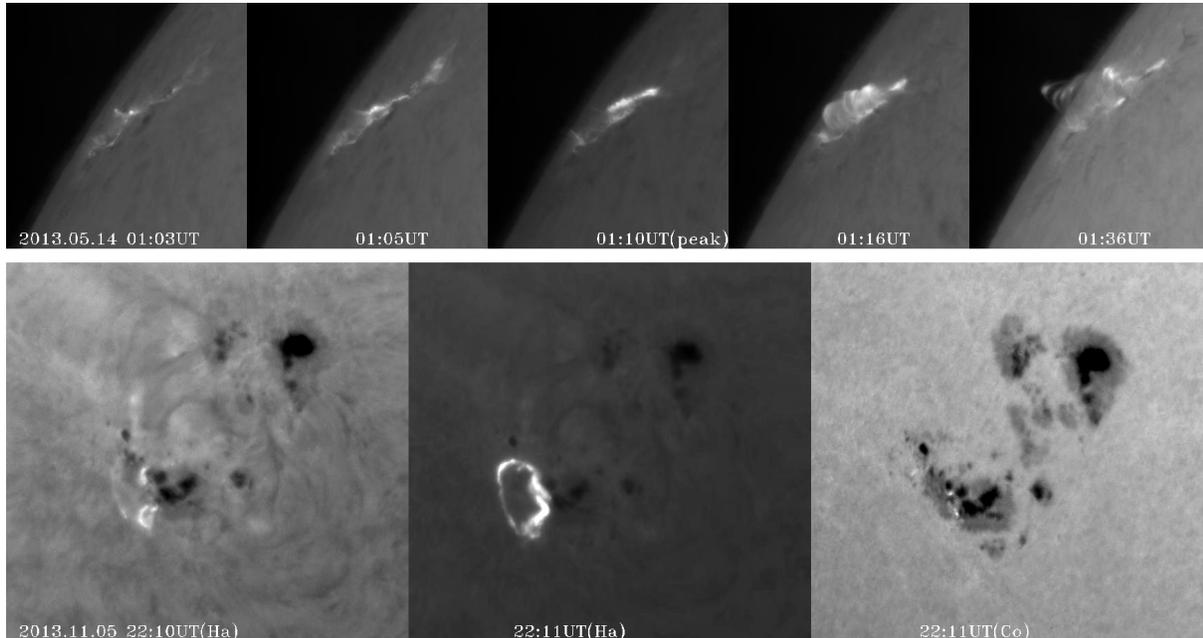


5.2 研究トピックス

SMART 観測トピックス

2013 年は、大フレア (X-class flare) が、12 回発生した。飛騨天文台 SMART 望遠鏡では、そのうちの半数 (6 回) のフレアが観測された。活動領域と観測日 (日本時間) 及びフレアの規模は、以下の通り。NOAA 11748 にて、2013 年 5 月 13 日 (X1.7)、14 日 (X3.2)、15 日 (X1.2)。NOAA 11875 にて、10 月 28 日 (X1.0:表紙)。NOAA 11890 にて、11 月 6 日 (X3.3)、8 日 (X1.1)。観測画像や動画は、附属天文台ホームページ (天文現象速報¹) にて公開されている。5 月 15 日の大フレアの動画は、フジテレビの夕方のニュースにおいて使用された。



(上):2013 年 5 月 14 日のフレアの時間変化 (下)2013 年 11 月 5 日のフレア。いずれも SMART 望遠鏡 FISCH/Flare Imaging System in Continuum and H-alpha (H-alpha 連続光高速撮像装置) による。上が天球の北、右が西。11 月 5 日のフレアでは、連続光 (下右図) においても複数の輝点がみられる。

(石井 貴子 記)

SMART-T4 新高速マグネトグラフの開発

飛騨天文台の太陽磁場活動望遠鏡 (Solar Magnetic Activity Reserch Telescope:SMART) の第 4 鏡筒 (T4) は、2003 年の建設当初は多目的望遠鏡と位置づけられてきました。その後、T1-T3 による観測が安定期に入った 2008 年度から、高精度の光球磁場観測を目指した装置の改修を進め、2012 年度より実際にデータの取得を開始しています。

新装置 Tandem Etalon Magnetograph(TEM) 特徴は、2 台の CCD カメラ (每秒 30 枚撮像可能) を使用することで、シーイングの影響を抑えながら太陽光球磁場の信号 (偏光信

