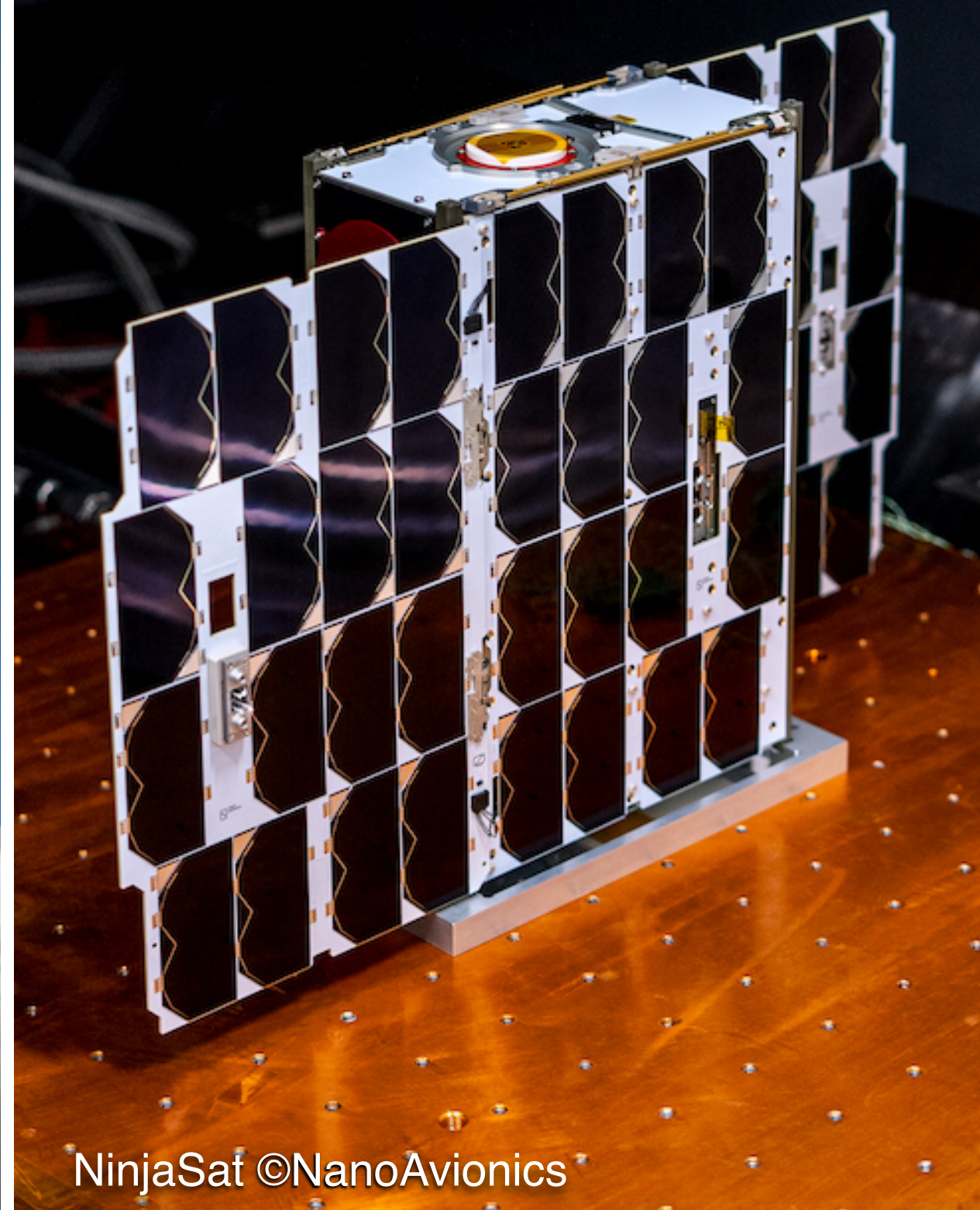


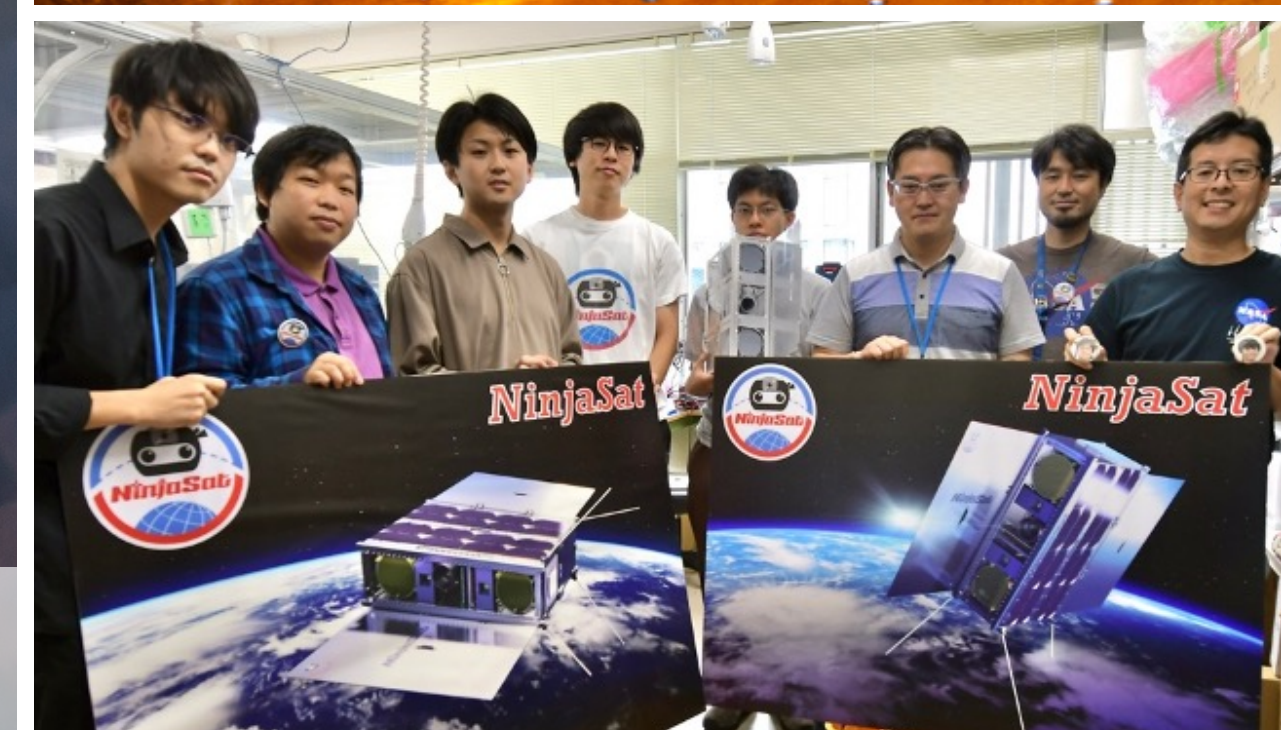
キューブサットX線衛星NinjaSat による時間軸天文学への貢献

榎戸輝揚^{A, B}, 玉川徹^{B, C}, 岩切渉^D, 武田朋志^E, 大田尚享^{B, C}, 青山有未来^{B, C}, 岩田智子^{B, C}, 高橋拓也^{B, C}, 山崎楓^{B, C}, 喜多豊行^D, 土屋草馬^{B, C}, 中野遥介^{B, C}, 一番ヶ瀬麻由^F, 三原建弘^B, Chin-Ping Hu^G, 土肥明^B, 西村信哉^H, 北口貴雄^B, 加藤陽^B, 沼澤正樹^I, 高橋弘充^E, ほか NinjaSat Team
京大^A, 理研^B, 東理大^C, 千葉大^D, 広島大^E, 立教大学^F, 彰化師範大^G, 東大^H, 都立大^I

米国で大型科学に逆風が吹く中、
小さな衛星では何ができるか？



NinjaSat ©NanoAvionics

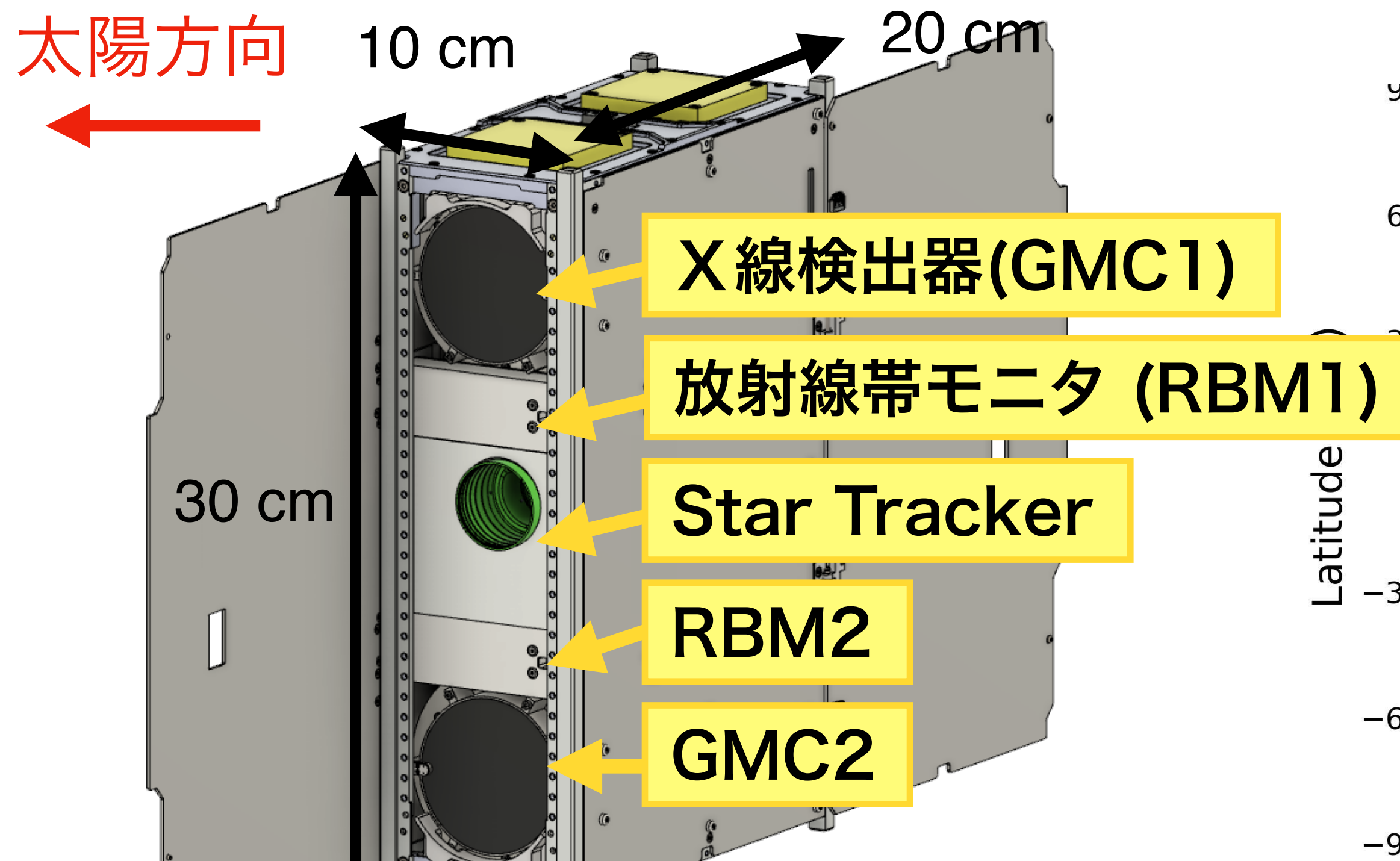


2023/11/11 Transporter-9 ©SpaceX

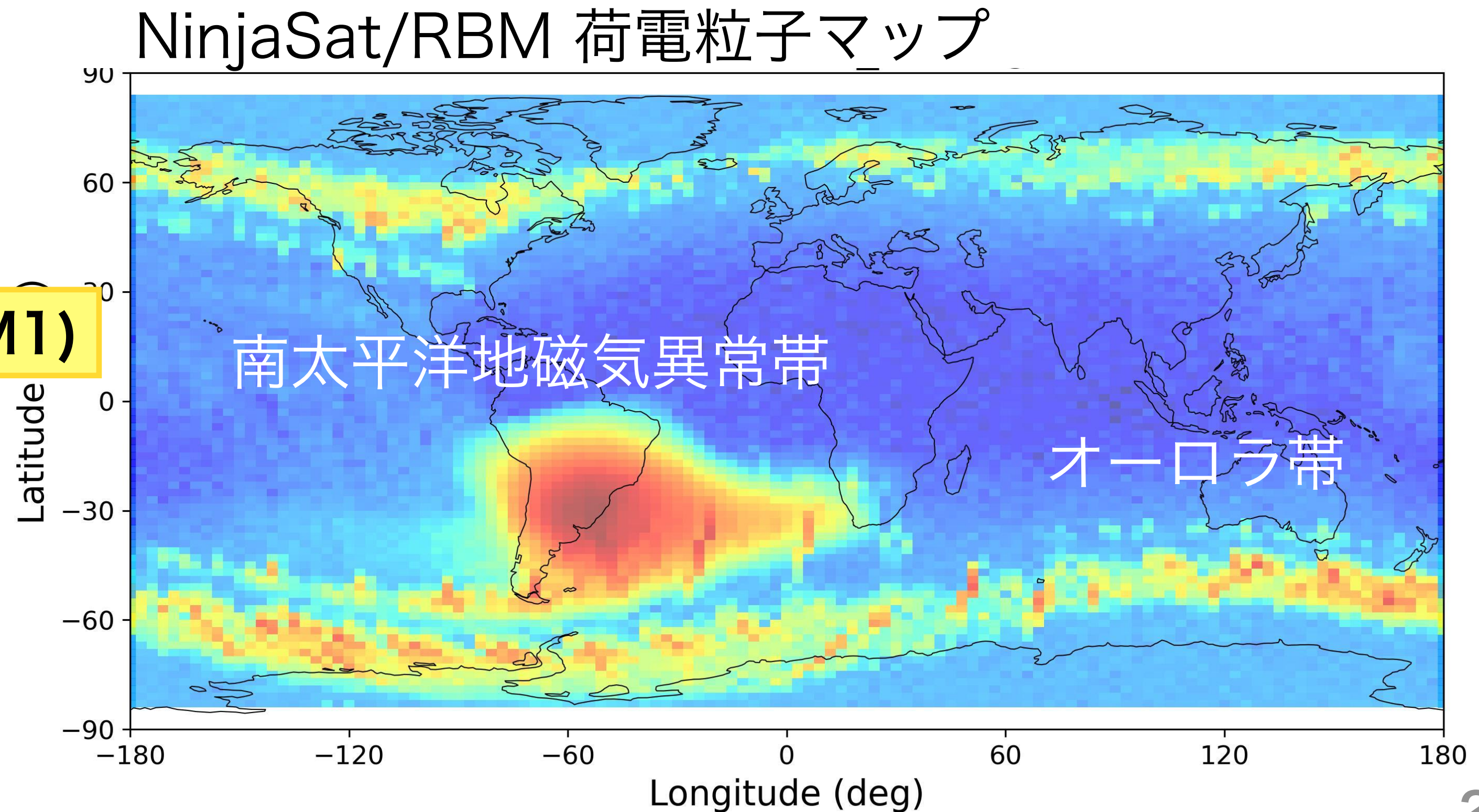
YITP workshop “Exploring Extreme Transients: Frontiers in the Early Universe and Time-Domain Astronomy”
2025/8/5 15:00-15:15, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University

日本初のキューブサット X線衛星 NinjaSat

- ・ 明るい X 線源の柔軟なモニタリングや、突発現象の迅速な追跡観測
- ・ NanoAvionics社 6Uバス (M6P), ~8 kg, 16 W (w/40% マージン)
- ・ Space X Transpoeter-9, 太陽同期軌道 510 km (2024年7月時点)
- ・ 3軸姿勢制御 (w/スタートラッカー) → ポインティング精度 $<0.1^\circ$

