

2016年度「小望遠鏡による基礎観測実習」

天文学科3年 05-162001 遠藤いずみ

実習場所 天文教育研究センター

実習教員 本原先生

TA 岡村さん・鵜山さん

1 概要・目的

この実習では東大天文センターの 21cm カセグレン望遠鏡を用い、CCD カメラによる基礎的な天体観測を行った。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及び CCD 観測の基本技術を一通り習得することを目的としている。

実習の流れは以下。

- ・観測を行う上で必要な基礎的な知識の確認
- ・観測天体の決定
- ・新規に導入された望遠鏡と赤道儀の立ち上げ
- ・CCD カメラを用いた観測
- ・得られたデータの解析

最終的に得られたデータからピクセル効率・システム効率・等級原点・限界等級を求めた。

2 使用機器

2.1 望遠鏡

今回使用したのは 21cm 反射望遠鏡:タカハシ μ -210 である。
スペックをまとめておく。架台は Vixen の SX-D 赤道儀を用いた。

| | |
|----------|-----------------|
| 口径 | 210mm |
| 焦点距離 | 2415mm(F11.5) |
| プレートスケール | 85.3(arcsec/mm) |

表 1 望遠鏡のスペック

また、天体の導入は STAR-BOOKS-TEN コントローラーを用いて行った。

2.2 CCD

CCD は感光素子としてのフォトダイオードによって発生した電荷を電荷結合素子 (CCD;CHarge Coupled Device) によって順次外部に転送して読み出すものである。

今回使用した CCD の仕様は以下の通り。

| | |
|-----------|---------------------------|
| フォーマット | 2048 × 2048 |
| アレイサイズ | 15.2mm × 15.2 |
| ピクセルサイズ | 7.4 μ m × 7.4 μ m |
| Full Well | 40,000 e-/pix |

表 2 CCD の仕様

また、CCD とともに使用したフィルターは広帯域ジョンソン B,V,R,I および狭帯域 H α , [SII],H β ,[OIII] である。

3 観測

この実習ではドームを使用せず、天文センター前の広場に三脚をおいて望遠鏡を設置した。明るいうちに少し離れた看板を基準にファインダー合わせを行った。また、観測を行う前に明るい星を使ってファインダーでアライメントを行った。天体の観測の間際に数回 bias をとった。観測は対象天体を撮るために短い積分時間で数回、背景の暗い星 (ピクセルスケール算出用) をとるために長い積分時間で数回行った。また、CCD が同じ位置をずっと撮影しないように対象天体の撮像位置をずらして 2 か所で撮像した。(Dithering) つまり、積分時間の違いと Dithering で計 4 パターンの撮像を行った。またフィルターは広帯域の 4 つのみを使用し、実習を行った 4 人で 1 バンドずつ担当することにした。

わたしが担当するのは R バンドなので以下で使用するデータでは R バンドのものに限る。

3.1 対象天体

今回観測したのは γ -Cet (くじら座 γ 星) である. そのほかにもミルフアク (α -Per) を観測したが、フィルターがごちゃごちゃになっていたので、データ解析には使用しない.

γ -Cet の基本情報を以下にまとめておく (Simbad より). 画像 (Aladin より) は範囲を実際の視野とほぼ同じにしてある

| | |
|---------|----------------|
| RA | 02 43 18.03910 |
| Dec | +03 14 08.9390 |
| sptypes | A2 |
| Rmag | 3.36 |

表 3 γ -cet の基本情報

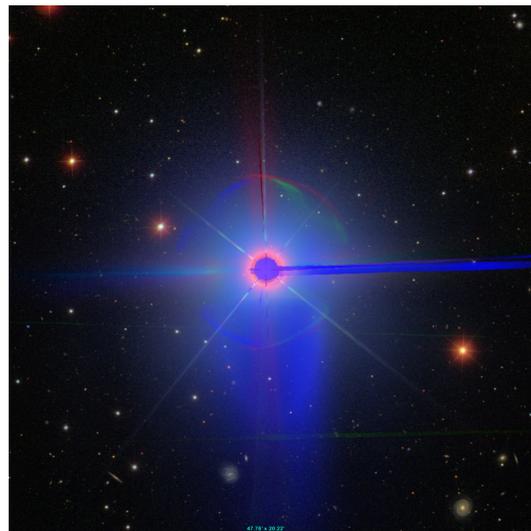


図 1 γ -cet(Aladin より)

3.2 CCD の操作

STAR-BOOKS-TEN コントローラーを用いて天体を導入したのち、CCD をパソコンからコマンドで操作して撮像を行った.

