

Einstein Probeイベント 自動追観測システムの開発

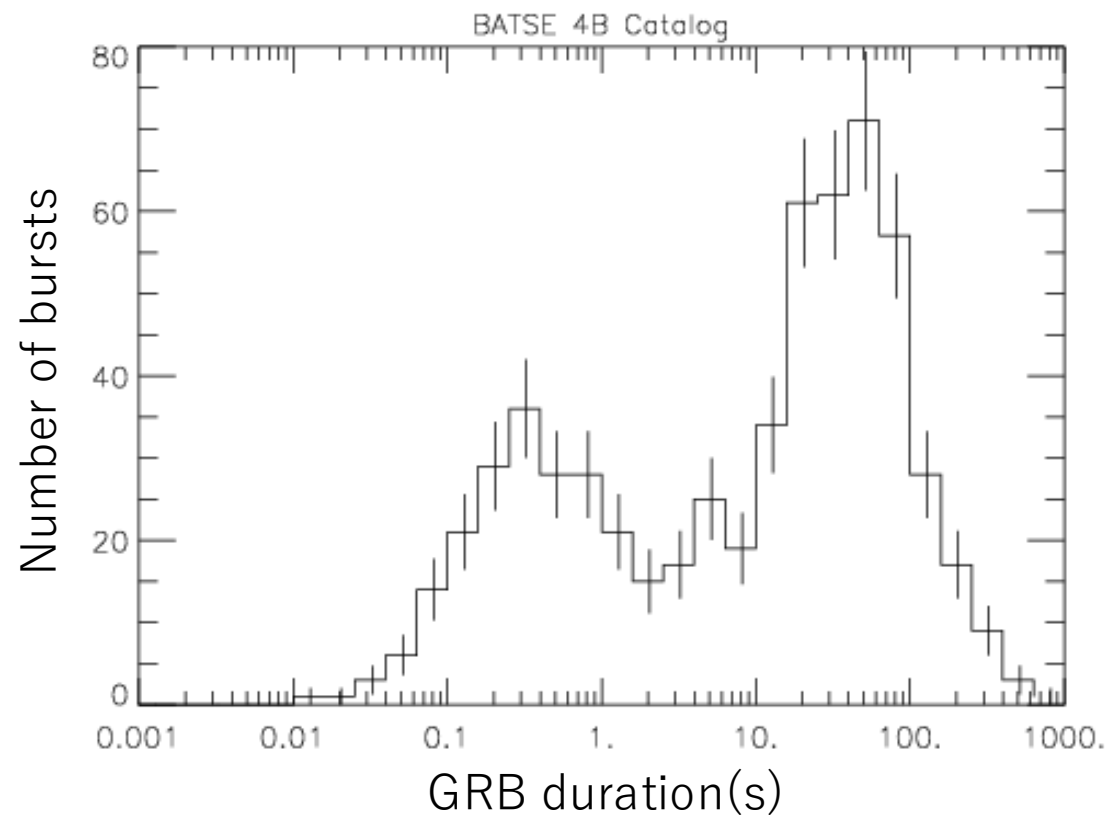
兒玉工門, 新納 悠, 小林尚人, 酒向重行(東京大学)

木曽シュミットシンポジウム 2025/05/27

Gamma Ray Burst (GRB) とは

- ガンマ線の突発現象(秒~時間程度の継続時間)
 - 高エネルギーかつevent rateが高い(平均1event/day/全天 程度)
- 継続時間2秒を境に、二つの種族に分かれる**
 - ショートGRB(継続時間2秒以下):中性子連星などの合体が起源と考えられている
 - ロングGRB(継続時間2秒以上):重い星の超新星爆発(SNe Ic-BL)を伴う

