

基礎天文学観測 I, II

小望遠鏡による基礎観測実習

理学部天文学科
大野 貴博
(学生証番号 62005)

15th January 2007

Contents

1	目的	2
2	原理	2
2.1	システム効率	2
2.2	限界等級	2
2.3	観測装置	3
3	方法	4
3.1	データの転送	4
3.2	天体観測 (1 回目)	4
3.3	IRAF によるデータ処理 (1 回目)	5
3.4	天体観測 (2 回目)	5
3.5	IRAF によるデータ処理 (2 回目)	5
4	結果	5
4.1	フォーカス	5
4.2	システム効率	6
4.3	限界等級 (理論値)	6
4.4	限界等級 (実測値)	7
5	考察	8
6	感想	9

§1

目的

東大天文センターの 30 cm カセグレン望遠鏡を用い、CCD カメラによる天体観測を行う。望遠鏡の基本操作法、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を目指す。具体的には、次のようにする：

- 観測からシステム効率を出す。
- 限界等級を算出する。
- 実際に観測を行って、その限界等級が得られるかを調べる。

§2

原理

2.1 システム効率

システム効率 η は、次で定義される：

$$\eta \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\text{CCD で生じた電荷の個数 } n_i [\text{e}^-/\text{s}]}{\text{天体から望遠鏡に入射した光子数 } s_i [\text{個}/\text{s}]} \quad (1)$$

ここで、望遠鏡の口径を D 、天体からのフラックスを F_λ 、フィルターの波長範囲を $\Delta\lambda$ 、画像上でのカウントを N 、conversion factor を f_{conv} 、積分時間を t とすれば、

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

$$n_i = \frac{N f_{\text{conv}}}{t} \quad (3)$$

と表される。式 (2) にフラックスと等級の関係式

$$m_V = -2.5 \log \frac{F_\lambda}{F_0} \iff F_\lambda = F_0 \times 10^{-\frac{m_V}{2.5}} \quad (4)$$

を代入して、

$$s_i = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\lambda \Delta\lambda F_0 \times 10^{-\frac{m_V}{2.5}}}{hc} \quad (\because c = \nu\lambda) \quad (5)$$

と書ける。

2.2 限界等級

システム効率を踏まえて、限界等級について考えよう。一般に、 S/N という量によって、ノイズに対して信号がどの程度来ているかを評価し、それがある一定の値を超えれば受かったとする。ノイズ成分 N_{noise} は、 m 個のピクセルに広がった像を検出する場合、

$$N_{\text{noise}} = \sqrt{n_i t + m n_{\text{sky}} t + m n_{\text{dark}} t + m N_{\text{read}}^2} \quad (6)$$

と書ける。ただし、 $n_{\text{sky}} [\text{e}^-/\text{s}/\text{pix}]$ は単素子当たりの検出された背景放射の光子数、 $n_{\text{dark}} [\text{e}^-/\text{s}/\text{pix}]$ は検出器の単素子当たりの暗電流、 $N_{\text{read}} [\text{e}^-/\text{pix}]$ は検出器からの単素子当たりの読み出しノイズである。このと

き, その S/N は, 次のようになる:

$$S/N \stackrel{\text{def}}{=} \frac{n_i t}{N_{\text{noise}}} \quad (7)$$

$$= \frac{n_i t}{\sqrt{n_i t + m n_{\text{sky}} t + m n_{\text{dark}} t + m N_{\text{read}}^2}}. \quad (8)$$

いま, $S/N = \alpha (> 0)$ を超えれば受かったとしよう. すると,

$$\frac{n_i t}{\sqrt{n_i t + m n_{\text{sky}} t + m n_{\text{dark}} t + m N_{\text{read}}^2}} > \alpha \quad (9)$$

$$\Leftrightarrow t^2 n_i^2 - \alpha^2 t n_i - \alpha^2 m (n_{\text{sky}} t + n_{\text{dark}} t + N_{\text{read}}^2) > 0 \quad (10)$$

$$\Leftrightarrow n_i > \frac{\alpha}{2t} \left\{ \alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4m (n_{\text{sky}} t + n_{\text{dark}} t + N_{\text{read}}^2)} \right\} \stackrel{\text{put}}{=} n_{i \text{min}}. \quad (11)$$

