

基礎天文学観測レポート

小望遠鏡による基礎観測実習

天文学科 3年 05092003

大北 農平

平成 22 年 1 月 26 日

概要

国立天文台三鷹キャンパスの 30cm 望遠鏡を使って、V バンドでの測光観測を行う。また、望遠鏡のシステム効率と限界等級を算出し、観測によりそれを検証する。

1 はじめに

まず初めに、この実習に必要な知識を整理する。

1.1 一次処理と測光

星の、画像上でのカウント N を求めることは、この実習で最も基本的なことである。しかし、CCD カメラでの実際の星の撮像 (light flame) は、さまざまなノイズ成分や素子間の非規格化によって、真の像を反映しているとは言えない。それらの影響を逐一除くことが必要であり、これを 一次処理 と言う。一連の作業は天文解析ソフト IRAF を用いて行う。

- dark 引き

light flame には、時間に比例するノイズ成分「暗電流」と、すべての撮像に対して同程度のカウントを与えるノイズ成分「バイアス」が上乘せされている。その影響を除くために、light flame と同じ露光時間で光を当てない flame(dark flame) を撮り、これで引き算をすれば、上乘せされた分を差し引くことができる。

- flat フィールドニング

すべての CCD 素子は同じ入射光に対して同じカウントを返すとは限らない。素子には多かれ少なかれ個体差がある。その影響を除くために、一様光を入射した flame(flat flame) を撮り、これで割り算をすれば、個体差をなくすることができる。

理想的には一様光として薄明の空などを利用するとよいが、ドーム内でもスクリーンや壁面を一様に照らすことで代用できる。

- sky 引き

星の光のほかに前景光がまぎれこむことがある。原因としては、夜空からの照り返しや望遠鏡周囲からの迷光などが考えられる。この影響を除くために、星の position を少しずらした light frame を複数枚撮っておき、これらを相互に引き算しあうとよい。

以上の一次処理を経て得られた画像を 測光 する。IRAF の phot というタスクを用いて、カウント・等級誤差など必要な量を得る。

1.2 システム効率

CCD は、天体の放射に由来する光子を読み取り可能な光子に変換する電気素子である。その変換の割合は望遠鏡の光学系や大気による減光、CCD の量子効率などに依存するが、それらの効果をまとめて システム効率 といい、 η で表す。

あらかじめ等級 m_V のわかっている恒星を観測し、それが CCD 上でどれだけの電荷に変換されているかを調べることで算出できる。

- s_i : 等級 m_V の星により望遠鏡に入射する光子の数は、

$$s_i = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\lambda \Delta\lambda F_\lambda}{hc} [e^-/s] \quad (1)$$

$$F_\lambda = 3.69 \times 10^{-17-0.4m_V} [\text{J/s/cm}^2/\text{nm}].$$

ここで望遠鏡の口径 D , フィルターの中心波長 λ , フィルターの波長幅 $\Delta\lambda$ である。定数 3.69×10^{-16} は、V バンドでのベガのフラックスに由来する。

- n_i : CCD 上で生じた光子の数は、

$$n_i = \frac{N f_{\text{conv}}}{\Delta t} [e^-/s]. \quad (2)$$

ここで画像上でのカウント N , CCD カメラのコンバージョンファクター f_{conv} , 積分時間 Δt である。

以上の二つの比がシステム効率で、 $\eta = n_i/s_i$ と表される。

1.3 S/N 比と限界等級

観測された信号が有意であることを示すためには、 S/N 比という概念が重要である。これは、信号 (signal) として検出された光子の数と、ノイズ (noise) として検出された光子の比で、

$$S/N = \frac{n_i \Delta t}{N_{\text{noise}}} = \frac{\eta s_i \Delta t}{N_{\text{noise}}} \quad (3)$$

$$N_{\text{noise}} = \sqrt{n_i \Delta t + m n_{\text{dark}} \Delta t + m n_{\text{sky}} \Delta t + m N_{\text{read}}^2}$$

と表される。ここで信号を検出する素子の数 m 、暗電流と前景光によって単位時間に CCD 単素子に生じる光子数 n_{dark} と n_{sky} 、読み出しノイズ N_{read} である。

一般に S/N 比が 10 で十分有意な信号、5 で有意とみてよい信号、3 より小さければその信号は有意でないとするようである。

また **限界等級** とは、観測に有意な信号を与える最も暗い等級のことである。観測条件によって S/N 比と積分時間 Δt の値を与えれば式 (3) より $n_i = \eta s_i$ が求まり、 η が求まっていれば式 (1) より等級に換算できる。

