



# 最近のさまざまな X線バーストの観測結果について

千葉大学ハドロン宇宙国際研究センター

岩切渉



RIBF ULIC miniWS 「星の進化と爆発天体における  
核反応の物理」  
2023年2月21日

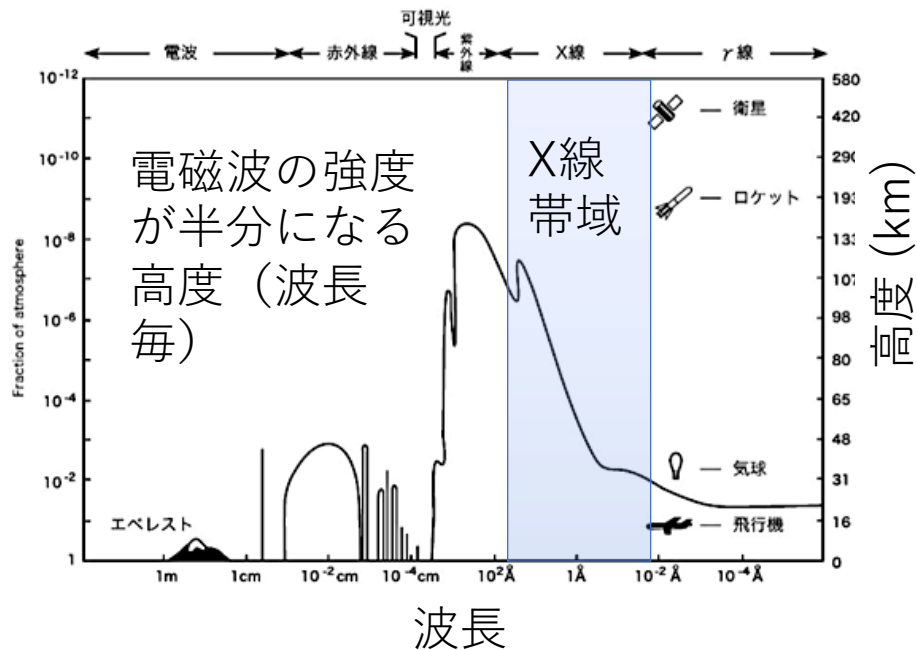
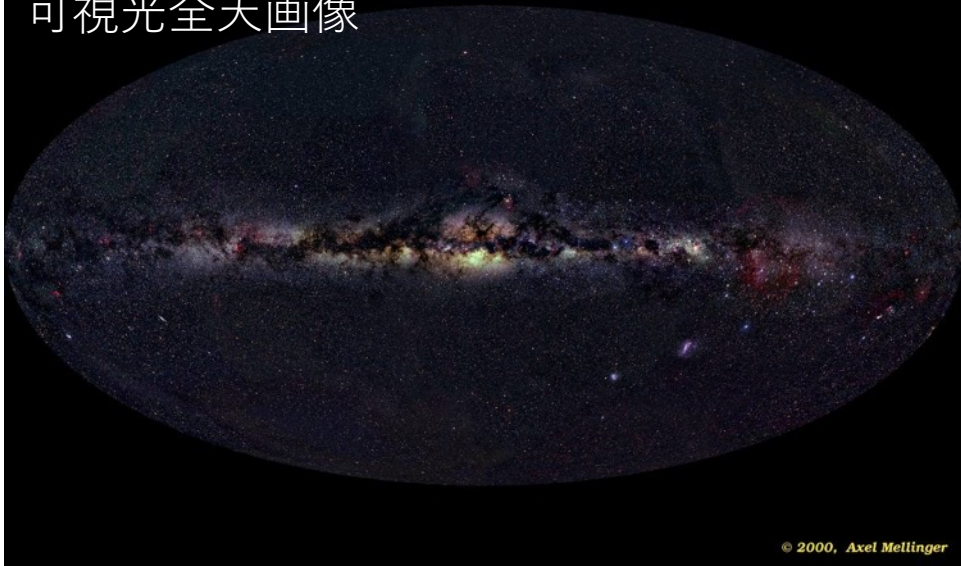
削ったスライドに関してご興味がある場合は、  
岩切までご連絡ください



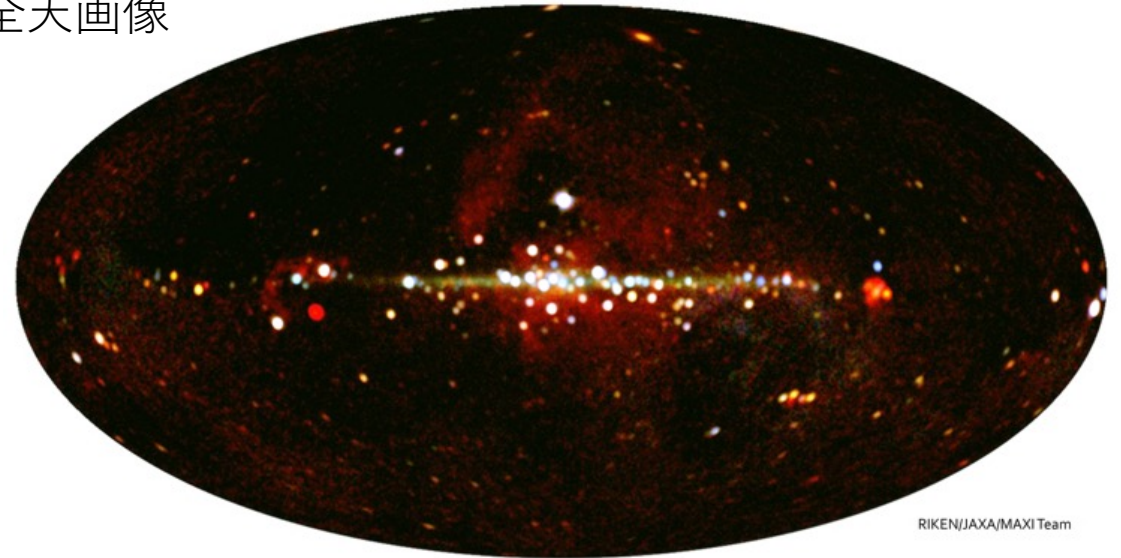
# X線天文学

The Deep Sky

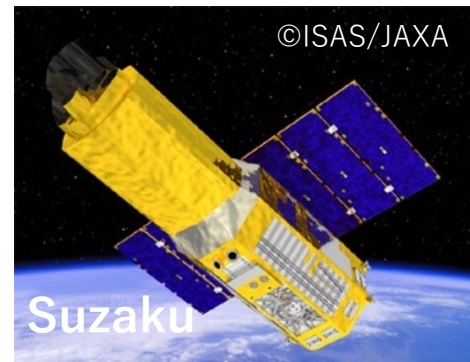
可視光全天画像



X線全天画像



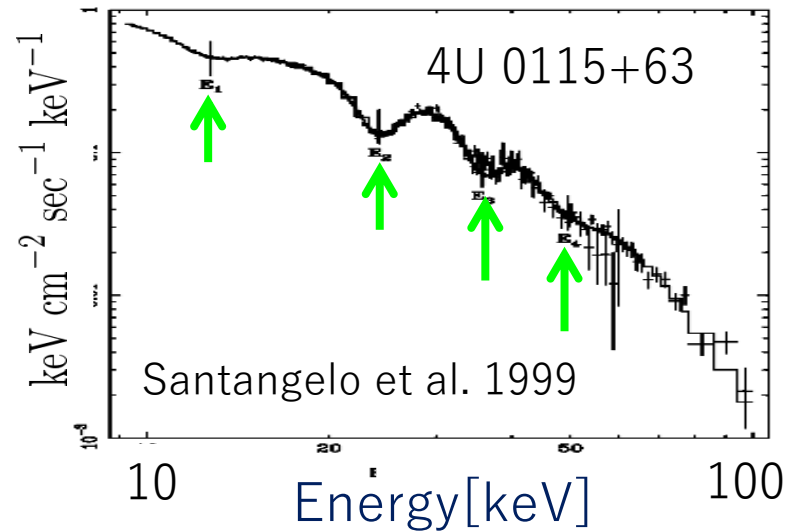
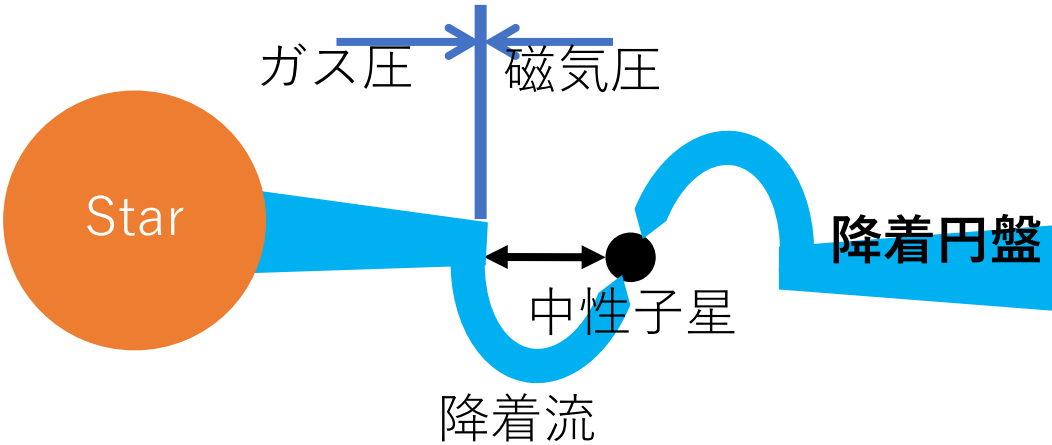
X線観測はブラックホールや中性子星(NS)の周囲などに存在する、数千万度を超えるプラズマを探るのに有効  
←地球大気はX線に不透明



人工衛星や、国際宇宙ステーション(ISS)に検出器を搭載して観測  
→日本は1979年から今日まで断続的にX線ミッションを続けている

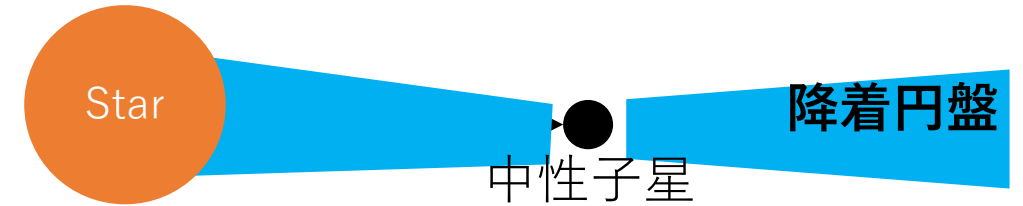
# NSと恒星の連星系

NSが若い（磁場が強い $\sim 10^8$  T）



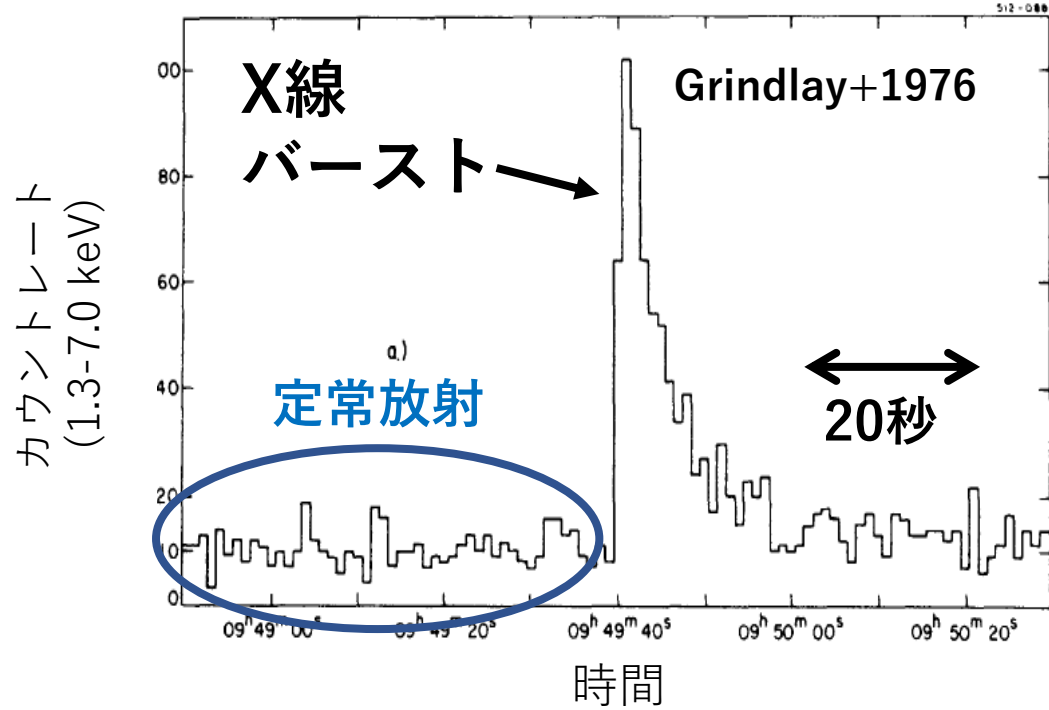
- 磁極に高温プラズマの柱→X線で強いパルス
- サイクロトロン共鳴線が見られる

NSが年寄り（磁場が弱い $\sim 10^4$  T）

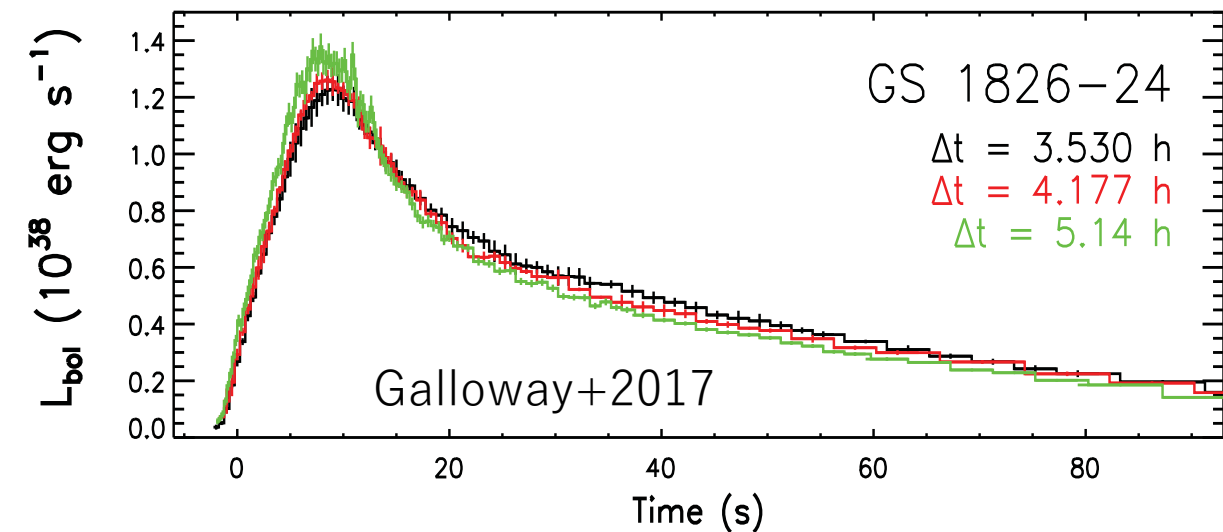


- NS-LMXB (Low Mass X-ray Binary)
  - 伴星の質量が太陽よりも小さい
  - 軌道周期が1時間以下のものはUCXB(Ultra Compact X-ray Binary,  $\sim 0.01 M_{\odot}$ )
- 自転周期が数ミリ秒（パルスは弱い）
- 近年、定常重力波源の候補としても期待
- 降着物質(H、He)がNS表面に堆積、X線バーストを起こす

