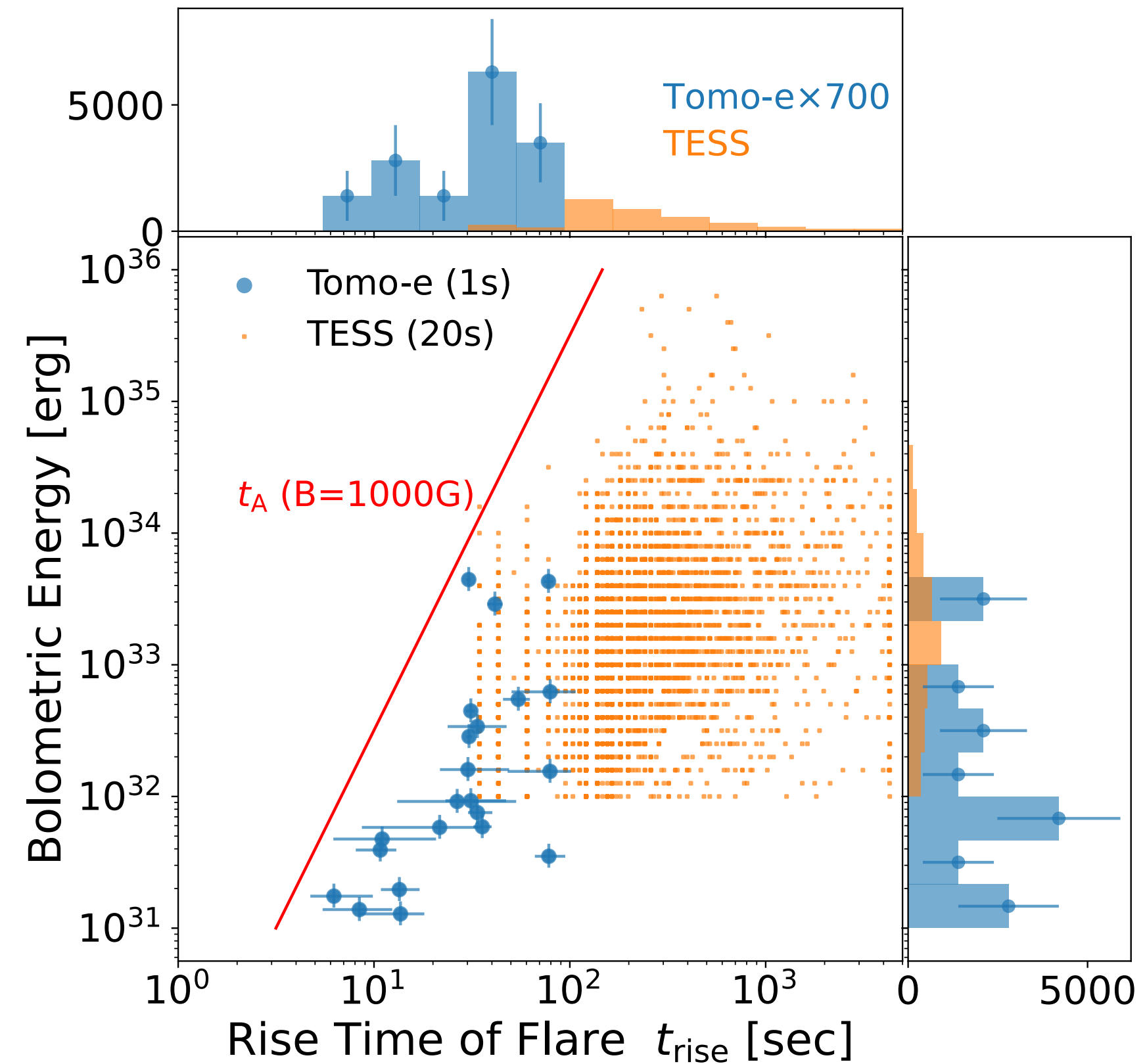
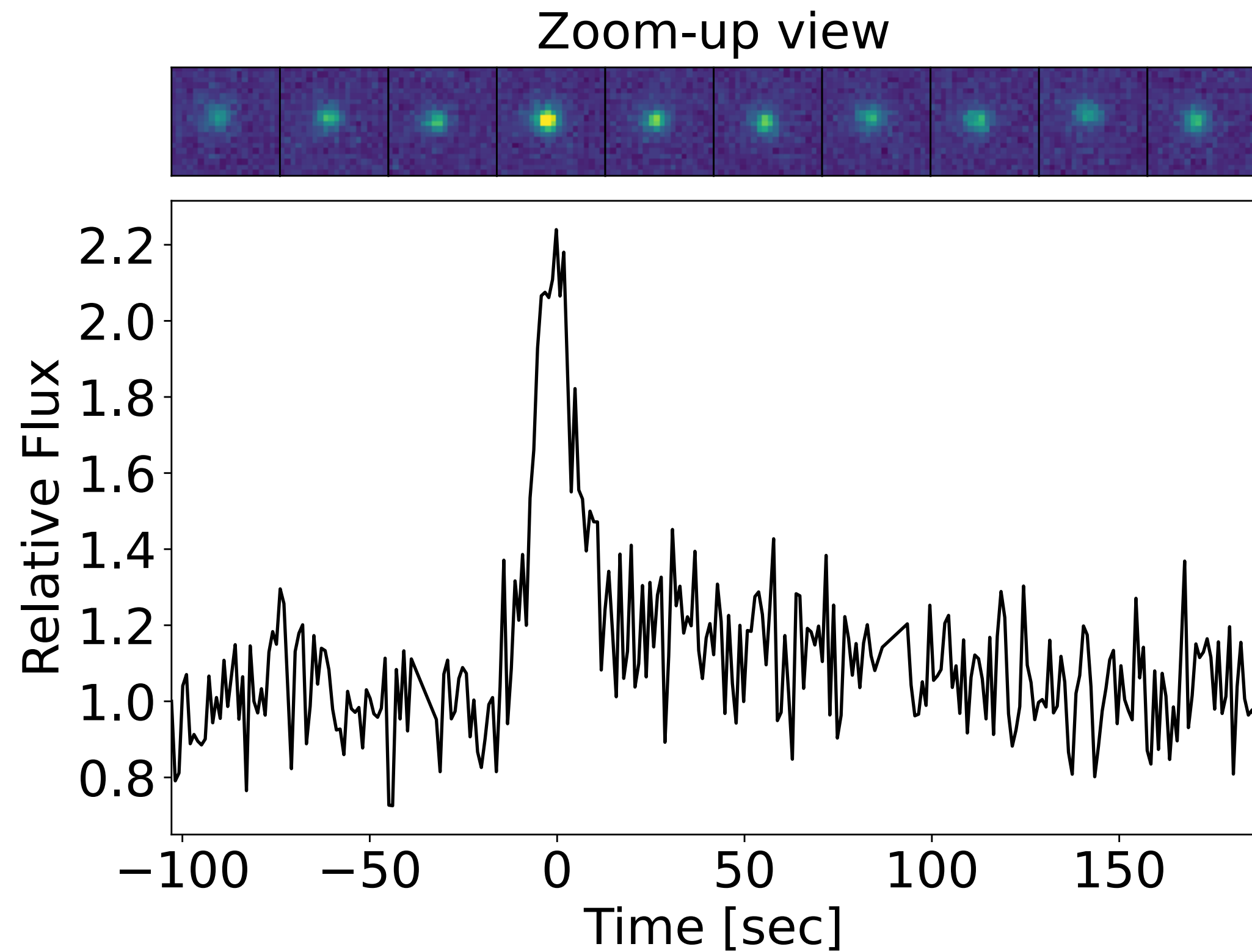


# Tomo-e Gozen による M dwarf からの超高速フレアの探索



逢澤正嵩 (PD, 上海交通大/李政道研究所), 川名好史郎, 檜山和己, 大澤亮, 河原創, 田尻智之,  
直川史寛, 有馬宣明, Hanchun Jiang, Tilman Hartwig, 藤澤幸太郎, 茂山俊和,  
酒向重行, & Tomo-e Gozen collaboration

**Aizawa+2022, accepted for PASJ (<https://arxiv.org/abs/2206.12847>)**

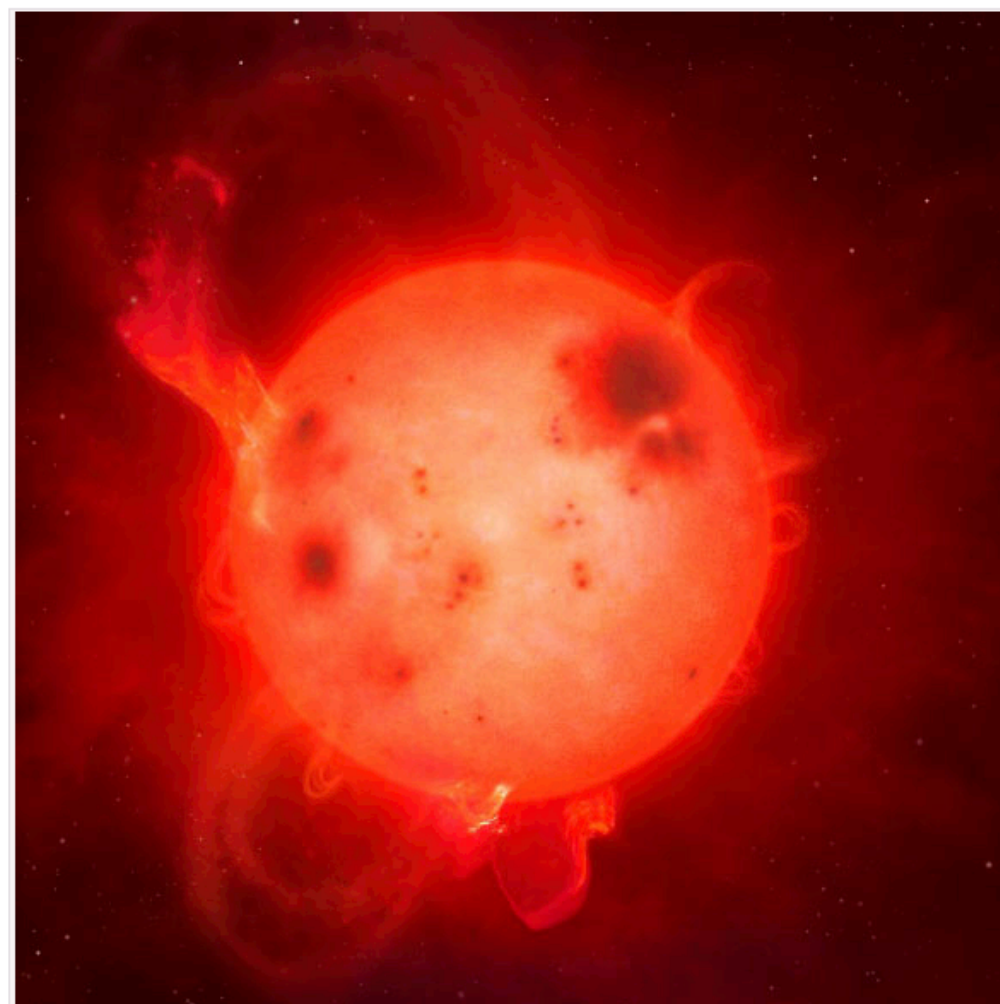


# HeSO (The Hertz Stellar Object Survey)

- 東大の物理、地惑あたりの研究者を中心に結成されたグループ
  - 主に”星”の秒スケールの光度変動をTomo-eで探る
  - Gaiaのカタログにある星を測光するパイプラインを構築

