

基礎天文学観測

小望遠鏡による基礎観測実習

林 隆之
学生番号 072010A
本原教員

2008/01/31

概要

2007 年度冬学期，10 月から 1 月にかけて行われた基礎天文学観測のレポート。

1 目的

東大天文センターの 30cm カセグレン望遠鏡を用い，CCD カメラによる天体観測の基本技術の習得，限界等級やシステム効率などの導出・理解を行う。

2 観測機器の原理

2.1 カセグレン式望遠鏡

カセグレン式望遠鏡は 1 組の凹面鏡，凸面鏡による反射指揮望遠鏡である。望遠鏡に入射した平行光線は，主鏡である凹面鏡により反射され，凸面鏡に向かう。凸面鏡により光線は再度反射され，凹面鏡の中心部に開けられた小さな穴を通り像を結ぶ。

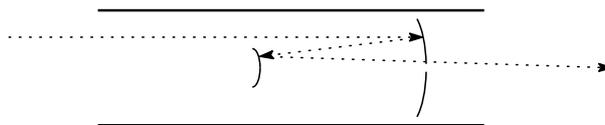


図 1 カセグレン式望遠鏡

同じ反射望遠鏡であるニュートン式望遠鏡に比べ，筒の長さが短くて済む利点がある一方で，より精密な技術が要求される。

2.2 フィルター

市販の駿河精機の青緑透過フィルタ S76-VG6 と赤外線カットフィルタ S76-KG5-1 を組み合わせて V バンド用フィルタとして代用する。それぞれの透過率と，重ねたときの透過率は以下のグラフの通り。

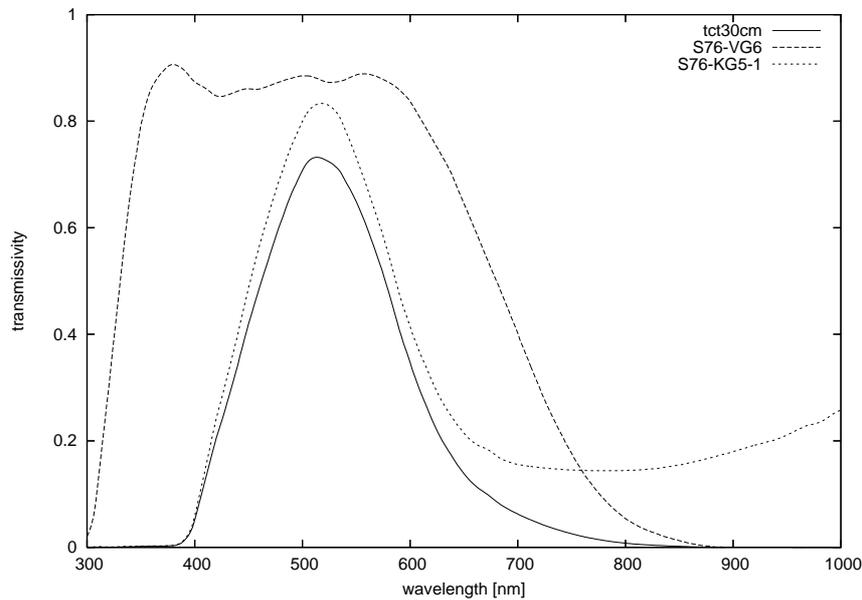


図2 フィルタの透過率

さらに、重ねあわせたフィルタのピーク付近の透過率の値は表1のようになる。

波長 [nm]	透過率	波長 [nm]	透過率
496.0000	0.6908268	518.0000	0.7304457
498.0000	0.6994554	520.0000	0.7287325
500.0000	0.7075854	522.0000	0.7266950
502.0000	0.7151214	524.0000	0.7246382
504.0000	0.7210472	526.0000	0.7223406
506.0000	0.7257318	528.0000	0.7196556
508.0000	0.7288070	530.0000	0.7161365
510.0000	0.7308859	532.0000	0.7125319
512.0000	0.7319927	534.0000	0.7081487
514.0000	0.7321971	536.0000	0.7024987
516.0000	0.7316640	538.0000	0.6950538

表1 フィルタの透過率

表より透過率がピークとなる波長は $\lambda = 514[\text{nm}]$, グラフより半値全幅はおよそ $\Delta\lambda = 160[\text{nm}]$ である。