GRBの継続時間の分布

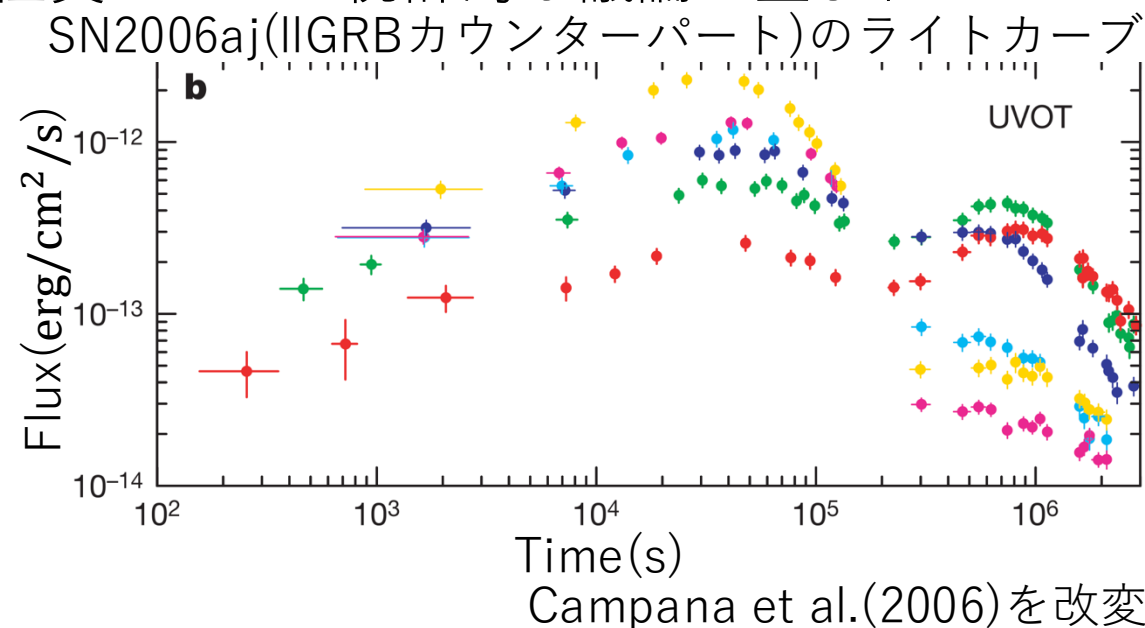


Credit: NASA Gamma-Ray Astrophysics

Low luminosity GRB(IIGRB)

- ロングGRBの中にはガンマ線光度が4桁ほど低い種族が存在(=IIGRB)
 - 通常のロングGRBと全く異なる性質を示す一方、SNe Ic-BLを伴うことは共通
 - 可視光カウンターパートのライトカーブはCSMとの相互作用を示唆
- **ガンマ線観測衛星の感度が原因で、観測サンプル数が少ない**
 - 現在のIIGRBサンプルは10件以下であり、統計的議論は困難
 - 観測サンプル数を増やし、親星およびCSMの性質について統計的な議論が望まれている

	通常のロングGRB	IIGRB
継続時間	10~100秒程度	1000秒以上
ガンマ線の光度	$10^{50} - 10^{52}$ erg/s	$10^{46} - 10^{48}$ erg/s
ピークのエネルギー	100keV以上(hard)	100keV以下(soft)
検出されているカウンターパート	X線、電波、可視光	X線、電波、可視光



Einstein Probe(EP)

- 広視野かつ高感度のsoft X-ray観測衛星

- 中国科学院が2024年1月9日に打ち上げ
- 3~5年の運用を予定している
- TDEなどのX線突発天体の検出、GWのX線カウンターパートの探査などが目的

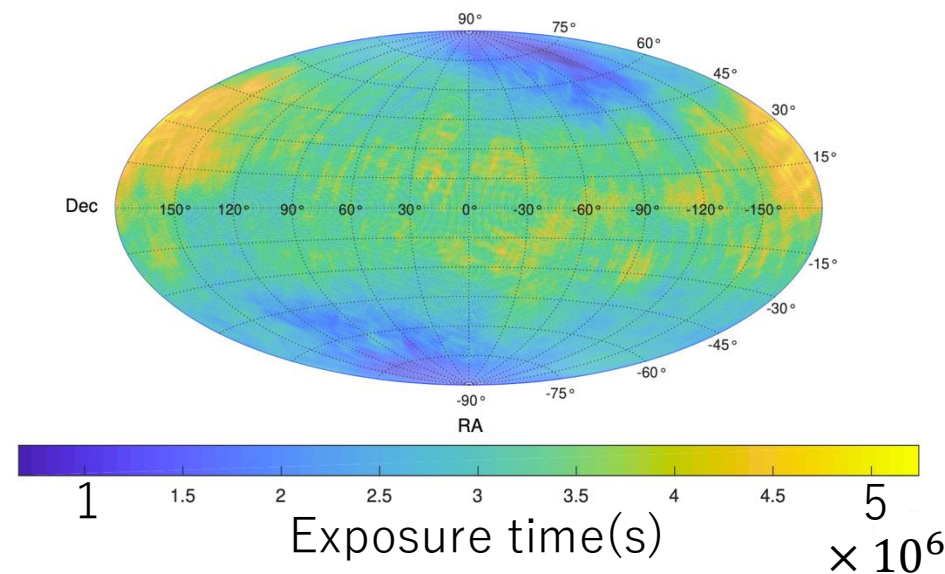
- サーベイ用の装置WXTとフォローアップ用の装置FXTを搭載

- WXT:3600平方度の視野を持ち、即時フォローアップが可能な夜の空のみを観測
- FXT:視野1平方度、位置決定精度4arcsec
- WXTの1pointingの観測時間は20分程度



Credit: ESA

1年あたりの総観測時間の予測値



Yuan et al.(2022)

