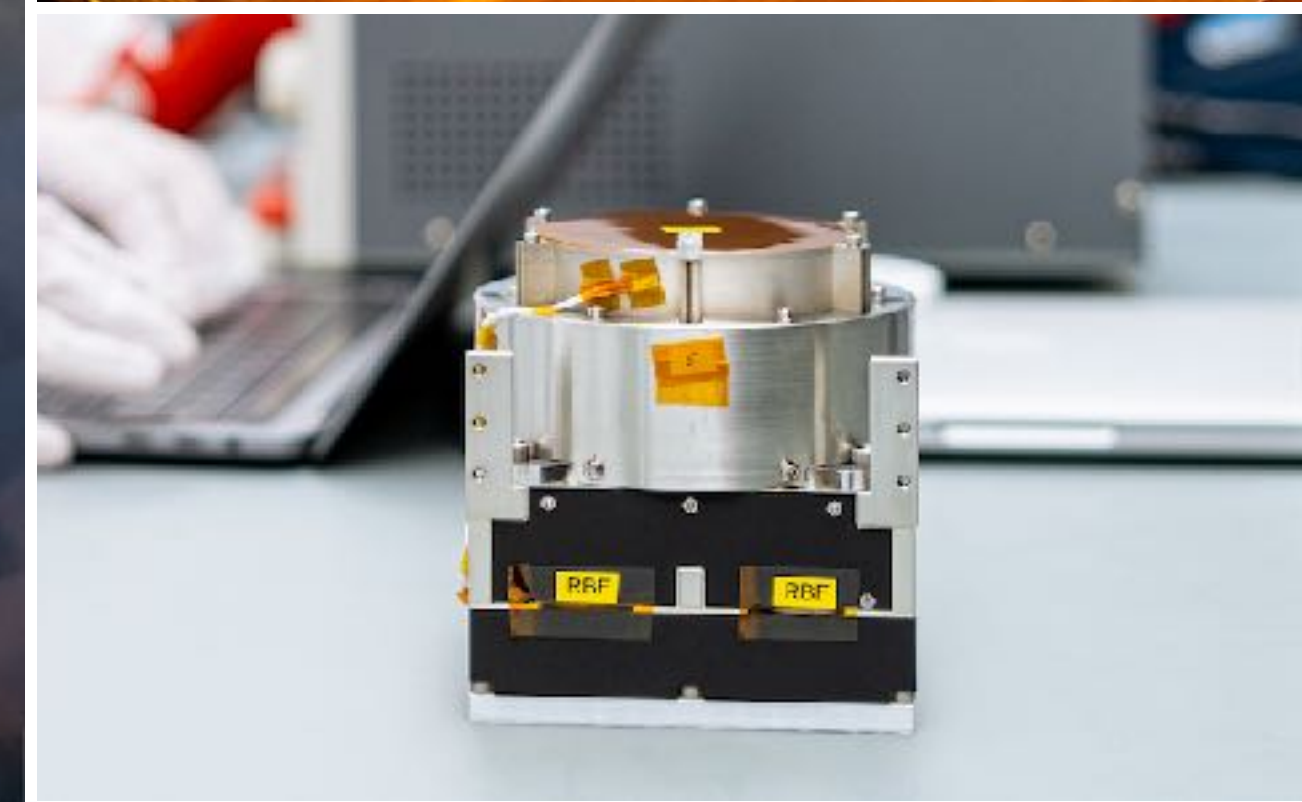
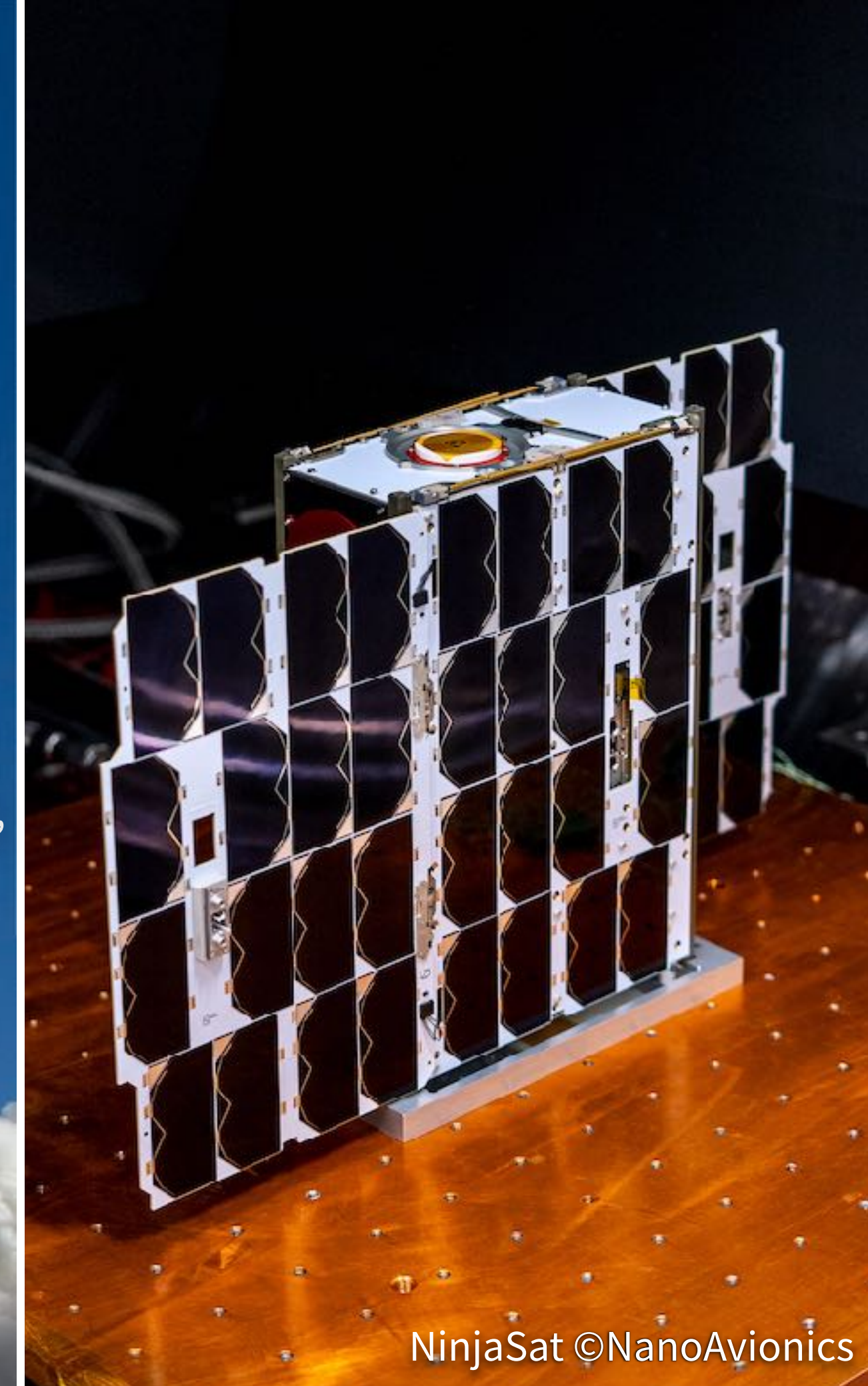


