# 小望遠鏡による木曽観測実習レポート

理学部天文学科3年

松野允郁

(05-132008)

# 目次

1	はじめに	2
2	観測手法	2
2.1	設備	2
2.2	観測	4
2.3	解析手法	6
3	結果	10
3.1	観測天体の選出	10
3.2	撮影データ....................................	11
3.3	読み出しノイズの測定	11
3.4	等級原点の計算・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	11
3.5	システム効率の測定	12
3.6	sky の測定	12
3.7	S/N 比の計算	13
3.8	限界等級の見積もり	13
4	考察	14
4.1	観測の問題点....................................	14
4.2	ノイズ評価....................................	15
4.3	各種計算の妥当性	16
4.4	今後の課題....................................	17
5	おわりに	18
6	参考文献	18

# 1 はじめに

東京都三鷹市にある国立天文台三鷹キャンパスおよび東京大学天文センターは暦や経緯度の計算、決定のた めの観測を行う場所として作られた。国立天文台はもともと港区麻布にあったものが急速に発展する都市部の 光害を避けて1924年に今の場所三鷹に移転してきた。今では三鷹も光害に埋もれ、主要な観測が行われるこ とは少ない。光害に埋もれた三鷹で実用的な観測を行うことは大変困難であるが、観測の原理を知るための観 測であれば十分に行うことが出来る。

今回の実習で用いた望遠鏡は昭和26年に完成されたものである。三鷹の光害と天文学の観測に使われる望 遠鏡の大型化のため、現在ではこの望遠鏡を使った観測はほとんど行われていない。数年前より学部3年生の 実習で年に一度使用されているのみである。

今回の実習では三鷹にあるこの望遠鏡を使い限界等級を調べる。

## 2 観測手法

## 2.1 設備

東京大学天文センター向かいにあるドームの中の口径 30cm 望遠鏡及び FLI 社製冷却 CCD を用いて観測 を行った。詳細を述べていく。

2.1.1 場所



### 表1 30cm 望遠鏡が設置されている場所



図1 ドーム付近の航空写真



図2 フィルターの透過曲線

表1にこのドームの設置されている場所についての情報をまとめた。なお、このデータは Google Maps を 利用して求めた。このドームが設置されている場所は図1にあるとおり、木に囲まれている。そのうえ、天文 センターの建物からの光がドーム内にさしこむ。決して条件がいいとは言えない。

2.1.2 架台

架台には日本光学 30cm 反射赤道儀を使用した。ドイツ式赤道儀であるが、詳しい仕様は不明である。

2.1.3 鏡筒

口径 300mm焦点距離 5000mm表 2 30cm 望遠鏡の仕様

今回使用した焦点における鏡筒の仕様は表2の通りである。その他詳しい仕様は不明であるが反射式である ことは間違いない。

2.1.4 フィルター

フィルターの透過曲線は図 2 のとおりである。http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kmotohara/30cm/より引用した。なお、このデータから観測波長  $\lambda = 510$ nm、波長幅  $\delta \lambda = 170$ nm とした。

2.1.5 検出器

カメラは FLI 社製 Proline PL4021 を使用した。使われている CCD は Kodak 社製 KAI - 4021 である。 詳しい仕様は表 3 のとおりである。なお表の数値は全て 40°C での測定値である。感度特性は図 3 のように なっている。大沢さんのレポートから conversion factor は  $F_{conv} = 0.94 \text{ ADU/e}^-$  とした。また、これも過 去のレポートからピクセルスケールは a = 0.27''/pix とした。

Architecture	Interline CCD;Progressive Scan
Number of Active Pixels	2048x2048 = approx. 4.19M
Pixel Size	7.4 $\mu m(H)x7.4\mu m(V)$
Chip Size	$16.67 \mathrm{mmx} 16.05 \mathrm{mm}$
Aspect Ratio	1:1
Saturation Signal	$40,000 e^-$
Peak Quantum Efficiency (KAI-4021M)	55%
Dark Current Doubling Temperature	$7^{\circ}\mathrm{C}$
Dark Current	$< 0.5 \mathrm{nA/cm^2}$





図 3 CCD の感度特性

## 2.2 観測

## 2.2.1 観測条件

観測日時は日本時間で 2013 年 11 月 29 日 17 - 21 時である。月も雲もなく、観測時間全体を通して透明度のよい空であった。seeing については後で述べる。

## 2.2.2 観測天体の選出

今回の実習の目的は三鷹で 30cm 望遠鏡を使った時の限界等級を知ることである。したがってより多くの恒星、それも変光星ではなく明るさの確定しているものが多く含まれる領域を選ぶのがよい。今回の CCD の視

