

小望遠鏡による基礎観測実習 (2015 年度)

平成 28 年 10 月 26 日

1 この実習の目的

東大天文センターの 21cm カセグレン望遠鏡を用い、CCD カメラによる基本的な天体観測を行います。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、および CCD 観測の基本技術の一通りを習得することを目指す。

毎年、具体的なテーマを一つ決めて、CCD カメラや望遠鏡の改良を行い、感度の向上をはかる。思った感度向上が得られているかを観測を通して検証することにより、天体観測において最も重要な量の一つである「限界等級」について理解を深めてもらいたい。

なお、昨年度に望遠鏡及び赤道儀システムが一新され、さらに大量のフィルター (広帯域フィルタは UBVR_I、狭帯域フィルタは [H β], [OIII], [H α], [SII]) が導入されたものまだ使いこなすまでにはいたっていない。

そのため、今年度は

新規に導入された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

新規に導入したフィルターの性能評価

実際に観測を行って、各種評価

限界等級を算出する

実際に観測を行って、その限界等級が得られるかを調べる

と、やらいといけないことが大量にあるため、時間が足りなくなった場合には、途中で終了することもありうる。

望遠鏡等のマニュアル/資料などは

<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kmotohara/30cm/>

にあるので、ある程度事前に目を通しておくように。

実習の web は <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kmotohara/wiki/> から左メニューの「講義など」にある「2016 基礎天文学観測」である。

(直リンク: <https://goo.gl/BN8Zeb>)

2 限界等級

2.1 システム効率とは

単純に言ってしまうと、

『望遠鏡に入射した星からの光子のうち、CCD で電荷となって読出されたものの割合』

。

ということで、

天体から望遠鏡に入射した光子数 (s_i (個/s))

$$s_i = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\Delta \lambda F_\lambda}{h\nu} \quad (1)$$

ここで、

D : 望遠鏡の口径
 F_λ : 天体からのフラックス
 $\Delta\lambda$: フィルターの波長範囲

と、

CCD で生じた電荷の個数 (n_i (e⁻/s))

$$n_i = \frac{N f_{conv}}{t} \quad (2)$$

ここで、

N : 画像上でのカウント
 f_{conv} : コンバージョンファクター
 t : 積分時間

とすると、システム効率 η は

$$\eta = \frac{n_i}{s_i} \quad (3)$$

で求まる。

2.2 限界等級 (単素子による検出の場合)

それをふまえた上で、限界等級はどのように定義されるかであるが、一般的には S/N という量で測る。すなわち、ノイズに対して信号がどの程度来ているかを評価し、それが一定の値を超えれば検出できた、ということにする。通常光赤外では $S/N = 5$ をこえれば検出できた、とすることが多い。

で、その S/N は

$$\begin{aligned} S/N &= \frac{n_i t}{N_{\text{noise}}} \\ &= \frac{\eta s_i t}{N_{\text{noise}}} \end{aligned} \quad (4)$$

のように書ける。ここで N_{noise} はノイズ成分、 t は積分時間。ノイズ成分は入射光子のポアソンノイズと検出器からの読出しノイズでほぼ占められており、

$$N_{\text{noise}} = \sqrt{n_i t + n_{\text{sky}} t + n_{\text{dark}} t + N_{\text{read}}^2} \quad (5)$$

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

ここまでは、検出器が単一素子の場合を考えた。それでは、CCDのように複数の素子に星像が結像する場合はどうなるのか？

2.3 限界等級 (複数素子による検出の場合)

複数素子の場合には複数の素子からのノイズを考慮する必要があるが、それらは統計的に足しあわせればいい。すなわち、 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_{noise} は

$$N_{\text{noise}} = \sqrt{n_i t + m n_{\text{sky}} t + m n_{\text{dark}} t + m N_{\text{read}}^2} \quad (6)$$

となる。

3 CCD カメラ

3.1 CCD について

- CCD の動作原理は
<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwamuro/LECTURE/OBS/detector.html>を参照。
- データについて具体的には西浦版『可視光域データ・リダクション法』を参照。

