

# 国立天文台での太陽研究

勝川 行雄

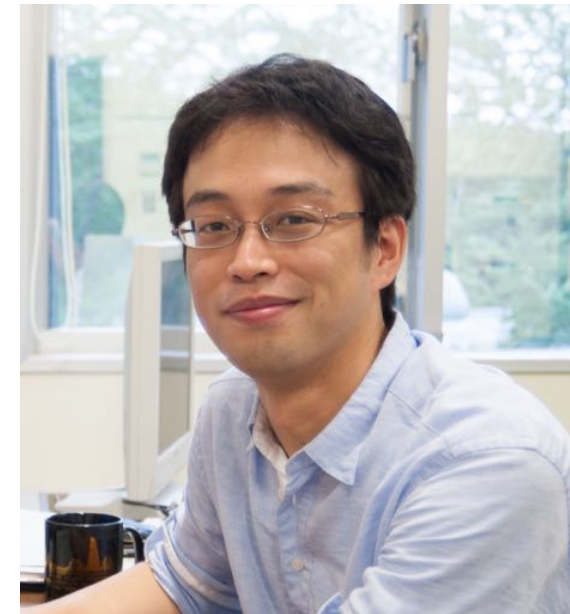
国立天文台 太陽観測科学プロジェクト

東京大学・理学系研究科天文学専攻

総研大・物理科学研究科天文科学専攻天文科学専攻

->先端学術院天文科学コース

- 国立天文台・太陽観測科学プロジェクトで仕事をしています
- 衛星観測や地上観測データを使って磁場を起源とする太陽活動現象の研究をしています
- 人工衛星「ひので」に加え  
海外のIRISやSDO衛星
- 地上望遠鏡による観測
- 新しい装置の開発も重要なテーマ
- 岐阜県恵那市の出身です





