

Kepler全データの解析による太陽型星 スーパーフレアの統計的性質

京都大学理学研究科宇宙物理学教室

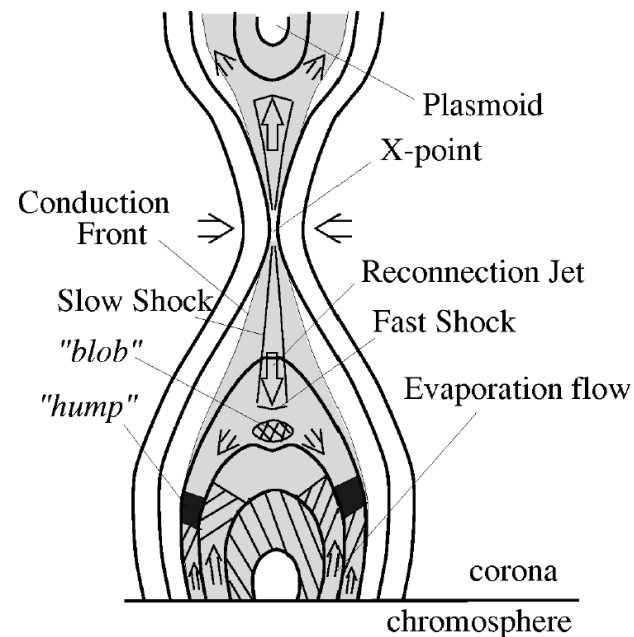
修士二年 岡本壮師

野津湧太(コロラド大),前原裕之(NAOJ), 行方宏介,幾田佳,
野上大作,柴田一成(京大),本田敏志(兵庫県立大)

太陽フレア

太陽大気中で生じる爆発的な増光現象

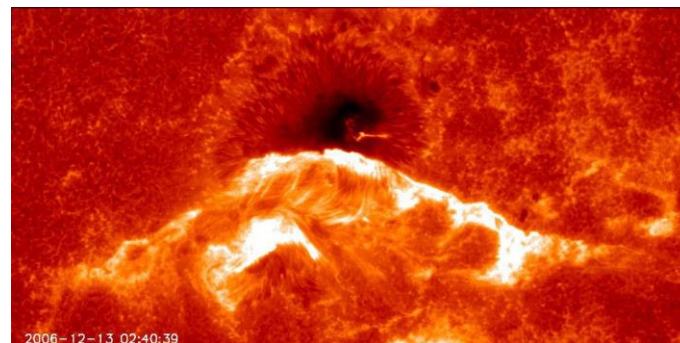
- 継続時間:数分~数時間
- 放射エネルギー: 10^{26} erg~ 10^{32} erg
- 黒点近傍で起こり、
黒点の磁場エネルギーをリコネクション
によって解放している



