

特集 太陽型星におけるスーパーフレア

(5) スーパーフレア星のすばる高分散分光観測



野 津 翔 太

〈京都大学大学院理学研究科 宇宙物理学教室 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: snotsu@kusastro.kyoto-u.ac.jp

「太陽でスーパーフレアは起きるのか。」この問いに答えるべく、私たちは太陽型星のスーパーフレア星の研究を行ってきました。これまでの研究によると、スーパーフレア星に見られる数日-数十日周期の準周期的な明るさの変動は、巨大黒点をもつ星が自転しているために起きると解釈でき、そのような巨大黒点をもつ磁気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できることなどがわかってきました。今回、私たちは初めてG型のスーパーフレア星に対してすばる望遠鏡を用いた高分散分光観測を行い、大黒点の存在をより直接的に確認するなど、スーパーフレア星の詳細な性質を考察しました。本稿ではこの研究の概説をしつつ、スーパーフレア星の高分散分光観測の意義についても議論します。

1. はじめに

太陽を含む多くの恒星の表面では、時折フレアと呼ばれる巨大な爆発現象が起きています。このフレアは、星表面にある黒点の周りに蓄えられた磁気エネルギーがごく短時間のうちに爆発的に解放されることで起きることが知られています¹⁾。なかでも若い星や近接連星、低温度星などは、今までに観測された中で最大の太陽フレア（全エネルギーが 10^{32} erg程度）の10倍から 10^6 倍大きなエネルギーを解放するような巨大フレア（スーパーフレア）を頻繁に起こすことが知られていました。

ではこのようなスーパーフレアが太陽や太陽型星（G型主系列星）でも起こる可能性はあるのでしょうか。この問いに答えるべく、京都大学を中心とする私たちの研究グループでは2010年秋頃より、主に太陽系外惑星探査に用いられているケプラー宇宙望遠鏡の高精度の測光データを用いて、

太陽型星におけるスーパーフレアを探索する研究を行ってきました。その結果はすでにこれまでの連載記事でも報告しておりますが、現在までに8万個を超える太陽型星の500日分の公開測光データを解析し、279個の太陽型星で1,547個のフレアを発見しています^{2),3)}。またこれにより、太陽型星でのスーパーフレアの発生頻度などについて統計的研究が初めて可能になりました。スーパーフレアの発見の経緯やケプラー測光データの解析手法、結果については、柴田一成さん、前原裕之さん、および柴山拓也さんの天文月報記事⁴⁾⁻⁶⁾において詳しい解説がなされておりますので、そちらをぜひお読みください。

また、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、明るさの変動の振幅が0.1-10%程度の準周期的な明るさの変動が見られます。私たちはこれらの明るさの変動が、巨大な黒点をもつ星が自転しているため

に起きるといふモデルで説明できることを発見しました。このモデルが正しければ、スーパーフレアのエネルギーは星表面の黒点付近に蓄えられた磁気エネルギーで説明がつくこともわかりました⁷⁾。詳しくは野津湧太さんの記事⁸⁾も併せてご覧ください。さらに、差動回転によるダイナモ理論に基づくオーダー計算からは、最大級の太陽フレアの100倍のエネルギーのスーパーフレアを引き起こすのに十分な磁気エネルギーを、太陽はわずか1太陽活動周期（～11年）以内に生成するということが示唆されています⁹⁾。

しかし、ここまでの私たちの研究は、あくまでケプラー宇宙望遠鏡による測光観測のデータのみに基づいたものです。スーパーフレア星の明るさの変動周期は、本当に星の自転周期に対応しているのでしょうか。スーパーフレア星の中に、太陽と同じ単独星はどの程度含まれているのでしょうか。あるいはスーパーフレアの発生に必要な大量の磁気エネルギーを蓄えることのできる大黒点は、本当に存在するのでしょうか。こういった疑問を、より直接的に確かめるには、多くのスーパーフレア星に対して、詳細な分光観測をすることが必要です。

また私たちのこれまでの研究では、ケプラー宇宙望遠鏡のデータの中から、温度や表面重力、自転周期などが太陽に近いスーパーフレア星を探してきました。しかし、私たちがこの絞り込みに用いた温度や表面重力のデータは、多色測光サーベイに基づくもので精度が不十分でした¹⁰⁾⁻¹²⁾。そのため個々のスーパーフレア星の詳細な性質や、太陽との類似性を議論するうえでは、分光観測を行いスーパーフレア星の表面温度、表面重力、金属量などの情報を精度良く得る必要がありました。

そこで本稿では、私たちがスーパーフレア星の分光観測をすばる望遠鏡で行うに至るまでの背景やその目的と、すばる望遠鏡を用いた初期観測の結果の一部やそこから得られた知見を紹介します。

2. 京都産業大学神山天文台での予備観測

私たちは2010年12月にケプラーのデータの中から最初のスーパーフレア数例を発見したのですが、それから僅か約3カ月後の2011年3月上旬、私たちはスーパーフレア星の詳細な性質を知り上記の疑問に答えるべく、スーパーフレア星の分光観測の実施に向け本格的に動き始めました。