©NASA/JPL

# 太陽の表面



地球

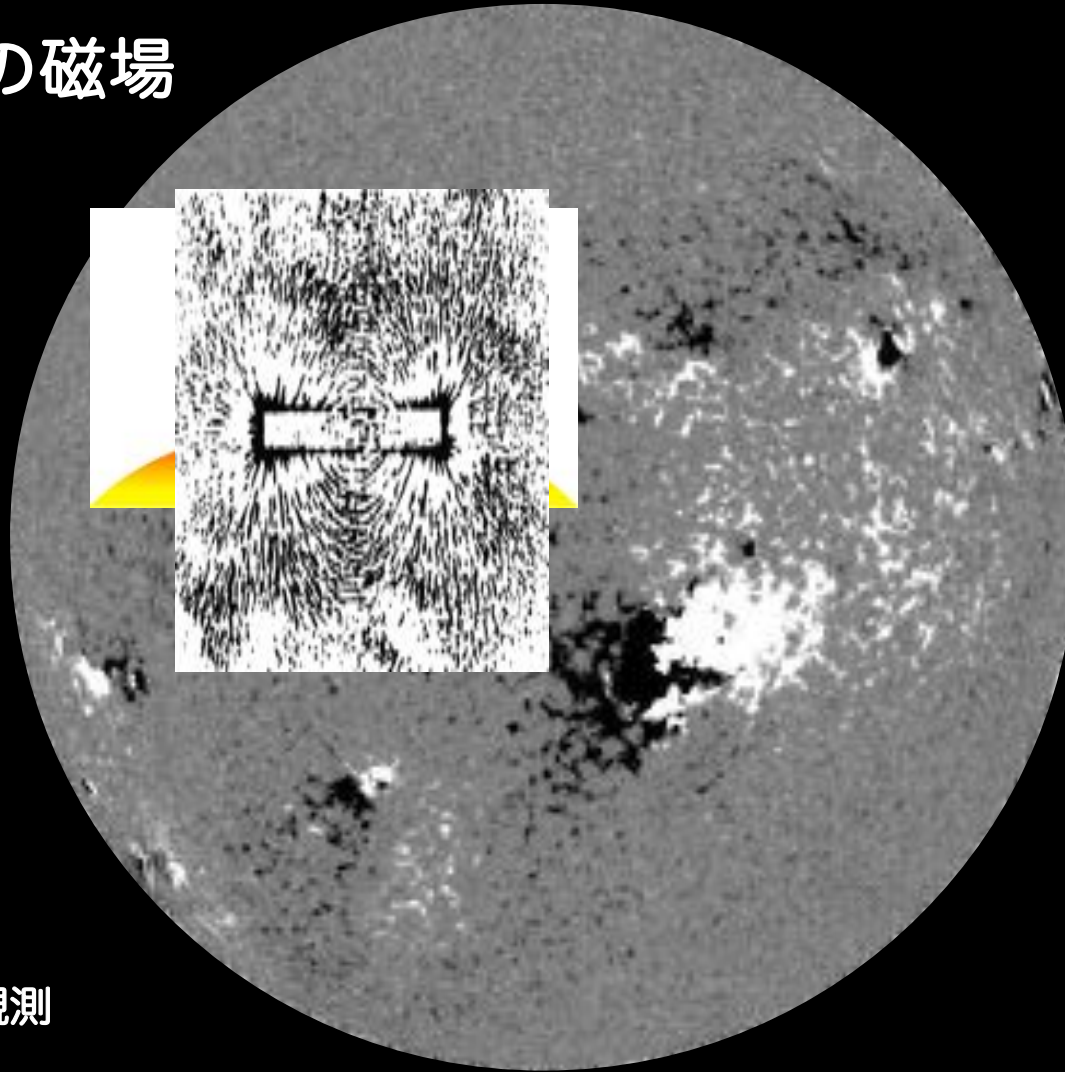
表面  
6000度

黒点  
4000度

国立天文台  
フレア望遠鏡で観測

©NAOJ

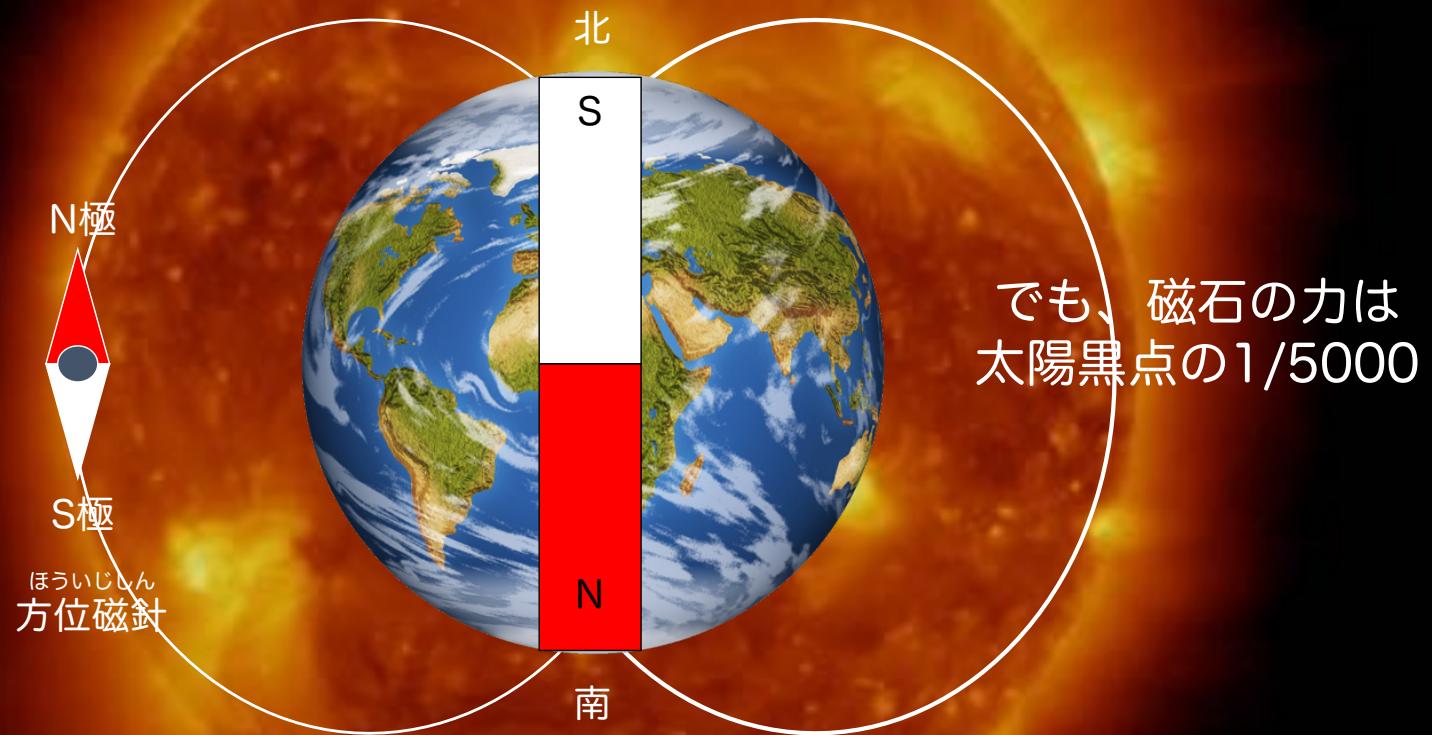
# 太陽の表面の磁場

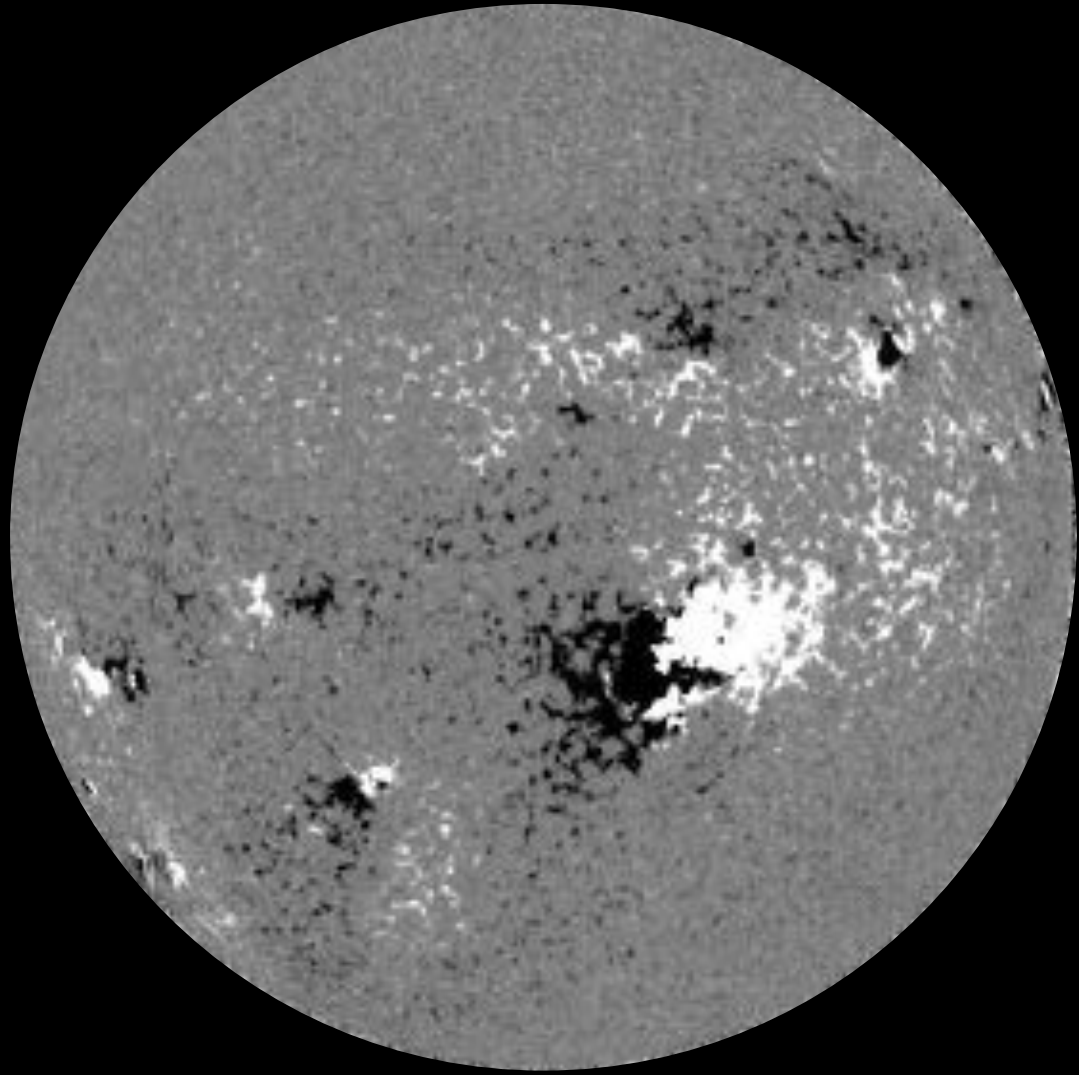


国立天文台  
フレア望遠鏡で観測

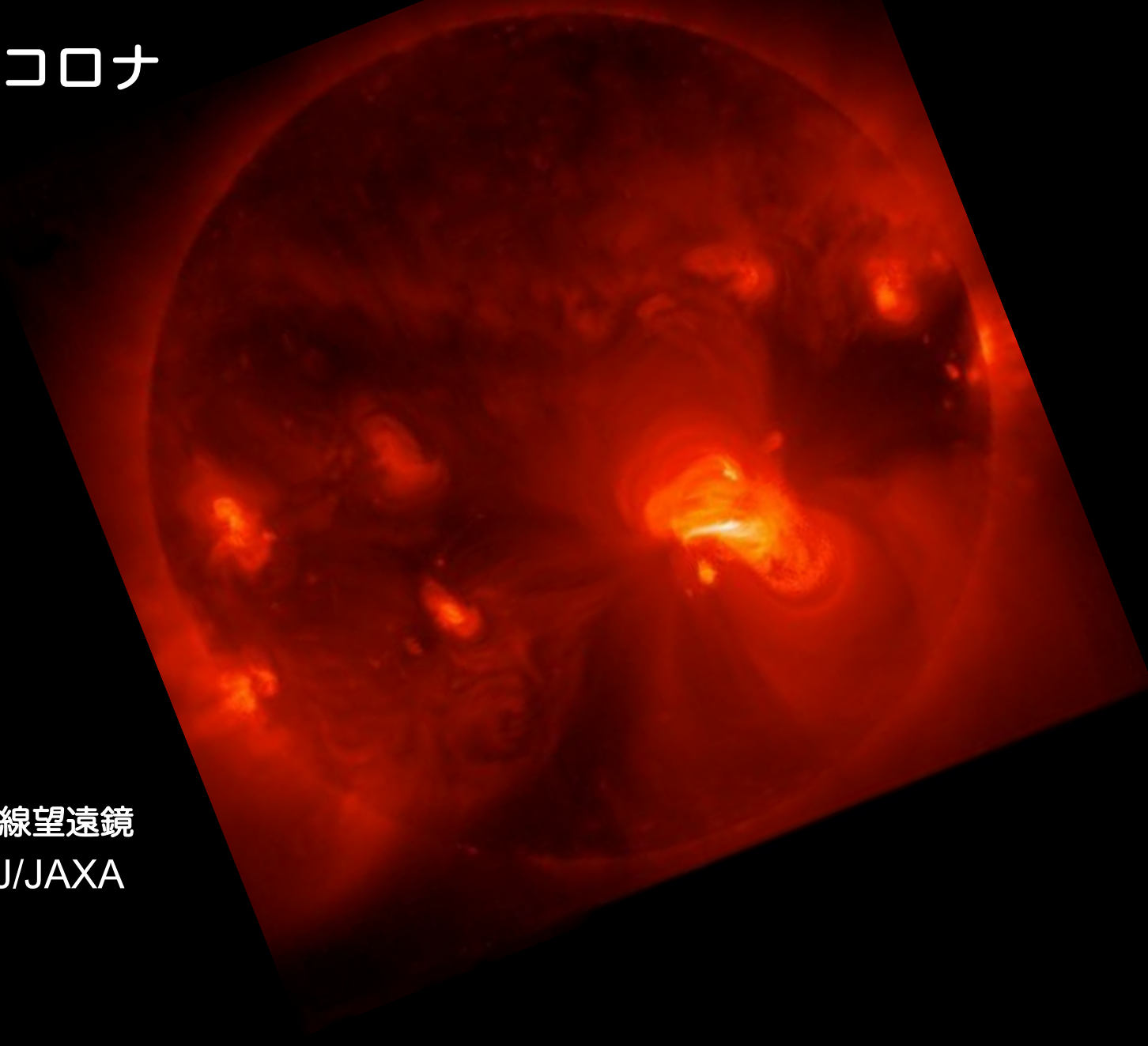
©NAOJ

# 地球もおおきな磁石





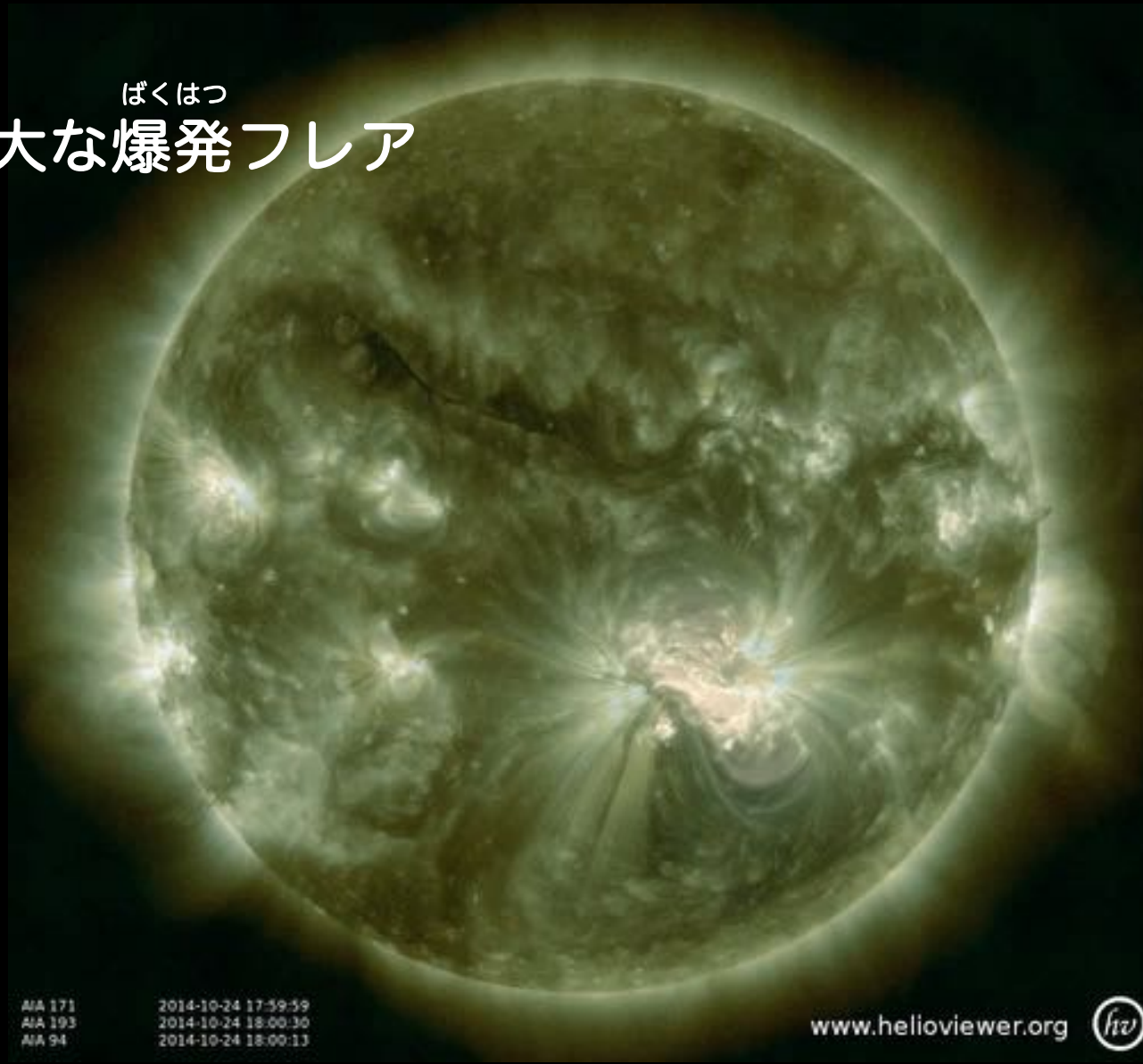
# 太陽のコロナ




ひのでX線望遠鏡  
©NAOJ/JAXA  
/MSU



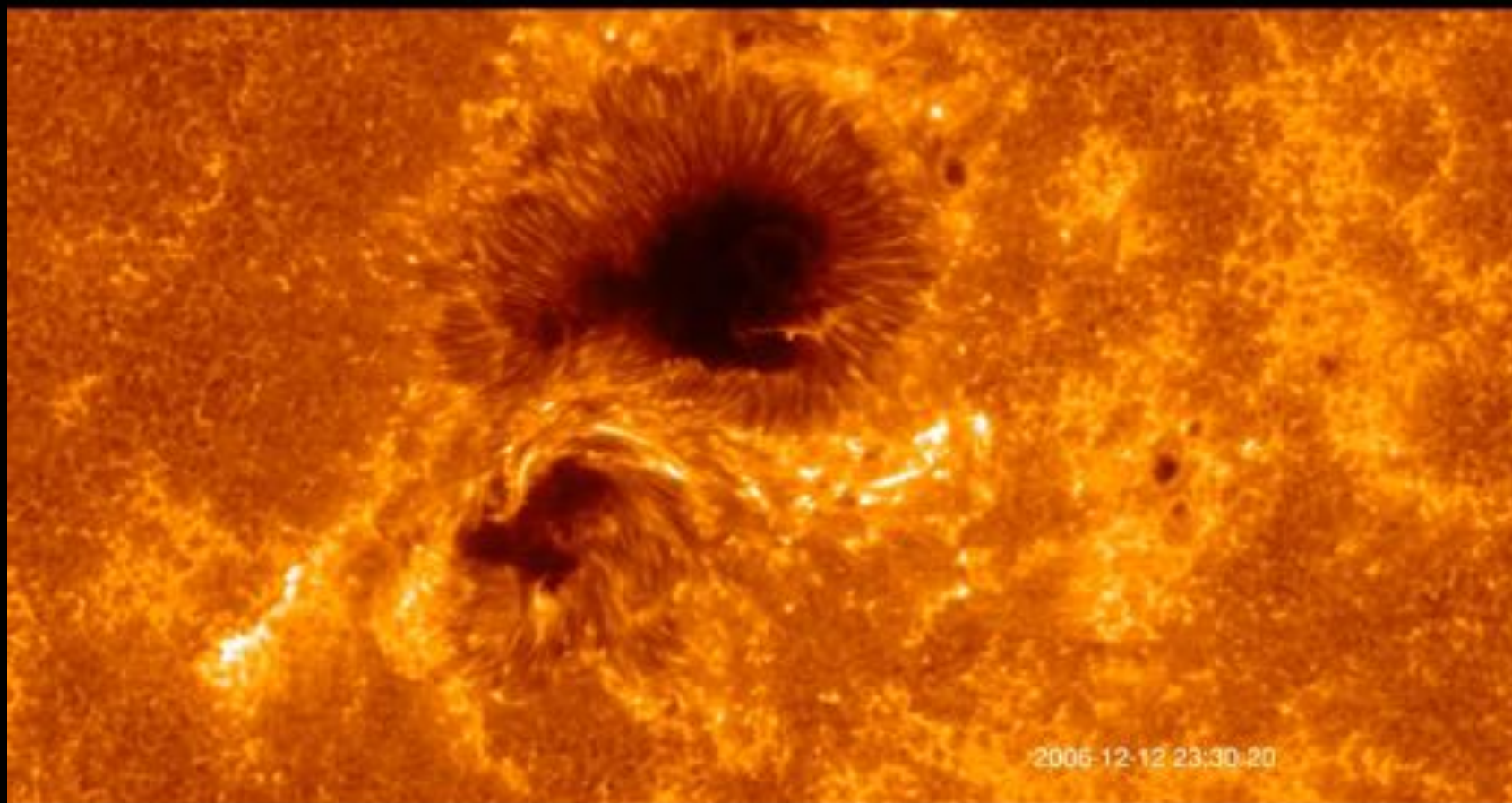
ばくはつ  
太陽の巨大な爆発フレア



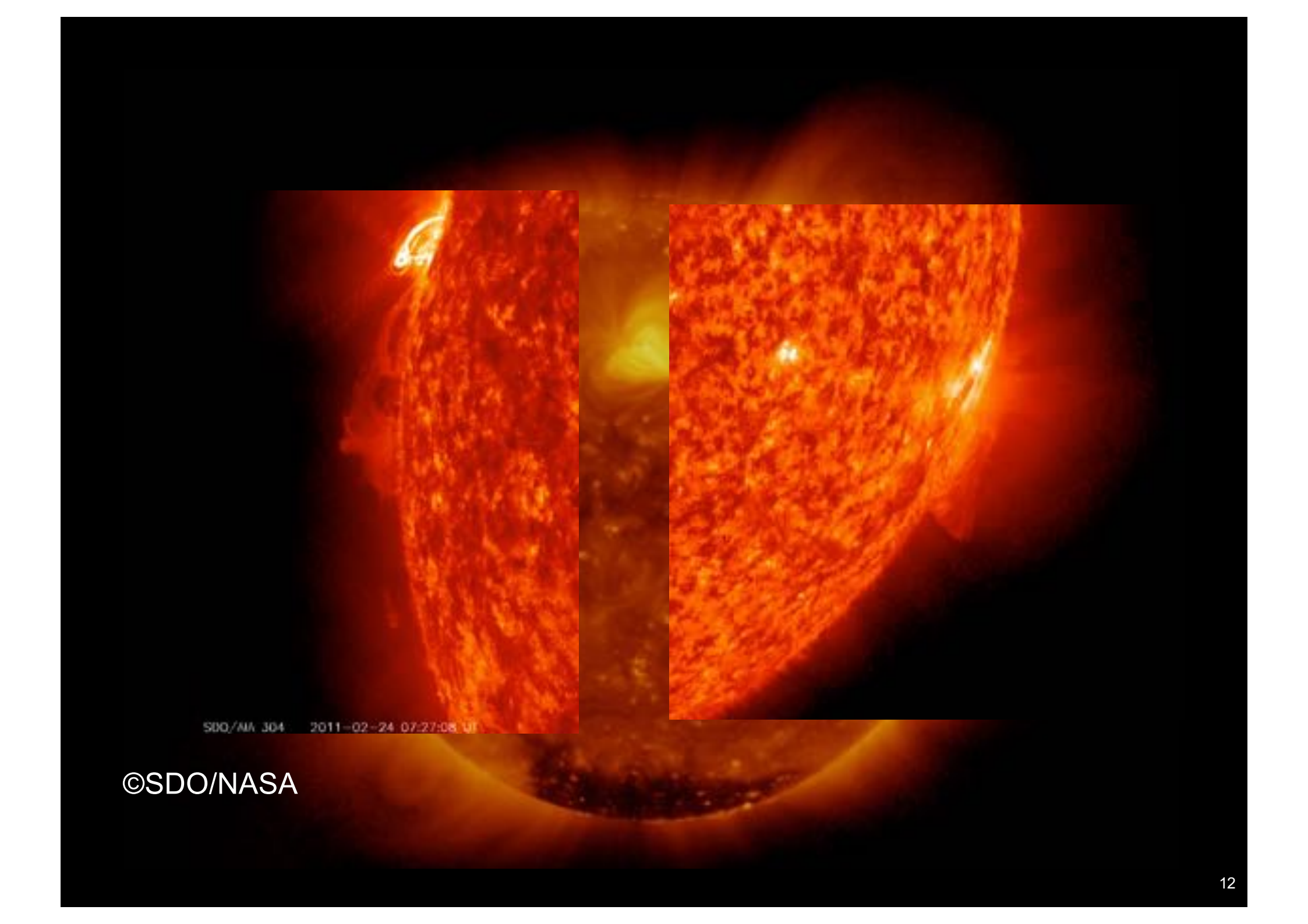
AIA 171 2014-10-24 17:59:59  
AIA 193 2014-10-24 18:00:30  
AIA 94 2014-10-24 18:00:13

[www.helioviewer.org](http://www.helioviewer.org) 