野は10'足らずと狭いため、適当に撮影しただけでは多くの星はうつらない。Stellarium を用いて恒星が多く 存在する領域を探し出し、そこへ望遠鏡を向けることにした。球状星団のように狭い領域にたくさんの星が密 集している天体を撮影するのが一番いいのだが、観測時間に観測可能な球状星団は存在しなかった。空の中で 他に明らかに恒星が多く存在するのは天の川付近である。観測実習が行われる時間の高度も考慮すればカシオ ペア座付近が最適であると考え、カシオペア座付近から 8-10 等の星が視野に複数含まれるような領域を探し だした。今回は手動で天体を導入する必要があるので、導入を簡単にするため、明るい星の近くであることや 特徴的な星の並びがあることも条件の一つとして考えた。

2.2.3 観測天体の導入



最近の望遠鏡では PC に座標を入力すると自動でその方向に向くようになっている。しかし今回の観測で はそのような機能は使えないので、自分たちの手で実際に動かして行う必要がある。赤経軸は粗動微動とも モーターによって行い、赤緯軸はクランプを緩めて動かし(粗動)、手元のコントローラによる操作で微調整し た。星の同定は Stellarium の星図との比較によって行われた。なお、CCD の視野は図 4 のようになっている から、反時計回りに 90 度回転させ、東西を反転すると北が上になるようにした時の実際の星空にあうように なっている。

2.2.4 観測データ

以上を考慮し、観測天体を決め、観測を行った。観測データをまとめると表4のようになった。今回の観測 では本来4枚以上対象天体の画像を取得することになっている。それにも関わらず、ここで撮影した枚数が2 枚となっているのは観測時間及び観測設備上の都合である。4人で観測を行ったが、3人分のデータを撮った 所で時間も遅くなり、また後に述べる観測装置の不調により観測を続けることが困難となった。そこで4人の うち1人が観測途中で試し撮りのつもりで撮った2枚の120s 露光の画像を解析し、同様の結論に辿りつける かどうか試すことにしたのである。

赤経	0h11m11s
赤緯	$+57^{\circ}51'47"$
露光時間	120s
撮影枚数	2 <b>枚</b>
撮影日	2013年11月29日
撮影時刻	20:29-35
CCD 温度	$232 \mathrm{K}$
天気	快晴
表 4 観測	天体の撮影データ

撮影枚数	20枚
撮影日	2013 年 11 月 29 日
撮影時刻	18:30-35
CCD 温度	$232 \mathrm{K}$
表 5	bias の撮影データ

露光時間	30s	
撮影枚数	20 枚	
撮影日	2013年11月29日	
撮影時刻	19:22-39	
CCD 温度	232 K	
<b>表</b> 6 da	ark <b>の撮影データ</b>	

## 2.3 解析手法

## 2.3.1 一次処理データの取得

表 5、表 6 に bias 及び dark の取得データを示す。dark の露光時間が 30s となっているところに注意が必要である。本来であれば 120s のデータに対しては 120s の dark ファイルが必要である。ところが今回の観測では撮りそこねてしまった。30 秒の dark から bias を引いたものを 4 倍して 120s の dark の代わりとすることもできる。しかし後に述べる理由で dark ファイルは結果として使用していない。またフラットの補正は行なっていない。

### 2.3.2 フラックスとカウントの関係

検出器に入射した光は光電効果を利用して電子に変換される。その電子の数をさらにカウントに変換して表示している。天体のカウント数 *C*[ADU] と天体のフラックス *f<sub>ν</sub>* の間には次式のような関係がある。

$$C = \frac{\pi (D/2)^2 f_\lambda \Delta \lambda t}{h\nu} \eta \frac{1}{F_{\rm conv}}$$
(1)

$$= \eta \frac{\pi (D/2)^2 \Delta \lambda}{F_{\rm conv} h \lambda} f_{\nu} t \tag{2}$$

となる。なお、t[s]は露光時間、 $F_{conv}[e^-/ADU]$ はコンバージョンファクター、 $\eta$ はシステム効率である。 途中

$$\begin{cases}
\nu = \frac{c}{\lambda}$$
(3)

$$\int f_{\lambda} = \frac{c}{\lambda^2} f_{\nu} \tag{4}$$

を使った。また

$$\int \alpha' \equiv \frac{\pi (D/2)^2 \Delta \lambda}{F_{\rm conv} h \lambda} \tag{5}$$

$$\begin{cases}
\alpha \equiv \alpha' \eta$$
(6)

$$\int \alpha'' = \alpha F_{\rm conv} \tag{7}$$

と定義すれば

$$C = \alpha' \eta f_{\nu} t = \frac{\alpha''}{F_{\text{conv}}} f_{\nu} t = \alpha f_{\nu} t \tag{8}$$

