

大橋宗史

MCLEAN ゼミ 5.3, 5.4

5.3 Polarimeters

- 天文学における偏光度は小さい
 - 天体からの光の数%が直線偏光
 - 円偏光はさらにもっと少ない
- しかし天体の「幾何情報」を解明する強力な道具

5.3.1 Modulators and polarizers

- Modulator

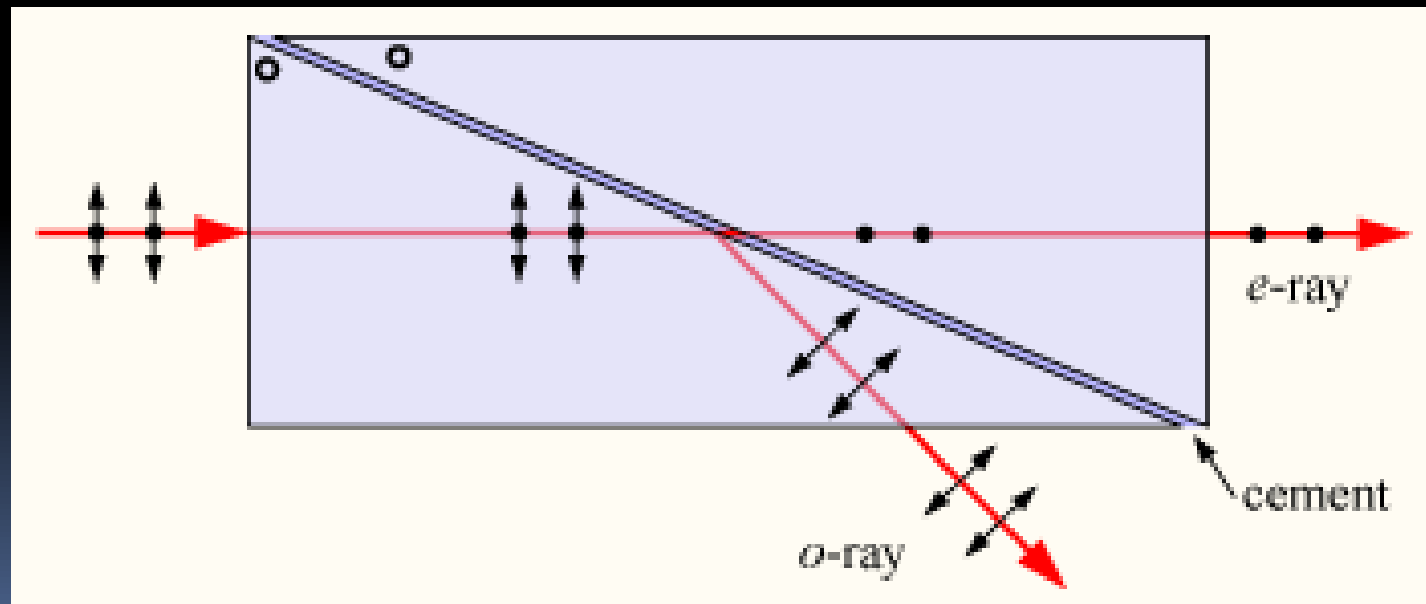
複屈折を有し、入射波の直交成分に位相差を生じさせる

- 石英やフッ化マグネシウムの混合物など
- Pockels cell : 「電圧制御型波長板」
- Kemp (or photoelastic) modulator:外力を受けた弾性体が複屈折を示すこと(光弾性)を利用

