

新 SiO メーザー検出が示唆する「宇宙の噴水」天体の進化急速

甘田 溪 (鹿児島大学 D2)

AGB 又は post-AGB 段階において、100km/s を超す高速な双極ジェットを出している天体が H₂O メーザー観測によって確認されており、「宇宙の噴水」天体と呼ばれている [1]。このような天体は銀河系内で 15 天体のみ確認されており、その H₂O メーザーの空間的・運動学的構造は天体によって様々である [2, 3]。また、その 15 天体の中で唯一 SiO メーザーが検出されていた W 43A では、双極ジェットの根本部分に見開き角が ~ 40° の双極アウトフローが形成されていることが確認された [4]。しかし、W 43A の SiO メーザーは現在消えてしまっており、このような天体の中心星近傍の情報はまだ少ないため、その進化状況についてはあまりわかっていない。

我々は、「宇宙の噴水」天体の一つである IRAS 16552-3050 で新たに SiO $v = 1, 2 J = 1 \rightarrow 0$ メーザーを検出した [5]。野辺山 45m 電波望遠鏡を用いて 2018 年 12 月からモニター観測を 2 週間に 1 回のペースで実施していたところ、2021 年の 3 月に突然 SiO メーザーが出現した。このことから、この新 SiO メーザーは、この天体が何かしらの進化段階に入ったことを示唆していると考えられる。また、検出したメーザーの視線速度は CO 輝線の中心速度から ~25km/s だけ青方偏移しており、これと同程度の視線速度オフセットが W 43A の SiO メーザーでも見られていた [4]。これらのことから、突然噴出した大規模高速ジェットがすでに存在していた星周物質を激しく貫通したことによってノズル構造が形成し、それと同時に、そこに存在していた SiO 分子が強く励起しメーザー放射をしたと考えられる。今年度中に High Sensitivity Array を使用するプロポーザルを提出し、SiO メーザーの位置同定をする予定である。

1. Imai, H., Proc. IAU Symp. No. 242, 279, 2007
2. Imai, H., et al., PASJ, 72, 58, 2020
3. Gómez, J. F., et al., MNRAS, 468, 2081, 2017
4. Imai, H., et al, ApJ Letters, 622, L125, 2005
5. Amada, K., et al., AJ, 163, 85, 2022

分光データを利用した高温ループにおける加熱分布・加熱機構の研究

石神 瞬 (総研大/国立天文台 D1)

コロナ加熱問題を解決するには、加熱の特徴が現れる「加熱の空間分布」情報を引き出すことが重要である。コロナでも特に明るい活動領域は、主に Warm loop(100 万 K 程度)と Hot loop(200 万 K 以上)で構成される。Hot loop は特に 200 万 K 以上の高温プラズマで構成され、温度の維持に Warm loop よりも一桁以上多くのエネルギーが必要になる (Hot loop: $\geq 10^7$ erg/cm²/s, Warm loop: 10^6 erg/cm²/s)[1][2]。このため、Hot loop の加熱分布に注目することが、コロナ加熱問題を

解く鍵である。先行研究では、加熱分布についても異なる性質を持つことが報告されている。すなわち、Hot loop の加熱はループの上部に集中していることが示唆され [1]、Warm loop は、加熱がフットポイント付近に集中していることが示唆されている [3]。加熱分布の測定は、観測データで得られる温度・密度分布から逆問題を解くことで行われる。先行研究では、狭帯域フィルター観測から得られる撮像データを使い、温度・密度診断が行われてきた。撮像データを使った温度診断は比較的精密である。一方、密度診断には視線方向のプラズマ長の情報が必要である。この値は 2 次元画像から取得することは難しく、多くの場合ループの幅から仮定した値を使用する。よって、推定される密度の値は不確実さを持つ。正確な加熱分布測定には、このような仮定を必要としない分光データを使った密度診断が必須である [4]。しかし、Hot loop に温度感度があり密度推定可能な輝線は少なく、分光データを用いた密度推定はほとんど行われていない。このため、上述の加熱分布測定も難しく、加熱機構解明への課題となっている。そこで本研究では、近年のプラズマ実験により 200 万 K 以上のプラズマの密度推定が可能であると報告された Ar XIV (187.96 Å/194.40 Å) 輝線比 [5] を使う。このことにより、上記の課題を解決し、Hot loop に対しても分光データを使った加熱分布推定を行うことで、加熱機構の調査する。

1. Kano & Tsuneta, PASJ, 48, 535-543, 1996
2. Aschwanden et al., ApJ, 550, 1036, 2001
3. Aschwanden et al., ApJ, 541, 1059-1077, 2000
4. Del Zanna & Mason, Living Reviews in Solar Physics, 15, 5, 2018
5. Nakamura et al., ApJ, 921, 115, 2021

飛騨天文台 SMART/SDDI および SDO/EVE を用いた 2022 年 10 月 2 日 M8.7 フレアの多波長分光 Sun-as-a-star 解析 大津 天斗 (京都大学 理学研究科 附属天文台 D1)