Yokoyama & Shibata, 1998

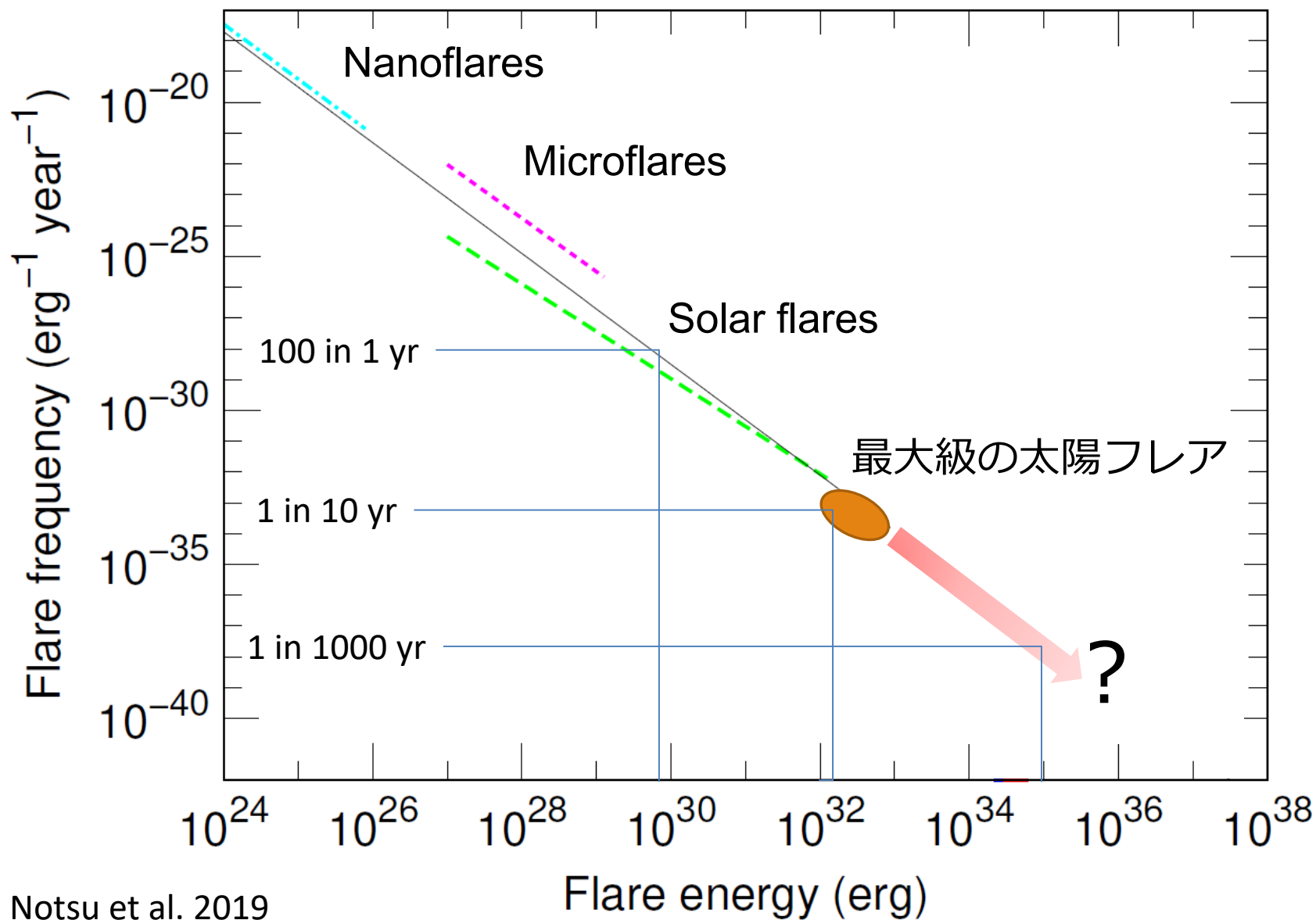
地球への影響

- 磁気嵐
 - 放射線
- 様々な影響を与える



©ひので SOT Ca II

太陽フレアの発生頻度



スーパーフレア

フレアは太陽以外の恒星でも起こる：恒星フレア

最大級の太陽フレア(10^{32} erg)の10~ 10^6 倍の
エネルギーを放出するフレアも観測された
→スーパーフレア

スーパーフレアを起こしやすい星

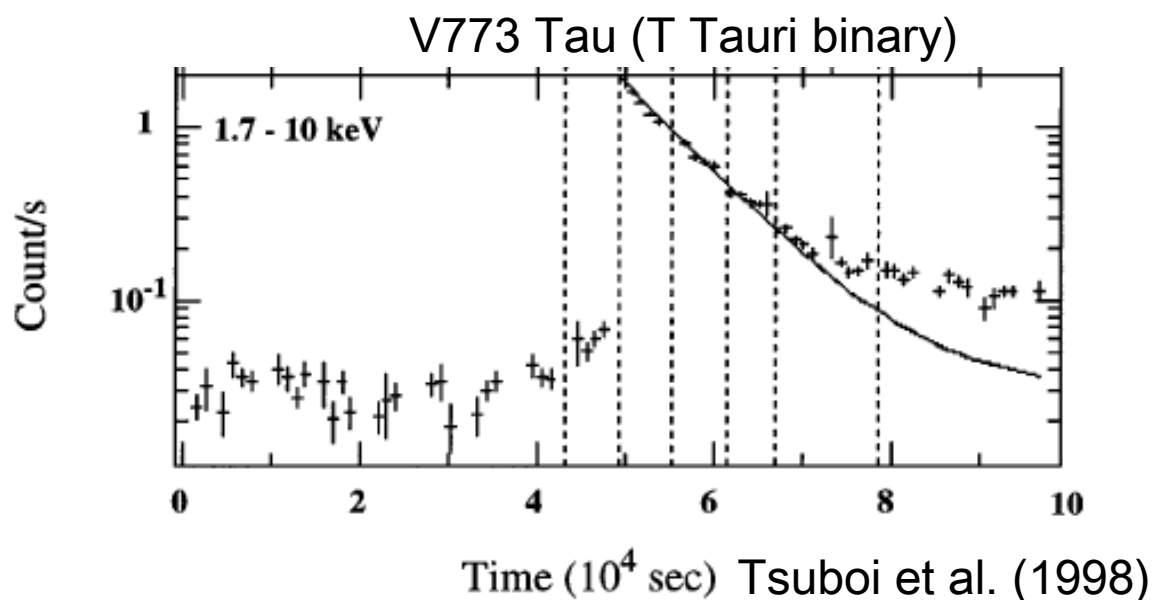
- 若くて自転の速い星（周期数日）

cf. 行方さん講演

- 低温度星(M型星)

cf. 前原さん講演

- 近接連星



太陽でスーパーフレアは起こるか？

スーパーフレアが起こるとしても滅多に起こらない

人類の太陽フレア観測の歴史、約160年

発生頻度が1000年に一度のフレアが起こったことがあるのか
わからない



滅多に起こらないイベントでも
多数の星を観測すれば短い期間で観測できるだろう

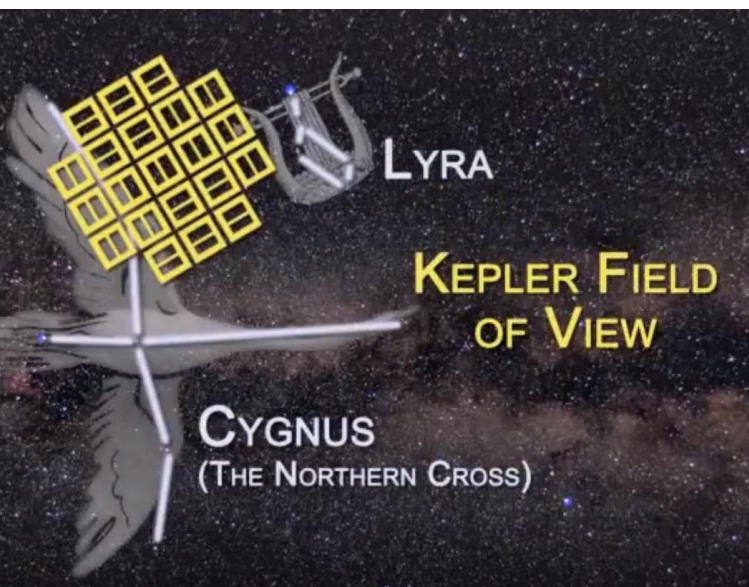
- 多数の太陽型星（G型主系列星）を観測し、フレアが起こるときの増光を探す
- スーパーフレアによる太陽型星の増光は僅か
 10^{32} erg : ~0.01% 10^{34} erg : ~1%

Kepler宇宙望遠鏡

- 系外惑星探査衛星
- 高い測光精度 $\sim 10^{-33}$ erg のフレア(振幅 $\sim 0.1\%$)検出可能
- 観測波長:400nm~900nm
- 約9万個の太陽型星を1500日(4年間)に渡って連続精密測光(30min cadence)