# 太陽の巨大な爆発フレア



©NAOJ/JAXA



SDO/AIA 304 2011-02-24 07:27:08 UT

©SDO/NASA



Bar Scale  
1,400,000 km

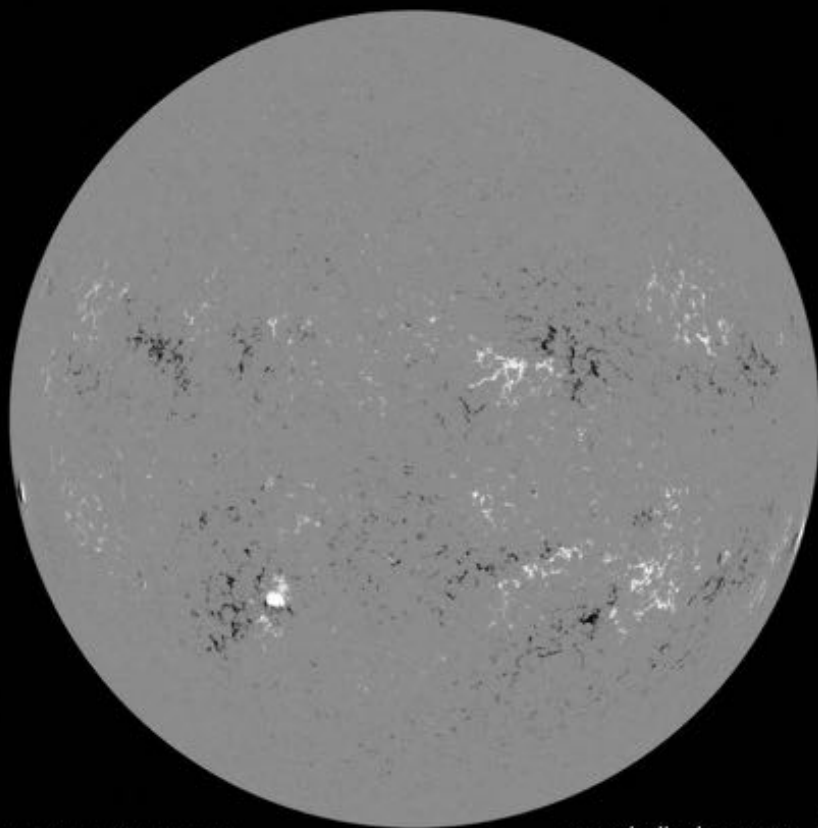
LASCO C3  
2012-05-18T00:00:00Z  
LASCO C3

2012-05-18T00:00:00Z (00 1 2012)  
2012-05-18T00:00:00Z  
2012-05-18T00:00:00Z (00 1 2012)


[www.helioviewer.org](http://www.helioviewer.org)



活発なとき (2014年)




HMI magnetogram 2014-10-12 00:00:31

[www.helioviewer.org](http://www.helioviewer.org) 

静かなとき (2019年)



HMI magnetogram 2019-07-16 00:00:39

[www.helioviewer.org](http://www.helioviewer.org) 

# 詳しい観測ができる唯一の星

- 空間分解できること！！
- 太陽の周囲には数100万度という高温のプラズマ
  - 電子と陽子が完全に電離した状態
- 爆発現象（フレア）によって、超高温(>1000万度)のプラズマができる
- 天体磁場の起源と変動 (ダイナモ)
  
- 地球や惑星環境への影響  
「宇宙天気」



「ひので」衛星による太陽黒点の「顕微鏡」観測  
(©NAOJ/JAXA)

## 大学入学共通テスト2023 地学基礎

**第3問** 高校生のSさんは、一昨年に太陽を観察してから宇宙に興味をもつようになった。そこで、家の近くにある公開天文台に通い、天体写真を撮った。次の会話を読み、後の問い(問1～4)に答えよ。(配点 14)

Sさん：メシエ天体の写真をいくつか撮ったので見てください(図1)。

T研究員：うまく撮れていますね。これらはどのような天体かわかりますか？

Sさん：M13とM45は星団です。にある恒星は若く、にある恒星は年をとっています。

T研究員：よく勉強していますね。そのとおりです。

Sさん：M42とM97は星雲です。の中には生まれたばかりの恒星が含まれることがあります。太陽程度の質量をもつ恒星は終末期にをつくります。

T研究員：それもそのとおりです。星雲が淡くぼんやりと見えるのは、からです。

Sさん：メシエ天体はいろいろな形があって楽しいのですが、恒星はどれも点にしか写りませんでした。

T研究員：そうですね。ただ、表面の様子が詳しく見える恒星が一つだけあります。太陽です。

Sさん：そういえば一昨年に(a)太陽の黒点を観察しました。今度は(b)遠い銀河を観察したいです。

T研究員：それには大きな望遠鏡が必要です。宇宙を学べる大学に行くといいですよ。

**問3** 58ページの会話文中の下線部(a)に関連して、黒点が黒く見える理由として最も適当なものを、次の①～④のうちから一つ選べ。

- ① その部分の磁場が強いため、光を吸収する物質が溜まっているから。
- ② その部分の磁場が強いため、内部からのエネルギーが表面まで運ばれにくくなって温度が低くなっているから。
- ③ その部分の磁場が弱いため、ガスが集まり高密度のガスで光が遮られるから。
- ④ その部分の磁場が弱いため、ガスの密度が低くなり発光するガスが少なくなっているから。

# プラズマ現象を理解するために

## Magneto-Hydro Dynamics (電磁流体力学)

- Continuity eq. (mass conservation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

- Eq. of motion (momentum conservation)

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \mathbf{F}$$

- $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ : Lorentz force,  $\mathbf{F}$ : other forces (e.g. gravity)

- Maxwell equations.

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_c}{\epsilon}$$



# プラズマ現象を理解するために

- Lorentz force

$$\mathbf{j} \times \mathbf{B} = \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}$$

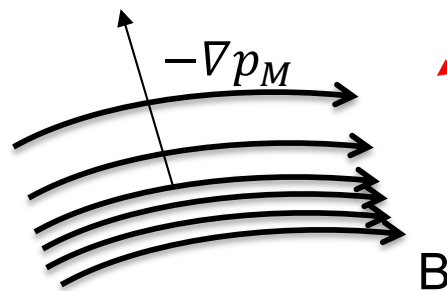
- Vector formula

$$\mathbf{B} \times (\nabla \times \mathbf{B}) = \frac{1}{2} \nabla (\mathbf{B} \cdot \mathbf{B}) - (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}$$

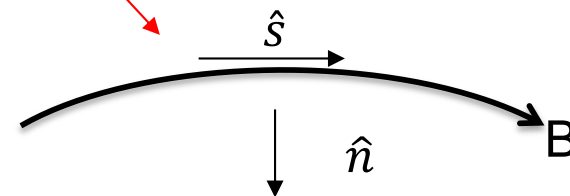
$$\mathbf{j} \times \mathbf{B} = \frac{1}{\mu} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} - \nabla \left( \frac{B^2}{2\mu} \right)$$

- Eq. of motion

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla \left( p + \frac{B^2}{2\mu} \right) + \frac{1}{\mu} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} + \mathbf{F}$$



Magnetic pressure

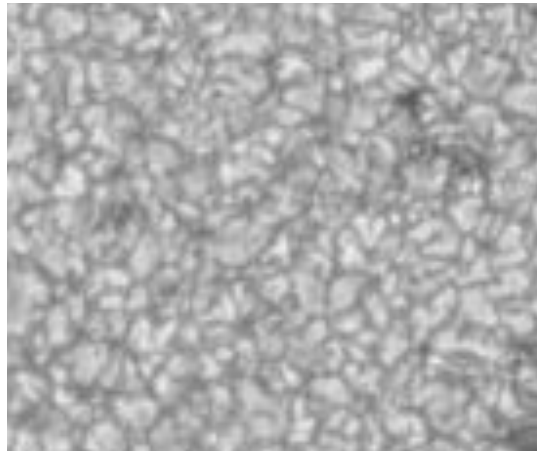


Magnetic tension

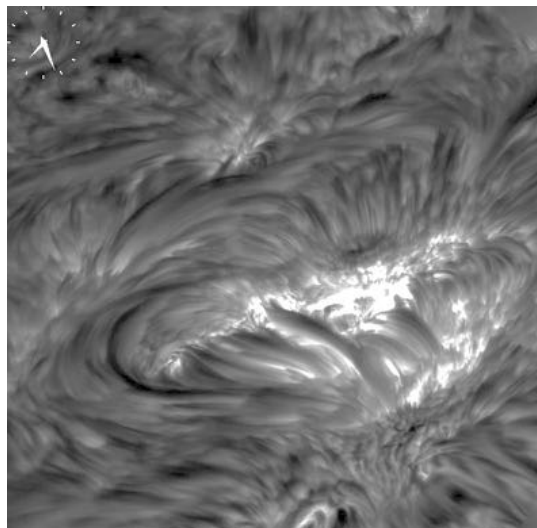
# Plasma $\beta$

Ratio of gas and magnetic pressures  $\beta = \frac{p_g}{p_M}$

High  $\beta$

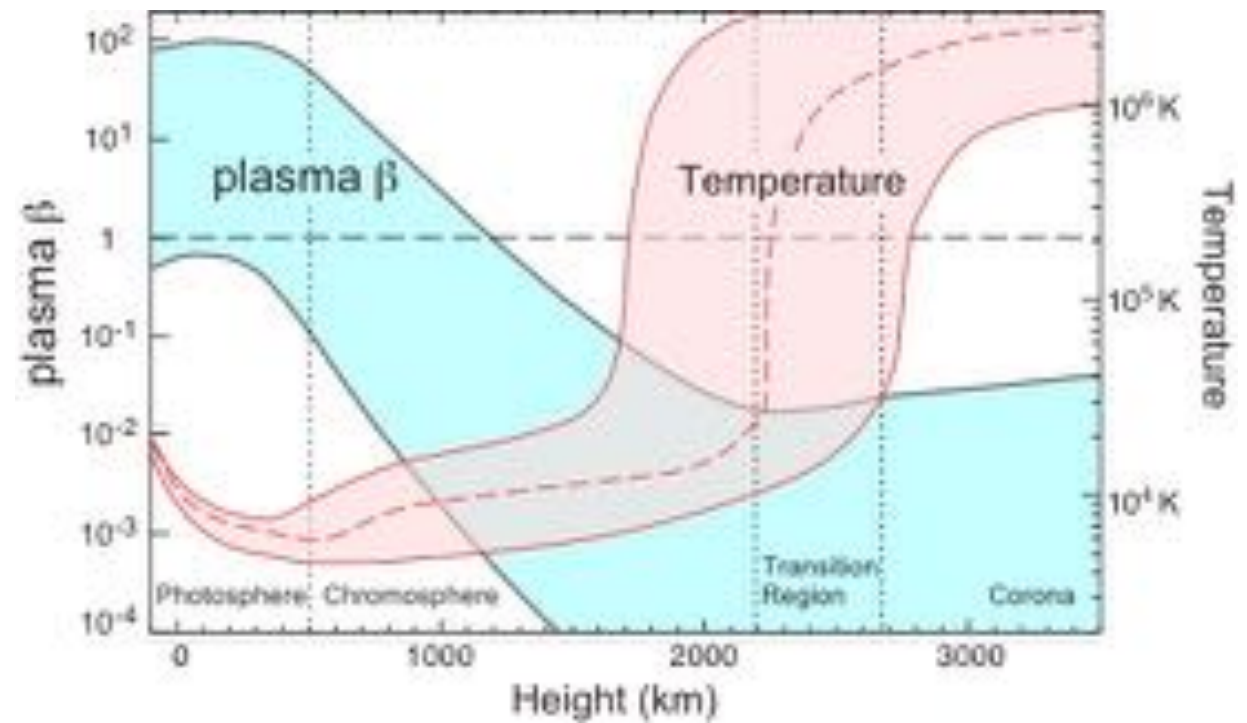


Low  $\beta$



High  $\beta$

Low  $\beta$



# プラズマ現象を理解するために

- Electric and magnetic fields in the frame moving in the velocity  $\mathbf{v}$  (Galilean transformation)

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

$$\mathbf{B}' = \mathbf{B}$$

$$\mathbf{j}' = \mathbf{j} + \rho_c \mathbf{v} = \mathbf{j}$$

- Ohm's law

$$\mathbf{j}' = \sigma \mathbf{E}' = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

- Electric field

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \frac{1}{\sigma} \mathbf{j} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \frac{1}{\sigma \mu} \nabla \times \mathbf{B}$$

- Maxwell eq.

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \nabla \times (\eta \nabla \times \mathbf{B})$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta \Delta \mathbf{B}$$

$$\eta = 1/\sigma \mu \text{ (m}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$$

# 磁場の凍結

- Vector formula  $\nabla \times (\mathbf{A} \times \mathbf{C}) = -\mathbf{C}(\nabla \cdot \mathbf{A}) + (\mathbf{C} \cdot \nabla)\mathbf{A} + \mathbf{A}(\nabla \cdot \mathbf{C}) - (\mathbf{A} \cdot \nabla)\mathbf{C}$
- $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = (\mathbf{B} \cdot \nabla)\mathbf{v} - \mathbf{B}(\nabla \cdot \mathbf{v}) - (\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{B}$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{B} = \frac{d\mathbf{B}}{dt} = (\mathbf{B} \cdot \nabla)\mathbf{v} - \mathbf{B}(\nabla \cdot \mathbf{v})$$

- Continuity eq.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt}$$

- Induction eq.

$$\frac{d\mathbf{B}}{dt} = (\mathbf{B} \cdot \nabla)\mathbf{v} + \frac{\mathbf{B}}{\rho} \frac{d\rho}{dt}$$

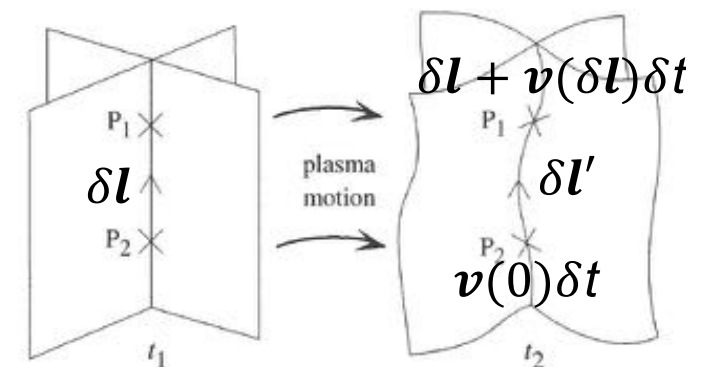
$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\mathbf{B}}{\rho} \right) = \left( \frac{\mathbf{B}}{\rho} \cdot \nabla \right) \mathbf{v}$$