恒星では最大級の太陽フレアの 10 倍以上のエネルギーを放出するスーパーフレアが観測されている ([1] 他)。太陽観測とのアナロジーから、スーパーフレアには大規模なコロナ質量放出 (Coronal Mass Ejection; CME) が伴うと考えられる。しかし、恒星で発生する CME は、太陽 CME のように白色光による空間分解観測はできないため、検出が難しい。恒星 CME に関わるシグナルの候補としてはバルマー線や UV 線のドップラー偏移した吸収/増光 ([1], [2], [3] 他)、X 線や極端紫外線 (Extreme Ultraviolet; EUV) におけるコロナ減光 ([4]) などが挙げられる。これらの候補シグナルが真に恒星 CME と関係するかを明らかにするためには、太陽 CME に関わる多数のシグナルが、太陽を遠くの恒星のように扱った解析、すなわち、Sun-as-a-star 解析 ([5] 他) でどのように観測されるかを明確

にしておく必要がある。

そこで、本研究では 2022 年 10 月 2 日に発生した M8.7 フレアと関連するプラズマ噴出について、京都大学飛騨天文台 SMART/SDDI ($H\alpha$ 線撮像分光) と SDO/EVE (EUV 全面積分分光) の同時観測データを用いて、Sun-as-a-star 解析を行った。その結果、空間積分した $H\alpha$ 線スペクトル ($\log T[K] \sim 4$) には、噴出に対応して最大視線速度 -300km/s の青方偏移した吸収が現れた。さらに、この高速成分の吸収と同時に O_V 629.73 Å ($\log T[K] \sim 5.4$) などの EUV 線スペクトルで青方偏移した増光が確認された。我々は SDO/AIA 304 Å ($\log T[K] \sim 4.9$), 171 Å ($\log T[K] \sim 5.9$) の撮像観測との比較から、EUV 線スペクトルで見られた青方偏移もプラズマの噴出に対応すると結論付けた。本講演では、これらの青方偏移成分について詳細を報告する。また、CME に関連する減光についても議論し、本研究の恒星観測への応用について述べる [3]

1. Namekata et al., NatAs, 6, 241, 2022
2. Maehara et al., PASJ, 73, 44, 2021
3. Leitzinger et al., A&A, 536, A62, 2011
4. Veronig et al., NatAs, 5, 697, 2021
5. Otsu et al., ApJ, 939, 98, 2022

Tomo-e Gozen と Nayuta による明るい金属欠乏星 探査

岡田 寛子 (兵庫県立大学 D1)

金属欠乏星は宇宙初期に誕生し現在まで生き残る低質量星であり、初代星の性質 [1] や稀な重元素合成過程の性質 [2] といった宇宙初期に関する情報を提供してくれる重要な天体である。金属欠乏星の最初の発見 [3] から 70 年以上にわたる大規模な探査によって、2000 天体以上の金属欠乏星が発見されている (e.g. [4])。しかし、過去の探査で発見された金属欠乏星は暗く、Frebel & Norris 2015 [5] でまとめられている宇宙初期の元素合成の理解に重要な元素 (Zn, r-process 元素など) を含む詳細な組成を測定できた星は 3 分の 1 にも満たない。

そこで本研究では、詳細な組成の測定が可能であり、特に発見数の少ない 12 等より明るい金属欠乏星を対象とした探査を実施した。2022 年 9 月に、東京大学木曾観測所 1.05 m シュミット望遠鏡の広視野 CMOS カメラ (Tomo-e Gozen) に 2 種類の狭帯域フィルタを搭載した測光観測を行った。測光情報から $[Fe/H] < -2$ の金属欠乏星候補を選択し、兵庫県立大学西はりま天文台なゆた望遠鏡の可視中低分散分光器 (MALLS) による中分散分光観測を行った。金属量が既知の星 40 天体を用いて、中分散スペクトルの解析手法を確立し、2022 年 12 月に追観測した 27 天体の候補星の金属量とアルファ元素と鉄の組成比を見積もった。その結果、新たに 6 天体の金属欠乏星を同定した。本講演では、探査手法と追観測の結果について紹介し、候補星選択手法について議論する。

1. Ishigaki et al., 2018, ApJ, 857, 46

2. Sneden et al., 2008, ARAA, 46, 241
3. Chamberlain & Aller 1951, ApJ, 114, 52
4. Beers & Christlieb 2005, ARAA, 43, 531
5. Frebel & Norris 2015, ARAA., 53, 631

太陽黒点形成・フレアの数値シミュレーション研究 金子 岳史 (新潟大学 講師)

太陽を含む恒星のプラズマ大気中では、フレアと呼ばれる爆発現象が発生する。宇宙インフラを活用する現代社会にとって、太陽フレアのメカニズムを理解し、予測することは重要な課題となっている。フレアは、恒星大気中に蓄積された磁気エネルギーが急速に解放されることで発生する。フレアのメカニズムを解明するためには、磁気エネルギーの蓄積過程と解放過程の両方を理解する必要がある。本講演では、フレアの磁気エネルギー蓄積と解放に関する数値シミュレーション研究について紹介する。

