

太陽を調べる光の目

京都大学・理学研究科附属
花山・飛驒天文台

一本 潔、協力:上野 悟

太陽研究最前線体験ツアー

2010.8.17-20

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 1日 東京大学東京天文台助手
平成 8年 1月 1日 文部科学省 国立天文台助教授
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(太陽黒点、コロナ)、偏光分光プラズマ診断、装置開発

関わったプロジェクト:

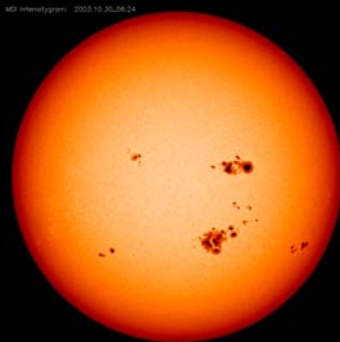
飛驒天文台、ひので可視光望遠鏡、乗鞍コロナ観測所、
国立天文台三鷹望遠鏡、皆既日食遠征(チリ、トルコ、...)

内容:

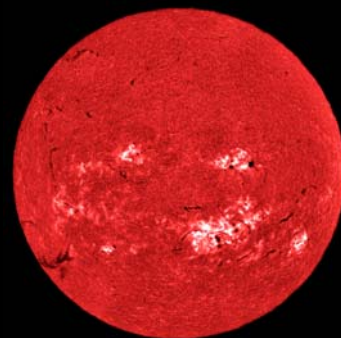
1. いろいろな光で見た太陽
 - 光に含まれる情報
 - 光の種類とスペクトル
 - 太陽スペクトル
2. スペクトルのでき方
 - 連続光の形成
 - 線スペクトルの形成
 - 太陽の周辺減光
 - 太陽の大気構造
 - 原子スペクトルの偏光とプラズマ診断
3. 光を読みとる観測装置
 - 空間を分解する望遠鏡
 - シーイングと補償光学系
 - 波長を分解する分光装置
 - 偏光を分解する偏光解析装置
 - 世界の太陽望遠鏡
4. 京都大学理・附属天文台でできる観測研究
 - 太陽の研究課題
 - 装置開発のプロジェクト
5. まとめ

1. いろいろな光で見た太陽

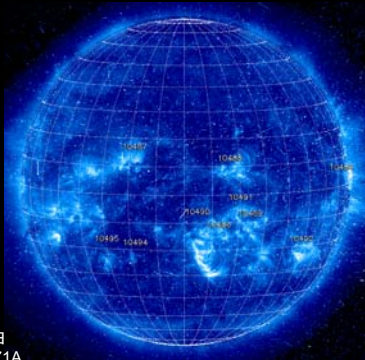
可視連続光で見た太陽
(光球=5800度)



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)



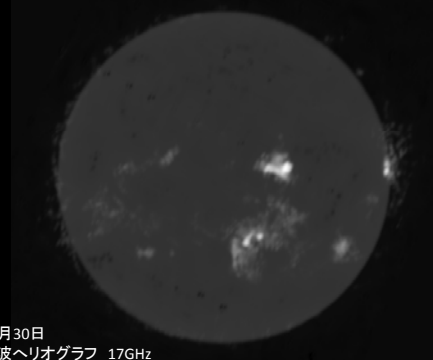
極紫外線で観た太陽 コロナ 100万度



2003年10月30日
EIT Fe IX/X, 171Å

7

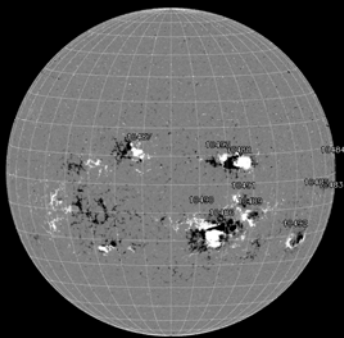
電波で観た太陽



2003年10月30日
野場山電波ヘリオグラフ 17GHz

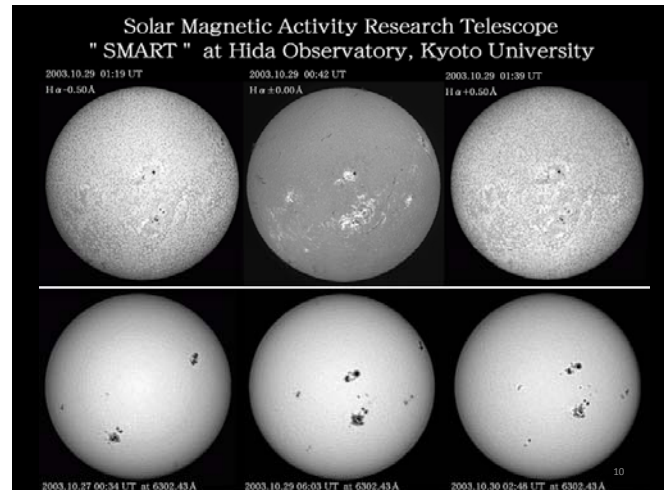
8

「偏光」で観た太陽 磁場



2003年10月30日
MDI 磁場

9



10

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れ伝わるかを理解することが、
「天体物理学」の出发点！

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 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

