

---

太陽・恒星 アブストラクト集  
2022年度 第52回 天文・天体物理若手夏の学校

---

---

青木和光 (国立天文台 准教授)

## 高分散分光で得られる恒星の化学組成

恒星大気の化学組成の測定は、恒星の大気や内部構造の進化の理解に不可欠であるとともに、天の川銀河や周辺の銀河の様々な恒星種族を調べることで銀河の形成・進化の解明にも有用な情報をもたらす。また、宇宙における元素合成・物質進化の解明につながることから、ビッグバンや初代星の形成、連星中性子星合体、惑星形成環境との関連など、宇宙物理学のさまざまな課題に波及する。恒星の化学組成の測定のなかでも、最も精度が期待でき、多数の研究が積み重ねられている主系列星や赤色巨星の高分散スペクトル解析の基礎について説明し、応用例を紹介する。

---

鄭祥子 (ISAS/JAXA 招聘研究員)

## Solar-C (EUVST) 時代の太陽観測研究

私たちの地球や太陽系は、太陽が生み出す高温プラズマの中に存在し、太陽から来る太陽風や電磁波の影響を絶えず受けている。Solar-C (EUVST: EUV High-throughput Spectroscopic Telescope) は、宇宙に如何に高温プラズマが作られ、太陽が如何にして地球や惑星に影響を及ぼしているか、という命題を探求する太陽観測衛星ミッションである。上記の命題に対して、これまでの太陽観測は、太陽大気へのエネルギー入力と最終的なエネルギー解放(出力)の振る舞いを明らかにしてきたが、その中で起きる基礎物理過程はブラックボックスのままである。この解明には、極端紫外線(EUV)域の分光観測から、エネルギー・質量の輸送やエネルギー解放の現場を捉え、何が起こっているかを診断することが有効である。Solar-C (EUVST) は、太陽大気の彩層(2万度)から太陽コロナ(100-2000万度)にわたる温度領域を隙間なく観測し、かつ、従来から約1桁以上向上した性能(空間・時間分解能)を持つことで、プラズマのダイナミクスに追従できる能力を、世界で初めて実現する。打ち上げは2020年代中頃を目指しており、太陽極大期に飛翔させることで、太陽フレアなど宇宙天気に関わる物理的な理解を進める。また、太陽表面の高解像度観測と、内部太陽圏の探査観測を結びつけることが可能である。本講演では、Solar-C (EUVST) が切り拓くサイエンスなどの概要と、Solar-C (EUVST) を取り巻く状況について紹介する。さらに、具体的な活動内容がイメージできるよう、私がどのようにプロジェクトに携わっているかについても紹介したい。

## アクシオンを考慮した重力崩壊型超新星シミュレーション

高田 剣 (福岡大学 M1)

ダークマターの候補である未発見の素粒子アクシオン (Axion-Like Particles; ALPs) の発見は、宇宙天体物理学に多大な影響を与えると考えられている。ALPs の効果が検討されている天体現象の一つとして、重力崩壊型超新星がある。重力崩壊型超新星とは、大質量星が進化の最終段階に引き起こす爆発現象であるが、詳細な物理過程を考慮した空間 1 次元シミュレーションで超新星爆発を再現することに成功した例は、非常に軽い親星など特別な場合に限られる。

最近の論文 [1] では、超新星内で ALPs が生成された場合の効果が調査されている。その結果、質量 100 MeV 程度の ALPs が超新星内部で生成され、衝撃波の復活を引き起こす可能性があることが明らかになった。一方、[1] では親星の質量を 20 太陽質量に固定して ALPs の効果が調べられた。しかし、中性子星の質量分布のようなより多様な観測可能量を予言するためには、より多くの親星モデルに対して同様の調査を実施する必要がある。

そこで本研究では、[1] で開発された ALPs を考慮した超新星爆発コードを使用し、1 次元数値シミュレーションを実行した。特に親星依存性を調査するため、複数の親星モデルに対して計算を行った。ALPs が超新星爆発内部の流体運動やその後に残される中性子星の質量にどのように影響するのかを解析し、親星質量への依存性を議論する。