¹<http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/topics/kako.html>

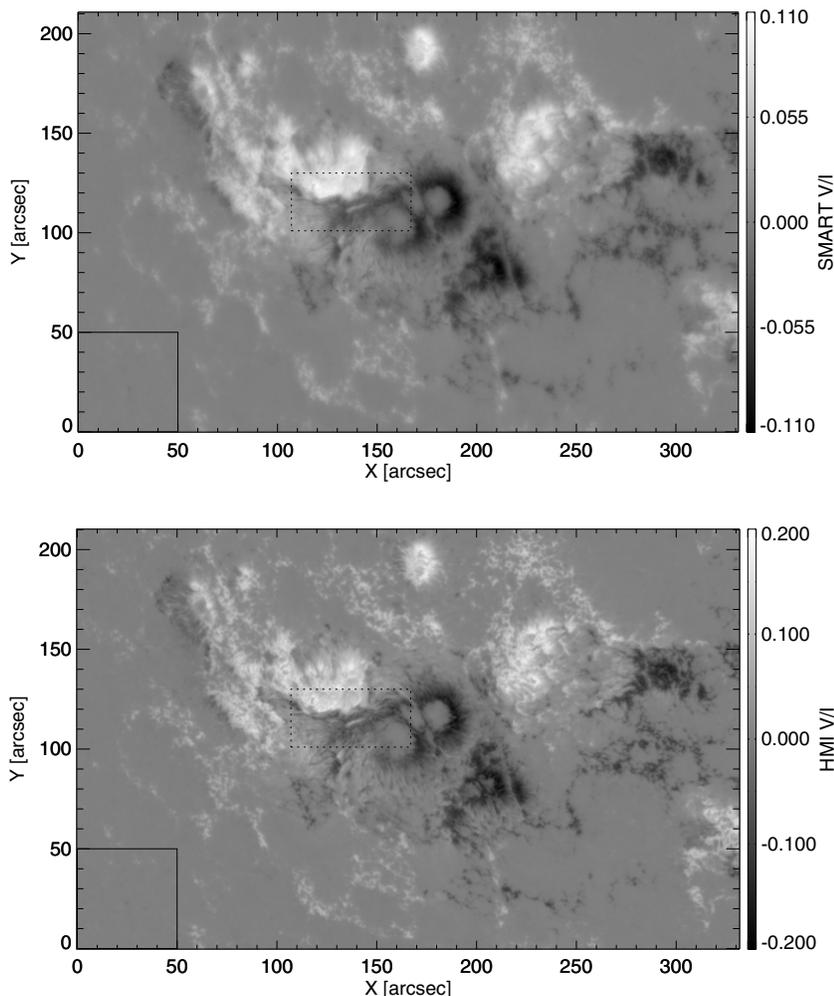


図: SMART/TEM (上) と、SDO/HMI で取得された NOAA11520 の偏光信号 (視線方向磁場強度) の比較。

号)を取り出すことができるように工夫した点にあります。設計値に基づく検討では、20秒間の観測により、 3×10^{-4} の偏光測定精度を実現できる物となっており、これは、日本の「ひので」衛星や、米国の Solar Dynamics Observatory(SDO) 衛星にも引けをとらない性能です。

そこで、新装置の TEM の性能を検証するために、2012年7月10日に観測された活動領域 NOAA11520 の様子を、SDO 衛星の Helioseismic and Magnetic Imager(HMI) の観測の様子と詳細に比較しました。その結果、SMART/TEM はほぼ設計値を満たす 3×10^{-4} という偏光測定精度を 20 秒の観測で実現出来ていることが確認されました。なお、これは、同じ観測時間で比較した場合は、SDO/HMI をも上回るものになっています。TEM(T4) を定常観測に加えることで、太陽フレア発生における磁気エネルギー蓄積・開放過程の、総合的な観測研究を推進していきます。

Reference: Nagata, S. et al. 2014, PASJ, 66, 45.

(永田伸一 記)

The Relationship between Extreme Ultraviolet Non-thermal Line Broadening and High-energy Particles during Solar Flares

太陽フレアにおいて数 MeV もの非熱的電子が電波やガンマ線観測から確認されているが、定常的に存在する熱電子がどのようにしてこれほどまで高エネルギーに加速されるかは未だ解決されていない。また同時に、フレア全体のエネルギーに対しどれほどのエネルギーが非熱的粒子の生成に寄与するかは議論の的となっている。

ようこう衛星ブラッグ結晶分光器の軟 X 線の分光観測により、インパルシブなフレアと長寿命なフレアの違いはループトップ乱流がプリフレア相で発生していると考えられる結果が得られた (Ranns et al. 2001)。両者はまた電波観測から、非熱的電子のピッチ角分布が異なることが議論されている。(Kawate et al. 2011)

