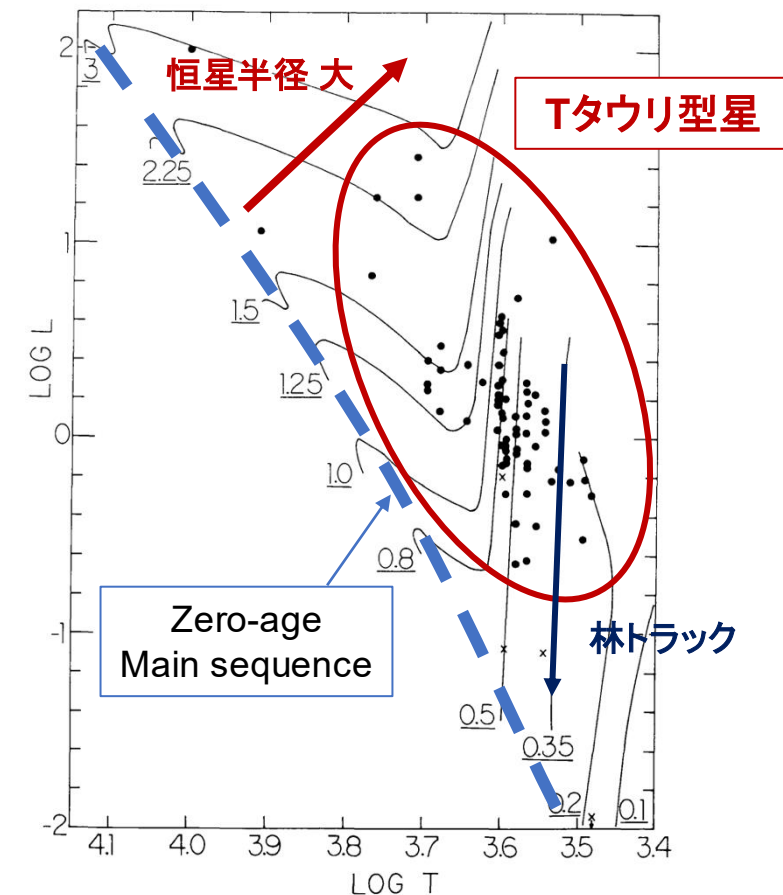
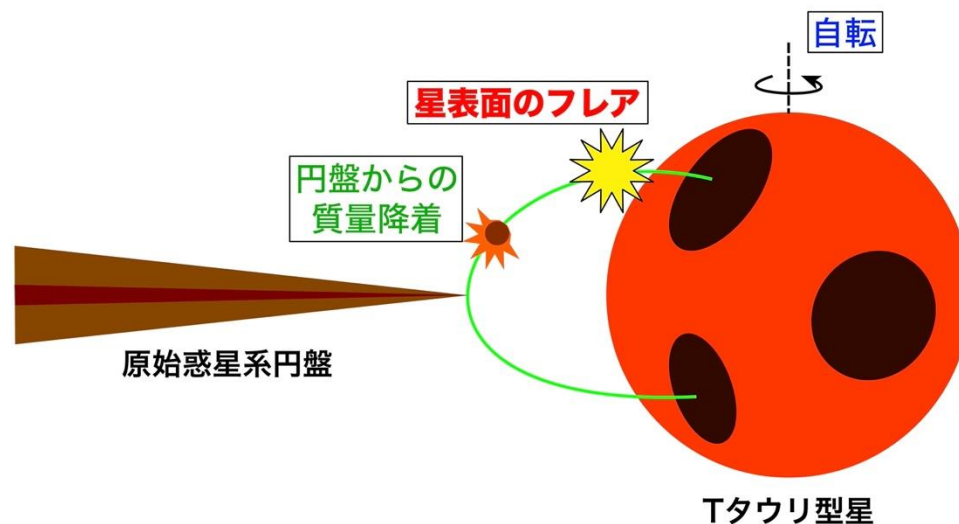

Tomo-e Gozenによる Tタウリ型星が起こす短時間フレアの観測

根津 正大(東京大学)

小林尚人, 新納悠, 瀧田怜, 酒向重行(東京大学),
他Tomo-e Gozenチームメンバー

Tタウリ型星 (TTSs)

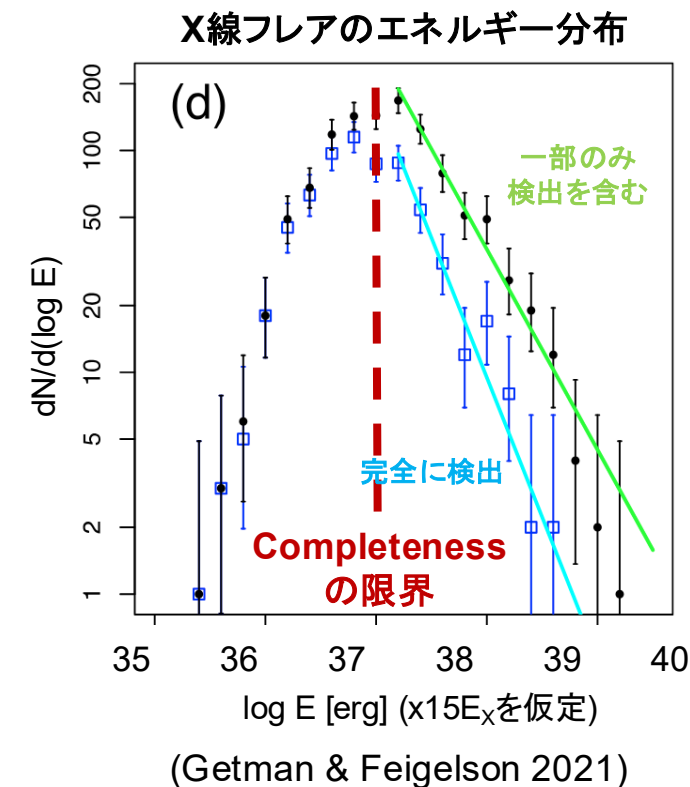
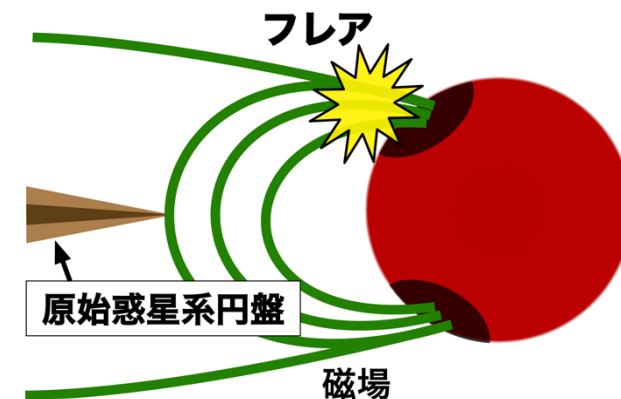
- 低質量 ($\lesssim 2 M_{\text{Sun}}$) の前主系列星
- **厚い対流層 + 速い自転速度**による強い磁場活動
- 多様な要因による可視光変動:
 - ▶ 自転 (非一様な黒点分布による)
 - ▶ 原始惑星系円盤からの質量降着 (古典的Tタウリ型星のみ)
 - ▶ **磁気リコネクションによって駆動されるフレア**



HR図上におけるTタウリ型星
(Cohen & Kuhi 1979)