強いフレアは黒点で発生する。長年の太陽観測により、強いフレアを起こす黒点は、一つの半暗部の中に正極と負極の磁場が隣接するような磁場分布 (δ 型) を持つことが知られている [1, 2]。 δ 型黒点の形成メカニズムを解明するため、様々な磁気流体シミュレーションが行われてきたが、多くは現実的な対流を含んでおらず、対流が黒点の磁場分布に与える影響は未解明であった。本研究では、輻射磁気流体シミュレーションによって黒点磁場形成過程を再現し、対流が δ 型黒点形成および磁気 (自由) エネルギー蓄積に与える影響を調査した。スーパーコンピュータ富岳と最新の輻射磁気流体コード R2D2[3] を用いて、大規模なパラメータサーベイを実施し、結果を統計的に解析した。結果、 δ 型黒点は、対流層内部に大規模な下降流がある領域に形成されやすいことが明らかになった [4]。

また、フレアのエネルギー解放をシミュレーションで再現するため、観測磁場時系列データを境界条件として磁気流体シミュレーションを行う手法があり、データ駆動と呼ばれている。講演者は近年、観測データから速度場を求めて境界条件に用いる新たなデータ駆動手法を開発し、実際に発生したフレアを再現することに成功している [5]。黒点形成シミュレーションとデータ駆動手法を組み合わせ、対流構造とフレア発生の関係を解明する研究の展望について議論する。

1. I. Sammis, F. Tang, H. Zirin, ApJ, 540, 1, pp 583–587, 2000
2. S. Toriumi, C. J. Schrijver, L. K. Harra, H. Hudson, K. Nagashima, ApJ, 834, 1, id 56, 2017
3. H. Hotta, H. Iijima, K. Kusano, Science Advances, 5, 1, 2307, 2019
4. T. Kaneko, H. Hotta, S. Toriumi, K. Kusano, MNRAS, 517, 2, pp 2775–2786, 2022
5. T. Kaneko, S.-H. Park, K. Kusano, ApJ, 909, 2, id 155, 2021

次期太陽観測衛星 SOLAR-C に搭載する超高精度太陽センサ UFSS の性能評価 近藤 勇仁 (東京大学/宇宙科学研究所 M1)

SOLAR-C は 2028 年度に打ち上げが予定されている次期太陽観測衛星であり、JAXA と国立天文台とした国際共同ミッションである。SOLAR-C は、高時空間分解能 (1 秒、0.4 秒角) で複数の紫外線バンドを分光観測し、2 万度から 1500 万度までの幅広い大気の物理量を隙間なく診断することができる。

高時空間分解測定を活かすためには望遠鏡の高い指向精度が求められる。SOLAR-C は、太陽面全面に対して系統誤差 2 秒角以内の指向精度を達成する超高精度太陽センサ UFSS(Ultra Fine Sun Sensor)[1] を搭載する。UFSS は直交する二つのレチクルと一次元 CCD センサから成り、センサ上の明暗の位相を計測し、太陽指向角度を決定するというものである。要求精度を満たすため、UFSS の性能評価試験を行う。評価試験では、UFSS を二軸ジンバルに設置して太陽シミュレータ光源を照射し、方位角・仰角方向にそれぞれ ± 0.5 度ずつ振った際の UFSS 出力角度を取得する。そしてジンバル指令値に対する出力角度の系統誤差を補正する関数を作成する。

本講演では UFSS の性能紹介及び高精度な性能評価試験を実施するための実験系構築についての進捗を報告する。

1. Tsuno, K. et al., SPIE, 11180, 2018

日米共同・太陽フレア X 線集光撮像分光観測ロケット実験 FOXSI-4 搭載プレ・コリメータの性能評価 佐藤 慶暉 (総合研究大学院大学 M2)

FOXSI(Focusing Optics X-ray Solar Imager) は、太陽コロナにおける高エネルギープラズマ現象の理解を目的とした、日米共同の太陽 X 線集光撮像分光観測ロケット実験である。4 度目の飛翔計画である FOXSI-4 は 2024 年春に打ち上げ予定であり、世界初となる太陽フレアに対しての X 線集光撮像分光観測を行うことで、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の解明という大目的に挑む。

FOXSI では 2 枚の円筒状の高精度斜入射ミラーを組み合わせて X 線を直接集光することで、高いダイナミックレンジを確保する。しかし、視野外から入ってきた光が 1 枚のミラーのみで反射し焦点面に到達することがある。プレ・コリメータは、このような光 (迷光) を取り除く役割を持つ。FOXSI-4 搭載品は、穴径と穴の深さの比が 1:270(0.7 mm:190 mm) の高アスペクト比の多孔ハニカム構造を持ち、X 線の入射角を制限することで迷光を除去する。このような迷光除去性能は、高ダイナミックレンジにより観測が期待できる暗い領域 (例えば磁気拡散領域) を解析する上で非常に重要である。