3.2.1 起動

CCD 本体の電源ケーブルをさして電源を入れ、CCD 制御用 Linux ノート PC を起動する.CCD を起動してから冷却が安定するまで待つ. 今回はその間にアライメントを行った.

3.2.2 画像取得

Linux 上でターミナルを開き、コマンドを入力する.

- ・画像取得ビューワーとして `ds9 &` を起動
- ・`acqflifframe e (time):(time)` の積分時間で露出を行う.
- ・`n_nacflifframe e (time) (N):(time)` の積分時間で露出を (N) 回行う.

3.2.3 フィルタ交換

フィルターはフィルターホイールに格納され USB 経由で制御される. 制御コマンドは `flifilter (filtername)` である.

3.2.4 各種設定

ファイル保存先、現在のフィルタや FITS ヘッダ情報などはローカル Linux マシンの MySQL サーバが管理しており、そのキーワードで変更する。重要なキーワードとしては

観測時に設定しないとイケないもの

- ・ DATA_DIR_NAME: データの保存先
- ・ OBJECT: 天体名
- ・ WEATHER: 天気
- ・ OBSERVER: 観測者

観測時に参照しないとイケないもの

- ・ CCD_SERIAL_NUMBER: フレーム番号
- ・ CCD_TEMP_SUR: CCD の現在の温度

キーワード一覧と現在の値は

- ・ `http://localhost/ccd.php`

で参照するか、`statal1` コマンドでコマンドラインからもみれる。

また個々のキーワードの確認と変更は

```
stataus (keyword)
```

```
status (keyword) (value)
```

コマンドでできる。

4 データ解析 (課題)

4.1 フィルタ特性評価

4.1.1 フィルタ

フィルタは光を選択的に吸収あるいは反射、散乱させて特定の波長域の光を透過させるもの。透過率は入射光に対する透過光の割合で波長により異なる。今回使用した R バンドフィルターの透過率は次の通り。

