

太陽を調べる光の目

京都大学・理学研究科附属
花山・飛騨天文台

一本 潔、協力:上野 悟

太陽研究最前線体験ツアー—
2014.8.25 - 29

いちもと きよし

一本 潔 (大阪出身)

附属天文台飛騨勤務

略歴:

1987.4 京大宇宙物理・天文台卒業

1987.5 国立天文台勤務; 乗鞍コロナ、日食、ひので、

|

2008.4~ 京大理・附属天文台

研究内容: 太陽観測(黒点、コロナ、フレア、)

飛騨の装置開発

太陽観測衛星Solar-C 光学望遠鏡の開発

昨年が存在場所:

飛騨~150日、京都~83日、その他~130日

太陽を調べる光の目 内容:

0. イントロ「飛騨天文台」、「宇宙の測りかた」
1. 太陽のみえ方
 - 光に含まれる情報
 - 光の種類とスペクトル
 - 太陽スペクトル
2. スペクトルのでき方
 - 連続光の形成
 - 線スペクトルの形成
 - 太陽の周辺減光と大気構造
3. 宇宙の中の「磁場」
 - 宇宙における磁場の働き
4. 磁場を測る
 - 偏光とゼーマン効果
5. 光を読みとる観測装置
 - 空間を分解する望遠鏡、シーイング
 - 波長を分解する分光装置
 - 偏光を分解する偏光解析装置
 - 世界の太陽望遠鏡
6. 京都大学理・附属天文台ですすめている観測研究
 - 飛騨天文台のとrikむ観測プロジェクト

北アルプスの麓
標高~1200m



京都大学飛騨天文台

長野県

日本

岐阜県

名古屋 Nagoya

Shizu

神戸 Osaka Kobe 大阪

© 2010 Europa Technologies
© 2010-ZENRIN
© 2010 Cnes/Spot Image
Data © 2010 MIRC/JHA

35° 46'00.47" N 137° 10'04.07" E 標高 634 m



飛騨天文台

国道158号

国道41号

高山市

至岐阜

0 5 10km



飛騨市

神岡

本郷

飛騨天文台

平湯

高山市

© 2010 Cnes/Spot Image
© 2010 Europa Technologies
© 2010 ZENRIN
© 2010 Geocentre Consulting

Google

画像取得日: 2002年9月2日

36° 13'59.26" N 137° 23'30.30" E 標高 1040 メートル

高度 37.12 キロメートル

飛騨天文台



飛騨天文台沿革：

- | | |
|----------|--------------------------|
| 1929年10月 | 花山天文台設立 |
| 1968年11月 | 飛騨天文台設立、管理棟・本館・60cm反射望遠鏡 |
| 1972年 4月 | 65cm屈折望遠鏡および新館完成 |
| 1979年 5月 | ドームレス太陽望遠鏡完成 |
| 1992年 3月 | 太陽フレア監視望遠鏡完成 |
| 2003年10月 | 太陽磁場活動望遠鏡(SMART)完成 |
| 2010年3月 | 太陽フレア監視望遠鏡ペルーに移設 |

飛驒天文台構成員 11.5人

常勤職員 5人

一本 潔 (教授)
上野 悟 (助教)
永田 伸一 (助教)
木村 剛一 (技術専門職)
仲谷 善一 (技術職)

非常勤職員

研究員 1.5
技能補佐員 1
技術補佐員 2
労務補佐員 2

花山天文台 9.5人

常勤職員 1人

柴田 一成 (教授・台長)

非常勤職員

研究員 2.5
教務補佐員 1
技術補佐員 3
事務補佐員 2 (分室)



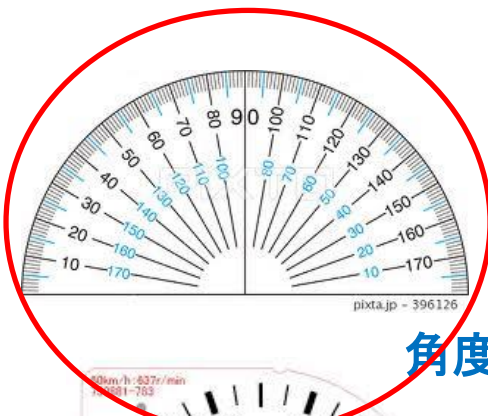
イントロ： 宇宙の測りかた

(飛騨天文台一般公開用スライド)

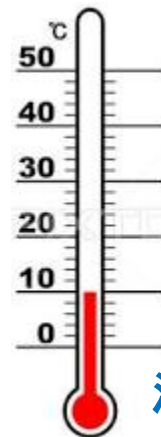
はか
測(計)る...



長さ・距離



角度



温度



重さ



時間



スピード



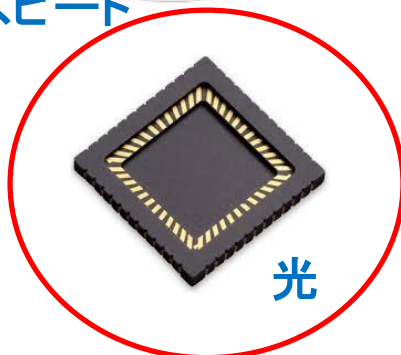
体積



電流・電圧



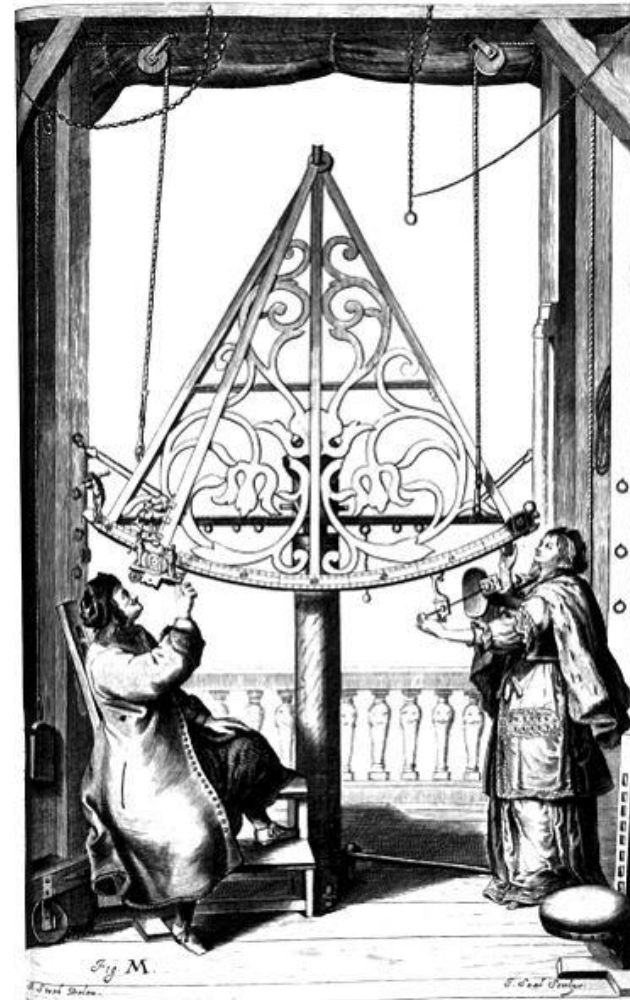
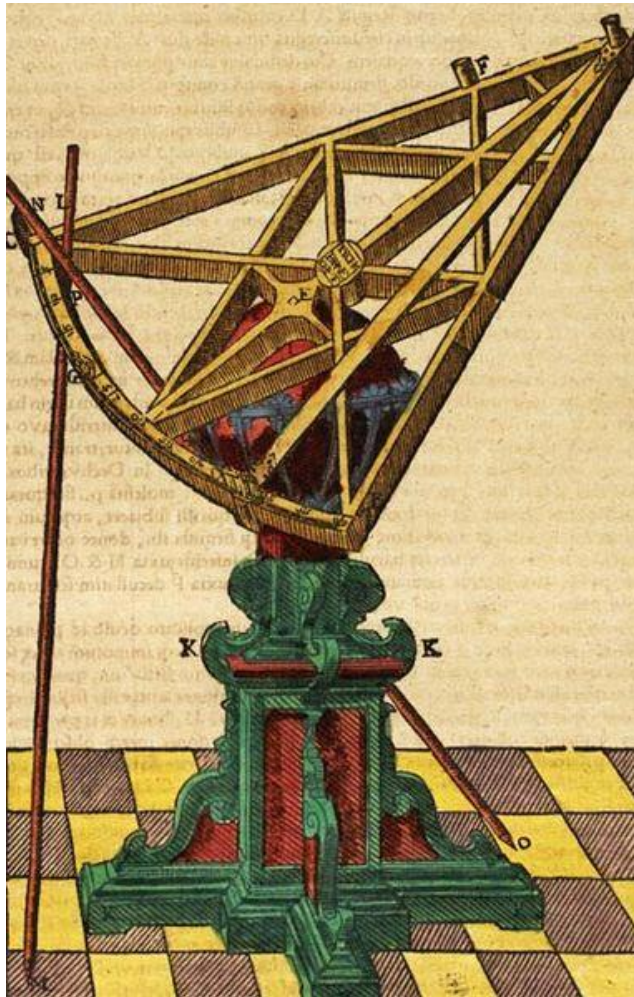
放射線



光

宇宙を計るのに使えるものは？

宇宙を計った分度器＝六分儀



ティコ・ブラーエの六分儀

星の「位置」を測定

星の「位置」から描かれた宇宙観



てんきゅう
天球

何か足りない……



こんてんぎ
渾天儀：天球の模型

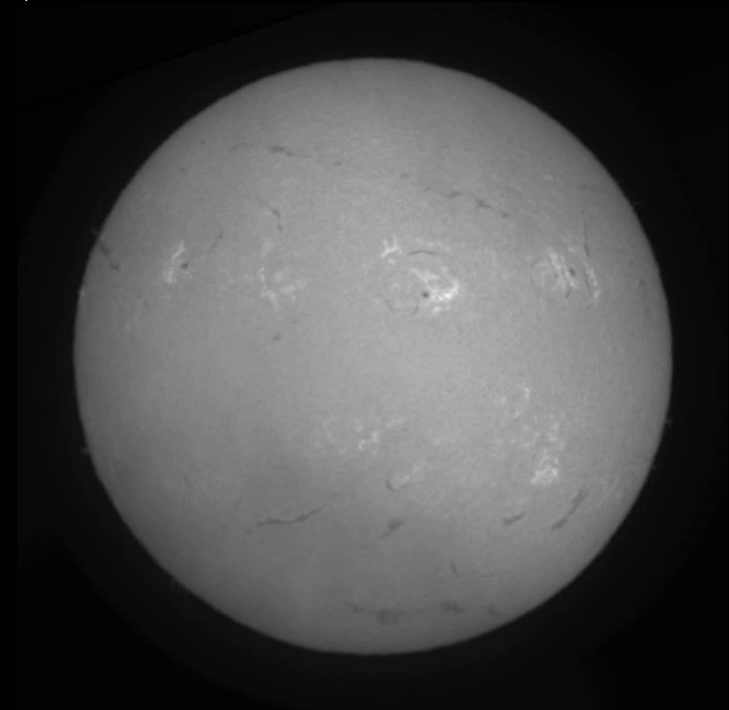
きんかんにつよく

去年おこった天体ショー：金環日食

2012年5月21日



国立天文台(東京三鷹市)



SMART 2012-05-20_21:11:41(p00)

飛騨天文台(高山市)

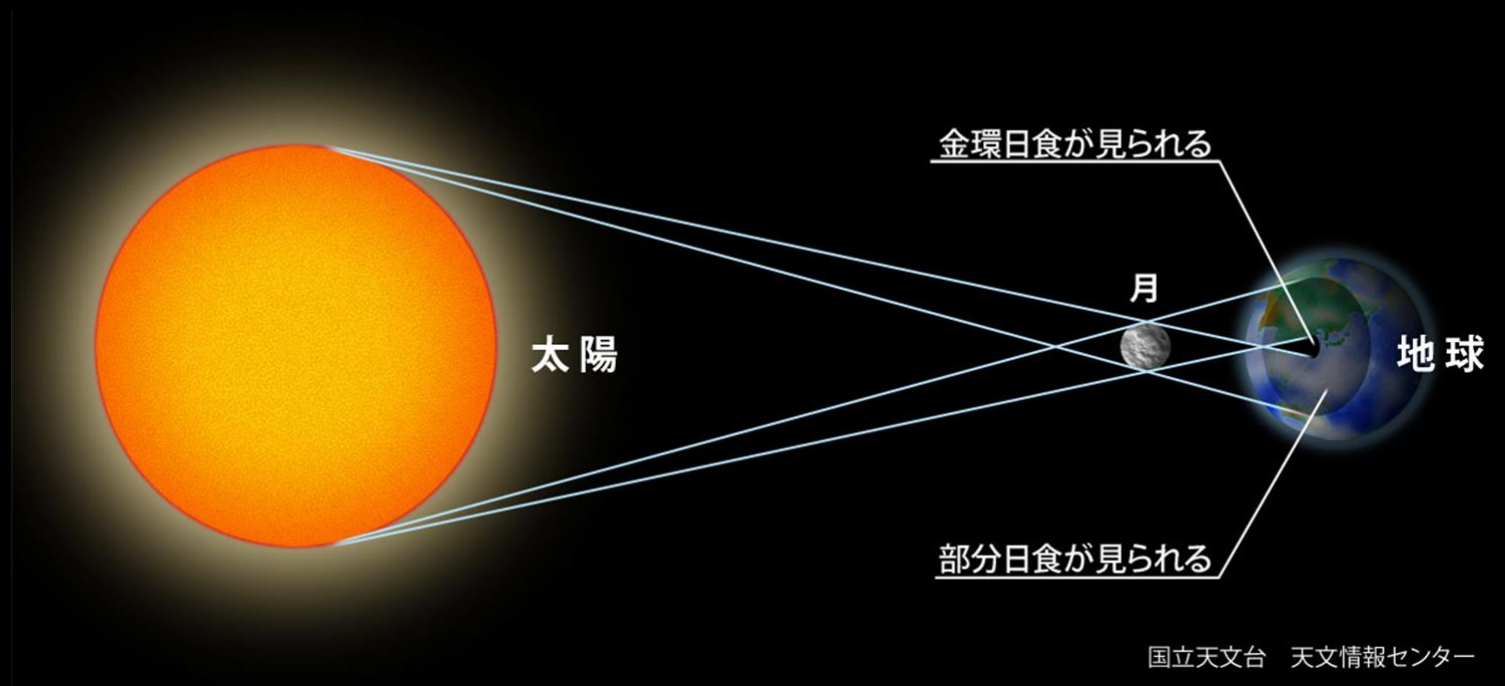
金環日食・部分日食

2012年5月21日



場所によって見え方がちがう。 なぜか？

遠くのもの(太陽)と近くのもの(月)の重なり具合が違う！



宇宙の奥行き・・・

太陽や月の「大きさ」はどのくらい？



2m先の1円玉
(2cm)



22m先の
サッカーボール
(22cm)



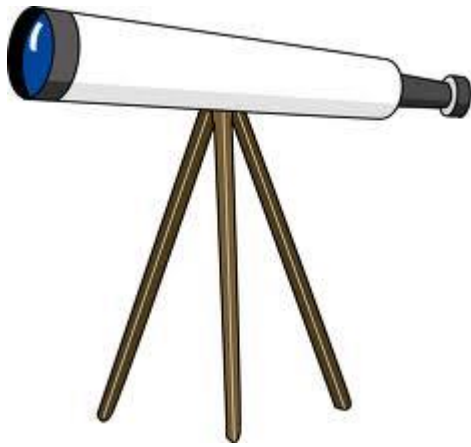
飛行機よりも
大きい



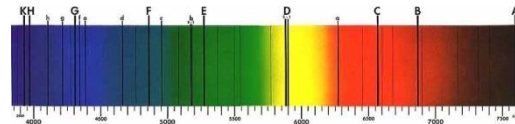
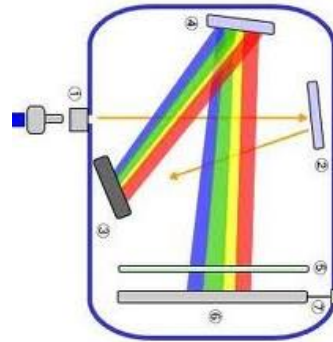
手を伸ばして持った5円玉の穴(5mm)

これって本当の大きさじゃない！

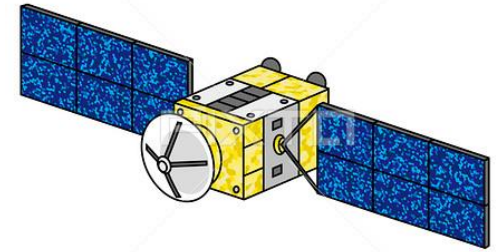
宇宙を計る道具



望遠鏡

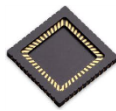


分光器



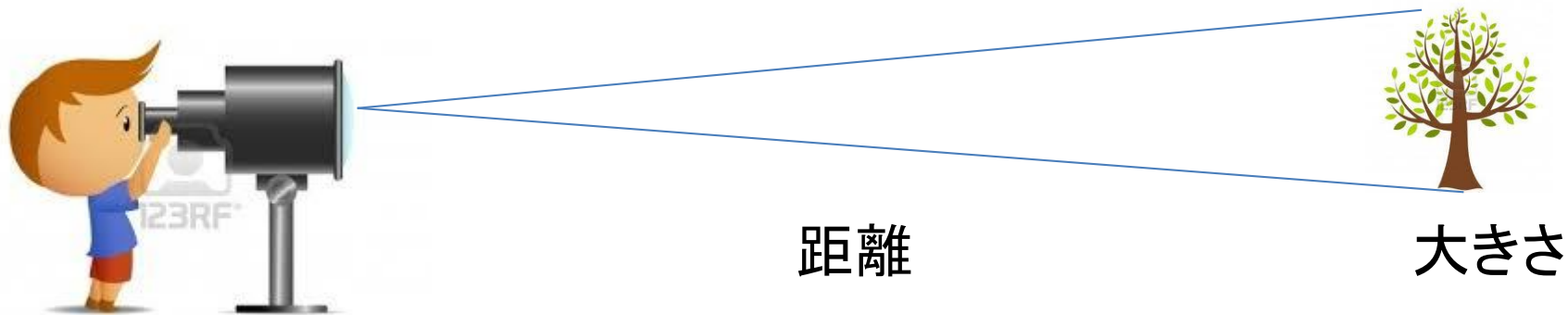
pixta.jp - 4499800

人工衛星



...

望遠鏡は高精度の分度器！？



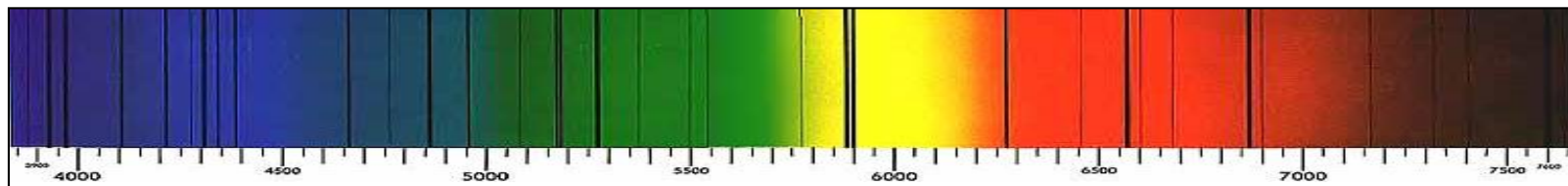
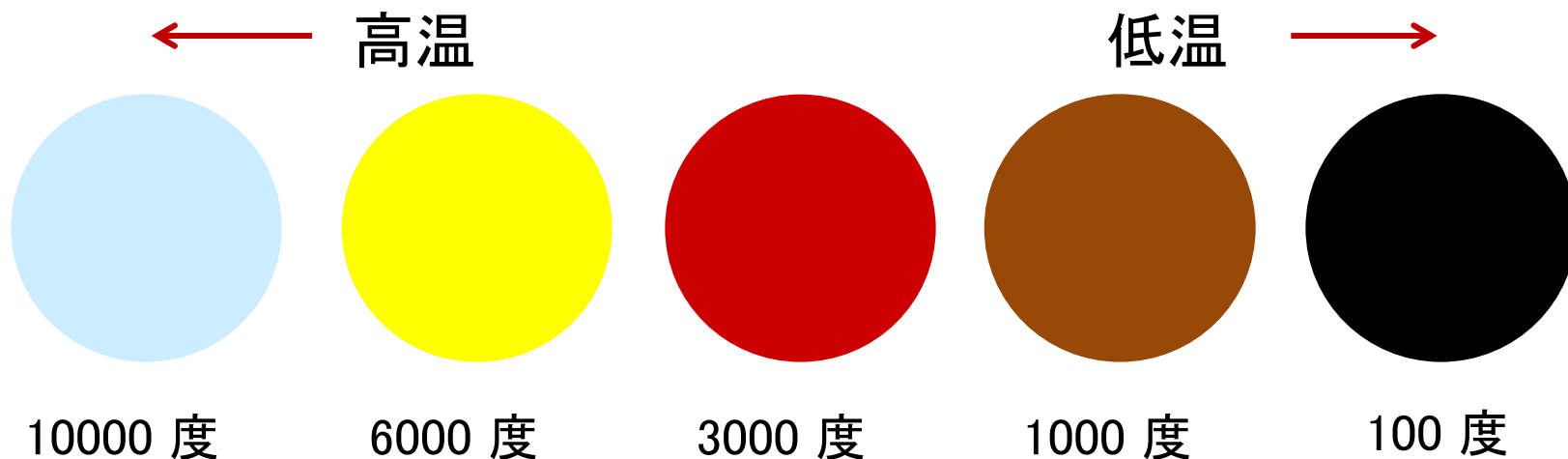
望遠鏡が遠くのものを見分ける能力 = 「分解能」

$$\frac{\text{大きさ}}{\text{距離}} = \frac{\text{光の波長}}{\text{望遠鏡の口径}}$$

口径 1 mm	100km 先の	50 m (高層ビル)	緑の光で
“ 4.5 cm	“	1 m (机)	
“ 20 cm	“	25 cm (ラーメンの器)	
“ 60 cm	“	8 cm (チャーシュー)	
“ 5 m	“	1 cm (ネギ)	

分光器は温度計！？

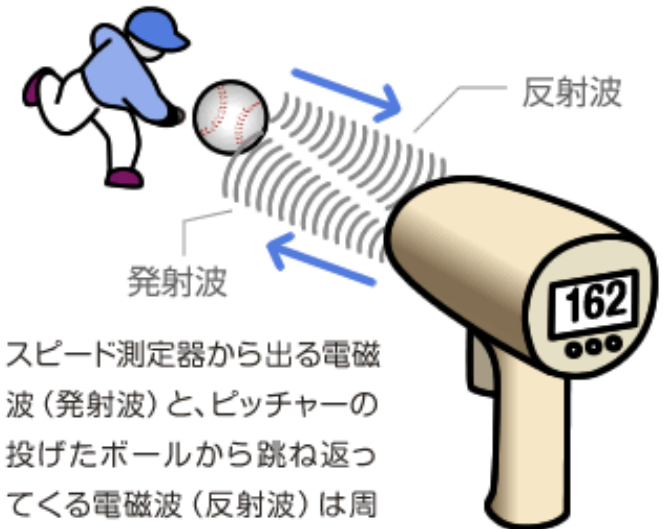
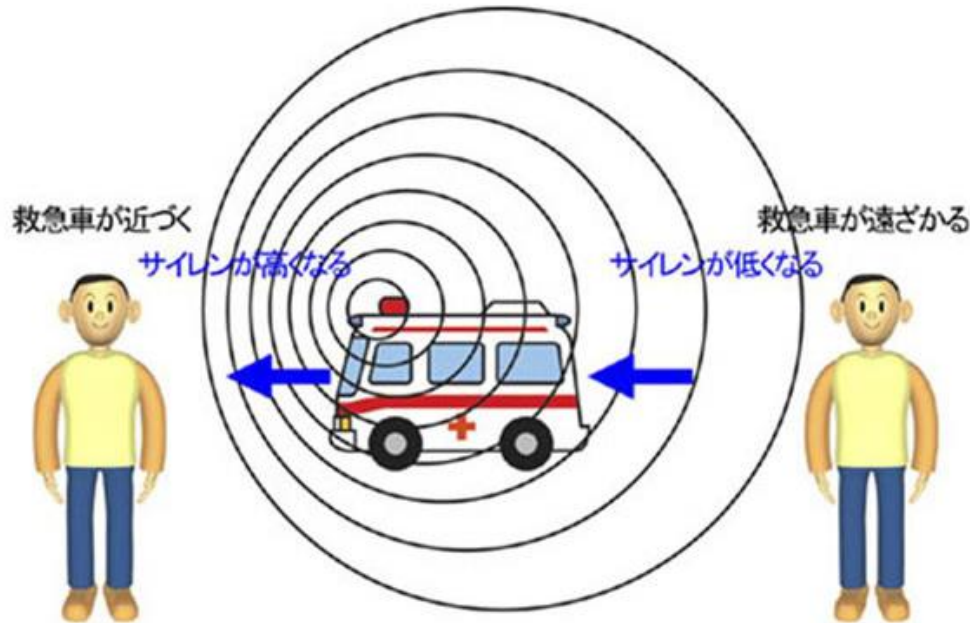
物体の温度と色



スペクトルのどこが明るいかで温度が分かる！

分光器はスピード計！？

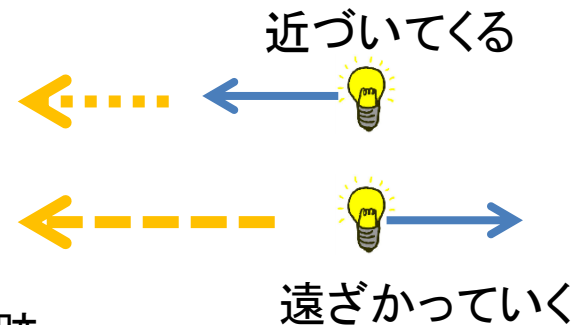
ドップラー効果・・・



光のドップラー効果



スペクトルに混ざった黒い線 - 星の元素の痕跡



飛騨天文台の2つの太陽望遠鏡

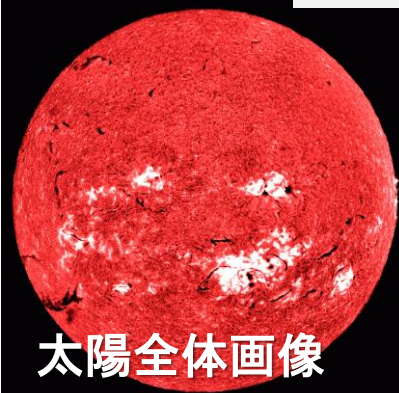
SMART望遠鏡
太陽全体を常に観測



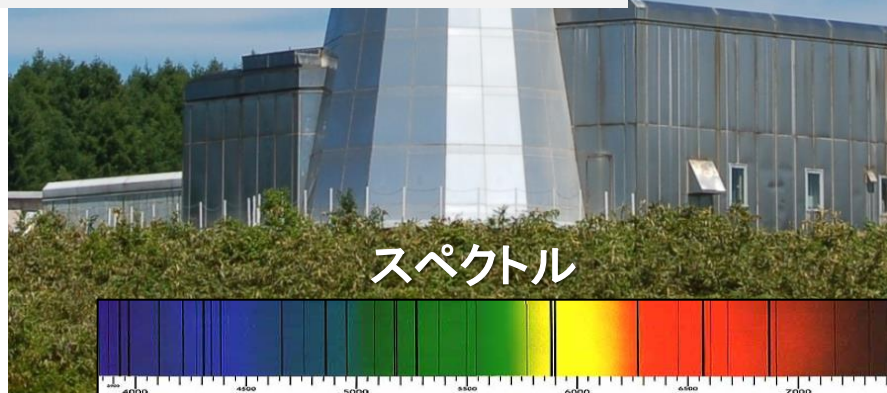
ドームレス太陽望遠鏡
世界屈指の分光器



これらをつかって
太陽の大きさを測ってみよう。

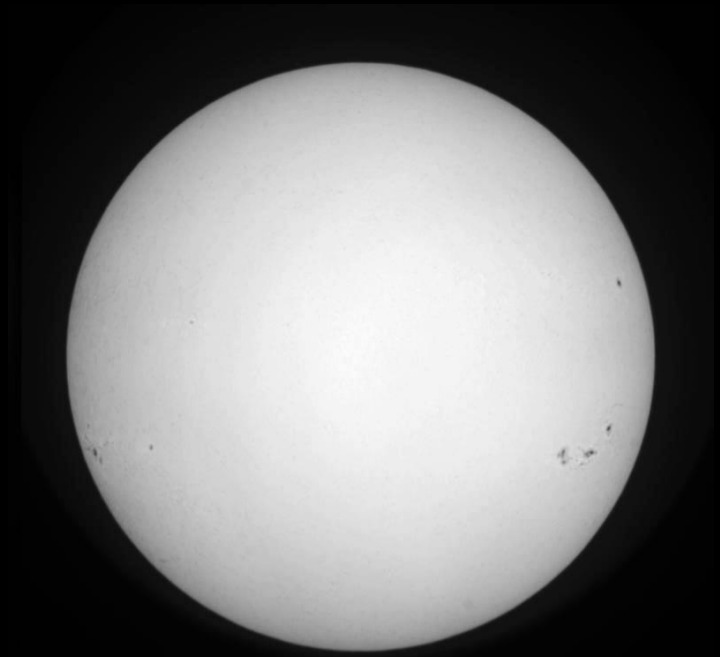


太陽全体画像



スペクトル

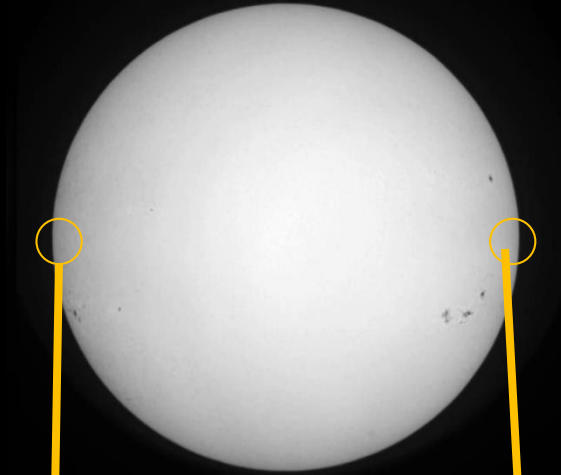
まずSMART望遠鏡



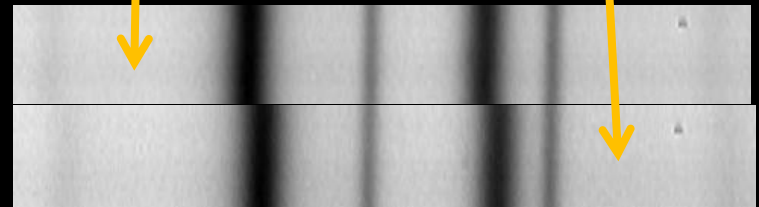
SMART 2012-07-07_00:35:55(m12)

太陽は約27日で1回転

つぎにドームレス望遠鏡



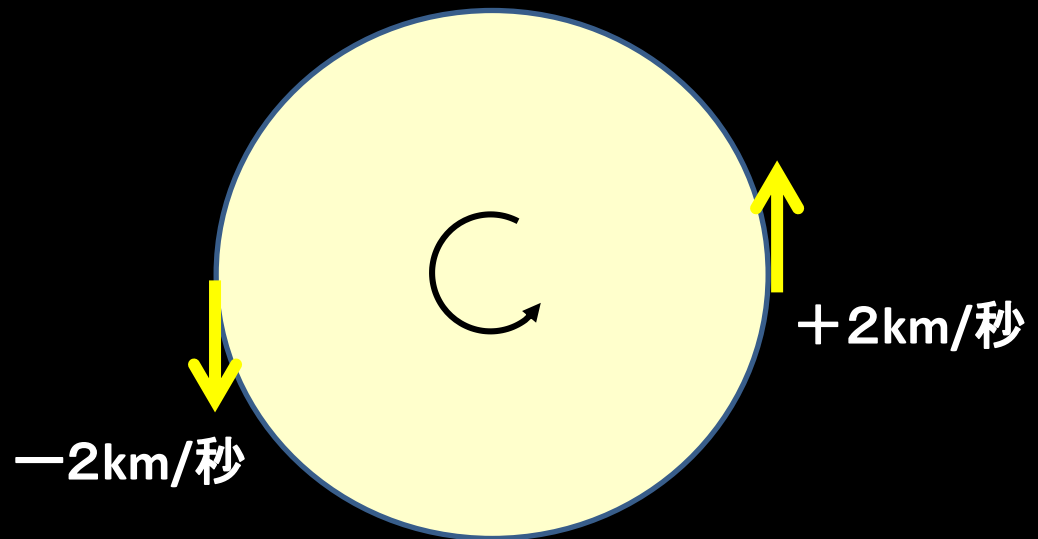
SMART 2012-07-07_00:35:55(m12)



太陽で作られる
スペクトル線

地球の大気(O²)で
作られるスペクトル線

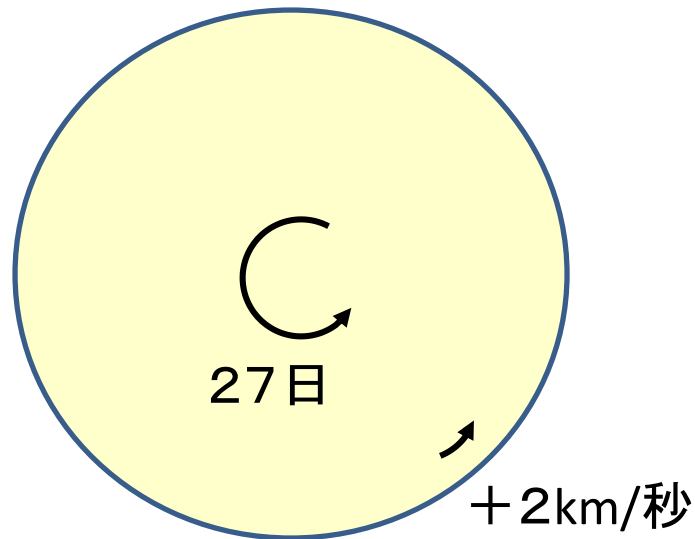
つぎにドームレス望遠鏡



太陽の表面は2km/秒で回転



太陽の大きさは？



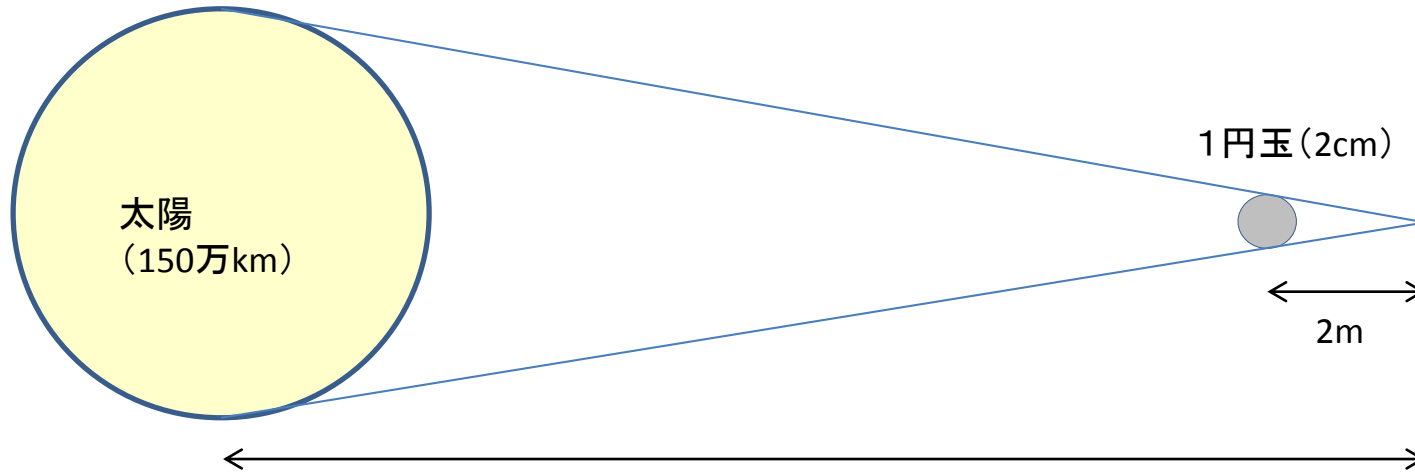
$$\begin{aligned} & \text{太陽の1周} \\ & = 2\text{km/秒} \times 27\text{日} \\ & = 2 \times 60 \times 60 \times 24 \times 27 \\ & = 470\text{万km} \end{aligned}$$

太陽の直径 = 1周 / 3.14(円周率) ~ 150万km

・ ・ 地球の約110倍

太陽はどのくらい離れているのか？

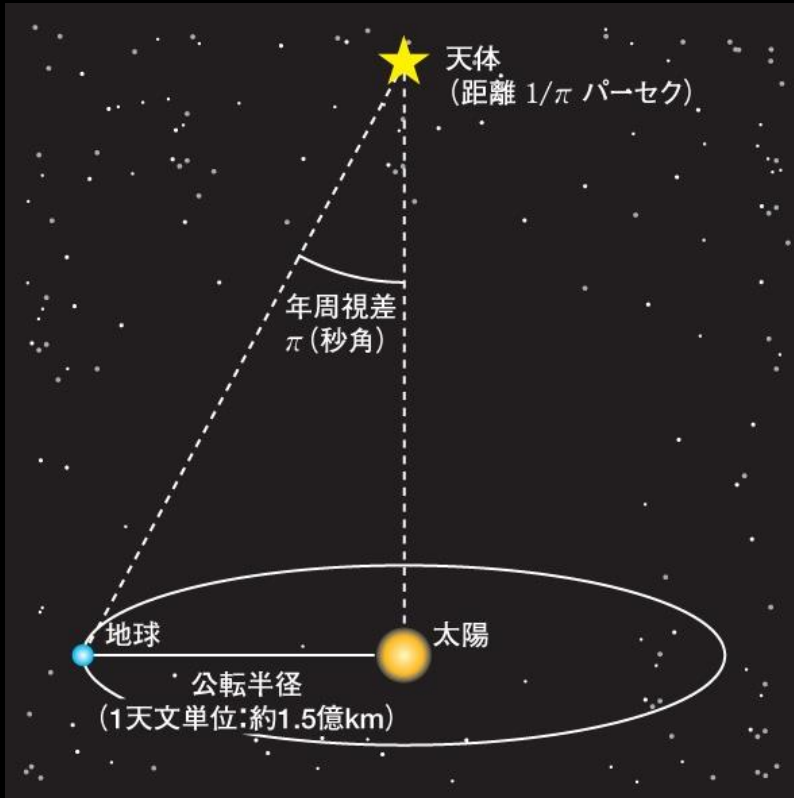
太陽の見かけの大きさ～2m先の1円玉(直径2cm)



$$\begin{aligned} \text{太陽までの距離} &= 2\text{m} \times 150\text{万km} / 2\text{cm} \\ &= 1\text{億}5\text{千万km} (=1\text{天文単位}) \end{aligned}$$

