

小望遠鏡による基礎観測実習

理学部天文学科 丘 栞 072004B

01/27/2008

1 目的

東大天文センターの 30cm 望遠鏡を使い、CCD カメラによる基本的な天体観測を行う。以下の作業を通して、望遠鏡の基本操作法、赤経・赤緯に基づいた天体観測の基本事項、および CCD 観測の基本技術を一通り習得することをめざす。

- コンバージョンファクターを求める。
- 観測から望遠鏡 / カメラシステムのシステム効率を出す。
- 限界等級を算出する。
- 実際に観測を行って、その限界等級が得られるかを調べる。

2 原理

天体観測とは望遠鏡の焦点面に検出器をとりつけ、特定の波長域を透過するフィルターに光を通して、空の特定の方向からの光子を記録し、天体の明るさに関する情報を得ることである。今回の実習では、口径 30cm のカセグレン望遠鏡と CCD を用いた。CCD は光子が入射した際に光電効果で生じる電荷を検出する。

2.1 システム効率

ところで天体からの光子のうち、電荷として実際に捕らえることができるのはどれくらいだろうか。それを表す量がシステム効率 η で、「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」と定義される。

$$\eta = \frac{n_e}{n_p} \quad (1)$$

ここで、 n_e は CCD で生じた電荷の個数で

$$n_e(e^-/s) = \frac{Nf_{conv}}{t} \quad (2)$$

但し、

N : 画像上でのカウント

f_{conv} : コンバージョンファクター

t : 露出時間

である。一方 n_p は天体から望遠鏡に入射した光子数は

$$n_p(\text{個}/s) = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\Delta\lambda F_\lambda}{h\nu} \quad (3)$$

により求めることができる。ここで、

D : 望遠鏡の口径

F_λ : 天体からのフラックス

$\Delta\lambda$: フィルターの波長範囲

2.2 フィルター

今回の実習では青緑透過フィルター S76-VG6、赤外線カットフィルター S76-KG5-1 の二枚のフィルターを重ねて V-band フィルターの代用とした。それぞれのフィルターの透過率と重ねた時の透過率を以下に示す。

2.3 コンバージョンファクター

フィルターを通過した光子が CCD に入射すると電子 - ホール対が作られ (光電効果)、光の強度に対応する数値がカウントとして記録される。電荷の個数 n_e とカウント N は比例関係にあり、比例定数をコンバージョンファクターという。

$$n_e = \frac{Nf_{conv}}{t} \quad (4)$$

ところで、コンバージョンファクターを実際に求めるには次のようにすれば良い。CCD にたまる電荷の個数と画像上のカウントはそれぞれ揺らぎ σ, Σ をもつ。電荷からカウントへの変換は線形変換なので

