

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—
2013.8.6-9

一本 潔 (いちもと きよし)

略歴:

昭和51年 3月	大阪府立茨木高等学校卒業
昭和56年 3月	京都大学理学部卒業
昭和58年 3月	京都大学大学院理学研究科宇宙物理学専門課程博士課程修了
昭和62年 5月	東京大学東京天文台助手
平成 8年 1月	文部科学省 国立天文台助教授
平成16年 4月	大学共同利用機関法人・自然科学研究機構 国立天文台 准教授
平成20年 4月	京都大学大学院理学研究科 教授

専門:

太陽の光学観測(太陽黒点、コロナ)、プラズマ偏光分光、装置開発・実験

関わったプロジェクト:

乗鞍コロナ観測所、国立天文台三鷹望遠鏡、皆既日食遠征(チリ、トルコ、、、)
ひので可視光望遠鏡開発
現在
飛騨天文台DST & SMART
Solar-C 光学望遠鏡

太陽を調べる光の目 内容:

0. イントロ「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

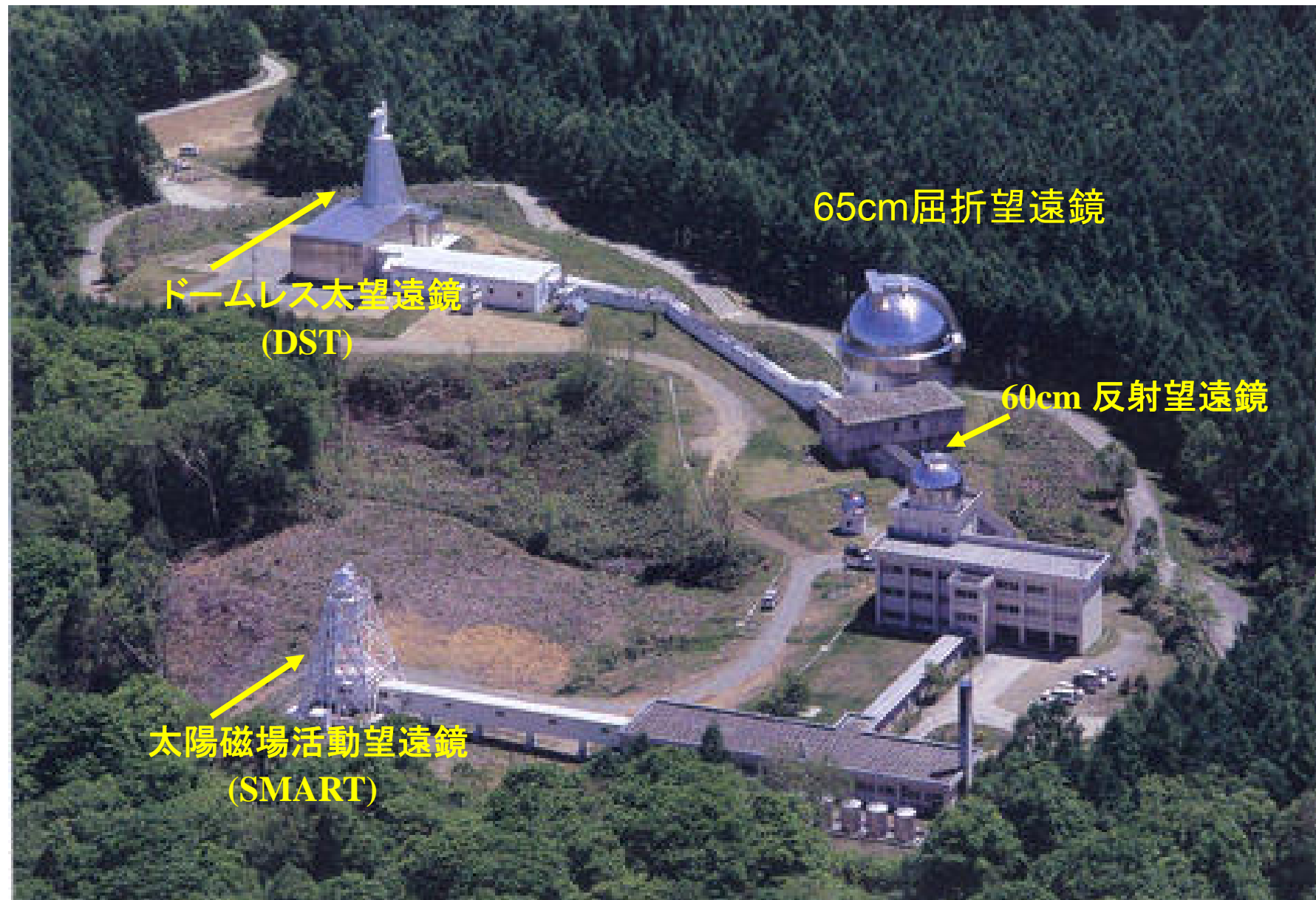
- 飛驒天文台のとrikむ観測プロジェクト



イントロ： 宇宙の測りかた

2013年8月3日(土) 飛騨天文台一般公開 より

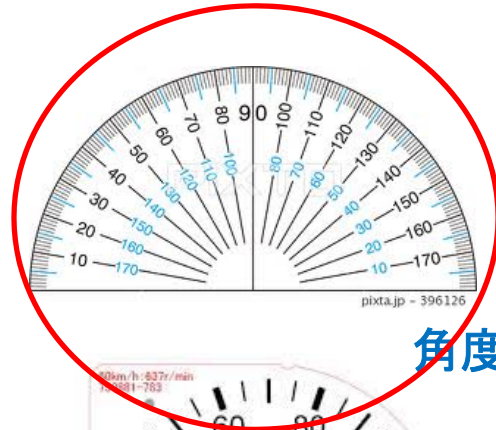
飛騨天文台



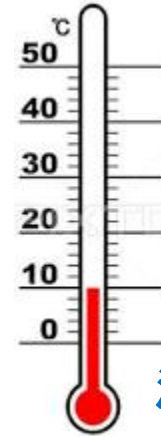
はか 測(計)る...



長さ・距離



角度



温度



重さ



時間



スピード



体積



放射線



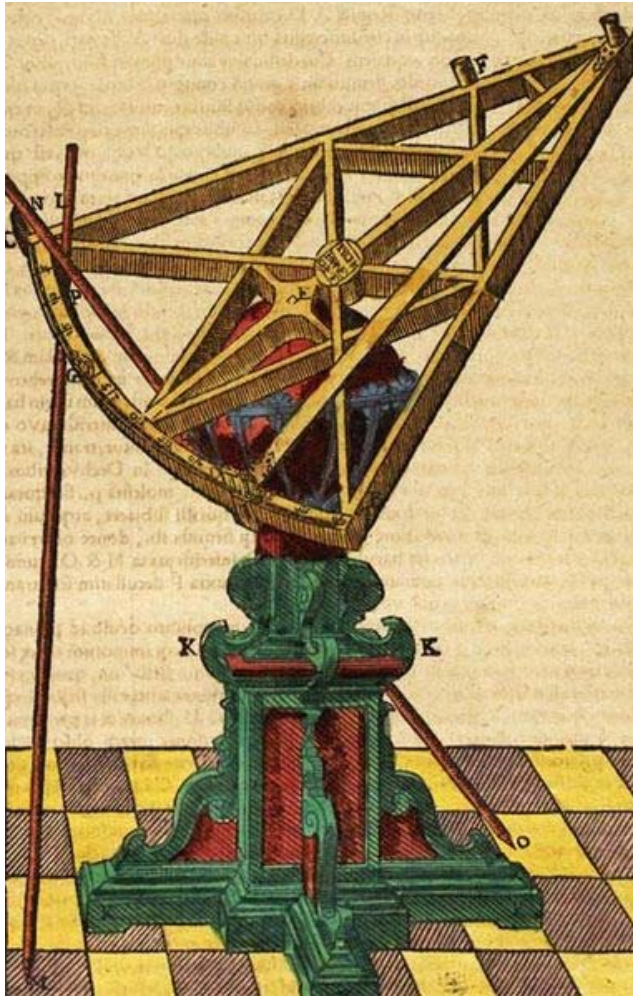
光



電流・電圧

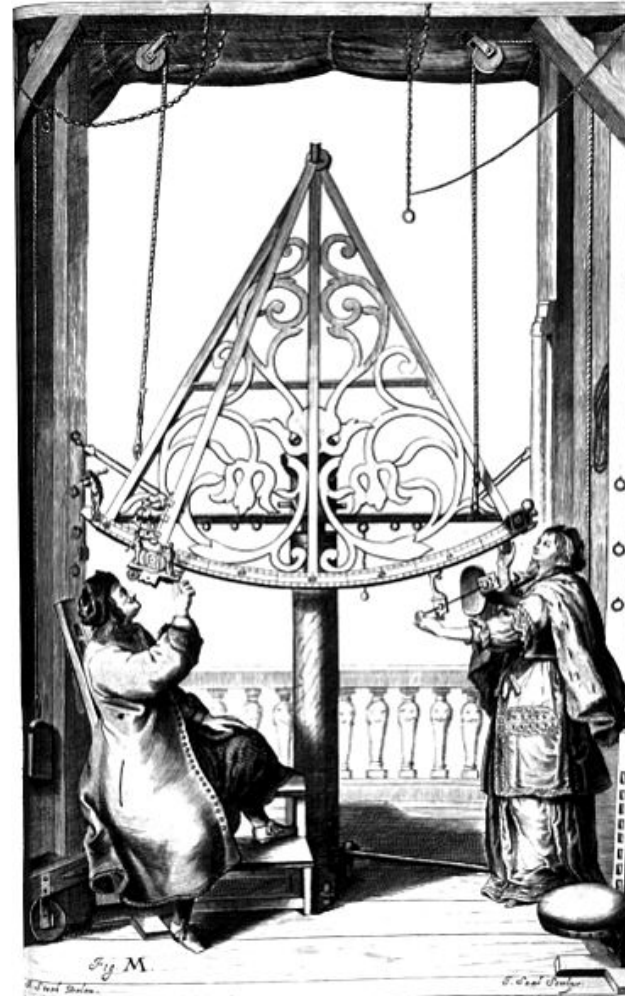
宇宙を計るのに使えるものは？

宇宙を計った分度器＝六分儀



ティコ・ブラーエの六分儀

http://mail2.nara-edu.ac.jp/~asait/kuiper_belt/eclipse2/sextant_astronomy.htm



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...

http://www.zero-co.com/seiza/faq/seiza_01.html

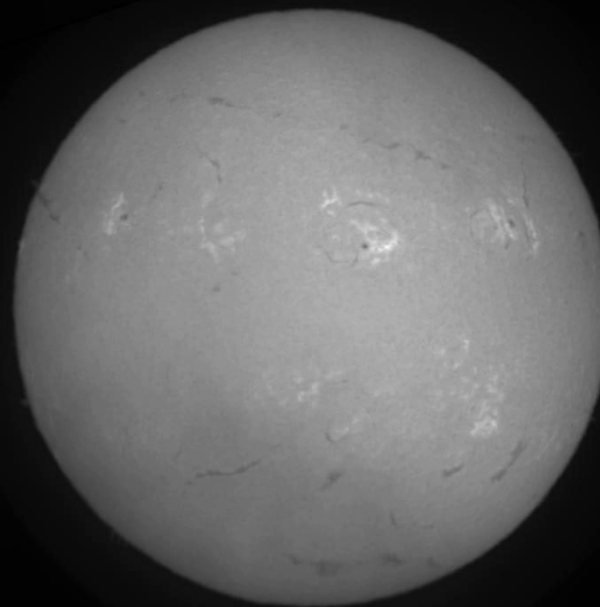


こんてんぎ
渾天儀： 天球の模型

きんかんにつよく

去年おこった天体ショー：金環日食

5月21日



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

国立天文台(東京三鷹市)

飛騨天文台(高山市)

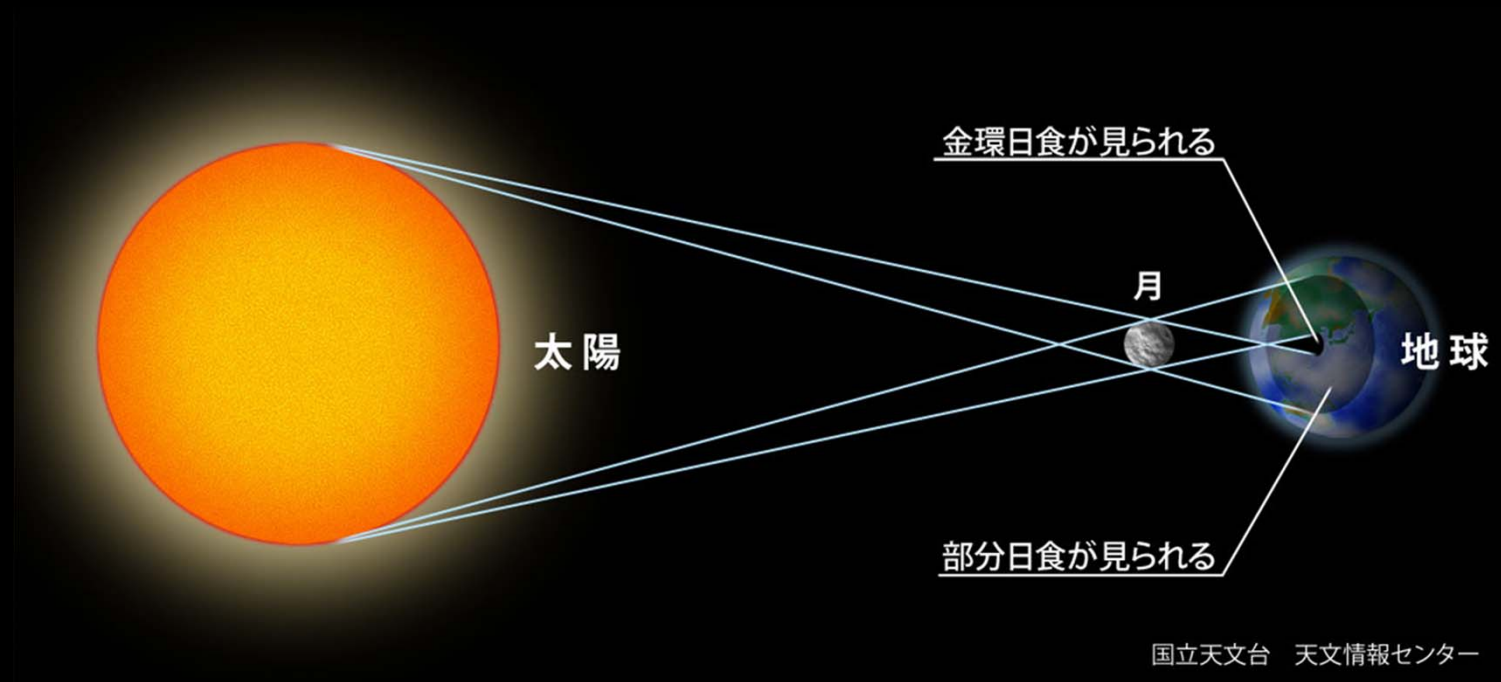
金環日食・部分日食

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)が重なり具合が違う！



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)



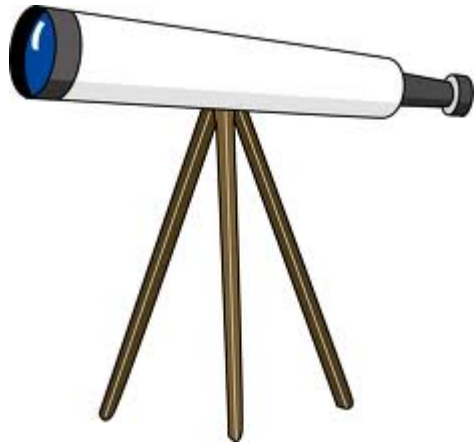
飛行機よりも
大きい



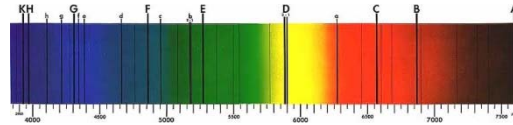
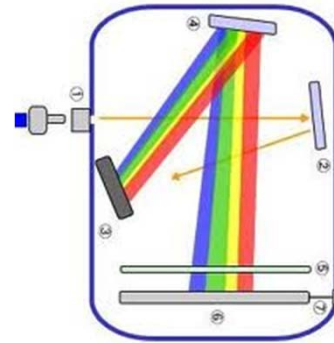
手を伸ばして持った5円玉の穴(5mm)

これって本当の大きさじゃない！

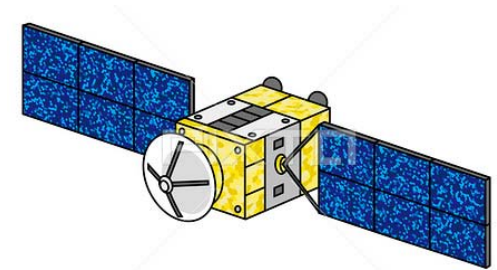
宇宙を計る道具



望遠鏡

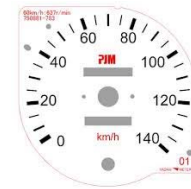
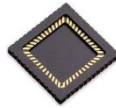


分光器



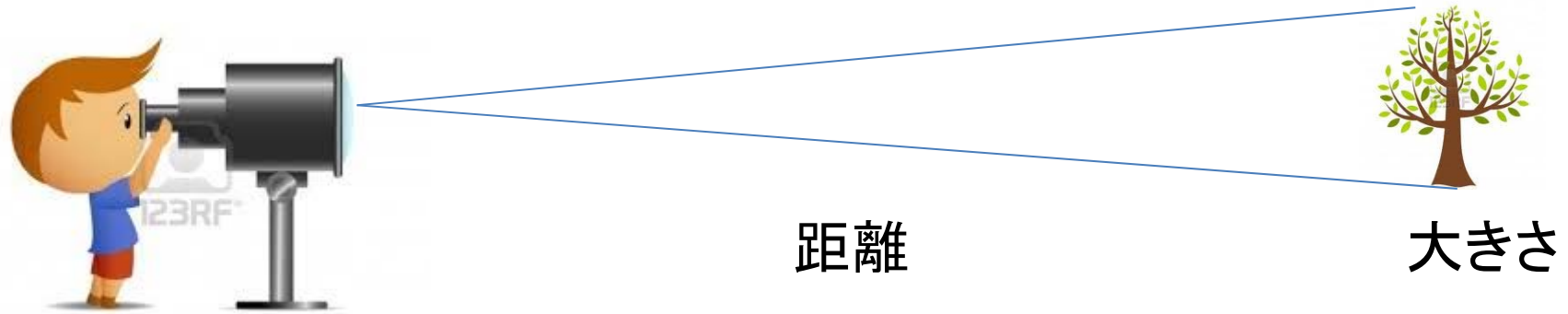
pixta.jp - 4499800

人工衛星



...

望遠鏡は高精度の測定器！？



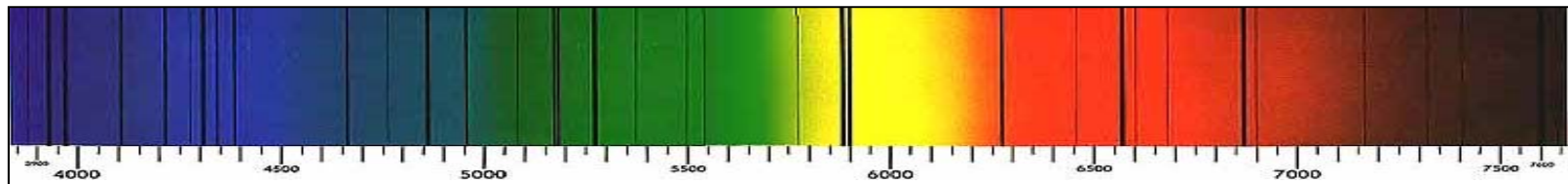
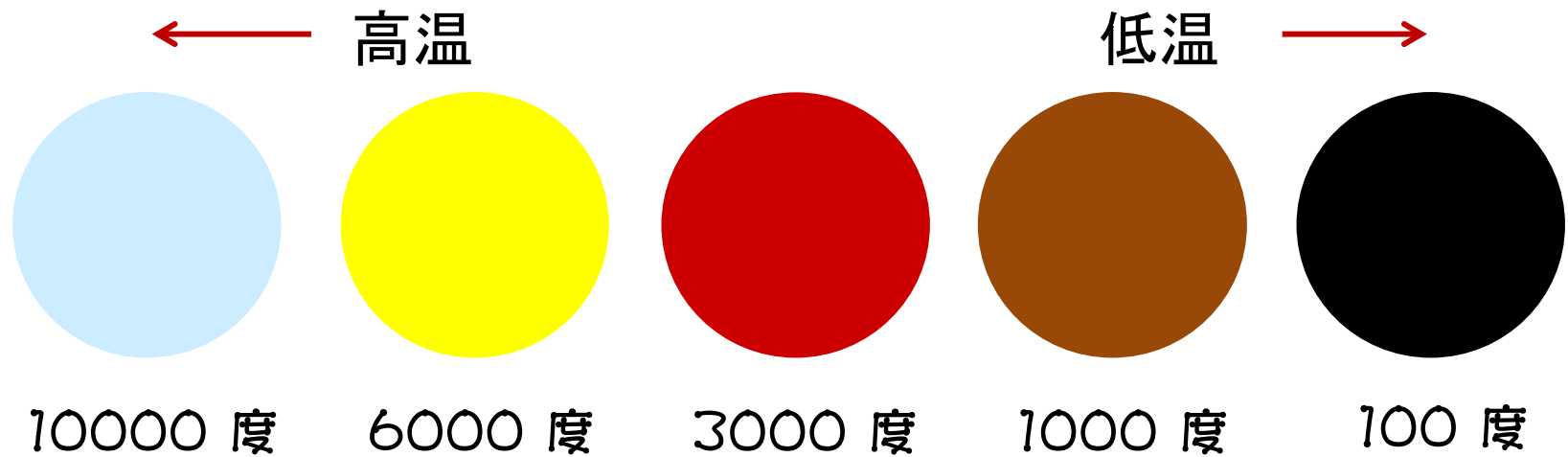
望遠鏡が遠くのものを見分ける能力 = 「分解能」

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

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！？

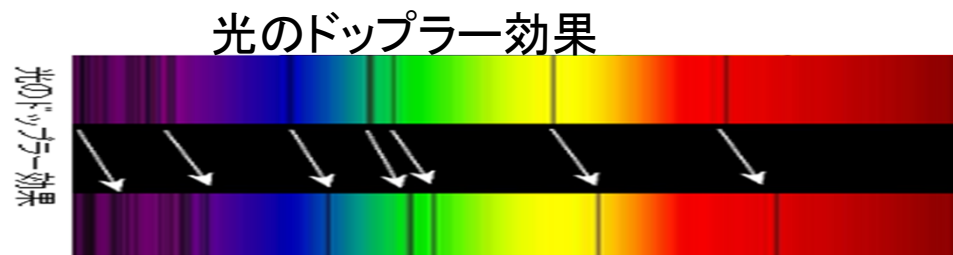
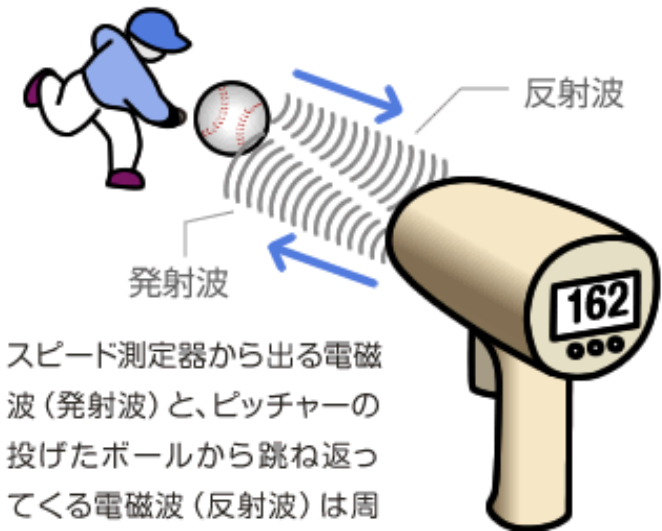
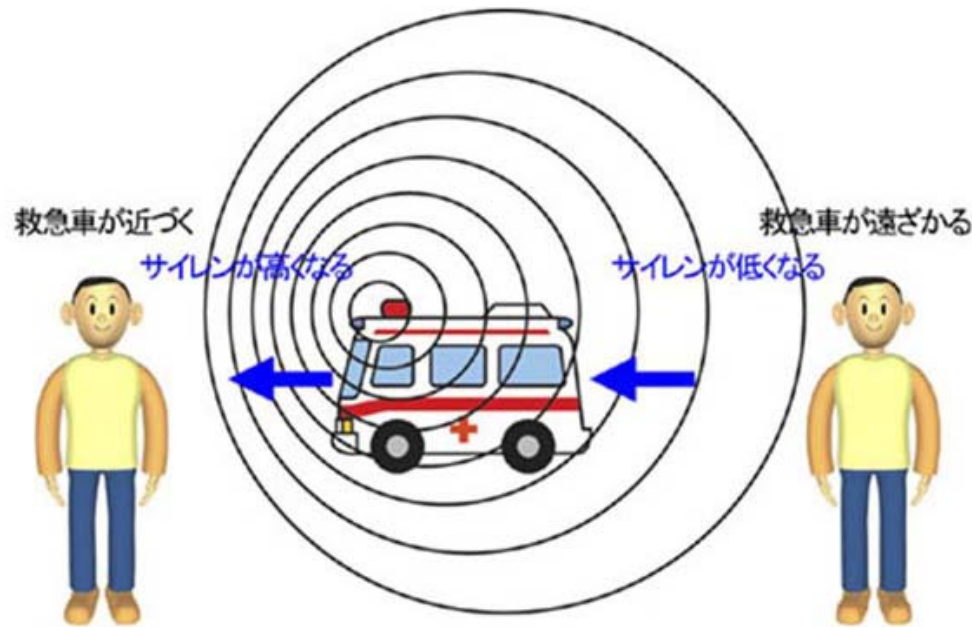
物体の温度と色



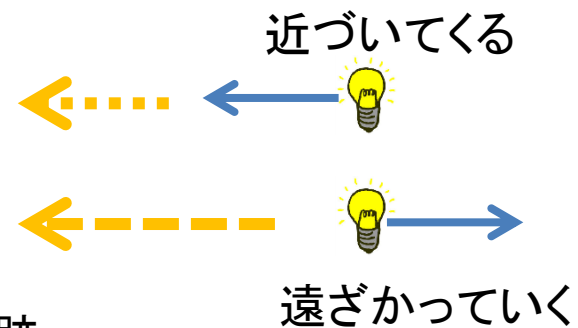
スペクトルのどこが明るいかで温度が分かる！

光器はスピード計！？

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

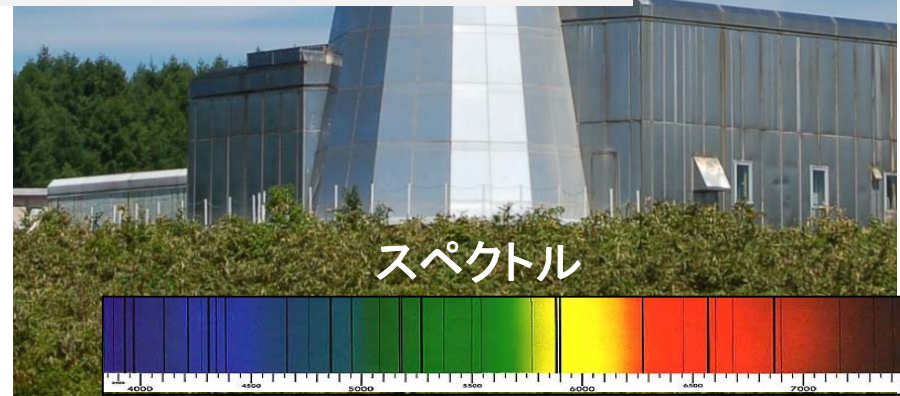
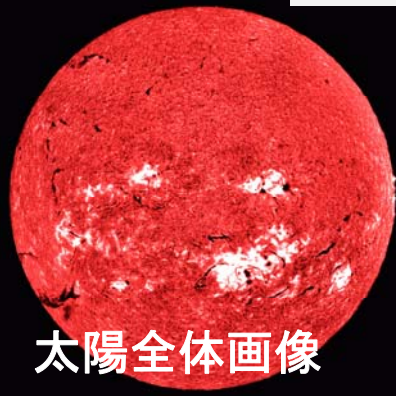
SMART望遠鏡
太陽全体を常に観測



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。



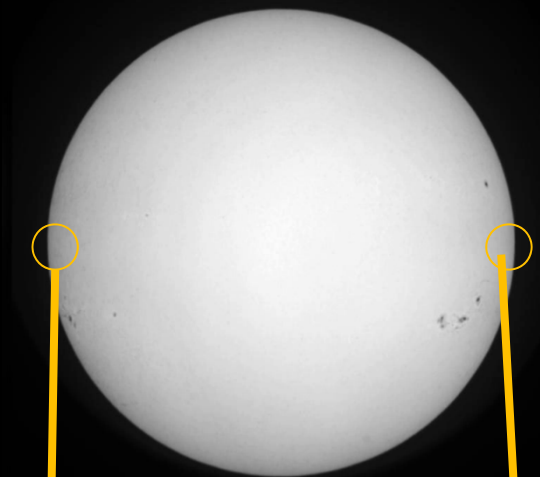
まずSMART望遠鏡



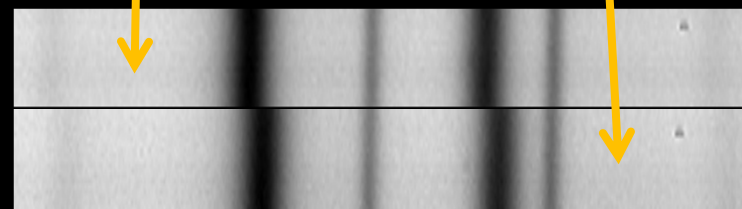
SMART 2012-07-07_00:35:55(m12)

太陽は約27日で1回転

つぎにドームレス望遠鏡



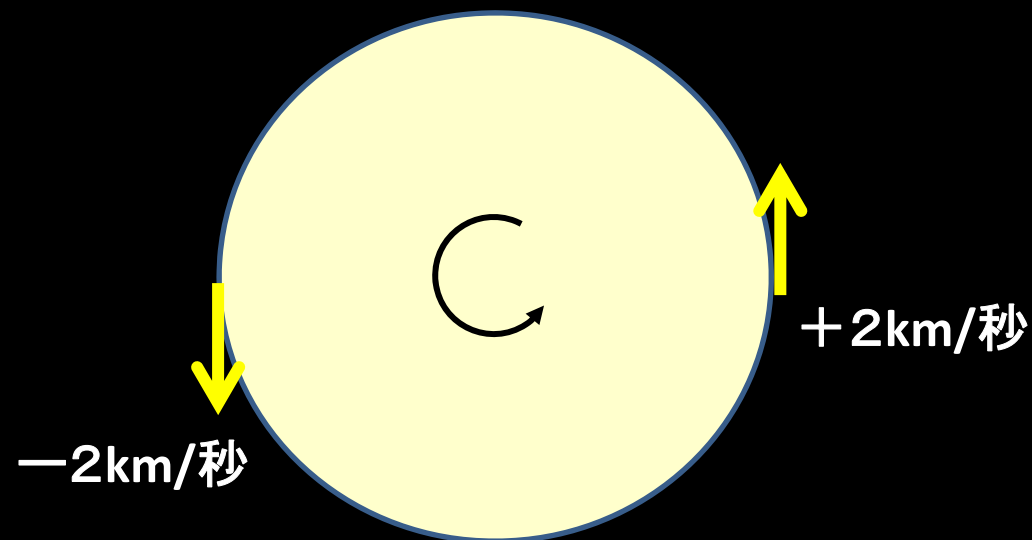
SMART 2012-07-07_00:35:55(m12)



太陽で作られる
スペクトル線

地球の大気で作られる
スペクトル線

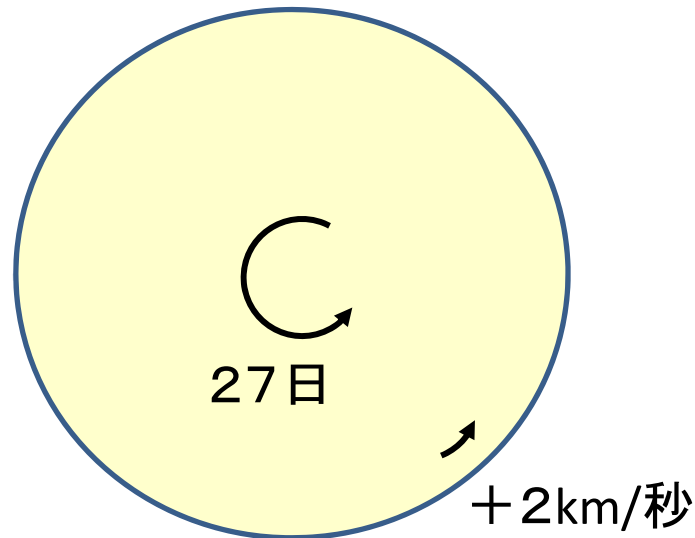
つぎにドーム型望遠鏡



太陽の表面は2km/秒で回転



太陽の大きさは？



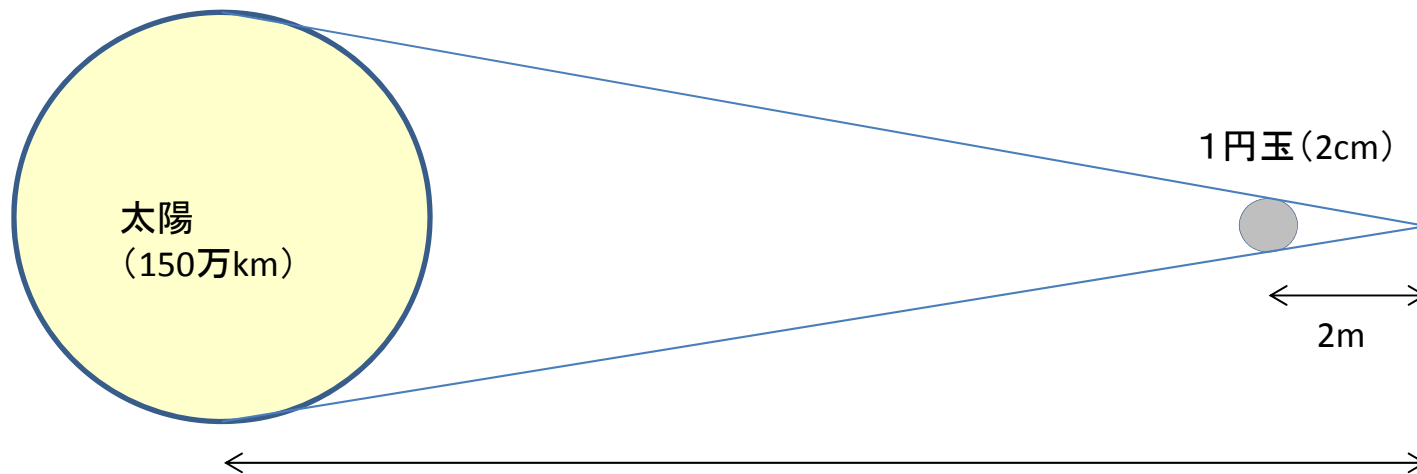
$$\begin{aligned} & \text{太陽の1周} \\ & = 2\text{km/秒} \times 27\text{日} \\ & = 2 \times 60 \times 60 \times 24 \times 27 \\ & = 470\text{万km} \end{aligned}$$

$$1\text{周} = \text{直径} \times 3.14(\text{円周率})$$

太陽の直径～150万km ∴ 地球の約110倍

太陽はどのくらい離れているのか？

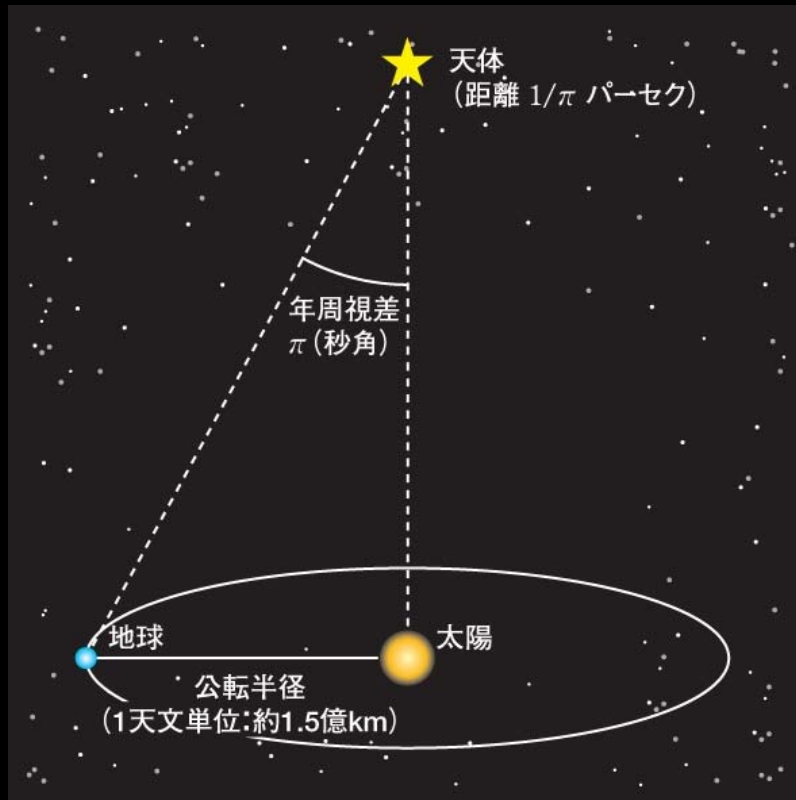
太陽の見かけの大きさ～2m先の1円玉(直径2cm)



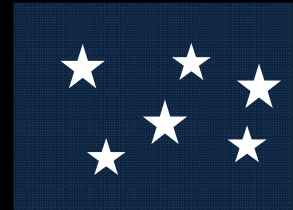
$$\begin{aligned} \text{太陽までの距離} &= 2\text{m} \times 150\text{万km} / 2\text{cm} \\ &= 1\text{億}5\text{千万km} (=1\text{天文単位}) \end{aligned}$$

きょり

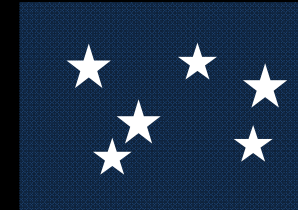
星の距離の測り方



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

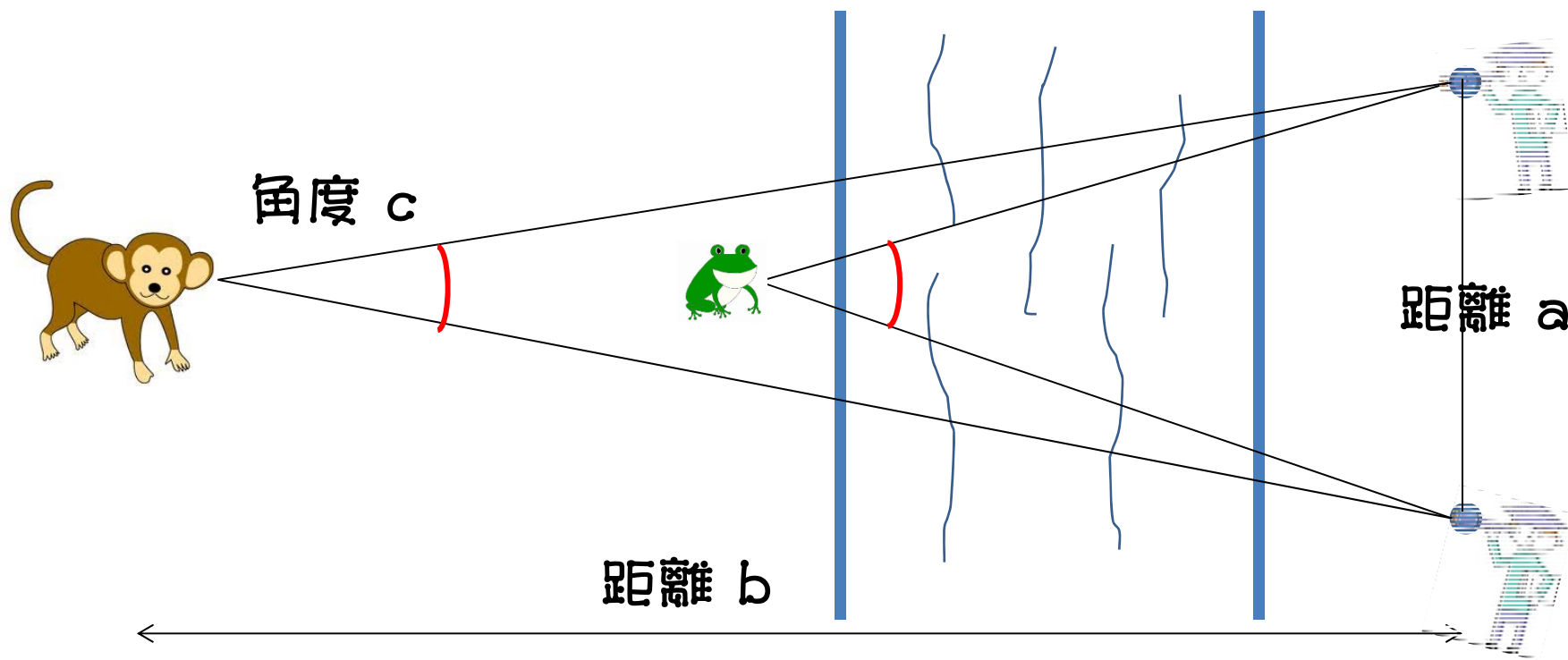
きっと手前にあるに違いない！
このみかけのずれから星までの距離
が分かる。

＝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

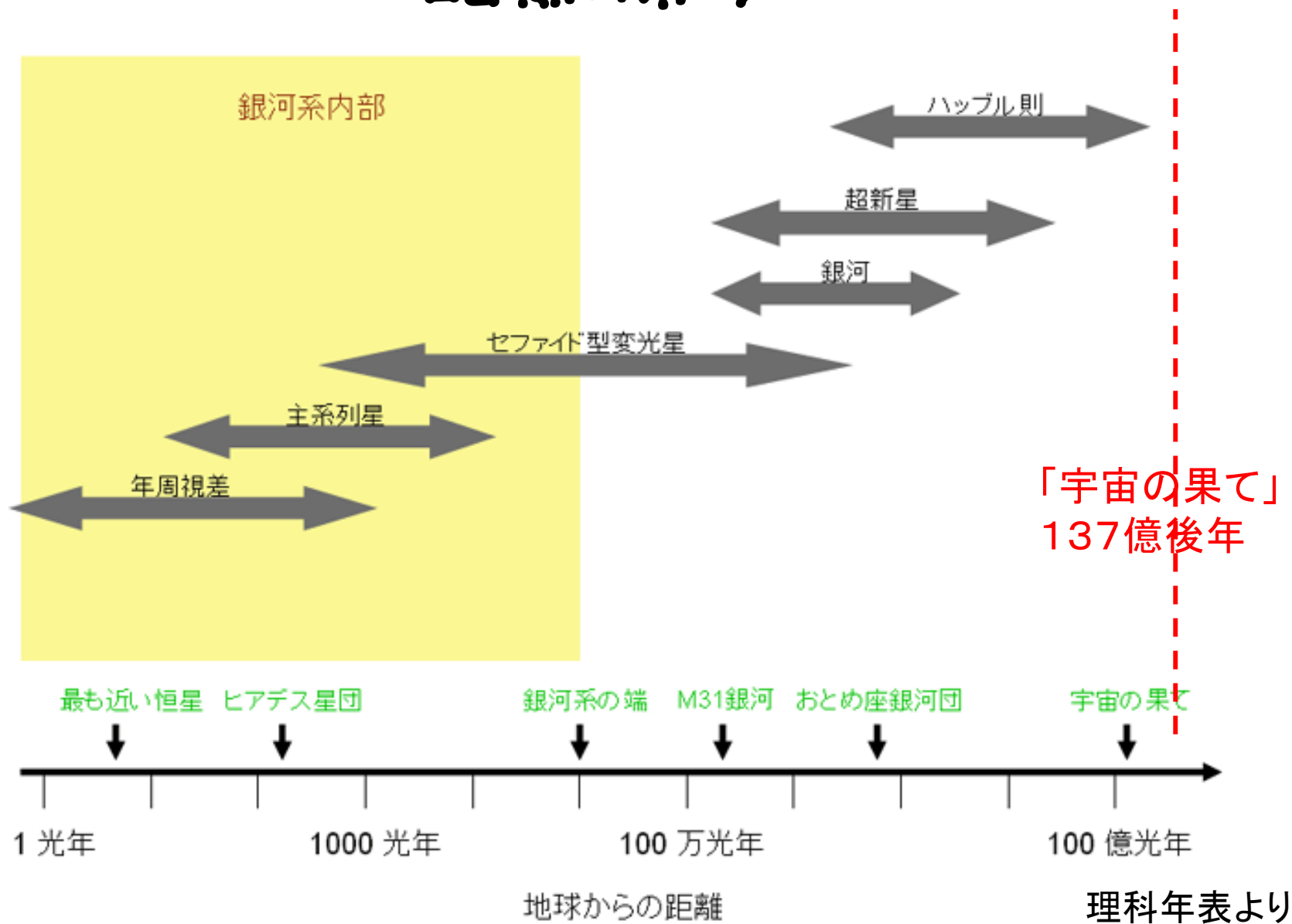
現在の「分度器」の最高精度 ~ 0.001秒角 (ヒッパルコス衛星)