# X線バースト

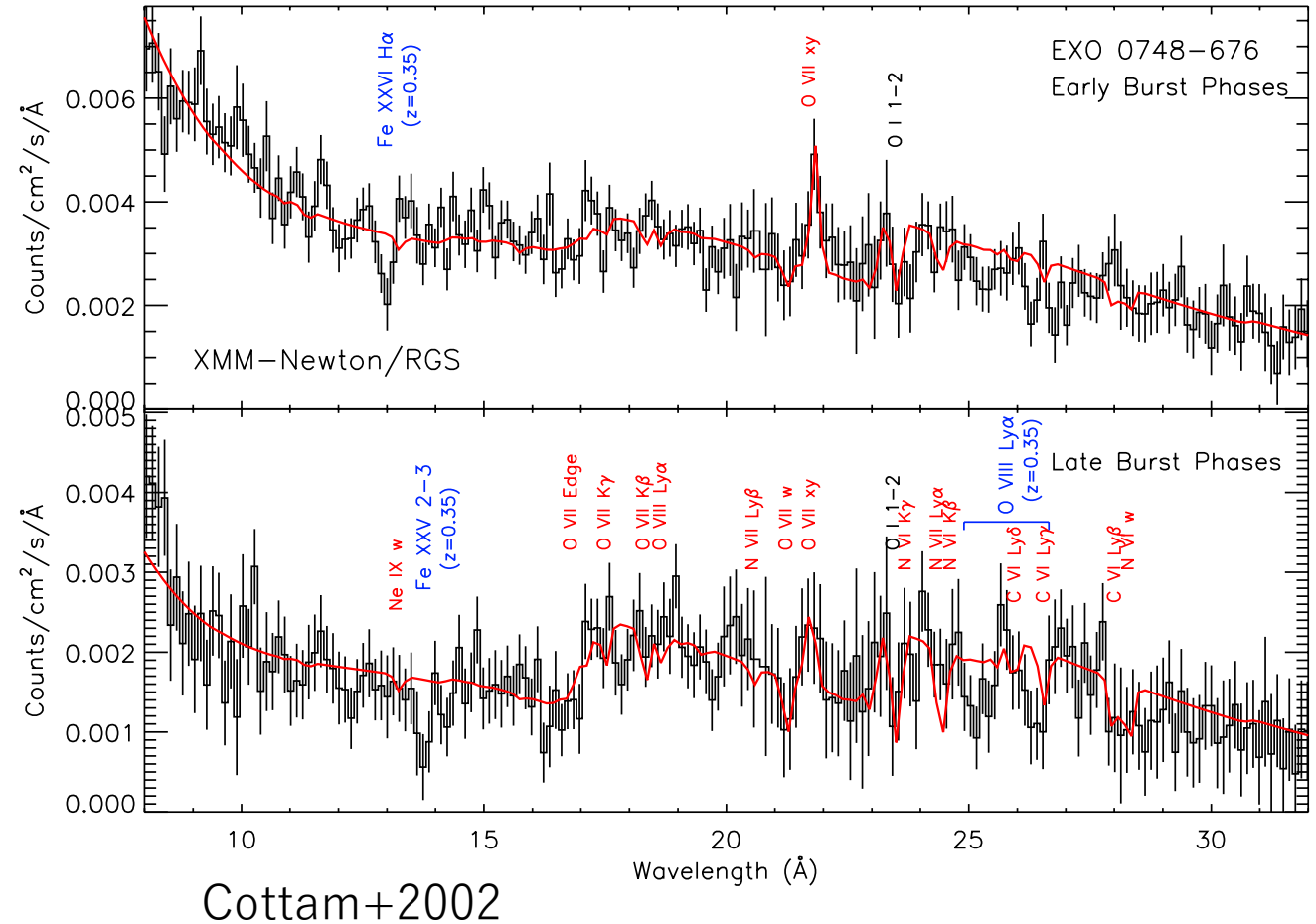
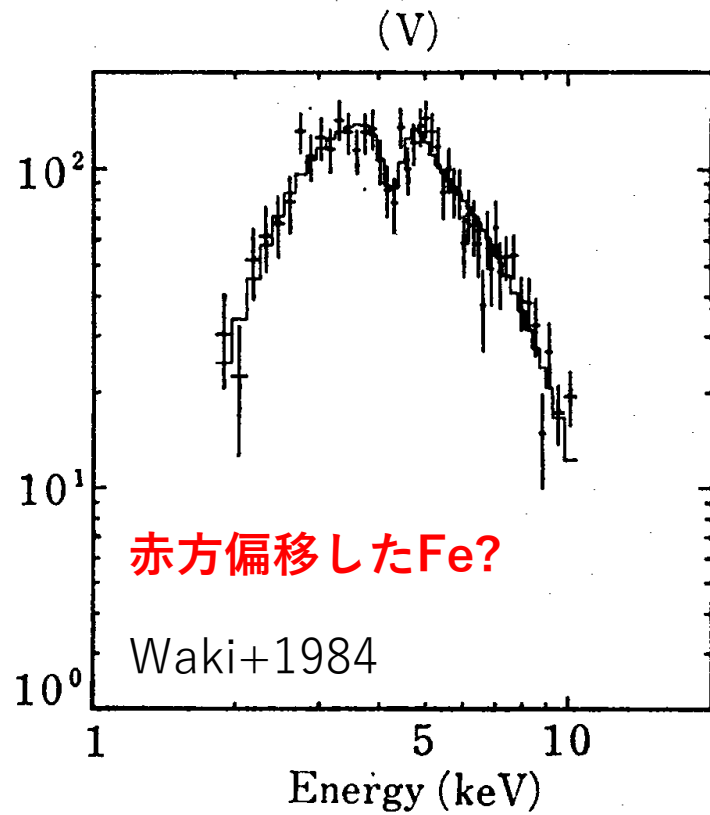


- 1975年にANS衛星によって発見
- 中性子星表面で起こる爆発的な核融合反応 (H,He)。
- 継続時間は数十秒
- X線のエネルギースペクトルは、半径~10 kmの黒体輻射で再現できる
- 日本の初代X線天文衛星はくちょうなどの活躍により、定常放射の光度（降着率を表す）とバーストのプロファイルに関係



- 1999年に打ち上げられた大有効面積のRXTE衛星によって、詳細なバーストのプロファイルが取得→核燃焼の反応率、NSのEOS、NSの温度情報などの良いプローブ

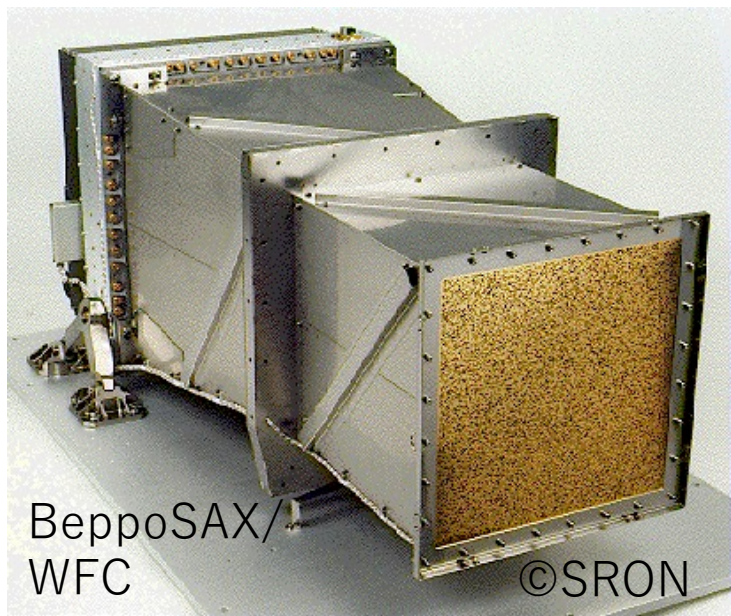
# X線バースト中の元素のラインスペクトル？



スペクトル中に元素のラインが見えると、NSの質量、半径情報や、X線バーストで合成される元素、組成比の情報を直接得ることができる

→しかし、10年に一回ぐらい報告されるも、追認されることが無い → 観測が難しい

# 広視野X線観測装置の発展とスーパーバーストの発見

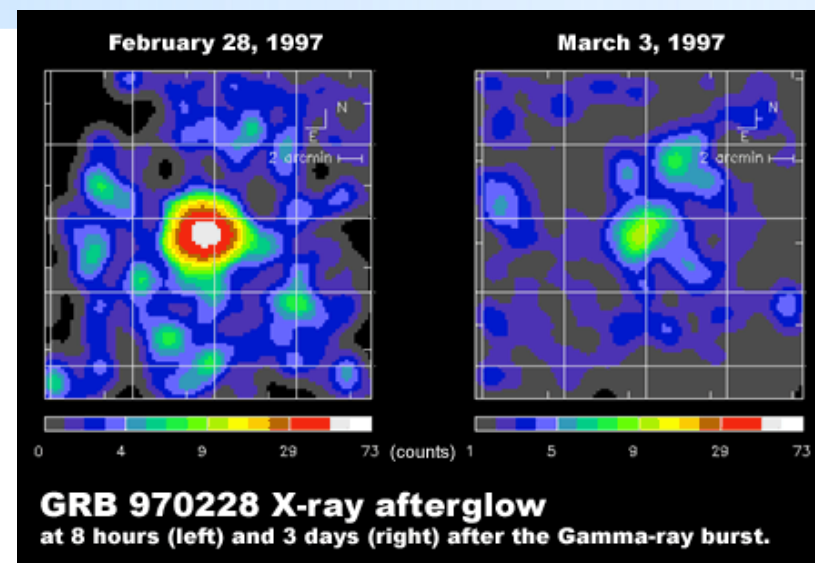


BeppoSAX衛星搭載の広視野検出器WFCは、ガンマ線バーストの残光の発見で有名

**継続時間が、数時間にも及ぶ**

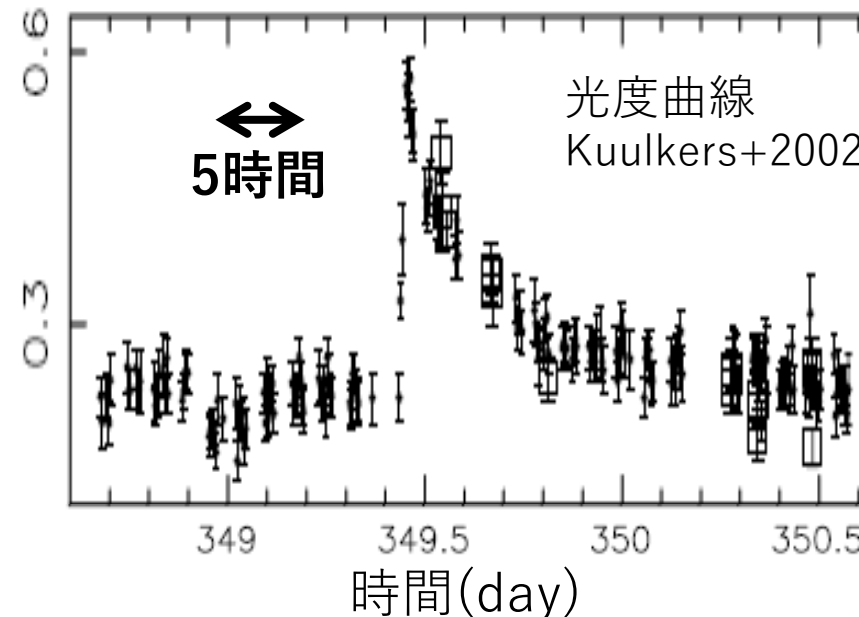
**X線バーストを発見(Cornelisse+2000)**

安定的なHe燃焼、通常のX線バーストのトリプル $\alpha$ によって生成された $^{12}\text{C}$ の燃焼か？ (土肥さんの talk)



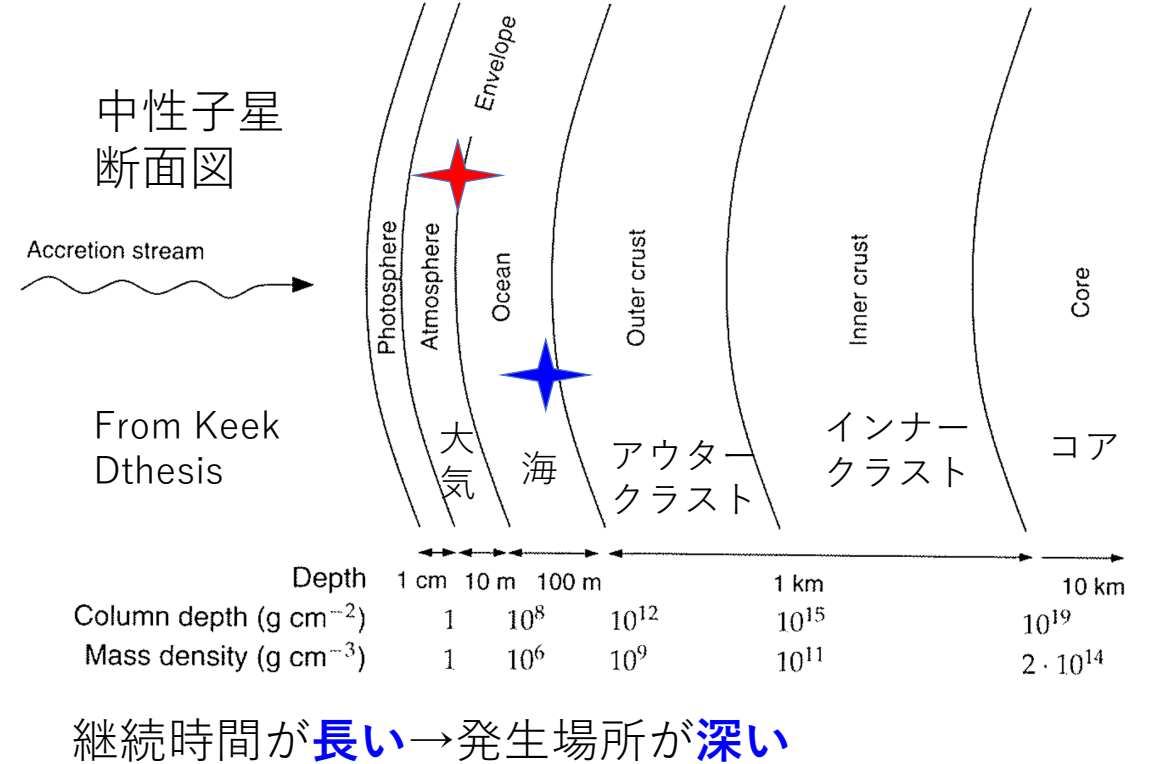
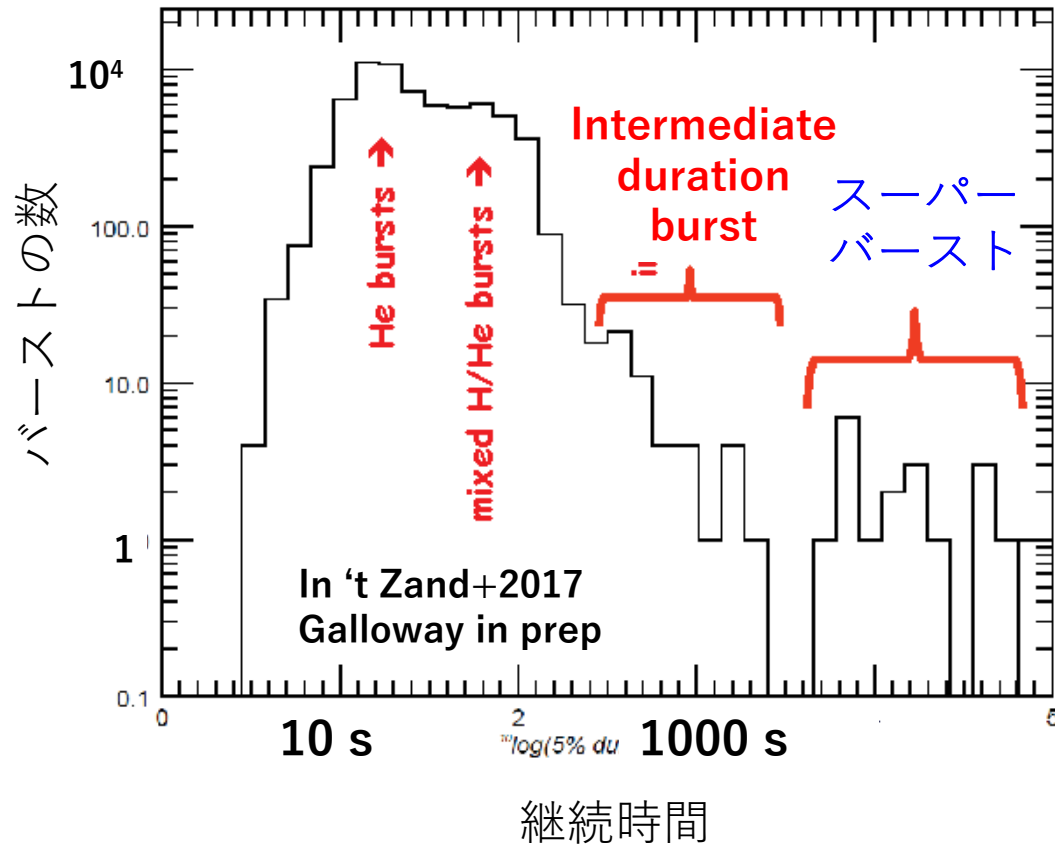
©SRON

