

太陽観測入門

桜井隆 (国立天文台)



太陽の観測

- 撮像(imaging)
 - 昔は写真、映画
 - 最近はほとんどCCD
 - アナログビデオ録画(昔)、デジタル記録
- 分光(spectroscopy)
 - プリズムまたは回折格子分光器
 - 狭帯域フィルター
 - Fabry-Perot干渉計
- 測光(photometry)
 - 太陽総放射計
 - 太陽定数 $1.37\text{kW}/\text{m}^2$

撮像観測

■ 空間分解能(波長 λ 、口径 D)

- 回折限界 $1.22\lambda/D$ radian
 $\approx 1.25'' (\lambda/5000\text{\AA}) / (D/10\text{cm})$
- 太陽直径 約 $2000''$ (≈ 0.01 radian)
- $1''$ は太陽面上で約 700km
- 地球大気の揺らぎによる像劣化 (seeing)が $1''$ 以下になることは稀 → 良いサイトを探す

■ 太陽像の大きさ

- 望遠鏡の焦点距離 f → 太陽像 $=0.01f$



CCD

- 可視光から近赤外線 ($1\mu\text{m}$) くらいまでに感度
 - バンドギャップ $1.2\text{ eV} \leftrightarrow 1\mu\text{m}$
- 短波長 (青色域) では蛍光物質を塗布して増感
- 光から電子への変換効率ほぼ100%
 - 電極など光に感じない領域
 - 表面反射によるロス
- 1ピクセルが貯められる電子数 (full-well capacity)
 \leftrightarrow 測光精度
- 暗電流 (光が当たらなくても出る熱電子)
 \leftrightarrow 暗い対象の観測限界、冷やす
- 感度ムラの補正 flat fielding



その他の波長

- X線もCCDで検出できる(2次元撮像)
一つのX線光子が電子をたくさん生成
(昔はX線検出器に空間分解能はなかった)
- 赤外線カメラ
CCDのシリコンの代わりに
 - InGaAs 0.9~1.7 μm
 - InSb 3~5 μm
 - HgCdTe 8~12 μm

分光観測

■ 回折格子の方程式

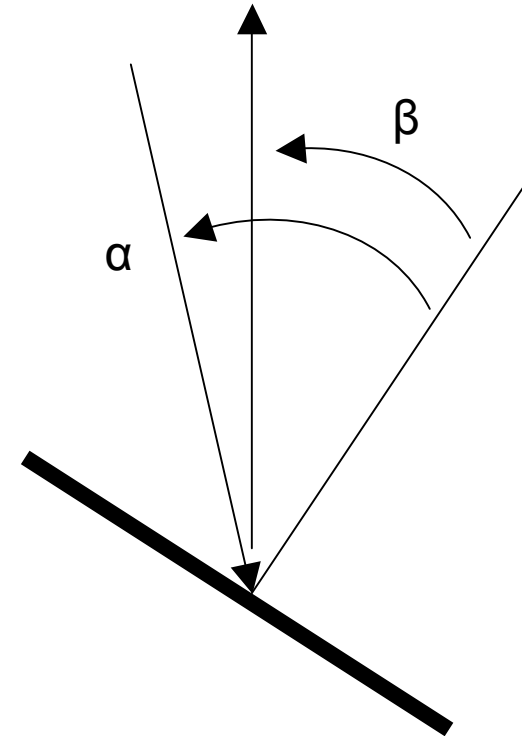
$$n\lambda = d(\sin\alpha + \sin\beta)$$

- n : 次数 (1, 2, ...,)
- d : 格子定数 (溝の間隔)
- α 入射角、 β 出射角

■ 波長分解能

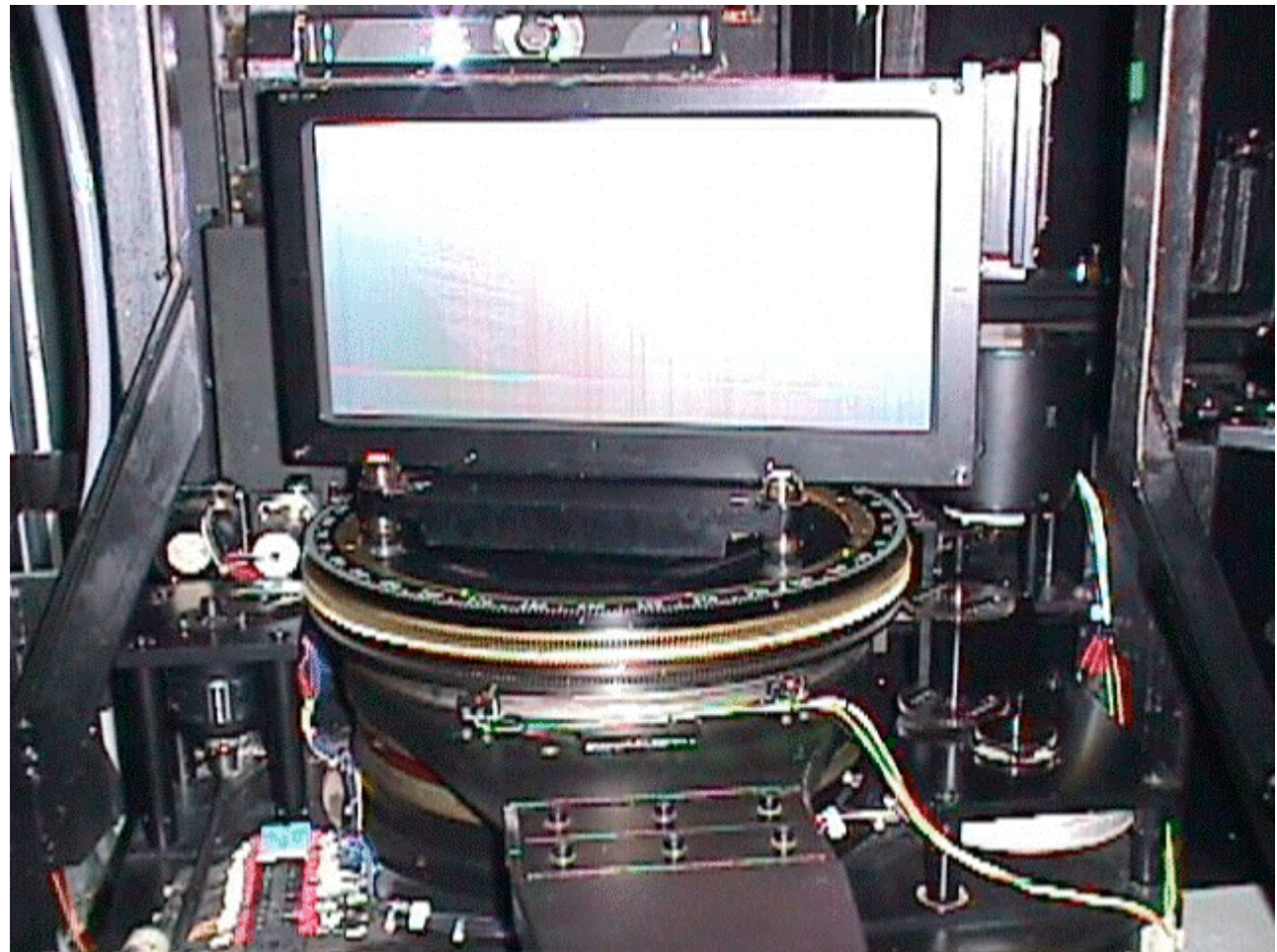
$$\lambda/\Delta\lambda = nN$$

$N = d \times \text{回折格子の大きさ} = \text{総溝数}$



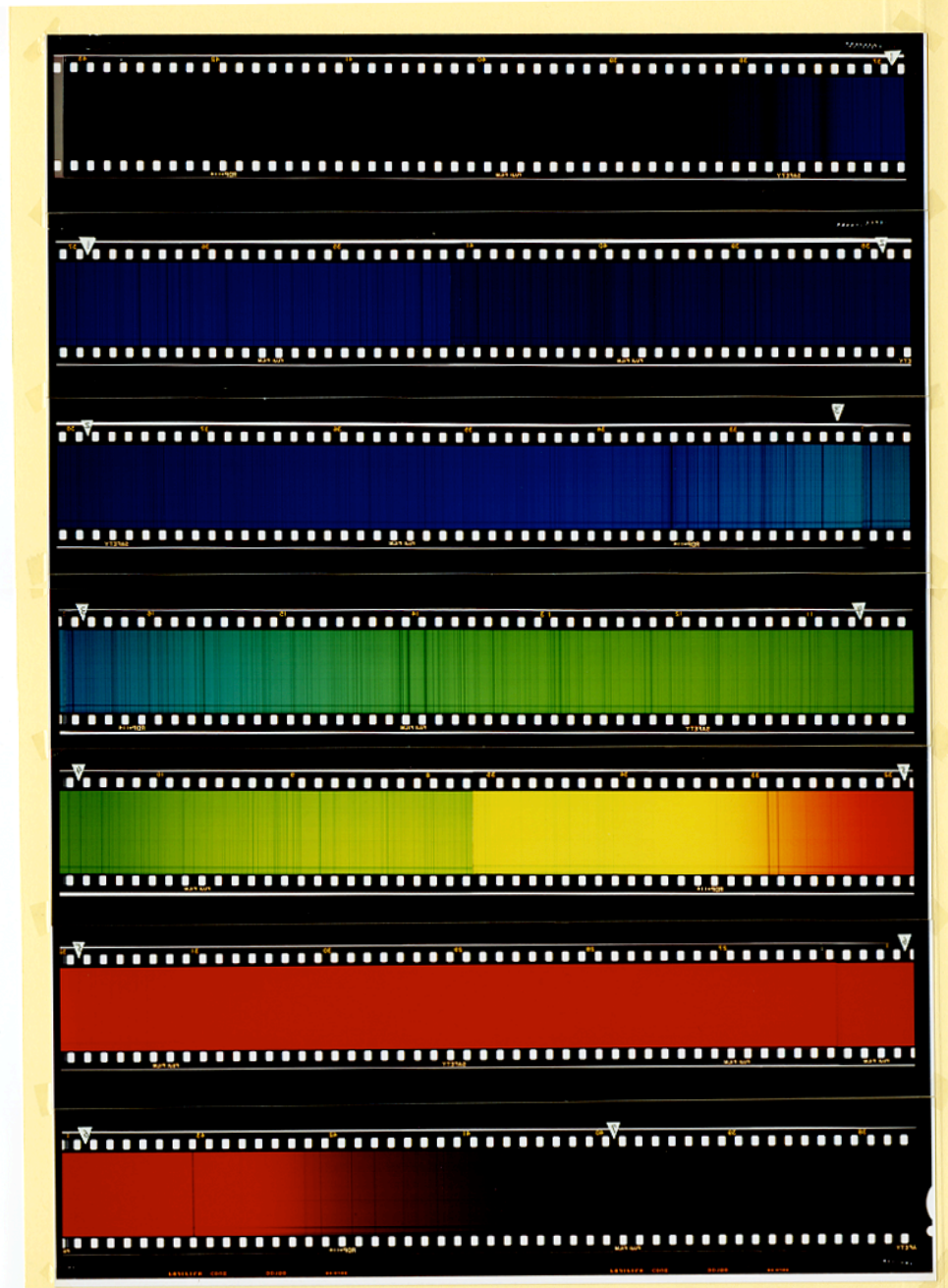
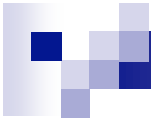
回折格子

40cm



乗鞍コロナ観測所

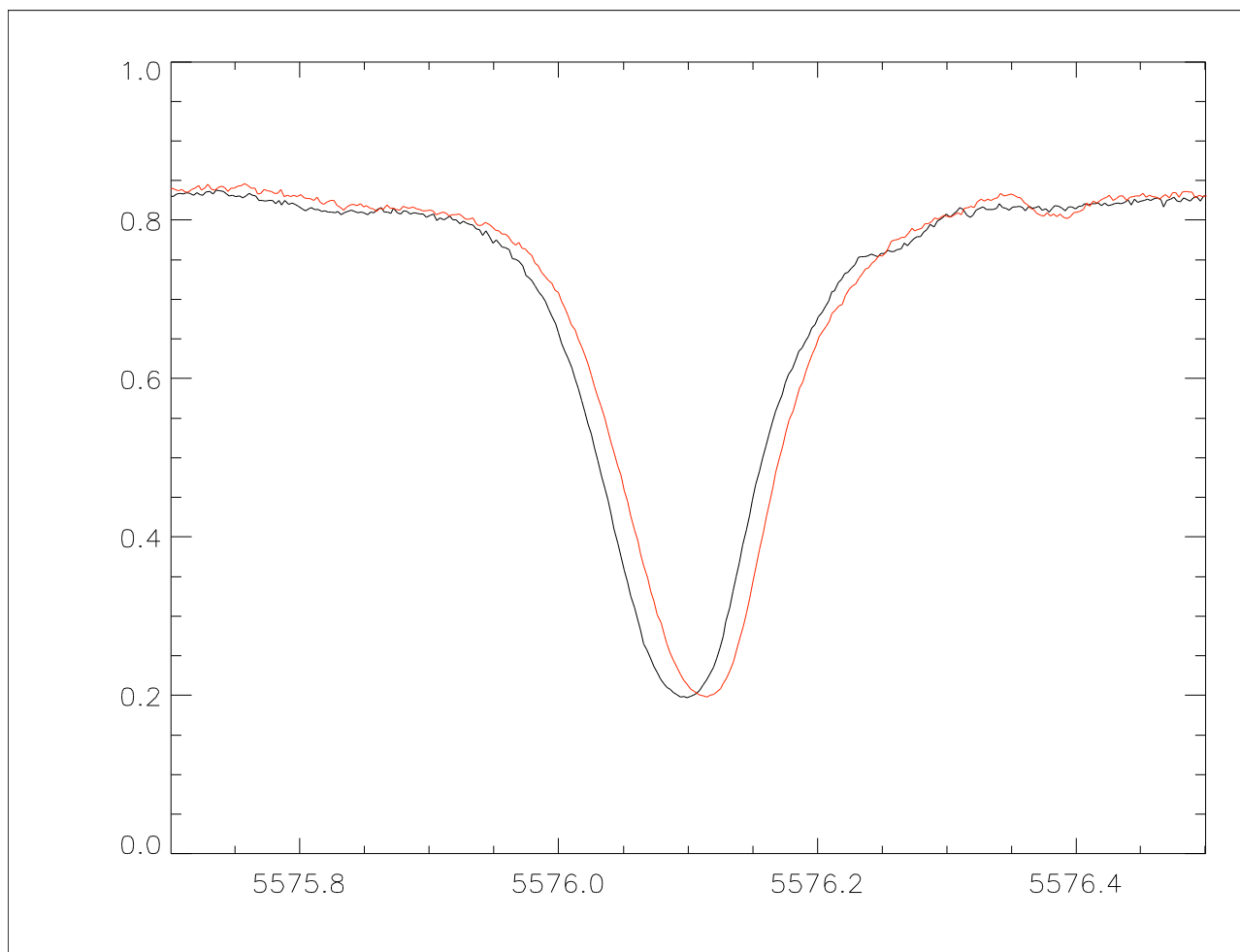
$d=1/600$ mm



太陽のスペクトル

いろいろの元素が特有の波長の光を吸収する

ドップラーシフトから自転速度がわかる 東西の縁で ± 2 km/s



スペクトル線のDoppler変移

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

$$c = 300,000 \text{ km/s}$$

$$v = 2 \text{ km/s}$$

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

$$\rightarrow \Delta\lambda = 0.03 \text{ \AA}$$


スペクトル線のDoppler幅

- 熱運動によるスペクトル線の広がり

$$\sim \exp[-(\lambda - \lambda_0)^2 / (\Delta\lambda_D)^2]$$

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_D &= \frac{\lambda}{c} \sqrt{\frac{2kT}{M_i}} && M_i \text{ はイオンの質量} \\ &= 4.3 \times 10^{-7} \lambda \sqrt{\frac{T(\text{K})}{M_i/m_p}}\end{aligned}$$