まずはスーパーフレア星の大まかな性質を確認する予備観測と分光観測自体の経験を積むことを目的として、2011年3月18日夜、京都産業大学神山天文台を訪問し、1.3 m 荒木望遠鏡可視光分光装置を用いた、低分散の分光観測を試みました。この日は残念ながら天候に恵まれず分光スペクトルを取得することはできませんでしたが、その約1週間後の3月24日夜に再び神山天文台を訪問し荒木望遠鏡を用いた観測を行い、無事スーパーフレア星14天体の低分散の分光スペクトルを取得することができました。

低分散分光観測とは星の光を波長方向に比較的粗く分解した観測のことで、星の大まかなスペクトル型や、水素のバルマー線（ $H\alpha$ 線、 $H\beta$ 線など）をはじめとした強いスペクトル線の特徴を調べることができます。このときの波長方向の分解



図1 京都産業大学神山天文台での予備観測の際の写真。観測に使う京都産業大学荒木望遠鏡の説明を受けているところです。

能 $R \sim \lambda/\Delta\lambda$ は400程度でした。

ちなみにこの観測の時点でスーパーフレアの研究に取り組んでいた学生は私を含め皆学部1回生で、大型の観測装置のついた望遠鏡を用いた観測は初めてだったので、観測装置の様子や観測の手順一つひとつが新鮮でとても印象深いものでした（その様子は図1の写真を参照）。

さて観測の結果、スーパーフレアを起こしたこれら14天体のスペクトルでは $H\alpha$ 線と $H\beta$ 線は輝線にはなっておらず、深めの吸収線となっていることがわかりました。それらを踏まえ、G型主系列星のスペクトルと矛盾がないことが確認されました。

3. 学部2回生がすばるプロポーザルの筆頭著者に

京都産業大学神山天文台での予備観測と平行して、私たちはスーパーフレア星の詳細な性質を調べ当初の疑問に迫るべく、すばる望遠鏡を用いた高分散分光観測の申請書（プロポーザル）の準備を始めました。高分散分光観測とは星の光を波長方向に非常に細かく分解する観測のことで、数多くの原子や分子の吸収線の形状や強度の測定を通じて、観測している星の情報を精度良く得ることができます。必要な波長方向の分解能 $R \sim \lambda/\Delta\lambda$ は数万-十万程度です。

このときはスーパーフレア星の高分散分光観測が初めてだったこともあり、まずはすばるサービスプログラムという、1課題4時間までで国立天文台ハワイ観測所の職員さんに観測を実行していただくというモードでの観測を申請しました。観測時間が限られているので、このときは神山天文台での予備観測でG型星のスペクトルを示すことが確認されていたスーパーフレア星の中から、KIC6934317という星を高分散分光観測するというプロポーザルになりました。

観測プロポーザルの作成作業は、作業を本格的に始めてから提出の締切（2011年4月8日）までが数週間しかなかったので、結構慌ただしかった

のを覚えています。観測の背景や目的、観測データの解析からどのような情報が得られるかといった内容を日本語で一通りまとめつつ、必要な観測時間や装置設定などを調べる。そしてそれらを英語の文章に直していく。どれも初めての経験ばかりで新鮮さを感じる一方、準備時間が少なくないへんでしたが、先生方のご指導やサポートもあり協力してまとめ、無事提出することができました。ちなみにこのときのプロポーザルの筆頭著者は私の双子の弟の野津湧太君で、私を含めたほかのメンバーは共著者という形になったのですが、学部2回生が筆頭著者のプロポーザルというのも珍しいものだったようです。

それから約2カ月半後の6月20日にプロポーザルの審査結果が返ってきました。幸い観測優先度が高いという判定（Rank A）をいただきました。プロポーザルを提出してから約4カ月後の2011年8月7日には、すばる望遠鏡での観測が8月3日夜に無事行われたとの連絡が届き、手に観測データが送られてきました。そして京都大学花山天文台（現 兵庫県立大学西はりま天文台）の本田敏志さんをはじめとする先生方のご指導のもと、IRAFを使っての一次処理、星のパラメーターの測定といった解析へと進んでいきました。

次章以降では、私たちがこのときの高分散分光観測で得たG型のスーパーフレア星（KIC6934317）の分光スペクトルを解析した結果¹³⁾の一部を紹介しながら、高分散分光観測からわかるスーパーフレア星の性質についても議論します。なお、この観測はG型のスーパーフレア星の初めての高分散分光観測であったので、この解析結果について私が筆頭著者となり論文としてまとめたものが、日本天文学会欧文研究報告（PASJ）2013年65巻5号¹³⁾にすでに掲載されております。詳しい内容についてはそちらをご覧ください。

4. スーパーフレア星 KIC6934317 は太陽とそっくり？

スーパーフレア星 KIC6934317 の観測は 2011 年 8 月 3 日（ハワイ時間）、すばる望遠鏡高分散分光器（HDS）¹⁴ を用いて行われました。この観測はすばるサービプログラム（S11B）の一環として行われました。観測時間は 3 時間、*S/N* 比（信号対雑音比）は 8,500 Å 付近で約 140、波長方向の分解能 $R \sim \lambda/\Delta\lambda$ は 100,000 程度です。波長範囲は 6,100–8,820 Å で、この波長範囲内には近赤外の 1 階電離カルシウム（Ca II）の三重線（図 6 参照）と H α 線のほか、表面温度、表面重力、金属量を求める際に用いる数多くの中性の鉄（Fe I）と 1 階電離の鉄（Fe II）の吸収線（図 3 にその一例を紹介しています。）が含まれています。