本研究では、野辺山電波ヘリオグラフとひので衛星搭載極端紫外線撮像分光装置 (EUV Imaging Spectrometer) で同時観測されたフレアデータを用いて、EUV で観測される高温プラズマの輝線幅がインパルシブ相に対してどこで変化するかを、2012 年以前に 2 つの装置で同時観測された全てのフレアに対し統計的に調査した。その結果、インパルシブなフレアではフットポイントで EUV 輝線幅の増加が起こり、電波源はループトップに発生した。一方比較的長寿命なフレアではループトップで EUV 輝線幅の増加が起こり、電波源はフットポイントに発生した。これは、インパルシブなフレアではループトップに乱流や波がなく、EUV 輝線幅の増加は彩層蒸発に伴う乱流であり、非熱的電子のピッチ角が大きいことで電子は主にループトップにトラップされていることにより、電波源がループトップとなる。対して長寿命フレアではループトップに EUV 輝線幅の増加に示される乱流や波動が存在し、ループトップで電子のピッチ角が擾乱されるため、磁場の強いフットポイントで電波源が観測されると考えられる。

この結果から、インパルシブなフレアと長寿命フレアを決定するものがループトップ上空に発生する乱流であり、両者は電子の加速効率が異なる可能性があることを示唆する。

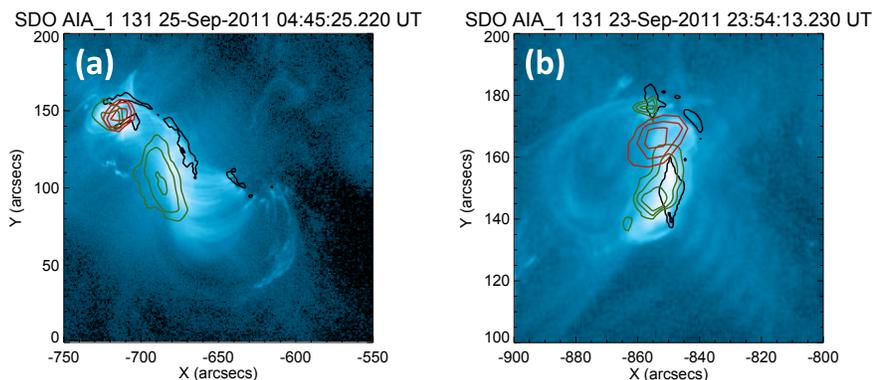


図: SDO/AIA131 に対し、AIA1700 で示されるフットポイント (黒)、電波 (赤)、EUV 輝線幅 (緑) を同時にプロットした図。(a) 長寿命フレア (b) インパルシブなフレア

Reference:

Kawate & Imada ApJ 775,122 (2013)

(川手朋子 記)

太陽フレアにおけるプラズモイド (フラックスロープ) 噴出の役割

磁気リコネクションは、プラズマ中で磁力線のつなぎ替わりにより、磁場のエネルギーが熱・運動エネルギーに効率的に変換される物理現象である。磁気リコネクションは太陽に限らず、宇宙のさまざまな場所・スケールにおけるエネルギー解放や構造形成、粒子加速などで重要な役割を果たしていると考えられている。その基礎物理過程の理解は、太陽物理学だけでなく、広くプラズマ物理学一般の重要課題である。

磁気リコネクションの未解決問題として、リコネクションの速さ (リコネクションレート) を決める機構がある。これを説明するモデルとして、プラズモイド (プラズマのかたまり) が噴出する際に、電流シートへのインフローを誘起し、速いリコネクションを引き起こすとする plasmoid-induced reconnection model が提案されている (Shibata & Tanuma 2001)。筆者らは既に太陽フレアの2次元磁気流体 (MHD) モデルを用いてこのモデルを検証している (Nishida et al. 2008)。今回はこの2次元モデルを3次元に拡張して、太陽フレアの数値シミュレーションを行い、より現実的な状況でこのモデルの検証を試みた。

数値シミュレーションの結果、プラズモイドの速度とリコネクションレートの間には相関が見られる (つまり plasmoid-induced reconnection model を支持する) ことと、電流シート中で secondary tearing により微小なプラズモイドが多数生成されることを示した。

