

2019 年度第 49 回 天文・天体物理 若手夏の学校
太陽・恒星分科会 アブストラクト

須田 拓馬 (東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター) 7月
30日 18:15–19:15 B 会場

金属欠乏星で探る宇宙の星形成と化学進化

恒星進化理論は一次元球対称の枠組みではほぼ確立したと考えられており、その理論データ（表面温度、明るさ、星表面の元素組成分布等）は天文学における重要な基礎資料となっている。その一方で、恒星内部の元素合成と物質混合については不定性が大きく、理論と観測の一致は必ずしも十分ではない。そのため、理論モデルの研究と観測との比較は並行して行われることがある。本講演の主題である金属欠乏星は、まさにこの20年ほどで発展してきた研究対象であり、理論的にも観測的にも多くの知見が得られてきた。

金属欠乏星、すなわち星表面の鉄組成の少ない星、は宇宙の構造形成直後に誕生し、初期宇宙の環境を保持していると考えられる天体である。とりわけ、宇宙で最初の光となったであろう第一世代星はビッグバン元素合成の痕跡を残しているはずであり、天文学における最重要天体の一つとしてその探査が理論観測の両面で進められている。本講演では、金属欠乏星の観測の現状をレビューするとともに、最も金属の少ない星の起源について我々が提唱してきた連星起源仮説を紹介する。さらに、連星起源仮説からの帰結である宇宙初期の星形成、化学進化への制限についても触れ、銀河系の星形成史に関するわれわれの主張を展開する。また、近年推進している第一世代星を発見するための新しい探査手段の提案についても紹介する。

1. T. Suda, M. Aikawa, M. N. Machida, M. Y. Fujimoto, and I. Iben Jr. ApJ, 611, 476 (2004)
2. T. Suda et al. MNRAS, 432, L46 (2013)
3. T. Suda, T. R. Saitoh, Y. Moritani, T. Shigeyama, in prep.

飯島 陽久 (名古屋大学 太陽地球環境研究所) 7月31日 13:15–14:15 B 会場

太陽大気の輻射磁気流体シミュレーション

太陽は我々の最も近くに存在する恒星である。太陽表面付近の空間構造は古くはガリレオの時代から研究され、現代では黒点、フレア、プロミネンス、スピキュールなど様々な構造が、多くの衛星・地上望遠鏡による測光・分光・偏光観測により調査されている。観測波長帯としても電波からガンマ線・X線まで幅広いデータが得られている。

現代・次世代ミッションで得られる太陽観測データから要求される解釈の精度に比して、太陽大気の高非線形性は強い。多くの場合、注目したい現象の空間サイズに対し、密度・圧力スケールハイトがずっと短いために、光球付近で励起された磁気流体波動は容易に非線形化・モード変換をおこし、振幅の大きい様々な磁気流体波動に満たされた大気生まれる。そこに光による熱輸送、非熱的電子による熱伝導、非平衡な電離過程など様々な物理が関わってくるために、観測データのみから物理過程を高精度に解釈することは、ほぼ不可能になっている。

我々のグループでは、この太陽観測データの解釈における困難に立ち向かうため、主要な物理過程を全て高い精度で取り込んだ、第一原理的計算として輻射磁気流体シミュレーションを実施している。講演では、その概要と将来の展望を紹介したい。

太陽 a1 太陽の CaK 線観測による紫外線放射の推定 田中 宏樹 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M1)

太陽活動は、11 年で極大期と極小期をむかえる周期変動をしている。この太陽活動が地球の気候に与える影響について研究がなされてきている (宇宙気候学)。影響として、まず考えられるのは、太陽の全エネルギー放射であるが、これは 11 年周期で 0.1% 程度しか変化していない [1]。一方で、太陽紫外線の 1000-2000 Å 領域は、11 年周期で 10-数 10% と変化が大きく [1]、地球大気の上空で吸収される [1] ことで、地球の気候に影響を与えていると考えられている。しかし、紫外線は地上に届かないため、人工衛星による観測が必須であるが、初めて人工衛星が打ち上げられたのは 1967 年であり、それ以前の観測はない。そのため、100 年規模の紫外線放射強度の時間変化や、紫外線が地球の気候に与える影響は明らかにされていない [2]。

