

X線天体Cir X-1のMAXIによる長期モニタ—観測

連星変光星研究会@中京大学名古屋キャンパス

2019年11月30日

富永愛侑(東京大学/ISAS), 海老沢研, 辻本匡弘, 菅原泰晴, 中平聡志(ISAS), 榎戸輝揚(京都大学)

Basic data :

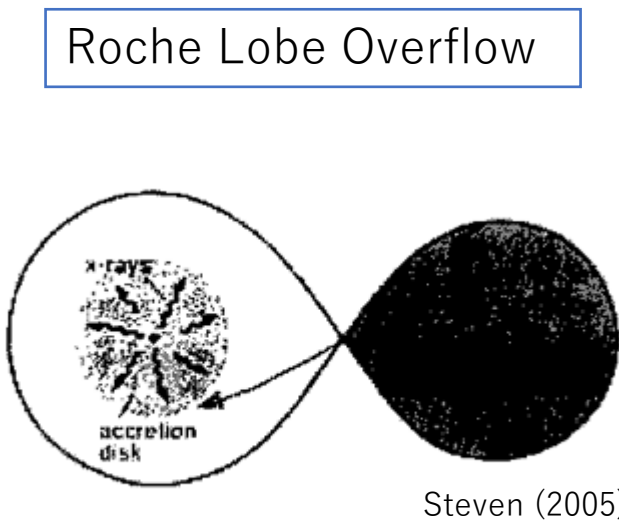
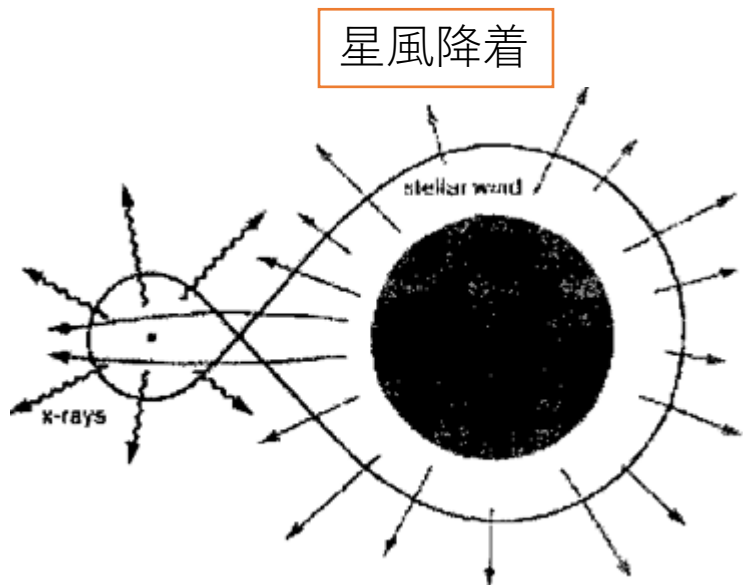
V* BR Cir -- High Mass X-ray Binary

Other object types:	X (3A,GPS,...), IR (2MASS,SSTGLMC), gam (INTEGRAL1,INTREF), N*? (Ref), LXB (Ref), HXB (Ref), V* (V*), Rad (GRS)
ICRS coord. (<i>ep=J2000</i>) :	15 20 40.85 -57 10 00.1 (Infrared) [60 60 90] C 2003yCat.2246....0C
FK4 coord. (<i>ep=B1950 eq=1950</i>) :	15 16 48.38 -56 59 11.4 [60 60 90]
Gal coord. (<i>ep=J2000</i>) :	322.11852 +00.03775 [60 60 90]
Fluxes (5) :	B 21.4 [-] E ~ V 21.4 [-] D 2007A&A...469..807L J 12.743 [0.031] C 2003yCat.2246....0C H 11.521 [0.029] C 2003yCat.2246....0C K 10.692 [0.025] C 2003yCat.2246....0C

(SIMBADより)

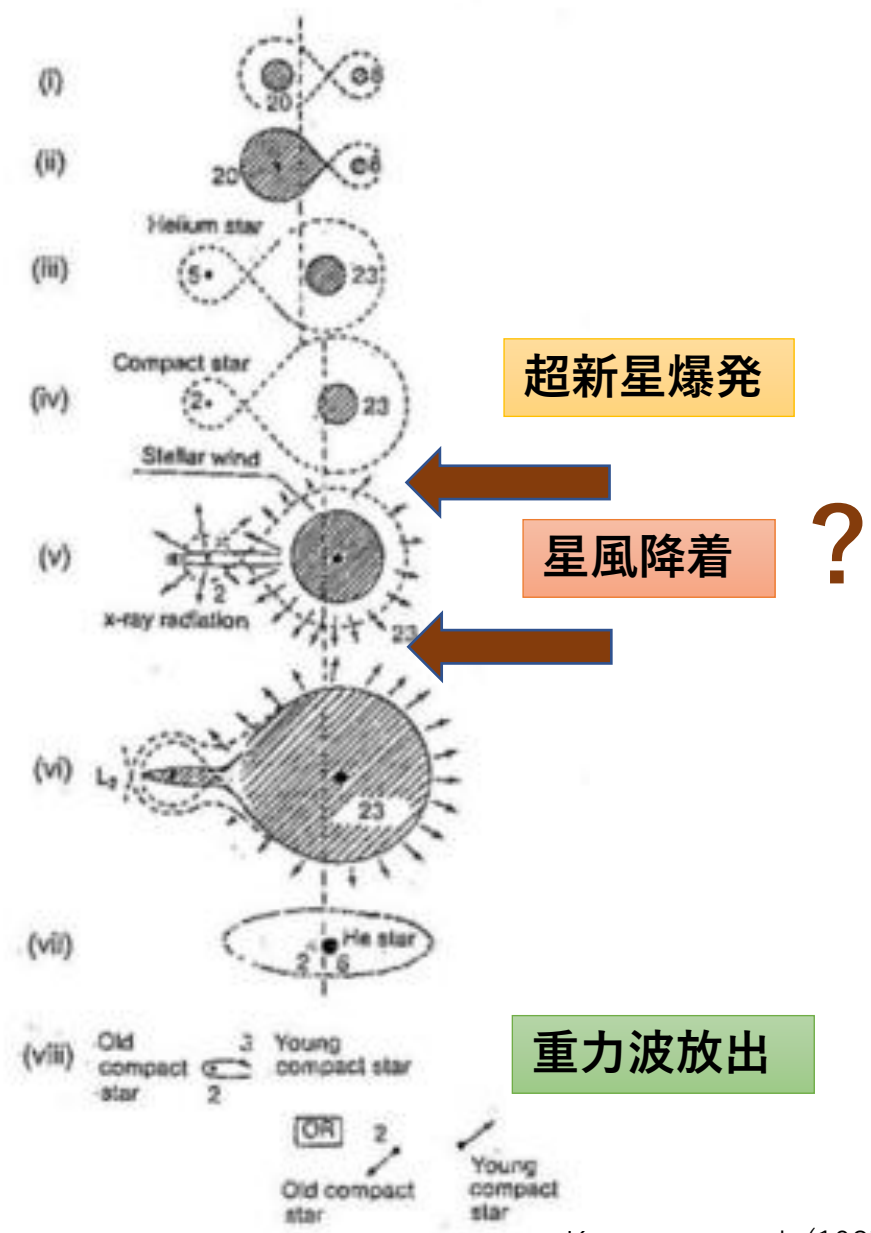
研究対象：X線連星

- コンパクト天体と通常の恒星から成る連星系
NS, BHは重力場が強く、X線でエネルギーを解放する



Steven (2005)