(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！

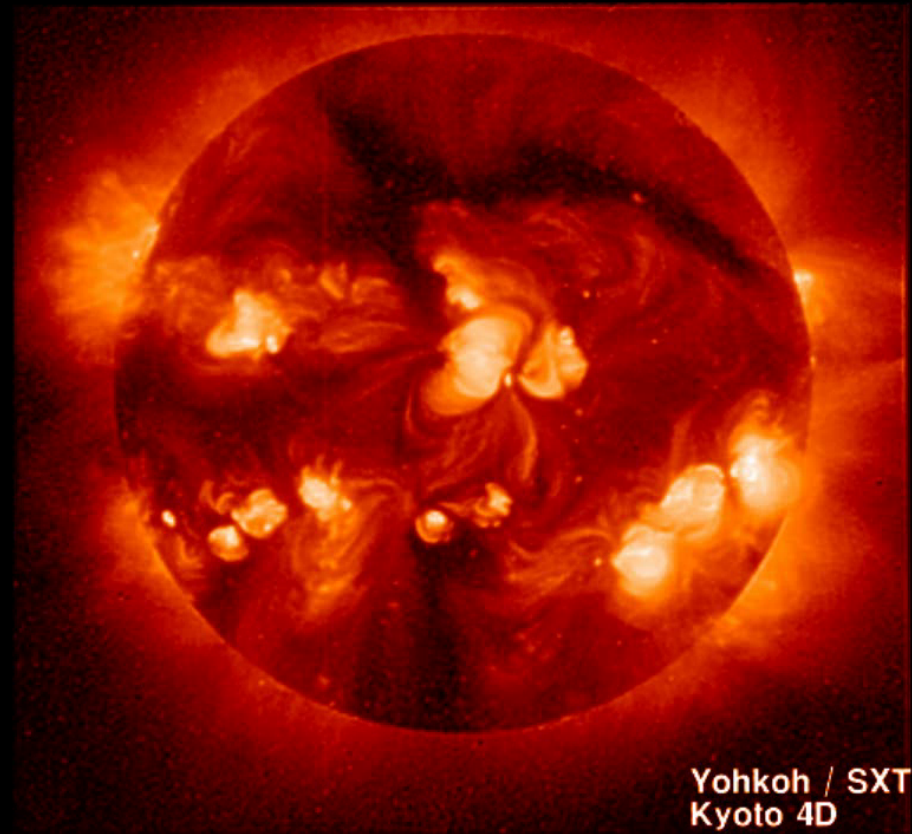
距離梯子



太陽の温度

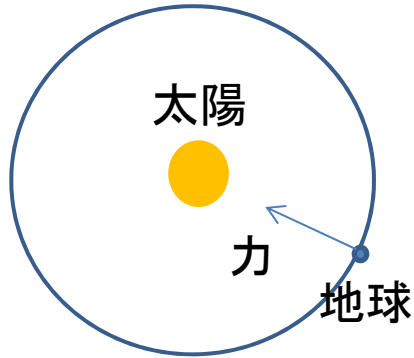
可視光のスペクトルから
約6000度

X線でも光っていた！ 200万度
1999/10/30



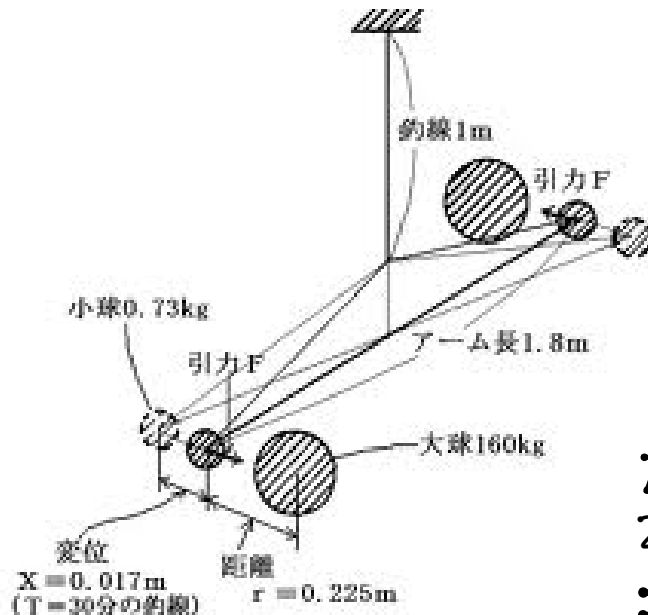
太陽は激しく変化している！ → 見学でご覧ください

太陽の重さ(質量)はどのようにしてわかる？



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)

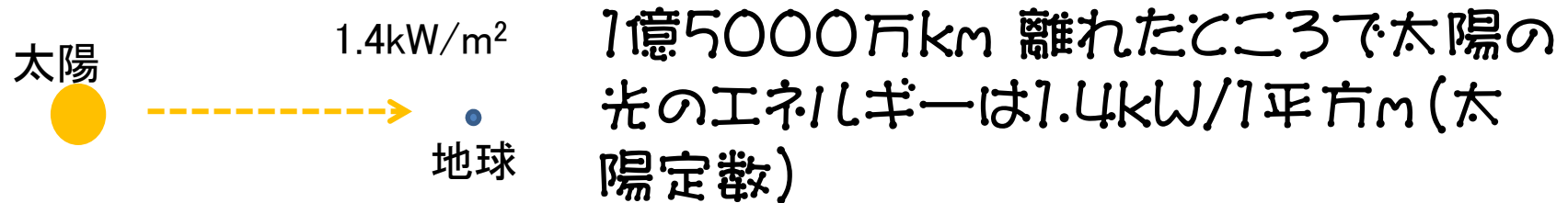


物体の質量と引力の関係を測る実験
(キャベンディッシュの実験)

これから太陽の質量が求まる！

太陽の質量 =
200kg
= 2×10^{30} kg

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)

まぶしいものを隠して淡いものを見る



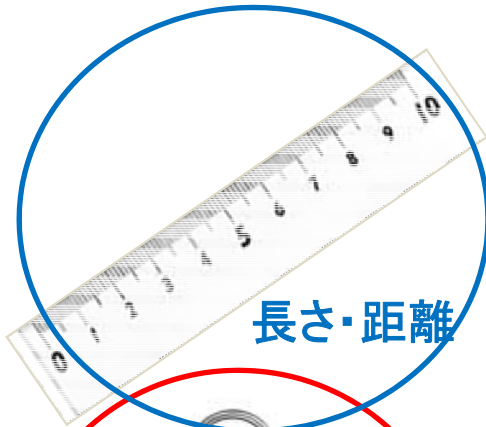
SOHO LASCO

太陽風
コロナ質量放出

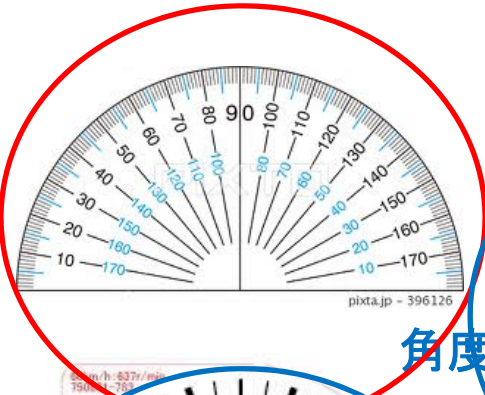
速度～数100km秒

太陽は1日に3000億トンほどのガスを失っている
宇宙には放射線が充満している！

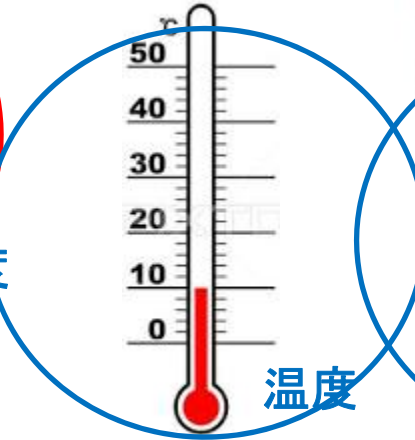
はか
宇宙を測(計)る...



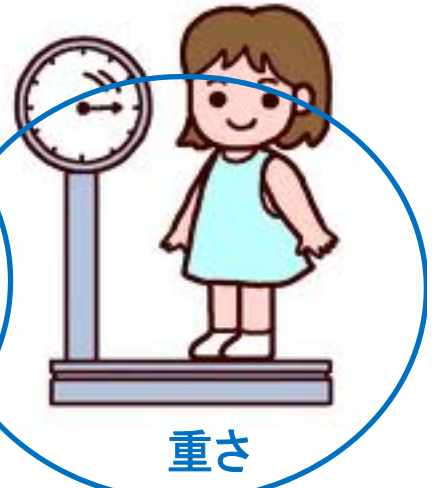
長さ・距離



角度



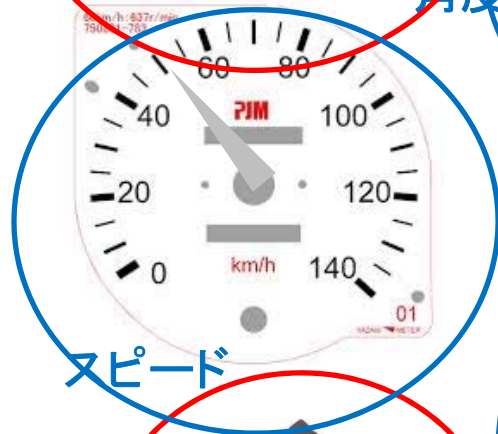
温度



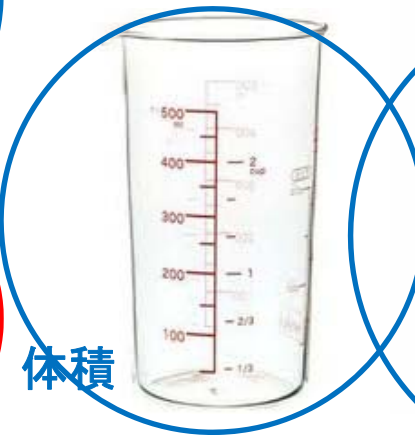
重さ



時間



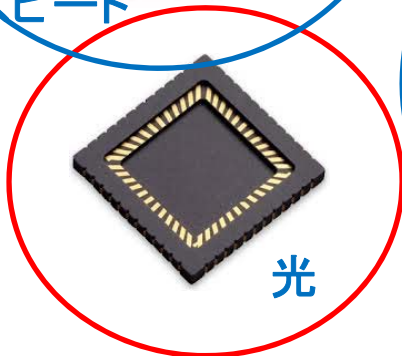
スピード



体積



放射線



光



電流・電圧

宇宙を計るのに使えるもの

太陽を調べる光の目 内容:

0. イントロ「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

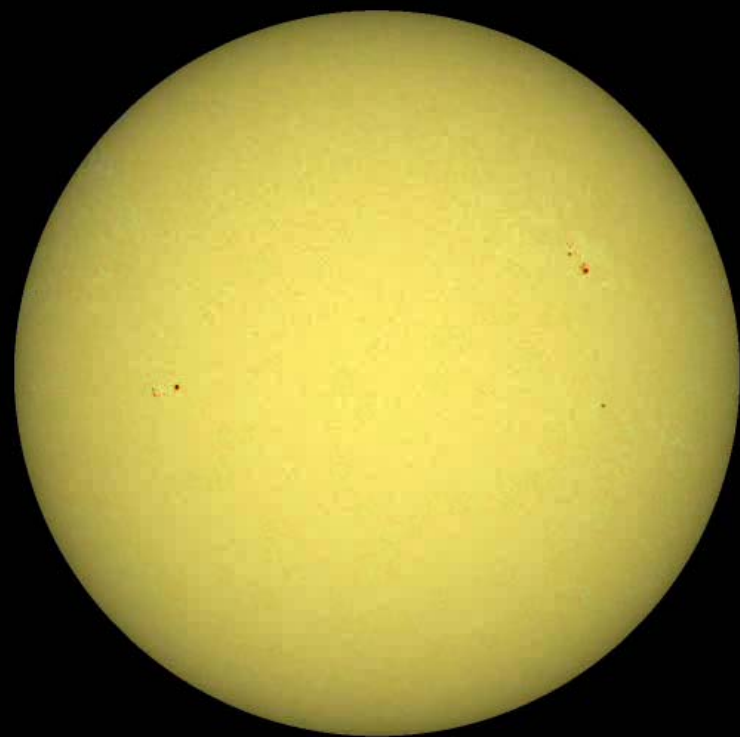
6. 京都大学理・附属天文台ですすすめている観測研究

- 飛驒天文台のとrikむ観測プロジェクト

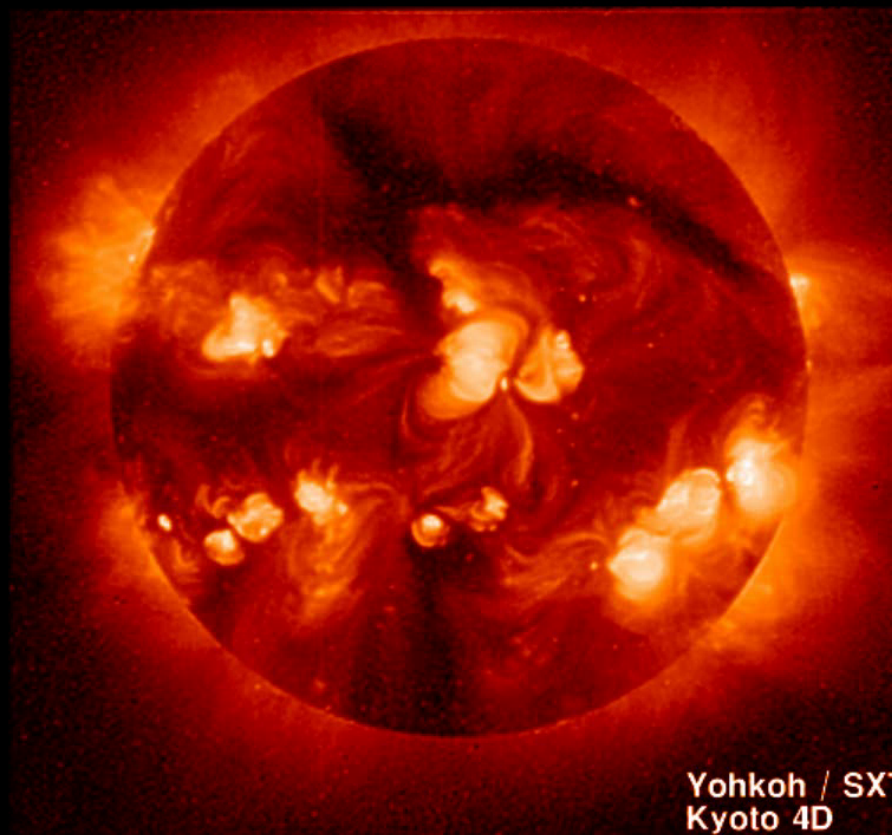
1. 太陽のみえ方

2つの異なる連続光で見た太陽

1999/10/30



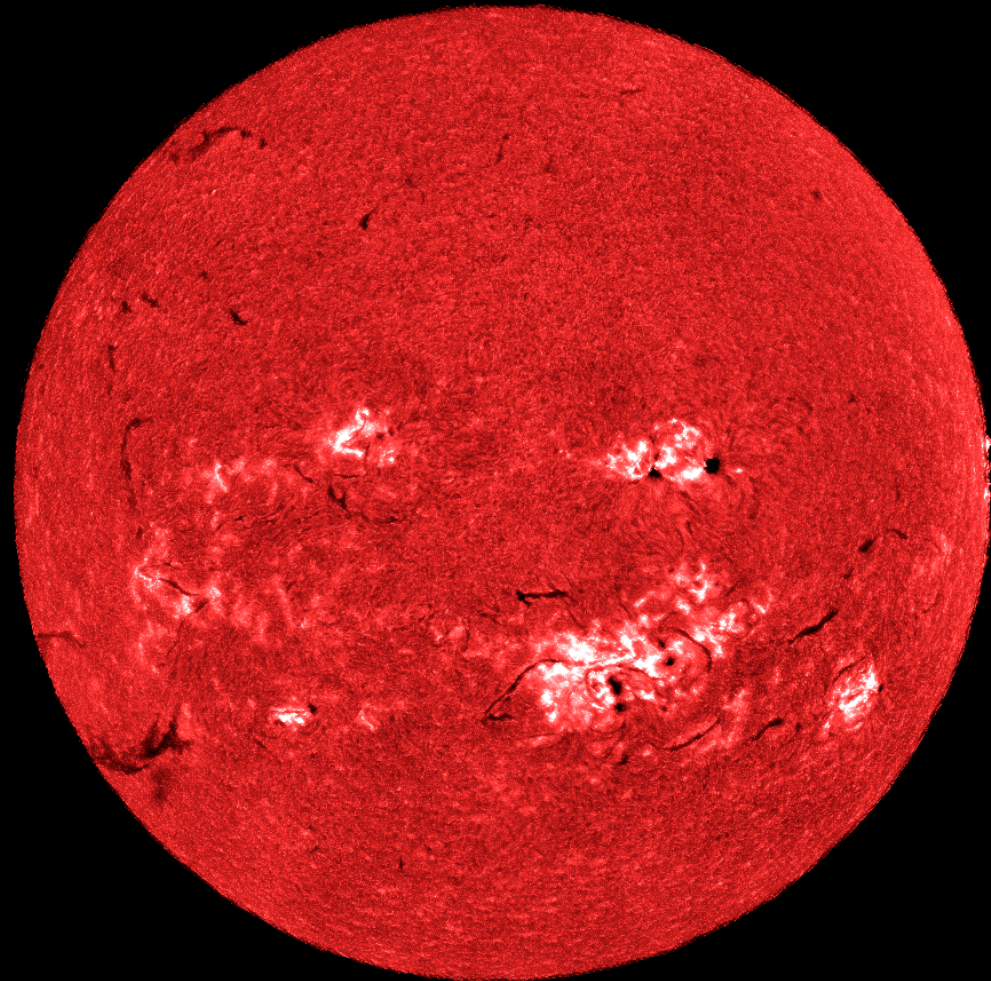
可視光



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)



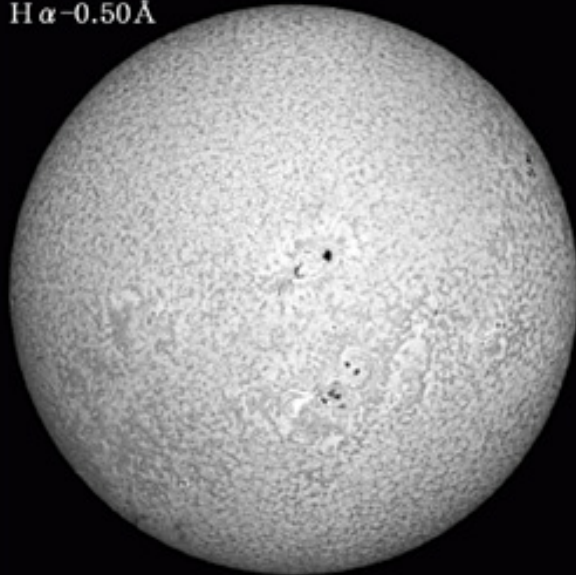
2003年10月30日
京大飛騨天文台
SMART望遠鏡

H α の異なる波長で観た太陽

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

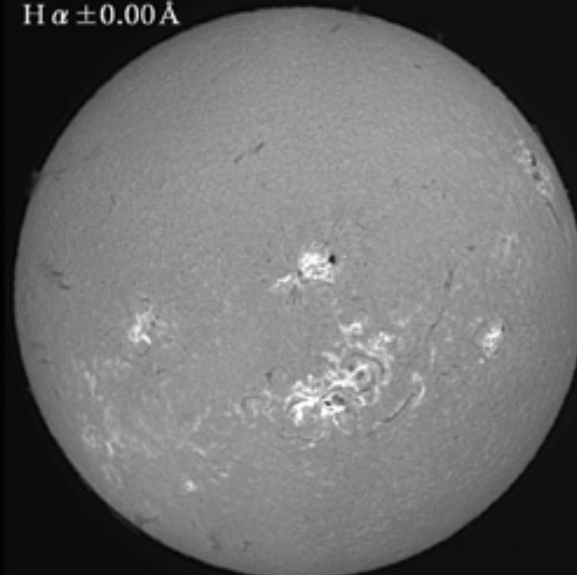
2003.10.29 01:19 UT

H α -0.50Å



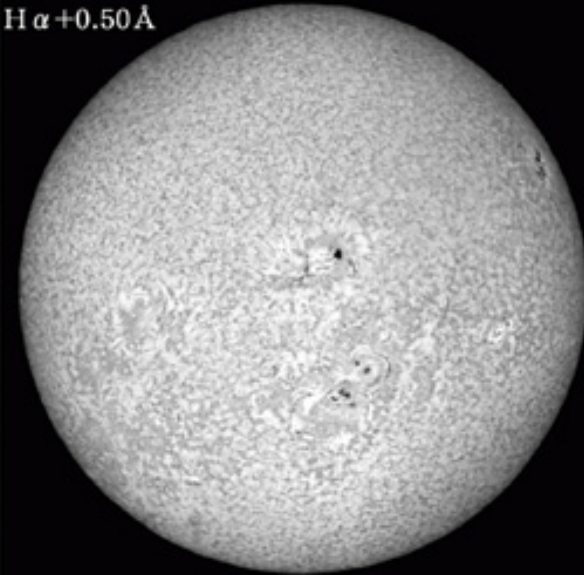
2003.10.29 00:42 UT

H α \pm 0.00Å

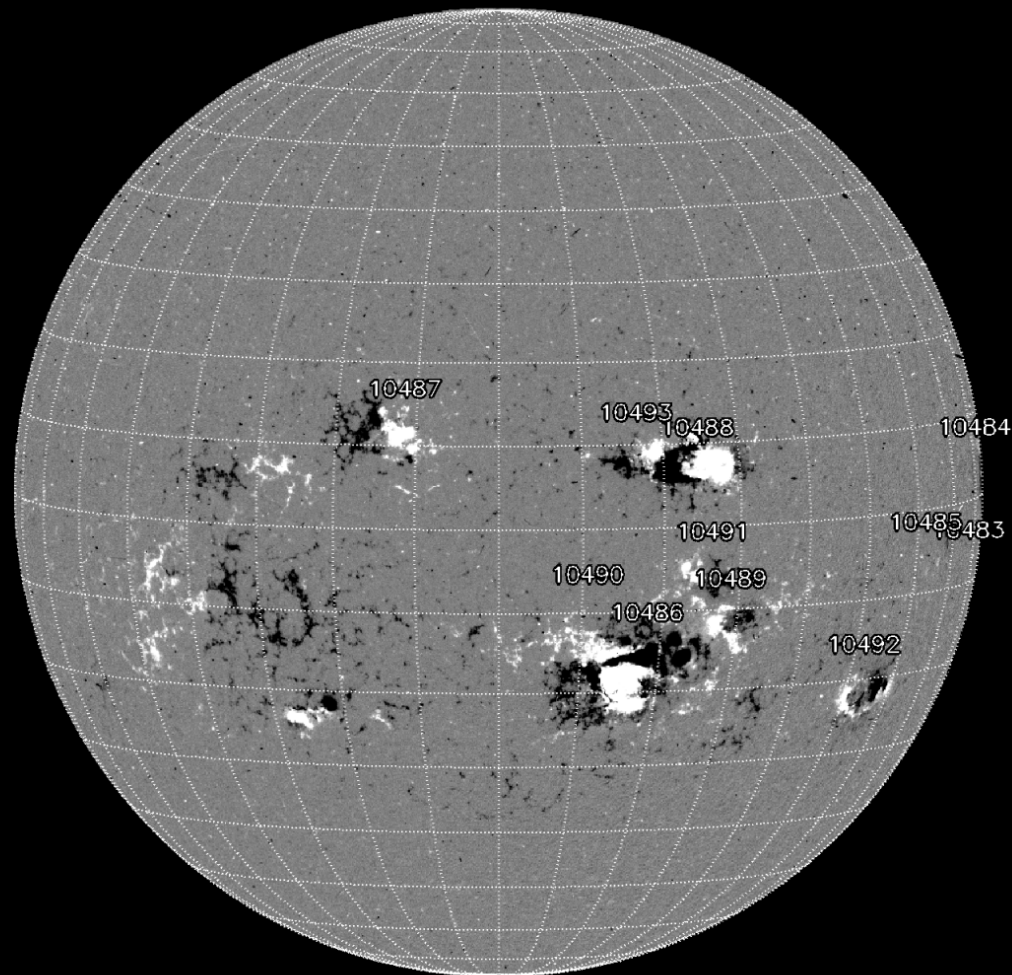


2003.10.29 01:39 UT

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空間分布が見える

光がどうやってつくられ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、...

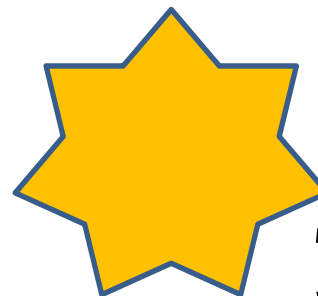
実験

スペクトル、偏光

電磁気学
統計力学
量子力学
輻射輸送理論

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

スペクトル、偏光

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

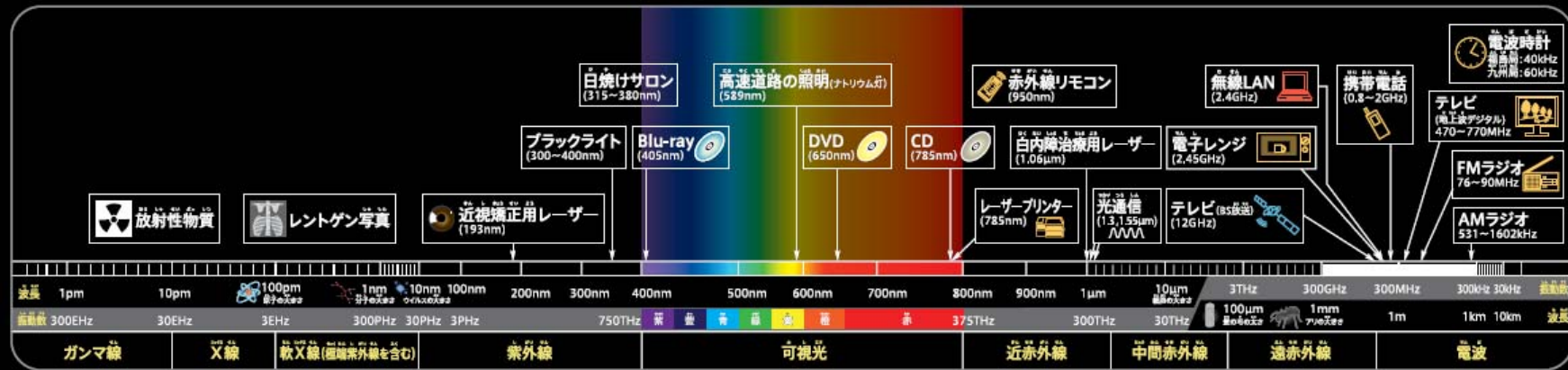
(磁場、電場、輻射場の異方性、、、)₄₀

光の種類とスペクトル

ひかり いろいろな光とスペクトル

京都大学南棟天文台で撮影された太陽スペクトル
www.kyoto-u.ac.jp/~astronomy/kyoto-u-astro/kyoto-u-astro.html

This image was taken by a Horizontal Spectrograph of the Dornier Solar Telescope (DST) at Hida Observatory, Graduate School of Science, Kyoto University, JAPAN
http://www.kyoto-u.ac.jp/~astronomy/kyoto-u-astro/kyoto-u-astro.html



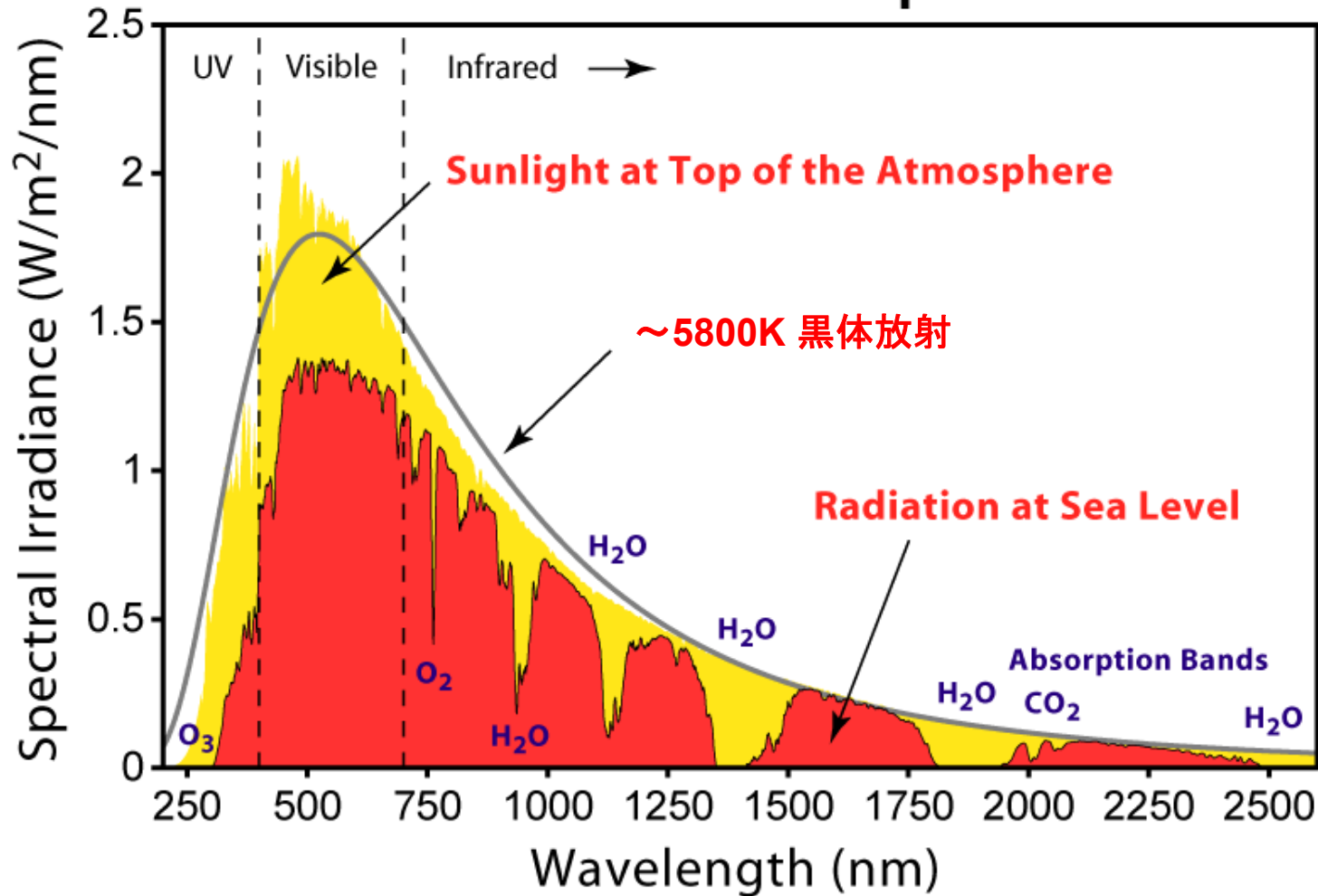
光は、空にかかる虹のように、赤から紫までの色に分けることができます。ニュートンは、私たちが目にする光が、いろいろな色の光が混ざったものであることを明らかにしました。光は波の性質をもっていることがわかっていますが、いちばん波長の長い光が赤、短い光が紫になります。

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

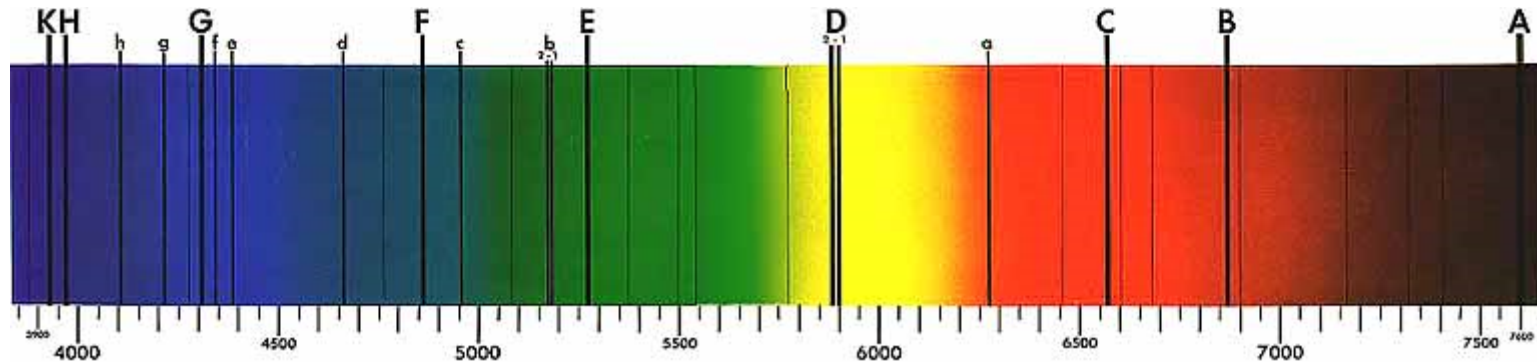
Solar Radiation Spectrum



http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_radiation

フラウンホーファー線

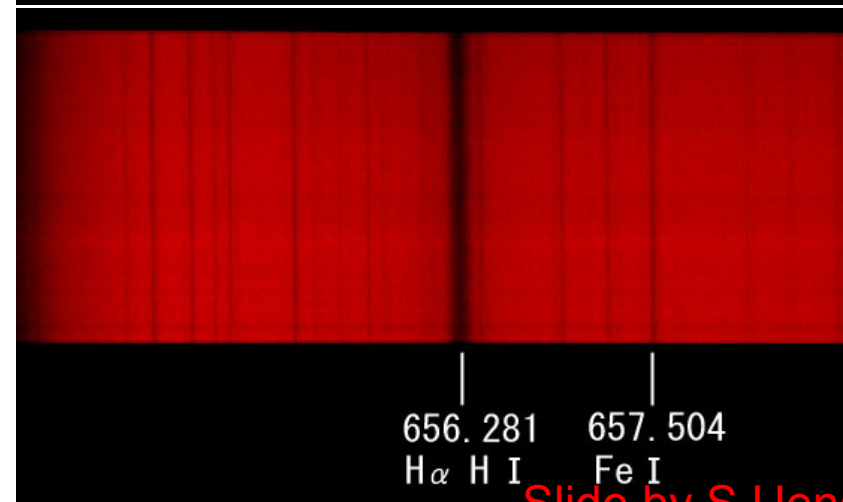
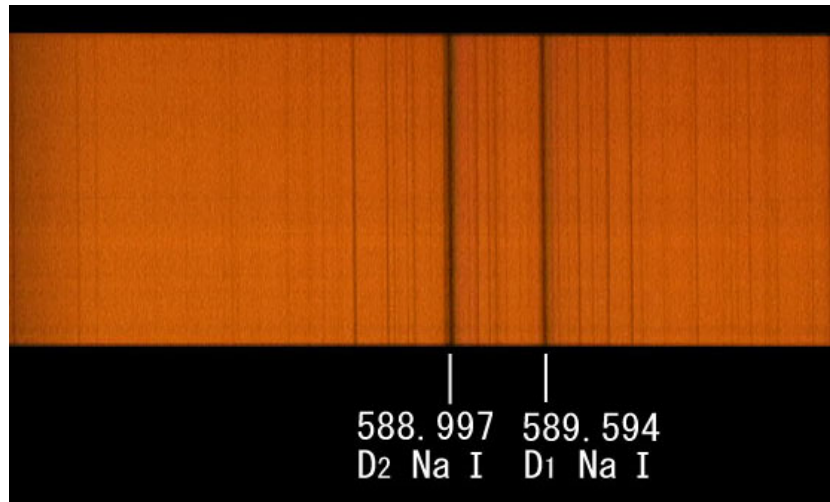
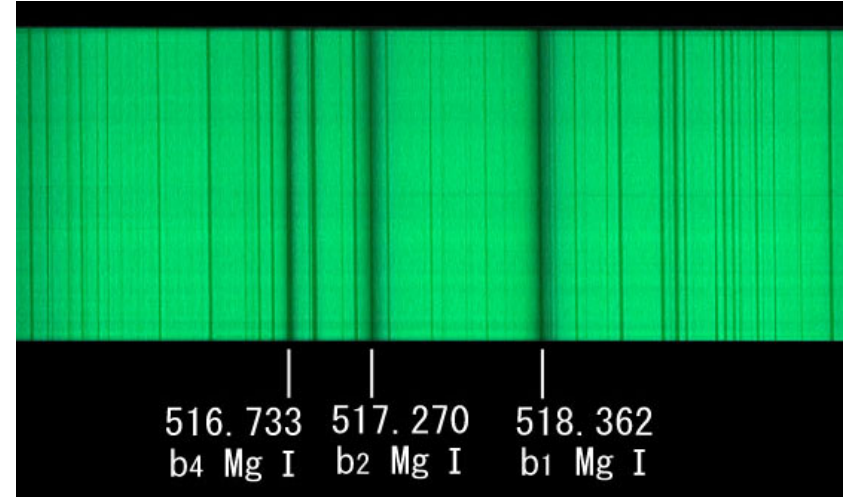
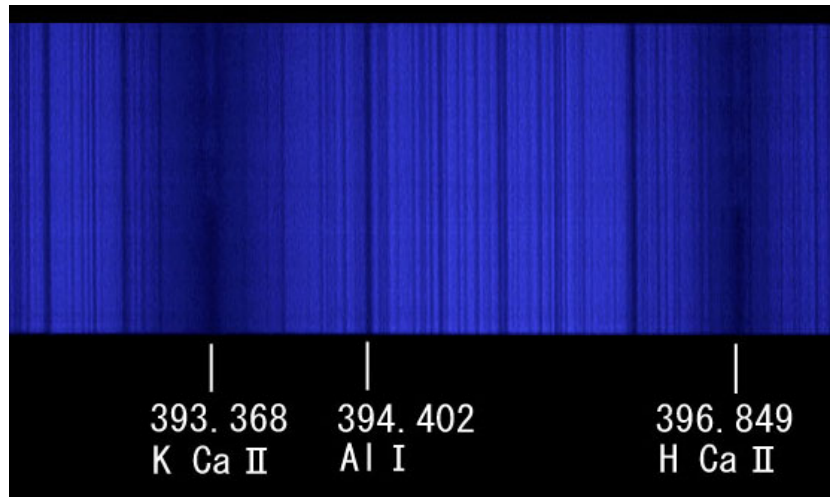
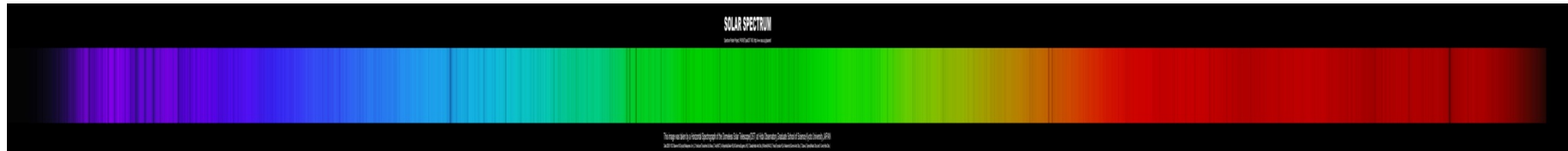
1814、ドイツの物理学者 ヨゼフ・フォン・フラウンホーファー



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)

