

2008 年度基礎天文学観測
— 小望遠鏡による基礎観測実習 —
(担当：本原先生)

渡辺 直人
(学生証番号 s082010)

平成 21 年 1 月 20 日

1 実習の目的

東大天文センターの 30cm カセグレン望遠鏡を用い、CCD カメラによる天体観測を行い、望遠鏡の基本操作方法、赤経・赤緯に基づいた天体観測の基本事項、および CCD 観測の基本技術の一通りを習得すること。

2 観測器機

今回の観測に用いた観測器機

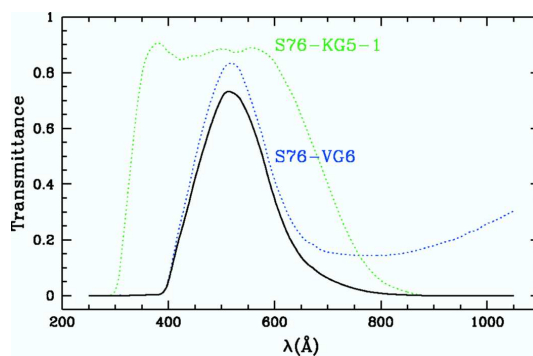
望遠鏡



表 1: 望遠鏡 – 鏡筒

口径	300mm
焦点距離	5000mm(F16.7)

フィルタ



駿河精機の表 2 のフィルタを 2 枚重ねて、おおよそ V-band のフィルタとしたものを用いた。

表 2: フィルタ

青緑透過フィルタ S76-VG6
赤外線カットフィルタ S76-KG5-1

CCD カメラ

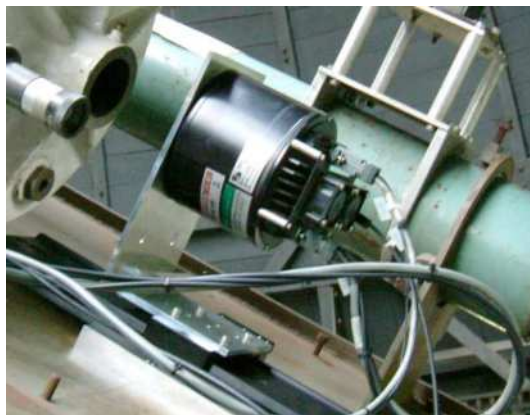


表 3: CCD の仕様

フォーマット	512 × 512
アレイサイズ	12.3mm × 12.3mm
ピクセルサイズ	24 μ m × 24 μ m
Full Well	250,000 e ⁻ /pix
読み出しノイズ (T=180K)	< 10e ⁻
暗電流	12.75 e ⁻ /sec/pix(T=240K) 0.0046 e ⁻ /sec/pix(T=160K)
量子効率	68%($\lambda = 450$ nm) 75%($\lambda = 550$ nm) 80%($\lambda = 650$ nm)
CTE	0.99999
出力数	2
Conversion Factor	1.3 e ⁻ /ADU (2007 年度実習結果)
望遠鏡での pixel scale	0.99 " /pix

3 リダクション (整約)

リダクションとは撮像観測の生データから天体の信号のみを取り出す作業のことを言う。実際の生データには天体からの信号の他に様々なノイズが含まれており、

$$(\text{生データ}) = [(\text{天体}) + (\text{スカイ})] \times (\text{感度むら}) + (\text{バイアス}) + (\text{暗電流}) + (\text{読出しノイズ})$$

という構造になっている。

3.1 Conversion Factor

CCD に光が入射すると、光電効果により光の強度に対応した電荷が生じる。この電荷の個数 n と画像上でのカウント N は比例関係にあり、その比例定数のことを Conversion Factor: f_{conv} と言い、

$$n = N f_{\text{conv}} \quad (1)$$

の関係が成り立つ。 n, N はそれぞれ $\sigma_n = \sqrt{n}$, $\sigma_N = \sqrt{N}$ のゆらぎを持ち、これらにも

$$\sigma_n = \sigma_N f_{\text{conv}} \quad (2)$$

の関係が成り立ち、

$$f_{\text{conv}} = \frac{N}{\sigma_N^2} \quad (3)$$

となる。

よって、実際に Conversion Factor を求めるには、ある一定強度の光を異なる露出時間で撮り、カウント N とゆらぎ σ_N を式 (3) に入れて最小二乗法を用いればよい。

