

# 低質量X線連星GRS 1915+105の X線で異常に暗い期間での 近赤外線放射起源について

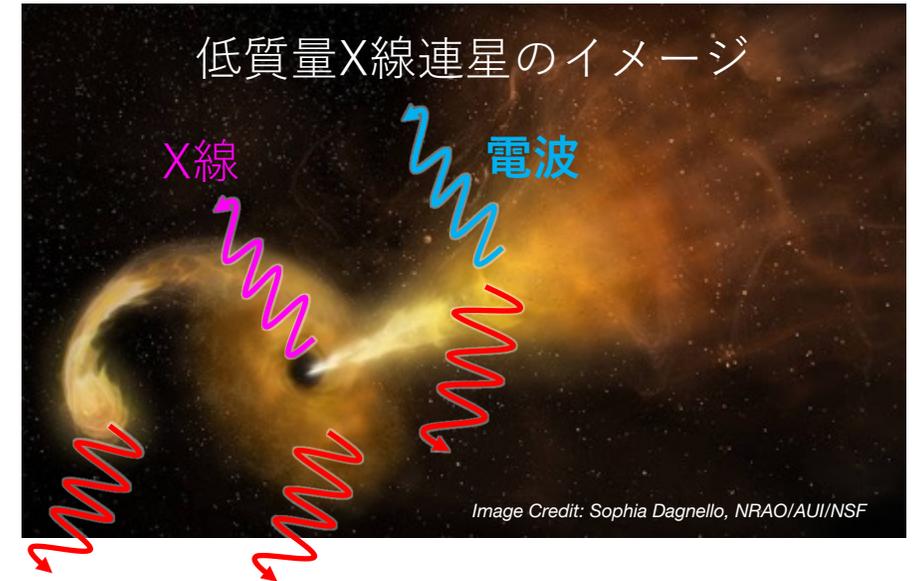
論文 : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021ApJ...916..114I/abstract>

今里郁弥 (広島大学)

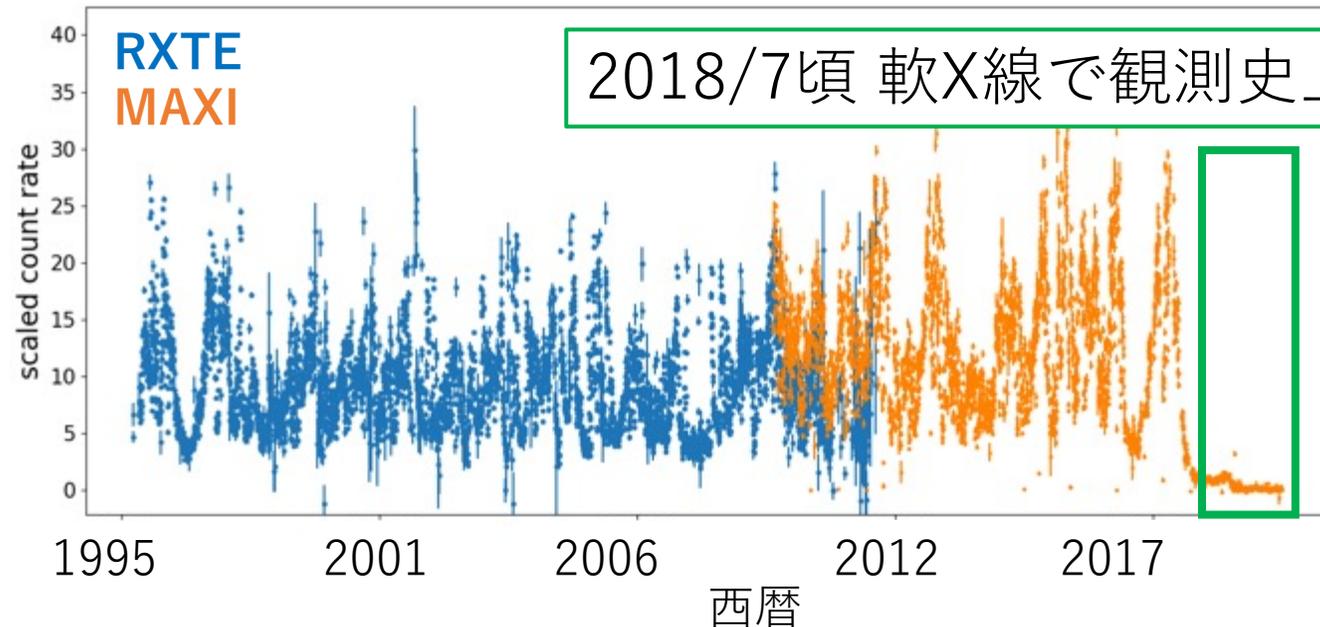
笹田真人, 植村誠, 深沢泰司, 高橋弘充, 川端弘治, 中岡竜也(広島大学),  
穂本正徳、藤沢健太(山口大学), 秋田谷洋(千葉工業大学)

# GRS 1915+105について

- コンパクト星がブラックホールの低質量X線連星.
- ブラックホール質量:  $12.4^{+2.0}_{-1.8} M_{\odot}$ <sup>1</sup>, 公転周期:  $\sim 34$ 日<sup>2</sup>
- 星間吸収( $A_v \sim 12.2-19.6$ )<sup>3,4</sup> がきつく, 可視光観測は難しい.
- 発見以来 X線で明るく高い活動性を継続的に示していた.



近赤外線の放射起源の候補：伴星, 円盤, ジェット



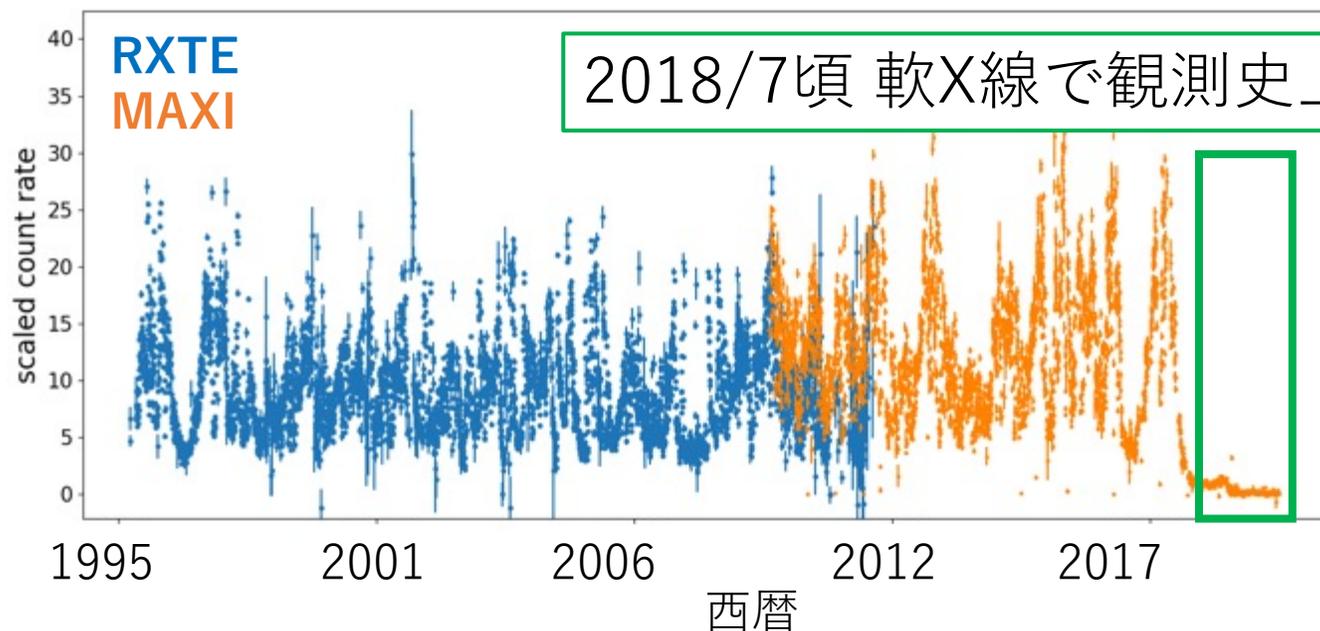
1. Reid et al. 2014
2. Greiner et al. 2001
3. Chapuis & Corbel 2004
4. Imazato et al. 2021
5. Negoro et al. 2018

# GRS 1915+105について

- ・コンパクト星がブラックホールの低質量X線連星.
- ・ブラックホール質量:  $12.4^{+2.0}_{-1.8} M_{\odot}$ <sup>1</sup>, 公転周期:  $\sim 34$ 日<sup>2</sup>
- ・星間吸収( $A_V \sim 12.2-19.6$ )<sup>3,4</sup> がきつく, 可視光観測は難しい.
- ・発見以来



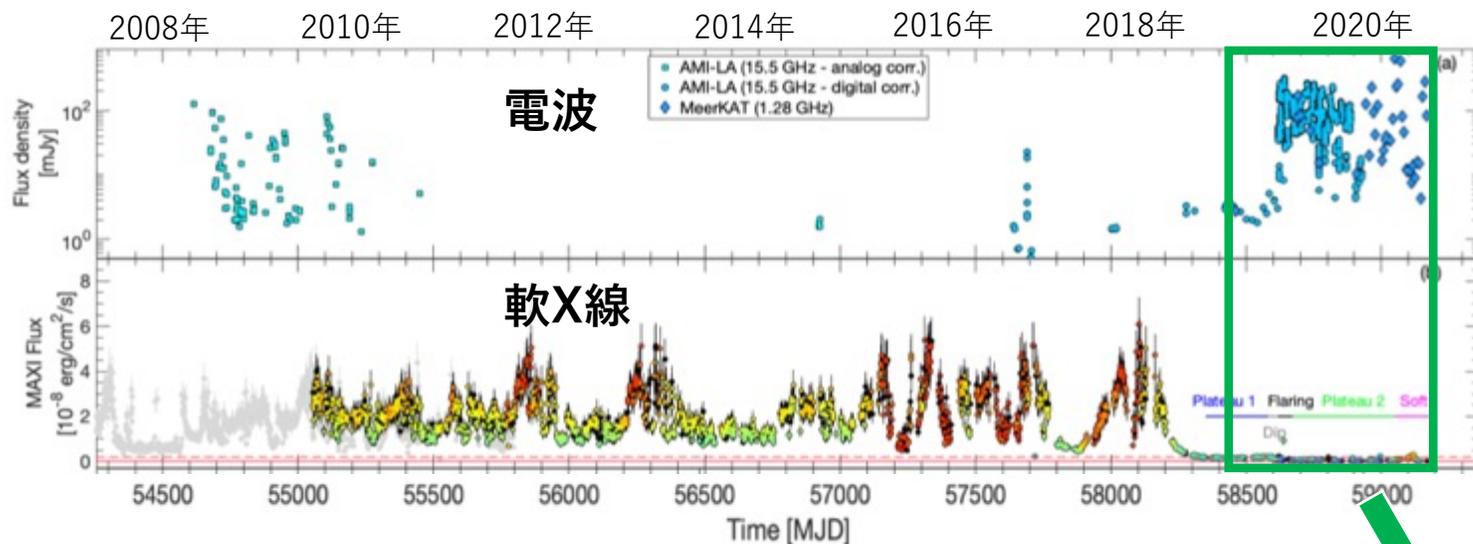
## X線で異常に暗くなった期間の 近赤外線のリバウンドや放射起源を調査



1. Reid et al. 2014
2. Greiner et al. 2001
3. Chapuis & Corbel 2004
4. Imazato et al. 2021
5. Negoro et al. 2018

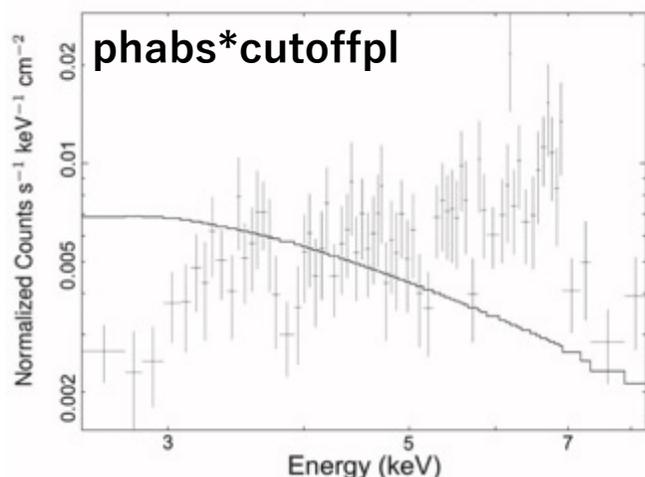
# X線で異常に暗い期間の電波・X線の研究結果

## (1) 電波 (Motta et al. 2021)



- 電波フラックスは明るい。
- 少なくとも静穏期ではない。
- X線はCompton-thickなものに隠されて、見かけの明るさが暗くなった。

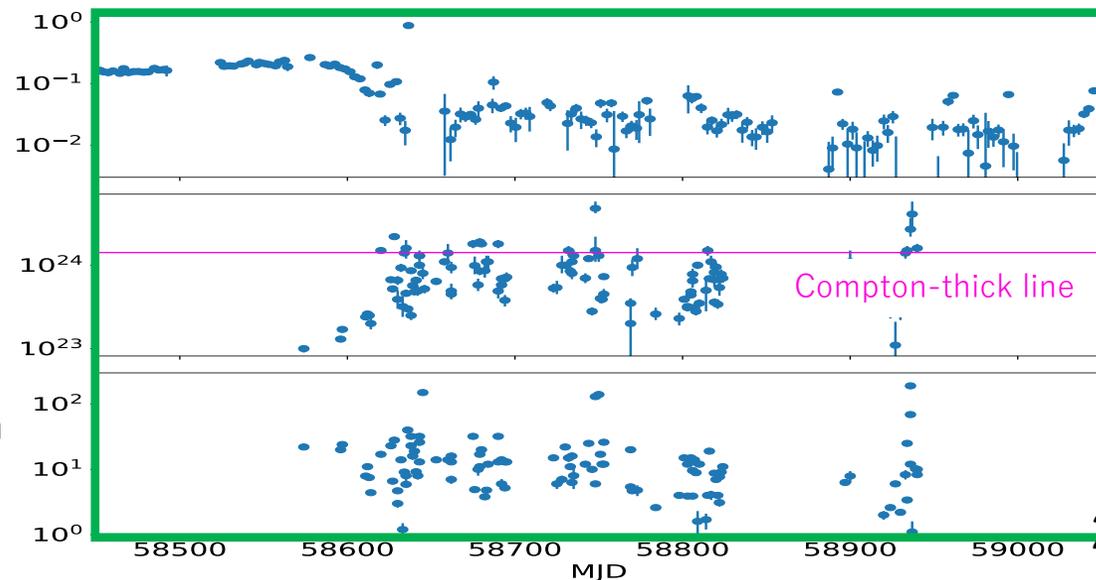
## (2) X線スペクトル (Balakrishnan et al. 2021)



X線Count rate  
(MAXI)

X線遮蔽体  $N_H$   
(NICER)

Eddington fraction  
(%)  
(NICER)



星間吸収だけではスペクトル再現できない

# 観測データ

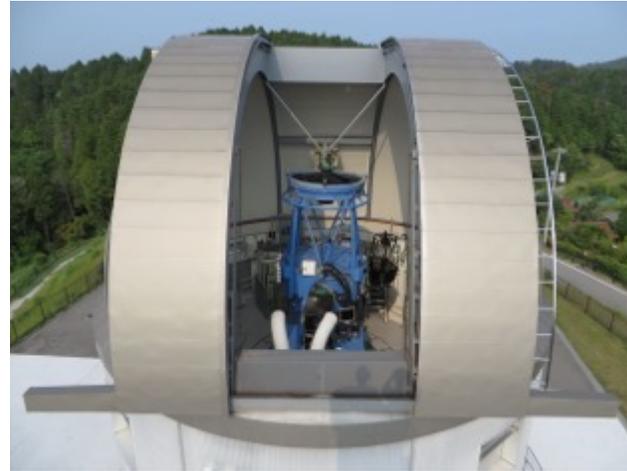
X線: MAXI, Swiftのアーカイブデータ

電波: 山口干涉計 (8 GHz)

