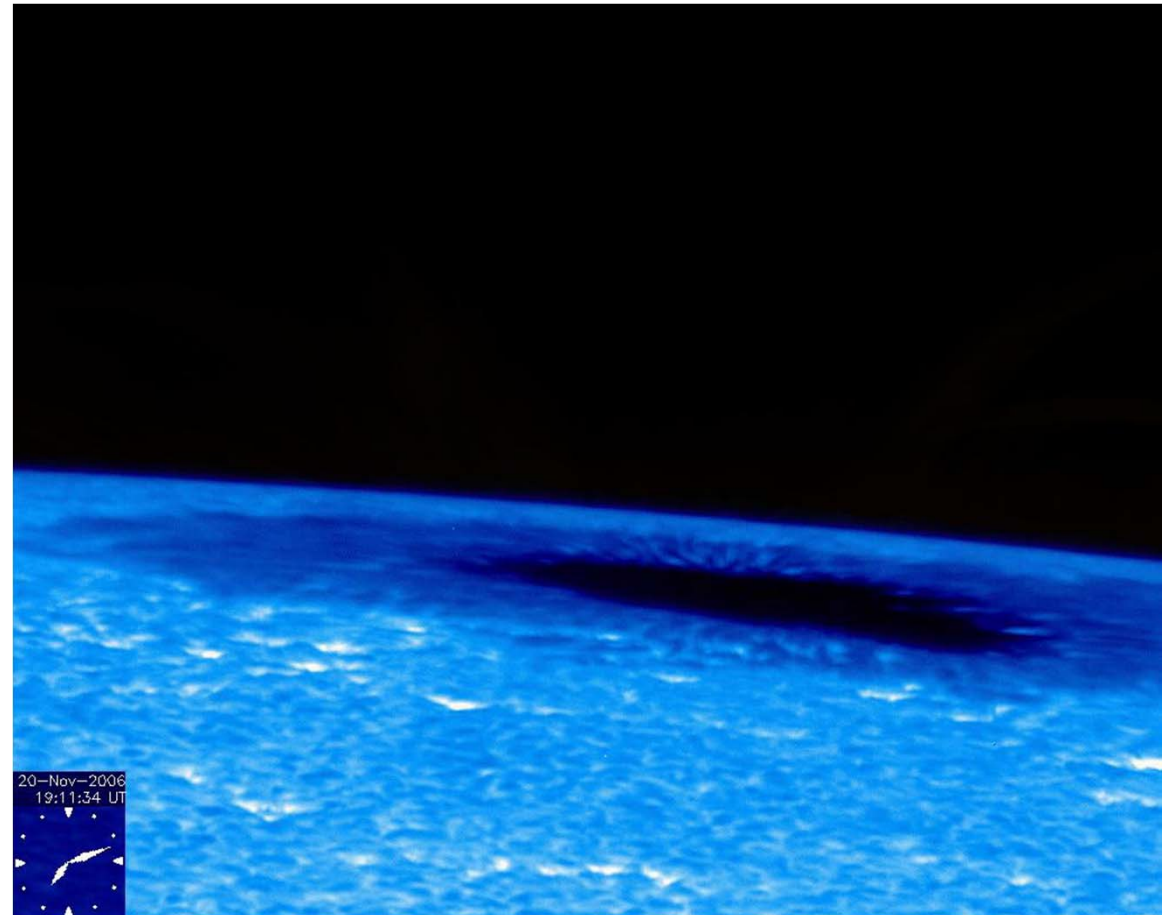
太陽表面で見られる多様な磁場構造は、異なる物理条件下での磁場と対流の相互作用で全部説明できそう。

非常にダイナミックな彩層

太陽の縁における黒点の観測
(可視光磁場望遠鏡)

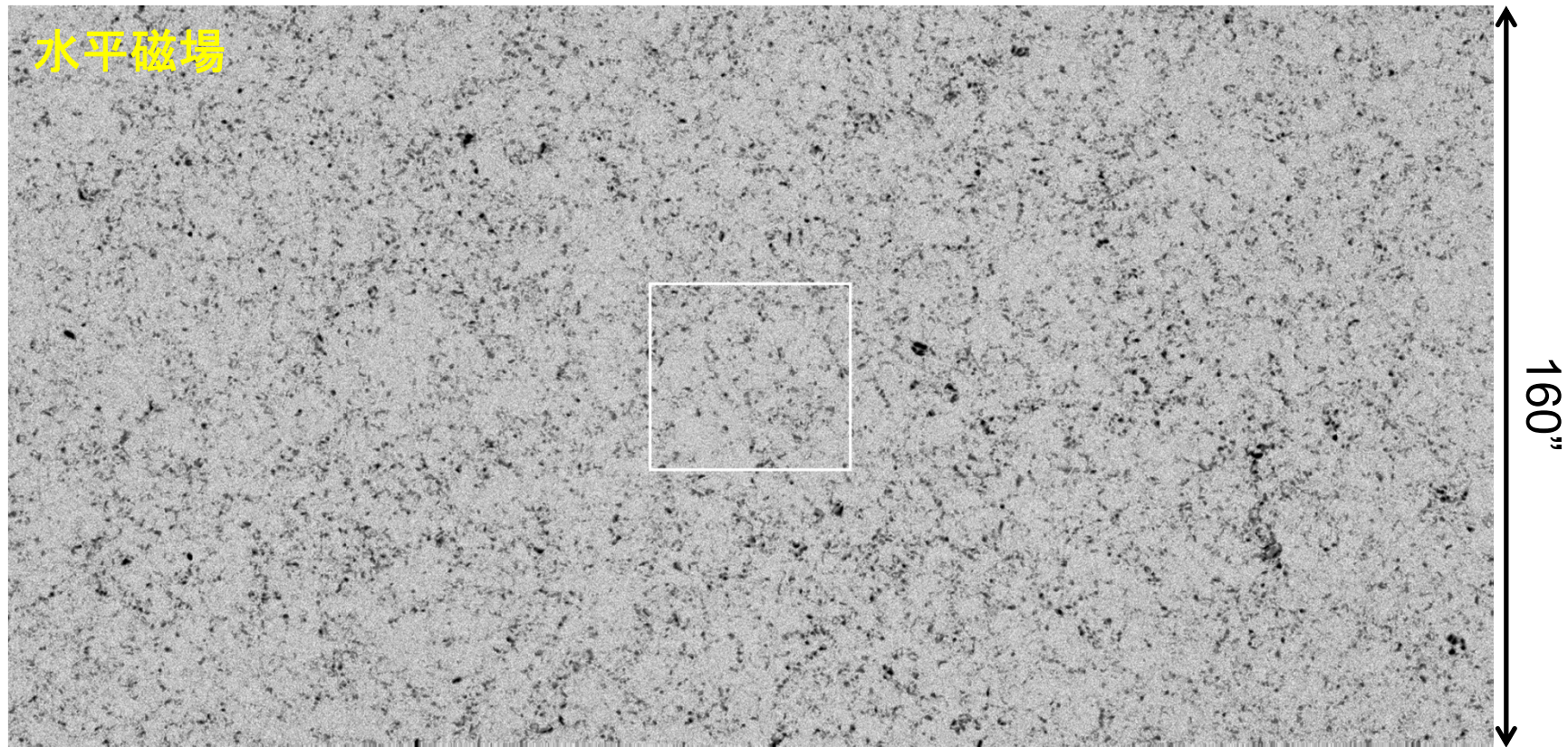
光球と彩層では太陽の姿が全く異なる。

- 彩層では黒点内でも静穏領域でも爆発・噴出現象に満ち溢れている。
- 彩層を伝わる磁気流体波も初めて検出された。



青色：光球、オレンジ色：彩層
(courtesy of Y. Katsukawa)

