

小望遠鏡による基礎観測実習

理学部天文学科 3年 05-132005

辰馬 未沙子

平成 26 年 1 月 31 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た CCD カメラによる基本的な天体観測を行い、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的とする。

1.1 システム効率

システム効率とは、望遠鏡に入射した星からの光子のうち、CCD で電荷となって読み出されたものの割合のことである。

天体から望遠鏡に入射した光子数 s_i [個/s] は、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 $\Delta\lambda$ とすると

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

と表される。ここで

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

より

$$s_i = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\Delta\lambda F_\nu}{h\lambda} \quad (3)$$

となる。このとき、 F_ν は見かけの等級 m と AB 等級の 0 等級の値 $F_{\nu,0}^{AB} = 3631 \text{ Jy} = 3631 \times 10^{-26} \text{ W/m}^2/\text{Hz}^2$ を用いて

$$F_\nu = 3631 \times 10^{-26} \times 10^{-m/2.5} [\text{W/m}^2/\text{Hz}^2] \quad (4)$$

と表される。

また、CCD で生じた電荷の個数 n_i [e⁻/s] は、画像上でのカウントを N 、コンバージョンファクターを f_{conv} 、積分時間を t とすると

$$n_i = \frac{N f_{conv}}{t} \quad (5)$$

と表される。

よって、システム効率 η は

$$\eta = \frac{n_i}{s_i} \quad (6)$$

で求められる。

実際に画像上での検出されたカウントを測定し、計算した入射光子数と比較することにより、システム効率を求める。

1.2 等級原点

等級原点 Z_{mag} とは、あるカメラシステムで 1 秒間の露出で 1 カウントの信号を生じさせる天体の等級のことである。

m 等級の星を 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での等級原点は

$$Z_{mag} = m + 2.5 \log \frac{N}{t} \quad (7)$$

となる。これを、観測したデータより算出する。

1.3 空の背景光

星の写っていない領域に入射している光の量を [photons/s/arcsec²]、および [mag/arcsec²] で算出する。

1.4 限界等級

限界等級は一般的には S/N という量で測られる。すなわち、ノイズに対して信号がどの程度来ているかを評価し、それが一定の値を超えれば検出できた、ということにする。通常光赤外では $S/N = 5$ を超えれば検出できた、とすることが多い。

その S/N は、ノイズ成分を N_{noise} 、積分時間を t とすると

$$S/N = \frac{n_i t}{N_{noise}} = \frac{\eta s_i t}{N_{noise}} \quad (8)$$

のように書ける。ノイズ成分は入射光子のポアソンノイズと検出器からの読み出しノイズでほぼ占められており、単素子当たりの検出された背景放射の光子数を $n_{sky}[e^-/s/pix]$ 、検出器の単素子当たりの暗電流を $n_{dark}[e^-/s/pix]$ 、検出器からの単素子当たりの読み出しノイズを $N_{read}[e^-r.m.s./pix]$ とすると

$$N_{noise} = \sqrt{n_i t + n_{sky} t + n_{dark} t + N_{read}^2} \quad (9)$$

と書ける。

複数素子の場合には複数の素子からのノイズを考慮する必要があるが、それらは統計的に足し合わせれば良い。すなわち、 m 個のピクセルに広がった像を検出する場合、ノイズ成分 N_{noise} は

$$N_{noise} = \sqrt{n_i t + m n_{sky} t + m n_{dark} t + m N_{read}^2} \quad (10)$$

となる。

実際にノイズ成分を測定し、限界等級を算出する。また、測定した等級誤差を、計算より求められる予想値と比較する。

2 観測方法

2.1 観測機器

観測に使用した望遠鏡は、東大天文センターの 30cm カセグレン望遠鏡である。この望遠鏡の基本情報を表 1 に示す。

口径	300mm
焦点距離	5000m(F16.7)

表 1: 望遠鏡の基本情報

次に、使用した CCD カメラの基本情報を表 2 に示す。

さらに、フィルタは青緑透過フィルタ S76-VG6 と赤外線カットフィルタ S76-KG5-1 の 2 枚を重ねて、だいたい V-band のフィルタの代用とした。それらの透過率プロット (赤線) と、重ね合わせたフィルタの透過率プロット (青線) を図 1 に示す。

