

基礎天文学観測 小望遠鏡による観測実習

理学部天文学科3年 毛利清
(学生証番号 132009)

実習実施日 2013/11/29(観測日)
レポート作成日 2014/1/31

概要

この実習では、三鷹にある東大天文センターの30cm カセグレン望遠鏡を用い、CCD カメラによる基本的な天体観測を行った。この実習を通じて、望遠鏡の基本操作法、赤経・赤緯に基づいた天体観測の基礎事項、および CCD 観測の基本技術の一通りを習得することを目標とし、具体的には、CCD のピクセルスケールのチェックや、システム効率の測定、観測からの限界等級の算出、そして算出された限界等級が正しいかを確認するために再び観測を行って、その限界等級が得られるか、ということを実習する予定であったが、最後の限界等級の観測は後述する機械の故障により断念した。また、今年度の実習では、電源からのノイズによって限界等級が制限されているという状況を改善するため、USB アイソレータをもちいてその改善を図る作業も行われたが、こちらも残念ながら成果は上がらなかった。

1 この実習の目的

この実習では、東大天文センターの30cm カセグレン望遠鏡を用い、CCD カメラによる基本的な天体観測を行うことを目的とする。具体的には、

- ・ CCD のピクセルスケールのチェックや、システム効率の測定
 - ・ 限界等級の算出
 - ・ 実際に測定を行って、その限界等級が得られるか
- ということを行った。

2 使用した器具

今回の実験で使用した器具などのうち、特に今回の実験で重要だったものについて述べる。

2.1 CCD カメラ

望遠鏡資料のページ¹に載っている CCD カメラのデータから、一部を抜粋して以下にまとめた。

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
Full Well	40,000 e ⁻ /pix
読み出しノイズ	12 [e ⁻] ²
Conversion Factor	0.95 [e ⁻ /ADU] ²

表 1: CCD カメラの仕様

また、望遠鏡に取り付けた際のピクセルスケールは 2010 年度の泉さんのレポート³から、0.27[arc-sec/pix] であるとした。

そして、観測に際しては次ページの図に示した透過率を持ったフィルターを用いた。横軸の単位が [Å] となっているが、正しくは [nm] である。フィルターについては目測で中心波長 $\lambda = 510$ [nm]、波長範囲 $\Delta\lambda = 170$ [nm] と読み取った。またこれもシステムの一部としてシステム効率の算出のさいにはフィルターの透過率については考慮しておらず、さらに簡単のため波長範囲については矩形近似を用いている。

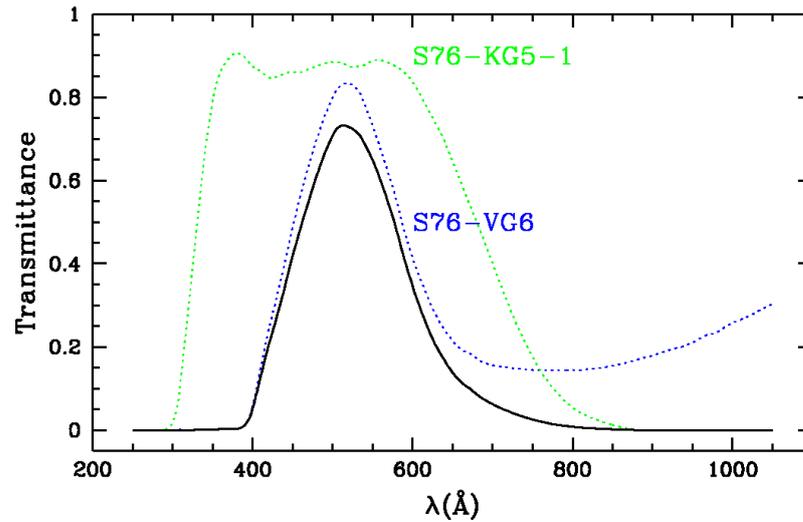


図 1: 実験に用いたフィルターの透過率特性

¹<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kmotohara/30cm/>

²大沢さんのレポート: <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kmotohara/30cm/camera/1005.pdf> を参照