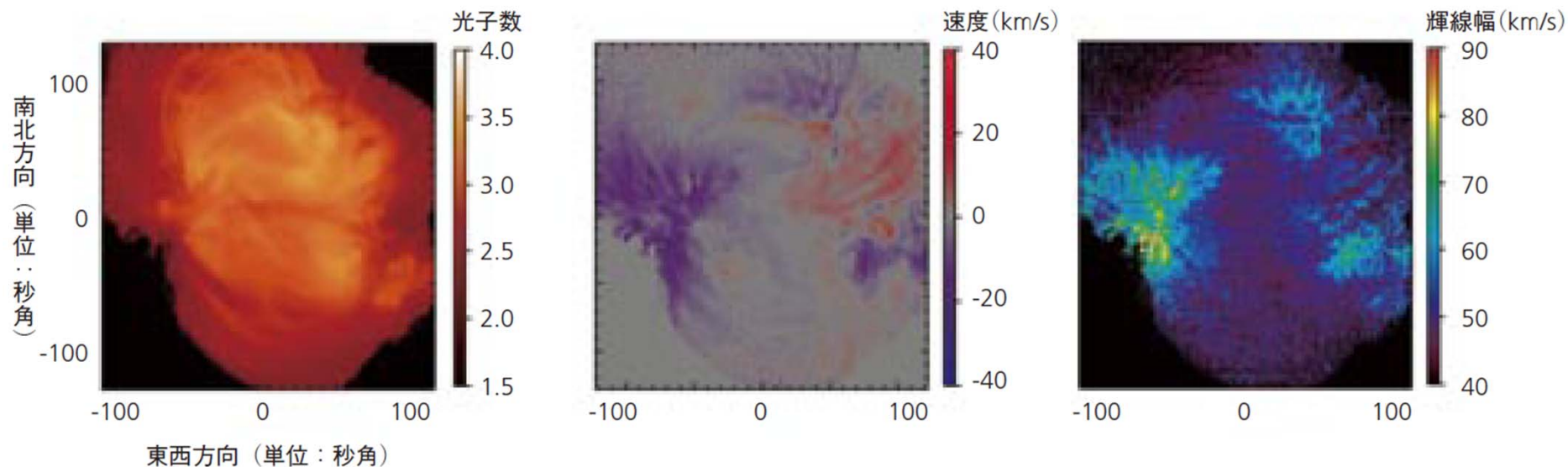
一新されつつある「静穏領域磁場」の理解



- 黒点など何も無い静穏領域が微細な磁場構造に埋め尽くされている。
- 粒状斑スケール(1000km程度)の磁場が対流の上昇流と一緒に大量に浮上してきている。

コロナループの足元の激しい運動

極端紫外線撮像分光装置による遷移層・コロナの物理量診断

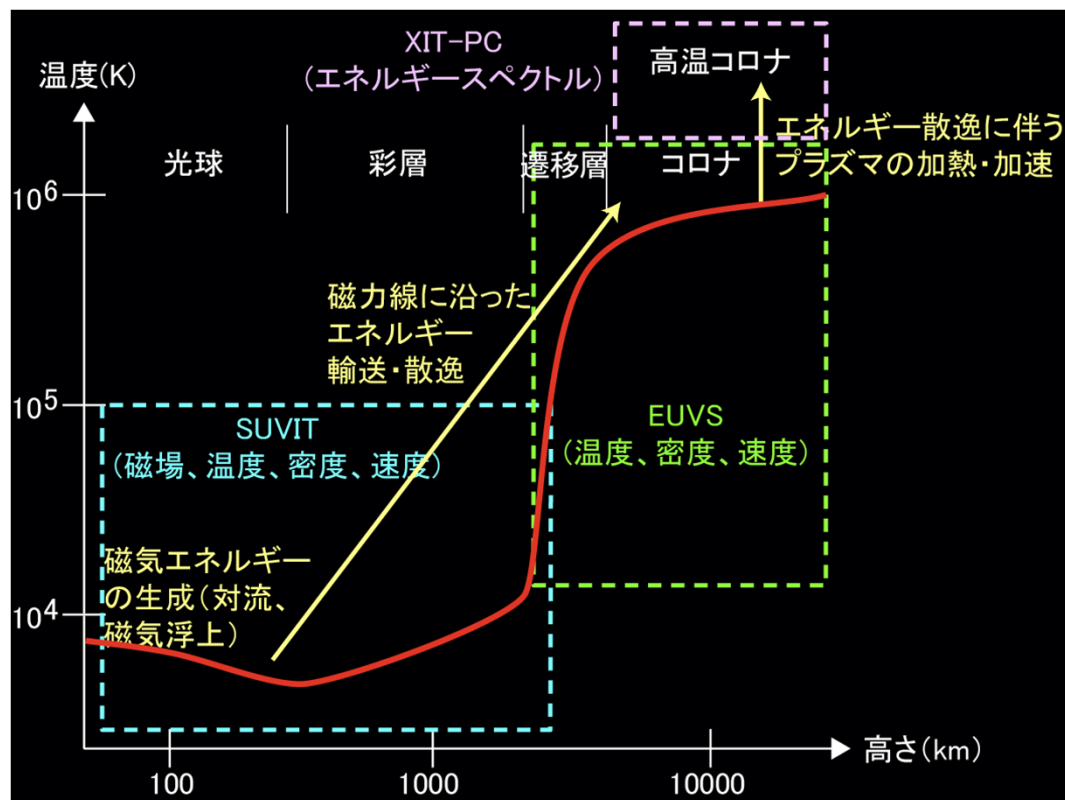


- 活動領域のループ構造の足元に上昇流 & 空間分解できない激しい運動が存在していることが分かった。

→ コロナ加熱の理解には彩層・遷移層の理解が本質

(光球・彩層: 0.2秒角解像度 ⇔ 遷移層・コロナ: 解像度2秒角)

