

# OISTERによるX線連星の観測

村田勝寛（東京工業大学）

共同研究者

安達稜, 高松裕, 伊藤尚泰, 庭野聖史, 細川稜平, 河合誠之（東京工業大学）,  
志達めぐみ（愛媛大学）, 諸隈智貴, 大澤亮（東京大学）, 花山秀和, 堀内貴史（国立天文台）,  
永山貴宏（鹿児島大）, 森鼻久美子（名古屋大）,  
伊藤亮介（美星天文台）, 上田佳宏, 吉武知紘（京都大学）  
東工大MITSuMEチームメンバー, OISTERメンバー

# 今日のお話

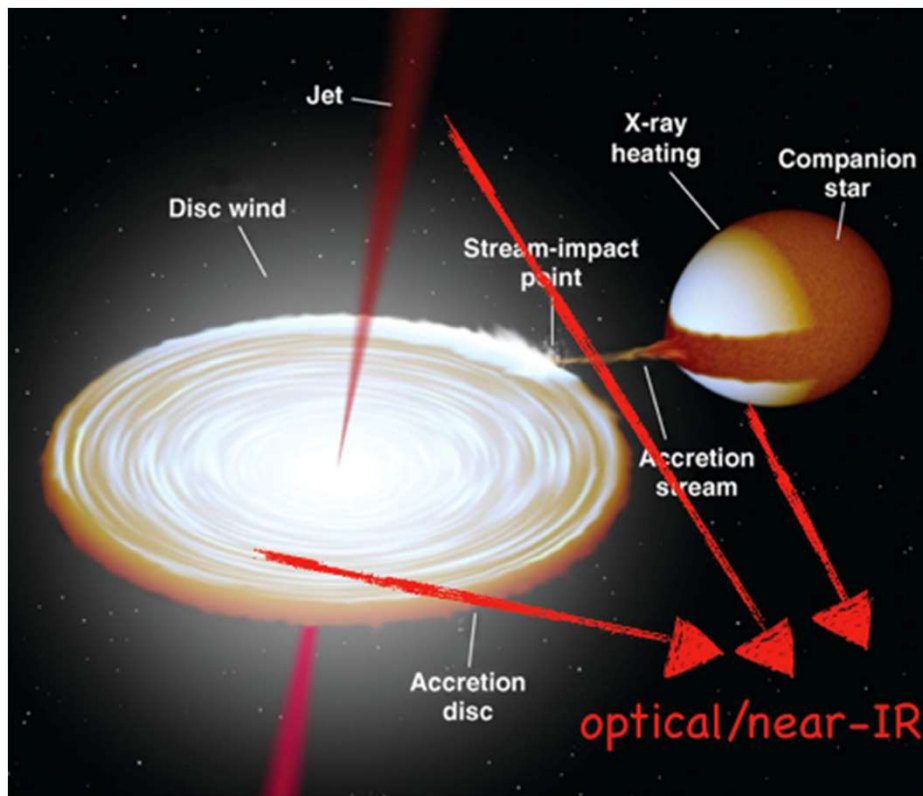
X線連星と可視光・近赤外線放射

我々のOISTER ToO観測

- ブラックホールX線連星 MAXI J1820+070
- ブラックホールX線連星 MAXI J1348-630

まとめ

# X線連星



Credit: NASA/R. Hynes

連星系を成す星の一つがコンパクト星（ブラックホール・中性子星）

- 伴星からのガスが降着円盤を形成し、中心に落下するに伴い重力エネルギーを解放し、その一部を放射エネルギーに転換
- X線アウトバーストすることでMAXI/GSCなどのX線検出器で発見される
- 我々が主に観測してるのは、伴星が太陽質量以下の低質量X線連星、コンパクト天体はブラックホール

X線連星の可視・近赤外線

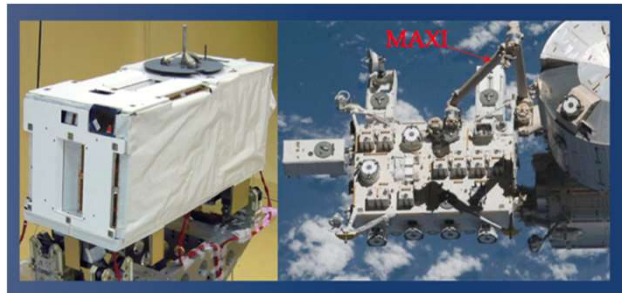
- ジェットからのシンクロトロン放射
- 降着円盤，X線が照射された降着円盤の外側、又は伴星からの熱放射

降着放射現象もアウトバースト中で変化

様々な時間尺度で変動

可視・近赤外線の色や変動、他波長との関係を調べることで放射源に制限

# 全天X線監視装置 MAXIによるブラックホールX線連星の発見



ISSの地球周回で約92分ごとに掃天

2009年にミッション開始

MAXIによるブラックホールX線連星の発見数 14個

(2020年10月時点 <https://iss.jaxa.jp/kibouser/pickout/71943.html>)

X線で（フラックスが）明るいTOP 3

- 2017年9月発見 MAXI J1535-571
- 2018年3月発見 MAXI J1820+070
- 2019年1月発見 MAXI J1348-630

2年間に明るいブラックホールX線連星が立て続けに発見された

→ 発見から数日以内に可視光・近赤外線で同定

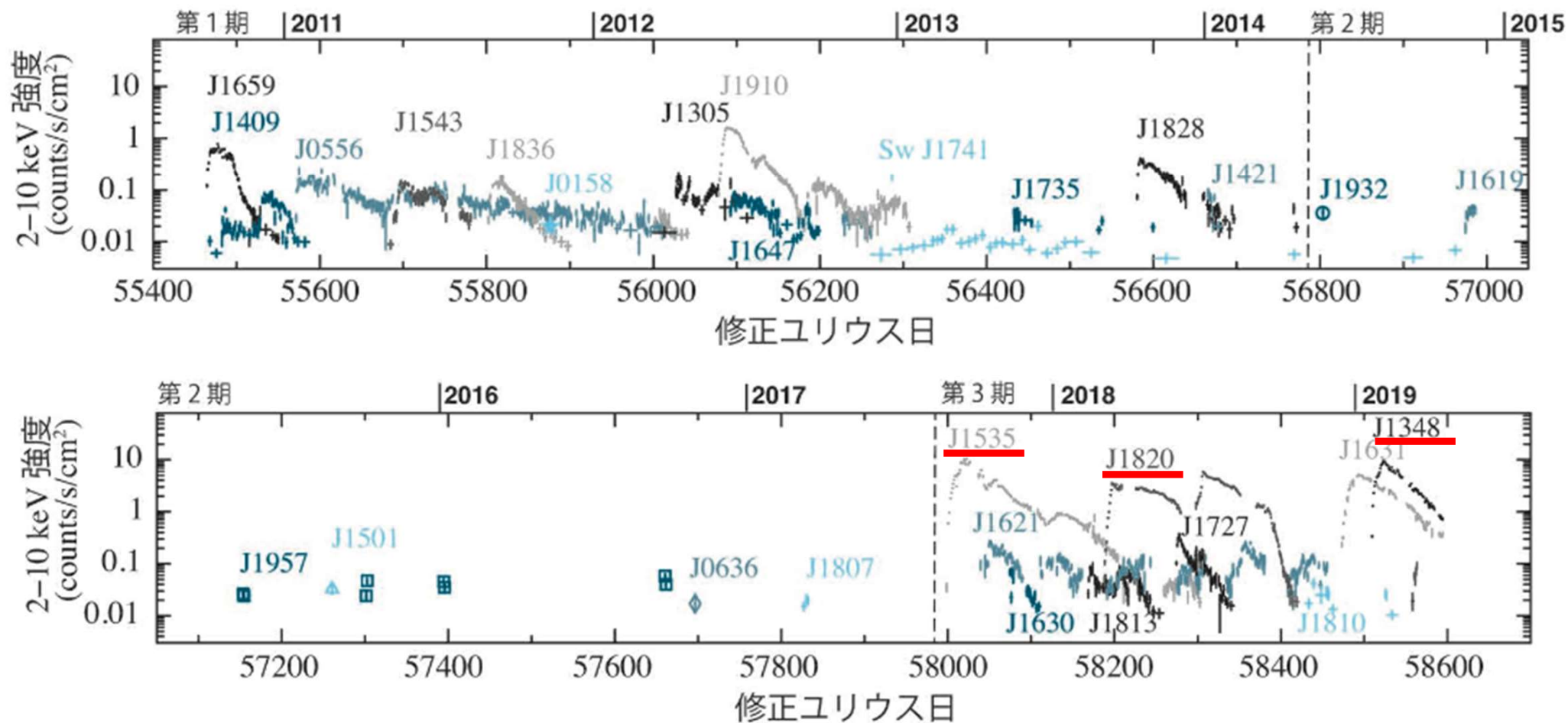
→ 可視光・近赤外線でも明るく、精力的に観測された

加えて、メインアウトバースト後に再増光も見られた

「MAXIによるX線連星の発見」, 根来均, 天文月報 全天X線装置 MAXI 10周年特集号, 2019

## MAXIが発見したX線連星の光度曲線

黒、灰色線がブラックホール



# X線連星観測のまとめ（2017年7月以降）

- **MAXI J1820+070** [OISTER ToO] 赤字：学生
  - 1日のうちの短時間変動など **安達（卒業）**、村田、**伊藤**、河合 / Adach et al. in prep 下線：東工大外
  - MAXIのX線+可視光・近赤外線 志達（愛媛大） / Shidatsu et al. 2018, 19, ApJ
  - せいめい分光+OISTER近赤外線 吉武・上田（京大） #「せいめい」は共同利用/京大時間枠
- **MAXI J1535-571** [IRSF] **森田（卒業）**、村田、河合
- **MAXI J1348-630** [OISTER ToO] **高松**、河合、村田、**大枝（卒業）**、**白石（卒業）** / Oeda+20 ATel #13539
- **MAXI J1727-203** [IRSF] X線 + 近赤外線 +LCO可視光 **Wang**、河合、村田 / Wang et al. submitted
- **GRS 1915+105** [OISTER ToO] 村田、河合 / Murata+19 ATel #12769
- **Swift J1858.6-0814** [OISTER ToO] 村田、河合
- **MAXI J0637-430** [IRSF] 村田、河合 / Murata+19 ATel #13292
- **MAXI J1621-501** [IRSF] 村田、河合 → データ提供してGorgone et al. 2019, ApJ, IRSF限界等級を含む追観測結果
- **Aql X-1** [MITSuME, むりかぶし, かなた] **庭野**、河合、村田