1. Mori et al. 2022, PRD, 105, 063009

## 数値計算を用いた太陽プロミネンスの質量循環メカニズムについての研究

吉久 健朗 (京都大学 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 M1)

太陽プロミネンスは、外層大気コロナに浮かぶ比較的低温高密度なプラズマの塊である。長年にわたり観測的にも理論的にもプロミネンスの研究は行われてきたが、その形成や内部の運動、噴出現象等のメカニズムについて完全な理解は得られていない。そのなかで、プロミネンスの質量循環問題というものがある。これは、形成された後、重力によりすぐ落下して消失するはずのプロミネンスがなぜ長時間観測されるかという問題である。

近年の観測装置の性能上昇によって、太陽プロミネンスの質量循環について詳細な観測的研究がなされてきた。プロミネンスの総質量と質量流出率の関係性 [1] や内部での乱流、上昇・下降流 [2] の定量的な解析したものがその代表例である。これらの観測の再現を試みた数値計算による研究も行われている。例えば、Evaporation-Condensation モデルを用いた計算ではその質量流出に伴う下降流の縦筋模様が再現された [3]。また、Reconnection-Condensation モデルを用いた計算では質量変化率の関係性を確認し、内部構造の再現も行われている [4]。これらのモデルによる結果は観測と整合的である。一方、前者はプラズマを供給するために観測とは一致しない長時間の加熱が加えられていたり、後者は計算領域がコロナに限られているなど、未だ ad hoc なモデルといえる。

そこで、本研究では、プロミネンスの質量循環メカニズムを解明するために、self-consistent な加熱を考慮する 3 次元数値計算を行う。そのために、まずは閉じたループにプロミネンスが存在す

る場合の加熱機構を調査する 1 次元磁気流体計算を行う予定だ。本講演では、上記のプロミネンスの質量循環に関する観測及び理論研究のレビューとそれらの具体的な課題、また今後の研究方針について紹介する。

1. Liu et al., ApJL, 745, L21, 2012
2. Berger et al., ApJ, 676, L89, 2008
3. Xia & Keppens, ApJ, 823, 22, 2016
4. Kaneko & Yokoyama, ApJ, 869, 136, 2018

## 明るい金属欠乏星の狭帯域測光探査および中分散分光追観測 岡田 寛子 (甲南大学 M2)

金属欠乏星は宇宙初期に誕生した太陽と比べて重元素の含有量が少ない星である。星の化学組成には形成当時の宇宙の化学情報が記録されていると考えられ、金属欠乏星の化学組成を調べることは宇宙初期の化学進化を理解する上で重要である。しかし従来の探査観測で発見された金属欠乏星は暗く、多数の元素を高い精度で測定することは困難であった。そこで我々は、これまで探査が不十分であり元素の測定も容易な明るい金属欠乏星に注目し、木曾シュミット望遠鏡の広視野 CMOS カメラ (Tomo-e Gozen) を用いて北半球から観測可能な空全域を網羅する探査観測を計画した。Tomo-e Gozen に星の金属量に感度のある狭帯域フィルタを搭載することで、観測領域に含まれる全天体の情報を得ることができる。実際に SkyMapper survey[1] や Pristine survey[2] は、狭帯域フィルタを用いた探査観測で成功を収めている [3]。

本研究は探査手法を確立するため、Tomo-e Gozen の試験観測で選択した金属欠乏星候補について、なゆた望遠鏡/可視光中分散分光器 (MALLS) を用いて追観測を行った。さらに金属量既知の天体についても観測を行い、MALLS を用いた中分散分光によって金属量を見積もることができるのかを検証した。天体の大気パラメータである有効温度および表面重力は測光値と Gaia で得られている天体までの距離から推計し、それらの値を用いた理論スペクトルと MALLS で取得した観測スペクトルとの比較を行うことで、金属量既知の天体の金属量を再現できることを確認した。また、同様の手法を用いて、金属欠乏星候補の金属量  $[Fe/H]$  および  $\alpha$  元素と鉄の組成比  $[\alpha/Fe]$  を見積もり、 $-2.0 < [Fe/H] < -1.75$  の低金属量星を新たに 4 天体同定した。本講演では、探査観測および追観測の結果を報告し、今後の展望についても述べる。