Tタウリ型星におけるフレアの重要性

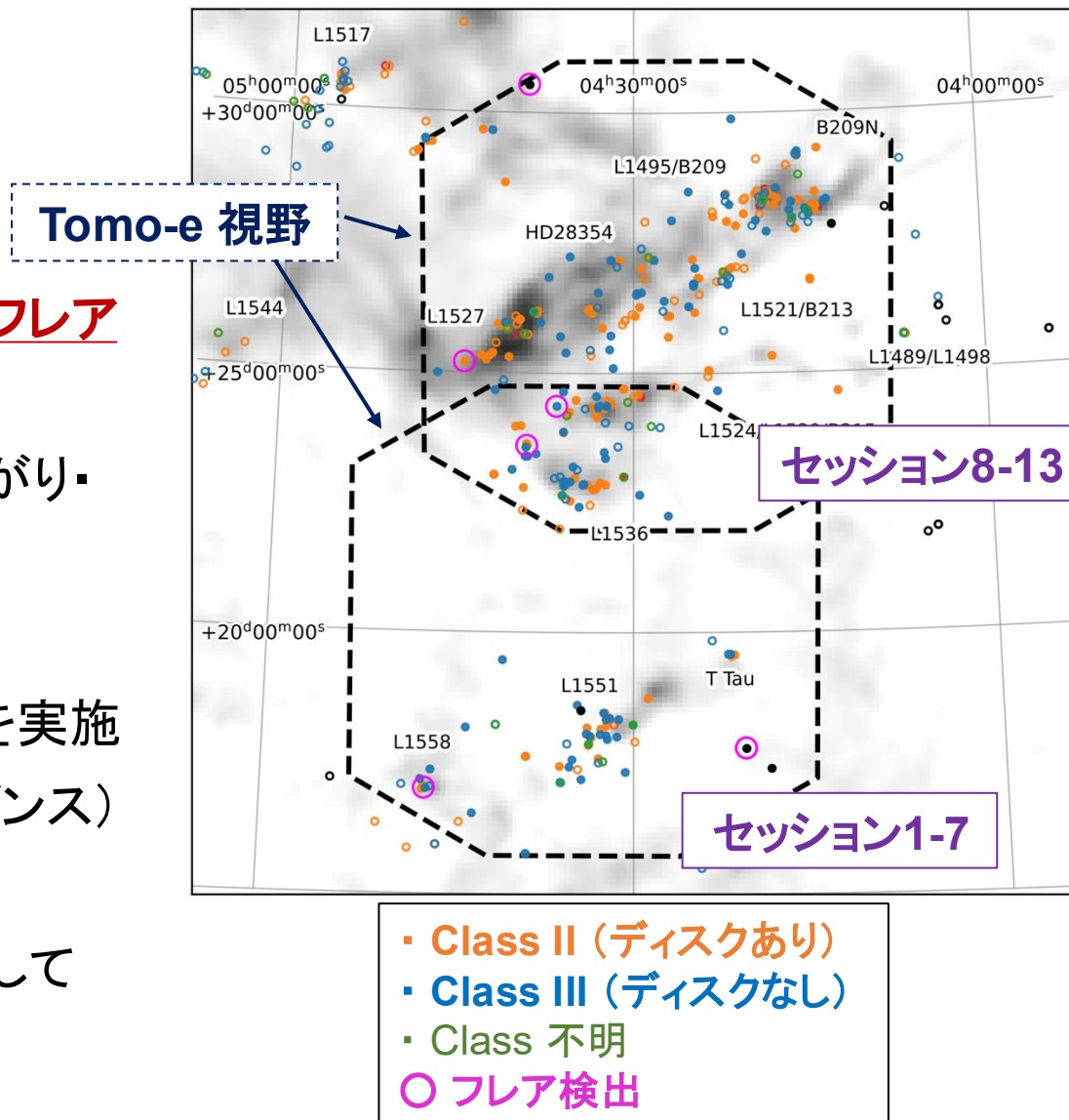
- **太陽・恒星と異なる磁場構造** (e.g., Favata et al. 2005)
 - ▶ 太陽・恒星フレアからの類推はどの程度可能か？
- **周辺環境への影響** (e.g., Benz & Güdel 2010)
 - ▶ 高エネルギー粒子やX線が円盤のイオン化を促し、力学的・化学的変化、ひいては惑星形成・円盤進化にも影響を与える
- **Tタウリ型星におけるフレアの全体像は未だ不明瞭**
 - ▶ これまでのX線観測ではエネルギーの非常に大きいフレア ($E \gtrsim 10^{36}$ erg) しか検出できていない
 - ▶ 可視光観測ではより小さいエネルギーのフレアまで検出できるが、観測例は限られている



Tomo-e Gozenによる観測

- 広視野
 - ▶ **一度に数十個**のTタウリ型星を観測可能
- 高速撮像
 - ▶ これまで検出されてこなかった**小さなエネルギーのフレア**まで検出できる
 - ▶ 光度曲線中の細かい構造まで時間分解し、立ち上がり・減衰などの**時間発展を正確に評価**できる
- 2023年11月 - 2024年12月にかけて、計38 hrsの観測を実施
 - ▶ 各2-4 hrs連続 × 13セッション（すべて1.0 sケーデンス）
 - ▶ 前半に南部領域、後半に北部領域
 - ▶ 観測セッションごとにわずかにポインティングをずらして隙間を埋め、できるだけ多くのTタウリ型星を観測

おうし座星形成領域 (d~140 pc)

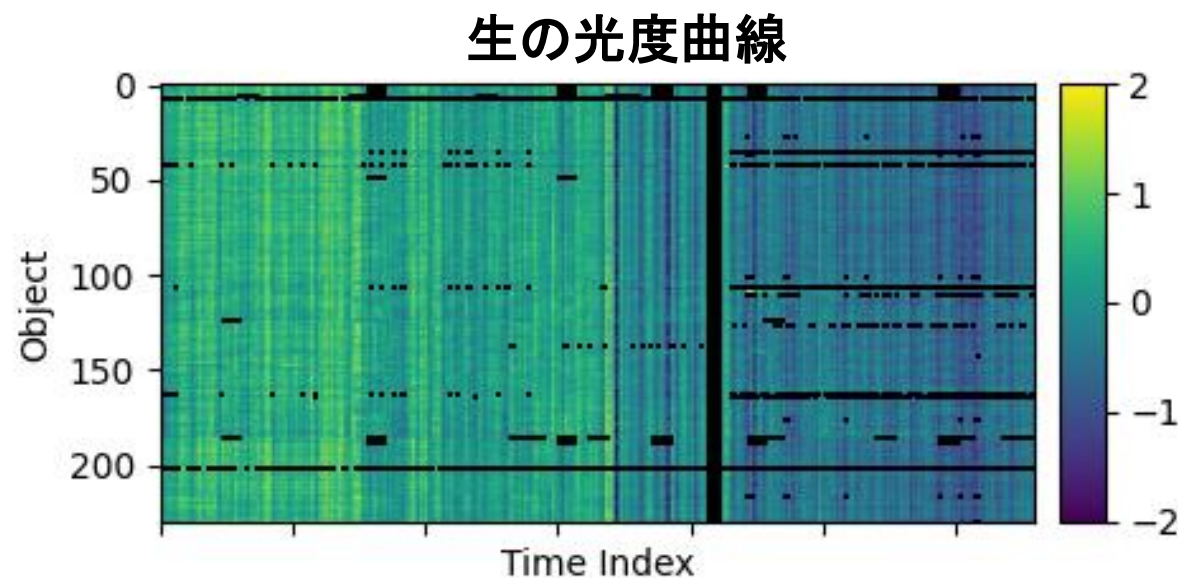
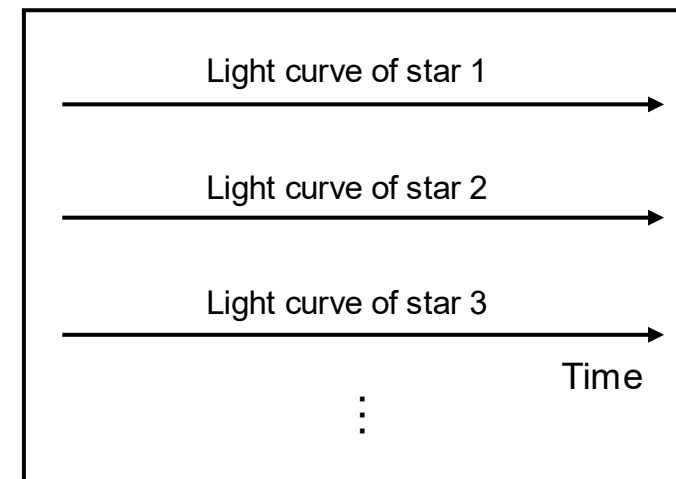


測光パイプラインの開発

- 特異値分解(SVD)を用いた相対測光を実装
 - 視野内の多くの星に共通するトレンドだけを抽出・除去
(inspired by HeSO pipeline; Aizawa et al. 2022)

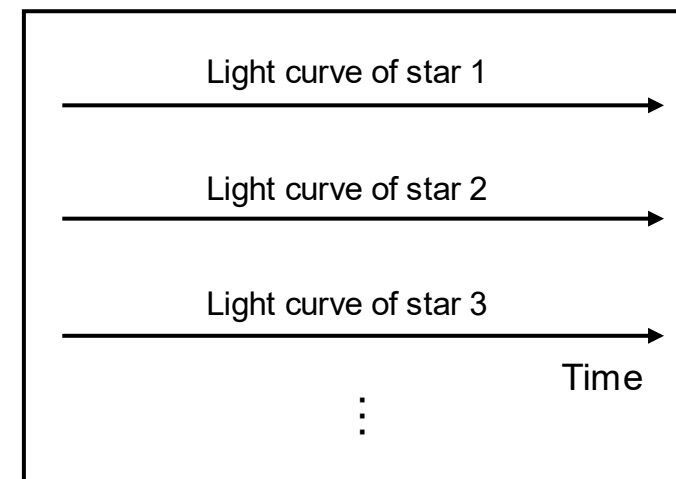
規格化した光度曲線(1チップ内の約200個の星)のカラーマップ

- 生の光度曲線
 - 縦方向の縞模様
 - 多くの星が共通のトレンドで変化している



測光パイプラインの開発

- 特異値分解(SVD)を用いた相対測光を実装
 - ▶ 視野内の多くの星に共通するトレンドだけを抽出・除去
(inspired by HeSO pipeline; Aizawa et al. 2022)

