



～中性子星の観測と理論～ 研究活性化ワークショップ 2025@RIKEN
2025年5月19-21日

超小型X線衛星 NinjaSat による新たな clocked X-ray burster SRGA J144459.2-604207 の 長期モニタリング観測

武田 朋志
(学振 PD @広島大学)

共同研究者:

玉川 徹 (理研), 榎戸 輝揚 (京大/理研), 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 (理研/東京理科大), 喜多 豊行 (千葉大学) 周 圓輝, 内山 慶祐, 吉田 勇登, 林 昇輝, 重城新大, 渡部蒼汰 (理研/東京理科大), 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), 土肥 明 (理研), 西村 信哉 (東大/理研), 平井 遼介 (理研/モナッシュ大学), 小高 裕和 (大阪大), 丹波 翼 (ISAS/JAXA), 谷口 絢太郎 (理研/早大)

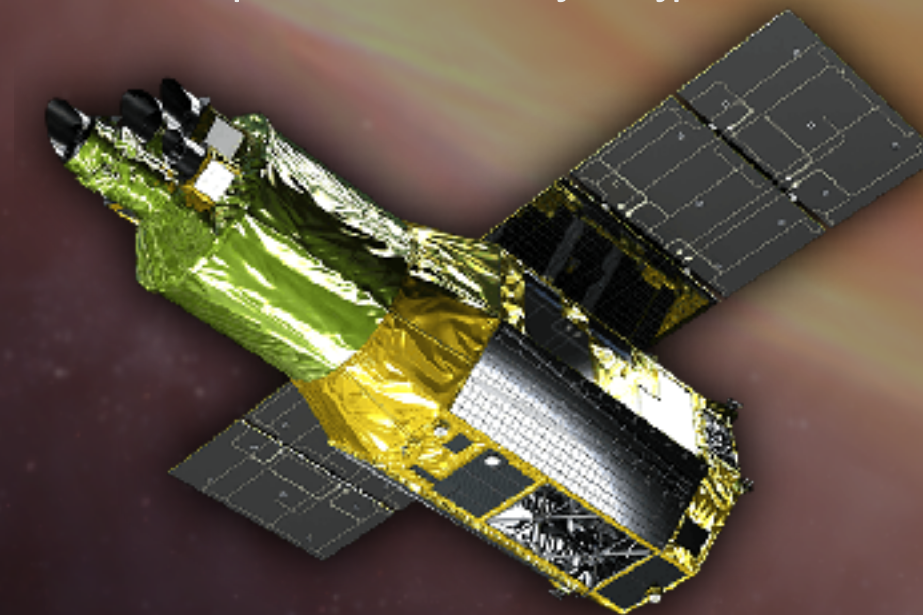
Based on papers (<https://doi.org/10.1093/pasj/psaf014>, <https://doi.org/10.1093/pasj/psaf003>)

<https://xrism.isas.jaxa.jp/>



NinjaSat

(10 × 20 m × 30 cm³)



XRISM 衛星

(790 × 920 × 310 cm³)

Contents

1. 超小型衛星 NinjaSat の紹介
2. 新たなX線バースター SRGA J144459.2-604207 の
長期モニタリング観測

Contents

1. 超小型衛星 NinjaSat の紹介
2. 新たなX線バースター SRGA J144459.2-604207 の
長期モニタリング観測

超小型衛星を活用したX線観測

■ 超小型衛星

- 複数の 1U-size ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) を組み合わせた衛星
- 近年、ミッション数が急激に増加 (X線天文分野でも)

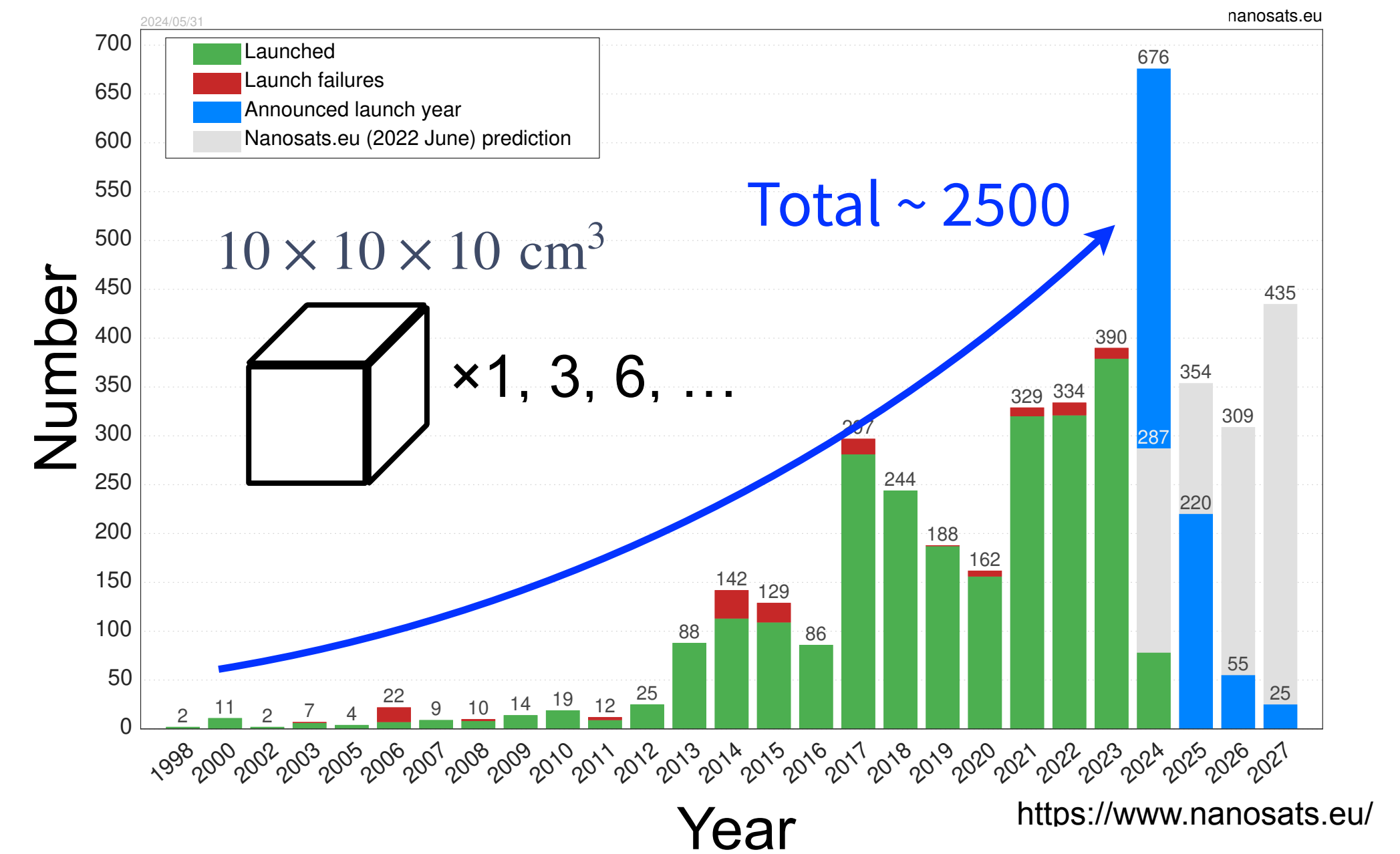
■ 従来の大型衛星と比べて開発費用/期間を大幅に削減

- 天体からのX線は地球の大気で吸収されてしまう
- 衛星 (or 気球) の打ち上げが必要不可欠
- お金も時間もかかる。。。

■ 柔軟な観測計画

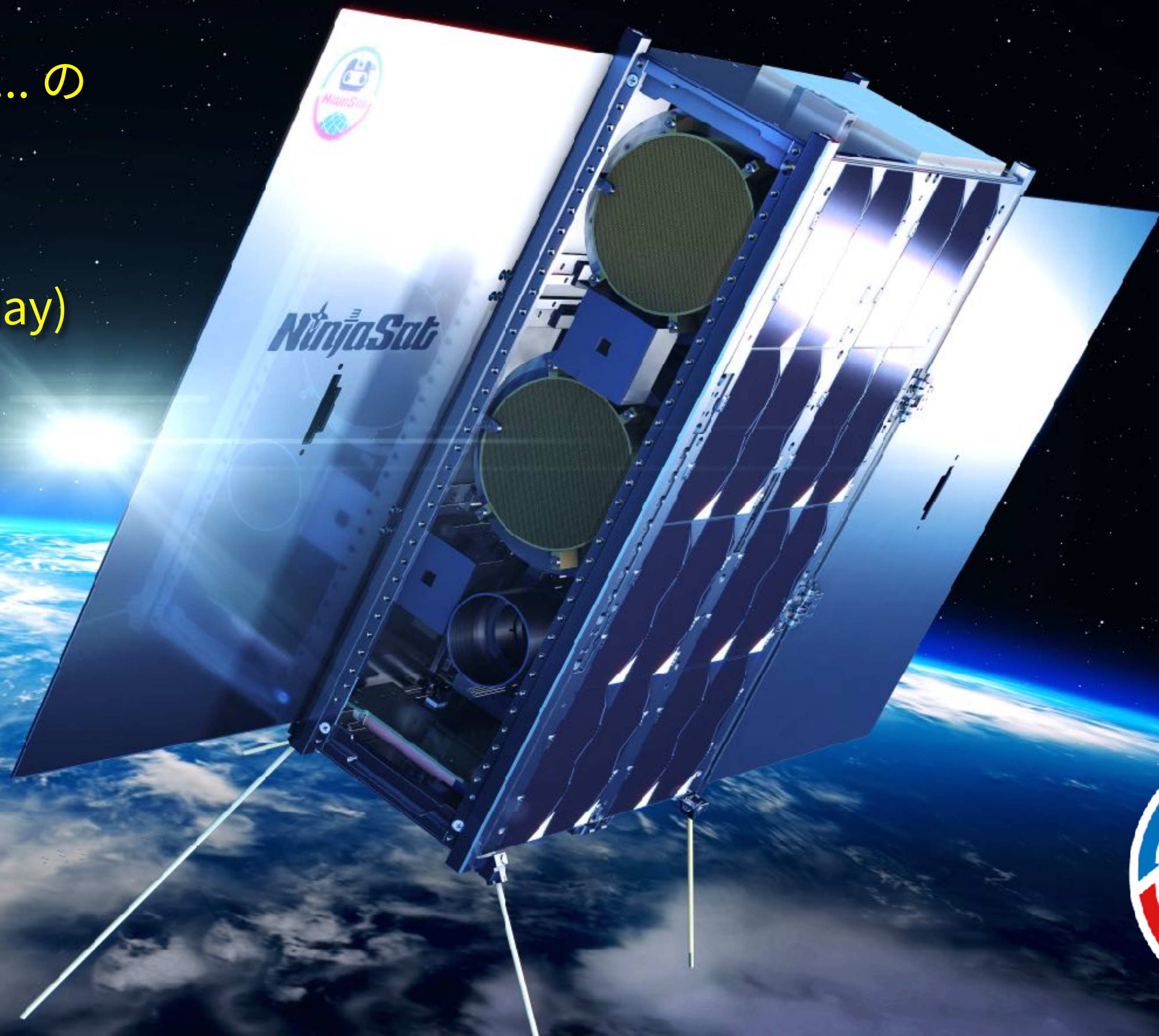
- 大型衛星では 観測時間を多くの研究者でシェア。
→ 1天体あたりの観測時間に制限 (長期観測が難しい)
- 超小型衛星 は少人数チームで開発・運用 → 1週間から数ヶ月の**長期観測**が可能 + 突発天体の**迅速な追観測**

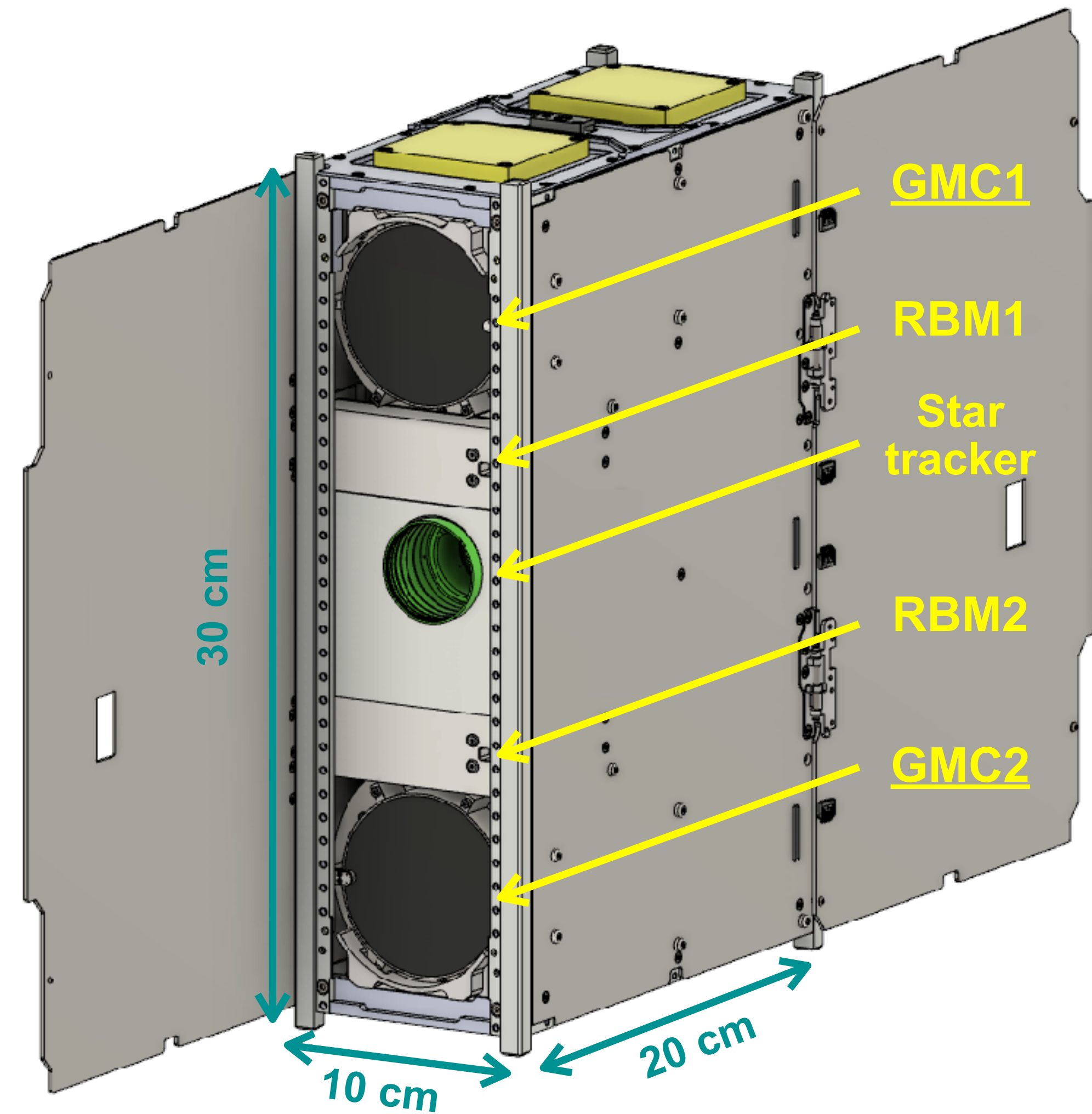
超小型衛星の打ち上げ台数の推移



NinjaSat: 日本初の超小型汎用X線衛星

- 汎用X線衛星 for 時間領域天文学
- 理研、京大、千葉大、東京理科大... のメンバーを中心に開発し、運用中
- 観測戦略
 - 突発天体の迅速な追観測 (hr~day)
 - 定常/突発天体の長期観測 (week ~ month)





宇宙実証済み 6U バス (M6P)