カウントレートの(1-11 keV)



(定義が難しいが)  
ここから最近の話し

# 継続時間による3つのX線バースト分類



Intermediate duration burst : 継続時間が100 – 3600秒。Ignition column depth  $\sim 10^8 \text{ g/cm}^2$ 。

UCXB (候補含む) から観測されるため、厚いHe層の燃焼と考えられている。

スーパーバースト : 継続時間が1時間以上。Ignition column depth  $\sim 10^{12} \text{ g/cm}^2$ 。oceanの底で起きる炭素の核融合と考えられる。



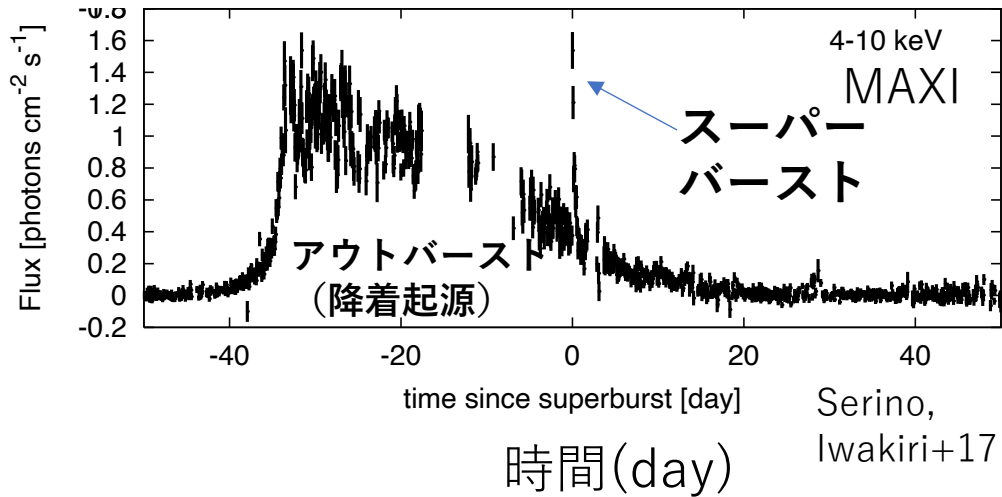
# 3つのスーパーバーストタイプ



- 2-20 keV (比例計数管)
- ISSの軌道周期に合わせて全天を走査観測

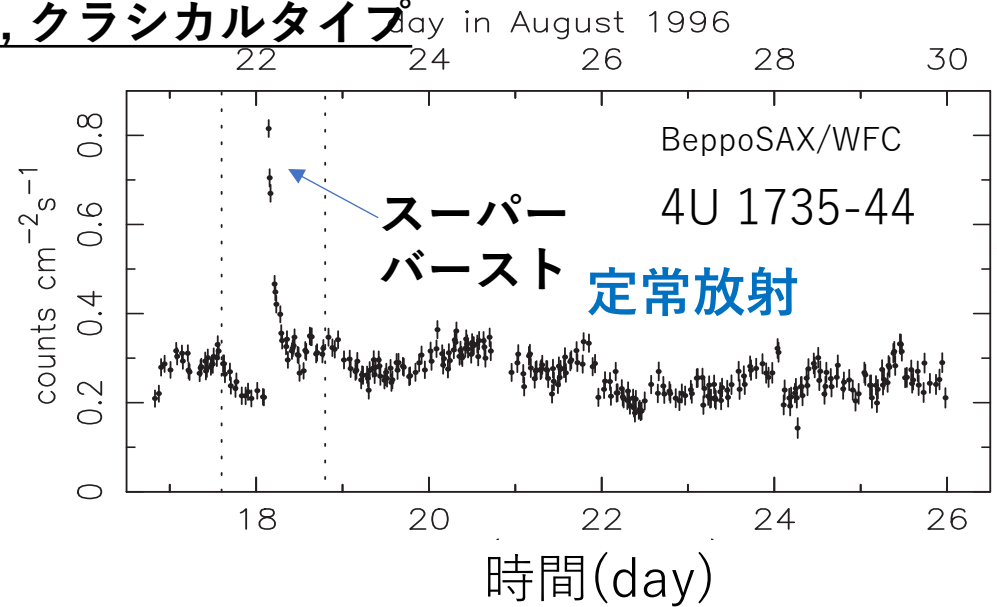
MAXIは、打ち上げ10年間で12個のスーパーバーストを検出している(Serino, Iwakiri et al., 16, Iwakiri+17 proceedings)。

## 2, アウトバーストタイプ



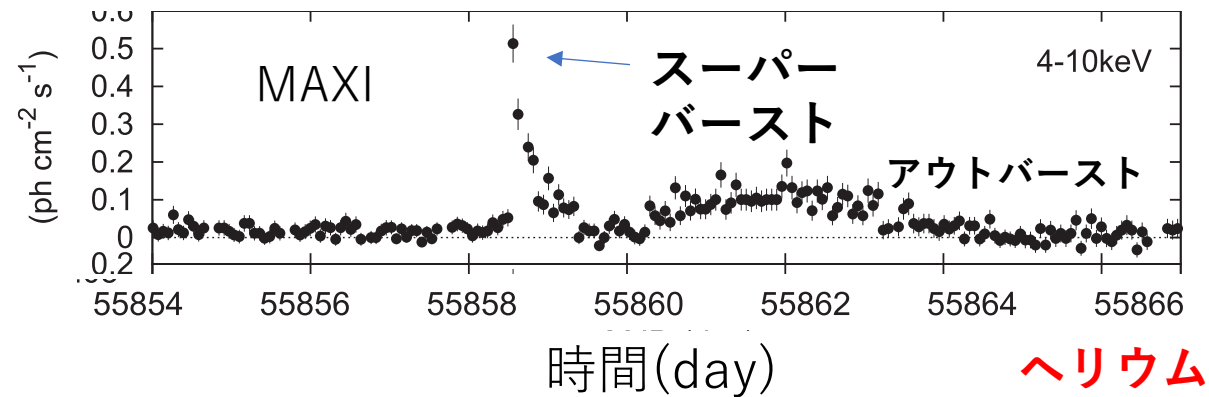
炭素? 点火しない?  
(Keek+2008)

## 1, クラシカルタイプ



炭素核融合?

## 3, エクストリームタイプ

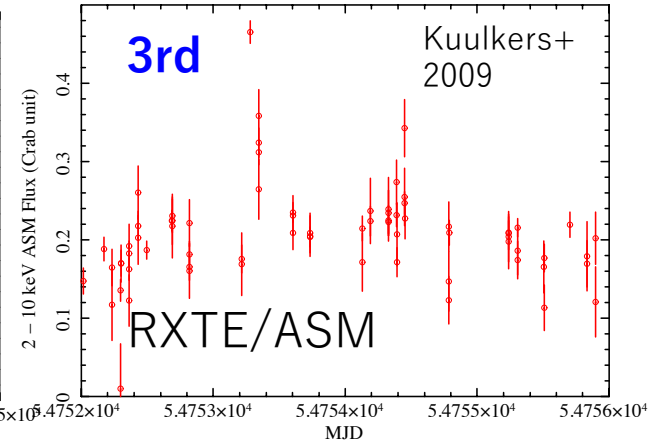
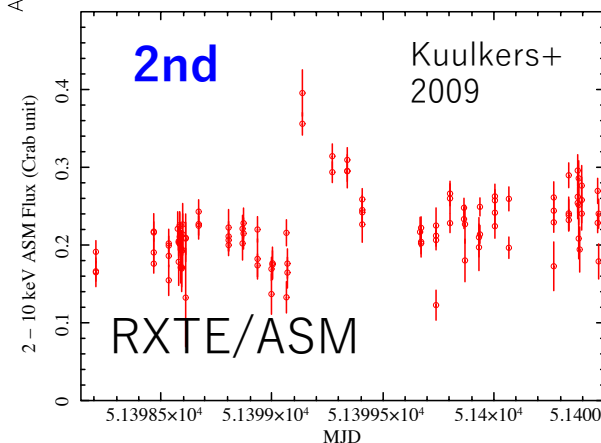
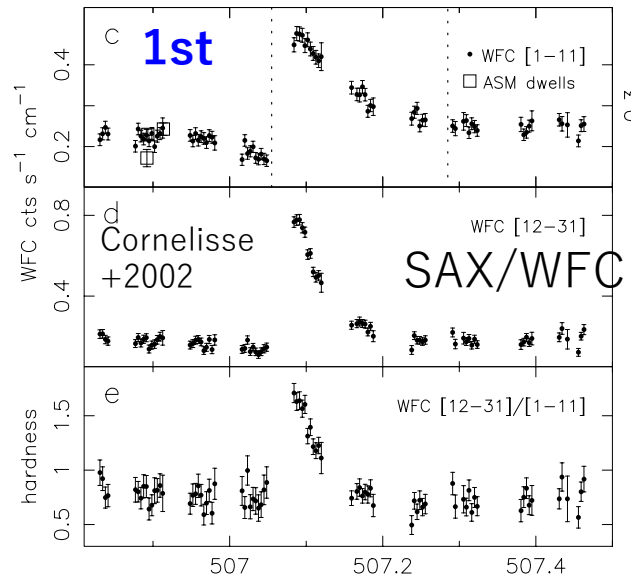
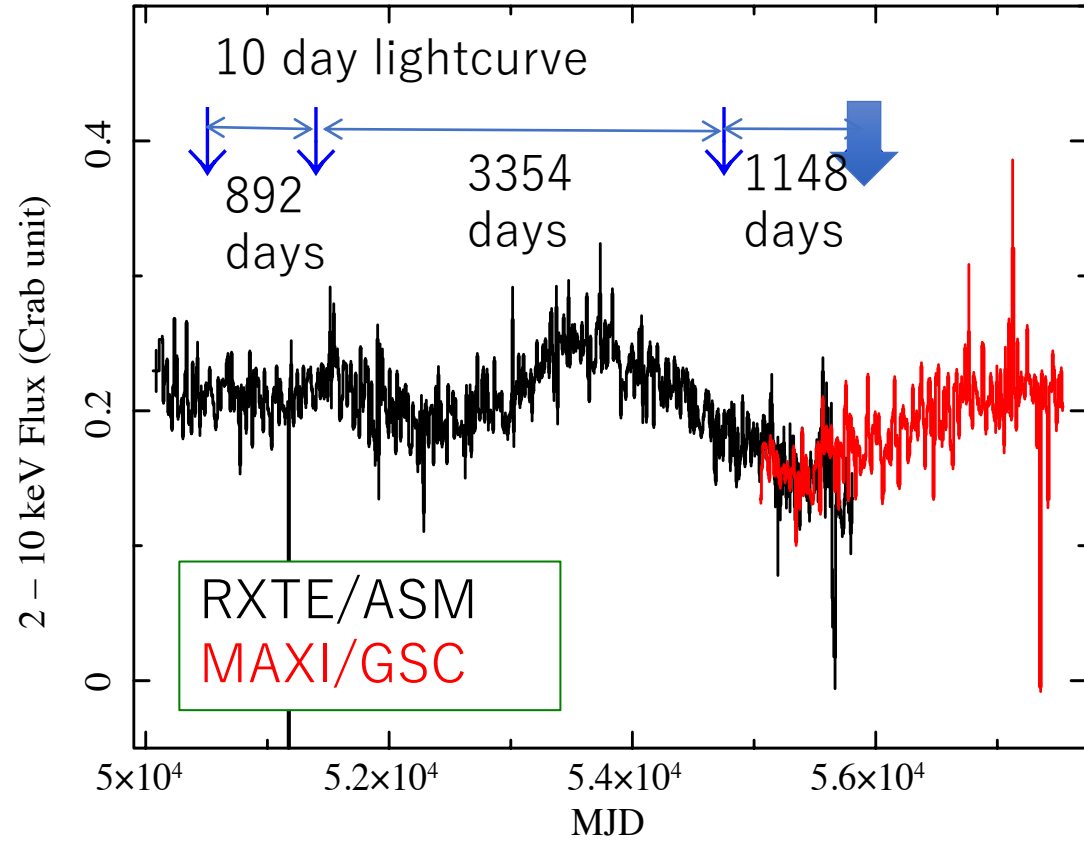


ヘリウム?