そこで、紫外線と CaK 線は、どちらも太陽の彩層が起原であり、相関が強いと考えられている [3] ことを利用する。CaK 線は、地上観測が可能のため、各地の天文台で観測結果が残されている。[観測波長幅と観測開始年が、それぞれ京都大学 (0.74 Å、1928 年)、国立天文台 (0.5 Å、1917 年)、Kodaikanal (0.5 Å、1907 年)、Mt. Wilson (0.2 Å、1915 年)] これと、現在の CaK 線と紫外線による観測を組み合わせることで、紫外線放射の 100 年規模の変動が地球の気候に与える影響を調べる研究への応用も期待される。

本研究では、飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡 (DST) による 2018 年 5 月 5 日の可視光線 CaK 線の強度と、人工衛星 SDO の紫外線観測装置 AIA による同日の紫外線 1600 Å の強度との相関を求めた。DST の波長分解能を生かして、CaK 線の積分する波長幅を変え、どの波長幅が紫外線放射強度と相関がいいのかを調べた。

その結果、相関が良い波長幅は 0.50 Å であると分かった。今回の結果からは、国立天文台と Kodaikanal の観測データの重要性が示唆される。今後は、太陽の活動がより激しい時期においてもどの波長幅の相関が良いのかを調べていく。

1. J. Lean and J. Rind, 1998, J. Climate 11, 3069.
2. Bertello, L., Ulrich, R.K., Boyden, J.E., 2010, Solar Phys., 264, 31.
3. Lean, J.L., 1987, J. Geophys. Res., 92, 839.

太陽 a2 部分電離プラズマ中での衝撃波の形成と発展 富野 芳樹 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M1)

太陽の彩層は約一万度の部分電離プラズマで、そこではジェット現象、爆発現象が盛んに起こっている。これらの現象の起源は磁場のつなぎ変え (磁気リコネクション) によって磁気エネルギーを解放することだと考えられている ([1] ほか)。

昔から磁気リコネクションにより生じる衝撃波の構造やジェット、磁場の形を理解するための数値シミュレーションは盛んに行われてきた [2]。[2] のような研究ではイオン、電子、中性粒子の混在する彩層を簡単のため 1 流体の電磁流体と近似して数値計算している。しかし、中性流体とプラズマ (電離成分) が混在している実際の彩層の大気を 1 流体として扱うことの妥当性は明らかではない。そこで彩層の大気を中性流体とプラズマの 2 流体の方程式で今後計算するための足がかりとして研究 [3] に着目した。研究 [3] では中性流体とプラズマ (電離成分) が混在した流体中で磁気リコネクション後に生じる衝撃波がどのように形成・発展するかを調べている。初期条件としては一様な熱力学量を採用し、磁場を折り曲げることによって衝撃波を発生させ、2 流体の方程式を解くことで衝撃波の時間発展を計算した。研究 [3] の結果は 2 流体を 1 流体に近似した場合の計算結果と異なっており、部分電離している場合には中性流体の存在を無視できないことが明らかになっている。

本発表では研究 [3] のレビューを行う。それに加えて、研究 [3] よりも彩層に適した初期条件かつ重力を考慮した場合に 2 流体がどのように時間発展するのか、1 流体の電磁流体シミュレーションの結果とどう変わってくるのかを調査している現在の自身の研究について述べる。

1. Tajima, T., & Shibata, K. 1997, Plasma Astrophysics
2. Yokoyama, T. & Shibata, K. 1998, ApJ, 494, L113
3. Hillier, A., Takasao, S., & Nakamura, N. 2016, A&A, 591, A112

太陽 a3 線形フォースフリー磁場モデルを利用した 太陽活動領域磁場の特徴量の抽出について 中谷 賢人 (名古屋大学 太陽地球環境研究所 M2)

太陽フレアの正確な発生予測は宇宙天気予報にとって重要な課題である。太陽フレアは太陽活動領域の磁場の不安定化によって発生すると考えられるが、太陽活動領域磁場の安定性を正確に評価する方法は未だに確立されていない。N.Ishiguro & k.Kusano (2017) らは最近、フレア発生の原因となり得る「ダブルアーク不安定性 (DAI)」を見出し、その安定性をパラメタ κ によって評価できることを提案した。ただし、パラメタ κ の導出のためには、磁力線ねじれ T_w の磁束積分を必要とする。これを行う一つの方法として、非線形フォースフリー磁場 (NLFFF) による太陽光球面ベクトル磁場観測データの外挿を利用する方法がある。しかし、NLFFF の導出のためには長時間の計算を必要とすると共に、光球面磁場がフォースフリー磁場と整合しない場合にはモデルの適合性そのものが下がる恐れがある。そこで、太陽活動領域磁場の特徴をより高速かつ安定して捉える方法を開発することは、宇宙天気予報運用を改善する観点から有用である。本研究ではそうした観点から、線形フォースフリー磁場 (LFFF) モデルを利用して太陽活動領域磁場の特徴量を高速に抽出するための方法の開発を試みている。