- $T=10^4$ K, $\lambda=6563$ Å, hydrogen $\rightarrow \Delta\lambda_D=0.28$ Å
- $T=10^6$ K, $\lambda=5303$ Å, Fe ($A=56$) $\rightarrow \Delta\lambda_D=0.3$ Å


$$v/c = GM/Rc^2 = 2.12 \times 10^{-6}$$

一般相対論による重力赤方変位

Adam, M. G.: MNRAS, 119, 460, 1959

$$v = 0.636 \text{ km/s}$$

$$\Delta\lambda = 0.01 \text{ \AA} \text{ at } 5000 \text{ \AA}$$



convective

blue shift

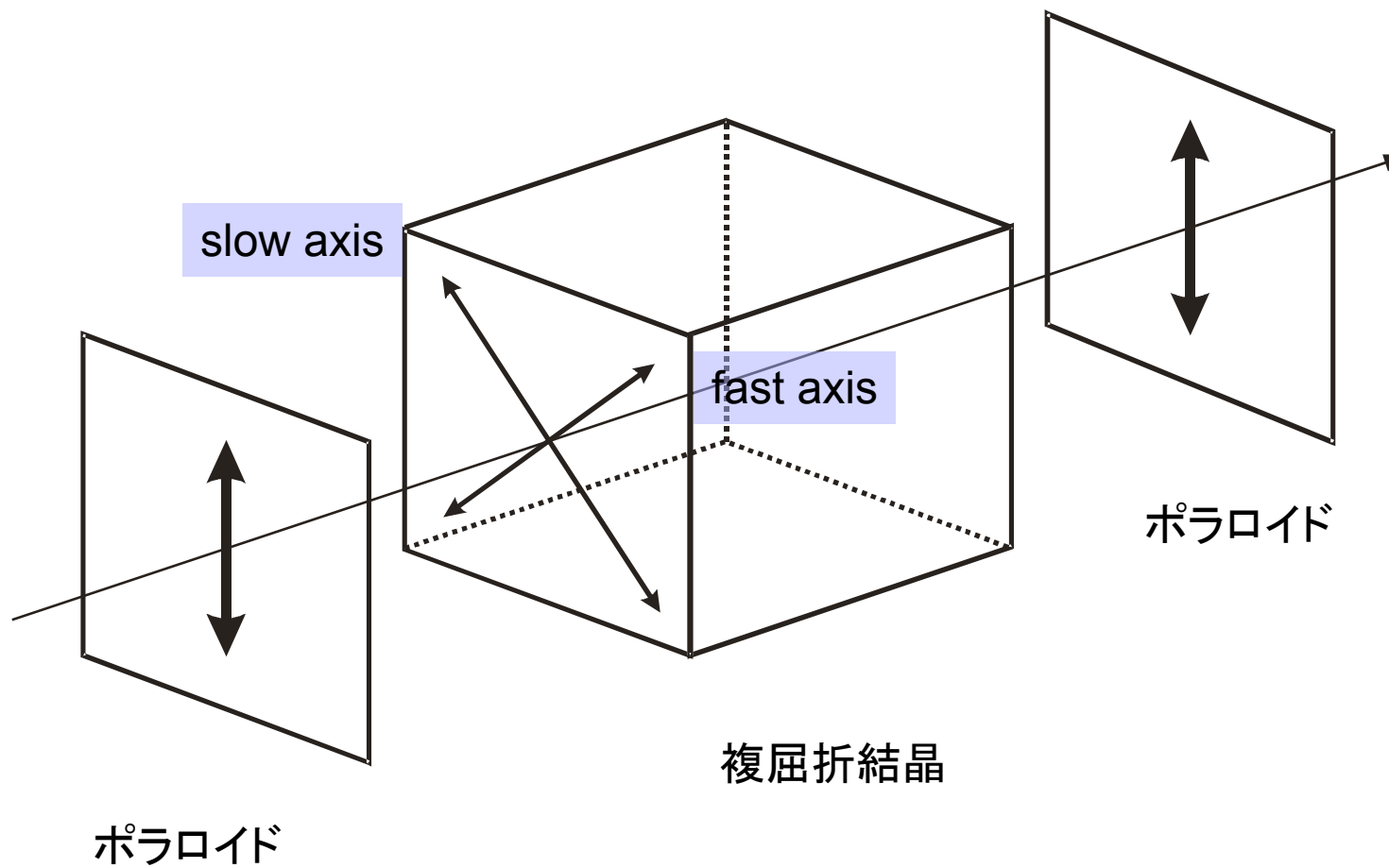




特殊な望遠鏡・装置

- リオ・フィルター(彩層を見る)
 - B. Lyot (1933)
- マグネトグラフ(磁場を測る)
 - H. Babcock (1953)
 - R.C. Smithson (1971)
- コロナグラフ(日食なしでコロナを見る)
 - B. Lyot (1930)
- 多層膜直入射XUV望遠鏡
- 斜入射鏡X線望遠鏡
- すだれコリメータ方式硬X線望遠鏡
- 電波望遠鏡
 - 電波干渉計

リオ・フィルターの一素子



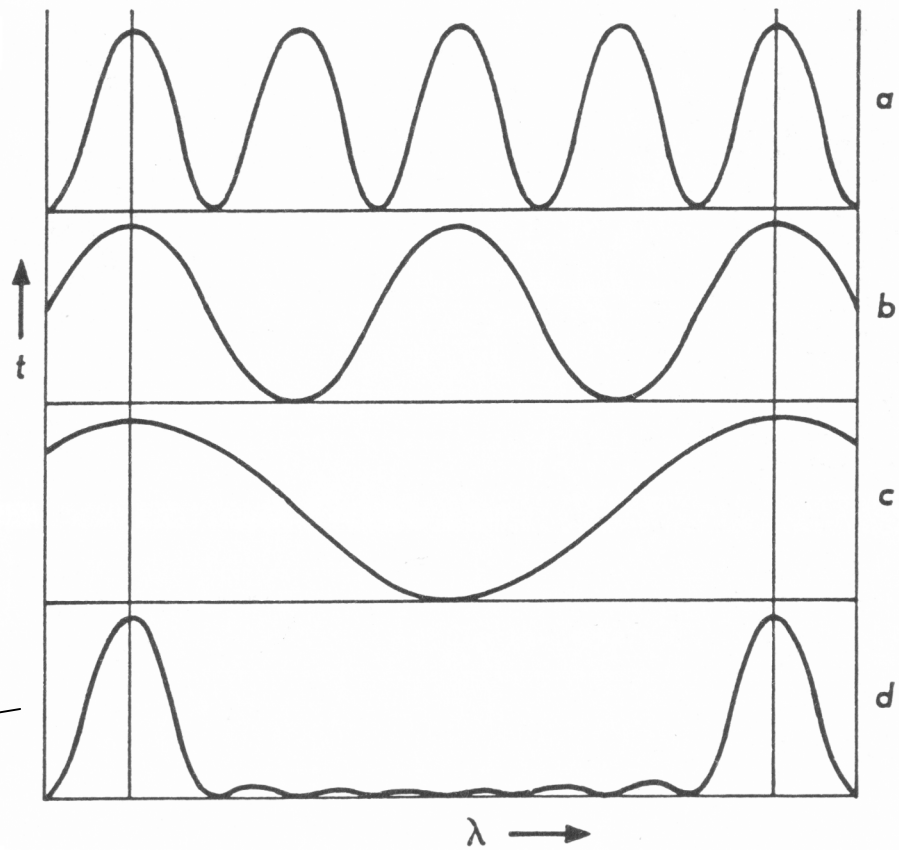
波長透過特性

一番長い結晶

1/2

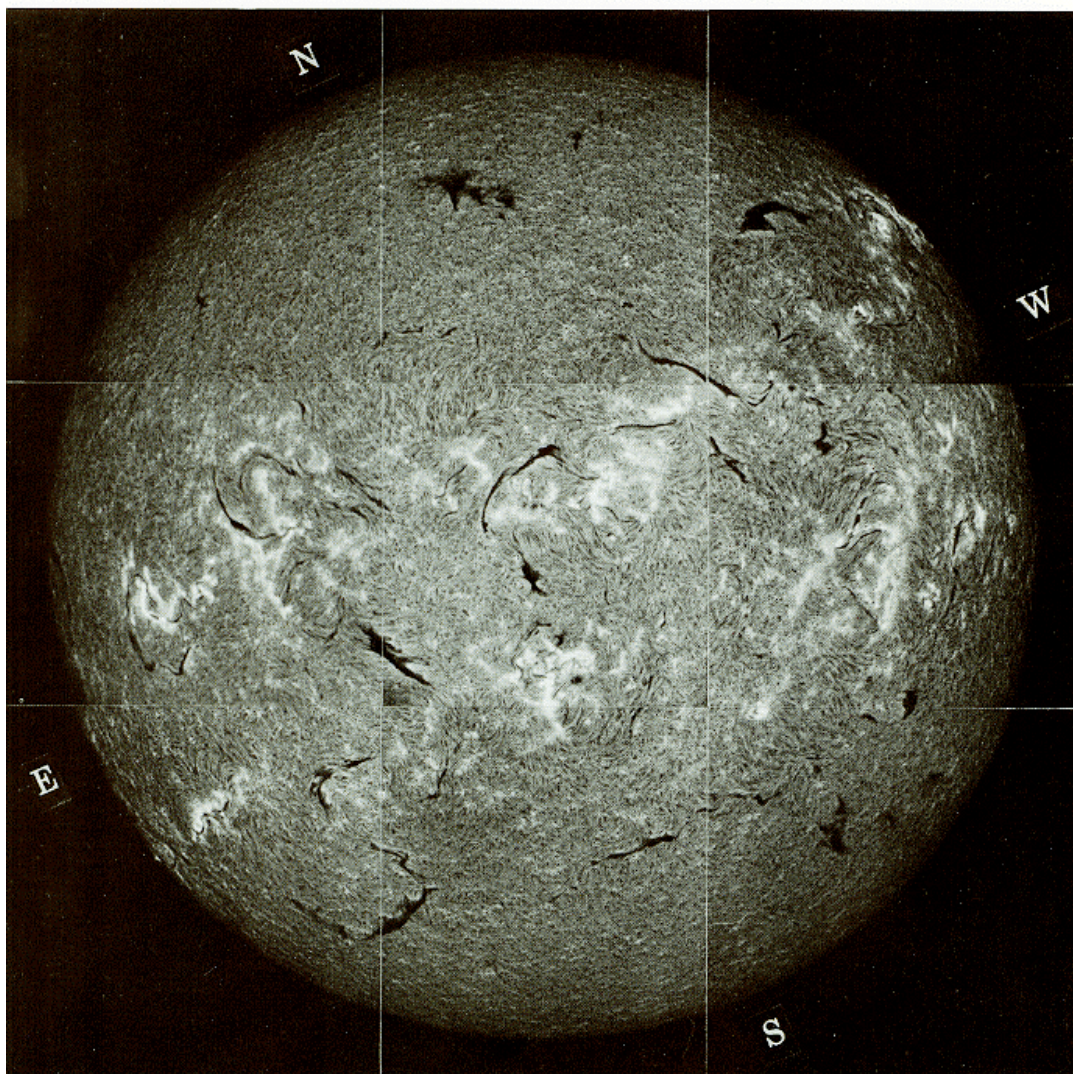
1/4

合成



1981 SEPTEMBER 22

21.55-22.03

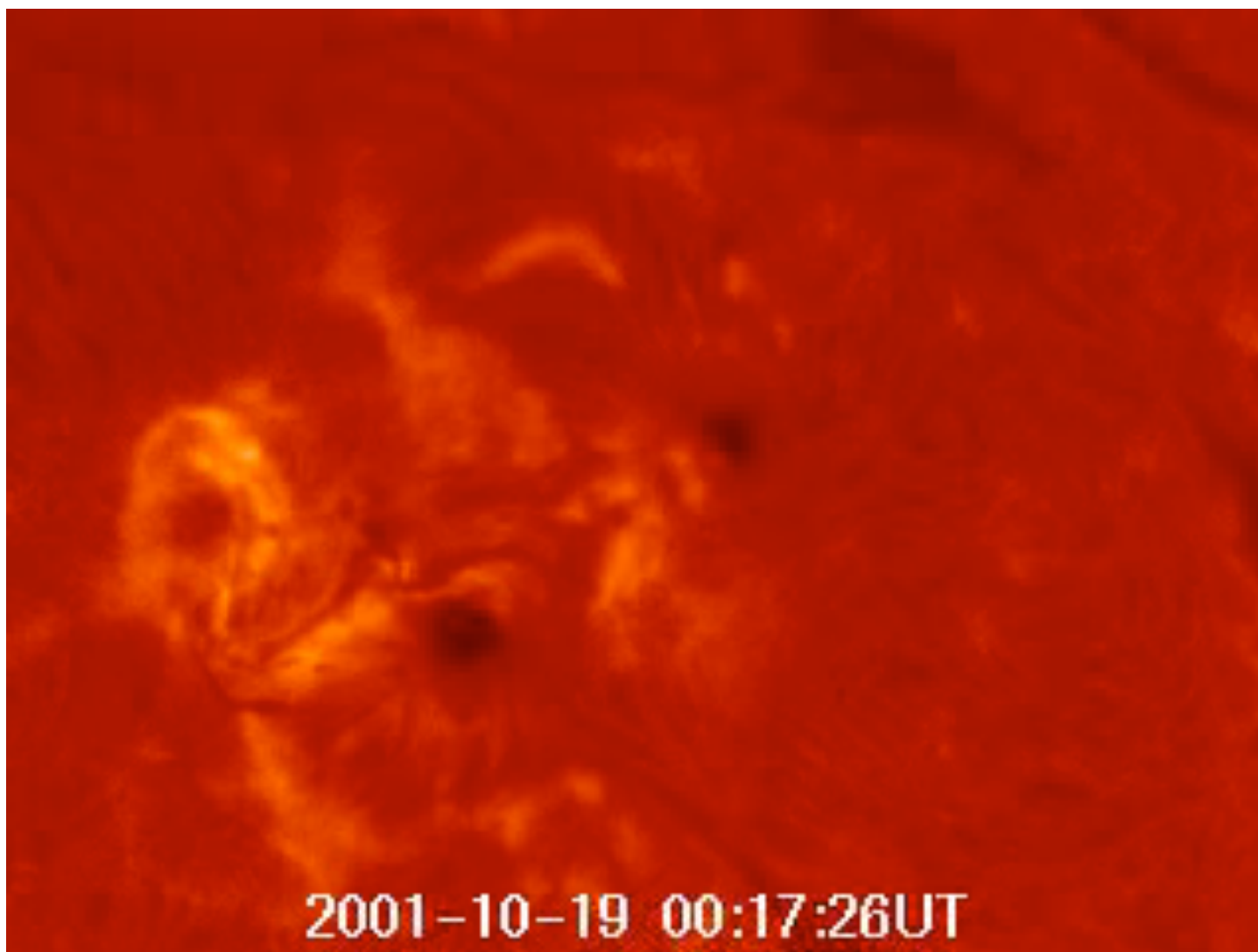


H α 線用
リオ・フィルターで
撮影した彩層

透過波長幅
0.25~0.5 Å

フィルターの大きさ
20cmくらい

フレア爆発 H α 画像



Stokesパラメータ I, Q, U, V

$$E_x = E_1 \cos(\omega t - \phi_1)$$

$$E_y = E_2 \cos(\omega t - \phi_2)$$

$$I_1 \equiv \overline{E_1^2} = 2\overline{E_x^2}$$

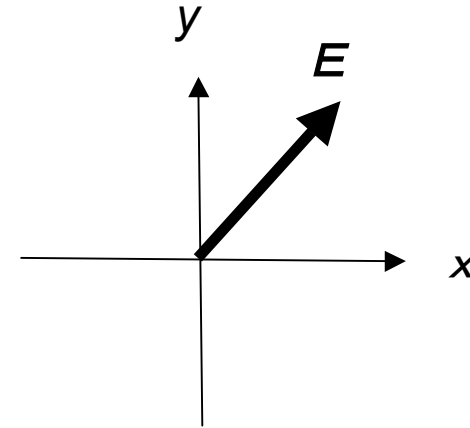
$$I_2 \equiv \overline{E_2^2} = 2\overline{E_y^2}$$

$$I \equiv I_1 + I_2 (= 2\overline{\mathbf{E}^2} = \overline{\mathbf{E}^2} + \overline{\mathbf{B}^2})$$

$$Q \equiv I_1 - I_2$$

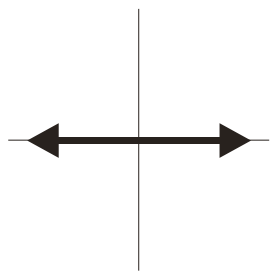
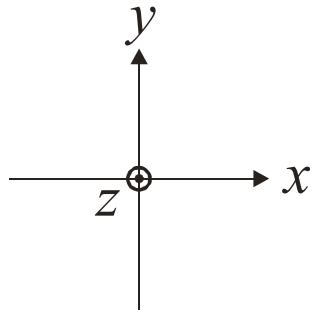
$$U \equiv \overline{2E_1 E_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)} = 4\overline{E_x E_y}$$

$$V \equiv \overline{2E_1 E_2 \sin(\phi_1 - \phi_2)} = 4\overline{E_x(t) E_y(t - \frac{2\pi}{\omega})}$$