フィルタの透過率が一番高い波長は図 1 より $\lambda = 510\text{nm}$ 、波長幅は透過率の FWHM を読み取り、 $\Delta\lambda = 160\text{nm}$ とする。

フォーマット	2048×2048
アレイサイズ	15.2mm×15.2mm
ピクセルサイズ	7.4 μ m × 7.4 μ m
ピクセルスケール	0.27"/pix
Full Well	40,000e ⁻ /pix
量子効率 (500nm)	55%
量子効率 (600nm)	40%
CTE	>0.99999
Conversion Factor(= f_{conv})	0.947
読み出しノイズ(= N_{read})	12e ⁻ /pix

表 2: CCD カメラの基本情報

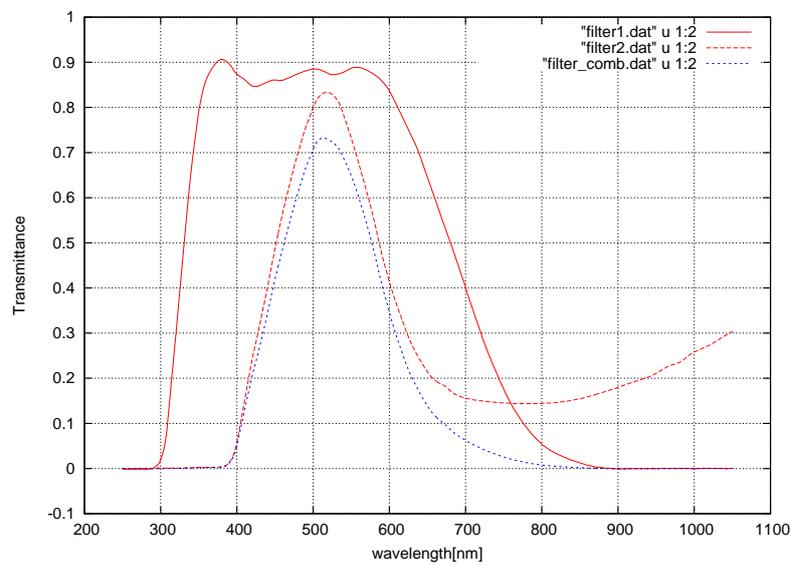


図 1: フィルタの透過率プロット

2.2 観測

2013年11月29日19:40頃から20:00頃にかけてHIP876Aとその周りにあるその他3つの天体を観測した。当日の天気は快晴であった。また、biasは同日18:30頃、darkは同日19:20頃に取得した。観測したそれぞれ天体のV等級を表3に示す。

恒星名	V 等級 [mag]
HIP876A	8.75
HIP876B	9.5
	9.6
	8.1
	8.6

表 3: 観測した天体のV等級

ただし、HIP876AとHIP876Bは連星であり、30cmカセグレン望遠鏡では分解できず一つの天体

として撮像されていたので、等級 m とフラックス F の関係式

$$m = -2.5 \log \left(\frac{F}{F_{vega}} \right) \quad (11)$$

を用いると、合計の等級 m_{tot} は

$$\begin{aligned} m_{tot} &= -2.5 \log \left(\frac{F_A + F_B}{F_{vega}} \right) \\ &= -2.5 \log \left(10^{-m_A/2.5} + 10^{-m_B/2.5} \right) \\ &= 8.3 \text{mag} \end{aligned} \quad (12)$$

と求められた。ただし F_{vega} をベガのフラックス、 F_A, F_B をそれぞれ HIP876A と HIP876B のフラックス、 m_A, m_B をそれぞれ HIP876A と HIP876B の等級とした。

そして、これらの天体を積分時間 30s で微妙に位置をずらしながら 4 枚撮像した。

3 結果

撮像した 4 枚の画像のうち 2 枚を選択し、引き算を行うことで sky, dark, bias を一度に消去し、引き算した画像で IRAF の測光を行った。このとき FWHM の平均が 23.20pix だったので、apartur を 50pix、annulus を 75pix、dannulus を 10pix に設定した。