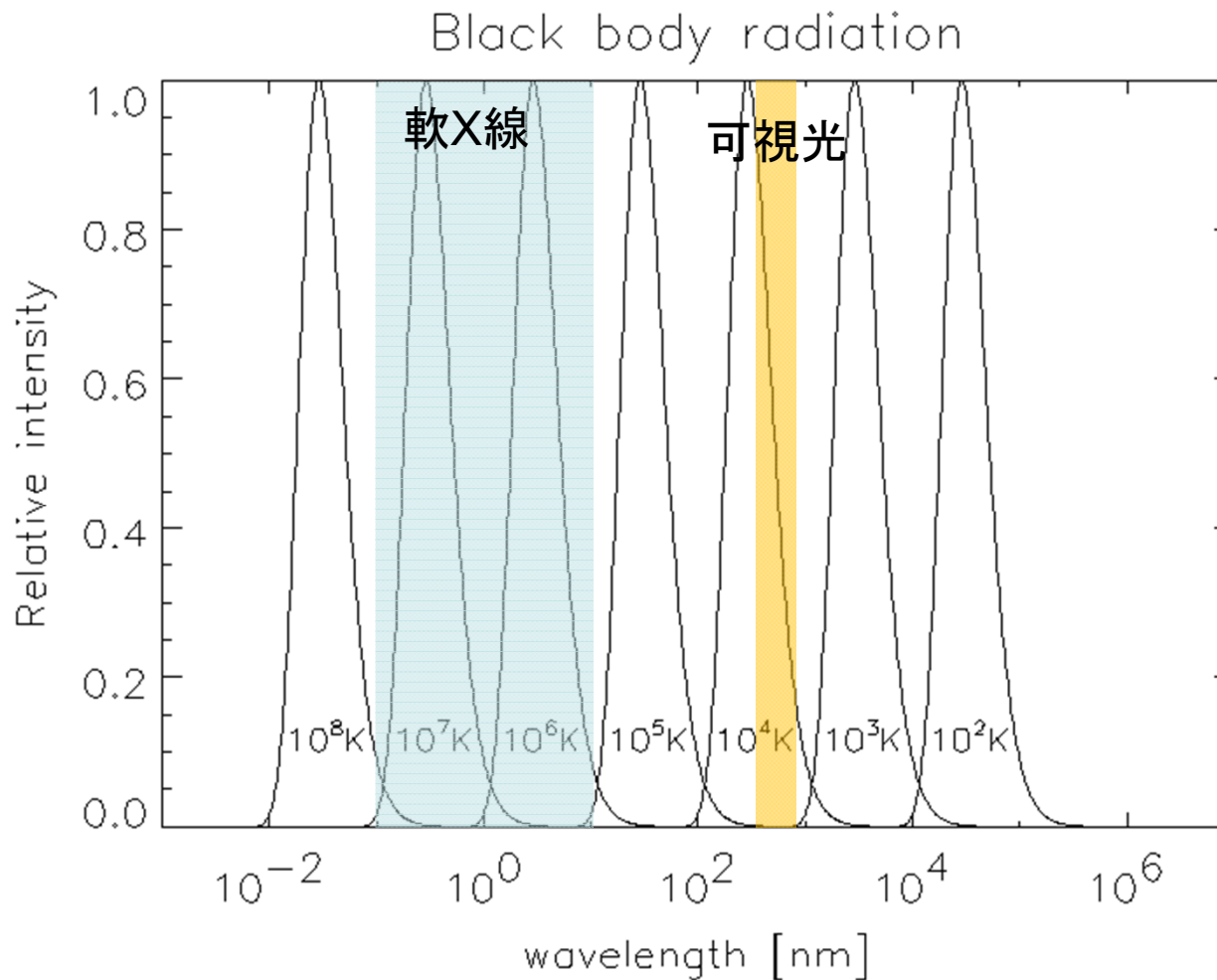


Slide by S.Ueno

2. スペクトルのでき方

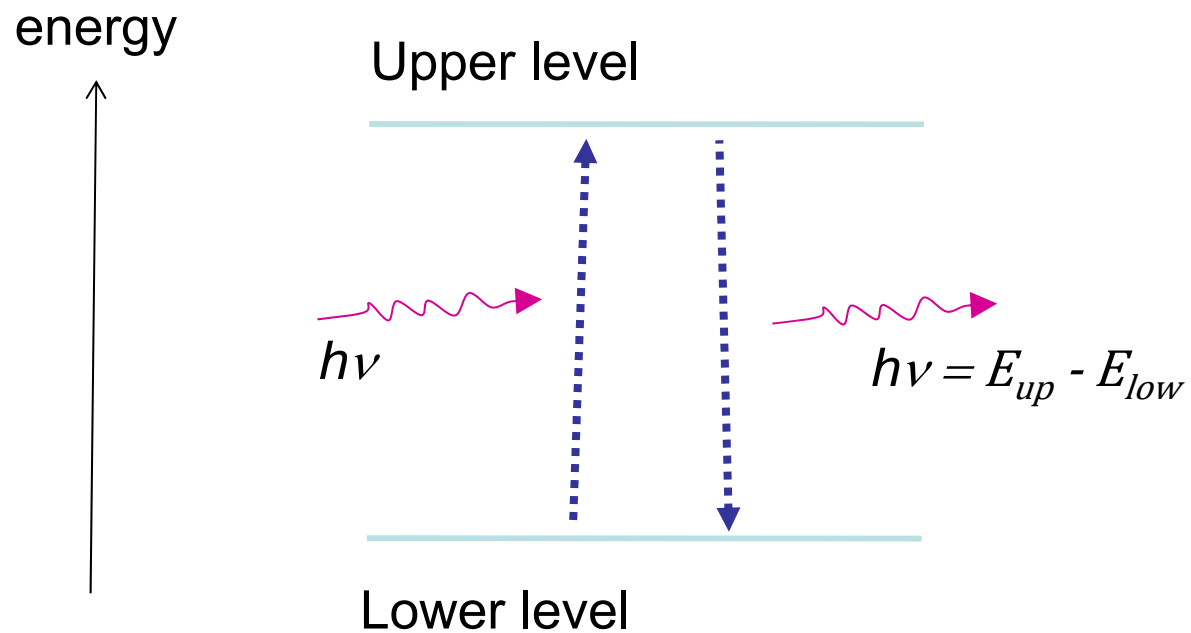
温度と光のスペクトル(連続光)

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

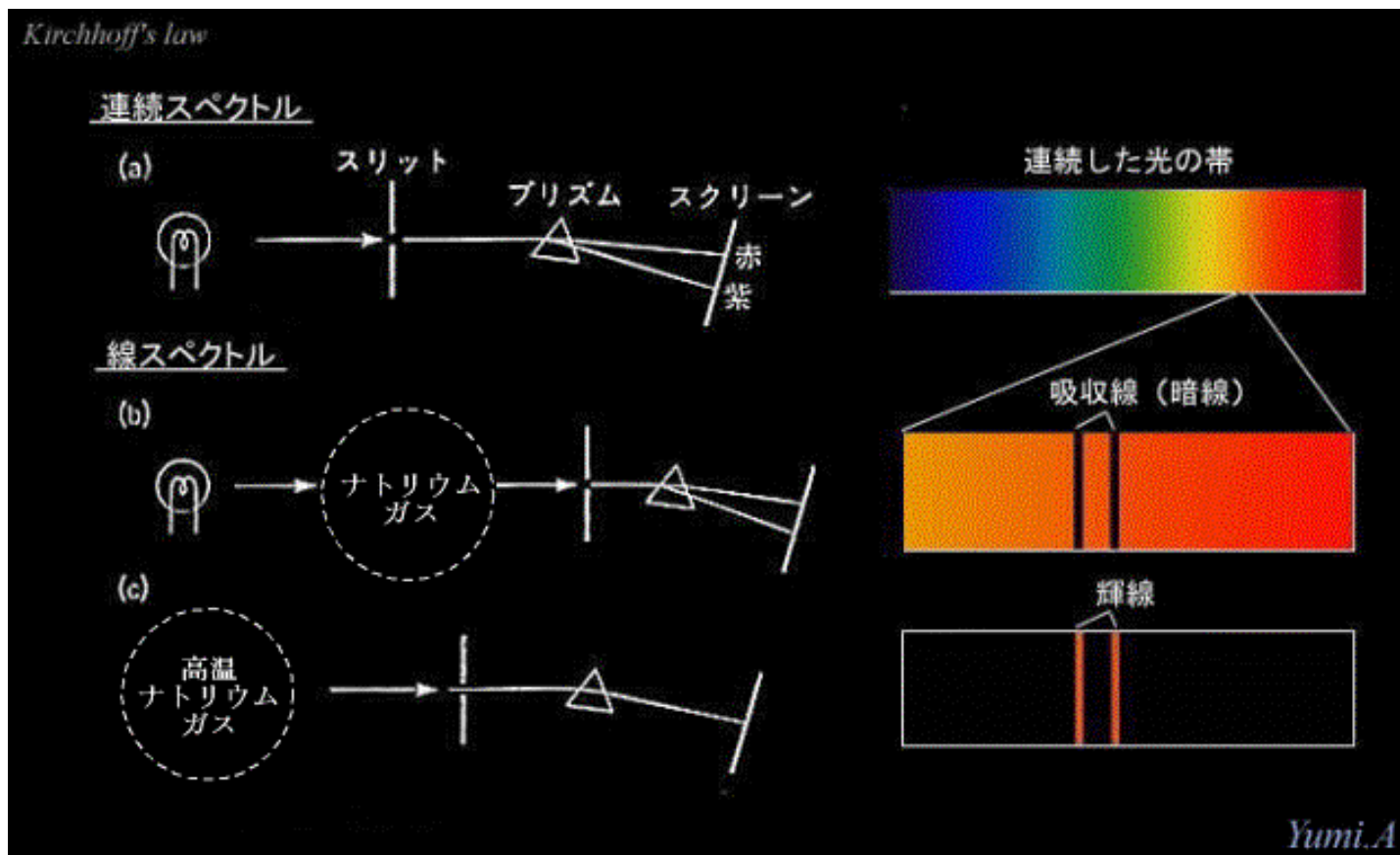


原子状態と線スペクトル

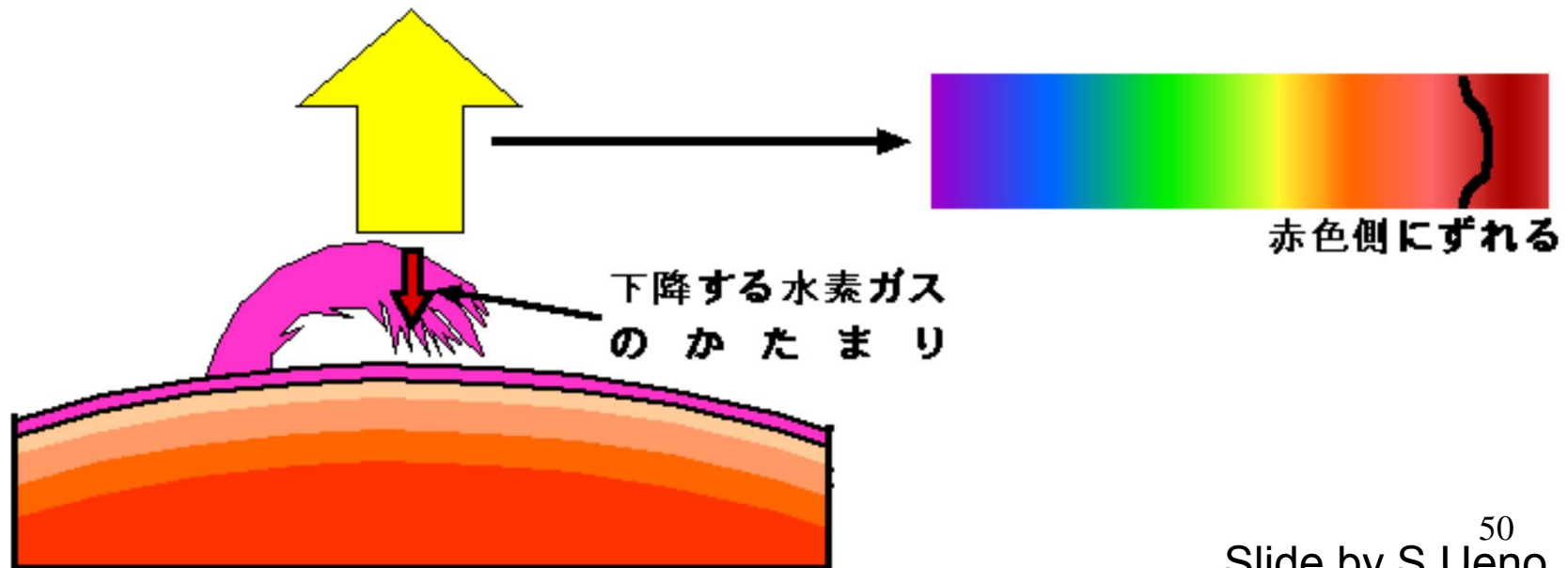
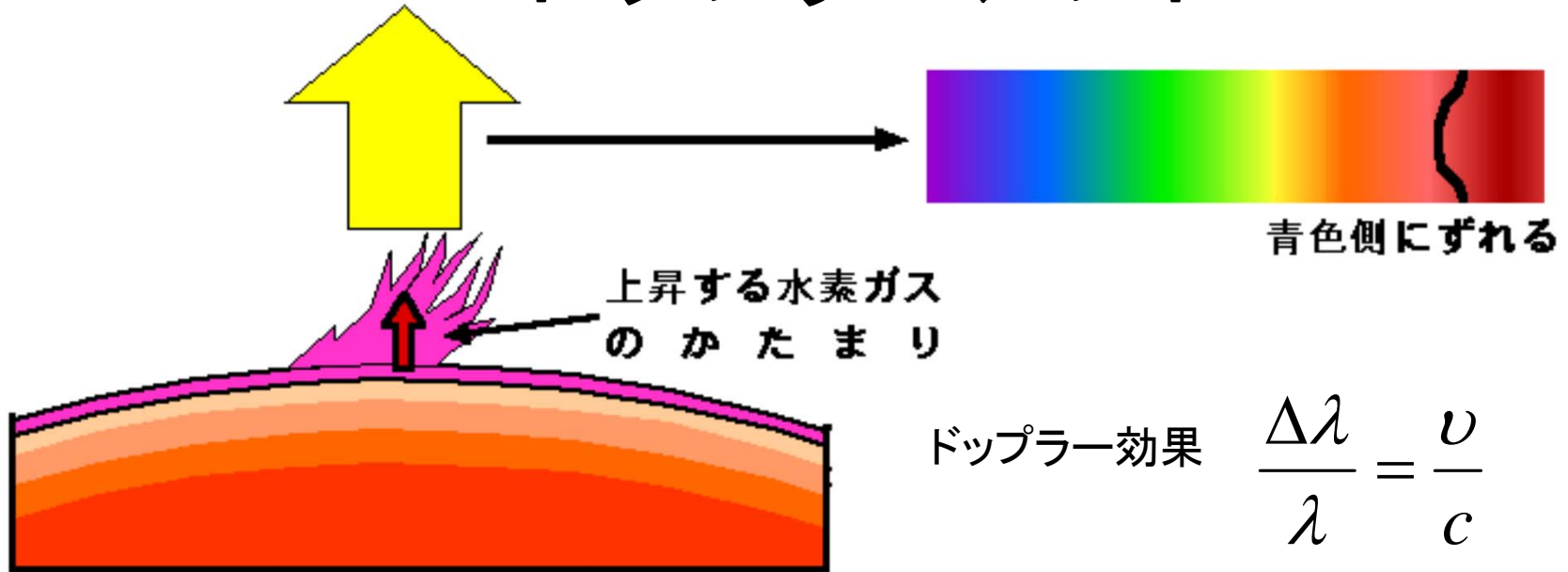
原子の線スペクトル \leftrightarrow 2つのエネルギーレベル間の状態遷移



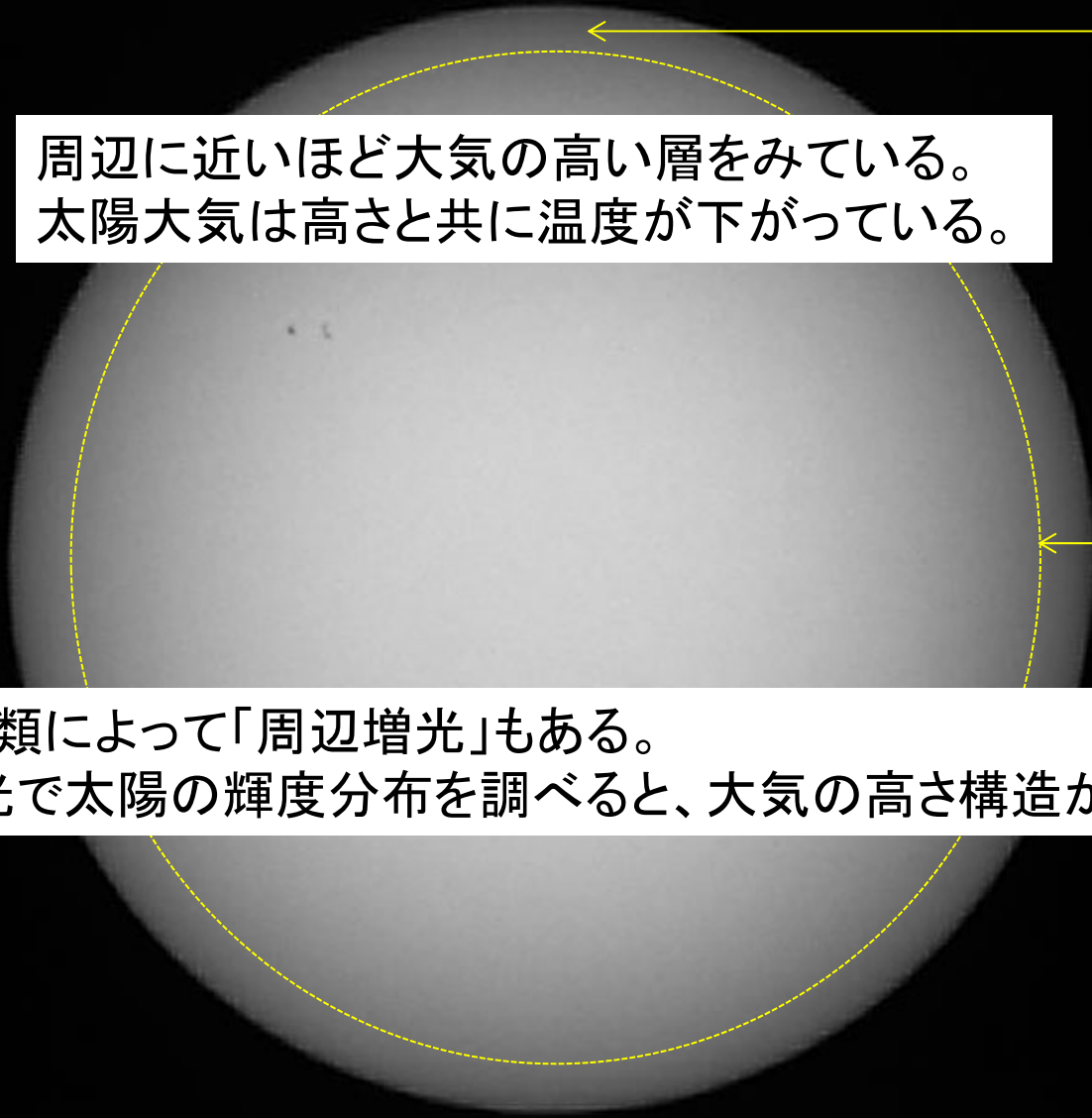
輝線スペクトルと吸収線スペクトル



ドップラーシフト



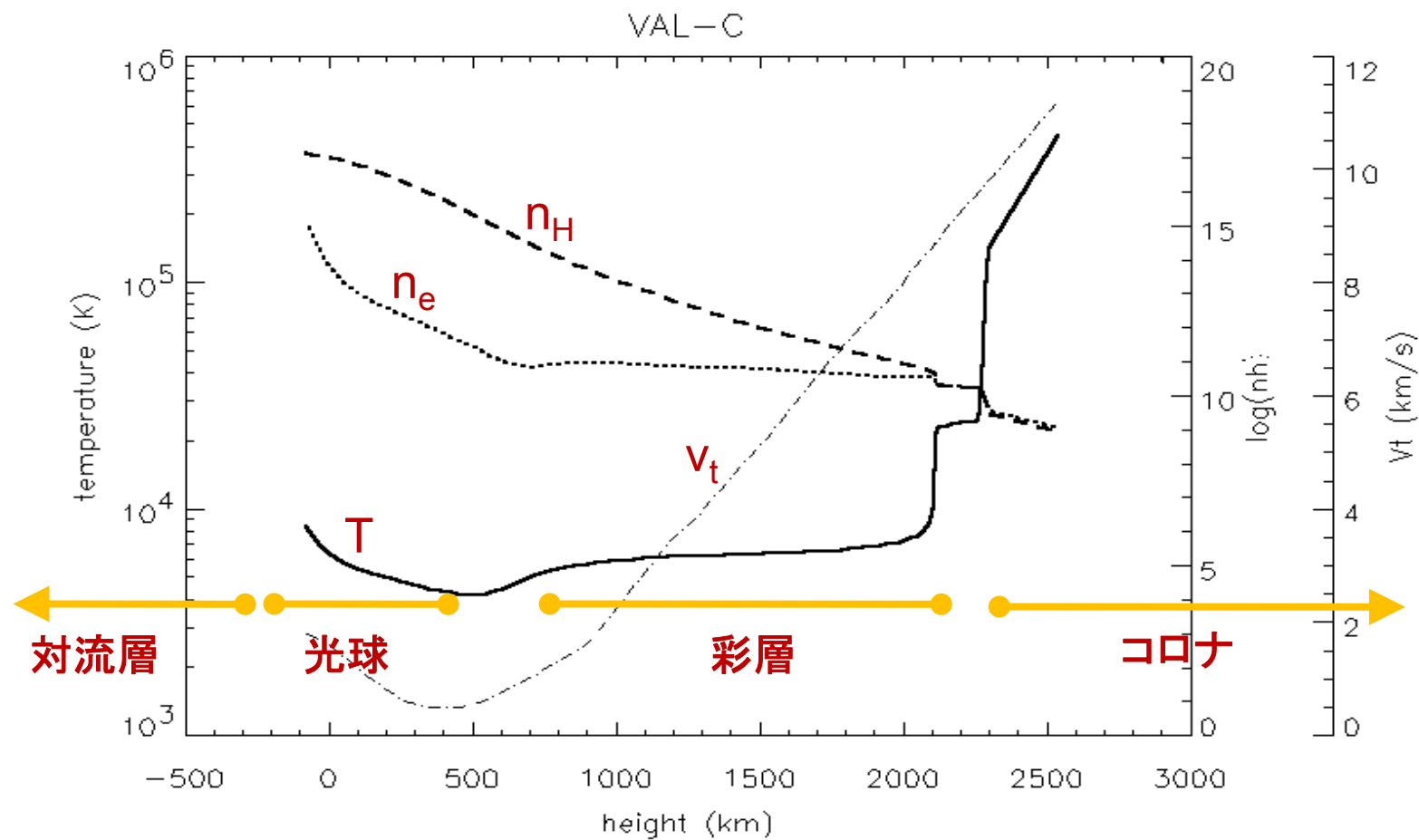
太陽はなぜ周辺が暗いのか？（周辺減光）



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

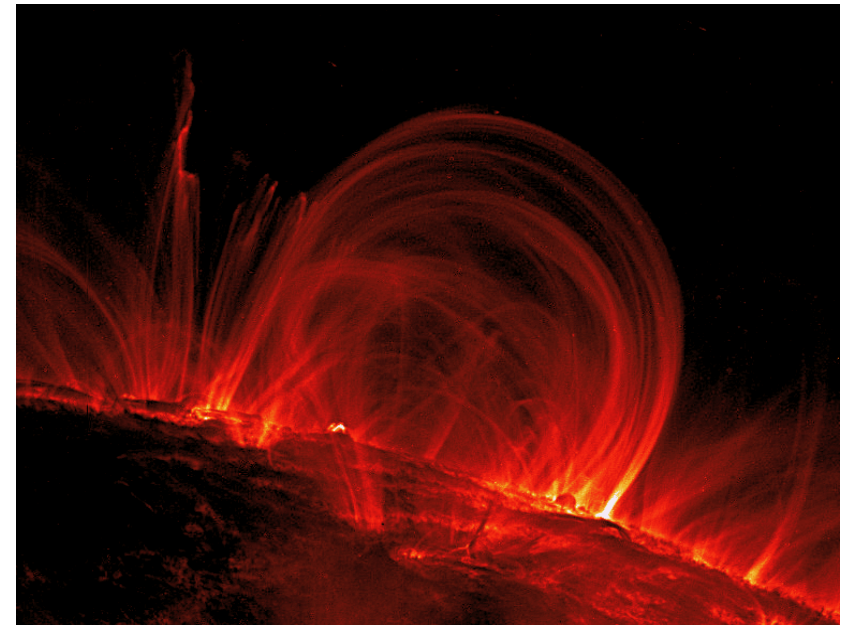
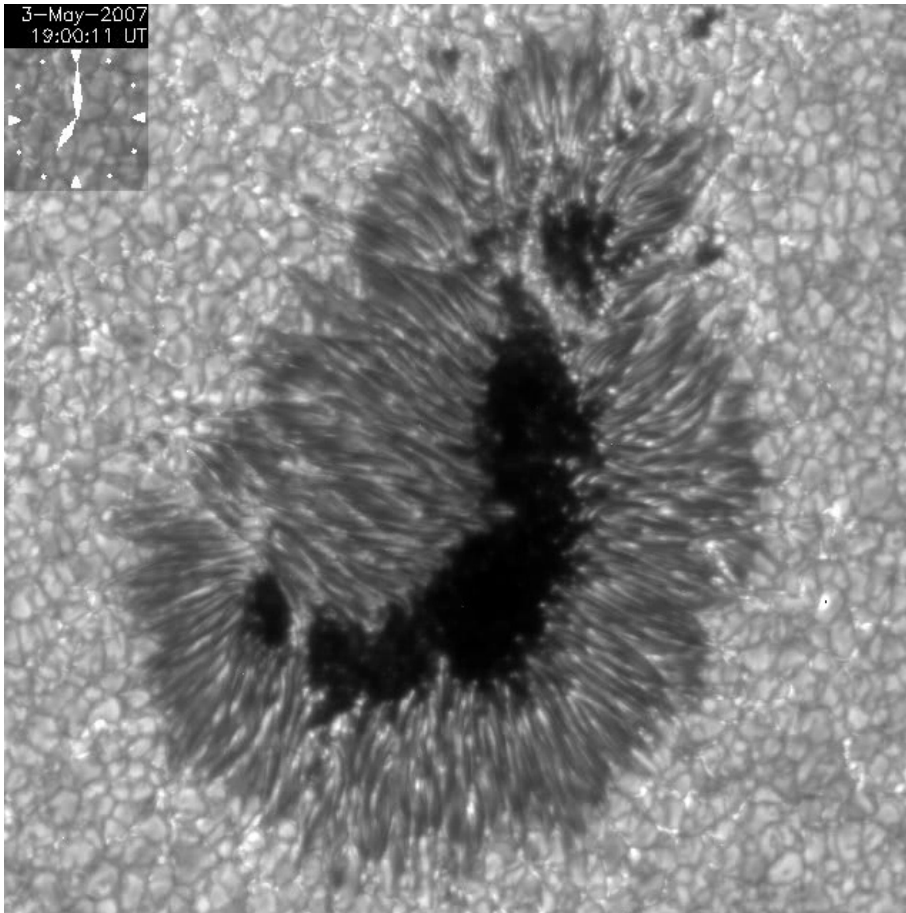


3. 宇宙の中の「磁場」

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

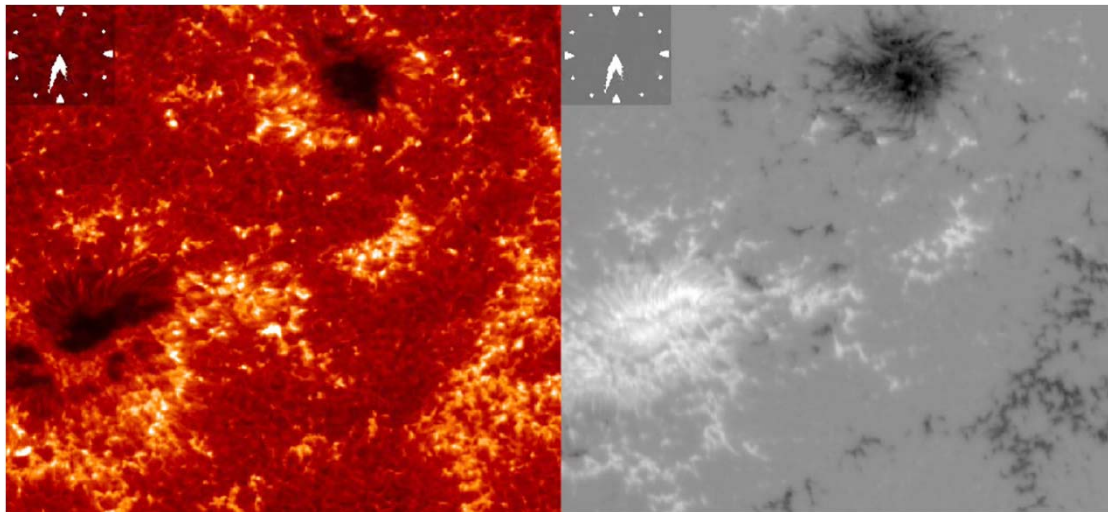
→ 「構造」の形成(対流の抑制、プラズマ閉じこめ)



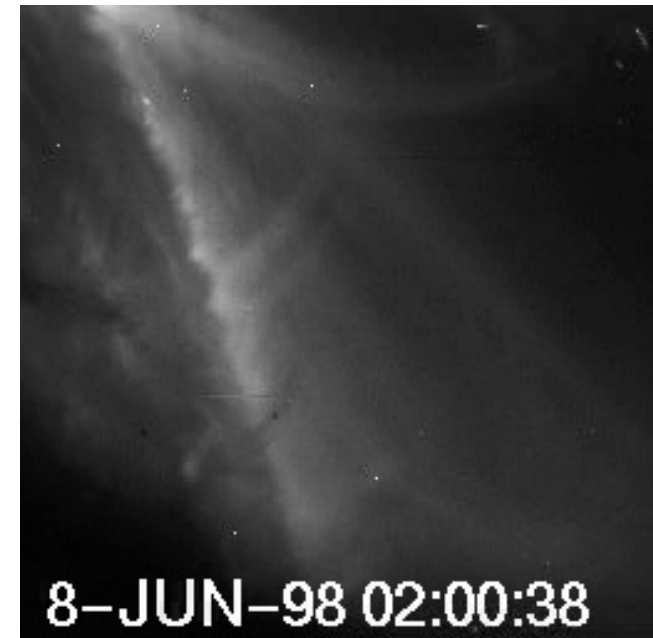
宇宙における磁場の働き(2):

- 磁気圧による膨張

→ 磁気ループの浮上、コロナへの拡大



ひので

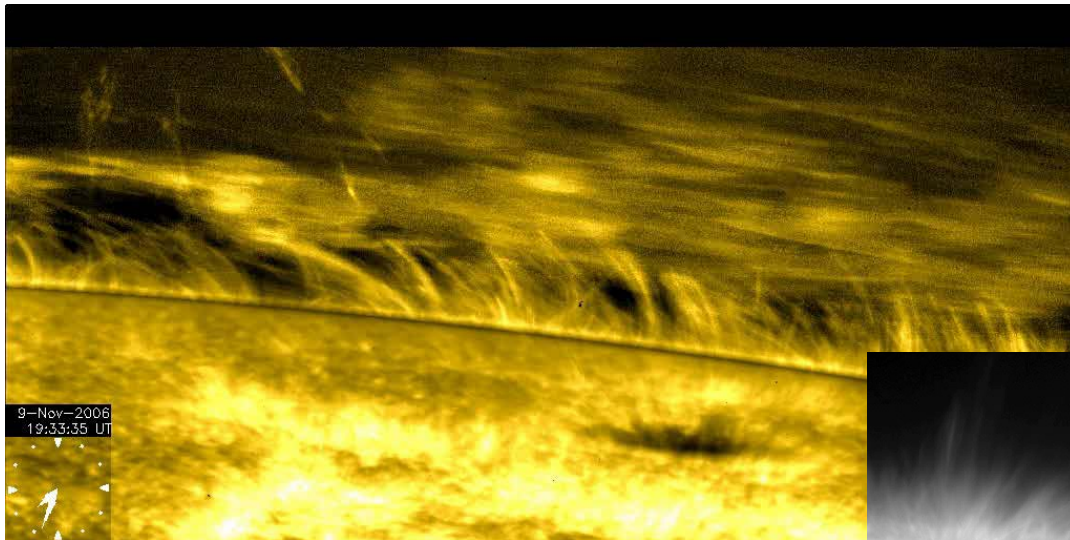


TRACE

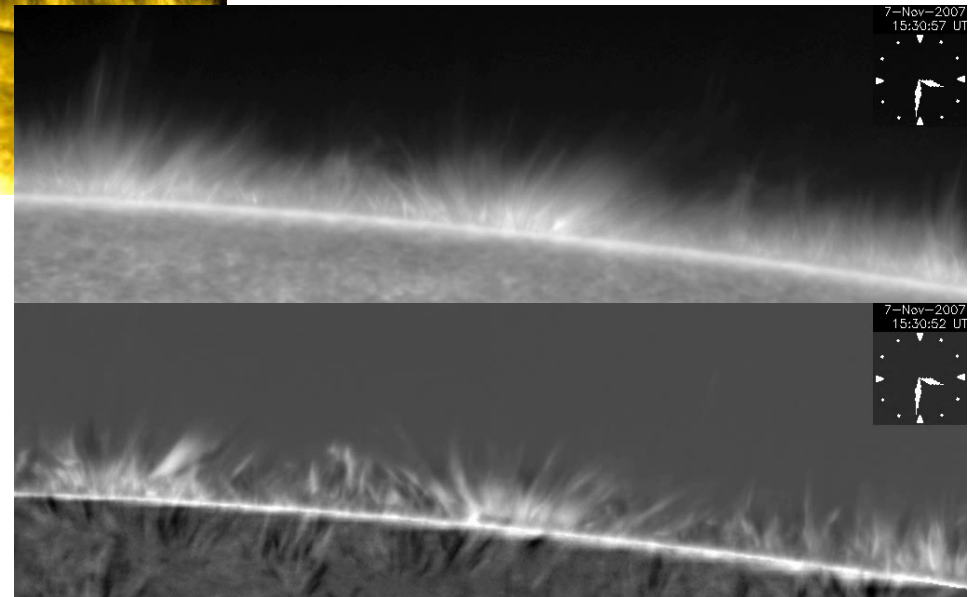
宇宙における磁場の働き(3):

- 波動の媒体

→ エネルギーや擾乱の伝達



ひので

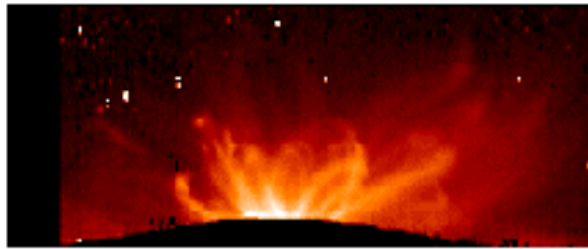


宇宙における磁場の働き(4):

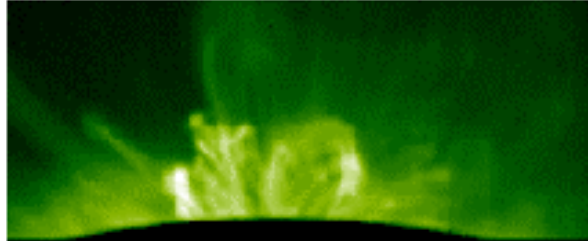
- 熱伝導を抑制・ガイド

→ コロナの多温度構造を形成

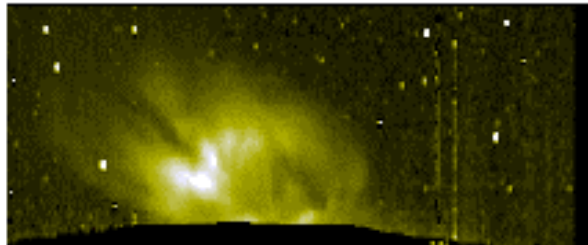
FeX
6374Å
(1MK)



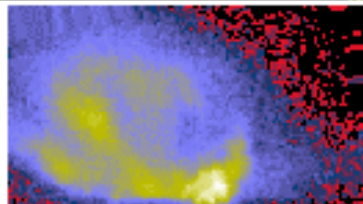
FeXIV
5303Å
(2MK)



CaXV
5694Å
(3.5MK)



Yohkoh SXT
(3—6MK?)



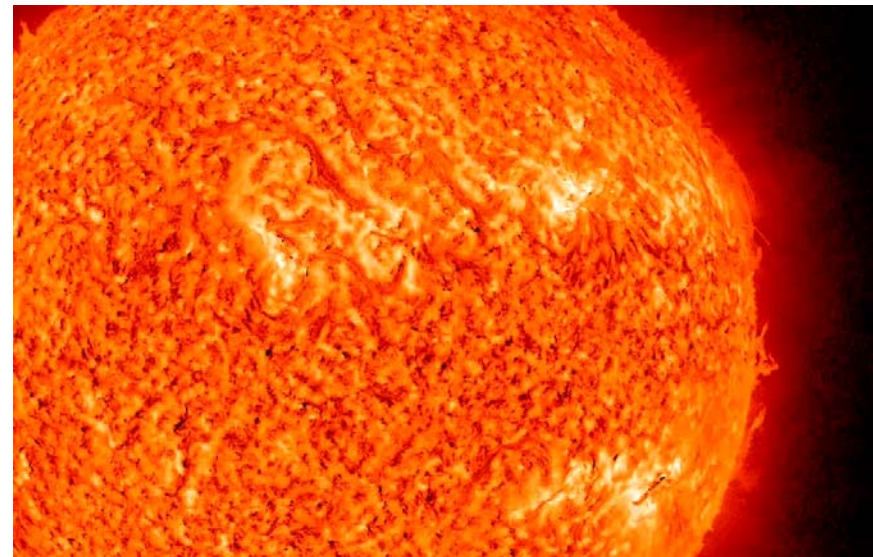
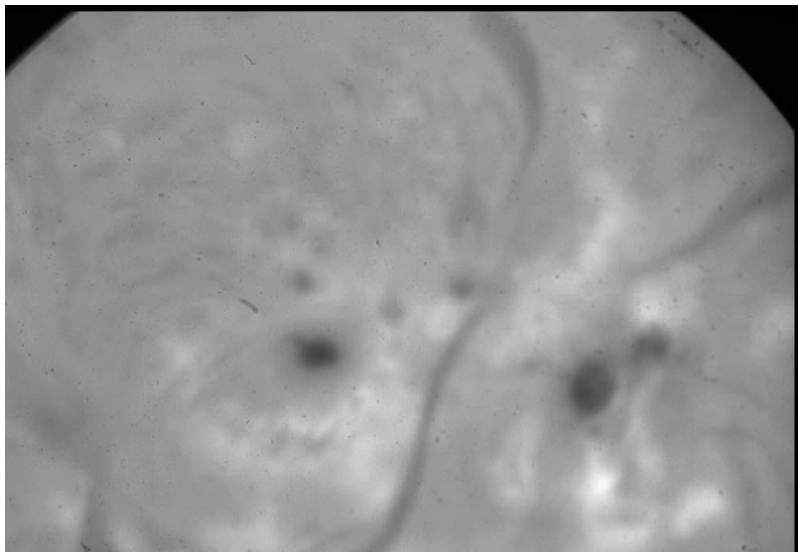
乗鞍コロナ観測所

宇宙における磁場の働き(5):

- エネルギーの蓄積・不安定化

→ 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

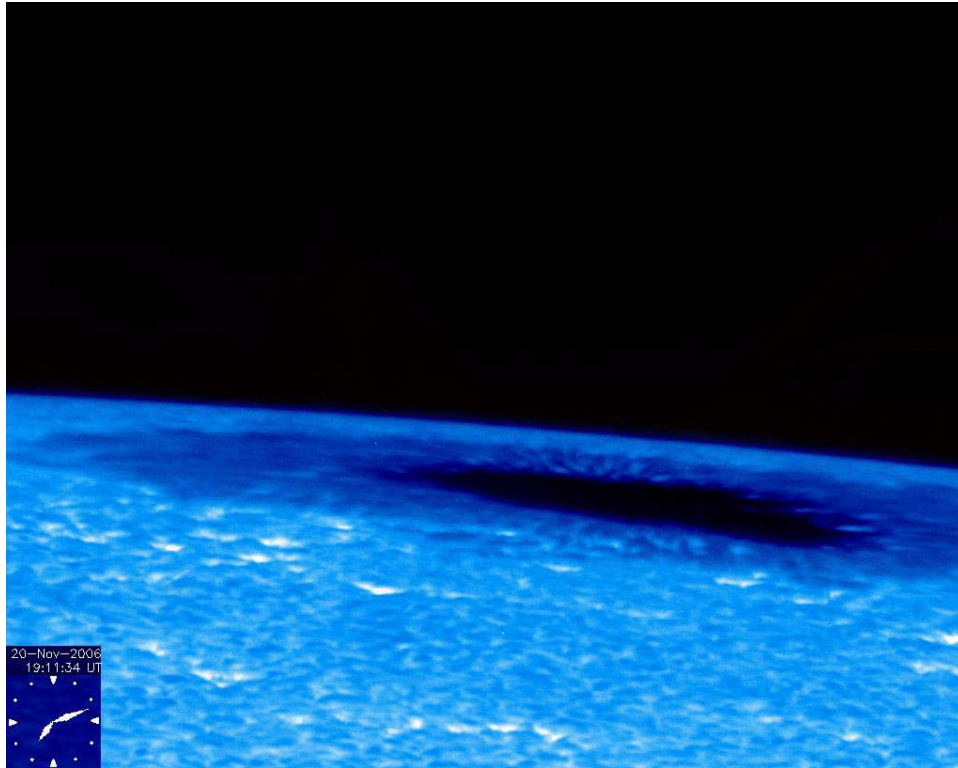
2001.04.10 04:29:26[UT]

飛騨天文台

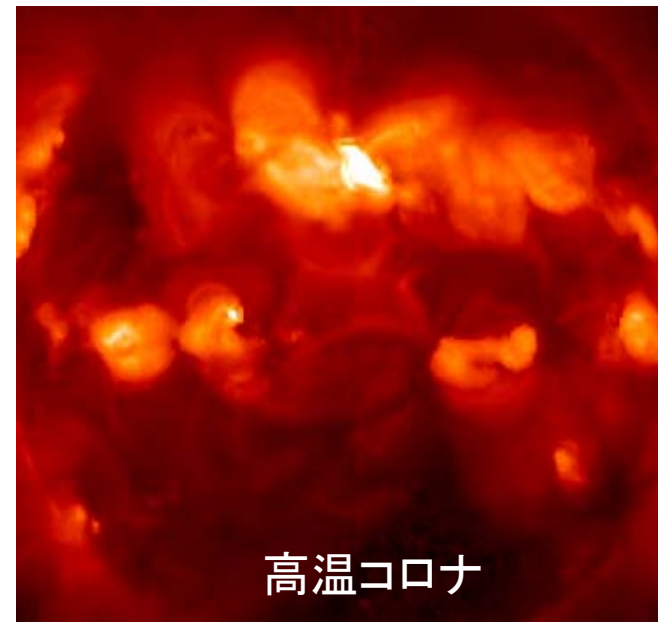
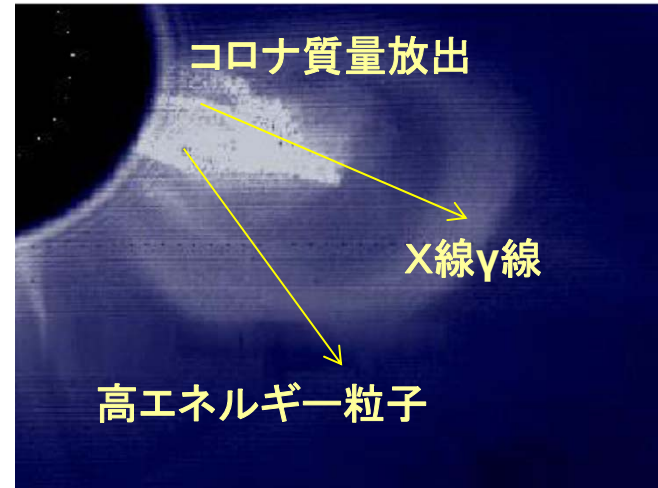
SDO

