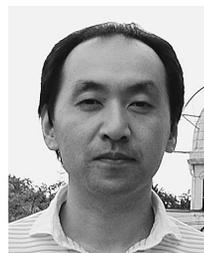


特集 太陽型星におけるスーパーフレア

(6) 太陽と極めてよく似た星における スーパーフレアの発見と3.8 m望遠鏡計画



野上大作*

〈京都大学花山天文台 〒607-8471 京都市山科区北花山大峯町〉

e-mail: nogami@kwasan.kyoto-u.ac.jp

スーパーフレアについての連載もいよいよ大詰めが近づいてきました。われわれのつけたスーパーフレア星は300星近くあり、それらをすばる望遠鏡／可視光高分散分光装置HDSを使って、星としての性質を詳しく調べるプロジェクトを進めています。その中で、自転周期、有効温度、表面重力、金属量で見て、太陽にとっても近い性質をもっている二つのスーパーフレア星を発見しました。これらのことは、太陽でもスーパーフレアが起こりうることを示唆します。ただし、 $H\alpha$ や $Ca II 8,542 \text{ \AA}$ といった彩層活動性の指標となる吸収線で見ると、太陽よりは若干活動性が高いようですが、G型星として「活動的」というほどではありません。現在京都大学を中心として、岡山で3.8 m望遠鏡建設を急ピッチで進めています。われわれはこの望遠鏡を使って、多数のスーパーフレア星の長期的なモニター観測などを行い、活動度の変化やスーパーフレアの機構、あるいは前兆現象を明らかにしていきたいと考えています。

1. はじめに

京都大学大学院理学研究科附属天文台では、1968年に飛騨天文台が完成し、花山天文台にあった60 cm反射望遠鏡が移設されました。その後1972年に65 cm屈折望遠鏡、1979年に60 cmドームレス太陽望遠鏡と次々に大型望遠鏡が建設されました。この次は1.5 mから2 mクラスの光学赤外線望遠鏡を作るという計画もあったそうですが、太陽観測の拠点としての役割を優先させ、1992年に6連式のフレア監視望遠鏡、2003年に太陽磁場活動望遠鏡が作られました。

この中口径望遠鏡計画は、京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室のほうで3 m級望遠鏡計画

として引き継がれ、1998年から議論がスタートしました。私は1999年3月にこの宇宙物理学教室で学位を取りましたので、D3のときにその議論を横目で眺めながら学位論文を執筆していたのを覚えています。2000年10月に飛騨天文台に助手として着任させてもらったときには、その当時はほとんど使われていなかった飛騨天文台の60 cm反射望遠鏡を整備して観測研究に再び活用するように、また3 m級望遠鏡計画に参加するようにと言われました。60 cm反射望遠鏡の整備と観測について書きたいこともいろいろありますが、本稿の本題から外れますので割愛します。

さて3 m級望遠鏡計画ですが、私としては激変星やブラックホールX線連星などの突発天体の研

* 現在の所属：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: nogami@kusastro.kyoto-u.ac.jp

究に使えるということで、当初からとても楽しみにしていたのですが、1999年に附属天文台に教授として着任された柴田一成さんは、自身のご専門である太陽フレアの研究を発展させて恒星フレアを研究したいということで期待していたそうです。柴田さんから、私が飛騨天文台に着任してすぐのときから、「恒星フレアと一緒に研究しよう。」と言われていました。そこで、60 cm反射望遠鏡でフレア星を少し観測してみたり、国立天文台岡山天体物理観測所や広島大学東広島天文台でRS CVn型連星やフレア星の観測をさせてもらったりしていたのですが、なかなか成果が上がらずにいました。

そんななか、計算機・ネットワーク管理が非常に得意でデータ解析に無類に強い前原裕之さん（現在 東京大学木曾観測所）、可視光高分散分光観測で恒星の性質を調査するエキスパートの本田敏志さん（現在 兵庫県立大学西はりま天文台）が花山天文台に同時に在籍しているというまさにベストのタイミングで、ケプラー宇宙望遠鏡のデータの公開があり、柴田さんの呼びかけに応じて5人のとても意欲と能力と時間のある学部1回生が集まってくれて¹⁾、スーパーフレアの研究が始まりました。それぞれの能力がうまく発揮されて、相乗効果で太陽型星（本稿ではG型主系列星を指します）のスーパーフレアというこれまでほとんど注目されてこなかった、というよりも多分、想像さえもあまりされてこなかった分野の研究が爆発的に進みました。人の縁とタイミングの良さに深く感謝しています。想像さえもあまりされてこなかった、というのは、先行論文がシェーファーらによる2000年の1本²⁾だけしかないということもありますが、この2年間で私だけでも6回国際研究会で発表の機会があり、「本当にそんなことが起こるのか。とてもインプレッシブだ！」というコメントを何度も受けたことからの印象です。さすがに最近はそのようなことはあまり言われなくなり、ほかのグループからも後追い論文がポ