その結果を表 4 に示す。

V 等級 m [mag]	カウント数 N [個]
9.6	474329.6
8.1	1654422
8.6	1000919
8.3	1477294

表 4: 観測した天体の画像上でのカウント数

3.1 システム効率

システム効率を求めるために、式 (3)、(4) に $D = 300\text{mm}$ 、 $\lambda = 510\text{nm}$ 、 $\Delta\lambda = 160\text{nm}$ 、 $h = 6.626 \times 10^{-34}\text{m}^2\text{kg/s}$ とそれぞれの等級 m [mag] を代入し、 s_i [個/s] を求めた。次に、式 (5) に $f_{conv} = 0.947$ 、 $t = 30\text{s}$ とそれぞれのカウント数 N [個] を代入し n_i [e^- /s] を求め、式 (6) に s_i 、 n_i を代入し、システム効率 η を求めた。その結果を表 5 に示す。

m [mag]	s_i [個/s]	n_i [e^- /s]	η
9.6	175653.5	14973.00	0.08524
8.1	699289.5	52224.58	0.07468
8.6	441221.8	31595.67	0.07160
8.3	581643.6	46633.24	0.08017

表 5: 観測した天体のシステム効率

この 4 つの値の平均値 $\eta \simeq 0.0779 \simeq 0.078$ をシステム効率とする。

3.2 等級原点

等級原点 $Z_{mag}[\text{mag}]$ を求めるために、式 (7) に $t = 30\text{s}$ とそれぞれの等級 $m[\text{mag}]$ 、カウント数 $N[\text{個}]$ を代入し、その結果を表 6 に示す。

$m[\text{mag}]$	$Z_{mag}[\text{mag}]$
9.6	20.09
8.1	19.95
8.6	19.90
8.3	20.03

表 6: 観測した天体の等級原点

この 4 つの値の平均値 $Z_{mag} \simeq 19.99 \simeq 20.0\text{mag}$ を等級原点とする。

3.3 空の背景光

dark に bias も含まれているので、撮像した 4 枚の画像のうち 1 枚を選択し、30s の dark 画像 20 枚の平均をとったもので引き算を行った。そして、星の写っていない領域のカウント数 N_{sky} を求めるために、iraf で引き算を行ったあとの画像のカウント数の中央値を調べると、 $N_{sky} = 699.4[\text{個}]$ となった。

またピクセルスケールが 0.27arcsec なので、 $1\text{pix} = 0.0729\text{arcsec}^2$ を用いると、式 (5) より

$$n_{sky} = \frac{699.4 \times 0.947}{30} \simeq 22.07\text{photons/s/pix} \quad (13)$$

$$\simeq 302.8\text{photons/s/arcsec}^2 \quad (14)$$

$$\simeq 303\text{photons/s/arcsec}^2 \quad (15)$$

と求められた。

さらに、式 (7) に $Z_{mag} = 19.99\text{mag}$ 、 $N/t = 302.8/f_{conv}$ を代入すると、空の背景光 m_{sky} は

$$m_{sky} = 19.99 - 2.5 \log \frac{302.8}{0.947} \simeq 13.72 \simeq 13.7\text{mag/arcsec}^2 \quad (16)$$

と求められた。

3.4 限界等級

dark に含まれている bias を除いて n_{dark} を求めるために、bias 画像 20 枚の平均をとったものを dark 画像 20 枚の平均から引くと、カウントの中央値が -222.1 になってしまった。これは bias の変動によると考えられ、一般に $n_{dark} \ll n_{sky}, N_{read}$ なので $n_{dark} \sim 0$ とする。

また、 N_{read} を求めるために 2 枚の bias 画像の引き算を行ったあと $\sqrt{2}$ で割り、その STDDEV を IRAF を用いて求めると、ADU 単位の読み出しノイズは 12.77 となった。よって

$$N_{read} = 12.77 \times 0.947 \sim 12.09 \sim 12.1[\text{e}^-/\text{pix}] \quad (17)$$