OISTER ToO + IRSF 8天体、明るい天体を重点的に観測

出版済み査読付き論文 OISTER利用 1編、IRSF利用 1編、MITSuME利用 1編

書き進めている論文 OISTER利用 1編、IRSF利用 1編

学位論文 学部 3、修士 3

ATel 3件

# ブラックホールX線連星 MAXI J1820+070

2018年3月11日にMAXIで発見された (Kawamuro+2018, ATel #11399)

- $(l, b) = (35.85, +10.160)$
- $D \sim 3 \pm 1$  kpc (Gaia, Gandhi et al. 2018)  
2.96  $\pm$  0.33 kpc (VLBI, Atri et al. 2020)
- $N_H \sim 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2} \Leftrightarrow$  減光  $A_v \sim 0.3$

比較的近くて減光が小さい

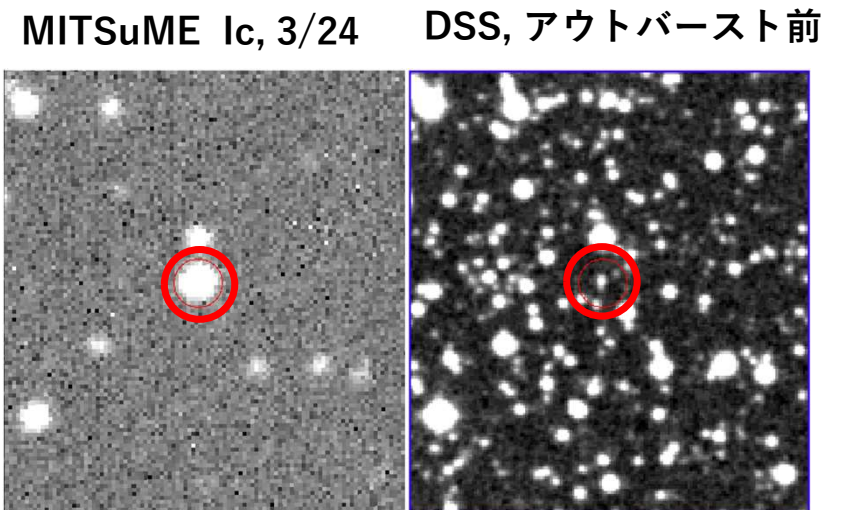
→ 可視光・近赤外線で明るい

Rc~12等 メインアウトバーストのピーク

Rc~13等 再増光のピーク

非常に活発な追観測が世界中で行われた

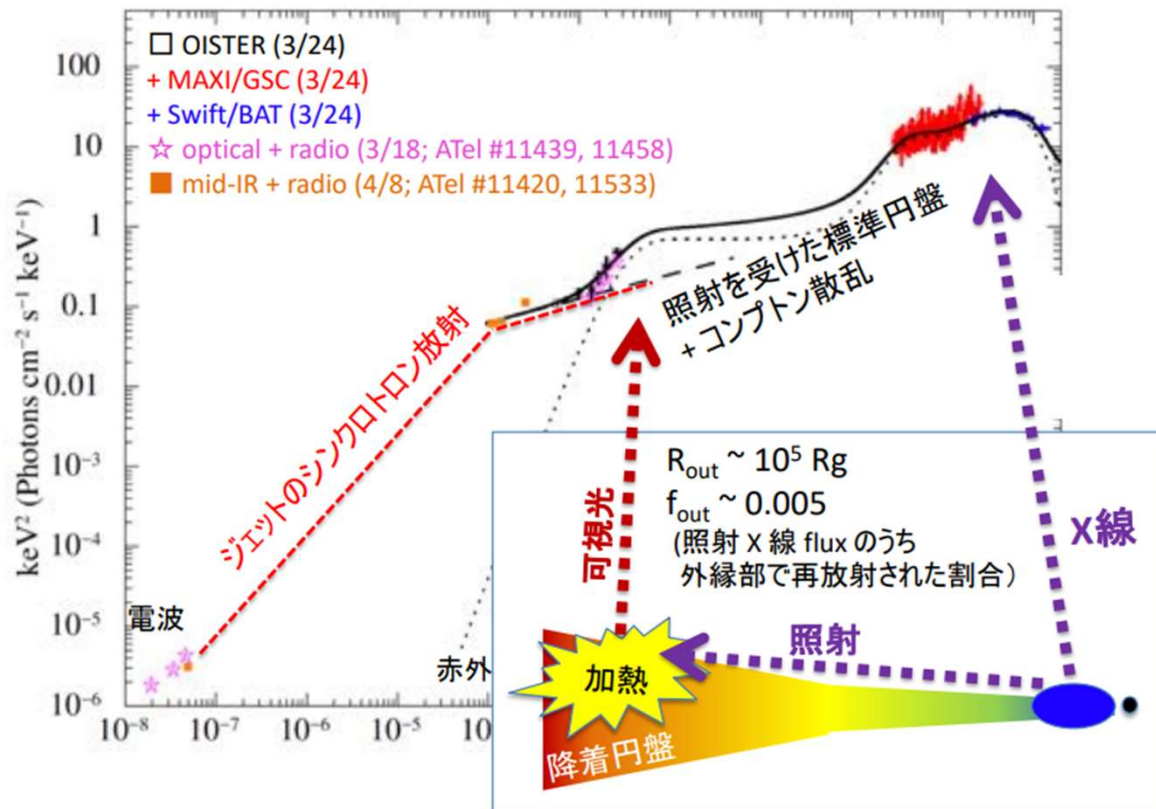
T~20日からOISTER ToO、MITSuMEで観測



# メインアウトバースト期のX線・可視近赤外線SED

## 2018年3月末の可視光・X線・電波SED

志達さんスライド, Shidatsu+18



可視光・近赤外線のSEDに折れ曲がり  
 → 照射円盤成分(irradiated accretion disk)と  
 ジェットからのシンクロトン放射の二成分

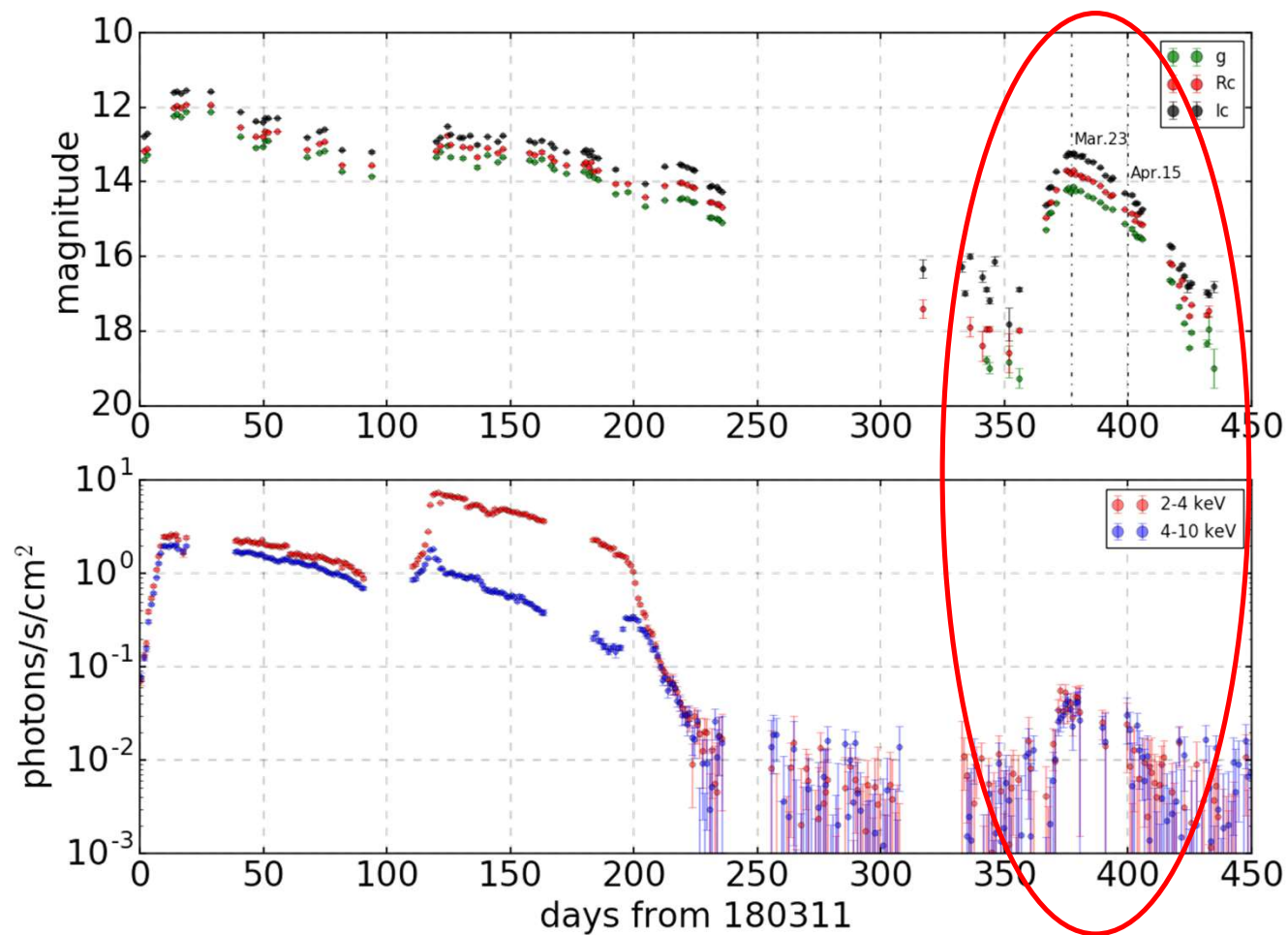
二成分分離するには、  
 OISTERの近赤外線・可視光の同時観測が重要

メインアウトバースト OISTER観測  
 Shidatsu et al. ApJ868, 54, 2018  
 Shidatsu et al. ApJ, 874, 183, 2019



# 1回目の再増光での観測

東工大安達さんの修論  
投稿論文を準備中

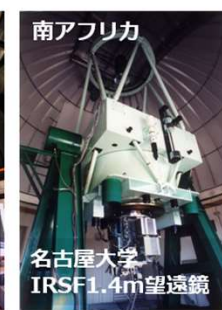
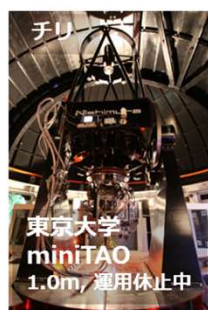
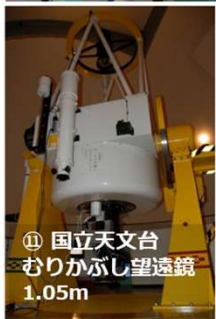
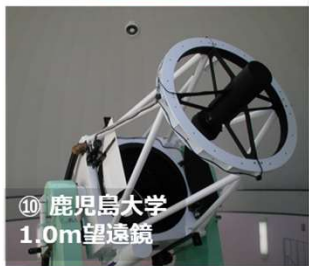