ツポツと出だしてきていて、スーパーフレアというものが浸透してきていることを実感します。

さてわれわれのスーパーフレア研究の連載も6回目です。5回目の野津翔太さんの回で、2011年に行ったすばる望遠鏡でのサービズ観測による、スーパーフレア星の高分散分光観測の結果の紹介がありました。この観測を皮切りに、われわれは2012年、2013年と同じくすばる望遠鏡で観測をさせてもらい、これまでに50個のスーパーフレア星のデータを得ています。本稿では、その中で2星、太陽に非常によく似たスペクトルを示す星を見つけたこと³⁾を報告します。50星のデータをまとめた詳細な解析や検討、またリチウムに着目した研究も進めていて、論文として発表できたら、また改めて主著者から天文月報誌上で報告があるでしょう。

ところで3 m級望遠鏡計画は、2006年に京都大学、名古屋大学、国立天文台、ナノオプトニクス研究所（現在は株式会社ナノオプトニクス・エナジー）の産学連携による4者協定が締結されて本格的に始動し、3.8 m望遠鏡としてアップグレードされ、昨年度（平成25年度）の補正予算で望遠鏡建設の予算がつかしました。今年度（平成26年度）中に竣工して、平成27年度には調整とテスト観測へと進んでいく予定です。この望遠鏡計画と、3.8 m望遠鏡でのスーパーフレア研究の計画も、本稿で簡単に紹介いたします。

2. スーパーフレア星 KIC9766237 と KIC9944137

図1には本稿で取り上げる二つのスーパーフレア星 KIC9766237 と KIC9944137 の、ケプラー宇宙望遠鏡によって得られた光度曲線が示されています。矢印が指しているのがわれわれの見つけたスーパーフレアで、どちらのスーパーフレアもほぼ 10^{34} erg と、過去最大級の太陽フレアの100倍近いエネルギーと推定されました。図1の中の小さいパネルの中には、それぞれの星のスーパーフ

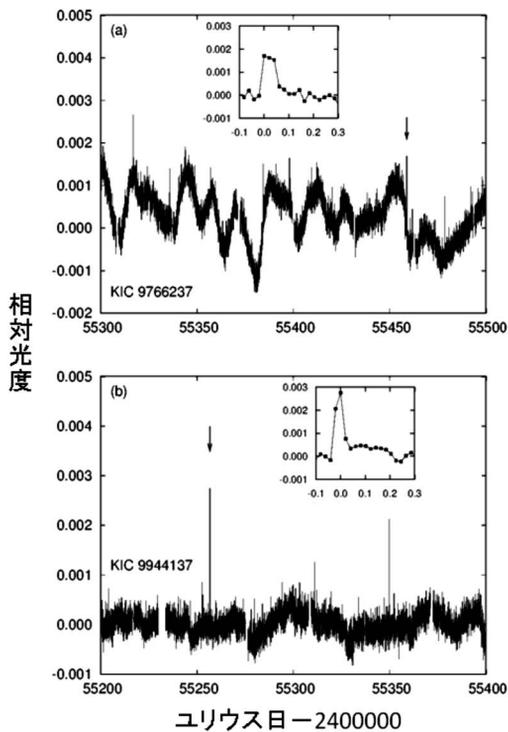


図1 KIC9766237 (a) とKIC9944137 (b) の光度曲線。縦軸は平均光度で規格化して1を引き、変化の割合にしたもの。黒点の存在によるものと思われる数十日の長期的な光度変化と、矢印で示したスーパーフレアがあります。小さいパネルは矢印で示したスーパーフレアの拡大図で、横軸はスーパーフレアの最初の点からの経過時間です。

レアを拡大して示しています。図1の中でもほかにスーパーフレアらしきものがたくさんあるやん？と思われた方！ するどい！ ですが、どれも1点明るくなっているだけで、宇宙線イベントを拾うなどのほかの要因を排除しにくいので、われわれとしてはそういうものはスーパーフレアとしてカウントしていません。

また、この図ではスーパーフレア以外にも数十日程度のタイムスケールの変動があることがわかります。これは巨大黒点をもって自転しているためと考えられる変動^{4),5)}で、500日分のケプラーデータを周期解析することによって、KIC9766237とKIC9944137は、それぞれ21.8日と25.3日の自