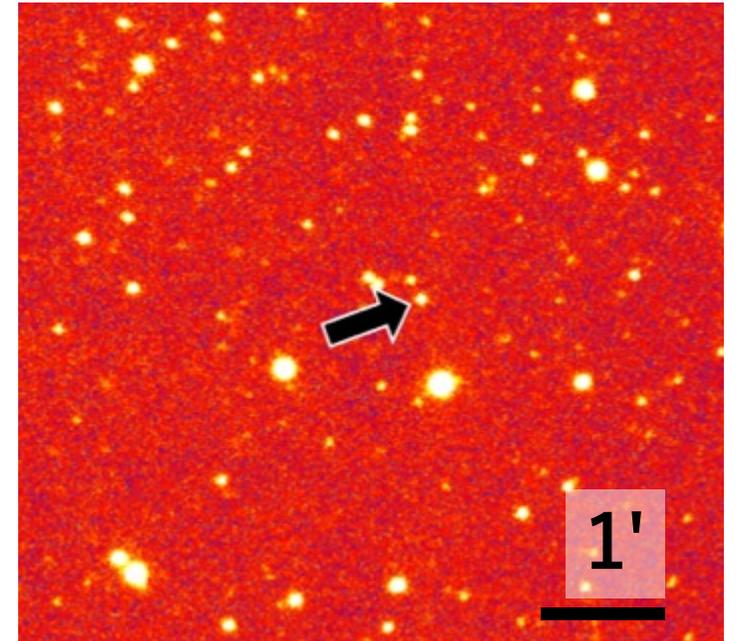
近赤外線: かなた望遠鏡(測光モード、測光偏光モード) Ks, H band



山口干涉計

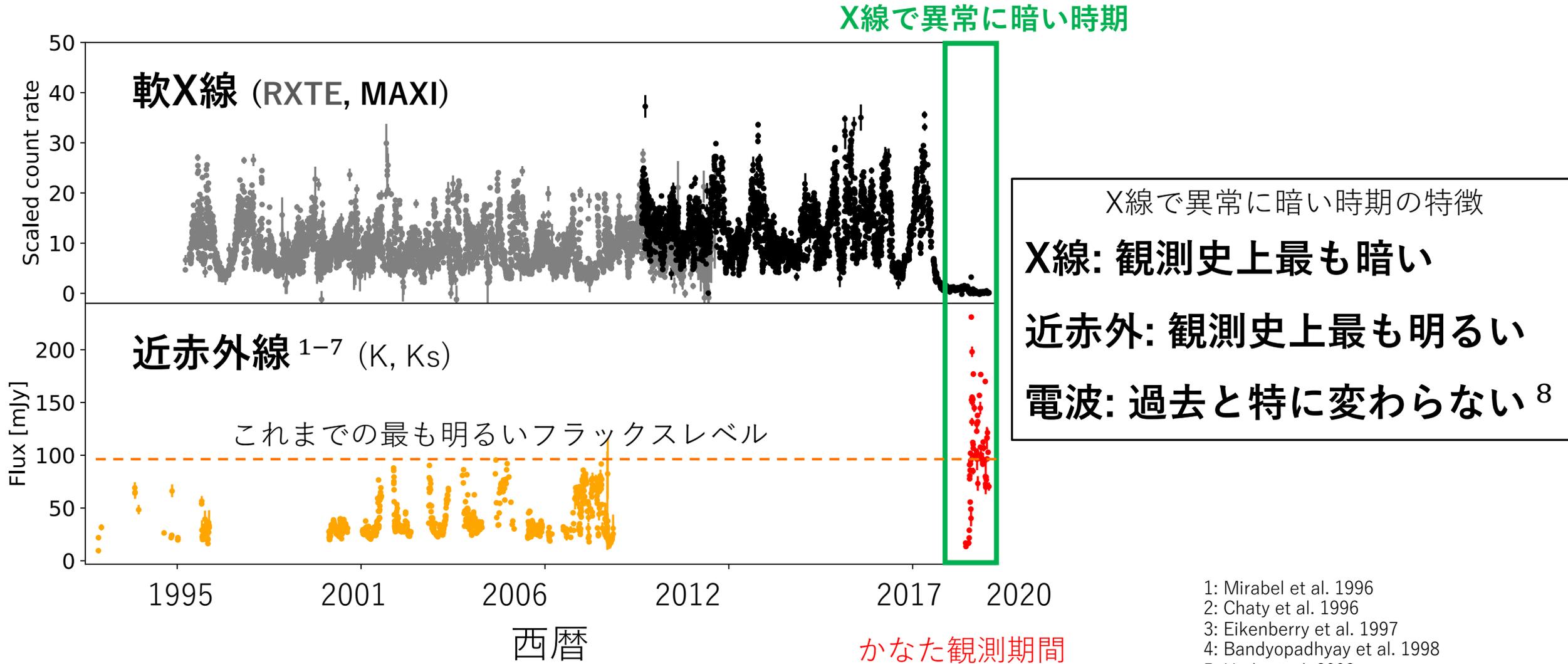


かなた望遠鏡



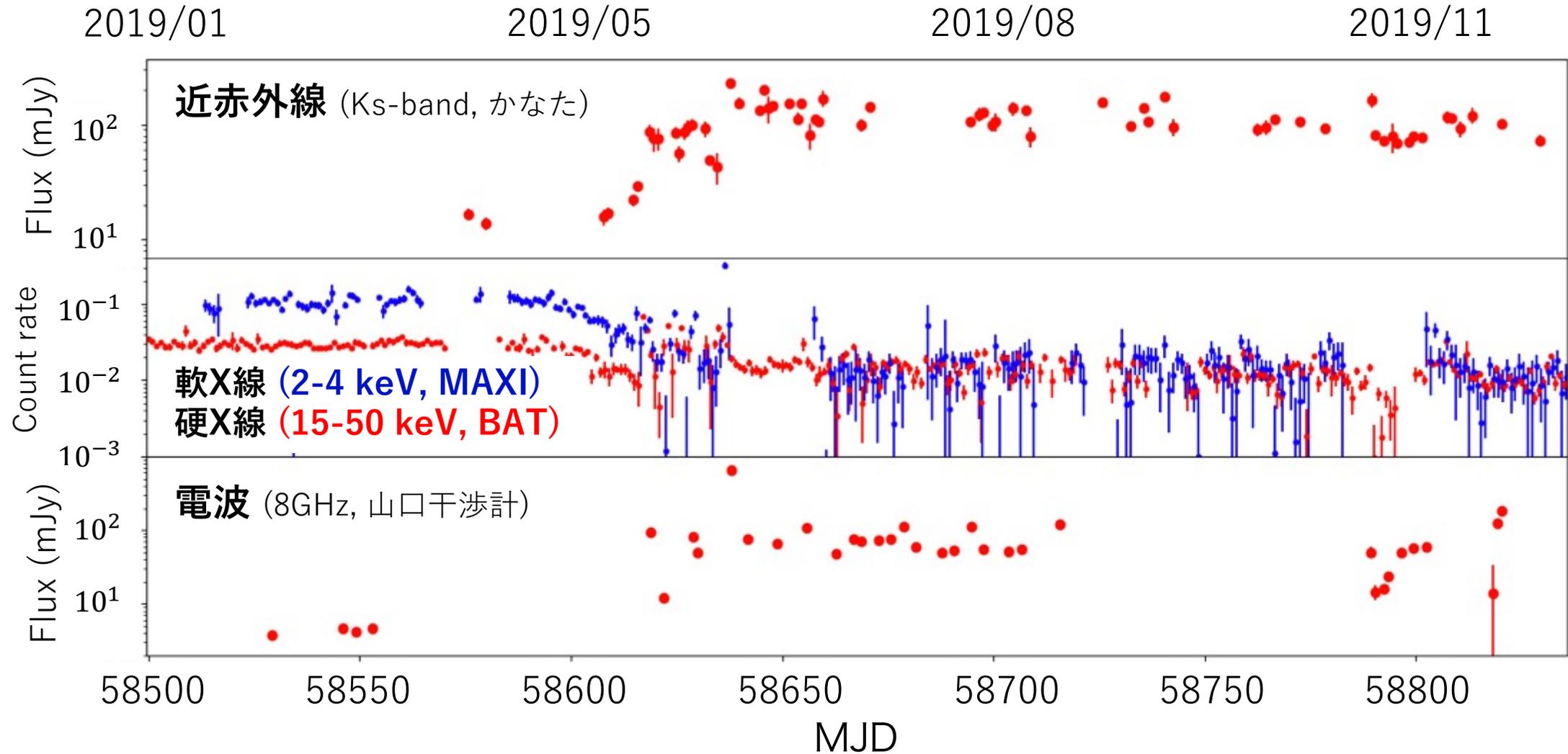
Kanata/HONIRの測光モードの画像 (Ks band)

# 結果 1 : 近赤外線30年分のライトカーブ



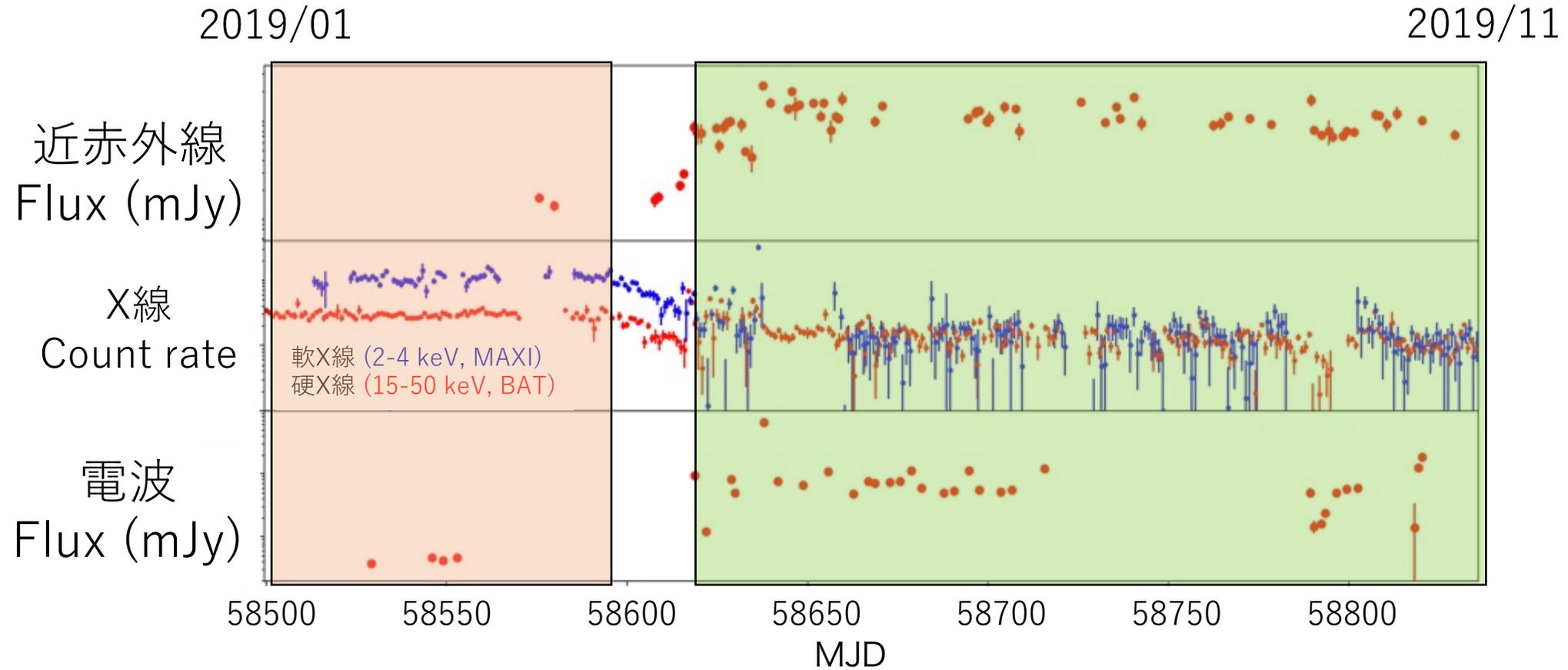
- 1: Mirabel et al. 1996
- 2: Chaty et al. 1996
- 3: Eikenberry et al. 1997
- 4: Bandyopadhyay et al. 1998
- 5: Ueda et al. 2002
- 6: Neil et al. 2007
- 7: Arai et al. 2009
- 8: Motta et al. 2021

# 結果 2 : 2019年のX線、近赤外線、電波のライトカーブ



近赤外線フラックス変動は、電波と正の相関、軟X線と負の相関

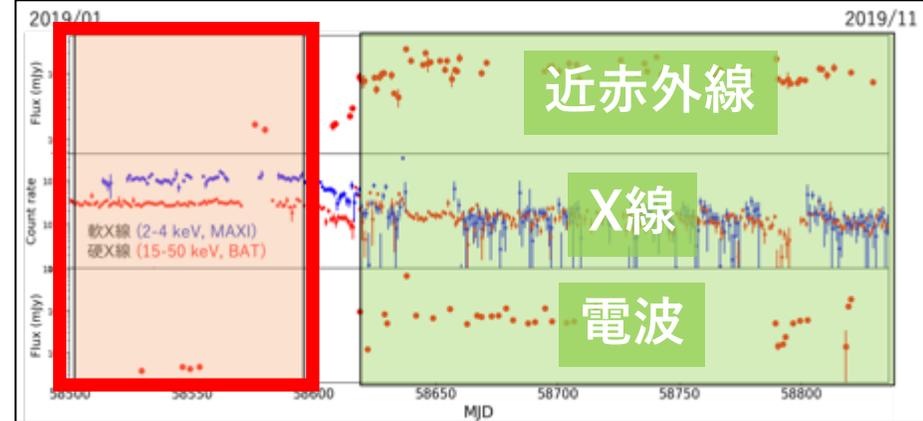
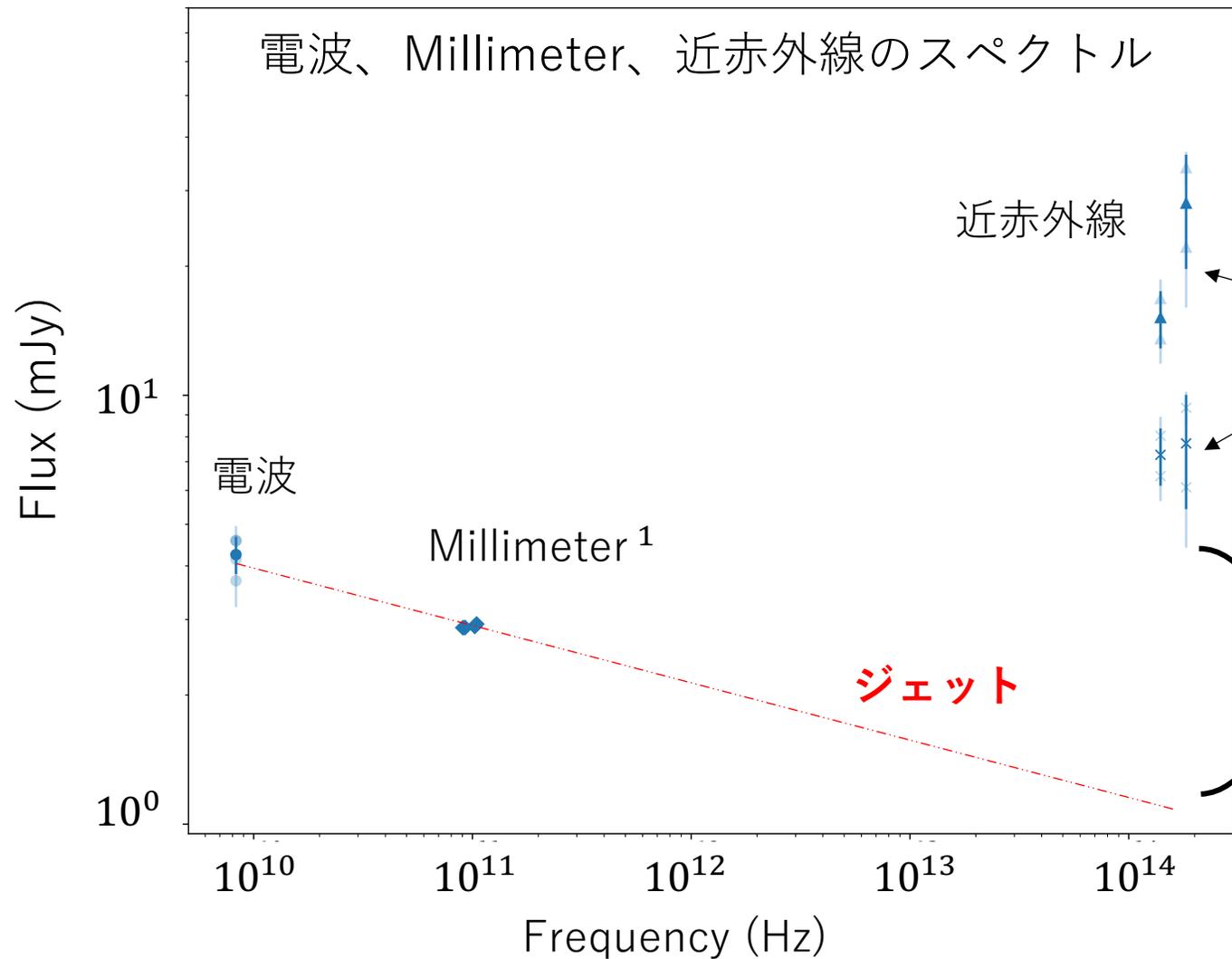
# 議論：近赤外線放射の放射起源



伴星 and/or 円盤

ジェット (+  $\alpha$ ?)

# 議論 1 : 前半期間の近赤外線放射起源



この時期の議論

近赤外線 : 2パターンの星間吸収<sup>2,3,4</sup>

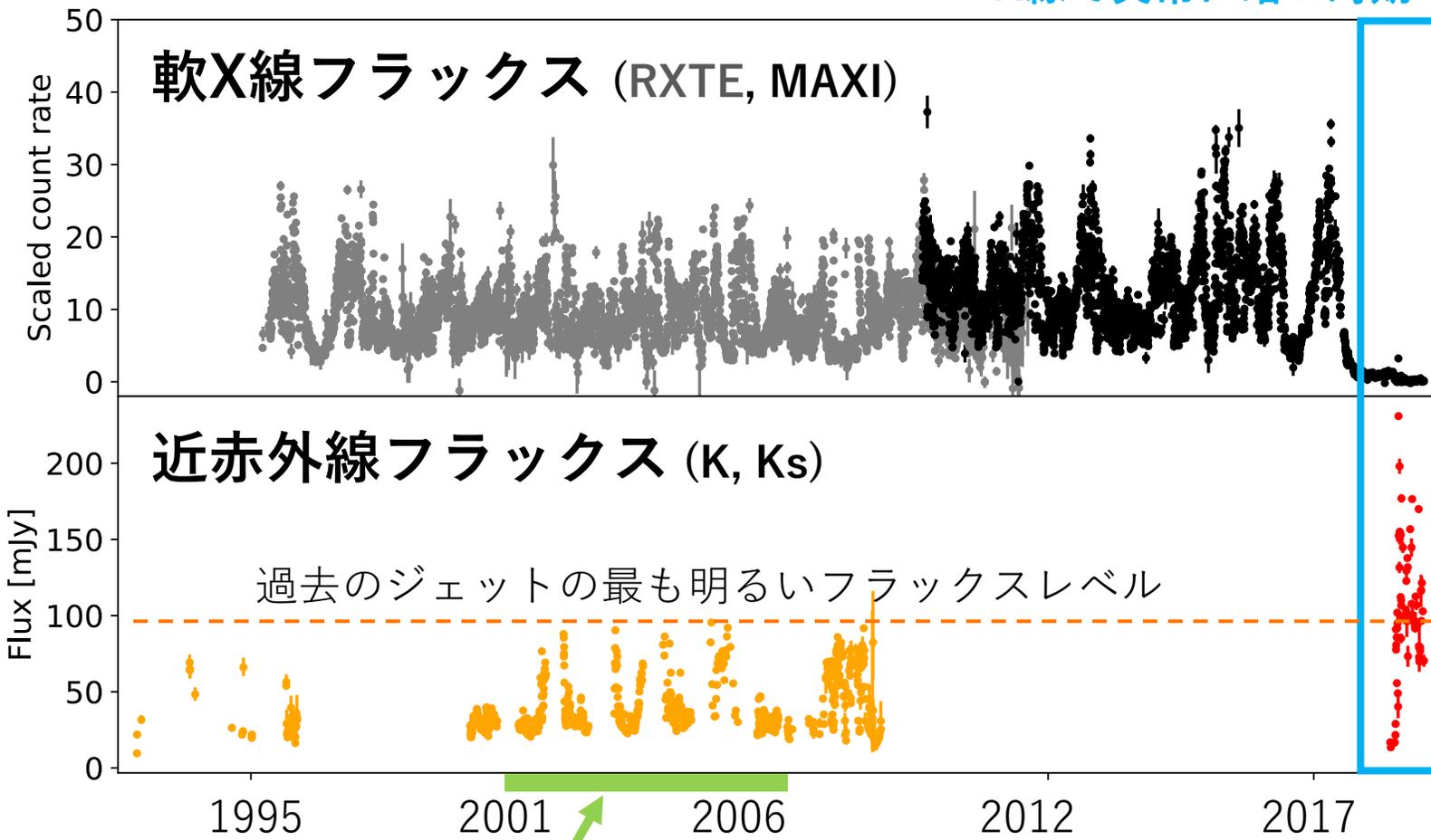
ジェット以外の寄与: 伴星 and/or 円盤

※ 電波, Millimeter, 近赤外線データは同時刻データではない

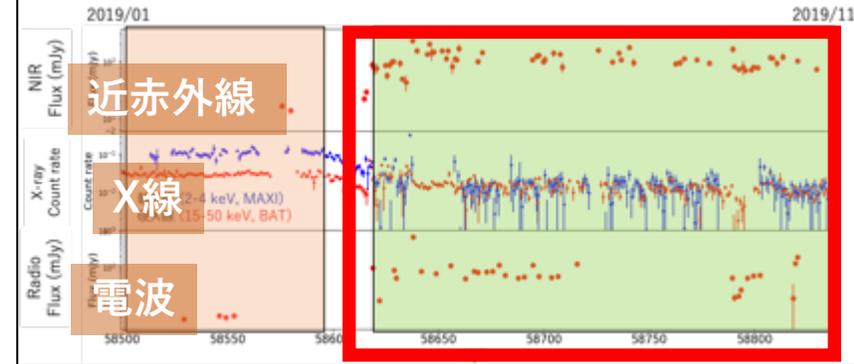
- 1: Koljonen & Hovatta 2021
- 2: Predehl & Schmitt 1995
- 3: Foight et al. 2016
- 4: Chapuis & Corbel 2004

