

2010年度学生実習

小望遠鏡による基礎観測実習

05102006

高橋亘

平成 23 年 1 月 30 日

目次

1	はじめに	2	4.4.1	結果	9
1.1	実習の目的	2	4.5	限界等級	9
1.2	結果	2	4.5.1	計算	9
1.3	概要	2	4.5.2	D の測定	10
2	システム設定～フラット取得	3	4.5.3	結果	10
2.1	CCD 取り付け [11/25]	3	4.6	背景光の等級	11
2.2	遮光 [11/25]	3	5	いろいろな考察	11
2.3	フラット取得・調整 [11/25,12/02]	3	5.1	サインゆらぎ	11
3	画像データ取得 [12/09]	4	5.1.1	サインゆらぎとは縞模様のこと	12
3.1	練習	4	5.1.2	ゆらぎ除去の方法	12
3.2	ピクセルサイズ測定	4	5.1.3	ゆらぎ除去の結果	13
3.3	システム効率測定	4	5.1.4	ゆらぎの時間依存	14
3.4	限界等級測定	4	5.1.5	まとめ	14
3.5	バイアス・ダーク用データ	4	5.2	ダークカウント減少のふしぎ	14
4	データ解析/種々のパラメタの算出	5	5.2.1	再現性	14
4.1	IRAF を用いた画像解析	5	5.2.2	線形性	15
4.1.1	バイアス・ダークデータ	5	5.2.3	ダークカウント解析	16
4.1.2	フラットデータ	6	5.2.4	Ct:時間依存する項	16
4.1.3	観測天体のデータ	6	5.2.5	B:時間に依存しない項	17
4.2	ピクセルスケール	6	5.2.6	まとめ	18
4.2.1	結果	6	5.3	読み出しノイズの不定性	19
4.3	システム効率	7	5.4	ノイズ計算	19
4.3.1	s_i の算出	7	5.4.1	背景光の見積もり	19
4.3.2	アルファレッツの解析と n_i の算出	8	5.4.2	暗電流の見積もり	19
4.3.3	結果	8	5.5	システム効率	20
4.4	等級原点	8	5.5.1	スペクトル型によるちがひ	20
			5.6	方位	21
			6	あとがき	22

1 はじめに

1.1 実習の目的

東大天文センターにある 30cm カセグレン望遠鏡 TCT を使い、CCD カメラによる撮像の基本を学んだ。具体的には、望遠鏡の基本操作法、赤経・赤緯による天体の指定法、CCD データの解析法である。得られたデータを用いて、望遠鏡のシステム効率、CCD のピクセルスケール、そして望遠鏡性能の重要な指標である、望遠鏡の限界等級を算出した。

1.2 結果

得られた結果は以下の通りである。

システム効率： $\eta = 0.133 \text{ e}^-/\text{photon}$
 ピクセルスケール： $\alpha = 0.2718 \text{ asec/pix}$
 0.5 sec での限界等級： $L_{mag} = 15.73$ 等

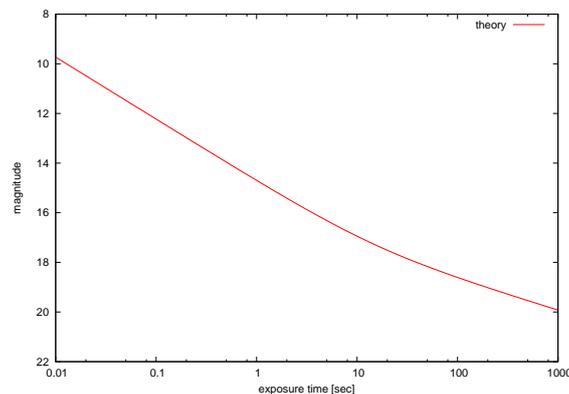


図 1: 限界等級の理論線

図 1 は長時間積分したときの限界等級を示したものである。

1.3 概要

実習は一回の説明会を含め、全五回の日程で行われた。

第一回	11/11 16:30-	: 説明会
第二回	11/25 16:30-21:30	: CCD 取り付け
第三回	12/02 16:30-21:30	: フラット取得
第四回	12/09 16:30-21:30	: 星選び・観測
第五回	01/06 16:30-	: データ解析

今回の実習では望遠鏡の CCD を新調したために、望遠鏡の様々なパラメタを全くあたらしく測定する必要があった。そのため CCD 取り付けの作業から始めるなど観測開始までに前半の三回を要してしまい、観測自体に神経を使うことができなくなってしまった。加えて、用いた CCD が持つと思われるさまざまな不思議性質のために、データ解析にも相当の不確かさがまぎれていると思われる。得られた結果の精度については議論の余地が大きい。

より精確な値を得るための反省として、我々の実習における問題点を以下にまとめておく。

第一の問題としては、システム設定の再現性の低さがあるだろう。例えば CCD の取り付け位置・角度は詳しく測定できておらず、したがって CCD が望遠鏡の焦点面に正しく配置されているのかが確かめられない。また CCD の大きさに対してフィルタが小さく、そのふんのけられが CCD 上に生じている可能性もある。このようなシステム設定の杜撰さによる問題は、その設定値を記録するだけで原因の解明ができるものと思われる。以降の観測ではぜひこうした値のメモをとりまくって頂きたい。

第二の問題として、CCD 性能の解析のためのデータ数の少なさがある。目標天体データの解析に先立って、CCD の持つバイアスやダーク、読み出しノイズなど与えられたパラメタの信用性が重要になる。考察にて詳しく述べるように、我々の実習では CCD 性能について確かな評価が下せず、そのことがシステム全体のパラメタ評価におおきな不確かさをもたらすことになった。この問題の回避のために CCD についてのデータを詳しく取得しておく必要がある。後述するような多数回のバイアス取得はもちろん、余裕があれば読み出しノイズやコンバージョンファクターについても再測定しておくべきではないだろうか。

2 システム設定～フラット取得

実習の前半に行った、フラットなフラット取得のための様々な試みについてまとめる。冒頭にも記したように、この段階での「とりあえず撮ればいいや」という安直な進行法が、実習を通じた解析不能な不確かさを生んでしまった要因のひとつと思われる。今後はこのような失敗のなきよう、この経験を生かしていきたい。

2.1 CCD 取り付け [11/25]

既に望遠鏡に取り付けられていた古い CCD を取り外し、新たに Kodak 社製の CCD を取り付けた。光軸上にはほかにフィルタも取り付けることになったが、光軸上での両者の位置、軸からの角度は詳しくわからない。

2.2 遮光 [11/25]

つづいて CCD の遮光を行った。ドーム内のすべての窓には段ボールによって覆いをかけ、CCD 自体にも段ボールで作成した覆いをつけた。これによって遮光状況は上がったと思われるが、同時に CCD 付近の気温上昇を引き起こしていたと考えられる。撮像中は CCD 周りの段ボールを閉め切るとは避けたが、気温上昇によるシーイング悪化が引き起こす分解能の低下が起きていたことが予想される。ただしこれも、実際にどの程度の大きさで影響が生じていたのかはわからない。

2.3 フラット取得・調整 [11/25,12/02]

以上を終えた時点で、ドーム内の壁や天井を用いたドームフラット取得を行ってみた。その結果、ばらつきはあるものの、CCD の右側 5%ほどの領域に、5%ほどのカウント数低下がみられた。これを改善しようと、

- 鏡筒先端での干渉が原因と考え、先端に黒塗り段ボールを巻いた
- けられが原因と考え、CCD/フィルタの位置関係を幅広く変更した
- 撮像対象にムラがあると考え、ドーム/スカイ両者のフラットを取得した

など試したものの結局ムラはなくなり、CCD の感度ムラによるものとして撮像を続けることにした。フラットのデータとしては、12/02 に曇り空の撮像から得たスカイフラットのデータ 10 枚を使用した。

3 画像データ取得 [12/09]

解析用に取得した画像データについてまとめる。すべての撮像データは12/09の一日にまとめて撮られたが、そのことがデータ数の少なさをもたらすことになってしまったといえる。

3.1 練習

はじめに、撮影の練習のためにはくちょう座デネブの観測を行った。露光時間は0.1secとし、5枚のデータを得た。デネブのV等級は1.25である。

3.2 ピクセルサイズ測定

ピクセルサイズ測定のため、連星系であるはくちょう座アルビレオを観測した。露光時間は0.5secとし、10枚のデータを得た。SIMBADによれば、アルビレオの連星の赤経/赤緯はそれぞれ