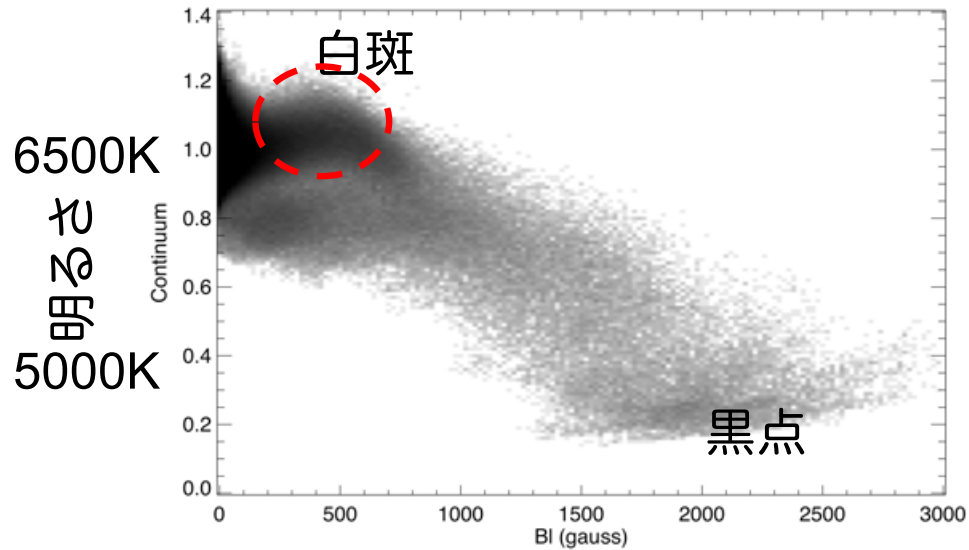
- Magnetic field line  $\delta \mathbf{l} \parallel \frac{\mathbf{B}}{\rho}$

$$\frac{d\delta \mathbf{l}}{dt} = (\delta \mathbf{l} \cdot \nabla)\mathbf{v}$$

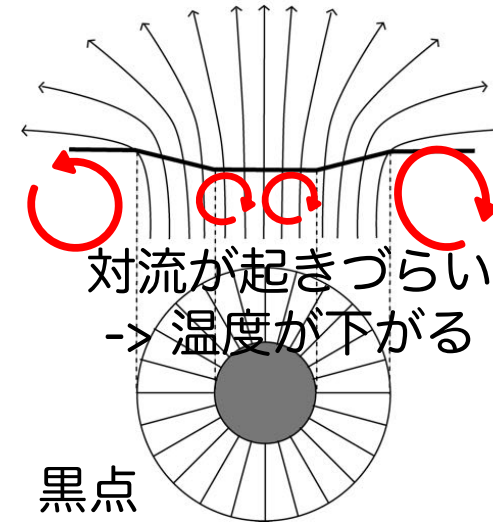
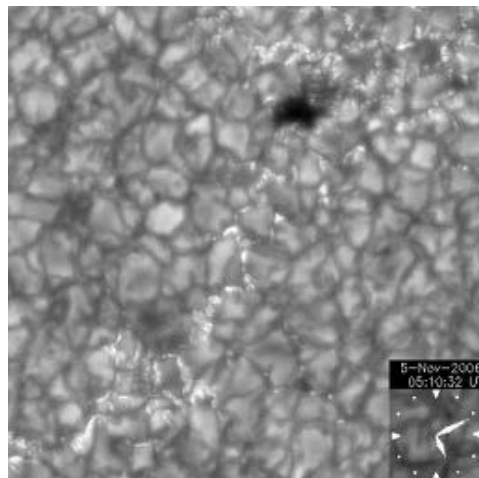
$$\delta \mathbf{l}' = \delta \mathbf{l} + \mathbf{v}(\delta \mathbf{l})\delta t - \mathbf{v}(0)\delta t$$

$$= \delta \mathbf{l} + (\delta \mathbf{l} \cdot \nabla)\mathbf{v}$$

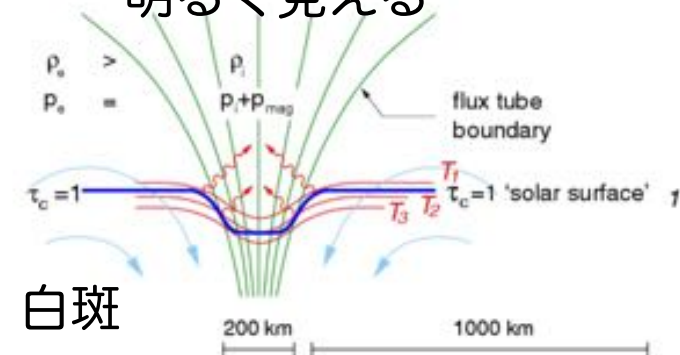




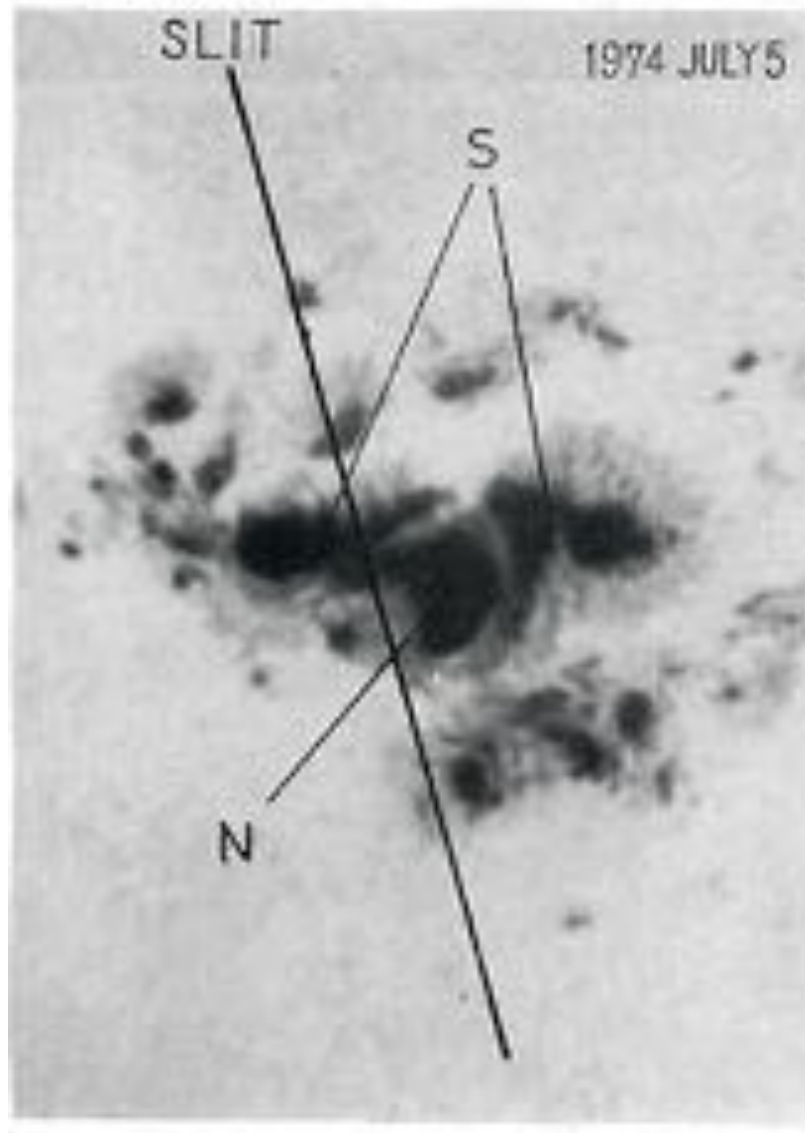
磁場の強さ



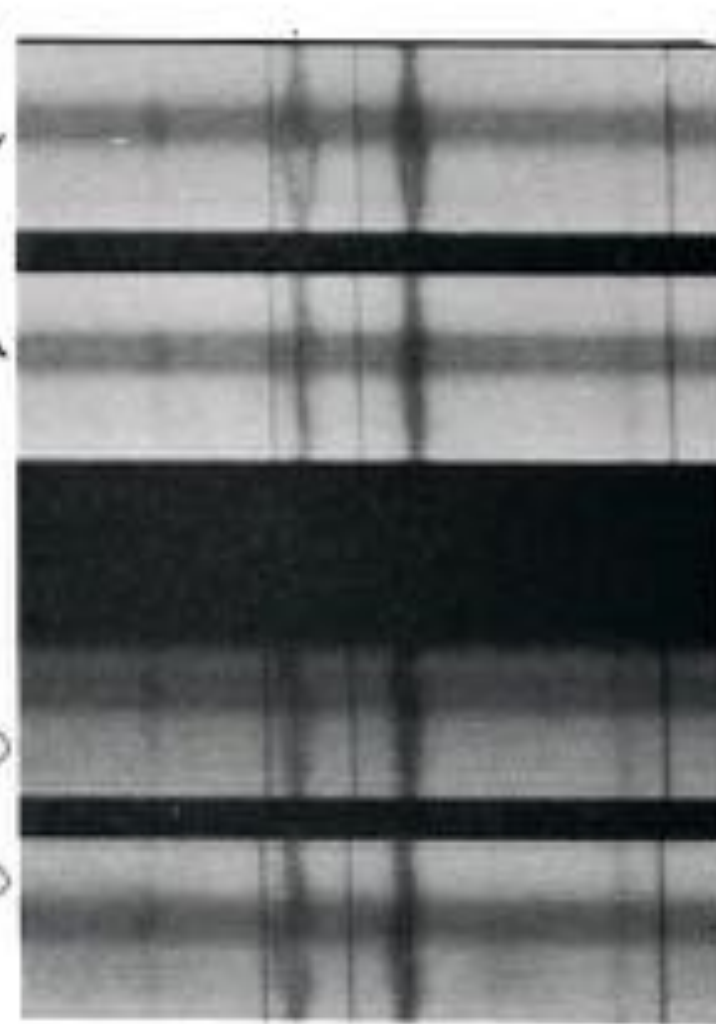
大気が透明になる->  
 明るく見える



# ゼーマン効果



国立天文台岡山



# ゼーマン効果

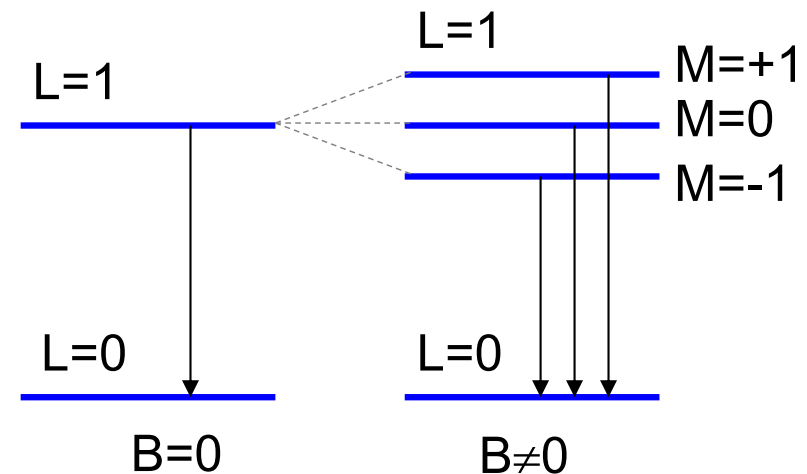
- 電子の角運動量(磁気モーメント)と磁場の相互作用でエネルギー準位が分離する

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

B: 磁場強度(ガウス)

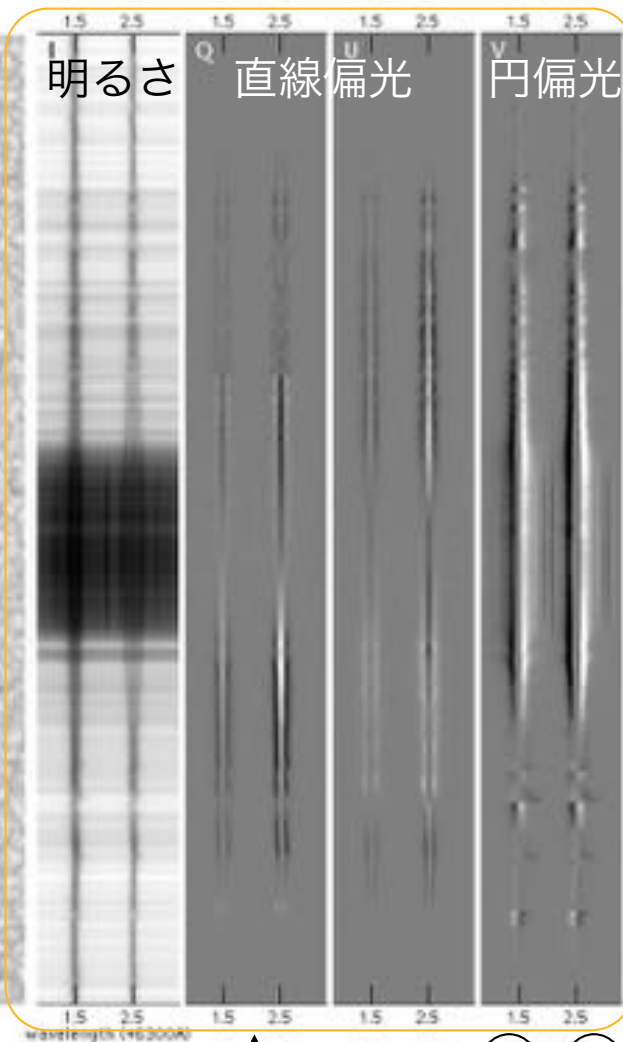
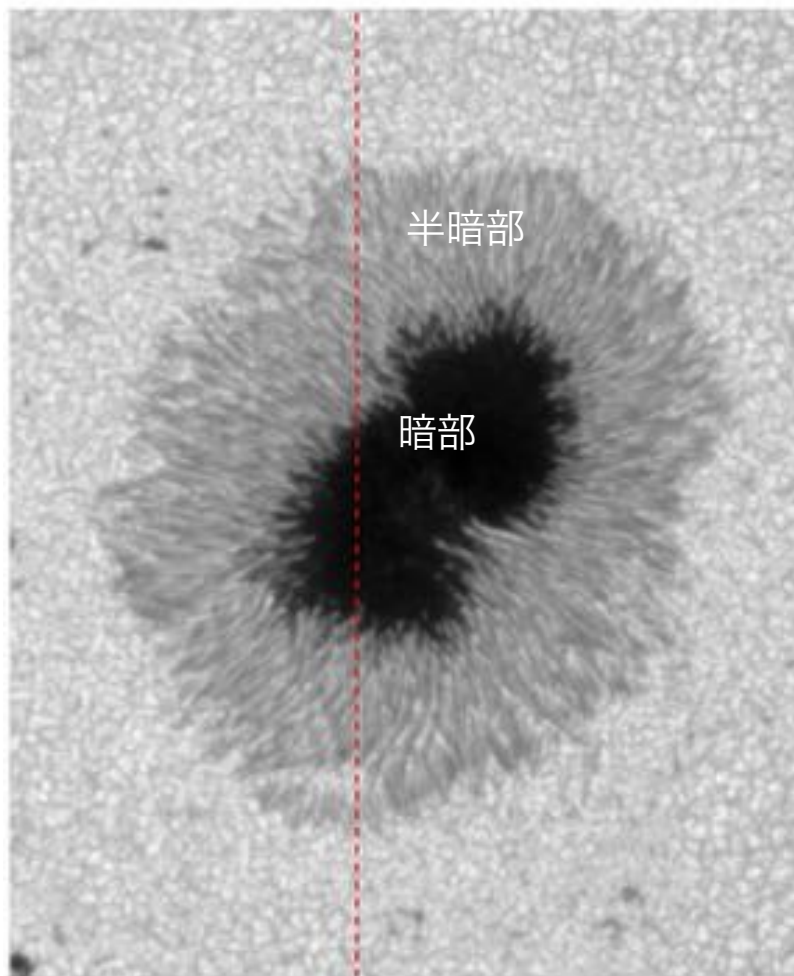
$\Delta\lambda_B, \lambda_0$ : Å

