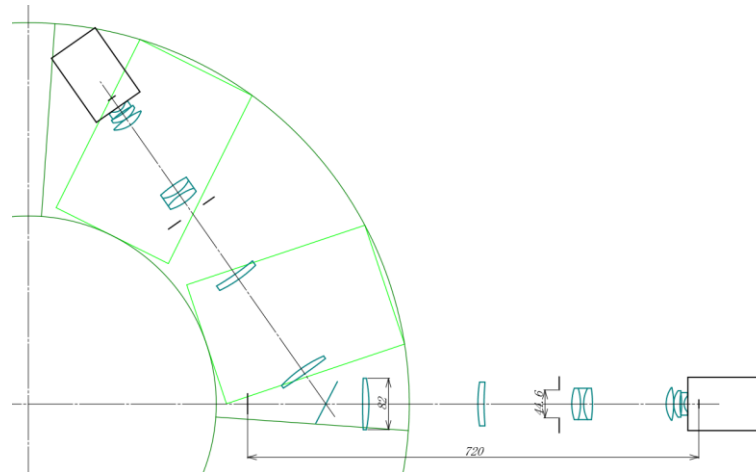


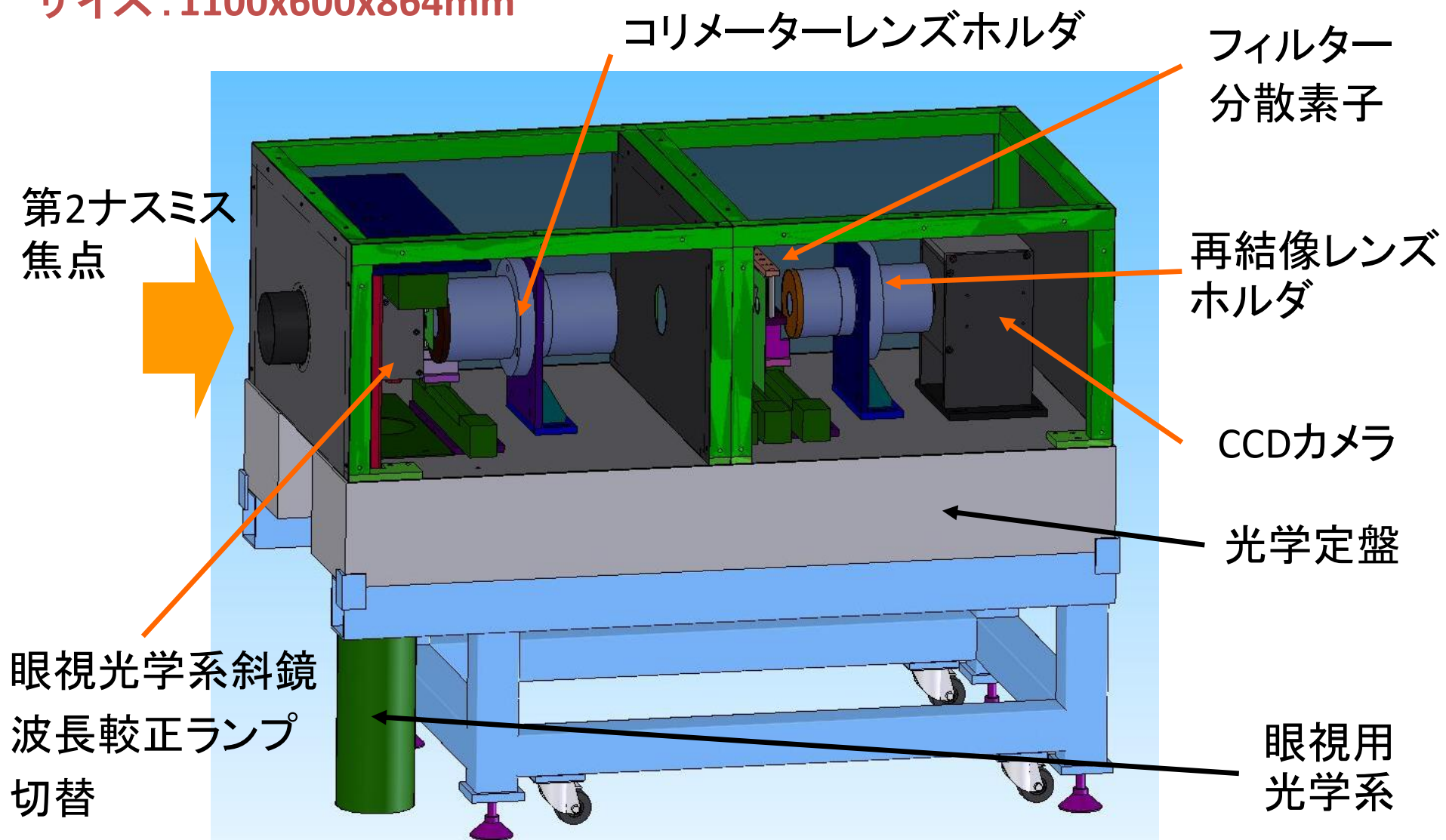
3.8m望遠鏡用高速測光 分光装置の概要と 狙うサイエンス

野上大作(京都大学)



○ 高速分光器@かなた望遠鏡 全体像

サイズ: 1100x600x864mm

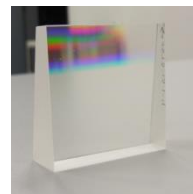
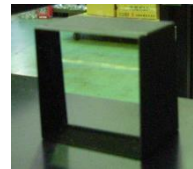


◎光学系：

H0WPo1の(予備の)レンズ群を使用

◎分散素子

- ・超低分散用($R \sim 20$) $\Rightarrow$ 2素子プリズム
- ・低分散用($R \sim 150$) $\Rightarrow$ グリズム
- ・~~(低分散2($R \sim 1000$))も入れられないか検討中)~~



◎筐体

- ・フィルター5種類 (BVR, ロングパス2種類 (L38, GG495))
- ・波長較正用光路
- ・マスク/スリット
3種類 (丸穴 $\phi 0.9\text{mm}$ 、スリット2種類(幅0.11, 0.20mm))

○高速CCDカメラ

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	16μm × 16μm
露光時間	27.1 msec ~ 10 sec
最速frame rate	35.8 frame/sec (No-bin)
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 (@0~30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-]

測光観測での限界等級 20 mag @かなた望遠鏡(1.5m)→22mag@3.8m?
(±0.2mag, 最長の10秒露光, 電子増倍率:最小)

○装置のまとめ

積分時間: 27.1ms ~ 10 sec

観測視野: 2.6' x 2.6' (撮像モード) (0.31"/pix)@Kanata

→74.5" x 74.5" (0.15"/pix)@3.8m

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

系全体の効率

最大13%

最大9%

限界等級(※)

15.7mag

12.4mag

→それぞれ2等
くらい深くなる

※積分時間:10秒、電子増倍率:4倍(2000倍まで増倍可能)