今回観測した G 型のスーパーフレア星 KIC6934317 は、私たちがケプラー宇宙望遠鏡のデータの中から初期に発見したスーパーフレア星の中では比較的明るい（*i* バンドでは 12.0 等¹⁰）星で、神山天文台での観測からも G 型星のスペクトルを示すことが確認されています。また平均 13 日に 1 回程度スーパーフレアを引き起こすなど、活動性が高いと思われる星です。その一方で、明るさの変動振幅は G 型のスーパーフレア星の中では比較的小さい（0.1% 程度）という特徴が見えます。今となってはスーパーフレアを起こすのに必要な大黒点を探すうえで、大黒点が存在しそうな明るさの変動が大きな星を観測するほうが良いとも考えられますが、このときにはそこまで考慮せず、明るさの変動振幅がそれほど大きくない太陽とよく似た星を探そうという観点から、振幅の小さなこの星を選ぶことになりました。

図 2(a) はこの星の光度曲線を示しています。星自体の明るさに振幅が 0.1% 程度、周期が 2.5 日程度の変動が見られます。また図 2(b) で拡大したのはこの星で発見されたスーパーフレアの一例で、フレアによる増光の振幅は 2.1% 程度であり、

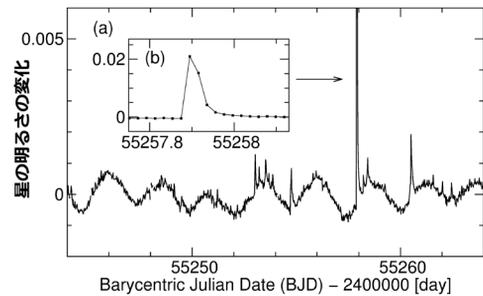


図 2 (a) スーパーフレア星 KIC6934317 の光度曲線。光度曲線のデータはケプラー宇宙望遠鏡の観測で取得されたものです。星自体の明るさに振幅が 0.1% 程度、周期が 2.5 日程度の変動が見られます。(b) スーパーフレアの一例の拡大図。

エネルギーに直すと約 6×10^{34} erg（最大級の太陽フレアの約数百倍）に当たります。なおこの星で発生したスーパーフレアの検出や、個々のフレアのエネルギーの見積もりは、前原ら² および柴山ら³ に記された手法を用いて行いました。私たちが解析した KIC6934317 の測光データ内で最も大きなスーパーフレアの場合、そのエネルギーは約 2×10^{35} erg（最大級の太陽フレアの約 1,000 倍程度）となりました。

解析の際の比較星として、59Vir と 61Vir という二つの G 型主系列星のスペクトルも取得しました。過去の研究¹⁵によると、59Vir は自転が速く磁場の強い星、61Vir は自転が遅く太陽と同程度で、磁場の弱い星として知られています。

高分散分光観測で得たスペクトルの一次処理は IRAF で行いました。その後、国立天文台の竹田洋一さんが開発した解析プログラムを用い、Fe I、Fe II の吸収線（図 3 にその一例を示しています。）計 100 本程度の解析から、表面温度 T_{eff} (K)、表面重力 $\log g$ (cgs)、金属量 [Fe/H]（星に含まれる Fe と H の個数比と太陽における個数比とを比較し、その比率を常用対数で表したもの）などのパラメーターを見積もりました。これらのパラメーターの導出方法の詳細についてはここでは省きますが、詳しくは私の論文¹³のほか、竹田

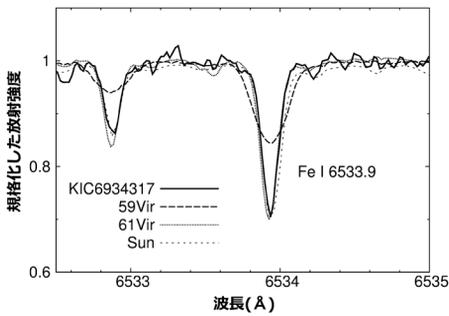


図3 スーパーフレア星KIC6934317, 比較星59Vir, 61Vir, そして規格化したFe I 6,533.9 Åの吸収線付近のスペクトル。各スペクトルは、連続光部分の強度で規格化してある。このようなFe I/IIの吸収線を解析して、表面温度、表面重力、金属量などのパラメーターを算出したり、射影自転速度 ($v \sin i$) を算出したりしました。太陽のスペクトルはKuruczら³¹⁾の太陽スペクトルアトラスのデータを、波長分解能を100,000程度に落としたうえで用いています。

表1 今回の観測結果から求めた、スーパーフレア星KIC6934317, 比較星59Vir, 61Virのパラメーター。

	KIC6934317	59Vir	61Vir
表面温度 T_{eff} (K)	5694±25	6009±28	5558±15
金属量 [Fe/H]	-0.03±0.07	0.09±0.06	-0.04±0.06
表面重力 $\log g$ (cgs)	4.42±0.08	4.15±0.06	4.50±0.04
射影自転速度 $v \sin i$ (km/s)	1.91	6.27	1.38

洋一さんの論文^{16), 17)} などをご覧ください。

なおこの解析方法の信頼性を確かめるため、私たちは59Vir, 61Virについても同様の解析を行い、これらのパラメーターを算出しました。その結果を表1に示していますが、これらは過去の研究^{15), 18)}によって得られた値と矛盾のないものでした。

