

ELECTRONIC IMAGING IN ASTRONOMY

Detectors and Instrumentation

4 The discovery power of modern astronomical instruments

5 Instrumentation and detectors

櫛引洸佑

理学部天文学科 4 年

2017/4/19

- 4.3 Polarization; transverse waves
 - 4.3.1 Introduction
 - 4.3.2 Polarization maps and spectra

- 5.1 Photometer and cameras
 - 5.1.1 Photoelectric photometers
 - 5.1.2 Camera systems
 - 5.1.3 Pixel sampling and matching to the plate scale

- 4.3 Polarization; transverse waves
 - 4.3.1 Introduction
 - 4.3.2 Polarization maps and spectra

- 5.1 Photometer and cameras
 - 5.1.1 Photoelectric photometers
 - 5.1.2 Camera systems
 - 5.1.3 Pixel sampling and matching to the plate scale

4.3.1 偏光

- Polarization: 一部 (すべて) の電磁波が同一平面上を振動している現象
 - 非偏光: 方向の偏りがなく、すべての平面の振動が混ざっている。
 - 直線偏光: 方向の偏りがあり、どの位置で観測してもその方向が変化しない。
 - 円偏光: 振動平面が波の周期を通じて一回転する。

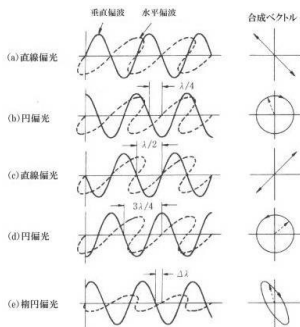


図14 位相差による偏光状態

Fig 1: [http:](http://laser-navi.com/laser_technology/technical_qa/kakouqa-q1-8/)

[//laser-navi.com/laser_technology/technical_qa/kakouqa-q1-8/](http://laser-navi.com/laser_technology/technical_qa/kakouqa-q1-8/)

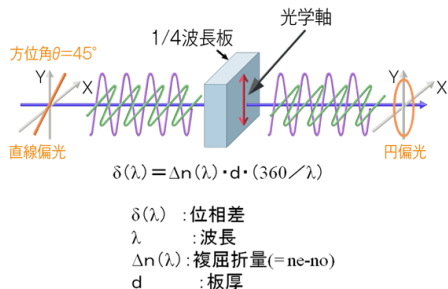
4.3.1 天文学における偏光

- 偏光を生じる天文現象
 - 無偏光と物質の相互作用
 - 液体表面での反射、電子、分子、微粒子による光子の散乱、特定の星間物質による吸収
 - 原子自身による偏光放射
 - 磁場中で放射する原子 (Zeeman 効果)、磁場中で相対論的に回転運動する電子 (シンクロトロン放射)
- 偏光したスペクトルや画像 ⇒ 物理過程や放射源の形状に関する情報を含んでいる。

4.3.1 偏光観測

- 偏光状態の決定には polarization modulator と呼ばれる物質の異なるセッティングでの明るさの比の測定が必要。
- もっとも単純なものは retardation plate
 - 異方性の軸に対して垂直方向 (ordinary) と水平方向 (extra-ordinary) で屈折率が異なる (n_o , n_e): 複屈折
 - 例えば calcite(解方石) では $n_e < n_o$ であり、extraordinary 方向に偏光した光が早く物質中を進む。
⇒ 結晶を通過すると、偏光状態が変化して出てくる。
 - $\Delta n = n_o - n_e$ とすると、直行方向に偏光していた光同士の位相のずれは $\gamma = 2\pi\Delta nL/\lambda$ (L : 結晶の厚さ)。

4.3.1 偏光観測



- $L = \lambda/4$ の場合。
- $\gamma = (\pi/2)\Delta n$
- 直線偏光が円偏光になって出てくる。

Fig 2: <https://www.kogakugiken.co.jp/products/retardation01.html>
より

4.3.1 偏光観測

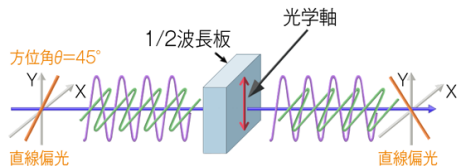


Fig 3: <https://www.kogakugiken.co.jp/products/retardation01.html>
より

- $L = \lambda/2$ の場合。
- $\gamma = \pi \Delta n$
- 直線偏光が 90° 回転して出てくる。

4.3.1 偏光観測に関する注意点

- ここまでの例では波長は単一で考えている。
⇒ 色収差ない achromatic wave plate が CCD の波長帯すべてに渡って作られている。
- シーイングやトラッキングのエラーにより生じる intensity の系統誤差的な変化
⇒ modulator のあるセッティングから他のセッティングに移る速度が速いことが重要。
- 二つの偏光位置 (polarization position) が同様に系統誤差の影響を受けるため、それらを同時に測定する方法が必要。
⇒ wave plate の回転が CCD カメラでの適用に対して遅いので、二つの偏光状態を同時観測でき、あらゆる drift を修正できる。