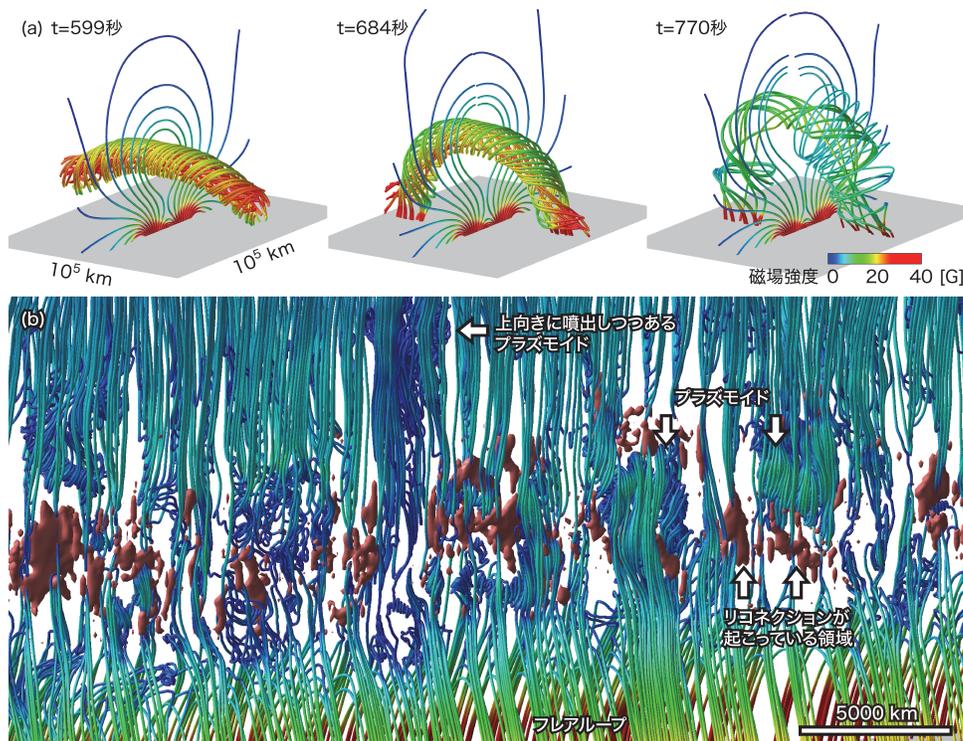


図: (a) シミュレーション結果の例。磁力線の時間発展を示す。フラックスロープが曲がりながら上昇していき、その下に電流シートが形成され、そこで磁気リコネクションが起こる。(b) 電流シート付近の拡大図。多数の微小なプラズモイドが形成される。

Reference: Nishida, K., Nishizuka, N., Shibata, K., ApJL, 775, L39 (2013)

(西田圭佑 記)

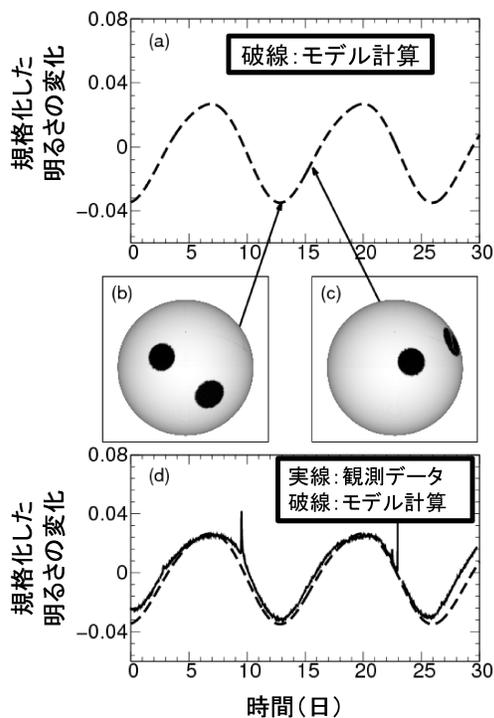
スーパーフレア星の明るさの変動と巨大黒点

太陽フレアは、黒点周辺の磁気エネルギーが突発的に解放される爆発現象である。太陽以外の恒星でも、フレア現象は多数観測されており、なかでも原始星や近接連星は、自転が速く、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フレア (スーパーフレア) を頻繁に起こす。一方、太陽は年をとった星であり、自転も遅いため、そのようなフレアは起きないと考えられてきた。我々は、系外惑星探査を主目的として打ち上げられた Kepler 宇宙望遠鏡の測光データの解析により、太陽型星 (G 型主系列星) におけるスーパーフレア (最大級の太陽フレアの $10 \sim 10^4$ 倍、 $10^{33} \sim 10^{36}$ erg のエネルギーを放出) を多数発見した (Maehara et al. 2012, Nature, 485, 478, & Shibayama et al. 2013, ApJS, 209, 5)。多くのスーパーフレア星では、数日から数十日程度の周期の準周期的な明るさの変動が見られた。その振幅は、典型的には数%程度であり、黒点の影響による太陽の明るさの変動の振幅と比べてはるかに大きい。本研究では、この変動は、星表面に大きな黒点が存在し、星の自転に伴って黒点の見え方が変化する事で生じているのだと考え、検討を行った。

まず、明るさの変動の形状の違う複数の星について、黒点による明るさの変動のモデル計算を行った。黒点の緯度や個数、視線方向に対する自転軸の傾斜角の影響を検討する事で、光度曲線の形状がおおむね再現されることを確認した。