2.3 CCD カメラ

カセグレン式望遠鏡により集光された光子は CCD 素子へ向かう。CCD 素子に光子が入射すると、一定の確率で電子が光子と 1 対 1 対応ではじき出される。こうしてはじき出された電子は電流となり、電圧として計測される。光子が電子をはじき出す確率を CCD の量子効率という。

今回の観測で使う望遠鏡に設置されているのは、カメラ本体が Spectra Source Instruments 社製 MCD-1000。中にはいっている CCD は SITe 社の SI-502AB という裏面照射の CCD である。量子効率は 68% (450nm) , 75%(550nm) , 80%(650nm) であるが、本実習にはさほど関係がない。

3 コンバージョンファクターの導出

3.1 定義

画像場でのカウントと CCD で単位時間あたりに生じた電荷の個数 n_e (e^-/s) との間の係数のことをコンバージョンファクター (conversion factor) と呼び、

$$n_e = \frac{N f_{\text{conv}}}{t} \quad (1)$$

で定義される。ただし、

$$\begin{aligned} N &: \text{画像上のカウント数} \\ f_{\text{conv}} &: \text{コンバージョンファクター} \\ t &: \text{積分時間} \end{aligned}$$

とする。

3.2 原理・方法

式 (1) より、

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

となる。ここで、 $n_e t$ は電荷の総数を表す。

カウント数 N のゆらぎを $\Sigma = \sqrt{\langle (N - \langle N \rangle)^2 \rangle}$ 、電荷の総数 $n_e t$ のゆらぎを $\sigma = \sqrt{\langle (n_e t - \langle n_e t \rangle)^2 \rangle}$ と定義すると、

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\langle (n_e t - \langle n_e t \rangle)^2 \rangle} \\ &= \sqrt{\langle (f_{\text{conv}} N - \langle f_{\text{conv}} N \rangle)^2 \rangle} \\ &= f_{\text{conv}} \sqrt{\langle (N - \langle N \rangle)^2 \rangle} \\ &= f_{\text{conv}} \Sigma \end{aligned} \quad (3)$$

となる。

ここで、電荷の総数に比例する入射光子数はポアソン分布に従うため、生じる電荷の総数もポアソン分布に従う。よって、ポアソン分布にて成立する関係式、

$$\sigma = \sqrt{n_e t}$$

が得られる。これに式 (2) を代入して、

$$\sigma = \sqrt{f_{\text{conv}} N} \quad (4)$$

以上より、式 (3) と式 (4) から、

$$\begin{aligned} f_{\text{conv}} \Sigma &= \sqrt{f_{\text{conv}} N} \\ \Leftrightarrow \sqrt{f_{\text{conv}}} \Sigma &= \sqrt{N} \\ \Leftrightarrow \log \Sigma &= \frac{1}{2} \log N - \frac{1}{2} \log f_{\text{conv}} \end{aligned} \quad (5)$$

となる (今回測定ができない電荷数に関するパラメーターが消去できた)。

上式によると、カウント数 N を横軸、ゆらぎ Σ を縦軸に対数プロットしたグラフを考えると、その y 切片がコンバージョンファクターとなる。

3.3 観測

11月16日、午後18時頃から21時頃にかけて、望遠鏡に一樣に光子を入射させ、様々な積分時間(0s,1s,2s,4s,8s,16s,32s)で観測した。積分時間、1s,2s,4s,8sのものについては各33枚、16s,32sのものについては各1枚ずつ画像を取得した。0sのものについては32連写と30連写の2つのファイル群を用意した。ファイル名は以下のように命名した。

積分時間	ファイル名
0s	no001.fits ~ no032.fits noi001.fits ~ noi030.fits
1s	con001.fits ~ con033.fits
2s	con2001.fits ~ con2033.fits
4s	con4001.fits ~ con4033.fits
8s	con8001.fits ~ con8033.fits
16s	con16.fits
32s	con32.fits

表2 ファイル名一覧

3.4 解析

まず、irafをのimcombineコマンドを用いて各積分時間ごとに画像の平均とゆらぎをとった(積分時間が16s,32sのものは撮った画像が少ない、あるいは飽和してしまったので解析には使わなかった)。ファイル名は以下の通り。

積分時間	ファイル名
0s(1)	平均 bias_01.fits
	ゆらぎ bias_01_sigma.fits
0s(2)	平均 bias_02.fits
	ゆらぎ bias_02_sigma.fits
1s	平均 conversion01s.fits
	ゆらぎ conversion01s_sigma.fits
2s	平均 conversion02s.fits
	ゆらぎ conversion02s_sigma.fits
4s	平均 conversion04s.fits
	ゆらぎ conversion04s_sigma.fits
8s	平均 conversion08s.fits
	ゆらぎ conversion08s_sigma.fits

