

2015 年度基礎天文学観測 6
「小望遠鏡による基礎観測～東京でどこまで観測できるか?～」
レポート

観測者

理・天文 B3 : 05152001 菊地原正太郎

担当

本原先生、TA 寺尾さん

講義・観測

2015/10/8-12/22

@天文学教育研究センター

提出

2015/1/31 (日)

1 概要

東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センターで必要な知識について講義を受けながら、同所の 21 cm カセグレン望遠鏡を用いた基本的な天体観測を行った。主な目的は望遠鏡の操作や CCD カメラの扱い方を学び基礎的な天体観測を行えるようにすること、およびデータの解析を通してピクセルスケールやシステム効率といった重要な量について理解することである。

望遠鏡およびカメラの立ち上げに伴う問題や故障、天候不順で十分な観測データは得られなかったが、 β And などの観測によりピクセルスケール・システム効率・限界等級および等級原点を求めることができた。

2 観測

2.1 望遠鏡

観測に用いた望遠鏡・架台・フィルターはいずれも今年度（昨年度?）から新しいものに入れ替えられた。そこで観測の前に、これらを立ち上げる作業を行った。また望遠鏡・架台は天文センター入口前のドーム内に設置して使用する予定であったが、ドームの故障のため入口前の広場で三脚を用いて使用することになった。

望遠鏡にはタカハシの μ -210 を用いた。基本的な性能は次表 1 の通りである [1]。ここにドール・カーカム式とは古典的カセグレン式の放物面主鏡と双曲面副鏡をそれぞれ楕円面主鏡と球面副鏡に置き換えたもので、元のカセグレン式よりも表面形成や光軸調整が容易なのが特長である。

架台には VIXEN の SXD-2 を用いた。形式は赤道儀。架台には STAR BOOK TEN コントローラーという制御用の端末が付属しており、それを用いて対象天体を自動で見つけたり追尾したりできる。

また望遠鏡の接眼部分には、分光観測のためのフィルターおよび撮影のための CCD カメラを取り付けた。フィルターはバンド U, B, V, R および狭帯域 [OIII], $H\alpha$, [SII] の 7 種類を選んだ。これを CCD カメラに取り付け、パソコン端末からコマンドラインでフィルターの交換および画像の撮影を行えるようにした。



図 1 望遠鏡と架台。望遠鏡の接眼部に CCD カメラを取り付けて撮影した。

表 1 望遠鏡の基本性能 [1]。口径と焦点距離は通常時と reducer 使用時について。

設置場所	北緯 35°40'24", 東経 139°32'18"
形式	ドール・カーカム式
口径	210 mm
焦点距離	2415 mm(F/11.5); 1873mm (F8.9)
プレートスケール	85.3 arcsec/mm; 110.8 arcsec/mm
質量	8.1 kg

2.2 撮影

撮影は望遠鏡に取り付けた CCD カメラに接続したコンピュータ端末から、コマンドラインで行う。まずは観測データを保存するディレクトリに `> cd` で移動してから、

```
> flifilter A
```

表2 CCDカメラの基本性能 [2]。

フォーマット	2048 × 2048
アレイサイズ	15.2 mm × 15.2 mm
ピクセルサイズ	7.4 μm × 7.4 μm
full well	40 000 e ⁻ /pix

としてフィルターを A に入れ替える。次に

```
> acqfliframe e t
```

を打つと、撮影が t 秒間行われる。暗電流は

```
> acqfliframe d t
```

により得る。

3 解析

3.1 ピクセルスケール

CCDカメラのサイズ (pix) に対する実際の視野の広さ (arcsec) をピクセルスケールという。ピクセルスケールが大きいほど、小さなカメラでより広い範囲を撮影できる。実際には予め座標の分かっている2つの天体を撮影して、天球上での距離 θ [arcsec] と画像上での距離 d [pix] を読み取って

$$p \equiv \frac{\theta}{d} \text{ arcsec/pix}$$

をピクセルスケールとする。

3.2 フィルター特性

フィルターの透過率は入射光の波長に依存する。今回は透過率曲線 $T = T(\lambda)$ の中心波長

$$\lambda_{\text{eff}} \equiv \frac{\int_0^{\infty} \lambda T(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} T(\lambda) d\lambda},$$

