

Tomo-e Gozenの 高頻度サーベイデータを用いた Fast Optical Transient 探査

押切 翔 (東北大学)

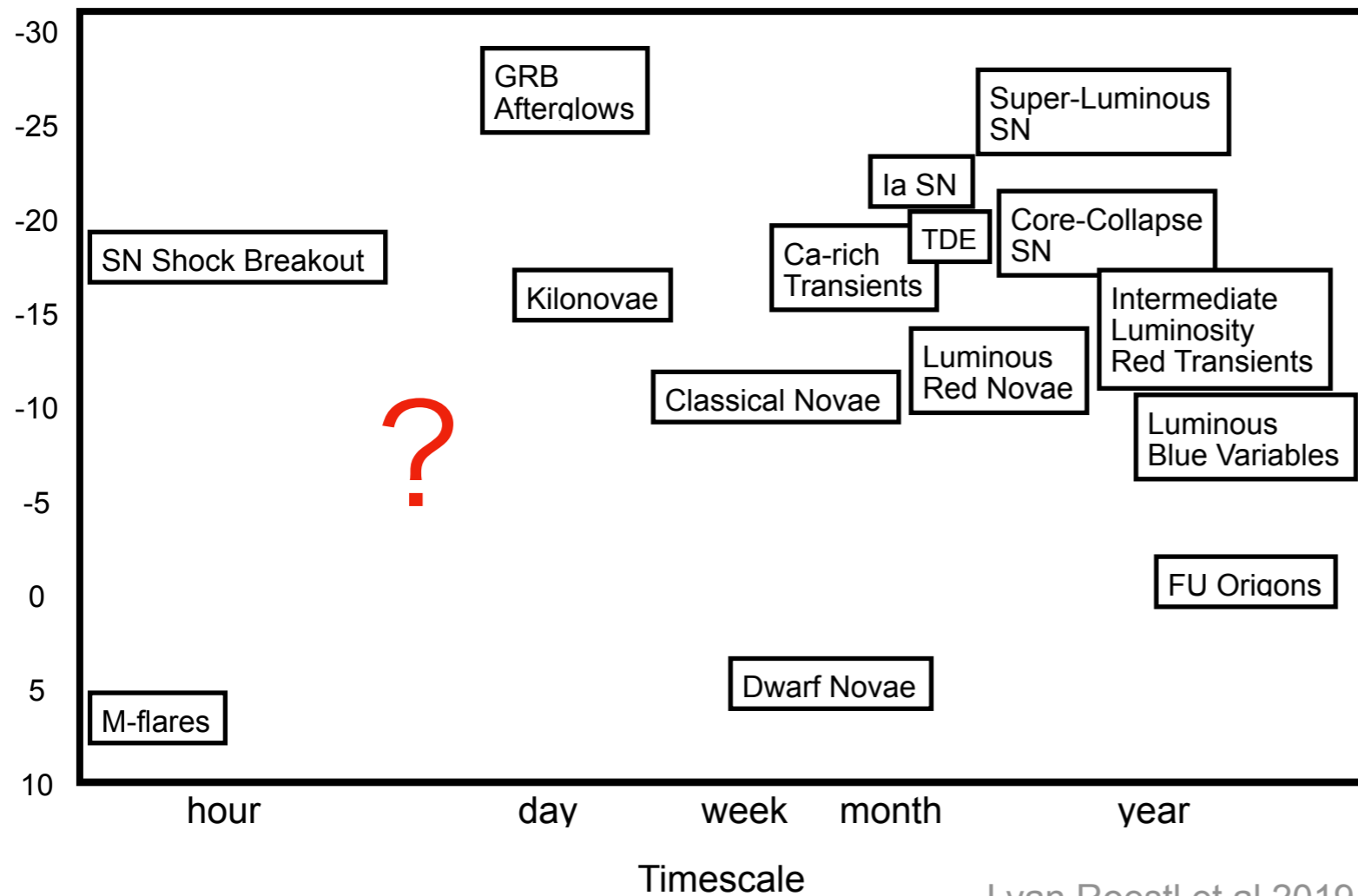
田中雅臣、高橋一郎 (東北大学)、富永望 (国立天文台)、
諸隈智貴 (千葉工業大学)、Tomo-e Gozenコラボレーション

