

強い X 線放射を示す太陽型星の高分散分光観測

野津 湧太 (京都大学大学院 理学研究科 宇宙物理学教室 M2)

Abstract

我々は、ケプラー宇宙望遠鏡の測光データの解析から、スーパーフレア (最大級の太陽フレア ($\sim 10^{32}$ erg) の $10\text{--}10^4$ 倍のエネルギーを解放する巨大フレア) を起こす太陽型星 (G 型主系列星) を多数発見した。さらに、発見したスーパーフレア星のうち 50 天体について、すばる望遠鏡 HDS を用いて高分散分光観測を行い、測光観測から推定された巨大黒点の存在や自転速度を確認し、スーパーフレア星が巨大な黒点を持つことが明らかになった。今後は、建設中の京大岡山 3.8m 新望遠鏡を用いた観測も推進し、スーパーフレア星の特徴や太陽でのスーパーフレアの発生可能性などについて更なる研究を行う予定だが、それにはより明るい天体を全天の様々な領域で多数発見することが欠かせない。そこで我々は、X 線観測衛星 ROSAT による全天サーベイで受かった星のうち、これまで連星の報告はない太陽類似星 49 星について、岡山 188cm 望遠鏡 HIDES で高分散分光観測を行った。フレア活動が活発な天体は、強い X 線を示すことが期待されるので、X 線源と同定されている星を詳しく調べれば、比較的近傍に存在する太陽型のスーパーフレア星や将来スーパーフレアを起こす可能性のある星の探査につながると期待される。

まず、観測した 49 星のうち 7 割以上が、連星の証拠を示さず、温度等の大気パラメータも太陽型星で矛盾ないことを確認した。次に、星の彩層活動の良い指標である Ca II 8542 線や H α 線の強度を調べた。その結果、X 線強度の強い星は、Ca II 線や H α 線で見ても巨大黒点の存在が示唆されると分かった。吸収線の広がりから測定した射影自転速度 ($v \sin i$) の値は大きい傾向にあったが、太陽程度 ($\sim 2 \text{ km s}^{-1}$) の星もあった。また、星の年齢を反映する Li の組成量 (対流層内部で徐々に壊されて減る) を測定したところ、比較的 Li が多い星も少ない星も含まれており、太陽のように年をとった星でも活発な磁気活動性を示している可能性が示唆される。今後は、スーパーフレア星の活動性の長期変動探査 (Ca II 線など利用) の候補星として、今回の観測天体を活用していきたい。

1 太陽型星のスーパーフレア

太陽フレアは太陽表面での爆発現象であり、黒点の周りに蓄えられた磁気エネルギーが短時間に爆発的に解放されることで生じると考えられている (e.g., Shibata & Magara 2011)。我々はケプラー衛星が取得した 8 万個を超える太陽型星の計 500 日間の測光データを解析することにより、279 個の太陽型星で計 1547 個のスーパーフレア (最大級の太陽フレアの $10\text{--}10^4$ 倍ものエネルギーを持つフレア) を発見してきた (Maehara et al. 2012; Shibayama et al. 2013)。非常に沢山のイベントを発見したことで、スーパーフレアに関する統計的研究が可能になった。発生頻度分布について調べてみると、スーパーフレアの発生頻度は、太陽フレアと同様のベキ分布をしており、太陽フレアとスーパーフレアの類似性が強く示唆された (Shibayama et al. 2013; Maehara et al. 2015)。

スーパーフレアを起こす太陽型星の多くでは、典型的な周期が数日～数十日程度の準周期的な明るさの変動が見られる。我々はこれらの明るさ変動が、巨

大黒点を持つ星の自転で説明でき、そのような巨大黒点の持つ磁場のエネルギーによって、スーパーフレアに必要なエネルギーを説明出来ることを確認した (Notsu et al. 2013b)。そして、星の自転 (差動回転) によるダイナモ機構の考え方に基づく理論研究により、太陽のような自転の遅い星でも、スーパーフレアに必要な磁気エネルギーを数十年のタイムスケールでためることができると分かった (Shibata et al. 2013)。これらの結果は、太陽でもスーパーフレアが起こり得ること、そして「巨大黒点」の存在がスーパーフレアを理解する重要な鍵であることを強く示唆している。

