

特集：太陽型星におけるスーパーフレア

(4) スーパーフレア星と巨大黒点



野 津 湧 太

〈京都大学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: ynotsu@kwasan.kyoto-u.ac.jp

2012年5月、私たちのグループでは、スーパーフレアという、最大級の太陽フレアの10-1万倍のエネルギーに達するフレアを太陽型星（G型主系列星）において数多く発見したことを報告しました（詳しくは、天文月報5号の本特集（1）および（2）をご参照ください）。「太陽でもスーパーフレアは起きるのか？」という謎の解明を目標として、スーパーフレアについての研究を引き続き行っています。スーパーフレア星の多くでは、典型的には数日から数十日周期の準周期的な明るさの変動が見られます。本研究では、それらの明るさの変動が巨大黒点をもった星の自転によって解釈でき、そのような巨大黒点のも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できることを示しました。本記事ではその概要をご紹介します。

1. はじめに

太陽の表面では、太陽フレアと呼ばれる爆発現象が頻繁に発生しており、これは突発的な磁気エネルギーの解放によるものだと考えられています。太陽以外の恒星においても、フレア現象は非常に多数発見されており、なかでも若い星や近接連星系の星は、最大級の太陽フレア（全エネルギーが 10^{32} erg）の10倍から 10^6 倍のエネルギーに達するような巨大フレア（スーパーフレア）を頻繁に起こします。それらの星は、一般に自転が速く（～数十km/s程度）、太陽のものよりはるかに巨大な黒点が星表面の大部分を覆っていて磁気活動が活発なことが、さまざまな観測によってわかってきました。一方、太陽は年をとった星であり、自転速度も遅い（2 km/s程度）です。したがってこれまで、現在の太陽ではスーパーフレアは起きないと考えられてきました。

しかし、本当に太陽でそのような巨大フレアが

起きる可能性はないのでしょうか？ この謎に迫ることを目標として、京都大学理学研究科附属天文台を中心とする私たちのグループでは、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使って、太陽型星におけるスーパーフレアを探す研究を2010年秋から始めました。実は筆者は当時、まだ京都大学理学部の1回生だったのですが、縁あってほかの4名の1回生とともにこの研究に参加する機会をいただき、今日までかかわらせていただいています。筆者を含めた学部1回生が研究に参加するに至ったきっかけやその後の顛末等は、柴田一成先生の記事¹⁾に特に詳細に記述されておりますので、こちらも是非ご覧ください。

研究の結果、2012年5月の段階で、ケプラー宇宙望遠鏡データに含まれる、8万個の太陽型星（G型主系列星）の120日分の明るさのデータの中から、148個の星で365個のスーパーフレア現象を発見したことを報告しました²⁾。さらにその

後500日分のデータの解析により、279個の太陽型星で1,547個のスーパーフレア現象を発見するに至っています³⁾。また、多数のスーパーフレア現象を発見したことにより、フレアの頻度等について統計的な解析をすることも可能になりました。スーパーフレア発見の詳しい方法や頻度等の統計的な解析の結果については、前原裕之さんの記事⁴⁾ および柴山拓也さんの記事⁵⁾ において、詳しい解説が行われているので、そちらをぜひご参照ください。

さて、太陽型星において、現在の太陽ではこれまで想像もされていなかったほど巨大なフレアが多数発見されてきました。そのような星に何か特徴的な性質は見られるのでしょうか？

スーパーフレア星の光度曲線を見てみると、大半の星において、スーパーフレアに対応する突発的な増光現象のほかに、図1に見られるように、準周期的な明るさの変動が見られます。それらの周期は、数日から週10日程度であり、変光の振幅は0.1%から数十%に及びます。本研究⁶⁾ ではこの準周期的な明るさの変動の原因を探ることを通して、スーパーフレア星の性質に迫ろうと試みしました。