KIC6934317のスペクトルから算出したパラメーターの詳細も表1に記します。これらの結果から、KIC6934317はG型主系列星であること、また太陽のパラメーターの値（表面温度 $T_{\text{eff}}=5,777$ K, 表面重力 $\log g=4.44$ ）と比較すると、

温度が太陽より僅かに（100 K程度）低いものの、太陽と非常によく似たパラメーターをもつことがわかります。

5. 予想に反して自転が遅い？ 実は極方向から見ていた！

4章で述べたように、KIC6934317の表面温度、表面重力、金属量の値は太陽のものと同様です。一方で図2よりこの星は周期が約2.5日の明るさの変動を示しています。ここでこの明るさの変動が、自転に伴い星表面の黒点が見え隠れすることが原因で起きると仮定し、自転速度 (v) の値に変換すると、その値は約20 km/sとなります。したがってKIC6934317は太陽（自転速度は約1.8 km/s）よりかなり自転速度が大きいと予想されます。

一方、図3に個々の星のFe I 6,533.9 Åという光球起源の吸収線周りのスペクトルを示します。各スペクトルは、連続光部分の強度で規格化してあります。一般に星の自転が速いとドップラー効果で星の吸収線の輪郭が広がることが知られていますので、KIC6934317も自転の速い星ならば吸収線の輪郭が広がっていることが予想されます。しかしこの図を見ると自転が速い比較星である59Virは広がった吸収線となっていますが、KIC6934317は上述の予想に反し細い吸収線となり、太陽や61Virと同様に、比較的自転速度が遅い星が示す吸収線に見えます。

私たちはこの問題についてさらに詳しく調べるため、取得したスペクトルから視線方向の射影自転速度 ($v \sin i$) の導出を試みることにしました。個々の吸収線に見られるスペクトルの広がり、星の自転による広がりのほか、星内部での乱流（マクロ乱流と呼ばれています）や、装置による広がりなどの成分が混じっており、正確な $v \sin i$ の見積もりにはこれらを適切に考慮する必要があります。私たちは国立天文台の竹田洋一さんが用いている手法¹⁹⁾に従い、Fe I, Fe IIの吸収線中でこ

これらの成分を切り分けることでKIC6934317, 59Vir, 61Vir, そして太陽の $v \sin i$ を見積もりました。

見積もりの結果、KIC6934317は $v \sin i \sim 1.9$ km/sとなったほか、比較星や太陽の値が過去の研究で得られた値¹⁷⁾と矛盾がないことを確認しました。このことからKIC6934317の $v \sin i$ はやはり小さく、太陽の自転速度(約1.8 km/s)と同程度とわかりました。

一方、上記でこの星の明るさの変動(周期2.5日)から求めた自転速度(v)の値は約20 km/sとなり、 $v \sin i$ の値と大きく異なるため、この二つの値の違いをどのように解釈したら良いか、最初はたいへん悩みました。

その後の議論を経て、私たちはこの違いが軌道傾斜角 i (星の自転軸と、視線方向の軸との間の角度)の効果で説明できると考えました。すなわち、この星は軌道傾斜角が小さく、私たちはほぼ極方向からこの星を観測しているので、 $v \sin i$ が v よりも小さい値となったということです。

また、この効果は別の観点からも確認できます。図4は横軸にスーパーフレア星の明るさの変

動の振幅、縦軸に個々のスーパーフレアによる増光の振幅を取ったものです。データは私たちのケプラー衛星のデータの解析から得られたものです。また、図の中の実線は $B=1,000$ Gを仮定した場合の星の明るさの変動の振幅(黒点領域の面積に対応)と、スーパーフレアによる増光の振幅(スーパーフレアのエネルギーに対応)の上限値の間の解析的關係を示しています。この図の詳細な説明や解釈は野津湧太さんの記事⁸⁾も併せてご覧ください。

一方、破線は軌道傾斜角が小さいとき($i=2$ 度)の星の明るさの変動の振幅と、スーパーフレアによる増光の振幅の上限値の間の解析的關係を表しています。ここでは星の軌道傾斜角が小さくなると、それに応じて見かけの明るさの変動の振幅が小さくなり、黒点領域の面積も小さく見積もられてしまうという効果を考慮しています。この効果を踏まえると、KIC6934317も軌道傾斜角が小さく、また実際の黒点領域の面積は、見かけの変動振幅から推測されるものよりも大きいということが考えられます。

6. 太陽より活発！大黒点が存在！？

次に私たちは、太陽型星の表面に大黒点が現れた際にその星の彩層活動性が高まることに着目し、太陽や晩期型星の彩層活動性の指標としてよく用いられる近赤外の1階電離カルシウム(Ca II)の三重線(8,498, 8,542, 8,662 Å)とH α 線のプロファイルを用いて、この星の活動性から間接的に大黒点の有無を調べることにしました^{20), 21)}。Ca IIの近赤外の三重線(8,498, 8,542, 8,662 Å)やH α 線はCa II H線(3,968 Å), K線(3,934 Å)等と同様に彩層活動性の指標として知られ、大黒点が存在し彩層活動性が高まると吸収線に彩層からの輝線成分が混ざり込み、吸収線が浅くなるという傾向があります²⁰⁾⁻²²⁾。