半値全幅

$$\Delta\lambda \equiv T_{\lambda > \lambda_{\text{eff}}}^{-1} \left(\frac{1}{2} T(\lambda_{\text{eff}}) \right) - T_{\lambda < \lambda_{\text{eff}}}^{-1} \left(\frac{1}{2} T(\lambda_{\text{eff}}) \right),$$

および平均透過率

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

を求める。

3.3 システム効率

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を、その観測系のシステム効率という。

望遠鏡に単位時間当たりに入射する波長 λ (振動数 ν) の光子の個数は

$$s = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\Delta\lambda F_{\lambda}}{h\nu} \quad \left(D \text{ は望遠鏡の口径, } F_{\lambda} \text{ はフラックス密度, } \Delta\lambda \text{ はフィルターの波長範囲, } h \text{ はプランク定数} \right),$$

CCD で単位時間当たりに生じる電荷の個数は

$$n = \frac{N f_{\text{conv}}}{t} \quad \left(\begin{array}{l} N \text{ はカウント値, } f_{\text{conv}} \text{ は変換係数,} \\ t \text{ は積分時間} \end{array} \right)$$

とそれぞれ書け、システム効率はこちらを用いて

$$\eta \equiv \frac{n}{s}$$

である。

3.4 限界等級

撮影を行ったときに天体が検出されたか否かは、S/N がある基準値を上回ったか否かで定義する。光赤外観測での基準は普通 S/N = 5 にとる。天体が暗くなる（等級が大きくなる）ほど S/N は小さくなっていくが、S/N = 5 となったときの天体の等級を限界等級という。

ただし S/N は

$$S/N \equiv \frac{nt}{N_{\text{noise}}} = \frac{\eta st}{N_{\text{noise}}}$$

で定義する。ここに N_{noise} は雑音であり、背景光 $n_{\text{sky}}t$ および暗電流 $n_{\text{dark}}t$, 読み出し雑音 N_{read} をポアソン分布的に足し合わせて

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

と書ける。

3.5 等級原点

1 秒間の撮影で 1 カウントを生じさせるような仮想の天体の等級を等級原点という。等級原点 Z_m は実在の天体を観測することで求められる。いま等級 m の天体を時間 t だけ観測してカウント値が N だったとすると、等級の定義より

$$m - Z_m = -2.5 \log \left(\frac{N/t}{1/1} \right) = -2.5 \log \left(\frac{N}{t} \right)$$

が成り立つので

$$Z_m = m + 2.5 \log \left(\frac{N}{t} \right)$$

となる。

4 結果

撮影は α Lyra (Vega), γ Lyr (Sulafat) および β And (Mirach) に対して行った。本来はとりあえずこれらの星を試験台として撮影が正しくできているかを確認し、その後に事前に Stellarium や Aladin Sky Atlas を用いて選んだ星を観測するはずであった。しかし本番の観測を始める前に天候が悪くなったり望遠鏡が破損したりという問題が起こったために、上記の天体を撮影して得られた画像を最終結果とし、解析に用いた。

