

# **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)**

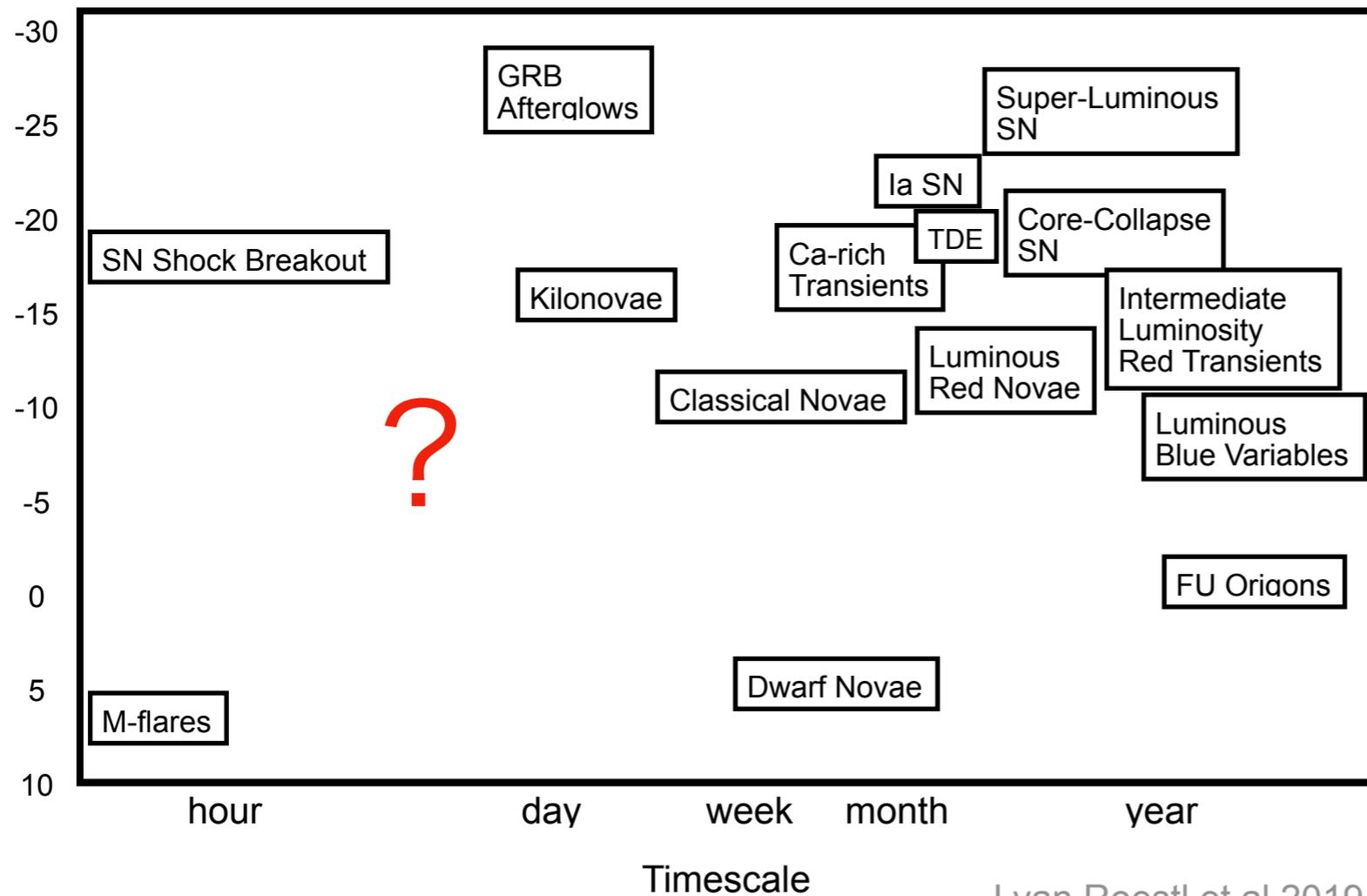
田中雅臣、高橋一郎 (東北大学)、富永望 (国立天文台)、  
諸隈智貴 (千葉工業大学)、Tomo-e Gozenコラボレーション