となった。過去のレポートを見ても $N_{read} = 12$ としていたので、今回も $N_{read} = 12$ を使用する。

ここで、限界等級を $S/N = 5$ のときと仮定する。式 (8)、(10) より、 $n_i > 0$ に注意すると

$$5 = \frac{n_i t}{N_{noise}}$$

$$n_i = \frac{5}{t} \sqrt{n_i t + m n_{sky} t + m n_{dark} t + m N_{read}^2}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{5}{t} \sqrt{n_i t + m(n_{sky} t + N_{read}^2)} \\
n_i^2 &= \frac{25}{t^2} [n_i t + m(n_{sky} t + N_{read}^2)] \\
n_i &= \frac{25/t \pm \sqrt{25^2/t^2 + 4 \times 25/t^2 \times m(n_{sky} t + N_{read}^2)}}{2} \\
&= \frac{25 + 5\sqrt{25 + 4m(n_{sky} t + N_{read}^2)}}{2t}
\end{aligned} \tag{18}$$

となる。これに $m = \pi \times 23.20^2 \text{pix}$ 、 $n_{sky} = 22.07 \text{photons/s/pix}$ 、 $N_{read} = 12e^-/\text{pix}$ 、 $t = 30\text{s}$ を代入すると

$$n_i = 195e^-/\text{s} \tag{19}$$

となった。さらに、式 (7) に $Z_{mag} = 19.99 \text{mag}$ 、 $N/t = 195/f_{conv}$ を代入すると、 $t = 30\text{s}$ での限界等級 m_{lim} は

$$m_{lim} = 19.99 - 2.5 \log \frac{195}{0.947} \simeq 14.20 \simeq 14.2 \text{mag} \tag{20}$$

と求められた。

4 考察

4.1 システム効率と等級原点のばらつき

システム効率は $\eta \simeq 0.078$ となり、去年の値よりも大きくなった。それは、観測当日の天気が快晴であり、観測条件が非常に良かったためだと考えられる。そのため、等級原点も去年の値よりも暗い値 $Z_{mag} \simeq 20.0 \text{mag}$ となった。

また、表 5 と表 6 よりそれぞれに関して標準偏差を計算し、それを誤差とみなすと

$$\eta = 0.078(\pm 0.005) \tag{21}$$

$$Z_{mag} = 19.99(\pm 0.07) \text{mag} \tag{22}$$

となった。等級原点に関しては 4 つの天体でばらつきは小さかったが、システム効率に関しては少しばらつきがあった。その原因を考察するために、解析に使った画像を図 2 に示す。

2 枚の画像を引き算しているため天体は濃い白と黒で示されているが、白のほうで測光を行った。表 5 より一番システム効率が高くなったのは 9.6mag の天体であるが、図 2 を見るとそのすぐ右上に暗い天体 a があるため、測光したときにその影響を少し受けてしまっている可能性がある。ただ、他の 3 つの天体も同じようにシステム効率にばらつきがあるので、ばらつきの原因は暗い天体だけではないことが考えられる。そこで考えられるのが画像全体に見られる横縞模様である。これは bias 画像にも dark 画像にも見られるノイズである。当初は電源からのノイズとされていて USB アイソレータを用いてその改善を計る作業を行ったが、改善されなかった。このノイズがあるため、得られた値にばらつきが生じたと考えられる。

これを改善するには取得した画像から人為的にノイズを除去する方法と、今年も行ったが、さらに別の場所に関して原因と考えられる部分を新しい部品に変えるなどの根本的に解決する方法が考えられる。

4.2 空の背景光の妥当性

空の背景光が $m_{sky} \simeq 13.7 \text{mag/arcsec}^2$ であったことは、当日の日の入りが 16:30 頃であったことから十分暗いことが言えるので、適した値だと考えることができる。また、去年の値よりも若干暗い結果となったのは、快晴だったため空気中の水蒸気が比較的少なかったからでもあると考えられる。