2 観測

観測は国立天文台三鷹キャンパスの 30cm 望遠鏡を用いる。CCD カメラに付随するパラメータは、コンバージョンファクター $f_{\text{conv}} = 1.3$ 、読み出しノイズ $N_{\text{read}} = 32.3[e^-]$ である。

フィルターは市販の [青緑透過フィルター S76-VG6] と [赤外線カットフィルタ S76-KG5-1](駿河精機) を重ねて、おおよそ V バンドのフィルターとする。フィルター幅 $\Delta\lambda = 170 \text{ nm}$ 、中心波長 $\lambda = 520 \text{ nm}$ である。

2.1 第一回:12月4日:カシオペア座

システム効率などの算出のため、あらかじめ V 等級の知られているいくつかの星の観測を行う。肉眼で確認できる程度に明るく、短い露出時間でも CCD 素子の過飽和が起こらない程度に暗い星が良い。今回はカシオペア座の中からいくつかの星を選び観測した。その情報を表 1 に示す。

表 1: 観測したカシオペア座の星

id	name	m_V	Δt	赤経	赤緯
1	Cas ϵ	3.342	0.1	1h54.4m	+63°40'
2	Cas η	3.450	0.1	0h49.1m	+57°49'
3	no name	5.075	1.0	0h36.1m	+54°10'
4	Cas ζ	3.666	0.1	0h37.0m	+53°54'

当日の天気は晴れ時々曇りで、雲の隙間をぬうような観測になった。

それぞれの星に対して、sky 引きをするため何度か position を変えて撮影し、さらにそれぞれの撮影に対して 4 ないし 8 フレームのマルチフレーム撮像 (連続撮像) を行った。

2.2 第二回:12月23日:ぎょしゃ座

算出した限界等級の検証を行うため、限界等級に近い等級の星の観測を行う。肉眼では到底見えないため、明るい星の近傍にあることも必要条件となる。今回はぎょしゃ座 β 星 (Aur β) の近くにある 10.6 等級の星を観測した。その情報を表 2 に示す。また、同じ画面に映りこんだ他のさらに暗い星も解析の対象となる。

表 2: ぎょしゃ座 β とその近傍の観測対象星

name	V mag	Δt	赤経	赤緯
Aur β	1.9	10	5h59.5m	+44°57'
BD+44 1328B	10.6	10	5h59.4m	+44°59'

当日の天気はよく晴れており、観測に適していた。

position をずらしながら全 6frame の撮像を行った。

また、測光の対象範囲であるアパーチャー (aperture) 半径 r_a を、 $r_a=6, 8, 10, 12$ pix と変更して一つの星につき 4 度ずつ測光を行った。

3 結果

3.1 カシオペア座の星

3.1.1 システム効率の計算

第一回の観測では4つの星に対して総計44flameの撮像ができた。このすべてについて独立な η を求めることができる。あいにくサンプル数が膨大なので、表3にはひとつのpositionごとの平均システム効率 $\bar{\eta}$ と、そこでの分散 $\Delta\eta$ を合わせて示している。

表 3: position ごとの平均システム効率 $\bar{\eta}$ と標本分散 $\Delta\eta$

id	flames	$\bar{\eta}$	$\Delta\eta$
1	4	0.0458	0.0008
	8	0.0356	0.0014
	8	0.0406	0.0015
2	4	0.0363	0.0010
	4	0.0347	0.0010
3	4	0.0326	0.0003
	4	0.0339	0.0013
4	4	0.0354	0.0014
	4	0.0362	0.0006

同じ星であっても、一方の不定性の範囲に他方の $\bar{\eta}$ が入っていないことがある。つまりシステム効率は、数分程度のタイムスケールに対して有意に変わりうる量であることが示唆される。もっとも、この観測日は雲が出たり消えたりする比較的悪い気候条件だったので、良い気候のもとでは必ずしもそうとは限らない。

このようなことからシステム効率は、一定の広がりを見込まなければならないが、 $\eta \sim 0.035$ と見積もることにする。

3.1.2 等級原点と限界等級の計算

等級原点 Z_{mag} は、このカメラシステムにおいて1秒間露出で1カウントの信号を生じさせる等級のことで、 $m - Z_{\text{mag}} = -2.5(\log(N/\Delta t) - \log(1/1))$ の関係式に、 $m = 3.45$, $N = 1.3 \times 10^5$, $\Delta t = 0.1$ を代入すれば、

$$Z_{\text{mag}} = 3.45 + 2.5 \log\left(\frac{1.3 \times 10^5}{0.1}\right) \sim 18.7 \quad (4)$$