このため、LFFF を使って NLFFF で求められる Tw の構造を的確に捉えるための複数の方法を比較検討する。本研究では特に太陽活動領域 NOAA 11429 を対象にした解析の結果を報告する。

1. Ishiguro, N., & Kusano, K. 2017, ApJ, 843, 101.
2. K.D.LEKA and A.SKUMANICH 1999. Solar Phys.188
3. Berger, M. A. et al. 2006, Journal of Phys A: Mathematical and General, 39(26), 8321–8348.

太陽 a4 X 線天文衛星「すざく」を用いた地球大気散乱太陽 X 線鉄輝線のテール構造の起源の探求 高橋 陽也 (埼玉大学 宇宙物理実験研究室 M1)

「すざく」は 2005 年 7 月に打ち上げられ、2015 年までの約 10 年間運用された日本の X 線天文衛星である。この衛星の特徴の一つに、地上 550km の低軌道を周回していることが挙げられる。これにより宇宙からの荷電粒子を地磁気によってガードでき、バックグラウンドを小さく抑えられるという利点を持つ。しかしこの低軌道ゆえ、衛星の視野に地球が映り込み目標天体が見えなくなる「地没」という状態になりやすいという側面もあった。目標天体の解析に使えない地没中のデータはこれまで活用されてこなかったが、その中には地球から衛星に向かってくる X 線が含まれている。例えば衛星の視野に太陽で照らされた昼地球が写り込んでいる間は、目標天体の代わりに地球超高層大気によって散乱された太陽 X 線を観測していることになるため、地没データから散乱に関与した地球大気と太陽 x 線の情報を得ることができる。

本研究では太陽 X 線を直接観測した場合と地球大気散乱を介して観測した場合の観測結果の違いに注目した。「すざく」で観測された、2005 年 9 月の巨大太陽フレア時に地球大気で散乱された太陽 X 線のスペクトルを解析し、その結果 He-like Fe K 輝線ピークから低エネルギー側へ伸びるテール構造を発見した。太陽フレア時の鉄輝線は高温電離平衡プラズマからの放射とされ、APEC モデル (Astrophysical Plasma Emission Code Model) で説明されるが、見つかった構造はその APEC モデルには含まれていなかった。このテール構造の起源を調べるために、地球大気での太陽 X 線散乱シミュレーションの結果と実際の観測スペクトルを比較した。その結果、太陽 X 線が地球大気によってコンプトン散乱された際に生じる構造で説明できることがわかった。

太陽 a5 Kepler 望遠鏡を使った太陽類似星のスーパーフレアの検出 岡本 壮師 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M1)

恒星/太陽フレアとは恒星/太陽表面での突発的な爆発現象であり、太陽フレアは磁気嵐や放射線の照射などの形で人類文明に悪影響を及ぼしている。恒星フレアの中には観測史上最大

級の太陽フレア (全エネルギー 10^{32}erg) の $10 - 10^6$ 倍の規模のエネルギーのものがあり、スーパーフレアと呼ばれている。以前は太陽型星 (G 型主系列星) でスーパーフレアは起きないと考えられていたが、近年 Kepler 宇宙望遠鏡の測光観測データ (~500 日分) の解析により、実際には数百個もの太陽型星でスーパーフレアが起きていることがわかった [1]。特に、太陽類似星 (太陽のように年老いた自転周期の長い太陽型星) でも、数千年に一度の頻度で最大 10^{35}erg 程度のスーパーフレアが起きることが発見され、太陽でもスーパーフレアが起きる可能性が示唆された [2]。もし太陽でスーパーフレアが起こった場合我々の生活に深刻な影響を及ぼす可能性があるため、スーパーフレアを起こす太陽類似星の特徴・多様性を調べることは非常に重要である。ところが、[2] でスーパーフレアが検出された太陽類似星は 6 個のみであり、その後分光観測や位置天文学衛星 Gaia によって恒星パラメータが修正され、最終的に 3 個のみになった [3]。これではスーパーフレアを起こす太陽類似星の観測的特徴を明らかにするには、個数が不十分である。そこで本研究では、これまで主系列星と判定されていなかったが、Gaia により太陽類似星と判明した星をサンプルに加えて、未解析の全期間の Kepler 衛星のデータ (~1500 日分) でスーパーフレアの検出を行った。解析では、先行研究 [1] に従って光度曲線からスーパーフレアと思われる増光をプログラムで自動検出し、目視で確認を行った。これにより先行研究 [3] の統計を補強し、今後はスーパーフレアを起こす太陽類似星と太陽の違いまで議論ができるかと期待される。本講演ではその進捗状況と今後の展望について発表する。