主星 ALBIREO : 19h30m43.281s, +27°57'34.85"

伴星 HR 7418 : 19h30m45.395s, +27°57'55.00"

に位置し、両者は34.51arcsecだけ離れている。

3.3 システム効率測定

システム効率測定のため、アンドロメダ座アルフェラッツを観測した。露光時間は0.5secとし、10枚のデータを得た。アルフェラッツはVbandで2.06等の等級をもっている。

3.4 限界等級測定

限界等級測定用の画像とするため、アルフェラッツ付近の夜空を100secの長時間にわたって観測した。10枚ずつの測定を二ヶ所について行ったが、いずれもアルフェラッツ自体を視野に入れた観測だったために星周辺のデータもサチュレーションの影響を受け、解析に耐えうる画像は得られなかった。

3.5 バイアス・ダーク用データ

CCDの特性を測定するために、以下のバイアス・ダーク画像を取得した。それぞれ約10(20)枚をまとめた平均カウント数・偏差・最小値・最大値を表にまとめている。ただし標準偏差は各画像から得られた値の平均であり、それ以外は平均データでの値である。

露光時間との相関について、露光時間が増加するにつれてカウントも増加することが予想されたが、得られた結果は減少を示していた。詳しくは後述するが、このような不可解な減少は、結局、CCDの特性であったのだと思われる。再現性を仮定して、アルビレオ・アルフェラッツの画像から露光時間を同じくした0.5secのダーク画像を引くことで、解析用の画像を得た。

4 データ解析/種々のパラメタの算出

4.1 IRAFを用いた画像解析

以下にデータ解析の流れを記述した。それぞれにおいて得られたデータを貼付しておく。

露光時間 [sec]	枚数	平均カウント数	偏差	MIN	MAX
0	11	2368	18.14	2343	2402
0.01	10	2324	17.49	2300	2355
0.1	10	2350	18.26	2319	2532
0.5	10	2326	17.50	2296	2460
1.0	20	2320	17.59	2298	2605
60	10	2161	19.83	2120	4195
100	10	2089	13.62	2066	6371

表 1: ダークイメージの簡単な統計値

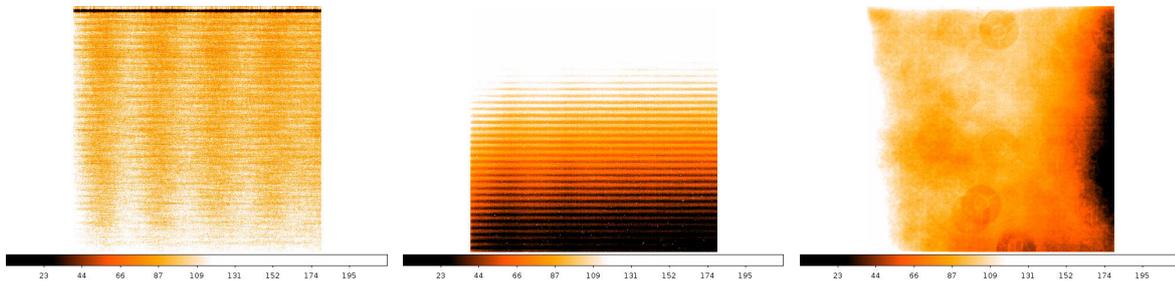


図 2: 0.5sec のダークイメージ

図 3: 60sec のダークイメージ

図 4: CCD の感度ムラ

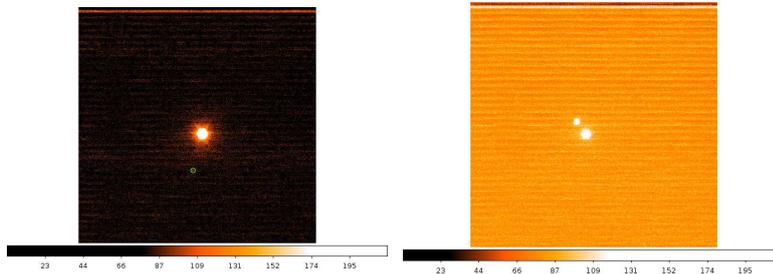


図 5: アルフェラッツ

図 6: アルビレオ

4.1.1 バイアス・ダークデータ

バイアス・ダークデータとして、天体観測に要した露光時間とおなじ、0.5sec の露光で得られたダーク画像 10 枚を使用した。

それぞれの画像から後述する”サインゆらぎ”を除去するために、ピーク位置をずらした”サインゆらぎ”のみのデータを 10 枚作成し、これとの差をとった。これら 10 枚全体の平均データを、0.5sec でのバイアス・ダークデータとして用いた。

スカイフラットと同じ露光時間である 60sec のダークイメージ 10 枚に対しては、単に 10 枚のデータの平均をとるにとどめた。これは、スカイフラットのデータには一面に約 20000 カウントという高いレベルでカウントがのっており、せいぜい 50 カウント程度にしかならない”サインゆらぎ”の影響はフラットの解析においては無視できると考えたためである。また 60sec のダークデータには別にやはり 50 カウント程度のカウント勾配が一面に記録されていたが、ダークイメージはシャッターの閉まった状態で撮られる画像であり迷光とは考えづらく、また熱勾配をトレースしたダークカレント勾配かとも考えたが 60sec 露光時の CCD は十分に冷えておりまた 100sec とも比較するとこれも否定される。結局この起源は不明である。

4.1.2 フラットデータ

10枚得られたスカイフラットのデータから平均のデータを作成し、60secでのダークデータとの差をとってフラットデータとした。その後タスク”normalize”により規格化をおこなった。

4.1.3 観測天体のデータ

アルフェラッツ／アルビレオ各画像について、0.5secのダークデータと同様の手順により”サインゆらぎ”引きを行ったのち、10枚の平均をとった。シグナルとバイアス・ダークからなるこの画像から先ほど得ていた0.5secでのダークデータを引き、その後フラットデータによるカウント較正を行った。これにより得られたデータを解析用の画像として使用した。

星の写っていない領域 [*;0:500] についてタスク”imstat”を行い、背景光由来のカウントとした。値は、アルフェラッツについて4.55、アルビレオについて3.37である。平均的に考えて、 $n_{\text{sky}} \sim 8 \text{count/sec} \sim 8e^-/\text{sec}$ とした。

タスク”imexam”によりFWHMを得た後で、タスク”photo”によって測光を行った結果が以下である。apertureの値をFWHMの3倍とした。ただしBD+28 4B(画像5において印を付けた天体)についてはMOFFATが得られなかったため、ENCLOSEDの値を用いた。

天体名	Vmag.	MOFFAT	ENCLOSED	FLUX
alpheratz	2.06	13.67	15.38	7946704
BD+28 4B	10.8	INDEF	5.83	1719.476
albireo	3.09	10.29	10.25	2128006
HR 7418	5.09	10.90	11.12	361520.6

表 2: 測光結果

4.2 ピクセルスケール

天球上での間隔が正確に分かっている二天体が同時に写るように撮像すれば、シグナルの間隔をピクセルスケールの指標として使うことができよう。

4.2.1 結果

SIMBADによればはくちょう座アルビレオは連星で主星と伴星との間隔は34.51arcsecであるが、実測データにおいては126.9706pixであった。すなわち、ピクセルスケールは、

$$\alpha = \frac{34.51}{126.97} \quad (1)$$

$$= 0.2718 \text{ asec/pix} \quad (2)$$

であったと言える。

4.3 システム効率

望遠鏡のパラメタのひとつとして、観測データからシステム効率を算出した。システム効率は『単位時間あたり望遠鏡に入射したはずの観測天体からの光子のうち、実際にCCDで電子に変換されたものの割合』のことであり、

$$s_i := (\text{望遠鏡に入射したはずの光子数}) \quad (3)$$

$$= \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \frac{\Delta\lambda F_\lambda}{h\nu} \quad (4)$$

$$n_i := (\text{CCD 上で生じた電子数}) \quad (5)$$

$$= \frac{N f_{conv}}{t} \quad (6)$$

ただし

D : 口径, $\Delta\lambda$: 観測波長帯, F_λ : 天体からのフラックス密度
 N : カウント数, f_{conv} : コンバージョンファクター, t : 観測時間

を用いて、

$$\eta := \frac{n_i}{s_i} \quad (7)$$

として定義される。

4.3.1 s_i の算出

Vband の等級原点として文献値¹

$$f_\lambda = 3.69 \times 10^{-9} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$$