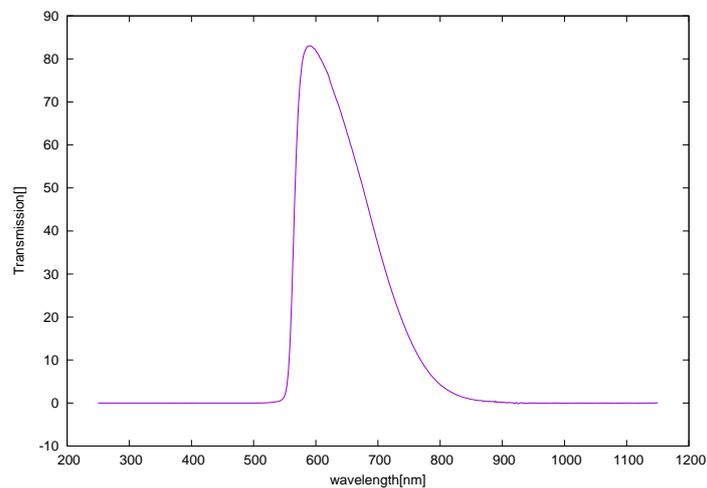


図 2 R バンドフィルターの透過率

4.1.2 CCD の量子効率

CCD の量子効率は入射光子にチアする発生した電子の数の比である．今回使用した CCD の量子効率は以下の通り．

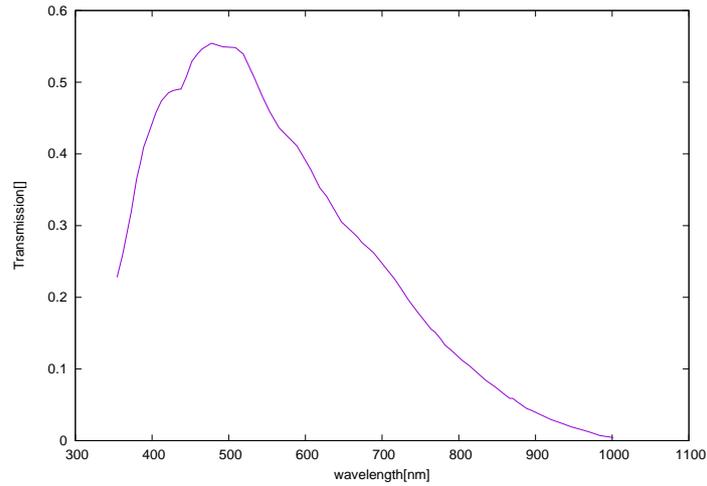


図 3 CCD の量子効率

4.1.3 実効透過率の評価

フィルタの透過率と CCD の量子効率を合わせたときの実効透過率曲線を求め、

- ・ 中心波長

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

- ・ 半値全幅

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

- ・ 平均透過率

$$T_{eff} = \frac{\int_{\lambda_{eff} - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda_{eff} + \frac{\Delta\lambda}{2}} T(\lambda) d\lambda}{\Delta\lambda} \quad (3)$$

をそれぞれ求める．プログラミングは python により行った．

結果を以下に示す．

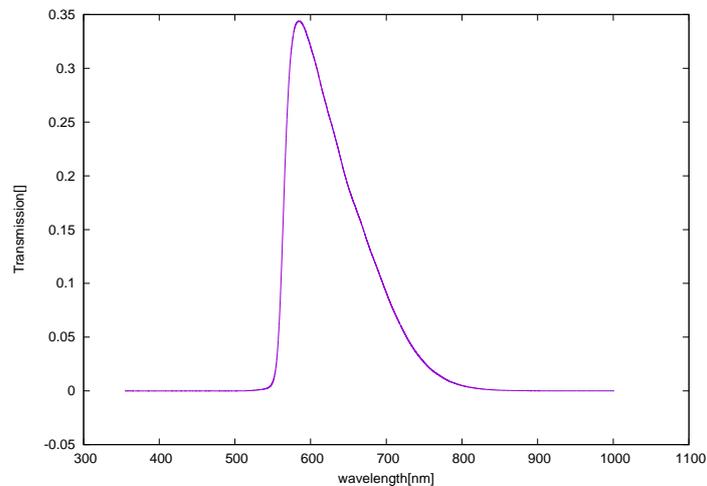


図 4 R バンドフィルタの実効透過率曲線

| | |
|-----------------|----------|
| λ_{eff} | 630(nm) |
| $\Delta\lambda$ | 94.4(nm) |
| T_{eff} | 0.244 |

表4 Rバンドフィルタの中心波長・半値全幅・平均透過率

4.2 カメラの視野とピクセルスケール

4.2.1 計算値

望遠鏡の焦点距離 f および CCD のピクセルサイズ d からピクセルスケール p の計算値を求める。まずプレートスケール (レンズに対してある角度で入射した光が CCD 上にどれほどの大きさの像をつくるかを示したもの) を計算すると

$$\frac{1(rad)}{f} = \frac{\frac{180}{\pi} \times 3600}{2415} = 85.3(arcsec/mm) \quad (4)$$

となる。これより CCD のピクセルスケールは

$$p = 85.3 \times d(mm/pix) = 85.3 \times 7.4 \times 10^{-3} = 0.632(arcsec/pix) \quad (5)$$