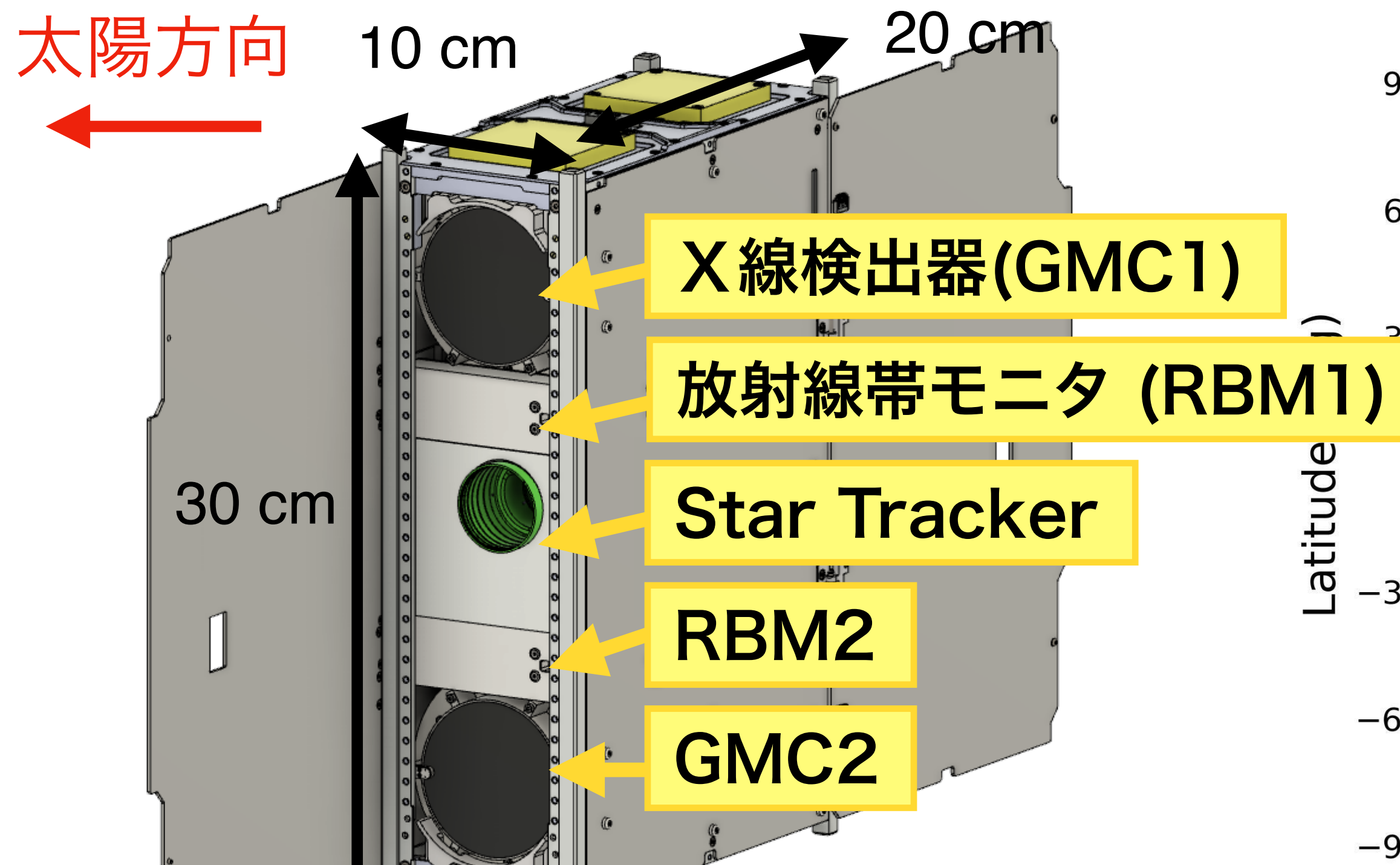


Tamagawa, TE et al., PASJ (2025)

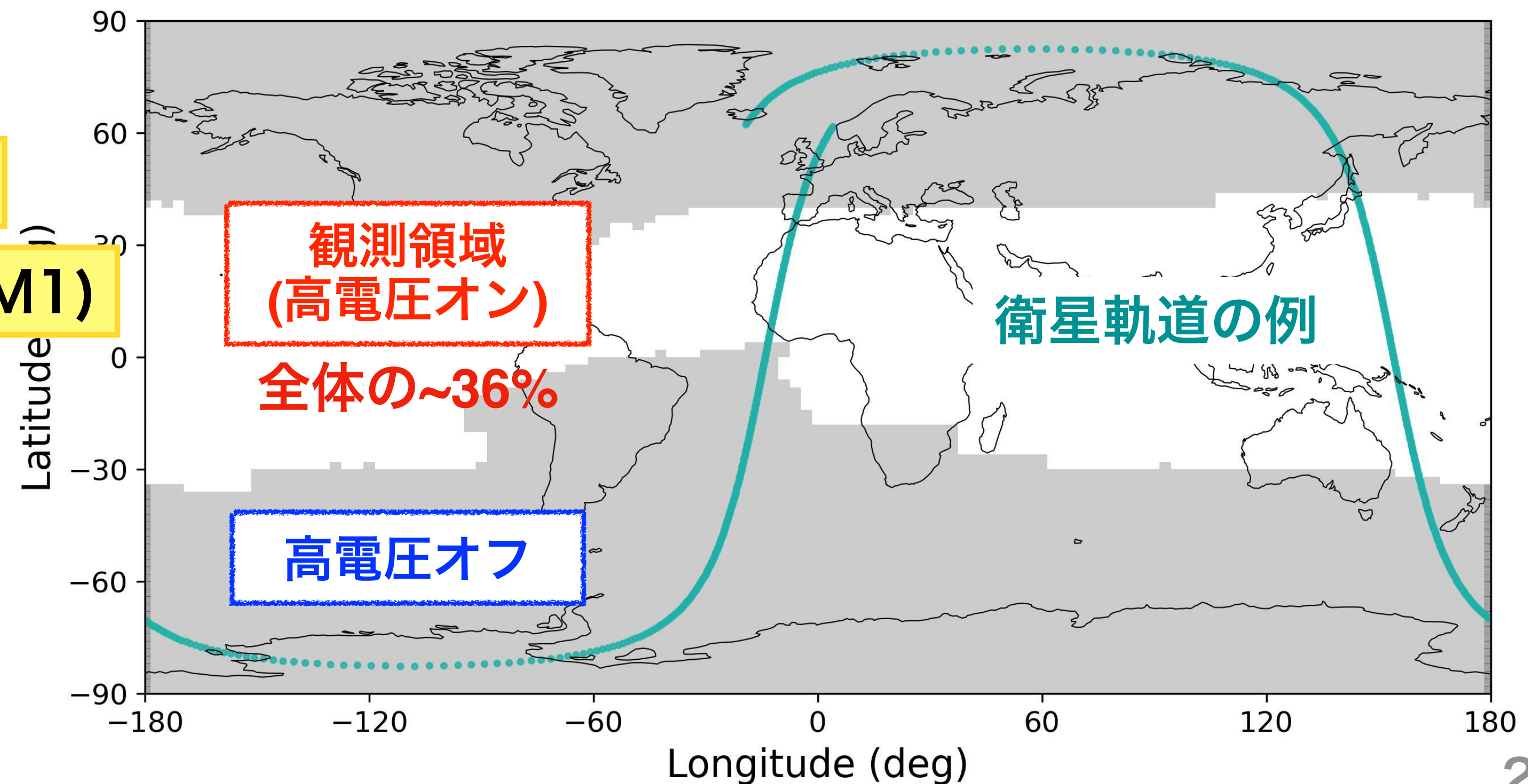


日本初のキューブサット X線衛星 NinjaSat

- ・ 明るい X 線源の柔軟なモニタリングや、突発現象の迅速な追跡観測
- ・ NanoAvionics社 6Uバス (M6P), ~8 kg, 16 W (w/40% マージン)
- ・ Space X Transpoeter-9, 太陽同期軌道 510 km (2024年7月時点)
- ・ 3軸姿勢制御 (w/スタートラッカー) → ポインティング精度 $<0.1^\circ$



Tamagawa, TE et al., PASJ (2025)



NinjaSat 科学ペイロード

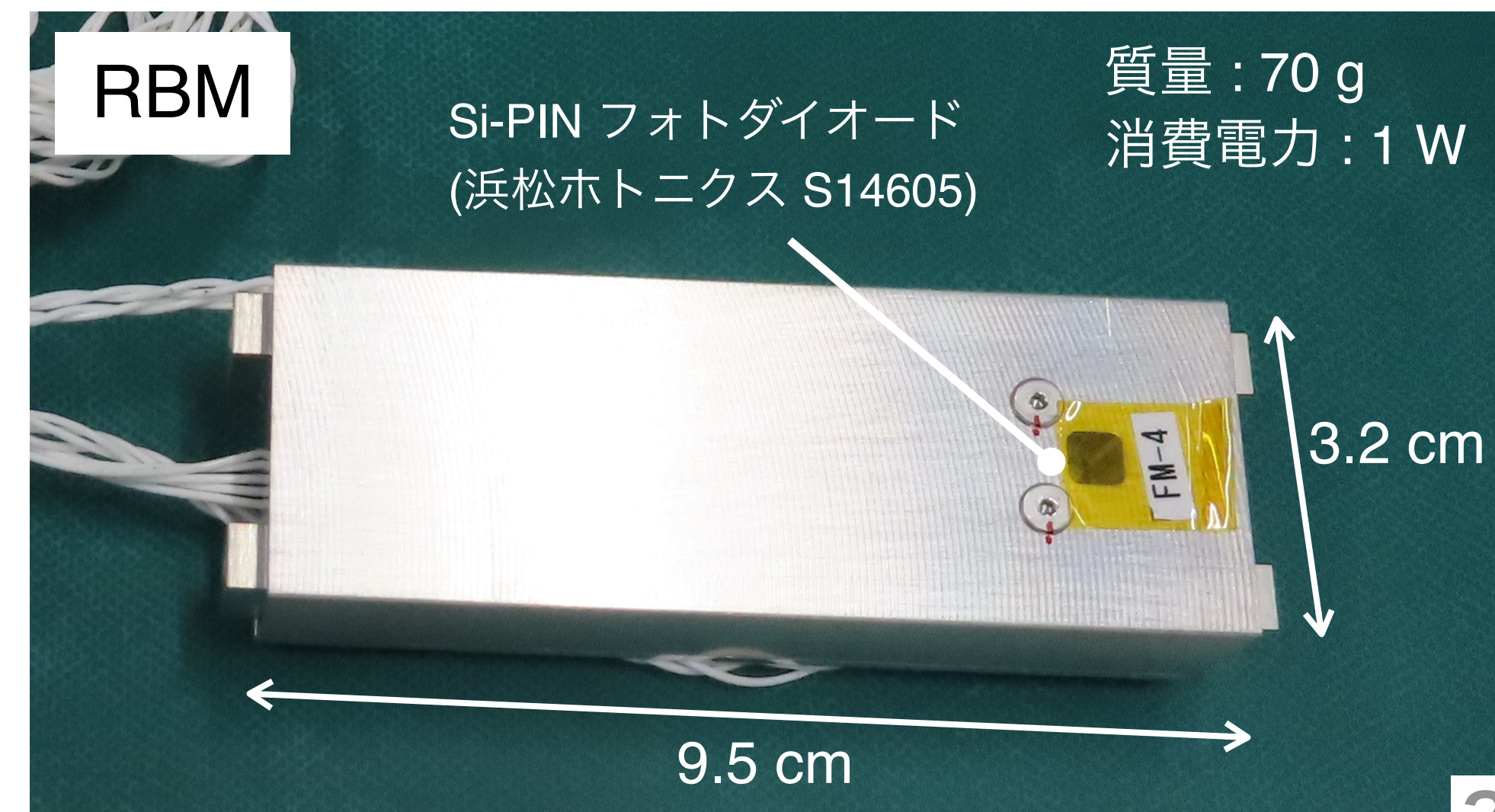
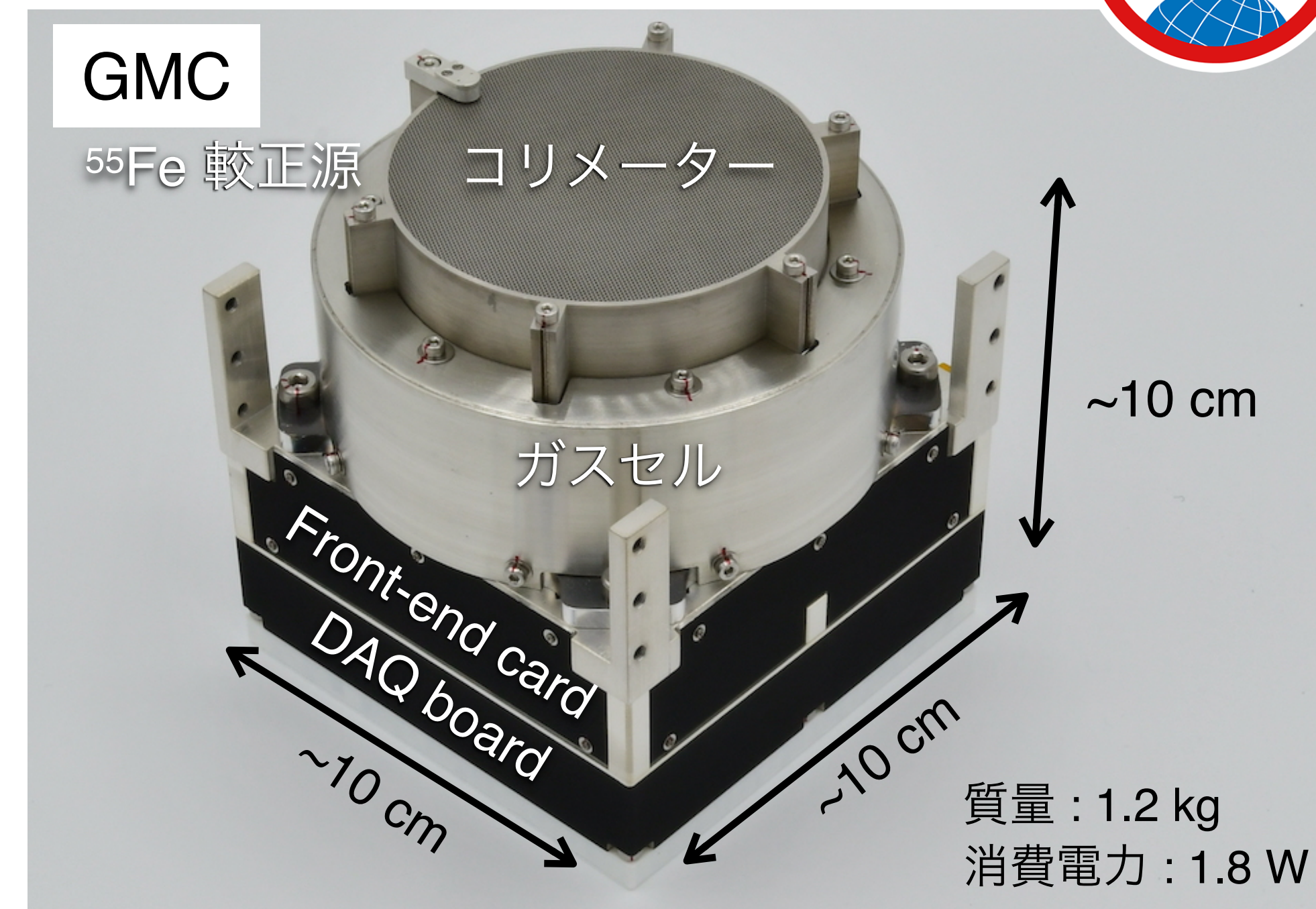


- **Gas Multiplier Counter (GMC)**

- 非撮像型ガス検出器 FoV 2.1° (FWHM)
- Xe (75%) Ar (24%) DME (1%)
- 2-50 keV ($\Delta E/E \sim 20\%$ @ 5.9 keV)
- 有効面積: 32 cm^2 @ 6 keV (2台)