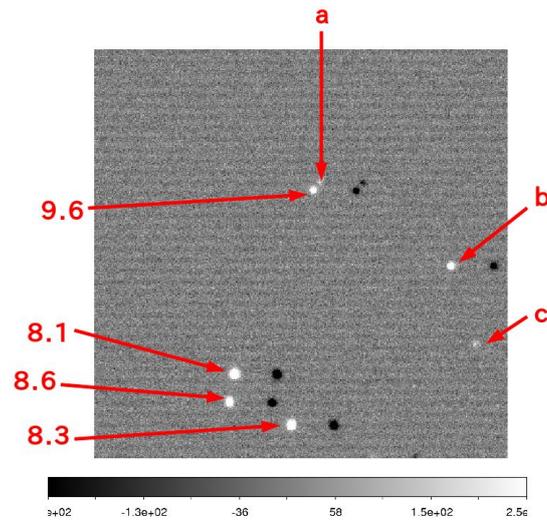


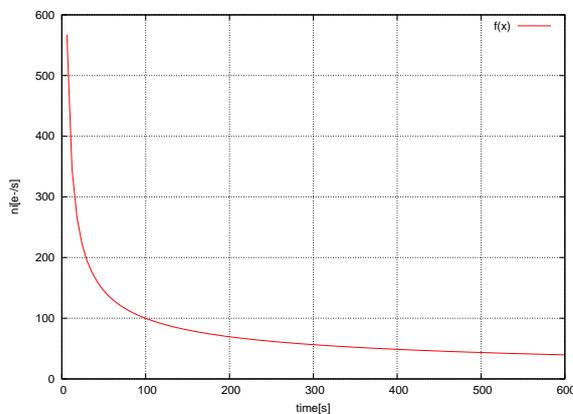
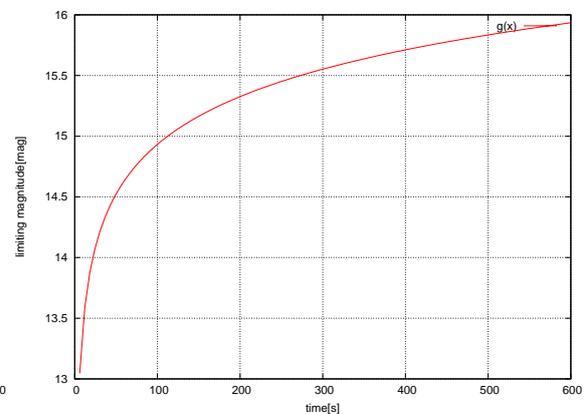
図 2: 解析に使った画像

4.3 bias 電圧の変動

dark 画像から bias 画像を引いたところ、カウントの中央値が -222.1 になってしまったことに関しては、bias 電圧の値が時間に依存して減少してしまっていることが過去のレポートでも指摘されている。これはどうにも解決できないので $n_{dark} \sim 0$ を用いたが、天体の画像から dark 画像を引くときには積分時間は同じなので、bias 電圧の変動はそこまで気にする必要はないと考えられる。

4.4 限界等級の時間依存性

CCD で生じた電荷の個数 n_i と限界等級 m_{lim} の時間依存性を詳しく調べるために、式 (18) を図 3 にプロットし、さらにその n_i を式 (7) に代入したものを図 4 にプロットした。

図 3: n_i の時間依存性図 4: m_{lim} の時間依存性

これより、限界等級 m_{lim} は時間に対して対数関数的に増加することがわかった。積分時間を長く

すればするほど暗い天体も検出できるが、およそ 100s を過ぎると限界等級の増加も緩やかになってしまいうのでむやみに長く積分するのも効率が悪いと言える。

4.5 等級誤差

等級誤差を計算により求める。天体からのフラックス F_ν が微小増加 ΔF_ν したとすると、その分等級 m は Δm だけ減少する。式 (4) より

$$\begin{aligned} F_\nu + \Delta F_\nu &= 3631 \times 10^{-26} \times 10^{-(m-\Delta m)/2.5} \\ &= F_\nu \times 10^{\Delta m/2.5} \\ \Delta F_\nu &= F_\nu (10^{\Delta m/2.5} - 1) \\ \frac{\Delta F_\nu}{F_\nu} &= (10^{\Delta m/2.5} - 1) \end{aligned} \quad (23)$$