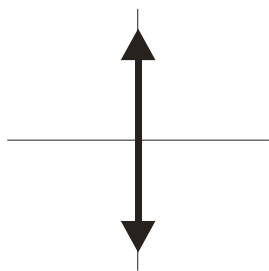


Q, U : 直線偏光、 V : 円偏光、一般に $Q^2 + U^2 + V^2 \leq I^2$

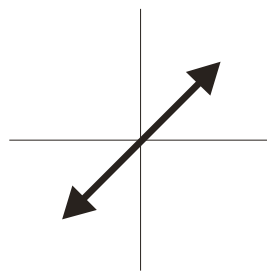
Stokes Parameters



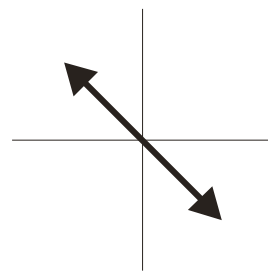
$$Q=I$$



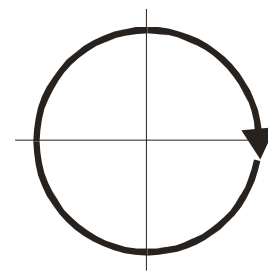
$$Q=-I$$



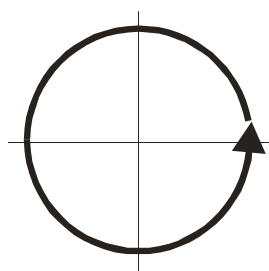
$$U=I$$



$$U=-I$$

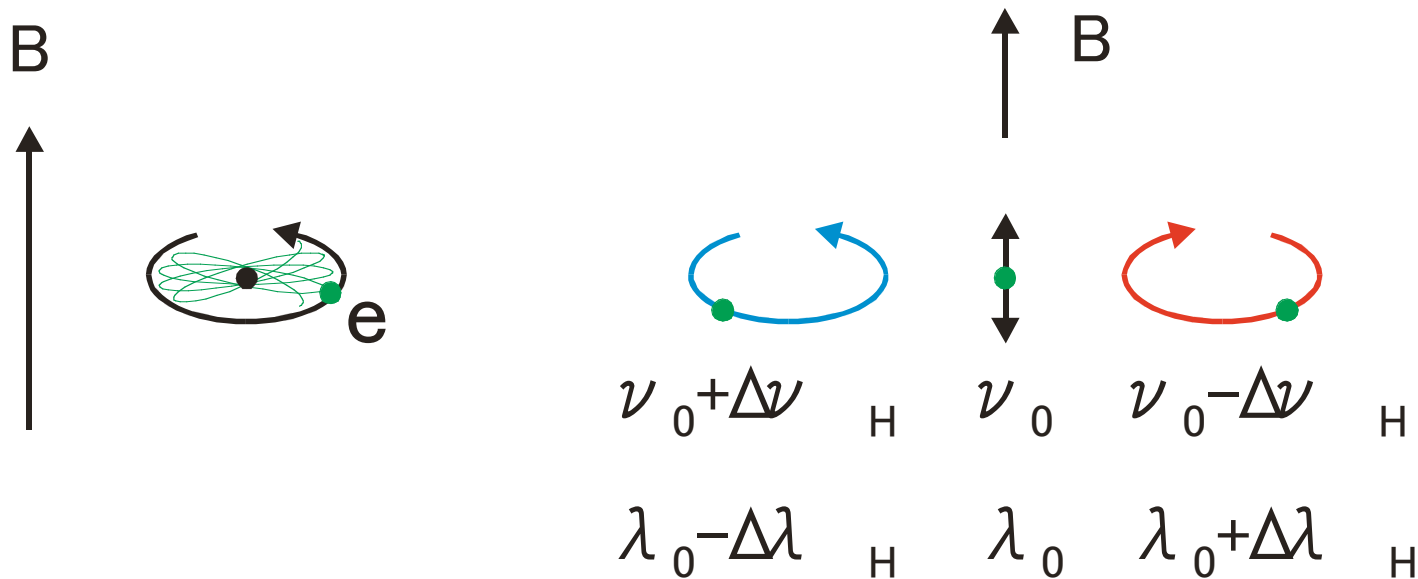


$$V=I$$



$$V=-I$$

Zeeman 效果

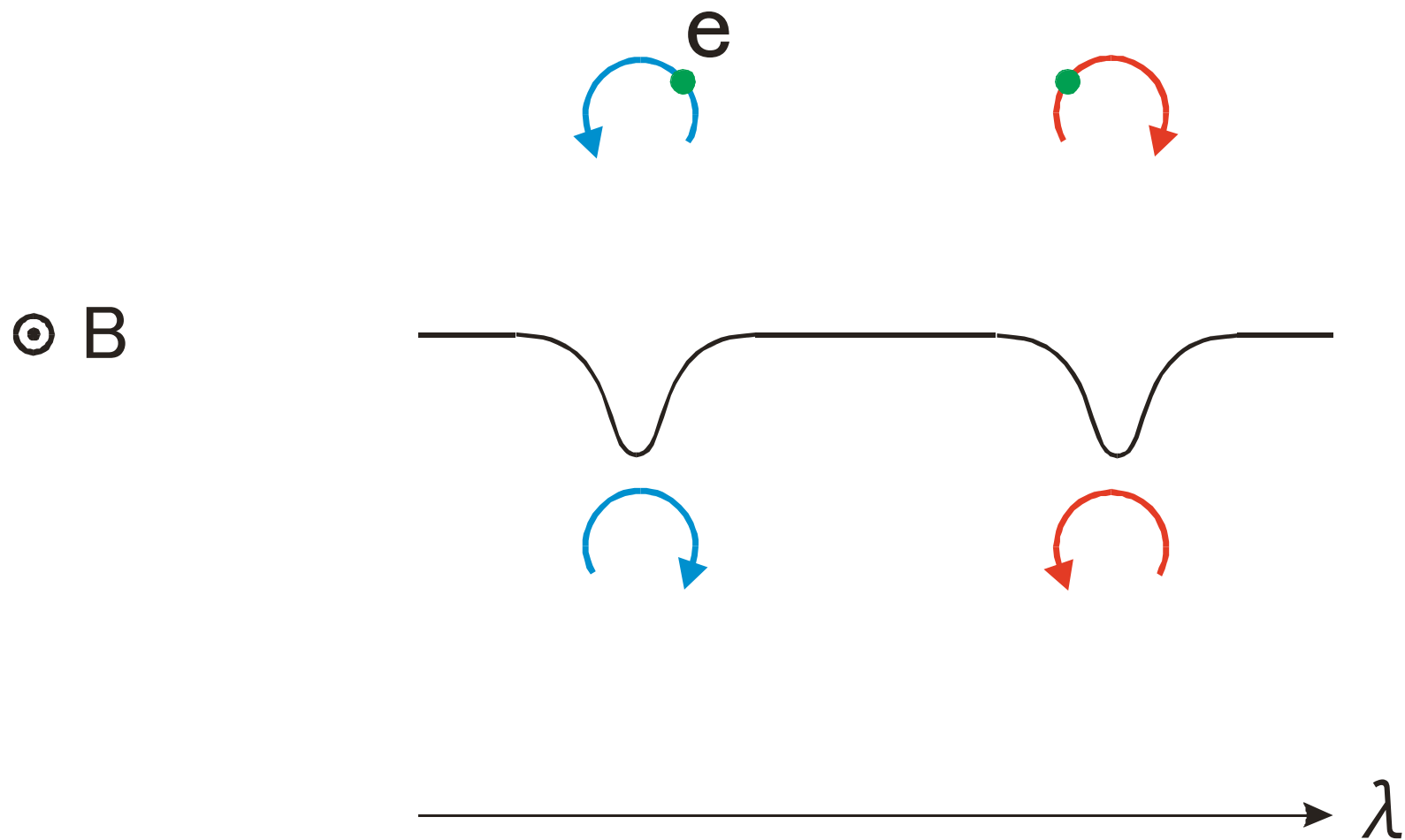


$$\Delta\nu_H = \frac{eB}{4\pi m_e c} g_L$$

$\frac{eB}{4\pi m_e c}$: Larmor (precession) frequency
 g_L : Landè factor

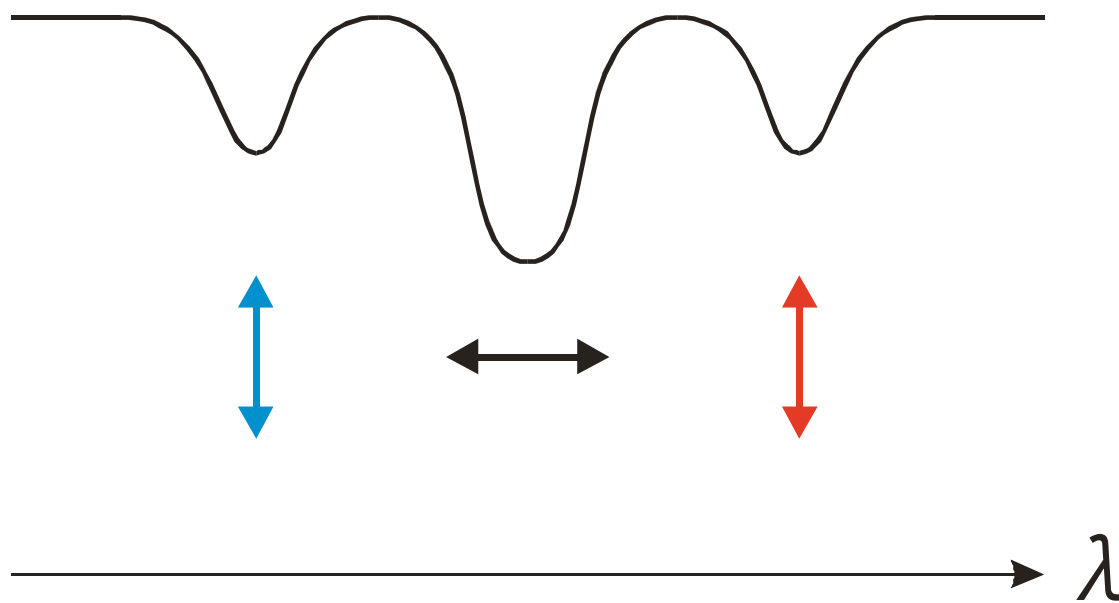
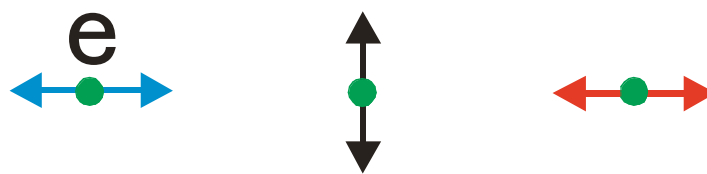
$$\Delta\lambda_H = \frac{\lambda_0^2}{c} \Delta\nu_H = 11.7 g_L \left(\frac{B}{1000 \text{ G}} \right) \left(\frac{\lambda}{5000 \text{ \AA}} \right)^2 \text{ m\AA}$$

Zeeman効果 (磁場に平行方向から見る)



Zeeman効果 (磁場に直角方向から見る)

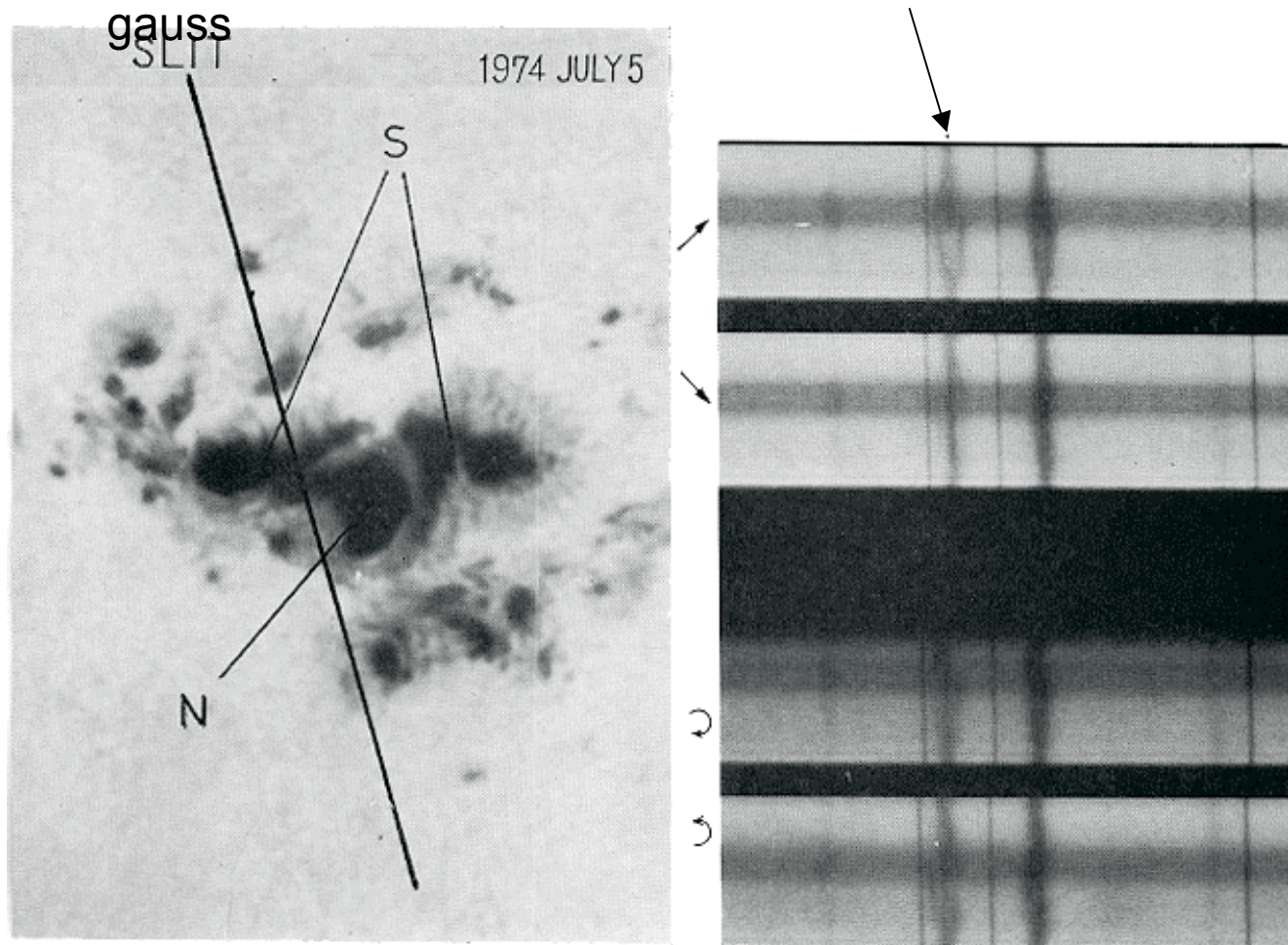
\uparrow B




Zeeman分離した黒点のスペクトル

岡山天体物理観測所 65cm太陽望遠鏡、ポラリメータ

6302.5 Å、 $g_L=2.5$ 、3300



- 
- 分離間隔から磁場を決めるには、最低1000ガウスくらい必要 → 黒点しか測れない
 - 偏光度の測定から磁場を求める: マグネットグラフ

Unno-Rachkovskyの公式

局所熱平衡(LTE)、平行平面大気、磁場、速度場が τ によらず一定
吸収係数の比 $\kappa(\text{line center})/\kappa(\text{cont}) \equiv \eta$ が τ によらない
(Milne-Eddington model)