3.2 実習用 CCD カメラの使い方

3.2.1 起動

- まずは、CCD 本体の電源ケーブルをさして、電源を入れる。
- CCD 制御用 Linux ノート PC を起動。
- ログインユーザは tct2015 (パスワードは実習当日に教えます)
- その後 CCD の冷却が安定するまで 10 分 (? 各自確認せよ) ほど待つ

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。

- 取得画像ビューワーとして ds9 & を起動
- `acqfliframe (e or d) (time) : (time) の積分時間で、露出 (e) かダーク取得 (d) を行う。`
- `n_acqfliframe (e or d) (time) (N) : (time) の積分時間で、露出 (e) かダーク取得 (d) を (N) 回 行う。`

3.3 フィルタ交換

フィルターはフィルタ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

```
filfilter (filter name)
```

であり、フィルタは名称 (デフォルトで B, V, R, I, Hb, O3, Ha, S2) またはスロット番号 (1-8) で選べる。

なお、選択しているフィルタ名は取得した画像の FITS ヘッダに書き込まれるので確認すること。

3.3.1 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。

キーワード一覧と現在の値は、

`http://localhost/ccd.php`

で参照できる。(あるいは、`statall` 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

`status (Keyword)`

`status (Keyword) (Value)`

コマンドでできる。

3.3.2 重要なキーワード

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_CUR` : CCD の現在温度

4 観測前にすること

4.1 今夜の星空のチェック

Stellarium を使う。 (<http://www.stellarium.org/ja/>)

4.2 観測する星の選出

4.2.1 コンバージョンファクター測定用

Stellarium を使って探す。表示される等級は V 等級。

4.2.2 限界等級測定用

11 等級よりくらいものなので、オンラインのカタログを用いる。操作が GUI で直感的な aladin sky atlas (<http://aladin.u-strasbg.fr/>) を使う。

なおカタログの等級は必ずしも V 等級ではないので、必要であれば V 等級を何らかの方法で推定する必要がある。

4.3 キャリブレーションデータの取得

4.3.1 バイアスとダーク

それぞれ最低 20 枚は取得すること。また、ダークについては想定以外の露出時間の観測を行った場合には観測終了後にも取得する必要がある。

4.3.2 フラット

望遠鏡鏡筒前面をに白い紙を置き、懐中電灯で照らして取得。20 枚以上は取得する。

4.4 読出ノイズの簡易チェック

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 単位の読出ノイズ

5 データ解析

5.1 用いる計算機

ioa09, ioa10, ioa11 を用いることができるが、自身のパソコンでもかまわない。その場合は、IRAF をインストールしておくこと。

5.2 アカウントとパスワード

CCD 制御 PC/ioa09/10/11 のアカウント、パスワードは：

```
tct2015 / ***実習時に教えます***
```

5.2.1 実験室 PC への転送

ioa09, ioa10, ioa11 で画像を扱うためには ノート PC からリモートコピーをすることになる。たとえば /home/ccdimages/test.FTS というファイルを ioa10 のユーザー tct2015 のホームディレクトリ直下に持ってきたい場合はコマンドラインから

```
scp /home/ccdimages/test.FTS tct2015@ioa10:test.fits
```

のようにすればいいわけである。そのほか応用編として

- /home/ccdimages/hogehoge というディレクトリ以下すべてを現在のディレクトリに転送したい場合は

```
scp -r /home/ccdimages/hogehoge tct2015@ioa10.
```

- /home/ccdimages/test.FTS をホームディレクトリ直下にある obs というにコピーしたい場合は

```
scp /home/ccdimages/test.FTS tct2015@ioa10:/obs/
```

- /home/ccdimages/test1.FTS, /home/ccdimages/test100.FTS と “test” で始まる FITS ファイルをホームディレクトリ直下にある obs というにコピーしたい場合は

```
scp /home/ccdimages/test*.FTS tct2015@vw:/obs/
```