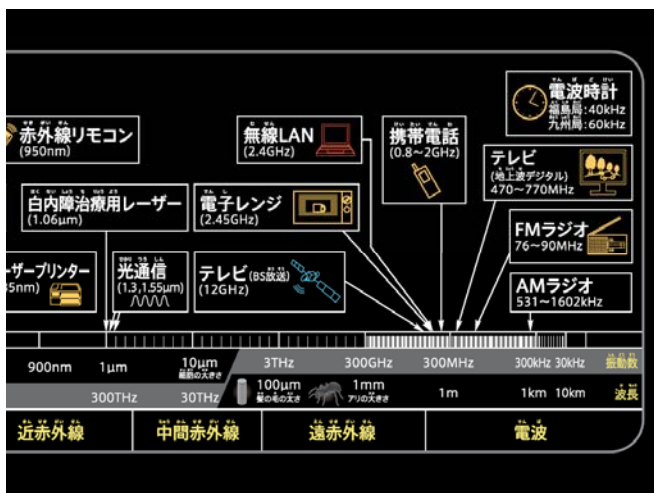
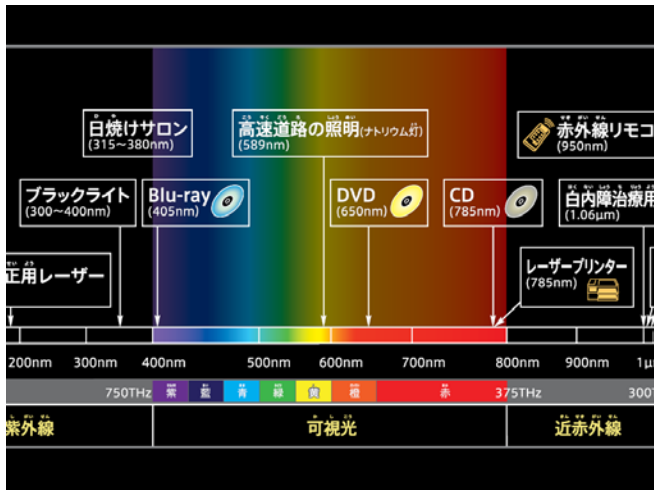
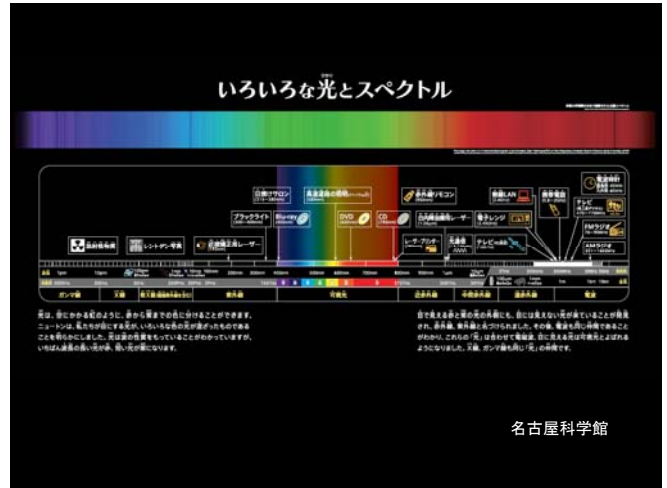
(磁場、電場、放射場の異方性、、、)

11

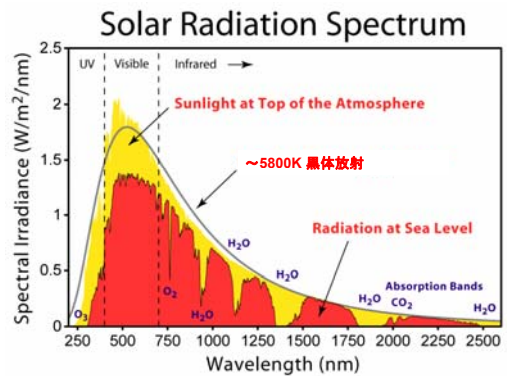
12

光の種類とスペクトル

13



太陽スペクトル

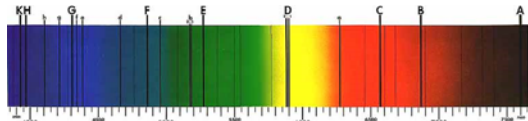


http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_radiation

18

Fraunhofer lines

1814, German physicist [Joseph von Fraunhofer](#)

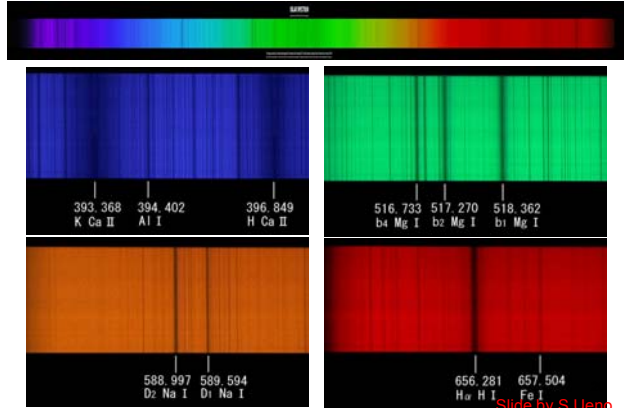


A線	O ₂	759.370 nm
B線	O ₂	686.719
C線	H α	656.281
D ₁ 線	Na	589.594
D ₂ 線	Na	588.997
D ₃ 線	He	587.565
E ₂ 線	Fe	527.039
F線	H β	486.134
G線	Fe	430.790
H線	Ca+	396.847
K線	Ca+	393.368

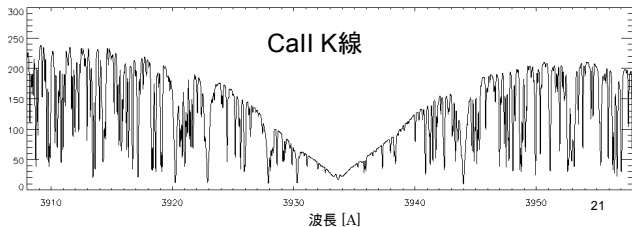
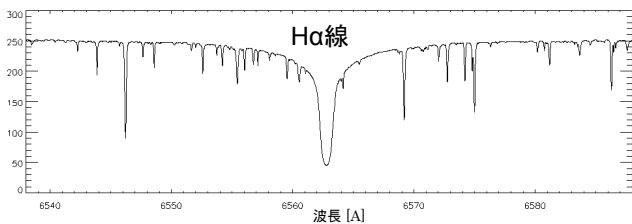
19

◆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

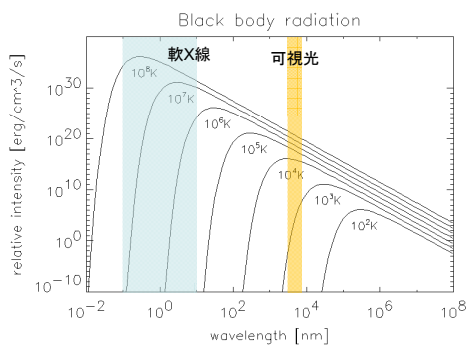


2. スペクトルのでき方

22

温度と光のスペクトル(連続光)

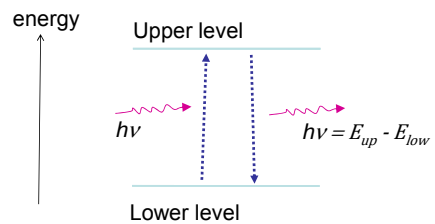
黒体放射
$$\pi B_{\lambda}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/kT\lambda) - 1}$$



23

原子状態と線スペクトル

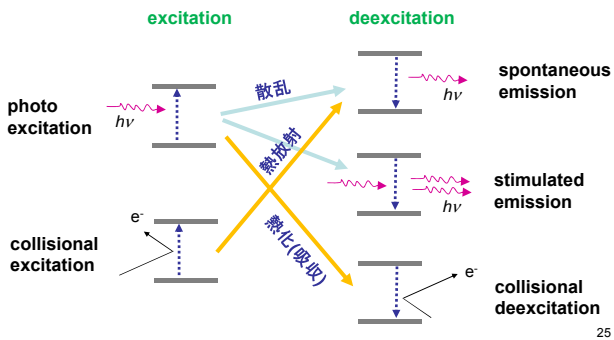
原子の線スペクトル \leftrightarrow 2つのエネルギーレベル間の状態遷移