3.8m望遠鏡用への改修へ向けて

○カメラ候補

浜松ホトORCA-Flash4.0 V3 CMOSカメラ(C13440-20CU)



ピクセル数	2k x 2k
ピクセルサイズ	6.5 μ m $\times$ 6.5 μ m
露光時間	1 msec ~ 10 sec
最速frame rate	100 frame/sec (No-bin)
冷却温度	-30 $^{\circ}$ C (水冷)
暗電流	0.006 e-/pix/s
読み出しノイズ	1.0 [e-]
A/Dコンバータ	16 bit
飽和電荷量	30,000 [e-]
量子効率	>80% @ 560nm

若干量子効率は下がるが、チップサイズの拡大と読み出しノイズの低減効果あり

3.8m望遠鏡用への改修へ向けて

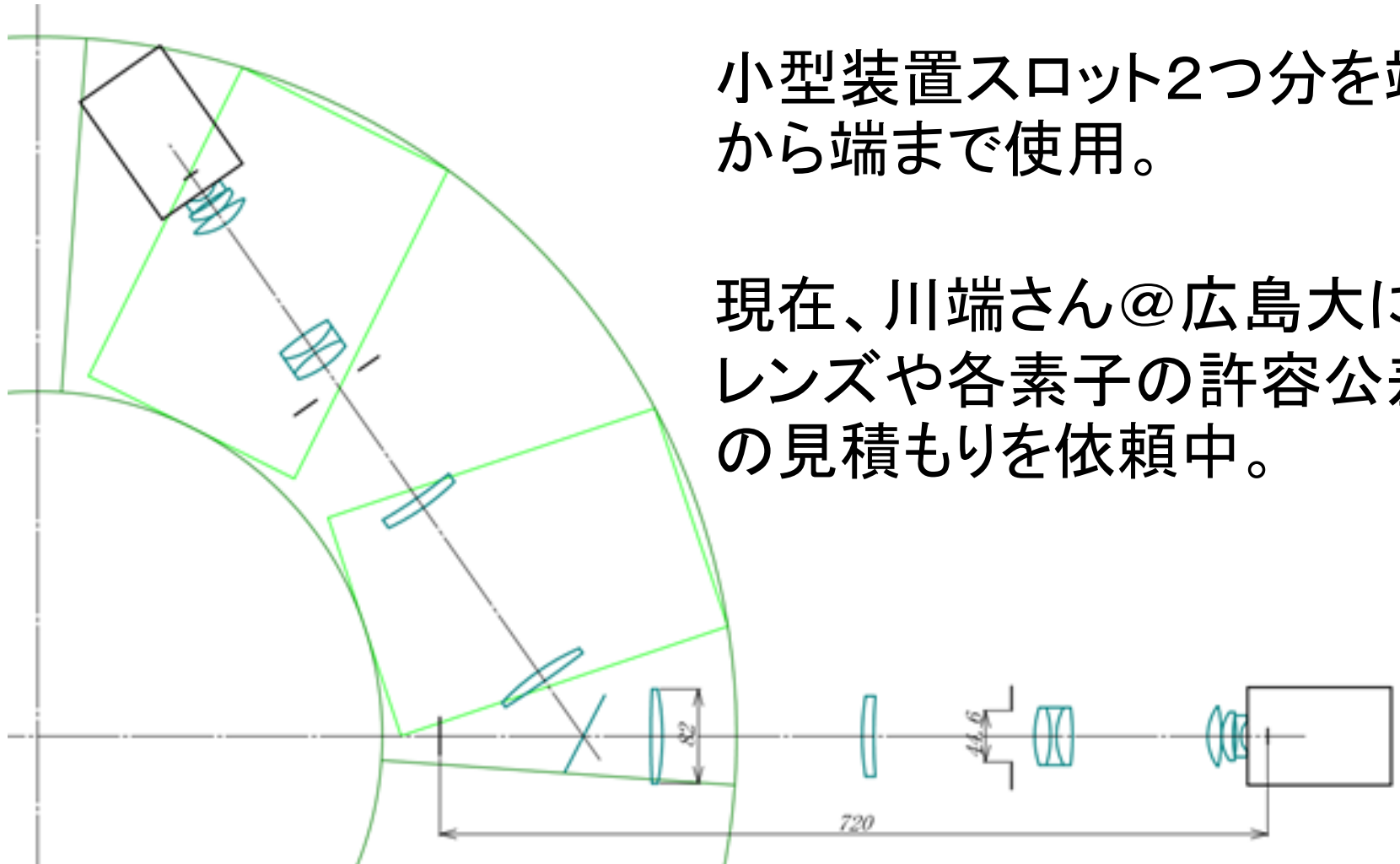
○要求仕様

波長分解能 20(プリズム), 150(グリズム)
波長帯域 400 - 800nm
視野 良像範囲 $\phi 5'$ 、ケラレ無し $\square 5'$
結像性能 1"
スリット 幅2" × 長さ10"以上

交換素子
スリット スルー, 2"スリット
フィルタ V, R, I, 2次光カット
(干渉フィルタなので入射角に注意)
分散素子 スルー, R20, R150

3.8m望遠鏡用への改修へ向けて

○光学設計



小型装置スロット2つ分を端から端まで使用。

現在、川端さん@広島大にレンズや各素子の許容公差の見積もりを依頼中。

どうも来年度後期の共同利用には
間に合わない雲行きです。申し訳
ありません。開発を手伝ってもいい
よ、という方は是非ご連絡下さい。

m(_ _)m

番外：可視光分散分光器は今年度も引き続き、柴田さん代表で科研費・特別推進を申請予定です。

観測装置のスペック

波長分解能	100, 000
観測波長	360–1, 050 nm
システム効率	20%
温度安定性	0.1 °C
限界等級（1時間積分）	13等(S/N=50)
ファイバー数と直径	0” . 45 × 12本

広帯域高分散分光器

回折格子

Richardson Gratings
53-*425E
溝密度 41.6本/mm
ブレイズ角 76°
20cm x 80cm

直交分散用プリズム

オハラ S-LAL7 頂角 18°
(片面は高次非球面)

検出器

1億画素 CCD
9.5cm $\square$ (最終 F/3.1)
真空入射窓
熔融水晶
直径 16cm
厚さ 1.2cm

反射鏡

バイコニック
6面 (5枚)

分散ファイバー
スリットによる
新型分光器概念

ファイバー
スリット

分光器

検出器上の
スペクトル

ファイバー間の
隙間で次数分離

(望遠鏡
より)