# 議論 2 : 後半期間の近赤外線放射の起源

X線で異常に暗い時期



High fluxはジェット起源の可能性  
X線との相関調査 (Neil et al. 2007)



この時期の議論

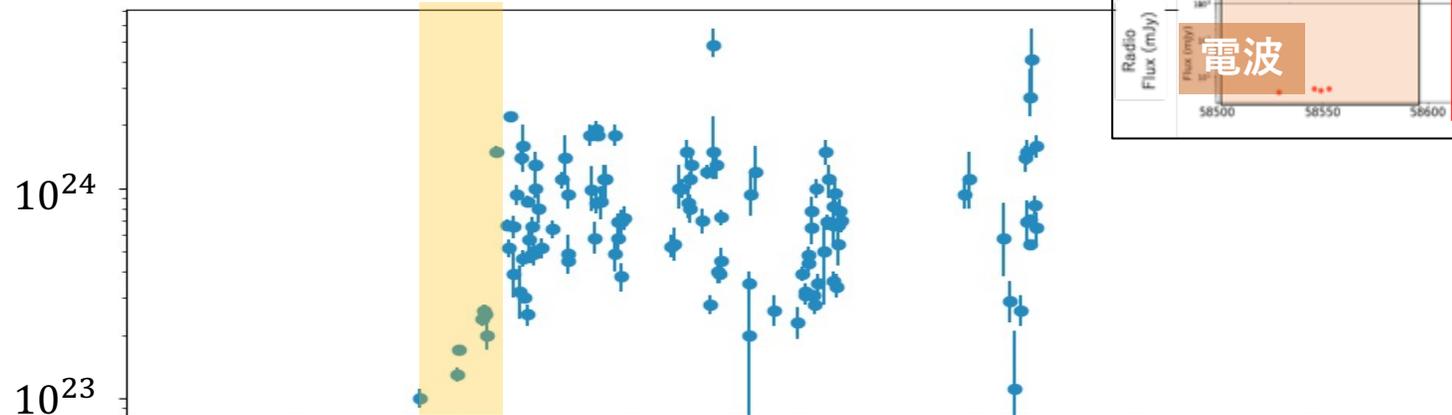
近赤外線と電波フラックスが正の相関  
→ ジェットが近赤外線の放射起源の1つ

ジェット以外の成分?

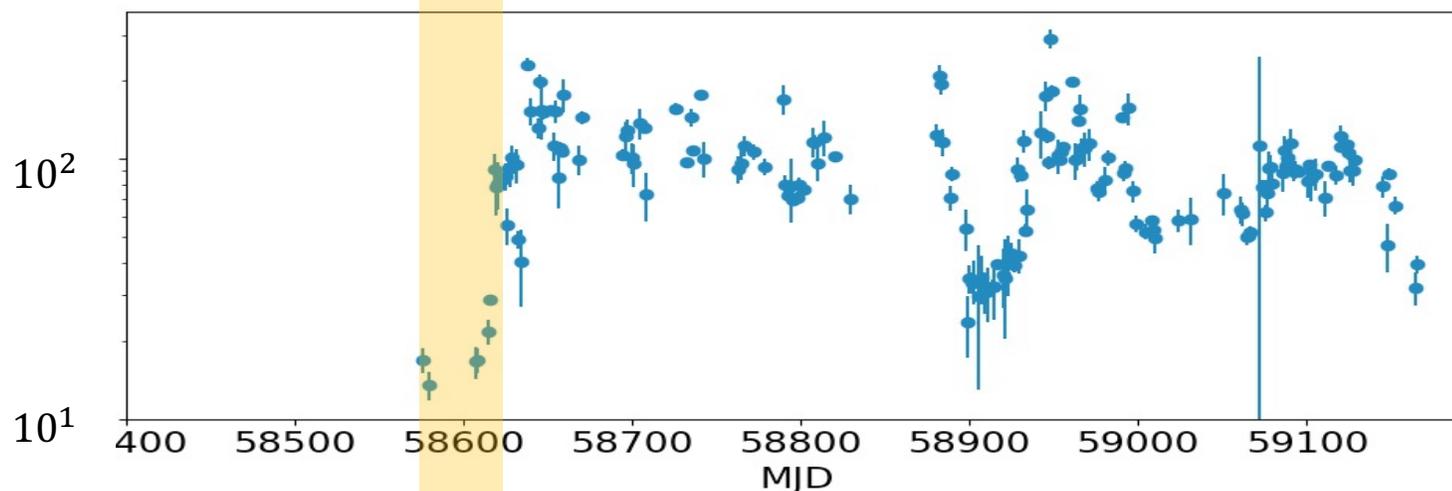
# 議論 2 : 後半期間の近赤外線放射の放射起源

NIR光度とX線遮蔽体の吸収量が正の相関

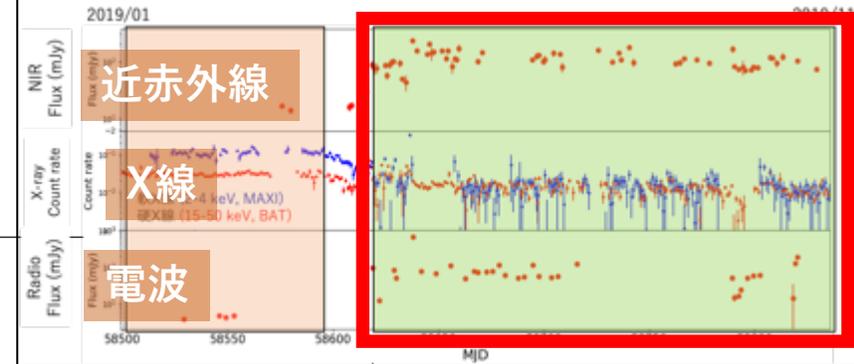
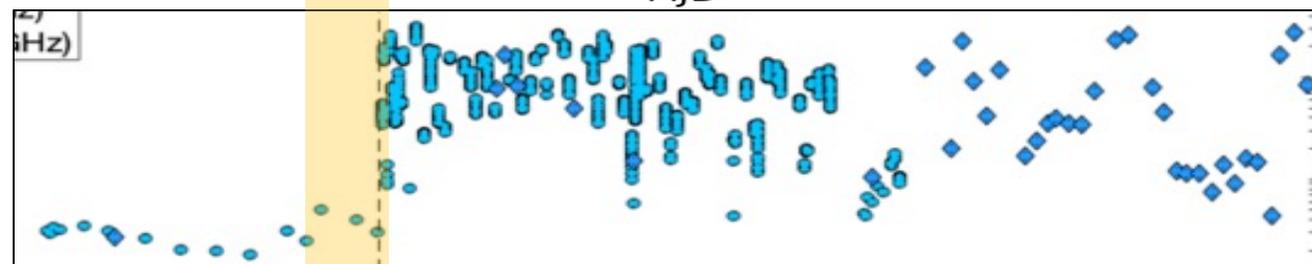
X線遮蔽体  
 $N_H$  ( $\text{cm}^{-2}$ )  
(Balakrishnan et al. 2021)



近赤外線  
フラックス (mJy)

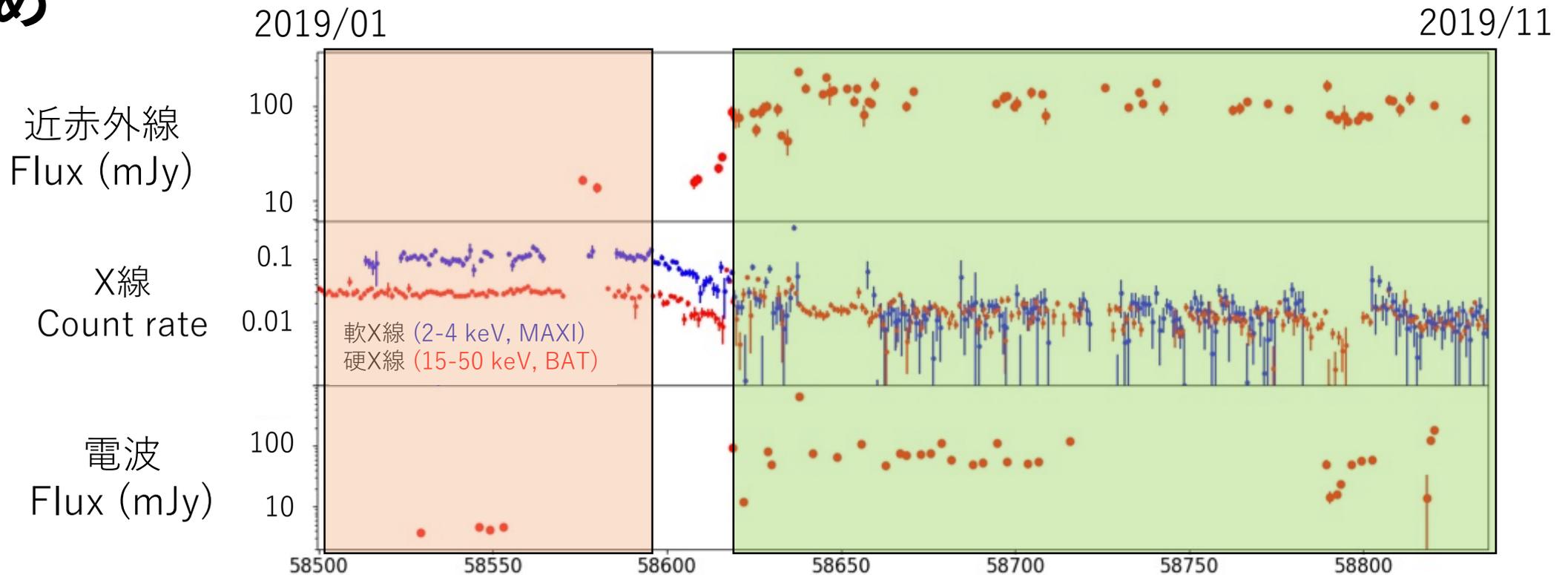


電波  
フラックス (mJy)  
(Motta et al. 2021)



この時期の議論

# まとめ

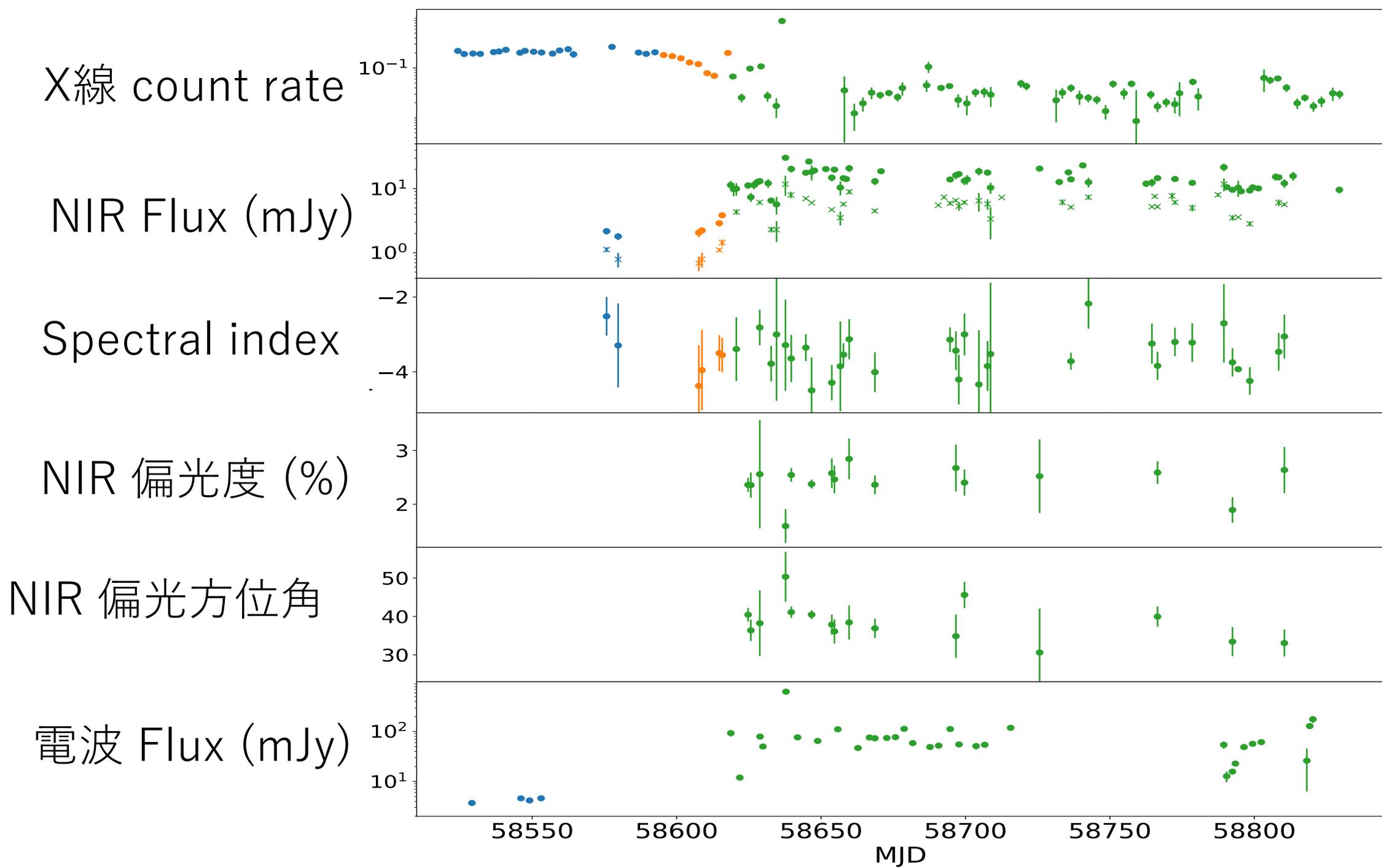


近赤外の放射起源： **伴星 and/or 円盤**                      **ジェット (+X線遮蔽体?)**

## 今後やること 1日以内の短時間変動に注目

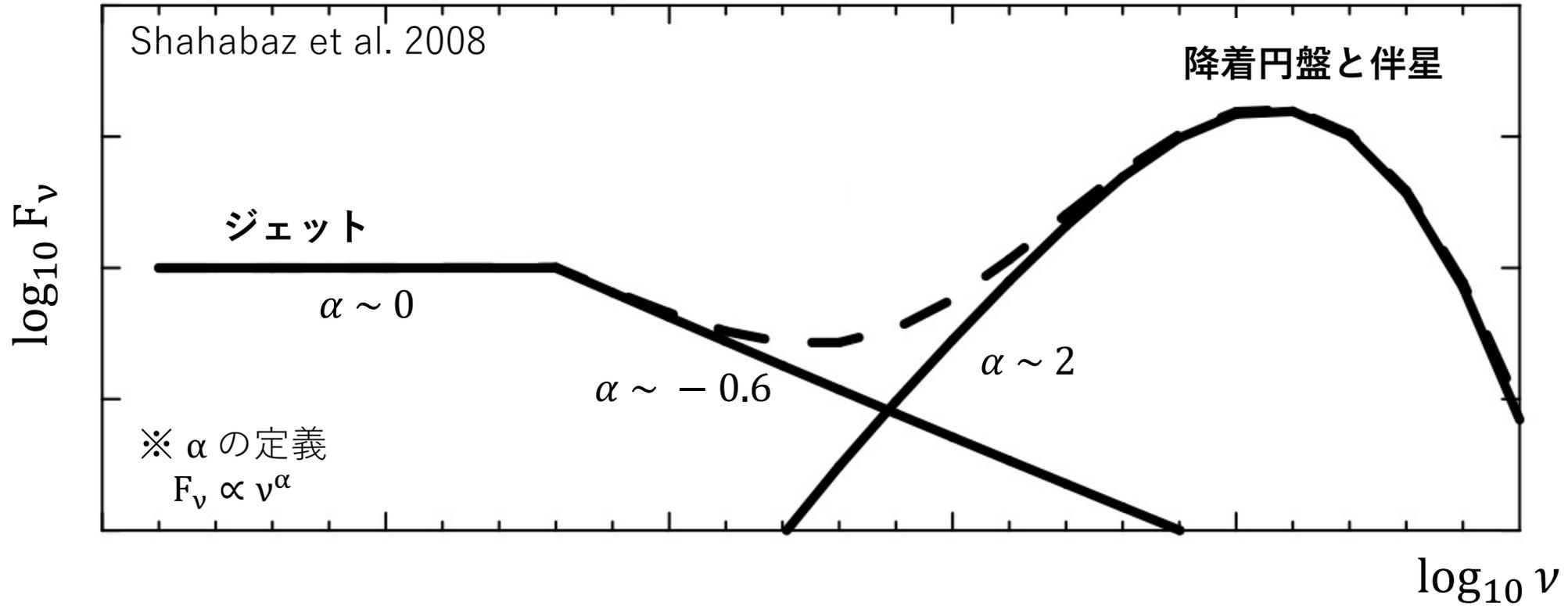
- ・ NIRフラックスがなぜ観測史上最も高いのか → 短時間変動から手がかりが得られるかも。
  - ・ 星間吸収の値について → 近赤外線3色の同時観測データから星間吸収と変動起源について分かる。
- 星間吸収はこれまで使われていた値とは異なった。これは最近の星間吸収の論文結果 (Foight et al. 2016) と一致。