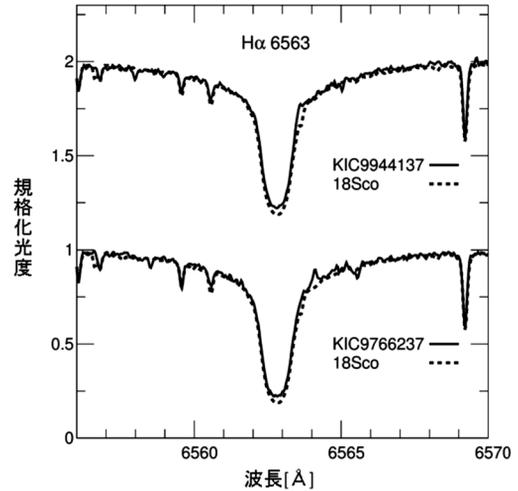


図2 KIC9766237とKIC9944137のH α 吸収線。比較のために、太陽の双子星と言われるほど太陽とそっくりな星とされる18 Scoのスペクトルを、視線速度の違いを補正して点線で重ねてあります。ほんの少し吸収線が浅く、18 Scoよりは活動性が高いと言えますが「活動的なG型星」と言えるほどではありません。

転周期をもつと推定されました⁶⁾。太陽では、緯度によっても少し違いますが、赤道では約25日周期なので、太陽に近いくらいゆっくりと自転している星と言えます。太陽型星の場合、星として輝き始めるあたりでは1日から数日の自転周期をもち、太陽風によって角運動量が抜き去られて、だんだん自転が遅くなるとされています。ですので、これらの星は太陽に近い年齢をもっていると考えられます。また太陽型星では、一般に自転が速いほど活動性が高いということが知られています⁷⁾。自転速度が遅い太陽型星でもスーパーフレアが起こるとなると、やはり太陽でもスーパーフレアは起こるのかも!?

3. KIC9766237とKIC9944137は太陽とそっくりさん

すでに述べたとおり、われわれはこれまでにすばる望遠鏡と高分散分光装置HDSで、50個のスーパーフレア星の高分散分光データを取得して

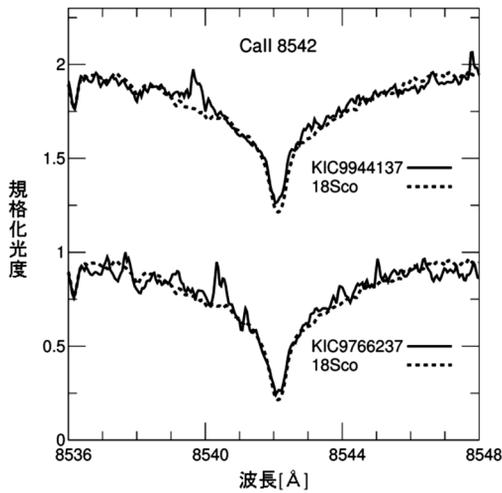


図3 KIC9766237とKIC9944137のCa II 8,542 Å. 18 Scoと比べると、少し輝線コアが強いようですが、やはり「活動的なG型星」というほどではありません。

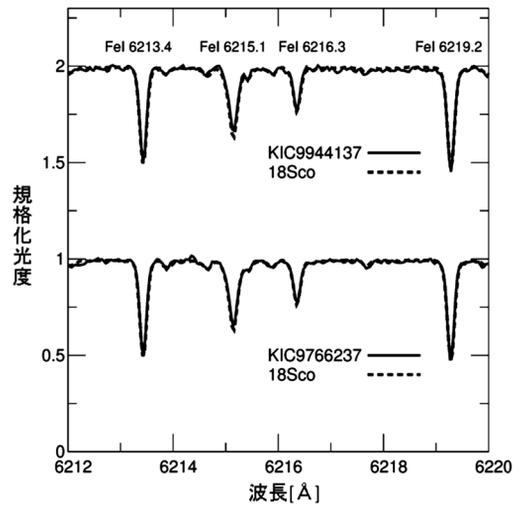


図4 KIC9766237とKIC9944137の中性的鉄 (Fe I) の吸収線で、18 Scoとほぼ重なっています。左右対称な形状で、伴星に由来すると思われるような成分は検出されませんでした。また、射影自転速度が18 Scoとほぼ同じであることがわかります。

います。KIC9766237のデータは2013年6月23日に、KIC9944137のデータは2013年6月24日に取りました。以下ではそのスペクトルの特徴を見ていきましょう。

図2はこれらの星のH α 付近のスペクトルです。これを見ると、太陽の双子の星と呼ばれるほどそっくりとされる18 Sco⁸⁾のもの(本稿のターゲットの星二つと同日に取りました)に比べて若干浅く18 Scoよりは活発であると言えそうですが、大きくは変わらないようです。また、H α と並んで彩層活動性の指標として用いられるCa II 8,542 Å (Ca II H&K線のほうがよく用いられますが、観測効率を重視してわれわれはこの線を使いました。)付近のスペクトルを図3に示します。こちらもほぼ18 Scoと重なっていますが、コア部分に僅かに輝線成分が見えます。ですがやはり太陽型星の活動性としては高いというほどではなさそうです。H α やCa II 8,542 Åを用いたスーパーフレア星の彩層活動性についての議論は、野津翔太さんの記事⁹⁾をご覧ください。