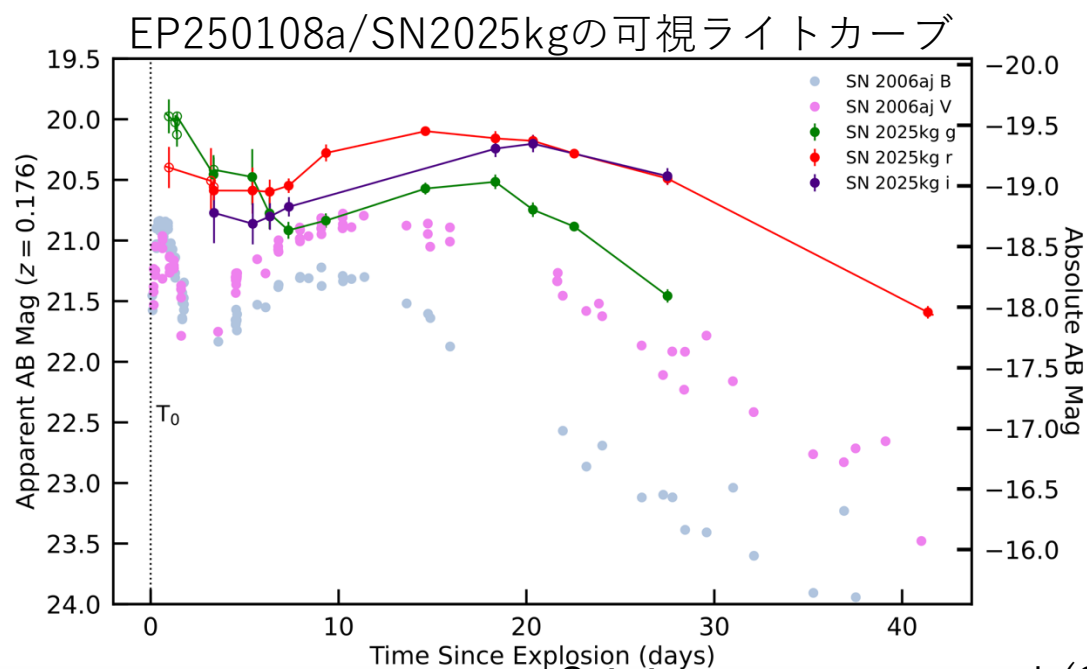
Einstein Probeと他のX線衛星

- EPは他のX線衛星と異なり、soft X-rayに感度がある
 - **低エネルギー側で明るいIGRBの検出に有効**
- しかし、EP自体は可視光フォローアップ装置を持たない
 - 地上望遠鏡による可視フォローアップが必要
 - EPにより送信されるアラートを受けて、フォローアップが行われている

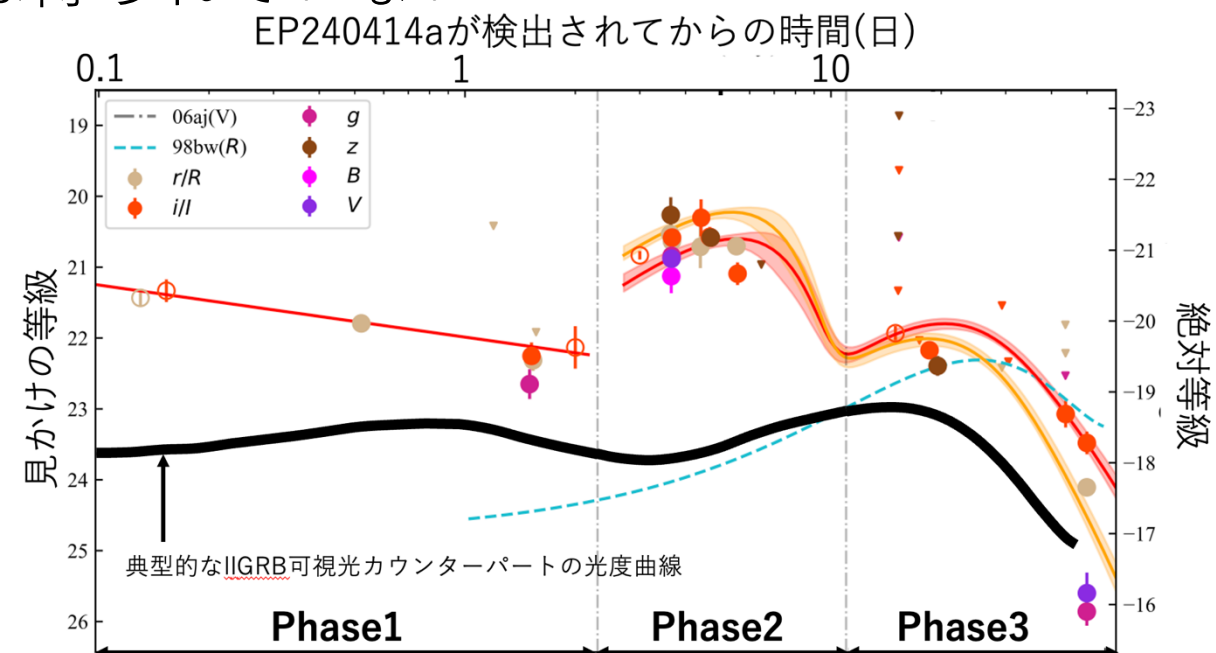
	Swift BAT	EP WXT	SVOM ECLAIRs
エネルギー帯(keV)	15-150	0.5-4	4-250
視野(平方度)	4600	3600	6400
感度(erg/cm ² /s ¹)	~10 ⁻⁸ (GRBを仮定)	1.2 × 10 ⁻¹⁰ (100s exposure)	~10 ⁻⁸ ?(GRBを仮定)
位置決定精度(arcmin)	~4	~2-3	~10
On boardのフォローアップ用装置	XRT(X-ray), UVOT(可視)	FXT(X-ray)	MXT(X-ray), VT(可視)