24

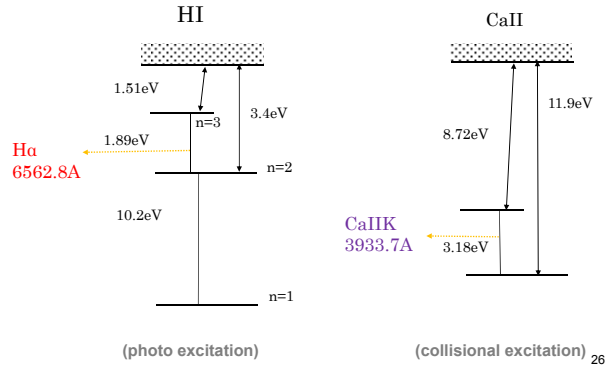
原子と光の相互作用

Matter-photon interactions; beyond the LTE



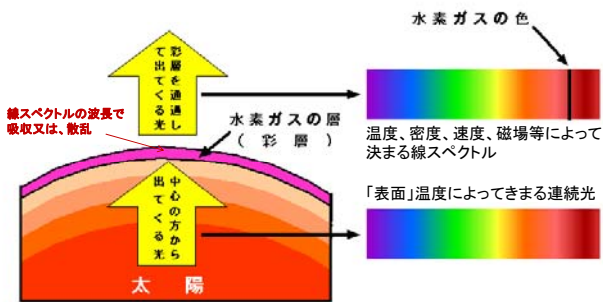
25

たとえば、



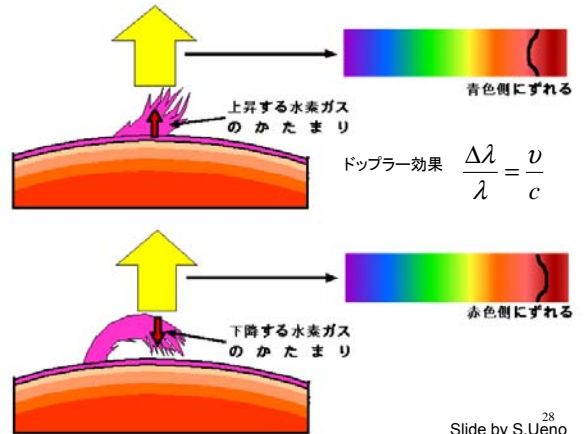
26

線スペクトルのでき方



Slide by S.Ueno 27

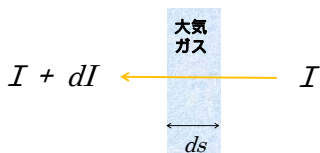
ドップラーシフト



Slide by S.Ueno 28

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 : 単位長さあたりの吸収量
 j_ν : 単位長さあたりの放射量
 (T, n, ν)

29

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

$$\frac{dI_\nu}{k_\nu ds} = -I_\nu + \frac{j_\nu}{k_\nu} \quad k_\nu ds \rightarrow d\tau_\nu \quad \text{: optical thickness (光学的深さ)}$$

$$\frac{j_\nu}{k_\nu} \rightarrow S_\nu \sim B(T) \quad \text{: source function (源泉関数)}$$

(~はキルヒホッフの法則、B(T)はプランク関数)

輻射輸送の式

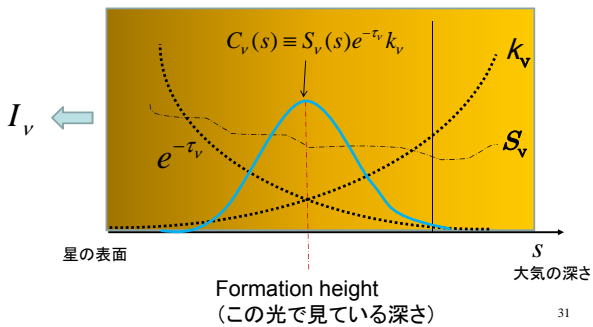
$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = -I_\nu + S_\nu$$

解: $I_\nu(\tau_\nu) = -e^{-\tau_\nu} \int_0^{\tau_\nu} S_\nu e^{-t} dt$ 星の表面から出てくる光

$$\tau_\nu = 0 \quad I_\nu = \int_0^\infty S_\nu(s) e^{-\tau_\nu} k_\nu ds$$

30

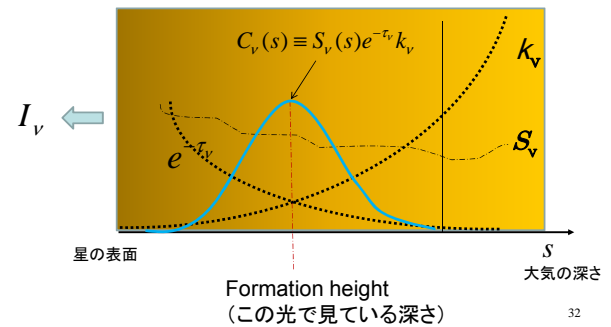
$$I_\nu = \int_0^\infty \underbrace{S_\nu(s) e^{-\tau_\nu} k_\nu}_{\text{Contribution function}} ds$$



31

$$I_\nu = \int_0^\infty \underbrace{S_\nu(s) e^{-\tau_\nu} k_\nu}_{\text{Contribution function}} ds$$

より不透明な光
→ 大気のより高いところを見る

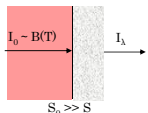


32

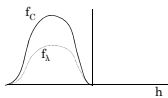
吸収線のでき方: 2つの考え方

< Schuster-Schwarzschild >

手前にある冷たい層によって吸収される



吸収層がoptically thin のとき weak line

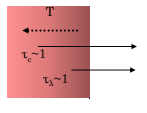


$$f_\lambda(\tau_\lambda) = \exp(-\tau_\lambda) f_c(\tau_\lambda)$$

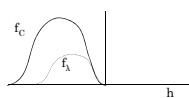
formation height \neq conrib.func.

< 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
→ weak line ほど深いところで形成



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

formation height = conrib.func.