2022/07/05

木曾シュミットシンポジウム2022

Fast Optical Transient

突発天体：急激な増光または減光を起こす天体



数時間から
数日のタイムスケール、
光学的に見える天体

→ **Fast Optical Transient**

先行研究

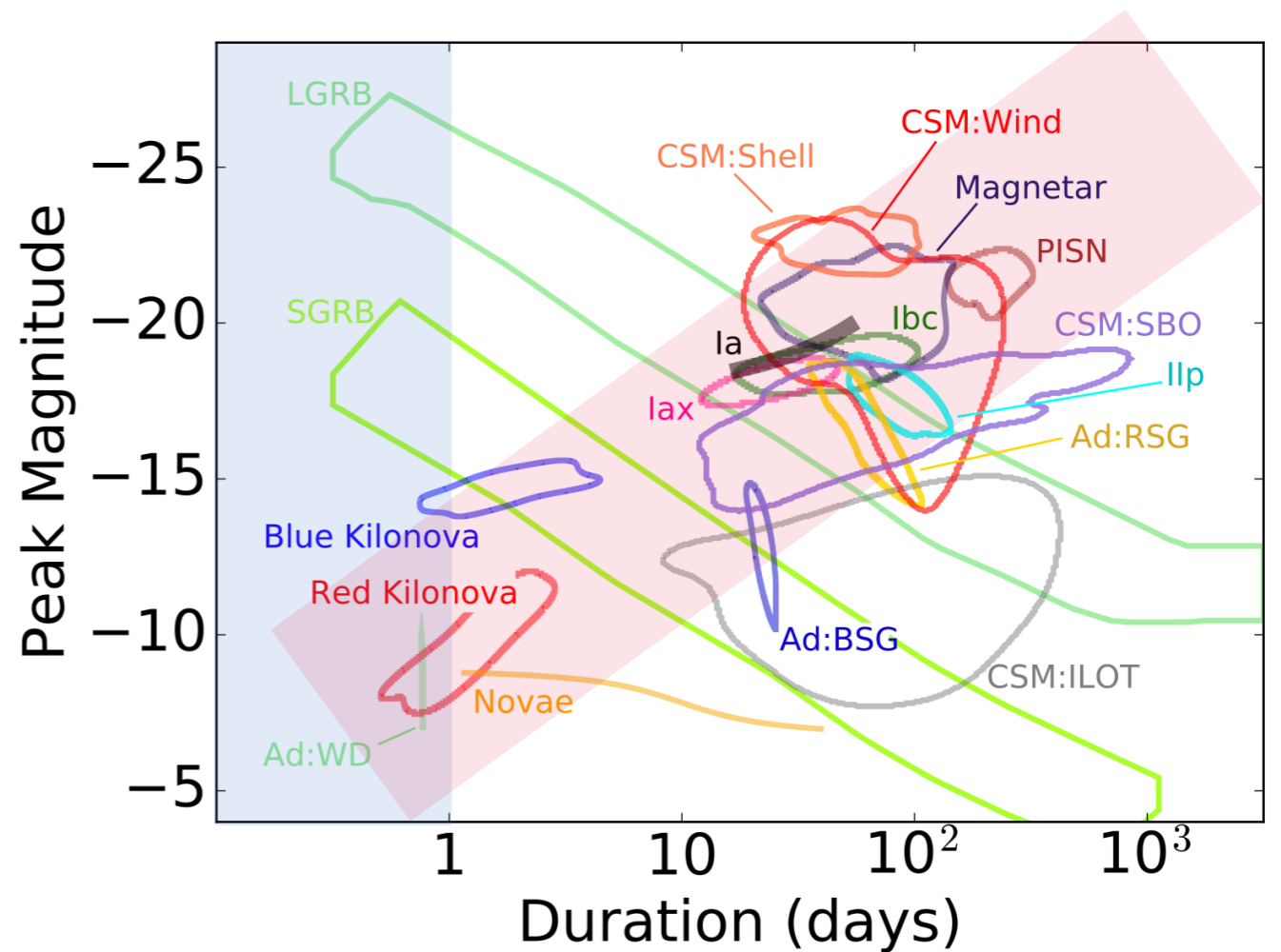
理論

- 相対論的ジェット
→ 短時間で明るい
- それ以外
放射線崩壊、非相対論的加熱
→ 右肩上がり
(明るいほど、長く輝く)

FOT候補

明るい：ガンマ線バースト？

暗い：質量の小さい爆発の熱的放射？



Villar et al.2017

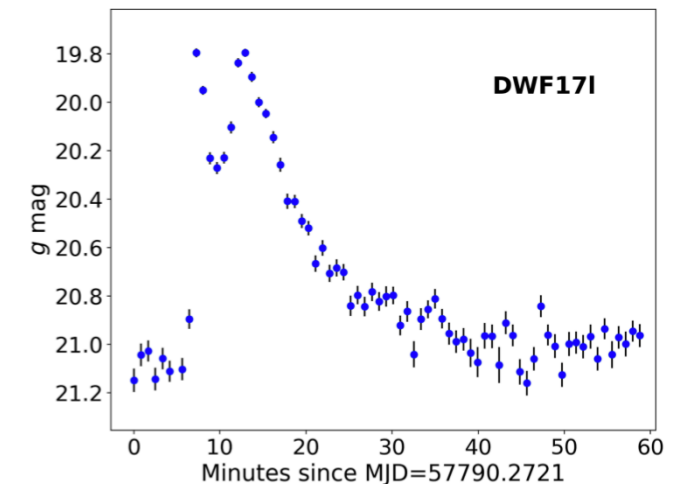
先行研究

サーベイ

- 新星や超新星爆発：～日、月、年のタイムスケール
昔から多く観測されてきた
- 近年、～分、時間といった短いタイムスケールで広視野の観測が可能に
Becker et al.2004 the Deep Lensing Survey (DLS)

見つかるものの多くは銀河系内のM型矮星のフレア
(e.g., Berger et al.2013, Roestel et al.2019)

ガンマ線バースト残光が**可視光**だけで見つかった例も
(e.g., Ho et al.2018 , Andreoni et al.2021)



