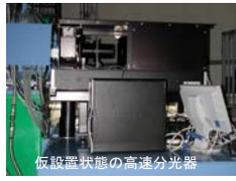


# 高速分光システムの開発 III



磯貝 瑞希(国立天文台)、嶺重 慎、野上 大作(京都大)、川端 弘治、植村 誠、大杉 節、山下 卓也、永江 修、新井 彰、山中 雅之、宮本 久嗣、上原 岳士、笹田 真人、田中 祐行、松井 理紗子、深沢 泰司、池尻 祐輝、先本 清志、小松 智之、かなた望遠鏡チーム(広島大)

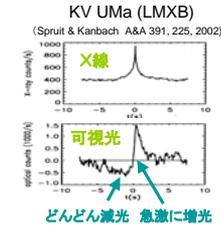
我々は高速読み出しが可能なCCDカメラに分光器を組み合わせて高速分光を行う観測装置の開発を進めている。現在、観測運用が可能な状態まで開発を終えているが、本来の性能を発揮した効率の良い観測を行うにはクリアすべき課題をまだ残している。

## 1. 高速分光システムとは

35.8 frame/sec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光学システム。目的は、ブラックホール連星、激変星での連続光SED (R≡λ/Δλ ~ 20) および輝線強度 (R~150)の短時間変動 (~0.1-1秒) (右図) を捉えること。

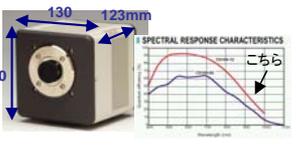
製作は嶺重(京大)の科研費(19年度基盤BF高速分光システムでとらえるブラックホール粒子加速の現場)を財源とする。

装置は広島大学宇宙科学センター附属東広島天文台かなた望遠鏡の第2ナスマス焦点に設置し、同じく第2ナスマス焦点を使用する観望用眼鏡視光学系と共存。



## 2. 高速CCDカメラとは

e2v社の電子増倍(EM)・背面照射型 frame transfer 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)



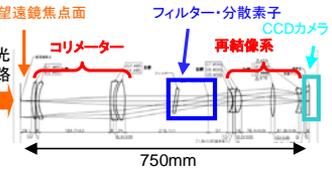
ピクセル数	512 × 512
ピクセルサイズ	16 μm × 16 μm
露光時間	27.1 msec ~ 10 sec
最速frame rate	35.8 frame/sec (No-bin, full-frame)
電子増倍(EM)	4 ~ 2000 (可変)
カメラヘッド	真空封じ切り・ペルチェ冷却+空冷
冷却温度	-50°C (@0~40度)
読み出しノイズ	100 [e-]
A/Dコンバータ	14 bit
飽和電荷量	400,000 [e-]
限界等級	20 mag @かなた望遠鏡(1.5m) (±0.2mag, 最長の10秒露光)

## 3. 分光器の仕様

### 3.1: 光学系

光学系は広島大で開発中の可視広視野一露出型偏光撮像装置HOWPolの(予備の)レンズ群を使用

・HOWPolの光学系 (視野: 15°, 縮小率: 1/1.741)



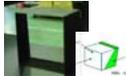
焦点面スケール:  
望遠鏡: 11.15"/mm → CCD: 19.41"/mm (0.31"/pix)

### 3.2: 分散素子

連続光SED、輝線強度観測用に2種類の素子を用意

○超分散素子

2種類の素材を組み合わせたプリズム



素材	BK7 + F2
透過率	85%以上
直透過光	λ = 600nm
波長分解能	R=70~10 (λ=400~800nm)

○低分散素子

Newport社製造型グレーティングを使用

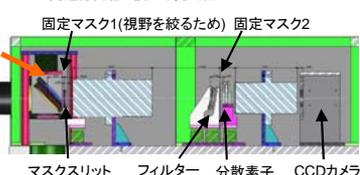
透過率	50 ~ 75%
直透過光	λ = 550nm
波長分解能	R = 155 @ Hα (0.2mmスリット使用)
観測波長域	450-680nm
グレーティング	溝200本/mm, 溝角10°, プレズ波長505nm

### 3.3: 筐体

分光器筐体の特徴および分光器の仕様は以下の通り。製作は西村製作所に依頼。

- 全ての光学素子を光学定盤上に設置
- 光学定盤をキャスターつきの土台で支持
- 眼鏡視光学系との切替は、斜鏡の出入りによる
- マスクスリット: 3種類  
φ0.9mm丸穴(=10°)  
W0.11xL4.0mmスリット(=W1.2"=4pix(波長較正用))  
W0.2xL4.0mmスリット(=W2.2"=7pix(グリズム分光用))
- フィルター:  
ロングパス2種類(L38, GG495)、  
広帯域(B,V,R,c)3種類
- 波長較正: Oriel社製 Hg-Neランプ
- マスクスリット、眼鏡視斜鏡、分散素子、分散素子の切替は、SUS社製電動アクチュエータの駆動にて行う

・高速分光器 横から見た図



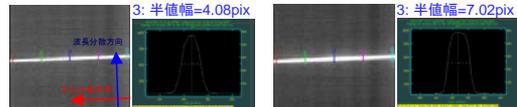
・高速分光器 撮影画像(正面上部より)