# 超小型X線衛星 NinjaSat の現状

## 武田 朋志 (広島大学)

玉川 徹 (理研), 榎戸 輝揚 (京都大), 北口 貴雄, 加藤 陽, 三原 建弘 (理研), 岩切 渉 (千葉大), 沼澤 正樹 (都立大), 大田 尚享, 青山 有未来, 岩田 智子, 高橋 拓也, 山崎 楓, 土屋 草馬, 中野 遥介, 周 圓輝, 内山 慶祐, 吉田 勇登, 林 昇輝, 重城 新大, 渡部 蒼汰 (理研/東理大), 喜多 豊行 (千葉大), 一番ヶ瀬 麻由 (立教大), 佐藤 宏樹 (理研/芝浦工大), Chin-Ping Hu (彰化師範大/理研), 高橋 弘充 (広島大), 小高 裕和 (大阪大), 丹波 翼 (ISAS/JAXA), 谷口 絢太郎 (理研/早大)



## ■ 主な観測目的

- 明るいX線天体の長期観測
- 突発天体の迅速な追観測

少人数チームで運用する  
超小型衛星の利点

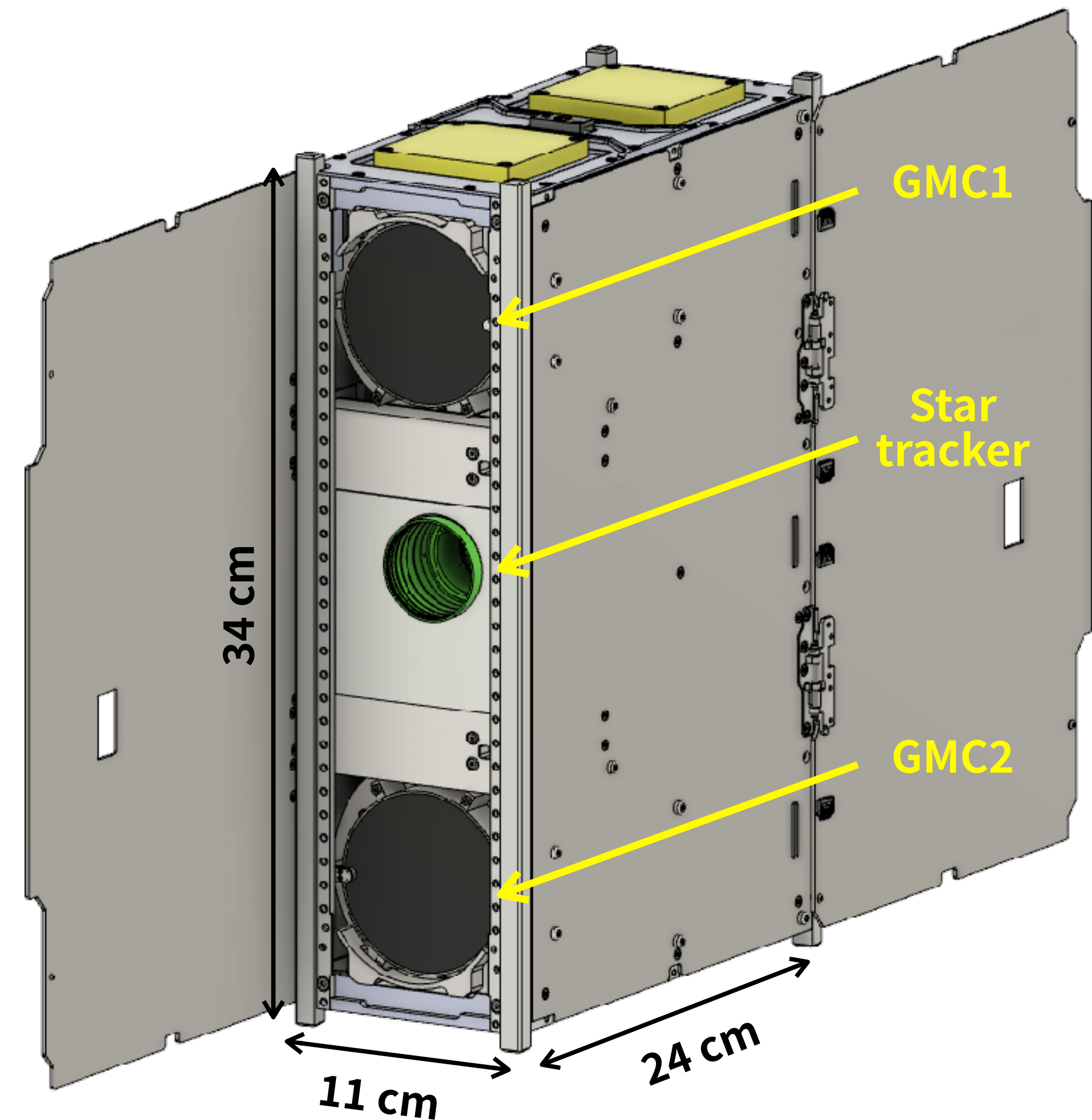
## ■ 衛星バス

- 姿勢制御・地上との通信・電力供給など
- NanoAvionics 社 (リトアニア) に委託  
→ 我々は検出器開発に専念することで開発期間を短縮

## ■ ガスX線検出器 Gas Multiplier Counter (GMC) ×2台

- サイズ ~ 1U (10 cm 立方), 重量 ~1.2 kg
- 封入ガス: XeArDME (75%/24%/1%) @1.2 atm
- コリメータ型で視野角 2.1° (FWHM)
- 観測エネルギー帯域: 2-50 keV
- 有効面積: 32 cm<sup>2</sup> @6 keV /2台 (超小型衛星では過去最大)

