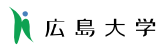


東広島天文台 観測装置開発状況

2009年岡山ユーザズミーティング

広島大学 宇宙科学センター 川端弘治



開発装置リスト

- ・ HOWPol (1露出型広視野偏光撮像器)
 - 2008年11月より観測開始、2009年5月よりGRBスタンバイ、10月より広視野偏光撮像稼働予定
- ・ HONIR (可視赤外線同時カメラ)
 - 2009年2月に赤外1チャンネル撮像のファーストライト、現在は調整、開発を継続
- ・ 高速分光器 (京大嶺重氏科研費)
 - 2008年7月完成、2009年2月制御ソフト完成

2

HOWPol: 1露出型広視野偏光撮像器

Hiroshima One-shot Wide-field Polarimeter



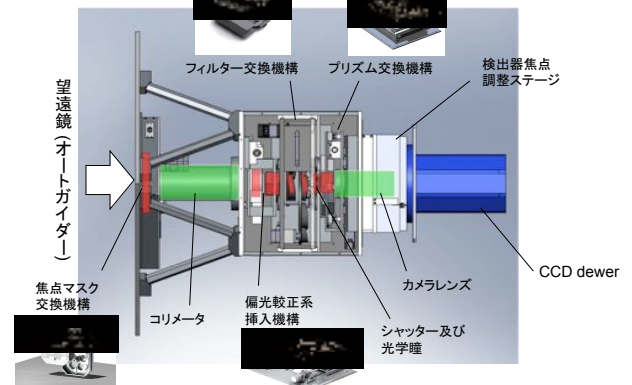
小松智之、田中祐行、千代延真吾、
永江修、川端弘治
中屋秀彦 (国立天文台)

2008年11月より観測開始 (GRBモードは2009年5月より)

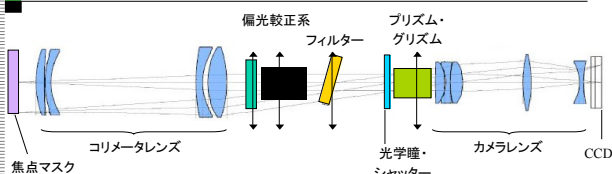
波長域	450nm-1100nm
観測モード	広視野撮像 (15' circle) 偏光撮像 (1露出型 7×7分角視野/1×15分角) Swift/BATのガンマ線バースト位置誤差をカバー 分光 ($\lambda/d, \lambda''$ 600 ~ 2300), 偏光分光
検出器	2k-4k back-illuminated, fully-depleted CCDs (浜ホト) 2ヶ

3

HOWPol筐体の構造と駆動機構の配置



光学系



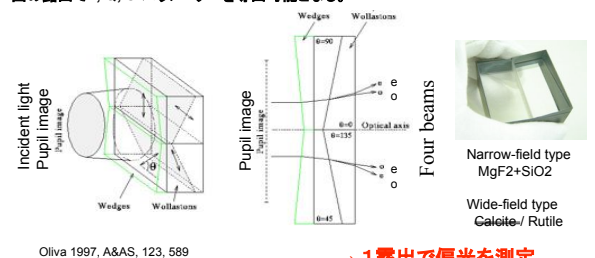
最終 F 値	F/6.9
光学瞳像の直径	φ23.9mm
光学瞳像の収差 (80% encircled energy)	<52μm at 450<λ<1100nm <32μm at 600<λ<1000nm
透過率	>38% at 450<λ<1100nm
カメラレンズの焦点距離	148mm
収差 (80% Encircled Energy)	<30μm (0.6 arcsec) at 450<λ<1100nm
ピクセルスケール	0.30 arcsec / pixel

5

Double wedged Wollaston prism

通常、Stokes I, Q, U パラメーターを導出するためには半波長板・偏光素子の方位角を回転させて撮影した2-4枚の露出を必要とする。

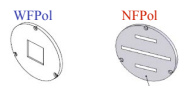
しかし、'Double wedged Wollaston prism' (Oliva 1997) を瞳像位置に置けば、一回の露出で I, Q, U パラメーターを導出可能となる。



→ 1露出で偏光を測定

6

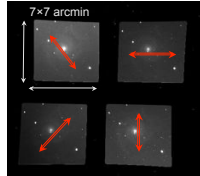
1 露出偏光モードでの像フォーマット



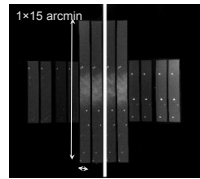
焦点マスク

左: 広視野用(WFPol)