FOXSI 搭載品は、そのアスペクト比の高さから機械加工が難しいため、製造に金属 3D プリンターを用いた。しかし、FOXSI-3 フライト品測定結果から、造形時に生じる構造の歪み

によって、開口率が想定より低下していた。そこで FOXSI-4 では開口率を確保するため、構造の歪みを抑える技術の開発をした上で製作を行った。本講演では、太陽光と同じく (準) 平行な X 線が得られかつ斜入射ミラーとの取り付けが行える NASA マーシャル宇宙飛行センターで実施した評価試験の結果を基に、FOXSI-4 フライト品のアスペクト比、開口率を含む性能について報告する。

プレアデス星団に属する恒星の中性子捕獲過程元素の存在度 杉村 風暁 (兵庫県立大学 M1)

元素のうち H と He、少しの Li は今から 138 億年前に起きたビックバンで生成され、鉄までの元素は恒星内部の核融合反応によって生成される。そして鉄より先の元素は中性子捕獲過程によって生成される。中性子を捕獲する時間が β 崩壊より短い r 過程は、中性子星合体で起きると考えられている。そのため、r 過程元素は宇宙初期から存在したと考えられている。一方で、中性子を捕獲する時間が β 崩壊より長い s 過程は、AGB 星で起きていることが分かっている。そのため、s 過程元素の放出はビックバンから約 8 億年たった時から行われたと考えられている。今までの研究で s 過程元素は近年生まれた恒星ほど多く存在することが示唆された。[1] しかし、散開星団で 5 種類以上の中性子捕獲過程元素を調べた先行研究は数例しかない。そこで本研究では若い恒星で s 過程元素の存在度を調べることを目的に、Keck 望遠鏡のエッセル分光器 HIRES で撮られた可視光高分散スペクトルを用いて、プレアデス星団で 7 種類の s 過程元素 (Y, Zr, Ba, La, Ce, Pr, Nd) の存在度を調べた。プレアデス星団に属する恒星のうち本研究で調べた恒星は 9 天体である。まず、スペクトルにある鉄の吸収線の等価幅からモデル大気計算プログラム TGVIT を使って有効温度、表面重力、微小乱流速度を求めた。次に、これらのパラメータを用いた合成スペクトルを作成し、観測スペクトルとフィッティングすることで元素の存在度を求めた。その結果、プレアデス星団に属する恒星で元素の存在度は各元素一様で、Ba・La・Ce の存在度は太陽の 2-4 倍と大きいことが分かった。

1. Tautvaisiene, Astronomy&Astrophysics, vol649, pages20, 2021

アルベーン波による太陽コロナ加熱の数値計算 鈴木 海渡 (京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 M1)

太陽外層大気コロナは、光球に比べ 100 倍以上高温であることが知られている。太陽コロナの加熱機構は長年議論されてきたが、未だ完全な理解には至っていない。磁場を介したエネルギーの輸送・散逸が考えられているが、その詳細については議論中である。

その候補の 1 つは磁気流体波であるが、圧縮性の波はコロナ

に届く前に減衰してしまうため、非圧縮であるアルペーン波による加熱機構が注目されている。実際、アルペーン波がコロナを伝播する様子が観測されており [1]、エネルギーを輸送していることは間違いない。しかし、加熱に寄与するには効率的な散逸メカニズムを考える必要がある。非線形モード変換による散逸では、アルペーン波が圧縮波に変換され、衝撃波へと発展してコロナで散逸、加熱する [2]。また、アルペーン波乱流によるエネルギー散逸では、衝突したアルペーン波が乱流的に小スケールへカスケードすることによって散逸する [3]。これらの加熱機構についての研究は、詳細な観測の困難さから理論研究が有利であるため、数値計算を用いた研究が盛んにおこなわれてきた。プラズマの物理状態が加熱機構に与える影響を調査した研究 [4] では、彩層の温度が高いほどコロナ加熱が達成されにくいことが確認された。さらに、コロナの背景磁場を変化させることで、プラズマの物理状態が変化することも確認されている [5]。

本研究では、これらの研究に続き、数値計算を用いてパラメーターの変化によって加熱に対するコロナの応答がどのように変化するかを調査する。本講演では、上記のようなコロナ加熱問題に関する理論研究についてのレビューを行い、自分の今後の研究方針について紹介する。

1. Tomczyk et al., Science, 317, 1192, 2007
2. Hollweg et al., SoPh, 75, 35, 1982
3. van Ballegoijen et al., ApJ, 736, 3, 2011
4. Washinoue et al., ApJ, 938, 126, 2022
5. Kai, Master thesis, The University of Tokyo, 2021

CME を伴うフレア、伴わないフレアとフレアリボンとの関係

寺岡 耕平 (東京大学, ISAS/JAXA M2)

