

小望遠鏡による観測実習レポート

石松 宏幸
(学生証番号 S092001)

平成 22 年 1 月 30 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観測を行い、この望遠鏡のシステム効率や等級原点を算出する。また空の背景光を測定し、そして限界等級を算出する。

1 使用機材

今回の実習で使用した装置を以下にまとめる。

1. 30cm カセグレン望遠鏡

口径 300[mm]、焦点距離 5000[m]、プレートスケール 41[arcsec/mm] の望遠鏡 (30cm 望遠鏡紹介ページより) を使用した。横には望遠鏡の微動を目で確認しながら行えるための小さな望遠鏡が取り付けられている。

2. フィルター

駿河精機の青緑透過フィルタ S76-VG6、赤外線カットフィルタ S76-KG5-1 の 2 枚のフィルタを重ねて V-Band フィルタの代用としたものを使用した (CCD カメラ紹介ページより)。

3. データ所得用コンピュータ

CCD カメラと直接繋がっている Windows のパソコンで、これを用いて露光時間などの制御や、撮像されたファイルの保存・転送をする。

4. 確認用コンピュータ (golf)

上記の Windows パソコンの隣にある Linux 系列のパソコンで、Windows から転送された画像データについて、DS9 を用いて簡単なチェックをする。

5. 解析用コンピュータ

学生実験室にある Linux 系のパソコンのことで、ここから golf にアクセスして画像を取り込み、解析を行う。

2 はじめに

システム効率などを算出する際に必要となるデータを準備する。

1. 観測天体

この実習ではカシオペア座の 11 beta Cas 「カフ」を観測した。

等級	2.3
赤経	0h9.2m
赤緯	+59°9′

表 1: カフのデータ

カメラの位置を少しずつ動かして、1つのポイントにつき4枚を4カ所で撮像した。撮像時間は0.1秒。ファイル名は cas1001-1004、…、cas4001-4004。

2. dark の除去

まず撮像されたものから dark を引く必要がある。0.1秒の dark を取り損ねていたため、露光時間0秒のバイアスで代用した。4つのバイアス画像を平均したもののファイル名は bias1-4。cas1001-4004 から bias1-4 を引いたものを、cas1001a-4004a とした。

3. フラットフィールドの作成

CCD カメラには感度のむらがあるため、それを補整する必要がある。まず10秒の dark を撮像し、その4枚の平均をとったファイルを dark10s とし、続いて10秒の sky を撮像し、その4枚の平均をとったファイルを sky10 とした。sky10 から dark10s を引いたもの（ファイル名 flat10）を1で規格化したものがフラットデータ（ファイル名 flat10）であり、

$$flat10 = \frac{sky10 - dark10s}{[sky10 - dark10s]_{mean}}$$

である。同様に20秒での測定をつかったフラットも作成したが、サチュレーションを起こしているようだったので、この実習では10秒の測定で導いたフラットを使用した。

cas1001a から cas4004a までのファイルを、flat10 で割り算することで、感度むらの補整をした。ファイル名は cas1001b から cas4004b。

ここで cas100[1-4]b がサチュレーションを起こしていることがわかったので、今後の計算から除外した。

4. 2つのファイルの差をとる

データをより正確なものにするために、星を撮像したデータから、別の場所で撮像したデータを引く。具体的には cas200[1-4]b の平均を cas2ave、同様に cas3ave, cas4ave を作成し

$$\text{cas200}[1-4]c = \text{cas200}[1-4]b - \text{cas3ave}$$

$$\text{cas300}[1-4]c = \text{cas300}[1-4]b - \text{cas4ave}$$

$$\text{cas400}[1-4]c = \text{cas400}[1-4]b - \text{cas3ave}$$

を作成した。

3 計算手順

1. システム効率の算出

システム効率 η は天体から望遠鏡に入射した光子の数 (s_i [個/s]) と CCD で生じた電荷の個数 (n_i [e^-/s]) の比

$$\eta = \frac{n_i}{s_i} \quad (1)$$

で表される。入射光子数 s_i について、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 $\Delta\lambda$ 、中心周波数を ν 、中心波長を λ とすると以下の式で表せる。

$$\begin{aligned} s_i &= \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\Delta\lambda F_\lambda}{h\nu} \\ &= \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\lambda\Delta\lambda F_\lambda}{hc} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、V バンドにおけるフラックスと等級 m との関係は文献値¹より

$$F_\lambda = 3.55 \times 10^{-8} \cdot 10^{-0.4m} [\text{erg/s/cm}^2/\text{nm}] \quad (3)$$