6U サイズ (11×24×34 cm<sup>3</sup>) の超小型X線衛星



総電力: 16 W, 総重量: 8.4 kg

## ■ 主な観測目的

- 明るいX線天体の長期観測
- 突発天体の迅速な追観測

少人数チームで運用する  
超小型衛星の利点

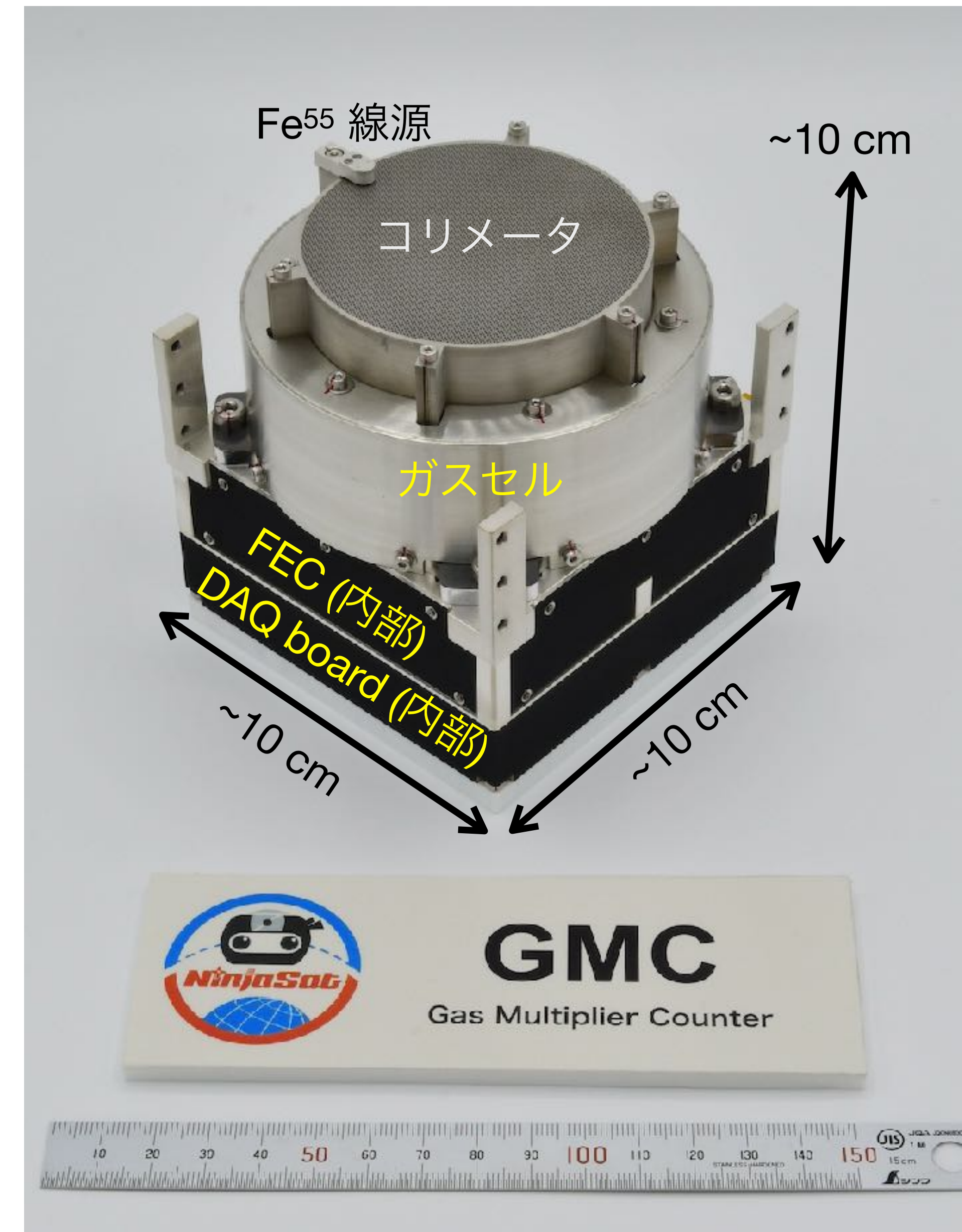
## ■ 衛星バス

- 姿勢制御・地上との通信・電力供給など
- NanoAvionics 社 (リトアニア) に委託  
→ 我々は検出器開発に専念することで開発期間を短縮