これと, フラックスと等級の関係式 (4) (p. 2) より,

$$m_V = -2.5 \log \frac{F_\lambda}{F_0} \quad (12)$$

$$= -2.5 \log \left\{ \frac{1}{F_0} \frac{n_i / \eta}{\pi} \left(\frac{2}{D} \right)^2 \frac{hc}{\lambda \Delta \lambda} \right\} \quad (\because \text{式 (1) (p. 2), (2) (p. 2)}) \quad (13)$$

$$< -2.5 \log \left\{ \frac{1}{F_0} \frac{n_{i \text{min}} / \eta}{\pi} \left(\frac{2}{D} \right)^2 \frac{hc}{\lambda \Delta \lambda} \right\} \stackrel{\text{put}}{=} m_{V \text{lim}} \quad (14)$$

とできて, 限界等級 $m_{V \text{lim}}$ が導かれる.

2.3 観測装置

CCD CCD の仕様は, 次のとおり:

Table 1: CCD の仕様

フォーマット	512 × 512
アレイサイズ	12.3 mm × 12.3 mm
ピクセルサイズ	24 μm × 24 μm
Full Well	250000 e ⁻ /pix
読み出しノイズ	< 10 e ⁻ (@180 K)
暗電流	12.75 e ⁻ /s/pix (@240 K), 0.0046 e ⁻ /s/pix (@160 K)
量子効率	68% (@450 nm), 75% (@550 nm), 80% (@650 nm)
CTE	0.99999
出力数	2

実際の計算には, 現ハワイ観測所の表さんによる実測値を用いた. パラメータの実測値は, 次のとおり:

Table 2: パラメータの実測値

読み出しノイズ	32.3 e ⁻ (@261 K)
暗電流	9 e ⁻ /s/pix (@261 K)

フィルター フィルターは, 駿河精機の青緑透過フィルター S76-VG6 と赤外線カット・フィルター S76-KG5-1 を重ねることで, V バンドのフィルターの代用とした. 波長と透過率の関係は, 次のとおり:

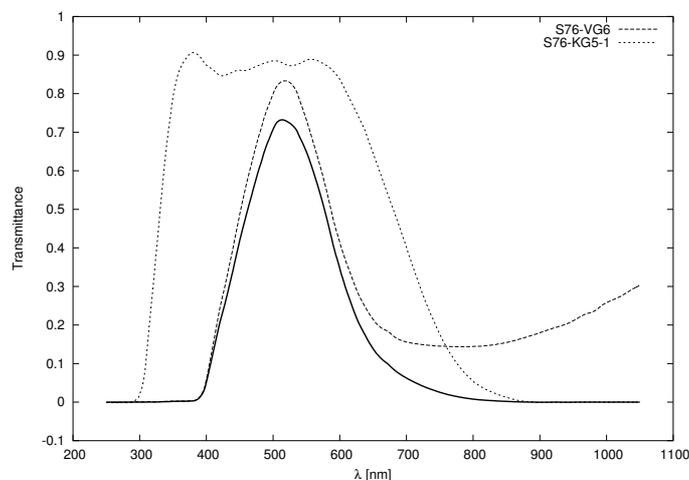


Figure 1: 波長と透過率の関係

このグラフから、透過率がピークとなる波長 λ と波長範囲 $\Delta\lambda$ について、 $\lambda = 514 \text{ nm}$, $\Delta\lambda = 0.154 \mu\text{m}$ と解る^{註1}。

§3

方法

3.1 データの転送

観測後のデータは、 $\overbrace{\text{Windows 98 "beatle"} \rightarrow \text{Linux "golf"}}^{30 \text{ cm ドーム}} \rightarrow \overbrace{\text{Linux "ioa09/10"}}^{\text{IoA}}$ という流れを辿った。

- beatle から golf への転送では、beatle のデスクトップにある `¥ccdimages` (golf の `/home/ccdimages` に相当) にデータをコピーした。
- golf から ioa09/10 への転送では、ターミナルで

```
scp -r tct2006@vw:/home/ccdimages/2006Fri .
```

