

CaHK+H α 中分散分光器

http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwamuro/CaHa/

岩室 史英 (京大宇宙)

●CaHK+H α 中分散分光器

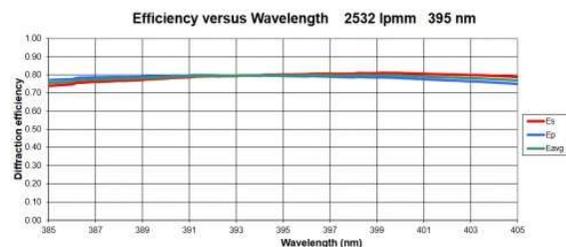
[GAOES-RV](#) の観測波長域外の紫外側にある CaII HK 線(395nm) と H α (656nm) を波長分解能 1 万以上で GAOES-RV と同時観測できるようにするもの。できる限りシンプルな構造で小型装置として開発する。

● 光学設計のポリシー

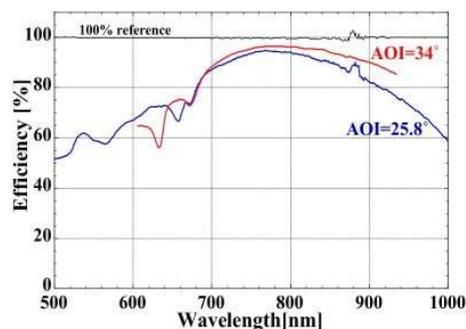
反射型の回折格子は偏光特性が強く高い効率が得られないので可能な限り高効率の透過型素子を用いる。GAOES-RV の前置光学系ユニットから光を分岐して、ファイバーでナスミス台下の装置へ送る。観測波長域は 395nm と 656nm 付近のみに限定し、汎用装置にすることは考えない。

● 透過型分散素子

CaHK 用分散素子としてまず検討したのが [Plymouth Grating Laboratory](#) の VB Grating だが、 ϕ 180mm のものの見積を依頼したところ予算的に厳しい価格であったため、断念して [Wasatch Photonics](#) の VPH で製作することに。効率予測は以下の通り。



H α の方は、[LightSmyth](#) の VB grating (T-1400-800) を用いる。こちらは、波長 800nm に最適化されているため、[RCWA 法での計算から溝深さ 1.64 \$\mu\$ m の VB grating](#) であるものと予想し、[溝深さ 1.2 \$\mu\$ m の VB grating](#) で特注できないか問い合わせたところ、通常の VB grating とは構造が異なるとのこと。SiO₂ 基板の上に Si₃N₄ などで 3 層の膜を形成、それをエッチングで基板まで削っている構造らしい(米国特許 [US8165436B2](#))。仕方がないので T-1400-800 を入射角を少し変えて 656nm の効率が最大となる角度で用いることにする。海老塚さんより T-1400-800 の入射角を変えた際の効率曲線の実測値を頂くことができた。



656nm 付近の透過率変化は 800nm に最適化されている AR コートの影響である可能性もあり、入射角を何度にするのが最適かは現物で調整するしかない感じだ(AR コートは無しで発注し、こちらで 656nm に最適化したコーティングを行う)。

(以下の部分、リンク先は "Not Found" となりますがファイル名の "." を手動で追加して下さい)

その後、磯貝くんが LightSmyth の技術者に問い合わせた結果、上記透過率変化はコーティングの影響ではなく回折格子の構造により生じていて不可避とのことだった([AOI 27°での理論的な透過率](#))。LightSmyth の技術者からの新たな情報として、T-1850-800s であれば 660nm 付近の効率は高いとのこと、[AOI 42°](#)、[AOI 37°](#)、[AOI 32°](#) の理論的透過率の情報ももらうことができた。これを見ると、T-1850-800s の方が圧倒的に素性がいい。検出器の暗電流の影響が気になるとりあえずは効率を上げることが重要なので、T-1850-800s の方を採用することにする。

LightSmyth の VB grating は量産品の厚さは 0.9mm しかなく、単独の水平置きは自重変形できないし(20 μ m たわむと致命的)、面積が大きいだけに垂直置きもちょっと心配だ。特注で厚さ 10mm の基板上に形成できないか問い合わせたが、LightSmyth に依頼しても張り合わせになるとのこと。しかも有効径は経験上 109mm とのことだった(この外側でも若干の効率低下がある程度らしいが)。0.9mm ではコーティングをすると反りが発生する可能性もあるし、立てた状態で単独で固定して使うのはやや心配。ということで、直接 LightSmyth の技術者に大面積の場合にどうしているか聞いてみたところ、6.35mm 基板で製作することも可能とのことだった。高出力レーザーなどと併用する場合は薄い方がいいので、大面積でも薄いまま製作する場合もあるが通常は 6.35mm らしい。