を用いた。観測天体は Vband 等級で 2.06 等であり、望遠鏡の半径は 15cm。フィルタはシステムの外とみなして、理想化したフィルタ関数

$$F(\lambda) = \begin{cases} 0.73 & (\lambda \in [4500\text{\AA}, 6000\text{\AA}]) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases} \quad (8)$$

により、

$$\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \Delta\lambda F_\lambda = \pi 15^2 \int d\lambda F(\lambda) \times f_\lambda \quad (9)$$

$$= \pi * 15^2 * 0.73 * 100^{-2.06/5} * 3.69 * 10^{-9} * 1500 \text{ erg/sec} \quad (10)$$

$$= 4.283 \times 10^{-4} \text{ erg/sec} \quad (11)$$

が得られる。ただし実際のフィルタの波長透過率を図 7 に示した。

観測光の中心波長 5250Å によって光子ひとつあたりのエネルギーを

$$h\nu = hc/\lambda \quad (12)$$

$$= 6.626 * 10^{-27} * 2.998 * 10^{10} / (5250 * 10^{-8}) \text{ erg} \quad (13)$$

$$= 3.784 * 10^{-12} \text{ erg} \quad (14)$$

とすれば、

$$s_i = \frac{4.283 \times 10^{-4}}{3.784 * 10^{-12}} \text{ photon/sec} \quad (15)$$

$$= 1.132 * 10^8 \text{ photon/sec} \quad (16)$$

が得られる。

¹<http://www.wakayama-u.ac.jp/~atomita/ccd/magnitude/>

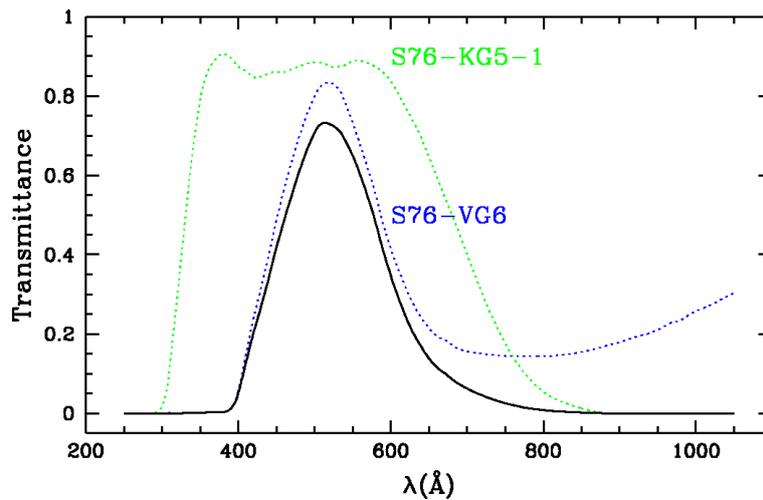


図 7: フィルタ透過率

4.3.2 アルファレッツの解析と n_i の算出

得られたフラックスは

$$N = 7946704 \text{ count}$$

である。

文献値²によれば、この CCD のコンバージョンファクターは

$$F_{conv} = 0.947(6) \text{ e}^-/\text{count}$$

であるから、観測時間 $t=0.5\text{sec}$ を用いて

$$n_i = 0.947 * 7946704 / 0.5 \text{ e}^-/\text{sec} \quad (17)$$

$$= 1.51 \times 10^7 \text{ e}^-/\text{sec} \quad (18)$$

を得る。

4.3.3 結果

以上より、TCT のシステム効率

$$\eta = \frac{1.51 \times 10^7}{1.132 \times 10^8} \text{ e}^-/\text{photon} \quad (19)$$

$$= 0.133 \text{ e}^-/\text{photon} \quad (20)$$

が得られた。

4.4 等級原点

あるシステムにおいて 1 秒間の観測で 1 カウントのシグナルを与える天体の等級を等級原点という。これを Z_{mag} とする。

²大澤さんによる試験レポート <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kmotoshara/30cm/camera/1005.pdf>

4.4.1 結果

V等級が2.06等のアルフェラッツは、0.5secの観測で 7.95×10^6 のカウントを与えたのであった。これにより、

$$7.95 \times 10^6 \times \frac{1}{0.5} = 10[(Z_{mag} - 2.06)/\frac{2}{5}] \quad (21)$$

すなわち

$$Z_{mag} = 2.06 + 2.5 \times [6 + \log(7.95 \times 2)] \quad (22)$$

$$= 2.06 + 18.00 \quad (23)$$

$$= 20.06 \quad (24)$$

等級原点は約20等であったと分かった。

4.5 限界等級

ある定められた時間にS/Nを5以上とする限界の等級を限界等級という。ただし天体はm素子で観測されるとし、 n_i : 天体からのシグナルと各種ノイズ n_{sky} : 散乱・背景光, n_{dark} : ダークカレント, N_{read} : 読出ノイズを用いて、

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

である。今回この値を L_{mag} とおいた。

4.5.1 計算

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

$$S = n_i t \quad (26)$$

とすれば、 $5=S/N=c$ について

$$c = \frac{S}{\sqrt{S + mD}} \quad (27)$$

$$S = \frac{c^2}{2} + \frac{\sqrt{c}}{2} \sqrt{c + 4mD} \quad (28)$$

$$\simeq \frac{c^2}{2} + \sqrt{cmD} \quad (29)$$

$$= \frac{c}{2} [c + \sqrt{\frac{mD}{c}}] \quad (30)$$

$$= 2.5[5 + \sqrt{\frac{mD}{5}}] \quad (31)$$

が成立。あとは実測値よりDを求め、各時間において必要な n_i を算出すればよい。

4.5.2 D の測定

n_{sky} については測定から、 n_{dark} については計算から、それぞれの値が

$$\begin{aligned} n_{sky} &\sim 8 \text{ e}^-/\text{sec} \\ n_{dark} &\sim 1 \text{ e}^-/\text{sec} \end{aligned}$$

であると分かった。これに比して、文献²からもわかるように

$$N_{read} \simeq 12$$

でありその自乗に対しては散乱光、ダークカレントの影響は無視できるだろう。

さて、後述するように実際には読出ノイズは一定の値ではないと考えられる。このため解析においては、リダクションをして得たアルビレオ・アルフェラッツの画像から星の入っていない領域で求めた標準偏差を 0.5sec の観測における実際の D の値として、 $t=0.5\text{sec}$ での限界等級を算出することにした。用いた D は、

$$\begin{aligned} N_{read} &\simeq 12 \text{ カウント} \\ D &= 144 \text{ カウント} \end{aligned}$$

である。

4.5.3 結果

天体の広がり $m=100$ である場合を考えた。

$$n_i \times 0.5 = 2.5 \times [5 + 12\sqrt{\frac{m}{5}}] \quad (32)$$

$$n_i \simeq 12\sqrt{5m} \text{ count/sec} \quad (33)$$

$$= 268 \text{ count/sec} \quad (34)$$

を得る。等級原点との比により、

$$268 = 100^{(Z_{mag}-L_{mag})/5} \quad (35)$$

$$L_{mag} = Z_{mag} - 2.5\log(268) \quad (36)$$

$$= 13.99 \quad (37)$$

0.5sec の積分時間での限界等級は、14 等であったとわかる。

読み出しノイズだいたい値を 12 の値としよう。時間比例するノイズも $n_{sky} + n_{dark} \sim 10 \text{ e}^-/\text{sec}/\text{pix}^2$ としてしまえば、

$$D \simeq 10 * t + 144$$

が成立する。

$$n_i t = 2.5[5 + 12\sqrt{\frac{mD}{5}}] \quad (38)$$

$$\simeq 2.5\sqrt{20}\sqrt{10t + 144} \quad (39)$$

$$n_i = 11.18\sqrt{\frac{10}{t} + \frac{144}{t^2}} \quad (40)$$

が得られる。 $n_i = 1$ が等級原点、すなわち 20.06 等なので、

$$n_i(t)/1 = 100^{(Z_{mag} - L_{mag}(t))/5} \quad (41)$$

$$L_{mag}(t) = Z_{mag} - 2.5 \log(n_i(t)/1) \quad (42)$$

$$= 17.43 - 1.25 \log\left(\frac{10}{t} + \frac{144}{t^2}\right) \quad (43)$$

$$(44)$$

が t[sec] だけ積分したときの限界等級である。

4.6 背景光の等級

背景光の値を $n_{sky} = 8 \text{ e}^-/\text{sec}/\text{pix}^2$ とし、計算を行う。背景光の等級を Z_{sky} とおいた。求めたピクセルスケールより、