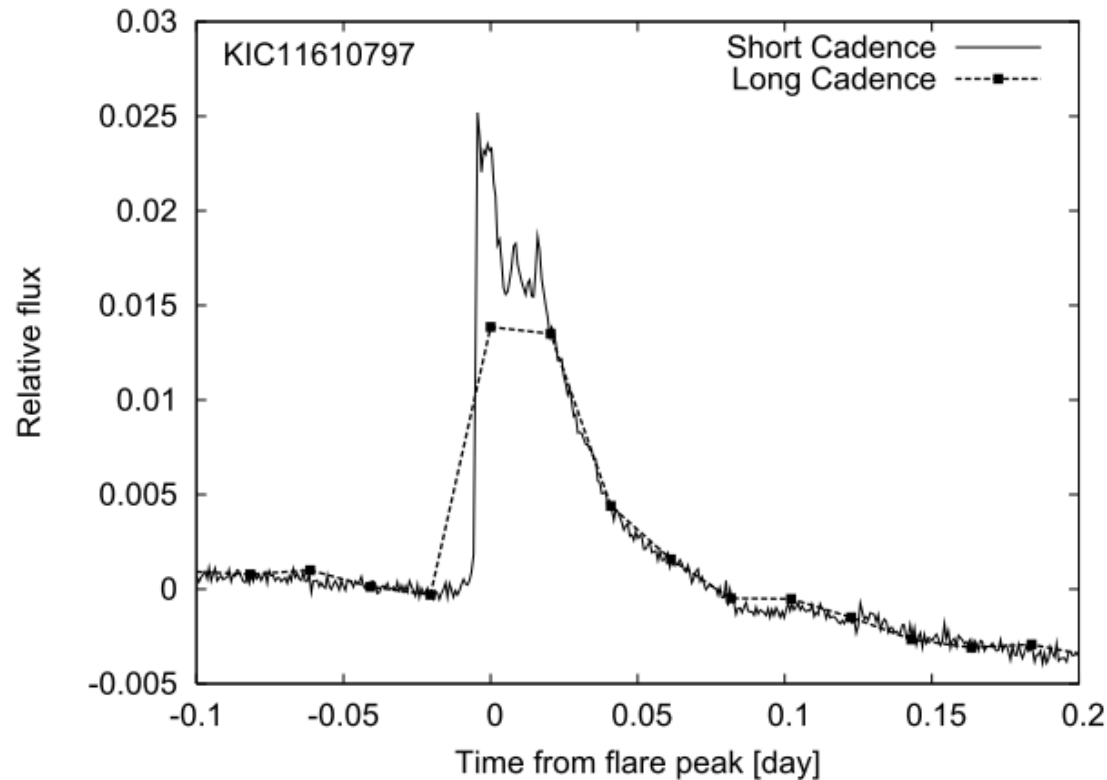
ファイバー
スリット
長さ 12cm
(入射 F/5)

観測波長域 $0.36\mu\text{m}$ (130次)
~ $1.05\mu\text{m}$ (45次)
同時入射ファイバー 12本/6本
ファイバー径 $50\mu\text{m}/100\mu\text{m}$
波長分解能 10万/5万

2m

分散配置

速いことはよいことだ！



Kepler衛星の1分cadenceのデータと30分cadenceのデータの比較。タイムスケールの短い現象の観測には、短時間でのデータ取得が必須。

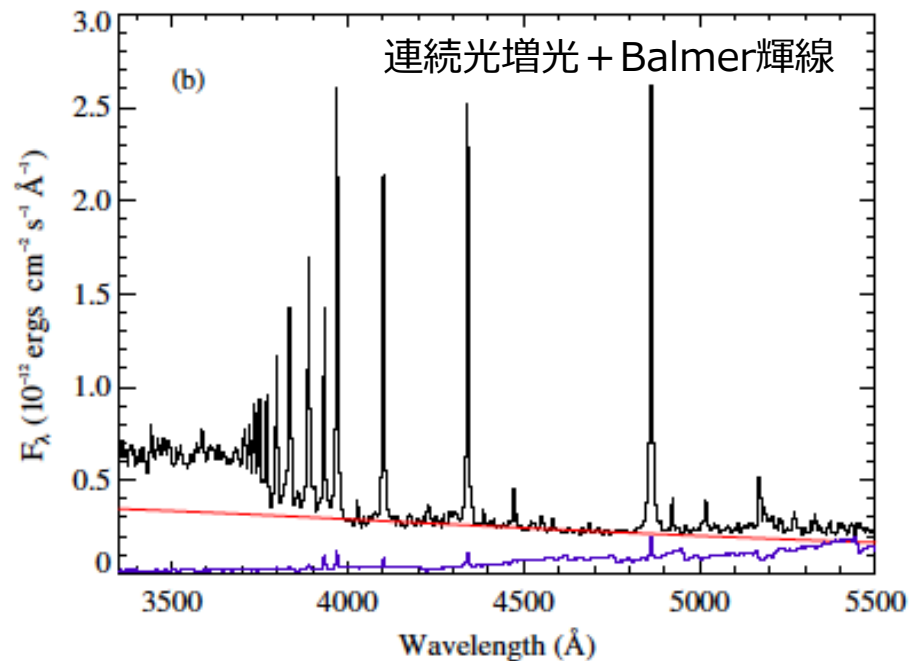
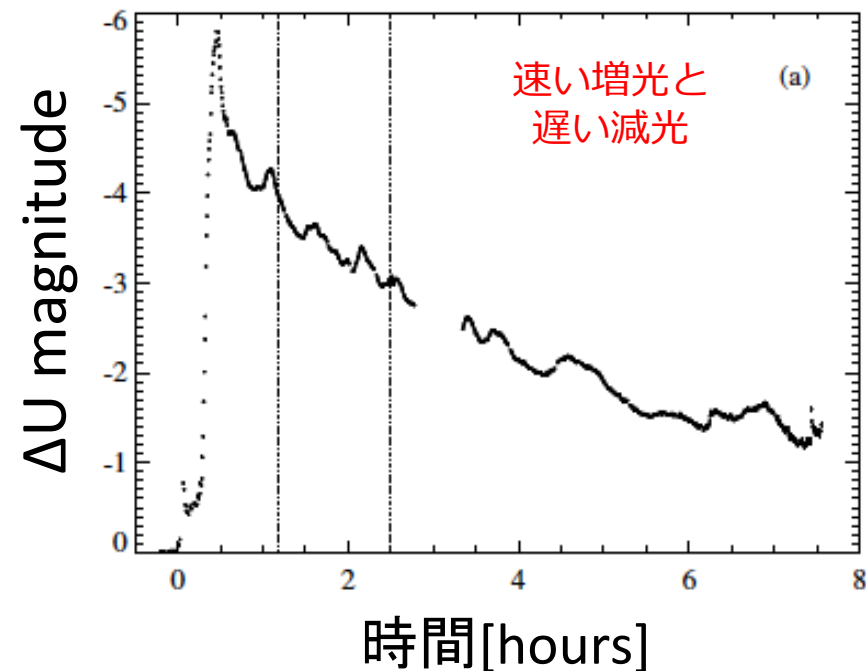
高速観測で拓くサイエンス