Andreoni et al.2020

FOTがどれだけいるのか

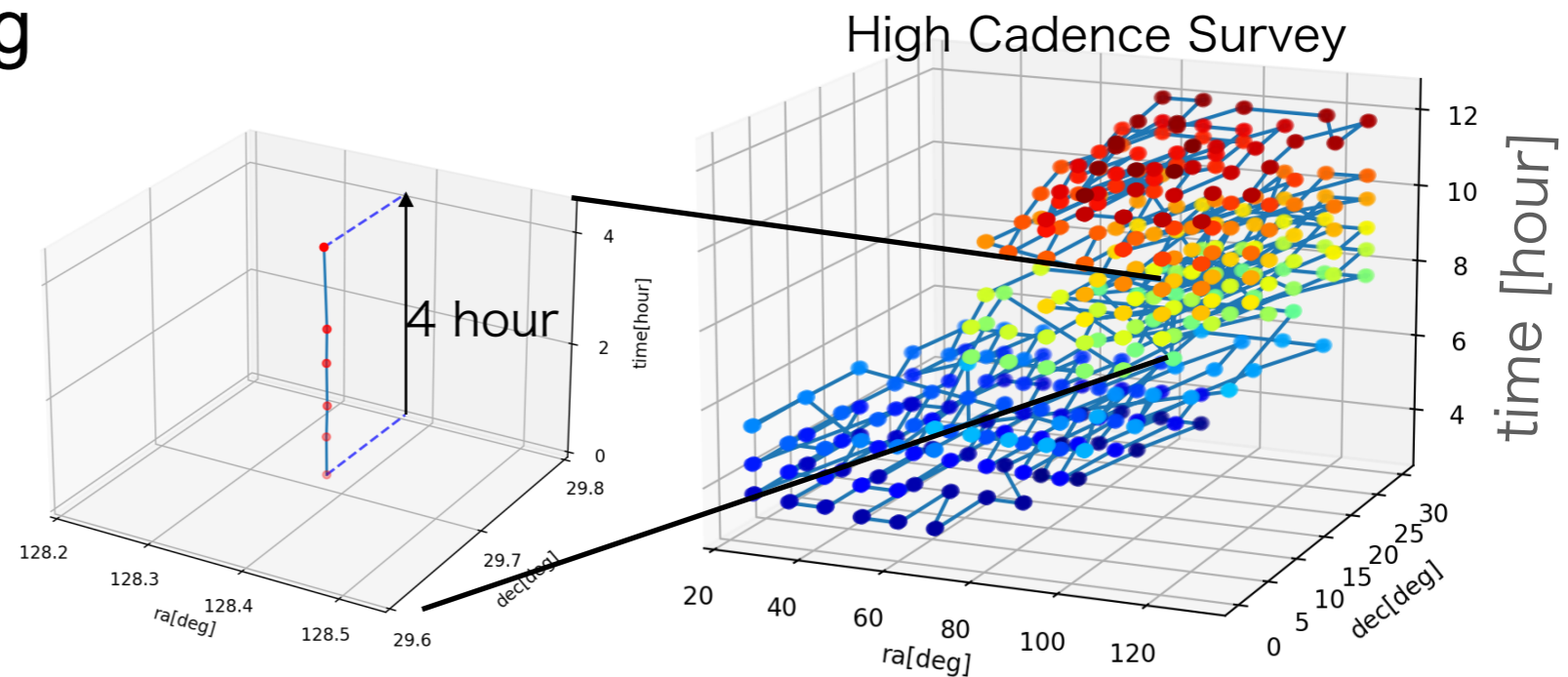
観測の時間間隔や限界等級、条件に依存 → 制限をつける

Tomo-e Gozen

木曾観測所 広視野高頻度サーベイプロジェクト

高頻度サーベイ：一晩で3000 deg²を複数回観測

- 平均限界等級 17.8 mag
- 有効視野 20 deg²
- 時間間隔 4 h



今回の研究では

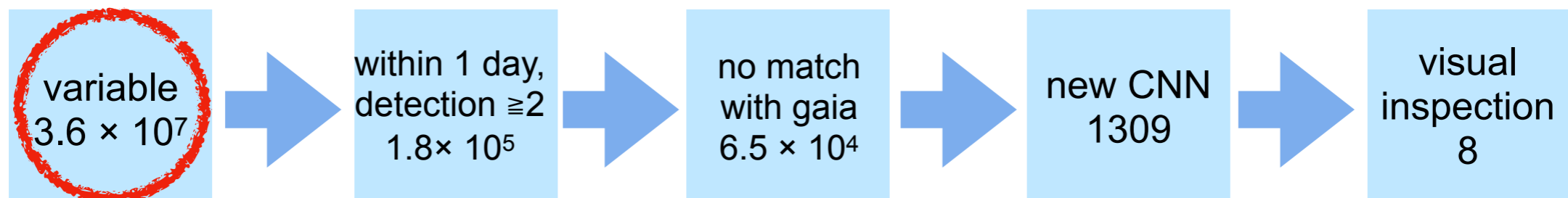
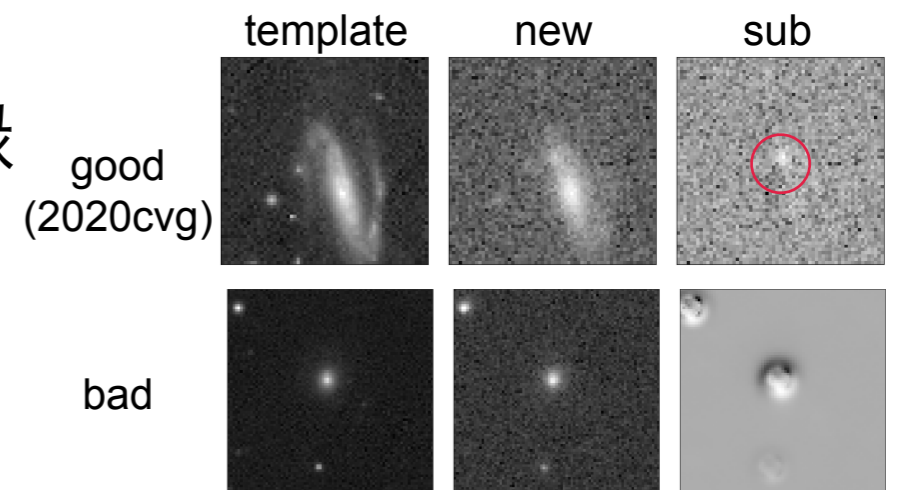
銀河系外のFOTを探したい

Selection

Tomo-eのパイプライン

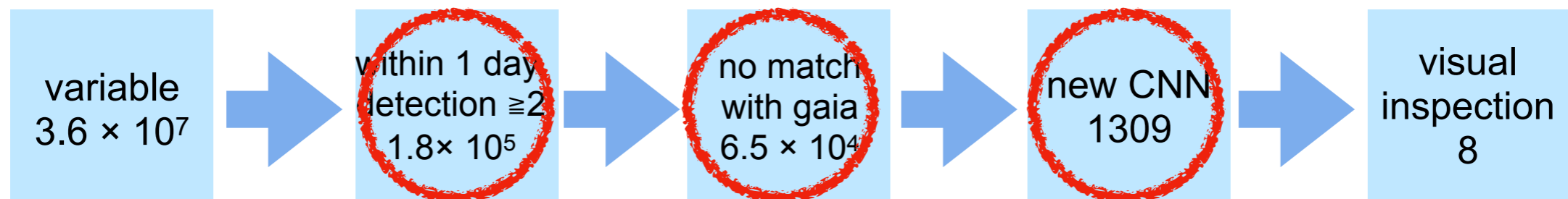
- 撮影された画像(raw)とPanSTARRS-1の画像(template)から差分画像(sub)を作成
- CNN (Convolutional Neural Network)で自動判定
→ IDが振られ、リストへ登録
- 約 3.6×10^7 個(2021年12月時点)の天体が登録

差分の失敗による多くの'ゴミ'の中から
本物の突発天体を探す



Selection

- 2021年11月末まで
期間（最後の検出 - 最初の検出）が1日未満、
2回以上検出 $\sim 1.8 \times 10^5$
- Gaia EDR3 カタログと照会
固有運動, 年周視差がerrorより大きいもの = 星
星から10"以上離れたもの $\sim 6.5 \times 10^4$
- new CNN Takahashi et al.2022
再度、機械学習で判定 1309

