

国立天文台での太陽研究 —太陽を通して活動的な宇宙を読み解く—

勝川行雄

国立天文台 太陽観測科学プロジェクト・SOLAR-C準備室
総合研究大学院大学・物理科学研究科天文科学専攻
(H30より東京大学大学院理学系研究科 天文学専攻の併任)

国立天文台の理念

ビジョン 私たちが目指す姿

- 宇宙の謎に挑む国立天文台

ミッション 私たちが成すべきこと

- 知の地平線を拓げるため、大型天文研究施設を開発・建設し、共同利用に供する
- 多様な大型施設を活用し、世界の先端研究機関として天文学の発展に寄与する
- 天文に関する成果・情報提供を通じて、社会に資する

プロダクト・成果 私たちが提供するもの

- 未知の宇宙の解明と、新しい宇宙像の確立
- 研究成果の社会への普及・還元と、未来世代への夢の伝承
- 世界を舞台に活躍する次世代研究者



国立天文台HPより

国立天文台の観測・研究設備



すばる望遠鏡
ハワイにある8m望遠鏡



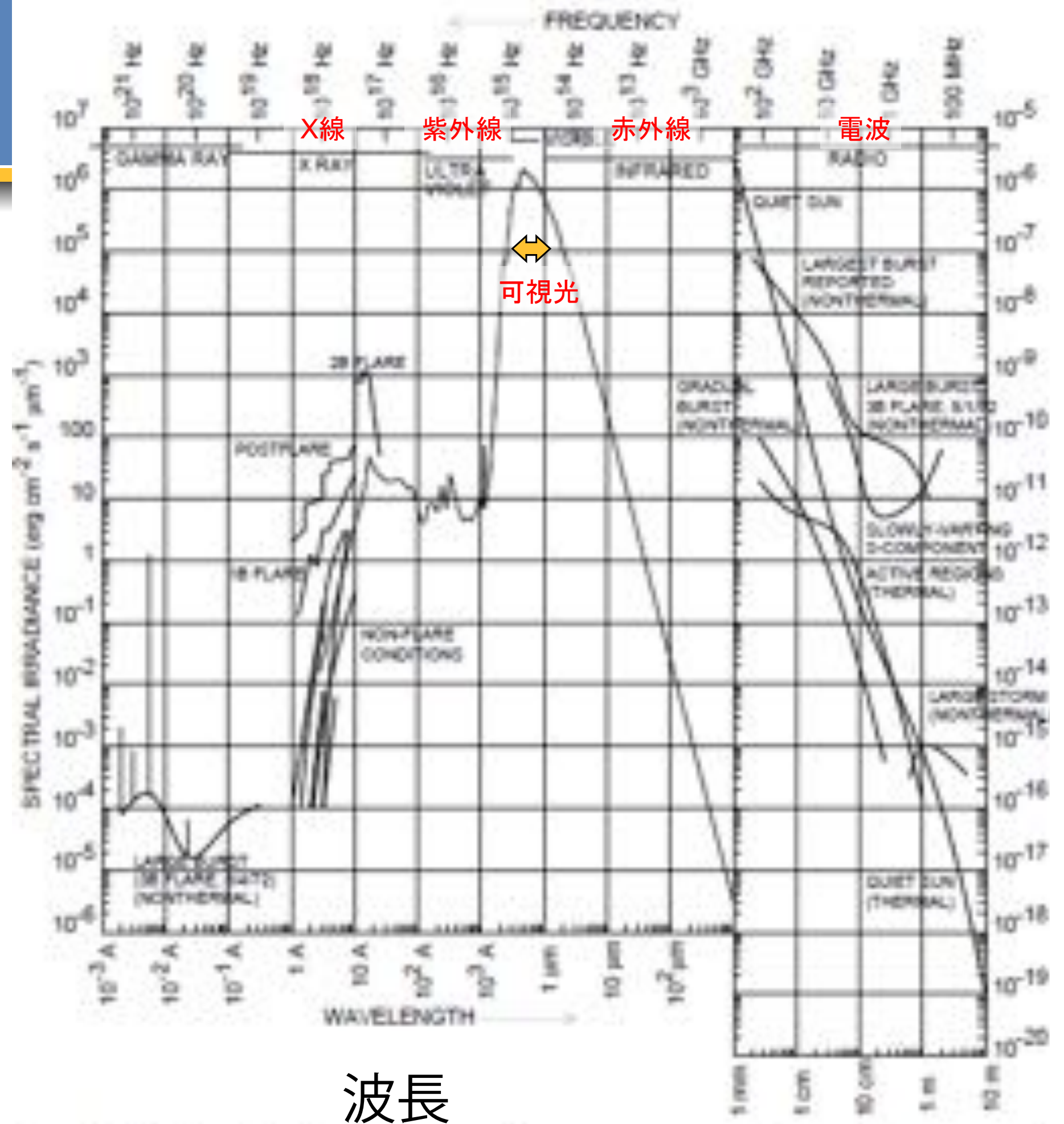
アルマ望遠鏡 (12m/7mのパラボラアンテナ66台)
南アメリカ・チリにある電波望遠鏡



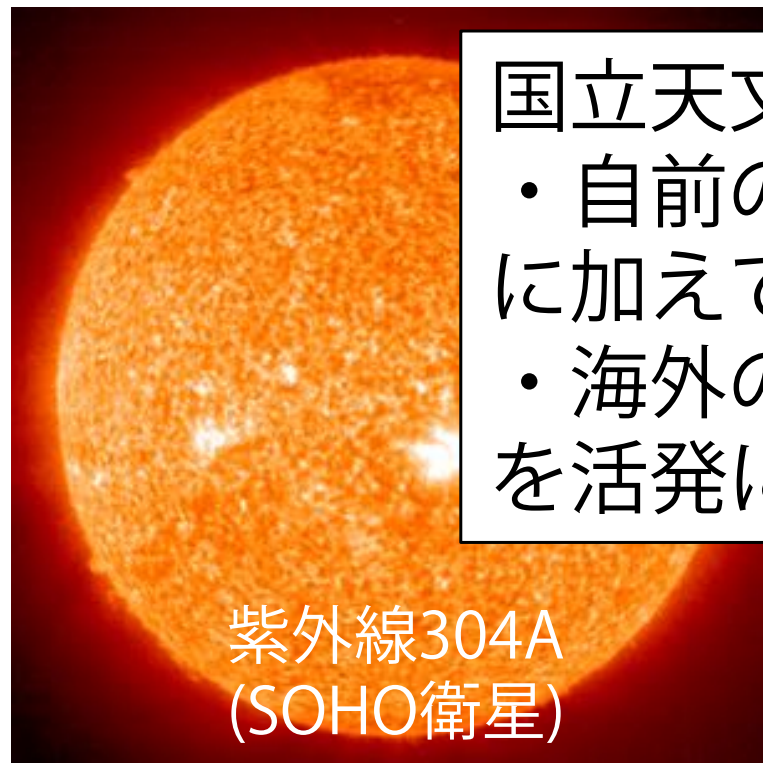
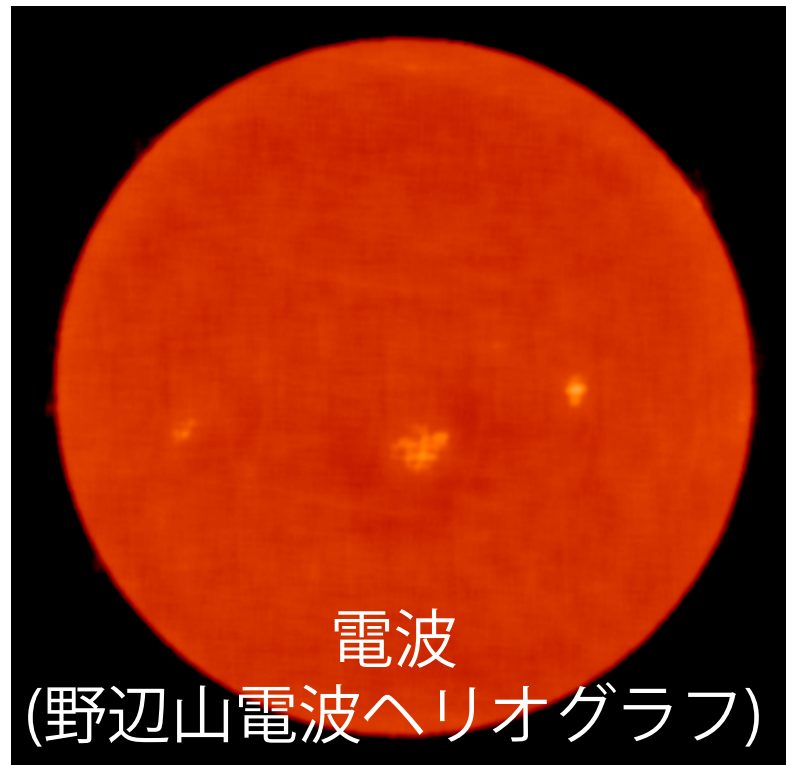
スーパーコンピュータ

太陽から来る光 (電磁波)

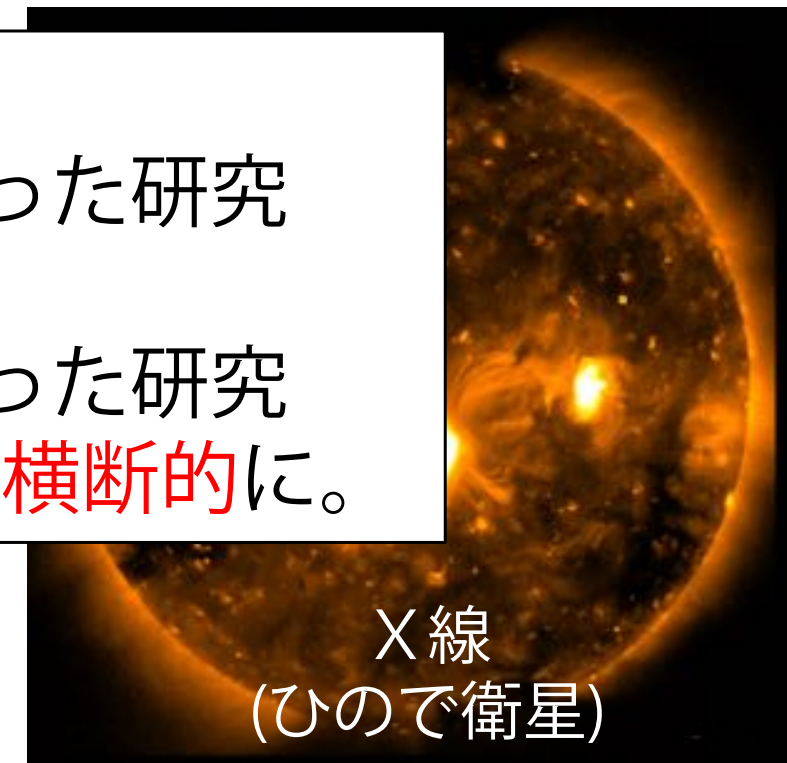
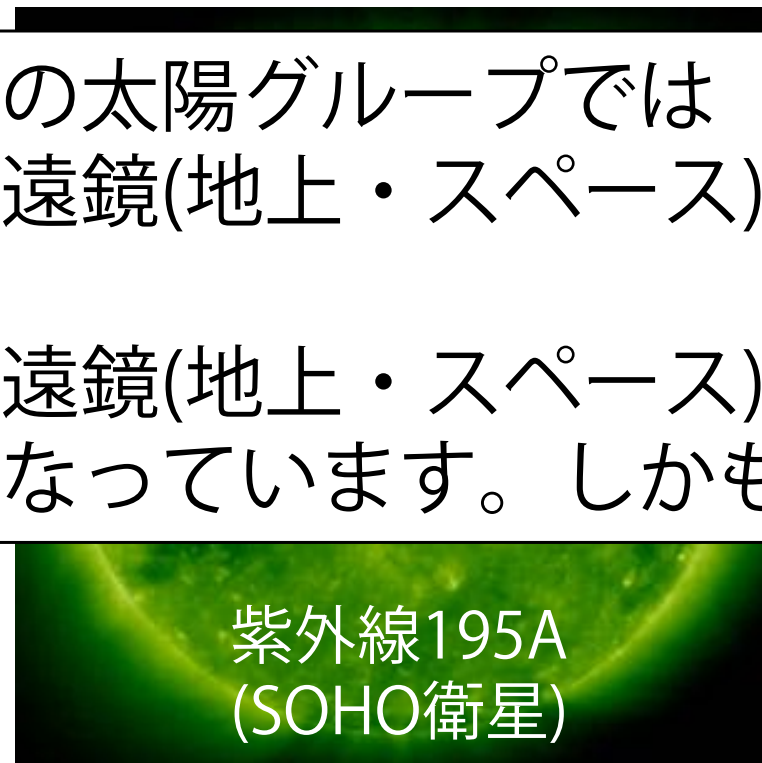
- 太陽はあらゆる波長の電磁波を放射している
- 温度5800Kの黒体輻射に極めて近い。可視光のあたりで放射強度は最大
 - $\lambda [\mu\text{m}] \cdot T [\text{K}] \sim 3000$
- X線や電波の強度は太陽の活動によって大きく変わる



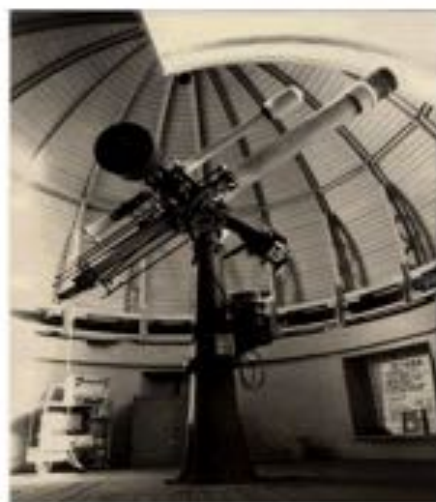
色々な光で見た太陽 (2007.7.14)



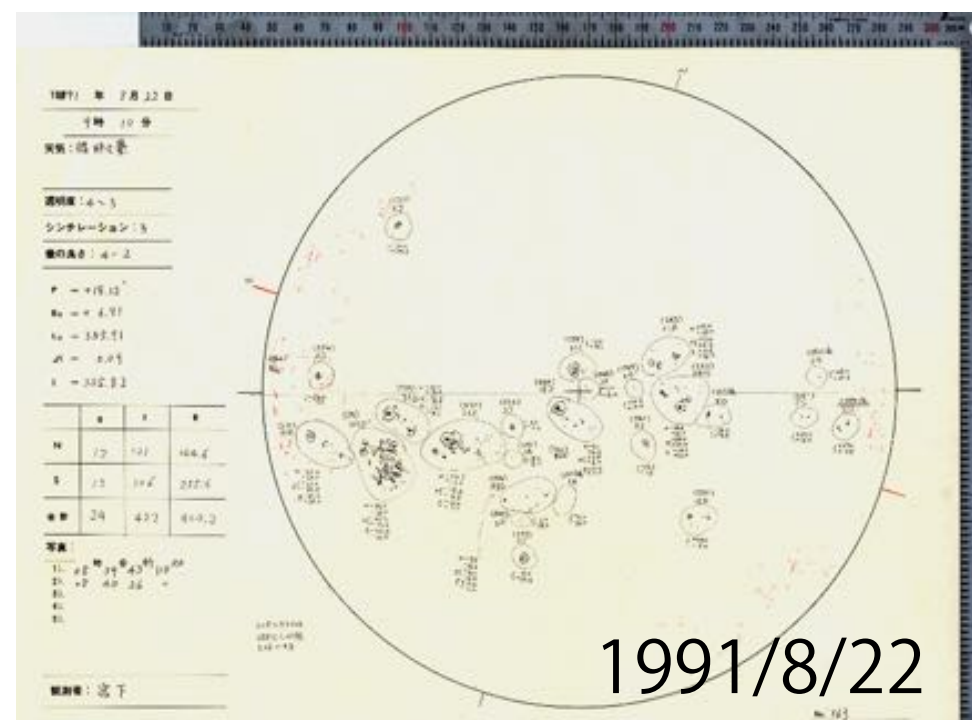
国立天文台の太陽グループでは
・自前の望遠鏡(地上・スペース)を使った研究に加えて
・海外の望遠鏡(地上・スペース)を使った研究を活発に行なっています。しかも波長横断的に。



国立天文台での太陽観測: 黒点観測



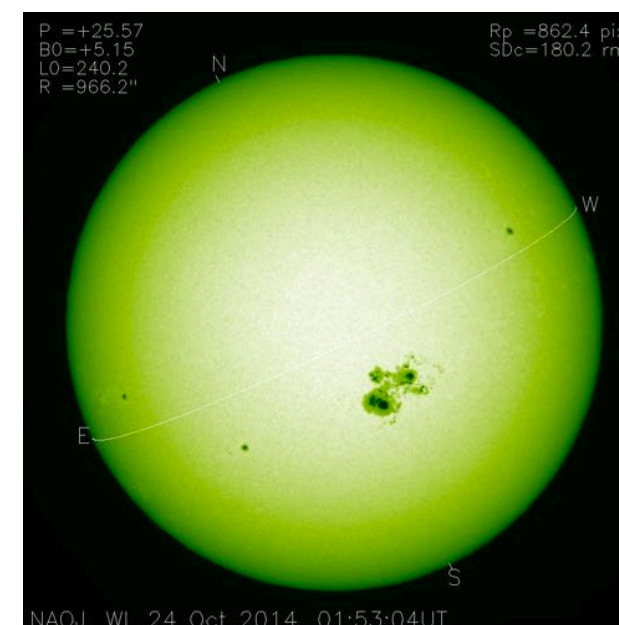
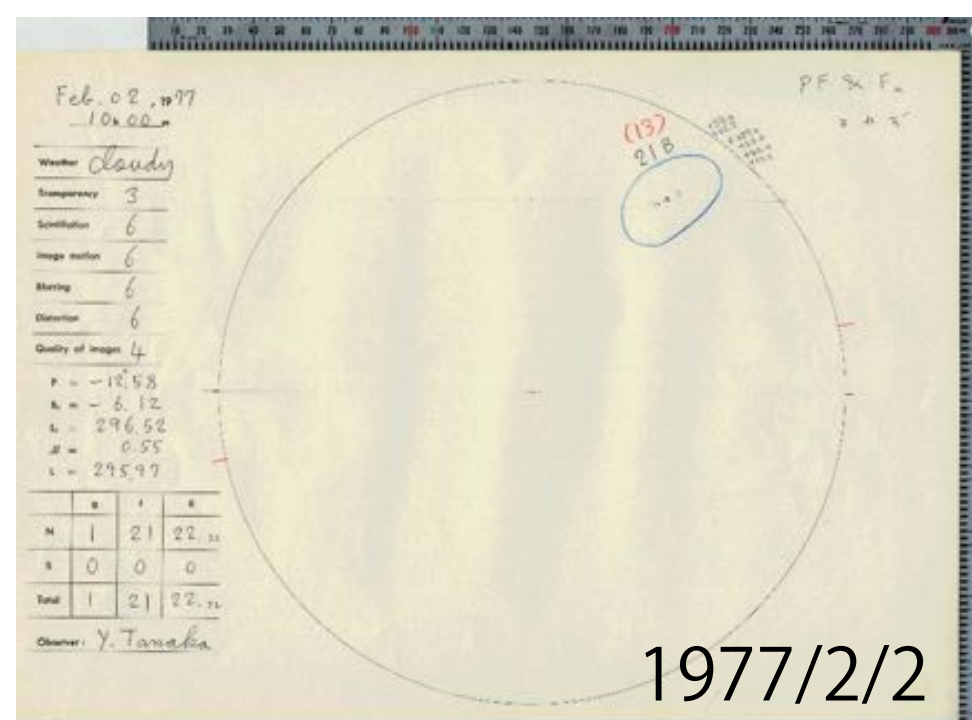
Sunspot Sketches with the 20cm Zeiss Refractor
 National Astronomical Observatory
 Mitaka, Tokyo, Japan



デジタル観測 (1998-)



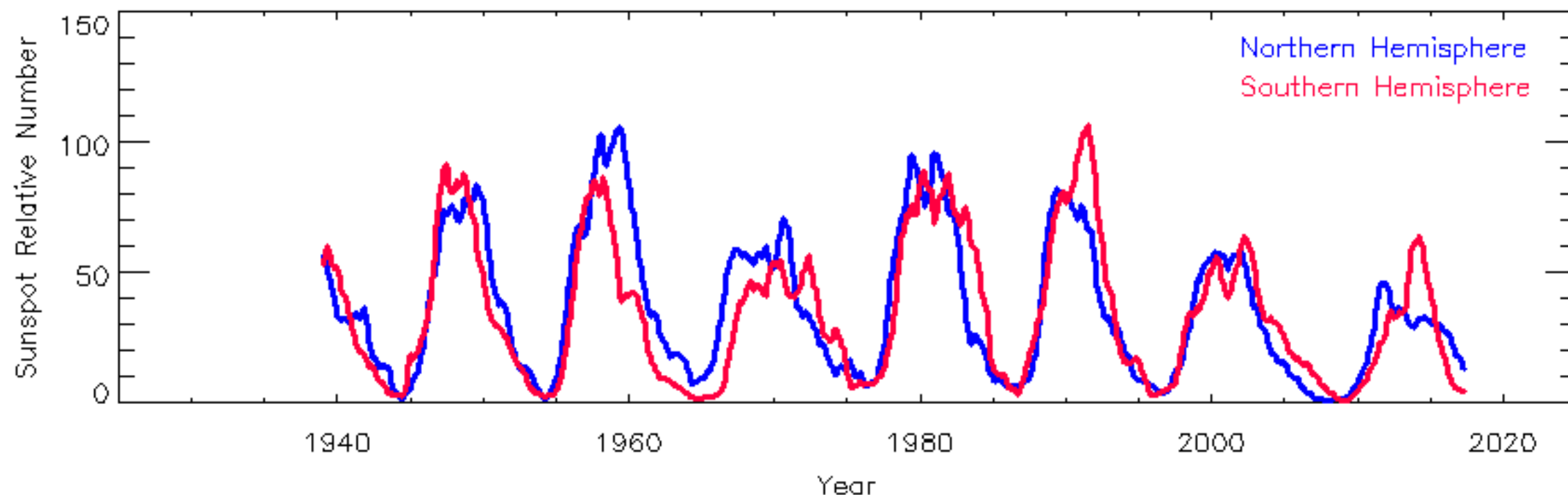
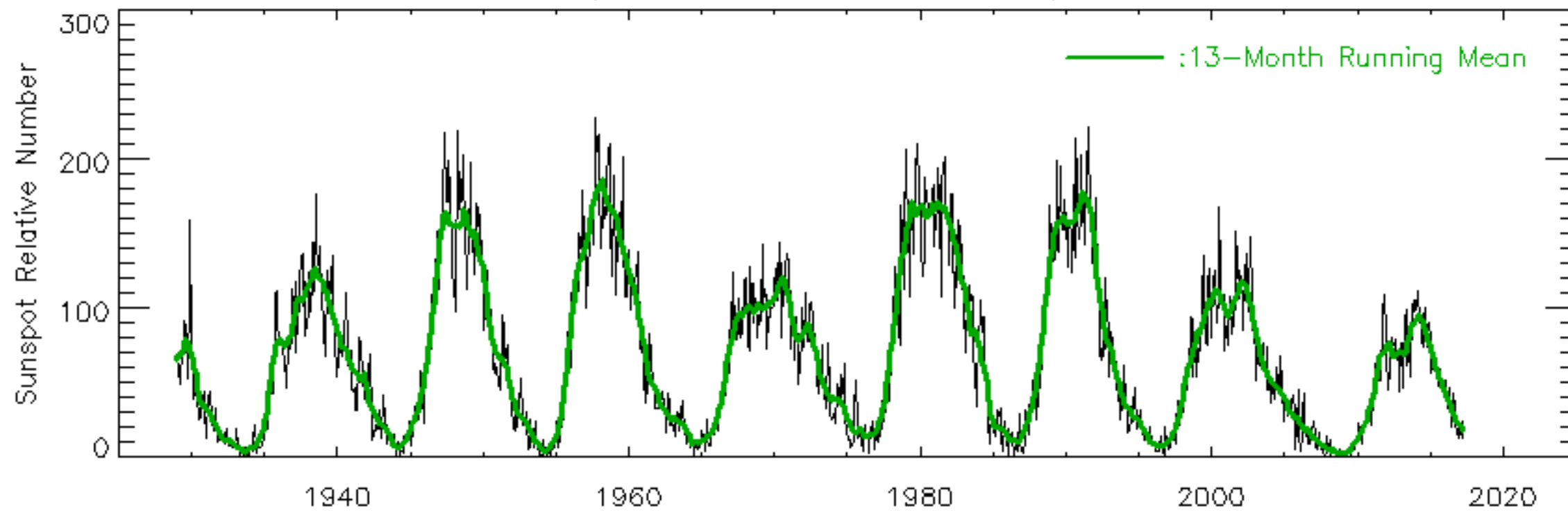
黒点スケッチ観測(1938-)



黒点数の変遷

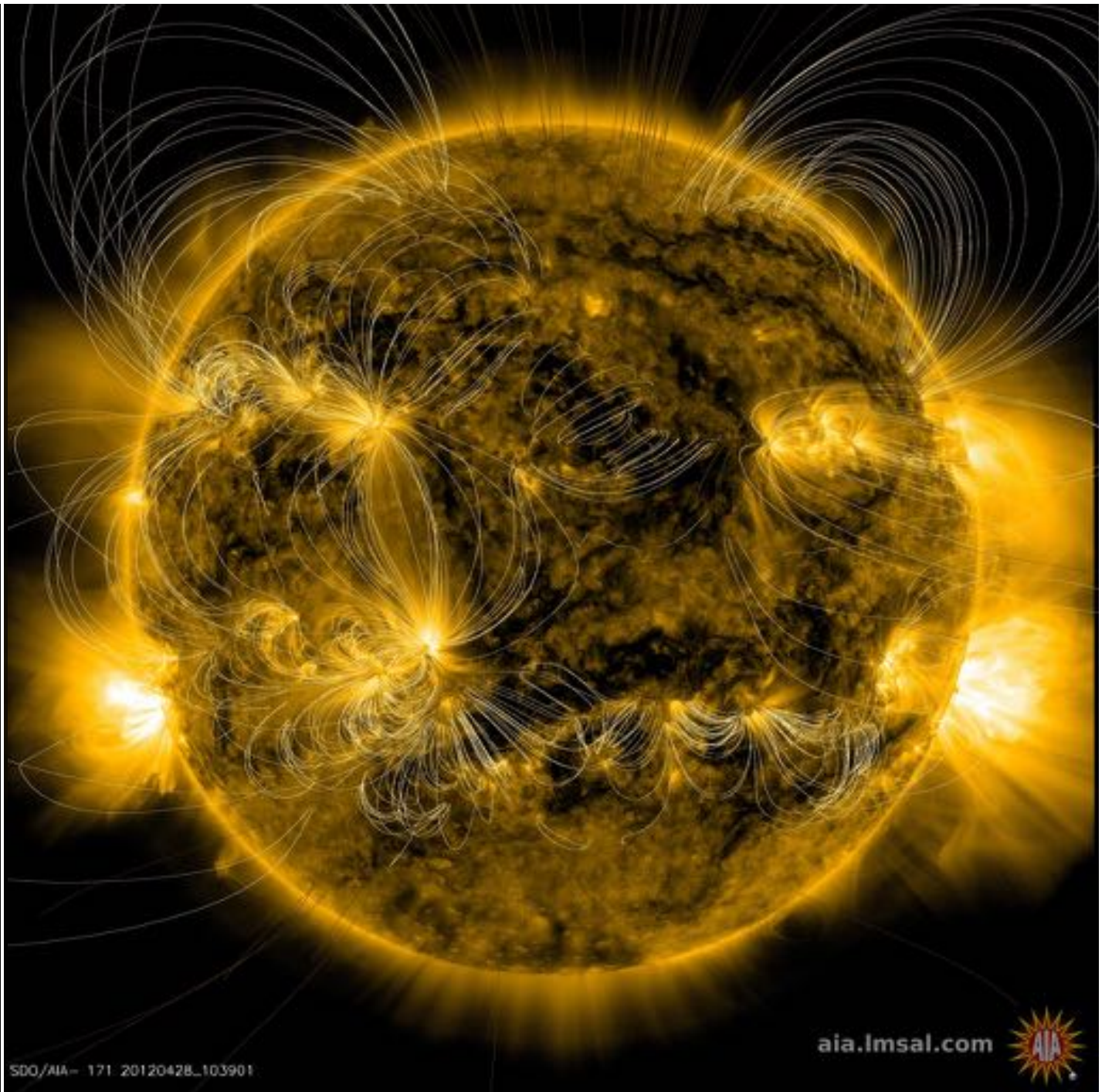
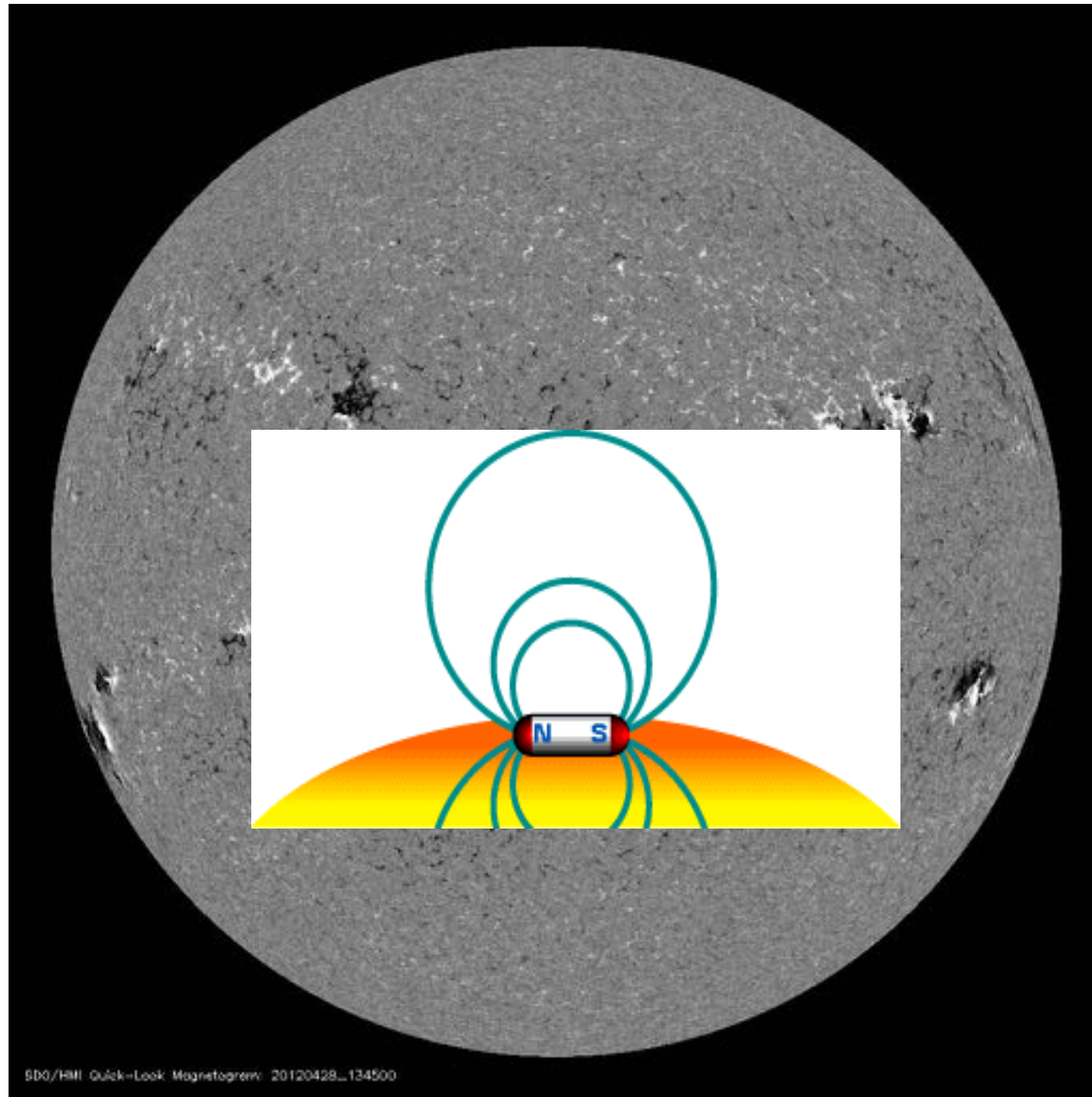
Sunspot Relative Number: NAOJ/Mitaka