なおCa IIの近赤外の三重線の振る舞いについては、私たちのほうでも太陽表面の分光観測を通

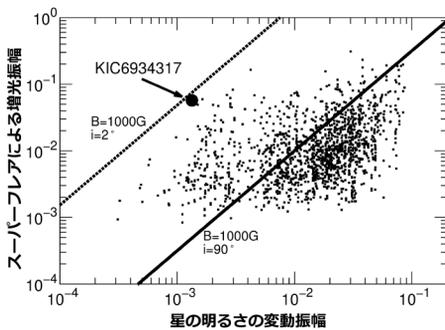


図4 横軸：スーパーフレア星の明るさの変動の振幅(黒点領域の面積に対応)、縦軸：個々のスーパーフレアによる増光の振幅(スーパーフレアのエネルギーに対応)の関係。図の中の実線は磁場強度 $B=1,000$ Gを仮定した場合の星の明るさの変動振幅と、スーパーフレアによる増光振幅の上限値の間の関係を示しています。一方、破線は軌道傾斜角が小さい場合($i=2$ 度)の関係を表しています。

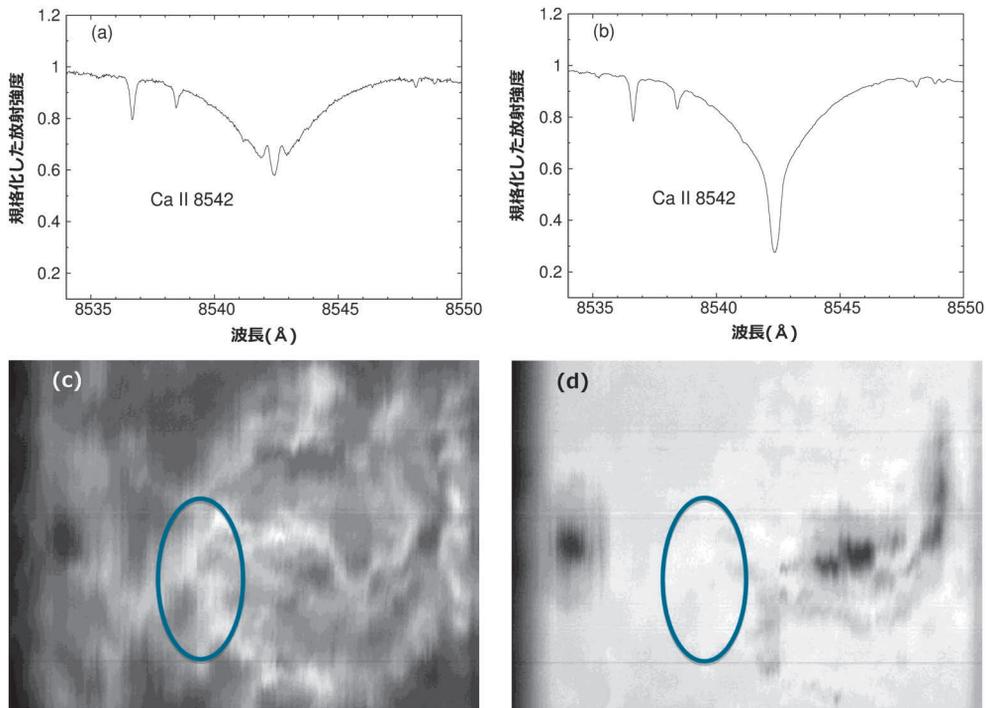


図5 (a) 太陽のプラージュ領域を観測して得たCa II 8,542 Åの吸収線周りのスペクトルの一例. (b) 太陽の静穏領域を観測して得たCa II 8,542 Åの吸収線周りのスペクトルの一例. (c) Ca II 8,542 Åの吸収線の中心波長で見た太陽の黒点付近の領域. 太陽の彩層を観測した画像で、黒点周りにあるプラージュが明るく光っています. (d) Ca II 8,542 Åの吸収線の輪郭部分の波長(8,534 Å)で見た太陽の黒点付近の領域. 視野は図(c)と同じですが、太陽の光球を観測した画像です. 図(c)と(d)において楕円で囲んだ領域で、図(a)に示したプラージュ領域のスペクトルを作成しました. 図(b)のスペクトルは太陽表面のさまざまな場所の静穏領域のスペクトルを平均して作りました.

じて確認をしました. 観測に用いた装置は京都大学飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡(口径60 cm)²³⁾に設置されている水平分光器で、実際の観測は2013年1月11日に行われました. このときの観測波長はCa II 8,542 Åの吸収線を含む8,533–8,553 Åの領域で、波長方向の分解能($R \sim \lambda/\Delta\lambda$)は300,000程度でした.

図5(a)は、太陽のプラージュ領域の観測から得たCa II 8,542 Åの吸収線周りのスペクトルの一例です. 一方、図5(b)は太陽の静穏領域の観測から得たCa II 8,542 Åの吸収線周りのスペクトルの一例です. これらを比較すると太陽のプラージュ領域のスペクトルでは輝線成分の混ざり込みがあり、吸収線が浅くなっていることがわか

ります. また図5(c)は太陽の黒点付近をスキャンして得たCa II 8,542 Åの吸収線の中心波長の画像で、太陽の彩層領域を見たものとなっています. 一方、図5(d)は同じ位置で太陽の光球領域を見た画像となっています(波長は8,534 Å). これらの画像の比較からも、黒点周りにあるプラージュが明るく光ることでCa II 8,542 Åの吸収線に彩層からの輝線成分の混ざり込みが起き、吸収線が浅くなるのがわかります.

