

基礎天文学観測 I, II
小望遠鏡による基礎観測実習
担当：本原先生

天文学科 3 年
072011B 守屋 堯
(s072011@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp)

平成 20 年 1 月 5 日

1 目的

天文センター横の望遠鏡を用いて天体の観測を行い、望遠鏡全体のシステム効率を出す。それを元に限界等級を求める。その後、求めた限界等級が得られるか観測によって確かめる。

2 使用する望遠鏡、CCD

使用する望遠鏡は天文センター横にあるもので、口径 30cm のカセグレン望遠鏡である。CCD の仕様は次の表の通りである。

フォーマット	512×512
アレイサイズ	12.3mm×12.3mm
ピクセルサイズ	24 μ m×24 μ 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	2
ピクセルスケール	0.99"/pix
視野	8.45'×8.45'

表 1: CCD の仕様

また、使用するフィルターは次のものである。

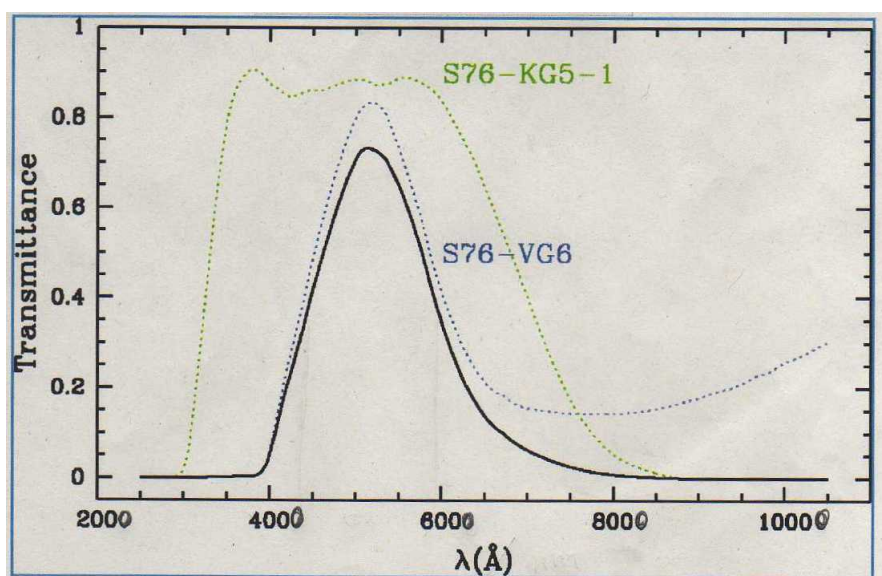


図 1: 使用したフィルター

3 CCDで得られる画像の処理

まず始めに、CCDで得られた生の画像にすべき処理を簡単にまとめる。観測で得られるデータにはすべてこの処理を施す必要がある。

3.1 バイアス補正

CCDはデータを読み出す際、各ピクセルに溜まっている電子を別のピクセルに順々に動かすという作業を行っている。この時、この移動自体に起因して電子が発生してしまう。このため、本来の観測データにこの移動によるデータが上乘せされてしまう。このデータ読み出しに起因する誤差をバイアスと言い、このバイアスを補正する必要がある。

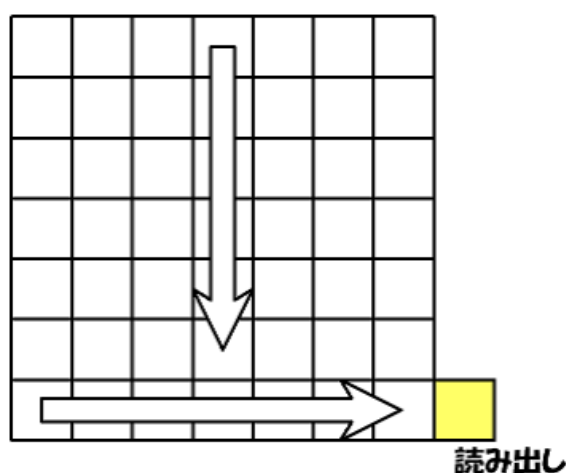


図 2: CCD のデータの読み出し

バイアスは CCD のデータ読み出しに起因するものなので、バイアスを補正するためには何も観測をせずに (露光時間 0 秒で) データ読み出しのみを行った際のデータを元のデータから引いてやれば良い。

3.2 ダーク補正

CCD を光が当たらないような状態で放置しておく、時間とともに電子の統計的な振る舞いに起因したカウントが現れる。これを暗電流 (dark current) と言い、この暗電流による誤差を校正する必要がある。これがダーク補正である。