- 恒星フレア
- コンパクト天体周囲での高速変動現象
(最短数10ms?)
- 重力波天体の光学観測？
- Fast Radio Burst対応天体？
- パルサー？
- 掩蔽観測？
- 系外惑星トランジット？
- 白色矮星の振動？
- 他に面白い現象をご存知の方は教えて下さい！

Science I: 恒星フレア

○星の明るさが短時間だけ突発的に増光する現象

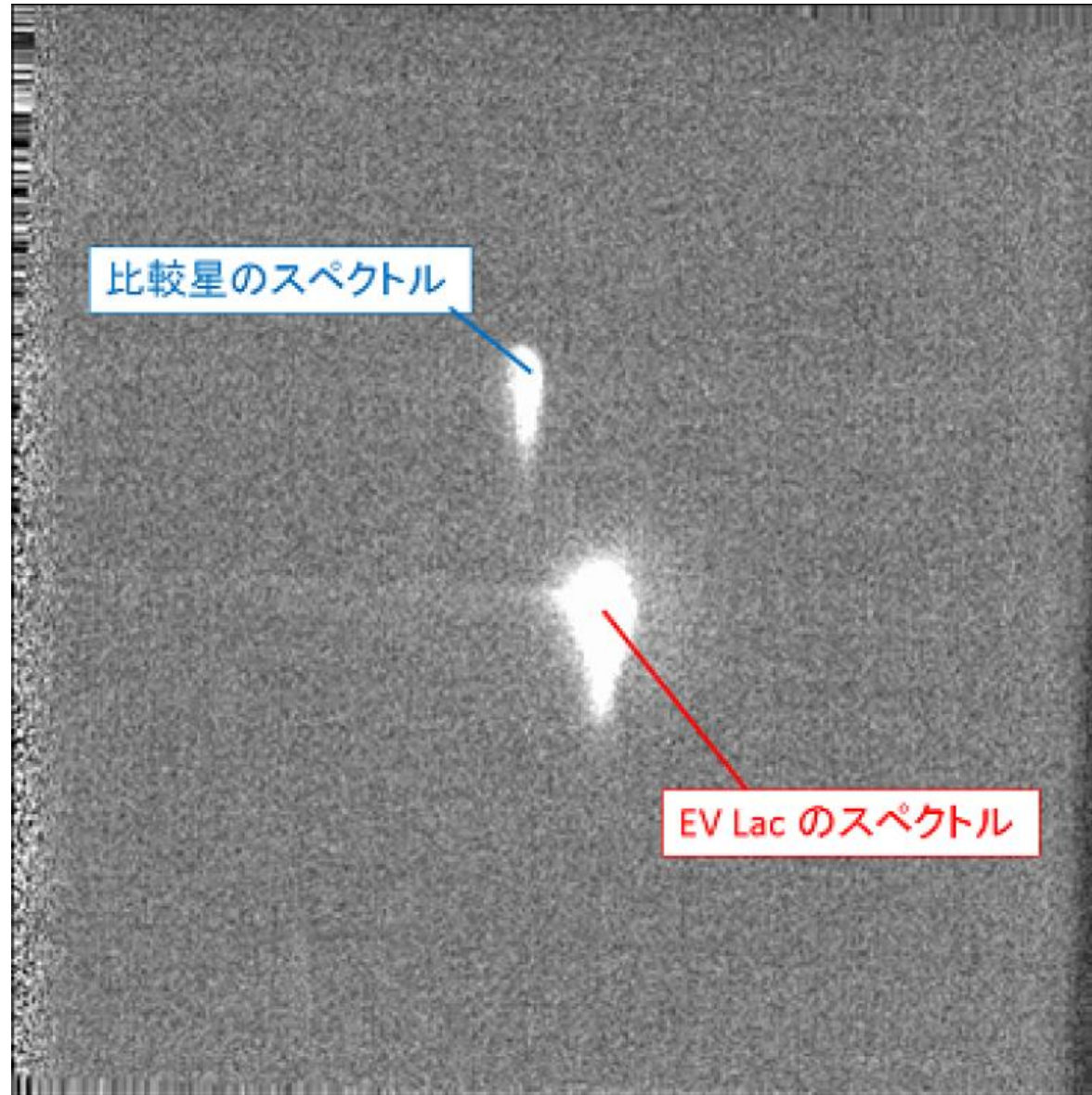
- 可視連続光やH α 輝線、UV・X線などでも、増光
- 従来はM型星(増光割合が大きい)や原始星(フレア発生頻度高い)がよく研究されてきた

