

小望遠鏡による基礎観測実習

松本 良雄

(学生証番号 s082009)

平成 21 年 2 月 2 日

概要

東大天文センターの 30cm カセグレン望遠鏡を用いて、CCD カメラによる天体観測を行う。望遠鏡の基本操作、赤経・赤緯に基づいた天体観測の基本事項、CCD の観測の基本技術の習得を目指す。観測データに対し IRAF を用いて簡単な一次処理を行い、得られたデータからシステム効率を求め、S/N 比、限界等級について、測定値と理論値を比較して測定精度の評価を行う。

1 実習の目的と、撮像、データ解析の流れ

おおよその目的は概要に書いた通りである。観測から、望遠鏡/カメラシステムのシステム効率が低いことを確認し、原因の対策を行う（主に望遠鏡の主鏡、副鏡の掃除）。再度システム効率測定のため観測を行い、限界等級を算出する。最初に観測した明るい天体付近の、限界等級に近いだろうと思われる（Aladin Sky Atlas で調べる）天体を実際に観測し、実際の等級と比較する。又、等級誤差についても予想される値と比較し、等級誤差により算出される S/N 比の理論値と測定値を比較、評価を行う。今回観測した天体は α Andromeda である（V 等級 2.1）。

まず、バイアス、フラットフレームを撮っておくが、補正は後に IRAF を用いて行う。天体撮像時は積分時間を設定する。取得したデータを golf（ドーム内の端末）に転送し、IRAF での解析が出来るように、fits ファイルにして実験室の端末に転送する。

imcombine や imarith でバイアス、フラット補正を行った後、天体や空について、imexam でピークの統計量を調べる（FWHM(半値幅)、フラックス、バックグラウンドレベルなど）。

apphot で天体の測光を行う。その際、epar phot でのパラメータで、apertur 半径（直径が FWHM の倍以上になるように）、zmag(求めておいた値)、annulus(直径が FWHM の 3 倍以上になるように)、itime(露出時間)をそれぞれ設定し、コマンド phot で測光を行う。得られる結果「 \sim mag」ファイルから、スカイを引いたアパーチャー内のフラックスカウントや、等級誤差などを読み取る。

2 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。

この実習で、天体から望遠鏡に入射した 1 秒当たりの光子数を s_i (個/s) とし、単位波長幅当たりの光子フラックスを $F_\lambda(\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (\text{nm})^{-1})$ とする。

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

ここで、CCD で生じた電荷の個数を $n_i(\text{e}^-/\text{s})$ とする。

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

但し、 N は画像上でのカウント、 f_{conv} はコンバージョンファクター、 t は積分時間 (秒) である。
システム効率は

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

V 等級 0 の天体からの、単位波長幅当たりの光子フラックスを $F_{\lambda,0}(\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (\text{nm})^{-1})$ とする。 m 等級の天体について、ポグソンの公式より、

$$m - 0 = -\frac{5}{2} \log_{10} \left(\frac{F_{\lambda}}{F_{\lambda,0}} \right)$$

$$\therefore F_{\lambda} = F_{\lambda,0} \cdot 10^{-\frac{2}{5}m}$$

$F_{\lambda,0} = 3.92 \times 10^{-12}$ とすると、

$$F_{\lambda} = 3.92 \times 10^{-12} \cdot 10^{-\frac{2}{5}m} \quad (4)$$

この観測では、 $D = 30(\text{cm})$ 、 $\Delta\lambda = 160(\text{nm})$ 、 $\lambda = 514(\text{nm})$ で、これらの値を (4) 式とともに (1) 式に代入すると、

$$s_i = 1.145 \times 10^9 \cdot 10^{-\frac{2}{5}m} \quad (5)$$

コンバージョンファクターを $f_{\text{conv}} = 1.316$ とし、又、apphot で測光した結果より得られた、スカイを引いたアパーチャー内のフラックスカウントを N として、(2) 式で n_i を計算し、観測した α Andromeda の V 等級 $m=2.1$ を (5) 式に代入して s_i を求め、(3) でシステム効率を求める。以下の表 1 が結果であり、システム効率は約 2.2 % と低い値になっている。