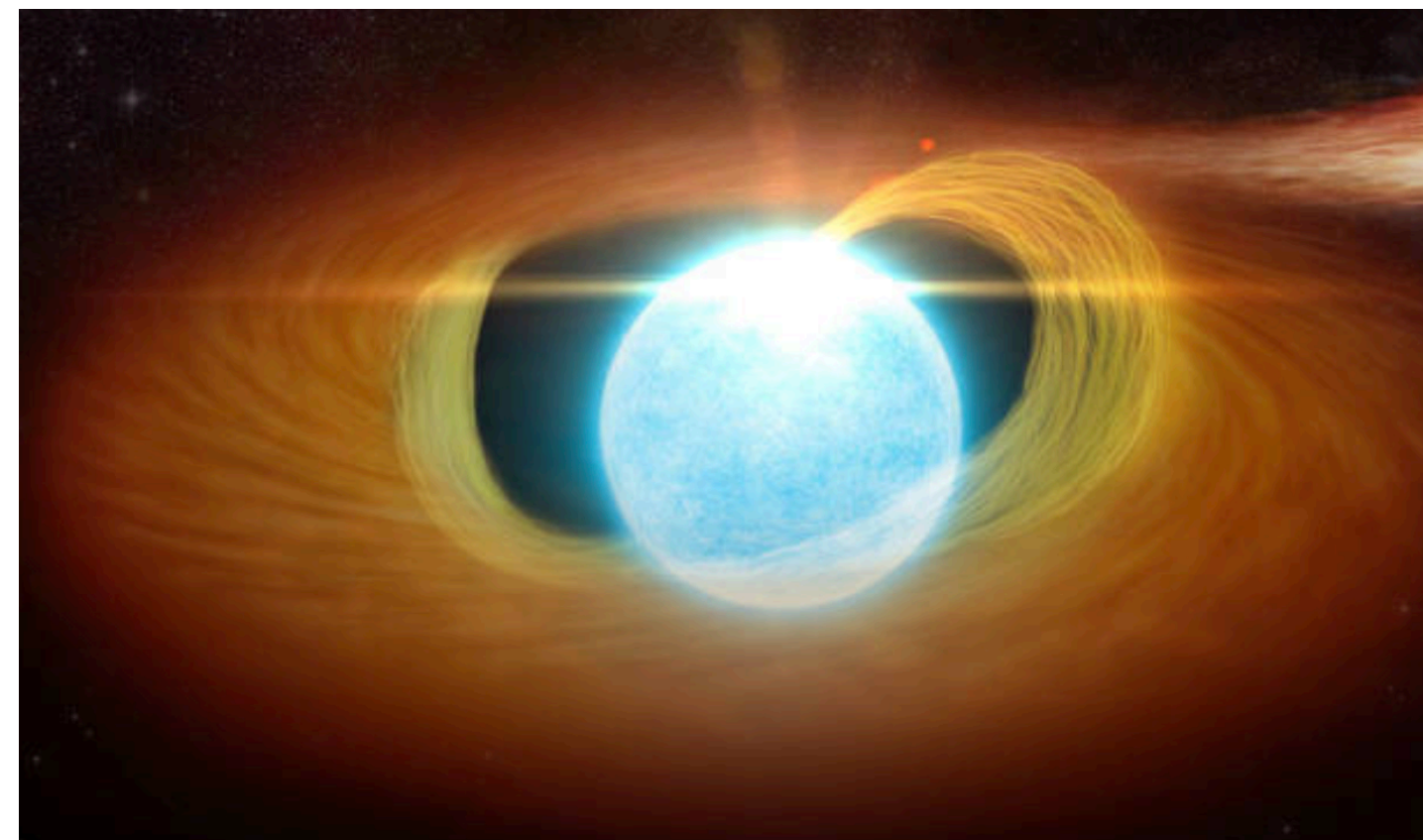
- 現在は、狙い目として以下二種類に絞り解析をしている

## M型矮星 (このトーク)



ESO

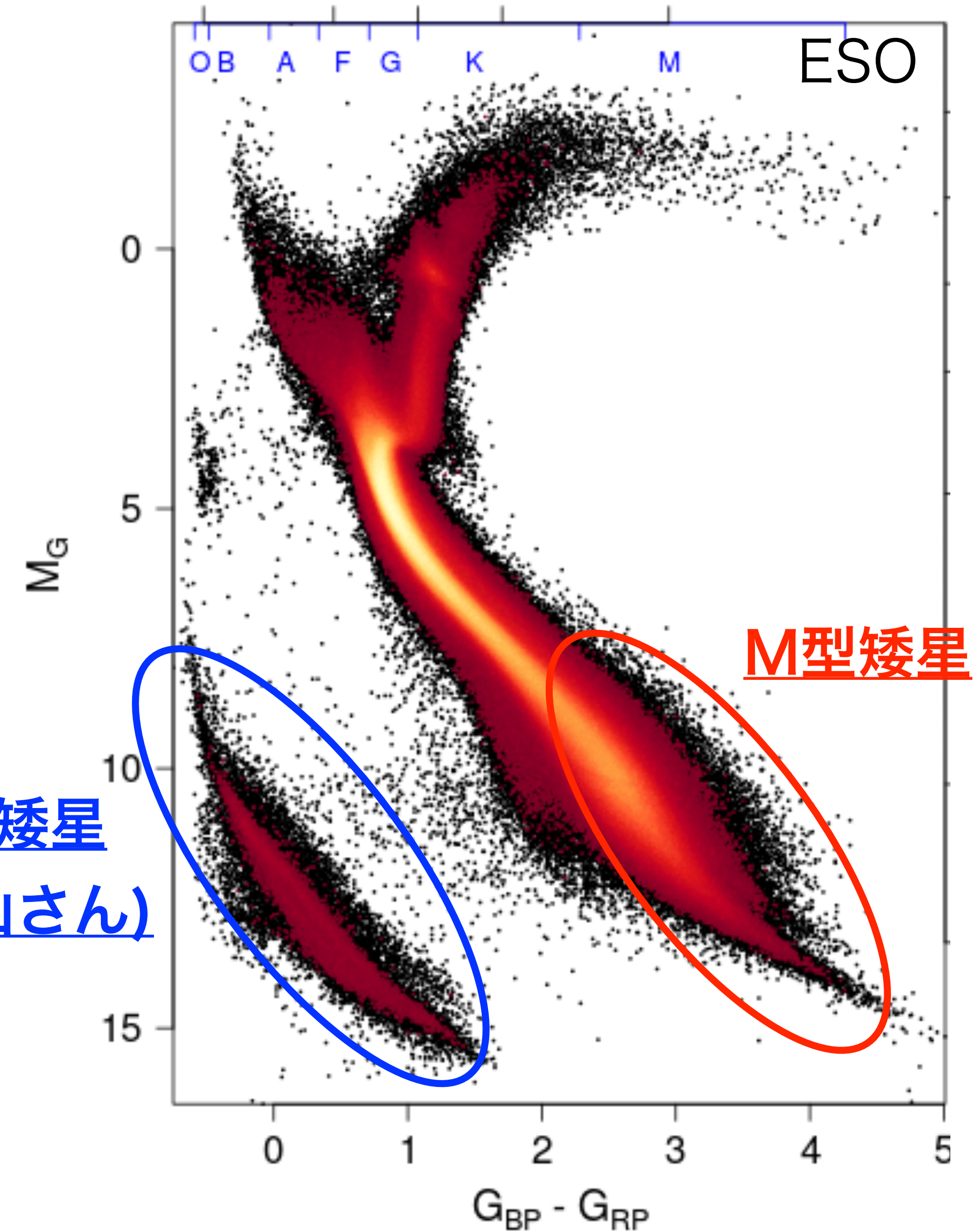
白色矮星 (榎山さん)



NASA

白色矮星  
(榎山さん)

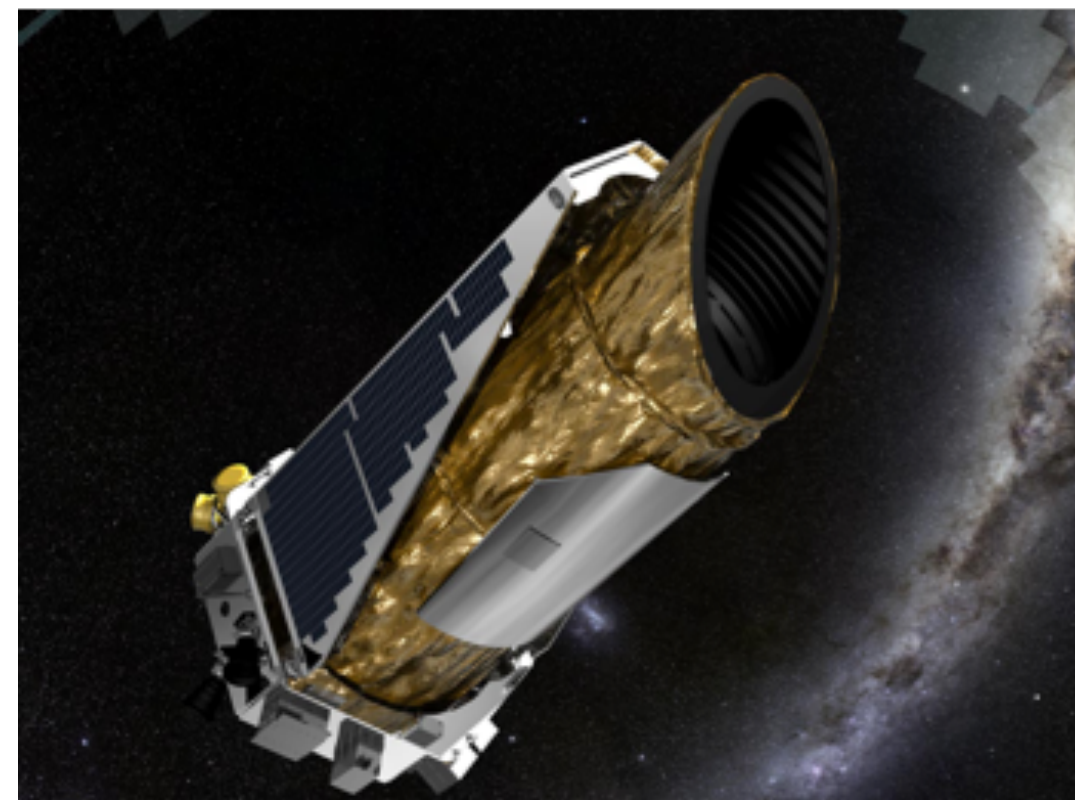
M型矮星



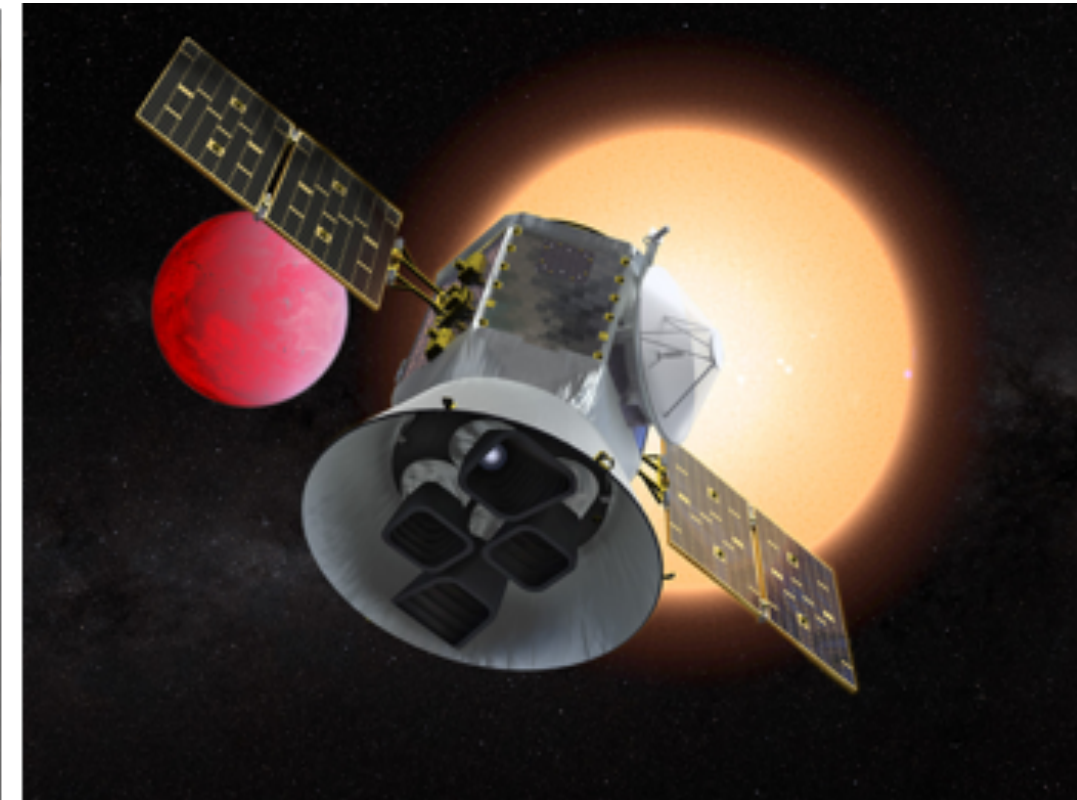


# 恒星フレアとは？

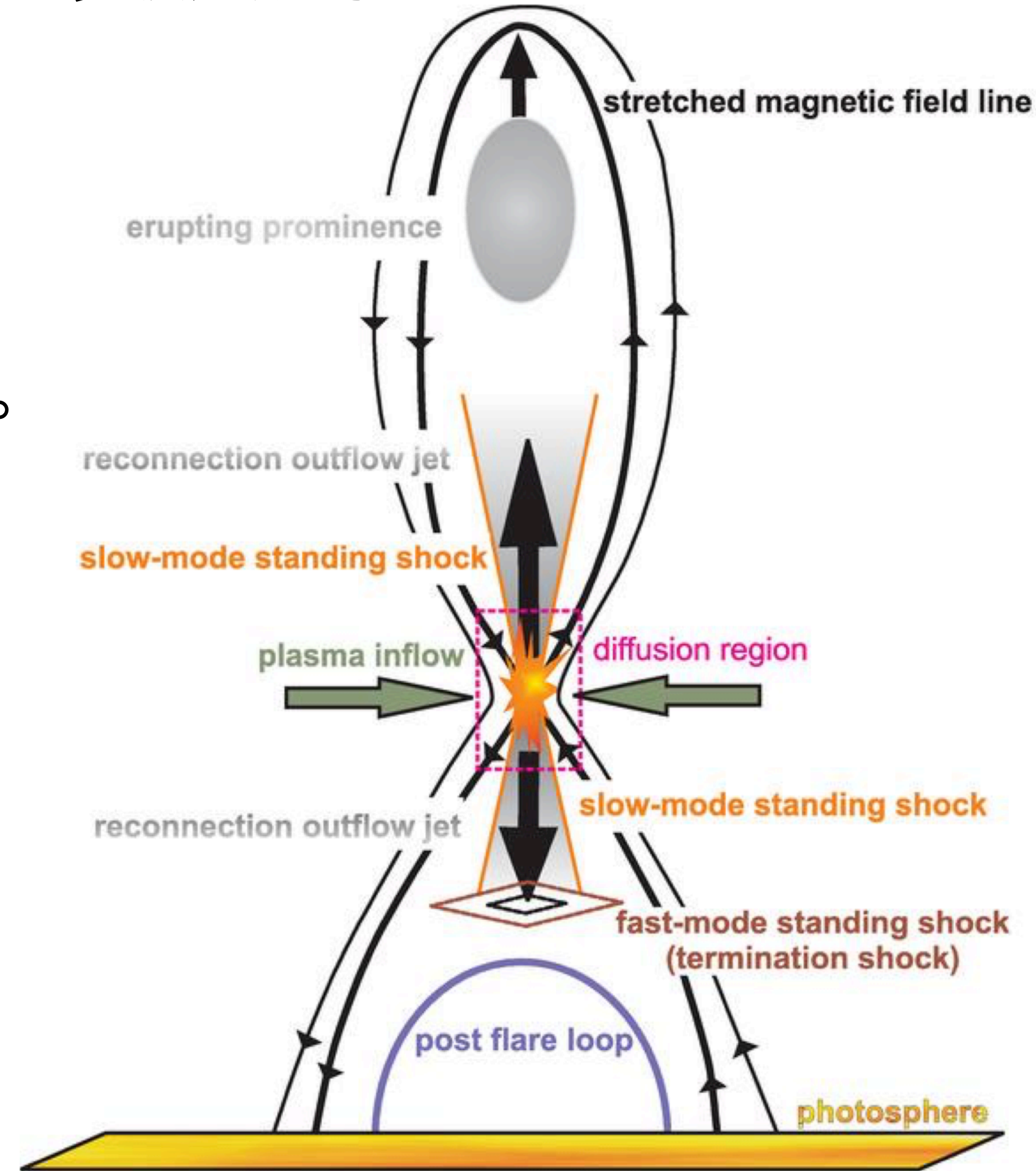
- ✓ 磁気リコネクションによるエネルギー解放を起点とした突発的な多波長放射
- ✓ タイムスケールは典型的に数秒から数時間
- ✓ Kepler, TESSをはじめとする数十秒-数十分の時間分解能の長時間の広視野測光観測で大量の恒星フレアが検出されている。



Kepler



TESS NASA



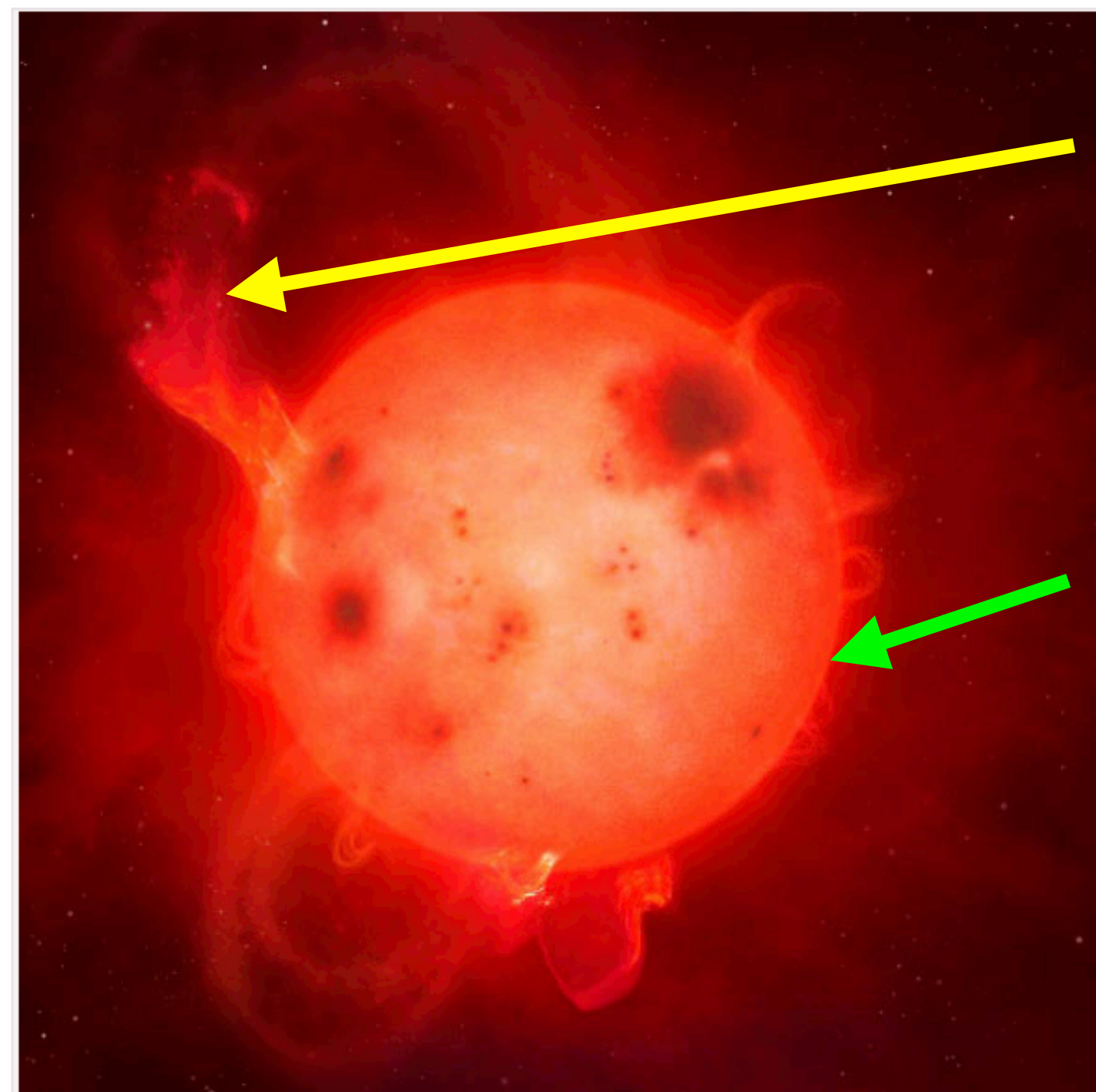
Mann+2009

- 強力な磁場下では超高速なフレアが起きうる？



# M型矮星と活動性、フレアの見えやすさ

- 1) 一般に温度が低い恒星の方が対流層が発達しやすく、磁場形成、フレア生成に有利
- 2) M型矮星の温度自体が低いため、高温のフレア成分による増光率が高い



ESO

フレア:

>10000Kの熱放射 + 紫外、電波、X線

恒星:

3000-4000Kの熱放射

- M型矮星は恒星フレア、活動性を覗き見る上で貴重な実験場である



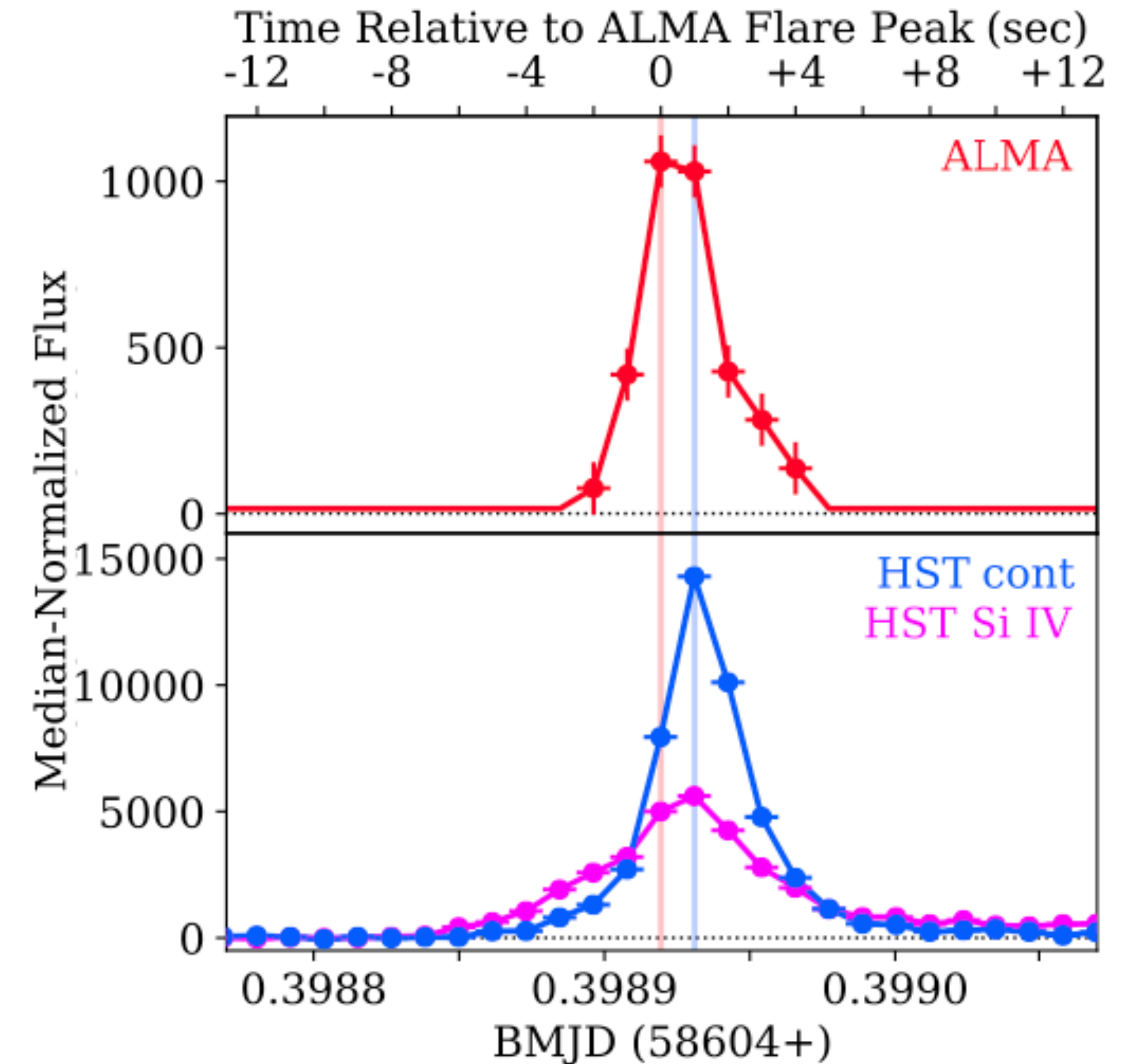
# Proxima Centauri (M型矮星)からの超高速なフレア

✓ 同天体のHST, ALMA, TESSによる40時間の同時観測が行われた (MacGregor+2021)

✓ **FUVで~10000倍の増光が数秒続くイベントを発見**

- 電波でも1000倍程度の増光

- TESSでは1点(2分積分)で0.9%の増光



(MacGregor+2021)

-> 高速な測光モニタ観測で、対応する可視増光を発見できないか?



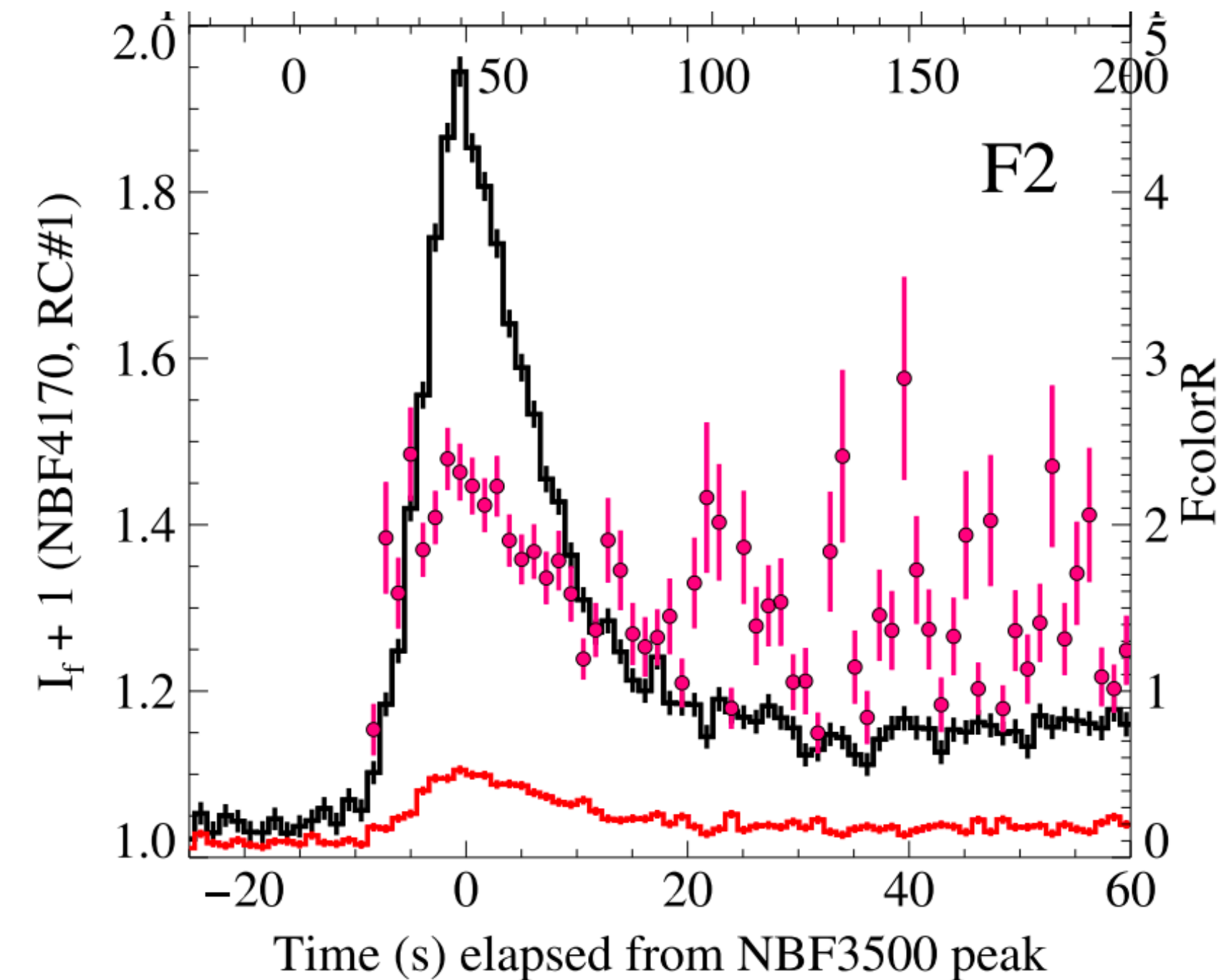
# ULTRACAMによる超高速フレアの探索

## ✓ ULTRACAMとは?

- 1秒積分、三色 (3500, 4170, 6010 Å) で同時測光観測できる装置 (Dhillon+2007)
- 主にターゲット観測

## ✓ ULTRACAMによる超高速フレア観測 (Kowalski+2016)

- 5つのActive M dwarfsを延べ40時間観測
  - 20個のS/Nが高い恒星フレアを報告  
(ほぼYZ CMiとProx Cenからのフレア)

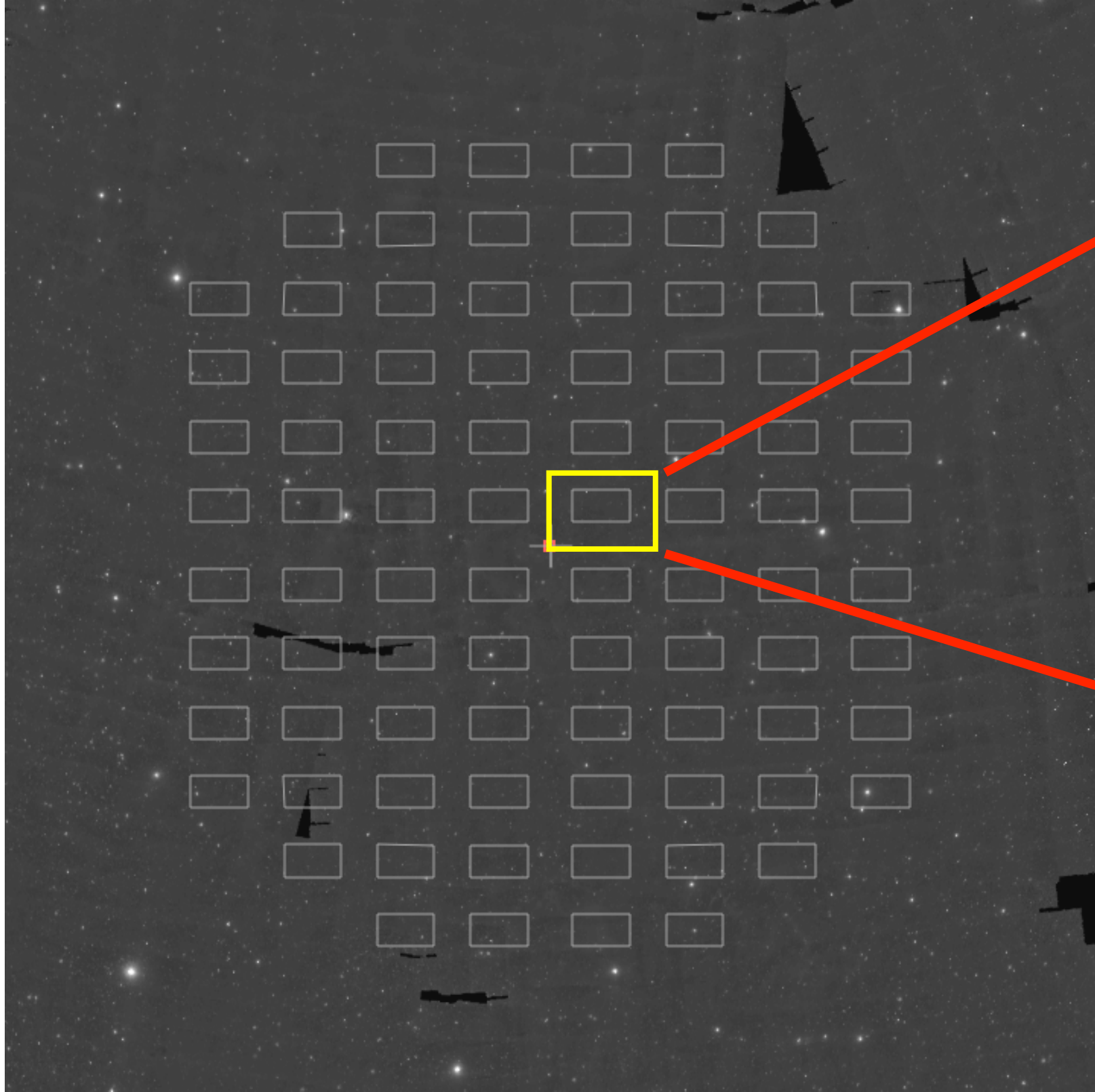


- 超高速フレアはどれくらい強力になれて、またどれくらい発生するのか?

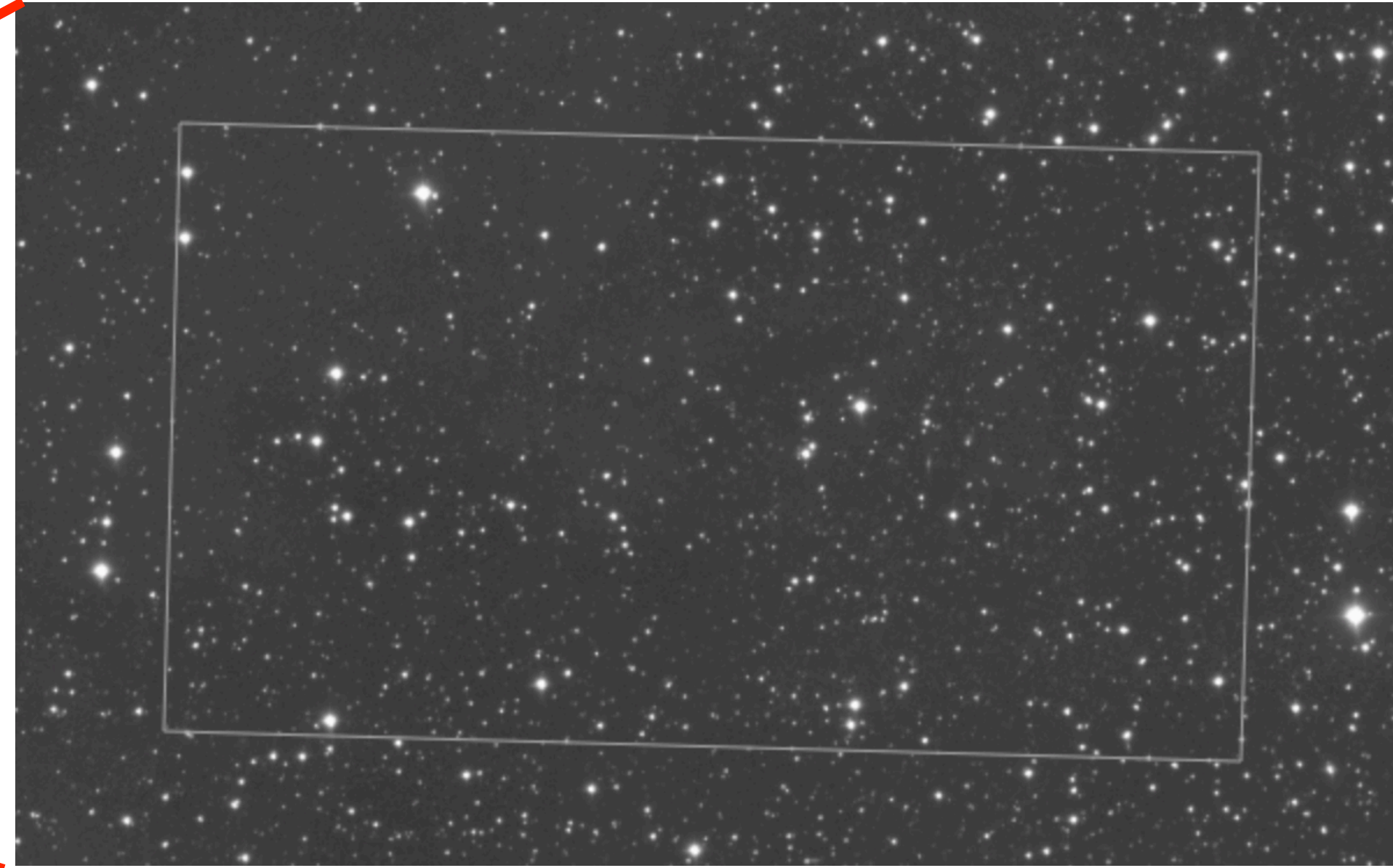


# Tomo-e Gozenによる超高速フレアの探索

全視野



1つのセンサー(0.25deg<sup>2</sup>)