伴星	若い 重い(HMXB)	年老いた 軽い (LMXB)
質量降着	直接降着	降着円盤
磁場	強い	弱い
軌道	長周期 楕円	短周期 円



Karttunen et.al. (1987)

研究対象：Circinus X-1

(NS + starのX線連星)

- I 型 X線バースト (Tennant et al. 1986, Linares et al. 2010)
- quasi-periodic oscillation (Boutlouko et al. 2006)
- Z-source, atoll-source
 - 磁場は弱い ($B \sim 10^8\text{-}9\text{G}$)
 - NSは年老いた星であることが多い

- 伴星を観測 (Jonker et al. 2006, Johnston 2015)
 - RA=230.170210, DEC=-57.166690 for pointing of telescope
 - スペクトル解析でB5-A0 supergiant ($M < 10M_{\text{sol}}$)
 - 軌道離心率が大きい: $e = 0.45 \pm 0.07$
 - 軌道周期: $P = 16.585 \pm 0.01$ (days)
- SNRが付随する若い天体 ($< 4.6 \text{ kyr}$) (Heinz et al. 2013)
 - 銀河系で**最も若いX線連星**

Cir X-1のイメージ図



<https://personal.psu.edu/wnb3/cirx1/cirx1.html>より

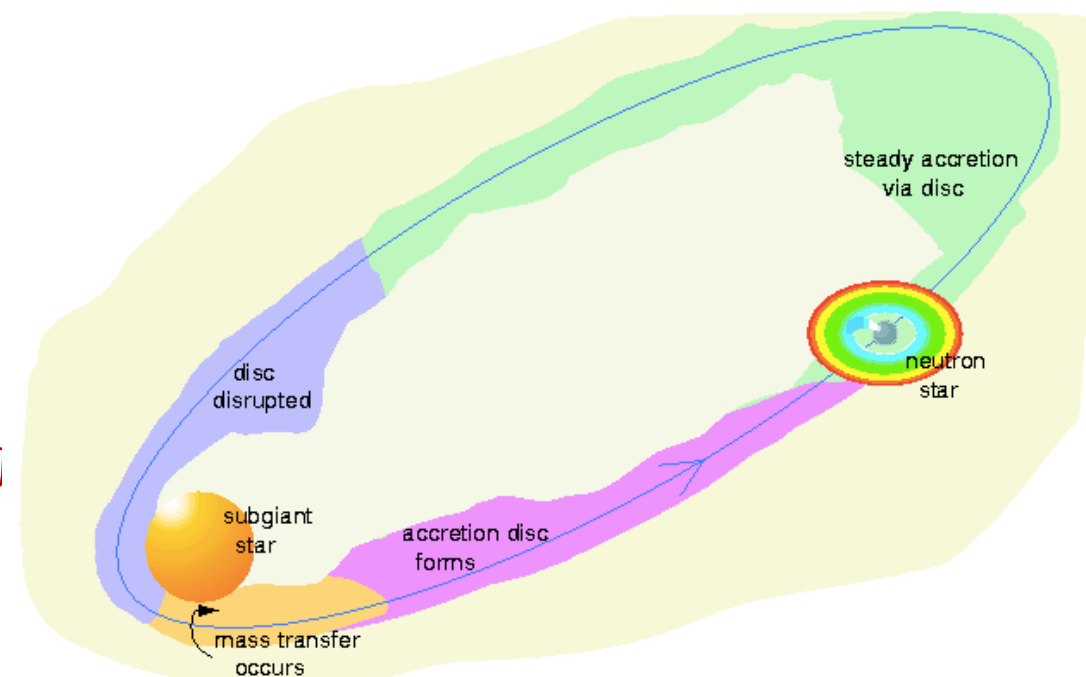
典型的な分類法で分類できない
LMXB or HMXB

弱磁場で若い唯一の天体

放射過程の統一的な説明がない
=変動が激しい

目的：光度変動の理解

- 離心率が大きい
近星点で質量輸送率が高い
近星点付近でフレアが起こる
- (赤外線領域と異なり、)X線では非周期的な変動
diskが一周期のなかで形成、散逸する説
disk accretion (ROF), wind accretion (伴星風)
- 近星点のephemeris→電波ジェットの長期観測
 $t(\text{MJD}) = 43076.32 + (16.55794 - 0.0000401N)N$ (Nicolson 2007)
- バースト、準周期的強度変動などの短時間変動



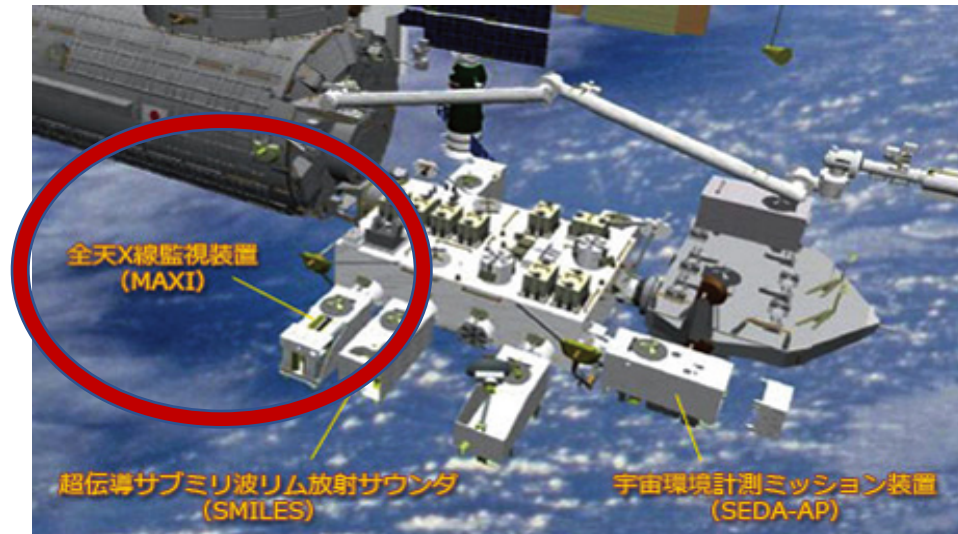
Cir X-1のモデル (Special Research Centre for Theoretical Astrophysics HPより)