1. Maehara, H., Shibayama, T., Notsu, S., et al. 2012, Natur, 258, 478
2. Shibayama, T., Maehara, H., Notsu, S., et al. 2013, ApJS, 209, 5
3. Notsu, Y., Maehara, H., Honda, S., et al. 2019, ApJ, 876, 58

太陽 a6 「IIIn/Ibn 型超新星の親星における爆発的な質量放出の研究 栗山 直人 (東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター M1)

超新星爆発を輝かせる典型的な熱源は、衝撃波加熱で生成された ^{56}Ni および ^{56}Co の放射性崩壊に伴い放射されるガンマ線であるが、超新星の周りに非常に濃い星周物質が存在する場合には、超新星イジェクタと星周物質の衝突や星周物質が紫外線励起されることによって超新星として輝く。このようにイジェクタと星周物質の相互作用を熱源とする超新星は星周物質の速度が遅いため、非常に狭い水素輝線を持つ IIIn 型超新星や、狭いヘリウム輝線を示す Ibn 型超新星として観測される。このような超新星において濃い星周物質が爆発時に存在することは、超新星親星の進化後期において爆発的な質量放出が起きた

ことを示唆している (Smith 2014)。

爆発的な質量放出のメカニズムはよくわかっていないが、その中でも中心核の対流エネルギーが内部重力波によって外層に運ばれて質量放出を起こすというモデルが提唱されている (Quataert & Shiode 2012)。このような質量放出のメカニズムを検討するうえで、外層にエネルギーが運ばれた際の質量放出量や光度などの観測的特徴の振る舞いが非常に重要になる。

そこで我々は、1次元恒星シミュレーションコード MESA を用いて作成した超新星親星モデルの外層にエネルギーを注入し、その後質量放出を起こすまでの過程を輻射流体シミュレーションすることによって、質量放出量や光度曲線、有効温度の変化などを計算した。また、親星の質量や注入するエネルギーを変えた際の結果の比較を行った。本講演では、シミュレーション結果を紹介するとともに、計算結果から IIn 型、Ibn 型超新星親星にどのような制限を付けることができるかを議論する。

1. N. Smith ARA&A 52 487 (2014)
2. E. Quataert & J. Shiode MNRAS 423 92 (2012)

太陽 b1 スペクトル線幅から探る太陽光球プラズマダイナミクス

石川 遼太郎 (国立天文台 D1)

太陽光球面は粒状斑と呼ばれる対流セルで埋め尽くされており、粒状斑は生成・消滅を繰り返すなど乱雑な時間変化を示す。このような乱雑な運動は光球面において磁場構造形成とポインティングフラックスの生成に大きく貢献し、コロナ加熱・太陽風加速のためのエネルギー源となりうることで輻射磁気流体計算によって提唱されている。特に近年、粒状斑よりも小さなスケールの速度構造が大きなエネルギーを保有している可能性が指摘されている (Rempel 2014) が、現状の観測装置では空間分解できず、その観測的検証は困難を極めている。Khomenko et al. (2010) は撮像観測から、粒状斑境界の下降流レーンでスペクトル線幅が増大することを明らかにしたが、その要因が空間分解能以下の微小スケールの運動なのか、視線方向の速度勾配によるもの (Gadun et al. 1997) なのかを分離することが出来なかった。本研究では偏光分光観測を行うことで、このような空間分解能以下のスケールの運動を定量的に評価し、またその空間分布と時間発展を明らかにすることを目的とした。