5.3 UNIX コマンドたちを使いましょう

5.3.1 ディレクトリに関する基本的な約束ごとなど

- 現在のディレクトリは
.
- 一つ上のディレクトリは
..
- ということは、もう一つ上のディレクトリは
../..
- ホームディレクトリは ~/

と表される。

現在のディレクトリを知りたい場合は

```
pwd
```

と打つ。

なお、一般的なディレクトリ構造は下図のようになっている。

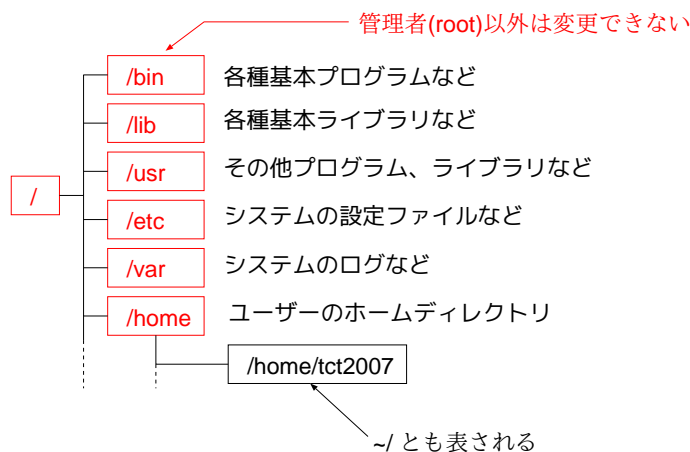


図 1: UNIX 系 OS のディレクトリ構造の一例

5.3.2 正規表現

文字列の集合を表現する約束ごと。いろいろあるが、とりあえず役に立ちそうなものを以下に示す。

- * : 任意の文字集合
たとえば、あるディレクトリで tmp で始まるファイルだけを表示したい場合は

```
ls tmp*
```


とする。あるいは、.FTS という拡張子をもつものだったら

```
ls *.FTS
```

とする。

- `?` : 任意の一文字
*が複数文字を代用するのに対して、一文字だけを表す。
たとえば、拡張子が2文字のファイルだけを表示する場合は

```
ls *.*??
```

とする。ls *.* とすると `.` が入っているファイルすべてが表示されてしまう。

- `[]` : 括弧内に含まれる一文字
たとえば、test のあとに数字一文字がついた.FTS をホームディレクトリにコピーしたい場合は

```
cp test[0123456789].FTS ~/
```

とする。これは代わりに

```
cp test[0-9].FTS ~/
```

と書くことも可能。
二桁の数字がつくファイルの場合には

```
cp test[0-9][0-9].FTS ~/
```

とすればいい。

5.3.3 ssh/scp

他のワークステーションにログインする。コピーする

- foo.ioa.s.u-tokyo.ac.jp に bar というユーザー名でログインしたいときは
ssh foo.ioa.s.u-tokyo.ac.jp -l bar
- foo.ioa.s.u-tokyo.ac.jp に bar というユーザー名のホーム下にある aho.txt というファイルを
カレントディレクトリにコピーしたいとき
scp bar@foo.ioa.s.u-tokyo.ac.jp:aho.txt .

5.3.4 less, more, cat

ファイルの中身を見たいときに使う。less, more は端末に出せるところまで表示して、続きはスペースキーなどで見ていくことが可能。cat はファイル全部を一気に端末に流し出す。

5.3.5 テキストファイルの編集

テキストファイルの編集をおこなうメジャーなものは vi と emacs が挙げられる。他にも色々あるが。

emacs aho.txt のように編集したいファイルを指定して起動。

基本的にマウスではなく、いろんなキー操作で編集するので、詳しいことはマニュアル本を見よ。

5.3.6 gawk

gawk はファイルテーブルの操作や、様々な計算が簡単にできる。

- たとえば

```
1 4 20.31
2 50 40.1
3 5 60.3
```

というテーブルが aho.txt という形であって、各行で 2 番目と 3 番目の要素を足し合わせて多テーブルに変換したい場合

```
gawk '{print($1,$2+$3)}' aho.txt
```

