

基礎天文学観測レポート
担当:本原顕太郎

理学部天文学科3年
05-122008
山口裕貴

平成25年1月15日

1 実習の目的

東京大学天文センターの 30cm カセグレン式望遠鏡を用いて CCD カメラによる基本的な観測を行う。今回の実習ではシステム効率を求め、限界等級を計算し観測結果と比較する。

2 原理

2.1 システム効率

システム効率とは、天体から望遠鏡に入射した光のうち CCD で電荷になって読み出されたものの割合である。

天体から望遠鏡に入射した光子の数を s_i [個/s] とすると

$$s_i = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\Delta\lambda F_\lambda}{h\nu} \quad (1)$$

である。ただし、ここで D は望遠鏡の口径、 F_λ は天体からのフラックス、 $\Delta\lambda$ はフィルターの透過幅 (半値幅) である。

一方、CCD で生じた電荷の個数を n_i [個/s] とすると

$$n_i = \frac{N f_{conv}}{t} \quad (2)$$

となる。ここで、 N は画像上のカウント数、 t は積分時間、 f_{conv} はコンバージョンファクターと呼ばれる係数で CCD カメラが受け取った光子数と画像上でのカウント数を結びつける係数である。

よって、システム効率 η は

$$\eta = \frac{s_i}{n_i} \quad (3)$$

で求められる。

2.2 等級原点

等級原点とは、あるカメラシステムで露出時間 1s で 1 カウントの信号を生じさせる天体の等級である。画像上の天体の等級を調べるためには等級原点が必要である。等級原点 Z_{mag} の導出は以下の式のようになる。

$$Z_{mag} = m + 2.5 \log \frac{N}{t} \quad (4)$$

ただし、 m は星の等級 (既知のものを使う)、 N は画像上でのカウント数、 t は露出時間である。

2.3 空の背景光

星の写っていない領域からの光の量を n_{sky} [photons/s/arcsec²] , および m_{sky} [mag/arcsec²] で算出する . ピクセルサイズを A [arcsec²] とおけば , 以下の式で求まる .

$$n_{\text{sky}} = \frac{N_{\text{sky}} f_{\text{conv}}}{tA} \quad (5)$$

$$m_{\text{sky}} = Z_{\text{mag}} - 2.5 \log n_{\text{sky}} \quad (6)$$

ただし , N_{sky} はスカイのカウント数 , t は積分時間である .

2.4 限界等級

限界等級は一般に S/N という量ではかられる . S/N はノイズに対して信号がどの程度きているかを評価した値である . S/N がある一定量を超えれば天体が検出できたと見なす . 一般に光赤外では $S/N = 5$ を超えれば検出できたとすることが多い .

$$\frac{S}{N} = \frac{n_i t}{N_{\text{noise}}} = \frac{\eta s_i t}{N_{\text{noise}}} \quad (7)$$

と表すことができる . ここで N_{noise} はノイズ成分 , t は露出時間である . ノイズの成分としては天体自身や背景光の揺らぎ , 暗電流の揺らぎや読み出しのノイズが考えられる . それらはポアソン統計に従うと考えられるから , l 個のピクセルに広がった像を検出する場合

$$N_{\text{noise}} = \sqrt{\eta s_i t + l n_{\text{sky}} t + l n_{\text{dark}} t + l N_{\text{read}}^2} \quad (8)$$

である . ここで , n_{sky} [e⁻/s/pix] は単位素子あたりの缶出された背景放射の光子数 , n_{dark} [e⁻/s/pix] は単位素子あたりの暗電流 , N_{read} [e⁻r.m.s./pix] は単位素子あたりの読み取りノイズである .

したがって ,

$$\frac{S}{N} = \frac{\eta s_i t}{\sqrt{\eta s_i t + l n_{\text{sky}} t + l n_{\text{dark}} t + l N_{\text{read}}^2}} \quad (9)$$

となる .

3 使用機器

3.1 望遠鏡

使用したのは東京大学天文センターにある 30cm 反射望遠鏡である . 基本データは以下の表に示す .