1. Da Costa, G.S. et al. 2019, MNRAS, 489, 5900
2. Starkenburg, E. et al. 2017, MNRAS, 471, 2587
3. Keller, S.C. et al. 2014, Nature, 506, A111

## 太陽・恒星における低温プラズマ噴出の質量とフレアエネルギーについての普遍的な相関関係とスケール則

古谷 侑士 (京都大学 博士課程 3 年)

We often find spectral signatures of chromospheric cold plasma ejections accompanied by flares in various spatial scales in the solar and stellar atmospheres. However, no physical quantities such as mass and energy have been estimated for flare energies covering over ten orders of magnitude until now. This study analyzed the spectra of cold plasma ejections associated with small-scale flares and solar flares (energy  $10^{25} - 10^{29}$  erg) by performing  $H\alpha$  imaging spectroscopy with the *Solar Dynamics Doppler Imager* on the *Solar Magnetic Activity Research Telescope* (SMART/SDDI) to supply smaller energy samples. We determined the ejected mass by cloud model fitting to the  $H\alpha$  spectrum. We estimated flare energy by differential emission measure analysis using *Atmospheric Imaging Assembly* onboard *Solar Dynamics Observatory* (SDO/AIA) for small-scale flares and by estimating the bolometric energy for large-scale flares. By comparing our analyzed results on the Sun with observations interpreted as stellar filament eruptions, we found a  $M \propto E_{\text{tot}}^{2/3}$  relationship between the ejection mass  $M$  and the total flare energy  $E_{\text{tot}}$ . In addition, we constructed a theoretical scaling law for ejection mass and the total flare energy. We showed that the scaling law could explain the observations by taking into account the difference in the coronal magnetic field strength (from 5 G to 50 G). These results suggest that cold plasma ejections with flares taking place on the Sun and stars in a wide range of the energy scale are caused by a common mechanism.

## 3 つの彩層ラインにおける太陽フレアに伴う現象の Sun-as-a-star 解析

夏目 純也 (京都大学 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 M1)

近年、太陽に似た恒星などでも、太陽フレアのような突発的な増光（恒星フレア）などの活動現象が観測されている。そして、これらの現象を太陽物理学の知見から理解するために、太陽の空間分解されたデータを取って空間積分する「Sun-as-a-star 解析」が行われている。Namekata ら [1] は、太陽型星スーパーフレア（最大級太陽フレアの 10 倍以上の規模のフレア）に伴う  $H\alpha$  線の吸収成分と、太陽プラズマ噴出現象の Sun-as-a-star 解析の比較から、このスーパーフレアもプラズマ噴出を伴っていたことを明らかにした。この先行研究では  $H\alpha$  線のみを用いたが、他の彩層ラインも含む多波長同時観測により、各ラインの形成高度や温度、密度への感度の違いから、より多くの物理情報を得られる可能性がある。これにより、空間分解できない恒星活動現象の理解が一層深まると期待される。

そこで本研究では、恒星表面の活動現象の理解を助けることを目的として、太陽面での現象について複数の彩層ラインの振る舞いを比較解析した。我々は、2014 年 11 月 11 日に活動領域 NOAA12205 で発生したフレアと付随する噴出現象についての、京都大学飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡で観測された [2]、 $H\alpha$  (6563 Å)、Ca II K (3934 Å)、Ca II IR (8542 Å) の 3 つの彩層ラインの分光観測データを、Sun-as-a-star 解析した。フレアに伴い、スペクトルにも 3 ラインすべてで増

光が確認された。しかし、その時間変化には違いがあり、増光を示す波長の幅が Ca II K では他の 2 ラインに比べ急速に減衰した。プラズマの噴出・落下については、青方・赤方偏移を持つ吸収成分が H $\alpha$  と Ca II K には確認されたが、Ca II IR には確認されなかった。本講演ではこれらの結果の物理的解釈と、恒星表面の活動現象の理解にどう活用できるかについて議論を行う。