予備スライド



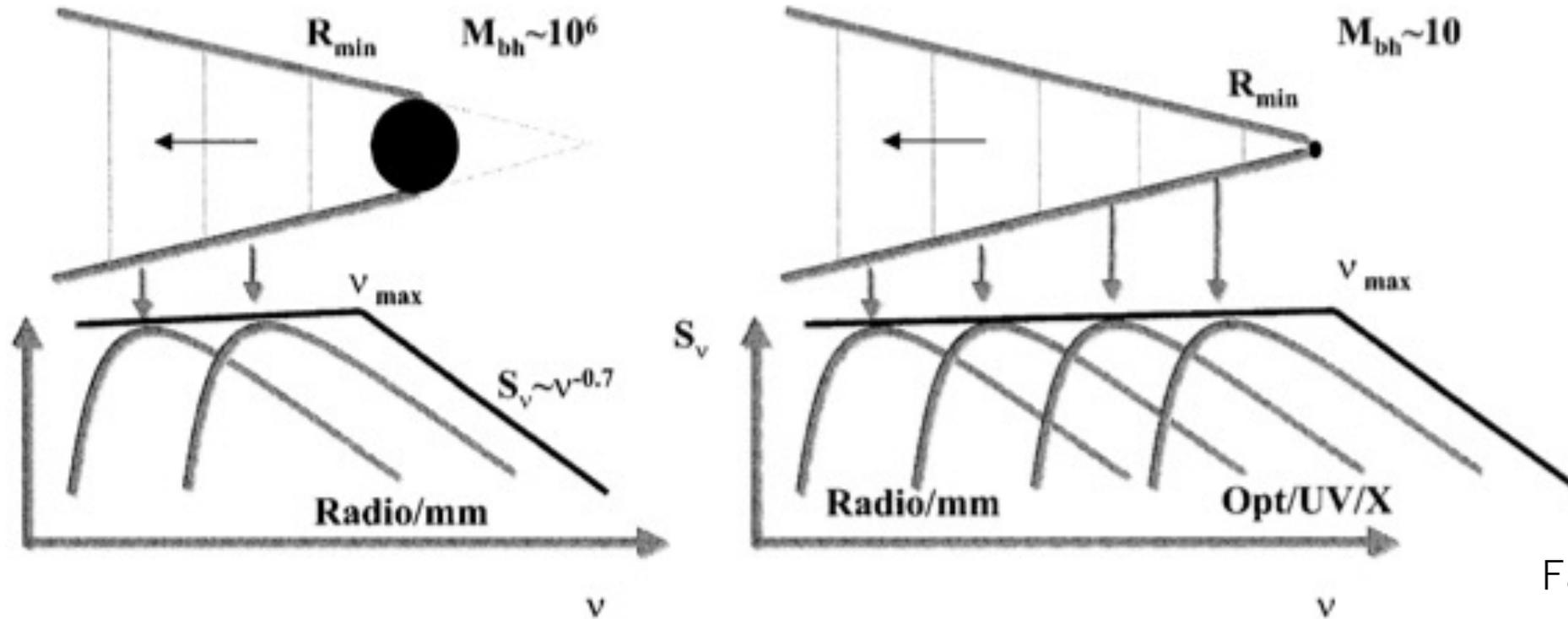
# 低質量X線連星の近赤外線スペクトル

※ 天体や状態によって見える放射の種類や強度が変わる.



近赤外線は複数の成分が見える周波数領域.

# AGNとX線連星のジェット (Conical jet)



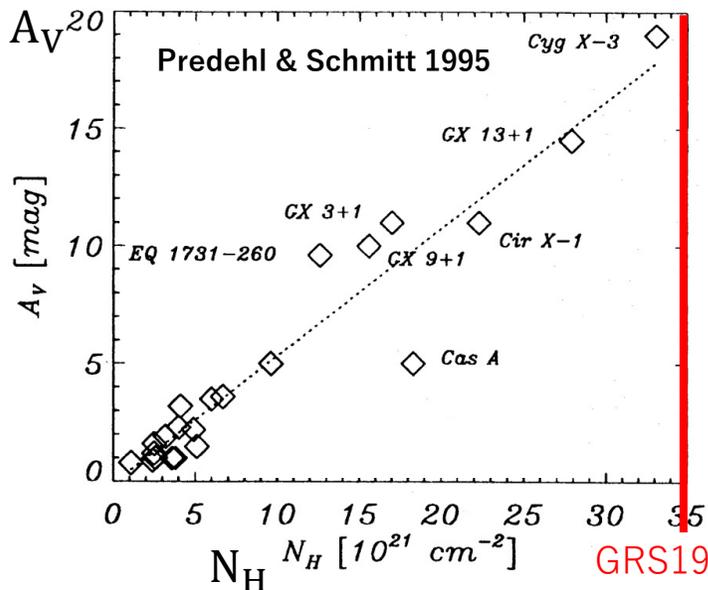
Falcke et al. 2002

flat or spectrum model:  
Conical jet  $\rightarrow v_{max} \propto 1/R_{min}$

# 星間減光 $A_V$ について

- 1: Predehl & Schmitt 1995
- 2: Foight et al. 2016
- 3: Chapuis & Corbel 2004

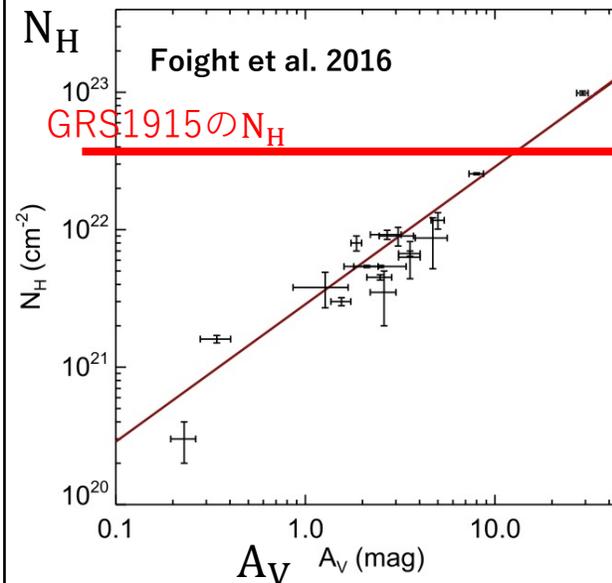
これまで使っていた $N_H - A_V$ 論文<sup>1</sup>



多くのX線連星と4つのSNRのROSATデータ  
 ・シンプルなモデルで $N_H$ 算出

**GRS1915の $A_V=19.6$**

最近の $N_H - A_V$ 論文<sup>2</sup>



SNRのChandraデータ  
 ・高空間分解能と高カウントレートで詳細な解析。系統誤差も見積もってる。  
 ・モデルも複数個使用して最適なものを使ってる。

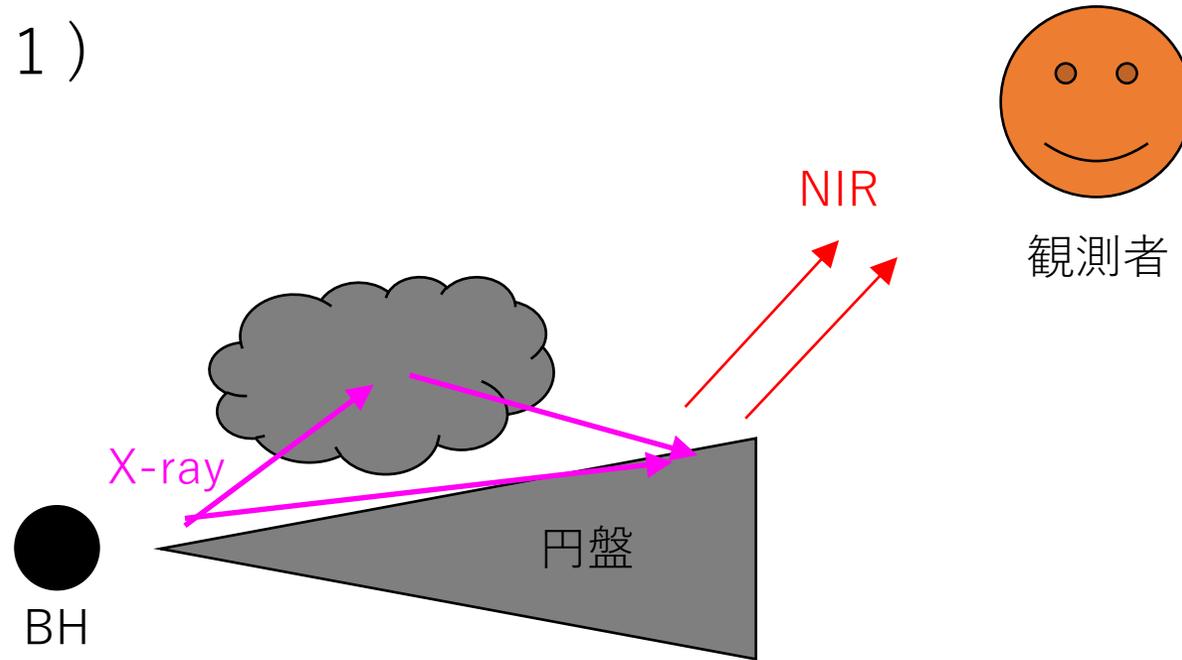
**GRS1915の $A_V=12.2$**

使う $N_H - A_V$ 論文によって減光量が大きく変わる

- ・濃い場所のデータが多少多いのは左、解析的に優れているのは右
- ・どちらの論文でもGRS1915の $N_H$ の値( $N_H \sim 3.5 \times 10^{22}$  <sup>3</sup>)の所はほとんどデータない

# X線遮蔽体の直接的or間接的なNIR放射

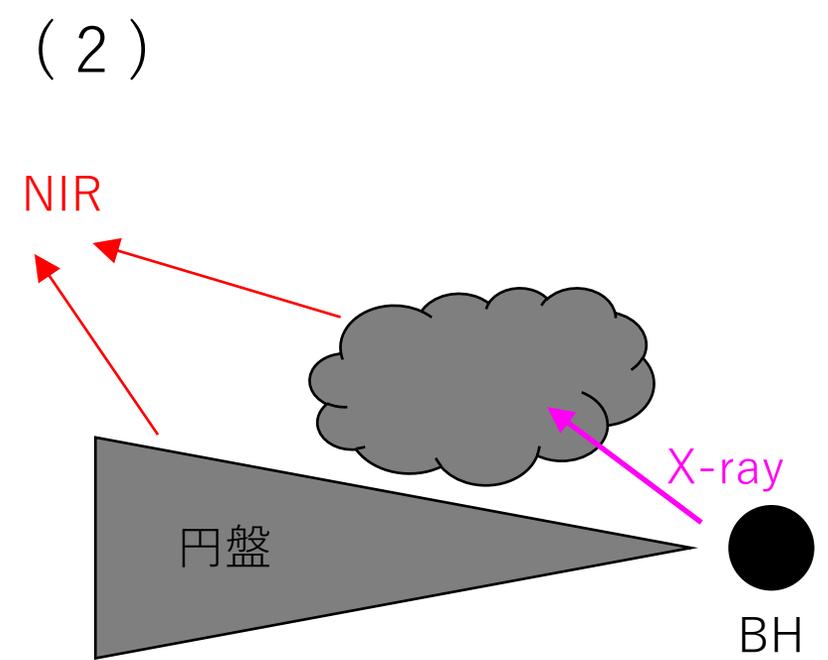
(1)



効率の良いreprocessingで円盤外縁の温度上昇  
→ NIR増光

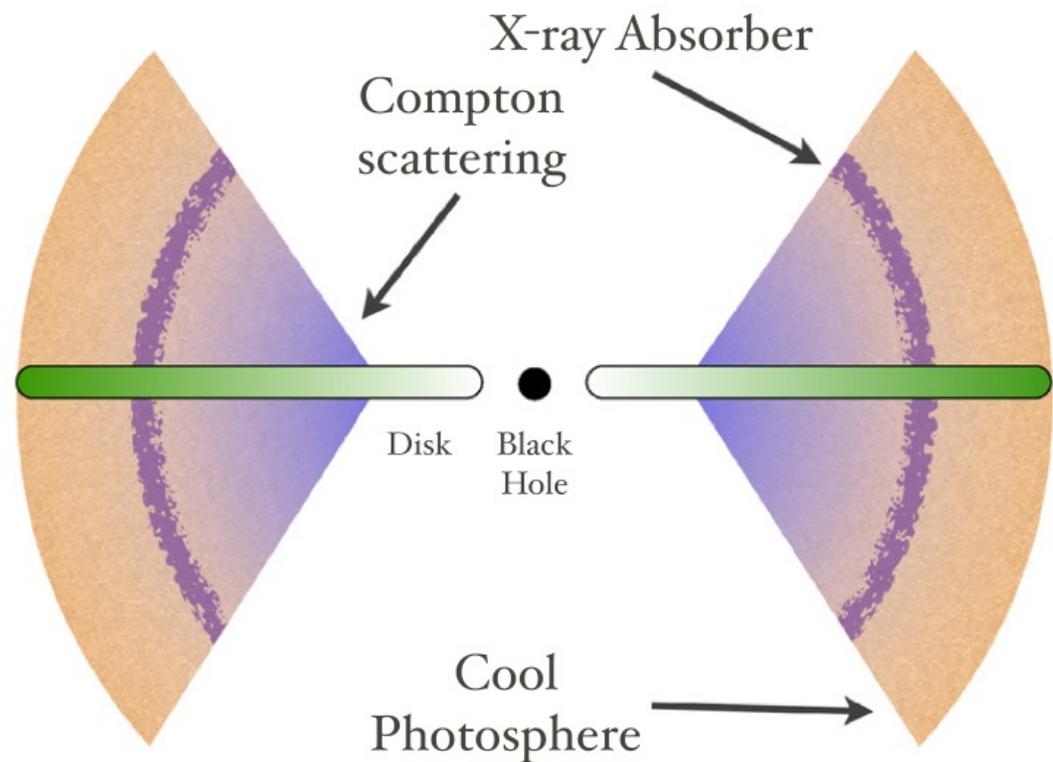
Shidatsu et al. 2016

(2)

