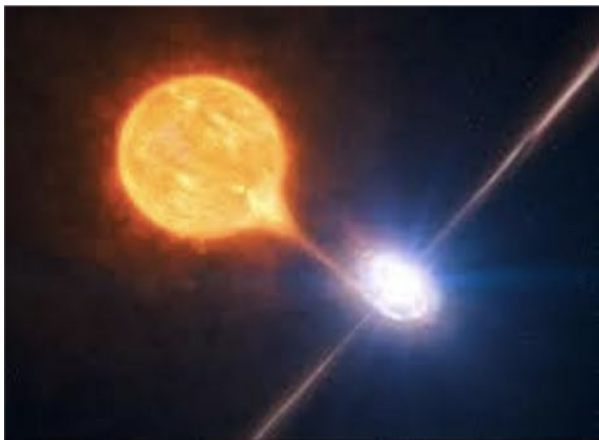


# X線・光赤外線同時観測で探る X線連星の降着円盤

志達 めぐみ (愛媛大学)



Collaborators:

中平 聡志 (理研)、上田 佳宏、吉武 知紘  
野上大作、木邑真理子 (京大)、  
村田 勝寛、安達 稜、河合 誠之 (東工大)、  
根来 均 (日大)、前原裕之、磯貝桂介 (国立天文台)、  
他 MAXI チーム、光赤外線大学間連携チームの皆さん

# 概要

## 1. 導入

- X線連星とは
- X線・光赤外の放射機構・同時観測の意義

## 2. 最近の研究成果

銀河系内ブラックホール X線連星 MAXI J1820+070 の  
アウトバーストの X線・光赤外線観測

(Shidatsu+ 2018, ApJ, 868, 54; Shidatsu+ 2019, ApJ)

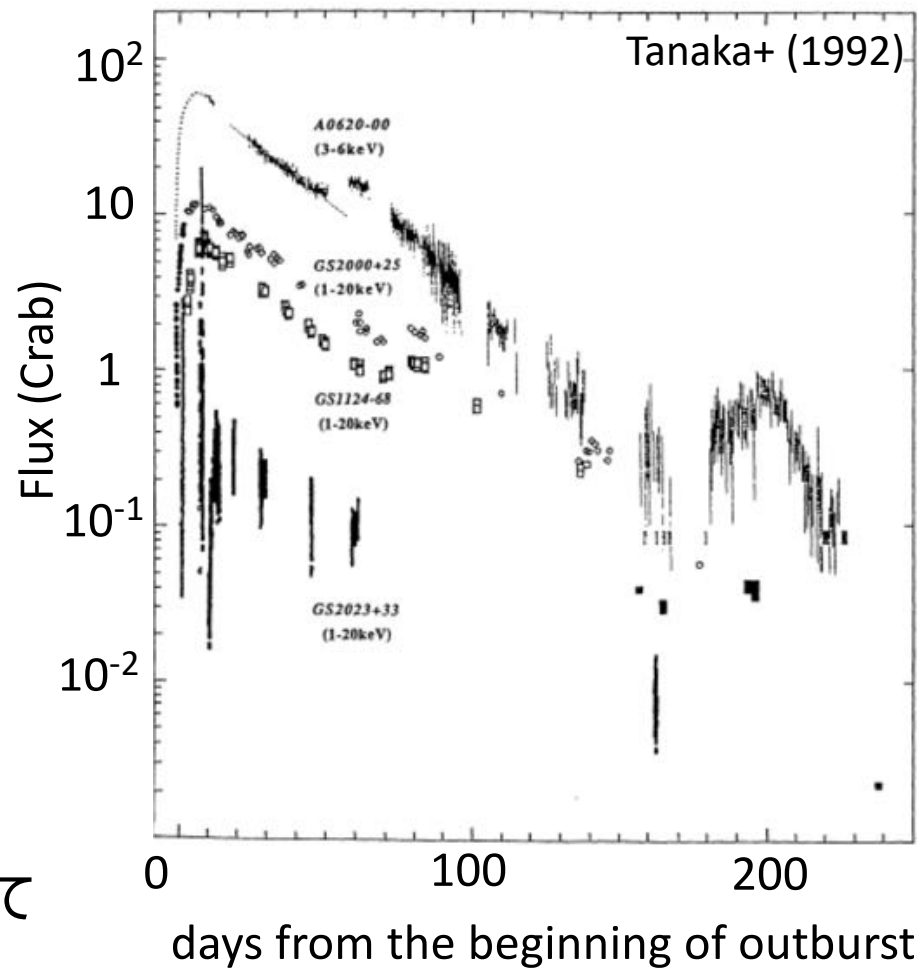
## 3. 今後の X線・光赤外線連携観測で期待されること

- アウトバースト中の測光モニタ
- せいめい望遠鏡による分光モニタ

# X線連星



アウトバースト時の  
ブラックホール X 線連星の X 線光度曲線



## 低質量 X 線連星

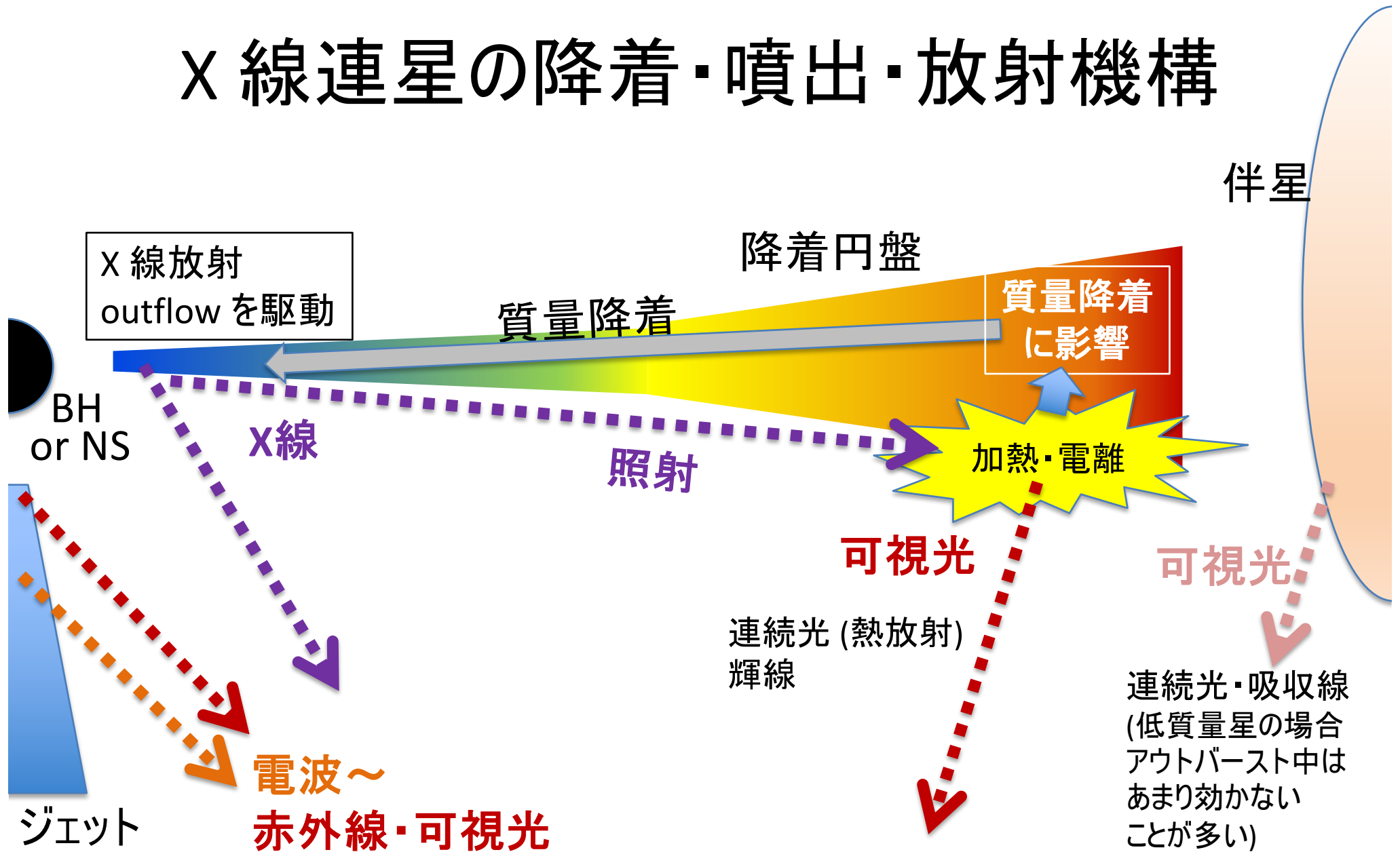
(伴星が OB 型星以外の低質量星)

突然アウトバーストを引き起こし、

X 線光度が数桁変化

→ 幅広い範囲の質量降着率にわたって  
降着円盤・噴出流の変化の仕方を  
調べられる

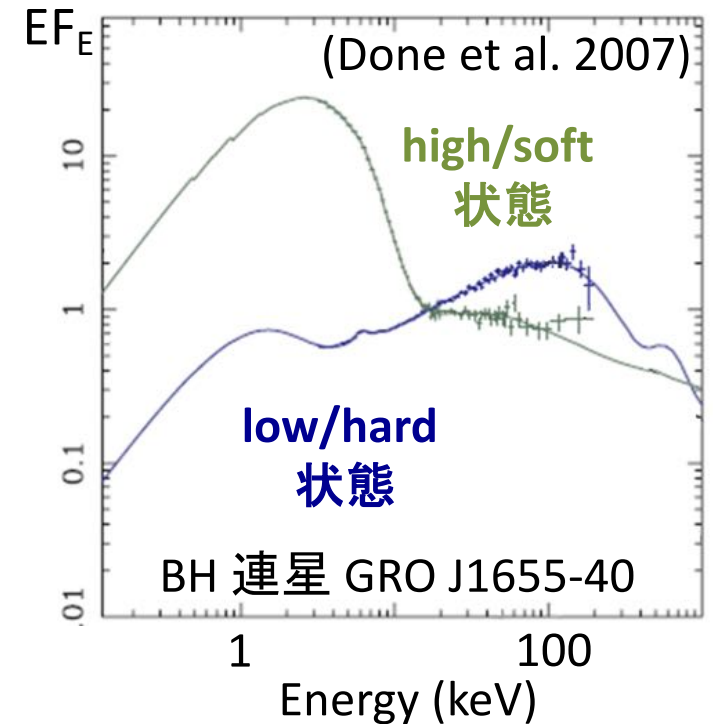
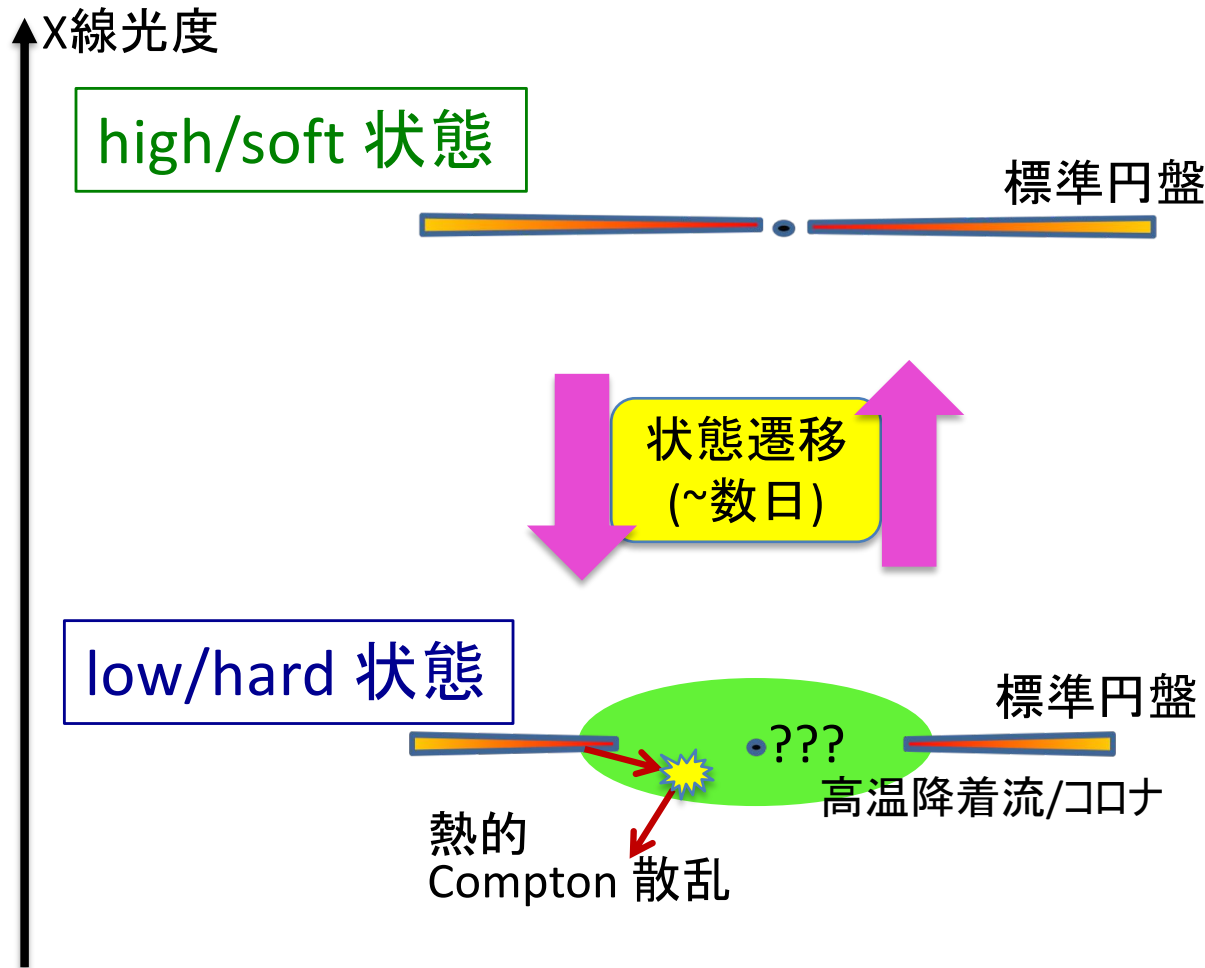
# X線連星の降着・噴出・放射機構