source functionが τ の一次関数: $B=B_0(1+\beta\tau)$

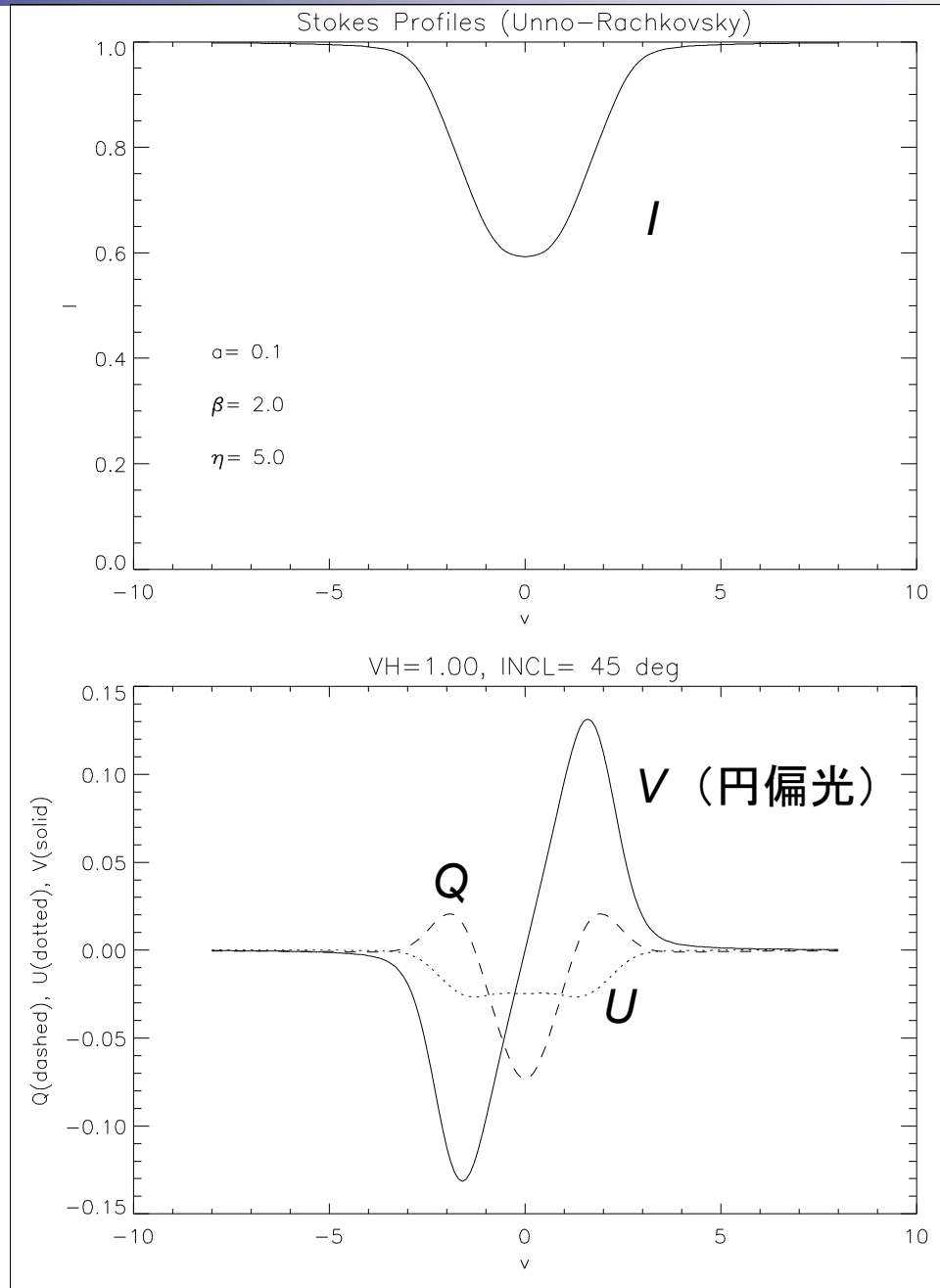
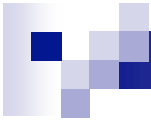
磁場の方向を+Qにとる

$$I/I_c = \frac{1}{1 + \mu\beta} + \frac{\mu\beta}{1 + \mu\beta} \frac{1 + \eta g}{\mathcal{D}} \left\{ (1 + \eta g)^2 + \eta^2 (d^2 + e^2) \right\}$$

$$Q/I_c = -\frac{\mu\beta}{1 + \mu\beta} \frac{\eta}{\mathcal{D}} \left\{ b(1 + \eta g)^2 + \eta^2 eD \right\}$$

$$U/I_c = \frac{\mu\beta}{1 + \mu\beta} \frac{1 + \eta g}{\mathcal{D}} \eta^2 (ce - bd)$$

$$V/I_c = -\frac{\mu\beta}{1 + \mu\beta} \frac{\eta}{\mathcal{D}} \left\{ c(1 + \eta g)^2 + \eta^2 dD \right\}$$



弱い磁場の近似

磁場と視線のなす角 ψ

$v = (\lambda - \lambda_0) / \Delta\lambda_D$ 、 $\Delta\lambda_D = \text{ドップラー幅}$

$v_H = \Delta\lambda_H / \Delta\lambda_D$

$H(a, v)$: Voigt function

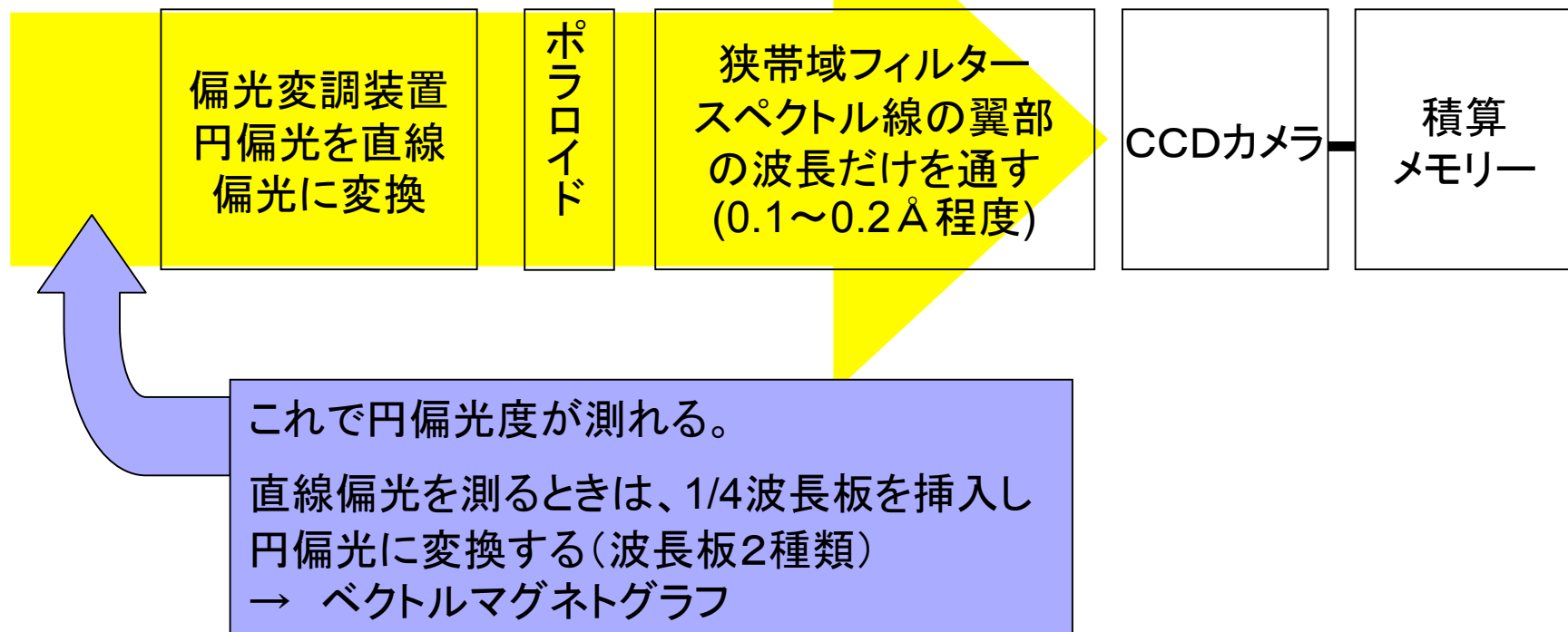
$$Q = -\frac{v_H^2}{4} \sin^2 \psi \frac{dI}{dv} \frac{H''}{H'} \propto B_t^2 \quad (\text{横方向磁場})^2$$

$U \sim 0$ 直線偏光の向きが横磁場の向き

$$V = -v_H \cos \psi \frac{dI}{dv} \propto B_\ell \quad \text{視線方向磁場}$$

磁場が弱いと直線偏光は非常に小さい

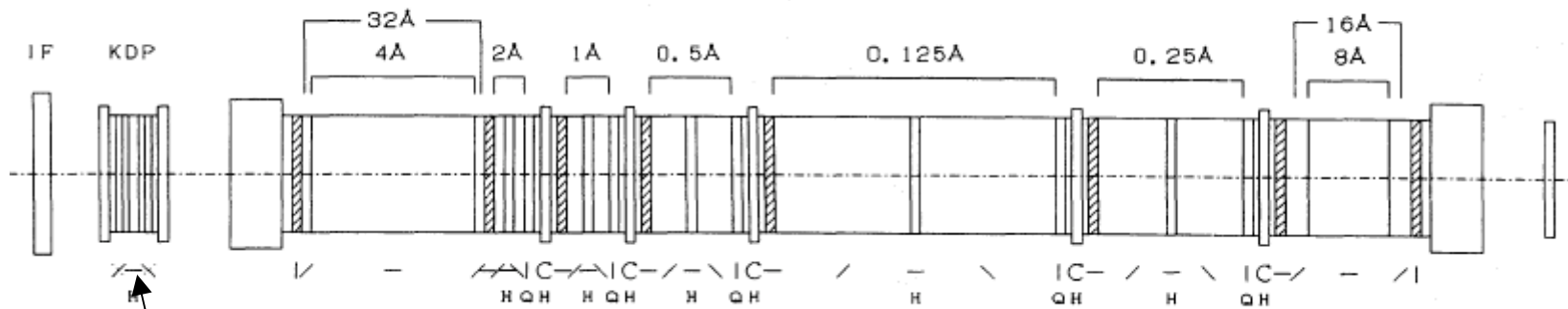
フィルター・マグネトグラフのしくみ



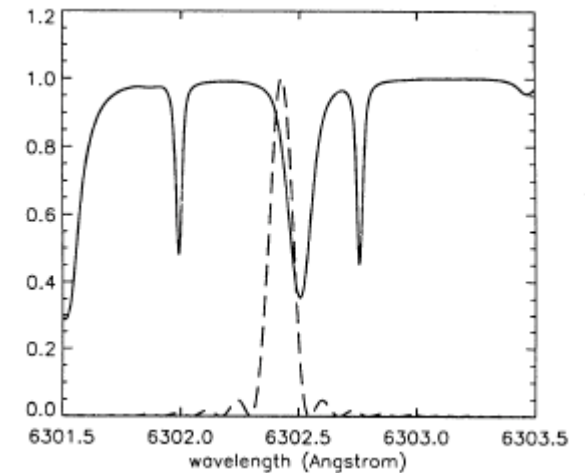
- 偏光測定精度: 約 10^{-3} が平均的
 - 視線方向磁場: 数ガウスの感度
 - 横方向磁場: 数十ガウスの感度

国立天文台・太陽フレア望遠鏡の磁場観測用フィルター

Solar Flare Telescope T1 Filter (6302.5Å, 1/8Å)



KDP結晶
電圧をかけると遅延を発生する
円偏光を直線偏光に変える

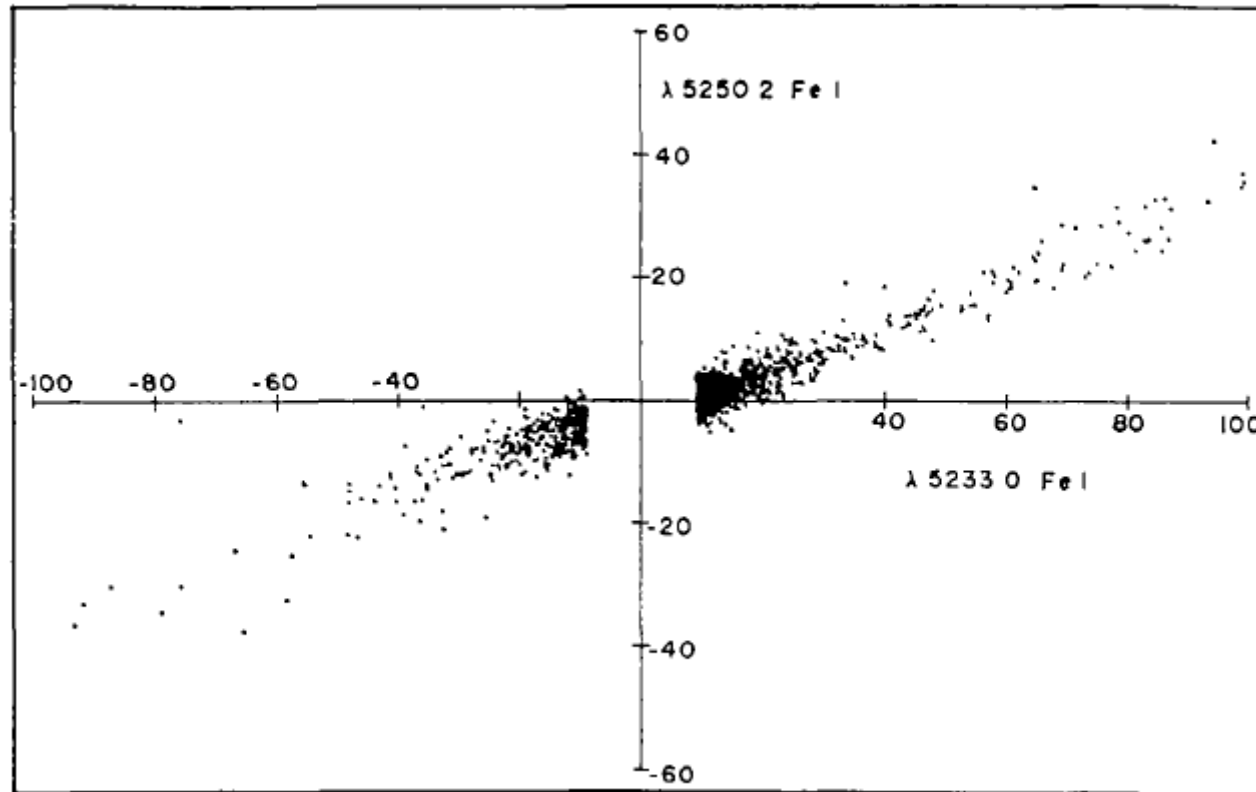


フィルター・マグネトグラフの限界

- 狭帯域フィルターを用いてスペクトル線の翼部の偏光画像を取り、弱い磁場の近似に基づいて磁場を求める装置
→ 速い、簡便
- 実際の太陽大気では磁場は微細磁束管になっている面積の割合 f だけに磁場 B があり、面積 $1-f$ には磁場がない、とする。 f : filling factor
 - quiet sun では $f \ll 1$ 、 $B \sim 1\text{kG}$ である。
 - 磁場のあるなしにかかわらず intensity profile $I(\lambda)$ が同じならば、弱い磁場の近似では $B \rightarrow fB$ とすればよい。磁束が測られていることになる。
 - 実際は磁束管の内外で $I(\lambda)$ が異なる (温度、密度構造が異なる) ので事情はもっと複雑である。
 - g_L の大きなスペクトル線では、 1kG の磁場では弱い磁場の近似が破れる