表3 各積分時間ごとのファイル名

ただし、0s積分の画像については、32連写したものを(1)、30連写したものを(2)とした。

次に、imarith コマンドを用いて積分時間 1s,2s,4s,8s の平均のファイルから 0s の平均のファイルを引き算した。「積分時間 0s」とはすなわち露光時間が 0s であることを言うため、光子が 1 つも望遠鏡に入っていない状態であり、理想的な状況ではカウント数もゼロになるはずである。しかしながら、実際は光子が入射するか否かに関わらず一定の電荷/カウントが生じてしまっている。この値のことをバイアスと呼ぶ。引き算の操作は、各積分時間のファイルからこのバイアス分のカウント数を差し引くことに相当する。差し引いたのちのファイル名は以下の通りである。なお、バイアスの値としては (1) の 32 連写したものを採用した。

積分時間	ファイル名
1s	平均 conversion01s_real.fits
2s	平均 conversion02s_real.fits
4s	平均 conversion04s_real.fits
8s	平均 conversion08s_real.fits

表 4 バイアスを差し引いた各積分時間ごとのファイル名

次に、imhist コマンドを用いヒストグラムを描くと同時にこれらの画像全体の平均をとった。これを行うことにより CCD 全体のゆらぎが求まる。ただし、外れ値や、CCD の痛んでいるだろう部分を外すために、imstat コマンドにより CCD の領域と、計算に入れるカウント数の上限と下限を指定した。

積分時間	ファイル名	画面の平均	カウント数の幅
0s(1)	平均 bias_01.fits	2180	1228 ~ 1232
	ゆらぎ bias_01_sigma.fits	6.396	0 ~ 8
1s	平均 conversion01s.fits	2180	1000 ~ 3400
	ゆらぎ conversion01s_sigma.fits	36.53	0 ~ 76
2s	平均 conversion02s.fits	4293	2000 ~ 6600
	ゆらぎ conversion02s_sigma.fits	55.7	0 ~ 110
4s	平均 conversion04s.fits	8217	4100 ~ 12900
	ゆらぎ conversion04s_sigma.fits	79.99	0 ~ 177
8s	平均 conversion08s.fits	15859	7800 ~ 25000
	ゆらぎ conversion08s_sigma.fits	109	0 ~ 234

表 5 各積分時間ごとのカウントの平均とゆらぎ

ただし、領域としては iraf の定める .fits ファイル上の座標で [150:500,150:500] を指定した。最後に、これらの結果を Gnuplot でプロットしたものが図 1 のグラフである。

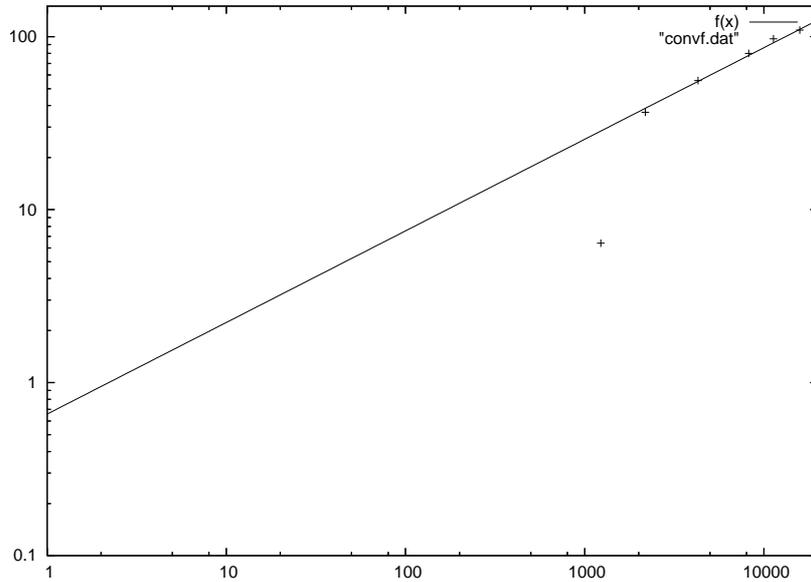


図1 カウントの平均（横軸）とゆらぎ（縦軸）

4 システム効率の導出

4.1 定義

望遠鏡に入射する光子の数 n_p と CCD で生じる電荷の個数 n_e との間の係数のことをシステム効率と呼び、

$$\eta = \frac{n_e}{n_p} \quad (6)$$

で定義される。



図2 システム効率

これは上図のように、天体の等級に相当する入射光子 n_p と、大気とフィルターの透過率、主鏡と副鏡での反射率、CCD での量子効率を受けて生じた電子の数 n_e の比のことである。