EP新規検出天体の例

- 実際、EPによりIIGRBと考えられる天体が検出されている
 - カウンターパートの性質がIIGRBと一致しているX線天体
- 特徴的な可視カウンターパートをもつX線天体も見つかっている
 - しかしそれらの起源について合意は得られていない



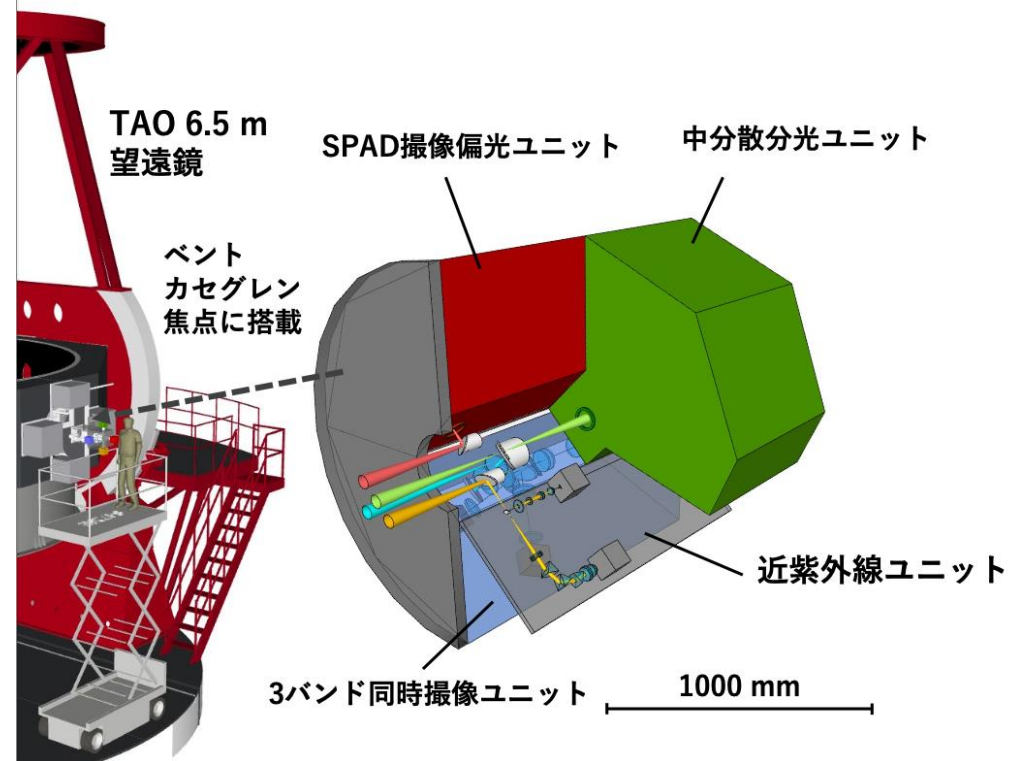
Srinivasaragavan et al.(2025)



Sun et al.(2024)を改変

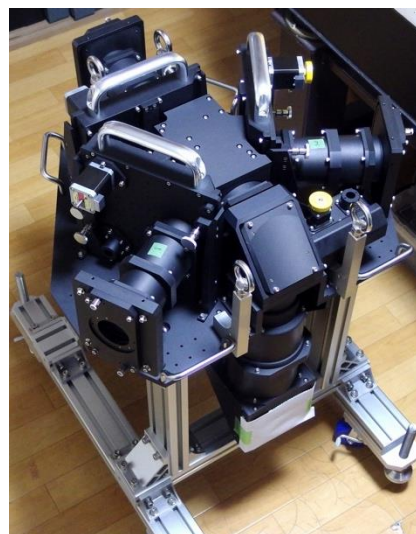
TAO6.5m望遠鏡用可視光観測装置

TAO可視光観測装置の全景



- TAO6.5m望遠鏡
 - 東京大学がチリのチャントール山(標高5640m)に建設
- 可視光観測装置を酒向グループで開発中
 - 複数ユニットから構成される装置
 - **3バンド撮像ユニット**:現在完成しており、評価を進めている
 - **SPAD撮像偏光ユニット**:現在設計中(→倉島さん発表)

3バンド撮像ユニット



EP新規検出天体の可視フォローアップ観測の問題点

- **(特に初期の)観測数が足りていない**
 - TAOで初期から高頻度の観測をすることで、IIGRBの詳細な観測サンプル数の増加を目指す
 - さらに**偏光観測を加えることによって、測光観測だけでは得られない情報(例:CSMの非球対称性)を追加する**
- しかし、全てのEP新規検出天体をTAOで即時フォローアップするのは難しい
- 本研究ではTAOを向けるべきかどうかを判断するために、**Tomo-eによるEP検出天体の自動フォローアップを行うシステムを開発する**