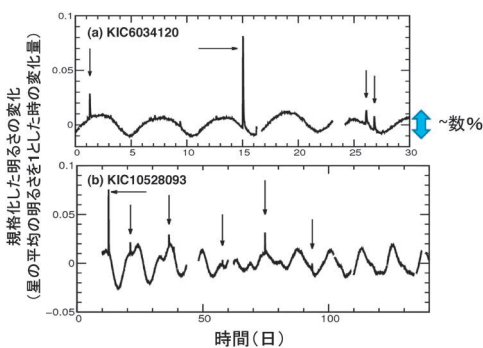


図1 ケプラー宇宙望遠鏡で観測されたスーパーフレア星の光度曲線の例。二つの星とも太陽型星です。矢印で示しているのが、検出されたスーパーフレアに対応します。周期数日から数十日、振幅数%の準周期的な明るさの変動が見られます。

2. 準周期変動の原因は何か？

私たちは、スーパーフレア星の示す準周期的な明るさの変動（周期：数日から数十日）について、星の表面にある黒点が、星の自転によって見え隠れすることによって説明できないかと考えました。太陽型星の自転周期は、一般に数日から数十日であり（太陽の自転周期は赤道付近で約25日）、ちょうどこの変光の周期どうまく対応します。なお、太陽においても、それなりに大きな黒点が出ている時期であれば、図2に見られるように、太陽黒点の見え隠れによって、ある程度準周期的な明るさの変動が見られています。

もちろん星の明るさが周期的に変動する原因としては一般に、黒点をもった星の自転以外にもいくつかの可能性が挙げられます。

まず、さまざまな星において研究が行われている現象として、脈動現象があります。しかし、脈動はスーパーフレア星に見られる準周期的な変動の原因ではないと判断できます。なぜならば、G型主系列星で見られる脈動の周期は、太陽の5分振動などのように、数分程度であり、今考えている、スーパーフレア星に見られる準周期的な明る

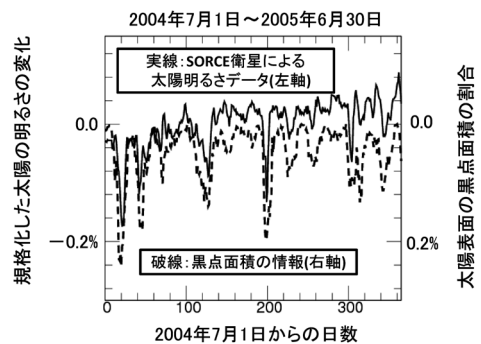


図2 Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE) という衛星で観測された、太陽の可視光での明るさの変化と、同じ観測日の黒点面積をプロットした図です。比較的大きな黒点が出ていると、自転による黒点の見え隠れに伴って、太陽の可視光での明るさが変化していることがわかります。

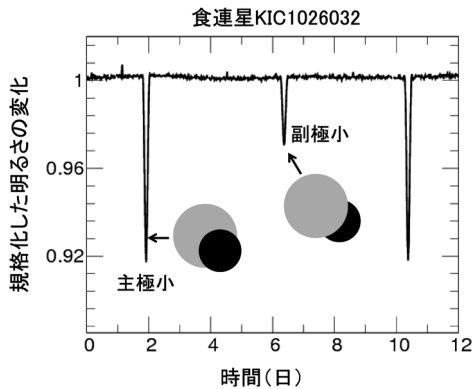


図3 ケプラー宇宙望遠鏡によって観測されている食連星KIC1026032の明るさの変化の図（食連星の具体例）。食連星においては、二つの星が互いに相手の星の前を横切って隠す現象（「食」）によって、観測される明るさが周期的に暗くなります。

さの変動の周期（数日から数十日）とは大きな差があるからです。

また、星が近接連星系をなしていれば、それによって光度変動を起こす可能性があります。例えば、図3に例が示されているように、一方の星がもう一方の星の前を横切って隠すことで見かけの明るさが変化する、「食」現象です。連星の効果による星の明るさ変動というのは、長年研究がなされてきた分野でもあり、一見有力な説とも思えますが、スーパーフレア星の変動の多くを連星の効果で説明するというのは、難しそうです。主系列星同士の連星系の軌道運動は基本的に定常的であり、何周期にもわたってほとんど光度曲線の形状には変化は生じないはずですが。しかし実際の光度曲線の形状は、数周期経つと変動の振幅が変化するなどしています（図1(b)）。これは、黒点サイズの時間に伴う変化や、新たな黒点の形成、あるいは差動回転の効果などが影響していると解釈したほうが妥当だと考えられます。