領域ごとに異なる波長の放射・互いに影響を及ぼし合う  
=> 降着・噴出の物理の完全理解には多波長観測が必須！

# X線連星の「状態」

- アウトバースト中に、X線スペクトル (=円盤内縁部の構造を反映) が劇的に変化

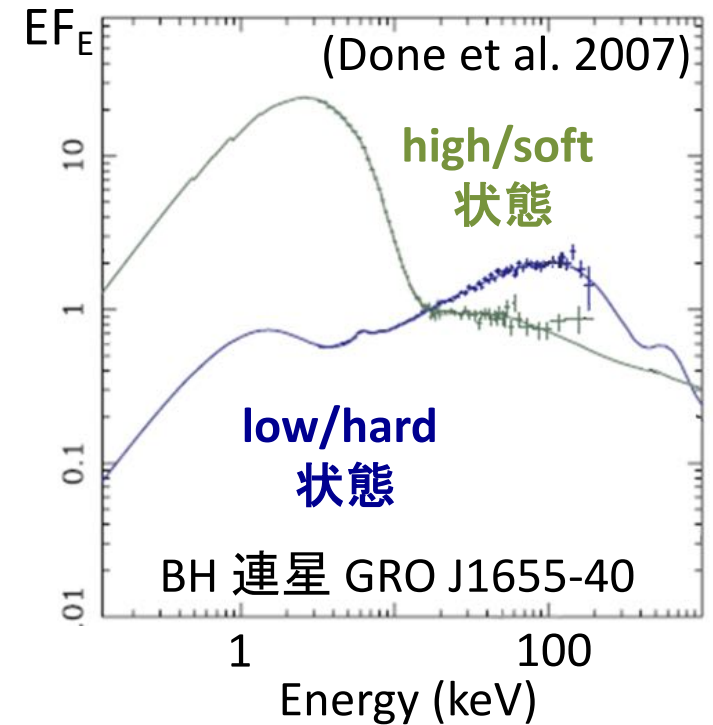
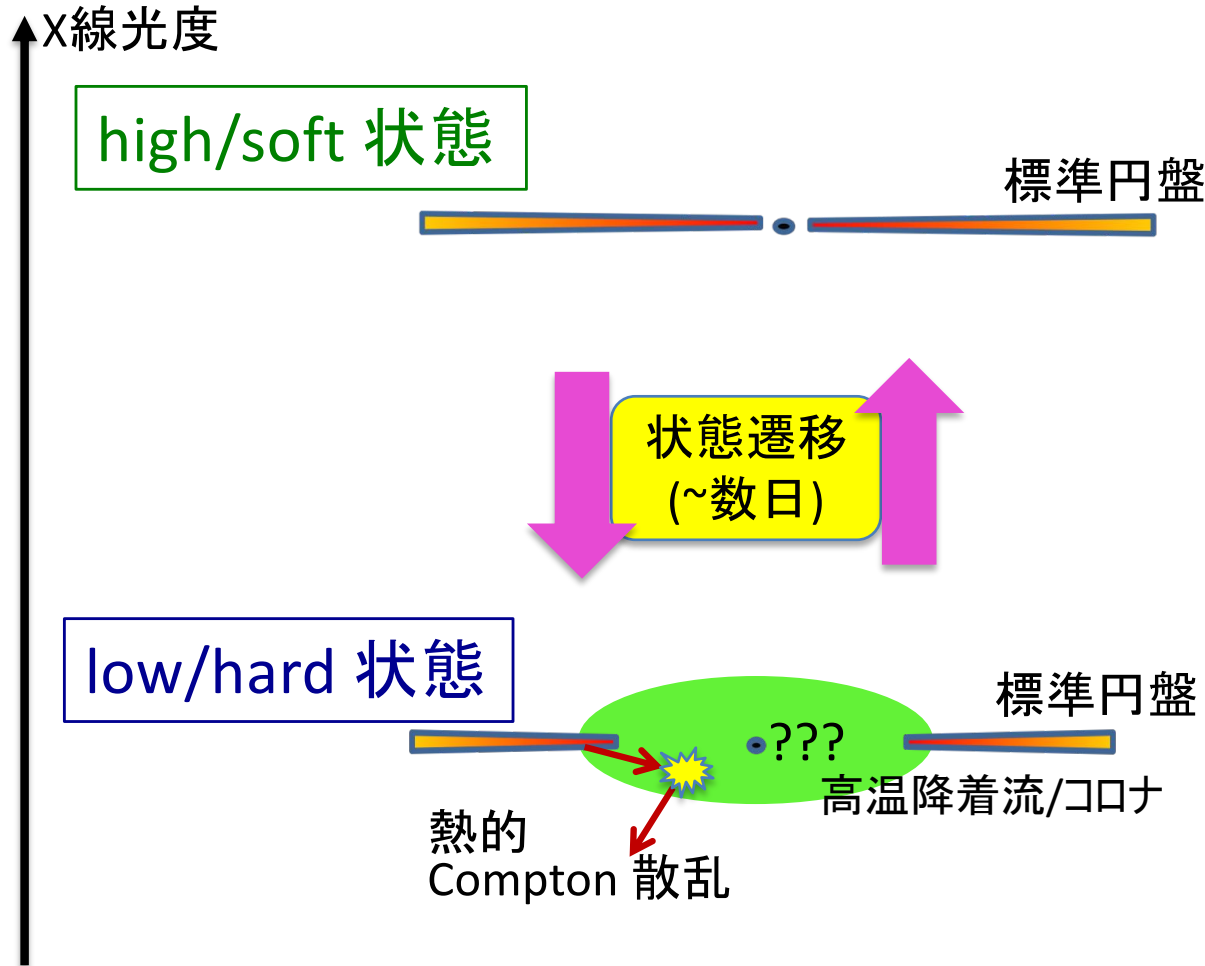


※中性子星の場合、表面からの黒体放射成分が軟 X 線に加わる

円盤内縁部の状態遷移に対して外縁部がどのように応答するのか?  
=> アウトバースト中のX線・可視光同時モニタが重要

# X線連星の「状態」

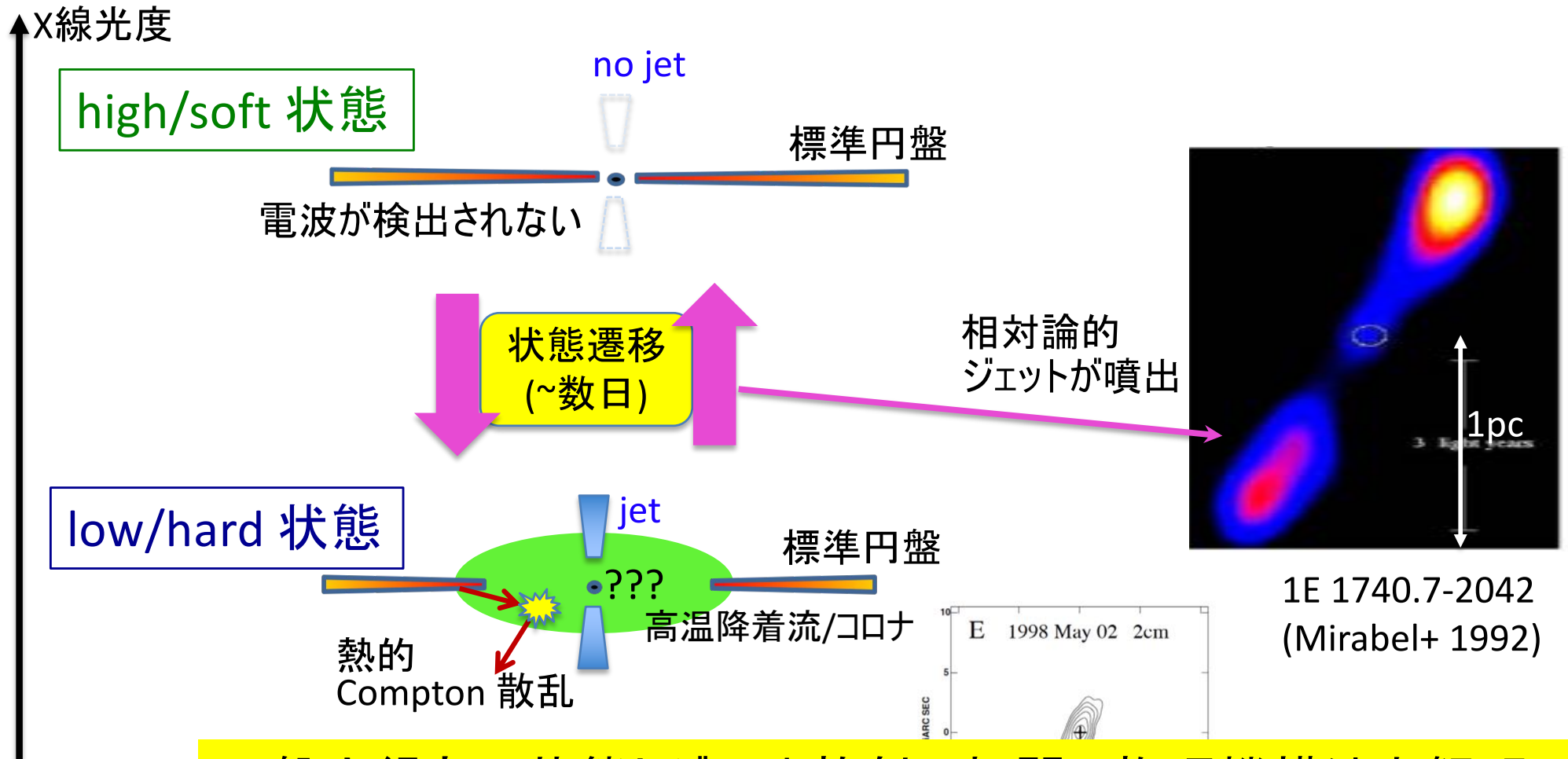
- アウトバースト中に、X線スペクトル (=円盤内縁部の構造を反映) が劇的に変化
- **ジェットの噴出は降着円盤の「状態」に強く依存**



※中性子星の場合、表面からの黒体放射成分が軟 X 線に加わる

# X線連星の「状態」

- アウトバースト中に、X線スペクトル (=円盤内縁部の構造を反映) が劇的に変化
- ジェットの噴出は降着円盤の「状態」に強く依存



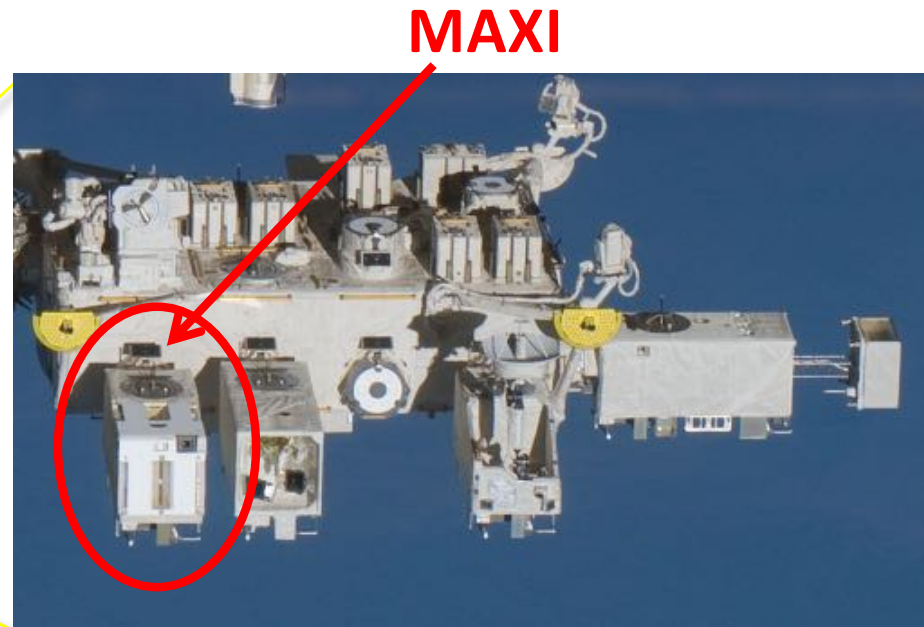
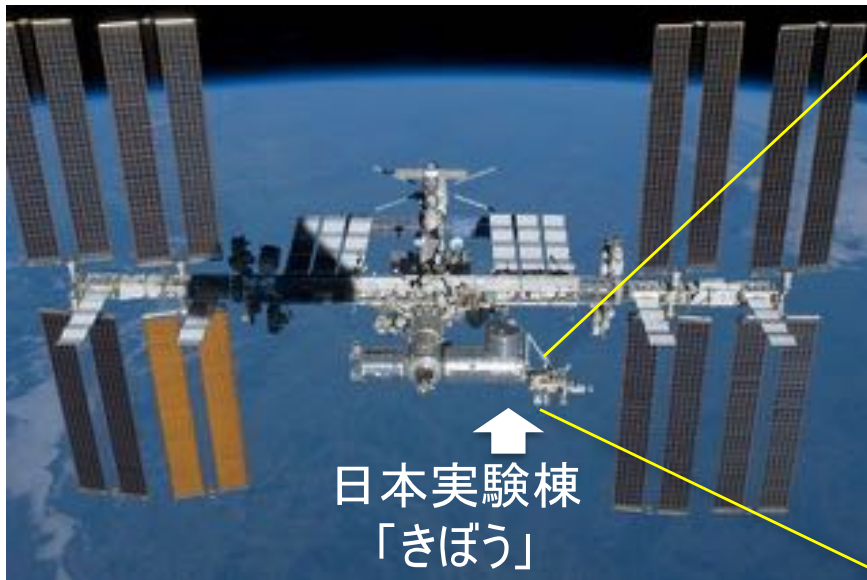
円盤内縁部の状態とジェット放射の相関の物理機構は未解明  
=> 多波長同時観測が重要

# 全天 X 線監視装置 MAXI

X 線連星のアウトバーストの予測は困難

→ X 線での常時全天監視が有効

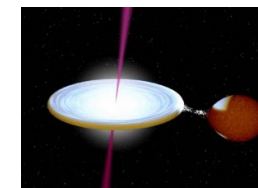
国際宇宙ステーション



- 2-20 keV で過去最高感度の全天 X 線モニタ
- JAXA, 理研を中心に 2009 から運用中
- ~92min に 1 度、ほぼ全天をカバー
- X 線連星など突発天体の変動を常時監視・全世界へ速報



# MAXI で検出した X 線連星



2009.09-現在までに  
見つかった新天体

black hole: 13

neutron star: 9

white dwarf: 1

unknown: 3

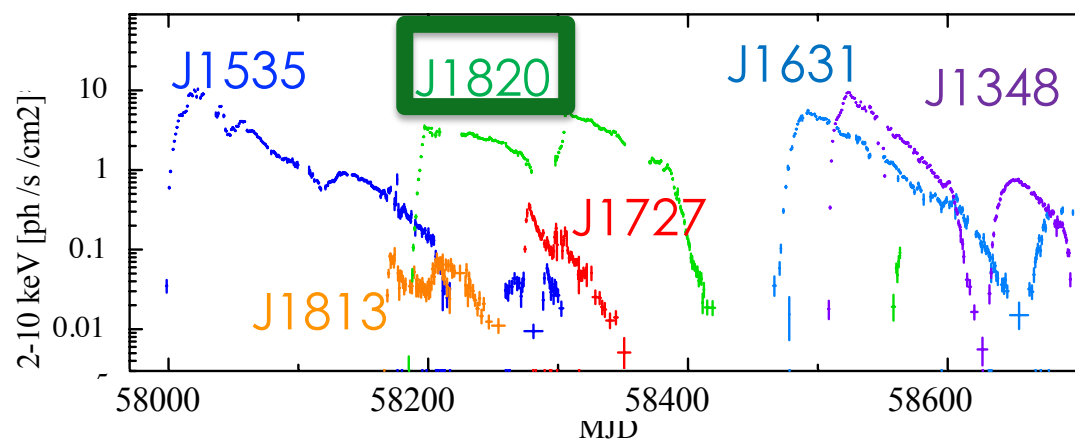
既知 X 線連星の  
アウトバースト

BH + NS で ~6 /年  
(Negoro+ 2016)