J.Harvey & W.Livingston: 1969, Solar Physics, 10, 283

5250 Å ($g_L=3$)と5233 Å ($g_L=1.3$)では、 g_L の大きい5250 Åの
ほうが弱い磁場を与える

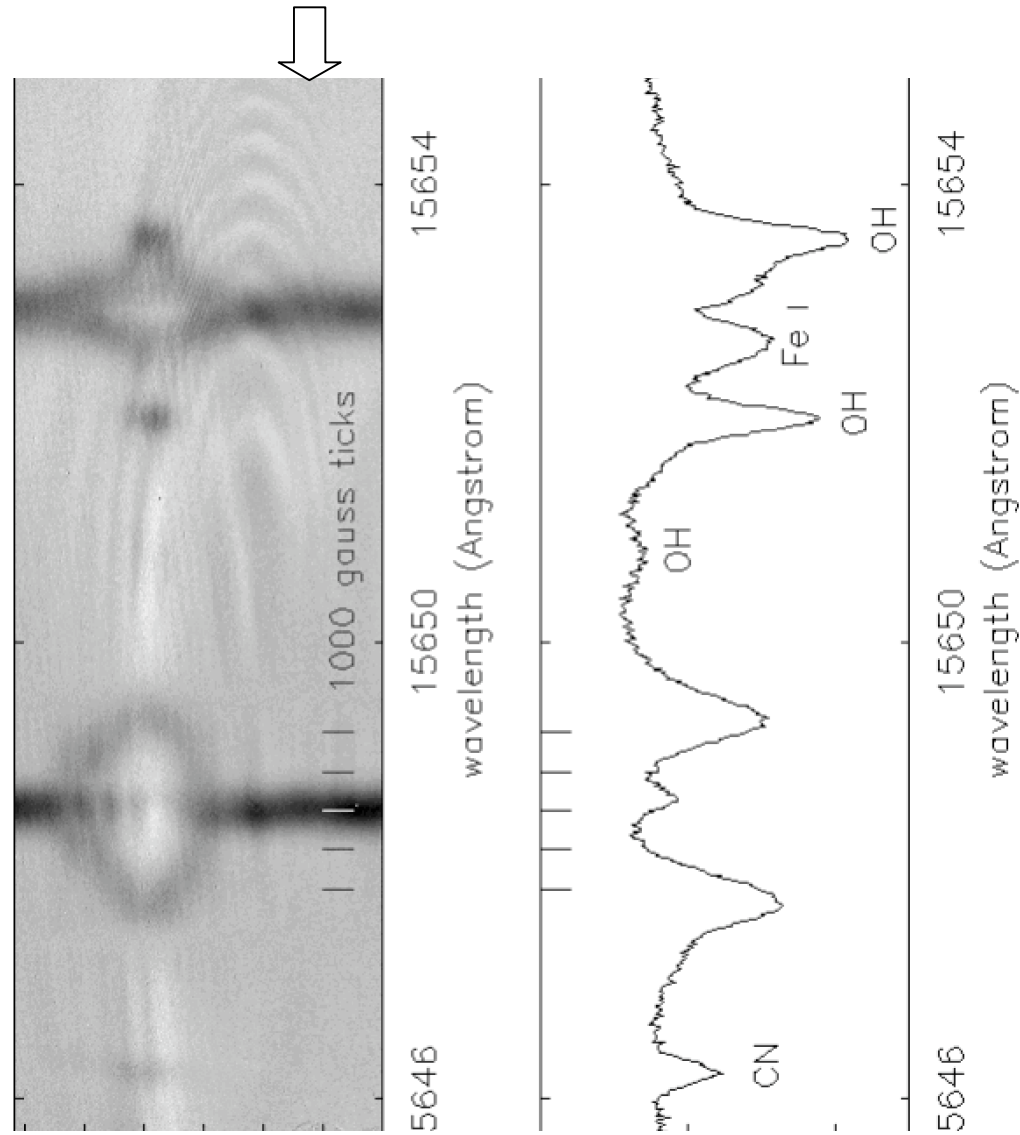


Stokes Polarimeter

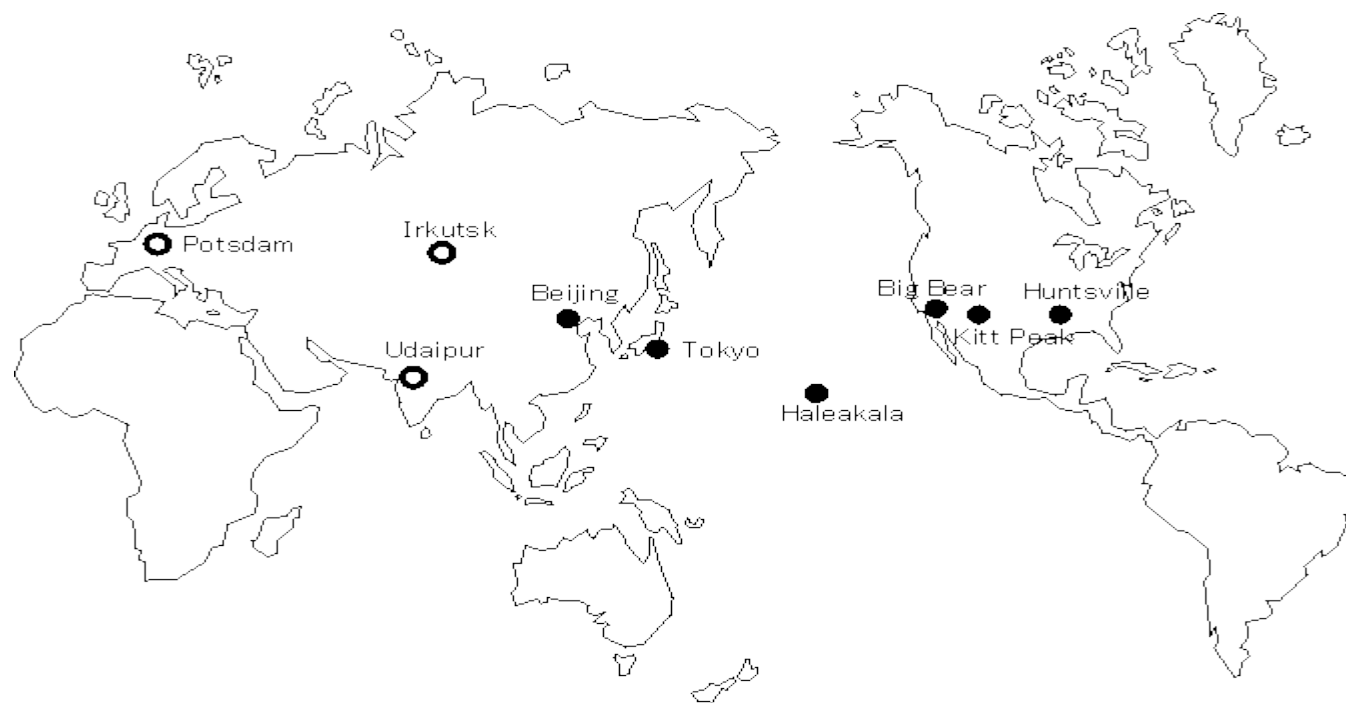
- 分光器でプロフィールを観測 → Stokes Polarimeter
- Unno-Rachkovsky公式の最小二乗あてあめにより磁場とfilling factorを求める (Stokes Inversion)
→ 遅いが正確
- 今後： 赤外領域へ
 - Doppler幅～波長
 - Zeeman分離～波長² → 長波長のほうが有利
 - 赤外Hバンド(1.6μm帯)：可視光の3倍の磁場感度
 - 有望なスペクトル線：Fe I 15648.54 Å、 $g_L=3$
 - 微細磁束管の磁場～1kGに対し完全にZeeman分離する → 解釈の不確定性が少ない

T.Sakurai et al. 2001, PASJ 53, 923

東大木曾観測所 PtSiカメラ(KONIC)を飛騨天文台に持ち込み観測

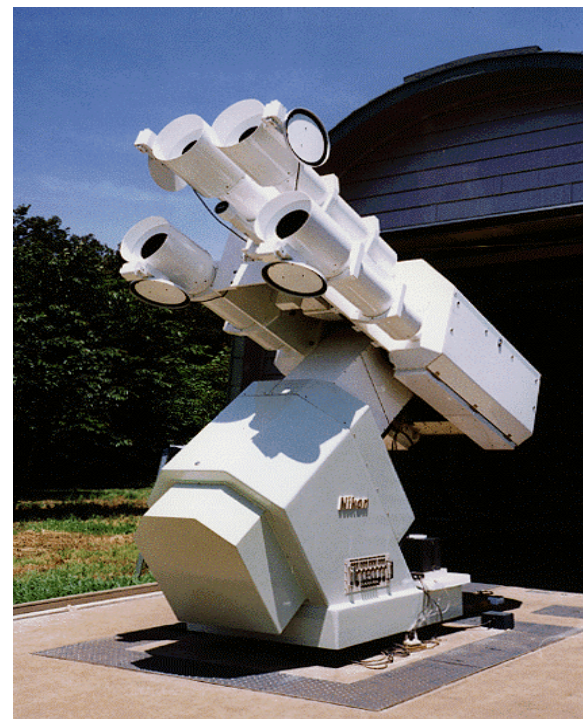
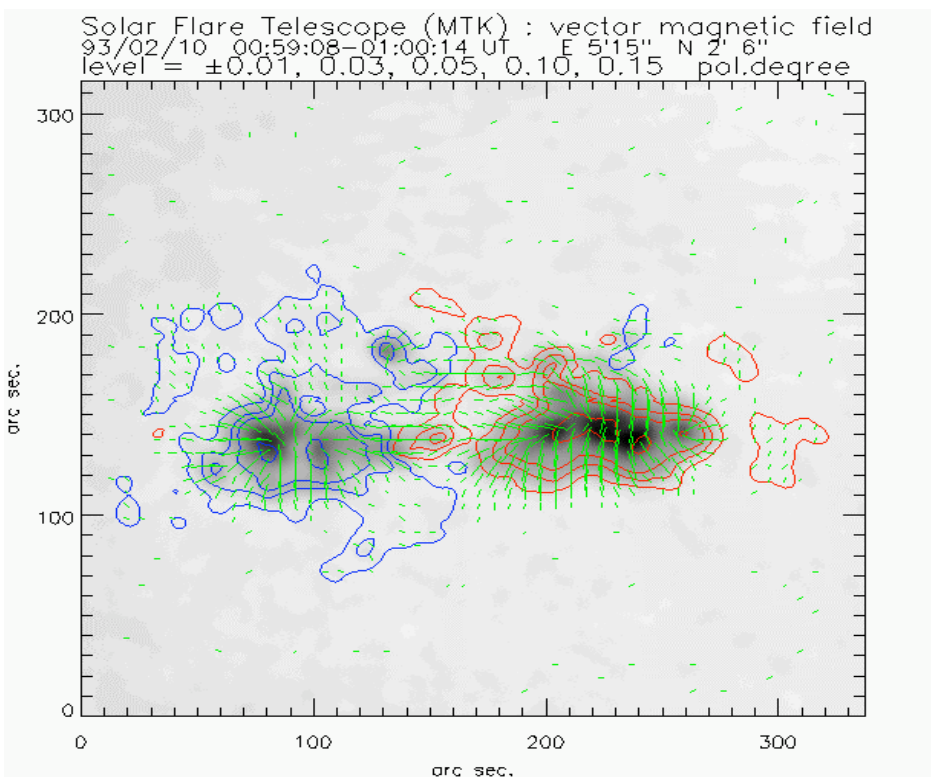


世界各地のベクトルマグネトグラフ



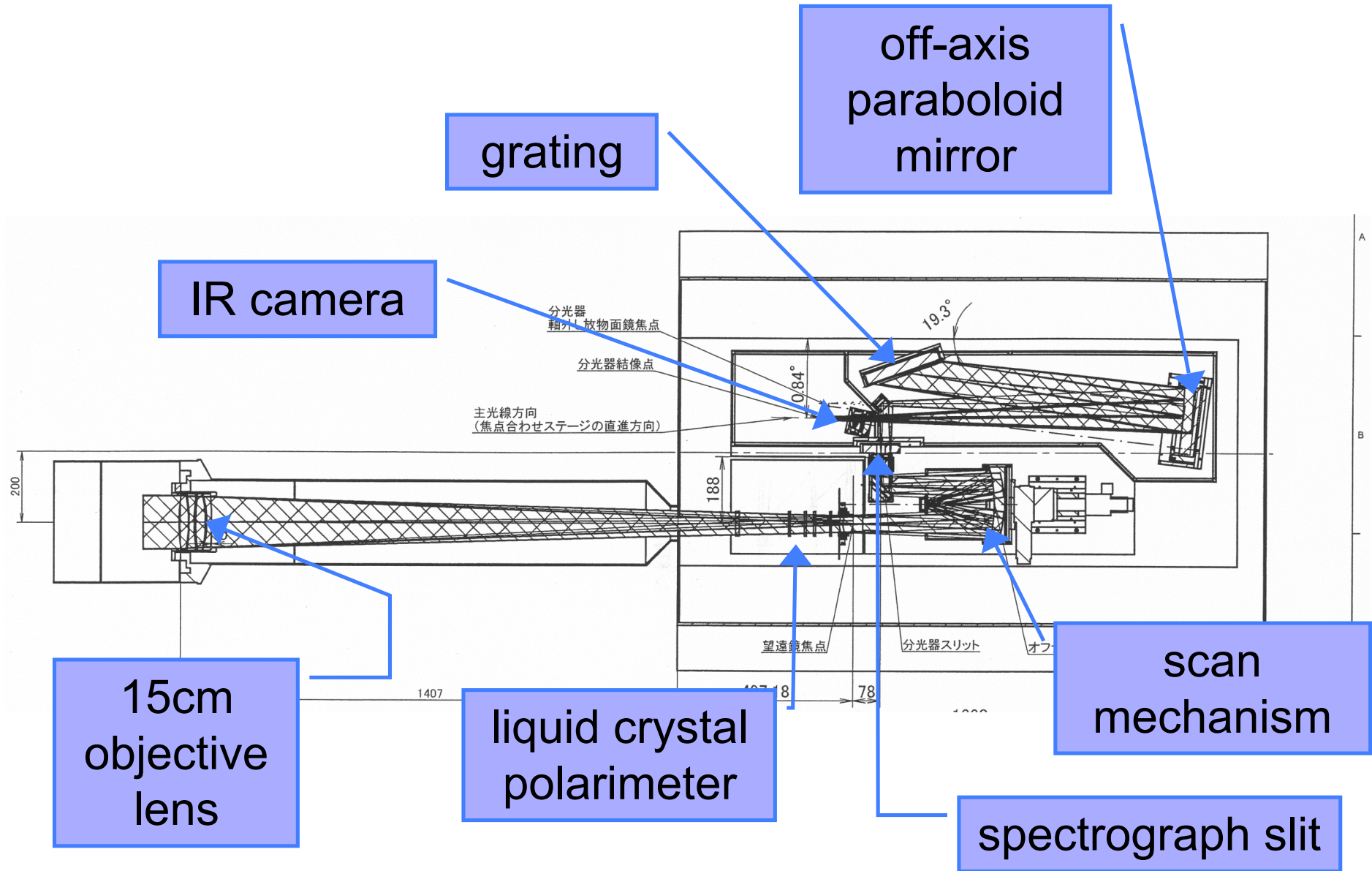
Hinode/SOT

国立天文台三鷹キャンパス 太陽フレア望遠鏡 (フィルターマグネトグラフ、1992-)