- **Radiation Belt Monitor (RBM)**

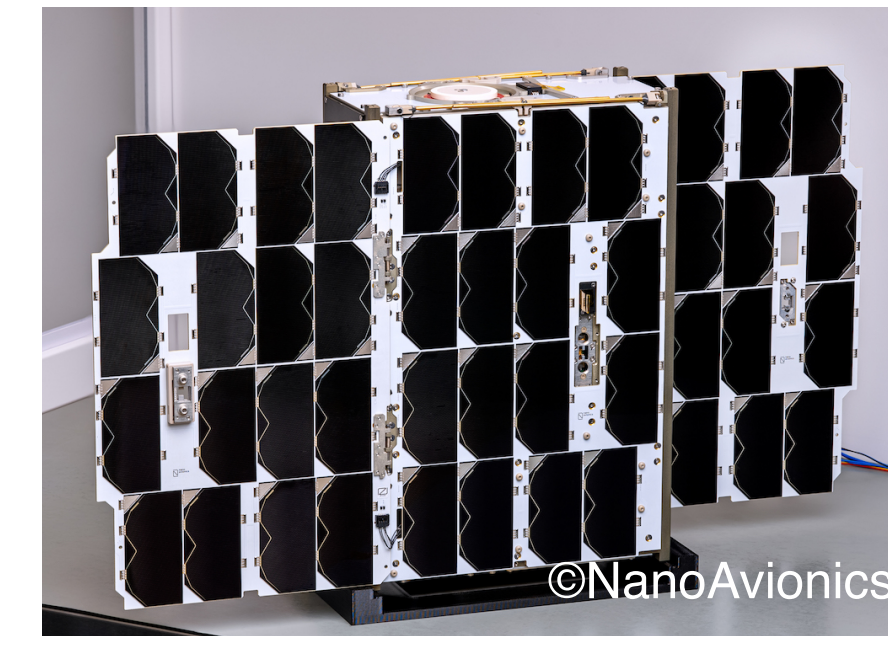
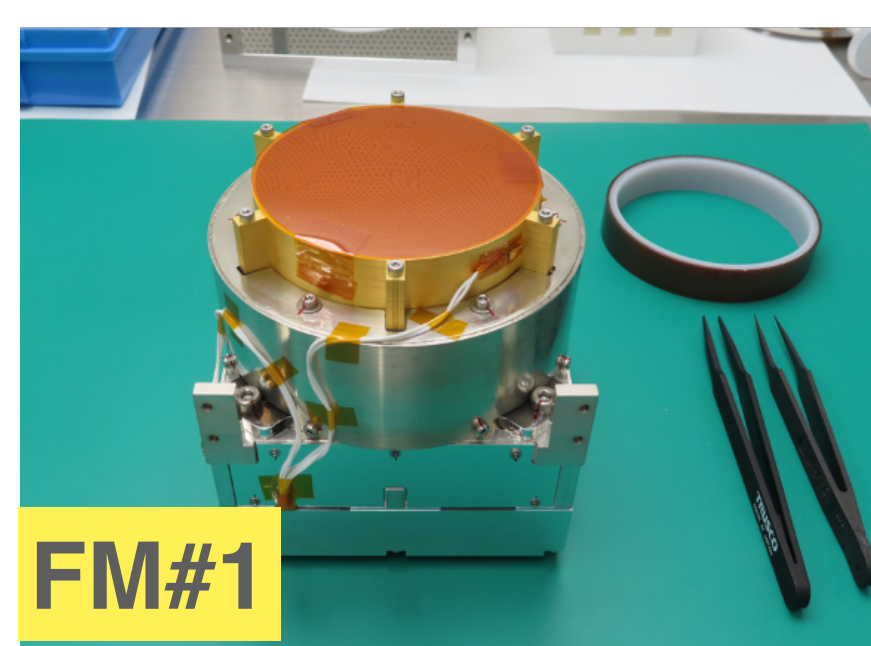
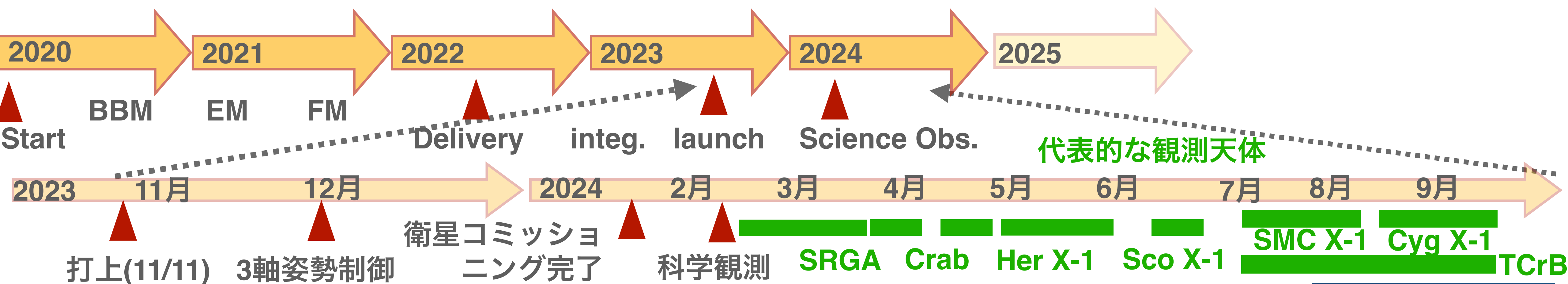
- Si-PIN 光ダイオード $9 \times 9 \text{ mm}^2$ 500 μm 厚
- 軌道上の放射線環境の常時モニタ
- 太陽フレアを検知し GMCへアラート
- GPS 時刻タグ, CAN 経由で他機器通信
- キューブサットで過去最大の有効面積！





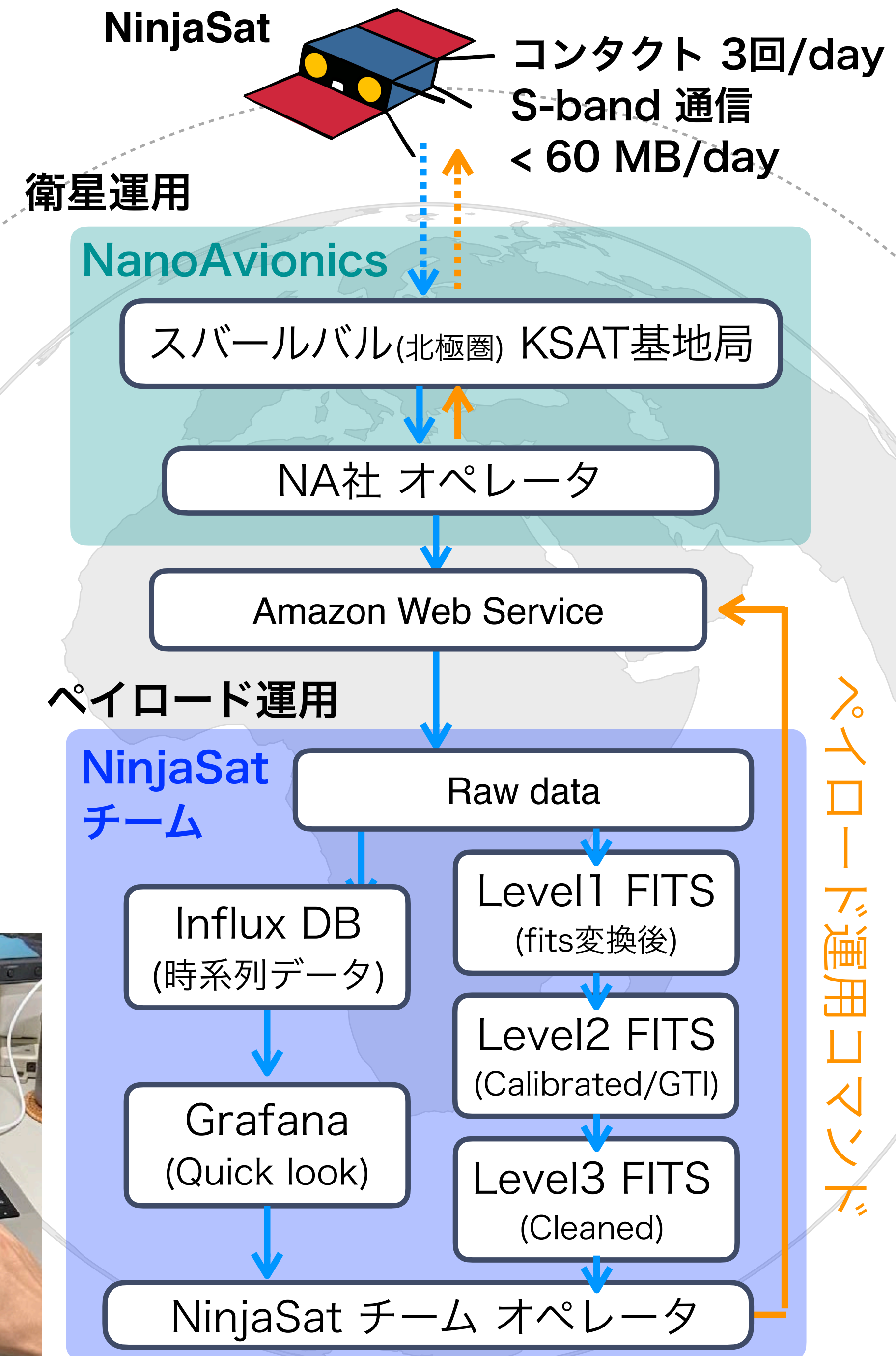
打ち上げから科学運用までの履歴

- ・ 2020年に正式始動、コロナ下でも3.5年の短期間で製作から軌道投入
- ・ 2023年11月11日打ち上げ、同 12月1日 3軸姿勢制御の開始
- ・ 2024年1月21日 衛星コミッショニング終了、1月22日ペイロード立上
- ・ 2024年2月23日 科学観測の開始 (SRGA J144459.2-604207 から)



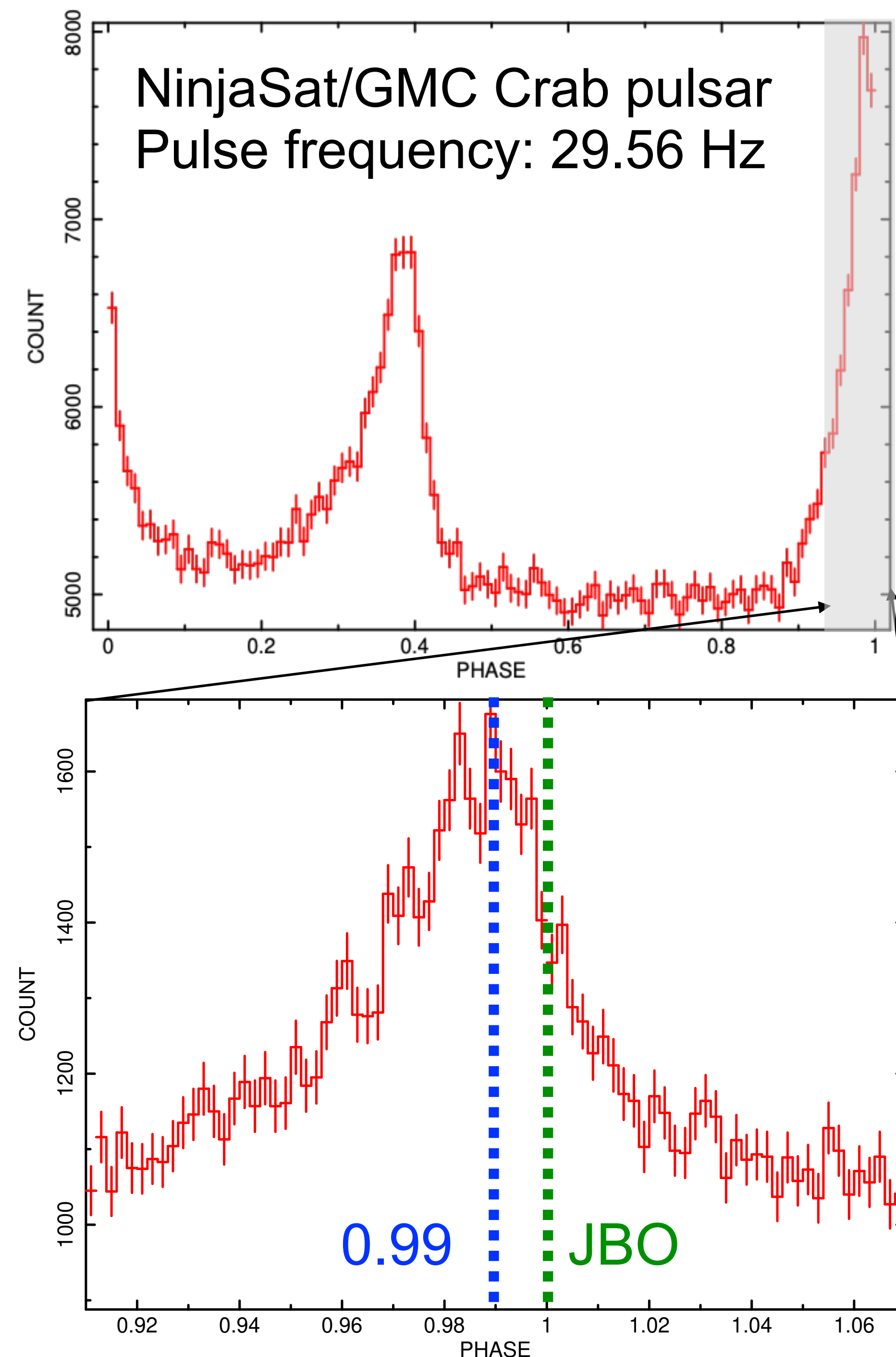
NinjaSat の衛星運用

- ・観測天体の選定は、毎週の NinjaSat 定例会議で数週間先まで選定。ToO も対応可。
- ・1日に1-2天体。1天体は数日から数週間
- ・若手研究者(理研の学生)を中心に運用コマンド作成、データQL、パイプライン処理
 - ・ペイロード運用は NinjaSat チーム
 - ・衛星運用は NanoAvionics 社



軌道上の性能検証: 時刻付け

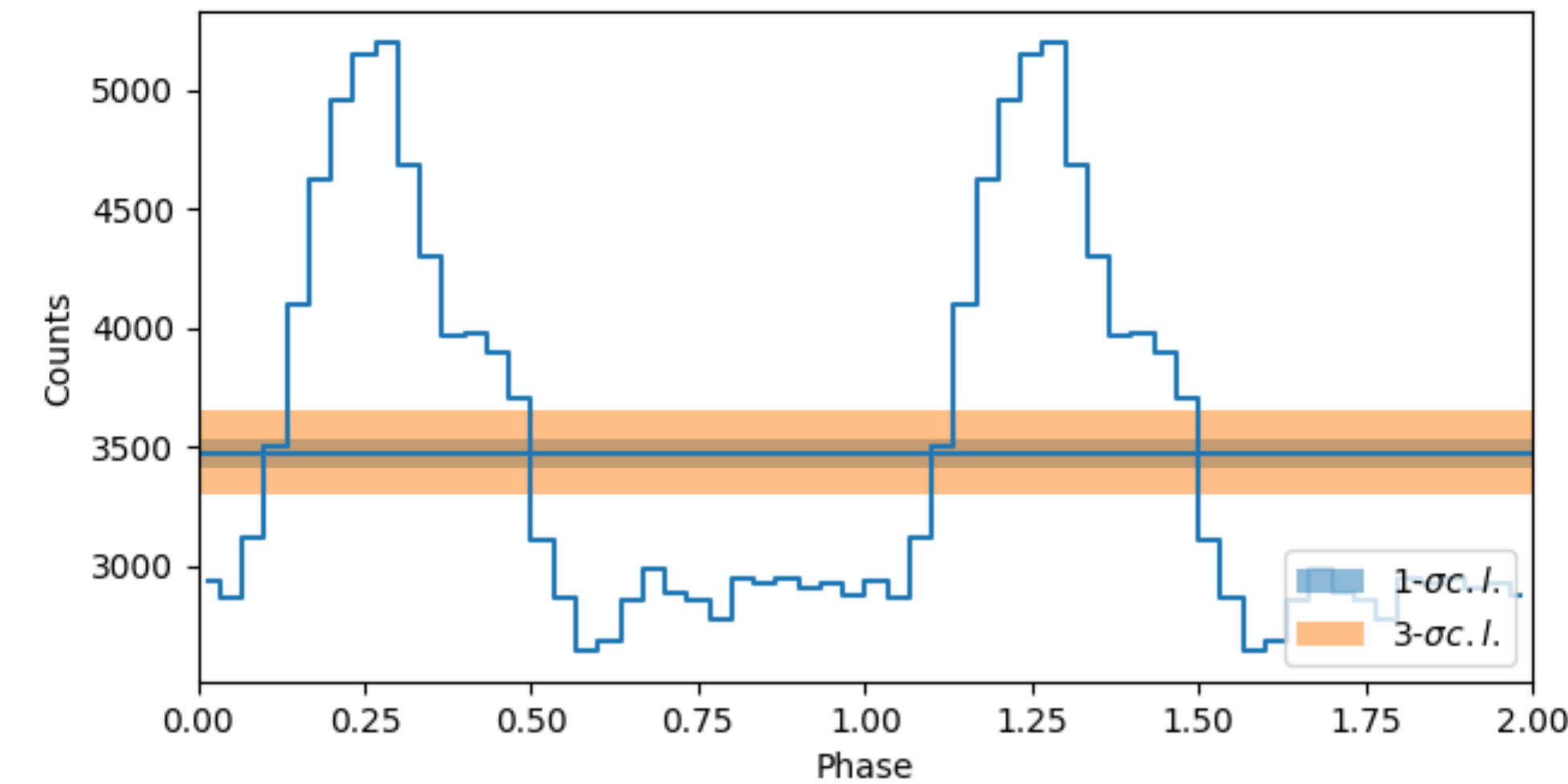
- 衛星バスGPS (1秒周期PPS) のUTC配信とGMC内蔵の時刻カウンタを紐づけて(GPS packet)、放射線イベントに時刻付与($61\text{ }\mu\text{s}$)
- 33ミリ秒の「かにパルサー」のX線ピークをJodrell Bank Observatory (JBO)と比較。
 - X線パルスのピークは、電波より0.01位相($340\text{ }\mu\text{s}$)先行することを確認できた。
 - GMCの絶対時刻精度は $<1\text{ ms}$ と検証。
- Her X-1 (1.23秒周期)や SMC X-1 (0.7秒)などの明るいX線天体のパルス波形を再現。