黒点数@国立天文台



太陽活動は約11年周期で活発になったり弱くなったりを繰り返す

太陽大気：磁場に支配された世界



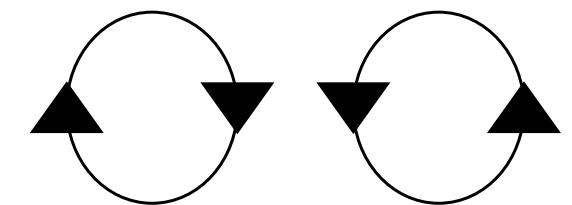
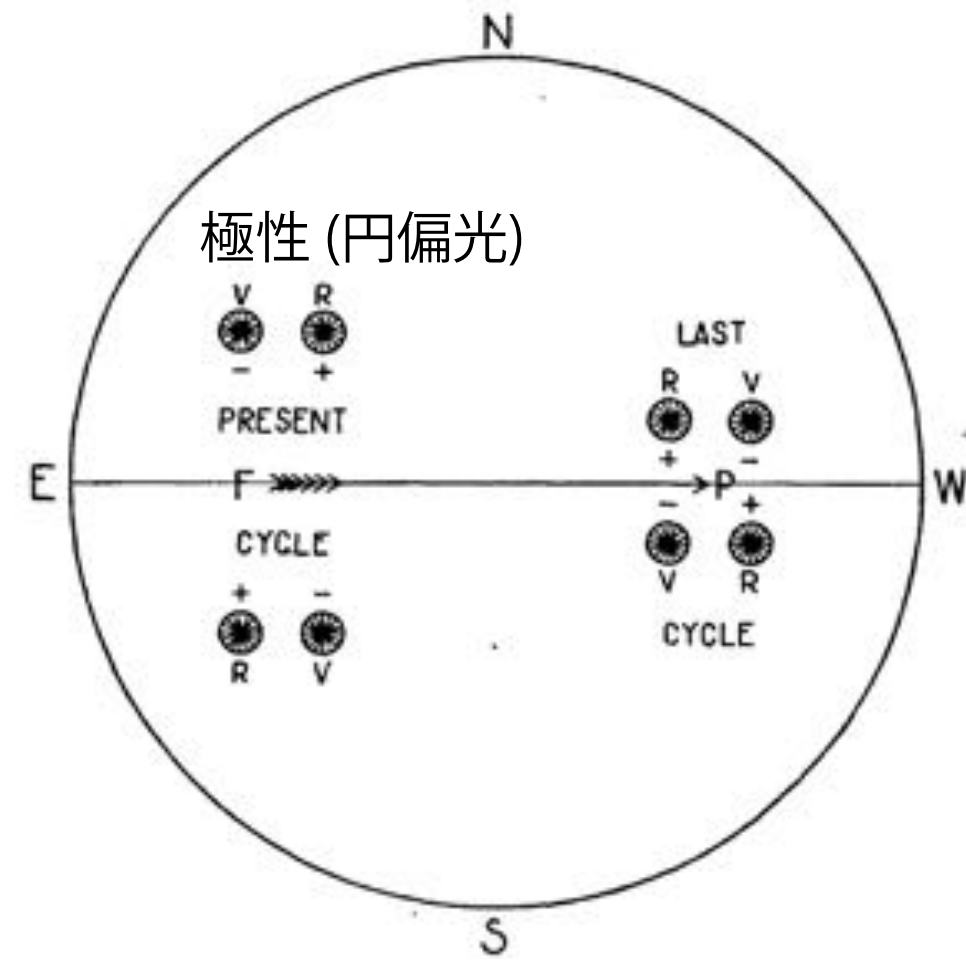
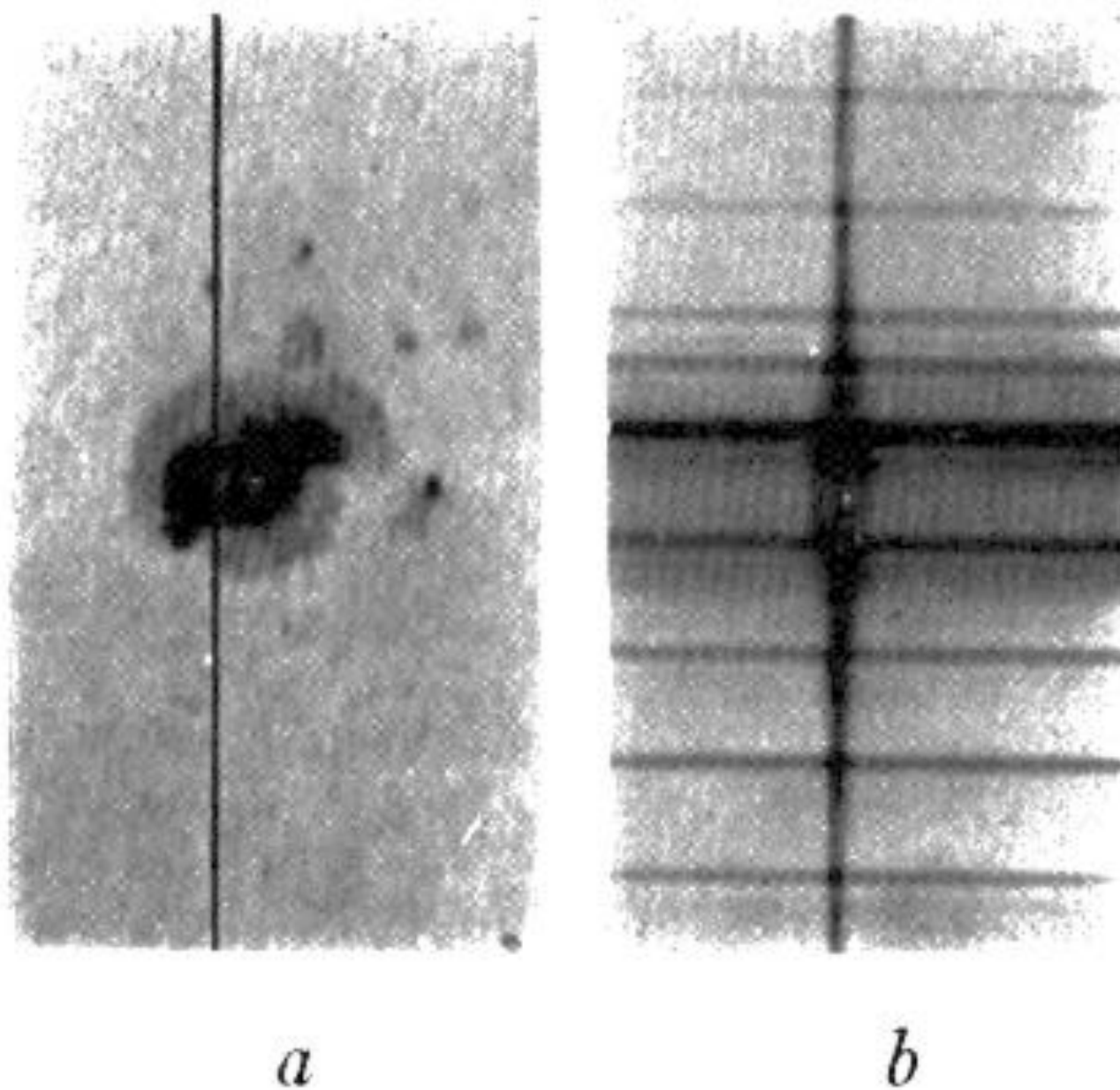
磁場
(SDO衛星/HMI)

*Black: S. pole
White: N. pole*

X線で見たコロナ (外層の高温大気)
(SDO衛星/AIA)

磁場の発見

Hale (1908)



(Hale et al. 1919)

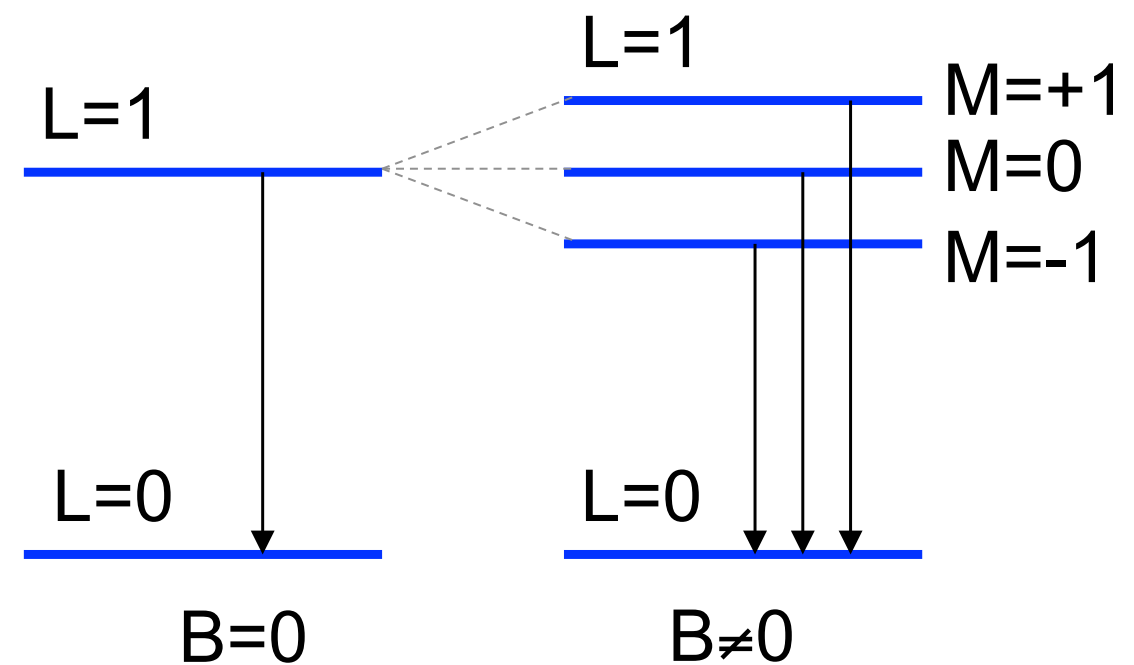
- 電子の角運動量(磁気モーメント)と磁場の相互作用でエネルギー準位が分離する

$$\Delta\lambda_B \approx 4.67 \times 10^{-13} \lambda_0^2 gB$$

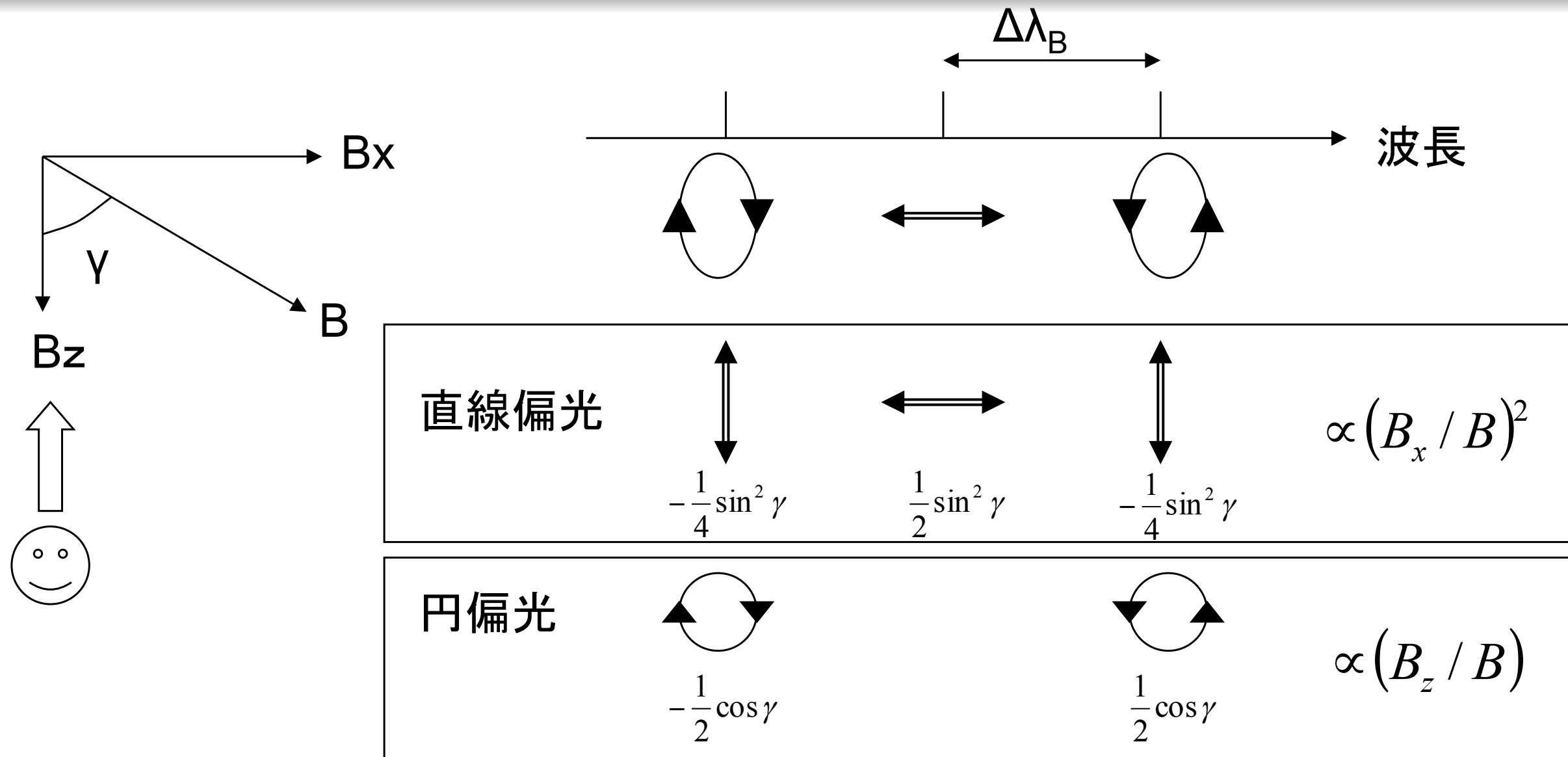
B: 磁場強度(ガウス)

$\Delta\lambda_B, \lambda_0$: Å

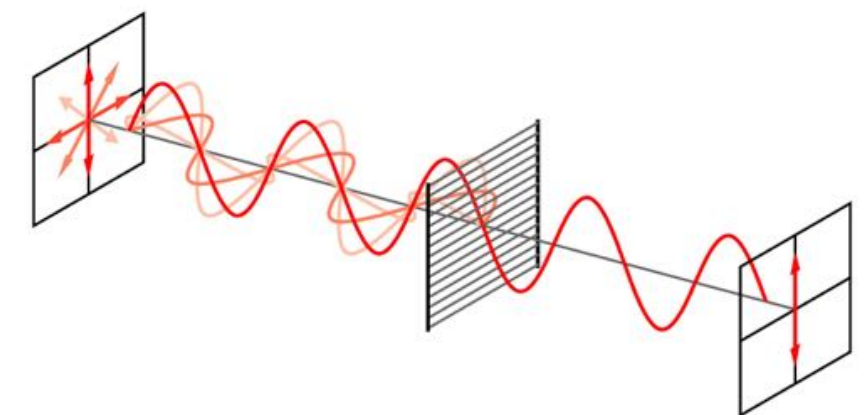
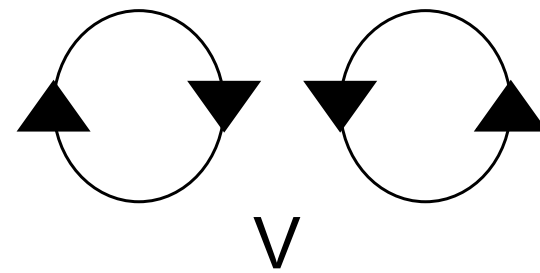
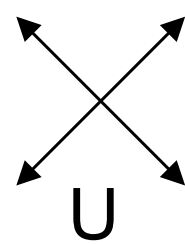
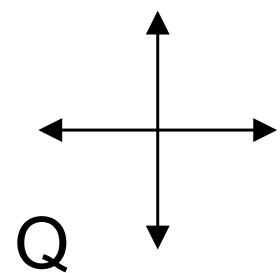
g: ランデ因子



ゼーマン効果: 偏光分光観測

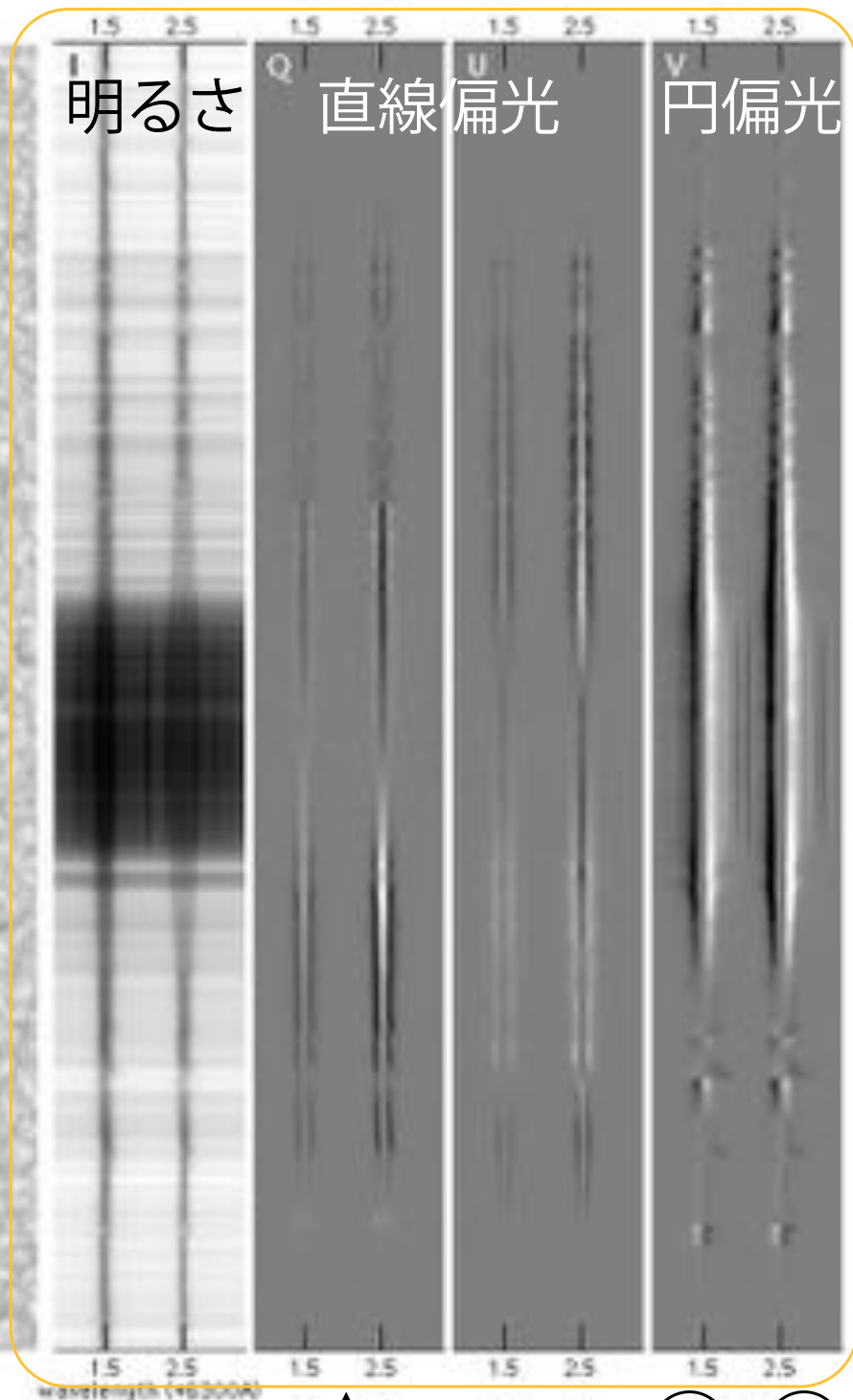
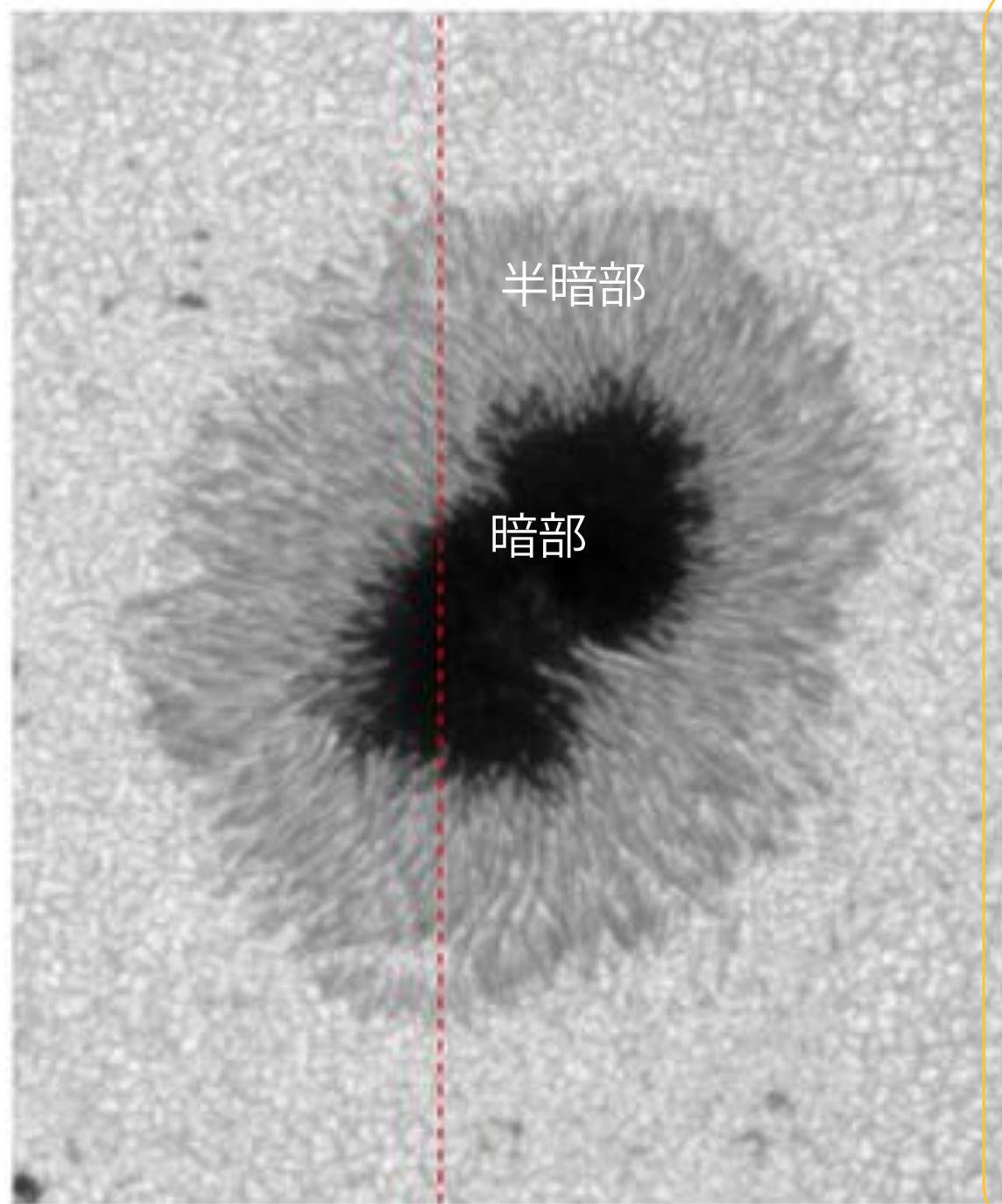


- 偏光を測定すると、磁場ベクトルの方向までわかる

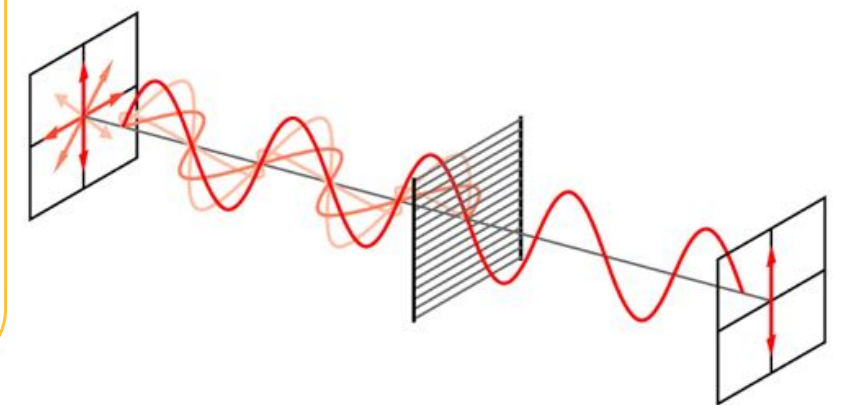


太陽表面の磁場をリモートセンシング

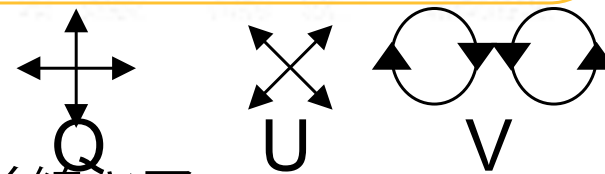
鉄の吸収線 (波長 630 nm)



「ゼーマン効果」で発生する偏光を測定。

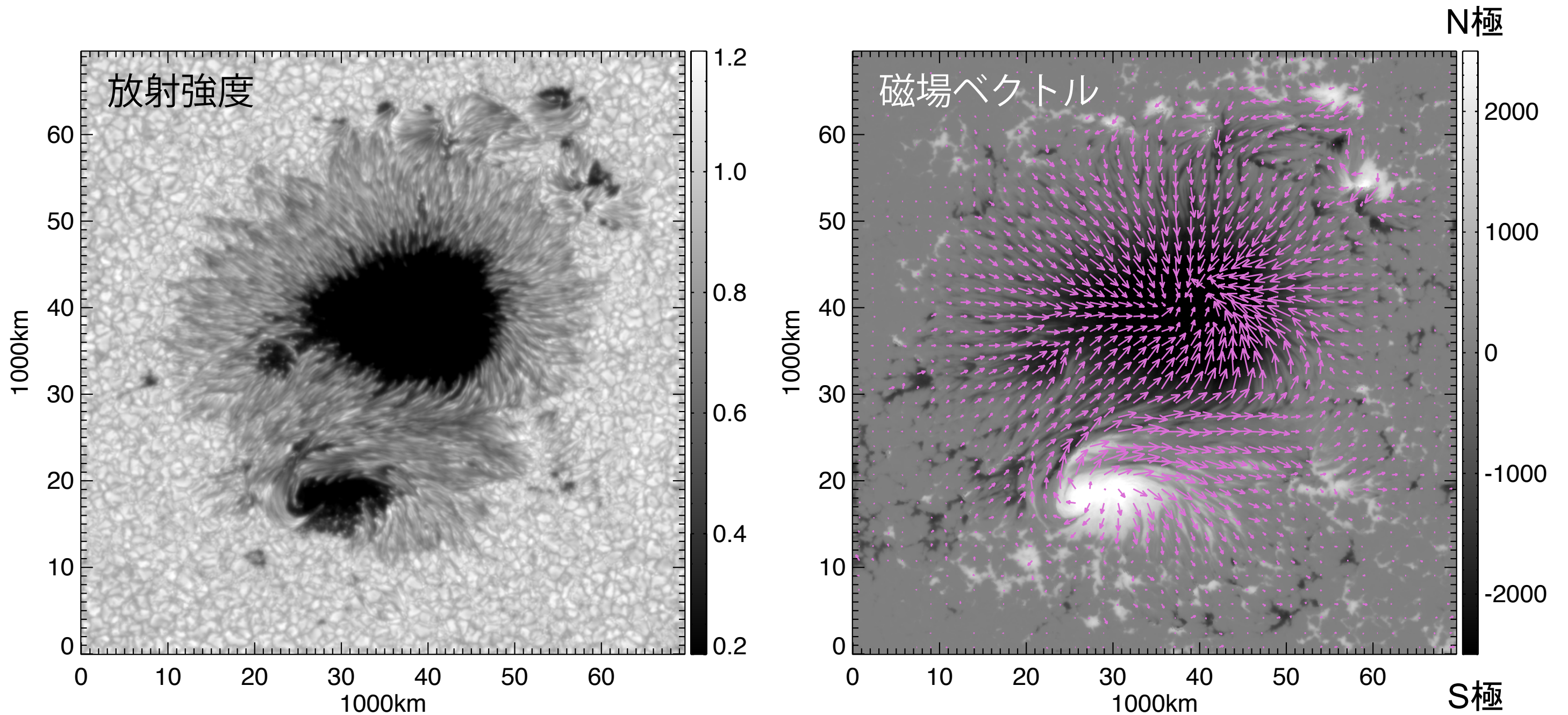


「ひので」 SOTによる偏光分光観測



太陽最前線ツアー

黒点周辺の磁場ベクトル

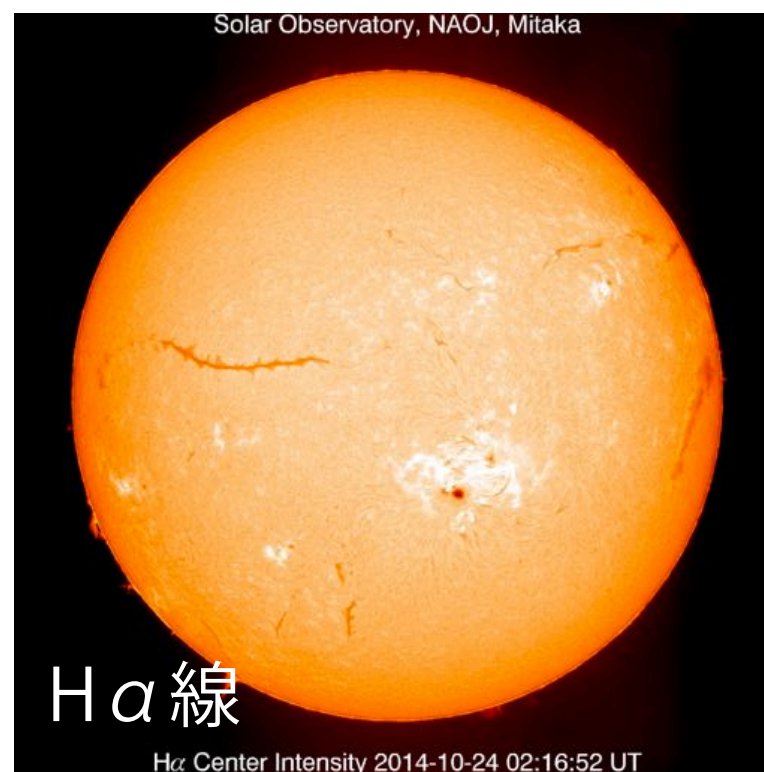


「ひので」 SOT偏光分光観測から得られた磁場分布

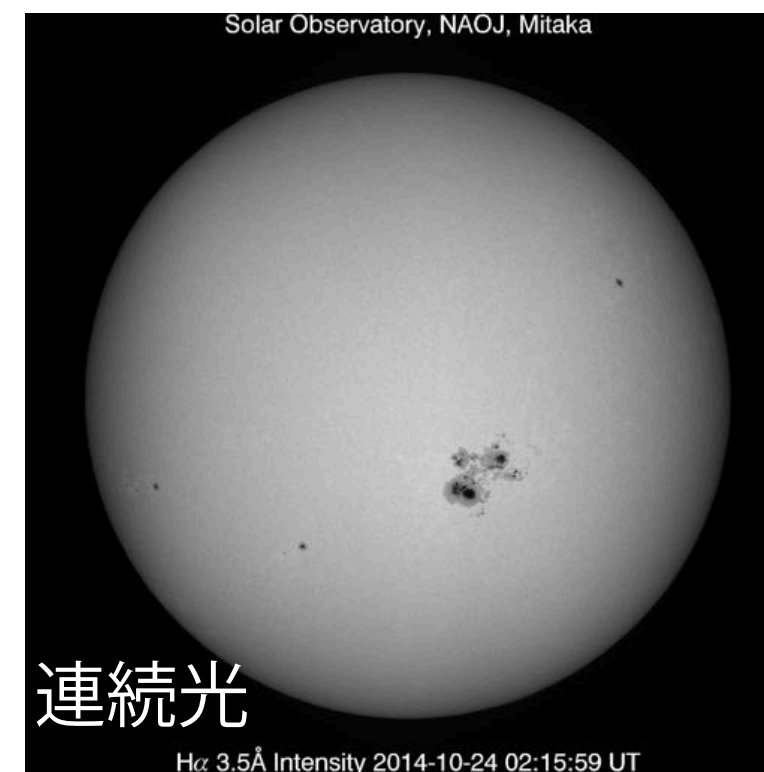
国立天文台での太陽観測: 磁場観測



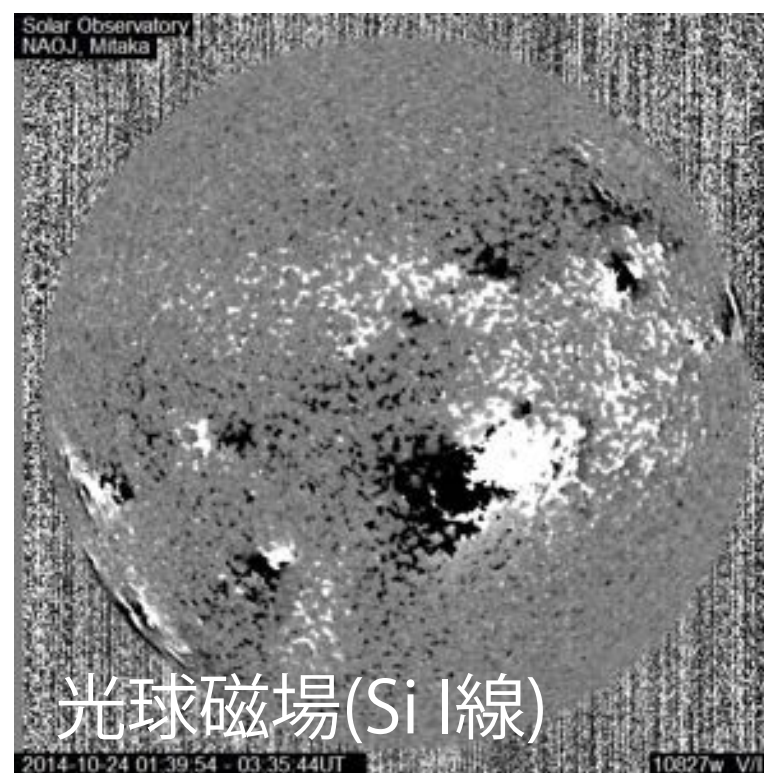
太陽フレア望遠鏡



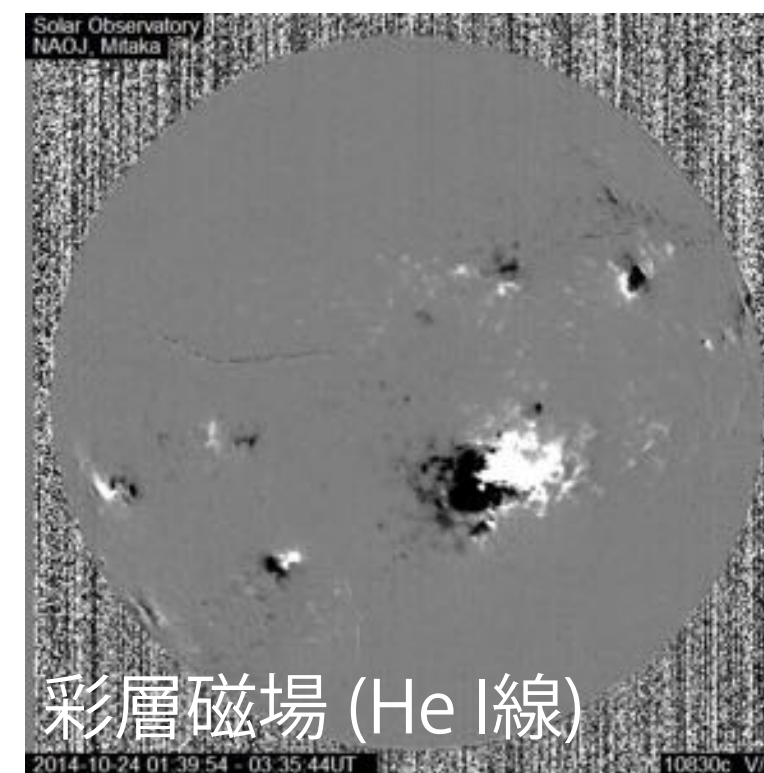
H α 線



連続光



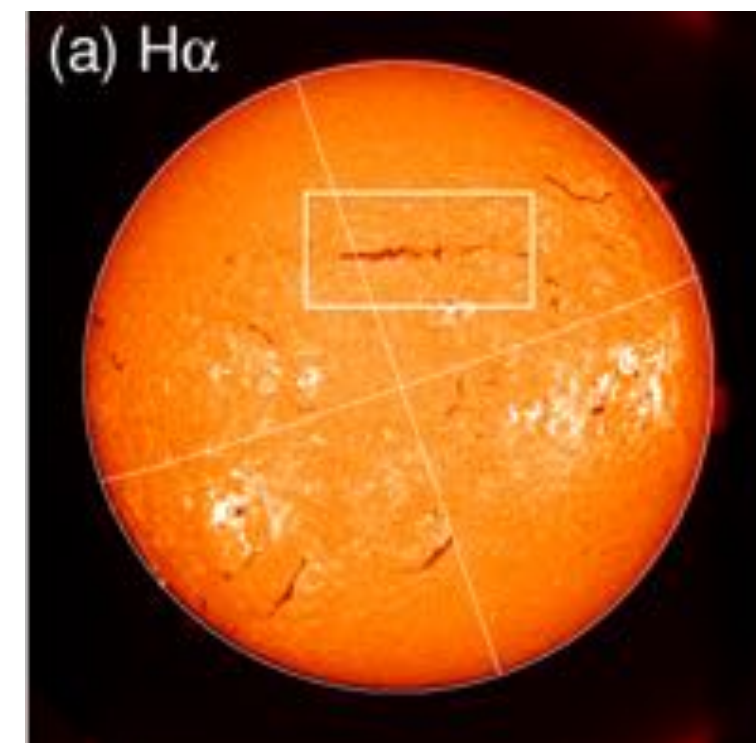
光球磁場(Si I線)