1. Namekata, K., Maehara, H., Honda, S., et al. Nature Astronomy, 6, 241, 2022
2. Sakaue, T., Tei, A., Asai, A., et al. PASJ, 70, 99, 2018

## 太陽光球の極域磁場強度と地球近傍オープンフラックスの関係 吉田 南 (東京大学/宇宙科学研究所 M2)

太陽の磁場構造は太陽活動周期によって変化する。磁気活動の小さい極小期では双極子、極大期では四重極子以上の複雑な構造となる。太陽光球からコロナへと延びる磁場の一部は開いており、惑星間空間に向かって延びている (オープンフラックス)。そのため、太陽活動が太陽圏や惑星間空間へ与える影響を見積もるために、オープンフラックスの振る舞いを理解することが重要となる。地球近傍のオープンフラックスは、発生源である太陽光球磁場のマップをコロナ磁場モデルに入力し、外挿をすることで推定することができる。しかし推定値は、その場で観測されている値に対して 25 ~ 50% 程度に過小評価されていることが問題となっている (オープンフラックス問題; [1], [2])。この問題の原因の一つとして、特に極小期ではオープンフラックスの根源が集中している光球の極域磁場強度が、衛星での観測が難しいために、過小評価されている可能性が考えられる。

そこで本研究では、推定値と実測値の乖離の原因を探ることを目的に、コロナ磁場モデルに入力する光球の極域磁場と、オープンフラックス推定値との関係を調査した。光球極域磁場が、実際の観測結果より強いと仮定をして、極域に磁場を加えたマップを用いてオープンフラックス推定値を計算した。結果として、光球の極域磁場強度を人為的に 2 倍しても、オープンフラックス推定値は測定値に対して、極大期ではほとんど改善せず、極小期では 10 ~ 20% 程度の改善であった。これより、光球磁場の観測が不十分であることは、オープンフラックス問題に対して、極大期では原因とはいえ、極小期でも影響は小さく、主要因とはならないと考えられる。

1. J. A. Linker et al., APJ, 848, 70, 2017
2. S. Wallace et al., Solar Physics, 294, 19, 2019

## 可視分光装置 MALLS を用いた恒星の重元素組成調査 古塚 来未 (兵庫県立大学 理学研究科 光学赤外線天文学研究室 M1)

宇宙の金属量は時間とともに増加してきたと考えられ、恒星大気にはその恒星が生まれた時の宇宙の化学組成が保持される。そのため、様々な金属量の恒星で元素組成を調べれば、元素組成が時間とともにどのように変化してきたかを知ることができる。鉄より重い元素は、恒星内部での熱核融合反応では作られず、中性子捕獲過程で作られる。中性子捕獲元素の約半数を作る r-過程の起源は中性子星合体とされているが不明なことも多い。特に、r-過程のみで作られるトリウムは検出され

た恒星の約 30%でその量が過剰な Actinide Boost star とされており、既存の核合成モデルでは元素存在量パターンを説明することができない [1]。また、トリウムの観測例は少ないため、このような元素の起源を探るには、より広い金属量の範囲でトリウムや他の r-過程元素を観測し、傾向を調べる必要がある。トリウムの観測が少ない理由の 1 つは、非常に弱い吸収線が多いため、比較的検出できる 4019 Å の吸収線が主に使われていることである。この吸収線は、鉄や炭素などの吸収線と混ざり、やや金属量の多い恒星では検出が難しくなる。一方 5989 Å の吸収線は弱い、他の元素の吸収線が周りに少ないとの報告もある [2]。

本研究では、西はりま天文台の 2 m なゆた望遠鏡に搭載された可視分光装置 MALLS のエッセルモード (波長分解能  $\approx 35000$ , 波長域 4960~6800 Å) を用いて、5989 Å の吸収線からこれまでにほとんどトリウムが観測されていない  $[\text{Fe}/\text{H}] \gtrsim -1.5$  の星でトリウム組成を得ることを目的とし、観測を行った。本講演では、得られた観測結果から  $[\text{Fe}/\text{H}] \gtrsim -1.5$  での r-過程元素のふるまいについて議論する。

