

3.4 超巨大フレアと極端宇宙天気現象の可能性

3.4.1 太陽型星のスーパーフレア

野津 湧太 (Laboratory for Atmospheric and Space Physics, University of Colorado Boulder / National Solar Observatory / 東京工業大学)

(2019年11月11日受付、2021年5月31日公開、2022年1月31日改訂)

3.4.1.1 スーパーフレアとは？

さて前章まででは、太陽フレアによって我々の地球や社会も影響を受ける可能性があるということ、そして 3.4.2 章では、歴史文献を紐解くと、キャリントン・イベント（近代観測の中で史上最大と言えるフレア）に匹敵するような宇宙天気現象が過去千年の歴史の中で何度も起きていた可能性が示唆されるということが述べられています。しかし、広い宇宙に目を向けてみると、20 世紀中頃からの可視光望遠鏡や X 線衛星などの観測によって、私達が今まで遭遇したこともないような巨大なフレア（スーパーフレア）が起きている星の存在が知られてきました (Gershberg 2005; Reid & Hawley 2005)。これらの星は、近接連星系を構成していたり、年齢が非常に若い（年齢数億年）ために、自転速度が太陽と比べて非常に速く（自転周期数日程度）、強い磁場強度を持っていることが知られてきました（平均磁場強度数 kG） (Reid & Hawley 2005; Guedel 2007, Benz & Guedel 2010; Linsky 2019)。一方太陽は、年をとった単独星で自転も遅いので（年齢 46 億年、自転周期 25 日）、磁場を作る力も弱く（平均磁場強度数 G）、スーパーフレアのような巨大フレアは太陽では起きないと長年考えられてきました。

3.4.1.2 Kepler 宇宙望遠鏡データでの太陽型星スーパーフレア発見

過去 100 年以上にわたる太陽フレア研究により、フレアの発生頻度は、「フレアのエネルギーが 10 倍上がると、発生頻度は約 10 分の 1 になる」という経験則に従うことが分かってきました (図 1)。これは興味深いことに、地震の発生頻度の統計と似ています。その関係を単純に延長すると、最大級の太陽フレア (10^{32} erg) の 100-1000 倍の大きさのスーパーフレアは、1000 年から 10000 万年に 1 回程度の頻度になります。もし、仮にスーパーフレアが太陽で起こるとすると、このような非常に低い頻度での発生が予想されますが、太陽の近代観測の歴史は数百年ほどにすぎないので、千年以上前はもちろん望遠鏡も人工衛星もなく、科学的記録から探るのは困難な状況でした。そのような

状況が続いた 2010 年頃（3.4.2 章で述べる文献から太陽活動を探る研究も本格化前です）、京都大学附属天文台の研究グループでは、太陽自体のフレアを過去に遡って調べるのではなく、太陽とよく似た星（太陽型星）を複数観測するという方法を考え始めました。例えば太陽型星を 1 万個 1 年間観測すれば、太陽を 1 万年観測したデータと同様のデータが得られるのではないかと。そして、スーパーフレアが太陽で起きるかどうかなのかの手掛かりを得る事が出来るかもしれない、と言う訳です。

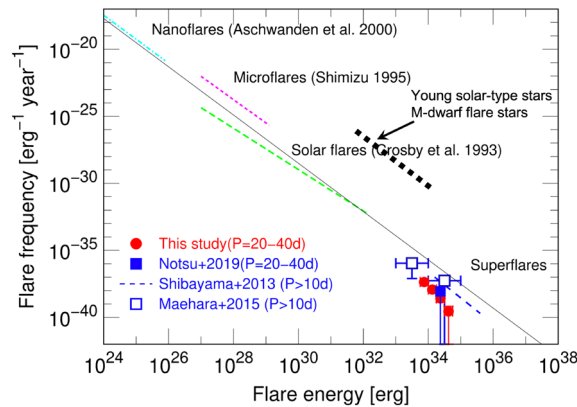


図 1. フレアのエネルギーと発生頻度（Okamoto et al. 2021 より改変）。太陽の（ナノ・マイクロを含む）フレアはエネルギーのべき乗則で頻度が下がる。最大級の太陽フレアの 100 倍のエネルギー（ 10^{34} erg）のフレアは、自転速度が遅く太陽とよく似た星（太陽類似星）では数千年に 1 程度程度の頻度で起きる。一方、若い太陽型星（=自転速度が速い）や M 型フレア星（=星が低温なため、深い対流層を持ちダイナモ機構が効率的に働いて磁気活動が活発）では 1 年に 1000 回程度起きる（Güdel 2007; Shibayama et al. 2013; Hawley et al. 2014）。

そしてまさに同じ 2010 年夏頃、系外惑星探査で革命的な業績を挙げ続けることになる、「ケプラー宇宙望遠鏡」（2009 年 3 月に打ち上げ）が本格的に成果を発表し始めました。ケプラーは、はくちょう座近くの領域にある 16 万個の星（そのうち、太陽型星は約 8 万個）の明るさを、30 分に 1 回の間隔で、4 年の長期にわたり常時観測し続けるという観測を行っています。このような観測から、星の明るさの僅かな変化も捉える事ができ、データは世界中の全ての研究者に対して、すぐに公開されました。ケプラーの観測データから、スーパーフレアによって星が僅かに明るくなる現象が検出可能である、ということはすぐに分かり、京都大学附属天文台研究員（当時）の前原裕之氏と理学部の学部生（当時）5 名（柴山拓也・野津湧太（本稿著者）・野津翔太・長尾崇史・草場哲）によって、太陽型星でのスーパーフレア検出に関する研究が開始されました。

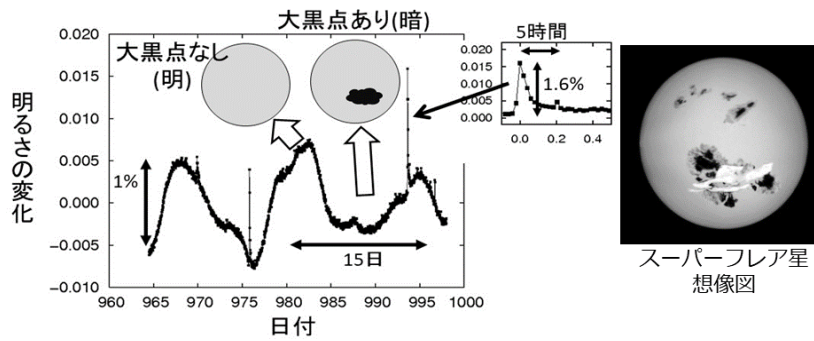


図2. 左図：太陽型星のスーパーフレアの明るさの時間変化（ケプラー宇宙望遠鏡の観測データ: Machara et al. 2012 より）。フレアでの突発的な増光の他に、周期 15 日程度のゆっくりとした明るさの変化が見られる。これから黒点のサイズと自転の周期が推定できる。右図：太陽型星のスーパーフレアの想像図。巨大な黒点群でスーパーフレア（白色）が起きている。

図2は検出された太陽型星のフレアの一例です。数日から数十日の準周期的な変動の上に、スパイク状の増光が何度も起きており、その部分を拡大すると、急速な増光とその後の緩やかな減光が見られることがわかります。近くに別の天体があるケースや、継続時間が短く増光点が1点しかないなど、疑わしいイベントについては最終的に個々の光度曲線を目で見て排除を徹底的に行った結果、最初の 90 日間のデータから 148 個の太陽型星で 365 個のフレアイベントを検出するに至りました (Machara et al. 2012)。フレアを起こした星自身の明るさとフレアの振幅、継続時間からエネルギーを推定すると、 10^{33} - 10^{36} erg という値になることがわかりました。前章で述べたキャリントンフレアのエネルギーが 10^{32} erg 程度だと推定されているので、まさにここで発見されたフレアは、最大級の太陽フレアの 10~10,000 倍に相当するような、「スーパーフレア」であることが判明しました。

このスーパーフレア発見で最も重要な意義は、非常に沢山の数のイベントを発見したことだと言えます。この発見以前は、過去の地上の写真乾板のデータや眼視観測から、太陽型星においては、わずか 9 例のフレアイベント「候補」が報告されているだけでした (Schaefer et al. 2000)。わずか 9 例という観測件数や、使われたデータ自体の精度を踏まえると、統計的な研究は困難でした。しかしケプラーのデータの登場以後、2012 年の最初の報告に引き続き、さらに長期間のデータが解析され、現在までに 1000 例以上のスーパーフレアが発見されています (Shibayama et al. 2013; Machara et al. 2015)。このように非常に多くのイベントを発見したことにより、太陽型星のスーパーフレアについて、統計的な議論をすることが初めて可能となりました。

3.4.1.3 分光観測とガイア衛星観測データによる検証

スーパーフレアを起こす星に、何か特徴や、あるいはスーパーフレアを起こすための条件のようなものはあるのでしょうか？ 太陽フレアの観測からは、フレアを起こす黒点（活動領域）のサイズが大きく、更に黒点（活動領域）の構造が複雑（「デルタ型黒点」など）であれば、より巨大フ

フレアが起きやすいということが知られています (Sammis et al. 2000; Toriumi & Wang 2019: 3.3 章も参照)。同様の特徴は、スーパーフレアを起こす星でも成り立つのでしょうか？

スーパーフレアを起こした星のケプラー観測データを詳しく見てみると、フレアによる増光とは別に、数日から数十日の準周期的な変動が多く星で見られます。このような変動は、表面に黒点を持つ星の自転によって引き起こされているのではないかと考えられます (図 2 & Notsu et al. 2013)。もしこの仮定が正しいとすると、明るさの変動の周期は星の自転周期、変動の振幅は黒点の大きさに対応することになります。変動の振幅は典型的には 0.1~10%なので、スーパーフレアを起こす星の多くは、図2のように太陽よりも大きな黒点を持つと考えられます。巨大な黒点があれば、磁場のエネルギーを沢山蓄えることができるので、スーパーフレアを起こすのに都合が良くなります。また、明るさの変動から得られる自転周期の値は、数日から 30 日程度に及んでおり、太陽と同程度の自転周期 (約 25 日) でも、スーパーフレアを起こす星が存在することが示唆されます (Notsu et al. 2013)。

しかし、この解釈はあくまで仮定であり、ケプラー宇宙望遠鏡の測光観測データだけで答えを出すことは困難です。本当に巨大な黒点が星の表面に存在するのか？明るさ変動が自転で説明できるのか？本当に太陽のように自転の遅い単独星でスーパーフレアが起きているのか？さらに、連星や準巨星など太陽とは異なる性質の星が混入している可能性はないのか？ ケプラー観測データによる発見以後も、これら根本的な点において、大きな疑問が残される状況が続きました。

その状況を踏まえ本稿著者らは、ケプラー宇宙望遠鏡の測光観測データで提起されてきた知見に対して、高分散分光観測 (すばる望遠鏡や米国アパッチポイント天文台 3.5m 望遠鏡) 及び衛星「ガイア」 (Gaia: 可視光で全天の天体約 10 億個の位置と距離を観測する衛星) の半径データという「新たな」手法とデータを最大限活用し、詳細な検証を行いました (Notsu et al. 2015a, 2015b, & 2019)。

まず分光観測では、ケプラーで発見された約 300 個のスーパーフレア星のうち明るい 64 星のデータを用いて、波長スペクトルの中に現れる多数の吸収線の詳細な分析を行い、以下の3点の結果が得られました。

1. 観測した64星のうち半数以上 (43星) では、二つの星の吸収線が重なっていたり視線速度の大きな変動があるなどの連星の兆候は見られなかった。そして、温度等が太陽型星 (G型主系列星) の範囲にあることを分光的に確認できた。

2. 上述の、「明るさ変動=自転」という解釈が正しければ、明るさの変化のタイムスケールは、星の自転の速さに対応することになる。「分光観測」を行うと、スペクトル線の広がり幅から、星の自転の速さを測定する事ができるが (図3)、今回の観測結果は、上記の明るさの変化から求めた値とよく対応しており、上記の予想が正しいことを提示している。

