

# 基礎天体観測実習レポート (担当 小林・本原)

理学部天文学科 3年

坂田 悠

42005J

平成 17 年 2 月 27 日

## 概要

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い、望遠鏡の基本操作、赤経・赤緯に基づいた観測の基本事項、および CCD 観測の基本技術を一通り習得する。

「観測から望遠鏡/カメラシステムのシステム効率を出す」ことを目標にし、その上で、余力があれば「空の明るさを測定」「限界等級の計算」「限界等級の実測試験」も行う。

## 1 限界等級

### 1.1 システム効率とは

「大気圏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」

天体から望遠鏡に (仮に loss がない場合) 入射するはずの光子数 ( $s_i$ )

望遠鏡の口径  $D$ 、天体からのフラックス  $F_{\lambda}$ 、フィルターの波長範囲  $\Delta\lambda$  とすれば、単位時間あたりに望遠鏡に入射する放射エネルギー  $\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 \Delta\lambda F_{\lambda}$ 、光子 1 個あたりのエネルギー  $hc/\lambda$  より、

$$s_i = \pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 \frac{\Delta\lambda F_{\lambda}}{hc} \quad (1.1)$$

となる。(ただしここで  $\Delta\lambda \ll \lambda$  で、この波長範囲で  $F_{\lambda}$  一定と仮定している)

CCD で生じた電荷の個数 ( $n_i$ )

画像上でのカウント  $N$ 、コンバージョンファクター  $f_{conv}$  (光子 1 個あたり平均何個の電荷が生じるかを表す) 積分時間  $t$  とすると、 $n_i$  は、

$$n_i = \frac{N f_{conv}}{t} \quad (1.2)$$

となる。

システム効率  $\eta$  は、

$$\eta = \frac{n_i}{s_i} \quad (1.3)$$

で求まる。

### 1.2 $S/N$ とは

一般的に限界等級は  $S/N$  を用いて測る。 $S/N$  はノイズに対する信号の割合を表し、通常光赤外の分野では  $S/N = 5$  を越えれば検出できたとする。

具体的には、

$$\begin{aligned} S/N &= \frac{n_i t}{N_{noise}} \\ &= \frac{\eta s_i t}{N_{noise}} \end{aligned} \quad (1.4)$$

である。ただし、

$$N_{noise} = \sqrt{n_i t + m n_{sky} t + m n_{dark} t + m N_{read}^2} \quad (1.5)$$

であり、 $m$  は星像のまたがるピクセル数、 $n_{sky}$  は 1 ピクセルあたりの検出された背景放射の光子数、 $n_{dark}$  は検出器の 1 ピクセルあたりの暗電流、 $N_{read}$  は検出器からの 1 ピクセルあたりの読出しノイズである。

### 1.3 限界等級の求め方

まず積分時間  $t$  を決める ( $t$  が大きい程当然限界等級は下がる)。次に、等級が既にわかっている比較的明るい星 (で、できれば観測する星の近くにあるもの) を用いてシステム効率  $\eta$  を求め、観測する星の周辺の画像から  $n_{sky}$  を求める ( $n_{dark}$ 、 $N_{read}$  は CCD 特有のものなので既にわかっているものとする)。最後に  $S/N = 5$  として (1.4) 式から  $s_i$  を求め、(1.1) 式から、この時の  $F_\lambda$  が求まり、あとはその値を

$$M = -2.5 \log \frac{F_\lambda}{F_0} \quad (1.6)$$

に代入すれば、限界等級  $M$  が求まる。

## 2 観測装置

### 2.1 CCD カメラ

今回の実習で使用した CCD カメラについて紹介する。  
CCD の仕様は表 2.1 の通り。

フォ・マット	512×512
アレイサイズ	12.3mm × 12.3mm
ピクセルサイズ	24 $\mu$ m × 24 $\mu$ m
Full Well	250,000 $e^-$ /pix
読み出しノイズ (@180K)	< 10 $e^-$
暗電流	12.75 $e^-$ /sec/pix(@240K) 0.0046 $e^-$ /sec/pix(@160K)
量子効率	68 % (@450nm) 75 % (@550nm) 80 % (@650nm)
CTE	0.99999
出力数	2
$f_{conv}$	3.8 $e^-$ /ADU
ピクセルスケール*)	0.99"/pix
視野*)	8.45' × 8.45'