と表すことが出来る。

#### 2.3.3 読み出しノイズの測定

2 枚の bias 画像を差し引きして読み出しノイズを測定する方法を参考に、より精度の高い読み出しノイズ の測定方法を考えてみた。bias1-bias20 までの 20 枚の画像があるとする。これらの画像を用いて、

$$\operatorname{biascheck} i = \operatorname{bias} i - \frac{1}{20} \sum_{j=1}^{20} \operatorname{bias} j = \frac{19}{20} \operatorname{bias} i + \sum_{j \neq i} \operatorname{bias} j \tag{9}$$

という画像を作る。もし読み出しノイズが含まれていなければこの画像のカウントは0になるはずである。実際には読みだしノイズに起因して各ピクセルの値は0のまわりにばらついている。今読み出しノイズを $N_{\text{read}}$ とすると、biascheck*i*の各ピクセルは

$$\sigma_i = \sqrt{\left(\frac{19}{20}N_{\text{read}}\right)^2 + 19\left(\frac{N_{\text{read}}}{20}\right)^2} = \sqrt{\frac{19}{20}}N_{\text{read}}$$
(10)

程度ばらつく。したがって biaschecki の画像の各ピクセルの標準偏差を求めればそれから読み出しノイズを 求めることが出来る。i = 1 - 20 までこの計算を行い、各画像の標準偏差を平均し、それを用いて読み出しノ イズを評価した。

2.3.4 dark レベルの測定

dark 画像から bias 画像を引くことで dark レベルを測定することが出来る。更にそれを露光時間で割れば、 どの程度の暗電流が発生しているのか見積ることが出来る。なお、dark に含まれるノイズはポアソンノイズ とする。

### 2.3.5 簡易チェック用の画像

同じ露光時間で撮影した画像を2枚用意し、差し引きし check.fits を作る。ただしこの時星同士が重ならな いように位置をずらして撮影しておく。差し引きすることでノイズを除けば背景光や bias, dark が取り除か れ、天体の光のみがネガとポジで残る。簡単に大半の背景光を取り除くことができるので check.fits は視野の 確認や観測パラメーターの決定のために用いることができる。

#### 2.3.6 seeing の測定

恒星の FWHM はサチュレーションを起こしていなければ恒星の明るさによらず、通常 seeing 程度の幅で 一定である。したがって、恒星の FWHM を測定すれば seeing を知ることが出来る。check.fits を用いていく つかの恒星について FWHM を測定し、その平均値を今回の観測の seeing とした。

#### 2.3.7 等級原点の計算

ここでは check.fits を利用して、等級原点  $Z_{mag}$  を求める。等級原点とは 1s 露光で 1 カウントとなる天体の等級のことである。以下のようにして等級原点を求めることが出来る。

等級 m とフラックス  $f_{\nu}$  の間には以下のような関係がある。

$$m = -2.5 \log \frac{f_{\nu}}{3630 \text{Jy}} \tag{11}$$

一方、(8)によれば等級原点の星のフラックスは

$$f_{\nu,Z} = \frac{1}{\alpha} \tag{12}$$

であるから、

$$f_{\nu} = \frac{C}{\alpha t} = \frac{C f_{\nu,Z}}{t} \tag{13}$$

となる。したがって、

$$m = -2.5 \log \frac{f_{\nu}}{3630 \text{Jy}} \tag{14}$$

$$= -2.5 \log \frac{Cf_{\nu,Z}}{t3630 \text{Jy}}$$
(15)

$$= -2.5\log\frac{C}{t} + Z_{\rm mag} \tag{16}$$

となり、カタログ等で明るさのわかっている星のカウントを見れば等級原点が

$$Z_{\rm mag} = m + 2.5 \log \frac{C}{t} \tag{17}$$

と求まることがわかる。これを利用して等級原点を求める。なお、ひとつの星を利用して等級原点を測定した 場合そこに誤差や誤りが含まれる可能性もあるので、いくつかの星から等級原点を計算しその平均をとること にした。

なお、恒星のカウント数については恒星が seeing のため数十ピクセルにまたがっているので注意が必要 である。通常恒星のカウント数は恒星の中心をピークにガウス分布に近い形で分布する。今回は星を中心に FWHM の数倍程度の半径の円形開口をとって、開口内のカウント数の合計を星のカウント数とした。実際に は開口の半径を少しずつ大きくして何度も恒星の総カウント数を測定し、カウントがほとんど増えなくなった 時の半径を使用し続けることにした。