フレアで星がわずかに明るくなる現象を
Keplerデータから探索



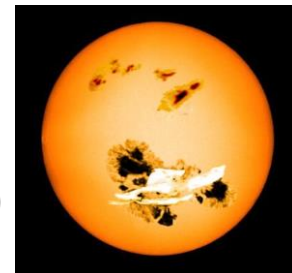
©NASA



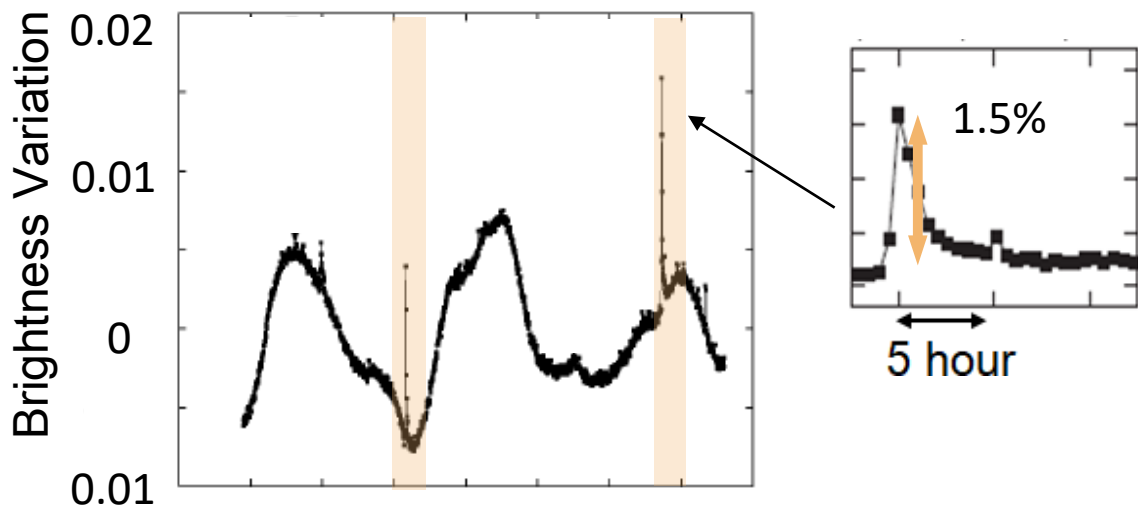
太陽型星のスーパーフレア発見

初期Keplerデータ(約500日分)から太陽型星(G型主系列星)のスーパーフレアを多数発見(279天体, 1547event)

(Maehara+2012, Shibayama+2013)



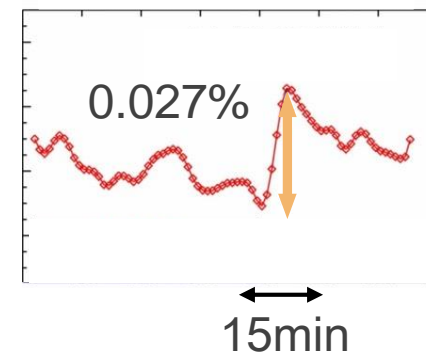
スーパーフレアのライトカーブ



時間(BJD-2454000)

Maehara et al. (2012)

太陽フレアのライトカーブ



Kopp et al. (2005)

太陽類似星($20 \text{ day} < P_{\text{rot}}$, 5600-6000K)でも頻度は低いがスーパーフレアを起こす

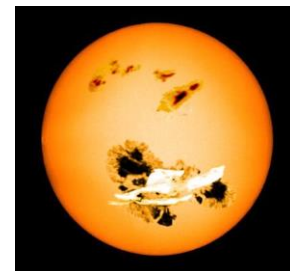
($> 10^{34} \text{ erg}$ のものは数千年に一度)