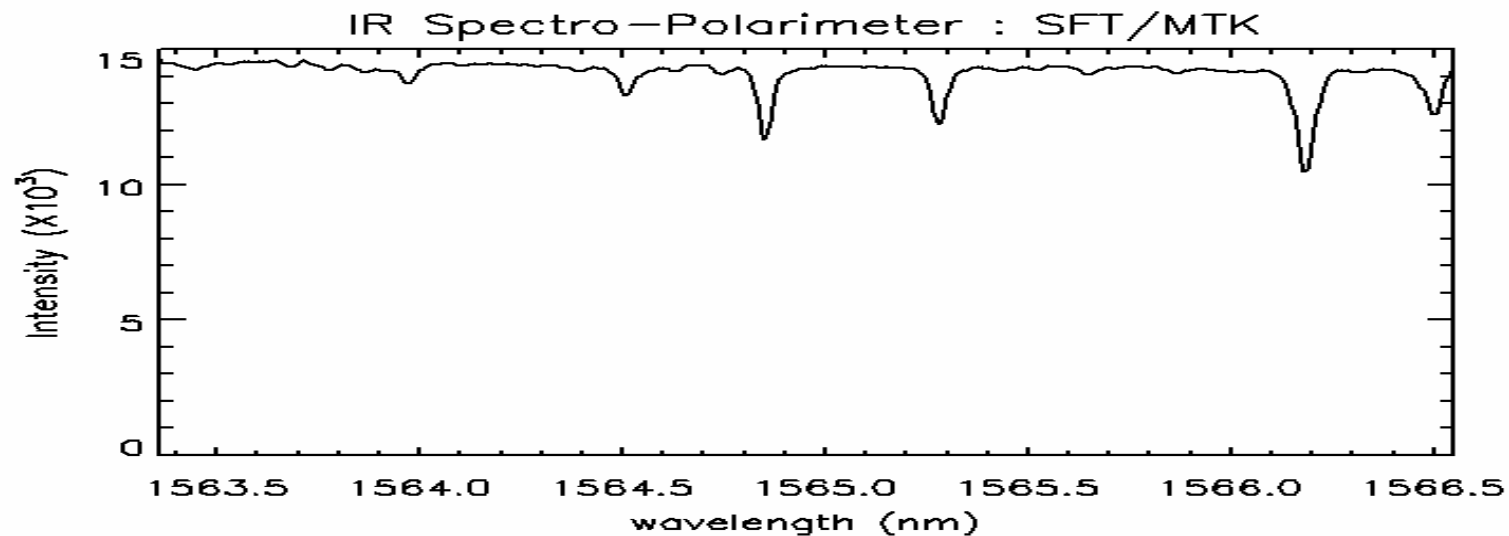


狭帯域フィルターを使用

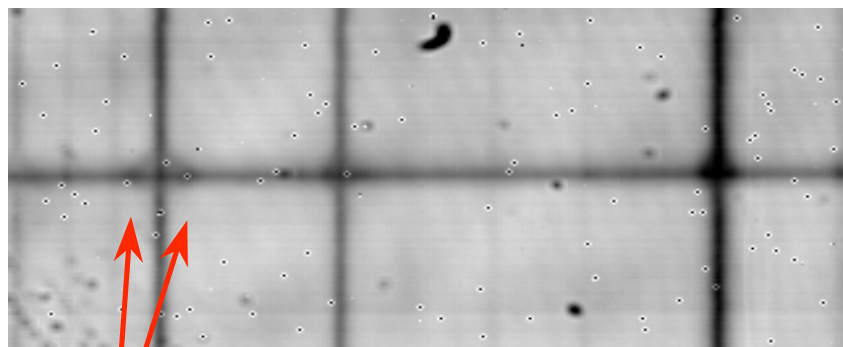
Stokes Polarimeterに改造中



Fe I 1.56 μm ファーストライト (2008年4月)



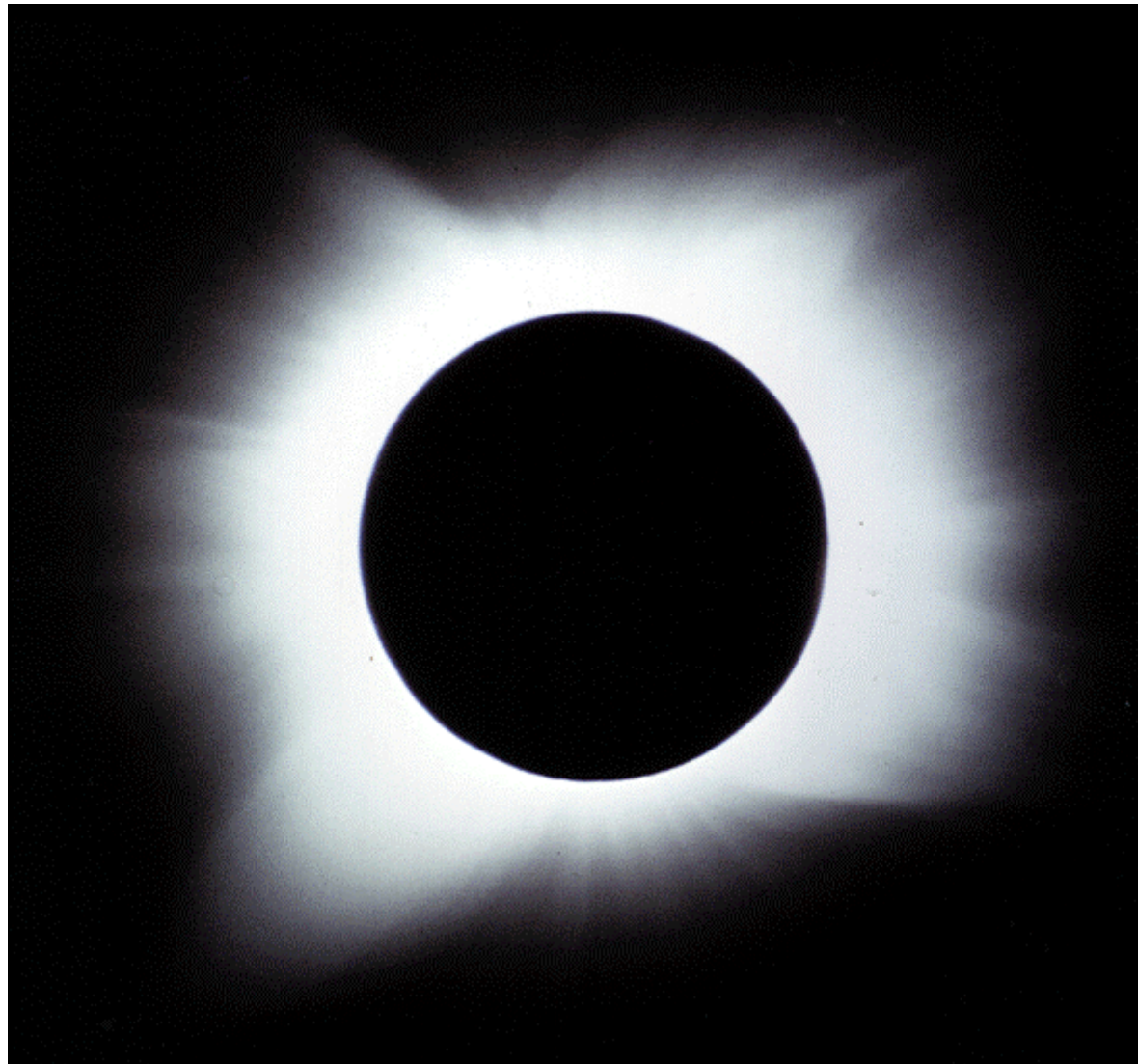
黒点



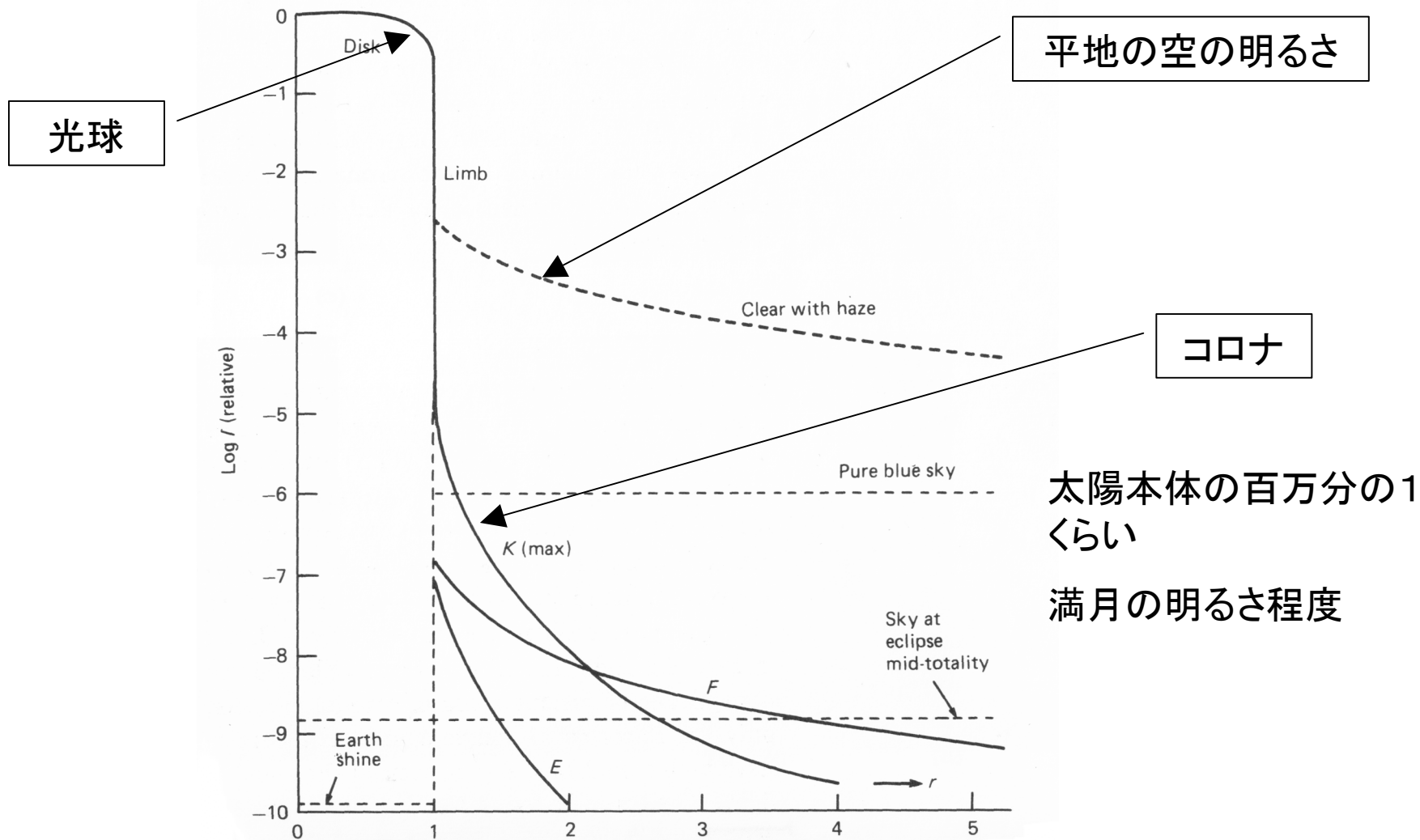
Zeeman分離

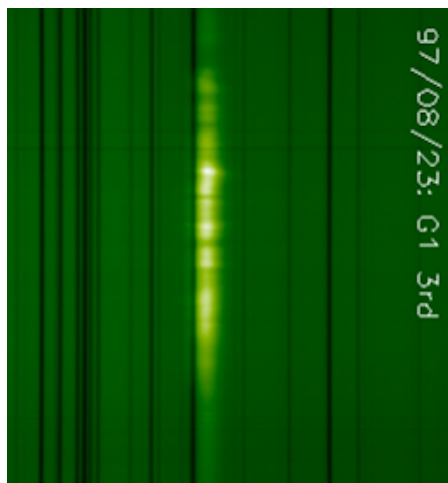
波長

皆既日食のコロナ

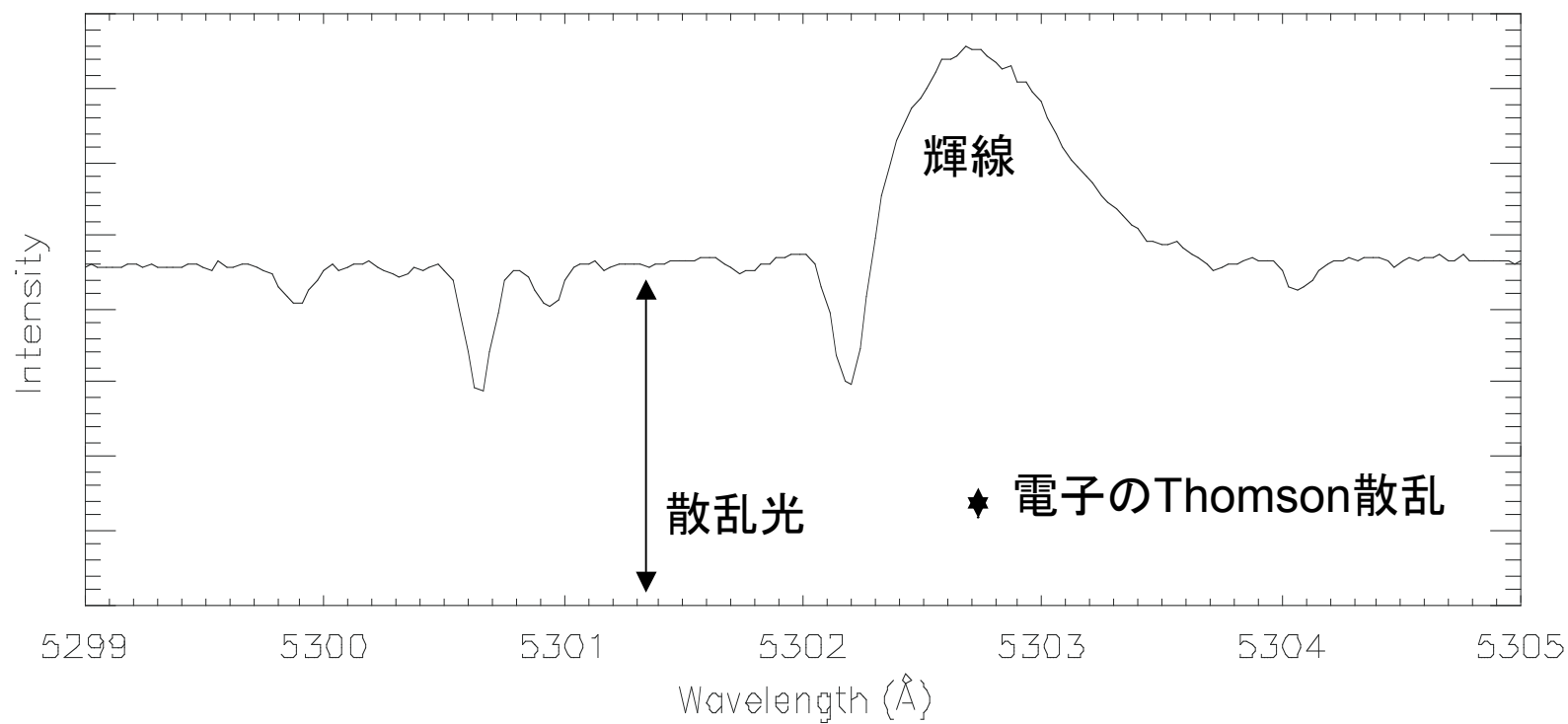


コロナの明るさと空の明るさ





この波長だけ取り出す
(狭帯域フィルター)



コロナグラフ (B.Lyot, 1930)

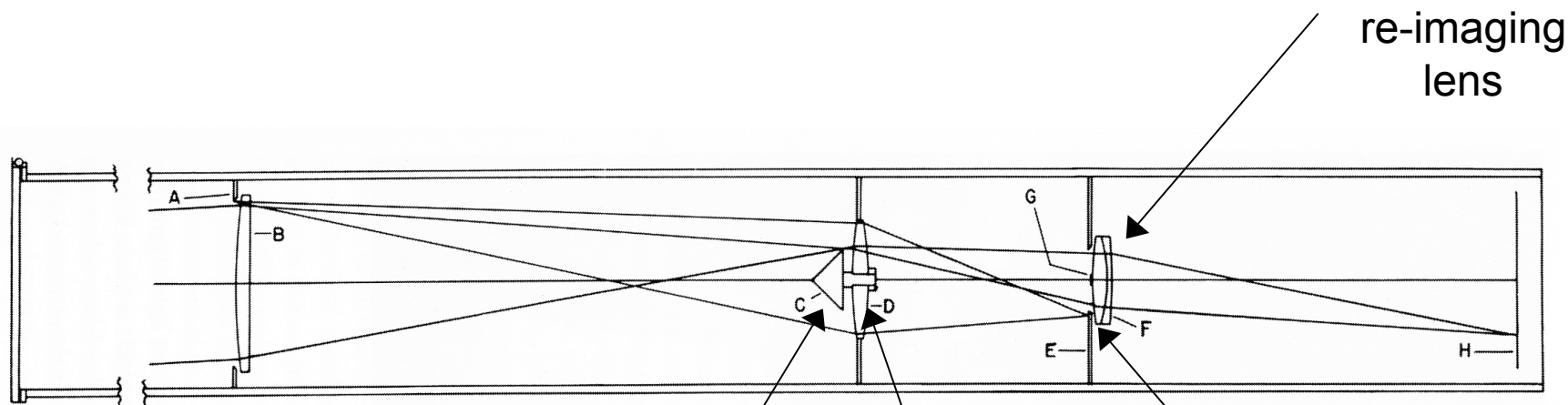


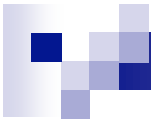
Fig. 1-15 Optical parts of a Lyot coronagraph. See text for explanation. By permission of the University of Chicago Press.