一度に大量の星をモニター可能

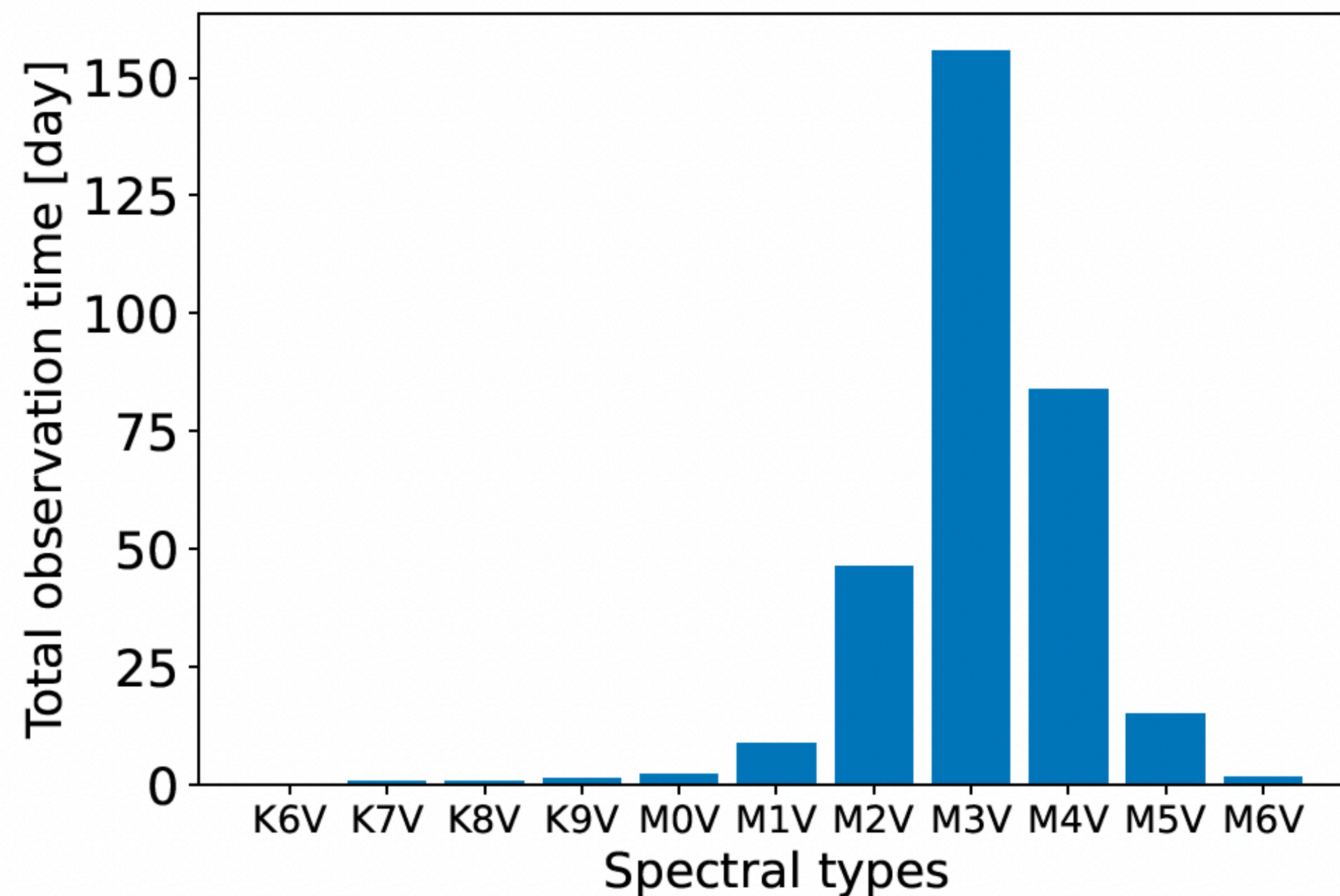
-> “秒”でフレアを効率よく発見できるユニークな装置

(Tomo-e Gozen Field Checkerより)



# Tomo-e GozenによるM dwarfからのフレア探索

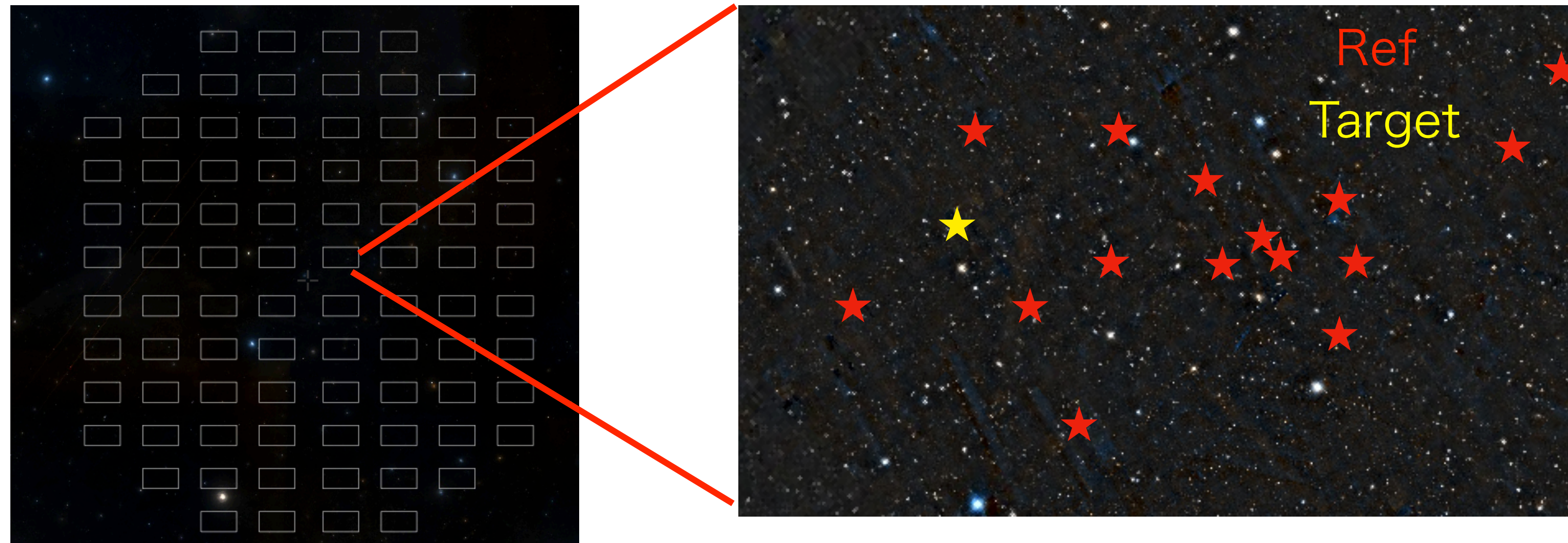
- 本研究では、M dwarfをターゲットにTomo-e Gozenを用いてフレアを探索した。
  - 2019-2020年に取得した合計40時間分のデータ (100TB) を解析
  - ターゲットとしては、Gmagで17等より明るいM dwarf
    - Tomo-e視野内に100-300個ほど入り、M dwarfを延べ1年程度観測したことに相当





# Tomo-e Gozen データの解析

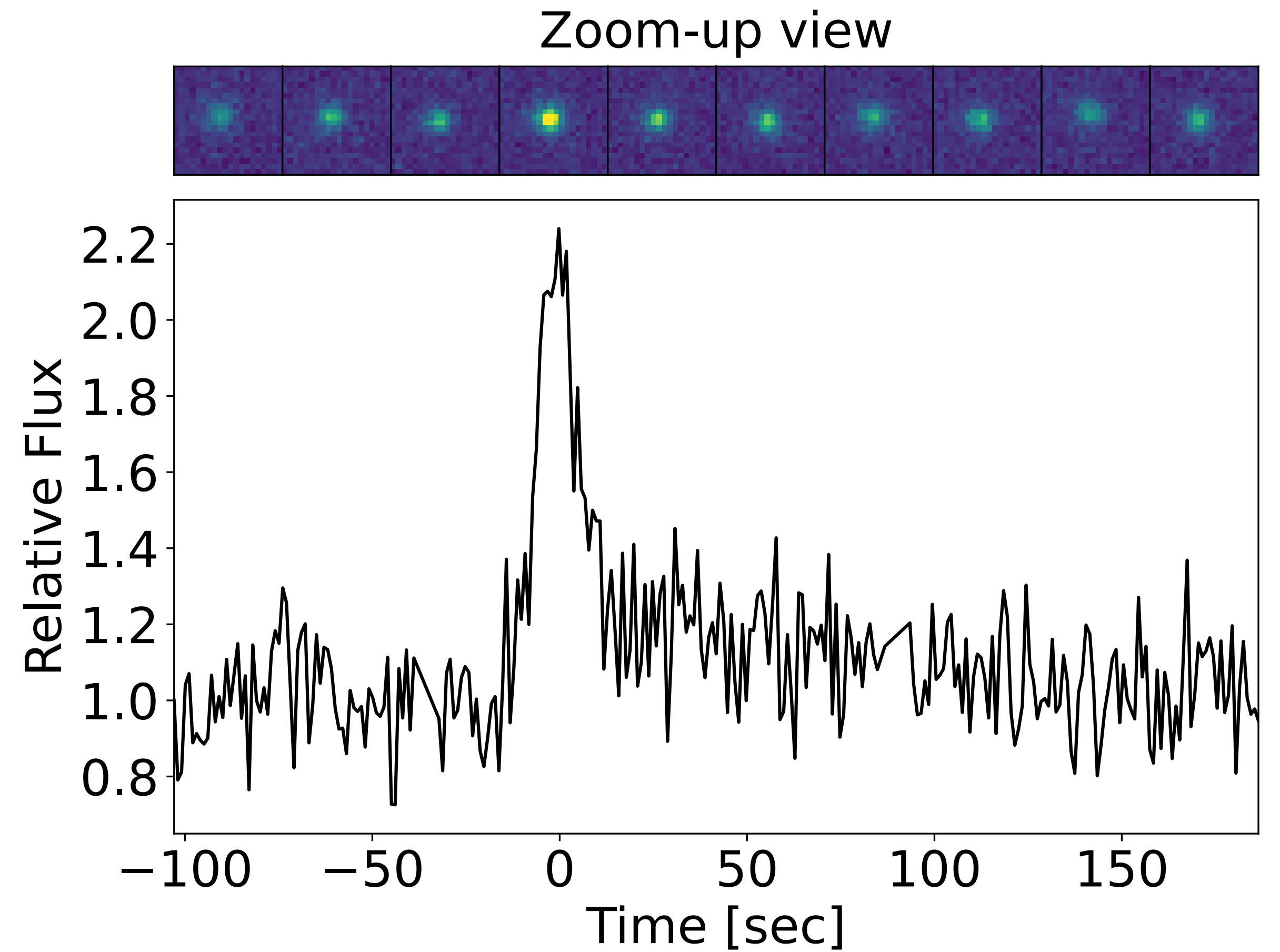
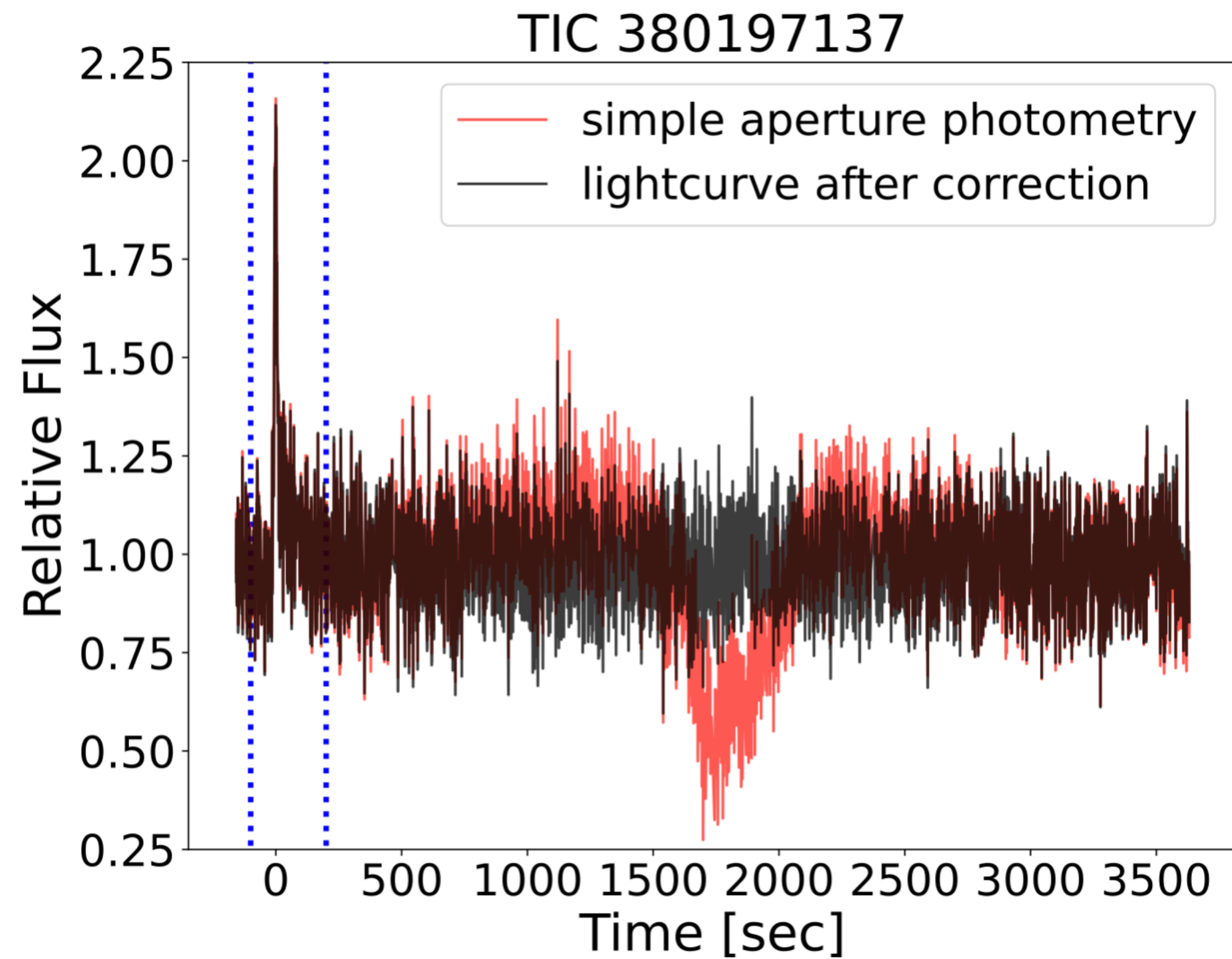
- ✓ SExtractor (Beritn & Arnouts 1996)に基づいた測光パイプラインを作成
  - 生の動画データを解析して、相対測光をしながら光度曲線を作成する



- ターゲット星: 17等より明るいM dwarf (1センサーあたり2-3天体)
  - 参照星: 16等より明るい星たち (1センサーあたり200-300天体)
- > 作成した光度曲線を3人の独立な人間が目視