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

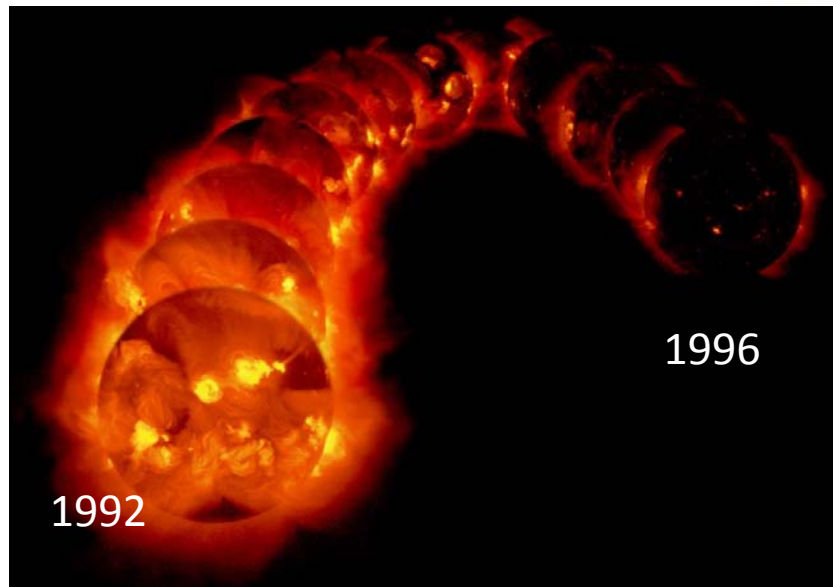
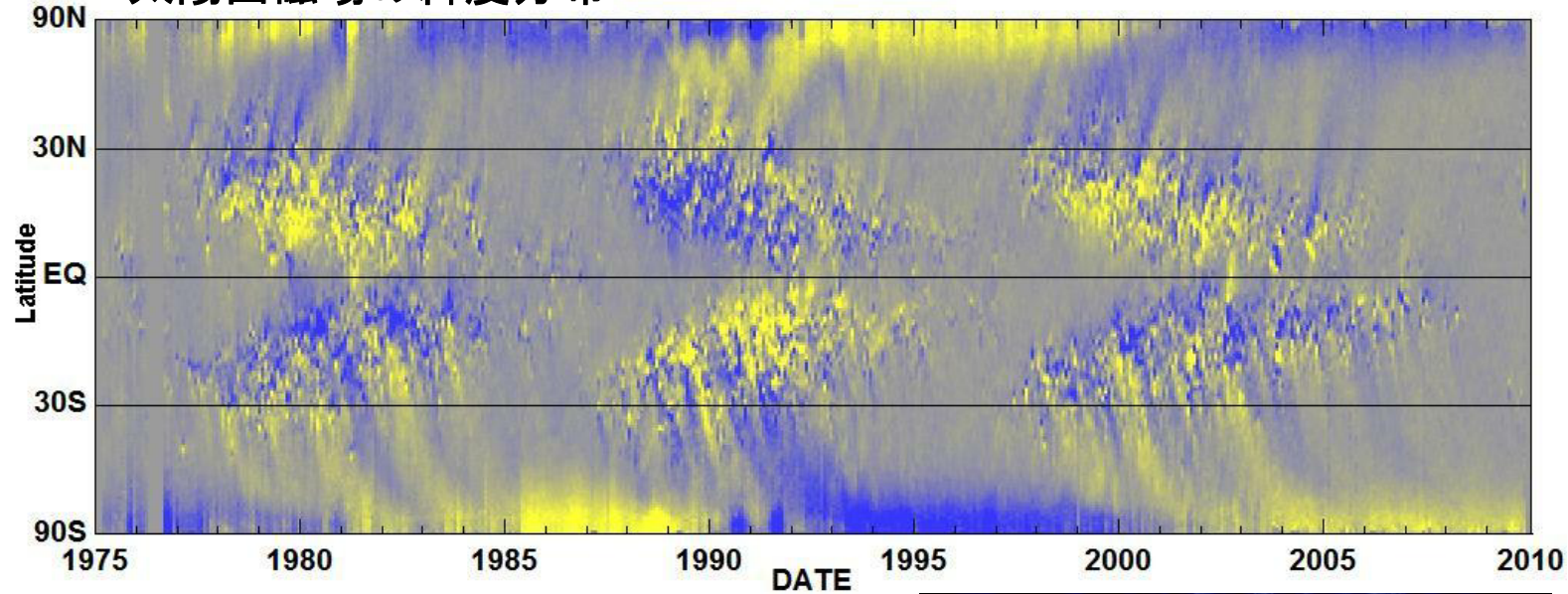


太陽研究の課題2

磁場の生成機構(ダイナモ)

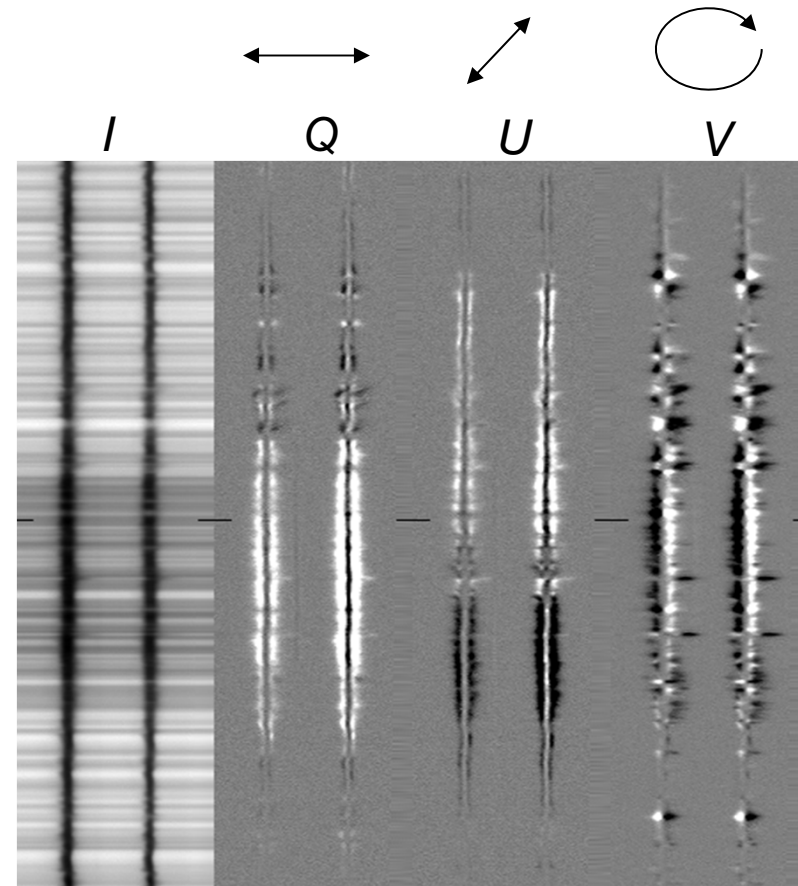
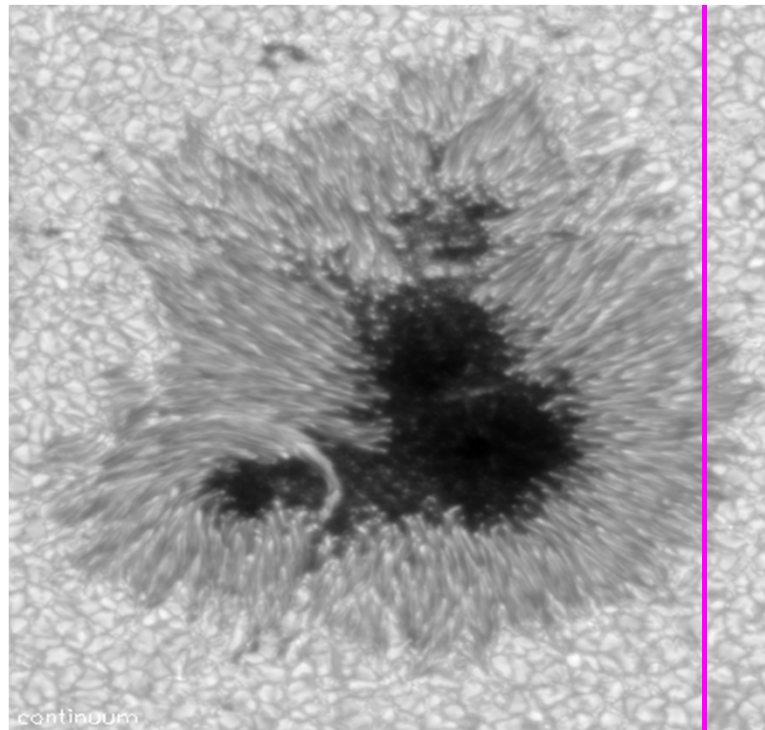
(11年活動サイクル、マウンダー極小期、)

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

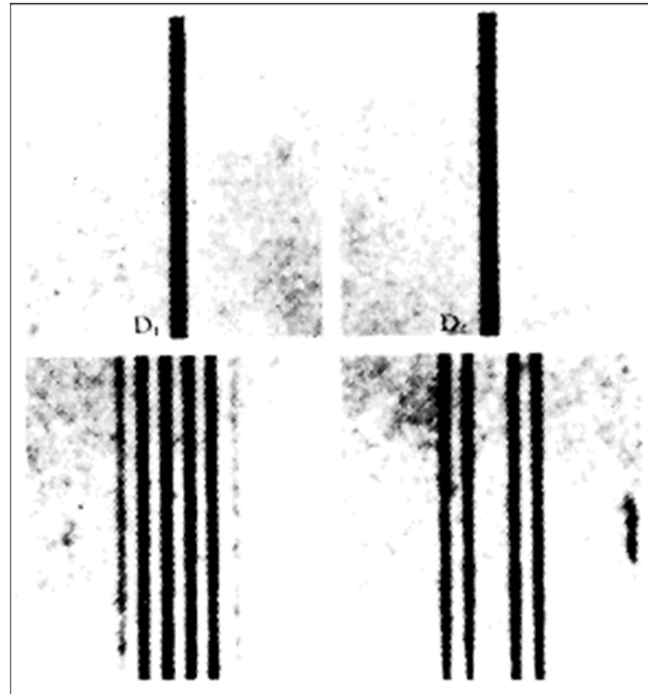
4. 磁場を測る

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

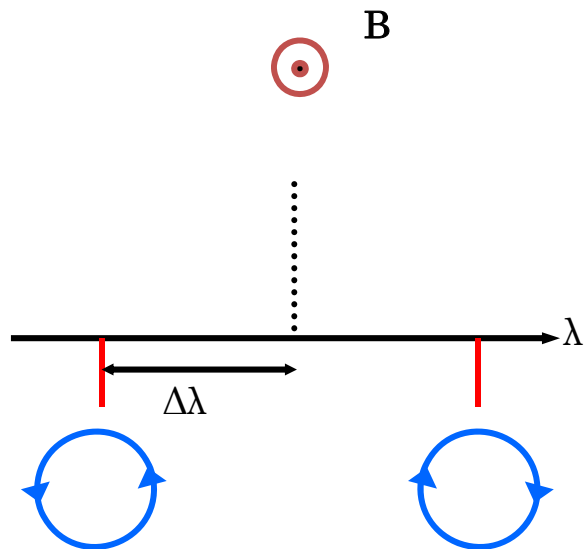
P. Zeeman, *Nature*, vol. 55, 11 February 1897, pg. 347



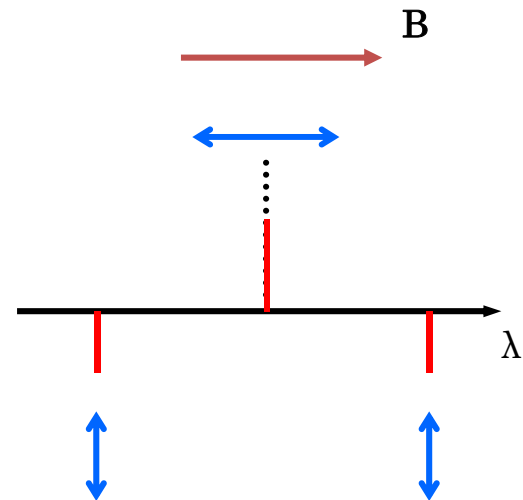
Zeeman 効果

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)

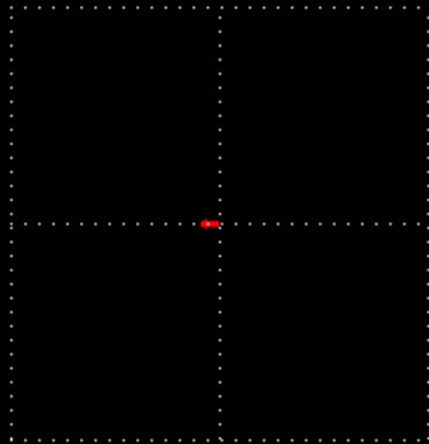
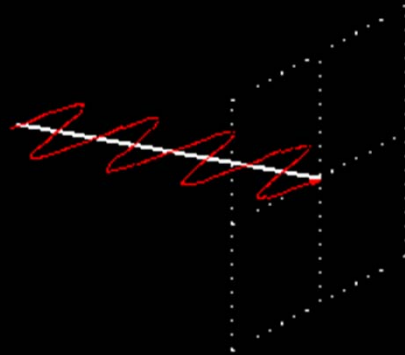


横Zeeman効果
(磁場と直角方向からみて)

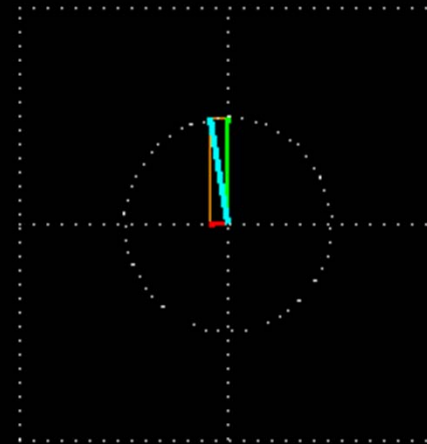
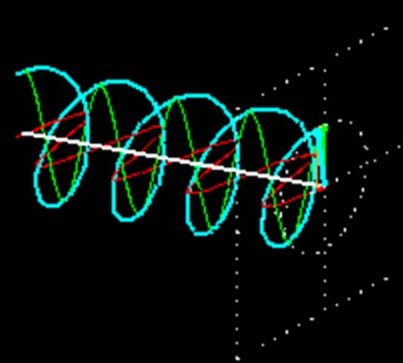


Description of polarized light

Linear polarization

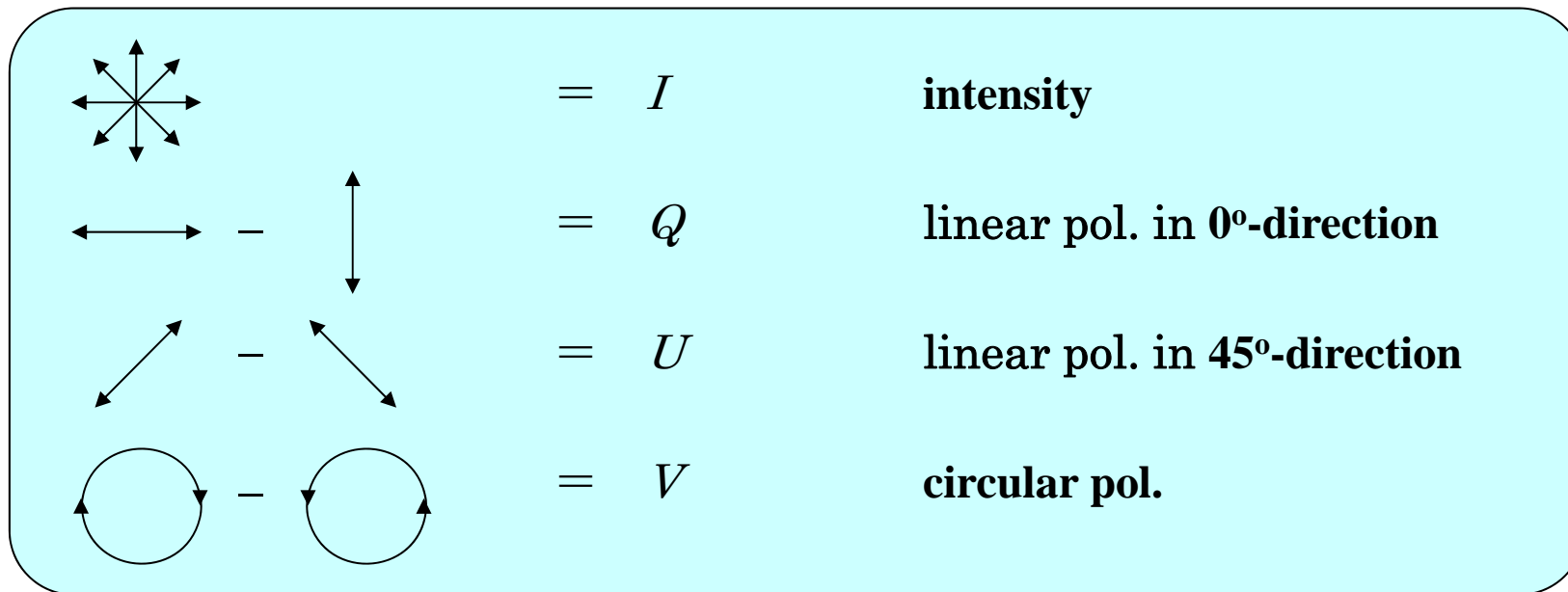


Circular polarization

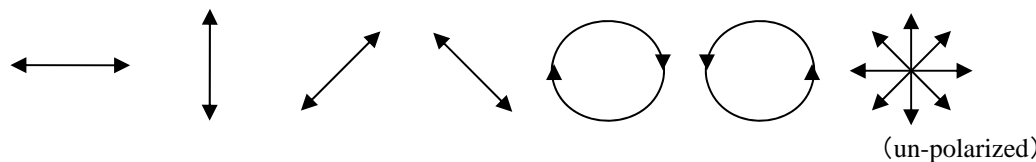


animation courtesy of Jose Carlos del Toro Iniesta

偏光の記述; Stokes パラメータの定義



↑
↑
Intensity through ideal polarizer



Stokes vector

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

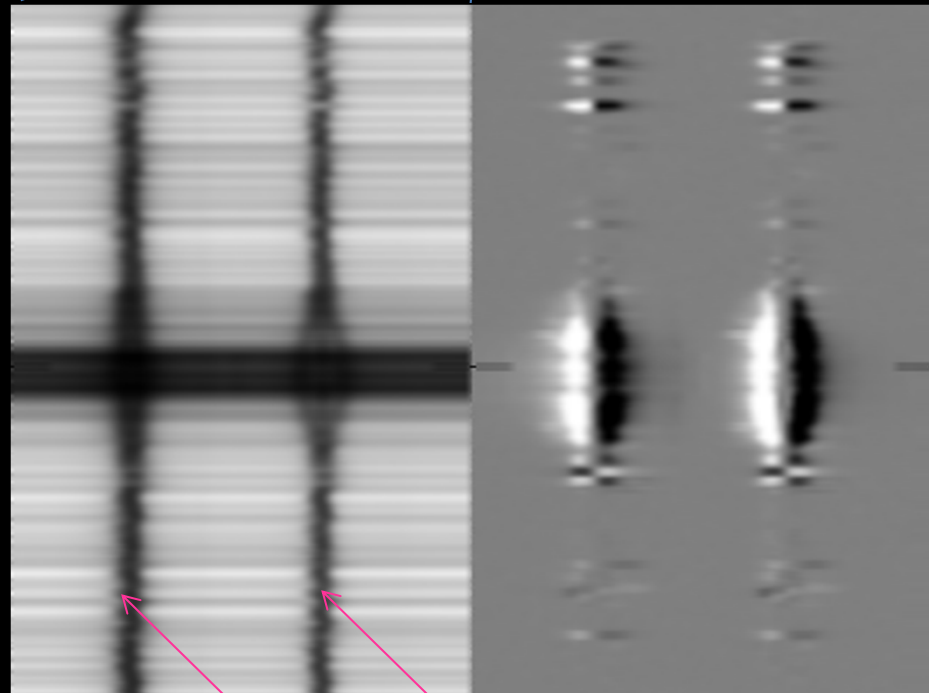
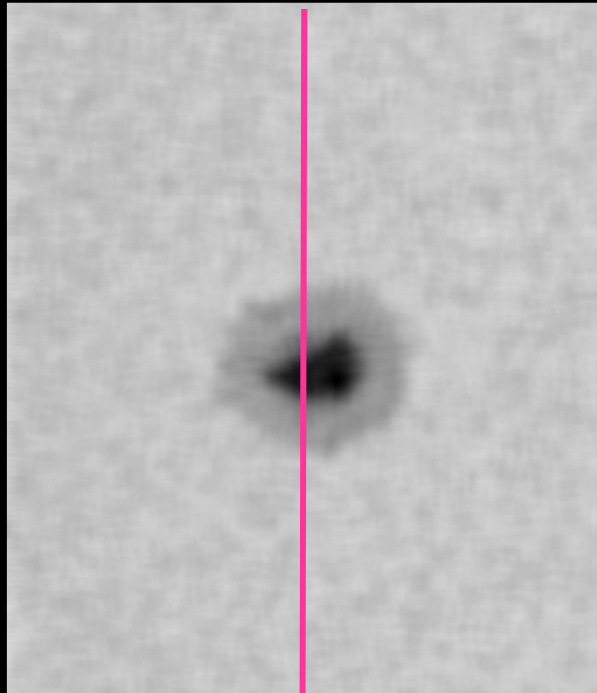
黒点磁場の発見（1908年、ヘール）

太陽可視光域のスペクトル写真



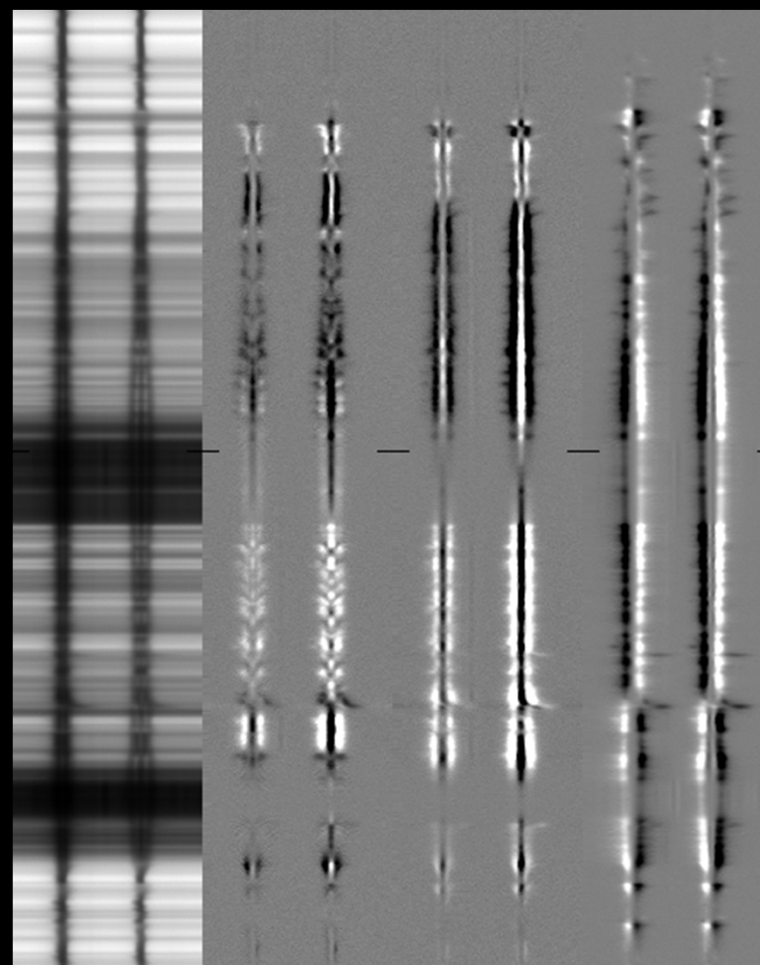
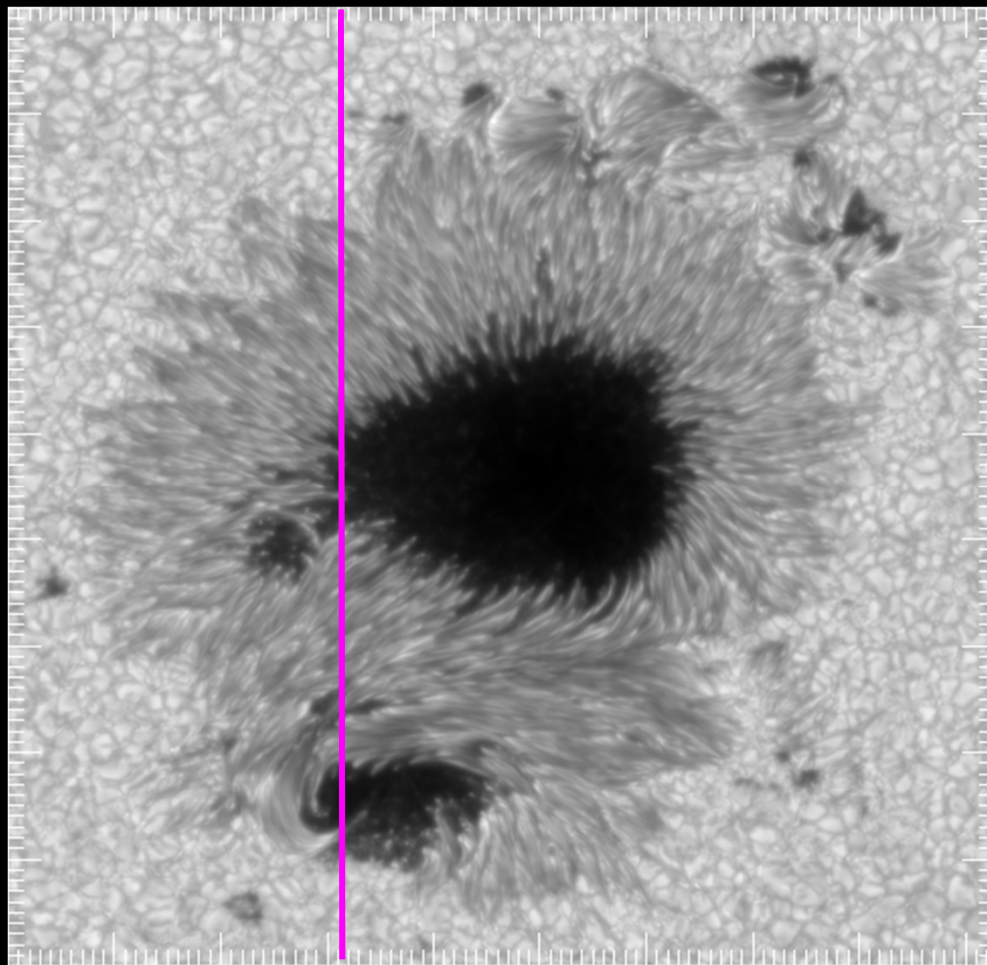
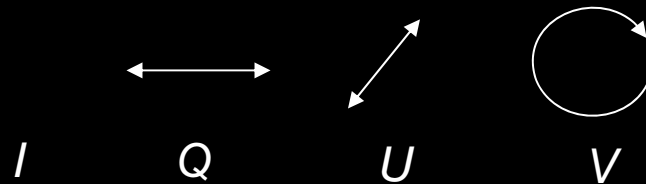
光の強度スペクトル

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

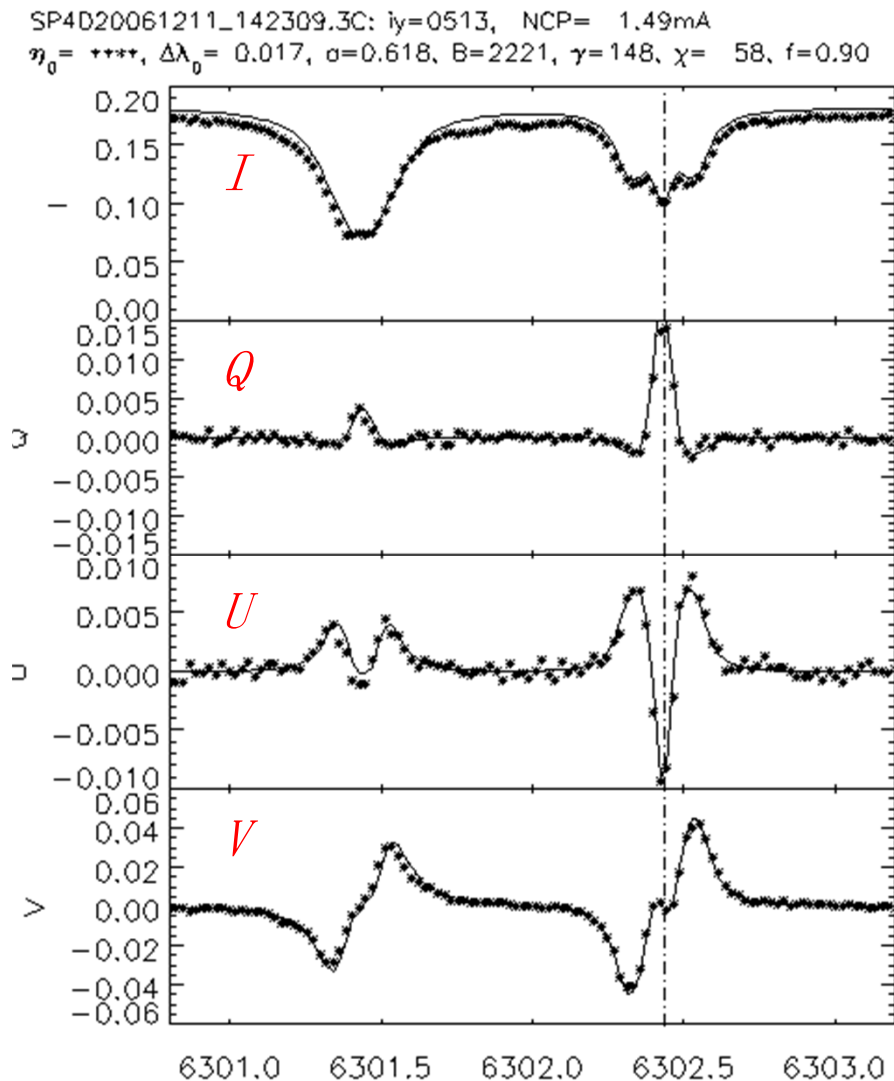


**Zeeman effect of spectral line
(SOT/Spectro-polarimeter)**

FeI6301.5A
 $g = 1.67$

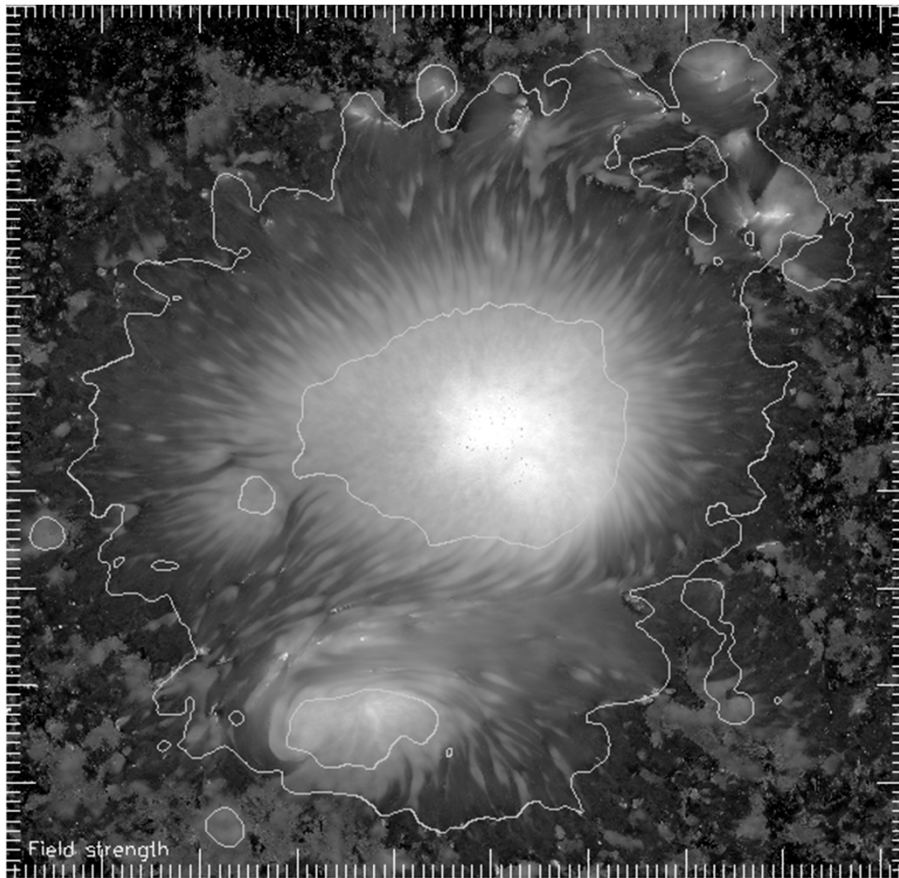
FeI6302.5A
 $g = 2.5$

Stokes profiles: Zeeman effect



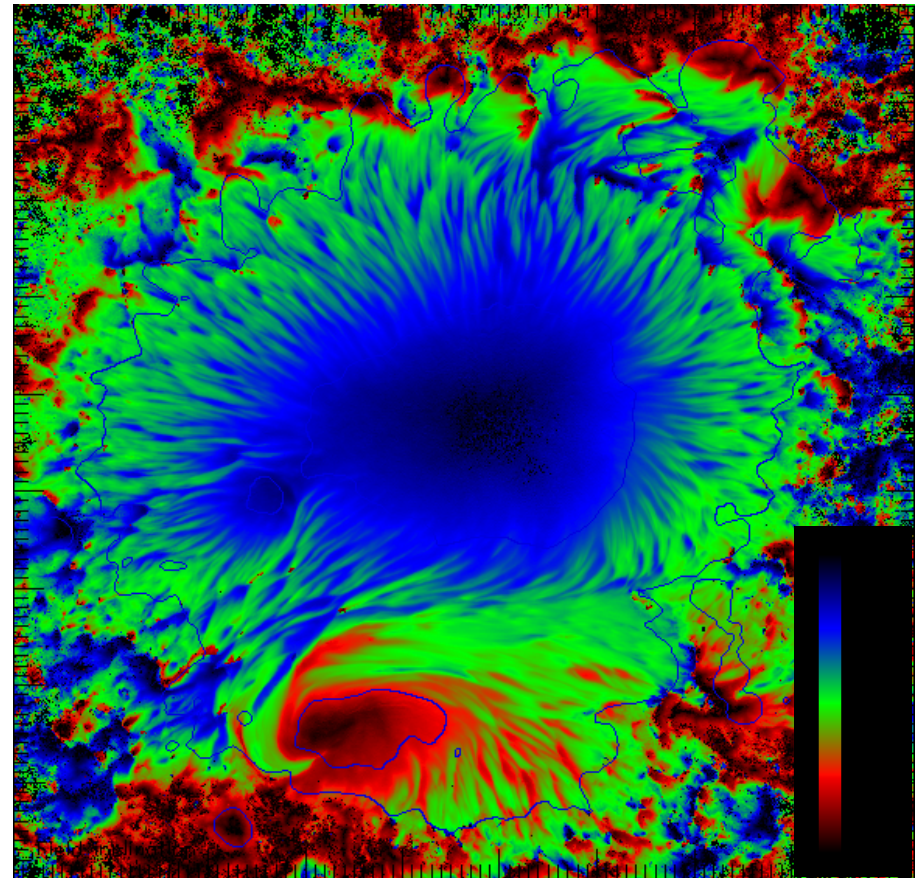
Sunspot magnetic field

Field strength



0 ~ 4000 Gauss

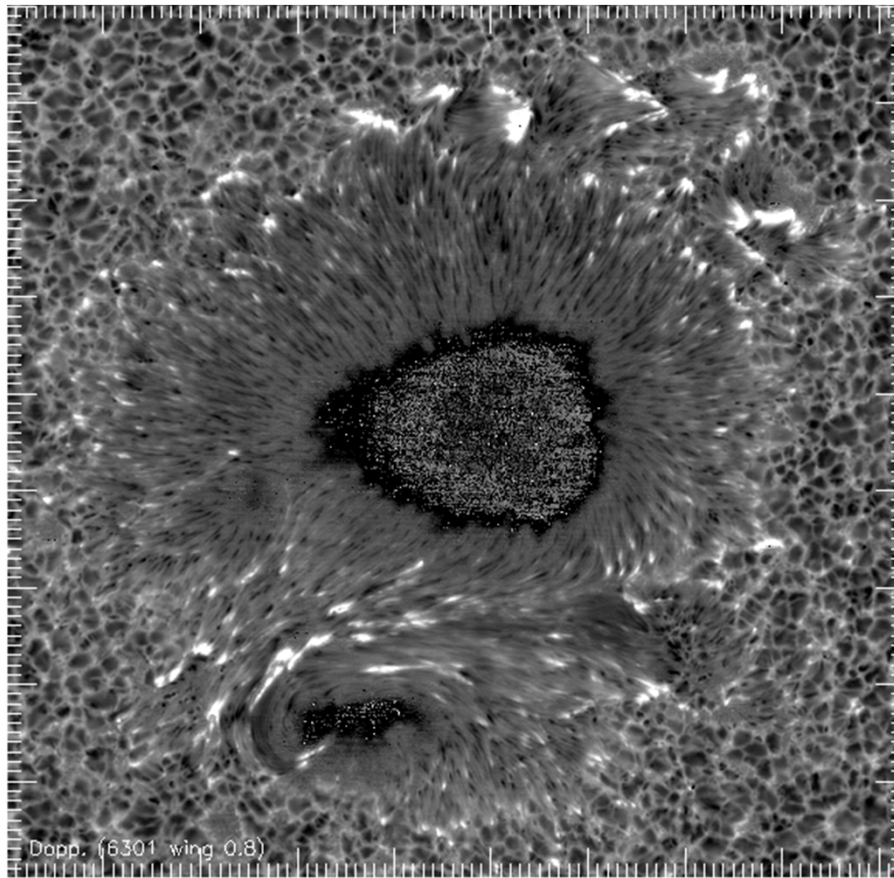
Field inclination



-90° ~ +90°

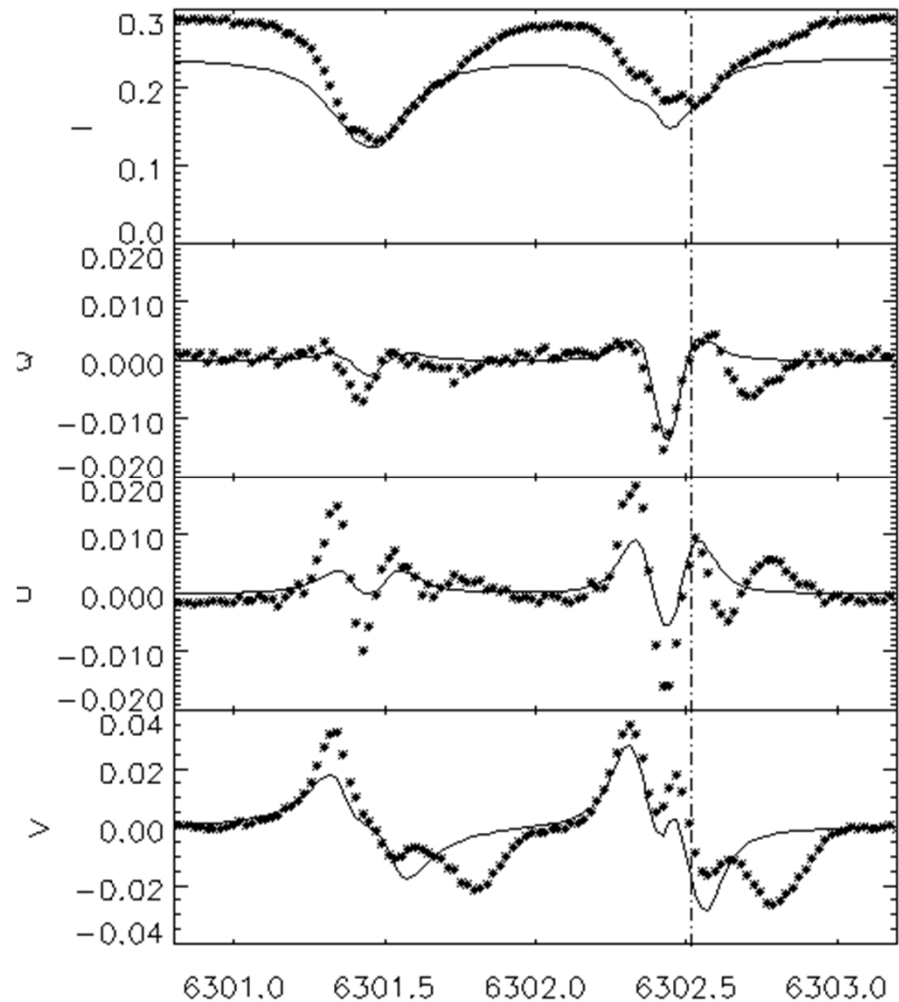
Stokes profiles: Zeeman effect

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

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



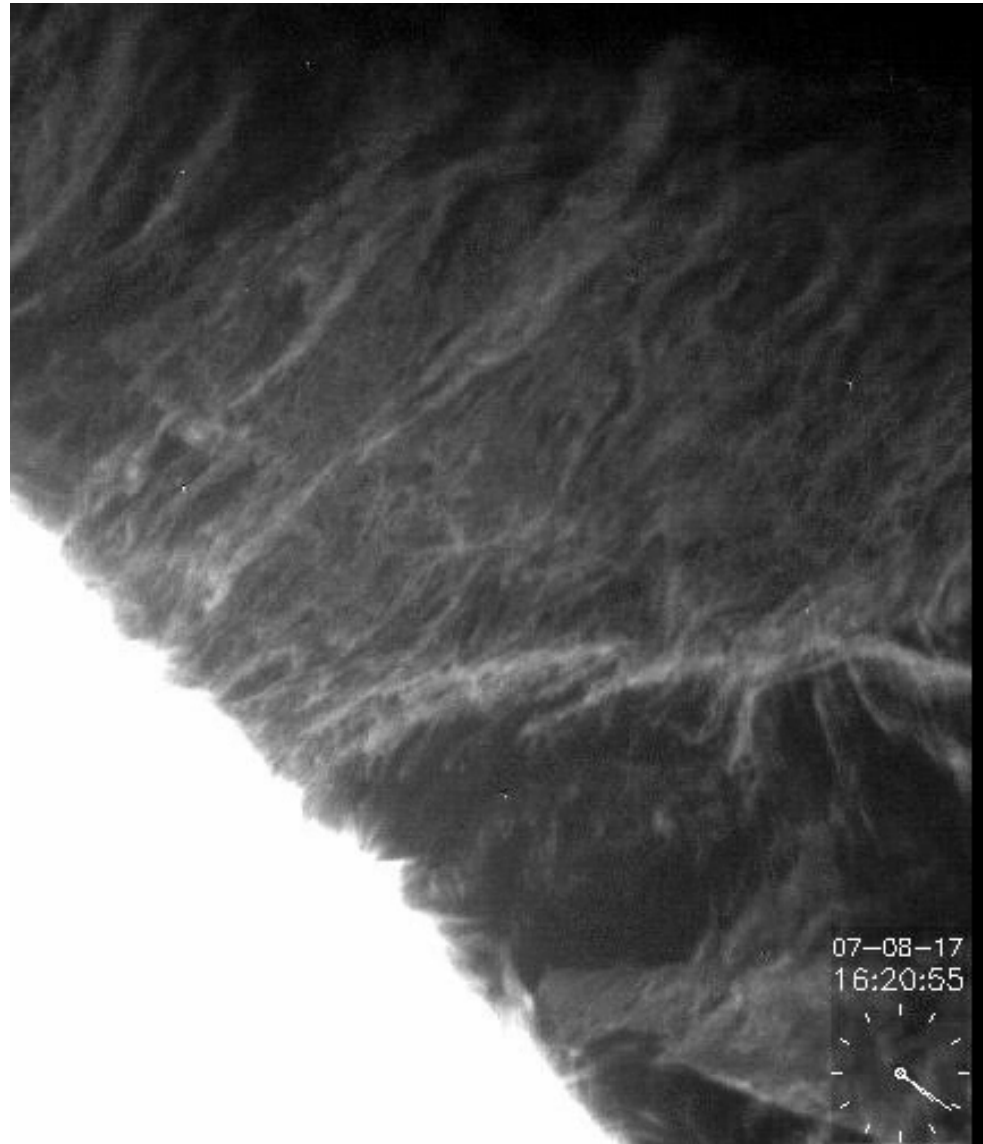
地球

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 = $J \times B$... 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 = $v \times B$ → 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