Courtesy of  
Negoro-san

RIKEN/JAXA/MAXI Team

過去 ~3年間に検出された BH X線連星 (新天体) のライトカーブ





# MAXI 10 Year Workshop for the Time Domain Astronomy

10-12 March 2020  
Tokyo Institute of Technology

参加をお待ちしております！  
(参加/講演登録: 近日 open)

Overview

Venue

Registration (not opened)

Contact (Organizing Committee)

## Topics

- MAXI transients
- Stellar Mass BH
- AGN
- Low Mass X-ray Binaries
- Superbursts
- Binary X-ray Pulsars
- Stellar Flares



**MAXI 10 Year Workshop for the Time Domain Astronomy**  
**March 10-12, 2020**

<http://maxi.riken.jp/conf/10year>

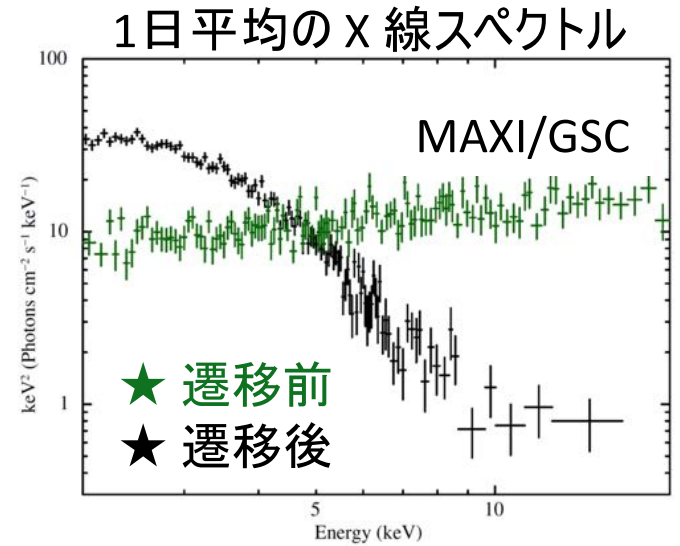
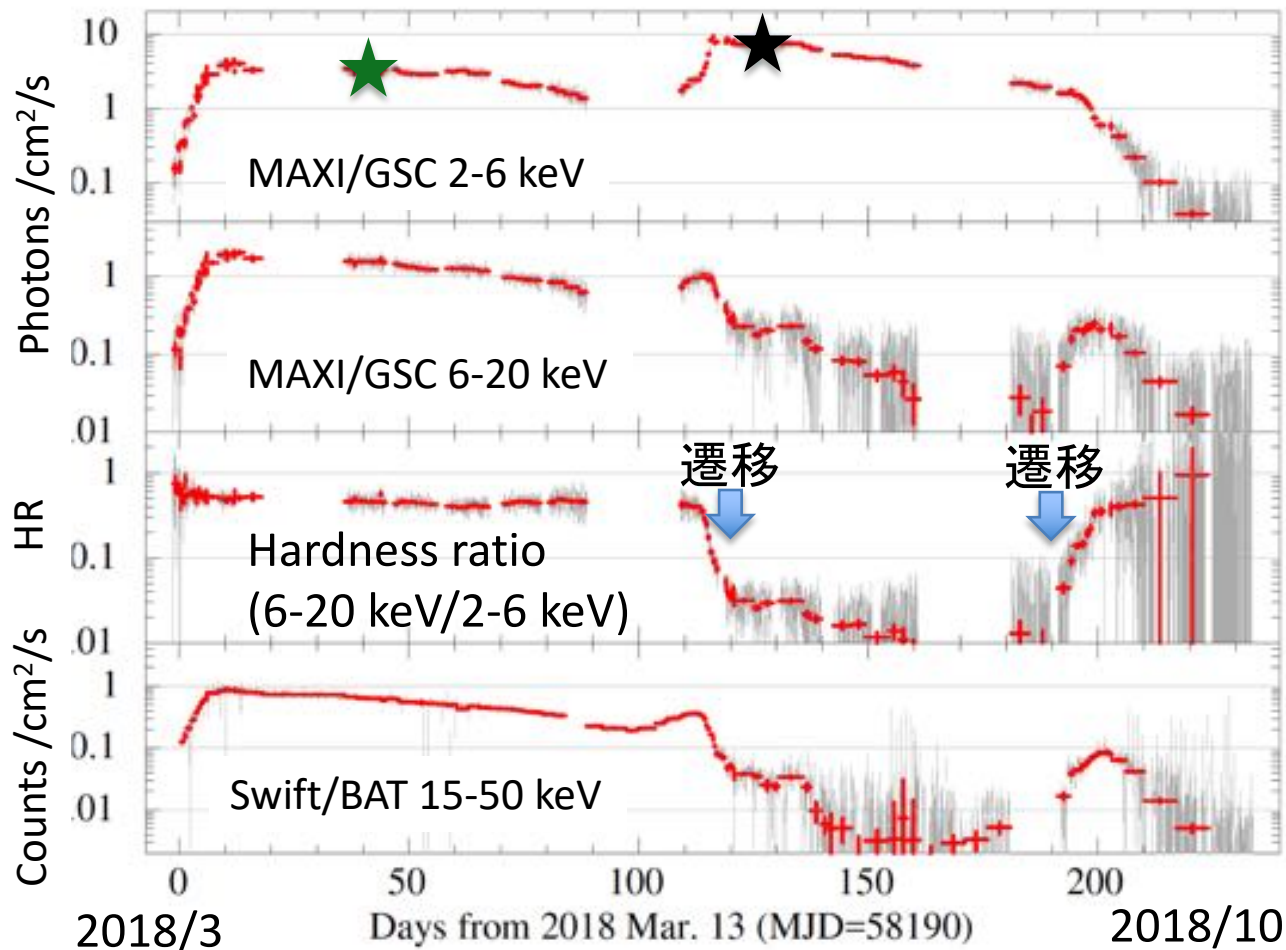
# 最近の観測成果:

銀河系内ブラックホール X 線連星 MAXI J1820+070 の  
アウトバーストの X 線・光赤外線観測

# MAXI J1820+070

2018 Mar. 11 に発見された BH X 線連星 (Kawamuro+ 2018 ATel #11399)

- $(l, b) = (35.853, 10.160)$
- $N_H \sim 1 \times 10^{21} / \text{cm}^2$ ,  $A_v \sim 0.3$
- $D = 3 \pm 1 \text{ kpc}$  (Gandhi+ 2018, Gaia)



## 2段階の急増光

- 1回目の増光中は常に low/hard 状態
- 2回目の増光中に状態遷移

2019年3月・8月に再増光・再々増光  
(→安達さんの講演)

# アウトバースト前半 (1回目の増光中) の 可視光・近赤外測光モニタ

光赤外大学間連携 (OISTER) チームによる  
測光観測

**g', Rc, Ic**

MITSuME プロジェクト (東工大)

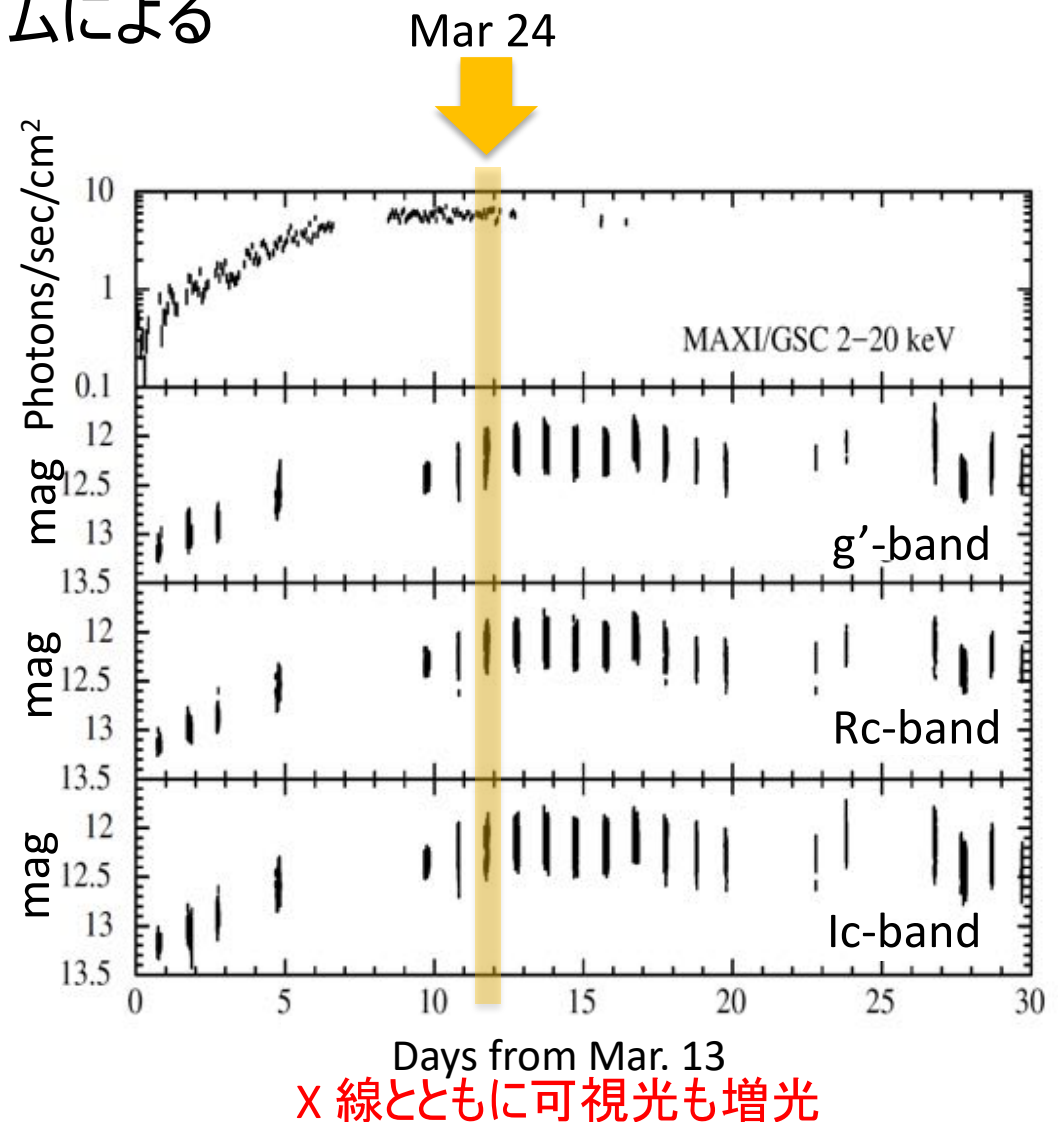
- 50 cm 望遠鏡 (明野)
- 50 cm 望遠鏡 (岡山天文台)
- むりかぶし 105 cm 望遠鏡  
(石垣島天文台)

**r, i, z**

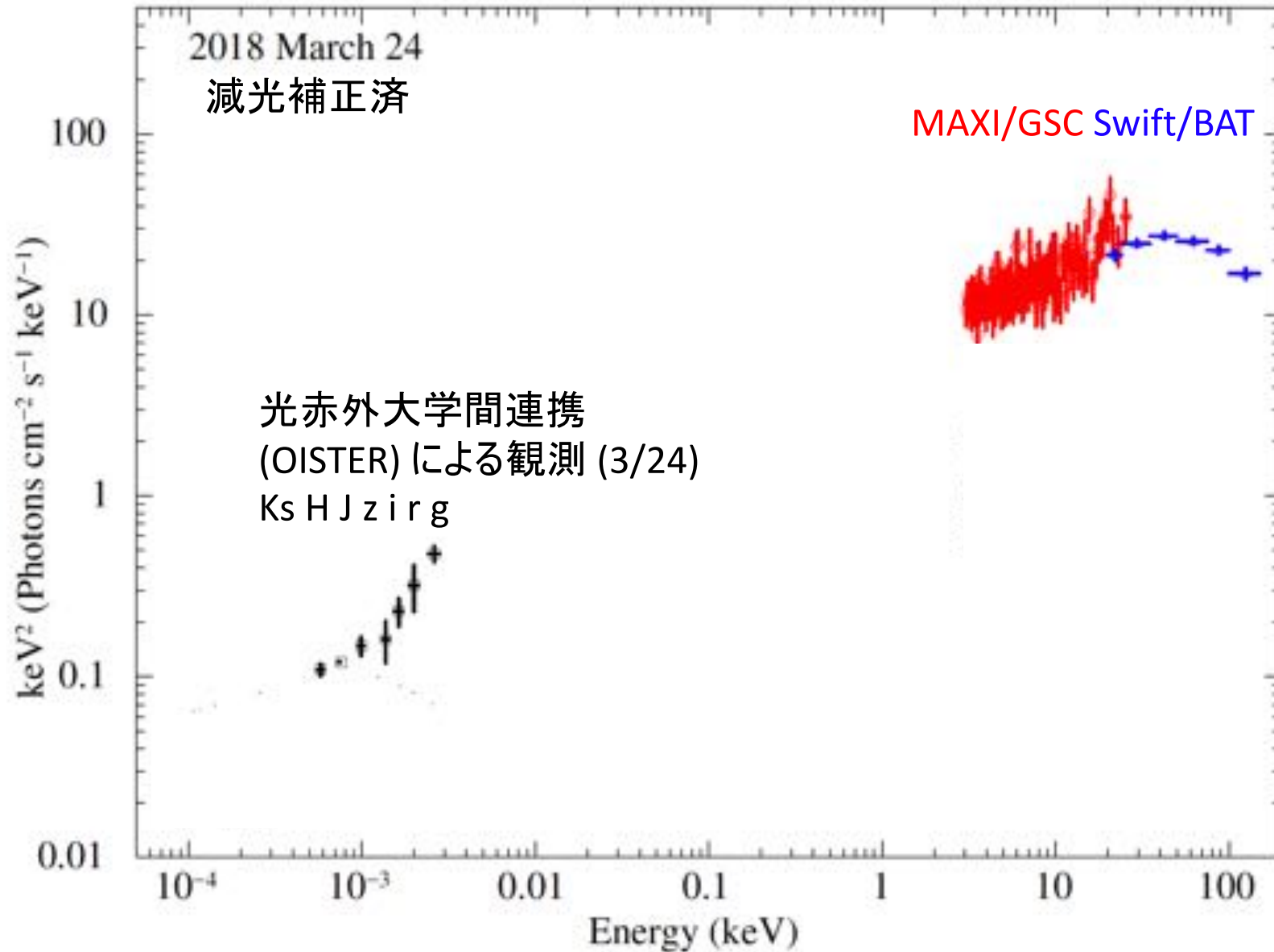
55 cm SaCRA 望遠鏡 (埼玉大)