今回は 2007 年度実習で得られた $f_{\text{conv}} = 1.3$ を用いた。

3.2 読出しノイズ

CCD で生じた電荷は、ある回路を通して電圧に変換して読出される。よって、得られるデータにはその変換に伴う僅かなノイズが含まれている。この CCD 以降のところからくるノイズのことを読出しノイズ: $N_{\text{read}} \text{ e}^-/\text{pix}$ という。

露出時間 0 秒でのカウントのゆらぎが、この読出しノイズに対応すると考えられる。今回は 2007 年度実習レポートより、 $N_{\text{read}} = 8.4$ とした。

3.3 暗電流

検出器の熱電子によって生じる電流のことを暗電流: $n_{\text{dark}} \text{ e}^-/\text{s}/\text{pix}$ という。CCD を冷却するのはこの暗電流によるノイズを抑えるためである。CCD の仕様からも分かる通り、CCD を充分冷却すればほぼ無視できる程度の値にしかならないので、今回は $n_{\text{dark}} = 0$ とした。

3.4 バイアス

CCD からの電荷を電圧に変換して読出すとき、読出しノイズによって負の値になることを防ぐため、実はある一定の電圧がかけられている。これを**バイアス**と言い、読出されたデータからバイアスを取り除くことを**バイアス補正**という。

バイアス補正を行うには、まず露出時間 0 秒のフレーム数枚撮り、それらを平均して 1 枚のバイアス・フレームを作る。そして、生データが載ったフレームからバイアス・フレームを引けばよい。

3.5 感度むら

CCD は一般的に 1 pixel ごとに感度にむらがある。この感度むらを補正することを**フラット・フィールドニング**と言い、そのために用いる画像フレームを**フラット・フレーム**と呼ぶ。

フラット・フィールドニングを行うには、まず一様光を撮り、それをバイアス補正してフラット・フレームを作る。そして、バイアス補正をした天体画像フレームをフラット・フレームで割り算すればよい。

3.6 スカイ

望遠鏡に入射してくるのは、純粋に天体からのフラックスだけでなく天体以外の背景のフラックス $n_{\text{sky}} \text{ e}^-/\text{s}/\text{pix}$ が含まれているので、リダクションの際にはこれを取り除かなければいけない。

実際に n_{sky} を調べるには、バイアス補正とフラット・フィールドニングを終えた画像の天体が写っていないところの pixel ごとのカウントの平均値をとればよい。

4 システム効率

システム効率とは望遠鏡に入射した天体からの光子数に対して、CCD で読出される電荷のカウント数の比である。

天体から望遠鏡に入射する光子数: s_i photons/s は

$$s_i = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\Delta \lambda F_\lambda}{h\nu} \quad (4)$$

となる。ここで、

D : 望遠鏡の口径

F_λ : 天体からのフラックス

$\Delta \lambda$: フィルターの波長幅

である。

観測天体が視等級で M mag のとき、 F_λ は 0 mag の天体からのフラックスが $F_{0\text{mag}} = 3.92 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2/\mu\text{m}$ であることを用いると、ポグソンの式

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \left(\frac{f_1}{f_2} \right) \quad (5)$$