である。

次に n_i について、画像上でのカウント数を N 、コンバージョンファクター (出力を 1 カウントとしたときに、実際に発生した電子の個数のこと) を f_{conv} 、積分時間を t とすれば

$$n_i = \frac{N f_{conv}}{t} \quad (4)$$

と書ける。

2. 等級原点の算出

等級原点とは、あるカメラシステムで 1 秒間の露光で撮像し、1 カウントを得るような天体の等級のことである。今回用いた天体は 2.3 等級なので、等級原点 Z_{mag} は

$$Z_{mag} = 2.3 + 2.5 * \log_{10} \frac{N}{t} \quad (5)$$

である。

¹<http://www.sr.bham.ac.uk/somak/constants.html>

3. 空の背景光の算出

星の写っていない領域に入射している、空の背景光を算出する。背景光から生じた電子の個数を $n_{sky}[e^-/s]$ とし、1pixel が $A \text{arcsec}^2$ に相当しているとする、(4) 式とあわせて

$$n_{sky}[\text{photons}/s/\text{arcsec}^2] = \frac{N_{sky} f_{conv}}{t \cdot A} \quad (6)$$

であり、 $[\text{mag}/\text{arcsec}^2]$ で表わすと

$$n_{sky}[\text{mag}/\text{arcsec}^2] = 2.3 - 2.5 \log \left(\frac{N_{sky}}{N} \right) \quad (7)$$

とかける。

4. 限界等級の算出

目当ての天体が検出できているかどうかの基準として S/N という値が使われる。光赤外では S/N が 5 をこえれば検出できたとされることが多く、また S/N が 10 あるとよりハッキリと対象を捕えることができる。 S/N は以下の式で表される。

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

ここで N_{noise} は l 個のピクセルに広がった像を検出する場合、以下の式で表わされる。

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

今回は $n_{dark} \simeq 0$ とし

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

とする。これを n_i についての二次方程式としてみると

$$n_i^2 - \frac{(S/N)^2}{t} n_i - (S/N)^2 \frac{l n_{sky} t + l N_{read}^2}{t^2} = 0 \quad (11)$$

$n_i > 0$ より

$$n_i = \frac{(S/N)}{2t} \left((S/N) + \sqrt{(S/N)^2 + 4l(n_{sky} t + N_{read}^2)} \right) \quad (12)$$

ここから n_i を求めることができる。さらにこれを星からのフラックスに直す。(1)(2) 式を用いて変形すると、

$$F_\lambda = \frac{hc}{\pi \lambda \Delta \lambda} \frac{2}{D^2} \frac{1}{\eta} \frac{(S/N)}{t} \left((S/N) + \sqrt{(S/N)^2 + 4l(n_{sky} t + N_{read}^2)} \right) \quad (13)$$

さらに (3) より

$$m = -\frac{5}{2} \log \left(\frac{F_\lambda}{3.55 \times 10^{-8}} \right) \quad (14)$$