$$n_{sky} = 8 \text{ e}^-/\text{sec}/\text{pix}^2 \quad (45)$$

$$= 8 \frac{1^2}{0.2718^2} \text{ e}^-/\text{sec}/\text{asec}^2 \quad (46)$$

$$= 108.3 \text{ e}^-/\text{sec}/\text{asec}^2 \quad (47)$$

が得られる。求めた等級原点と比較して、

$$n_{sky}/1 = 100^{(Z_{mag} - Z_{sky})/5} \quad (48)$$

$$Z_{sky} = Z_{mag} - 2.5 \log(108.3) \quad (49)$$

$$= 14.97 \text{ mag}/\text{asec}^2 \quad (50)$$

またシステム効率とフィルタ関数を考慮して、

$$n_{sky} = 108.3 \text{ e}^-/\text{sec}/\text{asec}^2 \quad (51)$$

$$= \frac{108.3}{0.73 * 0.133} \text{ photon}/\text{sec}/\text{asec}^2 \quad (52)$$

$$= 1115.4 \text{ photon}/\text{sec}/\text{asec}^2 \quad (53)$$

となる。

まとめると、背景光の明るさは以下の程度と言える。

$$\begin{aligned} n_{sky} &= 14.97 \text{ mag}/\text{asec}^2 \\ &= 1115.4 \text{ photon}/\text{sec}/\text{asec}^2 \end{aligned}$$

5 いろいろな考察

解析中にわかったことであるが、実は、実習に用いたこの CCD、おかしい。なにがおかしいのかは以下に詳しく述べてある。結果については得心のいかないものばかりである。次年度以降の解明をまちたい。

5.1 サインゆらぎ

まずはデータ解析に影響を与えた、“サインゆらぎ”について書く。

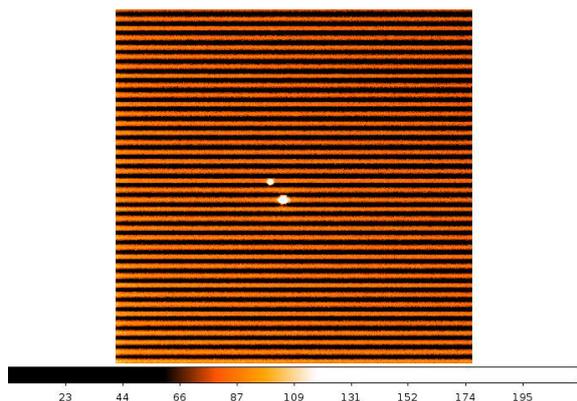


図 8: アルビレオの生画像

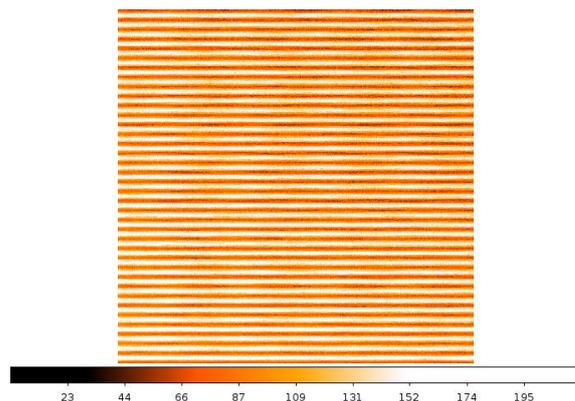


図 9: 0sec の生ダークイメージ

5.1.1 サインゆらぎとは縞模様のこと

図 8,9 に示すように、取得する画像はどれも目立つ縞模様を持っていた。レポートではこの模様を”サインゆらぎ”と名付け、とりあえず除去することにした。画像はそれぞれ、0.5sec で得たアルビレオの raw image とバイアス用に取得した 0sec の raw dark image である。

0-1sec で得られたダークイメージを見る限りではこの縞模様は露光時間によらない幅 (57pix) と振幅 (± 20 count) を持った、再現性のある”ノイズ”であると考えられた。ただし図 8,9 にも現れているように、この模様は画像によってピーク位置を変える性質があるようで、除去の際には多少面倒な作業をすることになる。

5.1.2 ゆらぎ除去の方法

ダークイメージひとつずつの画像には、画像内で一定と考えられるバイアスの上にそれぞれ異なるピーク位置を持ったサインゆらぎがのっていると考えられる。そこで、それぞれのゆらぎのみを集めて平均化することで理想的なサインゆらぎを作成し、それをういてゆらぎ除去を行うことができると考えた。ds9 で 0sec のダークイメージそれぞれの画像を表示し、ひとつひとつそのピーク位置を読み取る。その数値をもとに、imshift によってピーク位置が重なるようにずらしたダークイメージ 11 枚を作成、それぞれの平均カウントが 0 になるよう imarith で引き算を施したデータ 11 枚の平均として、理想的なサインゆらぎ yuragi.fits を得た。たとえば図 8 から得られた

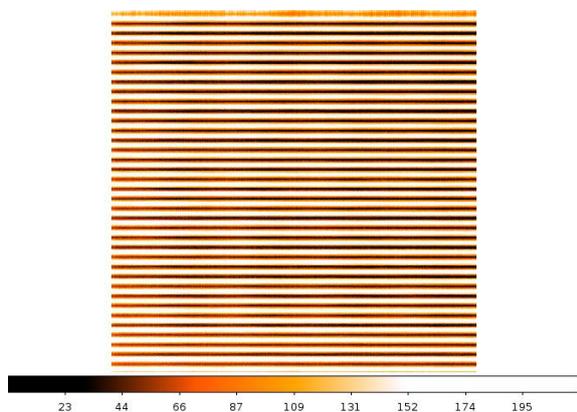


図 10: 復元したサインゆらぎ

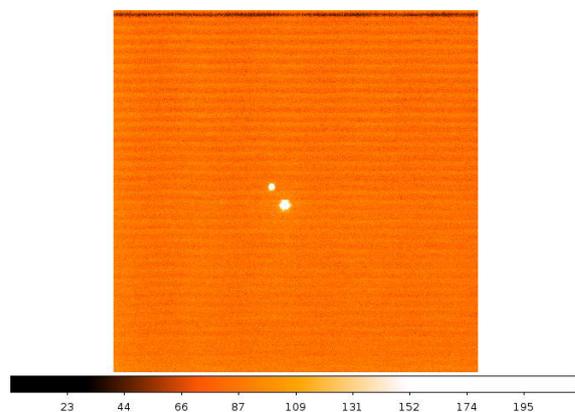


図 11: サインゆらぎを除去したもの

yuragi.fits を引くと、図 11 が得られる。見た目では、サインゆらぎはその大部分を除去できているように思えた。

ではこのゆらぎは、本当に除去すべきノイズだったのだろうか？この処理をすることで解析結果は変わるだろうか？変わるのなら、その変化は好ましいものなのだろうか？

5.1.3 ゆらぎ除去の結果

得た yuragi.fits を、今度は 0sec ダークイメージそのもののリダクションに用いた。つまり 11 枚取得したダークイメージそれぞれからサインゆらぎを引くことで、11 枚の ”平坦” な 0sec でのダークイメージを作成したのである。この ”平坦” なイメージは、一定とできるバイアスと、原理的に除去不能なノイズのみからなるはずである。結果図 11 と同様に、見た目には一様なノイズの広がった 11 枚のイメージが得られた。この操作による影響を調べるために、操作前後の 22 枚 (操作後のデータについては y 方向に [0:1950]pix の制限を加えた) に対して imstat を行ったところ、次のデータが得られた。

num.	元の標準偏差	後の標準偏差
1	18.07	12.99
2	18.18	13.2
3	18.18	12.82
4	18.2	13.01
5	18.08	12.82
6	18.13	13.1
7	18.18	12.62
8	18.12	12.99
9	18.04	13.38
9	18.06	12.73
10	18	12.89

一見して分かるように、サインゆらぎ除去により画像の標準偏差は大きく減少している。0sec でのダークイメージに乗り得るノイズと言え、読み出しノイズである。サインゆらぎを除去しないままの偏差 18 という値は文献値²¹²と比べて異常に大きく、読み出しノイズの不変性を仮定するとおかしな結果なのであるが、その問題がこのゆらぎ除去により、一致とは言わないまでも近い値を返すことで解決されるのである。一致しない分も、サインゆらぎ自体のもつ不確かさの影響だと考えられるだろう。