表 2.1: CCD の仕様

\*):望遠鏡に取り付けたときの値  
使用するためには 30 分以上冷却が必要である。

### 2.2 フィルタ

標準のフィルターシステムのフィルターは特注品になってしまい高いので、以下の市販のフィルターを組み合わせて用いた。

今回は駿河精機の

- 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 枚を重ね、V-band のフィルタとした。図 2.1 はフィルタの透過率のプロットである。図 2.1 (ただし横軸の単位は (nm) の間違いである) の半値幅をとることで、 $\Delta\lambda = 0.15[\mu\text{m}]$  であることがわかる。

しかしこの透過率は理想値であって、今回の実習で使用したときカビが生えていたことを考えると図 2.1 よりも透過率が小さくなることが予想されるが、 $\Delta\lambda$  に関しては概ねこの値を採用しても構わないと思われる。

## 3 観測

### 3.1 観測する星の選出

まず、今回の実習で各人が観測する星を

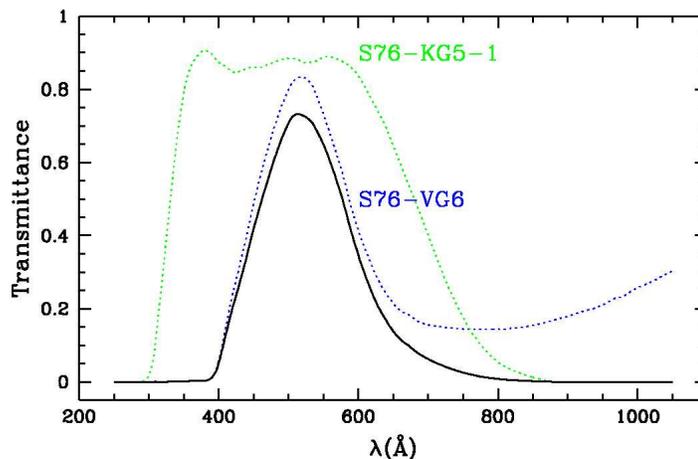


図 2.1: フィルタの波長-透過率関係

[http://mthamilton.ucolick.org/techdocs/standards/standards\\_intro.html](http://mthamilton.ucolick.org/techdocs/standards/standards_intro.html)を参考にして2個ずつ選んだ。選考基準は、観測日時(12月10日18:00~20:00)に天頂付近に見える2等級くらいの比較的明るい星(あまり暗すぎると見付けられないので)である。

選んだ星は、

1. アルフェラッツ (アンドロメダ  $\alpha$ ) (2.1 等級、赤経 0h8m23.3s、赤緯 +29°5'26'')
  2. ツイー (カシオペア  $\gamma$ ) (2.5 等級、赤経 0h56m42.5s、赤緯 +60°43'0'')
- の2つにした。

### 3.2 観測(1回目)

上で選んだ星を観測する前に、望遠鏡の操作法の理解と CCD の確認(ピント調節等)のためにまずは明るく有名な星を観測することにした。ド・ムを開けて西の方角を見上げると白鳥座のデネブが見えたので、これを始めに何枚か条件を替えて撮影しながらピント調節を行った。その撮像データは deneb01.FTS~deneb07.FTS に保存し、いろいろと処理を加えたもの(後述)を表 3.1 にまとめた。

	$N$ [ADU]	Sky[ADU]	Peak[ADU]	$t$ [s]	$F$ [mm]
deneb01	$5.742 \times 10^{6*}$	2839	65345	1.0	?
deneb02	605105	1454	10497	0.2	7
deneb03	$1.354 \times 10^6$	1856	29590	0.2	6
deneb04	$1.216 \times 10^6$	1580	19525	0.2	5
deneb05	$1.243 \times 10^6$	1612	10863	0.2	5
deneb06	442299	1612	10863	0.2	5
deneb07	$1.273 \times 10^6$	1735	28449	0.2	4

表 3.1: 観測データ(1回目)