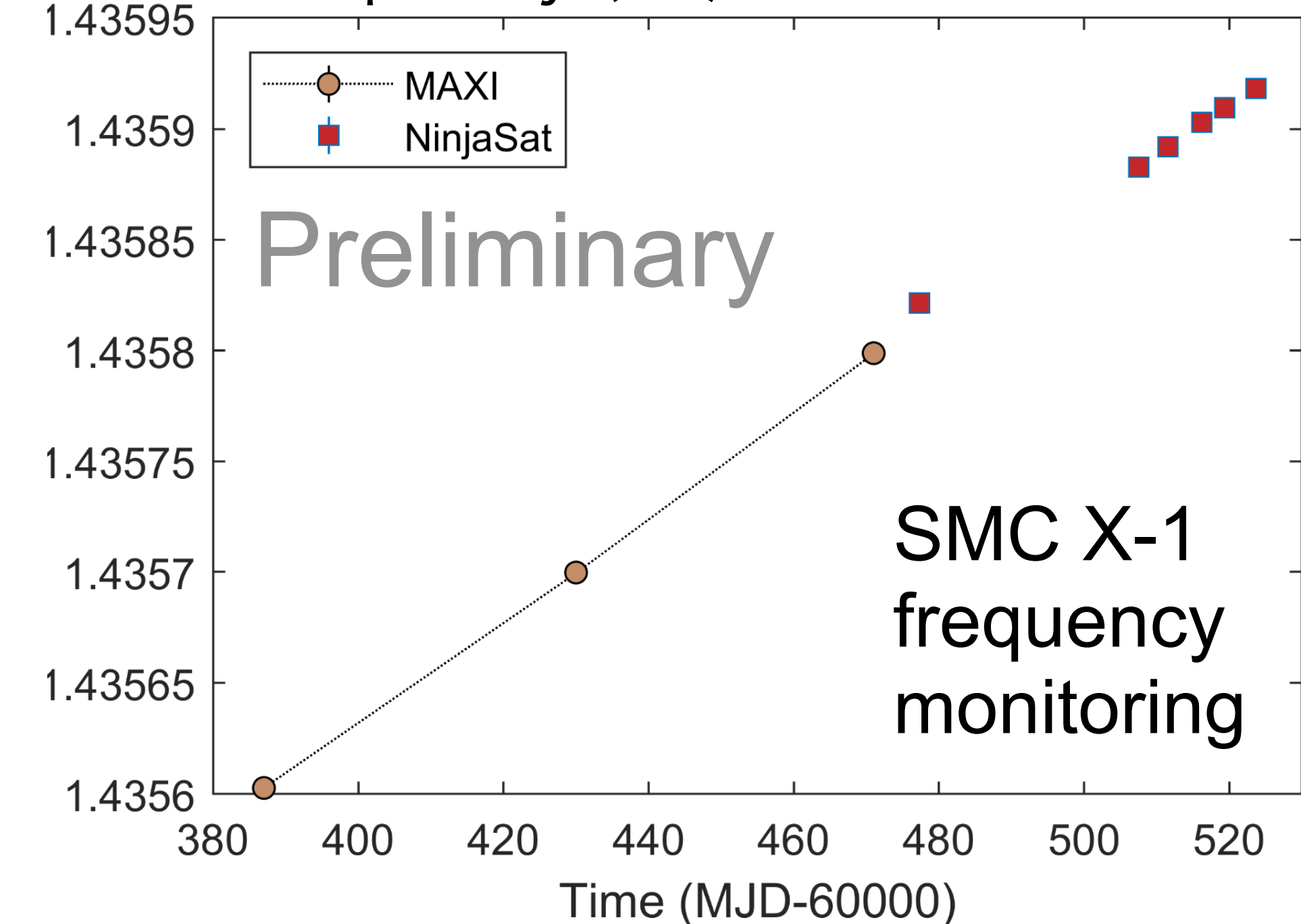
軌道上の性能検証: 時刻付け

- 衛星バスGPS (1秒周期PPS) のUTC配信とGMC内蔵の時刻カウンタを紐づけて(GPS packet)、放射線イベントに時刻付与($61\text{ }\mu\text{s}$)
- 33ミリ秒の「かにパルサー」のX線ピークをJodrell Bank Observatory (JBO)と比較。
 - X線パルスのピークは、電波より 0.01 位相($340\text{ }\mu\text{s}$)先行することを確認できた。
 - GMCの絶対時刻精度は $<1\text{ ms}$ と検証。
- Her X-1 (1.23秒周期)や SMC X-1 (0.7秒)などの明るいX線天体のパルス波形を再現。

NinjaSat/GMC Her X-1



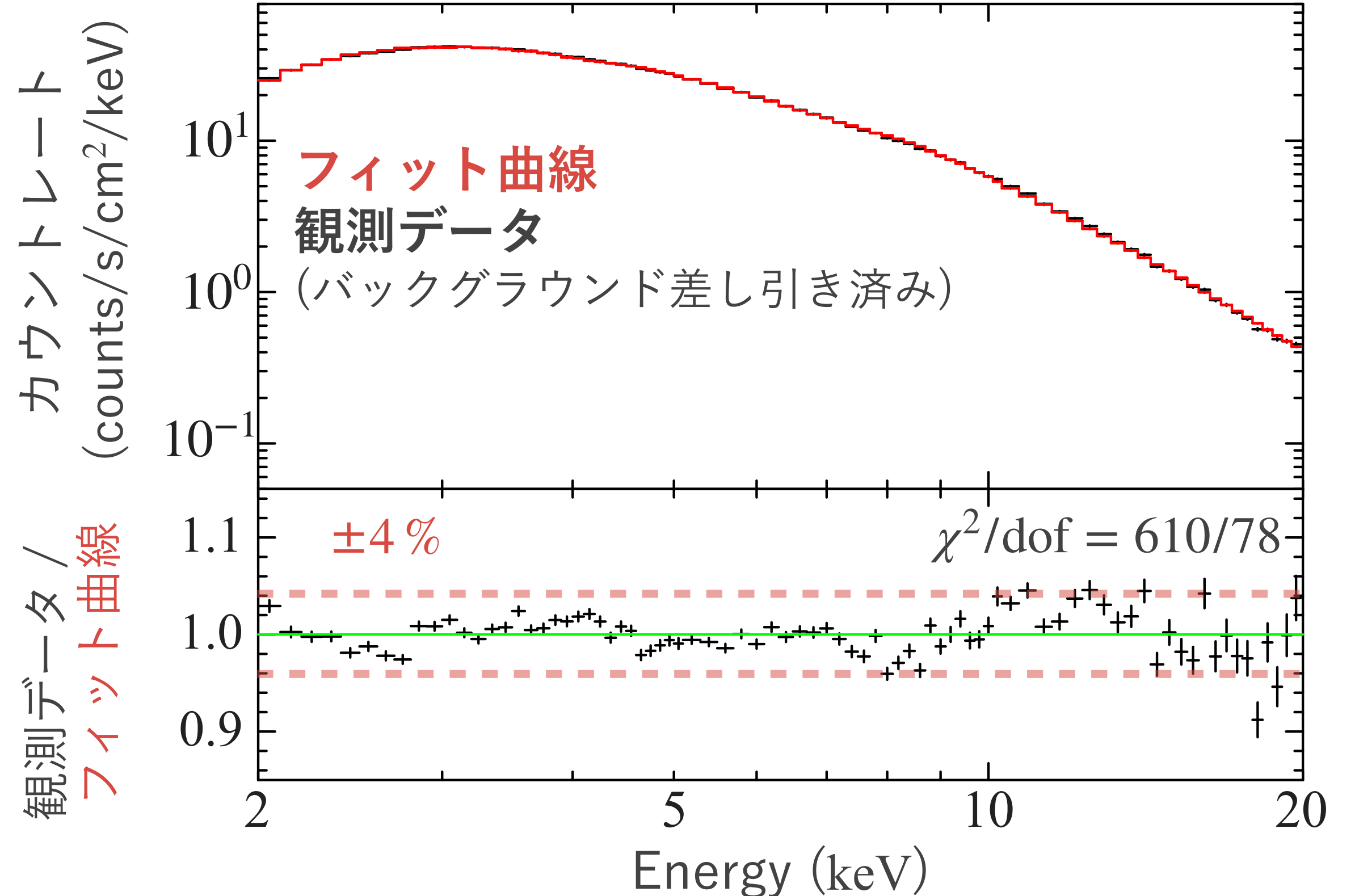
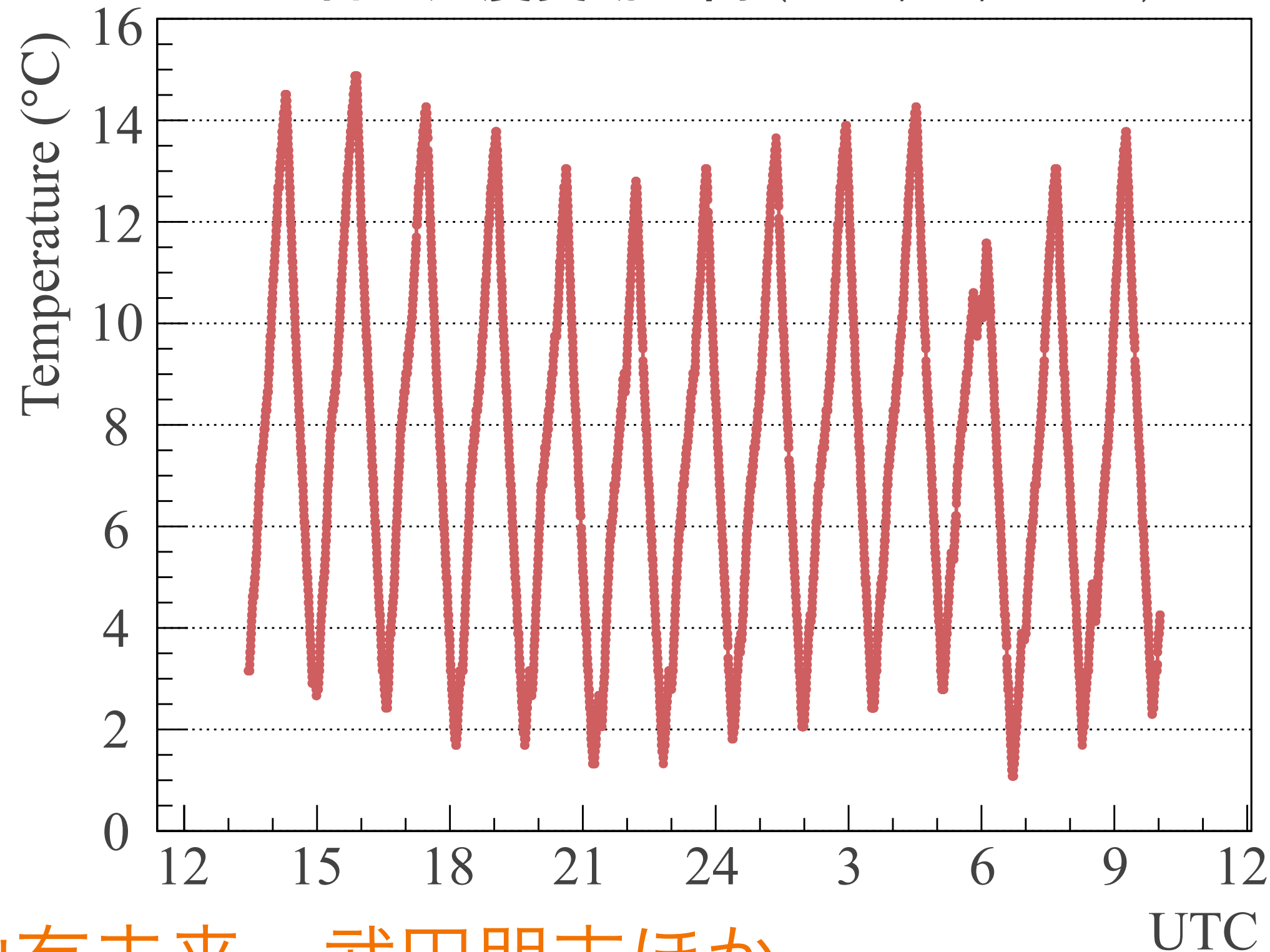
Frequency (Hz)



軌道上の性能検証: かに星雲のスペクトル

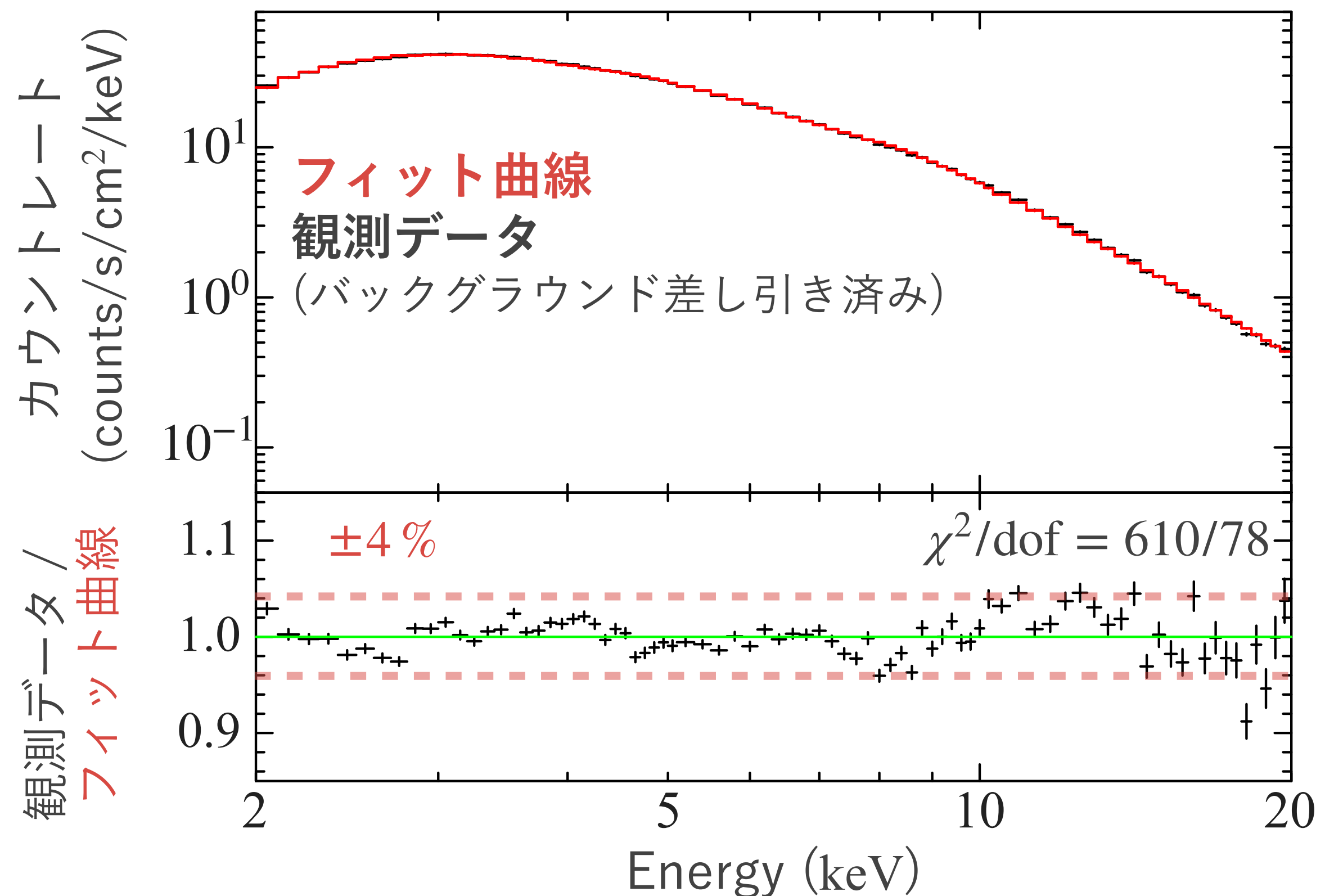
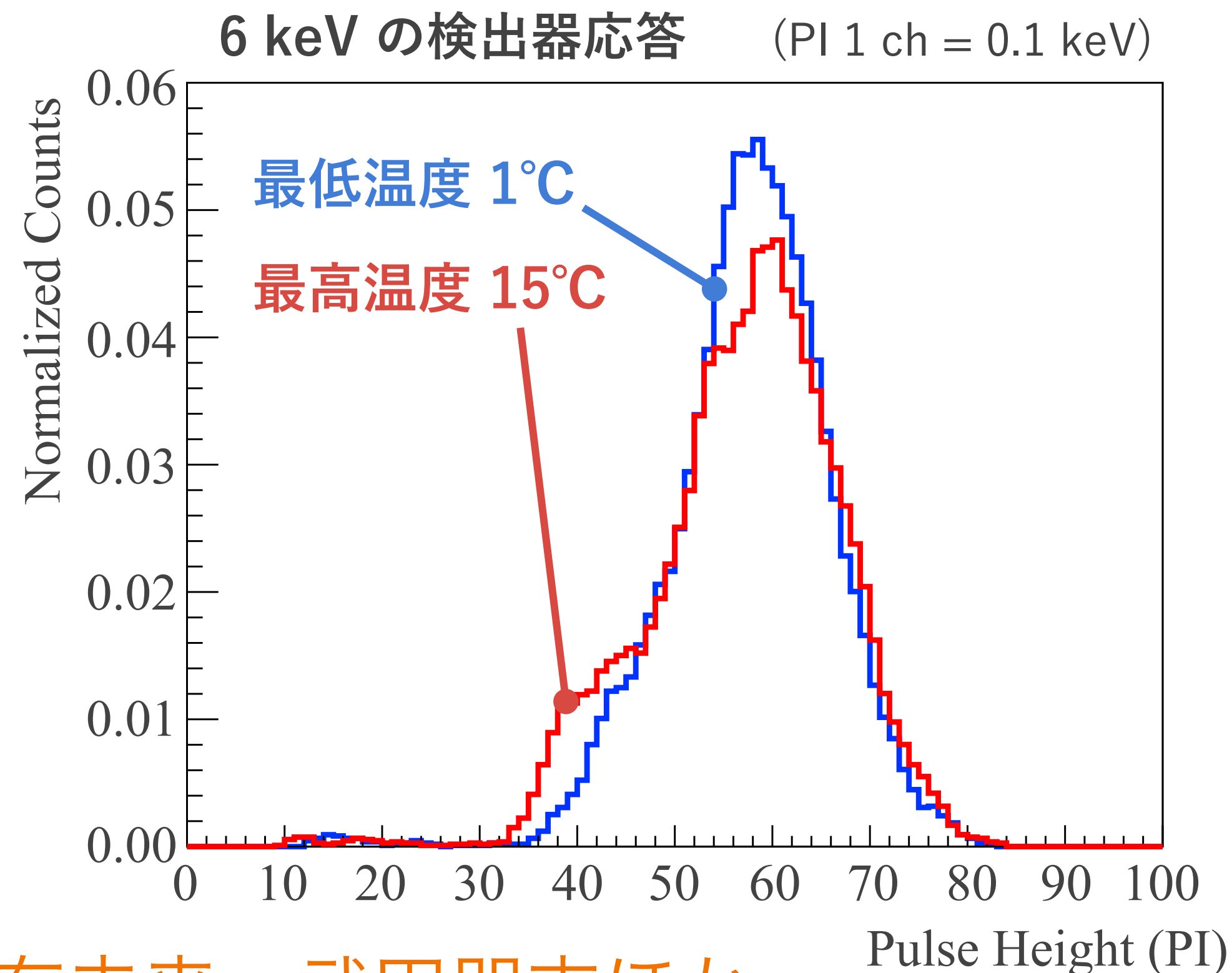
- GMCの温度依存性 (1.2-15.4°C範囲、平均9.3°C)を考慮した検出器レスポンスを作成。1°Cごとのテンプレートとイベント数の重み付け平均
- かに星雲のスペクトルを $\pm 5\%$ の精度で再現 (光子指数 2.010 ± 0.003 , 2-10 keVフラックス 1.92×10^{-8} ergs/s/cm²)、先行研究の範囲内