Notsu+2019

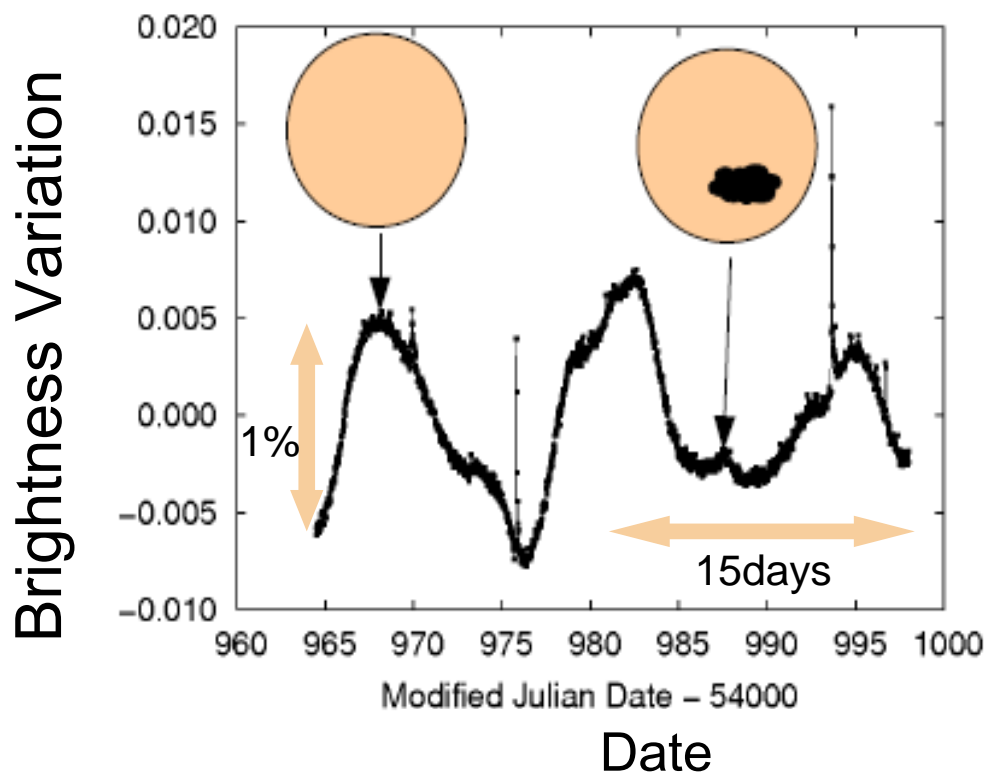
準周期的な変光

太陽フレア : 黒点の磁気エネルギー解放

スーパーフレア : 巨大黒点の磁気エネルギー解放



スーパーフレアを起こすには巨大黒点が必要



振幅 ≡ 黒点サイズ
周期 ≡ 自転周期

星の自転と年齢に伴うスーパーフレアの変化

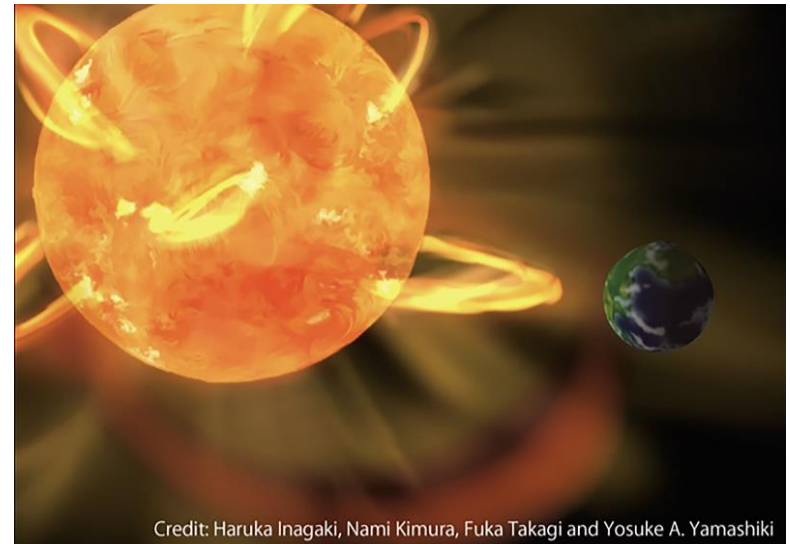
星の自転周期は年齢と良い相関がある(Ayres 1997; Guedel 2007)

自転周期が短い：若い星

自転周期が長い：年老いた星

太陽型星(G型主系列星)の自転周期依存性を見る

→昔の太陽のスーパーフレア発生頻度もわかる



Kepler全データからスーパーフレア検出

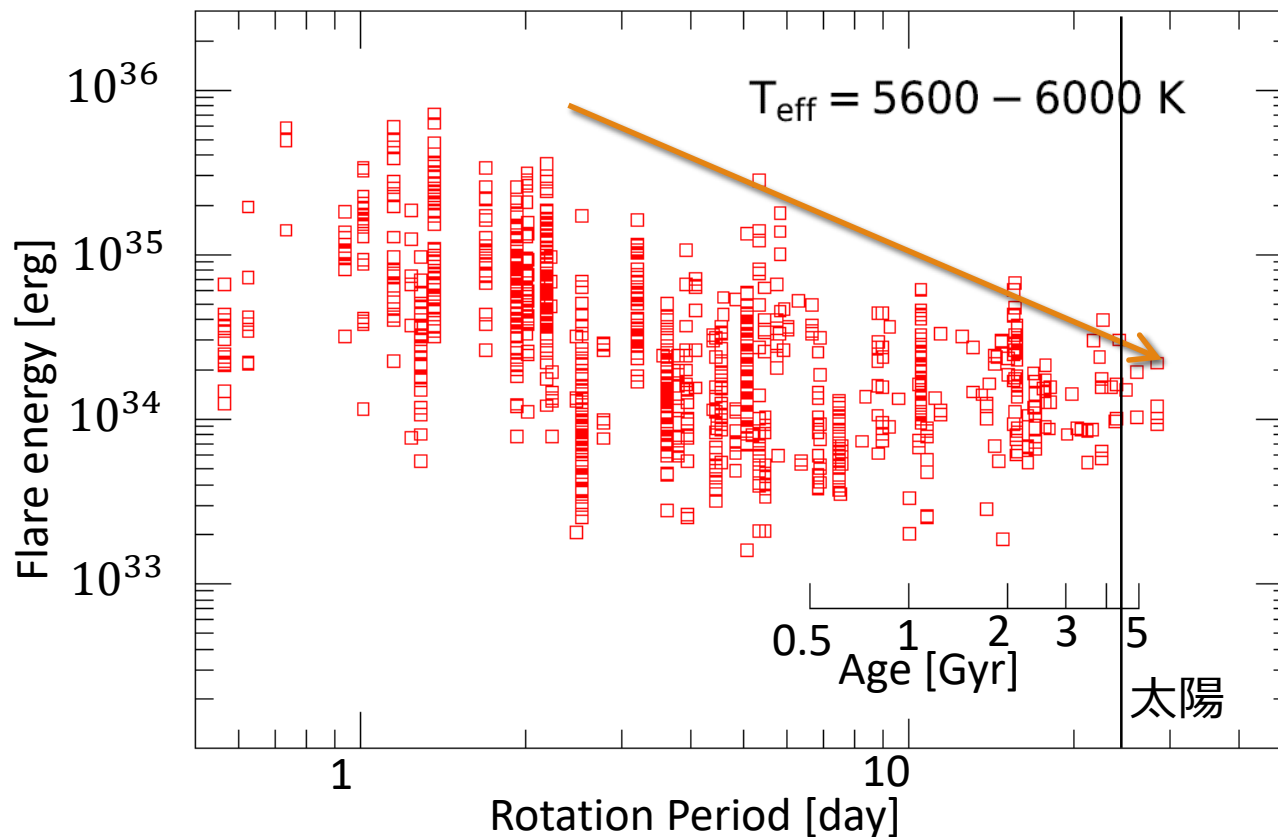
(Okamoto+2021)

- 先行研究では～500日分の観測データしか用いていない
- Gaia-DR2のアップデートによりサンプル数が減少した
- **Keplerの全データ(～1500日)**とGaia-DR2のパラメータを使用
- 太陽類似星($20 \text{ day} < P_{\text{rot}}$, 5600-6000K)のサンプルは先行研究の**～12倍**

	天体数	フレア星	フレア数
太陽型星 (G型主系列星, 5100-6000K)	11601	265	2341
太陽型星のうち 5600-6000K	5074	117	929
太陽類似星 ($20 \text{ day} < P_{\text{rot}}$, 5600-6000K)	1641	15	26