となる。

$\eta = 0.035$ のもとで、式 (3) より 限界等級 m_{lim} を計算する。

このレポートでは常に $S/N=10$, $\Delta t=10[\text{sec}]$ のときの限界等級を考える。他の定数については、アパーチャー半径 $r_a = 10$ として $m = \pi r_a^2 = 314$, 画像から読み取って $n_{\text{sky}} = 100$, 過去のデータから $N_{\text{read}} = 32.3$ とする。また $n_{\text{dark}} = 0$ とする。

このとき限界等級は、 $m_{\text{lim}} = 11.78$ となる。

3.2 ぎょしゃ座 β 周りの星

3.2.1 BD+44 1328B でのシステム効率の計算

第二回の観測で、BD+44 1328B ($m_V=10.6$) は全 6frame の撮像のうち 3frame に映り込んでいることが確認できた。V 等級がわかっているので、そのカウント N からシステム効率 η を求めることができる。その結果を表 4 に示す。

表 4: BD+44 1328B のシステム効率 η (アパーチャー半径 $r_a = 6, 8, 10, 12$)

$r_a=6$		$r_a=8$		$r_a=10$		$r_a=12$	
N	η	N	η	N	η	N	η
11090	0.0216	11818	0.0230	13152	0.0256	13763	0.0268
10559	0.0206	11252	0.0219	10700	0.0208	10727	0.0209
-	-	11431	0.0223	10532	0.0205	-	-

結果を総合すると、この時のシステム効率はおおよそ $\eta \sim 0.023$ と見積もることができる。値の不定性を見込むとしても、これは第一回の観測のときよりはっきりと低い。とりあえず、第二回の観測の結果にはこの値を使うことにする。

3.2.2 等級と S/N 比の計算

ぎょしゃ座 β の周囲には、BD+44 1328B を含めて 6 個の星とおぼしき光点 (id=1-6) が確認された。

$\eta = 0.023$ とカウント N より V 等級 m_V を求められる。また S/N 比は、

$$\begin{aligned} \text{signal} &= s_i = A \times 10^{-0.4m} \\ \text{noise} &= \Delta s_i = A \times 10^{-0.4(m-\Delta m)} - A \times 10^{-0.4(m+\Delta m)} \end{aligned} \quad (5)$$

とすれば、

$$S/N = \frac{A \times 10^{-0.4m}}{A \times 10^{-0.4(m-\Delta m)} - A \times 10^{-0.4(m+\Delta m)}} = (10^{0.4\Delta m} - 10^{-0.4\Delta m})^{-1} \quad (6)$$

の計算により, 測光で得られる等級誤差 Δm のみから求めることができる. これらの計算結果を表 (5) に示す.

表 5: ぎょしゃ座 β の周囲の星の m_V と S/N 比 (id=1 は BD+44 1328B)

id	$r_a=6$		$r_a=8$		$r_a=10$		$r_a=12$	
	m_V	S/N	m_V	S/N	m_V	S/N	m_V	S/N
1	10.67	20.10	10.60	15.96	10.48	12.06	10.43	12.33
	10.72	21.71	10.65	18.09	10.71	11.31	10.71	11.55
	-	-	10.64	13.92	10.72	10.24	-	-
2	12.55	4.166	12.44	3.258	12.00	3.360	11.96	2.936
3	12.49	4.231	12.34	3.536	12.77	1.716	12.09	2.685
	12.87	2.813	12.86	2.052	-	-	12.98	1.156
4	11.37	10.24	11.31	8.220	11.27	6.025	11.27	5.421
	11.34	10.44	11.38	7.534	-	-	11.50	4.072
5	12.55	4.166	11.92	4.753	11.88	3.360	12.01	2.607
	12.19	5.367	12.20	3.867	12.22	2.798	12.39	1.953
	12.35	4.404	12.21	3.632	12.40	1.953	12.36	1.667
6	12.78	2.440	13.12	1.261	14.35	0.244	-	-