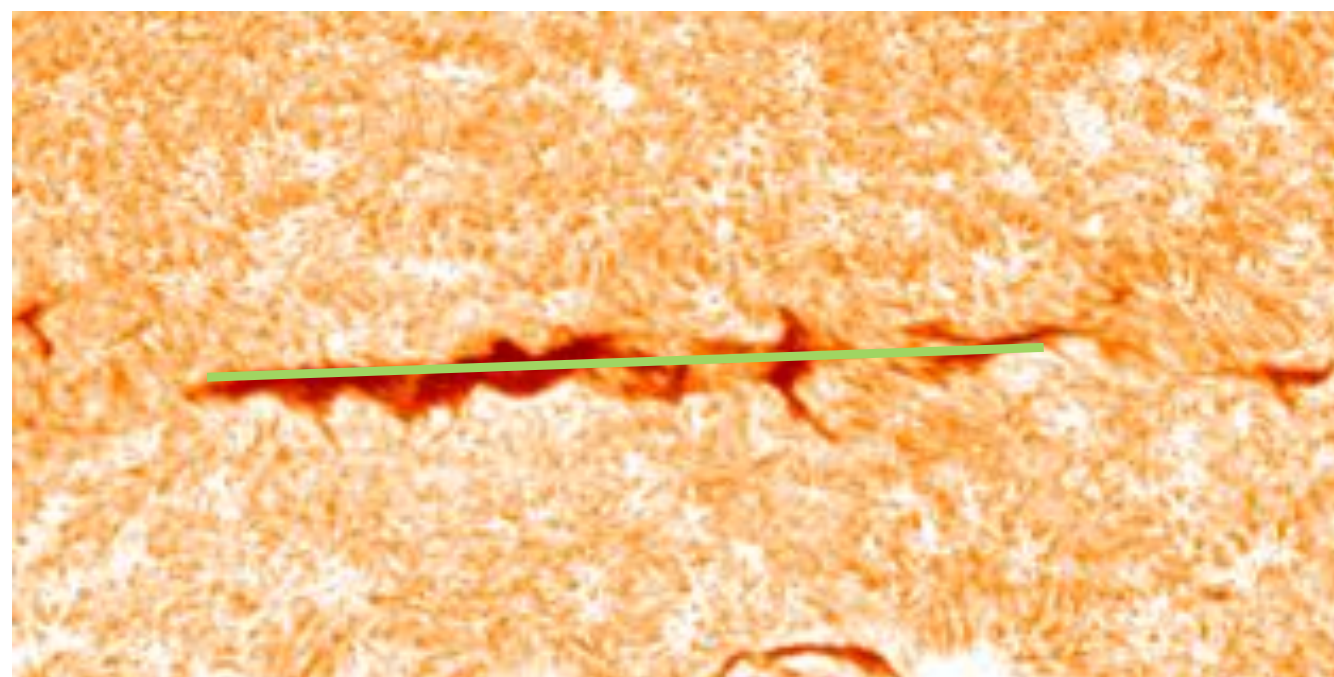
彩層磁場(He I線)

太陽フレア望遠鏡: フィラメントの磁場の観測

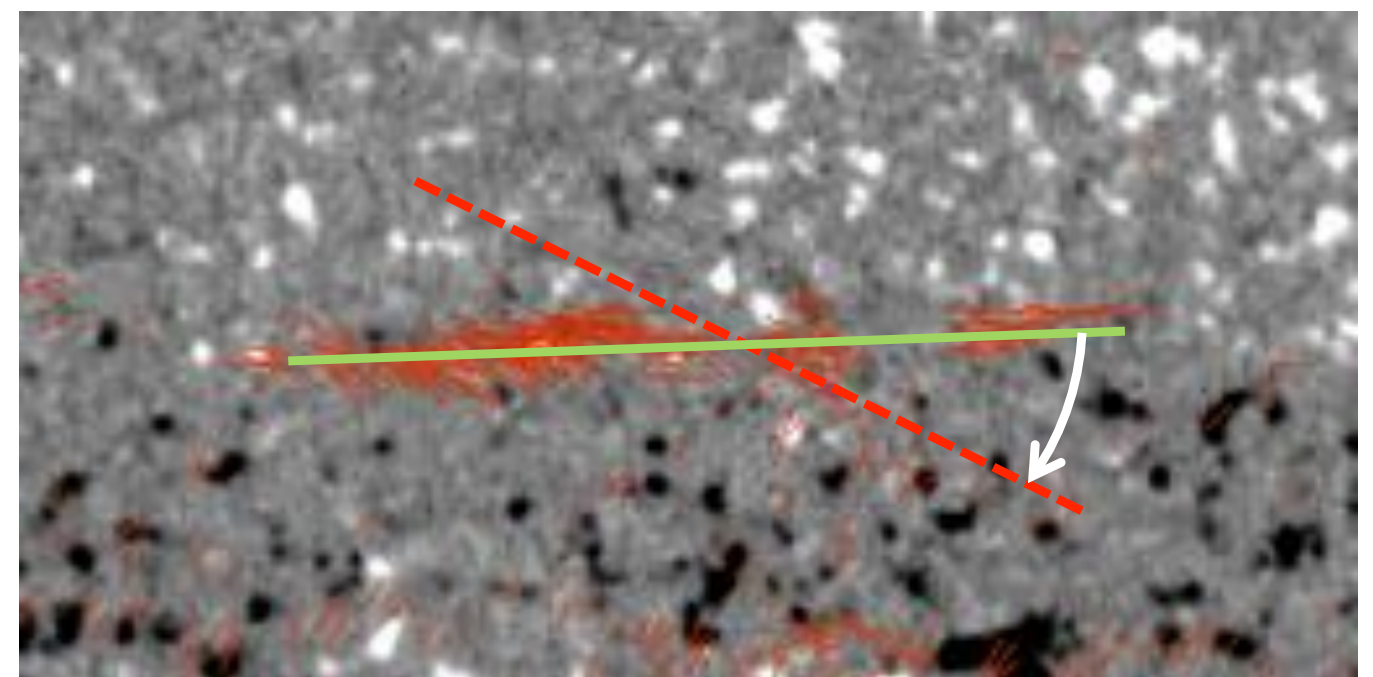
- 近赤外線偏光観測で、フィラメント(プロミネンス)の磁場を測定できる
- ひとつのフィラメントの中で偏光方向はある程度そろっている
 - フィラメントの軸と磁場方向(偏光方向)の関係を決められる
 - この例では、磁場方向は時計回りに回転している



Hanaoka & Sakurai (2017)



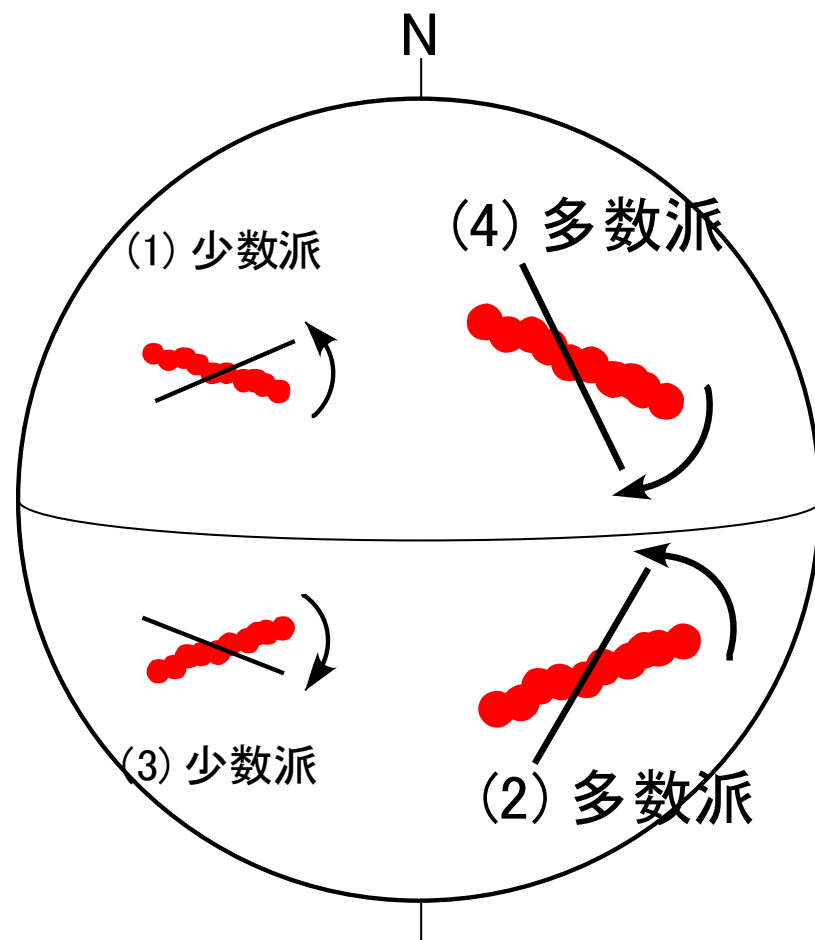
H α 画像



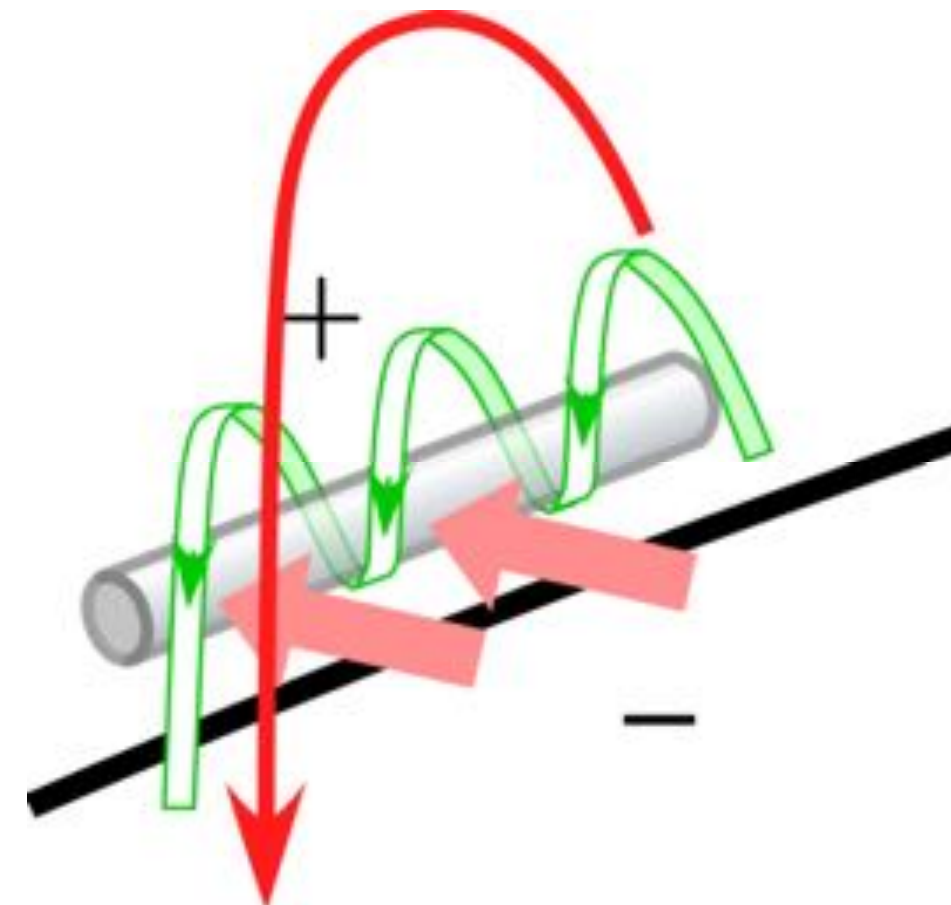
赤線: He 10830 直線偏光
背景: Si I 10827 円偏光

フィラメントの磁場構造

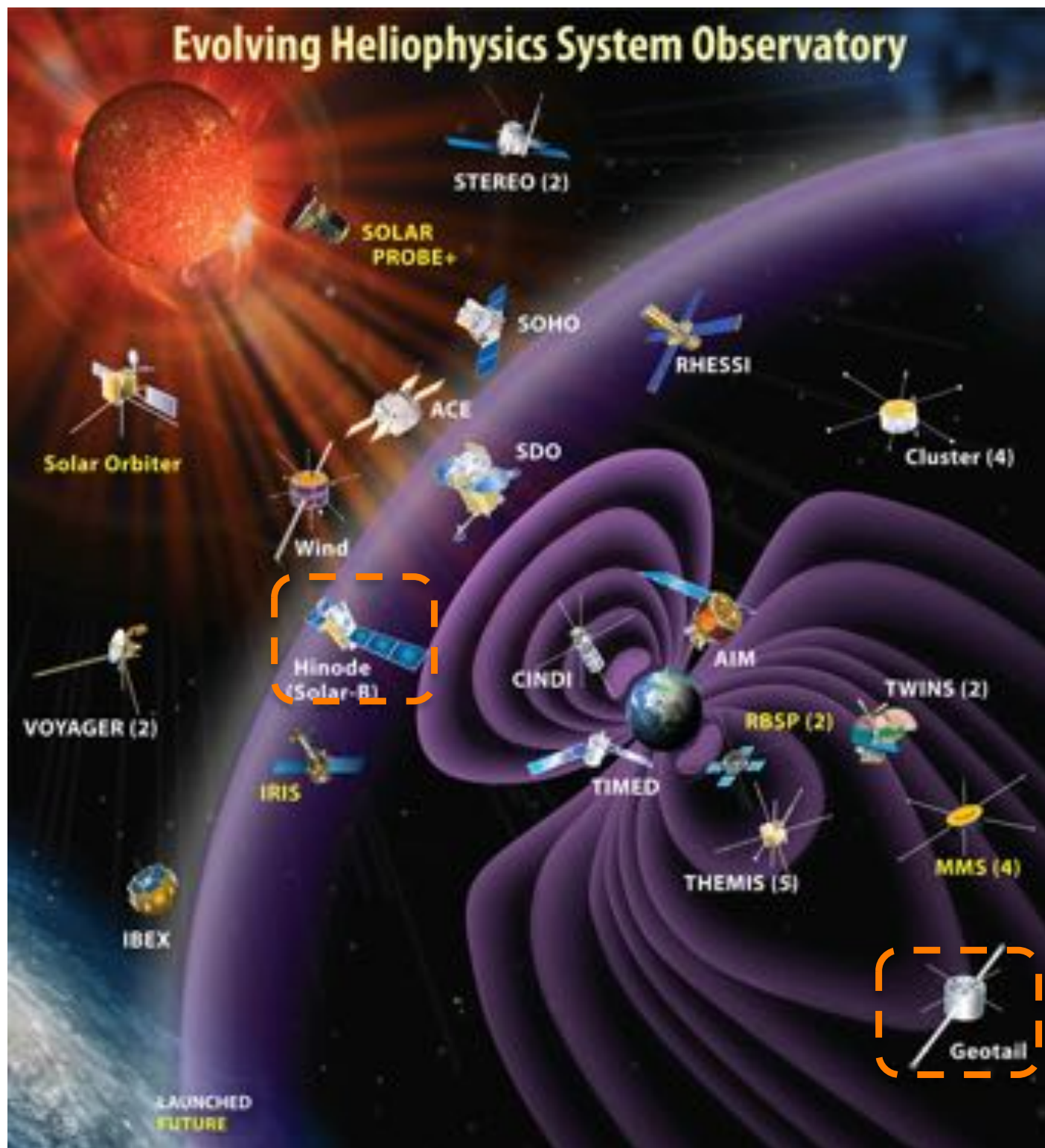
- 多数のフィラメントを測定すると、磁場の回転方向が半球ごとにだいたい決まっていることがわかった
 - 全球的なダイナモ作用の現れ
- フィラメントはフラックスロープの底に位置し、フラックスロープの下側の磁場がフィラメント磁場として見えている



フィラメント磁場の方向の傾向



フィラメント周りの磁場構造の模式図
 (北半球の場合)

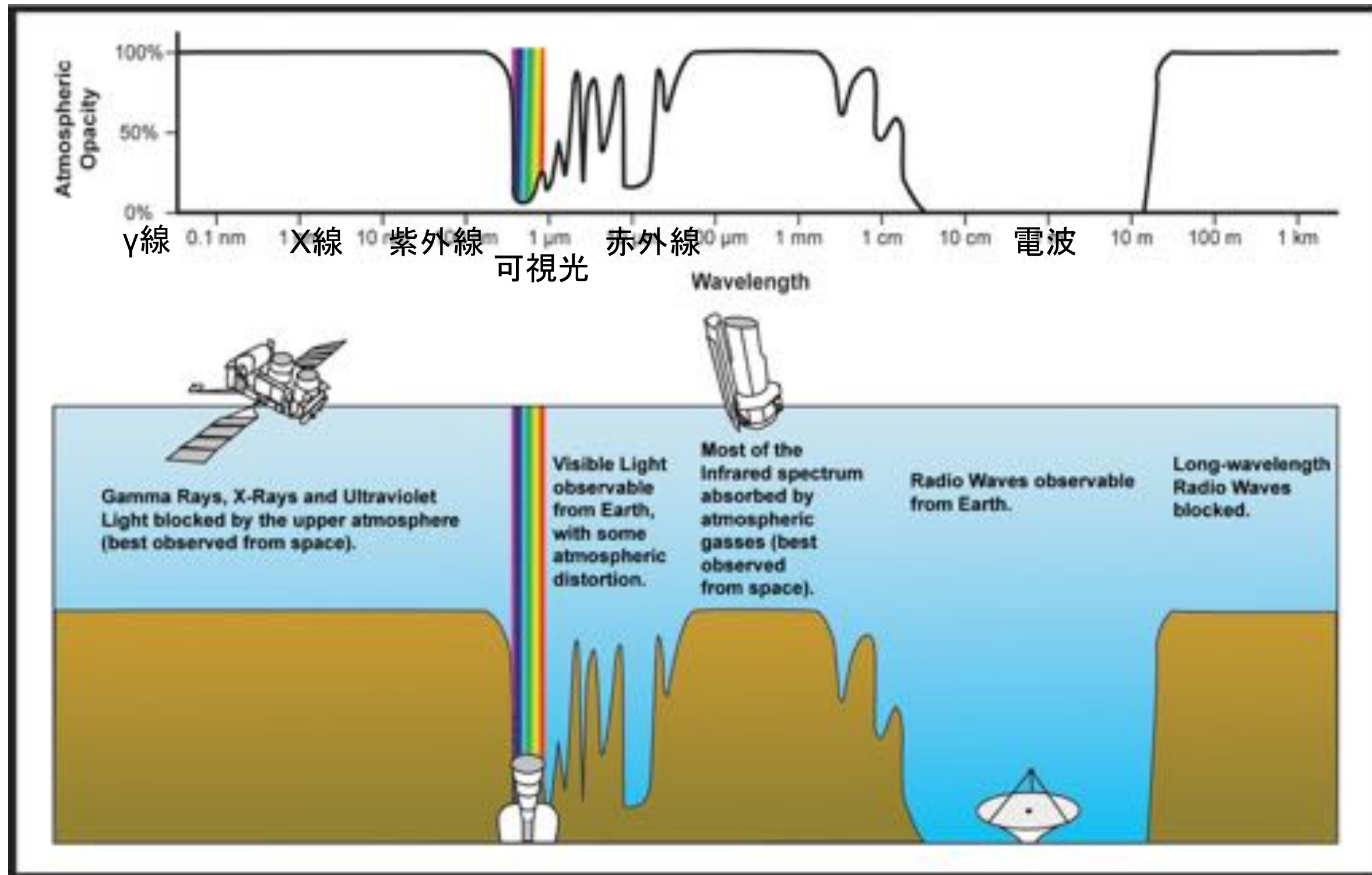


(Heliophysics decadal survey 2012)

- 光(電磁波)
 - 可視光に加え、電波、赤外線、紫外線, X線, γ 線

“リモートセンシング観測”
- 高エネルギー粒子
 - 太陽風によって、電離した気体 (主に電子と陽子)が地球までやってくる。
 - 300 – 1000 km/s、数日かかる

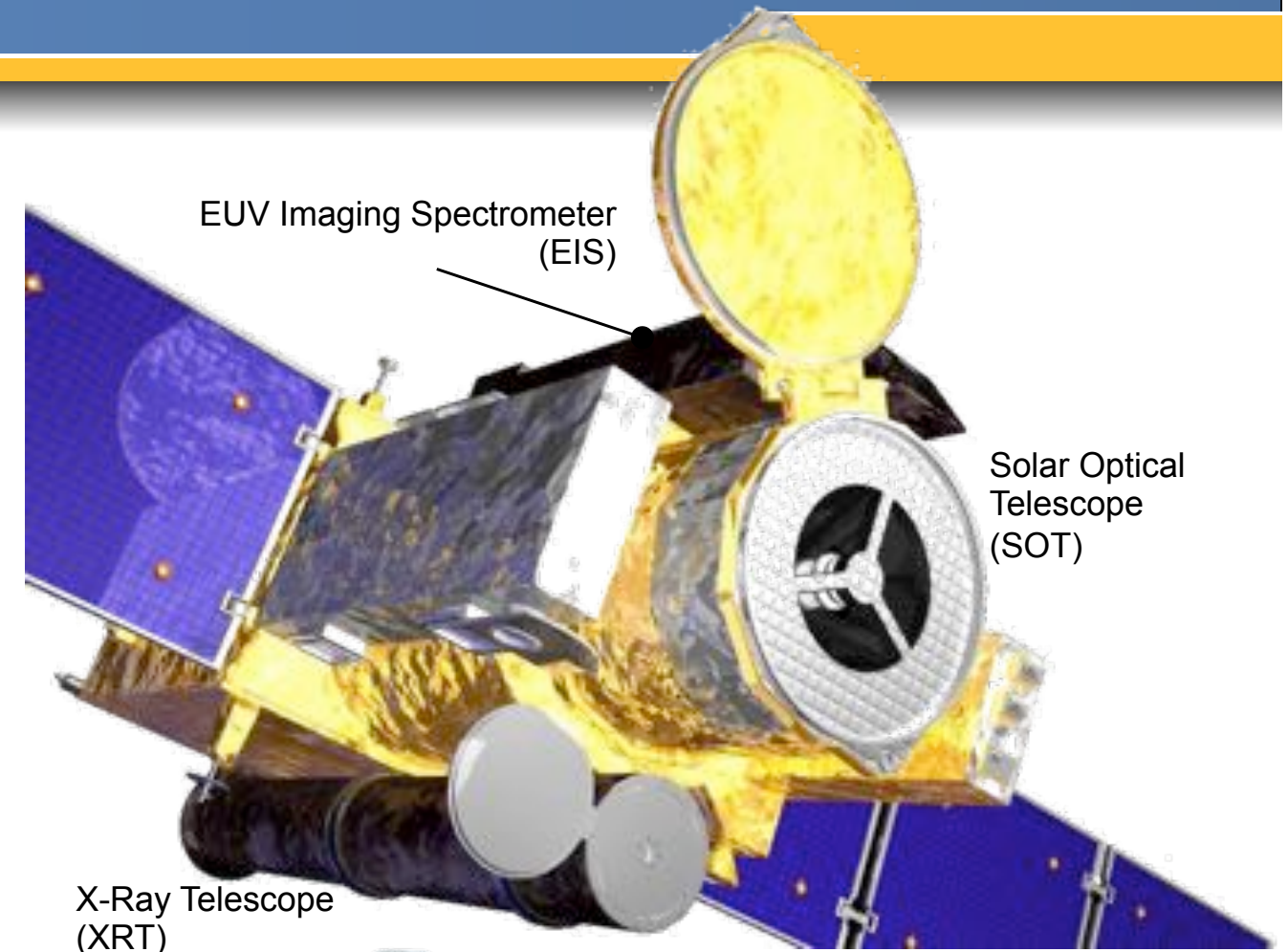
“その場観測”
- 1990年代以降、スペース観測によって、多波長観測とその場観測を組み合わせると太陽研究は大きく進展した。



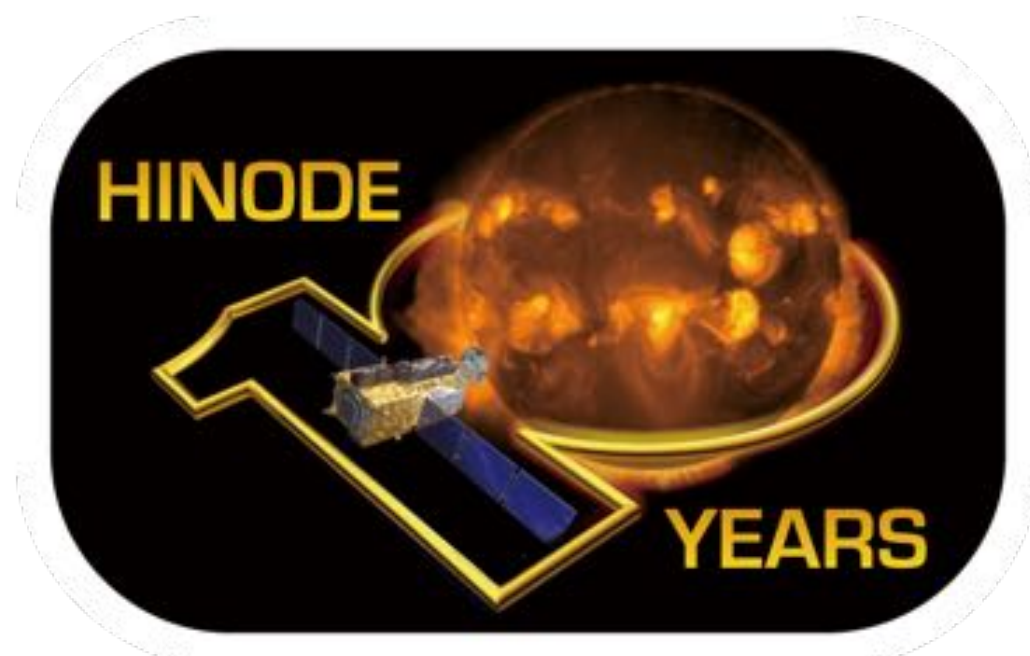
©NASA

「ひので」衛星

- スペースからの太陽観測
 - 地上からは見えない波長 (X線、紫外線) でコロナを観測
 - 大気に邪魔されず精度のよい観測ができる
 - 24時間連続観測、太陽の常時監視
- 2006年9月に打ち上げ、今も現役
- 可視光望遠鏡 (SOT)
 - 口径50cmの回折限界性能を持つ世界最大、最高性能の太陽観測用宇宙望遠鏡