と入力した。

3.2 天体観測 (1 回目)

2006 年 12 月 1 日に実施した。

まず、CCD を 30 分以上冷却してから、望遠鏡を適当な天体に向けて、撮像のテストを行った。その際に、露出時間が長くなりすぎないように注意しつつ、フォーカスと MOFFAT (半値幅) の関係を調べて、MOFFAT を最小化するようなフォーカスを採用した。

次に、`xplns` で選んだ、等級が既知の天体を 3 つ観測した。各天体とも、カメラに収まる範囲で少しずつ位置をずらしながら撮像し、これを 2 通りの露出時間に対して行った。同時に、バイアスとダークのデータも取得した。

^{註1} 波長範囲には半値幅を用いた。

3.3 IRAF によるデータ処理 (1 回目)

位置をずらしながら観測した天体については, 2 つのデータを差し引き (imarith), 位置をずらし損ねた天体については, データからバイアスを差し引いて (imarith), 天体からの正味のカウントを測定した (imexam). 式 (5) (p. 2) を使って等級から s_i を, 式 (3) (p. 2) を使ってカウントから n_i を, それぞれ計算できるので, 式 (1) (p. 2) に代入して, システム効率 η を求めた.

また, データから露出時間の等しいダークを差し引いて (imarith), 天体の写っていない領域より背景放射のカウントを読み取った (imexam). これを式 (3) (p. 2) に代入して, n_{sky} も決定した.

以上から, 式 (11) (p. 3), (14) (p. 3) を用いて, 限界等級 $m_{V\text{lim}}$ を算出した.

3.4 天体観測 (2 回目)

2007 年 1 月 4 日に実施した.

得られた限界等級を参考にして, The Aladin Sky Atlas^{註2}によって, 比較の見つけやすい天体付近にある, 限界等級に近い天体を選んだ. CCD を 30 分以上冷却してから, その天体を観測した. 天体がカメラに収まる範囲で少しずつ位置をずらしながら撮像し, これを 2 通りの露出時間に対して行った. 同時に, バイアスとダークのデータも取得した.

3.5 IRAF によるデータ処理 (2 回目)

位置をずらしながら観測した 2 つのデータを差し引き (imarith), アパーチャの半径に相応しい値を入れて, 天体を測光した (phot). 生成されたファイルから, カウントと等級誤差を読み取って, 見かけの等級および S/N を計算した.

§4

結果

4.1 フォーカス

$m_V = 2.5$ である $27 \gamma \text{ Cas}$ (赤経 $0^{\text{h}}56.7^{\text{m}}$, 赤緯 $+60^{\circ}43'$) でテストを行った. 露出時間 t とフォーカスを変えながら, MOFFAT を調べたところ, 次のようになった:

Table 3: フォーカスと MOFFAT の関係

t [s]	フォーカス	MOFFAT
0.1	-1.0	3.48
0.1	-1.5	3.78
0.1	0.0	3.26
0.05	+0.5	3.00
0.05	+0.5	2.25
0.05	+1.0	3.28
0.05	+0.5	5.69

これより, MOFFAT を最小化するようなフォーカスとして, +0.5 を採用した.

^{註2} <http://aladin.u-strasbg.fr/java/nph-aladin.pl>

4.2 システム効率

$D = 30 \text{ cm}$, $\lambda = 514 \text{ nm}$, $\Delta\lambda = 0.154 \mu\text{m}$, $F_0 = 3.92 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2/\mu\text{m}$ を式 (5) (p. 2) に代入して,

$$s_i = \pi \times \left(\frac{30 \text{ cm}}{2} \right)^2 \times \frac{514 \times 10^{-9} \text{ m} \times 0.154 \mu\text{m} \times 3.92 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2/\mu\text{m} \times 10^{-\frac{m_V}{2.5}}}{hc} \quad (15)$$

$$\cong 1.104 \times 10^{9-\frac{m_V}{2.5}} \text{ 個/s.} \quad (16)$$

また, $f_{\text{conv}} = 3.8 \text{ e}^-/\text{ADU}$ を式 (3) (p. 2) に代入して,

$$n_i = \frac{N \times 3.8 \text{ e}^-/\text{ADU}}{t}. \quad (17)$$

従って, 等級 m_V から s_i を, カウント N と露出時間 t から n_i を, それぞれ出して, システム効率 $\eta (= n_i/s_i)$ を導くと, 次のようになった:

Table 4: システム効率の測定

	t [s]	m_V	N [ADU]	R [pix]	s_i [個/s]	n_i [e ⁻ /s]	η
26 <i>v1</i> Cas	0.5	4.8	177623	13.01	13272999.36	1349934.8	0.1017
(赤経 0 ^h 55.0 ^m , 赤緯 +58°58')	1.0	4.8	332510	11.35	13272999.36	1263538	0.09519
28 <i>v2</i> Cas	0.5	4.6	212957	14.50	15957655.07	1641273.2	0.1028
(赤経 0 ^h 56.6 ^m , 赤緯 +59°11')	1.0	4.6	438852	10.18	15957655.07	1667637.6	0.1045
ADS 704 A	1.0	5.6	170853	11.87	6352856.908	649241.4	0.1021
(赤経 0 ^h 56.8 ^m , 赤緯 +60°22')	2.0	5.6	281385	15.42	6352856.908	534631.5	0.08415

これより, 平均をとって $\eta \cong 0.09840$ と求まった. なお, 天体の名称が解らなかったものは, simbad^{註3}にて調べた.

4.3 限界等級 (理論値)

露出時間 $t = 2.0 \text{ s}$ とした ADS 704 A のデータから露出時間の等しいダークを差し引いて, ランダムに 5 箇所背景放射のカウント N_{sky} を読み取ったところ,

$$587, 496, 455, 524, 504$$

となり, 平均して $N_{\text{sky}} = 513.2 \text{ ADU/pix}$ を得た.

$$\therefore n_{\text{sky}} = \frac{513.2 \text{ ADU/s} \times 3.8 \text{ e}^-/\text{ADU}}{2.0 \text{ s}} = 975.08 \text{ e}^-/\text{s/pix} \quad (\because \text{式 (3) (p. 2)}). \quad (18)$$

通常, 光赤外では $S/N = 5$ を越えれば受かったとすることが多い. S/N の値は大きいほど信用できるので, 今回は積分時間 $t = 5.0 \text{ s}$ で $S/N = 10$ を越えれば受かったとした. 像が広がったピクセル数 m は, Table 4 よりアパーチャの半径 R を参照して, $m \cong \pi R^2$ で与えられるため, 平均して $m \cong 518.6 \text{ pix}$ と置いた. このとき, Table 2 (p. 3) から $n_{\text{dark}} = 9 \text{ e}^-/\text{s/pix}$, $N_{\text{read}} = 32.3 \text{ e}^-$ を式 (11) (p. 3) に代入して,

$$n_{i \text{ min}} \cong \frac{10}{2 \times 5.0 \text{ s}} \times \left\{ 10 + \sqrt{10^2 + 4 \times 518.6 \times (975.08 \times 5.0 + 9 \times 5.0 + 32.3^2)} \right\} \quad (19)$$

$$\cong 3.527 \times 10^3 \text{ e}^-/\text{s}. \quad (20)$$

^{註3} <http://simbad.u-strasbg.fr/sim-fid.pl>

先に求めたシステム効率 $\eta \doteq 0.09840$ と一緒に、これを式 (14) (p. 3) に代入すると、限界等級 $m_{V\text{lim}}$ は、

$$m_{V\text{lim}} \doteq -2.5 \log \left\{ \frac{3.527 \times 10^3 \text{ e}^-/\text{s}/0.09840}{3.92 \times 10^{-12} \text{ W}/\text{cm}^2/\mu\text{m} \times \pi} \times \left(\frac{2}{30 \text{ cm}} \right)^2 \times \frac{hc}{514 \times 10^{-9} \text{ m} \times 0.154 \mu\text{m}} \right\} \quad (21)$$

$$\doteq 11.22 \quad (22)$$

となった。

4.4 限界等級 (実測値)