きより

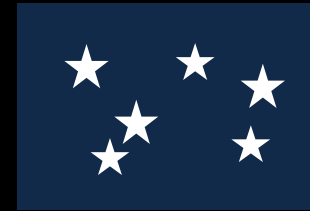
星の距離の測り方



春



秋



ある星は周囲の星に対して
半年ごとに位置がずれる(年周視差)。
ねんしゅうしき

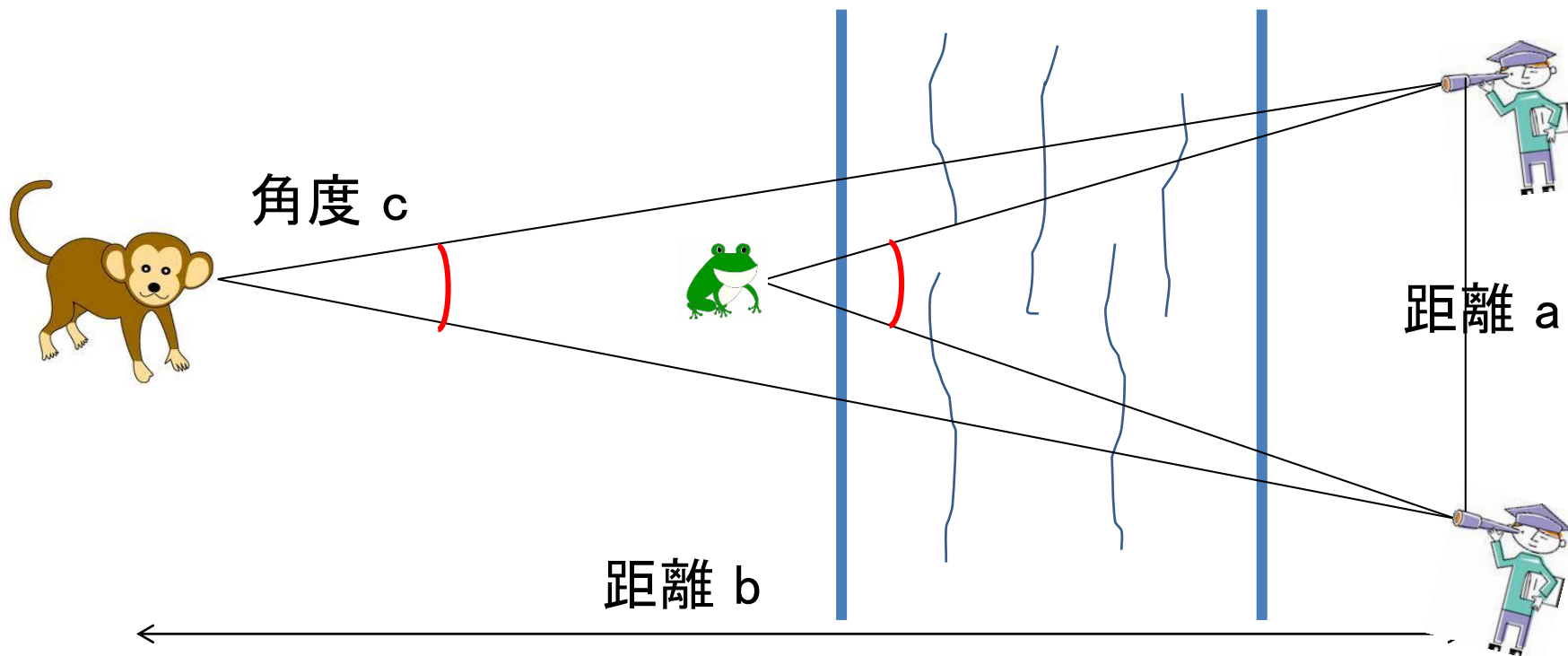
きっと手前にあるに違いない！
このみかけのずれから星までの距離
が分かる。

＝地球の公転軌道を用いた三角測量

そこまでいかに距離を測る方法

三角測量:

2つの地点から見こむ角度を測って距離を求める



$$\text{距離 } b = \text{距離 } a \div \text{角度 } c$$

年周視差で距離がわかった星

太陽からいちばん近い星：

α ケンタウリの年周視差 = 0.74秒角

(1秒角 = 1° の1/3600

= ここからみた乗鞍岳山頂のリンゴの大きさ)

α ケンタウリまでの距離は 26万天文単位 = 39兆km

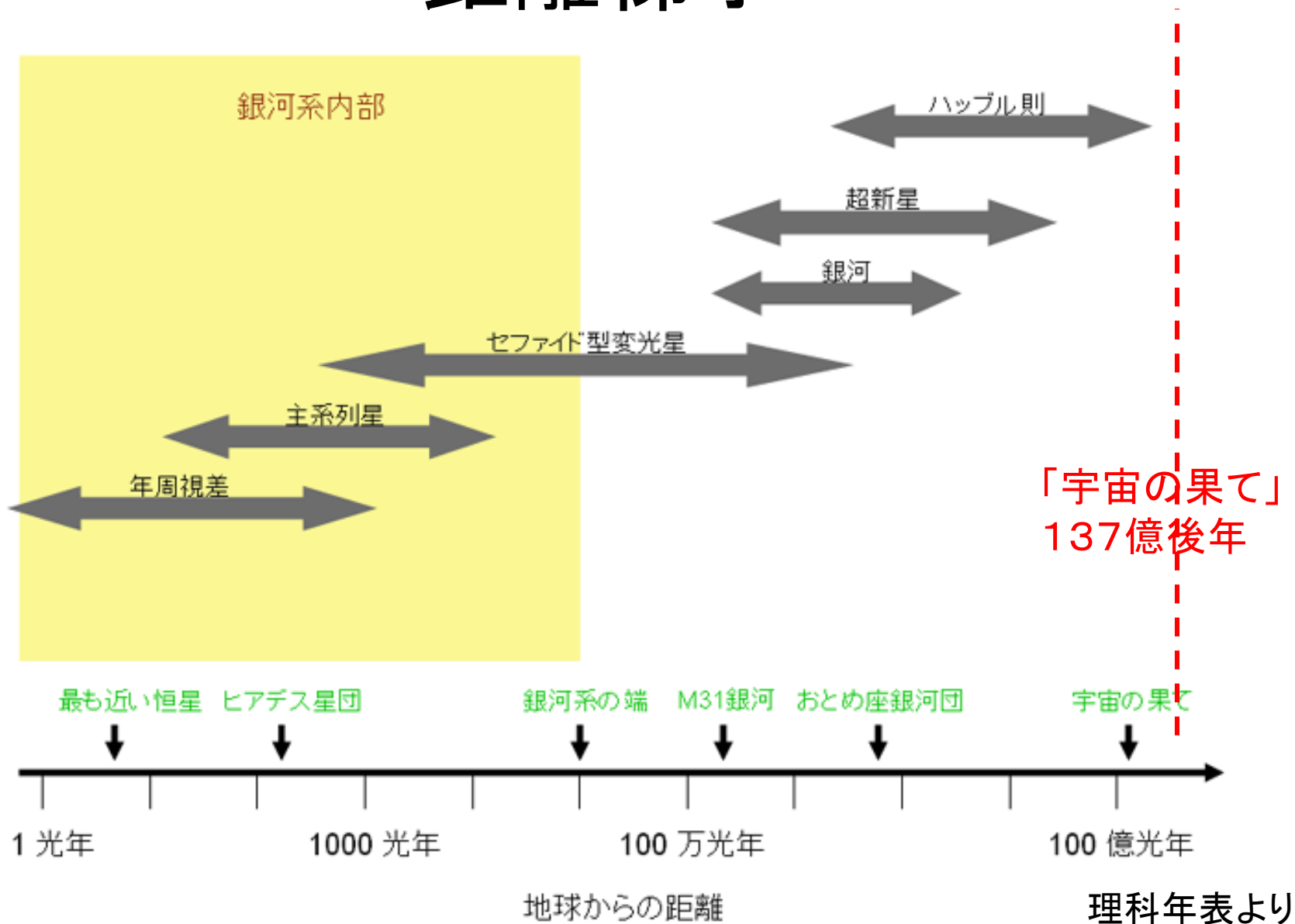
現在の「分度器」の最高精度 ~ 0.001秒角 (ヒッパルコス衛星)

(ここからみた京都にあるゴマ粒 (1mm) の大きさ)

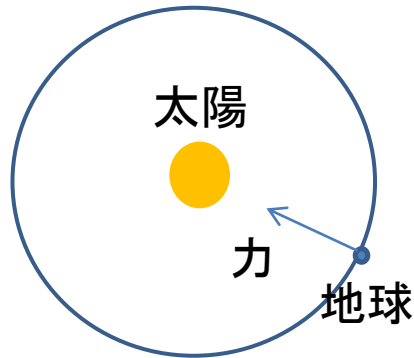
年周視差から距離が分かった星 ~ 約12万個

しかし、その背景(遠く)にはまだ無数の星がある！

距離梯子

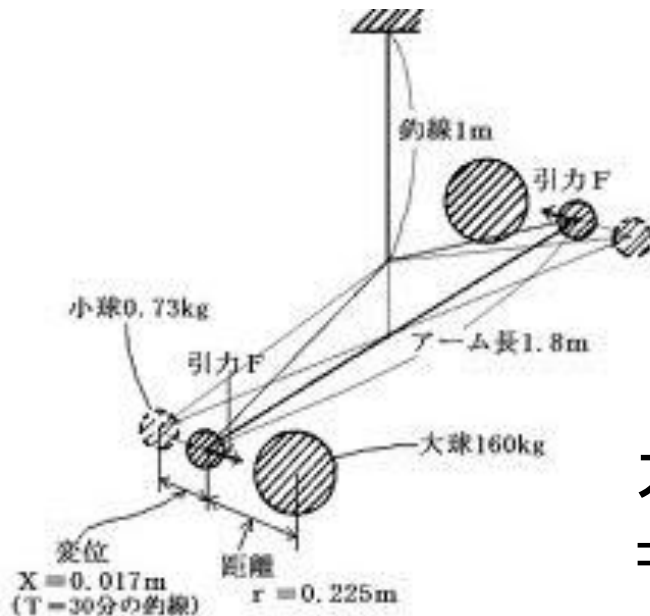


太陽の重さ(質量)はどうしてわかる？



地球は太陽から1億5000万km 離れたところを1年かけて回っている

これは太陽が地球を引きつけるから
(万有引力; ニュートンの法則)

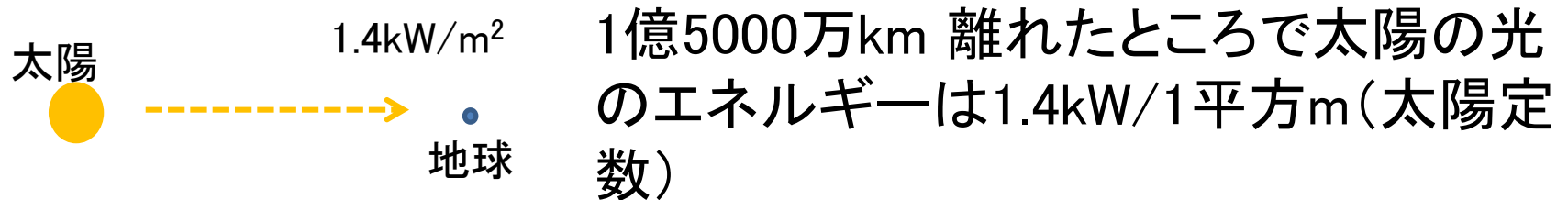


物体の質量と引力の関係を測る実験
(キャベンディッシュの実験)

これから太陽の質量が求まる！

$$\begin{aligned} \text{太陽の質量} &= 200000000000000000000000000000000\text{kg} \\ &= 2 \times 10^{30} \text{ kg} \end{aligned}$$

太陽の寿命は？



太陽は四方八方同じだけ光を出しているだろうから、
太陽が1秒間に放つ全エネルギーは $\sim 4 \times 10^{26}$ J/s [W]

太陽の燃料が石油だったとしたら・・・
太陽は500万年で燃え尽きてしまう。

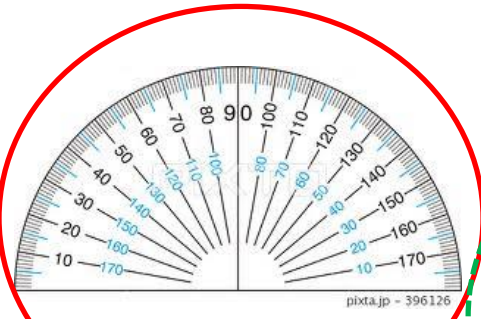
太陽の燃料は水素の核融合反応であることがわかった・・・
→ 太陽の寿命は約**100億年**(今45億歳)

はか

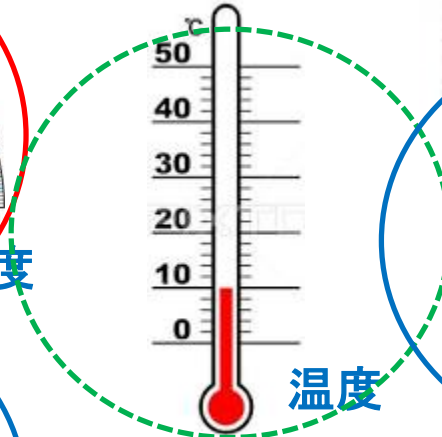
宇宙を測(計)る...



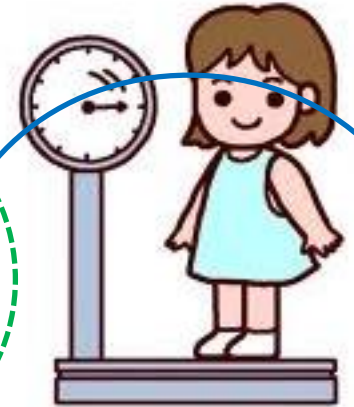
長さ・距離



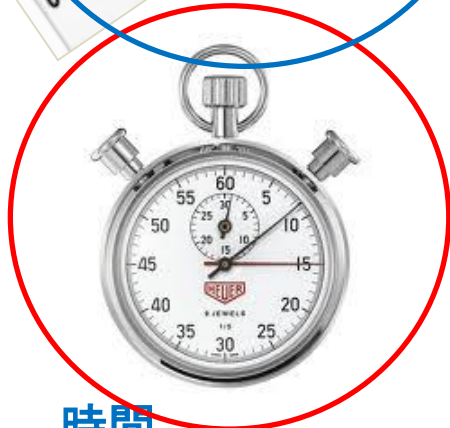
角度



温度



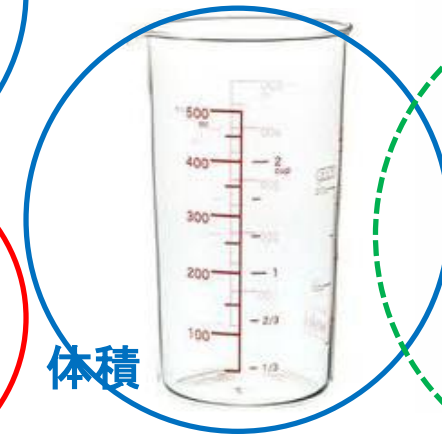
重さ



時間



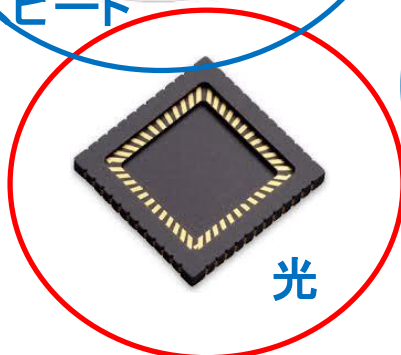
スピード



体積



放射線



光



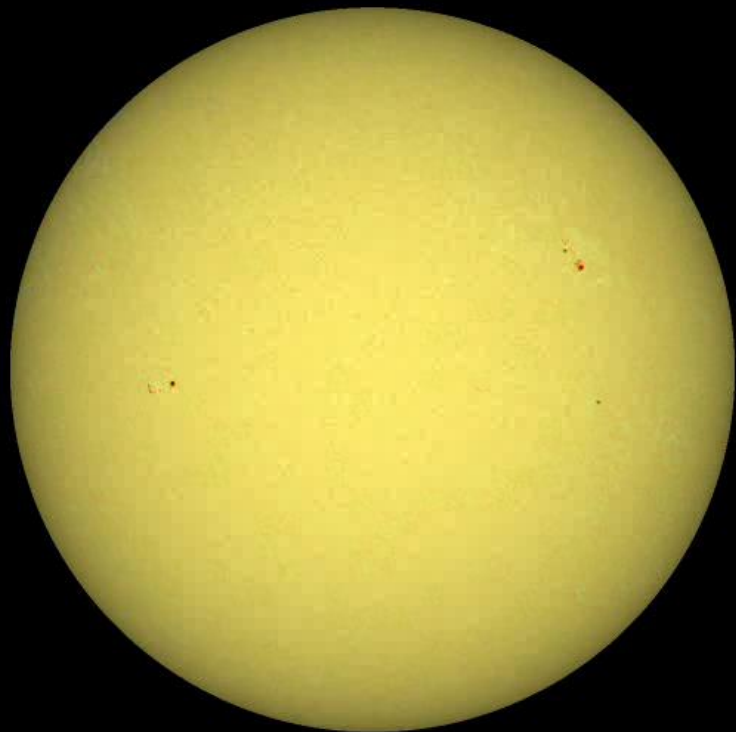
電流・電圧

宇宙を計るのに使えるもの

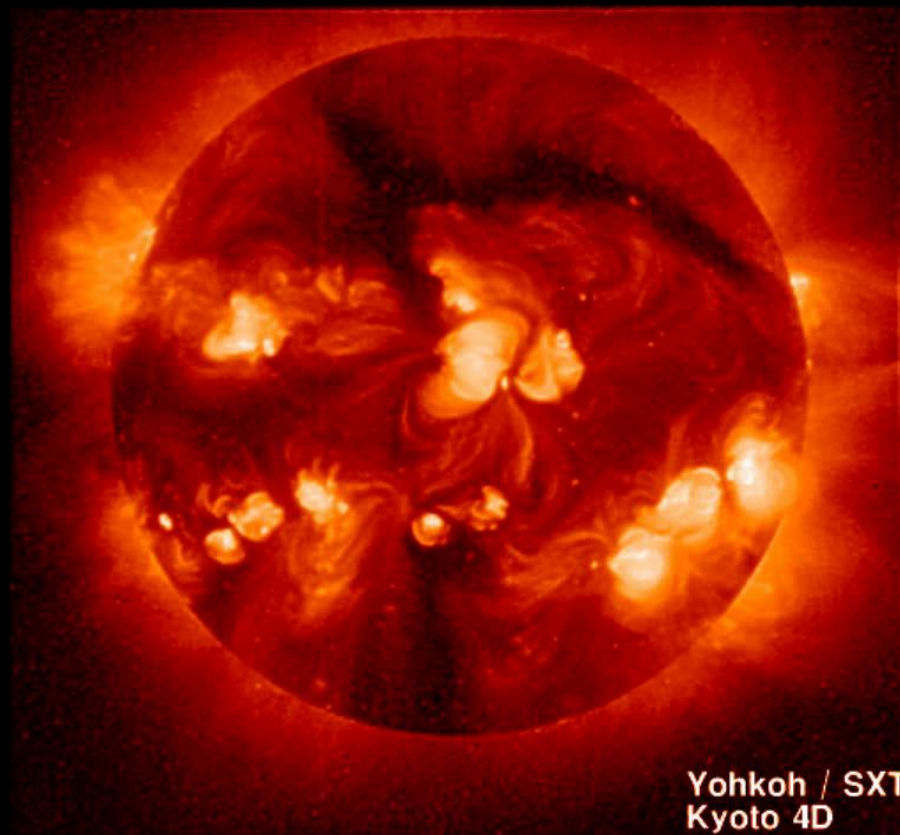
1. 太陽のみえ方

2つの異なる連続光で見た太陽

1999/10/30



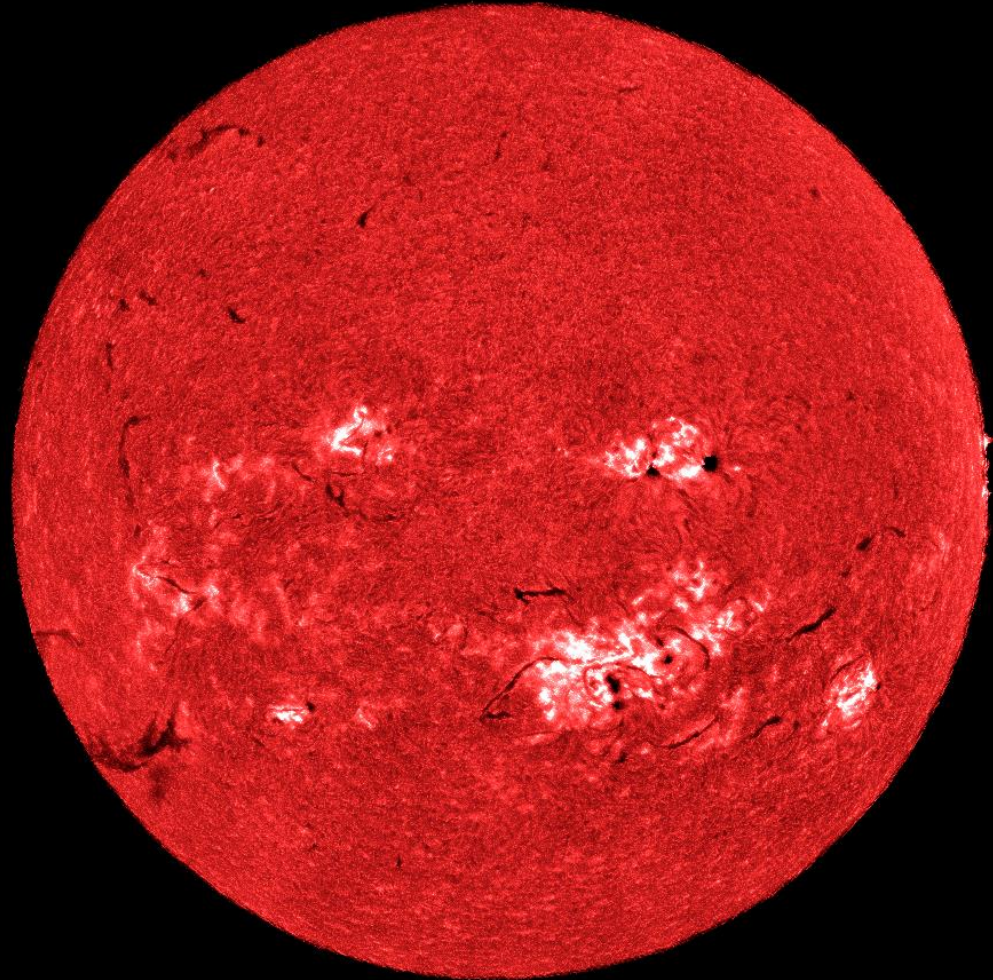
可視光



Yohkoh / SXT
Kyoto 4D

軟X線

H α 線(水素原子のスペクトル線)で見た太陽 (彩層=1万度: 光球の上層大気)



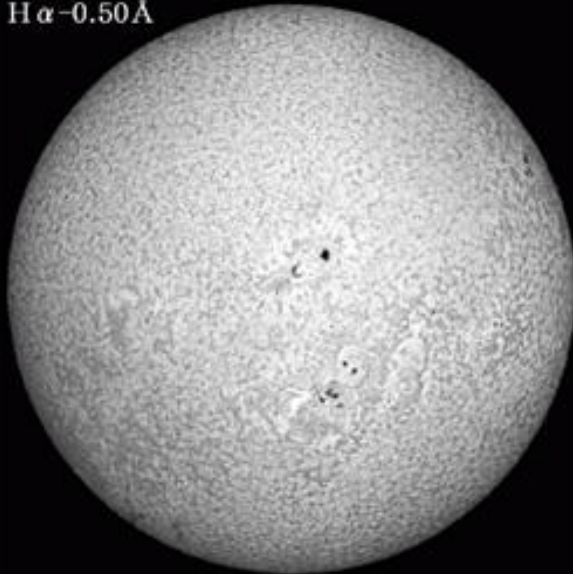
2003年10月30日
京大飛騨天文台
SMART望遠鏡

H α の異なる波長で観た太陽

Solar Magnetic Activity Research Telescope
" SMART " at Hida Observatory, Kyoto University

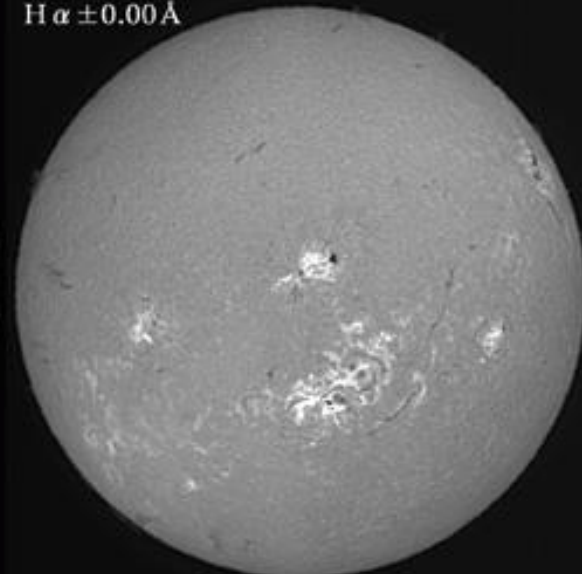
2003.10.29 01:19 UT

H α -0.50Å



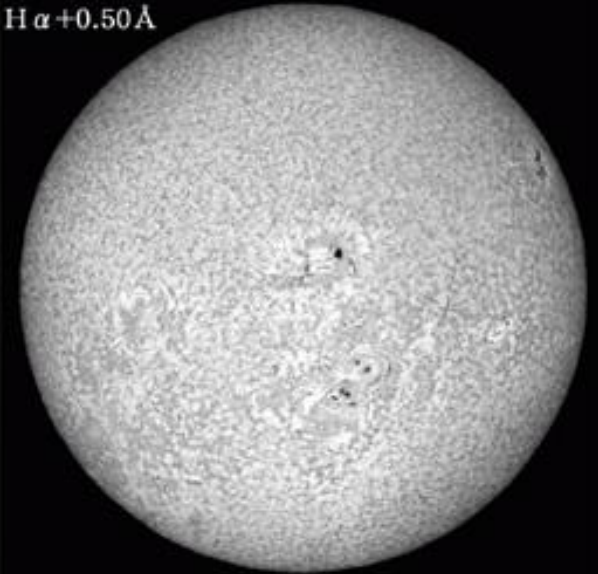
2003.10.29 00:42 UT

H α ±0.00Å

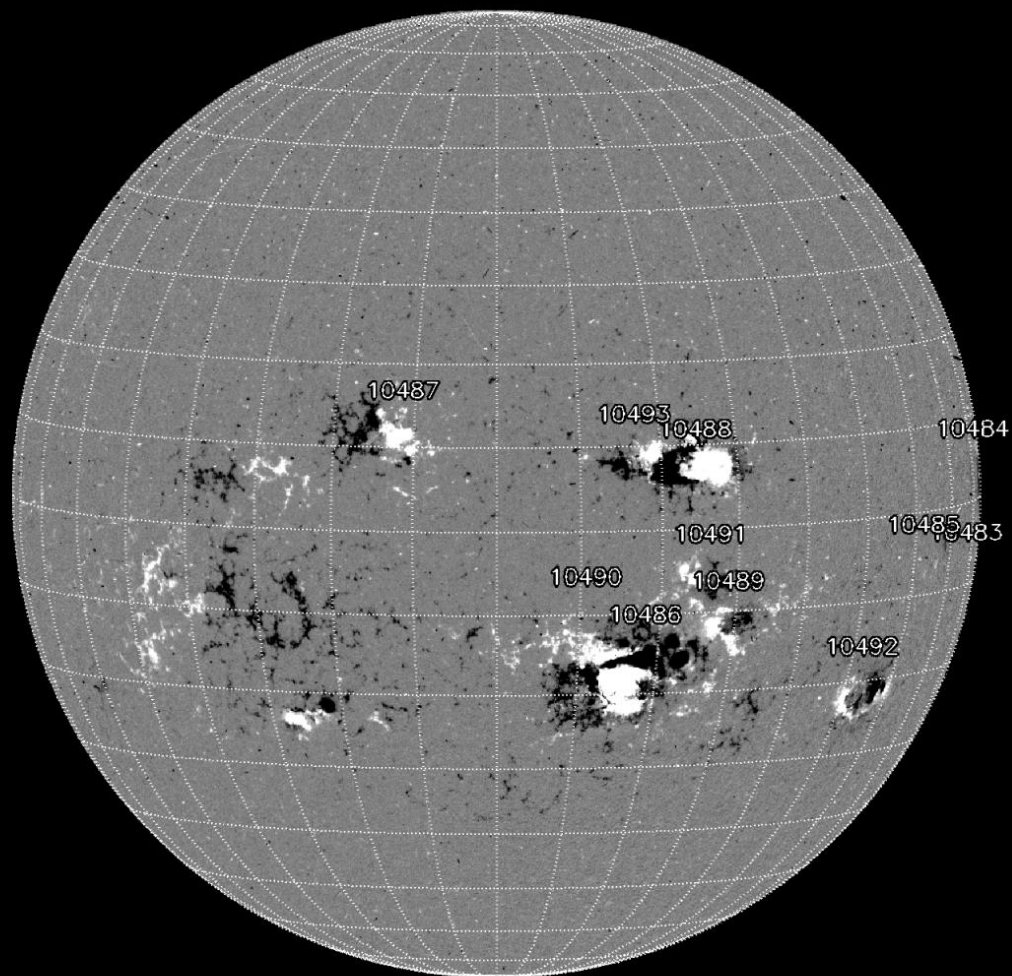


2003.10.29 01:39 UT

H α +0.50Å



「偏光」で観た太陽 磁場



2003年10月30日
MDI 磁場

なぜ光の種類によって見え方が異なるのか？

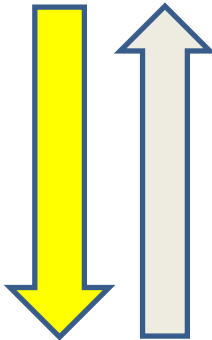
- ・物質は温度によって異なる波長の光を出すから
光の波長によって異なる温度のものが見える
- ・光の波長によって透明度が異なるから
波長によって見通す深さが異なる
- ・偏光：光をつくる領域に異方性があるから
磁場などのベクトル物理量の違いが見える

光がどうやってつくり伝わるかを理解することが、
「天体物理学」の出発点！

実験室

温度、密度、元素、運動、
磁場、...

実験

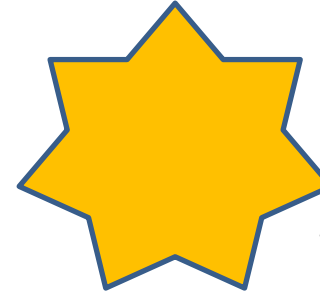


電磁気学
統計力学
量子力学
輻射輸送理論

スペクトル、偏光

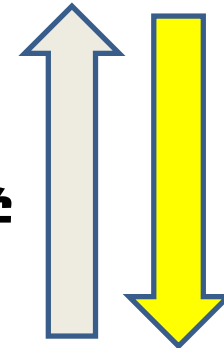
物理状態

天体



電磁流体力学
プラズマ物理

天体物理学



観測

光

スペクトル、偏光

光に含まれる情報

宇宙のことを知りたい！

その手がかりは光(電磁波)によってもたらされる

光に含まれる情報とは、、、

→ 強度 I の種々な次元に対する依存性

強度 $I(x, y, t, \lambda, p)$ --- 温度、密度

依存性 x, y 方向 --- 空間構造

t 時間 --- ダイナミクス

λ 波長 --- 運動、温度、密度、 z 方向空間構造、、、

p 偏光 --- ベクトルの物理量

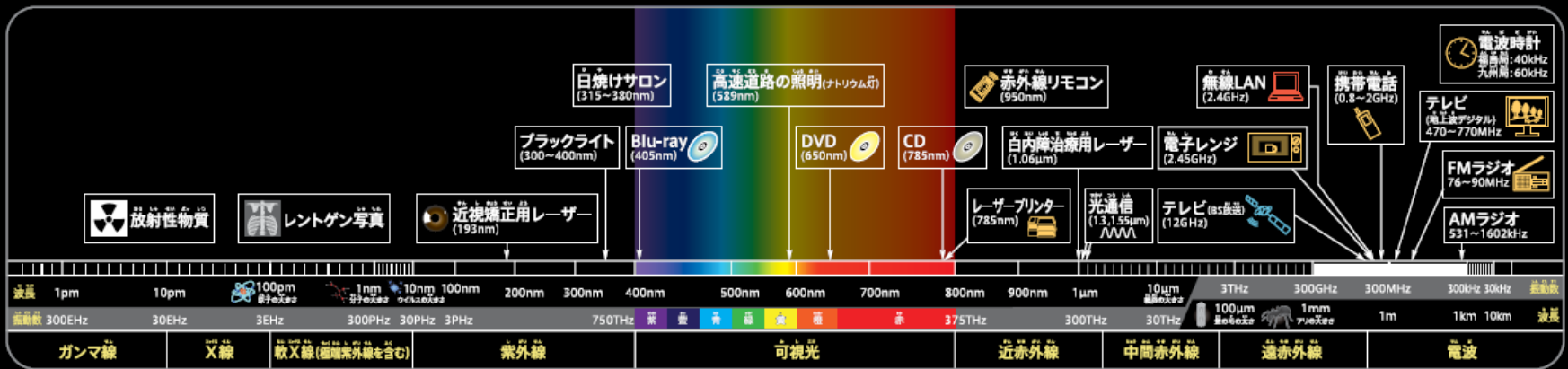
(磁場、電場、輻射場の異方性、、、)₄₂

光の種類とスペクトル

いろいろな光とスペクトル

京都大学理学天文台で撮影された太陽スペクトル

This image was taken by a Holographic Spectrograph of the Chuohei Solar Telescope (CST) at Hida Observatory, Graduate School of Science, Kyoto University, JPN



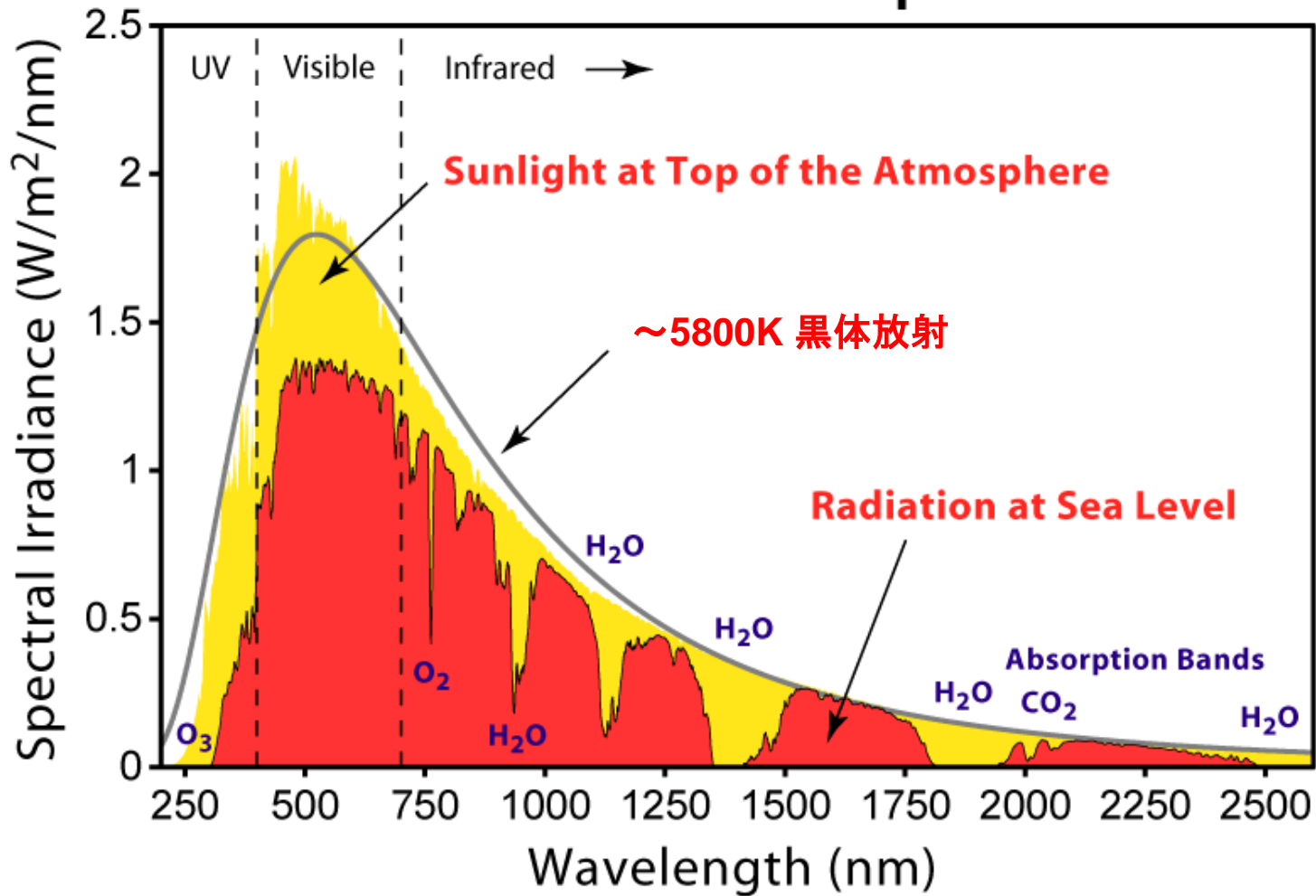
光は、空にかかる虹のように、赤から紫までの色に分けることができます。ニュートンは、私たちが目にする光が、いろいろな色の光が混ざったものであることを明らかにしました。光は波の性質をもっていることがわかっていますが、いちばん波長の長い光が赤、短い光が紫になります。

目で見える赤と紫の光の外側にも、目には見えない光が来ていることが発見され、赤外線、紫外線と名づけられました。その後、電波も同じ仲間であることがわかり、これらの「光」は合わせて電磁波、目に見える光は可視光とよばれるようになりました。X線、ガンマ線も同じ「光」の仲間です。

