

小望遠鏡による基礎観測実習

理学部天文学科 05-162005 榎引洗佑
共同観測者 遠藤いずみ、聖川昂太郎、森万由子

観測実施日：2016/11/25,12/16

提出日 2017/01/31

1 実習の目的

21cm カセグレン望遠鏡と CCD カメラによる基本的な天体観測実習を通して、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、CCD 観測の基本技術の一通りを習得する。

特に今回の実習では、

- 望遠鏡と赤道儀の立ち上げ
- CCD のピクセルスケールのチェックやシステム効率の測定
- 実際の観測からピクセルスケールや S/N を評価
- 限界等級の算出

を主に行った。

2 観測

2.1 観測装置

2.1.1 望遠鏡

今回の実習では図 1 の 21cm 反射望遠鏡望遠鏡「タカハシ μ -210」を用いた。主なスペックは以下の表 1 に示す。

表 1 タカハシ μ -210 の主なスペック (本原先生のホームページより)

口径	210mm
焦点距離	2415mm(F11.5)
焦点距離 (reducer 使用時)	1873mm(F8.9)
プレートスケール	85.3arcsec/mm
プレートスケール (reducer 使用時)	110.8arcsec/mm



図 1 21cm カセグレン望遠鏡 (本原先生ホームページより)

2.1.2 CCD カメラ

Finger Lake Instrumentation 社製 Proline PL4021 を用いた。中には Kodak KAI-4021 というインターレース CCD が入っている。

CCD の仕様は以下の表 2 で示す。

表 2 CCD の仕様 (本原先生のホームページより)

フォーマット	2048 × 2048
アレイサイズ	15.2mm × 15.22mm
ピクセルサイズ	7.4 μm × 7.4 μm
Full Well	40,000e ⁻ /pix
量子効率	55% (@500nm)
	40% (@600nm)
CTE	>0.99999

2.2 観測天体

今回の観測では 11/25 に Mirphak(α Per) を、12/16 に γ Cet を観測した。しかし、11/25 の観測についてはフィルターがずれていた可能性があること、バイアスデータを観測の始めにまとめて取ってしまったことにより CCD の動作が安定せず値が大きくなっていることを考慮し、 γ Cet のデータを用いて解析をしていく。

γ Cet については以下の表 3 に情報をまとめる。

表 3 γ Cet の情報 (Simbad より)

種類	二重星
赤経 (J2000)	2h43m18.03910s
赤緯 (J2000)	3°14′08.9390″
等級	B 3.56
	V 3.47
	R 3.36
	I 3.32
スペクトルタイプ	A2Vn+F4V

2.3 観測

12/16 の観測では風も強く星のちらつきもあったため、ピントを合わせる際に FWHM(Moffat) が 6-7 程度になってしまった。

BVRI バンドで γ Cet の 1 秒積分と 20 秒積分を行った。またディザリングを行ったうえでさらに 1 秒積分と 20 秒積分のデータを取った。観測の合間にバイスのデータを 5 枚ずつ 4 回に分けて合計 20 枚取った。

3 結果 (V バンド)

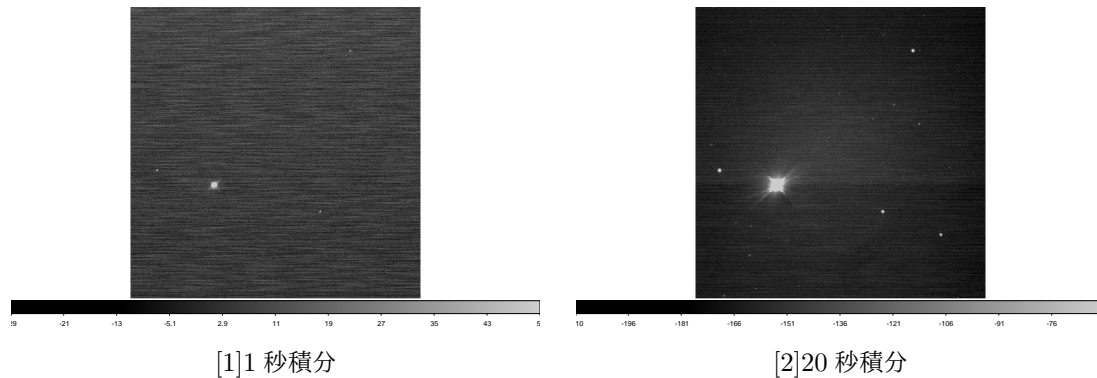


図 2 観測データ (バイアス処理後)