右: 狭視野用(NFPol)



広視野用の取得画像例
(Calcite WFWol 使用)



狭視野モードの取得画像例

広視野モード(WFPol)

色収差大

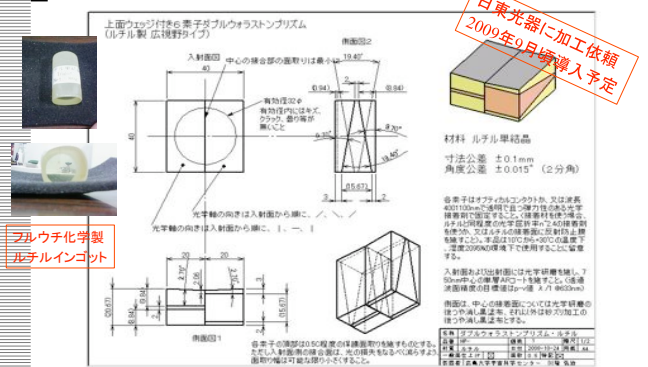
ガンマ線バースト(位置誤差大)用

狭視野モード(NFPol)

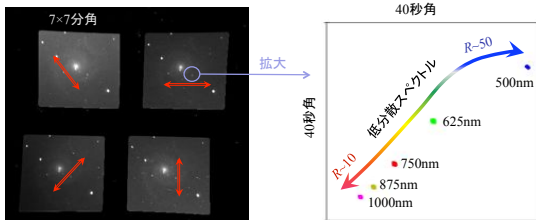
色収差小

一般観測向け

現在製作中のプリズム(科研特定領域)



期待される取得画像とスポットダイアグラム



- 7×7分角視野の4方位(0, 45, 90, 135度)の直線偏光像 → 1露出で Stokes I, Q, U を導出
- ルチル($n \sim 2.4$)の色分散を積極的に利用した低分散分光 → 偏光分光測光($R = \lambda / \Delta\lambda = 10 \sim 50$)を同時に
- 限界等級: 10分角 $p=0.2\%$ で $R = 13.3$ 等(R filterを通すと 14.2等)
(スカイ輝度 17.5等/arcsec², FWHM 3")

分散素子 グリズム

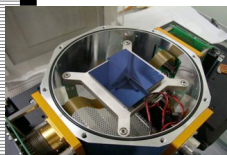
低分散型

プリズム: BK7 頂角25.67°
格子数: 420本/mm 620nmブレース
オーダーソートフィルター: 64R
波長域: 450~1050nm (620nm中心)
波長分散: 平均 2.45Å/pixel
分解能(2.3秒角幅slit): 18.8Å
 $\lambda/\Delta\lambda \sim 330, \Delta v \sim 910 \text{ km/s}$

高分散型

プリズム: ZnSe 頂角20°×2
VPH格子: 1579本/mm
波長域: 600~790nm (688nm中心)
分解能(2.3秒角幅slit): 18.8Å
 $\lambda/\Delta\lambda \sim 2300, \Delta v \sim 130 \text{ km/s}$

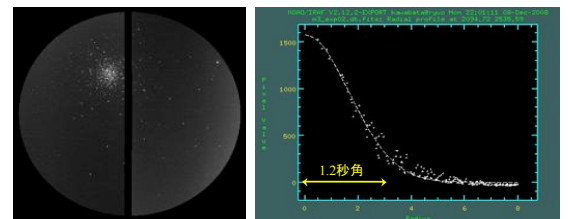
HPK CCD performance (Science grade)



- すばるS-Cam/FOCAS/HSCと同類
- 冷却・温度制御 -100°C
- 読み出し系: Messia5/M-front2 (中屋ほか 2006)
- ゲイン: 2.23e-/ADU
- 読み出しノイズ: $\sim 5e^-/\text{pixel}$ @ 133kHz
- リニアリティずれ: 1%未満(<6万ADU)
- Blurring effect: $<0.5\text{pixel}$ @ 450nm
- ダーク: $\sim 13e^-/\text{pix}/\text{hour}$ @ -100°C (datasheet $<1e^-/\text{pix}/\text{hour}$ @ -100°C)
- 読み出し時間(133kHz, 4ポート)
20sec(1x1), 9sec(2x2), 4sec(4x4)
GRBモード