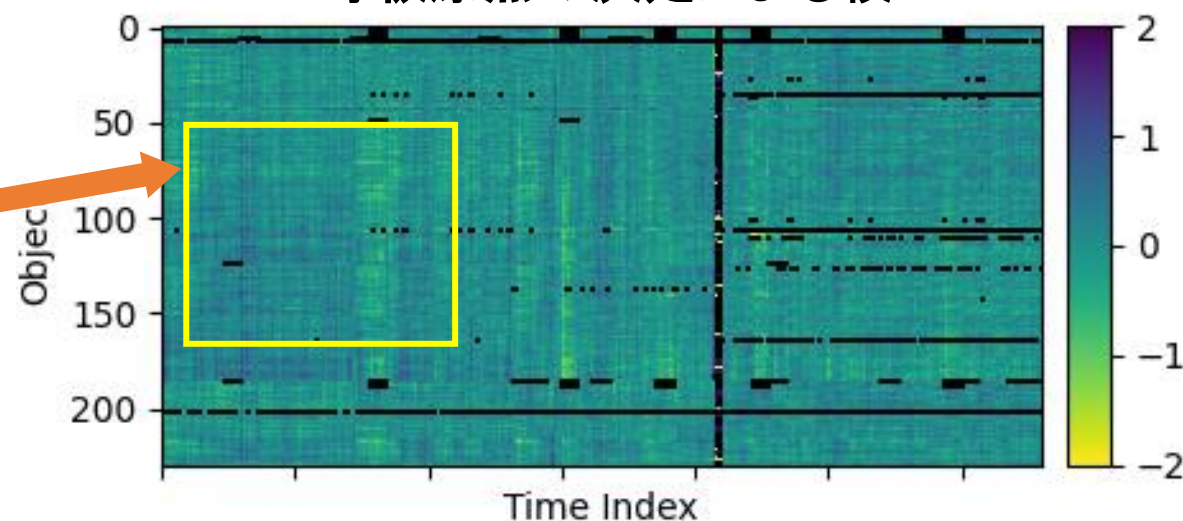


規格化した光度曲線(1チップ内の約200個の星)のカラーマップ

- 生の光度曲線
 - ▶ 縦方向の縞模様
 - ▶ 多くの星が共通のトレンドで変化している
- 等級原点の決定による較正
 - ▶ 縦縞や、逆位相的なトレンドが残っている

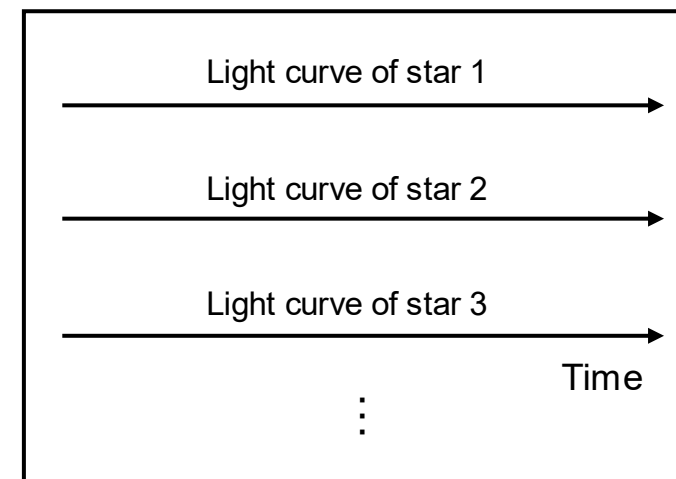
➡ 非一様な大気変動の影響を
除去しきれていない

等級原点の決定による較正



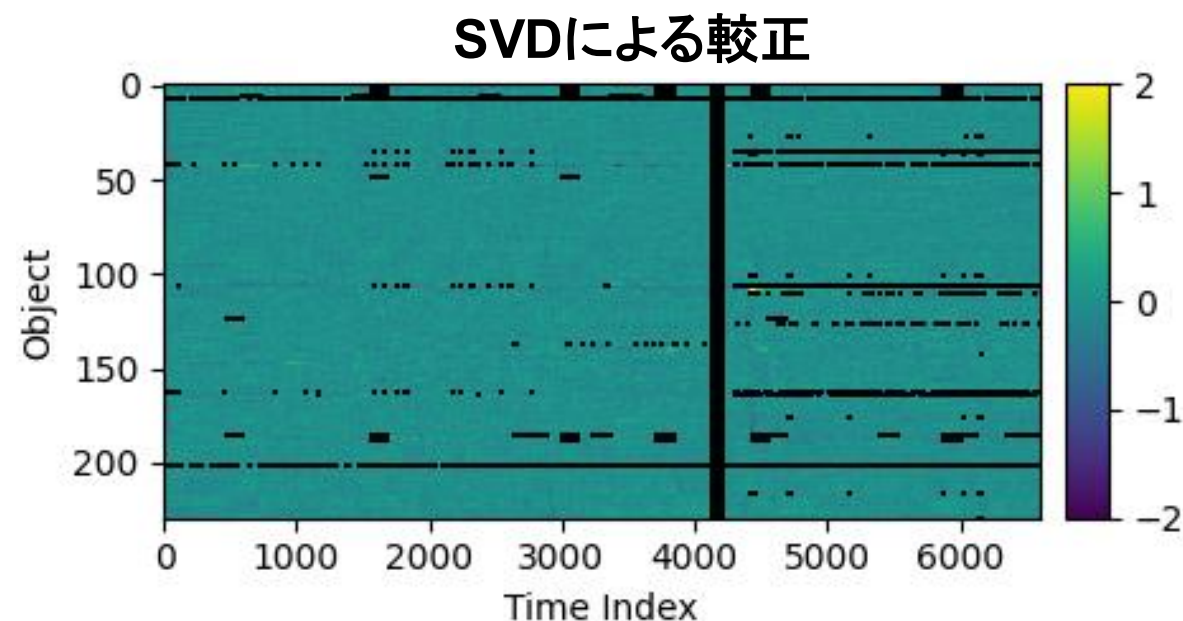
測光パイプラインの開発

- 特異値分解(SVD)を用いた相対測光を実装
 - ▶ 視野内の多くの星に共通するトレンドだけを抽出・除去
(inspired by HeSO pipeline; Aizawa et al. 2022)



規格化した光度曲線(1チップ内の約200個の星)のカラーマップ

- 生の光度曲線
 - ▶ 縦方向の縞模様
 - ▶ 多くの星が共通のトレンドで変化している
- 等級原点の決定による較正
 - ▶ 縦縞や、逆位相的なトレンドが残っている
- SVDによる較正
 - ▶ 目立つパターンは見られない