**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

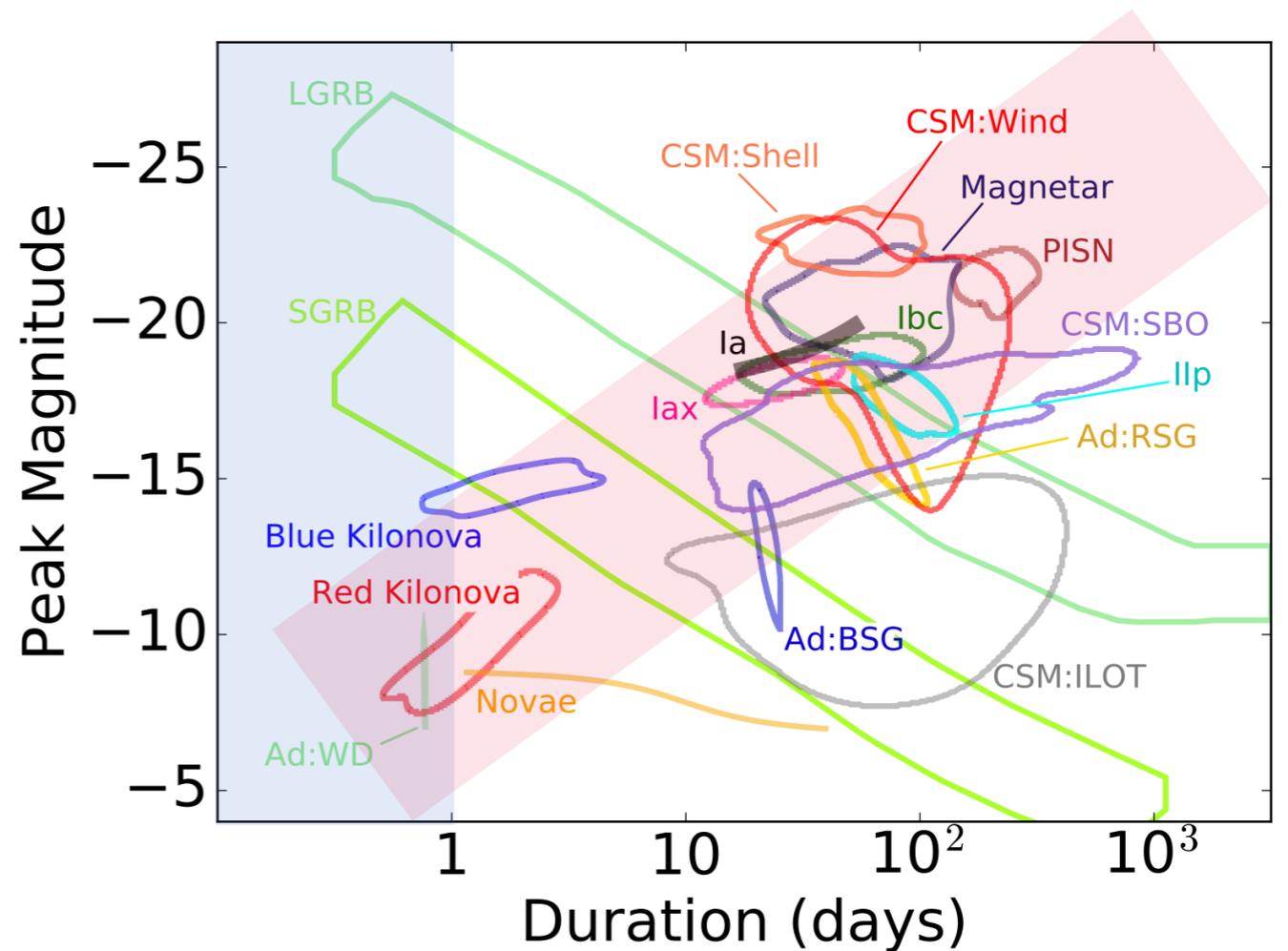
## 理論

- 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

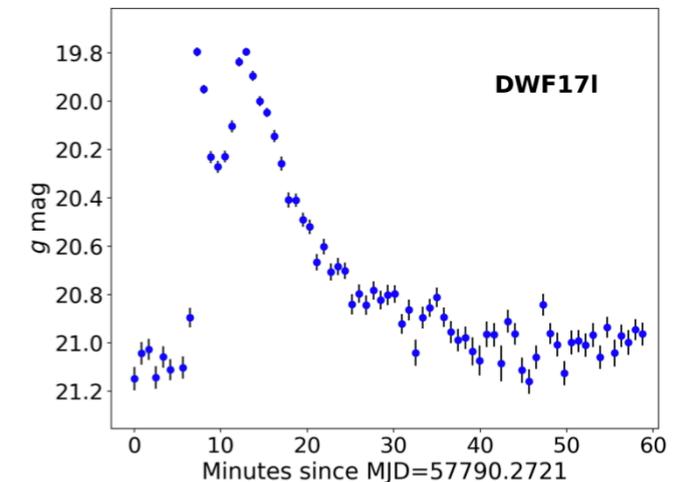
# 先行研究

## 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**

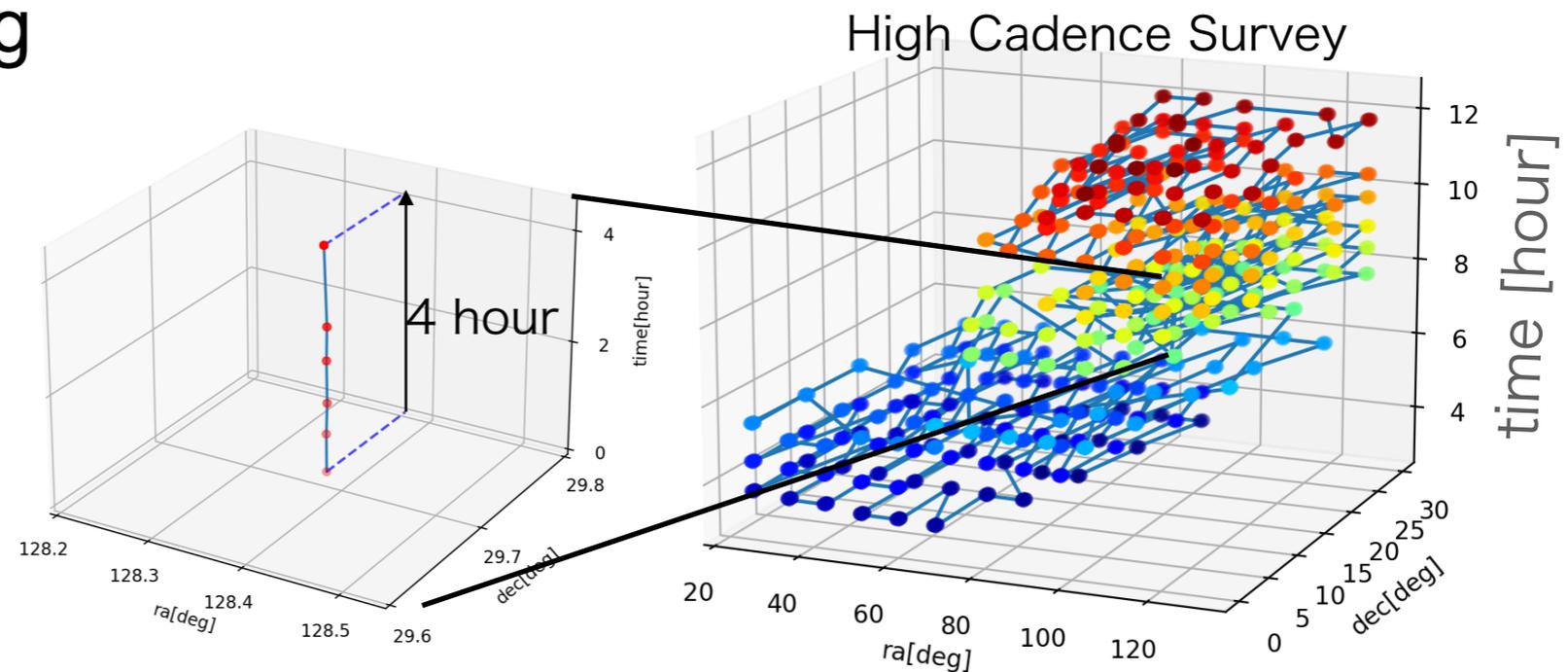