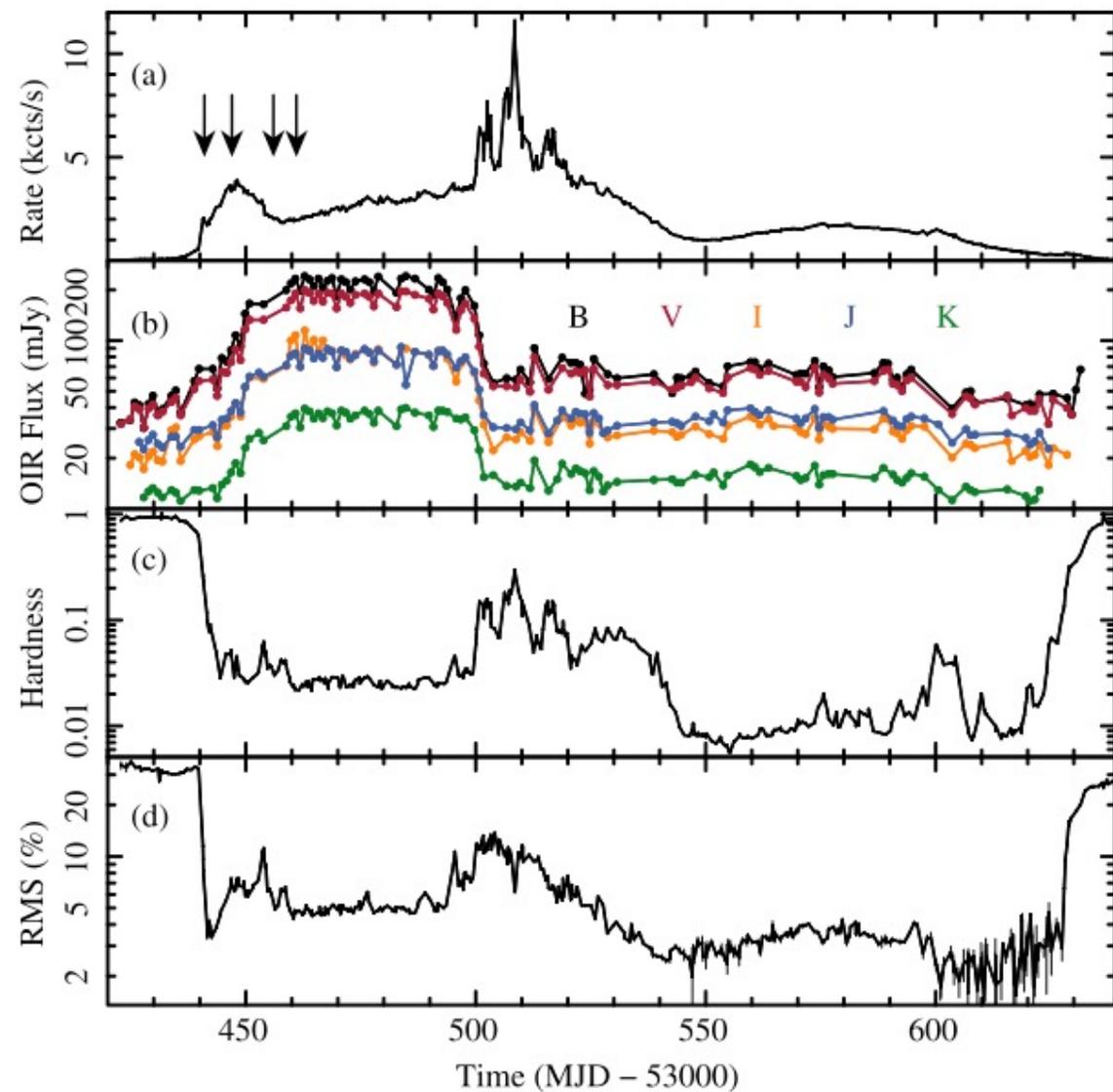


NIRの光球面からの黒体放射  
→ NIR増光

Neilsen et al. 2016



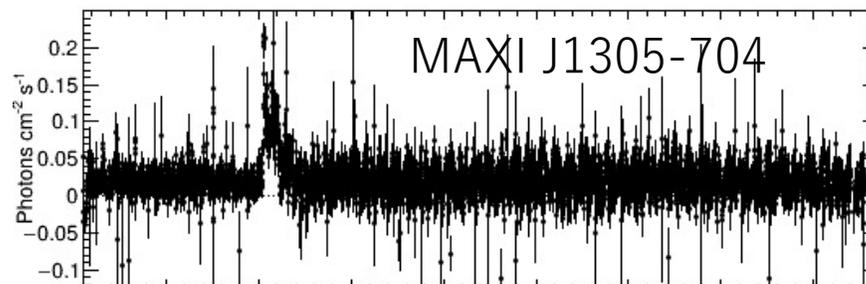
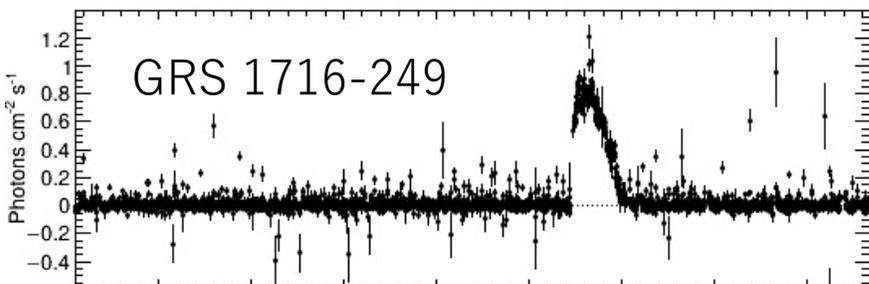
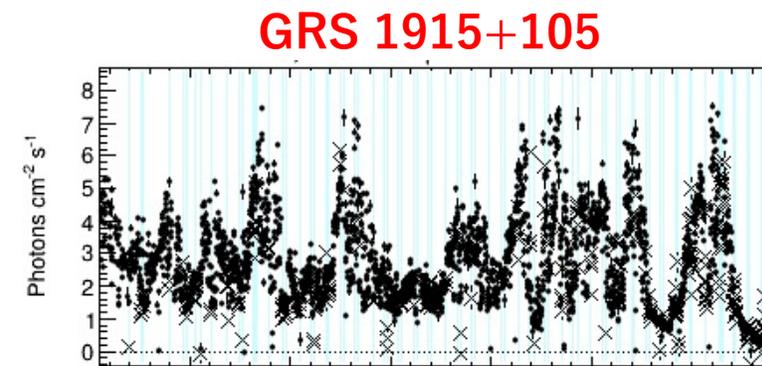
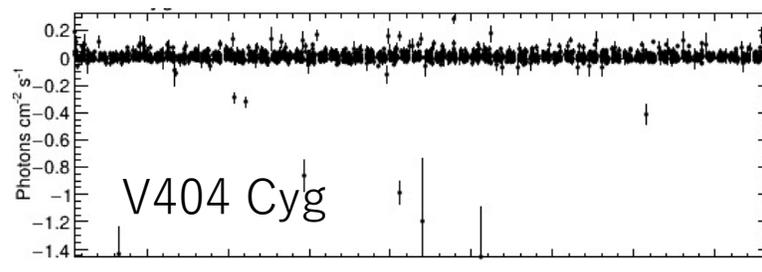
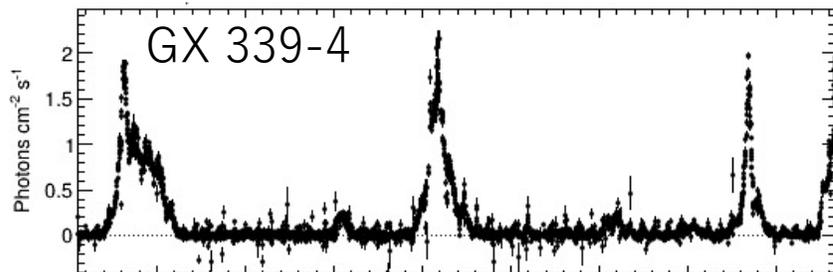
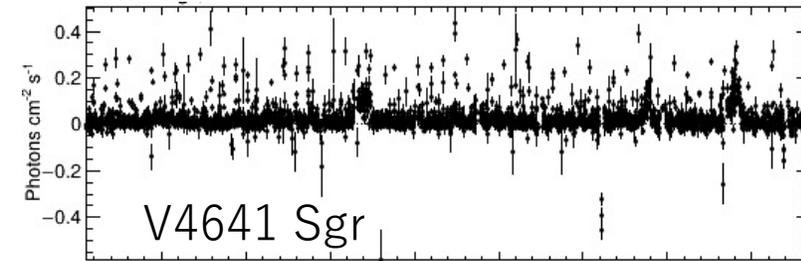
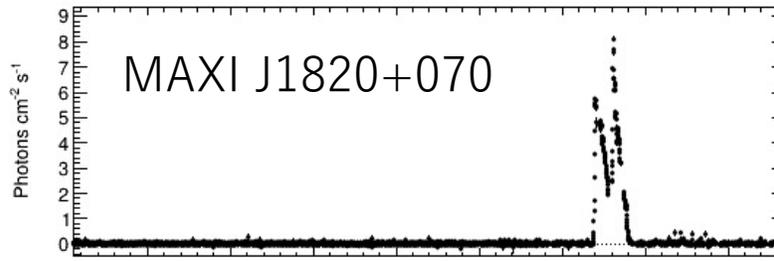
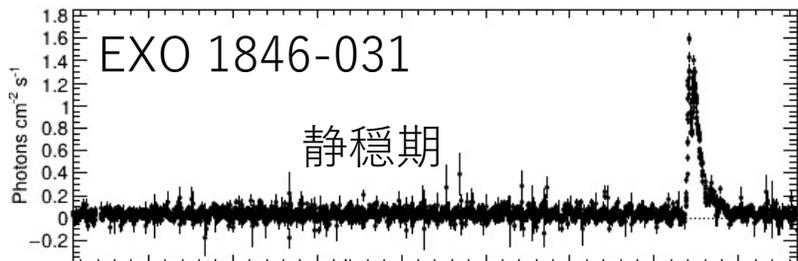
**Figure 5.** Cartoon of the geometry during the hypersoft state of GRO J1655–40. The hot, dense interior of the wind produces Compton scattered emission that falls off rapidly with distance from the black hole. The X-ray absorbing portion of the wind lies in a narrow region in ionization and physical space exterior to the majority of the Compton scattered emission. The cooler outer photosphere emits blackbody radiation in the OIR. See text for details.



# 色々な低質量X線連星のX線ライトカーブ

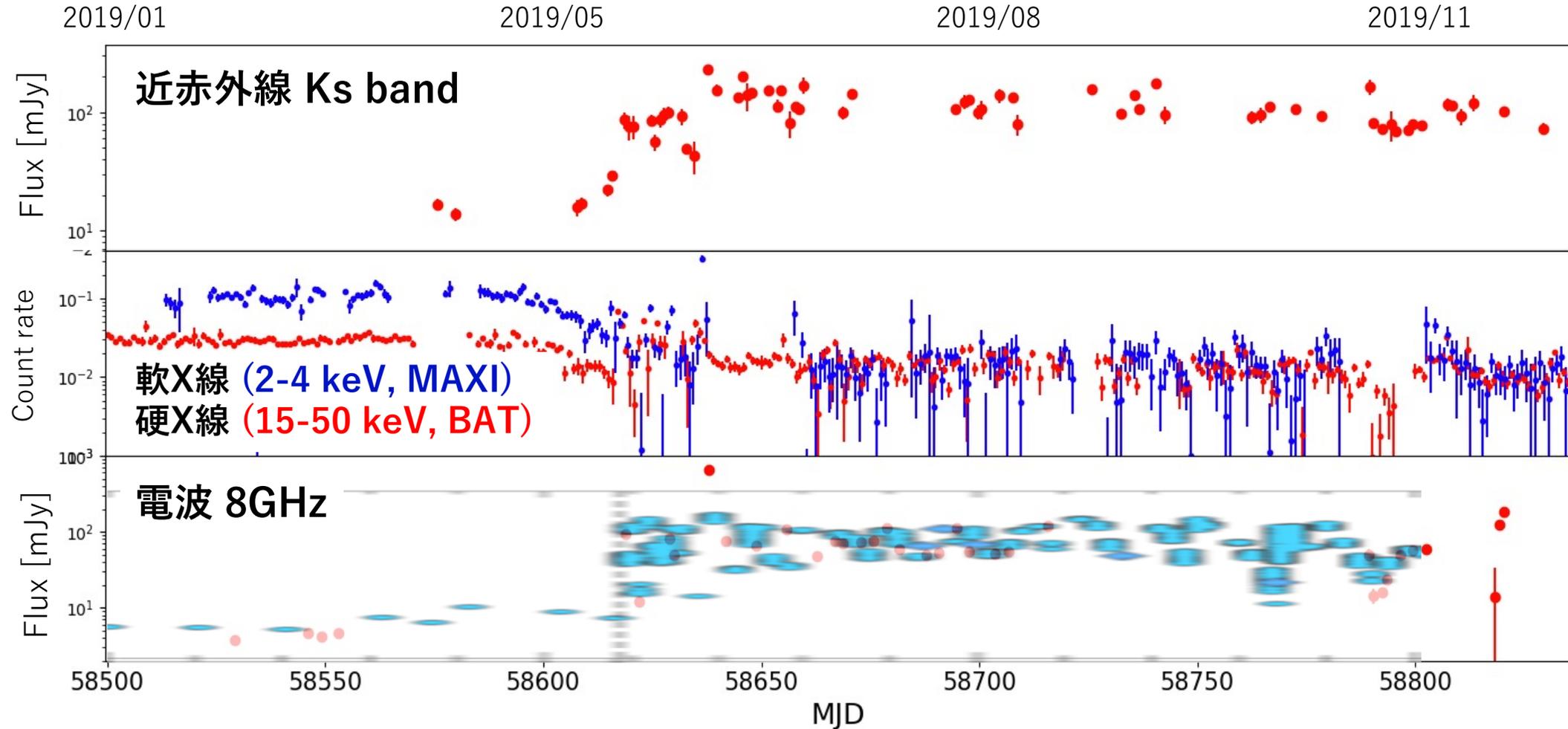
横軸は約10年間

アウトバースト



ライトカーブはMAXIデータのもの  
<http://maxi.riken.jp/top/lc.html>

# 多波長ライトカーブ



Motta et al. 2021の  
電波データ追加

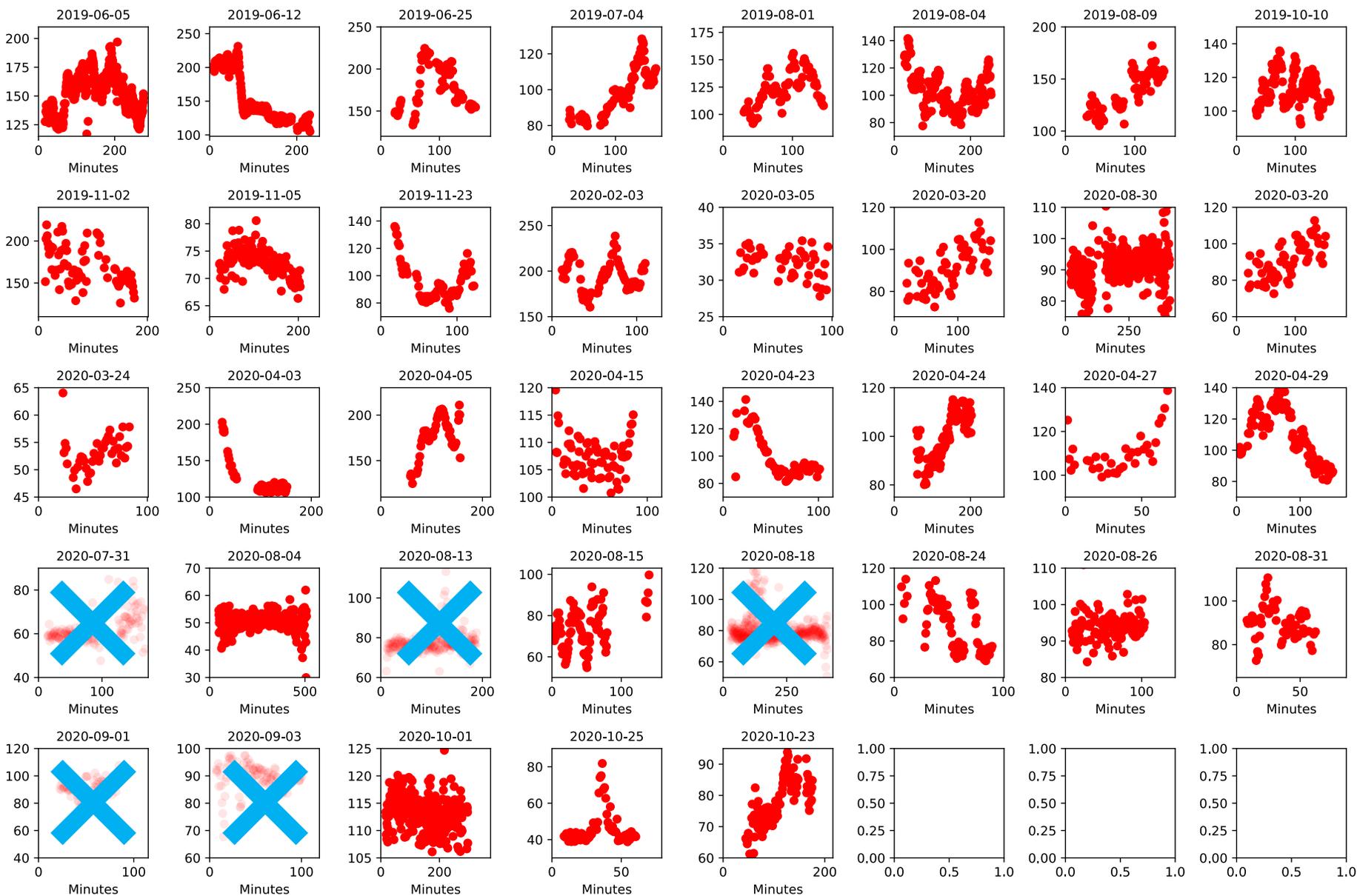
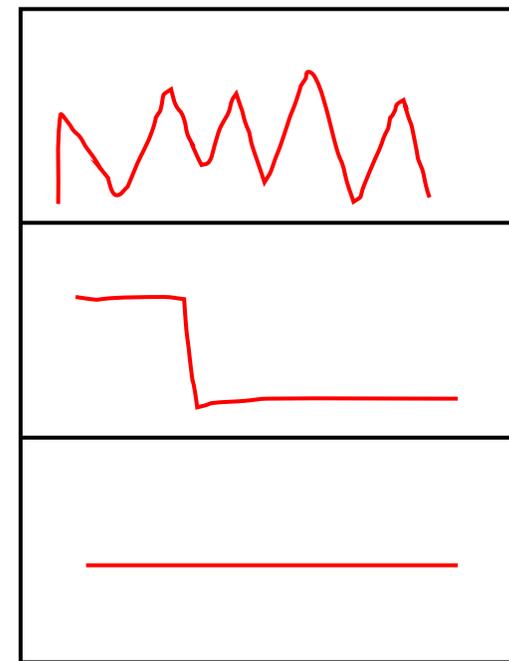
NIR/電波/X線のフラックス変動は完全に同期しているわけではない。

- ・ フラックス変動の開始日Ts: ~58587 (X線), ~58612 (NIR), ~58617 (電波)
- ・ 増光タイムスケールは  $\tau_X > \tau_{\text{NIR}} > \tau_{\text{Radio}}$ .