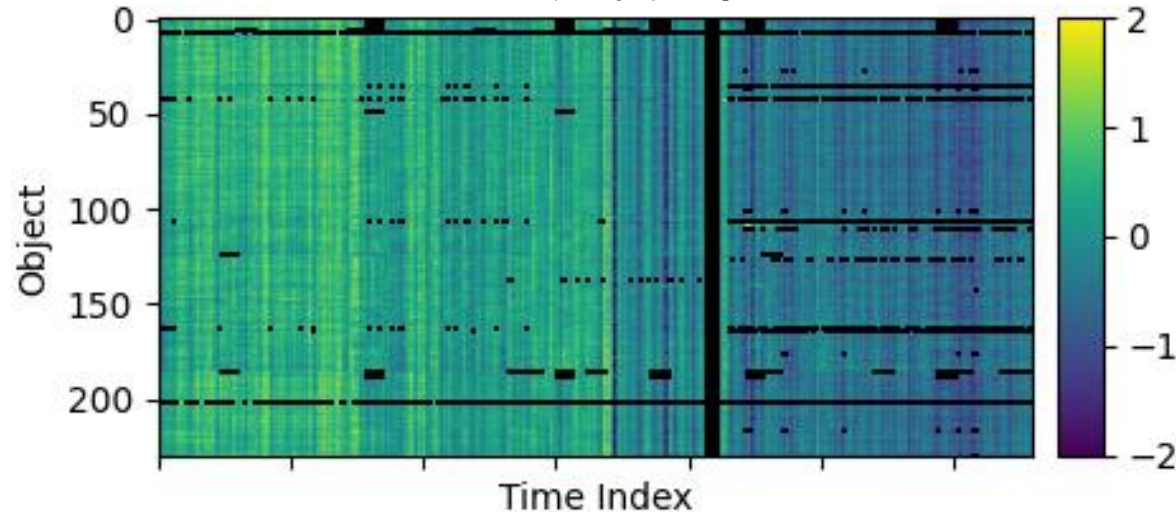


➡ 非一様な大気変動の影響を効果的に除去

測光パイプラインの開発

- 特異値分解(SVD)を用いた相対測光を実装
 - ▶ 視野内の多くの星に共通するトレンドだけを抽出

生の光度曲線

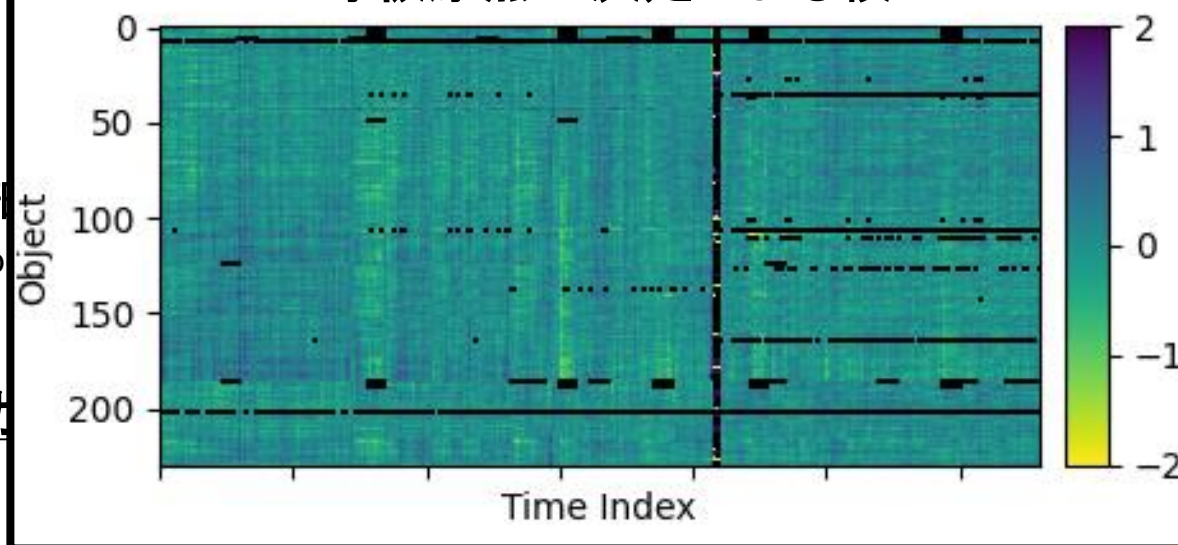


▶ 縦縞や、逆位相的なトレンドが残っている

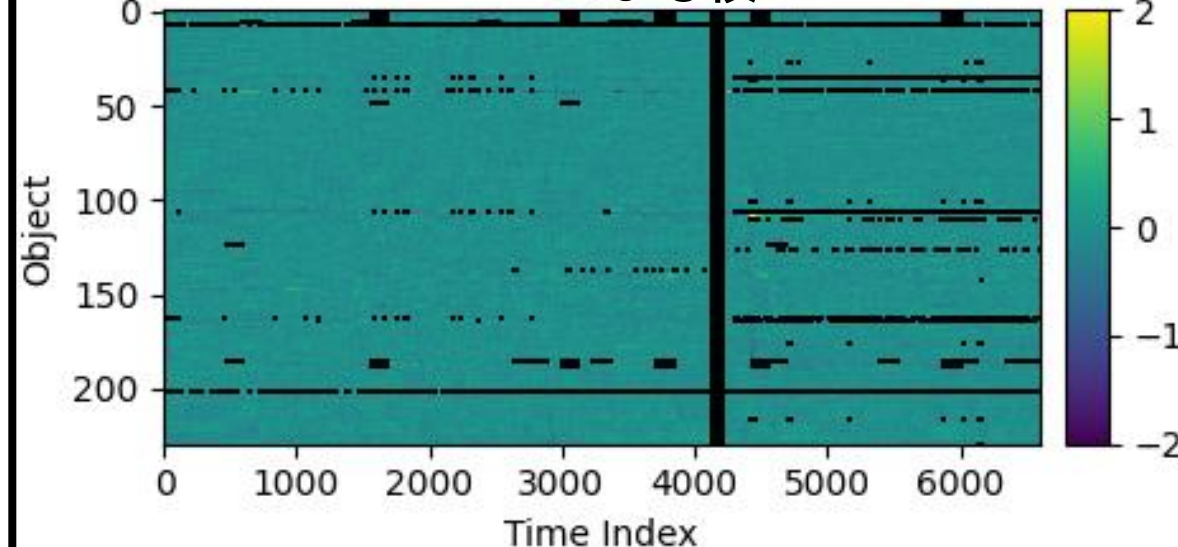
- SVDによる較正
 - ▶ 目立つパターンは見られない

➡ 非一様な大気変動の影響を効果的に除去

等級原点の決定による較正

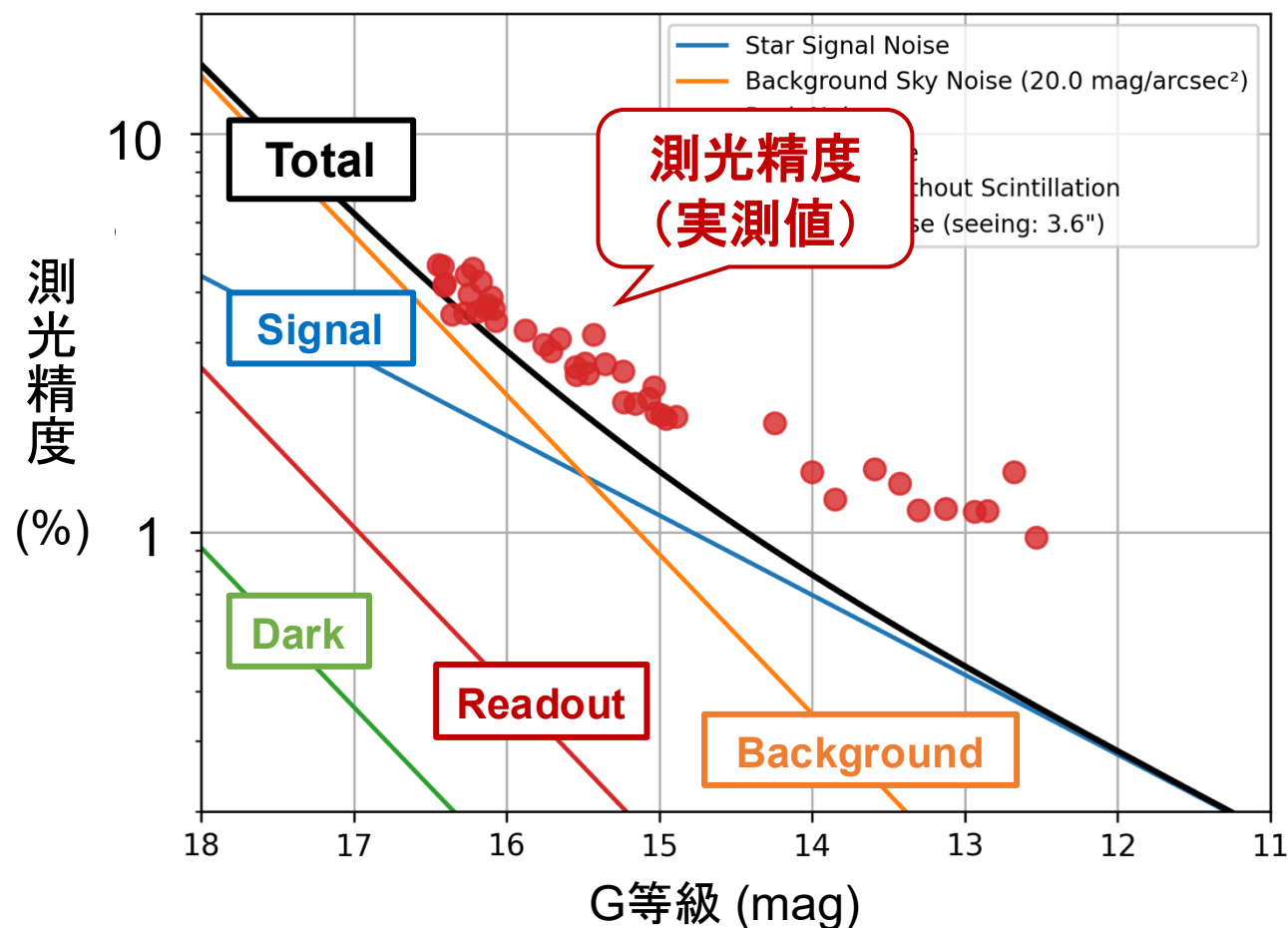


SVDによる較正



測光精度の評価

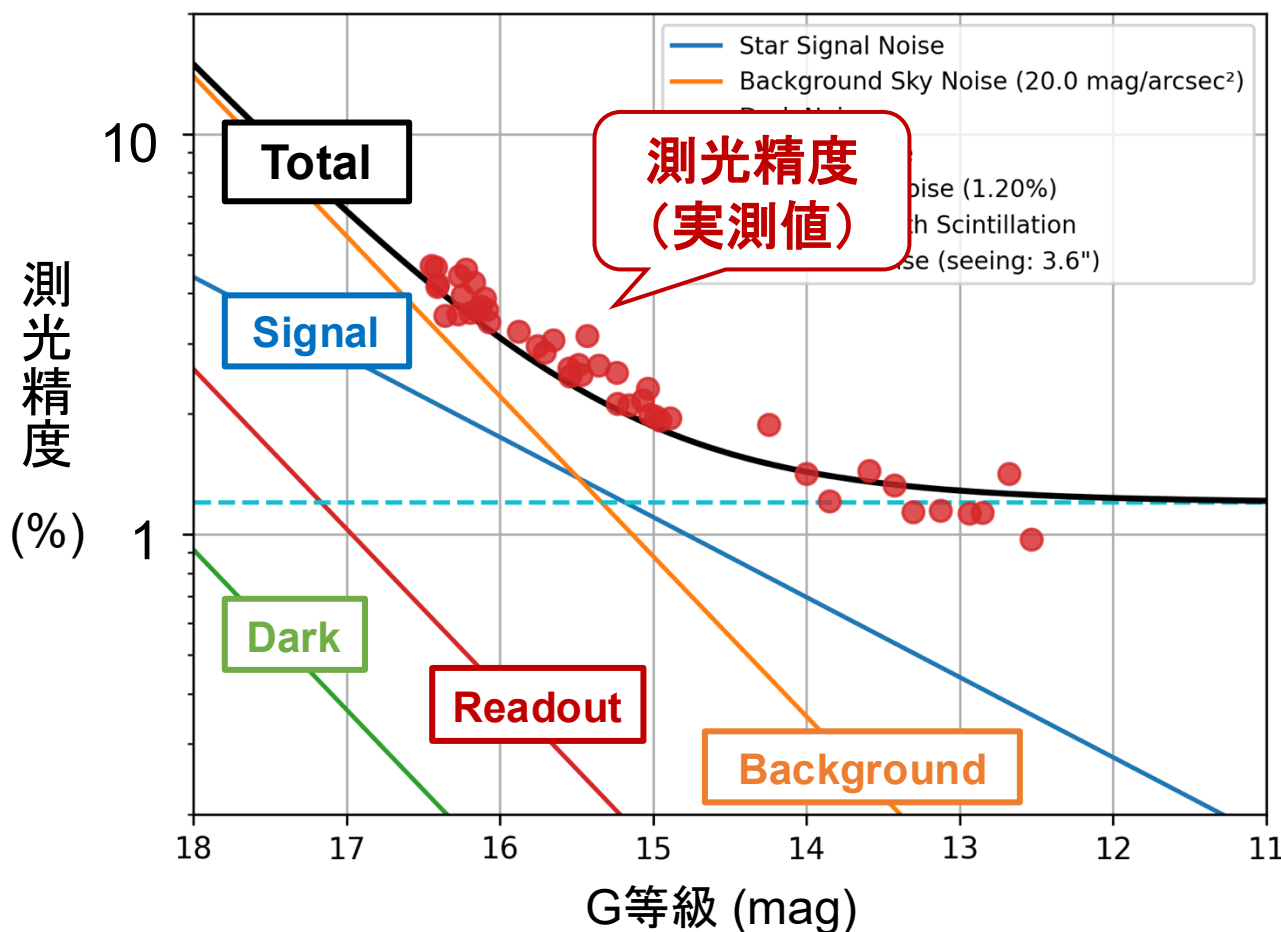
- 測光精度 (連続120フレームの標準偏差 ÷ 中央値): $\lesssim 15$ magにおいて、1-2%