**観測の時間間隔や限界等級、条件に依存 → 制限をつける**

# 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 deg<sup>2</sup> を複数回観測

- 平均限界等級 17.8 mag
- 有効視野 20 deg<sup>2</sup>
- 時間間隔 4 h



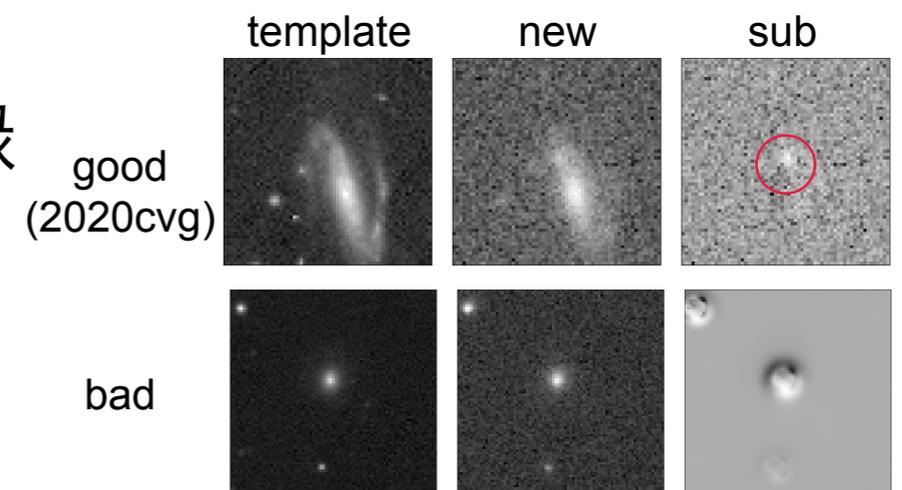
今回の研究では

銀河系外のFOTを探したい

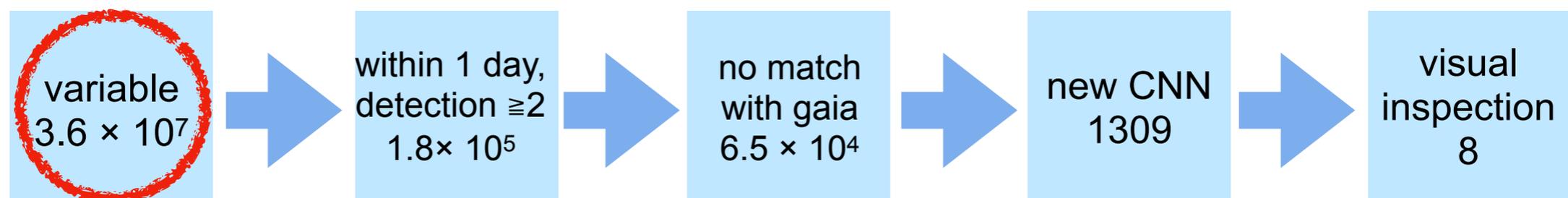
# Selection

## 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 $3.6 \times 10^7$  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