フレアは、磁気リコネクションにより磁気エネルギーが熱・運動エネルギーに急速に変換され、紫外線等の幅広い波長で増光する爆発現象である。爆発に伴い、コロナ中のプラズマが惑星間空間に噴出する現象がコロナ質量放出 (CME) である。フレアの後に CME が発生しないこともあり、そうなるフレアの状態は不明である。フレア・CME 標準理論モデルの CSHKP モデル (レビュー: 論文 [1]) では、エネルギーの溜まったねじれた磁力線 (磁気フラックスロープ) にまたがる 2 つの磁力線がリコネクションすることでフレアが発生する。その後、磁気リコネクションを繰り返しながら磁気フラックスロープと共に急上昇して膨張し、宇宙空間に飛び出した時に CME となる。磁気リコネクションの際に加速、加熱された粒子が磁力線を伝って彩層下層に落下して周辺の低温プラズマを加熱し、1 ペアのフレアリボンを形成する。実際には複数のフレアリボンが生じることもある (論文 [2] 等)。フレアを理解には磁場の三次元構造が重要で、磁場構造とフレアリボンは関係しているため、フレアリボンと CME の発生条件には関連性があると考え

られる。

本研究の目的は、CME の有無とフレアリボンとの関係を特定することである。2017 年 9 月 6 日に NOAA 12673 で発生した 2 つの X クラスフレアは、同じ領域かつ短い 3 時間間隔で CME が生じない confined フレアと CME が生じる eruptive フレアの両方が発生した珍しいイベントであるため、今回解析した。論文 [3] 等の先行研究では宇宙天気予測の観点からフレア前の磁場構造の比較をしていたが、フレア中の磁場構造の比較はなされていなかった。SDO 衛星の紫外線望遠鏡 AIA1,600Å 撮像データでは、confined フレアではフレアリボンが磁気中性線付近に動かずに存在した。一方、eruptive フレアではフレアリボンが複数対存在し、磁気中性線付近では次第にフレアリボンが南下していき、磁気中性線北側では西に移動していった。このことから、confined フレアではフレアで単一の場所で局所的に磁気リコネクションが起きたに留まったのに対し、eruptive フレアではフレアの際に広範囲で複数回磁気リコネクションが起きたことで大規模な CME になったと考えられる。

1. Kazachenko, M. D., et al., SoPh, 297, 59, 2022
2. Qiu, Y., et al., ApJ, 901, 13, 2020
3. Liu, L. et al., ApJL, 867, L5, 2018

K, M 型星の自転進化の経験則的表式に関する考察

徳野 鷹人 (理学系研究科天文学専攻 D1)

小質量星における自転と磁場の相互作用は進化において本質的である一方で、その定量的評価は恒星物理における難問である。その相互作用の一つとして磁気制動という磁気駆動恒星風の角運動量輸送が挙げられる。磁気制動により、主系列段階にある小質量星の自転角速度は時間と共に遅くなる事が分かっている。

この自転減速の古典的な理論として、自転周期 P 、時刻 t 、係数 A に対して $P \propto (At)^{1/p}$ というべき乗則がおおよそ成立するという Skumanich の法則がある [1]。そして Skumanich の法則の係数 A 、すなわち自転減速の効率は磁気制動トルク τ_w と恒星の慣性モーメント I の比である τ_w/I に比例されている事がわかっている。後者は恒星進化計算により求められるが、前者は様々な理論モデルが提案されるなど議論が尽きていないのが現状である [2]。

当研究では小質量星の中でも K, M 型星を対象とする。Kepler, TESS, Gaia といった宇宙望遠鏡の勃興により、K, M 型星の自転進化も調べられるようになってきている。自転周期や年齢はそれぞれ黒点による減光、星団による同定を用いて与えられ、フィッティングを行うことで Skumanich の法則の係数を調べる事ができる。この観測結果からは、(1) M3-M1 型の恒星は M0-K5 型の恒星よりも自転減速の効率が良いこと、(2) M0-K5 型の恒星は K4-K0 型の恒星は M0-K7 型よりも自転減速の効率が悪いことが判明した [3][4]。これは磁気制動の既存の理論

では解決できておらず、理論的な進展が求められる。

当研究では観測から求めた Skumanich の法則の係数 C から、磁気制動トルクの質量・半径依存性に関する経験則的な表式をもとめた [5]。磁気制動トルクの質量・半径依存性は磁場や質量損失率の質量・半径依存性に由来することから、経験則的な表式を再現するような磁場や質量損失率の性質を求めた。当講演では得られた結果と今後の展望に関して報告する。

1. Skumanich, ApJ, 171, 565 (1972)
2. Spada & Lanzafame, A&A, 636, A76 (2020)
3. Dungee et al., ApJ, 938, 118 (2022)
4. Gruner et al., A&A, 672, A159 (2023)
5. Matt et al. ApJ, 799, L23 (2015)

IRIS の分光観測によるコロナホール底部へ伝播する波動の研究

内藤 由浩 (総合研究大学院大学 修士 2 年)