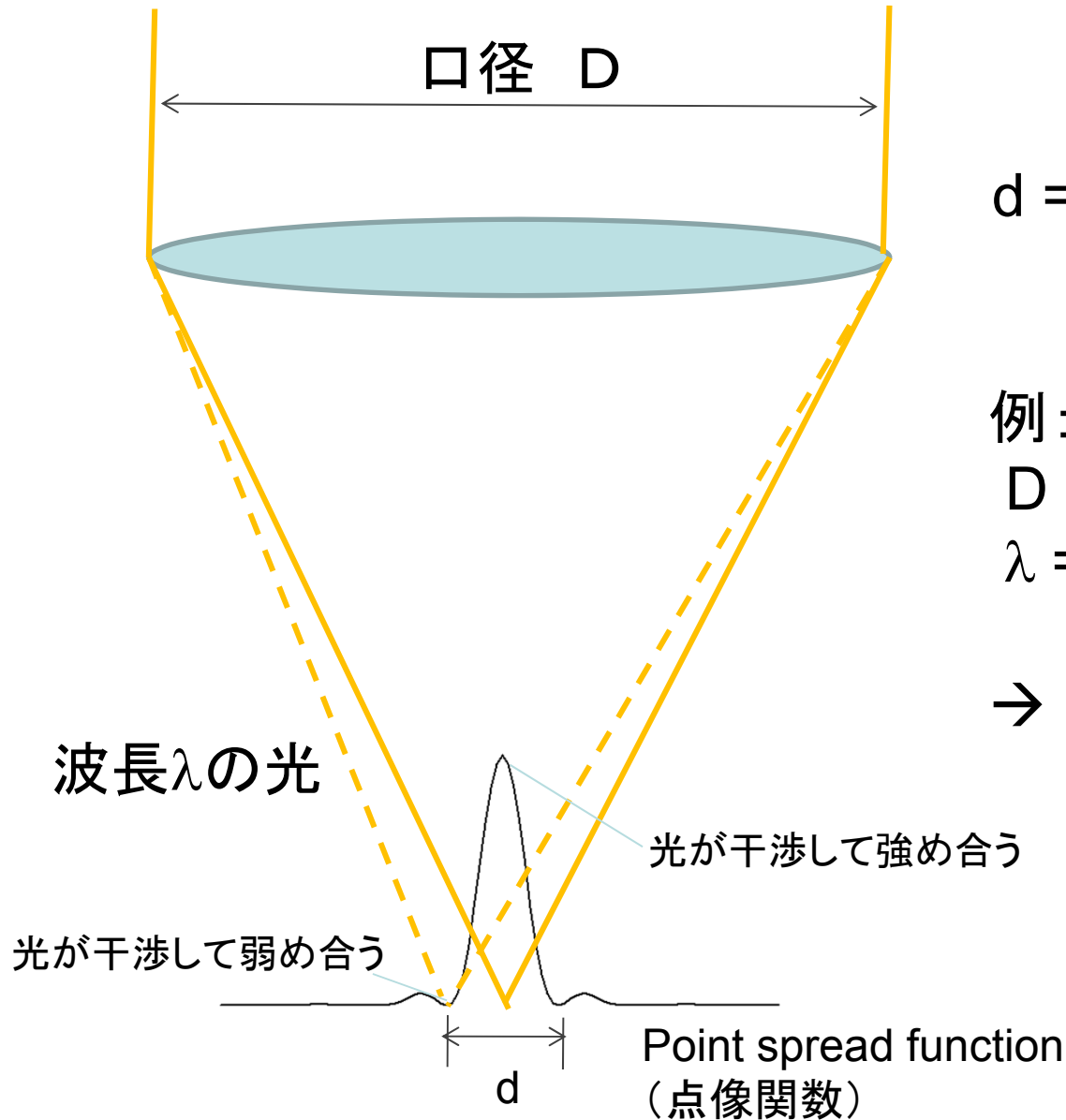
t 時間 --- ダイナミクス

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



$d = 1.22 \lambda / D$ -- 回折限界

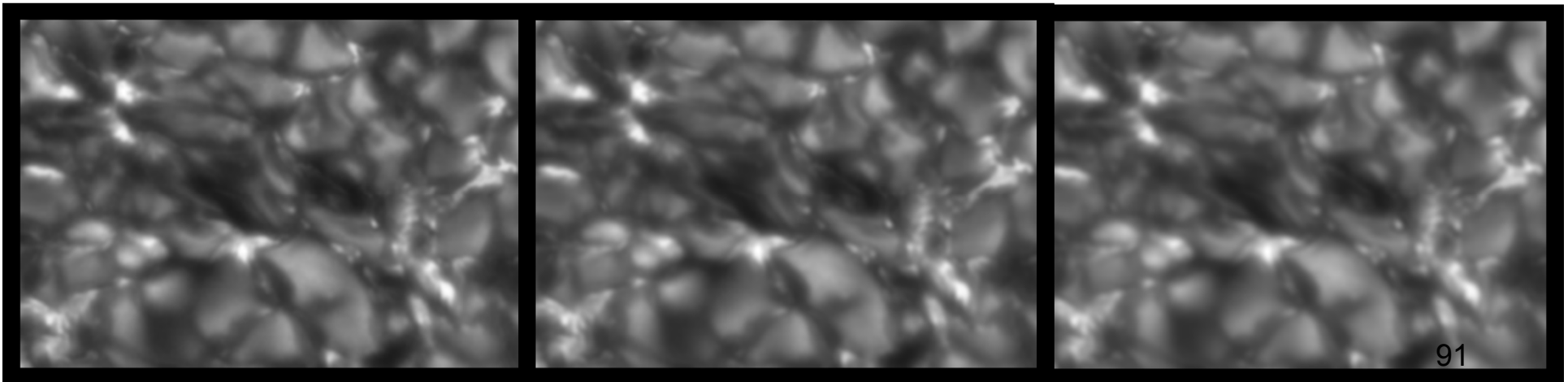
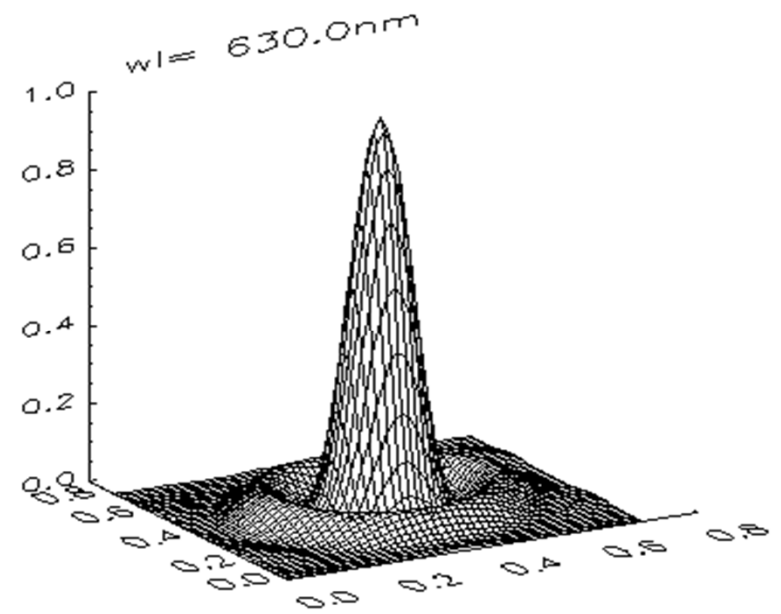
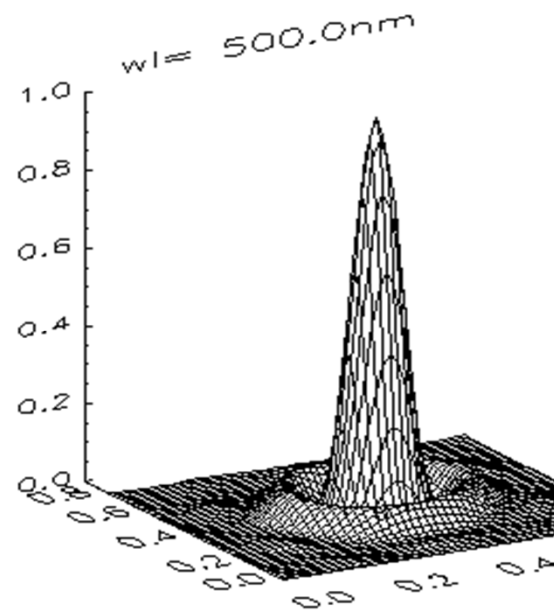
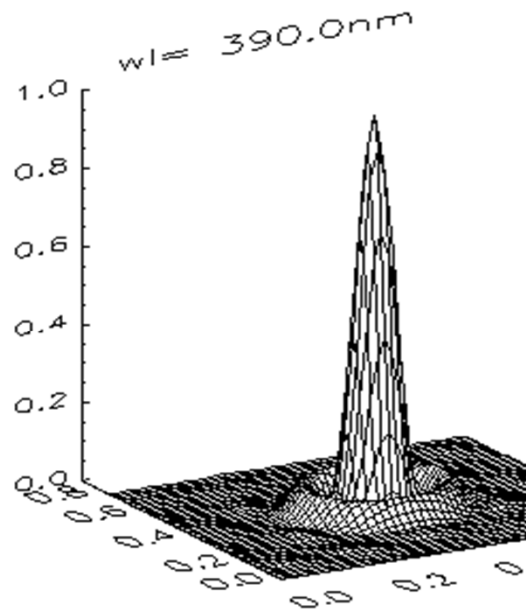
例:

$D = 60\text{cm}$

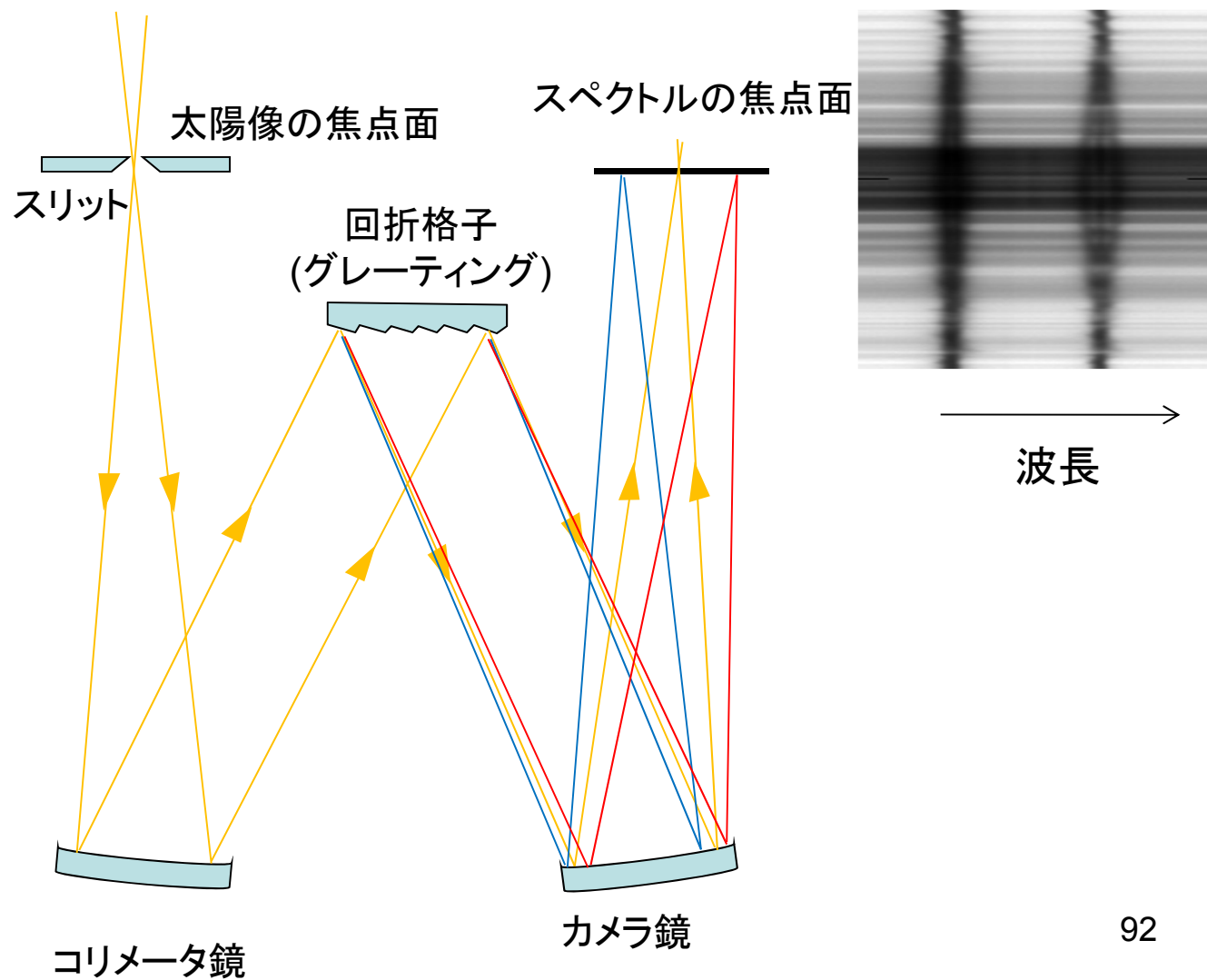
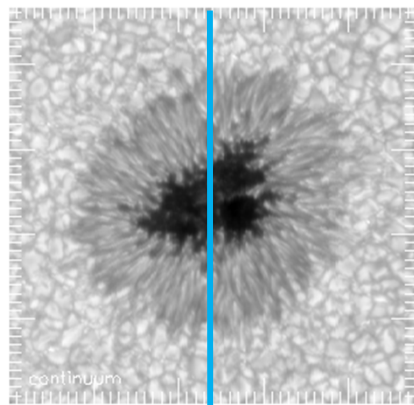
$\lambda = 500\text{nm}$

→ $d \sim 1.02\text{e-}6 = 0.2$ 秒角
(100km先の1mm)
(太陽面上の120km)

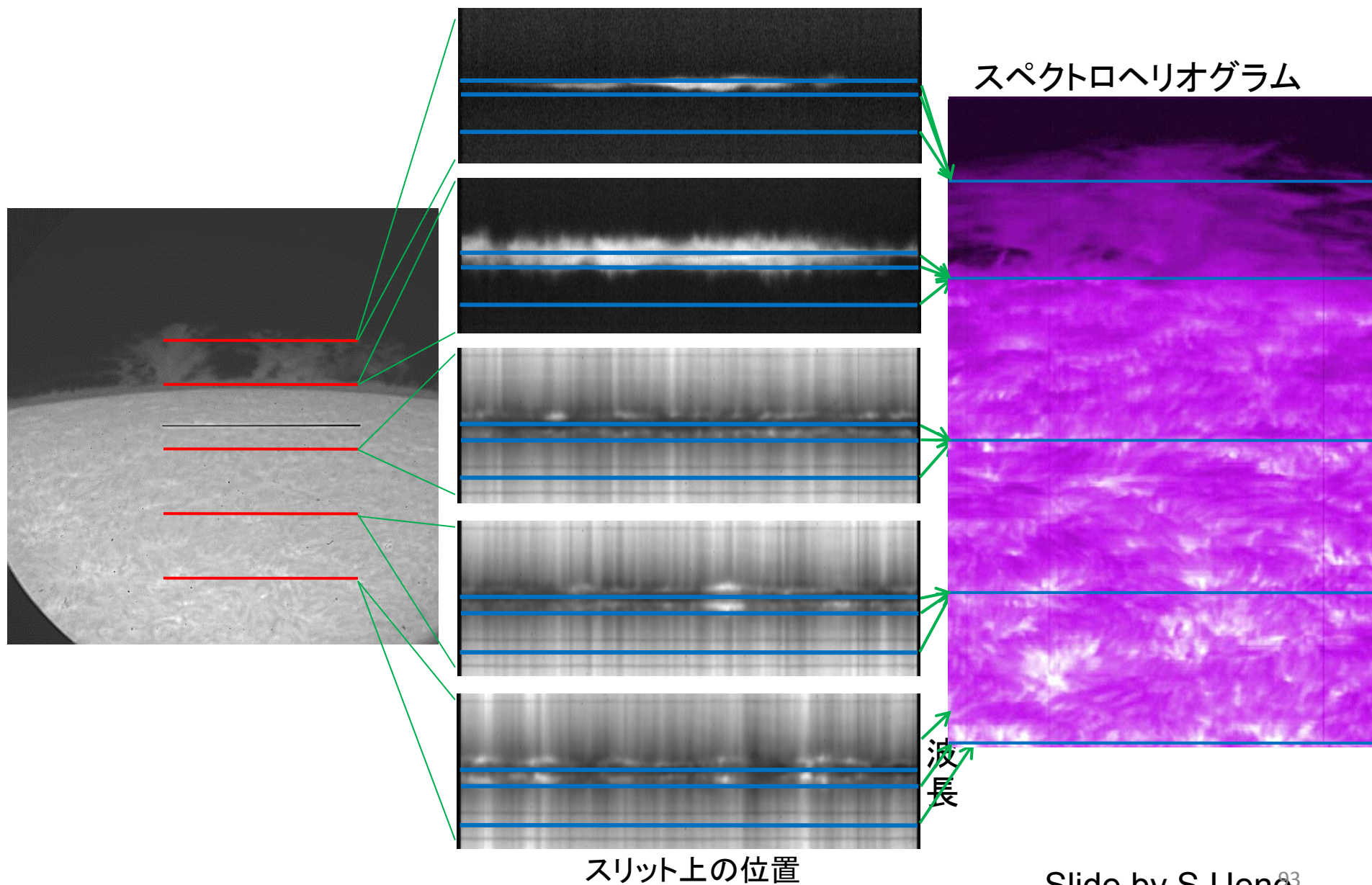
Point Spread Function (口径50cm 理想)



波長を分解する分光装置

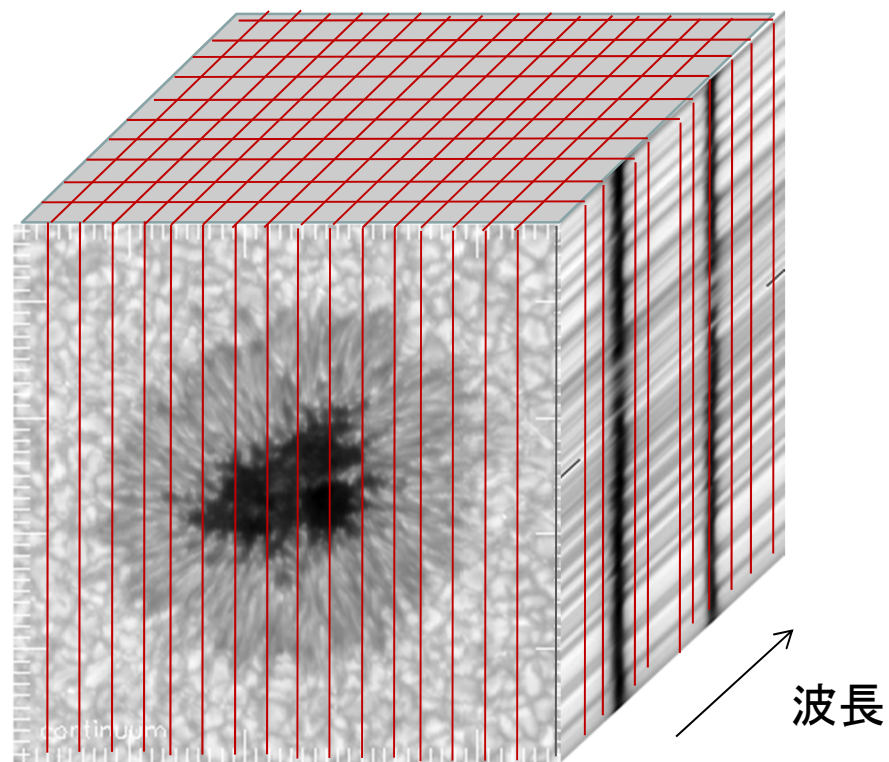


スペクトロヘリオグラムの説明



波長を分解する分光装置

データキューブ



狭帯域フィルタを用いた分光装置

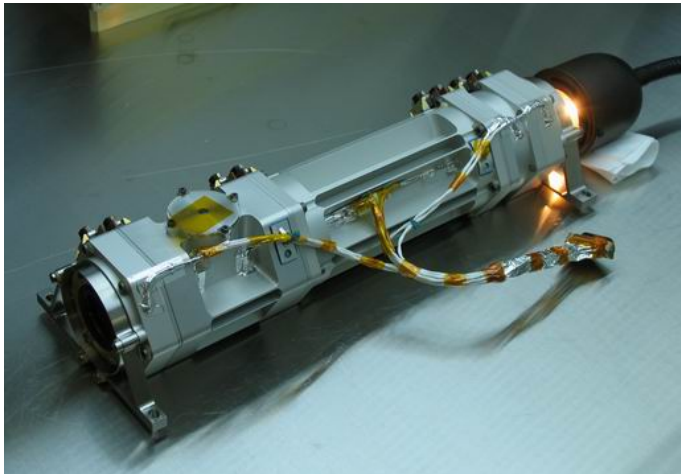
波長を分解する分光装置

狭帯域チューナブルフィルター

Lyot filter

vs.

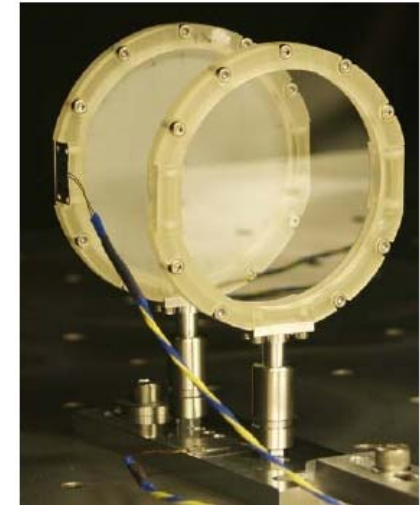
Fabry Perot



Tunable filter FPP/SOT

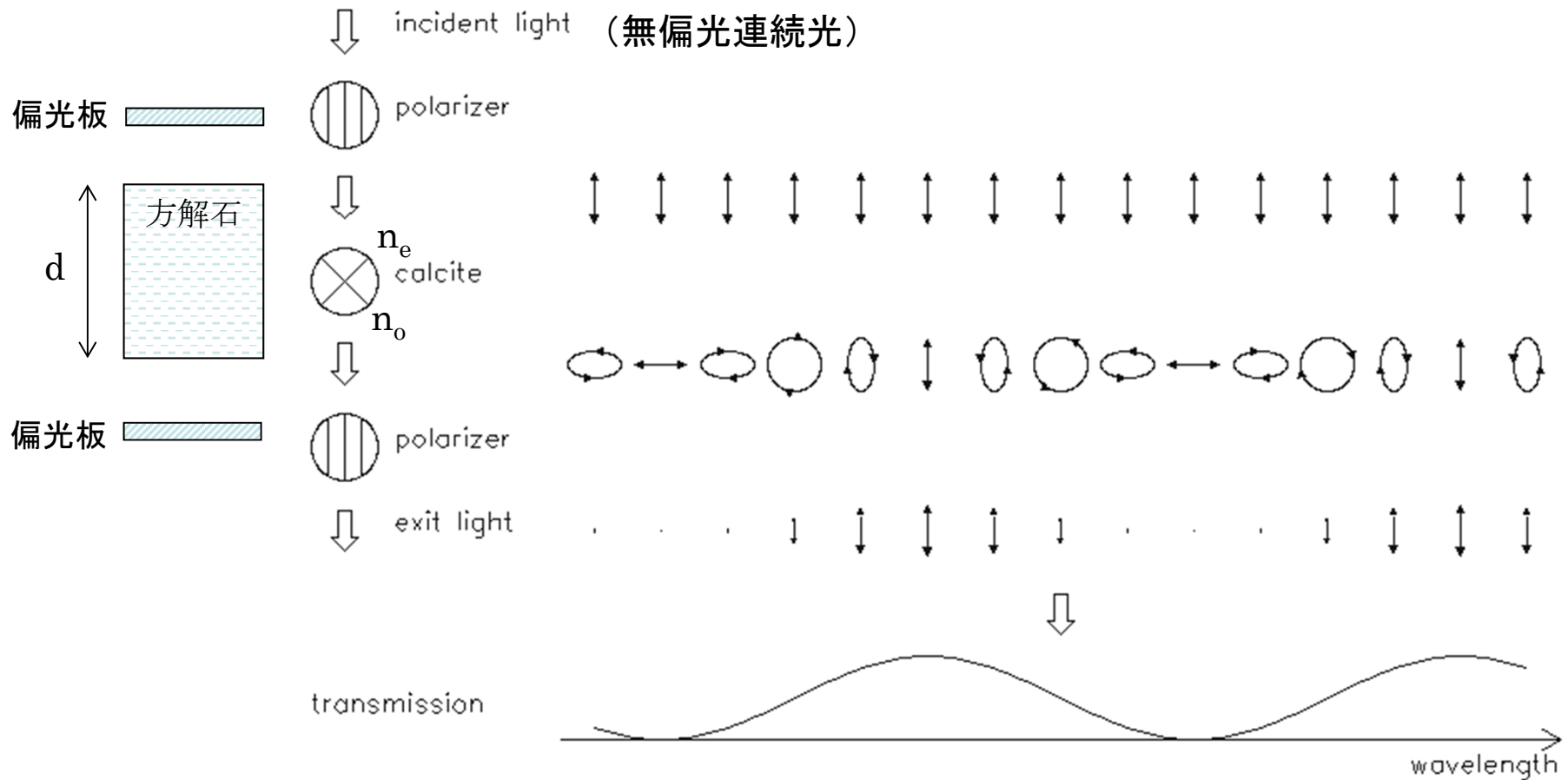


Air space
Foster etal 2009 Optical Society of
America



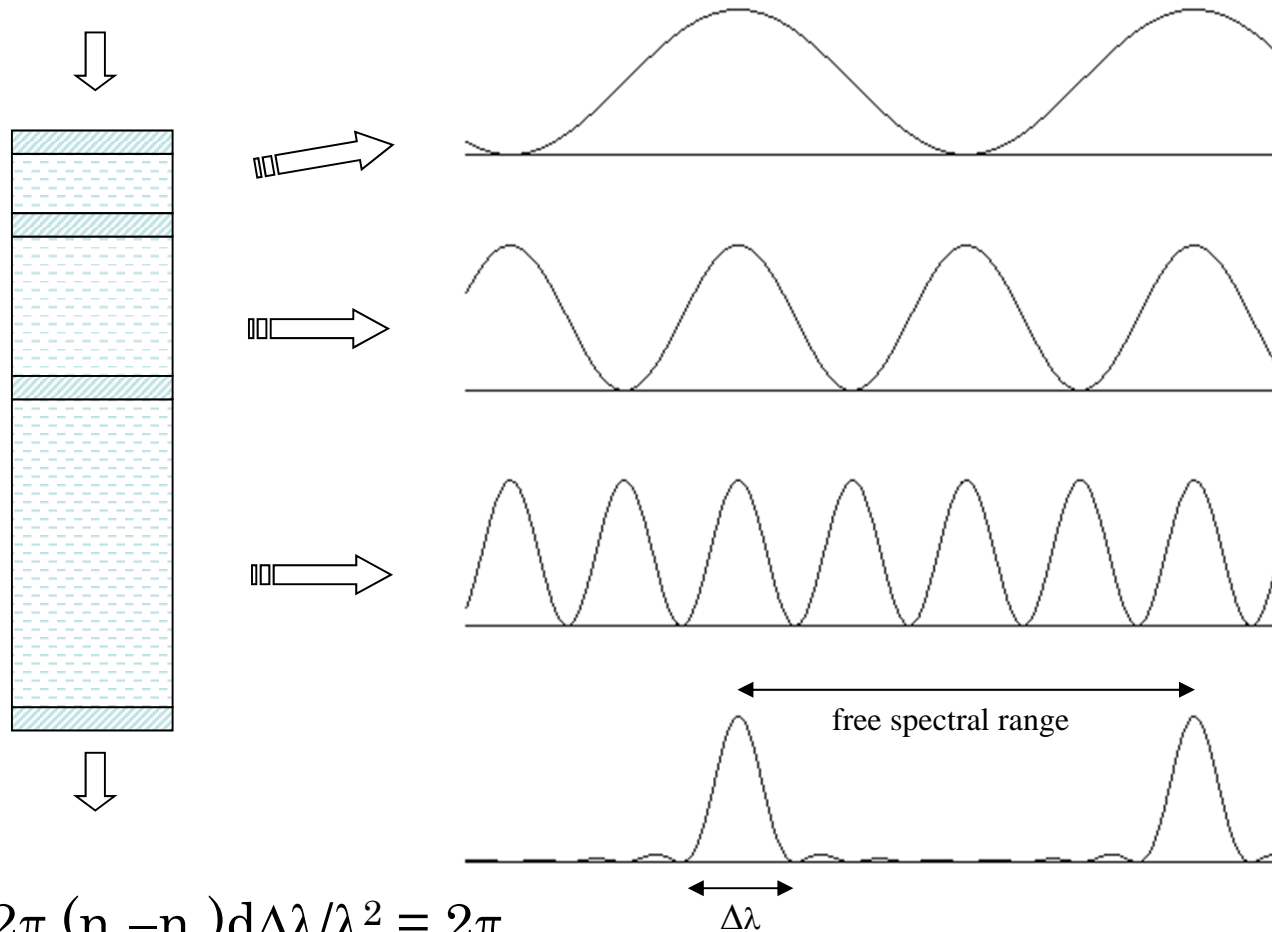
LiNbO3
Schuhle etal 2009(?)

リオフィルターの原理



遅延量 $\delta = 2\pi (n_e - n_o)d/\lambda$ が 2π 変化するごとに最大透過

リオフィルターの原理



$$\Delta\delta = 2\pi (n_e - n_o) d \Delta\lambda / \lambda^2 = 2\pi$$

$$d = \lambda^2 / (n_e - n_o) \Delta\lambda$$

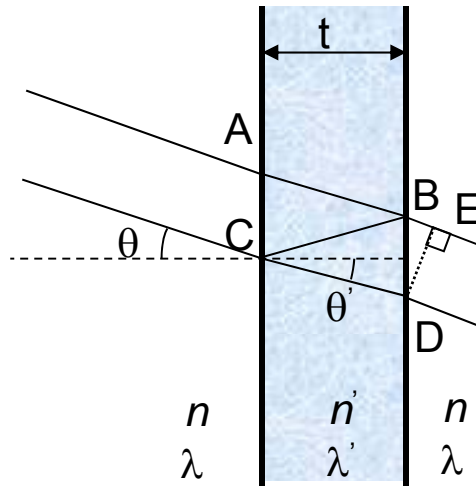
$$\lambda = 5000 \text{ \AA}$$

$$n_e - n_o = 0.172 \text{ (方解石)}$$

$$\Delta\lambda = 0.1 \text{ \AA}$$

$$\left. \begin{array}{l} \lambda = 5000 \text{ \AA} \\ n_e - n_o = 0.172 \text{ (方解石)} \\ \Delta\lambda = 0.1 \text{ \AA} \end{array} \right\} \rightarrow d \sim 144 \text{ mm}$$

Fabry-Perot 干渉計の原理



DとEで同じ位相になるための条件より、
透過率は

$$I_{\lambda} = \frac{T^2}{(1-R)^2} \left[1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi 2n't \cos \theta'}{\lambda} \right) \right]^{-1}$$

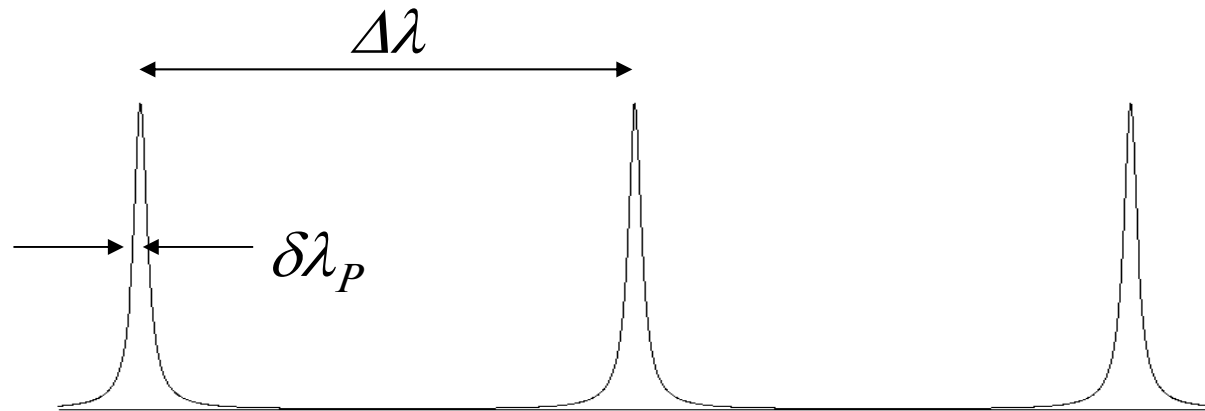
T : intensity transmission coeff of each coating

R : intensity reflectivity "

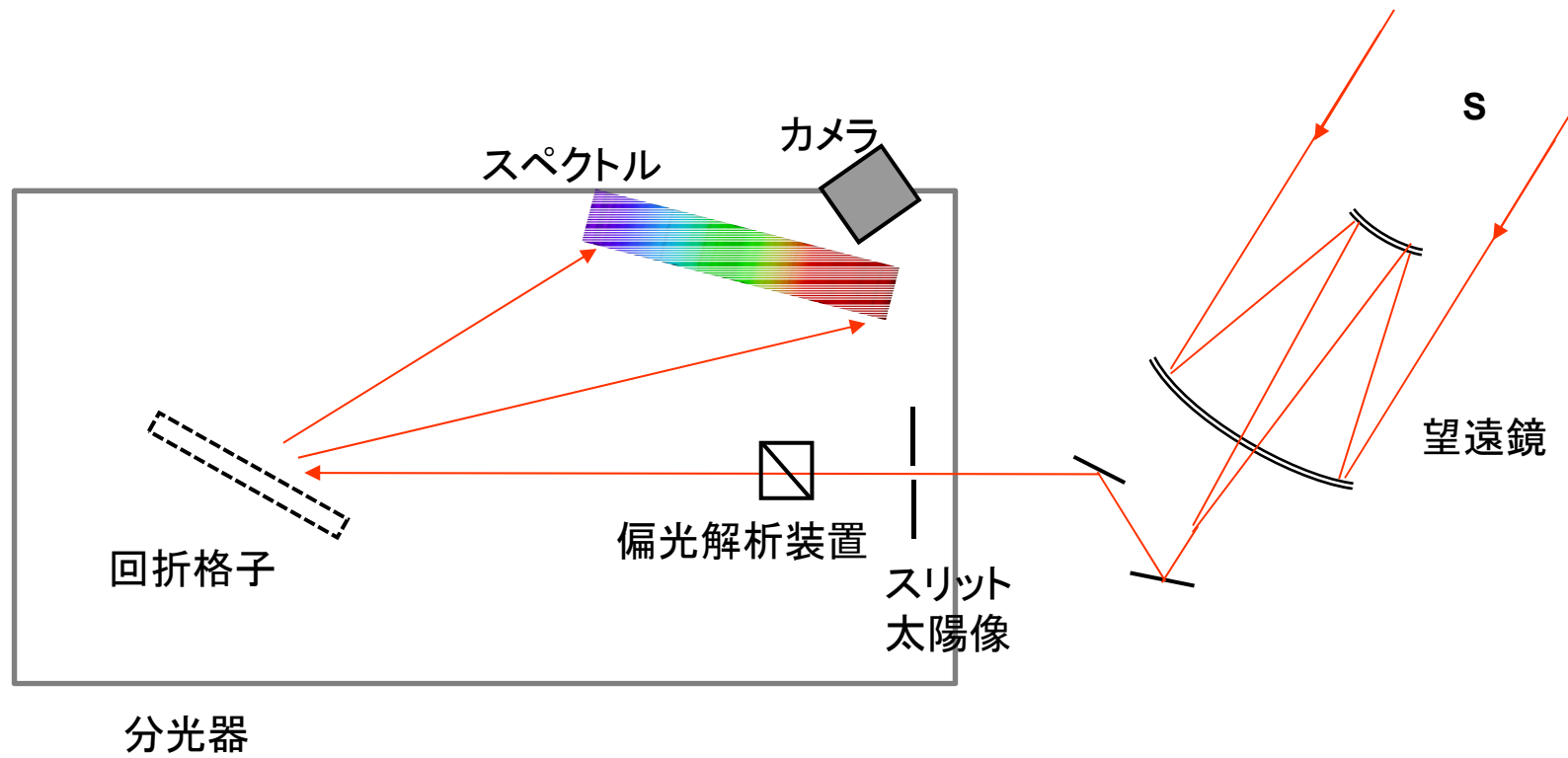
$$n\lambda = n'\lambda'$$

$$n \sin \theta = n' \sin \theta'$$

n : refractive ind

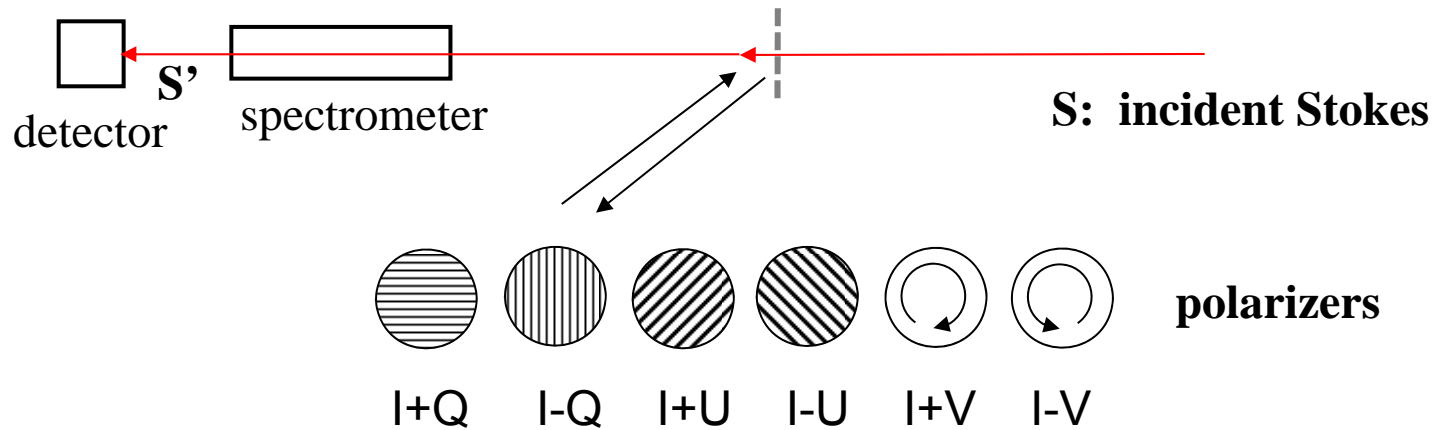


スペクトルの偏光測定システム



偏光を分解する偏光解析装置

最も原始的な偏光解析装置(ポラリメータ)



Insert 6 different polarizers successively in the beam

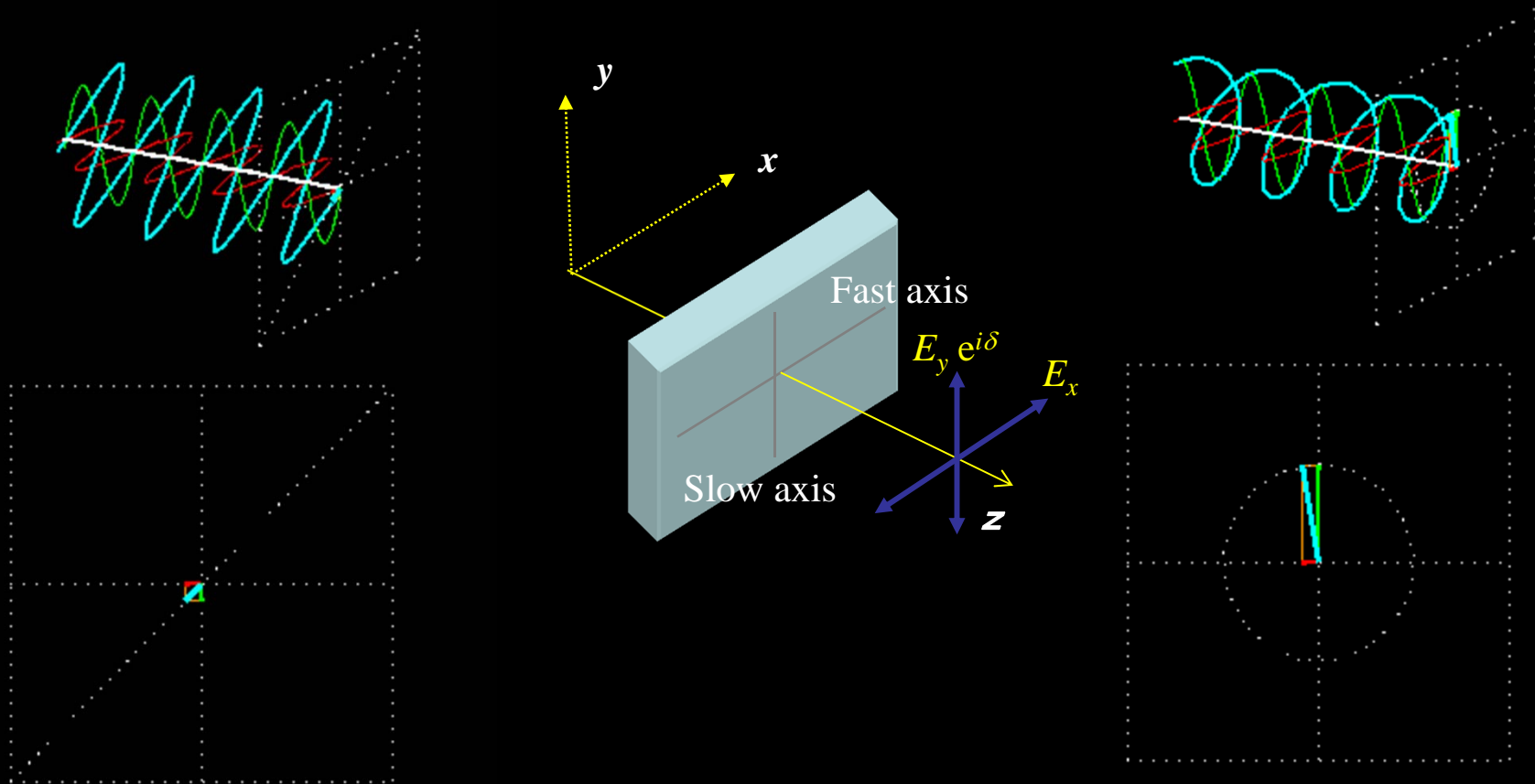
This polarimeter requires that the spectrometer and the detector have same throughput and sensitivity for all polarization states.