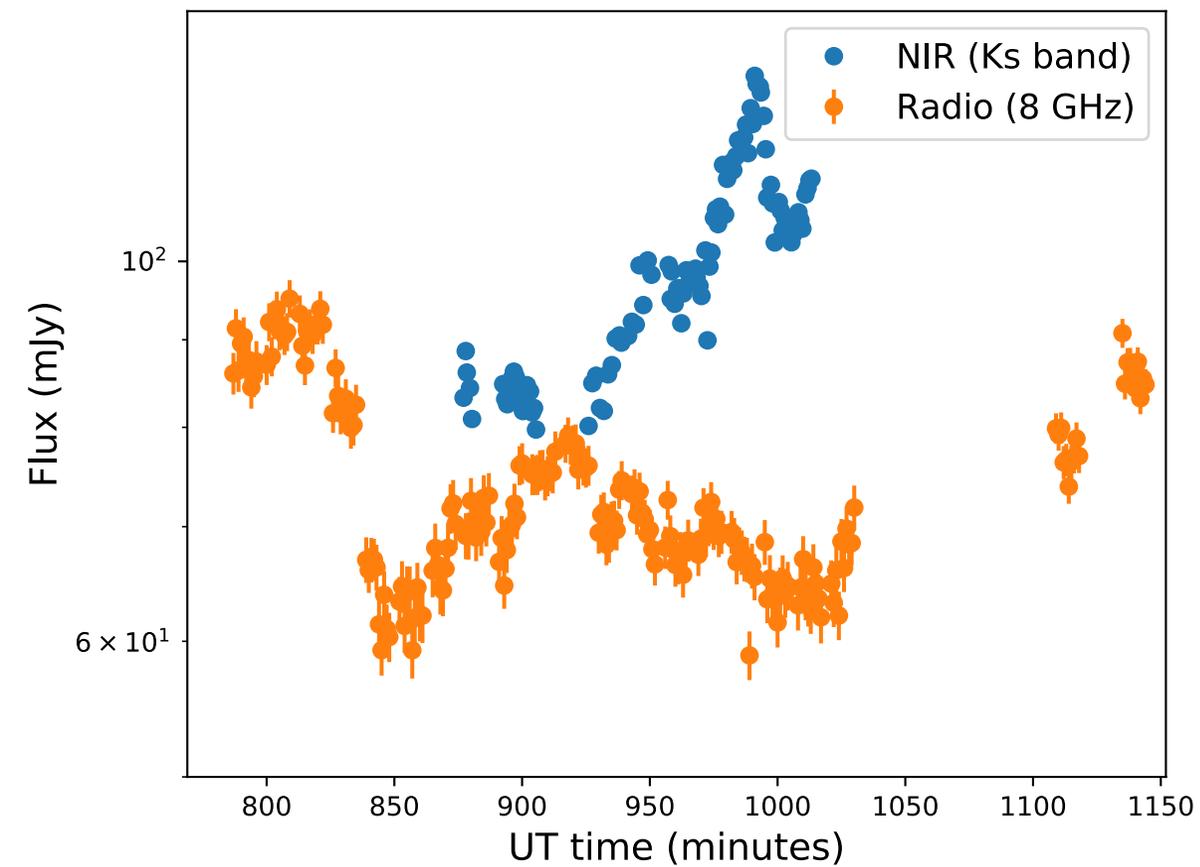
# GRS 1915+105の1日以内の変動について：長時間観測の結果

- ・ NIRの変動データは1色のみ
- ・ 電波との同時観測は数日
- ・ はっきりと電波と相関した変動は1日のみ

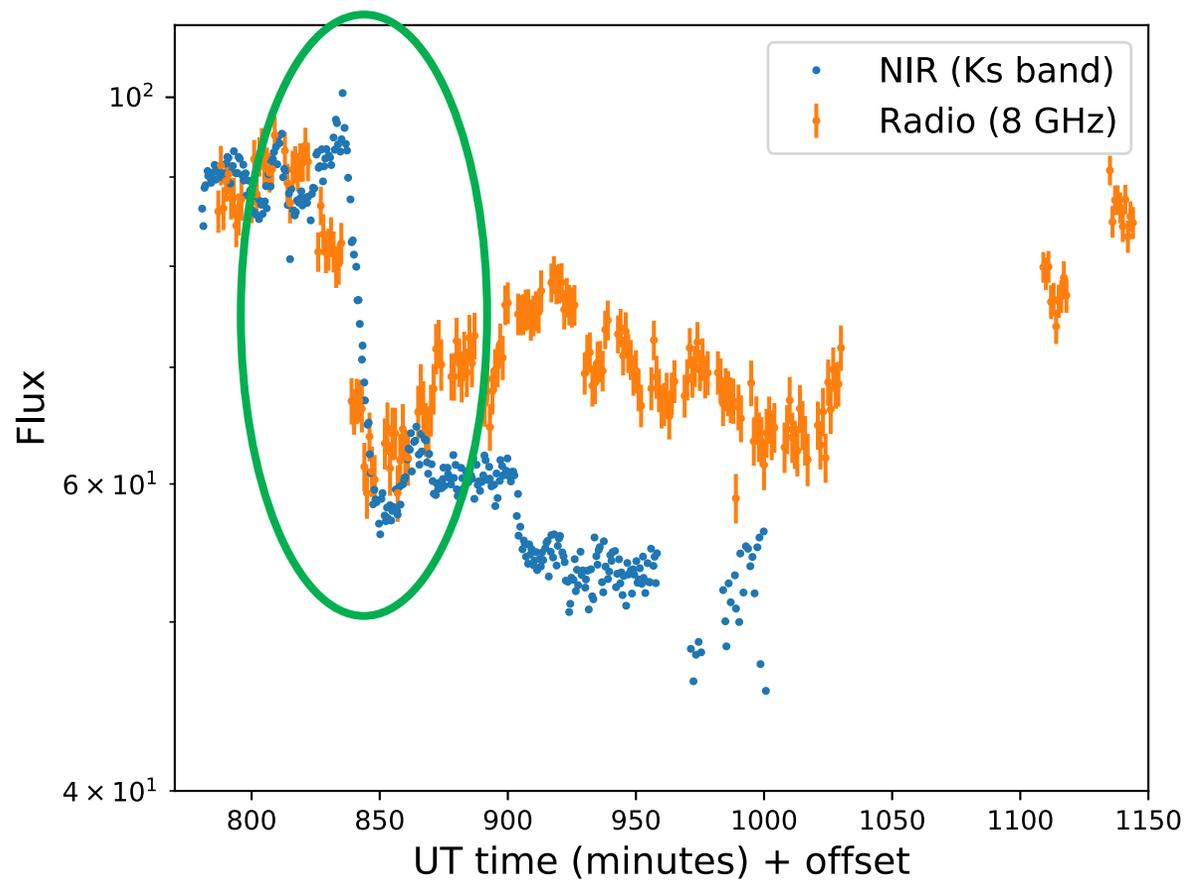
すごく大雑把に分類すると3パターン？



# GRS 1915+105の1日以内の変動について：電波とNIR



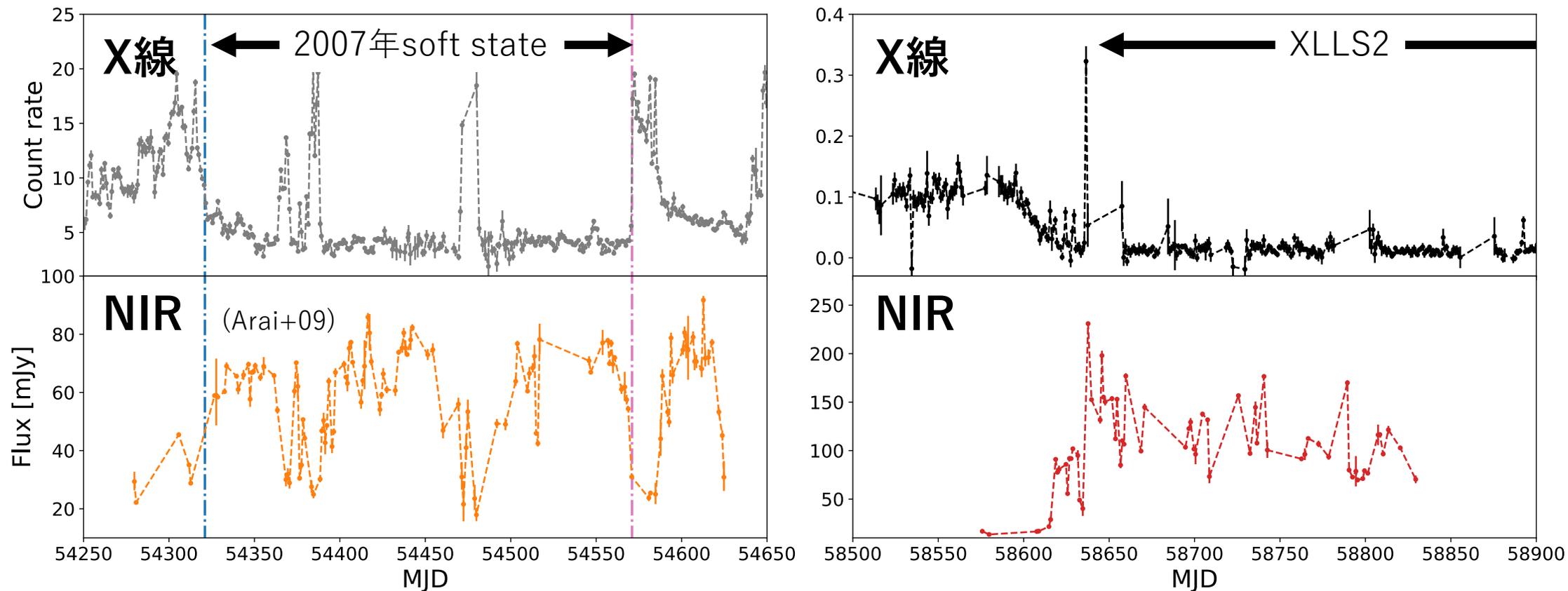
同時観測でNIRと電波で反相関  
-> NIRもジェット放射で、time delayがある？



別日のNIRと電波で似た特徴的な変動パターン

# 2007年のsoft stateとXLLS2の比較

GRS 1915+105の2007年のsoft stateでもNIR/X線で反相関のイベント発生



## 2つのstateの共通点

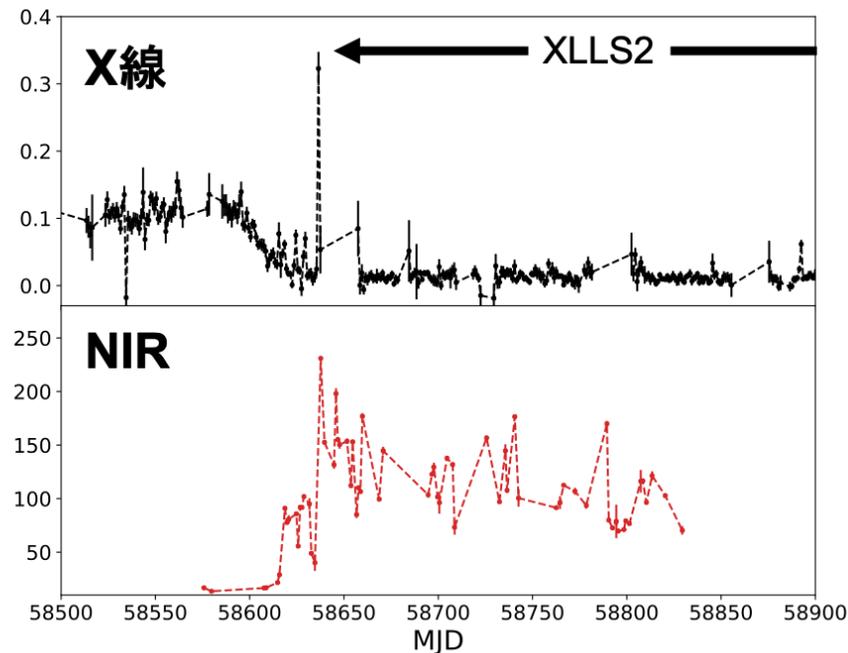
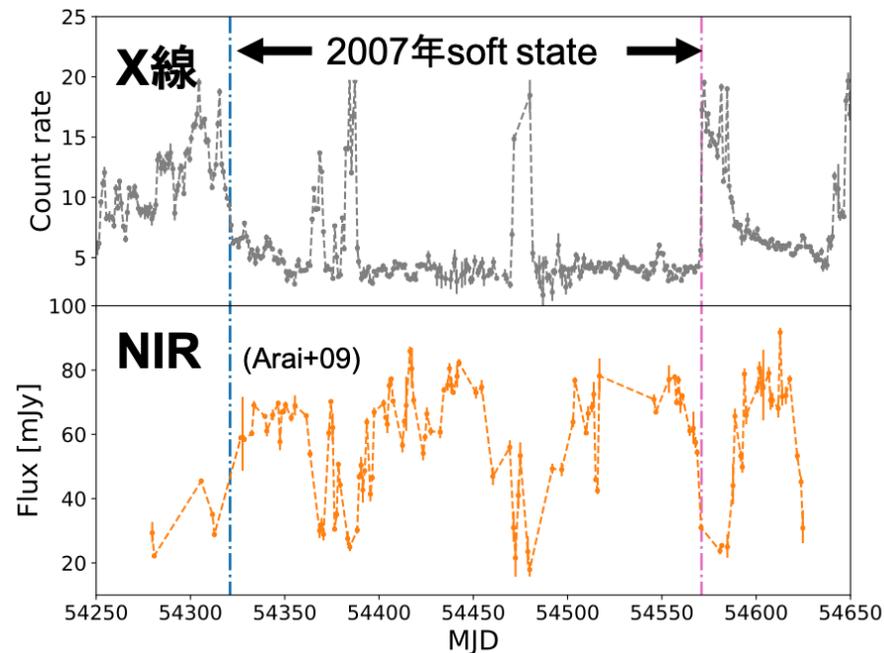
- ・ 遷移する際にNIR/X線で反相関のイベント発生
- ・ 長い期間 high NIR flux, low X-ray flux を維持
- ・ X線スペクトルから光学的に厚いものの存在示唆
- ・ NIRのspectral index

# 2007年のsoft stateの放射起源

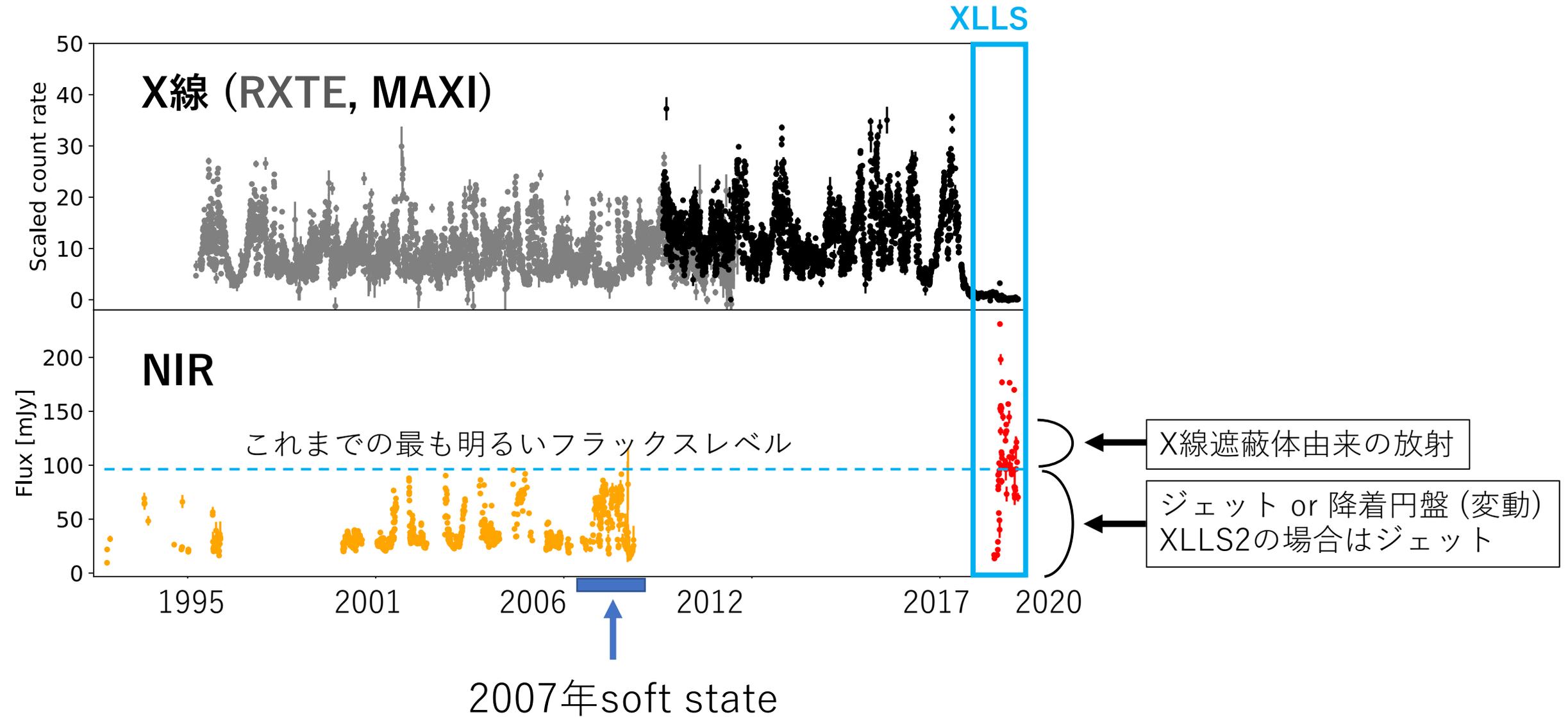
- XLLS2と類似点が多い. NIRで共通の放射起源を持っている可能性.
  - ただし2007年soft stateの電波フラックスは非常に低い.
- ▶ 2007年soft stateのNIRの放射起源はX線遮蔽体に由来する放射である可能性.

2つの状態で相違点もある.

1番目立つのは、2007年のsoft stateのX線フレア時にNIRが減光するイベント.