(各ノイズ成分の寄与は、倉島さんによる計算)

測光精度の評価

- 測光精度 (連続120フレームの標準偏差 ÷ 中央値): $\lesssim 15$ magにおいて、1-2%
- シンチレーションリミットの存在が示唆される

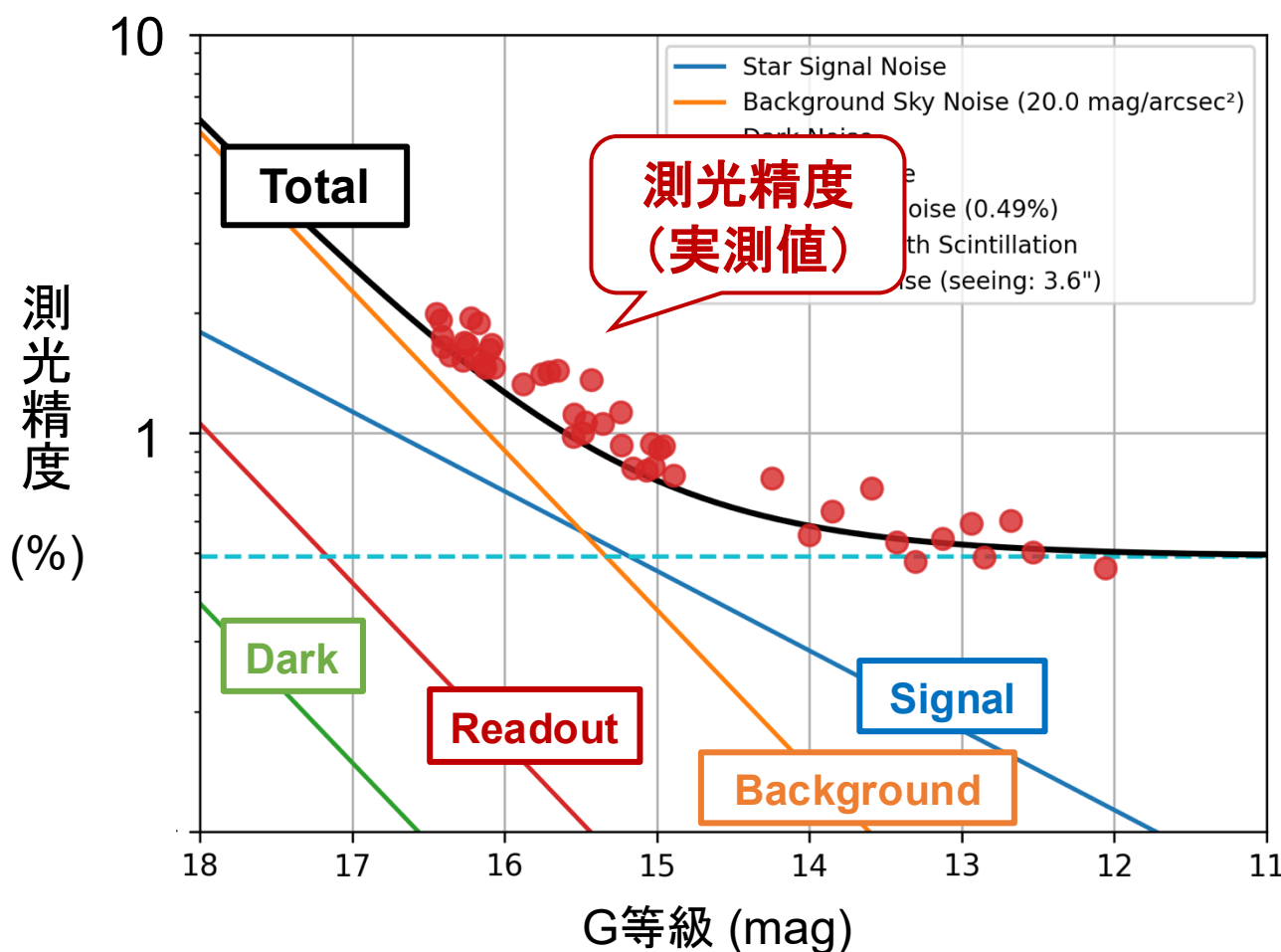


シンチレーションリミット: **1.2%**
(1.0 s、シーイング 3.6")

(各ノイズ成分の寄与は、倉島さんによる計算)

測光精度の評価

- シンチレーションレベルは、露光時間を長くすることで低減される



シンチレーションリミット: **0.5%**
(6.0 sスタック、シーイング 3.6")

(各ノイズ成分の寄与は、倉島さんによる計算)

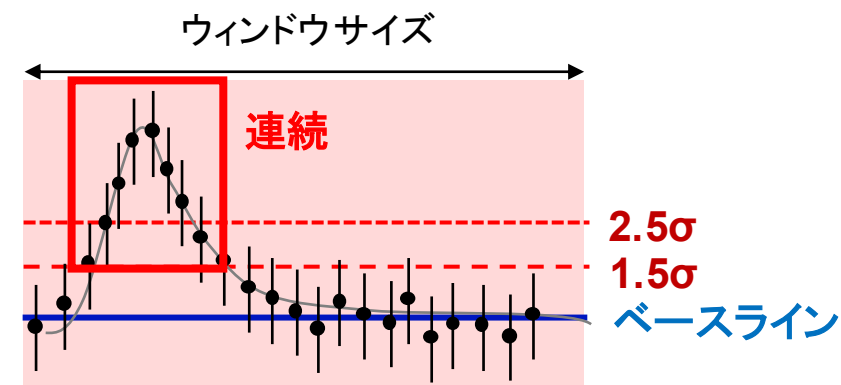
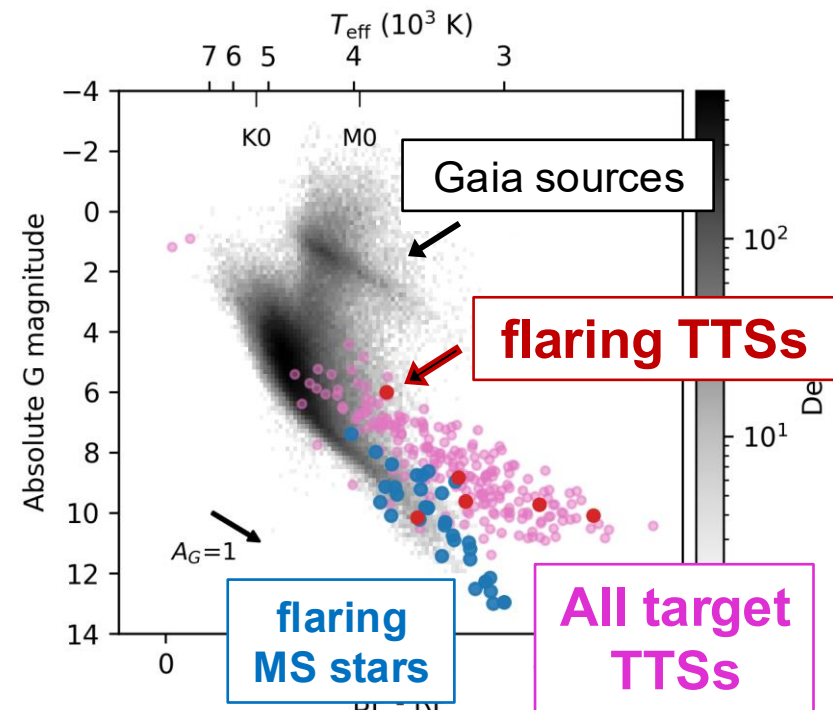
フレア検出とその結果

- 同定されているTタウリ型星(**TTs**) 239個 ($G \lesssim 16.5$ mag)
すべての光度曲線を目視で確認 (Kenyon et al. 2008, Luhman 2023)

➡ 7件のフレアを検出

- 比較のため、視野中の星(**MS stars**) $\sim 10^5$ 個からフレアサンプルを抽出(以下のアルゴリズムによる):
 1. ウィンドウサイズを変えながら、ローカルなベースラインとノイズレベル(σ)を計算していく
 2. $>2.5\sigma$ を5点以上含む、 $>1.5\sigma$ の連続点をフレア候補とする
 3. 光度曲線・元データを目視して確認する