*太陽: $T \sim 5780$, $P_{\text{rot}} \sim 25 \text{ days}$

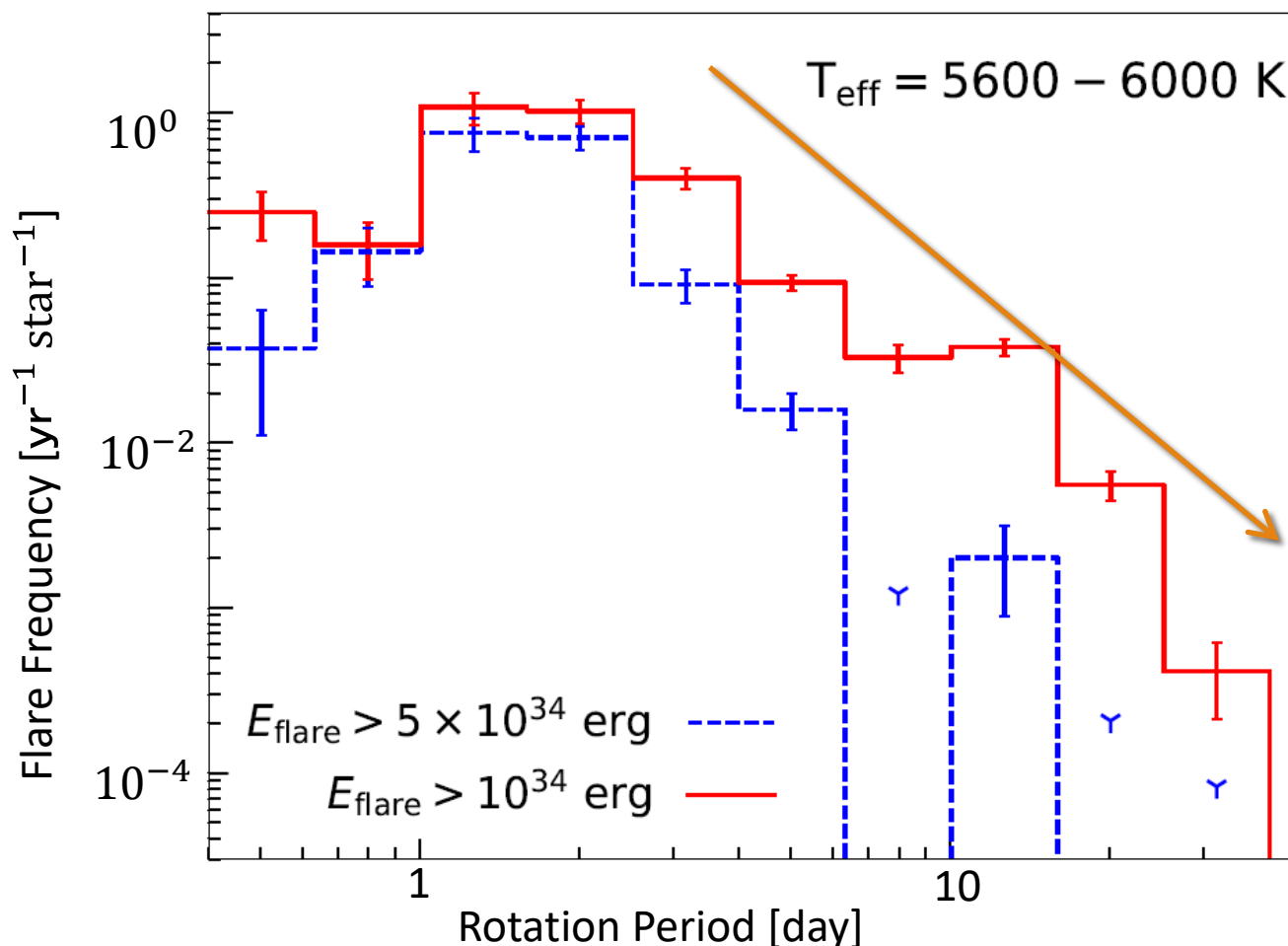
自転周期(年齢) vs フレアエネルギー



- フレアエネルギー上限値: 自転周期依存が明確にみられる
- 自転の速い星($P_{\text{rot}} \sim 1\text{-}2 \text{ day}$): $1 \times 10^{36} \text{ erg}$
- 自転の遅い星($P_{\text{rot}} > 20 \text{ day}$): $6 \times 10^{34} \text{ erg}$