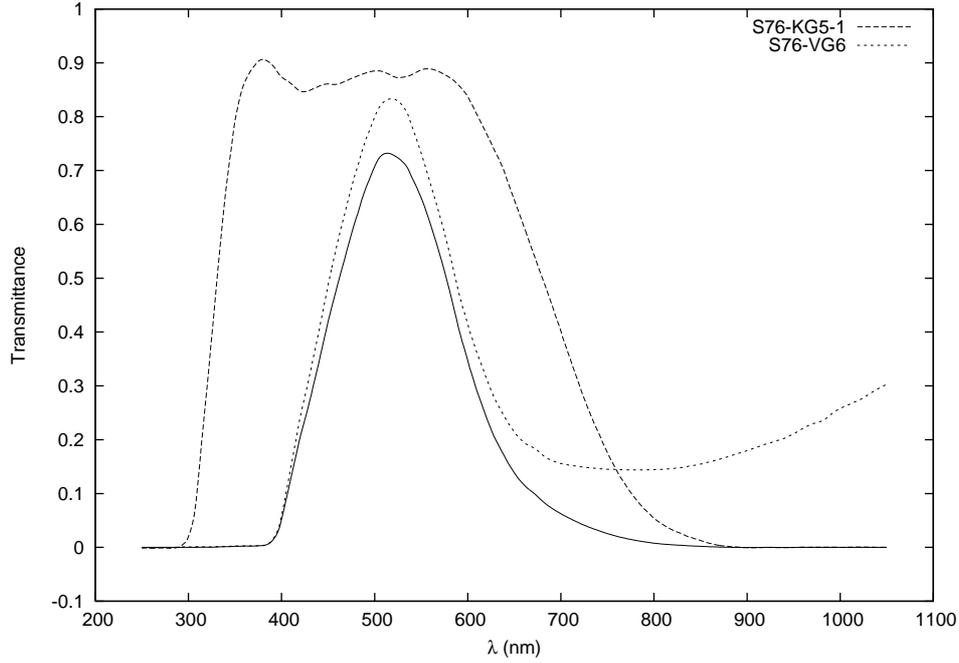


図 1: フィルタの透過率。点線がそれぞれ青緑透過フィルターと赤外線カットフィルター。実線は二枚を重ねた状態。

$$f_{conv} = \frac{n}{N} = \frac{\sigma}{\Sigma} \quad (5)$$

が成り立つ。ここで生じる電荷の個数は一般的にポアソン分布に従う (すなわち $\sigma = \sqrt{n}$) ため、

$$f_{conv} = \frac{N}{\Sigma^2} \quad (6)$$

となるので、露出時間を変えて一様光をいくつか撮り Σ^2 、 N をプロットしたものの y 切片からコンバージョンファクターが決まる。

2.4 フラックス

天体からのフラックスはその星の見かけの等級 m_v から知れる。ある二つの星の等級 m_{v1} 、 m_{v2} とフラックス F_1 、 F_2 の間には

$$m_{v1} - m_{v2} = \frac{5}{2} \log \left(\frac{F_2}{F_1} \right) \quad (7)$$

という関係があるので、(8) 式において片方の星を 0 等級 ($m_{v1} = 0$) とすればよい。0 等級の星のフラックスの値は、V バンドでの値

$$F_\lambda = 3.92 \times 10^{-12} (\text{W}/\text{cm}^2/\mu\text{m}) \quad (8)$$

を用いれば良いだろう。

3 限界等級

限界等級とは、望遠鏡を使って何等級まで見える (検出できる) ようになったのかというものである。

3.1 S/N

ところで、CCD を使った観測において、何をもちて検出できたとするかが問題である。そこで S/N という量を考える。

$$\begin{aligned} S/N &= \frac{n_e t}{N_{noise}} \\ &= \frac{\eta n_p t}{N_{noise}} \end{aligned} \quad (9)$$

望遠鏡で実際に測った電荷の個数には実は様々なノイズが含まれている。 S/N とはこれらのノイズに対し目的の星からの信号がどの程度来ているかを表す量である。これがある一定の値を超えれば検出できたものとする。一般的には $S/N = 5$ を超えれば検出されたとすることが多いらしいのだが、今回の実習では $S/N = 10$ くらいの星を狙った。

さて、ノイズ成分中には入射光子のポアソンノイズの他に、単素子あたり検出された背景放射由来の電荷の個数揺らぎ $\sigma_{sky} (e^-/\text{s}/\text{pix})$ 、検出器の単素子あたりの暗電流の揺らぎ $\sigma_{dark} (e^-/\text{s}/\text{pix})$ 、読み出しノイズ $\sigma_{read} (e^- \text{ r.m.s.}/\text{pix})$ が含まれる。

$$N_{noise} = \sqrt{\sigma^2 + \sigma_{sky}^2 + \sigma_{dark}^2 + \sigma_{read}^2} \quad (10)$$

$$= \sqrt{n_e t + n_{sky} t + n_{dark} t + \sigma_{read}^2} \quad (11)$$

星からの信号は

$$S = n_e t \quad (12)$$

である。

3.2 背景放射

望遠鏡に入ってくる光には星の光以外にも、大気で反射された街の光、太陽系に分布するダストが太陽光を反射して光る成分などがある。星からの光子の場合と同様ポアソン分布に従い露出時間に比例するので、背景光による電荷の個数の揺らぎ σ_{sky} は