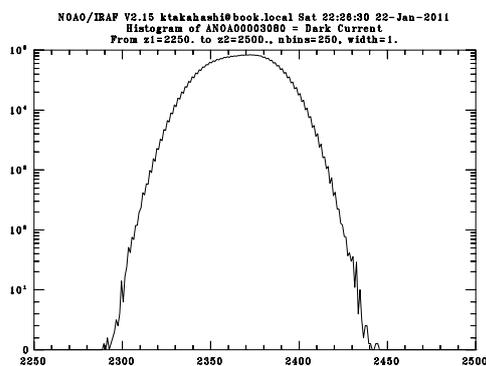


図 12: 生データのヒストグラム

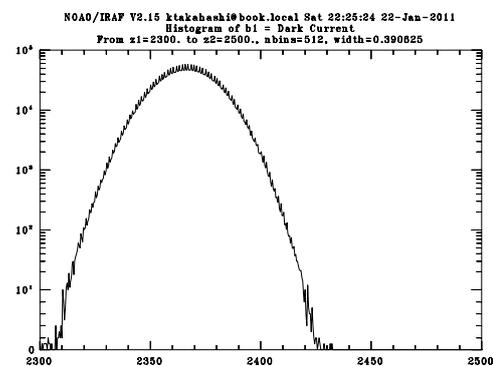


図 13: サインゆらぎを除去したもの

別に、除去の前後で CCD データのヒストグラムを作成した。もし ”ノイズ” が確率的なノイズのみならば、大数の法則から予想されるようにヒストグラムの輪郭は $\exp[-x^2]$ の形をとり、ログスケールにおいては放物線とな

ることが予想される。図 12,13 をみるに、除去前には放物線とは言えなかった輪郭がゆらぎ除去によりきれいな放物線となることが確認できた。(ただし由来不明の楕関数的アパーチャが残っているが。)

5.1.4 ゆらぎの時間依存

サインゆらぎも露光時間に関する変動性をもっているかもしれないと考え、100sec で得られたダークイメージに対して同様の手順で除去を行った。結果、図のようにゆらぎの引かれたイメージを得ることができた。これに

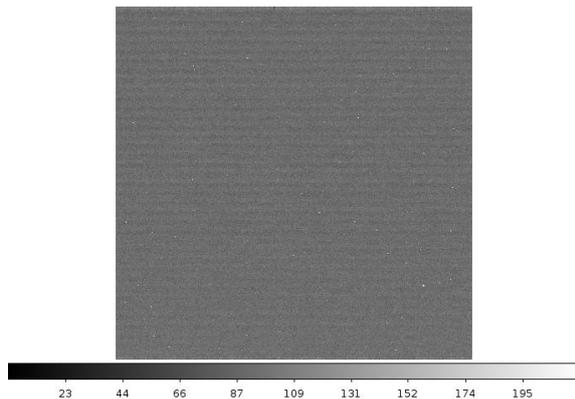


図 14: ゆらぎを除去した 100sec 露光

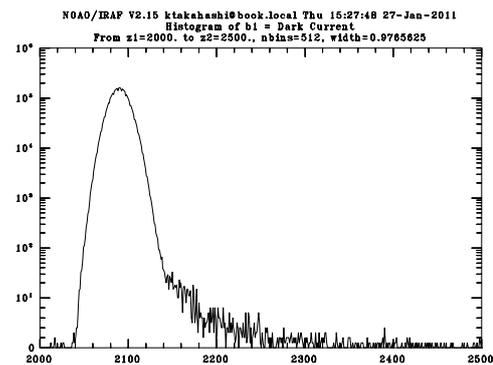


図 15: 100sec のヒストグラム

ついてもヒストグラムを描いたが、メインの偏差は二次関数的でありサインゆらぎは露光時間によらない不定性を持つことが確かめられた。

5.1.5 まとめ

サインゆらぎを除去しないデータはの偏差は、確率的でなく、値も異常に大きい、という問題があったが、以上の結果からその問題はサインゆらぎの除去によって解決できると示唆された。サインゆらぎの定性的な理解として、CCD 読み出しの様な一回的な作業の際にデータに加えられるある一定のサイン関数的な補正であると捉えられよう。ゆらぎの発生原因については確かなことはわからないが、現状でこの CCD を用いた観測をするのなら、サインゆらぎ除去はデータリダクションにおいて重要なステップとなるはずである。

5.2 ダークカウント減少のふしぎ

今回得られたデータのもつ最も不可思議な現象は、ダークカウントの減少である。前に挙げた通り、シャッターを開かないで露光した場合の平均カウントは露光時間を増すごとに減少していた。これは、シャッターを開かない場合にはある一定値のバイアスカウントの上に時間に比例して増加するダークカレントがのるはずだという予想に反しており問題があった。ダークカウントの挙動が予想できないとなると、シグナルのみを取り出したと考えている天体画像の信頼性が損なわれる。解析で得られた各種パラメータもその信頼性を失うだろう。

5.2.1 再現性

この減少が、そもそもバイアスの不定性によるものなどの、確率的に生じてしまった現象である可能性を考えた。これには容易に反論でき、12/09 の観測終了間際に得られた一連のダークイメージのデータを調べればすむ。これらのデータは、0.1sec10 枚、0.5sec10 枚、1.0sec20 枚、100sec10 枚、0.01sec10 枚の順で取得されたが、その 10(20) 枚のデータの中では平均値、標準偏差、最小値、最大値はだいたい一定の値を持っている。

12/09 取得									12/02 取得		
0.1sec	mean	stddev	1.0sec	mean	stddev	100sec	mean	stddev	60sec	mean	stddev
1	2356	18.47	1	2324	17.46	1	2090	13.57	1	2171	21.66
2	2354	18.38	2	2322	17.50	2	2082	13.41	2	2172	21.02
3	2352	18.31	3	2322	17.59	3	2091	13.56	3	2161	20.02
4	2350	18.22	4	2322	17.43	4	2085	13.58	4	2167	20.20
5	2349	18.24	5	2322	17.46	5	2091	13.66	5	2162	19.90
6	2348	18.26	6	2321	17.61	6	2086	13.61	6	2157	19.34
7	2348	18.21	7	2321	17.58	7	2093	13.68	7	2161	19.51
8	2347	18.18	8	2321	17.61	8	2087	13.61	8	2157	19.13
9	2346	18.23	9	2321	17.56	9	2093	13.72	9	2156	19.10
10	2345	18.14	10	2320	17.60	10	2093	13.76	10	2147	18.41
0.5sec	mean	stddev	11	2320	17.66	0.01sec	mean	stddev	0sec	mean	stddev
1	2326	17.54	12	2320	17.58	1	2326	17.39	1	2367	18.07
2	2328	17.49	13	2319	17.55	2	2328	17.37	2	2369	18.18
3	2328	17.40	14	2319	17.54	3	2326	17.43	3	2368	18.18
4	2328	17.57	15	2318	17.62	4	2325	17.51	4	2368	18.20
5	2327	17.31	16	2319	17.67	5	2324	17.50	5	2368	18.08
6	2326	17.54	17	2318	17.69	6	2324	17.49	6	2368	18.13
7	2326	17.44	18	2317	17.71	7	2323	17.52	7	2368	18.18
8	2325	17.57	19	2317	17.71	8	2323	17.57	8	2369	18.12
9	2325	17.54	20	2318	17.70	9	2323	17.56	9	2369	18.04
10	2325	17.57	-	-	-	10	2322	17.57	10	2369	18.06
									11	2369	18.00

表 3: 取得された一連のダークイメージの統計値

この結果より、10 秒程度の短期的なスパンの内では、ある露光時間に対して一定のバイアスがかけられていることが言えるだろう。さらに示唆的なことに、途中得られている 100sec のデータを見ることで、1000sec 程度の中期的な周期的バイアス変動は存在しないことも確かめられるだろう。なぜなら、100sec 程度のスパンでのバイアス変動があったとすれば 0.1sec-1.0sec のデータにその周期性が記録されるだろうし、1000sec 程度の変動があれば 100sec ダークイメージの平均カウントはこれほど一定な値とはならないだろうからだ。