比較の見つけやすい天体として、 $m_V = 3.45$ である $24 \eta \text{ Cas}$ (赤経 $0^{\text{h}}49^{\text{m}}6^{\text{s}}$, 赤緯 $+57^\circ48'55''$) を挙げて、その付近で限界等級に近い天体として、 $m_V = 10.17$ である 1478-0036317 を選んだ^{註4}。ここで、

$$m_V \doteq \frac{m_{B1} + m_{R1}}{2} \quad (23)$$

とみなした。測光の際に、アパーチャの半径は Table 4 (p. 6) の平均から 13 に、空の半径は (余裕を持たせて) $13 + 5 = 18$ に、それぞれ設定した。1478-0036317 に加えて、1478-0036337 と 1478-0036522 も同時にデータが取得できたので、これら 3 つの天体について、カウント N と等級誤差 Δm_V を読み取ったところ、次のようになった:

Table 5: カウントと等級誤差の測定

	t [s]	m_{B1}	m_{R1}	m_V	N [ADU]	Δm_V
1478-0036317	5.0	10.25	10.09	10.17	13104.73	0.062
(赤経 $0^{\text{h}}49^{\text{m}}16^{\text{s}}$, 赤緯 $+57^\circ48'3''$)	10	10.25	10.09	10.17	17105.2	0.061
1478-0036337	5.0	12.23	11.29	11.76	3257.248	1.130
(赤経 $0^{\text{h}}49^{\text{m}}19^{\text{s}}$, 赤緯 $+57^\circ49'15''$)	10	12.23	11.29	11.76	4606.914	0.232
1478-0036522	5.0	11.81	10.74	11.275	1765.012	0.460
(赤経 $0^{\text{h}}49^{\text{m}}36^{\text{s}}$, 赤緯 $+57^\circ49'24''$)	10	11.81	10.74	11.275	8014.939	0.138

カウント N と露出時間 t から (大気による減光を受けた後の) 見かけの等級 m_V を求めるには、式 (1) (p. 2), (16) (p. 6), (17) (p. 6) より、

$$0.09840 \doteq \frac{\frac{N \times 3.8 \text{ e}^-/\text{ADU}}{t}}{1.104 \times 10^{9 - \frac{m_V}{2.5}} \text{ 個/s}} \iff m_V \doteq 2.5 \times \left(9 - \log \frac{\frac{N \times 3.8 \text{ e}^-/\text{ADU}}{t}}{0.09840 \times 1.104 \text{ 個/s}} \right) \quad (24)$$

を用いた。また、等級誤差 Δm_V より等級は $m_V \pm \Delta m_V$ ゆえ、これから S/N を求めるには、

$$S/N = \frac{F_\lambda}{\Delta F_\lambda} \quad (25)$$

$$= \frac{F_0 \times 10^{-\frac{m_V}{2.5}}}{\left(F_0 \times 10^{-\frac{m_V - \Delta m_V}{2.5}} - F_0 \times 10^{-\frac{m_V}{2.5}} \right) + \left(F_0 \times 10^{-\frac{m_V}{2.5}} - F_0 \times 10^{-\frac{m_V + \Delta m_V}{2.5}} \right)} \quad (\because \text{式 (4) (p. 2)}) \quad (26)$$

$$= \frac{2}{10^{\frac{\Delta m_V}{2.5}} - 10^{-\frac{\Delta m_V}{2.5}}} \quad (27)$$

を用いた。

^{註4} 天体の名称は、The Aladin Sky Atlas の ID で示した。

以上より，見かけの等級 m_V と S/N は，次のようになった：

Table 6: 見かけの等級と S/N の測定

	t [s]	m_V (実測値)	m_V (理論値)	S/N (実測値)	S/N (理論値)
1478-0036317	5.0	10.09	10.17	17.50	26.21
	10	10.56	10.17	17.79	38.77
1478-0036337	5.0	11.61	11.76	0.807	6.094
	10	11.98	11.76	4.644	9.020
1478-0036522	5.0	12.27	11.275	2.291	9.516
	10	11.38	11.275	7.847	14.08