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。

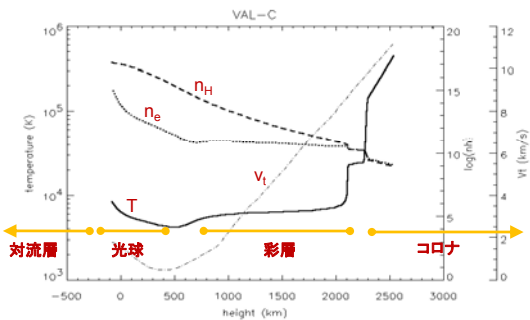
太陽はなぜ周辺が暗いのか? (周辺減光)

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。

2009-05-02 18:30:11

太陽の大気構造

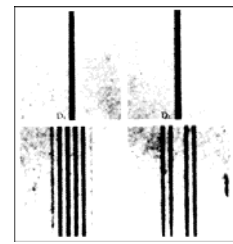


35

スペクトル線の偏光

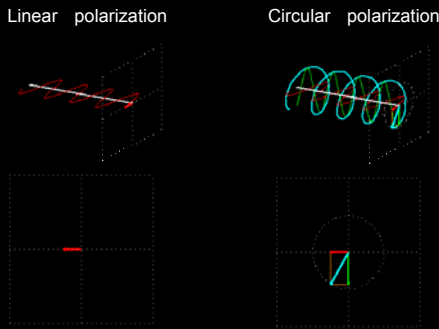
Zeeman効果の発見

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



36

Description of polarized light



animation courtesy of Jose Carlos del Toro Iniesta

偏光の記述; Stokes パラメータの定義

= I intensity
 = Q linear pol. in 0°-direction
 = U linear pol. in 45°-direction
 = V circular pol.

Intensity through ideal polarizer

Stokes vector

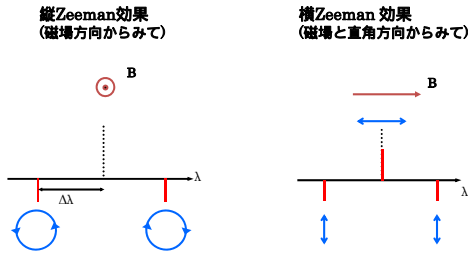
$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix}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

(unpolarized)

38

Zeeman 効果

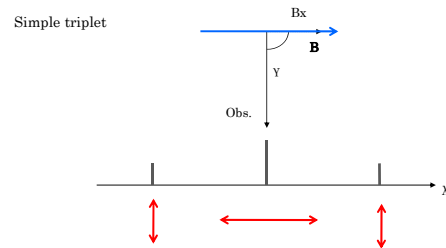
磁場によってスペクトル線が分離($\Delta\lambda \sim B$).
分離した各コンポーネントが偏光。



39

ゼーマン効果

Intensity and polarization of Zeeman components

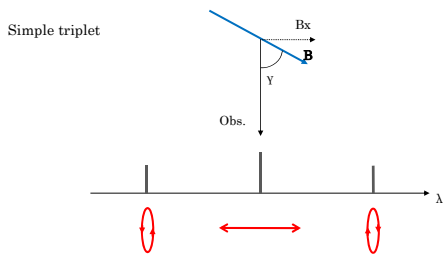


$$I_{\sigma^-} : I_{\pi} : I_{\sigma^+} = \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) : \frac{1}{2} \sin^2 \gamma : \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) \quad (I_{\sigma^-} + I_{\pi} + I_{\sigma^+} = 1)$$

40

ゼーマン効果

Intensity and polarization of Zeeman components

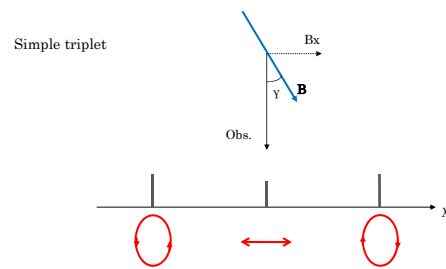


$$I_{\sigma^-} : I_{\pi} : I_{\sigma^+} = \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) : \frac{1}{2} \sin^2 \gamma : \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) \quad (I_{\sigma^-} + I_{\pi} + I_{\sigma^+} = 1)$$

41

ゼーマン効果

Intensity and polarization of Zeeman components

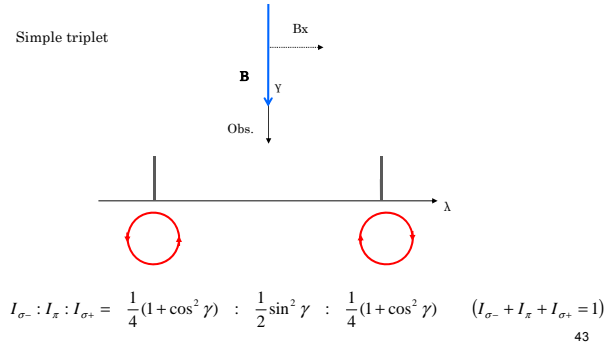


$$I_{\sigma^-} : I_{\pi} : I_{\sigma^+} = \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) : \frac{1}{2} \sin^2 \gamma : \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) \quad (I_{\sigma^-} + I_{\pi} + I_{\sigma^+} = 1)$$