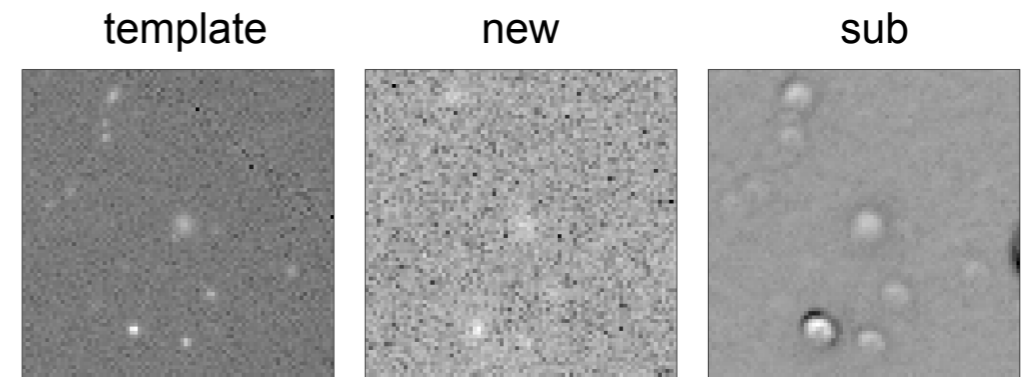


Selection

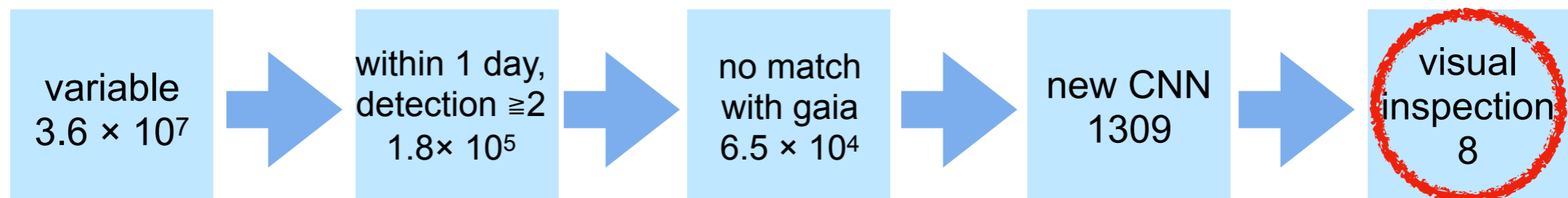
- 目視で確認

機械学習でも除去しきれなかった誤検出や、移動天体を除去
日を跨いで検出されている天体を除去

1309 → 8



目視で除去した例：画像の差分にミスあり



FOT candidate

過去に検出あり

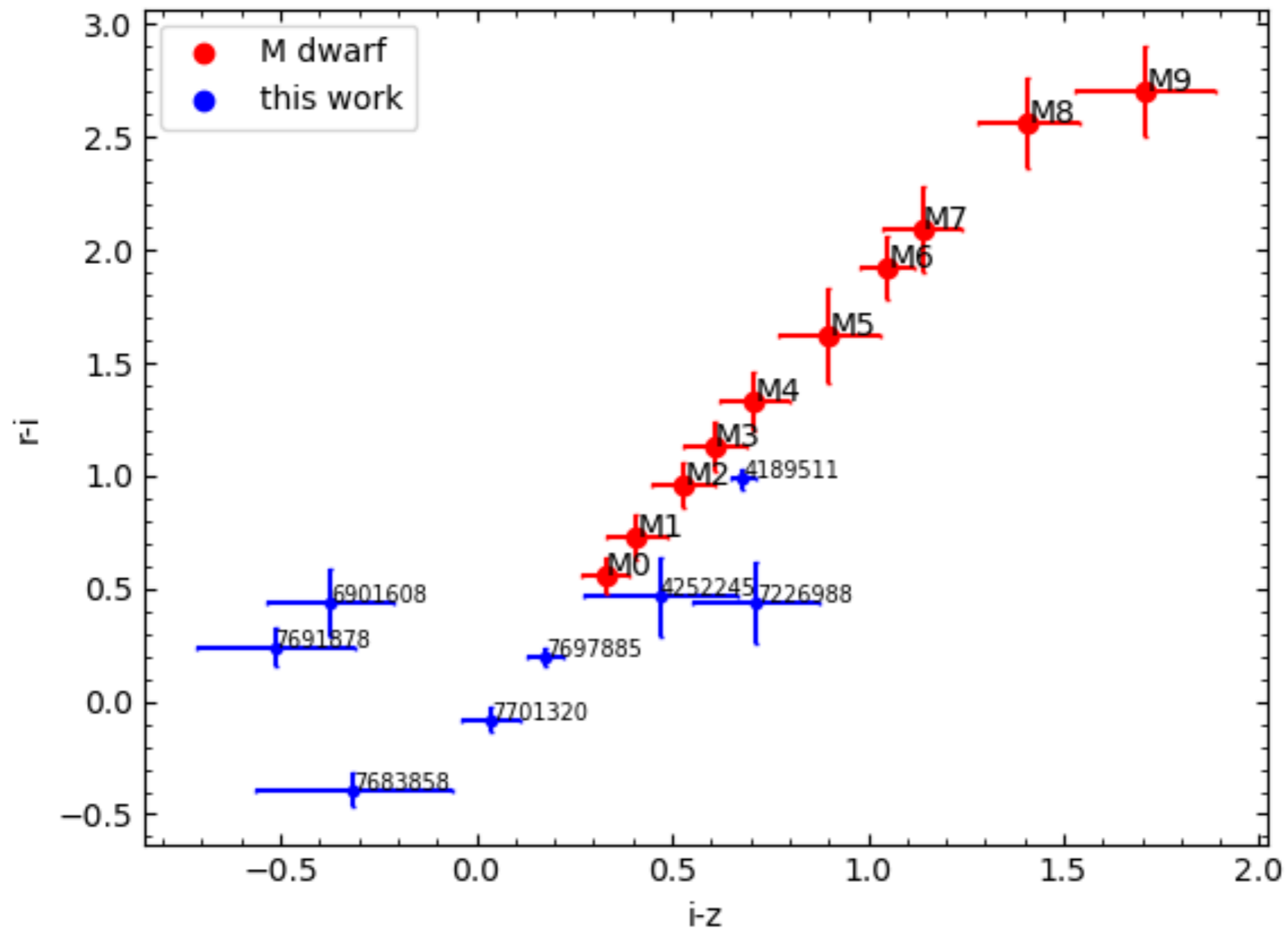
初検出

tns name	過去に検出あり			初検出		
date	template	new	sub	template	new	sub
transientID						
2016jai 2020-10-13 4252245						
			2016(gaia), 2018(ztf)	2020-06-02 4189511		
2018dck 2021-03-25 6901608						
			2018(gaia), 2019(ztf)	2021-11-07 7683858		
2019nei 2021-04-20 7226988						
			2019, 2021(ztf)	2021-11-25 7697885		
2019pzj 2021-09-24 7691878						
			2019(ztf)	2021afrt 2021-11-2 77701320		2021(gaia)