しかし、6.35mm 基板の場合は経費が倍以上かかり、少数製作の場合は張り合わせの方が安い(経費 2 倍弱)とのこと。LightSmyth はこの回折格子の張り合わせに十分な経験があり、張り合わせの場合は LightSmyth に頼むしかないので、結局は 0.9mm のまま保持するかかなりの経費を追加して張り合わせるかの選択となった。まずは、何とか 0.9mm 板の状態与安全に保持できないか、厚さ 0.7mm のガラス板を購入して保持方法の試験をすることにした。

とりあえず、ホルダーを作ってみた。ブランジャはバネ力最弱のもの。写真では先端が少しずれているように見えているが、目視ではちゃんと先端で接触しているように見えている。150x100x0.7 のガラス板が間もなく来るので、来たら挟んでみる。



カラスをはめてみたところ。思ったよりもしっかり保持できていて、ある程度の加速度をかけても問題なさそうだ。



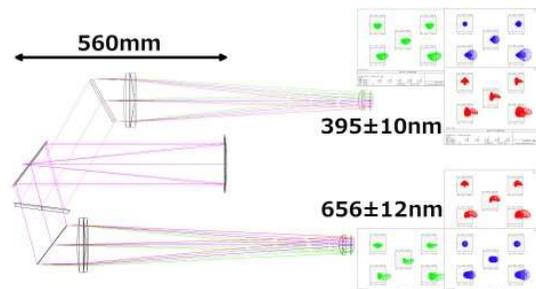
衝撃が伝わった場合が心配なので(ナスミス台下の取り付けなので、ナスミス台上で工具を落としたりした場合などが想定される)、アルミフレームの上部を樹脂ハンマーで結構強めにバシバシ叩いてみたが、ガラスは割れなかった(一番下の樹脂パイプが衝撃吸収していることもある)。厚さ方向はブランジャ、高さ方向はスプリングピンの横置きで衝撃吸収できるのではないと思う。ということで、LightSmyth は 0.9mm 厚のまま使用することにする。しかし、この厚さのものを蒸着する場合、真空引きの際の風圧も心配だ。LightSmyth に波長をずらした AR コートを頼めないか聞いてみることにする。

本体価格と同程度の費用がかかるとのことだったので、とりあえずはノーコートで進めていって、いずれ国内での蒸着を検討することにする。

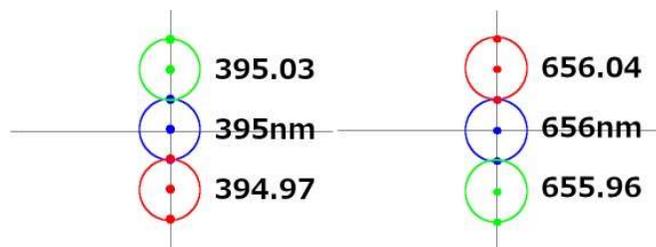
● 光学設計

分散素子が確定したので光学設計をしてみました。入射ファイバーはコア径50 μm で、検出器画素が19 μm (BITRAN BH-67M 使用予定、下の「検出器」参照)なので、ほぼ1:1光学系で問題なく、カメラ光学系はf/5程度の長焦点で大丈夫だ。また、分光器なので色消しにあまり気を遣う必要もなく、[オハラの光学材料](#)を400nmの透過率の順で並べ、透過率の高いものからクラウン(S-FPL53)とフリント(S-LAH97)を選んで設計したが、見積もり段階でアップ数70以上のクラウンで $\phi 150$ でt30の厚さが作れるものは**S-FPL51**と**S-FSL5**(S-FPL53はt12まで)だけだということが判明したため、クラウンをS-FSL5にして修正したところ、ほぼ同程度のものができた。また、フリントのS-LAH97は次の融解まで半年以上待たされるとのことだったので、S-NBH52Vならどうかを確認中。

ファイバースリット長は3.6mmで、検出器の中央しか使わない設計だが、大体1~1.5pixサイズに全スポットが収まっている。



(この部分、要差し替えです...)波長分解能はCaHKが約1.3万、H α が約1.6万。下図は○がファイバーコアの像サイズ(直径55 μm)で、3つの●がその位置でのスポットサイズ。395/0.03=13167、656/0.04=16150。

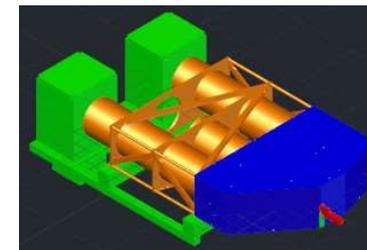


光学素子 pdf 図面

- [ミラー 1 \(厚さ20mm 版\)](#)
- [ミラー 2](#)
- [ミラー 3](#)
- [CaHK レンズ 1](#)
- [CaHK レンズ 2](#)
- [CaHK レンズ 3](#)
- [H \$\alpha\$ レンズ 1](#)
- [H \$\alpha\$ レンズ 2](#)
- [H \$\alpha\$ レンズ 3](#)