HPK CCDの量子効率(-100°C)
(鎌田、宮崎、中屋ほか)

球状星団の短時間露出: 結像性能

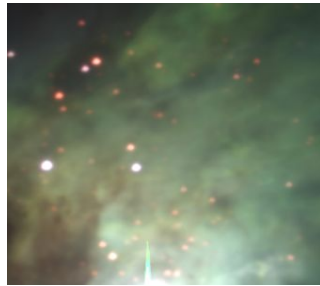


球状星団 M3 Rバンド2秒露出
視野全面にわたり 半値幅 1.1-1.2秒角



R (z'+Yバンド), G (Rバンド),
B (Vバンド)の3色合成

z'+Yバンドで多数の星が
写り込んでいる
完全空乏型CCD(空乏層
圧200μm)の威力



13

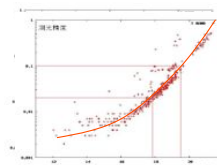
撮像モードの効率と限界等級

Photometric nightにおける実測効率
(大気吸収、望遠鏡反射率含む)

$B = 7.5\%$
 $V = 20.4\%$
 $R = 30.0\%$
 $I = 27.7\%$

限界等級(撮像)

表 4.4: 限界等級 (BVR バンド 100 秒露出、I バンド 50 秒露出)



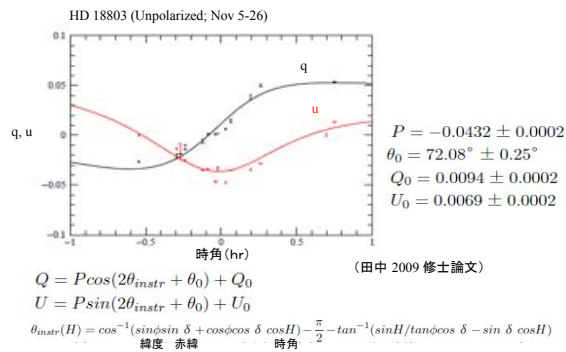
バンド	測光精度 0.02 等	測光精度 0.1 等
B	17.3	18.7
V	18.0	19.5
R	18.5	19.7
I	17.5	19.0

(田中 2009 修士論文)

設計値(100秒 $\angle R=0.02$ 等で18.2等)
と0.3等誤差で一致

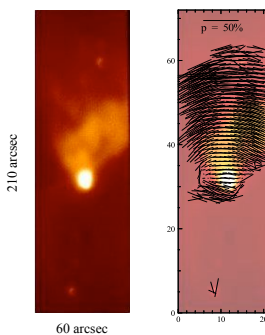
14

器械偏光の時角依存性



第3鏡起源のみのモデルからのずれ $\sigma=0.6\%$

R Mon の偏光撮像



Herbig Be星+反射星雲
NFPolモード
Rバンド 120秒×4フレーム
3秒角×3秒角ごとに偏光導出

星雲部:

同心円状の偏光パターン
外側の方が偏光度が大きい
(反射星雲の特徴)

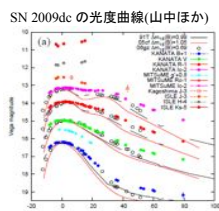
中心星付近:

揃った偏光ベクトル
星間偏光と同じメカニズムの偏光?

16

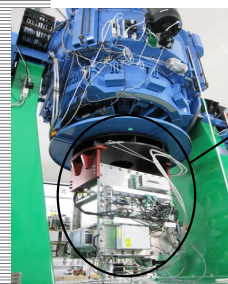
現状と今後のまとめ

- 撮像モード - 快調に活躍
 - 限界等級 $R=21.0$ 等(10分 $\angle R=0.1$ 等)
 - 実効シーイングサイズ 2-2.5" (追尾誤差込)
- 偏光撮像モード - 器械偏光調査中
 - 4%器械偏光の安定性 → 較正法確立
 - 1露出型と4露出モードの違い
 - 広視野1露出型(GRB用)の始動(9月~)
- 分光モード - 9月より低分散モード始動
 - $R=380, 450-1050\text{nm}$ BK7製グリズム
 - 高分散($R=2300$)も検討中
- 制御ソフト - unixからの一元処理可能に
 - 望遠鏡への命令も含んだ半自動観測を実行中
 - GRB即時対応観測も実施中(5月~、実効2回)
 - 分光が動き出すので、そろそろオートガイダーのソフトも整備して使いやすしたい
- 解析ソフト - 偏光較正法が確立したら