4.2 原理・方法

カタログを使って適当な等級の分かっている天体を選ぶ。その天体の等級から求まる入射光子数 n_p と、観測結果であるカウント数 N と先に求めたコンバージョンファクター f_{conv} によって導出する n_e の比を考える。

天体から望遠鏡に入射する光子数 n_p は単位時間あたり、

$$n_p = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\Delta \lambda F_\lambda}{h\nu} \quad (7)$$

である。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

である。ここで、等級の定義より m 等級である天体のフラックス F_m は、基準となる m_0 等級の天体のフラックス F_0 を用いて

$$m = m_0 - \frac{5}{2} \log \left(\frac{F_m}{F_0} \right) \quad (8)$$

$$\Leftrightarrow F_m = 3.92 \times 10^{-12} \cdot 10^{-\frac{2}{5}m}$$

と表せる。ただし、0 等級のフラックス $3.92 \cdot 10^{-12} [\text{W}/\text{cm}^2/\mu\text{m}]$ を基準とした。本観測では、 $D = 30[\text{cm}]$ 、 $\Delta\lambda = 160[\text{nm}]$ 、 $\lambda = 514[\text{nm}]$ であるため、これらを式 (8) とともに式 (7) に代入することに、

$$n_p = 1.145 \times 10^9 \cdot 10^{-\frac{2}{5}m} \quad (9)$$

となり、等級 m と単位時間あたりの光子数 n_p の関係が求まった。これと、

$$n_e = \frac{N f_{\text{conv}}}{t} \quad (10)$$

により求まる電子数 n_e と比較することにより、式 (6) からシステム効率 η が求まる。

4.3 観測

11 月 16 日、午後 20 時頃から 22 時頃にかけて、 ε -casi (3.4 等級) を観測した。観測は 3 連写を 2 度行った。ファイル名及び観測結果は以下の通りである。

ファイル名	積分時間	mophat	aperture	カウント
wcas001.fits	0.2s	7.8	10	221308.5
wcas002.fits	0.2s	6.37	8	196172.5
wcas003.fits	0.2s	8.83	10	213650.4
xcas001.fits	0.2s	7.8	10	221308.5
xcas002.fits	0.2s	6.37	8	196172.5
xcas003.fits	0.2s	8.83	10	213650.4
平均				221765

表 6 ε -casi の観測・解析

4.4 解析

解析結果は先の表に載せた。mophat とはカウントの半値全幅であり、aperture は mophat に応じて指定した半径である。カウント数はこの半径に含まれるカウントの総数である。いずれも、imexam コマンドを用いて mophat などの画像の統計量を調べた後、apphot パッケージを用いて aperture を指定し、カウント数などの値を得た。

次に、観測結果の平均値を取るが、aperture を 8 と指定したもの (wcas002.fits,xcas002.fits) はカウントが大きすぎてしまったため除外し*1、それ以外の 4 つのファイルで平均を取ったところカウント数は 221765 となった。

*1 天体からのフラックスの一部しか捉えられていないためと考えられる

これらの結果を用いて具体的な計算を行う。式 (9) より単位時間あたりに実際に光子数 n_p は、

$$\begin{aligned} n_p &= 1.145 \times 10^9 \cdot 10^{-\frac{2}{5}m} \\ &= 1.145 \times 10^9 \cdot 10^{-\frac{2}{5}3.4} = 5.001 \times 10^7 \end{aligned} \quad (11)$$

一方、CCD で生じた電子数 n_e はカウント数を式 (10) に代入することで、

$$\begin{aligned} n_e &= \frac{Nf_{\text{conv}}}{t} \\ &= \frac{221765 \cdot 1.316}{0.2} = 1.459 \times 10^6 \end{aligned} \quad (12)$$

と求まる。式 (11) と式 (12) より、システム効率は

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{n_e}{n_p} \\ &= \frac{1.459 \cdot 10^6}{5.001 \cdot 10^7} = 2.917 \times 10^{-2} \end{aligned} \quad (13)$$