ダーク補正のためには、シャッターを閉じて光が当たらない状態で、天体を観測する際と同じだけの露光時間でどのくらいのカウントが出るかを調べる。そしてその分を観測データから引いてやればよい。

3.3 フラットフィールドニング

CCD は光がくると、飽和状態に至るまではその光の量 (photon 数) に比例したカウント値を返してくる。しかし、各ピクセルによってその比例定数は異なり、各ピクセルごとにこの比例定数が異なってしまうことに起因するむらを校正する必要がある。

具体的には、観測をする波長域の光(つまり、同じエネルギーをもつ光)を CCD 全体に観測時間と同じ程度あてる。これによって、各ピクセルが、ある光の量に対してどのくらいのカウント数を出すのかがわかる。つまり、先の比例定数に相当する値がこれでわかる。従って、このデータで観測データを割れば各ピクセルごとの特性は解消される。ただし、フラットを行うためにとる CCD 全体を照射した際のデータは通常、観測データよりもカウント数が非常に大きく、そのまま割ると不便である。このため、フラットのためのデータを全カウント数のメディアンで割り、全体の平均がだいたい1となるように調整する。

3.4 背景光の除去

背景光が存在するため、観測のデータが存在しない場所でも CCD にはカウントが存在している。この部分をゼロにするために、CCD 上で天体からの情報が受かっていない部分のカウント数を読み、その分を全体のデータから引く。今回の実習では、CCD 自体による誤差が大きいと考えられるため、観測する場所を少しずらした画像を差し引くことで CCD 自体による影響、背景光を消した。

4 システム効率の算出

システム効率とは、望遠鏡に入射した天体からの光子のうち、CCD 上で電荷となって読み出されたものの割合のことである。具体的には等級の分かっている星を観測し、その CCD 上でのカウント数を元にシステム効率を算出する。天体から入射した光子数を s_i [e⁻/sec], CCD で生じた電荷の個数を n_i [e⁻/sec] とすると、システム効率は

$$\eta = \frac{n_i}{s_i}$$

となる。

今回、システム効率を出すのに用いた天体は RA=00h56.8m, Dec=60°22'(ep=2000) にある $m_v = 5.6$ の恒星である。位置を少しずらしながら 3 秒積分の観測を 3ヶ所、1.5 秒積分の観測を 2ヶ所で行い、それぞれ 1 つの場所につき 2 回観測を行った。同じ積分時間のデータ同士を引き、そのデータを IRAF で処理することにより、次のデータを得た。

No.	積分時間 [sec]	アパーチャー半径 [pix]	スカイを引いたアパーチャー内のカウント数
1	3	32.96	72,6169
2	3	20.26	72,6533
3	3	30.34	70,3166
4	3	30.00	68,7586
5	1.5	30.56	33,5363
6	1.5	33.48	34,5609

表 2: 観測結果

以上のデータから、システム効率を算出する。まず、天体から望遠鏡に入射した光子数 s_i [e⁻/sec] は次のページの図より、次のようになることが分かる

$$s_i = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\Delta \lambda F \lambda}{h \nu}$$

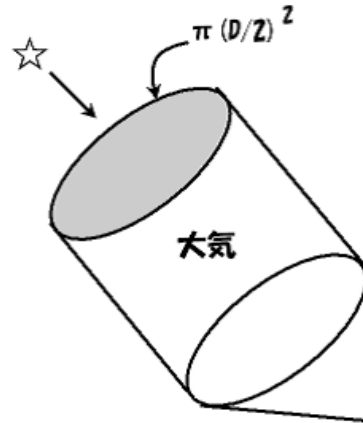


図 3: 入射する光子

具体的に数値を代入していく。フィルターの図より、 $\Delta\lambda = 160$ [nm] となる。 $D=30$ [cm], $\lambda \simeq 500$ [nm], $F_\lambda = 3.92 \times 10^{-12-m_v/2.5}$ [W/cm²/μm] を用いると次のようになる。

$$\begin{aligned} s_i &= \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\Delta\lambda F_\lambda}{h\nu} \\ &= \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\lambda \Delta\lambda F_\lambda}{ch} \\ &= 6.45 \times 10^6 \text{ [e}^-/\text{sec]} \end{aligned}$$