より、

$$M - 0 = -2.5 (\log F_\lambda - \log F_{0\text{mag}}) \quad (6)$$

$$F_\lambda = 3.92 \times 10^{-12 - \frac{M}{2.5}} \quad (7)$$

と求まる。

CCD で生じた電荷の個数: $n_i \text{ e}^-/\text{s}$ は、

$$n_i = \frac{N f_{\text{conv}}}{t} \quad (8)$$

となる。ここで、

N : 画像上でのカウント
 f_{conv} : Conversion Factor
 t : 積分時間

である。

これらを用いて、システム効率 η は

$$\eta = \frac{n_i}{s_i} \quad (9)$$

で求まる。

5 等級原点

等級原点とはあるカメラシステムにおいて、露出時間 1 秒で 1 カウントの信号を生じさせる仮想的な天体の等級のことである。仮に M 等級の天体を t 秒間露出したときに N カウントの信号が検出されたとすると、このカメラシステムの等級原点 Z_{mag} は

$$Z_{\text{mag}} = M + 2.5 \times \log \frac{N}{t} \quad (10)$$

である。

6 限界等級

限界等級とはある望遠鏡で検出できる最も暗い天体の等級のことである。具体的にはノイズに対する信号の比 S/N がある値を超えたとき検出できたとして計算する。通常光赤外では $S/N = 5$ を

越えれば検出できた、とすることが多い。ノイズ成分をまとめて N_{noise} とすると、

$$S/N = \frac{n_i t}{N_{\text{noise}}} \quad (11)$$

と書ける。天体の像が m 個の pixel に拡がっているとすると、

$$N_{\text{noise}} = \sqrt{n_i t + m n_{\text{sky}} t + m n_{\text{dark}} t + m N_{\text{read}}^2} \quad (12)$$

である。

7 観測・解析

7.1 2008/12/4 (木) 観測

表 4: data – 元期 J2000

観測天体	Alpheratz (α Andromeda)
赤経	$00^h 08^m 23.3^s$
赤緯	$-29^\circ 05' 26''$
視等級	2.1 mag

当初は天球上で α And. の近くにある 6.1 mag の星を観測する予定だったが、この暗い方の星は雲が出てきたため観測できなかった。

7.2 2008/12/25 (木) 観測

副鏡を拭いて、システム効率が良くなるかどうかを調べ、限界等級に近い天体を観測するということが目標。しかし、解析できそうな画像は一枚も撮れなかった。

7.3 システム効率 η , 等級原点 Z_{mag} の算出

今回の観測では、暗電流の成分は天体からの信号に比べて極めて小さいと思われるので、整約の際には無視した。バイアス補正には〔内山・藤井〕班のバイアス・フレームのデータを用いた。フラット・フィールドニングは行っていない。以下、IRAF でのパラメータ設定と測光で得られた値である。等級原点は初期設定のまま $Z_{\text{mag}} = 25$ とした。

表 5: IRAF data-1

file name	apertur	itime	N	n_i	η	Z_{mag}
21alpha.fits	15	1	2.84×10^6	3.70×10^6	0.0352	18.2
21alpha0.fits	13	0.1	3.12×10^5	4.05×10^6	0.0386	18.3
21alpha1.fits	15	0.1	3.28×10^5	4.27×10^6	0.0407	18.4
21alpha2.fits	20	0.15	5.03×10^5	4.36×10^6	0.0415	18.4
21alpha3.fits	20	0.4	1.10×10^6	3.57×10^6	0.0340	18.2

式 (4),(7) より、

$$\begin{aligned}
 F_\lambda &= 5.67 \times 10^{-13} \text{ W/cm}^2/\mu\text{m} \\
 s_i &= 1.05 \times 10^8 \text{ photons/s} \\
 Z_{\text{mag}} &= 2.1 + 2.5 \times \log \frac{N}{t}
 \end{aligned}$$

