

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—
2009.11.27

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51年4月 京都大学理学部入学
昭和56年3月 京都大学理学部卒業
昭和56年4月 京都大学大学院理学研究科宇宙物理学専門課程修士課程入学
昭和58年4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入学
昭和62年 5月 1日 東京大学東京天文台助手
昭和63年 7月 1日 文部科学省 国立天文台に改組、同助手
平成 8年 1月 1日 文部科学省 国立天文台助教授に昇任
平成16年 4月 1日 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 1日 京都大学大学院理学研究科 教授

専門:

太陽の光学観測、装置開発

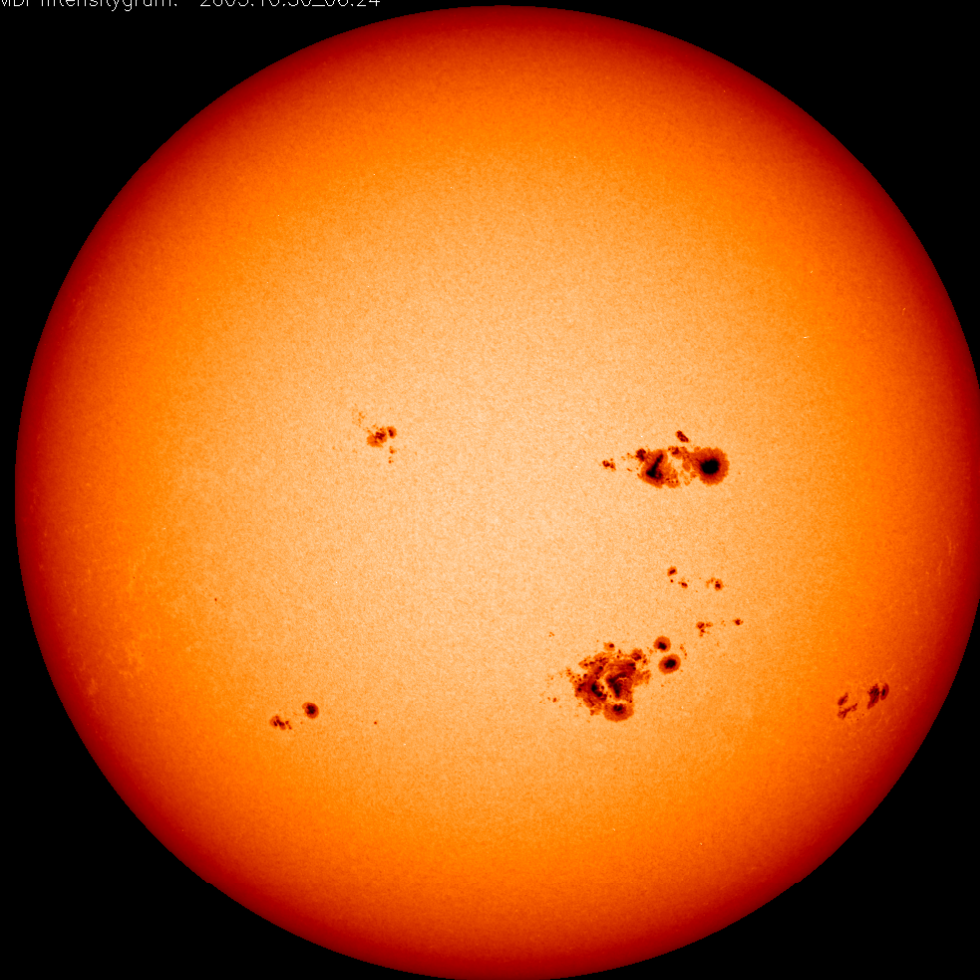
関わったプロジェクト:

飛騨天文台、ひので可視光望遠鏡、乗鞍コロナ観測所、国立天文台三鷹望遠鏡

いろいろな光で見た太陽

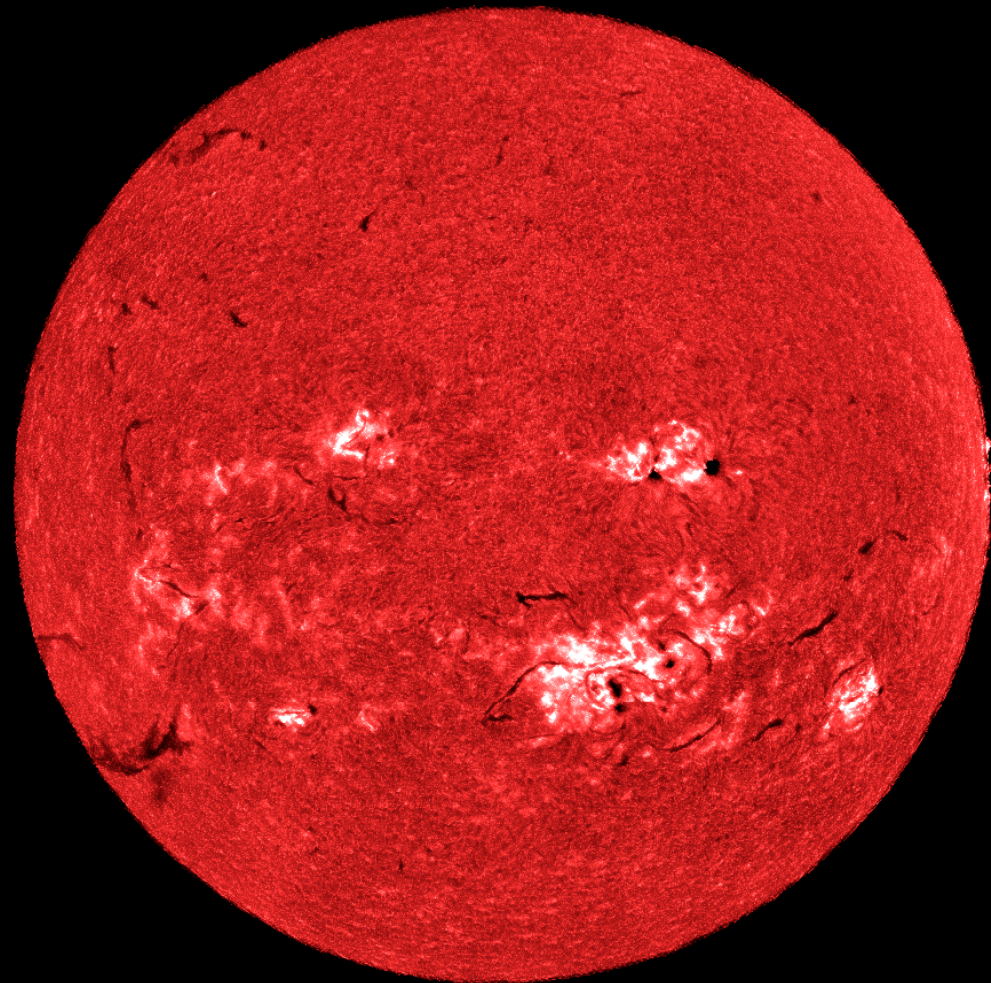
目で見た太陽 (光球=6000度)

MDI Intensitygram: 2003.10.30_06:24



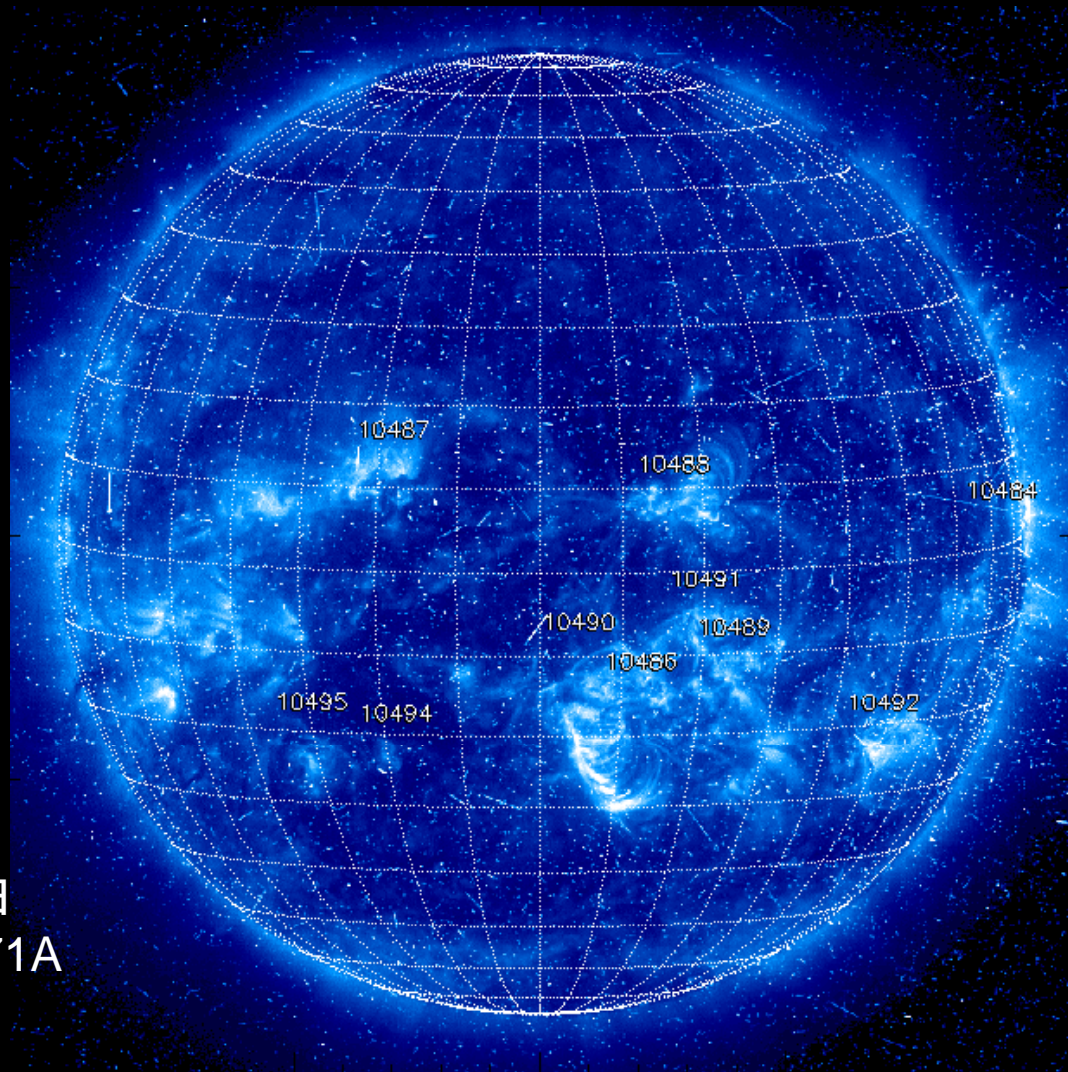
SOHO
(NASA&ESA)

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)



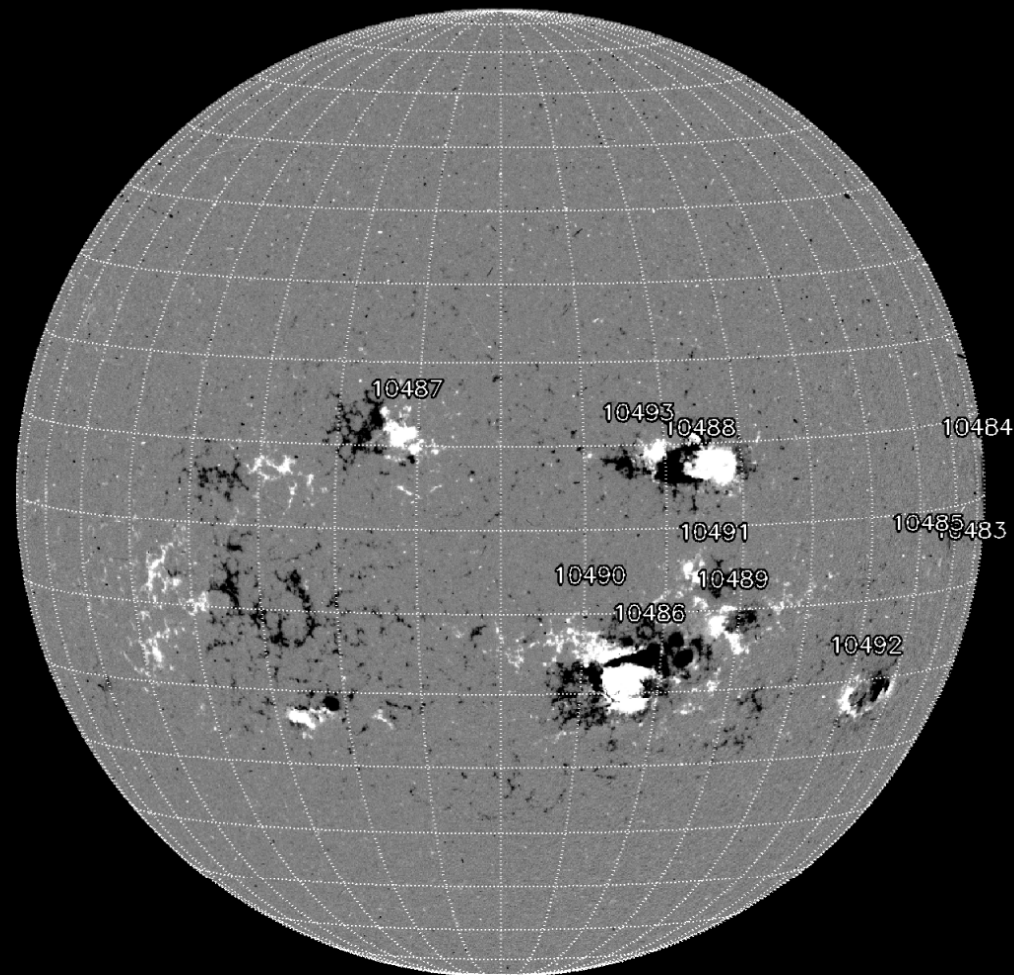
2003年10月30日
京大飛騨天文台
SMART望遠鏡

極紫外線で観た太陽 コロナ 100万度



2003年10月30日
EIT Fe IX/X, 171A

「偏光」で観た太陽 磁場

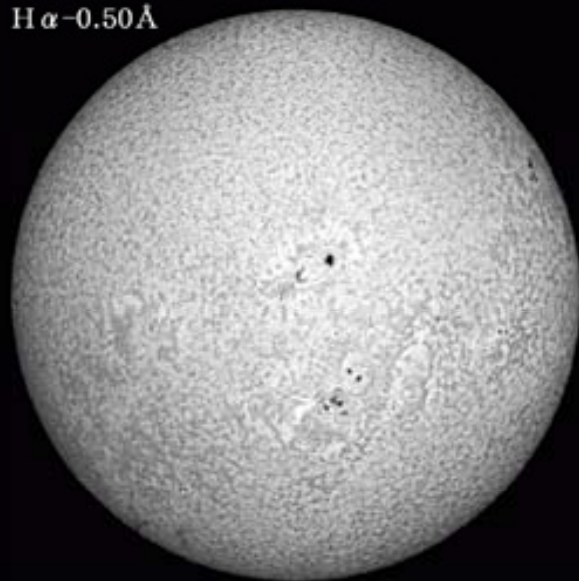


2003年10月30日
MDI 磁場

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

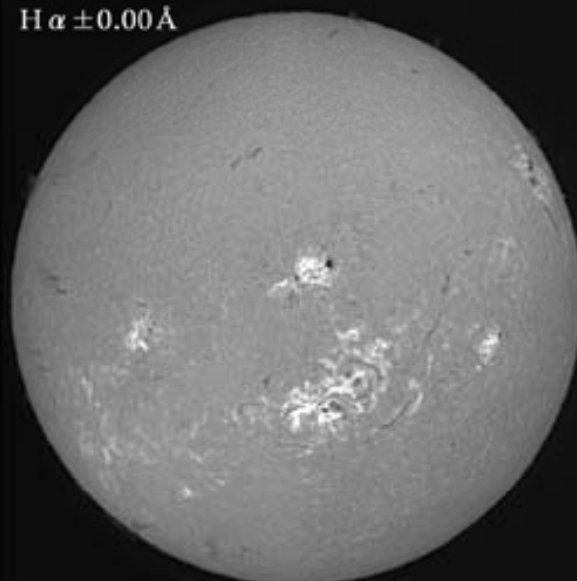
2003.10.29 01:19 UT

$H\alpha - 0.50\text{\AA}$



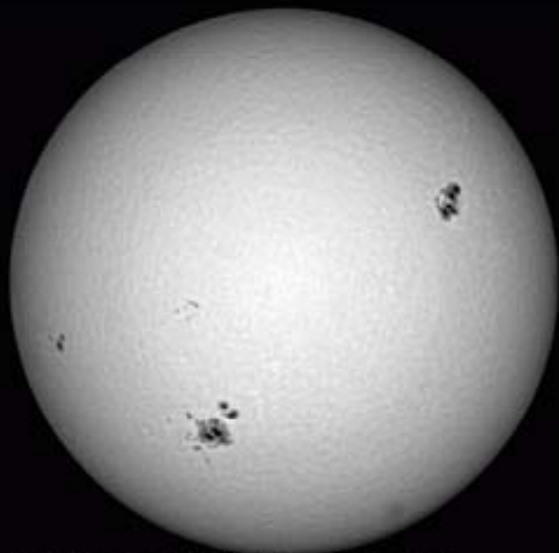
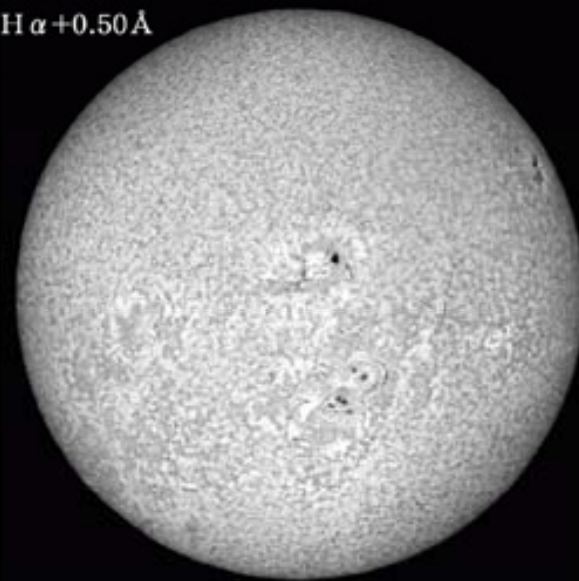
2003.10.29 00:42 UT

$H\alpha \pm 0.00\text{\AA}$

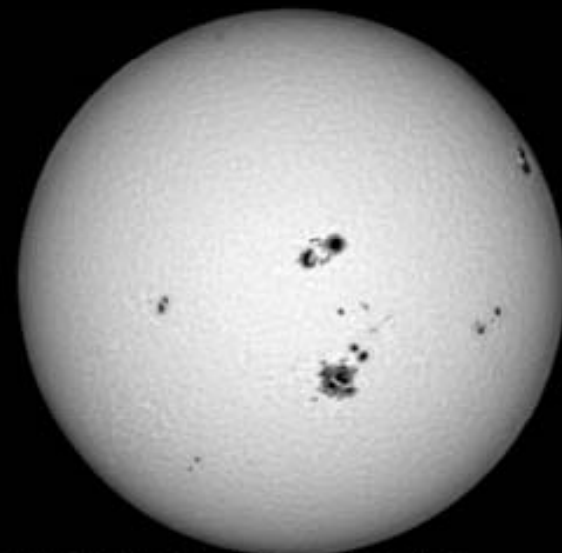


2003.10.29 01:39 UT

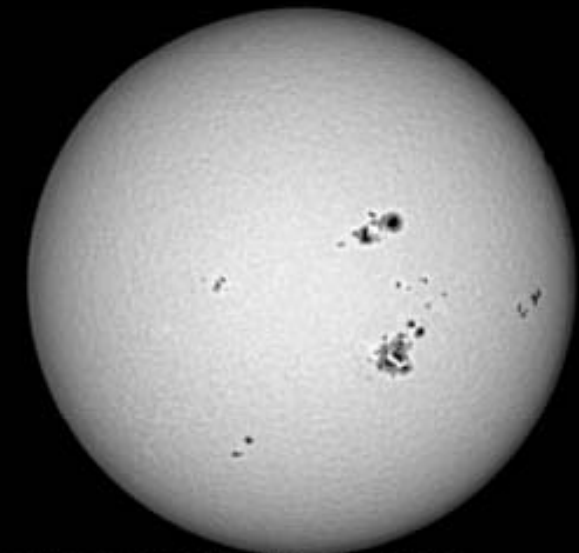
$H\alpha + 0.50\text{\AA}$



2003.10.27 00:34 UT at 6302.43 \AA



2003.10.29 06:03 UT at 6302.43 \AA



2003.10.30 02:48 UT at 6302.43 \AA

なぜ光の種類によって見え方が異なるか？

- ・物質は温度によって異なる波長の光を出すから
- ・光の波長によって透明度が異なるから
- ・偏光：光をつくる領域に異方性があるから

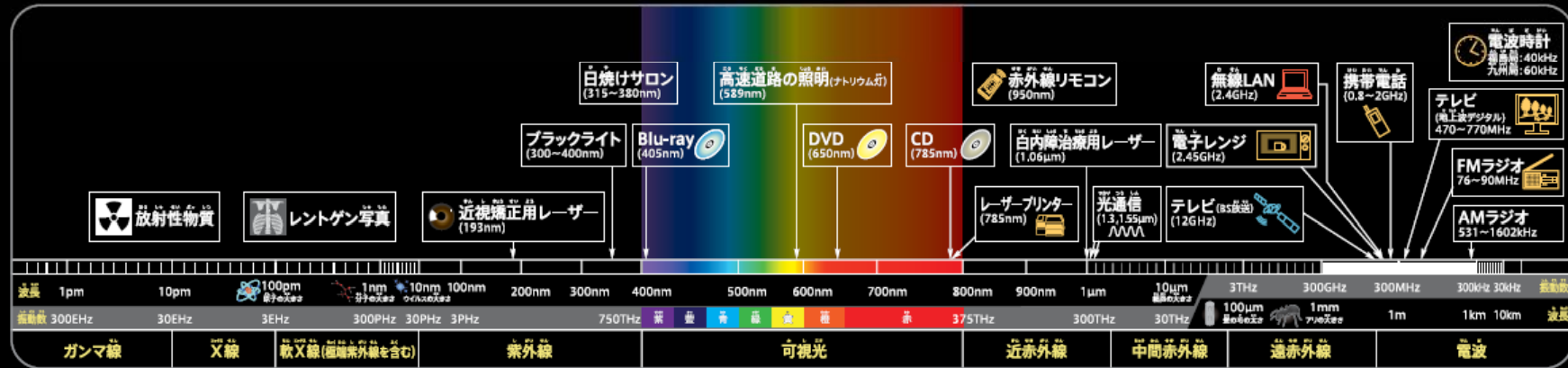
光がどうやってつくられるかを理解することが、
天文学の基礎

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

京都大学附属天文台で撮影された太陽スペクトル
Kyo Univ. Astr. Obs. (KAO) Japan

This image was taken by a Horizontal Spectrograph of the Dornika Solar Telescope (DST) at Hida Observatory, Graduate School of Science, Kyoto University, JAPAN