続いて、明るさの変動周期が自転周期に対応すると仮定して、変動周期とフレアのエネルギーやフレアの頻度との相関を調べた。フレアの頻度は、周期の短い星ほど高いことが分かった。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、フレアを頻発するというを示唆していると言える。その一方で、フレアのエネルギーの最大値は周期には依存せず、太陽のように遅い自転周期 (周期 10 日以上) の星でも 10^{35} erg を超える巨大フレアが見られた。

最後に、明るさの変動の振幅から黒点サイズを推定し、それをを用いて黒点の磁場のエネルギーを概算した。そして、フレアのエネルギーと比較し、太陽で知られている関係と同様に、黒点の磁場のエネルギーでフレアのエネルギーを説明する事が出来るか検討した。その結果、自転軸の傾斜角の影響により、黒点サイズを小さく見積もってしまう場合がある事を考慮に入れば、黒点の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可能だと確認された。



明るさの変動のモデル計算例

Reference: Notsu, Y., Shibayama, T., Maehara, H., et al., 2013, ApJ, 771, 127

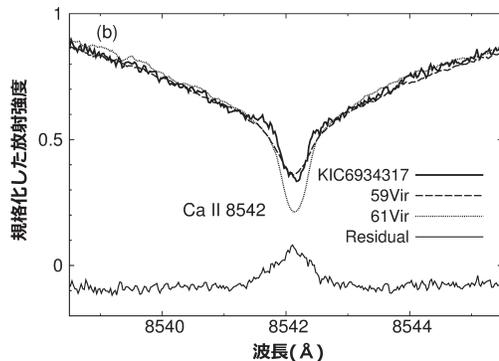
(野津湧太 記)

スーパーフレア星 KIC6934317 のすばる高分散分光観測

「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、私達は太陽型のスーパーフレア星の研究を行っている。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から数十日周期の準周期的な明るさの変動は、巨大黒点を持つ星が自転しているために起きると解釈でき、その様な巨大黒点の持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出来る事などが分かってきた。しかし、ここまでの我々の研究はあくまでケプラー宇宙望遠鏡による測光観測データのみに基づいたものである。大黒点の存在や自転速度を確かめたり、太陽との類似性を議論するべくスーパーフレア星の詳細なパラメータを調べたりするには、高分散分光観測を行う事が欠かせない。

そこで私達は2011年8月3日(ハワイ時間)、初めての太陽型のスーパーフレア星の高分散分光観測として、スーパーフレア星 KIC6934317 をすばる望遠鏡高分散分光器(HDS)を用いて観測した。本研究は、その解析結果をまとめたものである。なお、観測した波長範囲は6100~8820Åで、波長方向の分解能 $R \sim \lambda / \Delta\lambda$ は100000程度である。

解析の結果、まず得られたスペクトル中に見られる多数の光球由来の鉄の吸収線の分析から、この星の表面温度、表面重力、金属量などのパラメータが太陽とよく似ている事を示した。また、吸収線の広がりから射影自転速度 ($v \sin i$) を求めた。その値を、ケプラーで観測された KIC6934317 の明るさ変動を自転によるものと仮定し算出した自転速度と比較する事で、この星の自転速度が太陽と比べて大きい事と、軌道傾斜角が小さいと考えられる事を示した。そして1階電離カルシウム (Ca II) の近赤外の三重線 (8498, 8542, 8662Å, 図参照) やH γ 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事を示した。この事から、KIC6934317 の表面には大黒点が存在する事が示唆される。



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 8542Å の吸収線周りのスペクトルを示している。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分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 として示している。

Reference: Notsu, S., Honda, S., Notsu, Y., et al., 2013, PASJ, 65, 112

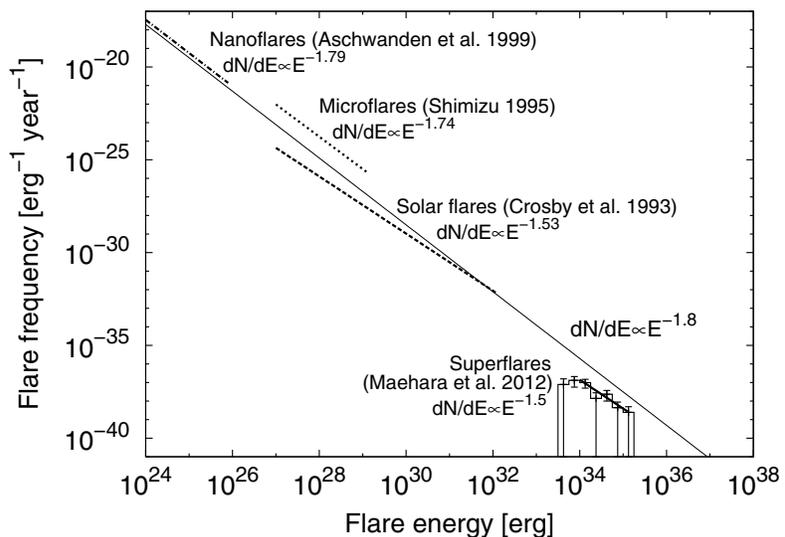
(野津翔太 記)

Can Superflares Occur on Our Sun?