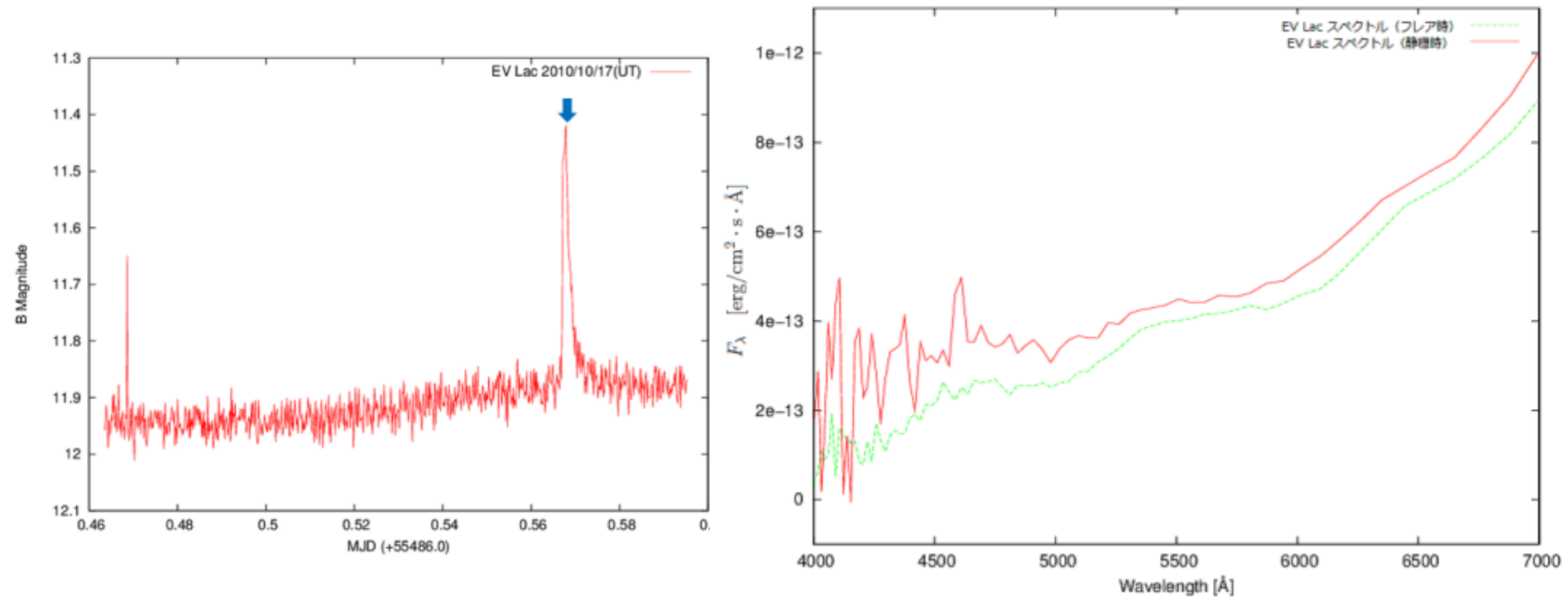


赤線: 10,000K黒体放射
紫線: 静穏期スペクトル

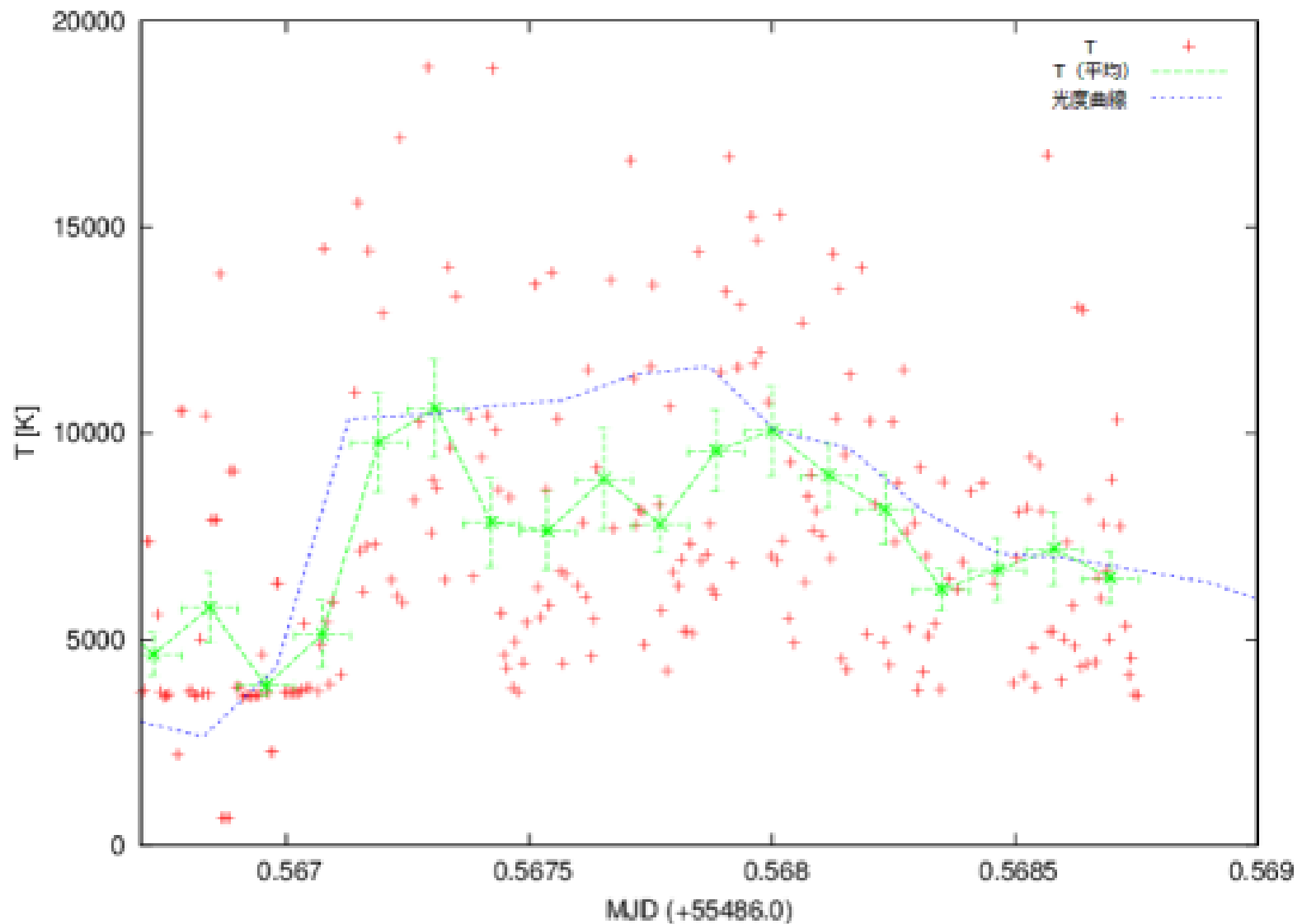
図: dM4.5e星YZ CMiでのフレア(Kowalski+2010)

M型星EV Lacのフレアの高速分光(蔵本哲也2013年修論) かなた望遠鏡(R $\sim$ 20; 1秒露出)





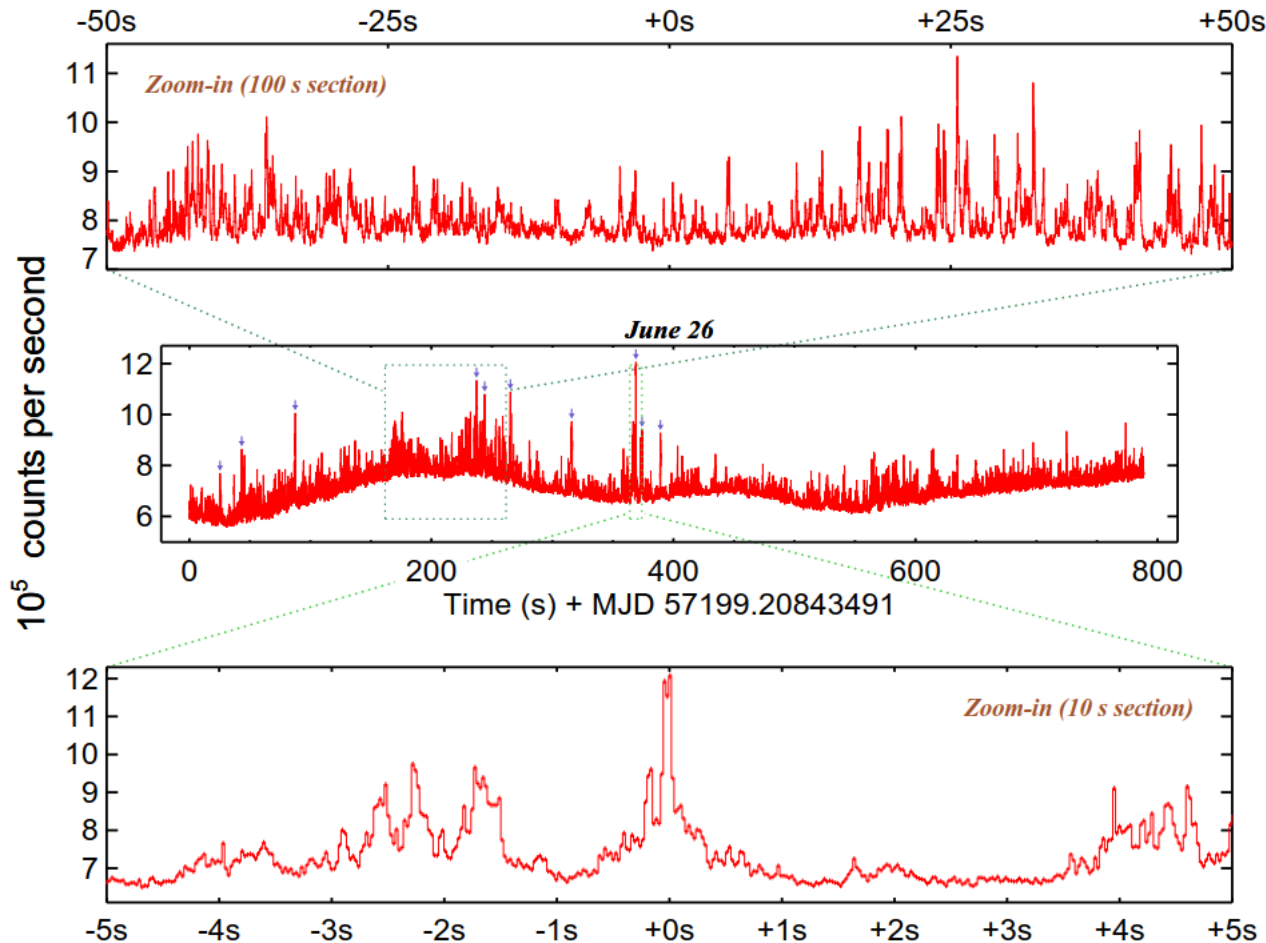
かなた望遠鏡に同架の25cm望遠鏡でのフレア星EV LacのBバンド観測(左)と高速分光で捉えられたスペクトルの変化(右)。フレアは振幅0.5等、継続時間～6分。スペクトルでは青側が主に増光していることがわかる。