3/23と4/15に  
多波長で集中的な同時観測

4/15はTomo-e, NICERなど  
の可視光・X線同時の  
高時間分解観測

# 3/23, 4/15の同時観測

近赤外線 JHKs



可視光 riz

可視光 no filter  
高時間分解

可視光 gRclc

# 同時観測

X線観測 NICER

(The Neutron Star Interior Composition Explorer Mission)

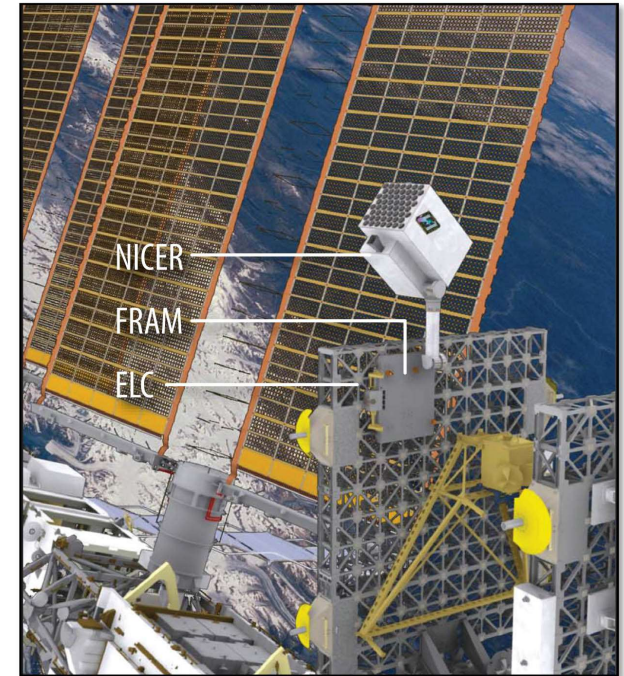
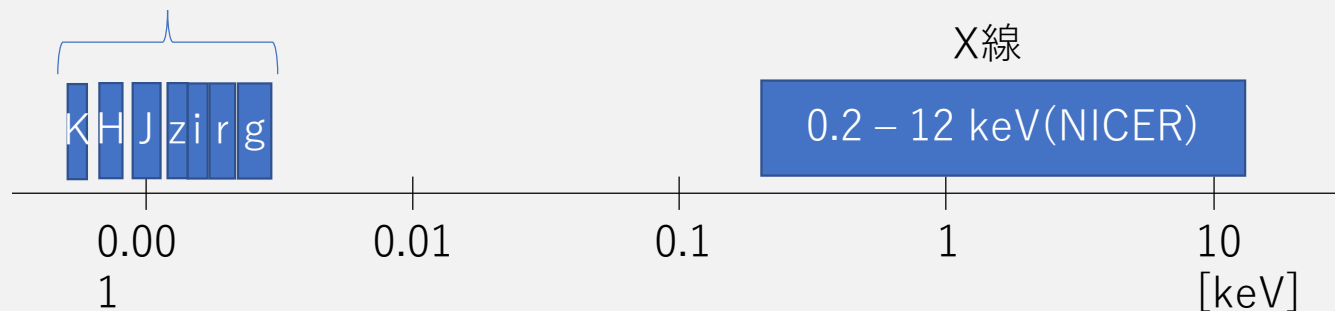
X線観測装置@ISS