©NAOJ

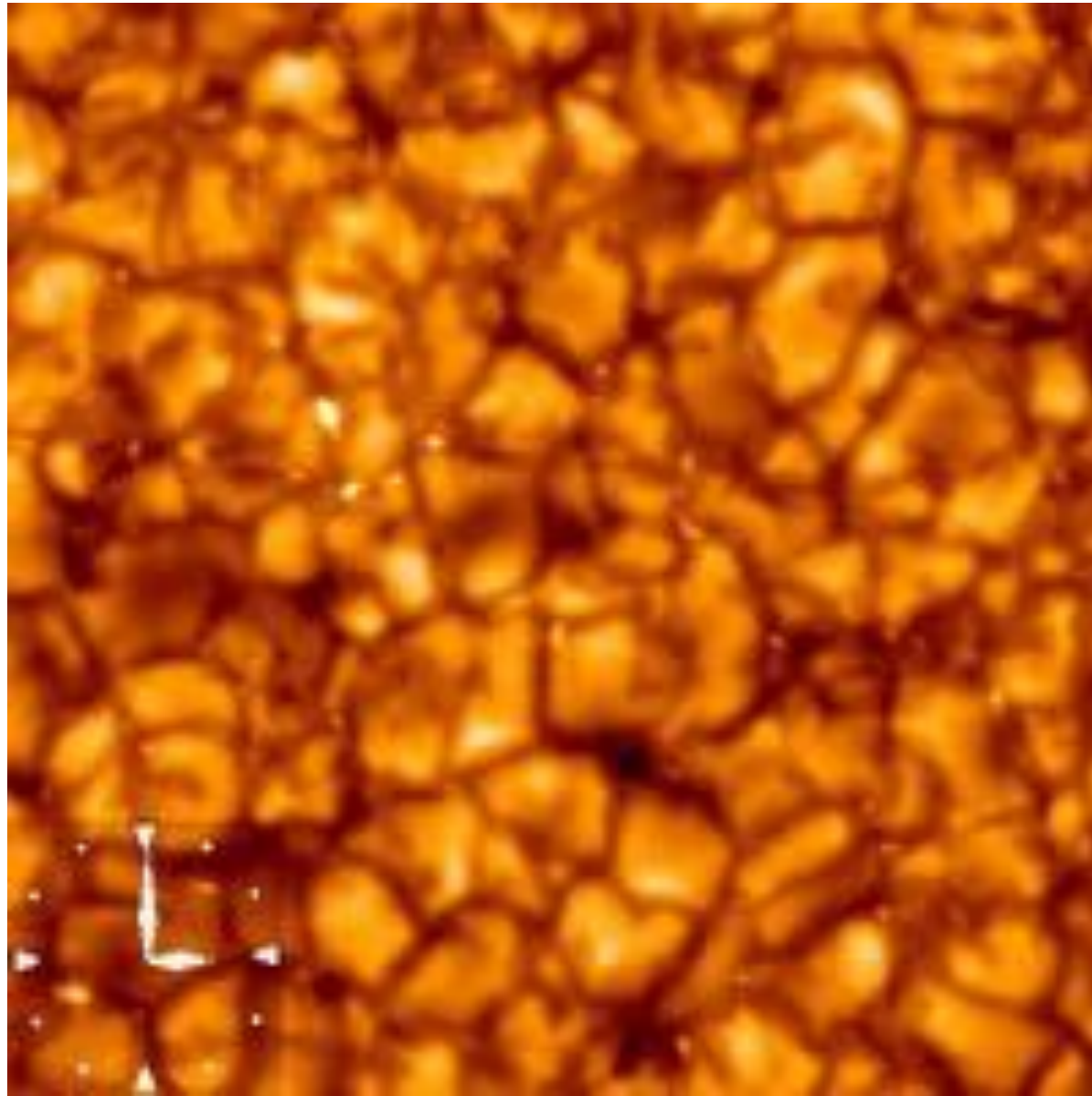


2016年で打ち上げから10周年

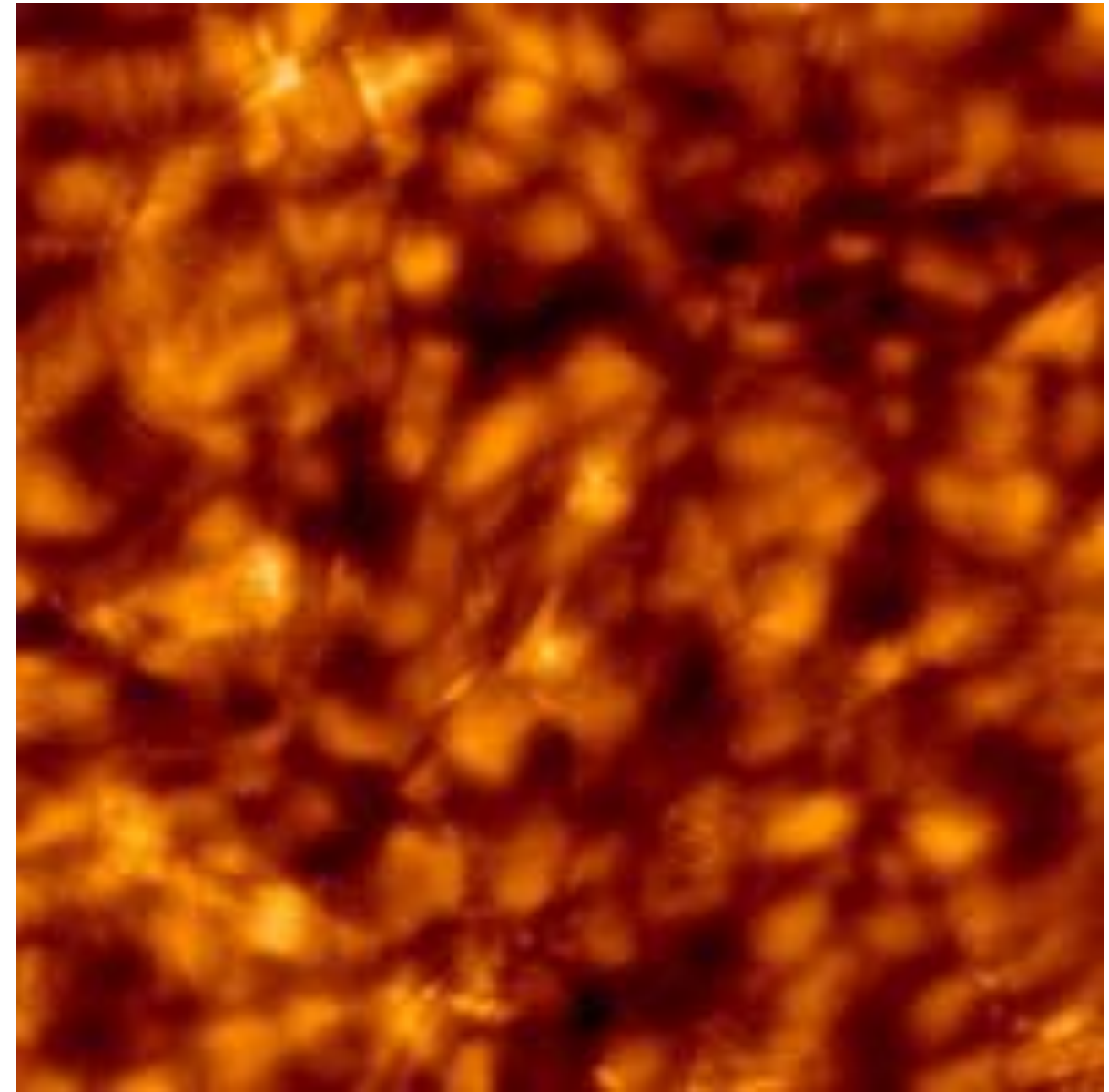


ナノブロック(©カワダ)にもなりました

スペース観測の威力



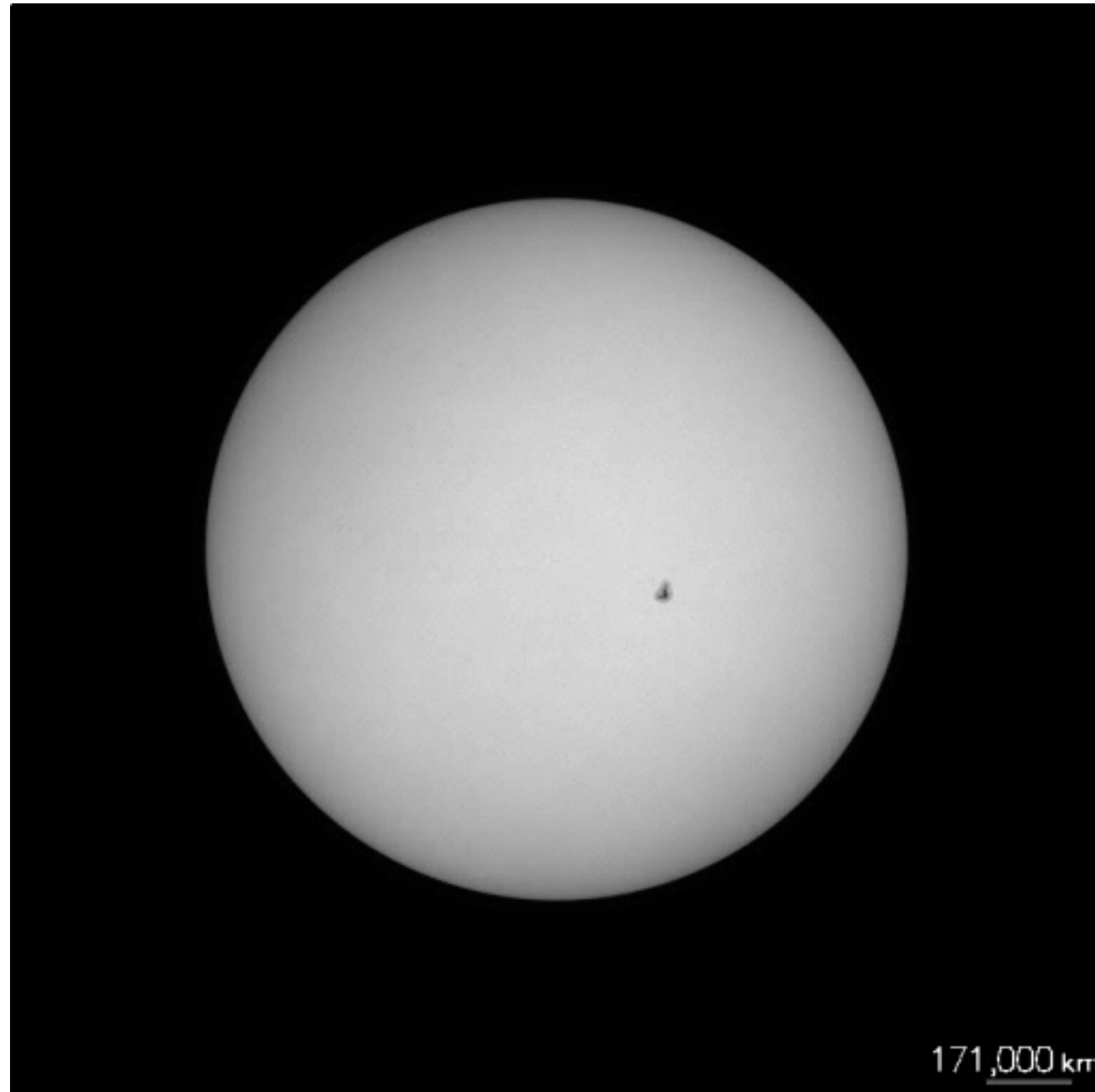
宇宙から ©NAOJ/JAXA



地上から

大気を脱出することで、精度の高い観測ができる

太陽の「顕微鏡」観測

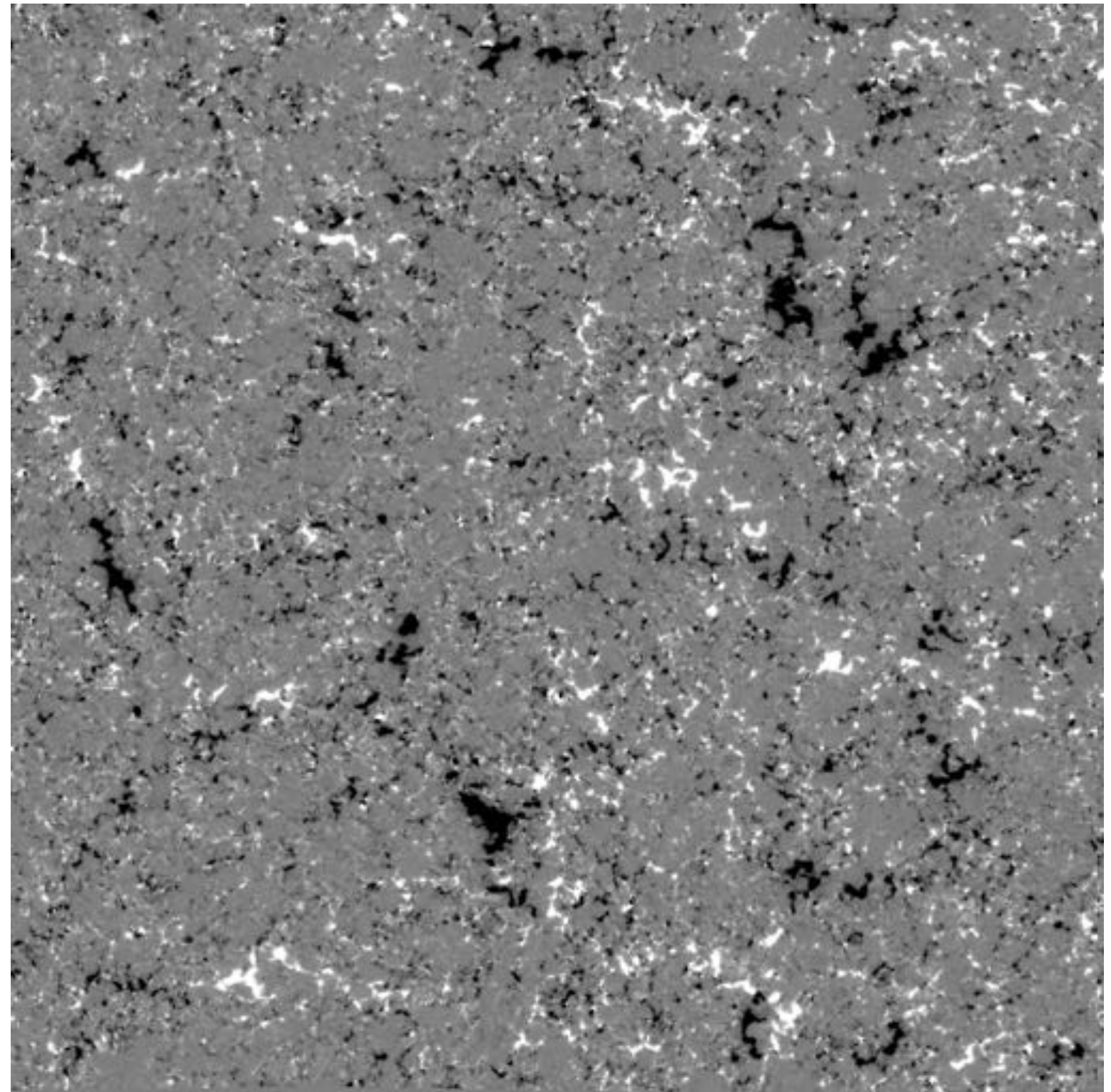


©Okamoto

太陽といえども暗い!?

太陽の静穏領域

- 偏光度はせいぜい0.1%~10%
- 構造を分解しないとN極・S極が打ち消しあってしまう。
- 磁場を測定するためには、精度の高い観測が必要



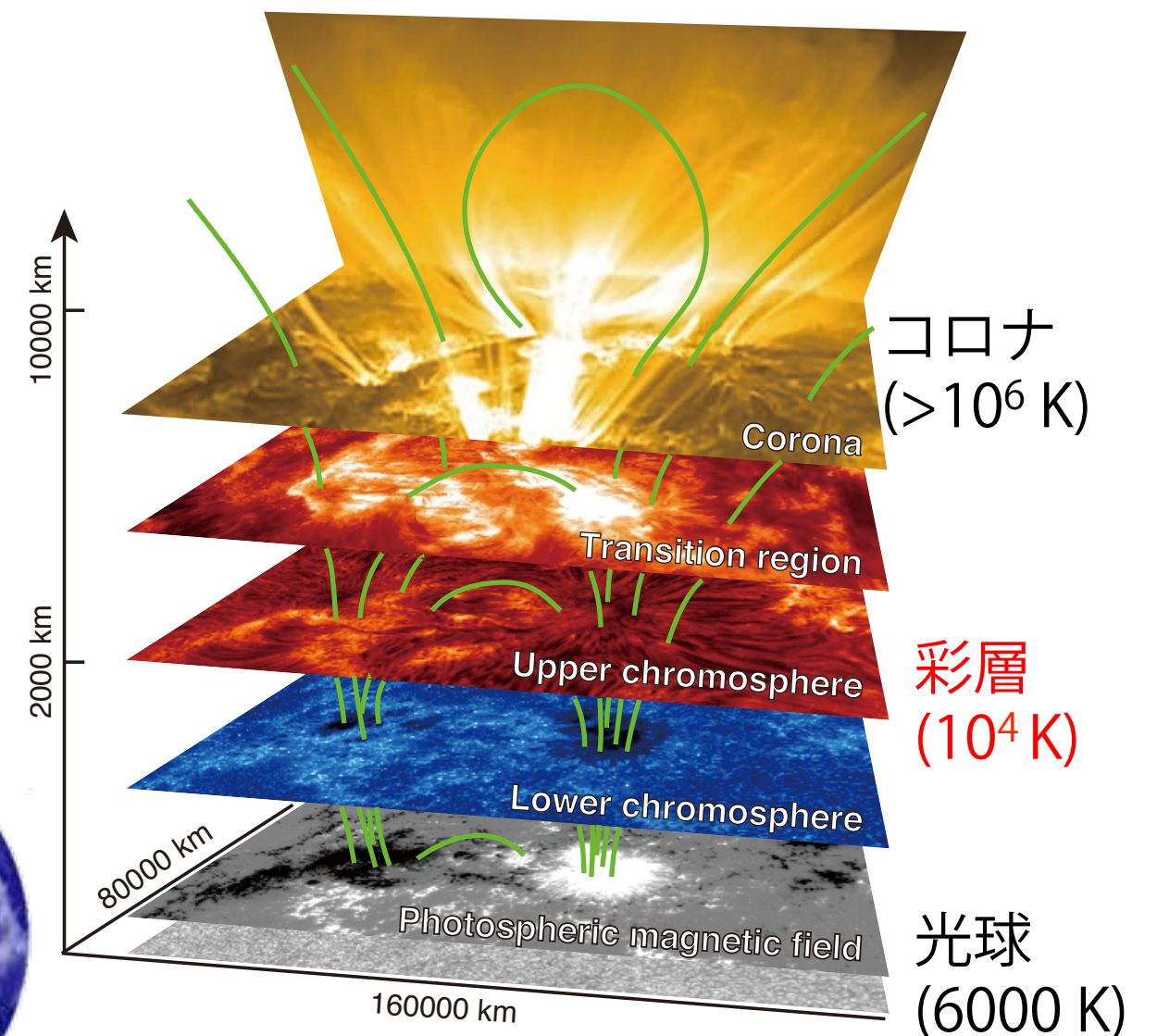
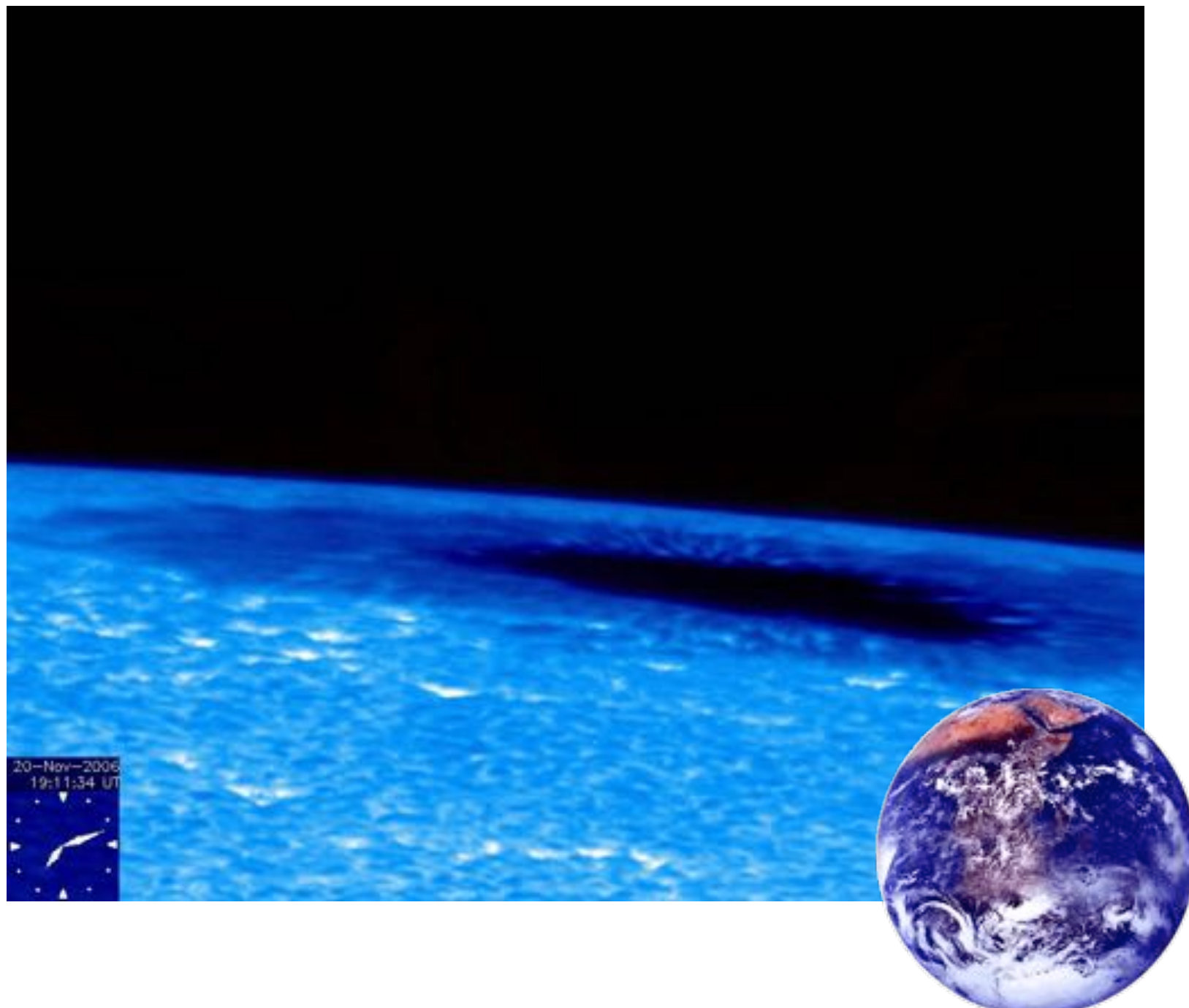
白:N極 黒:S極

1辺: 12万km

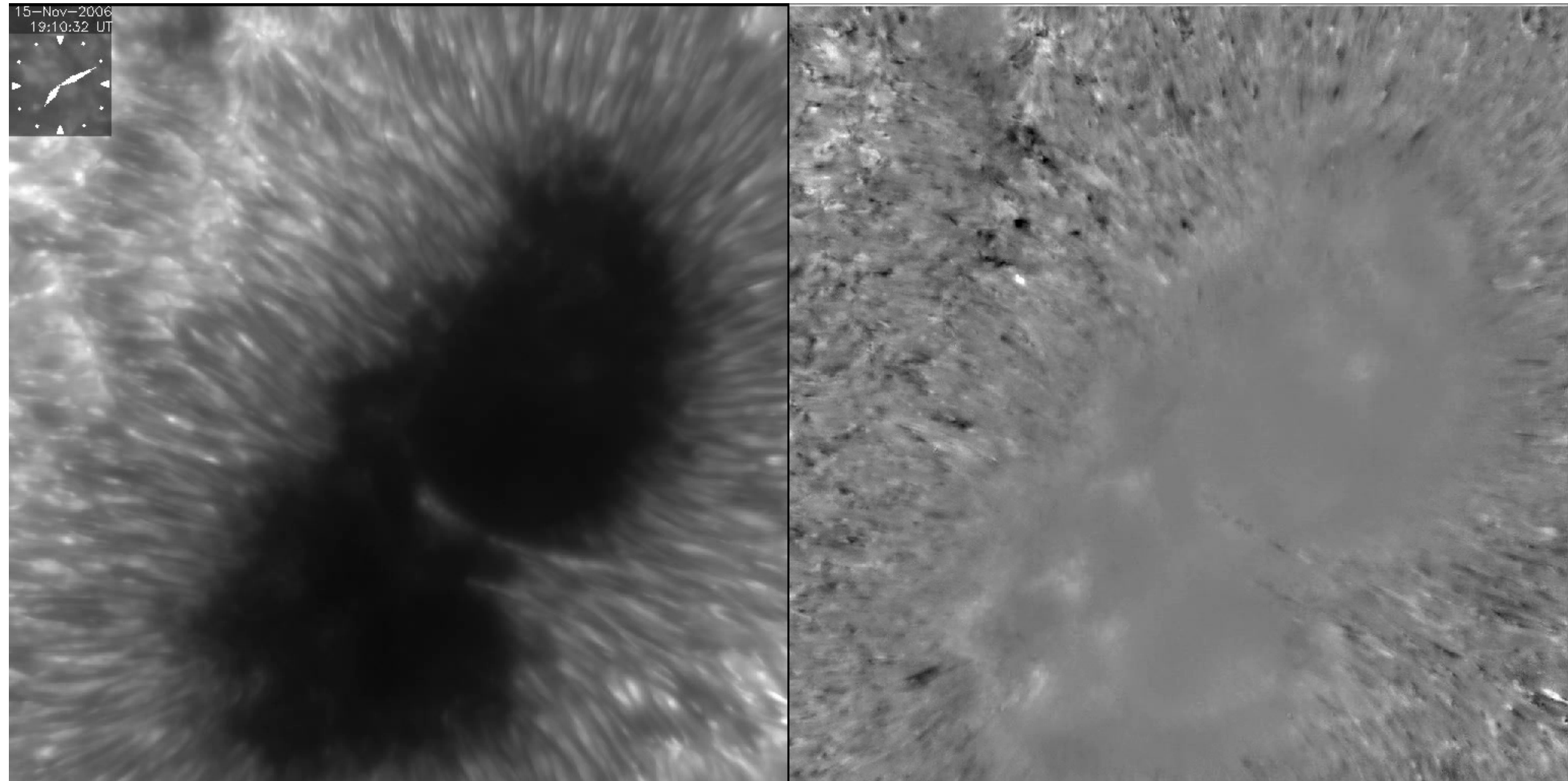
©NAOJ/JAXA

ダイナミックな彩層活動

- ジェットが地球を飲み込むほどの高さにまで数分で到達



黒点で発生する微細ジェット

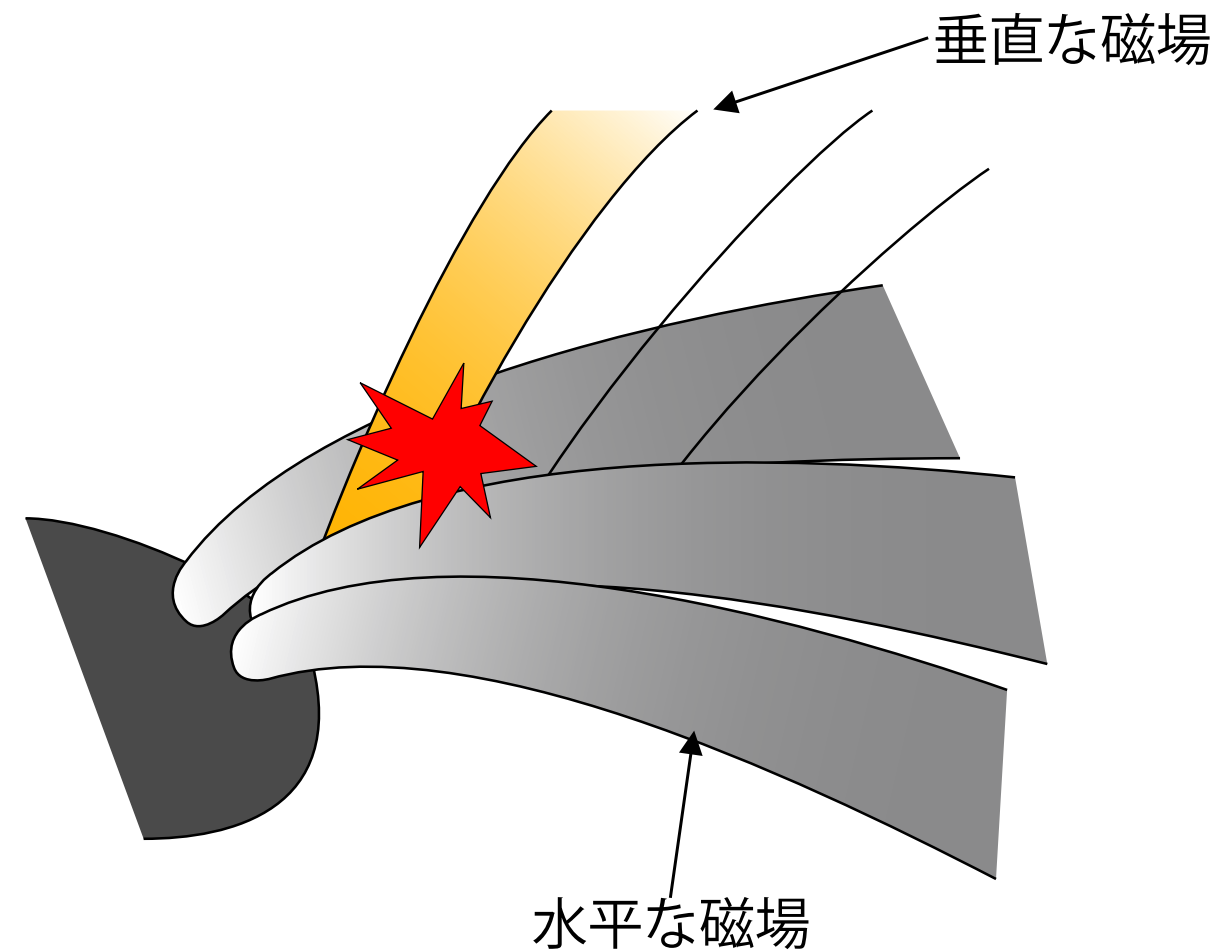
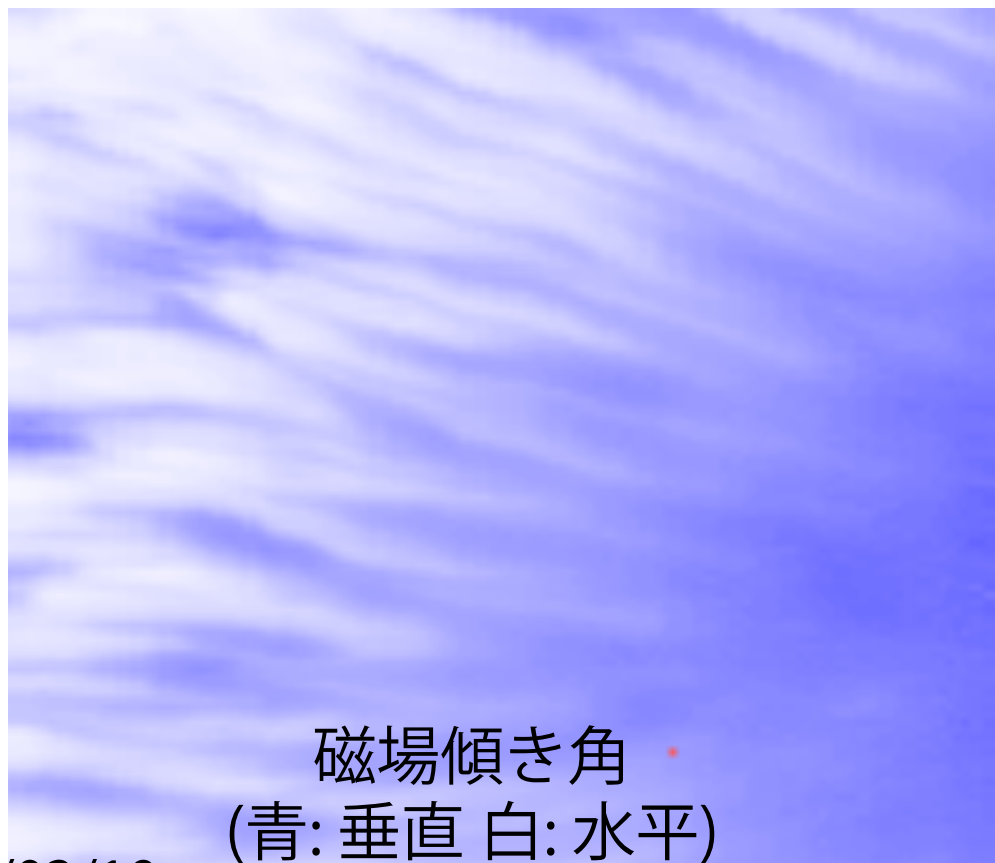
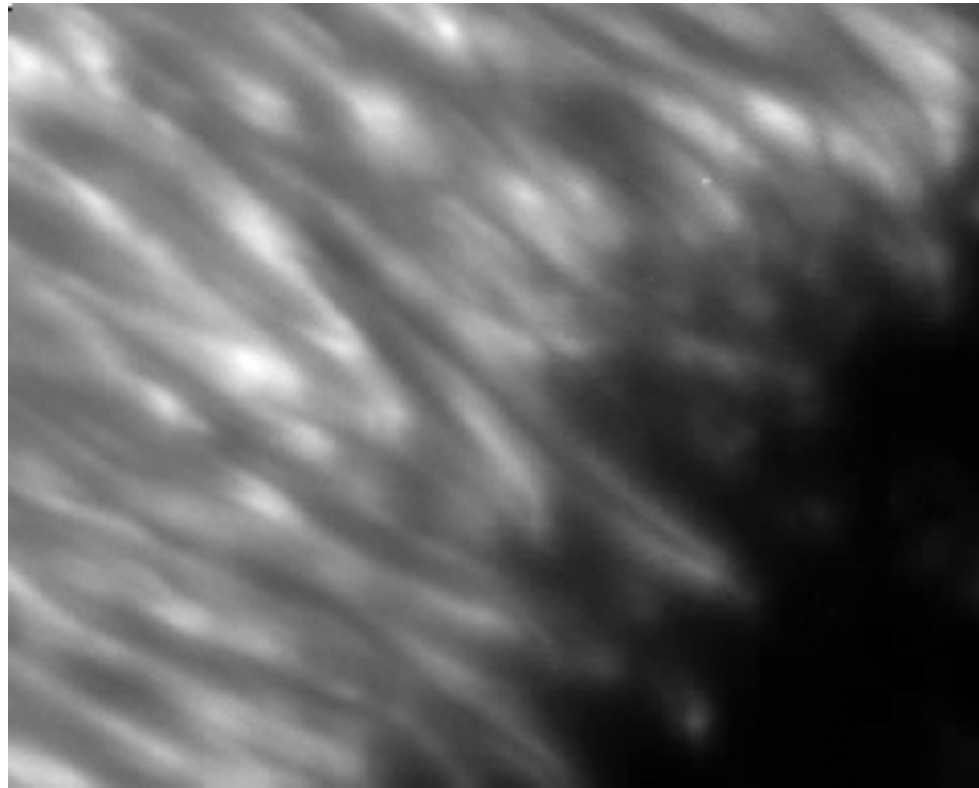


「ひので」彩層データ

時間変動成分を抽出

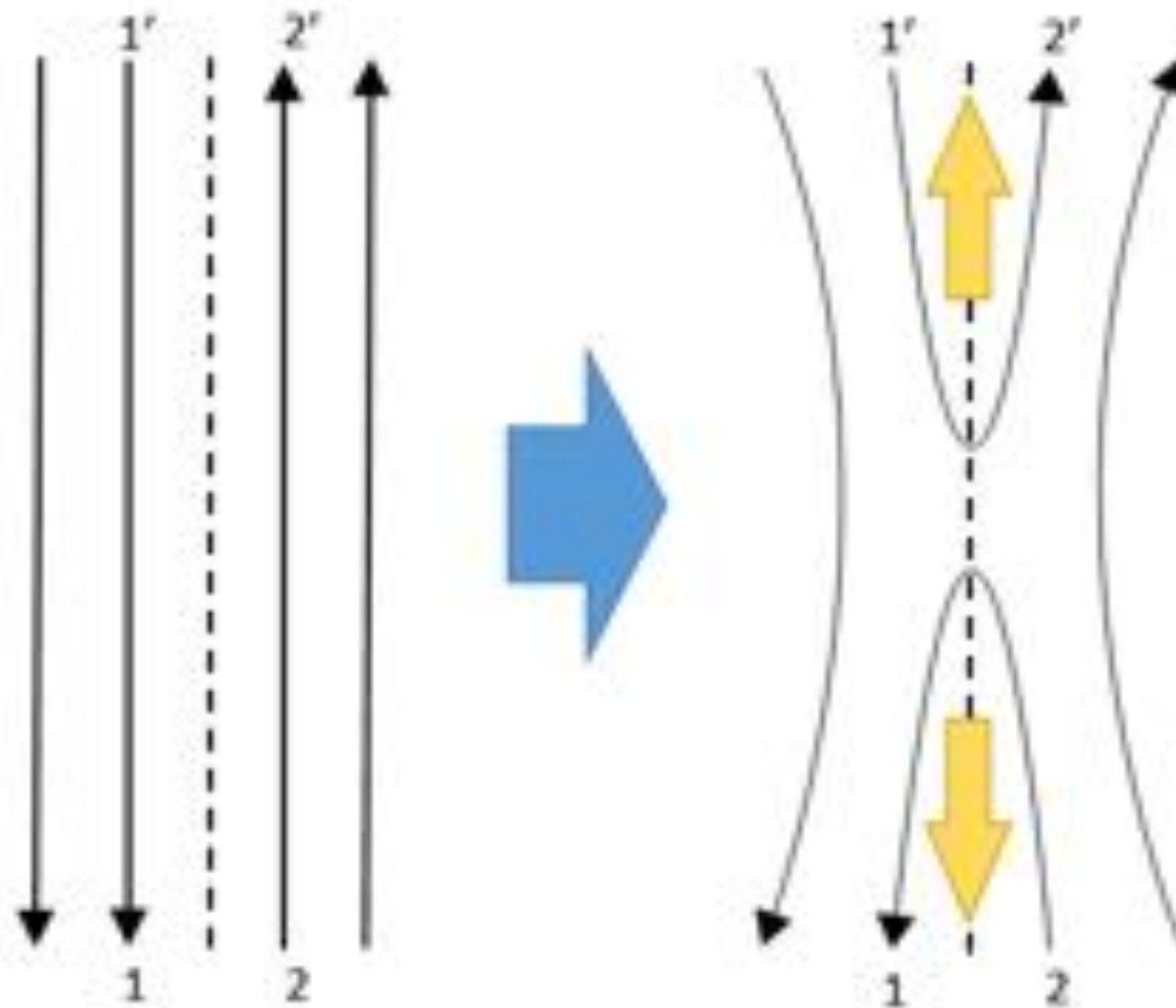
- 長さ: 1000 – 3000km, 幅: 300km, 寿命: 1分以下
- 微細で短命なジェット現象は、「ひので」以前の観測ではとらえることができなかった

微細ジェットのエネルギー源



- 半暗部には水平な磁場と立った磁場が混在 (くし状構造)
- 2つの磁場成分の間には強い磁場の不連続面が存在。そこで「磁気リコネクション」が発生しジェットが起こる