1. E.Holmbeck et al., ApJ, 859, L24, 2018
2. W.Aoki et al., PASJ, Vol59, L15, 2007

## DST を用いた多波長分光観測によるプロミネンスの物理量診断と加熱メカニズムの考察

橋本 裕希 (京都大学 M2)

プロミネンスとは太陽の外層大気である高温なコロナに浮かぶ低温高密度なプラズマであり、磁力線により支えられて浮いている。その温度は約  $10^4$  K であり [1]、光球や彩層からの放射を散乱して光っている。しかしながら、プロミネンスのプラズマの加熱源がその太陽放射のみだとすると約  $10^4$  K のプラズマは維持されないという計算結果が得られている [2]。したがって、太陽放射以外の加熱の存在が必要とされるが、具体的にどのような加熱メカニズムが働いているのかはわかっていない。そこで本研究では、観測によりプロミネンスの輻射損失を推定することでプロミネンスに必要な加熱量を定量的に求め、加熱メカニズムについて考察を行った。

プロミネンスの輻射損失を求めるため、以下のような観測、解析を行った。まず、飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡 (DST) を用い、プロミネンスから放射される  $\text{H}\alpha$  (6563 Å)、 $\text{H}\beta$  (4861 Å)、 $\text{Ca II}$  (8542 Å) の 3 本の輝線を同時観測した。そして、それらの輝線の幅や強度を用いてプロミネンス全領域の物理量 (温度、非熱速度、密度、厚み) を推定した。温度・非熱速度は single-slab モデルによるフィッティングを行い推定し、密度・厚みの推定は non-LTE モデルによるインバージョンを行い推定した。次に、推定された物理量を用いて、プロミネンス全領域の輻射損失  $L$  を計算した。結果、 $1 \times 10^3 < L < 6 \times 10^5 \text{ erg/s/cm}^2$  となった。さらに、加熱メカニズムについての考察のため、Alfvén 波 (磁力線に沿った方向に伝わる横波) がプロミネンス内に運ぶエネルギーフラックス  $F_A$  を計算した。その結果、プロミネンスの大部分の領域で  $F_A > L$  となった。この結果は、輻射損失により失われるエネルギーは、Alfvén 波が運ぶエネルギーにより賄うというこ

を示す。したがって、Alfvén 波が加熱メカニズムとなり、約  $10^4$  K のプラズマが維持されていると示唆される。本講演では、上記の解析手法・結果について詳細に報告する。

1. Okada et al., PASJ, 72 (5), 71, 2020
2. Heinzel et al., A&A, 562, A132, 2014

## 2017年9月6日に立て続けに発生した2つの大規模フレアの3次元磁場構造について

寺岡 耕平 (東京大学/宇宙科学研究所 M1)

太陽活動の一つ、太陽フレアとは太陽大気のコロナで発生する。コロナに余分に溜まった磁気エネルギーが、数10分程度で一気にプラズマの熱・運動エネルギーや高エネルギー粒子の加速エネルギーとして解放される爆発現象である。発見から1世紀半経つが、今なおエネルギー解放の原理が解明されておらず、太陽物理学における大きな謎の一つである。さらに、フレアに伴って高エネルギー粒子が地球に飛来して通信障害・衛星の故障や、コロナ中のプラズマが大量に放出されて地球に到達して送電線の異常を引き起こすことがある。そのため、フレアを理解はフレアの発生を予測して被害に備える観点からも重要である。また、恒星・太陽でフレアが多発すると、プラズマや高エネルギー粒子が惑星大気にぶつかって大気分子・原子にエネルギーを与える。それにより、大気が宇宙空間に逃げたり加熱されたりして惑星環境を変化させ、生命が生存できる環境に影響を与える可能性がある。太陽表面の黒点が集まっていて磁場が強い領域を足元にコロナまで磁力線が伸びている。その磁力線の形状が3次元的に大きく変化して不安定な状態になることで、フレアに至ると考えられている。なので、磁力線の3次元形状を追うことがフレア理解には重要である。なお、コロナの磁力線は現時点では測定できないので、数値計算を用いて導出する。今回紹介する、2017年9月6日に立て続けに発生した2つの大規模フレアは、ほぼ同じ場所で3時間弱の間隔しか空いていない点、最初と二番目で宇宙に飛ばしたプラズマの量が大きく異なる点が珍しいために、多くの論文が執筆された。それぞれの論文では、異なる磁力線についてどうフレアに関与しているのかを考察していた。中には、二つのフレアの違いについて考察していた論文もあった。本発表では、複数の論文で論じられているフレア発生までにどのような3次元磁場構造をしていたのかを総括的に紹介する。