g: ランデ因子  $g=2.5$



# 太陽表面の磁場をリモートセンシング

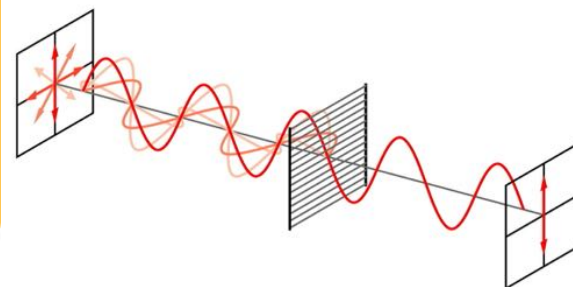
鉄の吸収線 (波長 630 nm)



「ゼーマン効果」で発生  
 する**偏光** (ストークスペク  
 トル)を測定

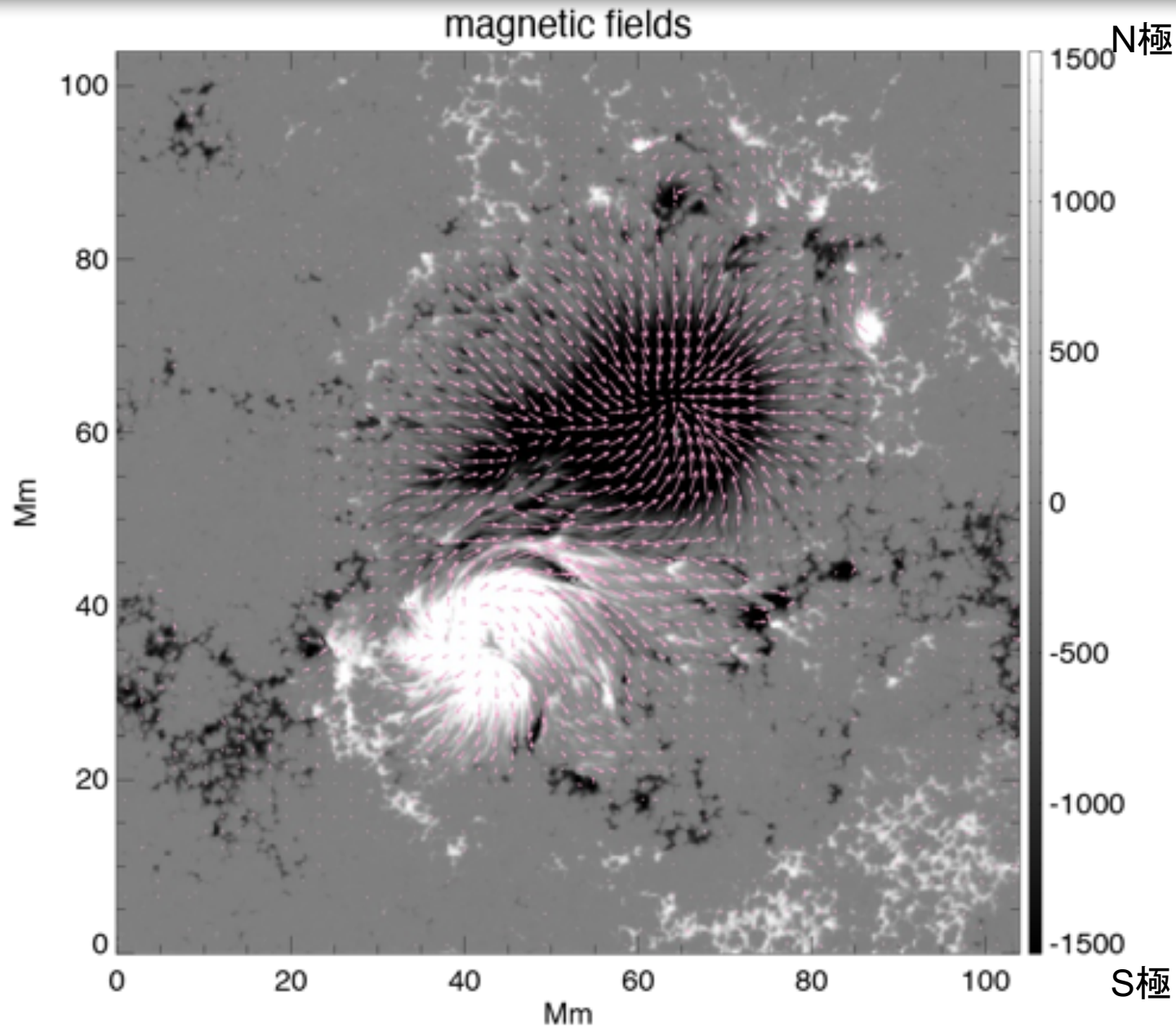
偏光を解析することで、  
 磁場の向き・強さが分かる。

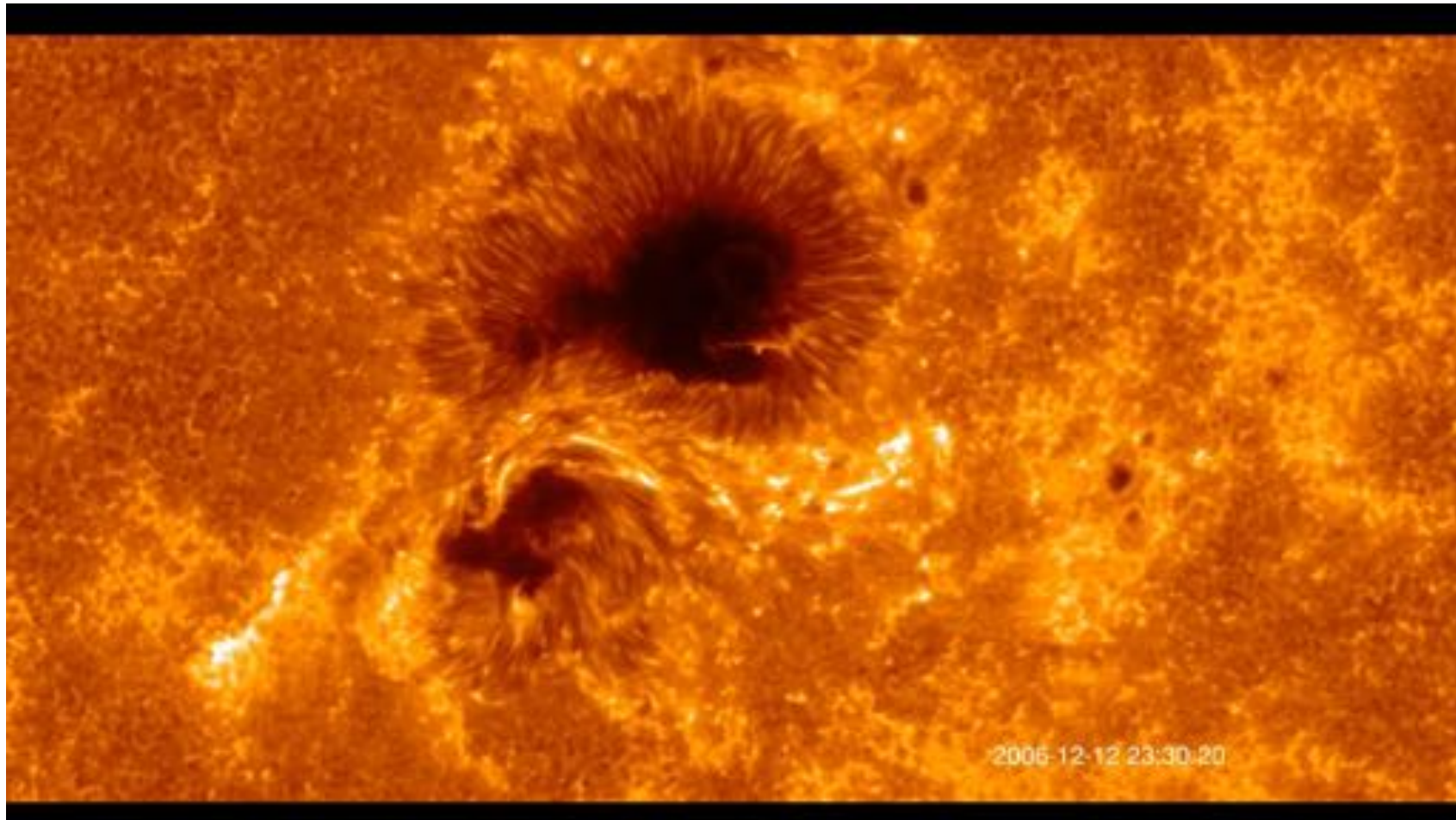
空間分解しないと偏光は  
 キャンセルしてしまう





# 黒点の磁場「ベクトル」





©NAOJ/JAXA

# 太陽から地球にやってくるもの

- 光
  - 秒速約30万km
  - 地球に到達するのに約8分
- 粒子 (太陽風)
  - 太陽から吹き出す高エネルギーの高い粒子 (電子、陽子など,放射線)
  - 秒速 300 - 800km (1000km を越えることもある)
  - 地球に到達するのに約1-3.5日かかる
- ニュートリノ
  - (ほとんど)光の速さ 約30万km/s
  - 地球に到達するのに約8分



# 太陽研究の新たな展開

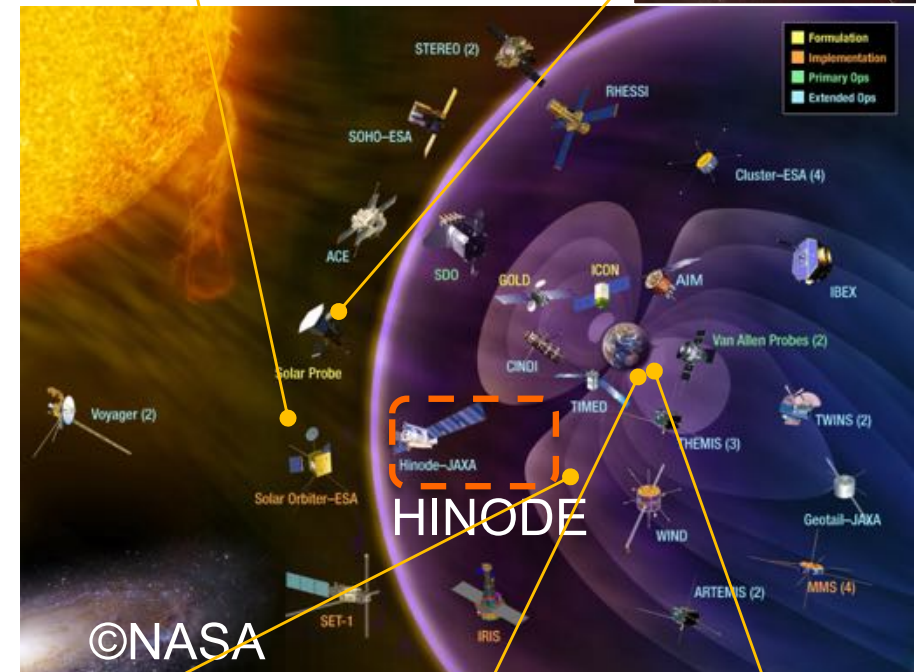
- 次の極大期は新しい太陽研究を展開できるチャンス



- 研究手法

- 「リモートセンシング」観測  
光 (電波-可視-Xなど全波長)
- 「その場」観測  
磁場・高エネルギー粒子・ダスト

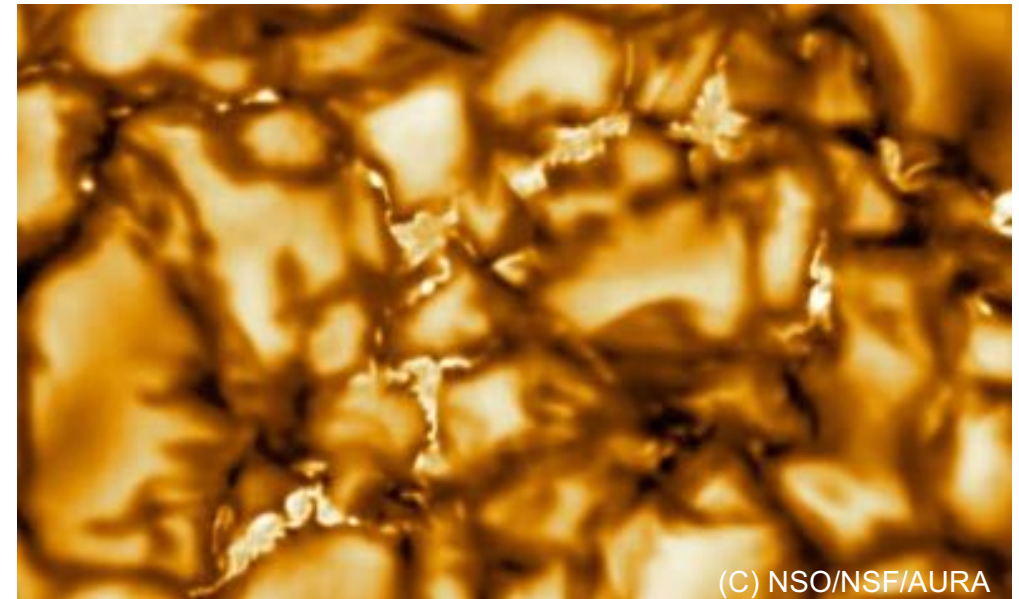
“マルチメッセンジャー”