*太陽: $T \sim 5780, P_{\text{rot}} \sim 25 \text{ days}$

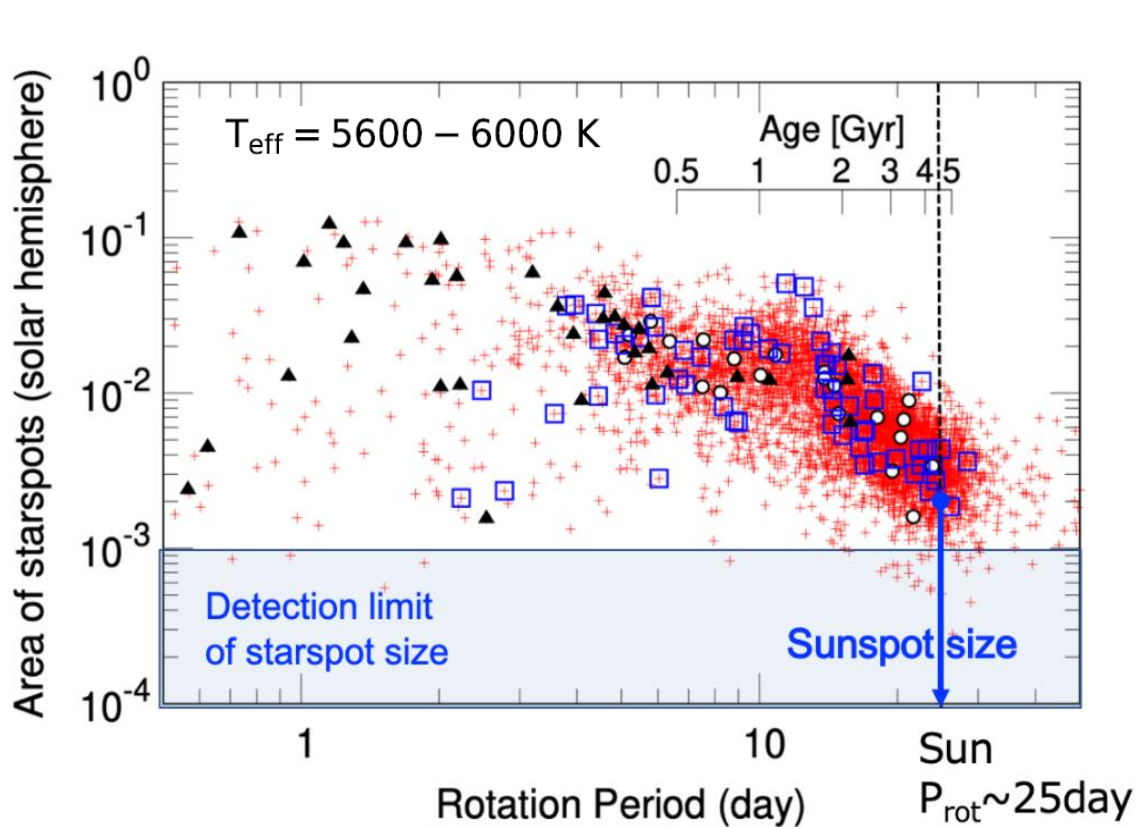
自転周期(年齢) vs フレア発生頻度



- フレア発生頻度: **自転周期(年齢)依存がみられる** ($P_{\text{rot}} > 2-3 \text{ days}$)
- 自転の速い星 ($P_{\text{rot}} \sim 1-2 \text{ day}$) は
自転の遅い星 ($P_{\text{rot}} > 20 \text{ day}$) の約100倍発生頻度が高い

*太陽: $T \sim 5780, P_{\text{rot}} \sim 25 \text{ days}$

自転周期(年齢) vs 黒点サイズ



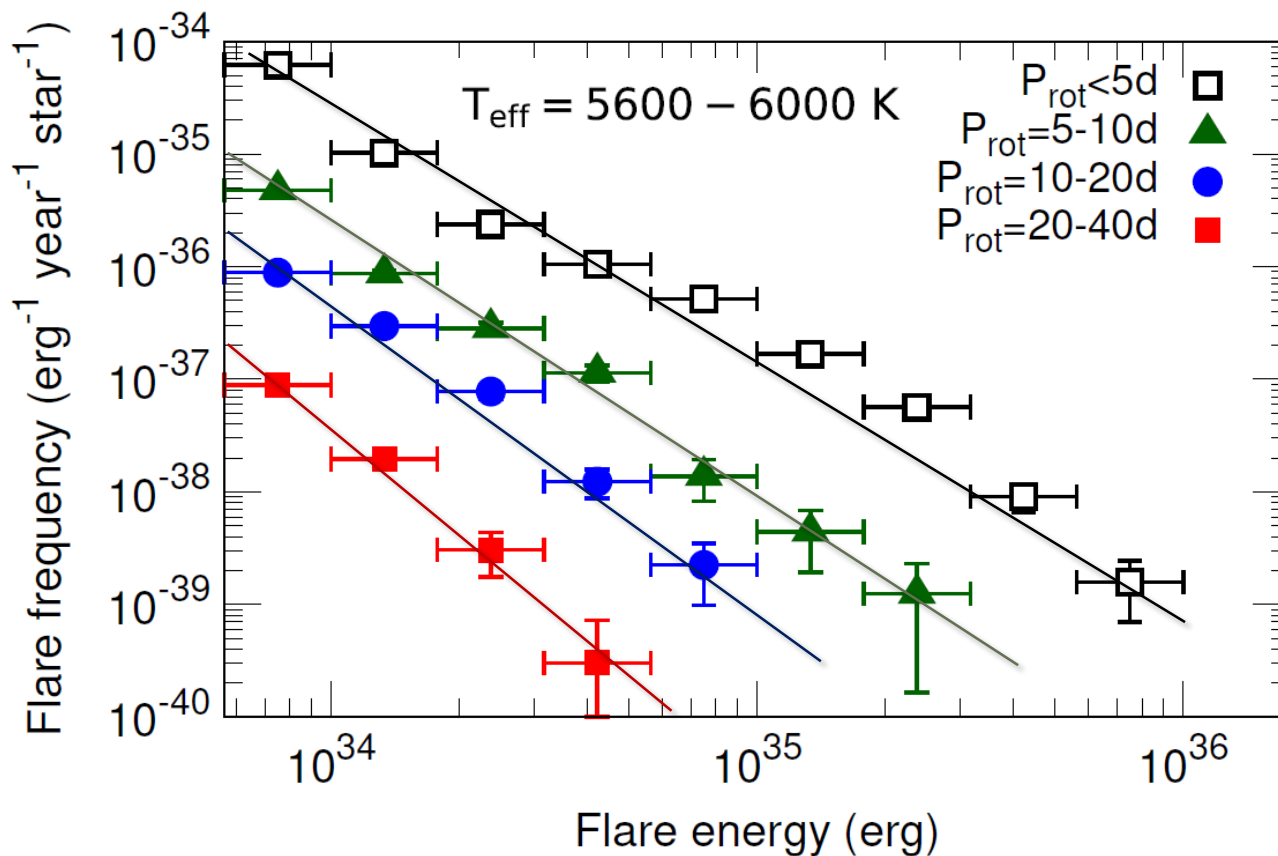
$E_{\text{flare,max}} > 1 \times 10^{33} \text{ erg}$ ○
 $E_{\text{flare,max}} > 1 \times 10^{34} \text{ erg}$ □
 $E_{\text{flare,max}} > 5 \times 10^{34} \text{ erg}$ ▲

- 黒点サイズ上限：自転周期の増加と共に減少している
- 太陽類似星(5600-6000K, $P_{\text{rot}} > 20 \text{ days}$)も巨大黒点($\sim 1\%$ 太陽半球)を持つ