4 結果の解析

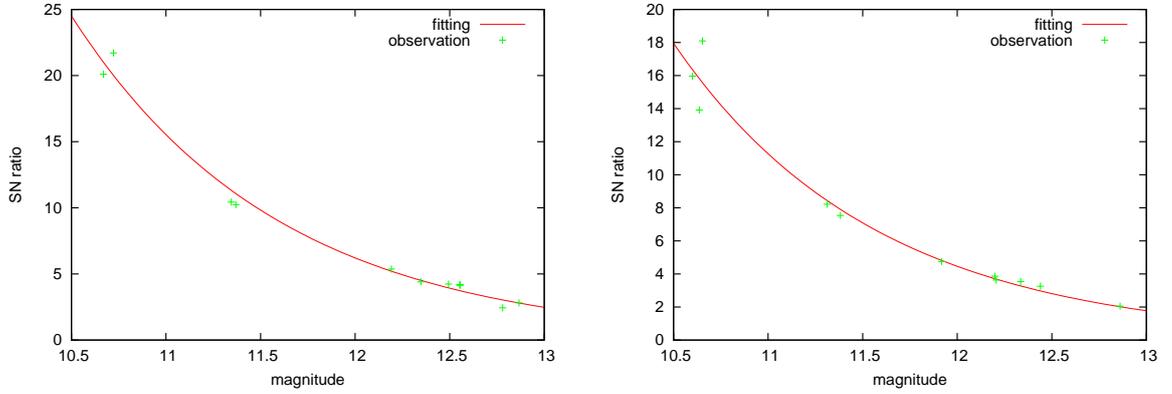
4.1 観測結果から限界等級を見積もる

さまざまな等級の星の S/N 比が得られたので, これより観測による限界等級 m_{lim} を見積もる. これはアパーチャー半径 r_a に対して個別に見積もることができるものである.

gnuplot の fit 機能で表 5 の値に理論曲線を fit する. $S/N = S/N(m_V)$ の理論曲線は式 (3) を参照すれば,

$$S/N(m_V) = \frac{A \times 10^{-0.4m_V}}{\sqrt{A \times 10^{-0.4m_V} + B}} \quad (7)$$

の形になる. A と B をパラメーターとして $r_a = 6, 8$ の表の値に fitting すると図 1 のようになる.

図 1: 観測された S/N 比と, その fitting 関数 (左: $r_a = 6$, 右: $r_a = 8$)

これより, $S/N = 10$ となる等級 m_V を読み取ることができて, これがすなわち限界等級 m_{lim} である. $r_a = 10, 12$ でも同様に読み取れる. その結果をまとめると表 6 である.

表 6: アパーチャー半径による限界等級の変化

r_a [pix]	6	8	10	12
m_{lim} [mag]	11.5	11.1	10.9	10.8

この結果は, アパーチャー半径が大きいほど多くのノイズ成分を感知し, 真の信号が埋もれてしまうことを反映している.

4.2 読み取り誤差 N_{read} の推定

一方で, 限界等級をアパーチャー半径 r_a の関数と見て, $m_{\text{lim}} = m_{\text{lim}}(r_a)$ の理論曲線は図 2 左のようになる. これは観測により見積もられた値 (表 6) と比べてはつきり大きい.

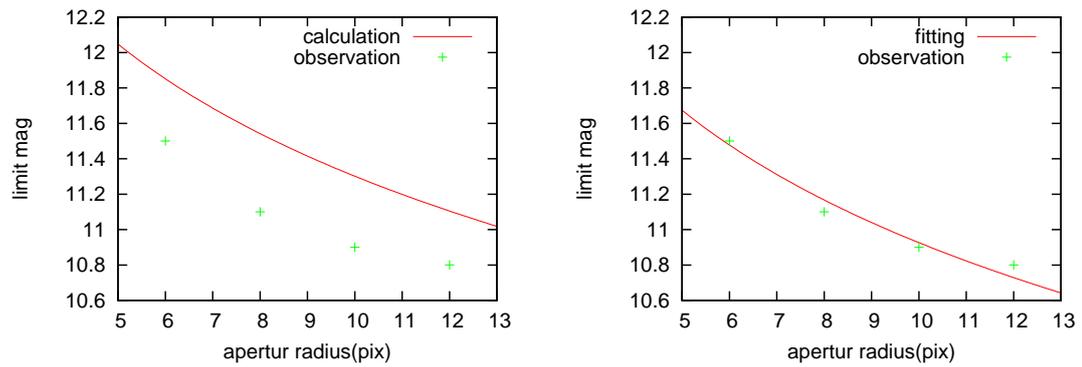
この差異を修復するために, これまでの計算では既知と見なしていた定数, 前景光 n_{sky} と読み取り誤差 N_{read} の 2 つのパラメーターを変更することを考える (変更できるパラメーターはこの 2 つしかない). しかし関数の型から両方のパラメーターを独立に決定することはできないので, 観測より実証される $n_{\text{sky}} = 100$ を固定して N_{read} を変更することにする.