近年、高速太陽風の加速機構として、コロナホールの開いた磁力線に沿って光球、彩層からコロナへ伝播したアルヴェン波をエネルギー源とする仕組みが考えられている [1]。彩層・遷移層温度による磁力線の振る舞いはスピキュールから間接的に観測され、これを伝える波動の検出は、アルヴェン波の伝播過程を観測的に議論する上で有意義なものである。IRIS では、SiIV 輝線によりスピキュールの彩層・遷移層温度プラズマを十分な時空間分解能で分光、撮像観測することが可能である。過去、IRIS の撮像イメージによるスピキュールを伝える擾乱を扱った研究はある [2]。しかし、分光観測では、スピキュールを伝播する波動の彩層内の散逸を扱った研究 [3] に留まっている。IRIS 以外の観測研究では、スピキュールを伝播する進行波の研究は CLASP の Ly α 線による観測 [4] などがある一方、IRIS の SiIV 輝線による例は見られない。

そこで本研究では、IRIS の SiIV 輝線、Mg II 輝線による極域コロナホールの分光観測に注目した。撮像イメージから分光スリットとスピキュールが重なっている範囲とその時刻を特定し、対応するスペクトルから得られる視線方向速度と EM により間接的に求まる密度摂動の時間変動を調べた。すると、連続的に現れた視線方向速度の赤方・青方偏移から kink mode の波動の検出に成功した。今回は、上記のようなイベントの観測データを拡充した上で、観測特徴から考察しうる物理的性質の議論を紹介する。

1. Suzuki and Inutsuka, Apj, 632, L49-L52,
2. Samanta, Apj, 815, L16, 2015
3. Antolin, Apj, 856, 44, 2018
4. Yoshida, Apj, 887, 2, 2019

太陽フレアに伴う諸現象の、4 つの彩層ラインでの 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 M2)

太陽フレアも恒星フレアも、表面での突発的な増光現象であるが、太陽フレアではこれを空間分解して観測することが可能である一方、恒星フレアでは空間積分したものに相当するスペクトルや光度が観測され、空間情報は失われてしまう。そこで、恒星の現象を太陽物理学の知見で理解するために、Sun-as-a-star 解析と呼ばれる、太陽のデータを空間積分し恒星の観測データを模したデータを得る解析が近年行われている。Namekata et al. 2022a[1] はその解析の活用例の一つであり、太陽型星スーパーフレアに伴う H α 線の吸収成分と、フレアに伴う太陽プラズマ噴出の 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。Namekata ら [1] は H α 線のみを用いたが、他の彩層ラインも含む同時観測により、各ラインの形成高度や温度、密度等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。例えば He I 10830 Å では、太陽フィラメント噴出の高速成分が検出された例があり [2]、恒星の CME とプラズマ噴出の関係の解明に役立つことが期待される。

この各彩層ラインの相違点を調べる目的のため、京大飛騨天文台 DST 水平分光器で観測した、太陽フレアの増光とフィラメントのドップラーシフトに対し、4 つの彩層ライン (H α 線、Ca II K 線、Ca II 8542 Å、He I 10830 Å) の Sun-as-a-star 解析を行った。その結果、フィラメントの吸収成分については、He I 線と H α 線で似た感度を持つが、H α 線中心付近はフレアの増光で吸収成分が検出できない場合でも、He I 10830 Å 中心付近では増光成分が弱く吸収成分を検出できる場合があることや、逆に Ca II K 線のフレアの増光は H α 線に比べて吸収成分の影響が小さく、増光の成分を検出しやすいことが分かった。

1. Namekata et al., Nature Astronomy, 6, 241–248, 2022
2. Penn, Solar Physics, 197, 313–335, 2000

ひので衛星を用いた太陽の極域磁場観測から探る太陽の周期活動性

藤森 愛梨沙 (東京大学 M1)

太陽の黒点数はおよそ 11 年の周期で増減を繰り返していることが知られている。太陽の極域磁場もそれとあわせて増減と極性の反転が生じ、極域磁束のピークは次の太陽サイクルの黒点数を予測する上で良い指標になっている。また、極域の開いた磁力線 (オープンフラックス) は惑星間空間磁場の構造に影響を与えている。極域のオープンフラックスが卓越する領域はコロナホールを形成し、コロナの大規模な構造を支配する。極域磁場の精度の良い観測から得られる理解は、太陽ダイナモ機構や太陽風の加速機構などを解明する上で重要である。

極性反転を含めた極域磁場の 11 年周期の活動性を調べるには、極域を支配する磁場の極性や磁束量を見積もることが基本である。これには、磁場の動径成分の導出が不可欠であり、磁

場の3成分の情報が必要になる。しかし、極域の平均磁場強度は黒点のような活動領域より弱く、観測が難しい。さらに、外縁部での射影の効果やシーイングの影響で極域の小さな磁場構造を分解することが難しく、1960年代から継続されている太陽全面磁場観測では、磁場の3成分を精度よく得ることは困難であった。比較的観測のしやすい視線方向磁場の観測のみを使って、公転面に対する自転軸の傾きによる視線角の変化から磁場の動径・方位角成分を見積ったり、赤道から高緯度に向かって視線方向磁場が弱くなる度合から極域の磁束の集中度を見積ったりしてきた。