## 慣性重力波及びロズビー波の固有振動数に関する振動理論の改良

徳野 鷹人 (理学系研究科天文学専攻修士課程2年)

星震学は恒星表面の振動を観測して内部構造を探る学問である。21世紀に入り COROT, *Kepler* 等の宇宙望遠鏡による長期間かつ高精度の測光観測が実現した事によって、当分野は理論と観測の比較が出来るようになり飛躍的に進展した。これまで未解明の部分が多かった内部構造の診断などにおいて大きな役割を果たしている [1]。

今回我々が対象とする表面が輻射層であり自転が速い恒星に対しては、慣性重力波 (g-mode) とロズビー波 (r-mode) という2種類の振動が存在することが示されている [1]。これらの振動は

1.4-1.6 太陽質量で自転周期が太陽より速い  $\gamma$  Dor 型変光星においてそれぞれ観測されており、固有振動数 ( $P_n$ ) と隣り合った固有振動数の差 ( $\Delta P_n \equiv P_{n+1} - P_n$ ) を用いて恒星の性質を調べる研究が行われている [2]。

しかし、これらの振動に関する理論は未だ十分でない。いくつかの近似と漸近展開を用いた既存の振動理論から、これらの振動では自転とともに動く系 (co-rotating frame) において  $\Delta P$  が  $P$  に依存せず一定であるという性質が示されている [1]。一方で、これらの振動の数値計算 [3] や観測結果 [2] からは必ずしも一定でない  $\Delta P$  が観測されている。これまでの先行研究では、既存の振動理論と差が生じる原因に対して詳しい調査はされてこなかった。

当研究では、既存の振動理論が課していた近似を仮定せずに解析を行う事で、より一般的かつ正確な場合の  $\Delta P$  の表式を得る事に成功した。この  $\Delta P$  の新たな表式から、既存の振動理論との差が生じる原因について新たな解釈を得た。この結果は既存の振動理論を用いたこれまでの解析をより発展させる可能性を秘めている。

1. Aerts, C., 2021, Rev.Mod.Phys., 93, id.015001
2. Lee, U & Saio, H., 1997, ApJ, 491, 839
3. Li, G. et al., 2019, MNRAS, 487, 782
4. Saio, H. et al., 2021, MNRAS, 502, 5856

## 観測ロケット実験 FOXSI-4 による次世代太陽フレア X 線観測 清水 里香 (総研大/宇宙科学研究所 M1)

これまでさまざまな太陽フレアの観測が行われ、この爆発現象は磁気再結合により磁気エネルギーが解放されることで引き起こると考えられている。しかしその物理プロセスは完全には理解されていない。例えば、太陽フレアの時間スケールを説明する高速磁気再結合や、粒子加速などは、今後明らかにすべき課題である。これらが未解決である理由の一つとして、既存の観測では太陽フレアを構成する超高温プラズマ現象の温度・密度・速度などの物理情報を十分に空間分解し、それらの時間発展を追跡できていないことが挙げられる。

観測ロケット実験 Focusing Optics X-ray Solar Imager の 4 回目の飛翔となる FOXSI-4 では、これらを達成する観測を行う。日米共同で取り組んでいるこの実験は 2024 年春に打ち上げが予定されており、世界初となる太陽フレア X 線集光撮像分光観測を行う。磁気再結合が引き起こす磁気エネルギーの解放とその変換機構を追求するために必要な観測技法や研究手法を実証することを目的のひとつとしており、この観測により太陽フレア領域全体にわたって温度構造を精密に評価し、加速電子を探索・追跡することを目指す。