**J, H, Ks**

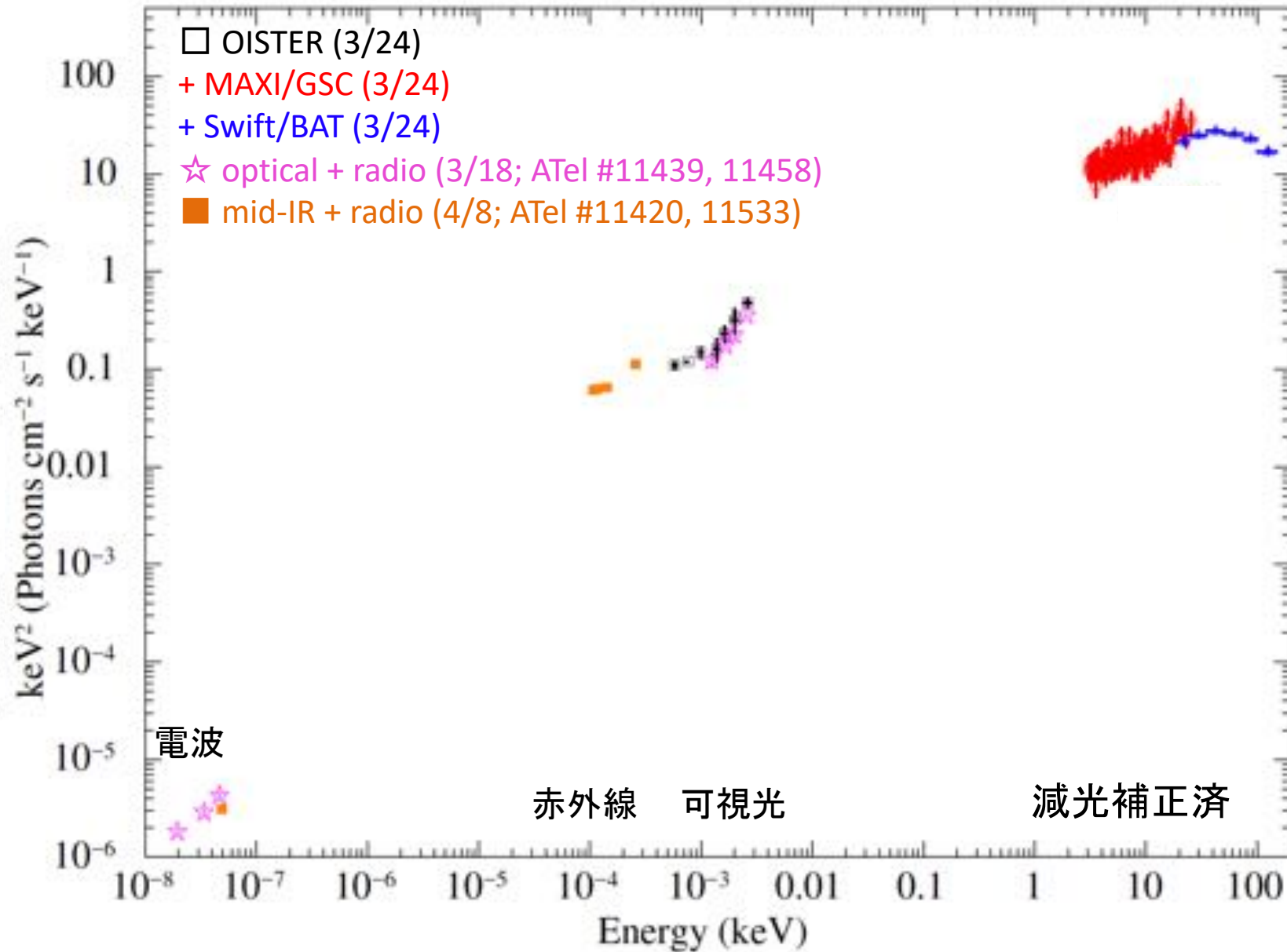
2.0 m なゆた望遠鏡 (西はりま天文台)