ただし、 $N$  は星のカウント、Sky は背景のカウント、Peak はピクセルでのカウント、 $t$  は積分時間、 $F$  は CCD 台の目盛である。

deneb06 のデータを見ればわかるようにこの辺りで空にちらほら雲が見え始めたので観測を終了した。

### 3.3 観測(2回目)

CCD をあらかじめ冷やしておくのを忘れていたため、その間に再びデネブの観測することにした。前回と同じ積分時間(0.2 s)で始めたが、サチリ気味だったので積分時間を半分にしたが今度はカウント数が予想される値よりも若干大きく CCD の線形性が不安になったのでとりあえず積分時間をいろいろと替えてみてどれくらいまで積分時間として信用できるかを調べることにし

た。そのデータを deneb01.FTS- deneb09.FTS (前回とは違うディレクトリ) に保存し、表 3.2 にまとめた。

	$N$ [ADU]	Sky[ADU]	Peak[ADU]	$t$ [s]	$F$ [mm]
deneb01	$1.550 \times 10^9$	1571	20840	0.2	4
deneb02	860177	1554	15196	0.1	4
deneb03	611918	1469	12516	0.05	4
deneb04	513725	1502	14832	0.05	4
deneb05	577646	1461	9339	0.025	4
deneb06	677401	1510	7878	0.05	4
deneb07	269162	1304	4325	0.05	3
deneb08	301169	1295	2256	0.05	2
deneb09	274331	1318	5058	0.05	5

表 3.2: 観測データ (2 回目)

そんなこなしているうちに再び雲が出てきてしまい、結局今回も選んだ星を観測することができなかった。

### 3.4 観測 3 回目

今回こそはと思って三鷹に向かうも昼前から空はあいにくの曇模様であり、実習開始時間にはさめざめと雨が降り出していた。天体観測は天候との戦いであることをあらためて実感した瞬間であった。

結局、今回の実習を通して観測できた星はデネブのみではじめに選んだ星を観測することはできなかった。

## 4 データ解析

これまでに得た撮像データから天体のデータを取り出し (一次処理)、そこからシステム効率と限界等級を求めることを考える。

### 4.1 前処理

まずはじめに、

```
sftp vw
```

で望遠鏡の端末に login し、deneb01.FTS- deneb07.FTS(ディレクトリ 041210) と deneb01.FTS - deneb09.FTS(ディレクトリ 041217) のデータを天文センター内の端末に

```
scp 'vw:data/041210/*.FTS' .
```

等で転送した。

次に、上のデータファイルの拡張子を

```
mv deneb**.FTS deneb**.fits
```

によって.FTS から.fits に変更した。

ここで、CCD が直接書き出す FITS ファイルはヘッダが signed short になっていて、値が 32768 より大きいピクセルは-32768 に折り返されてしまい変な画像になってしまうので、これを

```
cl>chpixtype deneb**.fits deneb**.fits ushort
```

としてヘッダを unsigned short に変換した。

これで前処理は終了した。次はこの生データから目標天体のシグナルを IRAF を用いて引き出すことを考える。

### 4.2 一次処理 (リダクション)

はじめに、作業ディレクトリで

```
mkiraf
```

を実行

```
ds9
```

を実行して画像ビューワを立ち上げ、

cl

で IRAF を立ち上げる。次に、

```
cl>display deneb**.fits
```

を実行し ds9 にデネブの画像を表示させ、

```
cl>imarith deneb**.fits - bias0001.fits deneb**.fits
```

```
cl>imarith deneb**.fits - dark0001.fits deneb**.fits
```

とバイアスとダークを引き

```
cl>imarith deneb**.fits / flat.fits deneb**.fits
```

でフラットで割る。次に、

```
cl>imexam
```

を実行すれば、画像の統計量を調べることができ、調べたいピクセルの位置にカーソルを持っていき a を入力すればカーソル位置にあるピクセルの統計 (FWHM、フラックス、バックグラウンドなど) を調べることができる。

これにより  $N$ 、Sky、Peak のデータが得られ (表 3.1、3.2) 一次処理が完了した。

### 4.3 システム効率の計算

まず、 $s_i$  を求める。 <http://www.alcyone.de/SIT/bsc/bsc.html> を参照すると、デネブの V 等級は 1.25 で、V-band の 0 等級のフラックスは  $F_0 = 3.64 \times 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}]$  なのでこれを (1.6) 式に代入すれば、

$$F_\lambda = 1.15 \times 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}] \quad (4.1)$$