## 4. 装置の性能評価

### 4.1: マスクスリット像

A: 幅0.11mm(=4pix)スリット(波長較正用) B: 幅0.2mm(=7pix)スリット(グリズム分光)



3以外の半幅値: 1.4, 2.1, 2.3, 96, 4, 4.15, 5, 3, 73pix 半幅値: 1.6, 99, 2, 6, 86, 4, 6, 93, 5, 6, 76pix

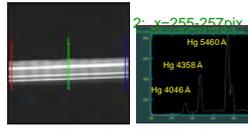


チップが回転している(2度)

0.11mm, 0.2mm両スリットともに、設計通りの性能を満たしている。  
スリットが斜めに写るのは、CCDチップがカメラ外枠に対して少し回転して設置されているため。  
スリットの傾斜=3.5% → 角度で2度の回転に相当

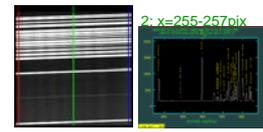
### 4.2: スペクトル画像(0.11mmスリット使用)

A: プリズム分光



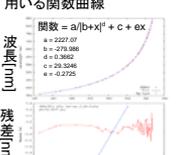
波長fitに使える輝線は3本のみ

B: グリズム分光



波長fitに使える輝線は15本

プリズム分光の波長較正に用いる関数曲線

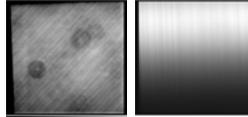


ピクセル Hg輝線の残差は最大で10nm程度

プリズム分光では、グリズムよりも複雑な関数が予想されるが、人工光源では3本しか波長固定できる輝線がないため、波長較正法としては別の方法(ZEMAXの計算結果を関数でfitし、天体スペクトルには波長方向のシフトのみで適用)を用いる。

### 4.3: フラット画像

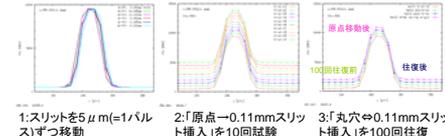
プリズム分光 (素通し) グリズム分光 (0.2mmスリット)



0.2mmスリット(0.11mmスリットにも)細かい線が見える。これはスリット表面の凹凸によるもの。データ整約の際には、スリット長方向の感度補正を行う必要がある

### 4.4: マスクスリット用アクチュエータ位置再現精度

カタログ値(10 μm)の再現精度を持つ調査を行った。



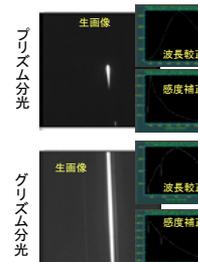
1:スリットを5 μm(=1/8)ずつ移動 2:1'原点→0.11mmスリット挿入」を10回試験 3:1'丸穴→0.11mmスリット挿入」を100回往復

スリットを10 μm動かすとピーク位置が変化する(1), 3の調査より原点に戻さずに使用を続けても5 μm程度の再現性を保持することが明らかとなった。この再現精度はCCDチップ面で0.18pixに相当。

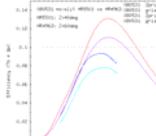
### 4.5: 効率 (電子増倍率=4(最小)での測定)

系全体の効率を測定するため、測光夜に測光分光標準星HR5501 (B9.5V, Z~40°)とHR4963(A11V, Z~60°)の観測を行った。

HR5501のスペクトル



効率曲線(λ)



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)

### 4.6: 限界等級 (電子増倍=最小)

HR5501 (Vmag=5.673)の結果を元に10秒積分での限界等級を推定。

電子増倍に起因するノイズファクター

S/Nの計算式:

$$S/N = g N a / (2 g (N a + D) + r^2)^{0.5}$$

N = カウント(HR5501の測定値)

a = scale factor (限界等級算出のため)

g = 変換係数 = 23 [e-/ADU] (浜ホト提供)

D = ダークカウント = 100 [ADU/10sec] (実測値)

r = 読み出しノイズ = 200 [e-/frame] (実測値)

λ=550nmでS/N=10となるようaを調整

プリズム分光 グリズム分光

a = 0.004, 積分時間T=0.25s a = 0.002, 積分時間T=10s

限界等級 = 5.673 - 2.5 log[a/(10/T)]

= 15.7 mag 12.4 mag

## 5. 性能のまとめ

積分時間: 27.1ms ~ 10 sec

観測視野: 2.6' x 2.6' (撮像モード)

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スリット

観測波長域 360~1000nm 430~690nm

波長分解能 6~80nm 4nm

限界等級(※) 15.7mag 12.4mag

※推定の詳細は4.6を参照のこと

## 6. 今後の課題

現在の状態では、側面・上面の遮光板を全て装着するとCCDカメラの排熱を阻害することが明らかとなっている。この改善が今後の課題である。

それ以外にも、効率の良い観測を行うために、

- 素子切替制御ソフト
- 整約支援ソフト
- 天体導入支援スクリプト

の作成を予定している。