スーパースペアを起こすには巨大黒点が必要である

フレア発生頻度 vs フレアエネルギー

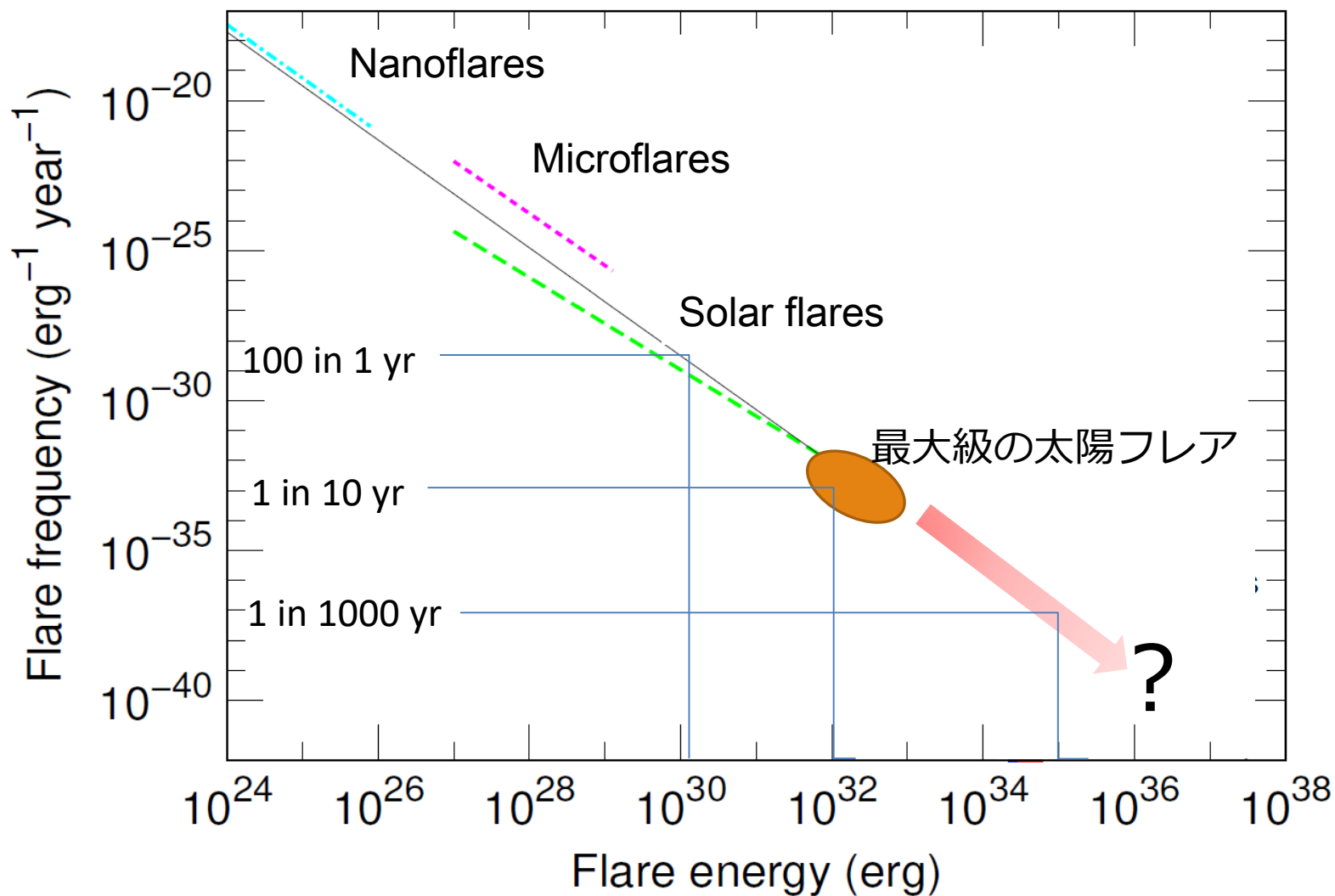
(Okamoto+2021)