- 4.3 Polarization; transverse waves
 - 4.3.1 Introduction
 - 4.3.2 Polarization maps and spectra

- 5.1 Photometer and cameras
 - 5.1.1 Photoelectric photometers
 - 5.1.2 Camera systems
 - 5.1.3 Pixel sampling and matching to the plate scale

4.3.2 ISP

- 交互の (偏光した) 信号を読み出しノイズが埋もれるまで十分な数溜めるために CCD の charge-coupling 特性を使う技術。
⇒ Imaging SpectroPolarimeter (ISP)
- ISP
 - spectrometer ← グリズムをフィルター位置の 1 つに置く。
 - polarimeter (imaging or spectro) ← 光学系全体の前に polarization modulator を置く。
 - spectropolarometry mode ← 二つの偏光スペクトル (O と E) を CCD に作るスリット (対象と sky 用の二つのスリット) の下に特殊な偏光子を入れる。
 - CCD の双方向の電荷輸送によって modulator の直交した偏光状態に対応する交互の画像 or スペクトルが位置をずらして交互に得られる (電荷が移動する時間で modulator のセッティングを変える)(Fig 4.19)。

4.3.2 ISP での観測

- ISP の功績
 - Crab Nebula (M1) からのシンクロトロン偏光の観測。
 - AGN の性質の理解に重要。
 - AGN はガスやダストで隠されているが、コアからの光が散乱光として得られる。
- シンクロトロン放射では電子が磁場に垂直な平面を運動。
 - ⇒ 電場が磁場と垂直になる。
 - ⇒ 逆に偏光していれば磁場が揃っている。

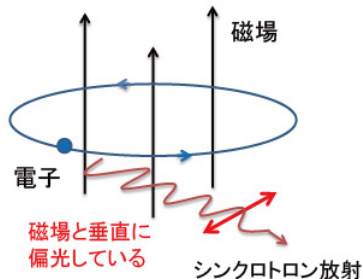


Fig 4:

<http://astro.s.kanazawa-u.ac.jp/~yonetoku/gap/asj-press/>
より

4.3.2 電荷シフトを用いた他のシステム/偏光観測の展望

- "nod and shaffle" method
 - sky background を除くための技術。
 - 望遠鏡は天体と sky の参照領域を行ったり来たり (nodding) する。
 - nodding は CCD 上での電荷の移動 (shuffling) が行われている間にする。
 - 同じピクセルで天体も sky も撮れる。
- CMB の偏光測定
 - CMB は宇宙の晴れ上がり時の"surface of last scattering" から来たと考えられる。
⇒ Thomson 散乱で光子に作用する自由電子があったなら部分的に偏光するはず。
 - WMAP の観測では $\sim 10\%$ の photon がこの散乱を受けて、初代星による再電離は Bib Bang の 4 億年後に生じたと示唆された。(Planck の測定では 5.5 億年)

- 4.3 Polarization; transverse waves
 - 4.3.1 Introduction
 - 4.3.2 Polarization maps and spectra
- 5.1 Photometer and cameras
 - 5.1.1 Photoelectric photometers
 - 5.1.2 Camera systems
 - 5.1.3 Pixel sampling and matching to the plate scale

5.1.1 Photometers

- photometer: 光源の見掛けの明るさを測る装置
- 理想ではすべての波長で合わせた単位面積当たりのパワーを測りたい。
⇒ フィルターを使って波長帯を選んで測定する。
 - 以前は色ガラスフィルターと検出器自身の感度の問題で決まっていた。
 - 今では干渉フィルターによって特定の波長を通すバンドを思い通りに作れる。
- 個々の星の測光には photomultiplier tube(PMT) が使われた。
 - 最も有名なものは UBV system (Jonson & Morgan)
 - U(360nm)B(440nm)V(550nm) のバンドと CsSb 光電陰極の光電反応。