0.2 – 12keV

OISTER ToOに（なるべく）時間を合わせた観測を依頼

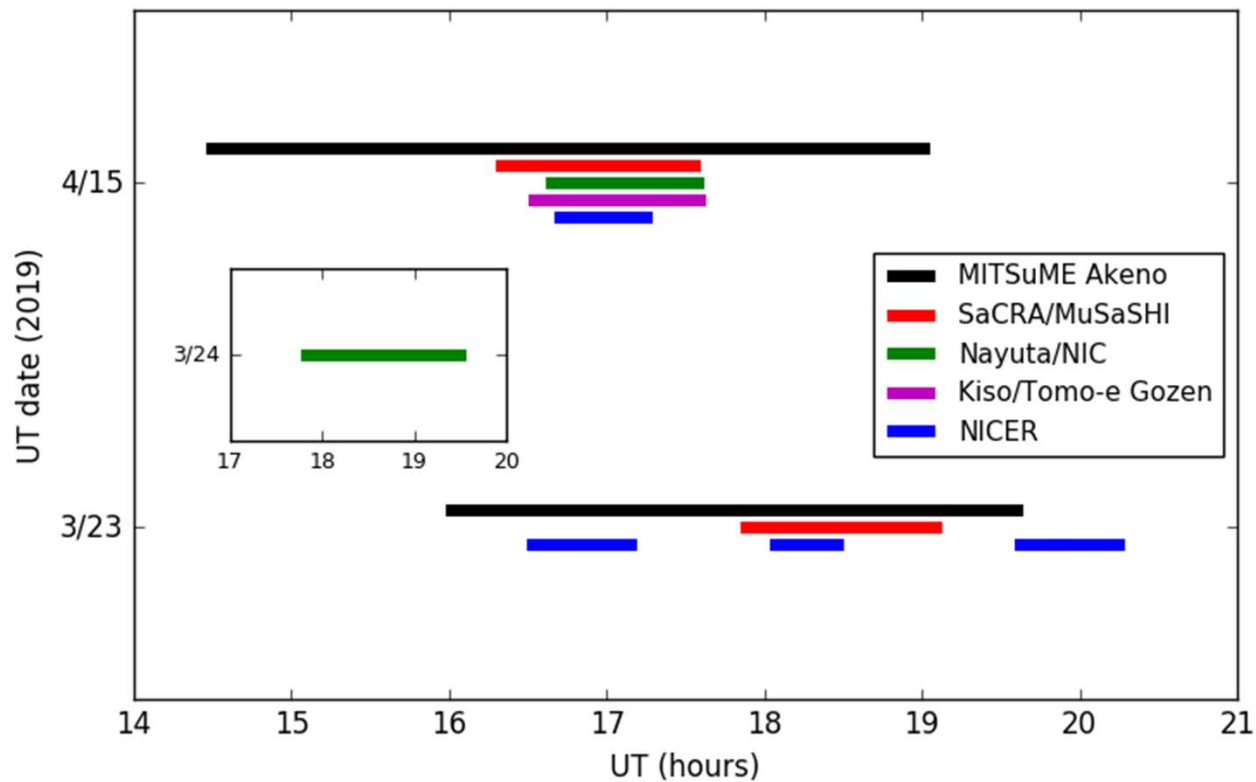
今回の同時観測のエネルギーバンド

可視・近赤外



<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/>

# 観測時間帯



4月15日

Tomo-e, NICERの高時間分解

→ 秒スケールでの光度曲線比較

なゆた, SaCRA, MITSuME

→ 変動・定常成分の多波長SED

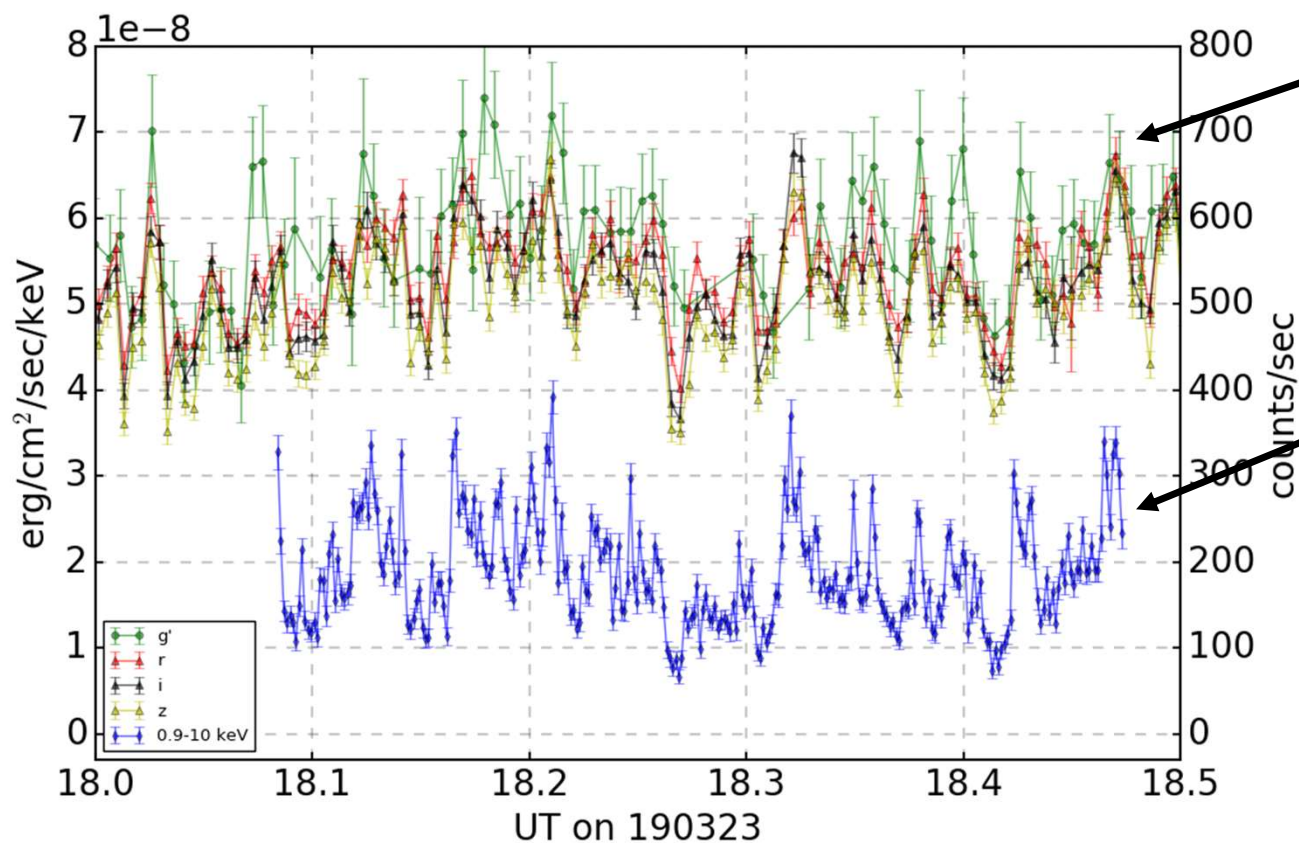
3月23日

SaCRA, MITSuME, NICER

→ 変動・定常成分の多波長SED

# 3月23日の一晩の光度曲線

可視光 + X線



可視光  
g : MITSuME 10秒露光  
riz: SaCRA 5秒露光

X線 NICER

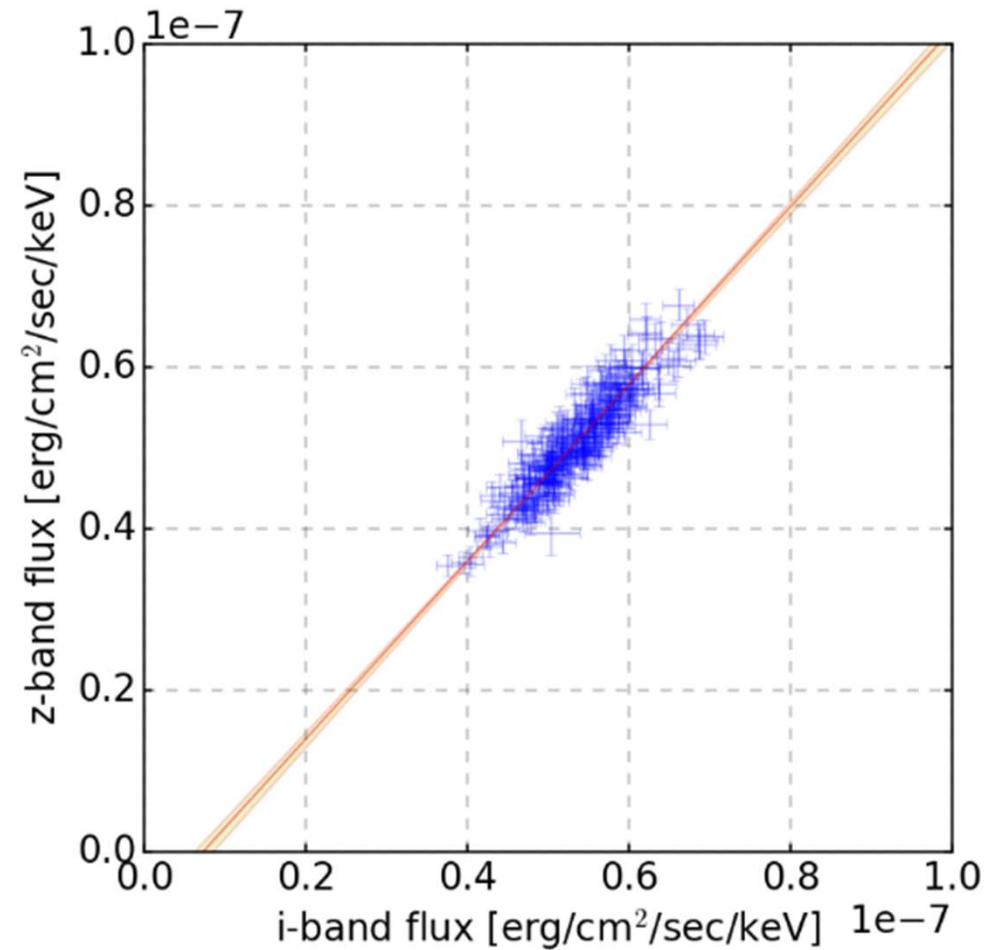
- 5-10秒スケールの時間分解データ
- 可視光・X線ともに変動
  - 両者が相関