フレアは、黒点周辺の磁気エネルギーが、突発的に解放される現象である。これまで観測された、最大の太陽フレアのエネルギーは 10^{32} erg 程度であり、さらに大きなエネルギーのフレア (スーパーフレア) が、自転速度も遅い現在の太陽で起きるのかという問題は、これまでまったくの謎であった。2012 年、附属天文台を中心とするグループでは、ケプラー宇宙望遠鏡のデータを用いた探査により、太陽型星 (G 型主系列星) においてスーパーフレアを多数発見した (Maehara et al. 2012, Nature, 485, 478)。多数のイベントを発見した事で、スーパーフレアについて統計的な議論をする事が可能となった。スーパーフレアの発生頻度分布は、太陽フレアの発生頻度分布と極めてよく似たベキ分布をしており、 10^{34} erg のフレアが 800 年に 1 回程度、 10^{35} erg のフレアは 5000 年に 1 回程度の発生頻度であることが示された (下図参照)。

本研究では、現状の太陽ダイナモ理論 (太陽での磁場生成・増幅を説明する、現在有力な理論) に基づいた、オーダー計算を行うことで、 $10^{33} \sim 10^{35}$ erg (最大級の太陽フレアの 10~1000 倍) の大きさのスーパーフレアが現在の太陽で起きうるか検討した。その結果、典型的なダイナモ理論で考えられているように、磁束が太陽内部の対流層の底で差動回転の効果によって生成されていると仮定すれば、現在の太陽においても、わずか 1 太陽活動周期 (~11 年) で、全磁束が 2×10^{23} Mx の巨大な黒点を生成する事ができると分かった。この磁束は、 10^{34} erg のエネルギー (最大級の太陽フレアの 100 倍) のスーパーフレアを起こすのに十分である。しかし、さらに大きな 10^{35} erg のフレアを起こすためには、 10^{24} Mx の磁束を生成する必要がある、それには 40 年程度かかる。

またこれまで、スーパーフレアの発生要因を考える際に、中心星のごく近傍を公転するホットジュピターという巨大惑星との磁気的な相互作用が必要だという説がしばしば主張されてきた。本研究は、ホットジュピターとの相互作用のみでは、スーパーフレアを起こすのに十分な磁場のエネルギーを生成する事が出来ないことを示した。これは、Maehara et al. (2012) の発見したスーパーフレア星において、ホットジュピターが 1 つも発見されていないことと矛盾しない。



フレアの発生頻度 vs. エネルギー。縦軸はフレアの発生頻度、横軸はフレアのエネルギー (erg)。スーパーフレアの頻度分布は、太陽でのフレアと同様のベキ分布を示す。

本研究の結果として、現在の太陽でも、800 年に 1 回の頻度で 10^{34} erg のエネルギーのスーパーフレアが起きる可能性があること示された。

Reference: Shibata, K., Isobe, H., Hillier, A., et al., 2013, PASJ, 65, 49

(野津湧太 記)

野辺山太陽電波ヘリオグラフを用いたジャイロレゾナンス放射の統計的解析 (修士論文)

ジャイロレゾナンス放射は、電子が黒点の磁力線の周囲をローレンツ力によって旋回運動する際に、円偏波した電波が放射される機構であり、その強度は黒点の磁場強度、観測周波数、視線方向となす角等に依存する。すなわち、ある観測周波数でジャイロレゾナンス放射が観測されれば、その近辺に対応する磁場強度を持った活動領域の存在を推測することができる。ジャイロレゾナンス放射に関する研究は、Kakinuma and Swarup (1962), Zhelenyakov (1962), White et al. 1997, White (2004) などで、理論的な放射機構が研究されている。しかし、実際の観測に基づく統計的な解析はあまり行われていない (Vourlidis et al. 2005)。本研究では、ジャイロレゾナンス放射について、実際の観測データを用いた統計的な解析を行うため、国立天文台野辺山太陽電波観測所の電波ヘリオグラフ (Nobeyama Radioheliograph, NoRH) による観測データを用いて、観測開始以降 (1992/07/01-) の活動領域についてのデータベースを作成した。また、このデータベースを用いて、ジャイロレゾナンス放射の発生に関して、発生回数の経年変化や、発生位置と放射強度についての関係、磁場強度との関係について調査した。その結果、(i) サイクル 23 の後半でジャイロレゾナンス放射の発生の割合が増加している (ii) ジャイロレゾナンス放射と磁場強度の間に正の相関が存在している (iii) サイクル 23 の後半でジャイロレゾナンス放射の放射強度が増加しているなどの結果が得られた。また、これらの結果から、サイクル 23 の後半では磁場強度の強い黒点の割合が増加していることが予想される。これは、サイクル 23 の後半で黒点磁場強度が減少しているという Livingston et al. 2012 の結果とは異なる結果となった。