17

HONIR



HONIR(Hiroshima Optical&Near-InfraRed Camera)

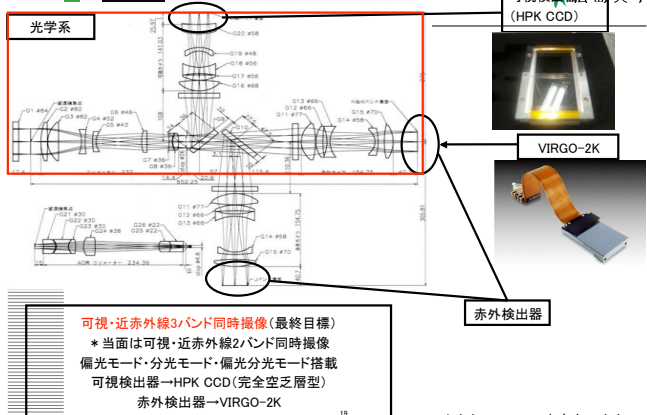
・現在開発中の可視・近赤外線同時撮像装置

・偏光/分光/偏光撮像/偏光分光モード

山下卓也、宮本久嗣、中屋秀彦、川端弘治
先本清志、小松智之、笹田真人

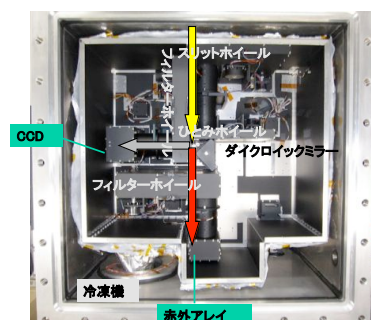
18

光学系



かなたMW2009@東広島天文台

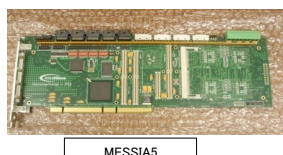
HONIR本体内部



撮像モード仕様

	TRISPEC	HONIR
検出器	OPT:512×512 IR2:256×256	OPT:2048×2048 IR2:2048×2048
視野	OPT:7分角 IR2:7分角	OPT:10分角 IR2:10分角
ピクセルスケール	OPT:0.82"/pix IR2:1.65"/pix	OPT:0.29"/pix IR2:0.29"/pix
観測効率 (5秒積分)	IR2:40%	IR2(VIRGO):53%(4ch-mode) 88%(16ch-mode)

- ・検出器が大フォーマット
- ・ピクセルスケールがシーイングとマッチ
→アンダーサンプリングを防止!!
- ・東広島天文台のベストシーイング 1"
- ・スカイバックグラウンド/pixが減少
- ・読み出しシステムはMESSIA5を搭載
→観測効率の向上!!
- ・限界等級が3等下がる!!

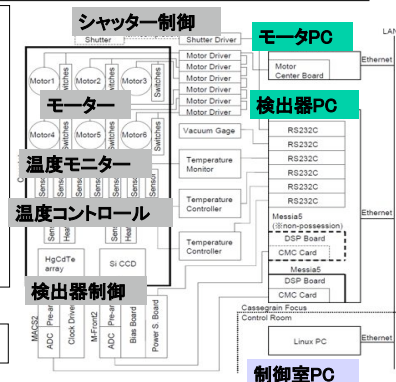


HONIR開発状況 I

～2009年2月

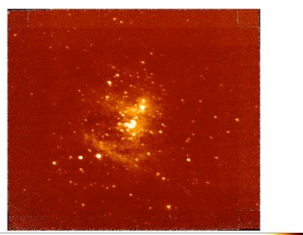
- ・検出器駆動試験
@国立天文台先端技術センター
- ・制御系の設計
- ・温度コントロールシステム
- ・温度モニターシステム
- ・モーター制御
- ・シャッタードライバ開発
- ・検出器制御の立ち上げ
(東広島天文台仕様)

制御PC1台での統一制御可能!!