次期太陽観測衛星SOLAR-C



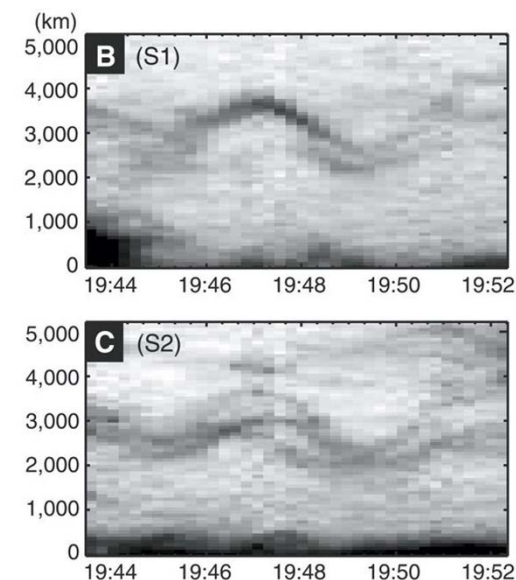
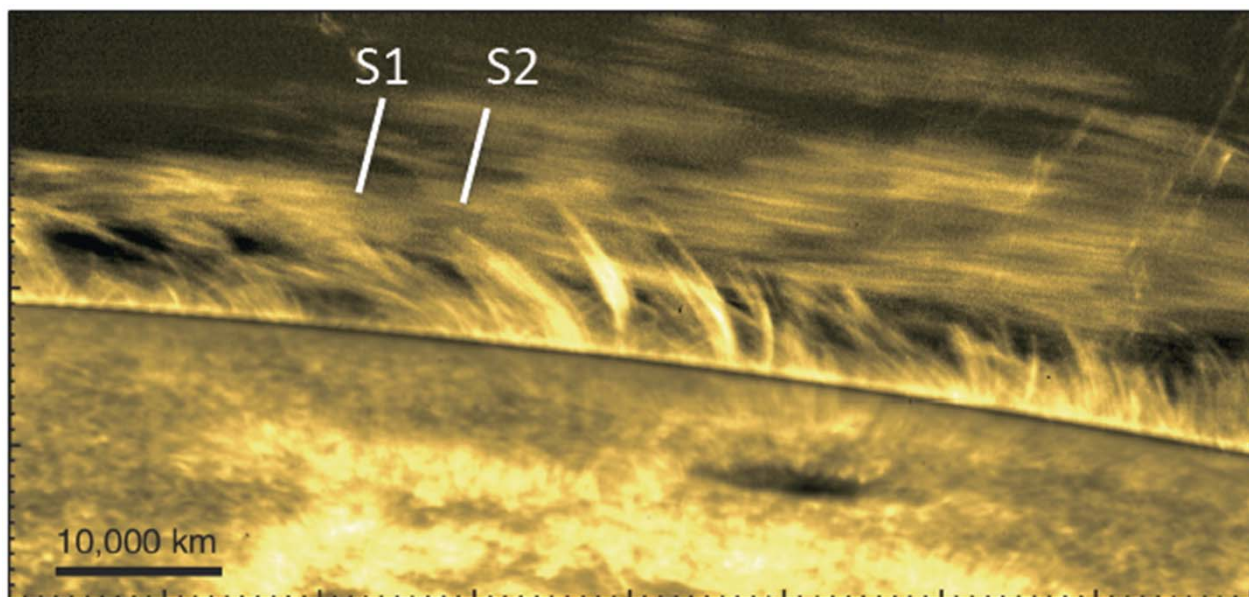
サイエンス課題

彩層・コロナ加熱
フレア発生機構
太陽風加速
ジェットが発生
プロミネンス・CME
磁気流体波
磁気リコネクション
.....

単に現象を見るだけでなく、全大気層でプラズマの温度、密度、速度、磁場などの物理量を測定することで、「磁気エネルギーの生成・輸送・散逸」の素過程を、プラズマ物理学に基づいて理解する。

撮像観測から(偏光)分光観測へ

- 磁気エネルギー輸送の中継点である彩層の高分解能偏光分光(磁場)観測
 - 爆発・噴出現象の原因(彩層リコネクションの物理)や上空大気への影響
 - 彩層を伝わる波のモード同定やエネルギー輸送量の見積もり
- 彩層の噴出・波動現象を観測できる分解能での遷移層・コロナの分光観測
 - 彩層→遷移層・コロナへのエネルギー輸送
 - 波の散逸や微小フレア



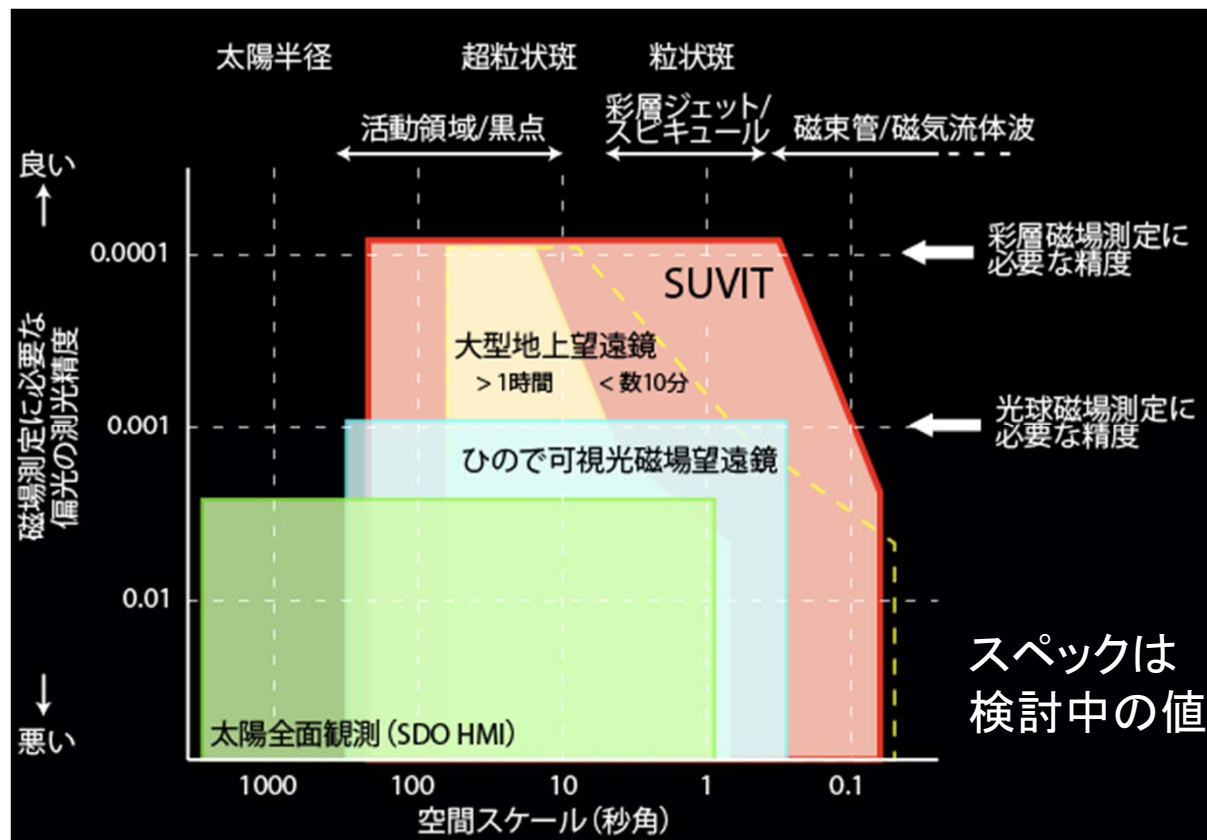
「ひので」で捉えたプロミネンス(彩層)を伝わる波

彩層の磁場・速度場測定

Solar UV-Visible-IR Telescope (SUVIT)

世界最大口径 ($\leq 1.5\text{m}$) の宇宙太陽望遠鏡で、初となる彩層・光球の偏光分光観測により、彩層・光球での微細磁場構造の生成・時間発展を捉える。