42

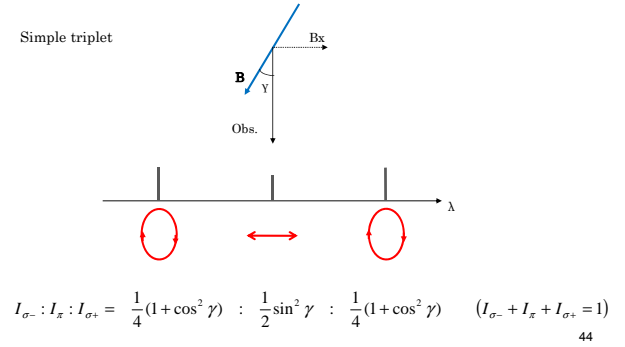
ゼーマン効果

Intensity and polarization of Zeeman components



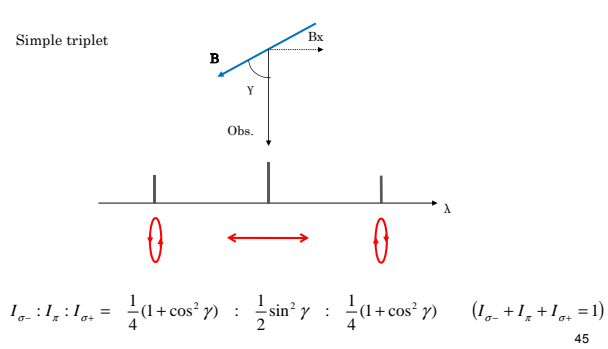
ゼーマン効果

Intensity and polarization of Zeeman components



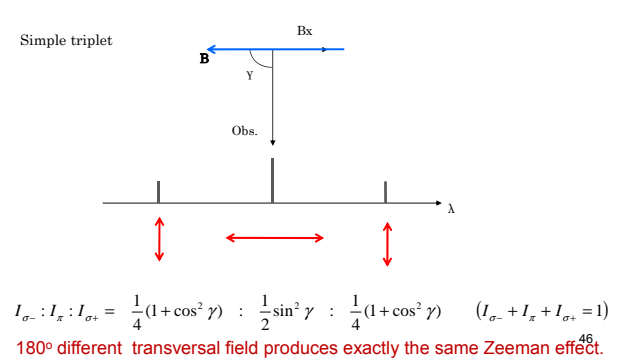
ゼーマン効果

Intensity and polarization of Zeeman components

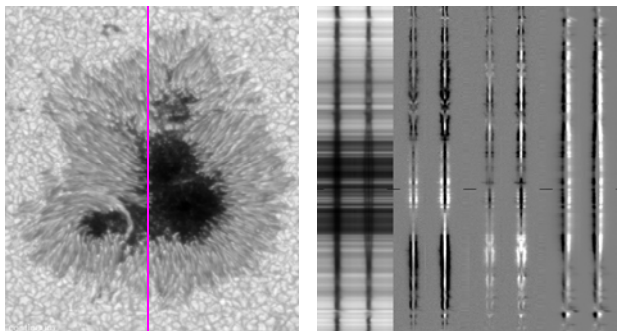
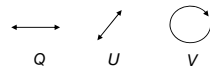


ゼーマン効果

Intensity and polarization of Zeeman components



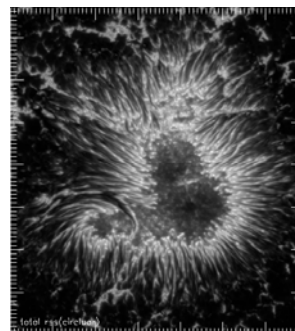
スペクトル線のゼーマン効果 (SOT/Spectro-polarimeter)



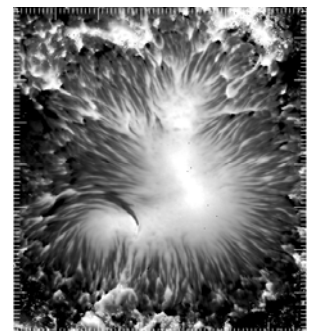
FeI6301.5A $g = 1.67$ FeI6302.5A $g = 2.5$ ひので、教科書には、...