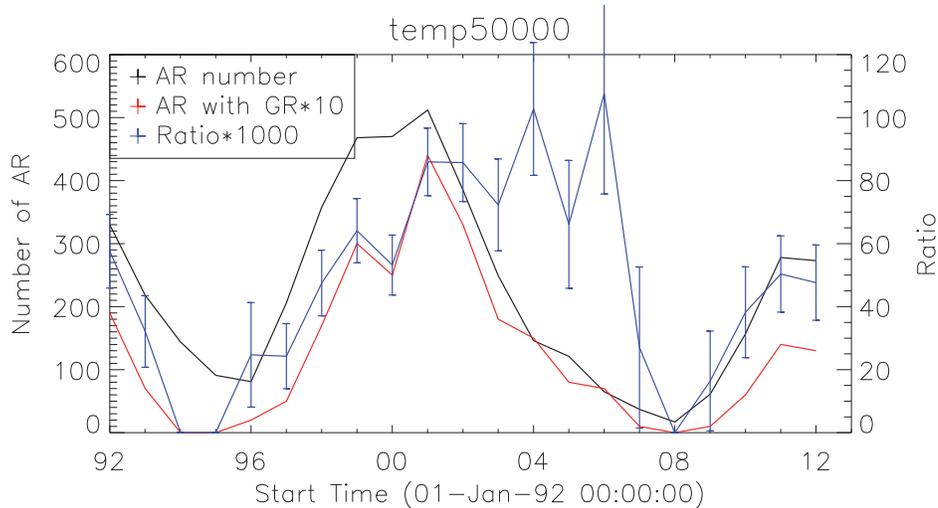


図:ジャイロレゾナンス放射の経年変化図。黒線は活動領域数 (ARs)、赤線はジャイロレゾナンス放射を起こした活動領域数 (GRs)×10、青線は GRs/ARs×1000 を表す

(田中 悠基 記)

Observational Study on Coronal Shock Wave associated with X-class Flare (修士論文)

太陽フレアにおいて一気に解放される磁気エネルギーの一部は磁気流体波動・衝撃波の形で惑星間空間を伝播する。このような惑星間空間の衝撃波面は、地球周辺の宇宙空間で観測される高エネルギー粒子の主要な加速源であると考えられている。そのため、太陽フレアに伴う宇宙空間放射線の増加の発生メカニズムを解明するには、衝撃波の形成・伝搬の物理を理解することが必要である。

太陽コロナは、衝撃波の形成・伝搬の過程を撮像観測から迫れる唯一の対象として重要である。近年の高時間・空間分解能極端紫外線観測は、太陽コロナでの衝撃波形成、伝搬の詳細な時間発展を明らかにして来た。一方で、太陽コロナは非常に希薄な大気であるため、磁場やプラズマ密度といった基本的な物理量を直接観測出来ない。そのため、コロナでの衝撃波物理量は直接観測から求めることが困難であるという問題があった。

本研究では、巨大フレア (X5.4 クラス) に伴いコロナ中を伝搬した衝撃波によって、大振幅のプロミネンス振動が励起される過程に着目して解析を行った。コロナ中を伝搬した衝撃波がプロミネンスに透過する現象として大振幅プロミネンス振動の励起過程をモデル化し、プロミネンスの観測からコロナ中の衝撃波物理量を診断する方法を提案した。弱い衝撃波の場合、解析的に求まる線形波の透過率でよく近似出来ることを数値計算を用いて示した。本観測に適用した結果、実際に弱い衝撃波であることを確かめられた。本研究では、衝撃波とプロミネンスの相互作用を用いることで、定量的に議論することが困難であったコロナ中の衝撃波物理量に迫る可能性を初めて議論した。

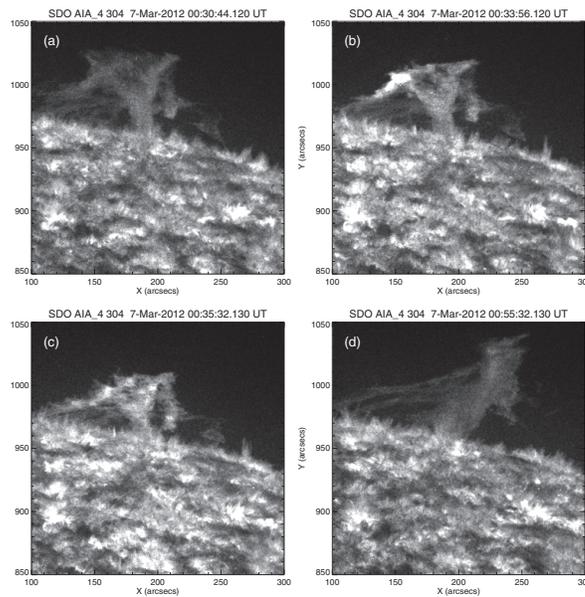


図: 衝撃波の入射によって励起された大振幅プロミネンス振動 (a) 衝撃波入射前のプロミネンス (b) 衝撃波が入射した瞬間。プロミネンスの増光がみられる (c) 衝撃波通過中のプロミネンス (d) 衝撃波通過後のプロミネンス