8個全てPanSTARRS-1の画像に対応天体が存在 → 銀河系内天体？

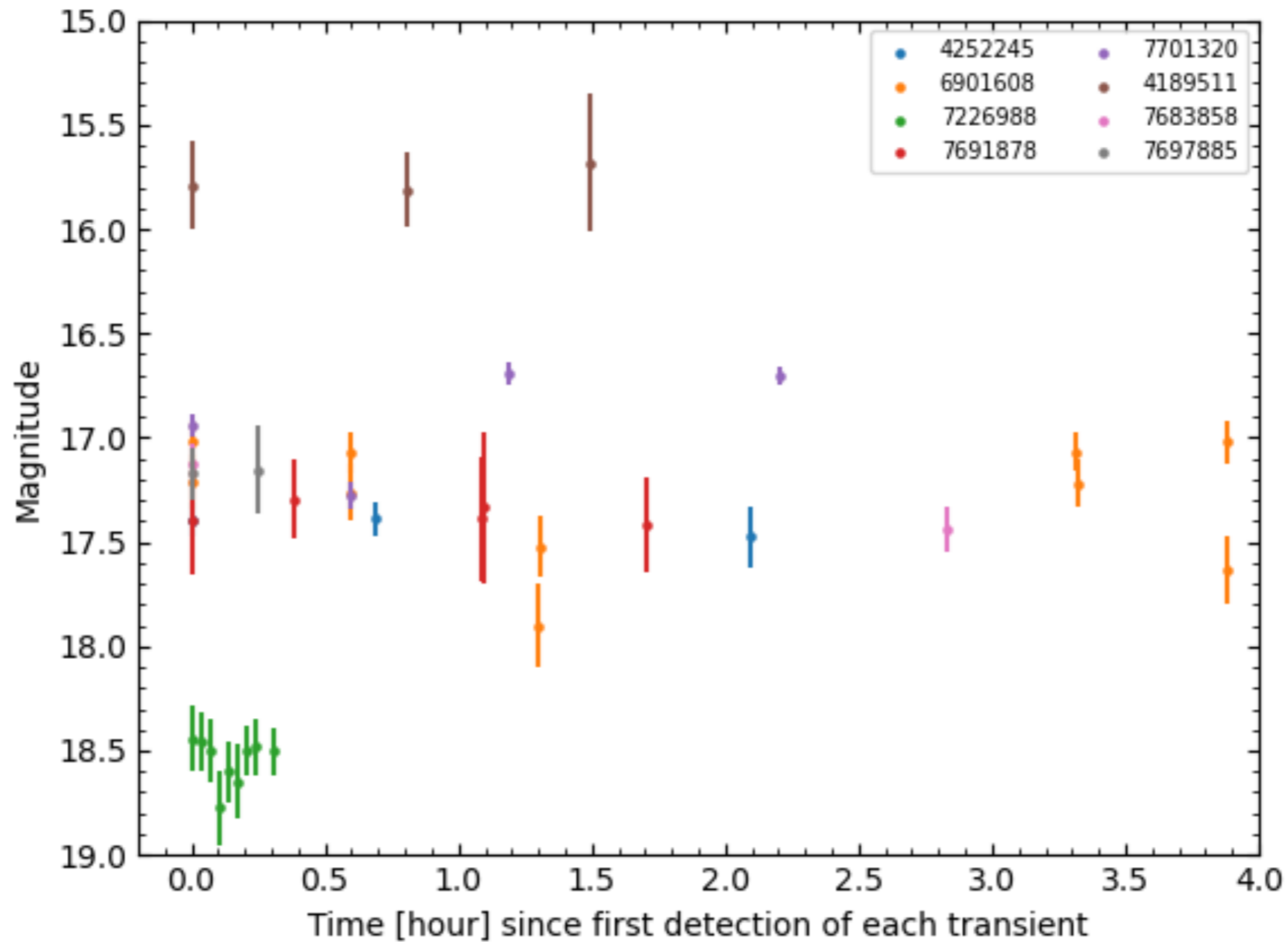
銀河系内FOTの性質

M dwarf との比較



銀河系内FOTの性質

light-curve

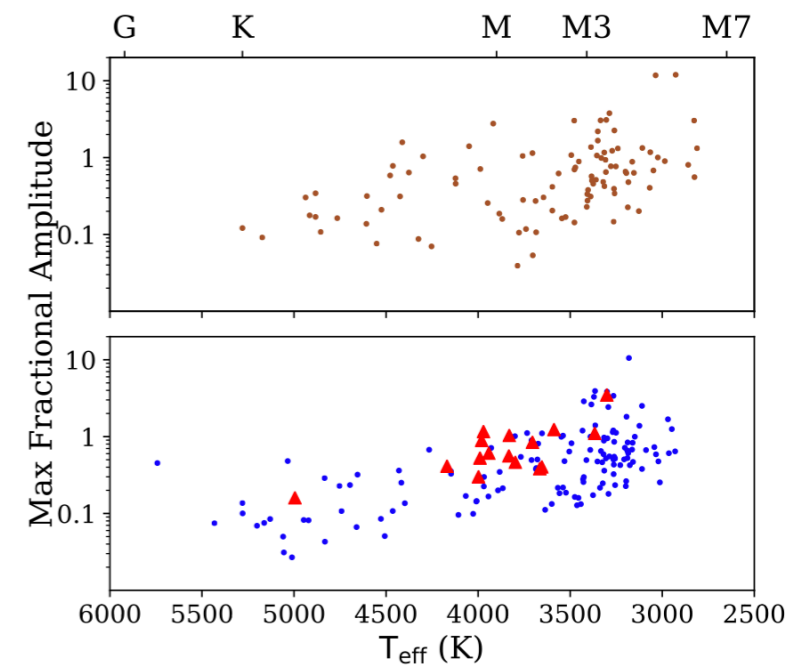
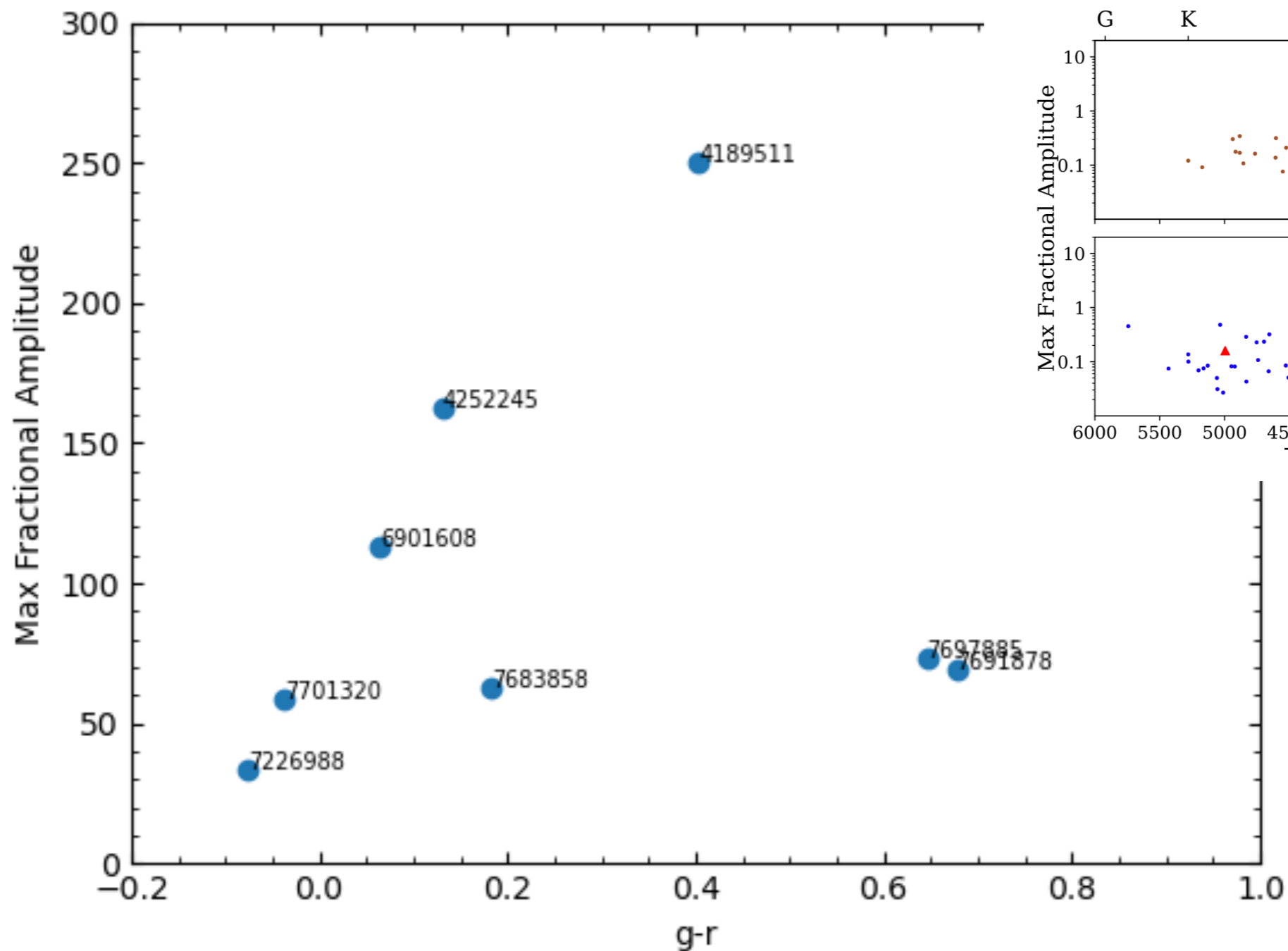


フラット → 数日続いている矮新星?