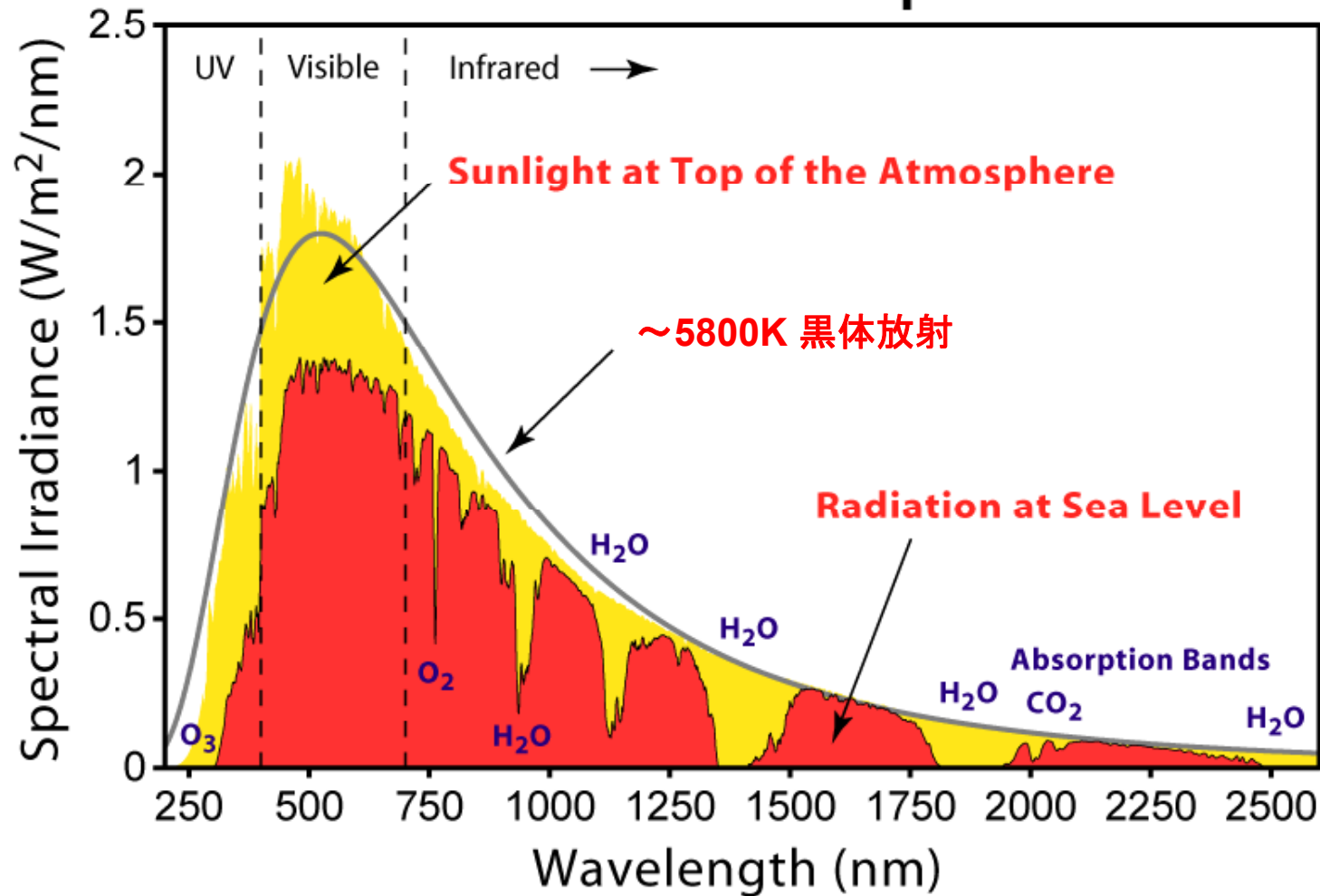
光は、空にかかる虹のように、赤から紫までの色に分けることができます。ニュートンは、私たちが目にする光が、いろいろな色の光が混ざったものであることを明らかにしました。光は波の性質をもっていることがわかっていますが、いちばん波長の長い光が赤、短い光が紫になります。

目に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

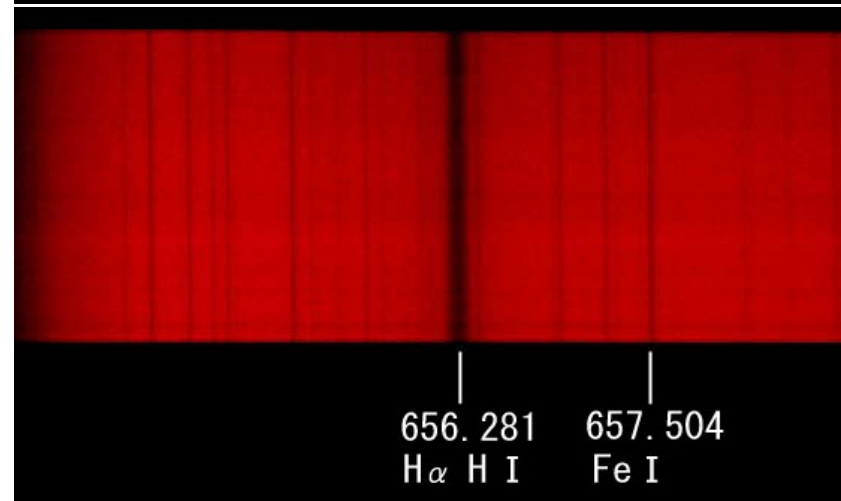
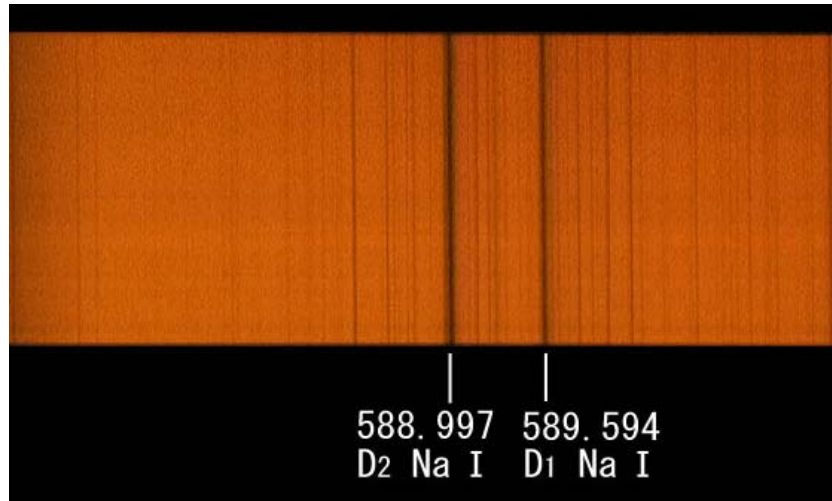
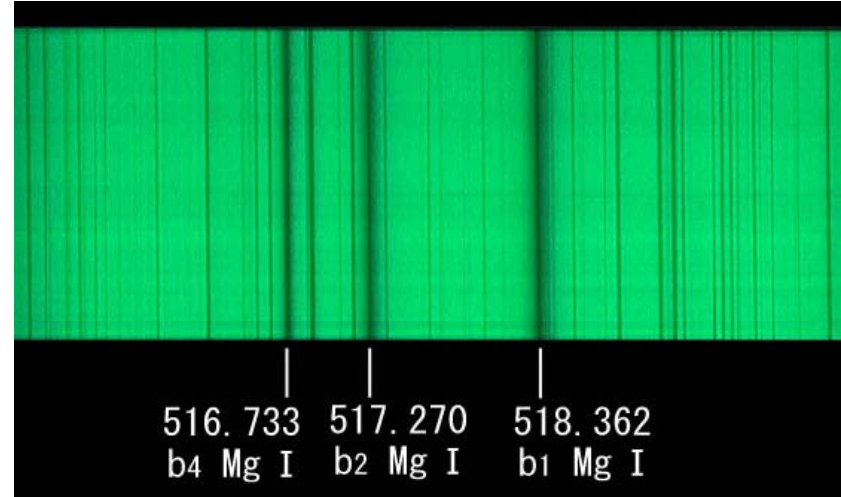
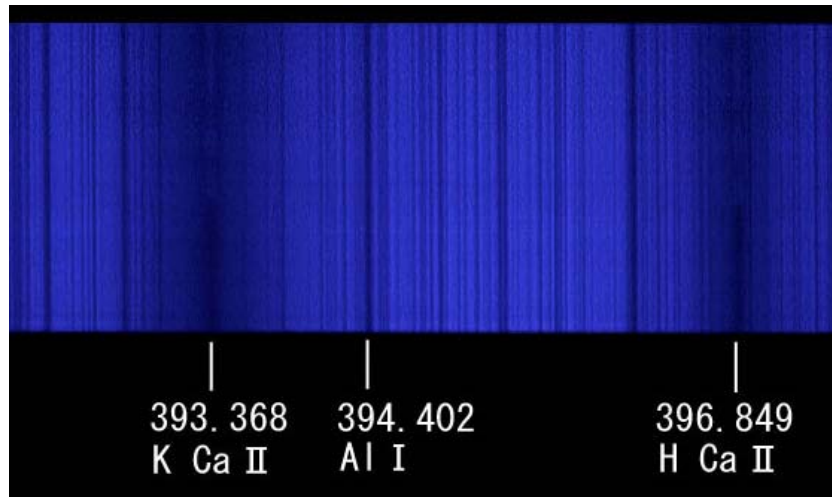
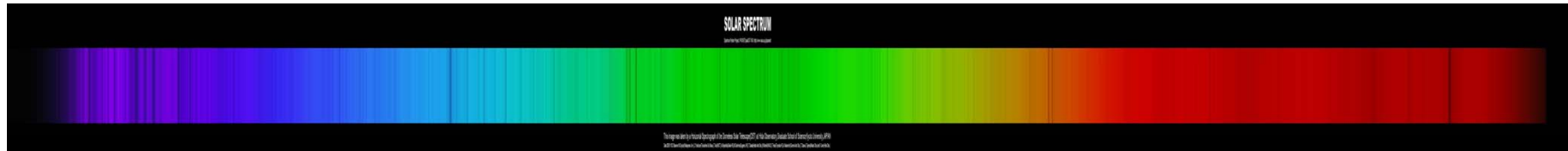
Solar Radiation Spectrum



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

◆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)



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

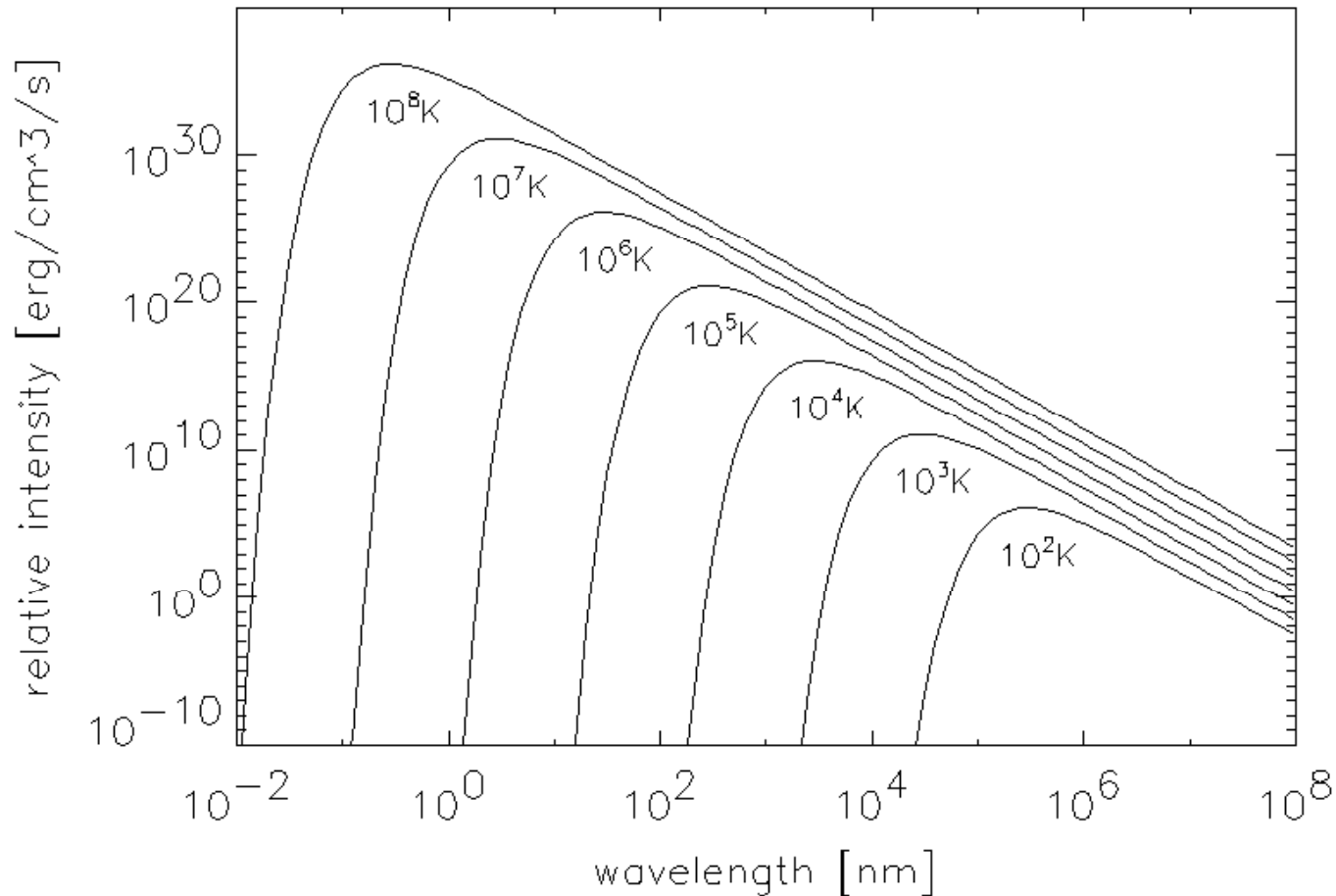
(磁場、電場、輻射場の異方性、、、)

スペクトルのでき方

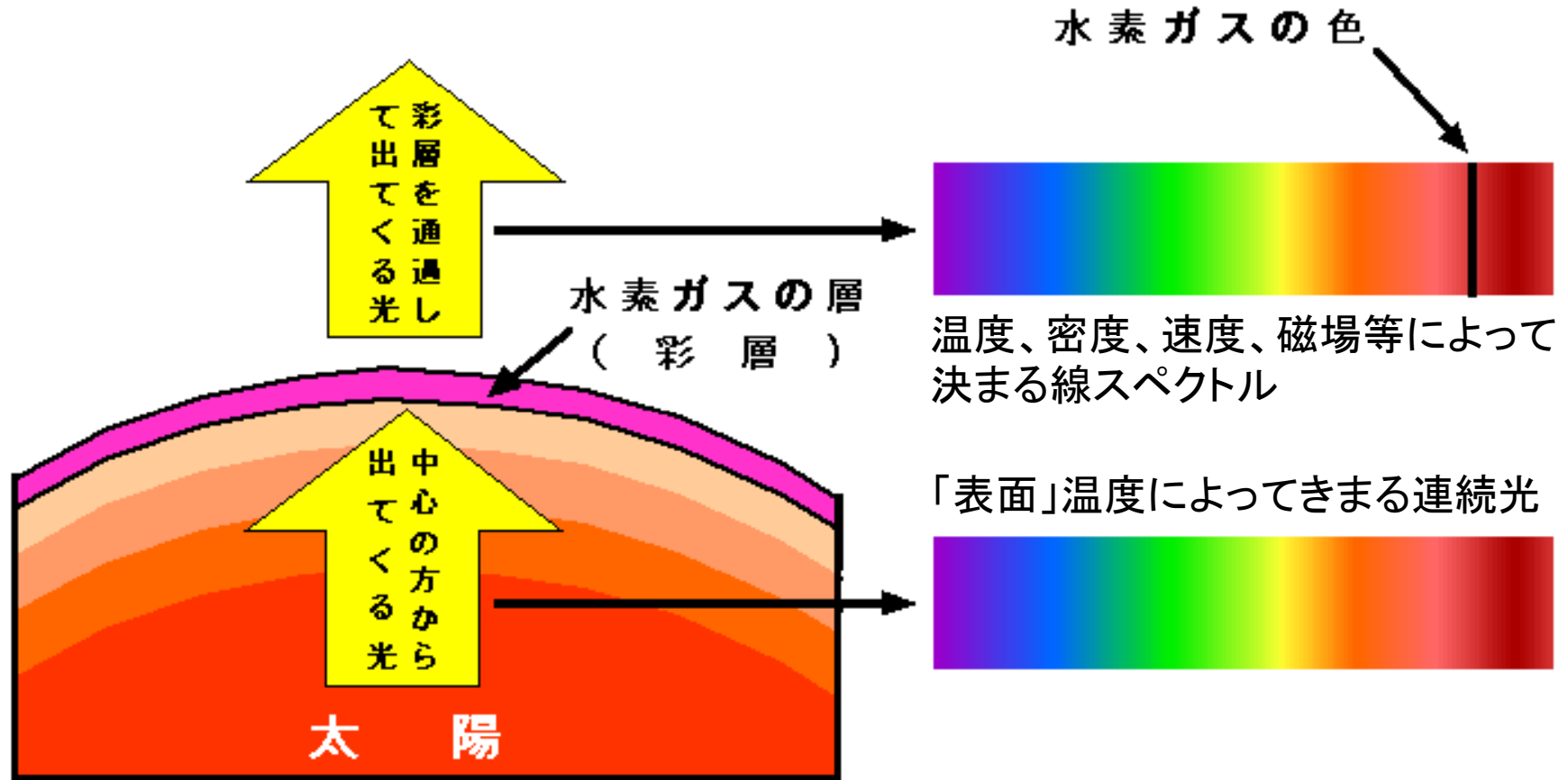
温度と光のスペクトル(連続光)

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

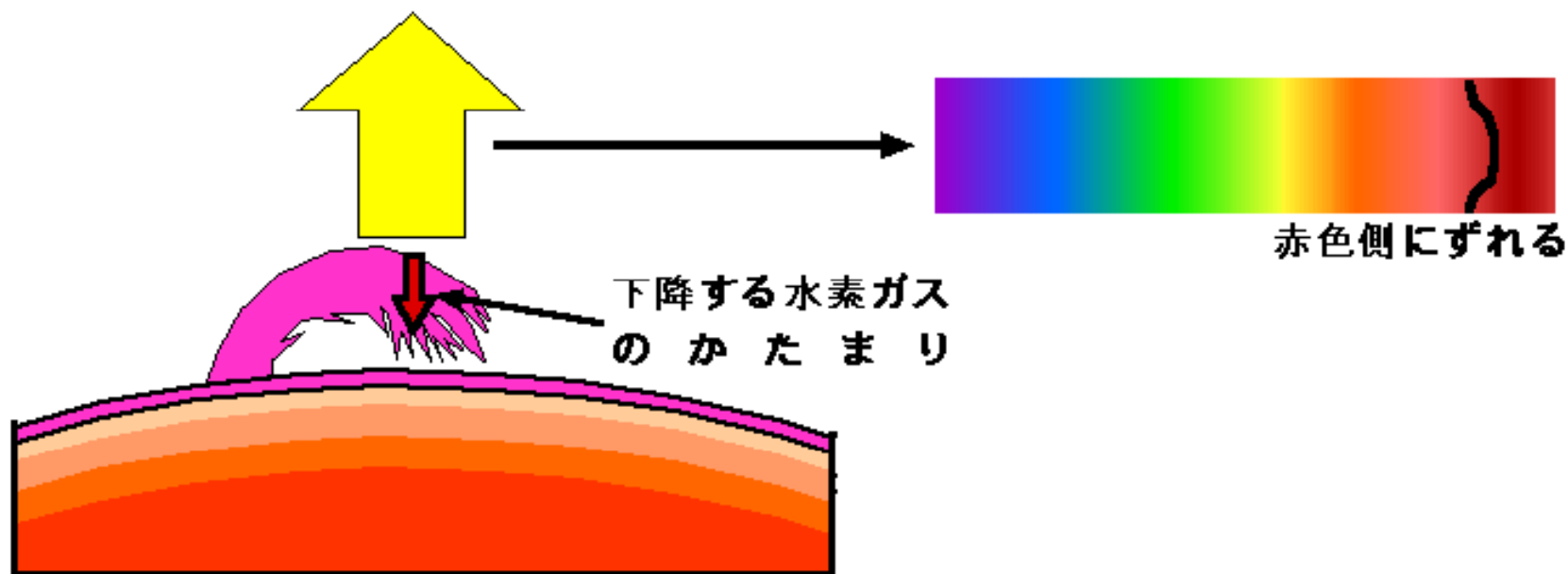
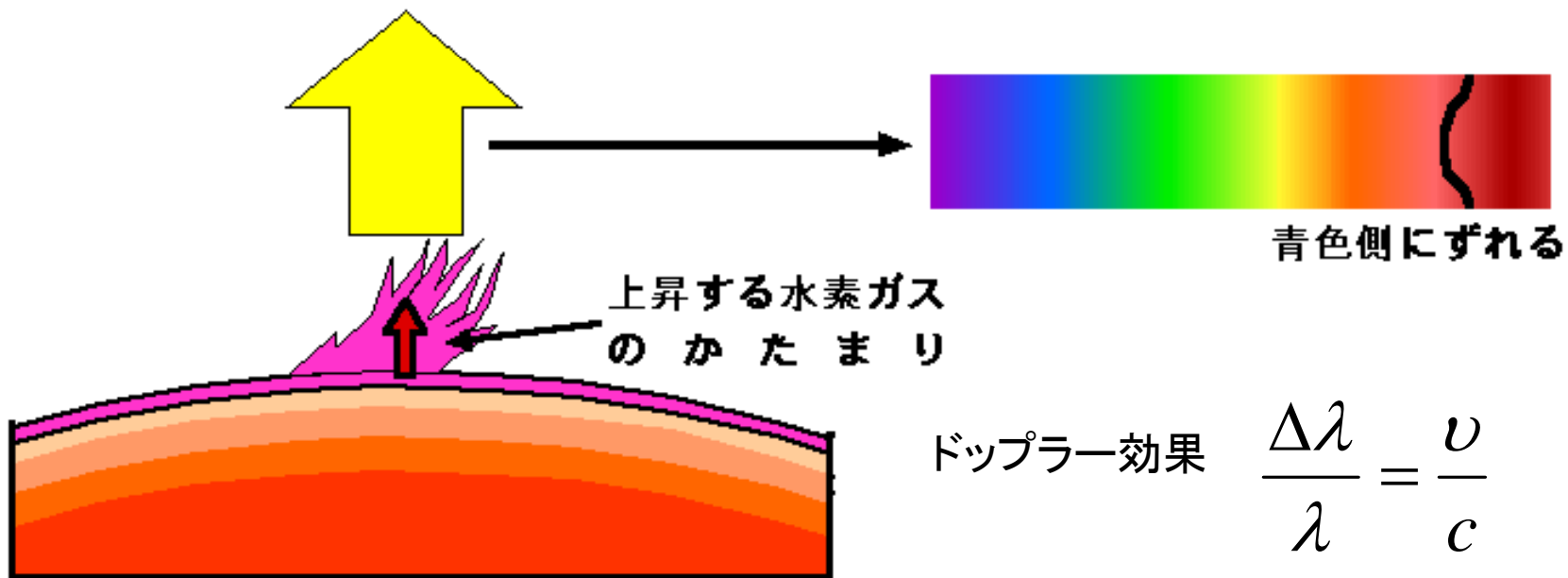
Black body radiation



線スペクトルのでき方

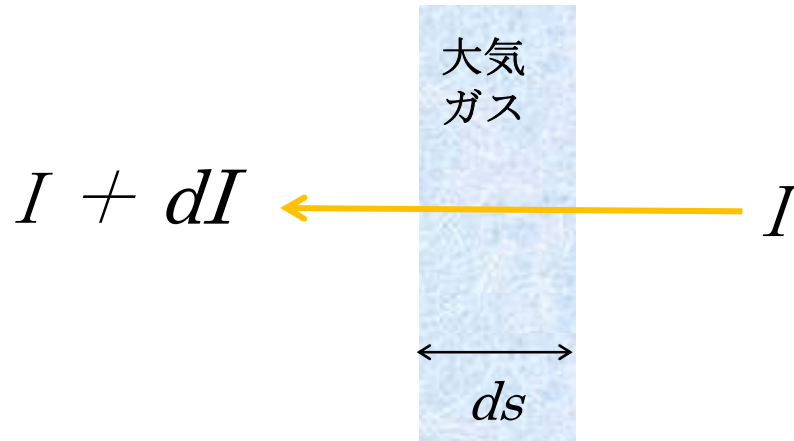


ドップラーシフト



スペクトルがどうやって作られるか

→ Radiative Transfer (輻射輸送)の問題



$$dI_\nu = -k_\nu I_\nu ds + j_\nu ds$$

k_ν : volume absorptivity
 j_ν : volume emissivity

(T, n, ν)

$$\frac{dI_\nu}{k_\nu ds} = -I_\nu + \frac{j_\nu}{k_\nu}$$

輻射輸送の式

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = -I_\nu + S_\nu$$

$d\tau_\nu = k_\nu ds$: optical thickness (光学的深さ)