周期ごとの変動=長期モニター観測 MAXI

周期内の変動=より短時間、感度に特化した観測

観測装置・データ

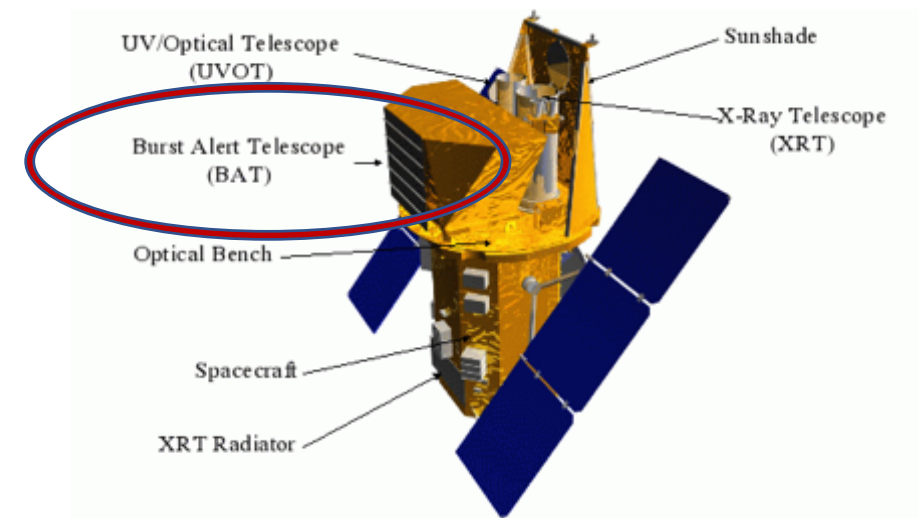
MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image)



<http://www.isas.jaxa.jp/j/column/kibou/10.shtml>

- GSC (Gas Slit Camera)
12台の比例計数管、2-30keV
- SSC (Solid-state Slit Camera)
32枚のCCD、0.5-10keV
- 2009/8/15- 観測開始
ISSに合わせて約90分で全天を一掃

Swift/BAT(Burst Alert Telescope)



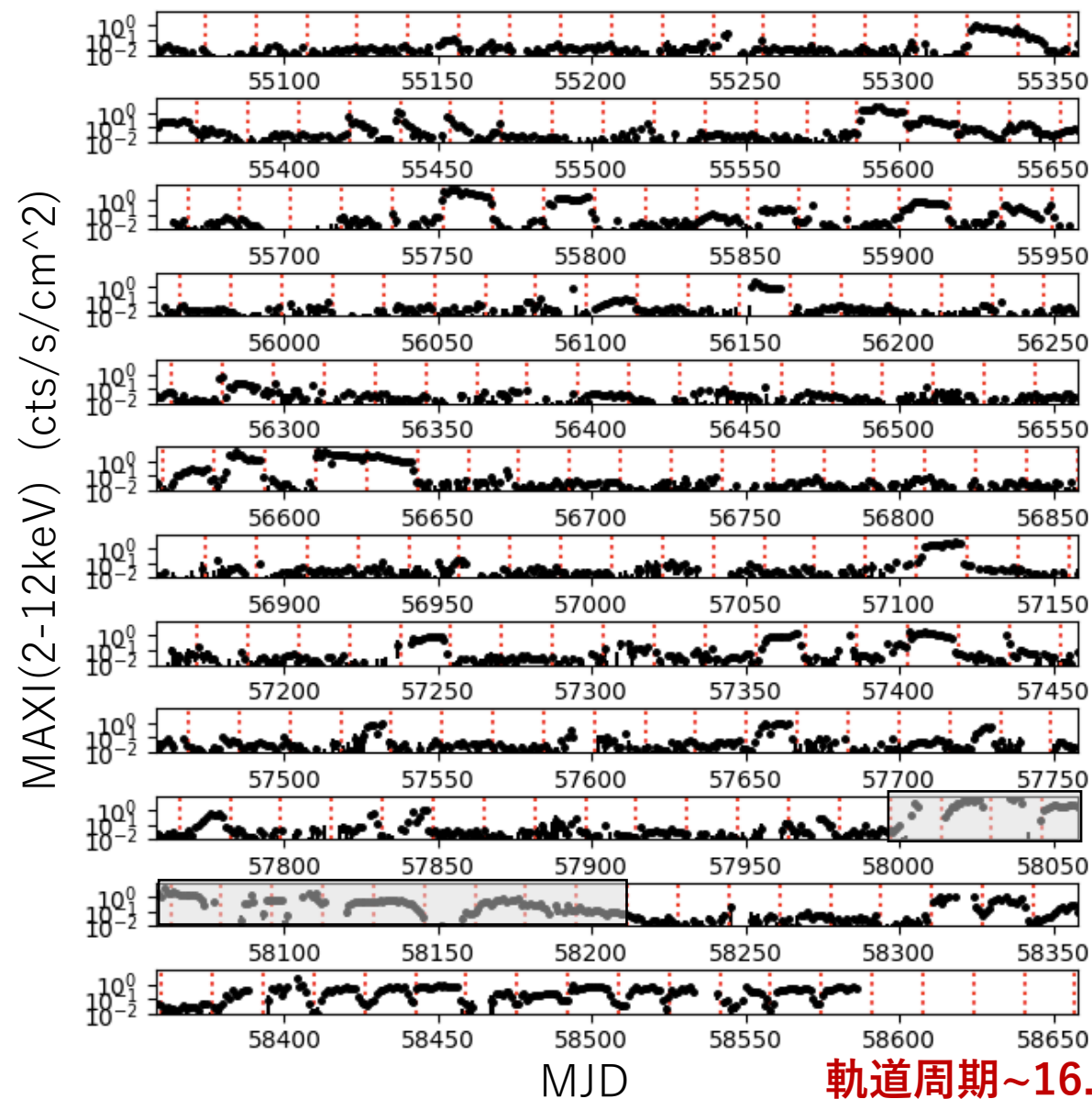
<https://www.swift.ac.uk/about/instruments.php>