2.3.8 システム効率の測定

コンバージョンファクターは過去のレポートで測定されている。コンバージョンファクターの値はそのレ ポートでの実測値を引用することにする。コンバージョンファクターが与えられている時、 $\alpha'$ を与えた (5)式 の右辺は全て既知の値である。したがって、(12)等から、

$$Z_{\rm mag} = -2.5 \log \frac{f_{\nu,Z}}{3630 \rm{Jy}}$$
(18)

$$= -2.5 \log \frac{1}{\eta \alpha' 3630 \text{Jy}}$$
(19)  
10<sup>Z</sup>mag/2.5

$$\eta = \frac{10^{-0.5}}{\alpha' 3630 \text{Jy}} \tag{20}$$

と求めることが出来る。

2.3.9 sky の測定

bias 及び sky を取り除いた画像を用いて sky の明るさを見積もった。撮影した画像の中で星が写っているのはごく僅かな部分であるから、画像のカウントの中央値は sky の明るさとほぼ一致する。120s の画像は 2枚あるのでそれぞれの画像の中央値を測定し、その平均をさらに露光時間で割った。こうして得られたものを sky の 1 ピクセルあたり 1s あたりのカウント  $C'_{sky}[s^{-1} pix^{-2}]$ とした。1秒角あたりの sky の等級を求めるためにはピクセルスケール a を使って、1秒角あたりの sky のカウント  $C_{sky}[s^{-1''-2}]$ を求める必要がある。  $C_{sky} \geq C'_{sky}$ の間には

$$C_{\rm sky} = a^2 C'_{\rm sky} \tag{21}$$

の関係がある。1 秒角あたりのカウントがわかれば (8) からフラックスが求まり、平方秒あたりの等級を求めることが出来る。

2.3.10 S/N比の見積もり

S/N 比とはノイズレベルに対して信号がどの程度突出しているかを表すものである。信号やノイズの量は 発生した電荷の個数で測定するとポアソンノイズのことを考慮しやすくなる。

 $C_{\text{star}}$  を恒星の全カウント、 $A[''^2]$  を恒星の広がりとする。恒星の広がりは FWHM の 3 倍程度に広がって いるとする。また、 $C'_{\text{dark}}$  を 1 ピクセルあたりの dark レベルとする。なお、 $C_{\text{star}}$  はカタログ値から、 $C_{\text{sky}}$  は 求めた sky の 1 秒角あたりの等級から (8) を使って求める。

シグナル S は恒星からの光で発生した電荷の数で、

$$S = C_{\text{star}} F_{\text{conv}} \tag{22}$$

と表される。

ノイズは大きく分けて

- 1. 恒星のポアソンノイズによるもの: $\sqrt{C_{\text{star}}F_{\text{conv}}}$
- 2. sky のポアソンノイズによるもの:  $\sqrt{AC_{sky}F_{conv}}$

3. dark のポアソンノイズによるもの:各ピクセルごとに  $\sqrt{C'_{\text{dark}}F_{\text{conv}}}$ 

4. 読み出しノイズによるもの:各ピクセルごとに  $\sqrt{N_{\text{read}}F_{\text{conv}}}$ 

の4つがあり、画像のノイズはこれらの組み合わせによる。したがってノイズは

$$N = \sqrt{C_{\text{star}}F_{\text{conv}} + AC_{\text{sky}}F_{\text{conv}} + \frac{AC'_{\text{dark}}F_{\text{conv}}}{a^2} + \frac{A}{a^2}\left(N_{\text{read}}F_{\text{conv}}\right)^2$$
(23)

となる。



図 5 観測領域

## 2.3.11 限界等級の見積もり

ノイズを恒星由来のものとそれ以外のものに分けて表し、

$$N = \sqrt{S+T} \tag{24}$$

と表す。今S/N = xとなる時を考える。この時

$$x = \frac{S}{\sqrt{S+T}} \tag{25}$$

$$x^2 = \frac{S^2}{S+T} \tag{26}$$

$$S = \frac{x}{2}(x + \sqrt{x^2 + 4T})$$
(27)

となる。これを用いればある露光時間の時に検出限界となる恒星のフラックスを求めることが出来る。

## 3 結果

## 3.1 観測天体の選出

観測した領域は図 5 のようになっている。CCD の視野に合わせた向きに表示してある。恒星の等級は Stellarium から引用した。また望遠鏡で分離できていない 2 重星については個々の星の等級を調べ、そのフ ラックスを足し上げて合成等級を推定した。



図 6 120 秒露光の Raw 画像

## 3.2 撮影データ

120 秒露光で対象天体を撮影すると図 6 のようになった。画像全体に横向きの縞状のノイズが見られる。縞 状のノイズは bias 画像にも見られ、画像ごとに位相がずれていた。位相がずれているので当然であるが、Raw 画像から bias を引いても縞状のノイズは残った。

また 30 秒露光の dark 画像から bias を引いたところ画像全体に渡ってカウントが負となってしまった。そ のため dark 画像を用いた解析は困難と判断し、今回は dark 画像を用いた解析は行わないことにした。