磁気リコネクション

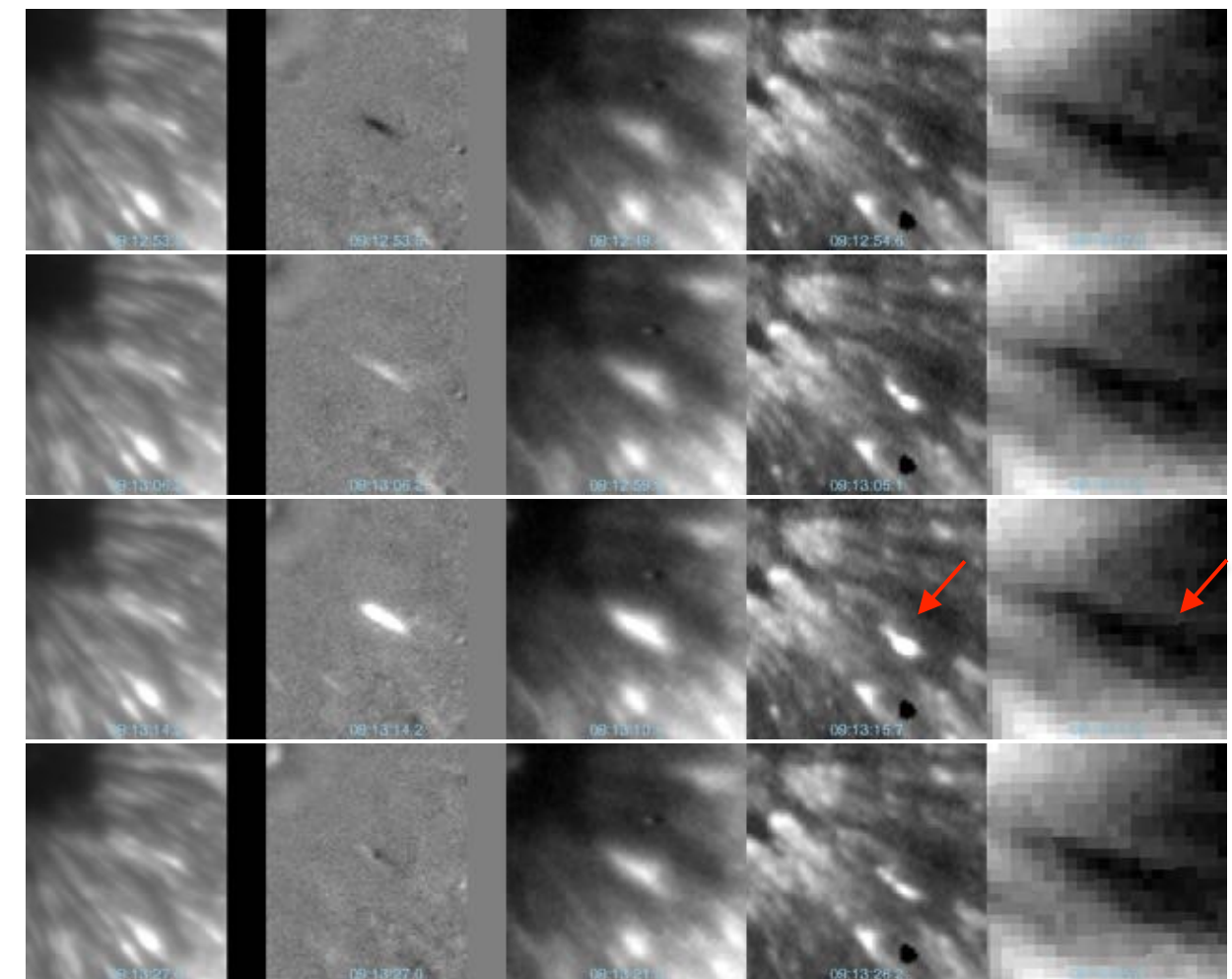
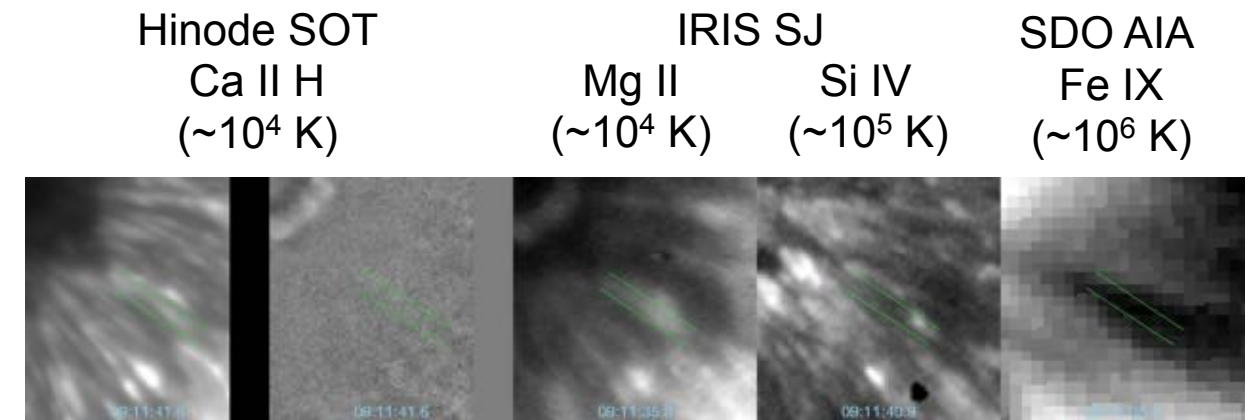
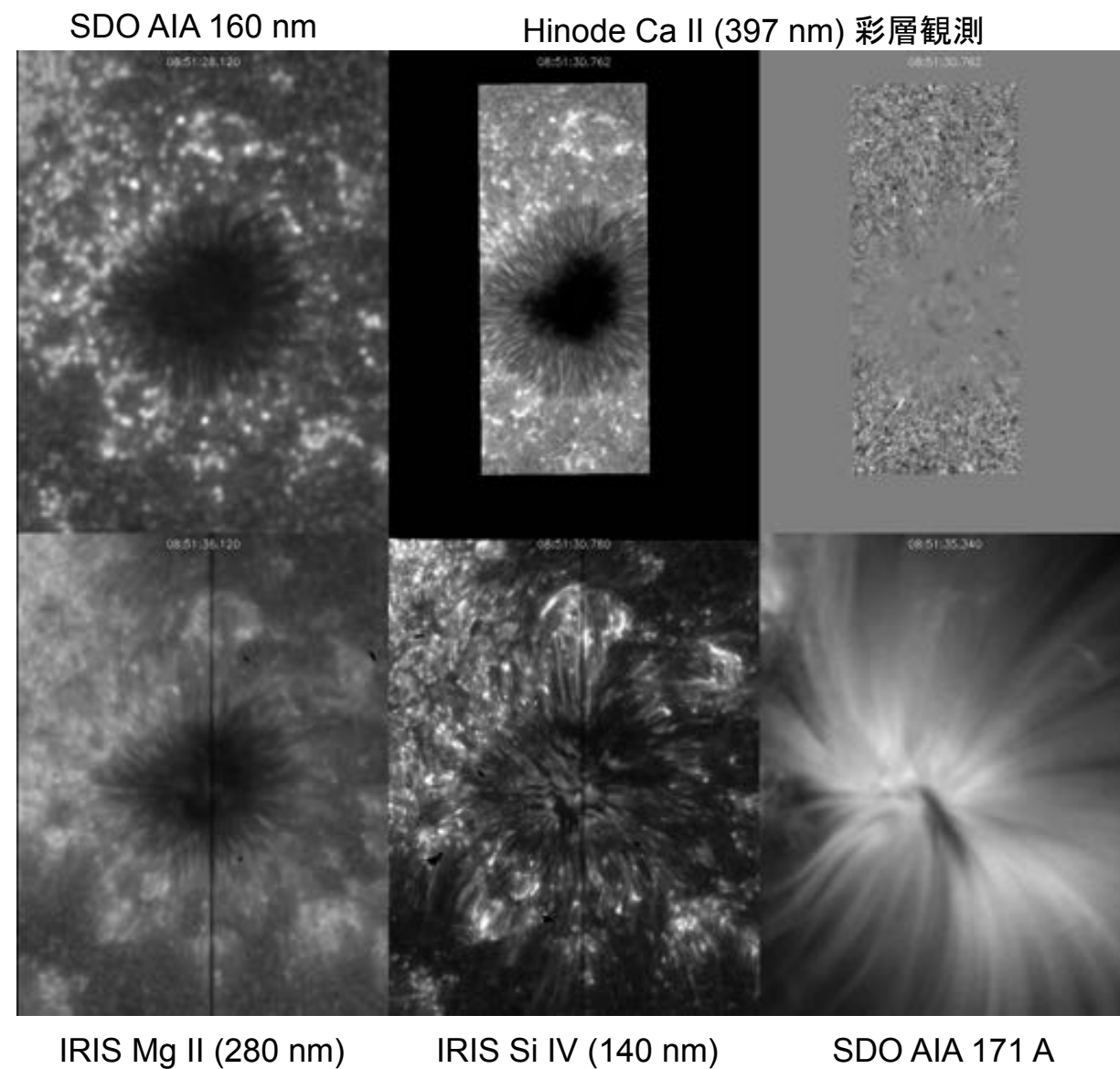


磁場のエネルギー
 $\propto B^2$

- 向きの異なる磁力線が接近し、つなぎ替わることで、磁場のエネルギーが運動エネルギーや熱エネルギーに変わる

彩層ジェット: コロナへの影響?

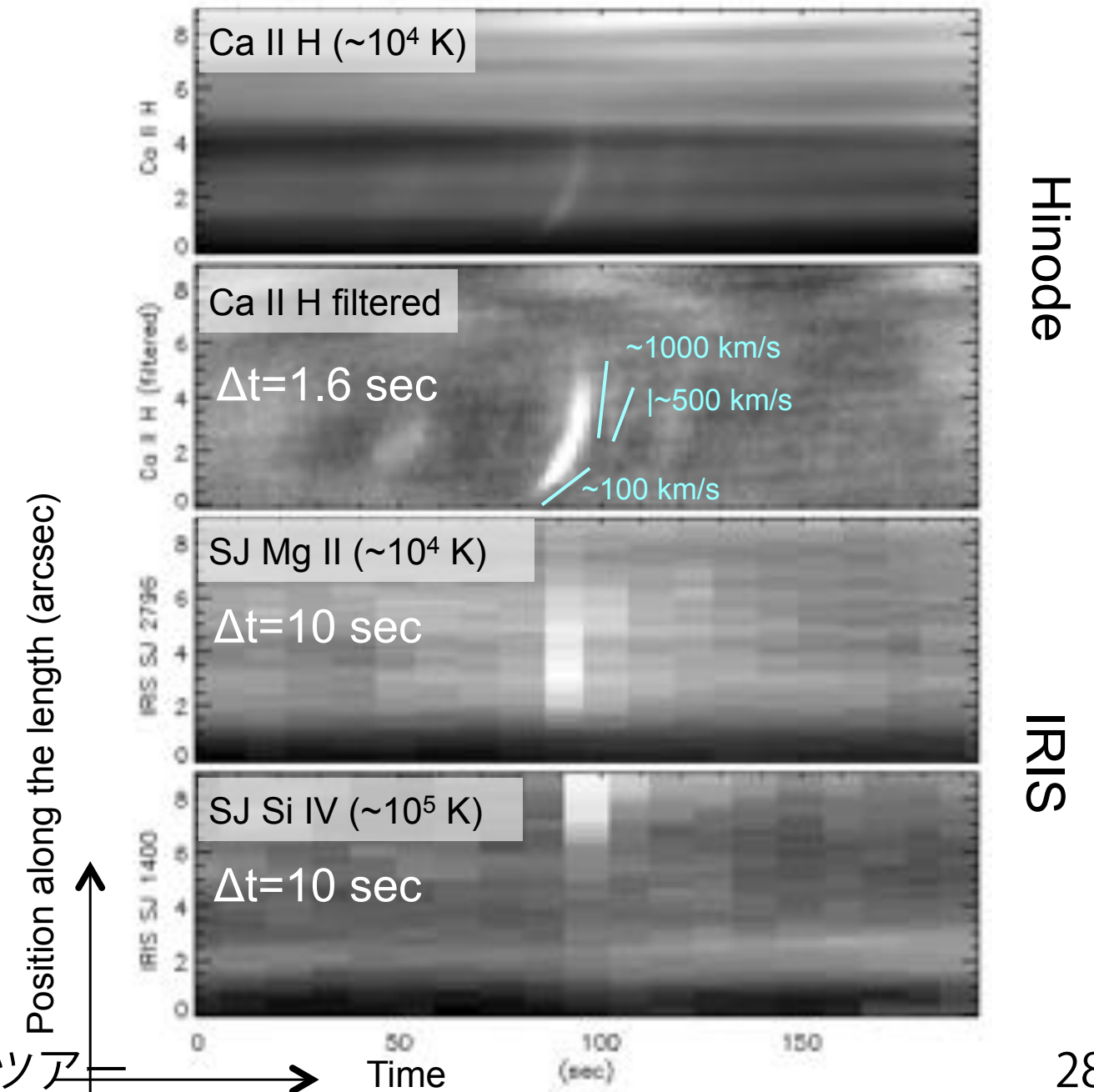
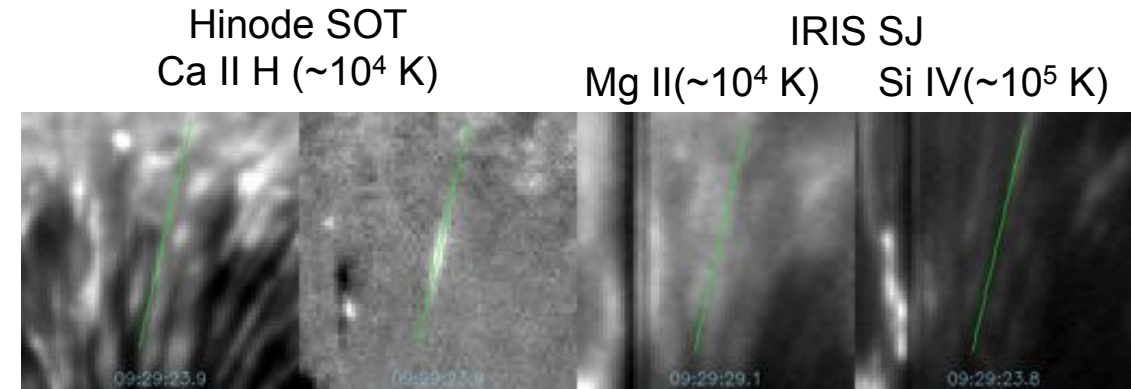
- 可視光彩層観測と紫外線コロナ(10^6 K)観測を組み合わせ、彩層ジェットがコロナにどう影響を及ぼしているのか調べる
- 彩層ジェットの先端が10万度以上に加熱されていることが見えてきた



(Katsukawa et al.) 視野: 13秒角

アルフベン波による加熱が

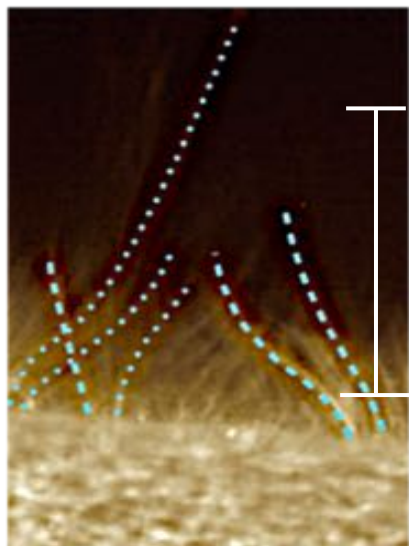
- 「ひので」の高時間分解能観測で、彩層のジェットで増光(加熱!!)の伝播がクリアに見えてきた。
- 彩層下部では100km/s程度、上方では500km/sを越える。
- このような速い伝播を説明できるのはアルフベン波(横波の磁気流体波動)が有力
 (アルフベン速度 \propto 磁場/密度^{1/2})



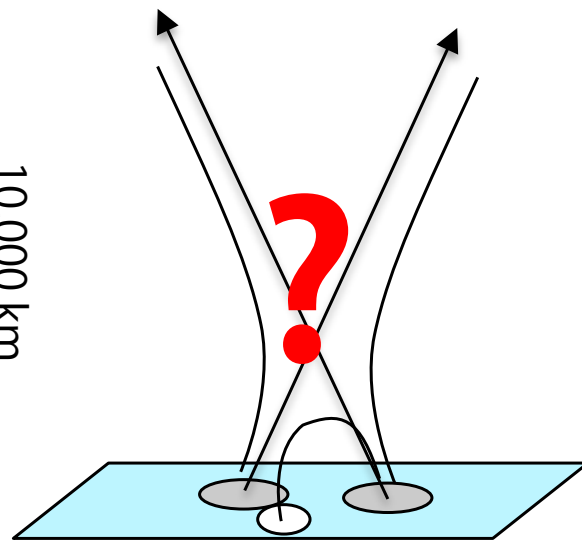
磁気活動の現場の磁場を調べたい

- しかし、従来は、太陽表面(光球)の磁場観測のみ

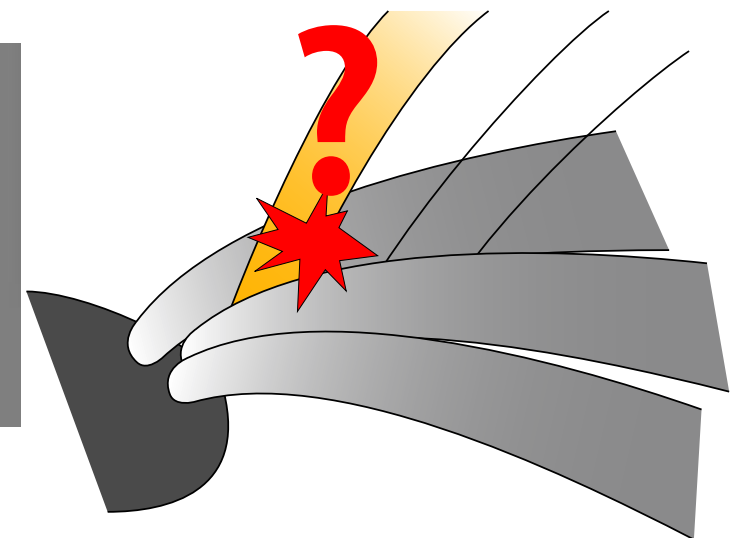
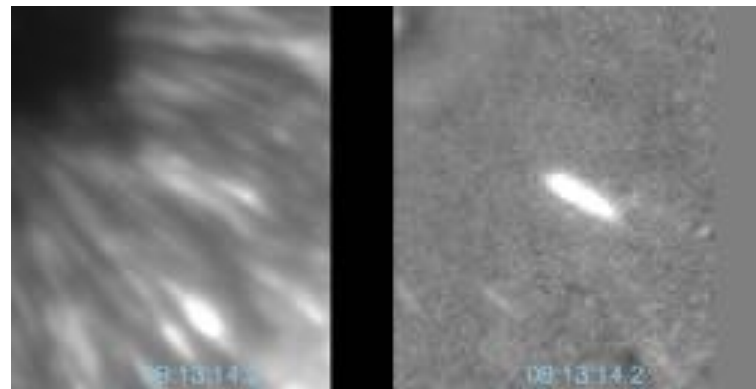
スピキュール



10,000 km



半暗部マイクロジェット



$$E \approx 10^{25} \text{ erg}$$

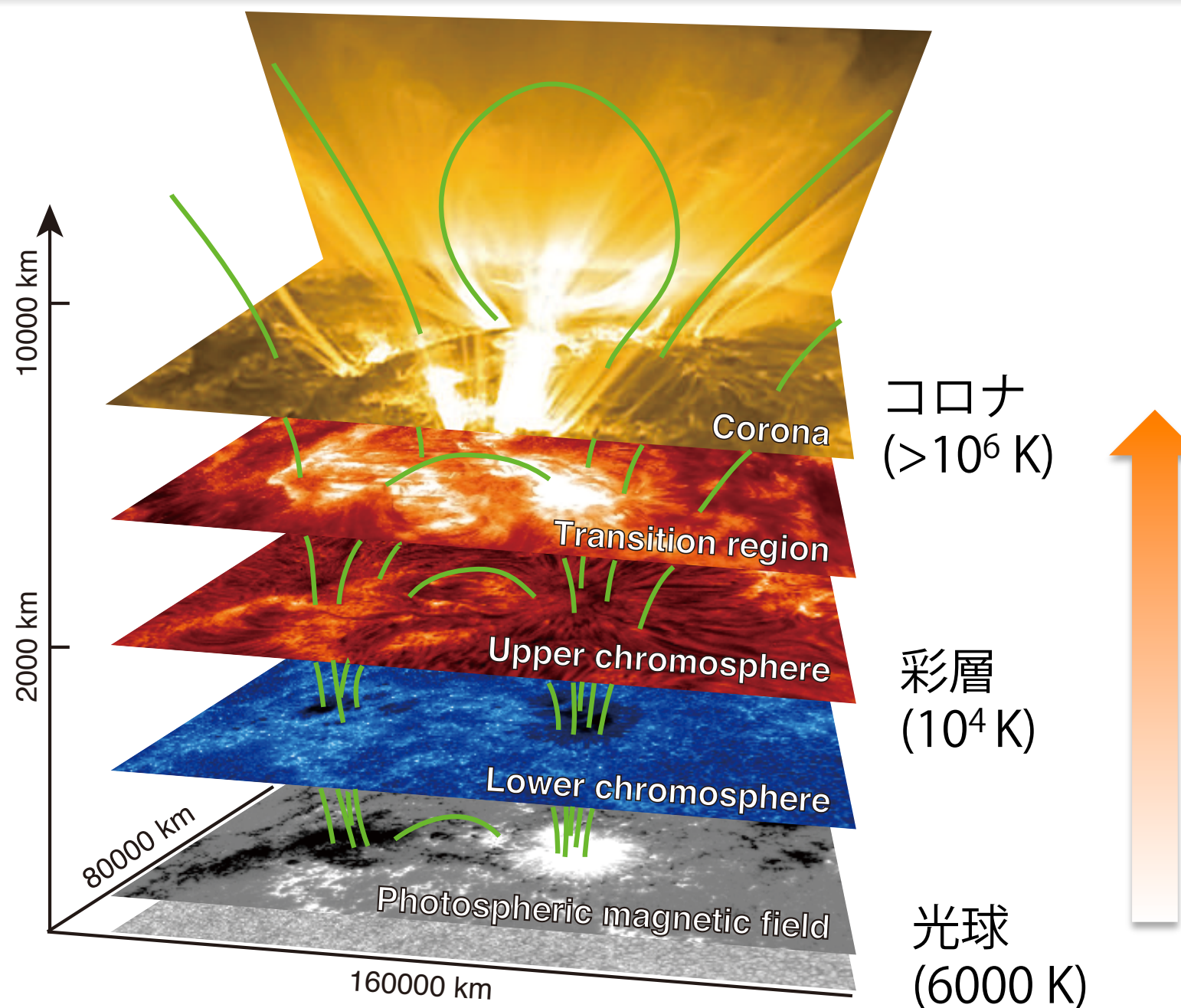
$$= \frac{1}{8\pi} \Delta B^2 V = \frac{1}{8\pi} (\sim 100 \text{ G})^2 (\sim 300 \text{ km})^3$$

磁場の時間変化

ジェットの幅

- 光球より上空で、高解像度と磁場感度があれば、エネルギー解放の現場をとらえられる

「見えない」磁場を見えるようにしたい



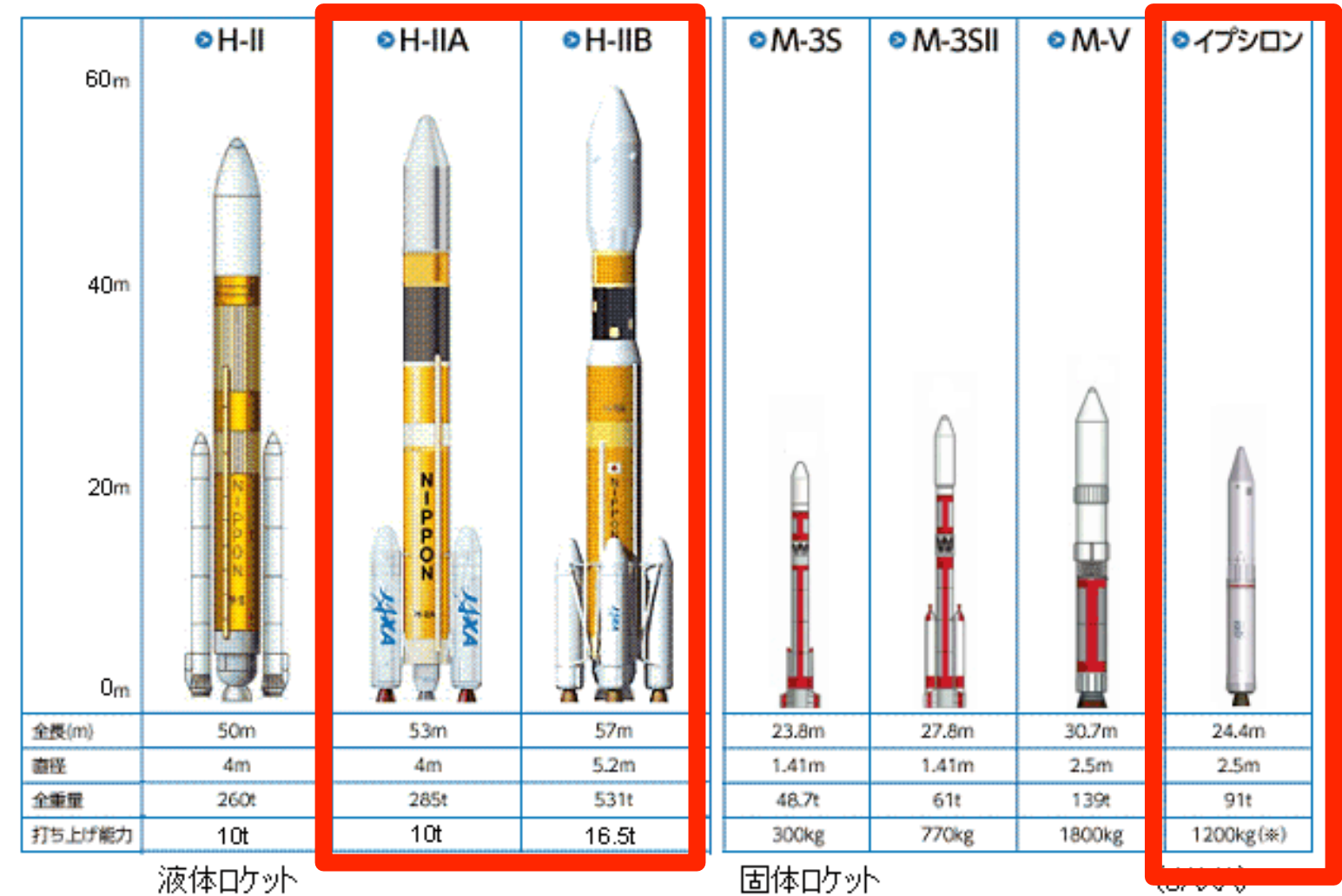
これまでの彩層・コロナ観測
撮像観測による定性的研究
(光球では偏光分光観測がなされた)



これからの彩層・コロナ観測
偏光分光観測から得られる物理量
(温度、速度、磁場)に基づく定量的研究

人工衛星 vs 小規模飛翔体

- 人工衛星
 - コスト大
 - 長い開発、少ないチャンス
 - 国際協力

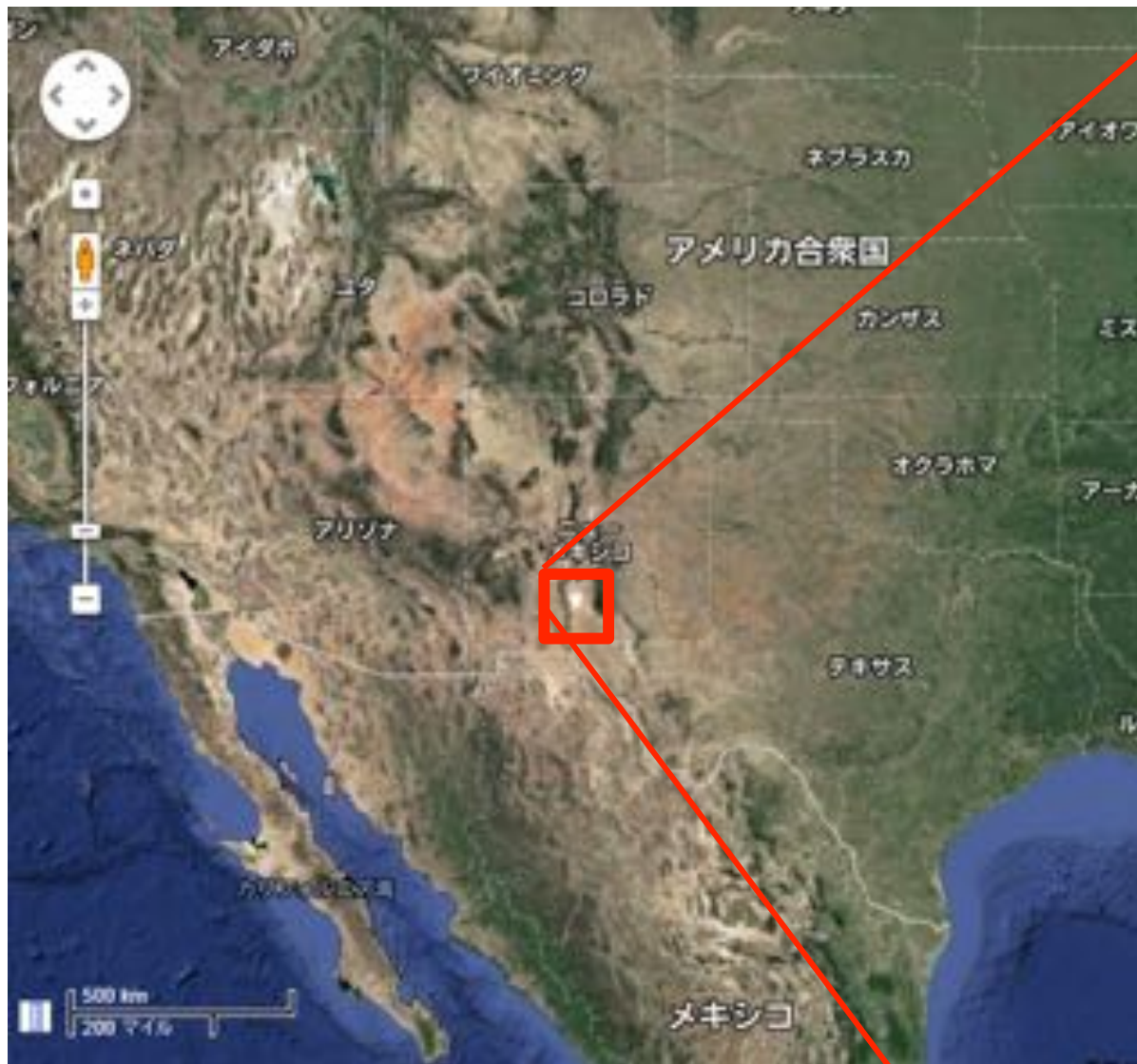


- 短時間・低コストの小規模な装置で研究成果を出し続ける
 - 小規模飛翔体: ロケット実験、超小型人工衛星、気球
 - 宇宙用の技術開発と人材育成 (装置開発、国際協力、マネジメント)
 - 好き勝手できる (チャレンジングなことができる)

CLASP(クラスプ)初飛翔 (2015年9月3日)



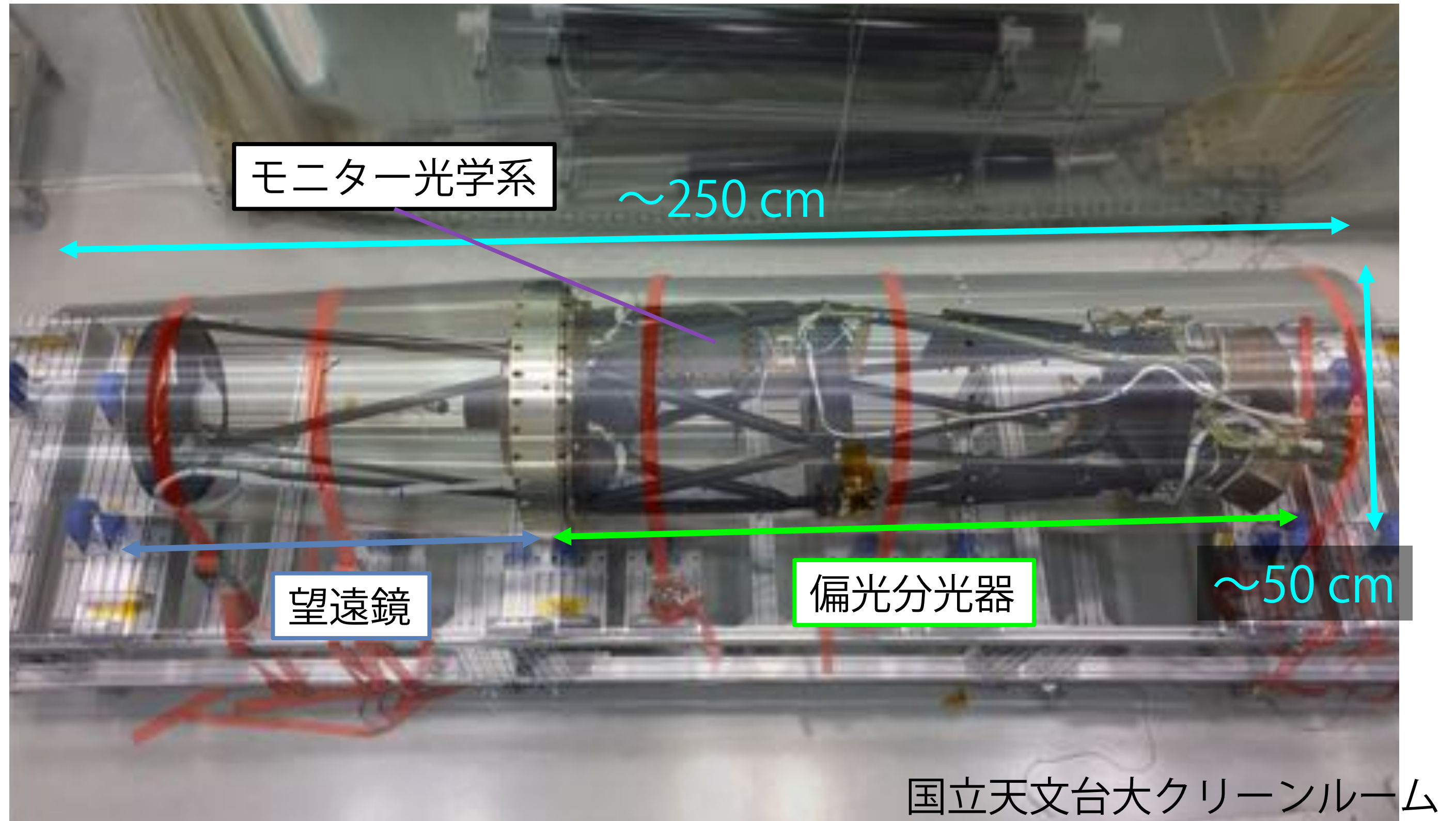
白い砂漠からの打ち上げ



弾道飛行

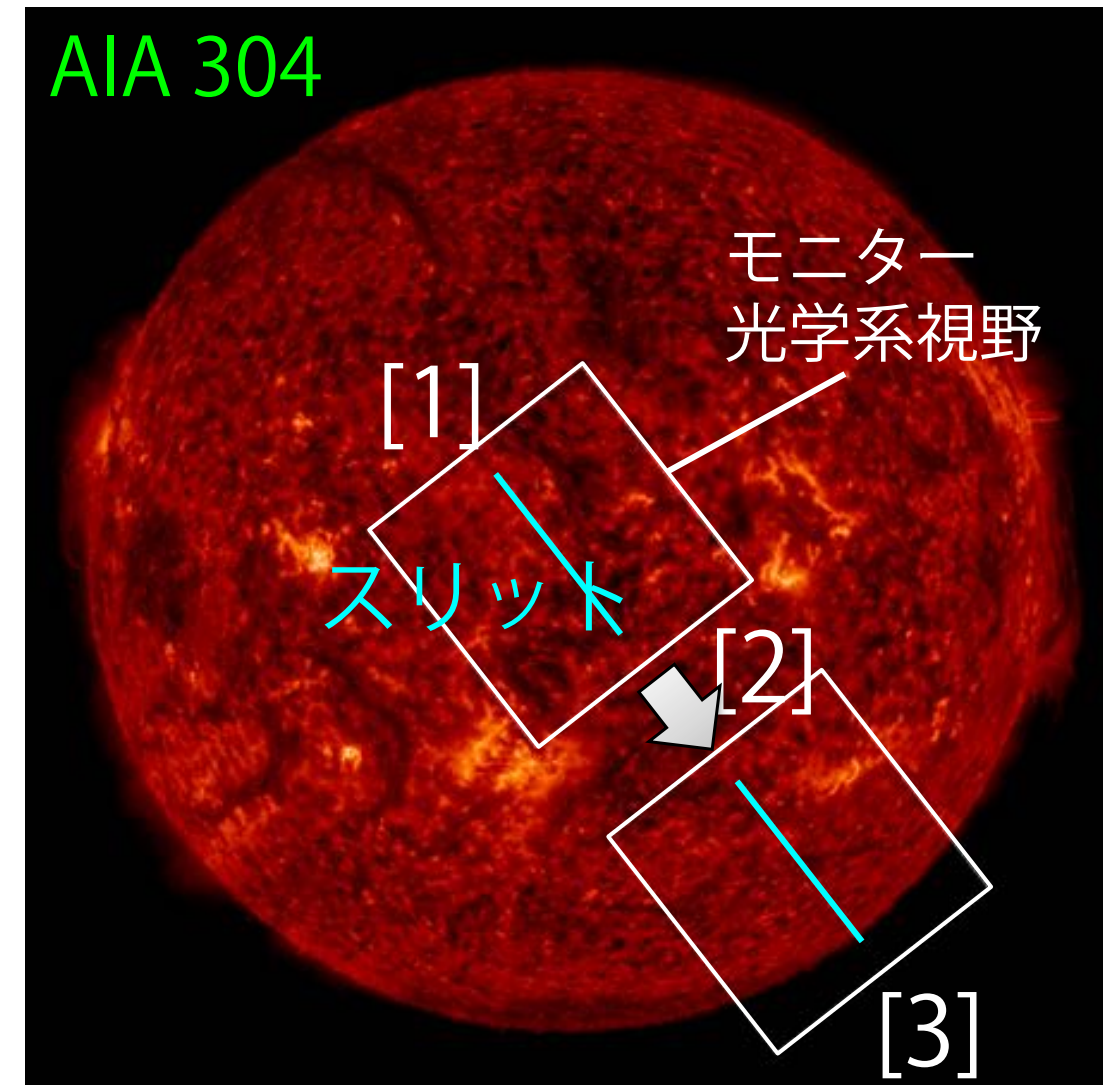
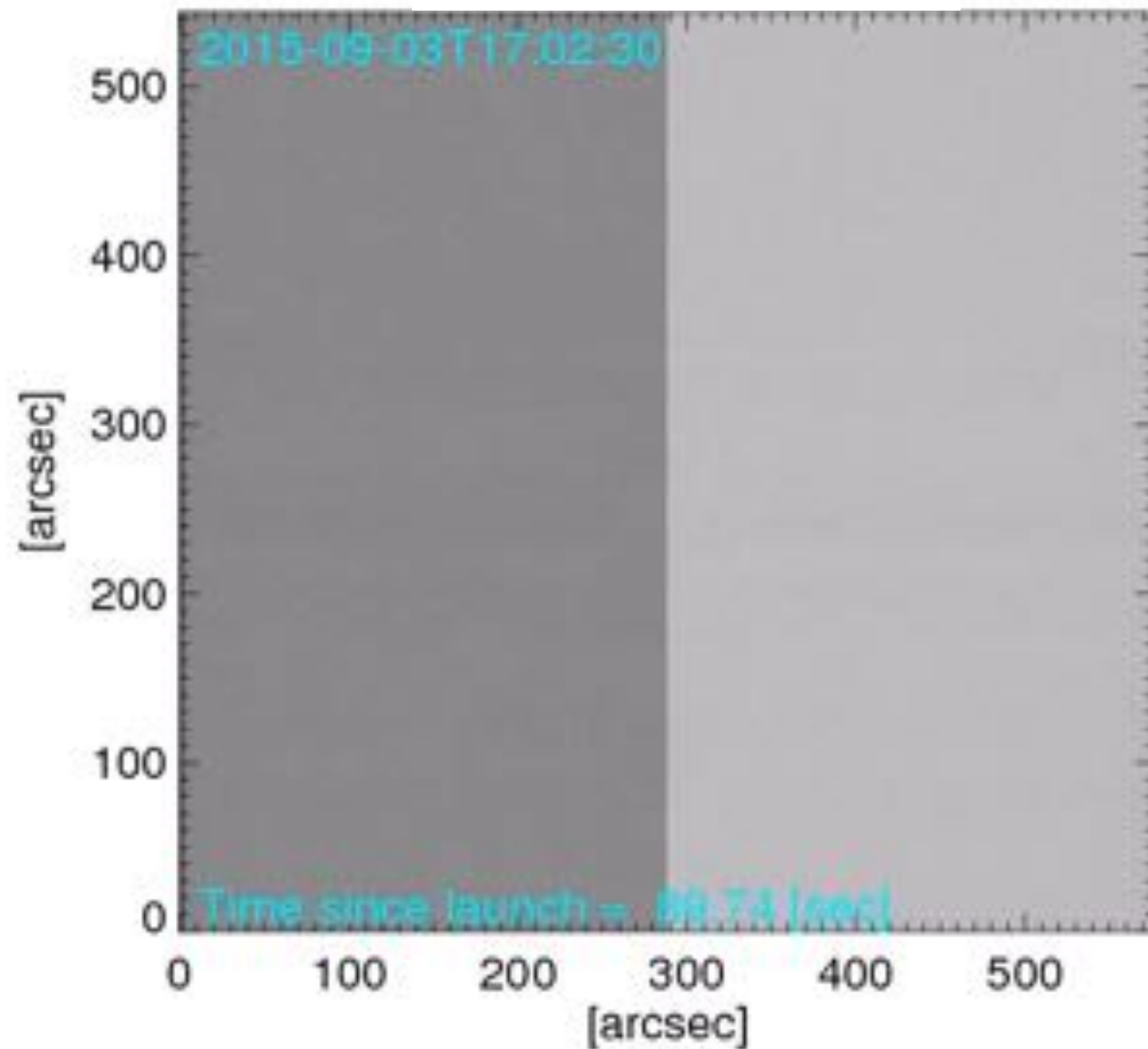
- 最大高度～278km
- 観測時間約300秒
- 無事砂漠に帰還。