# 変動成分のSEDを調べる

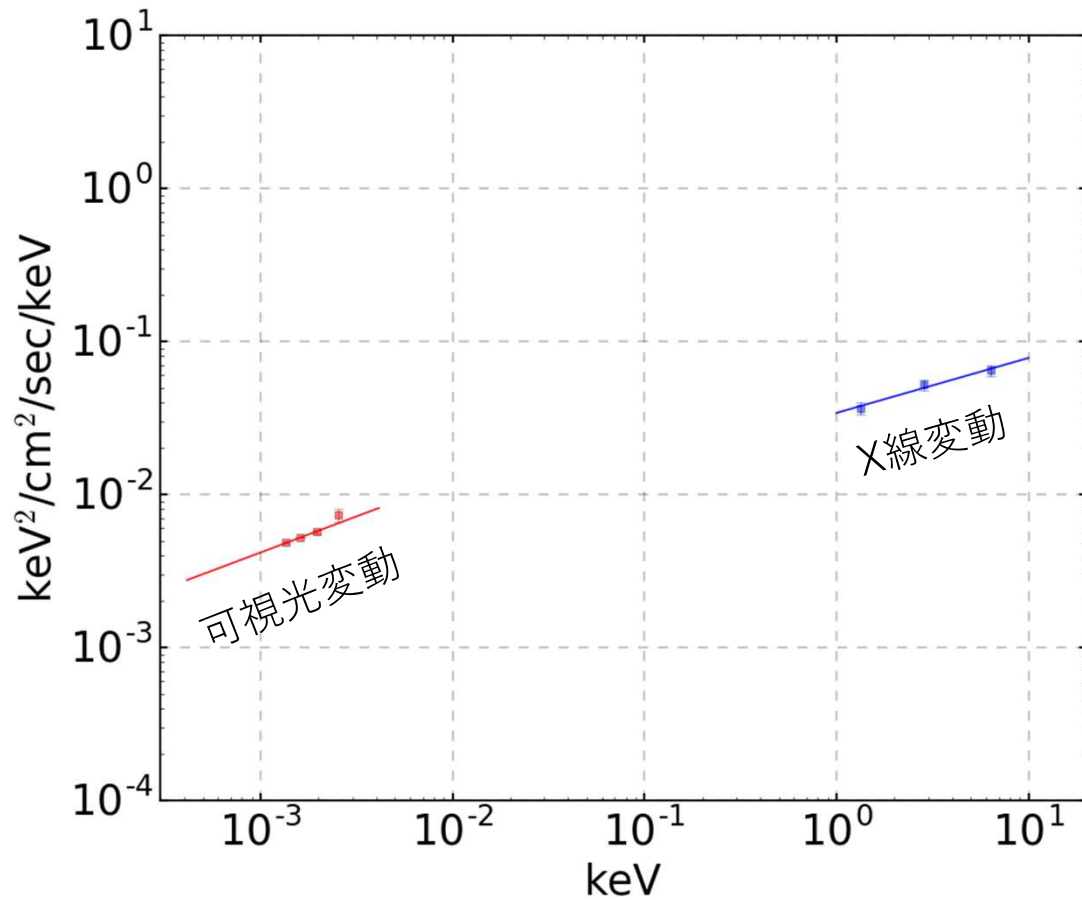
- flux-flux plotから各バンド間の比率を計算

$$\text{傾き } a = \frac{F_{\nu}(\text{z-band})}{F_{\nu}(\text{i-band})}$$

- i-bandを基準としてfluxの相対量をとる



# 3月23日のSED：変動成分

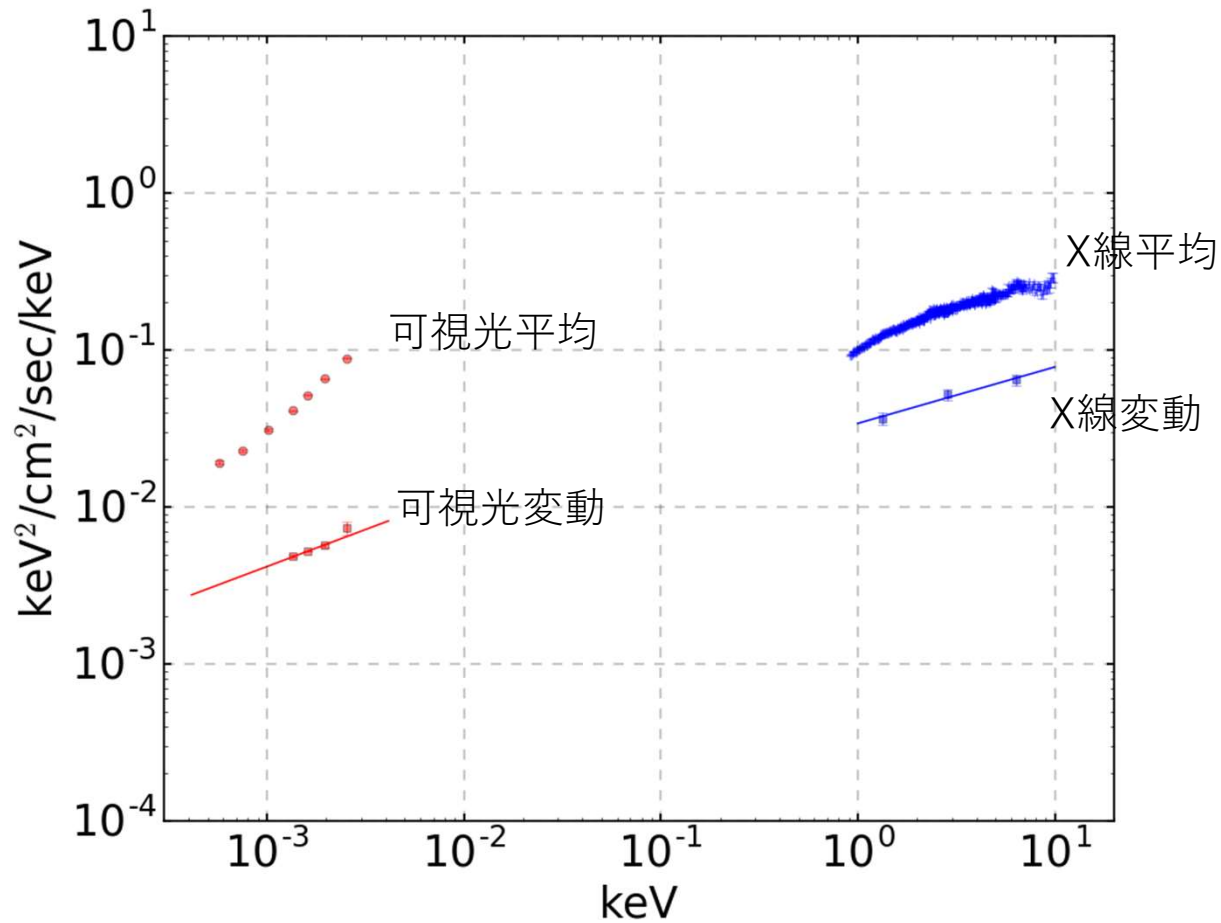


可視光：power law

X線：power law

可視光・X線がsingle power lawでも矛盾なさそう ( $\nu \sim 0.6$ )  $F_\nu \propto \nu^\alpha$

# 3月23日のSED：変動成分と平均



X線

平均と変動成分のSEDが同じ傾き

→ 変動成分のみでもよい

可視光

• 平均と変動成分のSEDが異なる傾き

• 平均は変動よりも青い

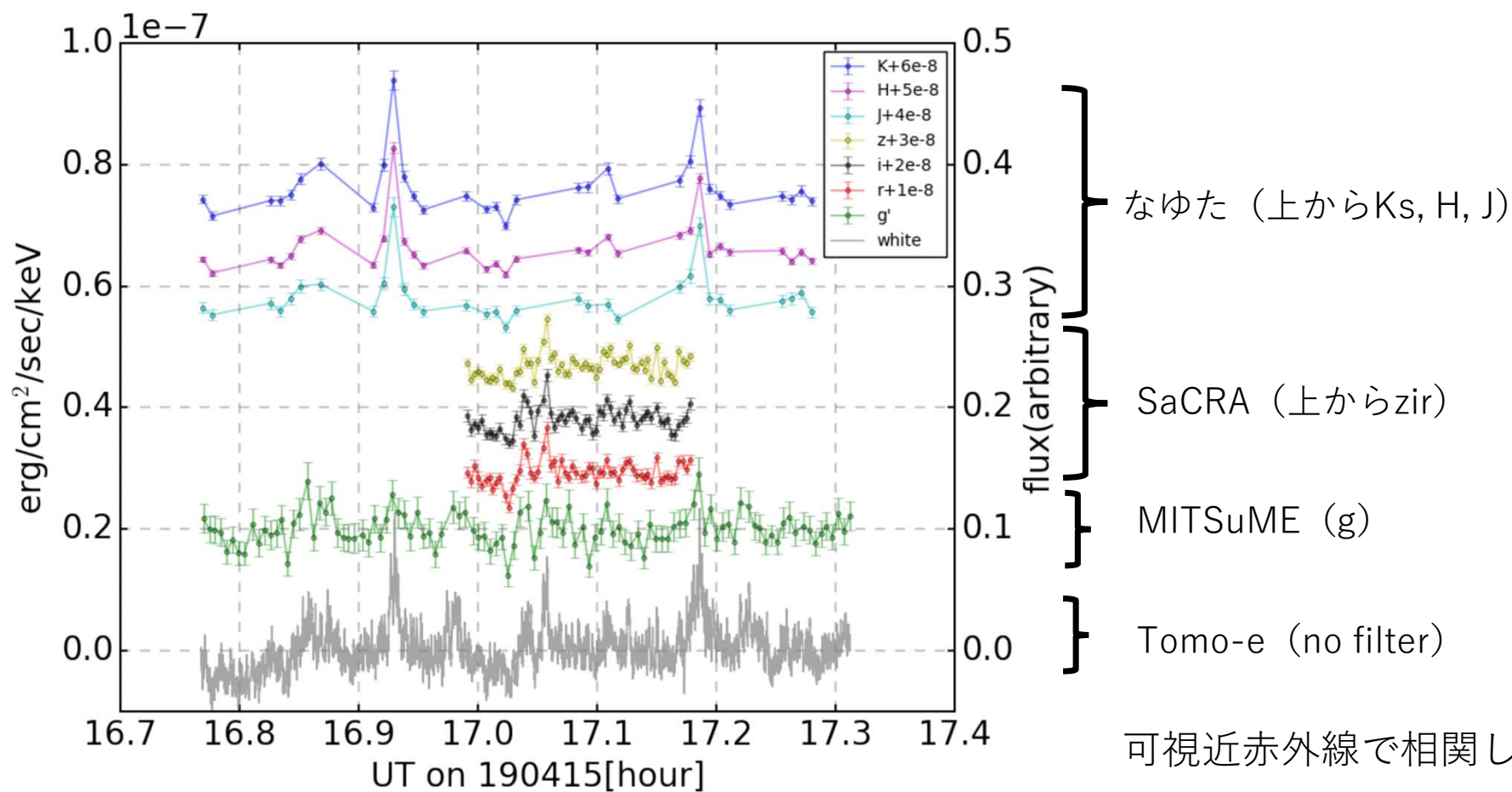
→ 変動成分と相対的に青い定常成分

可視光とX線のエネルギーがほぼ同じ



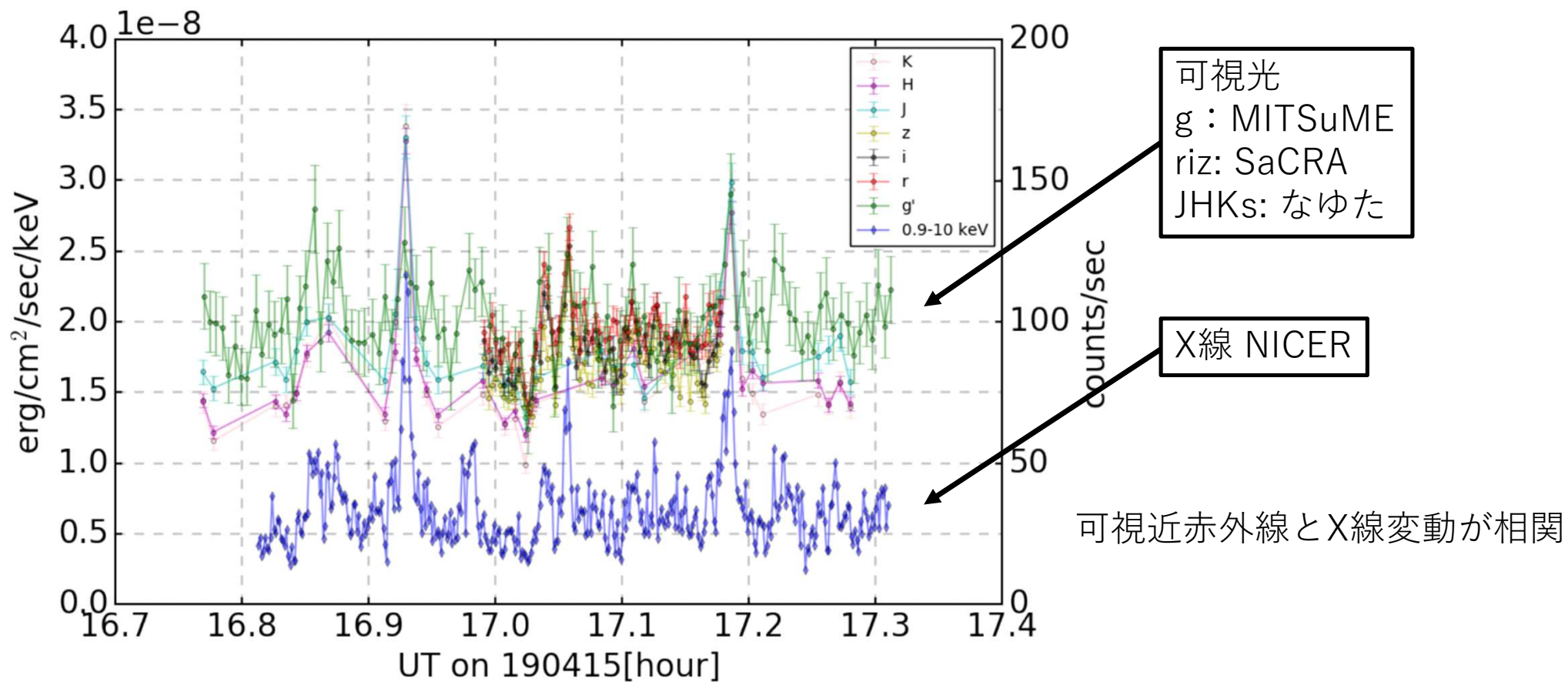
# 4月15日の一晩の光度曲線①

可視近赤外線

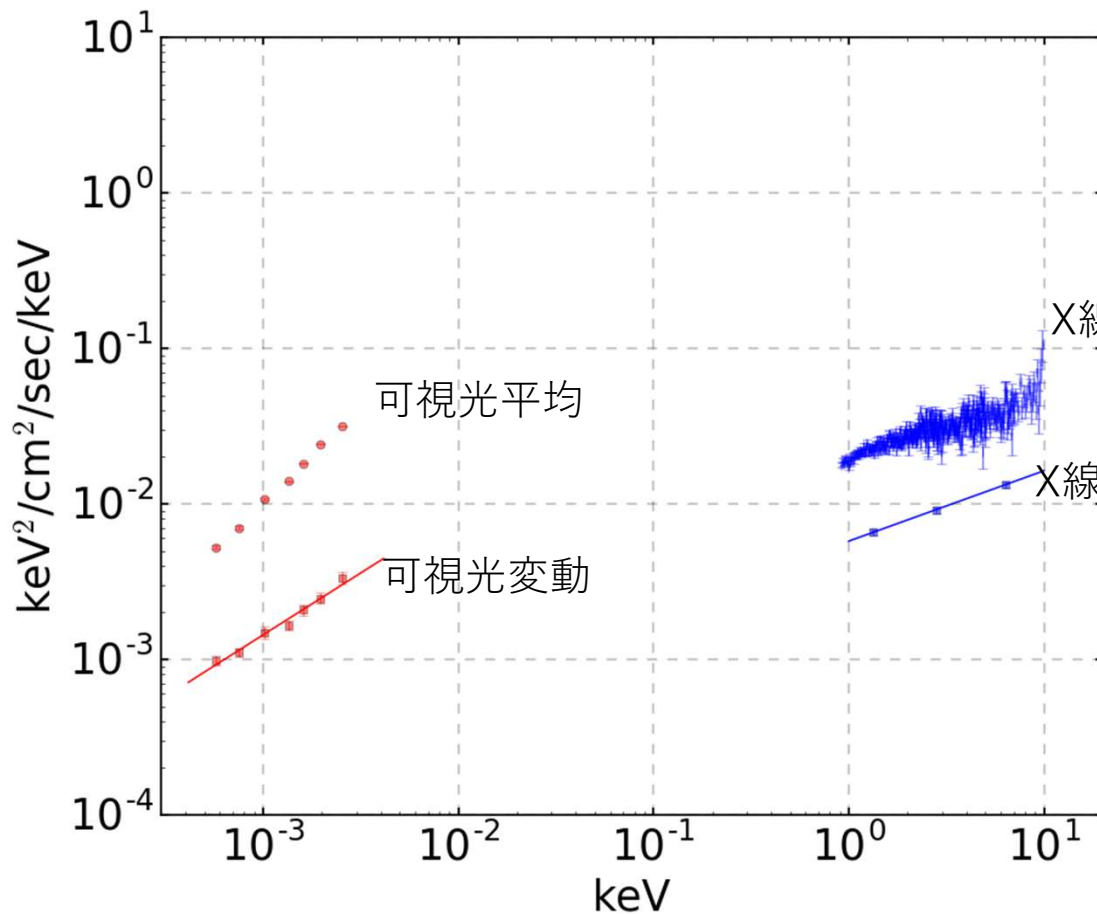


# 4月15日の一晩の光度曲線②

可視近赤外線 + X線