電離していない、あるいは1回電離の金属の吸収線は主に光球で形成されており、非常にたくさ

んあるのですが、図4では中性的鉄の吸収線を見せています。やはり18 Scoの吸収線とほぼ重なっています。これらの金属の吸収線からは、重要な情報が得られます。

まず、吸収線が左右対称な形をしています。もしこれらの星が、同程度の明るさの伴星をもつ連星系であれば、二つの星が視線方向に一直線に並んでいるという特別なタイミングでなければ、ドップラー効果で吸収線がずれてこのような形には見えないはずです。よって、これらの星は、太陽と同じく、似たような明るさの伴星をもつ連星系ではないことがわかります。ただし、例えば太陽の明るさの100分の1程度しかないM型星や、もっと暗い白色矮星、褐色矮星、ホットジュピター(恒星に非常に近い位置にある巨大惑星)が存在する可能性は、このスペクトルからだけでは否定はできません。これを調べるためには、今後何回も高分散分光観測を行い、視線速度の変化がないかを検証する必要があります。

太陽に性質の似た星でのスーパーフレアを発見

表1 われわれの測定した KIC9766237, KIC9944137, 18 Sco の恒星としてのパラメーター.

星	有効温度 T_{eff} [K]	表面重力 $\log g$ [cgs]	金属量 [Fe/H]	射影自転速度 $v \sin i$ [km/s]	リチウム量 A(Li)
KIC9766237	5,606 (40)	4.25 (0.11)	-0.16 (0.04)	2.1 (0.3)	<1.0
KIC9944137	5,666 (35)	4.46 (0.09)	-0.10 (0.03)	1.9 (0.3)	<1.0
18 Sco	5,824 (15)	4.50 (0.04)	0.07 (0.02)	2.4 (0.3)	1.6 (0.2)
(参考) 太陽	5,778	4.45	0	1.9	0.92

括弧内はエラー値. 太陽の値は理科年表と竹田ら¹²⁾ (リチウム量) による.

したシェーファーらは、太陽に似た星でスーパーフレアが起こりうるのはホットジュピターに原因があると考えており¹⁰⁾、今後スーパーフレア星が暗い伴星、あるいは巨大惑星をもっていないかを詰めていくのは必要でしょう。前原さんの *Nature* 論文¹¹⁾ を出版するときには、このことに関して (今となっては) 興味深い (と思える) 経緯がありました。興味がおありの方は柴田さんの記事¹⁾ に詳しく書かれていますのでご覧ください。

金属の吸収線輪郭からは、自転速度もわかります。太陽を想像してもらえばおわかりと思いますが、星は自転によって地球に近づくほうに運動する側と遠ざかるほうに運動する側があります。このためドップラー効果により、吸収線が広がるという効果があります。自転の速い星では、金属の吸収線が浅くなり、裾が広がっています。図3では、18 Sco とほぼ重なるような輪郭をしており、太陽と同程度の自転速度であることがうかがえます。ただし気をつけないといけないのは、星は太陽と違って、自転軸が地球からの視線方向と直角をなしているわけではありません。そのため、自転速度は視線方向に射影した大きさ (極端な話、自転軸が視線方向と重なっていれば、どれだけ速く自転していても射影自転速度はゼロになります) になります。実際に行う自転速度の測り方は竹田さんらの論文¹²⁾ を見ていただくとして、われわれの測った値を表1にまとめておきます。

また、光球の有効温度や表面重力の強さ、含まれている金属原子の量などによって、どの吸収線がどの強さで出るのかは変わってきます。逆に多

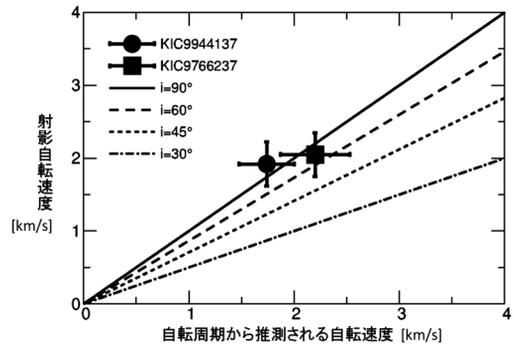


図5 自転周期に基づいて計算される自転速度とスペクトルから測定される射影自転速度. 自転軸の視線方向からの傾き角 i に応じた線を引いています. 二つの星とも、傾き角が高く、太陽と同じようにだいたい正立していると考えられます.