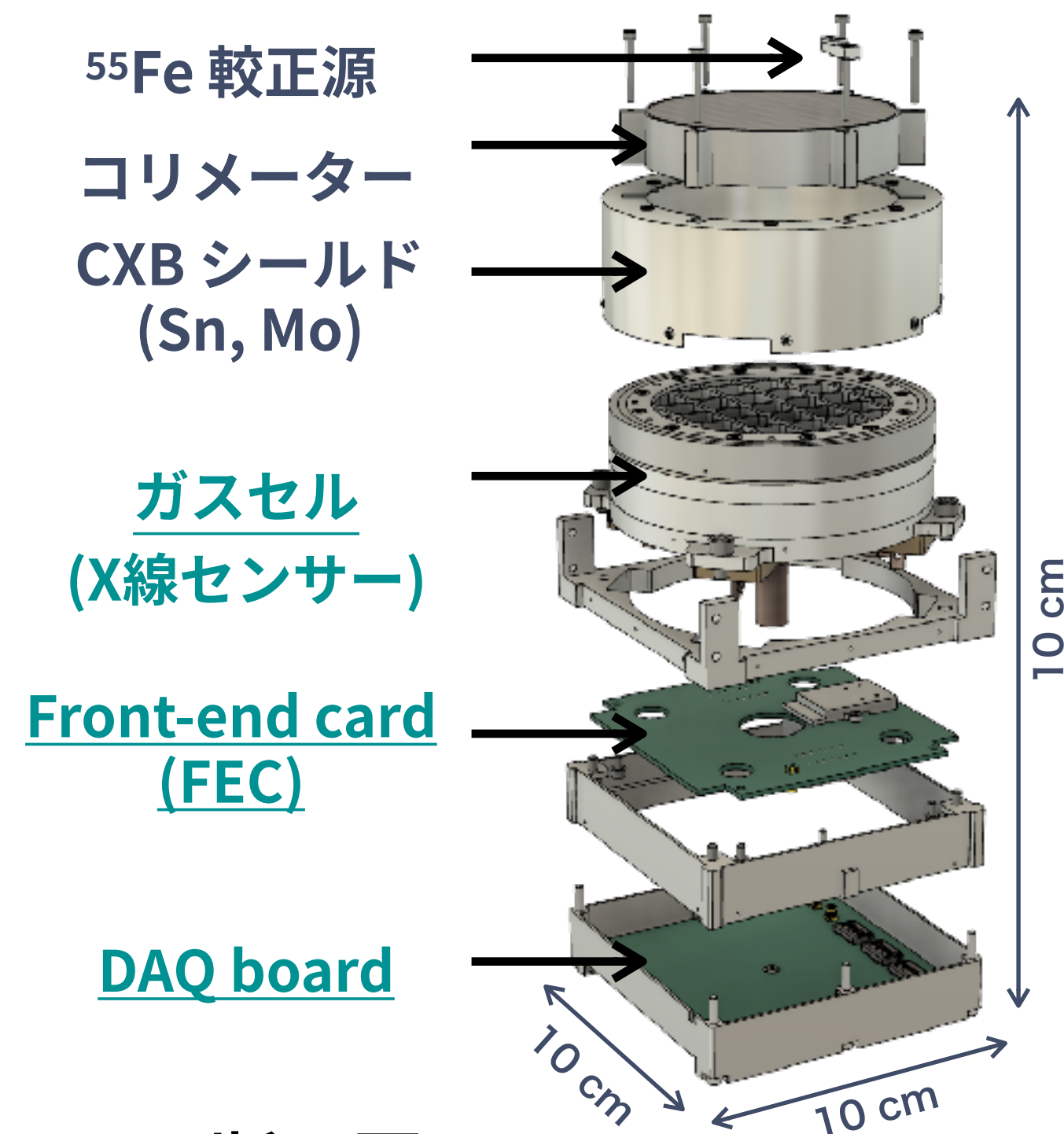
6U サイズ 衛星バス — NanoAvionics in リトアニア

- 姿勢制御・地上との通信・電力供給など
- NanoAvionics 社に委託
→ 我々は検出器開発に集中することで開発期間を短縮
- 総重量 8.14 kg (ペイロード 2.4 kg)
- 総電力 16.4 W

計4台の観測機器 — NinjaSat チーム (理研中心)

- ガスX線検出器 Gas Multiplier Counter (GMC) × 2
- 放射線帯モニター Radiation Belt Monitor (RBM) × 2

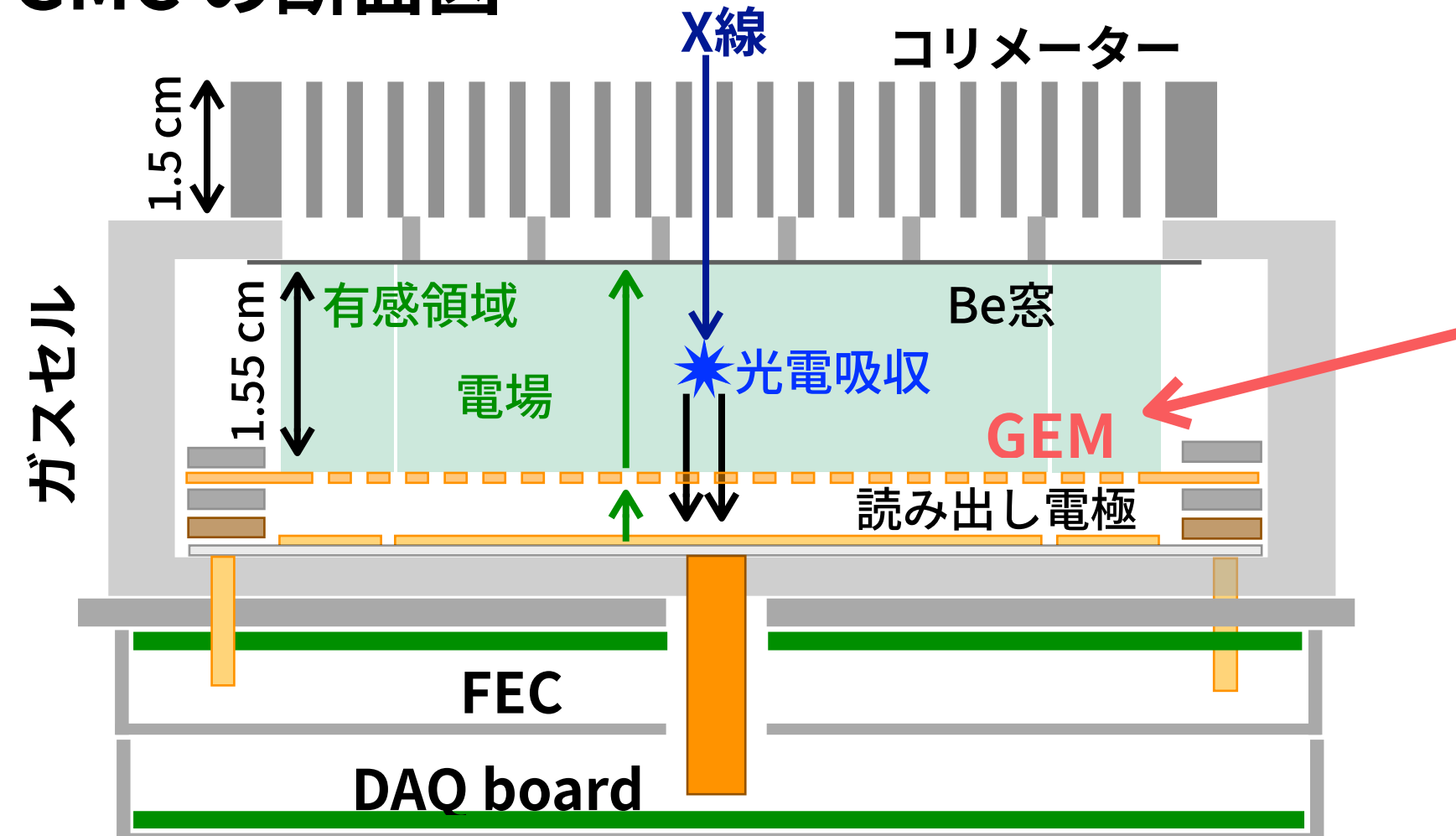
Gas Multiplier Counter (GMC)



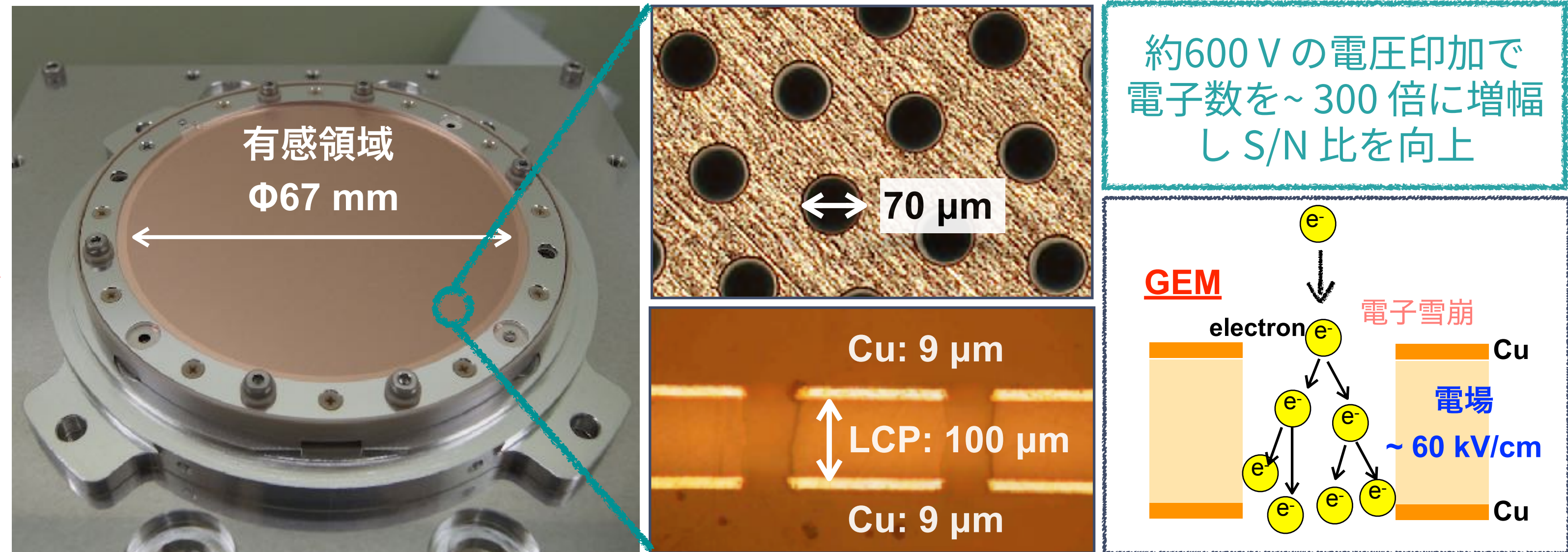
■ 非撮像型ガスX線検出器

- サイズ ~ 1U (10 cm 立方), 重量 ~ 1.2 kg
- 観測エネルギー帯域: 2–50 keV
- 封入ガス: XeArDME (75%/24%/1%) @1.2 atm
- 有効面積: 32 cm² @6 keV /2台 (超小型衛星では過去最大)
- 信号増幅: ガス電子増幅フォイル Gas Electron Multiplier (GEM)

GMC の断面図



ガス電子増幅フォイル (GEM) Tamagawa+09



なぜガス検出器を採用したのか

■ 検出器の有効面積 (有感領域 × 検出効率) を安価かつ容易に拡大可能

- ガスセルを大きくするだけで、有効面積の拡大が可能
- 他のタイプの検出器に比べて安価

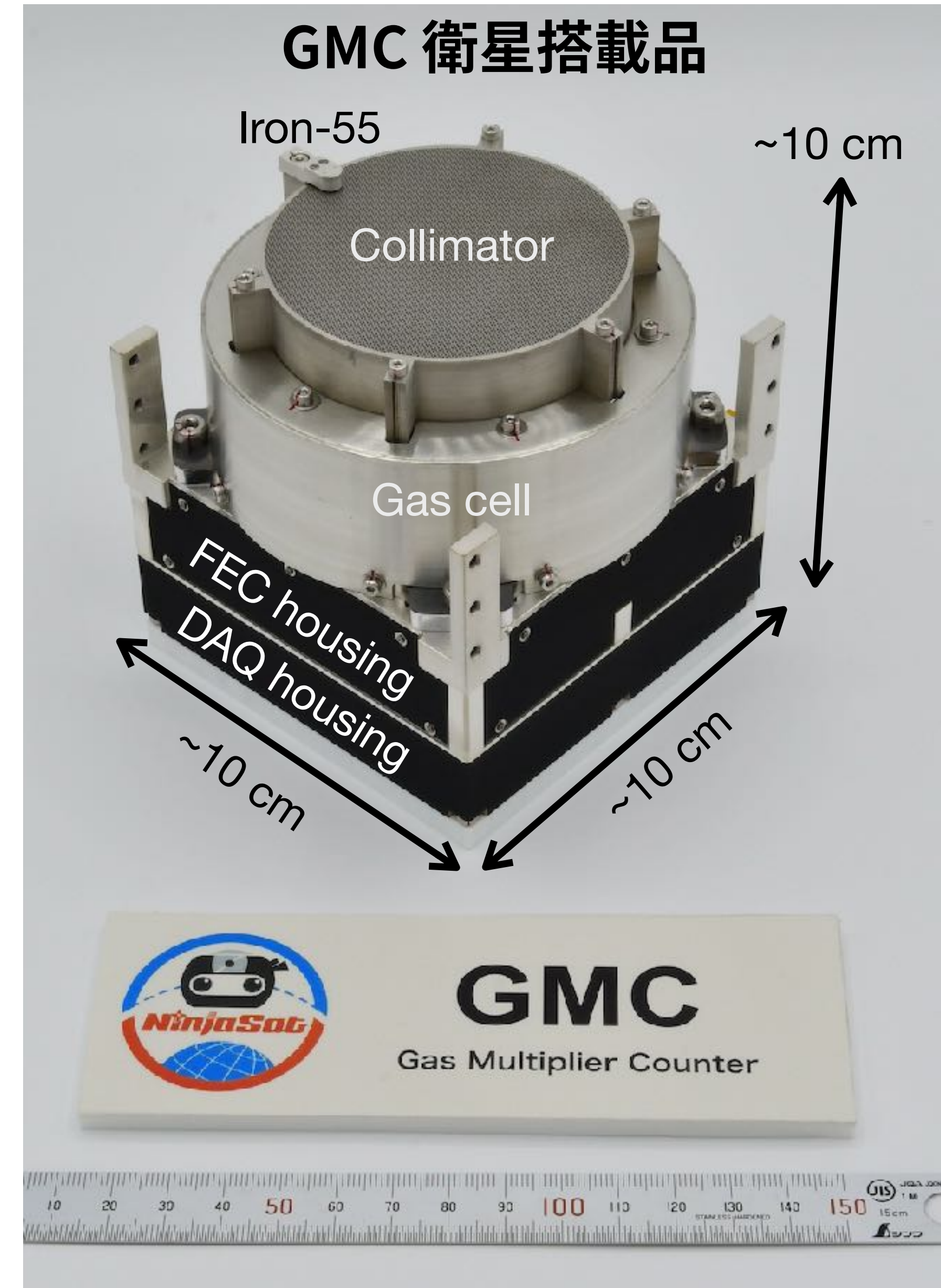
■ 温度制御なしで動作可能

- 超小型衛星ではスペース & 消費電力が制限。温度制御装置の搭載は不利
- 半導体検出器をはじめとする多くの検出器は温度制御が必要

■ ガスX線検出器の豊富な開発ノウハウ (玉川研究室)