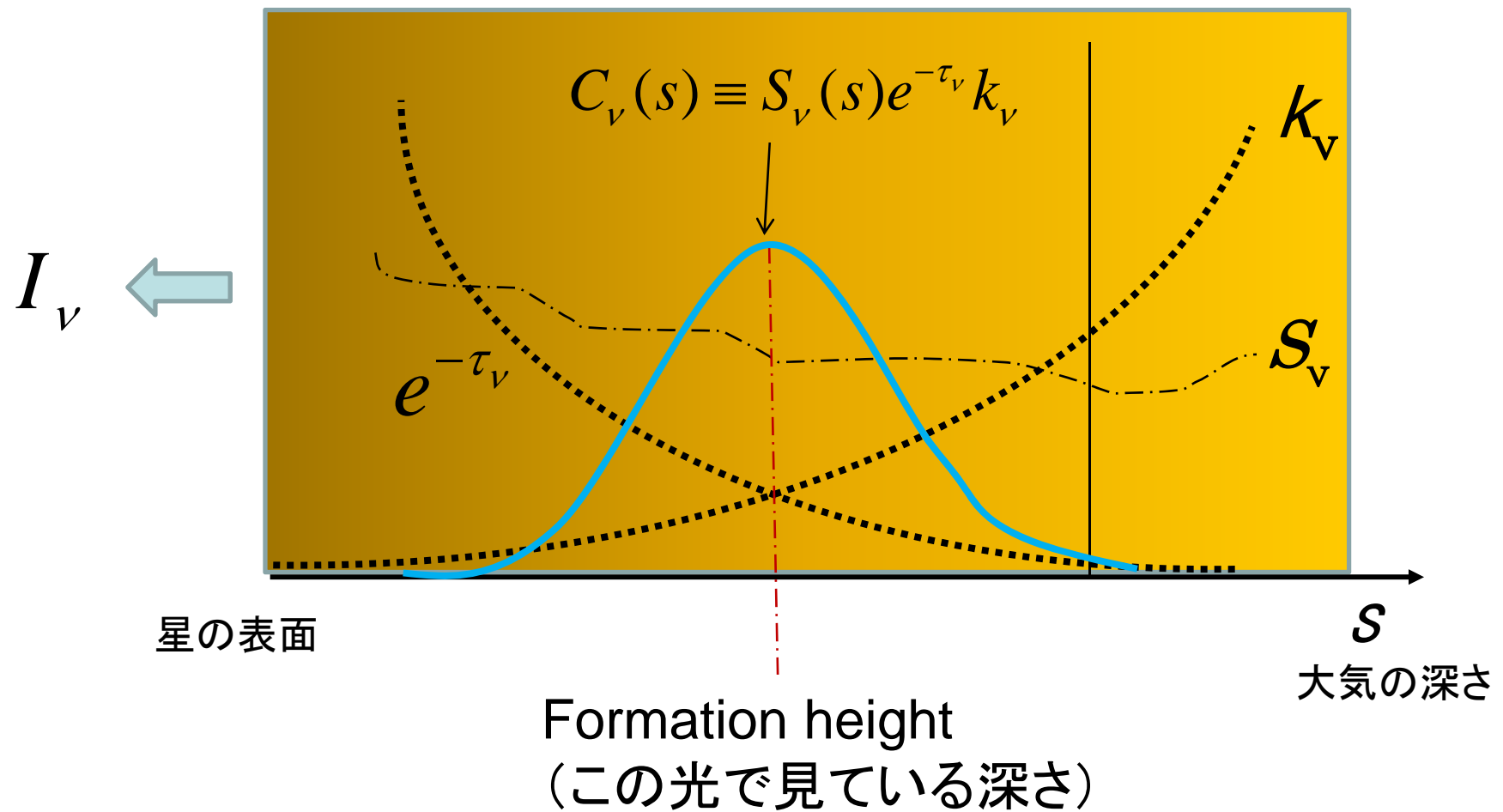
$S_\nu \equiv \frac{j_\nu}{k_\nu} \sim B(T)$: source function (源泉関数)
 (~はキルヒホッフの法則、B(T) はプランク関数)

星の表面から出てくる光

$$I_\nu = \int_{\infty}^0 S_\nu(s) e^{-\tau_\nu} k_\nu ds$$

解: $I_\nu(\tau_\nu) = -e^{\tau_\nu} \int_{\infty}^{\tau_\nu} S_\nu e^{-t} dt \xrightarrow{\tau_\nu=0}$

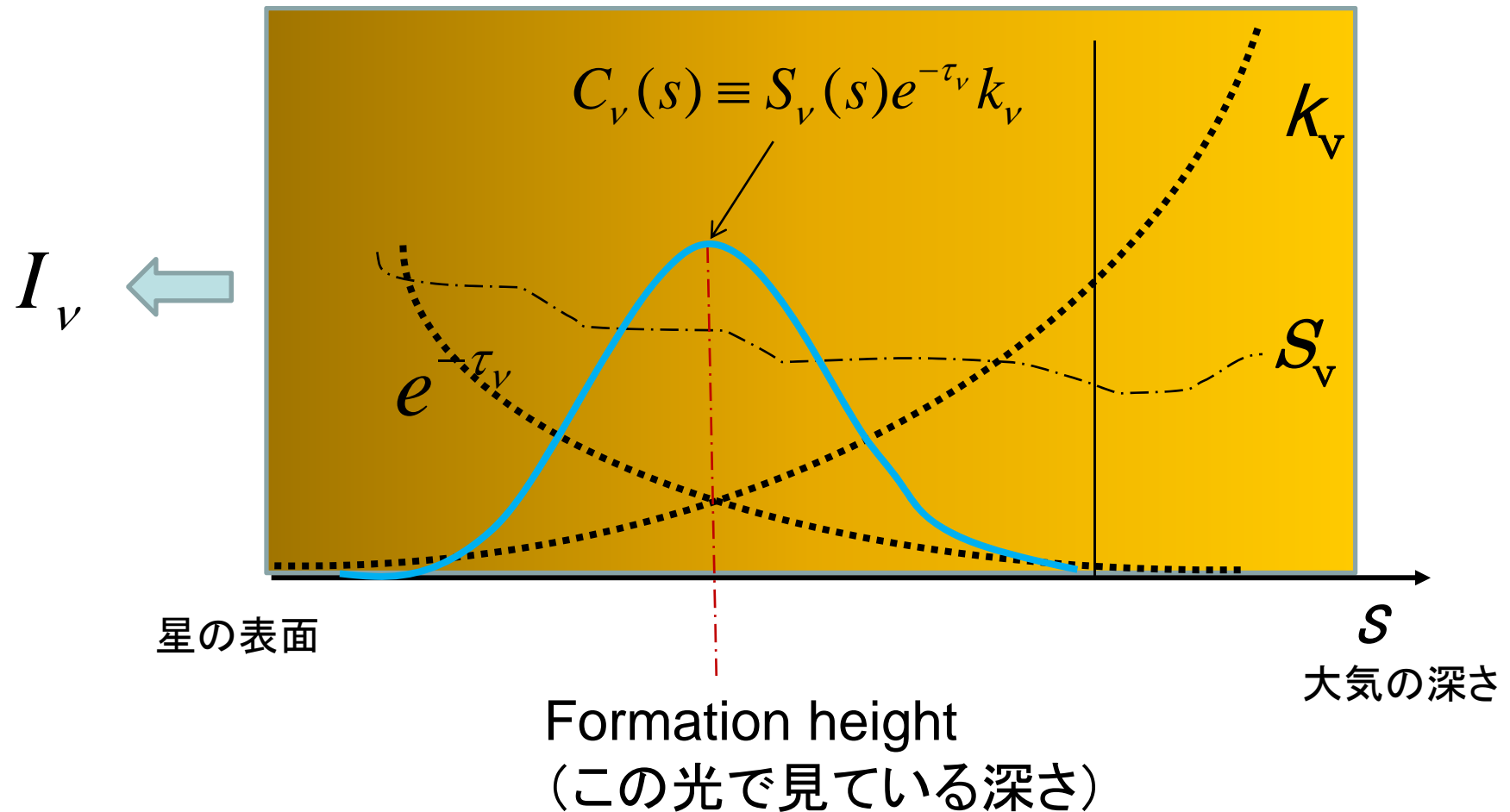
$$I_\nu = \int_{\infty}^0 \underbrace{S_\nu(s) e^{-\tau_\nu} k_\nu}_{\text{Contribution function}} ds$$



$$I_\nu = \int_{\infty}^0 \underbrace{S_\nu(s) e^{-\tau_\nu} k_\nu}_{\text{Contribution function}} ds$$

より不透明な光
→ 大気により高いところを見る

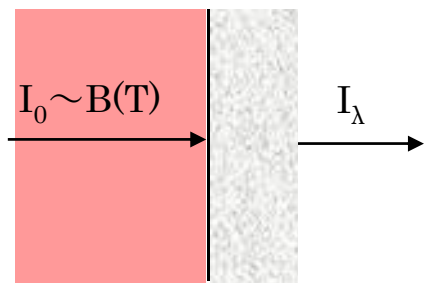
Contribution function



吸収線のでき方: 2つの考え方

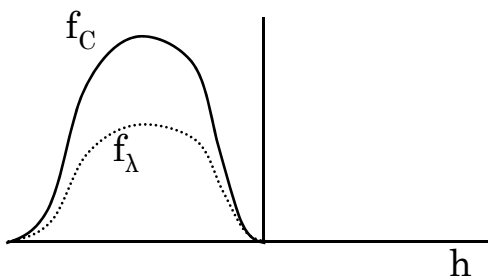
< Schuster-Schwarzshild >

手前にある冷たい層によって吸収される



$$S_0 \gg S$$

吸収層がoptically thin のとき weak line

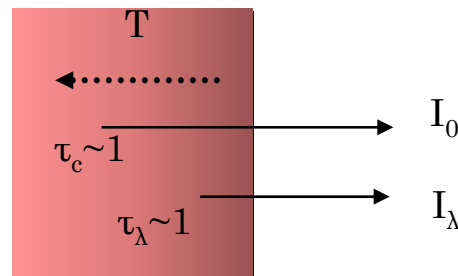


$$f_\lambda(\tau_c) = \exp(-\tau_\lambda) f_c(\tau_c)$$

formation height \neq conrib.func.

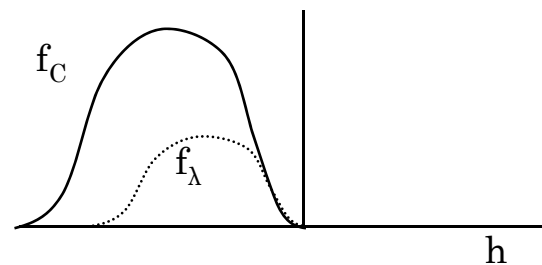
< Milne-Eddington >

温度勾配のある大気の浅いところを見る



$\tau_\lambda \sim \tau_c$ のとき weak line

\rightarrow weak line ほど深いところで形成



$$f_\lambda(\tau_c) = \exp(-\tau_\lambda) f_c(\tau_c)$$

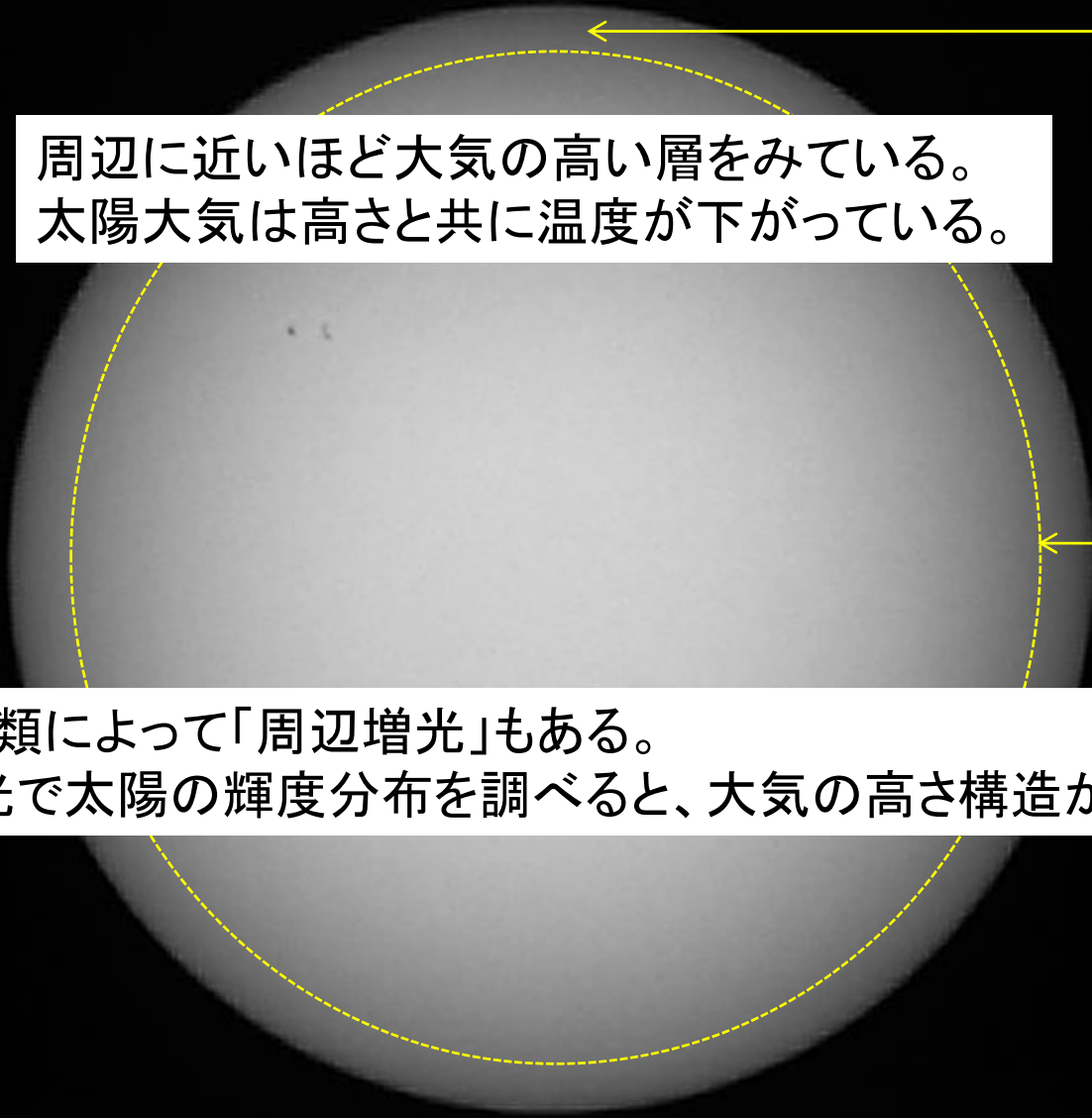
formation height = conrib.func.

Contribution
function
 $I = \int f(h) dh$

実際は両方の中間

‘contribution function’ とラインの形成高さは違うことがある。

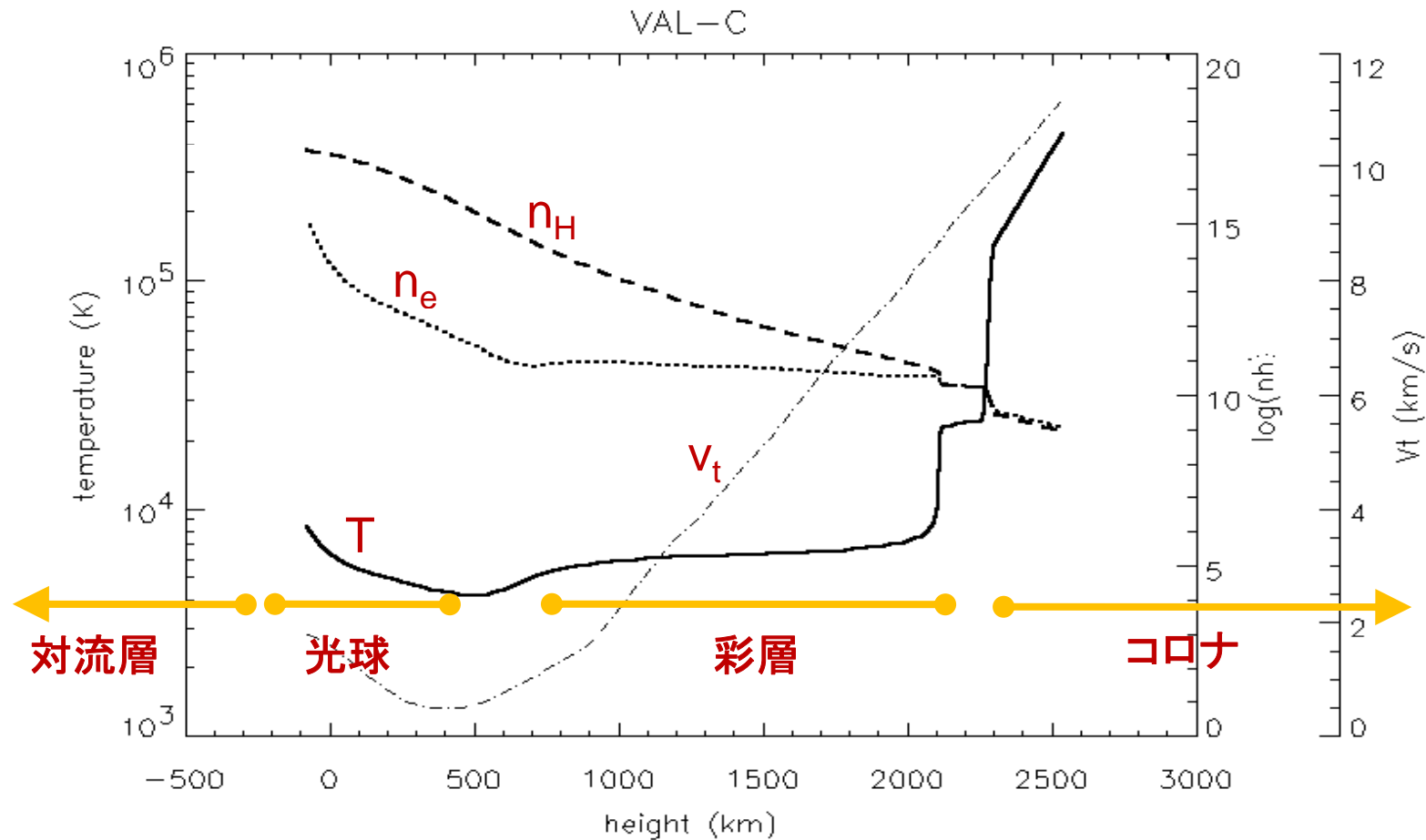
太陽はなぜ周辺が暗いのか？（周辺減光）



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



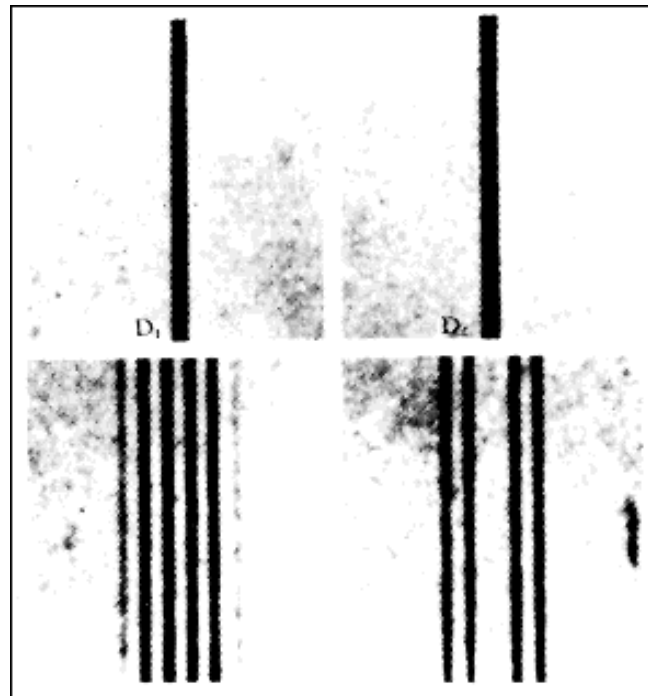
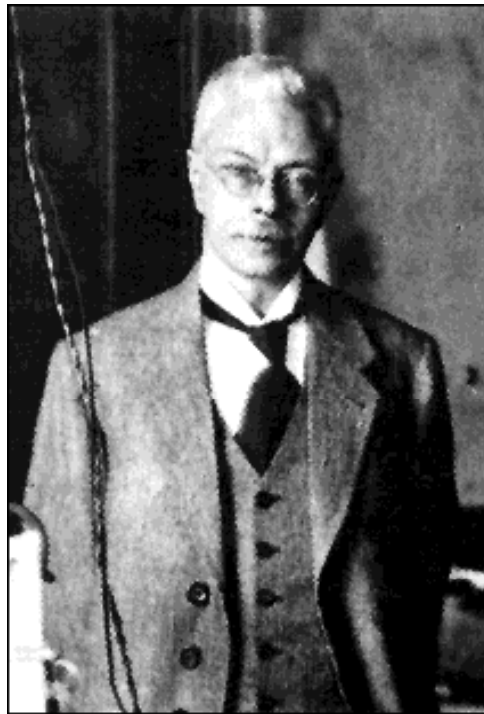
Sun's atmospheric layers couple with each other via magnetic fields, and produce numerous dynamic phenomena.