口径	300mm
焦点距離	5000m (F16.7)

表 1: 望遠鏡の基本データ (実習ホームページより)

3.2 フィルター

今回は駿河精機の市販フィルター S76-VG6(青緑透過フィルター) と S76-KG5-1(赤外カットフィルター) を重ねて V-band フィルターの代用とした。

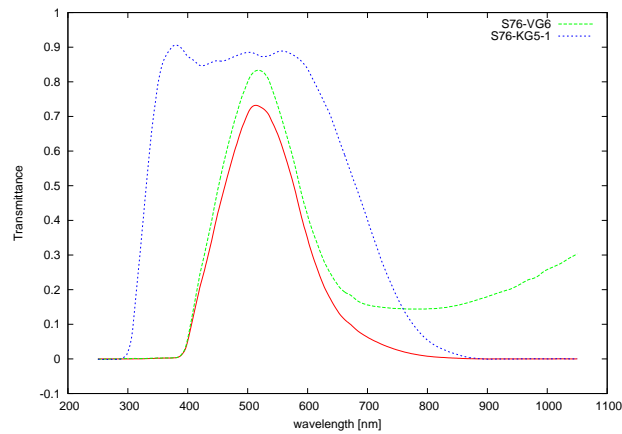


図 1: 使用したフィルターの透過率 (赤の実践, 実習ホームページより)

3.3 CCD カメラ

使用した CCD カメラは Finger Like Instrumentation 社製の Proline PL4021 である。パラメータは次の通りである (実習ホームページと大沢さんのレポートから)。

フォーマット	2048×2048
アレイサイズ	7.4 μm × 7.4 μm
Full Well	4000 e ⁻ /pix
読み出しノイズ	12 e ⁻ /pix
量子効率 (500nm)	55 %
量子効率 (600nm)	40 %
CTE	> 0.999999

表 2: CDD カメラのパラメータ

4 観測とその結果

4.1 観測天体

今回観測し、データを解析したのは次の2天体およびその周辺である。

天体名	赤経	赤緯	視等級 [mag]
Cac v^1	00 ^h 55 ^m 00.19 ^s	+58°58'22.1''	4.38
Cas η	00 ^h 49 ^m 05.10 ^s	+53°48'59.6''	3.46

表 3: 観測した天体 (wikipedia より)

4.2 システム効率の測定

Cas v^1 と Cas η についてそれぞれシステム効率を求め、その平均をとった。まず、 s_i について考える。視等級 m の天体のフラックス F_ν は、

$$F_\nu = 10^{-\frac{m+48.6}{2.5}} \quad (10)$$

であり、

$$F_\nu = \frac{\lambda^2}{c} F_\lambda \quad (11)$$

であることから、式 (1) が

$$s_i = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\Delta\lambda F_\nu}{h\lambda} \quad (12)$$

となることに注意する。なお、ここでは s_i のパラメータとして

$$D = 0.30 \text{ m}$$

$$\Delta\lambda = 159 \text{ nm}$$

$$\lambda = 520 \text{ nm}$$

を用いることにする。

次に、 n_i について考える。画像上出のカウント N は IRAF の phot 機能を使って求めた。この際のパラメータは aperture が 25pix, annulus が 80pix, 積分時間は $t = 1.0\text{s}$ である。またコンバージョンファクターは f_{conv} は 0.947 とした。

4.2.1 Cas v^1

Cas v^1 の視等級は $m = 4.83$ だから式 (11) より ,

$$\begin{aligned} F_\nu &= 4.246 \times 10^{-22} \text{ [erg/s/cm}^2\text{]} \\ &= 4.246 \times 10^{-25} \text{ [J/s/m}^2\text{]} \end{aligned} \quad (13)$$

したがって , 式 (12) から

$$s_i = 1.306 \times 10^7 \quad (14)$$

となる .

phot 機能による採光の結果 $N = 1020063$ であったことから式 (2) より

$$n_i = 9.656 \times 10^5 \quad (15)$$

である .

したがって , システム効率 η は

$$\eta = \frac{n_i}{s_i} \simeq 0.074 \quad (16)$$

となる .

4.2.2 Cas η

Cas η の視等級は $m = 3.46$ だから Cas v^1 と同様にして ,

$$s_i = 4.653 \times 10^7 \quad (17)$$

また , $N = 3.223 \times 10^6$ より

$$n_i = 3.053 \times 10^6 \quad (18)$$

である .