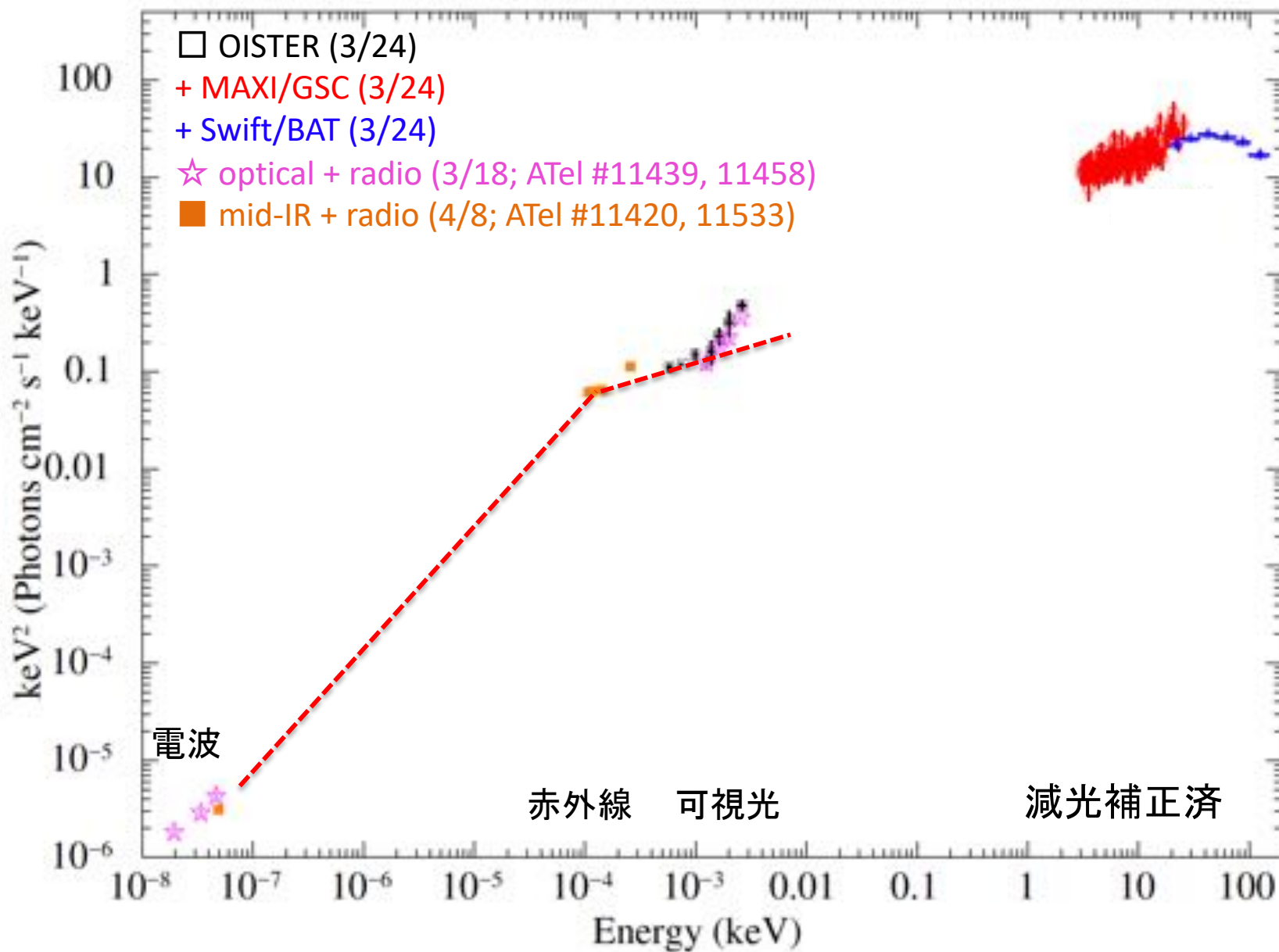
# 多波長 SED



# 多波長 SED

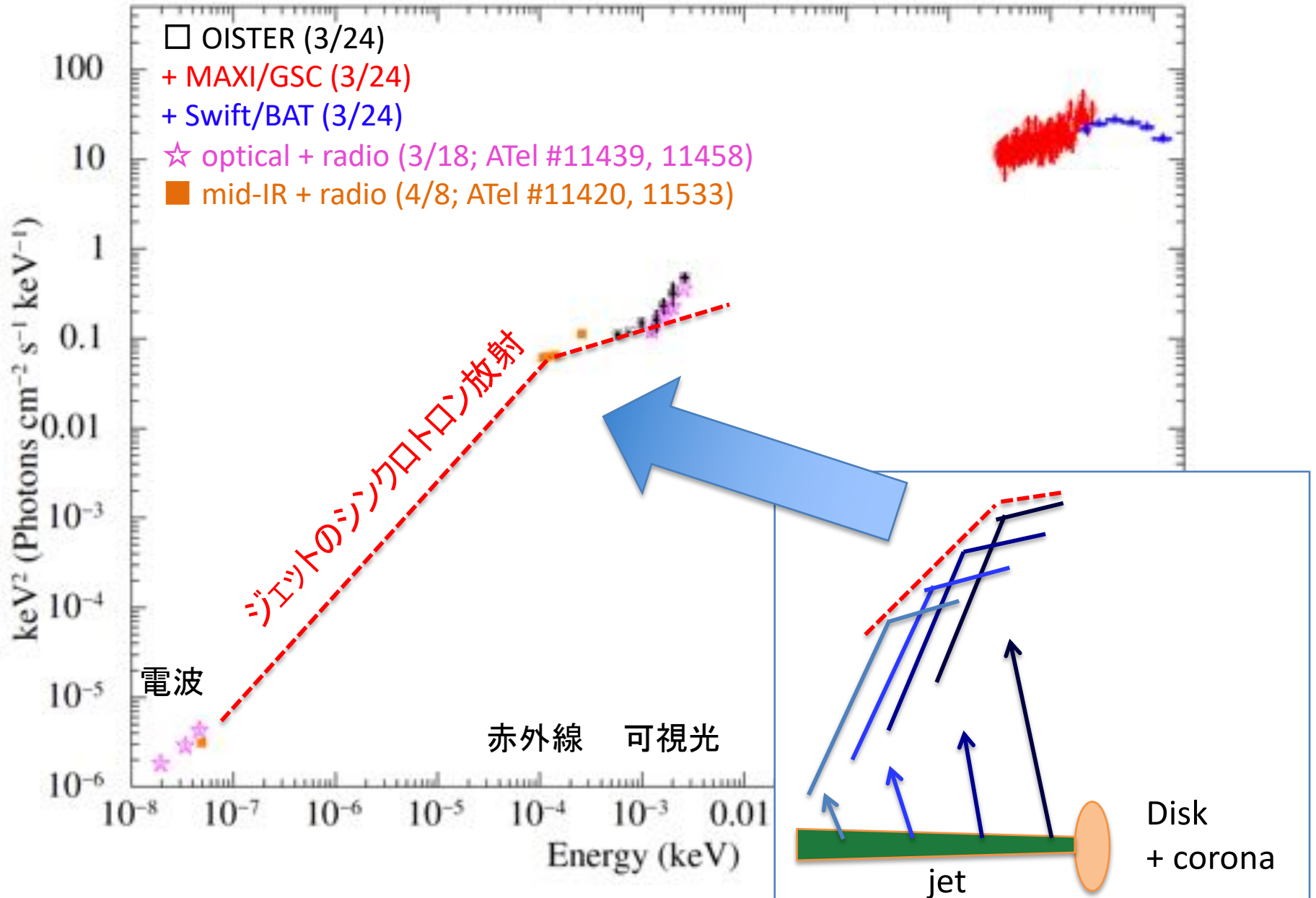


# 多波長 SED

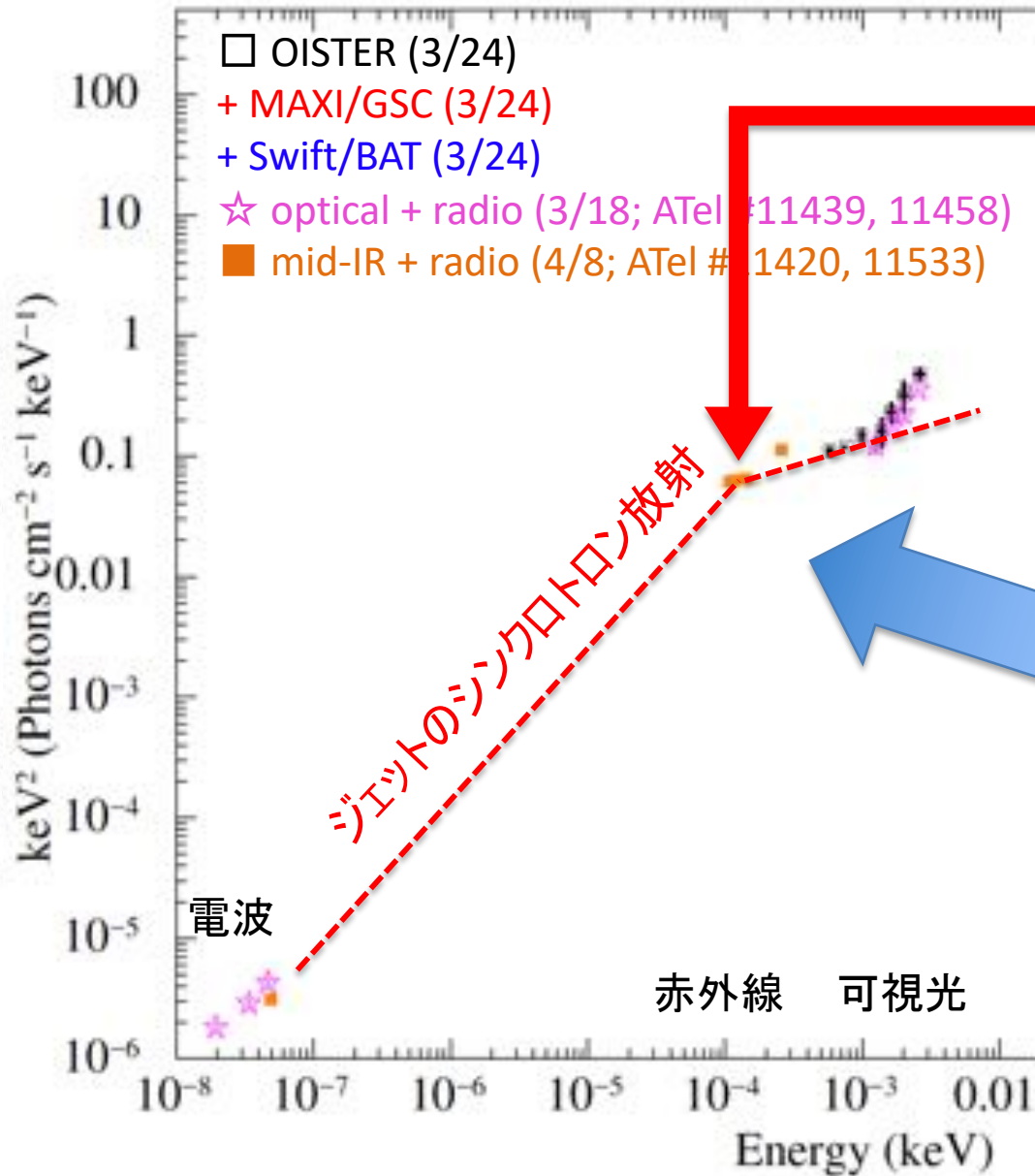




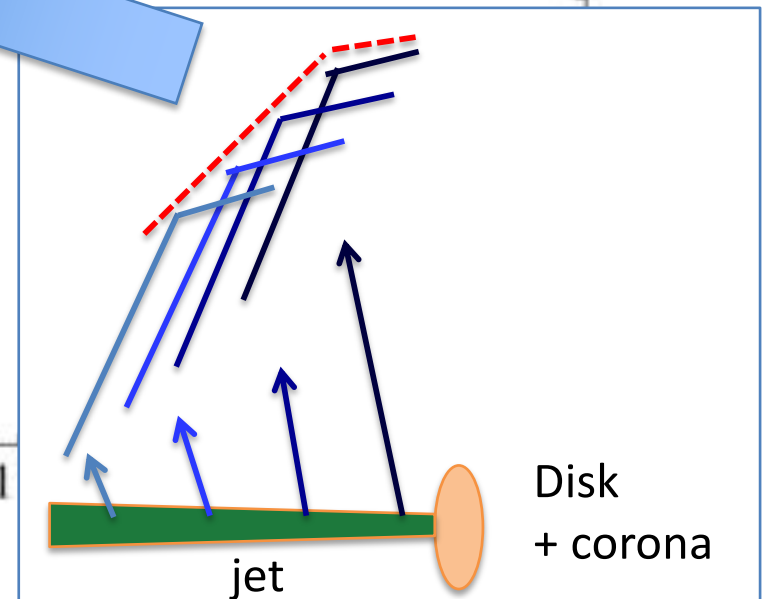
# 多波長 SED



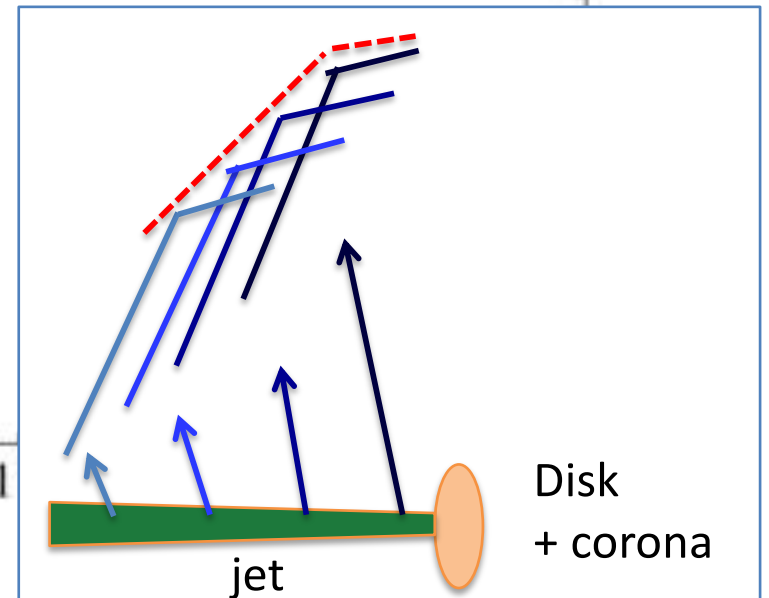
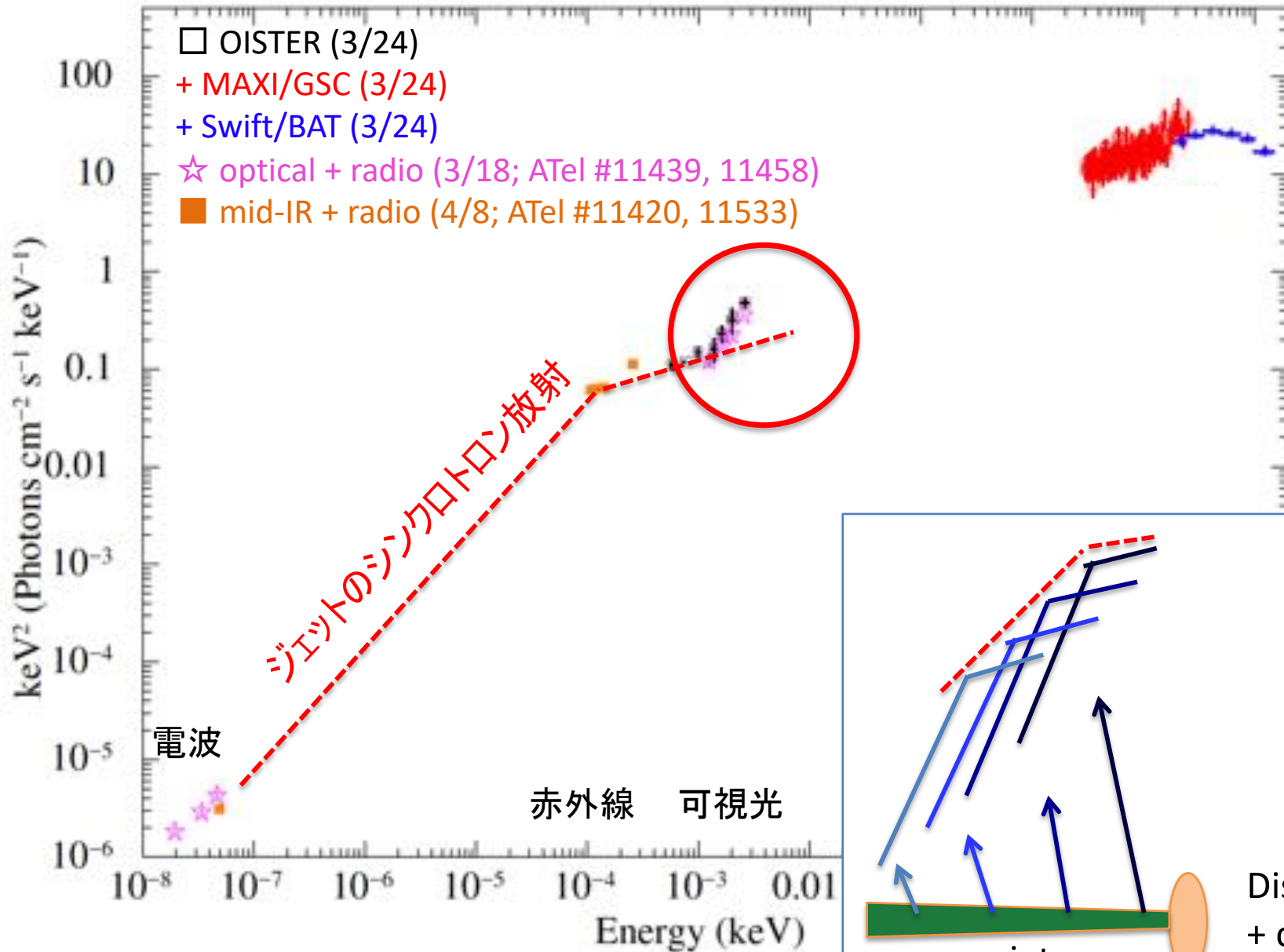
# 多波長 SED



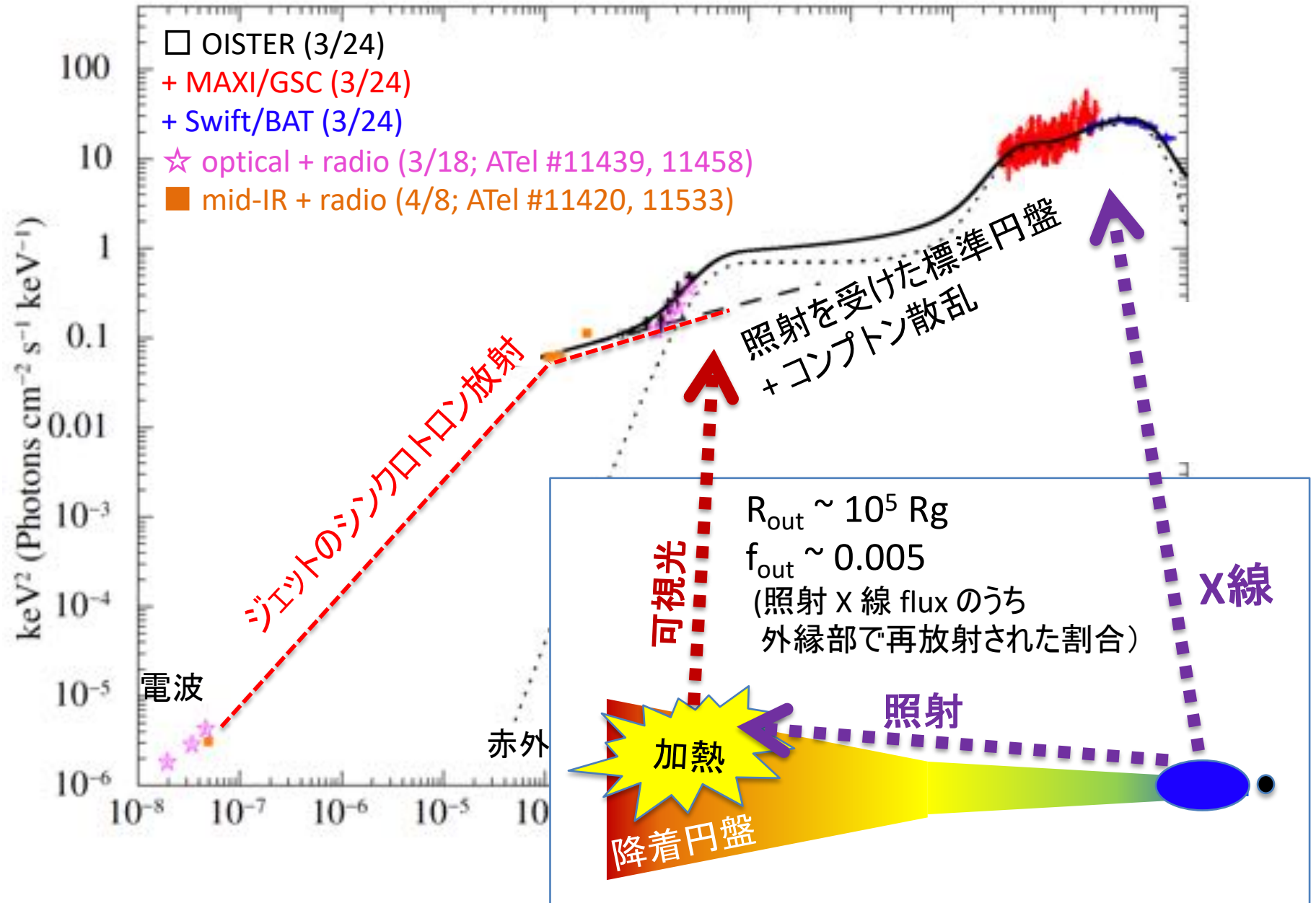
SED の折れ曲がり ( $\tau \sim \alpha_{\nu_B} R \sim 1$ ) から jet base のサイズ R と磁場 B を推定:  
 $\nu_B = 3 \times 10^{13} \text{ Hz}$   
 $F_{\nu_B} = 400 \text{ mJy}$   
 より、  
 **$B \sim 10^4 \text{ G}$**   
 **$R \sim 10^9 \text{ cm} \sim 10^3 \text{ R}_g$**   
 (磁場と運動エネルギーの equipartition を仮定)  
 -> 他のBH 連星と同程度  
 (Shidatsu+ 2011, Chaty+ 2011 etc.)



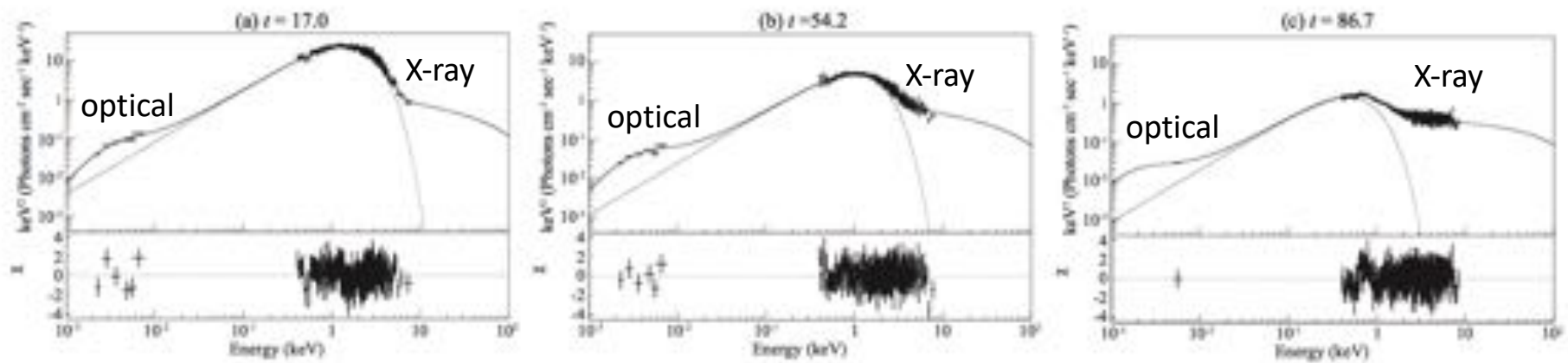
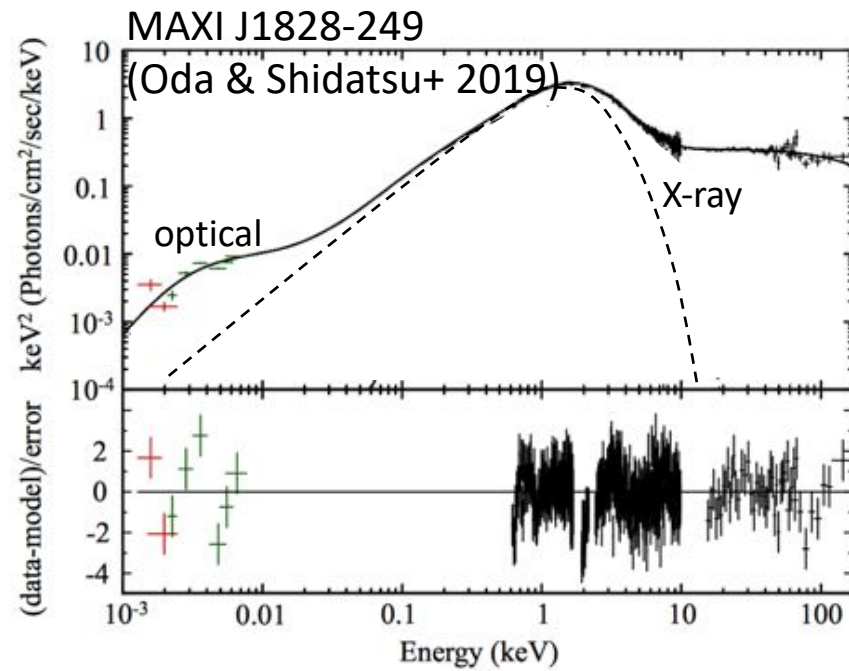
# 多波長 SED