3.1 1 秒積分のデータ

図 2[1] のような画像がとれた。図 2 は取れたデータの中で MOFFAT の値が小さく、ピーク値においてサチュレーションを起こしていないようなものを選んだ。その値は MOFFAT = 6.33, PEAK = 39,644 であった。CCD の FULL WELL が $40,000e^-/\text{pix}$ なので、サチュレーションを起こしていないと考えられる。

3.2 20 秒積分のデータ

図 2[2] のような画像がとれた。光源の位置の確認や γCet がサチュレーションしていることの確認はできるのだが、全体的にカウント値が 1 秒積分のデータに比べて小さくなっていった。またバックグラウンドの値が負になってしまっている。このことからこのデータはピクセルスケールを計測するために光源の位置を見るためのみ用い、測光には用いないことにする。

4 実習課題

4.1 フィルタ特性評価

まずはフィルタ透過率のデータと CCD の透過率のデータを `scipy` の `interpolate.splrep` によって離散的になっているデータの抜けている部分を補完し、`interpolate.splev` によって適当な波長範囲に対して 0.01nm の幅の新たな離散データにした。これによって後の積分を区分求積的に求めやすくなった。

このように修正したフィルタ透過率と CCD の量子効率のデータを掛け合わせることで、図 3 のような実効透過率曲線を得る。

上記で得た実効透過率のデータを用いて、中心波長 (λ_{eff})、半値全幅 ($\Delta\lambda$)、平均透過率 (T_{eff}) を求める。

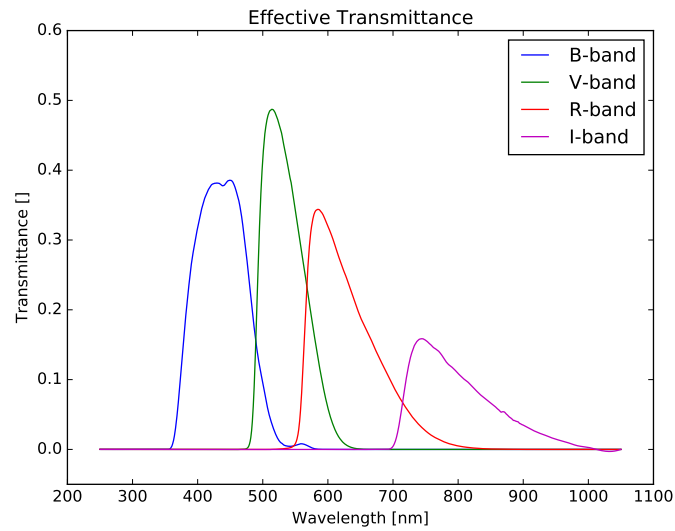


図 3 各フィルタの実効透過率曲線

ここで

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{\int_0^{\infty} \lambda T(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} T(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

$$T_{\text{eff}} = \frac{\int_{\lambda_{\text{eff}} - \Delta\lambda/2}^{\lambda_{\text{eff}} + \Delta\lambda/2} T(\lambda) d\lambda}{\Delta\lambda} \quad (2)$$

の積分については幅 0.01nm での区分求積として求める。

一方で半値全幅については np.max によって最大値を求め、np.where によって透過率について半値との差が適当な微小量以下になる波長を探した。適当な微小量をうまく決められず、候補の波長がいくつか出てきたときはその平均を用いた。