4.1 ピクセルスケール

β And の画像から雑音を取り除くと次頁図 2 左の画像が得られた。これを ds9 上に表示し、写っている β And 自身とその近傍にある恒星 HD 6892 の間の距離 d を測ると $d = 550.1$ pix であった。一方同じ範囲の画像 (図 2 右) を Aladin 上に表示して同じ距離 θ を測ると $\theta = 372.4$ arcsec であった [3]。したがってピクセルスケールは

$$p \equiv \frac{\theta}{d} = 0.677 \text{ arcsec/pix}$$

と求められた。

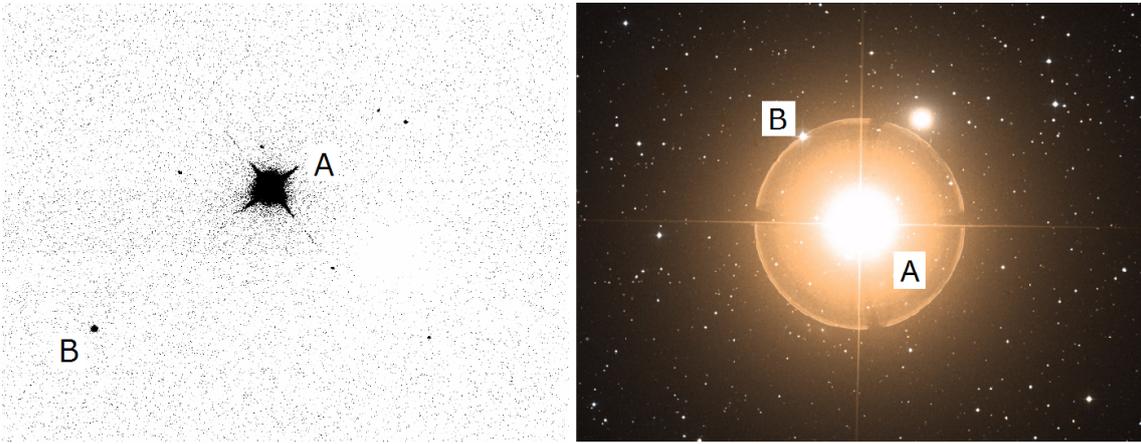


図2 β And について実際に得られた画像（左）と Aladin で表示した画像（右）。A が β And 自身、B がその近傍にある恒星 HD 6892。カメラの取り付けの向きが間違っていたために、左の画像は右の画像に比べて回っている。

4.2 フィルター特性

既存のデータ [4] を用いて V バンドフィルターの特性を求めた。ただし透過率には量子効率（フィルターに入射する電荷数に対する、射出する電荷数の非）を掛け算した。実際には 8 章のプログラム (1)-(3) を用いて計算を行い、

$$\lambda_{\text{eff}} = 534 \text{ nm}, \quad \Delta\lambda = 74.0 \text{ nm}, \quad T_{\text{eff}} = 0.320$$

を得た。

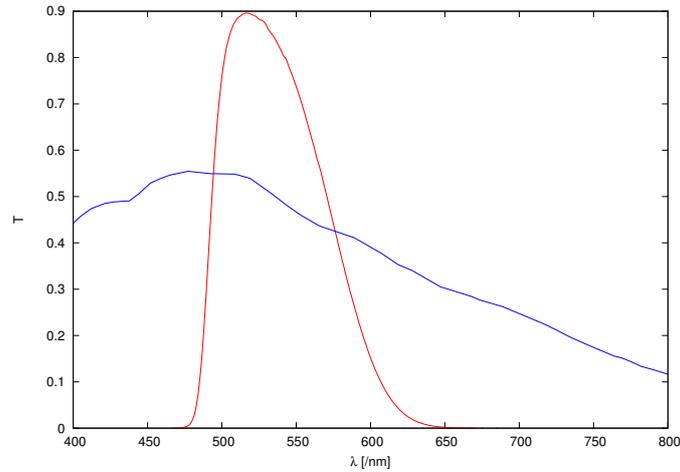


図3 V バンドフィルターの透過率曲線—と CCD カメラの量子効率—。上の諸量の計算にはこれらを掛け算したのを用いた。

4.3 システム効率

望遠鏡に入射する光子数 s : β And の等級（以下等級はすべて AB 等級）は V バンドで $m_V = 2.05$ なので [5]、

$$m_V \equiv -2.5 \log F_\nu - 48.60$$

よりフラックス密度は

$$F_\nu = 5.50 \times 10^{-21} \text{ erg/s/cm}^2/\text{Hz}$$

である。これを単位波長あたりの密度に直すと、 $F_\lambda d\lambda = F_\nu d\nu$ より

$$F_\lambda = F_\nu \frac{d\nu}{d\lambda} = \frac{c}{\lambda_{\text{eff}}^2} F_\nu = 5.78 \times 10^{-9} \text{ erg/s/cm}^2/\text{nm}$$