スペクトル線の偏光

Zeeman効果の発見

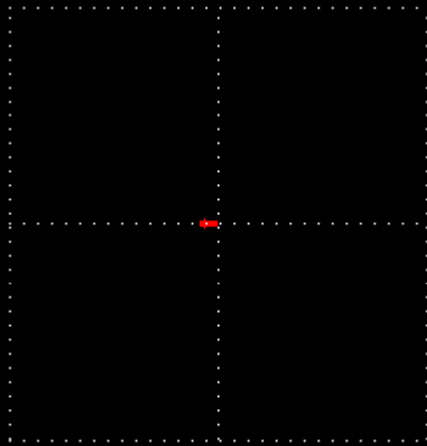
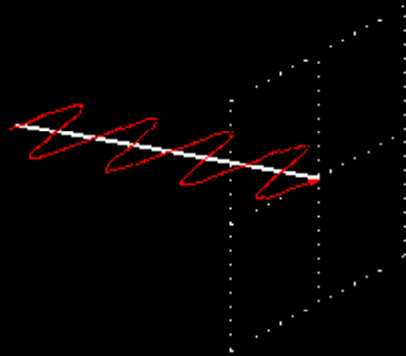
The Effect of Magnetisation on the Nature of Light Emitted by a Substance

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

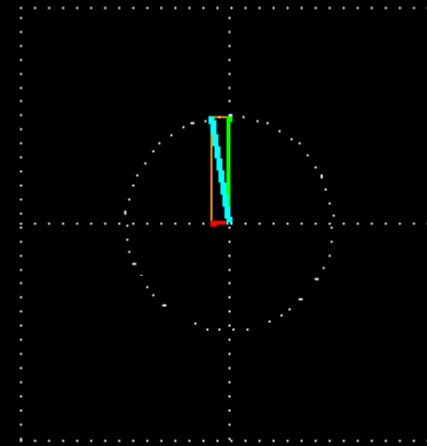
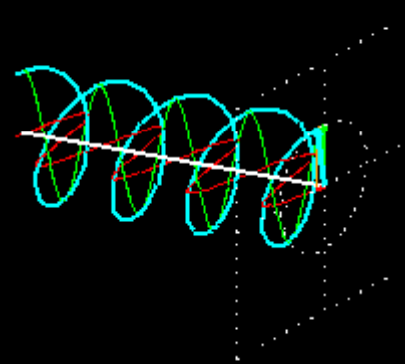


Description of polarized light

Linear polarization



Circular polarization

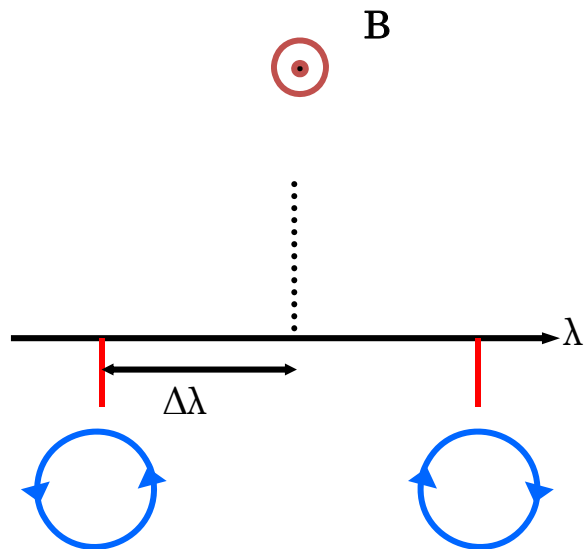


animation courtesy of Jose Carlos del Toro Iniesta

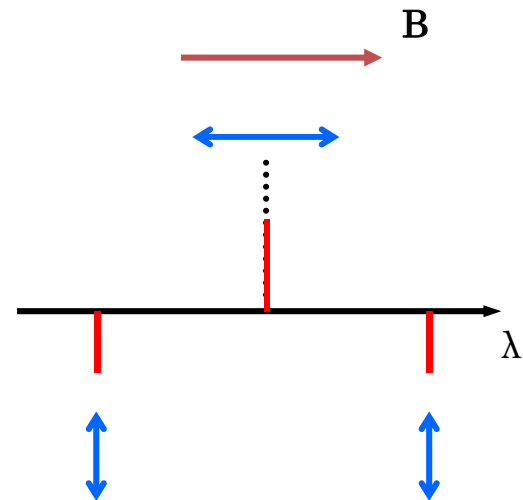
Zeeman 効果

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)



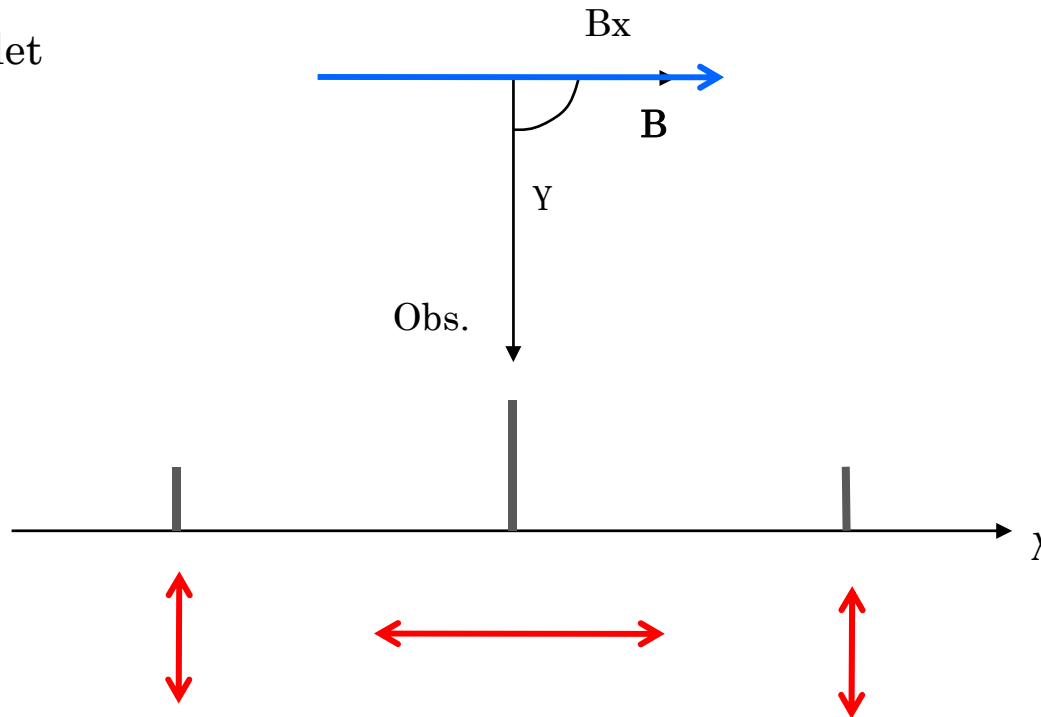
横Zeeman効果
(磁場と直角方向からみて)



ゼーマン効果

Intensity and polarization of Zeeman components

Simple triplet

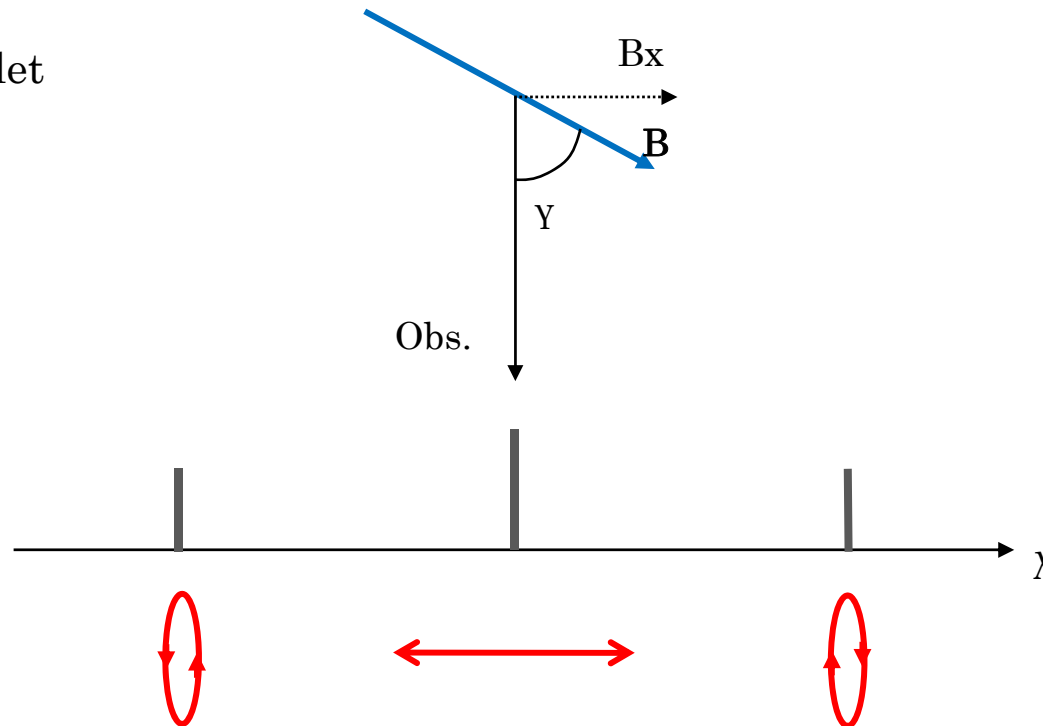


$$I_{\sigma^-} : I_{\pi} : I_{\sigma^+} = \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) : \frac{1}{2} \sin^2 \gamma : \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) \quad (I_{\sigma^-} + I_{\pi} + I_{\sigma^+} = 1)$$

ゼーマン効果

Intensity and polarization of Zeeman components

Simple triplet

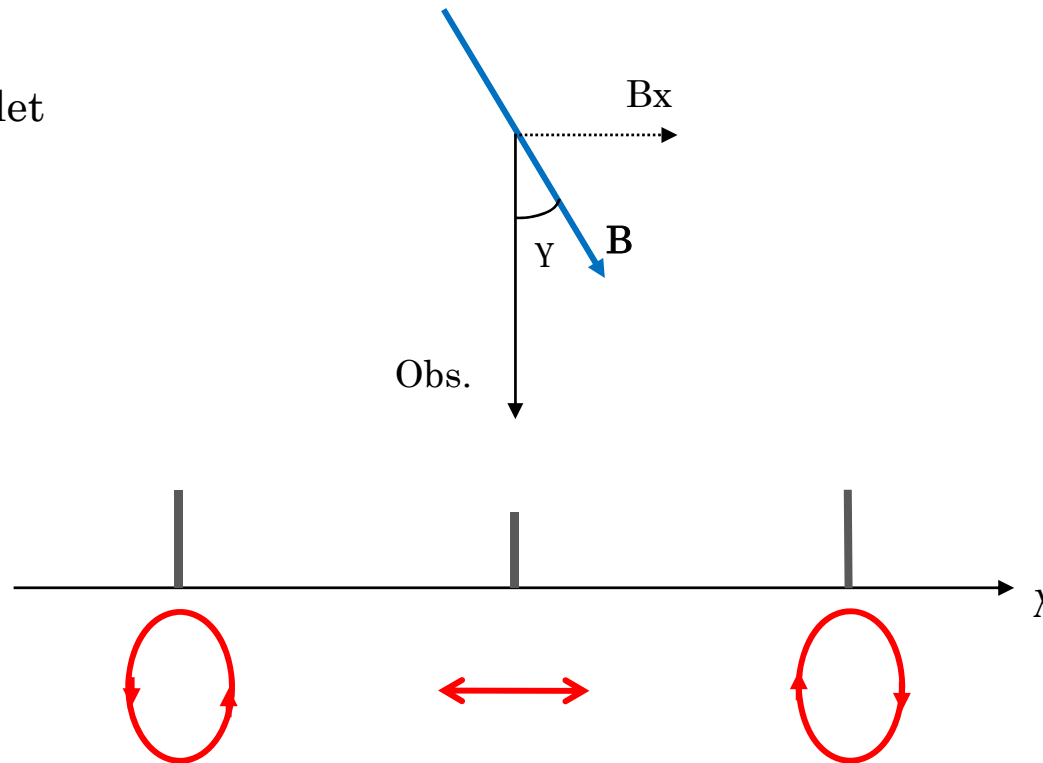


$$I_{\sigma^-} : I_{\pi} : I_{\sigma^+} = \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) : \frac{1}{2} \sin^2 \gamma : \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) \quad (I_{\sigma^-} + I_{\pi} + I_{\sigma^+} = 1)$$

ゼーマン効果

Intensity and polarization of Zeeman components

Simple triplet

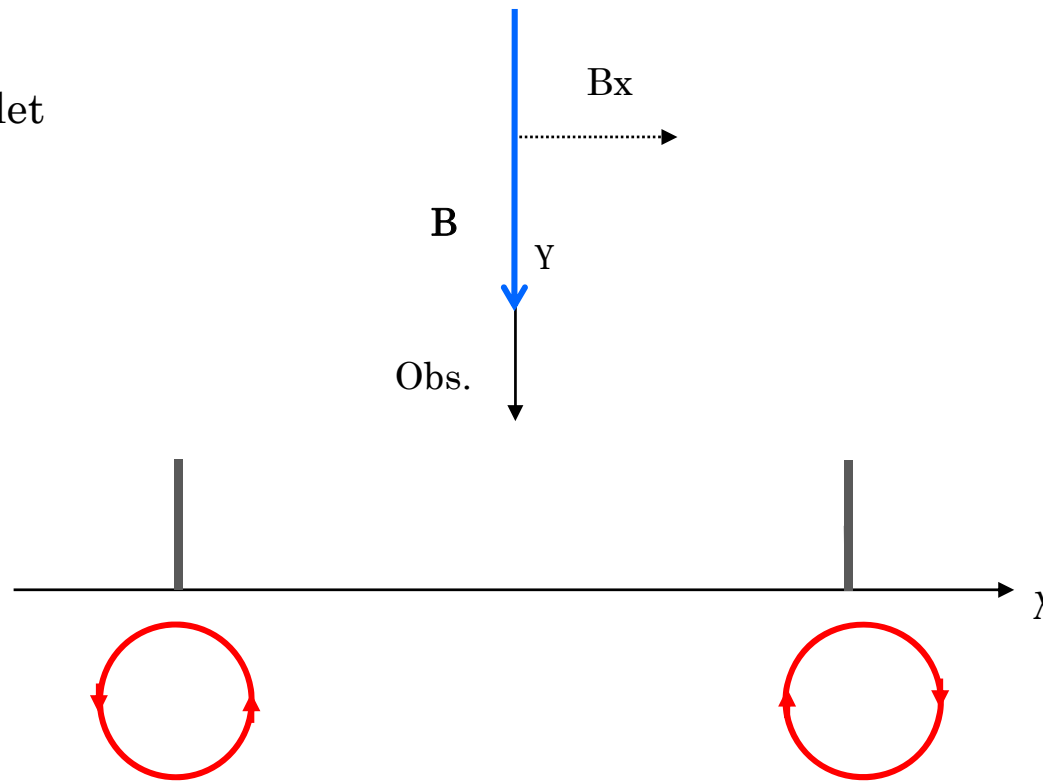


$$I_{\sigma^-} : I_{\pi} : I_{\sigma^+} = \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) : \frac{1}{2} \sin^2 \gamma : \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) \quad (I_{\sigma^-} + I_{\pi} + I_{\sigma^+} = 1)$$

ゼーマン効果

Intensity and polarization of Zeeman components

Simple triplet

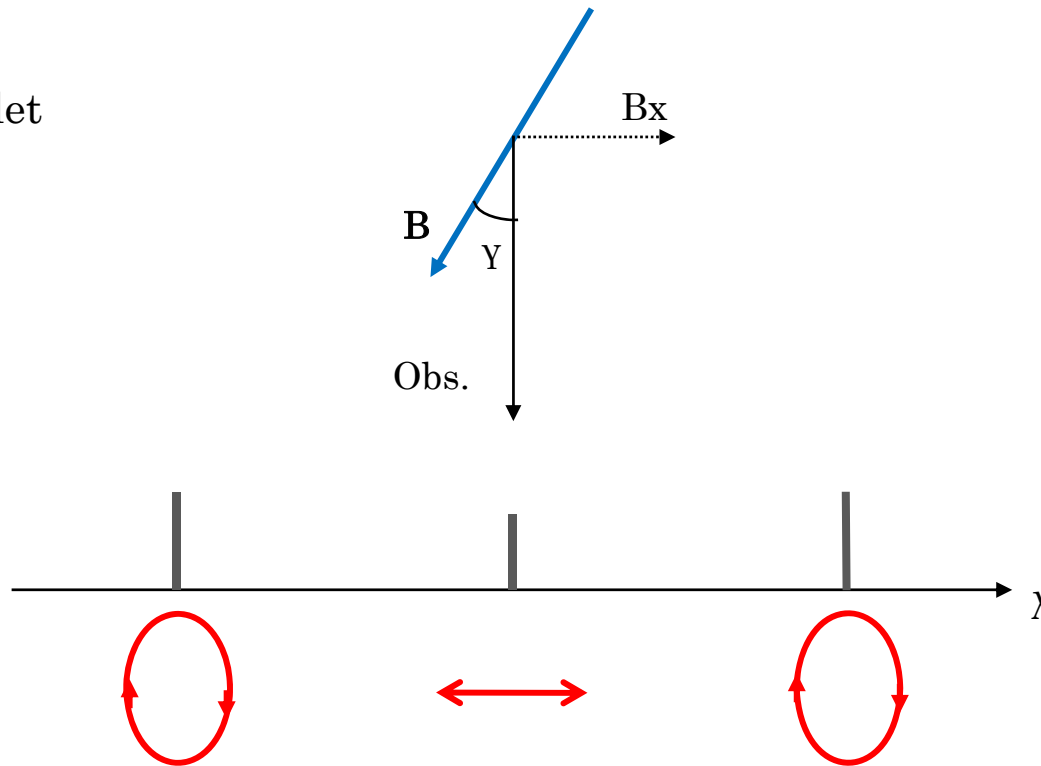


$$I_{\sigma-} : I_{\pi} : I_{\sigma+} = \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) : \frac{1}{2} \sin^2 \gamma : \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) \quad (I_{\sigma-} + I_{\pi} + I_{\sigma+} = 1)$$

ゼーマン効果

Intensity and polarization of Zeeman components

Simple triplet

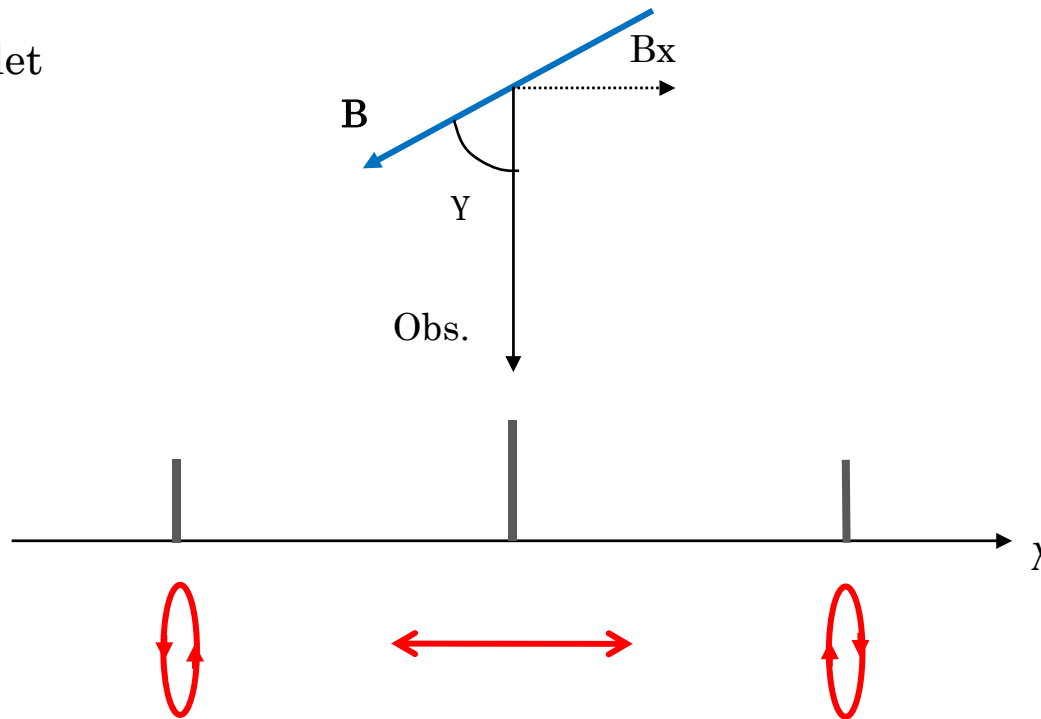


$$I_{\sigma^-} : I_{\pi} : I_{\sigma^+} = \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) : \frac{1}{2} \sin^2 \gamma : \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) \quad (I_{\sigma^-} + I_{\pi} + I_{\sigma^+} = 1)$$

ゼーマン効果

Intensity and polarization of Zeeman components

Simple triplet

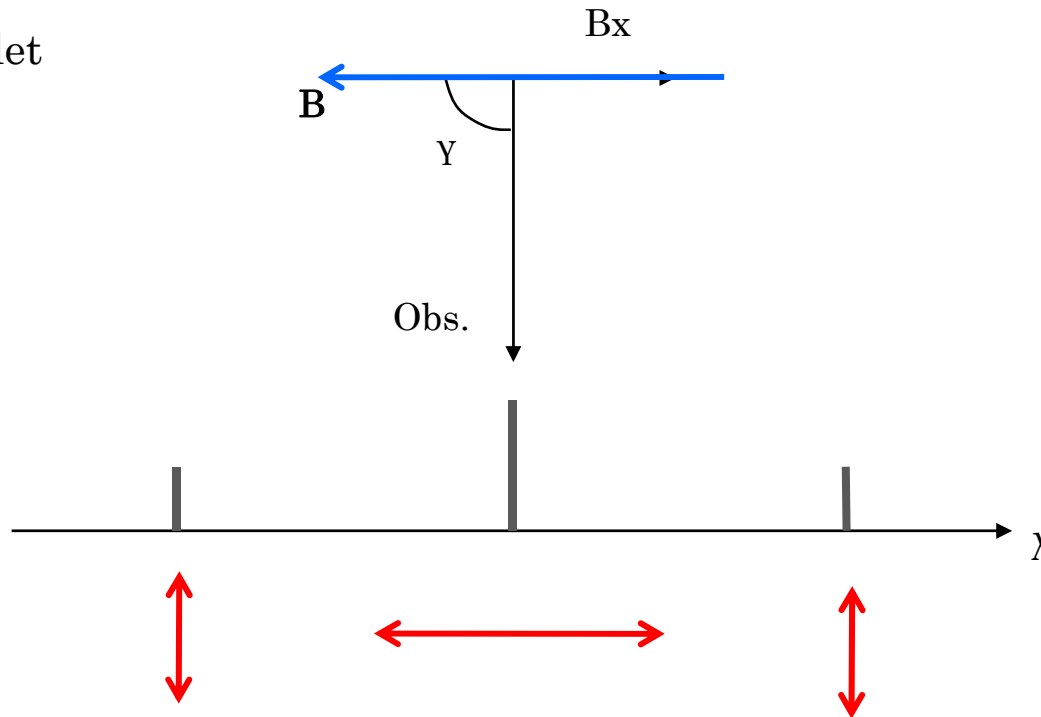


$$I_{\sigma^-} : I_{\pi} : I_{\sigma^+} = \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) : \frac{1}{2} \sin^2 \gamma : \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) \quad (I_{\sigma^-} + I_{\pi} + I_{\sigma^+} = 1)$$

ゼーマン効果

Intensity and polarization of Zeeman components

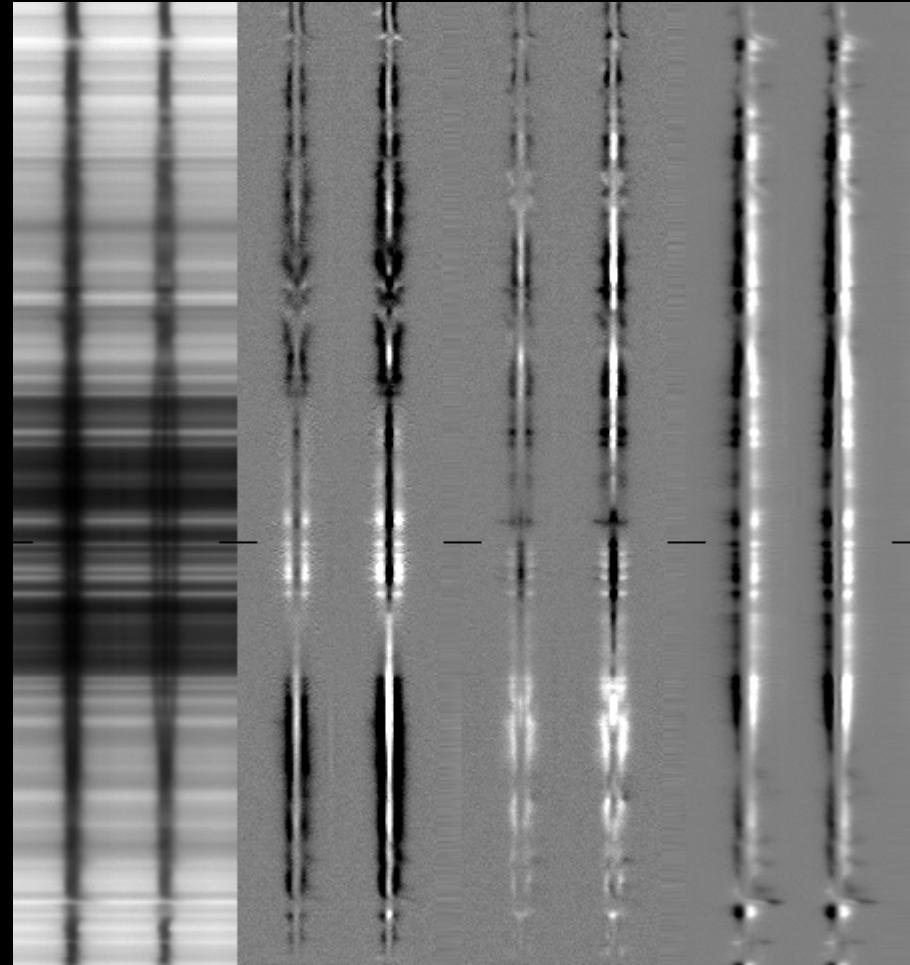
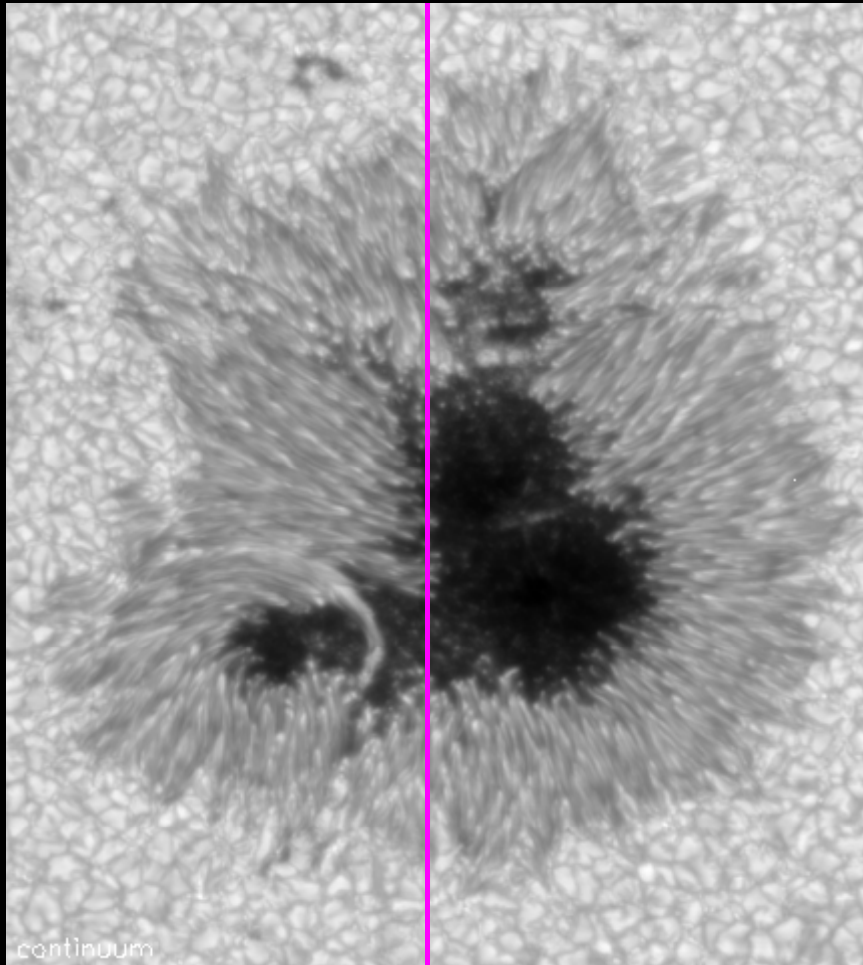
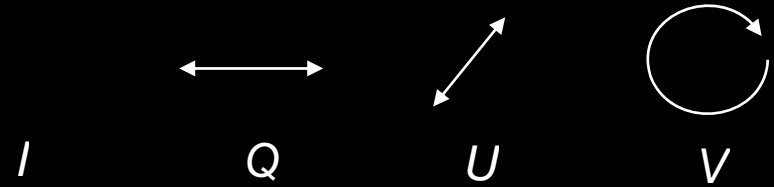
Simple triplet



$$I_{\sigma^-} : I_{\pi} : I_{\sigma^+} = \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) : \frac{1}{2} \sin^2 \gamma : \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) \quad (I_{\sigma^-} + I_{\pi} + I_{\sigma^+} = 1)$$

180° different transversal field produces exactly the same Zeeman effect.