(高橋 卓也 記)

京都大学飛騨天文台で観測されたモートン波現象に付随するフィラメント噴出の統計的解析 (修士論文)

太陽フレアに伴い発生するコロナ衝撃波により、太陽彩層観測ではしばしばモートン波が観測される。モートン波は典型的に約 1000 km s^{-1} の速度で伝播し、狭い開き角を持った弧状の波面を示すことが知られている。また、モートン波の起源に関する研究は過去に数多く行われ、モートン波の生まれる機構としていくつかの説が提唱されているが、未だにどの機構がモートン波を生じているのかはわかっていない。

そこで我々は、京都大学飛騨天文台フレア監視望遠鏡 (FMT) の $H\alpha$ 線データを用いて、モートン波を伴うフレアとモートン波を伴わないフレアそれぞれについてそのフィラメント噴出現象の様子を統計的に調べた。 $H\alpha$ 線の多波長データを用いクラウドモデルを適応することで、フィラメント噴出の3次元速度場を求め、フィラメント噴出の方向とモートン波の関係について調査した。また、モートン波を伴うフレアと伴わないフレアのフィラメント噴出の仰ぎ角を比較することによって、フィラメント噴出によってモートン波が生じているという一つの説について正しいかどうかを確認した。

その結果、モートン波を伴うイベントがより太陽表面に沿って噴出しているという結果を得た。

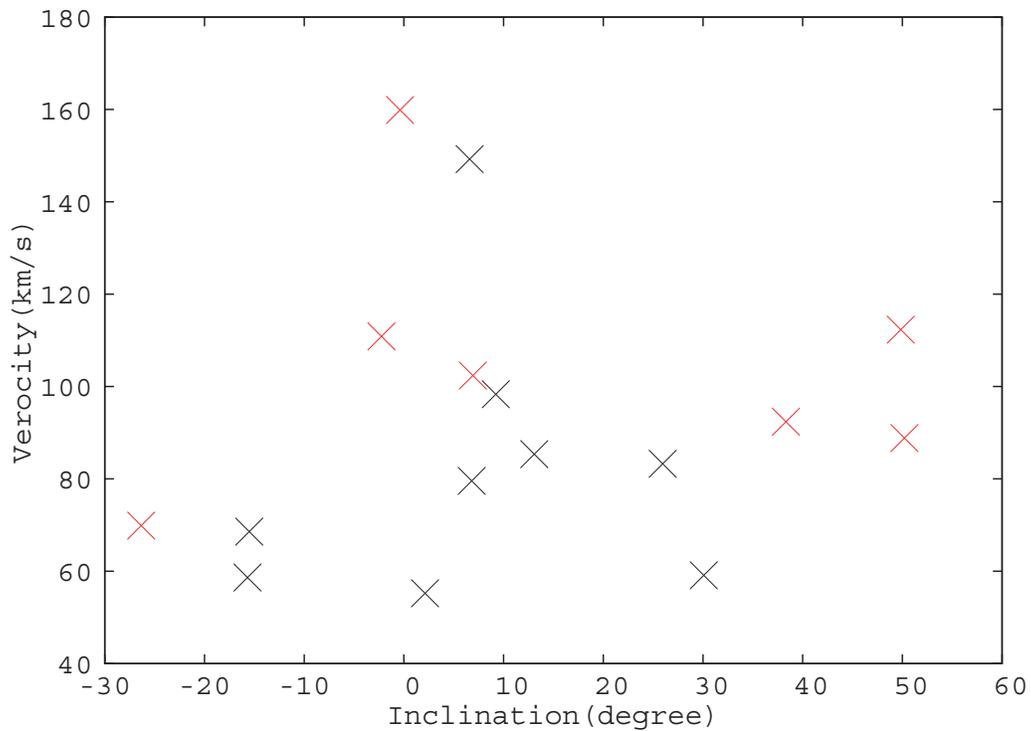


図: フィラメント噴出の仰ぎ角と速度の関係。黒い点はモートン波を付随するイベント、赤い点はモートン波を付随しないイベントについて記したものの。

(山口 雅史 記)