FOXSI-4 には独立した 7 つの光学系を搭載し、各種最先端技術の組み合わせによって高い空間・時間・エネルギー分解能をもつ種々の X 線集光撮像分光観測を可能にする。うち 2 つは軟 X 線観測用で、CMOS イメージセンサを用いたカメラで毎秒数百枚の連続露光を行い、光子一つひとつを計測するフォトンカウンティングを行う。

発表者は現在、この軟 X 線用高速度カメラの開発に取り組んでおり、本講演ではこれまでの FOXSI の成果と合わせて、FOXSI-4 の意義と開発について紹介する。

## 京都大学飛騨天文台 SMART/SDDI を用いた、様々な太陽活動現象に関する H $\alpha$ 線スペクトルの Sun-as-a-star 解析

大津 天斗 (京都大学理学研究科・宇宙物理学教室 M2)

太陽では太陽面爆発（フレア）やプラズマ噴出など、多様な活動現象が観測されている。一方、太陽以外の恒星でも様々な現象が発生していることが分光観測などから示唆されている [1 他]。しかし、遠方の恒星は空間分解できないため、発生した現象を特定することは難しい。そこで、太陽の空間分解された詳細なデータが恒星の研究に活用されている。

太陽のデータを空間積分し、遠方の恒星のデータと比較可能な形にする手法を「Sun-as-a-star 解析」と呼ぶ。近年、H $\alpha$  線スペクトルの Sun-as-a-star 解析により、プラズマ噴出を伴う太陽フレアと似た現象が恒星で発生していたことが明らかになった [2]。一方、太陽では面外へのプラズマ噴出やポストループなど、より様々な現象が観測されている。しかし、これらの現象に関する H $\alpha$  線スペクトルの Sun-as-a-star 解析は行われておらず、恒星活動現象を探る上で太陽の知見は未だ不十分である。

そこで、本研究では飛騨天文台 SMART/SDDI で観測された様々な太陽活動現象の H $\alpha$  線分光撮像データを用いて、Sun-as-a-star 解析を行った。その結果、解析した全イベントで増光が確認され、空間積分した H $\alpha$  線スペクトルには増光の原因ごとに異なる特徴が現れた。例えば、フレアは H $\alpha$  中心近傍の増光を、面外へのプラズマ噴出はシフトした増光を示す。本研究で得たスペクトルの特徴に基づいて、恒星観測においても増光を引き起こした現象を特定できると期待される。一方で、より細かな特徴も空間積分した H $\alpha$  線スペクトルで確認された。例えば、リム近傍のフレアでは red asymmetry が不明瞭になる傾向があることや、プラズマ噴出による吸収がフレアの増光によって弱められる場合があることなどがわかった。本講演ではこれらの結果の詳細を報告し、恒星研究への応用について議論する。

1. Maehara, H., Notsu, Y., Namekata, K., et al. PASJ, 73, 44, 2021
2. Namekata, K., Maehara, H., Honda, S., et al. Nature Astronomy, 6, 241, 2022

## RS CVn 型連星 V1355 Orions におけるスーパーフレアに伴う高速プロミネンス噴出

井上 峻 (京都大学 M1)

太陽/恒星フレアは星の表面において磁気エネルギーが突発的に解放される爆発現象である。恒星の場合は観測史上最大級の太陽フレアの 10 倍以上のエネルギーを解放するスーパーフレアが発生することが知られてきた。また、太陽フレアはプロミネンス噴出を伴うことがあり、それらはコロナ質量噴出 (CME) へと繋がることが知られている。[1] 近年、恒星フレアの分光観測においてバルマー線の青方偏移する輝線・吸収線成分が報告されている。[2], [3], [4] それらはプロミネンス

噴出によるものだと考えられているが、その青方偏移から算出された噴出物の速度が星表面での脱出速度を超過していた例は極めて少ない。

本研究では、比較的規模の大きいスーパーフレアを起こすことが知られている RS CVn 型の近接連星である V1355 Orions(K2IV+G1V, 公転周期約 3.8 日) を TESS の可視光測光観測に合わせて京都大学岡山天文台の 3.8m せいめい望遠鏡を用いて分光モニタ観測した。その結果、 $6.0 \times 10^{35}$  erg のエネルギーを解放するスーパーフレアを捉えることに成功した。このフレア中には H $\alpha$  の輝線に顕著な青方偏移が約 30 分間もの間確認され、さらにその速度が星表面での脱出速度を大幅に超過していた。このことはスーパーフレアに伴って発生したプロミネンス噴出が CME にまで発展したことを示唆している。本発表では、上記のイベントについてその詳細を報告する。