赤外撮像ファーストライト

2009年2月
オリオン大星雲 (Ksバンド)



星像サイズ(半値幅): 1.6-3"
収差大→調整要

ファーストライト (2009/2) まとめ

	結果	目標値	TRISPEC(参考)
ピクセルサイズ	0.29 "/pix		1.64 "/pix
結像性能	>1.6 "	1 "程度	3 "
光子の検出効率	~3 %	20 %前後	40 %
読み出しノイズ	300 e以上 (Labでは24 e)	最低100 e以下	87 e
暗電流	0.2 e/sec	< 1 e/sec	39 e/sec
1画素あたりの電荷量	130keまで安定	◎	60keまで安定

その他、真空保持、駆動系など多くの課題が判明

2009年4月以降の進捗

残りの開発アイテム

分光、偏光モードの導入(光学素子設計、製作)
Optチャンネルの同時駆動
シャッター設計と導入、半波長板機構との同架



不具合事項の解決

レンズ・トレインの再芯出し、冷却時の保持・調整
真空保持(アウトガス源、真空漏れ等 原因追究)
冷却駆動系(モーター改造、位置決め機構)
センサー読み取り(白金抵抗取り付け部改良、位置ステータス)
検出器(IR)ノイズ対策

25

HONIR まとめ

まとめ

- ・IR検出器、可視検出器の読み出しシステムの完成
(同時読み出しはこれから)
- ・今年2月にIRチャンネルのみのファーストライトを実行
- ・真空保持、冷却駆動、光学系の調整など多くの課題
- ・課題を克服しつつ、残りの開発アイテムを進めている
- ・2チャンネル同時観測、分光・偏光モードの設計、実装など

今年中に2バンドでの同時撮像観測をめざす
来年度中に2バンドでの全モード実装(完成)

26

高速分光器

最速で **36 frame/sec (no-bin, full frame)** の連続撮像が可能な**高速**
CCDカメラで**分光観測**を行うことを目的とした装置

観測対象:

ブラックホール連星、激変星での

- ・連続光SED
- ・輝線flux

の短時間変動(～ 0.1～10 sec)

必要な分散

超低分散(R～20)

低分散(R～150)

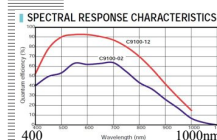
製作は嶺重(京大)の科研費

嶺重慎、野上大作、磯貝瑞希、川端弘治、小松智之、植村誠

27

高速CCDカメラ

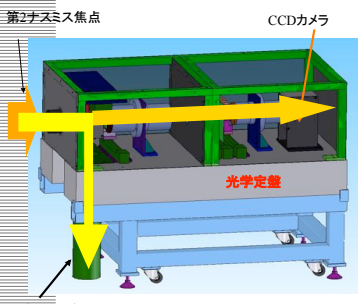
e2v社の**電子増倍(EM)**・背面照射・frame transfer型 CCD (CCD87) を使って浜松ホトニクスと共同
で開発されたEM-CCD カメラ(C9100-12)



ピクセル数	512×512
ピクセルサイズ	16μm×16μm
露光時間	27.1 msec～10 sec
最速frame rate	35.8 frame/sec (No-bin, full-frame)
電子増倍(EM)	4～2000 (可変)
カメラヘッド	真空封じ切り・ペルチェ冷却+空冷
冷却温度	-50℃ (@0～30度)
読み出しノイズ	100 [e-]
変換係数	23 [e-/ADU]
A/Dコンバータ	14 bit
飽和電荷量	400,000 [e-]
限界等級	20 mag @かなた望遠鏡(1.5m) 28 (±0.2mag, 最長の10秒露光, 電子増倍率:最小)

高速分光器 全体像

サイズ: 1100x600x864mm



- ・装置は第2ナスマスに設置。
- ・HOWPolと同じ光学系で直透過型の構造
- ・眼視光学系と共存
- ・全ての光学素子は光学定盤上に設置
- ・土台にはキャスターと固定具、位置決めピン(3本)を装着

装置の移動・再設置が比較的行える

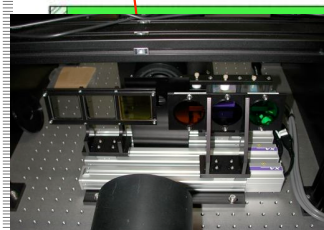
29

○ 高速分光器 全体像

固定マスク
(視野を絞る15' ⇒ 2.6')