このようにして求めた各値は以下の表 4 ようになる。

表 4 各フィルタにおける中心波長、半値全幅、平均透過率

中心波長 (λ_{eff}) [nm]	B 437.112740458
	V 534.468518597
	R 629.29876918
	I 797.588895985
半値全幅 ($\Delta\lambda$) [nm]	B 102.7
	V 73.86
	R 94.405
	I 116.4
平均透過率 (T_{eff})	B 0.332540360592
	V 0.392167768267
	R 0.244377927018
	I 0.112336179107

4.2 カメラの視野とピクセルスケール

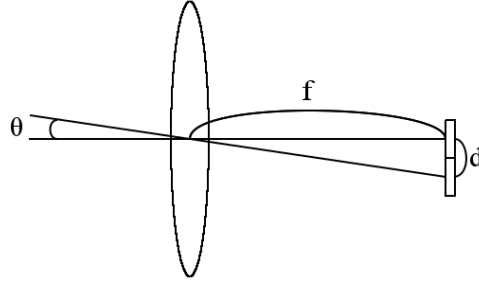


図4 ピクセルサイズ d とピクセルスケール θ 、および焦点距離 f の関係図

図4を参考にピクセルスケールを求めると、

$$\theta \approx \tan \theta = \frac{d}{f} \quad (3)$$

これに用いた望遠鏡の各値を代入すると、

$$\theta \approx \frac{7.4 \times 10^{-3} [\text{mm}]}{2415 [\text{mm}]} \times \frac{180}{\pi} \times 3600 = 0.6320329467''/\text{pixel} \quad (4)$$

一方で図2[2]20秒積分データの右下二つの恒星の距離をAladinによって調べると、 $4.632' = 277.92''$ であった。またデータ上での二点の物理座標は $(1323.005, 1440.665)(1732.463, 1600.683)$ なので、距離は 439.6153024 pixel である。これよりピクセルスケールは

$$\frac{277.92''}{439.6153024\text{pixel}} = 0.6321890946''/\text{pixel} \quad (5)$$

二つのピクセルスケールは小数点3桁まで一致している。なお、ds9による座標の読み取りで x, y 座標それぞれについて ± 1 pixel 程度は読み取り誤差が生じるので、それをもとに誤差伝播を考えると座標差には $\pm\sqrt{2}$ の誤差、さらにピクセルスケールには d_x, d_y を座標差として

$$\Delta = \frac{277.92''}{(d_x^2 + d_y^2)^{3/2}} \sqrt{d_x^2 (\Delta d_x)^2 + d_y^2 (\Delta d_y)^2} = 0.002033'' \quad (6)$$

のピクセルスケールの誤差が出てくる。誤差範囲内では上記二つの値は一致している。

またそのずれが何パーセントかを計算してみると、

$$\frac{|0.6320329467 - 0.6321890946|}{0.6320329467} \times 100 = 0.02470565828\% \quad (7)$$

である。非常によく理論値と一致していると考えられる。

4.3 システム効率

まずは図2[1]のデータに写っている γ Cet について測光を行う。この際、MOFFAT = 6.33 であったので、irafのapphotパッケージにおいて $\text{apertur} = 15.0$, $\text{annulus} = 20.0$ で測光を行った。この結果アパーチャー内でのカウント値は $N = 2503, 249$ となった。

この結果からシステム効率を求める。まずは天体から望遠鏡に入射した光子数 s_i (個/s) をもとめる。この際、V バンドのベガ等級は Fukugita et al. (1995) の 3.60×10^{-9} [erg/s/cm²/str/Å] という値を使用する。

$$s_i = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\Delta\lambda F_\lambda}{h\nu} = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\Delta\lambda F_\lambda \lambda}{hc} \quad (8)$$

