

太陽型星における巨大黒点とスーパーフレアの関係

前原裕之 (国立天文台), 野津湧太, 野津翔太, 行方宏介, 石井貴子, 野上大作,
柴田一成 (京都大学), 本田敏志 (兵庫県立大学)

1 太陽型星のスーパーフレア

“スーパーフレア”は太陽で起こる最大級の太陽フレア (10^{32} erg 程度のエネルギーを解放) の10倍以上のエネルギーを解放する巨大フレアである。これまでこのような巨大フレアは太陽型星での観測例はごく少数 [1] であったが、Kepler 宇宙望遠鏡の超高精度かつ連続した測光観測により、太陽型星で起こるスーパーフレアが多数発見され、その統計的性質の研究が可能となった [2, 3, 4]。スーパーフレアを起こす太陽型星の多くには、周期 0.5-30 日程度、振幅数%の変光がみられ、これらは巨大黒点を持つ星の自転による変光と考えられる。スーパーフレアが黒点付近に蓄えられた磁場エネルギーを磁気リコネクションで解放することで起きているとすると、起こりうる最大のフレアのエネルギーは蓄えられた磁場のエネルギーに制限される。Shibata et al. (2013) [5] によると、黒点付近に蓄えられる磁場エネルギーは黒点面積 (A_{spot}) の $3/2$ 乗に比例し、観測された多くのスーパーフレアのエネルギーは、測光的に見積もった大きさの黒点付近に蓄えられる磁場のエネルギーの 10% 以下であり、磁気リコネクションシナリオと矛盾しないことが分かった。また、高分散分光観測から、スーパーフレア星では黒点による変動の振幅と彩層活動の指標となる Ca II 8542 Å 線の強度に相関があり、大きな変光振幅 (大きな黒点を持つと考えられる) 天体ほど活発な彩層活動を示すことが分かった [6]。本研究では、太陽型星における巨大黒点の統計的な性質とスーパーフレアとの関係を Kepler 宇宙望遠鏡のデータを用いて調べた結果を報告する。

2 データと解析手法

Kepler の観測天体から太陽型星を選ぶために、Huber et al. (2014) [7] のデータを用いて星の表面温度 (T_{eff}) および表面重力 ($\log g$) がそれぞれ $5600 \leq T_{\text{eff}} < 6300$ K, $\log g \geq 4.0$ の範囲にある天体を選んだ (64239 個)。選んだ太陽型星の変光周期、変光振幅は McQuillan et al. (2014) [8] のデータを用いた。また、スーパーフレアのデータは Shibayama et al. (2013) [3] と Candelaresi et al. (2014) [9] で検出されたものを用いた。

変光の振幅 ($\Delta F/F$) は見かけの黒点面積 (A_{spot}^*)、星と黒点の温度 ($T_{\text{star}}, T_{\text{spot}}$)、星のみかけの面積 (A_{star}) を用いて

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{A_{\text{spot}}^* (T_{\text{star}}^4 - T_{\text{spot}}^4)}{A_{\text{star}} T_{\text{star}}^4}, \quad (1)$$

のようにあらわすことができる。星の光球面の温度と黒点の温度差 ($\Delta T(T_{\text{star}})$ K) は、Berdyugina (2005) [10] のデータを用いて

$$\Delta T(T_{\text{star}}) = T_{\text{star}} - T_{\text{spot}} = 3.58 \times 10^{-5} T_{\text{star}}^2 + 0.249 T_{\text{star}} - 808 \text{ [K]}, \quad (2)$$

とした。太陽の半球面積 ($A_{1/2\odot} = 3.3 \times 10^{22} \text{cm}^2$) を単位とした黒点面積は、太陽半径を単位とする星の半径 $R_{\text{star}}/R_{\odot}$ を用いて

$$A_{\text{spot}} = \left(\frac{R_{\text{star}}}{R_{\odot}} \right)^2 \frac{T_{\text{star}}^4}{T_{\text{star}}^4 - \{T_{\text{star}} - \Delta T(T_{\text{star}})\}^4} \frac{\Delta F}{F}, \quad (3)$$