スペクトル線のゼーマン効果 (SOT/Spectro-polarimeter)



FeI6301.5Å
g = 1.67

FeI6302.5Å
g = 2.5

ひので、教科書には、、

偏光メカニズムとプラズマ診断量

偏光情報から太陽プラズマの異方性（ベクトル物理量）の診断が可能となる。

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)

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

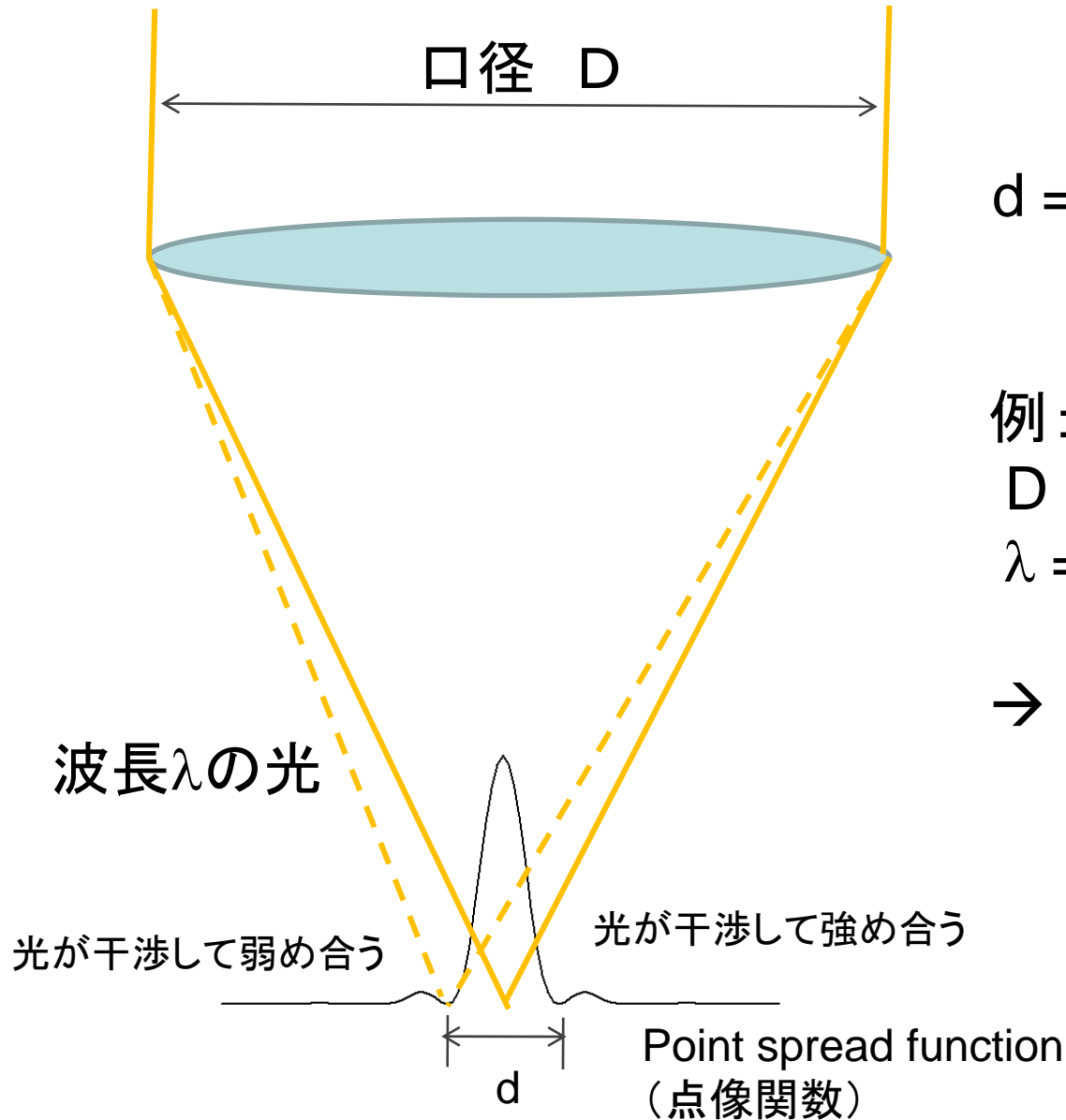
t 時間 --- ダイナミクス

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



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

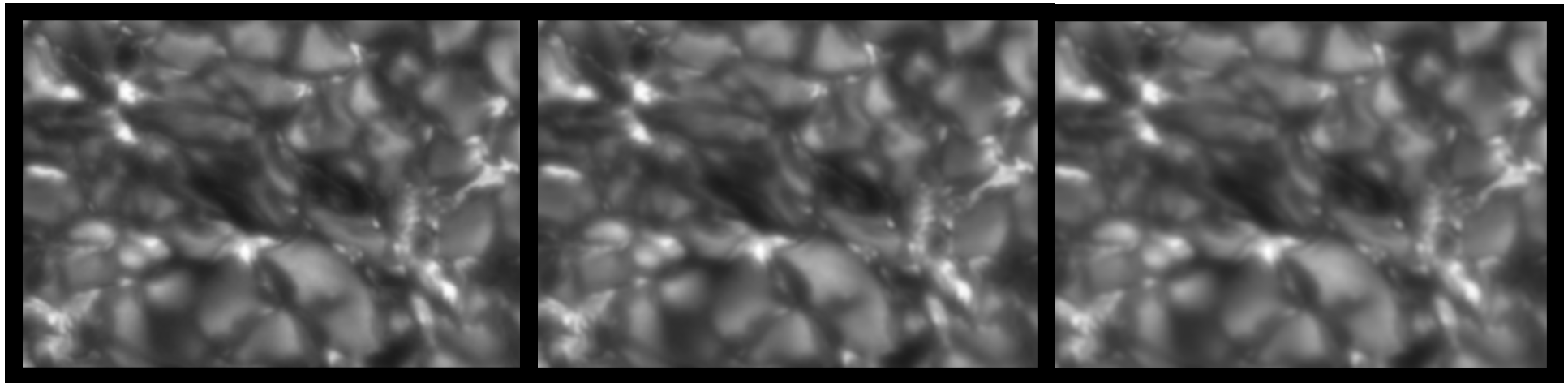
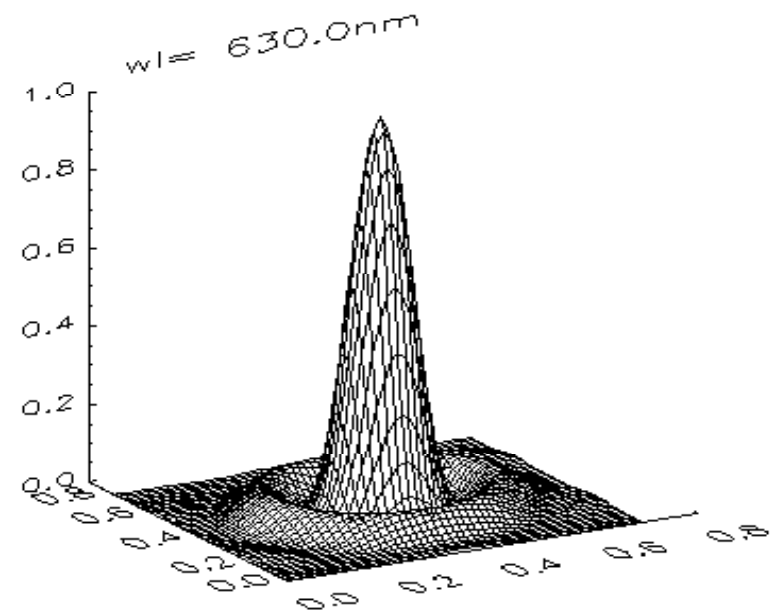
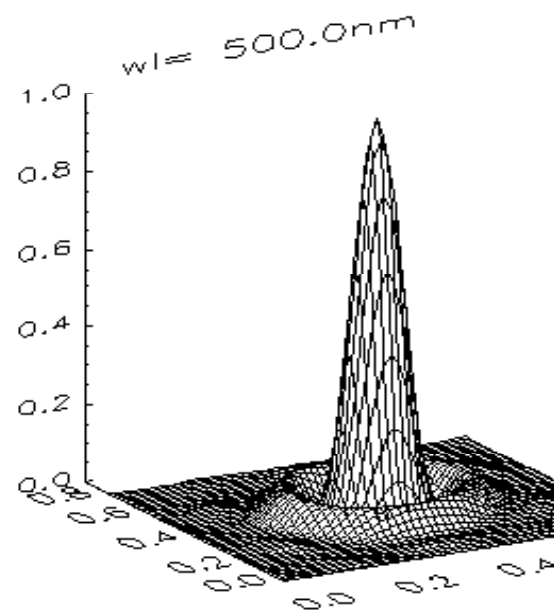
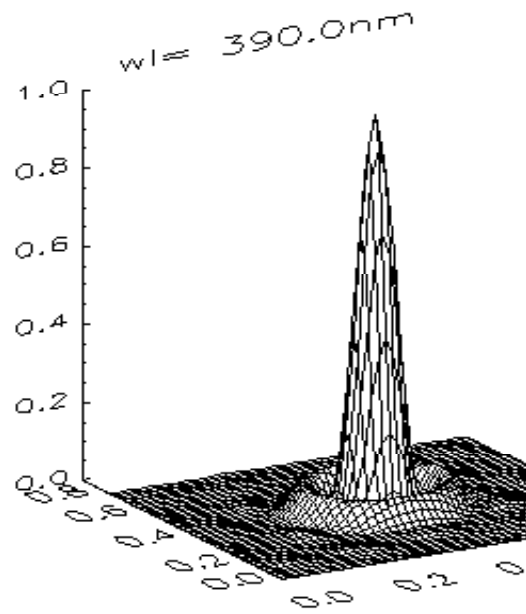
例:

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

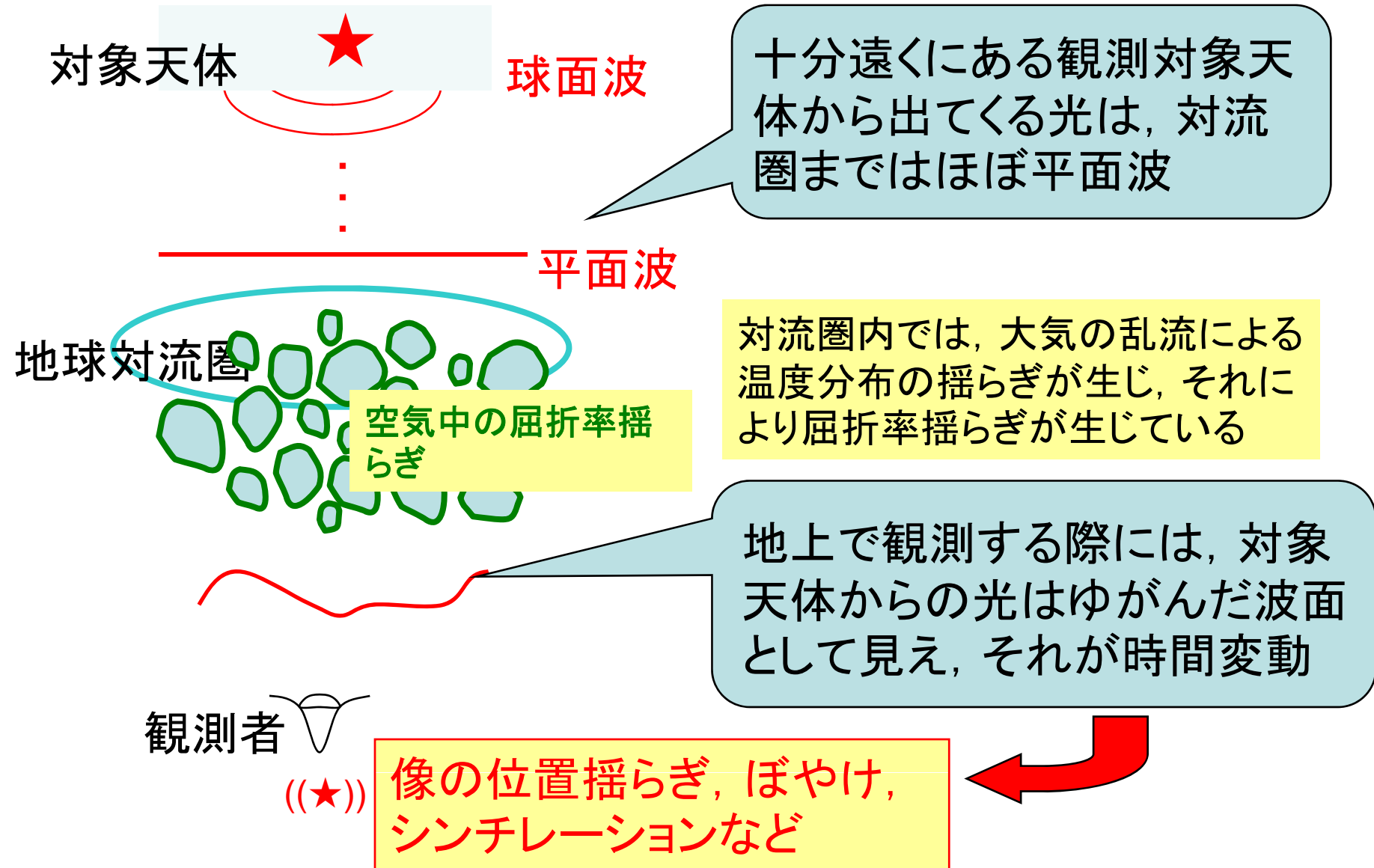
$$\lambda = 500\text{nm}$$

→ $d \sim 8.3\text{e-}7 = 0.17$ 秒角
(100km先の1mm)
(太陽面上の120km)

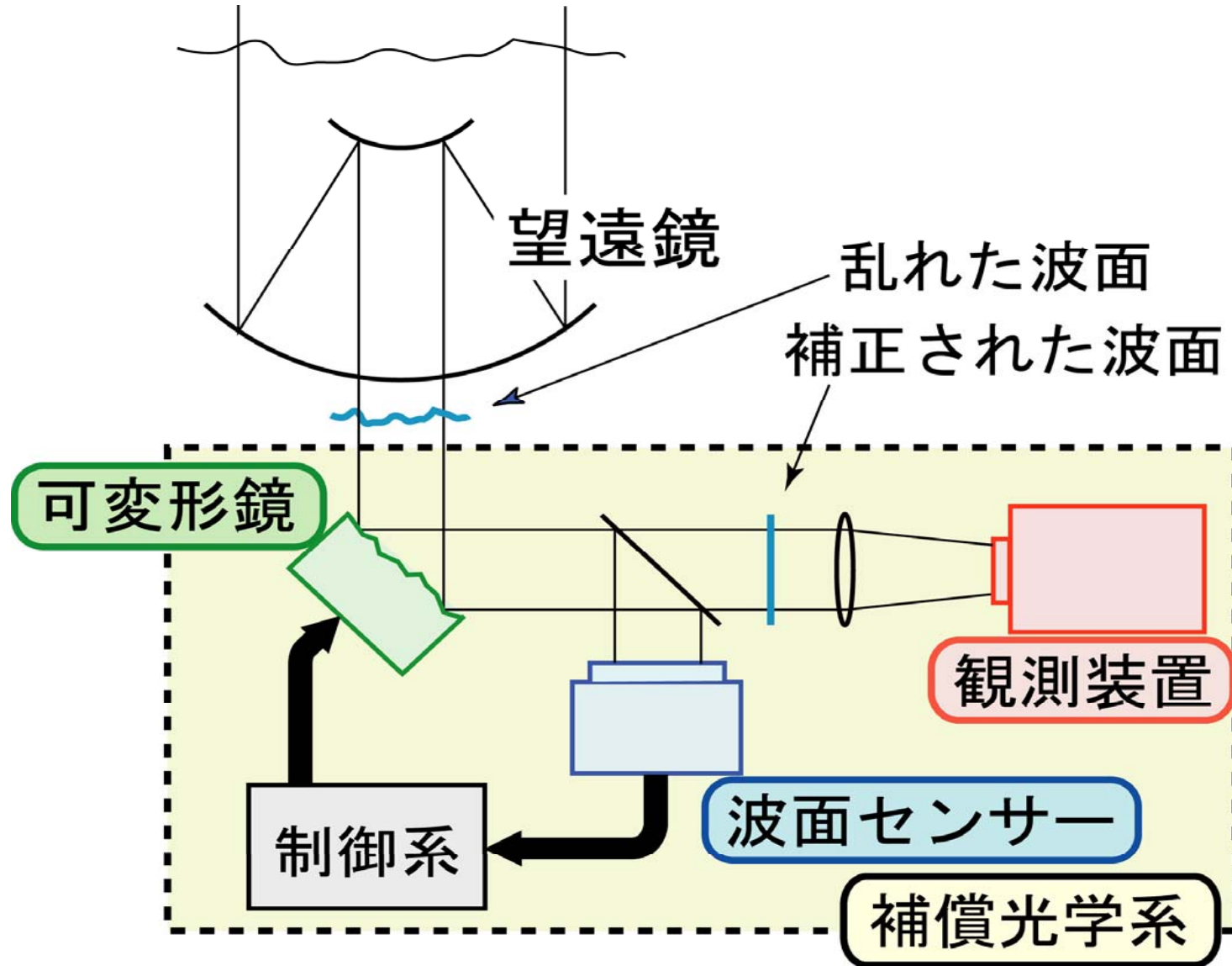
Point Spread Function (口径50cm 理想)

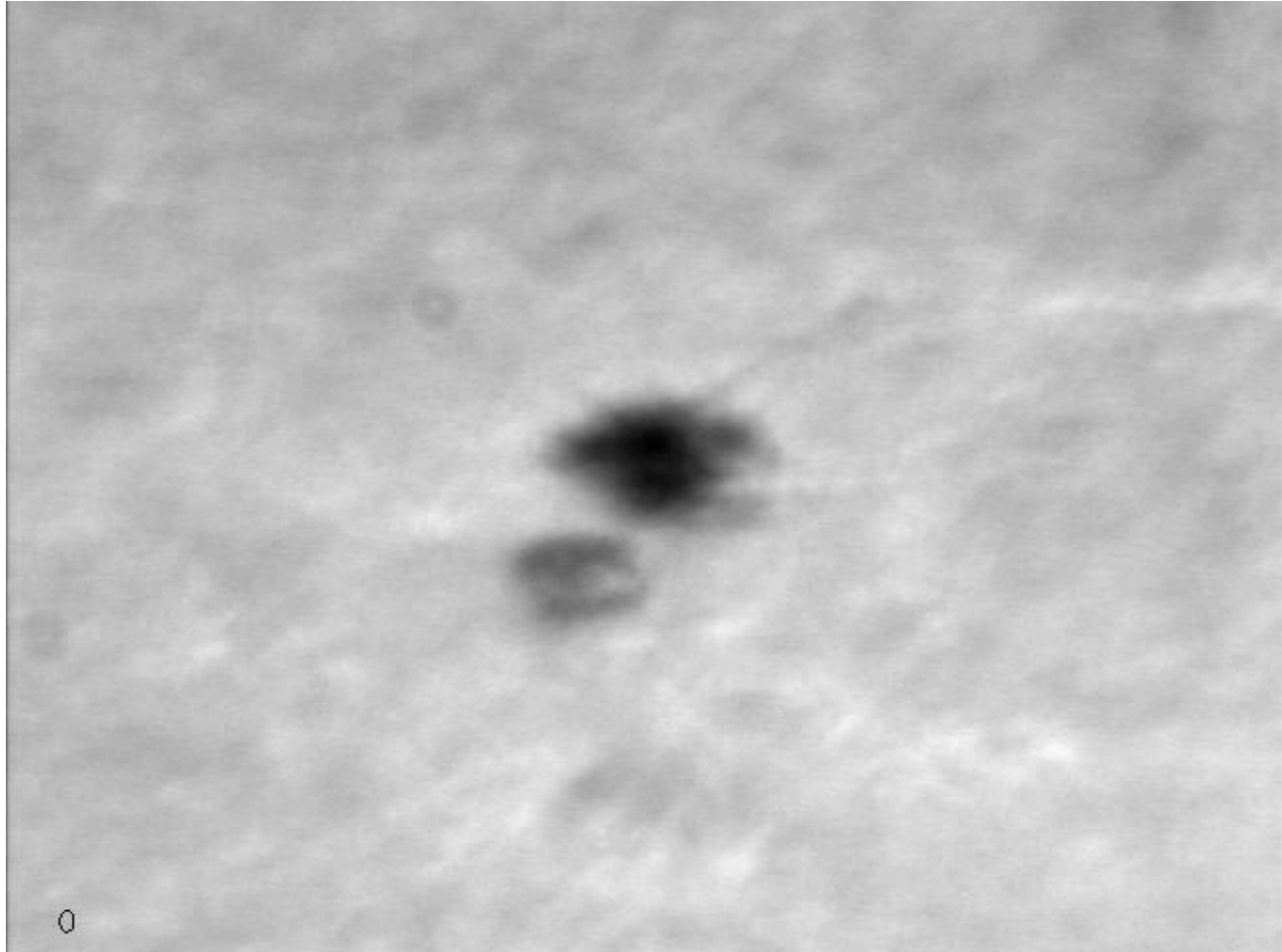


シーイングとは、

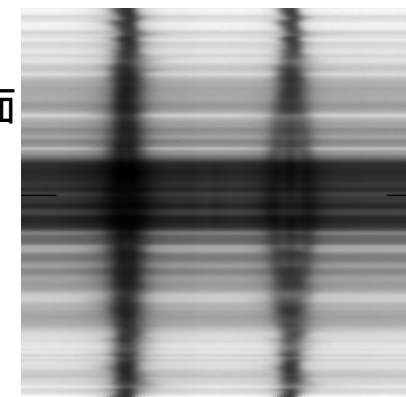
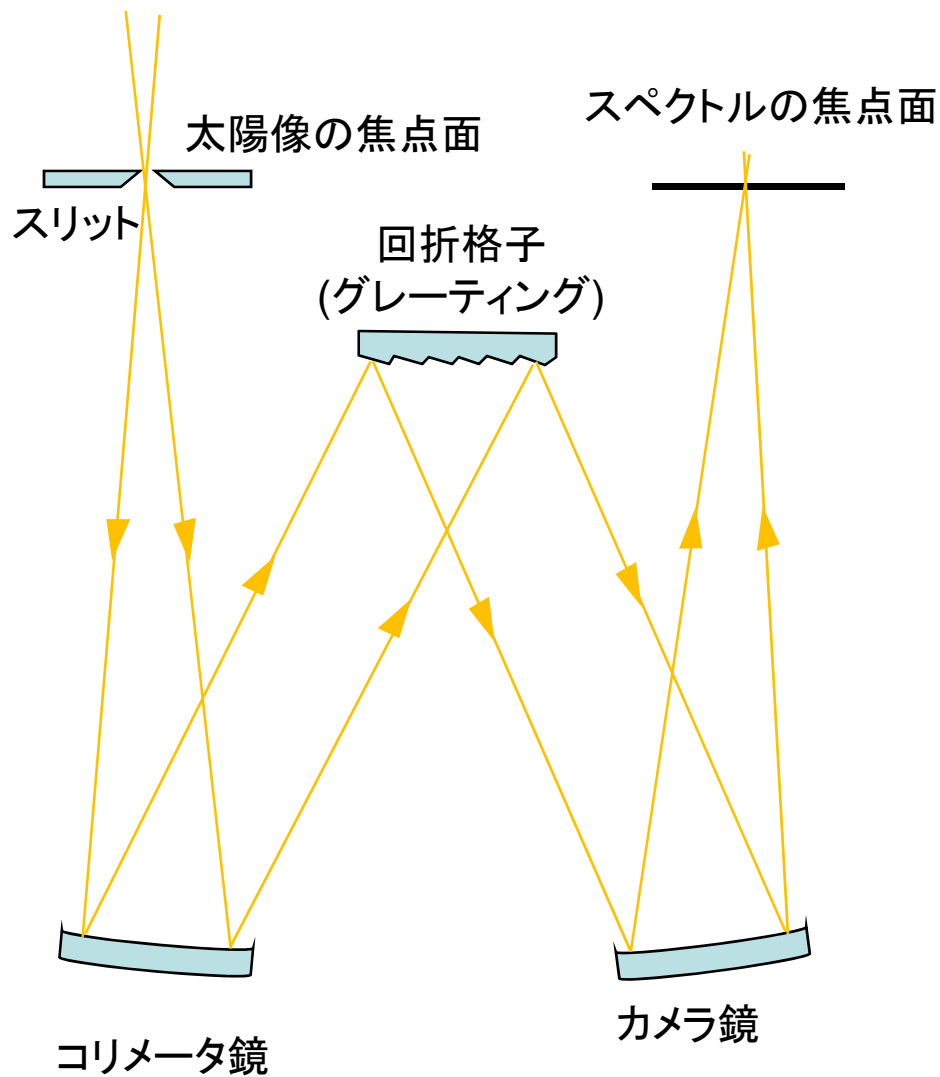
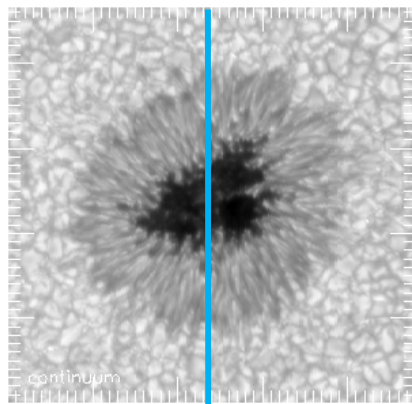