# 多波長 SED

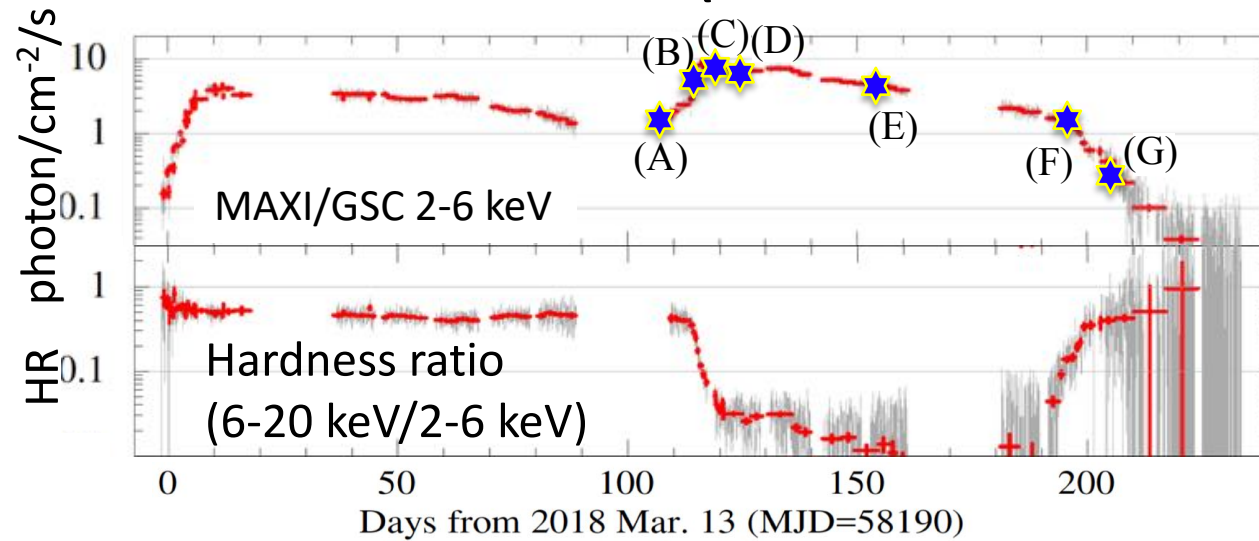


# 円盤外縁部は常に X 線照射を受けている



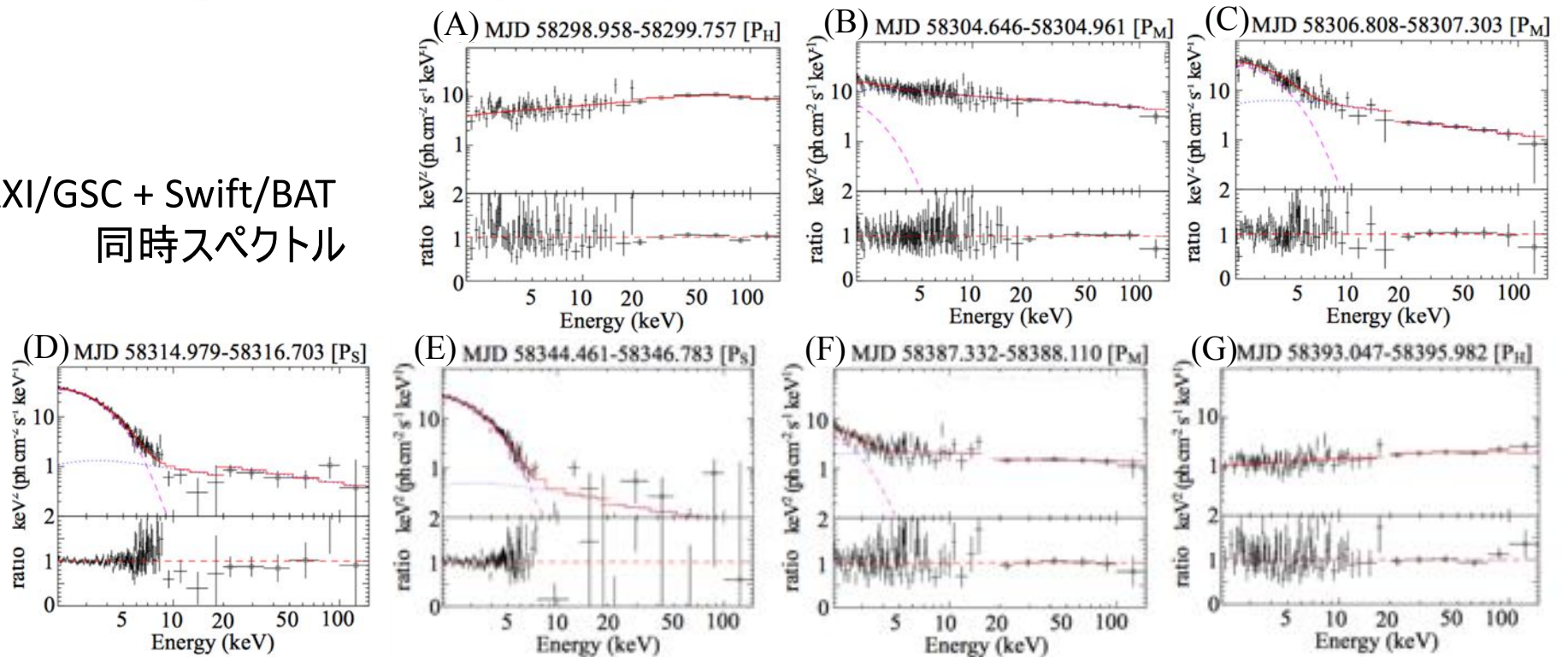
MAXI J1910-057 high/soft 状態 → 状態遷移 (Nakahira, Negoro, Shidatsu+ 2014)

# アウトバースト後半 (2回目の増光時) のスペクトル変化

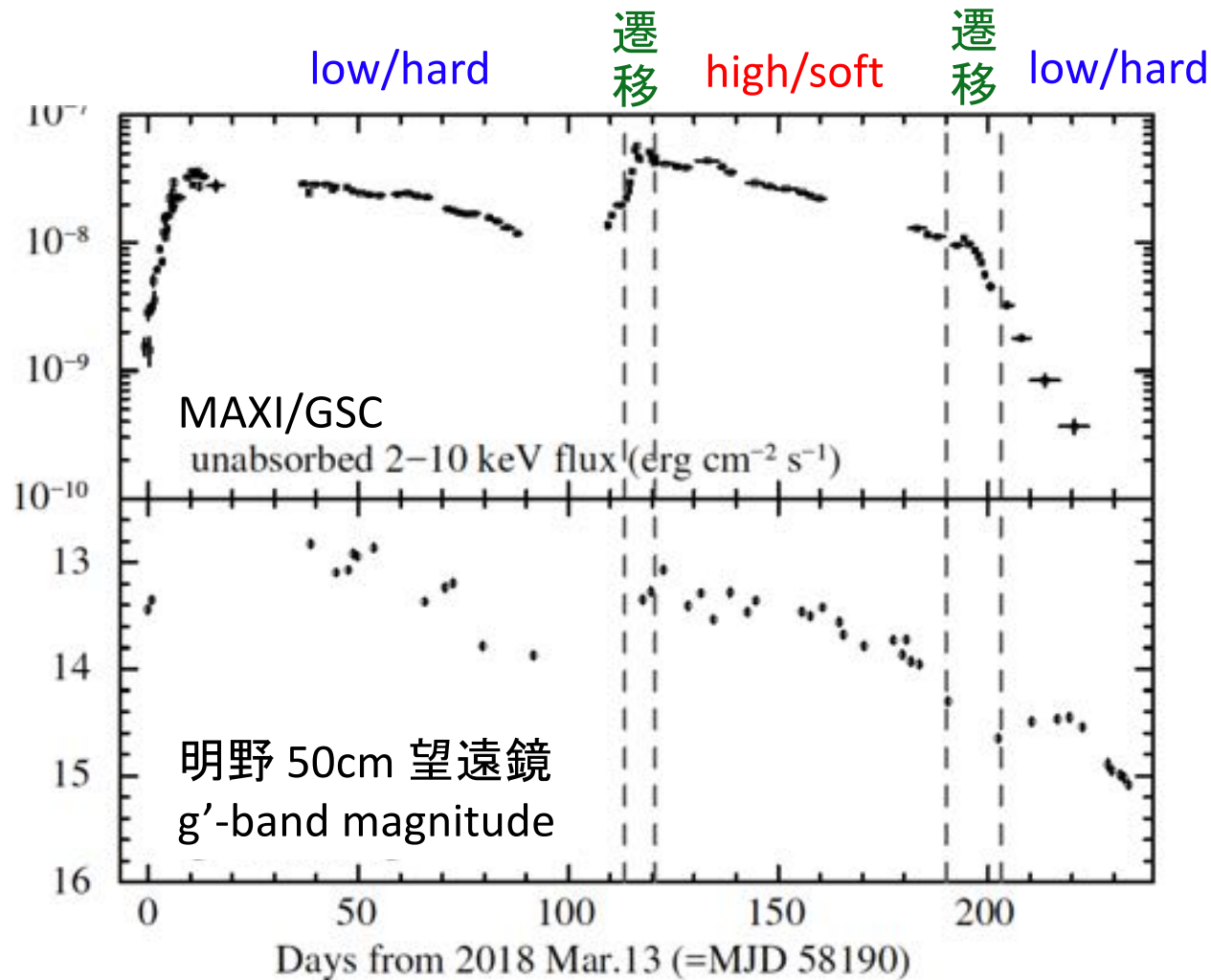


model: Tbars \* simpl \* diskbb

MAXI/GSC + Swift/BAT  
同時スペクトル

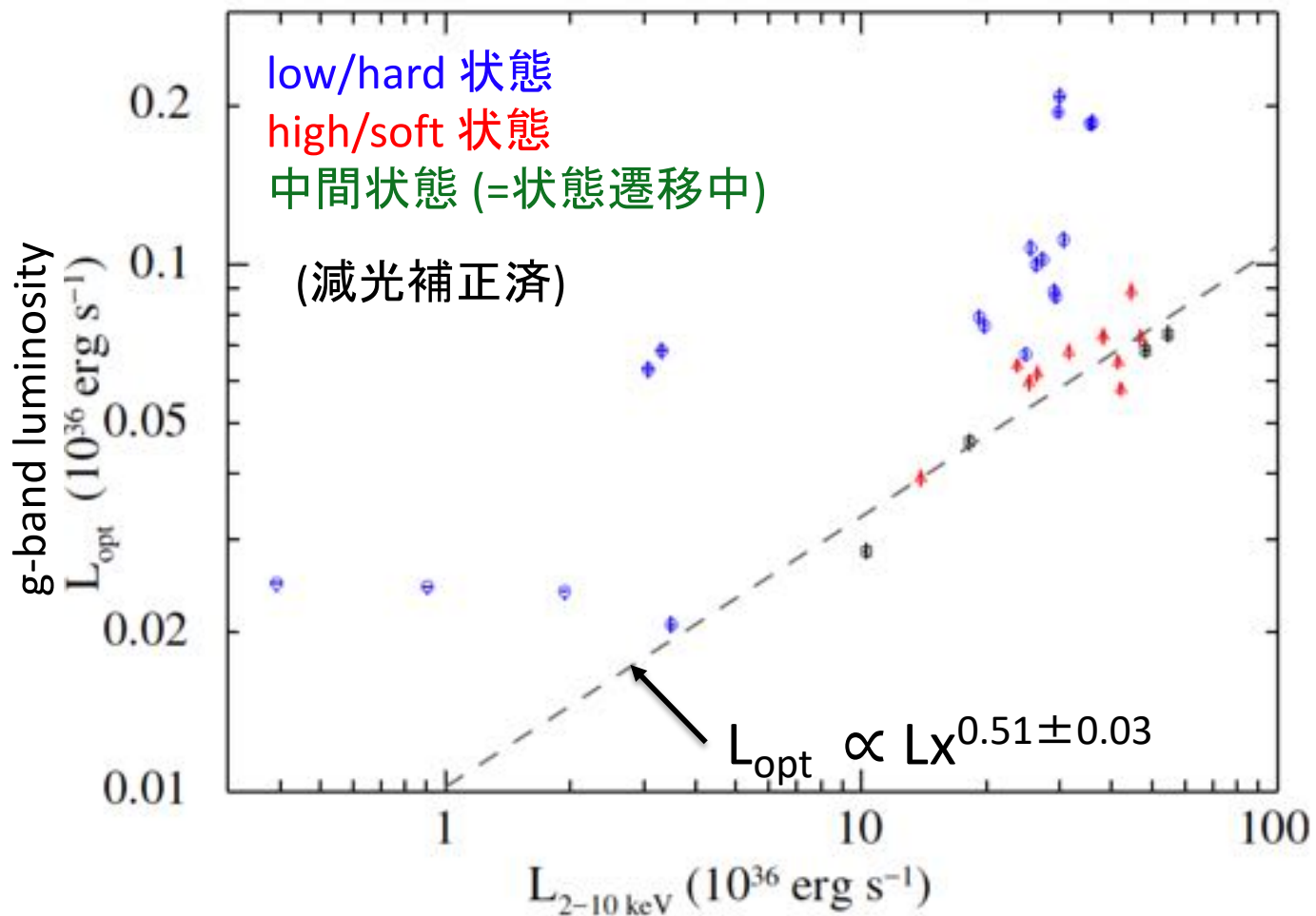


# アウトバースト全体の 可視光のモニタ観測 (明野 50 cm 望遠鏡)



× 線増光/減光にともない可視光フラックスも増加/減少

# 可視光 - X線強度の相関



## low/hard 状態:

- 分散大  
-> X線・可視光の短時間変動 (数秒~数時間) の影響?
- 他の状態と比べ可視光が強い  
-> jet の寄与 or 照射による加熱がより強く効いている?