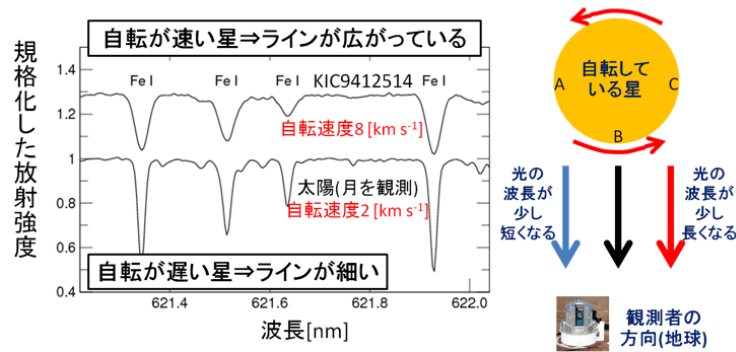


図3. (右) 自転している星の表面の各場所から放射される光は、光の「ドップラー効果」の影響で、波長に僅かな変化が生じる。最終的に地球上でスペクトル線を観測する場合、星表面の各場所からの、波長が少しずつずれた光の足し合わせとなるので、スペクトル線が波長方向に広がって観測される。(左) 星の自転速度とスペクトル線の広がり。ここでは、中性鉄 (Fe I) の吸収線を4本示している。上記の通り、自転している星表面から放射される光の「ドップラー効果」による波長ずれの影響で、吸収線には広がりが見られる。そして、太陽のように自転の遅い星は、ドップラー効果による波長ずれが小さいためにラインが比較的細い一方で、自転の速い星は波長のずれが大きくなり、ラインがより広がって観測される。このラインの広がりを測定する事で、星の自転速度を求めることができる。

3. 大きな黒点が存在して星表面の平均磁場が強くなると、上空の彩層が加熱され彩層由来のスペクトル線の放射が強くなり、Ca II 線や水素のH α 線のような吸収線が浅くなる。太陽の観測から知られている。このことを応用し、スーパーフレア星のCa II 線の深さを測定した。その結果、ケプラーの測光観測から予想される黒点サイズとCa II 線の強度との間に正の相関があり (図4)、ケプラーから得られた情報が正しいことが分光観測でも確認され、スーパーフレア星は太陽と比較して、大きな黒点を持つことがより確実となった。この結果は、Notsu et al. (2015b & 2019) の高分散分光観測に加えて、中国のLAMOST望遠鏡を用いたKaroff et al. (2016) の中分散分光観測でも確認されている。

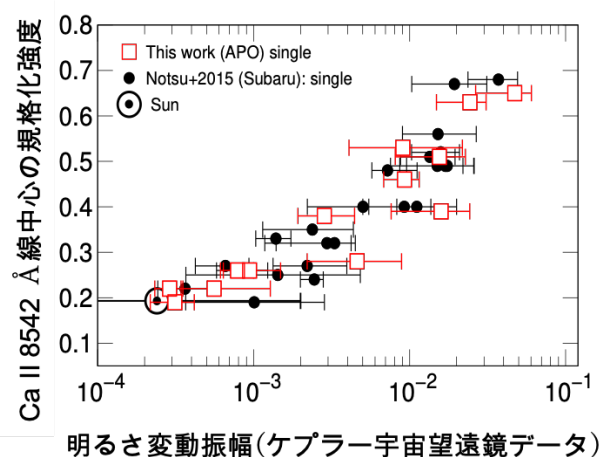


図4. ケプラーで観測された明るさの変動振幅 (横軸) と、Ca II 8542 Å線中心の規格化強度 (縦軸)。点の違いは、分光観測の望遠鏡の違い (すばる望遠鏡観測 (Notsu et al. 2015) と Apache Point 天文台観測 (Notsu et al. 2019))。この図から、黒点の大きさに関して、ケプラー宇宙望遠鏡の測光観測による指標 (横軸) と、分光観測による指標 (縦軸) の間に相関があり、よく対応しているということが分かる。

以上の結果から、スーパーフレア星の示す準周期的な明るさ変動が、巨大黒点の自転で説明できると考えて矛盾なく、そしてスーパーフレア星は巨大な黒点を持つ、ということが分かりました。さらに、これらの分光観測は全 300 星のうち明るい 64 星についての探査でしたが、残りの暗い星も含めて全 300 星の約 9 割の星については、2018 年 4 月に公開されたガイア衛星によって得られた星の距離データから、星半径の正確な導出が行われました。これにより、太陽と比べると半径も大きく明るい巨星など、太陽と似ているとは言えない星を棄却し、より正確に太陽と似ている星と言える星のみを用いて、ケプラーデータを用いたスーパーフレアの統計的な研究を行うことが可能となりました (Notsu et al. 2019; Okamoto et al. 2021)。その結果、Okamoto et al. (2021)では、Kepler の 4 年間全てのデータに対して、ガイアの星半径データを適用して、265 個の正確に太陽型星と判定される星で合計 2341 個のスーパーフレアを報告しています(自転周期 20 日以上, 温度 5600-6000K の自転の遅い太陽類似星については、15 個の星で 26 個のスーパーフレアを検出)。

以上の結果を踏まえ、図 2 のような明るさ変動の周期と振幅が、それぞれ個々のスーパーフレア星の自転周期と黒点サイズを表しているとし、スーパーフレア星の統計的性質について最新の知見 (Notsu et al. 2019; Okamoto et al. 2021) を、次章以降では述べていきます。

3.4.1.4 黒点サイズとスーパーフレアのエネルギー

前章での議論で、スーパーフレア星は巨大な黒点を持つという性質があることが確認されました。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開放されることで発生します。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。

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 B 、黒点領域のサイズ L とした時に $E_{\text{mag}}=B^2L^3/8\pi$ と概算できます。黒点領域の面積を A_{spot} 、 E_{mag} のうち割合 f の分のエネルギーが解放されるとし、 $A_{\text{spot}}^{3/2}=L^3$ を仮定すると、フレアのエネルギー (E_{flare}) は、次のような関係で与えられます (式 (1))。

$$E_{\text{flare}} \approx fE_{\text{mag}} \approx f \frac{B^2L^3}{8\pi} \approx f \frac{B^2}{8\pi} A_{\text{spot}}^{3/2} \quad (1)$$

図 5 は、ケプラーで得られたスーパーフレアのデータと、GOES 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。右上のデータ点がスーパーフレアに対応し、左下のデータ点が太陽フレアのデータ点です。

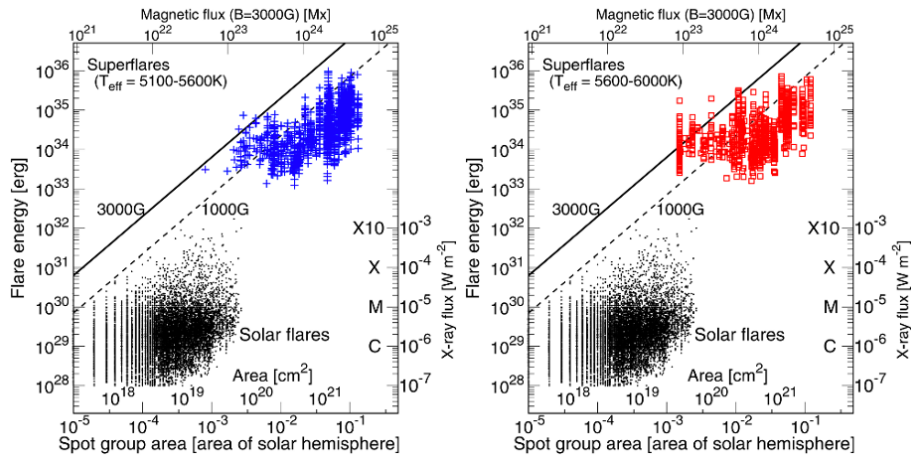


図5. 太陽フレアのデータと Kepler のデータから見つかったスーパーフレアのデータの間、横軸に黒点の面積、縦軸にフレアのエネルギーをとった図 (Okamoto et al. 2021 より)。右側縦軸では、フレアエネルギーに対応する、GOES flux 強度を示している。

太陽型星の黒点磁場強度が数千ガウスである事を踏まえて、 $B=1,000$ ガウスと $B=3,000$ ガウスの 2 つの場合について、式 (1) ($f=0.1$ の場合) に対する線を図 5 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、太陽フレアの全てのデータ点と大半のスーパーフレアのデータ点が式 (1) に対応する直線の下に位置していることから、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分かります。

一方、スーパーフレアのデータの一部については、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よいのでしょうか？ この理由としては、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事が挙げられます。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。すなわち、自転軸の傾き角等の効果を考慮すれば、スーパーフレアのエネルギーは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分かります。

3.4.1.5 スーパーフレア活動の星の自転と年齢に伴う変化

ケプラー宇宙望遠鏡のスーパーフレア活動の自転や年齢に伴う変化についても、より確かな特徴を明らかにしてきました。図 6 は一定規模 (10^{34} erg 及び 5×10^{34} erg) 以上のエネルギーを解放するスーパーフレアの発生頻度と自転周期の関係です。この図から、スーパーフレアの発生頻度は自転周期が長くなると低くなることがわかります。星の自転周期は星の年齢と良い相関にあることが知られており (Ayres 1997; Guedel 2007)、例えば若い年齢数億年の星は太陽と比べると 1 桁ほど速く自転し

ています。太陽と同じ自転周期（約 25 日、年齢 46 億年）の太陽型星では、周期数日（年齢数億年）の若い太陽型星と比べると、スーパーフレアの発生頻度は百分の一ないしはそれ以下と分かりました。フレアは星の上空大気（コロナ）中での磁気エネルギーの解放現象であり、その磁気的な活動の源は、星の自転と対流によるダイナモ機構だと考えられています。若くて自転周期が短い星ほどフレアの発生頻度が高いのは、自転周期が短い星ほどダイナモ機構による磁場生成が活発であるためと考えることができます。

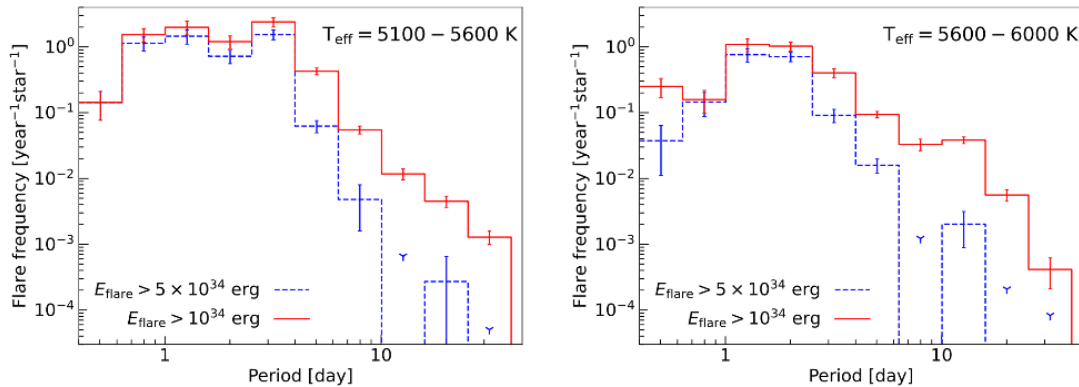


図 6. エネルギーが 10^{34} erg 及び 5×10^{34} erg 以上のスーパーフレアの発生頻度と星の自転周期の関係 (Okamoto et al. 2021 より)

一方で、自転周期が 2-3 日よりも短くなるとスーパーフレアの発生頻度はほぼ一定の値になることも分かりました (図 6)。太陽型星では、定常的な X 線強度や Ca II 線などの彩層から放射される輝線と自転周期の間にも、同様の関係が知られています (Wright et al. 2011)。

発生頻度については自転周期との相関が見られましたが、フレアのエネルギーについてはどうでしょうか? 単純に考えると、自転周期の短い星の方が大きなフレアを起こせるのではないかと考えられます。実際、スーパーフレアのエネルギーと自転周期の散布図 (図 7) を見てみると、フレアの上限エネルギーと自転周期の間には緩やかな相関が見られ、周期数日（年齢数億年）の若い太陽型星は、最大級の太陽フレアの 10,000 倍に達するエネルギー (10^{36} erg) のフレアを生じているのに対し、太陽と同じ自転周期（約 25 日、年齢 46 億年）の太陽型星では、エネルギーにして最大級の太陽フレアの数百倍に収まるスーパーフレア ($< 4 \times 10^{34}$ erg) しか生じていないことが分かります。