補償光学 (Adaptive Optics)



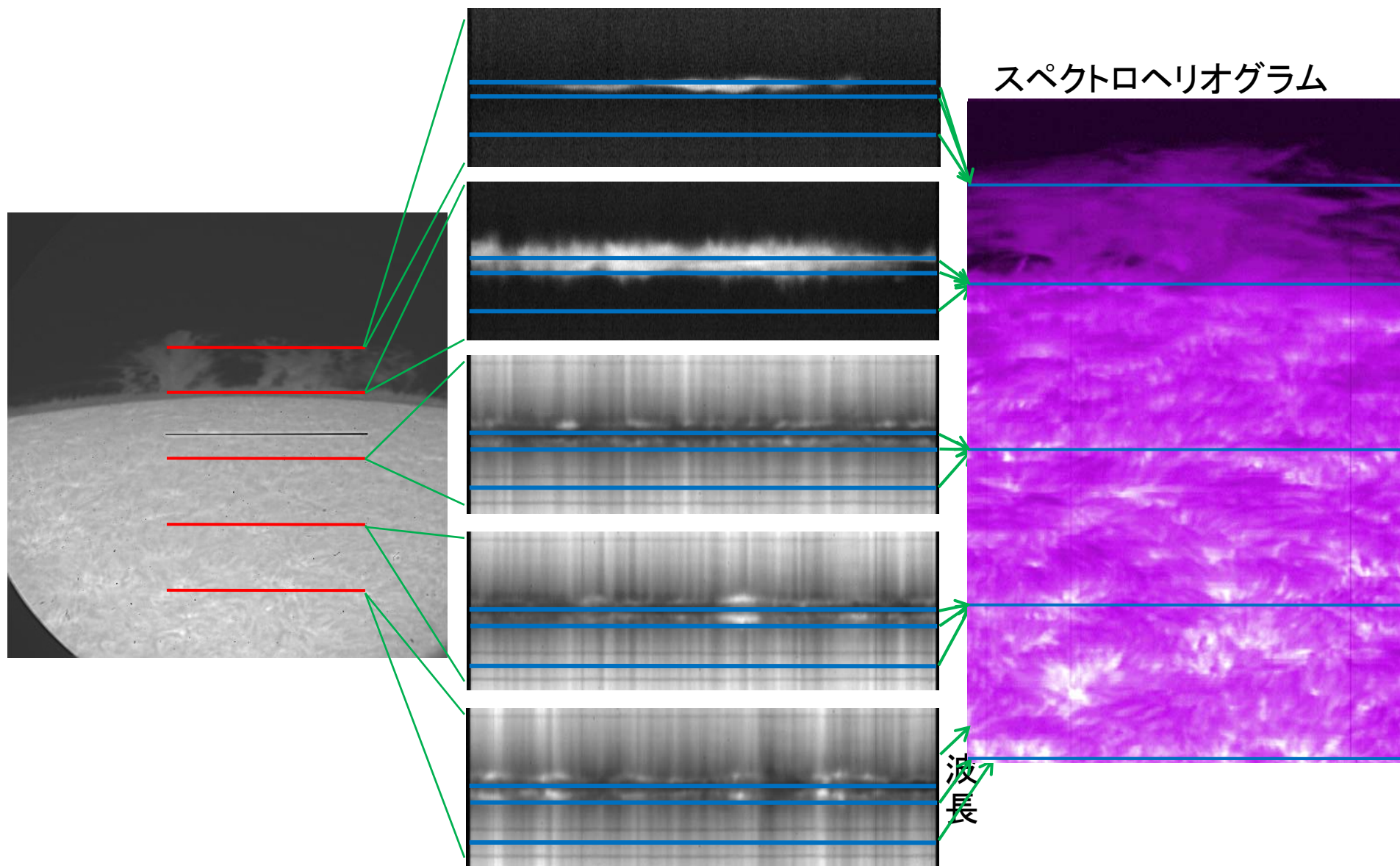


波長を分解する分光装置



→
波長

スペクトロヘリオグラムの説明



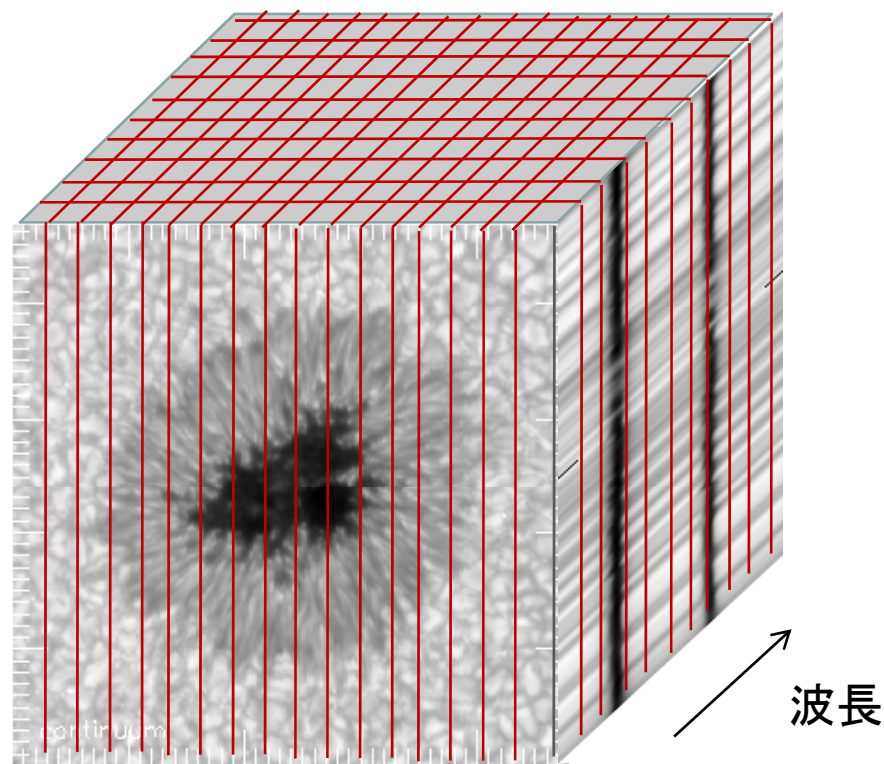
スペクトロヘリオグラム

スリット上の位置

by 上野

波長を分解する分光装置

データキューブ



狭帯域赤外線分光装置

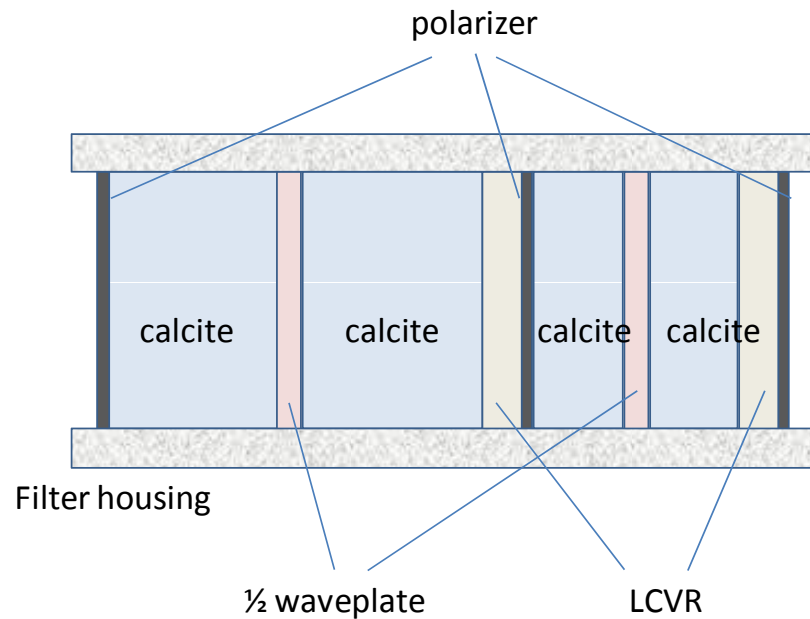
波長を分解する分光装置

狭帯域チューナブルフィルター

Lyot filter

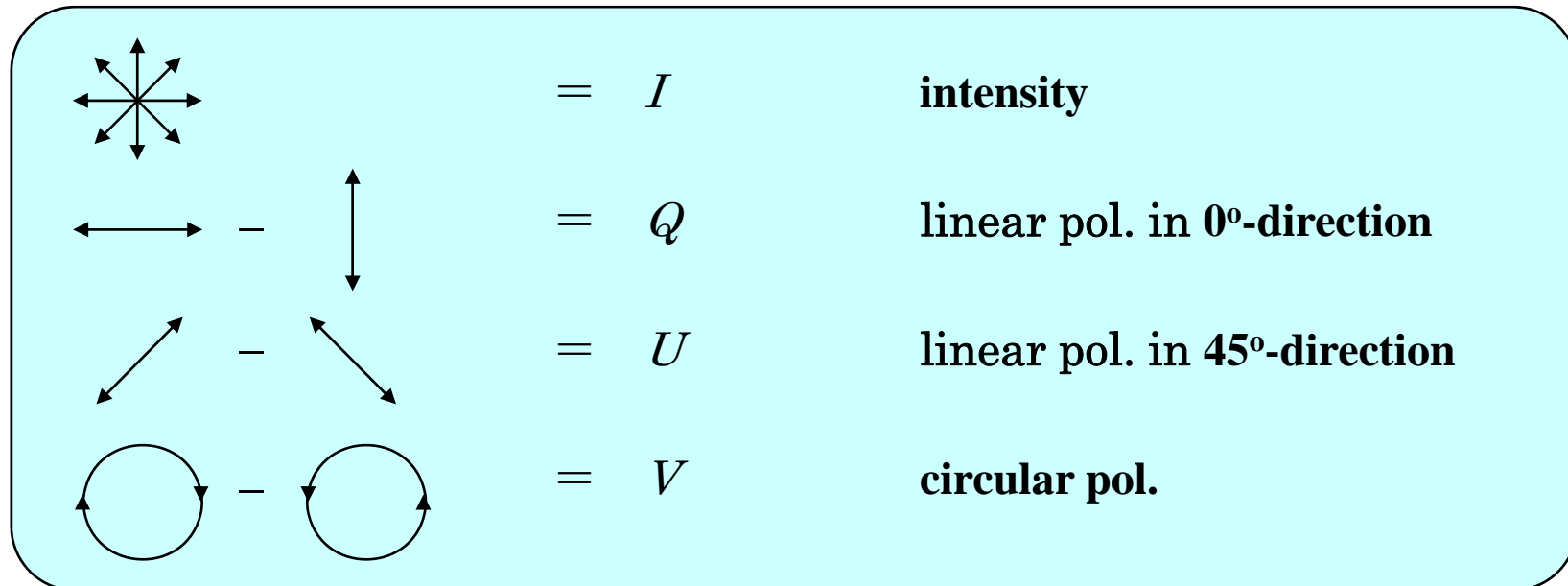
vs.

Fabry Perot

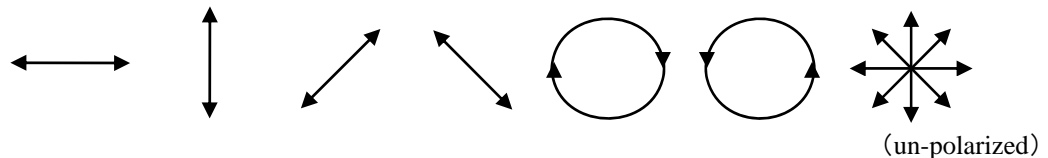


偏光を分解する偏光解析装置

偏光の記述; Stokes パラメータの定義



↑ Intensity through ideal polarizer

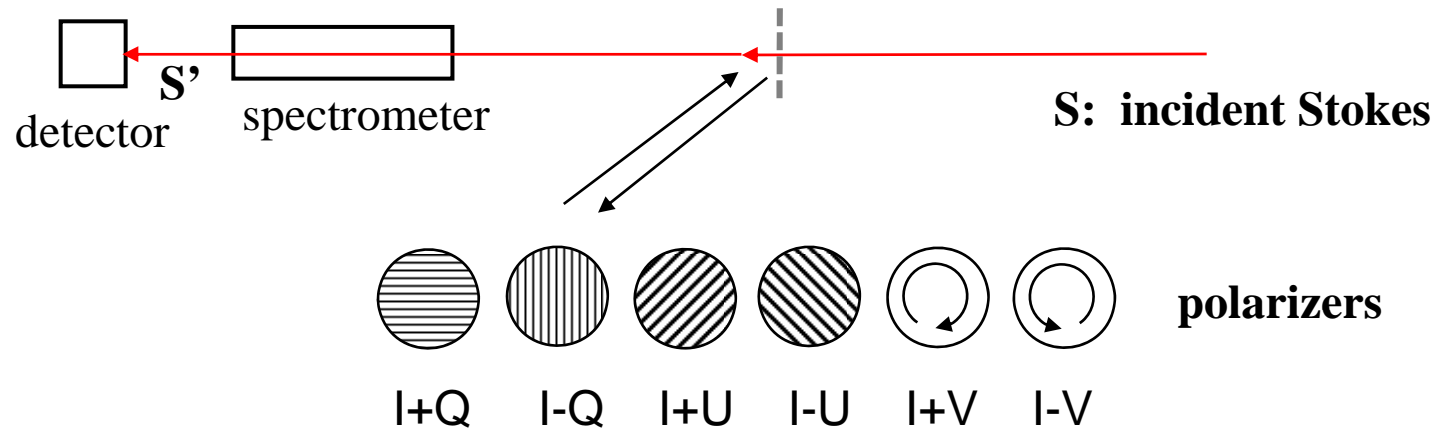


Stokes vector

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

偏光を分解する偏光解析装置

The most primitive polarimeter



Insert 6 different polarizers successively in the beam

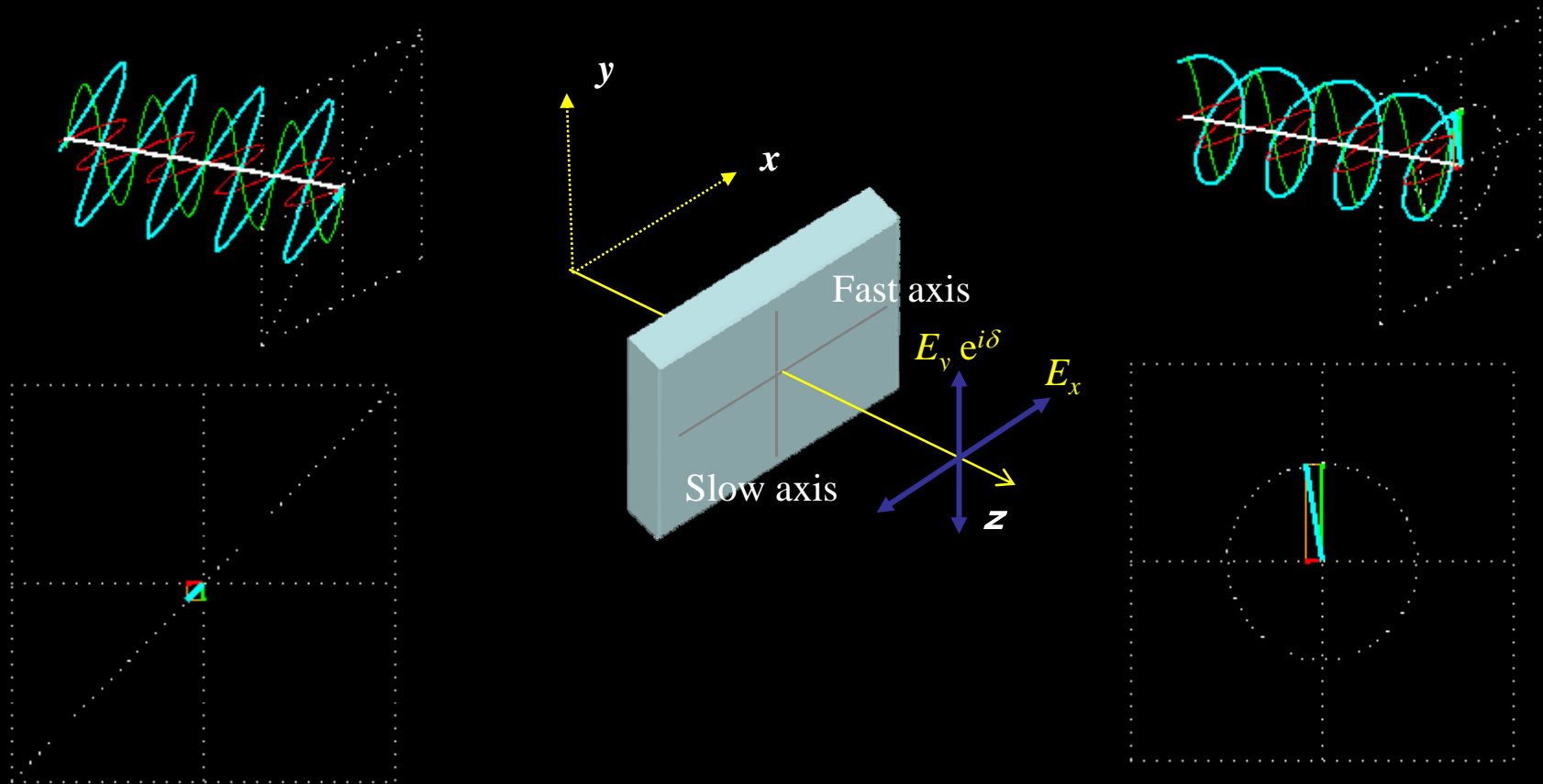
This polarimeter requires that the spectrometer and the detector have same throughput and sensitivity for all polarization states.

→ This is not the case in real devices.

Description of polarized light

Action of retarders on lights

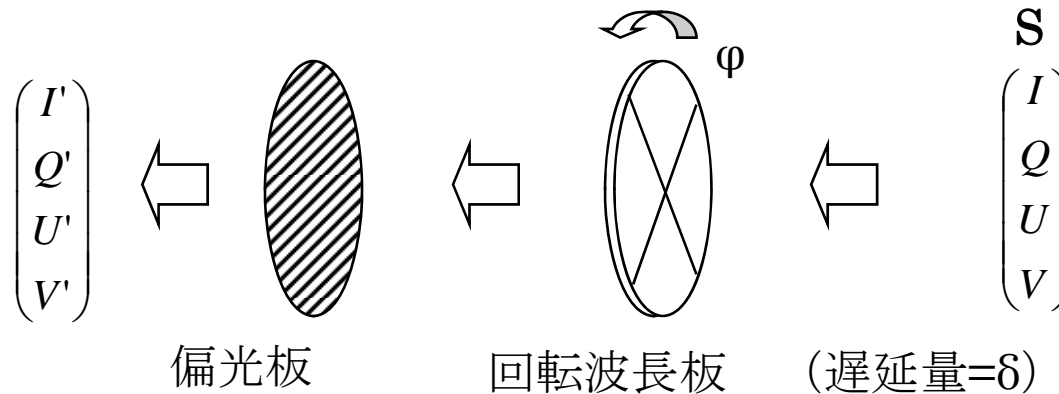
Linear retarder (90°)



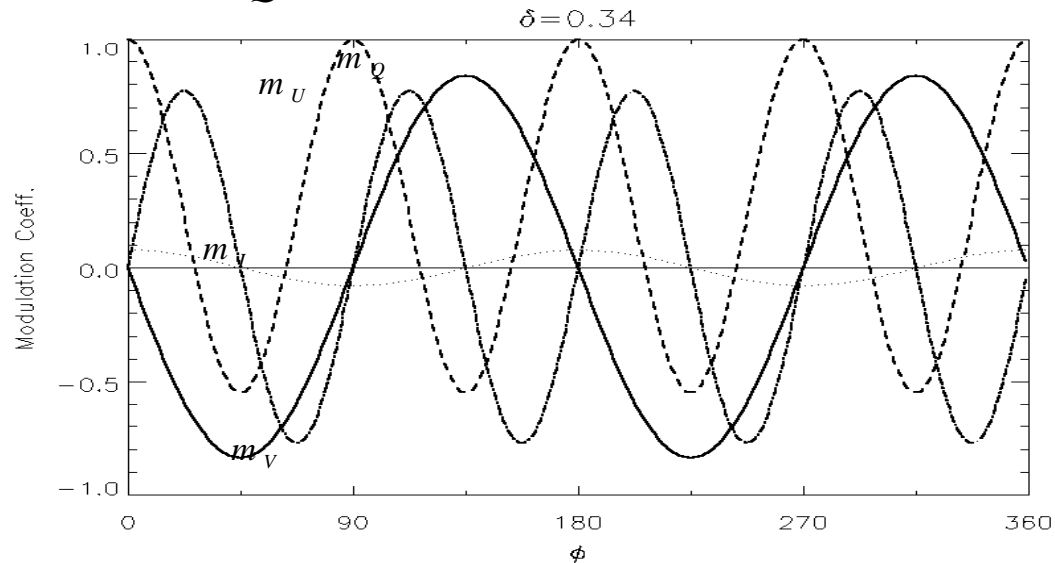
animation courtesy of Jose Carlos del Toro Iniesta

偏光を分解する偏光解析装置

A better polarimeter-1 (rotating waveplate)