本研究ではひので衛星によって得られた Fe I 6301.5 Å 線の偏光分光データに対してバイセクター解析 (e.g. Gray 2005) を実施した。これにより視線方向の速度勾配によってスペクトル線幅が増大する影響を分離することで、空見分解能以下の速度構造を定量的に評価することに成功し平均で 1.6 km/s と見積もった。また、粒状斑が消滅する時に速度勾配と乱流運動の両方が発達することを発見した。これは、粒状斑の消滅に伴い収束流が発生することで流れが不安定になり、乱流が発生すると考えられる。粒状斑消滅に伴う乱流は光球面に広く分布する一方で、磁場とはほとんど関連していないことも確認した。

1. Khomenko et al., ApJL, 723, L159 (2010)
2. Gadun et al., A & A, 320, 1001 (1997)
3. Rempel, ApJ, 789, 132 (2014)

太陽 b2 京都大学飛騨天文台望遠鏡を用いたフィラメント噴出・消失の3次元速度場の導出

木村 なみ (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M1)

太陽活動による地球周辺空間の環境変動を宇宙天気という。太陽面爆発 (フレア) や噴出現象が起こると、地球では磁気嵐や放射線の増加などの影響を受けるため、宇宙天気予報が重要視されている。特に太陽コロナ中で発生する冷たいプラズマの噴出・消失現象 (フィラメント噴出・消失) は、太陽のプラズマを大量に惑星間空間に噴出する現象 (コロナ質量放出; CME) との関連も高く、磁気嵐の原因の一つと言われている。しかし、フィラメント噴出・消失とコロナ質量放出、磁気嵐との関係性は未だ明らかになっていない。プラズマが実際に惑星間空間に噴出しているか否か判断するためにはフィラメントのプラズマの速度場を正確に測定する必要があるためであるが、H α 線中心波長のみによる彩層撮像観測では、フィラメントの視線速度を求めることができないからである。そこで、本研究では H α 線多波長観測から噴出・消失するフィラメントに「クラウドモデル」を適用することでその視線速度を算出する手段を開発した論文 [1] をレビューする。当研究では、Becker のクラウドモデル [2] を用いてプラズマの速度や温度を測定した先行研究をもとに、京都大学飛騨天文台フレア監視望遠鏡の H α 線中心波長に加え、H α - 0.8Å と H α + 0.8Å の波長で観測することでフィラメントの視線方向における移動を捕捉できるようになった。

本発表では 2016 年に飛騨天文台に実装された太陽磁場活動望遠鏡 (SMART)・Solar Dynamics Doppler Imager (SDDI) を用いて、より広い波長域でクラウドモデルの適用が可能となった例 [3] も合わせて紹介する。さらにこの手法を用いて統計解析を行う、自らの研究計画についても述べる。

1. Morimoto, T., Kurokawa, H. 2003, PASJ, 55, 503
2. Beckers, J. M. 1964, Ph.D. Thesis, 49
3. Seki, D., Otsuji, K., Isobe, H., et al. 2017, ApJL, 843, L24

太陽 b3 太陽極域磁場観測の概観

谷 竜太 (国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 M1)

太陽極域磁場とは子午面還流等の活動によって極域に存在する磁場のことであり、太陽においてダイナモから太陽風の加速といったグローバルな現象や惑星間空間磁場を理解するためには、太陽極域磁場の構造を理解する必要がある。太陽観測衛星「ひので」以前は極域全体に数ガウスの磁場があると考えられて

きたが、「ひので」の可視光磁場望遠鏡 (SOT)/偏光分光観測装置 (SP) による高精度観測でキロガウスの磁場がパッチとなって分布しているという事がわかった [1]。しかし、太陽全体の磁場構造の振る舞いは完全には理解されていない。

太陽全体の磁場構造の理解には太陽全面のベクトル磁場データが必要である。ベクトル磁場を地上望遠鏡「SOLIS」では太陽全面の 2048×2048 秒角を 1 秒角の分解能で取得しているが、極域ではパッチが見分けられず空間分解能が十分ではない。一方「ひので」は極域周辺の 320×164 秒角を高分解能 (0.3") で撮影しているため、「SOLIS」データの極部分に「ひので」の観測データを補填することで、より高分解能かつ太陽全域を網羅した磁場データが得られる [2]。