と求めることができる。 $R_{\text{star}}/R_{\odot}$ は Huber et al. (2014) [7] の値を用いた。

3 結果と議論

3.1 太陽型星における巨大黒点

図1に変光周期および振幅が求められている9383個の太陽型星の黒点面積と自転周期の関係を示す。自転周期 (P_{rot}) が12日以下では、黒点面積が $5 \times 10^{-2} A_{1/2\odot}$ を超える天体がほとんどないことが分かる。このことは、 $P_{\text{rot}} < 12$ 日の太陽型星における黒点面積には上限があり、その上限値は星の自転周期によらず一定であることを示唆する。さらに、 $P_{\text{rot}} > 12$ 日の天体では、周期が長くなるにつれて黒点面積の上限が小さくなる傾向があることが分かった。太陽と同程度の自転周期を持つ星 ($P_{\text{rot}} = 25$ 日) では、黒点面積が $1 \times 10^{-2} A_{1/2\odot}$ を超える星はほとんどなく、黒点面積は太陽の半球面積の1%程度が上限値であると考えられる。

太陽型星における巨大黒点の面積ごとの発生頻度分布と、太陽における黒点の面積ごとの発生頻度分布を比較した結果を図2に示す。太陽型星における巨大黒点の発生頻度分布は、黒点面積が $10^{-2.5} A_{1/2\odot}$ よりも大きい黒点では、べき関数分布 (power-law index = -2.3) となることが分かった。太陽黒点の発生頻度分布は、log-normal 分布となることが知られている [11]。黒点面積が $10^{-3.5} - 10^{-2.5} A_{1/2\odot}$ の太陽黒点の発生頻度分布¹は、太陽型星における巨大黒点の発生頻度分布の延長線上にのることが分かった。

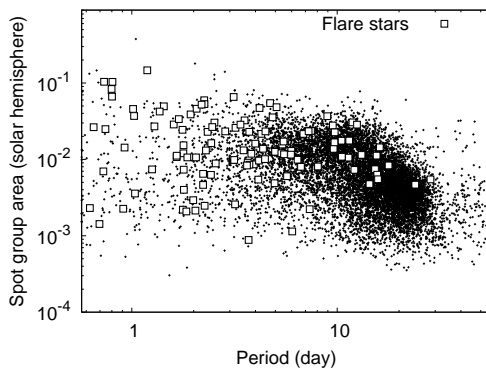


図1: 太陽型星の黒点面積と自転周期。白抜きの四角はスーパーフレア星を示す。

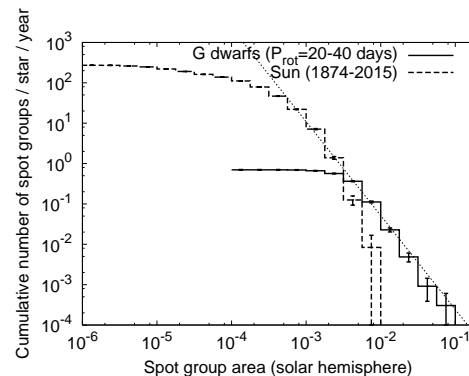


図2: 自転周期が20-40日の太陽型星における黒点の発生頻度分布と太陽における黒点の発生頻度分布の比較。

¹<http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml> から取得した Royal Observatory, Greenwich - USAF/NOAA Sunspot Data の1874-2015年のデータを用いた。