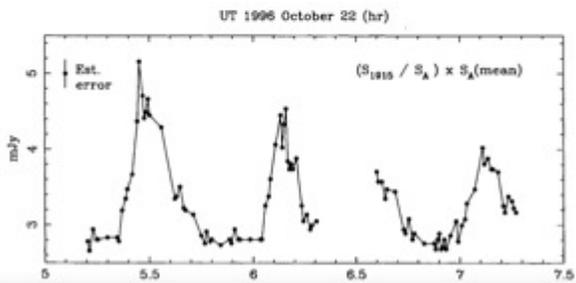


# NIRがXLLS2で観測史上最も明るい理由

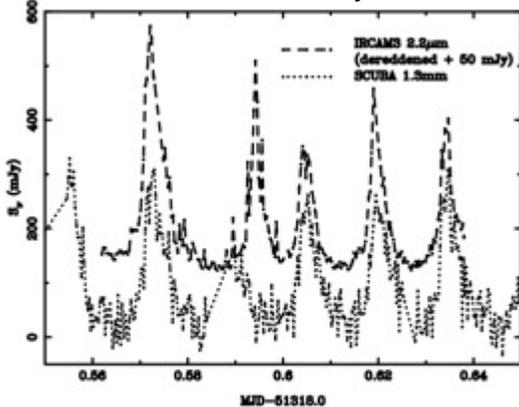


# (先行研究) NIRの1日以内の短期変動のまとめ

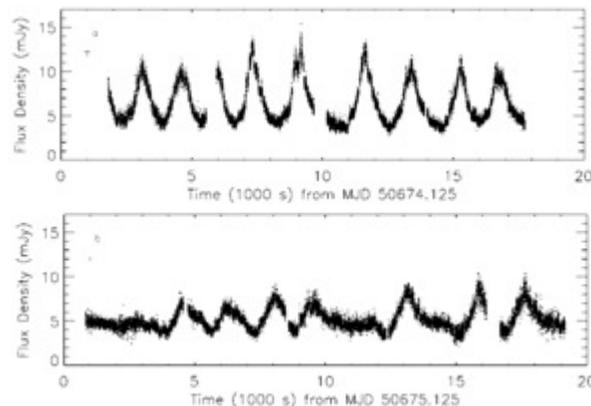
Fender et al. 1997



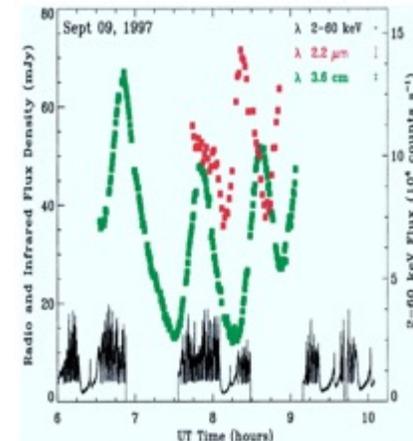
Fender & Pooley 2000



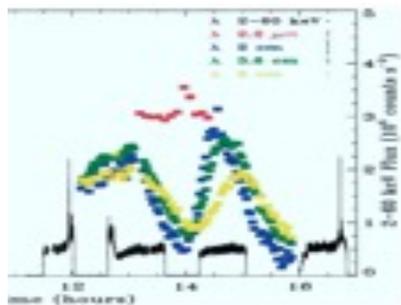
Eikenberry et al. 1998



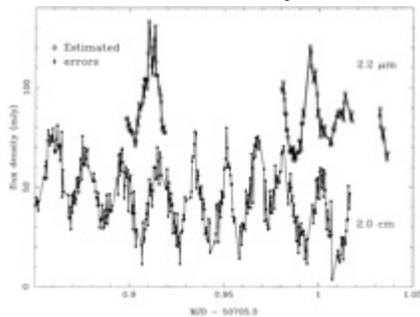
Mirabel et al. 1998



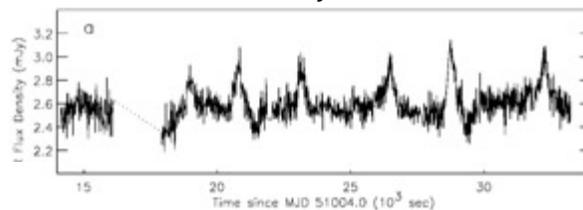
Mirabel et al. 1998



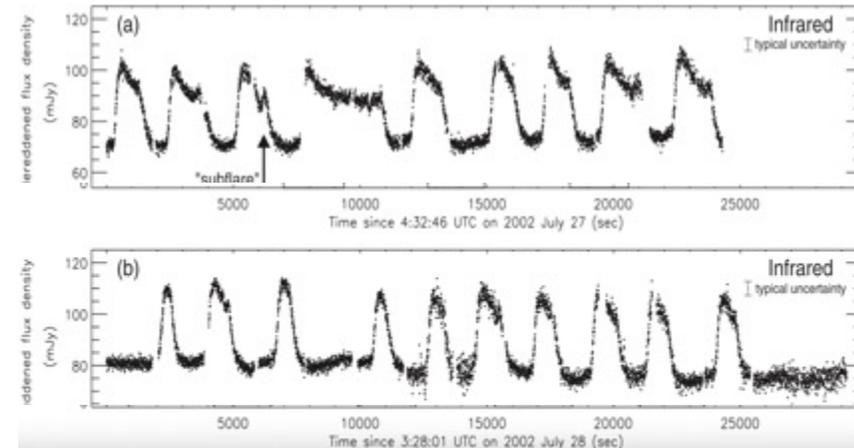
Fender & Pooley 1998



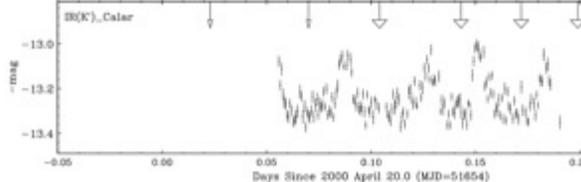
Eikenberry et al. 2000



Rothstein et al. 2005



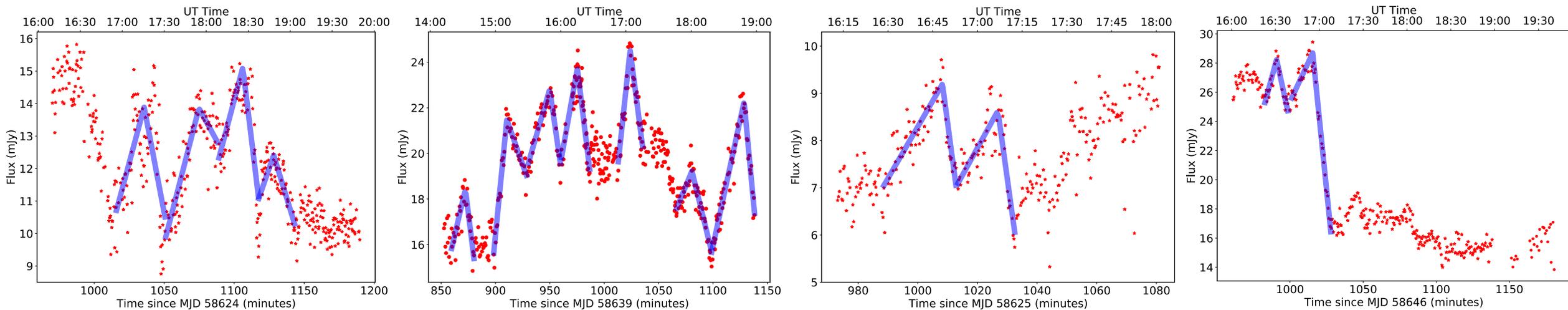
Ueda et al. 2002



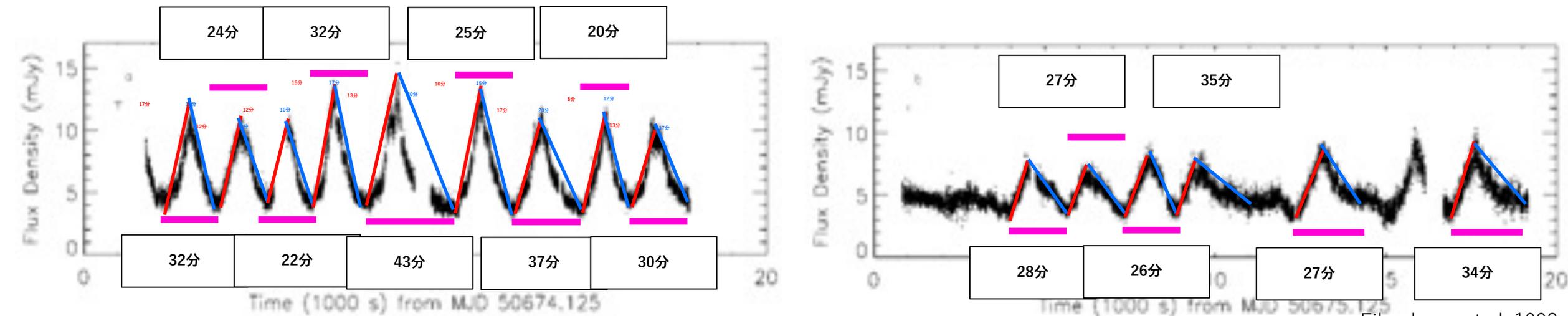
過去の論文では全て1日以内で変動している。  
電波やX線の情報からこれらの変動は全てジェット由来の変動だと考えられている。

# 短時間変動の特徴を抽出

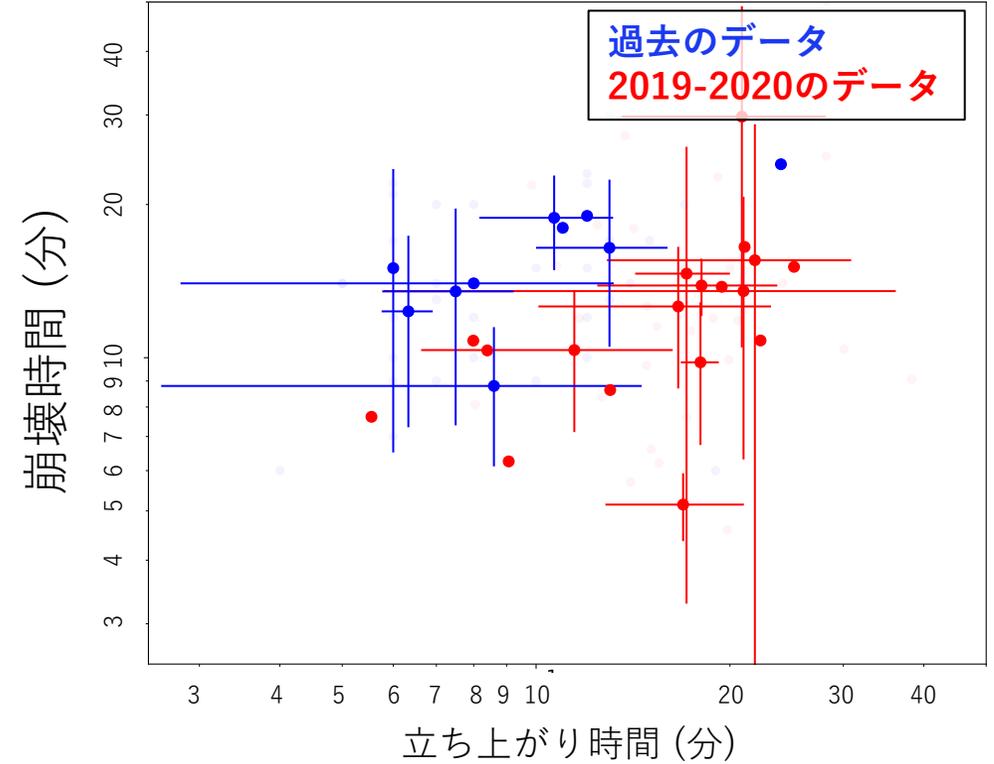
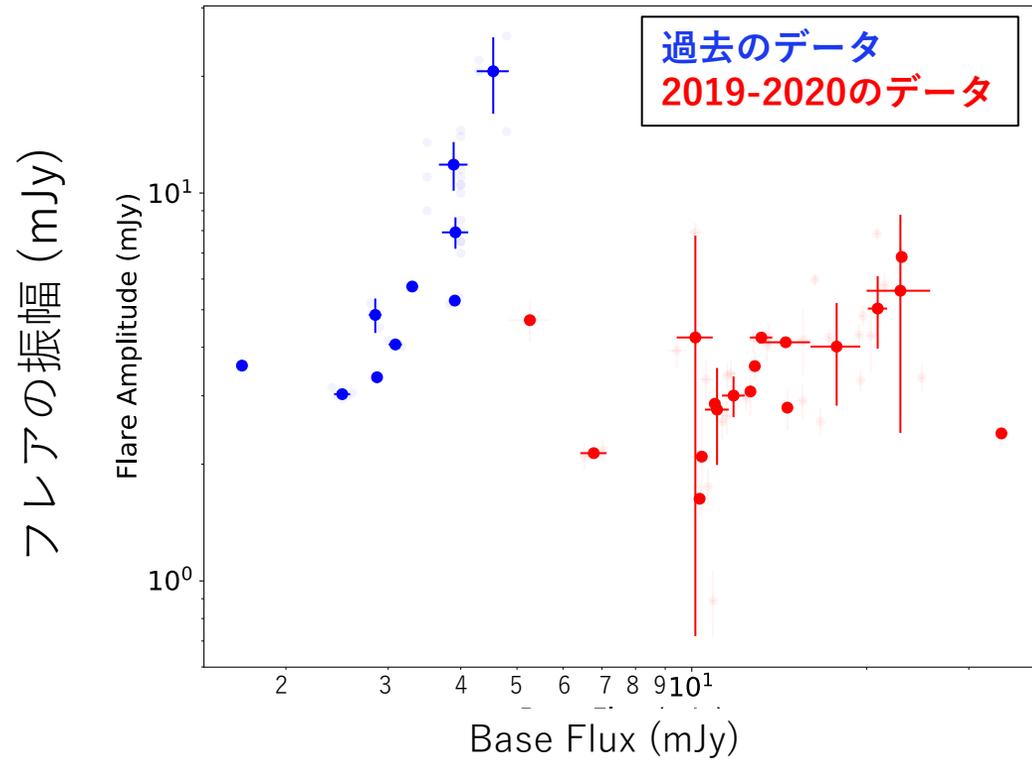
2019-2020の短時間変動を直線でフィットして特徴抽出



過去のデータの短時間変動を直線で目視で当てはめて特徴抽出



# 短時間変動の特徴を比較



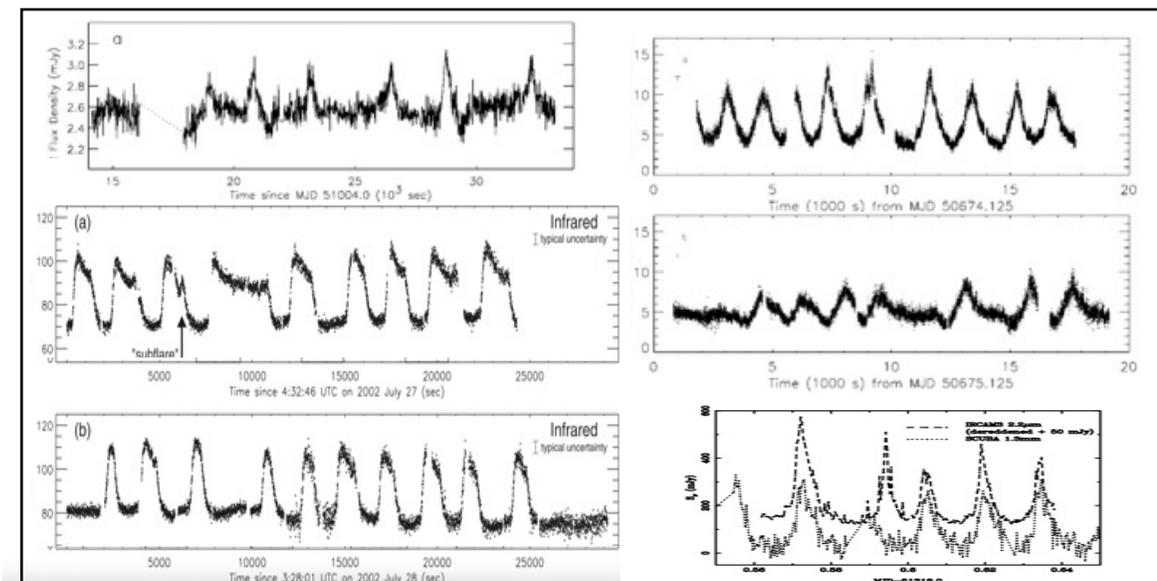
過去と比べて2019-2020年のデータはBase Fluxが明らかに高い。  
一方で、フレアの振幅や立ち上がり時間, 崩壊時間では明らかな違いは見られなかった。

短時間変動は変動成分と定常成分の2つに分かれていると考える。

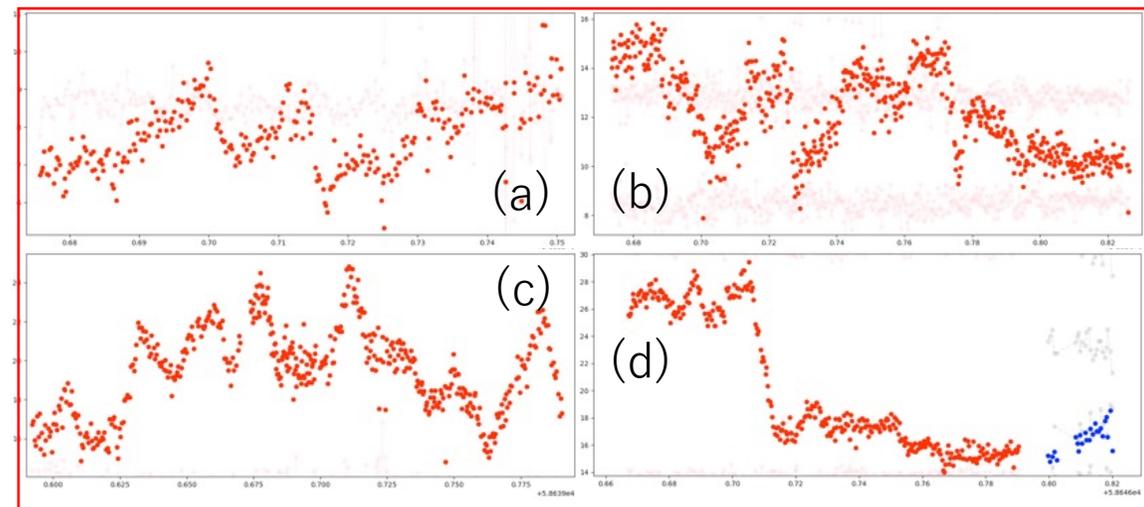
- ・ 変動成分の特徴が過去と今回で大きく変わらない：2019-2020の変動成分は従来通りジェット。  
NIR短時間変動が電波フラックスが高い時に起こる結果(4P前)とも無矛盾。
- ・ 定常成分(base flux)の寄与が過去よりも今回の方が強い：長期変動で増光したと考えられるX線遮蔽体の影響？

# なぜ2019-2020のbase fluxは過去よりも高かったのか①

過去の数時間の長時間観測たち



2019-2020の数時間の長時間観測たち



• Base lineについて

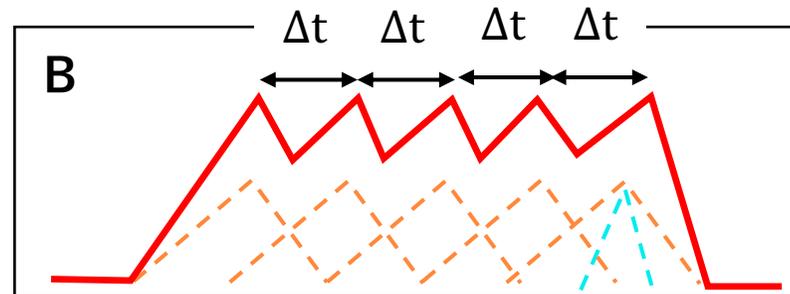
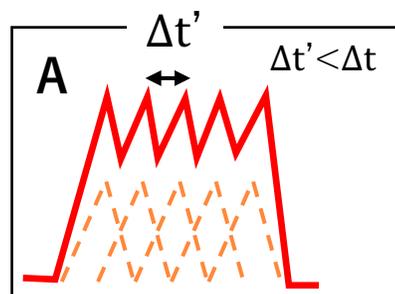
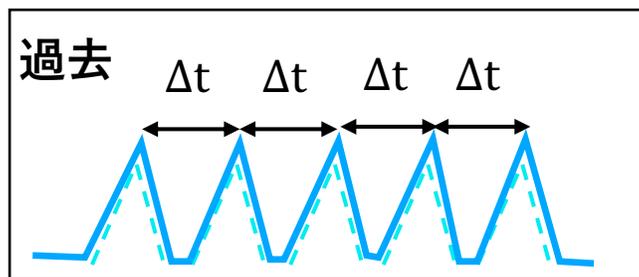
**過去** : はっきりとbase lineが見える. base lineは変動していない  
**2019-2020** : はっきりとしたbase line見えない日がある (a, b)  
 base lineはっきり見える日はbase lineが変動している (c,d)

• フレアについて

**過去** : 崩壊し終わってから次のフレアが立ち上がっている  
**2019-2020** : 崩壊し終わる前に次のフレア立ち上がり (a, b, c)

2019-2020の過去に比べてフレア周期が短いから？(フレアが頻出してる?) → フレアの周期的なものをチェック  
 もしくは 立ち上がり時間&崩壊時間が長いから? → フレア周期変わらなかったらこっちの可能性。 ※見た目のこれらの  
 タイムスケールは過去とあまり変わらないのはフレア周期が過去と今回で一緒だから?