5.3.1 Modulators and polarizers

Gran-Thompson prism

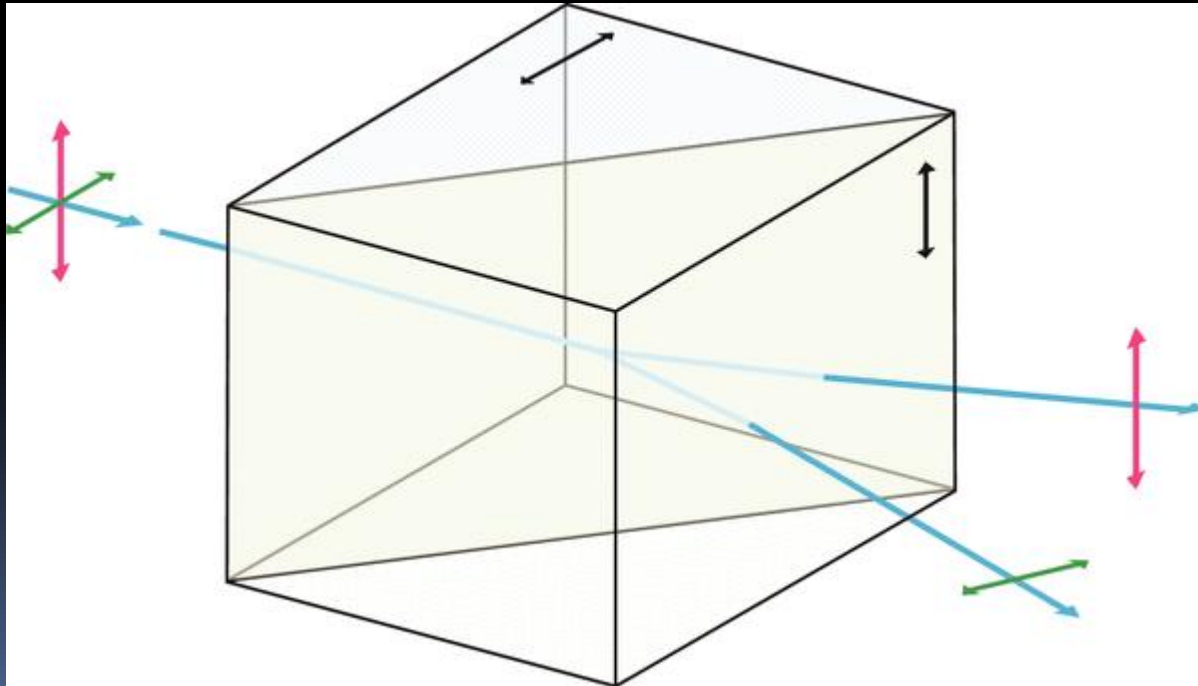
2つのプリズムの光軸が平行で、かつ接着面に直交。偏光版ビームスプリッター



5.3.1 Modulators and polarizers

Wollaston prism

2つのプリズムの光軸が直交



5.3.1 Modulators and polarizers

- Retardation device
 - 2つの偏光成分に特定の位相差を生じさせる
 - 複屈折を示す2種類の物質を混ぜることで、Pockels cellやKemp modulatorは持たないアクロマート性を実現
 - 望遠鏡のミラーよりも前に設置
 - 機器による偏光の影響を避けるため
- Fixed polarizer or analyzer
 - 偏光版の軸と偏光面とのなす角度を θ として、透過光の強度が $\cos^2\theta$ に比例
 - 他のpolarizer(回折格子など)と干渉して出力が落ちないように設置場所には注意

5.3.1 Modulators and polarizers

- 一般的なpolarimeterの配置 — Fig 5.9
- Spectropolarimeterの場合はanalyzerの後に分散素子を配置
- 大気によるシーイングや透過率の変動に伴う輝度変化を克服するために偏光観測は素早く行う必要がある(もしくはratio method?)
 - 4章にあったFig.4.19 やnod and shuffleなど(ccdの読み出しノイズ低減)

5.3.2 The Stokes parameters

電場の偏光成分を

$$E_x = e_1 \cos(2\pi\nu t), \quad E_y = e_2 \cos(2\pi\nu t + \delta)$$

として、ストークスパラメータを次のように定義

$$I_p = e_1^2 + e_2^2$$

$$Q = e_1^2 - e_2^2$$

$$U = 2e_1e_2 \cos \delta$$

$$V = 2e_1e_2 \sin \delta$$

$I_p^2 = Q^2 + U^2 + V^2$ であり、完全偏光 $\delta = 0$ ならば $V = 0$ 、
円偏光 $\delta = \pi/2$ ならば $U = 0$

無偏光成分の強度を I_u とすると入射光の強度は $I = I_p + I_u$
ただ、もしかするとここでは I_p のことを I としているかも?