完成したCLASP



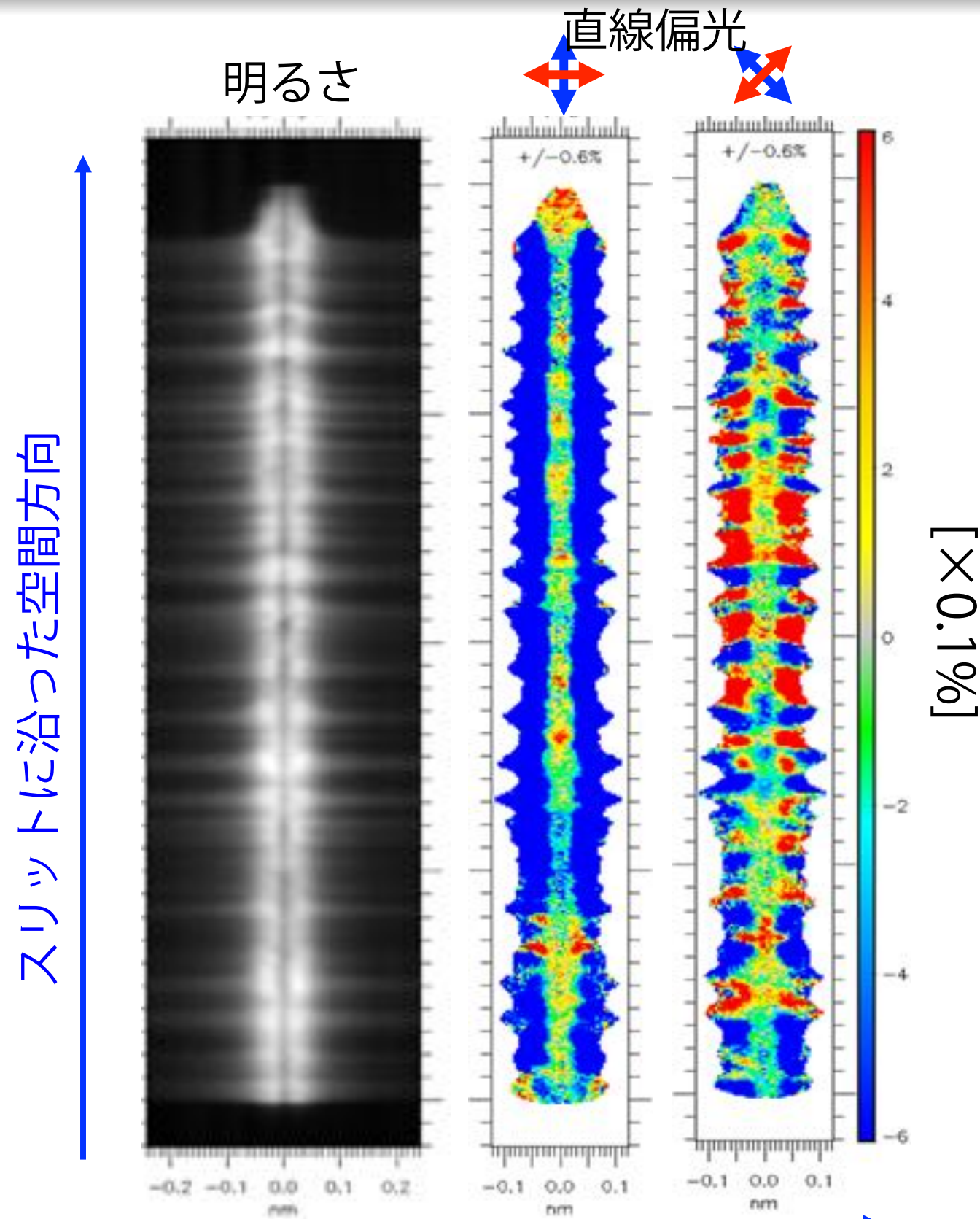
たった5分間の観測

モニター光学系

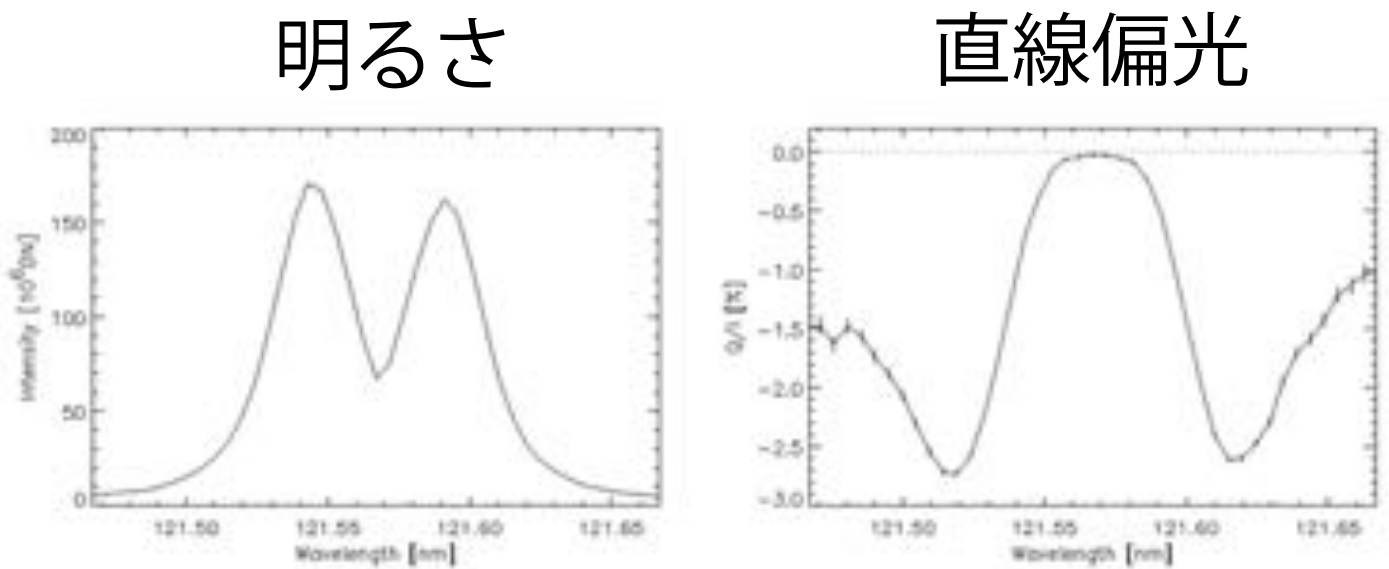


太陽中心付近の観測：～10秒
太陽縁付近の観測：～4分半

Ly α 線 (122nm) の偏光を初めて検出



- 紫外線観測で0.1%という高い偏光測定精度を達成。
- 水素ライマン α 輝線 (波長121.6 nm) での偏光分光観測に成功。
- 磁場起因の偏光(ハンレ効果)も検出。



平均的なプロファイル

CLASPから更なる発展



CLASP2 (CLASP再飛行計画)

- 電離マグネシウム線 (280 nm) の高精度偏光分光観測でハンレ効果とゼーマン効果を検出し、彩層上部の磁場を観測する
- 回収したCLASPを天文台に持ち帰り、CLASP2に向けてアップグレード中



2018/03/19

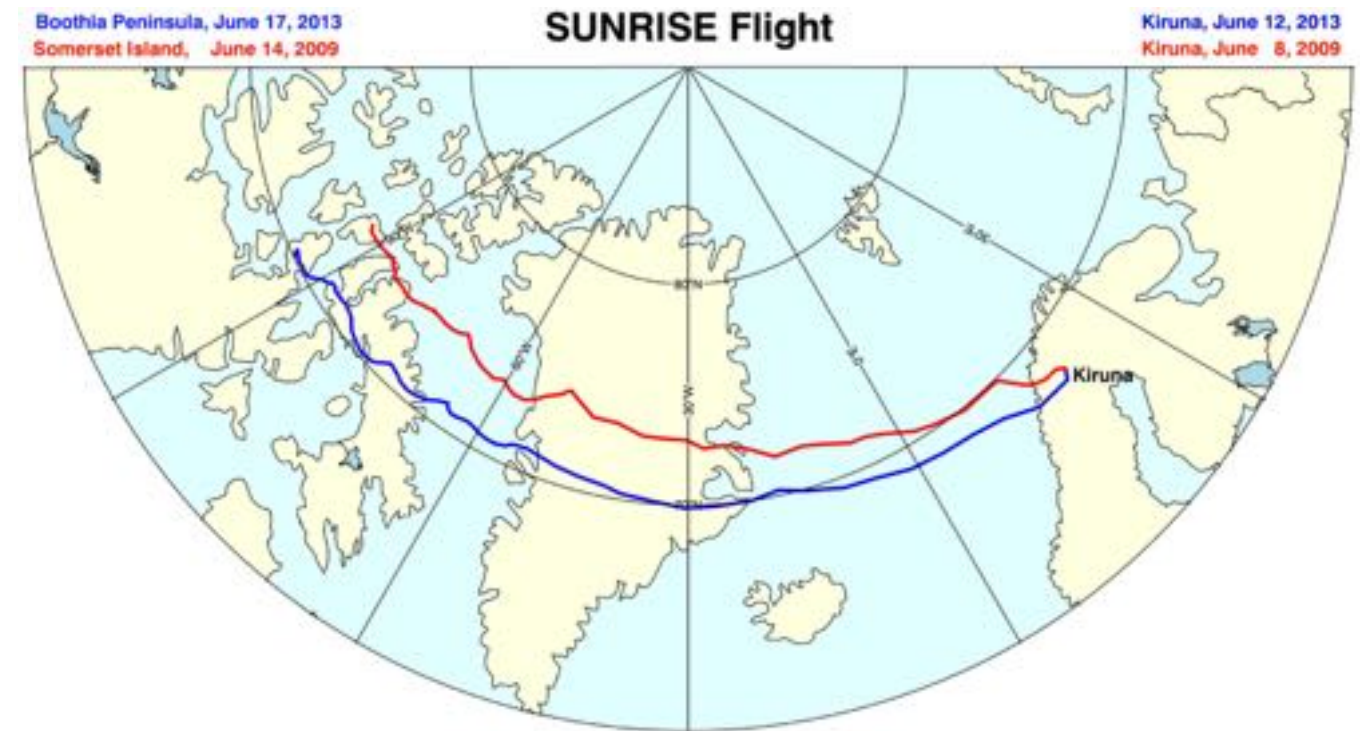


太陽最前線ツアー



38

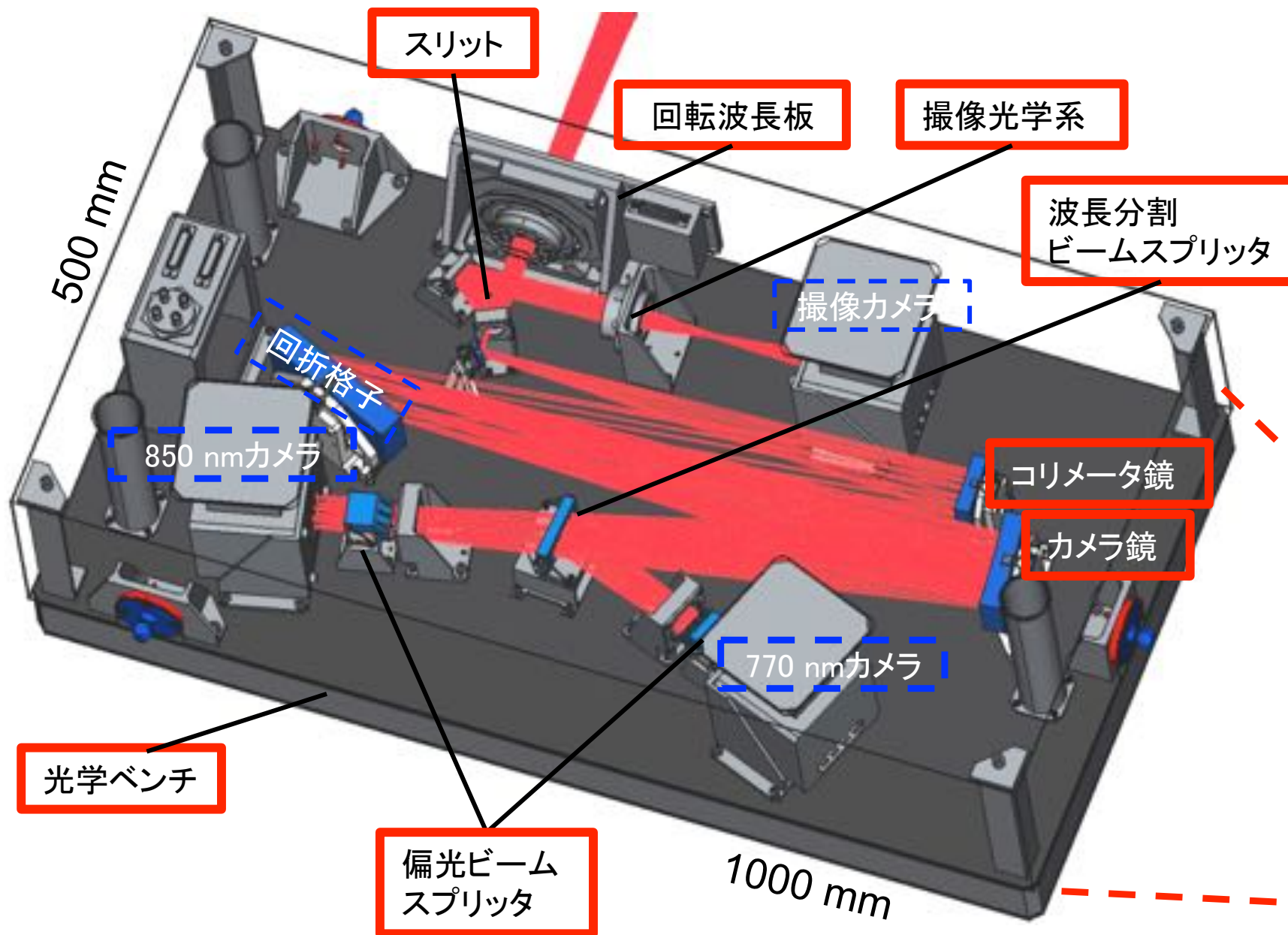
国際大型気球実験SUNRISE-3



- 口径1m（ひのでの2倍）の望遠鏡、高度35kmを1週間飛翔
- 2009年と2012年に観測。2021年の3回目の飛翔を目指す。
- 彩層磁場の高解像度・高感度観測をする装置（近赤外線偏光分光装置：**SCIPスキップ**）を日本で開発

SCIP (スキップ)

Sunrise Chromospheric Infrared spectroPolarimeter

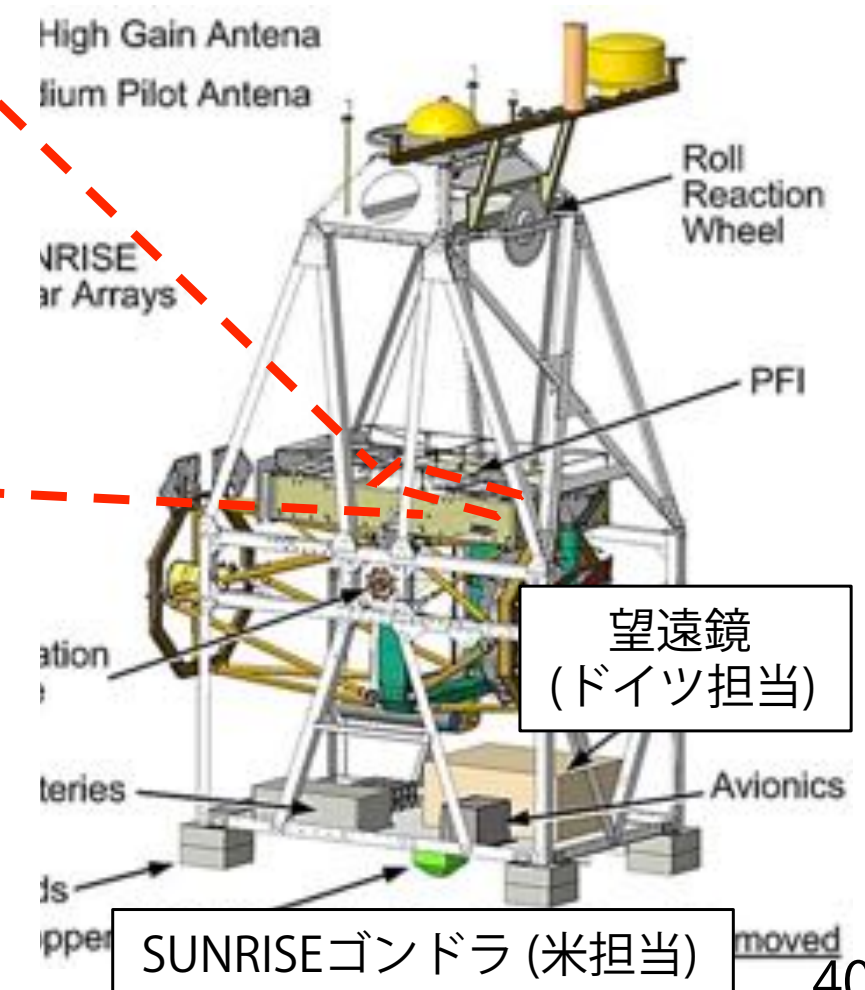


■ 高空間・時間分解能

- 「ひので」と同じ解像度: 0.2秒角
- 0.2秒角を音波が通過する時間: 15秒

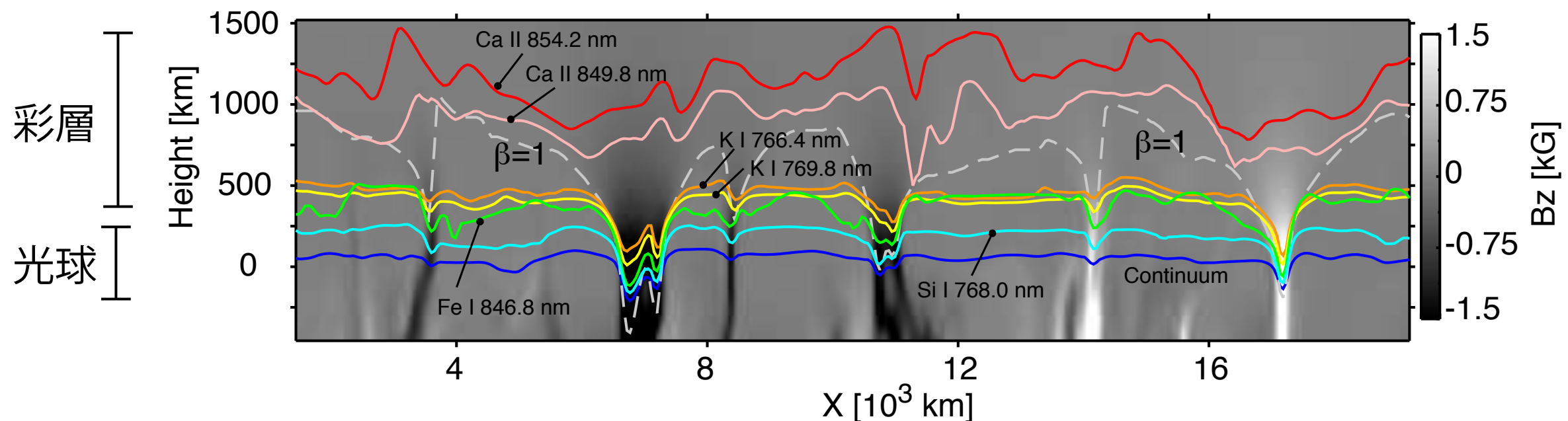
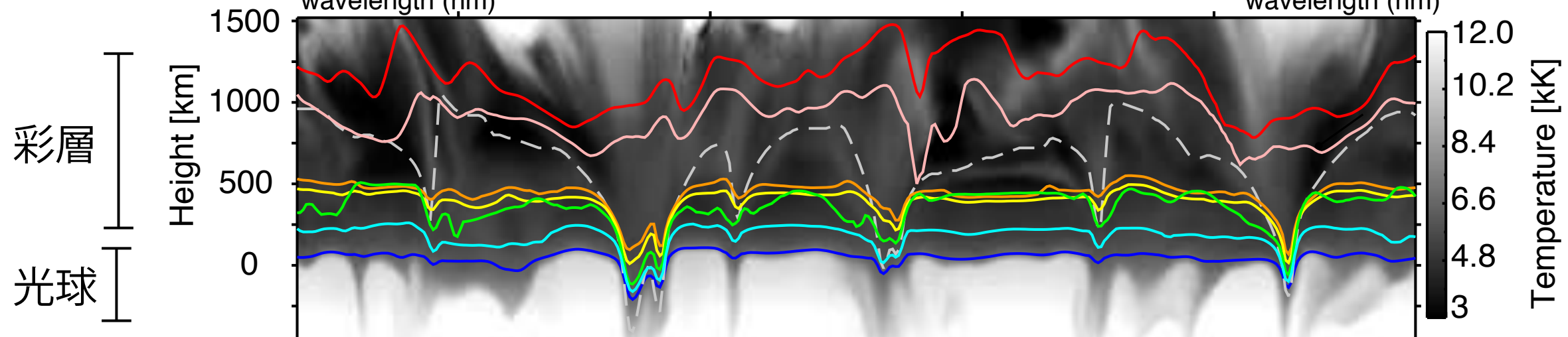
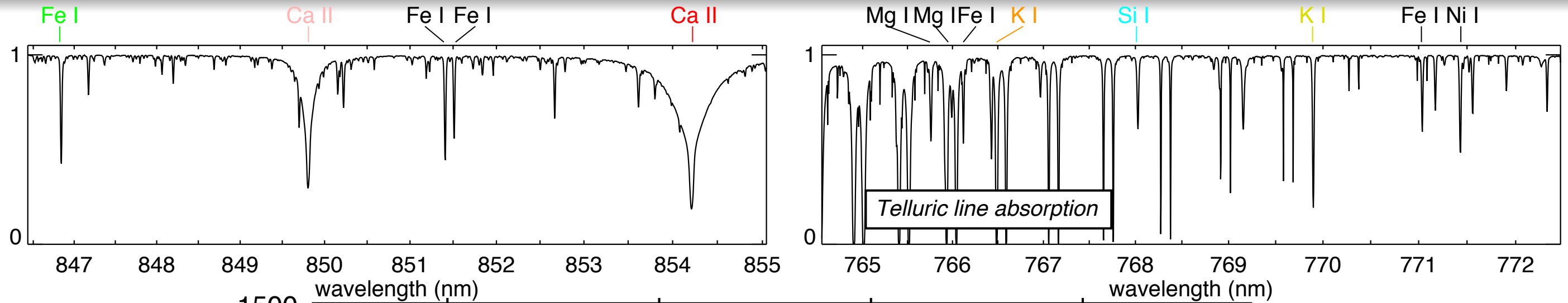
■ 高精度偏光観測

- Ca II 線で ~5 Gの磁場を測定: 0.03%の偏光度測定



ゼーマン効果に高感度なスペクトル線がある近赤外線2波長帯を同時に偏光分光

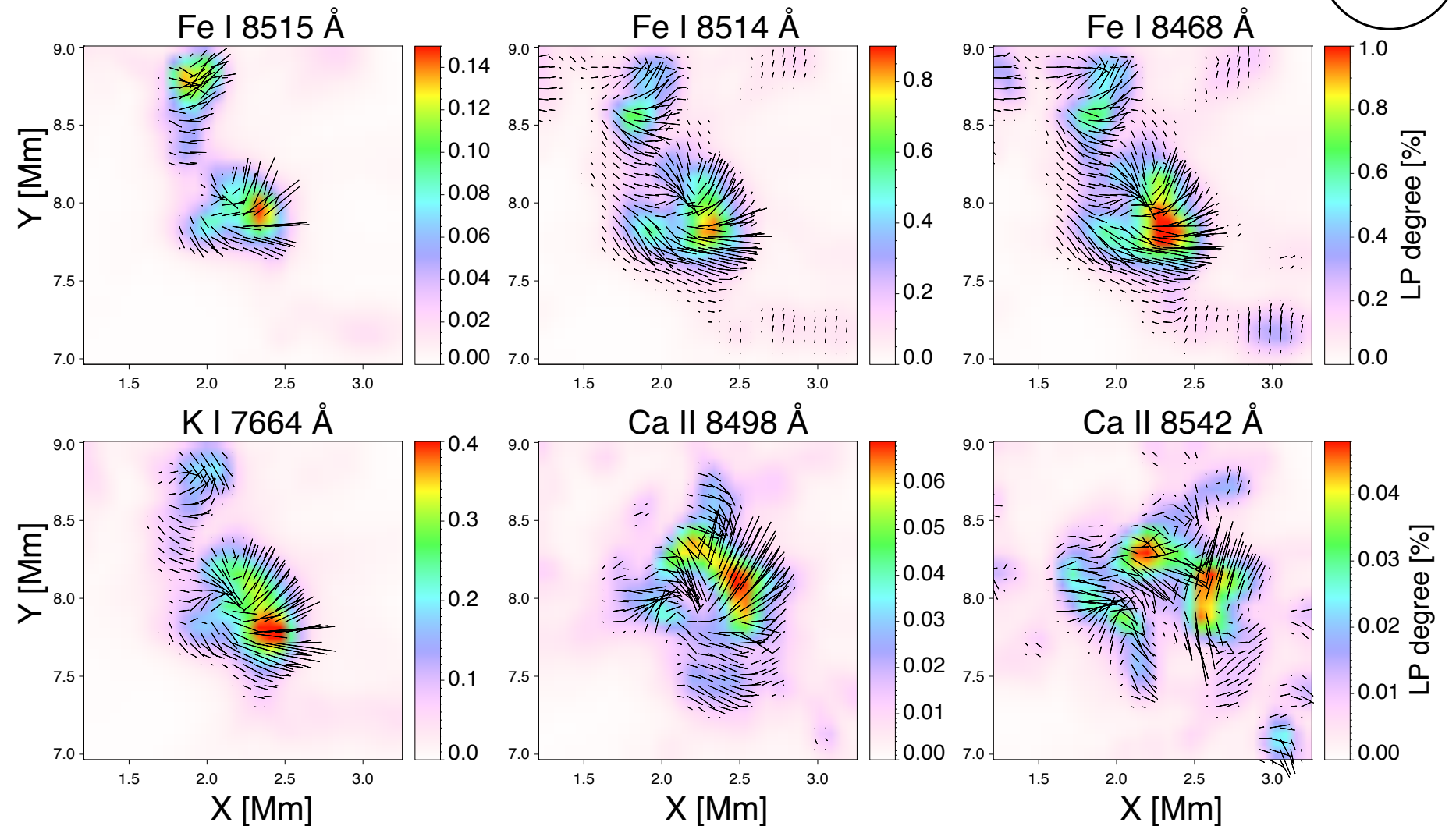
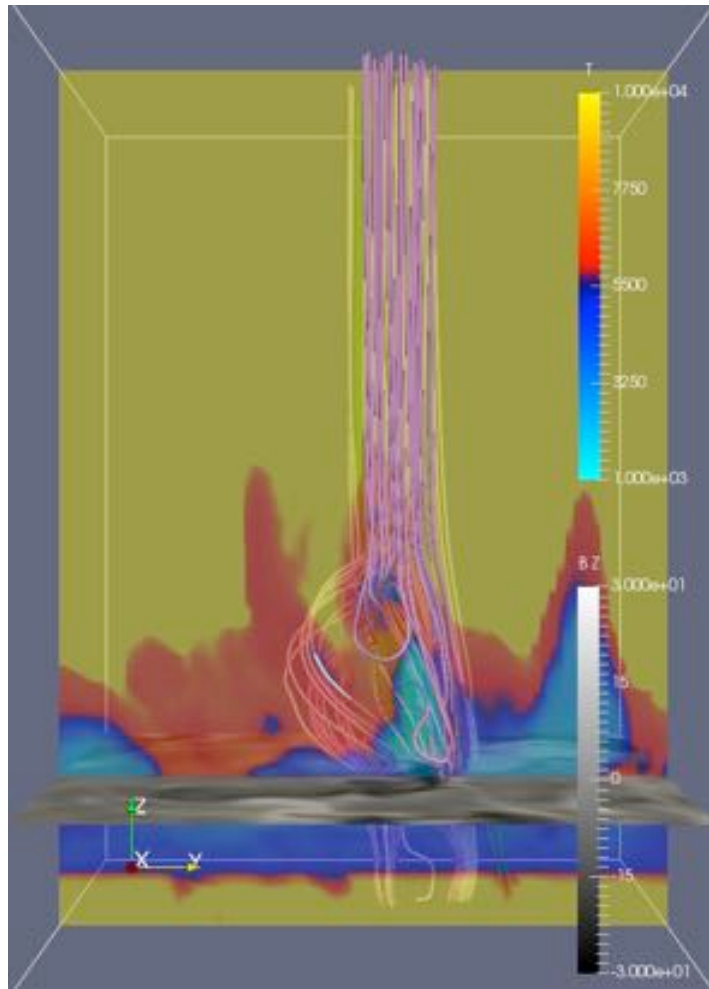
マルチライン観測による3D磁場測定