フィルター(3x2)

- ・広帯域B、V、Rc
- ・ロングパスFC405、120



波長校正ランプ(HgNe)
切替

- ・φ0.9mm(=10")丸穴、
- ・0.2mm(=2.2")スリット
- ・0.11mm(=1.2")スリット

分散素子

- ・2素子プリズム
- ・グリズム



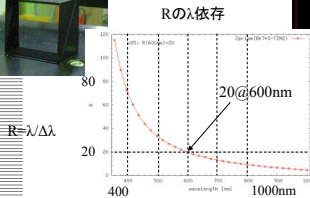
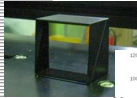
CCDカメラ
0.31"/pix

ト(3種類)

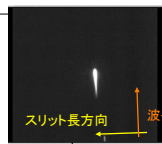
分散素子1

・超低分散=2素子プリズム

素材 BK7 + F2
 透過率 85%以上
 直透過光 $\lambda=600\text{nm}$
 波長分解能 $R=73-9$ ($\lambda=400-800\text{nm}$)
 サイズ $36 \times 36 \times 27\text{mm}$
 頂角 $27.5, 4.9^\circ$

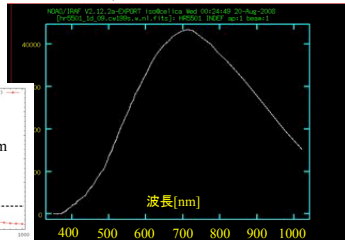


生画像



HR5501
B9.5V

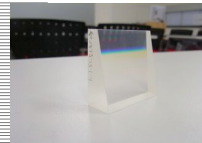
波長校正後 (ADU/pix)



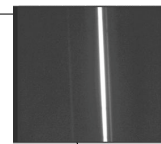
分散素子2

・低分散分光=グリズム

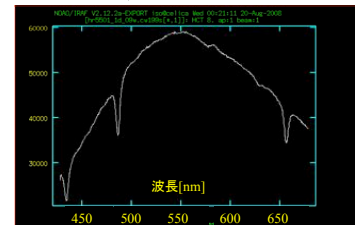
直透過光 $\lambda=550\text{nm}$
 波長分解能 $R=172@H\alpha, 0.2\text{mm}$ スリット
 観測波長域 $430-690\text{nm}$ 他の波長域も観測可能
 プリズム 頂角: 12.2° 素材: BK7
 回折格子 溝本数 200gr/mm , 角度 10°
 1次のブレイズ波長: 505nm



生画像



HR5501
B9.5V



分散素子以外の仕様

・マスクスリット

- ・ $\phi 0.9\text{mm}$ ($=10''$) 丸穴 プリズム分光用
- ・ 0.2mm ($=2.2''$) スリット グリズム分光用
- ・ 0.11mm ($=1.2''$) スリット 波長校正用

・フィルター

- ・広帯域 (B, V, Rc) 撮像観測用
- ・ロングパス
- ・GG495 ($\lambda_s=450\text{nm}$)
- ・L38 ($\lambda_s=353\text{nm}$)

・HgNeランプ

グリズム分光用
波長校正用

33

観測モード

・撮像 (視野: $2.6' \times 2.6'$)

- ・広帯域フィルター (B, V, Rc)
- ・フィルターなし (素通し)

・分光

- ・超低分散 (プリズム) 分光 ($R \sim 73-9$)
- ・素通し
- ・ $\phi 0.9\text{mm}$ 丸穴

・低分散 (グリズム) 分光

- ・ 0.2mm スリット ($R \sim 170$)
- ・ 0.11mm スリット ($R \sim 310$)

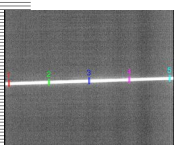
観測波長域に応じて
オーダーカットフィルターを使用

L38 ($\lambda \geq 353\text{nm}$)
 GG495 ($\lambda \geq 450\text{nm}$)

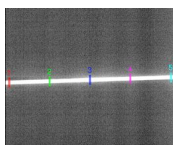
34

マスクスリット像

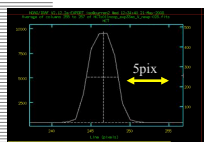
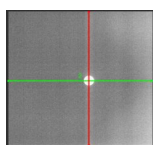
0.11mm ($=4\text{pix}$)