● 機械設計

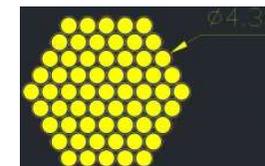
温度変化の影響を抑えて可動部をできるだけ減らしたいので、すべて鉄系のステンレス SUS430(熱膨張係数 $1e-5$)で製作することにした。これでも20 $^{\circ}\text{C}$ の温度変化で500mmに対し100 μm の変化があるので、約1pix分の像サイズ変化は温度変化で起こる。そのため、入射スリット部分のみ焦点移動機構を設け、温度変化の補正は入射部で行うことにする。ステンレスは重いので、できるだけ板を使わずに、カメラ系部分はパイプ構造にする。LightSmyth 回折格子は結局0.9mm厚のまま使うことになったので、最終設計が確定した。



● ファイバーバンドル

[OPTRAN WF](#) NA=0.12 コア径 50 μm 61本、大体4"程度の視野がカバーできる。

下図のままだと filling factor 63% だが、融着してできるだけ接近させることで80%近くまで filling factor を上げられるはず(若干の cross talk は伴うことが予想されるが)。



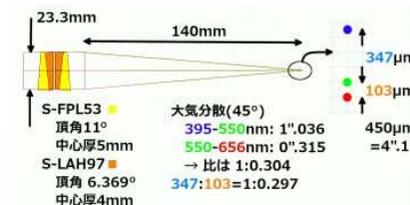
コア径50 μm のファイバーは、ジャケットを外して扱うことが結構難しいようで、[CeramOptec](#)では50 μm ファイバーではジャケットを外した状態でのバンドルが作れないとのこと。国内の他のメーカーで加工が可能か、国内代理店が調査中...。このバンドルが製作できない場合は、太いファイバーでイメージスライサを使うか、マイクロレンズアレイと組み合わせるしかない。

案の定、2ヶ月近く何も進展しないと思っていたら、「加工できる業者がありません」との回答が来た。OPTRANを使うのは諦めて、まずはNA=0.12 50 μm ファイバーでバンドルが製作できる会社を探すことにした。

ファイバー同士の平行度がどうなるかわからないが一応作れるという業者は1社見つかったが、なかなか難しそう。素線ファイバーで購入して自分で実験してみるか...

● ADC

天体の追尾は、GAOESの天体ガイド機能を用いるため、550nmでの天体の位置が固定される。また、GAOESの観測はInstrument Rotatorは固定されるため、視野回転も大気分散方向の回転もどちらも発生する。低高度(EL=20 $^{\circ}$)では550nmと395nmでは大気分散量は3"強となるため、上記バンドル内に入らない上に、入ったとしても露出中に天体が流れてしまう。そのため、ADCは必須ということになったので設計してみた。S-FPL53とS-LAH97の組み合わせは、運よく大気分散の波長変化によく合った屈折率変化を再現できる(後に、オハラの硝材リストを使ってUV透過率の高い全てのクラウンとフリントの組み合わせで調査したが、熱膨張率が同程度でアップ数の差が大きく、大気分散と似たような屈折率変化となる組み合わせは存在しないことが確認できた)。これでEL=20 $^{\circ}$ までは大気分散補正ができるはず。ただ、熱膨張率の違いが大きすぎて張り合わせはできないので、どのように配置するかは要検討だ。



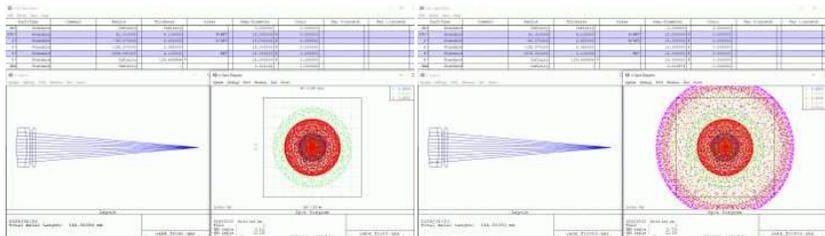
回転ステージはシグマ光機の[回転ステージ OSMS-60YAW](#) 2個でいけそう。カタログ上の中央穴の内径は $\phi 25\text{mm}$ だが、内部の筒を取り外すと内径は $\phi 28\text{mm}$ 確保できる。望遠鏡の高度が変わると瞳位置が移動

すると思うが、その移動量が大きいとこの穴サイズでは厳しいかも...