遮蔽円盤
(occulting disk)

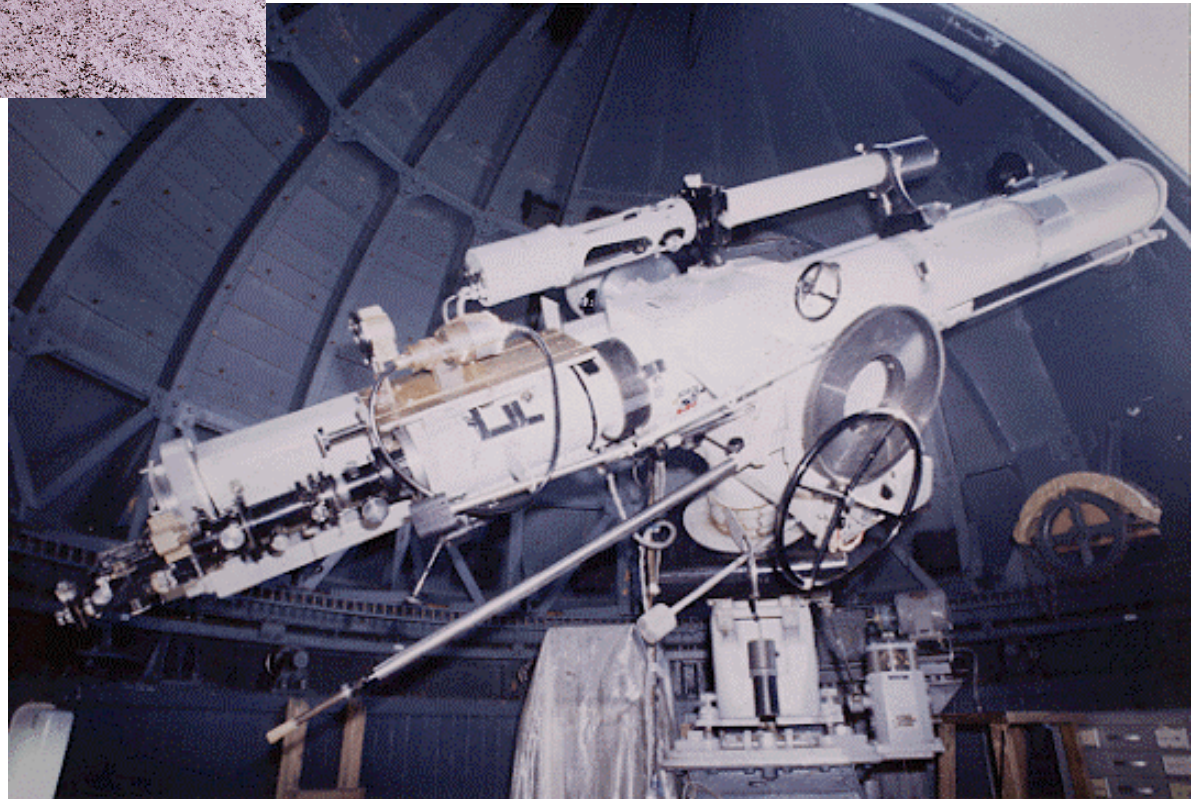
field lens

Lyotの絞り
(Lyot stop)

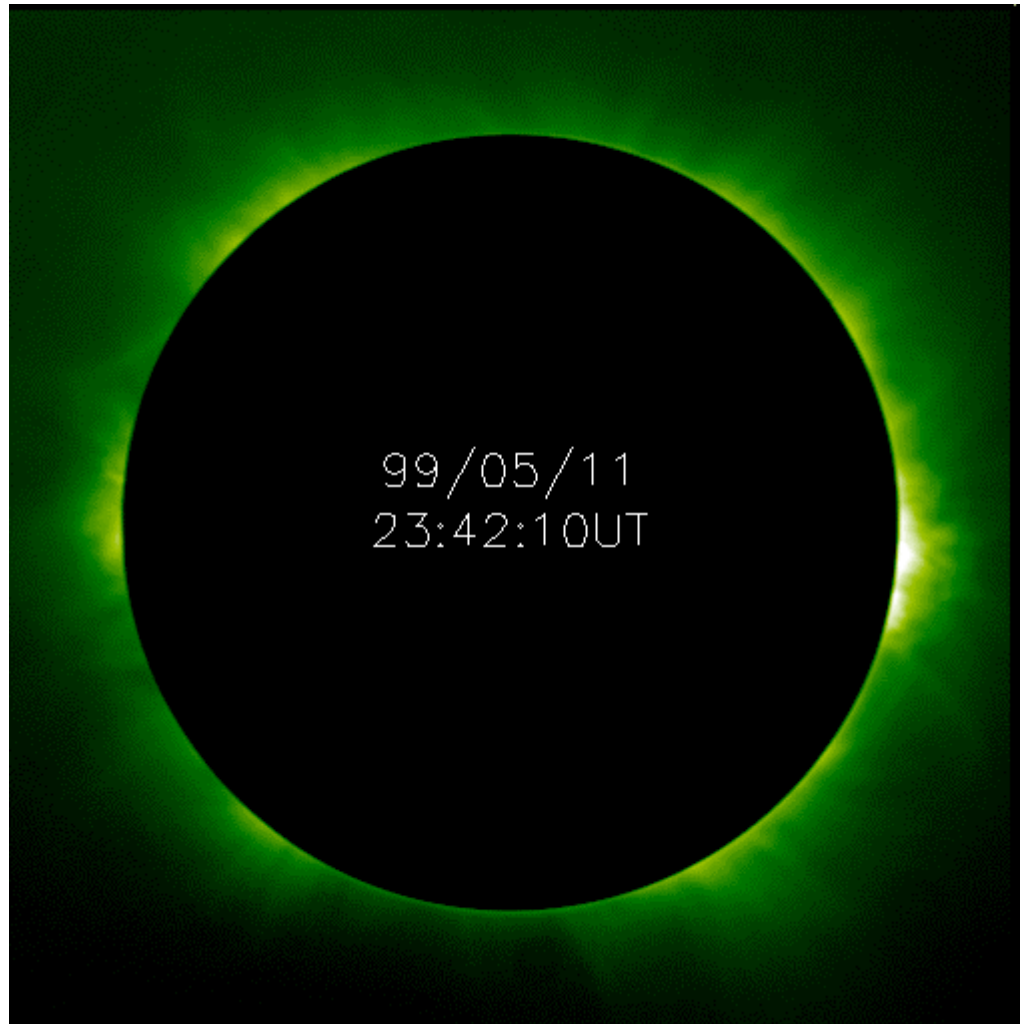
re-imaging
lens



国立天文台 乗鞍コロナ観測所 (1949年建設、海拔2876m)



乗鞍コロナ観測所 コロナグラフ画像



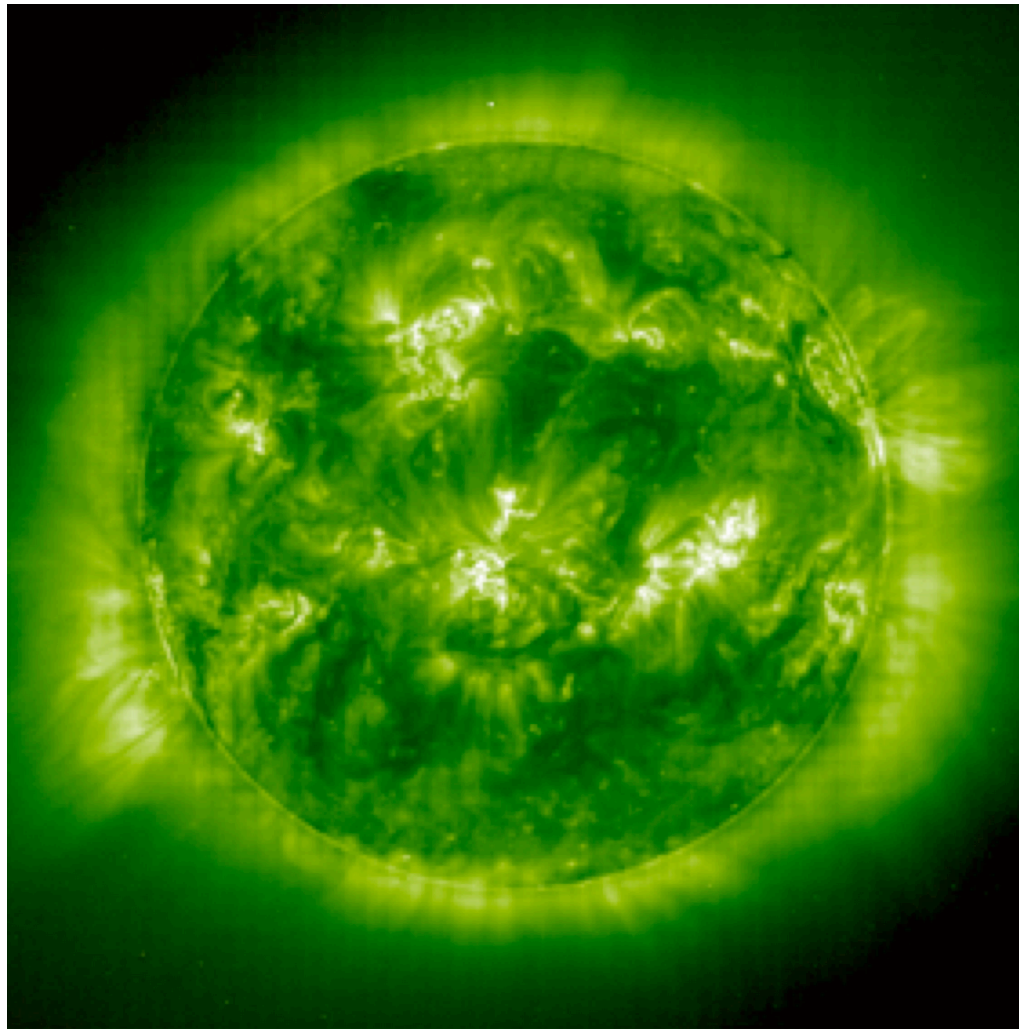
原理的に
縁の外しか
見えないのが
X線観測との差

世界各地のコロナグラフ



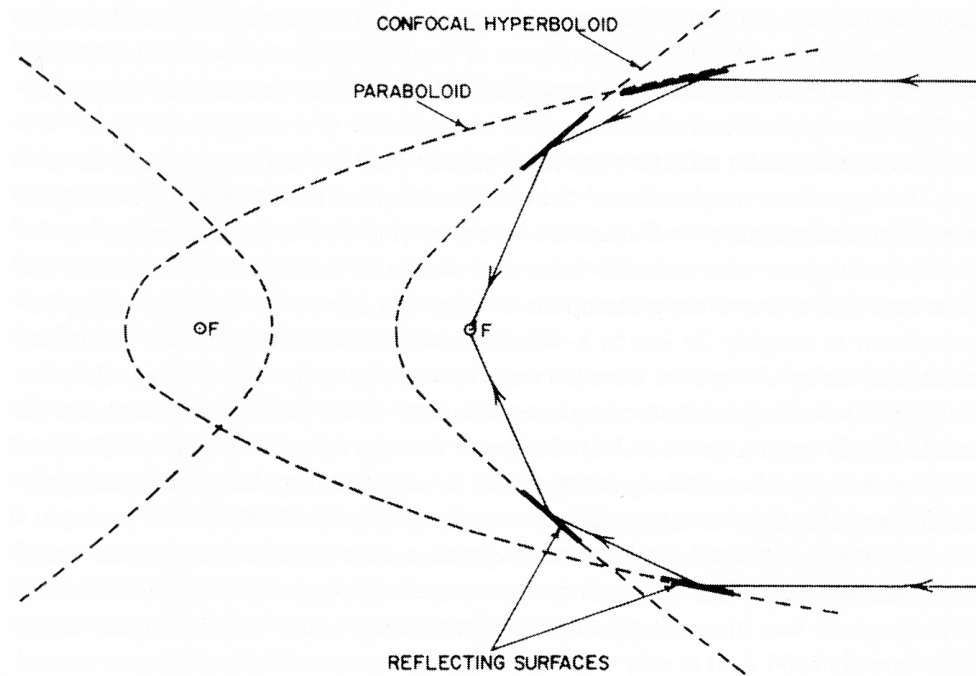
SOHO/LASCO

多層膜直入射XUV望遠鏡 (100~300 Å)



SOHO/EIT
195 Å

斜入射X線望遠鏡 (波長 数Åまで)

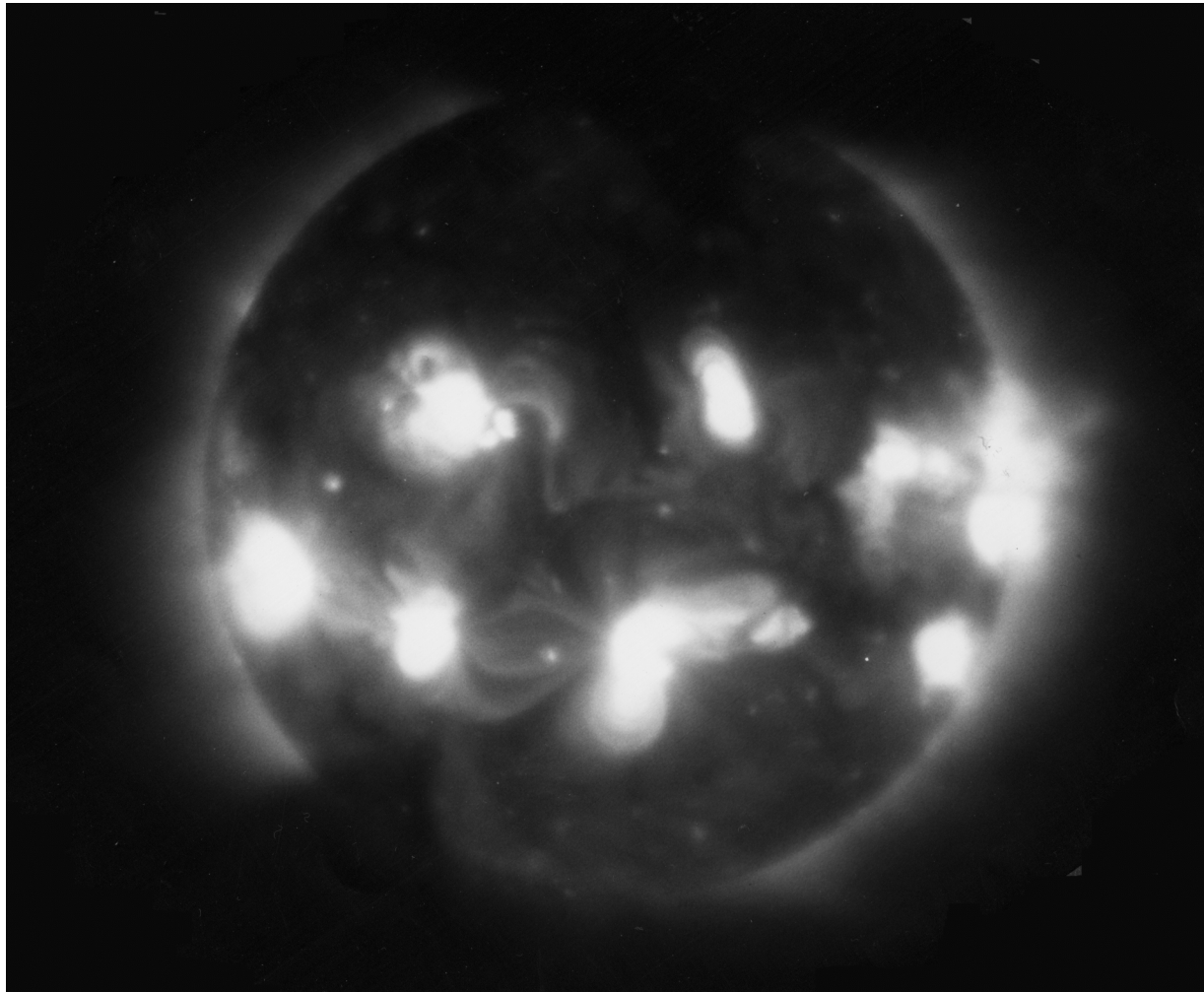


100万度 \leftrightarrow 86eV \leftrightarrow 144 Å

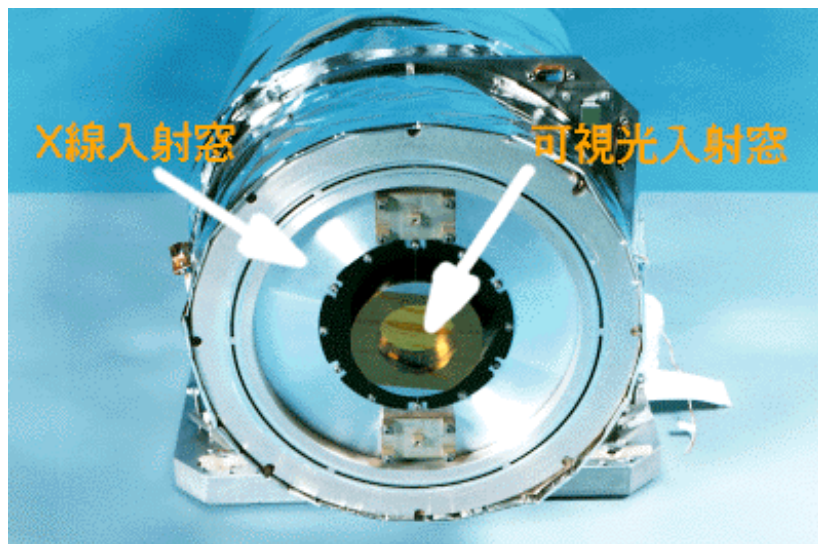
1200万度 \leftrightarrow 1keV \leftrightarrow 12 Å