3.2 巨大黒点とスーパーフレアの発生頻度

異なる黒点面積の太陽型星ごとにフレアの発生頻度分布を調べた結果を図3に示す。先行研究 [2, 3] において、全ての太陽型星を平均したスーパーフレアの発生頻度分布はべき分布を示すことが分かっていたが、黒点面積ごとに調べた結果においてもべき分布となることが分かった。フレアの発生頻度は黒点面積が増加するとともに増加し、またある黒点面積を持つ星で発生する最も大きなフレアのエネルギーも増加することが分かった。さらに、黒点面積が $10^{-3.0}$ - $10^{-2.5} A_{1/2\odot}$ の太陽型星におけるスーパーフレアの発生頻度分布と、同じ面積の太陽黒点で起きた太陽フレア²の発生頻度分布と比較した結果を図4に示す。両者はほぼ同じべき関数(実線)上に分布していることが分かる。さらに、黒点面積が $10^{-3.0}$ - $10^{-2.5} A_{1/2\odot}$ の場合と同じべき指数を持ち発生頻度を10倍(破線)および1/10倍(点線)にしたべき関数は、黒点面積が10倍 ($10^{-2.0}$ - $10^{-1.5} A_{1/2\odot}$) の太陽型星におけるスーパーフレアの発生頻度分布、および1/10倍 ($10^{-4.0}$ - $10^{-3.5} A_{1/2\odot}$) の太陽黒点におけるフレアの発生頻度分布とおおよそ一致することが分かった。このことは、フレアの発生頻度分布が黒点面積に比例することを示唆する。

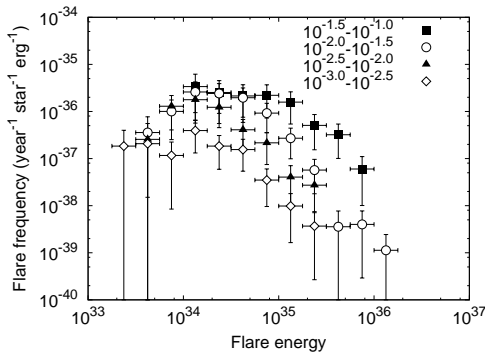


図3: 黒点面積が $10^{-1.5}$ - $10^{-1.0}$, $10^{-2.0}$ - $10^{-1.5}$, $10^{-2.5}$ - $10^{-2.0}$, $10^{-3.0}$ - $10^{-2.5} A_{1/2\odot}$ の太陽型星におけるスーパーフレアの発生頻度分布

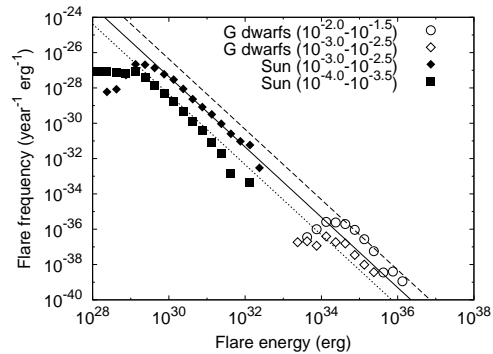


図4: 同じ黒点面積 ($10^{-3.0}$ - $10^{-2.5} A_{1/2\odot}$) の太陽型星のスーパーフレアと太陽フレアの発生頻度分布の比較。

3.3 巨大黒点を持つ天体におけるスーパーフレア星の割合

図5に黒点面積が $10^{-1.5}$ - $10^{-1.0}$, $10^{-2.0}$ - $10^{-1.5}$, $10^{-2.5}$ - $10^{-2.0} A_{1/2\odot}$ の太陽型星におけるスーパーフレア星の割合を示す。自転周期3日以上太陽型星において、スーパーフレア星の割合が自転周期が長くなるにつれて減少していることが分かる。一般に、観測期間は有限であるため、観測されたフレア星の割合はフレアの発生頻度の影響を受けてしまう。しかしながら、図6に示す個々のフレア星におけるスーパーフレアの発生頻度分布によると、スーパーフレアを起こした星においては、自転周期の長い星でも短い星でも、スーパーフレアの発生頻度の上限値(10回/年)にはほとんど差がないことが分かる ($P_{\text{rot}} > 20$ 日の星を除く)。このことは、スーパーフレア星の割合が自転周期が長くなるにつれて減少する傾向が、スーパーフレアの発生頻度の自転周期による変化では説明できないことを意味する。従って、観測されたスーパーフレア星の割合の減少傾向はリアル