ただし， S/N の理論値は， m_V の理論値と式 (1) (p. 2), (8) (p. 3), (16) (p. 6) を使って計算した。

§5

考察

Table 5 (p. 7) によれば，露出時間 t が長いほど，等級誤差 Δm_V が小さくなっていて，時間を要した分だけデータの精度が上がったことが解る．そこで， $t = 10$ s の場合を見てみると，Table 6 のとおり，3 つの天体すべてで m_V は (大気による減光を受けた後の) 実測値が理論値よりも大きく出ており，実際には雲のせいで暗く見えていると考えられる．カウント N が t に対してきれいな比例関係を示していない点も，雲の存在を示唆している^{註5}．また， $t = 5$ s の場合を見てみると，1478-0036337 の Δm_V が他と比べてかなり大きい．これは，位置をずらしながら観測した 2 つのデータを差し引いた際に，1478-0036337 の近くに，別の天体由来する反転が生じてしまったためであろう．アパーチャの半径をもう少し絞って測光すれば，抑えられたかもしれない．

S/N は，いずれも実測値が理論値を下回る結果となった．その理由として真っ先に挙げられるのは，理論値の計算に用いたパラメータの不備である．システム効率 η やピクセル数 m はあまり変動しないと推測できる一方，背景放射の光子数 n_{sky} は気象条件に大きく左右されるので，観測の度に n_{sky} を取り直さなかったのは致命的だった．あと，CCD の冷却が甘く，実際の暗電流 n_{dark} はもっと多かった可能性も否定できない．式 (8) (p. 3) が示すように， S/N の計算では， m が大きいと， n_{dark} の影響がかなり強くなることに鑑みれば，ダーク・データからバイアス・データを差し引いて， n_{dark} を直接測定してもよかった (し，恐らくその方が望ましい) ．

さらに，CCD の一部が完全に光を受け付けられない状態になっていたため，今回はフラット・フィールドイングを行わなかった．しかし，位置をずらしながら取得した 2 つのデータを差し引く場合，データの質を高める上で，フラット・フィールドイングが有用なのは明らかである．

S/N の実測値を見る限り，とりあえず天体は検出されてはいるものの，1478-0036317 以外はあまり信用できる値になっていない．Table 6 を踏まえると，受かった天体の m_V の実測値から真の限界等級 $m_{V\text{lim}}$ が導かれ，現実的には $m_{V\text{lim}} \doteq 10.56$ ということになるろう．ただし，この値は雲が薄くかかった状態で測定されたものゆえ，快晴に恵まれれば，これよりは高い値が得られると期待できる．

^{註5} Table 1 (p. 3) から Full Well は $250000 \text{ e}^-/\text{pix}$ である．いま， $m_V = 10$ ， $t = 10$ s， $m = 518.6 \text{ pix}$ として，入射した光子数を概算すれば，

$$\frac{1.104 \times 10^9 - \frac{10}{2.5} \text{ 個/s} \times 10 \text{ s}}{518.6 \text{ pix}} \doteq 2129 \text{ 個/pix} \quad (28)$$

ゆえ，Full Well に比べて十分小さいので，線形性の限界とは考えにくい．

§6

感想

望遠鏡の照準を手動で合わせる観測には、コンピュータ制御にはない楽しさがありました。しかし、捉えた天体が本当に狙いどおりの天体だと確信を持つのが難しいので、その意味では、改めて自動照準の偉大さを実感しました。

最初にドームに入ったとき、お世辞にも望遠鏡の状態はよいとは思えず、まともなデータが取れるのか不安を覚えました。でも、蓋を開けてみれば、10等星まで観測できており、実測値と理論値のずれも大体は説明がつくため、正直なところ意外な結果でした。ただ、口径 30 cm なら、もう少し暗い天体まで見えてもよかった気はします。

位置をずらしながら観測して、2つのデータを差し引く方法は、天体からの正味のカウントを即座に測定できるので、秀逸だと感じました。IRAF は、ぐんま天文台でのスペクトル解析でも使いましたが、そのときは別方面のコマンドに触れることができ、IRAF の機能の幅広さを再認識しました。主なコマンドの使い方が資料に載っていて、データ整約がやりやすかったです。gawk も併せて、今後に活かしたいと思います。

なかなか天候に恵まれず、何度か残念な思いをしたものの、無事に観測できて良かったです。最後になりましたが、寒い中、ご指導くださいまして、ありがとうございました。