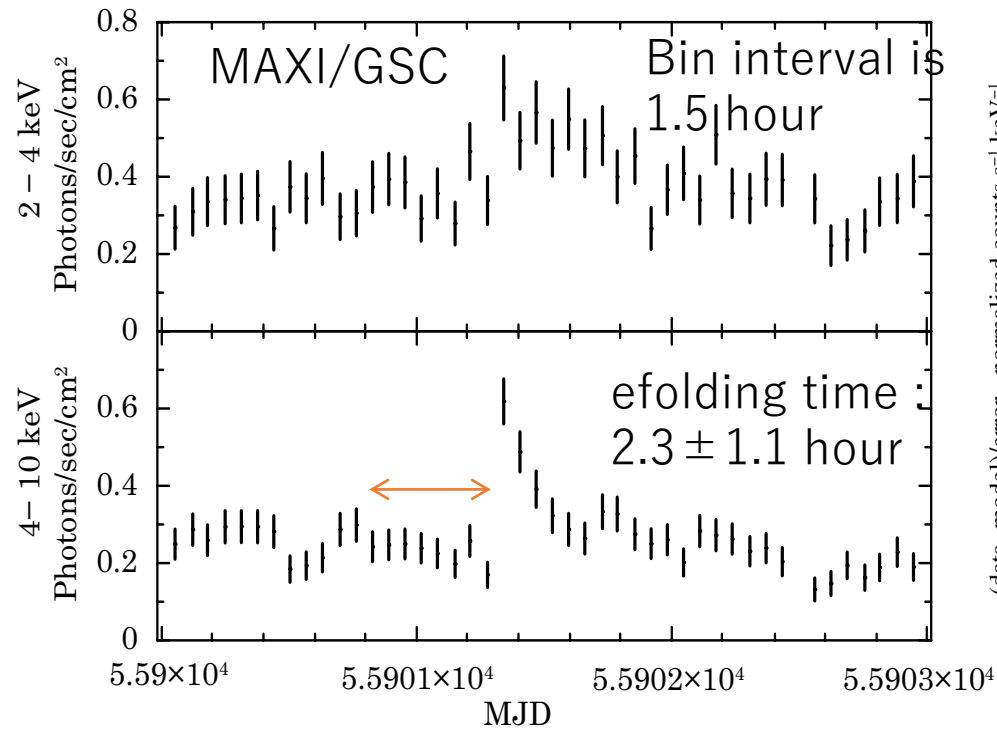
- ほとんど降着が起きていないのにスーパーバースト。He起源?(Altamirano+12)
- 定常放射が見えないので、重元素の痕跡が見やすいのでは?

# Serpens (へび座) X-1

- Persistent flux is  $4-6 \times 10^{-9}$  ergs/cm<sup>2</sup>/s (Galloway+08).
- Accretion rate : 38-50% Mdot Eddington (Galloway+08).
- Type-I burst  $\alpha$  range is 230 – 5800 (Sztajno+83, in't Zand+2003).
- Cooper+2006 suggested the CNO abundance is greater than solar (because of higher  $\alpha$ ).
- **3 superbursts** have been observed.



# Serpens (へび座) X-1 のスーパーバースト

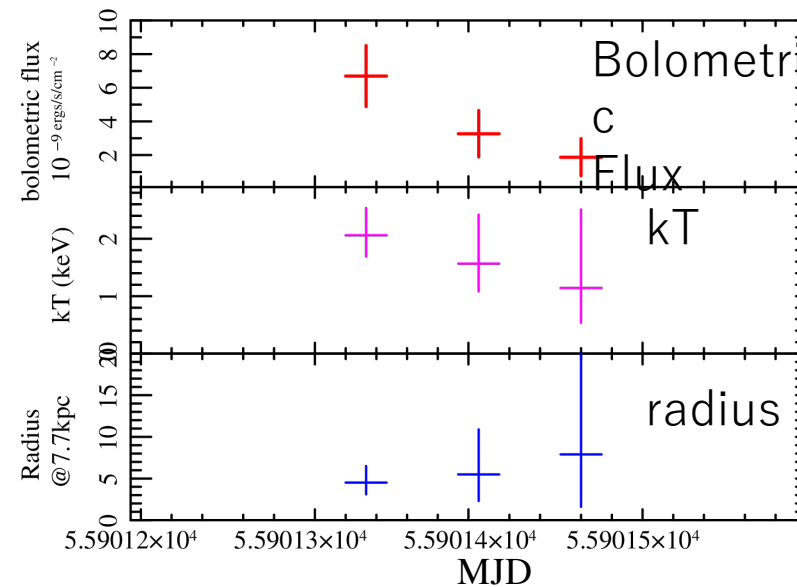
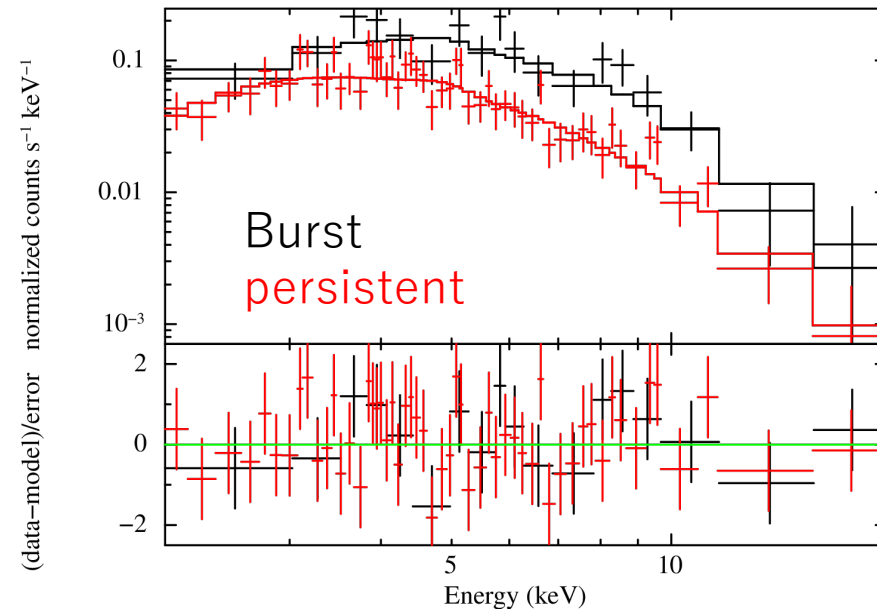


Observed the long-duration burst shows :

- fast rise and exponential decay.
- cooling properties (2 keV to 1 keV).
- blackbody radius is almost constant .

→ Typical properties of type-I X-ray bursts!

We conclude this is the fourth superburst from Ser X-1.



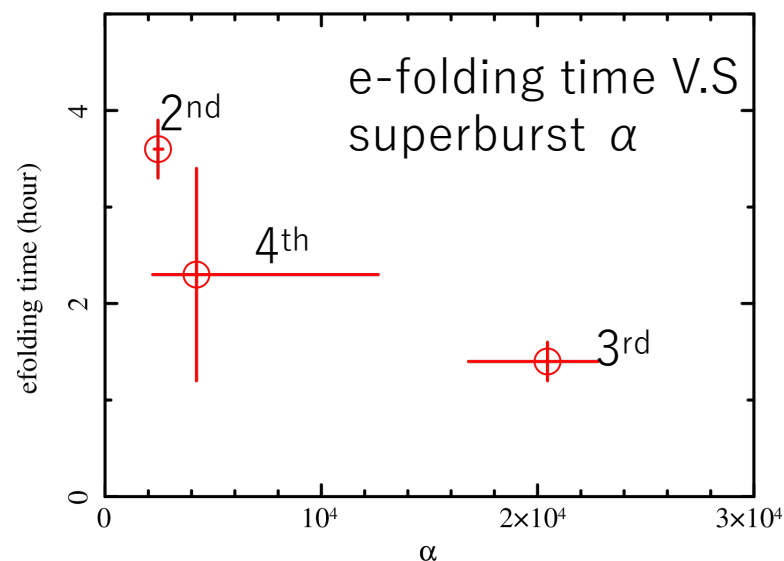
# 4回のスーパーバーストのまとめ

	1 <sup>st</sup> (Cornelisse+2002)	2 <sup>nd</sup> (Kuulkers+2009)	3 <sup>rd</sup> (Kuulkers+2009)	4 <sup>th</sup> (This work)
Date	50507.08	51399.14	54753.28	55901.34
Detector	SAX/WFC	RXTE/ASM	RXTE/ASM	MAXI/GSC
Recurrence time	---	892	3354	1148
e-folding time (hour)	$1.15 \pm 0.05$ (2 – 25 keV)	$3.6 \pm 0.3$ (1.5 – 12 keV)	$1.4 \pm 0.2$ (1.5 – 12 keV)	$2.3 \pm 1.1$ (bolometric)
$f_{\text{peak}}$ ( $10^{-9}$ ergs/s/cm <sup>2</sup> )	19	11	13	7-13
E17, y12 (Cumming+2004)	2.3, 0.5 (Cumming+2006)	---	---	1.4-6.5, 1.7 – 2.5

(イベントを見逃している可能性があるものの)  
 回帰周期と継続時間(深さ)に関連?  
 回帰周期が長い方が、浅いところで発生?

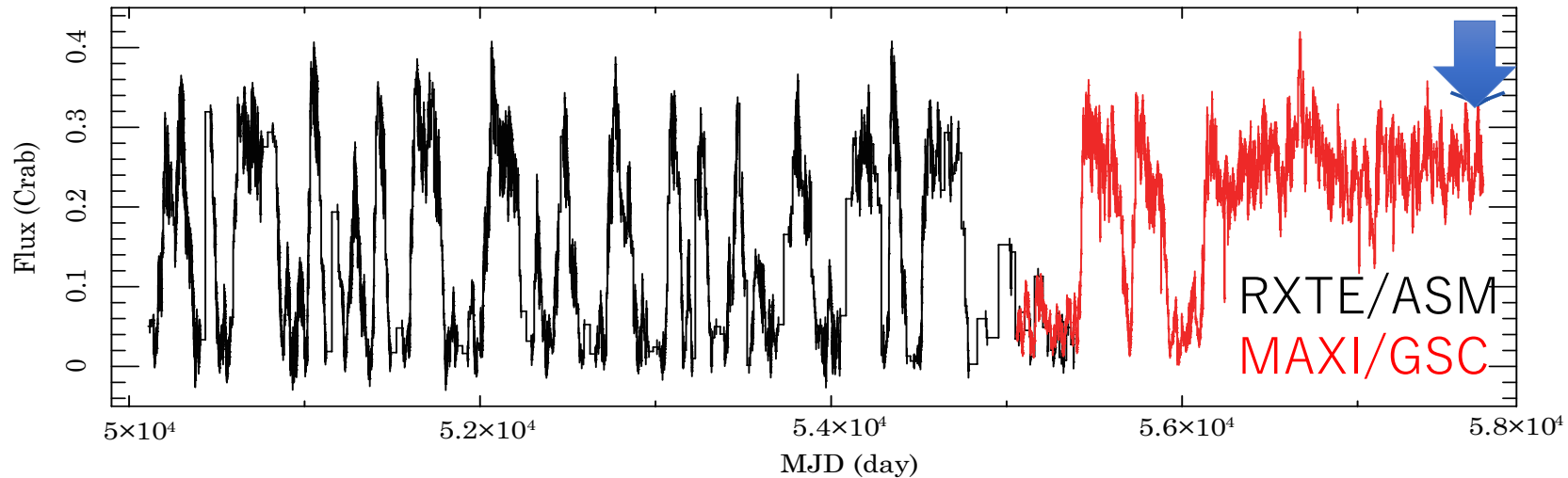
Future works:

- 系統誤差の見積もり
- この関係が正しいとすると、物理的な解釈は?



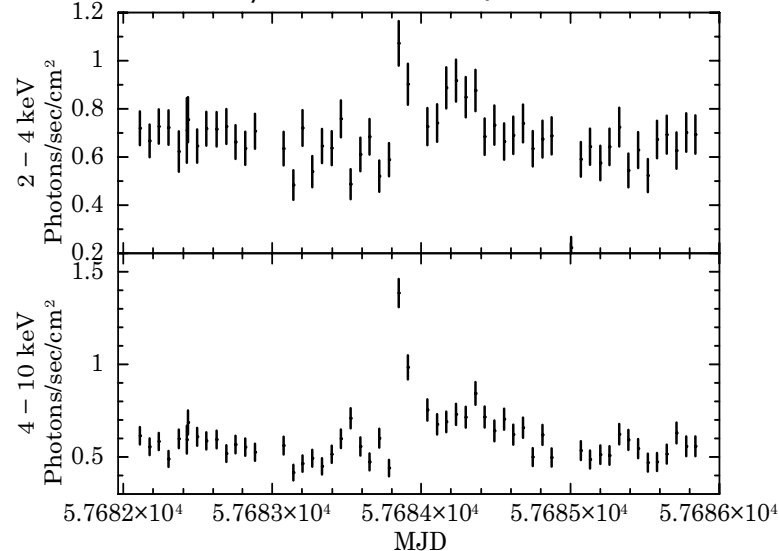
# 4U 1705-44からのスーパーバースト

ライトカーブ(~20年分)



Object name	$\alpha^{(b)}$
4U 1254-69	4800
4U 1636-536	440
KS 1731-260 <sup>(c)</sup>	780
4U 1735-444	4400
GX 3+1	2100
4U 1820-303	2200
Ser X-1	5800
EXO 0748-676	140
4U 1702-429	58
<b>4U 1705-44</b>	<b>1600</b>
GX 354-0	97
A 1742-294	130
GS 1826-24	32