1. Shinha et al., ApJ, 880, 84, 2019
2. Honda et al., PASJ, 70, 62, 2018
3. Maehara et al., PASJ, 73, 44, 2021
4. Namekata et al., Nat. Astron., 6, 241, 2022a

## おひつじ座 UX 星で起こった巨大フレアのせいめい及び MAXI による同時観測 那波 咲良 (中央大学 M1)

2022 年 4 月 3 日、近接連星系であるおひつじ座 UX 星からの巨大フレアを全天 X 線監視装置 MAXI によって検知し、5.5 時間後から京都大学せいめい望遠鏡による追観測を 12 日間行った。MAXI は、国際宇宙ステーションに搭載され、2-20 keV の帯域で 90 分に 1 回、80-100 mCrab/orbit の感度で全天をサーベイする。超巨大な恒星フレアにおいては減衰時間が数日も及ぶため (Tsuboi et al. 2016)、近傍 (150 pc 以内) の RS CVn 型連星における巨大フレアのサーチは特にもれが少ない。我々はその強みを活かし、MAXI の検出をトリガーとして、高い集光能力を持つせいめいで可視光追観測を行い、巨大フレアの発生場所の特定や幾何に迫ろうとしている。今回のフレアは 2-20 keV 帯域において、減衰のタイムスケール (e-folding time)  $1.4 \pm 0.3$  日、放射エネルギー  $10^{38}$  erg を持っていた。せいめいでは中分散分光器を用い、フレア中の H $\alpha$  線のドップラーシフトをモニターした。その結果は、中央大学の可視光望遠鏡 SCAT で 2016~2021 年間の分光観測で得た、星の自転周期 (公転周期も同じ) 6.4 日に対応した周期的速度変動と一致した。現在は静穏時にはこの連星系では H $\alpha$  線が暗くなっているが、今回のフレアは、この頃の静穏時における H $\alpha$  線活動領域で起こったと考えて矛盾なく、その速度からその領域は主星上にあると考えられる。また、H $\alpha$  線帯域における放射エネルギーは  $10^{37}$  erg であった。このフレアで得た X 線帯域および H $\alpha$  線帯域における放射エネルギーは、太陽フレアから今回の巨大フレアまで 8 桁以上にわたって成り立つ比例関係の上に乗った。

## $\gamma$ 線天文衛星 Fermi を用いた太陽フレアの Time-of-Flight 解析 矢倉 昌也 (名古屋大学 M2)

太陽フレアが発生した際に粒子加速が発生することは広く知られているが、その詳細なメカニズムについては解明されていない。粒子加速のメカニズムを考えるうえで加速点の位置を特定することは条件の制約の観点で重要で、先行研究 (Aschwanden et al. 1996) では、CGRO/BATSE を用いた “Time-of-Flight” (ToF) 解析により、フレアループの上空に電子加速領域があることが示されている。しかしその領域の時間発展に関する研究はこれまで行われていない。

本研究では、 $\gamma$ 線天文衛星 Fermi に搭載された GBM (Gamma-ray Burst Monitor) のデータを基に ToF から粒子加速点の時間発展の観測を試みた。粒子加速点の時間変化を捉えるための有効な手段として、観測データを時間方向に分割し、1 フレア中に複数回 ToF 解析を行って各時間における状態を推定することが考えられる。そこで解析の第一段階として、2015 年 6 月 25 日に NOAA12371 で発生した M7.9 クラスのフレアに対し、Aschwanden らが行った ToF と今回我々が考案した時間方向に分割した ToF の 2 つの解析を実施した。解析の結果、本フレアのタイムプロファイルの高周波成分において、Aschwanden らの手法と我々の手法で異なる遅延時間の傾向がみられた。本講演では、このフレアループ構造を考慮して ToF 解析の結果について議論する。