EP検出天体のフォローアップ戦略の構築に向けた検討

GCN Circularの一例

- GCN CircularsにあるEP新規検出天体に関する投稿を分析し、以下の項目を検討
- EP新規検出天体の天球面上の分布、X-ray fluxから、**フォローアップ基準を設定すべきか検討**
- 最速の可視~赤外フォローアップが行われた時刻、その深さから**必要な積分時間を検討**

GCN Circular 40154

Subject EP250416a: Einstein Probe detection of an X-ray transient
Date 2025-04-17T03:08:20Z (a month ago)
From EP Team at NAOC/CAS <ep_ta@bao.ac.cn>
Via Web form

G.Y. Zhao (SYSU), C. Zhou (HUST), X.L. Chen, K. Chatterjee (YNU), H. Zhou (PMO, CAS) and C.C. Jin (NAO, CAS) on behalf of the Einstein Probe (EP) team:

We report on the detection of an X-ray transient by the Wide-field X-ray Telescope (WXT) on board the Einstein Probe (EP) mission, designated EP250416a. The transient triggered EP-WXT (ID: 01709135021) at 2025-04-16T17:53:59 (UTC). The WXT position of the source is R.A. = 256.402 deg, DEC = 25.768 deg (J2000) with an uncertainty of 3 arcmin in radius (90% C.L. statistical and systematic).

A follow-up observation with the Follow-up X-ray Telescope (FXT) was performed automatically. Within the WXT error circle, an uncatalogued X-ray source was detected at R.A. = 256.4228 deg, DEC = 25.7755 deg (J2000) with an uncertainty of 20 arcsec in radius (90% C.L. statistical and systematic).

Further information will be updated when the telemetry data is received.

Launched on January 9, 2024, EP is a space X-ray observatory to monitor the soft X-ray sky with X-ray follow-up capability (Yuan et al. 2022, Handbook of X-ray and Gamma-ray Astrophysics).

<https://gcn.nasa.gov/circulars/40154>

アラートに含まれる情報

Trigger time

(RA, DEC)