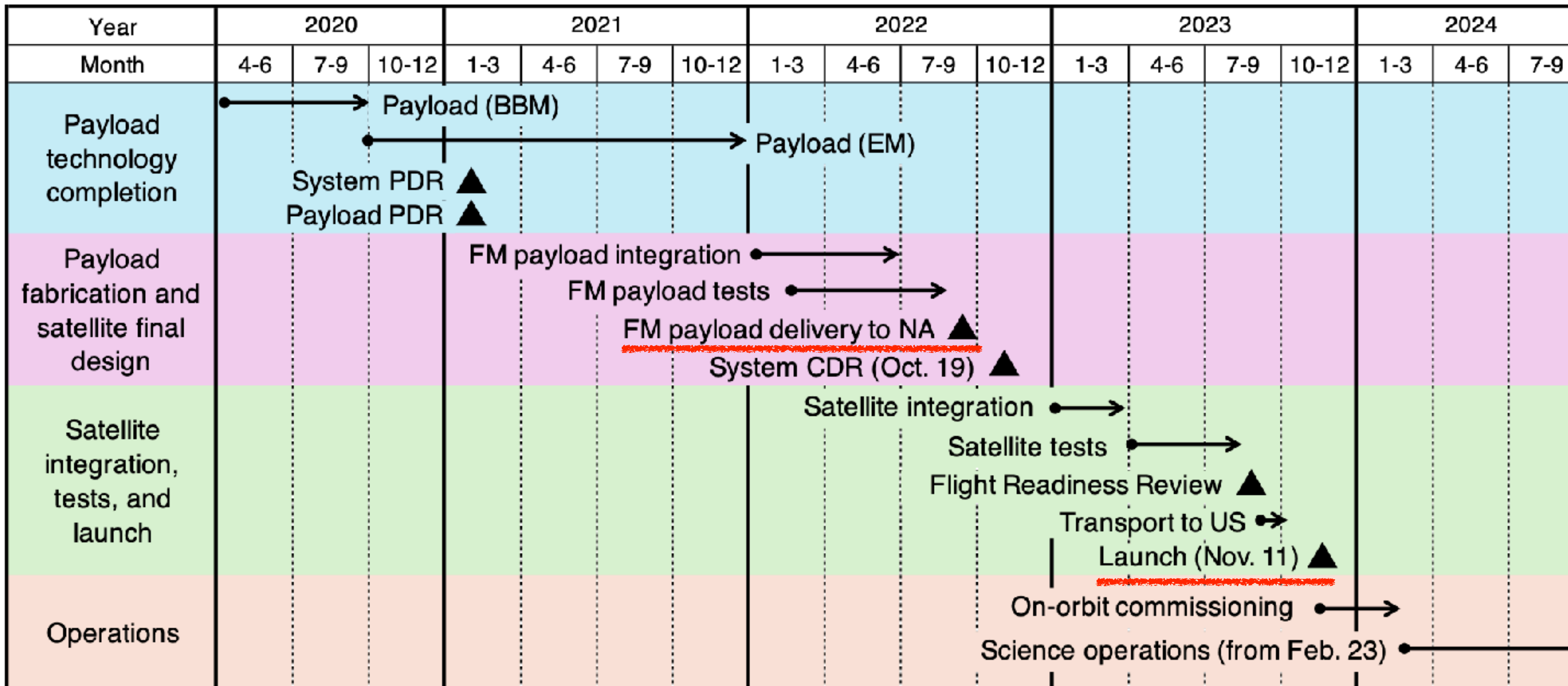
- 玉川研究室では NASA 主導のX線偏光観測衛星 IXPE (2021年打ち上げ) に GEM を提供 (Baldini+21, Tamgawa+09)
- 宇宙実証済みの GEM を用いることで開発期間を短縮

明るいX線天体 (> 1 mCrab) を観測可能な検出器を最短で開発



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 !!



運用体制

役割分担

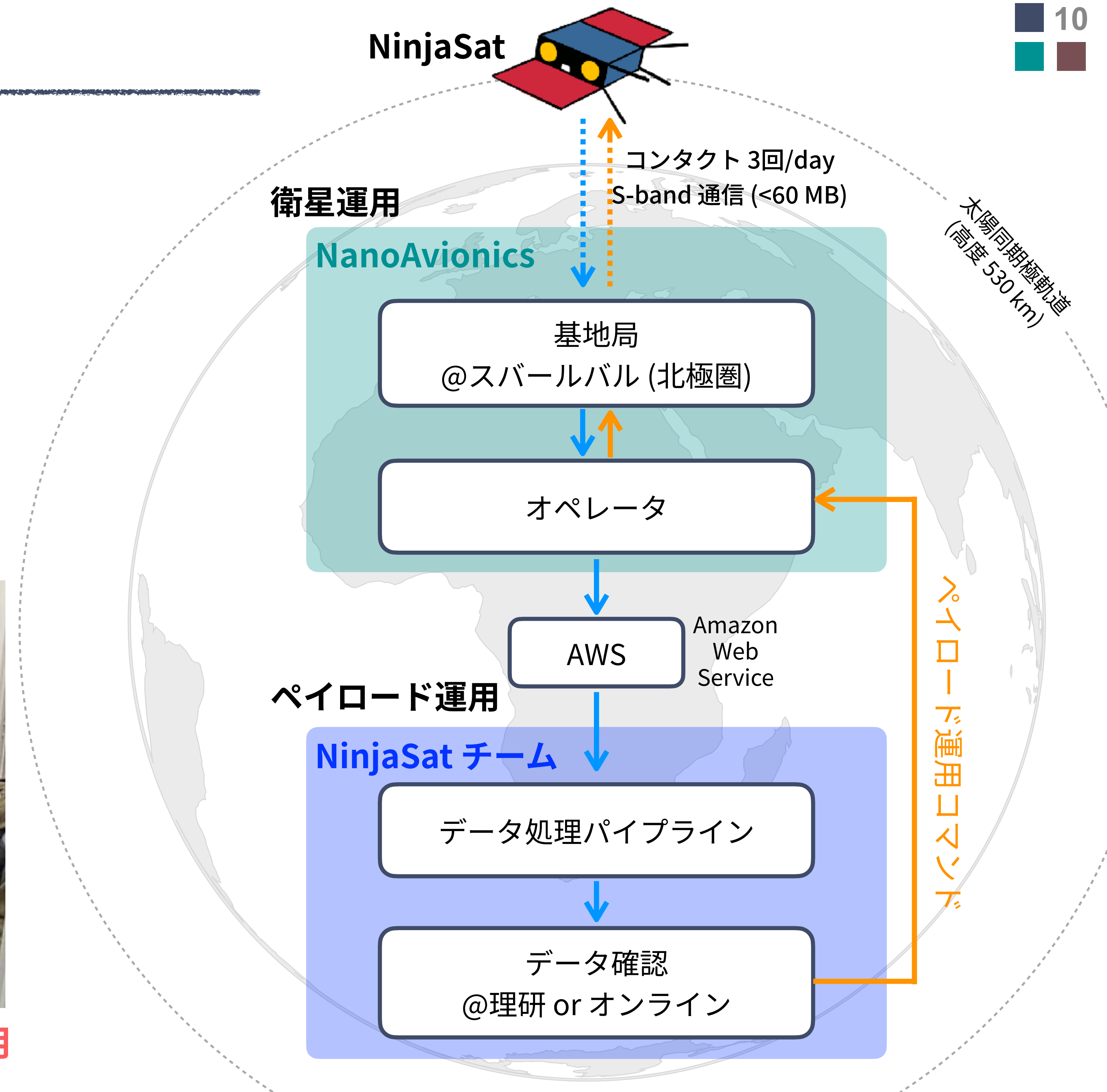
- 衛星運用 : NanoAvionics
- ペイロード運用 : NinjaSat チーム

ペイロード関連のソフトウェア開発

- 運用コマンド/ポインティングリストの作成
- 観測データのパイプライン処理
- Quick Look モニタ



若手研究者 (特に学生) が中心となって開発・運用



これまで (~1.5年) の観測状況まとめ

合計 28 天体を観測

- 主に中性子星/ブラックホール連星 + α (AGN, WD)

最長の連続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

追観測の最短記録 2.5 hr → 青山さん, Haoさん講演

- 新天体 MAXI J1752-457 (Aoyama+25, submitted to ApJL)

パルサー航法の実証実験 → 大田さん講演

その他

- Sco X-1 QPO探査 (高橋さんポスター)
- AGN IC 4329A のX線・可視光同時観測 (岩田さんポスター)
- 新天体 MAXI J1744-294 (山崎さんポスター)

	天体名	
1	Crab Nebula	
2	SRGA J144459.2-604207	
3	Sco X-1	
4	Her X-1	
5	4U 0115+63	
6	GX 301-2	
7	MXB 1730-335	
8	EXO 0748-676	
9	SMC X-1	
10	GX 17+2	
11	1E 1841-045	
12	Aql X-1	
13	GX 1+4	
14	Cyg X-2	
15	4U 1636-536	
16	Cen X-3	
17	MAXI J1752-457	
18	4U 1700-377	
19	Cir X-1	
20	4U 1538-52	
21	4U 0614+091	
22	Cyg X-1	
23	GX 339-4	
24	MAXI J1744-294	
25	T CrB	NS
26	NGC 4151	BH
27	NGC 526	WD
28	IC 4329A	AGN

これまで (~1.5年) の観測状況まとめ

- 合計 28 天体を観測
 - 主に中性子星/ブラックホール連星 + α (AGN, WD)
- 最長の連続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

最初の科学観測ターゲット：新しい clocked X-ray burster SRGA J1444

- 観測 (武田) : NinjaSat による長期モニタリング観測 (Takeda+25)
- 理論 (土肥さん) : X線バースト計算コード HERES によるモデリング (Dohi+25)

その他

- Sco X-1 QPO探査 (高橋さんポスター)
- AGN IC 4329A のX線・可視光同時観測 (岩田さんポスター)
- 新天体 MAXI J1744-294 (山崎さんポスター)

	天体名	12
1	Crab Nebula	
2	SRGA J144459.2-604207 (SRGA J1444)	
3	Sco X-1	
4	Her X-1	
5	4U 0115+63	
6	GX 301-2	
7	MXB 1730-335	
8	EXO 0748-676	
9	SMC X-1	
10	GX 17+2	
19	Cir X-1	
20	4U 1538-52	
21	4U 0614+091	
22	Cyg X-1	
23	GX 339-4	
24	MAXI J1744-294	
25	T CrB	NS
26	NGC 4151	BH
27	NGC 526	WD
28	IC 4329A	AGN

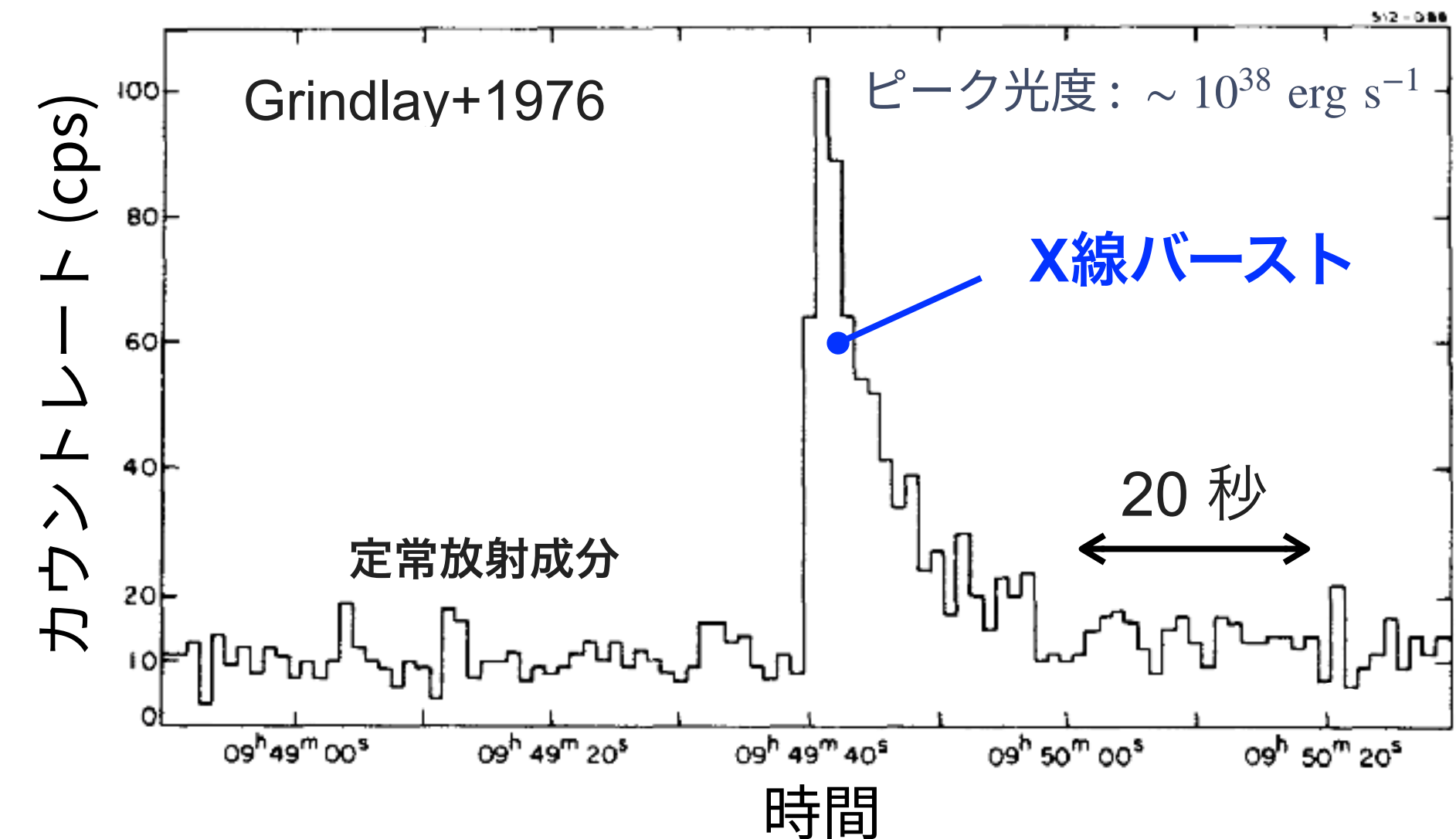
Contents

1. 超小型衛星 NinjaSat の紹介
2. 新たなX線バースター SRGA J144459.2-604207 の
長期モニタリング観測

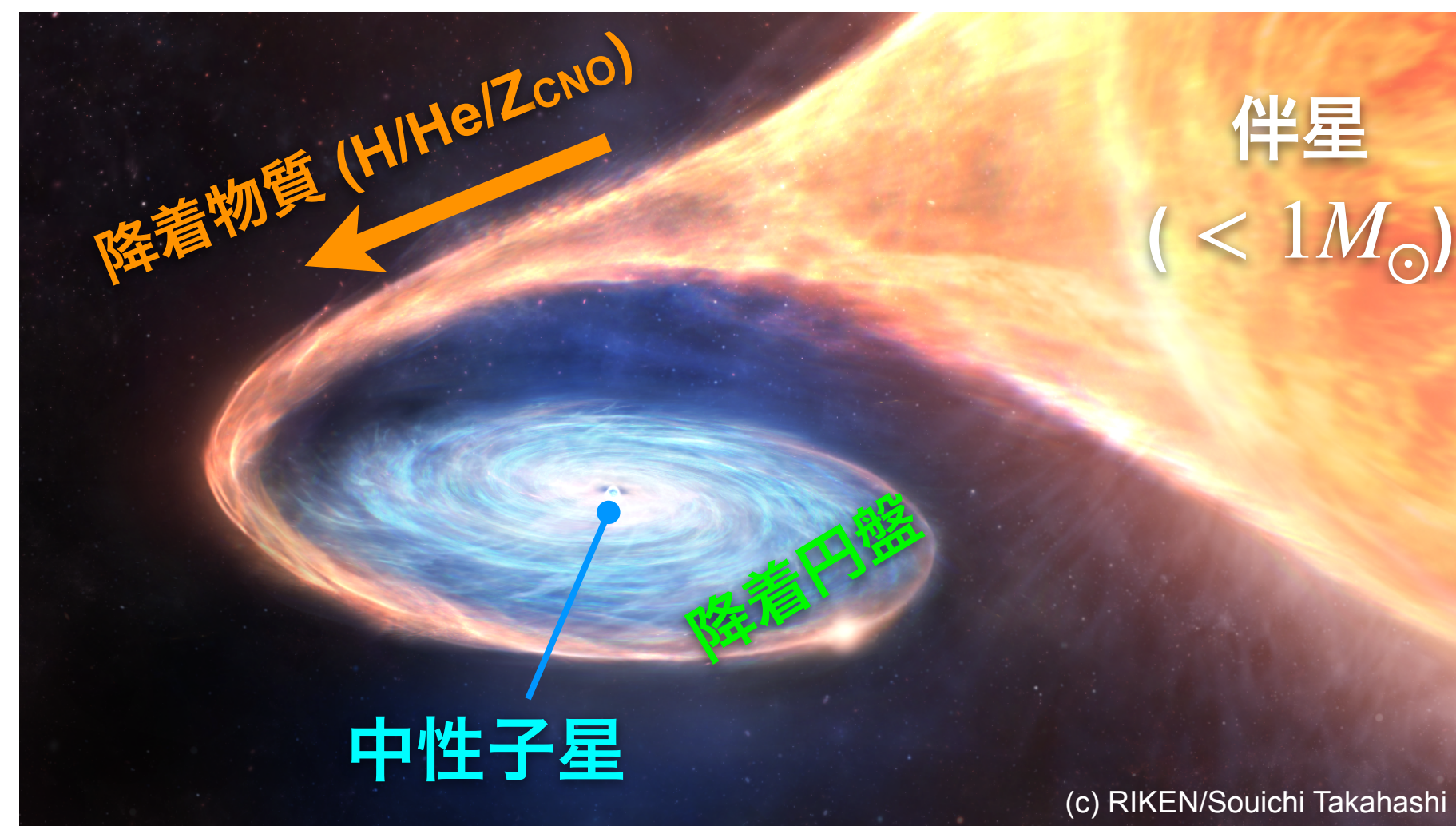
中性子星表面における核爆発現象

- X線帯域 (黒体温度 $kT_{\text{bb}} \sim 2 \text{ keV}$) の黒体放射
- 継続時間 ~ 数10秒, 総エネルギー $\sim 10^{39} \text{ erg}$
- これまでにおよそ 120天体から観測