よって、

$$s_i = 6.45 \times 10^6 \text{ [e}^-/\text{sec]}$$

となる。

次に、CCD で生じた電荷の個数 n_i [e⁻/sec] を求める。これは次の式で表される量である。

$$n_i = \frac{N f_{\text{conv}}}{t}$$

ただし、 N は CCD でのカウント数、 f_{conv} はコンバージョンファクター、 t は積分時間である。1 秒あたりのカウント数は観測結果の平均から $N/t = 233633.3$ [/sec] となる。コンバージョンファクターは $f_{\text{conv}} = 1.316$ とする。以上より、

$$n_i = 307,461 \text{ [e}^-/\text{sec]}$$

となる。

以上の結果を合わせれば、

$$\eta = \frac{n_i}{s_i} = \frac{307,461}{6.45 \times 10^6} = 0.048$$

となる。

5 限界等級

システム効率を得られたので、限界等級を出すことが出来るようになった。この節では、はじめに限界等級の理論値を求め、その後、観測値を求める。考察は次の節で行う。

5.1 理論値

先のシステム効率を出すために行った観測のデータを用いて、何の天体も存在しないところのカウント数を読むことで、背景光は $n_{\text{sky}} = 211$ [e⁻/sec/pix] となることがわかる。バイアスは $N_{\text{read}} = 7$ [e⁻] とする。ダークは非常に小さいので無視する。(実際にダークを計算すると $n_{\text{dark}} = 1.32$ [e⁻/sec/pix] となり、無視できることが分かる。)

S/N は次の式から分かる。

$$\begin{aligned} S/N &= \frac{n_i t}{\sqrt{n_i t + m n_{\text{sky}} t + m N_{\text{read}}^2}} \\ &= \frac{\eta s_i t}{\sqrt{\eta s_i t + m n_{\text{sky}} t + m N_{\text{read}}^2}} \end{aligned}$$

ただし、 m は天体の受かるピクセル数である。

この式を用いて、S/N=10, $t = 10$ [sec], R (アパーチャー半径) = 8 [pix] の条件下で限界等級を計算すると、

$$m_v = 12.6$$

となる。

5.2 観測値

観測はすべて 10 秒積分で行い、結果は以下の表のようになった。使うデータはシステム効率を出した時と同様に、近くの 2ヶ所の画像を取り、その 2つを差し引いたものである。S/N はフォトメトリーをした際の等級誤差をフラックスの誤差に直し、それを元に算出した。また、 m_v は The Aladin Sky Atlas(<http://aladin.u-strasbg.fr/aladin.gml>) で、R1 バンドと B1 バンドの中間の値とした。等級についてはシステム効率を出す際に観測した $m_v = 5.6$ のカウント数を元にして、カウント数からも求めた。

No.	m_v (Aladin)	R[pix]	等級誤差	S/N	カウント数 (除スカイ)	m_v (カウント数から)
1	11.75	6.12	0.093	11.8	7,115	11.9
2	12.39	6.19	0.144	7.47	5,247	12.2

表 3: 限界等級の観測結果

なお、それぞれの星の座標は以下の通りである。

No.	RA(ep=2000)	Dec(ep=2000)
1	00h75m17s	60°44'44"
2	00h56m22s	60°44'46"

表 4: 観測した星の座標

6 考察

$m_v = 12.3$, $R = 6$ [pix] の 10 秒積分に対する S/N の理論値は $S/N = 12.9$ となる。No.2 の星の等級が大体このくらいだと考えると、S/N の実測値とのずれが大きい。これは、データ処理をする際に 2 つのデータを引いたことに起因すると考えられる。2 つのデータを引くことにより、S/N の N の部分の背景光、読み出し雑音の寄与が倍になり、全体として N が

$$N = \sqrt{n_i t + 2mn_{\text{sky}}t + 2mN_{\text{noise}}^2}$$

となることによると考えられる。多く見積もって N が約 $\sqrt{2}$ 倍になると考えると No.2 の星の S/N の観測値から考えられるの実際の値は

$$m_v = 10.7$$

くらいであると考えられ、理論値に多少近づく。他にも、空の状態が n_{sky} のデータを取った時と S/N のデータを取った時で異なった可能性や、 m_v の正確な値が分かっていないことが観測値が理論値よりも小さくなった原因として挙げられる。観測に用いた CCD 上に見えたへんなパターンにより雑音が増えているため、S/N が小さくなったという可能性も否めない。しかし、総じて見れば大体理論値と観測値が S/N, m_v について一致していると言えると考えられる。

14 等級の星の観測の可能性について

はじめ、限界等級の計算を間違えて 14 等級の星が 10 秒積分で $R=8$ [pix] の下で $S/N=10$ 出るとしてしまった。実際に正しい計算をすると、同じ条件下で 14 等級の星は $S/N=1.9$ となる。S/N が大雑把に \sqrt{t} に比例すると考えれば、100 秒積分すると S/N は少なくとも 10 以上になり、検出が可能になると思われる。来年の実習生に是非やってもらいたい。

7 終わりに

実際に望遠鏡をほとんど手動で動かして観測するのがとても楽しくてよかったです。限界等級やその周辺の知識もかなり得られたように感じます。ありがとうございました。