## ■ ガスX線検出器 Gas Multiplier Counter (GMC) ×2台

- サイズ ~ 1U (10 cm 立方), 重量 ~1.2 kg
- 封入ガス: XeArDME (75%/24%/1%) @1.2 atm
- コリメータ型で視野角 2.1° (FWHM)
- 観測エネルギー帯域: 2-50 keV
- 有効面積: 32 cm<sup>2</sup> @6 keV /2台 (超小型衛星では過去最大)

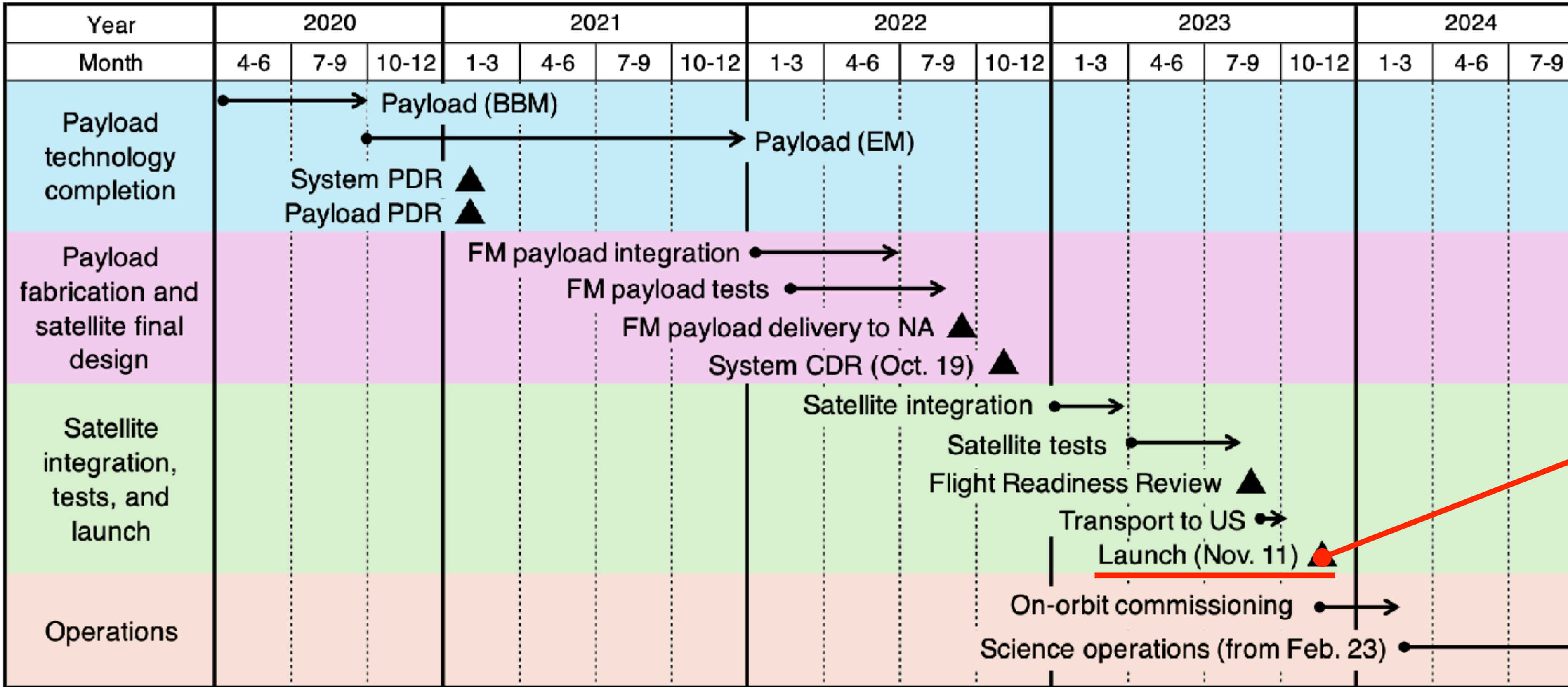
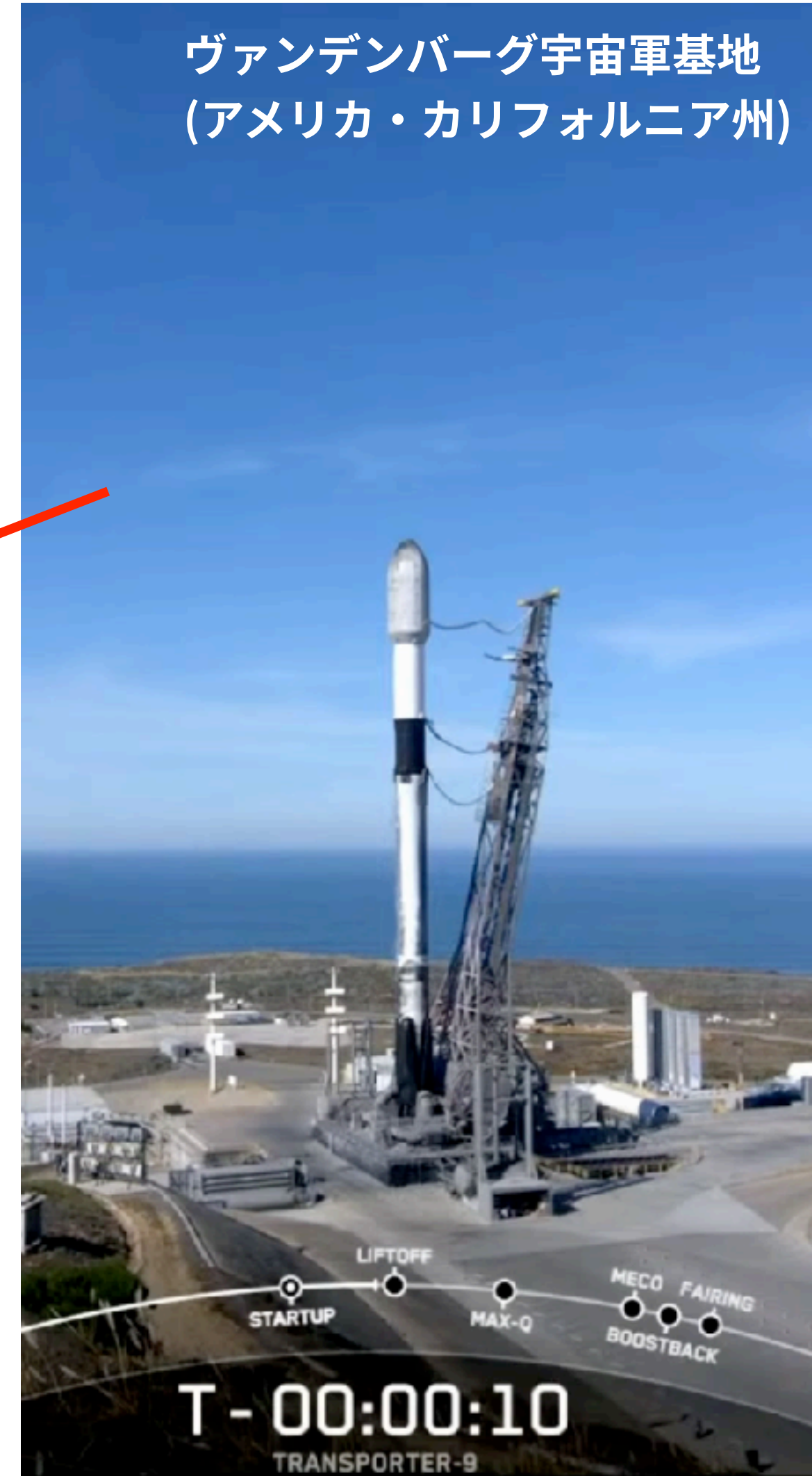
イベント弁別手法 → 喜多ほか, 軌道上バックグラウンド → 岩田ほか