これに課題 4.1 で求めた中心波長、半値全幅の値などを代入して、

$$s_i = \pi \left(\frac{21 \text{ [cm]}}{2} \right)^2 \frac{738.6 \text{ [\AA]} \times 3.60 \times 10^{-9} \text{ [erg/s/cm}^2\text{/str/\AA]} \times 534.4 \times 10^{-9} \text{ [m]}}{6.626 \times 10^{-34} \times 10^7 \text{ [erg} \cdot \text{s]} \times 3.0 \times 10^8 \text{ [m/s]}} \quad (9)$$

$$= 10132906.566280816 \text{ [個/s]} \quad (10)$$

となる。一方で CCD で生じた電荷の数 n_i (e⁻/s) は観測機器のコンバージョンファクター $f_{conv} = 0.947$ を用いて以下のように求められる。

$$n_i = \frac{N f_{conv}}{t} = \frac{2503249 \times 0.947}{1 \text{ [s]}} = 2370576.803 \text{ [e}^- \text{/s]} \quad (11)$$

以上の s_i , n_i を用いて、システム効率 η は

$$\eta = \frac{n_i}{s_i} = 0.233948353070633 \quad (12)$$

となる。

4.4 等級原点

gamCet は V 等級で 3.47mag なので、実習の資料にある原点等級の式から

$$Z_{mag} = 3.47 + 2.5 \log \frac{2503249}{1.0} = 19.466260128362812 \quad (13)$$

$$\sim 19.5 \text{ [mag]} \quad (14)$$

ちなみに上記の式は以下のように導出できる。まずは等級を求める式に含まれる天体からのフラックス f_λ について

$$f_\lambda \propto s_i \propto n_i \propto \frac{N}{t} \quad (15)$$

$$\Rightarrow f_\lambda = C \frac{N}{t} \quad (C: \text{定数}) \quad (16)$$

という比例関係が成立するので、 Z_{mag} の定義に基づき、

$$Z_{mag} - Z = -2.5 \log C \frac{1}{1} + 2.5 \log C \frac{N}{t} = 2.5 \log \frac{N}{t} \quad (17)$$

$$\Rightarrow Z_{mag} = Z + 2.5 \log \frac{N}{t} \quad (18)$$

4.5 空の背景光

まずは図 2[1][2] を比較して、[2] における天体の無い位置について [1] でのカウント数を iraf の imexam m で見た。この際 ds9 で二つのデータを異なるフレームで開き、フレームを切り替えながら二つの画像上での位置の対応を見た。20 カ所についてカウント数を見て、平均を取ると 6.9958 [/pixel] となった。

これを [photon/s/arcsec²] と [mag/arcsec²] に変換する。

まずはピクセルスケールを用いて、[/pixel] を [/arcsec²] に変換する。この際、実測値については ds9 上で距離を測ったりする際に多少のずれが生じることから計算には計算値のピクセルスケールを用いる。計算値と実測値のずれがほぼなかったことからこのようにして良いと考えられる。

$$1 \text{ [pixel]} = 0.632^2 \text{ [arcsec}^2\text{]} = 0.399424 \text{ [arcsec}^2\text{]} \quad (19)$$

これによって

$$N_{bg} = 6.9958 \text{ [/pixel]} = \frac{6.9958}{0.399424} \text{ [/arcsec}^2\text{]} \quad (20)$$

となる。これをさらに単位時間当たりの電荷個数、及び単位時間当たりの入射光子数に変換していく。

$$n_{bg} = \frac{f_{conv} N_{bg}}{t} = \frac{0.947 \times N_{bg}}{1} = 0.947 \times N_{bg} \text{ [electron/s/arcsec}^2\text{]} \quad (21)$$

$$s_{bg} = \frac{n_{bg}}{\eta} = \frac{0.947 \times N_{bg}}{0.233948353070633} = \frac{0.947}{0.233948353070633} \times \frac{6.9958}{0.399424} \quad (22)$$

$$= 70.89787 \text{ [photon/s/arcsec}^2\text{]} \quad (23)$$

今度は等級で [mag/arcsec²] で表すと、

$$Z_{bg} = Z_{mag} - 2.5 \log \frac{N_{bg}}{t} = 16.357752 \text{ [mag/arcsec}^2\text{]} \quad (24)$$