2 スーパーフレア星の分光観測

これまで我々はすばる望遠鏡 HDS を用いて、50 個のスーパーフレア星について、高分散分光観測を実施してきた (Notsu et al. 2013a; Nogami et al. 2014; Notsu et al. 2015a & 2015b; Honda et al. 2015)。観測波長域は、6100~8820Å であり、星の彩層磁気活動性の指標として知られている、Ca II の近赤外 3 重

線 (8498/8542/8662Å) や H α 線 (6563Å) を含んでいる。

観測の結果、50 星のうち 34 星では連星の徴候が見られず、温度や表面重力等の値も、太陽型星 (G 型主系列星) で概ね矛盾ないことが確認された (Notsu et al. 2015a)。次に、これら 34 星について、さらに詳細な解析を行い、以下の結果を得た。

(1) まず、吸収線の広がりから求めた射影自転速度 ($v \sin i$) の値 (cf. 図 1) は、星の軌道傾斜角 (i) の効果を考慮すれば、ケプラーのデータで見られた明るさの変動周期から見積もった自転速度と矛盾しなかった。(2) ケプラーのデータで見られた、上記の明るさ変動の振幅から巨大黒点の存在が予想される星は、例外なく高い彩層活動性を示していた。また、Ca II 線の強度から見積もった星の平均磁場強度 ($\langle fB \rangle$) と、明るさの変動振幅との間に相関が見られた。これらの結果から、スーパーフレア星の示す、上記の明るさ変動が、巨大黒点を持つ星の自転で説明可能だということが支持された (Notsu et al. 2015b)。

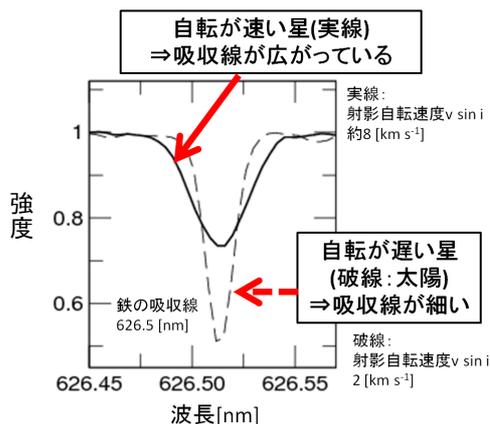


図 1: 自転速度の違いによる、吸収線の広がりの違いの例。一般に、星表面の各点から出る光は、自転に伴う運動でドップラーシフトして放射される。太陽以外の恒星を観測する場合、点源であるために、星全面の光を足し合わせた状態で観測することになる。したがって、自転によってドップラーシフトした光を足し合わせることで、全体としてはラインの広がりとして観測される。このラインの広がりを変えることで、自転速度を見積もることが出来る。ただし、太陽以外の恒星を観測する場合、太陽のように赤道方向から観測しているとは限らず、ラインの広がりから得られる値は、自転速度の視線方向への射影成分 “ $v \sin i$ ” となることに注意する必要がある (i は星の自転軸の方向と視線方向のなす角)。

3 長期計画と本観測の背景

我々は、上記の研究も踏まえ、「スーパーフレアを起こす太陽型星がどのような物理的特性をもつか、スーパーフレアはどのような条件下で起こるか?」という点の解明を目指している。ケプラー衛星の測光観測によって、自転速度や黒点サイズ(または磁場強度)の値が間接的であるが推定され、その結果は上記の分光観測でも支持された。これによって、スーパーフレアを起こす星には巨大黒点が存在し、通常フレアと同様に磁気活動に起因することがほぼ確実となった。ここで、磁気活動を定めるのは、星の自転速度(差動回転)と内部対流が結合したダイナモ機構である。つまり、スーパーフレア発生の重要な鍵である、巨大黒点の形成・存在の物理過程について理解するには、自転速度(差動回転)の情報が決定的に重要であり、高分散分光観測も用いた精密な測定が必須である。また、彩層活動性を反映する Ca II 線の長期モニター観測等により、太陽の 11 年周期と同様に、太陽型星でも数年～数十年程度の周期で活動性に变化があることが知られている (e.g., Baliunas et al. 1995)。このような長期の活動性変化は、巨大黒点の形成過程と密接な関係を持ち、ダイナモ機構における大きな鍵の 1 つであり、スーパーフレア星のような特に巨大な黒点を持つ星の磁気活動性変化の様子を調べることは非常に有意義である。