銀河系内FOTの性質

フラックス比 $\frac{\Delta f}{f}$ $\Delta f = f_{peak} - f$

恒星フレア ~10



Jackman et al. 2021

恒星フレアではない

銀河系外FOT発生率のUpper limit

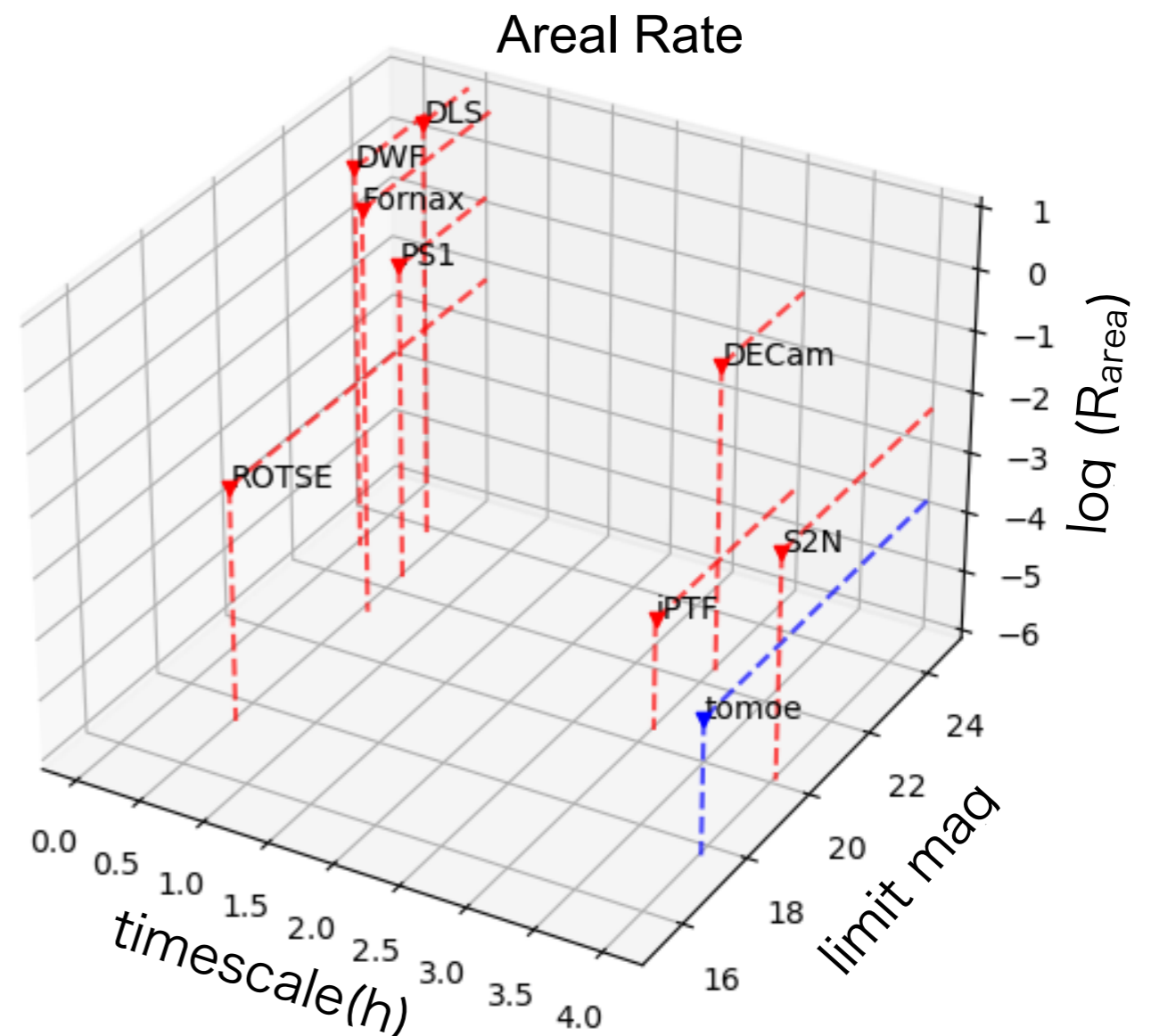
- E_a [deg²day] : 観測した面積 (平方度) と時間の積
 E_a (17.8 mag) ~ 26642 deg²day
- N : 検出したFOTの数
- R_{area} [deg⁻² day⁻¹] : 天球面上でどれだけ検出できるか

$$R_{\text{area}} = \frac{N}{E_a} < \frac{3}{E_a}$$

(非検出では $N \leq 3$: 95%信頼区間)