表 1: システム効率

No.	露出時間 $t(\text{s})$	アパーチャー半径
スカイを引いたフラックスカウント	n_i	システム効率
1	1.0	15
2840826	3738527.126	0.02258889826
2	0.1	6
276502.2	3638768.952	0.02198614023
3	0.1	7
293852.2	3867094.952	0.02336572973
4	0.15	5
408322.5	3582349.4	0.02164524247
5	0.4	10
1010756	3325387.24	0.02009262779
システム効率の平均		0.02193572772

3 等級原点

等級原点 Z_{mag} 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、

$$Z_{\text{mag}} = m + 2.5 \log_{10} \frac{N}{t}$$

これで計算した値を、apphot での測光の際のパラメータの一つとして入力する必要がある。 α Andromeda について、表 1 の No.1 ~ 5 それぞれの露出時間 t とフラックスカウント N を代入して、 $m=2.1(\text{mag})$ として計算すると、No.1 ~ 5 それぞれ次の表 2 の様になる。

表 2: 等級原点

No.	露出時間 $t(\text{s})$	Z_{mag}
1	1.0	18.23361159
2	0.1	18.20424648
3	0.1	18.27032237
4	0.15	18.18728013
5	0.4	18.10646584
平均		18.20038529

4 背景光

天体の写っていない部分で、No.1~5 について、同じ位置での光子カウント数として、imexam の結果の MEAN の値を読み取り、これを N として

$$n_{\text{sky}} = \frac{N f_{\text{conv}}}{t} \quad (f_{\text{conv}} = 1.316)$$

に代入する。計算結果は以下の表 3 の様になる。

表 3: 背景光

No.	MEAN	n_{sky}
1	1839	2420.124
2	161.5	2125.34
3	116.7	1535.772
4	109.5	960.68
5	161.9	532.651

5 S/N 比、限界等級

CCD から得られる信号の S/N 比は

$$S/N = n_i t / N_{\text{noise}}$$

ただし、 N_{noise} はノイズ成分である。

a) 天体光子のポアソンノイズに由来する電子数の揺らぎ

η をシステム効率として、

$$\sqrt{n_i} = \sqrt{\eta s_i t}$$

b) 背景放射の光子のポアソンノイズに由来する電子数の揺らぎ

$$\sqrt{n_{\text{sky}} t}$$

c) CCD の読み出しノイズ

$$N_{\text{read}} \text{ (e}^- \cdot \text{rm} \cdot \text{s/pix)}$$

今回暗電流は考えないので、以上 a)、b)、c) がノイズ N_{noise} に関る。複数素子の場合、 l 個のピクセルに広がった像を検出すると考えれば、S/N 比は次の様になる。

$$\begin{aligned} \frac{S}{N} &= \frac{n_i t}{N_{\text{noise}}} \\ &= \frac{\eta s_i t}{[\eta s_i t + l n_{\text{sky}} t + l N_{\text{read}}^2]^{\frac{1}{2}}} \\ &= \frac{\eta \cdot \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \frac{F_0}{h\nu} \cdot 10^{-\frac{2}{5}m} \cdot \Delta\lambda \cdot t}{\sqrt{\eta \cdot \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \frac{F_0}{h\nu} \cdot 10^{-\frac{2}{5}m} t \cdot \Delta\lambda + l n_{\text{sky}} t + l N_{\text{read}}^2}} \end{aligned}$$

ここでは、

$$\begin{aligned} \frac{S}{N} &= \frac{n_i t}{N_{\text{noise}}} \\ &= \frac{n_i t}{[n_i t + l n_{\text{sky}} t + l N_{\text{read}}^2]^{\frac{1}{2}}} \end{aligned}$$