# プロジェクトタイムライン：開発から打ち上げまで約3.5年

**2023年11月11日  
SpaceX Transporter-9  
により打ち上げ成功!!**

ヴァンデンバーグ宇宙軍基地  
(アメリカ・カリフォルニア州)



GMC 組み立て



GMC 地上試験



衛星全体組み立て



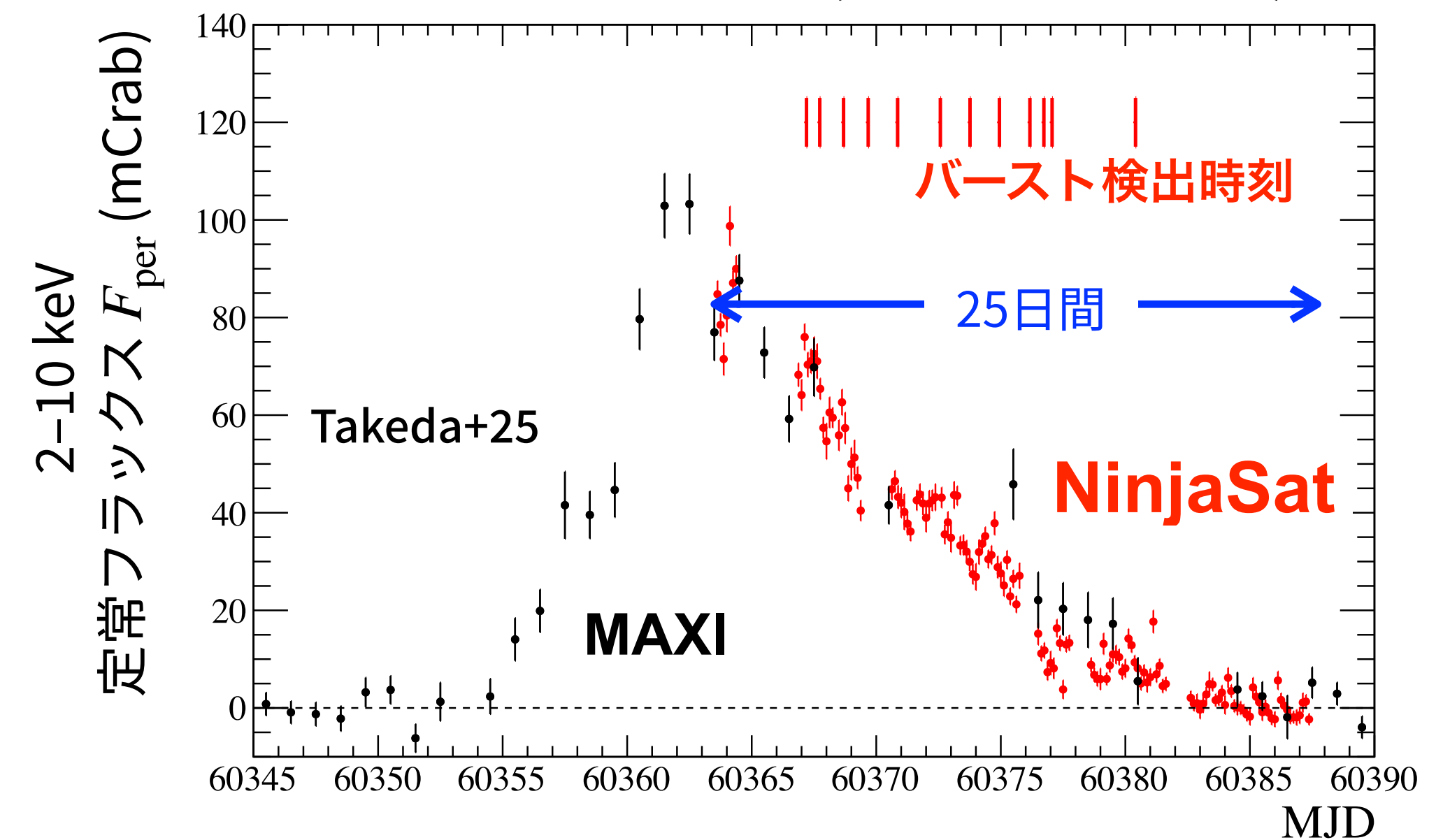
衛星運用・科学観測



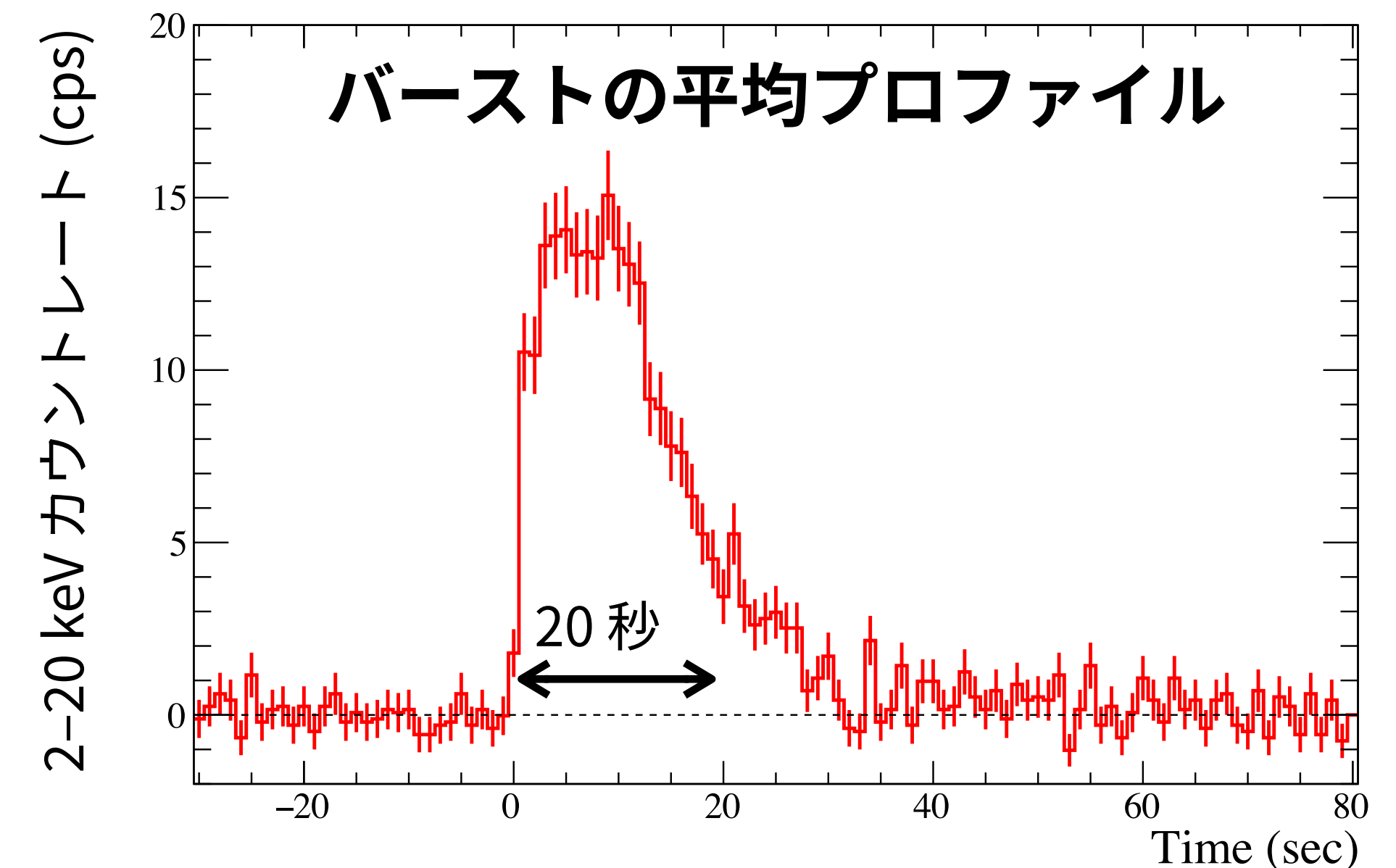
- NinjaSat 最初の科学観測ターゲット
- NinjaSat が科学観測を開始する2日前 (2024/02/21) に発見され、のちにX線バースターの一種であるクロックバースターと判明
- 約25日間の長期観測により、アウトバーストの減衰部分を全天モニターMAXI よりも高い感度でカバー
- X線バーストを12個検出。超小型衛星では**世界初**
- 質量降着率の低下に伴ってバースト再帰時間 & プロファイルが変化する様子を長期モニター
- (1) 中性子星質量が2太陽質量よりも重く、  
(2) 伴星の組成は太陽組成と比べて He に富んだ (H/He ~1.5)  
珍しい系であることを示唆