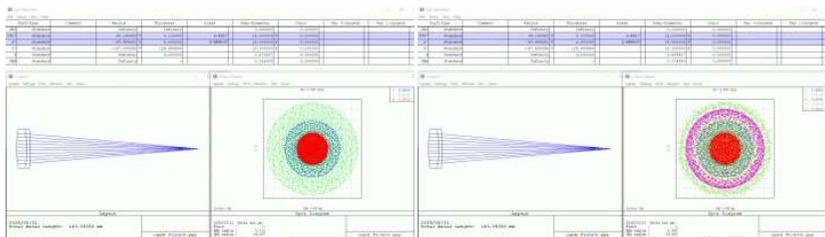


● 前置光学系のコリメータレンズ

前置光学系のコリメータレンズは、できれば GAOES で現在使用しているものを使えることが望ましいが、確認してみた。Edmund Optics [TS アクロマティックレンズ 30 x 150](#) とシグマ光機 [SLB-30-2000PM](#) との組み合わせとのこと。両方の光学パラメータを Zemax に入れて、GAOES の波長域 500-600nm で平行光を入れた際のフォーカスを調べたものが下左図。平凸レンズを左側に置く方が色収差は小さくなるが、現在の GAOES での配置は逆順になっているようだ。第二レンズは多分市販品で適切な焦点距離のレンズが無かったため加えたものだと思うが、見えている色収差はこの第二レンズによるもの。これに 400nm と 700nm の光も入れたものが下右図。像サイズは 2 倍弱となり、ファイバーのコア径と同程度になるのと、N-SF5 は 420nm 以下で急激に内部吸収が増大するので、特注で作り直す必要がありそうだ。

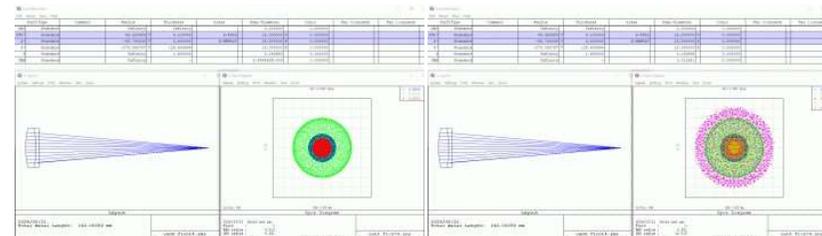


市販品では良いものがなさそうなので、現在使われているレンズとの交換で使えるアクリルマートを考えてみる。最も都合がいいのは 2 枚玉の張り合わせでの製作だが、直径 30mm のレンズの場合、熱膨張係数の大きい S-FPL53 を通常のレンズと合わせると 40K の温度変化で 10 μ m の直径差が生じるため、張り合わせはちょっと危険。S-BSL7 で考えてみる。ちょっと古いがこのページに色消しで有用なガラス材の組み合わせが出ていたので、S-BSL7 の相手候補 4 種から、400nm での透過率が最も高い S-NBH53V を用いて設計してみる。これなら熱膨張率はほぼ同じなので張り合わせでも大丈夫だ。バックフォーカス値を 3.2mm 増やせば上のレンズと同一パワーのレンズになるので、レンズを 1 枚減らしてその代わりにスペーサーを入れる。



GAOES の波長帯である 500-600nm では現状とほぼ同じスポットサイズで、390.660nm でも像サイズを 30 μ m 以下にすることができたので、まあこれで OK だと思う。もう 1 枚レンズを増やせば 3 色色消しにできるが、透過率も減るので検討しない(現在案では 410, 590nm 辺りで色消しになっているようだ)。

その後、S-BSL7 よりも少しアップ数の大きい S-FSL5 をベースにフリントを探したところ、S-NBH52V でかなりいい結果が出た。この 2 つは 40K の温度変化で 30mm に対し 1.6 μ m しか変化しないので、多分張り合わせでも問題ないだろう。スペーサーは 1.66mm で、こちらの方が良さそうだ(色消し波長は 410, 580nm 付近)。

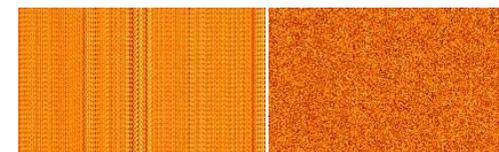


● 検出器

カメラとしては、時間も予算もないので TriCCS で用いられている CMOS を用いた市販品 [BH-60M/BH-67M](#) を用いる。画素サイズは 19 μ m、2 段階ペルチェの冷却能力は TriCCS のカメラの冷却性能よりも良い感じだが、最大冷却状態での暗電流の大きさが問題なので、[ビットラン株式会社](#) の協力で 0s, 60s, 600s でダークを撮ってもらった。

BH67

以下、BH-67M のデータ(BH-60M も依頼中)で、左が 20 枚平均(900-1200ADU)、右が 20 枚の標準偏差 (0-40ADU)。画像クリックで全体が確認できる。平均は、最も明るいものが 0s、時間が長くなるとどんどん平均が下がっていくが、どうやら天体撮影をした際の長い露出でも背景が明るくなりすぎないように、読み出し回路部分で露出時間に応じて原点シフトを行うようになっているらしい。Conversion factor は 1.10217e/ADU とのことなので、ノイズの大きさからダークを逆算できる。