となる。この結果を用いると、 $D = 21$ cm として s は

$$s = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\Delta\lambda F_\lambda}{h\nu} = \frac{\pi D^2}{4} \frac{\Delta\lambda F_\lambda}{hc/\lambda_{\text{eff}}} = 3.98 \times 10^7 /s$$

と得られる。

CCD で発生する電荷数 $n : \beta$ And を $t = 0.1$ 秒間撮影して得られた画像（下図 4）を ds9 で開き IRAF を用いて解析すると、 β And のカウント値は $N = 352\,265$ であった。また変換係数は既存の実験結果 [6] より $f_{\text{conv}} = 0.947$ とする。すると n は

$$n = \frac{N f_{\text{conv}}}{t} = 3.33 \times 10^6 /s$$

となる。

以上より、システム効率

$$\eta \equiv \frac{n}{s} = 12.0 \%$$

と求められた。

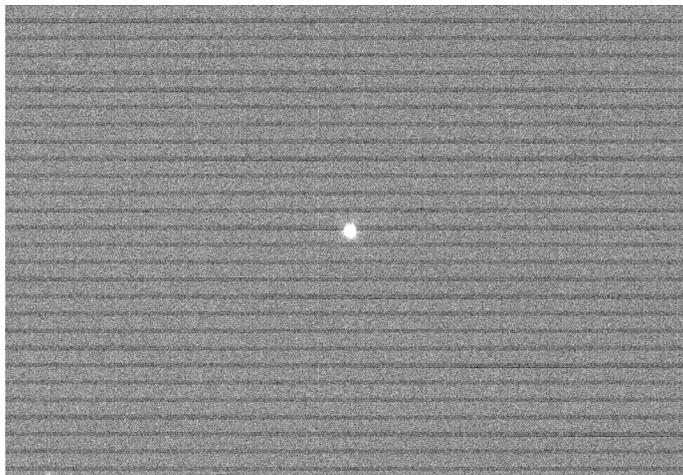


図 4 カウント値の計測に用いた β And の画像。撮影時間は $t = 0.1$ 秒。

4.4 限界等級

まず n_{sky} を (IRAF での解析ができなかったので ds9 上で大雑把に) $2000 /s$, n_{dark} を $< 1 /s$ と見積もり、既存の結果 [6] より N_{read} を 12.6 とする。すると $t = 0.1$ 秒の観測で S/N は

$$S/N \equiv \frac{nt}{N_{\text{noise}}} = \frac{nt}{\sqrt{nt + n_{\text{sky}}t + n_{\text{dark}}t + N_{\text{read}}^2}} = \frac{0.1n}{\sqrt{0.1n + 200 + 0 + 160}}$$

となり、これが 5 に等しいとき $n = 1.08 \times 10^3 /s$ である。いま n はカウント値 N に、 N はフラックス密度 F_λ (すなわち F_ν) に比例するので、4.3 節で得た n の値を元に限界等級では

$$F_\nu(\text{limit}) = \frac{1.08 \times 10^3 /s}{3.33 \times 10^6 /s} F_\nu = 3.24 \times 10^{-4} F_\nu$$