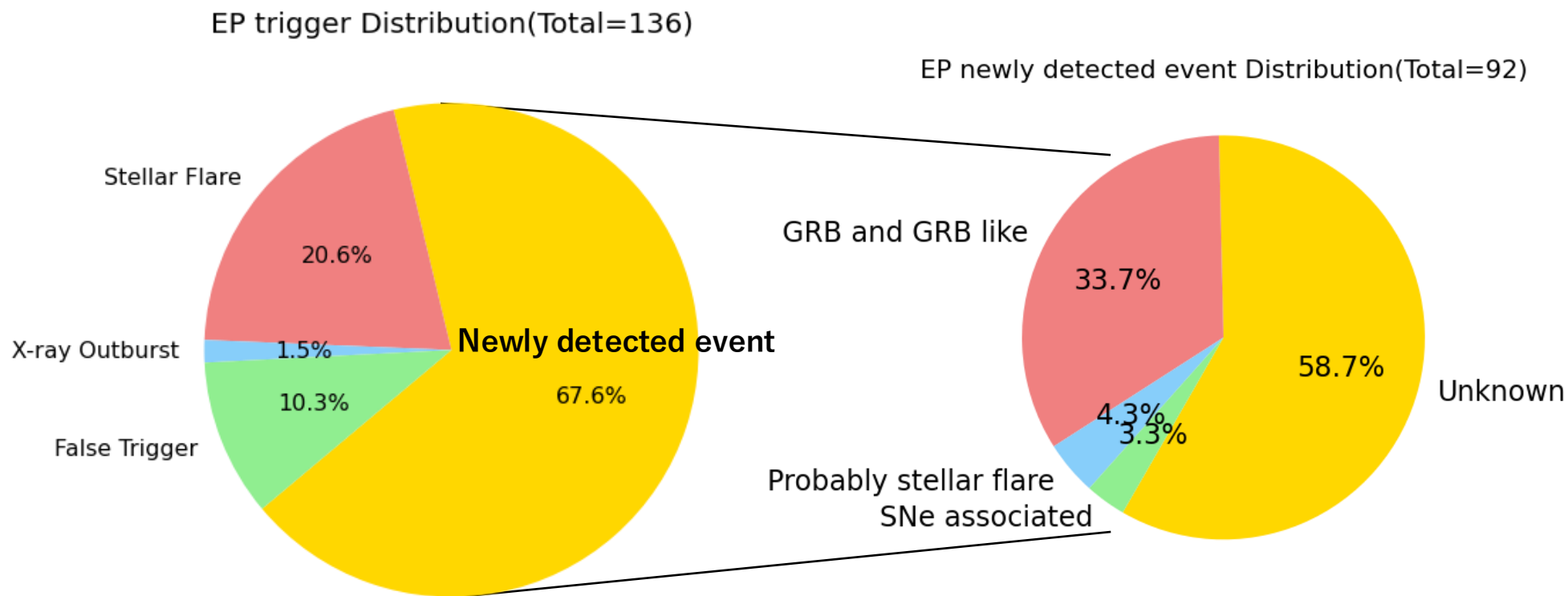
RA, DECのerror

Net count rate

画像のS/N比

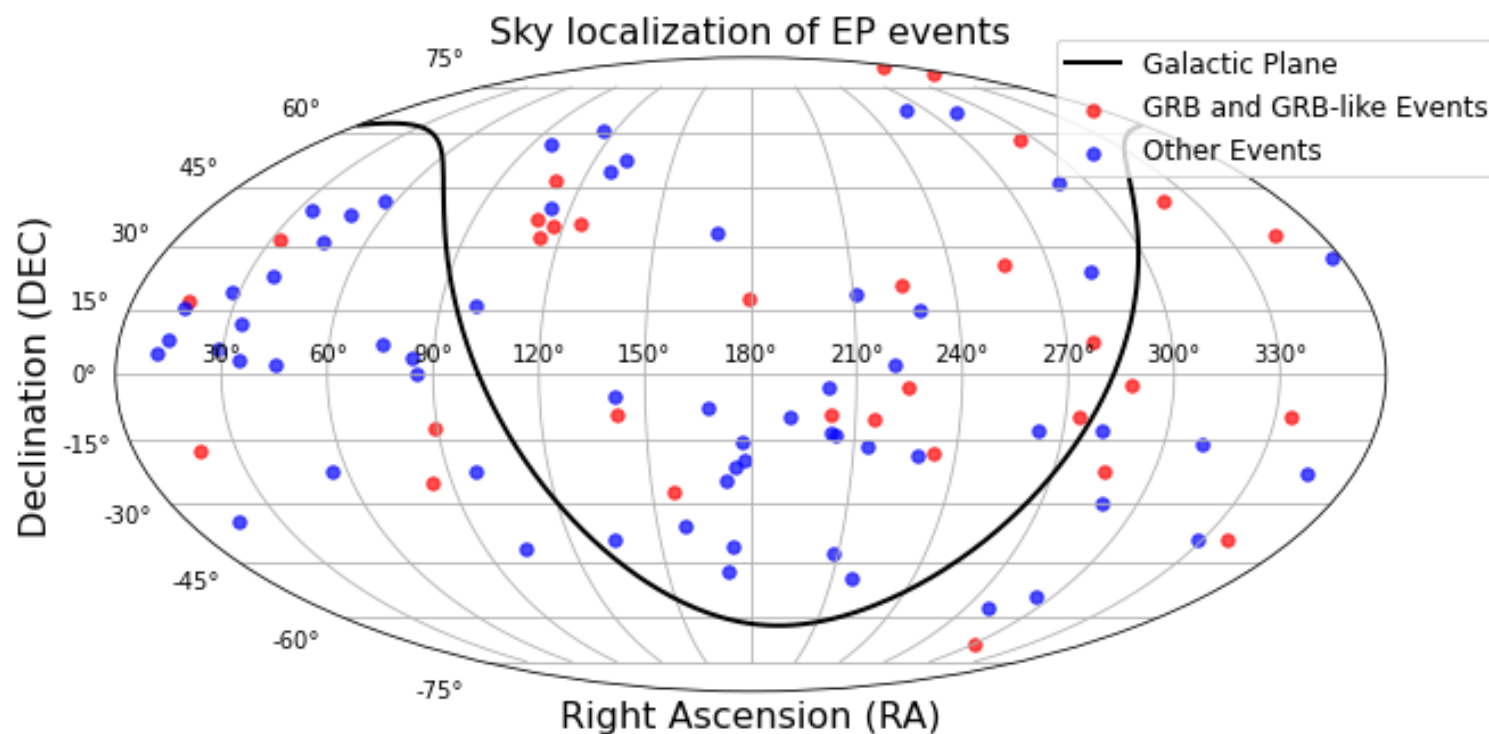
EPにより検出された天体の内訳

- 2024/03/15~2025/05/20にGCNに投稿されたEP triggerの内訳
 - 2 event/週程度のペースでGCNに検出報告が来ている
 - 70%程度は新規検出天体、さらにその30%ほどがGRBと関係