1日の温度変動の例 (2024/04/13-14)



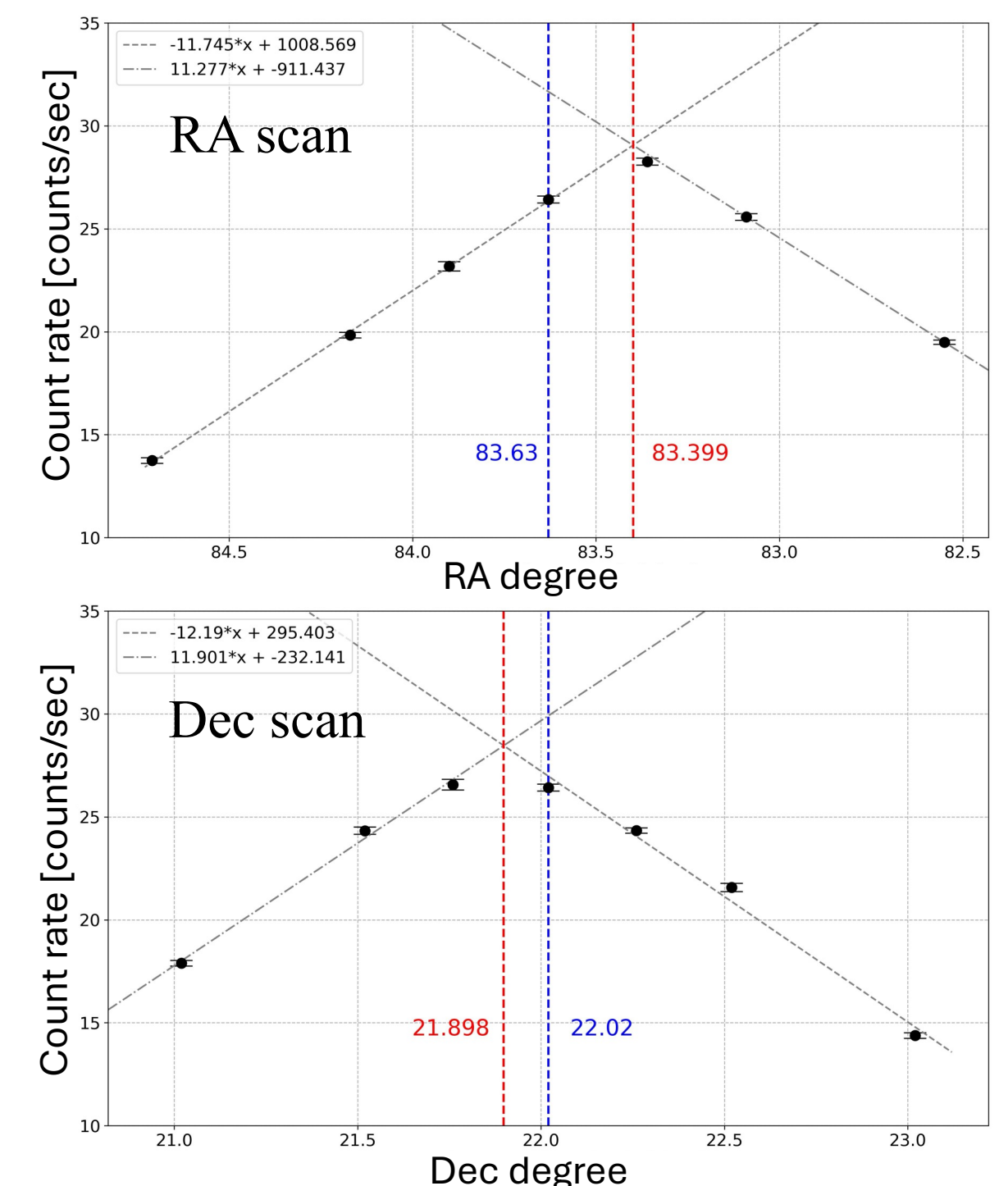
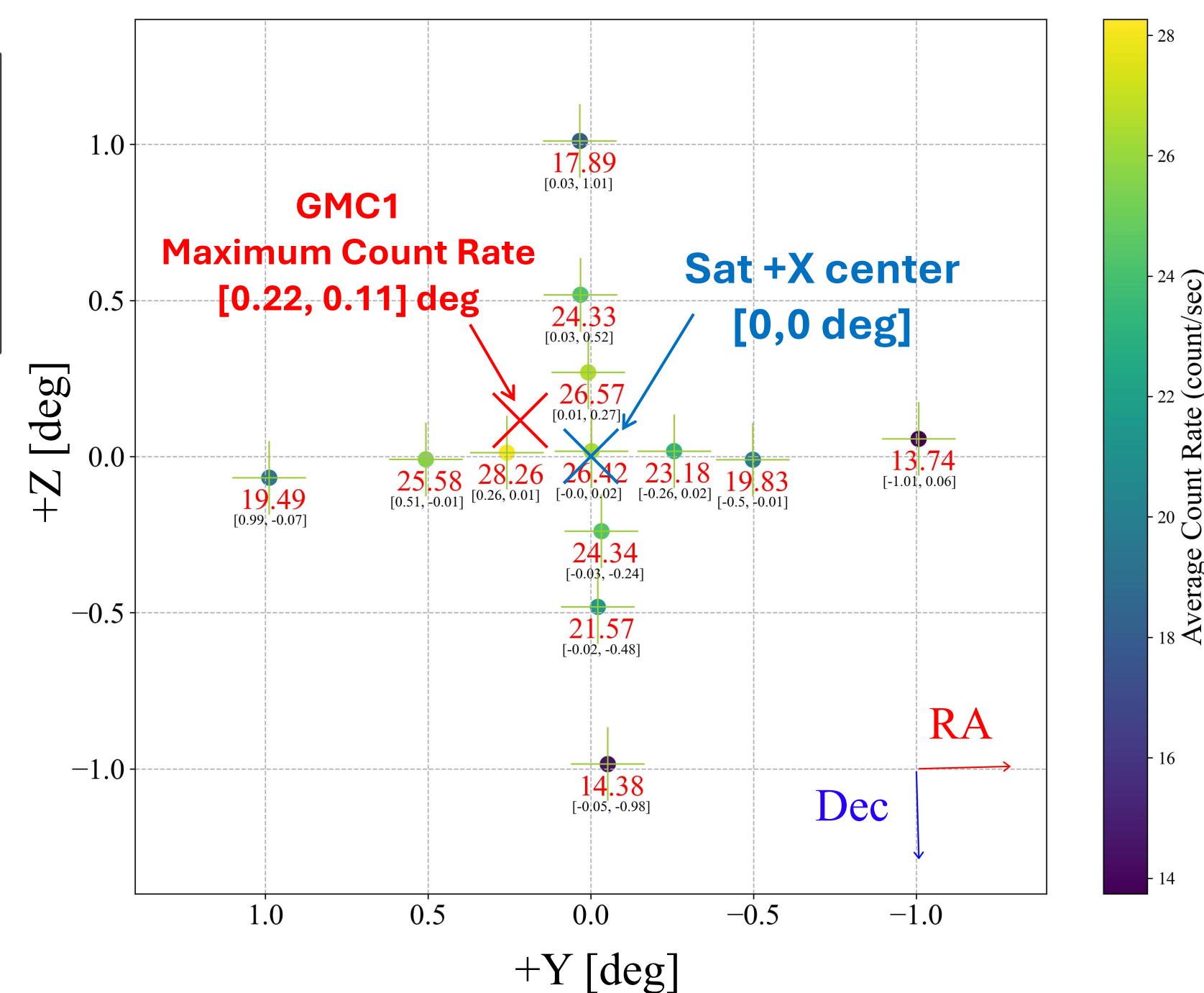
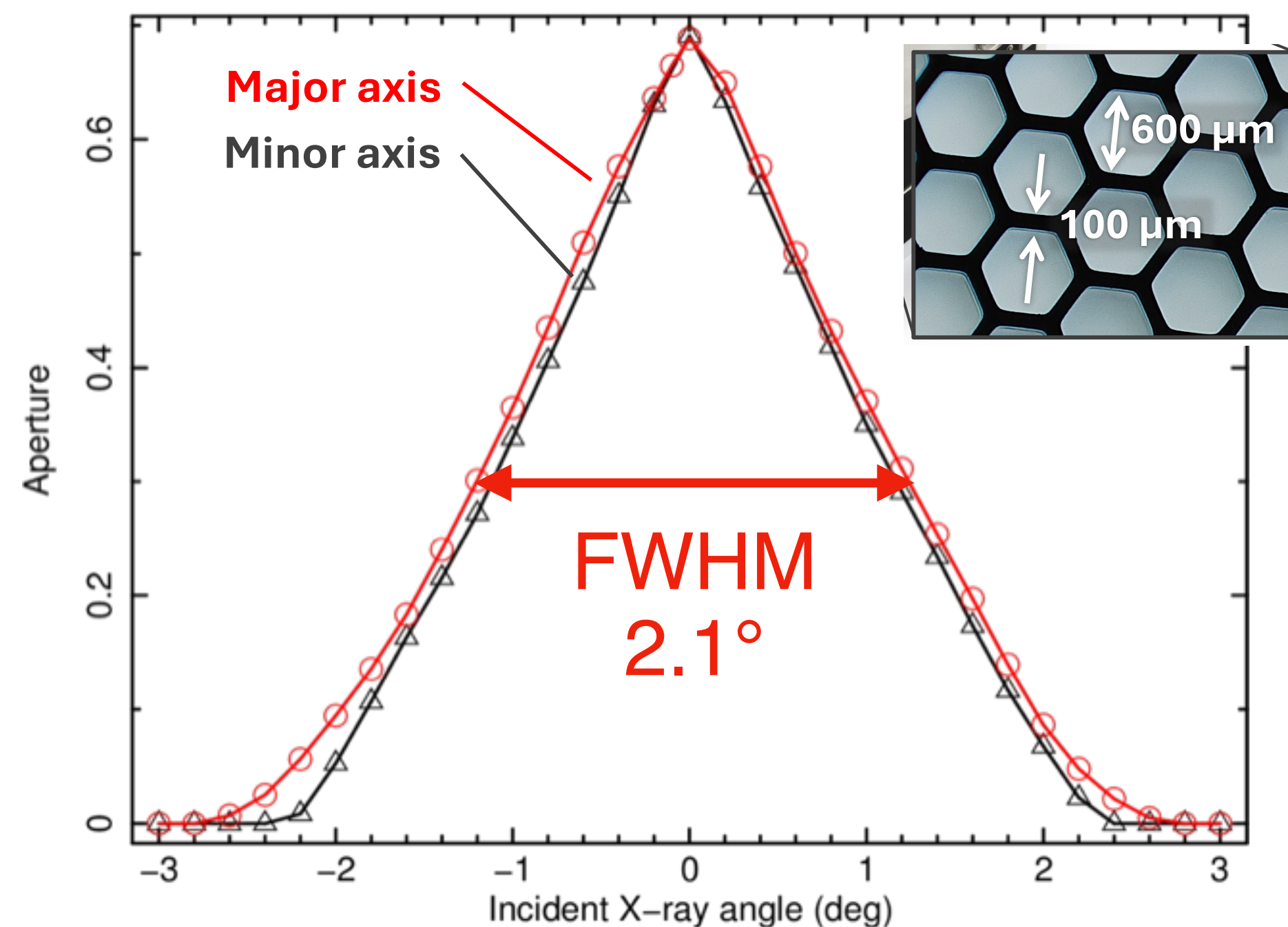
軌道上の性能検証: かに星雲のスペクトル

- GMCの温度依存性 (1.2-15.4°C範囲、平均9.3°C)を考慮した検出器レスポンスを作成。1°Cごとのテンプレートとイベント数の重み付け平均
- かに星雲のスペクトルを $\pm 4\%$ の精度で再現 (光子指数 2.010 ± 0.003 , 2-10 keVフラックス 1.92×10^{-8} ergs/s/cm²)、先行研究の範囲内



軌道上の性能検証: コリメータと光軸中心

- GMCの六角形のX線コリメータ: 直径 70 mm, 高さ 15 mm, 160 g
- かに星雲の周辺1°ほどの範囲をグリッド観測して、光軸中心の検証
- 三角形のコリメータ応答(透過率)の両側を線形フィットし光軸を計算
- 衛星+X(光軸方向)からのズレは 0.25° (GMC1), 0.32° (GMC2) で、X線は12-15%減少。STTと衛星筐体のアライメント? 追加観測で再検証