超小型衛星による**長期的なポインティング観測**で科学的に価値のあるデータを得られることを実証

## 定常フラックス ( $\propto$ 質量降着率)



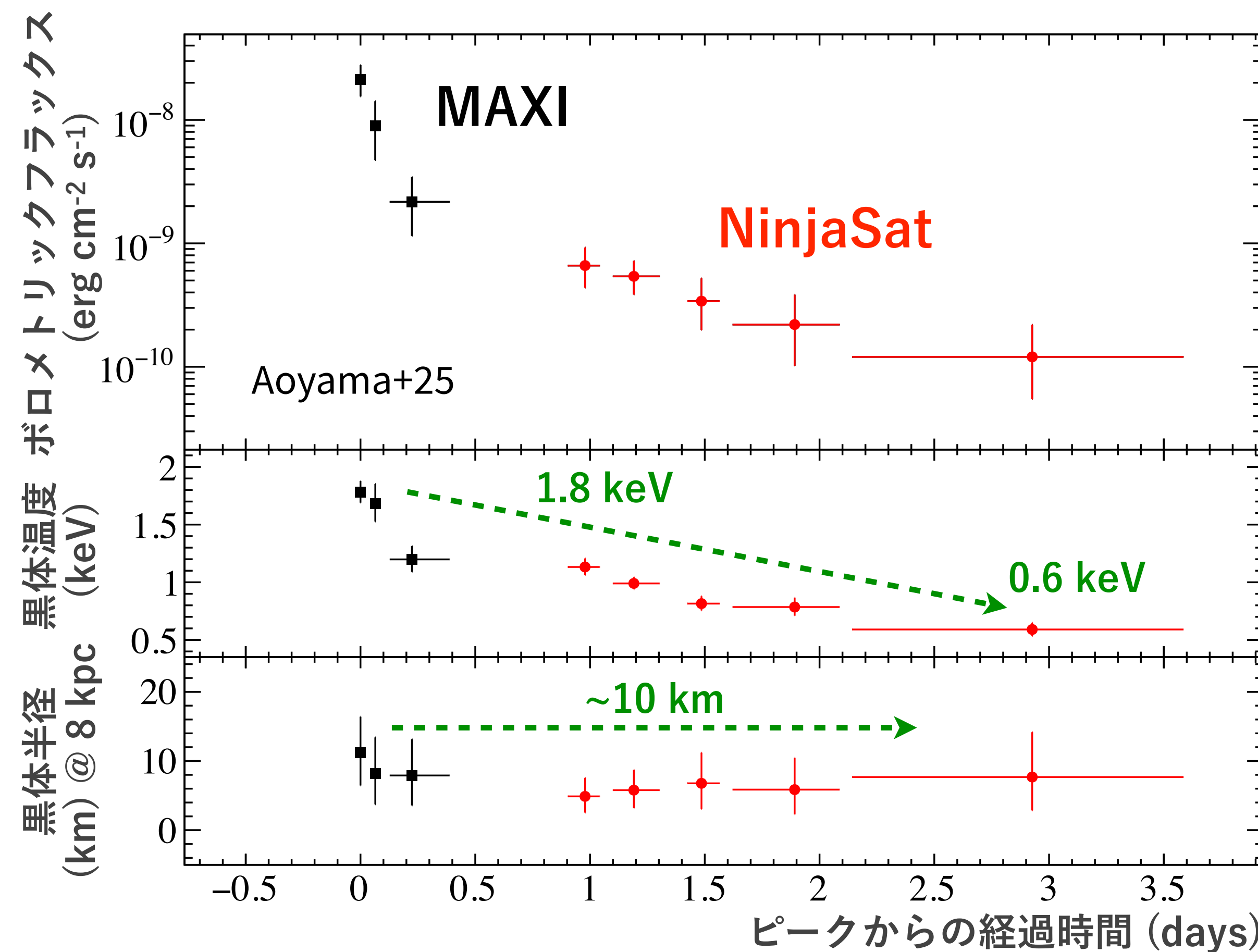
## バーストの平均プロファイル



- 2024/11/09 に全天モニター MAXI が発見  
→ 新天体であることを天文電報 ATel に速報 (ATel #16898)
- NinjaSat は報告から~2.5 hr で追観測を開始
- エネルギースペクトルが黒体放射モデルでよく再現でき  
黒体温度が数日かけて徐々に低下していく様子から  
中性子星連星で生じたスーパーバーストであると結論
- スーパーバースト
  - 水素・ヘリウムが燃料である普通のバーストと異なり、炭素が主燃料。継続時間が長い
  - 全天で~1イベント/年の稀な現象

超小型衛星による**迅速な追観測**を活すことで  
新天体の素性を明らかに

## NinjaSat & MAXI による観測結果



# その他のサイエンス成果 (投稿中)

## ■ クロックバースター GS 1826-238

- 10年ぶりに状態遷移 (ソフト→ハード)したことにいち早く気づき、NinjaSat で観測
- この天体の観測史上最も短いバースト再帰時間の検出に成功
- 降着ジオメトリの違い？  
降着による中性子星内部の加熱？

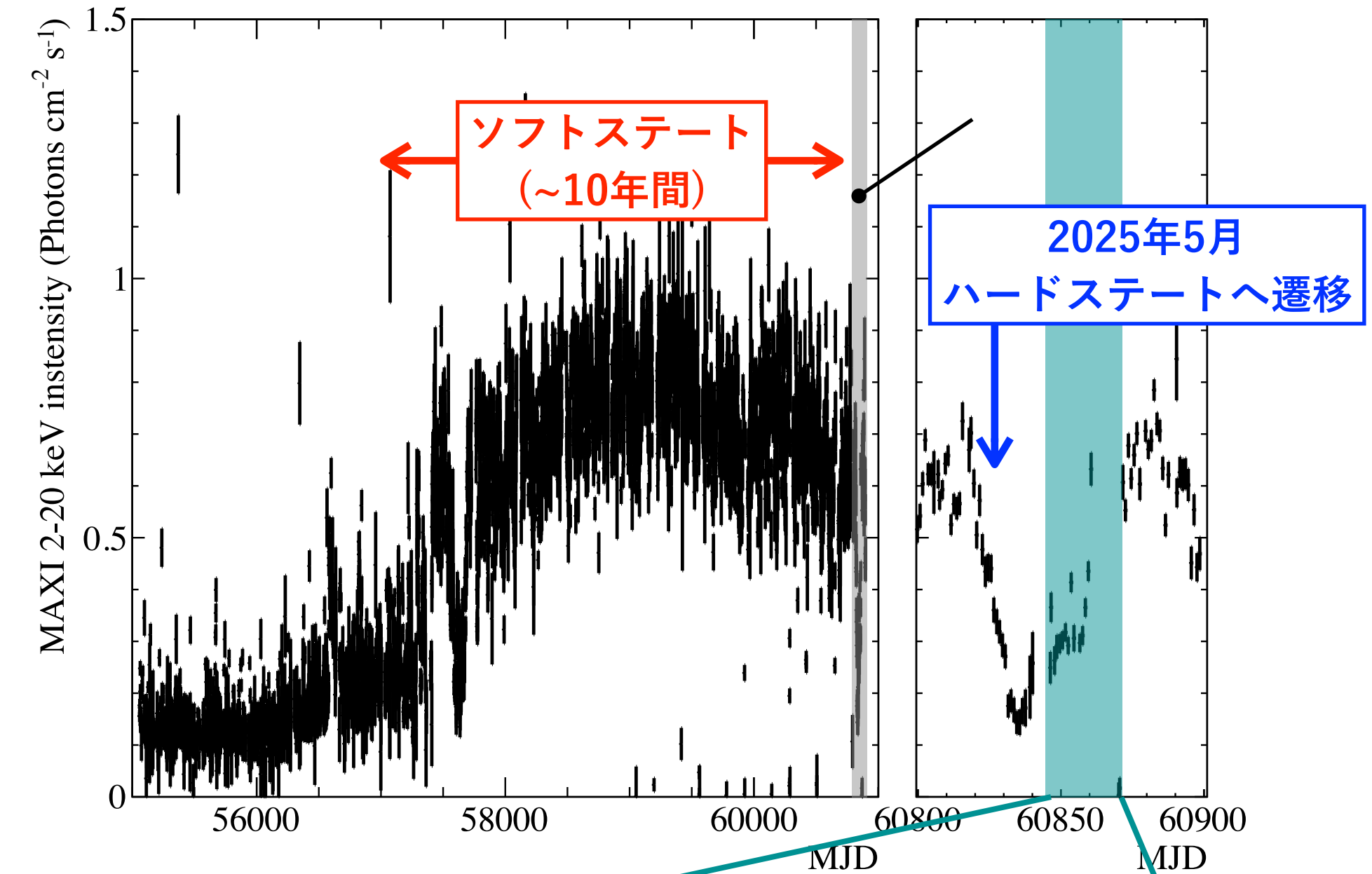
Takeda+25b, submitted to ApJL (arXiv 2508.18837)