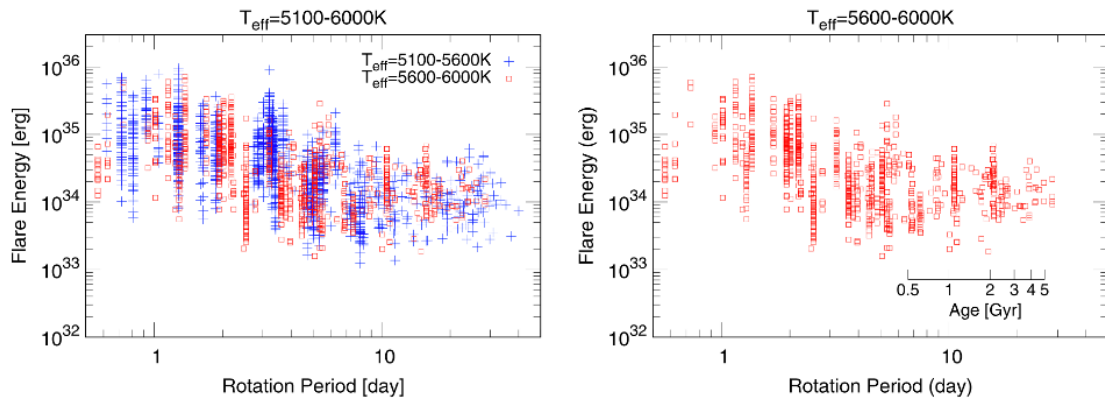


図7. 個々のスーパーフレアのエネルギーとそのフレアを起こした星の自転周期の関係(Okamoto et al. 2021)。太陽型星の年齢 vs 自転周期の関係 (Ayres 1996) に基づいて年齢の値も示している

以上の結果をまとめると、年をとり自転も遅くなった太陽では、頻度は低いものの最大級の太陽フレアの数百倍程度 ($< 4 \times 10^{34}$ erg) のスーパーフレアであれば生じうると言えます。そして一方、太陽誕生直後の時期 (年齢数億年) は太陽の自転速度も速いため、スーパーフレアに必要な大量の磁気エネルギーを生成する機構もより活発であり、自転速度も遅くなった現在の太陽と比べると、100倍以上もフレアの頻度が高く、生じうる最大のフレアも最大級の太陽フレアの 10,000 倍ものサイズ ($\sim 10^{36}$ erg) であるということが分かりました。

3.4.1.6 スーパーフレアは太陽で起きるのか？

では、太陽でスーパーフレアが起きるとすると、どのくらいの頻度になるのでしょうか？ スーパーフレアについて、エネルギー発生頻度分布を書いてみると、より大きなスーパーフレアほど発生頻度は下がっていく関係 (べき分布) が見られます (図8)。そして、図1に現れている通り、自転周期20日以上の太陽型星 (太陽の自転周期は約25日) でのスーパーフレア発生頻度分布は、太陽フレアの発生頻度分布を延長したものと良く合っています。これら図1及び8の結果から、太陽のように年をとり自転の遅くなった星 (太陽類似星: 自転周期約25日、年齢46億年) において、最大級の太陽フレアの70倍 (7×10^{33} erg) と100倍 (1×10^{34} erg) を超えるスーパーフレアが、それぞれ~3000年と6000年に1回の頻度で生じうるとことが示されました (Notsu et al. 2019; Okamoto et al. 2021)。

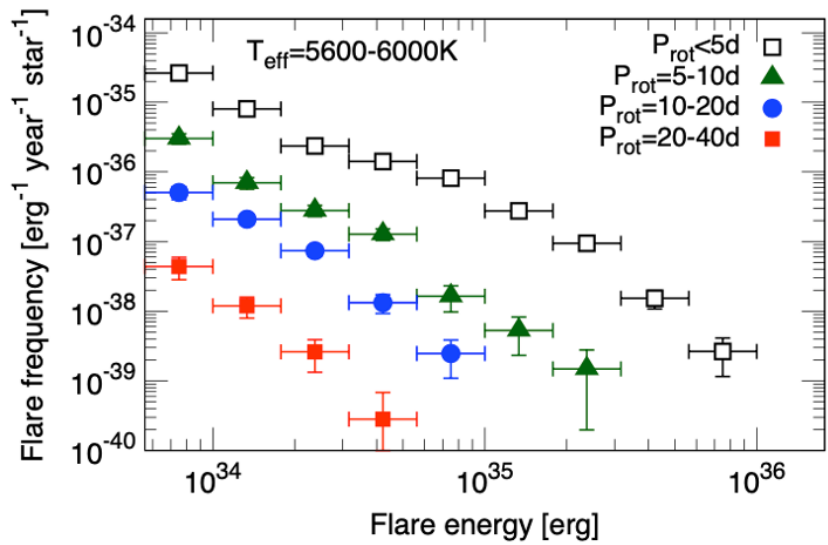


図 8. 温度 5600-6000K の太陽型星の、スーパーフレアのエネルギーと発生頻度 (Okamoto et al. 2021)。自転周期毎に区分されて表示されている。

ここで示した、「太陽類似星で 10^{34} erg のスーパーフレアが数千年に 1 回発生する」という結論は、ケプラーのデータで巨大黒点の発生を統計的に調べた結果 (図 9 および図 10: Machara et al. 2017 及び Notsu et al. 2019, Okamoto et al. 2021 より) とも、良く対応します。図 9 から分かる通り、太陽型星における自転周期と黒点面積の分布を見てみると、自転周期 20-40 日の太陽類似星でも太陽半球の 1% 程度あるいはそれを超える大きさの黒点が確かに存在しています。このサイズの黒点は、図 5 で示した関係を用いると、 10^{34} erg のスーパーフレアを生じるのに十分な磁気エネルギーを有していると言えます。

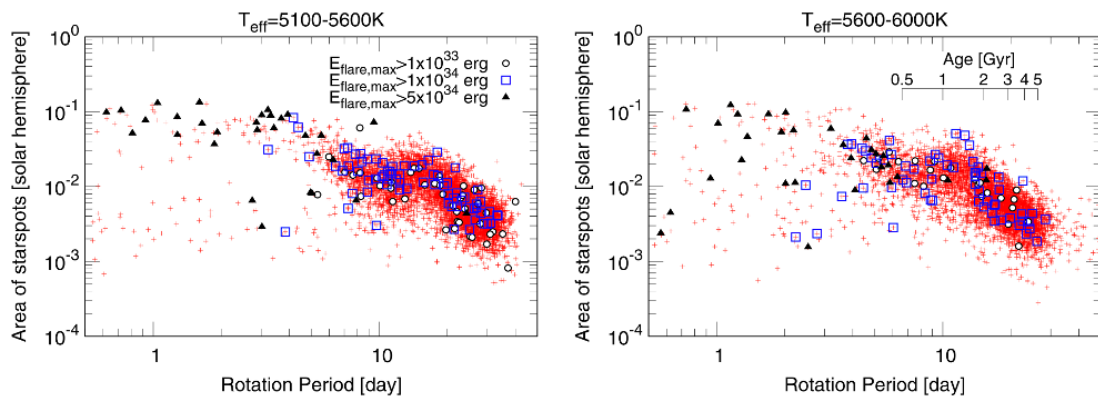


図 9. ケプラーで観測された、温度 $T_{\text{eff}}=5600\text{-}6000\text{K}$ の太陽型星 (スーパーフレア星でない星も含む) について、自転周期と黒点面積の関係 (Okamoto et al. 2021)。黒丸, 青四角, 黒三角の点は、それぞれ 5×10^{34} erg, 1×10^{34} erg, 1×10^{33} erg 以上のスーパーフレアを示した星を表している。

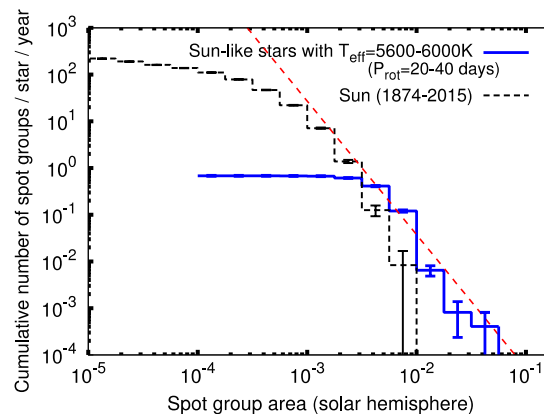


図 10. 太陽黒点と、自転の遅い太陽類似星（温度 5600-6000K、自転周期 20-40 日）の黒点について、サイズ毎の出現頻度の比較 (Notsu et al. 2019)

そして、この太陽類似星の黒点面積データを用いて、巨大黒点の発生頻度を示したのが、図 10 です。従来、太陽の黒点の発生頻度については、log-normal 分布になる、すなわち巨大な黒点になると発生頻度が急激に下がる、と指摘されてきました (Bogdan et al. 1998)。そして 100 年ないし 200 年の近代観測の期間で巨大黒点は生じていないから、 10^{34} erg に達するようなスーパーフレアも起きないのではないか、という議論もあります (Aulanier et al. 2013)。実際、図 10 で太陽黒点の分布だけを見ても、一見そのような傾向にあります。しかし、巨大黒点の発生頻度を合わせて見ると、太陽半球面積の 10^3 付近から 10^1 付近に至るまでの広い黒点面積にわたって、発生頻度が 1 つのべき分布で概ね表されています。なおこの図では見かけ上 10^2 付近で太陽黒点と恒星黒点の値が異なっていますが、これは太陽黒点の方が過去 140 年分のデータしかなく、十分な観測期間のデータとは言えないからだと解釈できます。この共通のべき分布で表されるという特徴は、太陽黒点と太陽類似星の巨大黒点が共通の物理過程で説明できる可能性を示唆します。そして、太陽半球の数%を超える大きさの黒点が、スーパーフレアと同様に、数千年に 1 回の頻度で生じることも示しています。

ここまで述べてきたケプラー宇宙望遠鏡データを用いた研究が登場する以前に、太陽型星のスーパーフレアについて議論をした Schaefer らは、太陽ではスーパーフレアが観測された形跡がないことから、スーパーフレアを起こす天体は、中心星近傍に巨大ガス惑星（ホットジュピター）をもち、惑星と恒星の相互作用によって恒星の磁場活動が高められ、スーパーフレアを起こすのではないかと考えました (Rubenstein & Schaefer 2000)。私たちの太陽には、太陽のすぐ近くを公転する巨大惑星がないために、スーパーフレアを起こさない、というわけです。もしこの説が正しければ、ケプラーで発見されたスーパーフレアを起こす太陽型星の大部分はホットジュピターをもつはずで、Okamoto et al. (2021) は、2020 年 5 月 28 日に NASA Exoplanet Archive から取得したデータを用いて、本研究で見つかった太陽型スーパーフレア星 265 星に系外惑星があるかどうかを調べました。その結果、本研究で見つかった太陽型スーパーフレア星には、確認された系外惑星がない一方で、系外惑

星候補が3個、偽陽性系外惑星が3個見つかりました。このことは、太陽型星のスーパーフレアの必要条件として、ホットジュピターが必ずしも必要でないことを示唆しています。また、Shibata et al. (2013)は理論的な考察から、恒星とホットジュピターの磁氣的相互作用だけを考えれば、ホットジュピターは恒星自体の磁束生成に本質的な役割を担っていない可能性を述べています。このことは、太陽型星でのスーパーフレアの必要条件がホットジュピターではない、という上記の観測結果と矛盾しない結果です。