47

円偏光

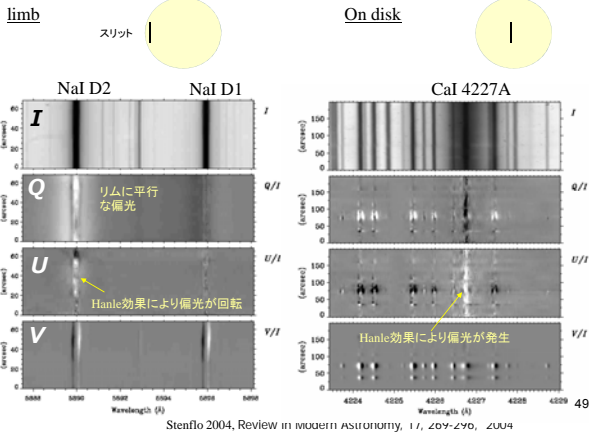


磁場の傾き



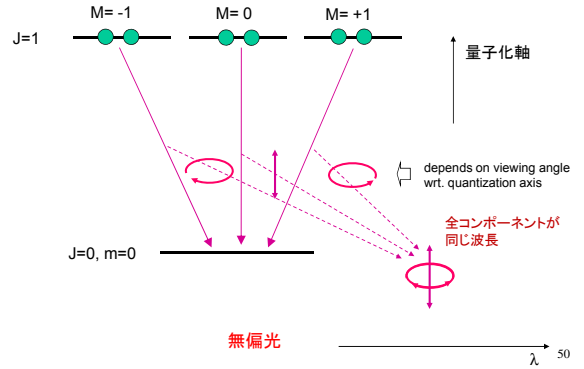
48

偏光は他にもある: ハンレ効果



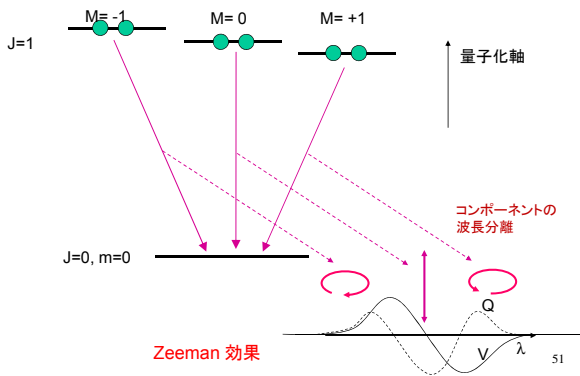
原子線の偏光メカニズム

各サブレベルからの遷移(コンポーネント)は偏光している。当方的な状態ではそれらはキャンセルして偏光は発生しない。



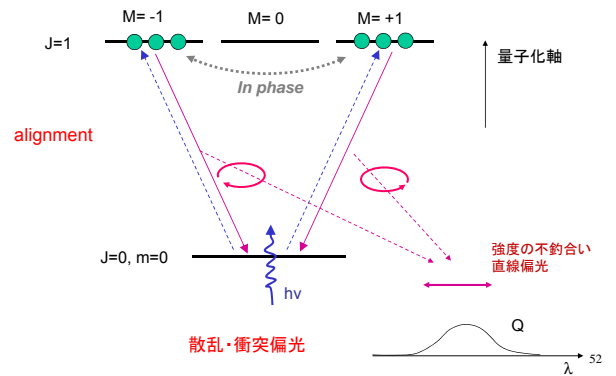
原子線の偏光メカニズム

磁場によってのコンポーネントのZeeman分離が起こり、線は偏光する。



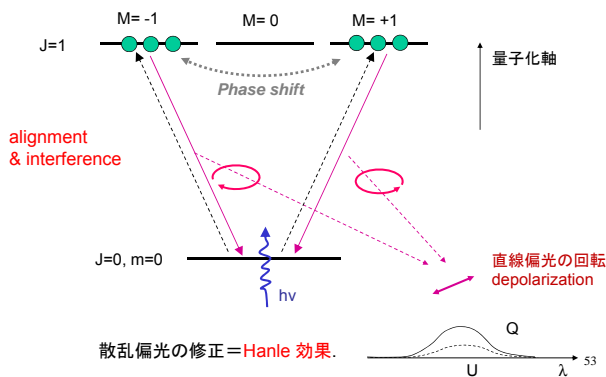
原子線の偏光メカニズム

非等方的な輻射場や粒子速度場による光 / 衝突励起によって、サブレベル間の分布の偏り(アライメント)が生じる。



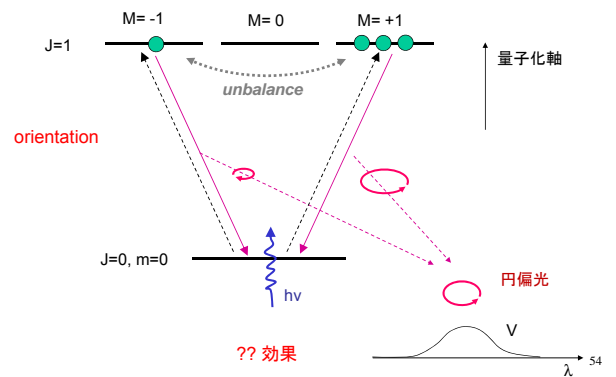
原子線の偏光メカニズム

弱い磁場によってサブレベル間に振動の位相差が発生する



原子線の偏光メカニズム

電場、或いは、磁場の中の衝突によって、サブレベル間の分布の偏り(オリエンテーション)が生じる。



偏光メカニズムとプラズマ診断量

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

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	遠鏡光コロナの分離(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

55

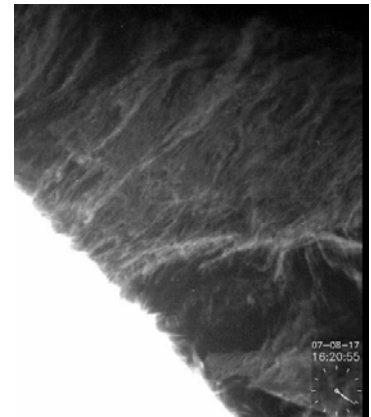
これはなんだ!?

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



高さ = $g t^2/2 = 10^6 \text{km}$
 重力 $g = 28 \text{G} = 274 \text{m/s}^2$
 → 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。。

56

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

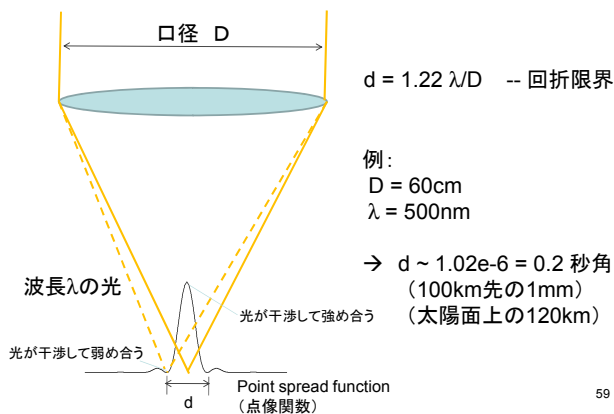
- 強度 $I(x,y,t,\lambda,p)$ — 温度、密度
- 依存性 x, y 方向 — 空間構造
- t 時間 — ダイナミクス
- λ 波長 — 運動、温度、密度、 z 方向空間構造、
- p 偏光 — ベクトルの物理量
(磁場、電場、輻射場の異方性、、、)

57

58

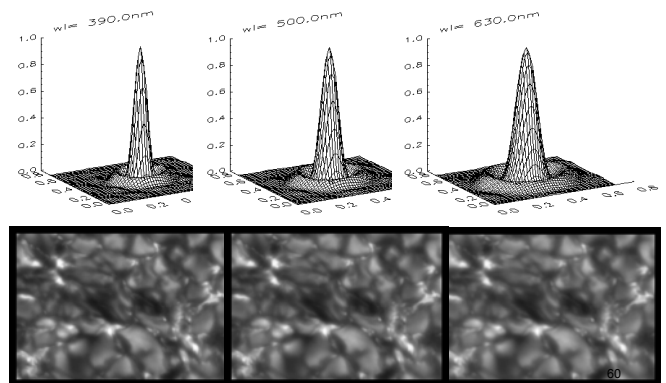
3. 光を読みとる観測装置

空間を分解する望遠鏡



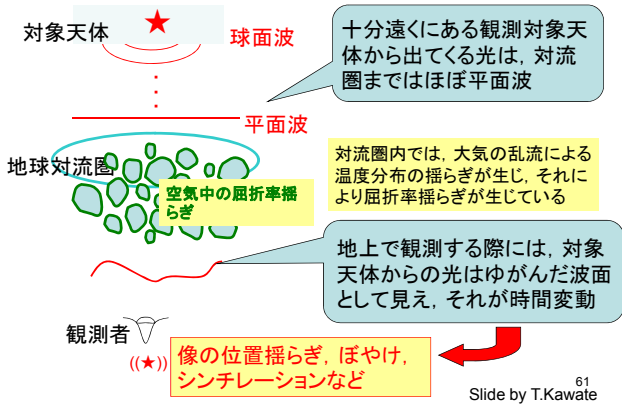
59

Point Spread Function (口径50cm 理想)

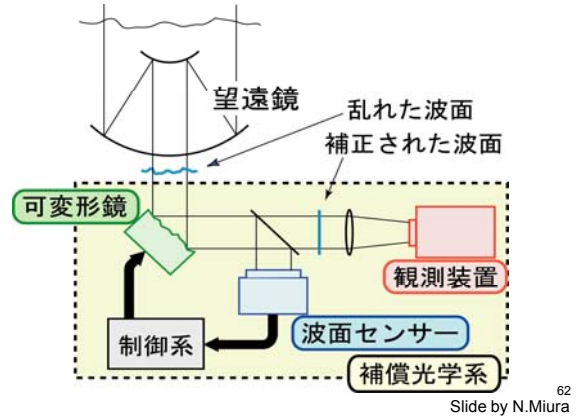


60

シーイングとは、



補償光学 (Adaptive Optics)