限界等級に依存

→ そのままでは比較できない

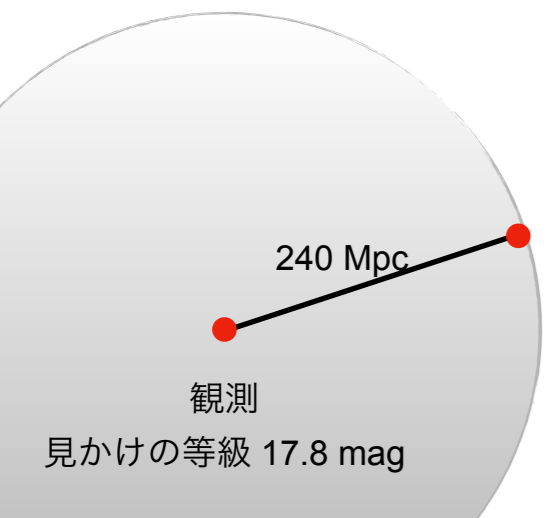
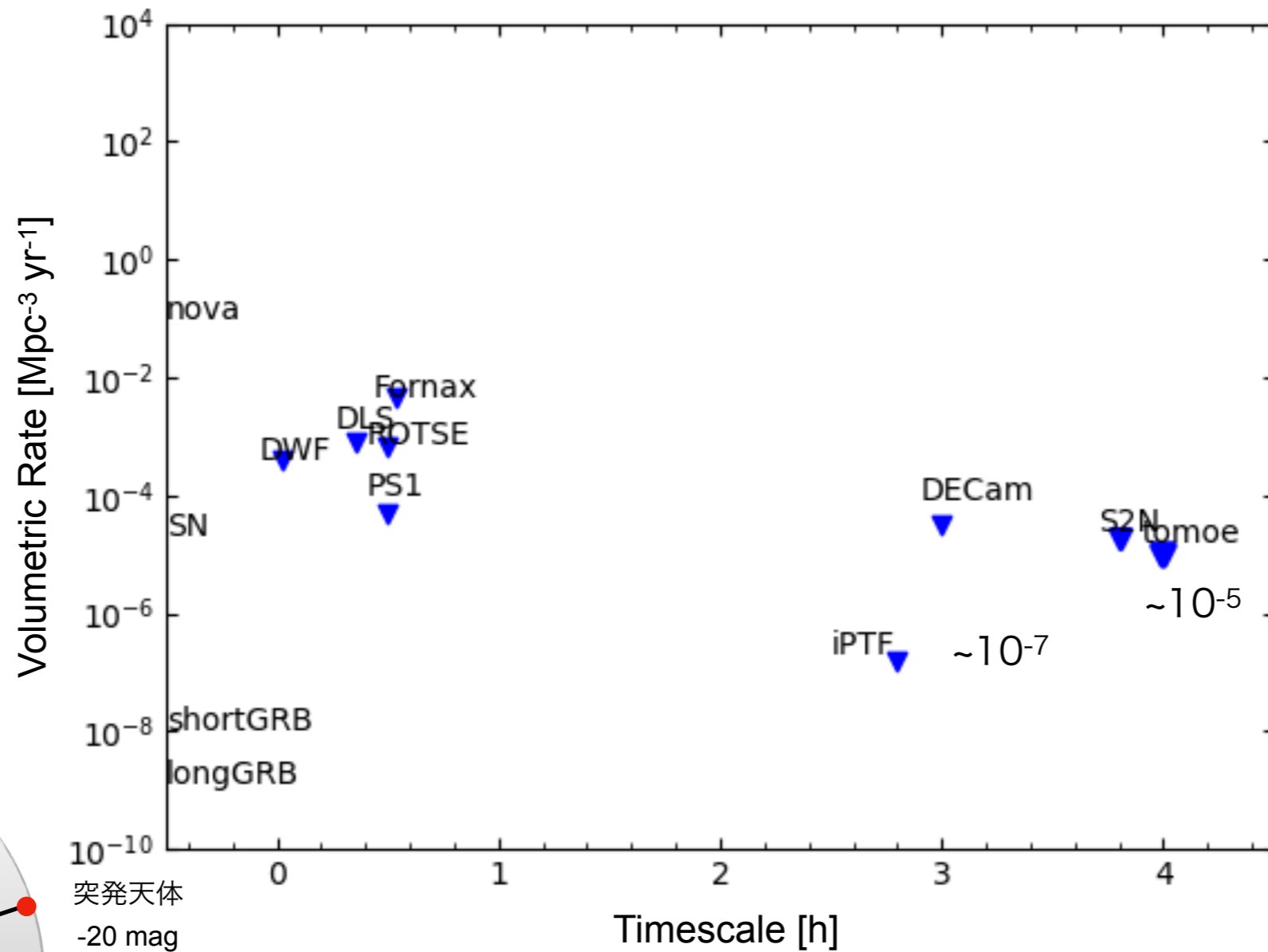


銀河系外FOT発生率のUpper limit

突発天体の絶対等級を仮定し体積率に変換

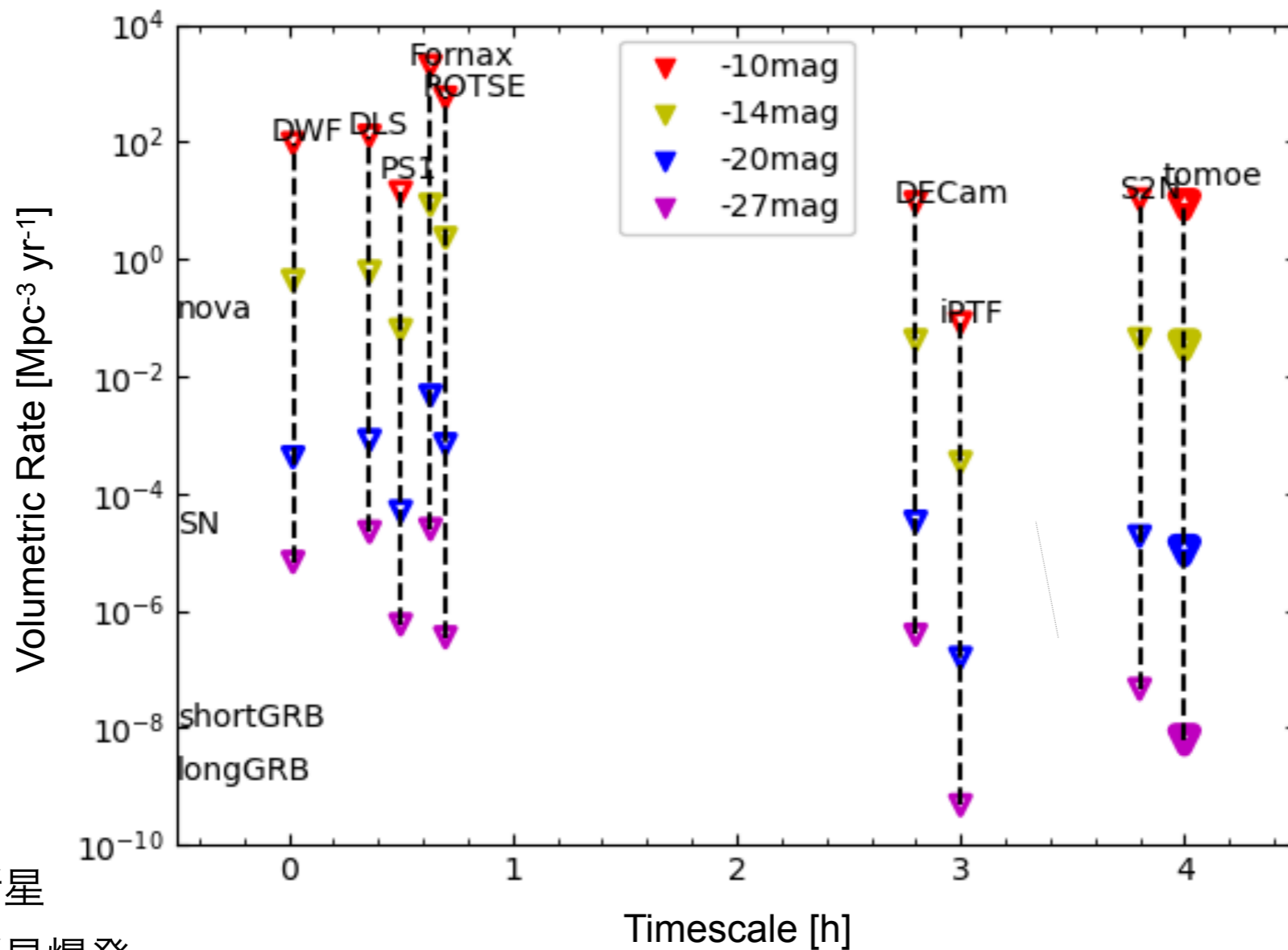
R_{vol} [$\text{Mpc}^{-3} \text{yr}^{-1}$]