となる。

4.2.2 観測値

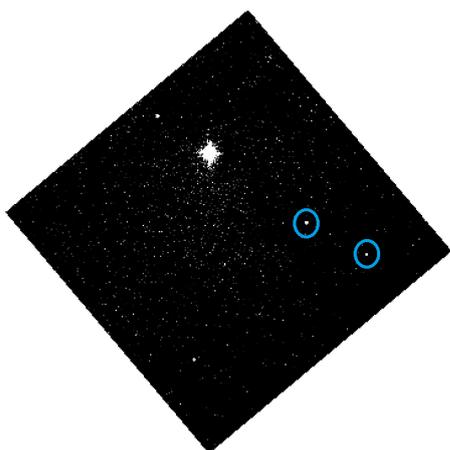


図5 取得データ

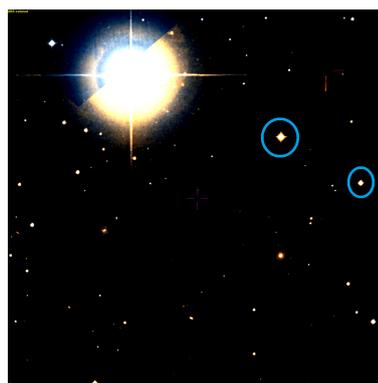


図6 Aladin より

画像の2つの星の距離を比較してピクセルスケールを求める。

まず Aladin 上では2点間の距離を求めることができるツールがあるのでそれを使用して求めた。また、距離は5回求めてその平均と標準偏差を求めた。

また、ds9 上ではそれぞれの星の論理座標を各5回求めてそれぞれ平均と標準偏差を求め、誤差伝搬の式から距離の標準偏差を求めた。結果を以下に示す。

| | 平均 | 誤差 |
|-------------|-----|----|
| 距離 (arcsec) | 277 | 1 |
| 距離 (pix) | 445 | 3 |

表5 距離測定の結果

ピクセルスケールは arcsec/pix なので計算すると

| ピクセルスケール (arcsec/pix) | 誤差 |
|-----------------------|-------|
| 0.622 | 0.005 |

表6 距離測定の結果

となった。計算値と観測値を比較すると 2σ の範囲に収まっていることが分かる。

4.3 システム効率

システム効率は簡単に「望遠鏡に入射した星からの光のうち、CCDで電荷となって読出されたものの割合」である。
天体から望遠鏡に入射した光子数 (s_i (個/s))

$$s_i = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\Delta\lambda F_\lambda}{h\nu} = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\Delta\lambda F_\lambda}{h \frac{c}{\lambda_{eff}}} \quad (6)$$

ここで D は望遠鏡の口径、 F_λ は天体からのフラックス、 $\Delta\lambda$ はフィルターの波長域である。

CCDで生じた電荷の個数 (n_i (e^-/s))

$$n_i = \frac{N f_{conv}}{t} \quad (7)$$

ここで N は画面上でのカウント、 f_{conv} はコンバージョンファクター (1 カウント何 electron か)、 t は積分時間である。
このときシステム効率は

$$\eta = \frac{n_i}{s_i} \quad (8)$$

である。

4.3.1 天体から望遠鏡に入射した光子数 s_i

等級 m と天体からのフラックス f には次の関係がある。

$$m = A - 2.5 \log f \quad (9)$$

よって 0mag (=vega) のフラックス f_0 が分かれば、求めたいフラックス f_R は辺々引くことで

$$f_R = f_0 \times 100^{-\frac{m_R}{5}} \quad (10)$$

で求まる。今回は f_0 の値を "Galaxy Colors in Various Photometric Band System" から引用した。
 $f_0 = 1.87 \times 10^{-8}$ (erg/s/cm²/nm)、 $m_R = 3.36$ を用いると

$$f_R = f_0 \times 100^{-\frac{m_R}{5}} = 8.47 \times 10^{-10} \text{ (erg/s/cm}^2\text{/nm)} = 8.47 \times 10^{-4} \text{ (kg/s}^3\text{/m)} \quad (11)$$