となるので、

$$m_V(\text{limit}) = -2.5 \log F_\nu(\text{limit}) - 48.60 = 11 \text{ mag}$$

が限界等級である。

4.5 等級原点

4.3 節の結果より β And は $m_V = 2.05$, $N = 352\,265$ であり、撮影は $t = 0.1$ 秒で行ったので、等級原点は

$$\underline{Z_m = m + 2.5 \log \left(\frac{N}{t} \right) = 18.4 \text{ mag}}$$

となった。

5 考察

5.1 ピクセルスケール

ピクセルスケールの理論値は 2.1 節表 1-2 のデータより

$$p = 85.3 \text{ arcsec/mm} \times 7.4 \text{ } \mu\text{m/pix} = 0.63 \text{ arcsec/pix}$$

である。ゆえに今回の測定値 $p = 0.68$ の理論値に対する相対誤差は 7.5 % であり、比較的一致した結果が得られた。

ピクセルスケールは 4.1 節図 2 の画像を左右で見比べることで算出した。しかし CCD カメラの取り付けの向きの関係で画像は回転しており、撮影後にピントが合っていないという指摘も出た。そのため画像の左右でどの星とどの星が対応するのかが微妙であったが、測定値が理論値に近かったことから、ずれはある程度小さいと言えるだろう。

5.2 システム効率

システム効率は 4.3 節図 4 の画像を元に IRAF を用いて算出したが、観測者によって値に多少の差異が見られた。したがって本来は画像の背景光を正しく処理し、同じ観測を複数回行って不確かさまで評価するべきであったが、観測が十分にはできなかったという理由から実際にはどちらも行えず、不確かさの評価はできなかった。それでも複数人のデータを見ると、いずれも 10 % 程度で一致していた。

5.3 限界等級

今回の観測は n_{sky} と n_{dark} を測定しないまま終わってしまったため、S/N および限界等級の計算は有効数字 1 桁程度という非常に大雑把なものになった。 n_{dark} は他の雑音に比べて無視できるというのは確かだろうが、少なくとも n_{sky} は測定すべきであった。しかしこのレポートでは撮影場所の明るさを考慮して場当たりに 2 000 /s という値を採用したが、1 000-10 000 の範囲で動かしても限界等級はやはり $m_V(\text{limit}) \sim 11 \text{ mag}$ だったので、これは的外れな値ではないかもしれない。

6 考察に関係のない感想

今回の実習は小型望遠鏡を用いて基礎的な天体観測を行い、データの解析を学ぶというものでした。夏に木曾観測所で実施された実習「対物プリズム分光で学ぶ CCD 観測の基礎」では同所の 105 cm 望遠鏡を用いて観測を行いました。今回の実習は規模も観測手法も異なり、両方を体験できたのは幸運でした。三鷹では 21 cm という手頃な大きさの望遠鏡を用いたいわゆる天体観測という感じがありましたが、天文学科に入るまで特に望遠鏡を覗いたことがある訳でもない私にとっては、木曾とは違った楽しみがありました。

逆に勿体なかったのは IRAF についてです。実習の途中 IRAF を自分のコンピュータ端末にインストールするという作業がありましたが、私は自分の端末の性能がそこまで高くないこともあり、インストールはしませんでした。そのため実習が終わってから再解析ができないという問題がありました。IRAF は天体観測に関わるかぎり確実に使うことになるので、来年度からは実習や「計算天文学 I」などで学生全員にインストールを推奨すると良いかもしれません。

今回は残念ながら天気などの関係で観測・解析ともに十分に行うことはできませんでしたが、それでも最低限のことはできたので満足しています。ありがとうございました。

7 参考文献

- [1] <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kmotohara/30cm/> 以下「21cm 望遠鏡 + 赤道儀」
- [2] 同「CCD カメラ」
- [3] Aladin Sky Atlas: <http://aladin.u-strasbg.fr/AladinLite/>
- [4] [2] 以下「広帯域ジョンソン V: 透過率データ」および `mod-ccd-qe.dat`
- [5] SIMBAD: <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>
- [6] [2] 以下 1005.pdf