³http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kmotohara/30cm/jisshu2010/report/2010_report_izumi.pdf

2.2 望遠鏡

この実習は口径 30cm のカセグレン式望遠鏡を用いて行った。この望遠鏡を天体に向けるさい、粗動は望遠鏡のラック、または手動で行うが、微動については以下のハンドセットを用いて行った。しかし、ハンドセットの N を押すと中の金具が手を離しても戻らなくなってしまうため、延々と N 側に動いてしまい観測が一時中断することが多々あった。最後の限界等級の観測についてもこれが原因で観測を断念したため、来年以降の観測の際にはハンドセットを解体して直すことを強く勧めたい。



図 2: 望遠鏡のハンドセット。裏面についているスイッチで駆動速度を切り替えられるため、遅くしたときには動いていてもほとんど見た目には分からない程になるが、この状態で撮像をすると尾を引いたような形で CCD に写ってしまう。

3 観測

観測は Stellarium⁴を用いて、明るさの分かっている天体を探して行った。今回観測したのは以下の領域である。



図 3: 今回測定した範囲。赤緯/赤経は $0\text{h}10\text{m}55.8\text{s}/+57^\circ50'13.9''$ (J2000) である。

この領域にはここに出ている 4 つ以外にも星があるのだが、今は意図的に 4 つだけを示している。これらの星に名前は特についていないので、左上の星から左下、右下、右上の順番に A,B,C,D とすると、これらの星の V バンドでの等級は以下の通りとなる。

星の名前 (A~D)	等級 (V バンド)
A	8.90
B	8.90
C	9.20
D	9.40

表 2: 観測した星の V 等級

これらの星がすべて CCD の中に収まるようにし、露出時間を $t = 30$ として、位置を少しずつずらした 4 枚の撮像を行った。また、これと同じ露出時間でダークを 20 枚所得した。フラットの撮像は行っていない。

⁴<http://www.stellarium.org/ja/>

4 測定結果

4.1 解析手順

測定で得られたデータは天体画像解析ソフト IRAF を用いて解析を行った。具体的には、位置をずらした 4 枚の撮像を引き算してマイナスフレームを作り、このマイナスフレームに対して IRAF のコマンドである phot を用いて測光を行った。測光の際のアパチャー半径 (photpar-apertur) は 50、fitskyp-annulus は 100 と設定し、得られたデータのカウンートをまとめたのが以下の表である。

マイナスフレーム No.	A	B	C	D
1	818538.8	805607.2	595374.4	564909.1
2	818668.9	820708.9	602520.9	568067.8
3	568686.9	522973.3	378665.1	319711.6
4	845975.5	837455.7	624135.5	557995.1
5	845999.4	824254.7	610999.9	564236.6
6	822808.9	812006.3	606619.7	584244.7
No.3 を除いた平均	830398.3	820006.6	607930.1	567890.7

表 3: マイナスフレームで測光した星からのカウン。3 番目のフレームだけ明らかにカウンが少なく、なんらかの要因で星からの光が遮られた可能性がある。

マイナスフレームを用いる事で、バイアスやダークの観測結果に与える影響が弱まり、バイアスの変化に伴う数値のずれは改善される。なお、過去のレポートに度々報告されているように、バイアスフレームがダークを取ると減少していくという現象が今回も発生している。原因は分からないが、上記の理由からダークフレームは今回の解析では背景光の測定以外には用いていない。以下には上記の数値の平均を使った解析結果を示す。

4.2 システム効率

4.2.1 導出

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である。

望遠鏡に入射した星からの光子数 s_i [個/s] は、

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

で表される。ここで、

$$\begin{aligned} D &: \text{望遠鏡の口径} \\ F_\lambda &: \text{天体からのフラックス} \\ \Delta\lambda &: \text{フィルターの波長範囲} \end{aligned}$$

である。また、CCD で生じた電荷の個数 n_i [e⁻/s] は、

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

で表される。ここで、

$$\begin{aligned} N &: \text{画像上でのカウント} \\ f_{conv} &: \text{コンバージョンファクター} \\ t &: \text{積分時間} \end{aligned}$$