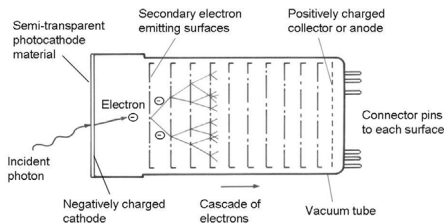


Fig 5: Mclean 教科書より

5.1.1 基本的な Photoelectric photometers

- 基本的な photoelectric photometer の構造 (Fig 5.1)
- 望遠鏡の焦点面に星を隔離するための円形の aperture (diaphragm) を置く。
 - ホイールやスライドによって交換できるようにする。
 - サイズは星の像より大きく、sky が入りすぎない程度に小さい。
 - フィルター用のホイール、スライドも他にある。
- 検出器はたいてい PMT。
- Fabry lens は望遠鏡の主鏡の像 (collecting aperture) を検出器に作る (星像ではない！)。
- thin lens equation: $1/f = 1/s + 1/s'$
(f : focal length, s : object distance, s' : image distance)
これによって $s \sim f_{tel} (\gg f_{lens})$ とすると、 $s' \sim f_{lens}$

5.1.1 基本的な Photoelectric photometers

- 星からの光は開口内にあるかぎり、pupil の像を通過しなければならない。⇒ トラッキングエラーなどで星像が diaphragm に渡って drift することによって生じる検出器上での像の動きを防ぐ。
- 実線は焦点面 aperture の中心に来るとき、点線は aperture の端に来るとき。

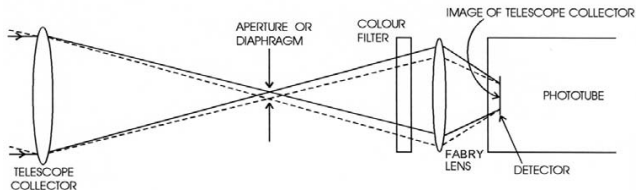


Fig 6: Mclean 教科書より

5.1.1 PMT について

- PMT の anode で生じた電流を測ることで測光する。
⇒ パルスの強さの幅広い変化 (pulse height) によって低光度ではノイズ大きい。
- height に関わらず、anode から出たパルスをカウントすることで改善。
⇒ pulse amplifier に引き込まれ、標準幅で高さが anode からのもとの信号に比例する矩形波になる (その後さらに discriminator でノイズを除く)。
- digital electronics で数えられコンピューターに送られる。
- PMT の cathode は-1,600V で、anode はグラウンド。
- -20°C で大体十分であるが、高い暗電流があるときはドライアイスで-78°C まで冷却。
- PMT は光度の変化への反応スピードが良かった。
⇒ cataclysmic variable、pulsar、occulted star などの短時間で変光するもの。

- 4.3 Polarization; transverse waves
 - 4.3.1 Introduction
 - 4.3.2 Polarization maps and spectra

- 5.1 Photometer and cameras
 - 5.1.1 Photoelectric photometers
 - 5.1.2 Camera systems
 - 5.1.3 Pixel sampling and matching to the plate scale

5.1.2 再結像光学系での Camera systems

- 最も単純なカメラシステムでは望遠鏡の焦点面に検出器 (フィルターが光路の収束部分) \Rightarrow 像スケールがピクセルサイズに一致した時にうまくいく (大望遠鏡では厳しい)。
- 代替のデザインが Fig 5.2(コリメーターレンズで平行光にしてカメラレンズで検出器に結像)
 - コリメーターとカメラレンズの焦点距離をプレートスケール (arcsec/mm) を調整可能; $m = f_{\text{cam}}/f_{\text{coll}}$
 - フィルターを平行光部分に入れられて、主鏡の像の近くにおける。
 - 外部からの他の光をさえぎるための stop (もしくは cold stop) を pupil image の位置における。
- 星の像はドリフトしてしまうが、適切なサイズの software aperture 内で信号を足し合わせることで測光 & 周りの円環で sky を測定。 \Rightarrow 多くの異なるピクセルが使われるので、感度やゲインの規格化が重要。

5.1.2 Camera systems の概略図

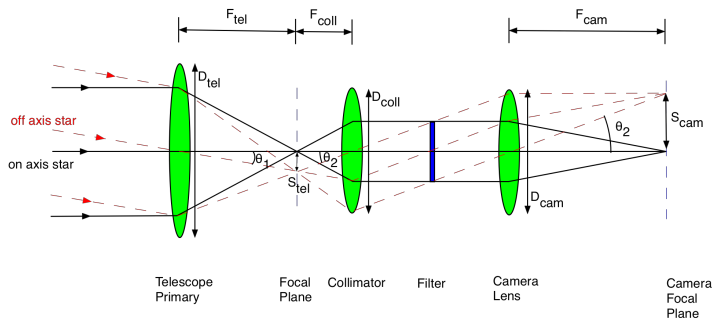


Fig 7: <http://slittlefair.staff.shef.ac.uk/teaching/phy217/lectures/instruments/L15/index.html#reimagers>