なお大黒点の存在の有無を調べるためには、ゼーマン効果を用いて磁場強度の測定を行うことも考えられます. ゼーマン効果とは黒点のような強い磁場が存在する場所から放出される光において、スペクトル線が波長方向に分裂する現象で

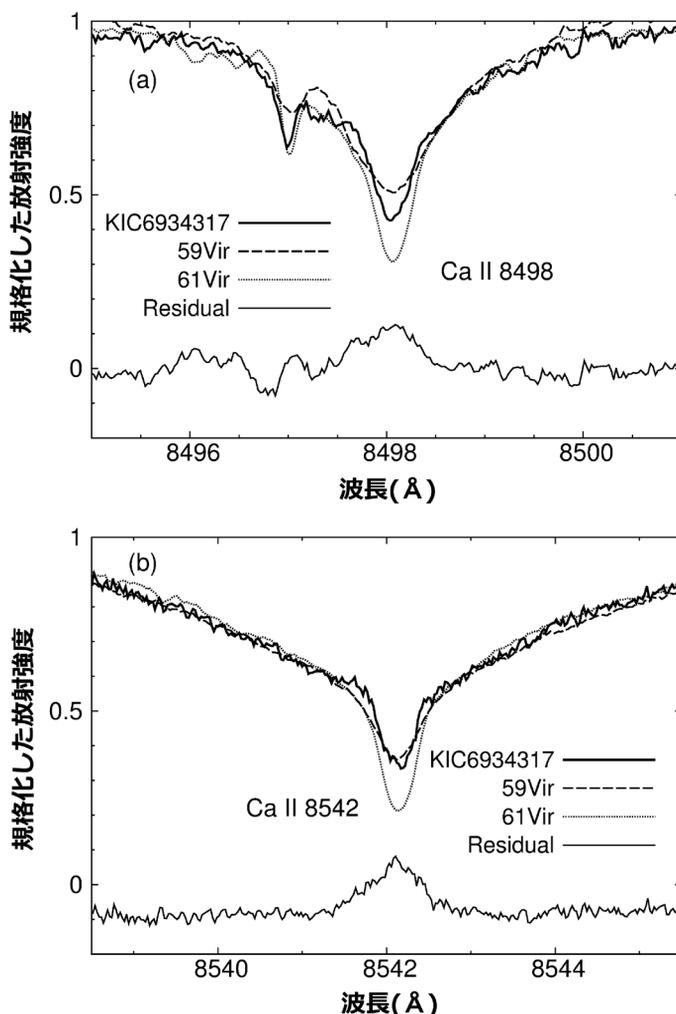


図6 各図の上部は連続光で規格化した、スーパーフレア星 KIC6934317、比較星 59Vir, 61Vir の Ca II 8,498 Å (a) と 8,542 Å (b) の吸収線周りのスペクトルを示しています。彩層からの輝線が吸収線に混ざり込みラインが浅くなる効果をわかりやすく示すために、KIC6934317の規格化したスペクトルから活動的でない比較星である 61Vir (表面温度、表面重力、金属量、 $v \sin i$ はほぼ同じ) の規格化したスペクトルを引き算した成分を各図の下側に Residual として示しています。

す。波長方向の分裂幅が磁束密度の大きさに比例することが知られていて、太陽表面の磁場測定などにもよく用いられています^{15), 24)}。

実際私たちも当初は、ゼーマン効果を用いたスーパーフレア星の磁場測定を観測目的の一つとしており、ゼーマン効果に対する感度の高い Fe I 8,468 Å の吸収線²⁴⁾ において、スペクトル線の分裂が見えないか期待していました。しかし今回の

KIC6934317の観測データを解析したところ、この吸収線の分裂は見られませんでした。その後の考察によると、星の場合は太陽と異なり星の各場所から放出される光を足し合わせたスペクトルしか観測できないうえ、スーパーフレア星表面での黒点部分の面積の割合はせいぜい数%から10%程度であり、かつ黒点部分は温度が低く明るさが暗すぎるため、黒点部分からの光は他の磁場強度