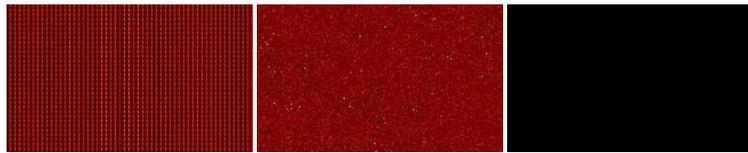
左上画像の median は 0s, 60s, 600s の順で 1055, 1041, 982、右上画像は 18.18, 18.53, 18.79 なので、rms にして 2 乗すると 401.5, 417.1, 428.9 \rightarrow 0, 15.6, 27.4 で 10 倍の関係とはなっていないので、暗電流が正しく計測できているわけではないが、0.05-0.26 e/sec という感じだ。この値は、波長分解能 1 万で観測した際の背景光と同程度のレベルなので、まあ暗電流は合格という感じだが、読み出しノイズが 20 erms (TriCCS の 5 倍だが ADC の bit 数の違いを考慮するとほぼ同等)で、暗電流だけでなくこの値にも注意する必要がある(撮像や明るい天体の分光であれば問題ないが、中分散分光なので...)。

その後、背景レベルのシフト機能を OFF にしてもらって、再度同じ測定をしてもらったのが以下。左が 20 枚平均(600-900ADU)、中が 20 枚の標準偏差 (0-40ADU)、右が 20 枚の平均-bias 平均 (0-100ADU)。



左上画像の median は 0s, 60s, 600s の順で 702.6, 712.7, 740.1、上中画像は 18.34, 18.60, 19.50 なので、rms にして 2 乗すると 408.6, 420.3, 461.9 \rightarrow 0, 11.7, 53.3 でまだ 10 倍となっていないが、暗電流の大きさは 0.089-0.20 e/sec となった。読み出しノイズは同じく 20 erms。今回は平均値の差からも暗電流が評価できるので、平均画像の差の median (0, 5.81, 30.9) から計算すると 0.057-0.11 e/sec となりノイズから求めた値の半分程度となる。

ゲインを上げれば、読み出しノイズの寄与が減らせる可能性があるので、ゲイン x16 でも同じセットを撮ってもらった。左が 20 枚平均(800-1700ADU)、中が 20 枚の標準偏差 (0-120ADU)、右が 20 枚の平均-bias 平均 (0-300ADU)。



左上画像の median は 0s,60s,600s の順で 989,1055,1208、上中画像は 29.86,39.21,57.49 で、ゲインが正しく 16倍になっているものと仮定すると、 σ の 2 乗が 4.2,7.3,15.7 \rightarrow 0.3,1,11.5 で、暗電流の大きさは 0.019-0.052 e/sec 読み出しノイズ 2.0 σ 、平均画像の差の median (0, 49.5, 191) から計算すると 0.022-0.057 e/sec となりノイズから求めた値とほぼ一致する。どちらにしても読み出しノイズの寄与は減る感じだ(なぜ暗電流も減るのかは不明)。問題は実際のゲインが何倍かかっているから、実際に光を入れてカウントが何倍になるかを調べてもらう必要がある。

個々のピクセルに対し、20枚の連続露出データを 3 σ クリッピングをかけながら最小 2 乗直線 fit して σ の評価をしているため、上の画像は宇宙線などの突発的な影響は除いて処理されている(単純平均を取ると、600s x 20枚ではかなりの密度で宇宙線が入る)。

上記ゲイン x1, x16 の結果をまとめると以下の通り。ゲインは正しく 16倍かかっているものとし、暗電流は左列がカウント変化から算出したもの、右側はノイズ変化から算出したもの。

Gain x1				Gain x16			
露出時間	平均(ADU)	σ	暗電流(e/sec)	露出時間	平均(ADU)	σ	暗電流(e/sec)
0	702.6(0.00)	18.34	---	0	989(0.00)	29.86	---
60	712.7(5.81)	18.60	0.11	60	1055(49.5)	39.21	0.057
600	740.1(30.9)	19.50	0.057	600	1208(191)	57.49	0.022

読み出しノイズの大きい 1 つの可能性として、TriCCS の読み出し回路の ADC は 14bit で、BH-67M の ADC は 16bit という違いが関係している可能性がある。サチュレーションレベルを同じにすると、BH-67M の conversion factor は TriCCS の 1/4 でいいので、その分、高いゲインの状態での読み出しノイズで比較すべきかもしれない。その場合は、上記の感じからすると BH-67M でも 5-6 σ 程度になると予想されるので(20 σ の 1/4 程度)、TriCCS の読み出しノイズと同程度になる。