とすればいい。さらに、その結果を boke.txt に書き込みたいのなら

```
gawk '{print($1,$2+$3)}' aho.txt > boke.txt
```

とする。

- 電卓のようにしても使える。

$$10 \times 2 \times \frac{5}{2 \times \sin(5)} \times \exp(10.4/300)$$

だと

```
gawk 'BEGIN{print(10*2*5/(2*sin(5))*exp(10.4/300))}'
```

とすればいい。

変数を定義して使うこともできる。 $a = 10\sqrt{5}$, $c = 3 \times 10^{10}$ として

$$100 * a/c$$

を計算したいのであれば、

```
gawk 'BEGIN{a=10*sqrt(5);c=3e10;print(100*a/c)}'
```

とする。

常用対数関数がないので要注意である。

```
gawk 'BEGIN{print(log(100))}'
```

は $\ln(100)$ を表示する。

他にもいろんなことができる。詳しくはマニュアルとかを見よ。

5.3.7 リダイレクト、パイプ

あるコマンドの出力を、ファイルに流し込みたいときはリダイレクト。" > "を使う。さっきの
gawk '{print(\$1,\$2+\$3)}' aho.txt > boke.txt
とか。

さらにその出力をべつのコマンドに流し込みたいときはパイプ " | "を使う。さっきの
gawk '{print(\$1,\$2+\$3)}' aho.txt | gawk '{print(\$2-\$1)}'
のようにする。

5.4 IRAF の操作

- まず、作業するディレクトリで
mkiraf
を実行。このとき、terminal type を聞いてくるので、xterm と答える。
- xterm &
を実行して xterminal を立ちあげる。
- ds9 &
を実行して画像ビューワーを立ち上げる
- 先ほど立ち上げた xterm 内部で c1
で IRAF を立ち上げる。

以下、IRAF の様々なコマンドたち。() で囲った引数は必須、[] はオプション。オプションは一部しか書いていないので、詳しいことは

epar (command) で引数のチェック
help (command) でヘルプ
などでチェック。

主なコマンドは以下のようなものがある。詳しくは参考リンクを見るか、聞いてください。

- display (filename) (frame) [fi+] [zr-] [zs-] [z1=xxxxx] [z2=xxxxx]
画像を ds9 の (frame) に表示する。

fi+で全画面表示。

zr- zs-とすると自動スケールリングが off になって、z1=xxxx z2=xxxx で表示スケールを指定する必要がある。

- imstat (filename)
画像の統計量を調べる
- imhead (filename)
画像のヘッダ情報を表示する。
全ヘッダ情報は

imhead (filename) longhea+
で見れる。

- imcombine (filelist) (output)
(filelist) で指定したファイルをすべてたし合わせて平均する (オプションで和にもできる)。 (filelist) は
 - * filename1,filename2,filename3,...
のようにコマンドで書き連ねるか、
 - * ファイル名リストを羅列した filename.list のようなファイルを用意して
@filename.list
のように指定してもいい。
- imarith (filename1) (+-*/) (filename2) (output)
(filename1) と (filename2) の加減乗除 (+-*/) を行う。
- imexam [filename]
(filename) で指定したファイルの性質をインタラクティブに調べる。 ds9 上にカーソルを持って行き、そこでキーボードを操作することによって実現する。たとえば、
 - * a カーソル位置にあるピークの統計を調べる。FWHM、フラックス、バックグラウンドレベルなど。
 - * e カーソル位置のコントアを描く。
 - * z カーソル位置周辺のピクセルの値の一覧を出す。
 - * m カーソル位置周辺のピクセルの統計値を計算する
 - * q 終了

等

- IRAF で測光

apphot パッケージを使う。まずは IRAF を立ち上げて

```
noao
digi
apphot
```

とする。そのあと各種パラメータの設定

- epar phot
を実行
- photpar にカーソルを移動して、:e と打つ
 - * apertur を適当な値 (アパーチャ直径が FWHM の倍以上になるように)
 - * zmag は求めておいた値 (あるいはそのままでもい)
 - * 終わったら、:q と打つ
- fitskyp にカーソルを移動して、:e と打つ
 - * annulus を適当な値 (直径が FWHM の 3 倍以上になるように)
 - * 終わったら、:q と打つ