→ This is not the case in real devices.

Description of polarized light

Action of retarders on lights

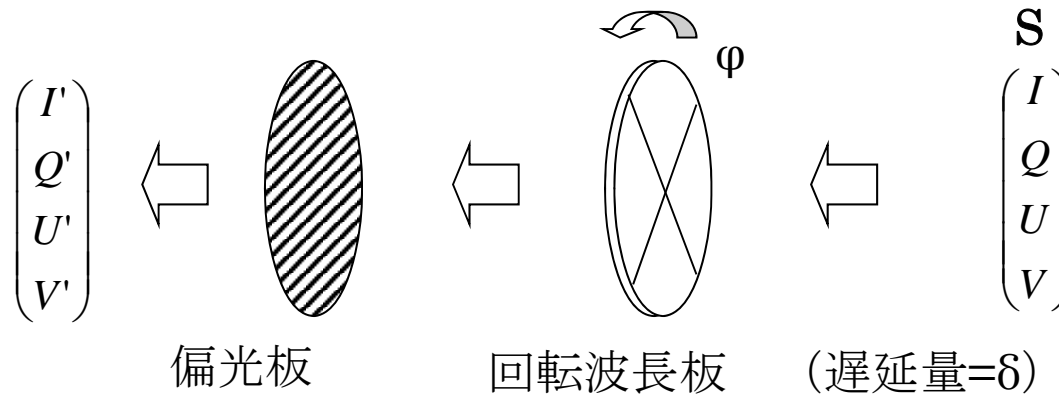
Linear retarder (90°)



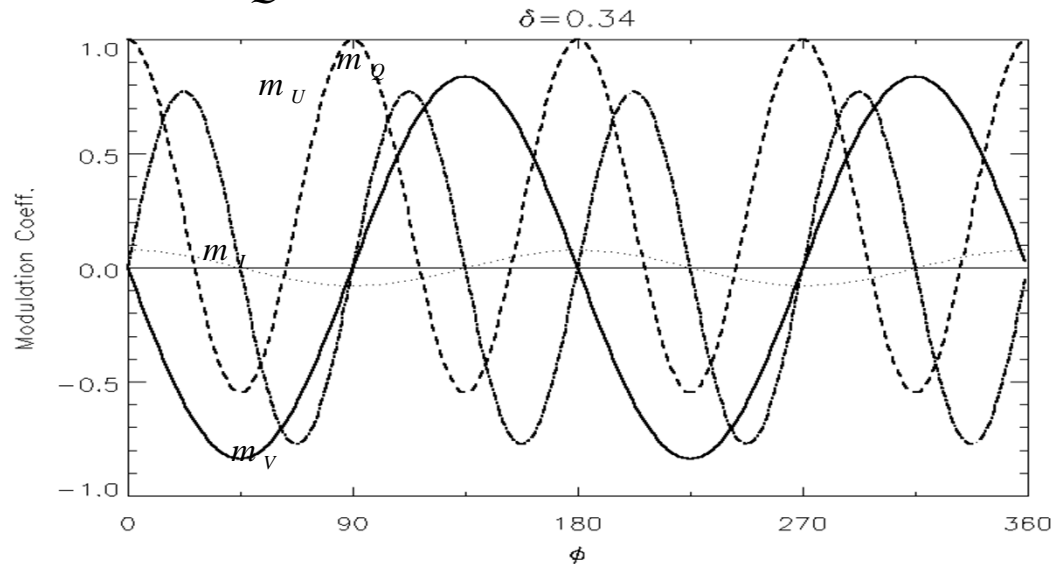
animation courtesy of Jose Carlos del Toro Iniesta

偏光を分解する偏光解析装置

A better polarimeter-1 (rotating waveplate)



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



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)



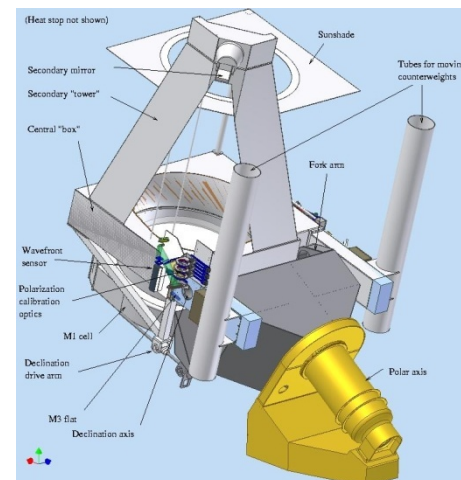
DST @SacPeak
(0.75m)



SST @LaPalma
(1.0m)

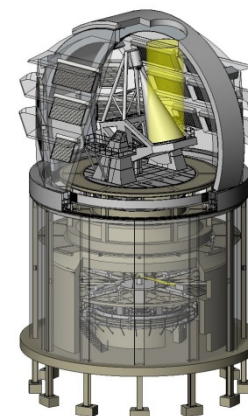


NST @BBSO
(1.6m)



狭帯域フィルターを用いた撮像観測が主流

ATST @Hawaii 4mφ



地上大型望遠鏡プロジェクト

Name (site)	D(m)	type	year
ATST (Hawaii)	4	open, off-axis	2017?
EST (Canary Island)	4?	open	?
NST (BigBear)	1.6	open, off-axis	2009
McMath (KitPeak)	1.6	heliostat	1961
GREGOR (Tenerife)	1.5	open	2010?
COSMO (Hawaii)	1.5	coronagraph	?
### (China)	1.0	vacuum	?
SST (LaPalma)	1.0	vacuum	2002
THEMIS (Tenerife)	0.9	helium	1996
DST (SacPeak)	0.75	vacuum	1969
VTT (Tenerife)	0.7	vacuum	1989
DST (Hida)	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

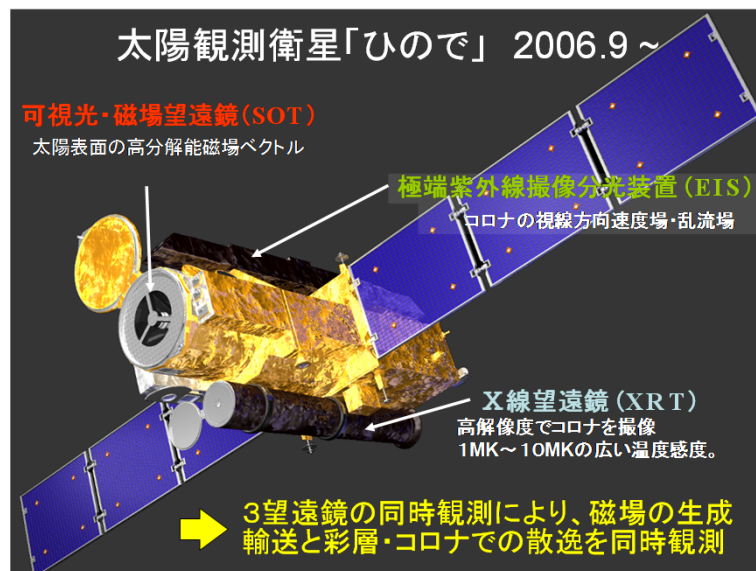
青: 建設中

黒: 既存

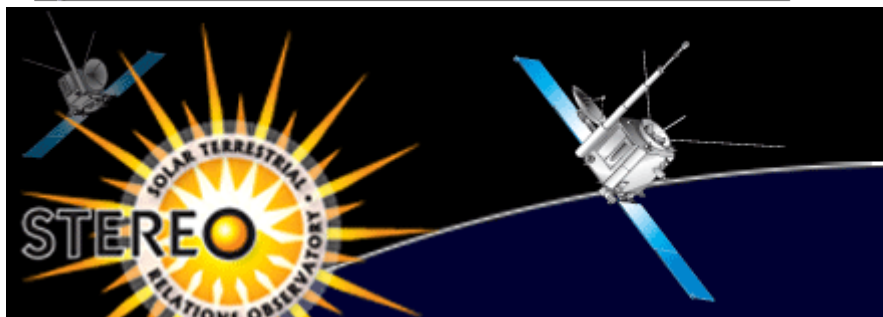
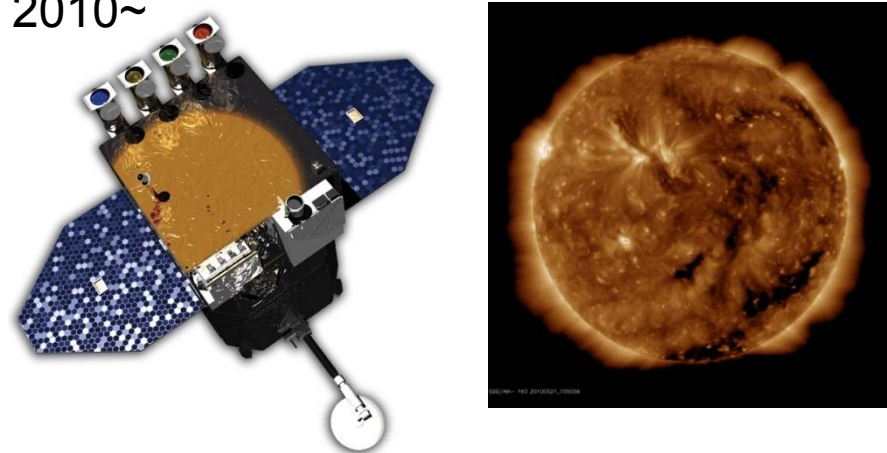
太陽観測の動向： スペース

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

京都大学飛騨天文台 (北アルプスの麓1300m)



飛騨天文台沿革:

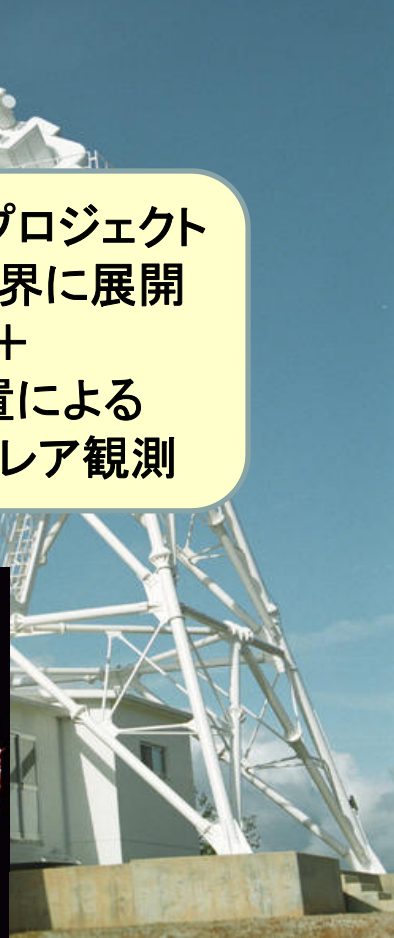
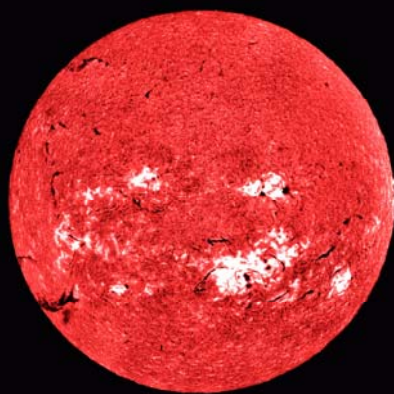
- 1929年10月 花山天文台設立
- 1968年11月 飛騨天文台設立、管理棟・本館・60cm反射望遠鏡
- 1972年 4月 65cm屈折望遠鏡および新館完成
- 1979年 5月 ドームレス太陽望遠鏡完成
- 1992年 3月 太陽フレア監視望遠鏡完成
- 2003年10月 太陽磁場活動望遠鏡(SMART)完成
- 2010年3月 太陽フレア監視望遠鏡ペルーに移設

飛騨天文台の2つの太陽望遠鏡

SMART望遠鏡

太陽全面、彩層速度場常時観測
→ 爆発、噴出現象の監視
→ 対流、磁場の大規模構造

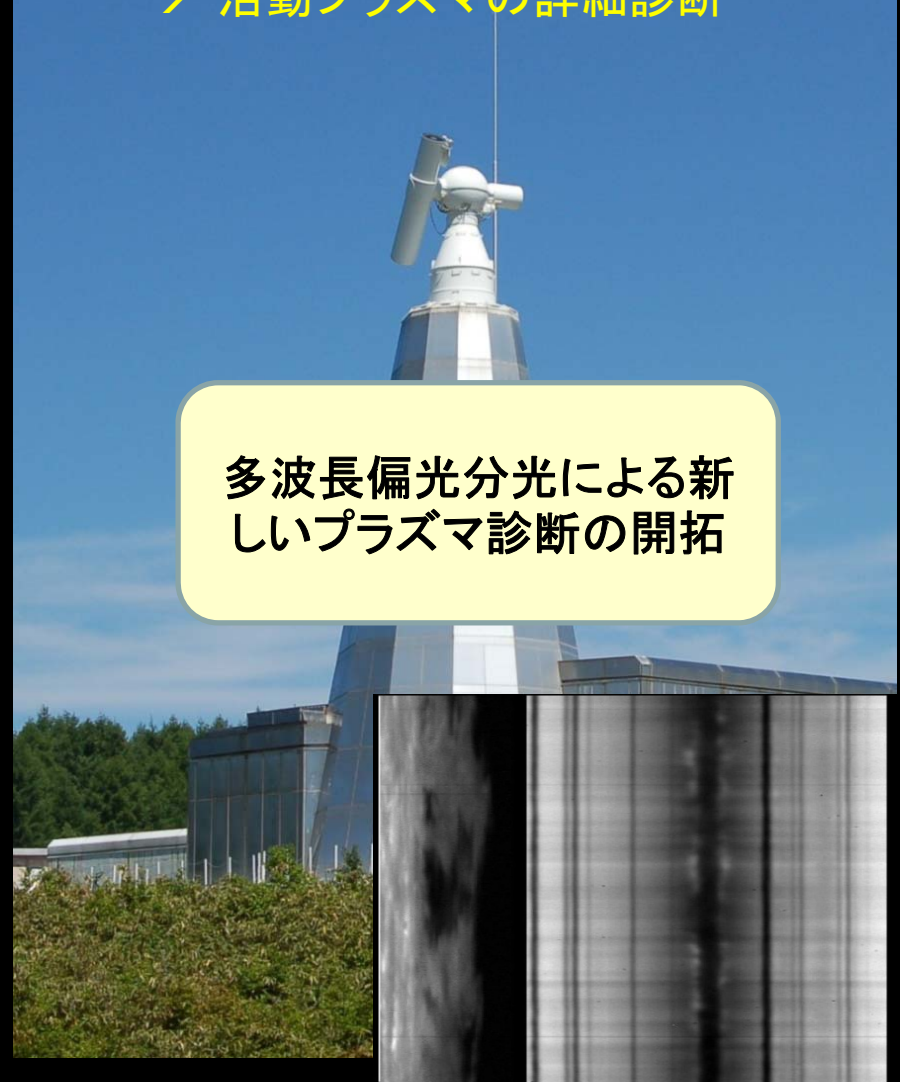
CHAIN プロジェクト
として世界に展開
+
新装置による
磁場・フレア観測



ドームレス太陽望遠鏡

高分解能真空太陽望遠鏡＋分光器
→ 活動プラズマの詳細診断

多波長偏光分光による新
しいプラズマ診断の開拓



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

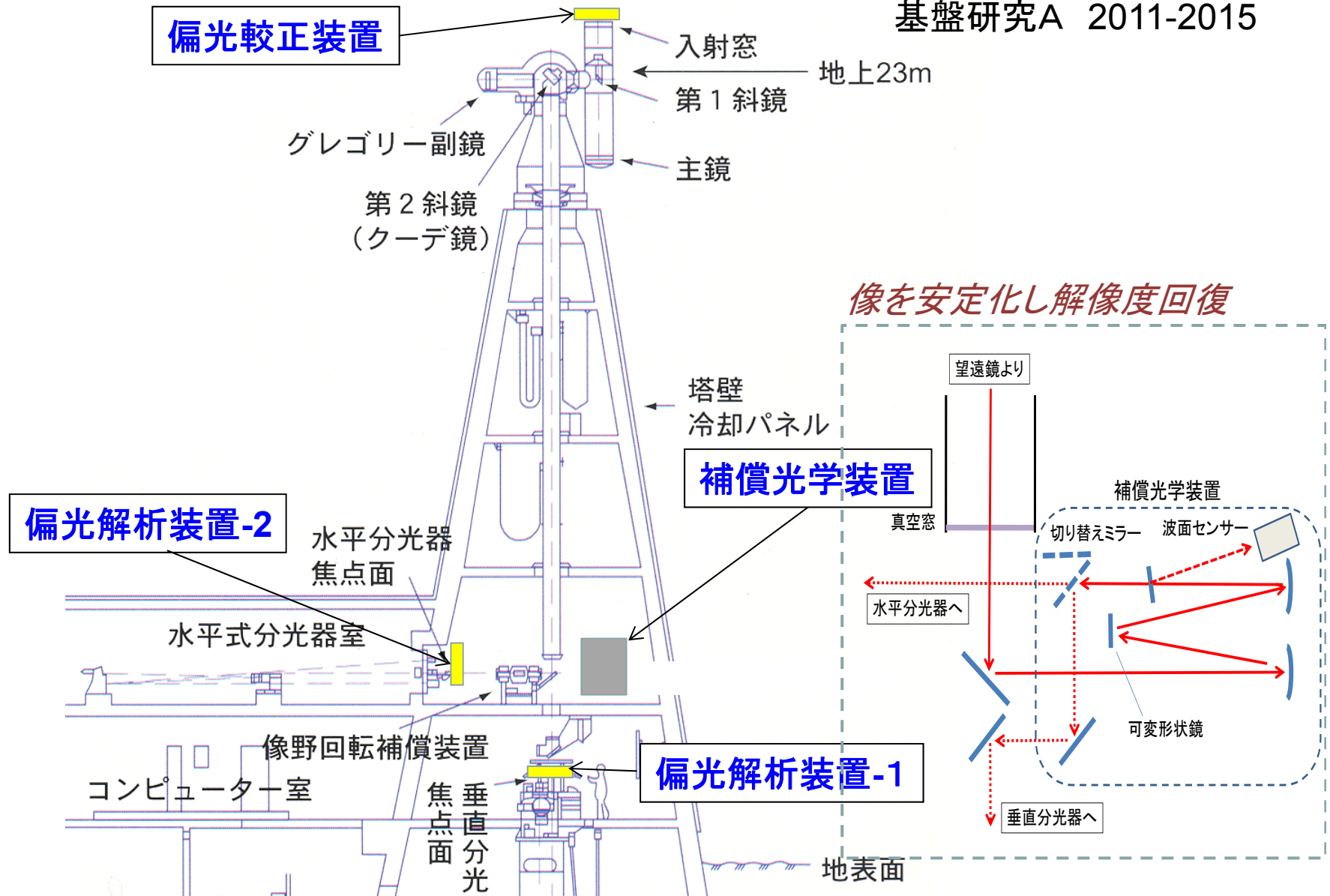
2011~

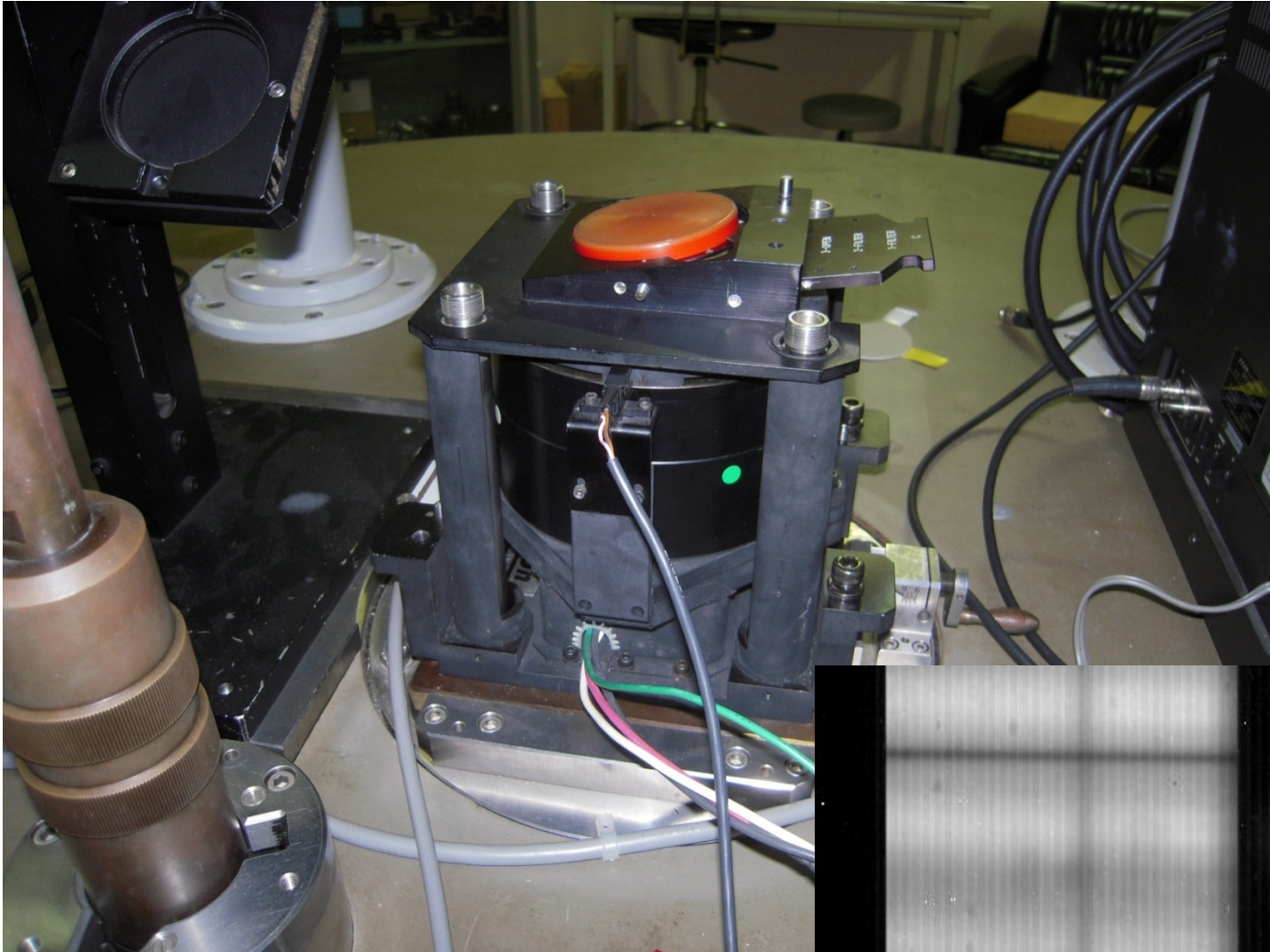
- ・シーイングモニター

ドームレス太陽望遠鏡

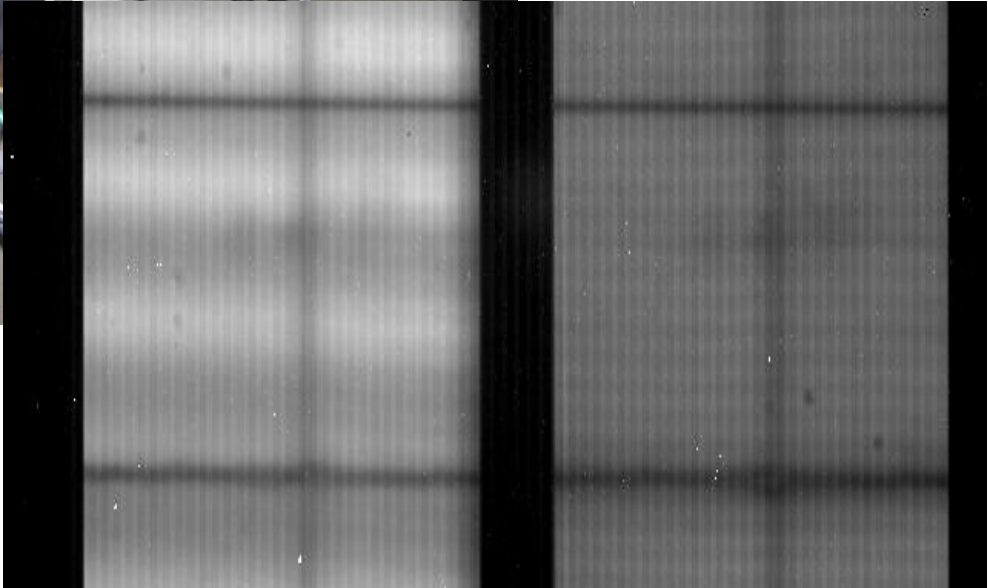
多波長偏光分光による新しいプラズマ診断計画

基盤研究A 2011-2015



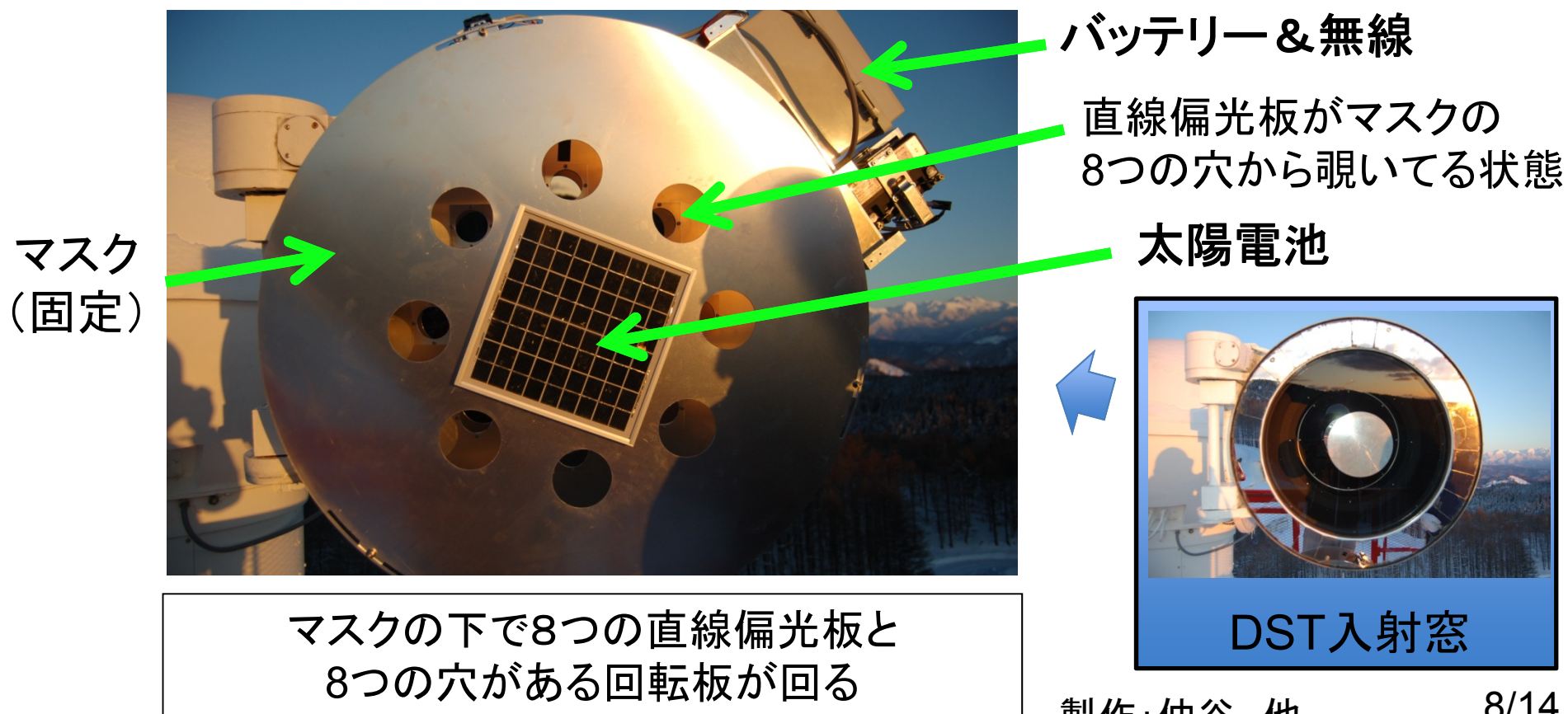


Sil 10827A



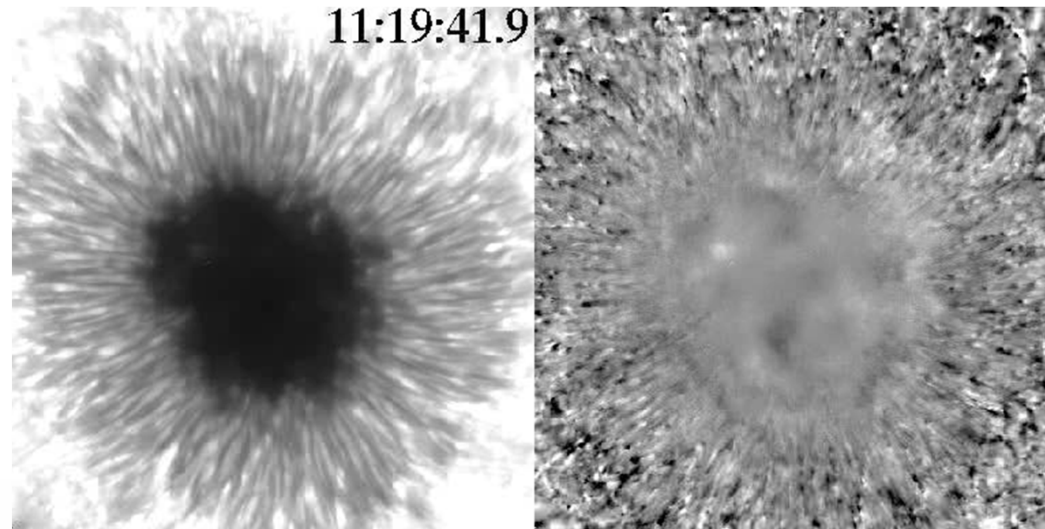
キャリブレーション用データ観測手法

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

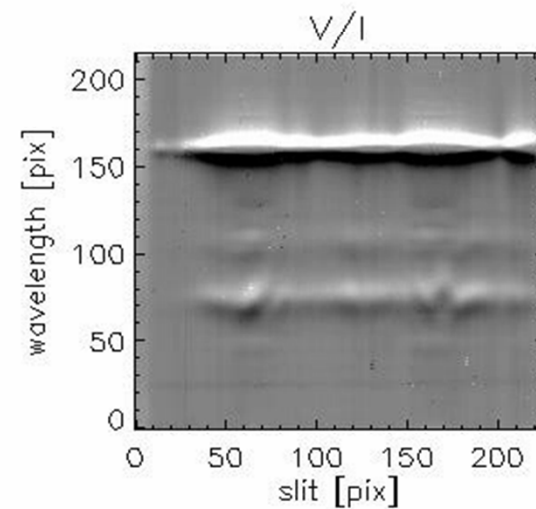
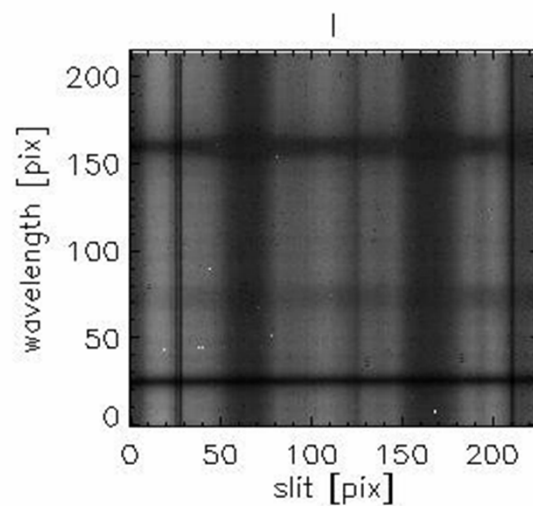


Oscillation in sunspot chromosphere

SOT/Hinode



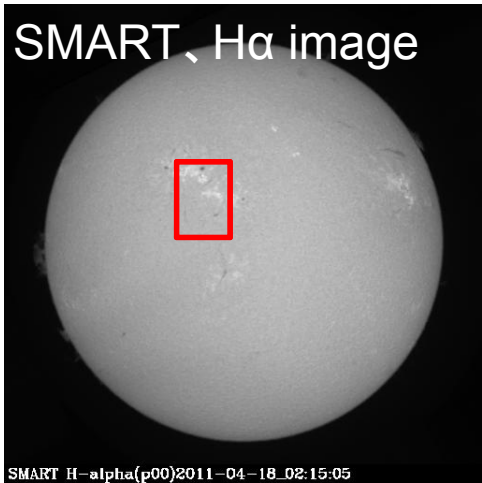
DST
polarimeter



← He I 10830A

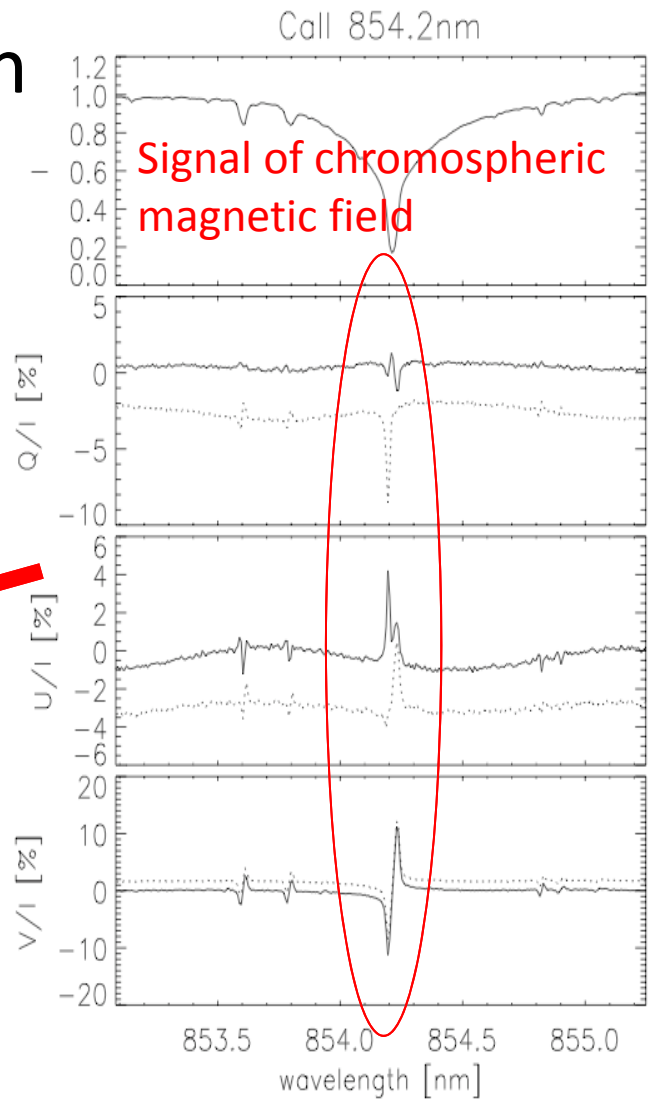
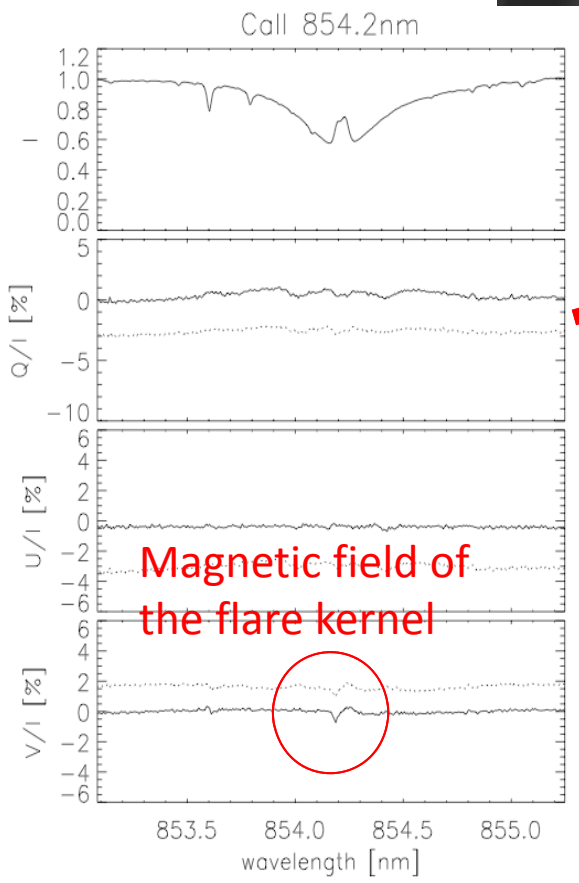
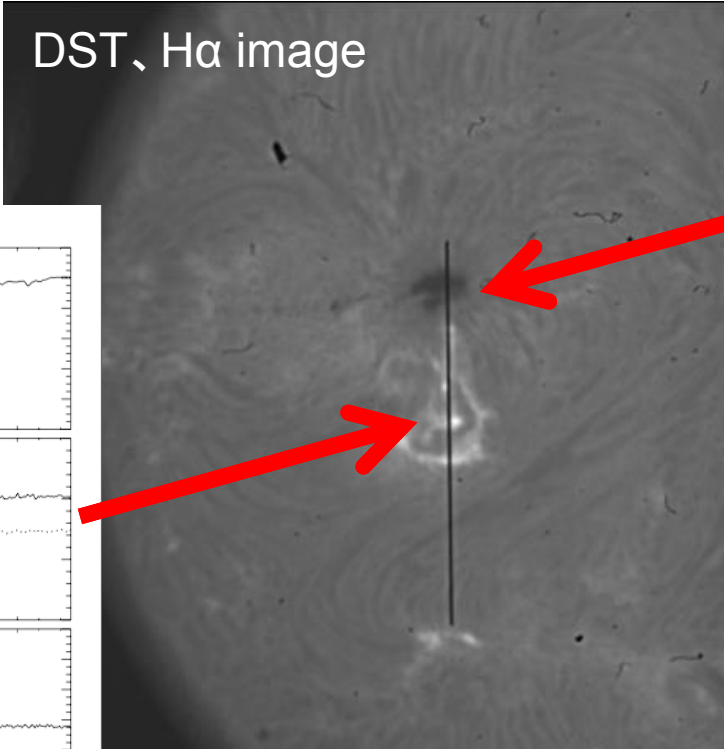
13:37:41 JST

By Anan



Scientific observation since 2011

An example; Call 854.2nm



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

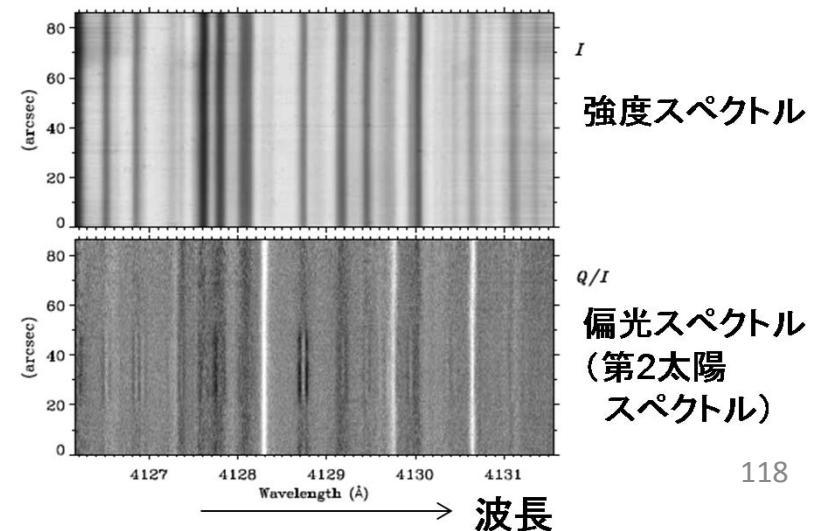
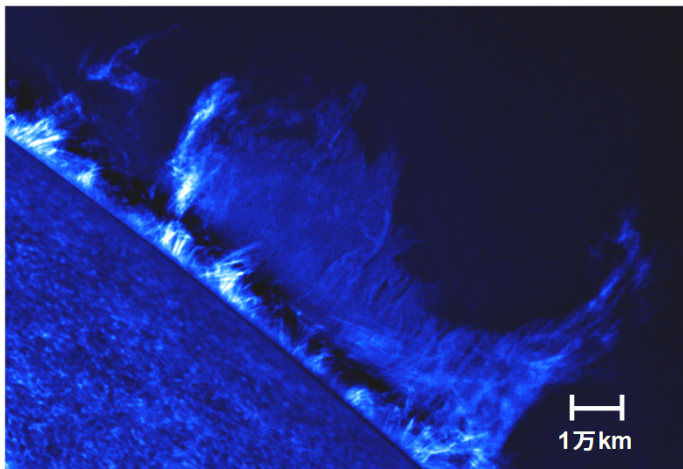
ドームレス太陽望遠鏡