# 4月15日のSED：変動成分と平均



3月23日と同様な傾向

X線

平均と変動成分のSEDが同じ傾き

→変動成分のみでもよい

可視光

- 平均と変動成分のSEDが異なる傾き

- 平均は変動よりも青い

→ 変動成分と相対的に青い定常成分

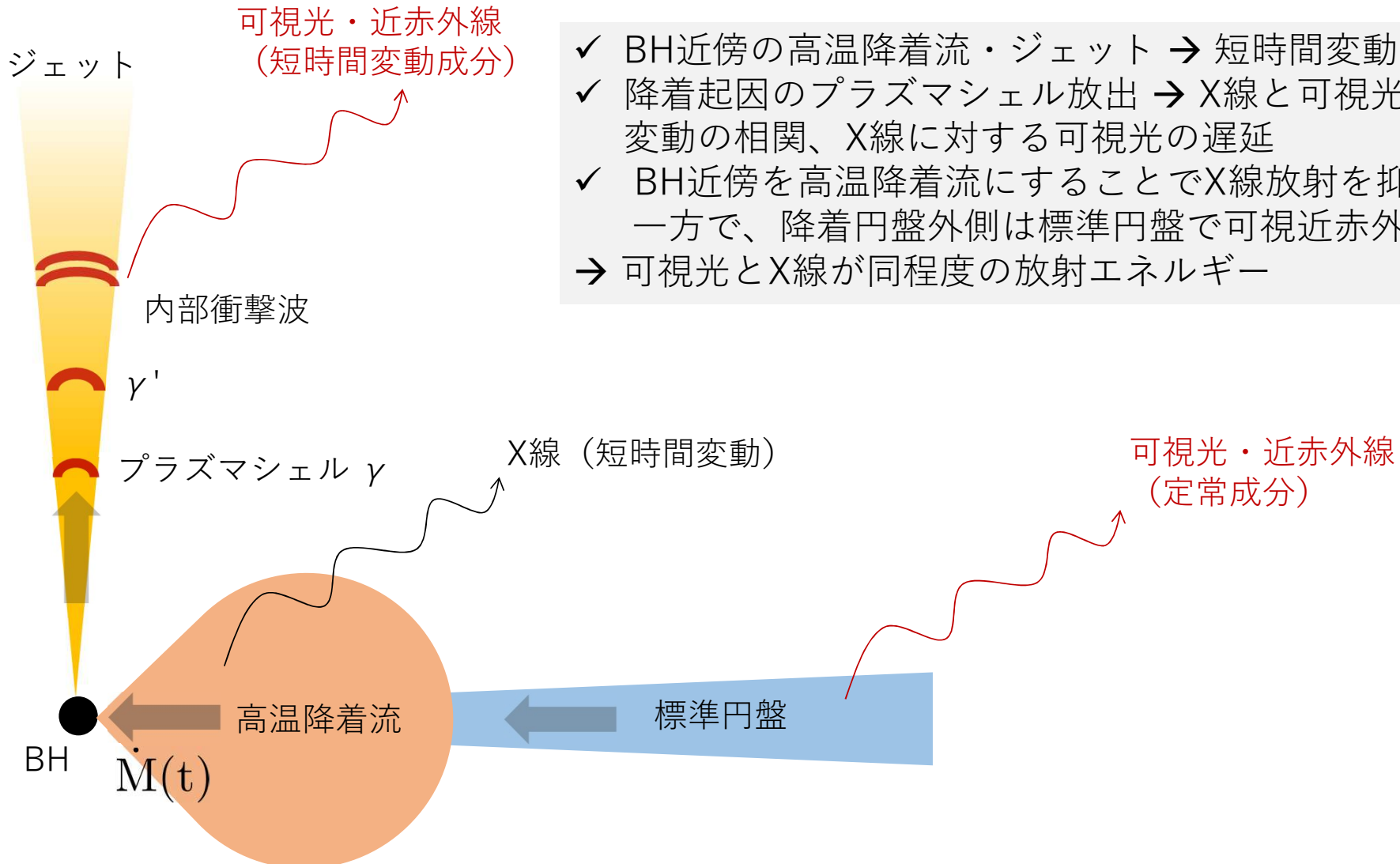
可視光とX線のエネルギーがほぼ同じ

変動成分と平均SEDの傾きは近い

平均SEDだけ二成分の存在には気づきにくい

→ 時間分解観測の有用性

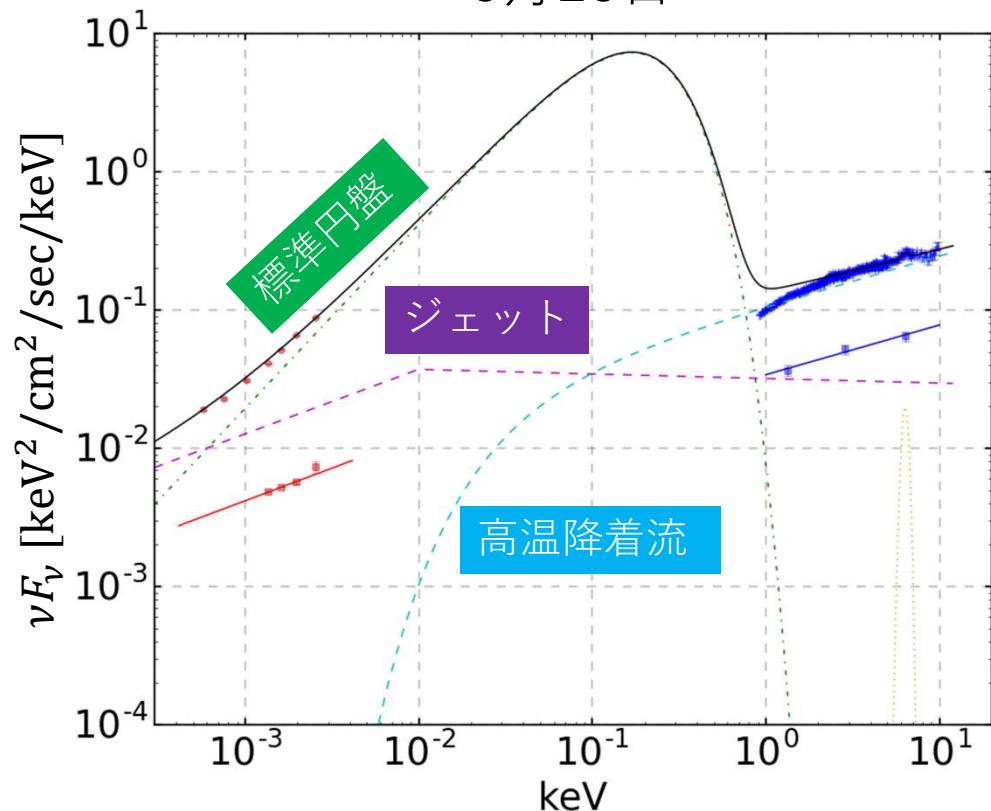
# 標準円盤 + 高温降着流 + ジェットモデル



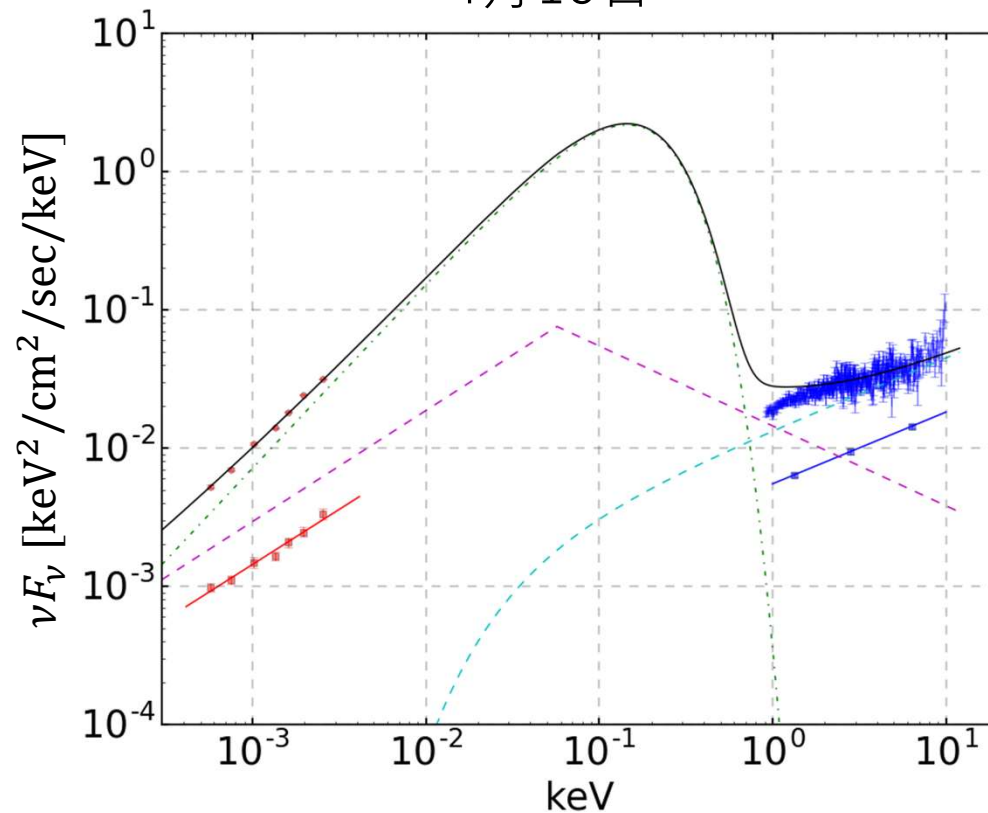
- ✓ BH近傍の高温降着流・ジェット → 短時間変動
- ✓ 降着起因のプラズマシエル放出 → X線と可視光の短時間変動の相関、X線に対する可視光の遅延
- ✓ BH近傍を高温降着流にすることでX線放射を抑制  
一方で、降着円盤外側は標準円盤で可視近赤外線を放射  
→ 可視光とX線が同程度の放射エネルギー

# 標準円盤 + 高温降着流 + ジェットモデルによるSEDフィット

3月23日



4月15日



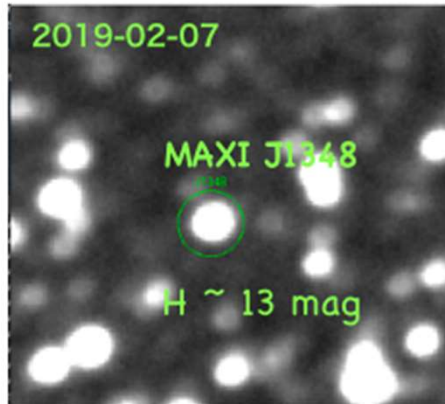
- 両日ともに、観測された平均SEDを再現可能
- 再増光時にも、メインアウトバースト同様に、標準円盤 + 高温降着流 + ジェットが存在