X線バーストの光度曲線 (ライトカーブ)



低質量X線連星系



X線バーストの流れ

バースト間隔
(再帰時間)
~ 数時間

伴星から中性子星へ降着物質が流入

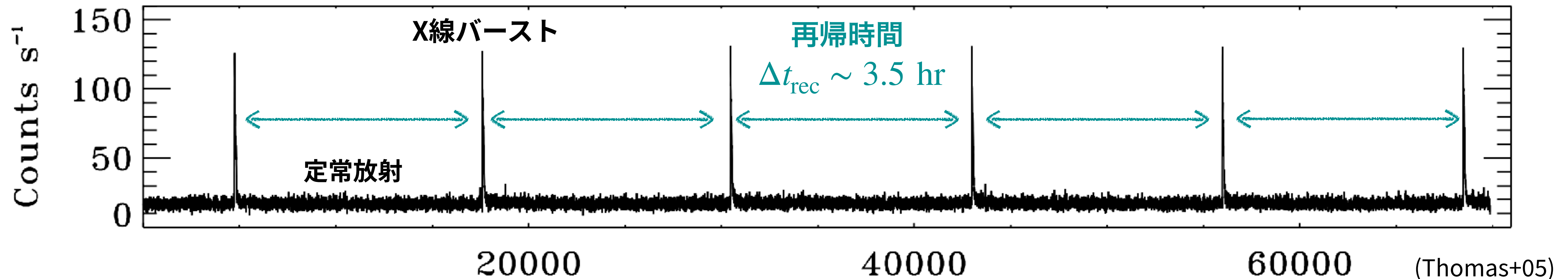
中性子星表面に降着物質が堆積

中性子星表面の温度上昇

X線バースト @ $\sim 0.2 \text{ GK}$
(燃料を消費)