2006年に打ち上げられたひので衛星は高い空間分解能と感度を持ち、極域の磁場ベクトルを観測することを可能にした。これにより、磁場強度が大きい磁気パッチの数は太陽周期と共に変化し、極域磁場の極性反転を担っていることが明らかになった。また、磁束が大きい磁気パッチは太陽面に対して垂直な方向を持つ傾向にあることが判明した。[1]

本講演では、極域磁場の研究に関するレビュー論文[2]を紹介し、と今後の研究方針について議論する。

1. Shiota et al., The Astrophysical Journal, 753, 157, 2012
2. Petrie, Living Reviews in Solar Physics, 12, 5-, 2015

高分散分光観測による太陽金属量近傍の恒星でのトリウムを含むrプロセス元素組成の調査 古塚 来未 (兵庫県立大学 光学赤外線天文学研究室 M2)

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、宇宙の化学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。鉄より原子番号の大きい元素は、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が、その半数を作るrプロセスの起源は長年不明であった。しかし、2017年に連星中性子星合体が重力波によって観測され[1]、続いて行われた測光観測と分光観測によって中性子星合体がrプロセスの起源であることが明らかになった[2]。ところが、中性子星合体だけでrプロセスの起源を説明することはできない。同じrプロセス元素でもトリウムの組成がユーロピウムに比べて過剰なアクチノイドブースト星が恒星の観測による化学組成の調査で発見されており、その起源は不明である。このような星の存在はrプロセスが一つ以上の起源をもつ可能性を示唆する[3][4]。多くの恒星でトリウムの組成を決定することは重要であるが、その観測は少なく、特に金属量が太陽の数10分の1以上の恒星での観測が少ない[5]。

そこで、我々はなむた望遠鏡/MALLSの観測とすばる望遠鏡/HDSのアーカイブデータにより金属量が太陽の数10分の1以上の恒星10天体以上でトリウムを含むrプロセス元素を

多数検出した。その結果、トリウム/ユーロピウム組成比は金属量によらずほぼ一定であり、金属量が太陽の数10分の1以上の範囲でアクチノイドブースト星は見つからなかった。これらの結果はアクチノイドブースト星の起源を明らかにし、rプロセスの起源を明らかにするうえで重要である。

1. Abbott et al., PhRvL, 119, 16, 2017
2. Tanaka et al., PASJ, 69, 6, 2017
3. Holmbeck et al., ApJ, 859, 2, 2018
4. Yong et al., Nature, 595, 7866, 2021
5. Mishenina et al., MNRAS, 516, 3, 2022

反復新星 U Scorpii の 2022 年爆発：食解析から探る光球面の後退と降着円盤の構造変化 村岡 克紀 (京都大学宇宙物理教室 M1)

新星とは、白色矮星と低温星(伴星)からなる近接連星系において、白色矮星表面へと降着したガスが熱核反応の暴走を起こすことで発生する爆発現象である。爆発が起きると光球面は連星系全体より大きくなり、可視光では突発的な増光として観測される。その後、光球面の後退に伴い減光し、連星間距離程度まで小さくなると、軌道傾斜角の大きい系では食が観測される。また、中には減光中に一時的に可視光度が一定になる(平坦期)系が存在する。これは U Sco の 1999 年爆発から白色矮星に照射された降着円盤による寄与と考えられ、平坦期の降着円盤半径は静穏期と比べ大きく、L1 点まで達することが示唆された[1]。しかしながら、これを補強する降着円盤の形成過程を追った観測は殆どない。

我々は、U Sco の 2022 年爆発に関し、VSNET を通じて国際共同可視連続測光観測を行った。食は可視極大期から約 11 日後に見え始めた。一方で平坦期は約 14 日後に始まり、約 24 日後に終了した。2010 年の爆発では食と平坦期が同時に始まるということが報告されたが、今回の観測では平坦期に入るよりも前に食が開始しており、伴星、降着円盤の順に寄与が見え始めることが分かった。また、得られた食のプロファイルから食幅を見積もり、降着円盤半径の時間変化を求めた。平坦期の降着円盤半径は L1 点近くまで達するが、平坦期を終えると急激に tidal truncation 半径まで落ちてくることが初めて確認された。本講演では、これらの結果から光球面の後退、及び新星爆発による降着円盤の構造変化について議論する。

1. Hachisu, I., et al., ApJ, 534, L198, 2000

X線天文衛星「すざく」を用いた地球超高層大気の長期変動の研究 山脇 鷹也 (埼玉大学 M1)

高度 80 km 以上の領域を覆う地球大気を地球超高層大気と呼ぶ。宇宙空間から飛来する X 線はこの領域で吸収され、蛍光 X

線を放射する。X線天文衛星はその天体観測過程において昼地球を指向する時間が存在するため、地球観測が不可避である。本研究ではX線天文衛星「すざく」が2005年9月から2015年6月の運用停止まで約10年に渡り地球大気の観測を行ったことに着目し、太陽活動の11年周期との関わりを調べた。