# ブラックホールX線連星 MAXI J1348-630

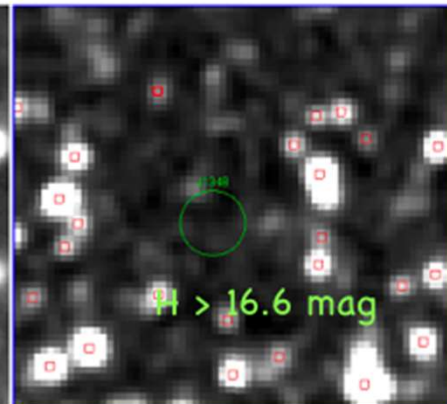
東工大M1高松さんの研究

- 2019年1月26日に発見されたブラックホールX線連星 (Yatabe+19, ATel #12425)
- 同日にSiding Spring 51 cmで可視光同定される (Denisenko+19, ATel #12430)
- 2月7日 (T=11日) から、OISTER ToOによりIRSF/SIRIUSにてJHKsバンド同時撮像
- 3月下旬にIRSFで10秒積分の約1.5時間連続観測、3月18日 (T=51日) に特異な短時間変動を検出

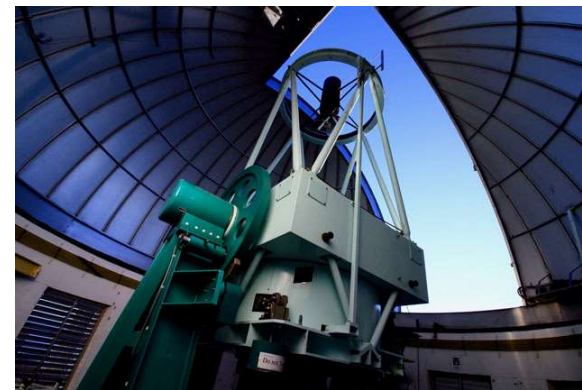
After the X-ray outburst  
IRSF 1.4m telescope H-band