- 4.3 Polarization; transverse waves
 - 4.3.1 Introduction
 - 4.3.2 Polarization maps and spectra
- 5.1 Photometer and cameras
 - 5.1.1 Photoelectric photometers
 - 5.1.2 Camera systems
 - 5.1.3 Pixel sampling and matching to the plate scale

5.1.3 空間 or 波長分解能とピクセルサイズ

- 空間 or 波長分解能を検出器のピクセルのサイズに合わせるときに考えること。
 - 観測効率を最大化する: 1つのピクセルにより多く光を当てて、積分時間を最小化
 - 正確な測光のためにカメラシステムの機能を妥協しない。
- 空間分解能: シーングか光学的限界で主に決まる。
 - critically sampled: 分解単位が2ピクセル程度に渡る (ナイキスト限界)。
 - oversampled: 分解単位が5ピクセル程度に渡る。
- 波長分解能: 入射スリットの幅で決まる
 - 狭いスリットは空間分解能が高い。
 - 広いスリットは観測効率がよい。

5.1.3 Plate scale/pixel scale

- 望遠鏡の plate scale:

$$(ps)_{\text{tel}} = \frac{206,265}{f_{\text{tel}}} ["/\text{mm}]$$

$f_{\text{tel}} (= D_{\text{tel}} \times F)$: 望遠鏡の焦点距離
定数: 1 ラジアンに対応する秒

- direct imaging での検出器のピクセルスケール:

$$\theta = (ps)_{\text{tel}} d_{\text{pix}} ["]$$

d_{pix} : ピクセルのサイズ (mm); $9\mu\text{m} \sim 30\mu\text{m}$ 程度

5.1.3 Plate scale と pixel scale の例/倍率

- plate scale と pixel scale の例 ($d_{\text{pix}} = 20\mu\text{m}$)
 - CFHT(3.6 m): prime; $13.70''/\text{mm} \rightarrow 00.27''/\text{pixel}$
Cassegrain; $7.33''/\text{mm} \rightarrow 0.15''/\text{pixel}$
 - UKIRT(3.8 m)(Cassegrain): $1.52''/\text{mm} \rightarrow 0.03''/\text{pixel}$
 - UCLA($f/16$, 24-inch): $21.1''/\text{mm} \rightarrow 0.42''/\text{pixel}$
- これらの値をいくら倍率が必要かどうか決まるために像のクオリティー (seeing) と比較する。
 - seeing のサイズ (arcsec) を選ぶ
 - sampling を選ぶ ($p = 2 - 5$ pixel)
 - 1pixel あたりの角度 (arcsec) を求める: $\theta_{\text{pix}} = \theta_{\text{see}}/p$
 - 検出器での plate scale を求める: $(ps)_{\text{det}} = \theta_{\text{pix}}/d_{\text{pix}}$
 - 必要な倍率が求められる: $m = (ps)_{\text{tel}}/(ps)_{\text{det}}$ ($m = f_{\text{cam}}/f_{\text{coll}}$)

5.1.3 focal reducer における pixel size

- m は Effective Focal Length ($EFL = mf_{\text{tel}}$) としても定義される.
- $m > 1$ なら magnifier、 $m < 0$ なら focal reducer
- focal reducer での pixel size (arcsec) と f-number の関係は

$$\theta_{\text{pix}} = 206,265 \frac{d_{\text{pix}}}{D_{\text{tel}}(f/\text{number})_{\text{cam}}}$$

- example
 - $d_{\text{pix}} = 27 \mu\text{m}$, $D_{\text{tel}} = 10\text{m}$
 - seeing を $0.5''$ で 2-pixel sampling $\Rightarrow F_{\text{cam}} = 2.2$

5.1.3 回折限界

- 遠い点光源はエアリーディスクになる
- 明るい中心と第一暗環について

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D_{\text{tel}}}$$

- example
 - $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$, $D_{\text{tel}} = 0.5 \text{ m} \Rightarrow \theta = 0.25''$
 - 大気ゆらぎによる seeing は $\lambda/r_0 = 0.5 \mu\text{m}/20 \text{ cm} = 0.5''$ (r_0 は入射光が地球大気に乱されず進める長さ Fried parameter)
- 上の式に適当な焦点距離 (ここでは f_{tel}) をかけることで、 physical size にできる

$$r_{\text{diff}} = 1.22\lambda(f/\text{number})_{\text{tel}}$$