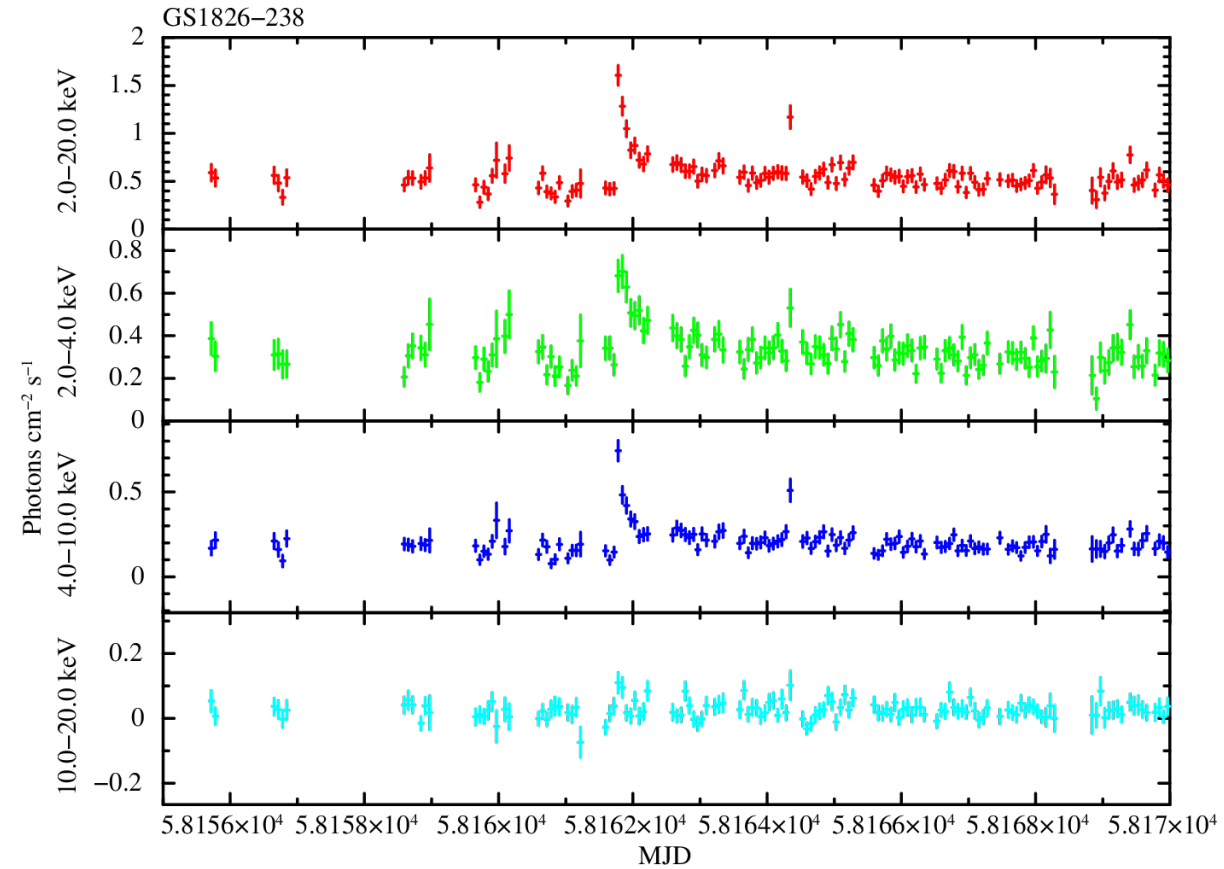
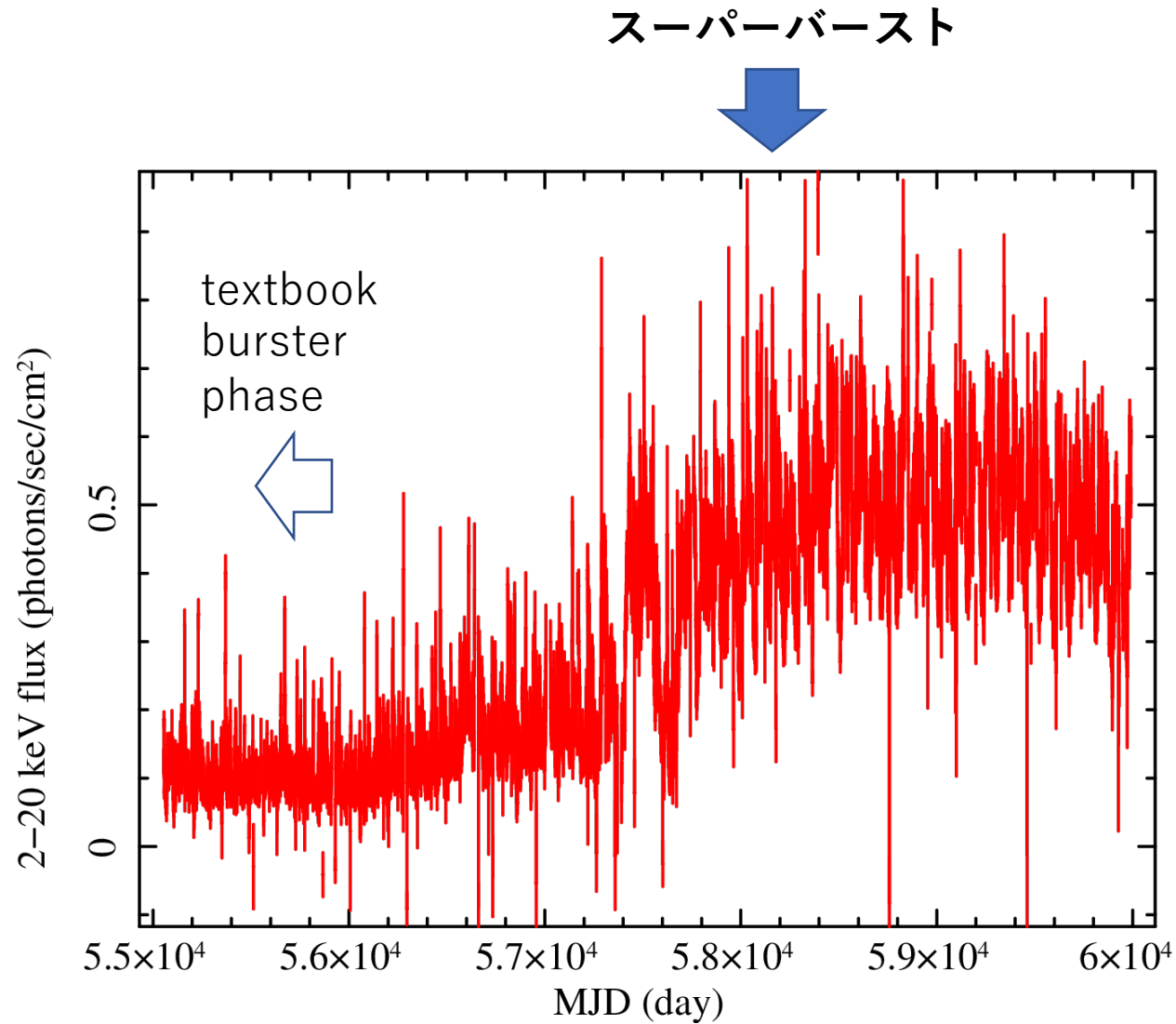
MAXI/GSCライトカーブ



$\alpha$  が大きいことから、有力なスーパーバースター候補だったが(in 't Zand+04)、ついに2016年10月に観測

Cに火がつくためには、ある程度Hi状態が続く必要があるのか？今後の課題。

# GS 1826-238からのスーパーバースト



2018年2月12日に初めて検出されて、以降は観測されず。

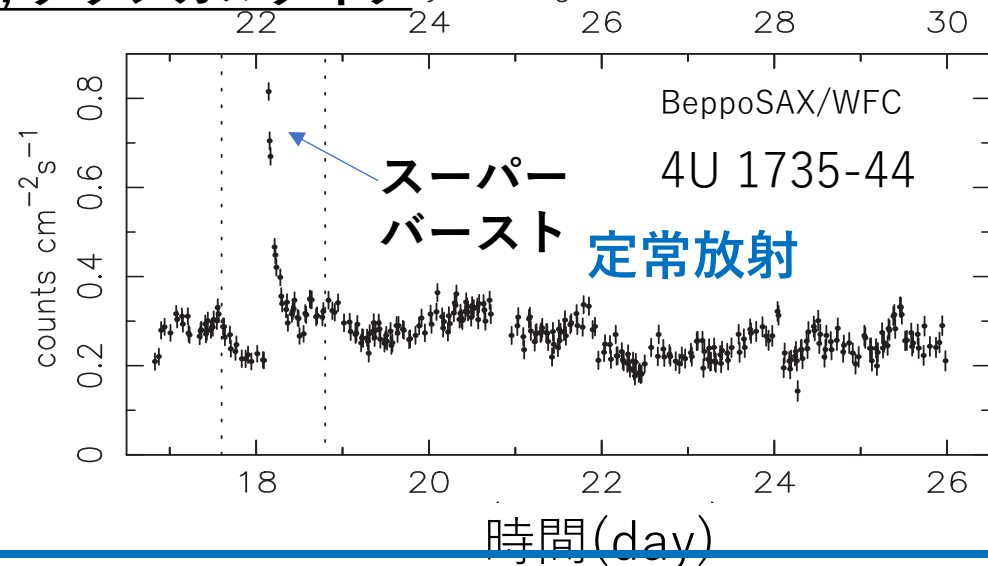
# 3つのスーパーバーストタイプ



- 2-20 keV (比例計数管)
- ISSの軌道周期に合わせて全天を走査観測

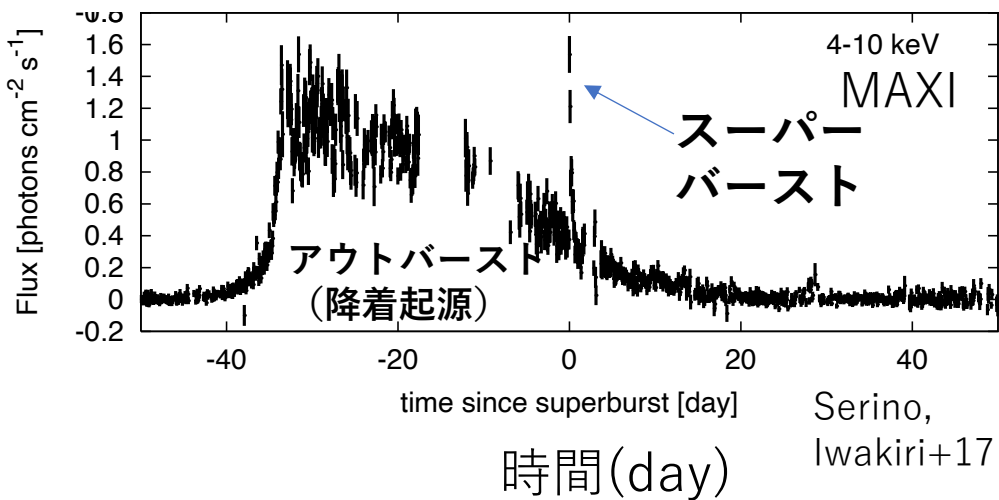
MAXIは、打ち上げ10年間で12個のスーパーバーストを検出している (Serino, Iwakiri et al., 16, Iwakiri+17 proceedings)。

## 1, クラシカルタイプ day in August 1996



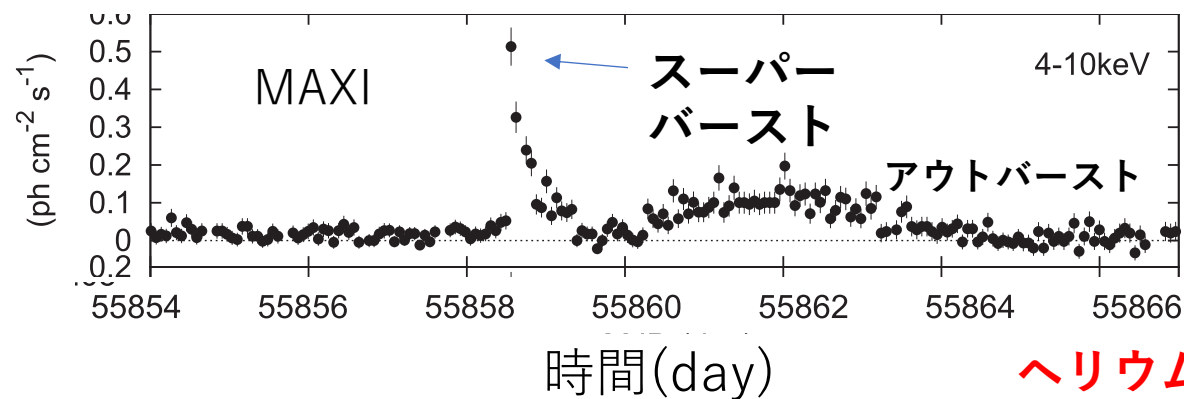
炭素核融合?

## 2, アウトバーストタイプ



炭素? 点火しない?  
(Keek+2008)

## 3, エクストリームタイプ

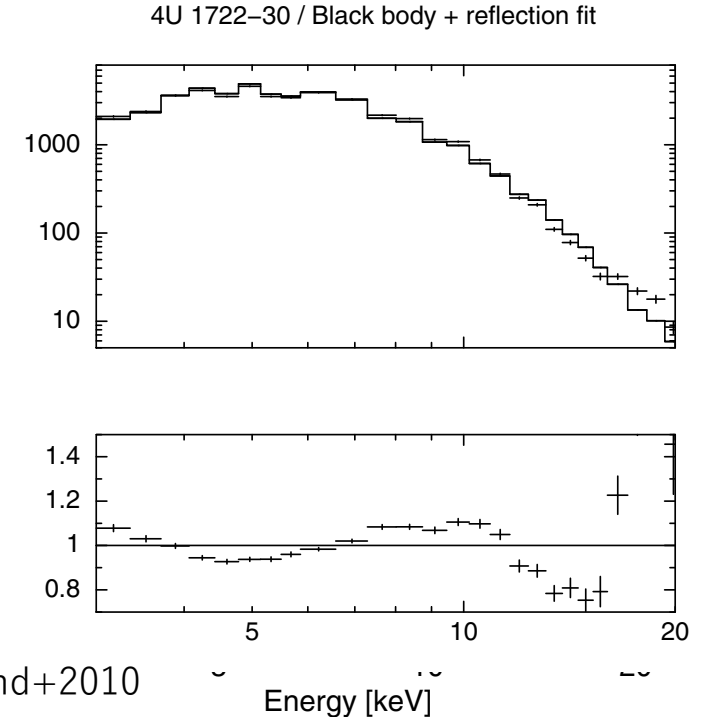
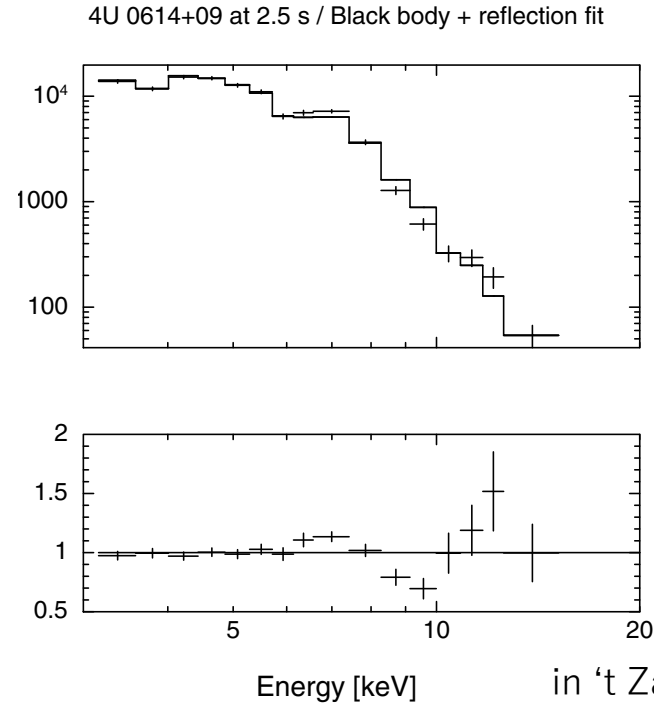
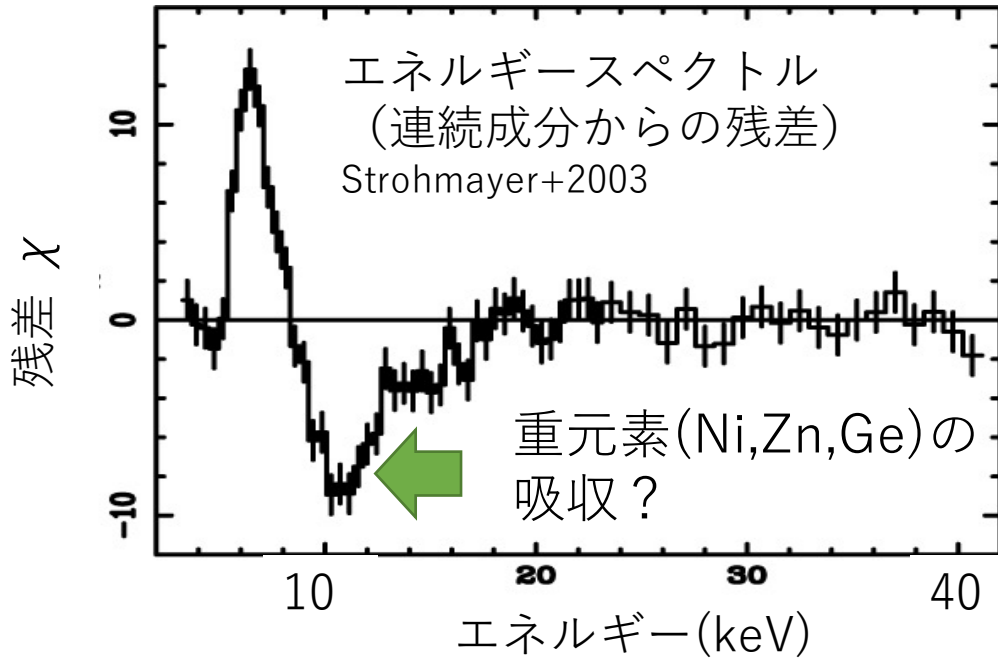


ヘリウム?