- $dN/dE \propto E^\alpha$ の傾向がみられる
- 自転周期に関わらず
フレアエネルギーの増加と共に発生頻度は減少

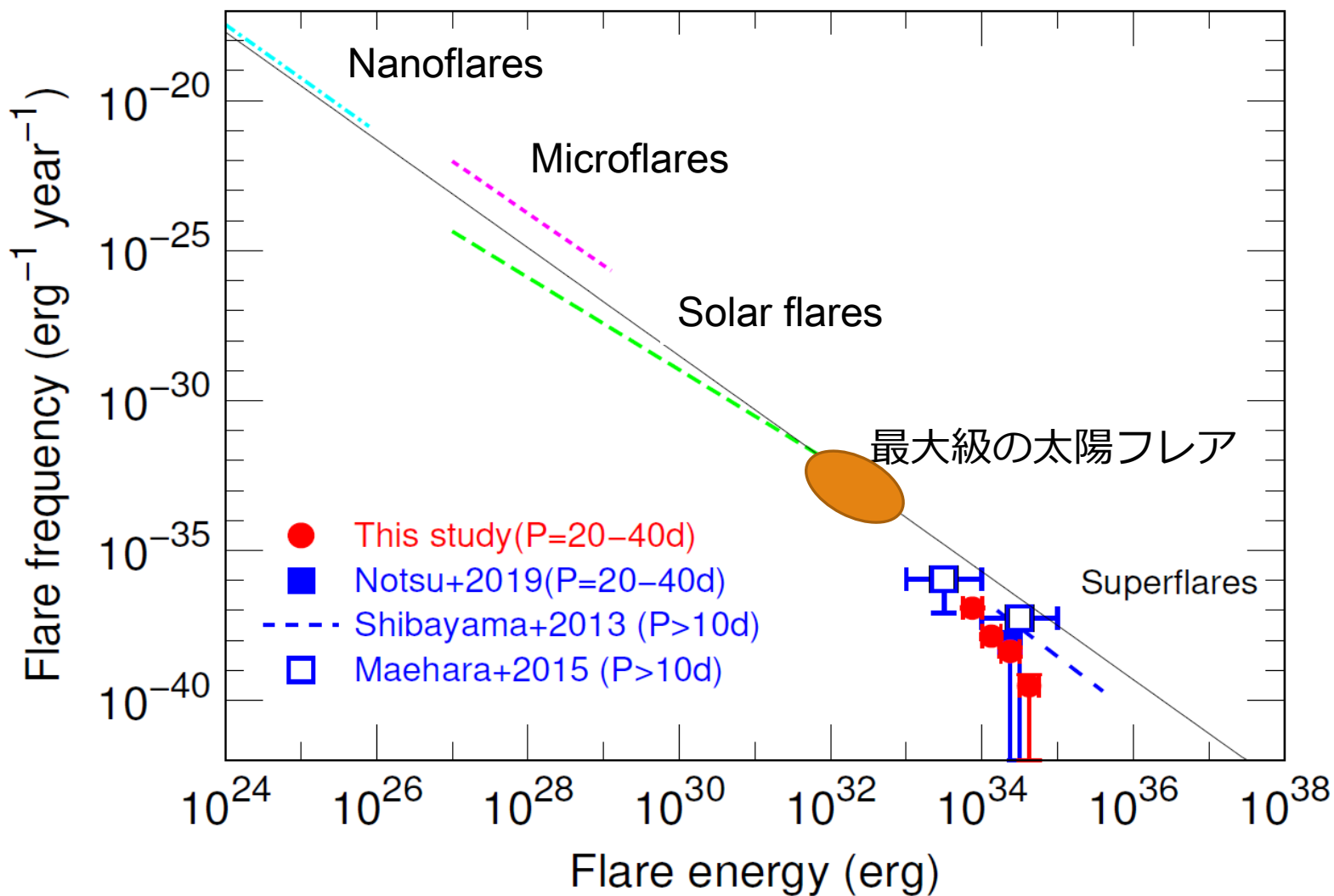
フレア発生頻度

太陽と太陽類似星($20 \text{ day} < P_{\text{rot}}, 5600\text{-}6000\text{K}$)



フレア発生頻度

太陽と太陽類似星($20 \text{ day} < P_{\text{rot}}, 5600\text{-}6000\text{K}$)



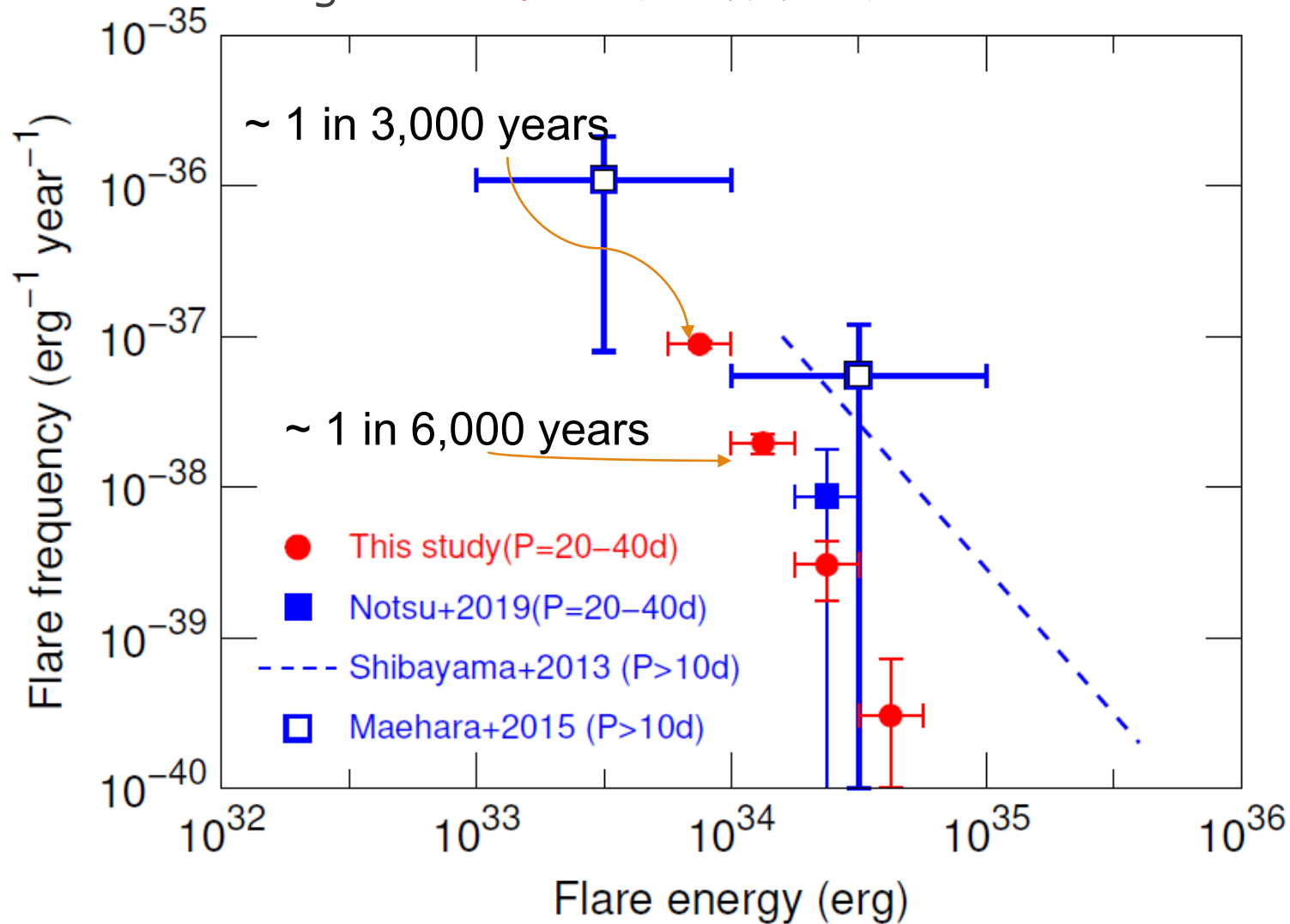
フレア発生頻度

太陽類似星(20 day < P_{rot}, 5600-6000K)

(Okamoto+2021)

~ 7×10^{33} erg : 3000年に一回

~ 1×10^{34} erg : 6000年に一回の頻度で発生



Summary

Gaiaのデータを使い、Keplerデータ(1500日)からスーパーフレアの検出

→**サンプル数が増加**し、より正確な議論が可能に

- 太陽型星(G型主系列星) :

フレア発生頻度、フレアエネルギーの上限値
は自転周期(年齢)の増加と共に減少

- 太陽類似星($20 \text{ day} < P_{\text{rot}}$, 5600-6000K) :

フレア発生頻度はフレアエネルギーと共に減少

$\sim 7 \times 10^{33} \text{ erg}$: **3000年に一回**

$\sim 1 \times 10^{34} \text{ erg}$: **6000年に一回**の頻度でスーパーフレアが発生する