名古屋科学館

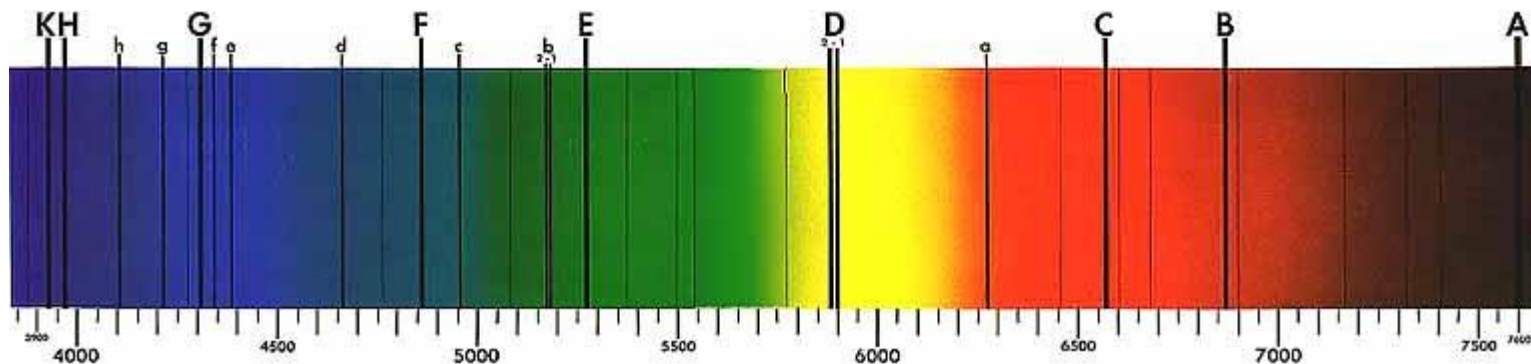
太陽スペクトル

Solar Radiation Spectrum



フラウンホーファー線

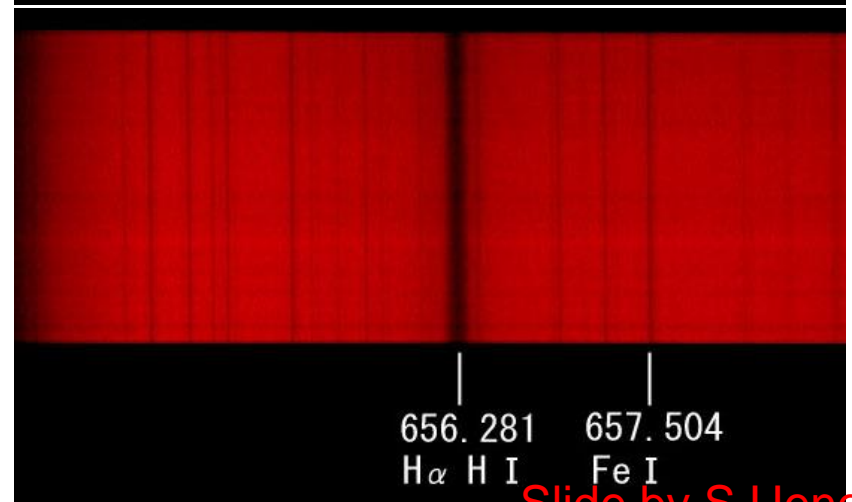
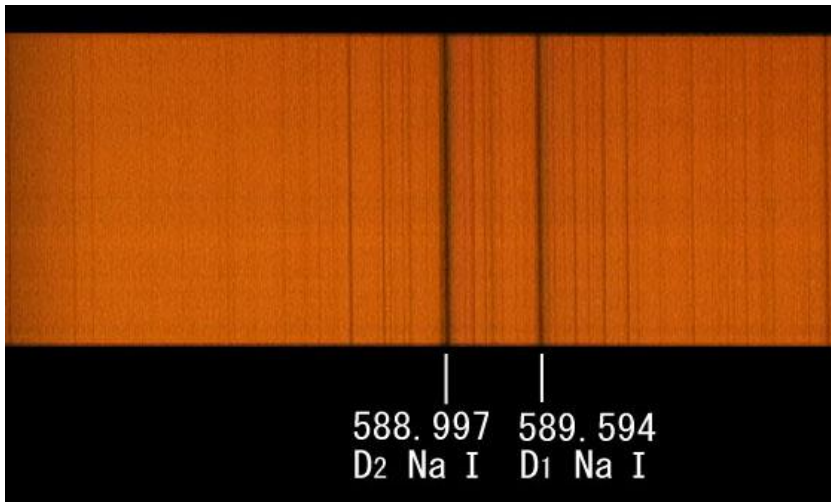
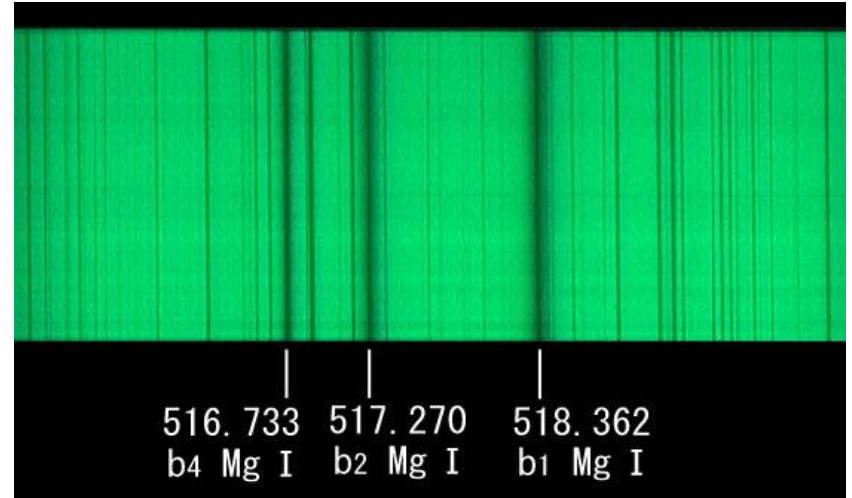
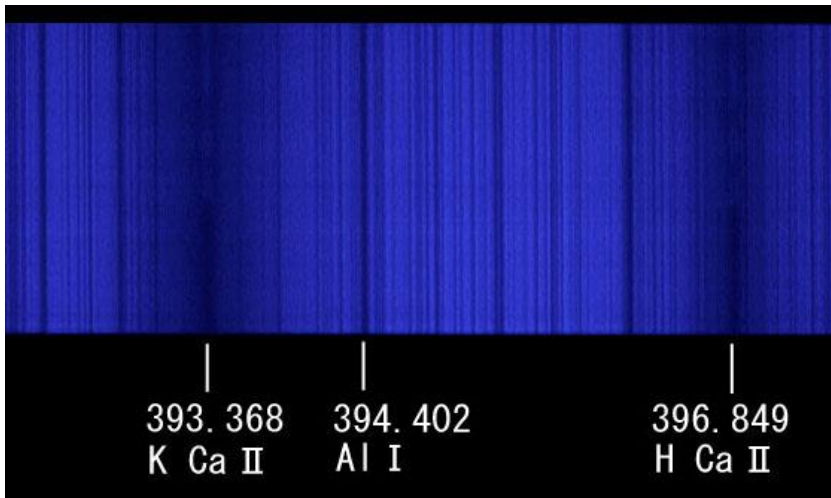
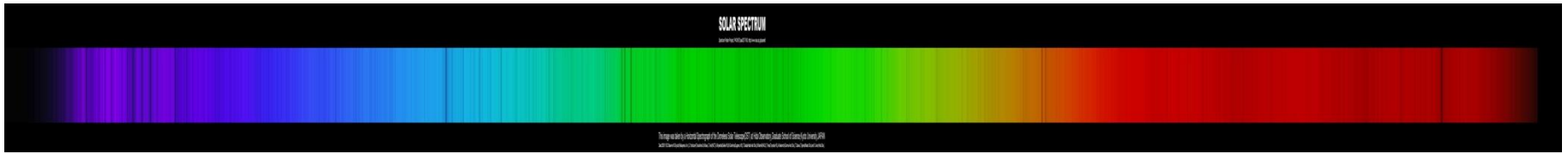
1814、ドイツの物理学者 [ヨゼフ・フォン・フラウンホーファー](#)



A線	O ₂	759.370 nm
B線	O ₂	686.719
C線	H α	656.281
D ₁ 線	Na	589.594
D ₂ 線	Na	588.997
D ₃ 線	He	587.565
E ₂ 線	Fe	527.039
F線	H β	486.134
G線	Fe	430.790
H線	Ca+	396.847
K線	Ca+	393.368

◆太陽可視光スペクトルと吸収線

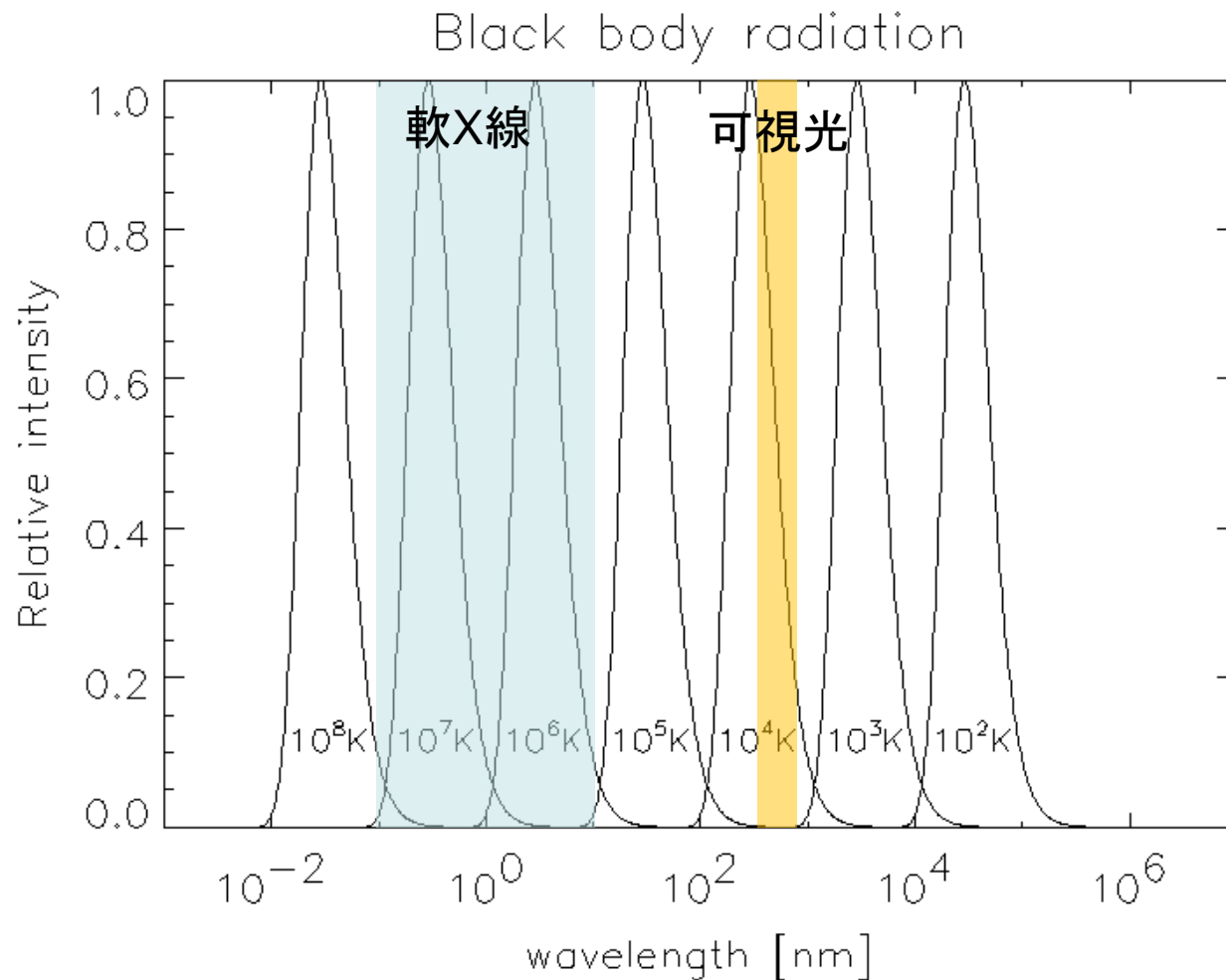
太陽可視光域のスペクトル写真(撮影:飛騨天文台、岡山天体観測所)



2. スペクトルのでき方

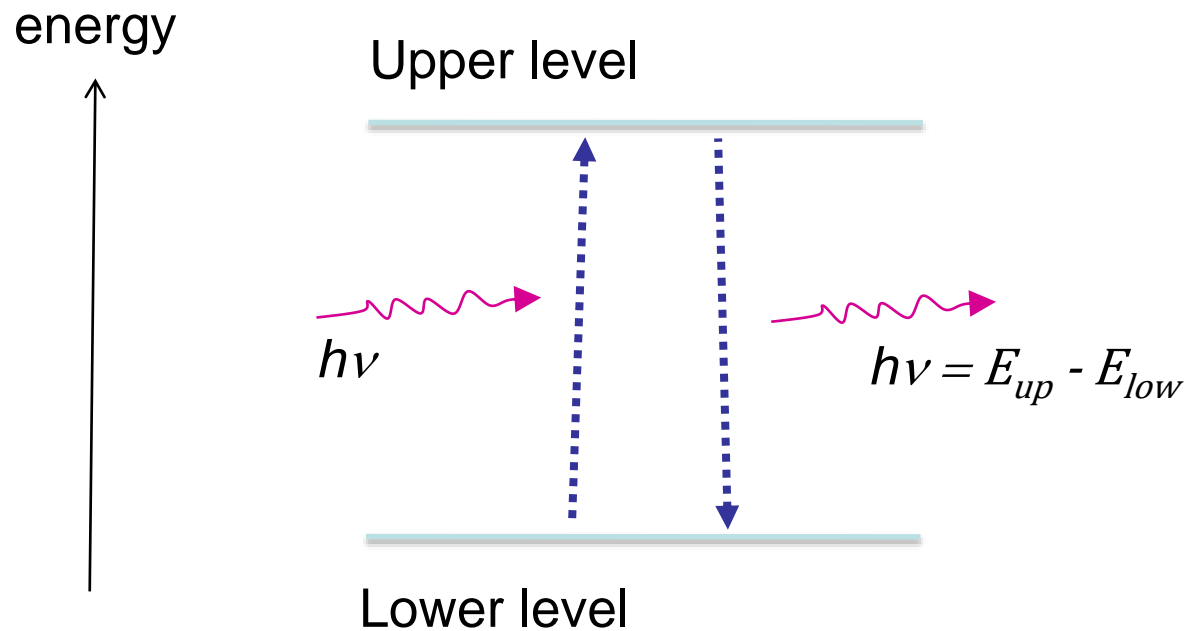
温度と光のスペクトル(連続光)

黒体放射
$$\pi B_{\lambda}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc / kT \lambda) - 1}$$

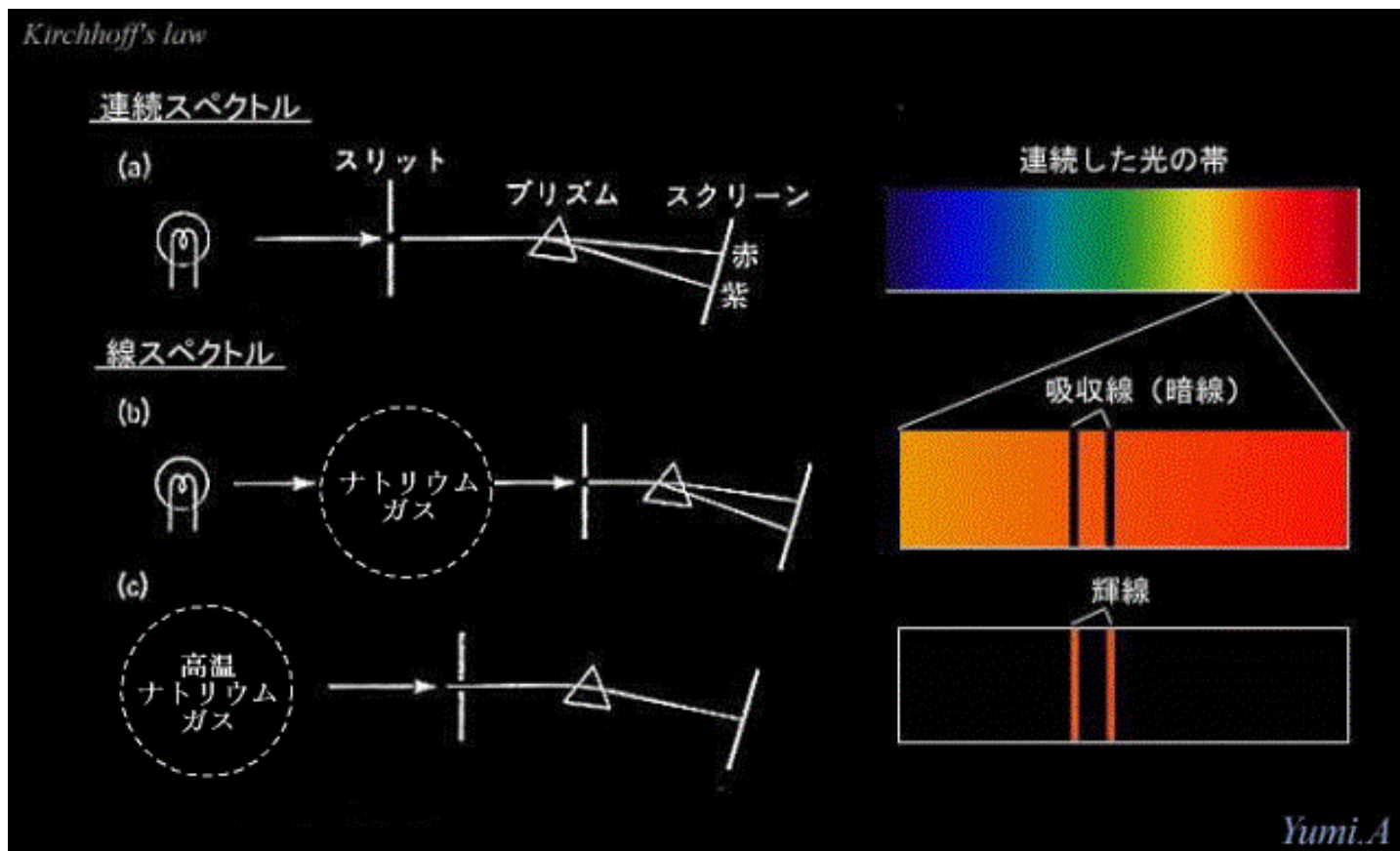


原子状態と線スペクトル

原子の線スペクトル \leftrightarrow 2つのエネルギーレベル間の状態遷移



輝線スペクトルと吸収線スペクトル

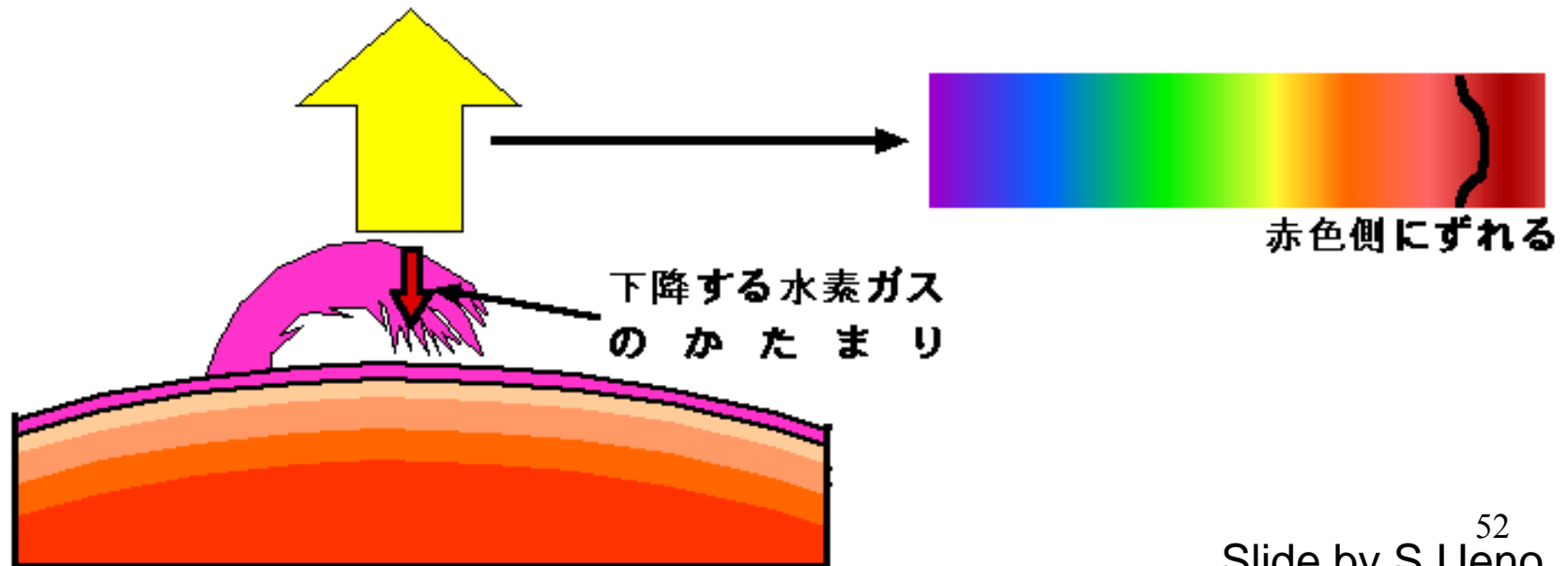
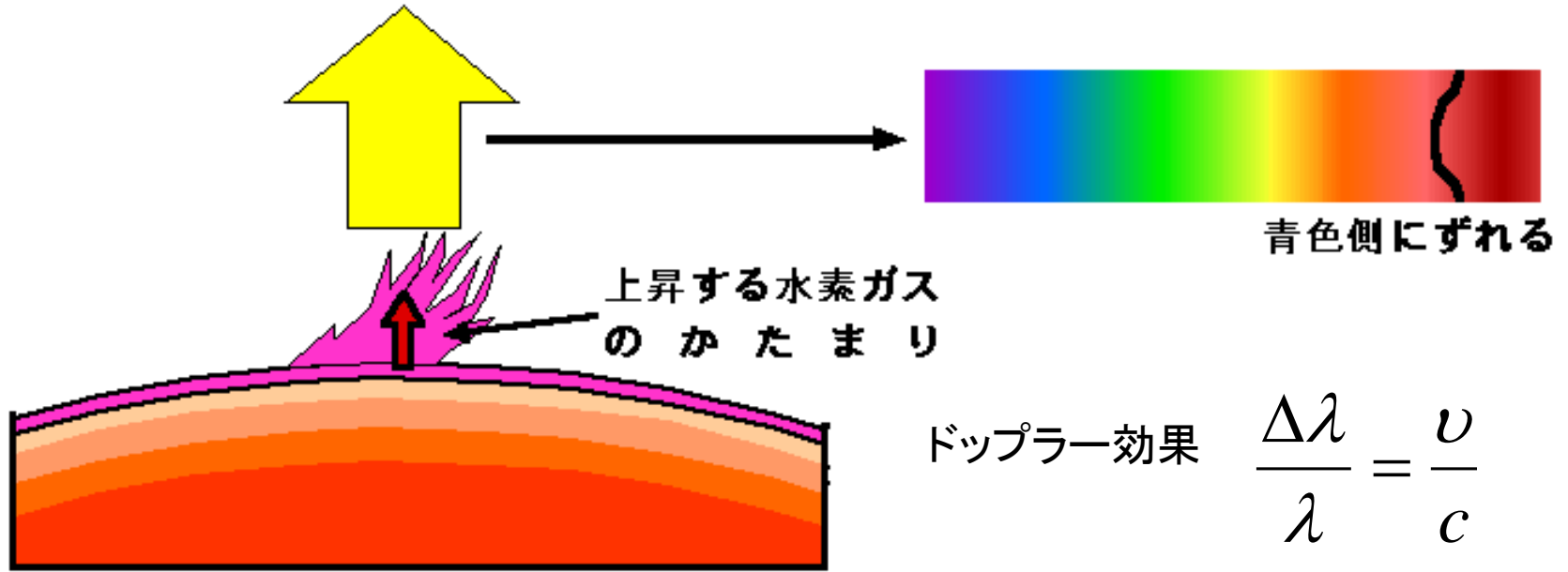


Yumi.A

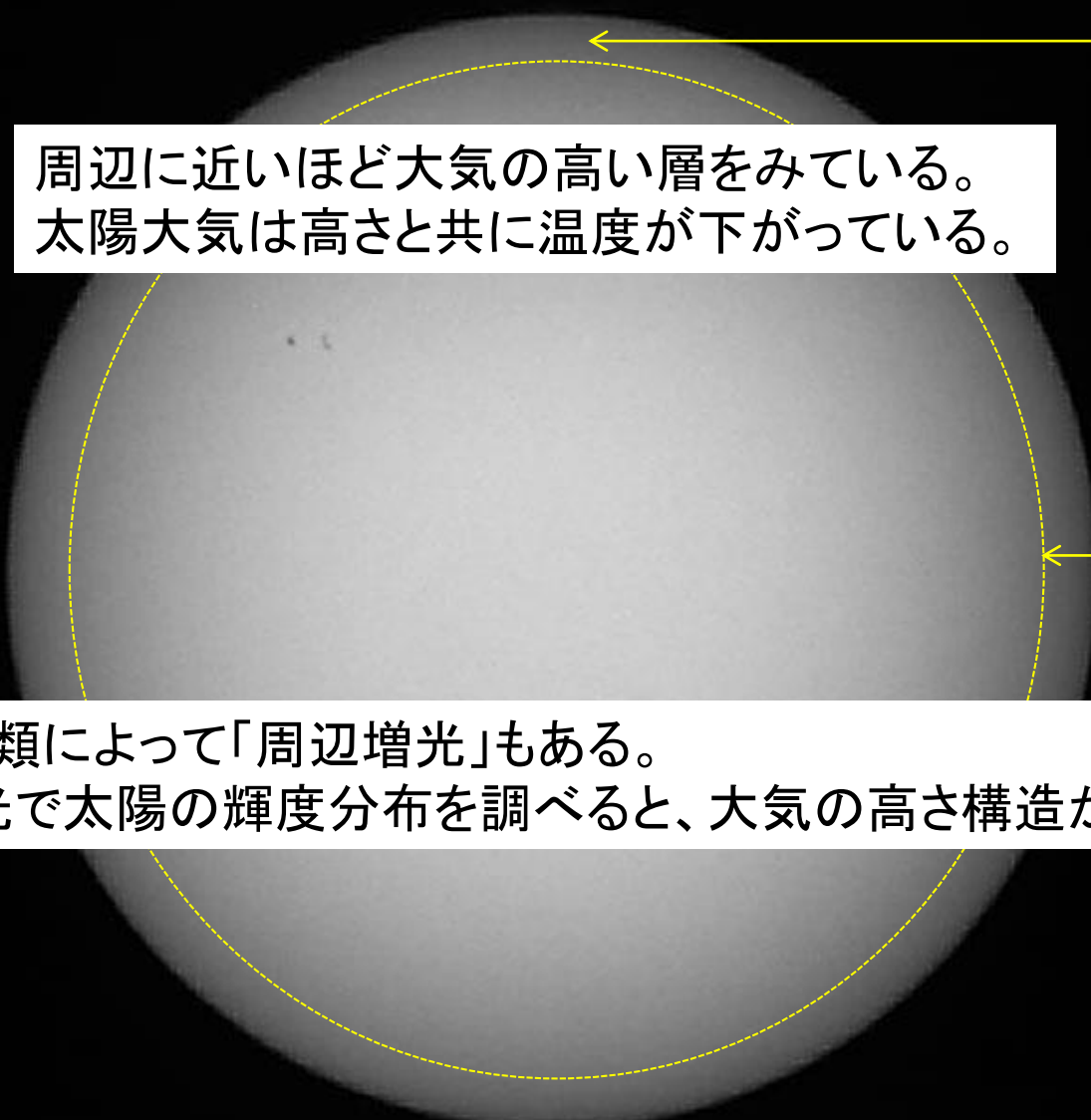
<http://www.kasaoka.okayama-c.ed.jp/kyoumu/kokusai/kokusai312a.htm>

美星天文台提供

ドップラーシフト



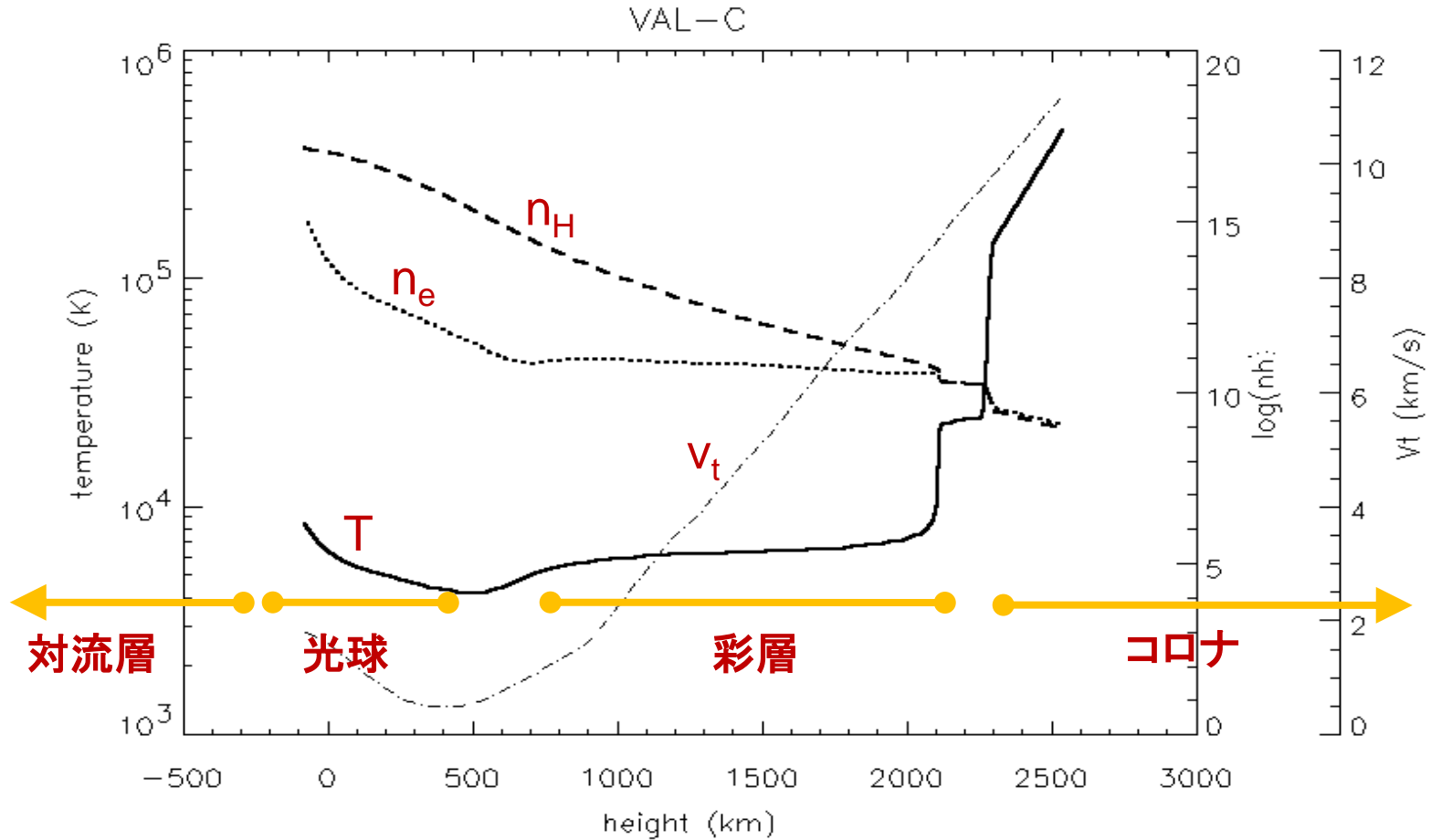
太陽はなぜ周辺が暗いのか？ (周辺減光)



周辺に近いほど大気の高い層をみている。
太陽大気は高さと共に温度が下がっている。

実は光の種類によって「周辺増光」もある。
いろいろな光で太陽の輝度分布を調べると、大気の高さ構造が分かる。

太陽の大気構造



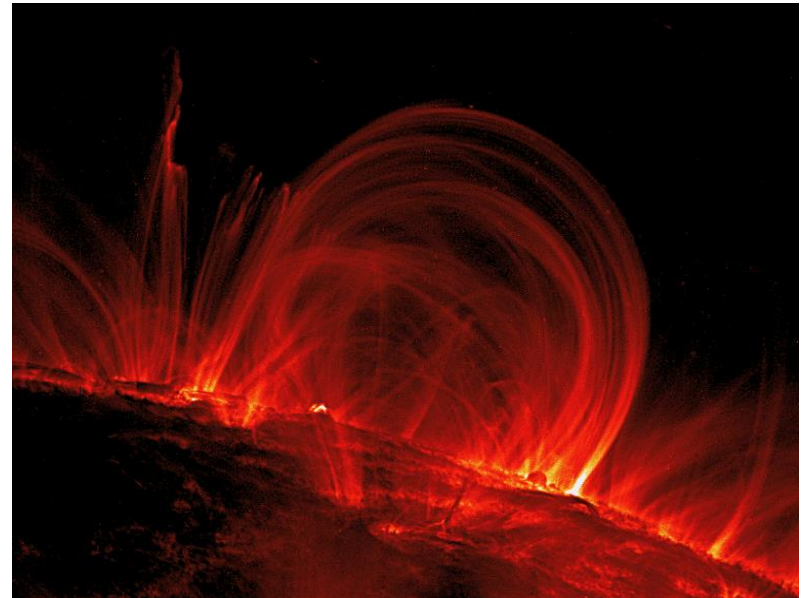
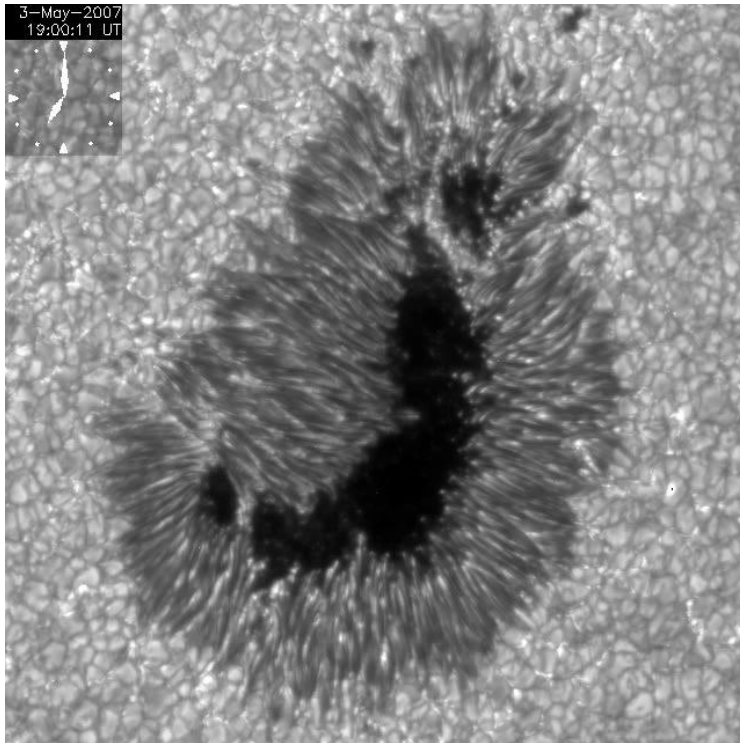
3. 宇宙の中の「磁場」

宇宙における磁場の働き(1):

- プラズマの運動を抑制・ガイド

$$r_L = \frac{v_{cm}}{eB} = \frac{2c}{eB} \sqrt{\frac{kmT}{3}} \ll L$$

→ 「構造」の形成(対流の抑制、プラズマ閉じこめ)

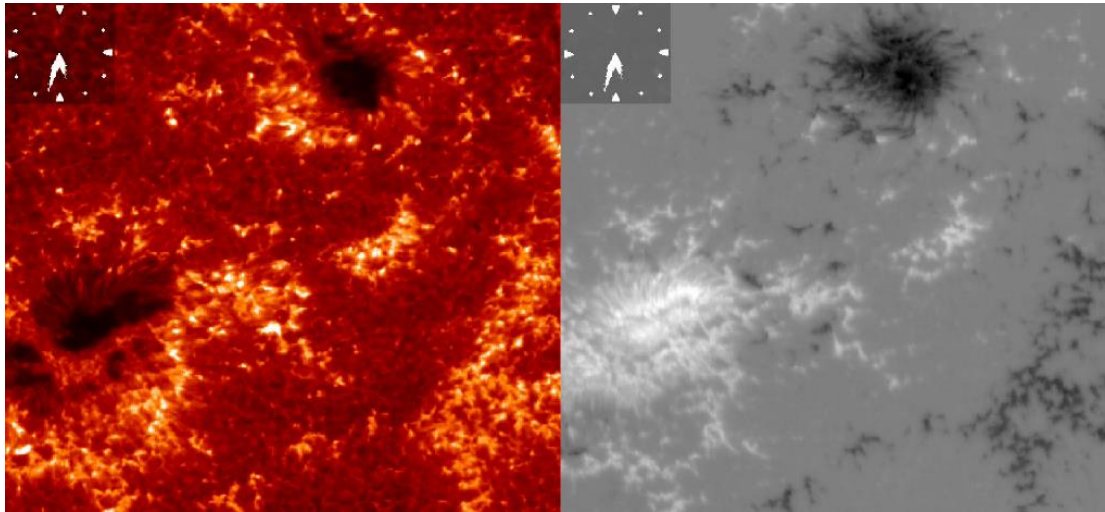


宇宙における磁場の働き(2):

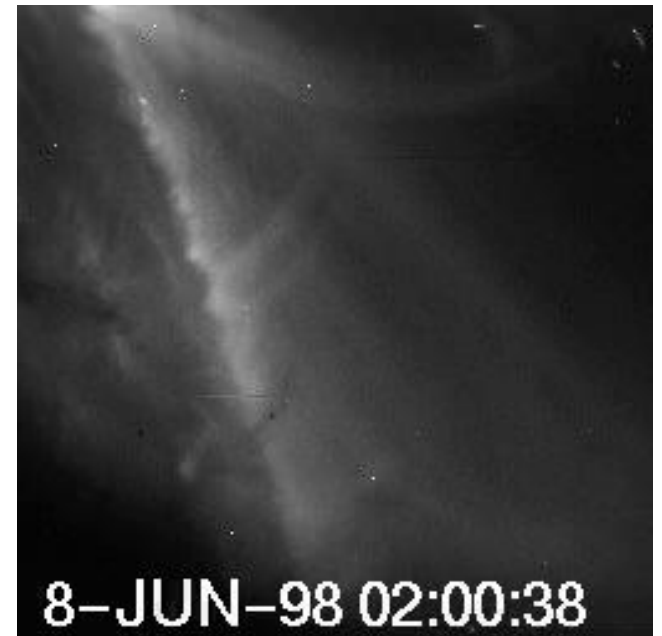
- 磁気圧による膨張

$$P = P_g + \frac{B^2}{8\pi}$$

→ 磁気ループの浮上、コロナへの拡大



ひので



TRACE

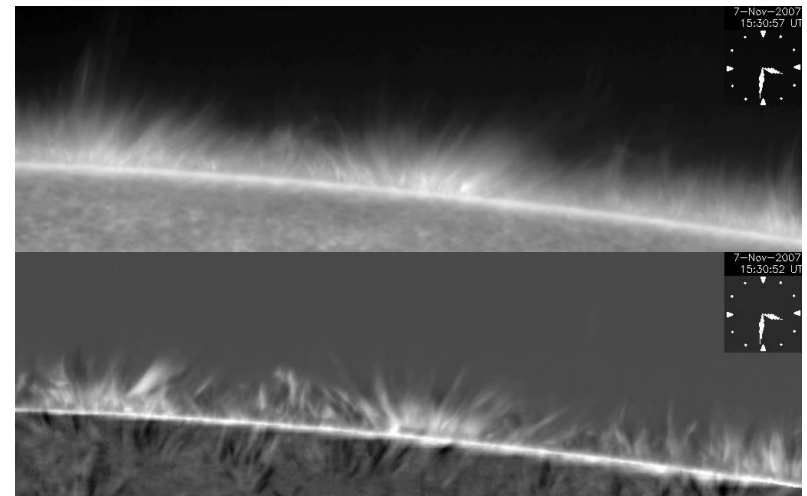
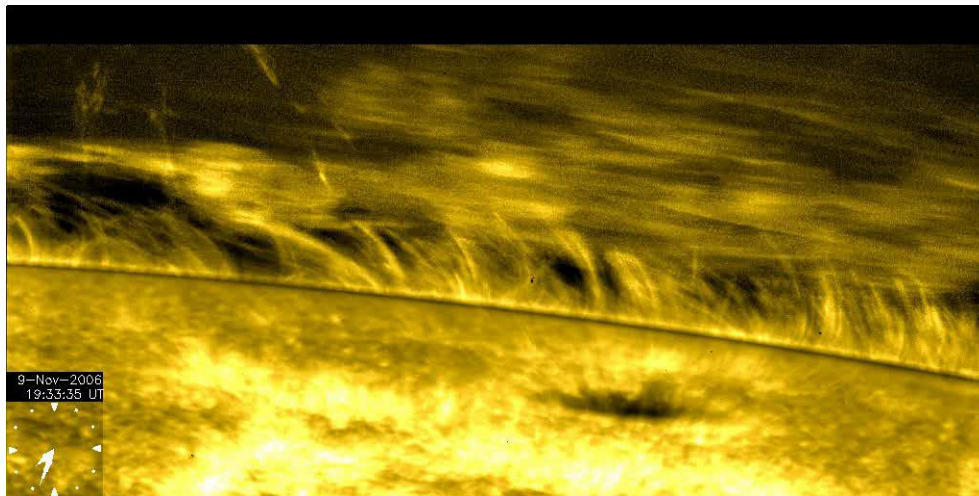
宇宙における磁場の働き(3):

- 波動の媒体

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla P - \nabla \left(\frac{B^2}{8\pi} \right) + \frac{1}{4\pi} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}$$

圧力 張力

→ エネルギーや擾乱の伝達



ひので

宇宙における磁場の働き(4):

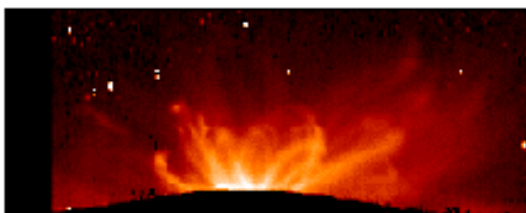
- 熱伝導を抑制・ガイド

$$\kappa_{\perp} \sim 2 \times 10^{-11} \frac{n^2}{T^3 B^2} \kappa_{\parallel} \quad B \text{ in Gauss} \\ \text{(Priest, 'Solar MHD')}$$

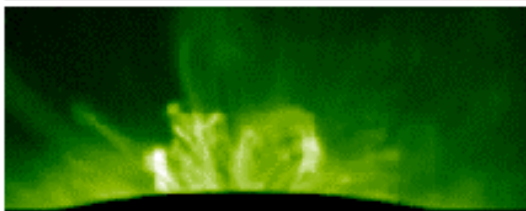
$$n=10^9 \text{cm}^{-3}, T=10^6 \text{K}, B=10 \text{G} \rightarrow \kappa_{\perp} / \kappa_{\parallel} \sim 2 \cdot 10^{-13}$$

→ コロナが多温度構造を形成

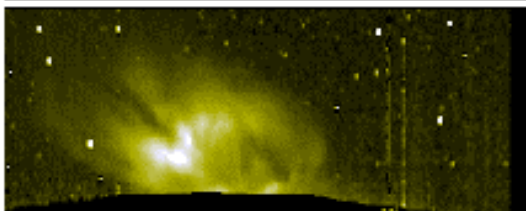
FeX
6374A
(1MK)



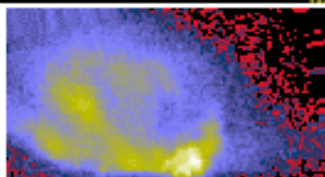
FeXIV
5303A
(2MK)



CaXV
5694A
(3.5M
K)



Yohkoh SXT
(3—6MK?)