画像から FWHM を測定したところ約 21pix であった。したがって三鷹の seeing は約 5.7" という事に なる。

3.3 読み出しノイズの測定

読み出しノイズは

	$N_{\rm read} = 16.9 \pm 0.5 \ \rm ADU pix^{-2}$	(28)
となった。今後	$N_{\rm read} = 17 \ {\rm ADUpix}^{-2}$	(29)

として扱う。

3.4 等級原点の計算

恒星	総カウント	$Z_{ m mag}$	
с	2496157	20.00	
d	3362637	20.02	
f	444193.6	20.02	
表 7 等級原点の計算			

試行錯誤の結果、測光の開口は半径を50pixとした。FWHMの5倍程度の領域をとっていることになり、 この中に恒星からの光のほとんど全てが入っているとしてよい。図5に記した星のうち c.d.f についてカウン ト数を調べたところ、表7のようになった。これより、等級原点を $Z_{mag} = 20.01$ とした。 $Z_{mag} = 20.01$ として、irafのphotコマンドで等級を図ると誤差付きで表8のようになった。恒星 a 及び g を除けば誤差の範囲で測定値とカタログ値はよく一致している。

恒星	等級 (測定値)	等級誤差	等級 (カタログ値)
a	12.216	0.051	11.95
b	11.529	0.027	11.53
с	9.214	0.003	9.20
d	8.892	0.002	8.90
е	8.886	0.002	8.91
f	11.071	0.018	11.10
g	12.621	0.074	11.85
	表 8	等級の測定値	<u> </u>

## 3.5 システム効率の測定

求めた等級原点を使い、システム効率を求める。

$$\alpha' = \frac{\pi 0.15^2 170^{-9}}{0.94 \times 6.626 \times 10^{-34} 510 \times 10^{-9}} = 3.78 \times 10^{31} \text{ ADUm}^2 \text{J}^{-1} \text{s}^{-1}$$
(30)

であるから、(20) より、

$$\eta = \frac{10^{20.01/2.5}}{3.78 \times 10^{31}3630 \times 10^{-26}} = 7.36\%$$
(31)

となる。以降この値を使う。したがって

$$\int \alpha = 2.76 \times 10^{30} \text{ ADUm}^2 \text{J}^{-1} \text{s}^{-1}$$
(32)

$$\begin{cases} \alpha'' = 2.59 \times 10^{30} \text{ e}^{-}\text{m}^2\text{J}^{-1}\text{s}^{-1} \end{cases}$$
(33)

となる。

## 3.6 sky の測定

sky の bias を引いた 2 つの画像から sky のレベルを見積った。それぞれの画像の中央値は 2245 ADUpix<sup>-2</sup>、 2214 ADUpix<sup>-2</sup> だったので、平均をとって  $C_{sky} = 2230 \text{ADUpix}^{-2}$  とした。したがって

$$C_{\rm sky} = 30589.8 \text{ ADU}^{\prime\prime - 2} \tag{34}$$

となる。これより空のフラックスを見積もれば

$$f_{\nu,\rm sky} = 9.24 \times 10^{-29} \ \rm Jm^{-2} Hz^{-1} s^{-1\prime\prime - 2}$$
(35)

となる。したがって空の等級は

$$m_{\rm sky} = 13.99 \ ''^{-2}$$
 (36)

と求まる。

## 3.7 S/N比の計算

以上をもとにまずは S/N の計算を行い、次に限界等級の計算をする。seeing は今回の観測時と同じ 5.7" 程度として、その3倍程度の広さに恒星の光が広がっていると考える。まず空に由来するノイズを見積ると

$$N_{\rm sky}^2 = A C_{\rm sky} F_{\rm conv} t \tag{37}$$

$$=\pi \left(\frac{5.7}{2} \times 3\right)^2 \frac{30589.8}{120} \times 0.94t \tag{38}$$

$$=55031t$$
 (39)

となる。したがって、今回の観測では $N_{\rm sky} = 6603689$ である。次に読み出しノイズを考えると、

$$N_{\rm read}^{\prime 2} = \frac{A}{a^2} (N_{\rm read} F_{\rm conv})^2 \tag{40}$$

$$=\pi \left(\frac{5.7 \times 3}{2 \times 0.27}\right)^2 (17 \times 0.94)^2 \tag{41}$$

$$= 804467$$
 (42)