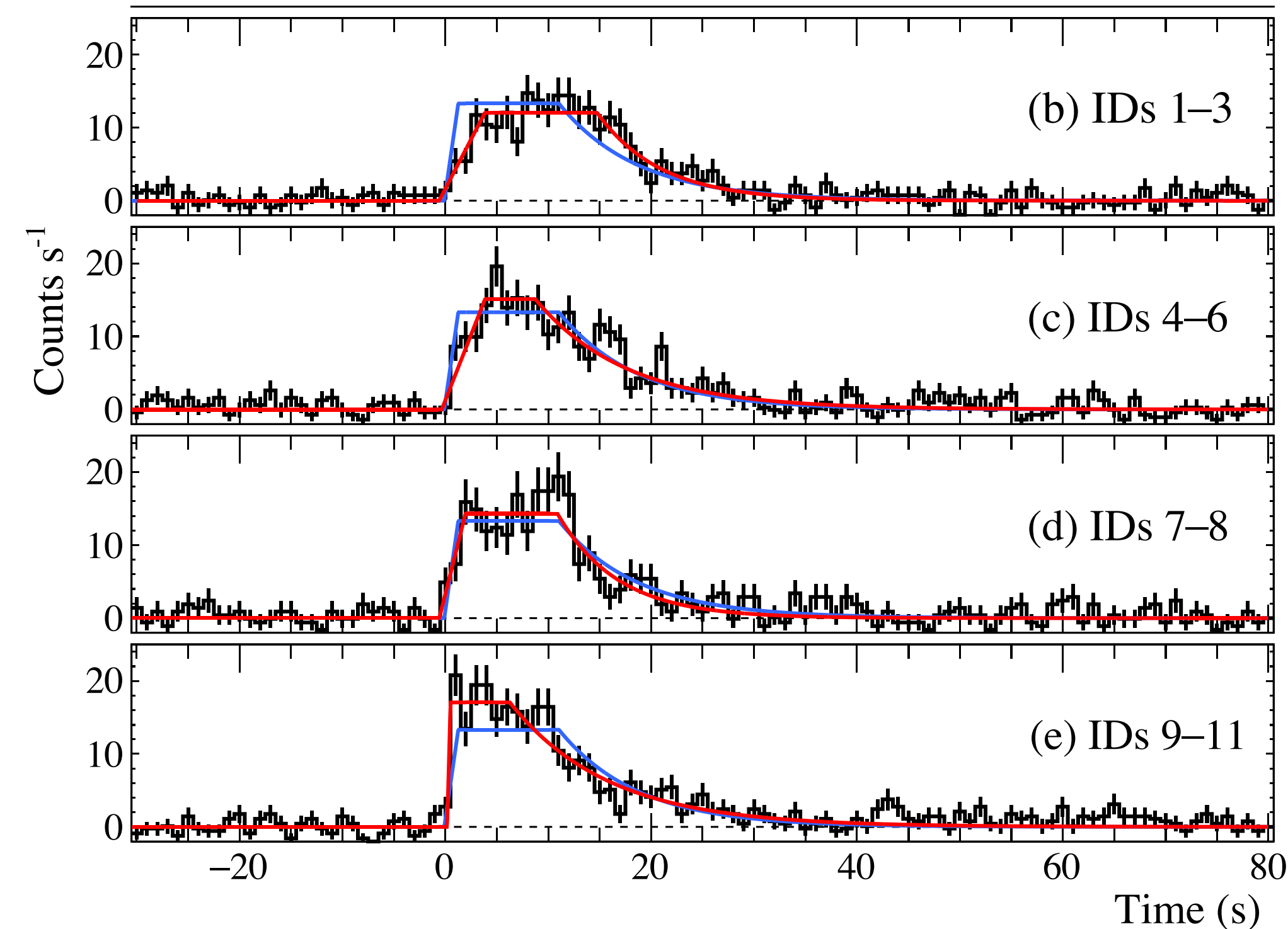
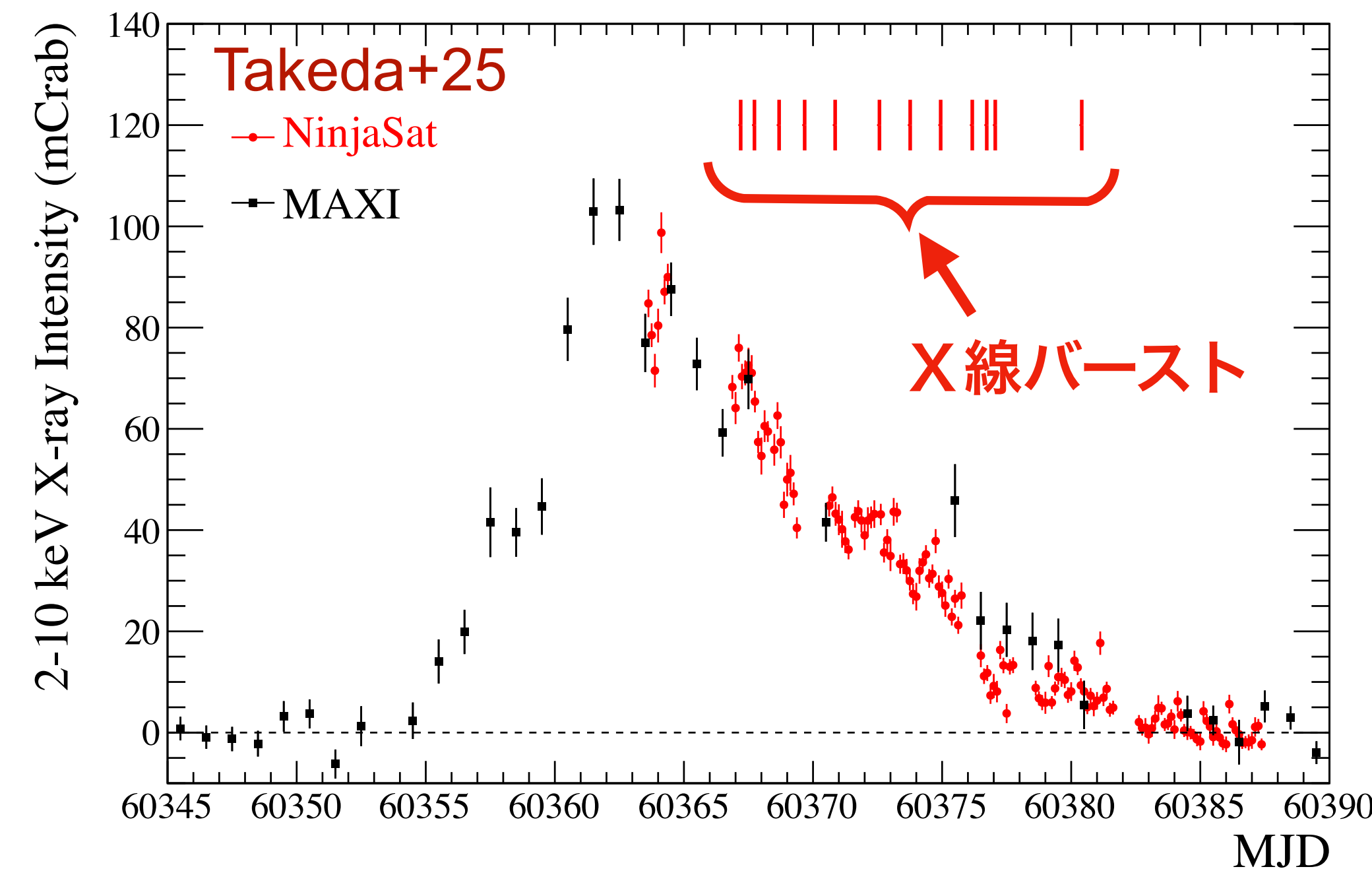


X線バースターの連続観測

- 2024年2月21日発見の史上6番目のクロックトバースターSRGA J144459.2-604207を最初の科学ターゲットとして2月23日から25日間にわたり連続観測。
- 12個の Type-I X線バーストを検出。
- バースト継続時間は、他の天体より短い約20秒 → 降着物質にヘリウムが多い？
- バースト再帰時間は、降着量の現象に従い2時間から10時間へ($\Delta t_{rec} \propto F_{per}^{-0.84}$) → 理論モデルで中性子星の質量が大きい？

Takeda et al., PASJ (2025) 観測論文

9 Dohi et al., PASJ (2025) 理論論文

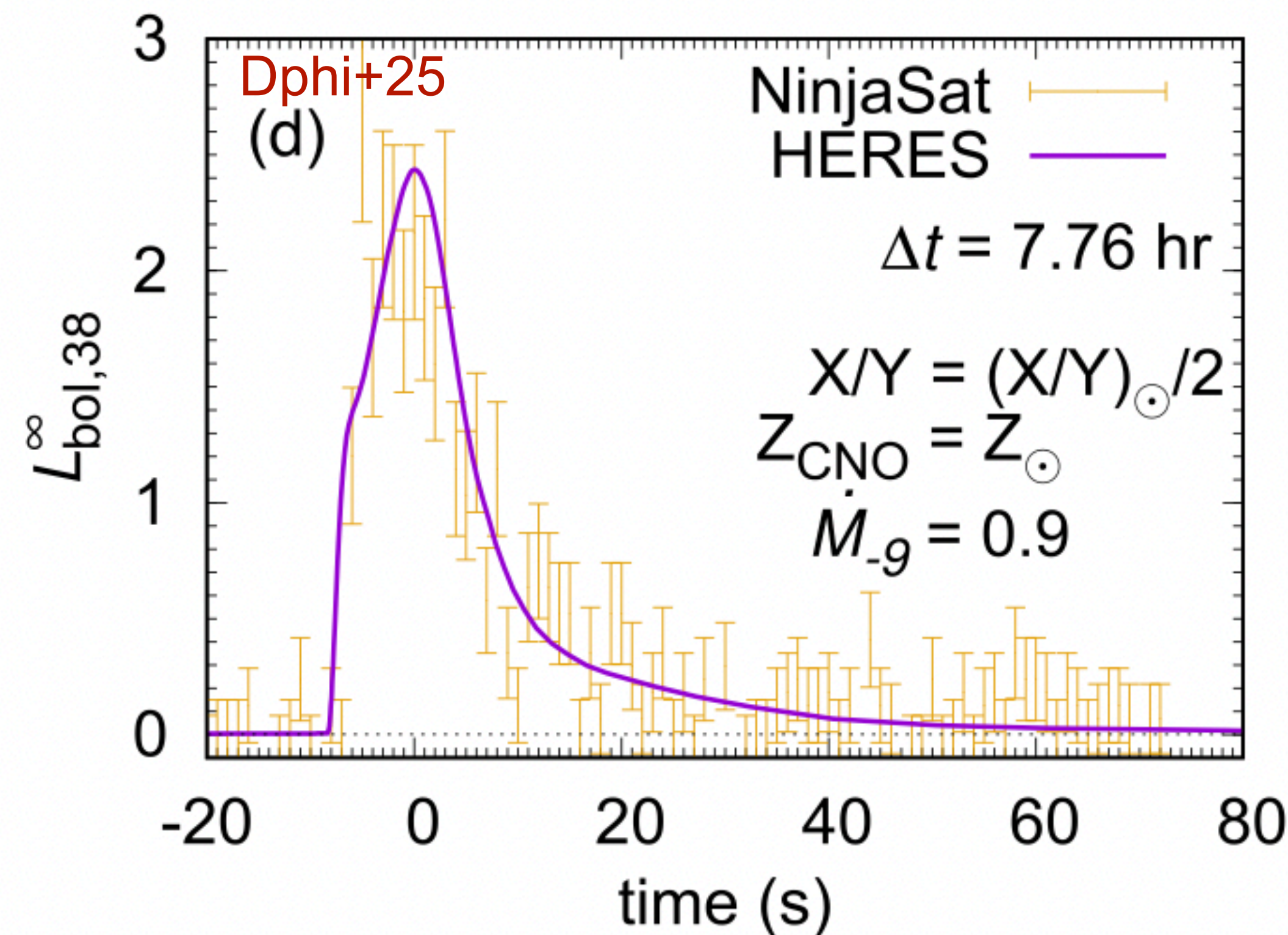
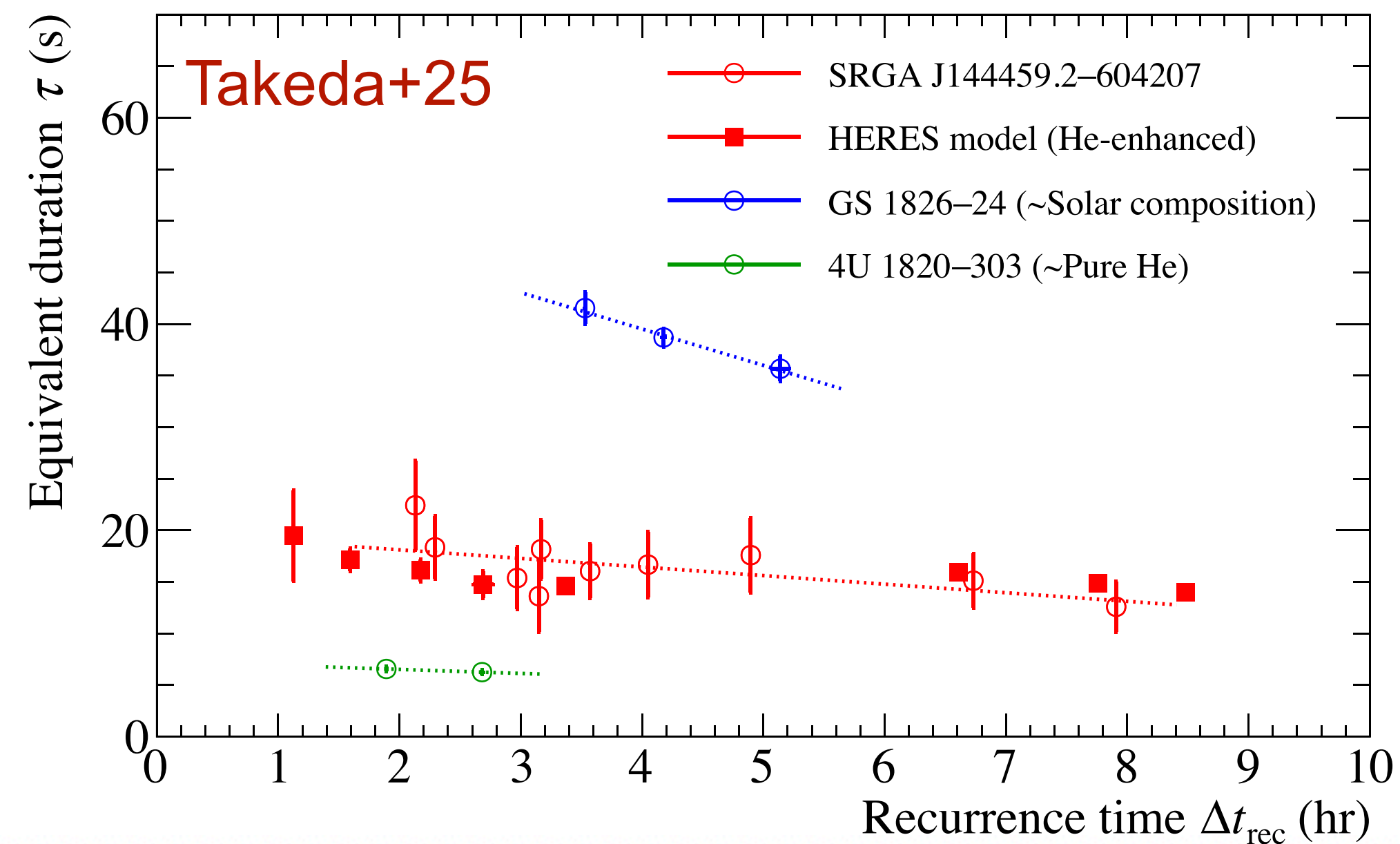


X線バースターの連続観測

- 2024年2月21日発見の史上6番目のクロックトバースターSRGA J144459.2-604207を最初の科学ターゲットとして2月23日から25日間にわたり連続観測。
- 12個の Type-I X線バーストを検出。
- バースト継続時間は、他の天体より短い約20秒 → 降着物質にヘリウムが多い？
- バースト再帰時間は、降着量の現象に従い2時間から10時間へ ($\Delta t_{rec} \propto F_{per}^{-0.84}$) → 理論モデルで中性子星の質量が大きい？