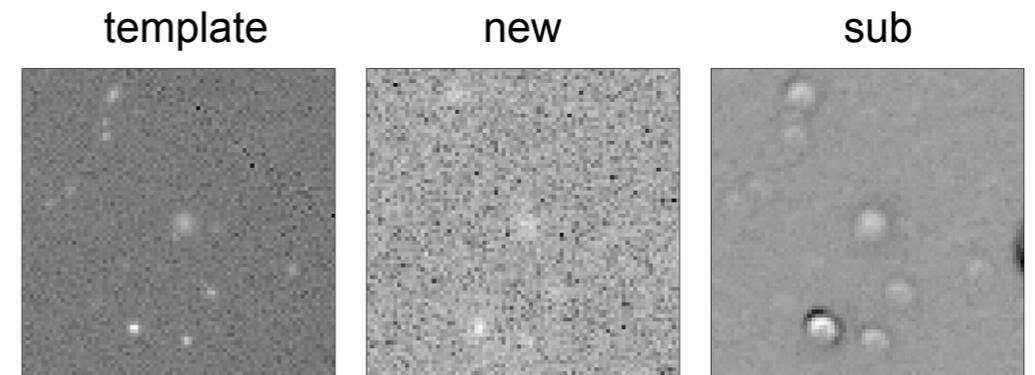


# Selection

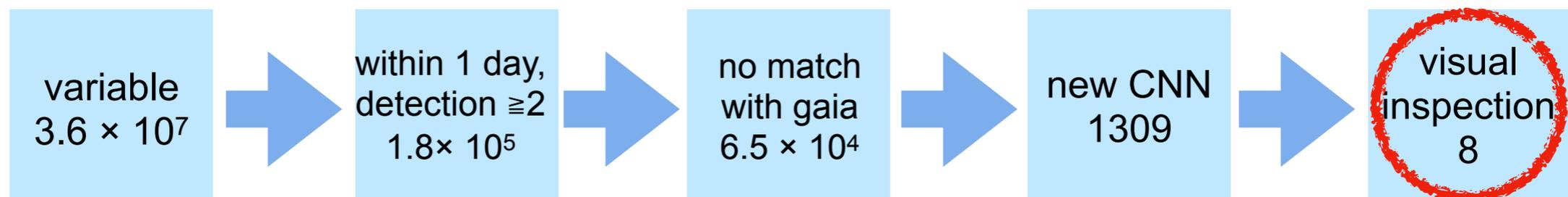
- 目視で確認

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

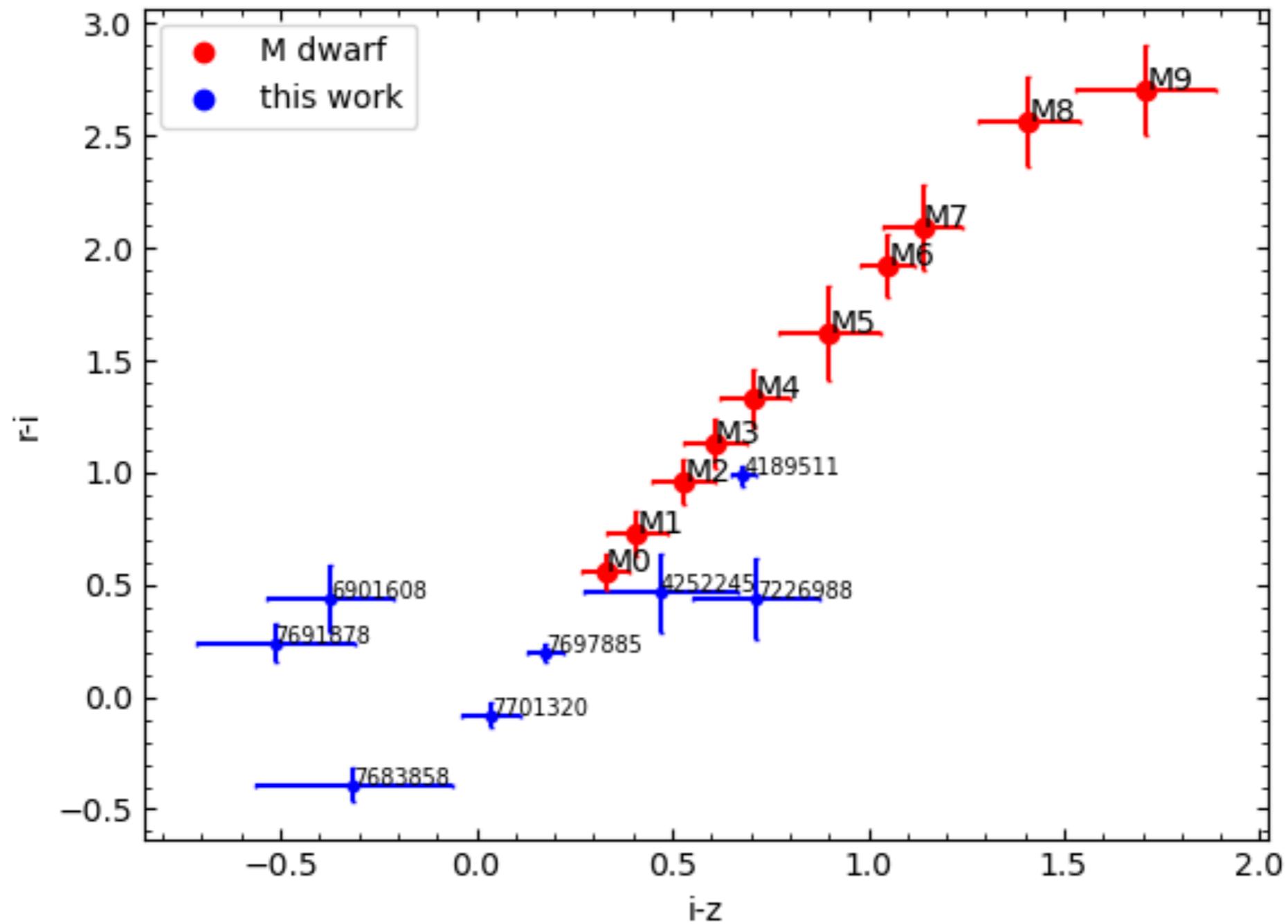
初検出

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？