増光分を黒体放射でfittingして求めた温度(左)と増光した部分の面積(右)。星表面の0.04%程度の面積が10000K程度まで温度が上がった！

Science II: ブラックホール近傍現象

V404 Cygの2015年のアウトバースト時のULTRACAM/WHT
による高速測光の結果 (Gandhi et al. 2016)



横軸の端から
端まで100秒

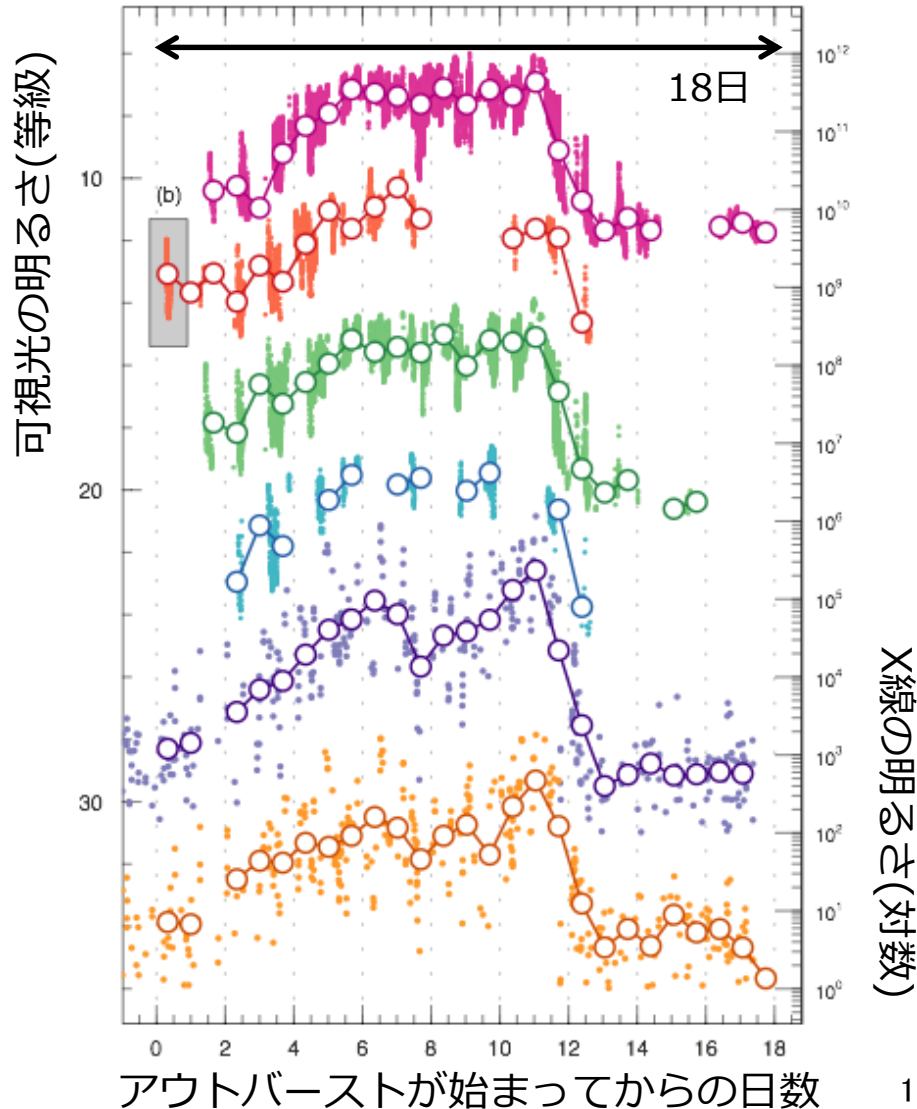
横軸の端から
端まで10秒

r' で24msec露出

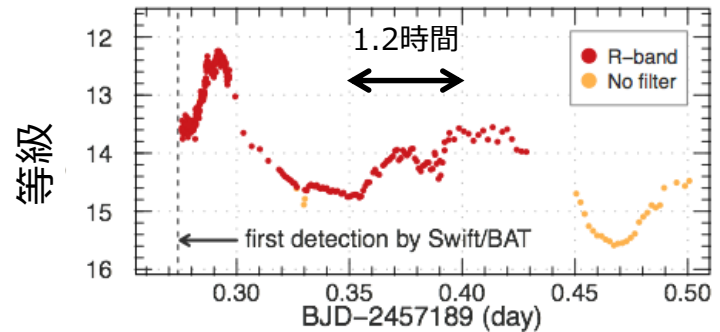
V404 Cyg の2015年のアウトバースト

Kimura et al. 2016, Nature