一般的なバースターの再帰時間は不規則

典型的なクロックX線バースター GS 1826-24 のライトカーブ



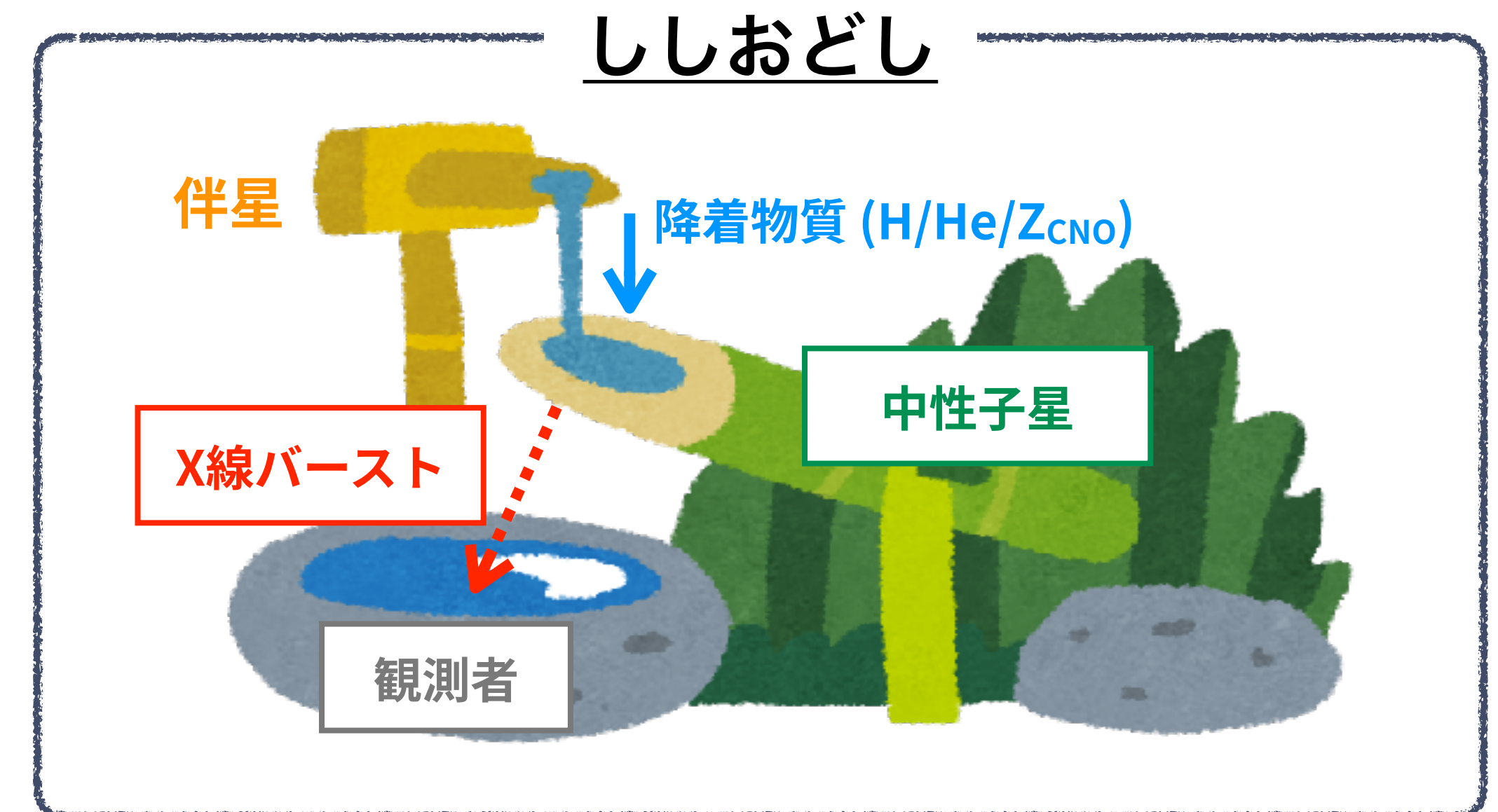
■ X線バースターの1種

- ~120天体のうち6天体のみ

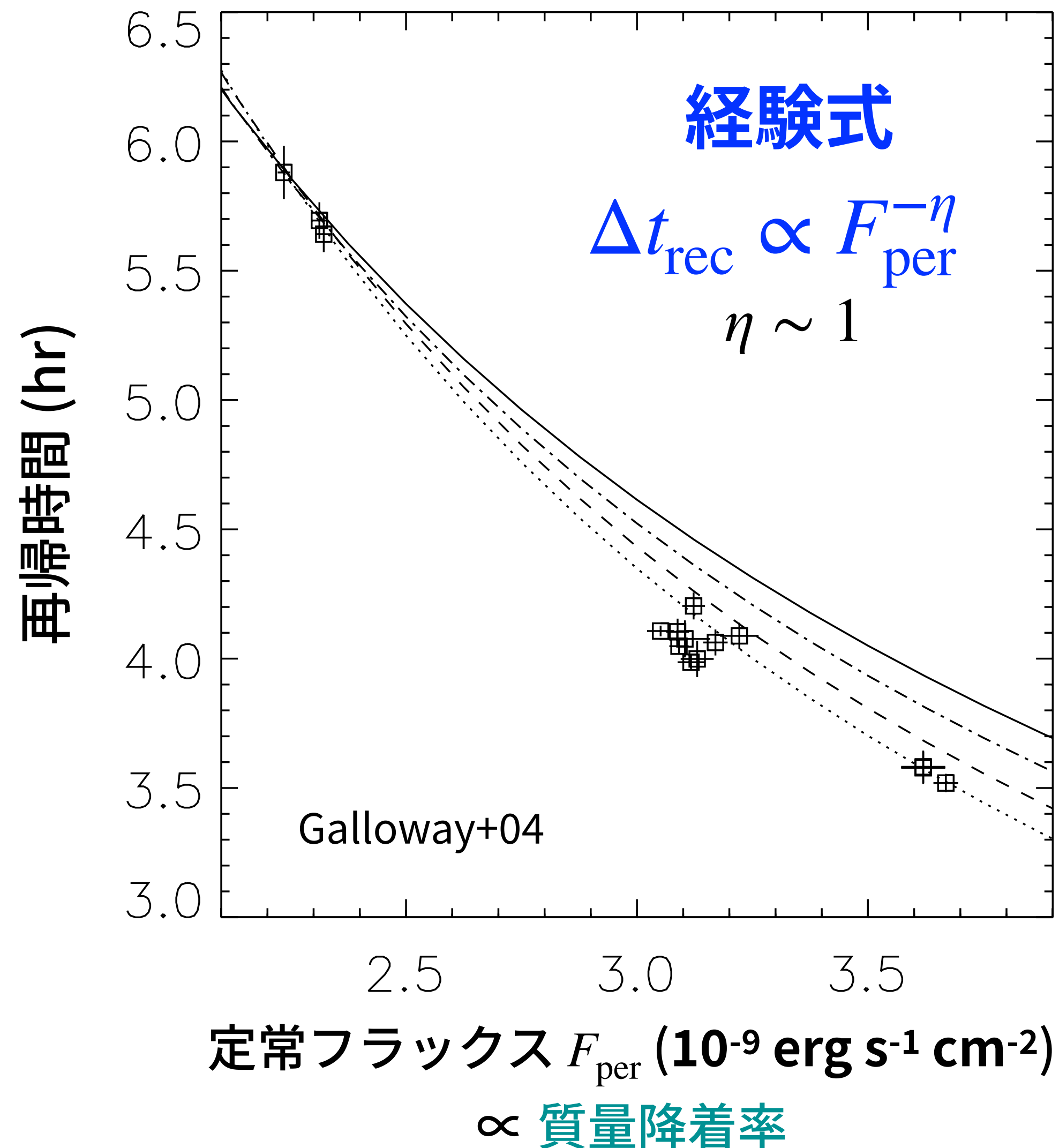
■ 特徴：

- 再帰時間 Δt_{rec} がほぼ一定
- プロファイルも毎回似ている

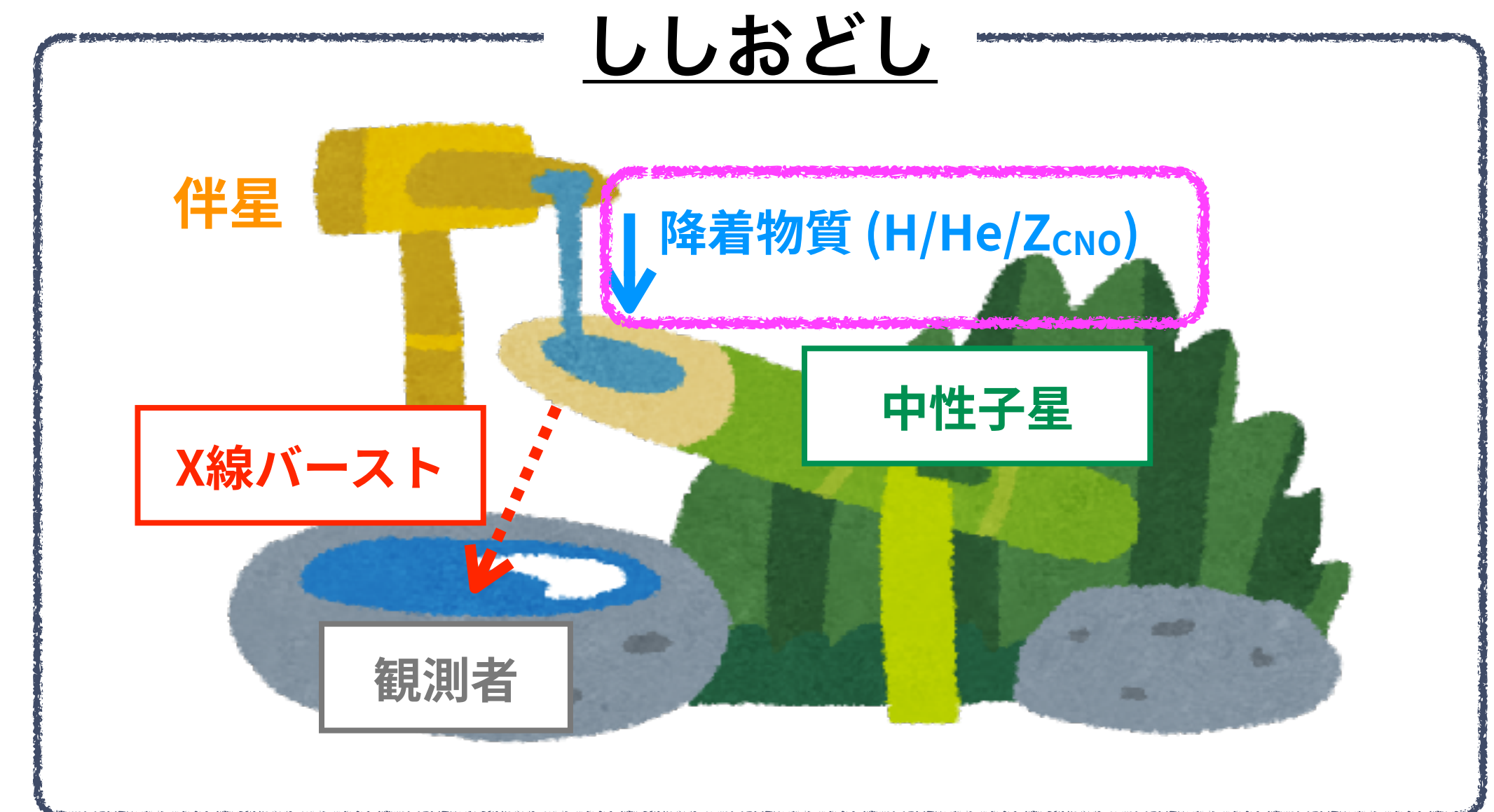
まるで“ししおどし”のような天体



再帰時間と質量降着率の関係



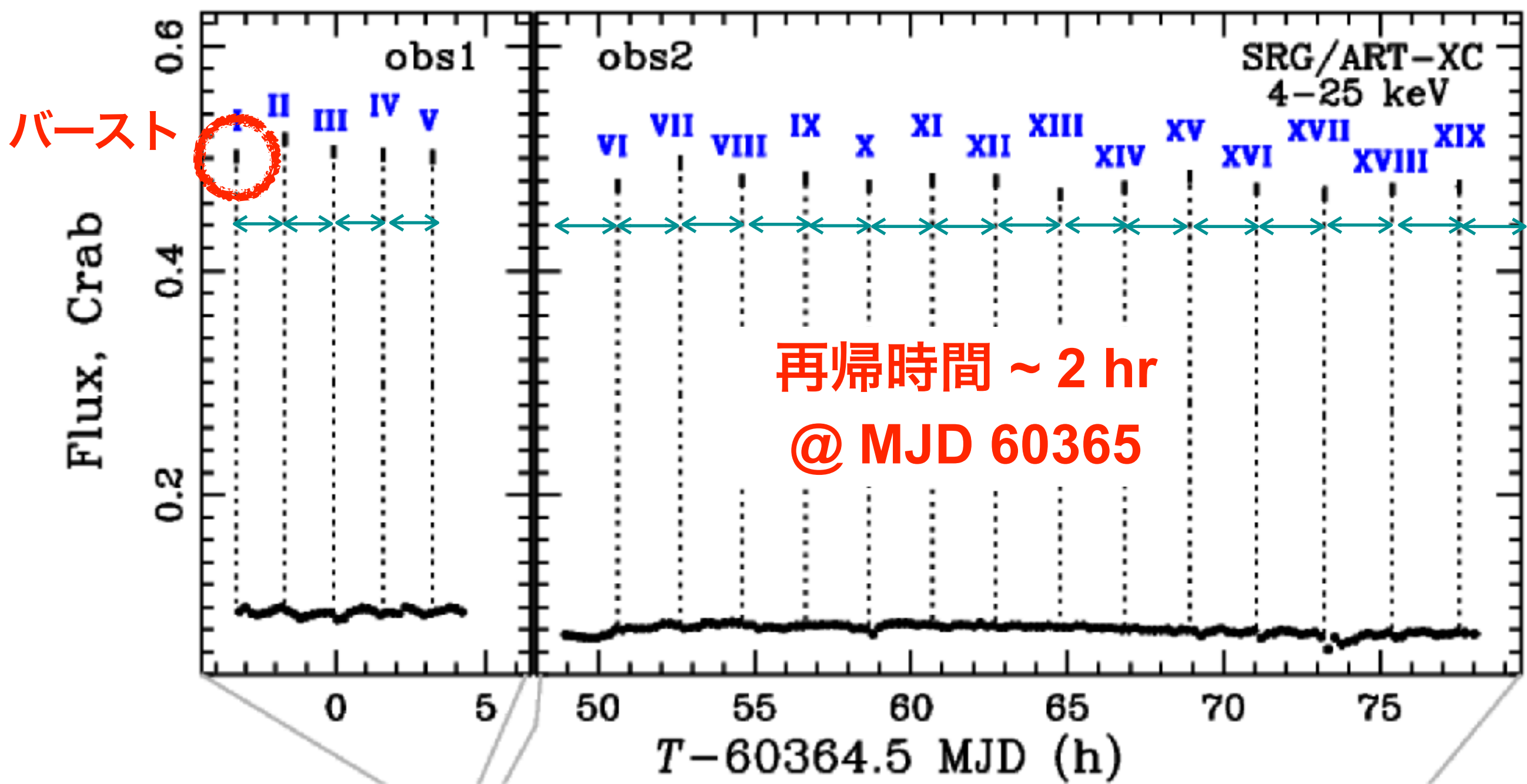
- 再帰時間は質量降着率 (定常放射) に概ね反比例
→ 1回のバーストに必要な燃料が毎回同じ (臨界質量が存在)
- ✓ 理論モデルとの比較に最適
- ✓ η の値で中性子星質量と EOS を制限できる!?
→ 野田さん講演 & 土肥さん講演 (Dohi+24)
- ✓ 典型的なバーストの再帰時間は数時間で、長期観測が必要
→ **NinjaSat** の観測候補の1つ



新たなクロックX線バースター: SRGA J144459.2-604207

- 幸運にも、NinjaSat が科学観測を開始する2日前に新たなクロックX線バースターが発見!!
- 6番目のクロックX線バースター SRGA J1444
 - 2024/2/21 に SRG 衛星が発見、その後およそ1ヶ月間、X線帯域で増光。複数の衛星が追観測
 - NinjaSat の観測期間中、再帰時間は 2 hr から 10 hr に徐々に変化

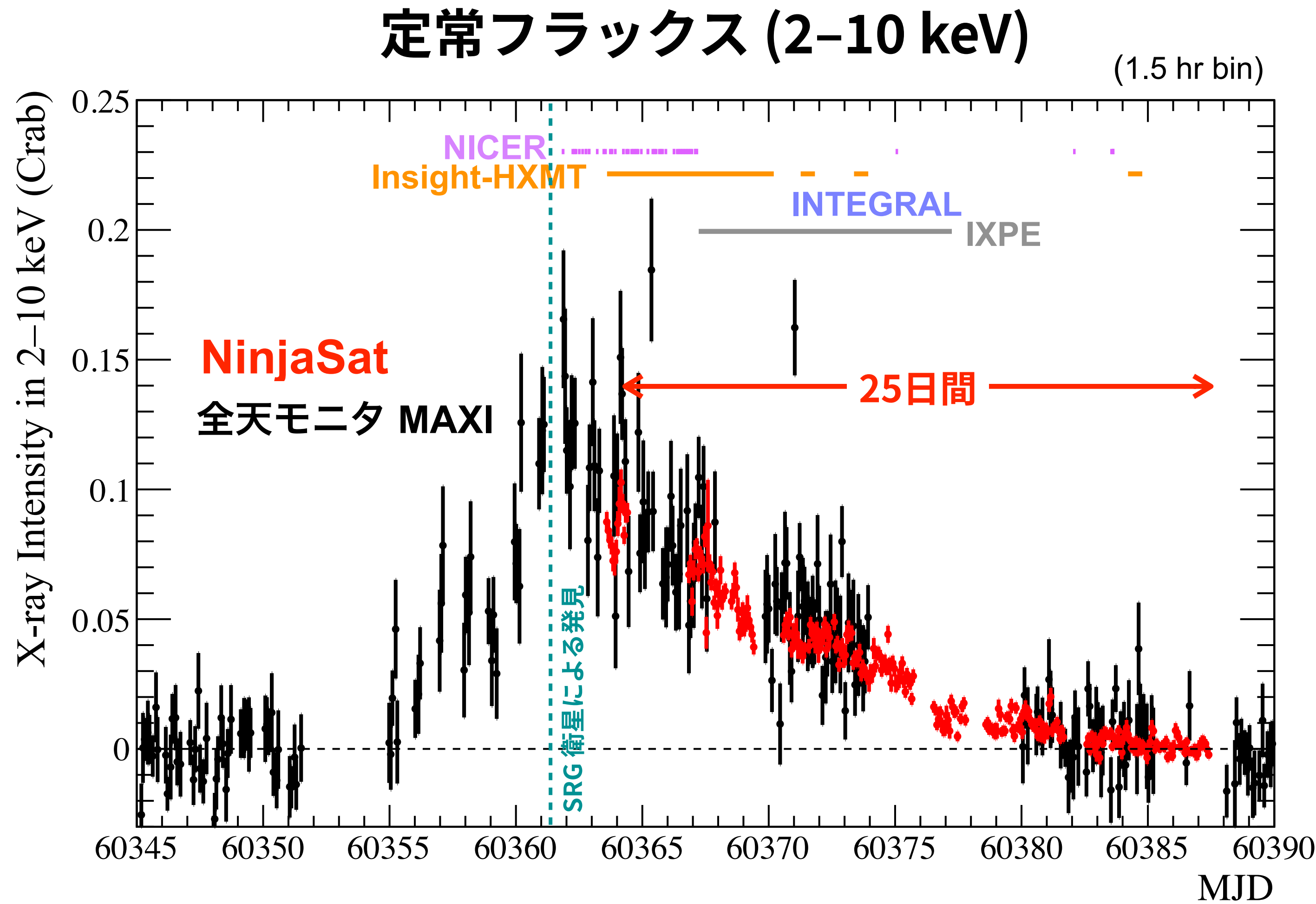
X線ライトカーブ (SRG 衛星) Molkov+24



各パラメータの観測結果

Parameter	Value	
(RA, Dec)	(221.2455833, -60.6986944)	Illiano+24
距離	~10 kpc	Fu+24
伴星質量	0.3–0.4 M _☉	Dohi+24
スピン周期	447.9 Hz	Ng+24
連星周期	5.22 hr	Ng+24
離心率	< 4 × 10 ⁻⁴	Ng+24

可視光の対応天体は見つからず。。。

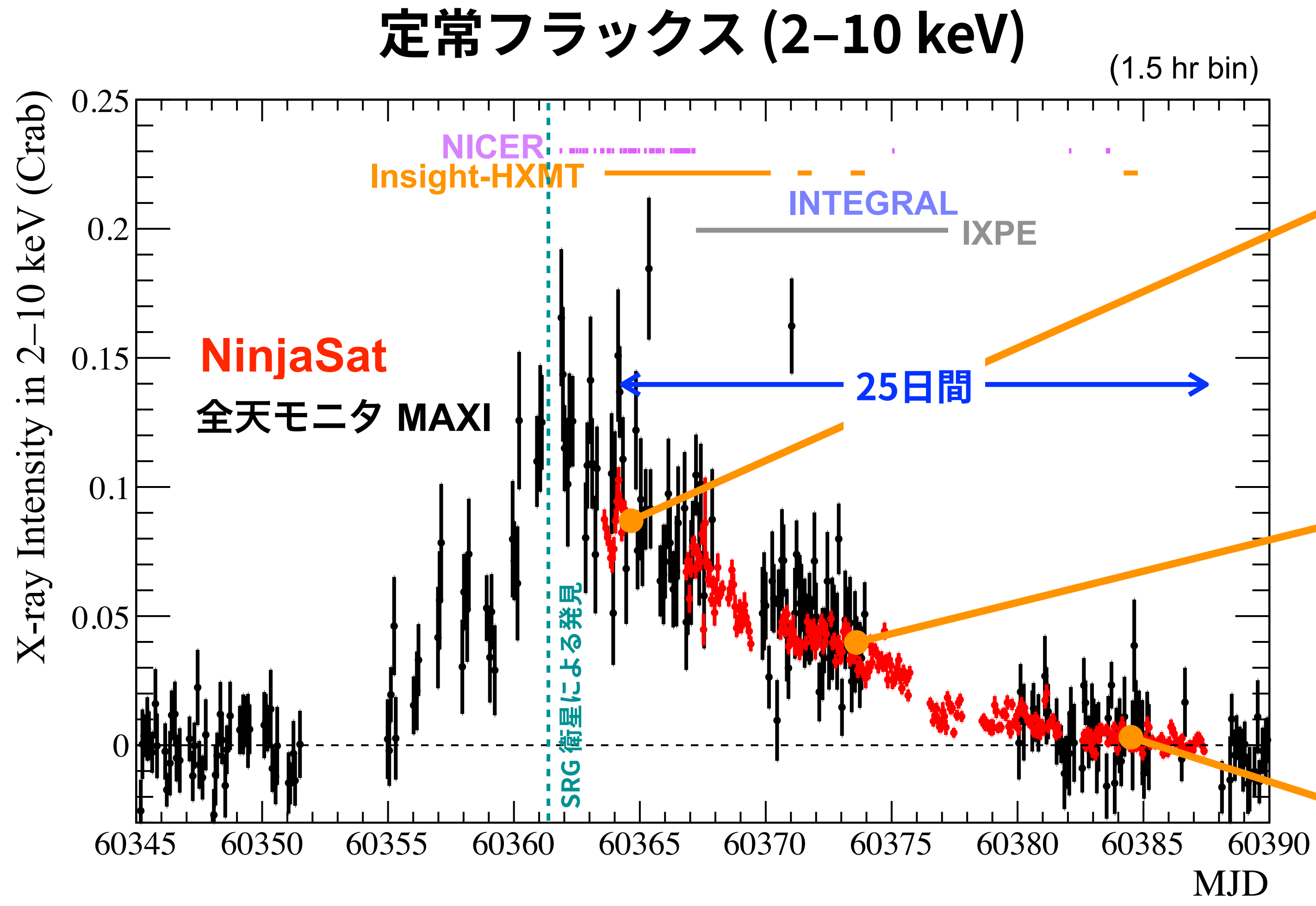


- NinjaSat は増光の減衰部分をほぼ全てカバー
- 約25日間の長期観測は 全天モニタ MAXI を除けば最長
- MAXI と比較しておよそ100倍の光子統計を実現
- 定常フラックス ($\propto$ 質量降着率) が減衰する際の細かな変動を精度良く観測

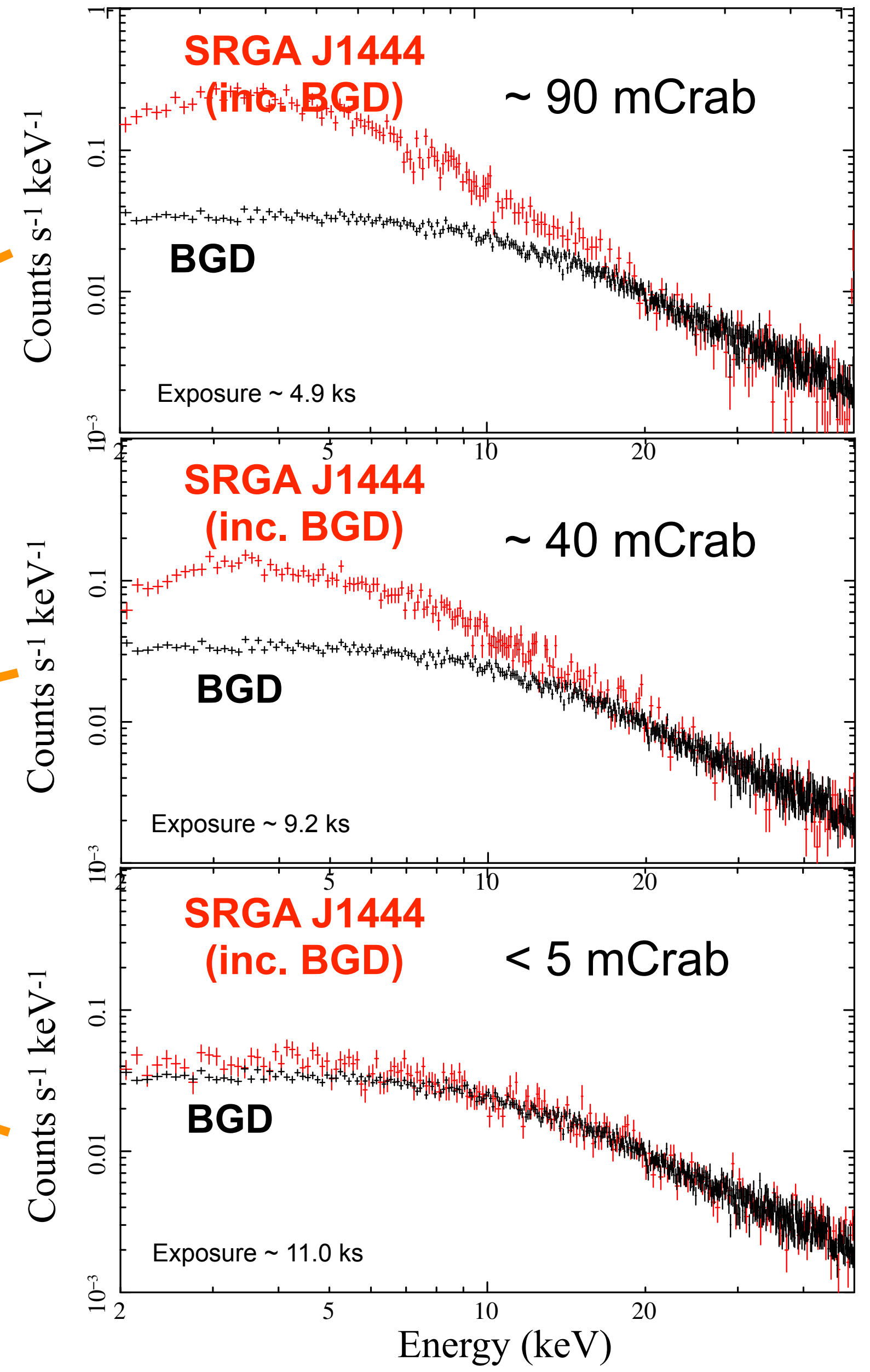
Parameter	MAXI	NinjaSat	
有効面積	~5 cm ²	~16 cm ²	~3倍
観測時間	~60 s/90 min	~2 ks/90 min (Max. case)	~30倍