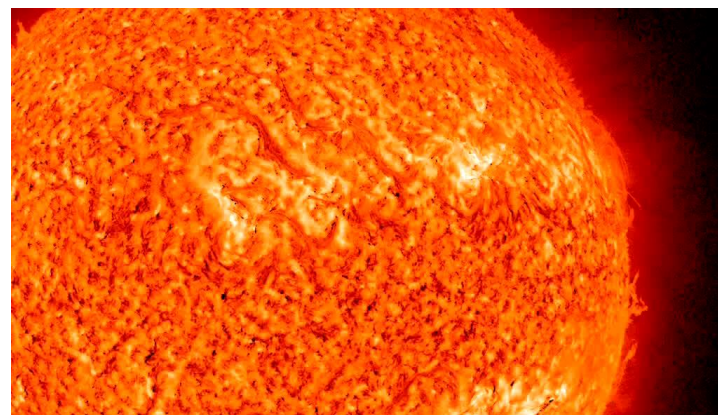
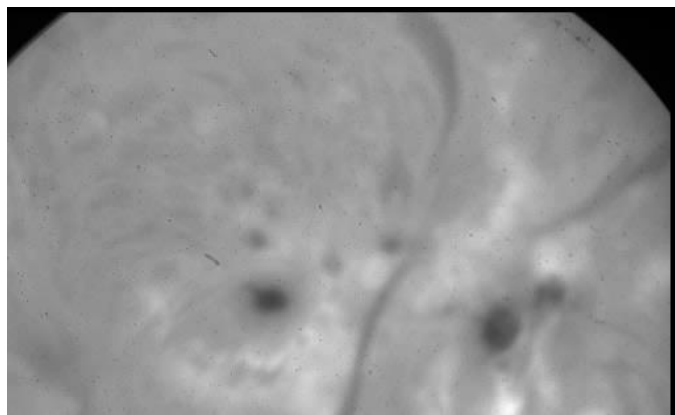
乗鞍コロナ観測所

宇宙における磁場の働き(5):

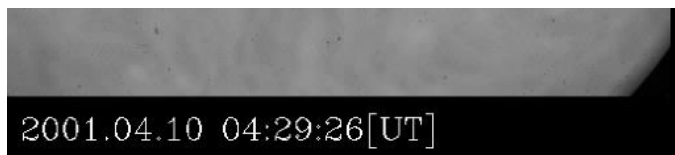
- エネルギーの蓄積・不安定化 $\varepsilon \approx \frac{1}{2}Lj^2$, L : inductance of magnetic loop

→ 突発的な状態遷移(爆発・噴出現象)

フレア



磁場は多様な「活動」現象の担い手



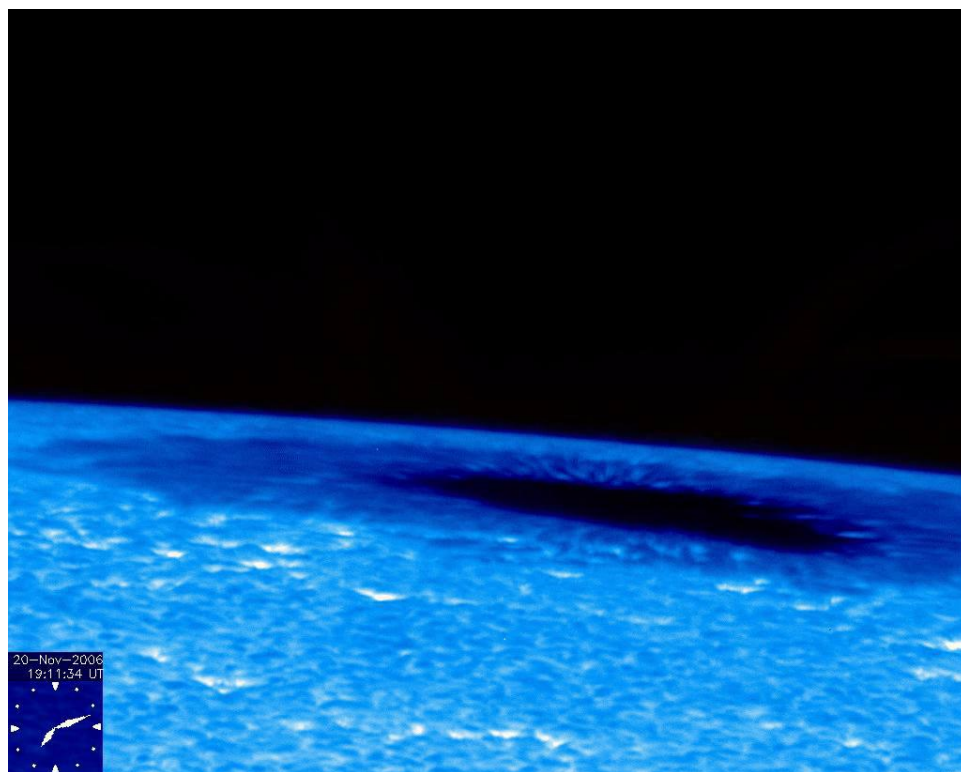
飛騨天文台



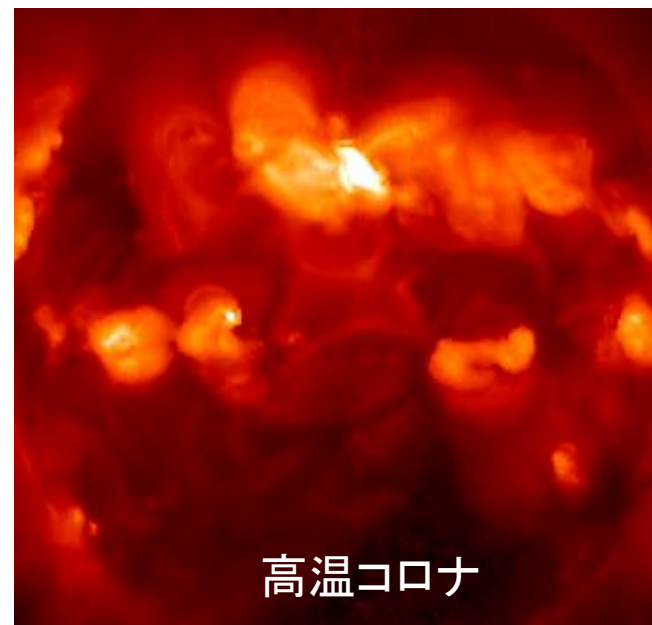
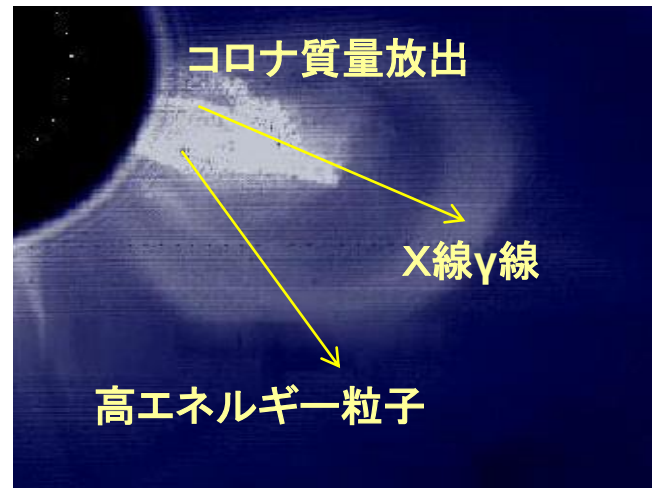
SDO

太陽研究の課題1 磁場の散逸機構

(プラズマ加熱、フレア爆発、質量放出、粒子加速、)



ひのでSOT ムービー by 勝川



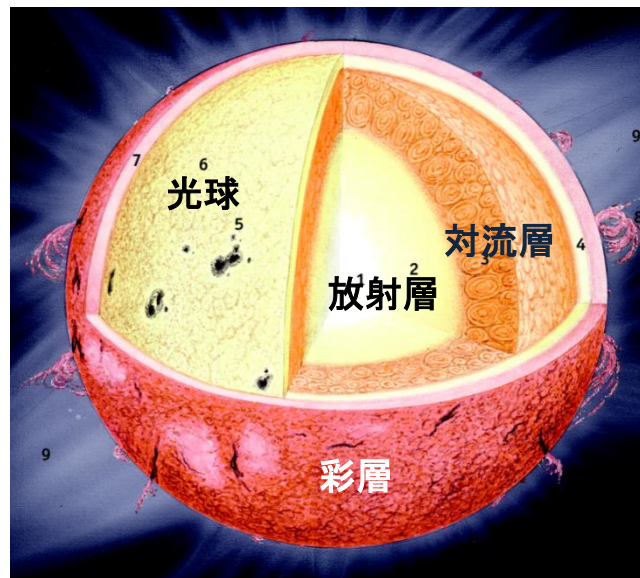
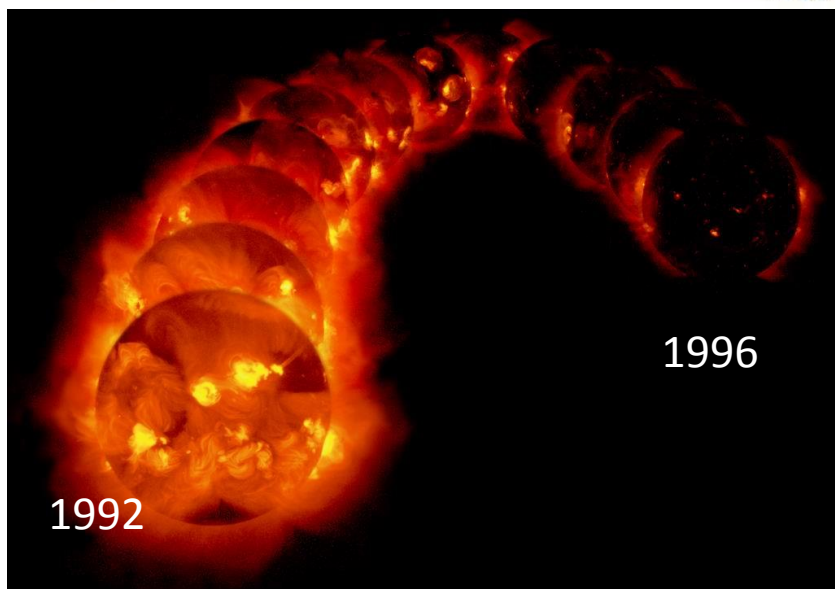
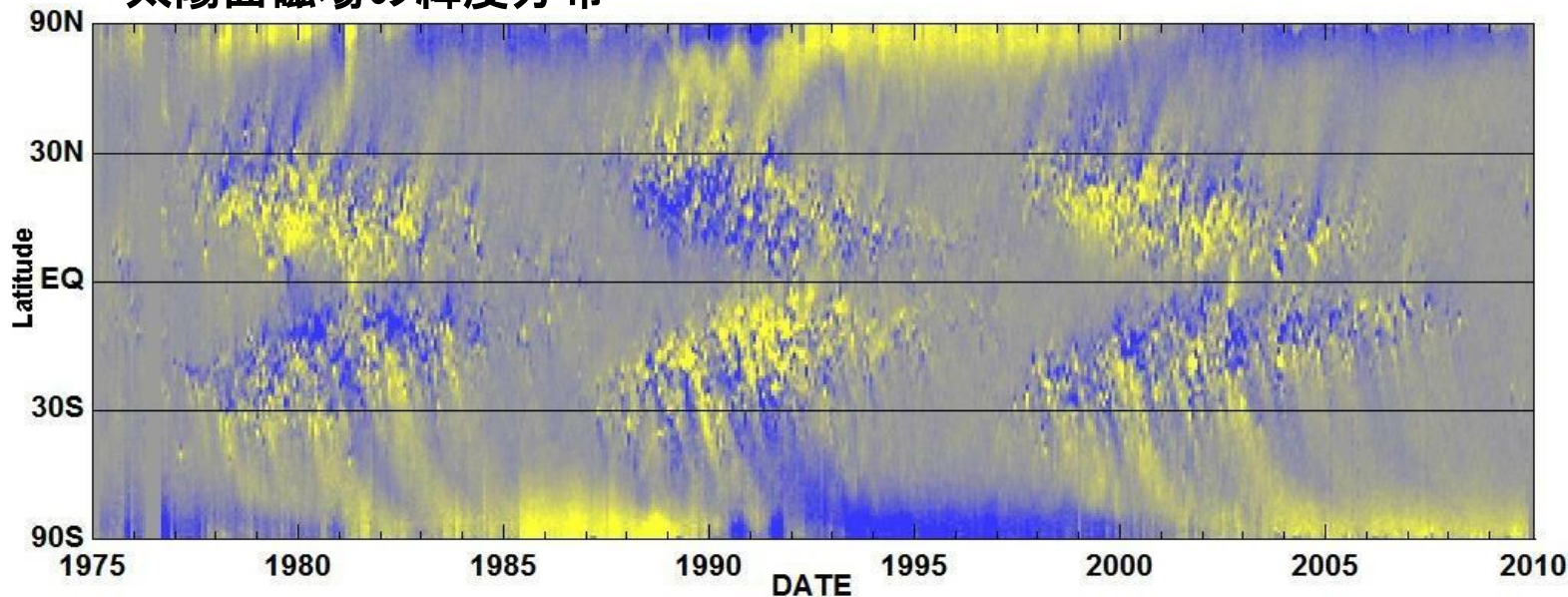
高温コロナ

太陽研究の課題2

磁場の生成機構(ダイナモ)

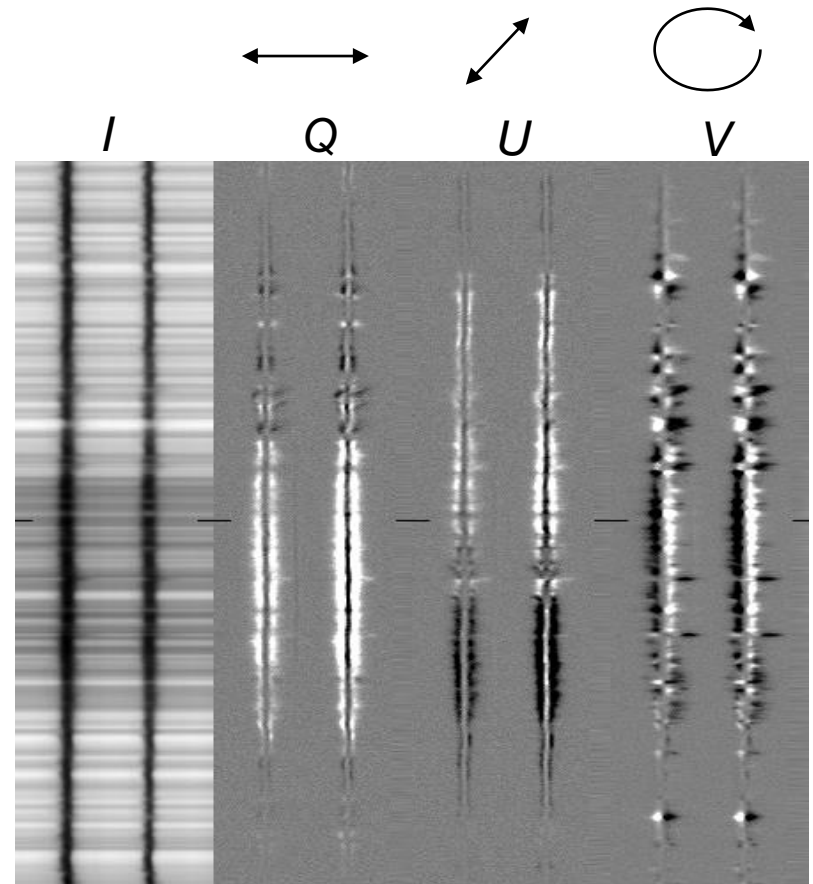
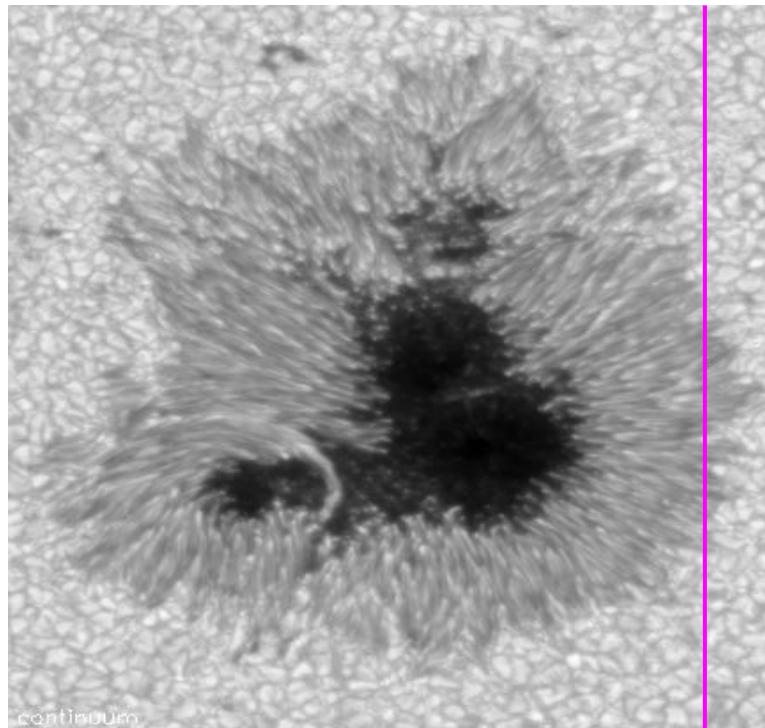
(11年活動サイクル、マウンダー極小期、)

太陽面磁場の緯度分布



宇宙における磁場の働き(続):

- スペクトル線の偏光を生成(変更)
→ それ自身の測定を可能とする!



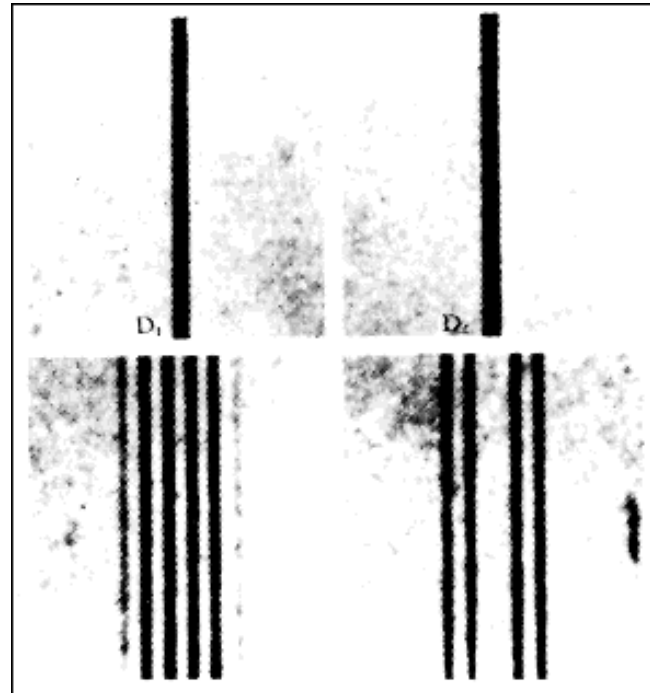
磁場が作るスペクトル線の偏光

4. 磁場を測る

スペクトル線の偏光

Zeeman効果の発見

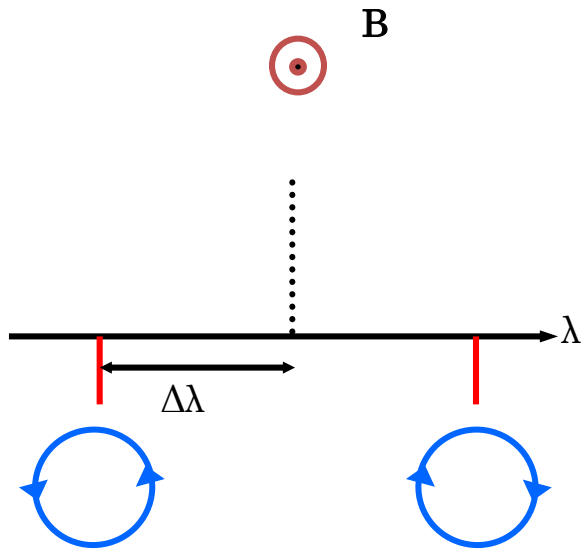
The Effect of Magnetisation on the Nature of Light Emitted by a Substance
P. Zeeman, *Nature*, vol. 55, 11 February 1897, pg. 347



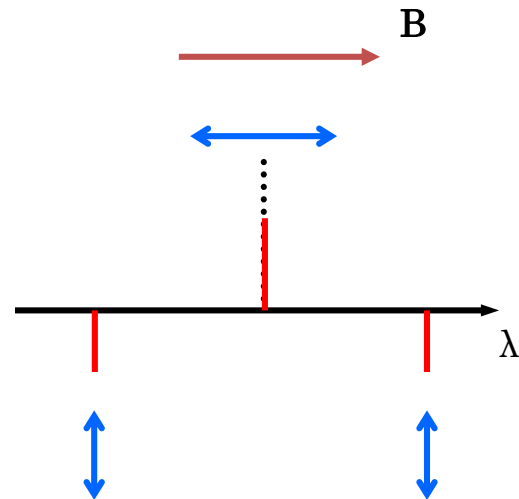
Zeeman 効果

磁場によってスペクトル線が分離($\Delta\lambda \sim B$).
分離した各コンポーネントが偏光。

縦Zeeman効果
(磁場方向からみて)

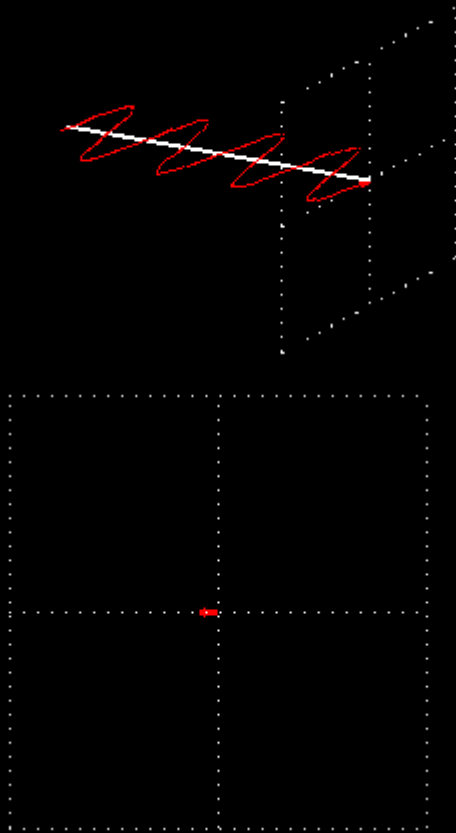


横Zeeman効果
(磁場と直角方向からみて)

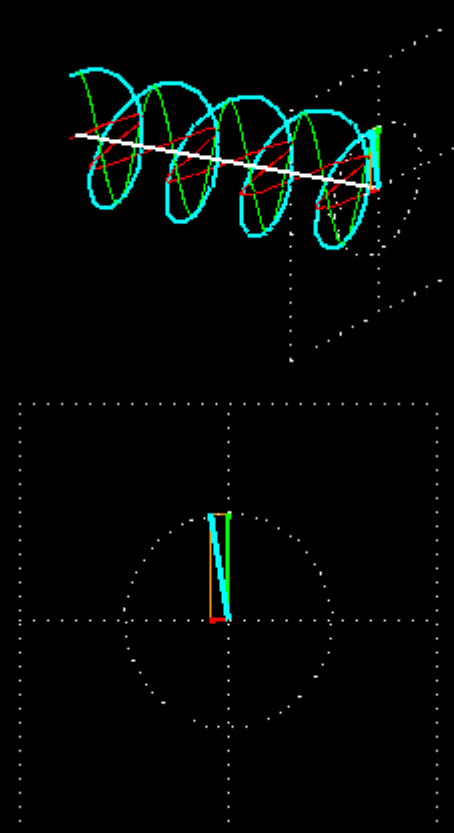


Description of polarized light

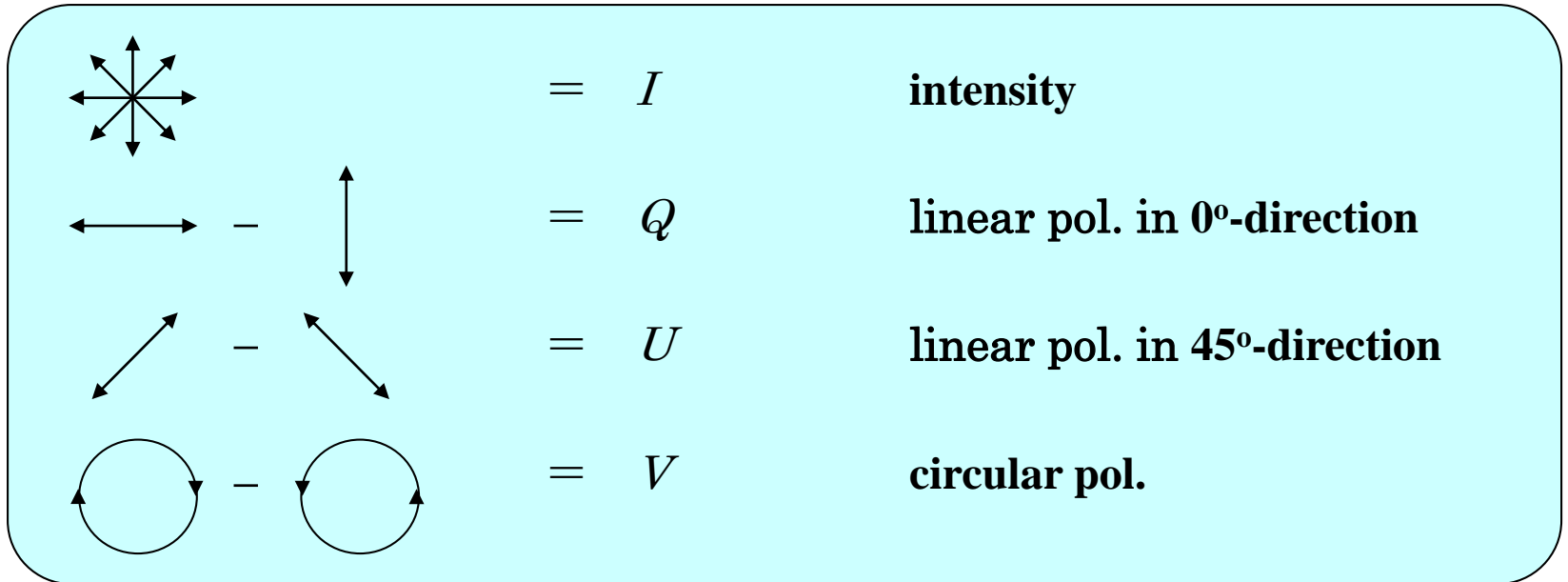
Linear polarization



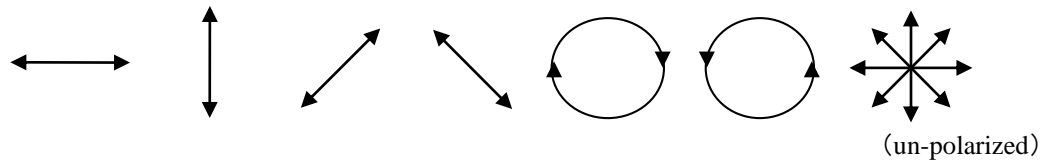
Circular polarization



偏光の記述; Stokes パラメータの定義



↑ ↑
Intensity through ideal polarizer



Stokes vector

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

黒点磁場の発見（1908年、ヘール）

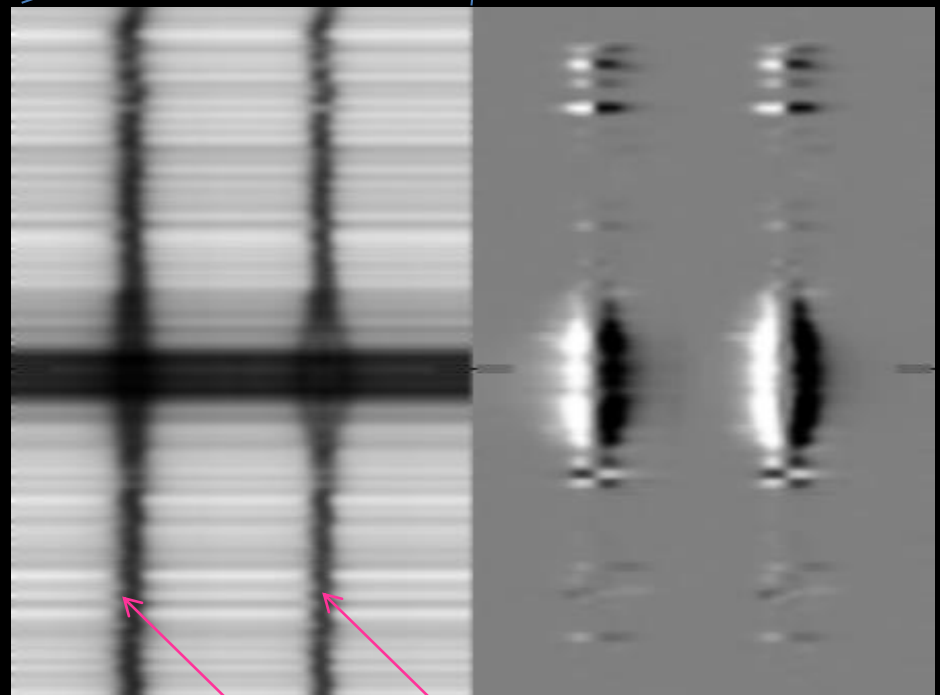
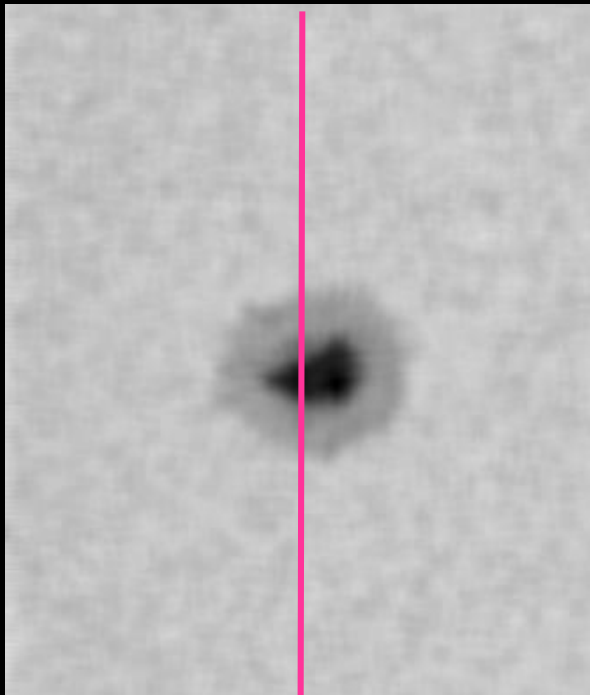
太陽可視光域のスペクトル写真



Image courtesy of the National Solar Observatory, Tucson, AZ. All rights reserved. © 2008 National Solar Observatory, Tucson, AZ.

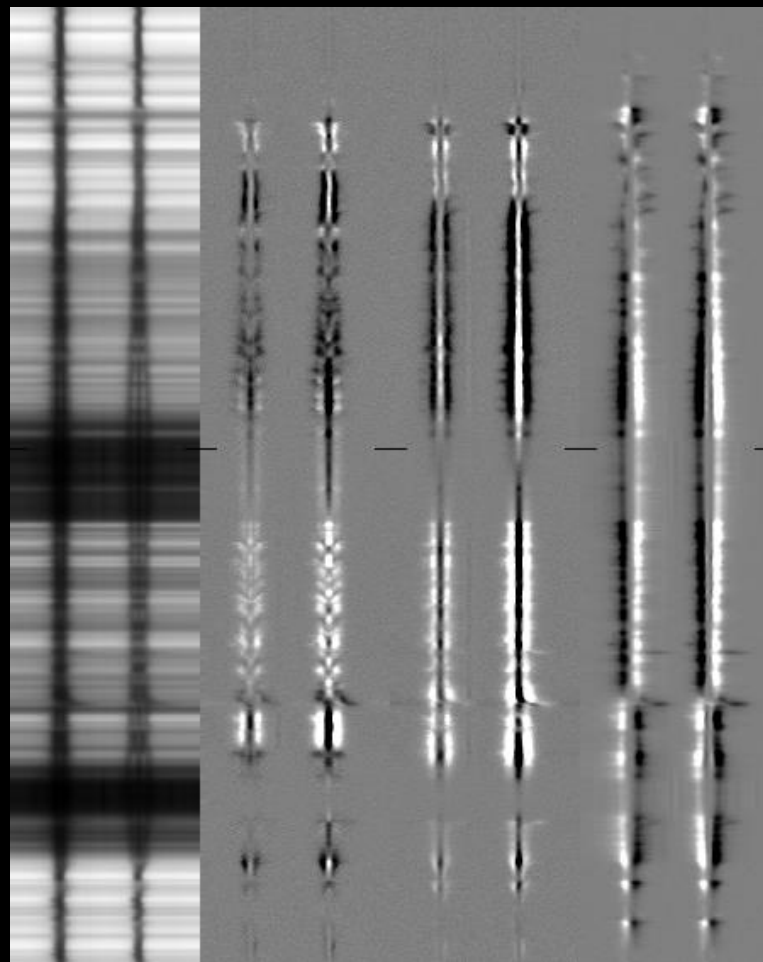
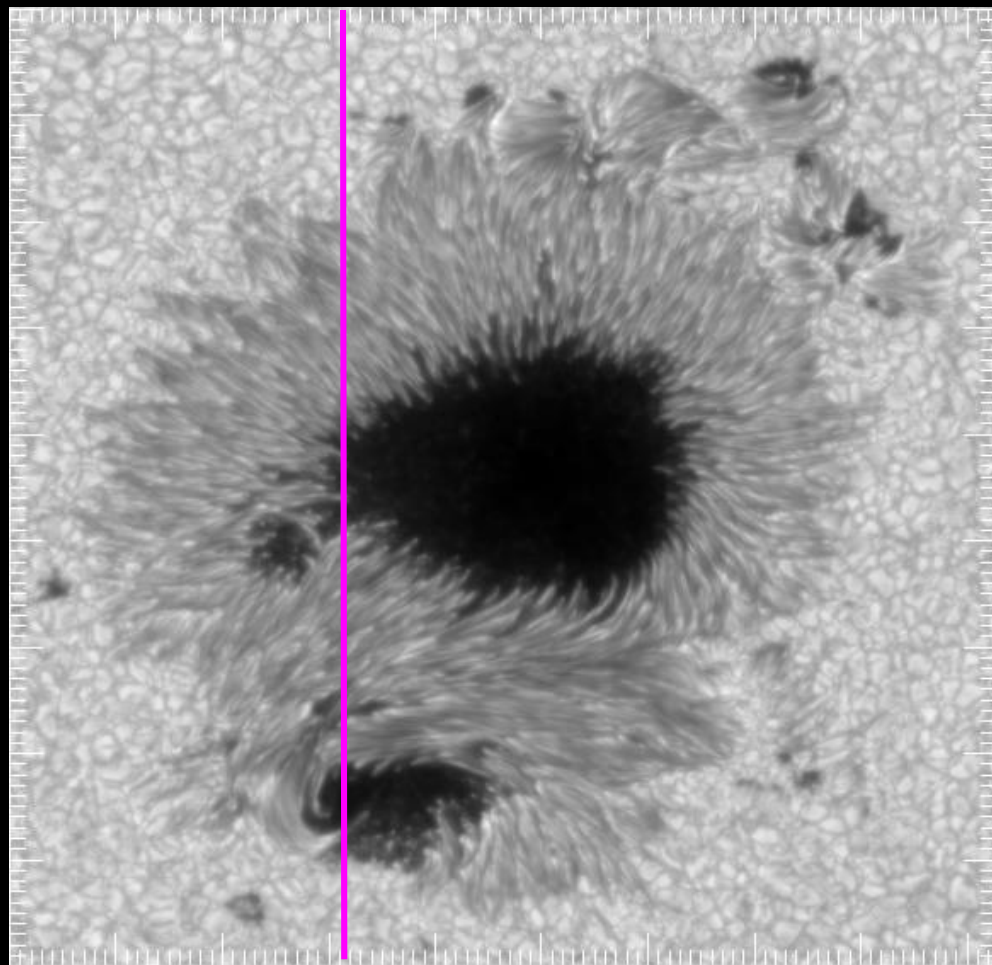
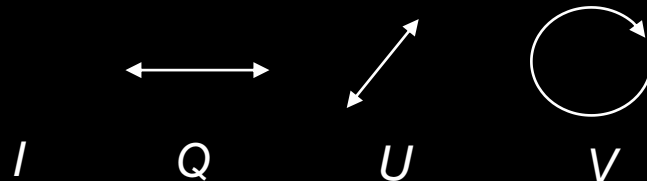
光の強度スペクトル

円偏光のスペクトル



鉄の原子がつくる線スペクトル

スペクトル線のゼーマン効果



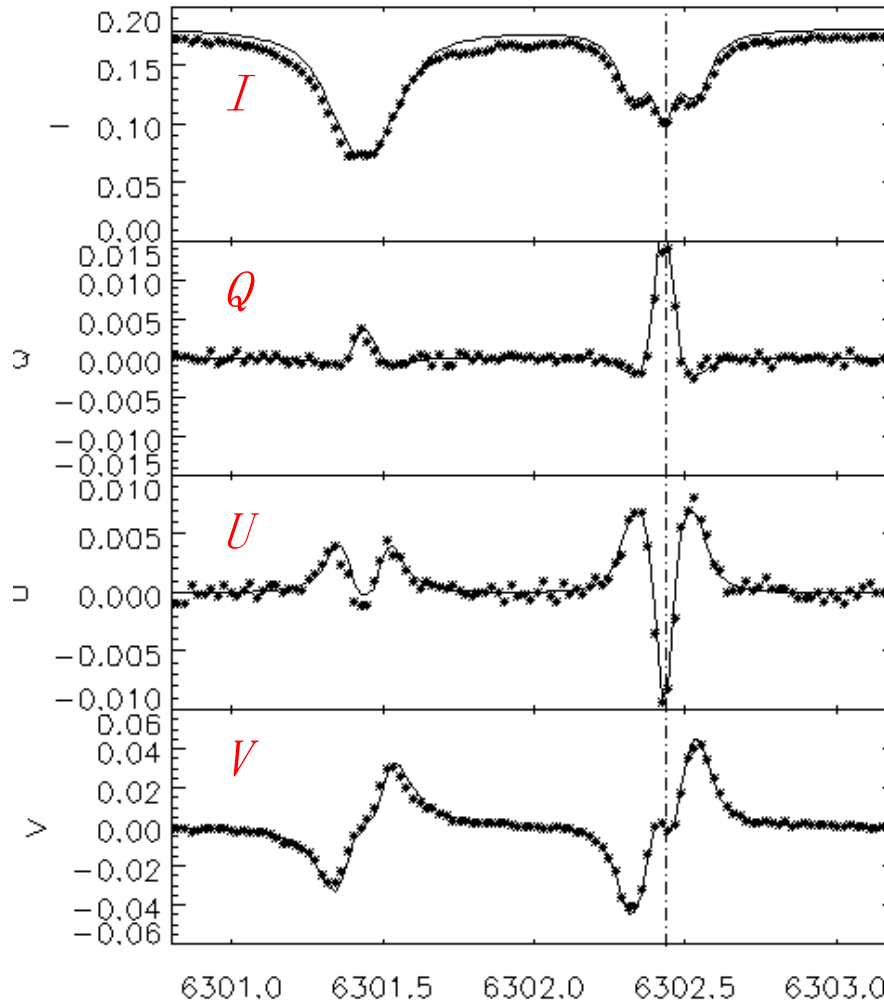
**Zeeman effect of spectral line
(SOT/Spectro-polarimeter)**

