

太陽型星におけるスーパーフレアのエネルギーと継続時間の関係

前原裕之(国立天文台)、柴山拓也(名古屋大学)、野津湧太、野津翔太(京都大学)、
本田敏志(兵庫県立大学)、野上大作、柴田一成(京都大学)

1. Introduction

太陽フレアは太陽大気(コロナ)中で起こる爆発現象で、黒点付近に蓄えられた磁気エネルギーが磁気リコネクションによって熱や粒子の運動エネルギーなどに変換される過程であると考えられている。通常の太陽フレアでは1回のフレアで 10^{29} - 10^{32} erg程度のエネルギーが放出され、これまでの観測された最大級の太陽フレア(放出されるエネルギーが 10^{32} erg程度)はおおよそ10年に1回の頻度で起こることが分かっている(e.g. Shibata & Magara 2011)。太陽以外の恒星ではさらに多くのエネルギー(10^{33} - 10^{38} erg)を放出する「スーパーフレア」と呼ばれるフレアが起こることも知られており、最近ではケプラー宇宙望遠鏡の観測データから、太陽型星でも最大級の太陽フレアの10-10000倍のエネルギー(10^{33} - 10^{36} erg)を放出するスーパーフレアが起こることが明らかとなった(Maehara et al. 2012, Shibayama et al. 2013)。しかし、これまでの太陽型星のスーパーフレアの研究で用いられたケプラーのデータは時間分解能が低く(30分)、フレアの検出やエネルギーの大きさの見積もりには用いることができるものの、継続時間やフレア中の光度変化の様子を調べるには時間分解能が足りなかった。本研究ではケプラーの時間分解能1分のデータからフレアを検出する手法を開発し90例のフレアを検出した。このデータを用いてフレアの継続時間とエネルギーの間に見られる関係を調べた結果について報告する。

2. Data and Method

本研究では、ケプラー宇宙望遠鏡によって2009年4月から2013年5月までに観測されたshort cadence data(時間分解能1分)の中から、太陽型星としてKepler Input Catalogの星の温度(T_{eff})および表面重力加速度($\log g$)がそれぞれ $5100 \leq T_{\text{eff}} < 6000$ K、 $\log g \geq 4.0$ となる条件を満たす天体を選んで解析を行った。この条件に合致する星で、short cadence dataがある天体の数は合計1485個であり、観測天体数×観測時間はおよそ700年に相当する。

フレアの検出は次のような手順で行った。

- 観測時刻 t_i と t_{i-n} における明るさの差分 $\Delta f_{i,n}$ 、 t_{i-1} と t_{i-n-1} における明るさの差分 $\Delta f_{i-1,n-1}$ の2つを用いて、

$$|\Delta f_{i,n} - \Delta f_{i-1,n-1}|$$

を各観測時刻において計算する(本研究では $n=3$ を採用)。

- 次に、各観測時刻における $|\Delta f_{i,n} - \Delta f_{i-1,n-1}|$ を大きい順に並べ、上位1%以上に入るデータ点を選択する。
- 選択されたデータ点の-60~-15分と+60~+170分の範囲でフレア以外の変光成分を二次関数で近似し、フレア以外の変光成分を除去する
- 選択されたデータ点の-15分~+60分の範囲で、フレア以外の変光成分を除去した後の明るさが、測光誤差の3倍以上明るい範囲をフレアが起きている時間と判定し、継続時間が5

分以上のもののみをフレア候補として選択する。

- ▶ 全てのフレア候補について、光度曲線および pixel level data を目視で確認し、ノイズや観測装置のエラーを誤検出しているものを除去

さらに、検出されたフレアから食連星カタログや分光追観測によって連星であると判定された天体で起きているフレアを除外し、連星であると判定されていない天体で起こったフレアのみを対象に解析を行った。

3. Results

1485 天体についての short-cadence data から 19 天体における 90 例のフレアを検出した。検出したフレアの光度曲線の例を図 1 に示す。