上の4つが可視光の光度曲線、
下の二つがX線の光度曲線



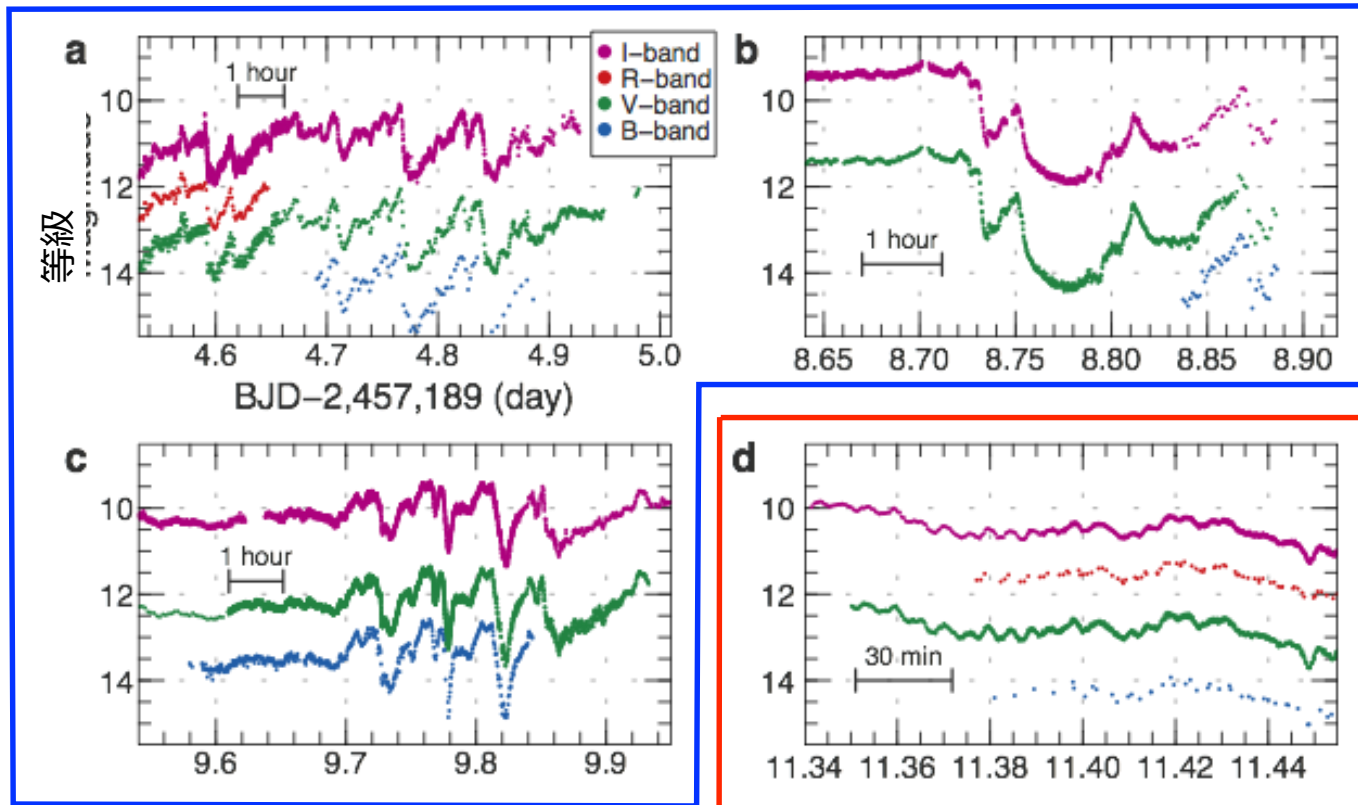
- 期間：およそ18日
- 可視光、X線の光度曲線が互いによく似ている。



↑台湾とロシアのチームの協力による、
開始3分後から数時間後までの可視光の
光度曲線

アウトバーストの最初から最後まで、
激しい短時間変動が見えた！

BHXB V404 Cygで見られた規則的な変動

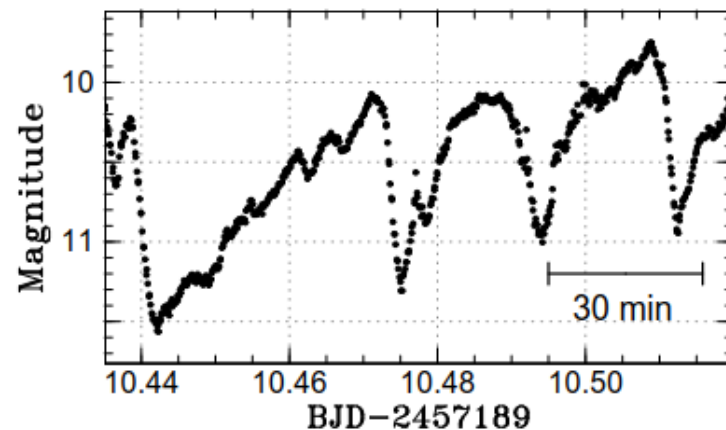
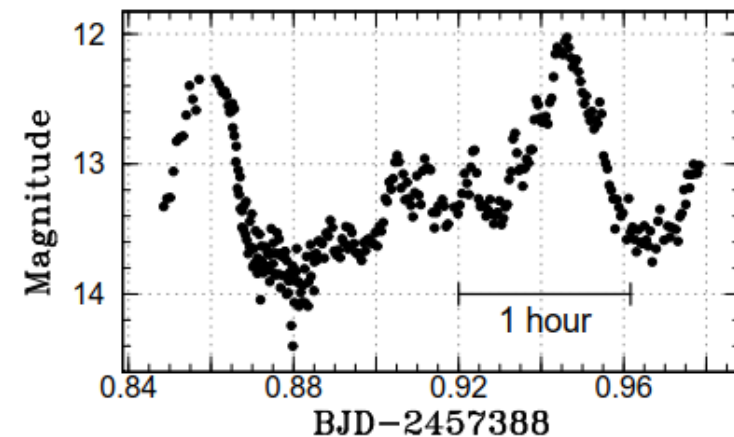
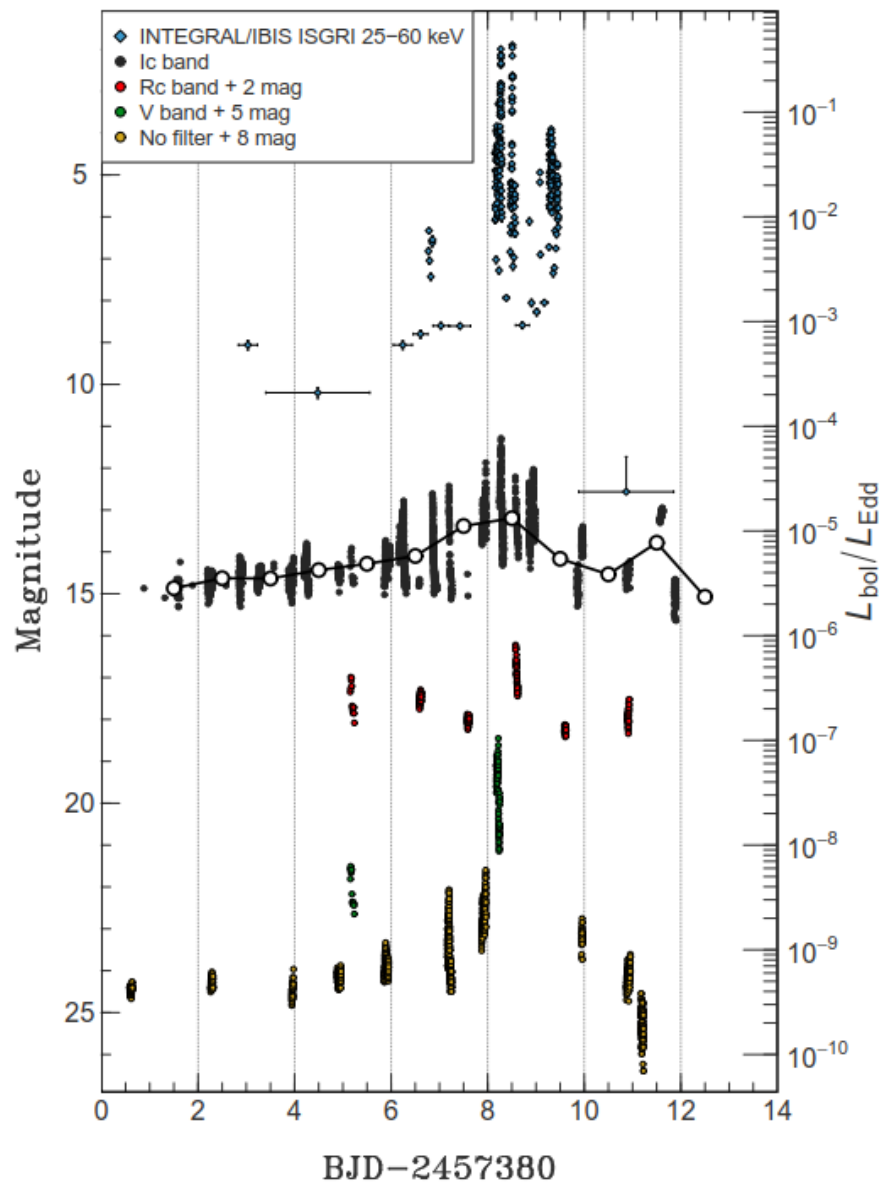