より、 $\eta = 2.92 \times 10^{-2}$ と求まった。

5 限界等級の導出

5.1 定義

ある積分時間 t のもとで、ある S/N 比のデータを得られる最も暗い天体の等級を限界等級と呼び、これは望遠鏡の立地も含めた観測精度の指標の 1 つとなる。

5.2 原理・方法

S/N 比は、 σ をゆらぎとすると、

$$\frac{S}{N} = \frac{n_e}{\sigma} \quad (14)$$

で定義され、

$$\sigma = \sqrt{n_e t + l n_{\text{sky}} + l n_{\text{dark}} t + l N_{\text{read}}^2} \quad (15)$$

である（ポアソン分布に従うため）。ただし、

- l : ピクセル数
- n_{sky} : 背景光由来の電子数
- n_{dark} : 暗電流
- N_{read} : 読み出し雑音

である。従って、

$$\frac{S}{N} = \frac{n_e}{\sqrt{n_e t + l n_{\text{sky}} + l n_{\text{dark}} t + l N_{\text{read}}^2}} \quad (16)$$

となり、 n_e の値を求めれば式 (6) ~ 式 (8) により等級が求まることになる。

5.3 観測

コンバージョンファクターを求める際に用いたフラット画像から読み出しノイズ N_{read} 、システム効率を求める際に用いた ϵ -casi の観測データから背景光由来の単位時間あたりの電子の個数 n_{sky} が求まるので新たな観測データは不要である。

5.4 解析

背景光由来のカウントは ϵ -casi の観測により取得したデータ cas001.fits*² から bias_01.fits を差し引くことにより求め、このファイルのデータは以下の通り*³。

MEAN	MEDIAN	STDDEV	MIN	MAX
1322	1299	152.1	1082	1616

表 7 背景光のカウントについてのデータ

このうち、MEAN の値を背景光のカウントとし、式 (10) より電子数 n_{sky} は、

$$\begin{aligned} n_{\text{sky}} &= \frac{Nf_{\text{conv}}}{t} \\ &= \frac{1322 \cdot 1.316}{0.5} \sim 3479.5 \end{aligned}$$

読み出しノイズは 0 秒積分のゆらぎであり、表 4 より、

$$\sigma = 6.396$$

これを電子数に換算すると、

$$\begin{aligned} N_{\text{read}} &= Nf_{\text{conv}} \\ &= 6.396 \cdot 1.316 \sim 8.417 \end{aligned}$$

また、ピクセル数 l は指定した aperture が 10 であることより、

$$l = 10^2 \cdot \pi \sim 314$$

以上より、積分時間 10 秒のもとで $S/N = 10$ のデータを得るのに必要な観測天体由来の電子数は、式 (16) より、

$$\begin{aligned} \frac{S}{N} &= \frac{n_e}{\sqrt{n_e t + l n_{\text{sky}} + l n_{\text{dark}} t + l N_{\text{read}}^2}} \\ \Leftrightarrow 10 &= \frac{n_e}{\sqrt{n_e \cdot 10 + 314 \cdot 3479 + 0 + 314 \cdot 8.417^2}} \\ \Leftrightarrow n_e &= 1.106 \times 10^4 \end{aligned} \quad (17)$$

である（ただし、暗電流は計測していないため $n_{\text{dark}} = 0$ とした）。これを式 (9) に代入すると、

$$\begin{aligned} n_p &= 1.145 \times 10^9 \cdot 10^{-\frac{2}{5}m} \\ \Leftrightarrow 1.106 \times 10^4 &= 1.145 \times 10^9 \cdot 10^{-\frac{2}{5}m} \\ \Leftrightarrow m &= 12.53 \end{aligned} \quad (18)$$

より、積分時間 10s で S/N 比 10 のデータを得られる最大の等級は 12.5mag であることが分かった。

6 η -Per 付近の天体の観測

・ η Per 付近の暗い天体を観測し、先に求めた限界等級通りの結果が得られているかどうかを確認した。

*² wcas001.fits などと同時に取得した 0.5 秒積分のデータ

*³ どの領域を指定したかはメモしていない・・・

6.1 観測

1月4日, 午後21時頃, η -Per 周辺の暗い天体を観測した。積分時間 10 秒で3連写を3回行った。ファイル群は下記の通り。

ファイル名	積分時間
epera001.fits ~ epera003.fits	10.0s
eperb001.fits ~ eperb003.fits	10.0s
eperc001.fits ~ eperb003.fits	10.0s