これを (1.1) に代入して、 $D=0.3[\text{m}]$ 、図 2.1 から  $\Delta\lambda=0.15[\mu\text{m}]$ 、 $\lambda = 0.55[\mu\text{m}]$  を用いると結局、

$$s_i \simeq 3.38 \times 10^8 [e^-] \quad (4.2)$$

と求まる。

次に、表 3.1、3.2 のカウントデータ (ADU) を (1.2) 式を用いて電子数 ( $e^-$ ) に変換し  $n_i$  を求める (後に  $n_{sky}$  を求める場合も同様)。ここでコンバージョンファクター  $f_{conv}=3.8(e^-/\text{ADU})$  とした。

以上から  $n_i$  と  $s_i$  が求まったので、(1.3) 式から、システム効率  $\eta$  を求めた結果を表 4.1、4.2 にまとめた。

データ ( 1 回目 )	$N[\text{ADU}]$	$t[\text{s}]$	$\eta[\%]$
deneb01	$5.742 \times 10^6$	1.0	6.5
deneb02	605105	0.2	3.4
deneb03	$1.354 \times 10^6$	0.2	7.6
deneb04	$1.216 \times 10^6$	0.2	6.9
deneb05	$1.243 \times 10^6$	0.2	7.0
deneb06	442299	0.2	2.5
deneb07	$1.273 \times 10^6$	0.2	7.2

表 4.1: システム効率 ( 1 回目)

データ ( 2 回目 )	$N[\text{ADU}]$	$t[\text{s}]$	$\eta[\%]$
deneb01	$1.550 \times 10^6$	0.2	8.7
deneb02	860177	0.1	9.7
deneb03	611918	0.05	13.8
deneb04	513725	0.05	11.6
deneb05	577646	0.025	26.1
deneb06	677401	0.05	15.3
deneb07	269162	0.05	6.1
deneb08	301169	0.05	6.8
deneb09	274331	0.05	6.2

表 4.2: システム効率 ( 2 回目)

## 4.4 限界等級の計算

次に、得られたデータから限界等級を求める。求め方は以前に述べたとおりである（ただしここでは12月10、17日の18:00-20:00頃にデネブの方向にもしデネブがなかったらぎりぎり見えるであろう星の等級を求めることに相当することに注意する。）

$n_{sky}$  は、表3.1、3.2と式(1.2)から求め、 $n_{dark}$  と  $N_{read}$  は、表2.1の値からそれぞれ  $n_{dark}=0.0046[e^-/\text{sec}/\text{pix}]$ 、 $N_{read}=10[e^-]$  とする。

星像のまたがるピクセル数  $m$  については、本来なら `imexam` で求めた FWHM から推測すべき値であるが、この値を記録し忘れてしまったので、デネブを点光源と仮定して見積もることにする。

30cm 望遠鏡の角分解能  $\theta_{DL}$  は

$$\theta_{DL} = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (4.3)$$

$$= 1.22 \frac{0.55 \times 10^{-6}}{0.3}$$

$$= 2.23 \times 10^{-6} [\text{rad}] = 0.46'' \quad (4.4)$$

であるが、一方三鷹のシーイングスケールは大体  $2''$  なので、点光源と仮定したデネブは  $2'' \times 2''$  の大きさで CCD に写る。表2.1から、CCDのピクセルスケールは  $0.99''/\text{pix}$  であるので、ピクセル数  $m$  は、 $2 \div 0.99 \simeq 2$  [pix] となる。

以上の値と前節で求めたシステム効率  $\eta$  を式(1.4)で  $S/N=5$  としたものに代入すれば、限界等級の  $s_i$  は

$$s_i = \frac{25\eta t + \sqrt{(25\eta t)^2 + 100\eta^2 t^2 (mn_{sky}t + mn_{dark}t + mN_{read}^2)}}{2\eta^2 t^2} \quad (4.5)$$