では、太陽でスーパーフレアが起こった証拠は本当にないのでしょうか？ 上記 Machara et al. (2012) のスーパーフレア発見論文が *Nature* 誌に掲載された2週間後、同じく *Nature* 誌に掲載された重要研究があります。名古屋大学の三宅英沙氏らの研究結果 (Miyake et al. 2012) で、屋久杉の年輪を使って1年の時間分解能で炭素 14 (^{14}C) の同位体比の時間変化を調べたところ、紀元後 774-775 年に急激な増加を示していたというものです (図 11)。 ^{14}C は宇宙線が地球の上層大気中の原子に衝突してできた中性子が窒素 14 (^{14}N) と衝突し、その後 ^{14}N が崩壊することで生成します。 ^{14}C の量が急激な増加を示したということは、宇宙からの放射線量が増えていたことを意味します。このイベントは屋久杉以外の世界各地の木々で検出がなされ、全地球的なイベントであることも分かっています (Usoskin et al., 2013; Usoskin 2017; Usitalo et al., 2018; Büntgen et al., 2018)。

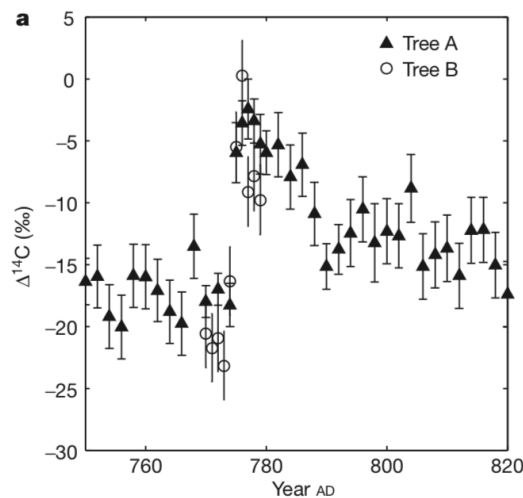


図 11. 紀元前 774-775 年付近の炭素 14 (^{14}C) の量の時間変化 (Miyake et al. 2012)

その後さらに長期間の ^{14}C の量の時間変化が探査され、紀元後 993-994 年及び紀元前 660 年にも同様のイベントがあることも発見されています (Miyake et al. 2013; Park et al. 2017; O'Hare et al. 2019; Usoskin & Kovaltsov 2021)。これらの宇宙線量増加の原因としては、近傍の超新星爆発やガンマ線バースト、

巨大な太陽フレアなどいくつかの可能性が挙げられてきました（レビュー論文 Usoskin 2017 や解説記事 三宅（2020）参照）。しかし、2012年の発見以来、屋久杉以外の世界各地の樹木を用いた ^{14}C 濃度の測定や、氷床コアのベリリウム 10 (^{10}Be) 及び塩素 36 (^{36}Cl) 濃度 (^{10}Be と ^{36}Cl は、 ^{14}C と同様に宇宙線によって生成される放射性同位体) の測定が行われました。このような検討の結果、この当時の各年輪の ^{14}C 濃度はその緯度と大きく関係し (Uusitalo et al., 2018)、ガンマ線バーストの場合濃度の上がりにくい ^{10}Be でも ^{36}Cl 同様ピークが見えたことから (Mekhaldi et al., 2015; Büntgen et al., 2018)、現在では太陽の爆発現象が最有力と考えられています (Mekhaldi et al. 2015; Usoskin 2017)。異なる核種 ^{14}C 、 ^{10}Be 、 ^{36}Cl の変化量の比較から、近代観測に捉えられた大規模な太陽高エネルギー粒子 (SEP) イベント (3.2-3.3 章参照) と比べてどの程度の規模であったか、という議論も行われています (図 12)。

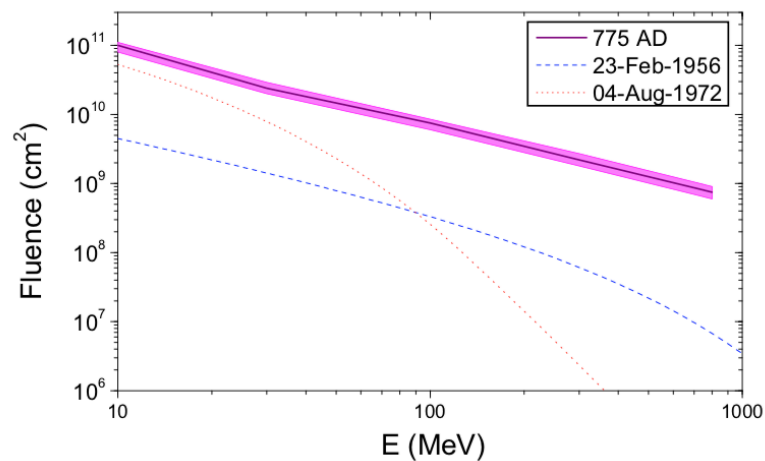


図 12. 太陽高エネルギー粒子 (SEP) イベントのエネルギースペクトル (Usoskin 2017)。775 年のイベント (^{14}C 、 ^{10}Be 、 ^{36}Cl の観測量から再現) と、2 つの顕著な SEP イベントの観測例が表示されている。1956 年 2 月 23 日のイベントは、これまでの観測の中で、最もエネルギースペクトルのべきの傾きが hard な (高エネルギー側まで広がっている) SEP イベントの例、1972 年 8 月 4 日のイベントは、最も巨大でべきの傾きが soft (あまり高エネルギー側まで広がっていない) な SEP イベントの例。

また、樹木の年輪や氷床コアを用いた宇宙線イベントの探査に加えて、巨大なオーロラの報告や巨大黒点のスケッチが過去の文献に残っていないかを探る試みなども進んでいます (3.4.2 章参照)。もしこれらのイベントが本当に太陽におけるスーパーフレアなどの痕跡であるとしたら、1000 年オーダーの時間スケールでは、太陽でもスーパーフレアが起きることを示唆しているのかもしれませんが。ただし、下記 3.1.4.7 章で述べる通り、スーパーフレアに伴う、SEP イベントやコロナ質量放出 (CME) のサイズについては現状かなりの不定性が存在します。したがって、例えば Schrijver & Beer (2014) や Battersby (2019) で言及されているような、地球上での痕跡 (大規模宇宙線イベントなど) の発生頻度と、太陽型星観測から得たスーパーフレア発生頻度を比較した結果がどの程度適切なのか、今後のさらなる研究が必要です。

3.4.1.7 スーパーフレアの惑星への影響 (1)

ここまで、太陽型星でのスーパーフレアの観測と、現在の太陽でスーパーフレアが発生する可能性について、見てきました。では、もしスーパーフレアが現在の太陽で起こったら、地球はどうなるのでしょうか？ 前章までで詳しく議論されている通り、現代社会は、多数の電子機器や衛星通信など、太陽フレアによる被害を受ける可能性のある様々な側面を有しています。最大級の太陽フレアの 10 倍ないし 100 倍の規模のスーパーフレアは、それぞれ数百年ないし数千年に一度と非常に稀な現象ではありますが、もし発生すれば、その結果人類が日々利用する社会インフラに甚大な影響をもたらす可能性もあります。特にスーパーフレアに伴って発生する磁気嵐の規模は Takahashi & Shibata 2017 による推定では DST index が 2000nT に達する可能性が提示されており、その具体的影響（社会的・経済的影響を含む）について、今後の研究が非常に重要です (Eastwood et al. 2017; Lingam&Loeb 2017; Riley et al. 2018; Battersby 2019)。

スーパーフレアに伴う、コロナ質量放出 (CME) や太陽高エネルギー粒子 (SEP) の規模については、恒星での CME 観測がまだ発展途上なため (cf. Moschou et al.2019; Airapetian et al. 2020)、正確な予測をすることは困難です。しかし、太陽での上限値を外挿して推定を行なった結果からは、最大級の太陽フレアの 100 倍のスーパーフレア (10^{34} erg & X1000 フレア) で、9000km/s の速度に達する CME が発生し、SEP flux が最大級の太陽フレアの 100 倍以上に達する可能性も示唆されています (図 13 及び Takahashi et al. 2016)。そして、そのような高い SEP flux の値を惑星大気中に突入させた放射線輸送計算の結果からは、大気圧が地表と比べて低い航空機高度や、地球のような磁場も十分な大気もない火星表面においては、生命に十分に危険なレベルまで放射線被ばく量が上昇する可能性も提示されています (図 14 及び Yamashiki et al. 2019)。しかし、図 12 の二つの SEP スペクトル観測例及び、図 13 の太陽でのデータ点のばらつきから分かる通り、フレアと CME 及び SEP の大きさの間には太陽フレアの範囲でも大きなばらつきがあり、スーパーフレアに伴う CME 及び SEP の定量的な推定は、更なる観測的及び理論的な研究が重要な状況です (cf. Schrijver et al. 2012; Airapetian et al. 2020; Herbst et al. 2019a; Moschou et al.2019, Lynch et al. 2019)。

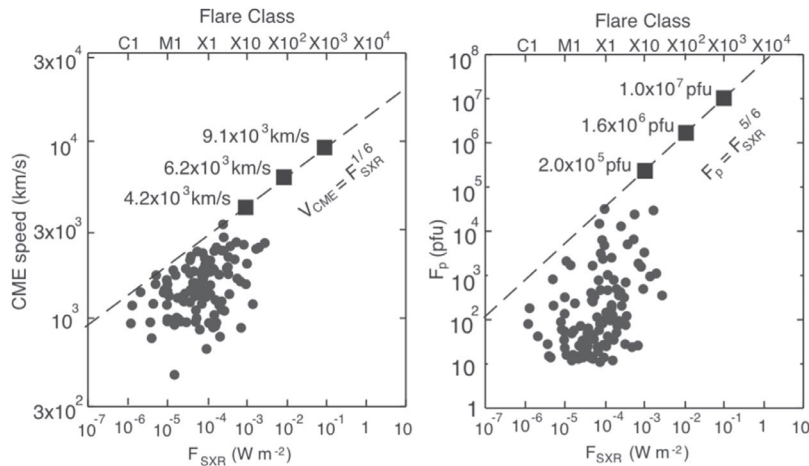


図 13. フレアサイズ (GOES X 線強度) と CME 速度及び陽子フラックス (Takahashi et al. 2016 より)。黒丸データ点は、太陽の場合の観測データ。黒四角点は、スーパーフレアの場合の上限値を示す。

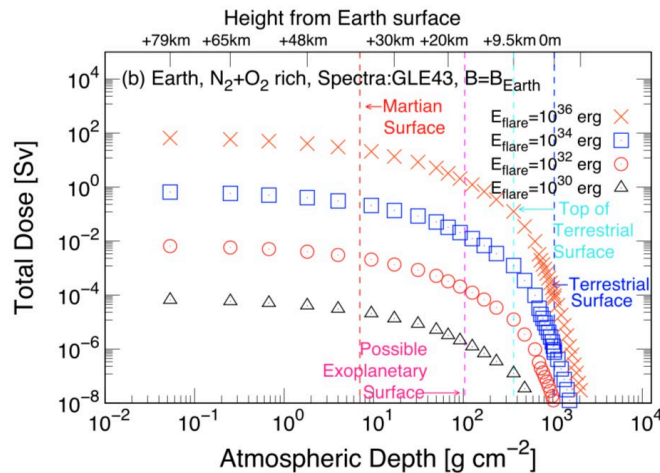


図 14. 地球型大気に、スーパーフレアに伴う高エネルギー粒子 (SEP スペクトルの形状については 1989 年の GLE43 イベントを仮定) を入射させた場合の放射線強度計算結果 (Yamashiki et al. 2019 より)。 10^{30} erg から 10^{36} erg まで 4 段階のサイズのフレアについて表示されている。

3.4.1.8 スーパーフレアの惑星への影響 (2)

3.4.1.7 章の議論は主に、スーパーフレアが現在の太陽系で起こった場合を念頭に置いた場合の話でした。ここではさらに話題を掘り下げて、まず、最近出てきた興味深い新説 (Airapetian et al. 2016) を紹介しながら、過去の地球や系外惑星系に対するスーパーフレアの影響について簡単に述べたいと思います (この分野の詳細は、Airapetian et al. 2020 及び Linsky 2019 の Review も参照)。