$$\sigma_{sky} = \sqrt{n_{sky}t} \quad (13)$$

である。画像中の星のない領域を調べればよい。

3.3 暗電流

検出器では熱があると検出器中に電荷が溜められてしまうため、光の入射がない状態でも電流が流れてしまう。これを暗電流という。暗電流はポアソン分布に従う揺らぎ

$$\sigma_{dark} = \sqrt{n_{dark}t} \quad (14)$$

を伴うため雑音となるが、これを減らすためには検出器を冷却する。暗電流は一般的に他のノイズよりも十分に小さいので、今回の実習では無視した。

3.4 読み出しノイズ

読み出しノイズ σ_{read} とは、CCD の各素子に蓄えられた電荷がそれぞれ電圧に変換されるときに生じるノイズであり、この変換は電荷たちが一箇所に転送されて行われるのでピクセルに依らない。式 (6) について両辺の対数をとると、

$$\log \Sigma = \frac{1}{2} \log N - \frac{1}{2} \log f \quad (15)$$

なので、理想的には傾き $\frac{1}{2}$ の直線になって欲しいのだが、実際にはそうならず読み出しノイズの影響で一定の値に近づく ($N \rightarrow 0$)。このノイズが読み出す際に生じるノイズであるため、露光時間には依らず N が大きければほとんど無視できるが、 N が小さいところでは効いてくるのだ。

$$(f_{conv}\Sigma)^2 = \sigma^2 + \sigma_{sky}^2 + \sigma_{read}^2 \quad (16)$$

より、露出時間が 0 秒 (このとき $N = 0$ と思う) のとき

$$\sigma_{read} = f_{conv}\Sigma \quad (17)$$

を満たす。

3.5 複数素子の場合

素子が複数ある場合はそれぞれのノイズを統計的に足し合わせればよい。評価する画像のピクセルの数を m とすれば、ノイズ成分 N_{noise} は

$$N_{noise} = \sqrt{n_e t + m n_s k y t + m n_{dark} t + m \sigma_{read}^2} \quad (18)$$

と表される。

4 画像の処理

上記の作業をするにあたって、光学系や観測装置や素子に固有の特徴を取り除く必要がある。

4.1 バイアス

露出時間 0 とすると、出力されるカウントも 0 になることが期待される。しかし実際には CCD から画素ごとの電荷を読み出すときに、読み出し雑音が混入しても負の値が発生しないように一定のバイアス電圧をかけているため、読み取り値は 0 にはならない。これをバイアスといい、読み出されたすべてのデータに含まれている。

バイアスを取り除くには、露出時間 0 で読み出した複数のデータの平均を引き算する。

4.2 暗電流

3.3 節でも述べたが、検出器内部の熱エネルギーによって生じた電荷によって、光の入射がない状態でも電流が流れてしまう。しかし CCD を十分に冷却すれば無視できる程度なので、今回の実習では無視している。

補正をする場合は、天体の画像を取得した時と同じ露出時間で検出器のシャッターを閉じたまま光の入らない状態で撮像し、読み出す。

4.3 フラット

一般的に、二次元検出器は 1 画素ごとに感度が異なる。また、光学系の非一様性も観測データに影響する。これら画素ごとの感度ムラや光学系の非一様性をフラットという。フラットを補正するためには望遠鏡に一様光を入射して、そのパターンを調べる。このデータを用いて、天体画像を割り算する。

5 観測と解析

2007年11月から2008年1月にかけて観測と解析を行った。

5.1 観測 (1) 11/16(曇りのち晴れ)

初め曇っていたのでコンバージョンファクターと読み出しノイズを測定することに。懐中電灯を向ける方向を色々変えてみたり、望遠鏡にキムワイプをかぶせてみたり、試行錯誤のすえ一様光らしいものを作った。露出時間を色々変えてみて (0, 1, 2, 4, 8sec) それぞれについて複数枚撮った。