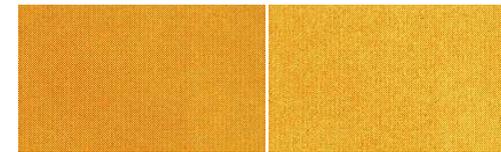
読み出しノイズを下げることでできる 1 つの可能性として、読み出し時のマルチプレクサ切り替え後の AD 変換前に少し間を置く手がある。マルチプレクサ切り替えに伴い、FET にトラップされていたある程度の電子が移動するはずだが、その移動が落ち着く前に AD 変換するとカウントが安定しない。ある程度の読み出し時間を犠牲にして、電子移動の静定時間を設ければ安定する可能性があるが、ビットランからの情報では、マスタークロックの入力だけで 16ch のアナログ読み出し口のデータがどんどん変わっていくようで、23.8ns 以内に AD 変換しないと次のデータになってしまうとのこと。検出器を製作しているキャンロンにこの待ち時間で電子が静定するのか、これを延ばすと読み出しノイズが減る可能性があるのかに関して聞いてみたところ、「可能性はある」とのことだったのでビットランと相談中。

ゲインの倍率をカウント比と Conversion factor の両方から確認するため、光量一定の状態ではゲイン x1, x16 の両方で露出時間を変えて 1000 ~ 10000 カウント程度の画像を 20 枚ずつ取得が完了したとのことだったので、解析してみた。上記の解析と同様、20枚の露出を時間順に並べ、各 pixel のカウントを 3 σ クリッピングしながら 1 次 fit して平均と σ を pixel 毎に評価する。各セットの結果の代表値(画像全体での中央値)は以下の通り。

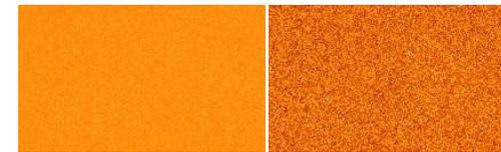
Gain x1				Gain x16			
露出時間	平均	σ	測定順	露出時間	平均	σ	測定順
0.001	721.7	18.41	15	0.001	1022	33.16	14
0.250	1010	23.57	8	0.017	1366	71.45	13
0.500	1289	27.28	1	0.034	1698	94.12	12
1.000	1875	34.28	6	0.068	2352	128.5	11
2.000	3030	44.76	5	0.125	3457	170.4	10

4.000	5368	61.37	4	0.250	5850	237.6	9
8.000	10046	85.72	3	0.500	10595	332.6	2
4.000	5406	61.90	16	1.000	20382	472.9	7
8.000	10188	86.39	17				

ゲイン x1 の 4秒と 8秒が 2 組あるのは、計測中の光源の明るさ変化を確認するためのもの。露出時間 0.001秒は bias 画像。ゲイン x1 と x16 で 10000 カウントの画像から bias を引いたものが以下 (8000-11000ADU、クリックで全体表示)。

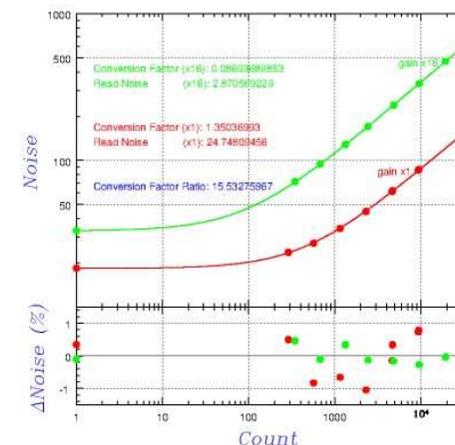


5000 カウントの画像との比例関係を確認するためそれぞれを bias 差し引き後の 5000 カウント画像で割ったものが以下 ($\pm 10\%$ 表示)。

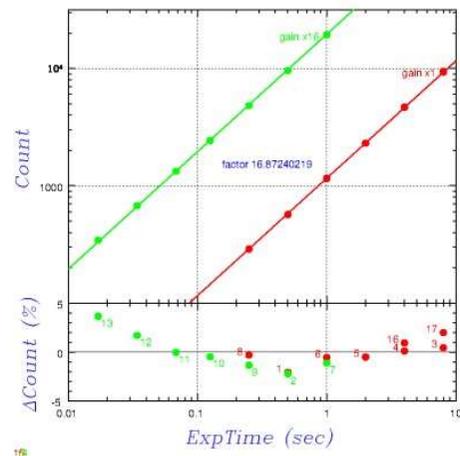


大体平らになるので、2 つ上の画像に見えている細かいパターンはリアルな pixel 毎の感度特性のようだ。当然だが、ゲイン x16 だと 10000 カウントでも結構ノイズがある。

カウント - ノイズ関係は以下の通り。



ゲイン x1 での Conversion factor は 1.35e/ADU、ゲイン x16 での Conversion factor は 0.087e/ADU で、ここから出したゲイン比は 15.5。ゲイン x1 での値がビットランより連絡頂いた値(1.10217 e/ADU)より少し大きい、この一部は 3 σ クリッピングの影響で σ が過小評価された影響が考えられる(20回で 3 σ は通常はなかなかクリップされないが、20pixel に対し 1pixel 程度の割合でクリッピングされるものがあるはず)。露出時間とカウントの関係から線形性とゲイン倍率を確認してみると、