そこで我々は今後、建設中の京大岡山 3.8m 望遠鏡に設置予定の高分散分光装置とその豊富な観測時間を用いて、より大規模にスーパーフレア研究を推進する予定である。上述の磁気活動性の長期変化の様子に迫るため、スーパーフレア星の長期 (10 年以上) にわたるモニター観測を実施する計画である。しかし、これまでの Kepler 衛星で観測された星は、比較的暗い天体が多く ($V \gtrsim 12$ mag)、観測領域も限定的であるという課題があり、全天で明るい観測星の絶対数を増やすことは、複数回の観測を効率的に行う観点からも必須であるといえる。これを踏まえ我々は今回、X 線観測衛星 ROSAT による全天サーベイで、強い X 線を放射を示した太陽型星 49 星について、岡山 188cm 望遠鏡 HIDES で高分散分光観測を行い、詳しく調べた。フレア活動が活発な天体は、強い X 線放射を示すことが期待されるので、X 線源と同定されている星を詳しく調べておけば、比較的近傍に存在する磁気活動の活発な星の探索につながり、3.8m 望遠鏡での長期観測に資するものと期待される。以下この観測の結果を紹介する。

4 観測の概要

3 章で述べた通り、今回我々は X 線観測衛星 ROSAT による全天サーベイで、X 線源として同定された ($L_X \gtrsim 10^{28} \text{ erg s}^{-1}$; 0.1-2.4keV) 太陽型 (G 型主系列) 星 49 星について、岡山 188cm 望遠鏡 HIDES を用いて可視高分散分光観測を行った。この 49 星は、ROSAT で X 線源と同定された太陽型星の中から、Hipparcos 衛星による距離データが存在する、過去のサーベイ等で連星等の分類がない、color 及び絶対光度の値が太陽に近い ($0.6 \lesssim B-V \lesssim 0.73$, $M_V > 4 \text{ mag}$)、比較的明るい ($V \lesssim 9.5 \text{ mag}$)、といった事柄を考慮して、選ばれた天体である。観測波長域や解析の詳細については、2 章で述べたすばる HDS での観測 (e.g., Notsu et al. 2015a) とほぼ同じである。観測期間は、2014 年 3 月, 4 月, 5 月, 8 月, 9 月, 11 月, 12 月, 2015 年 6 月にわたる計 18 日間である。

49 天体の観測の結果、38 星では連星の証拠 (複数回観測した場合の視線速度変動など) が見られず、温度等の性質も太陽に比較的近い値 ($5600 < T_{\text{eff}} < 6000 \text{ K}$; $4.2 < \log g < 4.7$; $-0.2 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.2$) であることが確認された。以下では、この 38 星の単独星について、詳細な解析を行った。

5 自転速度と彩層活動性

まず、図 1 で説明した通り、吸収線の広がりから射影自転速度 ($v \sin i$) の測定を行った。

次に、今回の X 線の強い星が巨大黒点を持つことの確認を試みた。Zeeman 効果等によって、黒点付近の強い磁場強度の値を直接検出することが出来れば、巨大黒点の存在を証明することが出来ると期待される。しかし、太陽の場合と違って、星全面の観測であるために、G 型星では黒点以外の光球部分からの光が強すぎることで、そして今回の観測と比べてさらに高い S/N の観測が必要とされることをふまえると、現状では磁場の直接検出は困難である。したがって今回は、2 章で述べたすばる観測 (Notsu et al. 2015b) と同様に、Ca II 線を用いた調査を行った。太陽観測から、黒点周辺の磁場が強い領域では、磁力線に沿ってエネルギーが上空に輸送されることで加熱が生じ、彩層から放射される Ca II 線等の放射が増加することが知られている。したがって、星全体としての Ca II 線の放射強度を調べることで、間接的ではあるが、巨大な黒点の存在の有無 (星の平均磁場強度の値) を調べることができる。