NinjaSat データでは、X線バーストにより増光している時間帯は除外

定常フラックス ($\propto$ 質量降着率) の長期モニタリング

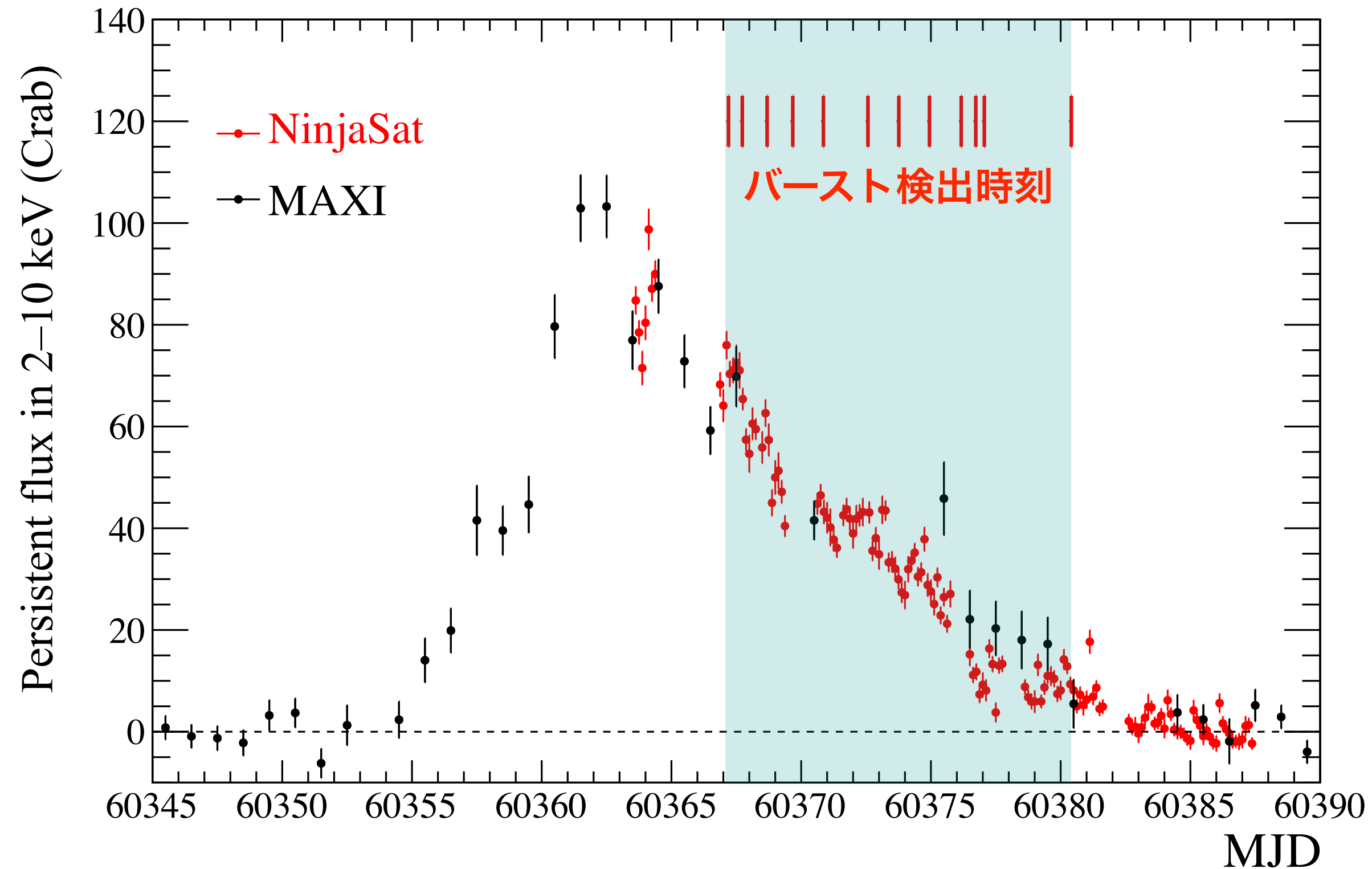


NinjaSat データでは、X線バーストにより増光している時間帯は除外

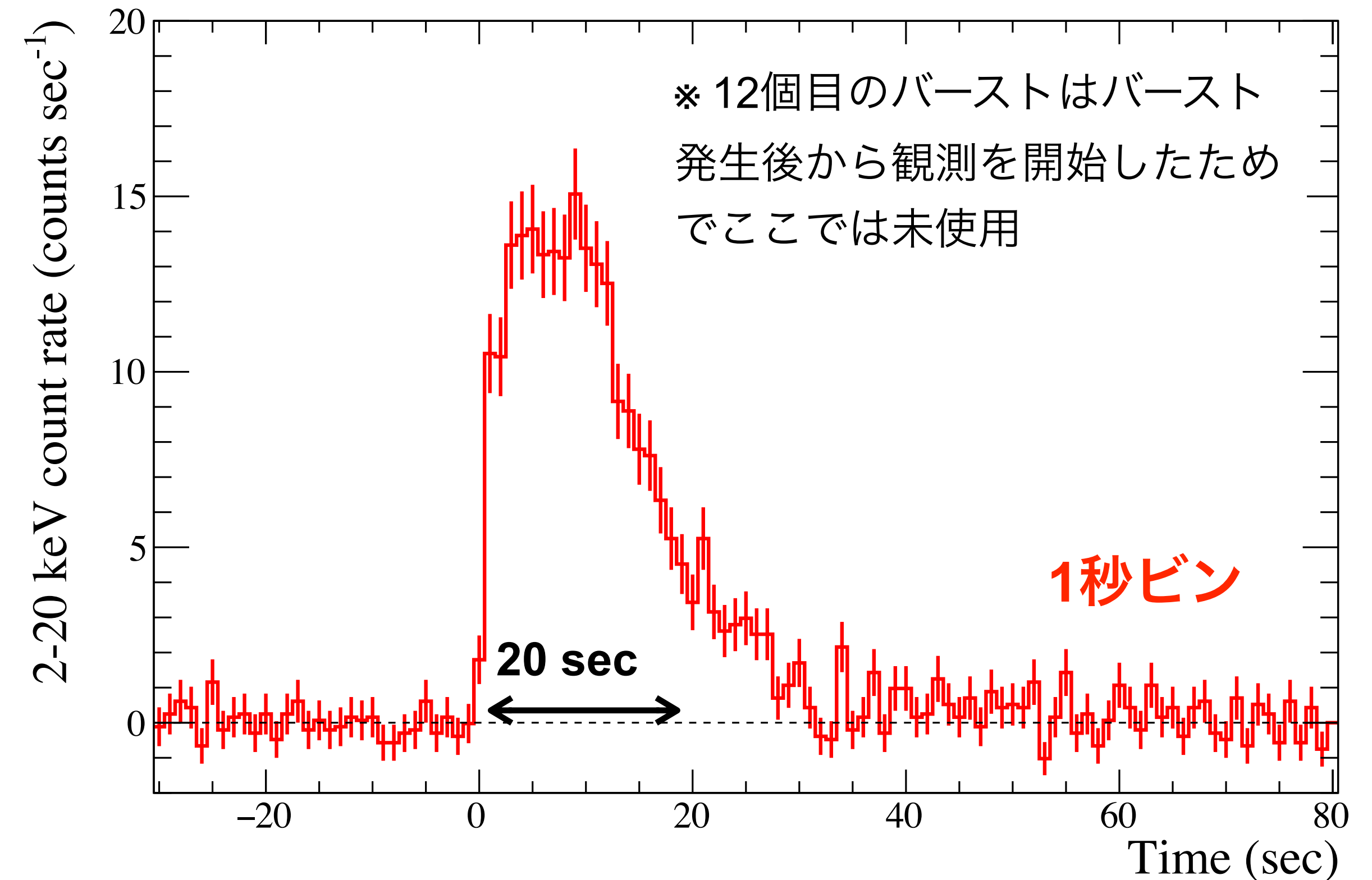


合計 12 個のX線バーストを検出

合計12個のX線バーストを検出

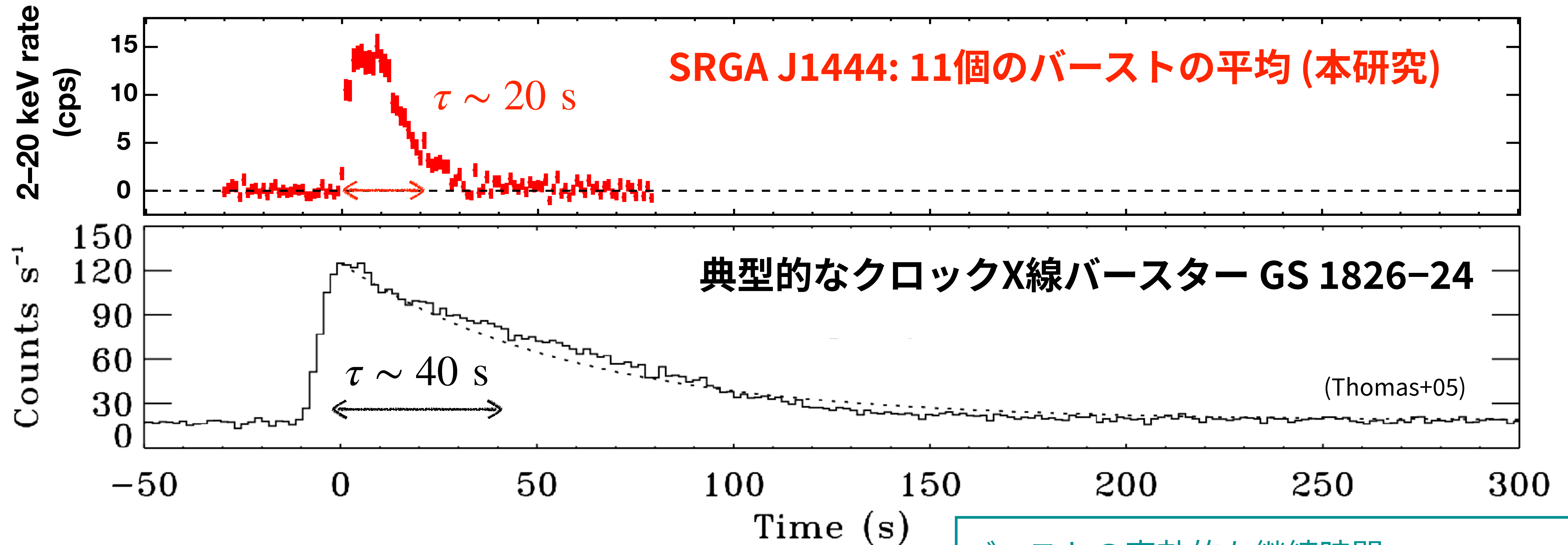


11個のバーストの平均プロファイル



- X線バーストの検出は超小型衛星では世界初
- 超小型衛星でもバーストプロファイルの変動を秒スケールで調べることができる!!
(有効面積が2桁小さい従来の超小型衛星では不可能)

X線バーストの継続時間の比較



バーストの実効的な継続時間 τ
 $\equiv$ バーストの fluence (積算値)/ピークの高さ

- SRGA J1444 のバースト継続時間は $\tau \sim 20 \text{ s}$
- 典型的なクロックX線バースター GS 1826-24 ($\tau \sim 40 \text{ s}$) と比べて短い
→ テールの長さは陽子過剰環境で起きる rp過程が担う。つまり、伴星の水素が少なめ？
(詳細なモデル計算との比較はこの後の土肥さん講演)

NS 質量への示唆：バーストの再帰時間 vs. 定常フラックス

経験式

概ね反比例の関係

$$\Delta t_{\text{rec}} = C F_{\text{per}}^{-\eta} (\eta \sim 1)$$

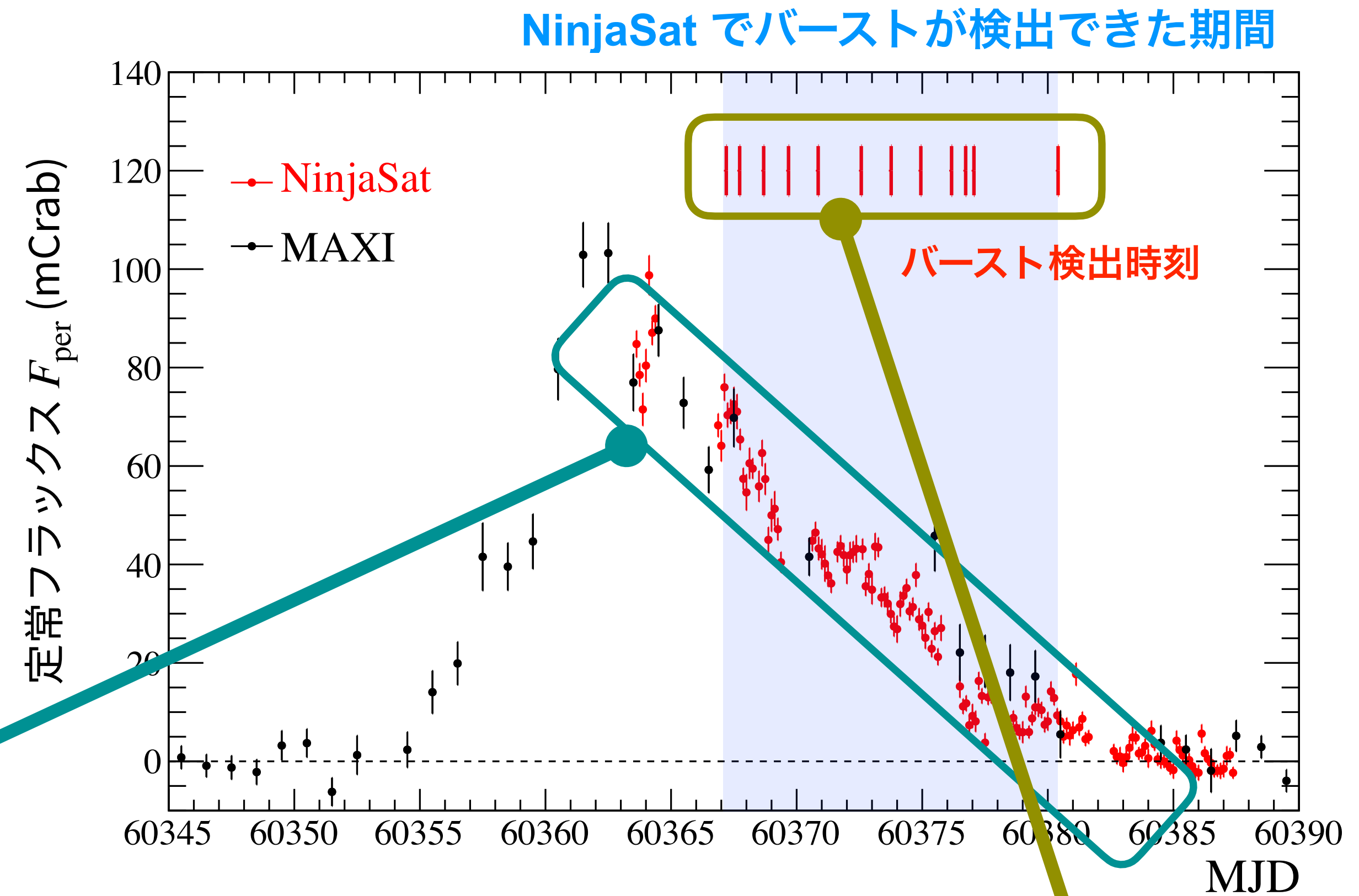
Δt_{rec} : 再帰時間

F_{per} : 定常フラックス

C : 定数

η : べき

η は NS 質量に依存
(Dohi+25)



定常フラックスが概ね一定の割合で低下しているのに対して、検出できたバーストの時刻差はバラバラ

- 観測効率 10–20% のため、複数のバーストを検出し損ねている
- さらに、バースト検出間に定常フラックスが変動

→ 経験式を適用できない...