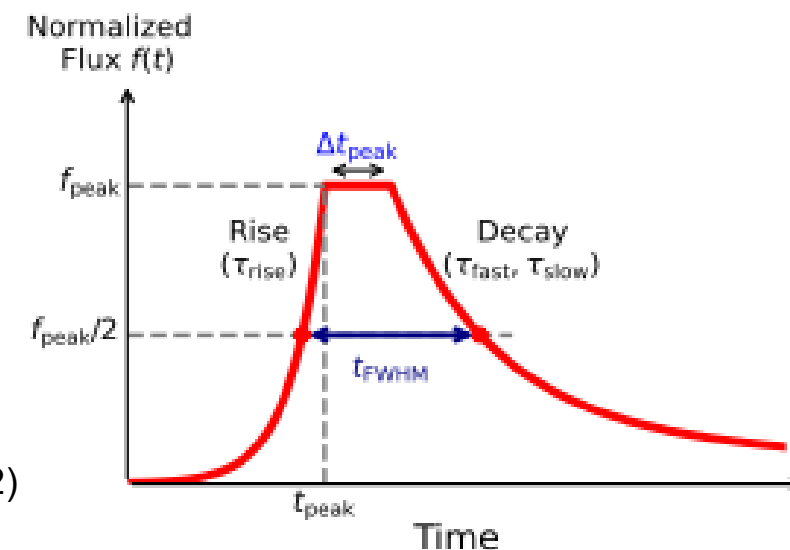
➡ 38件のフレアサンプルを抽出



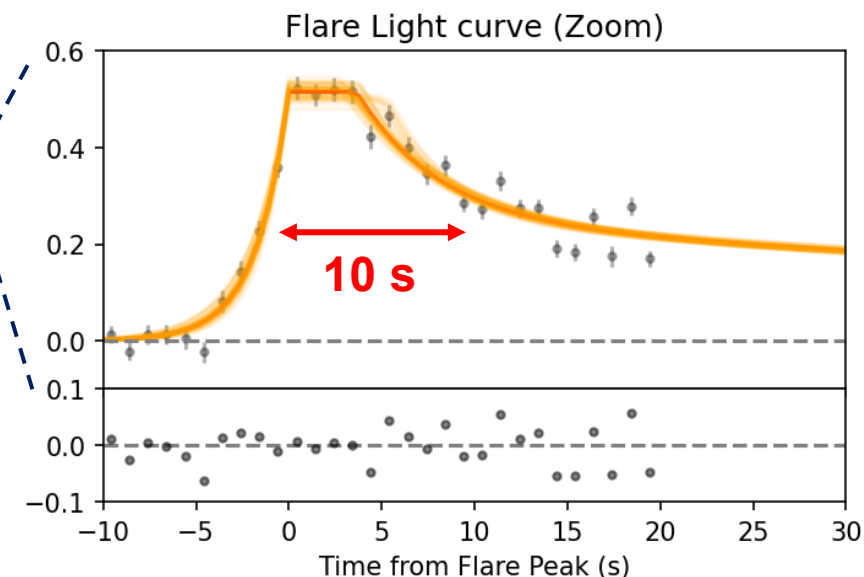
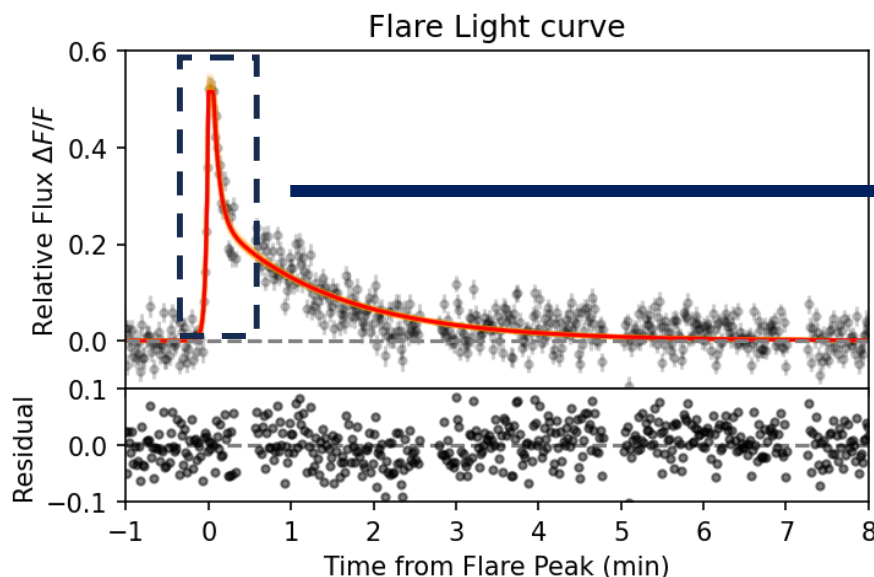
フレア光度曲線のモデルフィッティング

- 以下の要素で光度曲線をフィッティング:
 - 指数関数による立ち上がり
 - フラットなピーク
 - fast / slowモードの指数関数による減衰

(based on Davenport et al. 2014; Aizawa et al. 2022)

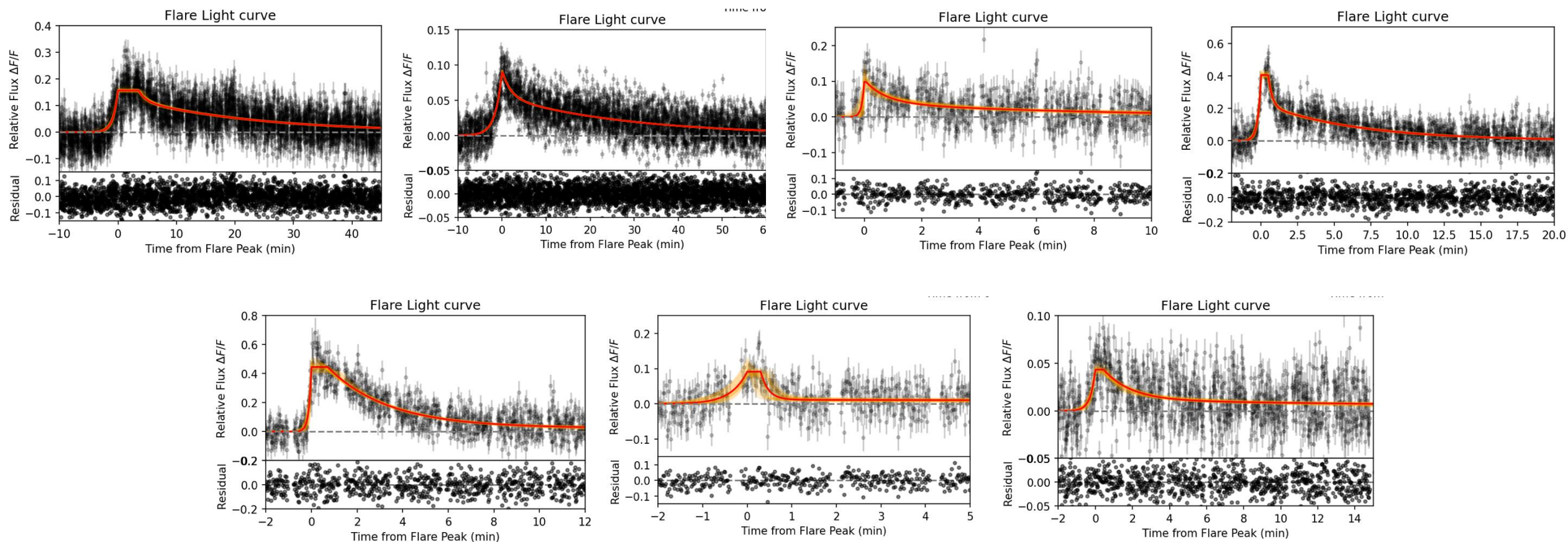


- 光度曲線のモデルフィッティング例 (M型主系列星のフレア):



フレア光度曲線のモデルフィッティング

- 光度曲線のモデルフィッティング例(7件のTタウリ型星フレア):



エネルギー・継続時間の関係

- $T_{\text{flare}} = 10000 \text{ K}$ としてエネルギーを計算
(the same way as Shibayama et al. 2013)