FeI6301.5A
 $g = 1.67$

FeI6302.5A
 $g = 2.5$

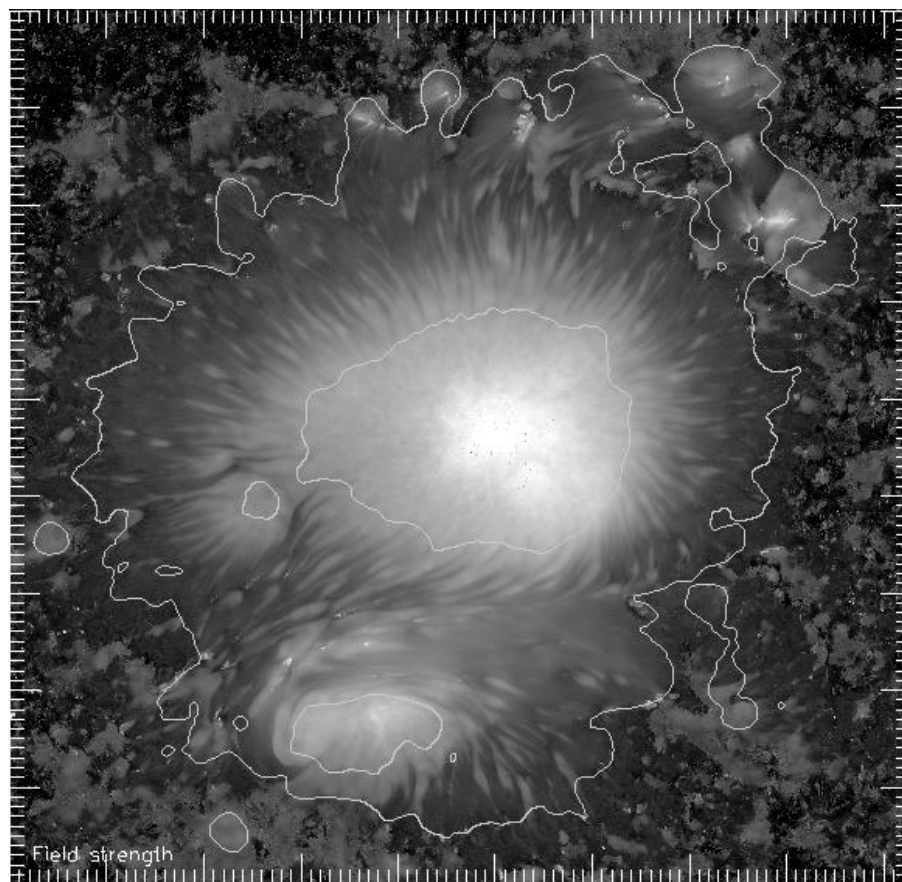
Stokes profiles: Zeeman effect

SP4D20061211_142309.3C: iy=0513, NCP= 1.49mA
 $\eta_0 = \text{****}$, $\Delta\lambda_0 = 0.017$, $\sigma = 0.618$, $B = 2221$, $\gamma = 148$, $\chi = 58$, $f = 0.90$



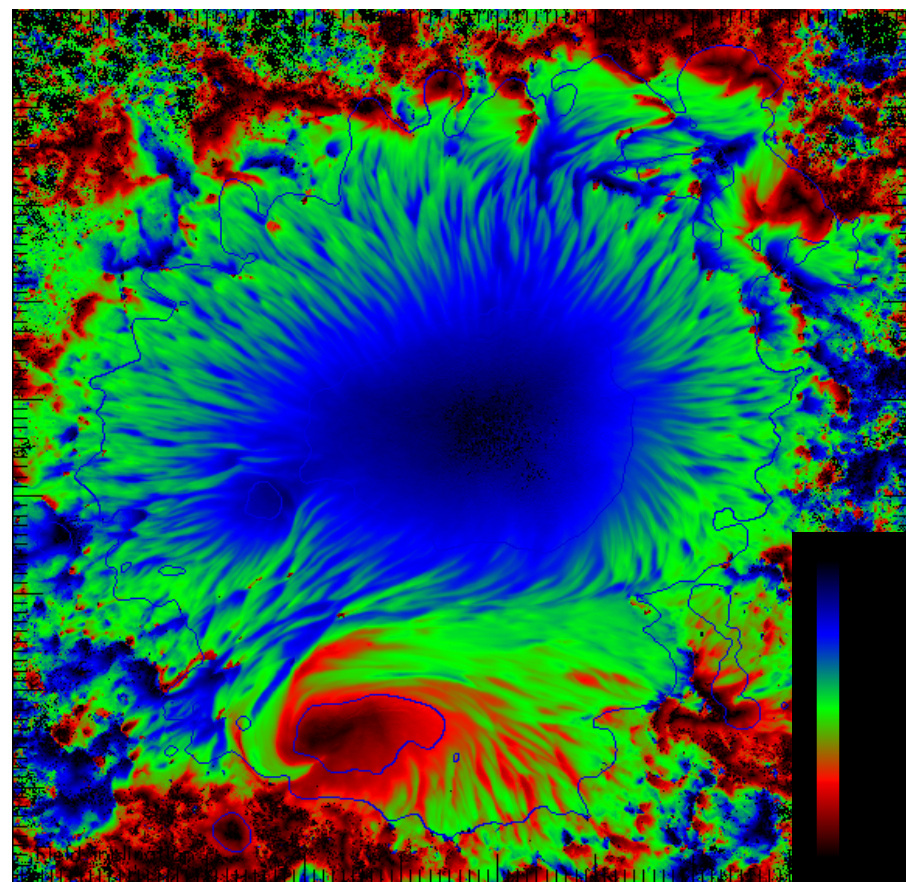
Sunspot magnetic field

Field strength



0 ~ 4000 Gauss

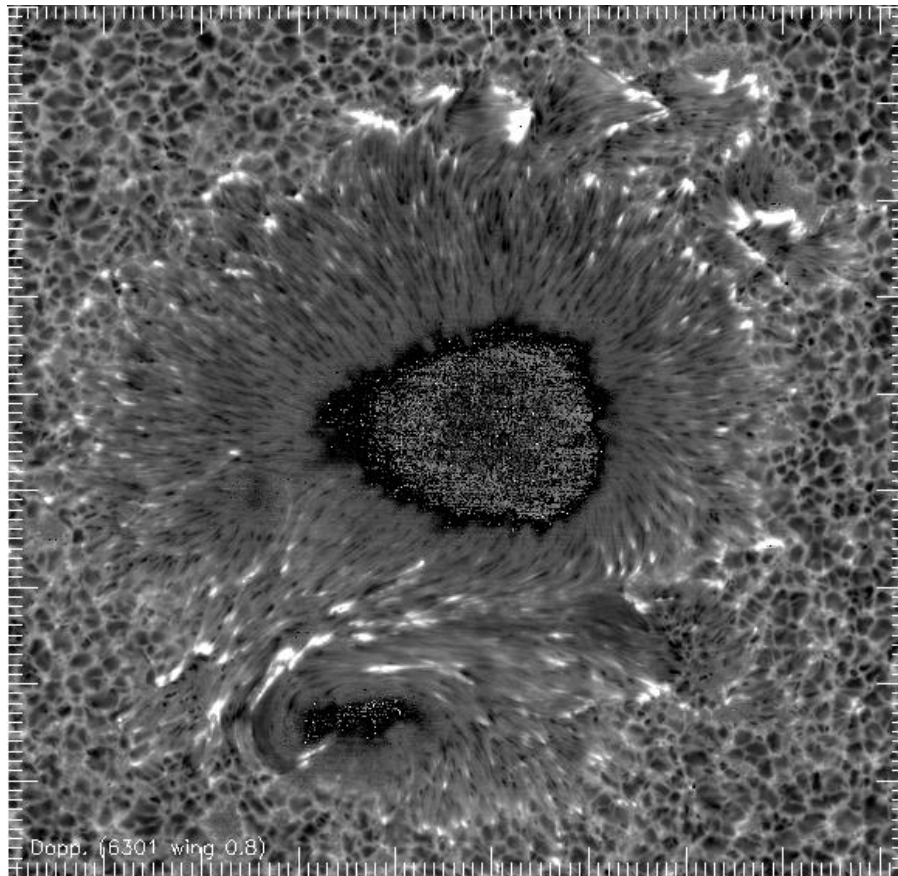
Field inclination



-90° ~ +90°

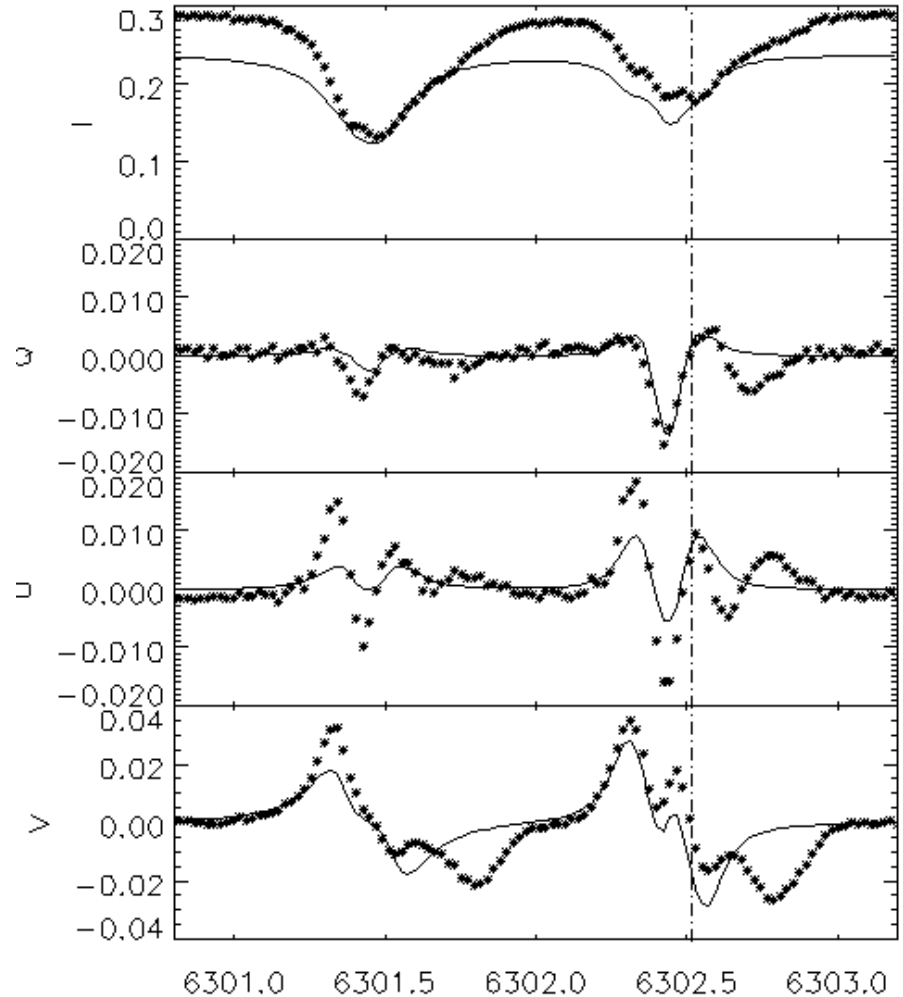
Stokes profiles: Zeeman effect

Doppler shift



-2 ~ +3 km/sec

SP4D20061211_142622.8C: iy=0430, NCP= -9.60mA
 $\eta_0 = 98.7$, $\Delta\lambda_0 = 0.017$, $\sigma = 1.330$, $B = 2459$, $\gamma = 44$, $\chi = 27$, $f = 0.78$



しかし・・・スペクトルの偏光は ゼーマン効果と磁場だけではない！

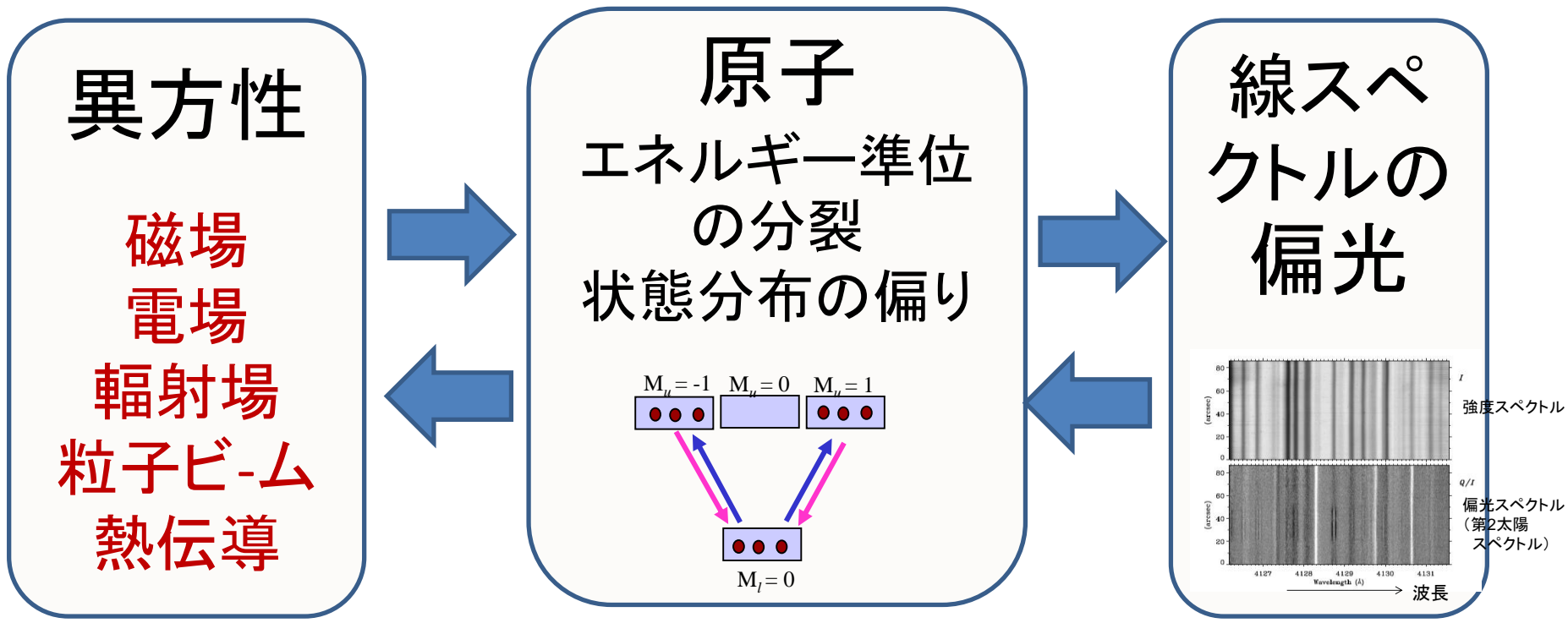
偏光の起源 = 太陽プラズマの空間的異方性
偏光の情報 → ベクトル物理量の診断が可能

偏光メカニズムとプラズマ診断量

異方性の原因	偏光メカニズム	診断量
磁場	Zeeman 効果 Paschen-Back効果	ベクトル磁場
電場	Stark 効果	電場、電子密度
粒子速度場	衝突偏光	熱伝導、粒子ビーム
輻射場	散乱	連続光コロナの分離 (Thomson)
輻射 + 磁場	Hanle 効果	弱い磁場、(プラズマ密度)
	禁制遷移散乱	コロナ磁場(方向)、(プラズマ密度)

未開拓領域

線スペクトルの偏光メカニズム



準位分裂: Zeeman効果、Paschen-Back効果、Stark効果
分布偏り: 散乱偏光、Hanle効果、衝突偏光、、、、

ベクトル物理量の診断 ← 偏光分光観測

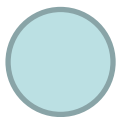
これはなんだ！？

CaH プロミネンス

= 100万度のコロナに
浮かんだ低温の雲

質量 ~ 10 億トン

速度 ~ 100 km/秒



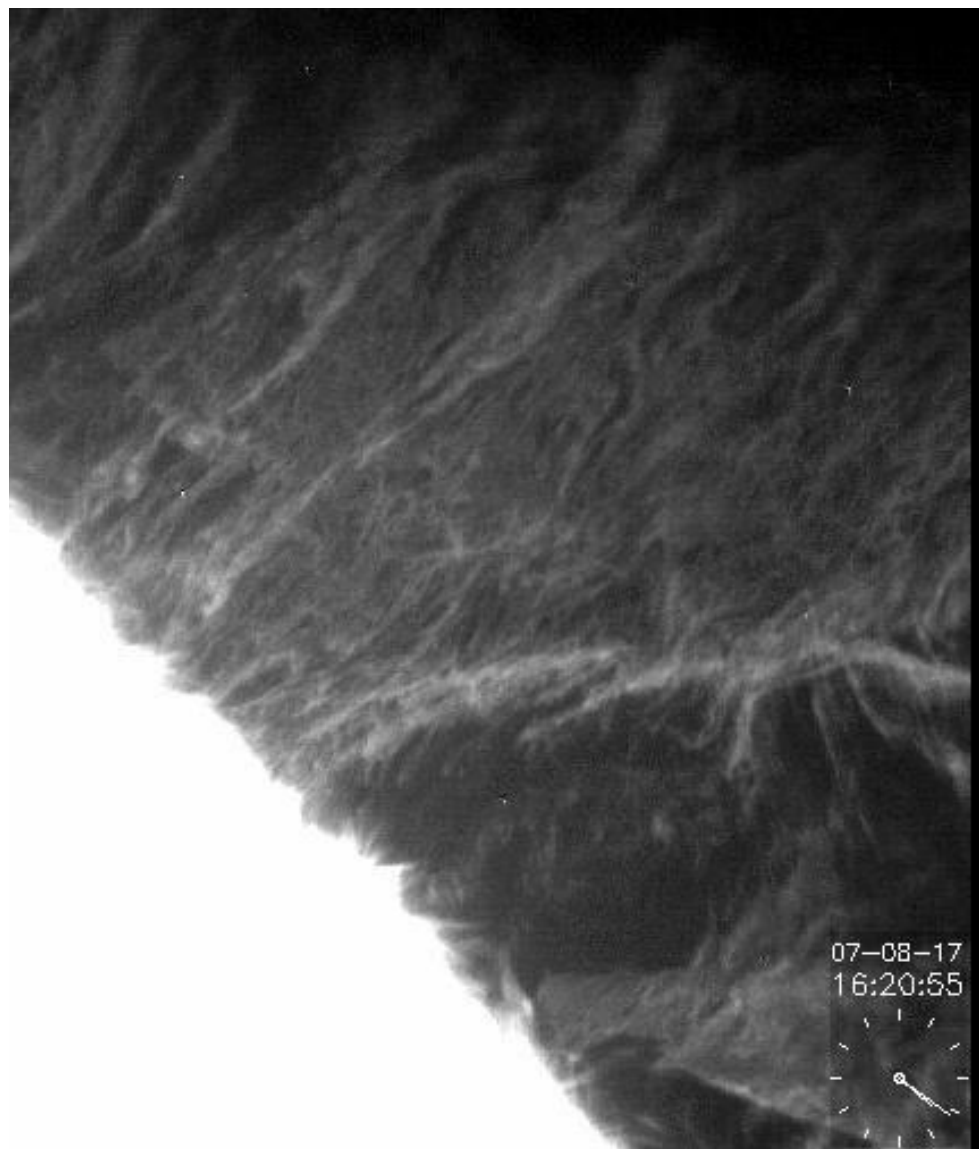
地球

直径 ~ 13000km

高さ = $g t^2/2 = 10^5 \text{km}$

重力 $g = 28G = 274 \text{m/s}^2$

→ 落下時間 $t \sim 14 \text{min}$



駆動力 = $J \times B \dots$ 但し、 B も J もまだ測られてない。。

中性水素原子の感じる電場 = $v \times B \rightarrow$ スタルク効果で見えるはず！

5. 光を読みとる観測装置

光に含まれる情報

天体の素性を説くための手がかりは光(電磁波)によってもたらされる

光に含まれる情報とは、、、

→ 強度 I & 種々の次元に対する依存性

強度 $I(x, y, t, \lambda, p)$ --- 温度、密度

依存性 x, y 方向 --- 空間構造

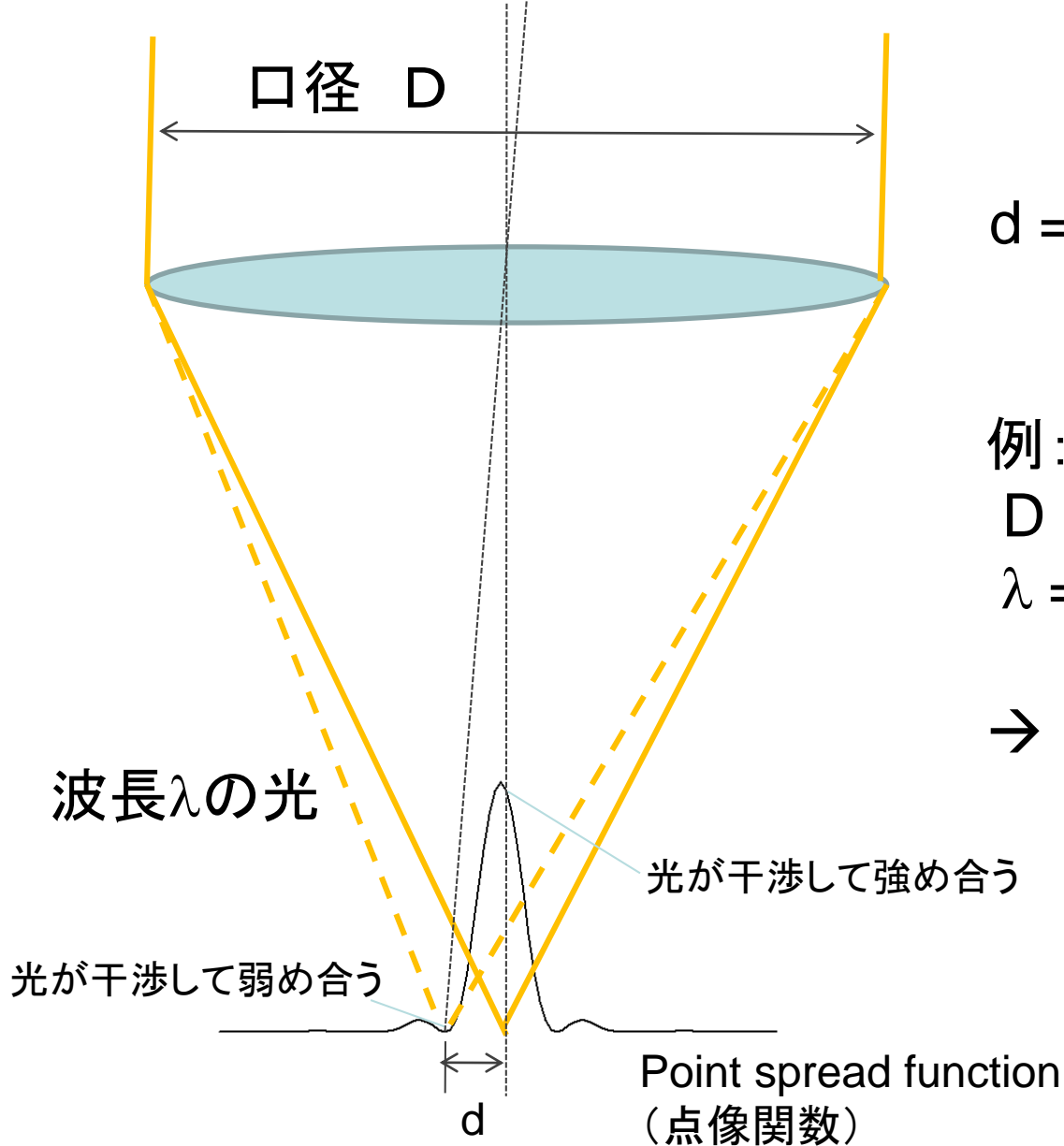
t 時間 --- ダイナミクス

λ 波長 --- 運動、温度、密度、 z 方向空間構造、、、

p 偏光 --- ベクトルの物理量

(磁場、電場、輻射場の異方性、、、)

空間を分解する望遠鏡



$$d = 1.22 \lambda / D \quad \text{-- 回折限界}$$

例:

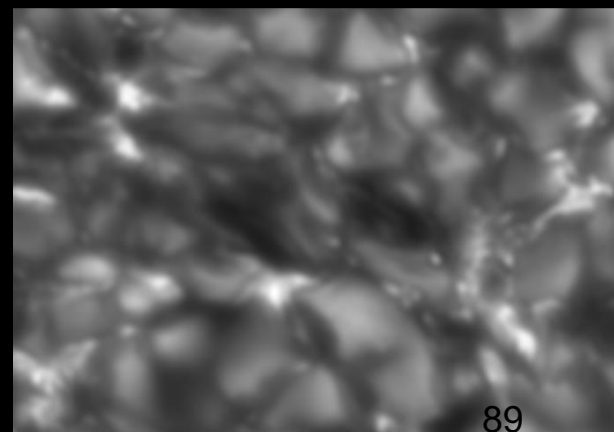
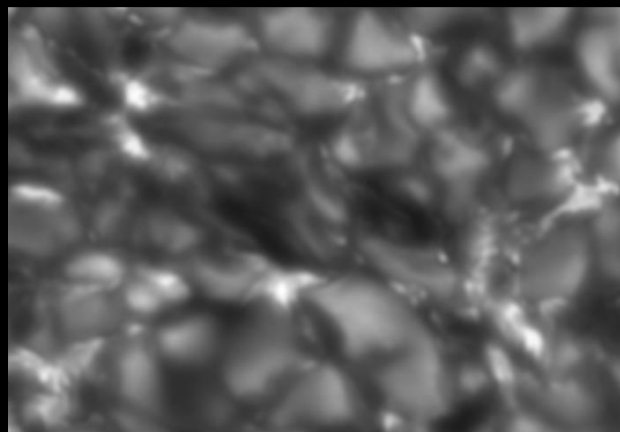
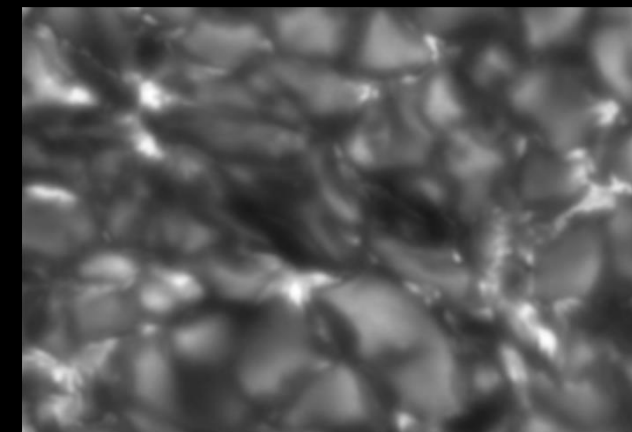
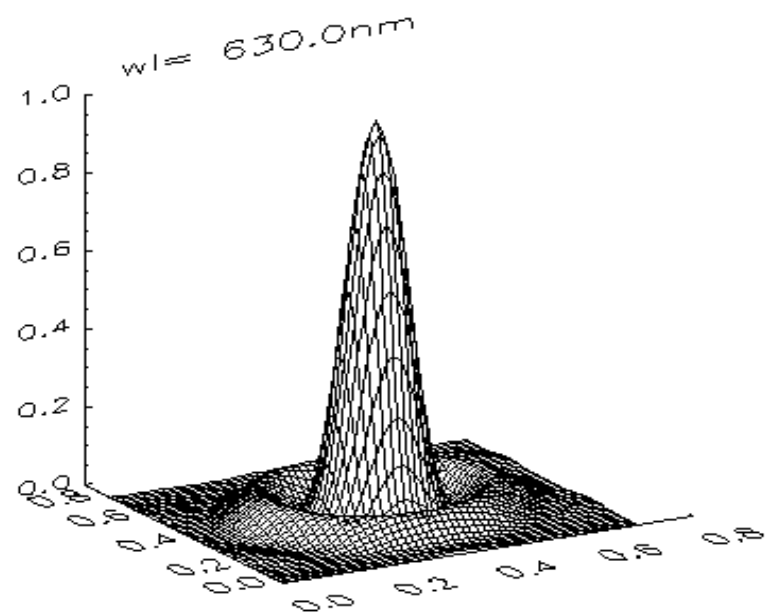
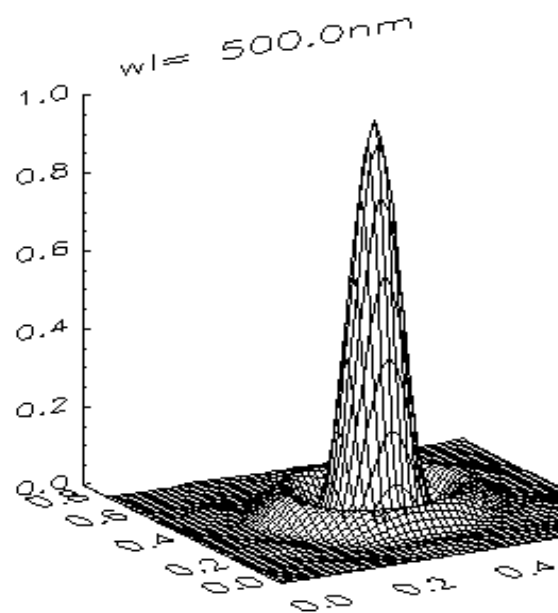
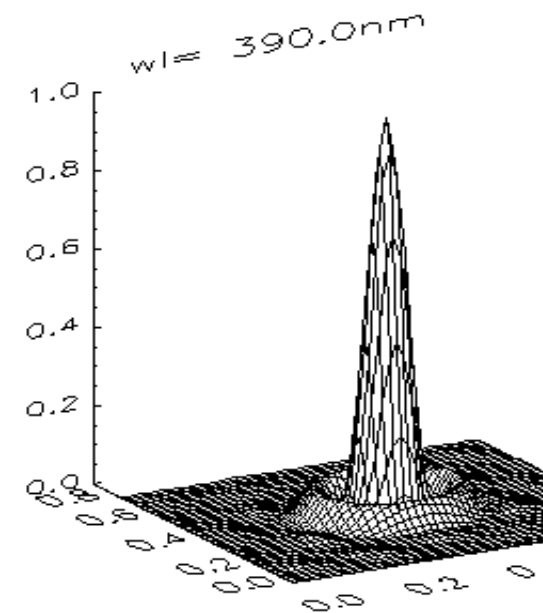
$$D = 60\text{cm}$$

$$\lambda = 500\text{nm}$$

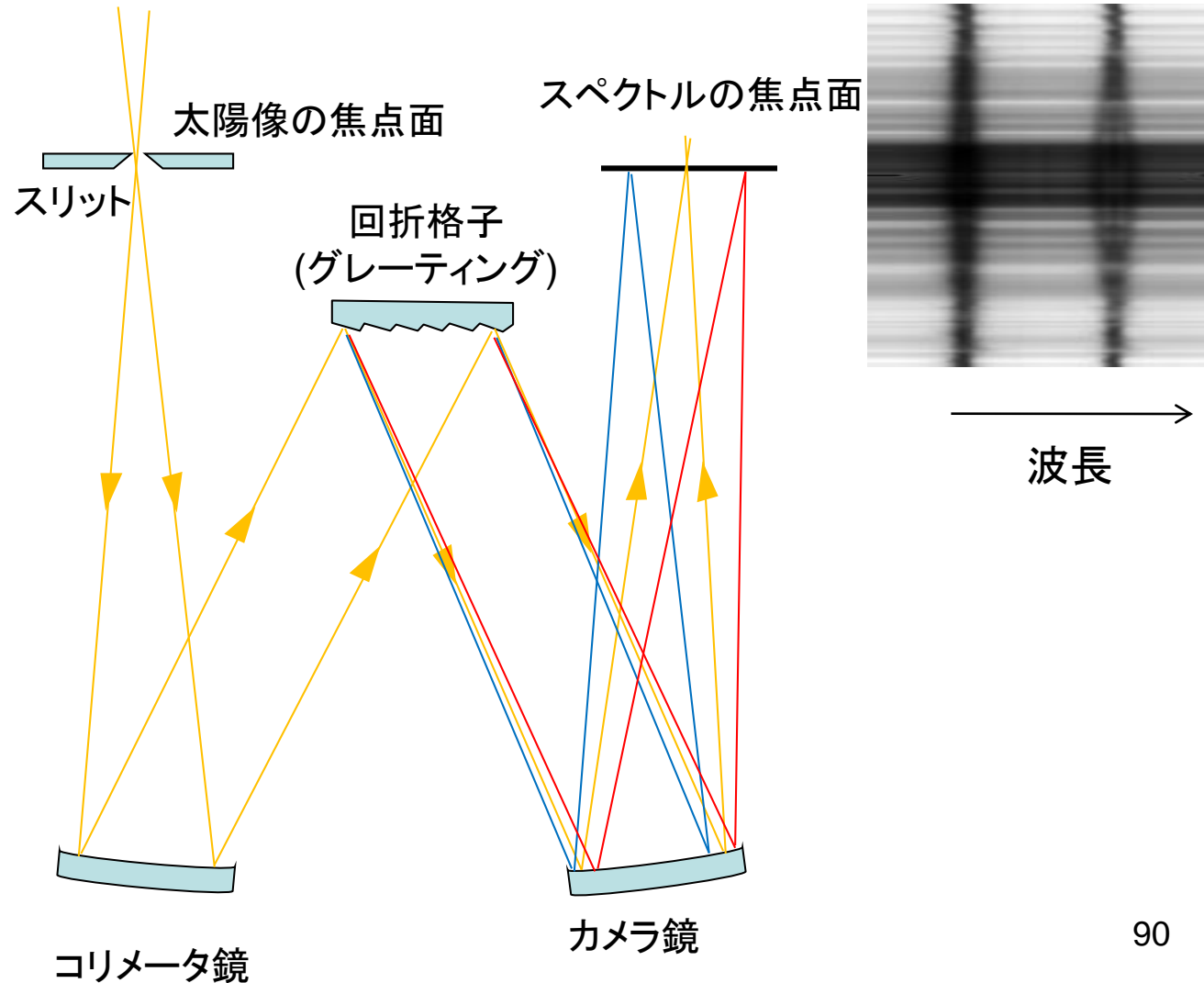
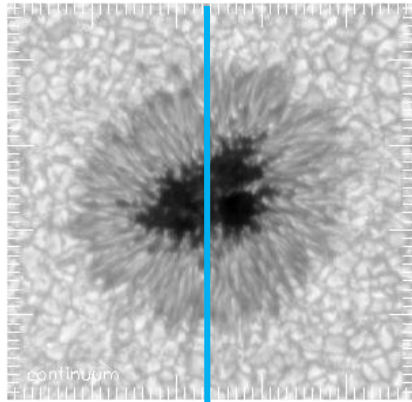
$$\rightarrow d \sim 1.02\text{e-}6 = 0.2 \text{ 秒角}$$

(100km先の1mm)
(太陽面上の120km)

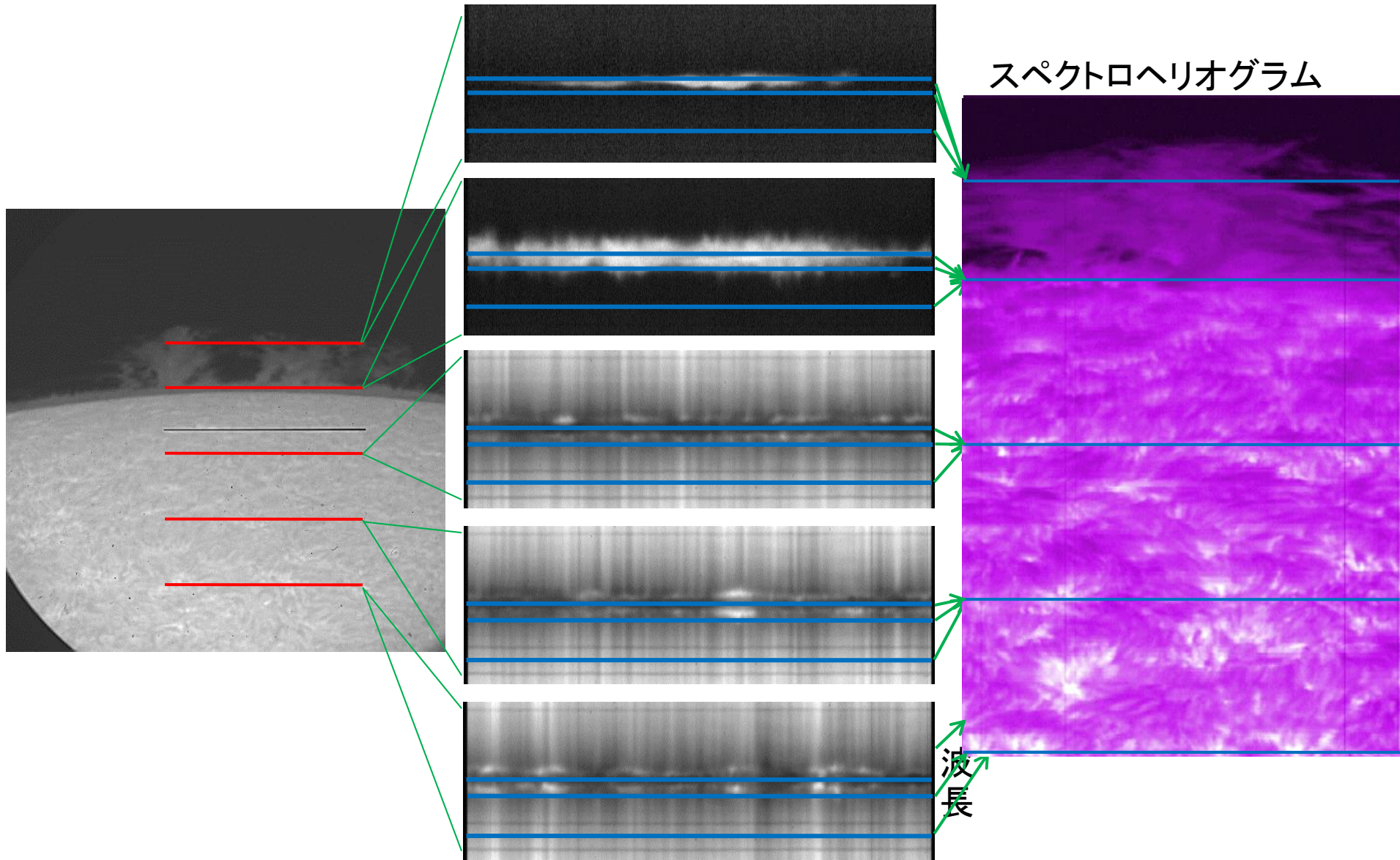
Point Spread Function (口径50cm 理想)



波長を分解する分光装置



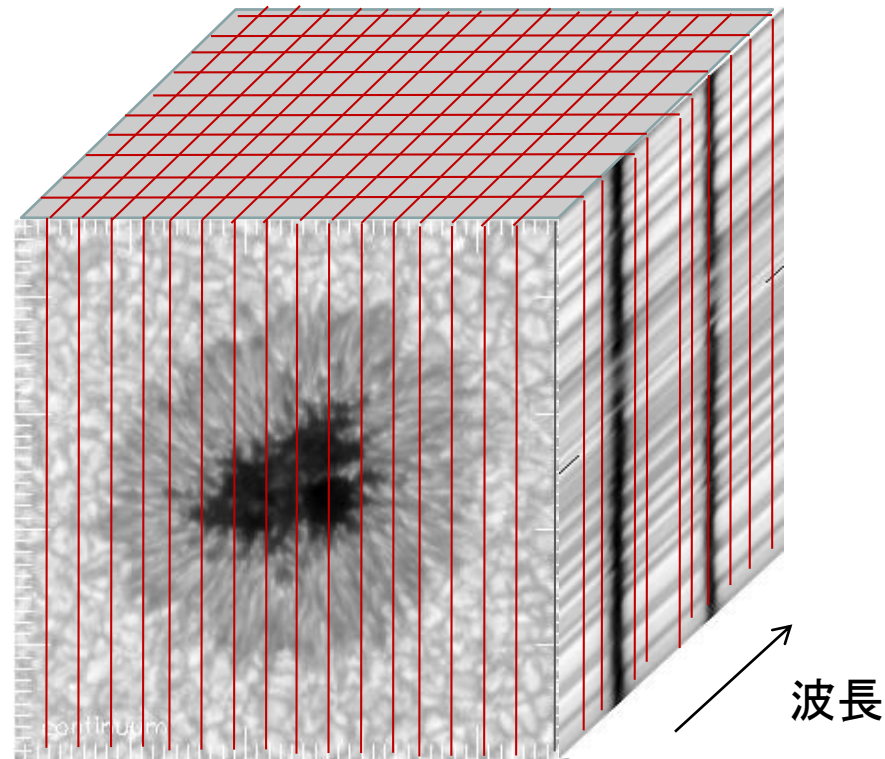
スペクトロヘリオグラムの説明



スリット上の位置

波長を分解する分光装置

データキューブ



狭帯域カスケードホログラム

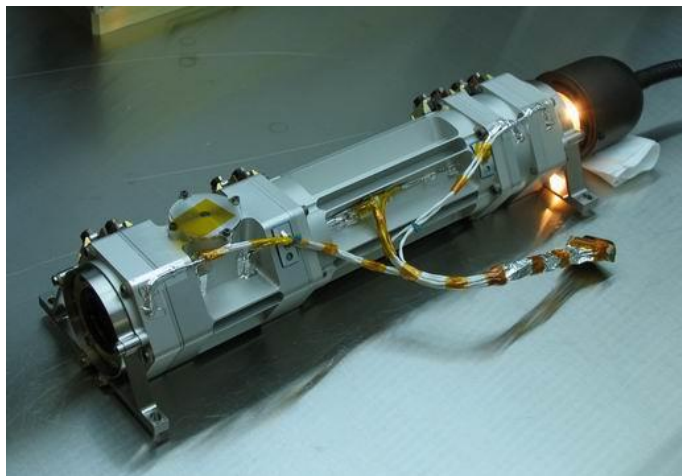
波長を分解する分光装置

狭帯域チューナブルフィルター

Lyot filter

vs.