図 2 に、今回の観測星の Ca II 8542 及び 8498 線のスペクトルを例示した。Ca II 線のコア部分が浅くなっている星は、巨大黒点の磁場の影響によって彩

層がより加熱されていると予想される。続いて、自転速度と Ca II 8542 線のライン中心の深さ $r_0(8542)$ (ライン中心の強度を連続光部分の強度で規格化した値) を比較した (図 3)。その結果、ROSAT の X 線強度の強い星について、Ca II 8542 線で見ても、巨大黒点の存在が示唆された ($H\alpha$ 線も同様の傾向を示した)。また、自転速度が比較的速い星が多い一方で、太陽と同程度の射影自転速度 ($v \sin i \sim 2 \text{ km s}^{-1}$) でも、一般的な太陽型星と比べて $r_0(8542)$ 強度が強く、巨大黒点の存在が示唆される天体が存在した。

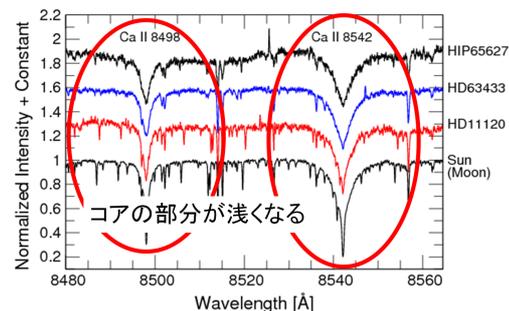


図 2: 今回の観測星の Ca II 8542 及び 8498 線のスペクトル例。一番下は太陽 (月のスペクトル)。

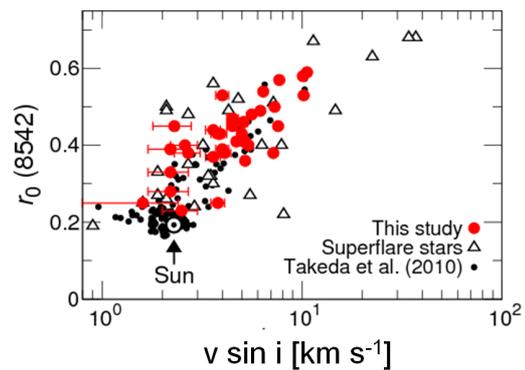


図 3: 横軸: (射影) 自転速度 ($v \sin i$)。縦軸: Ca II 8542 線中心の深さ $r_0(8542)$ 。今回の観測データに加えて、スーパーフレア星の観測データ (Notsu et al. 2015b) と、一般的な太陽類似星の観測結果 (Takeda et al. 2010) も plot している。

6 Li 組成と年齢

今回の観測波長域には、Li I 6708Å の吸収線が含まれている。Li という元素は、星の対流層下部で容易に破壊されるため (破壊される温度: $T > 2.5 \times 10^6 \text{ K}$ (${}^7\text{Li}$), $2.0 \times 10^6 \text{ K}$ (${}^6\text{Li}$)), 対流層の存在する星では、星の年齢とともに徐々に壊されて減ることが知られており (e.g., Skumanich 1972)、しばしば星の年齢の指標として用いられる。我々は既に、2 章で述べたすばる観測のデータを用いて、スーパーフレア星

の Li 組成と年齢の議論を行い、スーパーフレア星の中に太陽のように年をとった星も含まれることを確認した (Honda et al. 2015)。今回の観測天体 (X 線の強い星) についても Honda et al. (2015) と同様の手法で Li の組成量を求めた。その結果、一般的な太陽型星の分布と比べ、自転速度が速く、Li 量の高い若い星が多い一方で、X 線の強い (\approx 磁気活動の大きい) 星の中でも、太陽のように比較的 Li 量が少なく ($A(\text{Li}) < 2$)、自転の遅い ($v \sin i \sim 2 \text{ km s}^{-1}$) 星も含まれることが分かった (図 4)。これは、太陽のように年をとった星でも活発な磁気活動性を示している可能性を示唆しているといえる。