Takeda et al., PASJ (2025) 観測論文

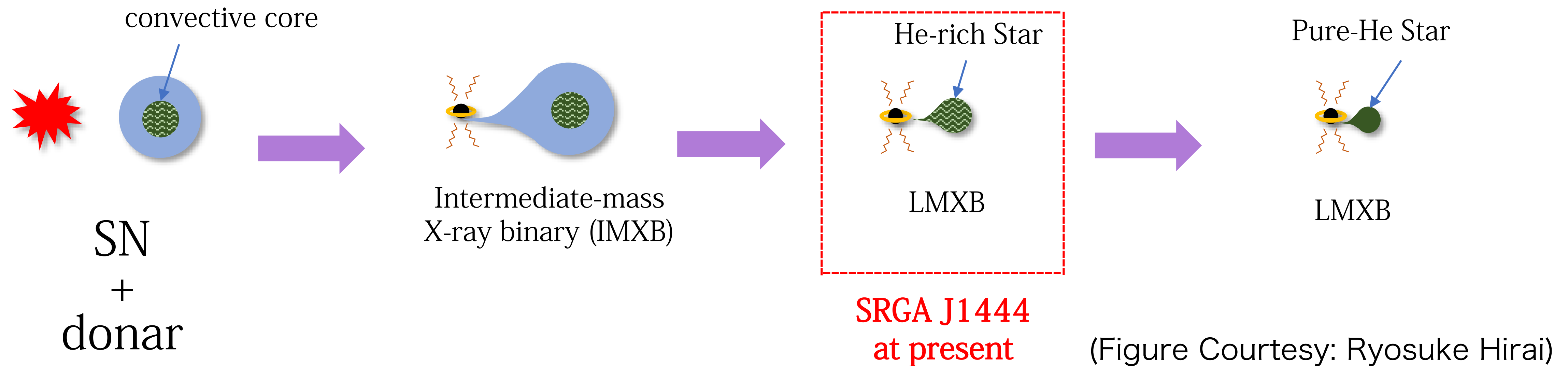
9 Dohi et al., PASJ (2025) 理論論文



NinjaSat から連星進化の議論へ

土肥明、西村信哉ほか

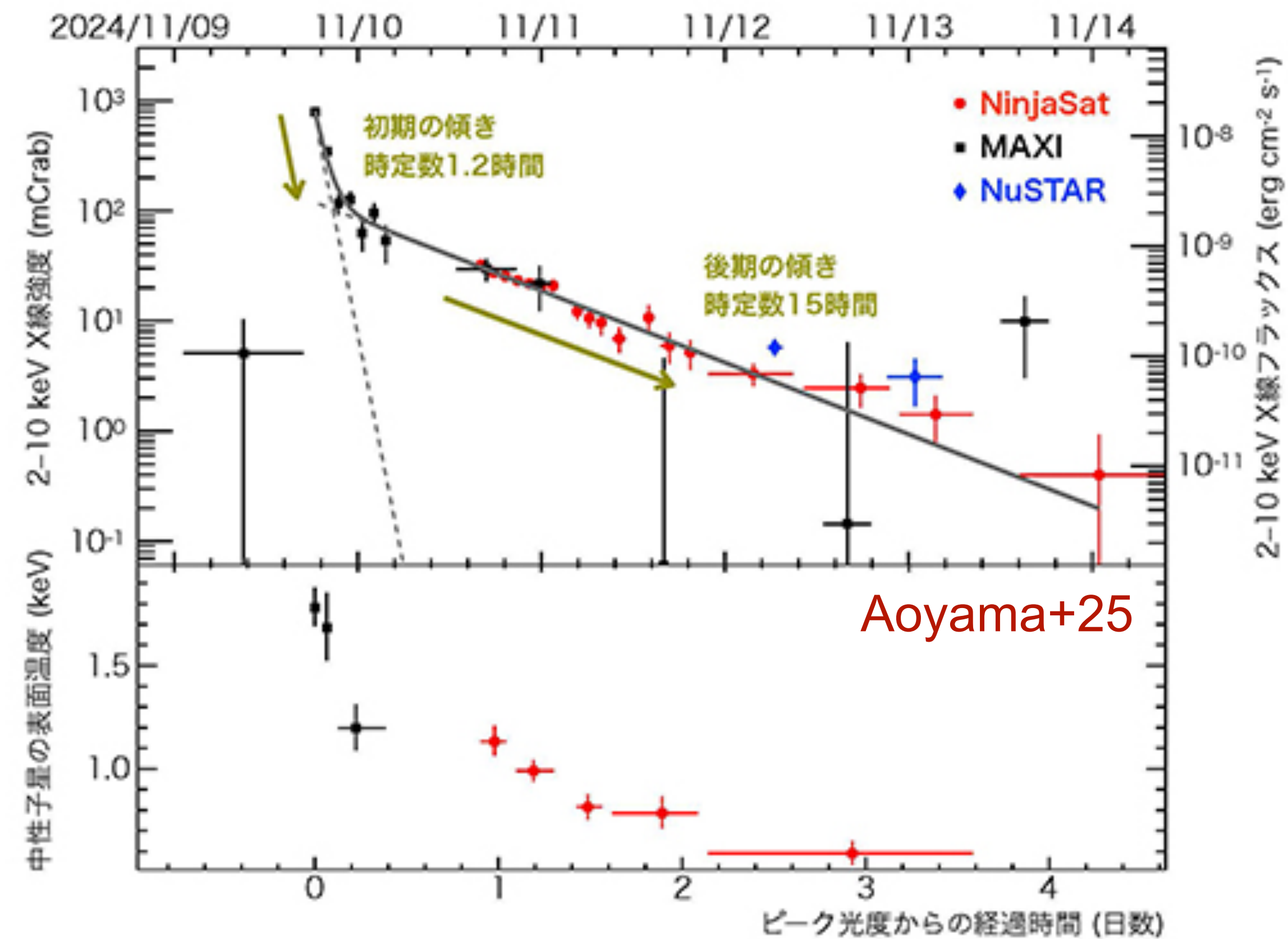
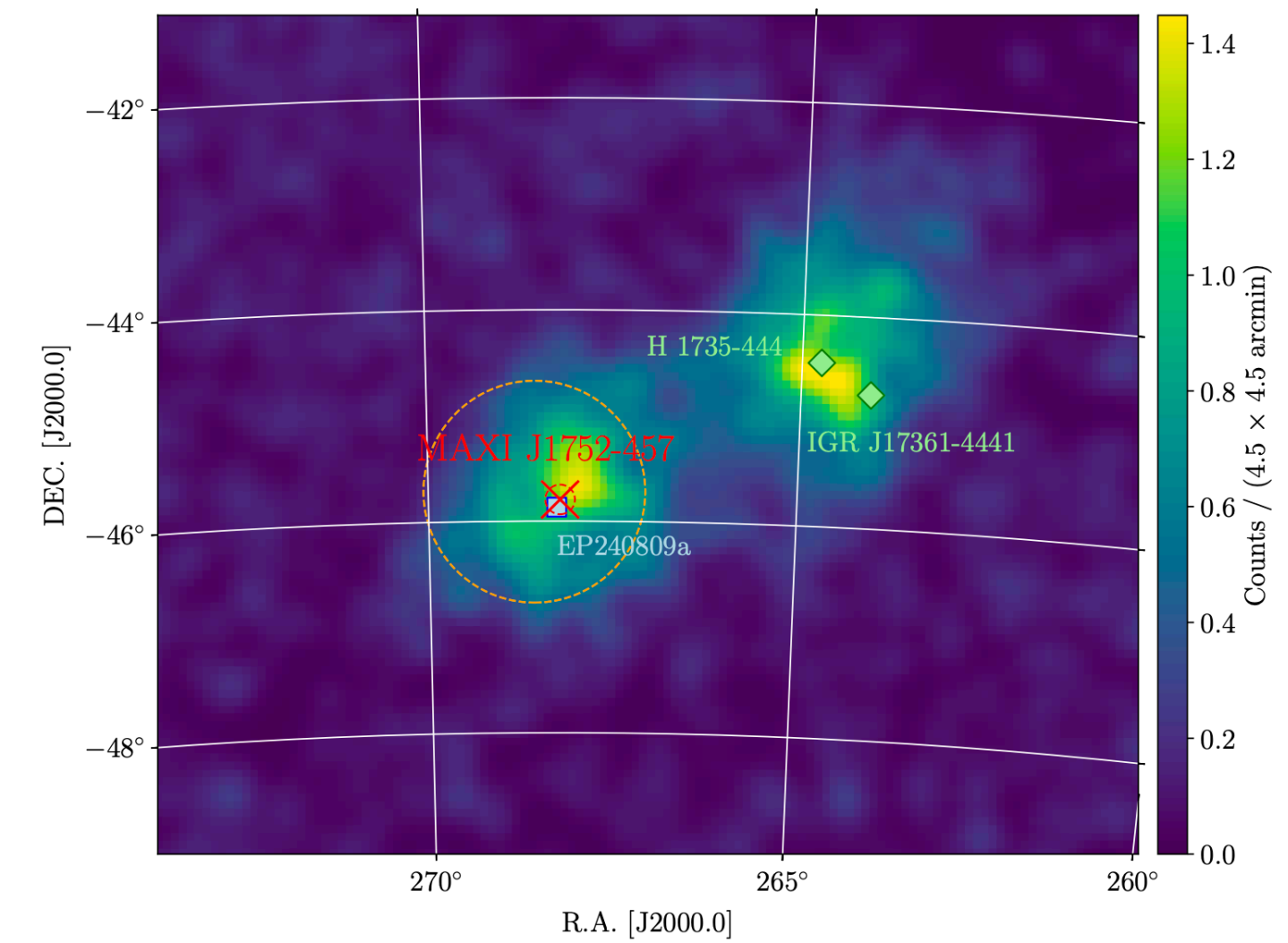
1. X線バーストの光度曲線から、燃料である水素とヘリウムの組成が判定
2. これまでのX線バーストは太陽系組成か進化が進んだ純ヘリウム星のみ。SRGA J14445は、著しくヘリウム過剰（水素が半分）で、初めて「中間」（主系列の終わりかけ）か？
3. 「主系列の終わりかけ」という絶妙なタイミングを同定は難しく、新たな手法・例？



2025年6月には、GS 1826-238の再帰バーストも観測し、この天体で史上一番短い1.6時間の再帰時間を報告 (Iwata+ ATel #17245)

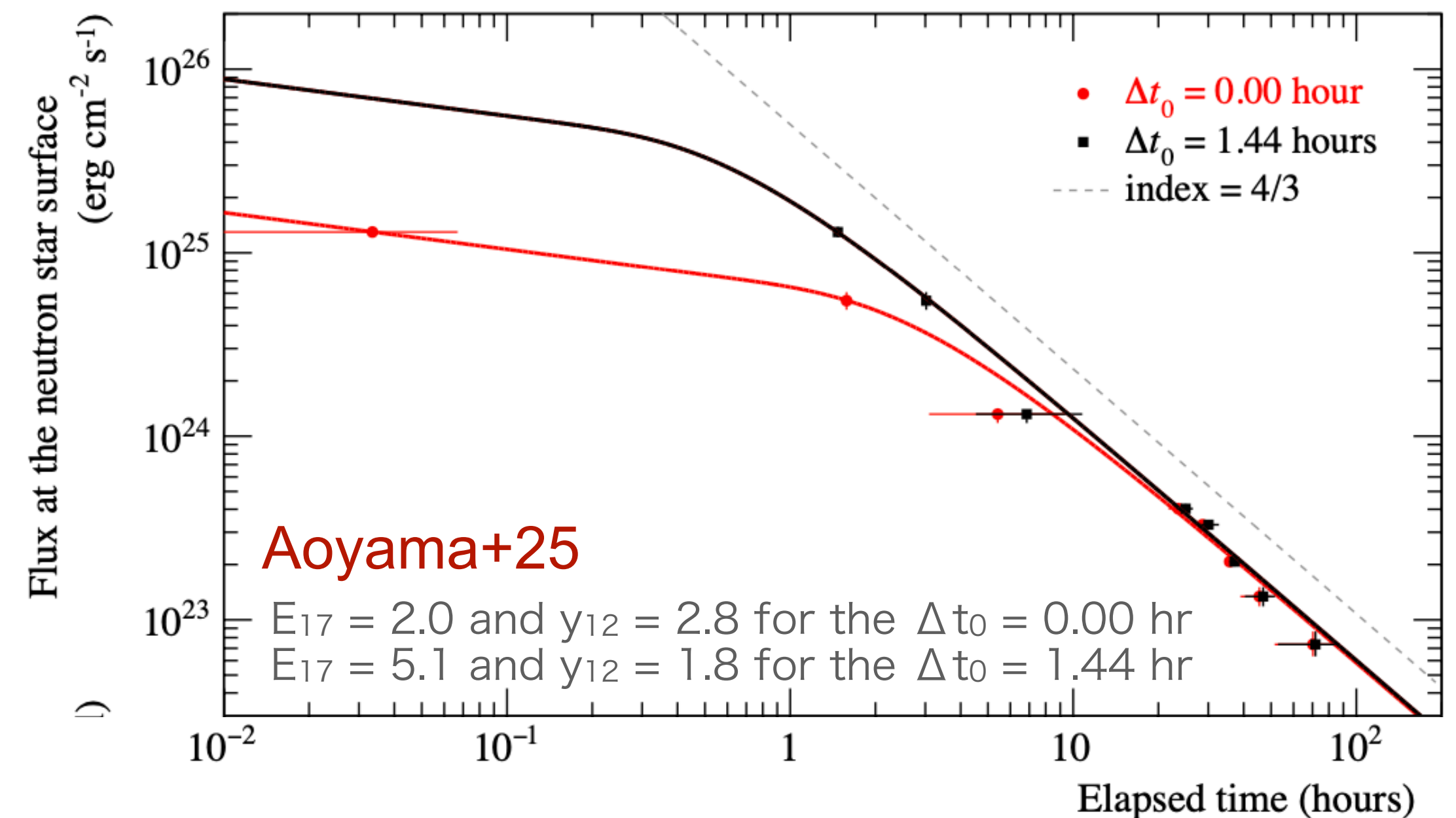
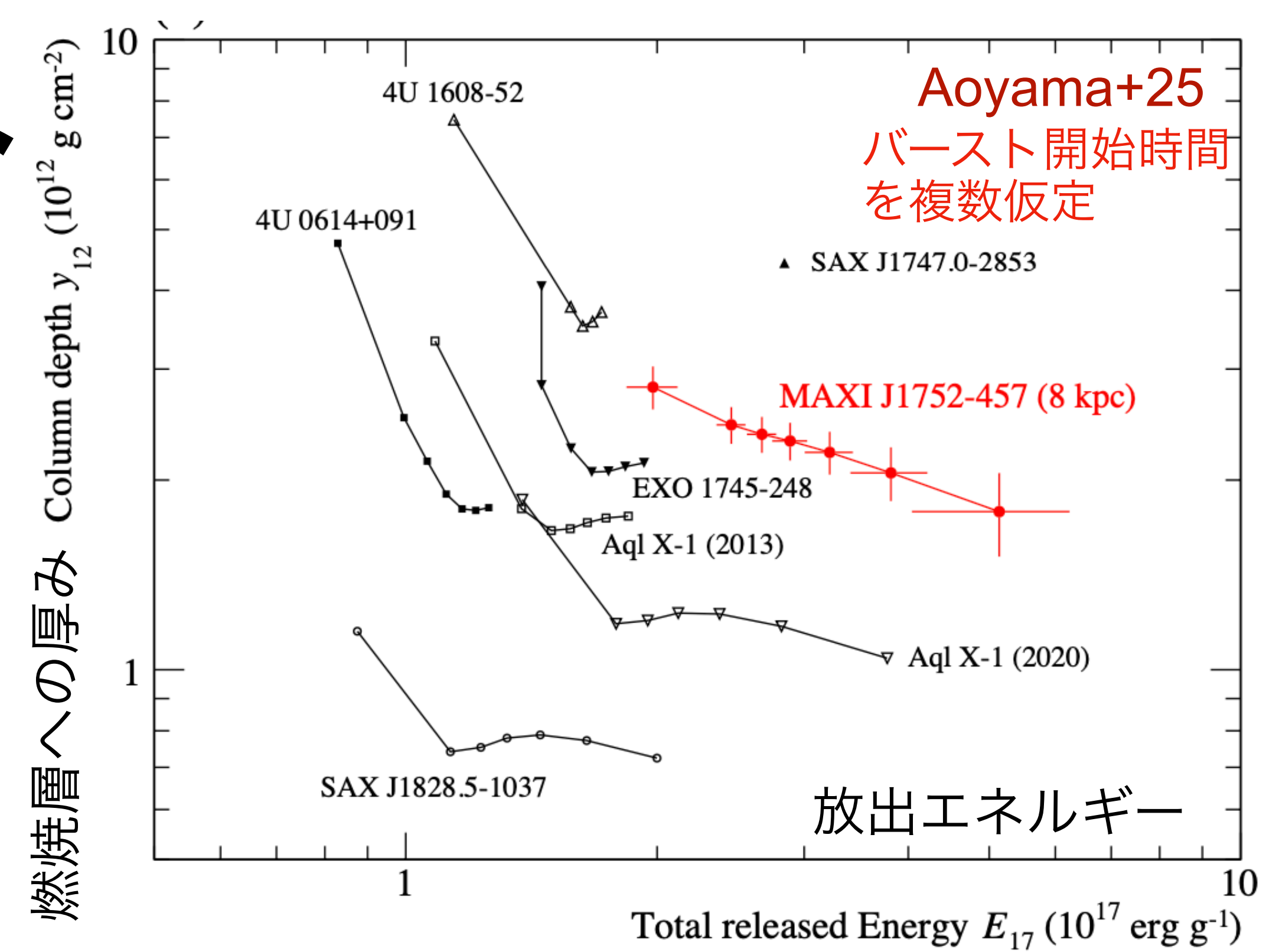
新天体のスーパーバースト観測

- 2024年11月9日に MAXI J1752-457が見つかる(ATel #16898)。発見から2.5時間後にNinjaSatが観測開始し8日間、追跡。
- 他のX線衛星は太陽角制限で観測できず
- X線フラックス減衰は2成分(指数関数の時定数で1.2時間と15時間)で、黒体放射の温度は1.8 keVから0.6 keVまで低下
- 低質量X線連星で、炭素燃焼によるスーパーバーストと解釈できる(史上17例目)
- 2成分の減衰も中性子星のアウトークラスと近傍での核融合の理論モデルで説明可能