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



世界の可視光望遠鏡

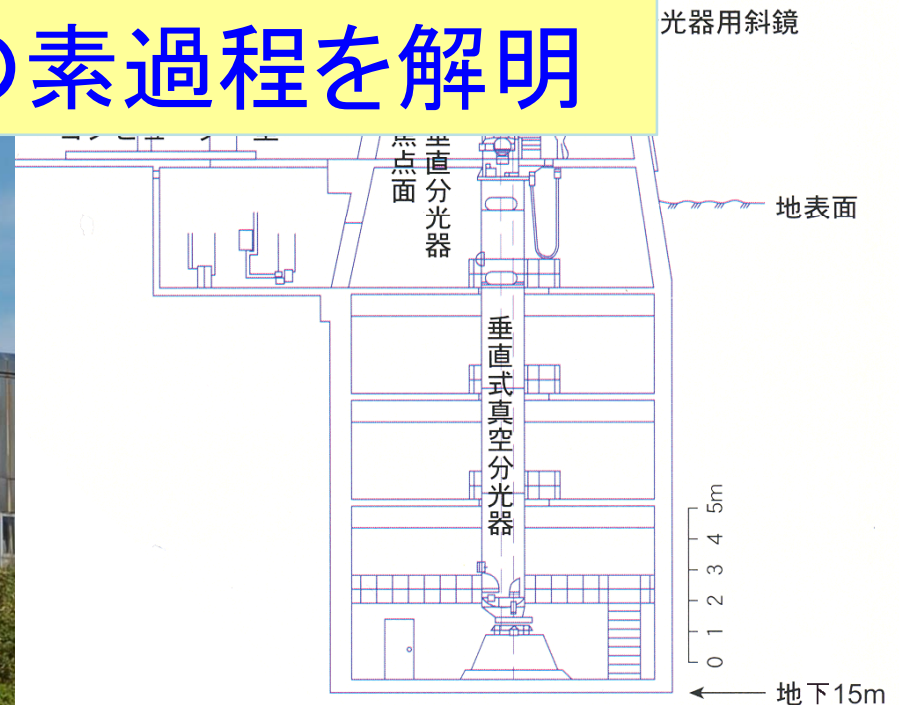
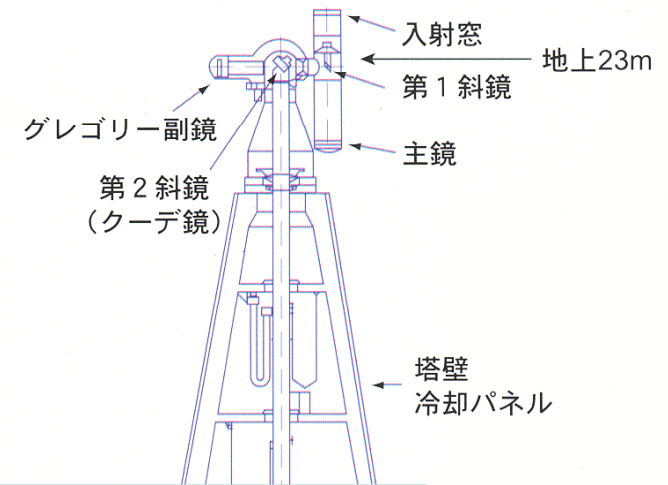
京都大学飛騨天文台 (北アルプスの麓1300m)



ドームレス太陽望遠鏡

世界屈指の真空太陽望遠鏡
“
分光装置

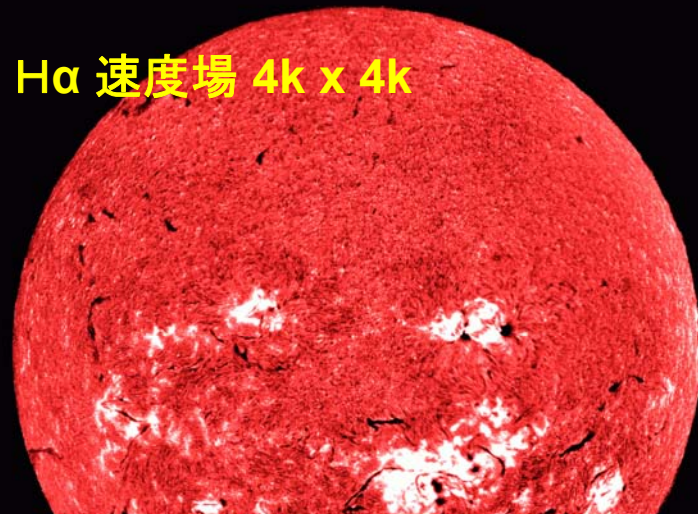
高空間分解能で精密な物理診断
→ 太陽プラズマの素過程を解明



SMART(Solar Magnetic Activity Research Telescope)

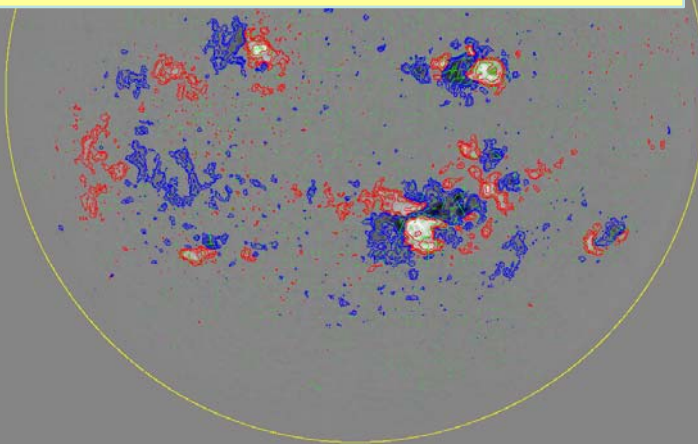
世界一高い分解能の太陽全面観測

H α 速度場 4k x 4k



大小スケールの磁場構造の時間発展
突発現象(爆発・噴出)を逃さず観測

→ 太陽の11年活動周期のしくみを解明し、
地球をとりまく宇宙環境を監視・予知する。



「ひので」衛星の搭載望遠鏡

可視光・磁場望遠鏡 (SOT)

0.2-0.3秒角
陽表面の磁場
フォトメトリック

地球

太陽

太陽同期極軌道

高度: 680 km

周期: 97 min

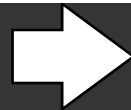
24hr/日 9ヶ月/年

量 (EIS)

くで視線方
速度検出
~1%、分
三倒。

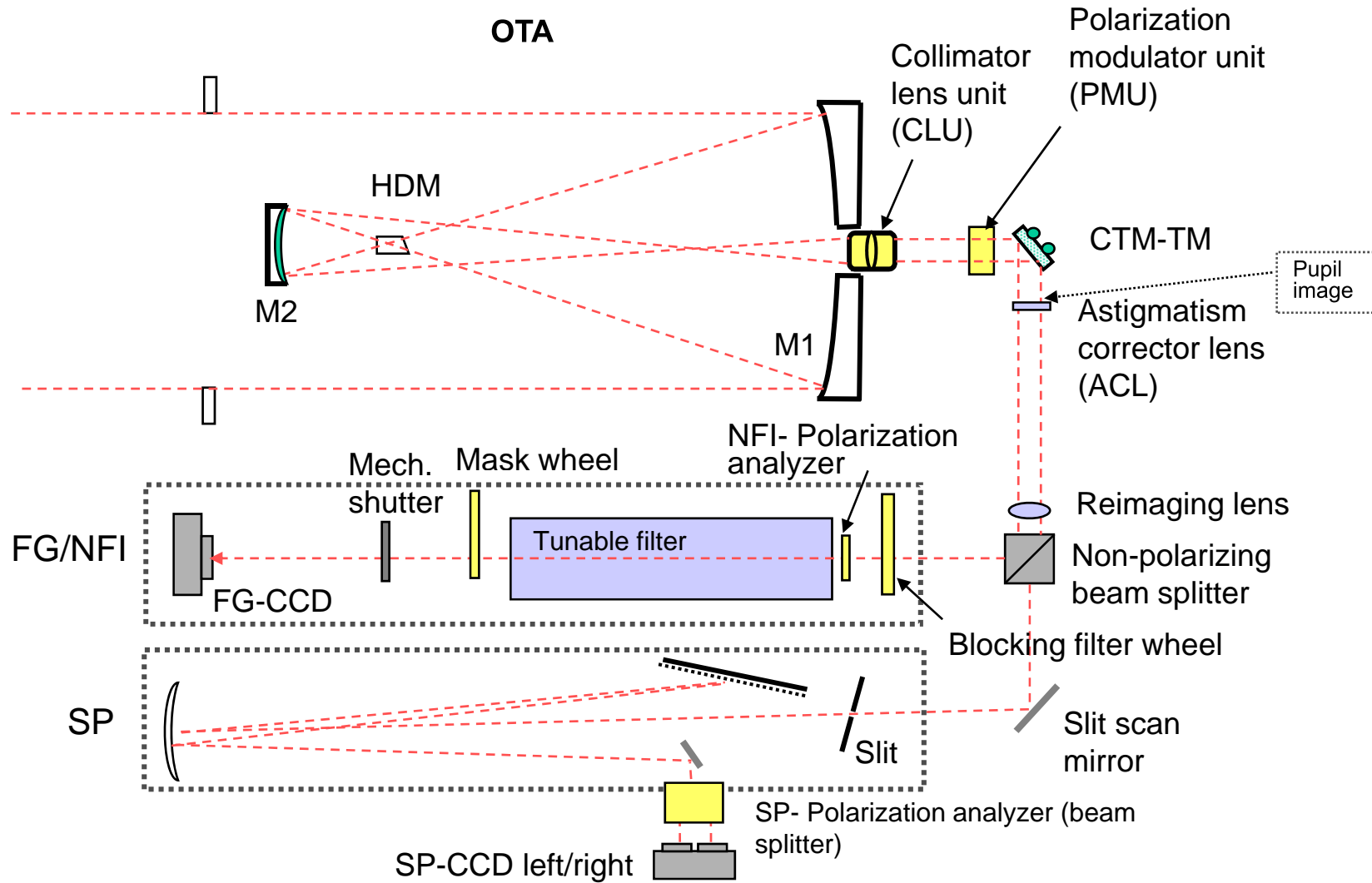
T)

ナを撮像
感度。



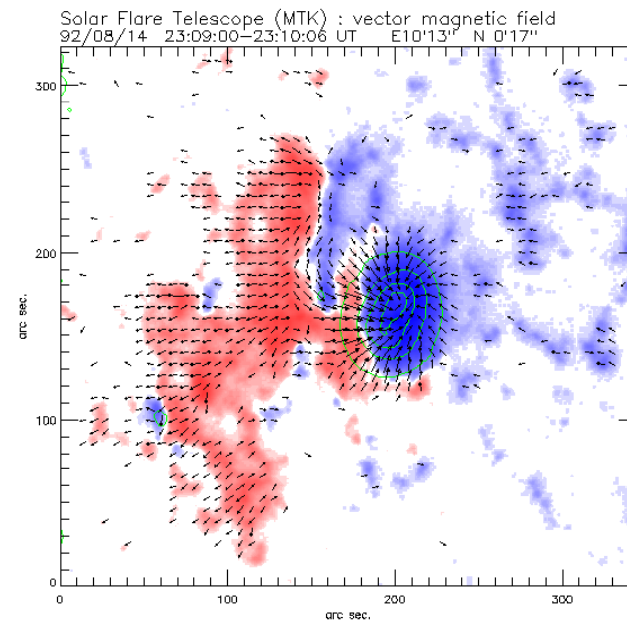
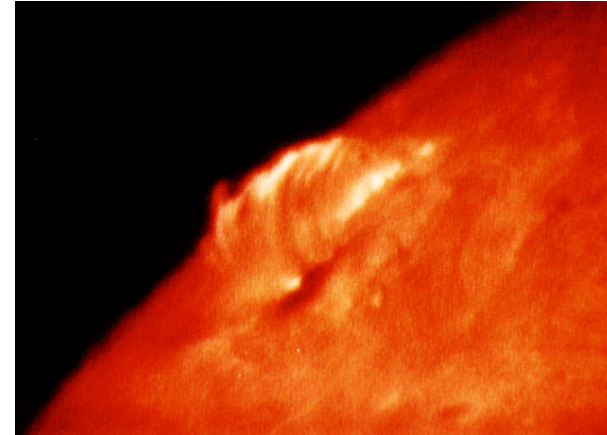
3望遠鏡の同時観測により、磁場の生成
輸送と彩層・コロナでの散逸を同時観測

SOT/Hinode polarimeter



国立天文台三鷹 太陽フレア望遠鏡(1991~)

太陽フレアとその起源となる光球磁場の発展を観測



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	?
EST (TBD)	4?	open	?
NST (BigBear)	1.6	open, off-axis	2009
McMath (KitPeak)	1.6	heliostat	1961
GREGOR (Tenerife)	1.5	open	2010?
COSMO (?)	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。

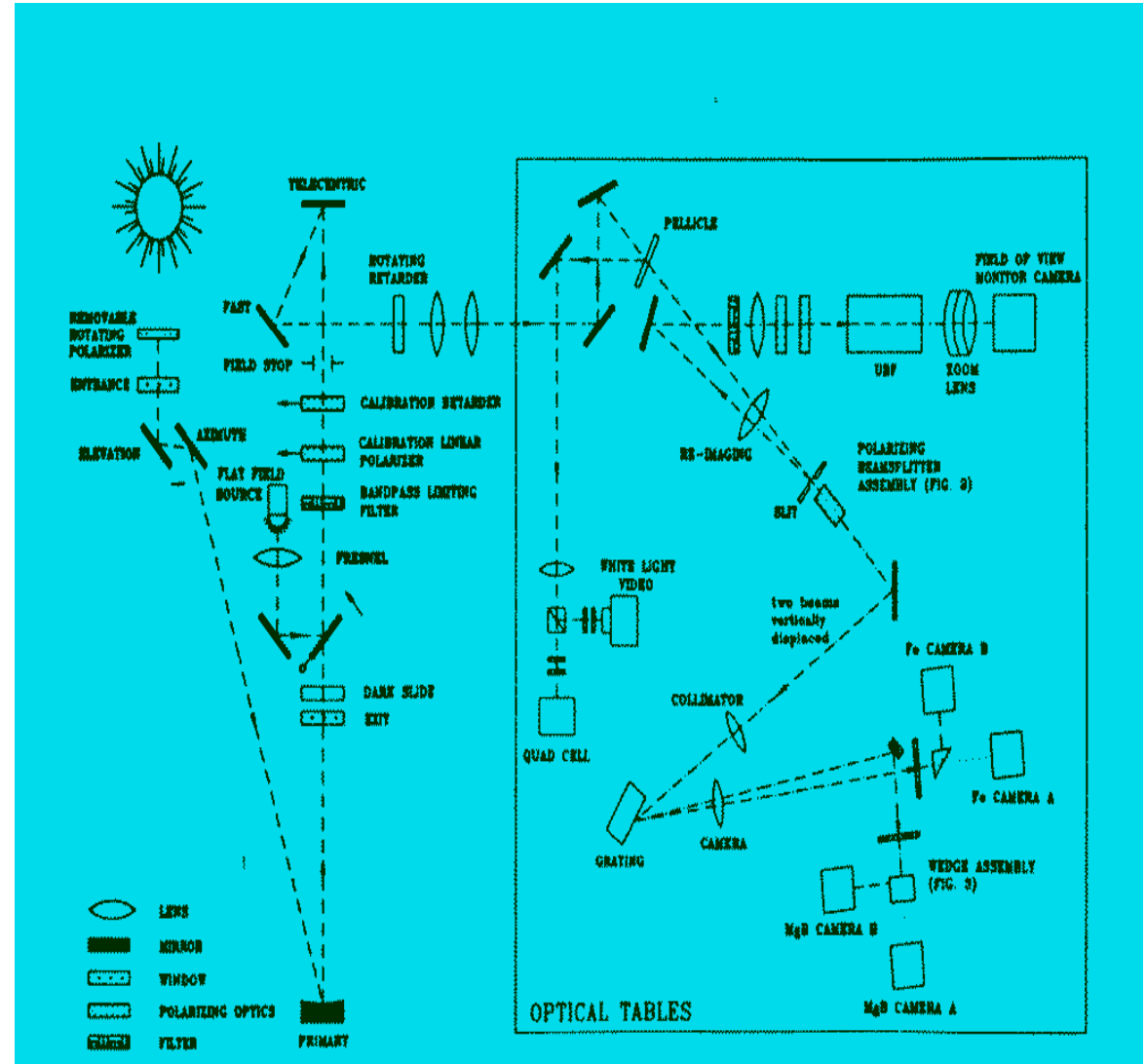
マシンタイムの取合い、実験的観測をしづらい。

灰: 計画

青: 建設中

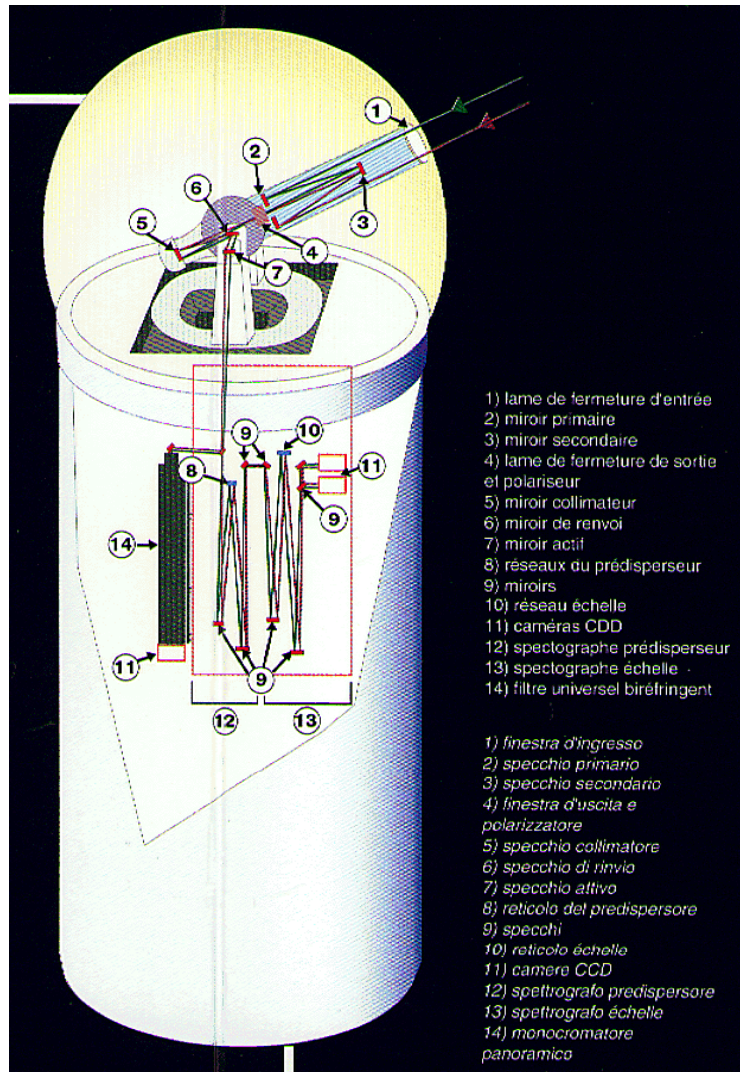
黒: 既存

SacPeak, Dun Solar Telescope

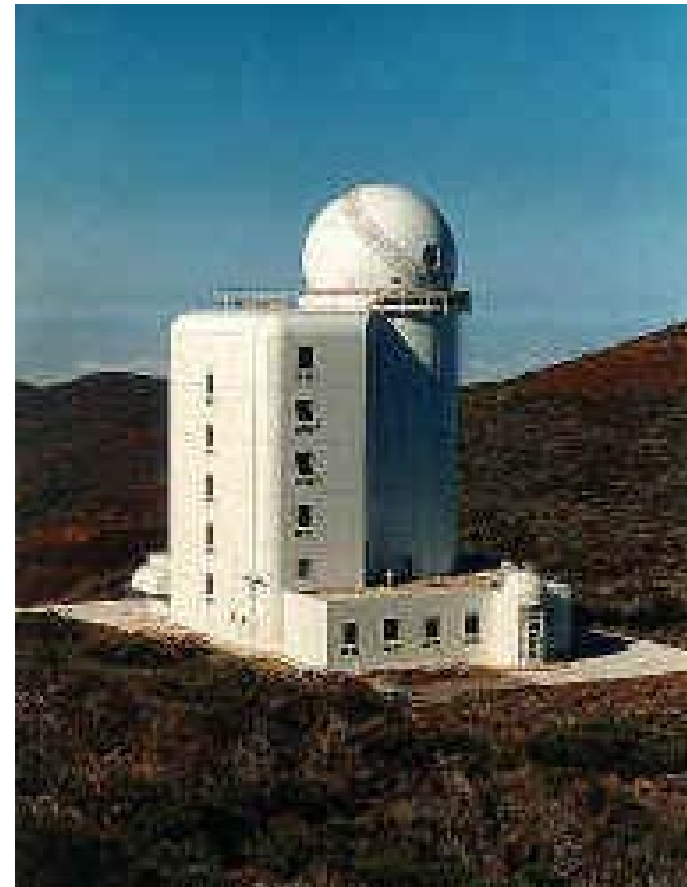


Advanced Stokes Polarimeter (ASP) @ SacPeak
 Diffraction Limited Stokes Polarimeter (DLSP)

THEMIS

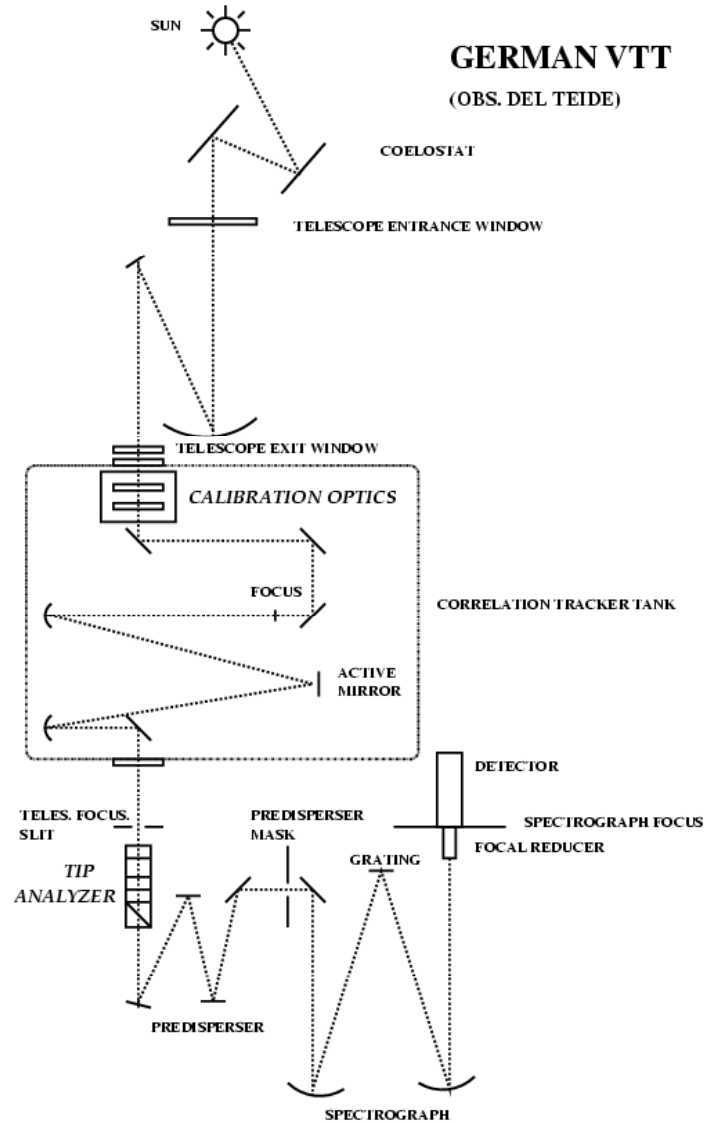


THEMIS at Obs. del Teide



0.9m axi-symmetric telescope

Tenerife VTT (German)