²<ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/> から取得した GOES 衛星の 1976 年から 2015 年のデータを用いた

であり、自転周期が長くなると、同じ黒点面積であってもスーパーフレアを起こさない天体の割合が増えることを示唆する。

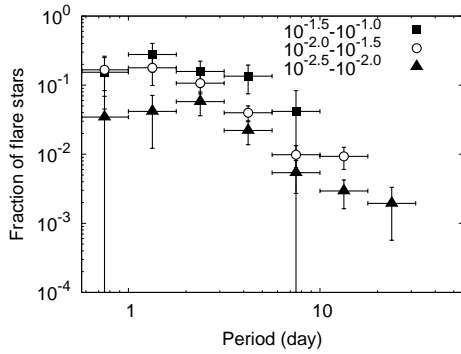


図 5: 黒点面積が $10^{-1.5}$ - $10^{-1.0}$, $10^{-2.0}$ - $10^{-1.5}$, $10^{-2.5}$ - $10^{-2.0} A_{1/2\odot}$ の太陽型星における 10^{34} erg 以上のエネルギーのスーパーフレアを起こした星の割合。

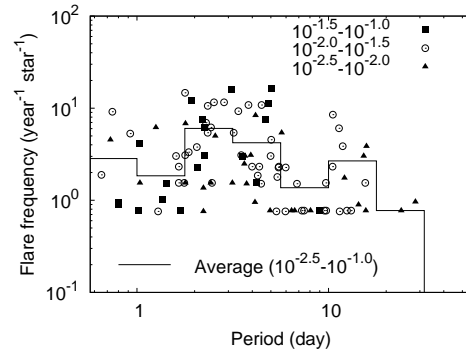


図 6: 個々のフレア星における 10^{34} erg 以上のエネルギーのスーパーフレアの発生頻度。

4 まとめ

- 太陽型星における巨大黒点の面積は (1) $P_{\text{rot}} < 12$ 日では自転周期に依存性はなく太陽半球面積の 5%程度が上限値となる (2) $P_{\text{rot}} > 12$ 日では自転周期が長くなると黒点の面積の上限値も減少する。
- 巨大黒点の発生頻度分布はべき分布を示す。
- スーパーフレアの発生頻度は黒点面積に比例し、太陽型星のスーパーフレアと太陽フレアの発生頻度分布は、黒点面積が同じであれば同じべき分布上にある。
- 巨大黒点を持つ太陽型星であっても、スーパーフレア星の割合は自転周期が長くなると減少する。

参考文献

- [1] Schaefer, B. E., King, J. R., & Deliyannis, C. P. 2000, ApJ, 529, 1026
- [2] Maehara, H., Shibayama, T., Notsu, S., et al. 2012, Nature, 485, 478
- [3] Shibayama, T., Maehara, H., Notsu, S., et al. 2013, ApJS, 209, 5
- [4] Maehara, H., Shibayama, T., Notsu, Y., et al. 2015, Earth, Planets, and Space, 67, 59
- [5] Shibata, K., Isobe, H., Hillier, A., et al. 2013, PASJ, 65, 49
- [6] Notsu, Y., Honda, S., Maehara, H., et al. 2015, PASJ, 67, 33
- [7] Huber, D., Silva Aguirre, V., Matthews, J. M., et al. 2014, ApJS, 211, 2
- [8] McQuillan, A., Mazeh, T., & Aigrain, S. 2014, ApJS, 211, 24
- [9] Candelaresi, S., Hillier, A., Maehara, H., Brandenburg, A., & Shibata, K. 2014, ApJ, 792, 67
- [10] Berdyugina, S. V. 2005, Living Reviews in Solar Physics, 2, 8
- [11] Bogdan, T. J., Gilman, P. A., Lerche, I., & Howard, R. 1988, ApJ, 327, 451