数の吸収線の強さ (この解析では等価幅を利用しました) を調べることで、有効温度、表面重力、金属量を調べることができます^{13), 14)}. われわれは100本程度の吸収線を使い、KIC9766237 と KIC9944137, および 18 Sco の有効温度、表面重力、金属量 (ここでは太陽を基準とした相対的な水素に対する鉄の元素数) を求めました。これも表1にまとめてあります。自転周期と表面重力 (半径の指標) から推定される自転速度と、スペクトルから測定した射影自転速度を図5に示しました。両星ともこの二つの値が近く、おおむね60度以上の軸の傾き角であることがわかります。

表1を見ると、有効温度こそ100度程度太陽と違うものの、表面重力や金属量は太陽にとっても近いことがわかります。表1ではリチウム量も載せています。リチウム原子は250万度程度の温度で壊

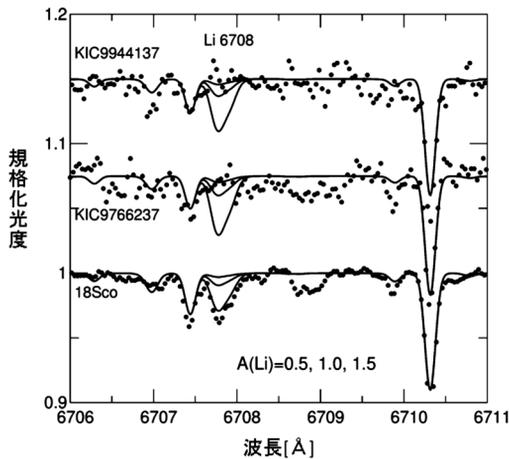


図6 KIC9766237とKIC9944137のLi 6,708 Åの吸収線. Liの吸収線はほとんど検出できませんでした. 実線はそれぞれのリチウム量を仮定(吸収線が浅いほうから $A(\text{Li})=0.5, 1.0, 1.5$)して計算されたモデルスペクトル.

れてしまうことが知られており、対流で表面のガスが内側に落ち込むと壊れてしまうため、年齢とともにリチウム量は減っていきと考えられていて、年齢の指標として使われます。スペクトルは図6で、18 Scoではきれいにリチウムの吸収線が検出できているのに対し、KIC9766237とKIC9944137では明確な検出ができませんでした。この図にはリチウム量を仮定して計算したモデルスペクトルも載せており、これに基づいてリチウム量の上限は1.0と推定しました。KIC9766237とKIC9944137はこの程度の温度の星としてはリチウム量が少なく¹⁵⁾、何らかのほかの要因でリチウム量が減っているのではない限り、少なくとも若い星ではない(年齢は30~40億歳以上)と考えられます。このことは、自転周期が長いことや、光度曲線中の自転周期での変動の振幅から考えられる黒点の大きさの下限値(太陽全体の表面積の0.1%程度)が小さいことにも符合します。

これらの観測結果は、太陽と同程度に年をとって自転周期も遅くなっており、彩層活動性もさほど高くない、太陽とよく似た恒星パラメー



図7 京大岡山3.8 m新技術望遠鏡の建設予定地. この航空写真では北が下側になっており、白丸で囲った、博物館の駐車場の東側の丘が建設予定地です.

ターをもつ星でスーパーフレアが起きていることを示しています。太陽でもいつかスーパーフレアが起こる、という可能性が高まったと言えます。しかしほかに、太陽にはなくスーパーフレア星のみが示す特徴はないか、暗い伴星・ホットジュピターはないか、太陽における活動性の11年サイクルに見られるような活動性の大きな変化はないか、スーパーフレアは太陽でこれまで観測されてきたフレアと同じ機構で起こるのか、など、まだまだ観測的に調べていかないといけない課題はたくさんあります。これをわれわれはすばる望遠鏡や3.8 m望遠鏡で調べていくつもりです。

4. 京大岡山3.8 m新技術望遠鏡計画

これまで3.8 m望遠鏡と書いてきましたが、現在の正式な名称は京大岡山3.8 m新技術望遠鏡と言います。これについて簡単に紹介しておきます。

名称で「岡山」が入っているのは、国立天文台岡山天体物理観測所の敷地内に建設する計画だからです。図7は岡山観測所の航空写真で、新望遠鏡の建設予定地にマークをつけてあります。岡山は国内としては高い晴天率と安定したシーイングを誇る「晴れの国」です。また岡山観測所の敷地内に作らせてもらえるなら、新たに道路を作ったり電気や水道を引いたりといったインフラの整備が、最小限に抑えられるというメリットもあります。

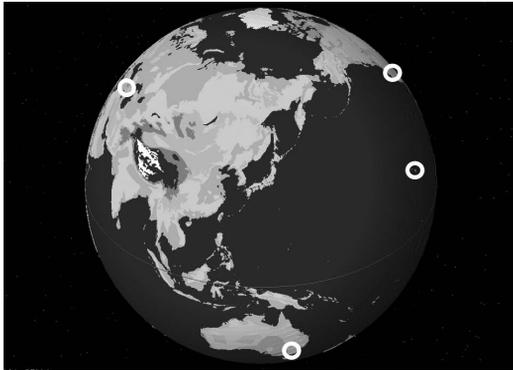


図8 日本を中心とした半球の4 mクラス以上の汎用望遠鏡の分布図。北米西海岸，ハワイ，オーストラリア，ヨーロッパには望遠鏡が存在しますが，日本付近にはこのクラスの汎用望遠鏡はありません。