である。上記の式を用いて、システム効率 η は、

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

で求められる。

4.2.2 システム効率の算出

(1)、(2)、(3) 式に観測された数値を代入する。V バンドにおける天体からのフラックス F_λ は、AB 等級がほぼ V 等級であることを用いて

$$F_\lambda = F_\nu \frac{c}{\lambda^2} = 10^{0.4(-48.60 - m_{AB})} \frac{c}{\lambda^2}$$

で表される。ここで c は真空中の光速であり、 m_{AB} は AB 等級である。

したがって、システム効率 η は、

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{n_i}{s_i} = \frac{N f_{conv}}{t} \frac{1}{\pi} \left(\frac{2}{D} \right)^2 \frac{h\nu}{c\Delta\lambda} \frac{\lambda^2}{10^{0.4(-48.60 - m_{AB})}} \\ &= \frac{N f_{conv}}{t} \frac{1}{\pi} \left(\frac{2}{D} \right)^2 \frac{h\lambda}{\Delta\lambda} 10^{0.4(48.60 + m_{AB})} \end{aligned}$$

で求められる。この式に

$$f_{conv} = 0.95$$

$$t = 30$$

$$\pi = 3.14$$

$$D = 0.3$$

$$h = 6.63 \times 10^{-34}$$

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{510}{170} = 3 \text{ を代入すると、システム効率は}$$

$$\eta = 8.915N \times 10^{0.4m_{AB}-11.56}$$

となる。これをそれぞれの星について、AB 等級が V 等級と等しいとして計算すると、システム効率は以下の表の通りとなる。

	A	B	C	D
η	0.0740	0.0731	0.0714	0.0802

表 4: システム効率

この表からは D の星が他の 3 つよりも少し大きくずれたシステム効率を出していることが読み取れる。システム効率はすべての平均をとり、 $\eta = 0.0747$ と求められる。

4.3 等級原点

4.3.1 導出

等級原点 Z_{mag} は、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である。例えば、ある CCD で Z 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 CCD での等級原点は

$$Z_{\text{mag}} = Z + 2.5 \log \frac{N}{t}$$

で計算できる。

4.3.2 等級原点の計算

露光時間 $t = 30$ であるので、先ほどと同様に A~D までの星について、等級原点を求めると以下の通りとなる。

	A	B	C	D
η	20.01	19.99	19.97	20.09

表 5: 等級原点

先ほどと同じく D の値が他の星よりも大きくなっているが、システム効率の時とは違い小さな差になっている。これは等級が対数で測られるためだと考えられる。ここでも同じく平均をとり、等級原点は $Z_{\text{mag}} = 20.02$ と求められる。

4.4 空の背景光

4.4.1 導出

空の背景光 n_{sky} は、星の写っていない領域に入射している光の量であり、星の写っていない領域で得られたカウントを $N_{\text{sky}}[\text{ADU}]$ 、積分時間を t とすると、1 秒角四方あたりに入射する光子の数はピクセルスケールの逆数の 2 乗倍になることに注意して、

$$n_{\text{sky}} = \frac{1}{\eta} \frac{N_{\text{sky}} f_{\text{conv}}}{t} \left(\frac{1}{0.27} \right)^2 [\text{photons/s/arcsec}^2]$$

で表される。等級としては、等級原点 Z_{mag} を用いることで

$$n_{\text{sky}} = Z_{\text{mag}} - 2.5 \times \log(N_{\text{sky}}) [\text{mag/arcsec}^2]$$

で求めることができる。

4.4.2 空の背景光の計算

星が写っていない領域に対し、フレームからダーク 20 枚の平均を引き、imexam でカウントの平均値を調べたところ、 $N_{\text{sky}} = 600$ [photons/pix²] という値を得た。積分時間 $t = 30$ なので、空の背景光の明るさは、

$$n_{\text{sky}} = \frac{1}{0.0747} \frac{600 \times 0.95}{30} \left(\frac{1}{0.27} \right)^2 = 3489.0 [\text{photons/s/arcsec}^2]$$