3.4.1.8.1 faint young Sun paradox

私たちの住む地球は現在、温暖で液体の水が表面に安定に存在し、さらに私たち生命の体を形づくっている有機物が豊富に存在するという、生命の存在に非常に適した環境となっています。岩石など地質学的な証拠を紐解くと、地球に生命が誕生した約 40 億年前の昔から、地球上には海洋が存在し、現在のような温暖な環境がすでに形成されていたことが示唆されています。しかしその一方で、標準的な太陽の進化モデルでは、40 億年前の太陽の明るさは、いまの約 70%程度であったと考えられており、地球大気が現在と同じ組成であったと仮定すると、地球表面の温度は 0°Cを下回り、液体の海は存在できないことになってしまいます。この矛盾を、「若い太陽のパラドックス (faint young Sun paradox)」といい、1972 年に Carl Sagan らによって提唱されました (Segan & Mullen 1972)。

この矛盾を解決するために、さまざまな説が提唱されてきました (cf. Kasting 2010)。これらの説では、昔の地球大気では温室効果ガスの量が、現在よりはるかに多かったことを仮定しています。たとえば、アンモニア (NH₃) とメタン (CH₄) の量が多くその温室効果が効いていたという説や、現在の 1000~1 万倍ほどの二酸化炭素 (CO₂) が存在していたという説があります。しかしどの説も、たとえば地質学的に過去の CO₂ 濃度を調べた結果と一致しないなど、定量的な妥当性が確立されているとはいえ、現状このパラドックスについて、確定的な解決策は得られていないという状況です。

3.4.1.8.2 若い太陽のスーパーフレアの地球への影響

さて、約 40 億年前の若い太陽は、現在よりも 30%も暗かったわけですが、フレアなどの磁気活動の視点で見ると、太陽はどのような星であったのでしょうか？

上記で述べてきた、ケプラーのデータを用いた統計的研究によると、太陽と比べると自転が 10 倍ほど速い若い星では、スーパーフレアの頻度ははるかに高く、1 日に 1 回を超えるような頻度で起こっていることがわかります (図 1)。この結果から、40 億年前の若い太陽は、自転が速く、フレアに必要な大量の磁場のエネルギーを簡単に蓄えられる状況にあり、スーパーフレアが頻発し現在と比べて非常に活発な状態であった、ということができます。そして、図 13 でも見たように規模に大きな不定性はあるにせよ、頻発するスーパーフレアに伴って、巨大なコロナ質量放出も頻発し、地球の方へ飛んできていた可能性も考えられます。Airapetian et al. (2016) は、そのような高頻度の巨大コロナ質量放出が、地球へと衝突した際の地球磁場との相互作用について、数値シミュレーションを行い、その結果、地球の磁気圏が圧縮され、極地域から高エネルギー粒子が大気中に侵入する経路が形成されることがわかりました (図 15)。

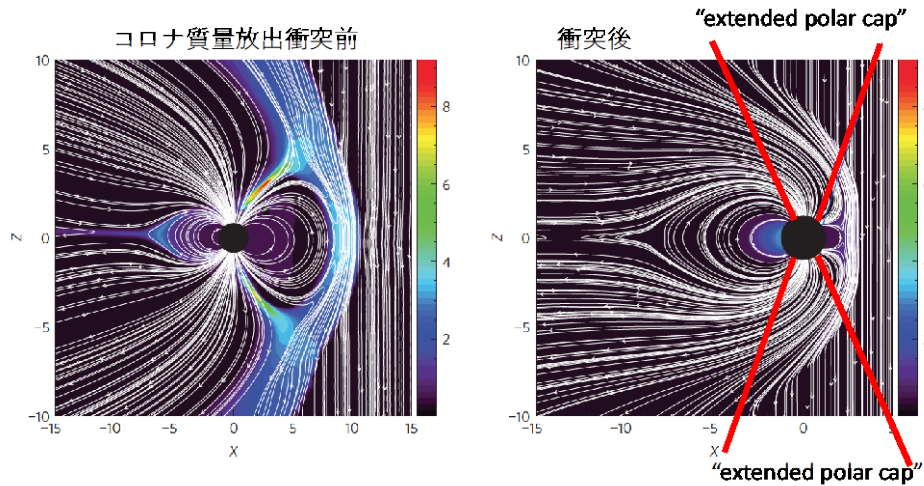


図 15. スーパーフレアによって放出されたコロナ質量放出が、約 40 億年前の地球の磁気圏に（図の右方向から）衝突した際の想像図（Airapetian et al. 2016 の図を改変）。白線は磁力線、カラーバーはプラズマの圧力を表している。地球磁気圏が圧縮され、磁場配位のつなぎ換えが生じて、極地域から高エネルギー粒子が大気中に侵入する経路（図中の赤線で示された領域）が形成される（右側の図は繋ぎ換え後の最終状態なので、圧力が低下している）。

高エネルギー粒子が大気中に侵入すると何が起こるのでしょうか? Airapetian et al. (2016) は、初期地球の大気成分（窒素が豊富： N_2 80%、 CO_2 20%）を仮定し、化学反応計算を行いました。その結果、これらの高エネルギー粒子は地球大気の中に豊富に含まれる窒素分子（ N_2 ）と化学反応を起こし、さまざまな中間生成物を経ながら、亜酸化窒素（ N_2O ）とシアン化水素（HCN）が大量に生成されることが強く示唆されました。

3.4.1.8.3 生命誕生に適した環境の形成

大量に生成される N_2O と HCN。この 2 つの物質が、原始地球が生命誕生に適した環境であったかを考える上で、重要な役割を担う可能性があります。

実は N_2O は強力な温室効果ガスであり、頻発するスーパーフレアの影響で大量の N_2O が生成され、地球大気中へ拡散していくことを考えると、最初に述べた「若い太陽のパラドックス」は十分に解決できてしまう可能性が示唆されます。生命誕生に必要な液体の水を持つ温暖な地球環境が、初期地球においては、スーパーフレアのおかげで形成および維持されたのかもしれない。

一方 HCN は、別の重要な役割を担います。より複雑な化合物の生成の起点となり、アミノ酸をはじめとする生物分子の供給源となる可能性があります。すなわち、私たち生物の体を形づくる物質の起源ともなった可能性があるわけです。

3.4.1.8.4 系外惑星系へのスーパーフレアの影響

「若い太陽での活発なスーパーフレアの影響により、原始地球の大気が温暖になり、さらに生命誕生に必要な環境と材料がつくられた」とする新説（Airapetian et al. 2016）が提唱されました。今後より定量的な検討が必要ですが、太陽のフレアが単に地球に被害をもたらすだけでなく、初期地球

での生命発生という、私たちの起源にもかかわっている可能性があるとは、非常に驚くべき結果といえます。

現在、太陽系外の惑星系が多数発見されており、その数は 2019 年 11 月現在で 4000 個を超えています。そして、「第2の地球」を探そうという試みが、多数の宇宙・地上の望遠鏡を用いて、盛んに行われています。しかし、その対象としては、太陽型星より低温の M 型星が、ちょうど良い温度の惑星（ハビタブル惑星）がより内側に存在し、詳細な観測が容易であるため、有力なターゲットとされています。しかし、M 型星は低温で対流層が発達しているため、太陽型星と比べて磁気活動度が遥かに高いことがケプラーの観測のフレア発生頻度等からも分かっています（図1やHawley et al. 2014, Candelaresi et al. 2014, Davenport 2016）。

そこで、ここで述べてきたような、スーパーフレアなど恒星磁気活動の惑星への影響の研究は、系外惑星系に対しても活発に研究がなされています（Airapetian et al. 2020 及び Linsky 2019 の Review も参照）。生命が存在できるような環境にとって重要な分子（ O_3 や CH_4 、 H_2O 、窒素酸化物など）が、スーパーフレアに伴う高エネルギー粒子によってどのような影響（生成ないしは破壊）を受けるのか（図 16）、そしてその結果が近い将来の大型望遠鏡（James Webb Space Telescope や地上の 30m 望遠鏡）による詳細な大気透過分光観測でどんな形で観測されるのかといった研究も行われています（Segura et al. 2010; Scheucher et al. 2018; Tilley et al. 2019; Herbst et al. 2019b）。今後も、恒星スーパーフレアの研究の進展とともに、様々な分野融合研究が期待されます。

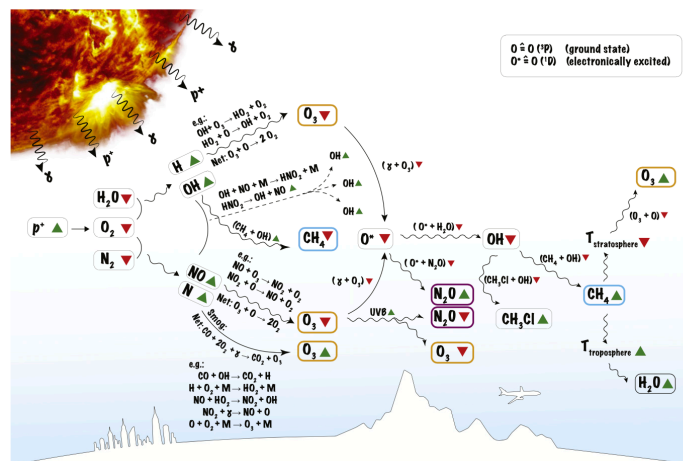


図 16. スーパーフレアに伴う高エネルギー粒子と紫外線によって生じる、生命関連物質の化学反応の模式図（Scheucher et al. 2018 より）

3.4.1.9 今後のスーパーフレア研究

上記 3.4.1 章の前半では、ケプラー宇宙望遠鏡等の最新の恒星観測データに基づき、スーパーフレアを起こす星の性質について見てきました。そして、自転周期の遅い太陽のような星でも、巨大な黒点が生じれば、頻度は数千年に一回と低いものの、巨大なスーパーフレアが発生するという描像が見えてきました。しかし、「太陽でスーパーフレアは起きるのか？」や「スーパーフレアで惑星にどんな影響が及ぶのか？」という問いに迫るには、まだまだ明らかにすべき、調べるべき点が多数残されています。

まずは、図7や図8から分かる通り、現状解析されたケプラーのデータの範囲では、自転の遅いスーパーフレア星の数は少なく、更に分光観測で確実に自転周期 25 日程度の太陽類似星であると確認までされたスーパーフレア星となると、未だ0星であり (Okamoto et al. 2021 の Appendix B 参照)、更なる観測研究が重要です。この点に関しては、ケプラー宇宙望遠鏡の後継機、TESS 衛星 (2018 年 7 月観測開始) と PLATO 衛星 (2026 年打上予定) によって、近傍にあり分光観測にも適した、多数のスーパーフレア星のデータが取得され、更に統計的な研究の確度が高まることが期待されます。

スーパーフレアの必要条件である巨大黒点の性質について、更なる研究も重要です。そのような巨大黒点は、自転の遅い太陽でどのようにして形成されるのか？ 巨大黒点の寿命はどれくらい持続するのか？ Shibata et al. (2013) は、ダイナモ機構に基づく推定により、巨大黒点が太陽内部でも形成できる可能性を提示しています。また、Namekata et al. (2019 & 2020) はケプラー宇宙望遠鏡の測光データを用いて、太陽型星の巨大黒点の生成・消滅率が太陽黒点の生成・消滅率から外挿される値とよく一致すること (図 17)、寿命が 1 年に達するような巨大黒点もあること等を示しました。これらの結果は、スーパーフレアを起こす巨大黒点について、太陽物理の知見をもとに理解する手がかりになると言えます。