がわかる。(13)、(14) から、限界等級を求められる。

5. わかっている定数

2007年度の実習レポートより

$$\Delta\lambda = 160nm$$

$$\lambda = 514nm$$

$$f_{conv} = 1.3$$

$$N_{read} = 8.4$$

である。また、2008年度の実習レポートより

$$1[pixel] = 0.99^2[arcsec^2]$$

$$\simeq 0.98[arcsec^2]$$

である。つまり (6) での $A = 0.98$ である。さらに、積分時間は

$$t = 0.1[s]$$

とした。さらに

$$D = 30[cm]$$

$$c = 3.00 \times 10^8[m/s]$$

$$h = 6.63 \times 10^{-34}[m^2 \cdot kg \cdot s^{-1}]$$

である。

4 観測

下表が測定結果である。

番号	apertur	スカイを除いたカウント	積分範囲
1	12	402641.1	452.1083
2	14	407104.7	616.1481
3	12	371288.6	452.5645
4	10	344341.9	314.3435
5	15	360901.1	706.9561
6	16	364432.1	804.5008

表 2: 測定結果

5 計算結果

1. システム効率の測定

まず n_i を求める。表 2 で得たカウントの平均は 375118.25 であるので、(4) より

$$\begin{aligned} n_i &= \frac{375118.25 \cdot 1.3}{0.1} \\ &= 4.88 \times 10^6 [e^-/s] \end{aligned} \quad (15)$$

である。次に s_i を求める。(2)(3) に値を代入して計算すると

$$\begin{aligned} s_i &= 3.14 \left(\frac{30[cm]}{2} \right)^2 \frac{514[nm] \cdot 160[nm] \cdot 3.55 \times 10^{-8} \cdot 10^{-0.4 \cdot 2 \cdot 3} [erg/s/cm^2/nm]}{6.63 \times 10^{-34} [m^2 \cdot kg \cdot s^{-1}] \cdot 3.00 \times 10^8 [m/s]} \\ &= 1.24 \times 10^8 [\text{個}/s] \end{aligned} \quad (16)$$

と求まる。これより、システム効率は

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{4.88 \times 10^6}{1.24 \times 10^8} \\ &= 0.0393 \dots \\ &\simeq 4\% \end{aligned} \quad (17)$$

と求まった。

2. 等級原点の算出

(5) 式にカウントの平均 375118.25 を用いると

$$\begin{aligned} Z_{mag} &= 2.3 + 2.5 * \log \frac{375118.25}{0.1} \\ &= 18.73 \dots \\ &\simeq 18.7 \end{aligned} \quad (18)$$

と求まる。

3. 空の背景光の算出

フラットフィールドを作成する際に作成したファイル fla10 は、まさに空の背景光を 10 秒間の露光時間で撮像したものである。その平均値は 10432 なので、(6) 式より

$$\begin{aligned} n_{sky} &= \frac{10432 \cdot 1.3}{10 \cdot 0.98} \\ &= 1383 \dots \\ &\simeq 1.4 \times 10^3 [photons/s/arcsec^2] \end{aligned} \quad (19)$$

と求まる。また、(7) 式より

$$\begin{aligned} n_{sky} &= 2.3 - 2.5 \log \left(\frac{10432}{375118.25} \right) \\ &= 6.18 \dots \\ &\simeq 6.2 [\text{mag}/\text{arcsec}^2] \end{aligned} \quad (20)$$

となる。

4. 限界等級の算出

表 2 で示した測定結果のそれぞれに対して、S/N が 5,10 となるときに (13)、(14) 式を計算してまとめたものが以下の表である。

番号	$F_\lambda [\text{erg}/\text{s}/\text{cm}^2/\text{nm}]$	限界等級
1	3.10×10^{-11}	7.65
2	3.62×10^{-11}	7.48
3	3.10×10^{-11}	7.65
4	2.59×10^{-11}	7.84
5	3.88×10^{-11}	7.40
6	4.13×10^{-11}	7.33

表 3: S/N=5 のときの限界等級

番号	$F_\lambda [\text{erg}/\text{s}/\text{cm}^2/\text{nm}]$	限界等級
1	6.22×10^{-11}	6.89
2	7.26×10^{-11}	6.72
3	6.23×10^{-11}	6.89
4	5.20×10^{-11}	7.09
5	7.77×10^{-11}	6.65
6	8.29×10^{-11}	6.58