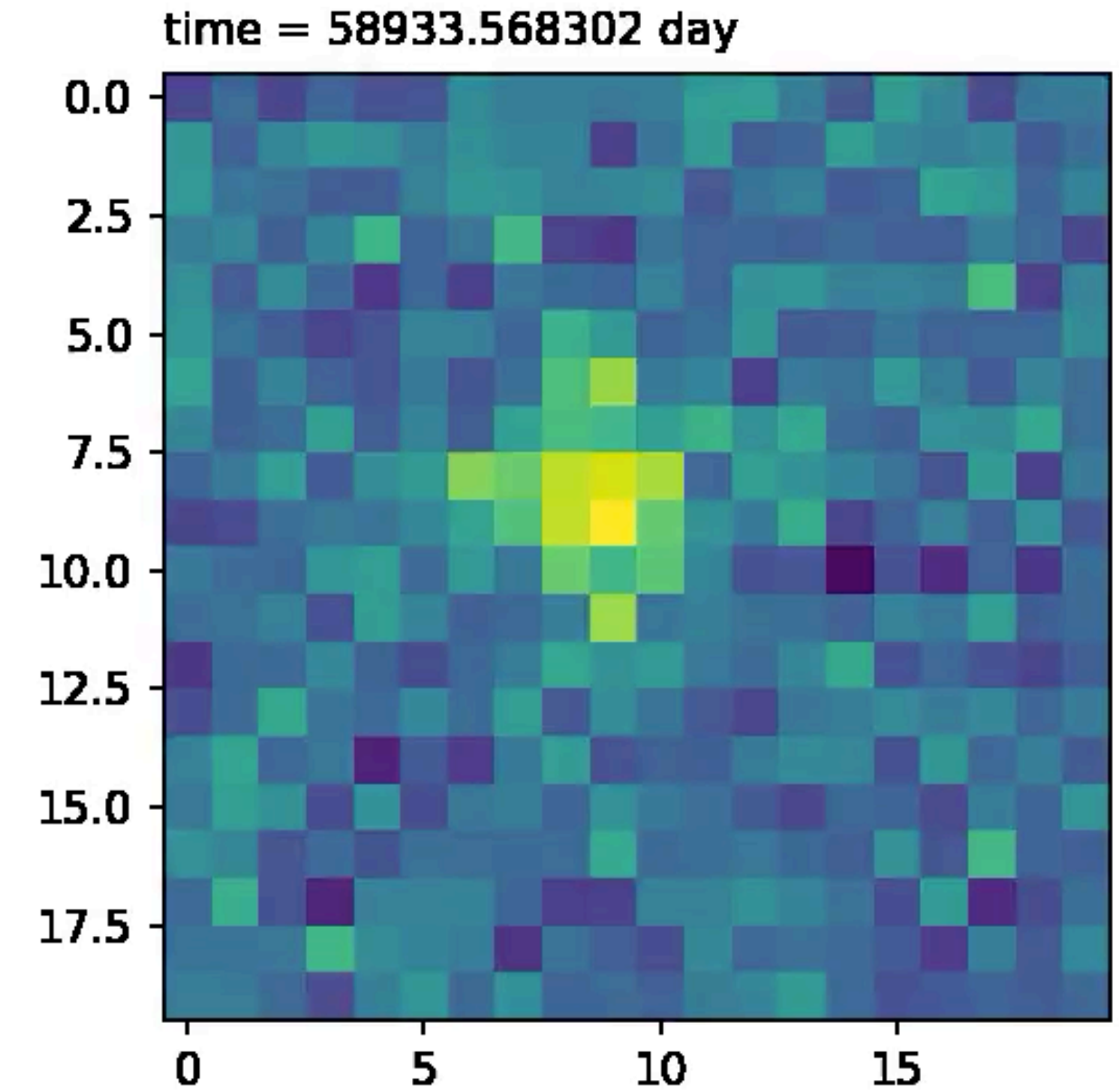
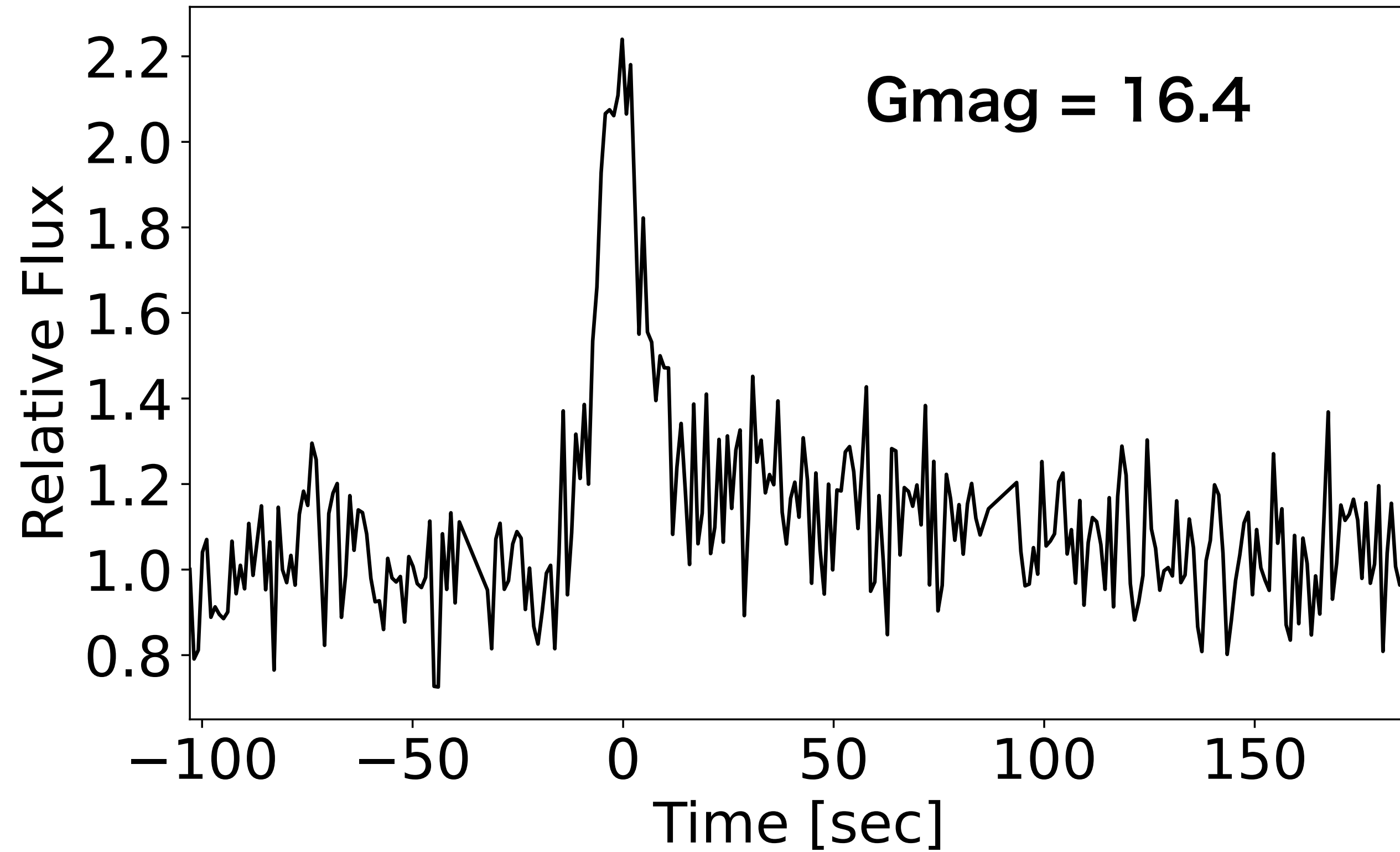
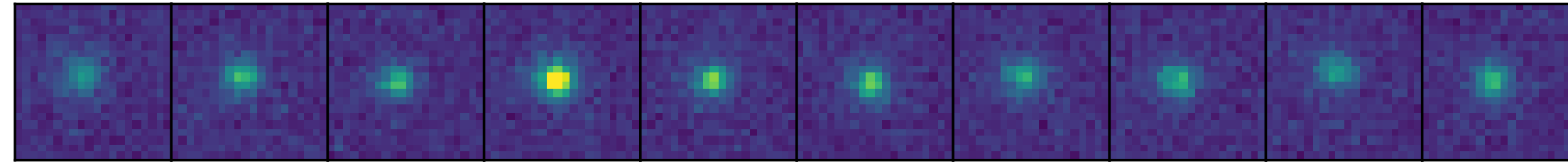
# Tomo-e Gozen データの解析 2



-> 合計22個のフレアイベントを検出した!

# M5V型星 (0.16Msun) からの超高速フレア

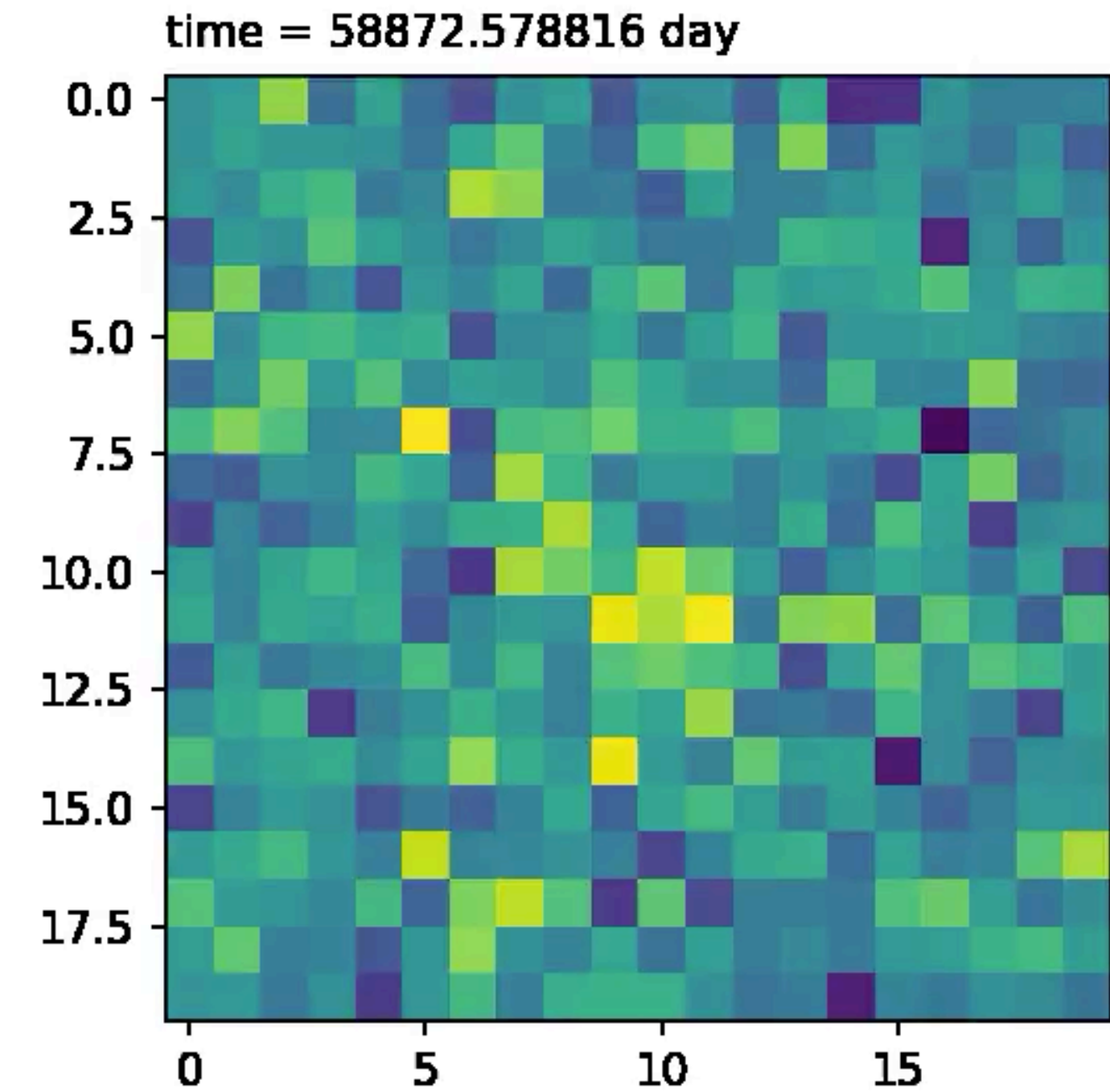
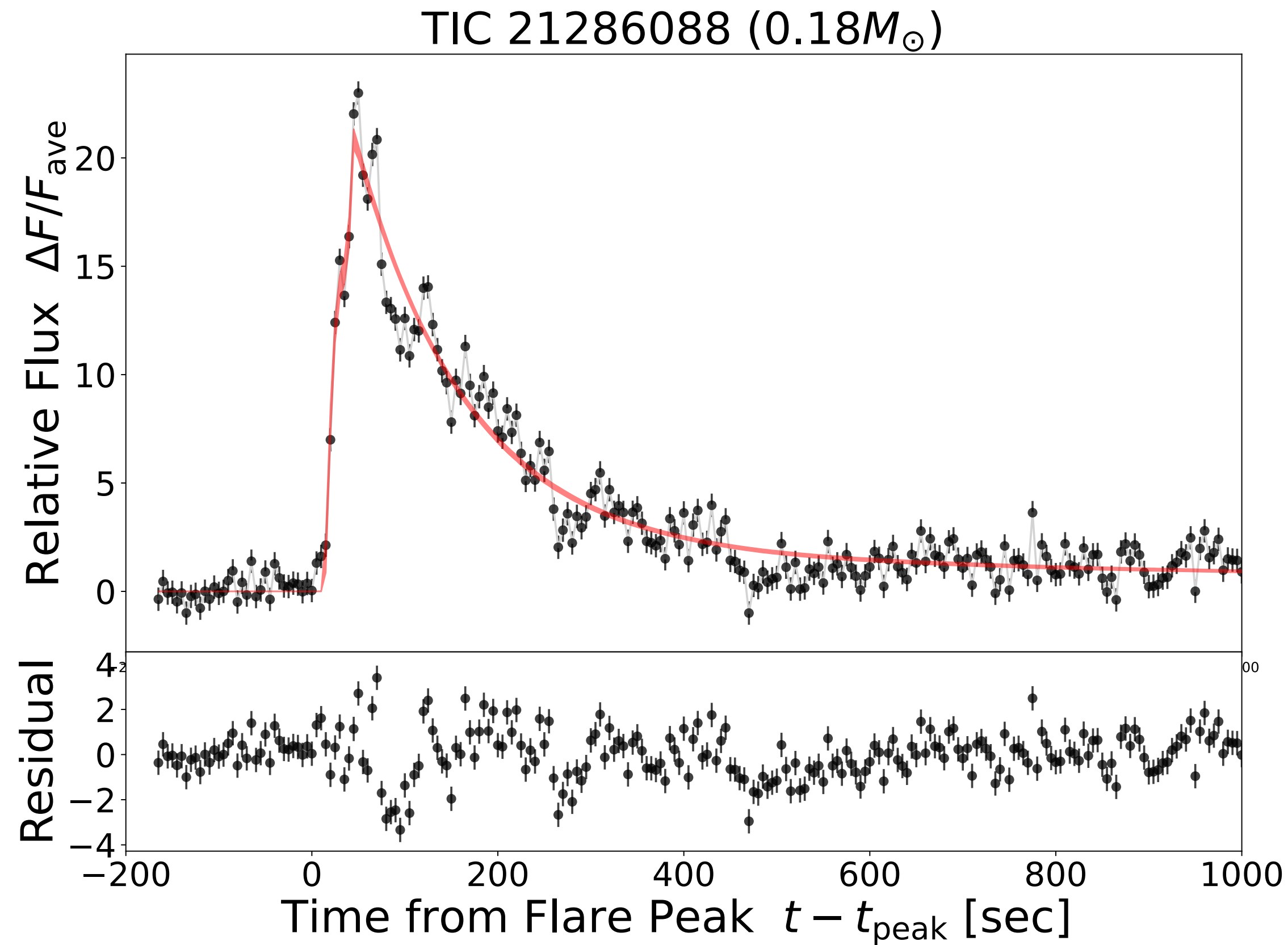
Zoom-up view