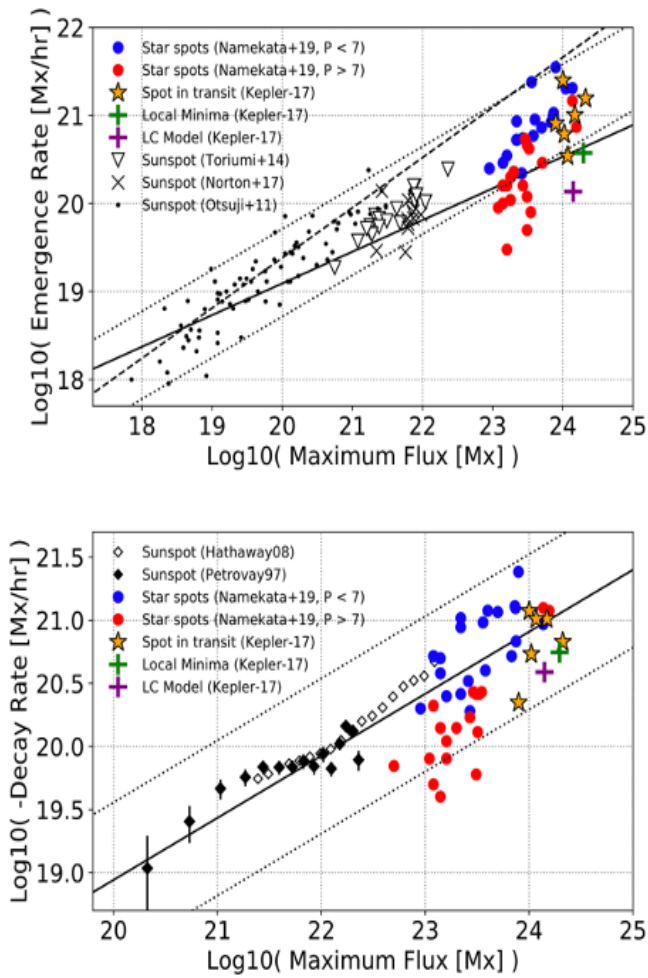


図 17. (上図) 黒点の総磁束量の最大値 vs. 磁束量の生成率 (下図) 黒点の総磁束量の最大値 vs. 磁束量の消滅率 (共に Namekata et al. 2020 より) 太陽黒点のデータの概ね延長線上に、ケプラーによって観測された太陽型星の黒点 (Star Spots) のデータが位置している。太陽型星については、自転周期 (P) で色分けされている。

しかし、スーパーフレア星の巨大黒点についてはまだ多くの謎があります。例えば太陽の場合は、黒点サイズに加えて、「黒点の複雑さ」も巨大フレア発生の重要な条件です (Sammis et al. 2000; Toriumi & Wang 2019: 3.3 章も参照)。スーパーフレア星の黒点の場合、黒点分布・形状の「複雑さ」はどうなっているのでしょうか？ ケプラーの明るさ変動の位相とフレア発生に着目した研究 (Doyle et al. 2018; Roettenbacher & Vida 2018) や、系外惑星トランジットを用いて黒点の数を調べた研究 (Morris et al. 2017) などによると、例えば恒星の巨大黒点について、太陽黒点程度のサイズの黒点が星表面に広く多数分布している描像なども提示されています。これらがスーパーフレア星でも共通して見られる特徴なのか、更なる観測的な検証が必要であり、そのような黒点をどのようにして形成するか、理論的な研究も重要です。さらに、太陽においては磁気活動は、約 11 年の周期で変動しますが、これはスーパーフレア星の場合にどうなっているのか？ より長期的な観点からの観測研究も必要です。

巨大黒点に加えて、スーパーフレア現象そのものに対する理解もまだまだ不十分です。例えば、ケプラー宇宙望遠鏡でのスーパーフレアの観測は、「可視連続光」での観測、すなわち「白色光フレア」の観測です。しかし、太陽型星のスーパーフレアの場合に白色光の放射がどのように生じるのか、太陽型星のスーパーフレアで解放される全エネルギーのうちどの程度が可視連続光なのか (cf. 太陽フレアの場合の例: Emslie et al. 2012) といった点は、太陽型星ではスーパーフレアそのものの分光観測が行われていないこともあり、まだ確立したといえる段階にはありません。太陽白色光フレアの観測結果 (Hudson 2016; Watanabe et al. 2017; Namekata et al. 2017; Jejcic et al. 2018 など) や、低温の M 型星の可視連続光の分光観測例 (Hawley & Pettersen 1991; Kowalski et al. 2010 & 2013, Namekata et al. 2020 など) を踏まえつつ、理論的な考察が始まった段階です (Kowalski & Allred 2018; Heinzel & Shibata 2018; Nizamov 2019, Namekata et al. 2020 など)。今後、観測的な検討も重要です。

連続光だけでなく、フレア中の彩層線の時間変化の様子も、太陽フレアの知見をもとにスーパーフレア現象を理解する上では重要です。通常の太陽フレアでは、彩層線 ($H\alpha$ 線など) は主に彩層下降流からの放射により "red asymmetry" を示すことが知られています (Ichimoto & Kurokawa 1984)。一方、M 型星スーパーフレアの分光観測例では、彩層線の "blue asymmetry" も多く観測されつつあります (Fuhrmeister et al. 2018; Honda et al. 2018; Vida et al. 2019; Machara et al. 2021)。この "blue asymmetry" は、スーパーフレアにおいて共通して見られる現象なのか？ そして、太陽フレアとスーパーフレアの間で、彩層のダイナミクスがどれほど共通なのか、あるいはどれほど異なるのか？ このような点を知るために、更なる観測的な探査が必要です。

そして、3.4.1.7 章及び 3.4.1.8 章で述べた通り、スーパーフレアに伴う質量放出 (CME) が惑星大気に大きな影響を与える可能性が注目されています。スーパーフレアに伴う CME の物理量 (質量や速度) を知ることができれば、図 10 及び図 11 のような高エネルギー粒子 (SEP) の強度やスペクトルに制限をつけることができ、図 12 や図 14 のように惑星大気の化学反応や放射線強度を検討する上で重要な要素となります。また、3.4.1.6 章で述べたような地球上に残る宇宙線イベントの痕跡 (14C イベントなど) とスーパーフレアとの関係 (発生頻度の比較など) を検討する上でも重要です。この状況を踏まえ、スーパーフレア星 (特にフレアの頻発する M 型星) において、CME を観測しようという検討や観測が、実施されつつあります。例えば、EUV での dimming に着目する方法 (Harra et al.

2016; Veronig et al. 2021)、CMEに伴う Type II 電波バーストの探索 (Crosley & Osten 2018)、フレア中の彩層線の Blueshift に着目する方法 (Vida et al. 2019; Maehara et al. 2021)、フレア中の X 線輝線の Blueshift に着目する方法 (Argiroffi et al. 2019)、X 線の吸収量に着目する手法 (Moschou et al. 2019) などが挙げられます。Blueshift を用いる手法では、後述のせいめい望遠鏡を利用した観測で、M 型星だけでなく、若い太陽型星でフィラメント噴出(early phase of CME)に伴う青方偏移した吸収成分の検出に成功した例も登場しました(Namekata et al. 2021; 図 18)。これらの結果を総合し、理論的な考察 (Alvarado-Gómez et al. 2018; Lynch et al. 2019; Sun et al. 2021) などとの比較も含めて、今後更なる研究が必要です。

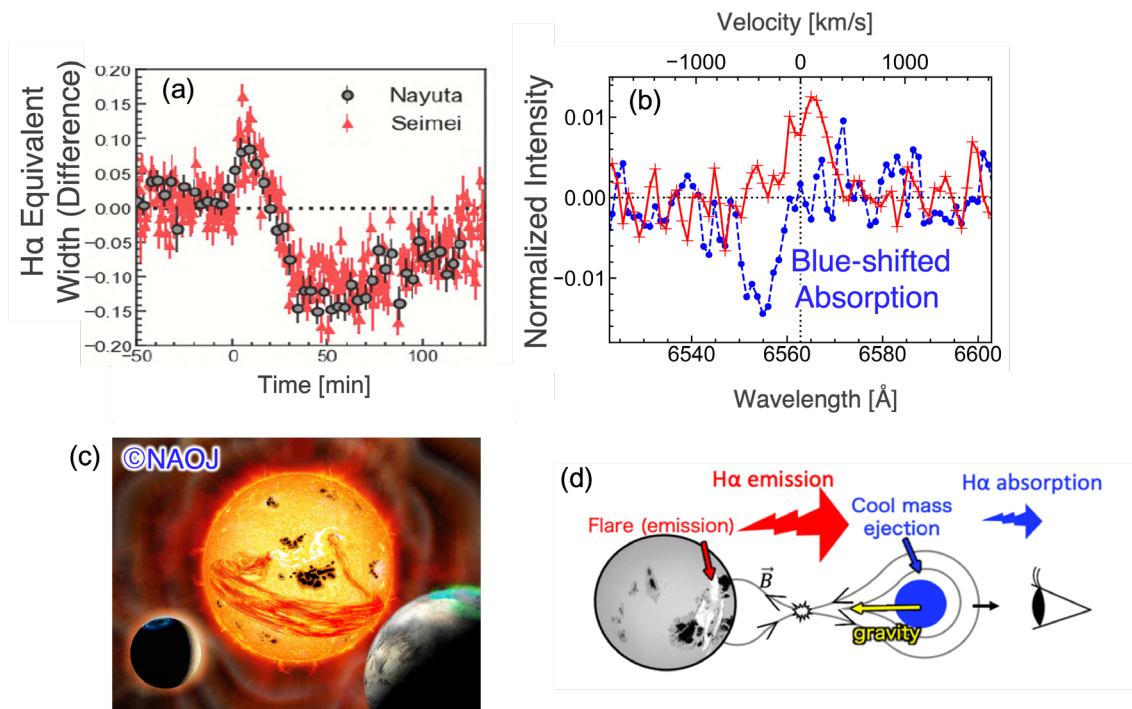


図 18. 若い太陽型星 EK Dra のスーパーフレアによるフィラメント噴出の検出例 (Namekata et al. 2021 より)。(a) 2つの地上望遠鏡 (京都大学 3.8m せいめい望遠鏡・兵庫県立大学 2m なゆた望遠鏡) のデータによる水素 H α 線の等価幅の光度曲線 (フレア前の値を差し引いた差分を示したもの)。正の値は増光を、負の値は吸収を意味している。フレアのピークから約 30 分後に、フィラメント噴出による H α 線の減光が見られる。(b) せいめい望遠鏡のデータからフレアピークと減光期における H α スペクトル (フレア前の値を差し引いた差分を示したもの)。減光期には、フィラメント噴出による青色シフトした吸収が観測された。(c) EK Dra のフィラメント噴出の想像図 (出典: 国立天文台)。(d) H α 線で EK Dra のフィラメント噴出がどのように観測されるかの模式図 (created by Kosuke Namekata for this textbook)。

ここまでまとめた通り、今後のスーパーフレア研究においては、巨大黒点の時間変化の観測や、スーパーフレア自体の分光観測など、多数の観測時間を集中的に投下する専門観測が重要です。日本国内においては、2019 年に稼働を開始したばかりの京都大学岡山天文台 3.8m せいめい望遠鏡 (図 19) が今後大きな役割を果たしていくことが強く期待されます。そして、TESS 衛星 (2018 年 7 月定

常観測開始) や PLATO 衛星 (2026 年打上予定) による測光観測、NICER (2017 年 7 月観測開始) や XRISM (2022 年打上予定の日本の X 線衛星) による X 線観測など、せいめい望遠鏡との連携が期待される宇宙望遠鏡も複数あります。これら新たな観測の進展とともに、太陽物理分野との更なる連携や、惑星分野との分野横断研究 (cf. Airapetian et al. 2020; Herbst et al. 2019b) などの方向へのスーパーフレア研究の発展が期待されます。そして、3.4.1.7 章で言及したような、現在の太陽でスーパーフレアが起こった場合の地球への影響 (cf. Eastwood et al. 2017; Lingam&Loeb 2017; Riley et al. 2018) の推定においては、広く太陽地球圏研究分野全体での連携が、重要と言えます。

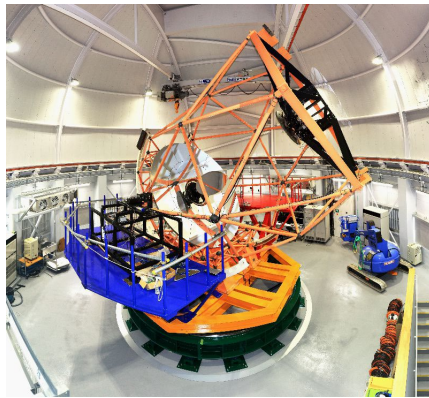


図 19. 京都大学岡山天文台 3.8m せいめい望遠鏡

参考文献

AIRAPETIAN, V. S. ET AL.: PREBIOTIC CHEMISTRY AND ATMOSPHERIC WARMING OF EARLY EARTH BY AN ACTIVE YOUNG SUN, NATURE GEOSCIENCE, VOLUME 9, PP. 452–455 (2016)