表 5 より、システム効率、等級原点はそれぞれ平均をとって

$$\eta = 0.038, \quad Z_{\text{mag}} = 18.3 \text{ mag}$$

とした。

7.4 空の背景光

空の背景光: n_{sky} photons/s/pix を求める。

画像上の星が写っていない領域 (25 pixel) のカウントの平均: N_{mean} photons をとったものを示す。

表 6: 空の背景光

file name	N_{mean}	n_{sky}
21alpha.fits	575.4	575.4
21alpha0.fits	145	1450
21alpha1.fits	118.7	1187
21alpha2.fits	115.4	769.3
21alpha3.fits	157.5	393.8

$$n_{\text{sky}} = \frac{N_{\text{mean}}}{t} \quad (13)$$

画像上に、明らかに天体の光とは異なる明光が写っていたので、得られた n_{sky} の値は本来より大きくなっていると考えられる。よって、 n_{sky} の値は最も小さかった 21alpha3.fits から得たデータを用いて

$$n_{\text{sky}} = 394 \text{ photons/s/pix}$$

とした。

また、1 pixel = 0.99^2 arcsec^2 なので $n'_{\text{sky}} = \frac{n_{\text{sky}}}{0.99^2} \text{ photons/s/arcsec}^2$ となり

$$n'_{\text{sky}} = 402 \text{ photons/s/arcsec}^2$$

と書くこともできる。

あるいは、表5の値の平均をとり、

$$n_i = 3.99 \times 10^6 \text{ photons/s/pix}$$

とすると、これを式(5)に用いれば $n''_{\text{sky}} \text{ mag/arcsec}^2$ は、

$$n''_{\text{sky}} - 2.1 = -2.5 \log \left(\frac{n_{\text{sky}}}{n_i} \right) \quad (14)$$

となり、

$$n''_{\text{sky}} = 12.1 \text{ mag/arcsec}^2$$

と書くこともできる。

7.5 S/N の比較

このカメラシステムの等級原点が求まったので、 $Z_{\text{mag}} = 18.3$ とパラメータ設定をして再び測光した。今度は aperture はすべて 20 とした。結果を以下の表にまとめる。 M は N を等級に変換した値、 ΔM は等級誤差である。

表 7: IRAF data-2

file name	itime	N	M	ΔM	S/N (観測値)	S/N (理論値)
21alpha.fits	1	2.93×10^6	2.133	0.002	543	1817
21alpha0.fits	0.1	3.20×10^5	2.037	0.003	362	559
21alpha1.fits	0.1	3.36×10^5	1.985	0.003	362	576
21alpha2.fits	0.15	5.04×10^5	1.985	0.002	543	724
21alpha3.fits	0.4	1.20×10^6	2.206	0.001	1086	1148

M と ΔM が求まれば、式(5),(7)より、 S/N の観測値は

$$S/N = \frac{10^{-\frac{M}{2.5}}}{10^{-\frac{M-\Delta M}{2.5}} - 10^{-\frac{M+\Delta M}{2.5}}} \times 2 \quad (15)$$

から求まる。

S/N の理論値は式 (11),(12) より求めることができる。 m は $m = \pi \times (\text{apertur})^2 \simeq 1257$ である。

S/N の観測値が理論値に比べて小さいのは、観測条件の悪さやフラット・フィールドイングを行っていないため等級誤差が大きくなったからだと考えられる。

7.6 限界等級の算出

$S/N, t$ に適当な値を与えたモデルを考える。式 (11),(12) を用いて n_i についての 2 次方程式を解き、式 (9) から s_i が求まると、式 (4) より F_λ が求まる。これと式 (5),(7) を用いれば限界等級が求まる。

以下に様々なモデルで計算した限界等級をまとめる。

表 8: 限界等級

S/N	t (s)	限界等級 (mag)
5	20	12.9
10	10	11.6
10	1	9.8
15	60	12.3
15	30	11.9
20	25	11.5
20	5	10.4

8 感想

実際に自分で望遠鏡を動かして観測したのは初めてだったので楽しかったです。IRAF を使ったの画像データの整約は CCD 観測の理解が深まり、とても勉強になりました。

あと、レポートを書きながらやるべきことが他にもたくさんあったのに、全然できていないことに気付きました。予習段階でもっと自分で計画を立てておくべきだったと反省しています。

忙しい中、ありがとうございました。