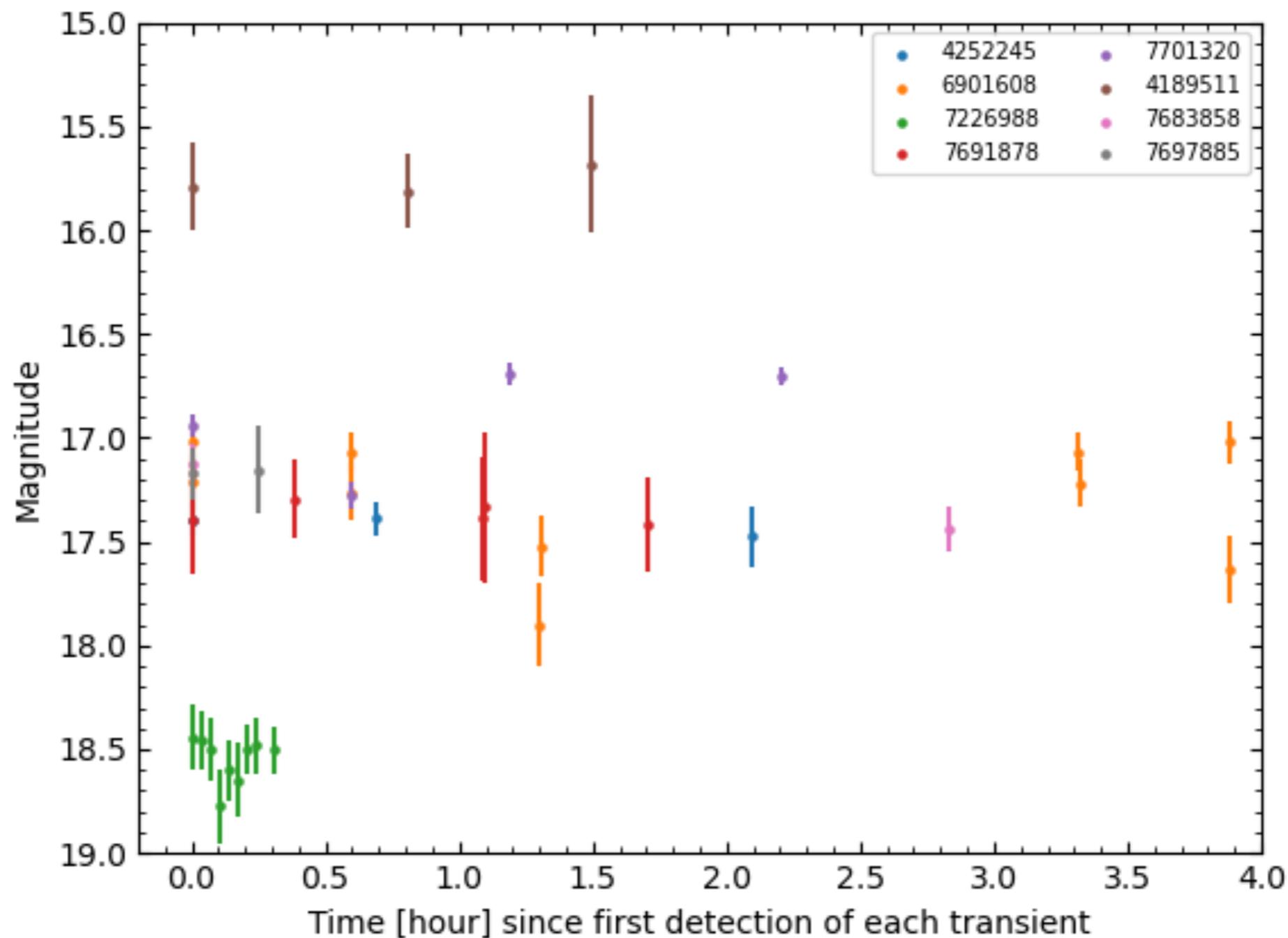
# 銀河系内FOTの性質

## M dwarf との比較



# 銀河系内FOTの性質

## light-curve

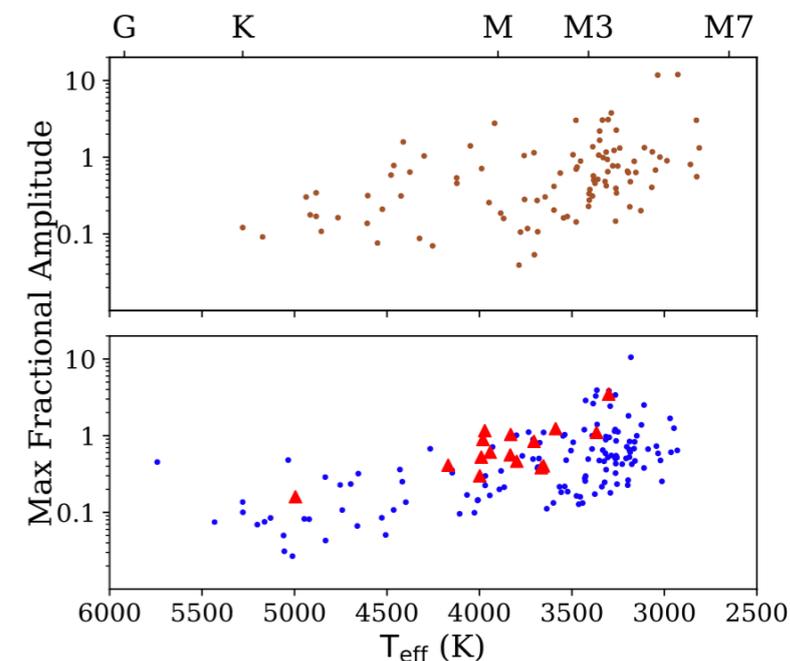
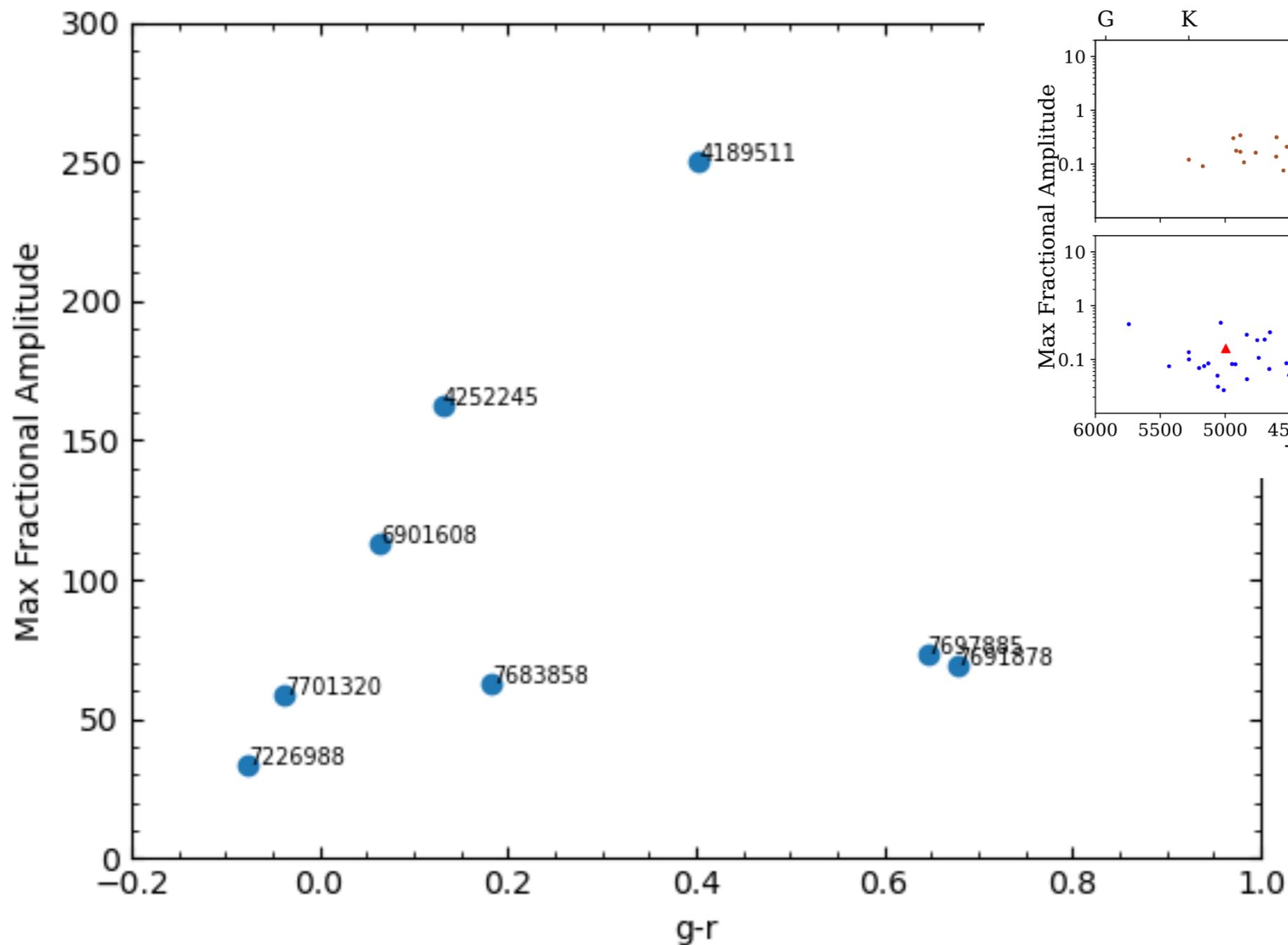


フラット → 数日続いている矮新星?