線型性からのずれは多分光源の明るさ変化で、測定順に従って変化している感じだ(biasは欄外で関係なし)。カウント比から出したゲイン倍率は16.9倍で上記と少し異なるが、大体16倍の倍率がかかっている。ということは、暗電流もゲインによって変化するということになり、何だか疑問が残ってしまったが、大体の特性は確認できたのでBH-67Mの確認はこれで完了。読み出しノイズや暗電流が分光器の性能にどの程度影響を与えるのかはこれから検討。

その後、杉原くんにクリッピングなしでConversion factorを計算してもらったところ、

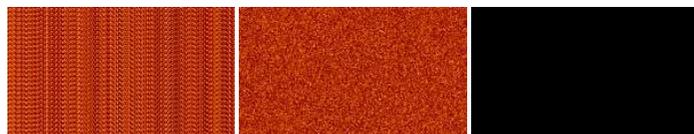
ゲイン x1: 1.266 e/ADU

ゲイン x16: 0.0809 e/ADU

とのこと。クリッピングの影響で7%程度大きい値が出た感じだが、こちらの値は逆に突発的な異常値を含んだ評価になるので、過小評価になっているはず。まあ、2つの値の間くらい(1.31と0.084)が妥当と考えるべきだろう。

BH60

以下、BH-60Mのデータで、背景レベルのシフト機能をOFFにしてBH-67Mと同様0s,60s,600sでダーク画像を取得。左が20枚平均(500-800ADU)、中が20枚の標準偏差(0-40ADU)、右が20枚の平均-bias平均(0-100ADU)。Conversion factorは0.9155e/ADUとのこと。



上左画像のmedianは0s,60s,600sの順で604.1,625.6,630.0、上中画像は13.82,14.54,14.77なので、rmsにして2乗すると160.1,177.2,182.8 → 0.17,1.22,7で全然10倍となっていないが、暗電流の大きさは0.038-0.29 e/secとなった。読み出しノイズは12.7 rms。平均画像の差のmedian(0, 16.5, 19.7)から計算すると0.030-0.25 e/secとなりノイズから求めた値とほぼ一致するが、1分と10分での結果の違いがかなり大きい。biasのみ取得時間が離れているので、検出器の状態が異なっている可能性がある(ヘッダはどれもCAM-TEMP=-15.0だが...)が、イメージに見られる上下部分の暗電流パターンは1分と10分ではほぼ同一なので、大部分の暗電流は1分以内に減少すると考えるのが正しい感じだ。すなわち、読み出し時の発熱で大部分の暗電流が決まるということになる。その場合、1分~10分の間の暗電流は0.008 e/secとなりBH67M(1分~10分の間の暗電流は0.051 e/sec)よりもかなり小さい感じだ(空乏層が薄いので)。

デモ機での試験

デモ機が借りられたので、[Matrox Radiant eV-CL](#)に接続して、[millite10.53.1354lnx](#)を用いて読み出ししてみる。注意点は以下の通り。

- カメラリンク接続にはシリアル通信の機能もあり、Radiant eV-CLではシステム起動時に /dev/

RadianteVCLS0、/dev/RadianteVCLS1 というデバイス名でマウントされる。BH60では /dev/RadianteVCLS0 を用いて設定コマンドを送信し、カメラリンクの主機能を使った部分では主にデータ転送のみが行われる。

- millite はシリアル通信部はサポートしていないため、通常のシリアル通信のプログラムに millite のライブラリを混ぜ合わせて制御ソフトを作る必要がある。



BITRANさんからのヒントなど頂いて、Ubuntuから16bitで画像取得・fits書き出しすることができた。あとは連続露出の際の高速化ができればととりあえずのテスト画像取得用プログラムは完成。



単一の露出プロセスの流れは以下の通り。

1. カメラとのシリアル通信を確立
2. 露出時間とゲインをシリアル通信でカメラに設定
3. 上記2つの値と検出器の目標温度の情報をカメラ側に問い合わせ確認
4. millite で受け取り側の環境構築
5. millite で待受け状態にする
6. 現在の時刻と検出器温度を記録
7. カメラに露出コマンド送信
8. 露出終了後に画像バッファポイント受取と現在時刻確認
9. 画像バッファを2次元配列に移し替え
10. 画像の平均値と分散を計算
11. fitsに書き出し
12. milliteの環境構築を解除
13. カメラとのシリアル通信を切断