- 15-150keV
- 32768素子の半導体検出器 (CdZnTe)
- 一度に全天の約1/6を観測
- 2005年以降のデータがある



どちらも全天サーベイ=長期間のデータ
共通時期の変動を広帯域で比較することができる

結果：MAXI/GSCライトカーブ



Asai et al. (2013) MAXIによる先行研究
「近星点から始まり一周期続くフレアは、
次の近星点(phase~0.95)で急に減光する」

periastron flares

基本的に近星点からフレアが始まる
フレアがない周期も多い

apastron flares

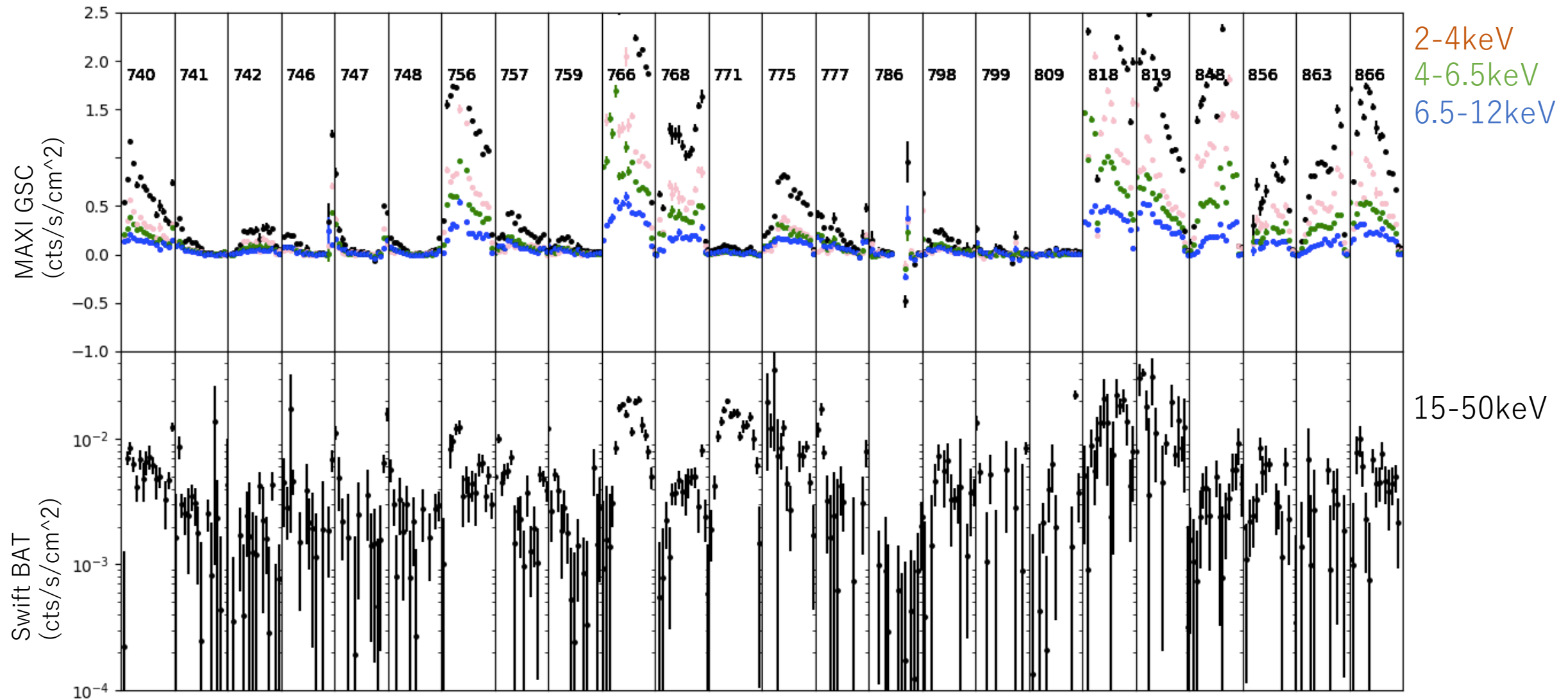
近星点以外 (遠星点付近) から
フレアが始まることが多い

本研究により発見!