そしてこれが重要なのですが，日本は4 mクラス以上の汎用望遠鏡が存在しない地域の真ん中に位置します（図8）。完成すれば，アジア最大の望遠鏡となります。ガンマ線バーストや重力波天体，超新星のショックブレイクアウトなどの一刻一秒を争う観測や，世界的な連携を組んで時間変動現象を狙う観測のような場合には，日本にこのクラスの汎用望遠鏡があることはたいへん大きな意味をもちます。また，平成23年度から光赤外線大学間連携が走っていて，観測，教育，人材育成，観測環境整備に成果を上げてきていますが，その基幹望遠鏡としての意味もあります。

「新技術」をうたっているのは，花びら型の分割鏡，超精密研削と干渉計を使う鏡面測定による高速高精度反射鏡製作，斬新な構造をもつ軽量かつ堅固な架台という，望遠鏡建設の未来を先取りする技術開発を行い，それを実証する望遠鏡だからです。この望遠鏡の完成予想図を図9に載せておきます。

順調にいけば，本稿が掲載される号が発行される直後あたりから，実際の建設が始まる予定です。京大岡山3.8 m新技術望遠鏡計画のホームページ <http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/psmt/>



図9 京大岡山3.8 m新技術望遠鏡の完成予想図。18枚の鏡を組み合わせる分割鏡方式で，独特な構造の軽量架台となっています。

[index.html](#)には，すでにさまざまな情報が掲載されていますし，今後の進捗状況も随時掲載されていきます。ご興味がおありの方は，是非こまめにチェックしてください。

5. 3.8 m望遠鏡によるスーパーフレア星の研究計画

この望遠鏡の観測時間のうち，約半分の時間を京都大学が使う予定です。その京都大学の時間枠の中では，1) ガンマ線バースト，重力波天体，超新星，激変星などの突発天体・現象の即時対応観測，2) 直接撮像による系外惑星探査，3) スーパーフレア星の長期間の高分散分光モニター観測をサイエンスの柱としています。1) と2) は本稿の趣旨から外れますので置いておいて，残りの紙面でスーパーフレア星の研究について簡単に紹介します。

われわれの一貫した興味は「太陽でスーパーフレアは起こるのか？」ということです。このために，スーパーフレア星は太陽と何が同じで何が違うのか，そしてスーパーフレア星は根本的に太陽と違うのか，それともある極端に活動的などときだ

けスーパーフレアを起こすのか、ということが鍵になりそうです。より根本的なこととしては、スーパーフレアと太陽でこれまで観測されているフレアとが本当に同じ機構で起こるのかも自明ではありません。

スーパーフレア星と太陽との恒星としての比較という意味では、自転周期、年齢、有効温度、半径（表面重力）、金属量、リチウム量が太陽とほぼ同じような値の星が、今回報告しているように見つかっています。一方でこのような星は、そもそもスーパーフレアが観測されているという点で現在の太陽と異なります。しかし彩層活動性という意味ではそう大差がない星もあるようです。野津翔太さんの記事⁹⁾を見てもらえばわかりますが、Ca II 8,542 Åの吸収線の深さで見ると、今回の二つの星はむしろ彩層活動性の低い星に分類されてしまいます。

スーパーフレア星と太陽とで明らかにすべき類似点、または相違点の一つは、暗い伴星、あるいはホットジュピターがあるかないかです。前原さんの記事¹⁵⁾にあるように、統計的にはすべてのスーパーフレア星がホットジュピターをもつということはなさそうですが、観測的にはっきりさせたいところです。暗い伴星（M型星、白色矮星、褐色矮星）・ホットジュピターの有無をきちんと調べるためには、秒速1mのオーダーの視線速度の変化が検出できる高分散分光装置と、何年にもわたって膨大な観測時間を使うモニター観測が必要です。

このような観測はすばる望遠鏡よりもむしろ、3.8 m望遠鏡で観測を行うほうが有利と言えます。もちろんすばる望遠鏡と比較すると、集光力と晴天率が落ちるため、観測時間は3.8 m望遠鏡の方が長くかかることとなります。しかし年間50晩の観測を10年20年といったタイムスケールで行うのは、ホームテレスコープを使うからこそこの計画と言えるでしょう。われわれは、このための観測をなるべく効率良く行えるような可視光高分散分光装置を、大型科研費を申請して開発しよ

うとしています。

また、長期のモニター観測というのは、活動性の変化を調べる意味でも重要です。太陽で見られる11年の活動サイクルのように、太陽型星でも10年程度のタイムスケールで彩層活動性が周期的に変化することが、Ca II H&K線の吸収線の強度変化の観測などからわかっています¹⁶⁾。太陽ではマウンダーミニマムと呼ばれる黒点がほとんど現れない時期が、1600年代後半に数十年間続いたことはよく知られていますが、逆に巨大な黒点がたくさん発生するスーパー活動期があるかもしれません（太陽の400年にわたる黒点観測記録ではそのような時期はないようです）。