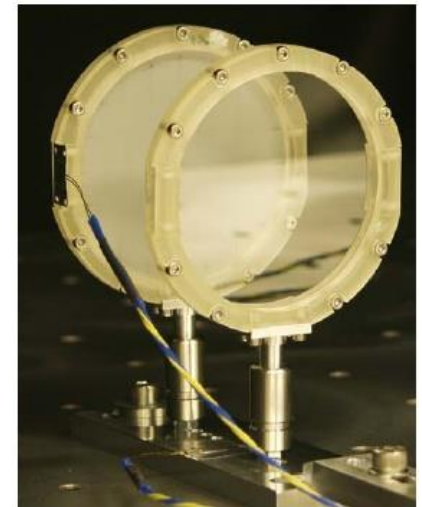
Fabry Perot



Tunable filter FPP/SOT

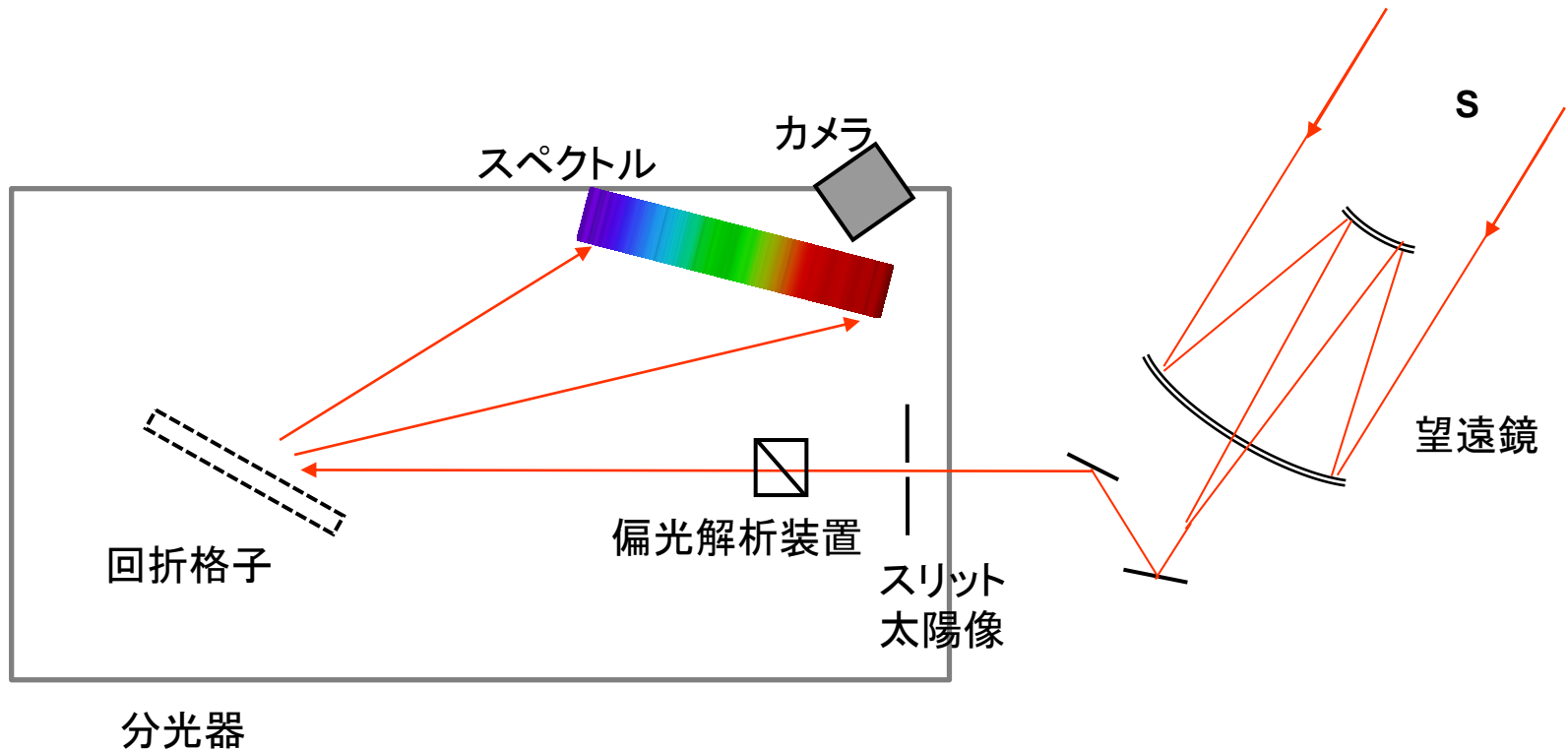


Air space
Foster etal 2009 Optical Society of
America



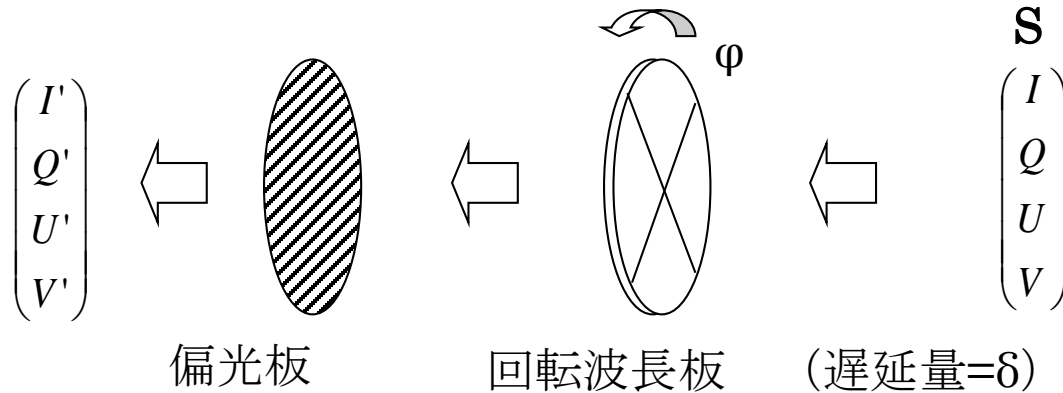
LiNbO3
Schuhle etal 2009(?)

スペクトルの偏光測定システム



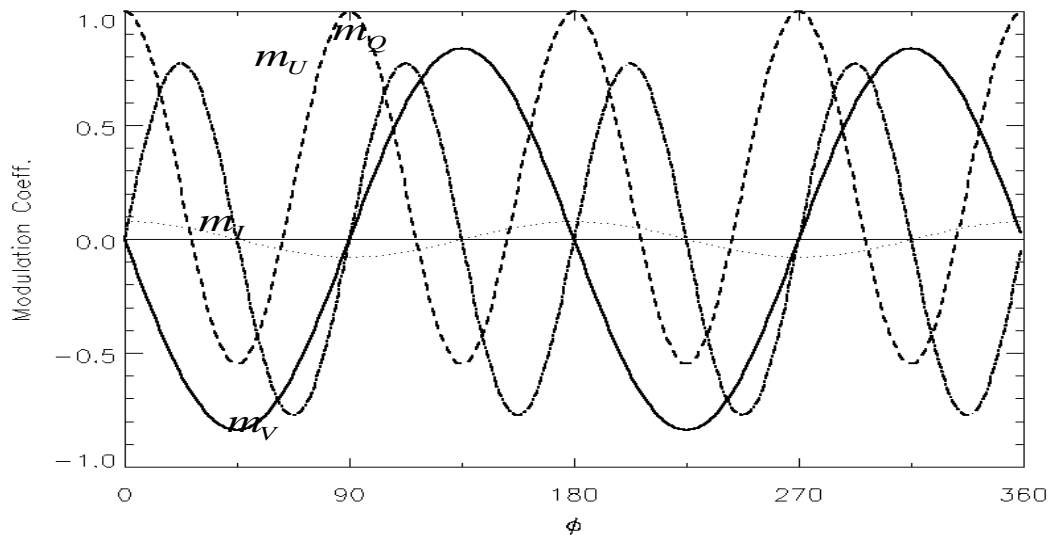
偏光を分解する偏光解析装置

A better polarimeter-1 (rotating waveplate)



$$I' = m_I I + m_Q Q + m_U U + m_V V$$

$$\delta = 0.34$$



世界の太陽望遠鏡

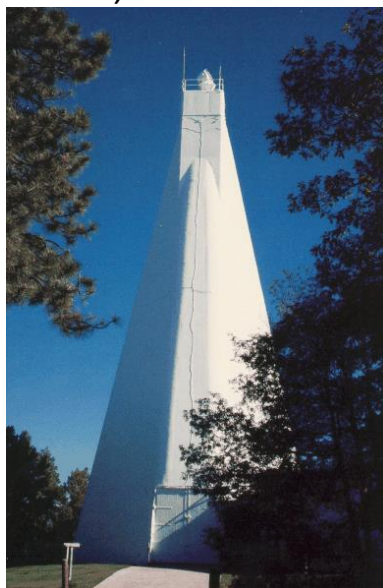
太陽観測の動向： 地上観測

空間分解能、取得情報量、測光精度の追求

VTT @Tenerife
(0.7m)



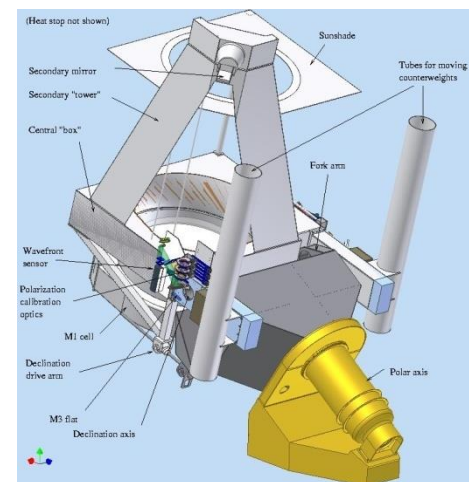
DST @SacPeak
(0.75m)



SST @LaPalma
(1.0m)

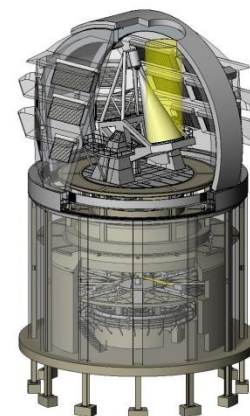


NST @BBSO
(1.6m)



狭帯域フィルターを用いた撮像観測が主流

ATST @Hawaii 4m ϕ



世界の地上大型望遠鏡

Name (site)	D(m)	type	year
ATST (Hawaii, US)	4	open, off-axis	2019
EST (Canary Island)	4?	open	?
### (India)	2	open	?
NST (BigBear, US)	1.6	open, off-axis	2009
McMath (KitPeak, US)	1.6	heliostat	1961
GREGOR (Tenerife, Spa)	1.5	open	2011
COSMO (Hawaii)	1.5	coronagraph	?
NVST [Fuxian, China)	1.0	vacuum	2012
SST (LaPalma, Spa)	1.0	vacuum	2002
THEMIS (Tenerife, Spa)	0.9	helium	1996
DST (SacPeak, US)	0.75	vacuum	1969
VTT (Tenerife, Spa)	0.7	vacuum	1989
DST (Hida, Japan)	0.6	vacuum	1979

大口径プロジェクトはいずれも回折限界を狙う ATST~0.03" !

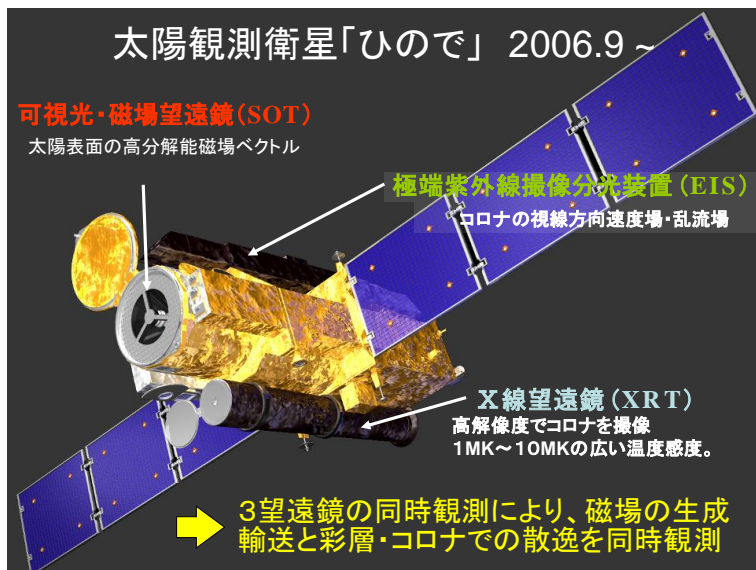
弱点: 視野が狭い。
 よい画像の得られる時間は小口径望遠鏡よりも少ない。
 マシンタイムの取合い、実験的観測をしづらい。

灰: 計画
 青: 建設中
 黒: 既存

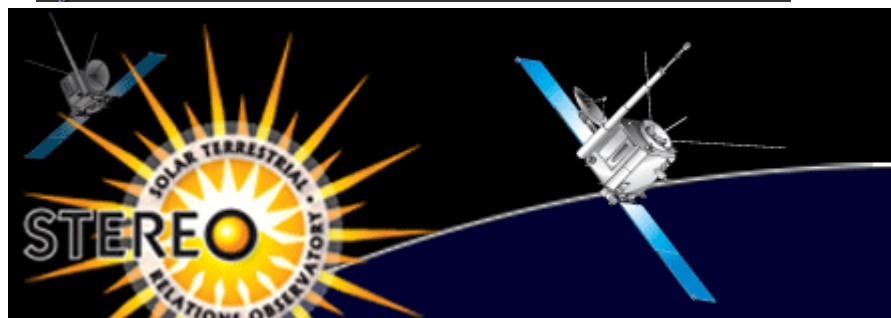
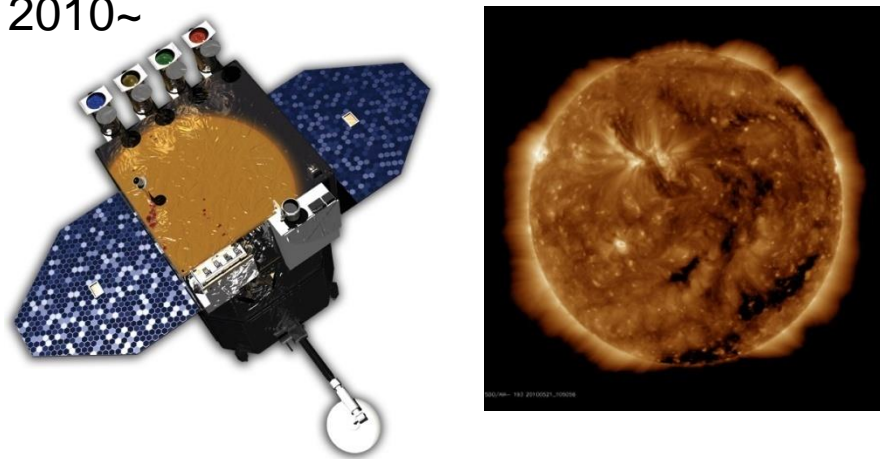
太陽観測の動向： スペース

X線, EUV領域、連続観測, 高安定度

Hinode 2006.9 ~



SDO (Solar Dynamic Observatory)
2010~



STEREO 2006.10 ~

EUV imager + Coronagraph x 2 spacecraft

日本の太陽コミュニティー

次期太陽観測衛星
Solar-C

6. 京都大学理・附属天文台 でできる観測研究

飛騨天文台で開発中の新しい観測装置

2009~

- ・DST 広帯域ポラリメータ

2004~

- ・DST 補償光学装置

2008~

- ・SMART 高感度ベクトルマグネトグラフ

2011~

- ・SMART 連続光/H α 高速フレア撮像装置

2010~

- ・宇宙 (Solar-C) 用狭帯域リオフィルター

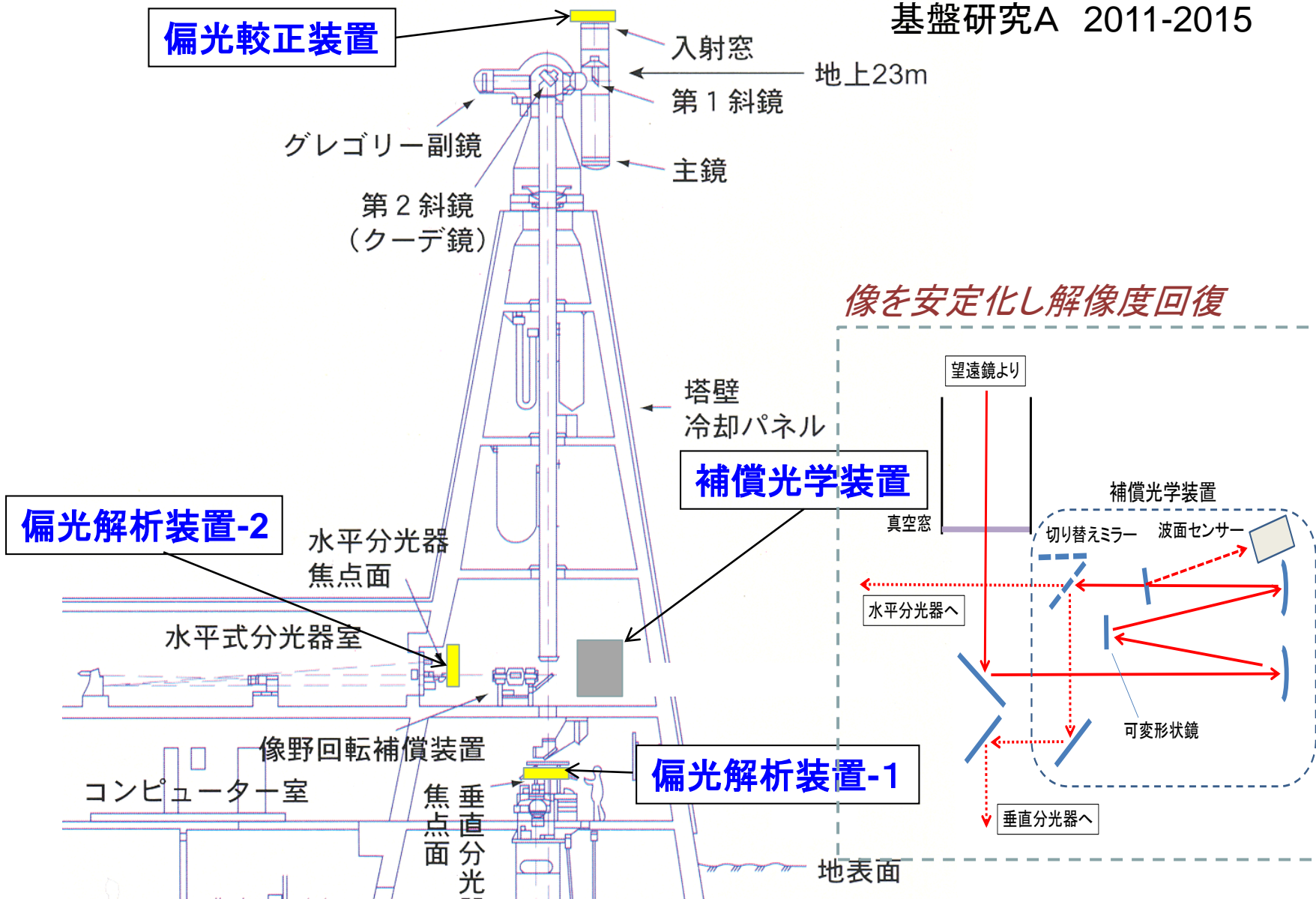
2011~

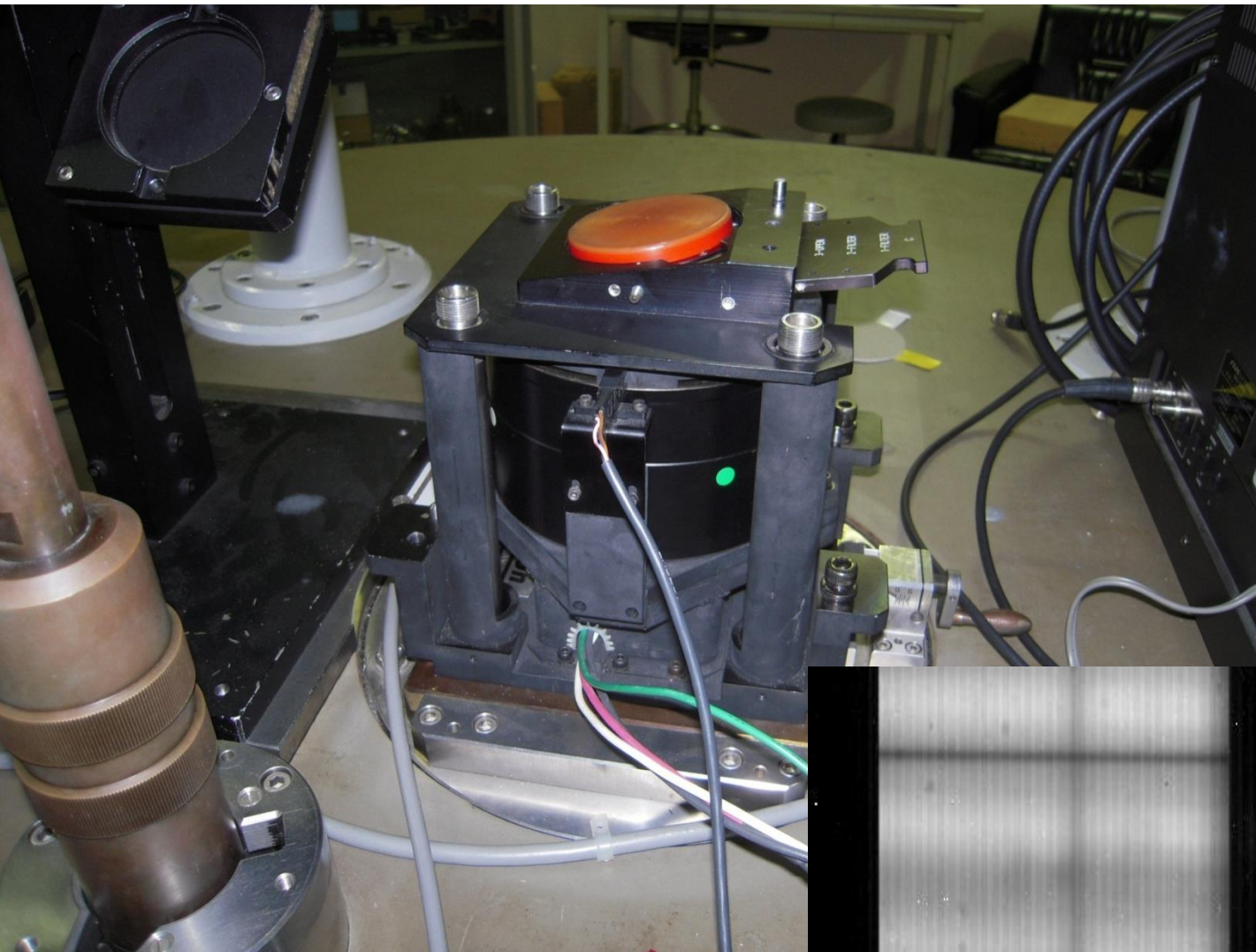
- ・シーイングモニター

ドームレス太陽望遠鏡

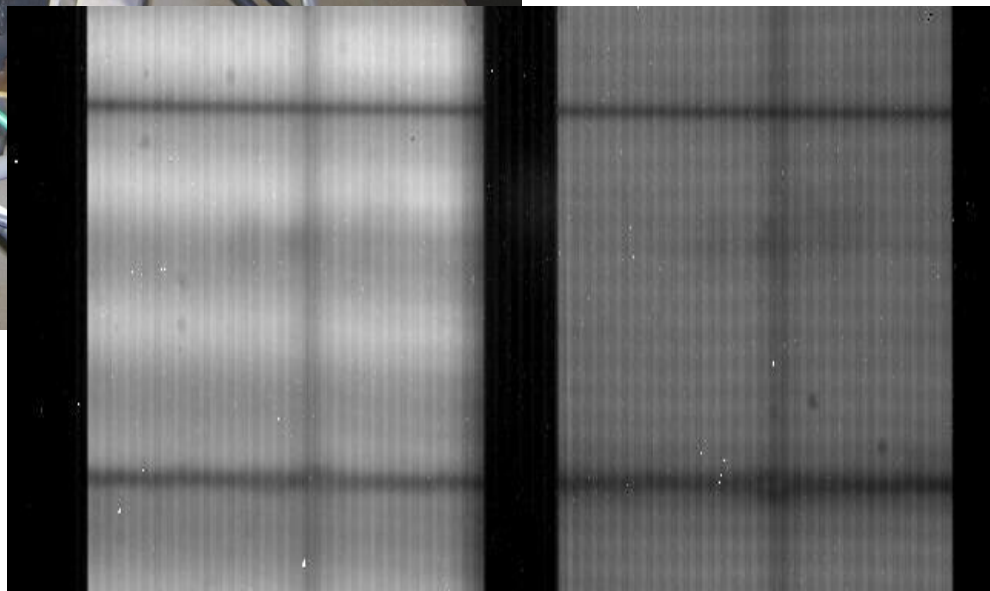
多波長偏光分光による新しいプラズマ診断計画

基盤研究A 2011-2015



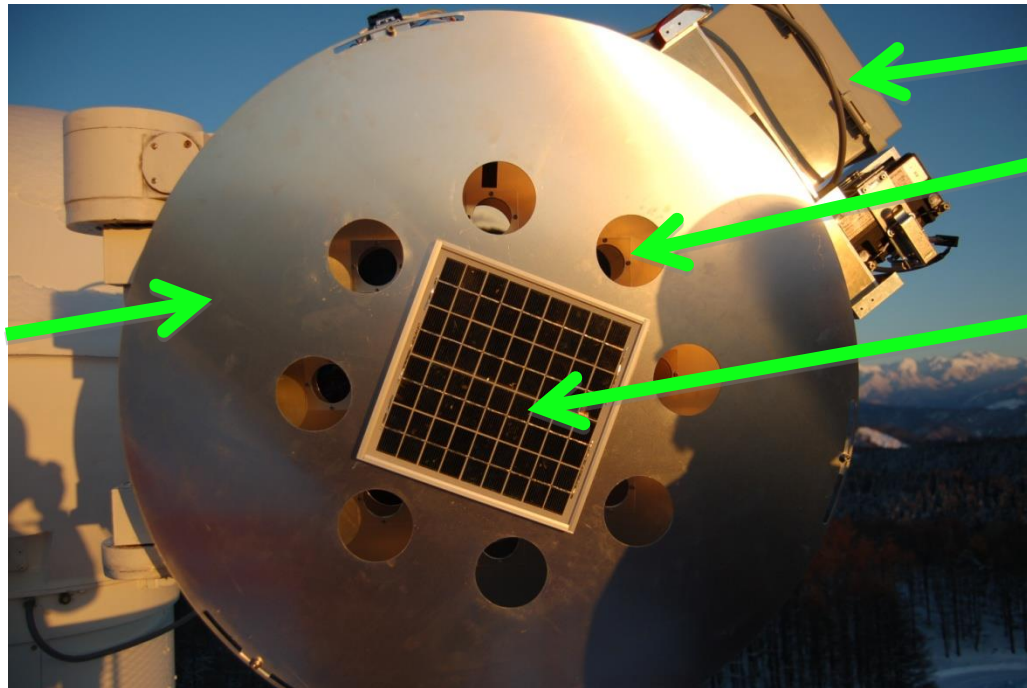


Sil 10827A



キャリブレーション用データ観測手法

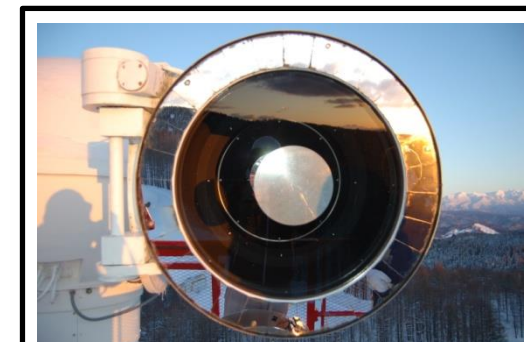
- 観測室から無線で操作し、**既知の偏光をDSTに入射**
- $(I, Q, U, V) = (1, 0, 0, 0), (1, \pm 1, 0, 0), (1, 0, \pm 1, 0)$



バッテリー & 無線

直線偏光板がマスクの
8つの穴から覗いてる状態

太陽電池

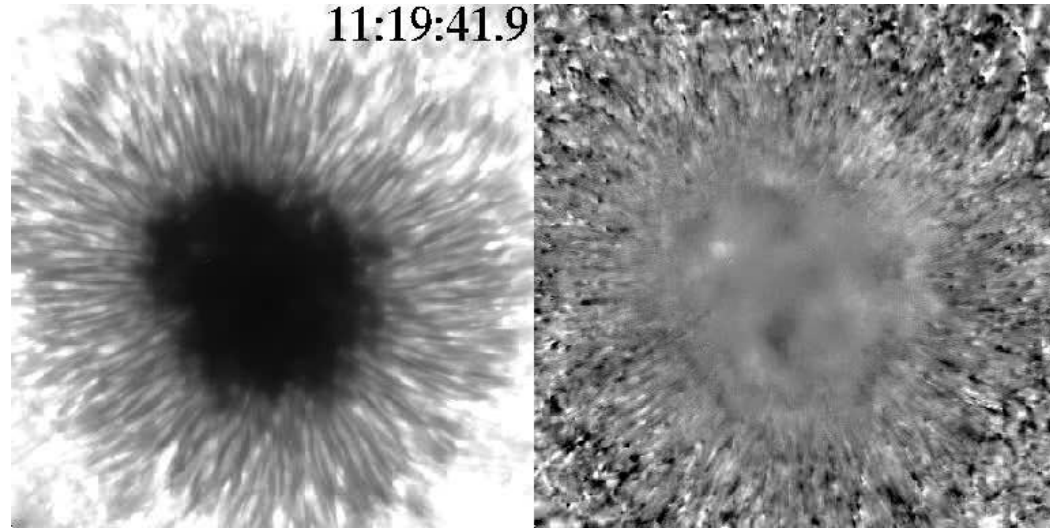


DST入射窓

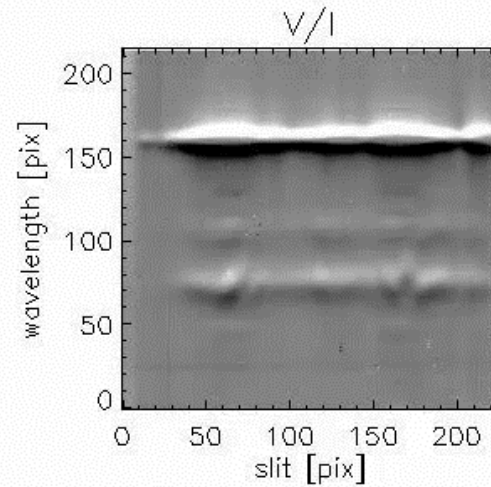
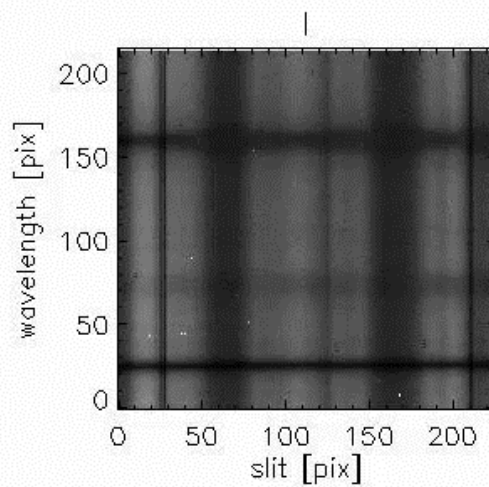
マスクの下で8つの直線偏光板と
8つの穴がある回転板が回る

Oscillation in sunspot chromosphere

SOT/Hinode



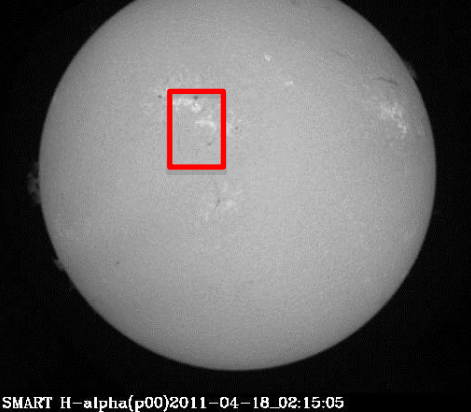
DST
polarimeter



← He I 10830A

By Anan

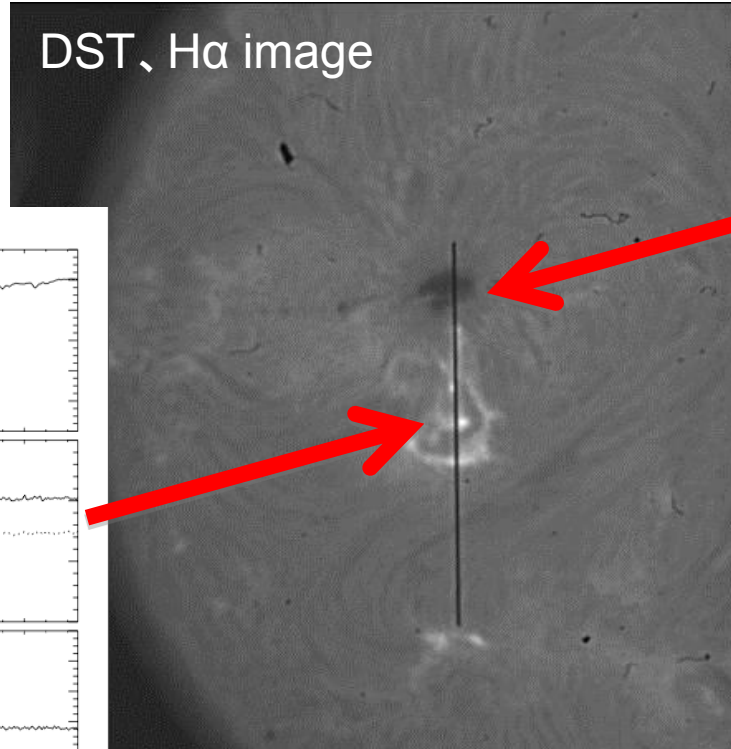
SMART, H α image



Scientific observation since 2011

An example; Call 854.2nm

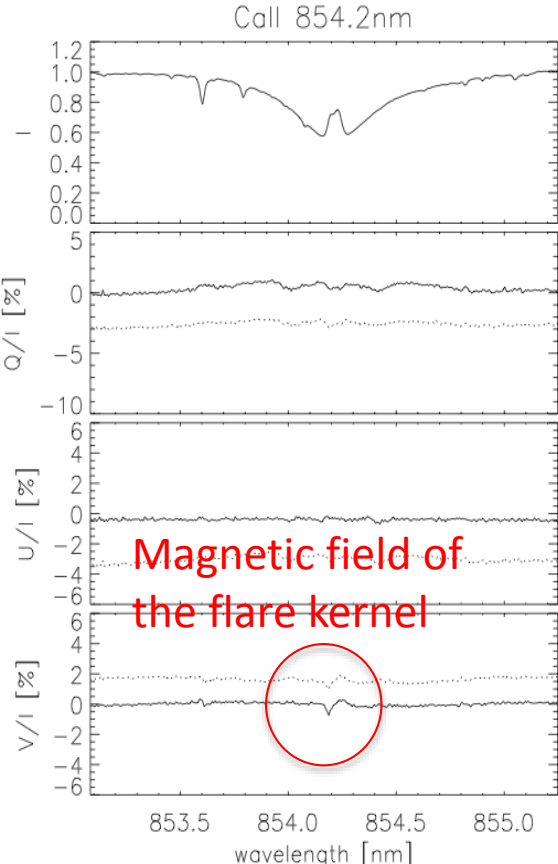
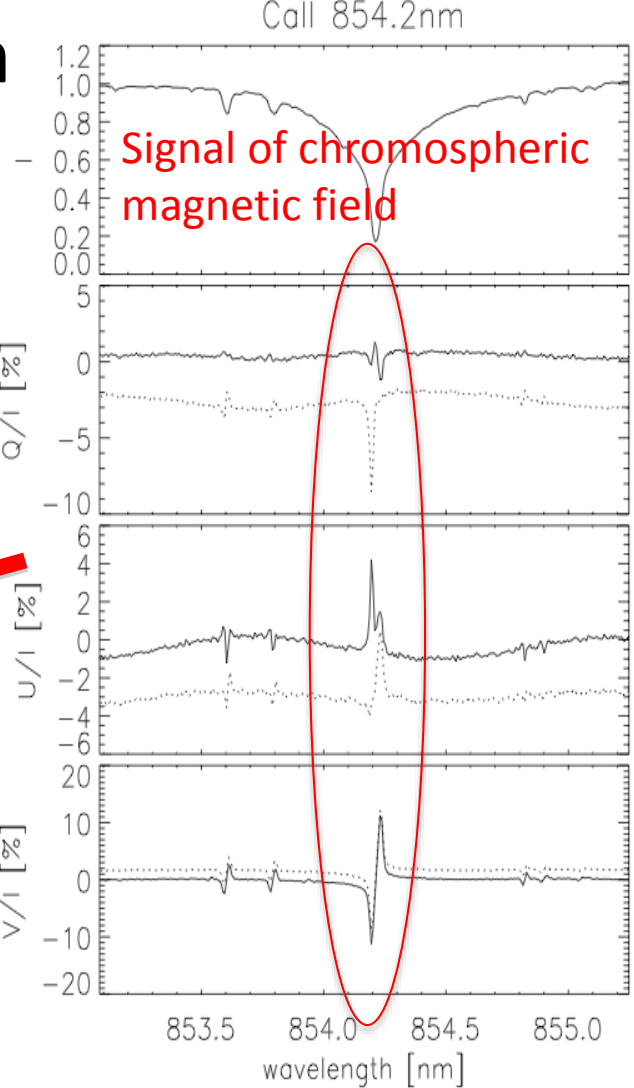
DST, H α image