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

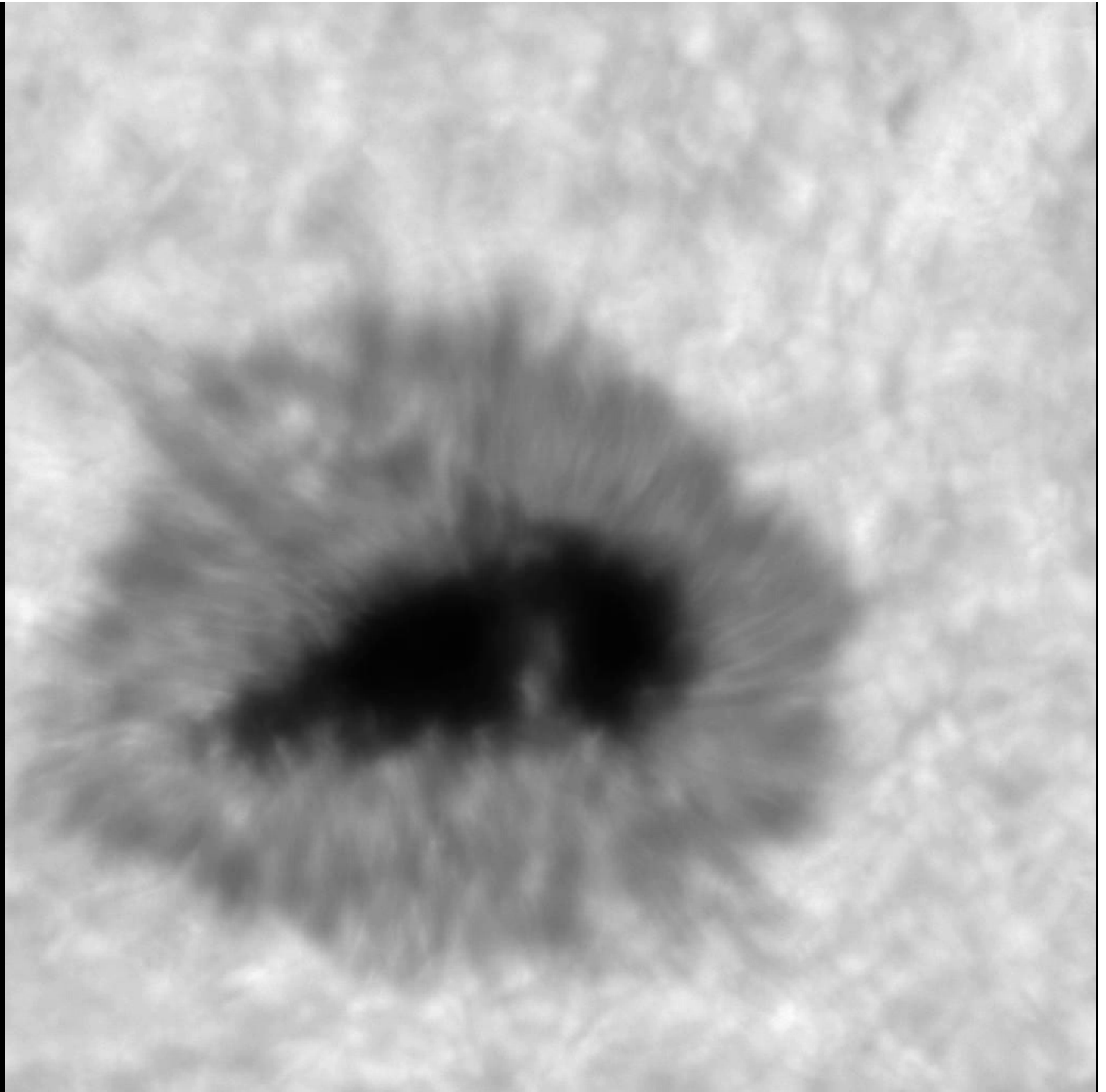
→ 天体磁気プラズマの基礎過程を真に理解する



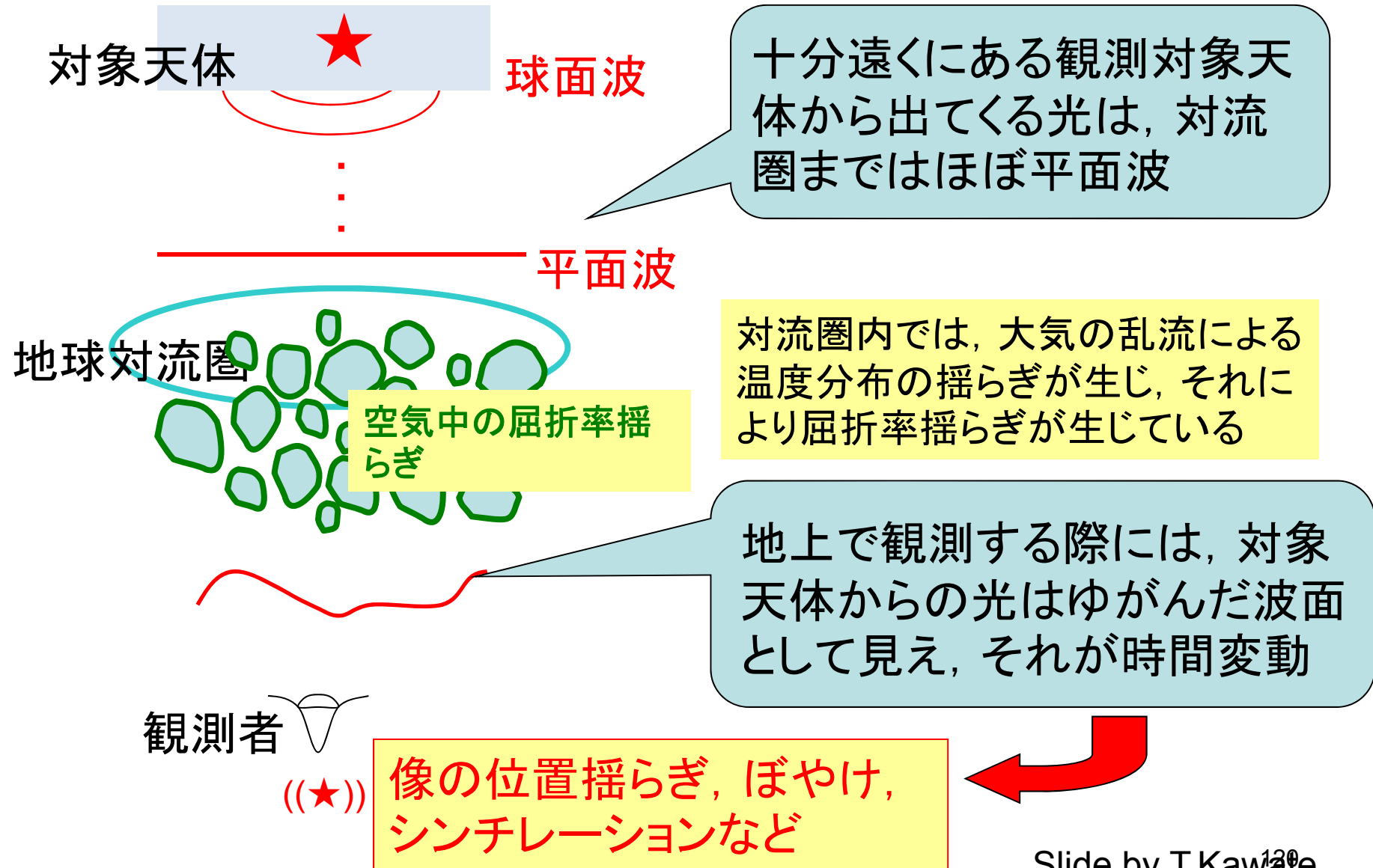
DST
2013.6.25

430nm
ORCA4
1ms expo.x100

天体観測の
天敵 =
シーイング



シーイングとは、



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

より高解像度を目指して

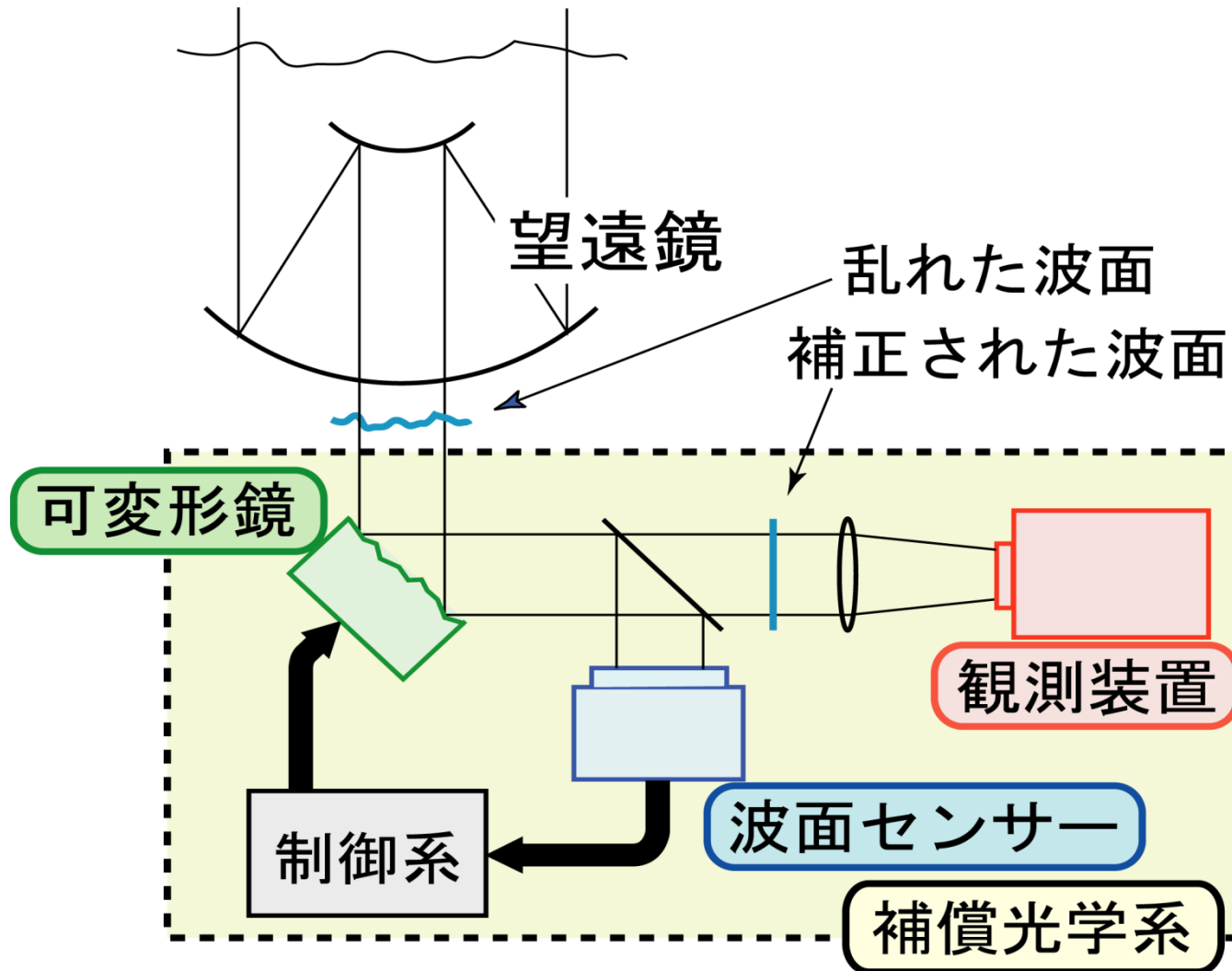
観測ツール

- Phase diversity 実績有、2台のカメラで面倒
- Adaptive optics 開発中

画像復元

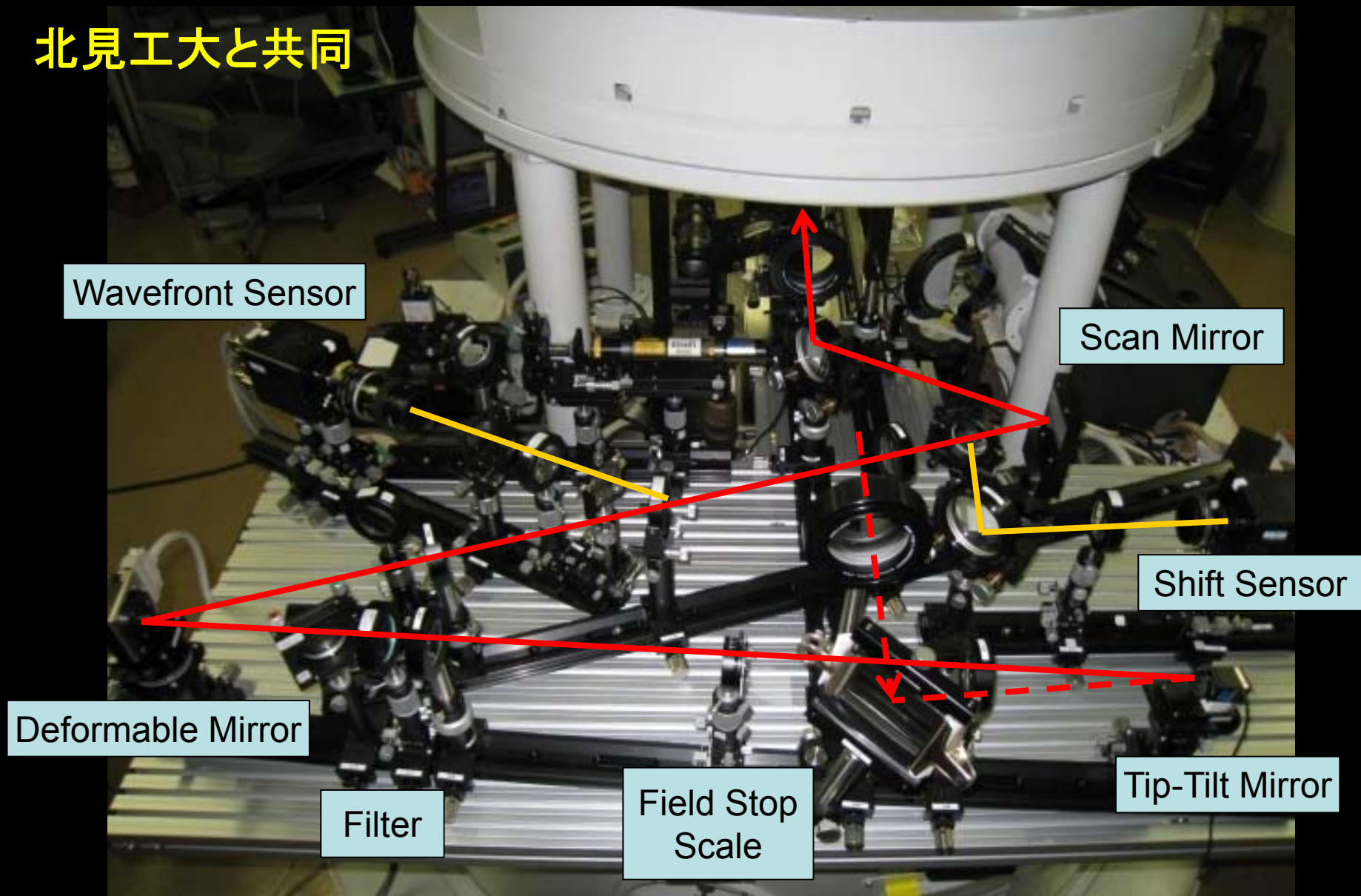
- Frame selection 1枚の「歪んだ」画像を選択
- Shift and add ぼけた画像も取り込む
- Speckle KISIP を試したがいまいち
- Speckle masking 今回プログラム作成
- Deconvolution by psf 理論的psf & 画像からpsf推定
- Multi-frame blind deconvolution 今後の課題

シーイングを克服する補償光学 (Adaptive Optics)



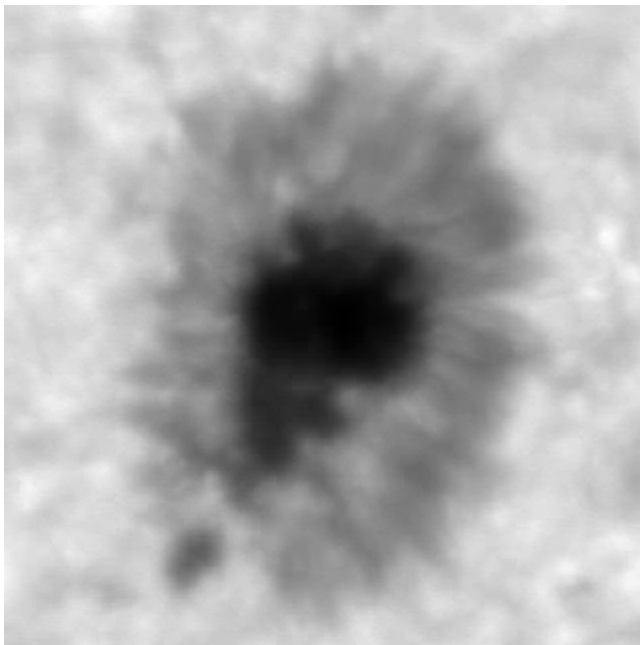
DST補償光学装置プロトモデル 2010

北見工大と共同

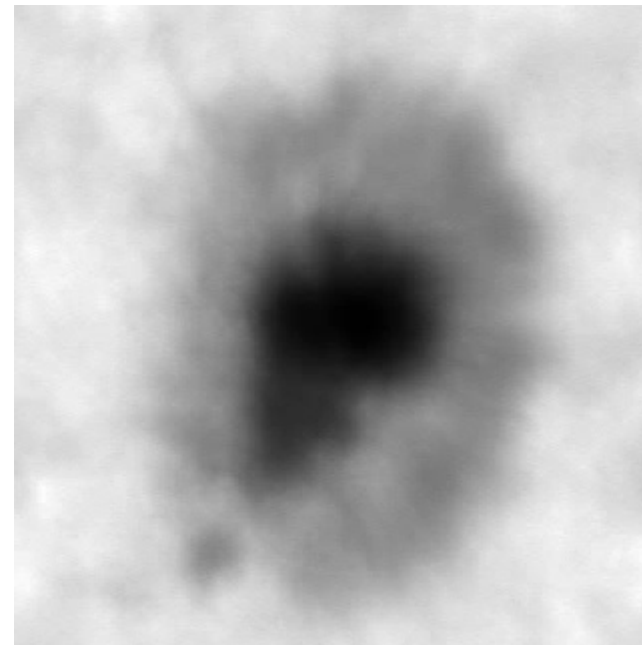


結果(1) 2010.11.20

AO-ON(21-70)



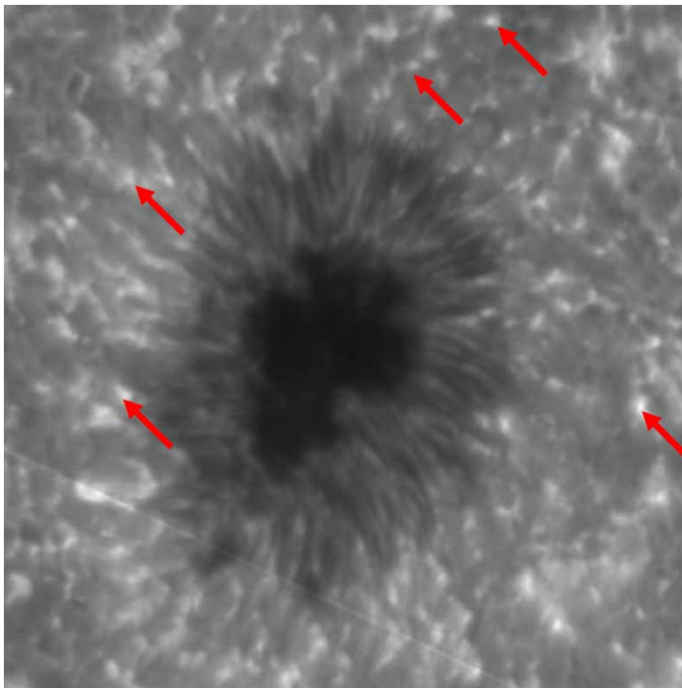
AO-OFF(251-300)



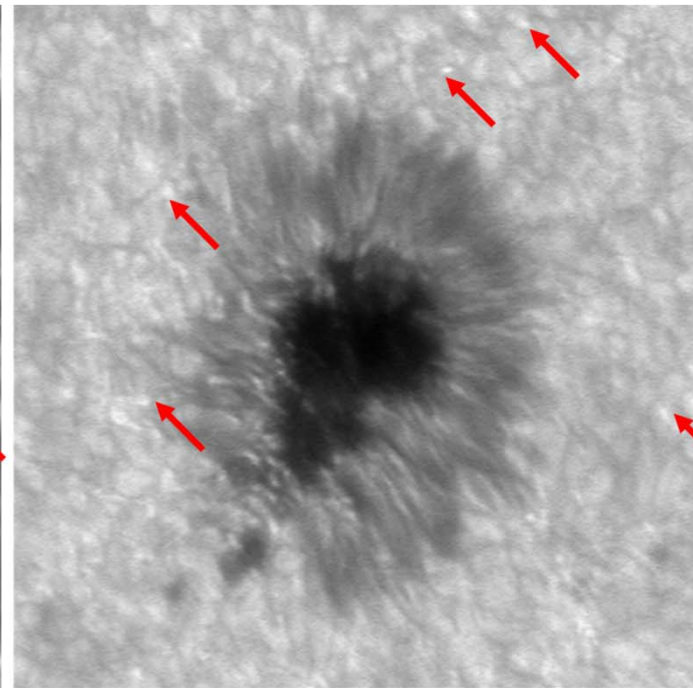
by (元)北見工大 横山

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)

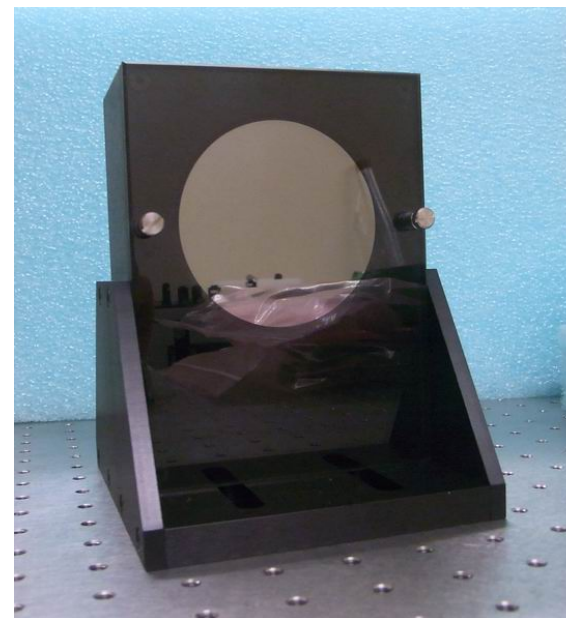
新AOの開発

現AOシステムの問題点

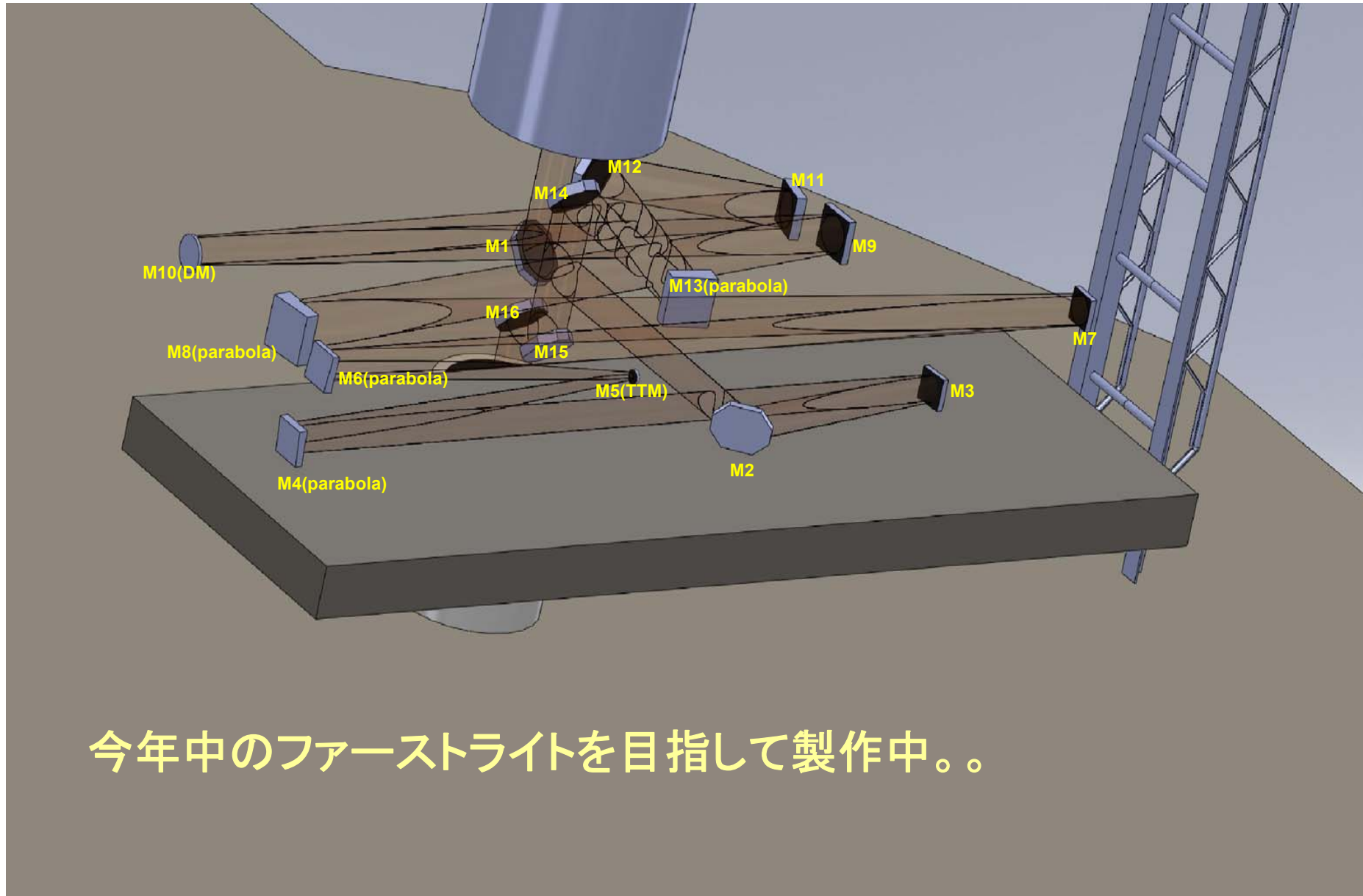
- (1) 波面補償能力が不十分
 - (2) 光量の損失が大きい
 - (3) 限られた波長(垂直分光器)でしか使えない
- これらのため、科学的な観測に適用できていない

新AO

- 97素子可変形鏡
- 高スループット
- 水平、垂直両用

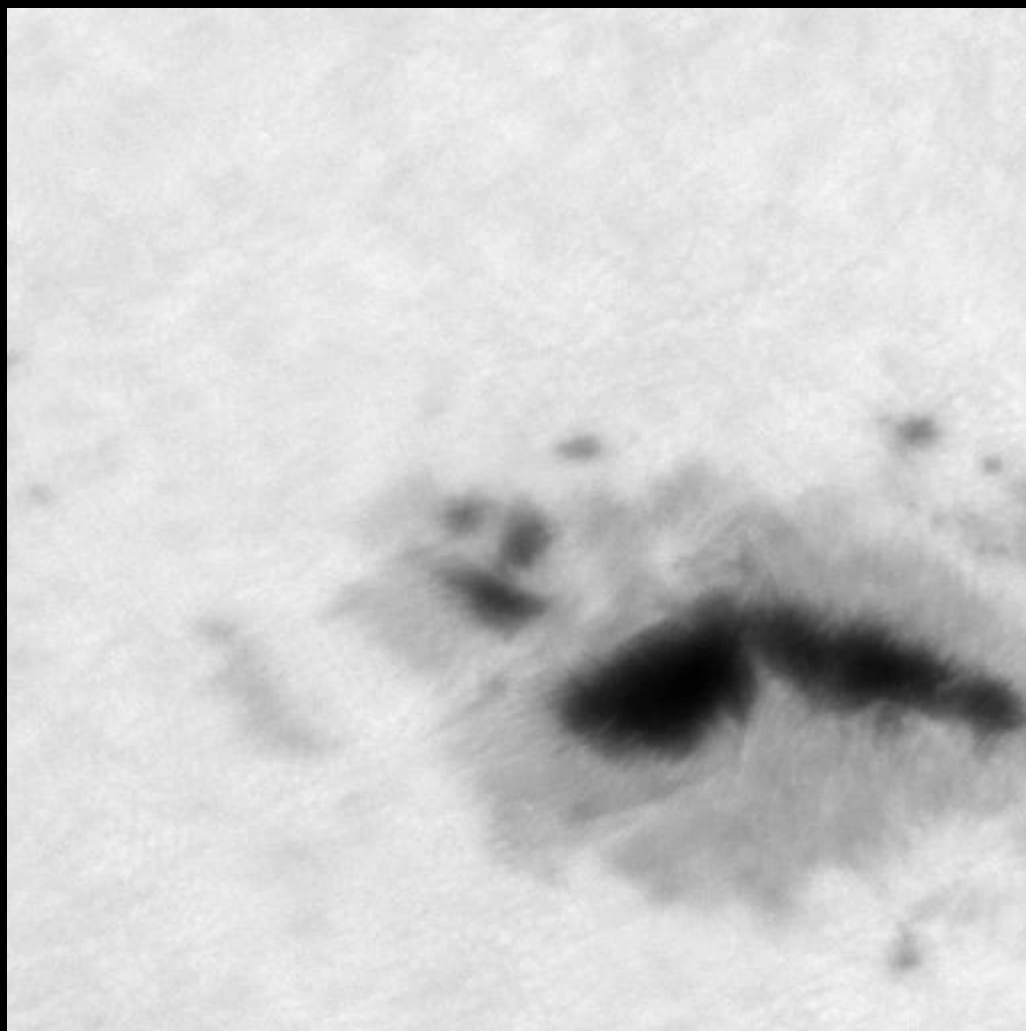


本格AO計画： 光学ベンチ概念図



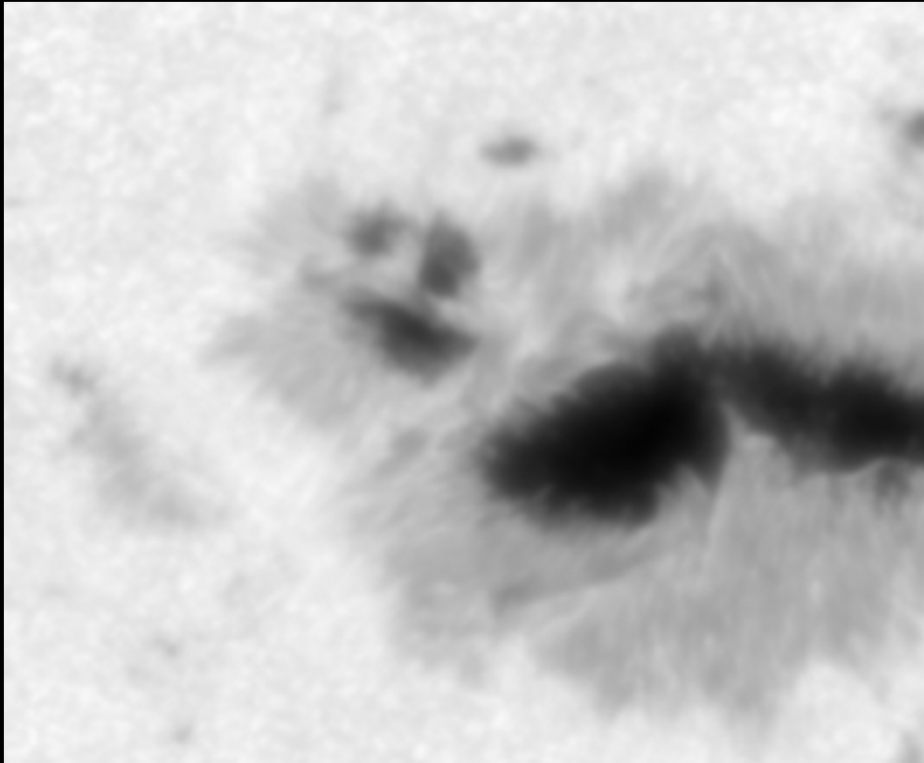
今年中のファーストライトを目指して製作中。。

スペックルマスキング画像復元

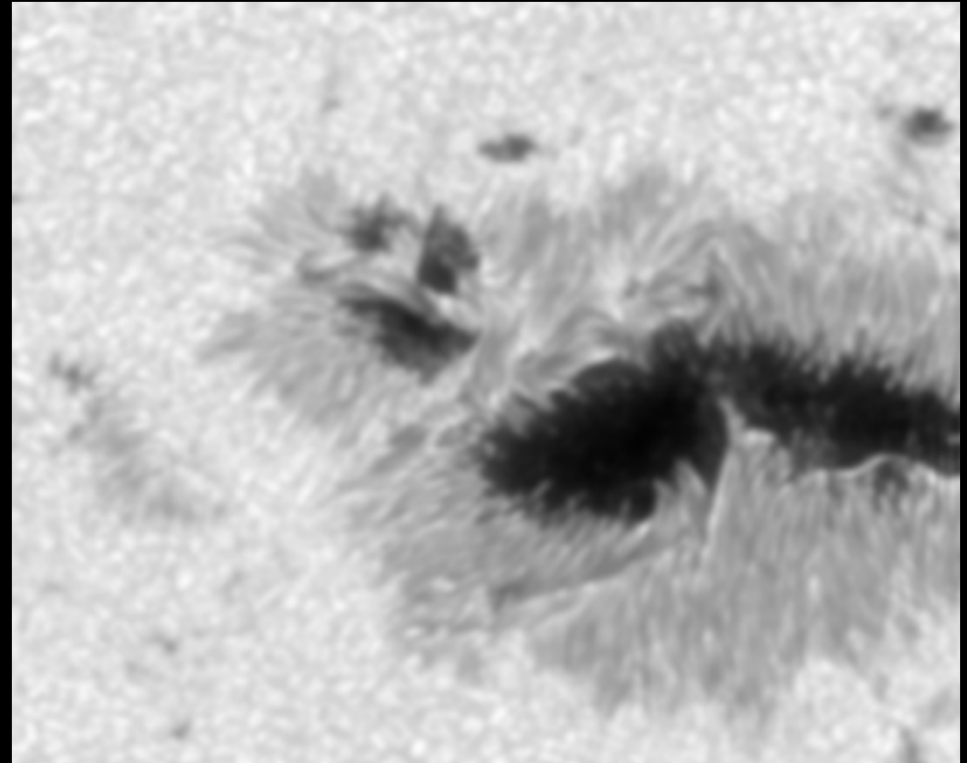


2011.9.29 continuum

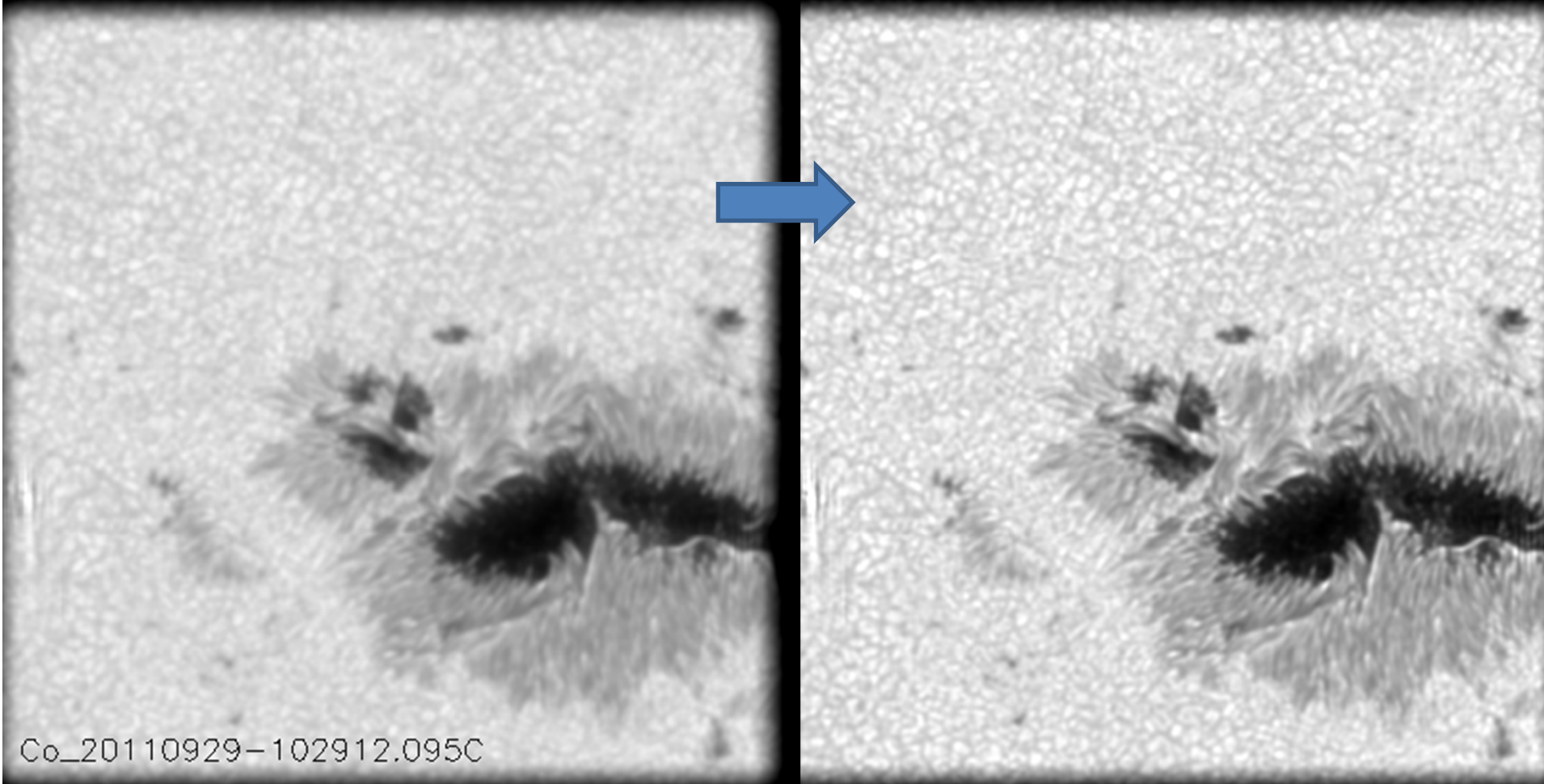
Shift and add



Speckle masking

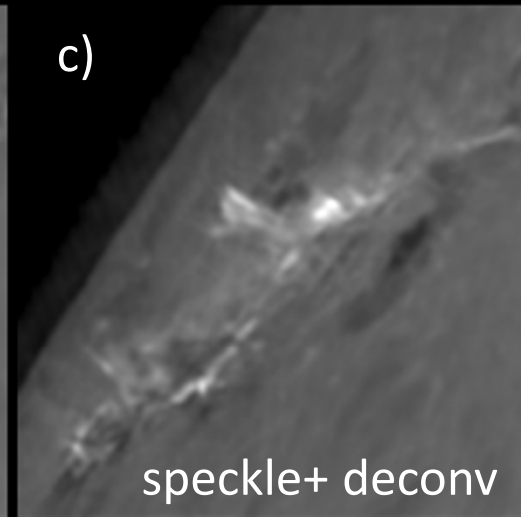
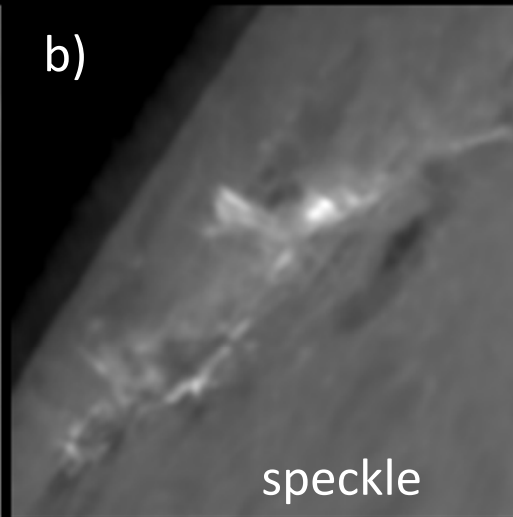


+ max_likelihood deconvolution

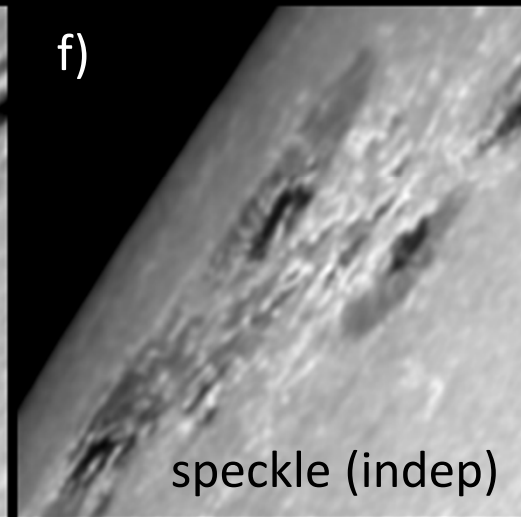
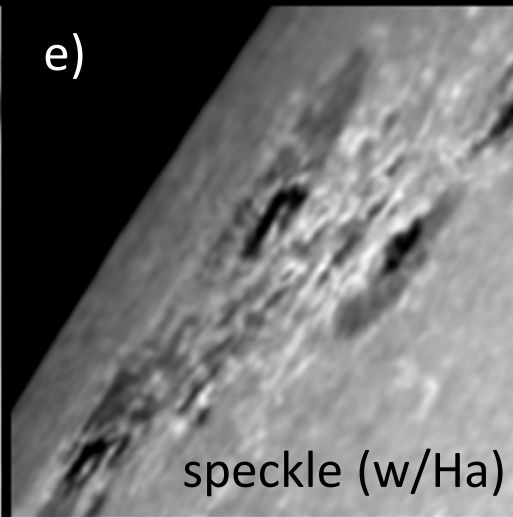
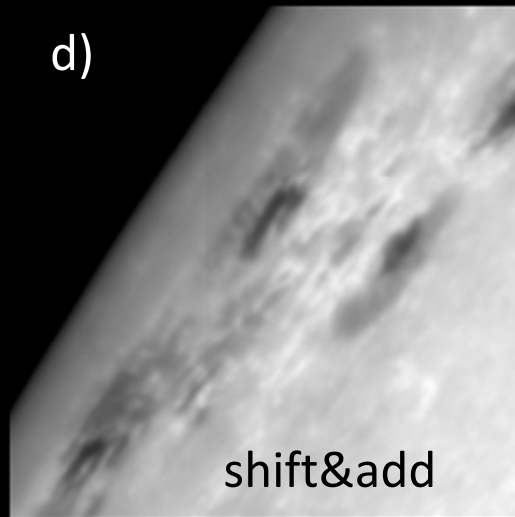


2013.5.14 X flare

Ha

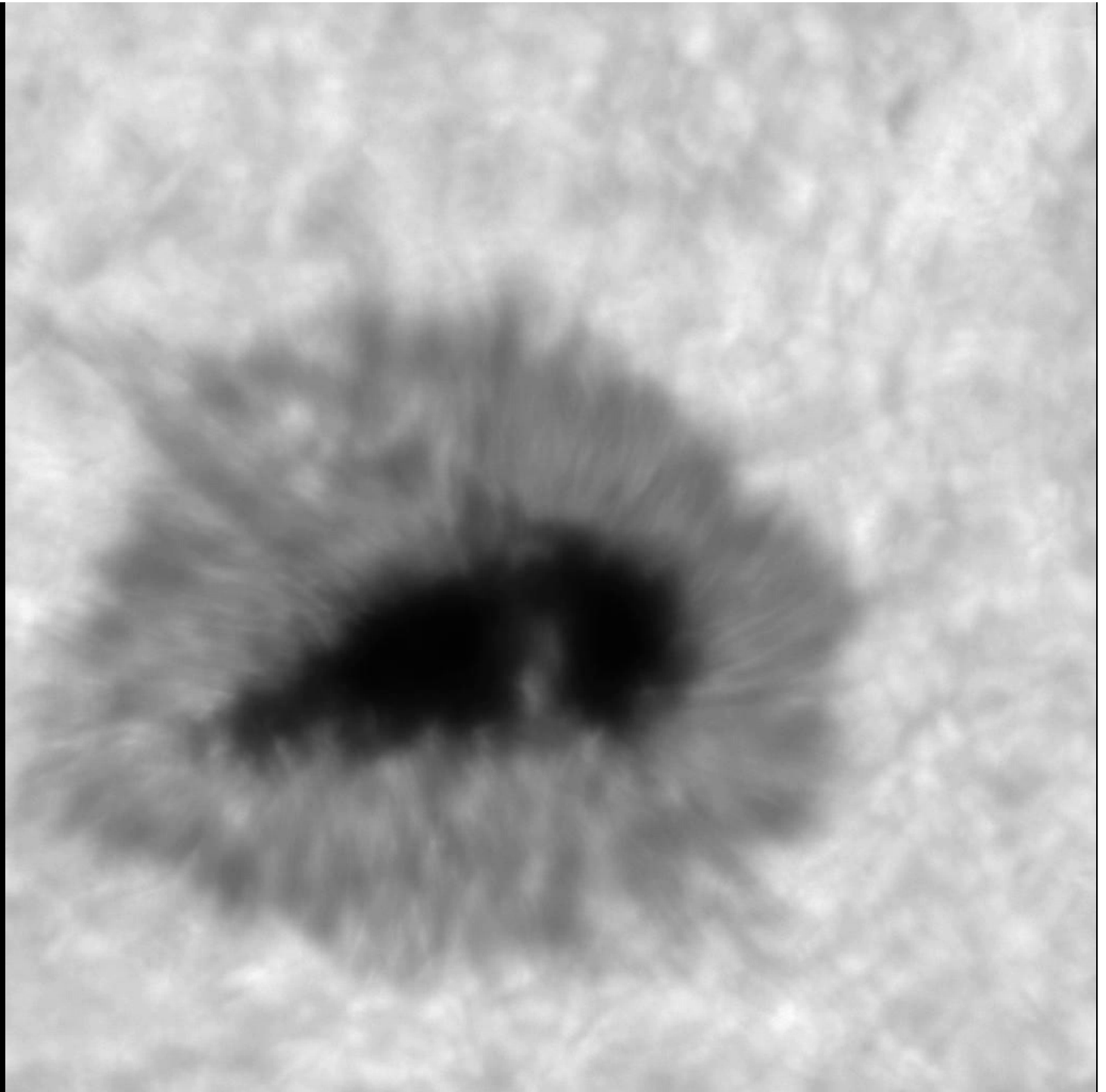


Conti.