- ほとんど降着が起きていないのにスーパーバースト。He起源?(Altamirano+12)
- 定常放射が見えないので、重元素の痕跡が見やすいのでは?

# heavy-element ashes?

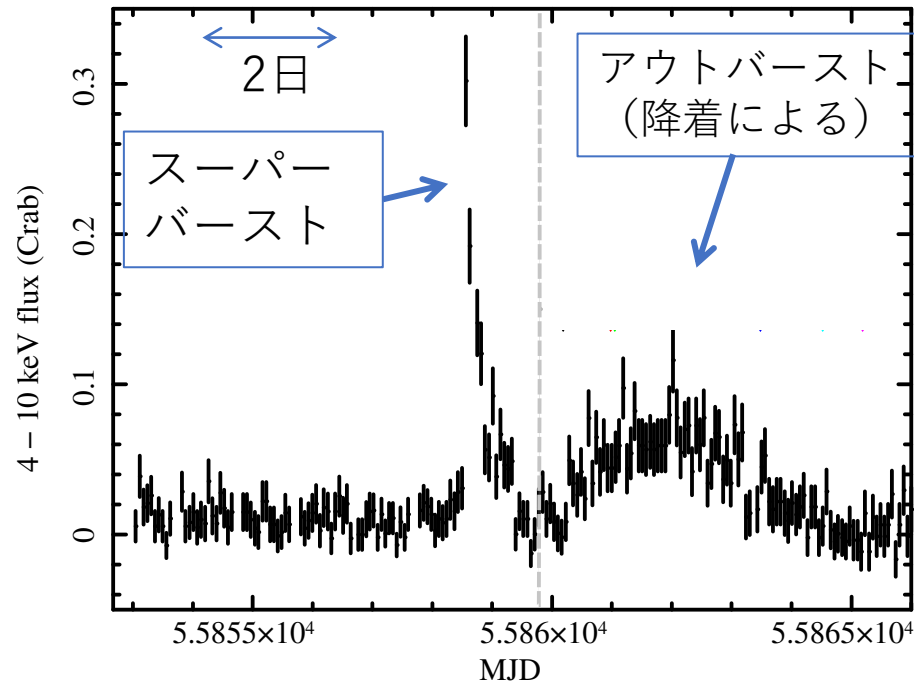
継続時間が長く、明るいバーストのスペクトルの例



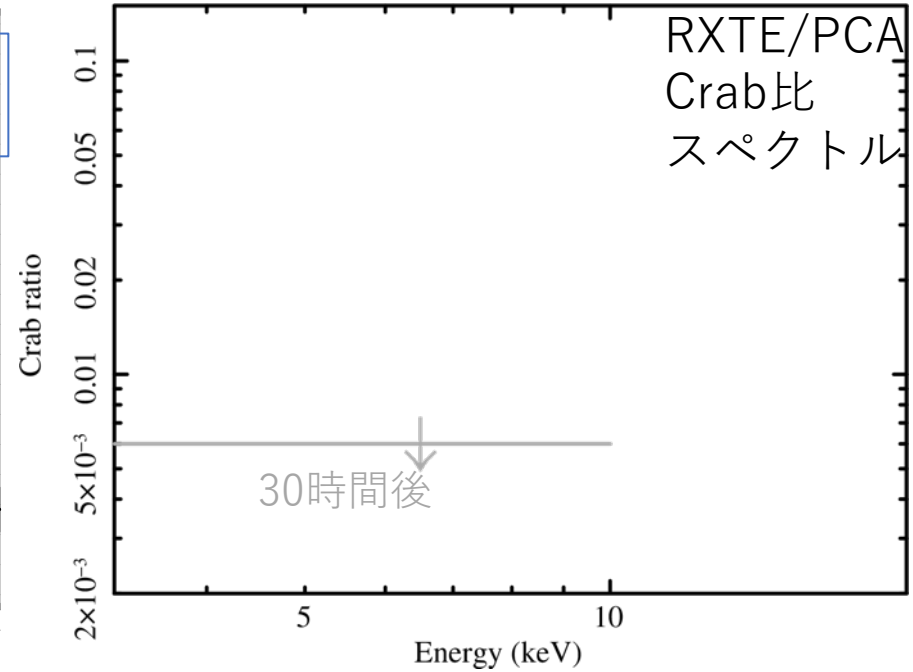
エディントン光度 (星の重力とバーストの輻射圧が釣り合う光度) を超えるバーストが起きた場合、輻射圧によるバースト風が、重元素の灰を中性子星の外に撒き散らす or NSの表面が曝露する?



# EXO 1745-248 のスーパーバースト発生後のX線スペクトル



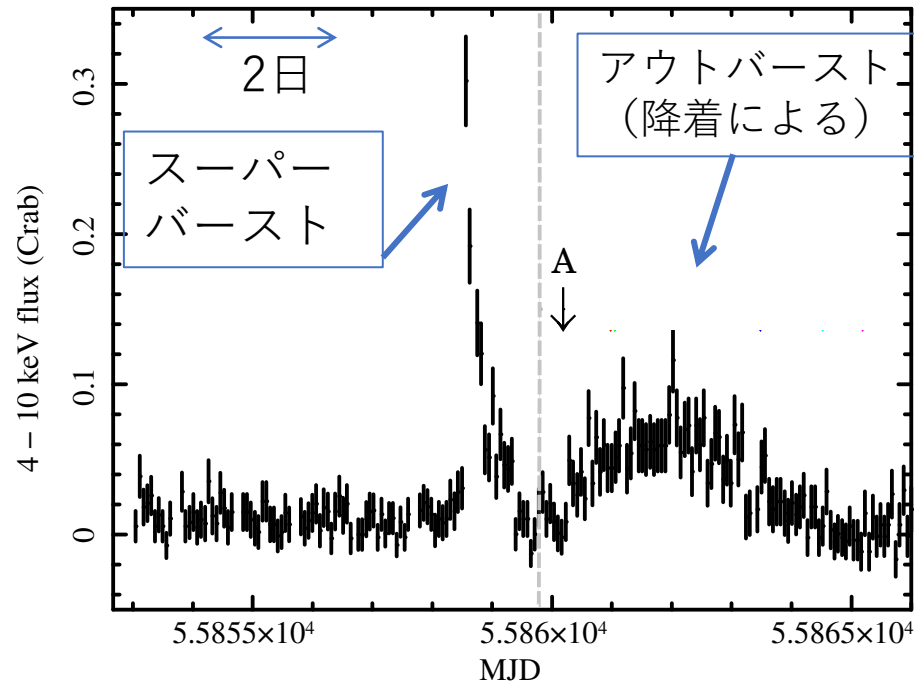
EXO 1745-248 MAXI lightcurves  
(Serino+12)



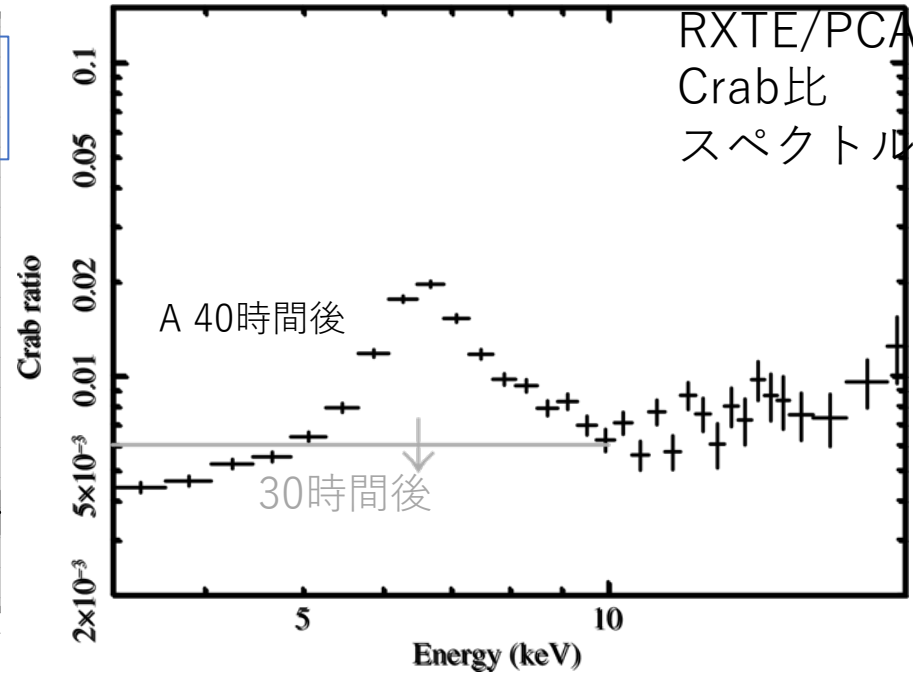
Iwakiri+2021

スーパーバーストのピークから：黒(39時間後)、緑(58時間後)、青(3日後)、シアン(4日後)、マゼンタ(5日後)

# EXO 1745-248 のスーパーバースト発生後のX線スペクトル



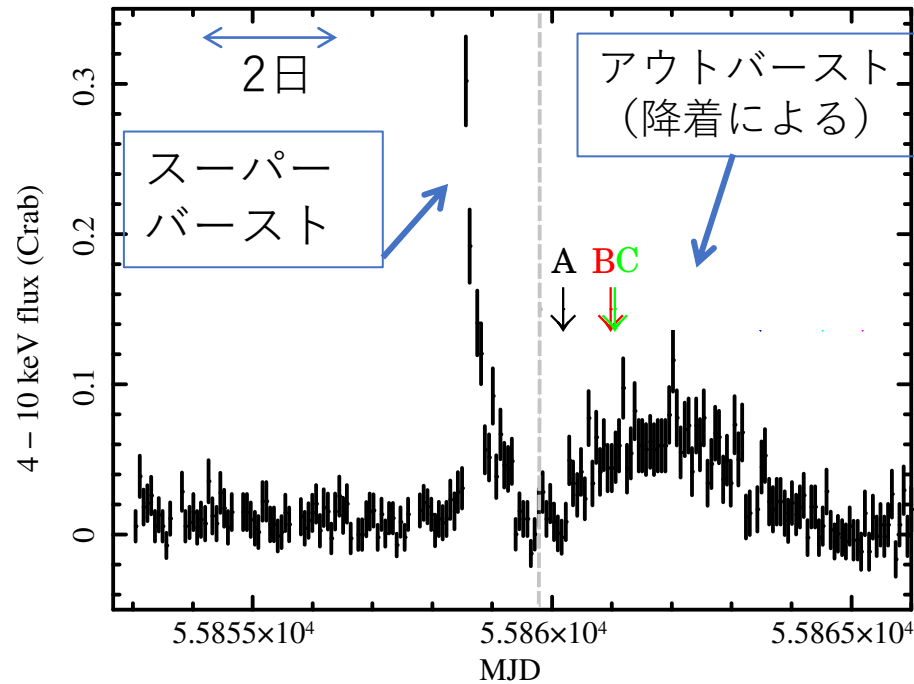
EXO 1745-248 MAXI lightcurves  
(Serino+12)



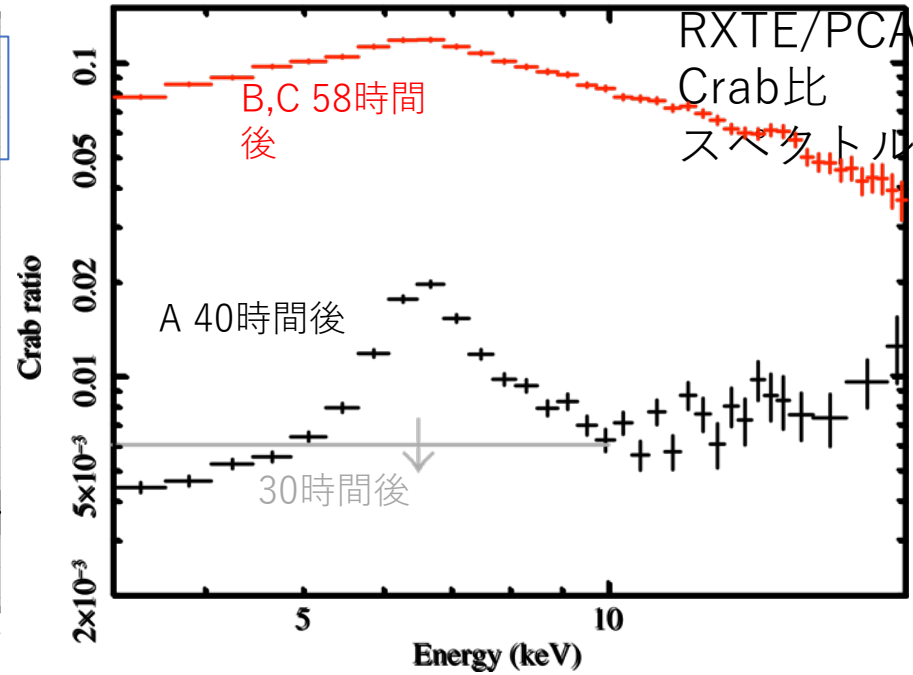
Iwakiri+2021

スーパーバーストのピークから：黒(40時間後)、緑(58時間後)、青(3日後)、シアン(4日後)、マゼンタ(5日後)

# EXO 1745-248 のスーパーバースト発生後のX線スペクトル



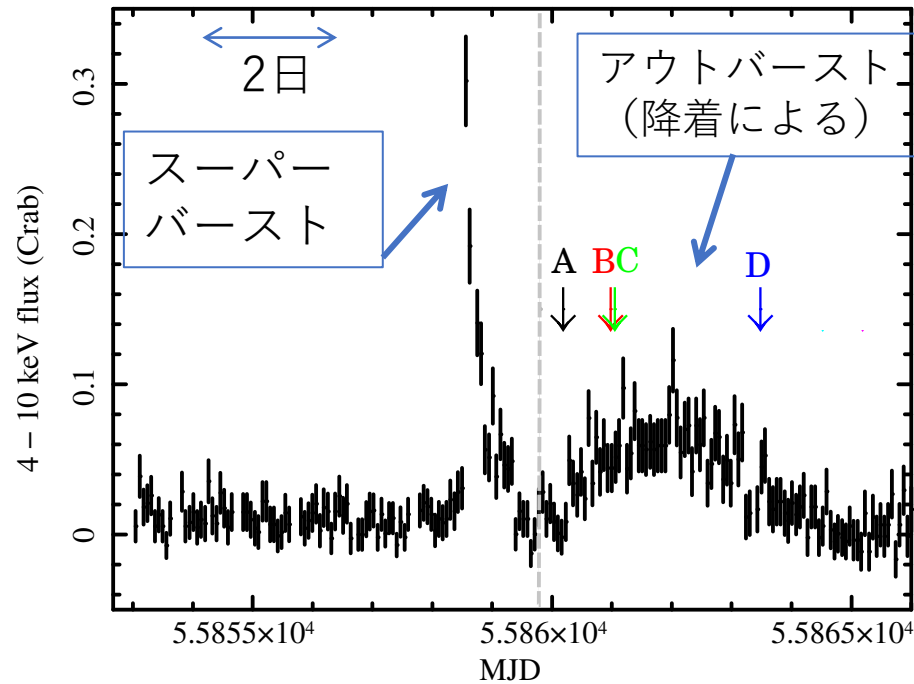
EXO 1745-248 MAXI lightcurves  
(Serino+12)