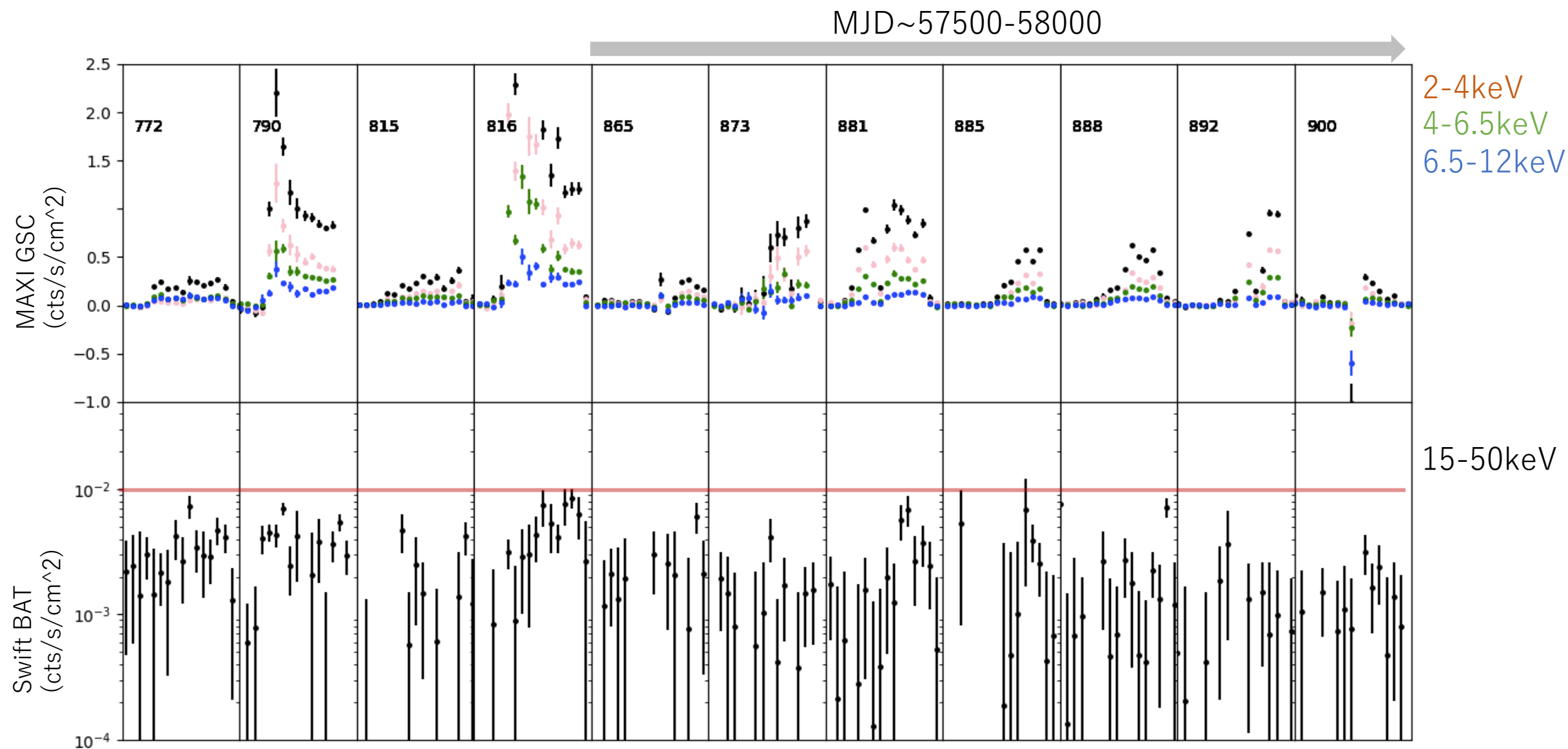
結果：periastron flares

↙ periastron spike

↙ 一周期続くフレア



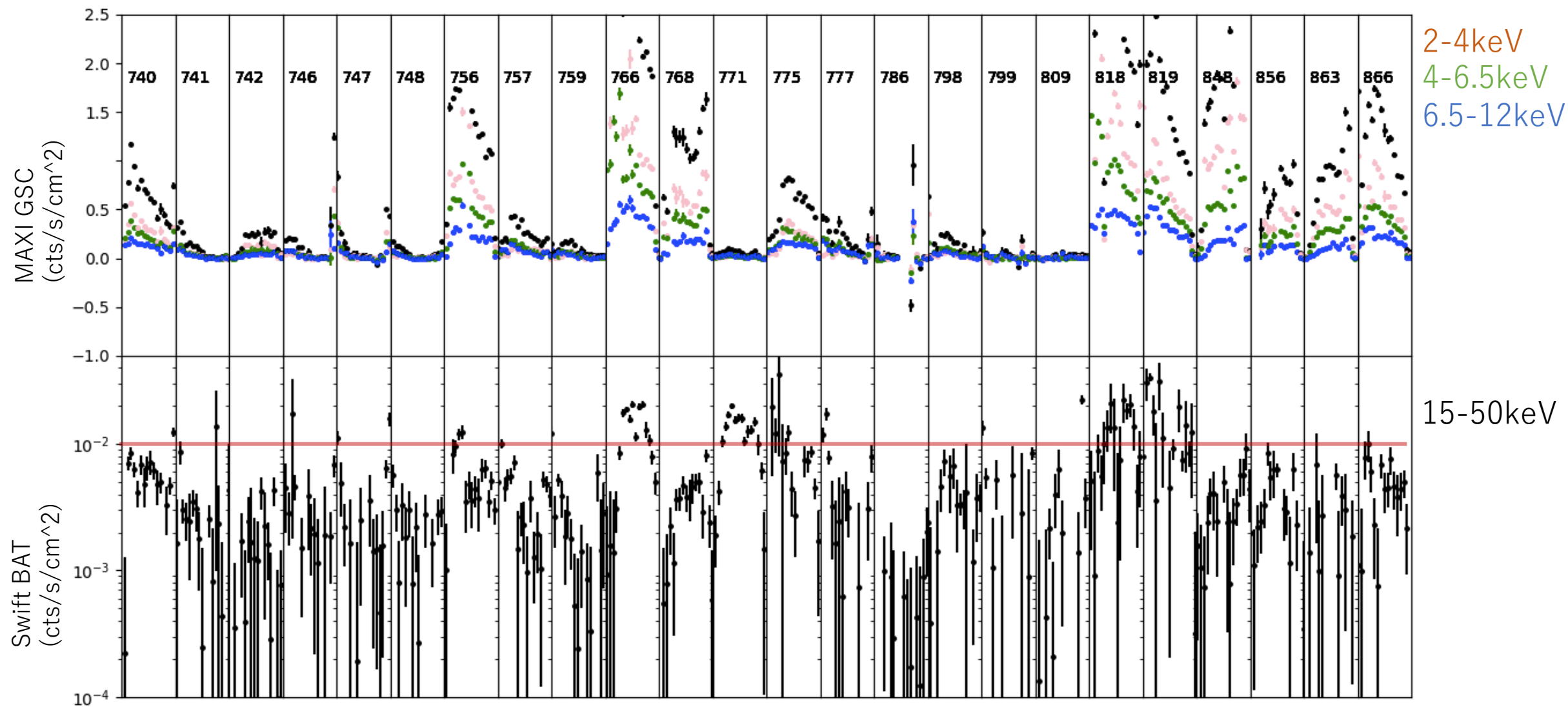
結果：apastron flares



結果：periastron flares

↙ periastron spike

↙ 一周期続くフレア



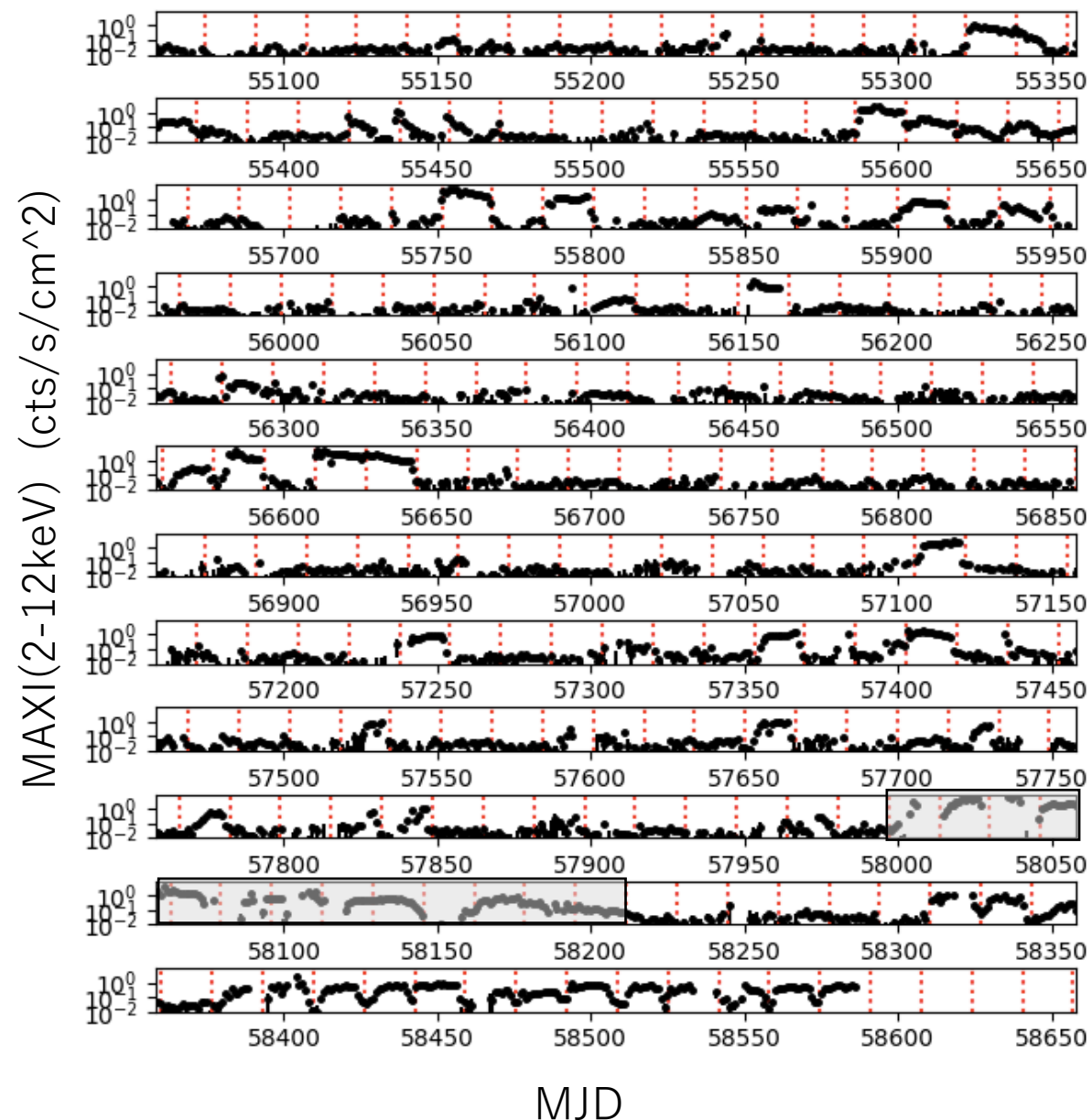
ここまでのまとめと仮説

- 質量輸送率が大きくなるため近星点でフレアが起こることが多い
 - 一周期フレアが続くもの($\sim 16.6\text{d}$): 円盤形成
 - 近星点付近で一瞬フレアを起こすもの: 星風降着
- 近星点以外の軌道位相から始まるフレアを発見した (phase $\sim 0.3-0.6$)
 - 波の伝搬の遅れ: $t = (\text{円盤半径}) / (\text{音速}) \sim 8\text{日}$
 - 軌道長半径: $a = 4.1 \times 10^{12} \text{ cm}$
 - 円盤半径: $d = \alpha * a$ (α は円盤サイズを決めるパラメータ、0.2と仮定)
 - 音速 $\sim 1.2 \times 10^6 \text{ cm/s}$
- 遠星点付近のフレアより近星点フレアの方が硬X線領域で明るい
 - 円盤に当たってできる衝撃波で光るか、降着で光るかによる違いか