この結果からはさらに長時間の、例えば 1 時間や 1 日経た時点でのバイアスの一定性は得られないものの、今回はその再現性については仮定することとした。すなわち、0.1sec でのダークイメージを取得したのならば、そのデータは日にちや時間帯によらず、平均値 2320 程度、標準偏差 17.6 程度のデータとなっているはずだということである。これにより取得日時の異なる 60sec でのダークイメージのデータを含め、バイアス減少の考察を進められる。60sec で得られたデータ 10 枚もだいたい一定の統計値を持っており、この仮定による単純な矛盾はなかった。

5.2.2 線形性

同じ時間で得られた画像に同じような統計値が得られるのだから、露光時間増加と相関をもつカウント数の低下は本当に露光時間によるものであると考えるのが素直であろう。

得られたデータ (12/02 取得の 0.60sec、12/09 取得の 0.01,0.1,0.5,1.0,100sec) の平均値、最大値、最小値、標準偏差に対して、露光時間を横軸にとったグラフを描いてみると、平均値、最小値については線形にみえる減少が、最大値については線形にみえる増大が確認できたが、標準偏差については 60sec で最大値をとり、100sec で最小

値をとるという不可思議な結果となった。あるいは標準偏差については露光時間との間の相関関係は成立しないのかもしれない。

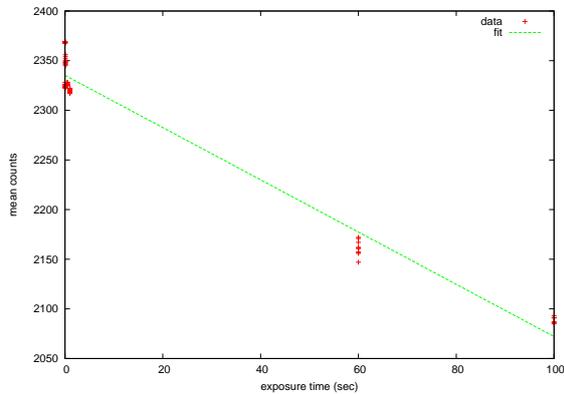


図 16: 平均値

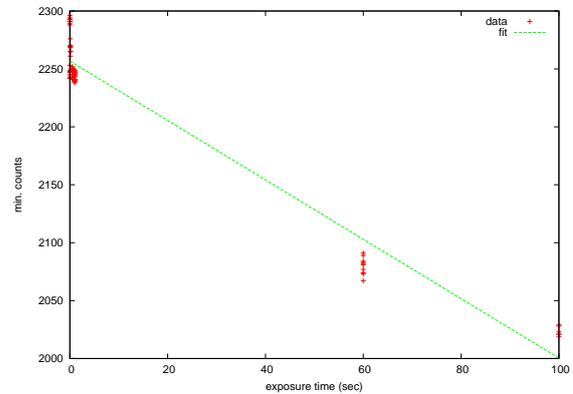


図 17: 最小値

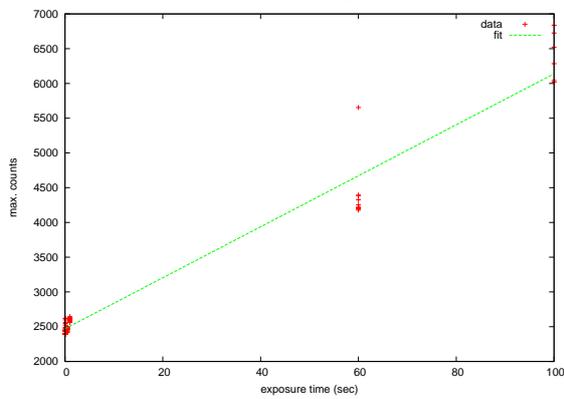


図 18: 最大値

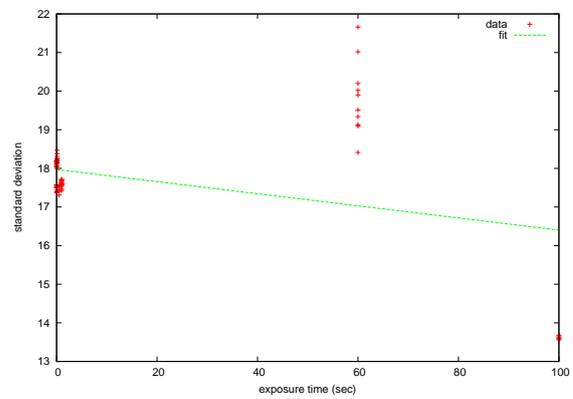


図 19: 標準偏差

いずれにしても露光時間に相関したダーク平均値の減少というのは、確かに起こっている現象のようである。

5.2.3 ダークカウント解析

実験に用いた CCD においては、ダークカウントはどのような量なのだろうか。今回、この量が

$$\begin{aligned} (\text{ダークカウント}) &= (\text{時間依存しない項}) + (\text{時間依存する項}) \\ (\text{時間依存しない項}) &: B \\ (\text{時間依存する項}) &: C(t) = C \times t \quad (\text{露光時間に比例}) \end{aligned}$$

と表せることを仮定して解析を行った。

5.2.4 Ct:時間依存する項

60sec, 100sec での平均カウントからわかるように、10sec を超えるような露光では時間依存する減少項が依存なしの B の影響を凌駕すると言える。ひとまず何も考えずにフィッティングをし、その係数を C とした。得られた値は

$$C = -2.6 \text{ count/sec}$$

である。オーダーで言えば、一秒に数カウント程度のものであろう。

さて、物理的にはこの減少をどう捉えるべきだろうか。一切の積極的な理由を欠いたまま以下のような推論をすることにした。

そもそもバイアスとは、読み出し時にデータが負となることを回避するための数値的な補正だ。となれば、カウント数を減少させていく物理的な現象があるはずである。たとえば、CCD は露光状態においてはほとんど絶縁体とみなしているが実は多少の電流が流れてしまっており、この影響により CCD 上に生じた電荷が自発的にどこかとおくのほうへ流れていってしまってもおかしくない。そうだとすれば、シャッターを閉じた状態の CCD 上の電荷数は、ダークカレントによる増加分と、この”電荷蒸発”と名付ける効果による減少分との綱引きにより、正負どちらにもとりうる時間依存性をもつはずである。実験に用いたこの CCD では特別蒸発の効果が大きく、それゆえダークカウントは時間的に減少することになってしまったのである。

本当にこのような影響があるかについてのテストとしては、例えば露光開始 0.1sec 経過時に瞬間的な光を当てて、その後読み出すまでの時間を 1sec, 5sec, 10sec とさまざまに設定したデータを用意すればよい。考えが正しければ、読み出しまでの時間が経過するにつれピークでの値は拡散していくことだろう。

5.2.5 B：時間に依存しない項

B の推定には、露光時間の少ない 0-1.0sec までで得たダークイメージを用いた。これは、オーダーとして B ~ 2000count, C ~ 3count/sec 程度の量であると仮定することで、せいぜい 1sec の露光では C の項は無視できるだろうと考えたからだ。さて、その考えを確かめるために時間対カウントで描いたグラフが図である。明ら

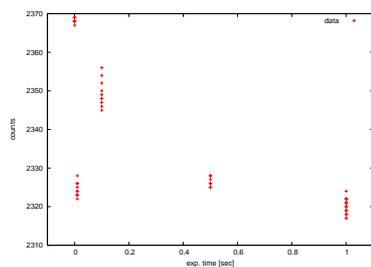


図 20: 時間対カウント

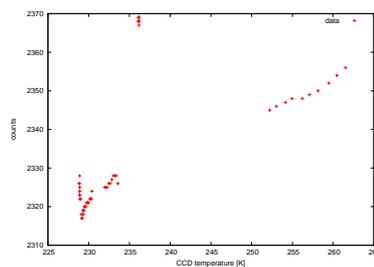


図 21: 温度対カウント

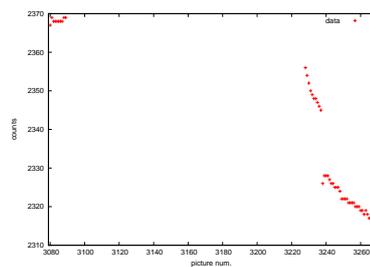


図 22: 撮影枚数対カウント

かに、0sec, 0.01sec, 0.1sec の間において一定とは扱えない性質が見て取れる。

例えば、文献³によれば、CCD のバイアスというものは CCD の連続起動時間に対して少しずつ変動するものらしい。この影響として B の不定性を理解できるかと考えた。つまり、12/09 の取得順は 0.1sec、0.5sec、1.0sec、(100sec、)0.01sec であるのに対し、ちょうど B の減少も 1.0sec と 0.01sec の小さな逆転を除けばこの順であるからである。