したがって以下では、スーパーフレア星の明るさの変動は、星の表面に大きな黒点があって、それが見え隠れしていることによって起こっている

という観点で考えていきたいと思っています。もちろんケプラーの測光観測データだけでは、連星系である可能性は完全には排除できません。それについては、最後に再び述べたいと思います。

3. スーパーフレア星の黒点のモデル計算

上述の準周期的なスーパーフレア星の明るさ変動が自転によって説明できるとすると、星表面に存在する黒点はどのようなサイズになるのでしょうか？ 私たちはその例を示すために、黒点をもった星の自転についての簡単なモデル計算を試みました。

モデル計算では、星表面の黒点分布を仮定して、その分布によって生じる明るさを計算し、黒点の見え隠れによる明るさの変化を追いかけ、ケプラーの観測データから得られた光度曲線の再現を試みました。

同じような方法で光度曲線モデルから恒星表面の黒点分布を調べる研究は長い歴史があります。しかし一般に、黒点のモデル計算には大きな不定性があり、黒点分布の唯一解を単色の測光データだけから求めることはできません⁷⁾。光度曲線の形状を変えるパラメーターとしては、単に黒点のサイズのほかに、星の自転軸の視線方向に対する傾きや黒点の緯度などがあります。例えば、黒点が高緯度にあつて自転軸の傾き角が小さい（極方向から星を見ている）場合、黒点の一部は常に観測者から見えている状態になるので、明るさの変動の振幅が小さくなります。ケプラー宇宙望遠鏡のデータは単色の測光データしかないので、黒点サイズと黒点の色合いについての情報を得ることができません。またさらに、実際の太陽の可視光画像を見てみるとわかるように、太陽表面には黒点のほかに、白斑と呼ばれる周囲よりも明るい部分もあり、これらが明るさの変動に影響を与える可能性もあります。

これらのことを踏まえて私たちは、明るさの変

動が、スーパーフレア星の大まかな黒点サイズと自転周期についての情報をもたらしてくれることを明示するため、モデル計算を行いました。

モデル計算の概要を紹介します。まず、球形の星表面を1度ごとのメッシュに区切り、各点の明るさを積分することによって、観測される放射を計算しました。表面に黒点を置き、黒点部分とそれ以外の部分（光球部分）の温度比を2:3として（太陽における黒点温度約4,000度と光球温度約6,000度を念頭に置いています）、各点からの放射は黒体放射

$$F = \sigma T^4 \quad (1)$$

をしていると仮定しました。そのうえで、太陽などでも見られる周縁減光の効果を加味して、星の明るさを計算し、自転に伴う時間変化を追いました。ここでは、モデル計算結果のうち、三つの星

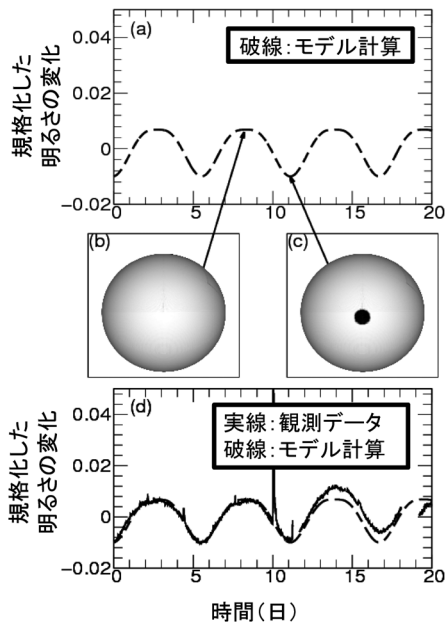


図4 図1(a)で示したスーパーフレア星 KIC6034120についての、モデル計算の例。(a)がモデル計算によって求めた光度曲線、(b)と(c)は矢印で示している時刻について、モデルで仮定している黒点の想像図、(d)がモデルと観測のライトカーブの比較です。

の結果について、図4-6でご紹介します。

図4は、KIC6034120というスーパーフレア星の例で、この星は光度曲線の形状が比較的単純であり、黒点一つが存在し、星が剛体回転するというモデルで大まかな形状が再現されました。数%の振幅を再現するのに、星半径の10%に相当するような巨大な黒点が必要なことが見て取れます。