- 物理的起源に迫るため、NICER, XRISMのproposalを提出した

結果：MAXI/GSCライトカーブ



periastron flares

基本的に近星点からフレアが始まる
フレアがない周期も多い

apastron flares

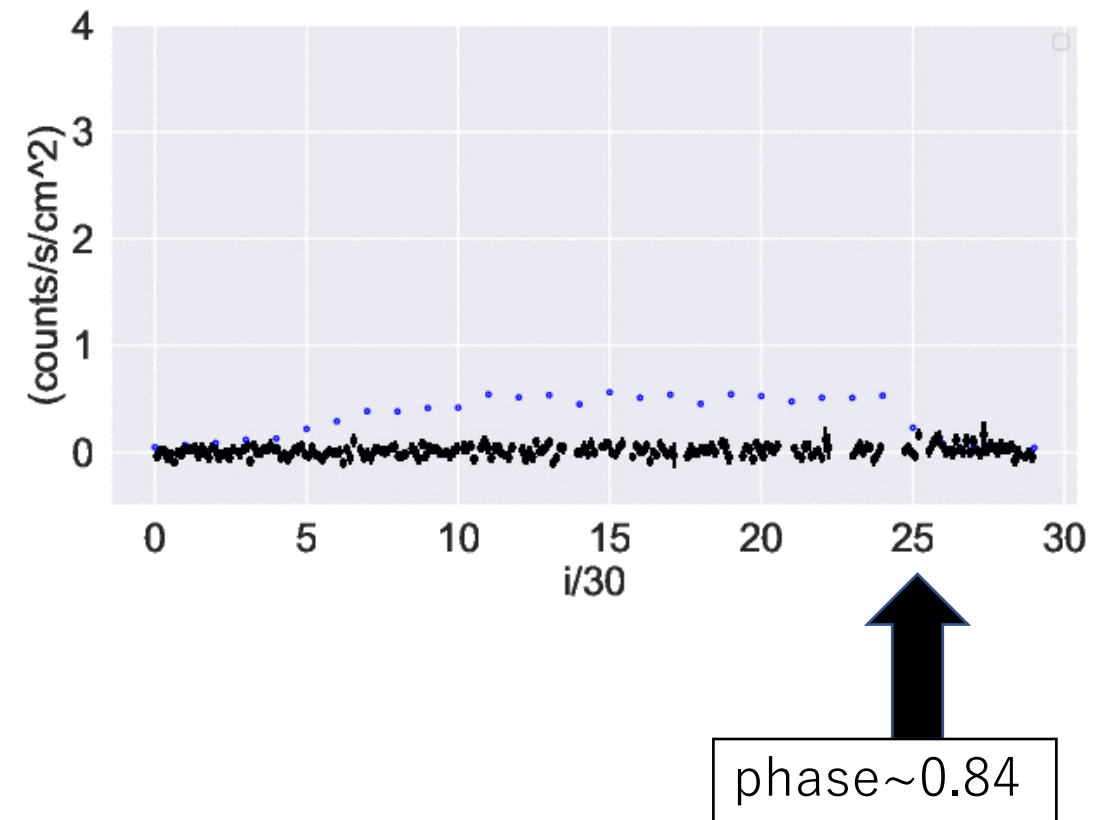
近星点以外 (遠星点付近) から
フレアが始まる

ほぼ毎周期 近星点からフレアが始まる

結果：最近の変動

- MJD=58207-現在
ほぼ毎周期、一周期続くフレア
Phase~0.84で減光
- Asai et al. (2013)では0.95で減光
可能性
Dipの間にバーストが終了
プロペラ効果
伴星からの星風の影響
- 10年間で徐々に早まったのか？
- 何かが原因で急にずれたのか？

1周期ごとのライトカーブと中央値の比較



今後の予定

2019年4月

8月

11月

2020年

2022年2月?