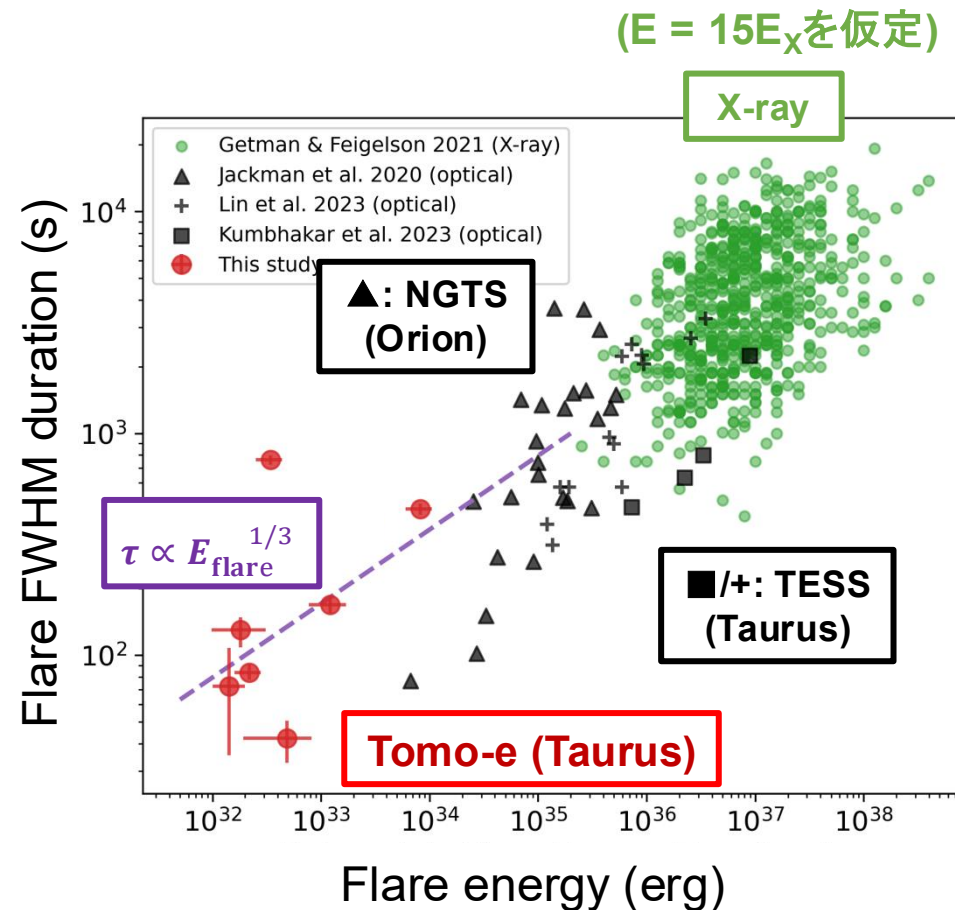
- 本研究で検出されたTTSフレア:

- ▶ $E_{\text{flare}} \gtrsim 10^{32} \text{ erg}$: X線や他の可視光装置で検出されたフレアよりも**2桁小さいエネルギー**
 - ▶ $t_{1/2} \gtrsim 40 \text{ s}$: TESS(最速20 sケーデンス)では検出が難しい時間領域

- 概ね $\tau \propto E_{\text{flare}}^{1/3}$ に従っている

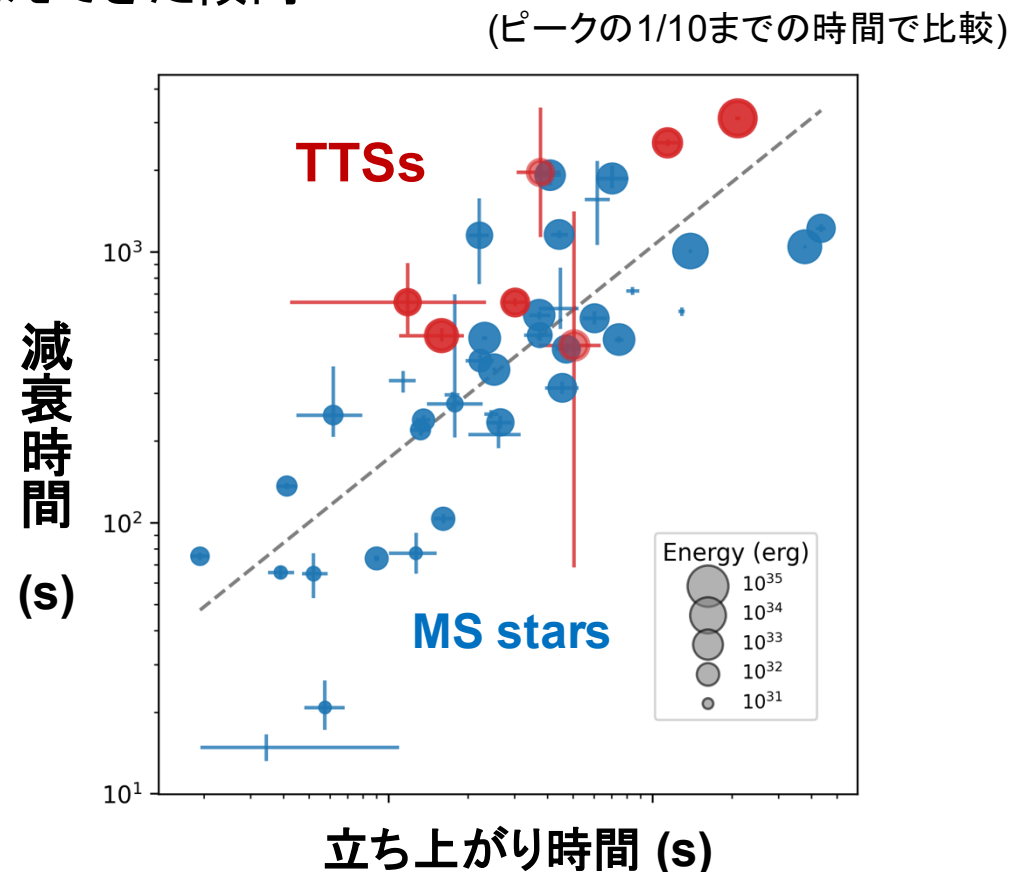
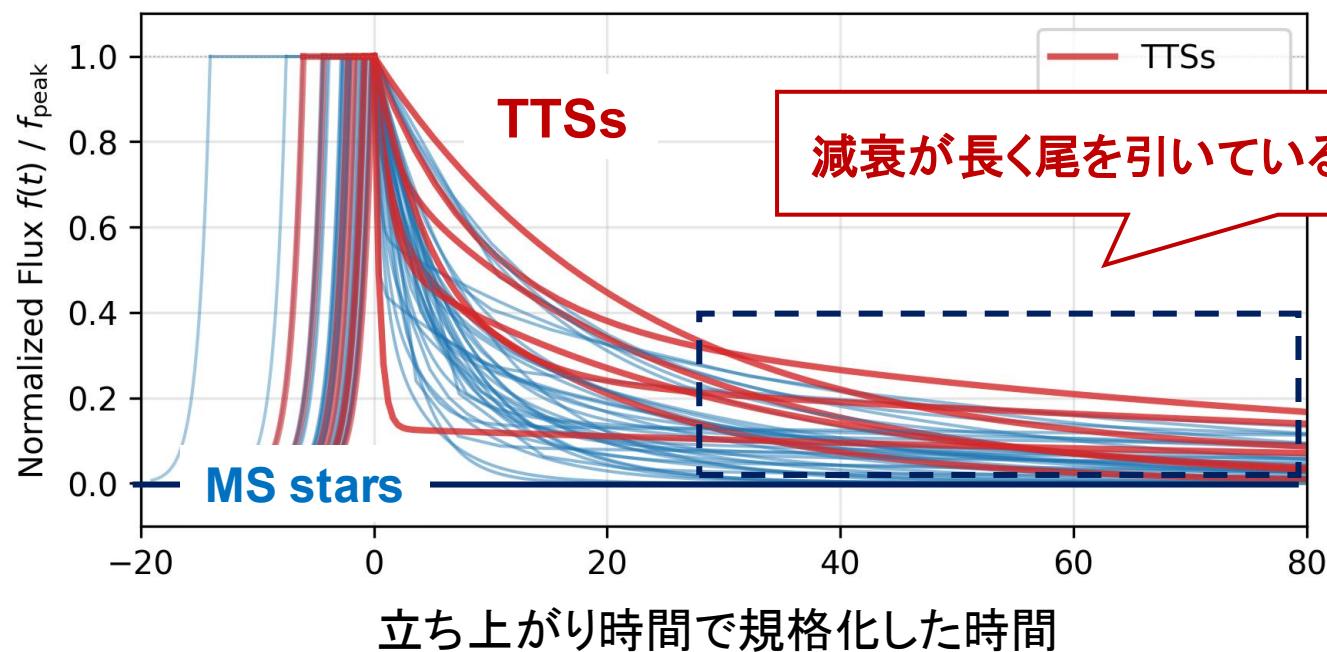
- ▶ 太陽・G型主系列星の白色光フレアと同様の関係

(Maehara et al. 2015; Namekata et al. 2017)