使う値は以下の通り

| | |
|-----------------|---|
| D | 0.21(m) |
| $\Delta\lambda$ | $94.4 \times 10^{-9} m$ (m) |
| h | 6.626×10^{-34} (m ² kg/s) |
| c | 3.0×10^8 (m) |
| λ_{eff} | 630×10^{-9} (m) |

表7 計算に使用する値

以上を用いて計算すると

$$s_i = 8776269 \text{ (個/s)} \quad (12)$$

4.3.2 CCDで生じた電荷の個数

まず N を得られたデータから求める。解析は iraf および ds9 を使用する。

まず iraf を立ち上げ、ds9 を起動する。たくさん撮った画像から 1 枚選んで解析する。手順は以下の通り。

1. bias20 枚を合成して平均をとる。(imcombine)

2. 使用する画像から bias を引く (imarish (filename) - (bias.fits) (new_filename))

3. 画像を ds9 上で開く (display (filename) (frame))

4. 画像の性質を調べる (imexam a,e)

→ PEAK やコントラを見てさちっていないか調べる。MOFFAT の値は後でアパーチャー直径などを設定するのに使用する。

5. IRAF で測光する (apphot パッケージを使用)

| | |
|------------|---------|
| N | 1857094 |
| f_{conv} | 0.947 |
| t | 1 |

表 8 計算に使用する値

この測光によりスカイを引いたアパーチャー内のフラックスカウントが求まる。

上の値を用いて計算すると

$$n_i = \frac{N f_{conv}}{t} = 1758668(e^-/s) \quad (13)$$

4.3.3 システム効率

上の結果を用いてシステム効率は

$$\eta = \frac{n_i}{s_i} = 0.20 \quad (14)$$

よって 20 % となった。

4.4 等級原点

等級原点 Z_{mag} はあるカメラシステムで 1 秒間の露光で 1 カウントの信号を生じさせる天体の等級のことである。今回は $m_R = 3.36$ の星を 1 秒間露出したときに 1857094 のカウントの信号が検出されたので、このカメラシステムでの等級原点は

$$Z_{mag} = 3.36 + 2.5 \log \frac{1857094}{1} \sim 19 \quad (15)$$

となった。

4.5 空の背景光

星の写っていない領域に入射している光の量を求める。

長時間露光の画像はカウントに問題があったので長時間露光の画像と比較して星が映ってない部分の測光を行った。原因はわからないが sky のカウントがマイナスになることがあった (謎)。星が写っていない場所でカウントが正になる所を 15 カ所測光し、平均をとった。結果は

$$N_{sky} = 7.21(\text{photons}/\text{pix}^2) \quad (16)$$

となった。(photons/s/arcsec²) で求めたいのでシステム効率 $\eta = 0.20$ およびピクセルスケール $0.632(\text{arcsec}/\text{pix})$ を用いて

$$n'_{sky} = \frac{N_{sky} f_{conv}}{t} \times \eta \frac{1}{(0.632)^2} = 3.42(\text{photons}/\text{s}/\text{arcsec}^2) \quad (17)$$

となる。次に (mag/arcsec²) で求めたいので等級原点の式より

$$m = (Z_{mag} - 2.5 \log \frac{N_{sky}/(0.632)^2}{t}) = 16(\text{mag}/\text{arcsec}^2) \quad (18)$$

となった。

4.6 限界等級

4.6.1 等級・等級誤差・S/N の計算

iraf で測光を行うとフラックスカウント以外に等級と等級誤差を求めることができる。結果は以下に示す。この結果よ

| | |
|------|-------|
| 等級 | 9.328 |
| 等級誤差 | 0.001 |

表 9 等級と等級誤差

り S/N を求める.

$S/N = N/\delta N$ である. 等級原点の式を考えて

$$Z_{mag} = m + 2.5 \log \frac{N}{t} \quad (19)$$

誤差を考える.

$$Z_{mag} = m + \delta m + 2.5 \log \frac{N + \delta N}{t} \quad (20)$$

2式より

$$2.5 \log \frac{N}{t} = \delta m + 2.5 \log \frac{N + \delta N}{t} \quad (21)$$

これより

$$S/N = N/\delta N = \frac{1}{1 - 10^{-\frac{\delta m}{2.5}}} \quad (22)$$

よって $\delta m = 0.001$ を代入して

$$S/N = 1086 \quad (23)$$

となる.