となり、式(1.1)と式(1.6)から限界等級  $M$  が求まる。それをまとめたのが表4.3、4.4である。

データ(1回目)	$\eta$ [%]	$s_i[e^-]$	$F_\lambda[\times 10^{-12}\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}]$	$M$ [等級]
deneb01	6.5	11545.34	3.935E-13	12.42
deneb02	3.4	79851.00	2.722E-12	10.32
deneb03	7.6	40175.05	1.369E-12	11.06
deneb04	6.9	40948.59	1.396	11.04
deneb05	7.0	40754.63	1.389	11.05
deneb06	2.5	114112.96	3.889	9.93
deneb07	7.2	41050.31	1.399	11.04

表 4.3: 限界等級 (1 回目)

データ(2回目)	$\eta$ [%]	$s_i[e^-]$	$F_\lambda[\times 10^{-12}\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}]$	$M$ [等級]
deneb01	8.7	32387.41	1.104	11.29
deneb02	9.7	57794.07	1.970	10.67
deneb03	13.8	79082.07	2.696	10.33
deneb04	11.6	95088.65	3.241	10.13
deneb05	26.1	83408.26	2.843	10.26
deneb06	15.3	72277.42	2.464	10.42
deneb07	6.1	168986.17	5.760	9.50
deneb08	6.8	151089.66	5.150	9.62
deneb09	6.2	167111.46	5.696	9.51

表 4.4: 限界等級 (2 回目)

となった。

## 5 考察

### 5.1 CCD カメラの線形性

2回目の観測時の初めの観測データ(deneb01)がサチリ気味だったので(この日は前回の観測時よりもシーイングがよかった)積分時間を半分減らしたところカウント数が予想されるよ

りも若干小さかったので CCD のシャッターの線形性が怪しくなって調べることにした。案の定さらに積分時間を半分にしてデータを取ったところ (deneb03・deneb06) カウントが予想される値よりも 50 % 近く大きく、 $t < 0.1[s]$  では線形性は保証されていないことがわかった。

このことからわかるように CCD は明るすぎる天体を撮像するにはあまり適しておらず (積分時間を長く取るとサチュレーションを起こし、積分時間が短すぎると線形性が保証されなくなる。) あくまでも暗い天体専用の検出器だということがわかった。

## 5.2 結果

結局得られたデータで信用性が高いものは、積分時間が  $0.1[s]$  以上のもので、明らかに値がおかしかった deneb06(1 回目) を除いた deneb03,04,05,07 だけだったのでこの場合の平均をとることで三鷹の 30cm 望遠鏡 (とその上空の大気) のシステム効率と限界等級は

$$\eta = 7.2\% \quad (5.1)$$

$$M = 11.05 \text{ 等級} \quad (5.2)$$

となった。参考までにいろいろと調べてみると、積分時間にもよるがすばる望遠鏡の限界等級はおよそ 21- 26 等級、ハッブル宇宙望遠鏡は 30 等級ぐらいらしい。システム効率はあまり口径に関係のない量であり、 $n_{dark}$ 、 $N_{read}$  は検出装置に依存する量なので、この限界等級の差違はおもに  $n_{sky}$  による。このことから東京 (三鷹) の空とマウナケア山山頂の空と、大気圏外 (の空?) がいかに違うかがわかる。

## 6 感想

今回の実習で、光赤外での天体観測は空模様との戦いであることが身にしみてわかった。朝空を見上げ晴れていて今日は観測日和だと確信し、昼にも空を見上げよしよしまだ雲ひとつないなと安堵し、夜いざ観測する直前はきれいな星空がひろがっていて、今日は観測できるなと思っているうちにカウント数がガクッと下がりあれっとなんと空をよくよく見ると薄暗い雲が、また今日も終了。なかなか思い通りにいかないものであるなど改めて実感した。しかし、望遠鏡や CCD の準備に手間取ったり、フィルターがカビていたり、目的以外の星を間違えて導入したりと人為的なミスも多かったのも確かで、あとはいかに「人事を尽くして天命 (天候) を待つ」状態にしておくかといったところをもっと改善するよう努力しなければならないことも痛感し、また同時にもっといろいろな天体を CCD で観測してみたいという欲求も生まれ、自分としては結構満足のいく実習でした。3 日間どうもありがとうございました。