図5は、KIC6691930という星についてのモデル計算例で、図4のケースよりは、少し光度曲線の形状が複雑であり、黒点二つが存在して、星が剛体回転するというモデルで、おおよそ光度曲線が再現されます。二つの黒点を仮定することによって、変動のピークと肩の部分それぞれがうまく再現されます。

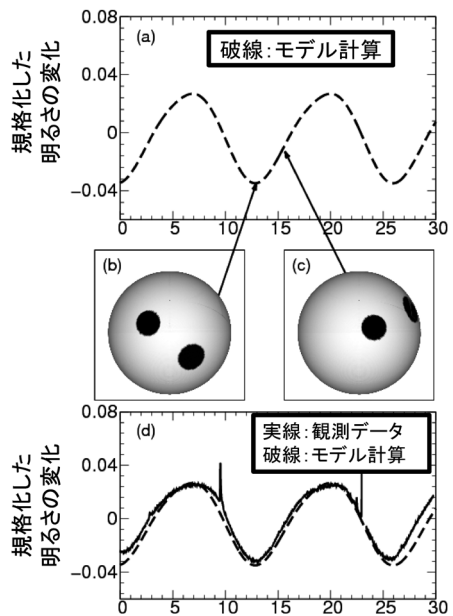


図5 スーパーフレア星 KIC6691930についてのモデル計算の例。(a)がモデル計算によって求めた光度曲線、(b)と(c)は矢印で示している時刻について、モデルで仮定している黒点の想像図、(d)がモデルと観測のライトカーブの比較です。図4のケースと違って、この場合は二つの黒点を考慮することで光度曲線（特に変動のピークと肩の部分の形状）がおおよそ説明されます。

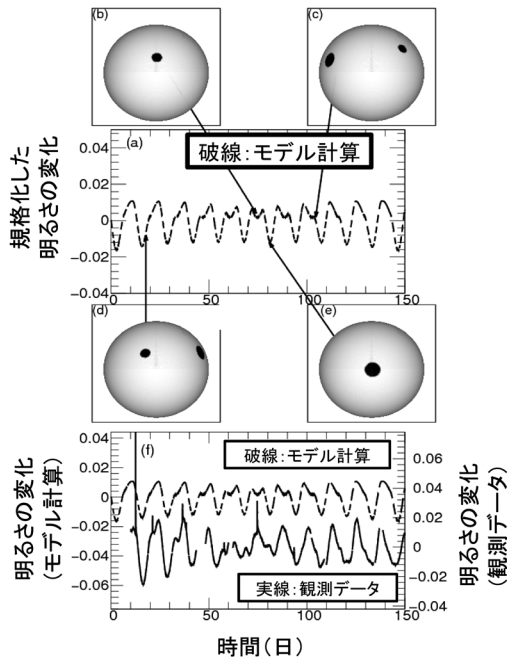


図6 図1 (b) で示したスーパーフレア星 KIC10528093 についての、モデル計算の例。(a) がモデル計算によって求めた光度曲線、(b)-(e) は矢印で示している時刻について、モデルで仮定している黒点の想像図、(f) がモデルと観測のライトカーブの比較です。図4, 5 の場合と違って、この計算例では差動回転の効果を考えています。

図6は、KIC10528093 という星についてのモデル計算例で、図4, 5 よりも長い期間について調べています。ケプラーのデータを見てみると変動の形が、時間とともに大きく変化しています。単純に振幅が変わっているだけならば、黒点のサイズが時間とともに変化していると捉えることもできますが、この星では、変動の肩の部分の位置が変化していつていることがわかります。私たちはこの変化が、星の差動回転の効果で大まかに説明できるのではないかと考えました。太陽での差動回転のパラメーターをそのまま適用して再現して見ると、この光度曲線の形状変化の大まかな傾向は差動回転で説明が付きそうだとわかります。