5.2 解析 (1) コンバージョンファクターはどれくらいか

露出時間別にとったデータの平均を IRAF を使って求め、同時に揺らぎを求めた。このデータにはバイアスが含まれているので、0秒露出で得たデータで各画像を引き算した。フラット補正は行ったところであまり変わらないだろうという判断のもとやっていない。さらに露出時間ごとに、1素子あたりのカウントの平均、各画素間の揺らぎを求めた。この際、画像上の明らかにえぐれたような部分や、統計量を見てみて怪しげな部分は切り取ってある。表1はその結果。

表 1: 一様光で撮像

露出時間 (sec)	各単素子のカウント N の平均	カウントの揺らぎ Σ	$\frac{N}{\Sigma^2}$
0		6.418	
1	2201	36.99	1.61
2	4371	55.80	1.40
4	8279	81.43	1.25
8	15968	110.0	1.32

表の右の欄が式 (6) から求めたコンバージョンファクター。1秒露出の時のデータを (怪しげなので) 除いて最小二乗法を用いて

$$f_{conv} = 1.30812 \pm 0.0257 \quad (19)$$

と求めた。予想以上に小さいことが判明。また、式 (17) より読み出しノイズは

$$\sigma_{read} = 8.394 \quad (20)$$

となった。

5.3 観測 (2) 11/16

さてしばらくして晴れてきたので、星を実際にとって見ることに。xplns というのを使って選んでおいた ϵ -Cas(3.4 等級) を苦労して望遠鏡の真ん中に入れたものの、なかなかピントが合わない。しばらくして妥協して、ピンボケした画像を取得。これも露出時間を 0.1sec、0.2sec と変えて、さらにそれぞれの露出時間について画像上の星の位置を少しずらして撮ってみた。宇宙線や検出器の欠損画素の影響を除けるようにしておくことが目的だと思われる …。

5.4 解析 (2) システム効率を求めよう

IRAF を使って、観測 (2) で得た画像からバイアスを切り取り、星が写っている部分を選んで測光。フラットはやはり補正していない。この際アパーチャー半径を、半値幅のだいたい 3 倍の 8pix とした。

ϵ -Cas は 3.4 等級なので、望遠鏡に入射する光子数は式 (3) より

$$n_p = 6.0845 \times 10^7 \text{個/sec} \quad (21)$$

である。この際、フィルターの中心波長として $\lambda = 500\text{nm}$ 、フィルタの波長範囲は図 1 を見てほしい半値幅をとって $\Delta\lambda = 200\text{nm}$ とした。

カウント数と式 (2) を用いて求めた電荷の個数などを表 2 にまとめた。

表 2: ϵ -Cas の測光とシステム効率

露出時間 (sec)	カウント N	電子数 $n_e (\times 10^6 \text{個/sec})$	$\eta = \frac{n_e}{n_p} (\times 10^{-2})$
0.1	129293.7	1.689	2.78
	119216.5	1.559	2.56
	114707.1	1.500	2.47
0.1	130882.0	1.710	2.79
	116852.5	1.527	2.52
	118881.5	1.553	2.57
0.2	241379.1	1.578	2.59
	230289.1	1.505	2.47
	232482.2	1.519	2.50
0.2	250711.8	1.639	2.69
	240390.9	1.571	2.58
	237276.7	1.551	2.55

システム効率 η は表 2 の値を平均して

$$\eta = 2.59 \times 10^{-2} \quad (22)$$

が得られた。予想以上に小さい。

5.5 限界等級の見つもり

ノイズを見積もり、 $S/N = 10$ でどれくらいの等級の星まで見えるかを見積もった。式 (18) で

$$n_{sky} = 3.147 \times 10^3 (\text{e}^-/\text{sec}/\text{pix})$$

$$n_{dark} = 0 (\text{e}^-/\text{sec}/\text{pix})$$

$$\sigma_{read} = 8.394 (\text{e}^- \text{r.m.s.}/\text{sec}/\text{pix})$$

$$m = 50 (\text{pix})$$

とする。 n_{sky} は星の写っていない領域のカウントの平均を使って求め、 σ_{read} は式 (20) の値を用いている。 m はアパーチャー半径を 8pix とした。露出時間と、検出したと判断する S/N の最小値をいろいろ試してみると、限界等級は表 3 のようになった。