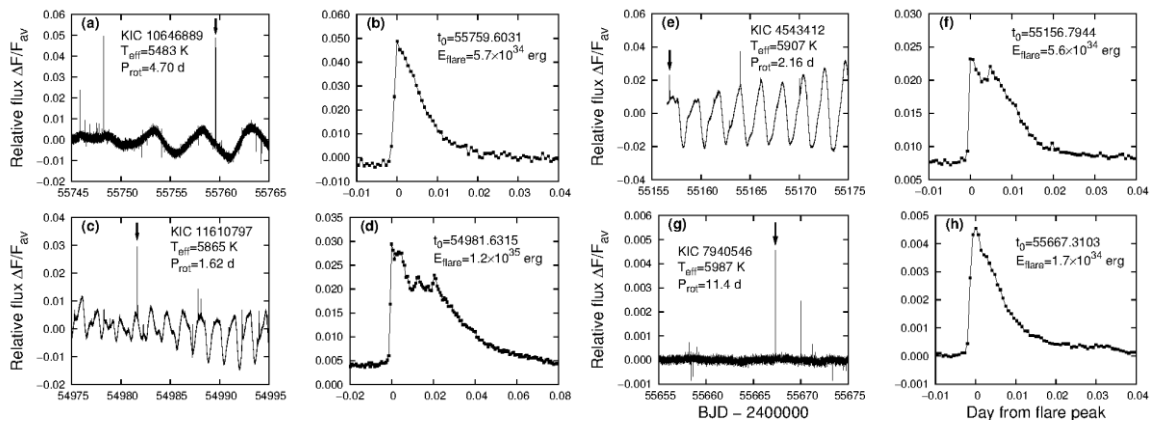


図 1 short-cadence data から検出したフレアの光度曲線の例

個々のフレアの 3×10^{32} - 1.2×10^{35} erg、e-folding time は 2-60 分であり、検出できたフレアのうち小さなものは X100 程度の太陽フレアに相当すると考えられる。検出したフレアのエネルギーごとの発生頻度分布は図 2 のようになり、long-cadence data から検出したフレアの発生頻度分布 (Shibayama et al. 2013) とほぼ重なることが分かった。また、short-cadence data から検出した自転周期 10 日以上、表面温度 5600-6000K の天体 (太陽類似星) におけるフレアの発生頻度分布は、太陽フレアの発生頻度分布および long-cadence data から検出したフレアの発生頻度分布とほぼ同一のべき関数上にあることがわかった (図 3)。

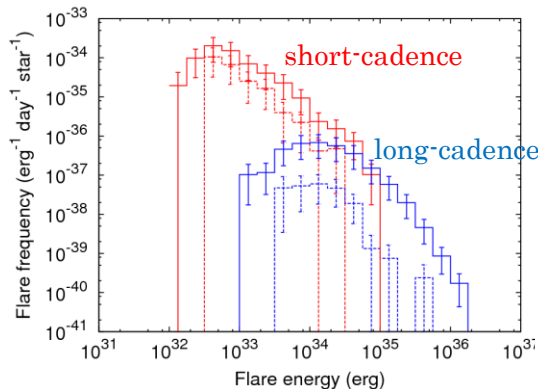


図 3 スーパーフレアの発生頻度分布 (実線: 全 G 型星、点線: 太陽類似星のみ)

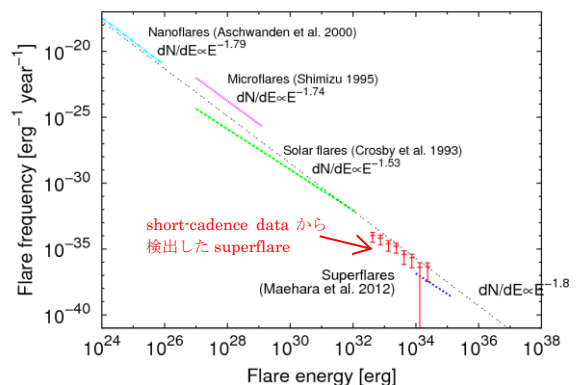


図 2 太陽フレアと太陽類似星のスーパーフレアの発生頻度分布の比較

4. Discussion

時間分解能 1 分のデータを用いることで、これまでの long-cadence data よりもフレア中のデータ点が増えたことで、フレアの継続時間をより正確に決めることができるようになったので、フレアの継続時間（ここでは、継続時間として e-folding time を用いる）とフレアによって放出されるエネルギーの関係性を調べた(図 4)。