■ 経験式をより一般的なモデルに拡張

1. 検出し損ねたバーストの個数 $n_i - 1$ をパラメータ とする
2. バースト間のフラックス変化を考慮するために積分系とする

赤：観測量 F_{per}, t_i
青：パラメータ η, C, n_i

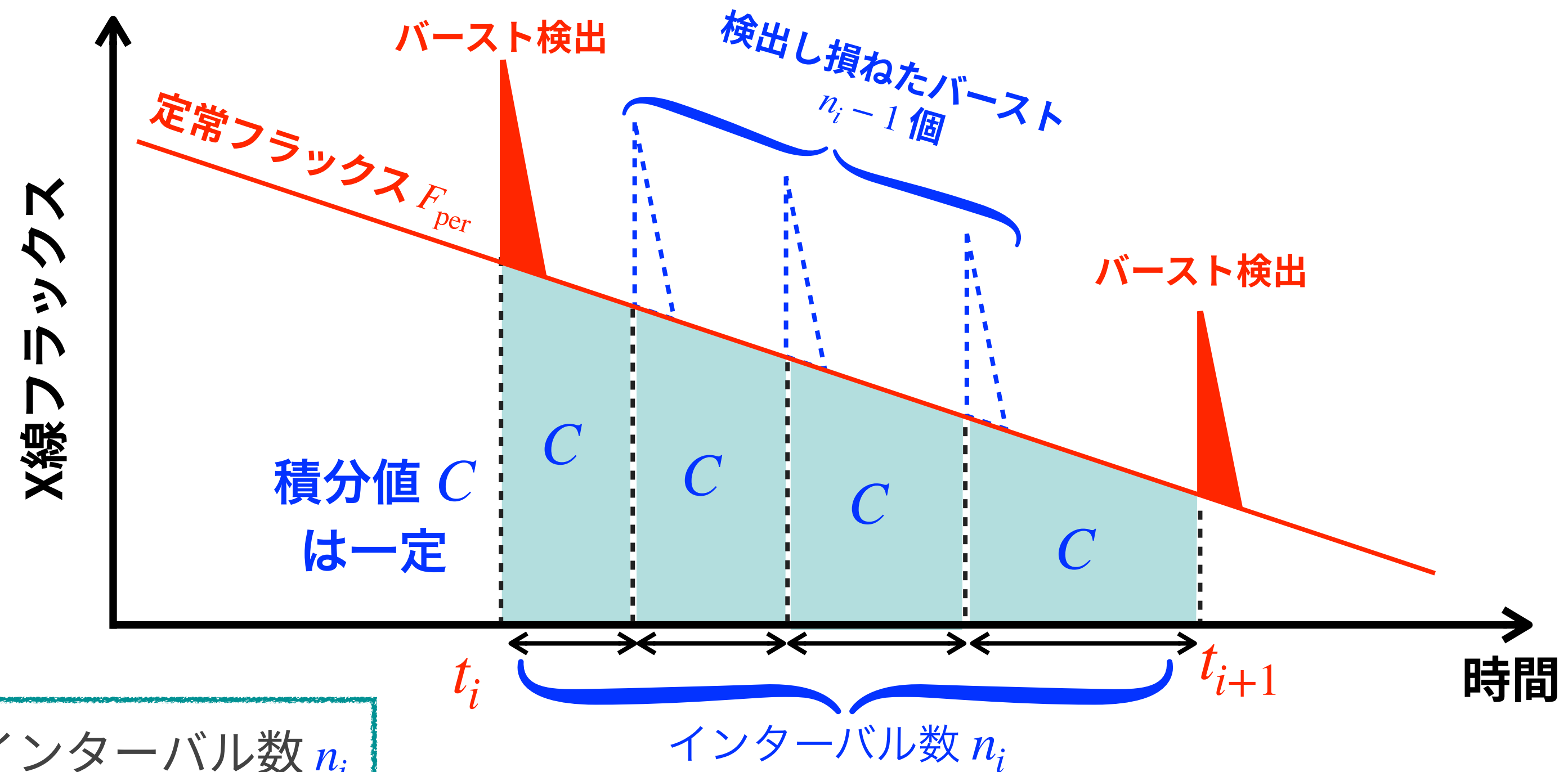
従来の経験式

$$F_{\text{per}}^\eta \Delta t_{\text{rec}} = C$$

一般化したモデル

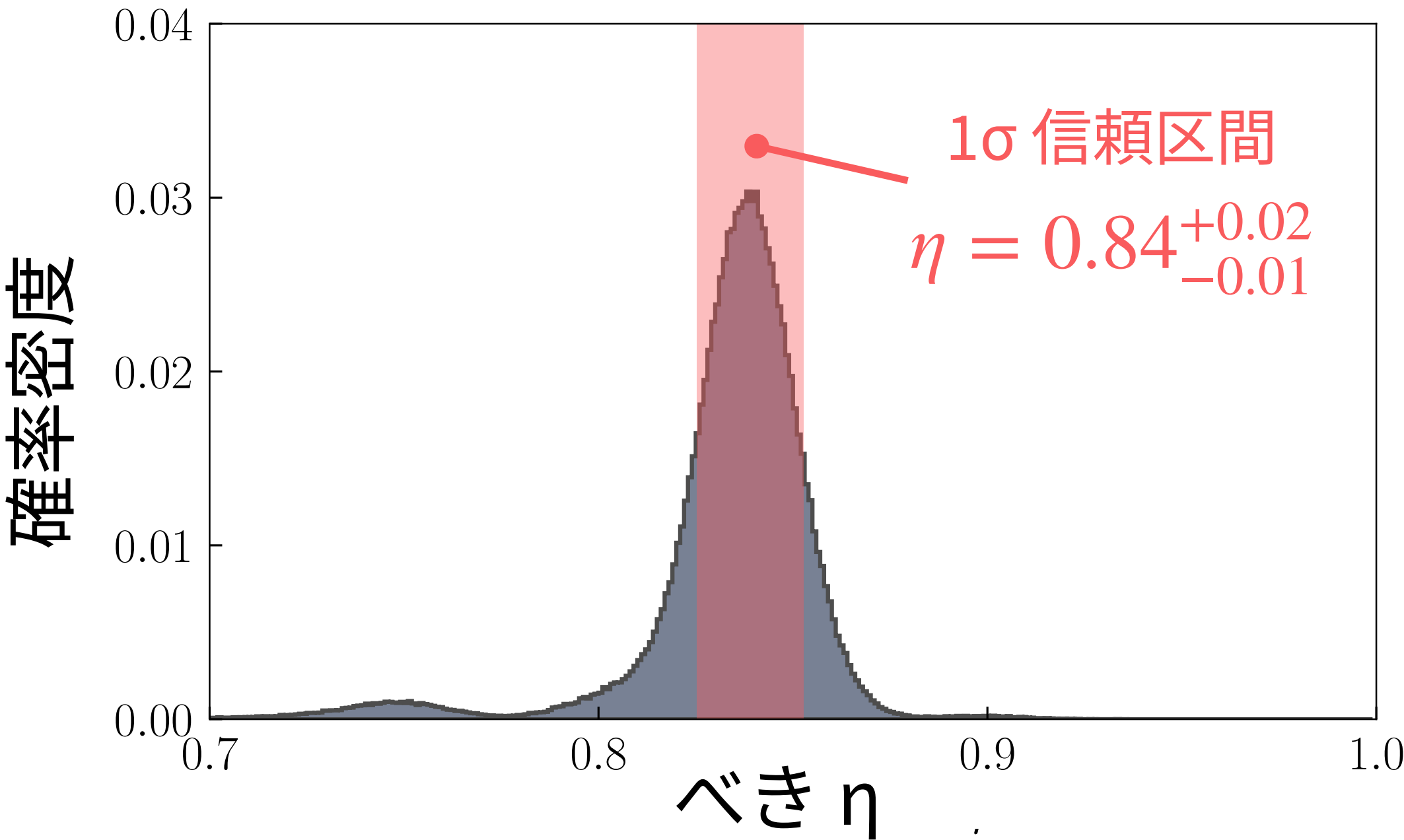
$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} F_{\text{per}}^\eta dt = C n_i$$

バースト間のフラックス F_{per}^η の積分値 = 保存量 C × インターバル数 n_i



■ マルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法を用いてパラメータ η, C, n_i ($i = 1, 2, \dots, 12$) を推定

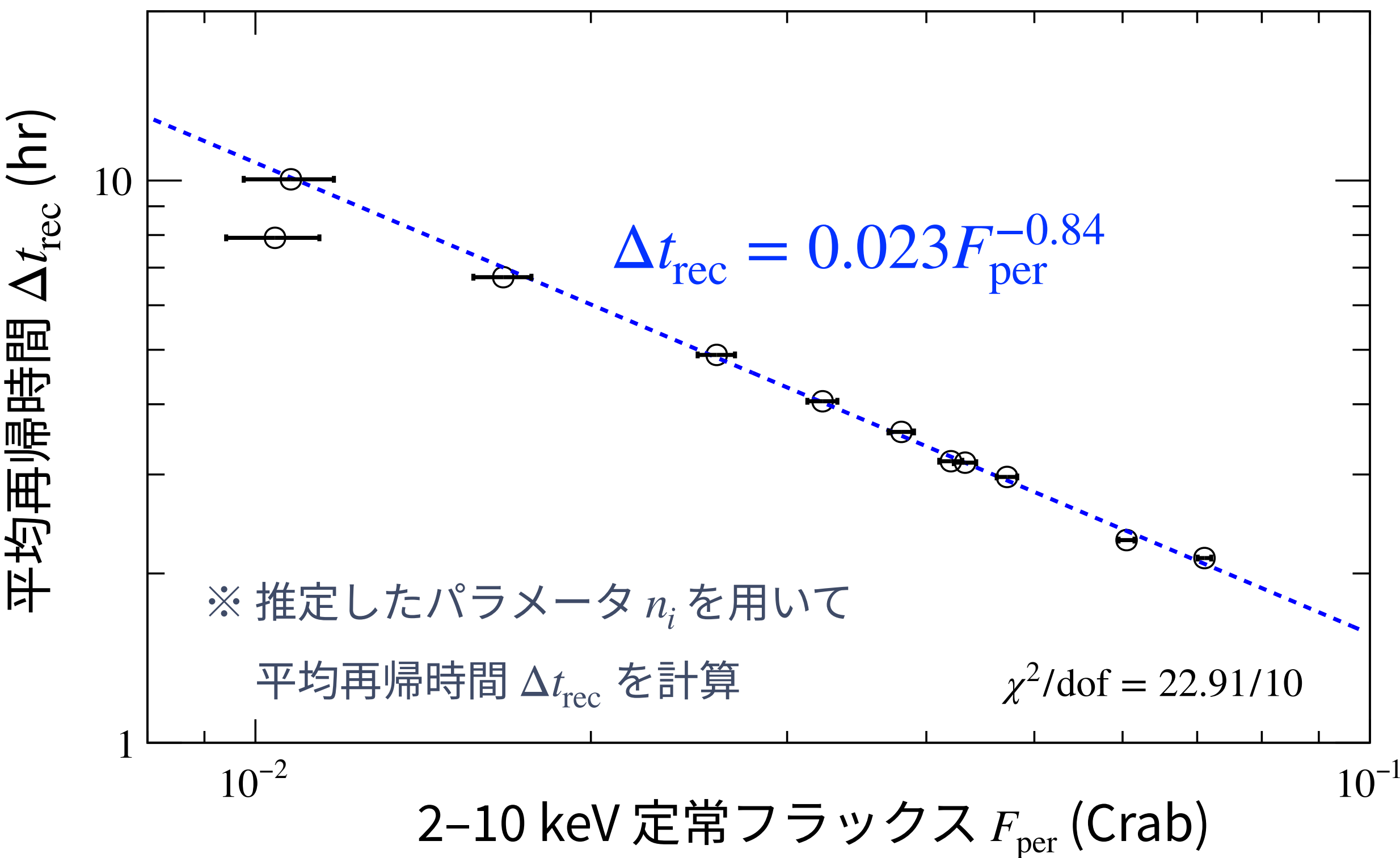
べき η の確率密度分布 (事後分布)



これまでの5天体の観測結果は $\eta \gtrsim 1$

Source name	η	
GS 1826–24	1.05 ± 0.02	Galloway+04
IGR J17480–2446	$\gtrsim 1$	Linares+12
MXB 1730–335	0.95 ± 0.03	Bagnoli+13
SAX J1748.9–2021	1.02 ± 0.03	Li+18
1RXS J180408.9–342058	> 1.35	Dohi+24

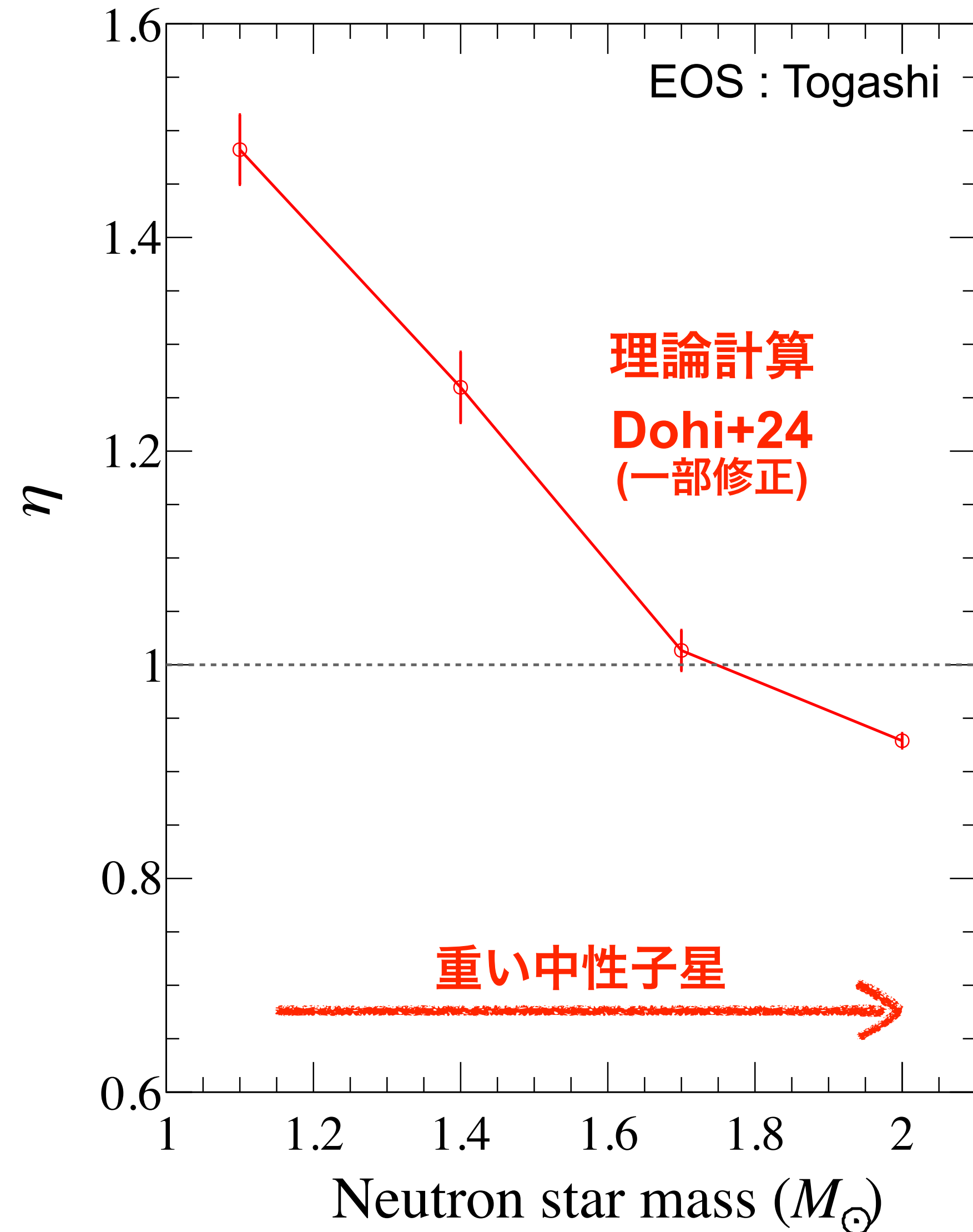
平均再帰時間 vs. 定常フラックス



- $\eta = 0.84^{+0.02}_{-0.01} < 1$
- 過去に η が観測された天体で最も小さな値
- η の値が 1 よりも有意に小さい初めての天体