よってシステム効率 η は

$$\eta \simeq 0.065 \quad (19)$$

となる .

両者の平均をとって以下システム効率 η は

$$\eta = 0.067 \quad (20)$$

を用いる .

4.3 等級原点の算出

Cas v^1 のデータを用いて等級原点を算出する .

$$\begin{aligned} Z_{\text{mag}} &= 4.85 + \log \frac{N}{1} \\ &\simeq 19.85 \end{aligned} \quad (21)$$

となるので , 等級原点 $Z_{\text{mag}} = 19.85$ である .

4.4 空の背景光

式 (5) と式 (6) に観測した値を代入する . 結果は次の表のようになった . ただし $A = 0.27$ [arcsec²] , $t = 180$ [s] である .

面積 [pix ²]	N_{sky}	n_{sky} [photon/s/arcsec ²]	m_{sky} [mag/arcsec ²]
1962.661	11956305	464	13.2
1964.195	11384969	442	13.2
1963.362	16030775	622	12.9
1963.418	16685165	647	12.8

よって , 空の明るさはおよそ 13 [mag/arcsec²] となる .

4.5 限界等級の算出

今回の解析では 2 枚の画像を引き算して採光したため , ノイズが式 (8) の $\sqrt{2}$ 倍になっていることに注意する . したがって , S/N は式 (9) の $1/\sqrt{2}$ となり

$$\frac{S}{N} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\eta s_i t}{\sqrt{\eta s_i t + l n_{\text{sky}} t + l n_{\text{dark}} t + l N_{\text{read}}^2}} \quad (22)$$

となる . 今 , $n_{\text{dark}} \ll n_{\text{sky}}, N_{\text{read}}$ であることに注意して式 (22) を s_i について解くと ,

$$s_i = \left(\frac{S}{N}\right)^2 + \frac{S}{N} \sqrt{\left(\frac{S}{N}\right)^2 + l(n_{\text{sky}} t + N_{\text{read}}^2)} \quad (23)$$

である .

これをフラックスに直すと

$$\begin{aligned} F_\nu &= \frac{h\lambda}{\pi\Delta\lambda} \left(\frac{2}{D}\right)^2 s_i \\ &= \frac{h\lambda}{\pi\Delta\lambda} \left(\frac{2}{D}\right)^2 \left[\left(\frac{S}{N}\right)^2 + \frac{S}{N} \sqrt{\left(\frac{S}{N}\right)^2 + l(n_{\text{sky}} t + N_{\text{read}}^2)} \right] \end{aligned} \quad (24)$$

となり，等級に変換すれば

$$m = -2.5 \log F_\nu - 48.6 \quad (25)$$

である．

このレポートにおける限界等級 m_{lim} は $S/N = 5, t = 60$ [s] のときの等級と定義する．また， $n_{\text{sky}} = 31, N_{\text{read}} = 12, \eta = 0.067$ である．天体の像のアーチャー半径を 10pix と仮定すれば，天体を見込むピクセル数は $l \simeq 314$ pix である．

これらの値を代入して計算すると

$$m_{\text{lim}} = 14.75 \text{ [mag]} \quad (26)$$

となる．

5 考察

今回の実習は望遠鏡の故障といったトラブルもあり，大変なものだったが観測日は晴天に恵まれいい観測ができたと思う．

得られたシステム効率は何年よりも高い値であった．これは当日の天候が良好だったために得られた値だろう．観測天体によってシステム効率が異なったのは，観測時間の違いにより生じた誤差だけでなく観測天体の高度によって生じる誤差も考えられる．高度によって天体からの光が大気中を通過する距離が異なるためである．

計算によって得られた限界等級と実際の観測で得られた画像を比較する．等級誤差を Δm とすると S/N との関係は

$$\frac{S}{N} \simeq 1.086 \Delta m \quad (27)$$

であることがわかっている． Δm は IRAF の phot 機能を用いて調べられる．実際の画像では $m = 14.7$ の星が $S/N = 5$ で検出されることが分かり，計算によって求まる値とほぼ一致している．

また， $t = 180$ とすれば $m_{\text{lim}} = 15, 13$ である．