表 3: S/N と限界等級

S/N	露出時間 (sec)	限界等級
10	5.0	9.7
10	10.0	10.1
5	10.0	10.8

だいたいこれくらいの等級の星を Aladin sky atlas を使って探した。ちょうど良い等級の星がなかなか見つからず、結局 ϵ -Cas の側にある、表 4 の 3 つの星を選んだ。B1 等級と R1 等級の平均を V 等級としている。カタログは USNO-B1 というもの。

表 4: 星と等級

星の ID 番号	B1 等級	R1 等級	V 等級
1536-0062999	11.51	8.76	10.135
1536-0062946	12.67	12.27	12.47
1536-0063001		11.79	

5.6 観測 (3) 1/4(晴れときどき曇り)

再び苦労して ϵ -Cas を望遠鏡に入れ、露出時間 10 秒で何枚か撮った。位置をずらしてまた数枚。途中曇ったもののなんとか無事に撮れた。

5.7 解析 (3)

画像中の星の位置が同じものどうしで平均し、平均したものどうし (星の位置をずらした二つのデータ) を引き算した。これでバイアスが除かれ暗い星も画像上で確認できるようになった。フラット補正はしていない。

アパーチャー半径を 8pix にとり測光しカウント数と等級誤差を調べた。これらの値より等級の実測値と S/N の実測値が求まる。結果を次にまとめる。

また S/N は次のように求めた。(8) 式をフラックスについて解くと

$$F_{\lambda} = F_0 \cdot 10^{\frac{2}{5}(m_0 - m_v)} \quad (23)$$

となるので

$$\begin{aligned} S/N &= \frac{F_{\lambda}}{\Delta F_{\lambda}} \\ &= \frac{1}{|10^{\pm \frac{2}{5} \Delta m_v} - 1|} \end{aligned} \quad (24)$$

Δm_v : 等級誤差

表 5: 等級と S/N の実測値

	星の ID 番号	カウント N	等級	等級誤差	S/N
(i)	1536-0062999	52281.05	9.2459	0.011	98.204
(ii)	1536-0062946	5295.529	11.793	0.092	11.309
(iii)	1536-0063001	2547.38	12.587	0.18	5.5457

(i) と (ii) はカタログよりも小さな等級が得られた。また、 $S/N > 10$ なので十分に検出できたと言えるだろう。等級が小さくなった理由としては、(i) はかなり赤い星であることが挙げられるだろう。表 4 を見ると R1 等級が B1 等級より 3 等級くらい小さく、8.76 である。フィルターの赤い側からの漏れが影響したのだろう。(ii) に関しては使用したカタログにおいて (ii) の星が ϵ -Cas のスパイダーと重なっていたため、カタログの等級が正確ではなかったのではないか。

(iii) の等級はカタログの等級よりも大きくなった。 S/N が 5 にけっこう近いので微妙なところだが、一応検出できたと考えても良さそうだ。等級が大きくなったのは、(i) と (ii) が明るくとれていたことから天候の影響ではないように思う。情報がなかった B1 等級が実は大きかったのかもしれない。あるいは、ちょうど CCD のその部分が感度が良くなかったのだろうか。星の位置をさらにずらして撮ってみれば理由が分かったかもしれない。

6 感想

天体観測らしい観測は初めてだったので慣れないことが多い上に予想以上に寒く、天文学者は体力勝負だなあと実感しました。また、星座が全然分からないとそれなりに不便だということも分かり、これから少しずつ覚えていきたいと思いました。

寒い中どうもありがとうございました。