5.3.2 The Stokes parameters

$p = [Q^2 + U^2]^{1/2} / I$, $q = V / I$ と定義すると、
pは直線偏光の度合いの、qは円偏光の度合いの指標になっている

直線偏光の方向とx軸のなす角度を θ とすると、
 $\tan 2\theta = U / Q$

これらから

$$Q = I p \cos 2\theta$$

$$U = I p \sin 2\theta$$

$$V = I q$$

5.3.2 The Stokes parameters

- 4分の1波長板: $\tau = \pi/2, G = H = 1/2$

$$I' = \frac{1}{2} \left[I \pm \frac{1}{2} Q \cos 4\varphi \pm \frac{1}{2} U \sin 4\varphi \mp V \sin 2\varphi \right]$$

- 2分の1波長板: $\tau = \pi, G = 0, H = 1$

$$I' = \frac{1}{2} [I \pm Q \cos 4\varphi \pm U \sin 4\varphi]$$

一般には2分の1波長板を用いるが、太陽の観測では円偏光が重要になるため、4分の1波長板を用いる必要がある

5.3.2 The Stokes parameters

$$I'(0^\circ) = \frac{1}{2}(I + Q) \quad I'(45^\circ) = \frac{1}{2}(I - Q)$$

$$I'(22.5^\circ) = \frac{1}{2}(I + U) \quad I'(67.5^\circ) = \frac{1}{2}(I - U)$$

これらより

$$Q = I'(0^\circ) - I'(45^\circ)$$

$$U = I'(22.5^\circ) - I'(67.5^\circ)$$

$$I = I'(0^\circ) + I'(45^\circ) = I'(22.5^\circ) + I'(67.5^\circ)$$

Iで規格化したものもストークスパラメーター
という

5.3.3 Mueller matrices

偏光作用による4つのストークスパラメータの変換を行う手法

$$S' = M_n M_{n-1} \cdots M_2 M_1 S$$

一般にanalyzerを基準とした座標系を取るが、他の光学素子の軸がずれている場合には、Muller行列は以下のように変換される

$$M' = R(-\varphi) M R(\varphi)$$
$$R(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\varphi & \sin 2\varphi & 0 \\ 0 & -\sin 2\varphi & \cos 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

5.4.1 The Fourier Transform Spectrometer (FTS)

- 要はマイケルソン干渉計
- 2つの光路の光路差を Δx とすると、出力光(単色)の強度は $T(k, \Delta x) = \frac{I}{2} [1 + \cos(k\Delta x)]$
- スペクトル強度 $I(k)$ とすると

$$\begin{aligned} F(\Delta x) &= c \int I(k) T(k, \Delta x) dk \\ &= \text{const.} + \frac{c}{2} \int I(k) \cos(k\Delta x) dk \end{aligned}$$

- 高分散 $R = 4\Delta x_{\max}/\lambda$
 $\Delta x_{\max} = 10\text{cm}, \lambda = 1\mu\text{m}$ で $R = 400,000$
- 全ての光が検出器に入るため、SN比が高い
- 多数のスペクトル情報を得るには時間がかかる