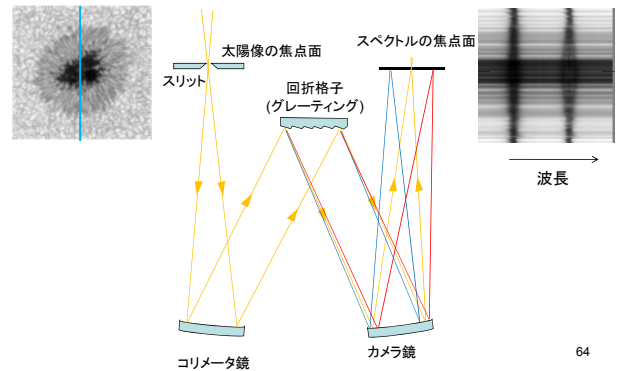


DSTの補償光学実験

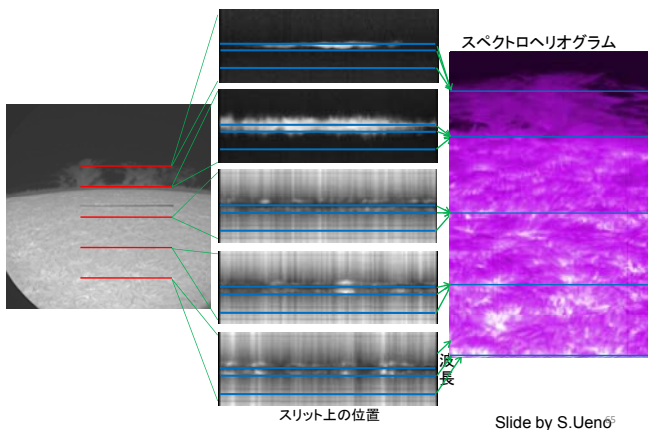
シーイングによる像のゆらぎ
AOによる補正

2010.3.28
・観測波長: 650.0±40nm
・視野65"x52"
途中からAOを動作
動作周波数: 500Hz
取得: 北見工大 三浦

波長を分解する分光装置

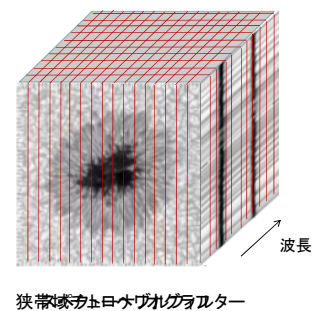


スペクトロヘリオグラムの説明



波長を分解する分光装置

データキューブ



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

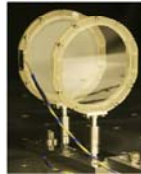
Lyot filter vs. Fabry Perot



Tunable filter FPP/SOT



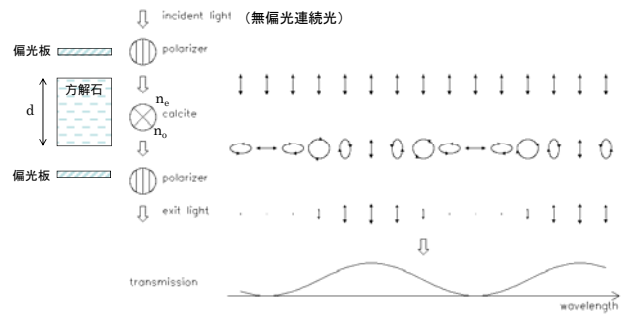
Air space
Foster etal 2009 Optical Society of America



LiNbO3
Schuhle etal 2009(?)

67

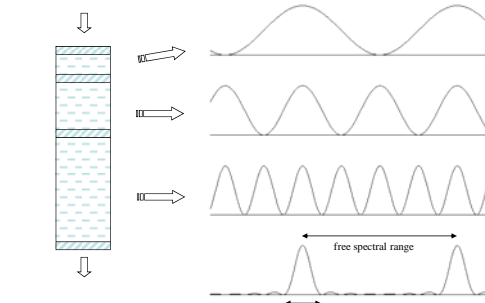
リオフィルターの原理



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

68

リオフィルターの原理



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

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

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

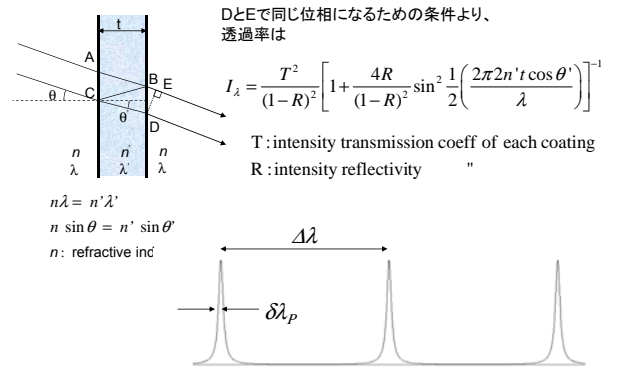
$$n_e - n_o = 0.172 \text{ (方解石)}$$

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

$$\rightarrow d \sim 144 \text{ mm}$$

69

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 "

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

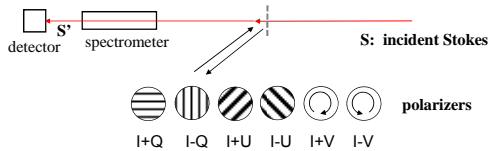
$$n \sin \theta = n' \sin \theta'$$

$$n: \text{refractive ind}$$

70

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.

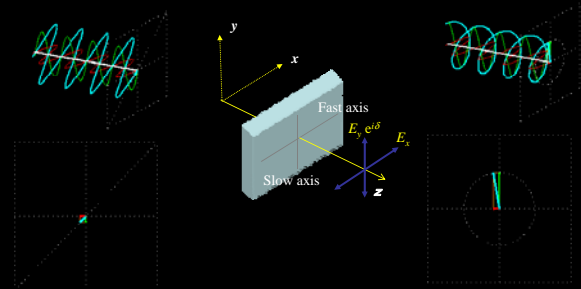
→ This is not the case in real devices.

71

Description of polarized light

Action of retarders on lights

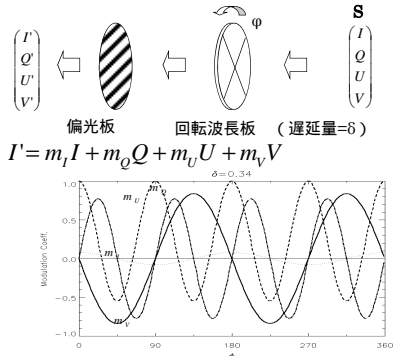
Linear retarder (90°)



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)