- 10秒くらいで立ち上がり、最大で2倍くらいに増光

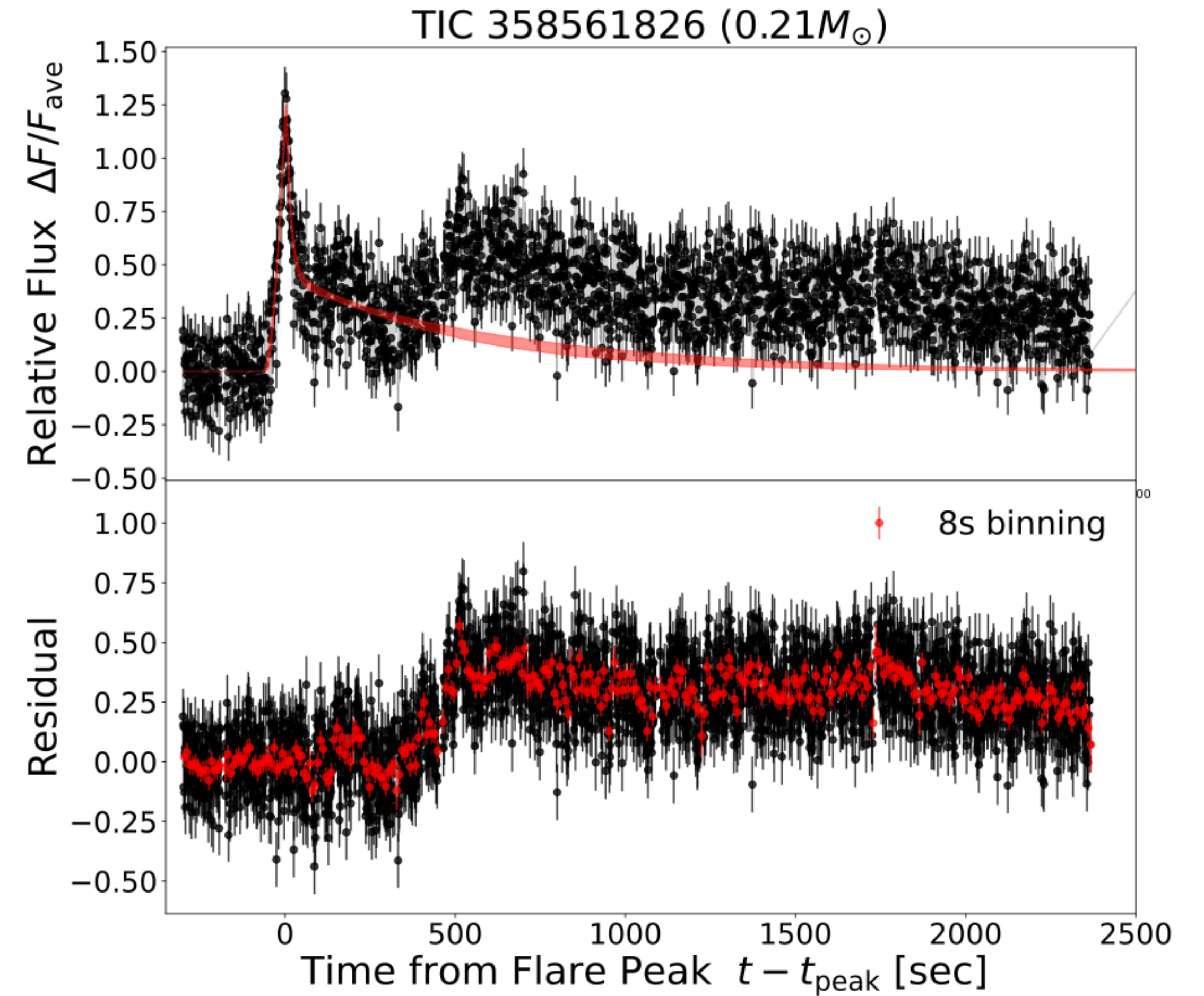
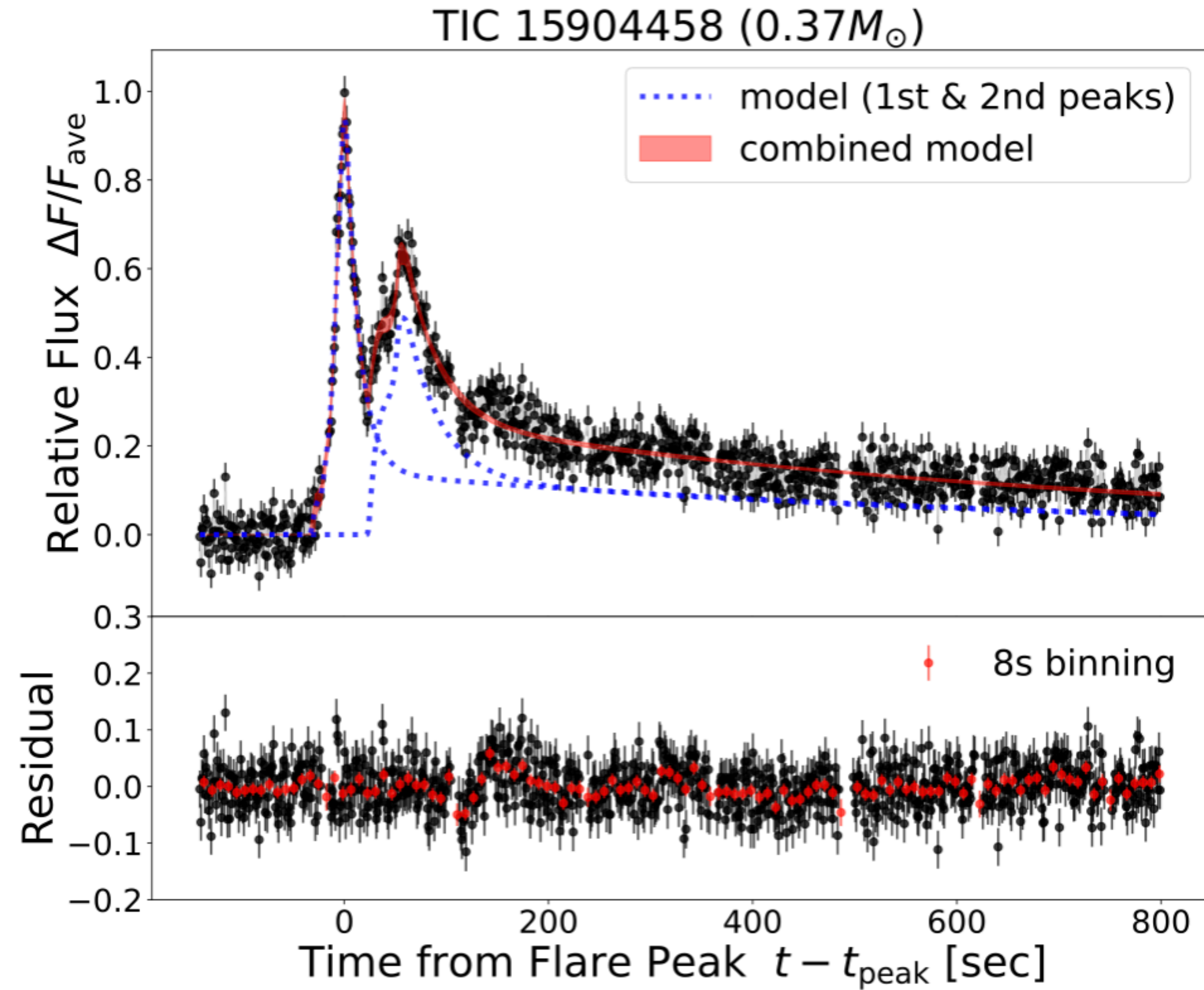


# M5V型星 (0.18Msun) からの超巨大で高速フレア



- 視野の端に位置する暗い星 (18.63等) が増光
- 1分程度で立ち上がり、最大で20倍くらいに増光

# 複数のピークを持つフレア

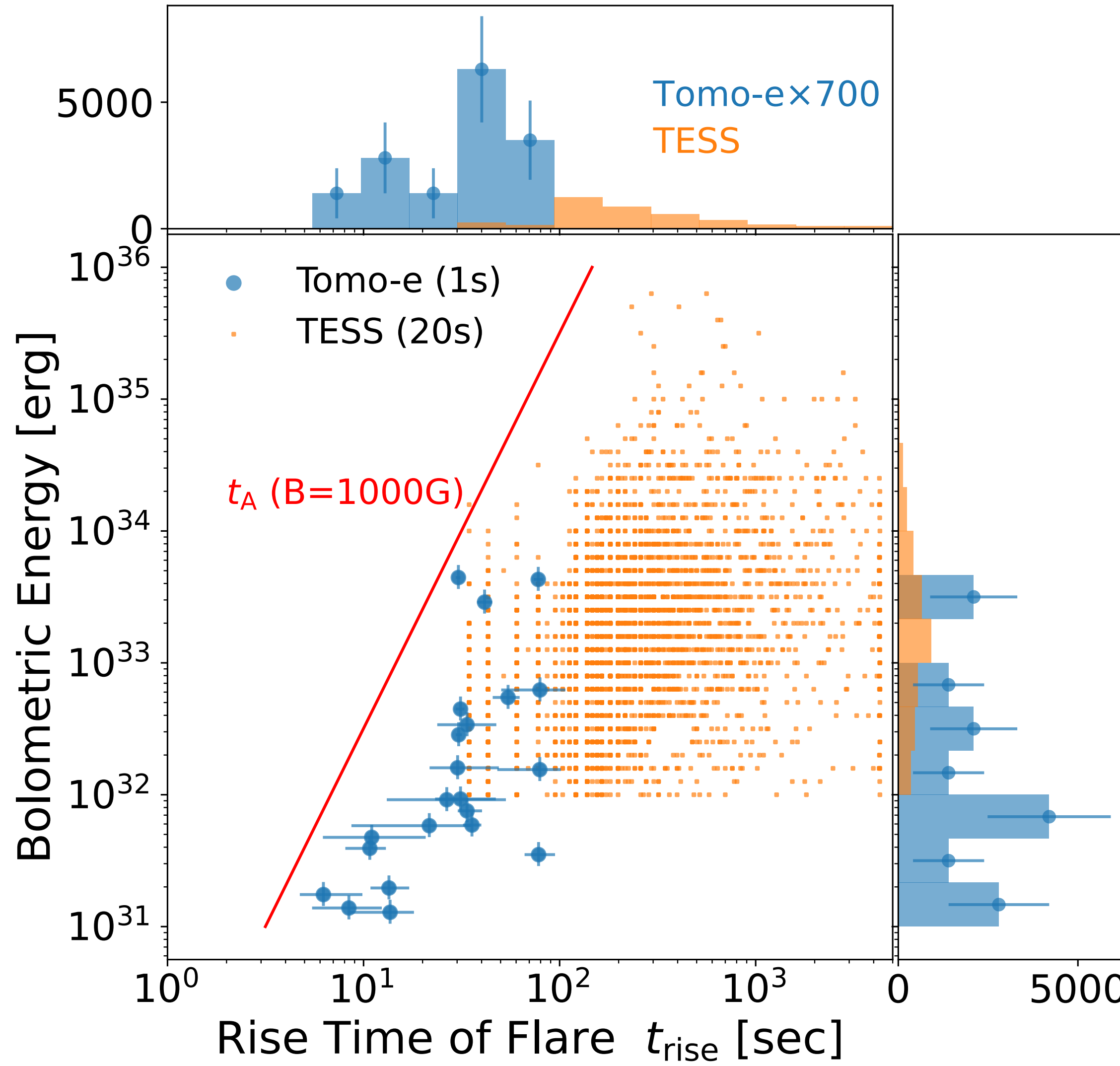


- 連鎖的な磁気リコネクションによる多発的なフレア?
  - いわゆるQuasi-periodic oscillation? (e.g. Nakariakov & Melnikov 2009)



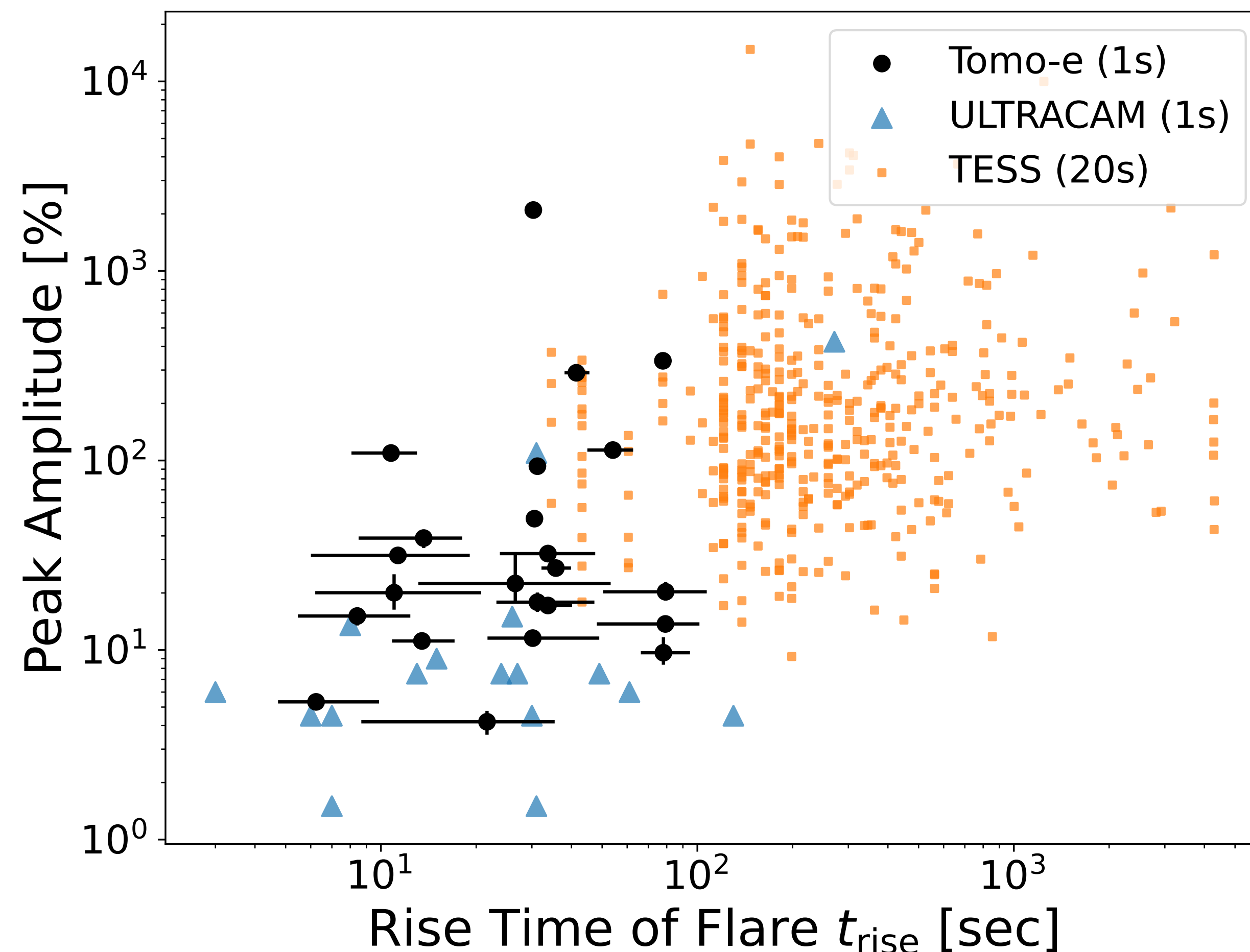
# 超高速フレア: エネルギー VS 立ち上がり時間

- ✓ エネルギーは9000-15000Kの黒体を仮定して計算
- ✓ 比較のためにTESSの20sでのフレア探索の結果をplot (Howard & MacGregor (2021))
- ✓ あるエネルギーに対して最小の時間が存在している
  - B=1000G程度のAlfven transit timeを考えると立ち上がり時間の下限値が説明できる