5.4.1 The Fourier Transform Spectrometer (FTS)

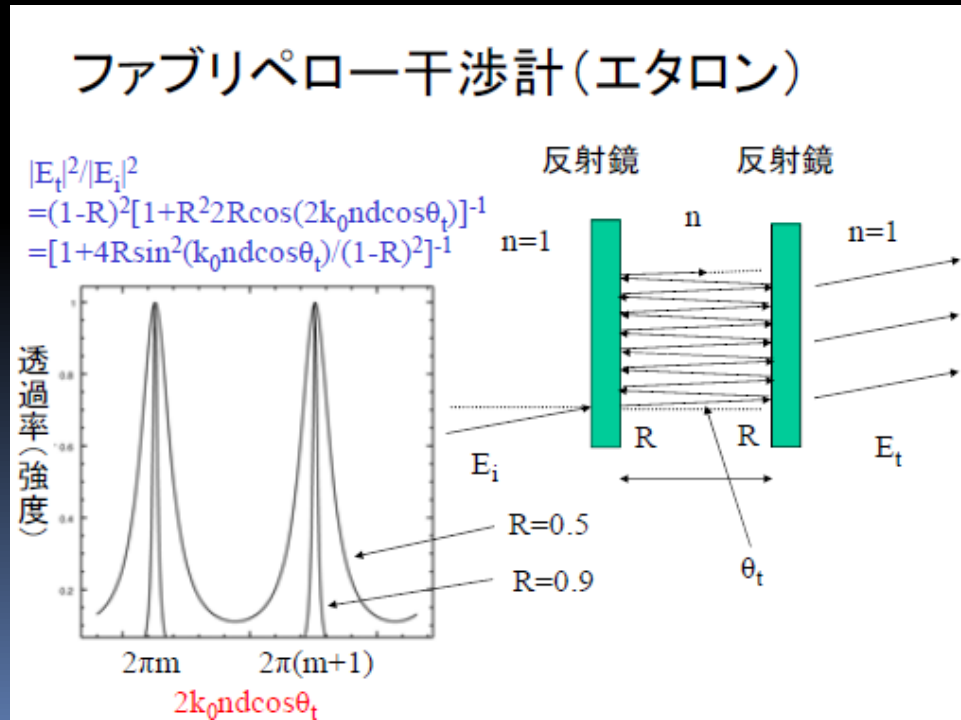
- 高分散 $R = 4\Delta x_{\max}/\lambda$

$\Delta x_{\max} = 10\text{cm}, \lambda = 1\mu\text{m}$ で $R = 400,000$

- 全ての光が検出器に入るため、SN比が高い
- 多数のスペクトル情報を得るには時間がかかる

5.4.2 The Fabry-Perot etalon

- $m\lambda = 2nd\cos\theta$ を満たす波長で透過率最大
- ナローバンドフィルターを先に通す必要がある
- 分解能は $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{\Delta\lambda_{\text{FSP}}}{\Delta\lambda} \frac{2nd}{\lambda} = \frac{2Fnd}{\lambda}$



5.4.2 The Fabry-Perot etalon

$\delta = (2\pi / \lambda)(2nd\cos\theta)$ とすると、透過光強度は

$$\frac{I(\delta)}{I(0)} = 1 / \left(1 + \frac{4r}{(1-r)^2} \sin^2(knd\cos\theta) \right)$$

$$= 1 / \left(1 + \left(\frac{2F}{\pi} \right)^2 \sin^2 \frac{\delta}{2} \right)$$

2π 周期でピーク。 $\frac{I(\delta)}{I(0)} = \frac{1}{2}$ となるところで

$\delta_{FWHM} = \frac{\pi}{F} \ll 1$ だから、

$$\frac{\Delta\lambda_{FSP}}{\delta\lambda} = \frac{2\pi}{2\delta_{FWHM}} = F = \pi\sqrt{r}/(1-r)$$

一般に分解能 $R=100-1000$

5.4.3 Interference filters

- Fabry-Perotと同じ原理
- 最も単純なのはFabry-Perotのギャップを半波長の長さ誘電体で埋めたもの
- Reflectorとして観測波長で反射率がピークの、広波長反射体からなる4分の1波長板
- このセットを何層にも重ねる