8 プログラムリスト

記述はいずれも Fortran90 による。

(1) λ_{eff} の計算

```
program lambda_center

implicit none
  integer :: i, j, ios = 1, jos = 1
  double precision lambda, Trans, jambda, QE
  double precision int_T, lt, int_lT
  double precision lambda_eff

!*****find lambda_eff*****!
open(1, file = 'V.dat')

int_T = 0.0d0
int_lT = 0.0d0

do i = 1, 1000
  read(1, *, iostat = ios) lambda, Trans
  if (lambda > 3.5d2 .and. lambda < 1.0d3) then
    Trans = Trans * 1.0d-2

    open(2, file = 'mod-ccd-qe.dat')
    jos = 1
    do j = 1, 1000
      read(2, *, iostat = jos) jambda, QE
      if (abs(lambda - jambda) < 5.0d0) exit
    end do
    close(2)
    Trans = Trans * QE

    int_T = int_T + Trans
    lT = lambda * Trans
    int_lT = int_lT + lT
  end if
end do

lambda_eff = int_lT / int_T

write(*, '(e15.7)') lambda_eff

close(1)
close(2)
!*****!

```

```
end program
```

(2) $\Delta\lambda$ の計算

```
program FWHM

implicit none
integer :: i, j, ios = 1, jos = 1
double precision lambda, lambda1, lambda2, Trans, jambda, QE
double precision T_max, T_half, Delta

!*****Find FWHM of <<Trans*QE>>*****!
open(1, file = 'V.dat')

do i = 1, 1000
  read(1, *, iostat = ios) lambda, Trans
  if (lambda > 3.5d2 .and. lambda < 1.0d3) then
    Trans = Trans * 1.0d-2

    open(2, file = 'mod-ccd-qe.dat')
    jos = 1
    do j = 1, 1000
      read(2, *, iostat = jos) jambda, QE
      if (abs(lambda - jambda) < 5.0d0) exit
    end do
    close(2)
    Trans = Trans * QE

    if (Trans > T_max) then
      T_max = Trans
    end if
    T_half = T_max / 2.0d0
  end if
end do
close(1)

open(1, file='V.dat')
ios = 1
do i = 1, 1000
  read(1, *, iostat = ios) lambda, Trans
  if (lambda > 3.5d2 .and. lambda < 1.0d3) then
    Trans = Trans * 1.0d-2

    open(2, file = 'mod-ccd-qe.dat')
    jos = 1
    do j = 1, 1000
      read(2, *, iostat = jos) jambda, QE
      if (abs(lambda - jambda) < 5.0d0) exit
    end do
    close(2)
    Trans = Trans * QE

    if (abs(Trans - T_half) < 1.0d-1 .and. lambda < 5.0d2) then
      lambda1 = lambda
    else if (abs(Trans - T_half) < 1.0d-1 .and. lambda > 5.0d2) then
      lambda2 = lambda
    end if
    Delta = lambda2 - lambda1
  end if
end do
```

```

write(*, *) lambda1,lambda2, Delta

close(1)
!*****!

end program

```

(3) T_{eff} の計算

```

program Trans_eff

implicit none
integer :: i, j, ios = 1, jos = 1
double precision lambda, lambda1, lambda2, Trans, jambda, QE
double precision int_T
double precision T_eff, Delta, lambda_eff

!*****Find Trans_eff*****!
open(1, file = 'V.dat')

lambda_eff = 5.338666d3
lambda1 = 4.96d2
lambda2 = 5.70d2
Delta = 7.40d1

int_T = 0.0d0

do i = 1, 1000
read(1, *, iostat = ios) lambda, Trans
if (lambda .ge. lambda1 .and. lambda .le. lambda2) then
Trans = Trans * 1.0d-2

open(2, file = 'mod-ccd-qe.dat')
jos = 1
do j = 1, 1000
read(2, *, iostat = jos) jambda, QE
if (abs(lambda - jambda) < 5.0d0) exit
end do
close(2)

Trans = Trans * QE
int_T = int_T + Trans
end if
end do

T_eff = int_T / Delta

write(*, '(e15.7)') T_eff

close(1)
!*****!

end program

```