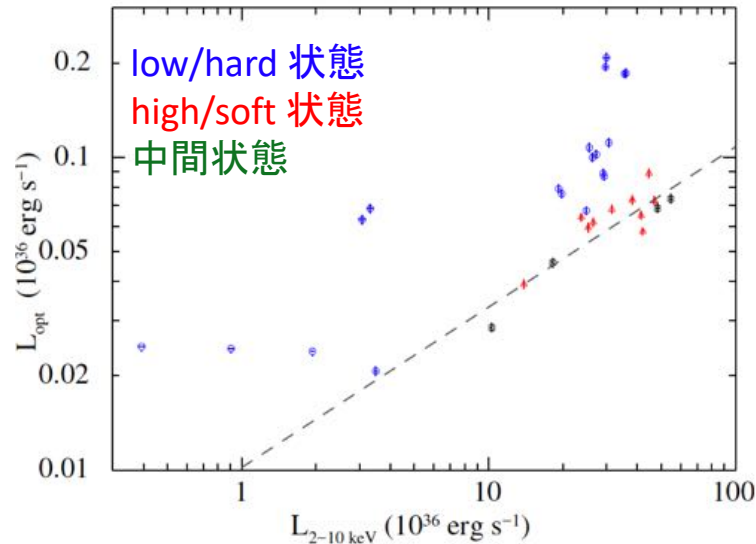
## high/soft 状態・ 中間状態

- 強い相関

注: X線・可視光データは完全同時ではなく、<1日のずれがある



# high/soft 状態・中間状態の 可視光 - X 線強度の相関の起源

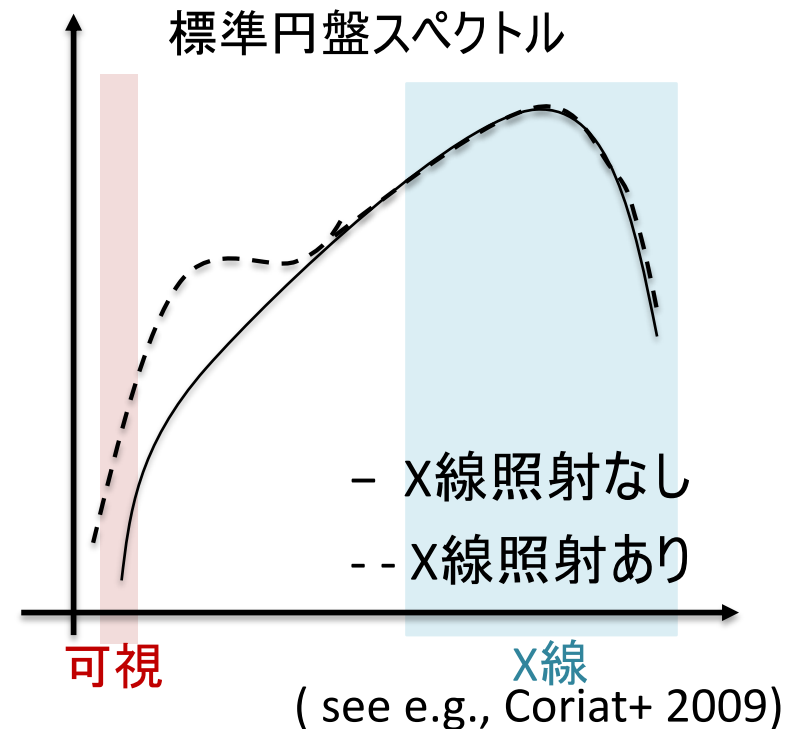


可視光の起源

- × jet (電波未検出: Tetarenko+ 2018, etc.)
- × 伴星の黒体放射 (静穏期の観測から、可視 flux の数%以下)
- 円盤外縁部からの熱放射

可視光バンドが円盤スペクトルの  
レイリーゾーンズ側に対応する場合:

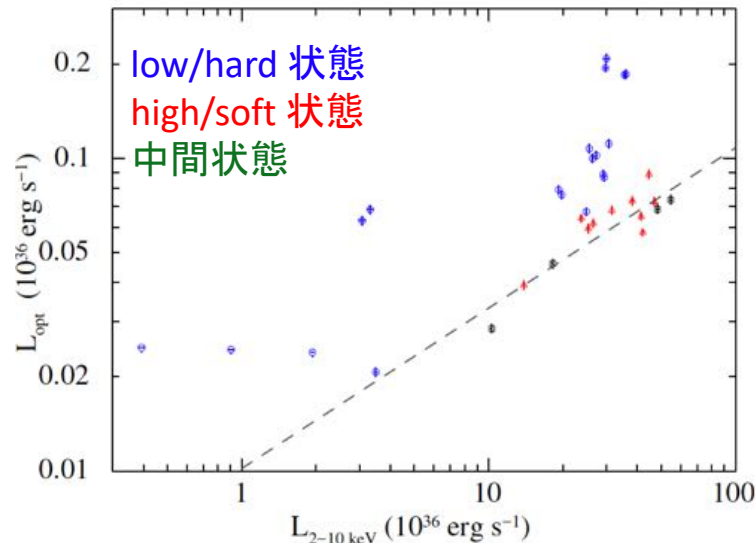
$$L_{\text{opt}} \propto L_X^{1/4}$$



今回の観測:  $L_{\text{opt}} \propto L_X^{0.51 \pm 0.03}$

→ 可視光は円盤最外縁からの黒体放射のピーク付近に対応？

# high/soft 状態・中間状態の 可視光 - X 線強度の相関の起源



可視光の起源

- × jet (電波未検出: Tetarenko+ 2018, etc.)
- × 伴星の黒体放射 (静穏期の観測から、可視 flux の数%以下)
- 円盤外縁部からの熱放射

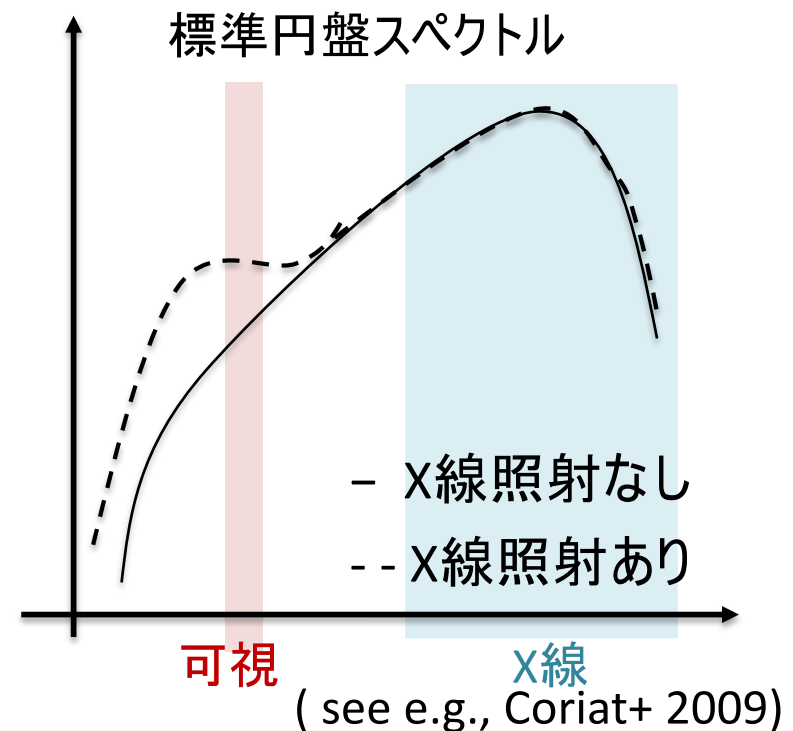
可視光バンドが円盤スペクトルの  
レイリーゾーン側に対応する場合:

$$L_{opt} \propto L_X^{1/4}$$

可視光バンドが“flat part”に対応する場合:

$$L_{opt} \propto L_X^{2/3} \text{ (X線照射なし)}$$

$$L_{opt} \propto L_X \text{ (X線照射あり)}$$



今回の観測:  $L_{opt} \propto L_X^{0.51 \pm 0.03}$

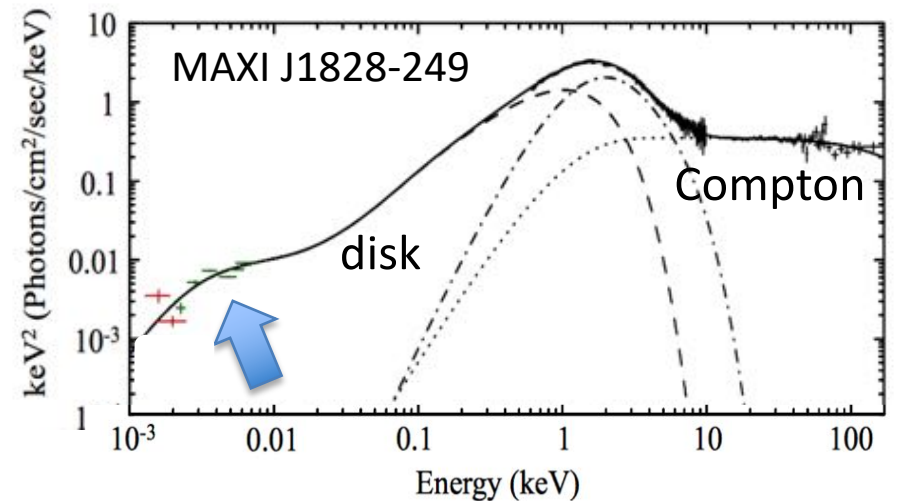
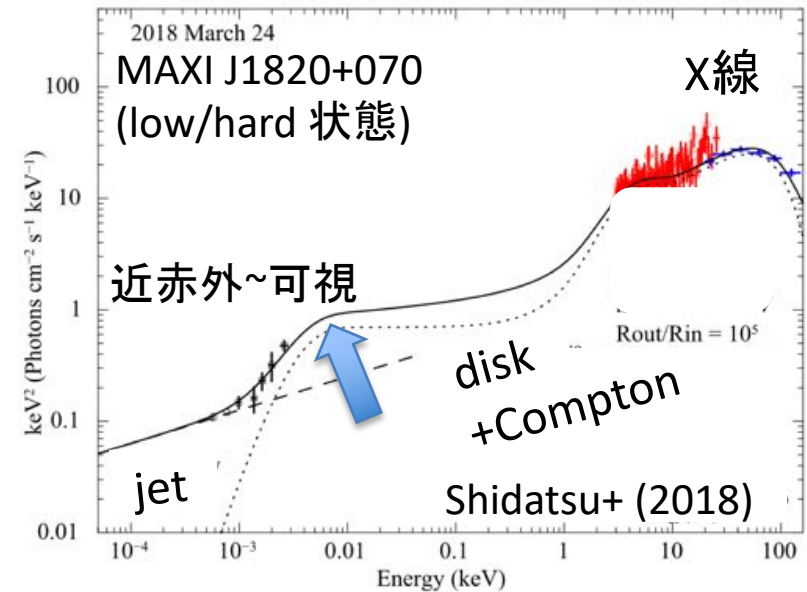
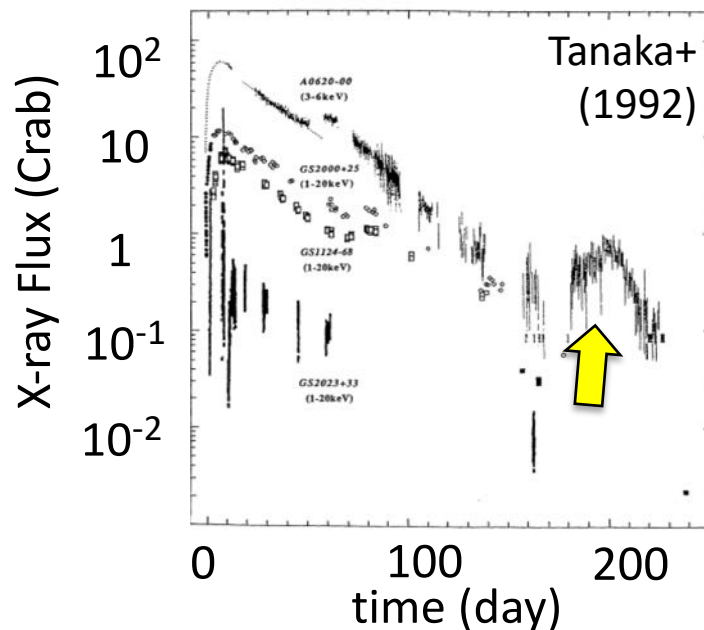
→ 可視光は円盤最外縁からの黒体放射のピーク付近に対応？

# 今後の X 線・光赤外線観測で期待されること

アウトバースト中の X 線連星の多バンド測光モニタ  
(1~数日に1回、近赤外も含めてできるだけ多バンドデータが得られるとありがたいです)

多波長 SED に X 線照射を考慮した  
円盤モデルを適用することで  
円盤サイズや照射強度を推定できる

これらのパラメータの長期変化  
→ 再増光を理解する鍵?