# 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

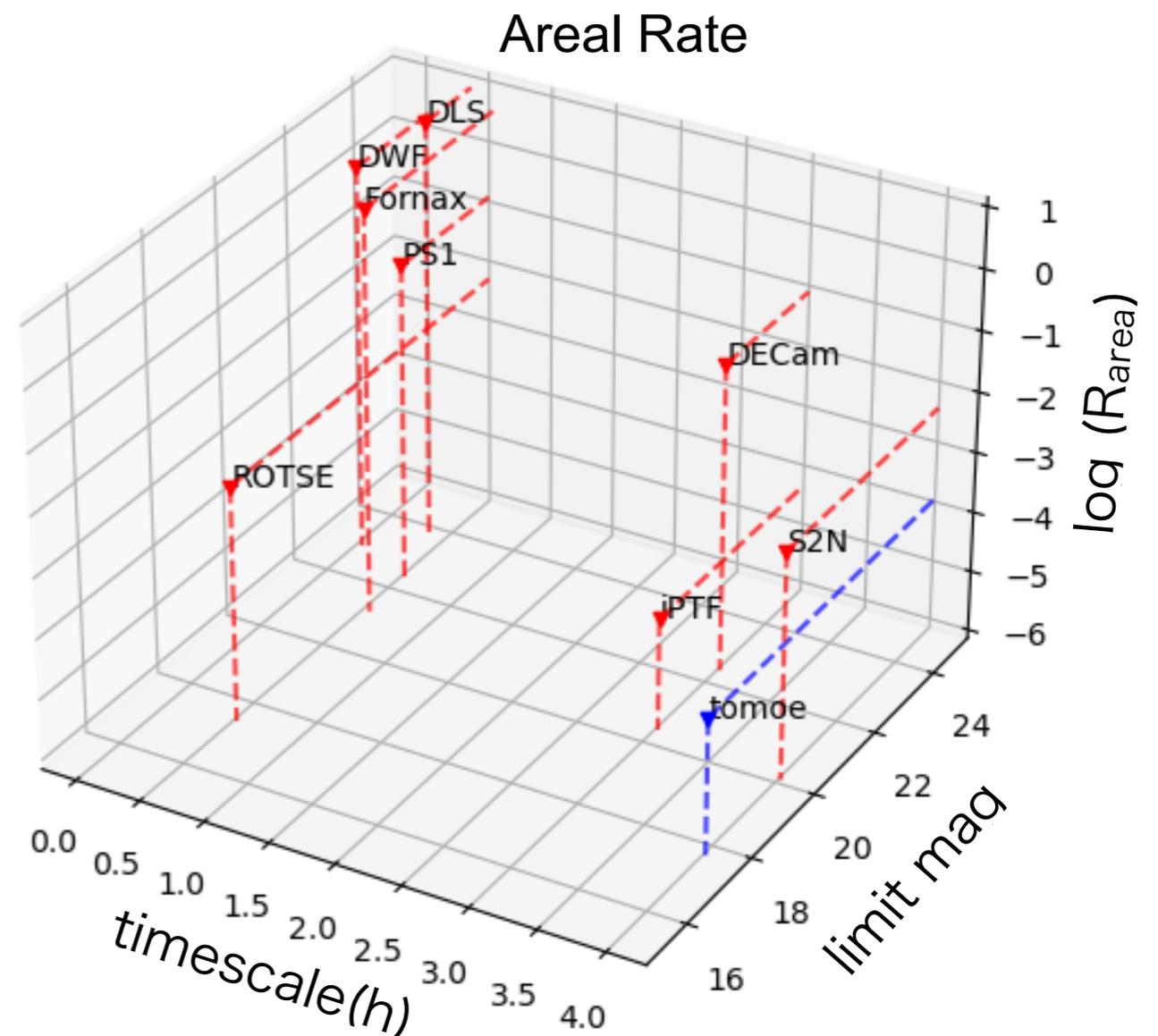
- $E_a$  [deg<sup>2</sup>day] : 観測した面積 (平方度) と時間の積  
 $E_a$  (17.8 mag) ~ 26642 deg<sup>2</sup>day
- $N$  : 検出したFOTの数
- $R_{\text{area}}$  [deg<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>] : 天球面上でどれだけ検出できるか