(Planck18 $H_0 = 67.7 \text{ km/s/Mpc}$, $\Omega_M = 0.31$)



突発天体
-20 mag

銀河系外FOT発生率のUpper limit



-10mag : 明るい新星

-14mag : 暗い超新星爆発

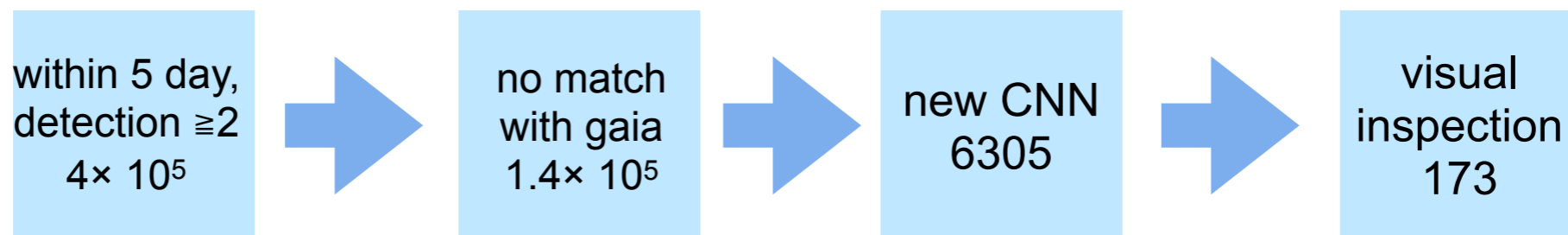
-20mag : ショートガンマ線バースト

-27mag : ロングガンマ線バースト

iPTF(Ho et al.2018) , PS1(Berger et al.2013) , DLS(Becker et al.2004), DWF(Andreoni et al.2020) , Fornax(Rau et al.2008) , DECcam(Cowperthwaite et al.2017) , ROTSE(Rykoff et al.2005) , S2N(Roestel et al.2019), nova,shortGRB(Berger et al.2013) , supernova(Graur et al.2014),longGRB(Wanderman&Piran 2010)

FOT探査の拡張

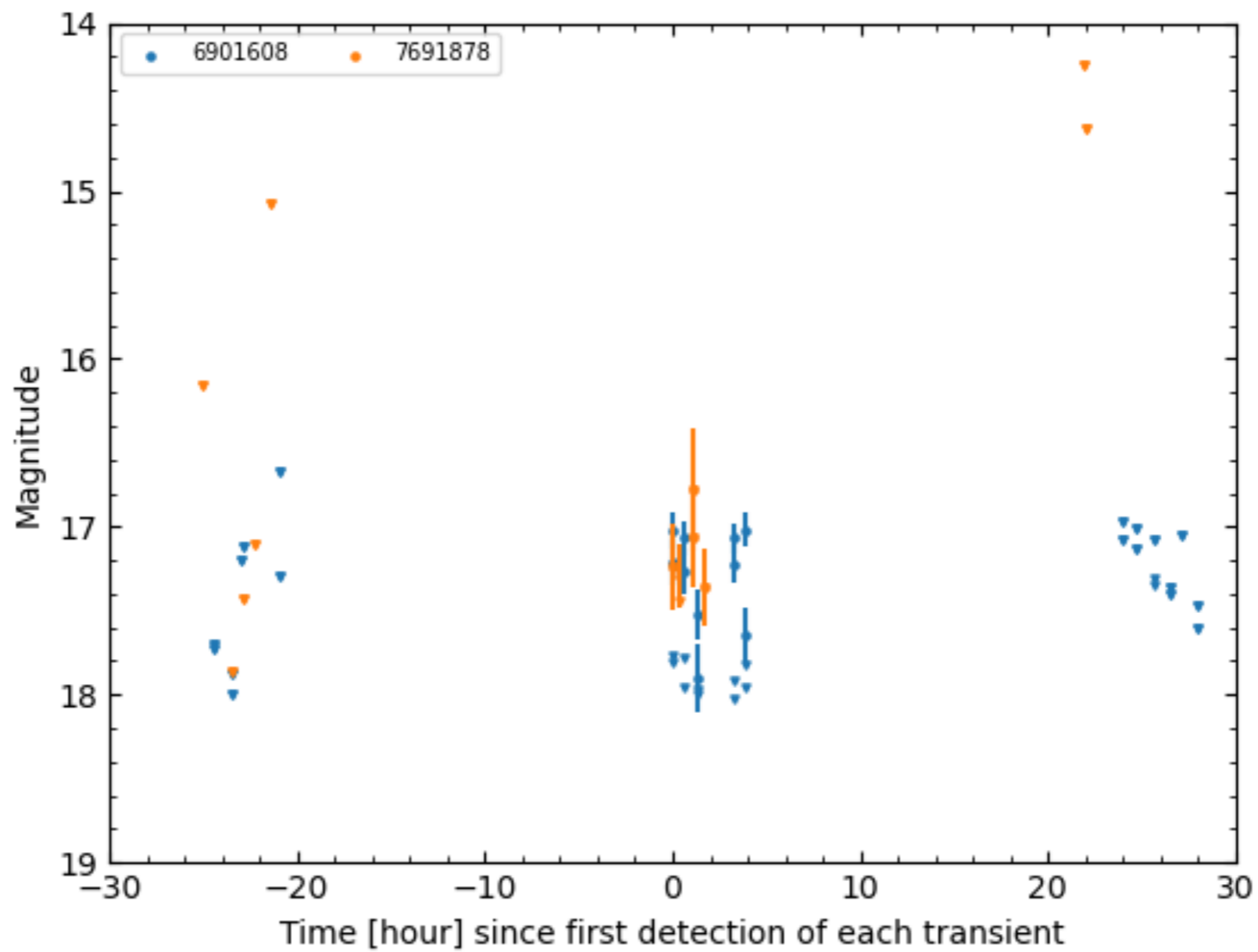
- 2022年5月末まで
期間（最後の検出 - 最初の検出）が5日未満、
2回以上検出 $\sim 4 \times 10^5$
- Gaia EDR3 カタログと照会
固有運動, 年周視差がerrorより大きいもの = 星
星から10"以上離れたもの $\sim 1.4 \times 10^5$
- new CNN Takahashi et al.2022
再度、機械学習で検出と判定 6305
- 目視で確認 173 (SN 61 ,未分類 112)



まとめ

- タイムスケール4時間でFOTを探查
 - ・ 突発天体を8個検出
 - ・ Gaia EDR3 には載らないほど暗い星を対応天体に持つ
 - ・ 銀河系外FOTは非検出
- 銀河系外FOT発生率のUpper limit
 - ・ 限界等級17.8でFOTのレートを $1.1 \times 10^{-4} \text{ deg}^{-2} \text{ day}^{-1}$ に制限
 - ・ -20 mag のFOTに対し体積率を $1.1 \times 10^{-5} \text{ Mpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ に制限
- 現在
数時間スケールから、数日スケールに拡張

検出の前後にデータあり 2天体のみ



銀河系内FOTの性質

フラックス比