となる。また、 $S/N = F_\nu/\Delta F_\nu$ を仮定すると

$$\begin{aligned} \frac{N}{S} &= (10^{\Delta m/2.5} - 1) \\ 10^{\Delta m/2.5} &= \frac{N}{S} + 1 \end{aligned} \quad (24)$$

$$\Delta m = 2.5 \log \left(\frac{N}{S} + 1 \right) \quad (25)$$

となる。ここで、式 (5)、(8)、(10) より $n_{dark} \sim 0$ とすると

$$S/N = \frac{n_i t}{N_{noise}} = \frac{N f_{conv}}{\sqrt{N f_{conv} + m(n_{sky} t + N_{read}^2)}} \quad (26)$$

$$\Delta m = 2.5 \log \left(\frac{\sqrt{N f_{conv} + m(n_{sky} t + N_{read}^2)}}{N f_{conv}} + 1 \right) \quad (27)$$

と、等級誤差 Δm が求められた。

IRAF の測光により得られた等級と等級誤差、その等級誤差を式 (24) に代入して求めた S/N と、式 (26)、(27) に測定したカウント数 N と、aperture 半径が 50pix だったので $m = \pi \times 50^2$ 、 $f_{conv} = 0.947$ 、 $n_{sky} = 22.07$ 、 $N_{read} = 12$ 、 $t = 30$ を代入して求めた S/N および等級誤差を表 7 にまとめた。

m [mag]	測定 m [mag]	測定 Δm [mag]	測定 S/N	計算 S/N	計算 Δm [mag]
9.6	9.49	0.014	77	1.7×10^2	0.0063
8.1	8.13	0.004	2.7×10^2	5.6×10^2	0.0019
8.6	8.68	0.007	1.5×10^2	3.5×10^2	0.0031
8.3	8.25	0.004	2.7×10^2	5.0×10^2	0.0022

表 7: 測定結果と計算結果の比較

測定により求めた S/N は、計算により求めた S/N の平均して 2.1 倍の値となっていた。また、等級誤差についても同様に 2.1 倍となっていた。これらのずれの原因としては、式 (26)、(27) が間違っている可能性と、他のノイズ要素があるという可能性が考えられる。ここでは求めた式は合っているとして、他のノイズ要素を考える。ここでもやはり画像全体に見られる横縞模様が関係してくる。 N_{noise} を求めたときにはこの sin カーブのような縞模様は考慮していなかったため、表 7 の計算 S/N や計算 Δm はこのノイズがない場合の値であると考えることができる。

他の天体 a、b、c についても同様の設定で IRAF の測光を行い、そのカウント数 N と測定等級、測定等級誤差、測定 S/N 、計算によって求められた S/N と等級誤差を表 8 にまとめた。

何らかの方法で横縞模様のノイズを除去することができれば、この計算によって求められた S/N と等級誤差が実現できると考えられる。

天体	N [個]	測定 m [mag]	測定 Δm [mag]	測定 S/N	計算 S/N	計算 Δm [mag]
a	282233.9	10.056	0.023	47	1.0×10^2	0.010
b	592139.7	9.252	0.011	98	2.1×10^2	0.0051
c	118685	10.997	0.054	20	44	0.024

表 8: 他の天体の測定結果と計算結果

5 次年度の観測実習に向けて

今回の観測で一番悩まされたのは、微調整に使用するリモコンの「N」のボタン(だったと思います)がときどき沈んだままになり、望遠鏡が止まらなくなることでした。結局最終日にリモコンを分解してみると基盤部分に問題があるらしく、直す必要があるとのことでした。次年度の観測実習の人たちにはぜひこのリモコンを直してもらってから、できれば横縞模様のノイズを除去する方法も探して解決してもらえると、限界等級に近い値が出る観測ができることと思います。

本原先生には予定調節から大変お世話になりました。コンピュータではなく自分たちで望遠鏡を動かして観測するという貴重な経験ができました。ありがとうございました。