- 光球と比べて磁場強度の弱い彩層の磁場を測定するには、光球磁場に比べて約10倍の偏光測光精度が必要。
- 様々な彩層磁場構造の生成から消失までを理解するためには、最低1時間以上の観測が必要。



遷移層・コロナの高空間分解能分光観測

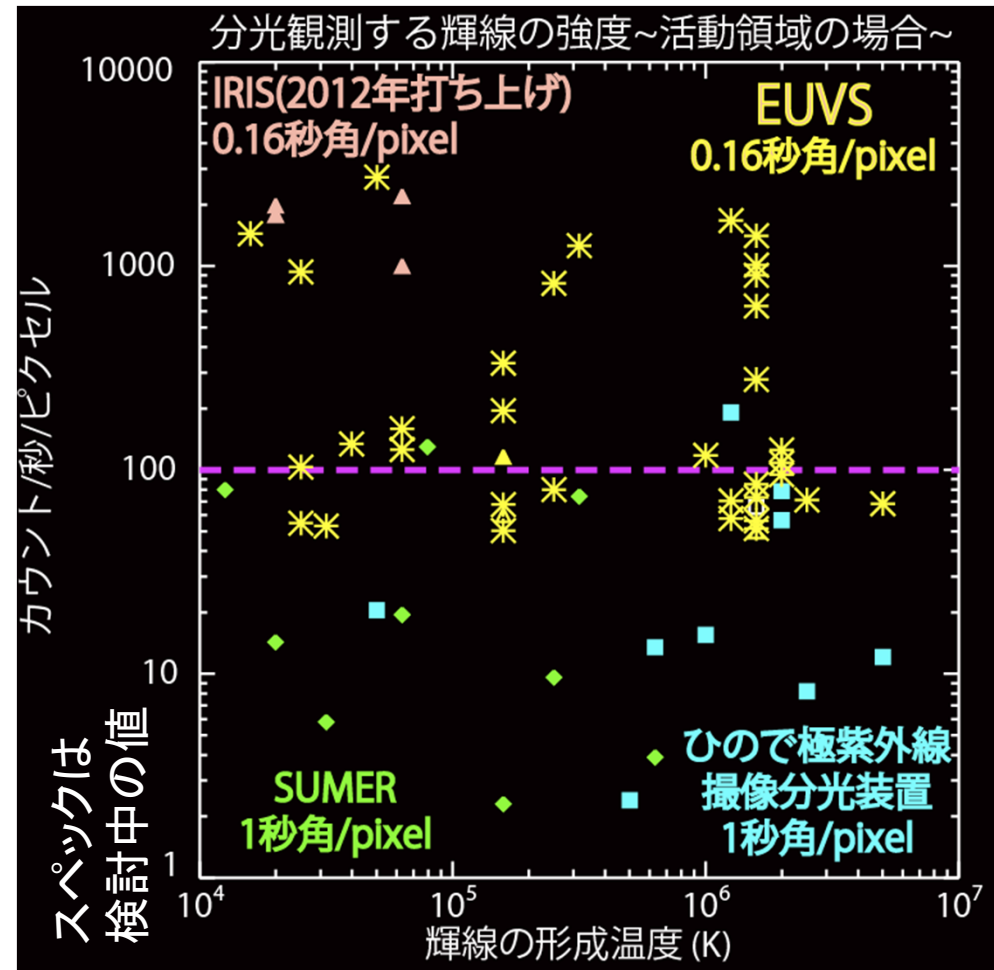
EUV/FUV high throughput spectroscopic telescope (EUVS)

運用中の紫外線分光装置に比べ、

- 1桁以上のスループット性能
- 解像度は5倍以上(約0.3秒角)

で彩層からコロナまでを切れ目なく撮像分光観測してプラズマ診断(温度、速度、密度)

低散乱望遠鏡で暗い構造(例:磁気リコネクション直前・直後のプラズマ)も捉える。



※プラズマ診断には100-200カウント必要

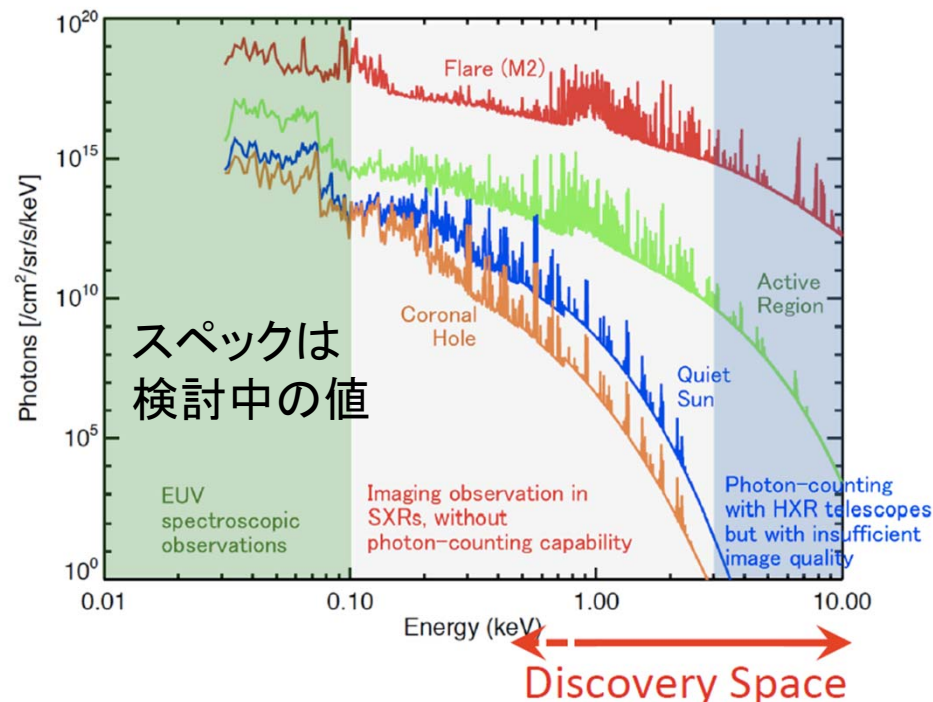
高温プラズマのエネルギースペクトル診断

X-ray imaging (spectroscopic) telescope (XIT)

光子計測型軟X線望遠鏡 (XIT-PC) :
軟X線太陽コロナの撮像分光観測を
世界で初めて行ない、高温プラズマ
の持つエネルギースペクトルの
時間・空間変化を測定。