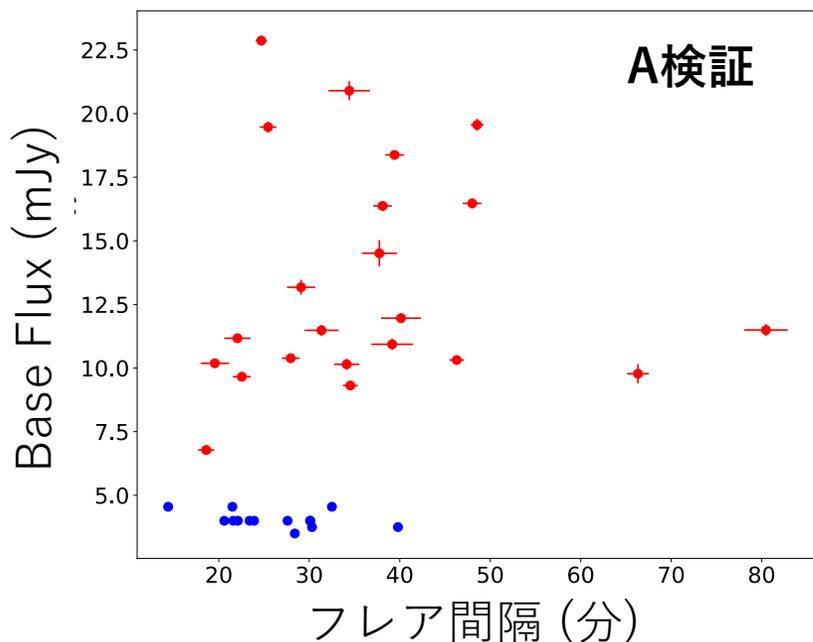
# なぜ2019-2020のbase fluxは過去よりも高かったのか②



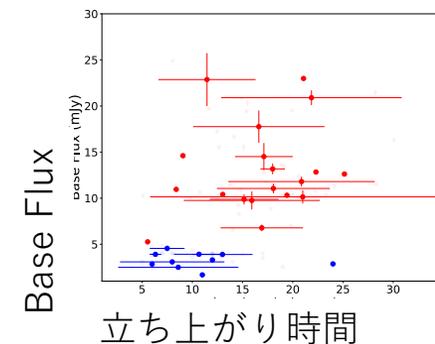
## 考えられる原因

**A.** 2019-2020の過去に比べてフレアのピークの時間間隔が短い？

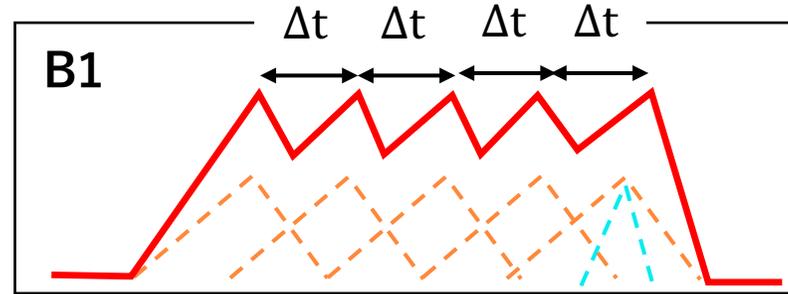
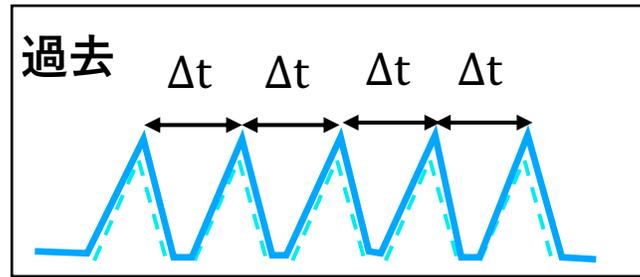
**B.** 立ち上がり時間&崩壊時間が長いから？ → フレア周期変わらなかったらこっちの可能性。 ※フレアのピーク間隔が同じだから見た目のタイムスケールは過去とあまり変わらないように見える



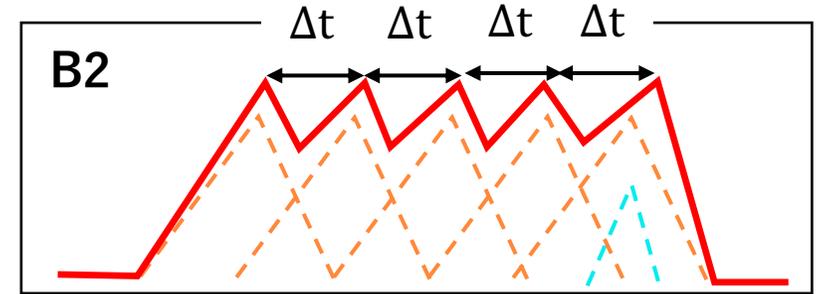
隣接するフレアのピークの時間間隔は過去よりも短いわけではない。つまりBase Fluxが高い原因はAではない。Bの可能性残る。フレアタイムスケール vs Base Flux図 (左) を見ると、過去よりも2019-2020の方がタイムスケール長い(が、手法による系統的違いかも)



# なぜ2019-2020のbase fluxは過去よりも高かったのか③

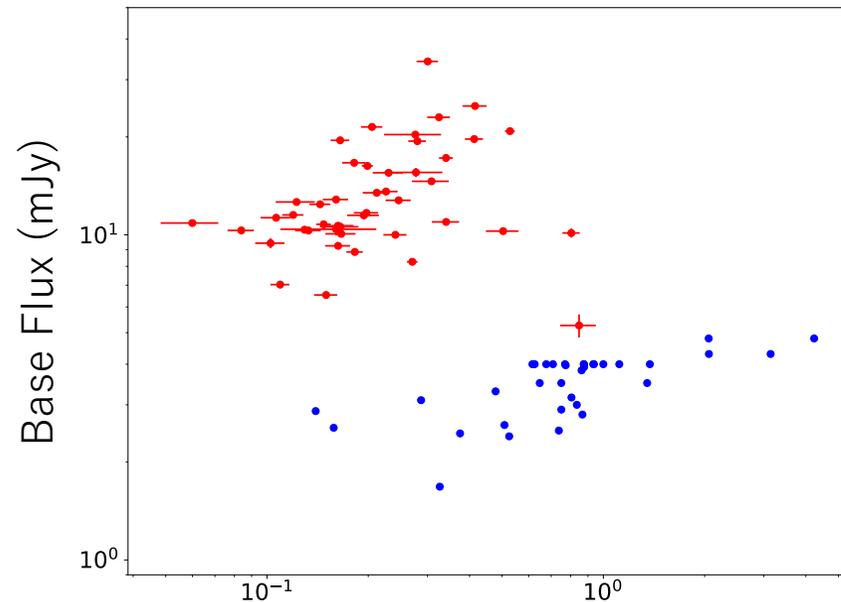


過去と比べて、1つ1つの山の裾が広い版



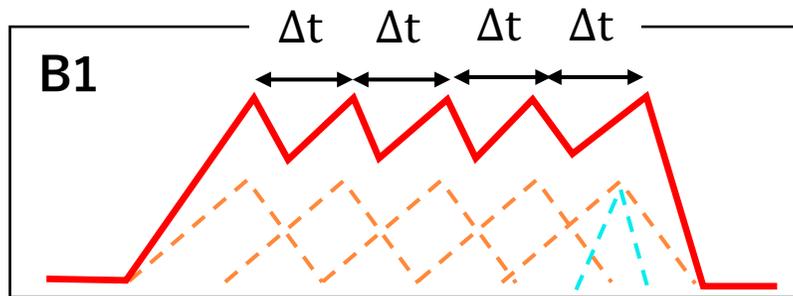
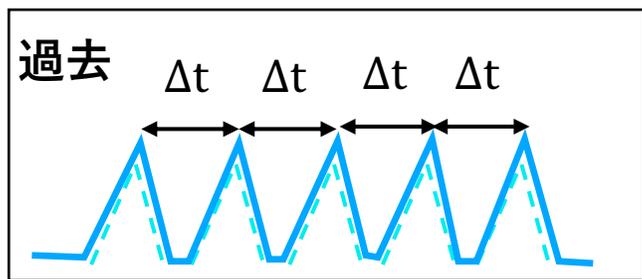
B1と比べて、1つ1つの山の高さが高い版

B1,B2のどちらでも過去の山々よりもフラックスの変化速度が小さいはず

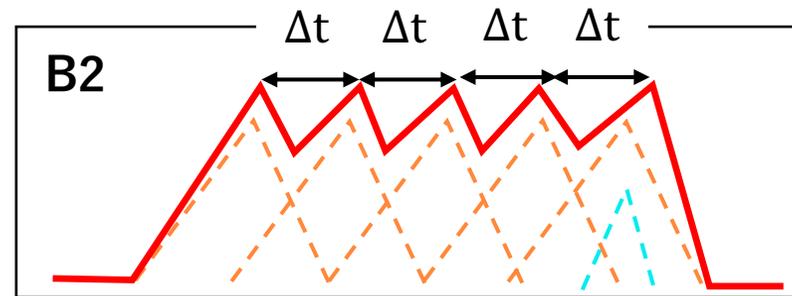


フラックスの立ち上がり速度 (mJy/minutes)

# なぜ2019-2020のbase fluxは過去よりも高かったのか③



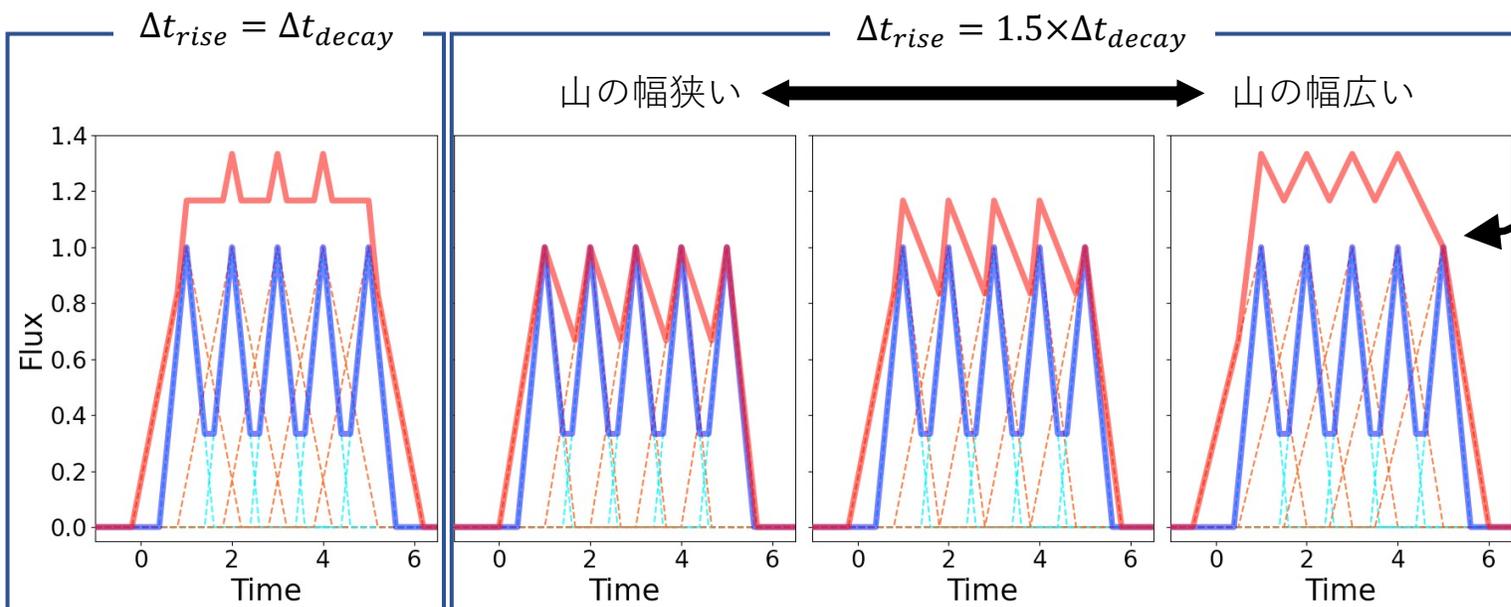
過去と比べて、1つ1つの山の裾が広い版



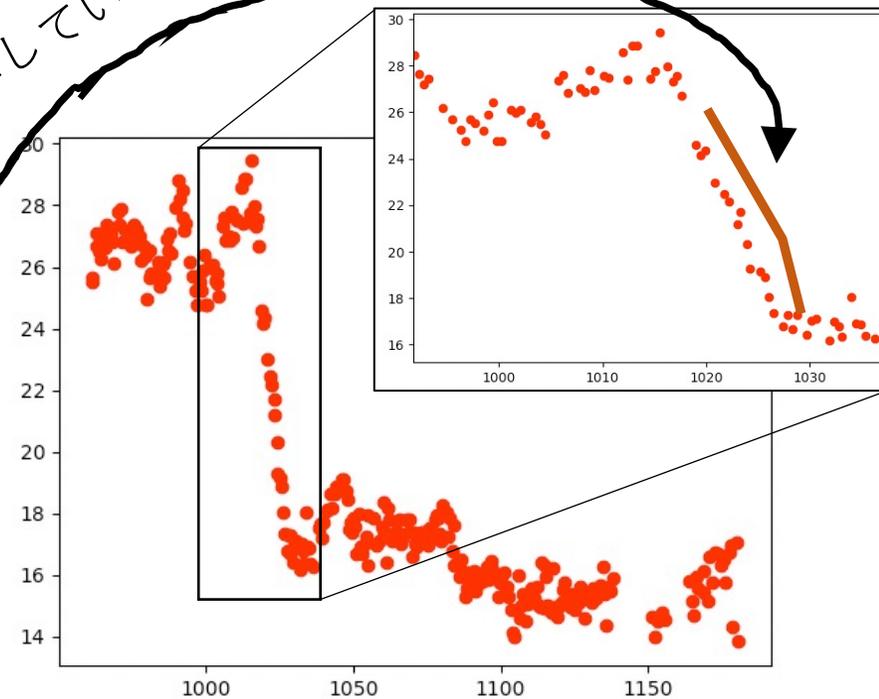
B1と比べて、1つ1つの山の高さが高い版

過去 B1

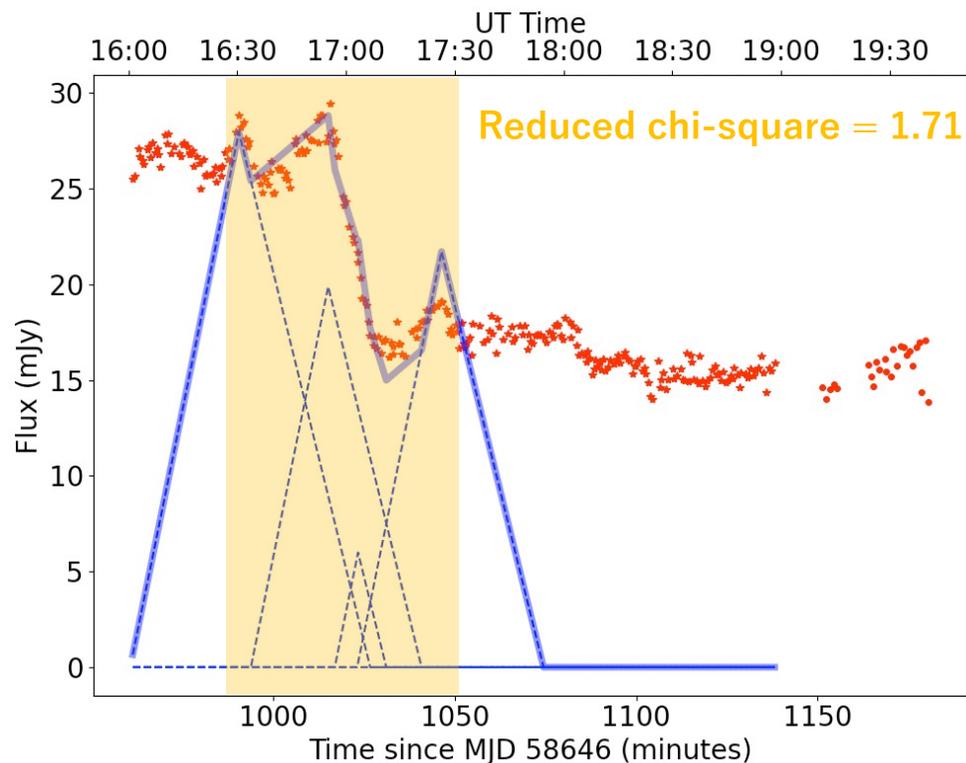
1個1個の山の広げ具合などで形変わる。



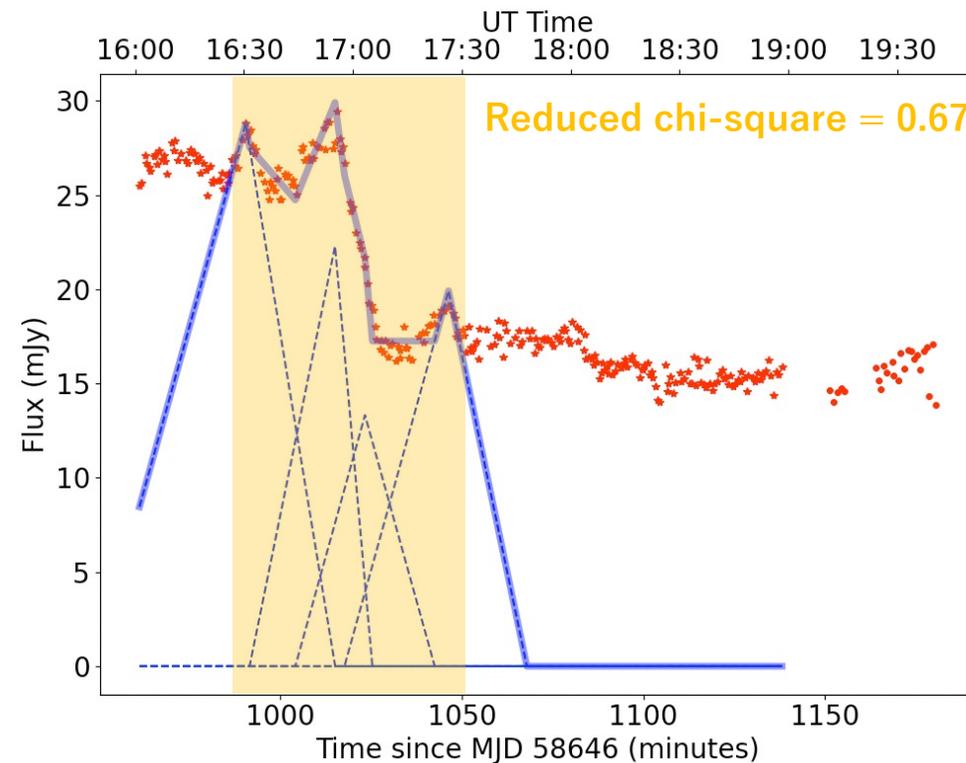
対応している？



(i) Amplitudeフリー、同じフラックス変動速度( $\Delta F / \Delta t$ )



(ii) Amplitudeフリー、フラックス変動速度( $\Delta F / \Delta t$ )フリー



(i)の結果

$$\Delta F / \Delta t_{rise} = 1342.94591 \pm 41.9125535 \text{ [mJy/MJD]} \Rightarrow \Delta t_{rise} \sim 6\text{-}30\text{分}$$

$$\Delta F / \Delta t_{decay} = -1111.79626 \pm 32.8680959 \text{ [mJy/MJD]} \Rightarrow \Delta t_{decay} \sim 8\text{-}36\text{分}$$

$\Delta F \sim 6\text{-}28\text{mJy}$ 使った