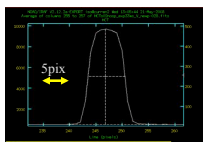
0.2mm ($=7\text{pix}$)



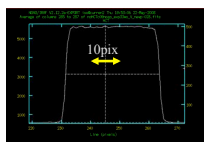
$\phi 0.9\text{mm}$ ($=32-33\text{pix}$) 丸穴



半値幅=3.73-4.21pix



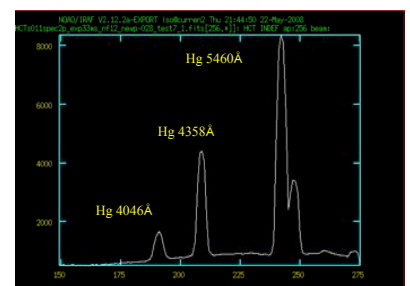
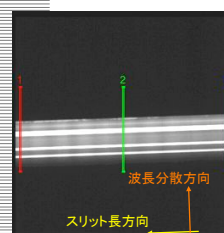
6.76-7.02pix



32.06-32.09pix

波長校正ランプのスペクトル像

・プリズム分光 (0.11mm スリット)

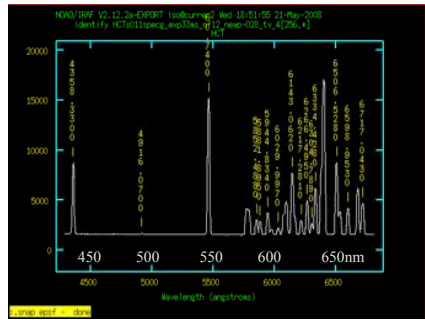
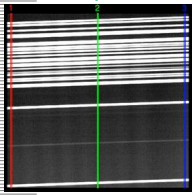


波長校正に使える輝線は3本のみ

35

○波長校正ランプのスペクトル像

・グリズム分光
(0.11mmスリット)

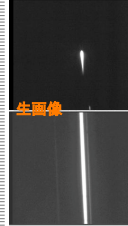


波長fitに使える輝線は15本

効率測定

測光分光標準星 HR5501 (B9.5V,
Vmag=5.673, Z~40°)

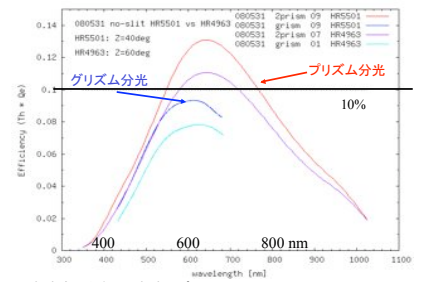
スリットレス分光



プリズム分光
グリズム分光

系全体の効率

(大気・望遠鏡・装置・CCD量子効率全てを含む)

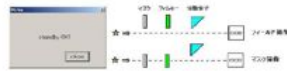


大気・望遠鏡・装置・CCD量子効率全てを含めた効率のピークは

プリズム: ~13%(@λ=640nm)

グリズム: ~9%(@λ=610nm)

制御ソフトウェア



39

小松(2009 広島大卒論)

高速分光器まとめ

積分時間: 27.1ms ~ 10 sec

観測視野: 2.6' x 2.6' (撮像モード) (0.31"/pix)

2.2" x 2.6' (0.2mmスリット分光)

1.2" x 2.6' (0.11mmスリット分光)

	2素子プリズム	グリズム
マスク	スリットレス(素通し)	0.2mm(=2.2")スリット
観測波長域	400-800nm	430-690nm
波長分解能(R)	73-9	114-180
系全体の効率	最大13%	最大9%
限界等級(※)	15.7mag	12.4mag

※積分時間:10秒、電子増倍率:最小(4倍)、λ=550nmでS/N=10

開発装置リスト

- ・ HOWPol (1露出型広視野偏光撮像器)
 - 2008年11月より観測開始、2009年5月よりGRBスタンバイ、10月より広視野偏光撮像稼働予定
- ・ HONIR (可視赤外線同時カメラ)
 - 2009年2月に赤外1チャンネル撮像のファーストライト、現在は調整、開発を継続
- ・ 高速分光器(京大嶺重氏科研費)
 - 2008年7月完成、2009年2月制御ソフト完成