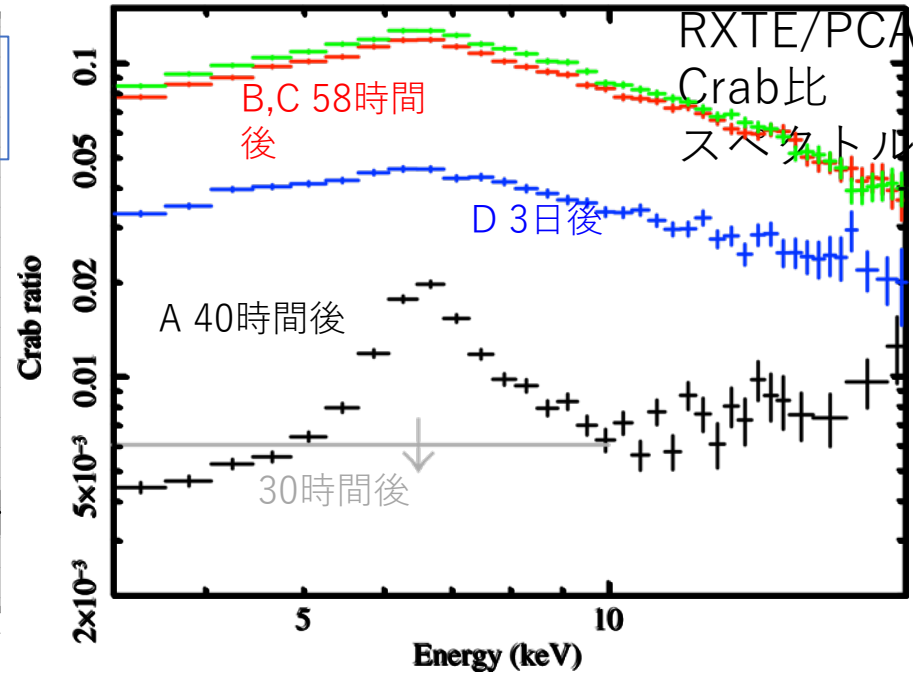
Iwakiri+2021

スーパーバーストのピークから：黒(40時間後)、緑(58時間後)、青(3日後)、シアン(4日後)、マゼンタ(5日後)

# EXO 1745-248 のスーパーバースト発生後のX線スペクトル



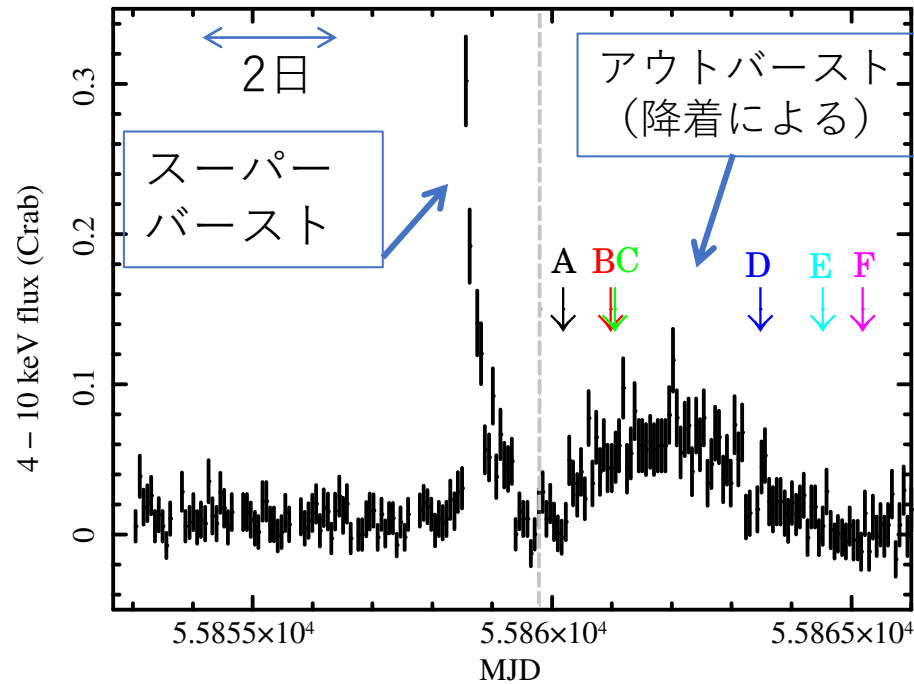
EXO 1745-248 MAXI lightcurves  
(Serino+12)



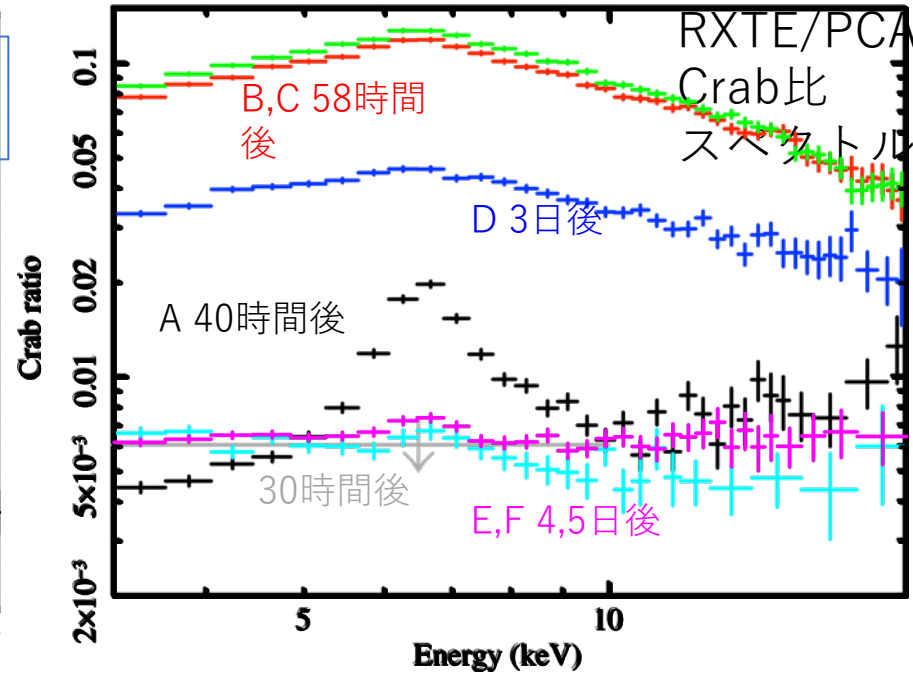
Iwakiri+2021

スーパーバーストのピークから：黒(40時間後)、緑(58時間後)、青(3日後)、シアン(4日後)、マゼンタ(5日後)

# EXO 1745-248 のスーパーバースト発生後のX線スペクトル



EXO 1745-248 MAXI lightcurves  
(Serino+12)



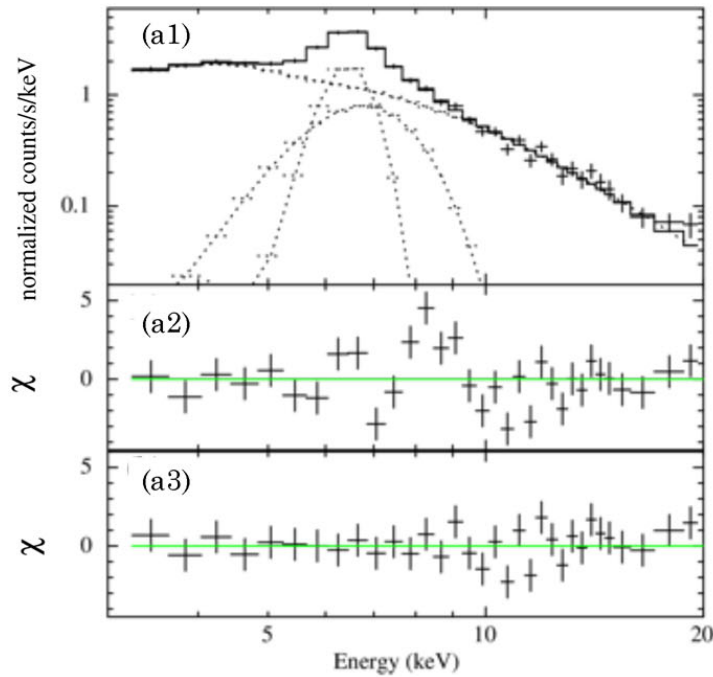
Iwakiri+2021

スーパーバーストのピークから：黒(40時間後)、緑(58時間後)、青(3日後)、シアン(4日後)、マゼンタ(5日後)

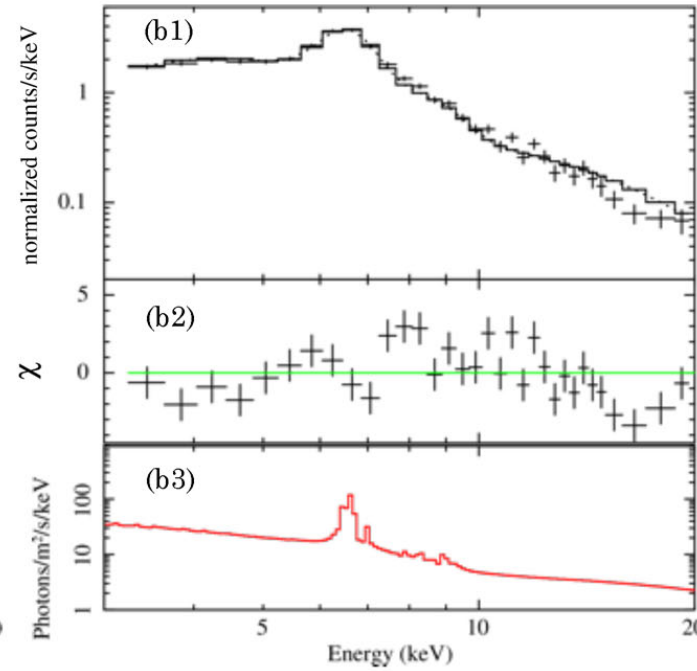
スーパーバースト後(MAXIのピークから39.6時間後)の、Aのスペクトルに異常な輝線成分を検出。しかし、その10時間前には見えていない。

その後、数日にわたるアウトバーストが発生し(スーパーバーストが周囲の環境を変えたため?)、数日後にAと同程度のfluxに落ちた時には、輝線構造が消えている。

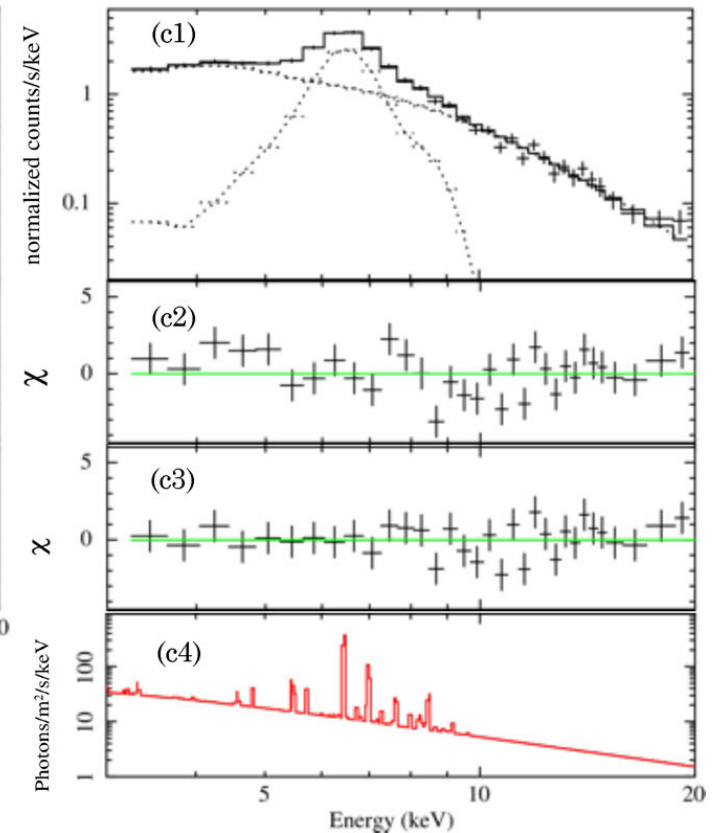
# 輝線構造の起源は？



経験的なモデル



反射成分モデル



電荷交換反応 (Charge exchange) モデル

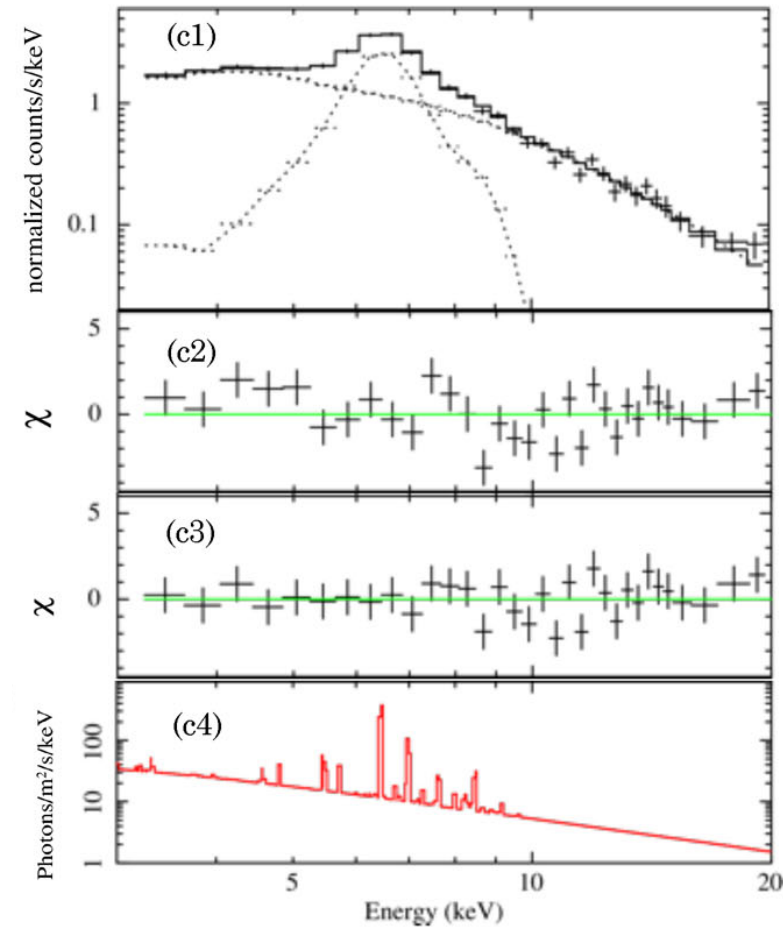
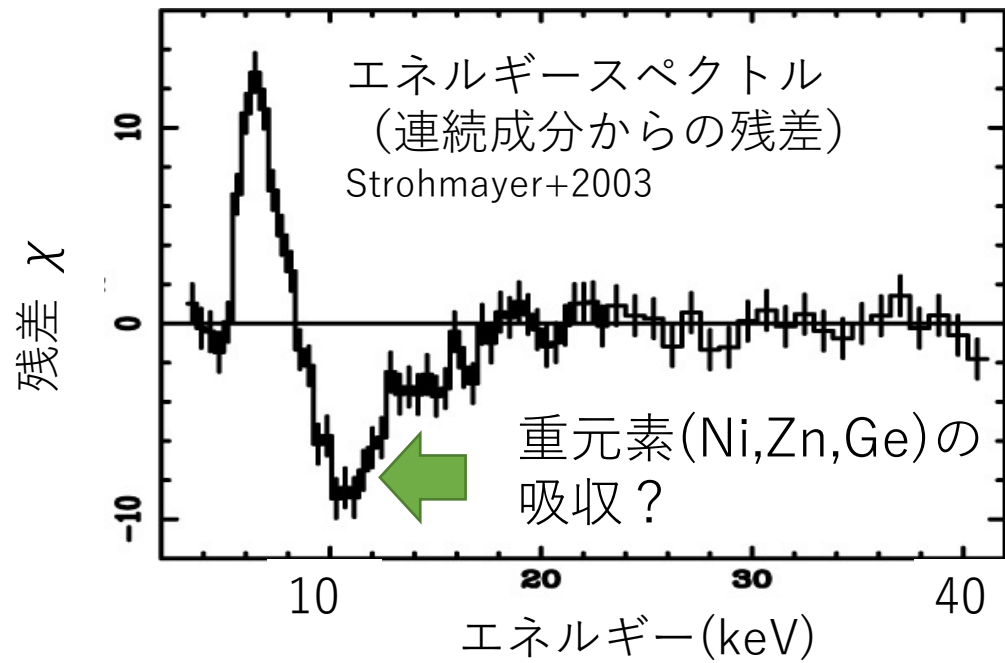
Iwakiri+2021