となる。

次に天体からの光で発生する電荷の数を考えると、120ADU で 20.01 等なので、

$$S = F_{\rm conv} \times 120 \times 10^{-\frac{m-20.01}{2.5}} \tag{43}$$

となる。等級誤差とS/Nについて考える。(11)より、

$$dm = -2.5 \frac{df}{f} = -\frac{2.5}{S/N} \tag{44}$$

となる。測定された等級や sky の明るさなどから求めた等級誤差を iraf によって得られた等級誤差と比べたのが表 9 である。両者はよく一致している。

恒星	等級 (測定値)	等級誤差 (測定値)	等級誤差 (計算値)
a	12.216	0.051	0.046
b	11.529	0.027	0.025
с	9.214	0.003	0.003
d	8.892	0.002	0.003
е	8.886	0.002	0.003
f	11.071	0.018	0.016
g	12.621	0.074	0.067
表 9 等級誤差			

## 3.8 限界等級の見積もり

限界等級を見積る。S/N = 5が検出限界だとしよう。この時、検出できる天体のフラックス  $f_{\nu}$ は (27)より、

$$f_{\nu} = \frac{5}{2\alpha''t} \left( 5 + \sqrt{5^2 + 4(N_{\rm sky}^2 + N_{\rm read}'^2)} \right)$$
(45)

となる。したがって今回のように120秒露光で画像を取得する場合の限界のフラックスは

$$f_{\nu} = 2.493 \times 10^{-29} \tag{46}$$

となり、これを等級に直すと

$$m = 14.8$$
 (47)

となる。なお、この時の等級誤差は 0.5 等と見積もられる。実際にカタログ値で 14.3 等の星の位置で等級と 等級誤差を測定すると 15.1±0.4 等という結果が得られた。

#### 4 考察

#### 4.1 観測の問題点

これからあげるような問題点があることに観測中に気がついた。

#### 4.1.1 コントローラーの不調

コントローラを使い北に動かそうとすると動いたまま止まらなくなってしまった。コントローラの不調に よって観測時間が大きく削られ、4人分の画像を取得することが出来なかった。また、bad pixel の影響や CCD の感度ムラの影響を避けるため、同じ天体を4枚以上微妙に位置をずらしながら撮る必要があるが、微 妙に位置をずらすことにも困難が伴い、満足の行く観測は出来なかった。実習最終日にコントローラを分解し て原因を探ったが短時間では原因の究明も問題の解決もかなわなかった。

4.1.2 迷光

ドーム内には様々な光が入っていて目が慣れてしまえば懐中電灯なしでも問題ないほどだった。

ドーム内には天文センターの建物からの光が差し込んでいた。天文センターの建物からの光はセンサー式で ついたり消えたりする。そのため背景光のレベルが変化してしまう可能性がある。

またドーム内では PC を使用しているがこの PC からの光も気になった。PC ごと布をかぶせてその中に 入って作業するなどの対策を行うとよりよい結果が得られると期待できる。

4.1.3 気流

今年の実習では四人で観測を行った。人手という意味で言えば4人でやったのは良かったと思うがその分気流が乱れているように思う。今回の観測では seeing が 5.7" と出ているが通常三鷹の seeing は 3" 程度である。暖房器具は使用していないが人の影響があったと考えられる結果である。

4.1.4 光学系

光学系については問題はなかった。ただ中に虫が巣作っていたりするので鏡筒を上に向ける前にそれらを取 り除くことが必要である。

ガイドスコープを使ってのガイドはしなかった。十字線も入っていないのでガイドスコープとして使えるの かはそもそも疑問である。ガイドスコープはかわりに導入用の補助鏡筒として使用した。補助鏡筒で真ん中に 来た時に CCD の視野に収まるように調整しておくべきだったがその作業はしなかった。主鏡筒の大きさが大 きいため、左右に乗っている鏡筒はどちらも導入用の補助鏡筒として使用する可能性がある。それらの向いて いる向きをあわせておくことは観測効率をあげるためにやっておいたほうがよかった。

#### 4.2 ノイズ評価

4.2.1 読み出しノイズ

取得した 20 枚の画像全てを使って読み出しノイズを計算することでより正確に読み出しノイズが評価できたと考えられる。

なお、各画像には読み出し時に周期的なノイズが乗るようである。振幅はどの画像であっても 30-40ADU 程度であるが、画像ごとに位相は異なっている。この画像ごとに異なる位相が周期的なノイズの除去を困難に している。過去には imshift 等を使ってこのノイズを除去しようとした方もいるようであるがここではそこま では立ち入らない。かわりに何が原因であるのかを考えてみることにする。