## ■ 超巨星X線連星パルサー SMC X-1

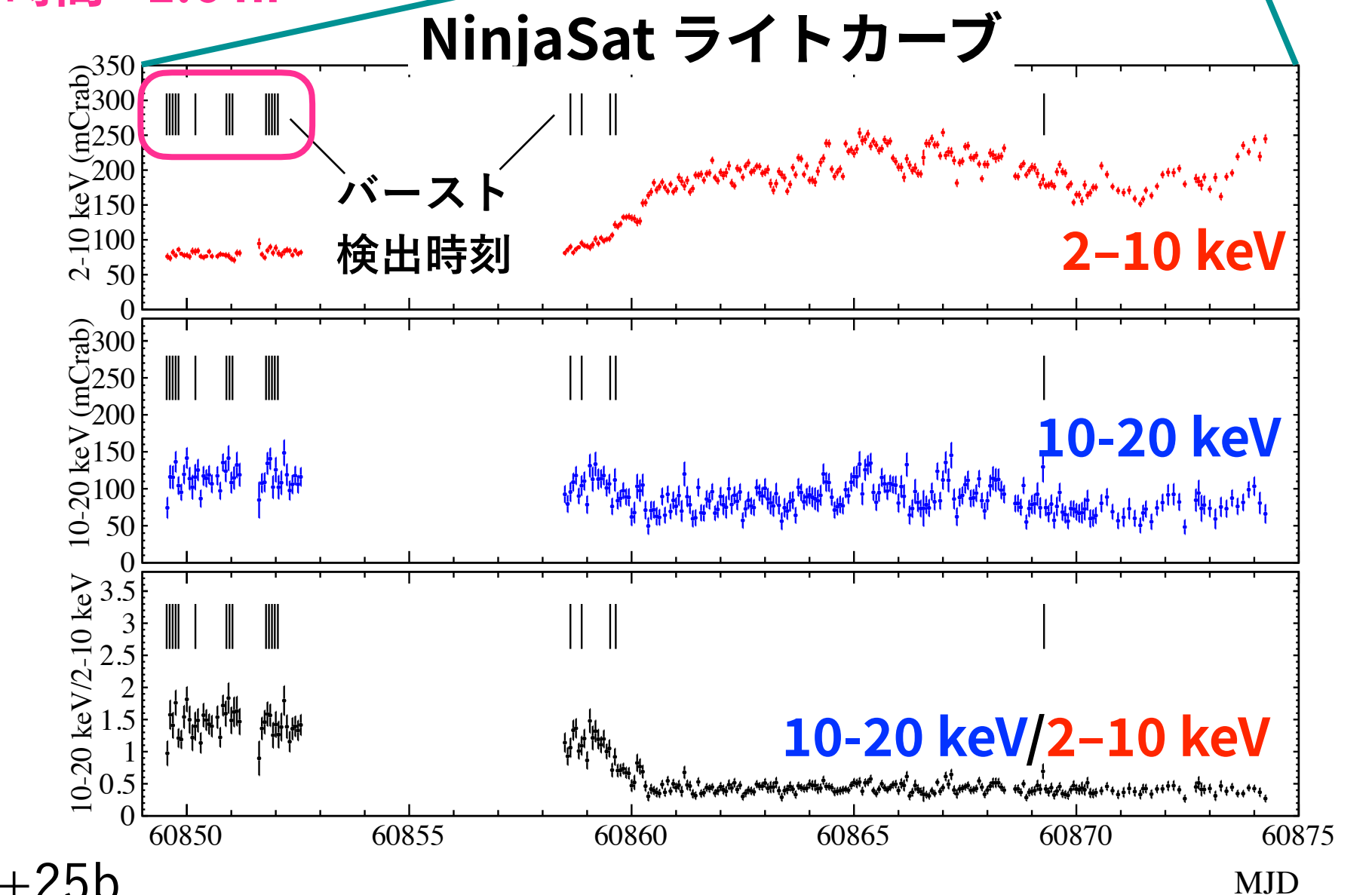
- パルス周期 0.7秒, 連星周期 3.9日 + 超軌道周期 40-65日
- 超軌道周期の起源は、  
(1)降着率の変化 or (2)歪んだ降着円盤などによる遮蔽？
- パルス波形やスペクトルの長期変化をモニタリング  
→ (2) 降着円盤などによる遮蔽を指示？

Hu+25, submitted to ApJ

## MAXI 長期ライトカーブ



再帰時間 ~1.6 hr



Takeda+25b

## ■ クロックバースター GS 1826-238

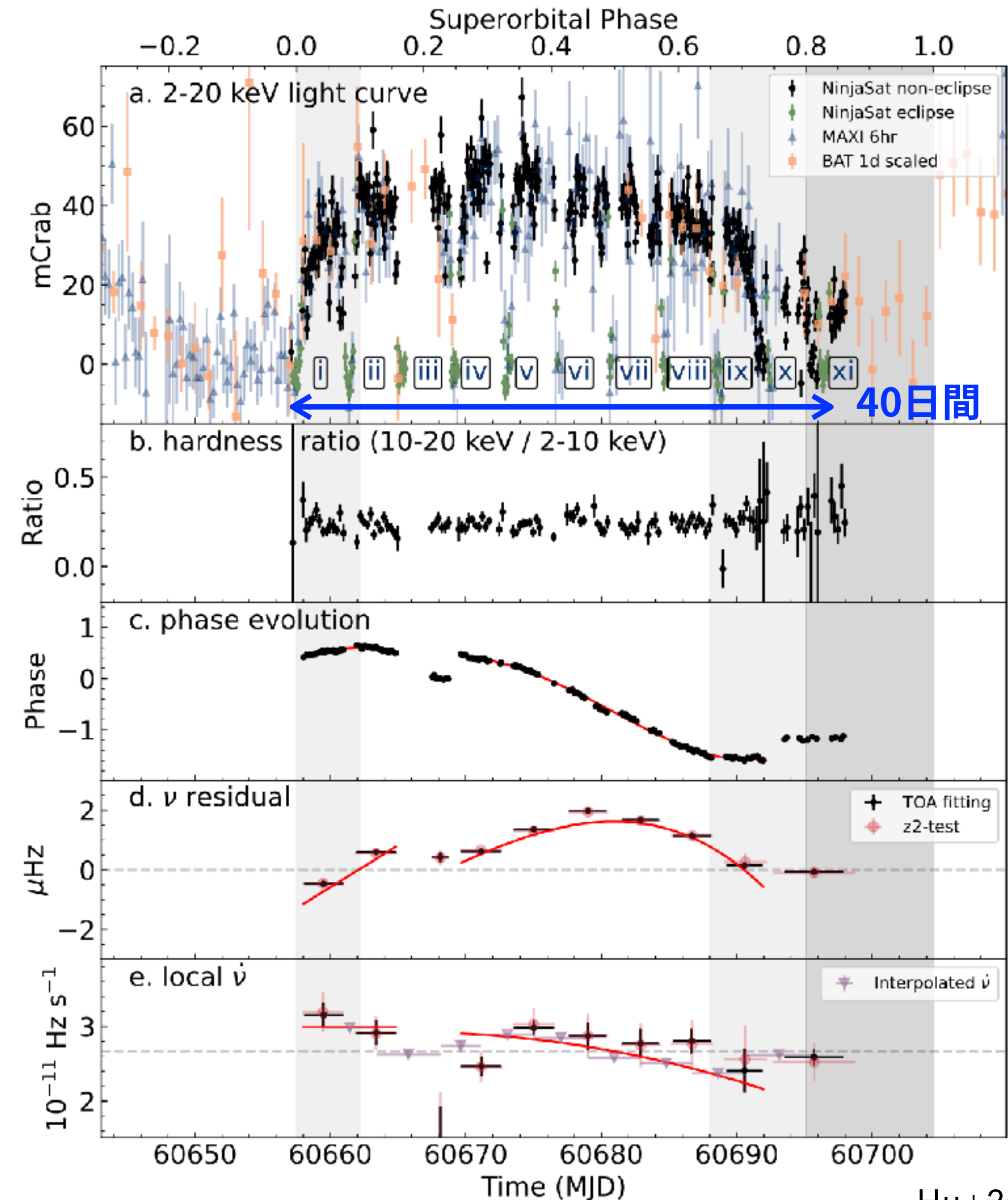
- 10年ぶりにステート遷移 (ソフト→ハード)したことにいち早く気づき、NinjaSatで観測
- この天体の観測史上最も短いバースト再帰時間の検出に成功
- 降着ジオメトリの違い？  
降着による中性子星内部の加熱？

Takeda+25b, submitted to ApJL (arXiv 2508.18837)