- ゆっくり増光したのち、急に光度が落ち込むという変動が続く。増光中は光度が変動する。
- タイムスケール：45分～2.5時間程度

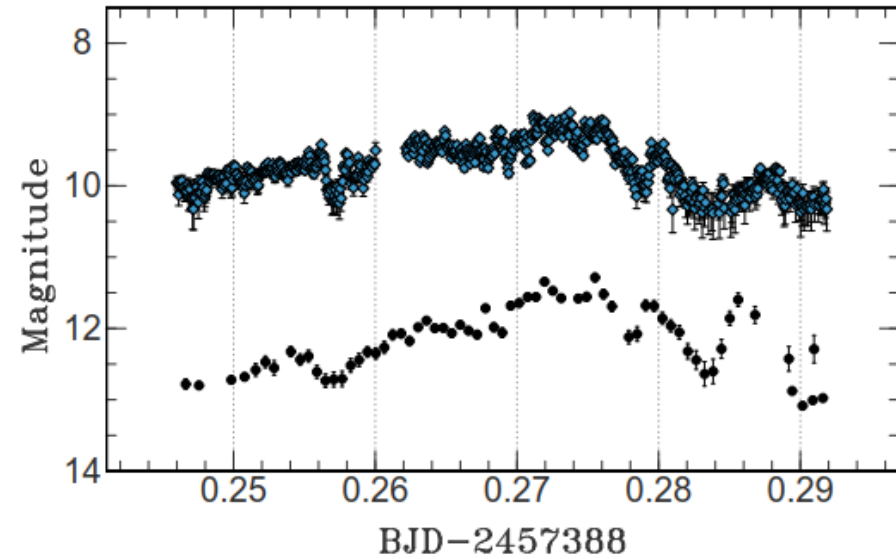
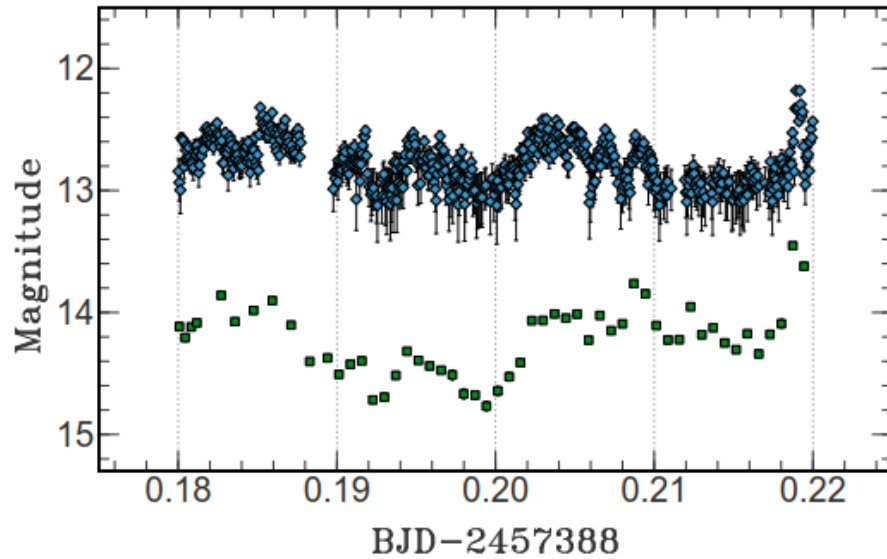
- 振幅の小さい短時間変動が続く。
- タイムスケール：5分程度

ブラックホールごく近傍での振動現象が初めて可視光で捉えられた！
X線変動に対して1分の可視光の遅れから、disk 外側でのreprocessか？

26年ぶりのアウトバーストの後、わずか6ヶ月で再度アウトバーストが！ (Kimura et al., submitted)



ややエネルギー的に小さいが、前回と似た光度曲線(左)と短時間変動(上)



30~50秒程度のX線変動の遅れ
→disk内での変動+accretion flow?

高速分光のプロファイルの変化が鍵？

まとめ

- 広島大学東広島天文台のかなた望遠鏡に取り付けられている高速測光分光器の分光素子を活かし、コンパクトにして3.8m望遠鏡の小型観測装置スロット2つ分に押し込む予定。
- 性能としてはほぼ踏襲する。
- 来年度後期の最初の共同利用に供することは難しそう。
- コンパクト天体周囲の超強重力場での変動現象が、可視光で捉えられる。X線との共同観測が鍵。Tomo-eサーベイでX線連星のアウトバーストの検出→3.8m即時高速測光／分光とか。
- 短いタイムスケール(秒～分程度のオーダー)の変動現象にはなんでも威力を発揮する。→恒星フレア、重力波天体？、FRB？、パルサー？、掩蔽観測、系外惑星transitなどなど？
- 単純な撮像装置、低分散分光器として普通に使えるように。