4.6.2 予想される S/N

S/N はノイズに対して信号がどの程度来ているかを評価し、その値を超えれば検出できたとするものである. ここで

$$S/N = \frac{n_i t}{N_{noise}} = \frac{\eta s_i t}{N_{noise}} \quad (24)$$

と書ける. ここで N_{noise} はノイズ成分、 t は積分時間である. ノイズ成分は入射光子のポアソンノイズと検出器の読み出しノイズでほぼ占められており

$$N_{noise} = \sqrt{n_i t + n_{sky} t + n_{dark} t + N_{read}^2} \quad (25)$$

と書ける. ここで n_{sky} (photon/s/pix) は単素子あたりの検出された背景放射の光子数、 n_{dark} (e^- /s/pix) は検出器の単素子あたりの暗電流、 N_{read} (e^- r.m.s./pix) は検出器からの単素子当たりの読み出しノイズである

これまでは検出器が単素子の場合の話をしたが、複数素子の場合は複数素子からのノイズを考慮する必要があるが、それは統計的に足し合わせればよい. つまり、 m 個のピクセルに広がった像を検出する場合、ノイズ成分 N_{read} は

$$N_{noise} = \sqrt{n_i t + m n_{sky} t + m n_{dark} t + m N_{read}^2} \quad (26)$$

となる.

今回は n_{dark} は小さいとして無視する. n_i はすでに求めていて $n_i = 1768668$ である. n_{sky} は前章の N_{sky} から計算できて

$$n_{sky} = \frac{N_{sky} f_{conv}}{t} \times \eta = 1.365 (\text{photon/s/pix}^2) \quad (27)$$

である. m は測光時のアパーチャー面積で今回は $m = 706.7873 (\text{pix}^2)$ である.

N_{read} は以下のように求める.

取得したバイアスフレームを2枚用いる.

・差引する

・ $\sqrt{2}$ で割る.

・ `imstat nclip=3 (filename)` で表示される `stddev` が ADU 単位の読み出しノイズ.

その結果

$$stddev = 12.13 (\text{ADUr.m.s./pix}) \quad (28)$$

となるので f_{conv} をかけて

$$N_{read} = 12.13 \times 0.947 = 11.49 (e^- \text{ r.m.s./pix}) \quad (29)$$

である. 以上より

$$N_{noise} = \sqrt{n_i t + m n_{sky} t + m N_{read}^2} = 1365 (e^- \text{ r.m.s./pix}) \quad (30)$$

と求まるので

$$S/N = \frac{n_i t}{N_{noise}} = 1296 \quad (31)$$

と予想される.

4.6.3 比較

予想される値と等級誤差から求めた値では 300 程の差があった。この原因を等級誤差が 0.001 の位までしか表示できないことが原因と仮定してみる。このとき等級誤差は 0.0005-0.0014 までをとる可能性がある。上限下限の時の等級誤差を用いて S/N を計算してみると

$$S/N = \frac{1}{1 - 10^{-\frac{0.0005}{2.5}}} = 2172 \quad (32)$$

$$S/N = \frac{1}{1 - 10^{-\frac{0.0014}{2.5}}} = 776 \quad (33)$$

となり、かなりずれることが分かる。予想される S/N はこの範囲に収まっているので等級誤差が原因の一つと考えられる。

5 参考文献

・シリーズ現代の天文学 15 宇宙の観測一光・赤外天文学 家正則ほか

6 感想・謝辞

天体の観測といえば大型望遠鏡というイメージがあったので、小望遠鏡での観測を行うことができたのはいい経験になりました。また、この実習を通して望遠鏡や CCD の基本的な操作などを一通り学ぶことができました。丁寧に指導して下さった本原先生、TA の岡村さん、鶴山さん、ありがとうございました。