DST
2013.6.25

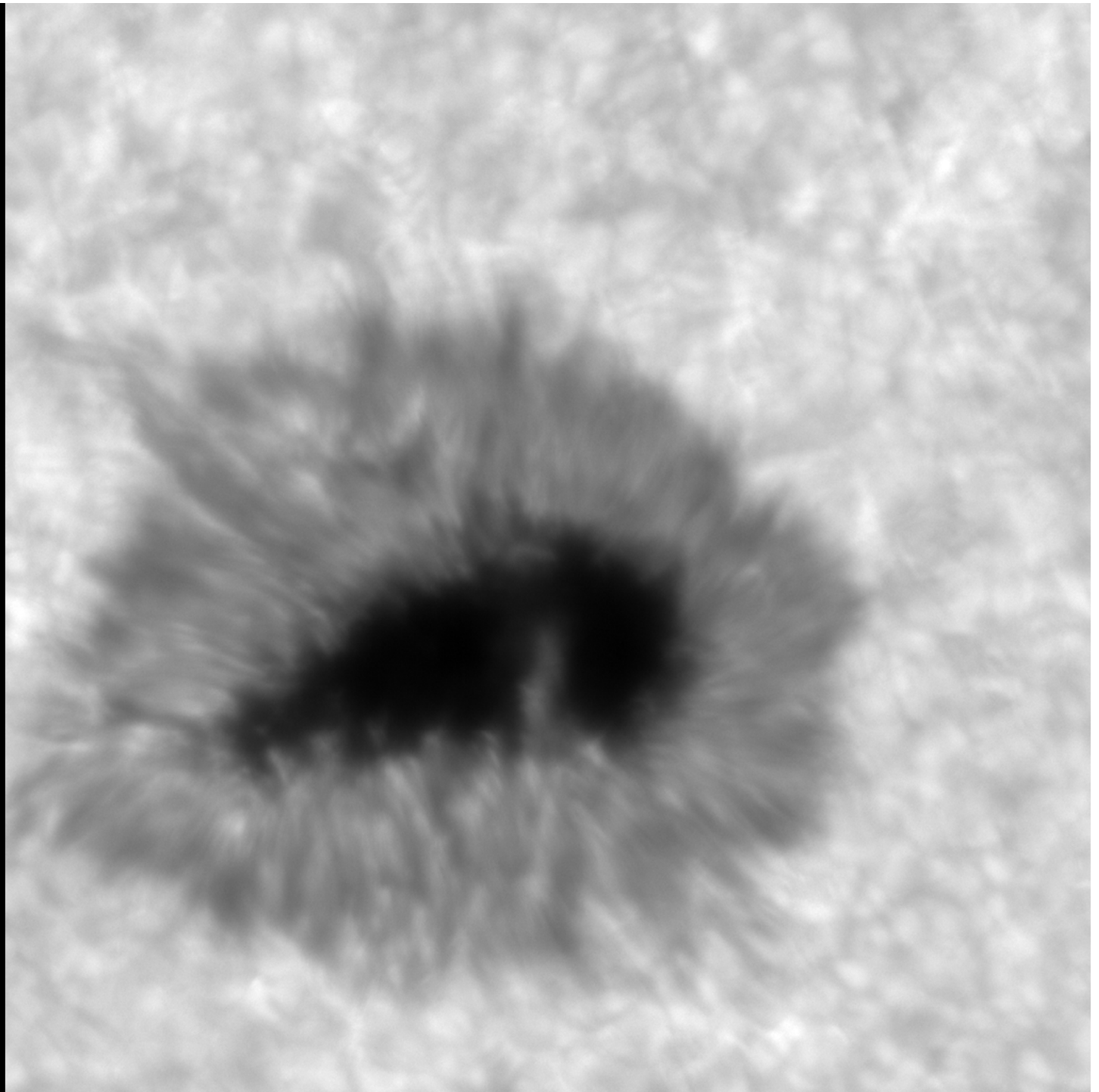
430nm
ORCA4
1ms expo.x100



DST
2013.6.25

430nm
ORCA4
1ms expo.x100

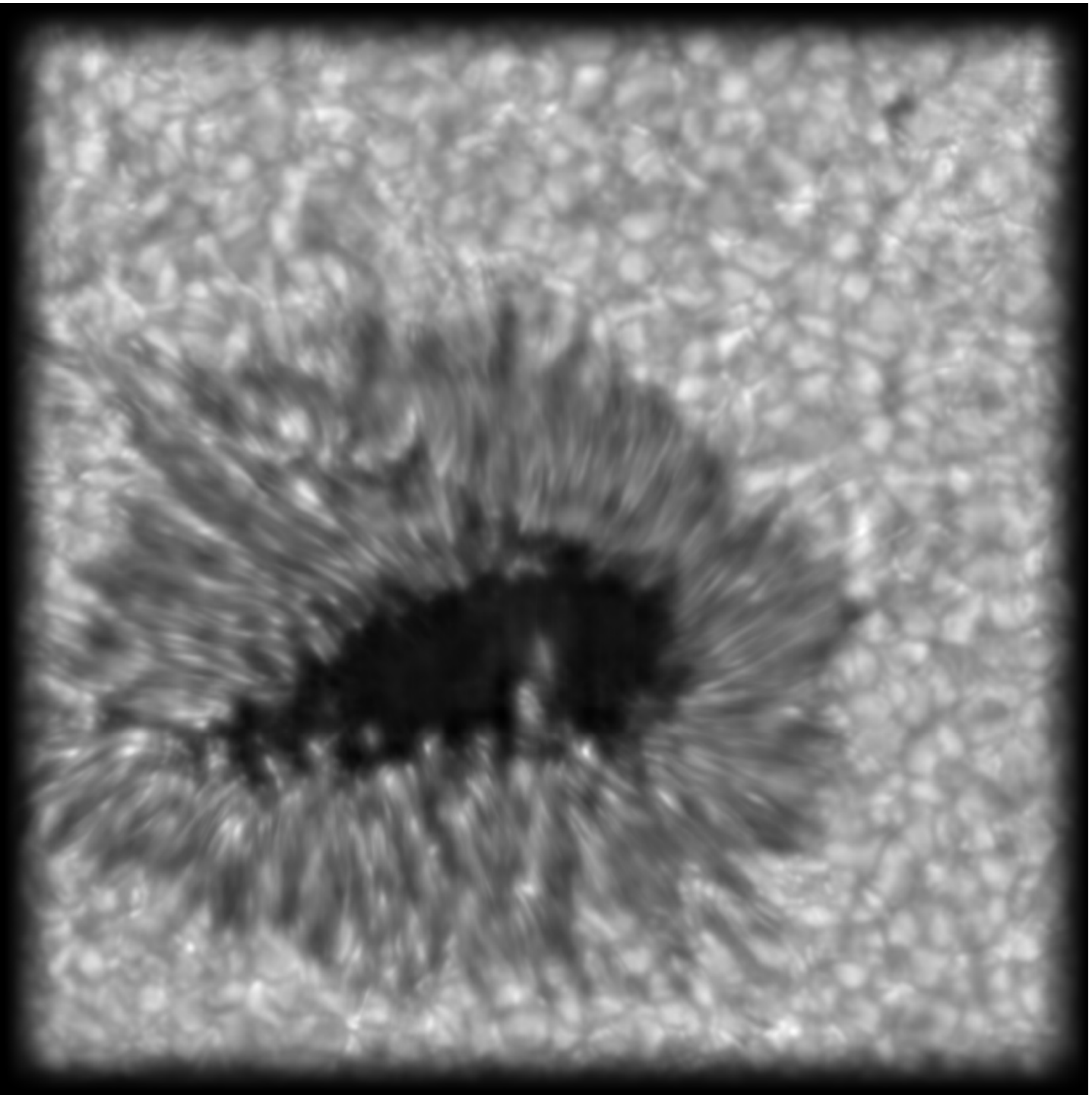
Rms best image



DST
2013.6.25

430nm
ORCA4
1ms expo.x100

Speckle masking
+
Deconvolution
(max_likelihood)

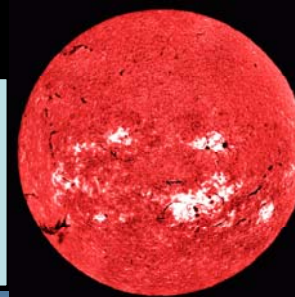


SMART望遠鏡の開発

2004~

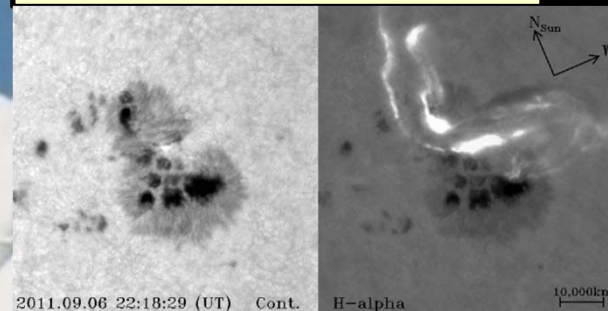
全面磁場
活動領域の発達過程
(休止中)

H α 全面撮像
フレア・プロミネンス
放出の監視



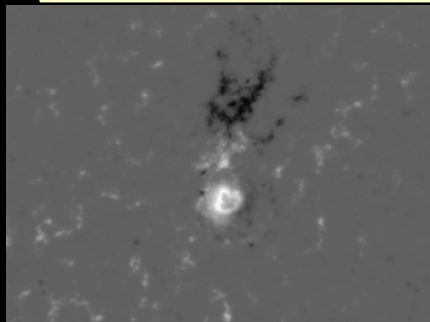
2011~

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

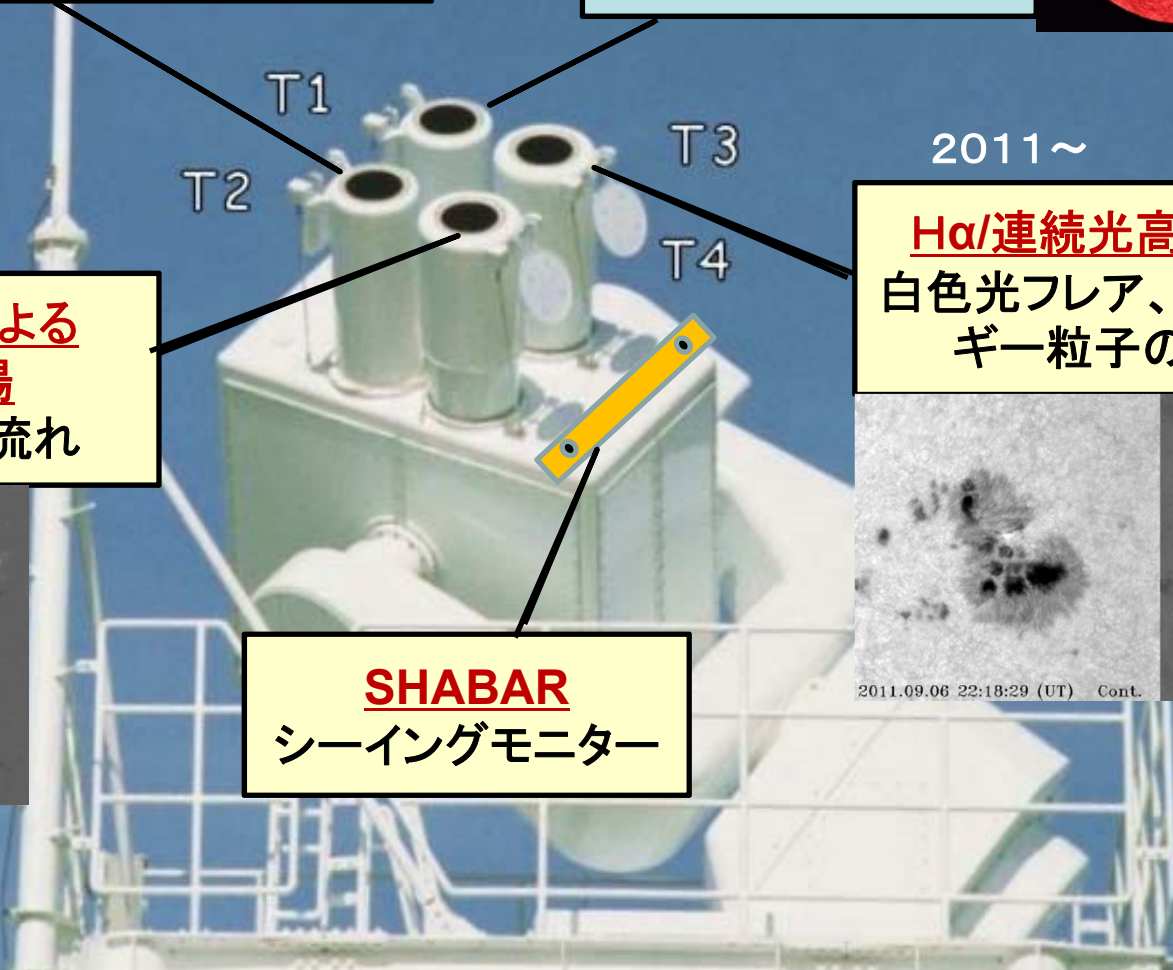


2012~

**ファブリペロによる
高精度磁場**
大規模磁場と流れ

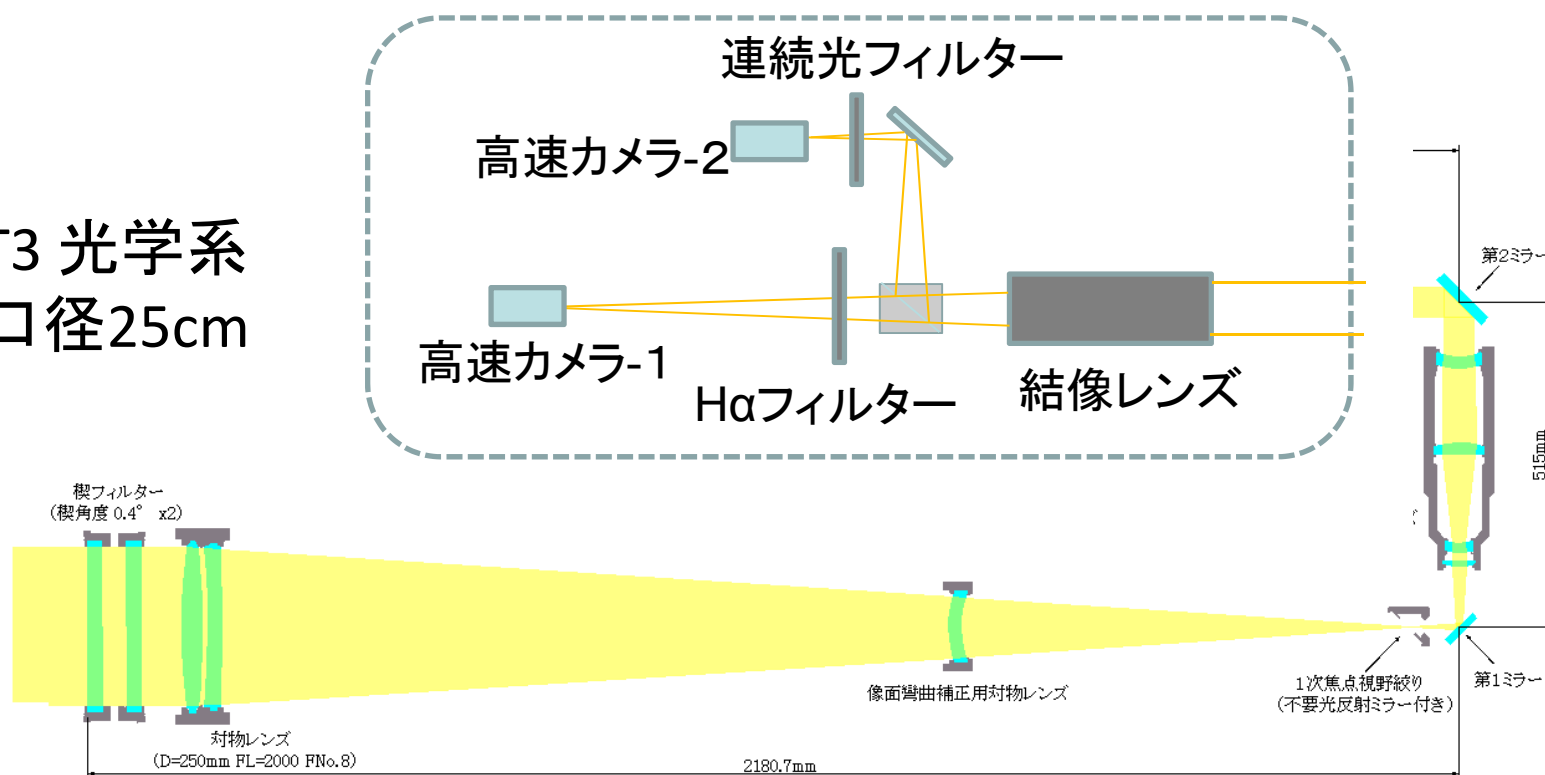


SHABAR
シーイングモニター



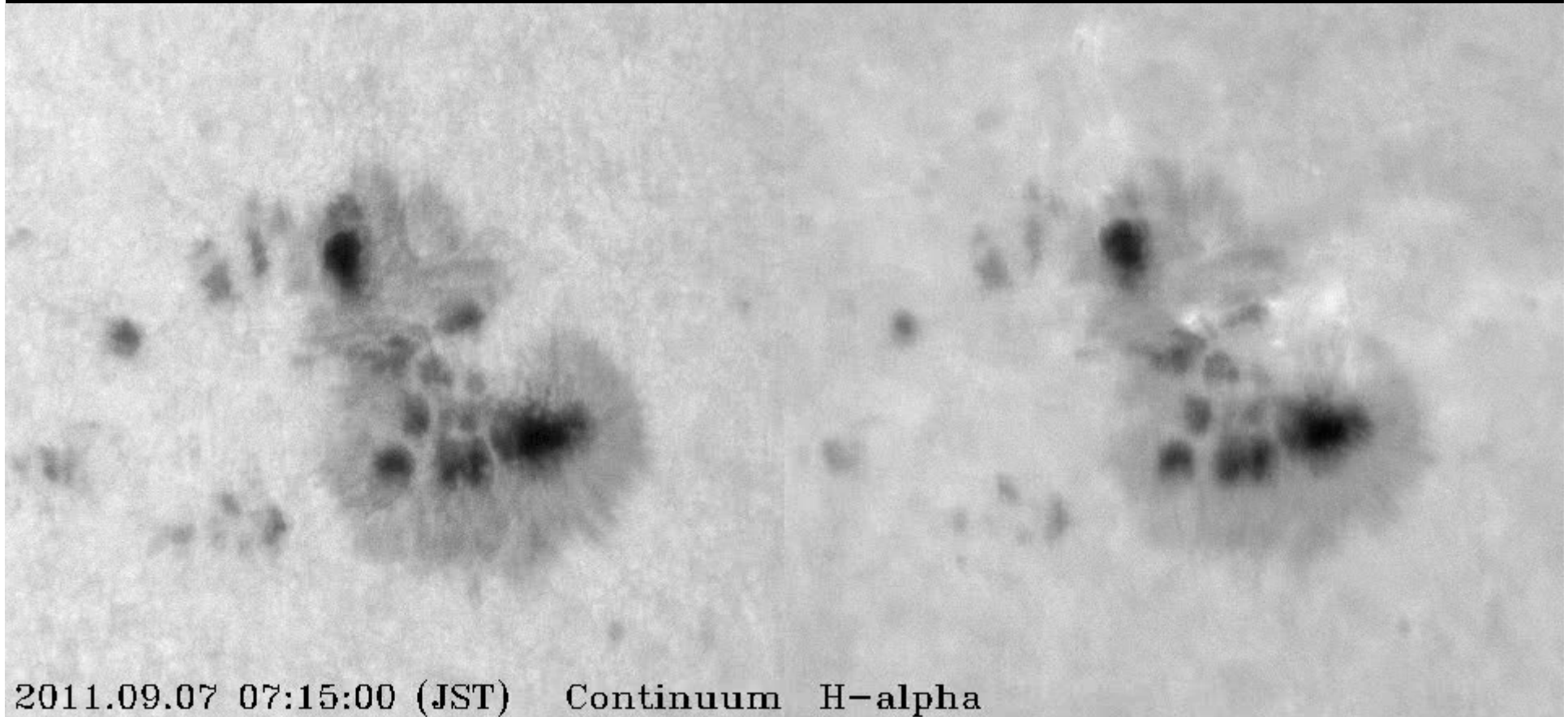
SMART T3 による 白色光 + H α フレアカーネル高速撮像計画

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

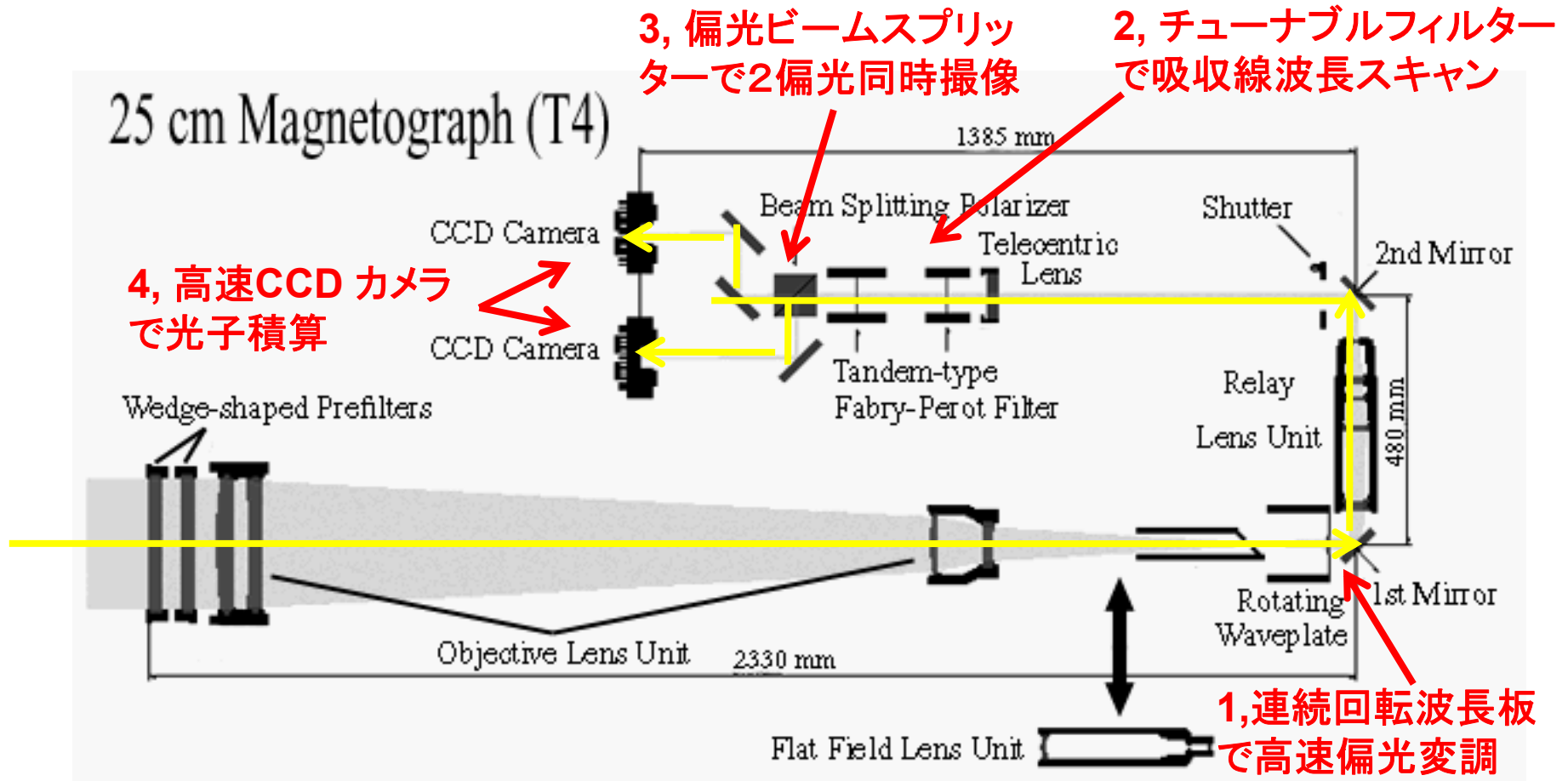
20120709 Ha



20110906 continuum



4 key components of SMART T4 magnetograph



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

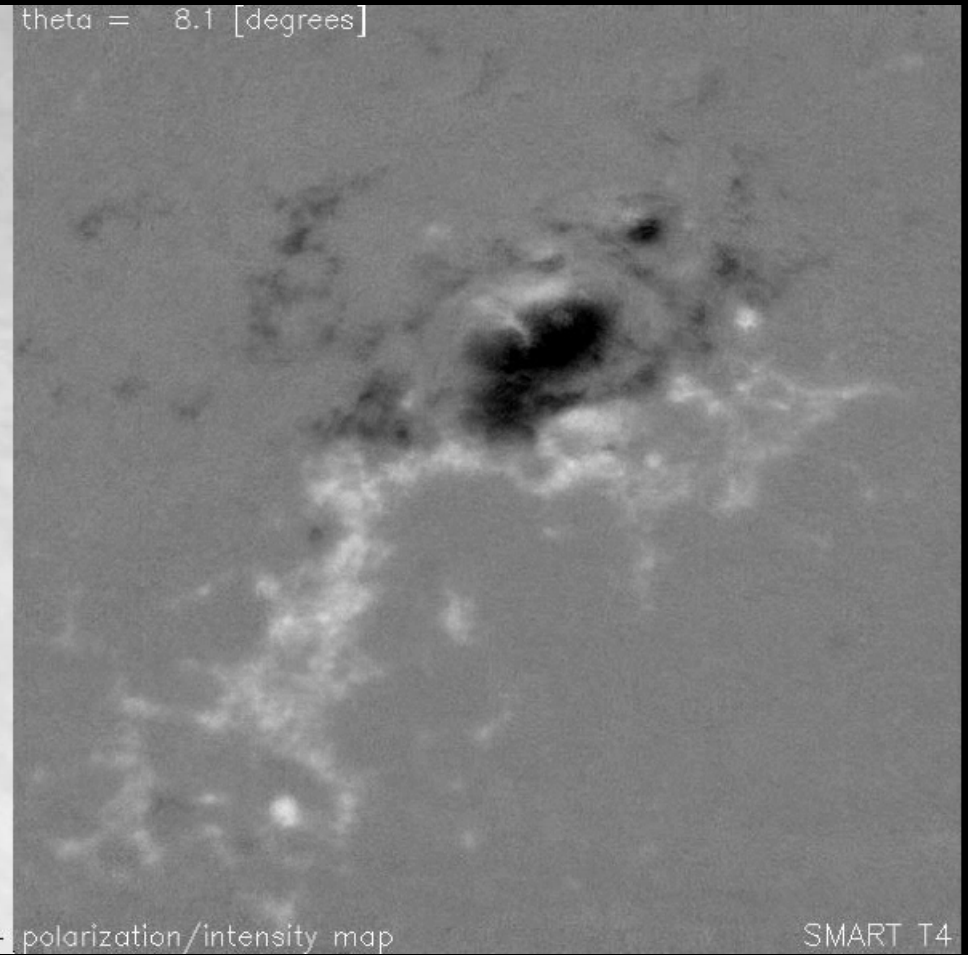
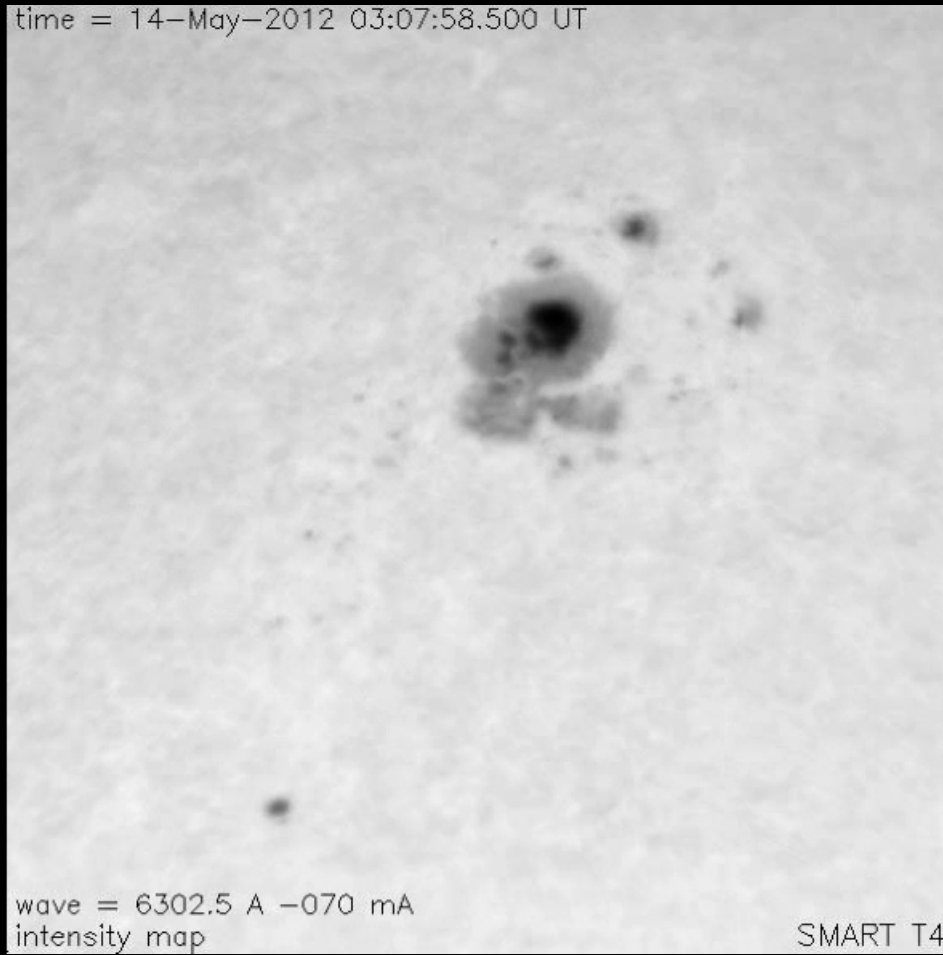
SMART T4 vector magnetograph

Intensity

Polarization modulation

time = 14-May-2012 03:07:58.500 UT

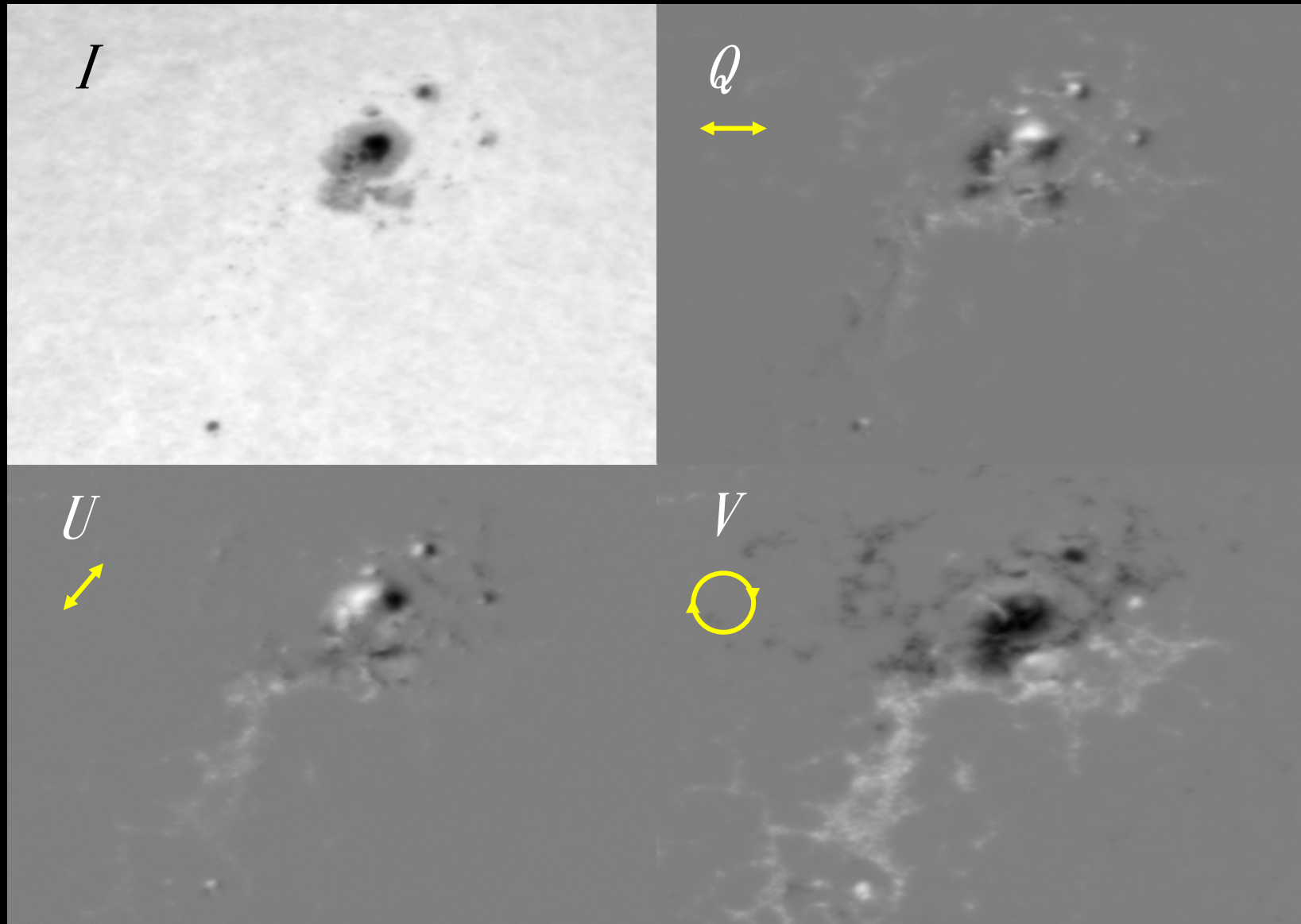
theta = 8.1 [degrees]



2012.05.14 6302.5 - 0.07A

by S. Morita, S.Nagata

Map of Stokes parameters



The SOLAR-C Strawmann instruments

3. X-Ray spectrometer (XIS)

Grazing incidence telescope with photon counting and/or normal incidence ultra-high resolution telescope (TBD)

1. UV-Visible-NIR telescope (SUVIT) -

- ~1.5m ϕ telescope
- High spatial resolution
- Wide wavelength coverage
- *Zeeman+Hanle spectropolarimetry*

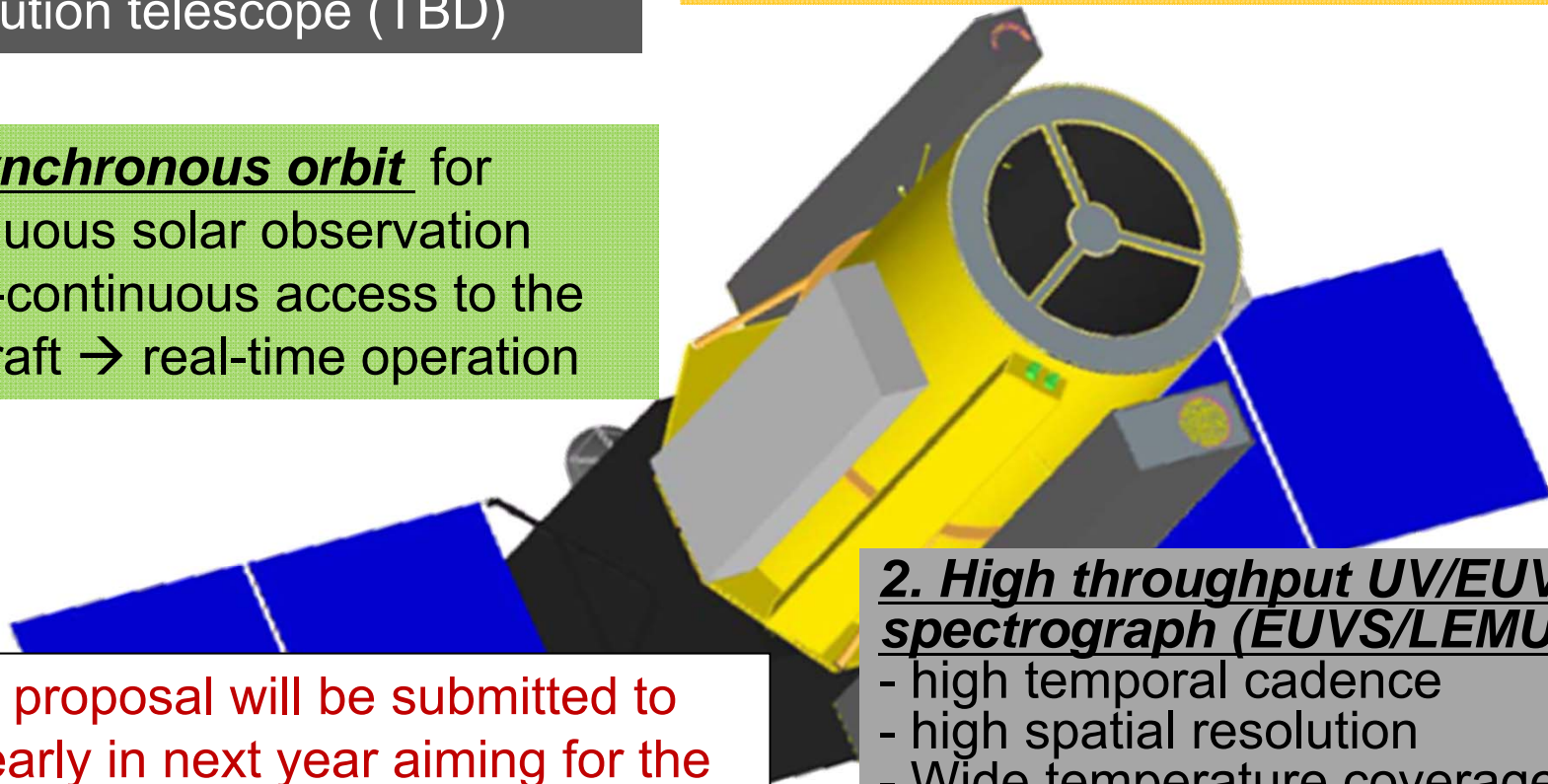
Geo-synchronous orbit for

- Continuous solar observation
- Quasi-continuous access to the spacecraft \rightarrow real-time operation

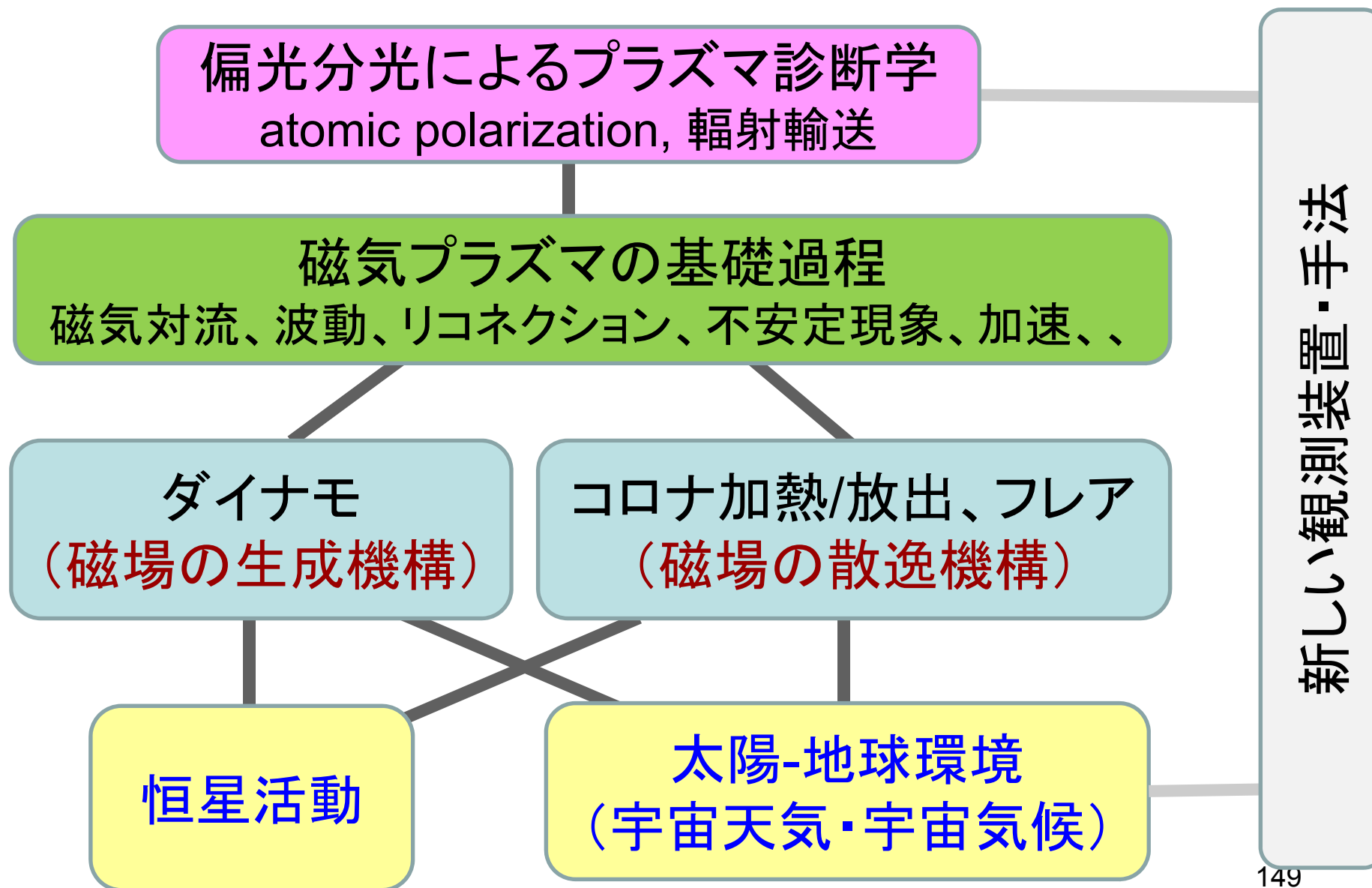
Mission proposal will be submitted to JAXA early in next year aiming for the launch in ~2020.

2. High throughput UV/EUV spectrograph (EUVS/LEMUR)

- high temporal cadence
- high spatial resolution
- Wide temperature coverage



太陽研究が取り組む課題；



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こを使った観測研究
(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)計画への参加
(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。