## ■ 超巨星X線連星パルサー SMC X-1

- パルス周期 0.7秒, 連星周期 3.9日 + 超軌道周期 40-65日
- 超軌道周期の起源は、  
(1)降着率の変化 or (2)歪んだ降着円盤などによる遮蔽？
- パルス波形やスペクトルの長期変化をモニタリング  
→ (2) 降着円盤などによる遮蔽を指示？

Hu+25, submitted to ApJ



## 合計 32 天体 を観測

- 主に中性子星 or ブラックホール連星 + AGN

## 追観測の最短記録 2.5 hr

- MAXI J1752-457 (Aoyama+25)

## 最長のモニタリング観測期間 ~3ヶ月

- 増光が期待された再帰新星 T CrB の待ち受け観測

## 各学生は1人1天体以上の解析を担当

- 銀河中心領域で見つかった BH 候補天体 MAXI J1744 の追観測  
→ 山崎ほか
- X線の大気掩蔽を用いた地球大気密度の測定  
→ 土屋ほか

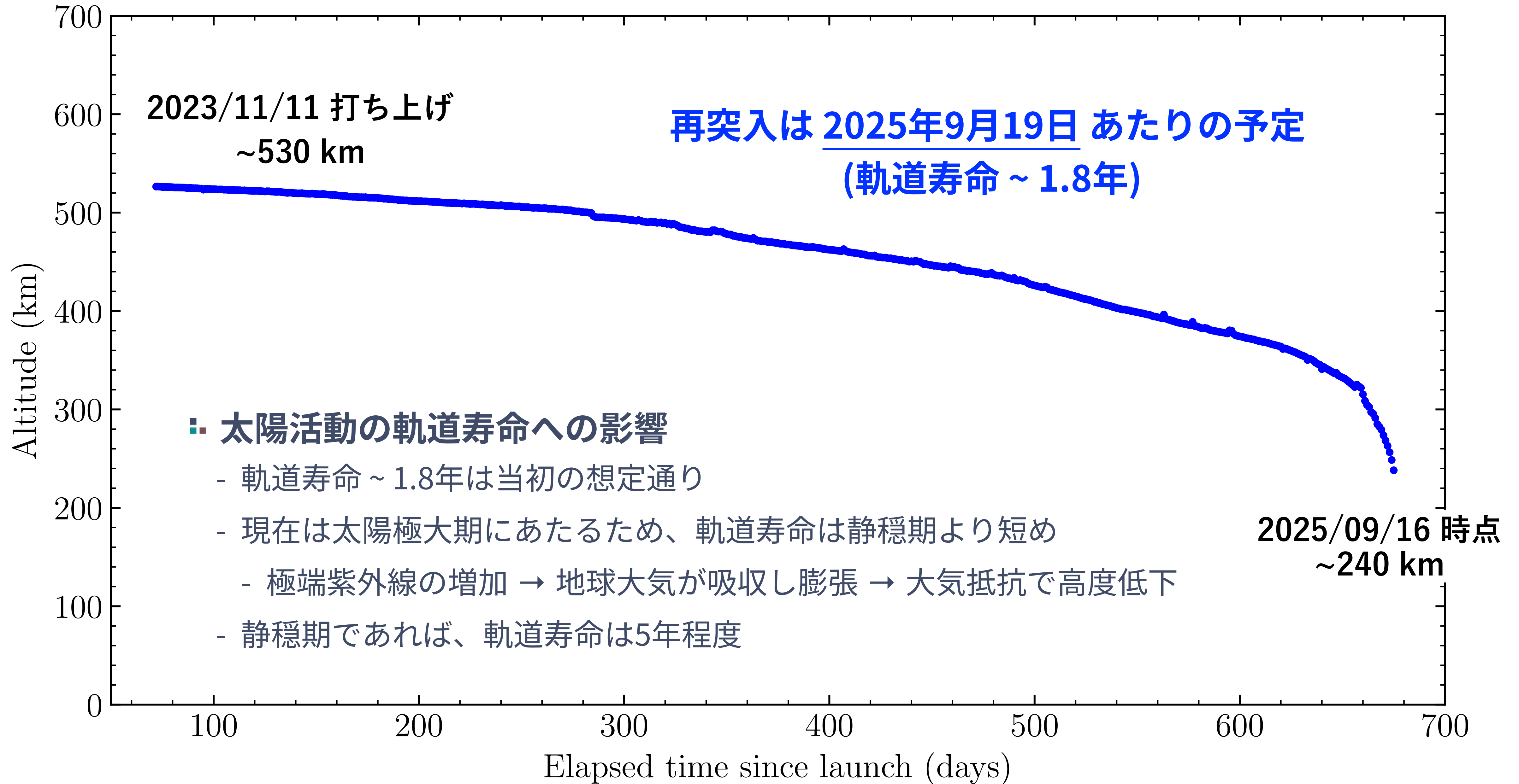
Source type	Source name
Pulsar (NS)	Crab Nebula
NS-LMXB	Sco X-1, EXO 0748-676, GX 17+2, Aql X-1, GX 1+4, Cyg X-2, 4U 1636-536, MAXI J1752-457, 4U 1538-52, 4U 0614+091, 4U 1820-303
NS-HMXB	SMC X-1, Her X-1, 4U 0115+63, GX 301-2, Cen X-3, 4U 1700-377, Vela X-1, LMC X-4
Clocked burster (NS)	SRGA J144459.2-604207, GS 1826-238
Rapid burster (NS)	MXB 1730-335
Magnetar (NS)	1E 1841-045
Black hole	Cyg X-1, GX 339-4, MAXI J1744-294
AGN	NGC 4151, NGC 526, IC 4329A
White dwarf	T CrB

<p><b>Minimum Success</b></p>	<p>X線天体をポインティング観測し、天体由来のX線放射を検出する かに星雲の観測 (Tamagawa et al., PASJ (2025))</p>
<p><b>Full Success</b></p>	<p>2本以上の査読付き論文を出版 Takeda et al., PASJ Letter (2025a) Aoyama et al., ApJL (2025) + 理論コラボ Dohi et al., PASJ Letter (2025)</p>
<p><b>Extra Success</b></p>	<p>以下2つのいずれかを達成する</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1) 電波・可視光などの他波長と連携観測を実施し、新たな発見を論文として出版</li><li>2) 降着中性子星 (e.g., Sco X-1) の自転周期を決定し、定常重力波の検出に貢献する</li></ol>



On-going

# 大気圏再突入



## ■ NinjaSat: 6U サイズの超小型X線衛星

- 2023年11月11日に打ち上げ。今週中に大気圏再突入の予定
- 明るいX線天体の迅速な追観測・長期観測を実現。約1.5年間の科学観測

## ■ フルサクセスを達成

- X線バースター×3 (2 accepted, 1 submitted), SMC X-1 (1 submitted)
- 天文電報 ATel ×5 (#16495, 16678, 16903, 17009, 17245)

運用終了後、サイエンス成果の最大化に向けて観測データの解析に注力  
並行して、後継機 NinjaSat2 の開発もスタート

## ■ 本学会での関連発表 (このあと)

- GMC のイベント弁別手法 (喜多ほか)
- GMC の軌道上バックグラウンド (岩田ほか)
- 銀河中心領域で見つかった BH 候補天体 MAXI J1744 の追観測 (山崎ほか)
- X線の大気掩蔽を用いた地球大気密度の測定 (土屋ほか)