→ 磁気リコネクションに伴う
エネルギー散逸(分配)過程を
捉える。

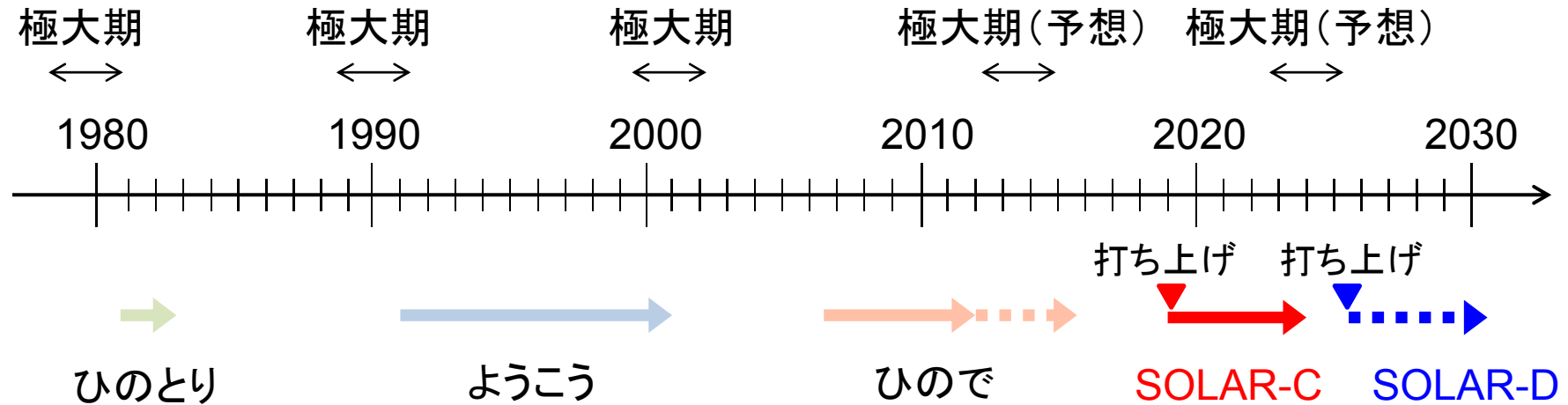
超高空間分解能EUV望遠鏡 (XIT-NI) :
0.2-0.3秒角の過去最高の空間分解能で
EUVコロナの広視野・高頻度の撮像観測を行なう。



SOLAR-Cに向けて必要な準備

- 既存の観測装置(特に「ひので」)を使って成果を出し続ける
 - SOLAR-Cに向けての問題点の洗い出し
- 彩層磁場の観測・導出・解釈
 - 彩層領域の良質な偏光分光データの取得
 - 彩層の弱い磁場(<100G)の導出の理論(ハンレ効果)
 - 複雑な彩層大気モデル化(非局所熱平衡大気)
- 遷移層(コロナ)の高空間分解能(<1秒角)分光観測
 - 2012年打ち上げ予定のIRISのデータ解析など
(高空間分解能ほど分光観測は面白い)