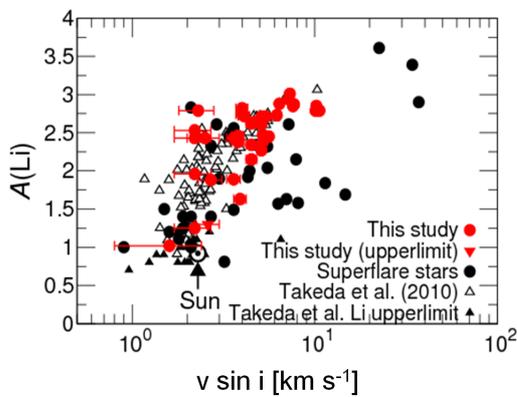


図 4: 横軸: (射影) 自転速度 ($v \sin i$)。縦軸: Li 組成。スーパーフレア星の観測データ (Honda et al. 2015) と、一般的な太陽類似星の観測結果 (Takeda et al. 2010) も plot している。

7 まとめと今後

X 線観測衛星 ROSAT による全天サーベイで受かった星のうち、これまで連星の報告はない太陽類似星 49 星について、岡山 188cm 望遠鏡 HIDES で高分散分光観測を行った。観測した 49 星のうち 38 星は、連星の証拠を示さず、温度等の大気パラメータも太陽型星で矛盾ないものであった。次に、星の彩層活動の良い指標である Ca II 8542 線や H α 線の強度を調べた。その結果、X 線強度の強い星は、Ca II 線や H α 線で見ても巨大黒点の存在が示唆されると分かった。吸収線の広がりから測定した射影自転速度 ($v \sin i$) の値は大きい傾向にあったが、太陽程度 ($\sim 2 \text{ km s}^{-1}$) の星もあった。また、星の年齢を反映する Li の組成量 (対流層内部で徐々に壊されて減る) を測定したところ、比較的 Li が多い星も少ない星も含まれており、太陽のように年をとった星でも活発な磁気活動性を示している可能性が示唆された。今後は、京大岡山 3.8m 望遠鏡でのスーパーフレア星の活動性の長期変

動探査の候補星として、今回の観測天体を活用していきたい。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台、光学赤外線天文連絡会からのご支援に感謝いたします。本研究は、国立天文台岡山天体物理観測所の共同利用観測で得られたデータを用いて、本田敏志氏、前原裕之氏、野津翔太氏、柴山拓也氏、野上大作氏、柴田一成氏と行った共同研究です。岡山観測所での観測の際には、神戸栄治氏をはじめとする岡山観測所の職員の皆様に大変お世話になりました。また、分光観測データの解析では、国立天文台の竹田洋一氏が開発したプログラムを使用させて頂くとともに、多くの助言を頂きました。これらの方々をはじめとして、本研究に関わった全ての皆様に深く感謝します。

Reference

- Baliunas, S. L., Donahue, R. A., Soon, W. H., et al. 2015, ApJ, 438, 269
- Honda, S., Notsu, Y., Maehara, H., et al. 2015, PASJ, in press (doi: 10.1093/pasj/psv054)
- Maehara, H., Shibayama, T., Notsu, S., et al. 2012, Nature, 485, 478
- Maehara, H., Shibayama, T., Notsu, Y., et al. 2015, EPS, 67, 59
- Nogami, D., Notsu, Y., Honda, S., et al. 2014, PASJ, 2014, 66, L4
- Notsu, S., Honda, S., Notsu, Y., et al. 2013a, PASJ, 65, 112
- Notsu, Y., Shibayama, T., Maehara, H., et al. 2013b, ApJ, 771, 127
- Notsu, Y., Honda, S., Maehara, H., et al. 2015a, PASJ, 67, 32
- Notsu, Y., Honda, S., Maehara, H., et al. 2015b, PASJ, 67, 33
- Skumanich, A. 1972, ApJ, 171, 56
- Shibata, K., & Magara, T. 2011, Living Rev. Sol. Phys, 8, 6
- Shibata, K., Isobe, H., Hillier, A., et al. 2013, PASJ, 65, 49
- Shibayama, T., Maehara, H., Notsu, S., et al. 2013, ApJS, 209, 5
- Takeda, Y., Honda, S., Kwanomoto, S., et al. 2010, A&A, 515, A93