Slit length = 128 "

0418024555FBin2Bit10p00

by T. Anan



空間分解能: 0.4秒角/pix
 波長分解能: 0.07 Å/pix
 点線: DSTキャリブレーション前
 実線: DSTキャリブレーション後

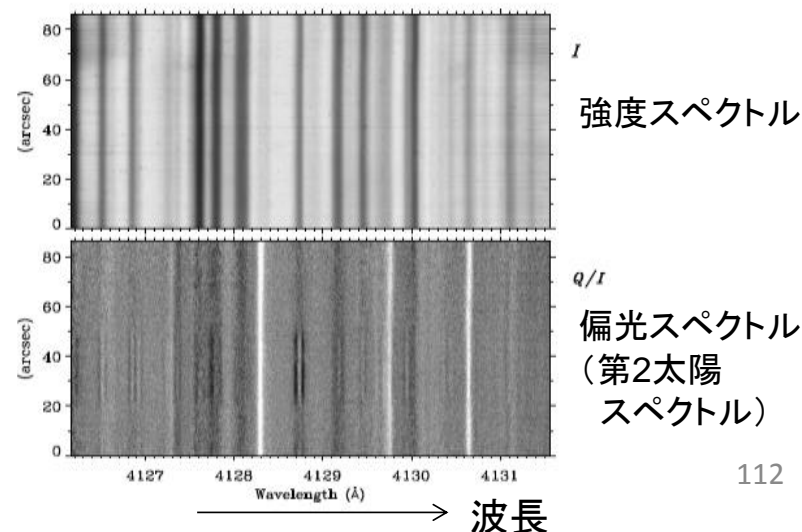
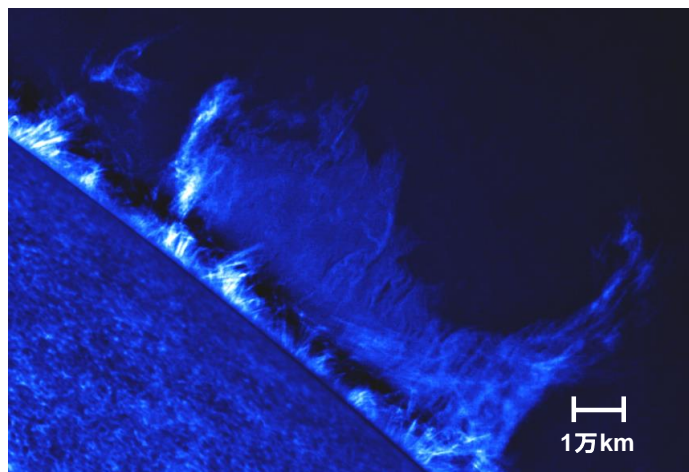
ドームレス太陽望遠鏡

多波長偏光分光による新しいプラズマ診断の開拓

ゼーマン効果	→ 光球、プロミネンス磁場
散乱偏光、ハンレ効果	→ 彩層・コロナ弱磁場
シュタルク効果	→ 彩層・コロナの電場
衝突偏光	→ 粒子ビーム、熱伝導

原子の偏向と輻射過程の基礎研究

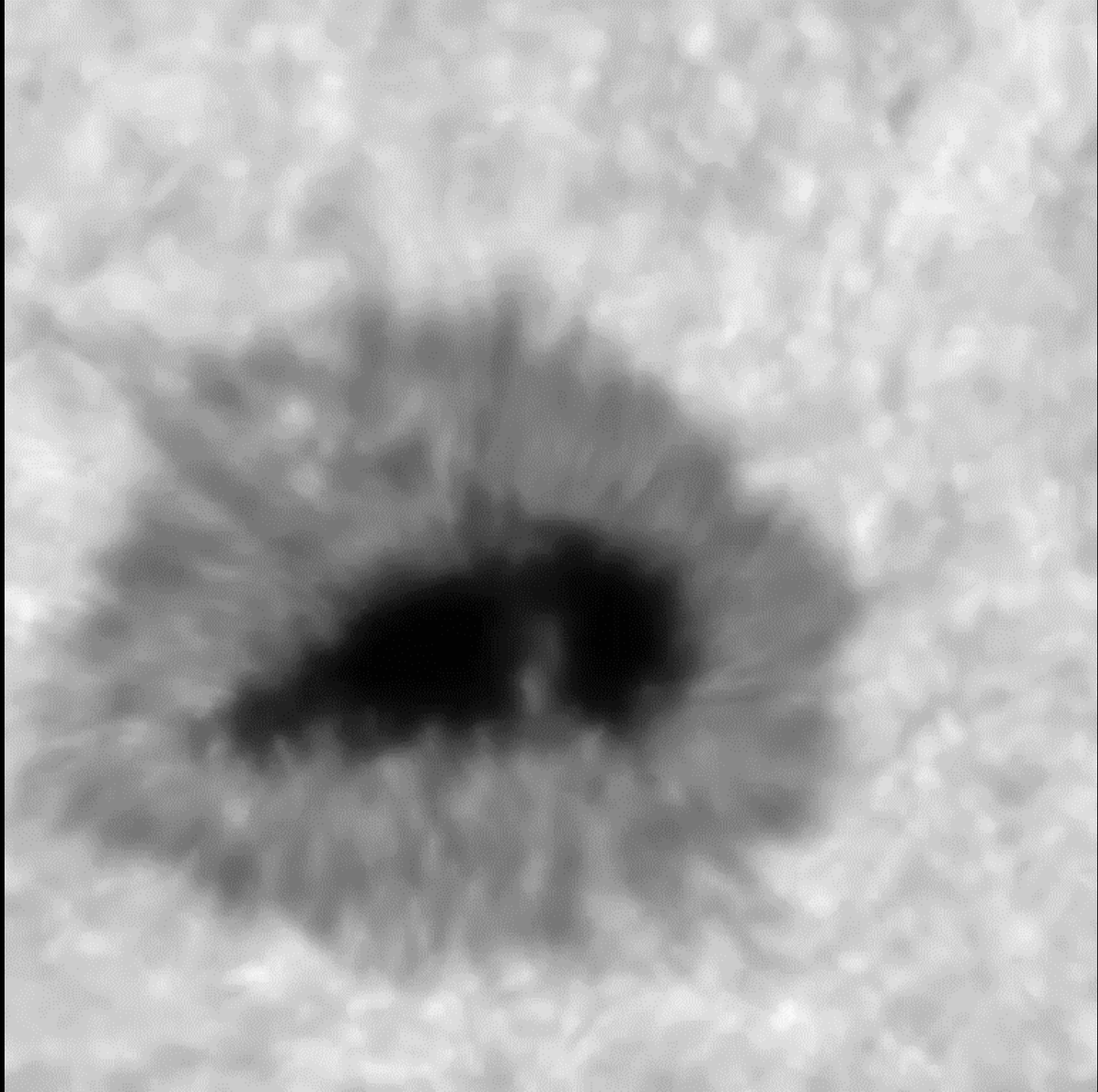
→ 天体磁気プラズマの基礎過程を真に理解する



DST
2013.6.25

430nm
ORCA4
1ms expo.x100

天体観測の
天敵 =
シーイング

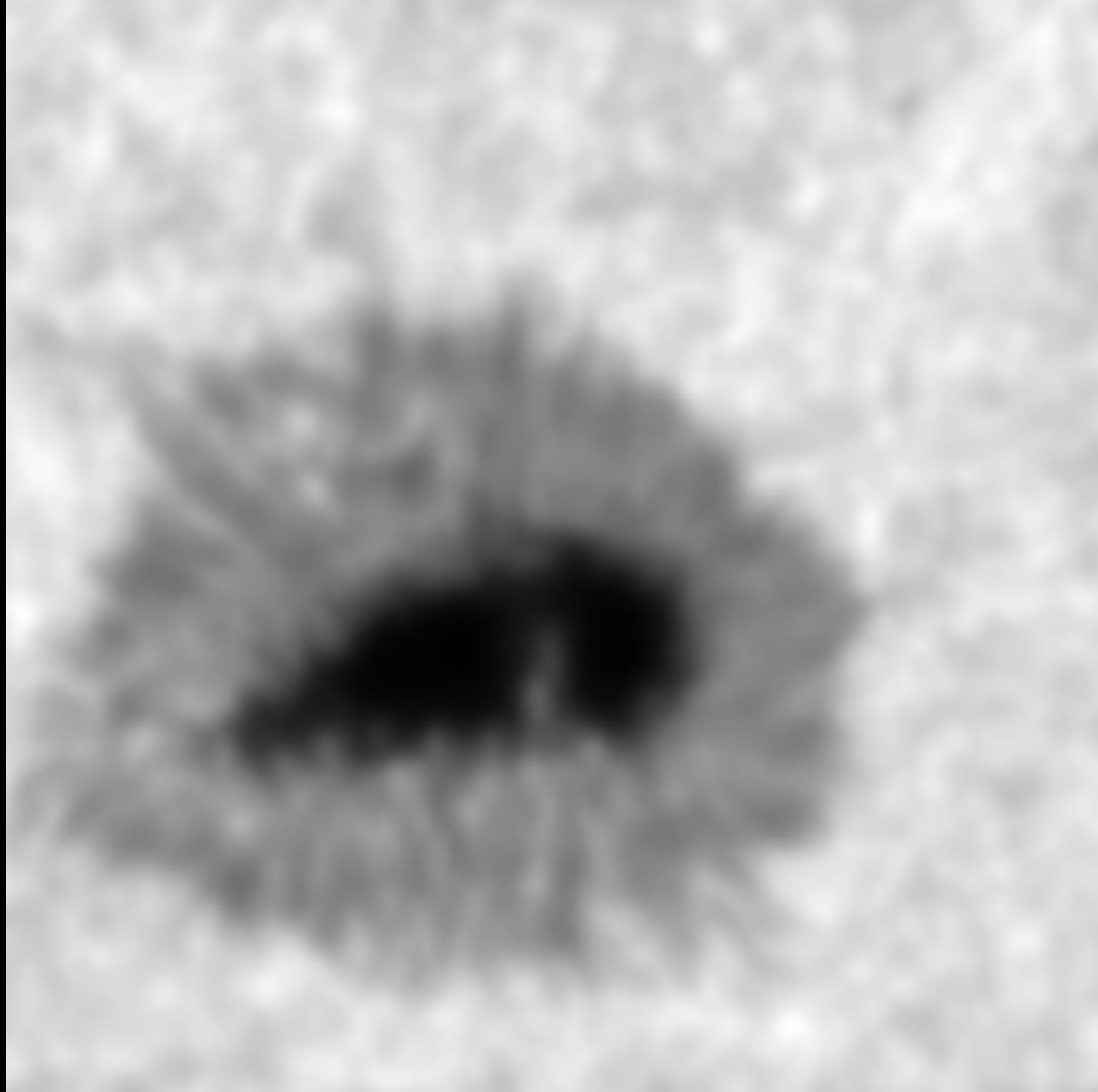


ドームレス望遠鏡
2013.6.25

430nm
ORCA4
1ms expo.x100枚

回折限界分解能
~0.2秒角
~120km



平均画像
1秒露出の画像



シーイングとは、

対象天体  球面波

十分遠くにある観測対象天体から出てくる光は、対流圏まではほぼ平面波


⋮
 平面波

地球対流圏

対流圏内では、大気の乱流による温度分布の揺らぎが生じ、それにより屈折率揺らぎが生じている

空気中の屈折率揺らぎ

地上で観測する際には、対象天体からの光はゆがんだ波面として見え、それが時間変動

観測者 

((★))

像の位置揺らぎ, ぼやけ, シンチレーションなど

より高解像度を目指して..

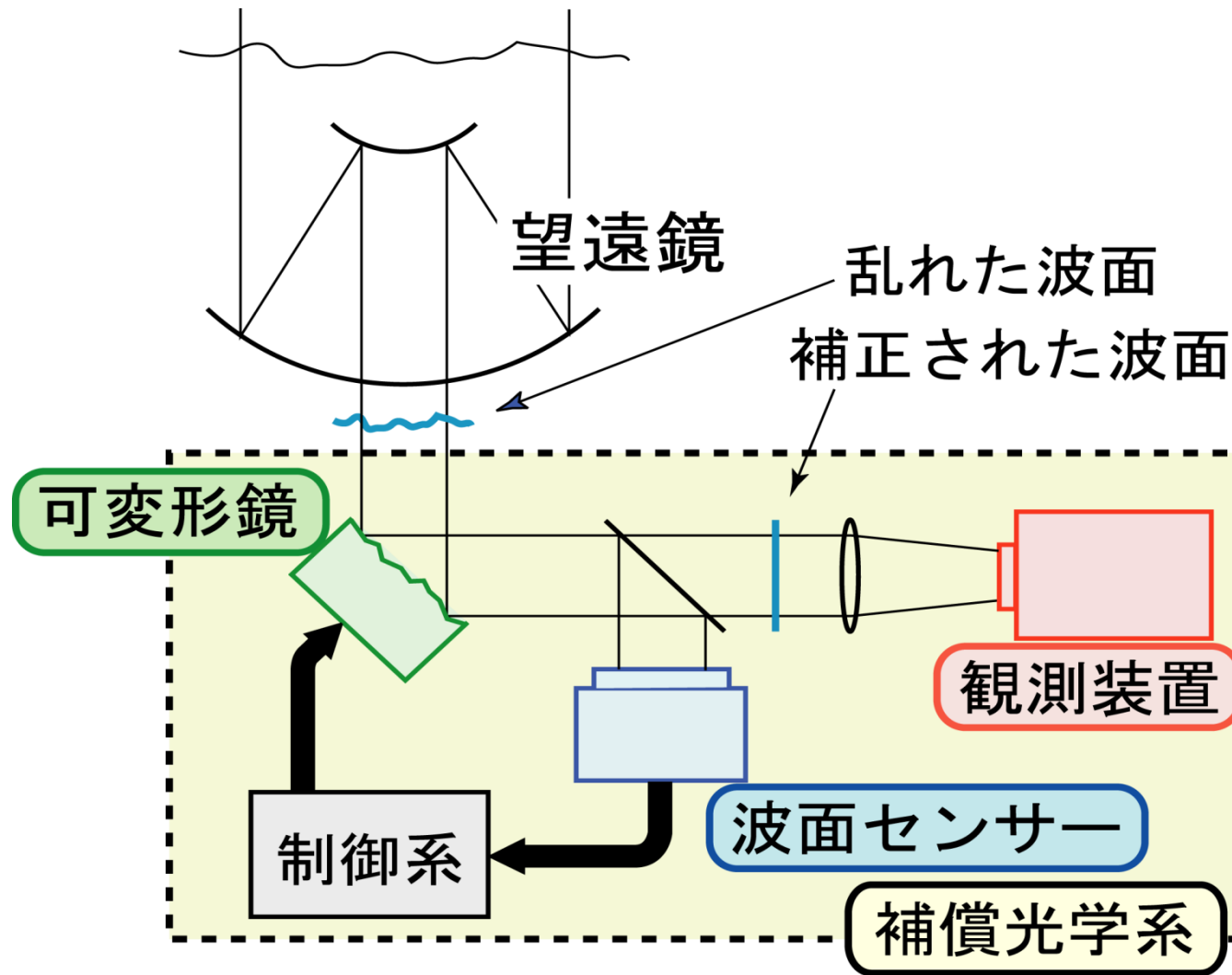
リアルタイムで波面のゆらぎを補正

→ Adaptive optics 開発中

画像復元

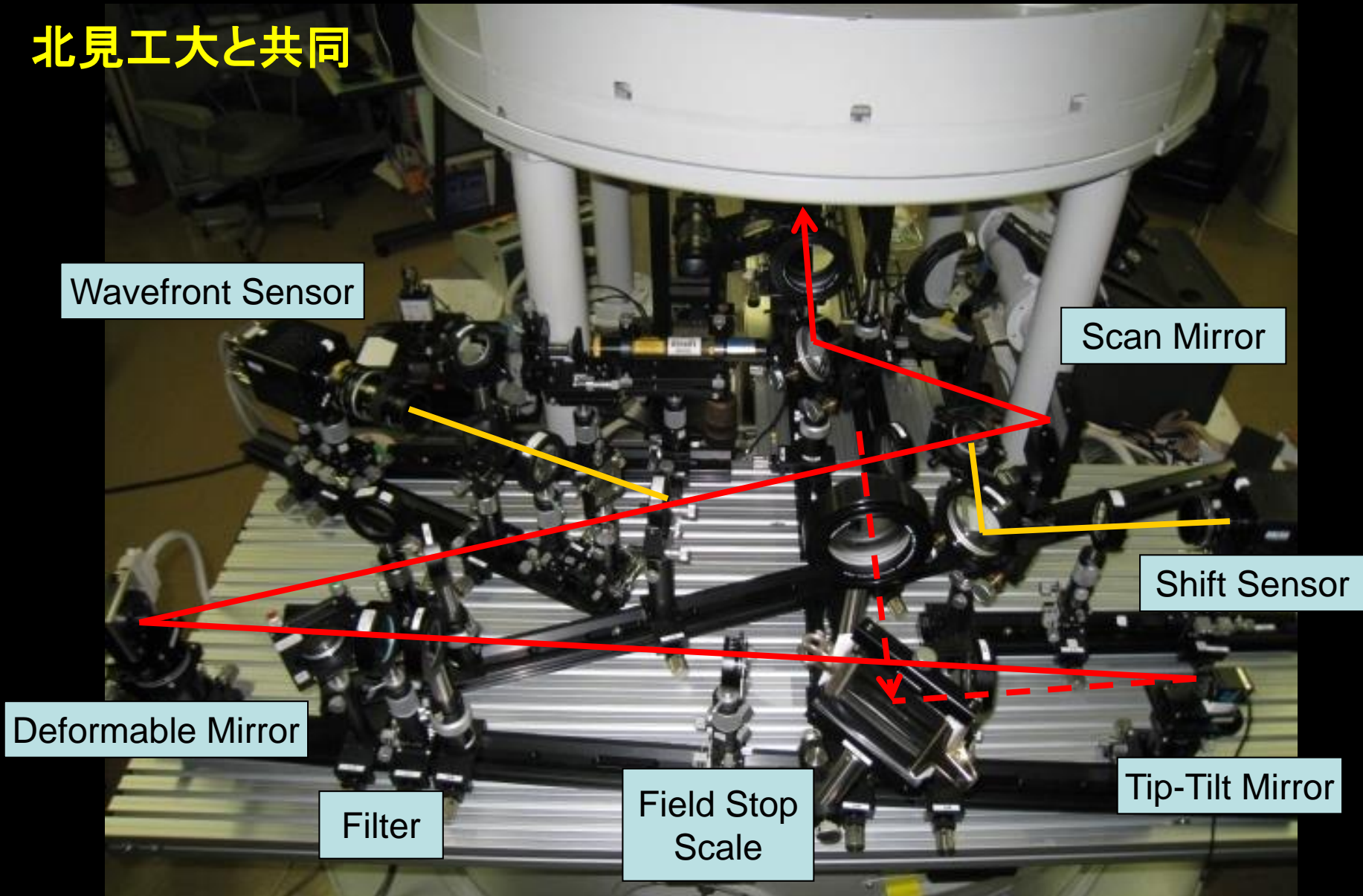
→ スペックルマスキング 最近開発

シーイングを克服する補償光学 (Adaptive Optics)



DST補償光学装置プロトモデル 2010

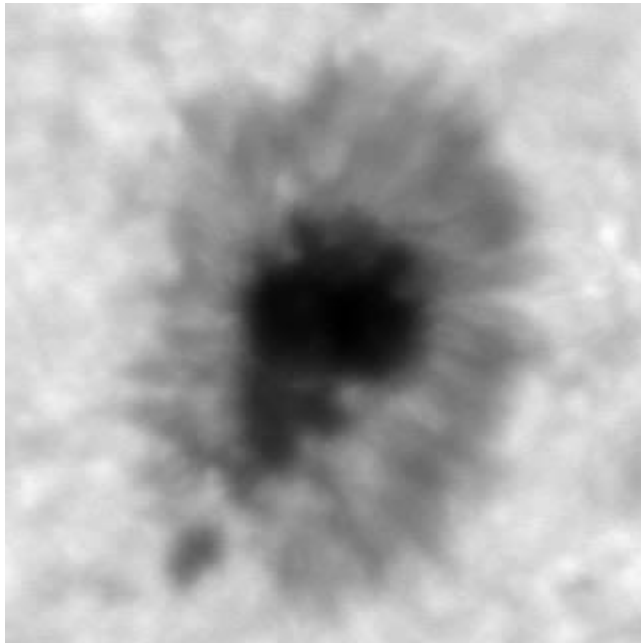
北見工大と共同



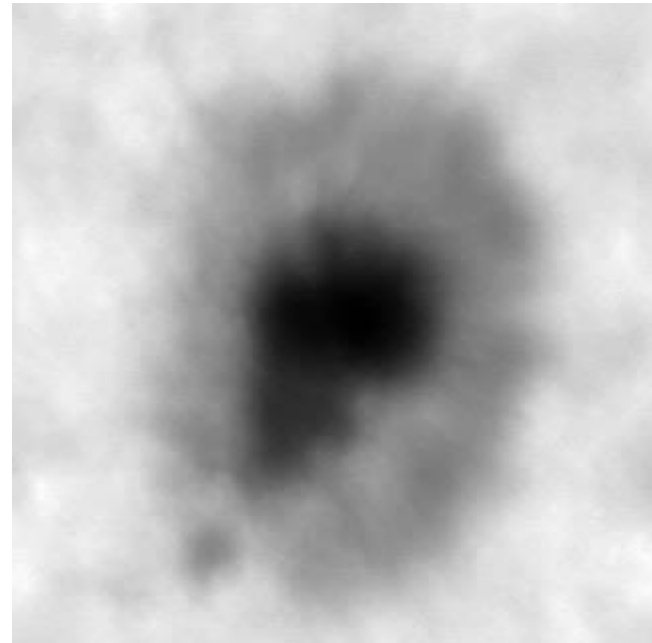
結果(1)

2010.11.20

AO-ON(21-70)



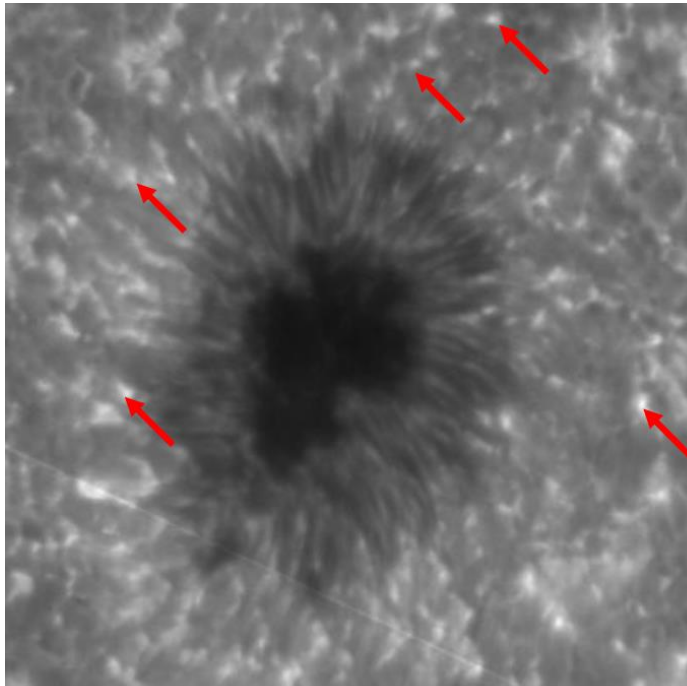
AO-OFF(251-300)



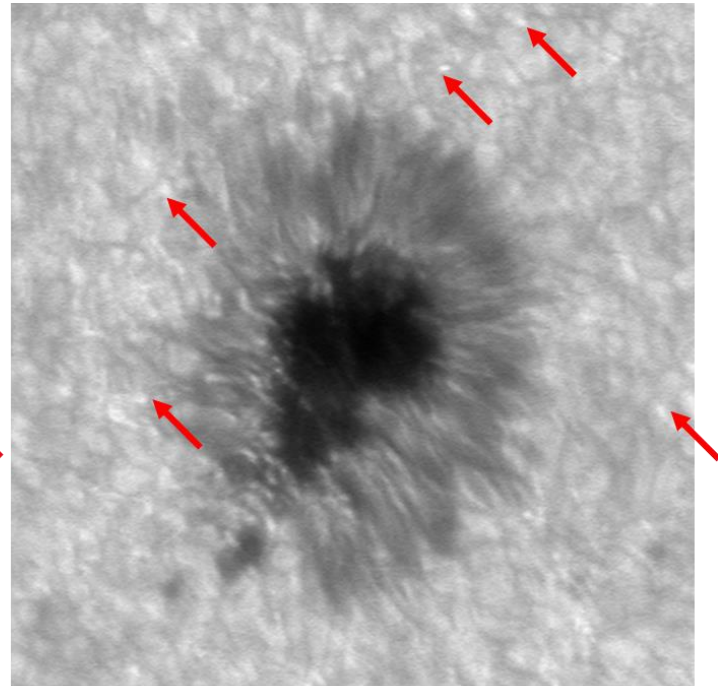
by (元)北見工大 横山

結果(2)

- ほぼ同時刻に太陽観測衛星「ひので」から撮られたものと、地上からAOを動作させながら観測したものとの比較。



Hinode SOT-FG Ca-II H
2011.11.21 08:43:08(JST)



DST AO+IP G-band
2011.11.21 08:42:49 (JST)

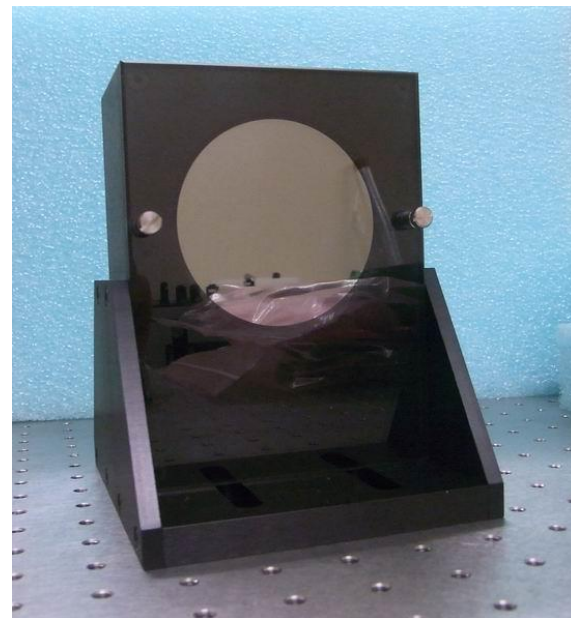
新AOの開発

現AOシステムの問題点

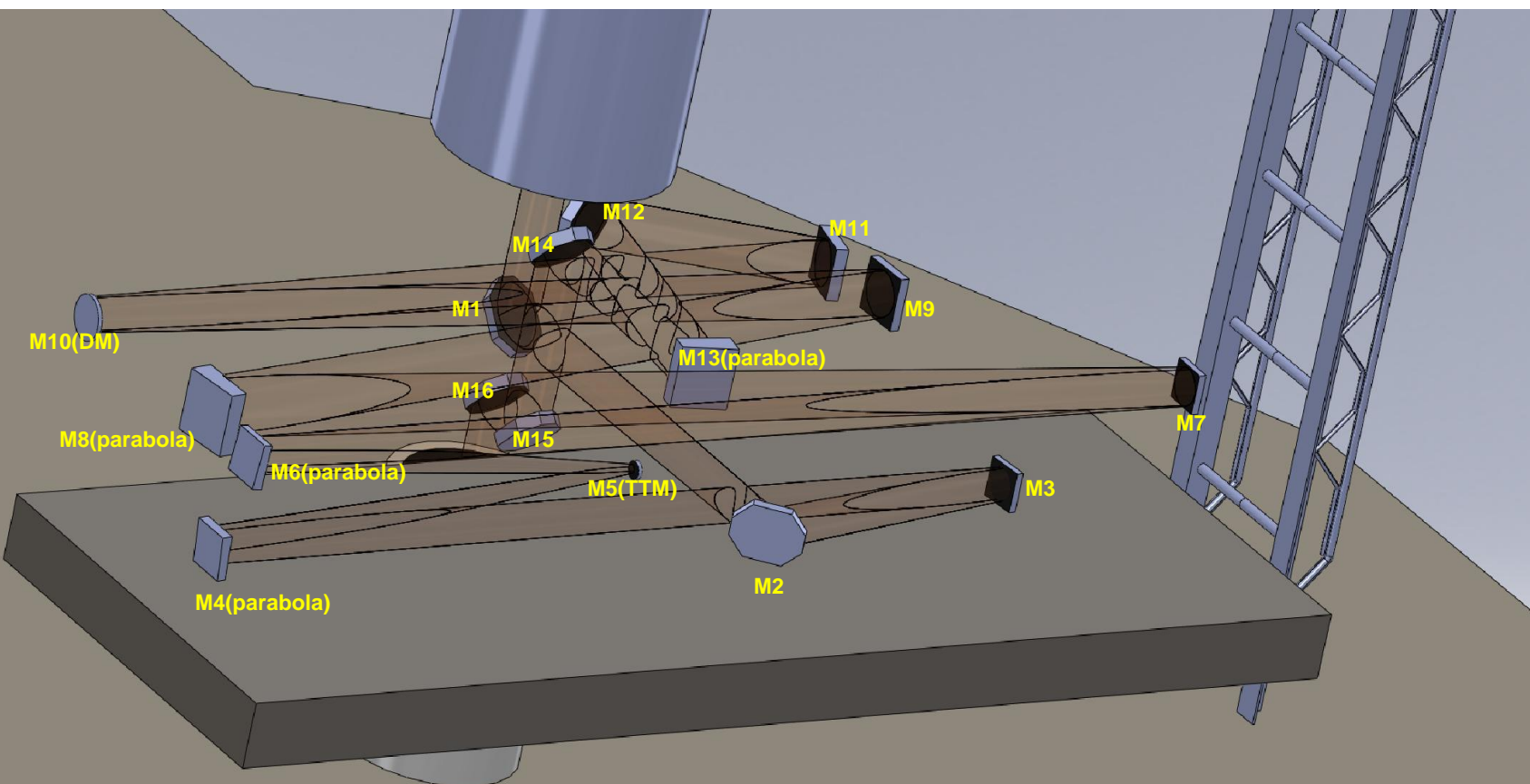
- (1) 波面補償能力が不十分
 - (2) 光量の損失が大きい
 - (3) 限られた波長(垂直分光器)でしか使えない
- これらのため、科学的な観測に適用できていない

新AO

- ・97素子可変形鏡
- ・高スループット
- ・水平、垂直両用

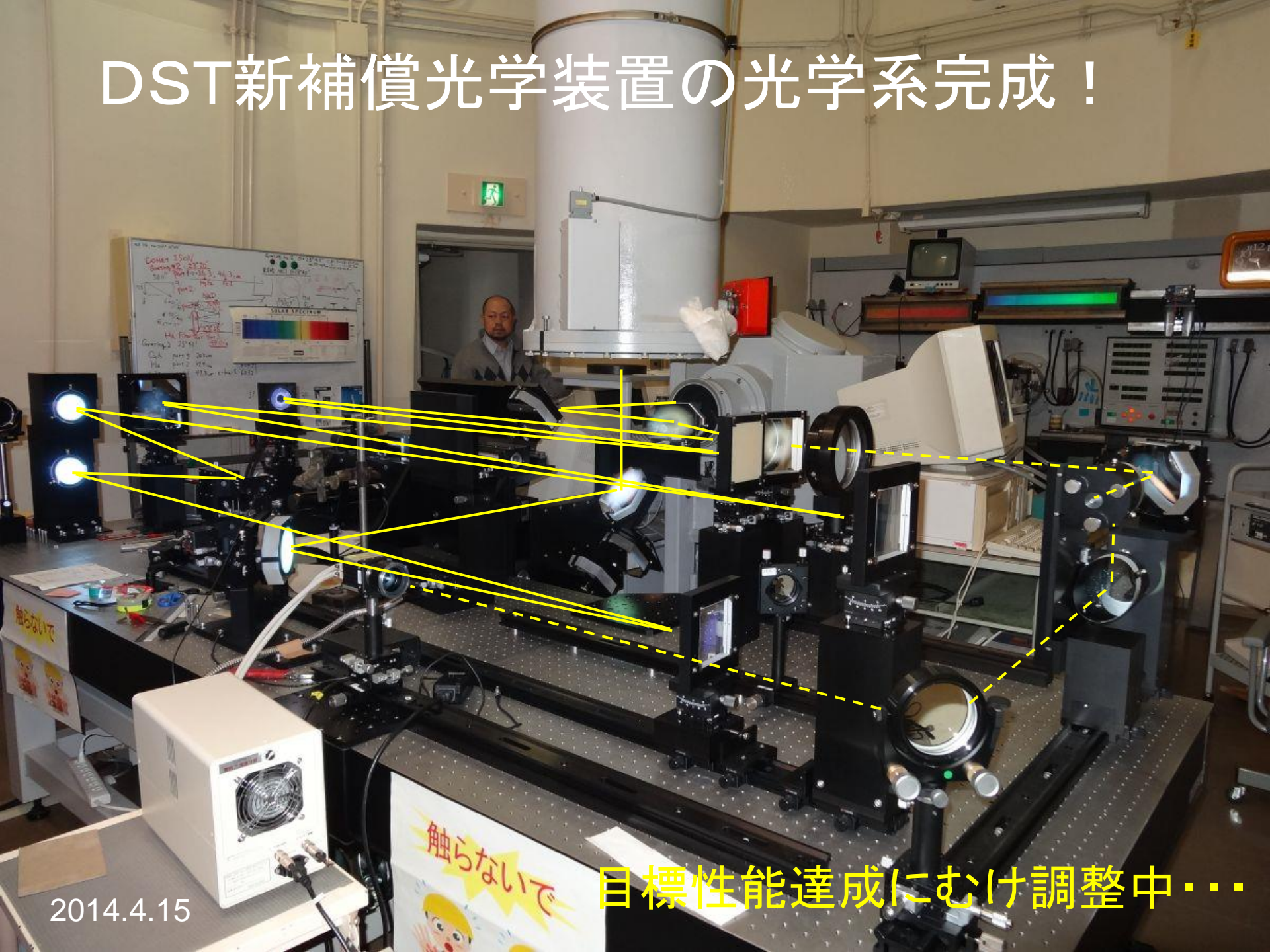


本格AO計画： 光学ベンチ



今年中のファーストライトを目指して製作中。。

DST新補償光学装置の光学系完成！



2014.4.15



目標性能達成にむけ調整中...