しかし取得順によるという性質は、起動時間に対してという理由以上に、撮像を続けるうちに CCD 温度が安定するからという理由を示唆するだろう。これを確かめるため、CCD 温度対カウントで描いたグラフが図である。確かに、12/02 に得た 0sec をのぞいたデータは、線形の相関を持っているように見える。ただこの考えも、なぜ 12/02 取得の 0sec については成立しないのかを説明できない。

あるいは、両者を合わせた理由なのかもしれない。次のように考えることができまいか。12/02 取得の 0sec のデータは温度の安定した状態で得られたものでその時点での B を示したものののだが、次のダーク取得開始までに 100 枚を超える枚数を撮影したことで、起動時間由来の影響分のずれが生じてしまった。12/09 取得のデータは、終了間際の 60 枚のデータとして得られたものでありこの内では起動時間を経ることによる影響は小さいだろう。ただし冷却不十分な状態で得られた 0.1sec のデータには温度由来のずれが生じてしまい、以上まとめて一見一定には見えない B が得られたのである。この考えは、図と一致するようにも見える。

³<http://150.86.55.181:8080/dspace/bitstream/123456789/2660/1/KJ441300055.pdf>

数式で表そう。温度依存は 0.1sec のデータに線形のフィットを施し、 $+1.1/K$ が得られる。温度補正ののち、全体のデータから再度フィッティングによって得た式が、

$$B = 2360 - 0.22 \times ((\text{pict.number}) - 3080) + 1.1 \times ((\text{CCDtemp.}[K]) - 230) \quad (54)$$

である。より正確な値を求めるために露光時間についても補正をおこなったが、

$$B = 2360 - 0.21 \times ((\text{pict.number}) - 3080) + 1.1 \times ((\text{CCDtemp.}[K]) - 230) \quad (55)$$

大差はなかった。

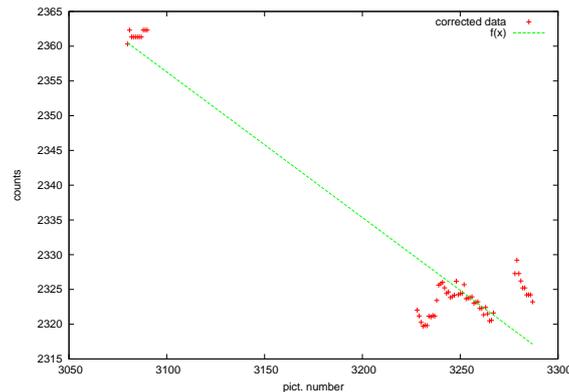


図 23: 温度・露光時間補正後

この考えが正しければ、解析に用いたダーク画像のカウントは、実際に天体に乗っていたダークカウントに比べて 10-30 カウント小さく見積もっていたことになる。例えばアルフェラッツのデータの場合、画像データは一律に 229.9K で得られ、pict. number は 3181-3190。B は 2338 である。0.5sec の解析用ダークイメージは 2326 だから、全体に 5 カウント程度としていた背景光はそれよりも 12 大きい 17 ということになる。またアルビレオの場合には温度は 231.15[K]、番号は 3167-3176 であるから、 $B=2341$ が得られる。背景光は、3 カウントから 15 大きい 18 と補正される。ただしこの考えのもとではデネブの解析に深刻な問題が生じる。サインゆらぎを除去したデネブの画像には、星の写っていない領域に平均 2320 カウントがのっていた。得られたダークカウントのデータは、どんな露光時間であっても 2320 カウントを超える平均カウントを持っている。デネブの画像はアルビレオ/アルフェラッツの画像に先立って取得されたもので、また CCD 温度も 230K と安定している。すなわち、以上の依存性のもとではデネブの画像に記録された背景光の値は、確実に負の値となるのだ。

以上見てきたように、バイアス見積りの変更でデータは大きく修正される。新しいデータでは $n_{sky} \simeq 30$ になってしまうから、数秒の露光においても背景光の影響は無視できなくなる。ただしデネブの解析で明らかになったように、この考えも已然深刻な矛盾を含んだままである。

5.2.6 まとめ

結局のところバイアスについて確実に言えることはそれが変動するという点ぐらいで、肝心の天体画像にのっているカウントがどの程度なのかという点については更なる検証が必要である。ダークカウントの変更によっては、今回データ解析で得られたパラメータのうち限界等級の値は大きく変わり得る。観測の際には以下の点に気をつけてバイアス、ダークの取得を行うべきであろう。

- CCD 温度が安定していること
- 観測のはじめと終わりに全てのバイアス、ダークを撮っておくこと
- 目標天体の撮像の前後に同時間露光のダークを撮ること、できればバイアスも

5.3 読み出しノイズの不定性

サインゆらぎの項で書いたように、ダークイメージからサインゆらぎを引いたデータには読み出しノイズがメインと思われる確率的なノイズが記録される。ヒストグラムにおいて、ダークカレントや宇宙線由来と思われる高いカウントのノイズは図に示したようなすそ野の広い形に現れるが、imstat に上限設定を設けることでこの影響は抑えることができるだろう。その後標準偏差を測定すれば、その値はその露光時間での読み出しノイズを反映したものになると考えられる。

num.	0sec	0.5sec	100sec
1	12.99	11.98	10.64
2	13.2	11.94	10.84
3	12.82	11.96	10.57
4	13.01	11.98	10.73
5	12.82	12.01	10.67
6	13.1	12.0	10.67
7	12.62	12.17	10.64
8	12.99	11.92	10.82
9	13.39	12.2	10.9
10	12.73	12.02	10.87
11	12.9	-	-

表 4: 各露光時間での標準偏差

結果を表 4 に示した。ダークカウント同様に、読み出しノイズも長時間露光に対して減少するように思える結果となった。

5.4 ノイズ計算

時間比例するノイズとして、典型的に背景・散乱光由来の n_{sky} と暗電流由来の n_{dark} を考えていた。先に記したように、今回の観測においてはその値を

$$\begin{aligned} n_{\text{sky}} &\sim 8 \text{ e}^-/\text{sec} \\ n_{\text{dark}} &\sim 1 \text{ e}^-/\text{sec} \end{aligned}$$

と見積もっていた、その理由を述べておく。

5.4.1 背景光の見積もり

リダクションの済んだ天体画像に対し y 方向のピクセルを 1-500 に絞って統計値をとることにより、その平均カウントとして背景光を見積もった。結果、アルフェラッツからは 4.55、アルビレオからは 3.37 の値を得た。各画像は 0.5sec の積分時間で得られたものでありコンバージョンファクターもほとんど 1 であるから、背景光の値はだいたい $8 \text{ e}^-/\text{sec}/\text{pix}^2$ 程度の値になろう。

5.4.2 暗電流の見積もり

CCD のカタログに記載された値 $n_{\text{dark}} = 0.5\text{nA}/\text{cm}^2$ から以下のように計算する。

$$n_{\text{dark}} = 0.5\text{nA}/\text{cm}^2 \quad (56)$$

天体名	スペクトル型	推定した実行温度	カウント	推定等級	実際の等級	等級差
alpheratz	B9	12000K	7946704	-	2.06	-
BD+28 4B	G5	5600K	1719.476	11.2	10.8	+0.4
deneb	A2	9500K	2518665	1.56	1.25	+0.31
albireo	K3	4900K	2128006	3.49	3.09	+0.40
HR 7418	B8	14000K	361520.6	5.42	5.09	+0.33

表 5: 等級の推定

$$= \frac{0.5 * 10^{-9}}{1.6 * 10^{-19}} e^{-} / \text{sec/cm}^2 \quad (57)$$

$$= \frac{0.5 * 10^{-9}}{1.6 * 10^{-19}} \frac{1.61 * 1.67}{2048 * 2048} e^{-} / \text{sec/pix}^2 \quad (58)$$

$$= 1.5 * 10^3 e^{-} / \text{sec/pix}^2 \quad (59)$$

カタログによれば、この値は $40^{\circ}\text{C}=313\text{K}$ での上限値らしく、また暗電流は 7K の温度上昇で 2 倍になるらしい。これより、典型的な CCD 温度 230K でなら $n_{\text{dark}} \sim 0.3/\text{sec}$ 、高温である 260K においてもせいぜい $n_{\text{dark}} \sim 10/\text{sec}$ 程度と考えられる。先に述べた通り、アルフェラッツは温度 229.9K で、アルビレオは温度 231.15K で得られたものである。