輝線構造を再現できる、唯一の物理モデルは、赤方偏移したTi、Cr、Fe、Coによる電荷交換反応モデル

→NSから~50 km程度の距離で、バーストの輻射で電離した不安定核 $^{44}\text{Ti}$ 、 $^{48}\text{Cr}$ 、 $^{52}\text{Fe}$ 、 $^{55}\text{Co}$ と、中性の降着円盤との電荷交換反応では？ (Iwakiri+2021)

Ti/Fe、Cr/Fe、Co/Feは太陽組成と100~1000倍程度違う。

# 観測の問題点



Iwakiri+2021

よりエネルギー分解能の良いX線検出器を使って、貴重な継続時間の長いバーストを観測できる体制を構築することが重要

# OHMAN (On-orbit Hookup of MAXI And NICER)

## 3. すばやく追観測



## 2. 軌道上で新星を発見



## 1. データを OHMAN PCへ送信



MAXIもNICERもISSに搭載。

MAXIはバーストは見つけれられるが、詳細なスペクトルは取れない。NICERはバーストは見つけれられないが、詳細なスペクトルは取れる。

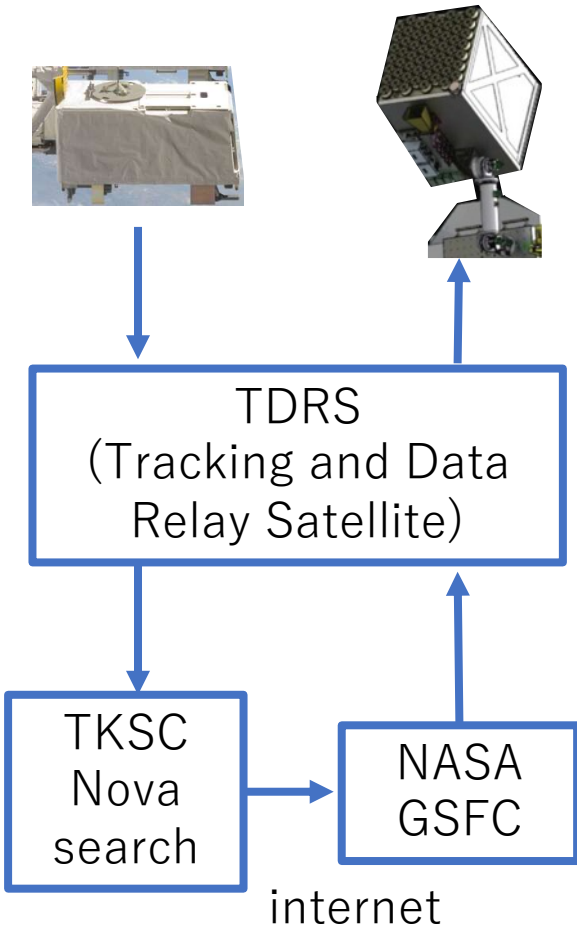
→2つの検出器をISS内のPCを介して繋いで、MAXIで見つけた突発現象をNICERで2分以内に観測



# MANGA (MAXI And NICER Ground Alert)

- OHMAN実現に向けた、地上経由でのMAXI-NICER連携観測

Test transient observations for OHMAN

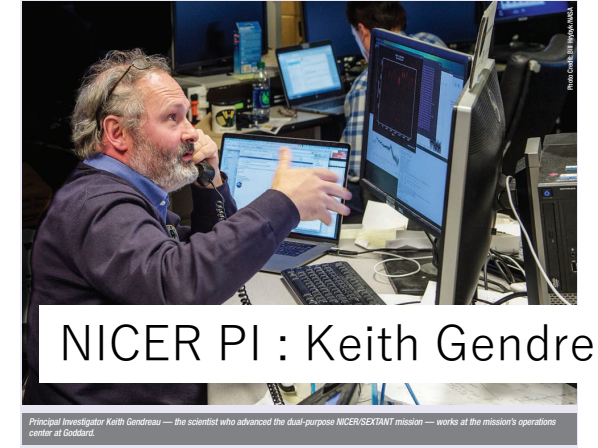


Volume 14 • Issue 2 • Winter 2018



Scientists operate the NICER mission and the X-ray navigation experiment, SEXTANT, from the operations center at Goddard.

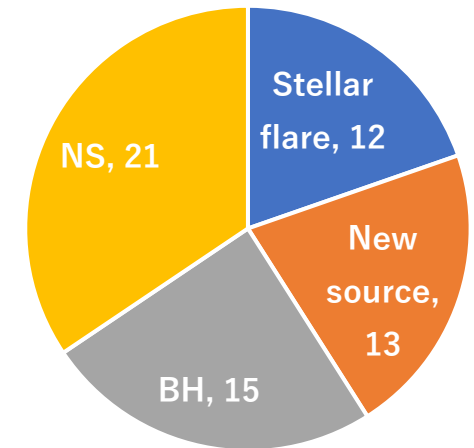
NASA Goddard  
NICER Operation room



NICER PI : Keith Gendreau

Principal Investigator Keith Gendreau — the scientist who advanced the dual-purpose NICER/SEXTANT mission — works at the mission's operations center at Goddard.

NICERは人工衛星のように姿勢制御を失う危険性がないため、早い追観測が可能



61 MANGA observation have done

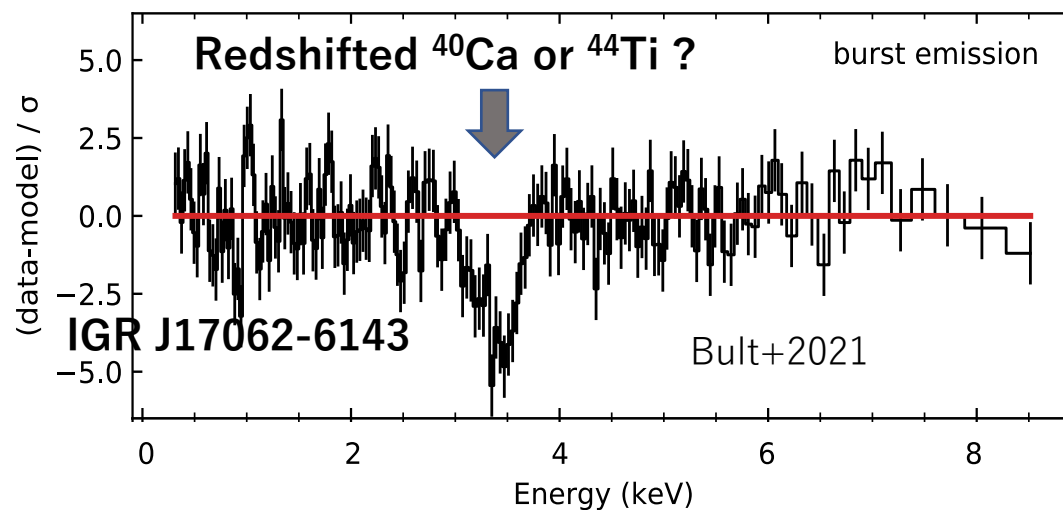
# MANGA observation for Long X-ray bursts

MAXI detection of the long X-ray burst from IGR J17062-6143 and 4U 1820+30



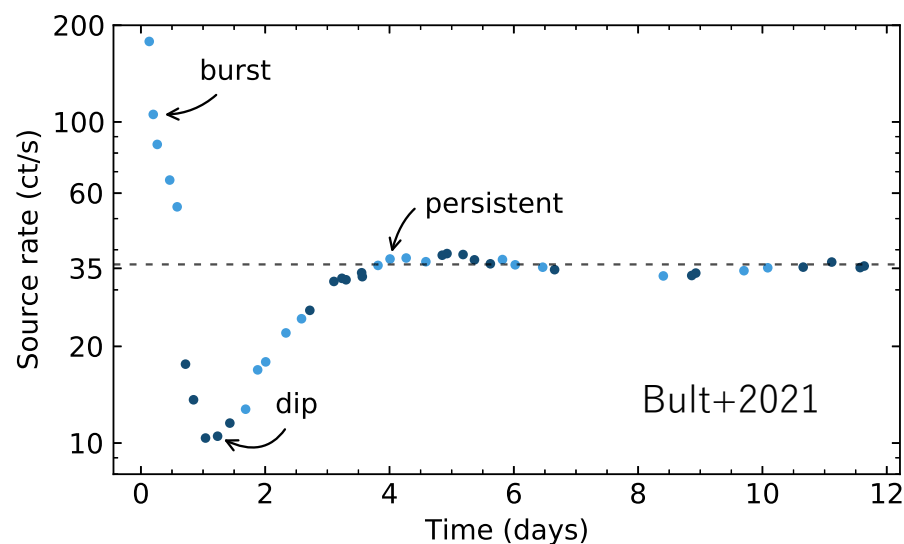
Successful NICER observation 3 hours after detection.

## Spectral feature



- 6.4  $\sigma$  の有意度で吸収線を検出
- NS表面の $^{40}\text{Ca}$  or  $^{44}\text{Ti}$  では？

## Mysterious dip after the burst

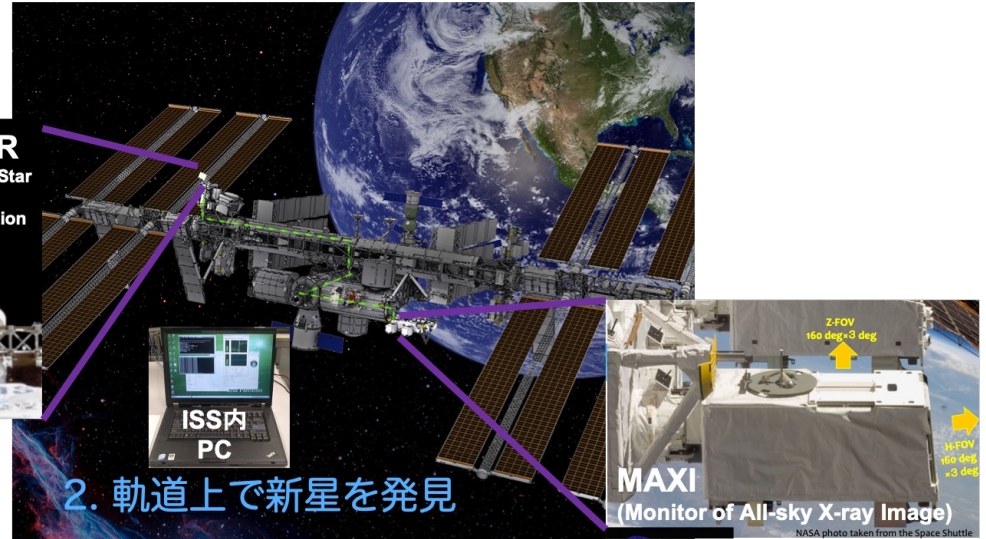
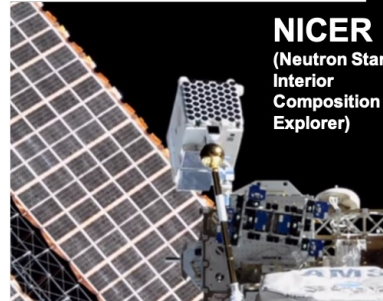


- dipの原因として、バーストによってNS周囲の降着円盤が一旦破壊され、それが戻っていく様子がみえている？

# 直近の新たなX線ミッション

OHMANは6月後半より開始  
されました！  
→現在最初のイベントを待っ  
ている最中（レートはおよそ  
1ヶ月に1イベント）

## 3. すばやく追観測



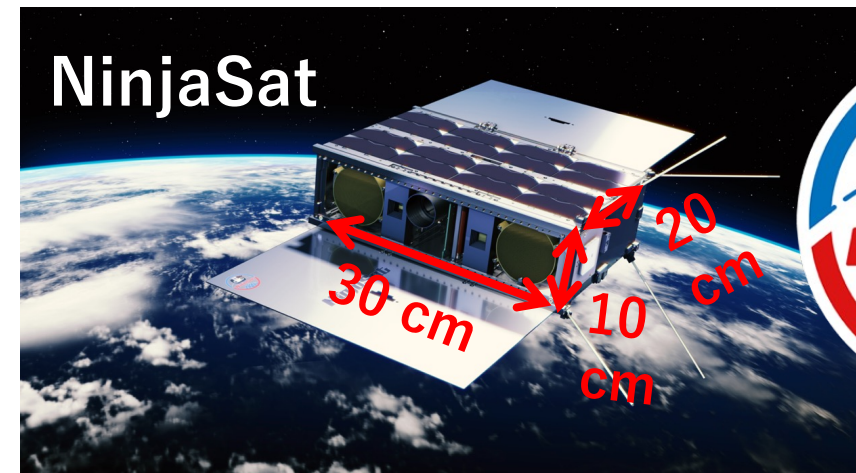
## 2. 軌道上で新星を発見



## 1. データを OHMAN PCへ送信

## 超小型衛星NinjaSat

- 2023年10月打ち上げ予定
- monthオーダーで明るいLMXBを観測できるので、クラシカルなスーパーバースト(炭素核融合)の新たな情報が得られることを期待



# まとめ

- 広視野のX線検出器によって、継続時間の長いX線バーストが見つかるようになってきた。
- MAXIによって、3つ目のタイプのスーパーバーストが発見された。
- MAXIによって、2回目以降のスーパーバーストの検出も増えてきた。
- EXO 1745-248のスーパーバーストのケース（恐らく燃料はHe）では、 $^{44}\text{Ti}$ 、 $^{48}\text{Cr}$ 、 $^{52}\text{Fe}$ 、 $^{55}\text{Co}$ によるものと思われるスペクトル構造が観測された。
- よりエネルギー分解能の良い観測で元素の情報を得るために、MAXI-NICER連携を推進。 $^{40}\text{Ca}$  or  $^{44}\text{Ti}$ による吸収線の観測に成功
- 開始されたOHMANによってさらに観測例が増えることを期待