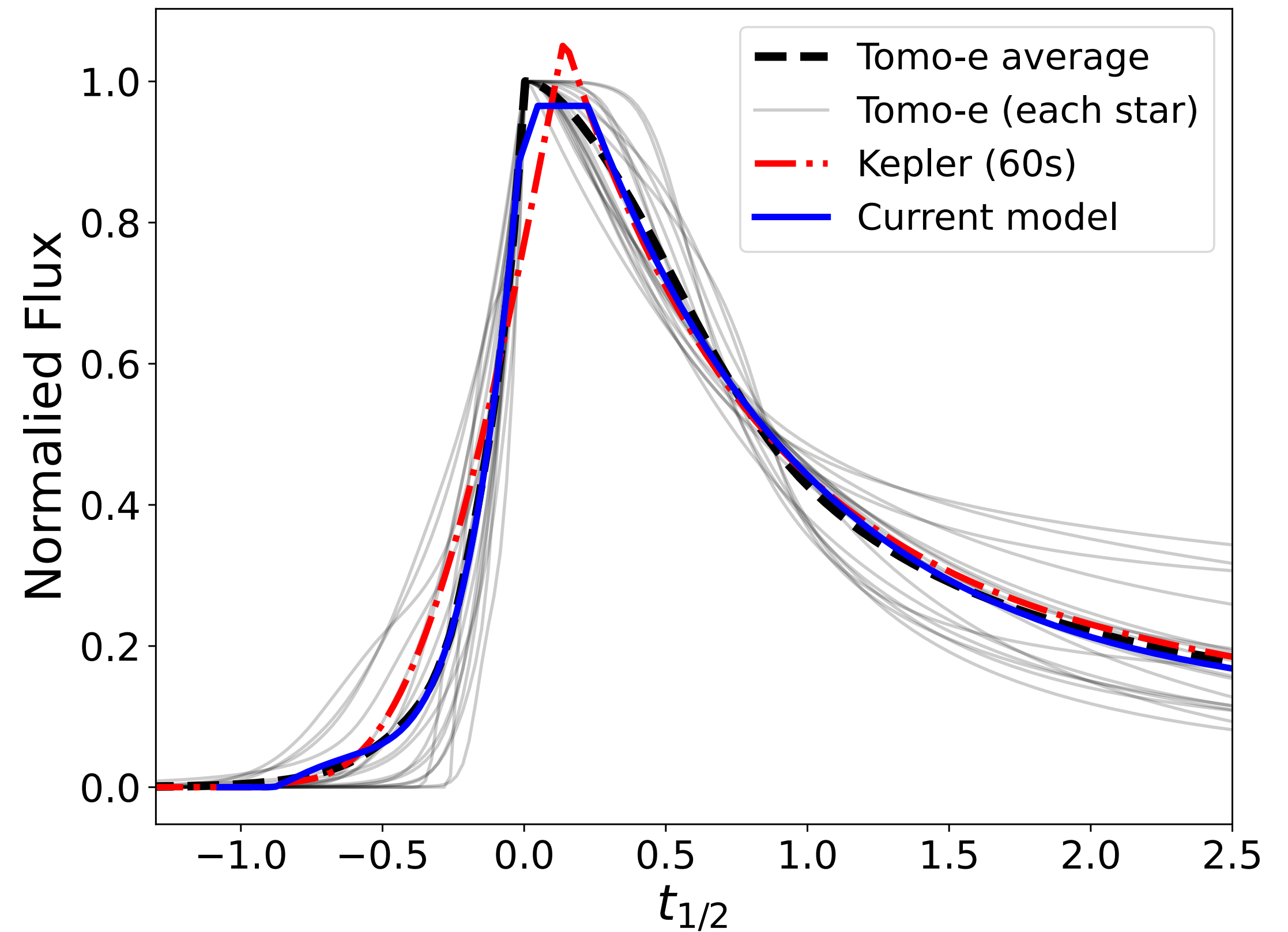
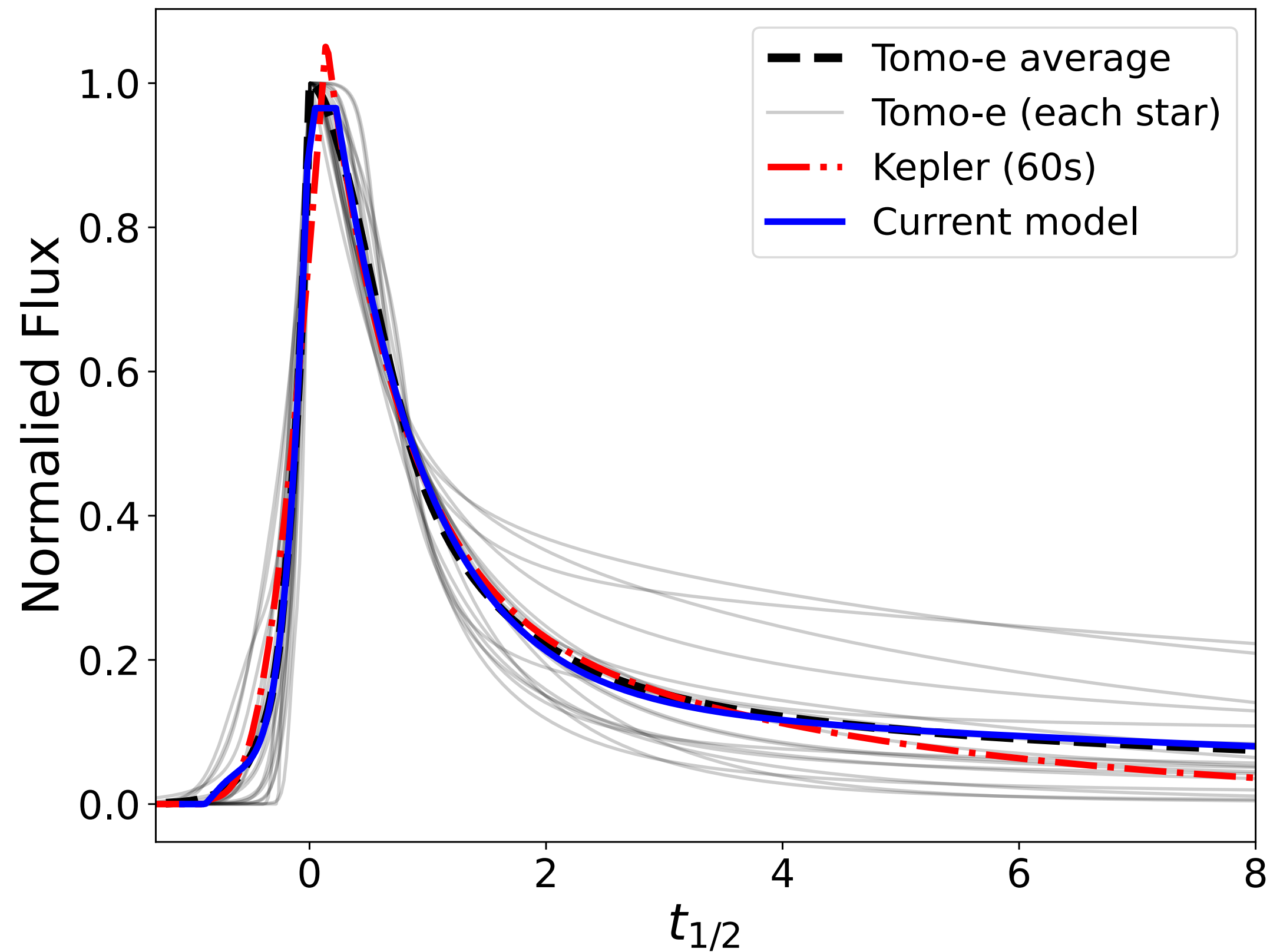
# 超高速フレア: 振幅 VS 立ち上がり時間

- ✓ 比較のためにULTRACAMの観測もplot
  - ULTRACAMは4m望遠鏡での観測のため比較的暗いフレアを検出できている
  - “延べ”観測時間は我々の1/100
- ✓ TESSよりも高速で、ULTRACAMよりも強力なフレアを検出できている





# 超高速フレア: average profile



✓ Kepler 1分データから作成されたaverage flare profileとの比較 (Davenport+2014)

- 時間スケールはFWHMで規格化

✓ Tomo-eフレアは立ち上がりが有意に早い & フレアトップが見えている

# 超高速フレア: 活動性 & event rate

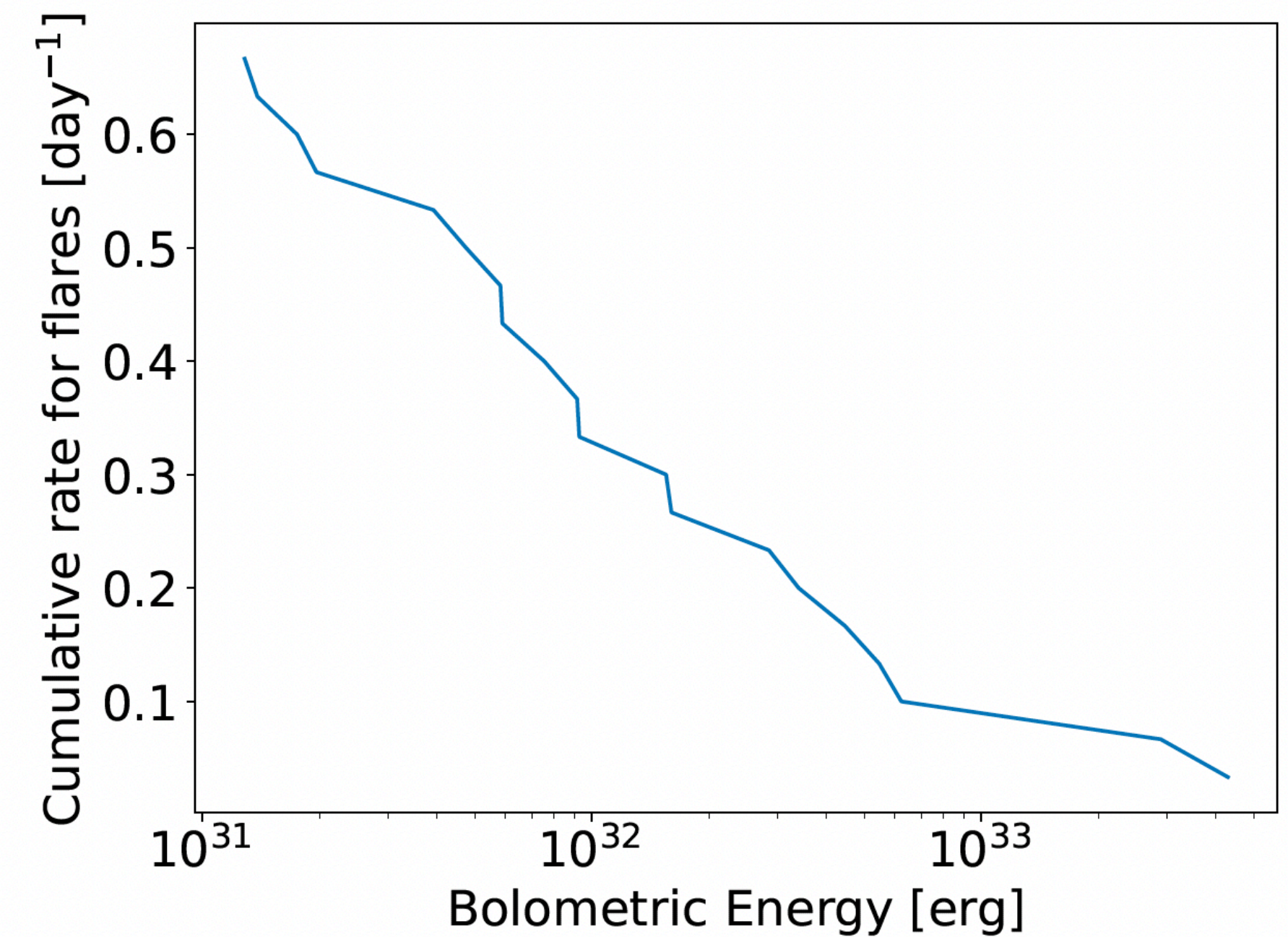
- ✓ 22のフレア星に対してLAMOST分光データをサーチした結果、10/11が活動的なM dwarfであることがわかった。

-> 今回見つかったフレアはほぼ活動的なM dwarfで起きている

- ✓ 一方で、今回解析した全てのMdwarfについてもLAMOSTデータを調べたところ全体の276/1392が活動的であった (約20%)

-> 以上より活動的なM dwarfでの、**今回見つかったフレアの event rate**を計算した (右図)。

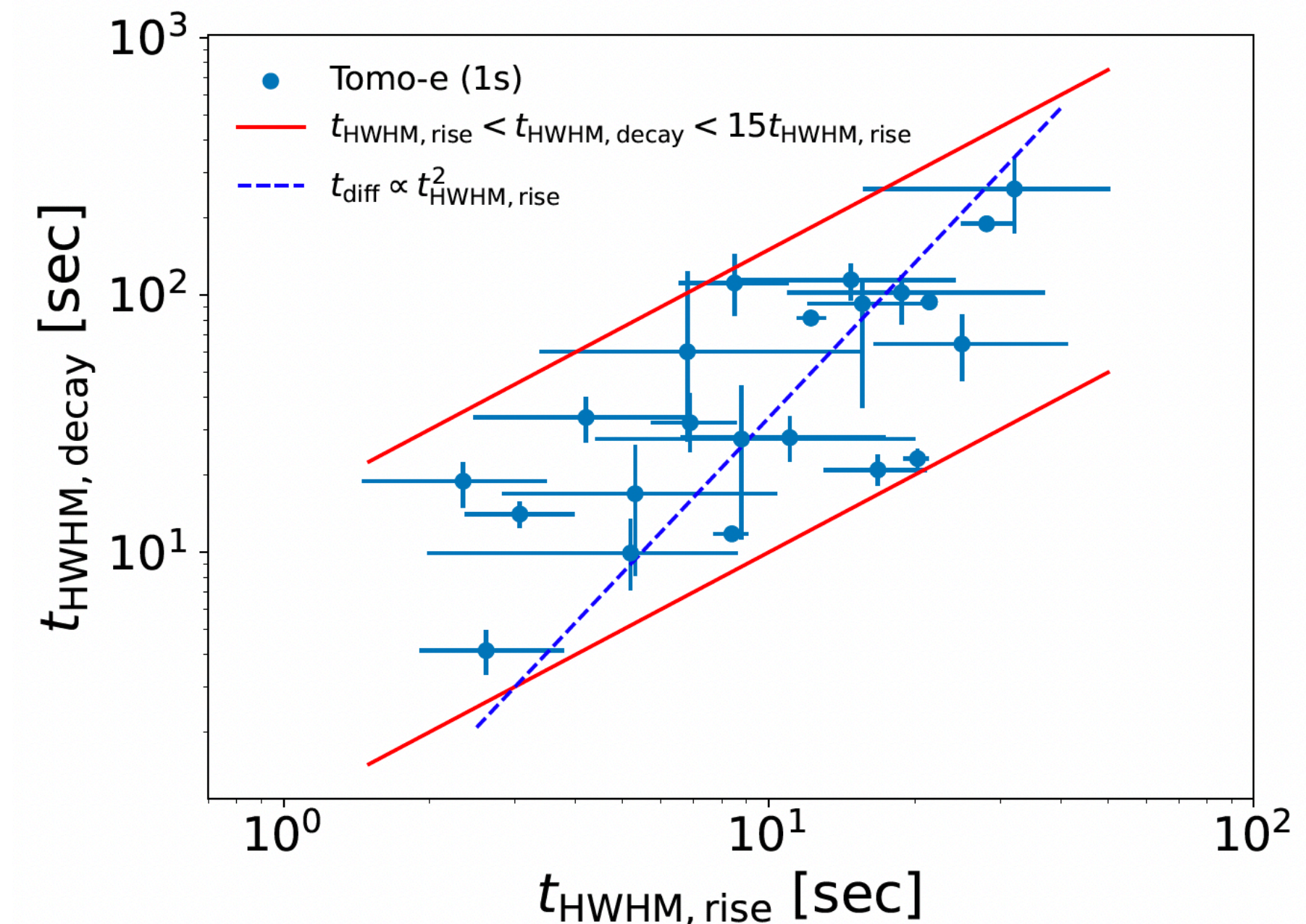
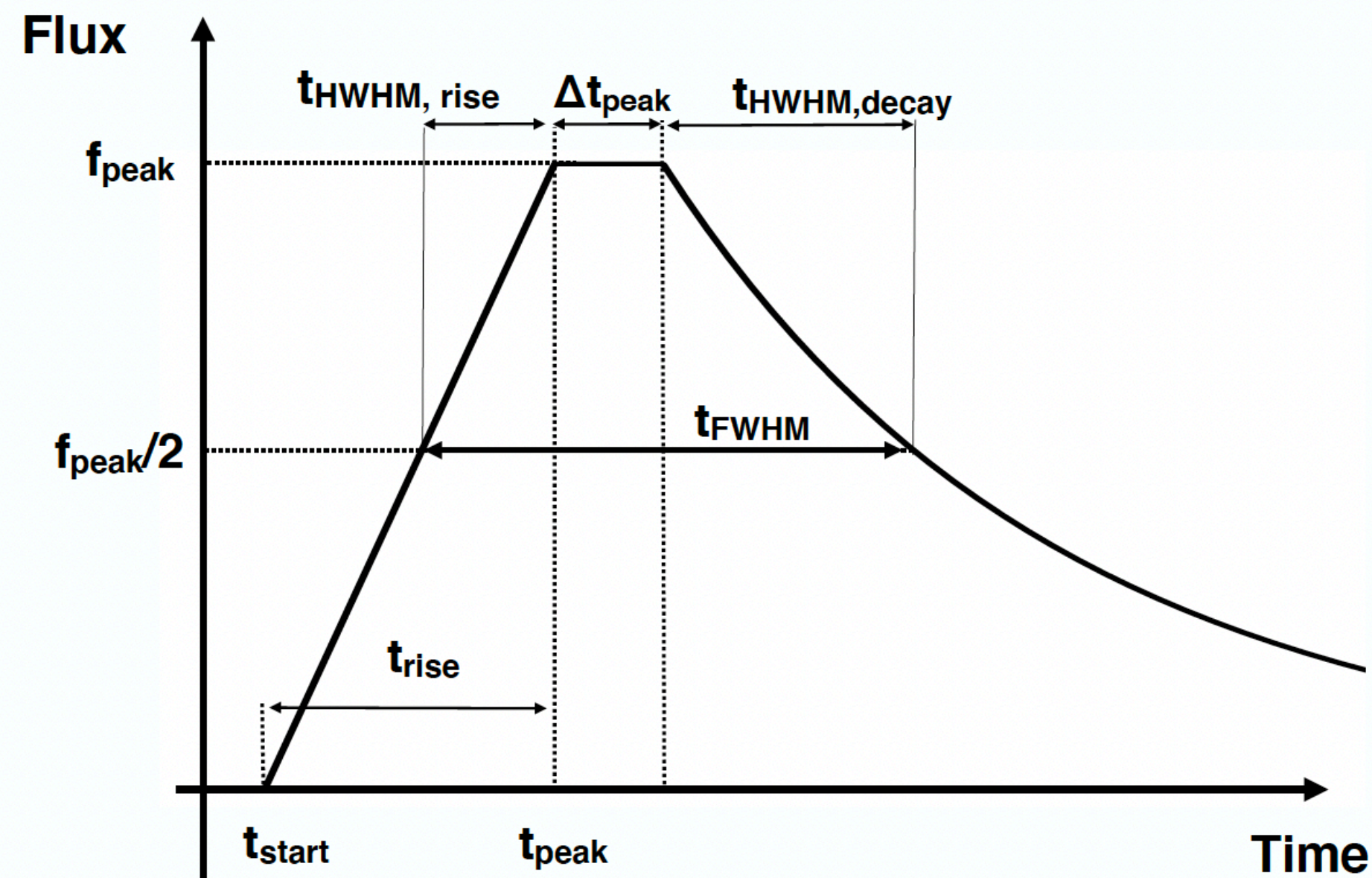
- 例えば $10^{31}$  erg < Ebolのフレアは $0.7 \text{ day}^{-1}$