太陽活動の多くが約11年の周期性を持つことが知られている。一方で、「すざく」による昼地球観測データには、地球大気の主な構成物質である窒素及び酸素由来の蛍光X線が確認でき、この2つのX線スペクトルから超高層大気の窒素と酸素の存在比を算出できる。このことから「すざく」により、太陽活動の1サイクル間の超高層大気の窒素と酸素の存在比の変動を調べることが可能である。また「すざく」のevent fileに含まれる時刻情報から、地表から何kmの領域を「すざく」が観測しているのかという情報を得ることができる。これらから「すざく」によるX線観測で、50km-200km付近までの高度区間における窒素と酸素の存在比が10年でどのように変動するのか、さらにその変動が太陽活動の11年周期とどの程度相関を示すのかを調べた。その結果、太陽黒点相対数と地球超高層大気領域の酸素/窒素比率に相関が見られ、太陽活動が活発になると超高層大気領域の酸素/窒素比率が増加することが分かった。

オープンフラックス問題に対する新たな原因の可能性の検討

吉田 南 (東京大学 D1)

太陽は磁場をもち、表面の光球からコロナへと延びている。太陽コロナの磁場構造は、光球へと戻る「閉じた」磁場、惑星間空間へと広がる「開いた」磁場(オープンフラックス)から成り、オープンフラックスは惑星間空間磁場(IMF)を形成している。この構造は11年の太陽活動周期にわたって変化している。極小期は極域に磁場が集中するため双極子構造をとり、極大期は強い磁場領域によって局所的に磁場が閉じた複雑な構造をしている。太陽磁場が作り出すIMFもまた、活動周期にわたって変化している。両者を関係づけて惑星間空間の磁場構造を理解することは、太陽が惑星間空間に及ぼす影響や、プラズマで満たされた宇宙空間における諸現象の物理学的理解に重要である。しかし、衛星で観測された太陽光球磁場を外挿し、地球近傍の磁場を推定すると、地球近傍で「その場」観測されたIMFに対して3倍程度過小評価される問題がある(オープンフラックス問題 [1])。この問題の原因の一つとして、観測が難しい光球の極域磁場強度が過小評価されている可能性が検討されてきた [2]。

そこで本研究では、これまで注目されてきていないIMFと太陽磁場の長期変動の特徴に着目した。太陽磁場を大局的な成分、局所的な成分に分解し、実際にどの成分がIMFの変動に寄与しているのかを解明した。解析の結果、極大期では大局的な磁場、極小期では局所的な磁場がIMF変動を作り出すことが明らかになった。さらに、これまで検討されてきた極域ではなく、赤道付近の中低緯度の太陽磁場が、より重要であること

が示唆された。本講演では、新たなオープンフラックス問題の原因の可能性を議論する。

1. J. A. Linker et al., ApJ, 848, 70, 2017
2. P. Riley et al., ApJ, 884, 18, 2019

衝撃波と乱流的効果によるコロナ加熱を考慮した太陽プロミネンス形成に関する数値計算 吉久 健朗 (京都大学 理学研究科 物理宇宙物理学専攻 M2)

太陽外層大気コロナ中の高温低密なプラズマ($T \sim 10^6$ K, $\rho \sim 10^{-15}$ g/cm³)は、しばしば低温高密度なプラズマ($T \sim 10^4$ K, $\rho \sim 10^{-13}$ g/cm³)に凝縮される。この現象はプロミネンスなどとして長年観測されているが、その形成機構や物理的性質は完全には理解されていない。有力なプロミネンス形成機構の一つである彩層蒸発-凝縮モデル [1] では、コロナ下部での局所加熱によって彩層上部のプラズマが温められ、蒸発したプラズマがコロナ中で凝縮するとされている。この過程は非線形現象であるため、現象の理解には数値計算を用いて、プラズマの冷却項と加熱項の物理量依存性や時間変化を考慮する必要がある。しかし、多くの先行研究ではコロナ加熱を考慮する難しさから、冷却項のみを考慮しており、加熱項を正確に取り入れられていない。また、加熱のプロセスを含めて、実際の太陽大気が凝縮現象に与える影響を考慮するには、光球や彩層の影響を考える必要がある。

そこで、本研究は光球からコロナまでを含めた領域で、衝撃波と乱流的効果による磁気流体波のエネルギー散逸を考慮した窪んだコロナループに沿った1.5次元MHDシミュレーションを行った。足元に人工的に加える局所加熱やループ足元に境界条件として与えている速度場などのパラメーターを変化させることで、凝縮現象やプロミネンスの熱的性質に与える影響を調べる。結果として、光球での対流運動に由来する衝撃波が凝縮現象を誘発することを確認した。また、境界条件に加えている横波による加熱が凝縮現象の発生の有無に影響を及ぼすことを確認した。これは、横波が加熱と冷却のエネルギーバランスに与える影響とコロナ温度が衝撃波の圧縮率に与える影響を考慮する重要性を示唆する。

1. Antiochos & Klimchuk, ApJ, 378, 372, 1991