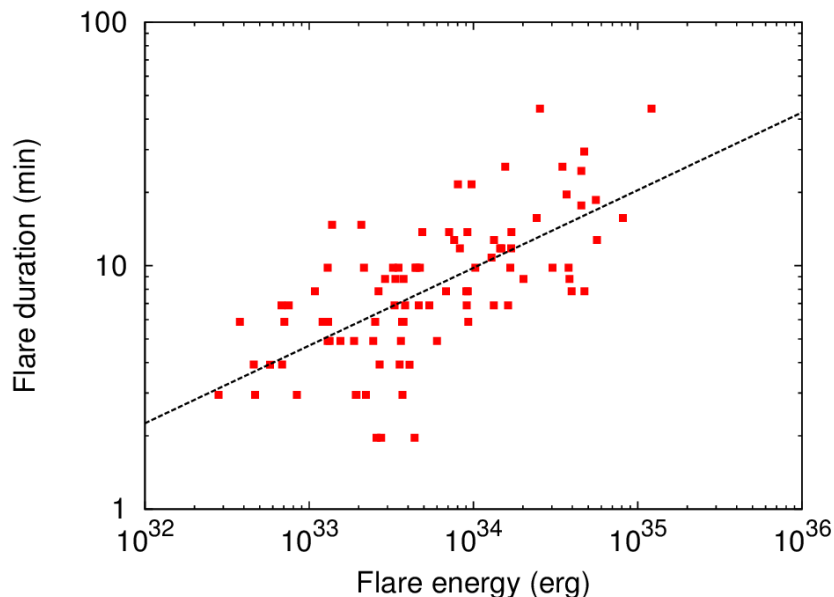


図 4 フレアの継続時間とエネルギーの関係

フレアの継続時間(τ_{flare})はフレアのエネルギー(E_{flare})が大きくなるほど長くなる傾向が見られ、べき関数で近似すると

$$\tau_{\text{flare}} \propto E_{\text{flare}}^{0.32 \pm 0.02} \quad (1)$$

となることが分かった(図 4 の点線)。フレアのエネルギーは黒点に蓄えられる磁場のエネルギーがもとになっているため、フレアのエネルギーは磁気エネルギーが蓄えられている領域の体積(活動領域のサイズ L の 3 乗)と磁束密度(B)の 2 乗に比例する。

$$E_{\text{flare}} \propto E_{\text{mag}} \propto L^3 B^2 \quad (2)$$

一方、フレアの impulsive phase のタイムスケールは Alfvén time 程度であるため、こちらは活動領域のサイズ(L)と Alfvén 速度(v_A)を用いて

$$\tau_{\text{flare}} \sim \tau_A \propto L / v_A \quad (3)$$

となる。ここで対象にしている天体はどれも G 型主系列星であるため、星表面の物理状態はほぼ同一と考えられるため、Alfvén 速度(v_A)や活動領域の磁束密度は星によらず同じような値となると仮定すると、式(2), (3)から

$$\tau_{\text{flare}} \propto E_{\text{flare}}^{1/3} \quad (4)$$

となる。観測データから求めたべき指数(0.32)は(4)式のべき指数と誤差の範囲で一致することが分かった。同様の継続時間とエネルギーの関係性は太陽フレアでも見られることが報告されている(Veronig et al. 2002, Christe et al. 2008)。

References

- Aschwanden, M. J., Tarbell, T. D., Nightingale, R. W., et al. 2000, *ApJ*, 535, 1047
- Christe, S., Hannah, I. G., Krucker, S., McTiernan, J., & Lin, R. P. 2008, *ApJ*, 677, 1385
- Crosby, N. B., Aschwanden, M. J., & Dennis, B. R. 1993, *Sol. Phys.*, 143, 275
- Maehara, H., Shibayama, T., Notsu, S., et al. 2012, *Nature*, 485, 478
- Shibata, K., & Magara, T. 2011, *Living Reviews in Solar Physics*, 8, 6
- Shibayama, T., Maehara, H., Notsu, S., et al. 2013, *ApJS*, 209, 5
- Shimizu, T. 1995, *PASJ*, 47, 251
- Veronig, A., Temmer, M., Hanslmeier, A., Otruba, W., & Messerotti, M. 2002, *A&A*, 382, 1070