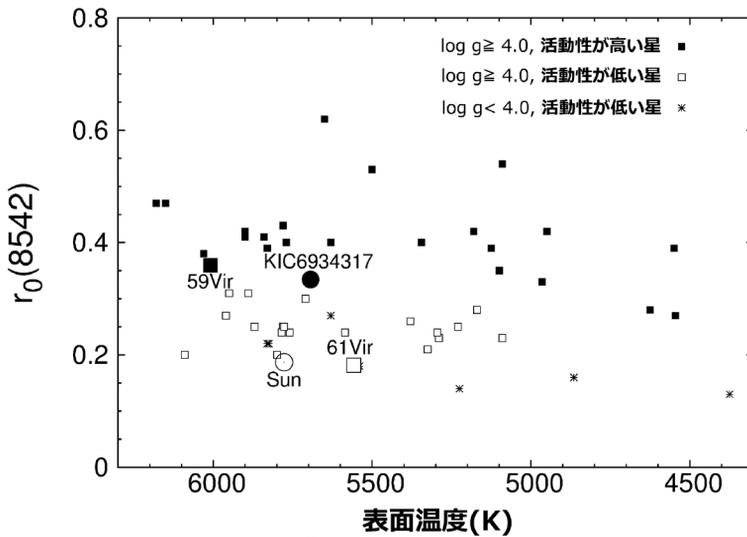


図7 星の表面温度とCa II 8,542 Åの吸収線中心の規格化した強度 $r_0(8,542)$ の関係. 大きい印はスーパーフレア星KIC6934317, 比較星59Vir, 61Vir, 太陽のデータを表します. 小さい印は晩期型星の活動性を調べた過去の研究で得られているデータです²⁶⁾. 黒四角は活動性が高いと判定されている主系列星を表し, 白四角は活動性が低い主系列星 ($\log g \geq 4.0$), 米印は活動性が低く進化が進んで表面重力が小さくなった星 ($\log g < 4.0$) を表します.

の弱い部分 (~数G) からの光で隠されてしまいます. そのため現在の観測では, スーパーフレア星の磁場強度をゼーマン効果で直接測定することはなかなか難しいようです.

図6には連続光で規格化した, スーパーフレア星KIC6934317のCa II 8,498 Åと8,542 Åの吸収線周りのスペクトルを示しています. この図から, KIC6934317のCa IIのライン中心は自転が遅く磁場の弱い比較星である61Virや太陽に比べ浅く, 自転が速く磁場の強い星である59Virとほぼ同程度であることがわかります.

また図6の下部では, 吸収線に彩層からの輝線が混ざり込みラインが浅くなる効果をわかりやすく記すために, KIC6934317の連続光で規格化したスペクトルから活動的でない比較星である61Vir (表面温度, 表面重力, 金属量, $v \sin i$ はほぼ同じ) の連続光で規格化したスペクトルを引き算した成分を示しています. このような処理を行うと, ラインプロファイル中の光球由来の成分や, 自転が速いことによってラインプロファイル

が広がったために中心部分が浅くなった効果などを上手く取り除くことができ²⁵⁾, KIC6934317の彩層由来の強い輝線成分の存在を見て取ることができます. なお, 同じく彩層活動性の指標として知られるH α 線のプロファイルについてもライン中心が浅くなる傾向が見られ, 同様の処理を行うと彩層由来の強い輝線成分の存在を確認することができました.

一方, 図7は横軸に星の表面温度, 縦軸にCa II 8,542 Åの吸収線中心の規格化した強度 $r_0(8542)$ を表したものです. この図では今回観測したスーパーフレア星KIC6934317, 比較星59Vir, 61Vir, 太陽のデータに加えさらなる比較のために, 過去の晩期型星の活動性を調べた論文の中で活動性が高いと判定されている天体と活動性が低いと判定されている天体のデータも, 同じく図中に記してあります²⁶⁾. この図を見ると, 活動性が高いと判定されている星の分布と低いと判定されている星の分布には違いがあることがわかります^{25), 26)}. その中でKIC6934317と強い磁場

の存在が確認されている比較星59Virは活動性が高い星の分布の中に位置し、太陽と磁場が弱い比較星である61Virは活動性が低い星の分布の中に位置しています。

さらに、私たちは上記の方法で得られたH α 線やCa IIの近赤外の三重線のライン中の輝線成分のスペクトルから、輝線成分の等価幅および輝線フラックスを求めました。これらの値を過去に別のG型星で行われた研究と比較すると、KIC6934317の輝線フラックスの値は活動的なG型星によるものと同程度であることがわかりました^{25), 27)}。以上のことより、このKIC6934317は太陽型の星で表面温度、表面重力、金属量などが太陽とほぼ同じでありながら、その彩層活動性は太陽より高く、したがって巨大な黒点領域の存在が示唆されることがわかりました。

7. まとめと今後の展望

さて本稿では、スーパーフレア星の高分散分光観測の重要性に触れたうえで、私たちが初めて高分散分光観測を行ったG型のスーパーフレア星(KIC6934317)の解析結果の一部を紹介しました。具体的には、まずこの星の表面温度、表面重力、金属量などのパラメーターが太陽とよく似ていることを示しました。また、スペクトルから射影自転速度($v \sin i$)を求め、それをケプラーの光度曲線のデータから求めた自転速度と比較することで、この星の軌道傾斜角が小さいと考えられることを示しました。そしてCa IIの近赤外の三重線やH α 線のプロファイルから、この星の彩層活動性が太陽に比べて高いことを示しました。

しかし、スーパーフレア星の詳しい性質を明らかにし、「太陽でスーパーフレアは起きるのか?」という謎に迫るためには、さらに多くのスーパーフレア星に対して分光観測を行うことが欠かせません。私たちは本稿で報告した星に加え、明るさの変動周期が太陽の自転周期と同程度の長さの星も含め、新たに約50個の太陽型のスーパーフレア星

に対して、すばる望遠鏡高分散分光器を用いた同様の可視光高分散分光観測を行い、その表面温度、表面重力、金属量、自転速度などを求めたり、単独星の割合、彩層活動性などの性質を評価したりしつつあるところです。こちらの結果の詳細については、この後の野上大作さんの記事²⁸⁾やその元論文²⁹⁾、さらに今後の私たちのグループの研究発表をご覧ください。