- 宇宙と地上から観測



# 地上超大型太陽望遠鏡 (DKIST) (アメリカの望遠鏡)

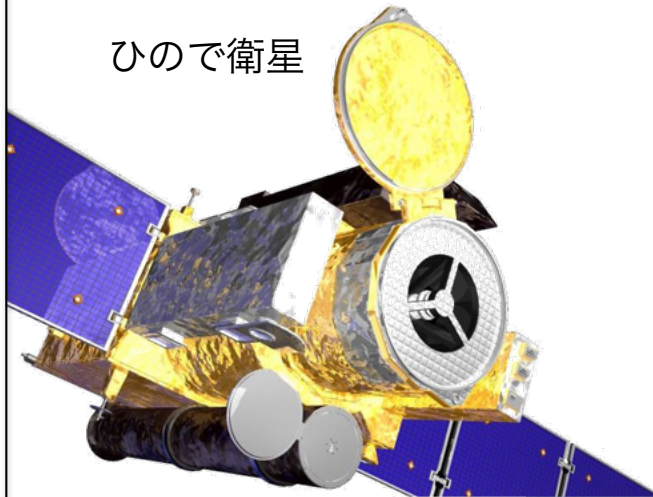


## 2022年から口径4mの地上望遠鏡が本格的に観測開始

- これまでは最大でも1.6 m
- 高解像度、高感度により、太陽彩層・コロナ磁場の観測
- SOLAR-C衛星との連携観測に期待
- プロポーザル制: 日本からの提案も受理されている

## 太陽観測科学プロジェクト

ひので衛星



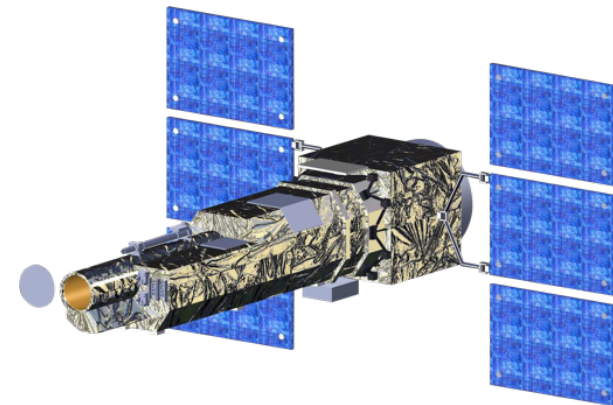
地上観測



ロケット、気球観測



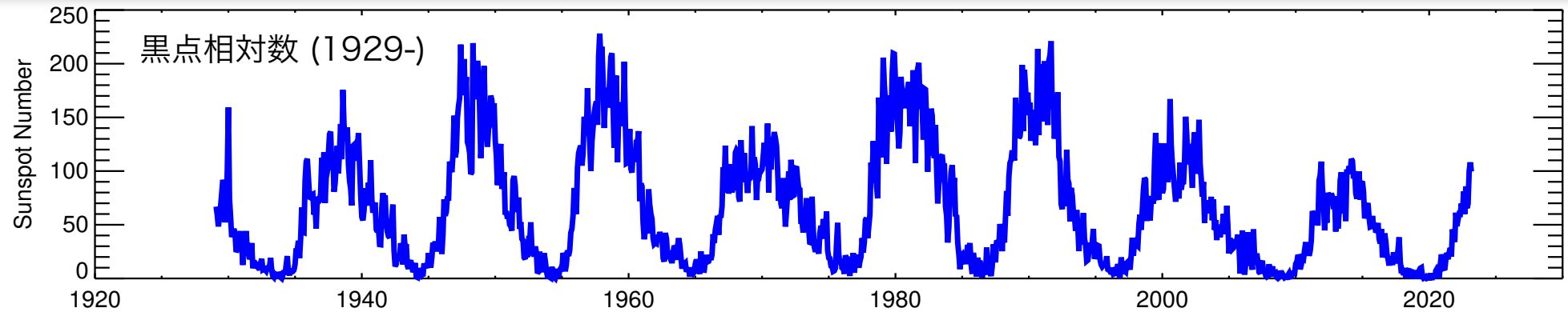
## SOLAR-Cプロジェクト



## ALMAプロジェクト

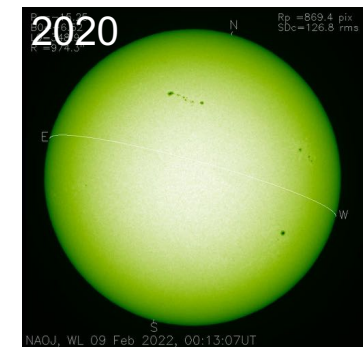
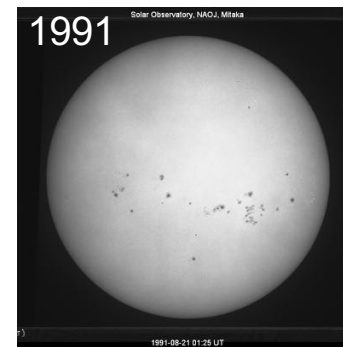
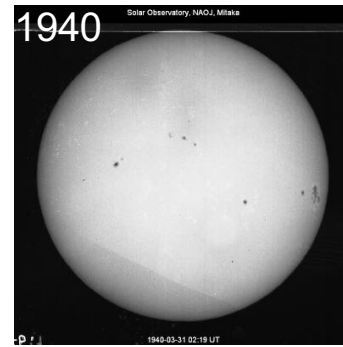
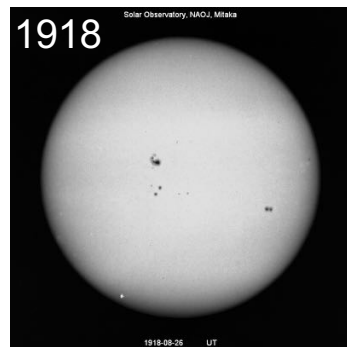


# 国立天文台における太陽観測

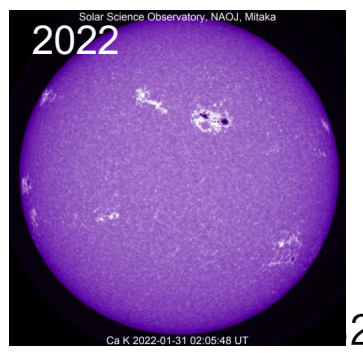
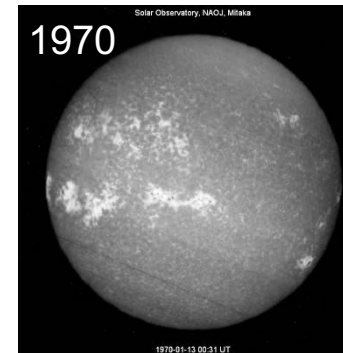
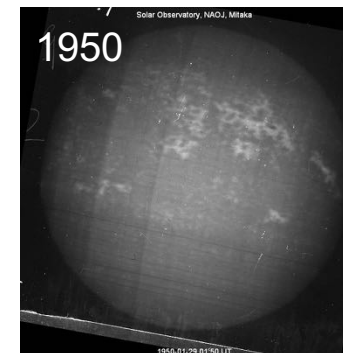
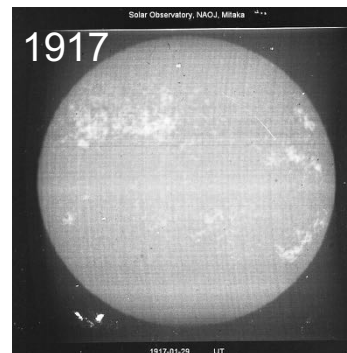


太陽磁気活動の長期変動を知る貴重なデータ

白色光  
(1918-)



黒点スケッチ  
(1938-1998)



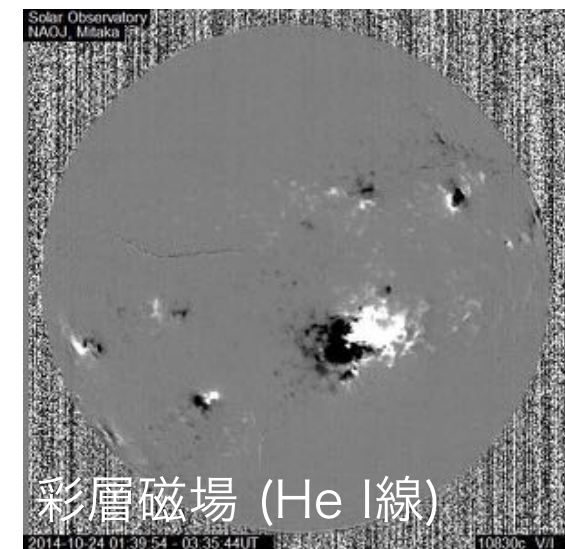
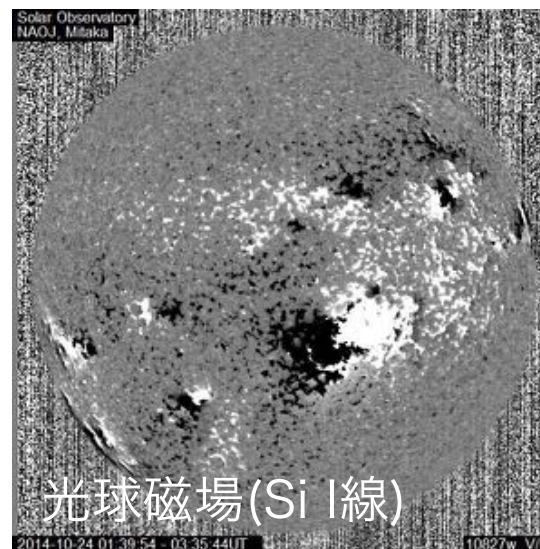
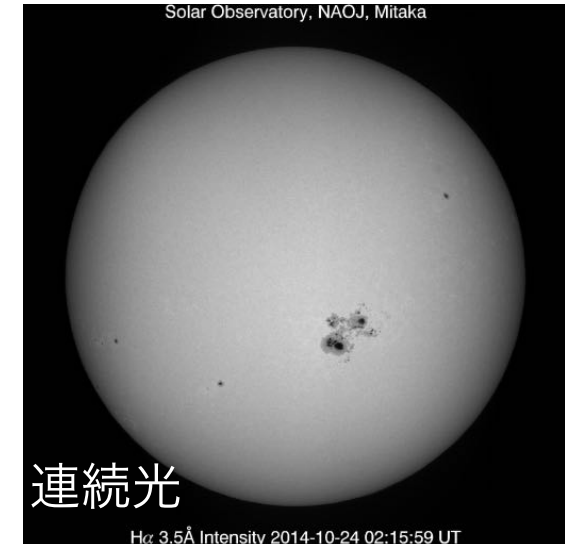
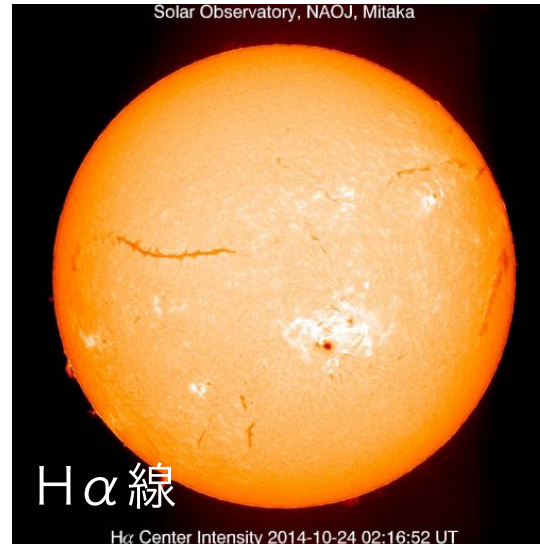
Ca II K線  
(1917-1974)  
(2015-)

H $\alpha$ 線

# 国立天文台での太陽観測: 磁場観測



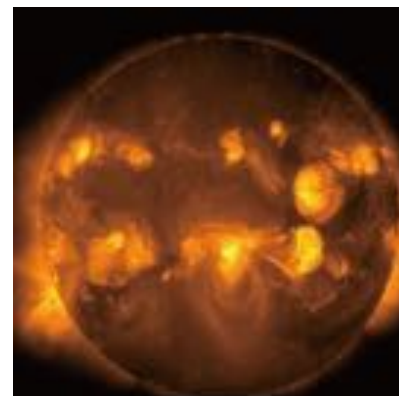
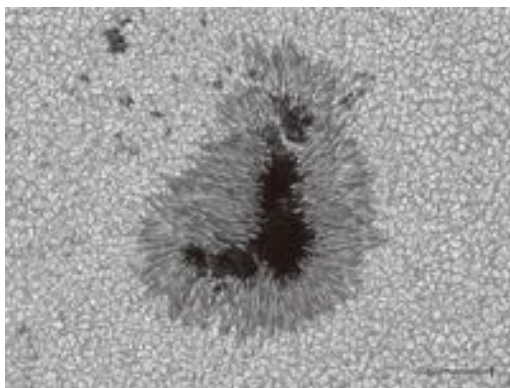
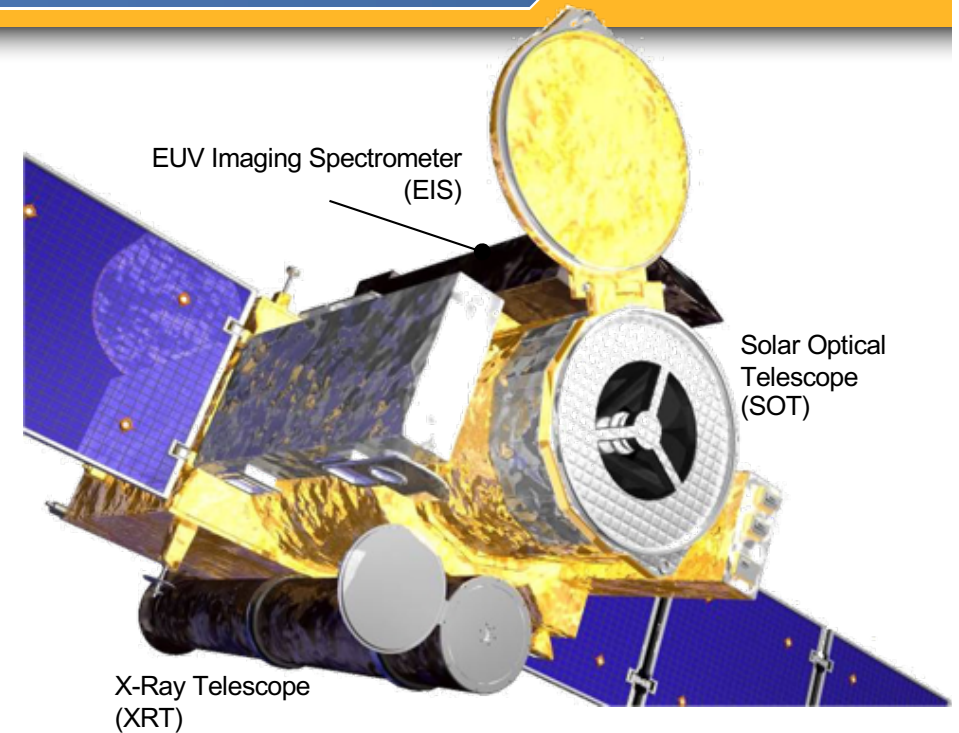
太陽フレア望遠鏡@三鷹