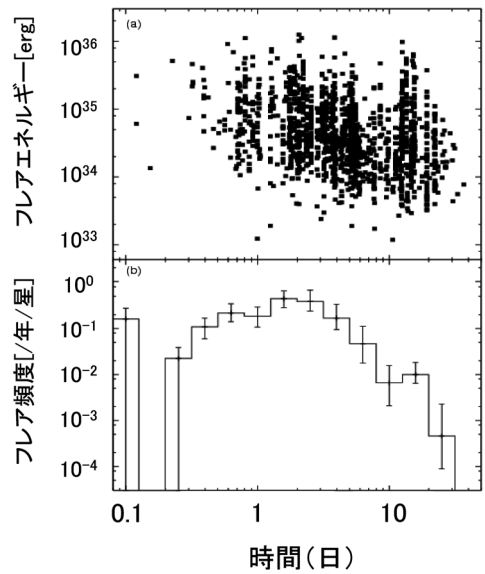


図7 (a), (b) ともに、横軸は明るさの変動周期 (自転周期に対応) で、縦軸については、(a) はスーパーフレアのエネルギーを、(b) は 5×10^{34} erg 以上のエネルギーのフレアの頻度をそれぞれとった図です。

4. 自転周期とスーパーフレア

上記の再現例から、周期数日から数十日の明るさの変動の多くは、巨大な黒点をもった星の自転で説明できそうだとわかりました。それを踏まえて、スーパーフレア星の示す準周期的な明るさ変動は、星の自転と巨大黒点の存在ですべて説明できると仮定して、自転周期 (= 明るさの変動周期) とスーパーフレアの特性について調べました。

図7(a) は横軸にスーパーフレア星の変光周期を、縦軸にフレアのエネルギーをプロットした図です。起きうる最大のフレアのエネルギーは周期には関係せず、太陽のように自転周期の遅い星 (周期10日以上) の星でも 10^{35} erg を超えるフレアが起こっていることがわかります。

図7(b) は、横軸にスーパーフレア星の変光周期を、縦軸にフレアの頻度をプロットした図です。ただし、 5×10^{34} erg 以上のエネルギーをも

つ、比較的大きなフレアのみプロットしています。周期数日以上のデータについて見てみると、自転周期の短い星ほど、フレアの頻度が高いことがわかります。これは、自転周期の短い星ほど、磁場による活動性が活発になり、その結果フレアを活発に起こすということを示唆していると言えます。

5. フレアのエネルギー

太陽でのフレアは、黒点付近の活動領域に蓄えられた磁場のエネルギーが突発的に解放されることによって発生すると考えられています。ケプラー宇宙望遠鏡のデータで観測されたスーパーフレアについても、太陽フレアと同様の機構で発生しているとするならば、黒点のもつ磁場のエネルギーでスーパーフレアのエネルギーが説明できるだろうと予想されます。準周期的な明るさの変動の振幅から黒点のサイズを見積もり、そのデータを用いて、この謎に迫ってみました。

黒点に蓄えられる磁場のエネルギー E_{mag} は、黒点の磁場強度を B 、黒点領域のサイズを L とすると、

$$E_{\text{mag}} \approx \frac{B^2 L^3}{8\pi} \quad (2)$$

と概算できます。黒点領域の面積を A_{spot} 、フレアのエネルギーを E_{mag} とし、 $A_{\text{spot}} \approx L^2$ を仮定すると、

$$E_{\text{mag}} \approx \frac{B^2 A_{\text{spot}}^{3/2}}{8\pi} \geq E_{\text{flare}} \quad (3)$$

という関係が出てきます。不等号は、フレアのエネルギーが黒点のエネルギーによって説明できるという条件を示しています。

図8は、ケプラーのデータから得たスーパーフレアのデータと、GOESという衛星による1989-2006年までの太陽フレアのデータについて、横軸に黒点面積、縦軸にフレアのエネルギーをプロットした図です。なお、太陽フレアのデータについては、京都大学花山天文台の石井貴子さんのご協力によって、調査およびまとめていただいた

ものです。右上のデータ点がスーパーフレアに対応し、黒点面積は、明るさの変動振幅から見積もっています。左下のデータ点が太陽フレアのデータ点です。太陽型星の黒点磁場強度が数千ガウスであることを踏まえて、 $B=1,000$ ガウスと $B=3,000$ ガウスの二つの場合について、式(3)に対する線を図8中に直線で表しています。特に太陽フレアについては、黒点サイズとフレアのエネルギーの最大値の間に相関があり⁸⁾、太陽フレアのすべてのデータ点と半分以上のスーパーフレアのデータ点が式(3)に対応する2本の直線の下にきていることから、フレアのエネルギーが黒点のエネルギーで説明されていることがわかります。