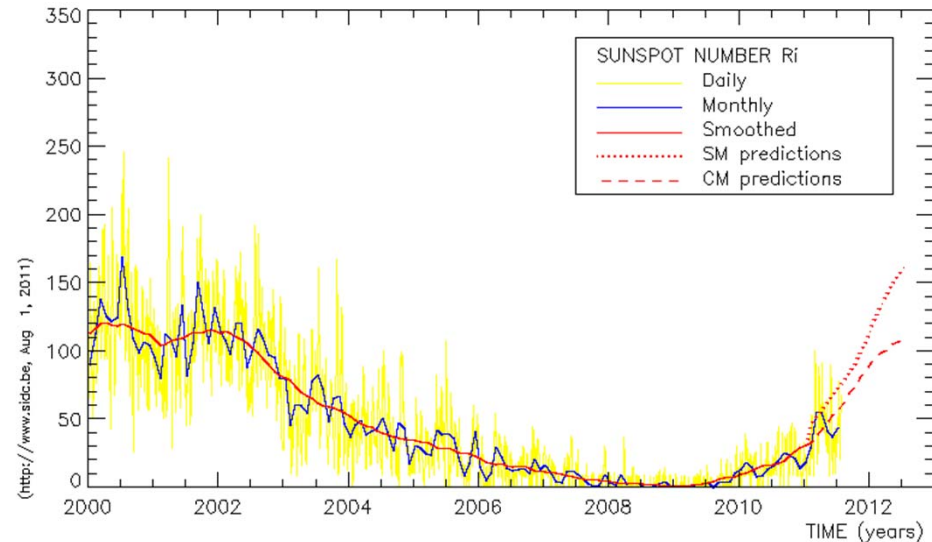
太陽衛星開発のロードマップ



- SOLAR-Cは、2018年度の打ち上げを目指して提案書を作成中。

太陽周期が近年にない異常性を示し始めており、次の太陽サイクルの極小期から極大期への立ち上がりを捉えたい。

黒点数の変動

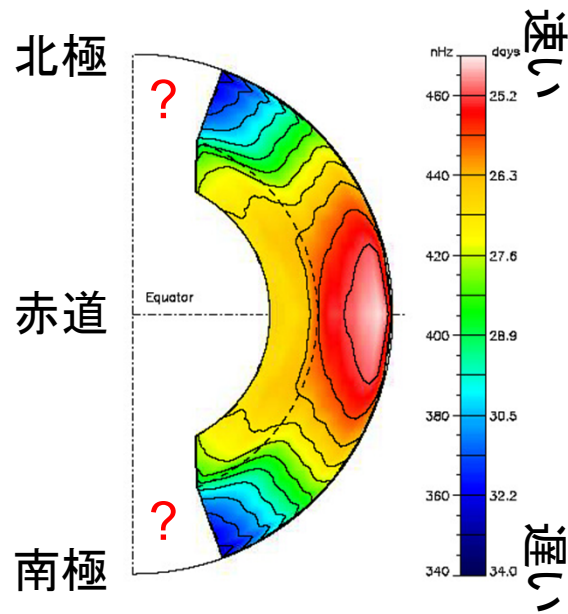


SOLAR-D

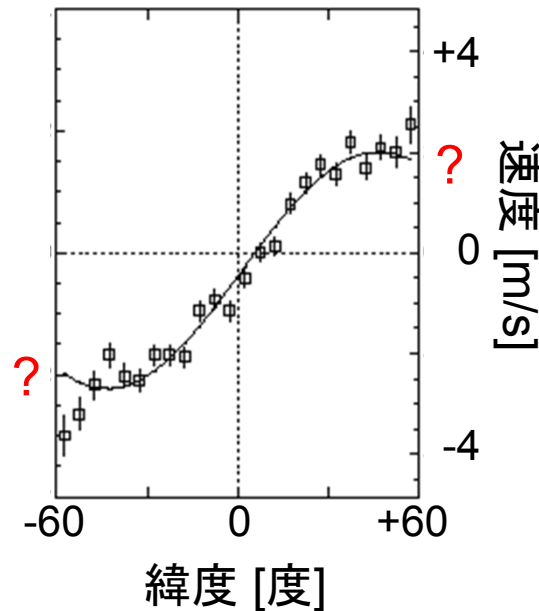
未踏の太陽極域探査

- 黄道面を離れ太陽極域内部の回転角速度・流れ場と磁場を同時観測
- 太陽ダイナモ機構(太陽磁場の周期活動)の解明へ向けた基礎的観測

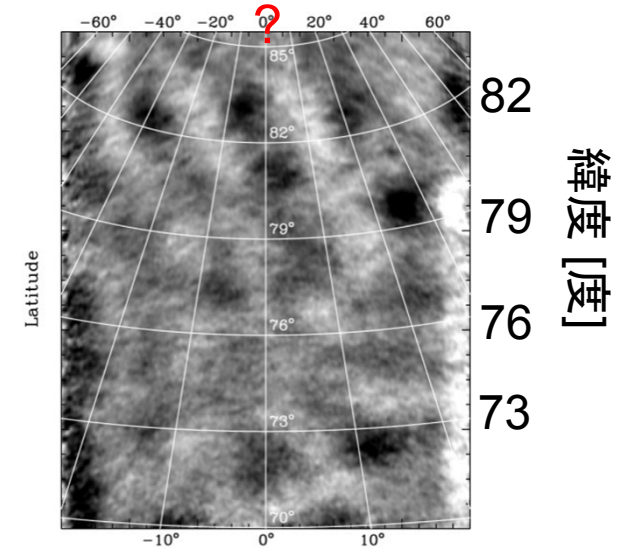
差動回転



子午面流



対流



日震学

- 太陽内部は電磁波(可視光、電波、X線等)に対して不透明。

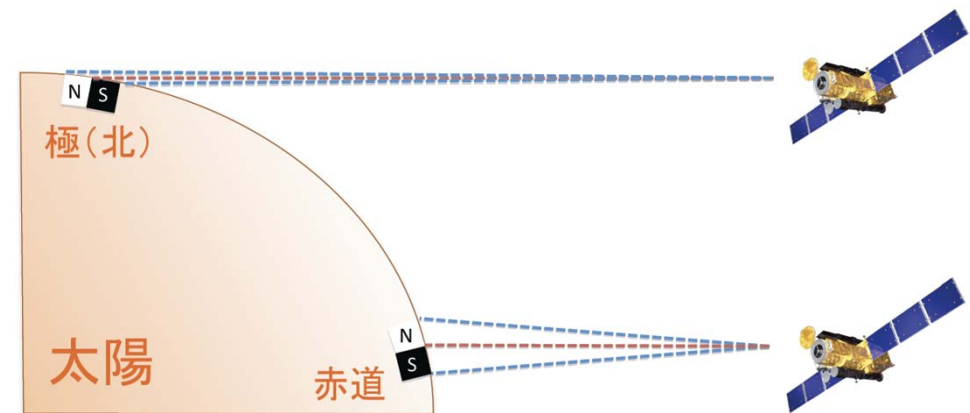
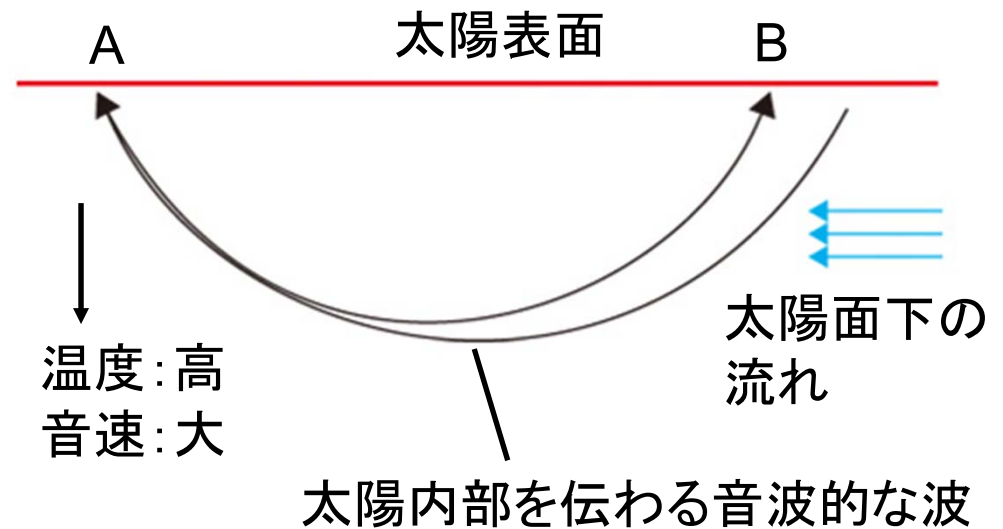
どうやって内部を診断するか？