MAXIによる長期モニター観測
10年分のデータ解析

NICER AO2 proposal
Cir X-1

1周期 100 visits (total~50ks)
1keV付近で高感度
NH密度map, スペクトル変化

XRISM PV proposal
Cir X-1
Cen X-3

1周期 8 visits(?)
7keV付近で過去最高感度
Fe lineの詳細な変化

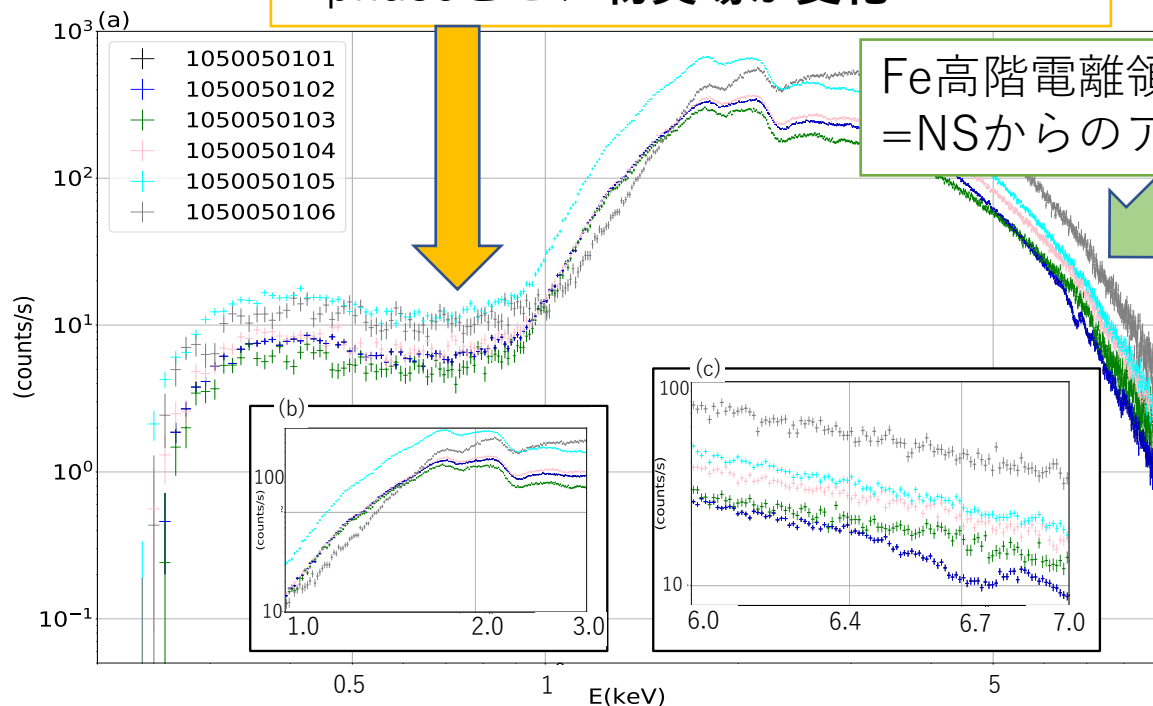
(できれば)
電波・近赤外の同時観測

X線と他波長で比較して長期、短期変動を完全解明したい

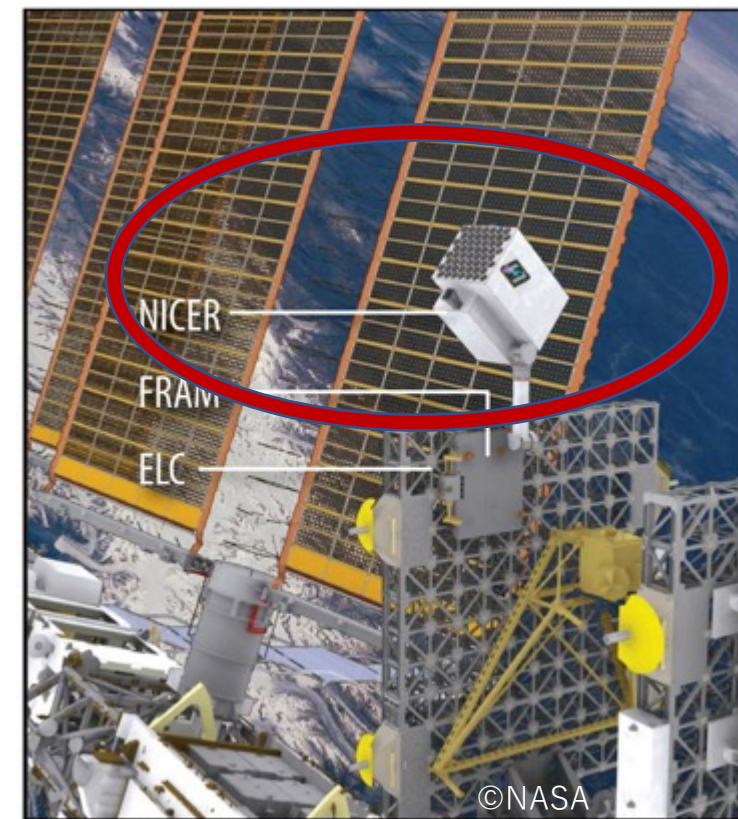
おまけ：今後の観測

- NICER(Neutron star Interior Composition ExploER)
2017年6月ISSに設置、観測開始
有効面積が大きく、短時間のスペクトル変動を追える
PV観測で同周期内を6回観測している

低エネルギー (1-3keV) で傾きが変化
=phaseごとに**物質場が変化**



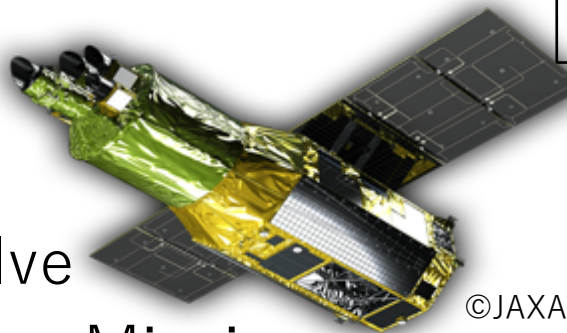
Fe高階電離領域でP Cygniが見える
=NSからのアウトフロー



一周期中でスペクトル変動を細かく見たい
本当にdiskは散逸しているのか？
物質場のmapと理論モデルは合うのか？
100visits, total~50ks のproposalを提出した

(from NICER AO2 proposal)

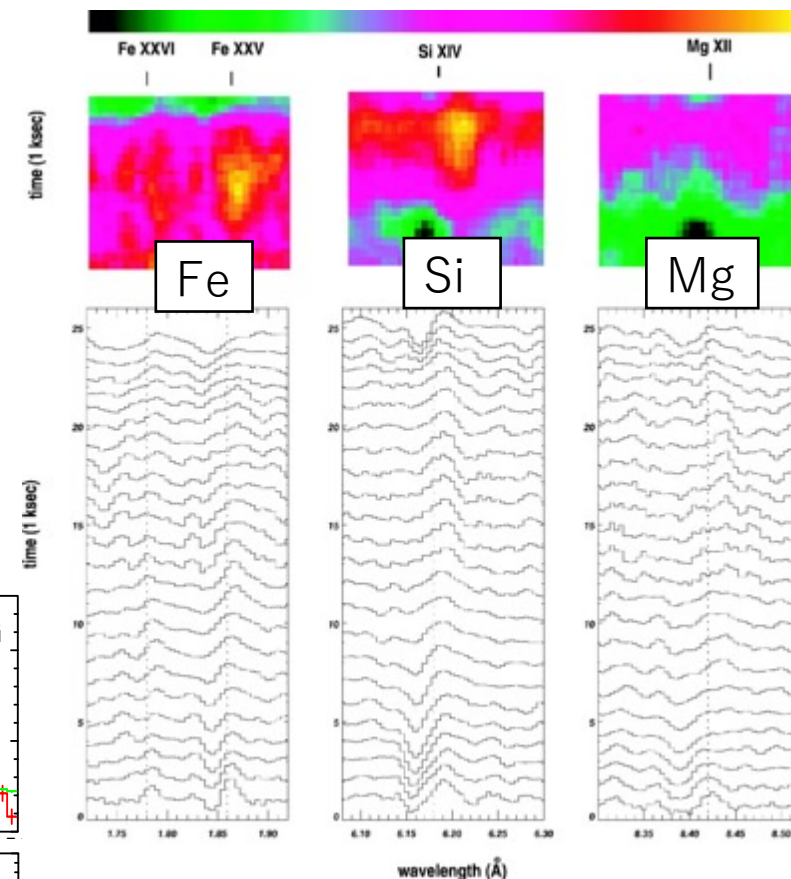
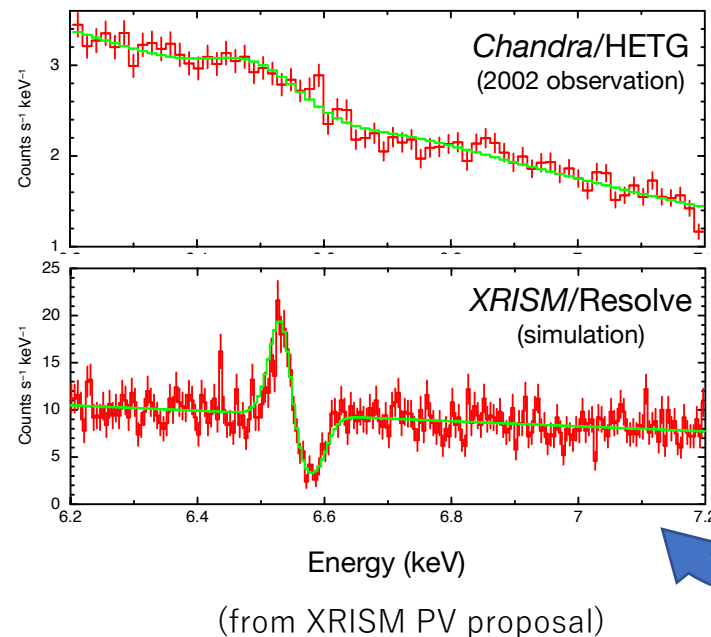
おまけ：今後の観測