この式を用いて、仮定の S/N 比を代入することで n_i についての二次方程式を解いて、限界等級 m を導出してみる。

S/N 比を 10(通常光赤外では 5 を越えれば検出出来るとされる)、 N_{read} を 8、 l = (アパーチャー半径) $^2 \pi$ として、No.1 について計算すると、

$$10 = \frac{n_i \times 1}{\sqrt{n_i \times 1 + 15^2 \pi \times 2420.124 \times 1 + 15^2 \pi \times 8^2}}$$

$$\therefore n_i^2 - 100n_i - 100 \times 15^2 \pi \times (2420.124 + 64) = 0$$

$$\therefore n_i = 13301.22177$$

よって、

$$\begin{aligned} s_i &= \frac{13301.22177}{0.02193572772} \\ &= 606372.4869 \end{aligned}$$

$$1.145 \times 10^9 \cdot 10^{-\frac{2}{5}m} = 606372.4869$$

を計算すれば、

$$\begin{aligned} \therefore m &= 8.190164997 \\ &= 8.2 \end{aligned}$$

6 等級誤差、S/N 比の観測値・理論値

今回の実習では、最初に観測した α Andromeda 付近の限界等級に近い天体を、Aladin Sky Atlas で調べ、その天体を観測し、等級と等級誤差を測定して、等級をカタログ値と比較、等級誤差を予想値と比較するはずだったが、実際の観測で dithering を忘れていた為、データがとれなかった。仕方がないので、天候が悪くて観測が出来なかった最終日に、 α Andromeda の測光の際の apphot の結果から得た等級誤差を用いて S/N 比の理論値を計算し、実際に観測された値との比較を行った。

m 等級の天体について、等級誤差を Δm とすると、天体から望遠鏡に入射するフラックスの誤差は、

$$\Delta F = F(m + \Delta m) - F(m)$$

すると、

$$\begin{aligned} \frac{S}{N} &= \left| \frac{F(m)}{\Delta F} \right| \\ &= \left| \frac{F(m)}{F(m + \Delta m) - F(m)} \right| \\ &= \left| \frac{1}{F(m + \Delta m)/F(m) - 1} \right| \\ &= \left| \frac{1}{10^{-\frac{2}{5}\Delta m} - 1} \right| \end{aligned}$$

これを、等級誤差 Δm の天体の S/N 比の理論値として用いることが出来る。

又、観測値は、

$$\frac{S}{N} = \frac{n_i t}{\sqrt{n_i t + l n_{\text{sky}} t + l N_{\text{read}}^2}} \quad (l = (\text{アパーチャー半径})^2 \pi)$$

を用いて計算する。

結果は以下の表 4 の様になる。等級の測定値も付しておく。

表 4: 等級の測定値、等級誤差、及び S/N 比の理論値・観測値

No.	等級の測定値	Δm
S/N 理論値	S/N 観測値	
1	1.766	0.001
1086.236282	1594.918071	
2	1.996	0.002
543.3662559	596.5744927	
3	1.930	0.002
543.3662559	578.8583518	
4	2.113	0.002
543.3662559	596.561623	
5	2.199	0.001
1086.236282	1117.344924	

等級誤差が 0.001 か 0.002 で大きく分かれたが、これは設定したアパーチャー半径と露出時間の違いによるものと思われる。比較的には、S/N 比の理論値と観測値が同様の傾向を表していることが分かる。

7 考察

システム効率は、数回の撮像で、それぞれの回でほぼ同じ値を示したので、測定精度は良かったと思う(ただシステム効率そのものは極めて低い)。鏡を拭いた後の再度の測定は、自分達の方法が間違っていたのと時間が無かったのとで出来なかったが、おそらくもう一回やればシステム効率は上がったと思う。限界等級は帰って改めて計算したもので、最初に計算したものよりいくらか低い値になってしまっていた。これが、目標の天体が写らなかった一番の原因だと思う。S/N 比は理論値と観測値がだいたい同じ様な傾向だったので、測定は成功したと思う。ただ、S/N 比としては理論値、観測値ともに少し大きすぎるように思う。露出時間を大きくすると観測値が大きくなる傾向にあった。

8 おわりに (感想)

今回の実習は、群馬のときと違い、主に IRAF による解析をするというよりは、観測に重点を置いているように思えた。ただ、測定、理論計算では実際に自分で手を動かすことが多く、天体観測におけるいくつかの物理量について自分から積極的に学ぶという点では、群馬のときより大変だったように感じる。

観測がきちんと行えなかった部分があるのが心残りだが、実習中何をやっているかはちゃんと理解できたつもりなので、これからの学習に活かせると思う。