Skylab (1973-74)

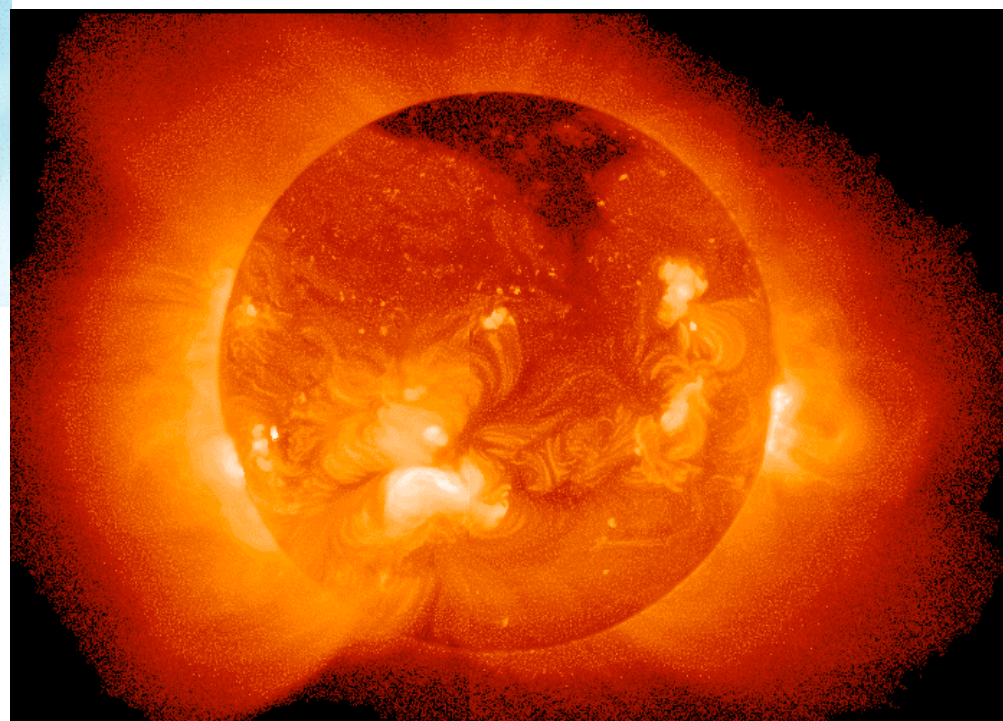
検出器はX線フィルム



Yohkoh/SXT



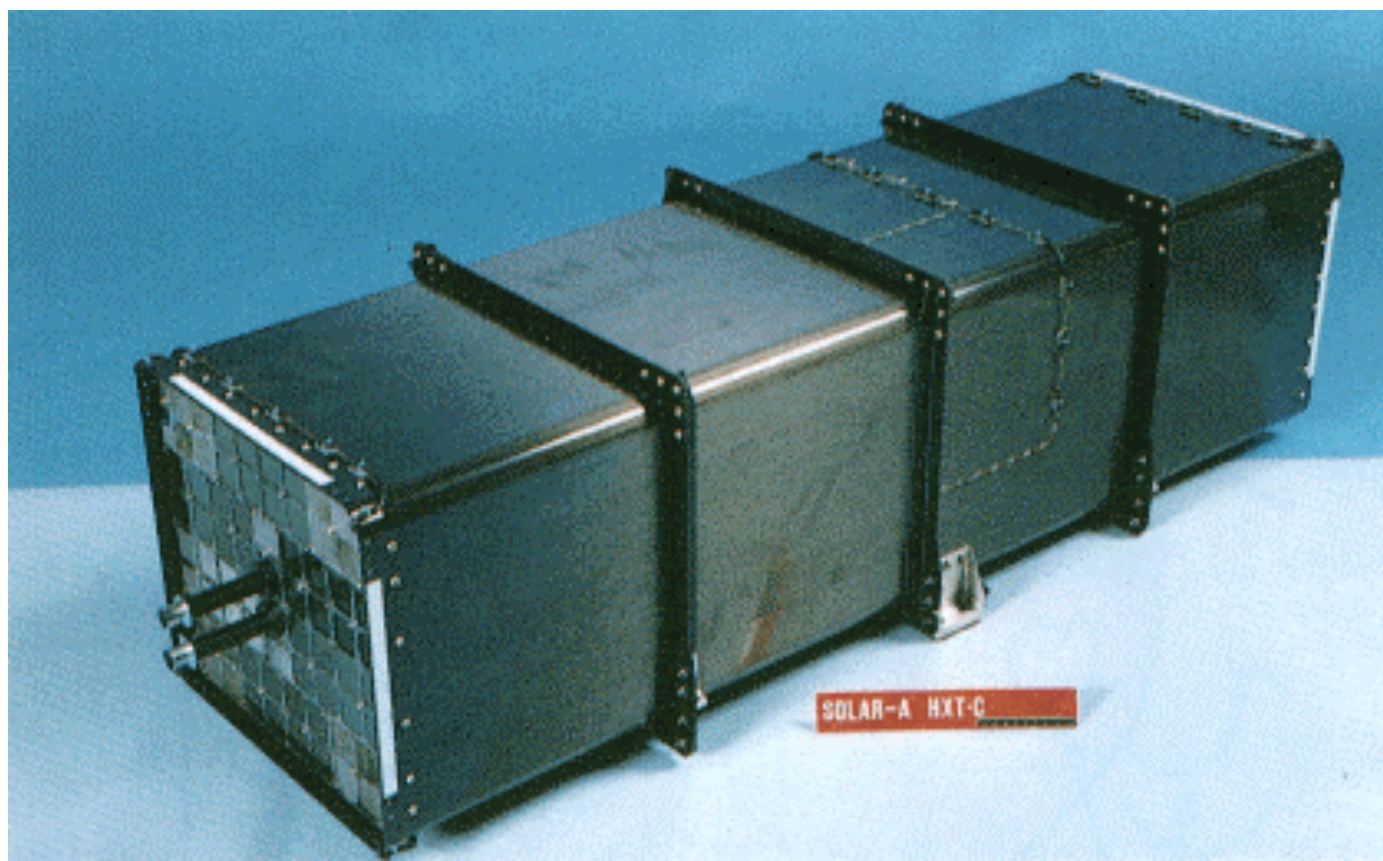
検出器はCCD



Yohkoh/HXT (すだれコリメータ)

14 - 93 keV

硬X線 非熱的電子(加速された電子)の制動放射





電波放射

- 熱的、非熱的電子の制動放射
- 磁場に巻きつく運動によるgyro emission
- プラズマ波から電波への変換
 - MHD衝撃波が励起するプラズマ波によるもの
Type II radio bursts
 - 電子ビームが励起するプラズマ波によるもの
Type III radio bursts
 - 振動数 $\sim \sqrt{n_e}$

電波 動スペクトル計

NiCT Hiraizo: HiRAS



HiRAS-1



HiRAS-2



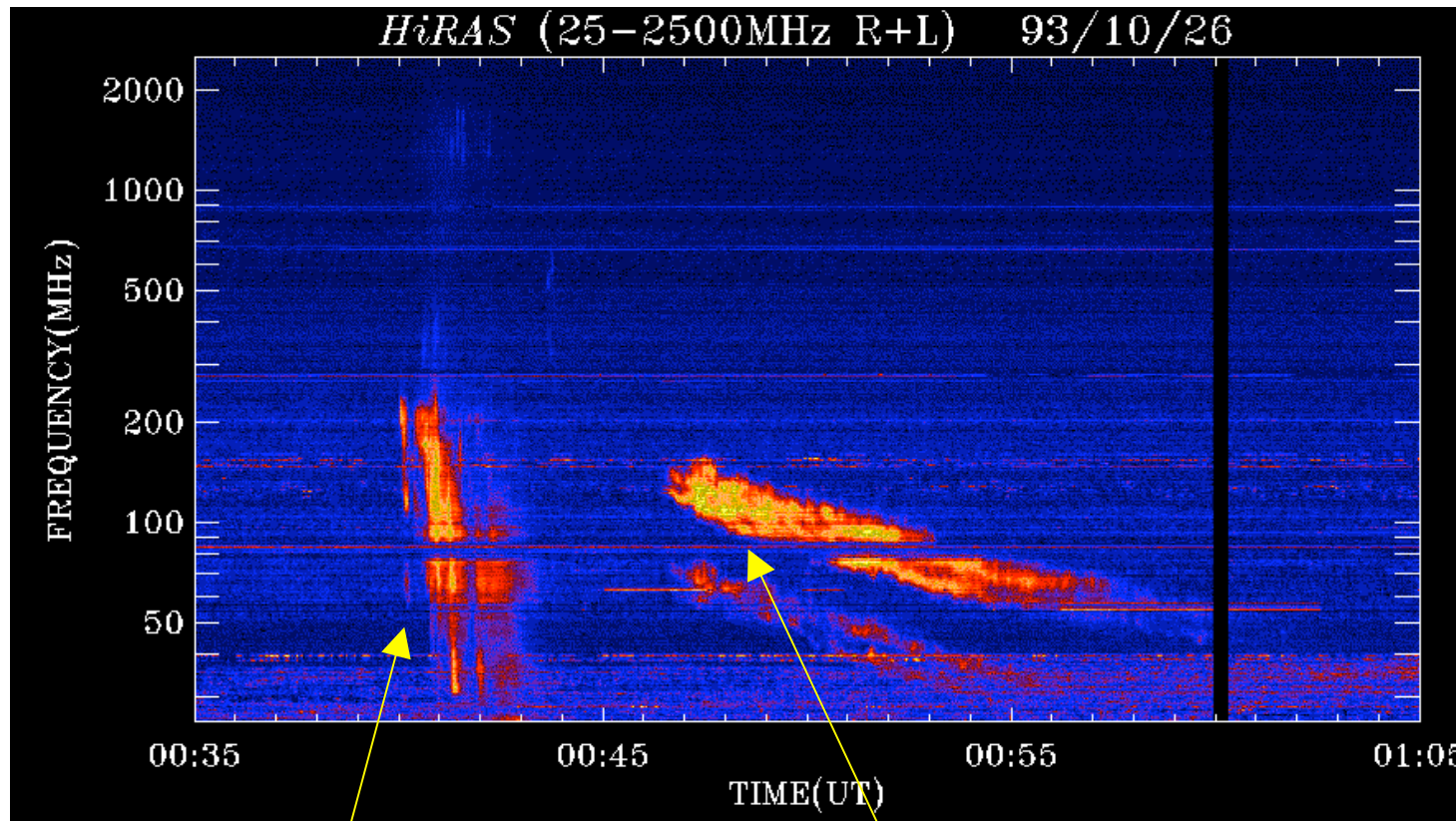
HiRAS-3



2.8GHz Antenna

	HiRAS-1	HiRAS-2	HiRAS-3	2.8GHz Antenna
直径	----	10 m	6 m	2 m
周波数帯域	25-70MHz	70-500MHz	500-2500MHz	2800MHz

Type II and Type III Bursts

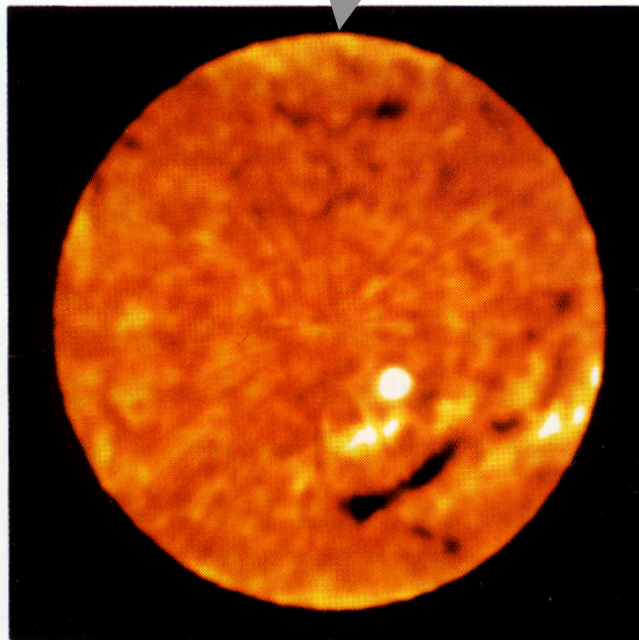


Type III
burst

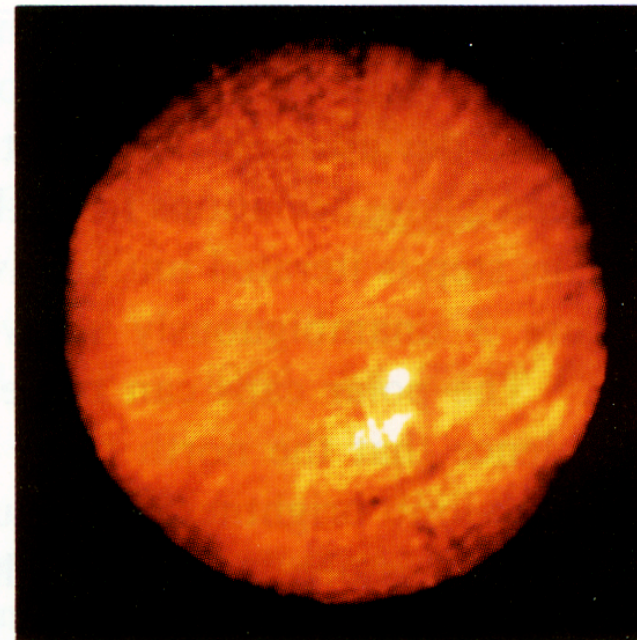
Type II
burst

Kosugi, Ishiguro, and Shibasaki: PASJ 38, 1, 1986

- Discovery of polar cap brightening



1984 JULY 22(36 GHz)



1984 JULY 22(98 GHz)



太陽電波干渉計（電波ヘリオグラフ、1992年）
口径80cmのアンテナを84台

太陽の電波画像(周波数17GHz)