# 議論: タイムスケール

- ✓ Tomo-eのデータはフレアの立ち上がり~立ち下がりまで詳細に分解できる
- ✓ 立ち上がりはAlfven timescale, ゆっくりした立ち下がりには上層のcooling timescale or 輝線?
  - 立ち下がりの半値幅の方が立ち上がりの半値幅よりも長い (最大で15倍程度)
  - もう一つタイムスケール必要?





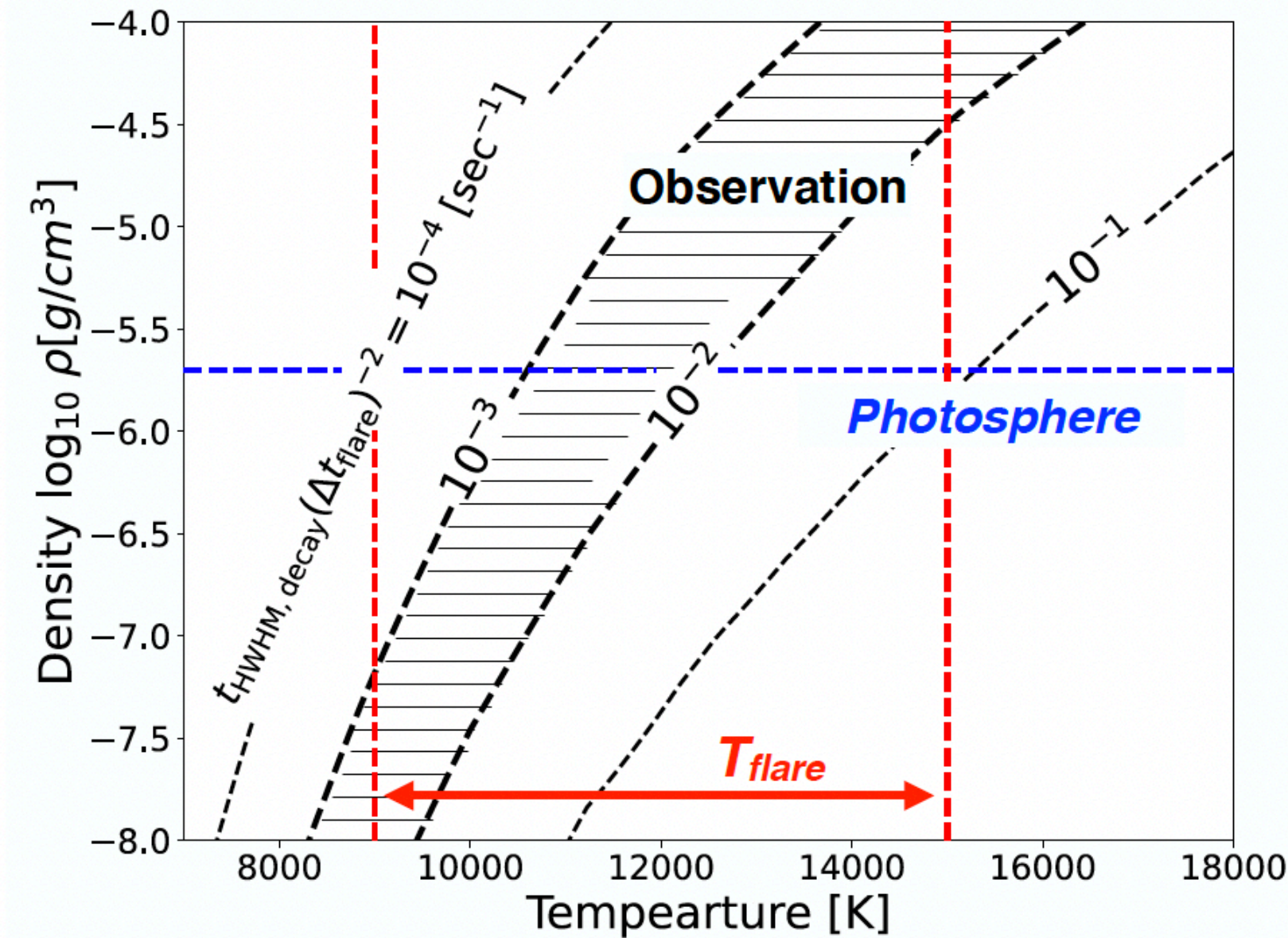
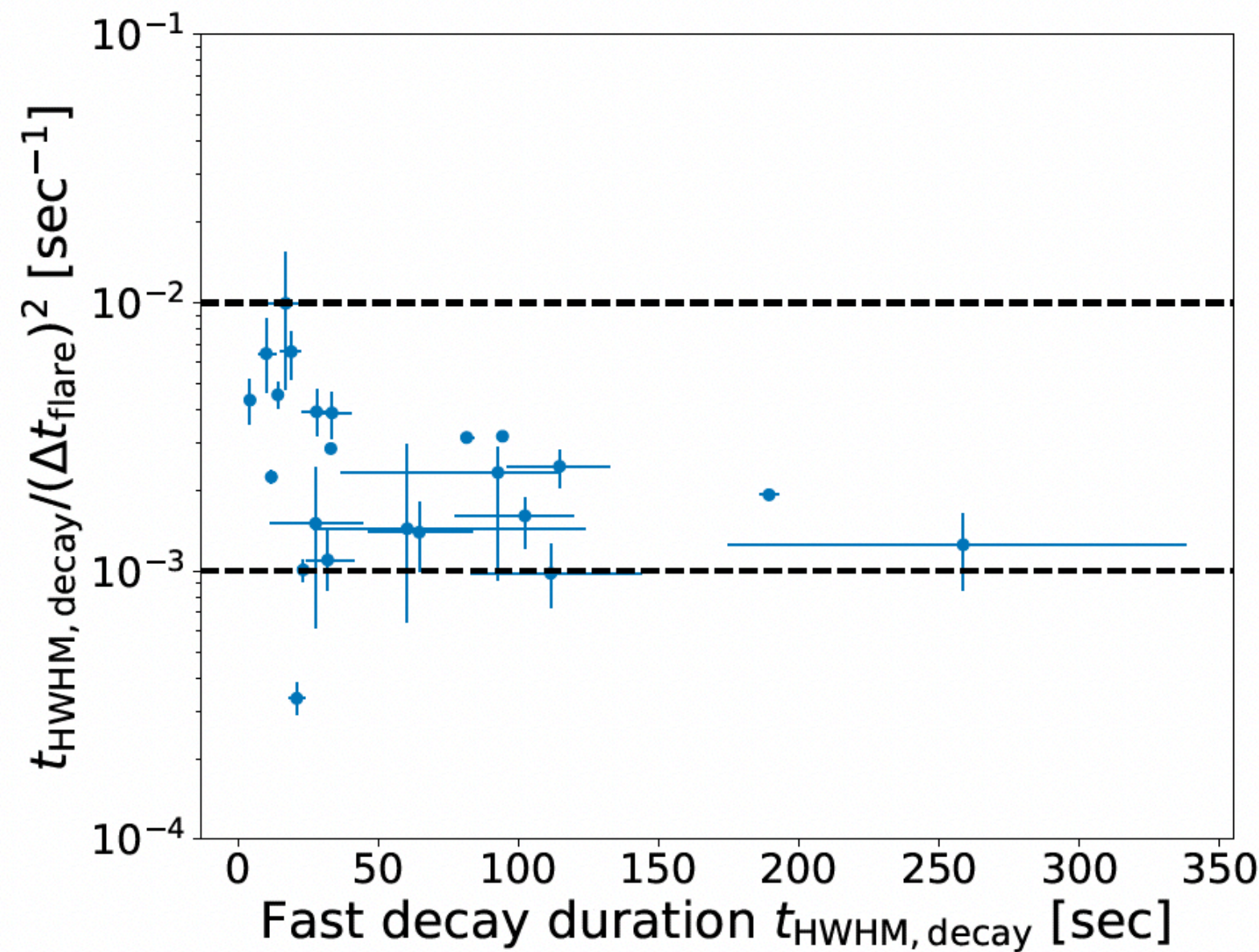
# 議論: Diffusion timescale?

- Electron beamで熱された大気 (厚み  $\Delta R$ , 密度  $\rho$ ) から光が抜け出る時間がおおよそ立ち下がり時間と同じと仮定

$$t_{\text{HWHM,decay}} \approx \frac{\tau \Delta R}{c}$$

- 上の関係から密度と温度の制限へ

$$\frac{t_{\text{HWHM,decay}}}{(\Delta t_{\text{flare}})^2} \approx 5.5 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1} \left( \frac{\kappa(\rho, T_{\text{flare}})}{530 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}} \right) \left( \frac{T_{\text{flare}}}{12,000 \text{ K}} \right)^6 \left( \frac{\rho}{2 \times 10^{-6} \text{ g cm}^{-3}} \right)^{-1}. \quad (\Delta t_{\text{flare}} \equiv \frac{E_{\text{bol}}}{L_{\text{peak}}} = \int \frac{f(t)}{f_{\text{peak}}} dt. )$$

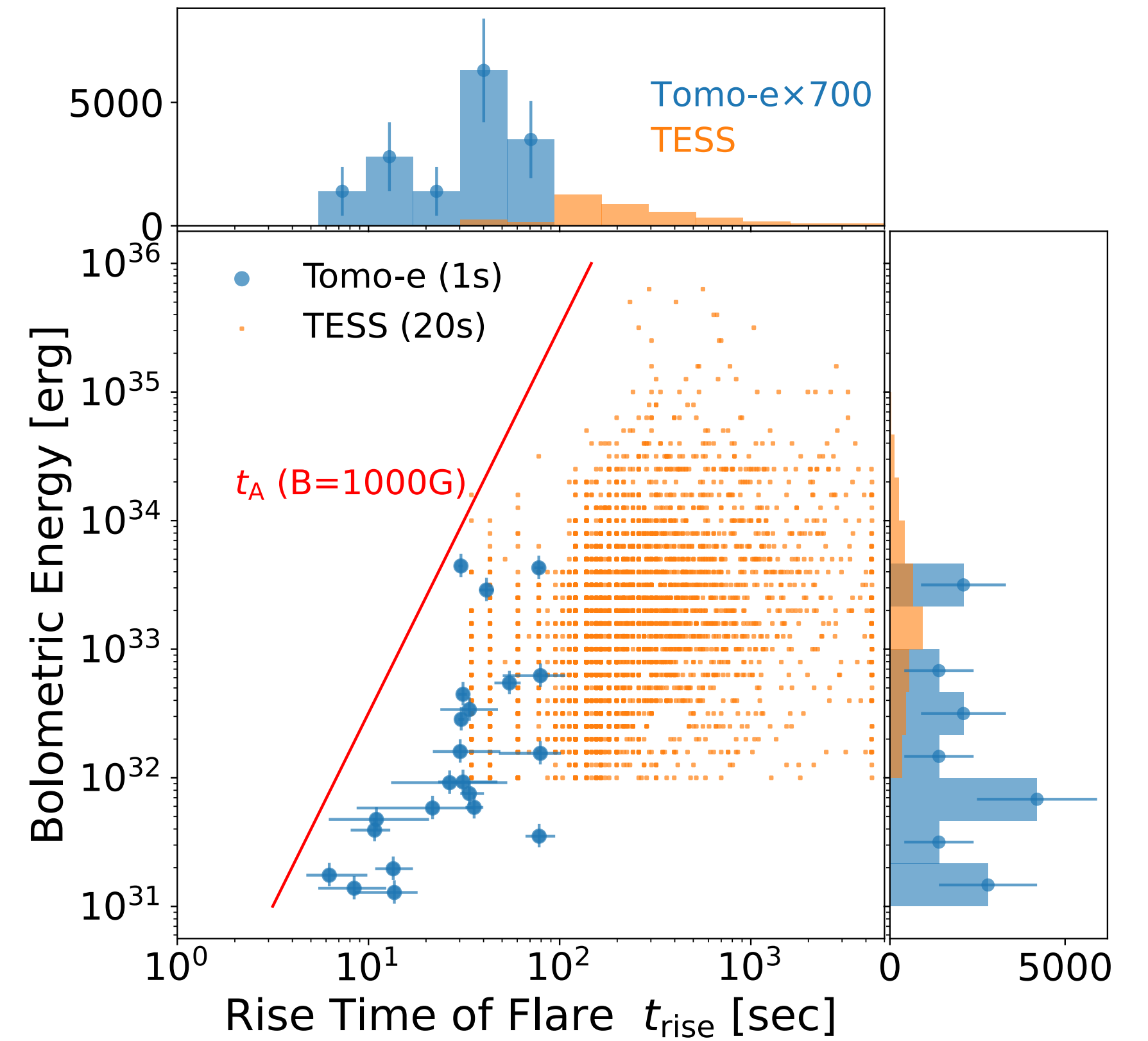


✓ 観測されてるフレアの温度(典型的に9000-15000K, Kowalski+2013)と無矛盾



# まとめ

- ✓ Tomo-e Gozenの40時間分のデータを解析し  
M dwarf から22のユニークな高速なフレアを発見した
  - 延べ1年間M dwarfを秒で観測したことに相当。
  - 活動的な星で $0.7 \text{ day}^{-1}$ くらいの頻度
- ✓ あるエネルギーを仮定した時のフレアの立ち上がり  
時間の下限値を観測的に推定した
  - $B=1000\text{G}$ 程度の磁気リコネクションの時間スケール?
- ✓ 圧縮された熱い大気のdiffusion timescaleを試算して、  
観測されたフレアのタイムスケールと無矛盾であることを示した。



# フレアサーチの今後の展望

## A) 異なるターゲット

- 今回はM型星でフレアを探索したが、K, G型星などでのフレアサーチ (東大、直川さん)
- 星形成領域、散開星団などでの若い星のフレアサーチ (電気大、樋口さん)
  - 夏にCepheus領域の観測予定? 冬におうし座などを見たい。

## B) 他の望遠鏡とのシナジー (特に多波長な観測)

- 可視光: TESSなどの広域観測との同時観測 (黒点などとの相関をとる)
- 電波, X線: プロキシマケンタウリなどのターゲット観測

## C) 狭域フィルターによるフレア探索?

- $H\alpha$ ,  $H\beta$  等の特定の輝線に絞った広域高頻度観測?