また私たちはこれまでのすばる望遠鏡などを用いた観測に加え、現在京都大学理学研究科宇宙物理学教室および附属天文台で推進中の、京都大学岡山3.8m新技術光学赤外線望遠鏡³⁰⁾に高分散分光器を設置し、それらを用いて大量のスーパーフレア星の長期にわたる分光観測を行うことも計画しています。これらの内容についてもこの後の野上大作さんの記事²⁹⁾で詳しい解説がありますので、ぜひご覧ください。

今後も私たちのグループでは、「太陽でスーパーフレアは起きるのか?」という謎の解明に向け、研究を続けていく予定です。

謝辞

本稿は、筆者らの発表した論文¹³⁾に基づくものです。この研究は、国立天文台すばる望遠鏡による観測で得られたデータを用いて行われました。私たちの観測を実施する際には、田実晃人氏をはじめとするハワイ観測所の職員の皆様にたいへんお世話になりました。またスペクトルデータ解析の際には、国立天文台の竹田洋一氏から数多くの有益な助言をいただきました。そして京都産業大学神山天文台での予備観測の際には、神山天文台研究員の新井 彰氏(現 兵庫県立大学西はりま天文台)にたいへんお世話になりました。

京都大学飛騨天文台での太陽の分光観測や太陽画像の解析の際には、上野 悟氏、阿南 徹氏、浅井 歩氏、北井礼三郎氏にご協力いただきました。さらに、この記事の執筆する機会を与えてくださり、かつ完成まで見守ってくださった勝川

行雄氏に感謝いたします。

最後に、筆者が学部1回生の時期から本研究に携わり、学部生ながら論文発表まで至ることができたのは、本田敏志氏、前原裕之氏、野津湧太氏、柴山拓也氏、長尾崇史氏、野上大作氏、柴田一成氏をはじめとする、本研究にかかわった方々によるご助言・ご指導のおかげです。この場をお借りして皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Shibata K., Magara T., 2011, Living Review in Solar Physics 8, 6
- 2) Maehara H., et al., 2012, Nature 485, 478
- 3) Shibayama T., et al., 2013, ApJS 209, 5
- 4) 柴田一成, 2014, 天文月報107, 253
- 5) 前原裕之, 2014, 天文月報107, 260
- 6) 柴山拓也, 2014, 天文月報107, 361
- 7) Notsu Y., et al., 2013, ApJ 771,127
- 8) 野津湧太, 2014, 天文月報107, 367
- 9) Shibata K., et al., 2013, PASJ 65,49
- 10) Brown T. M., et al., 2011, ApJ 142, 112
- 11) Molenda-Żakowicz J., et al., 2010, Astronomische Nachrichten 331, 981
- 12) Pinsonneault M. H., et al., 2012, ApJS 199, 30 [Erratum 2013, 208, 12]
- 13) Notsu S., et al., 2013, PASJ 65, 112
- 14) Noguchi K., et al., 2002, PASJ, 54, 855
- 15) Anderson R. I., Reiners A., Solanki S. K., 2010, A&A 522, A81
- 16) Takeda Y., Ohkubo M., Sadakane K., 2002, PASJ 54, 451
- 17) Takeda Y., et al., 2005, PASJ 57, 27 [Erratum 2005, 57, 415]
- 18) Takeda Y., Kawanomoto S., 2005, PASJ 57, 45
- 19) Takeda Y., Sato B., Murata D., 2008, PASJ 60, 781
- 20) Frasca A., et al., 2010, A&A 518, A48
- 21) Takeda Y., et al., 2010, A&A 515, A93
- 22) Takeda Y., et al., 2012, PASJ 64, 130
- 23) Nakai Y., Hattori A., 1985, Memoirs Faculty of Sciences University of Kyoto 36, 385
- 24) Johns-Krull C. M., Valenti J. A., 1996, APJ, 459, L95
- 25) Martínez-Arnáiz R., et al., 2011, MNRAS 414, 2629 [Erratum 2011, 417, 3100]
- 26) Chmielewski Y., 2000, A&A 353, 666
- 27) Fröhlich H.-E., et al., 2012, A&A 543, A146
- 28) 野上大作, 2014, 天文月報107, 472
- 29) Nogami D., et al., 2014, 66, L4
- 30) <http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/psmt/>
- 31) Kurucz R. L., Furenlid I., Brault J., Testerman L., 1984, Solar Flux Atlas from 296 to 1,300 nm (Sunspot, NM: National Solar Observatory)

High-Dispersion Spectroscopy of a Superflare Star Using the Subaru Telescope

Shota NOTSU

Department of Astronomy, Graduate school of Science, Kyoto University, Kitashirakawa-Oiwakecho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

Abstract: We have researched superflares to investigate whether the Sun can really give rise to superflares, or not. Our previous studies showed that many superflare stars have quasi-periodic brightness variations with a typical period of one to a few tens of days, and indicated that these brightness variations can be explained by the rotation of a star with fairly large starspots, which can contain magnetic energy enough to explain that of superflares. In this article, we report the results of our first spectroscopic study of a G-type superflare star (KIC6934317), and discuss the detailed properties of the star. We also describe importance of spectroscopic observations of superflare stars.