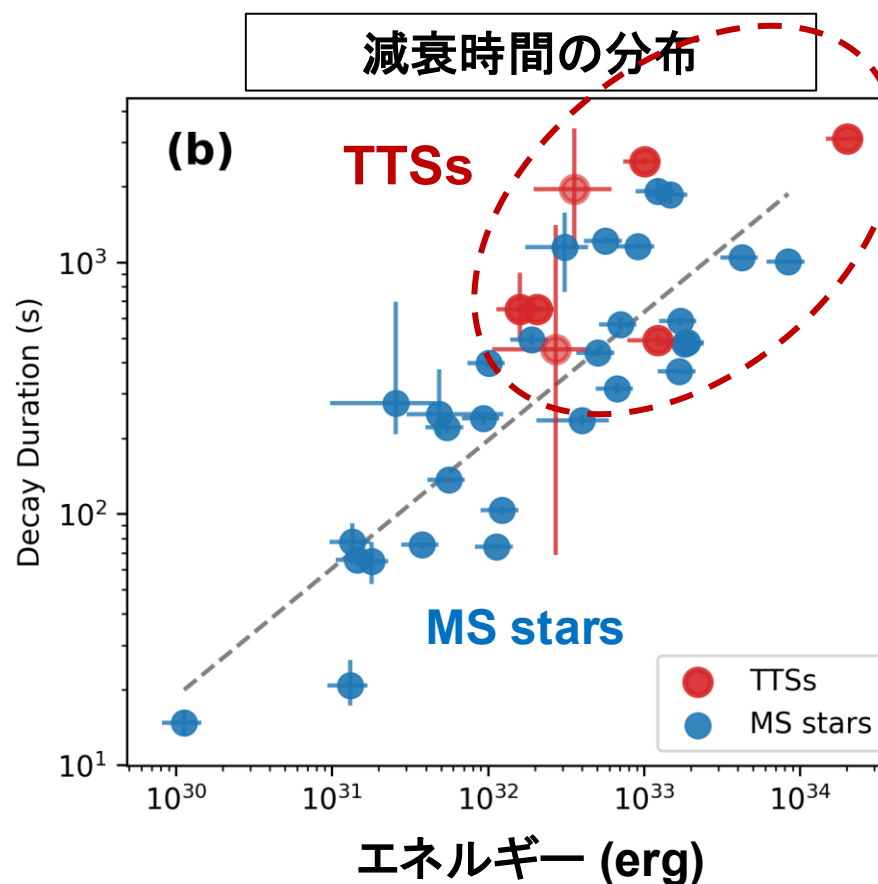
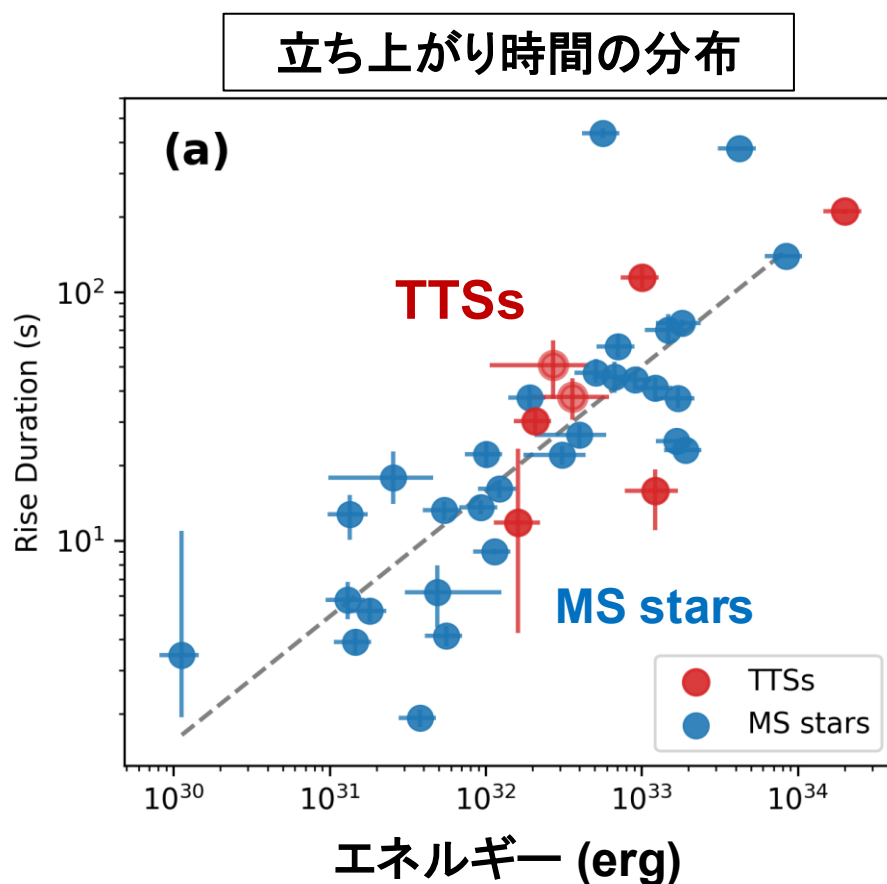
光度曲線の形状比較

- TTSフレアは、同じ立ち上がり時間の主系列星フレアよりも**減衰が明確に長く続いている**
 - ▶ 減衰時間 vs 立ち上がり時間ではMSフレアより上方に分布
 - ▶ Tomo-e Gozenの高時間分解能観測によって初めて見えてきた傾向



TTSフレアの長い減衰時間

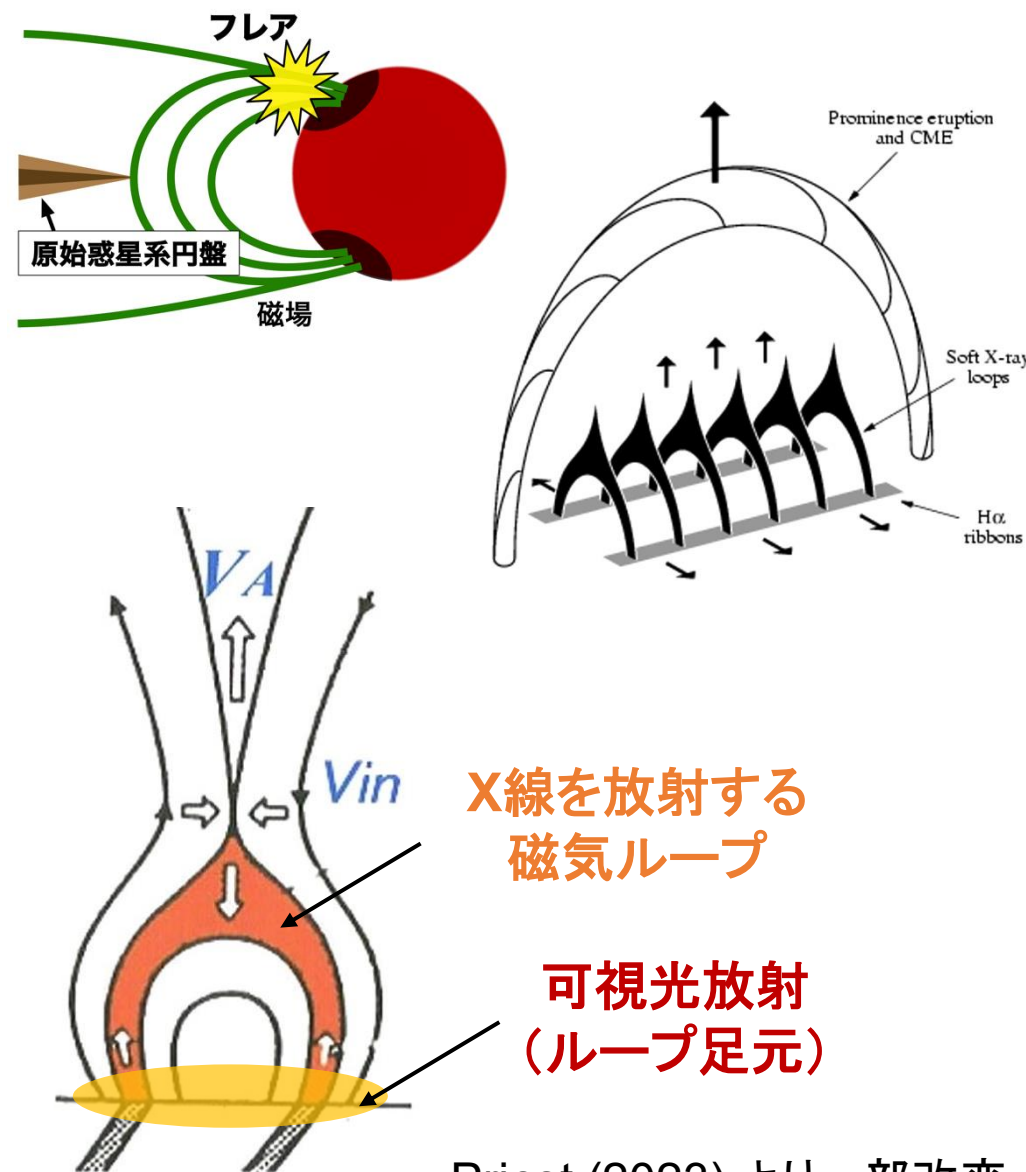
- 同じエネルギーで比較すると、立ち上がり時間には分布の違いはなく、
減衰時間のみが約2.3倍長くなっている



約2.3倍
上方

TTSフレアの長い減衰時間の原因

- X線においても、主系列星よりも長い減衰時間が観測される:
 - ▶ 長い磁気ループ ($\geq 1 R_{\text{star}}$) (e.g., Getman et al. 2021)
 - ▶ 磁場構造の複雑さ e.g., アークード構造 (Pandey & Singh 2008)
- 巨大で複雑なループからの放射(back-warming)や熱伝導による持続的な加熱によって、ループ足元付近の可視光放射についても減衰時間が引き伸ばされている可能性がある
 - ▶ 可視光の減衰時間がX線の減衰時間を反映しているならば、X線では検出が難しい小規模フレアから、磁場構造に制限を与えられる？



Priest (2023) より一部改変

まとめ・今後の展望

- 木曾シュミット望遠鏡Tomo-e Gozenを用いて、**おうし座星形成領域中のTタウリ型星に対して1秒ケーデンスのモニター観測**を実施した。
- 先行研究よりも**2桁エネルギーの小さい範囲** ($E_{\text{flare}} \gtrsim 10^{32}$ erg) で、合計7件のフレアを検出した。
- Tタウリ型星のフレアは主系列星よりも**減衰時間が長い傾向**があり、**巨大で複雑な磁気ループからの持続的な加熱**を反映している可能性がある。

【今後の展望】

- X線との同時観測による減衰期加熱の検証
- 光度曲線中に見られる秒スケールの細かい構造の解析
(Tomo-e Gozen最大の強み)