Before the X-ray outburst  
2MASS archive image in H



IRSF 1.4m望遠鏡



<https://www.nsc.nagoya-cu.ac.jp/~sugitani/>

# 長期ライトカーブ

近赤外線 IRSF

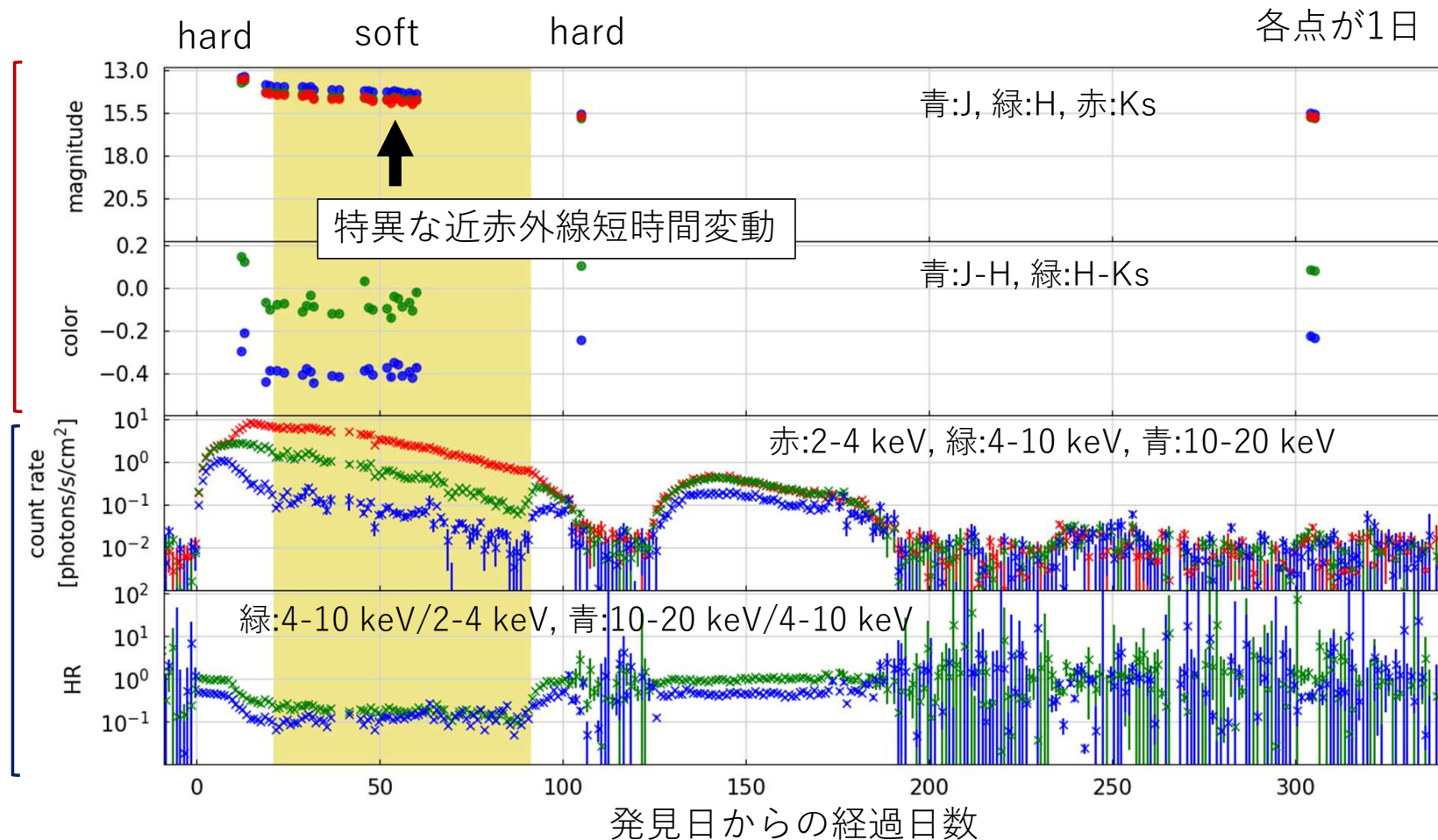
明るさ

色

X線 MAXI

明るさ

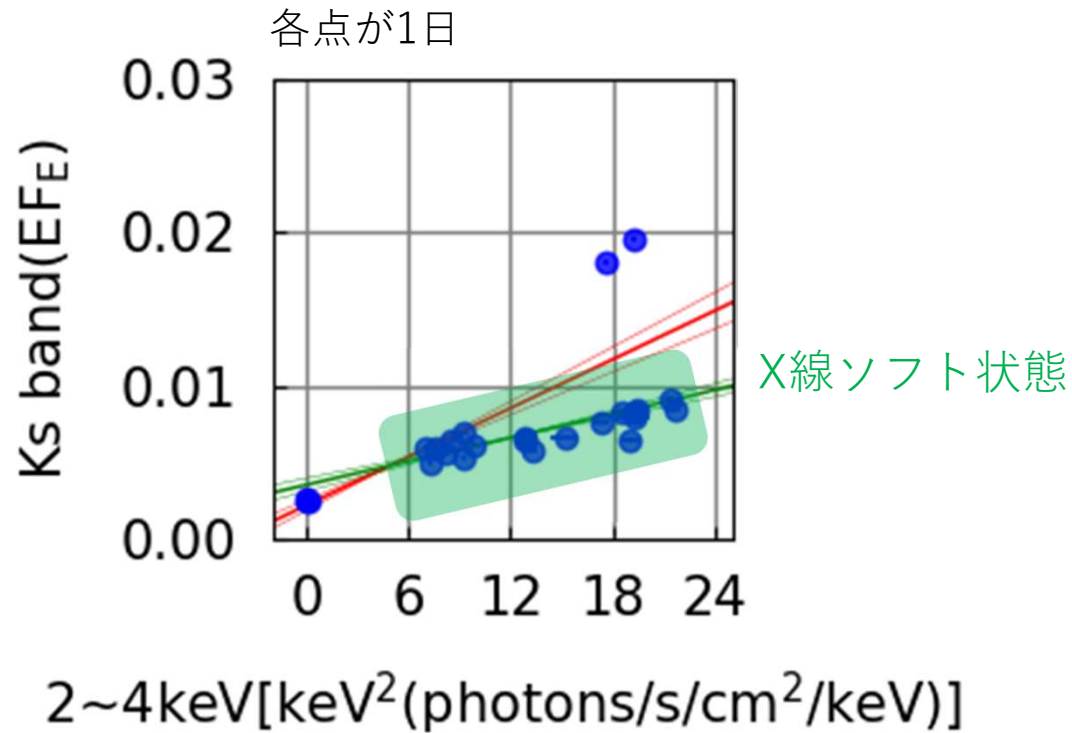
hardness ratio



近赤外線の特異な変動は、X線ハイ・ソフト状態で出現

X線ハイ・ソフト状態は~10秒スケールの短時間変動は、他のX線連星でも（少なくとも）稀

# X線と近赤外線の長期変動の相関

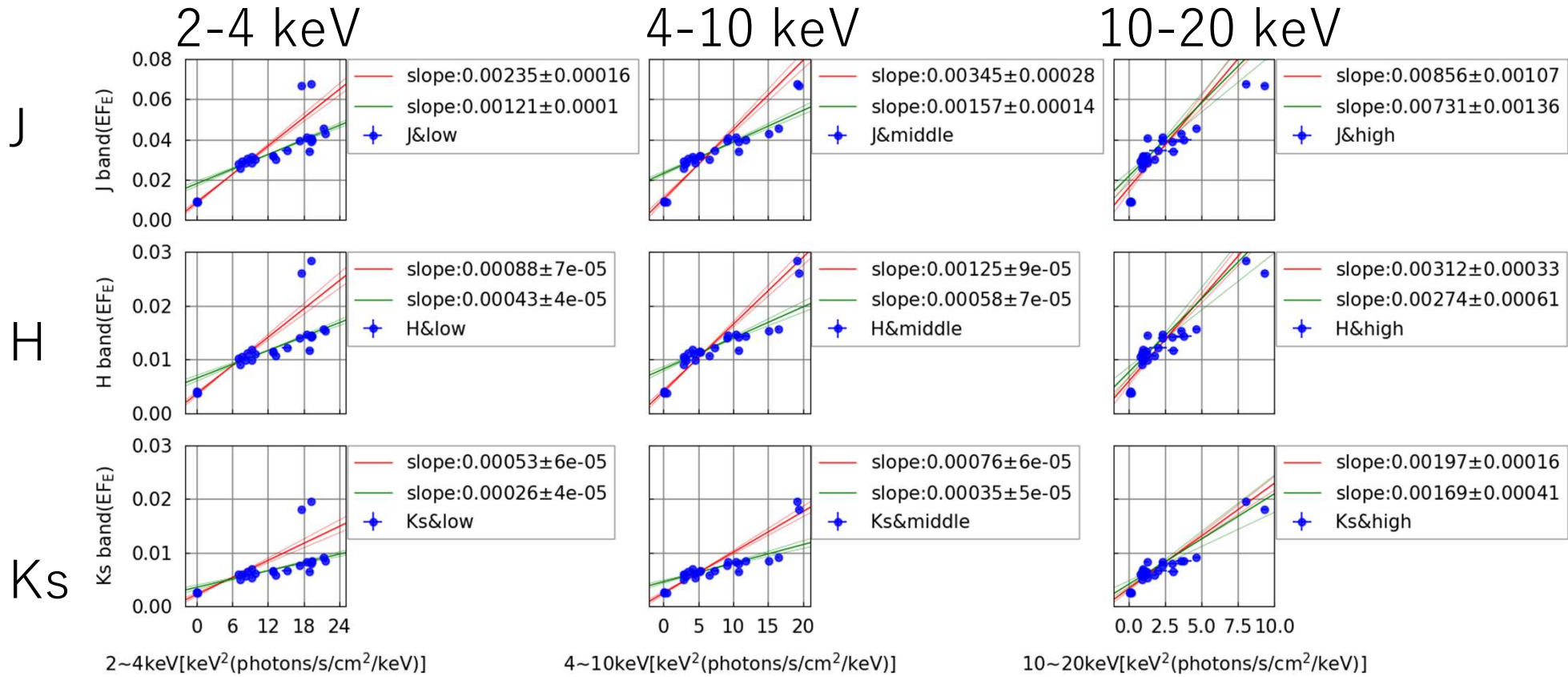


X線ソフト状態  
2-4 keV X線とKsバンドが相関



# X線と近赤外線の長期変動の相関

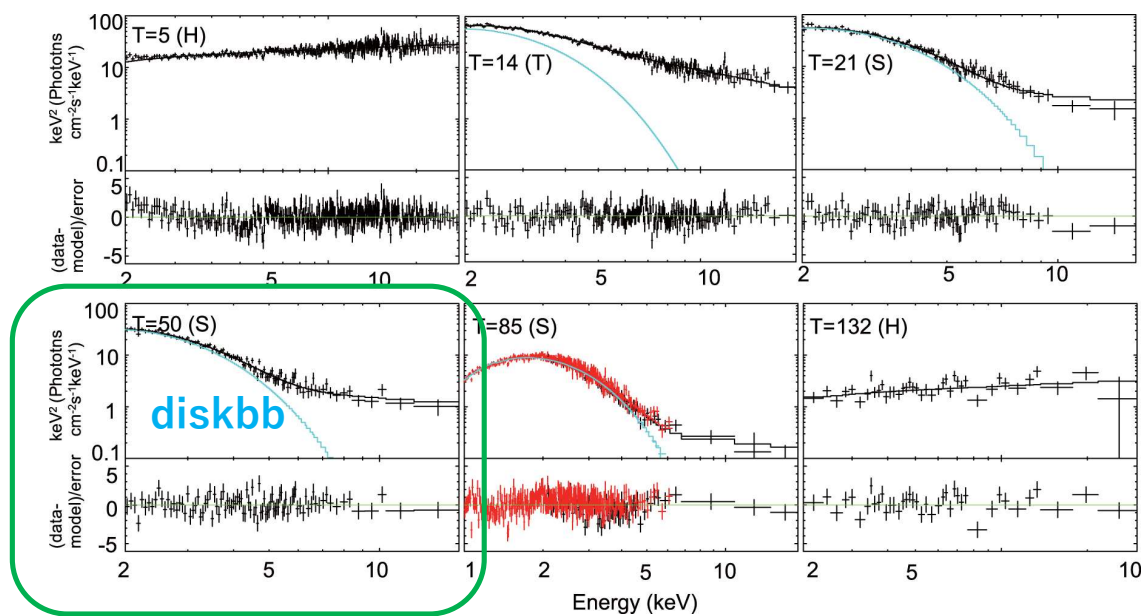
緑線：X線ソフト状態のフィット



近赤外線はソフトX線と相関がよさそう（要定量評価）

# 近赤外線長期変動成分の放射源

先行研究のX線スペクトルフィット (Tominaga+20)



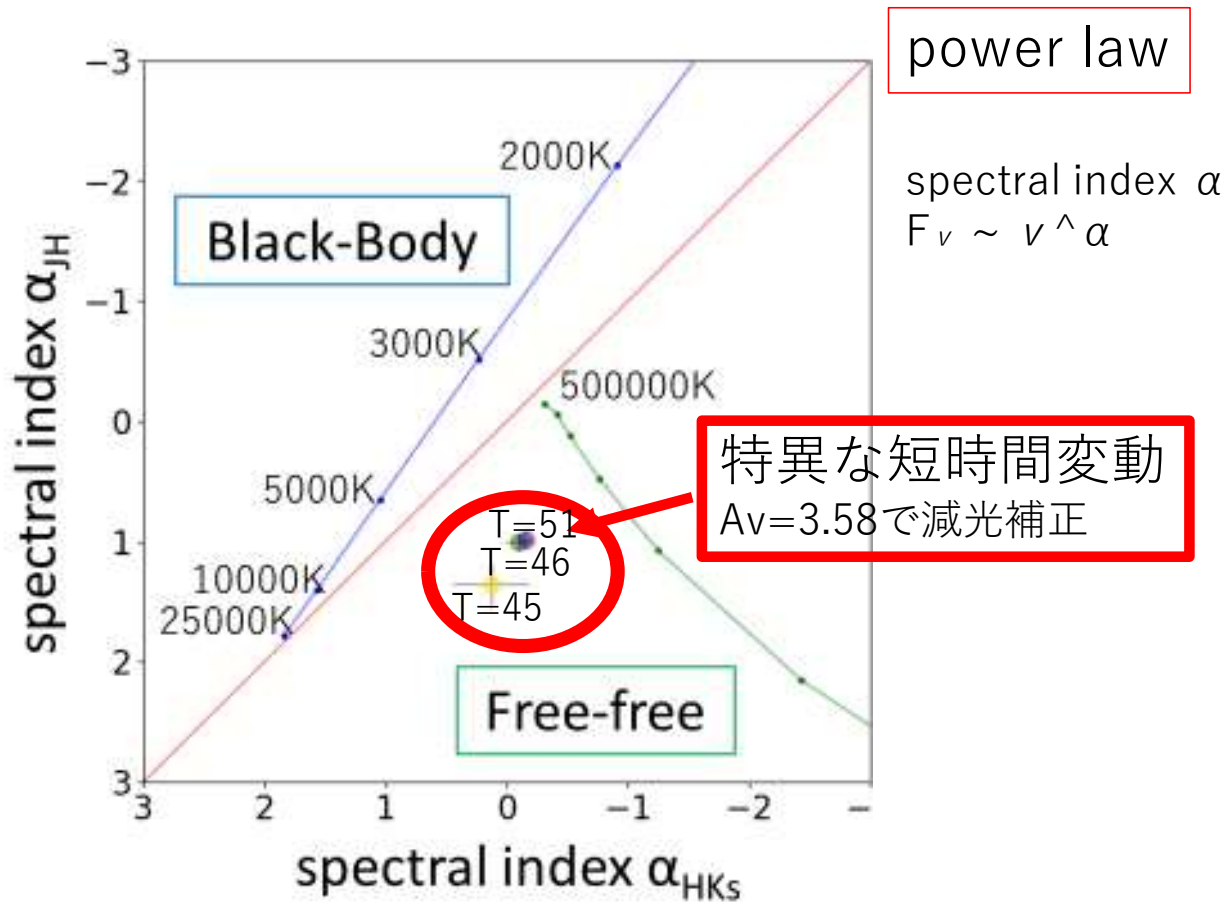
T ~ 50日  
特異な近赤外線変動の一日前

黒点 : MAXI/GSC  
赤点 : Swift/XRT

- T ~ 50日で2-4 keVは多温度黒体放射成分が支配的 (Tominaga+20)
  - 近赤外線長期変動とソフトX線が相関
- 近赤外線長期変動成分と多温度黒体放射の降着円盤の放射が関係
- 近赤外線の長期変動成分が照射円盤から可能性 (別のX線連星ソフト状態で見られている)

今後, X線 + 赤外線 の SED フィット で 検証

# 近赤外線の特異な短時間変動



現時点では放射源は不明

分かっていること

1. 近赤外線 of 長期変動成分とは色が異なるため別起源
2. J-H, H-Ks の色は, 黒体放射, power law, free-free とは不一致 (左図)
3. 17秒以下の増光・減光であり, コンパクトな放射領域
4. 約30分は変動がなく安定

# 近赤外線の特異な短時間変動

我々が知る限り、ブラックホールX線連星では初めて観測された現象  
X線ではブラックホールX線連星でflip flopと呼ばれる同様な光度変動の報告例があるがこれも起源不明。  
他波長でも報告例はなさそう。

これまで未発見だった理由

## 1. 今回の観測実施の特殊性

- X線ソフト状態 & 短時間積分（17秒おき）を連続して1時間以上 & 長波長（赤外線）
- X線ソフト状態では1秒, 10秒程度の時間尺度の変動報告がなかった
  - 短時間積分の連続観測を長時間しない
    - 積分時間が長いと特異性に気付かない
- 赤外線で長波長ほど増光幅が大（ $\Delta J \sim 0.15$ ,  $\Delta H \sim 0.25$ ,  $\Delta K_s \sim 0.3$ ）
  - 可視光では増光幅が小さくて検出不可能？

## 2. 稀な発生頻度？

- 我々のソフト状態の観測中でも1回のみ、やや変動時間が遅い類似した変動は6回

**意図的に観測したら別天体でも検出可能かもしれない**

# まとめ

OISTER ToOにより，ブラックホールX線連星の観測

## **MAXI J1820+070**

- メインアウトバースト：X線との多波長観測 → 可視光近赤外線はジェット + 照射円盤放射
- 再増光：X線との多波長+高時間分解同時観測 → 標準円盤，高音降着流，ジェットの存在

## **MAXI J1348-630**

- X線ソフト状態で特異な近赤外線短時間変動を検出

OISTERの多波長・時間分解，X線と同時観測でX線連星の物質降着放射現象の理解

- 明るいX線連星は中小口径望遠鏡でも短時間変動の検出も可能
- J1348の特異な変動の検出例のように，観測が不十分で発見の余地がある可能性

ToO観測の実施・ご協力ありがとうございました。