しかし、スーパーフレアのデータ(右上)の一部については、式(3)に対応する2本の直線よりも上に位置しています。これはどのように解釈すれば良いのでしょうか？

理由としては、明るさの変動振幅から黒点サイズを見積もる際に、自転軸の視線方向からの傾き角や黒点の経度分布などの効果によって、黒点サイズの見積もりには誤差が含まれることが挙げられます。例えば、自転軸の傾き角が小さい、すなわち極に近い方向から星を観測している場合、黒点サイズを実際よりも小さく見積もってしまいます。

これを踏まえ、式(3)に対応する直線を、自転軸の傾き角 (i) が大きい場合 ($i=90^\circ$) と小さい場合 ($i=2^\circ$) に分けて、それぞれ $B=1,000$ ガウスと $B=3,000$ ガウスの二つの場合について、引いています。するとスーパーフレアについても、すべてのデータ点が線の下に位置しています。この結果、自転軸の傾き角等の効果を仮定すれば、スーパーフレアのエネルギーが黒点のエネルギーで説明されていると、おおむね判断して良いだろうとわかります。

6. 今後へ

本研究では、スーパーフレア星の示す数日から

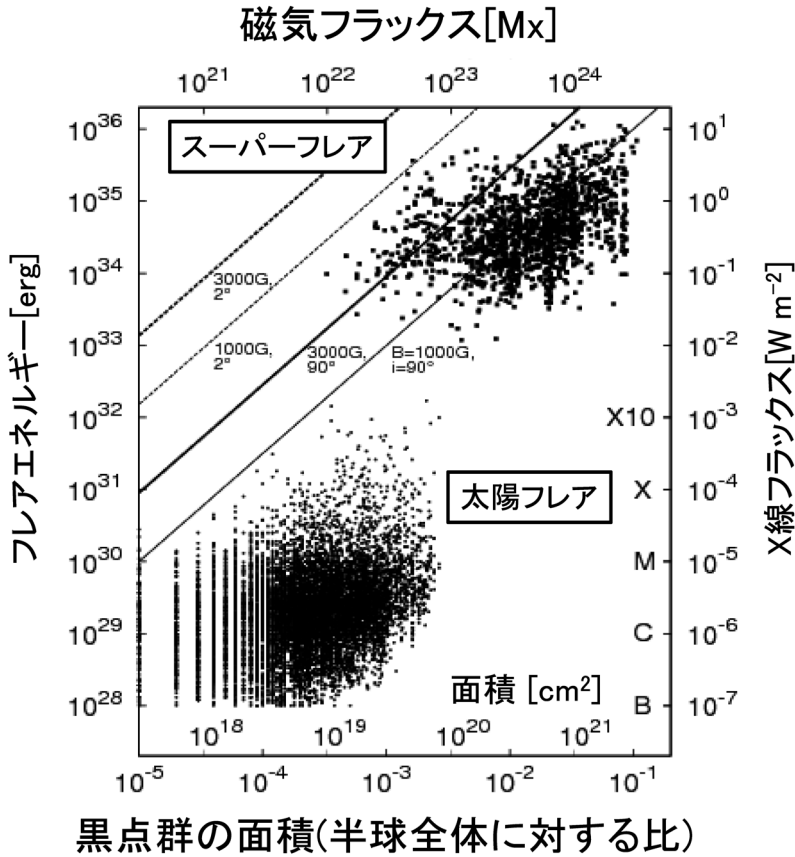


図8 太陽フレアのデータとケプラーのデータから見つかったスーパーフレアのデータの両方について、横軸に黒点のサイズ、縦軸にフレアのエネルギーをとった図です。左下が太陽フレア、右上がスーパーフレアのデータ点です。式(3)に対応する直線を、視線方向からの自転軸の傾き角が90度または2度、および磁場強度が1,000 Gaussまたは3,000 Gaussの計四つの場合に分けて書き込んでいます。

数十日周期の明るさの変動に着目し、それらが黒点をもった星の自転で説明できる可能性が高いことを確認しました。そして、フレアのエネルギーがその黒点のエネルギーで説明可能であることなどを示しました。しかし、スーパーフレア星の性質を明らかにし、「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、まだまだ追求すべき問題があります。