AIRAPETIAN, V. S. ET AL.: IMPACT OF SPACE WEATHER ON CLIMATE AND HABITABILITY OF TERRESTRIAL-TYPE EXOPLANETS, INTERNATIONAL JOURNAL OF ASTROBIOLOGY, VOL. 19, ISSUE 2, PP. 136-194 (2020)

ALVARADO-GÓMEZ, J. D., ET AL.: SUPPRESSION OF CORONAL MASS EJECTIONS IN ACTIVE STARS BY AN OVERLYING LARGE-SCALE MAGNETIC FIELD: A NUMERICAL STUDY, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, VOLUME 862, ISSUE 2, ARTICLE ID. 93, 12 PP. (2018)

ARGIROFFI, C. ET AL.: A STELLAR FLARE-CORONAL MASS EJECTION EVENT REVEALED BY X-RAY PLASMA MOTIONS, NATURE ASTRONOMY,

VOLUME 3, p. 742-748 (2019)

AULANIER, G. ET AL.: THE STANDARD FLARE MODEL IN THREE DIMENSIONS. II. UPPER LIMIT ON SOLAR FLARE ENERGY, *ASTRONOMY & ASTROPHYSICS*, VOLUME 549, ID.A66, 7 PP. (2013)

AYRES, T. R.: EVOLUTION OF THE SOLAR IONIZING FLUX, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOLUME 102, ISSUE E1, P. 1641-1652 (1997)

BATTERSBY, S. ET AL.: CORE CONCEPT: WHAT ARE THE CHANCES OF A HAZARDOUS SOLAR SUPERFLARE?, *PNAS*, VOL. 116, NO. 47, PP. 23368–23370 (2019)

BENZ, A. O. & GUEDEL, M.: PHYSICAL PROCESSES IN MAGNETICALLY DRIVEN FLARES ON THE SUN, STARS, AND YOUNG STELLAR OBJECTS, *ANNUAL REVIEW OF ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS*, VOL. 48, P.241-287 (2010)

BOGDAN, T. J. ET AL.: DISTRIBUTION OF SUNSPOT UMBRAL AREAS: 1917—1982, *ASTROPHYSICAL JOURNAL* V.327, P.451 (1988)

BÜNTGEN, U. ET AL.: TREE RINGS REVEAL GLOBALLY COHERENT SIGNATURE OF COSMOGENIC RADIOCARBON EVENTS IN 774 AND 993 CE, *NATURE COMMUNICATIONS*, VOLUME 9, ID. 3605 (2018)

CANDELAESI, S. ET AL.: SUPERFLARE OCCURRENCE AND ENERGIES ON G-, K-, AND M-TYPE DWARFS, *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL*, VOLUME 792, ISSUE 1, ARTICLE ID. 67, 9 PP. (2014)

CROSLY, M. K. & OSTEN, R. A.: CONSTRAINING STELLAR CORONAL MASS EJECTIONS THROUGH MULTI-WAVELENGTH ANALYSIS OF THE ACTIVE M DWARF EQ PEG, *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL*, VOLUME 856, ISSUE 1, ARTICLE ID. 39, 10 PP. (2018)

DAVENPORT, J. R. A., THE KEPLER CATALOG OF STELLAR FLARES, *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL*, VOLUME 829, ISSUE 1, ARTICLE ID. 23, 12 PP. (2016).

DOYLE, L. ET AL.: INVESTIGATING THE ROTATIONAL PHASE OF STELLAR FLARES ON M DWARFS USING K2 SHORT CADENCE DATA, *MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY*, VOLUME 480, ISSUE 2, P.2153-2164 (2018)

EASTWOOD, J. P. ET AL.: THE ECONOMIC IMPACT OF SPACE WEATHER: WHERE DO WE STAND?, *RISK ANALYSIS*, VOL. 37, NO. 2 (2017)

EMSLIE, A. G. ET AL.: GLOBAL ENERGETICS OF THIRTY-EIGHT LARGE SOLAR ERUPTIVE EVENTS, *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL*, VOLUME 759, ISSUE 1, ARTICLE ID. 71, 18 PP. (2012)

FUHRMEISTER, B. ET AL.: THE CARMENES SEARCH FOR EXOPLANETS AROUND M DWARFS. WING ASYMMETRIES OF H α , Na I D, AND He I LINES, *ASTRONOMY & ASTROPHYSICS*, VOLUME 615, ID.A14, 25 PP. (2018)

GERSHBERG, R. E.: SOLAR-TYPE ACTIVITY IN MAIN-SEQUENCE STARS, *ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS LIBRARY*. ISBN 978-3-540-21244-7. SPRINGER BERLIN HEIDELBERG (2005)

GUEDEL, M.: THE SUN IN TIME: ACTIVITY AND ENVIRONMENT, *LIVING REVIEWS IN SOLAR PHYSICS*, VOLUME 4, ISSUE 1, ARTICLE ID. 3, 137 PP. (2007)

HARRA, L. K. ET AL.: THE CHARACTERISTICS OF SOLAR X-CLASS FLARES AND CMES: A PARADIGM FOR STELLAR SUPERFLARES AND ERUPTIONS?, *SOLAR PHYSICS*, VOLUME 291, ISSUE 6, PP.1761-1782 (2016)

HAWLEY, S. L. & PETERSEN, B. R.: THE GREAT FLARE OF 1985 APRIL 12 ON AD LEONIS. *ASTROPHYSICAL JOURNAL* V.378, P.725 (1991)

HAWLEY, S. L.: KEPLER FLARES. I. ACTIVE AND INACTIVE M DWARFS, *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL*, VOLUME 797, ISSUE 2, ARTICLE ID. 121, 15 PP. (2014)

HEINZEL, P. & SHIBATA, K.: CAN FLARE LOOPS CONTRIBUTE TO THE WHITE-LIGHT EMISSION OF STELLAR SUPERFLARES?, *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL*, VOLUME 859, ISSUE 2, ARTICLE ID. 143, 7 PP. (2018)

HERBST, K. ET AL.: FROM SOLAR TO STELLAR FLARE CHARACTERISTICS. ON A NEW PEAK SIZE DISTRIBUTION FOR G-, K-, AND M-DWARF STAR

- FLARES, *ASTRONOMY & ASTROPHYSICS*, VOLUME 621, A67, 10 PP. (2019A)
- HERBST, K. ET AL.: A NEW MODEL SUITE TO DETERMINE THE INFLUENCE OF COSMIC RAYS ON (EXO)PLANETARY ATMOSPHERIC BIOSIGNATURES, *ASTRONOMY & ASTROPHYSICS*, VOLUME 631, A101, 17 PP. (2019B)
- HONDA, S. ET AL.: TIME-RESOLVED SPECTROSCOPIC OBSERVATIONS OF AN M-DWARF FLARE STAR EV LACERTAE DURING A FLARE, *PUBLICATIONS OF THE ASTRONOMICAL SOCIETY OF JAPAN*, VOLUME 70, ISSUE 4, ID.62 (2018)
- HUDSON, H. S.: CHASING WHITE-LIGHT FLARES, *SOLAR PHYSICS*, VOLUME 291, ISSUE 5, PP.1273-1322 (2016)
- ICHIMOTO, K. & KUROKAWA, H.: H α RED ASYMMETRY OF SOLAR FLARES, *SOLAR PHYSICS*, VOLUME 93, ISSUE 1, PP.105-121 (1984)
- JEJIC, S. ET AL.: HIGH-DENSITY OFF-LIMB FLARE LOOPS OBSERVED BY SDO, *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL*, VOLUME 867, ISSUE 2, ARTICLE ID. 134, 10 PP. (2018)
- KAROFF, C. ET AL.: OBSERVATIONAL EVIDENCE FOR ENHANCED MAGNETIC ACTIVITY OF SUPERFLARE STARS, *NATURE COMMUNICATIONS*, VOLUME 7, ID. 11058 (2016)
- KASTING, J. F.: FAINT YOUNG SUN REDUX, *NATURE*, VOLUME 464, PP. 687–689 (2010)
- KOWALSKI, A. F. ET AL.: A WHITE LIGHT MEGAFLARE ON THE DM4.5E STAR YZ CMi, *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS*, VOLUME 714, ISSUE 1, PP. L98-L102 (2010)
- KOWALSKI, A. F. ET AL.: TIME-RESOLVED PROPERTIES AND GLOBAL TRENDS IN DME FLARES FROM SIMULTANEOUS PHOTOMETRY AND SPECTRA, *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL SUPPLEMENT*, VOLUME 207, ISSUE 1, ARTICLE ID. 15, 57 PP. (2013)
- KOWALSKI, A. F. & ALLRED, J. C.: PARAMETERIZATIONS OF CHROMOSPHERIC CONDENSATIONS IN DG AND DME MODEL FLARE ATMOSPHERES, *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL*, VOLUME 852, ISSUE 1, ARTICLE ID. 61, 19 PP. (2018)
- LINGAM, M. & LOEB, A.: RISKS FOR LIFE ON HABITABLE PLANETS FROM SUPERFLARES OF THEIR HOST STARS, *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL*, VOLUME 848, ISSUE 1, ARTICLE ID. 41, 13 PP. (2017)
- LINSKY, J.: HOST STARS AND THEIR EFFECTS ON EXOPLANET ATMOSPHERES: AN INTRODUCTORY OVERVIEW, *LECTURE NOTES IN PHYSICS*, VOLUME 955. ISBN 978-3-030-11451-0. SPRINGER NATURE SWITZERLAND AG (2019)
- LYNCH, B. J. ET AL.: MODELING A CARRINGTON-SCALE STELLAR SUPERFLARE AND CORONAL MASS EJECTION FROM $\kappa^1\text{CET}$, *HE ASTROPHYSICAL JOURNAL*, VOLUME 880, ISSUE 2, ARTICLE ID. 97, 12 PP. (2019)
- MAEHARA, H. ET AL.: SUPERFLARES ON SOLAR-TYPE STARS, *NATURE*, VOLUME 485, ISSUE 7399, PP. 478-481 (2012)
- MAEHARA, H. ET AL.: STATISTICAL PROPERTIES OF SUPERFLARES ON SOLAR-TYPE STARS BASED ON 1-MIN CADENCE DATA, *EARTH, PLANETS AND SPACE*, VOLUME 67, ARTICLE ID.59, 10 PP. (2015)
- MAEHARA, H. ET AL.: STARSPOOT ACTIVITY AND SUPERFLARES ON SOLAR-TYPE STARS, *PUBLICATIONS OF THE ASTRONOMICAL SOCIETY OF JAPAN*, VOLUME 69, ISSUE 3, ID.41 (2017)
- MEKHALDI, F. ET AL. MULTIRADIONUCLIDE EVIDENCE FOR THE SOLAR ORIGIN OF THE COSMIC-RAY EVENTS OF AD 774/5 AND 993/4, *NATURE COMMUNICATIONS*, VOLUME 6, ID. 8611 (2015)
- MIYAKE, F. ET AL.: A SIGNATURE OF COSMIC-RAY INCREASE IN AD 774-775 FROM TREE RINGS IN JAPAN, *NATURE*, VOLUME 486, ISSUE 7402, PP. 240-242 (2012)
- MIYAKE, F. ET AL.: ANOTHER RAPID EVENT IN THE CARBON-14 CONTENT OF TREE RINGS, *NATURE COMMUNICATIONS*, VOLUME 4, ID. 1748 (2013)

三宅美沙, 2020, 天文月報 113, 208

MORRIS, B. M. ET AL.: THE STARSPOTS OF HAT-P-11: EVIDENCE FOR A SOLAR-LIKE DYNAMO, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, VOLUME 846, ISSUE 2, ARTICLE ID. 99, 15 PP. (2017)

MOSCHOU, S.-P.: THE STELLAR CME—FLARE RELATION: WHAT DO HISTORIC OBSERVATIONS REVEAL?, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, VOLUME 877, ISSUE 2, ARTICLE ID. 105, 18 PP. (2019)