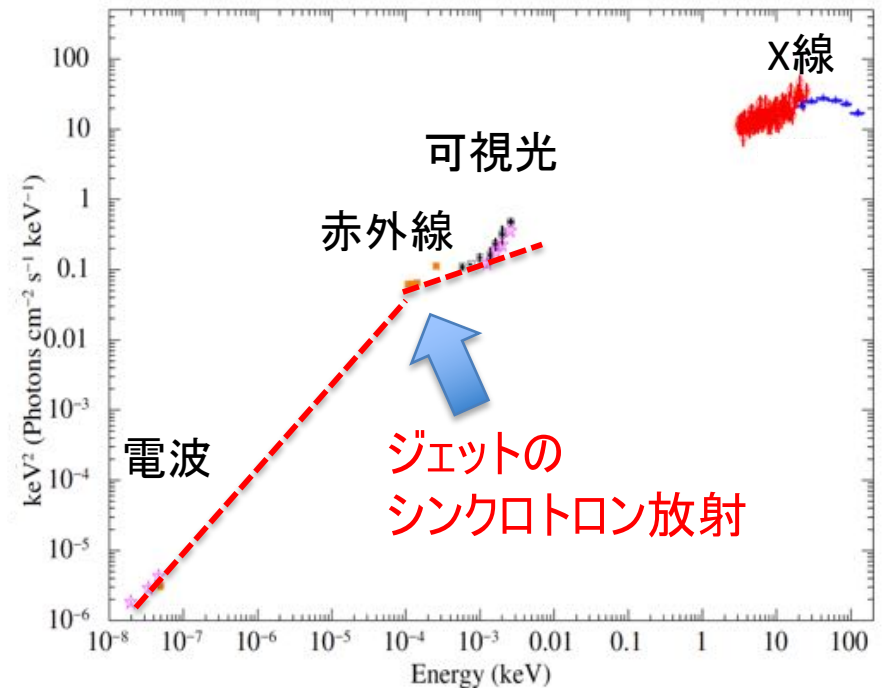
Oda & Shidatsu+ (2019)

# 今後のX線・光赤外線観測で期待されること

## アウトバースト中のX線連星の密な多バンド測光モニタ

電波の同時モニタも加われば、  
ジェットの構造変化を調査できる

JCMT, ATCA など電波干渉計による  
アウトバースト中のモニタ観測を  
欧・豪などの電波観測の専門家  
+ MAXI メンバー et al. で計画中



折れ曲がりの周波数・光度から  
jet base の磁場やサイズを測定可能

# 今後のX線・光赤外線観測で期待されること

せいめい望遠鏡を用いた分光モニタ (1日~数日間隔)

=> 円盤外縁部の構造変化の調査

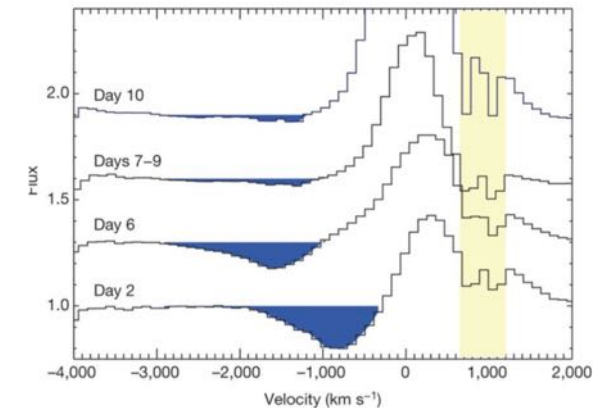
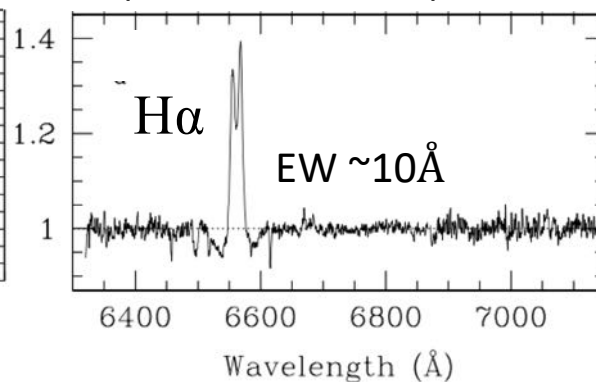
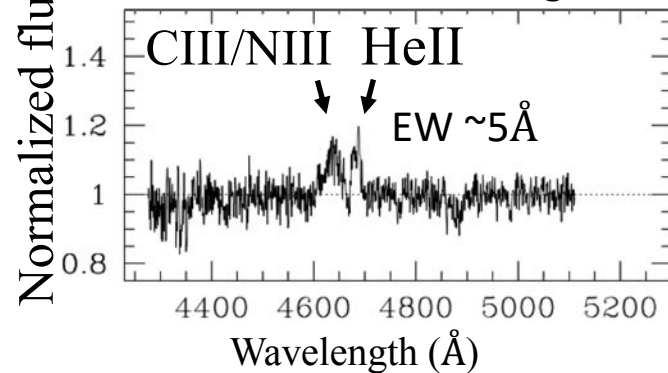
降着円盤からの輝線

↓Disk wind による

吸収線が見えることもある!

(Munoz Darias+ 2016, Nature)

GRO J1655-40, high/soft state (Soria et al. 2000)



線幅 (FWHM) ~ 500km/s

- 状態遷移の前後では X 線照射の効率が劇的に変わり、輝線や吸収線の形状も大幅に変化すると期待
- 状態遷移前後を、X 線スペクトル変化に対応する観測密度でカバーする、長期輝線モニタが実現すれば世界初!

せいめい望遠鏡に提案中

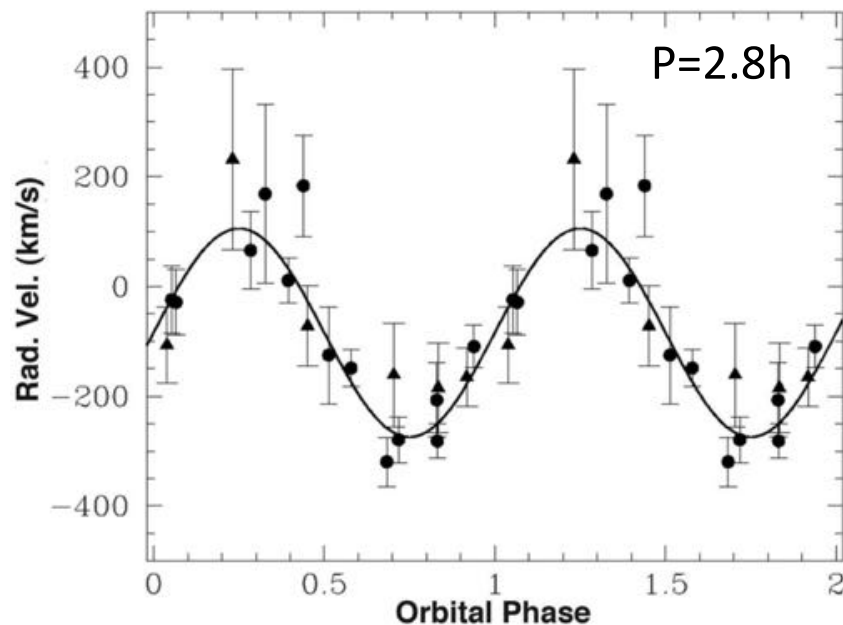
w/ 上田さん、野上さん他 (京大)、村田さん他 (東工大)、  
前原さん・磯貝さん (岡山天文台) + MAXI メンバー

# 今後のX線・光赤外線観測で期待されること

輝線の連続分光観測 (orbital phase を密にカバー)

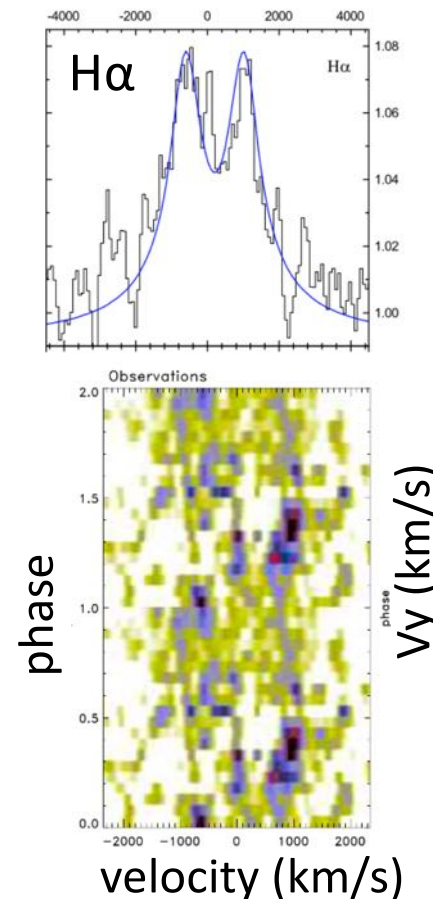
- 軌道周期の測定

Swift J1357.2-093313  
(Corral-Santana+ 2013)

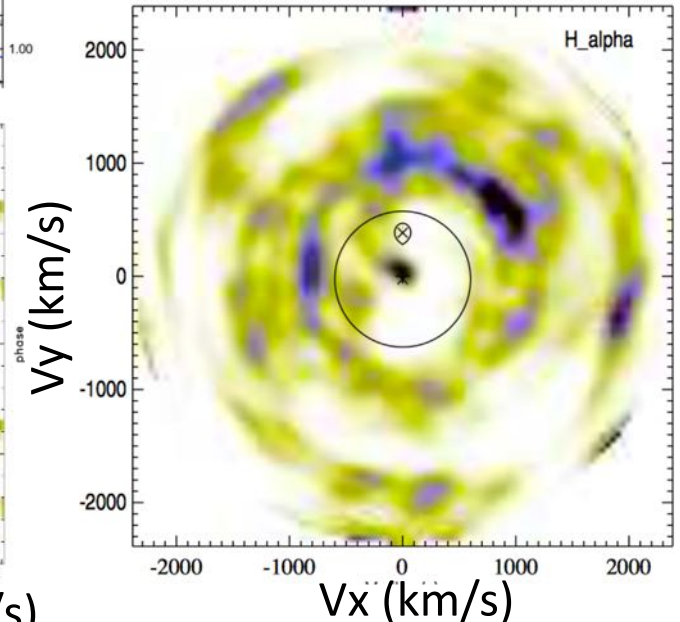


※ X線連星の軌道周期:  
多くは数時間～数日

- ドップラートモグラフィによる  
円盤外縁部の2次元構造の調査



Swift J1753.5-0127  
low/hard 状態  
(Neustroev+ 2014)



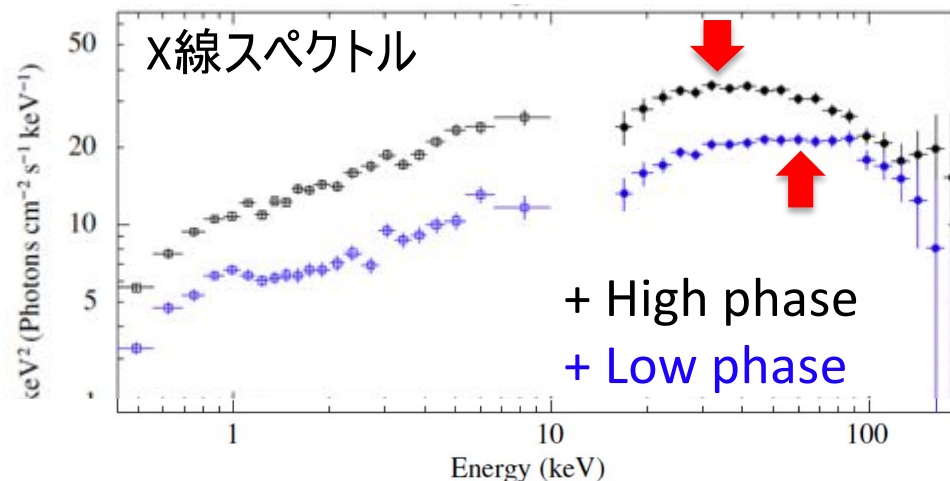
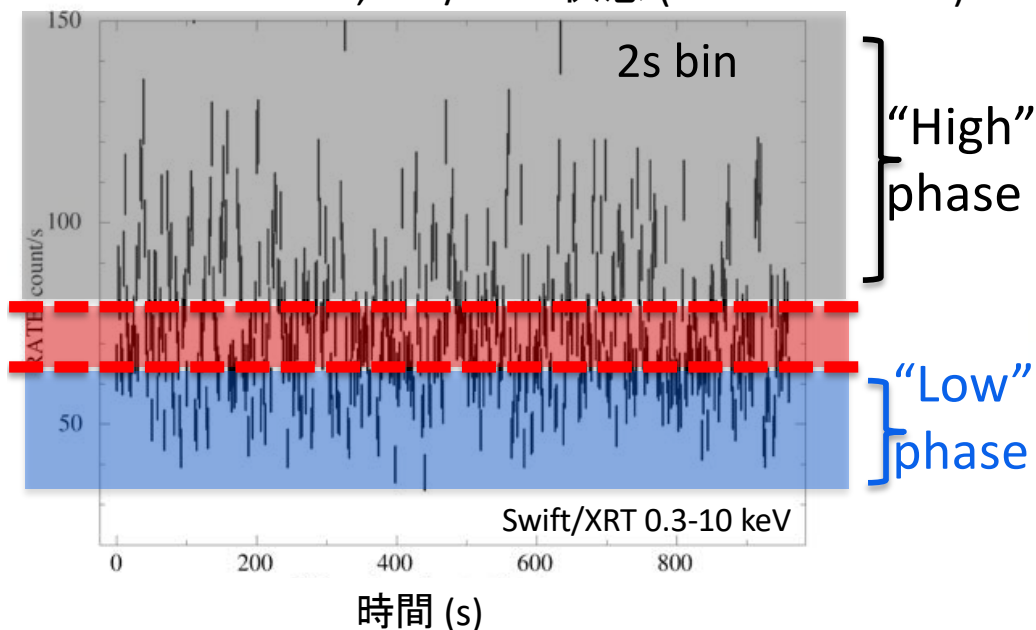
→ high/soft 状態・low/hard 状態での違いは?

# 今後のX線・光赤外線観測で期待されること

## 高速測光

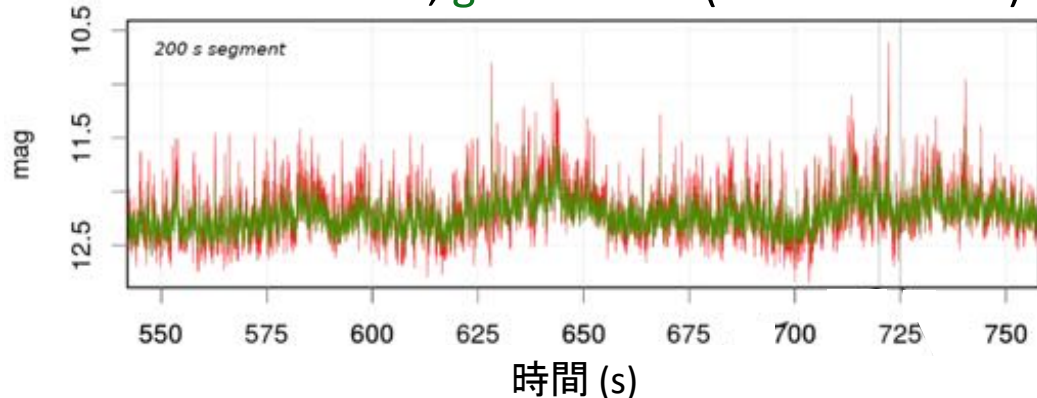
ミリ秒~数十秒の激しいX線・可視・近赤外線短時間変動

MAXI J1820+070, low/hard 状態 (Shidatsu+ 2018)



~数秒の強度変動とともに、  
電子温度やスペクトルの傾き  
(=高温降着流の光学的厚み)が変化

MAXI J1820+070,  $g'$  &  $i'$  band (Gandhi+ 2018)



可視光・近赤外カラーは  
どのように変動するか?  
→ 多バンド高速測光/分光

(MAXI J1820+070 再増光時の  
短時間変動: 安達さんの講演)

# まとめ

X線連星の降着円盤の構造変化の理解、  
アウトフローの噴出機構・円盤構造との関連性の  
理解のために、アウトバースト中の多波長観測が重要

- 状態遷移中を密にカバーする長期測光  
・分光モニタ
- low/hard 状態の高速測光  
etc.

今後でも可視光・近赤外の専門家の皆様と連携できれば  
幸いです。どうぞよろしくお願いいたします