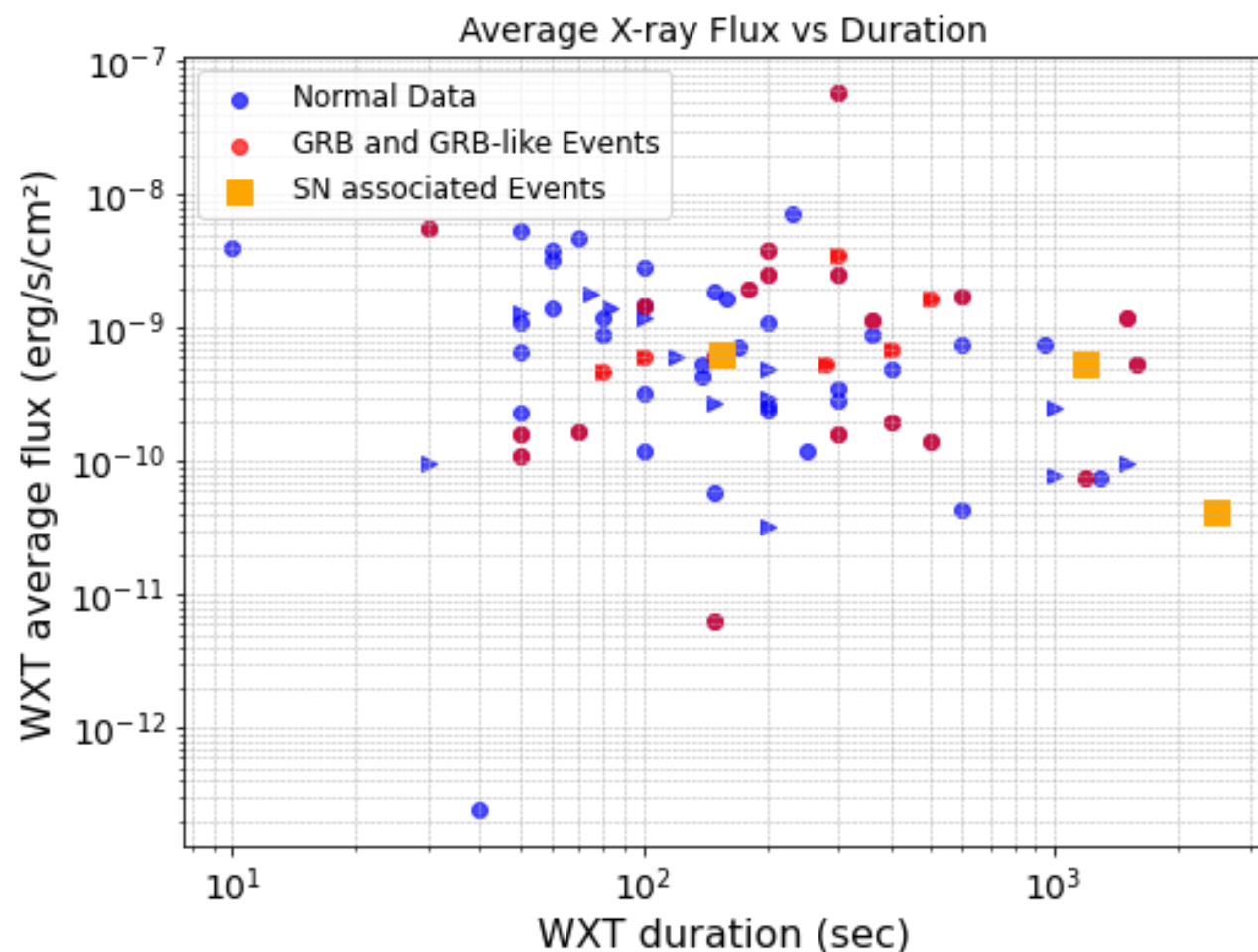
EP新規検出天体の天球面上での分布

- EP新規検出天体は天球面上に一様に分布している
 - **RA,DECでフィルタリングする必要はない**と言える
 - 既知天体の場合の情報がないため、観測を始めた後に再確認する