NAMEKATA, K. ET AL.: STATISTICAL STUDIES OF SOLAR WHITE-LIGHT FLARES AND COMPARISONS WITH SUPERFLARES ON SOLAR-TYPE STARS, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, VOLUME 851, ISSUE 2, ARTICLE ID. 91, 14 PP. (2017)

NAMEKATA, K. ET AL.: LIFETIMES AND EMERGENCE/DECAY RATES OF STAR SPOTS ON SOLAR-TYPE STARS ESTIMATED BY KEPLER DATA IN COMPARISON WITH THOSE OF SUNSPOTS, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, VOLUME 871, ISSUE 2, ARTICLE ID. 187, 13 PP. (2019)

NAMEKATA, K. ET AL.: TEMPORAL EVOLUTION OF SPATIALLY RESOLVED INDIVIDUAL STAR SPOTS ON A PLANET-HOSTING SOLAR-TYPE STAR: KEPLER-17, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, VOLUME 891, ISSUE 2, ARTICLE ID. 103, 12 PP. (2020)

NAMEKATA, K. ET AL.: OPTICAL AND X-RAY OBSERVATIONS OF STELLAR FLARES ON AN ACTIVE M DWARF AD LEONIS WITH THE SEIMEI TELESCOPE, SCAT, NICER, AND OISTER, PUBLICATIONS OF THE ASTRONOMICAL SOCIETY OF JAPAN, VOLUME 72, ISSUE 4, ID. 68, 15 PP. (2020)

NAMEKATA, K. ET AL.: PROBABLE DETECTION OF AN ERUPTIVE FILAMENT FROM A SUPERFLARE ON A SOLAR-TYPE STAR, NATURE ASTRONOMY, IN PRESS (2021)

NIZAMOV, B. A.: SOFT X-RAY HEATING AS A MECHANISM OF OPTICAL CONTINUUM GENERATION IN SOLAR-TYPE STAR SUPERFLARES, MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY, VOLUME 489, ISSUE 3, P. 4338-4345 (2019)

NOTSU, Y. ET AL.: SUPERFLARES ON SOLAR-TYPE STARS OBSERVED WITH KEPLER II. PHOTOMETRIC VARIABILITY OF SUPERFLARE-GENERATING STARS: A SIGNATURE OF STELLAR ROTATION AND STARSPOTS, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, VOLUME 771, ISSUE 2, ARTICLE ID. 127, 10 PP. (2013)

NOTSU, Y. ET AL.: HIGH DISPERSION SPECTROSCOPY OF SOLAR-TYPE SUPERFLARE STARS. I. TEMPERATURE, SURFACE GRAVITY, METALLICITY, AND $V \sin i$, PUBLICATIONS OF THE ASTRONOMICAL SOCIETY OF JAPAN, VOLUME 67, ISSUE 3, ID. 32, 24 PP. (2015A)

NOTSU, Y. ET AL.: HIGH DISPERSION SPECTROSCOPY OF SOLAR-TYPE SUPERFLARE STARS. II. STELLAR ROTATION, STARSPOTS, AND CHROMOSPHERIC ACTIVITIES, PUBLICATIONS OF THE ASTRONOMICAL SOCIETY OF JAPAN, VOLUME 67, ISSUE 3, ID. 33, 14 PP. (2015B)

NOTSU, Y. ET AL.: DO KEPLER SUPERFLARE STARS REALLY INCLUDE SLOWLY ROTATING SUN-LIKE STARS?—RESULTS USING APO 3.5 M TELESCOPE SPECTROSCOPIC OBSERVATIONS AND GAIA-DR2 DATA, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, VOLUME 876, ISSUE 1, ARTICLE ID. 58, 39 PP. (2019)

OKAMOTO ET AL.; STATISTICAL PROPERTIES OF SUPERFLARES ON SOLAR-TYPE STARS: RESULTS USING ALL OF THE KEPLER PRIMARY MISSION DATA, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, VOLUME 906, ISSUE 2, ARTICLE ID. 72, 28 PP. (2021)

O'HARE, P. ET AL.: MULTIRADIONUCLIDE EVIDENCE FOR AN EXTREME SOLAR PROTON EVENT AROUND 2,610 B.P. (660 BC), PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, VOL. 116, ISSUE 13, PP. 5961-5966 (2019)

PARK, J. ET AL.: RELATIONSHIP BETWEEN SOLAR ACTIVITY AND $\Delta 14\text{C}$ PEAKS IN AD 775, AD 994, AND 660 BC, RADIOCARBON, VOLUME 59, ISSUE 4, PP. 1147-1156 (2017)

REID, I. N. & HAWLEY, S. L.: NEW LIGHT ON DARK STARS RED DWARFS, LOW-MASS STARS, BROWN STARS, ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS LIBRARY. ISBN 978-3-540-21244-7. SPRINGER BERLIN HEIDELBERG (2005)

- RILEY, P. ET AL.: EXTREME SPACE WEATHER EVENTS: FROM CRADLE TO GRAVE, SPACE SCIENCE REVIEWS, VOLUME 214, ISSUE 1, ARTICLE ID. 21, 24 PP. (2018)
- ROETTENBACHER, R. M. & VIDA, K.: THE CONNECTION BETWEEN STARSPOTS AND FLARES ON MAIN-SEQUENCE KEPLER STARS, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, VOLUME 868, ISSUE 1, ARTICLE ID. 3, 8 PP. (2018)
- RUBENSTEIN, E. P. & SCHAEFER, B. E.: ARE SUPERFLARES ON SOLAR ANALOGUES CAUSED BY EXTRASOLAR PLANETS?, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, VOLUME 529, ISSUE 2, PP. 1031-1033 (2000)
- SAMMIS, I. ET AL.: THE DEPENDENCE OF LARGE FLARE OCCURRENCE ON THE MAGNETIC STRUCTURE OF SUNSPOTS, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, VOLUME 540, ISSUE 1, PP. 583-587 (2000)
- SCHAEFER, B. E., KING, J. R., & DELIYANNIS, C. P.: SUPERFLARES ON ORDINARY SOLAR-TYPE STARS, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, VOLUME 529, ISSUE 2, PP. 1026-1030 (2000)
- SCHEUCHER, M. ET AL: NEW INSIGHTS INTO COSMIC-RAY-INDUCED BIOSIGNATURE CHEMISTRY IN EARTH-LIKE ATMOSPHERES, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, VOLUME 863, ISSUE 1, ARTICLE ID. 6, 11 PP. (2018)
- SCHRIJVER, C. J. ET AL.: ESTIMATING THE FREQUENCY OF EXTREMELY ENERGETIC SOLAR EVENTS, BASED ON SOLAR, STELLAR, LUNAR, AND TERRESTRIAL RECORDS, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: SPACE PHYSICS, VOLUME 117, ISSUE A8, CITEID A08103 (2012)
- SCHRIJVER, C. J. & BEER, J.: SPACE WEATHER FROM EXPLOSIONS ON THE SUN: HOW BAD COULD IT BE?, EOS, TRANSACTIONS, AMERICAN GEOPHYSICAL UNION, VOLUME 95, ISSUE 24, PP. 201-202 (2014)
- SEGAN, C. & MULLEN, G.: EARTH AND MARS: EVOLUTION OF ATMOSPHERES AND SURFACE TEMPERATURES, SCIENCE, VOL. 177, ISSUE 4043, PP. 52-56 (1972)
- SEGURA, A. ET AL.: THE EFFECT OF A STRONG STELLAR FLARE ON THE ATMOSPHERIC CHEMISTRY OF AN EARTH-LIKE PLANET ORBITING AN MDWARF, ASTROBIOLOGY, VOLUME 10, ISSUE 7, PP. 751-771 (2010)
- SHIBATA, K. ET AL.: CAN SUPERFLARES OCCUR ON OUR SUN?, PUBLICATIONS OF THE ASTRONOMICAL SOCIETY OF JAPAN, VOL. 65, NO. 3, ARTICLE ID. 49, 8 (2013)
- SHIBAYAMA, T. ET AL.: SUPERFLARES ON SOLAR-TYPE STARS OBSERVED WITH KEPLER. I. STATISTICAL PROPERTIES OF SUPERFLARES, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL SUPPLEMENT, VOLUME 209, ISSUE 1, ARTICLE ID. 5, 13 PP. (2013)
- SUN, X. ET AL.: TORUS-STABLE ZONE ABOVE STARSPOTS, MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY IN PRESS (2021)
- TAKAHASHI, T. ET AL.: SCALING RELATIONS IN CORONAL MASS EJECTIONS AND ENERGETIC PROTON EVENTS ASSOCIATED WITH SOLAR SUPERFLARES, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, VOLUME 833, ISSUE 1, ARTICLE ID. L8, 6 PP. (2016)
- TAKAHASHI, T. & SHIBATA, K.: SHEATH-ACCUMULATING PROPAGATION OF INTERPLANETARY CORONAL MASS EJECTION, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, VOLUME 837, ISSUE 2, ARTICLE ID. L17, 8 PP. (2017)
- TILLEY, M. A. ET AL.: MODELING REPEATED MDWARF FLARING AT AN EARTH-LIKE PLANET IN THE HABITABLE ZONE: ATMOSPHERIC EFFECTS FOR AN UNMAGNETIZED PLANET, ASTROBIOLOGY, VOLUME 19, ISSUE 1, 2019, PP. 64-86 (2019)
- TORIUMI, S. & WANG, H.: FLARE-PRODUCTIVE ACTIVE REGIONS, LIVING REVIEWS IN SOLAR PHYSICS, VOLUME 16, ISSUE 1, ARTICLE ID. 3, 128 PP. (2019)
- UUSITALO, J. ET AL.: SOLAR SUPERSTORM OF AD 774 RECORDED SUBANNUALLY BY ARCTIC TREE RINGS, NATURE COMMUNICATIONS, VOLUME 9, ID. 3495 (2018)
- USOSKIN, I. G.: THE AD775 COSMIC EVENT REVISITED: THE SUN IS TO BLAME, ASTRONOMY & ASTROPHYSICS, VOLUME 552, ID. L3, 4 PP. (2013)

- USOSKIN, I. G.: A HISTORY OF SOLARACTIVITY OVER MILLENNIA, LIVING REVIEWS IN SOLAR PHYSICS, VOLUME 14, ISSUE 1, ARTICLE ID. 3, 97 PP. (2017)
- USOSKIN, I. G., & KOVALTSOV, G. A.: MIND THE GAP: NEW PRECISE ¹⁴C DATA INDICATE THE NATURE OF EXTREME SOLAR PARTICLE EVENTS. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 48, E2021GL094848. (2021)
- VERONIG, A. M. ET AL: INDICATIONS OF STELLAR CORONAL MASS EJECTIONS THROUGH CORONAL DIMMINGS, NATURE ASTRONOMY, VOLUME 5, P.697-706 (2021)
- VIDA, K. ET AL.: THE QUEST FOR STELLAR CORONAL MASS EJECTIONS IN LATE-TYPE STARS. I. INVESTIGATING BALMER-LINE ASYMMETRIES OF SINGLE STARS IN VIRTUAL OBSERVATORY DATA, ASTRONOMY & ASTROPHYSICS, VOLUME 623, ID.A49, 14 PP. (2019)
- WATANABE, K. ET AL.: CHARACTERISTICS THAT PRODUCE WHITE-LIGHT ENHANCEMENTS IN SOLAR FLARES OBSERVED BY HINODE/SOT, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, VOLUME 850, ISSUE 2, ARTICLE ID. 204, 13 PP. (2017)
- WRIGHT, N. J.: THE STELLAR-ACTIVITY-ROTATION RELATIONSHIP AND THE EVOLUTION OF STELLAR DYNAMOS, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, VOLUME 743, ISSUE 1, ARTICLE ID. 48, 16 PP. (2011)
- YAMASHIKI, Y. ET AL.: IMPACT OF STELLAR SUPERFLARES ON PLANETARY HABITABILITY, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, VOLUME 881, ISSUE 2, ARTICLE ID. 114, 24 PP. (2019)