ジェットを駆動する磁場構造が見えるか

SCIPで観測するスペクトル線における直線偏光

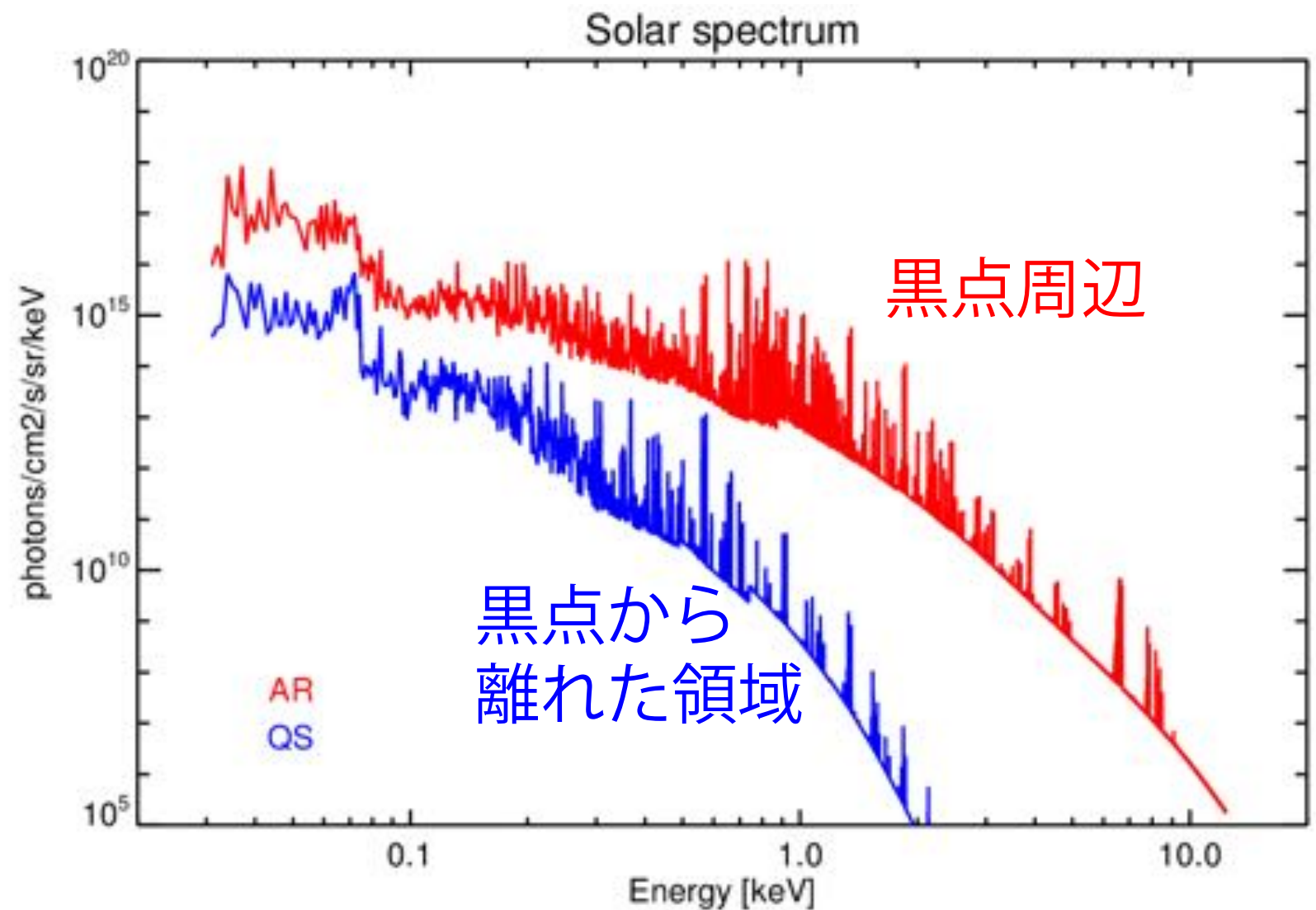
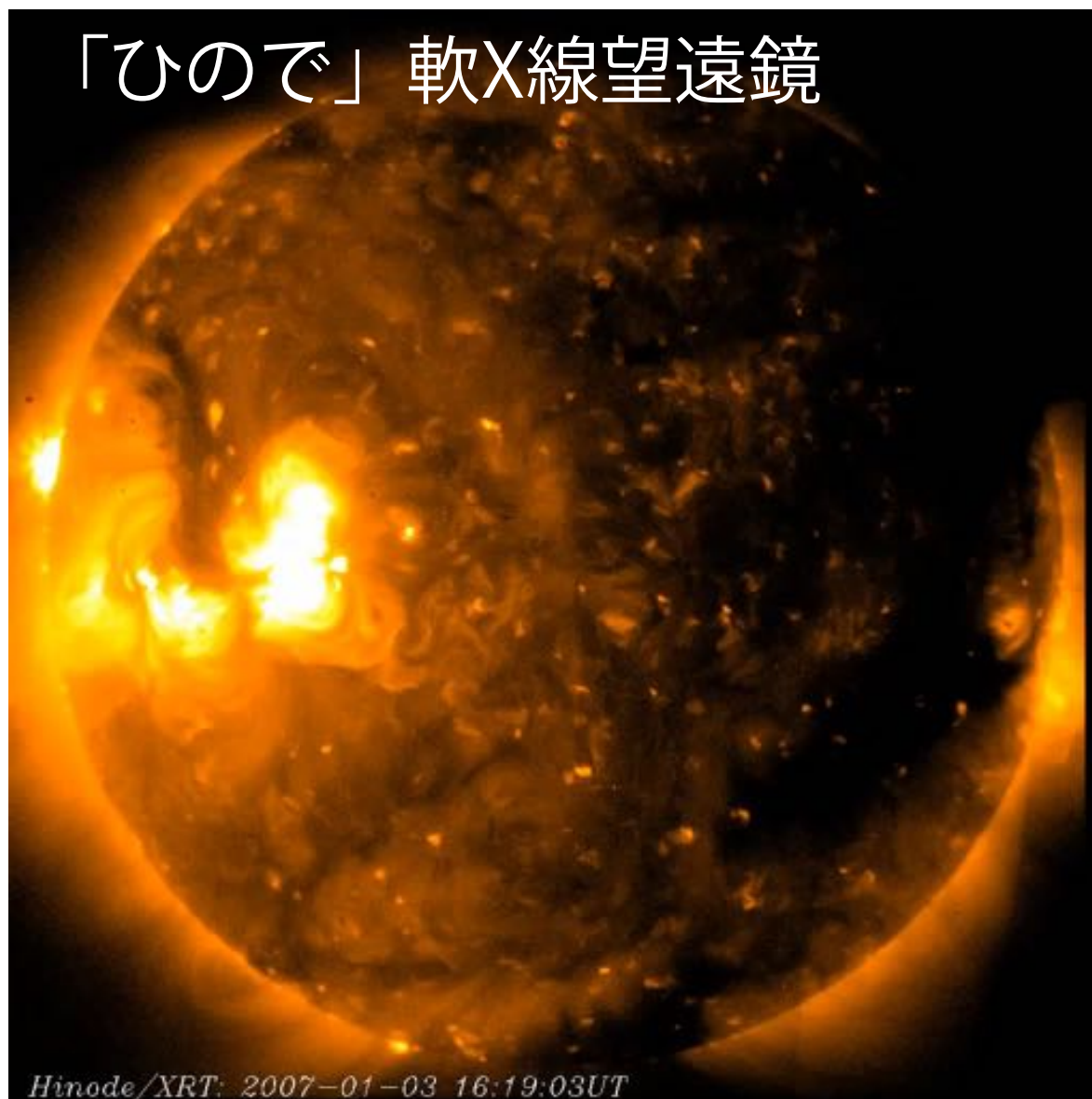
1秒角



- 彩層ジェットを駆動する磁場・速度構造からの偏光分光信号を十分検出できる
 - 3次元輻射MHD数値シミュレーション

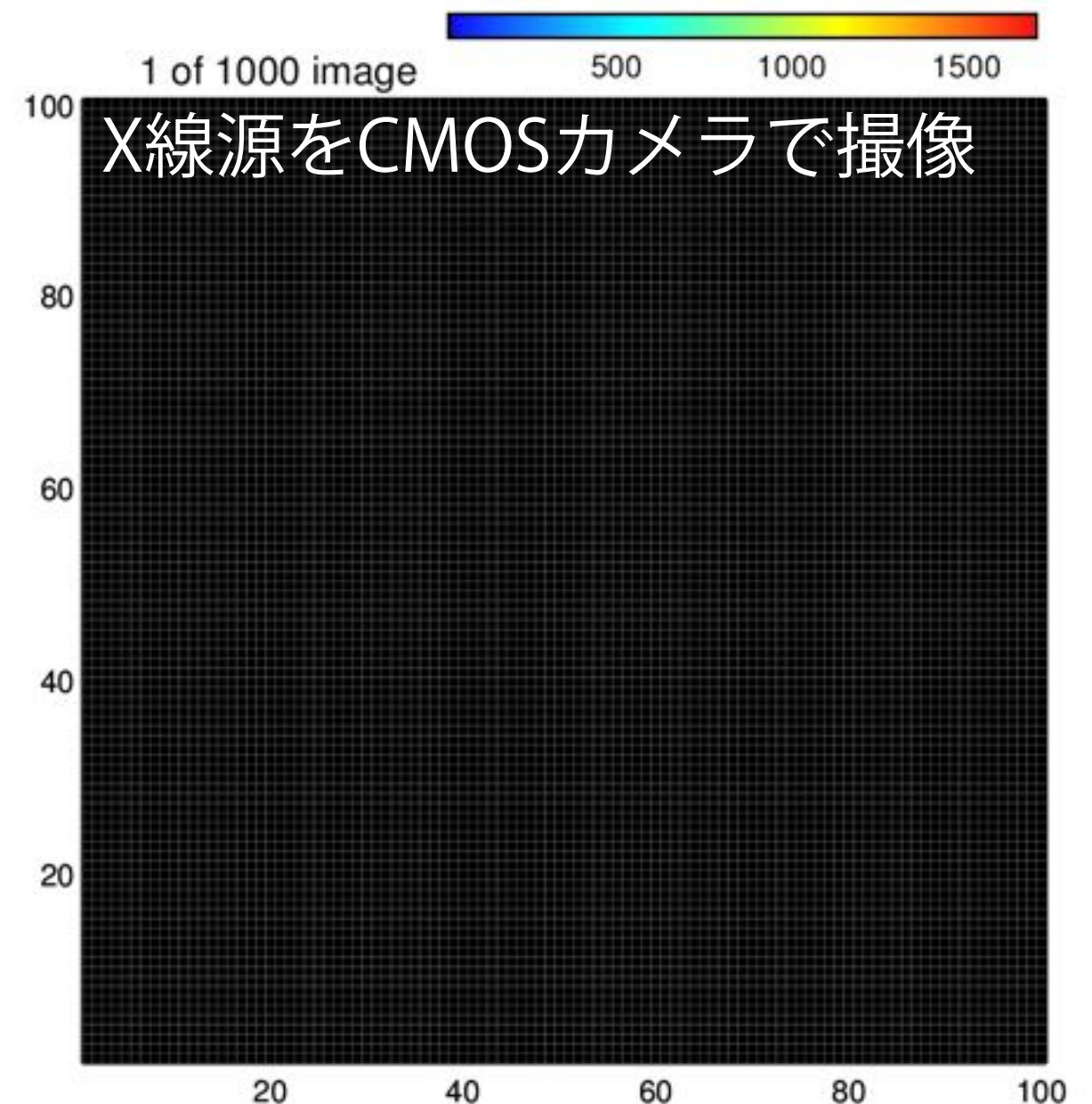
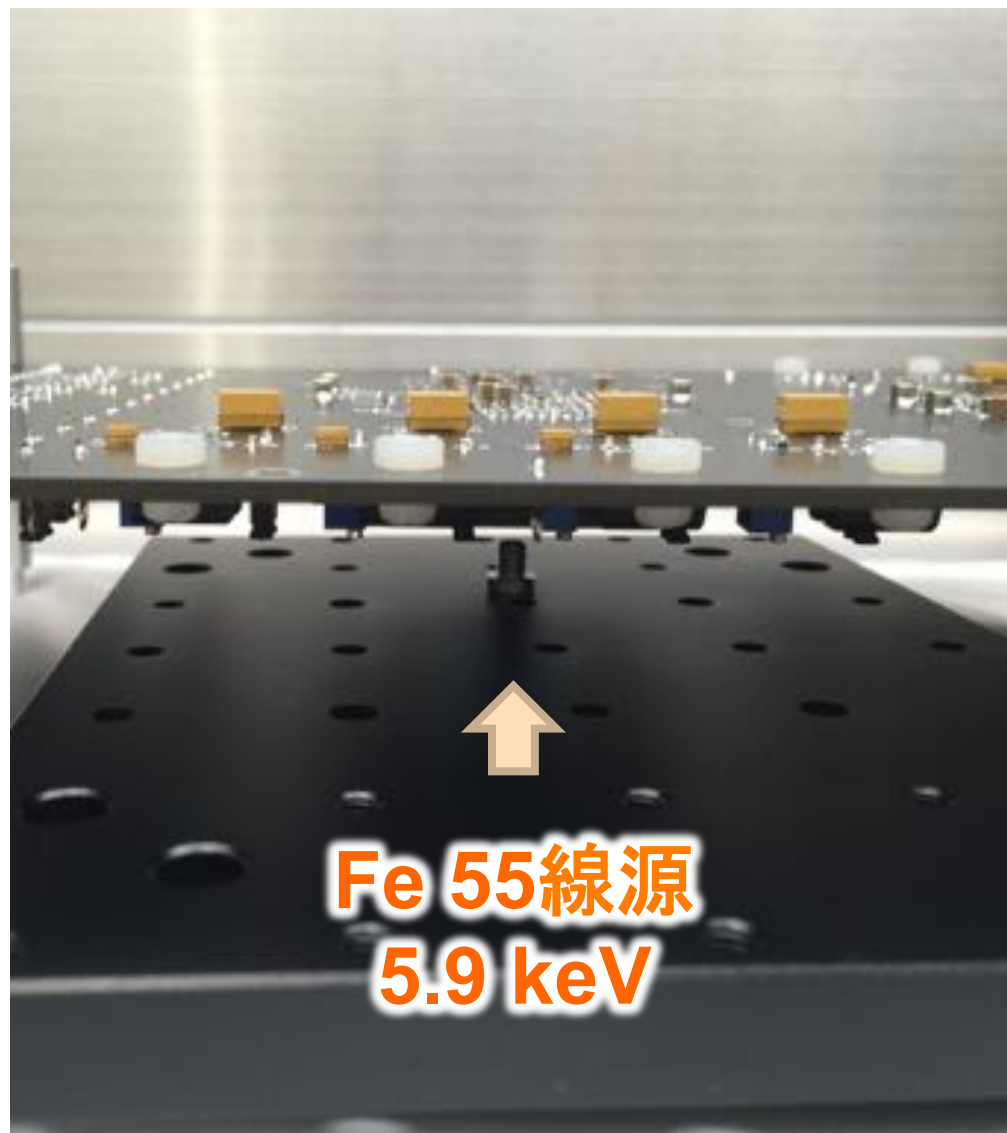
光子計測型X線撮像装置

- コロナから放出されるX線光子のエネルギーを測定する
⇒太陽コロナの加熱・加速機構を定量的に調べる。



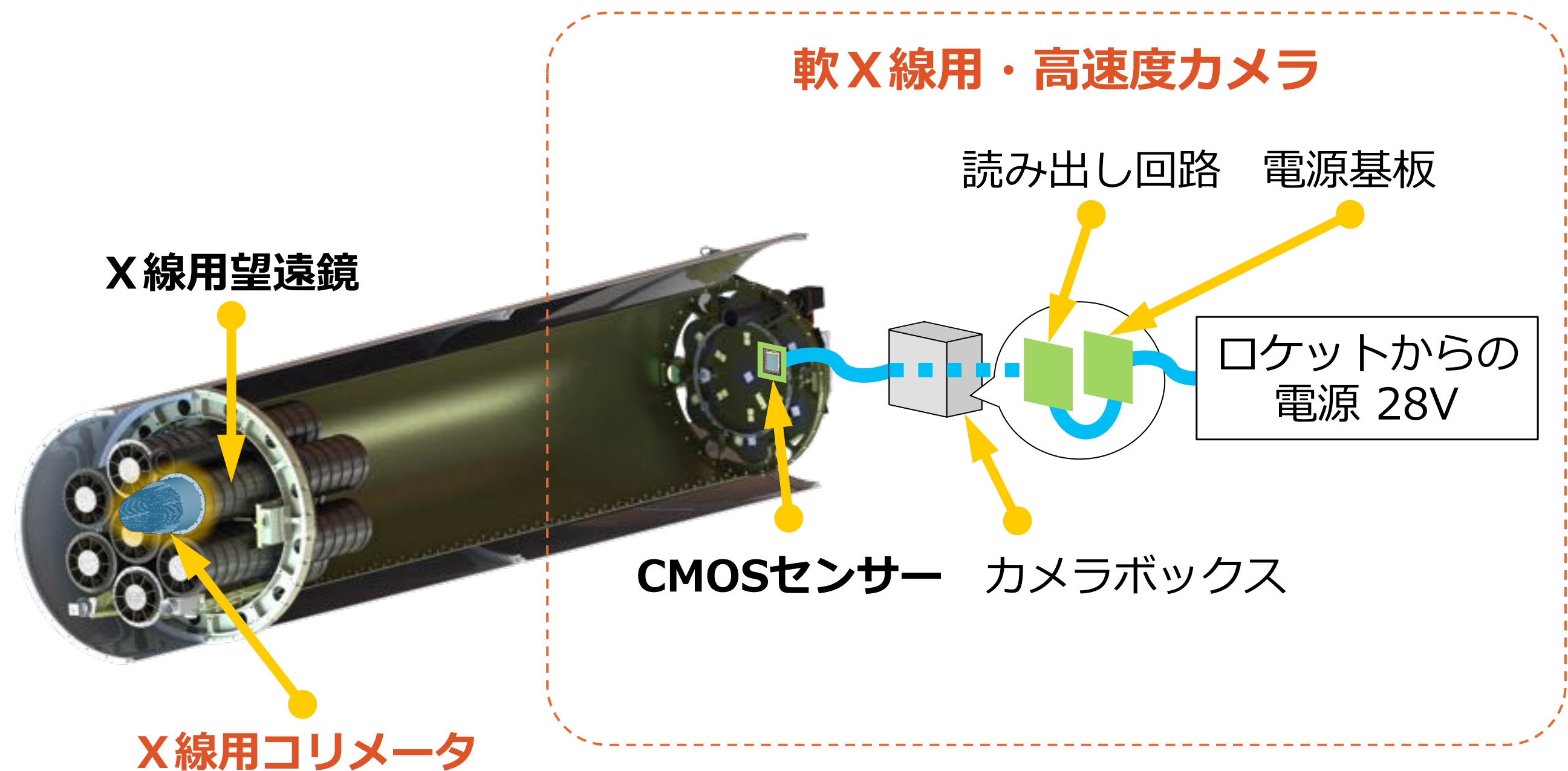
光子計測型X線撮像装置

- 光子の持つエネルギーに比例した信号を出す検出器で、光子のエネルギーを光子1個毎に計測すること
- 1秒間に連続~1,000回の露光が必要



FOXSI-3への参加

- FOXSI は、鏡を使って集光するX線撮像分光するロケット実験
- 2018年夏の3度目のフライトに参加
- 7本の望遠鏡のうちの1本に光子計測用のカメラを日本から供給



小さな飛行体の将来展望

FOXSIロケット実験



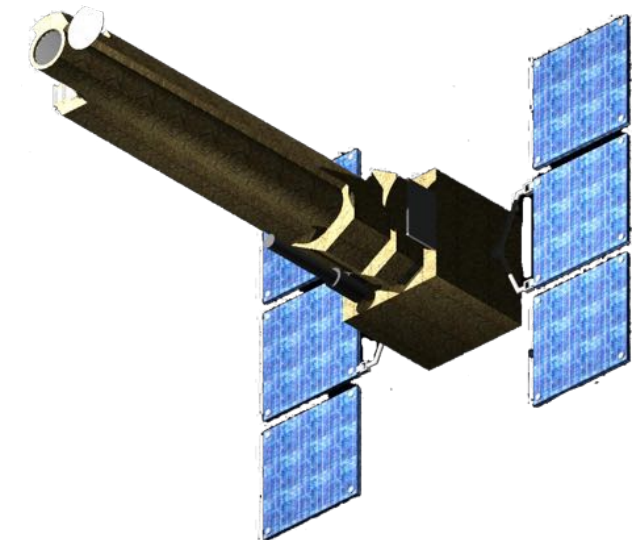
CLASP1, CLASP2ロケット実験



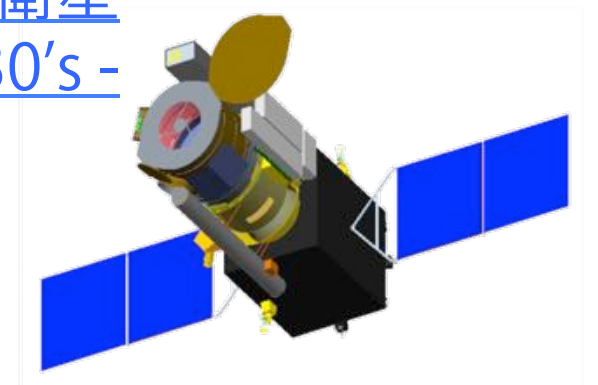
SUNRISE3気球実験



公募型小型衛星
Solar-C EUVST (提案中)



次世代大型衛星
2030's -



大型地上望遠鏡の観測装置

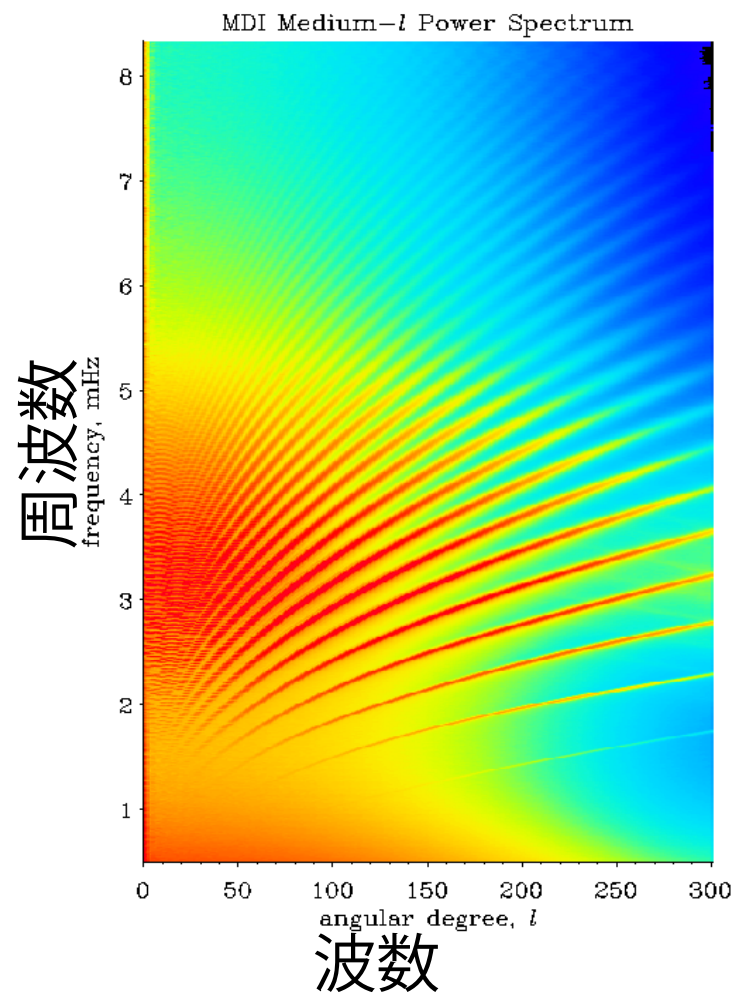
超大型太陽望遠鏡: DKIST Daniel K. Inouye Solar Telescope

- ハワイに建設中の口径4m「究極」の太陽望遠鏡
(現在の最大は1.6m)
- 2019年にファーストライト
- 光球・彩層の高解像観測・高精度偏光観測
 - 分解能 \propto 口径 $^{-1}$
 - 光子数 \propto 口径 2
- コロナグラフ観測
- 絶対、観測したい！！

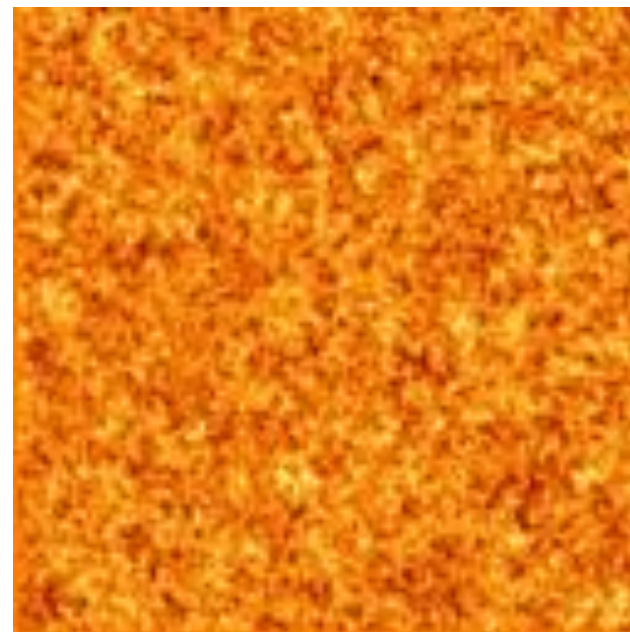
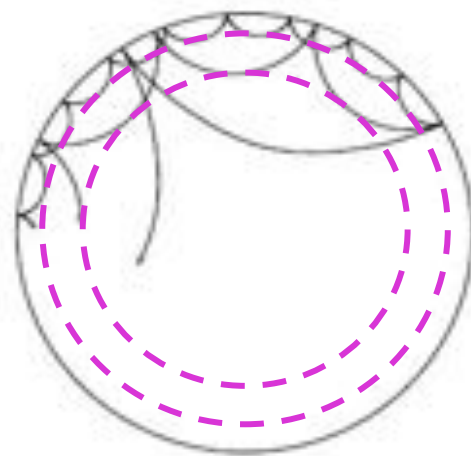


日震学: 太陽の内部を探る

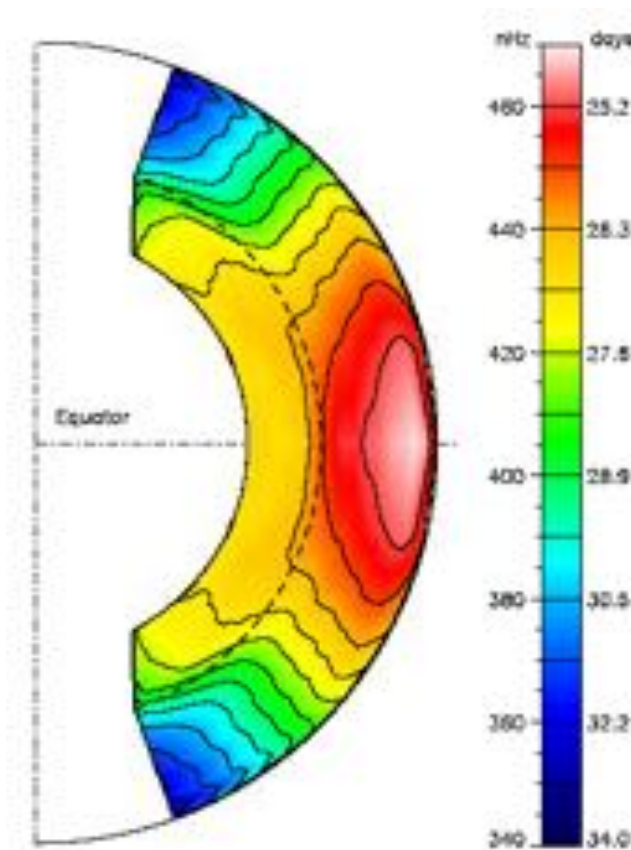
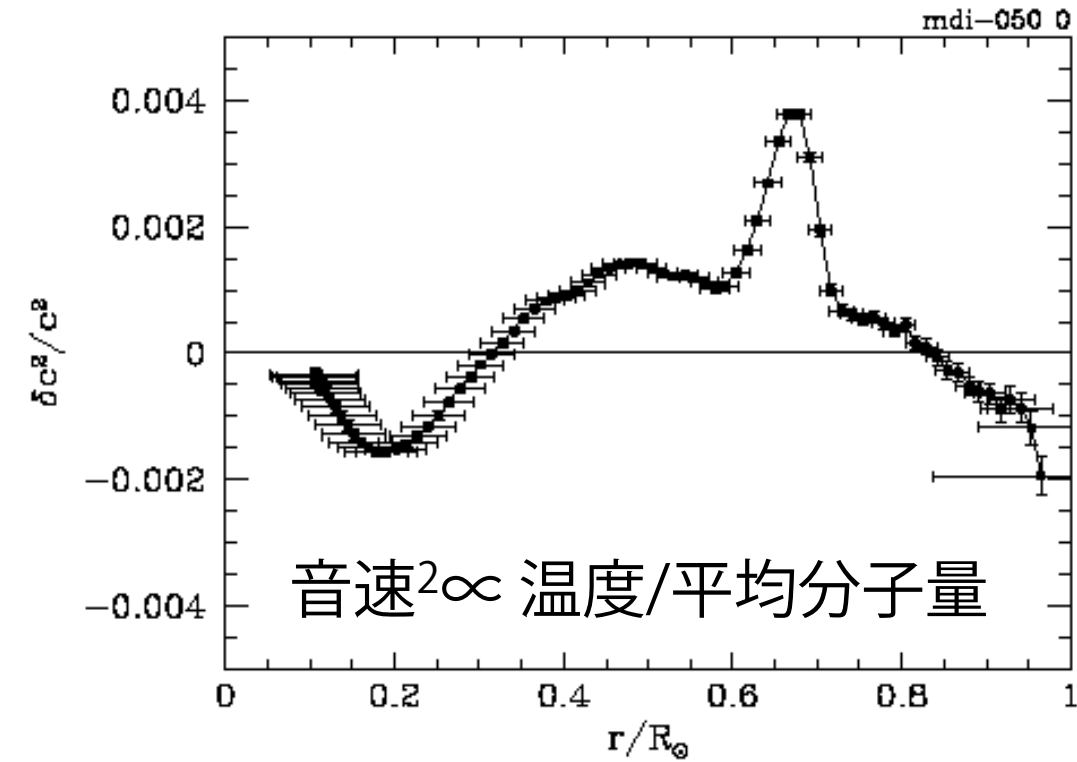
- 太陽の「地震」を観測して、内部構造を調べる
 - 固有振動数 \leftrightarrow 内部構造



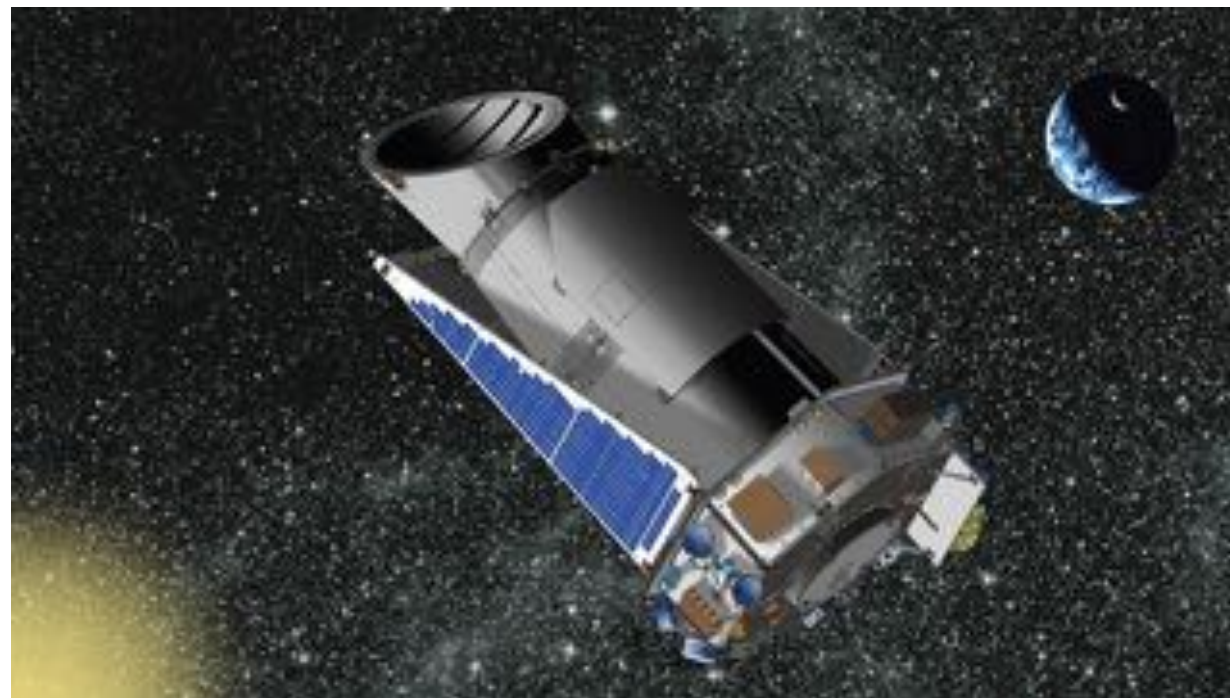
©NASA/ESA



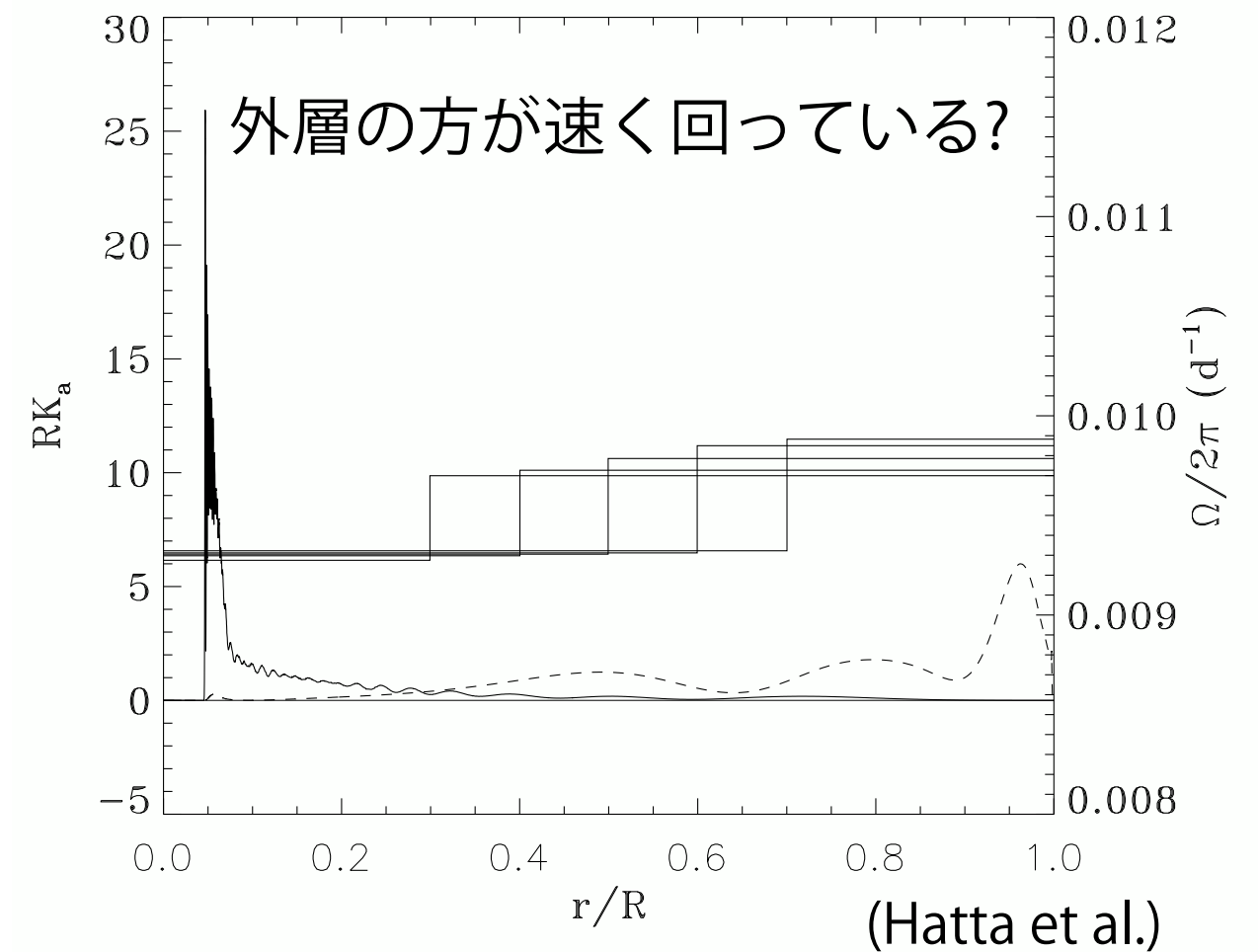
音速分布 (観測-モデル)