CCD につながる線は PC にデータを転送するための USB ケーブルと CCD の電源ケーブルの 2 本存在す る。以下のような理由からデータ転送用のケーブルではなく CCD に電源を供給している AC アダプタが怪し いのではないかと考えた。まず、今回発生したノイズは周期的であるから交流電源由来のものである可能性が 高い。USB ポートに流れる電流は 5V 直流のものであるから、PC とのデータ通信用のケーブルからノイズが 紛れる可能性は低い。加えて画像全体で 37 回繰り返されているから交流電源由来のものであれば 1 秒以内に 起こる現象が悪さをしていると考えられる。データ通信用のケーブルで読み出すときに周期的な交流電源由来 のノイズが乗ると考えるならば、読み出し速度から考えてもっと細かく数の多い縞模様が見えていないといけ ない。bias 電圧を画像全体にかけるタイムスケールはわからないが、bias 電圧をかけるときに各 pixel ごとに bias 電圧がかかるタイミングが微妙に異なって電源からこのノイズが乗ってしまったと考えるほうが良さそ うに思える。さらに今年の最初の観測では USB アイソレーターを使って bias 画像を取得したにも関わらず効 果は現れていない。この 3 点から CCD の AC アダプタが怪しいとの結論に至った。オシロスコープを使って 波形の測定をすればもっと確実な結論を得られるであろう。

4.2.2 暗電流

今回の実習では dark 画像の取得し忘れ及び dark から bias を引くと負になってしまうという奇妙な現象の ため暗電流によるノイズの影響を考慮に入れなかった。この妥当性について考える。

表 3 から 40°C=313K で暗電流が < 0.5 nAcm<sup>-2</sup> であり、dark corrent doubling temperature が 7K であ ることが読み取れる。また CCD の 1pixel のサイズは 7.4 $\mu$ m 四方であり、観測時の CCD の冷却温度が 232K であることにも注意する。したがって発生する暗電流由来の電荷数  $C'_{\text{dark}}$  は

$$C'_{\text{dark}} = \frac{0.5[\text{nA}] \times 2^{(232-313)/7} \times (7.4[\mu\text{m}]/1[\text{cm}])^2}{e} = 0.55 \text{pix}^{-2} \text{s}^{-1}$$
(48)

となる。これは sky のレベルに比べて十分に小さく無視することが出来る。したがって今回のように無視して も結果に大きな影響を与えることはなかったといえよう。

また dark については過去のレポートによれば積分時間が伸びるほど減るようである。もしそうであれば今回 dark から bias を引いた時に画像全体に渡ってカウントが負になったことの説明がつく。以下のことは全く 推測でしか無いが自分なりに理由を考えてみた。通常 dark current はカウントを増やす向きに流れることが 多い。すなわち輝点となって画像上に現れることが多い。しかし逆向き、すなわちカウントを減らす向きの電 流が流れることもある。この場合には画像上に暗点として現れる。通常の CCD の場合輝点の方が出やすく暗 点の方が出にくいが、今回の CCD の場合は特別にこの逆向きの電流が強かったと考えられる。

別の手法で dark を評価することも出来る。dark 画像には bias と dark の両方がのっている。dark 画像に

ついて、読み出しノイズを取得したのと同様の方法をとることで、 $N_{\rm cr} \equiv \sqrt{N_{\rm read}^2 + N_{\rm dark}^2}$ を知ることが出来る。今回は 30 秒の dark 画像を 20 枚用意したのでそれらを用いて解析を行ったところ、 $N_{\rm cr} = 12.01 \pm 0.06$ という結果が得られた。信じられないことに bias だけの画像よりノイズが有意に減っている。このことから今回の場合 dark を考慮しなくてよいというのは間違いないようである。なお、incombine を平均で行ったことが問題なのかと思い median でも同様の解析を行なってみたがほとんど同じ結果が得られた。

しかし bias だけの画像より dark も含めた画像のほうがノイズが少ないというのは奇妙だ。暗電流によって 暗点が出来るというのでは説明がつかない。この場合にはカウントは減ってもノイズは増加するはずである。 以下に考えられる原因をあげる。

- bias 画像と dark 画像を取得した時の環境の違い
- 長時間積分をすること読み出しノイズが減少する

過去の実習でも bias 画像よりも dark 画像の方がカウントが小さいという結果が得られていることから 1 つ目 のように環境、例えば AC アダプタや PC の温度、CCD の冷却温度や室温などが影響したとは考えにくい。 残る可能性は 2 つ目ということになるがこんなことはありうるのだろうか。長時間積分をしている間に電源が 落ち着いて読み出しノイズが減少したりするのだろうか。奇妙な CCD である。積分時間が増加するほどノイ ズが減る CCD ということになるのであればある意味夢のような CCD だ。これ以上考察のしようがないので CCD の読み出しノイズに関わる部分の評価はこれで終える。

## 4.3 各種計算の妥当性

#### 4.3.1 等級原点

等級原点を決める際、やや恣意的に計算に使う星を選択したが、計算結果を見るに間違っていなかったよう に見える。ただし a,e,g の星ではカタログと結果が大きく異なってしまった。e は重星なので単純な足しあわ せとして合成等級を計算している。このことが結果に響いている可能性が考えられる。a や g に関しては暗い 星であるため十分な精度が得られていないと考えてもあまりにもカタログ値から測定値が大きく離れてしまっ ている。スペクトル型も調べてみたが目立った特徴はなく説明がつかない。