- 次世代X線天文衛星XRISM/Resolve
X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission
Feの高階電離エネルギー帯で過去最高のエネルギー分解能を持つ
極低温検出器、カロリメータを搭載
2022年打ち上げ予定

- 現在もシステム試験が進行中

- line の変動 (FeのP-Cygni profile)
アウトフローがphaseごとにどう変化するか？
8visits(未定), total~40-200ks
のPV proposalを提出した



Brandt & Schulz (2002) より、Chandra/HETGSの観測によるP-Cygni profile

シミュレーション結果
Chandraでは15ks
XRISMは1ksの観測でも
はっきりとP Cygniが見える

まとめ

- ・ 銀河系内で最も若いX線連星(NS+star) Cir X-1は若いのに弱磁場 ←形成過程不明
- ・ (電波、) X線光度は不規則に変動している
- ・ 伴星からのガスの降着方法が変動の原因である可能性を考えている
 - 近星点から始まるフレア: 一周期続くもの/spike型のもの
 - 遠星点から始まるフレア: 複数回発見
- ・ 最近二年ほど、phase~0.8で急に減光するパターンがほぼ毎周期続いている
- ・ これらの物理過程を解明するため、2つのproposalを準備した。

(将来計画)

- ・ NICERで、任意の一周期を高頻度で観測
- ・ XRISMで、line スペクトル変動を観測
- ・ 他波長同時観測を実現したい

- Orbital elements

- orbital period = 16.68 days (measured, Jonker+07)
- eccentricity = 0.45 (measured, Jonker+07)
- inclination = 20 deg (assumption: >13.7 deg from Jonker+07)
- omega = 2 deg (measured, Jonker+07)
- $a \sin i = 16.9$ lightseconds (measured, Jonker+07)

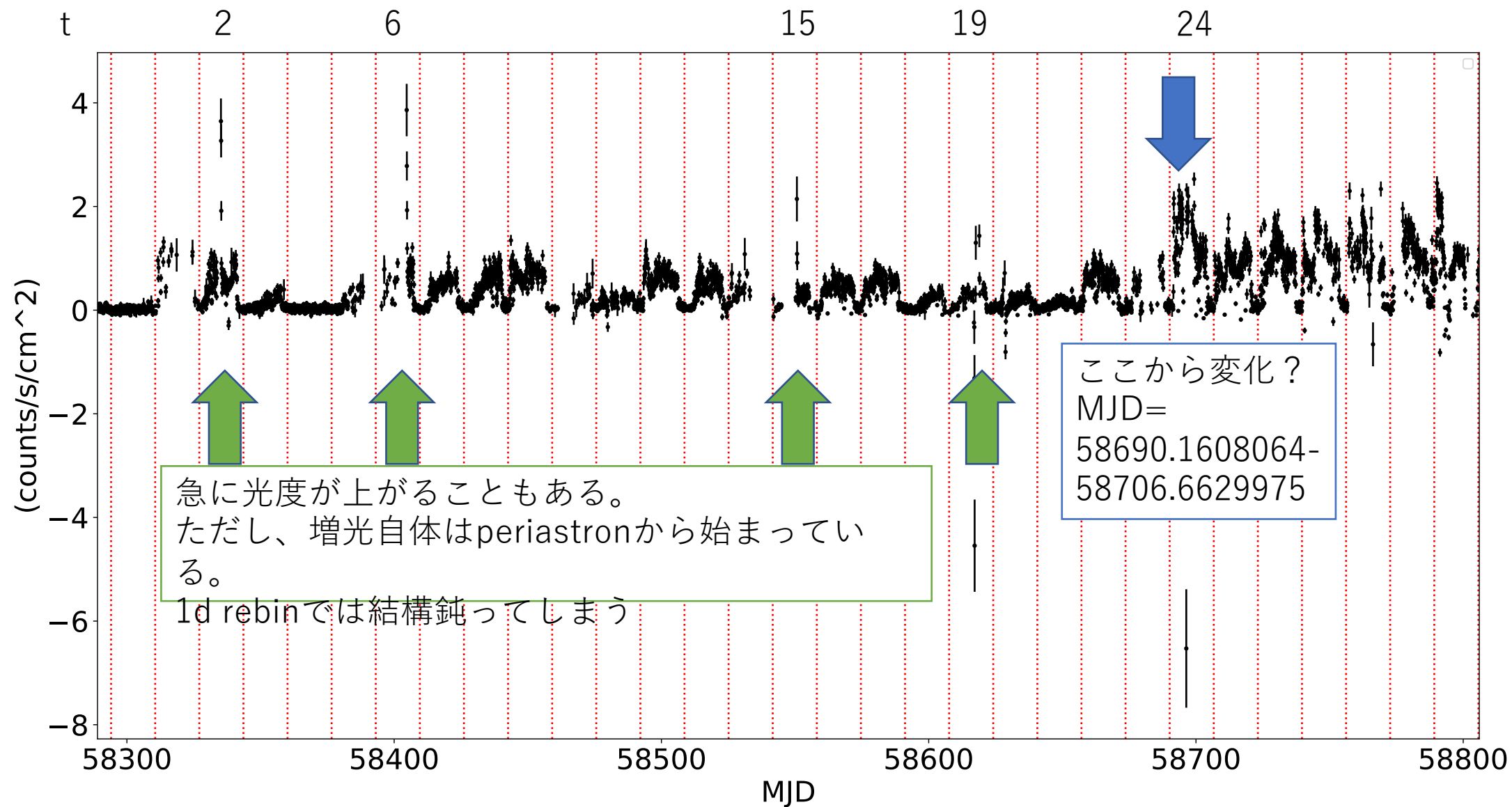
- Companion star : supergiant B5I

- $M_{\text{companion}} = 4 M_{\text{sun}}$ (<10 M_{sun} from Jonker+07)
- Radius = 24 R_{sun}
($R_{\text{comp}} = R_{\text{sun}} C \sqrt{M_{\text{comp}}/M_{\text{sun}}}$), from Jonker+07 with $C=12$ assumed)

- Compact object : neutron star

- $M = 1.4 M_{\text{sun}}$

2018/6/20-2019/11/19 高さに変動はあるがほぼ毎周期山形フレア **1scan bin**



Basic data :

V* BR Cir -- High Mass X-ray Binary

Other object types: X (3A,GPS,...), IR (2MASS,SSTGLMC), gam (INTEGRAL1,INTREF), N*? ([Ref](#)), LXB ([Ref](#)), HXB ([Ref](#)), V* (V*), Rad (GRS)

ICRS coord. (*ep=J2000*) : 15 20 40.85 -57 10 00.1 (Infrared) [60 60 90] C [2003yCat.2246....0C](#)

FK4 coord. (*ep=B1950 eq=1950*) : 15 16 48.38 -56 59 11.4 [60 60 90]

Gal coord. (*ep=J2000*) : 322.11852 +00.03775 [60 60 90]

Fluxes (5) :
B 21.4 [-] E ~
V 21.4 [-] D [2007A&A...469..807L](#)
J 12.743 [0.031] C [2003yCat.2246....0C](#)
H 11.521 [0.029] C [2003yCat.2246....0C](#)
K 10.692 [0.025] C [2003yCat.2246....0C](#)