- datapar にカーソルを移動して、:e と打つ
 - * itime に露出時間の値 (秒) を入れる
 - * 終わったら、:q と打つ
- 終わったら、:q と打つ

次に、測光を行う。

phot (画像ファイル名)

で ds9 に画像が表示されるので、測光したい星にカーソルを持っていてスペースキーを押す。複数の星を測定することも可能。

終わったら q を 2 回打つ。

結果は (画像ファイル名).mag.[1-9] というファイルに保存される。中身は以下のようになっている。(# で始まる行はコメント行)

```
test.fits          2082.000  2449.000  2      nullfile          0      \
  2081.515  2448.083  -0.485  -0.917  0.575  0.777      0  NoError  \
  0.001193246  0.01377304  0.0068786  911  29      0  NoError  \
  1.          INDEF          INDEF          INDEF          \
  3.00      4.924091      28.69609  4.88985      23.277  0.491  0  NoError
```

このなかで、最後の行が重要で

- (アパーチャー半径)
- (アパーチャー内のカウント [スカイ込み])
- (アパーチャー面積)
- (スカイを引いたアパーチャー内のフラックスカウント)
- (等級に変換した値 [上の zmag を用いている])
- (等級誤差)

となっている。

5.5 解析の実際

西浦版『可視光域データ・リダクション法』を参照。

実際に行うことは、

- データのバイアス引き、ダーク引き、フラットフィールドを行う
- imexam で星からのフラックス量を算出。
- それを電子数に換算して n_i を算出
- それと計算から出る s_i を比較してシステム効率と conversion factor を出す

という流れになる。

6 実習課題

6.1 フィルタ特性評価

6.1.1 フィルタ透過率データの取得

フィルタ透過率のデータが、

<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kmotohara/30cm/camera/index.html>

に、

CCD の量子効率が

<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kmotohara/30cm/camera/mod-ccd-qe.dat>

にあるので、それをダウンロードする。

6.1.2 実効透過率の評価

いずれか一つのフィルタについて、CCD の量子効率と合わせた時の実効透過率曲線をプロットし、

- 中心波長 (λ_{eff})
- 半値全幅 ($\Delta\lambda$)
- 平均透過率 (T_{eff})

を求めよ。

なお、透過率の波長依存性を $T(\lambda)$ とした場合、

•

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

•

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

と定義する。

以下の作業は、上記のフィルタに対して行うこと。

6.2 カメラの視野とピクセルスケール

- 望遠鏡の焦点距離及び CCD のピクセルサイズから、ピクセルスケール (arcsec/pixel) を計算せよ。
- 既知の二重星、或いは間隔のわかっている二つの星を同時に撮影し、画像上での距離からピクセルスケールを算出せよ。また、上記の値とどれくらい一致したかを評価せよ。

6.3 システム効率

- 適当な明るさの星を適当な積分時間で撮影し、検出されたカウントを測定せよ。
- その星から望遠鏡に入射した光子の数を計算せよ。
- 上記2つを比較してシステム効率 (式 3) を求めよ。

6.4 等級原点

等級原点 Z_{mag} は、あるカメラシステムで 1 秒間の露出で 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。たとえば、8 等級の星を 5 秒露出したときに 100 カウントの信号が検出されたとすると、このカメラシステムでの等級原点は

$$\begin{aligned} Z_{\text{mag}} &= 8 + 2.5 * \log \frac{100}{5} \\ &\sim 11.3 \end{aligned}$$

となる。これを、上記のデータより算出せよ。

6.5 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 [photons/s/arcsec²]、および [mag/arcsec²] で算出せよ。

6.6 限界等級

- 適当に星を選び、適当な積分時間で露出を行い、その等級と等級誤差を測定せよ。さらに、S/N を計算せよ。
- 予想される S/N 値を式 (6) から計算せよ。
- 実際に検出された S/N 比を上記の計算値と比較し、一致しない場合はその原因を考察せよ。