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

(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

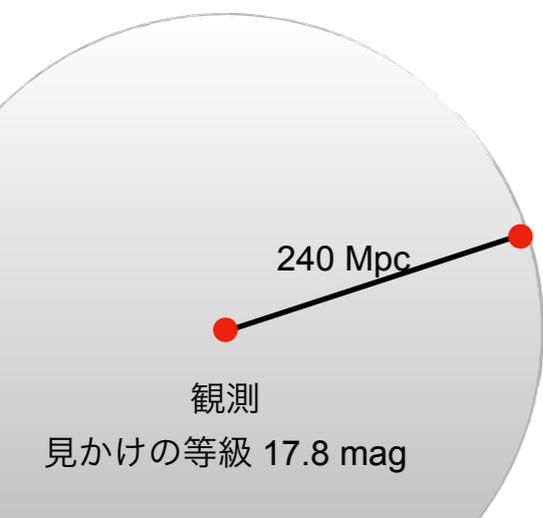
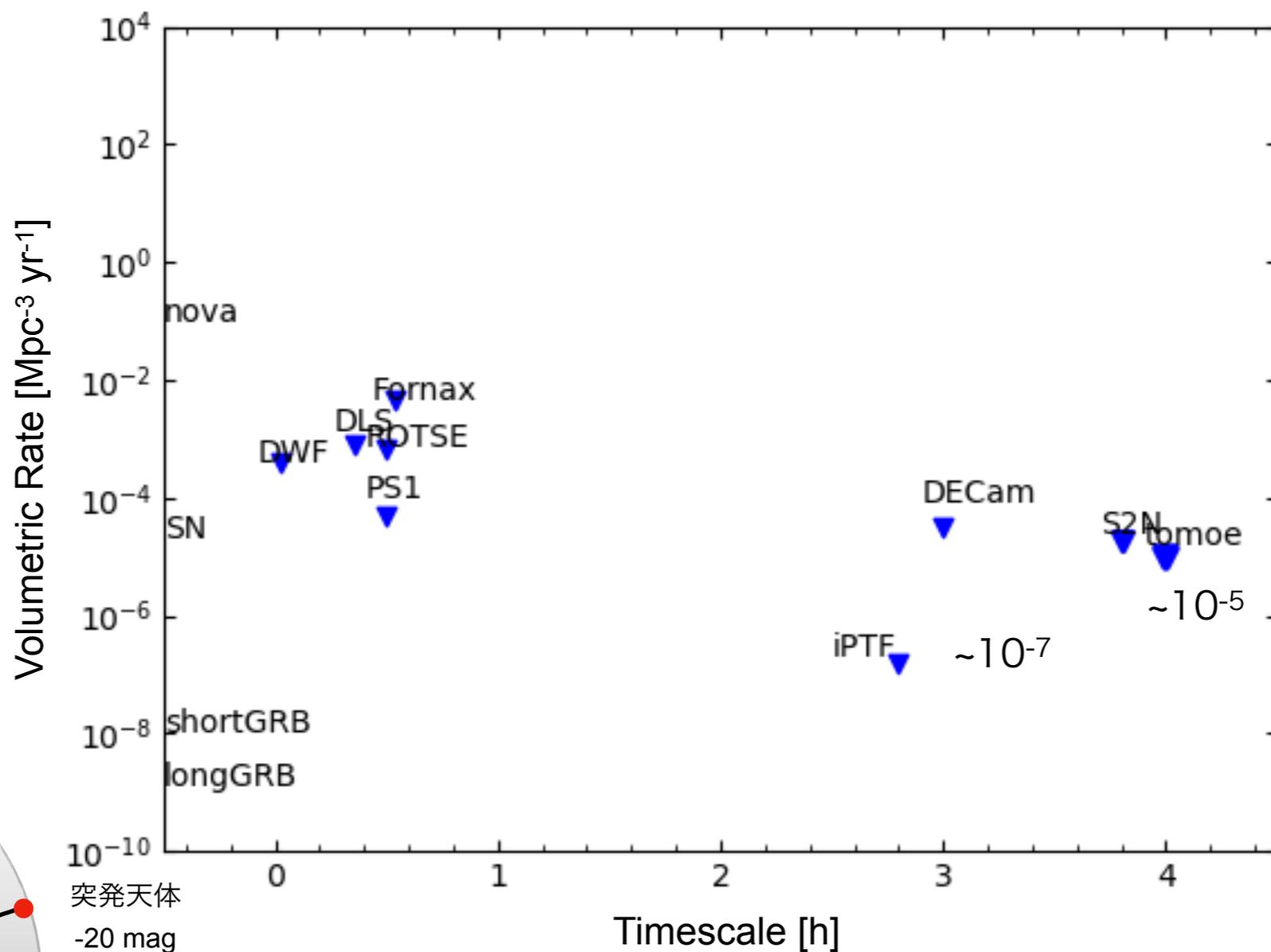


# 銀河系外FOT発生率のUpper limit

突発天体の絶対等級を仮定し体積率に変換

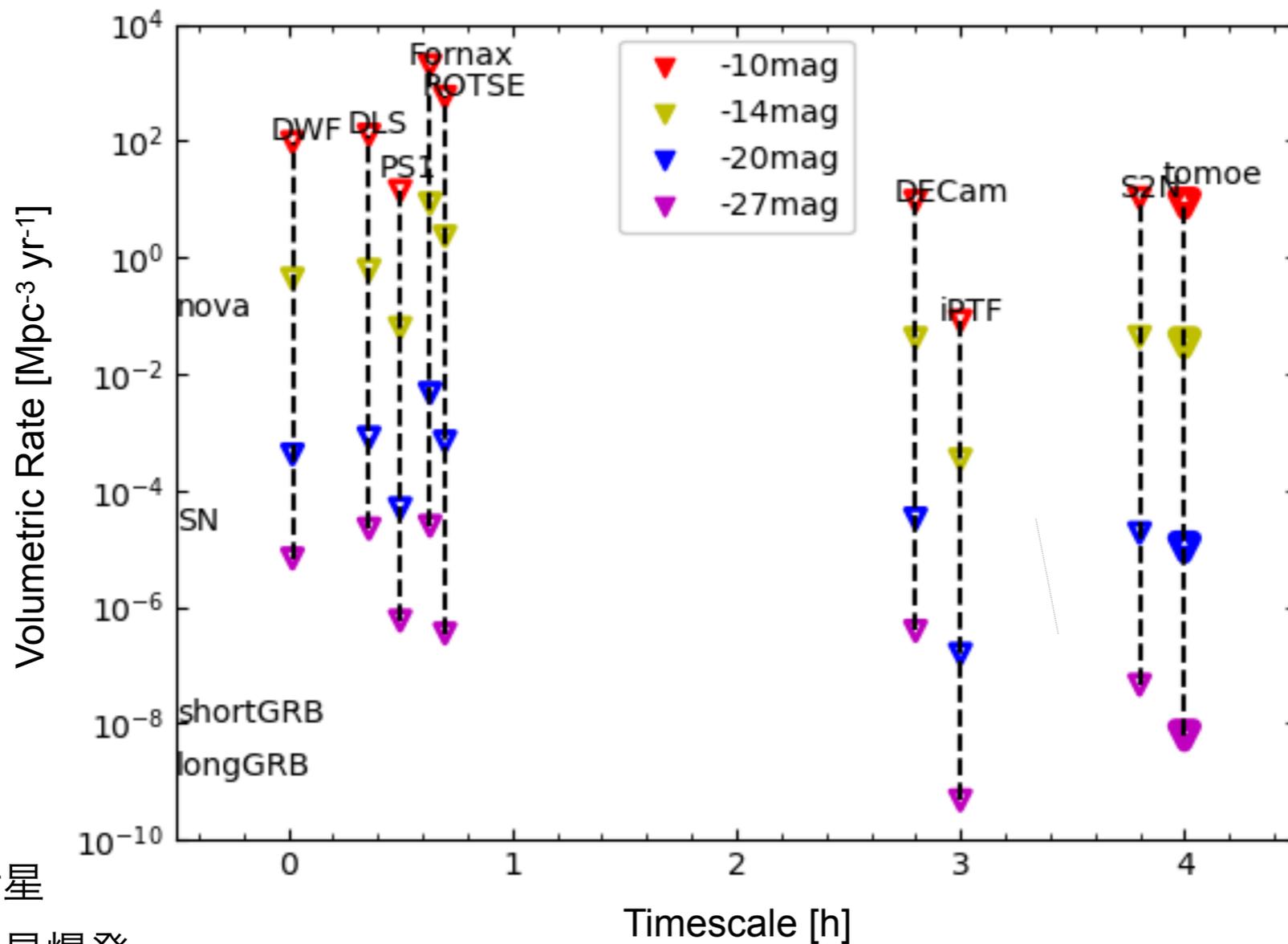
$R_{\text{vol}}$  [ $\text{Mpc}^{-3} \text{yr}^{-1}$ ]