まずは、本当に明るさの変動は自転で説明できるのか、連星である可能性はないのか、ということです。この問題に迫るためには、分光観測によるさらに詳細な探査が極めて重要です。そこで現

在私たちのグループでは、すばる望遠鏡を用いたスーパーフレア星の可視光高分散分光観測も行っています。実際筆者も、すばる望遠鏡のプロポーザルをPI (Principal Investigator) として書き、幸い観測時間をいただいて、すでに2012年夏と2013年夏の2回、ハワイ島マウナケアの山頂にあるすばる望遠鏡に観測へ訪れました(学部生が観測へ訪れるのは珍しいようです)。結果については、現在取りまとめを進めている段階ですが、その初期成果^{9), 10)}について、野津翔太さんおよび野上さんの記事(本特集(5)および(6))において、解説していただく予定ですので、ぜひご覧ください。

ださい。

すばる望遠鏡での高分散分光観測を引き続き行っていくと同時に私たちは、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3.8 m新技術望遠鏡¹¹⁾における高分散分光観測も計画しています。3.8 m望遠鏡を用いた探査では観測時間を非常に長く取得でき、長期にわたる大規模な分光観測が可能になることが強く期待されます。詳しくは、野上さんの記事（本特集（6））や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、スーパーフレア星の明るさの変動が自転で説明できるとしても、まだまだわかっていないことがたくさんあります。例えば黒点の見え隠れとフレアの起きるタイミングに相関はないのかという点があります。また、黒点の寿命についても興味深いテーマです。太陽では大きな黒点ほど寿命が長いですが、スーパーフレアを起こす巨大黒点の寿命はどのくらい長いのでしょうか？

そして、最も重要な問題は、スーパーフレア星で見られるような巨大な黒点が、本当に現在の太陽でも作られるのか？ という疑問です。この疑問については、ダイナモ理論に基づいた理論的研究が重要です。柴田ら¹²⁾によれば、現在の太陽でも作られうるという指摘も出ています。

私たちのグループでは、今後も引き続きこれらのさまざまな謎に迫り、「太陽型星のスーパーフレア」という現象の全体像を明らかにし、「私たちの太陽でもスーパーフレアは起こるのか？」という謎へと挑んでいきたいと考えています。今後とも私たちの研究にご興味をもっていただければ幸いです。

謝 辞

本研究は、筆者らの発表した論文⁶⁾に基づくものです。筆者らのグループが、ケプラーのデータを使ったスーパーフレアの研究を始めたのは、

国立天文台の関口和寛教授のコメントが重要なきっかけとなりました。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、前原裕之氏、柴山拓也氏、本田敏志氏、野津翔太氏、野上大作氏、石井貴子氏、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助言・ご指導のおかげです。この場をお借りして深く感謝します。

参考文献

- 1) 柴田一成, 2014, 天文月報 107, 253
- 2) Maehara H., et al., 2012, Nature 485, 478
- 3) Shibayama T., et al., 2013, ApJS 209, 5
- 4) 前原裕之, 2014, 天文月報 107, 260
- 5) 柴山拓也, 2014, 天文月報 107, 361
- 6) Notsu Y., et al., 2013, ApJ 771, 127
- 7) Walkowicz L. M., Basri G., Valenti J. A., 2013, ApJS 205, 17
- 8) Sammis I., Tang F., Zirin, H., 2000, ApJ 540, 583
- 9) Notsu S., et al., 2013, PASJ 65, 112
- 10) Nogami D., et al., 2014 PASJ 66 L4
- 11) <http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/psmt/index.html>
- 12) Shibata K., et al., 2013, PASJ 65, 49

Superflare Stars and Large Starspots

Yuta Notsu

*Department of Astronomy, Kyoto University,
Kitashirakawa-Oiwake-cho, Sakyo-ku,
Kyoto 606-8502, Japan*

Abstract: We have found many superflare events on ordinary solar-type stars. Most of the superflare stars show quasi-periodic brightness variations with a typical period of one to a few tens of days. Our results indicate that these brightness variations can be explained by the rotation of a star with fairly large starspots. We also found that the energy of superflares is related to the total coverage of the starspot. The correlation between the spot coverage and the flare energy in superflares is similar to that in solar flares. These results suggest that the energy of superflares can be explained by the magnetic energy stored around the starspots.