4.6 限界等級

適当な星での等級と等級誤差の測定

まずは測光を行う星として、 γ Cet を選ぶ。この星について 4.4 で求めた等級原点を用いて測光を行うと

$$\text{等級} = 3.470 \quad (25)$$

$$\text{等級誤差} = 0.001 \quad (26)$$

という結果が出た。これより S/N を求めるが以下の式によって考える。

$$Z_{mag} = Z + 2.5 \log \frac{N}{t} \quad (27)$$

$$\Rightarrow N = t \cdot 10^{\frac{Z_{mag} - Z}{2.5}} \quad (28)$$

また δN , δZ という誤差を考えて同様に

$$Z_{mag} = Z + \delta Z + 2.5 \log \frac{N + \delta N}{t} \quad (29)$$

$$\Rightarrow N + \delta N = t \cdot 10^{\frac{Z_{mag} - (Z + \delta Z)}{2.5}} \quad (30)$$

これらの両辺にコンバージョンファクターをかけてやれば時間 t の間に生じた電荷になる。

(30)/(28) を考えると、

$$\frac{N + \delta N}{N} = 10^{-\frac{\delta Z}{2.5}} \quad (31)$$

これによって、

$$S/N = \left| \frac{N}{\delta N} \right| = \left| \frac{N}{N + \delta N - N} \right| = \left| \frac{1}{(N + \delta N)/N - 1} \right| \quad (32)$$

$$= \left| \frac{1}{10^{-0.001/2.5} - 1} \right| = 1086.236 \quad (33)$$

計算による S/N の算出

まずは読み出しノイズを実習資料に載っている操作によって確認する。しかし、nclip=3 をつけると、Syntax error が表示されたので、nclip=3 は除いて stddev を見た。

読み出しノイズに大きな変化はないかを見るために、4 回に分けて 5 枚ずつ取ったバイスによって、

- 同じタイミングで取った異なる二枚を用いる (1 枚目と 5 枚目とした)
- 異なるタイミングで取った二枚を用いる (それぞれのタイミングの 3 枚目)

という場合で算出したところ、大きなずれはなく平均で ADU 単位で 12.228[/pixel] であった。また測光の際のアーチャー面積は $m = 707.0782$ 。背景光の値は 4.5 で求めた 6.9958[/pixel] によって誤差を考えると、電子数に変換することに注意して

$$n_i = 2503249 \times 0.947 \quad (34)$$

$$n_{sky} = 6.9958 \times 0.947 \quad (35)$$

$$N_{read} = 12.228 \times 0.947 \quad (36)$$

$$(37)$$

であるから、

$$S/N = \frac{n_i t}{\sqrt{n_i t + m n_{sky} t + m N_{read}^2}} = 1571.647 \quad (38)$$

と計算された。

測定値と計算値の比較

測定値と計算値は大きく異なってしまった。

まず、等級誤差 0.001 というのが iraf の表示できる下限なのではと思われたので、1 秒積分のデータに写っていたより暗い星 (図 2[1] の右下の星、V 等級 9.59) についても測光してみた。その結果、カウント数が 7070.561、アーチャー面積が 707.0495、等級誤差が 0.064 となった。これらの値を用いて S/N を計算してみると、

$$S/N = \frac{n_i t}{\sqrt{n_i t + m n_{sky} t + m N_{read}^2}} = 20.547 \quad (39)$$

$$S/N = \left| \frac{1}{10^{-0.001/2.5} - 1} \right| = 16.469 \quad (40)$$

この結果は先ほどの γ Cet のものよりは比較的一致した値が現れた。このことから等級誤差 0.001 は iraf の表示できる下限であると思われる。

しかし、この結果についても等級誤差から出した値が計算式によって出した値より小さくなっている。天体からの光子数については同じデータのカウンタ数から考えているの大きな差はないと考えると、計算式の方でノイズ成分を小さく算出してしまっているようである。その要因としては暗電流のノイズを無視してしまっていることがまず第一に考えられるが、これについてはどれくらいの影響がある値なのかわからないために断定はできない。また他の要因についても iraf の測光においてどのように等級誤差を計測しているのかをきちんと理解しなければ断定的なことは言えない。ただし、iraf の測光データの中にある MSKY (counts) という値は 5.458 という値であり、自ら測定した背景光 6.995[/pixel] と大きな差はなかった。