複数枚連続露出は上記5~11をループさせて行うことになる。試しに走らせた所、0.1sec x 10枚でビットリ2秒だった。大半はdiskへの書き込みを含む後処理時間だと思ったので、より高速化するために10,11の部分をforkで分けて子プロセスに引き渡すようにしてみた。しかし、どうやらmilliteで環境構築した状態ではforkは許可されていないらしく(10,11ではmilliteのポインタなどは一切使っていないが)、forkするためには一旦milliteで構築した環境を解除しなければならないようだ。仕方がないので4~9+12をループさせ、10,11をforkで処理した所、今度は0.1sec x 10枚で7.5秒もかかる。結局、milliteの環境構築は非常に時間がかかることが判明したため、後者のやり方は却下。前者の方法でもデッドタイム1秒の大半はmilliteの環境構築時間だったことも判明した。

これ以上高速化したとしても10枚あたり約0.3秒の時間短縮が限界だが、共有メモリを介して後処理の専用プロセスに引き渡す手はある。しかし、その場合セマフォなどのプロセス間通信で処理開始のタイミングを知らせ、後処理が手間取った際にもクラッシュしないようにする必要がある。過去の経験上トラブルの元となりそうなので、とりあえずはやめておこうという感じ。

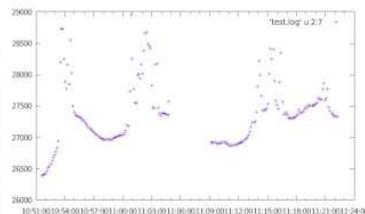
結局、複数回露出の際には10,11を直後の露出の7,8の間に入れることでほんの少し高速化できたので、これでとりあえずの読み出しソフトの開発は終了。0.1sec 10枚で2秒弱、100枚で約14秒だった。100枚程度では検出器の温度変化(設定温度0°C)やバイアスレベルの変動は無いことも確認できた。

- [インストールメモ](#)
- [BH60_settemp.c](#)
- [BH60_settemp.sh](#)

◦ BH60.cpp

Conversin factor を計測してみる。

安定化光源の光を32枚の紙で減光し、30cm 長の φ5cm チューブを通して検出器全面に当てる。チューブ端の開口を絞れば検出器上の光度分布がより均一になるが、まあ2割程度は違いがあっても変わらないのでこのままで。試験時は蛍光灯は消灯する(外の明るさは少し変わるが影響はほぼないはず)。下右図は、とりあえず安定化光源の光源安定性をモニタしてみたものだが、電源 ON して十分に時間が経過しているにもかかわらず、結構周期的に暴れていることが判明した。まあ、5% レベルのふらつきはありうるとい感じか...

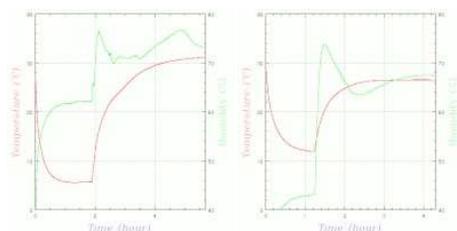


カメラ冷却箱

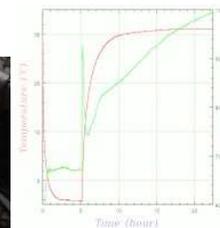
カメラの暗電流を少しでも減らすため、ベルチェクーラーを用いた冷却箱を大小2種類準備した。使用したクーラーは、オーム電機株式会社 [OCE-F80F-D24](#) と [OCE-F40F-D24](#) で、ミスミの断熱板で箱を作り空の状態での冷却試験をした(下図上段が大、下段が小)。



結果は以下の通り(下図左が大、右が小)。



小の方だとよほどの湿度でない限り表面の結露はそれほど深刻ではないが、大の方だと水が滴る状態になるので断熱版だけではまずい。内と外にハレバネを貼ってみる。



マイナス4℃まで冷えるようになったが、案の定、電源 OFF にすると最終的には湿度100%になる。この状態で内部を確認してみたが、水が溜まっているほどの状況ではなく、ハレバネなど水分を吸収するところからどんどん蒸発して供給されている感じだ。何らかの方法で内部を乾燥させるか、外部から乾燥空気を入れて強制換気する機構が必要そうだ。

BH60 入手

BH60 が納品されたので、デモ機ではできなかった内部観察。セットビスで位置決めされている F マウントスリプをセットビスを外して取り除き、接続部の状態確認(下左)。4つの M3 タップがあり、この面で分光器に接続する。設計値ではこの面から CMOS まで 18.68mm とのこと。この面でピンホールカメラにすればこの値が確認できると思う。

カメラ下側と上側の蓋を取り外して中を見てみた(下中と下右)。思ったよりも内部は一杯詰まっていた、風通しは結構大変そう。カメラ冷却箱大の方のファンの風は結構強いので、この中にダクトで導入すると流れが悪くなって冷凍機の性能が十分発揮できない可能性はありそう。直感的には冷却箱小の方が規格的には良さそう(カメラの発熱次第)。



iwamuro@kusastro.kyoto-u.ac.jp