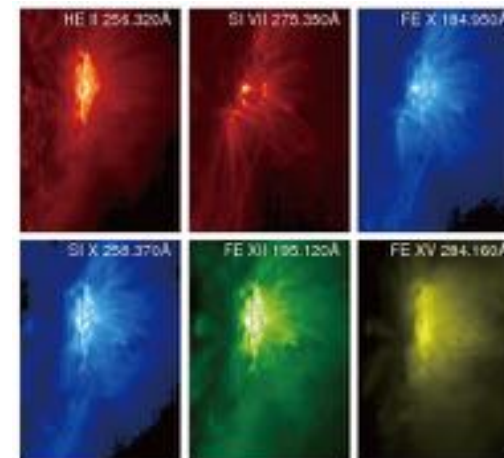


# 「ひので」衛星

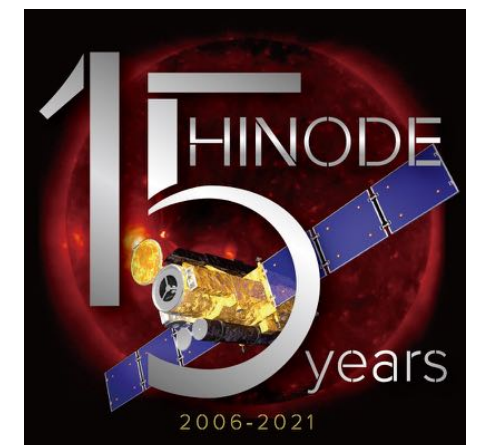
- スペースからの太陽観測
  - 地上からは見えない波長 (X線、紫外線) でコロナを観測
  - 大気に邪魔されず精度のよい観測ができる
  - 24時間連続観測、太陽の常時監視
  
- 可視光望遠鏡 (SOT)
  - 口径50cmの回折限界性能を持つ世界最大、最高性能の太陽観測用宇宙望遠鏡



太陽全面X線画像



極端紫外線輝線の分光観測



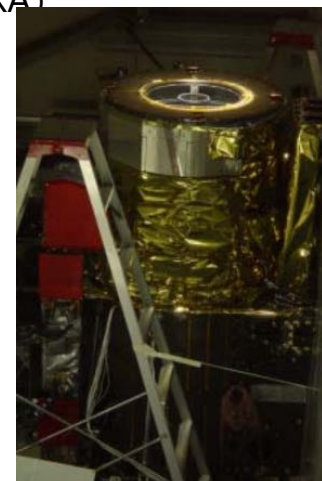
# 宇宙望遠鏡の開発

干渉計による高精度波面測定  
180度反転させて重力キャンセル

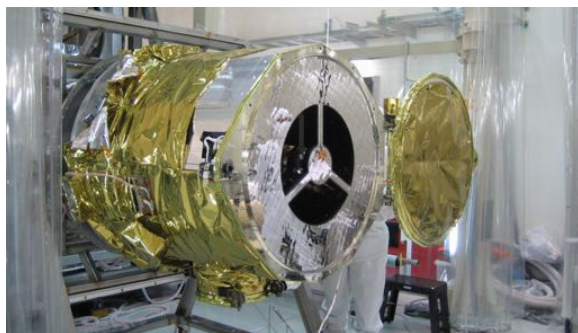


微小擾乱試験  
可動物による像ぶれの  
影響評価  
(@ISAS/JAXA)

熱光学試験  
宇宙を模擬した真空  
熱環境で光学測定  
汚染管理

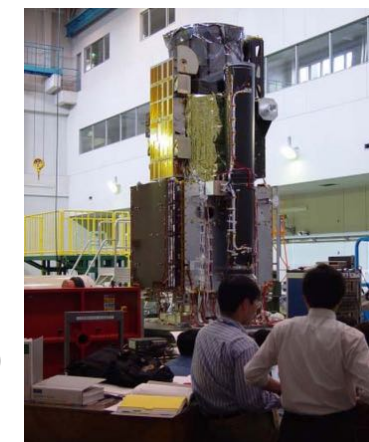


ドア展開試験



太陽光試験

振動試験  
(@ISAS/JAXA)



(2005年NAOJ先端技術センタークリーンルームにて)

# 打ち上げ・ファーストライト

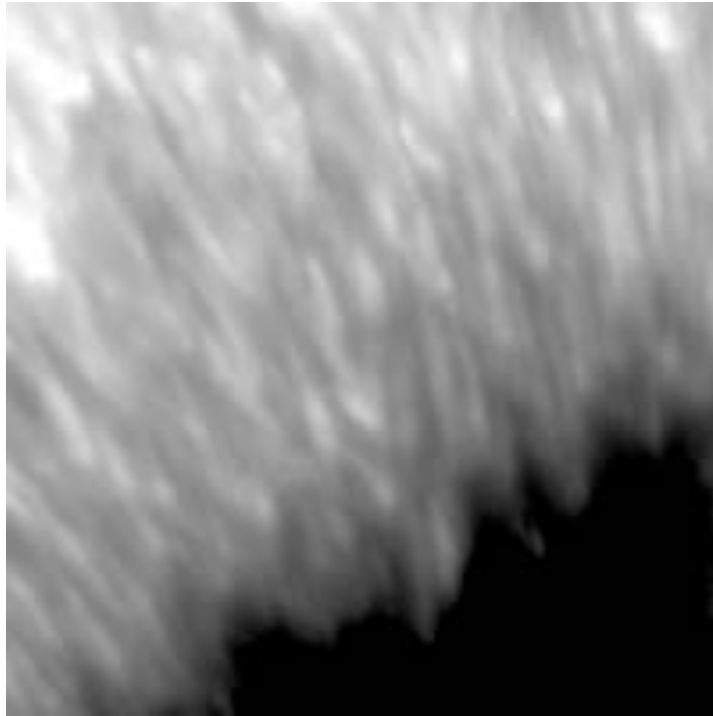
- 2006年9月23日: ISAS M-Vロケットで打ち上げ
- 2006年10月25日: ファーストライト



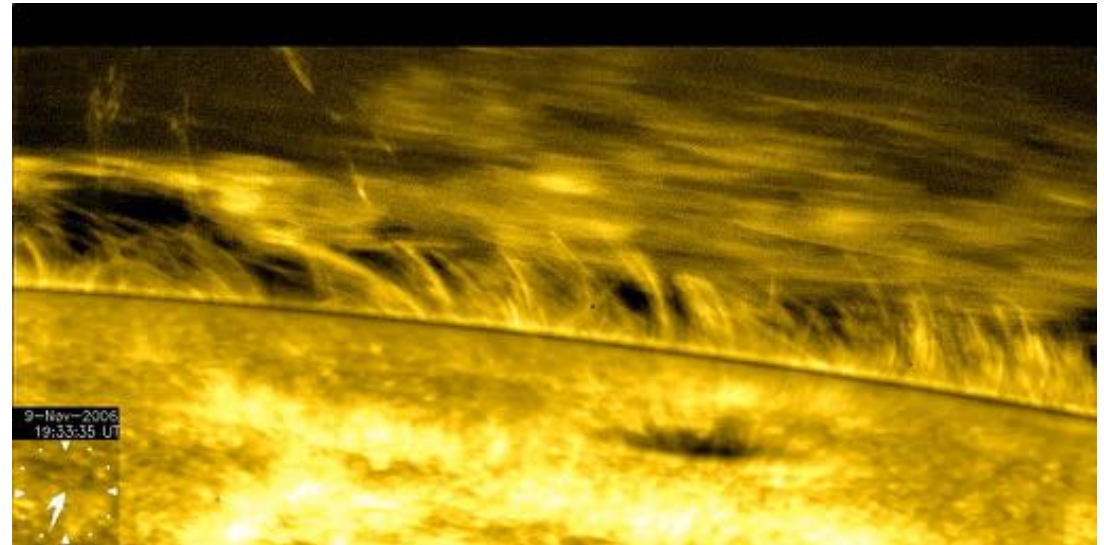
JAXA宇宙科学研究所にて

# 誰も見たことがない観測データ！！

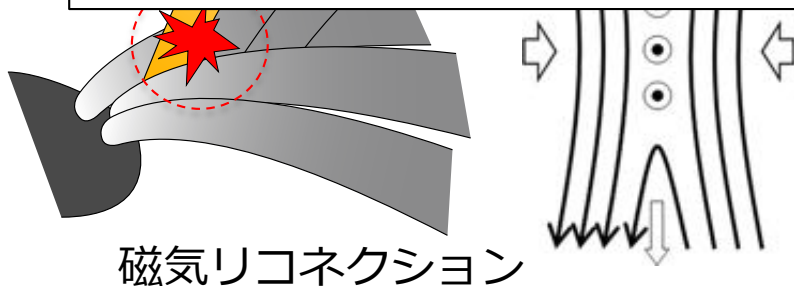
黒点半暗部で発生するジェット現象



プロミネンスを伝える波 (Alfven波)



でも、この「磁場」が直接測定できたわけではない

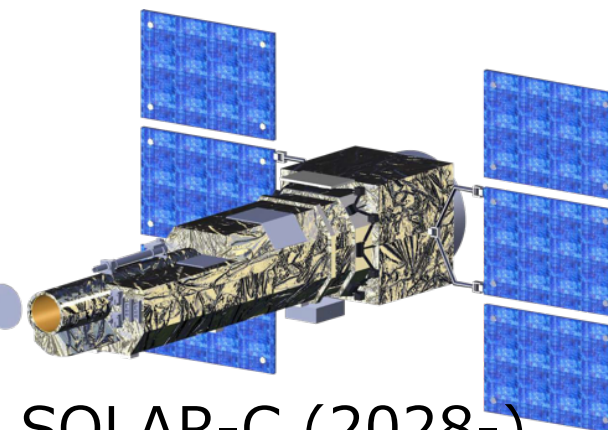
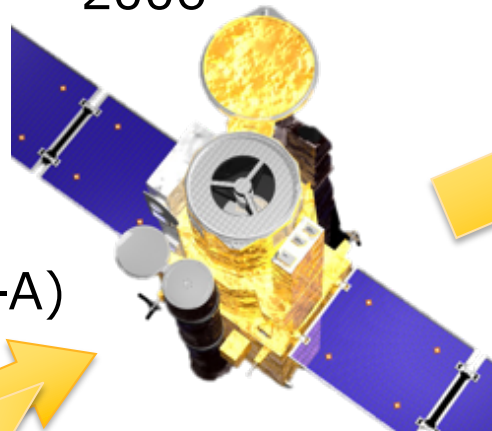


磁気リコネクション

磁気張力を復元力とする波

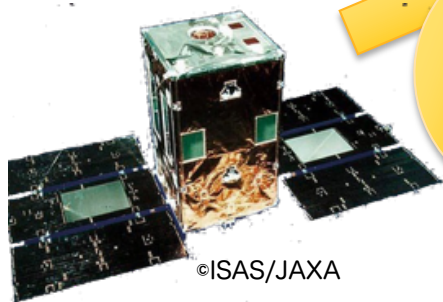
# 将来の宇宙ミッションへつなげるために

ひので (SOLAR-B)  
2006-



SOLAR-C (2028-)

ようこう (SOLAR-A)  
1991-



©ISAS/JAXA



XUV Doppler Telescope  
(ロケット, 1998)



HXR spectrum  
(気球, 2002)

小規模飛行体機器による実験

ロケット観測

気球観測



©NASA/MSFC



©MPS

ノウハウの継承  
新しい技術の獲得  
人材育成 (研究者と技術者) 38

# ロケット実験・気球実験

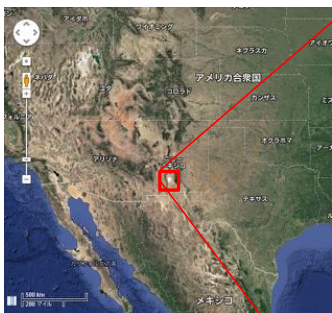
## CLASPロケット実験

(2015/2019/2021)  
紫外線偏光

## FOXSIロケット実験

(2018/2024[予定])  
X線撮像分光

米国(NASA)と共同



©google

高度250 km  
 5分間観測

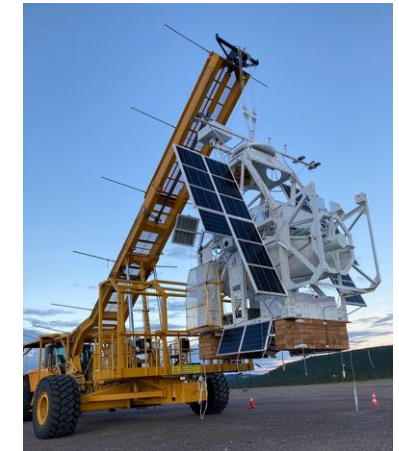


©NASA/MSFC

## SUNRISE-3気球実験

(2022, 2024[予定])