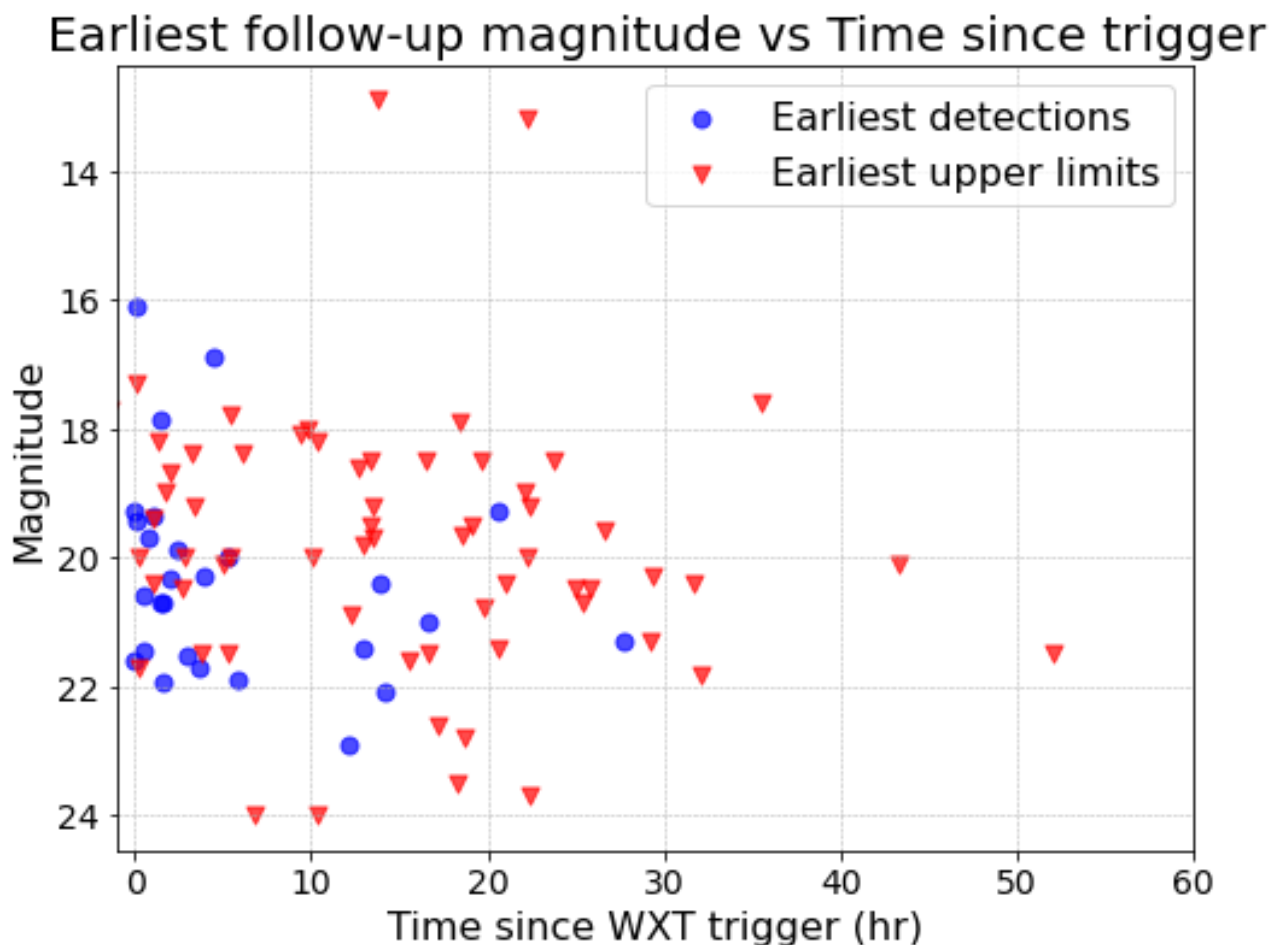
EP新規検出天体のX-ray durationとflux

- EP新規検出天体のWXT X-ray fluxの分布は右図の通り
 - 極端にfluxの低いものはほとんど存在しない
- **Net count rateの値**(fluxに相当)でフィルタリングする**必要はない**といえる
 - こちらも観測を始めた後に再確認する



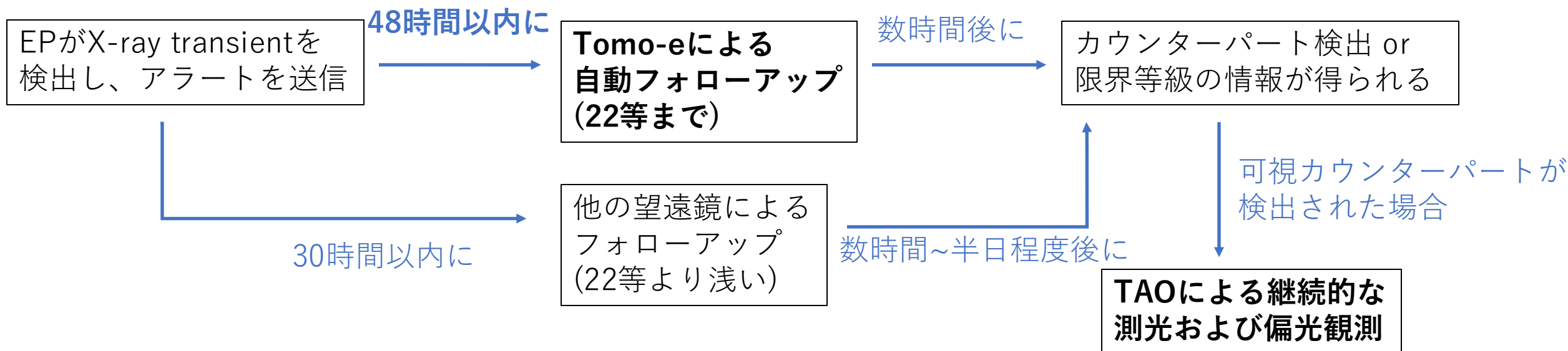
EP新規検出天体の可視光フォローアップ

- 最速の可視～赤外フォローアップが行われた時刻と、その深さの分布は右図の通り
 - ほとんどの検出、限界等級は**22等より浅い**
 - ほとんどの最速フォローアップは**30時間以内**に行われている



EP新規検出天体のフォローアップ戦略

- 他の望遠鏡による観測結果がGCNに流れてくるまでに要する時間を考え、**アラートの48時間後までフォローアップを行う**
- **合計1000秒程度観測**し、22等の深さまで検出できるようにする
 - Tomo-eは10秒積分、S/N=10での限界等級が19.1magのため



まとめ

- EPの登場により、IIGRBと考えられる天体と特徴的なカウンターパートをもつX線突発天体の検出数が増えている
- それらの初期からの観測を行うためには、即座に自動フォローアップを行う必要がある
- EP新規検出天体のフォローアップを行う場合に、フィルタリングは不要
- 48時間以内に、22等の深さのフォローアップを行うことが有効
- 今回検討したフォローアップ戦略に基づき、自動観測用システムを現在開発中

EP新規検出天体の可視光フォローアップ

- 最速フォローアップの80%程度(74/92)は1m以下の口径の望遠鏡で行われている
 - うちMASTER robotic telescope(40cm)が27件、Lulin(40cm or 1m)が12件