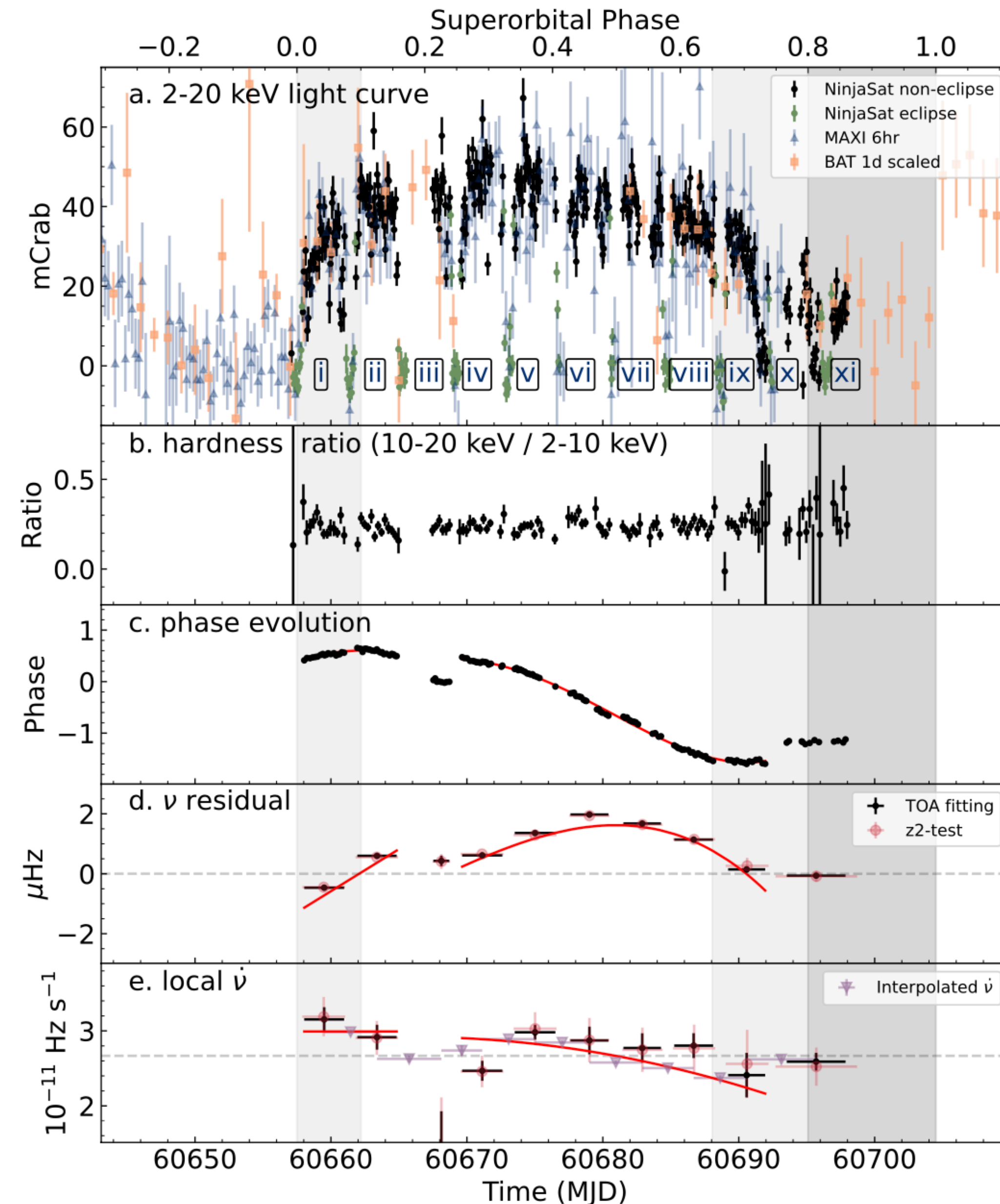
新天体のスーパーバースト

- 2024年11月9日に MAXI J1752-457が見つかる(ATel #16898)。発見から2.5時間後にNinjaSatが観測開始し8日間、追跡。
- 他のX線衛星は太陽角制限で観測できず
- X線フラックス減衰は2成分(指数関数の時定数で1.2時間と15時間)で、黒体放射の温度は1.8 keVから0.6 keVまで低下
- 低質量X線連星で、炭素燃焼によるスーパーバーストと解釈できる(史上17例目)
- 2成分の減衰も中性子星のアウトークラスと近傍での核融合の理論モデルで説明可能



明るいX線源 SMC X-1 の長期モニタリング

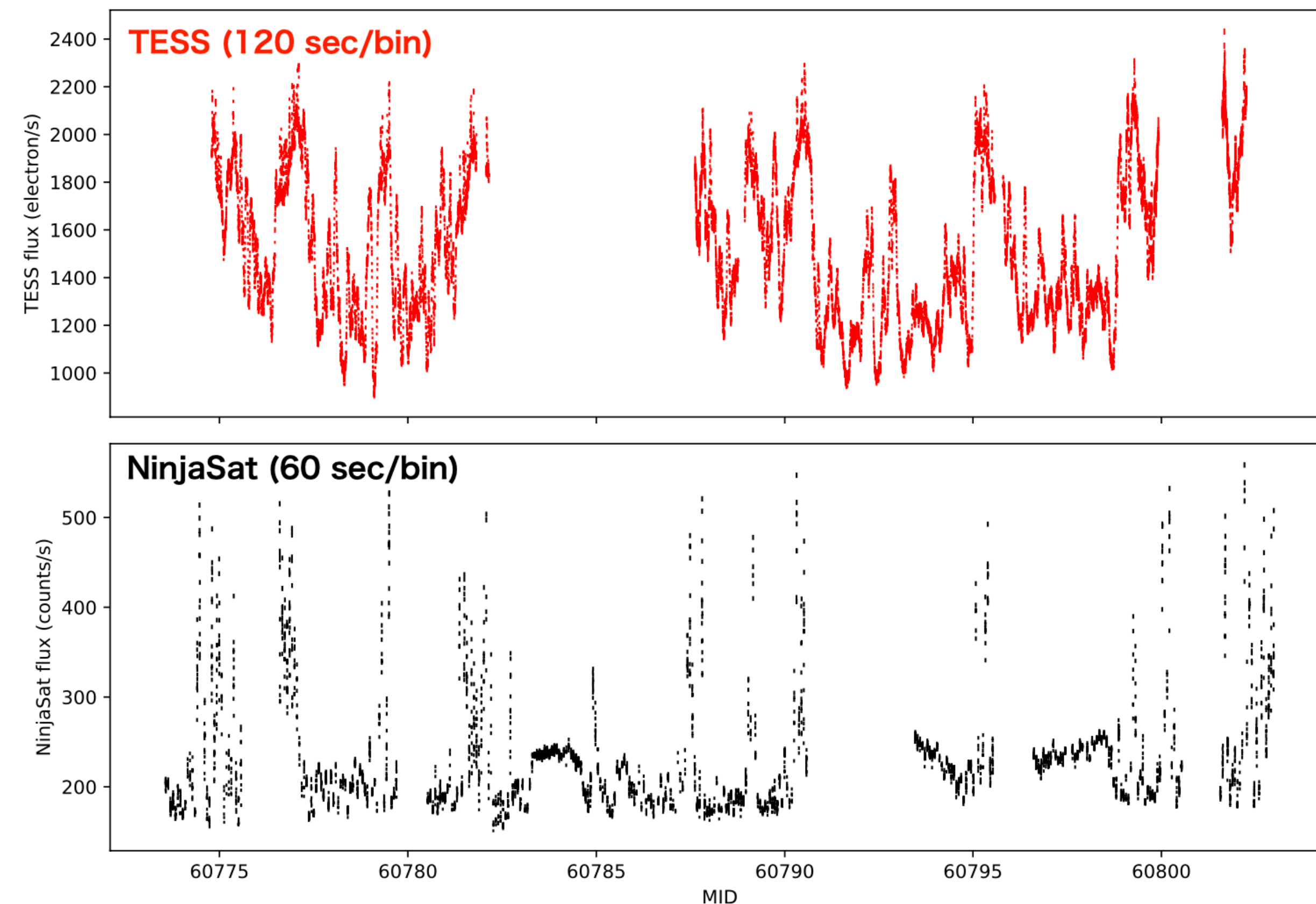
- 小マゼラン雲の明るいX線源 SMC X-1 (連星周期 3.9日、パルス周期 0.7秒) には40-65日の superorbital modulation
- これが降着率の変化によるのか、傾いた降着円盤による遮蔽かを検証するため2024年12月13日から翌年1月23日までの長期モニタリングを実施。
- NinjaSat によりパルス波形の長期変化やパルサーの暦をモニタリングでき、MAXIとも合わせることで、superorbital modulation は円盤遮蔽の可能性を示唆？



多波長(可視光・電波)との連携モニタリング

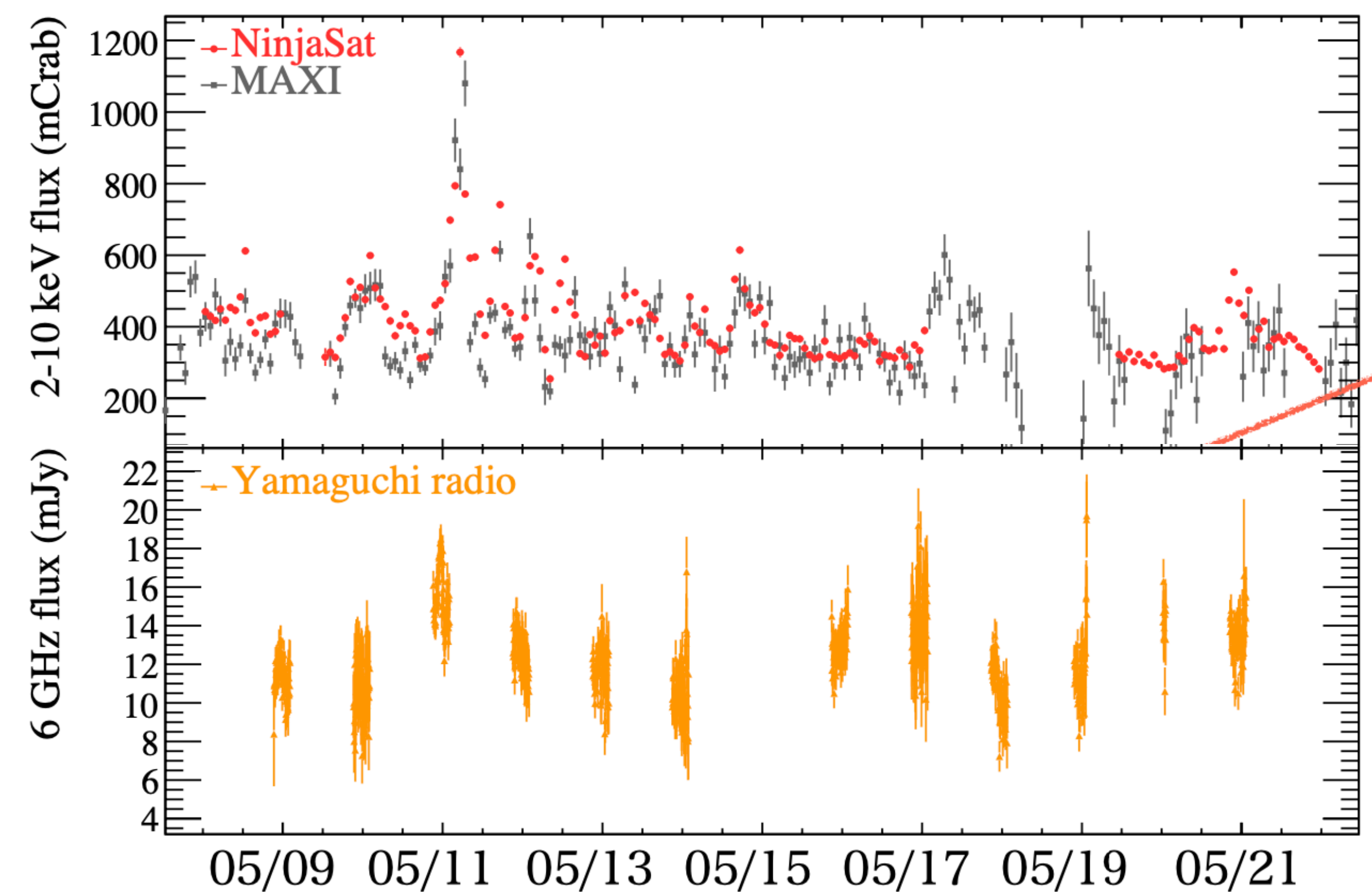
Sco X-1の可視光 (TESS)との同時観測

高橋・天文夏の学校25



Cyg X-1の電波(6, 8GHz) (山口)との同時観測

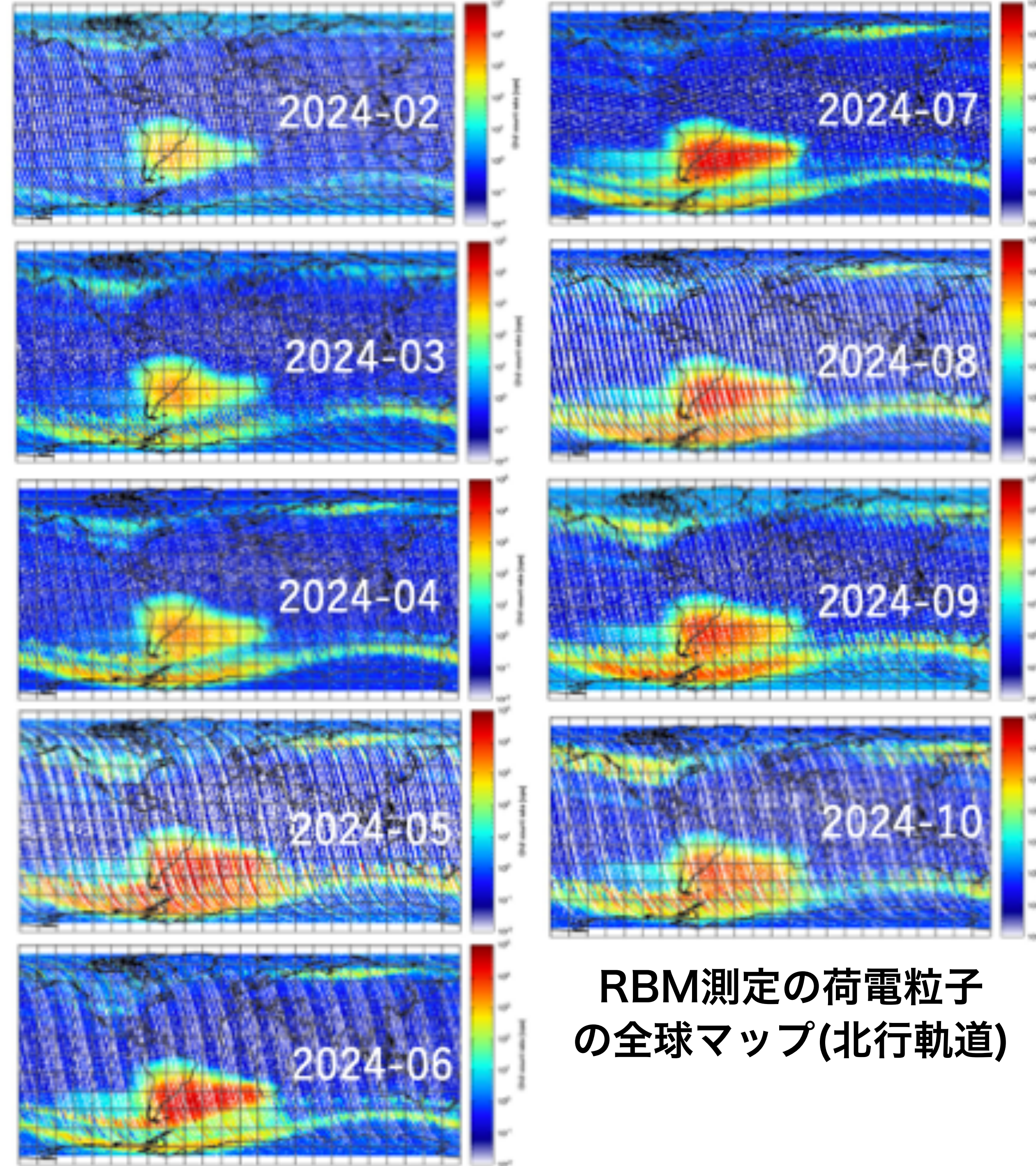
山崎・天文夏の学校25



山崎楓ほか、山口大学などの電波メンバー(藤沢氏、穂本氏、新沼氏、前川氏、松崎氏)と連携

荷電粒子モニタの活用

- 荷電粒子モニタ(RBM)は、主検出器GMCの保護を目的に衛星周辺の荷電粒子（陽子、電子）を測定する
- 太陽活動の第25期極大期(2025年7月がピーク?) に近づく中、太陽フレアに伴うSAAやオーロラ帯の変化を検出



RBM測定 of 荷電粒子
の全球マップ(北行軌道)

Kato et al., in prep. 検出器論文

14 Numazawa et al., in prep. 太陽活動

NinjaSat で他にもこんな事をやっています

- X線パルサーによるパルサー航法の検証 (大田尚享ほか)
- AGN (IC 4329A) の可視光との同時観測 (岩田智子ほか)
- 銀河中心のX線源 MAXI J1744-294 の観測 (山崎楓ほか)
- 大気掩蔽観測から地球大気密度の測定 (土屋草馬ほか)
- IXPE や XRISM との同時観測 4U 1700-377, Her X-1 など
- 衛星GPSによる軌道情報を活用し、太陽EUV放射に対する地球大気の応答 (田中颯さん[東京科学大学・ISAS]ほかと連携、詳細は天文学会2025春季年会の発表参照)

キューブサットの自由度を活かし、アイデアベースで「やってみなはれ」



まとめ

- ・キューブサット衛星NinjaSatは、2023年11月に打ち上がり、2024年2月23日から科学観測を開始した。X線天文学に必要な時刻付けや分光性能を軌道上で較正・検証できた。([Enoto et al., SPIE, 2020](#); [Tamagawa et al., PASJ, 2025](#))
- ・キューブサット衛星の機動性を活かして時間軸天文学を中心に科学成果を蓄積。
 - ・新天体のクロックトバースター SRGA J144459.2-604207から12個のType I X線バーストを検出し理論モデルとの比較からヘリウムが多い降着物質と重たい中性子星を示唆。GS 1826-238の再帰バーストも報告 ([Takeda+2025, Dohi+2025](#))
 - ・新発見のX線トランジェント MAXI J1752-457 の追跡観測で、低質量X線連星での炭素燃焼型のスーパーバーストを検出 ([Aoyama et al., ApJL, 2025](#))
 - ・LMC X-1 の Superorbital modulation の長期観測や、Sco X-1 の可視光 (TESS)同時観測、Cyg X-1 の電波(山口干渉計)との同時観測、パルサーナビゲーションや大気密度測定、太陽活動のモニタリングなど多様な科学を実現。
- ・キューブサット衛星でもサイエンスができるか? → はい、できます。