紫外-可視-  
 赤外偏光分光



©MPS

米(NASA, APL)、  
 ドイツ、スペインと共同



©MPS

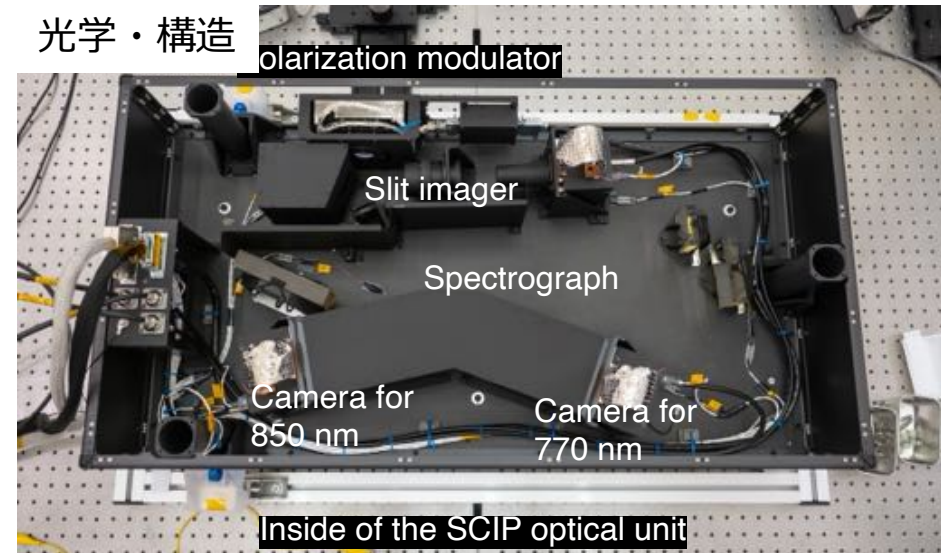
スウェーデンからカナダまで  
 高度37km、5日間観測

# CLASP, SUNRISE-3の開発

光学素子の接着



光学・構造

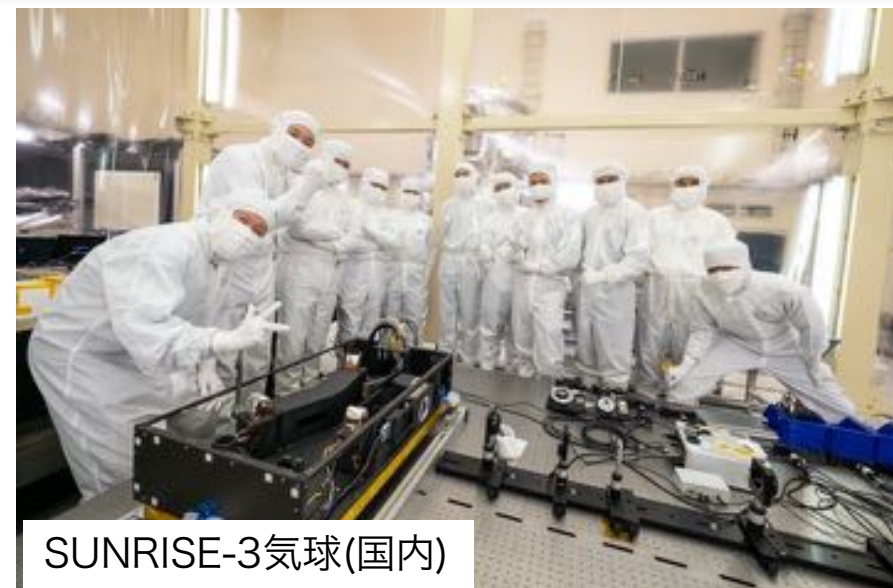


紫外線望遠鏡開発



光学アライメント

# 開発は協力・連携抜きではできない





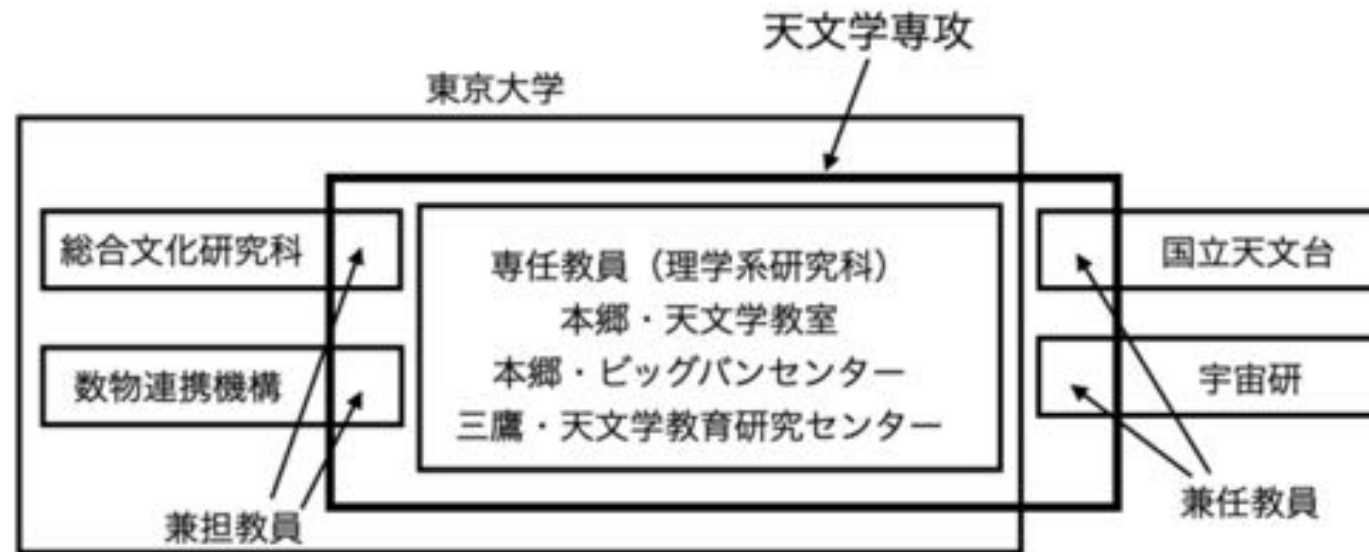
(2023年4月現在)

- 「太陽観測科学プロジェクト」 「SOLAR-Cプロジェクト」  
「ALMAプロジェクト」
  - 教授: 原, 関井, 勝川
  - 准教授: 石川, 下条, 花岡
  - 助教: 岡本, 川畑, 久保, 成影
  - 国立天文台フェロー: Benomar
  - 研究員: 大場
  - 学振研究員: 鄭, 行方
  - 大学院生: 5名 (総研大 3, 東大 2)

人材豊富です

# 多様なニーズに応えます！！

- いろいろなデータを使った研究をやりたい
  - 地上～衛星、電波～X線、自前～海外の望遠鏡をつかった観測
- 人工衛星を運用してみたい
  - ひのでの運用だけでなく、IRIS(NASAの衛星)を運用している人もいます
- 自分で観測装置を作ってみたい
- 大きなプロジェクトで仕事がしたい
  - Solar-C衛星
  - ロケット・気球実験
- 太陽以外の天文宇宙研究にも興味がある



- 講義は大学(本郷)で
  - 総研大講義も履修可能
- 研究は、各指導教員のいる拠点で
- 天文学の幅広い講義を受講できる
- R6年度入試ガイダンス: 2023年6月3日(土)予定

詳しくは<http://www.astron.s.u-tokyo.ac.jp/admission/graduate/>

# 天文学専攻教員

## 理論・数値シミュレーション

グループA

教員名	所属	研究分野	研究テーマ
戸谷 友則	天文学教室	理論天体物理学	宇宙論、銀河形成進化、及び高エネルギー天体現象の研究
相川 祐理	天文学教室	理論天体物理学	星・惑星系形成、アストロケミストリー
梅田 秀之	天文学教室	理論天体物理学	恒星進化、超新星、ガンマ線バースト、初代天体と元素合成
藤井 通子	天文学教室	理論天体物理学	星団・銀河・惑星系の形成・進化の理論的研究、シミュレーション手法の開発
茂山 俊和	ビッグバン	理論天体物理学	爆発的天体現象におけるガスの運動論・輻射輸送、銀河の進化
鈴木 健	総合文化	理論天体物理学	宇宙天体プラズマ物理学、特に天体風駆動理論と天文学への応用
小久保英一	国立天文台	理論天体物理学	惑星系形成論、太陽系、系外惑星系
中村 文隆	国立天文台	理論天体物理学	星・惑星系形成過程の観測的および理論的研究

## 光赤外観測

グループB

教員名	所属	研究分野	研究テーマ
田村 元希	天文学教室	系外惑星天文学	系外惑星天文学・赤外線天文学、観測装置開発
柏川 伸成	天文学教室	銀河天文学	初期宇宙、銀河形成、ブラックホール、噴出形成、宇宙電磁、銀河間物質
嶋作 一大	天文学教室	銀河天文学	銀河の形成と進化
土居 守	天文センター	光赤外線天文学	観測的宇宙論、超新星、変光天体、銀河、観測装置開発
宮田 隆志	天文センター	赤外線天文学	熱赤外線天文学：機知開発と時間変動を用いたダストの研究
小林 尚人	天文センター	天体物理学	星・惑星系の形成進化、光学赤外線天文学、木星シュミット望遠鏡
神崎 尚夫	天文センター	赤外線天文学・銀河天文学	銀河天文学・観測的宇宙論、観測装置開発
酒向 康行	天文センター	光赤外線天文学	時間軸天文学、光赤外線装置開発、短時間変動現象
本原誠太郎	国立天文台	赤外線天文学	銀河形成進化、赤外線天文学、観測装置開発
SILVERMAN John	数物連携機構	銀河天文学	Evolution of galaxies and supermassive black holes

## 電波観測

グループC

教員名	所属	研究分野	研究テーマ
河野幸太郎	天文センター	電波天文学	銀河・銀河団の形成と進化の研究、ミリ波サブミリ波観測機開発
原本 成一	国立天文台	電波天文学	ミリ波サブミリ波観測による星間物化学
深川 康夫	国立天文台	電波天文学	系外惑星天文学、電波・系外銀天文学
本間 孝樹	国立天文台	電波天文学	超伝導電波干渉計を用いた電波天文学
奥田 武志	国立天文台	電波天文学	近傍銀河の観測的研究、観測装置開発

## 衛星、重力波

グループD

教員名	所属	研究分野	研究テーマ
森野 良平	国立天文台	天体物理学	位置天文観測衛星計画の推進と装置開発、太陽・恒星物理学
郡丸 雅行	国立天文台	重力波天文学	重力波天文学（実験）
藤川 行雄	国立天文台	太陽物理学	太陽・恒星磁気活動の観測的研究、次世代観測装置の開発
海老沢 研	宇宙研	X線天文学	主に X 線天文衛星を用いた高赤役天体や天の川の観測的研究、科学衛星データアーカイブシステム開発、地上システム開発
岡本祐太郎	宇宙研	実験宇宙物理学	宇宙マイクロ波背景放射観測衛星、ミリ波広視野観測装置の開発研究
片倉 圭一	宇宙研	天体物理学	衛星搭載赤外線望遠鏡による観測ミッションの開発

注: R5年度入学案内から  
R6年度は変更される可能性

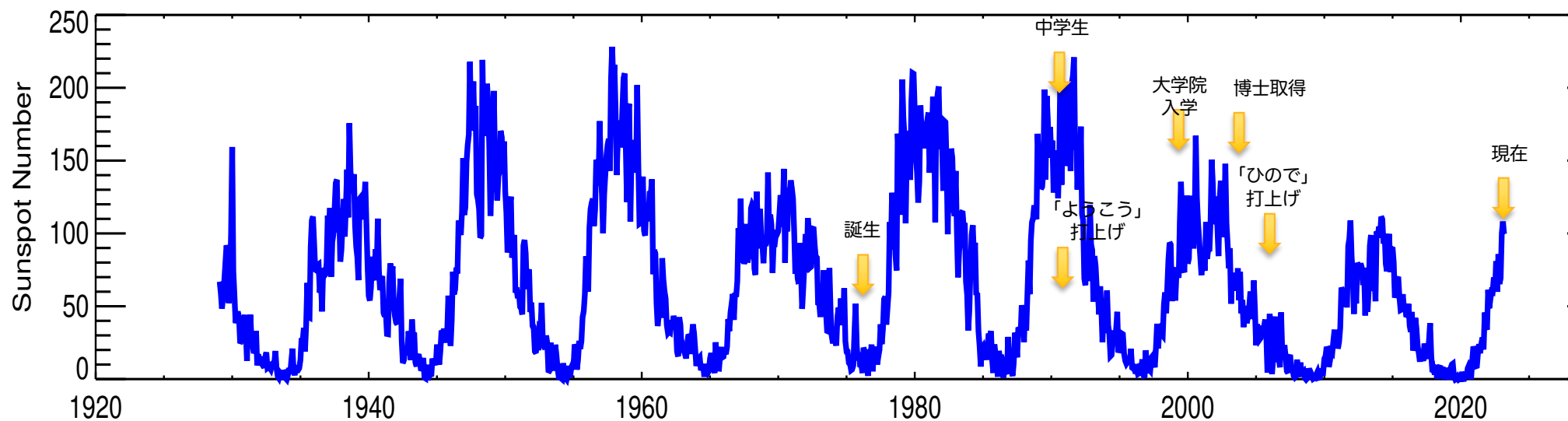
希望は教員&グループで

- 各プロジェクトで居室/机が割り当てられます
  - 多くが三鷹に在籍、ランチに籍を置く方もいます
- 研究指導やゼミなどはプロジェクト/研究室ごと
  - 国立天文台には多くの研究者(教員/ポスドク)がいます
  - 東大兼任教員以外の国立天文台のスタッフが指導に参加してもらうことも
  - 総研大の大学院生も一緒にゼミをやっている (総研大講義も受講可能)
- 他分野の研究の話を聞いたり、学生通しの横のつながりを持つのも大事
  - 東大大学院生の発表会
    - 2022年度は2日間x2回開催: 8月 (M2/D3発表)、3月 (M1/D1/D2発表)
  - 天文学教育研究センターの大学院生コロキウム(週1)への参加

- 学術振興会研究員 (DC1, DC2)
- 卓越大学院制度:
  - 宇宙地球フロンティア国際卓越大学院プログラム (IGPEES)
  - 変革を駆動する先端物理・数学プログラム (FoPM)
  - 修士1年の4月 or 10月から卓越RAとして17-18万円/月支給
  - プログラムの講義やセミナーへ参加
- SPRING GX (グリーントランスフォーメーション(GX)を先導する高度人材育成)
  - 博士課程学生への支援
- TA & RA 制度
- 詳しくは <https://www.astron.s.u-tokyo.ac.jp/about/supports/>

- 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
- 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
  - 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

# 太陽活動は人生にも影響を与える！！



新しい太陽研究と一緒に挑戦してみませんか？