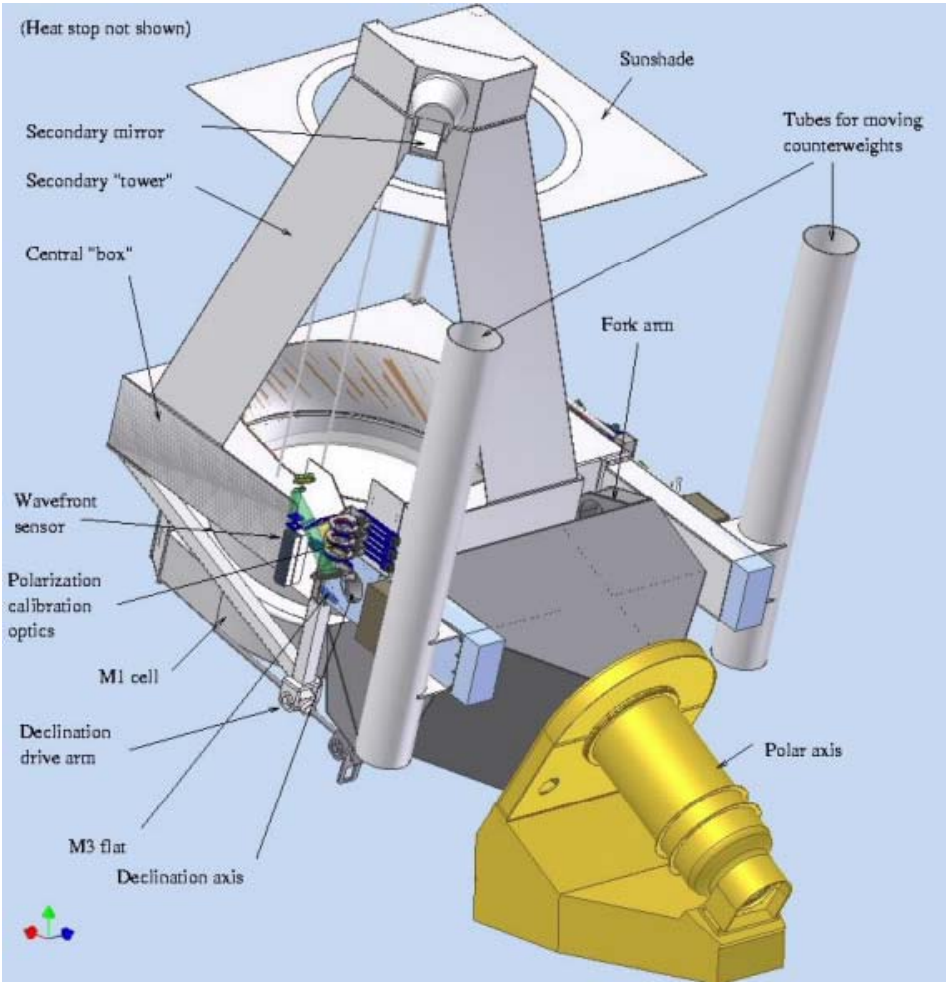
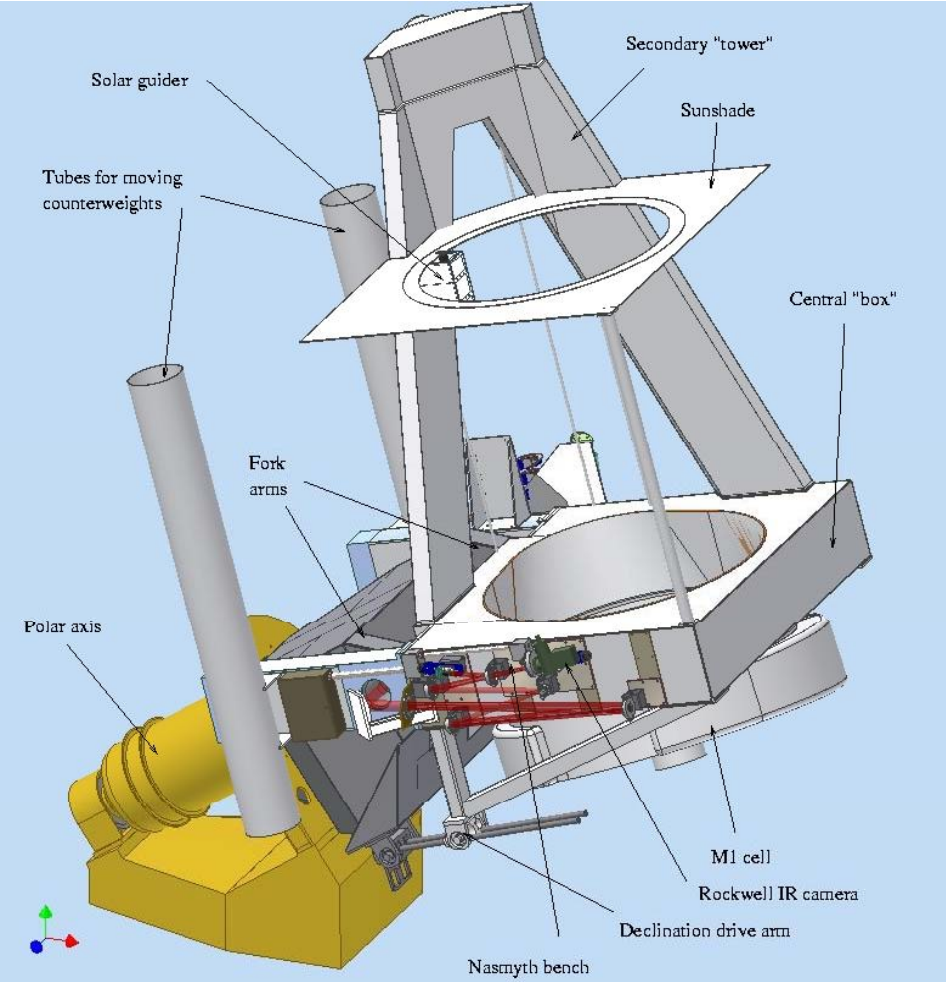


VTT at Obs. del Teide (see [Collados 1999](#))

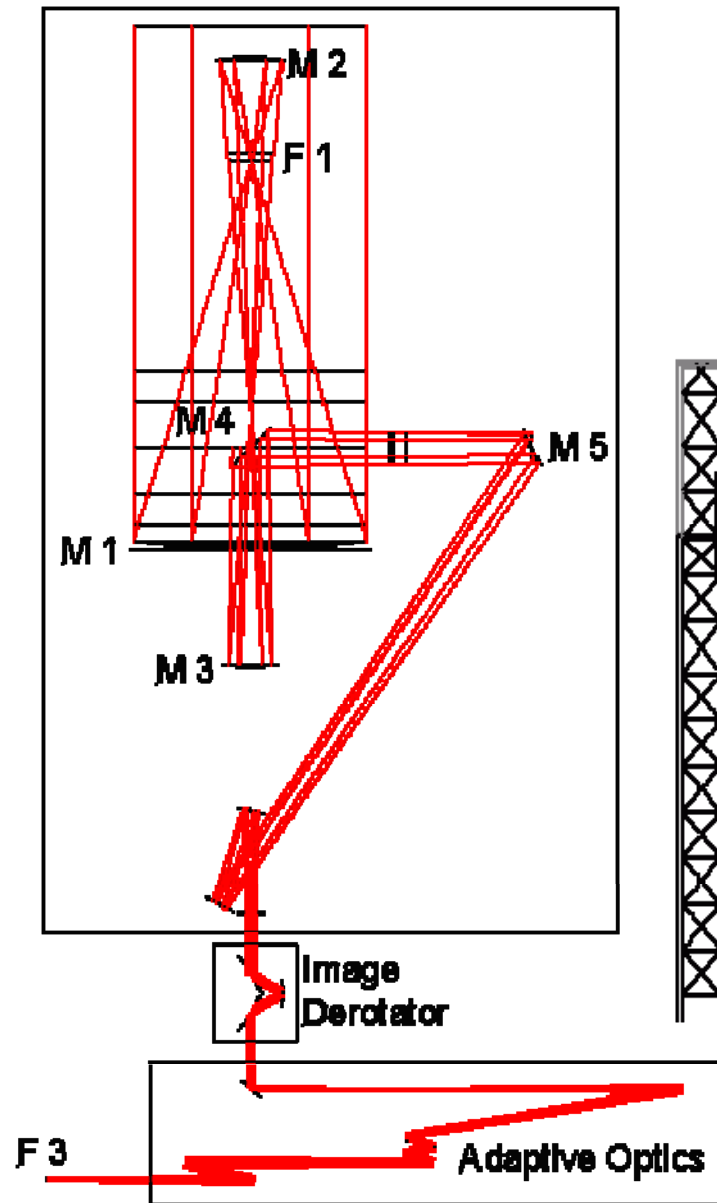


Big Bear Solar Observatory (US)

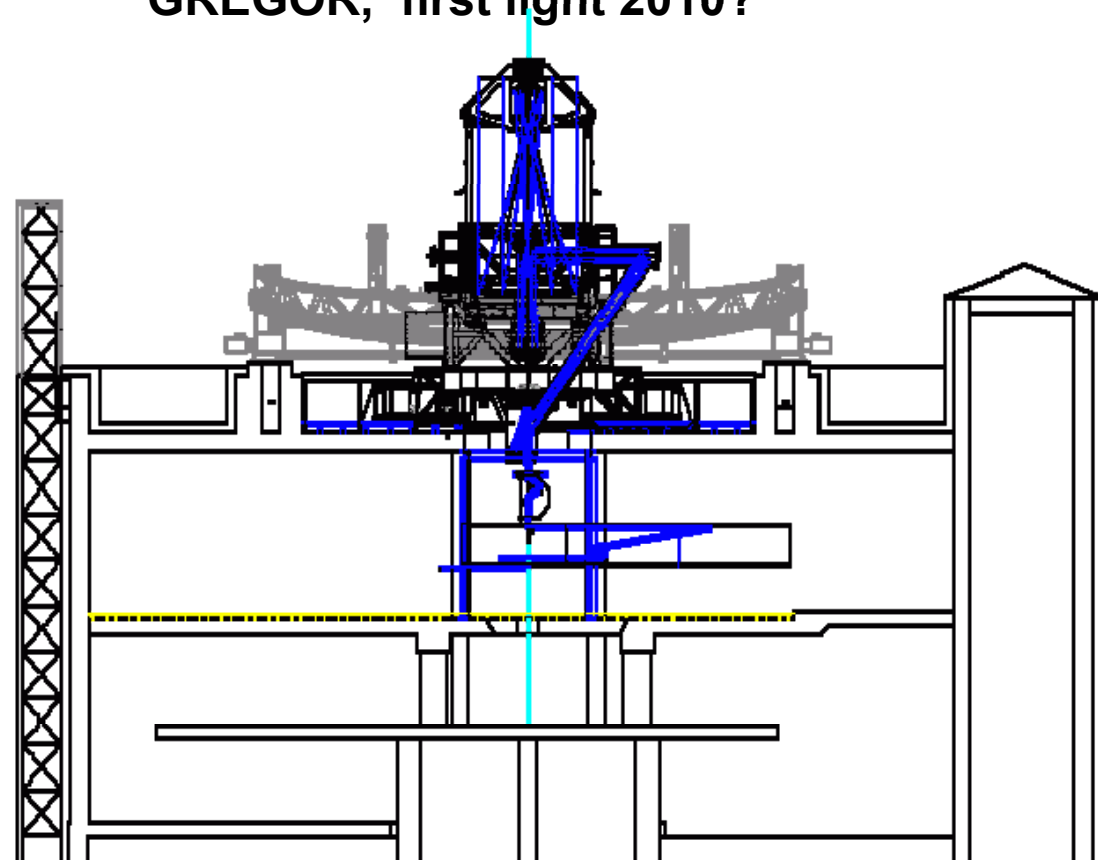
NST (New Solar Telescope)



Tenerife GREGOR (German)

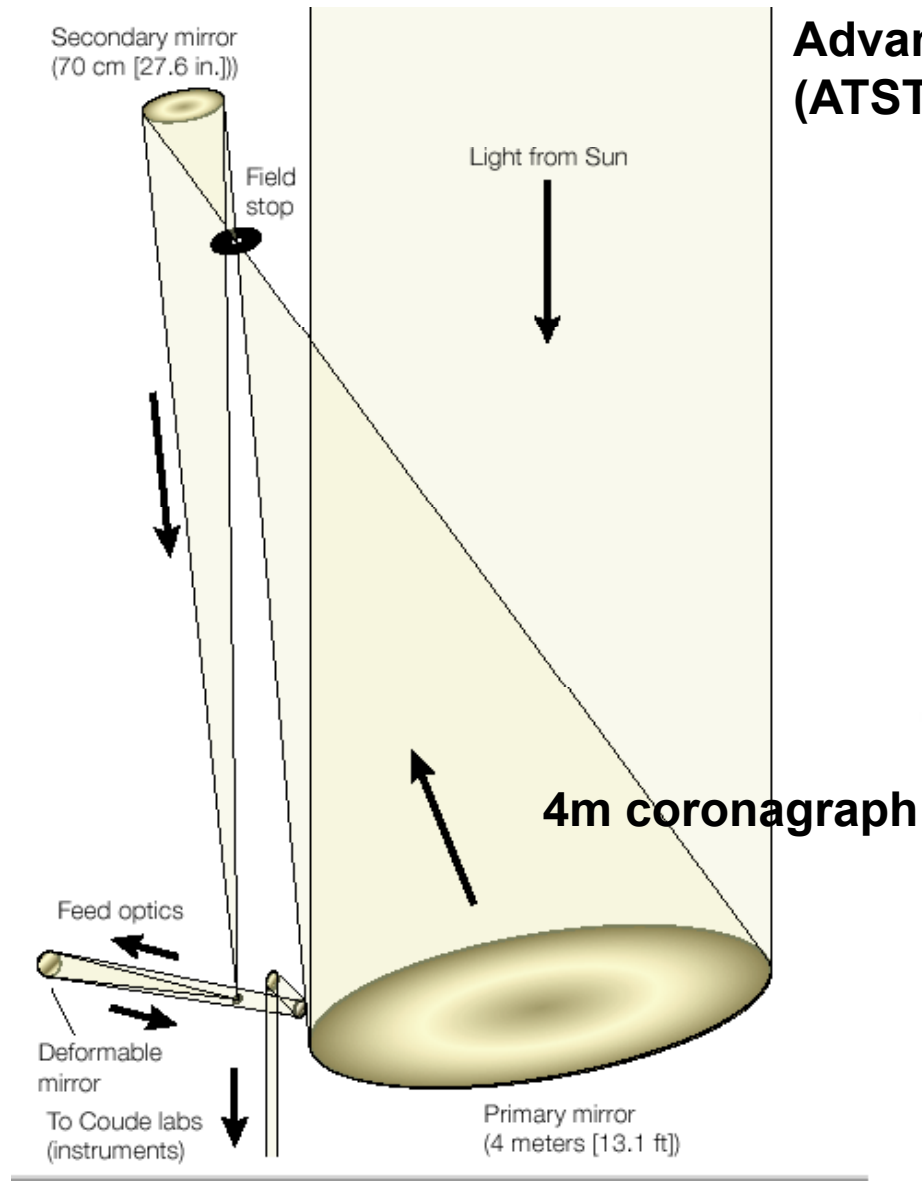


GREGOR, first light 2010?

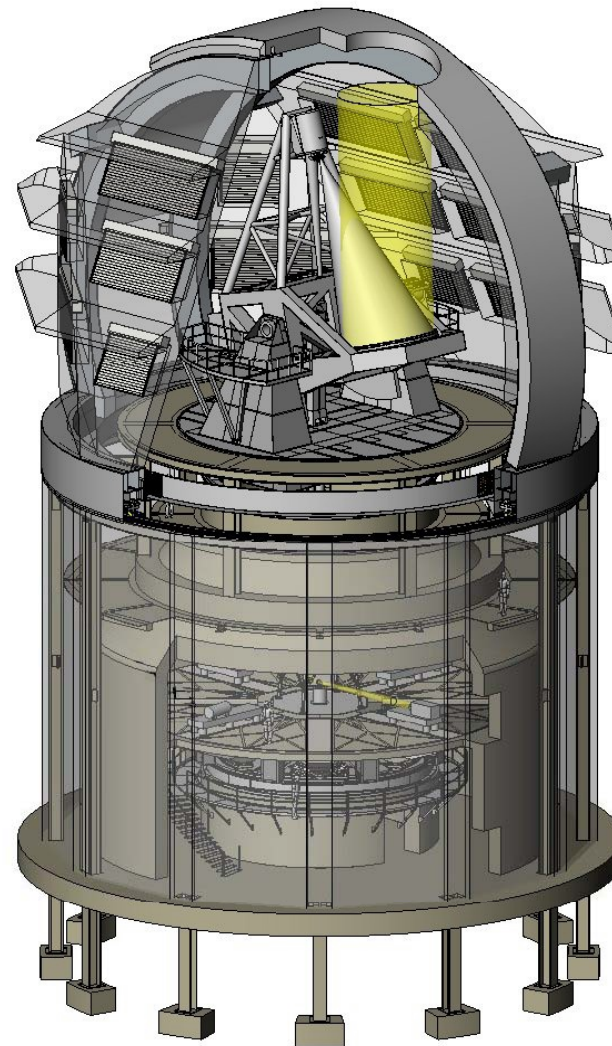


1.6m axi-symmetric telescope

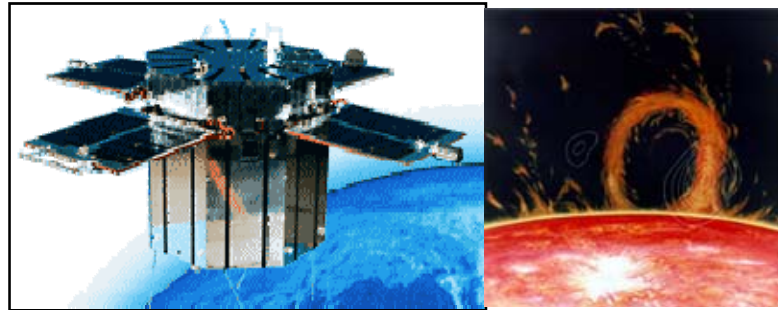
ATST (Hawaii)



Advanced Technology Solar Telescope (ATST, first light 2014?)

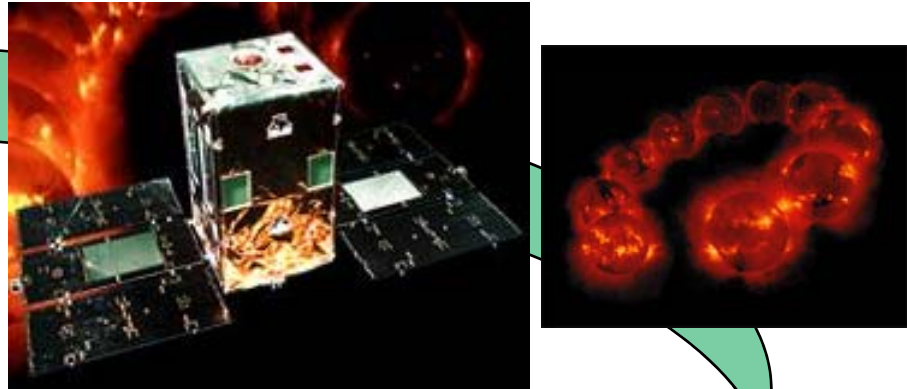


日本の太陽観測ミッション、次はSolar-C



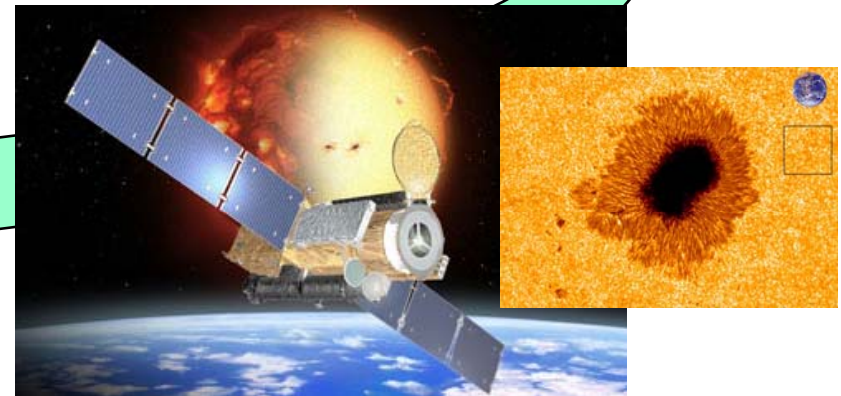
ひのとり/ASTRO-A (1981-1982)
Solar flare
X-ray, γ -ray ($E > 10$ keV)

ようこう/SOLAR-A (1991-2001)



Flare, Corona
X-ray, γ -ray ($E > 0.1$ keV)

ひので/SOLAR-B (2006-)



Photosphere, chromosphere,
transition region, corona, flare
Visible, EUV, X-ray

SOLAR-C
2017 (目標)

2007.12、JAXAに検討ワーキンググループ発足
(JAXA宇宙科学研究本部、国立天文台、京大、東大、)

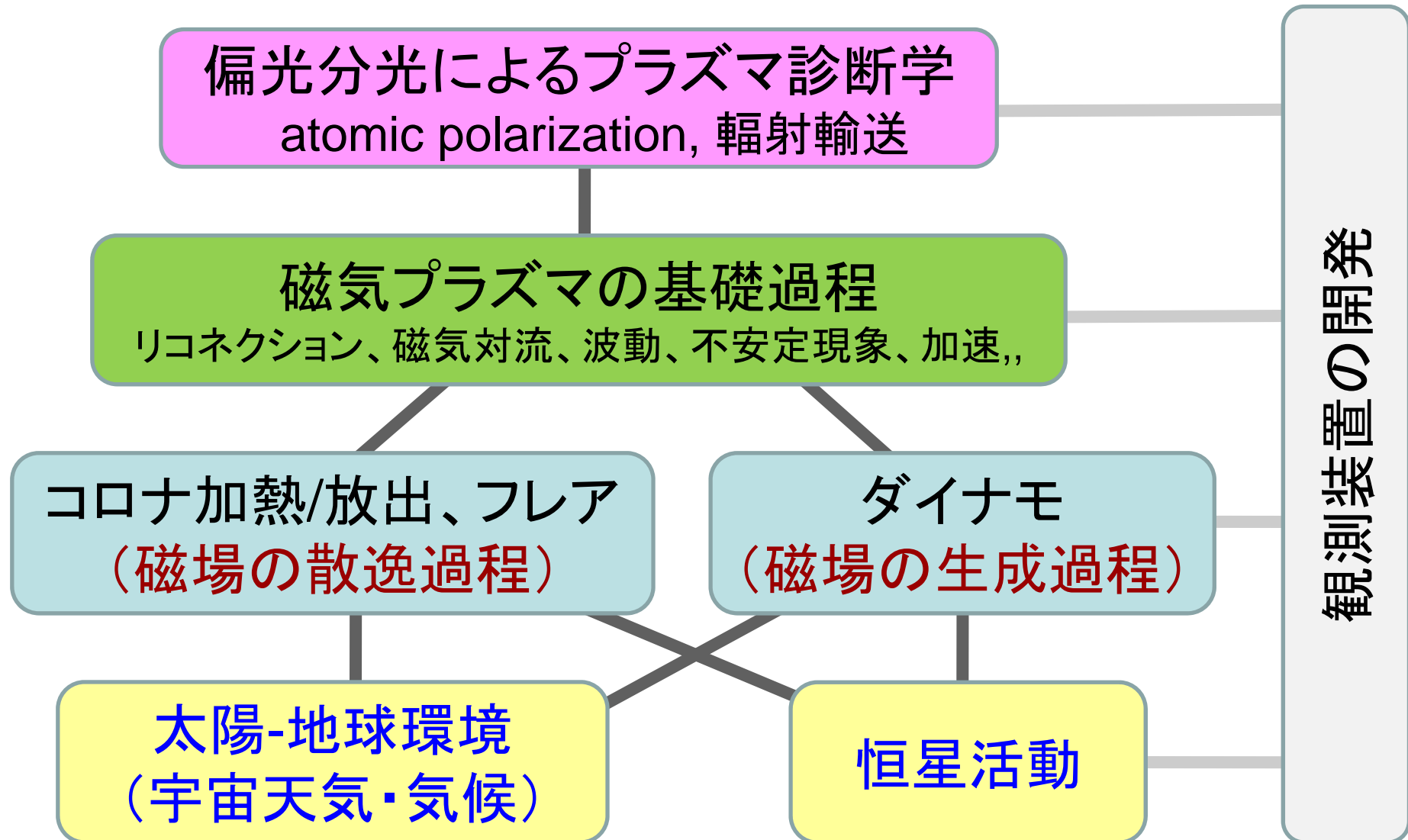
まとめ:

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)

全部必要！ → 得意な分野を生かして活躍できます。

京都大学理・附属天文台でできる研究



京都大学理・附属天文台でできる観測研究

- ひのりと飛騨天文台の望遠鏡を使った観測研究
(太陽現象一般)
- さらに野辺山や海外施設を使った観測研究
- ドームレス望遠鏡やSMARTでの装置開発、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、、)
-