73

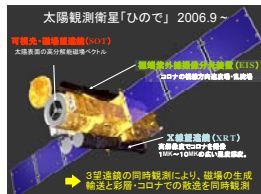
世界の太陽望遠鏡

74

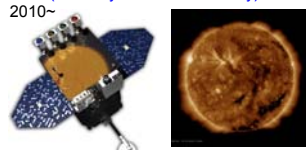
太陽観測の動向：スペース

X線, EUV領域、連続観測、高安定度

Hinode 2006.9 ~



SDO (Solar Dynamic Observatory) 2010 ~



太陽全面画像 (EUV+光球磁場・光球速度場) 4kx4k 大量データ

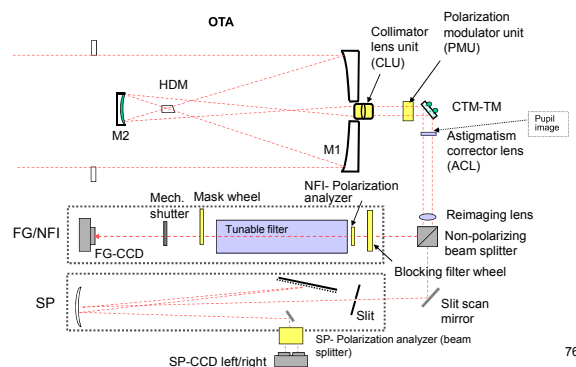


STEREO 2006.10 ~
EUV imager + Coronagraph x 2 spacecraft

日本の太陽コミュニティー
次期太陽観測衛星 Solar-C

75

SOT/Hinode polarimeter



76

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

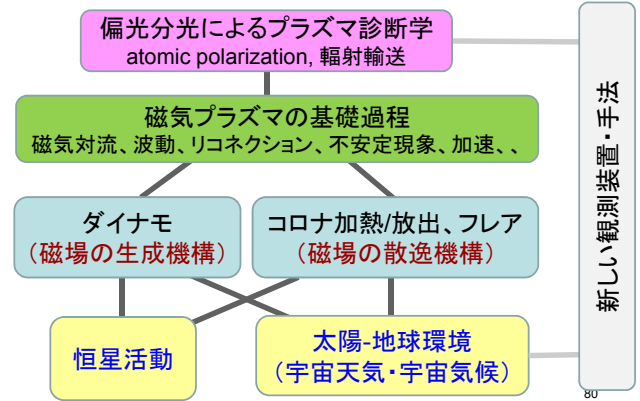
大口径プロジェクトはいずれも回折限界を狙う ATST~0.03" !

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

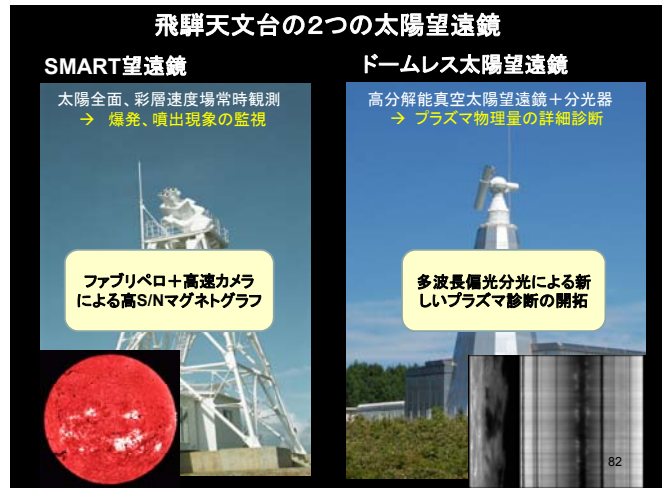
4. 京都大学理・附属天文台 でできる観測研究

太陽研究が取り組む課題；

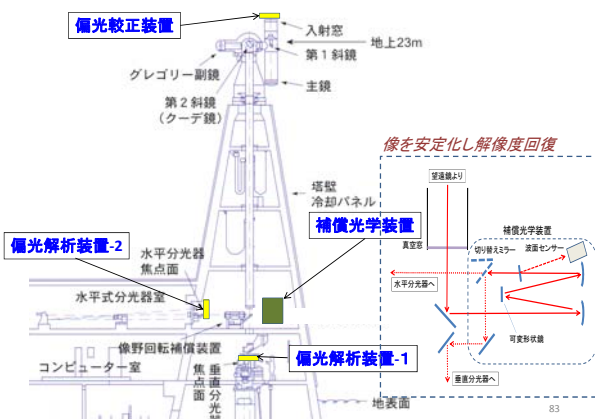


79

80



高精度偏光分光観測を実現するためDSTを補強



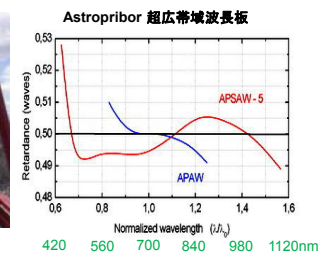
83

DST広帯域ポラリメータ

- 広い波長領域 (380 - 1600nm)、多波長同時
- 2偏光同時撮像
- 連続読み出し・加算により S/N > 10³
- AO によるシーイングノイズ低減、解像度向上



ドームレス望遠鏡の機械偏光測定



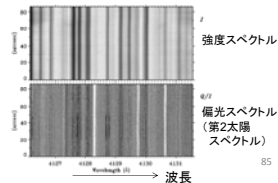
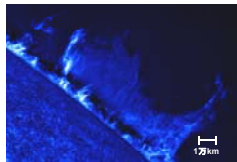
ドームレス太陽望遠鏡

多波長偏光分光による新しいプラズマ診断の開拓

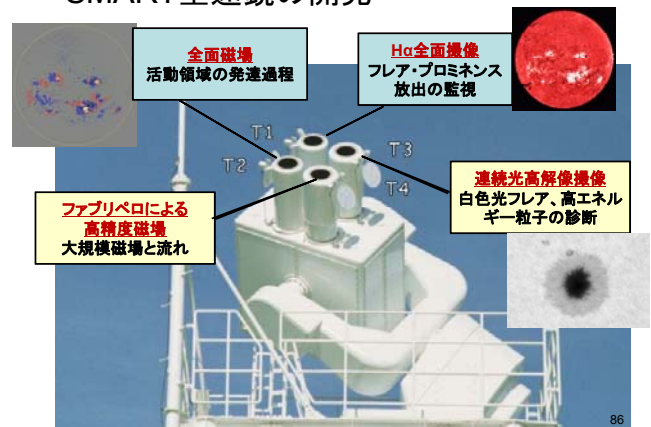
ゼーマン効果	→ 光球、プロミネンス磁場
散乱偏光、ハンレ効果	→ 彩層・コロナ弱磁場
シュタルク効果	→ 彩層・コロナの電場
衝突偏光	→ 粒子ビーム、熱伝導

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



SMART望遠鏡の開発



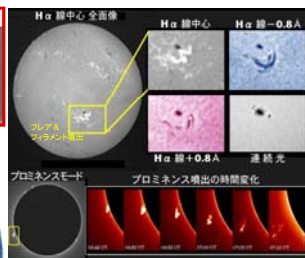
SMART望遠鏡の展開



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(ベルギー)
・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。



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に挑戦)
- 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、)

88

5. まとめ

太陽の謎解きには、

- ・光がどうして作られるか、
(放射輸送、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。

90