表 8 η -Per の fits ファイル名

ここで, それぞれのファイル群では η -Per の位置を少しずつずらして連写を行った。

6.2 解析

まず, 背景光や暗電流などに由来するカウントを除外するため, iraf の imarith コマンドを用い,

eperc00X.fits - eperb00X.fits

という演算を行い ($X = 1, 2, 3$), ファイル名を eper00X.fits とした。

6.2.1 等級

このファイルを先に ε -casi を解析したのと同様の方法で解析し, η -Per 付近の2つの天体について以下の観測値を得た。

天体 ID	ファイル名	積分時間	mophat	aperture	カウント	等級誤差
1459-0095477	cas001.fits	10.0s	3.83	10	66335.27	0.009
	cas002.fits	10.0s	3.84	10	66745.31	0.009
	cas003.fits	10.0s	4.05	10	66432.41	0.009
	平均				66504.33	0.009
1459-0095538	cas001.fits	10.0s	#	10	4572.9	0.117
	cas002.fits	10.0s	#	10	4388.2	0.132
	cas003.fits	10.0s	#	10	3869.5	0.144
	平均				4276.8	0.131
ID なし	cas001.fits	10.0s	#	10	3269.5	0.153
	cas002.fits	10.0s	#	10	2601.3	0.198
	cas003.fits	10.0s	#	10	3029.3	0.168
	平均				2966.7	0.173

表 9 η -Per の近傍の天体の観測値 1

ただし, 表中で#とした情報は計測していない。このカウントの平均値と, 先に求めたコンバージョンファクター, システム効率を用いて式 (9) より天体の等級を求め, カタログで等級が出ている物についてはそれと比較した。

天体 ID	観測結果から求めた等級	カタログの等級
1459-0095477	9.21±0.01	9.28
1459-0095538	12.2±0.13	12.5
ID なし	12.6±0.17	

表 10 η -Per の近傍の天体の等級

6.2.2 S/N 比

等級誤差から S/N 比を求めることができる。等級を m , 等級誤差を Δm とすると、望遠鏡に入射する天体からのフラックスの誤差は

$$\Delta F = F(m \pm \Delta m) - F(m) \quad (19)$$

これがノイズに他ならなく、従って S/N 比は式 (8) を用いて、

$$\begin{aligned} \frac{S}{N} &= \left| \frac{F(m)}{\Delta F} \right| \\ &= \left| \frac{F}{F(m \pm \Delta m) - F(m)} \right| \\ &= \left| \frac{1}{F(m \pm \Delta m)/F(m) - 1} \right| \\ &= \left| \frac{1}{10^{-\frac{2}{5}\Delta m} - 1} \right| \end{aligned} \quad (20)$$

と表せる。これにより、各天体の S/N 比を求めることができ以下のようになる (各ファイルごとの S/N 比を計算した後取ったそれらの平均値を天体の S/N 比とした)。

天体 ID	ファイル名	等級誤差	S/N 比
1459-0095477	cas001.fits	0.009	121
	cas002.fits	0.009	121
	cas003.fits	0.009	121
	平均		121
1459-0095538	cas001.fits	0.117	9.788
	cas002.fits	0.132	8.735
	cas003.fits	0.144	8.050
	平均		8.857
ID なし	cas001.fits	0.153	7.608
	cas002.fits	0.198	5.998
	cas003.fits	0.168	6.975
	平均		6.860

表 11 η -Per の近傍の天体の S/N 比

求めた限界等級は 12.5 であったが、カタログで 12.5 等級である ID1459-0095538 の天体が S/N 比約 9 で 12.1 等星として検出できているのでまずまずの結果になった。

7 感想

最先端であるすばるの 8m 鏡と比較すると 30cm 鏡は素人目にはちんけなものに感じてしまったが、わずか 10 秒積分で 12 等級を検出でき意外だった。寒かったのと、 η -Per を視野に入れただけで満足してしまったので長い積分時間で試さなかったが、機会があればより暗い天体の検出もまたやってみたい。

CCD カメラの特長については嶋作先生の「CCD カメラの性能評価」を同時に解析していたこともあり、相乗効果か、大変よく理解できた。ゆくゆくは観測系に進みたいなと漠然と考えていたが、実際に観測することで観測のイメージが掴めて良かった。

結局予定をより長い時間がかかってしまったが、学部生の実習につきっきりで丁寧に説明して下さりありがとうございました。