4.6.1 限界等級の算出

$S/N = 5$ となる等級を求める。なお、積分時間は 1 秒と 20 秒の両方で計算してみる。

まずはどちらも共通で、 S/N の式より、

$$\frac{n_i t}{\sqrt{n_i t + mn_{sky} t + mN_{read}^2}} = 5 \quad (41)$$

$$\Rightarrow n_i t = \frac{25 + \sqrt{25^2 + 4 \cdot 25(mn_{sky} t + mN_{read}^2)}}{2} \quad (42)$$

$$\Rightarrow \frac{N}{t} = \frac{n_i t}{t \cdot f_{conv}} = \frac{25 + \sqrt{25^2 + 4 \cdot 25(mn_{sky} t + mN_{read}^2)}}{2t f_{conv}} \quad (43)$$

この式を 1,20 秒のそれぞれにあてはめると、

1 秒

$$Z = Z_{mag} - 2.5 \log \frac{N}{t} = 11.43 \text{ [mag]} \quad (44)$$

20 秒

$$Z = Z_{mag} - 2.5 \log \frac{N}{t} = 14.34 \text{ [mag]} \quad (45)$$

となっている。以下の図 5 は 20 秒積分のデータの左下を切り取ったもので、緑の丸で囲んだ星は V バンドで 14.08 (Aladin, Simbad より) なので、ぎりぎり見えている。

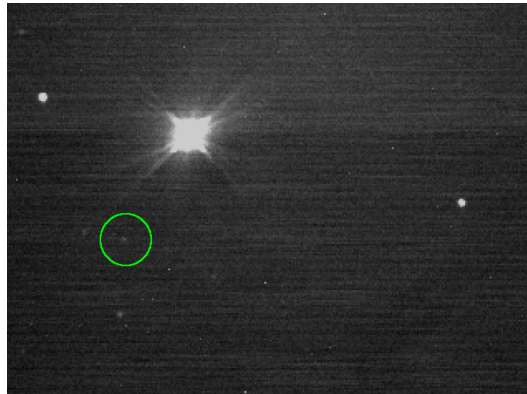


図 5 限界等級付近の星

5 考察と感想

今回の実習で残ってしまった疑問や課題として、まず画像のカウント数に関することがあげられる。これは積分時間が長くなるとカウント数が減ってしまうという普通の感覚とは逆のことであり、この点が改善できないと長時間積分でしか取れないような暗い天体に関して信頼できるデータを取れないことになってしまう。CCD の温度には 1 秒と 30 秒の画像で大きな変化はなかった。また、長時間積分すると確実に暗い星まで映り込んでくることから、それらに対応する光子は確実に CCD で感知しているはずである。しかし、そこで電子が生じる過程、もしくは電子をカウント値に変換する過程

で本来はあるはずの電子もしくはカウントを減らすような過程を踏んでしまっているものと考えられる。1 秒積分で 30 秒積分より大きな出ていた値がことから、電子自体は生じているのではないかと考えられるので、電子をカウント値に変換する際に 1 秒積分と 30 秒積分で違いが生じているのではないかと私は考えている。

次に残ってしまった点としてはより暗い星での解析がある。これについては上記の問題点も絡んではくるが今後の学生にはどこまで暗い星が見えるのか挑戦して行って欲しい。

参考文献

- [1] 実習資料
- [2] 実習ホームページ, <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kmotohara/30cm/>
- [3] Aladin アプリケーション版
- [4] Simbad,
<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-basic?Ident=gam+Cet&submit=SIMBAD+search>
- [5] M. Fukugita, K. Shimasaku, T. Ichikawa “Galaxy Colors in Various Photometric Band Systems”, *Astronomical Society of the Pacific* 107: 945-958, 1995 October