太陽内部の
回転角速度



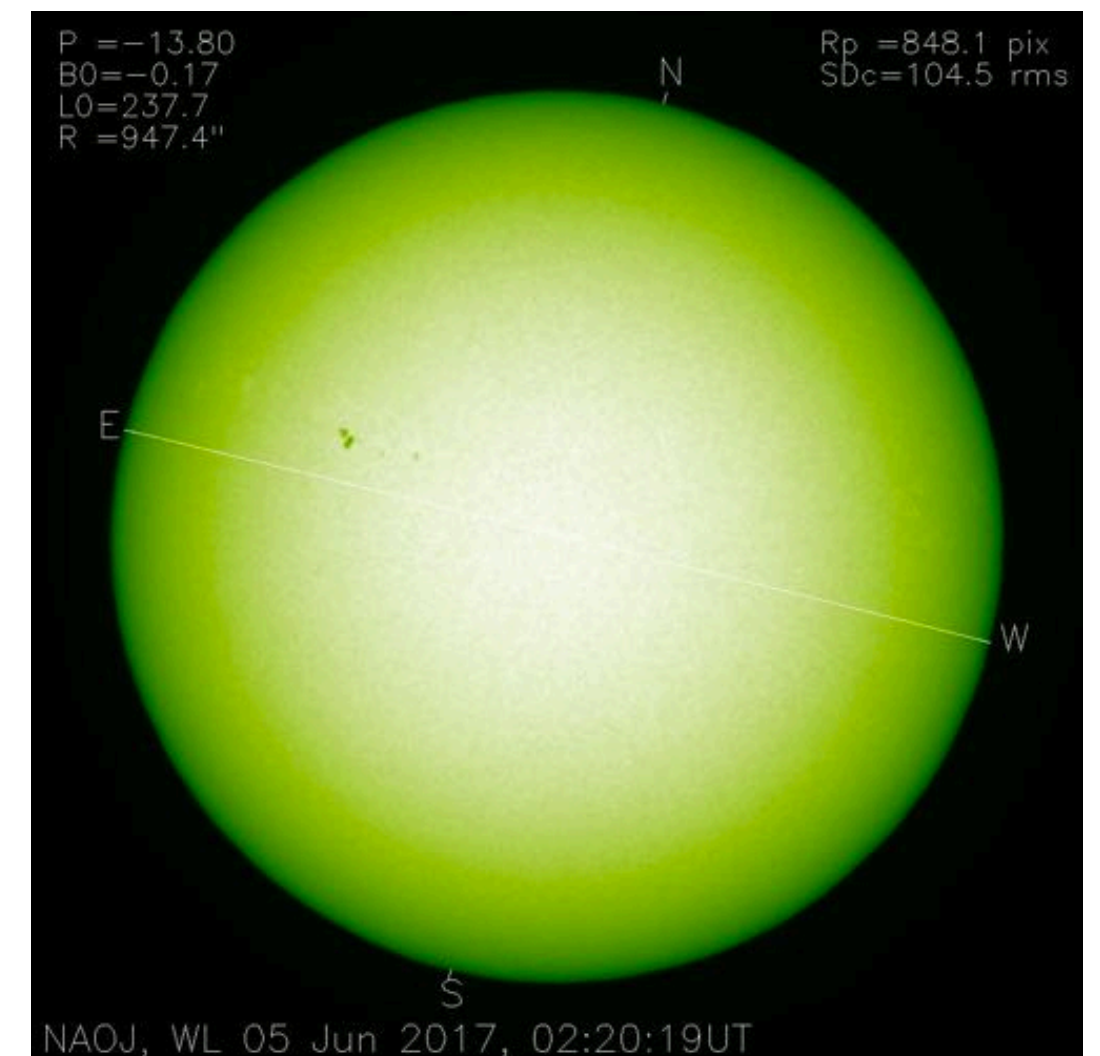
KIC11145123の内部回転速度



- ケプラー衛星
- 精度の高い測光データが得られた
- 恒星の内部構造を調べる研究が盛んになってきている

太陽に興味をもったきっかけ

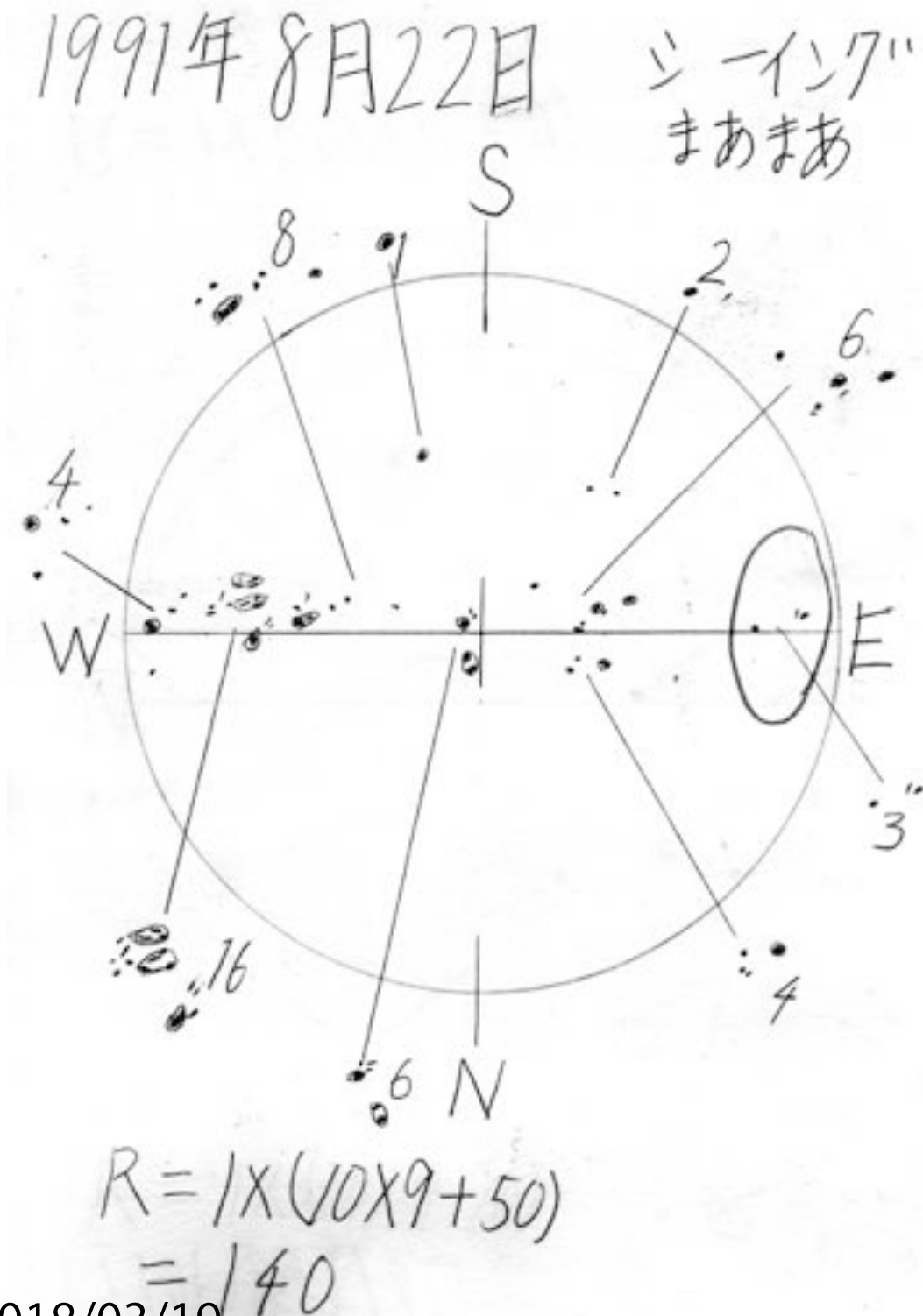
- 中学生のとき、夏休みの自由研究で黒点のスケッチをしたことがきっかけ
 - 日々、形や数が変化して面白い
 - 太陽が自転していることが分かる
 - 中学3年のとき(1991年)、太陽が活発だった



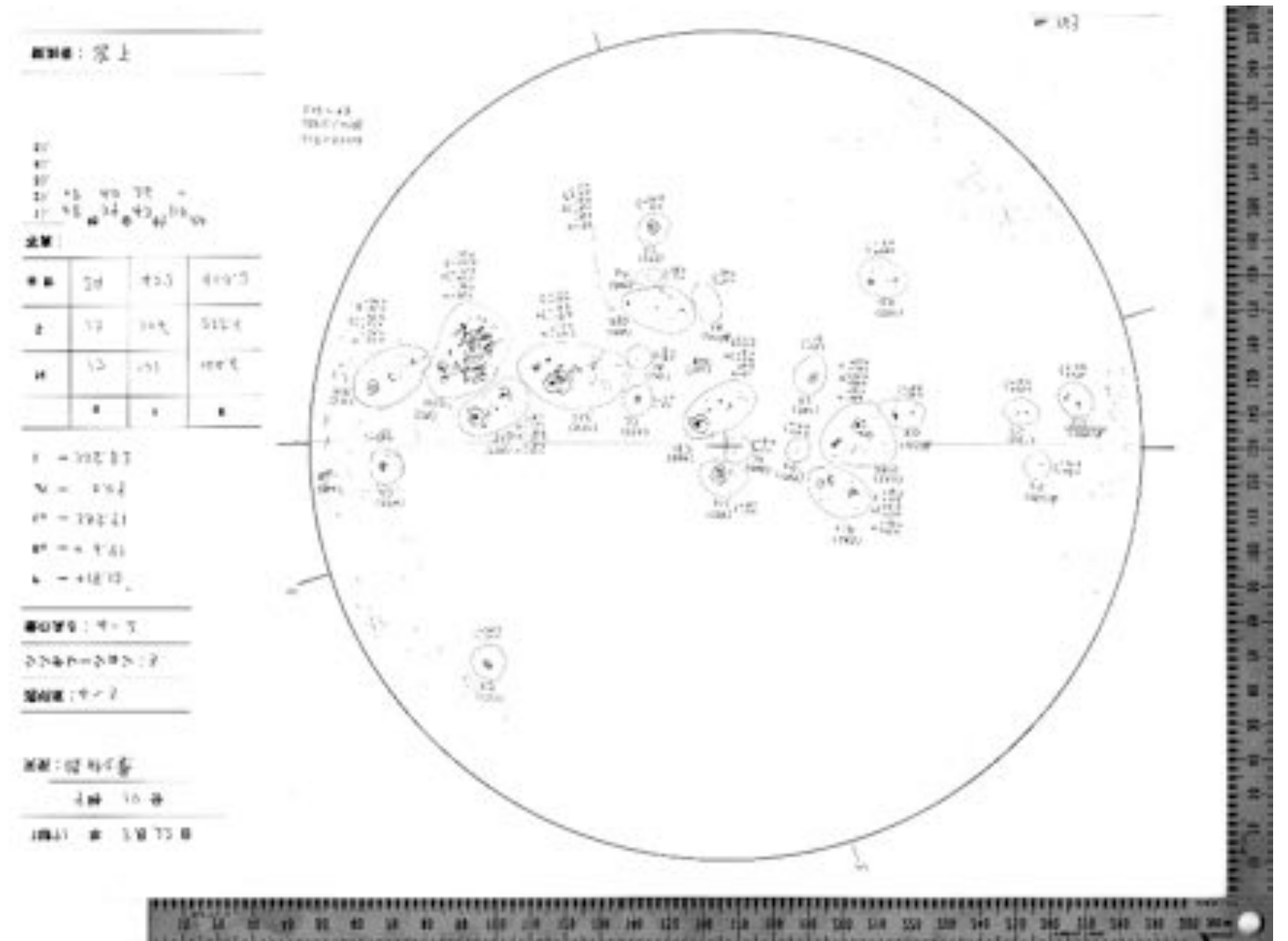
6月5日の太陽(©NAOJ)

夏休みの自由研究 (1991年/中3)

自分の黒点スケッチ



国立天文台・太陽観測所で記録された黒点スケッチ

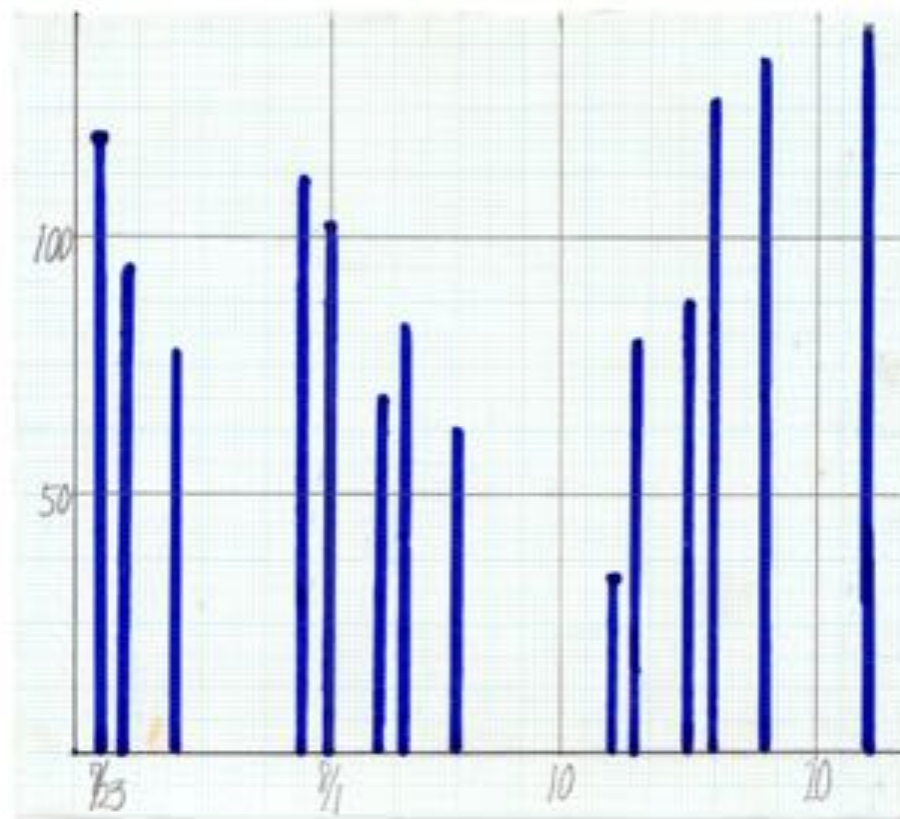


夏休みの自由研究 (1991年/中3)

自分で記録した黒点数

国立天文台太陽観測所

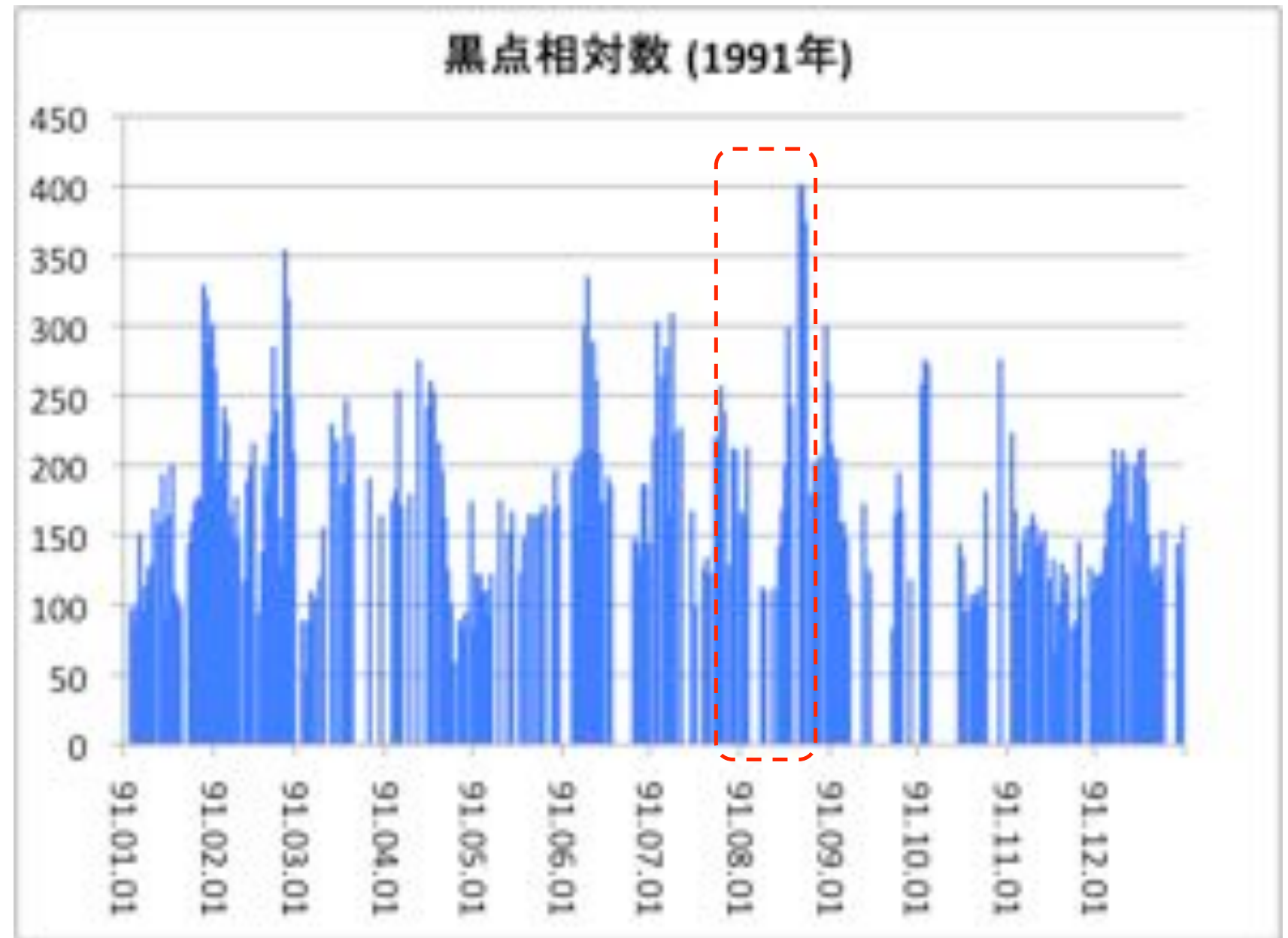
黒点相対数の変化



結果

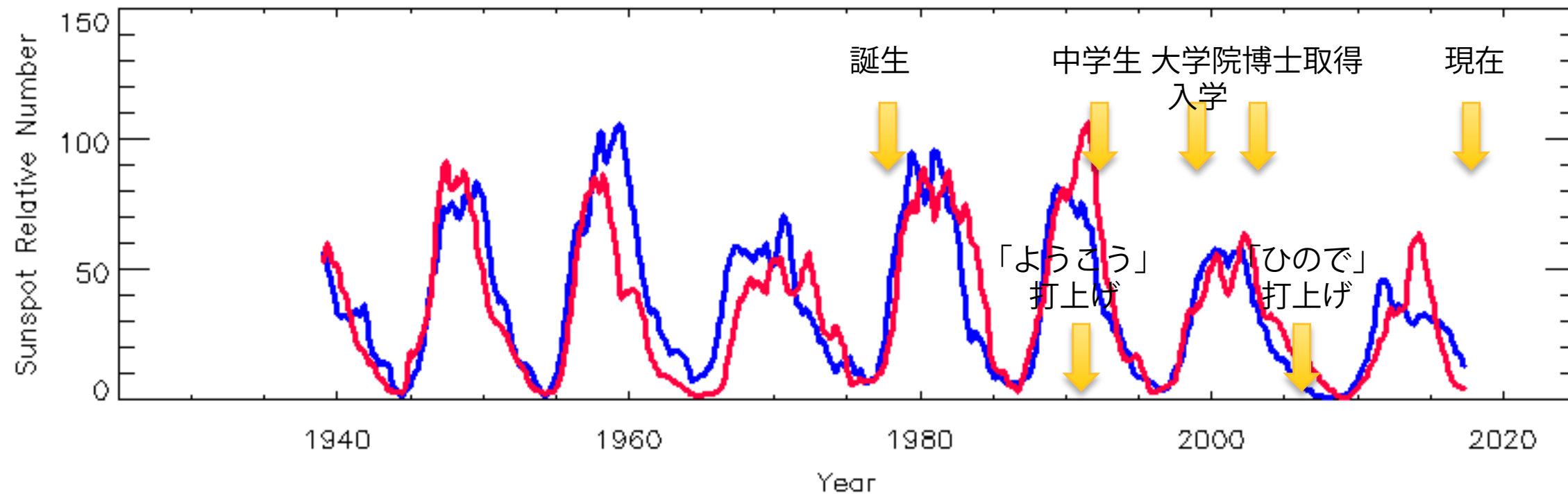
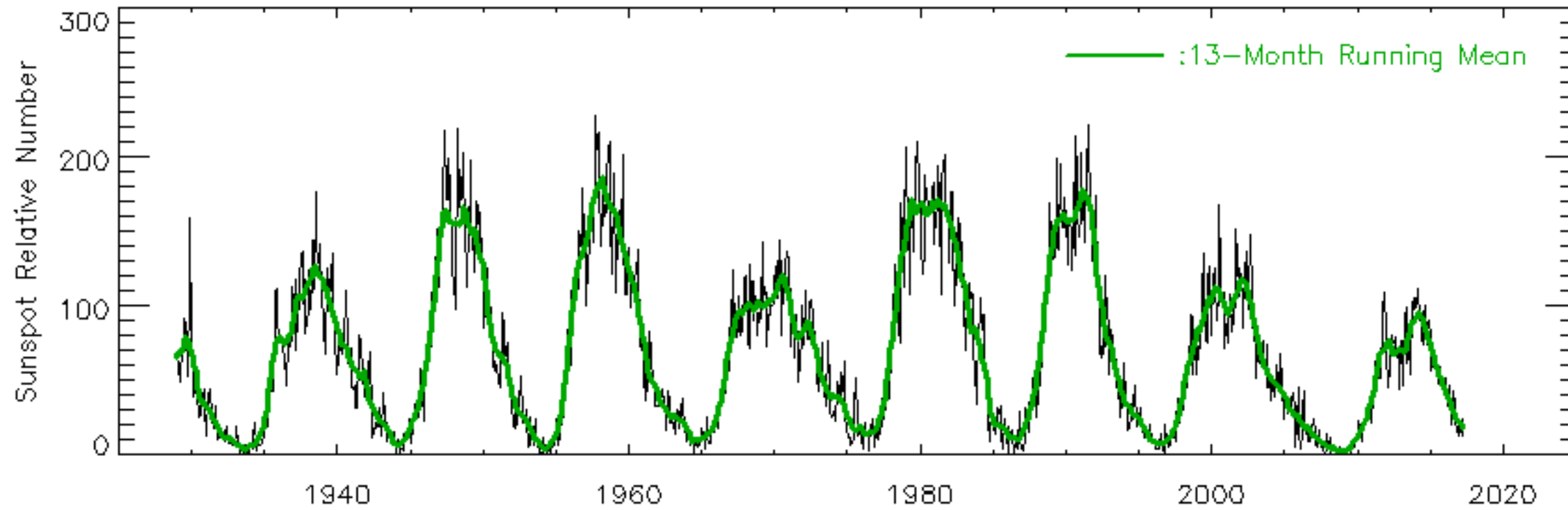
グラフを見るとわかるように、黒点相対数は10日
 ぐらいの間隔で波のように変化していることがわか
 る。また、7月下旬に比べて8月中旬から下旬の方が高く
 なっている。

黒点相対数 (1991年)

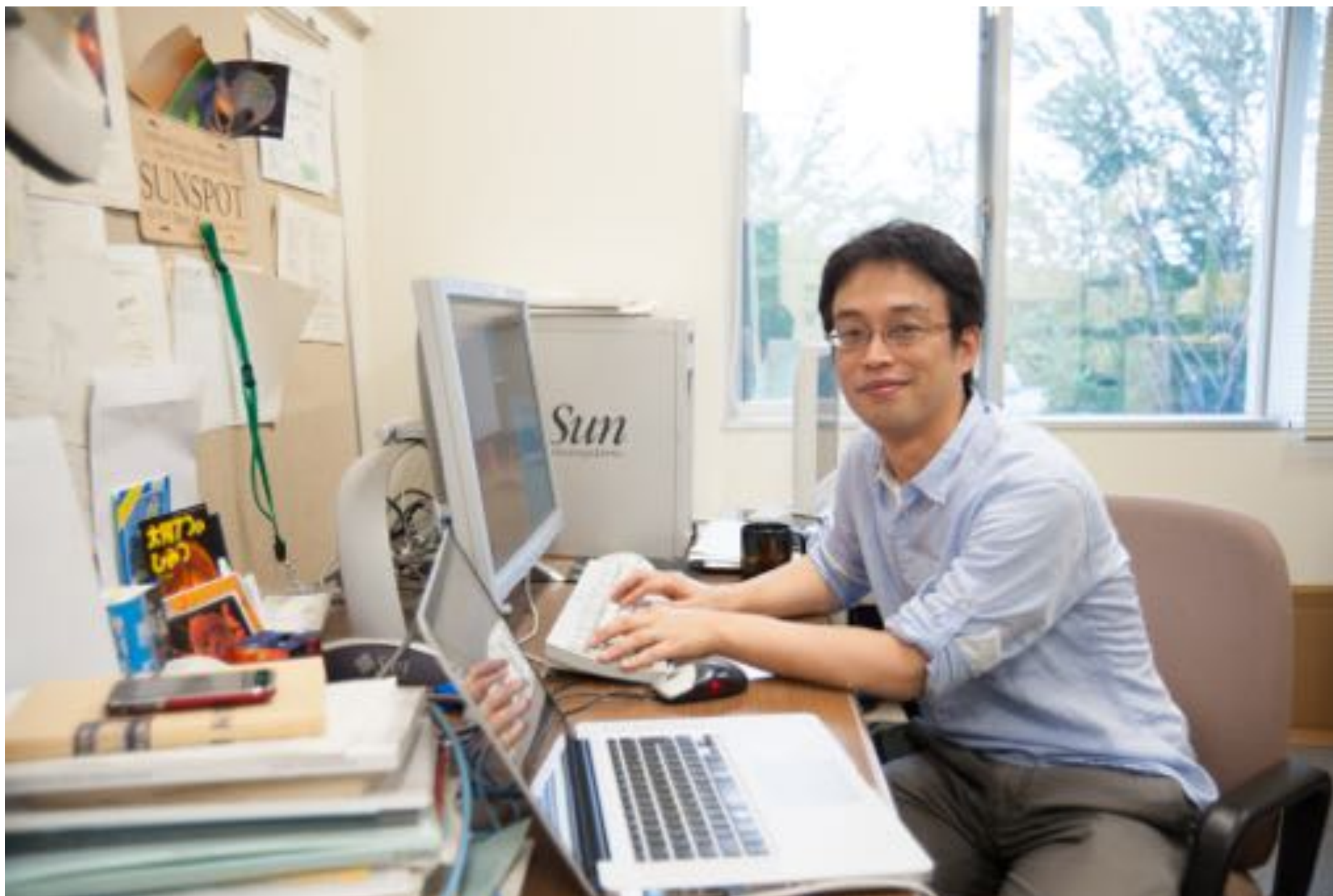


黒点の数の変遷

Sunspot Relative Number: NAOJ/Mitaka



どういう仕事?



国立天文台のオフィスにて

「ひので」可視光望遠鏡 (SOT)の開発

- 口径50cmの世界最大、
最高性能の太陽観測望遠鏡
- 可視光でハッブル宇宙望遠
鏡に継ぐ解像度

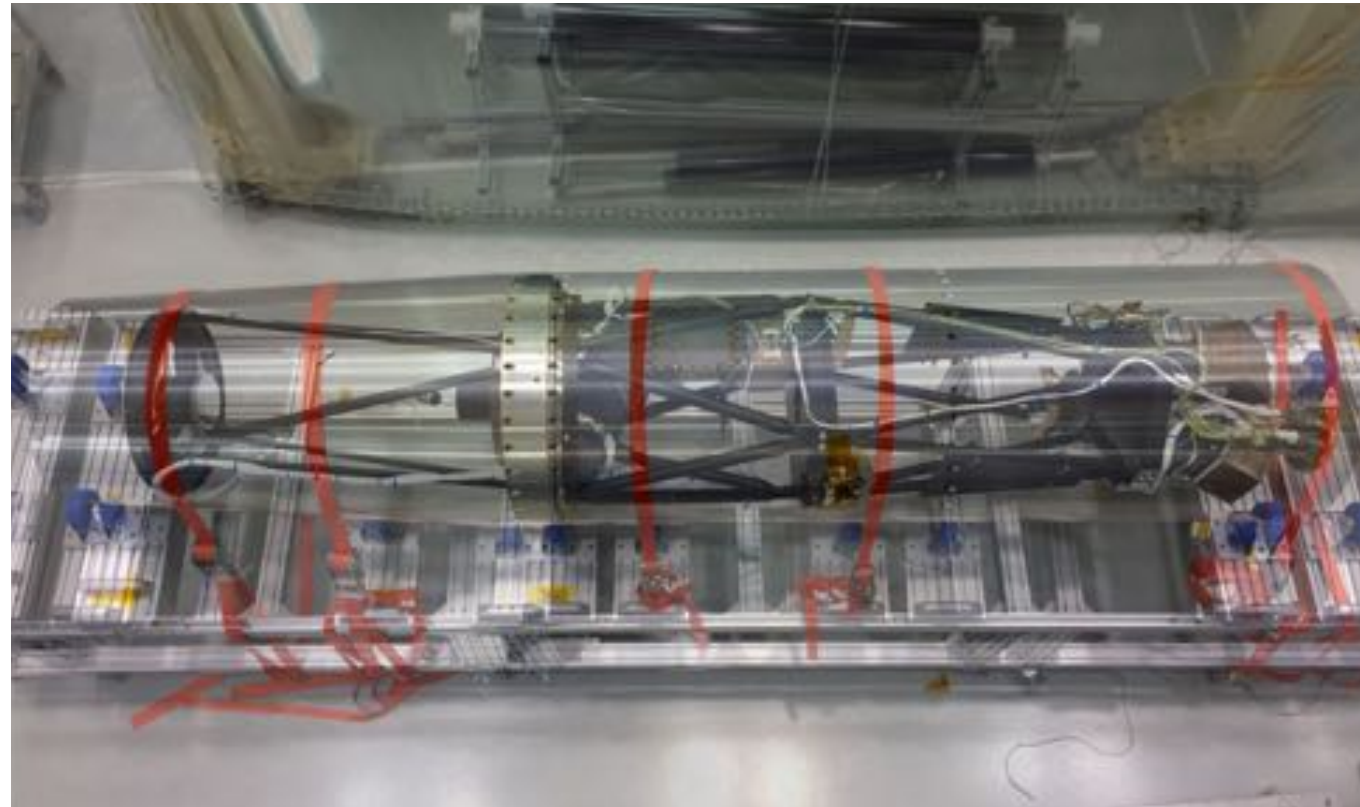


可視光望遠鏡(SOT)の完成を記念して
(国立天文台のクリーンルームにて)

「ひので」ファーストライト(2006年10月)



CLASP(クラスプ)の開発

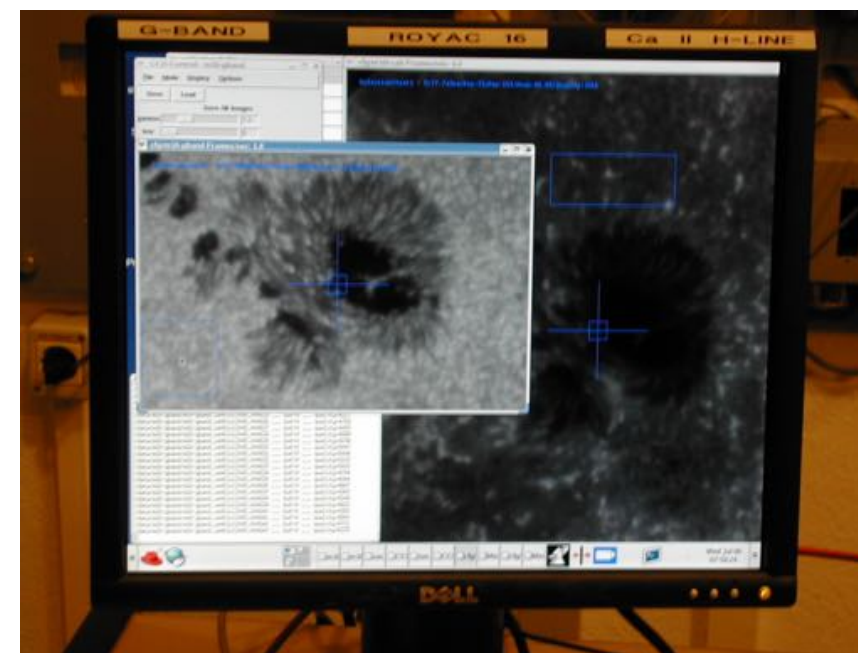


国立天文台のクリーンルームで
開発

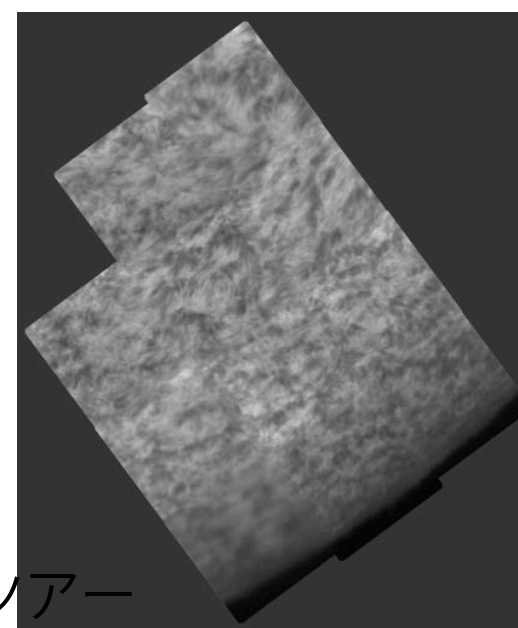


海外の望遠鏡で観測

スペイン・カナリア諸島
(2005年)



アメリカ・サクラメントピーク
(2015年)



2018/03/19

太陽最前線ツアー

- 太陽天体プラズマ研究部
「太陽観測科学プロジェクト」と「SOLAR-C準備室」
 - 教授: 渡邊 (3月まで), 一本 (京大併任)
 - 准教授: 鹿野, 末松, 関井, 花岡, 原, 勝川, 後藤 (核融合研併任)
 - 助教: 石川, 久保, 成影
 - 国立天文台フェロー: 鳥海
 - 研究員: Joshi, Lee, Song
 - 大学院生: 4名 (総研大 3, 東大 1)

(*)原は勝川(H30より)が東大併任
- 電波研究部
「チリ観測所 (三鷹)」
 - 助教: 下条
 - 国立天文台フェロー: 岡本

- 総研大では学部生(主に2-3年生)を対象に最先端の天文学研究に触れられる企画をおこなっています。
- 総研大スプリングスクール
 - 国立天文台の研究者による天文学の基礎の集中講義を行う
 - 2-3月に1週間、50名ほど
- 総研大サマーステューデント
 - 国立天文台に滞在し、研究者の指導で、実際の研究を行う
 - 8月に2-4週間、最後に発表会、全体で10名ほど
 - 面白い成果がでたときに、天文学会で発表してもらったこともあります

- 太陽は近いからこそフロンティア
 - 詳細な観測ができる唯一の恒星
- 様々な波長やスペースと地上観測を組み合わせ合わせた研究ができる
 - 観測データに誰でもアクセスすることができる
- 新しい観測データを得るには新しい観測が必要。無ければ自分で作るしかない