表 4: S/N=10 のときの限界等級

S/N を 5 としたときの平均は $7.55 \dots \simeq 7.6$ 、S/N を 10 としたときの平均は $6.80 \dots \simeq 6.8$ なので、

$$m = 7.6 \quad (S/N = 5) \quad (21)$$

$$= 6.8 \quad (S/N = 10) \quad (22)$$

と求まった。

6 考察

1. システム効率の評価

今回の実習でシステム効率は4%と求まり、これを昨年及びそれ以前の結果と比較することについて考察する。このシステム効率を求める際に外挿する定数が $\lambda \cdot \Delta\lambda \cdot (3) \text{式} \cdot f_{conv} \cdot D$ である。D=30cmは間違いのないものとして、 $\lambda \cdot \Delta\lambda \cdot f_{conv}$ は昨年と同じ値を使っているが、(3)式の係数は昨年までのものが3.92であるのに対し今年には文献値3.55を使用している。もし今回3.92という値を信用して使えば、得られるシステム効率は3.6%となる。2006、2007、2008年の実習レポートを見ていると、その時によって $\lambda=500,510,514,520,525[\text{nm}]$ 、 $\Delta\lambda=100,150,154,160,180,200[\text{nm}]$ と、それぞれ異なった値を選んでいる。 $\lambda \cdot \Delta\lambda \cdot (3)$ 式の係数は求まるシステム効率と反比例の関係にあることから、この値の選び方はシステム効率の結果に直結する。試しに一番小さい数字を使ったモデル($\lambda = 500\text{nm}$, $\Delta\lambda = 100\text{nm}$, $F_\lambda \propto 3.55$)と一番大きい数字を使ったモデル($\lambda = 525\text{nm}$, $\Delta\lambda = 200\text{nm}$, $F_\lambda \propto 3.92$)を比較すると

$$\begin{aligned} \frac{\eta_{larger}}{\eta_{lower}} &= \frac{525 \cdot 200 \cdot 3.92}{500 \cdot 100 \cdot 3.55} \\ &= 2.31 \dots \end{aligned} \quad (23)$$

となり、結果に2.3倍の差が出てしまう。この計算で最も効いている値は $\Delta\lambda$ の取り方であるが、それを除いても1.1から1.2倍程度の差は出てしまう。フィルタ特性やフラックスと等級の変換式など、毎年絶対に変化がないはずの部分に違いがあるので、このような値の取り方を無視してシステム効率だけを年ごとに比較することは、正しくない。ただし今回の計算結果である $\eta = 3.93 \dots \%$ について、有効数字一桁分つまり4%という値は、それなりに信頼性がある値といえるだろう。

また、2006年のレポートでは $f_{conv} = 3.8$ が使用されていて、これは2007年以降の1.3という値と3倍近く異なっている。2007年のレポートを見ても「コンバージョンファクターは1.316とする。」としか書いてなく、なぜ値が大きく変わったのかということについては不明である。

システム効率を計算する際に、まずフラットフィールドを使いCCDカメラの感度むらの補正を行い、さらにそこから別の場所で撮影した二つのファイルを引き算するという厳密な準備をする一方、フィルタの中心波長や半波長の値はグラフから目で見ても大雑把に決められている。こういった定数に信憑性がないことは観測結果の信頼性に直接的に影響するので、より確からしい観測結果を得るためには、フィルタとCCDカメラについての特性を、何らかの手段を用いて事前に調べておく必要がある。

2. 限界等級の評価

今回の実習では2.3等級という明るい星を用いて観測を行ったため、露光時間を短くしなければすぐにサチュレーションをしてしまう状態だった。実際に、サチュレーションを起こしているファイルもあった。(8)、(10)式から、S/N比は露光時間を長くしたほうが大きな値になるので、もう少し暗い星を選び露光時間を長くしておけば、より良い結果が得られたものと考えられる。

7 感想

とはいえ自分の目が悪いこともあり、目を凝らしてなんとかカシオペア座を見れる状態でした。天文学科に来て初めての星の観測を行う実習でしたが、やはり東京ではこんなものだなあと感じました。ちなみに自分は東京人です。記憶に残る実習になりました。ありがとうございました。