NS 質量への示唆 : $\eta = 0.84^{+0.02}_{-0.01} < 1$ の解釈

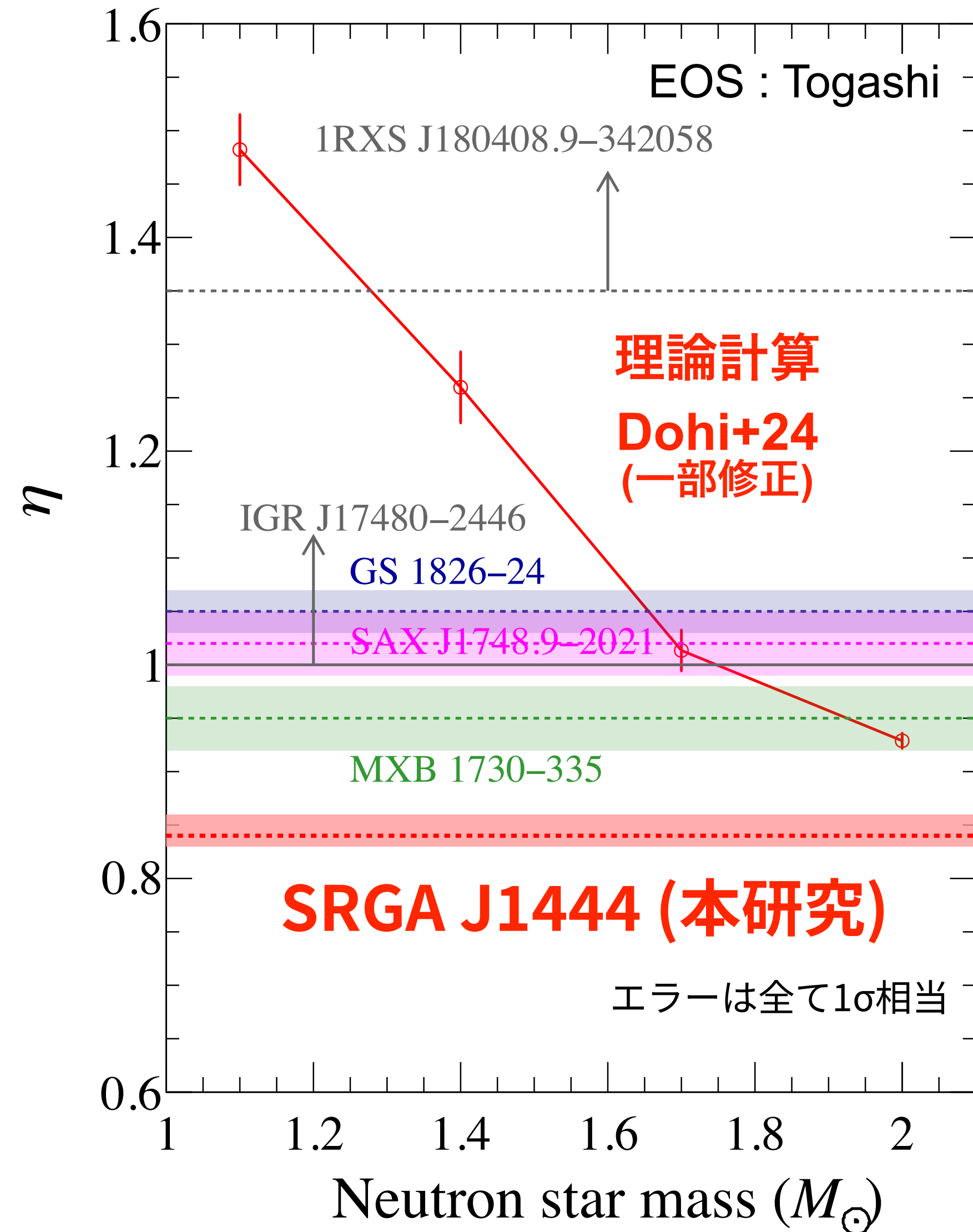
η の質量・EOS 依存性 (理論計算)



- η は中性子星質量 に依存することが理論計算により指摘されている (Dohi+24)
- 中性子星質量が大きく、コンパクトな中性子星ほど η が小さくなる傾向

NS 質量への示唆 : $\eta = 0.84^{+0.02}_{-0.01} < 1$ の解釈

η の観測結果と理論計算の比較



これまでの5天体の観測結果は $\eta \gtrsim 1$

- SRGA J1444 の観測結果は、中性子星質量 $M_{\text{NS}} < 2M_{\odot}$ では説明できず、**重い中性子星 ($M_{\text{NS}} > 2M_{\odot}$) を示唆**
- 観測結果と詳細に比較するために、 $M_{\text{NS}} > 2M_{\odot}$ の理論計算が必要 (future work)

NinjaSat 打ち上げ前を振り返る：観測・理論のコラボ

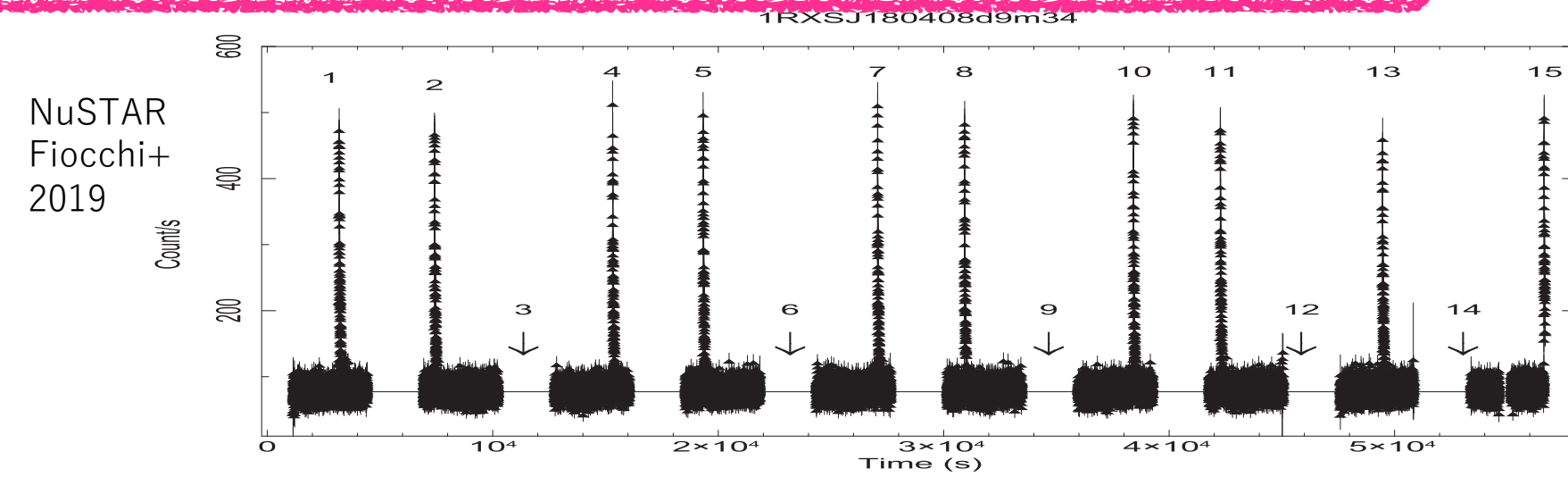
2021年ワークショップ

岩切さんスライド 「超小型X線衛星NinjaSatが目指すサイエンス」 より

X-ray burst

Measuring recurrence time and persistent flux ($\dot{M}$)

- Constraints EOS (see Dohi-san's talk)

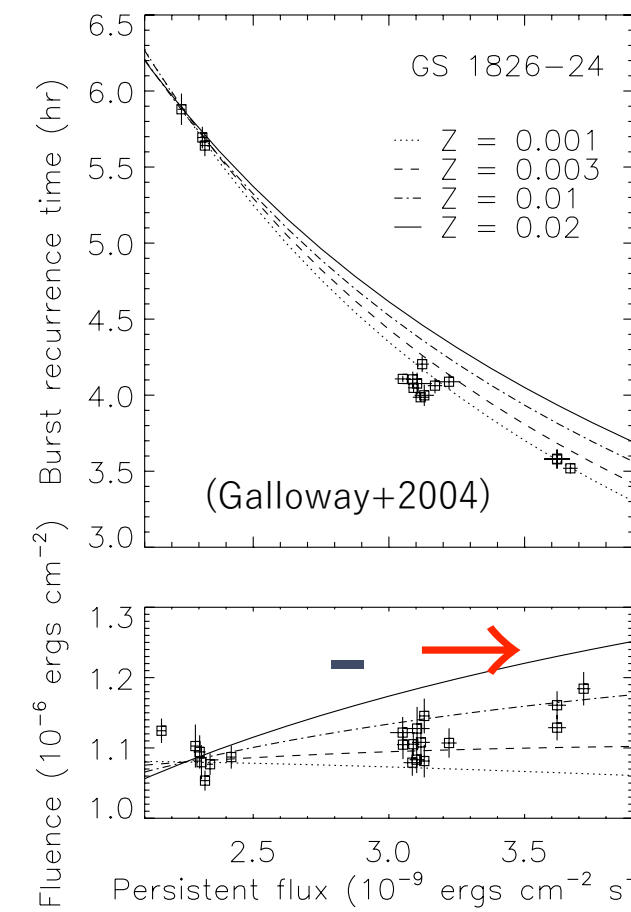
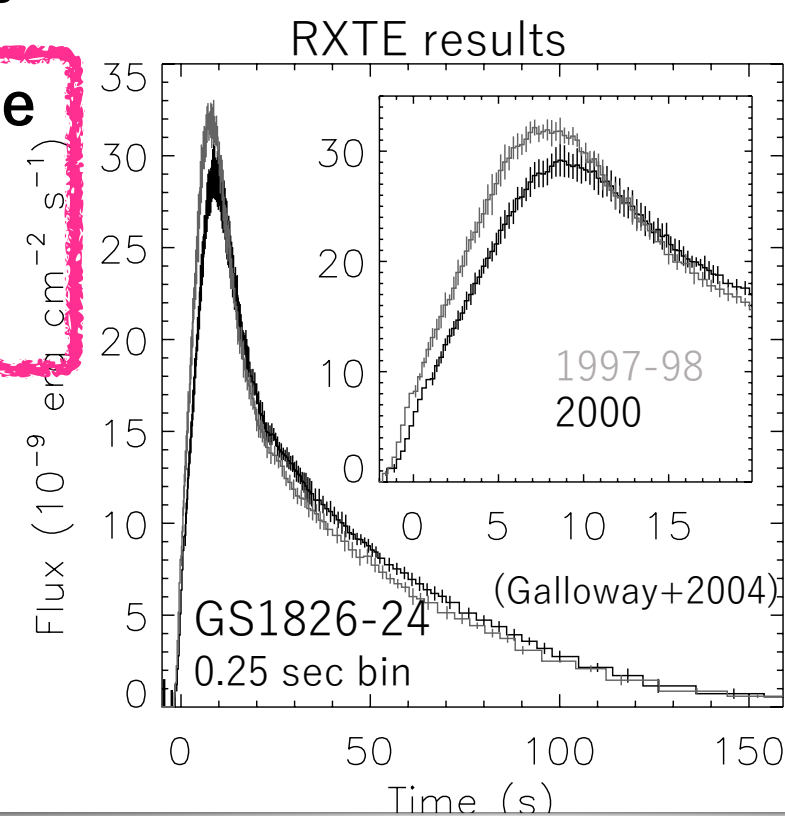


can be observable by NinjaSat

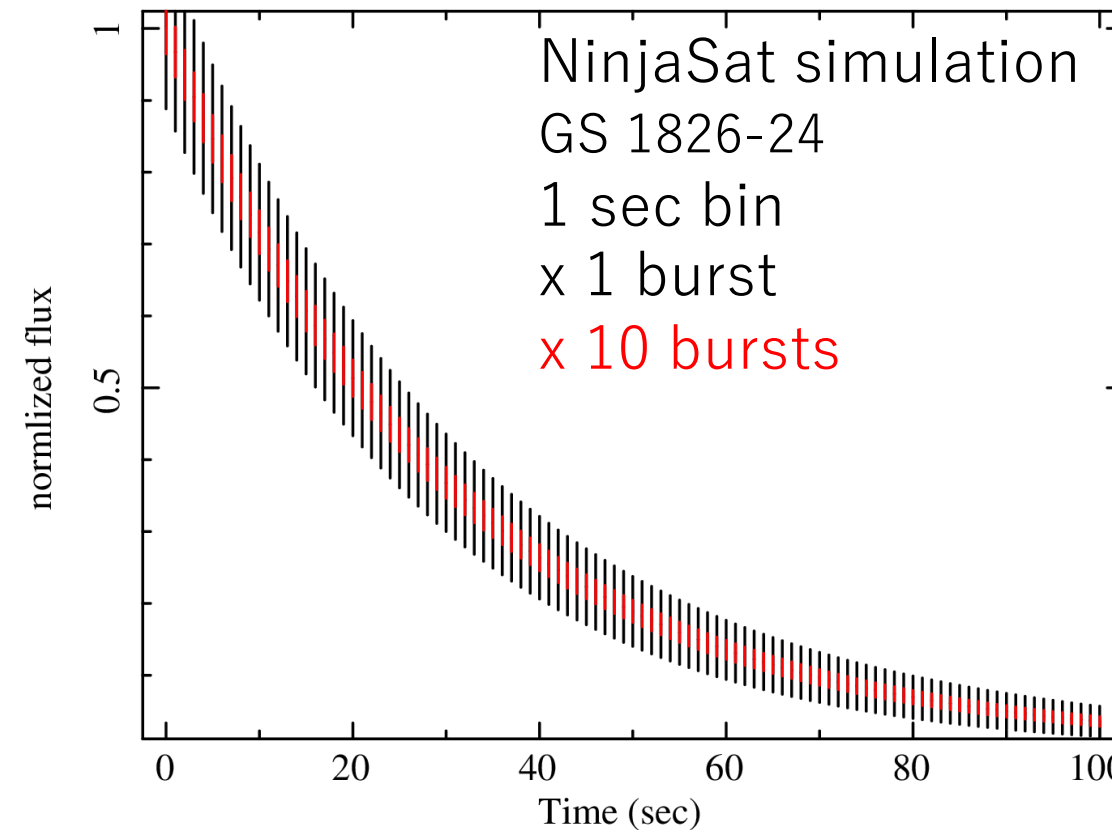
Measuring the accurate burst profile (from summing up bursts)

- fuel composition
- rp-process

Summing up ~10 bursts by the NinjaSat data, can we get data with meaningful accuracy to compare with theoretical calculations?



Not many other objects have been studied it. What is the uniqueness of each source?



(新しい clocked buster が
見つかったのは幸運だったが)

打ち上げ前の目論見通り

観測・理論のコラボによる

成果の創出に成功

- 再帰時間 Δt_{rec} vs. $\dot{M}$
→ NS 質量推定
- バーストのプロファイル
→ 伴星組成

NinjaSat で観測したX線バーストの再帰時間 Δt_{rec} vs. $\dot{M}$, バーストのプロファイルを
観測・理論で比較し、NS 質量・EOS や伴星組成を制限したい!!



■ 超小型X線衛星 NinjaSat

- 2023年11月11日に打ち上げられた 6U サイズ (10 × 20 cm × 30 cm) の超小型X線衛星
- 開発から打ち上げまで約3.5年、その後およそ2年間の科学運用中
- X線バースターをはじめとする明るいX線天体の迅速な追観測・長期観測を実現

■ クロックX線バースター SRGA J144459.2-604207 の長期観測

- 超小型衛星が得意な長期観測を活かすことで、バースト再帰時間と定常フラックスの間に $\Delta t_{\text{rec}} \propto F_{\text{per}}^{-0.84}$ の関係を発見。中性子星質量が $2M_{\odot}$ より重い可能性を示唆
- バーストの継続時間を理論計算と比較することで、降着ガスの組成を推定
太陽組成ではない初めてのクロックX線バースターであることを示した

- 超小型衛星でも、運用方法や天体選定を工夫することで科学成果を出せることを実証
- 打ち上げ前の目論見通り、観測・理論のコラボによる成果の創出に成功
- NinjaSat は今年夏頃に大気圏突入予定。NinjaSat 後継機 (NinjaSat2) へ