(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

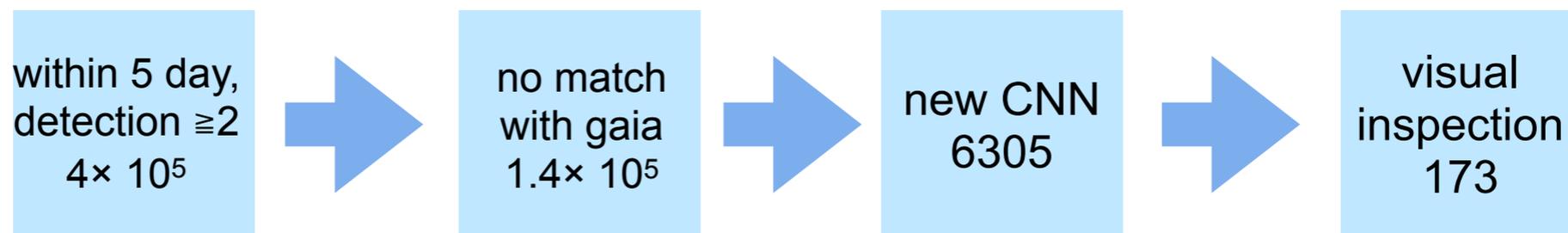
-20mag : ショートガンマ線バースト

-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

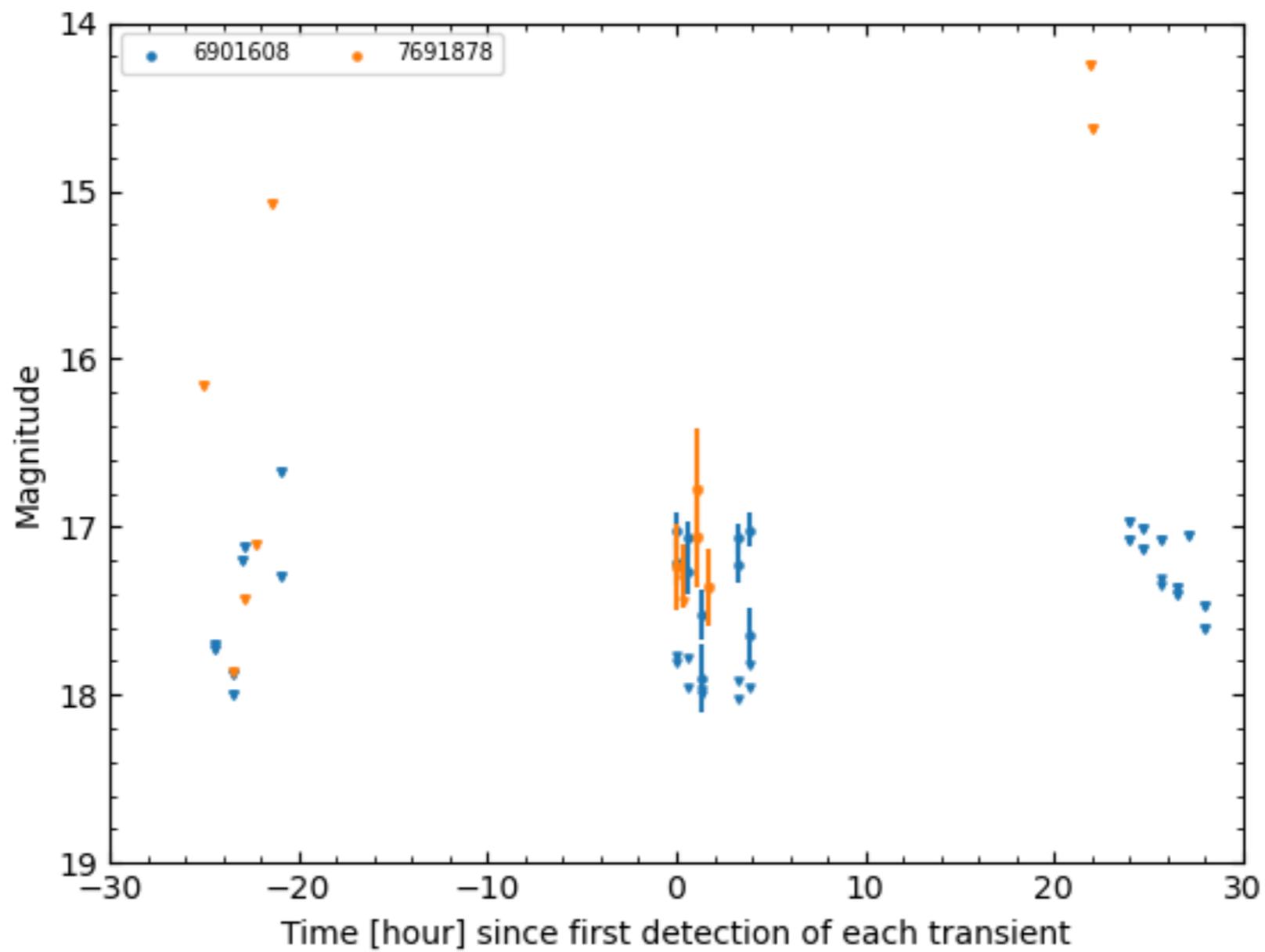
- 2022年5月末まで  
期間（最後の検出 - 最初の検出）が5日未満、  
2回以上検出  $\sim 4 \times 10^5$
- Gaia EDR3 カタログと照会  
固有運動, 年周視差がerrorより大きいもの = 星  
星から10"以上離れたもの  $\sim 1.4 \times 10^5$
- new CNN Takahashi et al.2022  
再度、機械学習で検出と判定 6305
- 目視で確認 173 (SN 61 ,未分類 112)



# 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