ケプラー宇宙望遠鏡の光度曲線の解析で、20日以上自転周期が検出されているもののうち、スーパーフレアを起こす星は1,000個に1個程度の割合です。1個の星で考えるならば、1,000年に1年がスーパー活動期になるのか、10,000年に10年がその時期なのか、あるいはやっぱりスーパーフレア星は太陽型星のように見える星のうちの1,000個に1個の特別な星で、こういう星ではいつでもスーパーフレアが起こるのかは、まだ何とも言えません。これから息の長い観測が明らかにしてくれることでしょう。

スーパーフレアのメカニズムに直結することとしては、黒点の分布や磁場強度の精密な測定、あるいは黒点の生成と消滅、差動回転（緯度によって自転の回転角速度が異なること）の様子などを明らかにすることが重要です。スーパーフレアは太陽フレアと同じく、黒点に蓄えられている磁気エネルギーの爆発的解放現象であり、その磁気エネルギーは差動回転と強い関係をもつダイナモ機構によって蓄えられると考えられるからです。

星表面の温度分布を調べるには、多数の金属の吸収線を用いて、自転に伴ってその形状がどのように変化するかを観測する、というやり方があります。星表面で非対称な温度分布をしている場合、吸収線形状が非対称になります。このやり方

は、自転に伴う非対称性の変化について逆問題を解くことで温度分布を求めるもので、ドップラーイメージングと呼ばれる手法です。周囲に比べて温度の低くなっているところが黒点です。この観測を自転周期の何倍か継続して行くと、黒点の生成・消滅の様子や、緯度による自転周期の違い、すなわち差動回転の様子がわかってきます。この観測にさらに偏光観測を組み合わせると高分散偏光分光観測を行うと、磁場強度までわかることになります。ゼーマンドップラーイメージングと呼ばれます。たいへん困難な観測になりますが、太陽型星で少数の成功例があります¹⁷⁾。

スーパーフレアのメカニズムを調べる別のアプローチとして、スーパーフレアが起きている最中に時間分解した高分散分光観測を行って、 $H\alpha$ や $Ca II$ の線の形状の変化を調べるというやり方もあるでしょう。太陽フレアの立ち上がりのときに $H\alpha$ に強い輝線成分が現れますが、このとき、非対称な形状で強くなっていくことが明らかになった¹⁸⁾ ことが、太陽フレアのメカニズムの理解を進めるのに大きな役割を果たしました。太陽型星ではありませんが、M型星やRS CVn型連星のフレア時の $H\alpha$ の非対称性を調べる観測は、これまでもある程度なされています¹⁹⁾。この連載最初の柴田さんの記事¹⁾ でありましたように、われわれは全天の太陽型星を多数モニターして、スーパーフレアが起こればすぐに検出できるシステムが作れないかという検討も行っています。精度の問題でなかなか難しいのですが、これが実現すれば、スーパーフレアが起こればすぐに3.8 m望遠鏡を向けて高分散分光観測を開始する、ということも可能になるかもしれません。こういういつ起こるかかわからない、しかも継続時間が短い突発現象に、即時対応観測を行うことができるのもホームテレスコープの大きな強みです。

ケプラー宇宙望遠鏡で見ついているスーパーフレア星の多くはVバンドで12等以下と明るくないので、このような高分散偏光分光観測や時間

分解能を上げて高分散分光観測を行うことは、3.8 mの口径をもつ望遠鏡でも、十分な光量が得られずにノイズの影響が大きくなってしまふことが考えられます。また、ケプラー宇宙望遠鏡ははくちょう座に近いある領域をずっと観測し続けるミッションだったので、観測に適した時期は夏あたりに限られます。そのため、より明るいスーパーフレア星候補天体を全天のさまざまな場所で探そうと、X線強度の強い太陽型星の高分散分光観測を行うプロジェクトを、現在岡山観測所の188 cm望遠鏡を用いて進めつつあります。

これまでの連載で何度も書かれているように、もし本当にスーパーフレアが太陽で起こることがあれば、地球文明は甚大な被害を受ける可能性があります。われわれの観測から、スーパーフレアが起こる予兆現象のようなものが見つければ、被害を最小限に抑える防災に役立てられるでしょう。宇宙天気や地球磁気圏、高層大気、あるいはさまざまな防災関係の研究者の方々と、この方面の研究も進めていきたいと考えています。

以上のように、われわれはスーパーフレアの解明と太陽でのスーパーフレアに対する備えに向けて、さまざまな計画を考えています。すぐには実現が難しいものもありますが、少しずつ着実に前進していきたいと思ひます。