4.3.2 システム効率

大雑把にシステム効率を見積る。フィルターの透過曲線から  $\lambda = 510$ nm、 $\Delta \lambda = 170$ nm とした時の透過 率はおよそ 70% と求められ、またその領域での CCD の量子効率はおよそ 50% である。鏡の反射率を 90%、 補正レンズの透過率を 80% とすれば、二回反射させているので望遠鏡自体の透過率は約 65% 程度である。 大気による減光は 0.5 等程度なので、大気の透過率はおよそ 60% 程度である。これらを全てかけあわせると 13% 程度となる。実際のシステム効率はこれより悪い。鏡の状態や大気の状態によって更に 50% ほど効率が 落ち、最終的に 7.4% というシステム効率になったのだろうと推測できる。

4.3.3 sky の測定

sky の明るさは1平方秒あたり13.99 等と求まったが東京の空であることを考えてもやや明るいように感じる。薄いシラスがかかっていて街あかりを反射してしまったとか、建物や PC からの光が鏡筒内に入り込み乱 反射してしまった可能性が考えられる。

なお、今回観測したのは天の川の中の領域であったため天の川の光も背景光として紛れ込んでいるかもしれ

ない。しかし今回観測した領域は銀河中心から離れているうえ、都市部での観測であったから天の川の明るさ は空自体の明るさに比べて無視できるほど暗い。

4.3.4 S/N や等級誤差の計算

irafの phot コマンドで求めた等級誤差と読み出しノイズや sky の明るさを評価して求めた等級誤差はほとんど同じであるから今回のノイズの見積もりはそう外れていなかったことがわかる。

sky 由来のノイズと読み出しノイズを比べると

$$(N_{\rm sky}/N_{\rm read})^2 = 0.068t \tag{49}$$

となる。したがって今回の観測で読み出しノイズの影響を小さくするためには最低でも 150 秒以上の積分時 間が必要となってくる。理想的には 10 分程度積分するのがよさそうだ。

#### 4.3.5 限界等級の計算

実際には 14.8 等の恒星を目で見て判別するのはほとんど不可能で、カタログと見比べながら「ちょっと明 るくなっている気がする」ところを測光すると 14 等程度の測光結果が出る、といったようなものだった。目 で見て 14 等の恒星を見つけるのは困難なので、限界等級をより正確に調べるなら天体検出ソフト等を使って カタログを出力するのがよさそうだが今回はそこまでしていない。

限界等級の計算は精度を出すためかなり細かく計算したが実際には検出限界の恒星のフラックスは

$$f_{\nu} = \frac{x}{\alpha' t} \sqrt{N_{\rm sky}^2 + N_{\rm read}^2} \tag{50}$$

で十分精度よく求まる。特に積分時間を長くとって読み出しノイズが無視できるときには

$$f_{\nu} \propto \frac{x}{\alpha''\sqrt{t}} \tag{51}$$

と近似できる。したがって限界等級は要求する S/N が 2 倍になると 0.75 等明るくなるし、積分時間が 10 倍 長くなると 1.25 等暗くなっていくと予想できる。また、空が一等級暗くなると限界等級は 0.5 等級暗くなる こともわかる。

#### 4.4 今後の課題

より正確な解析や精度のよい観測を行うために、以下のようなことをしておくべきだった。今後機会があれ ば行いたい。

- 様々な露光時間の dark の取得
- コントローラーの修理
- ガイド鏡の活用
- 読み出し時にのる周期的なノイズの除去
- 長積分時間 (~ 10min) の画像の取得
- 天体検出ソフトの活用

# 5 おわりに

ずいぶんと定性的な議論の多いレポートになってしまった。考察の最後にもあげたがやり残したことも多い。とはいえ今回行った観測及び解析で三鷹でも基礎的な天文学の観測について学ぶことは出来た。わかっていたつもりのことは多かったが、実際に解析してみると理解しきれていなかったことがわかり、レポートを仕上げるのにはかなりの時間を要した。解析からは光害地にあるたった 30cm の望遠鏡であっても SN 2014Jのような明るい超新星なら写すことができるという結果が得られたのも驚きである。

望遠鏡の取り扱いについてはアマチュア天文を趣味としていることもあり、コントローラの故障を除いてほ とんど苦労しなかった。

全体を通して楽しく学ぶことの多い実習でした。ありがとうございました。

# 6 参考文献

- 実習の HP(http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/k~motohara/30cn/)
- 家正則 岩室史英 舞原俊憲 水本好彦 吉田道利編 (2007)「シリーズ現代の天文学 15 宇宙の観測 I-光・赤 外天文学」