等級は

$$n_{\text{sky}} = 20.02 - 2.5 \times \log(600) = 13.07 [\text{mag/arcsec}^2]$$

とそれぞれ計算できる。

4.5 限界等級

4.5.1 導出

限界等級とは、この望遠鏡で検出できるギリギリの等級の事を指すが、一般的には、ノイズ N に対して信号 S がどの程度来ているのかを評価し、それが一定の値を越えれば検出できたとみなす。通常では S/N 比が 5 を越えれば検出できた、とすることが多い。その S/N は

$$S/N = \frac{n_i t}{N_{\text{noise}}} \quad (4)$$

で表される。ここで、 N_{noise} は、検出素子が m 個のピクセルにまたがっている場合、

$$N_{\text{noise}} = \sqrt{n_i t + m n_{\text{sky}} t + m n_{\text{dark}} t + m N_{\text{read}}^2} \quad (5)$$

で計算される。したがって S/N は

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

となる。これが 5 になるときを求めたいので、 $S/N = 5$ を代入して両辺二乗すると、

$$25 = \frac{n_i^2 t^2}{n_i t + m n_{\text{sky}} t + m n_{\text{dark}} t + m N_{\text{read}}^2} \quad (7)$$

となる。これを n_i について整理すれば、

$$t^2 n_i^2 - 25 t n_i - 25 m (n_{\text{sky}} t + n_{\text{dark}} t + N_{\text{read}}^2) = 0 \quad (8)$$

と変形できるので、これは n_i の二次方程式であり、これを解けば $S/N = 5$ を与える n_i を求めることができる。限界等級は、この時の n_i を用いて

$$Z_{\text{lim}} = Z_{\text{mag}} - 2.5 \log(N) = Z_{\text{mag}} - 2.5 \log\left(\frac{n_i}{f_{\text{conv}}}\right) \quad (9)$$

で求められる。

4.5.2 限界等級の計算

ここでは 30 秒露光での限界等級はどのくらいなのかを求める。IRAF の imexam を用いた測光により、星の写り込んでいる領域の半径は 21.79 ピクセルであったので、ピクセル数 m は $m = \pi 21.79^2$ となる。また、ダークは負の値をとることから、ここでは無視できるほど小さいと仮定する。さらに、

$$\begin{aligned} n_{\text{sky}} &= 3489.0 [\text{photons/s/arcsec}^2] = \eta \times 3489.0 [\text{e}^-/\text{s/arcsec}^2] = 260.6 [\text{e}^-/\text{s/arcsec}^2] \\ N_{\text{read}}^2 &= 144 [\text{e}^-] \\ t &= 30 [\text{s}] \end{aligned}$$

であるので、これらを (8) 式に代入すると、

$$900 n_i^2 - 750 n_i - 25 (\pi 21.79^2) (260.6 \times 30 + 144) = 0 \quad (10)$$

という式になる。この二次方程式を自力で解くのは難しいので、wolframalpha⁴を用いて計算したところ、

$$n_i = -573.954, 574.787$$

という2つの解を得た。 n_i は正の数なので、

$$n_i = 574.8 \quad (11)$$

が求める n_i となる。したがって限界等級は

$$Z_{\text{lim}} = 20.02 - 2.5 \log \left(\frac{574.8}{0.95} \right) = 13.07 \quad (12)$$

である。偶然にも空の背景光の等級と同じ等級になった。

5 感想

今年は例年と違って4人いっぺんでの実施でしたが、大変密度の濃い実習だったと思います。30cm望遠鏡でしかも東京の空でもこれだけたくさんの星が見れるということには驚きました。望遠鏡も自由に使わせてもらったので、天体観測とCCDに関する理解を深めることができました。IRAFについては用いた実習がこれだけだった事もあり、まだまだ修行が必要そうです。また、望遠鏡のハンドセットの動作不良に最初から最後まで苦しめられ、とうとう限界等級の測定ができなかったので、来年の実習をする方々にはぜひとも直すことをおすすめします。ありがとうございました。

⁴<http://www.wolframalpha.com/>