6. ま と め

われわれはケプラー宇宙望遠鏡の公開データから、300星程度のスーパーフレアを起こす星を発見しました。スーパーフレアが起これ、それによる放出物が地球を直撃すれば、甚大な被害が出る可能性があります。「太陽でもスーパーフレアは起こるのか？」という疑問に答えるため、すばる望遠鏡でスーパーフレア星の可視光高分散分光観測を行い、二つの太陽によく似ている星KIC9766237とKIC9944137を発見しました。これらは自転周期、年齢、表面重力、金属量、彩層活動性という観点では太陽によく似ています。ただし、1回の

観測だけではわからない性質、例えば暗い伴星やホットジュピターをもつか、活動性の変化はどうか、あるいは黒点について情報は得られないか、などは、これからの調査を待つ必要があります。

現在京都大学を中心に、3.8 m望遠鏡の建設を進めていて、平成27年度には試験観測を開始する予定です。この望遠鏡に、スーパーフレア星を研究するための可視光高分散分光装置を取り付け、さまざまな観測を行っていく予定です。

7. おわりに

京大岡山3.8 m新技術望遠鏡の完成の暁には、京大理学研究科附属天文台の、花山天文台、飛騨天文台に続く第3の天文台となる予定です。附属天文台全体の持続的安定的な運用を支援していたらこうと、天文台基金を作り、寄附を募っています。詳しくは附属天文台のホームページ<http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/>をご覧ください。観望会や施設公開も積極的に行い、一般の方に開かれた天文台づくりを目指しています。皆様にご温かく見守っていただけますと幸いです。

謝辞

本研究は、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、柴田一成氏、本田敏志氏、前原裕之氏、野津翔太氏、野津湧太氏、柴山拓也氏ほかの方と行った共同研究です。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。京大岡山3.8 m新技術望遠鏡計画は現在、京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室と同附属天文台、国立天文台、株式会社ナノオプトニクス・エナジーを中心にして、多くの方が協力して、光赤外線大学間連携事業の支援を受けて推進しています。本研究にかかわったすべての方々に、この場をお借りして深く

感謝を申し上げます。なお、図7の3.8 m望遠鏡の建設予定地の航空写真は、国立天文台岡山天体物理観測所のホームページで公開されているものを取得し、改変して作成しました。

参考文献

- 1) 柴田一成, 2014, 天文月報107, 253 参照
- 2) Schaefer B. R., King J. R., Deliyannis C. P., 2000, ApJ 529, 1026
- 3) Nogami D., et al., 2014, PASJ 66, L4
- 4) 野津湧太, 2014, 天文月報107, 367
- 5) Notsu Y., et al., 2013, ApJ 771, 127
- 6) Shibayama T., et al., 2013, ApJS 209, 5
- 7) 例えばReiners A., Schmitt J. H. M. M., 2003, A&A 398, 647
- 8) 例えばPorto de Mello G. F., et al., 2014, A&A 563, A52
- 9) 野津翔太, 2014, 天文月報107, 461
- 10) Rubenstein E. P., Schaefer B. E., 2000, ApJ 529, 1031
- 11) Maehara H., et al., 2012, Nature 485, 478
- 12) Takeda Y., Sato B., Murata D., 2008, PASJ 60, 781
- 13) Takeda Y., Ohkubo M., Sadakane K., 2002, PASJ 54, 451
- 14) Takeda Y., et al., 2005, PASJ 57, 27 [Erratum 2005, PASJ 57, 415]
- 15) 前原裕之, 2014, 天文月報107, 260
- 16) 例えばBaliunas S. L., et al., 1995, ApJ 438, 296
- 17) 例えばMarsden S. C., et al., 2006, MNRAS 370, 468
- 18) Ichimoto K., Kurokawa H., 1984, Solar Physics 93, 105
- 19) 例えばGarcia-Alvarez D., et al., 2003, A&A 397, 285

Two Superflare Stars Spectroscopically Similar to the Sun, and Our Plan of Kyoto University 3.8 m Telescope

Daisaku NOGAMI

Kwasan and Hida Observatories, Graduate School of Science, Kyoto University, Yamashina, Kyoto 607-8471, Japan

Abstract: We have found about 300 superflare stars, and have been pursuing a project to investigate the stellar properties of our superflare stars by using the High Dispersion Spectrograph (HDS) attached to the SUBARU telescope. Among 50 stars we have already observed, two stars seem to have stellar parameters very similar to those of the Sun, in terms of the rotation period, effective temperature, surface gravity, and metallicity. The absorption lines of H α and Ca II IR triplet, indicators of the chromospheric activity, are a little bit shallower than those of 18 Sco, a solar twin star, but are still classified as an 'inactive' star. These facts support a possibility that the Sun can give rise to a superflare someday. Our group, mainly in Kyoto University, is going to construct a 3.8 m telescope in Okayama, Japan. By using this telescope, we will carry out long-term high-dispersion spectroscopic monitoring of superflare stars, and investigate their binarity, activity variations, stellar spots, mechanisms of the superflare, and so on.