スペックルマスキングによる 画像復元プログラム

Lohmann, Weigelt, and Wirnitzer, 1983, App. Opt., 22, 4028

Pehlemann and von der Luhe, 1989, AA, 216, 337

spemirh

一本 & 川手 2014, 京都大学大学院理学研究科附属天文台技報 Vol. 2 -1

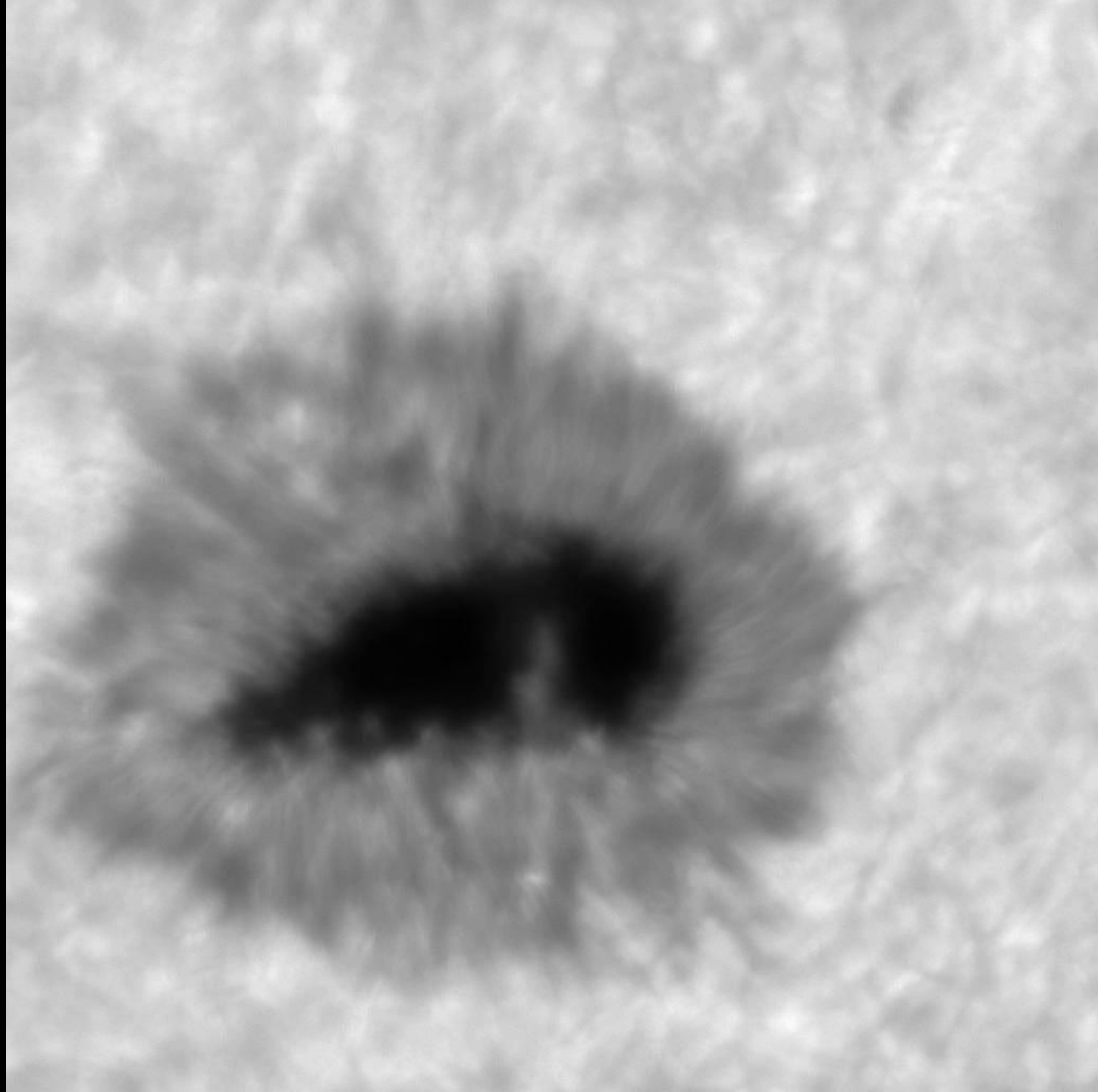
フーリエ空間における振幅と移送の復元

DST
2013.6.25

430nm
ORCA4
1ms expo.x100

$r_0 \sim 38\text{mm}$

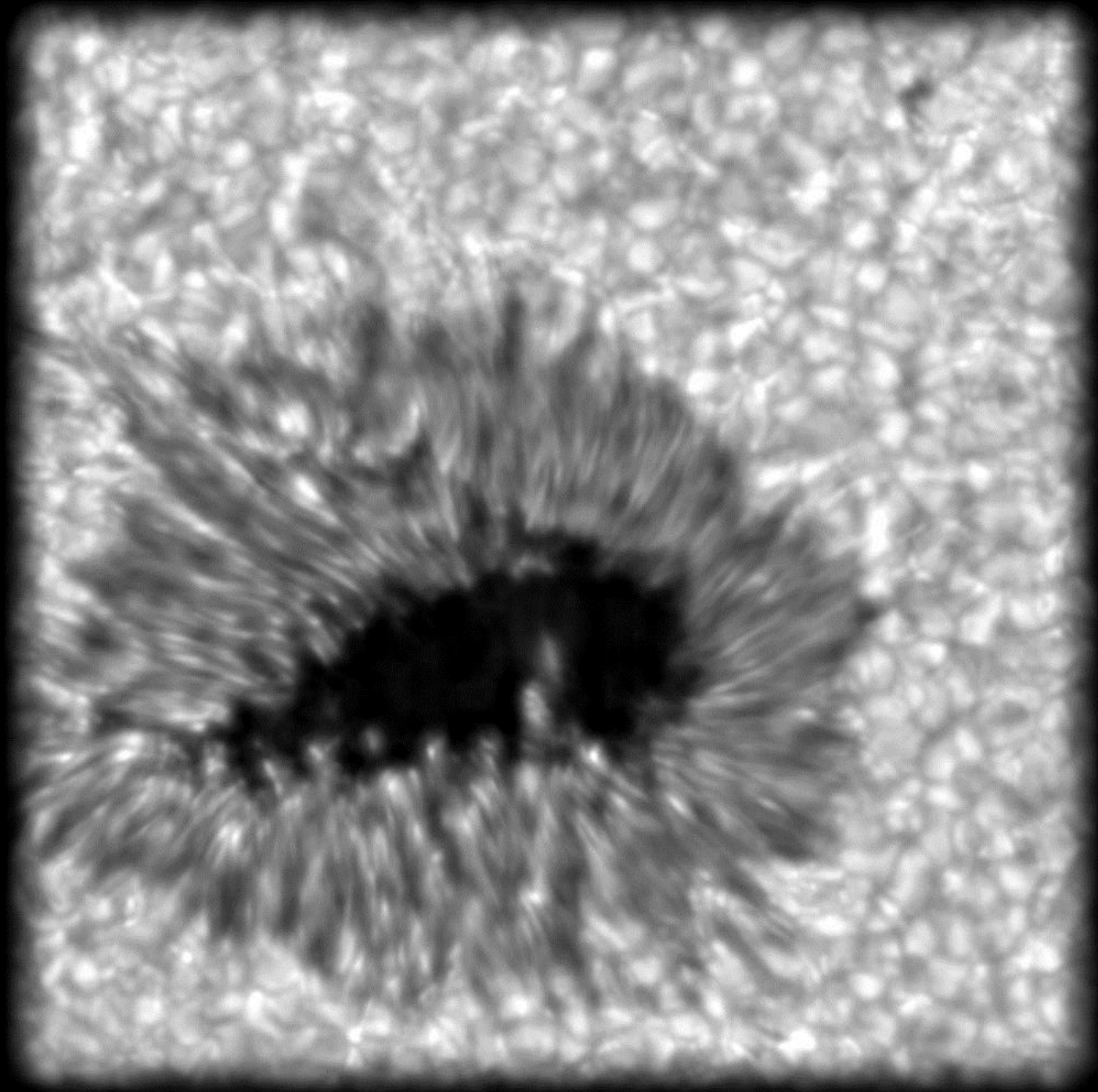
$w=128\text{pix}$



DST
2013.6.25

430nm
ORCA4
1ms expo.x100

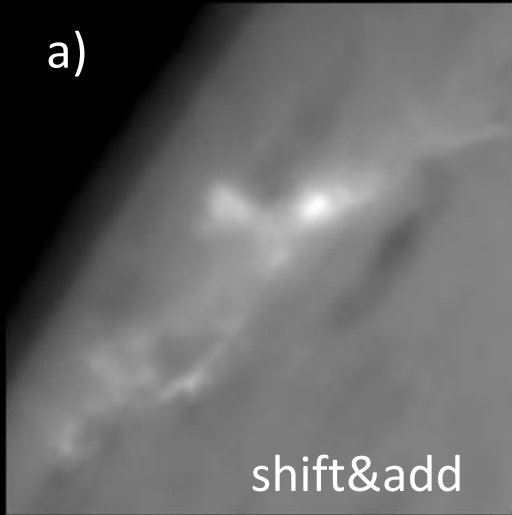
Speckle masking
+
Deconvolution
(max_likelihood)



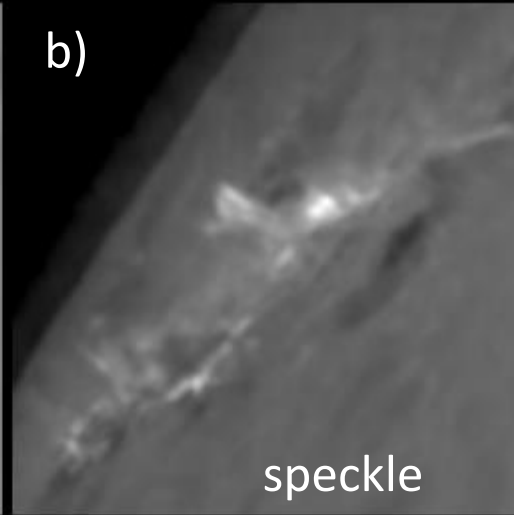
2013.5.14 X flare

Ha

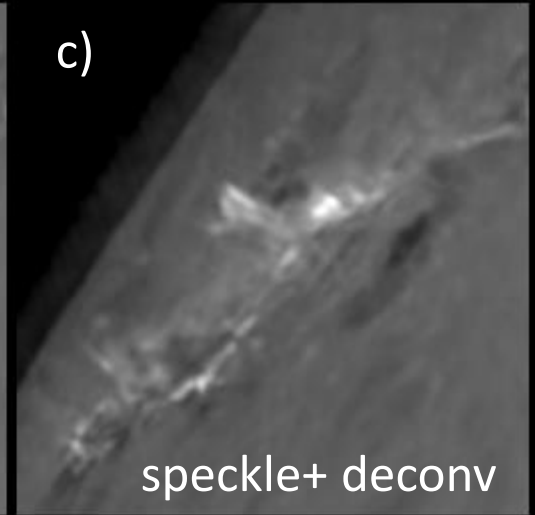
a)



b)

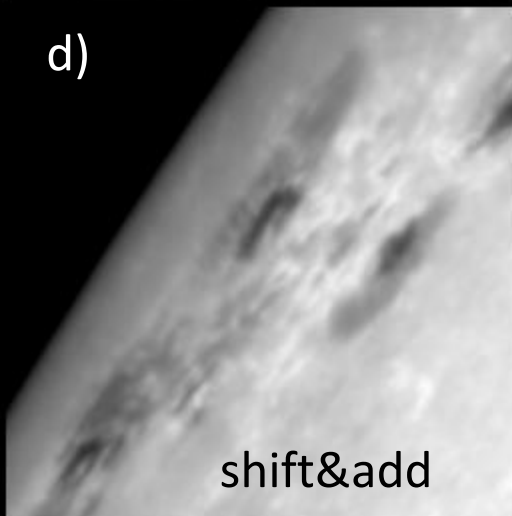


c)

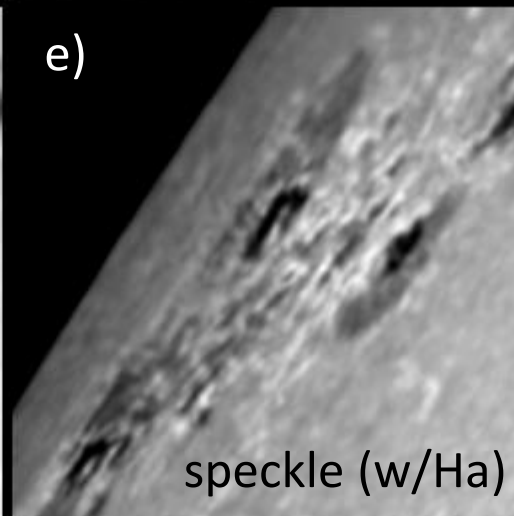


Conti.

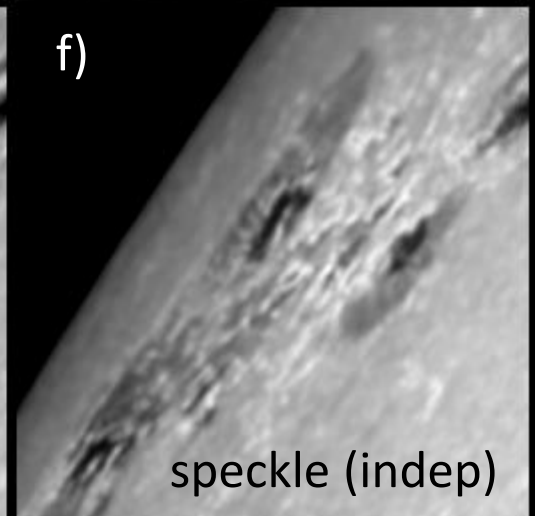
d)



e)



f)

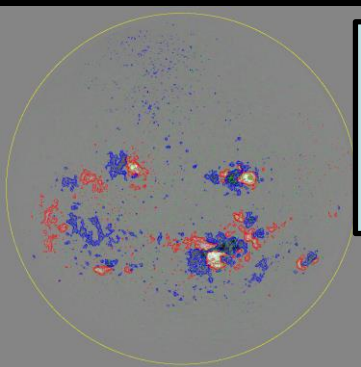
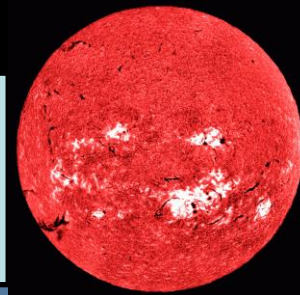


SMART望遠鏡の開発

2004~

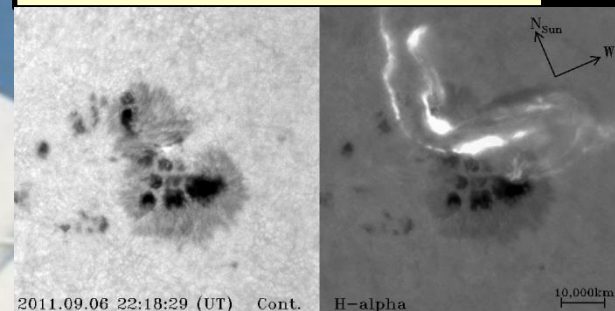
全面磁場
活動領域の発達過程
(休止中)

H α 全面撮像
フレア・プロミネンス
放出の監視



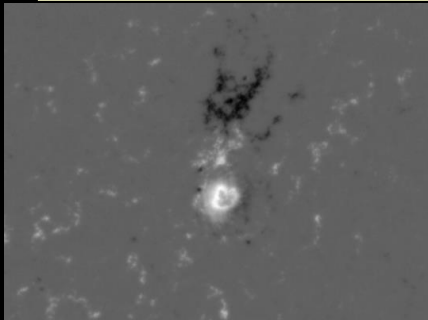
2011~

H α /連続光高速撮像
白色光フレア、高エネルギー粒子の診断



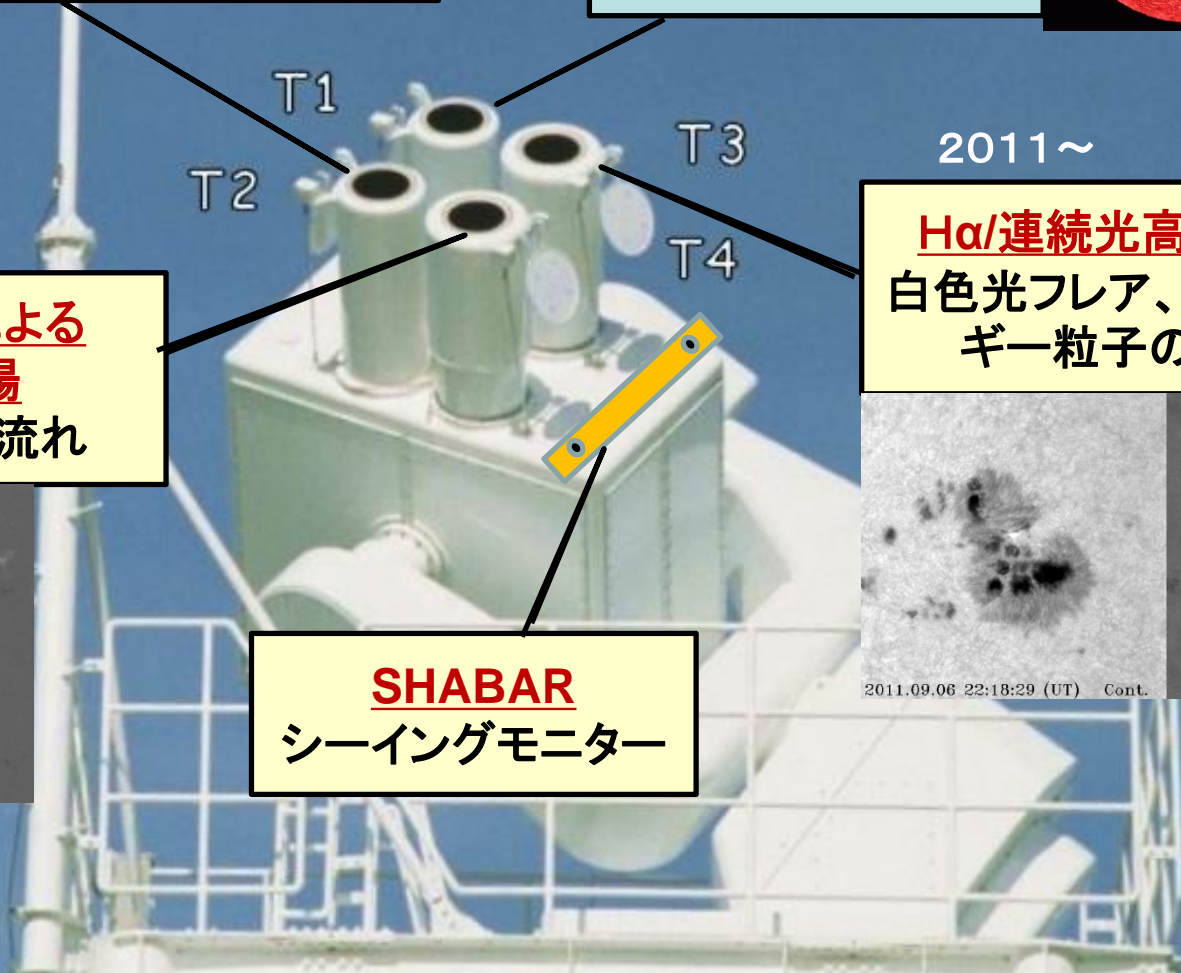
2012~

**ファブリペロによる
高精度磁場**
大規模磁場と流れ



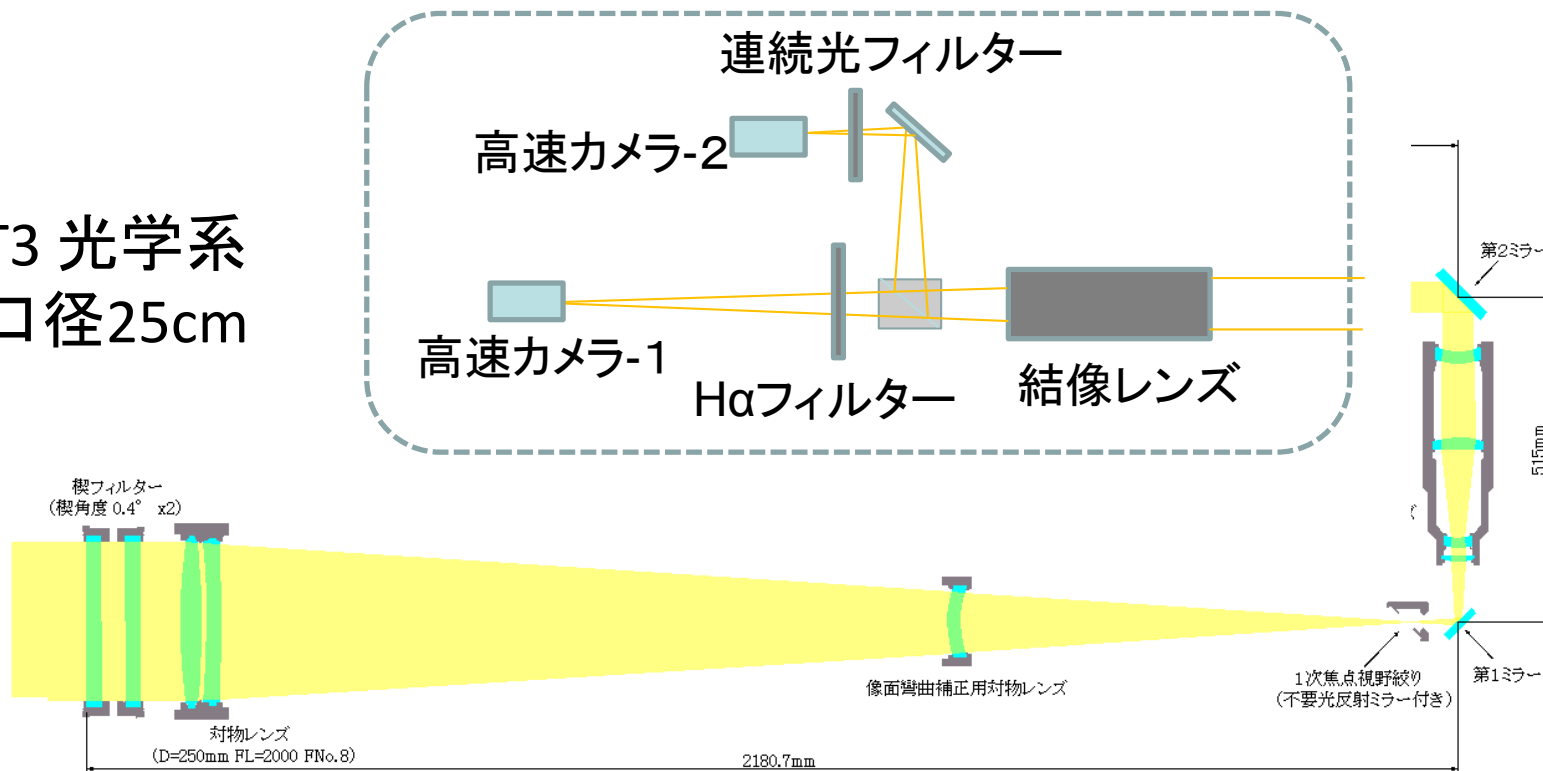
T1
T2
T3
T4

SHABAR
シーイングモニター



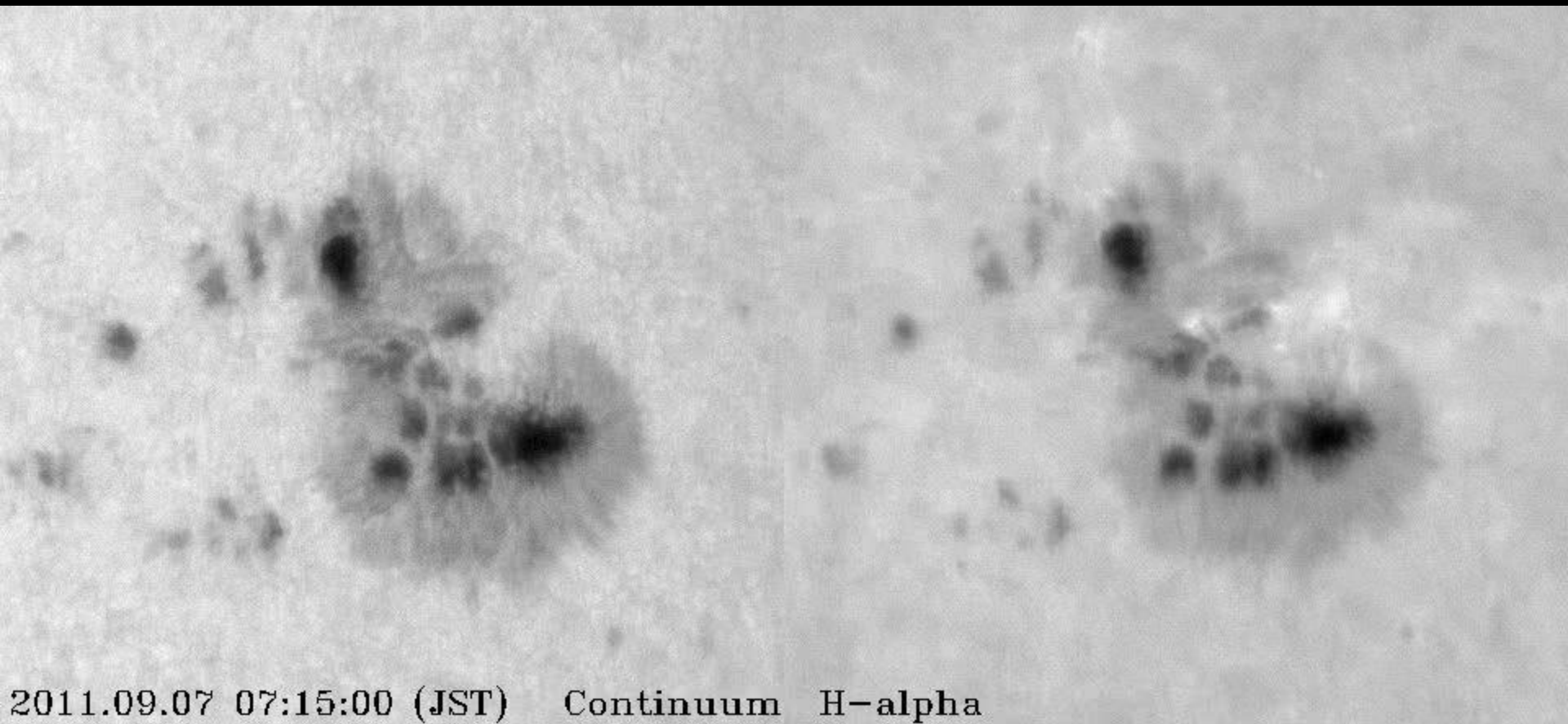
SMART T3 による 白色光 + H α フレアカーネル高速撮像計画

T3 光学系
口径25cm



- 連続光とH α 同時撮像
- 1600x1200CCD, $\sim 0.2''/\text{pix}$, 30 frame/sec
- Speckle による像質改善

White light flare on 6 Sep.2011 (X2.1)

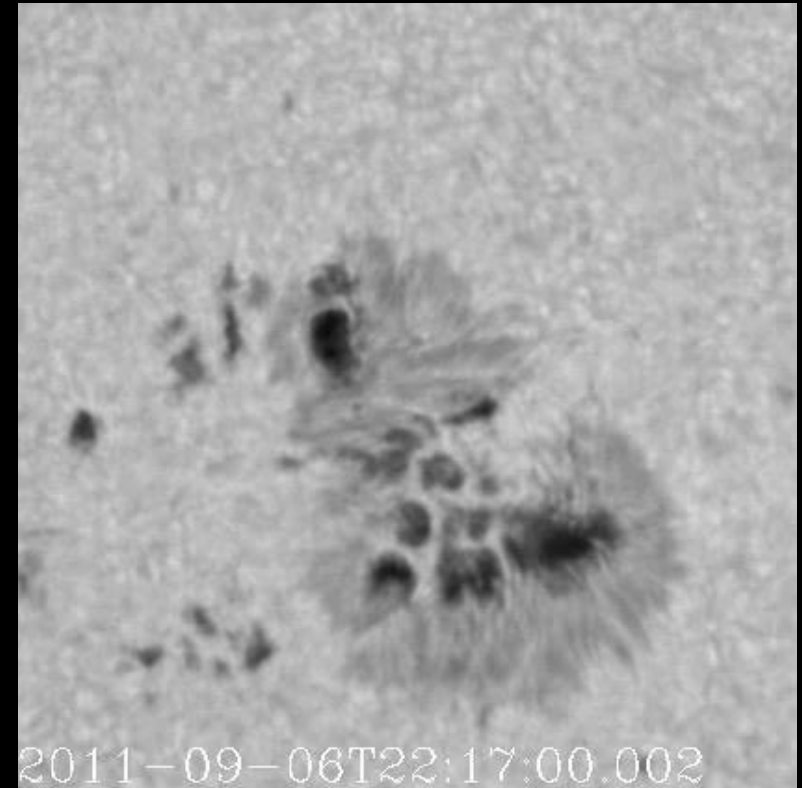


2011.09.07 07:15:00 (JST) Continuum H-alpha

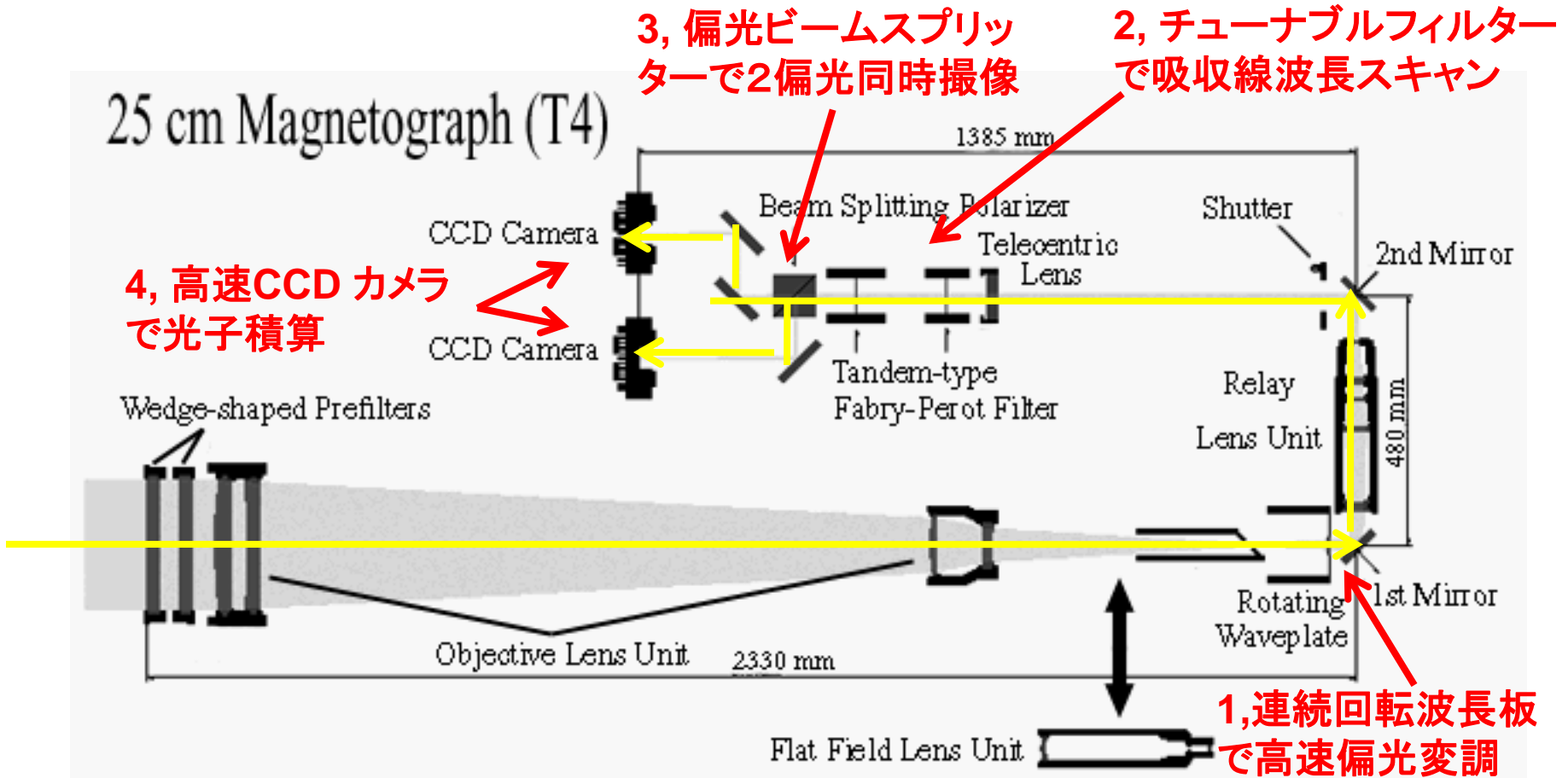
SMART/FISCH flares

20120709 Ha

20110906 continuum



4 key components of SMART T4 magnetograph

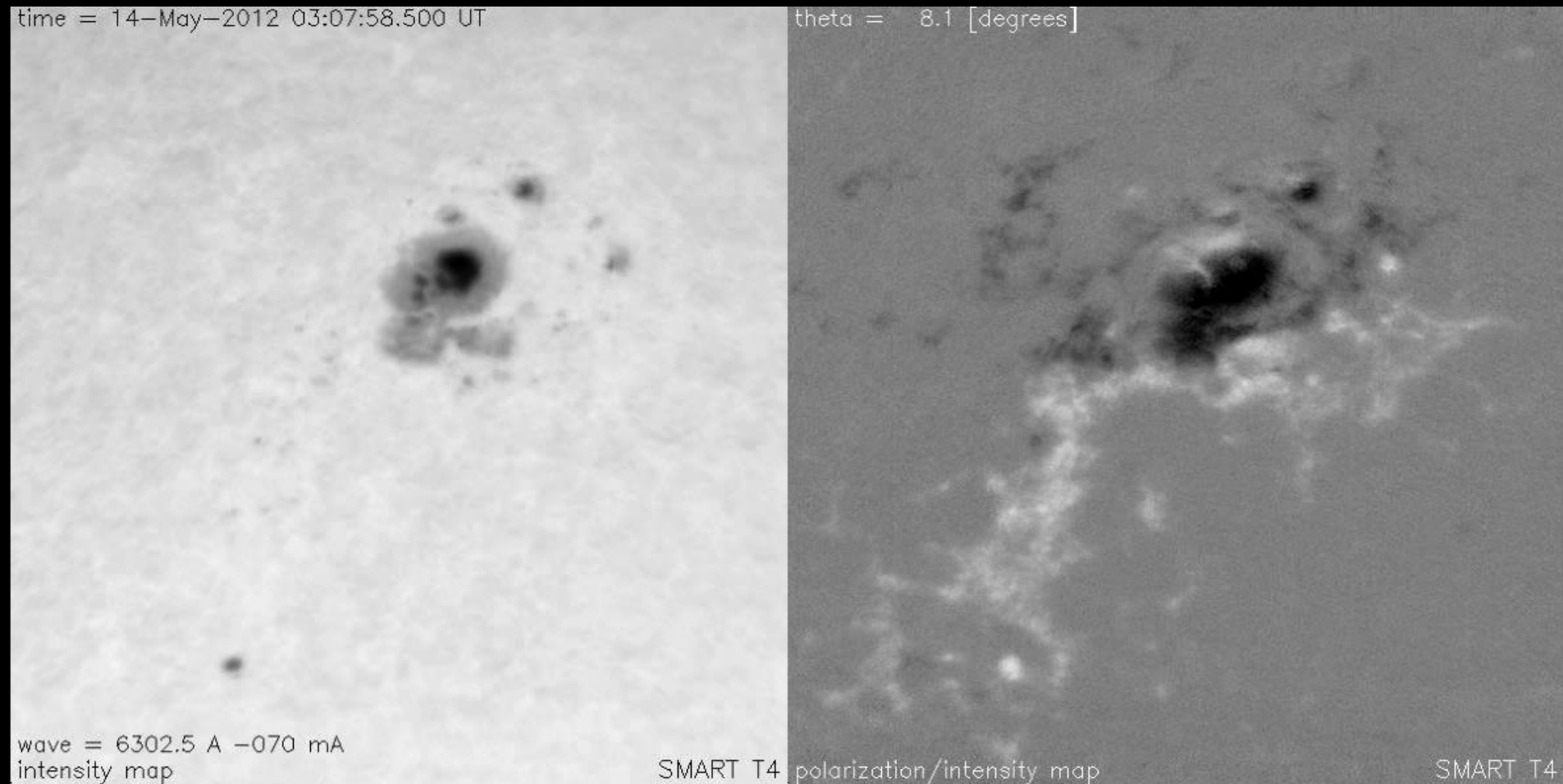


The coefficients a, b, c, d are the function of wave plate

SMART T4 vector magnetograph

Intensity

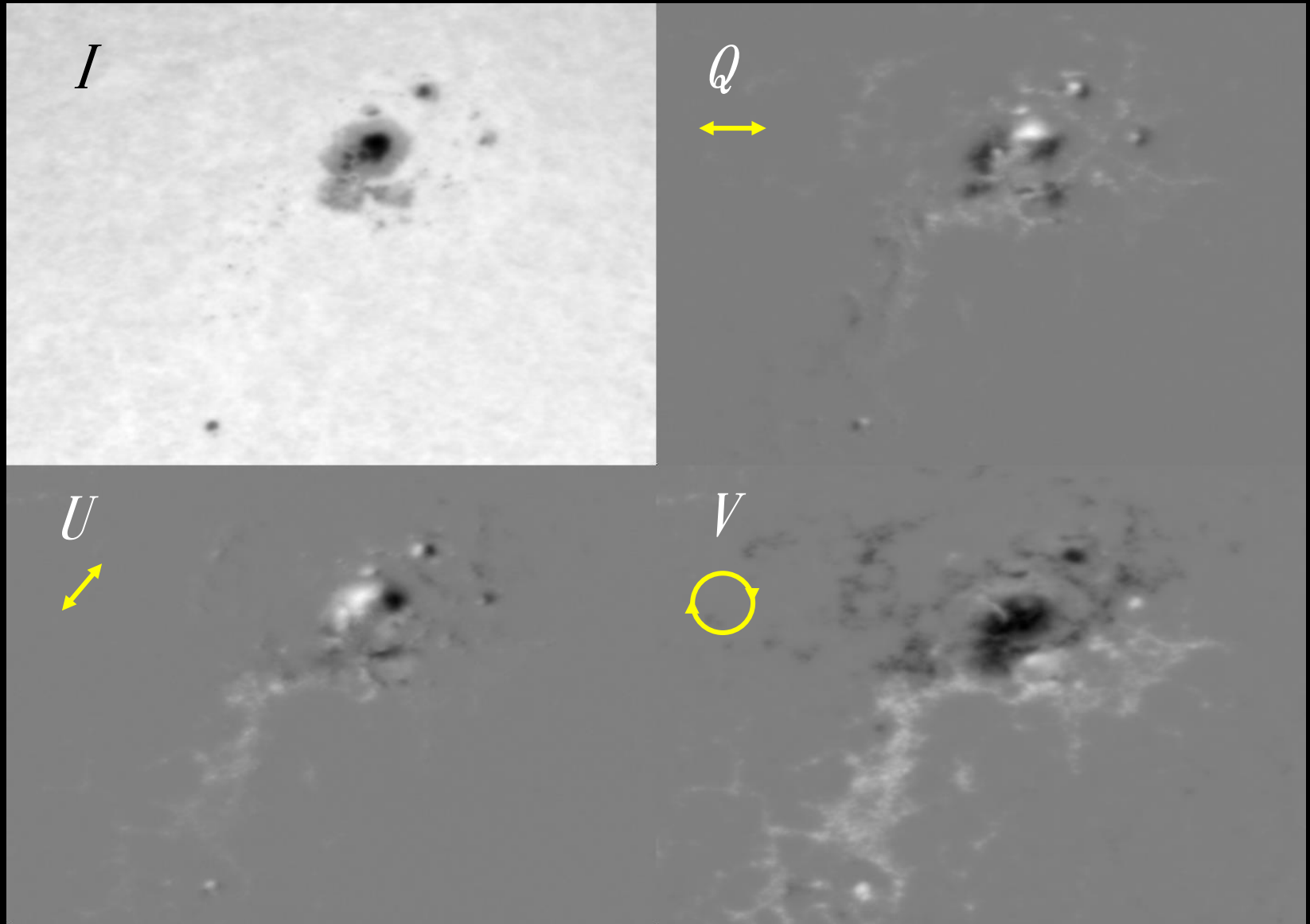
Polarization modulation



2012.05.14 6302.5 - 0.07A

by S. Morita, S.Nagata

Map of Stokes parameters



SMART望遠鏡の展開



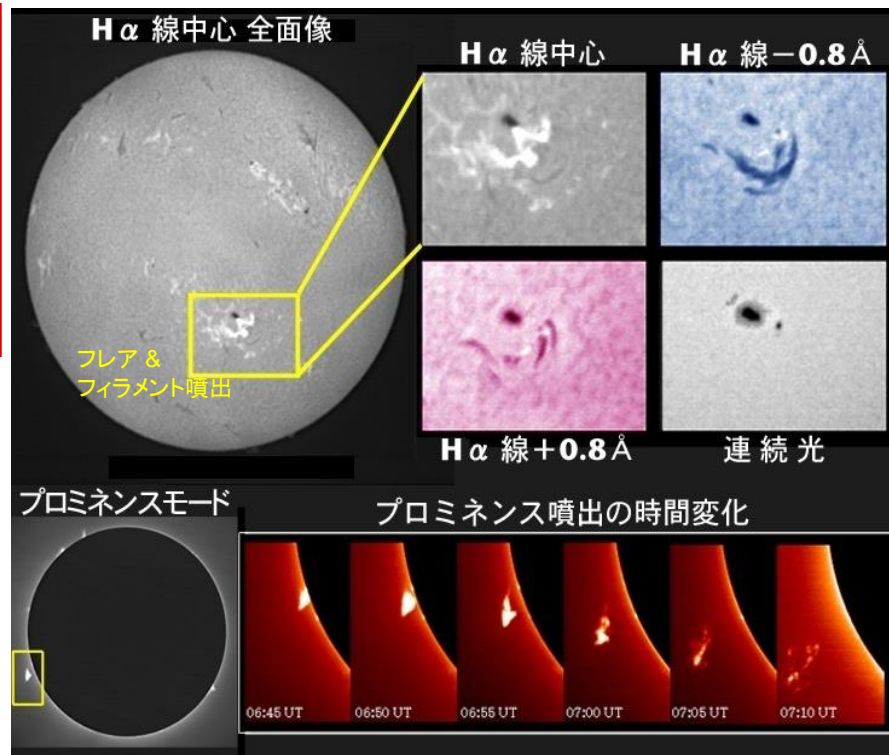
1日24時間太陽活動を監視する国際共同プロジェクト

本計画で実現する3つの拠点

- ・飛騨天文台(日本)、
- ・イカ大学(ペルー)、
- ・新教育天文台(アルジェリア)



フレア監視望遠鏡



太陽面爆発によるプラズマの噴出速度と方向を測定。太陽地球間環境変動に与える影響を研究する。



Solar-C ミッション

Solar-Cの科学課題;

- 太陽や星になぜ彩層とコロナがあるのか？
- フレア爆発はどうしておこる、いつおこる、地球影響は？
- 宇宙磁気プラズマはどのようにエネルギーを輸送し変換するか？
- 太陽磁場はどう作られ、太陽放射の長期変動はなぜおこる？

Solar-Cは如何にしてこれに答えるか;

- ・太陽大気の構造を**空間的、時間的に分解**して観る
- ・光球-彩層-コロナを繋ぐ**磁場の3次元構造**を測る
- ・プラズマの**温度 ($3 \cdot 10^3 - 10^7 \text{K}$)**を隙間なく観測する
- ・熱化する前のプラズマの**運動**を測る

- ・数値シミュレーションとの密接な連携

3.7 m x 3.2 m x 7.1 m, 4t
静止軌道

日本の太陽コミュニティが主導する国際プロジェクト

X線撮像分光望遠鏡
(XIT)

光学磁場診断望遠鏡
(SUVIT)

紫外線高感度分光望遠鏡
(EUVST)

太陽研究が取り組む課題；

偏光分光によるプラズマ診断学
atomic polarization, 輻射輸送

磁気プラズマの基礎過程
磁気対流、波動、リコネクション、不安定現象、加速、

ダイナモ
(磁場の生成機構)

コロナ加熱/放出、フレア
(磁場の散逸機構)

恒星活動

太陽-地球環境
(宇宙天気・宇宙気候)

新しい観測装置・手法

京都大学理・附属天文台でできる観測研究

- ドームレス望遠鏡やひののでを使った観測研究
(太陽による宇宙プラズマの基礎物理過程の探求)
- SMART望遠鏡やCHAINによる宇宙天気研究
(フレア、質量放出、太陽活動周期の予報に挑戦)
- 他の国内・海外施設を使った観測研究
- ドームレス望遠鏡やSMARTの装置開発、実験
(偏光、像安定化装置、高精度磁場撮像、etc.)
- 次期太陽観測衛星(Solar-C)計画の推進
(装置設計、宇宙用基礎実験、)

7. まとめ

太陽の謎解きには、

- ・光がどうして作られるか、
(輻射輸送、量子力学、熱力学、統計力学、相対論)
- ・光をどうやって測定するか、
(光学、電子工学、機械工学、体力)
- ・データをどう解釈するか、
(電磁流体力学、熱力学、プラズマ理論、シミュレーション)

全部必要！ → 得意な分野を生かして活躍できます。

おわり