→ 日震学が唯一の手段

- 極域の日震学(5分振動の観測)が難しい理由

- 空間分解能の劣化
- Doppler速度のS/Nの劣化

→ 解決方法: 上から見る



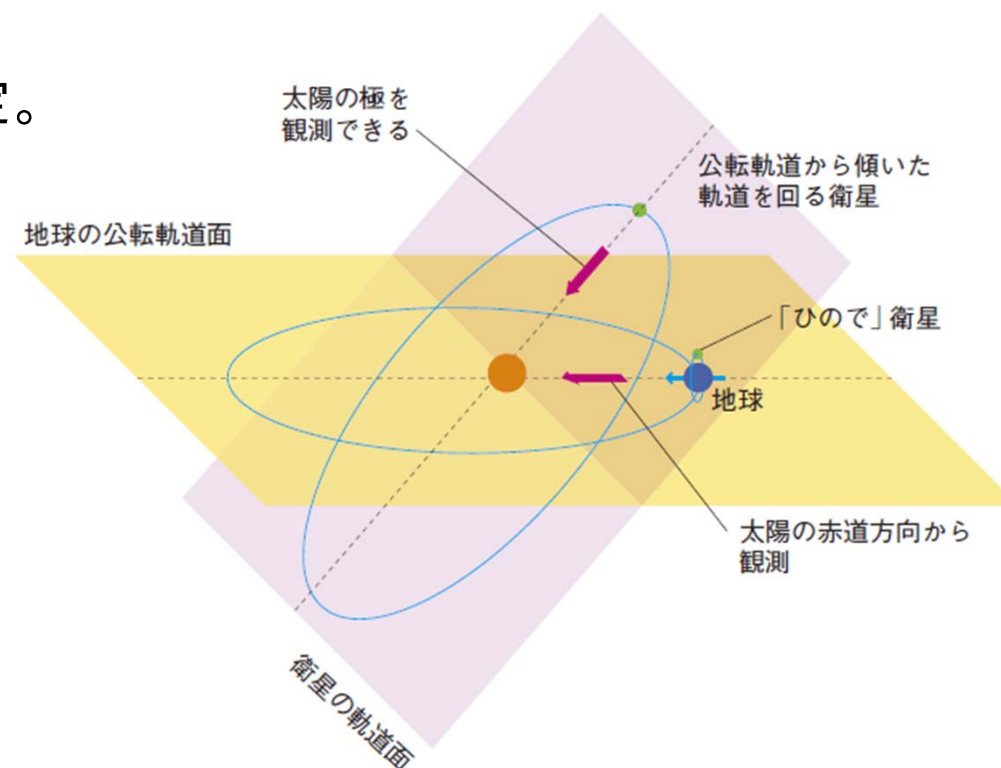
SOLAR-D 搭載観測機器案

- 太陽全面可視光磁場・ドップラー観測装置
 - 日震学を用いた太陽内部の流れの導出や光球磁場の測定。

- 総放射量計
 - 太陽光度の緯度依存性を測定し、同じ磁気活動を持つ太陽型星に比べて1/3程度の光度変動の理由を探る。

- X線/EUV撮像・分光望遠鏡
 - 軌道傾斜角による見え方の違いから、極域太陽風等の3次元構造を探る。

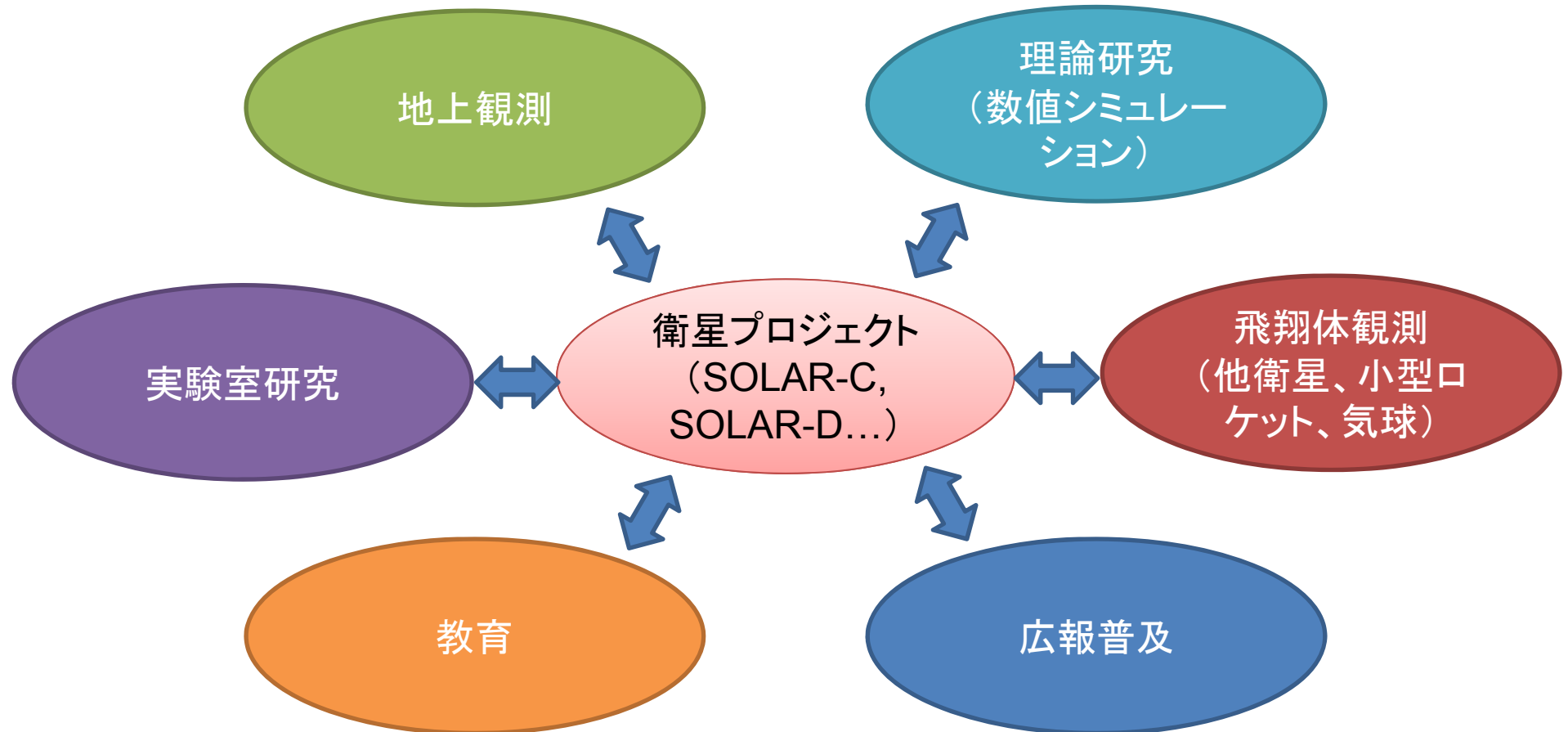
- オプション(惑星間撮像装置、その場観測装置等)



目標軌道傾斜角～40度

理想的な衛星プロジェクトの姿

300億円(推定)の衛星プロジェクトを、良い衛星搭載装置を作るため「だけ」に使うのはもったいない。



1個のパッケージとして全部の分野が潤うことが大切。

地上観測(の経験)の重要性

現在は、直径1.5mの大型地上望遠鏡の観測がスタートし、直径4mの超大型地上望遠鏡計画が始まっている状況。

- 空間・時間分解能や連続性が異なっても、同種類の観測データは重要
 - SOLAR-C観測の科学的最適化
 - キャリブレーション・解析ソフトの開発
- 地上観測(特に他との共同観測)の経験
 - 視野が限られている「ひので」やSOLAR-Cタイプの衛星観測の良し悪しは、科学観測立案者の腕にかかっている。
 - 打ち上げ後は、衛星・地上を問わず、たくさんの共同観測依頼が来る。

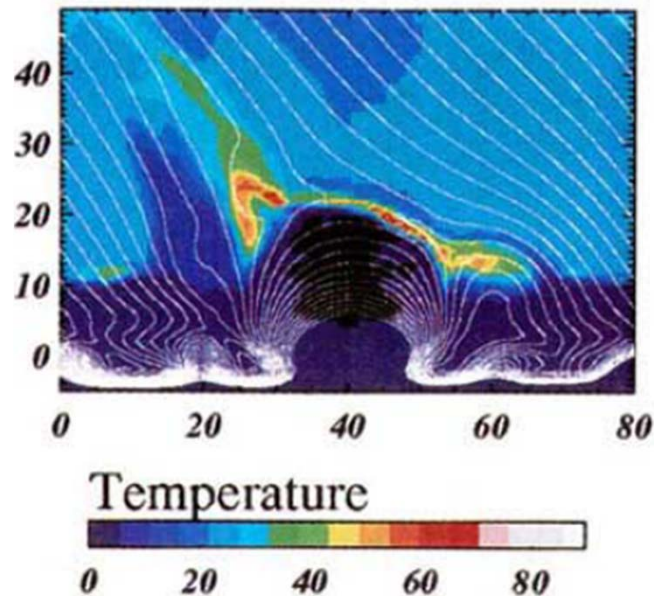
理論的研究との相乗効果が成功度を決める

成功する衛星プロジェクトには密接にリンクする理論研究がある。

「ようこう」: 磁気リコネクションで生み出されるダイナミックなコロナ現象
(フレア、ジェット、CME、...)

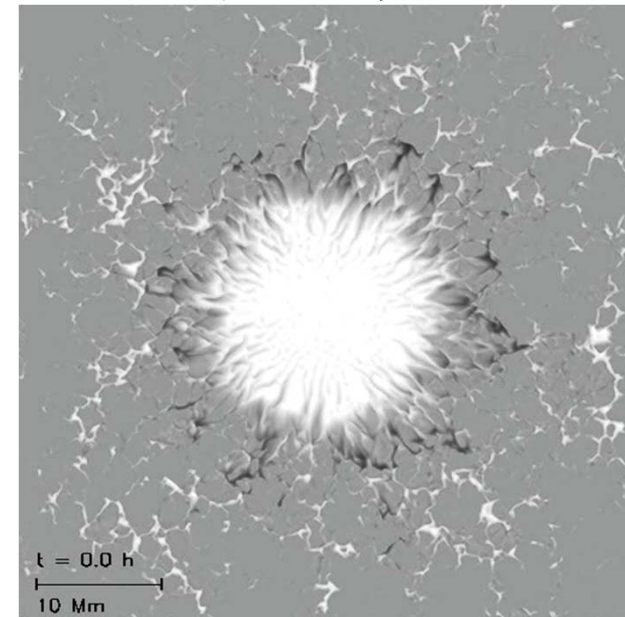
「ひので」: 磁気対流で生み出される様々な光球磁場構造

浮上磁場と既存磁場間
の磁気リコネクション



Yokoyama & Shibata (1994)