再び gnuplot の fit 機能を用いると, 最適値として

$$N_{\text{read}} = 55.63 \pm 2.04 \quad (8)$$

が得られ, これを用いた理論曲線は図 2 右 である.

図 2: 限界等級 $m_{\text{lim}}(r_a)$ の観測値と理論曲線 (左: $N_{\text{read}} = 32.3$, 右: $N_{\text{read}} = 55.6$)

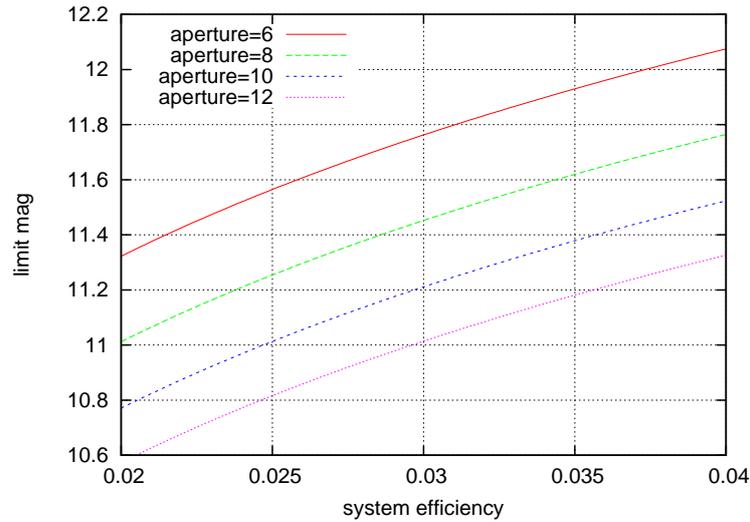


5 結論と考察

すでに述べたように、読み取り誤差として初め $N_{\text{read}} = 32.3$ という値を利用したが、この測光観測では $N_{\text{read}} = 55.6[e^-]$ に改めると理論と観測がよく一致するようである。

このとき、システム効率 η の関数としての限界等級 $m_{\text{lim}} = m_{\text{lim}}(\eta)$ をグラフにすると、図 3 のようになる。

図 3: さまざまな r_a での限界等級 $m_{\text{lim}}(\eta)$



あいにく今回の観測では、システム効率に対してかなり不可解な点が残った。特に第二回目の観測は第一回目の観測よりも天候的には好条件だったと思うが、予想に反してシステム効率ははっきりと悪くなっていた。

もしかしたら、急いで観測を行ったので、CCD カメラの冷却が十分ではなかったことが原因に挙がるかもしれない。

これに関して一つだけ気付いたことを挙げるならば、観測した 5 つの星 (カシオペア座の 4 つの星と BD+44 1328B) の等級とシステム効率の間にかなり強い相関があるということだ。もしシステム効率が星の等級に依存するとしたら、第二回の観測でシステム効率が小さくなったのももっともだ。

表 7: 観測した星の等級とシステム効率のみかけ上の相関

等級	3.342	3.450	3.666	5.075	10.6
システム効率	0.0407	0.0355	0.0358	0.0332	0.023
全 5 項の相関係数	-0.9548				
後ろ 4 項の相関係数	-0.9987				

ただ、4 ないし 5 点の相関ではただの偶然ということもあるだろうし、観測機器についての裏付け知識も根本的に足りないので、これが意味のある相関だとは断言できない。

6 感想

口径 30cm という大きな望遠鏡を使って観測を行うのは初めてで、大変貴重な経験になりました。初めのガイダンスの時には、今回の実習で扱う題材がとてもシンプルで取り組みやすいもののように思われたのですが、IRAF などを用いた解析の過程を体験して、その苦労を身にしみて実感することができました。観測天文学に携わっている方々が日々どのようなことに尽力しているのか、その末端が垣間見えたような気がします。

内容に関しては、 S/N 比や限界等級といった“なんとなくわかっているような概念”を、この実習でいろいろいじってみることで改めて深く理解できました。システム効率や測光の際のアーチャー半径の設定がそれらの量にどのように依存するかも、実際にグラフにしてみてもよく実感できました。一部不可解な点が残りますが、得るものは大きかったです。

最後に、先生、TA の先輩、共同実習者の皆さんの懇意なご指導と寛大なご協力がなければ、無事の実習を終えることもこのレポートを書きあげることにも到底できなかったと思います。大変お世話になりました。ありがとうございました。