5.5 システム効率

アルフェラッツ、アルビレオに加え同日に先立って取得していたデネブの画像について、得られたフラックスカウントから等級の推定をしたところ、以下の表の通りになった。ただし、等級の推定は

$$(\text{mag.}) = Z_{\text{mag}} - 2.5 \times \log(\text{flux counts/exposure time}) \quad (60)$$

によって行った。

推定等級は実際の等級を超える傾向があるが、これは天体の観測の高度によるものと思われる。システム効率の測定のために取得したアルフェラッツについては、大気による減光の影響を避けるためになるべく高い位置で観測できる天体を選んでいく。対して、測定の練習のため、またはピクセルスケール測定のために選んだデネブ、アルビレオについては、より低い高度にて観測を行った。取得した時点での各天体の高度はアルフェラッツ > デネブ > アルビレオであり、推定等級の差の大きさと一致している。

5.5.1 スペクトル型によるちがい

もちろん、星の持つ色によってもシステム効率は変化すると考えられるが、今回の天体についてはこれによる影響は小さいことが確かめられた。

グラフは、各天体のスペクトルにシステム全体の波長依存性を掛けて得られたデータである。波長依存性は 10nm ごとに読んだフィルタと量子効率の積を用いた。また各天体のスペクトルとしては、スペクトル型から推定した温度にプランクの公式から計算したものをを用いた。同じ V 等級をもつ天体を想定して、それぞれのデータはフラックス密度の段階で積分値が 1 になるように規格化してある。

得られたデータを周波数で割ったものを積分することで、同じ V 等級で異なるスペクトル型の天体からどの程度の光子が観測されるのかを比較できる。

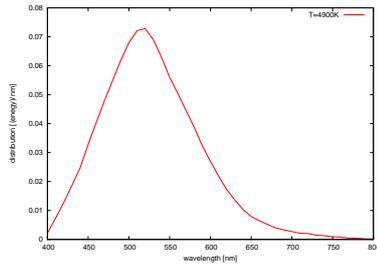


図 24: 4900K

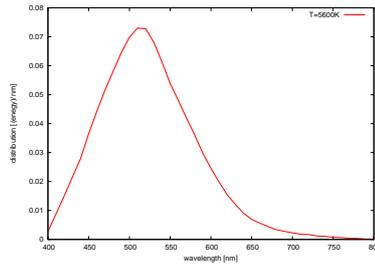


図 25: 5600K

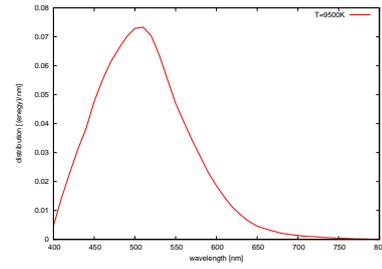


図 26: 9500K

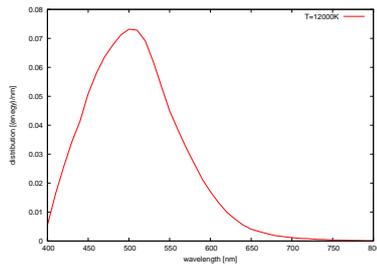


図 27: 12000K

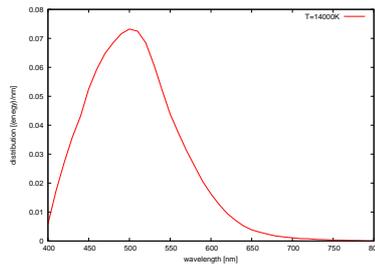


図 28: 14000K

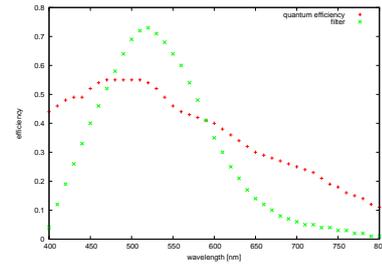


図 29: フィルタと量子効率の波長依存性

データを $f(\lambda)$ とすると、

$$N_{\text{photon}} = \int \frac{f(\lambda)d\lambda}{h\nu} \quad (61)$$

$$\propto \int f(\lambda)\lambda d\lambda \quad (62)$$

である。計算結果から分かるように Vband の観測では低温の星ほど効率よく観測されるといえるが、その違いは

天体名	推定した実効温度	N_{photon}
alpheratz	12000K	508.66632
BD+28 4B	5600K	523.90240
deneb	9500K	511.88651
albireo	4900K	528.37958
HR 7418	14000K	507.02164

表 6: 光子比推定

4900K と 14000K との間でも 4%ほどしかない。今回の観測効率の差を説明できる差にはならないだろう。

5.6 方位

観測で得たアルフェラッツ、アルビレオの画像と、ALADIN で得た比較用の画像を並べた。ALADIN の画像は上方向から右回りに、北、西、南、東の順で方位が決まっているのに対し、観測で得た画像では上方向から右回りに、東、南、西、北の順の方位になっていることが分かった。アルフェラッツと近くに写る BD+28 4B(いずれも丸く囲った天体) をそれぞれの画像で比較すると分かり易いだろう。

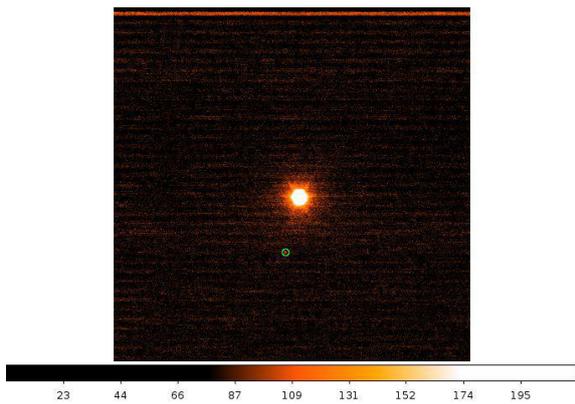


図 30: アルフェラッツ：観測

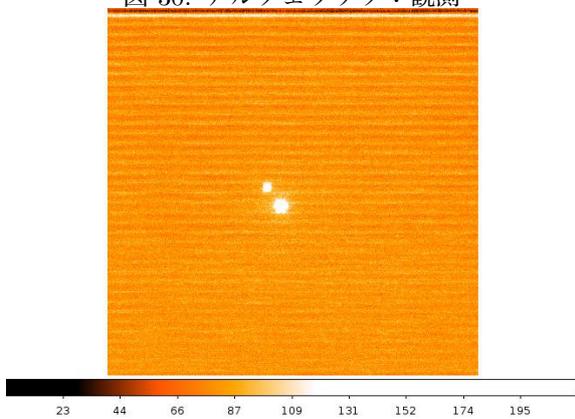


図 32: アルビレオ：観測

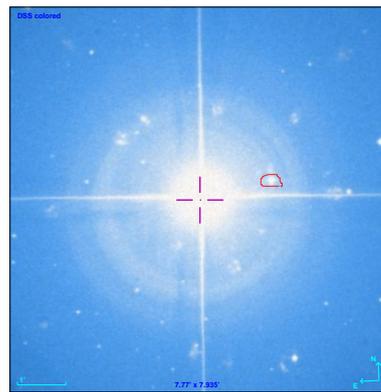


図 31: アルフェラッツ：ALADIN

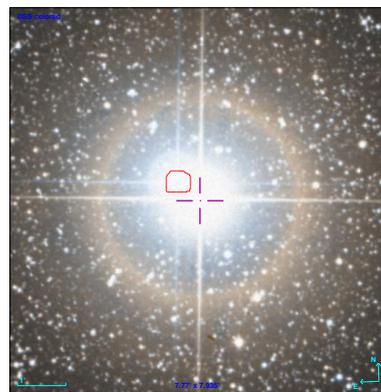


図 33: アルビレオ：ALADIN

6 あとがき

じつに楽しい実習でした。惜しむらくは CCD のこまかいところにこだわったレポートになってしまったこと。もっと天体を向いたレポートを書きたいものですが、それにはやはりもっと信頼できるシステムにしなければならぬと思われます。

どうもありがとうございました。