黒点磁場



Rempel et al. (2009)

衛星プロジェクトに参加するメリット・デメリット

デメリット:

- とにかく忙しい
(×切が自分で決められない)
 - 研究のアクティビティ
(論文数)の低下
 - 視野が狭くなる
- 大型プロジェクト(長期間)の場合、
最後までやり遂げられるか？

「ひので」可視光磁場望遠鏡の
望遠鏡部完成時の記念写真



検討開始から完成まで約10年

衛星プロジェクトに参加するメリット・デメリット

メリット:

- 新発見と装置起因のニセ信号をすぐに切り分けられる。

新発見 = 既存の装置では見えない = 新しい装置の性能を引き出した結果

- 面白いイベントがいつ・どこで起きているかすぐ分かる。

大量のデータが毎日取得される。

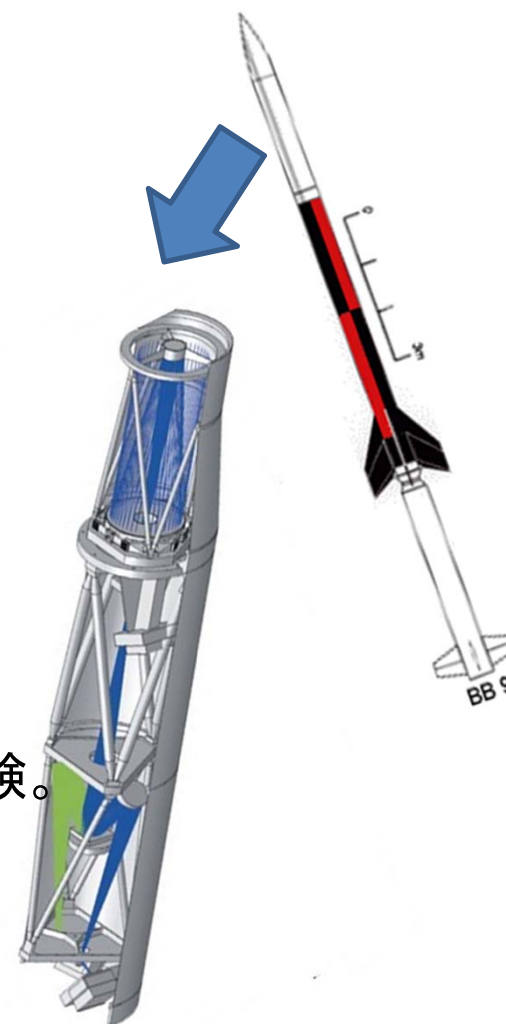
どんなにすごい人でも面白いデータが無ければ論文は書けない。

- プロジェクトの遂行能力が(半ば強制的に)向上する。
 - 問題把握(発見)能力・問題「早期」解決能力
 - 信頼関係の構築
 - 経験

CLASPロケット実験

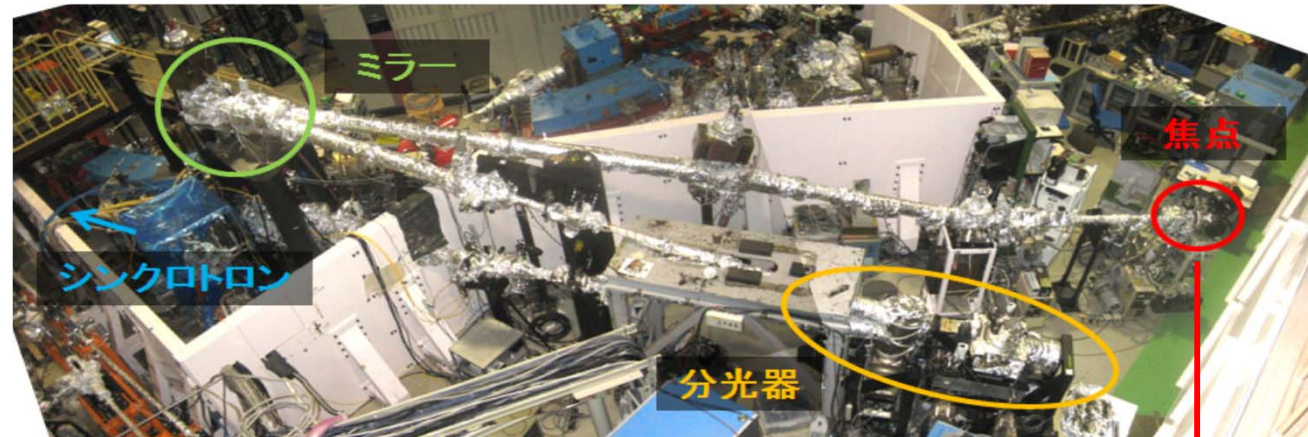
Chromospheric Lyman-Alpha SpectroPolarimeter

- 彩層の直線偏光度マップを取得し、**彩層磁場の直接測定**を目指す。
- Solar-C等の次期観測衛星で本格運用するための、**科学的・技術的パスファインダー**。
- NASA観測ロケット(2014年6月実施予定)を使った、日・米・スペイン・ノルウェーによる国際観測ロケット実験。
- Ly α 輝線での太陽彩層の偏光分光観測(**“世界初”**)。

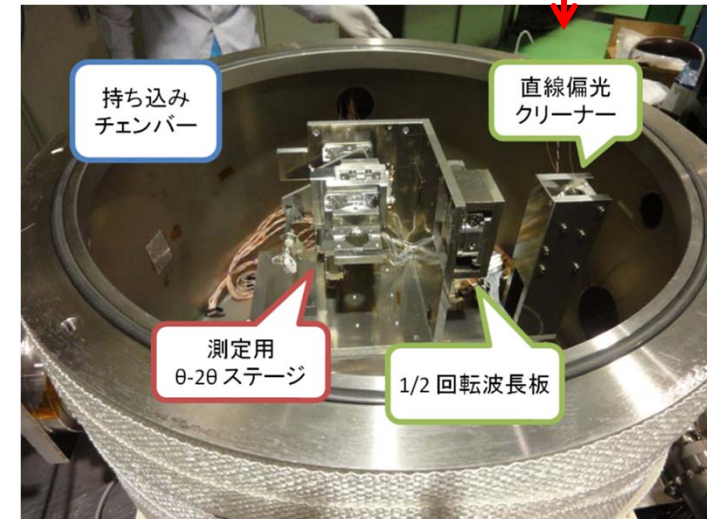


CLASP用光学素子の開発と測定

分子科学研究所
シンクロトロン
UVSOR BL-7B



- 日本は観測装置部分を担当
- 若者を中心に検討・設計・試験



最後に

とにかく、衛星プロジェクトに目を向けて、
自分の研究・仕事にどう活かせるか(利用
できるか)を考えて下さい。

本音を言うと、皆さんが積極的に衛星プロジェクトに参加してくれたら嬉しい。