「ひので」はこれまでに極域データを 12 年分毎月蓄積しており 11 年の太陽活動周期を網羅している。本講演では、極域磁場の振る舞いや、「ひので」のデータを使って太陽全体の磁場構造にどのようにアプローチしていくのかを議論する。さらに 2018 年 8 月に NASA が打ち上げた Parker Solar Probe が今後得るであろうデータと、惑星間空間までの磁場モデルを比較することで、プラズマ温度や速度といった基礎物理量の理解を目指す。

1. S.Tsuneta et al., 2008a, *Astrophys. J.* 688, 1374
2. G.Petrie, 2017, *Solar Phys.*, 292, 13

太陽 b4 狭帯域フィルターを用いた金属欠乏星の 探索 岩崎 巧実 (甲南大学 宇宙理論研究室 M1)

金属欠乏星とは、太陽と比べて重元素、すなわち金属の量が少ない恒星を指す。これらは金属がまだ少なかった時代の宇宙で誕生したため、古い星が多い。ゆえに金属欠乏星を観測することで、宇宙初期の情報を得ることができる。その金属欠乏星の探索方法に、狭帯域フィルター (narrow band filter、以下 NB) を用いた観測がある。NB 観測では、恒星からの光を対物プリズムに比べて少ない素子に集められるため、暗い天体でも観測できる。また見た目の距離が近い天体でも、NB は互いの光を分離できる。中でも、 Ca^+ の吸収線である Ca H&K 線 (各々 3968.5 Å、3933.7 Å) に高い感度を持つ NB が、金属欠乏星の探索に有用である (Starkenburger et al. 2017)。この吸収線は、金属量の小さい恒星ほど強度が弱くなるという特徴があるため、金属量の比較に利用できる。NB400 は、Ca H&K 線を含む 3900-4000 Å の波長の光だけを透過するため、同じ波長域に感度を持つ ν バンドフィルターと比較すると、Ca H&K 線に対して感度が高い。それにより、他の元素によるスペクトルに埋もれることなく、恒星の Ca H&K 線を観測できる。

本研究では、東京大学木曾観測所 105cm シュミット望遠鏡を使った金属欠乏星の NB 観測を行う。一度に広範囲を観測できるこの望遠鏡で、金属欠乏星を効率よく検出できる NB400 を使うことで、多くの金属欠乏星をまとめて見つけられることが

期待される。本講演では、金属欠乏星の探索に対する NB の特徴および利用を述べた、上記の Starkenburg et al. (2017) についてのレビューを行う。また研究内容である Ca H&K 線の NB を使った、105cm シュミット望遠鏡による観測データを用いた金属欠乏星の探索への利用、およびその結果についても議論する。

1. Starkenburg, Else, et al. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 471.3 (2017): 2587-2604.

太陽 c1 光球で起こるアネモネジェットの数値的研究 古谷 侑士 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M2)

太陽大気では、足元に光るループを伴うジェット現象がコロナと彩層で観測されている。これらのジェットは、足元の形状がイソギンチャク (sea anemone) のように見えることからアネモネジェットと呼ばれる。注目すべきは、アネモネジェットはコロナと彩層で空間スケールが 10 – 1000 倍異なるが、スケールに依らず同様の形状をしており、磁力線の繋ぎ変え (磁気リコネクション) で統一的に説明できる点である [1]。アネモネジェットのスケール普遍性から、光球でも 100 km 程度のアネモネジェットが存在していると予想できる。しかし、磁気エネルギーが優勢でない光球 ($(\text{ガス圧})/(\text{磁気圧}) \sim 1 - 10$) で、磁気エネルギーが優勢なコロナ・彩層と同様に磁気リコネクションによる磁気エネルギーの解放でジェットができるのかは自明ではない。また、光球・彩層では密度は高さと共に指数関数的に減少する一方、電磁流体波のエネルギーフラックスがほぼ一定に保たれるため、波の速度が高さと共に急速に増加し、衝撃波を形成すると考えられる。光球アネモネジェットから生じた電磁流体波もこのメカニズムによって成長して上層へ影響を与えると考えられるが、どのように成長するか定量的には明らかではない。

そこで、発表者は電磁流体シミュレーションによって光球アネモネジェットについて研究している。計算の結果、光球でも磁気リコネクションによりジェット現象が確認された。また、電磁流体波の一種である遅い磁気音波がジェットと共に発生し、上層へ伝搬していくのも確認された。本発表では、ジェットを発生させた磁気リコネクションのメカニズム、及び磁気音波の上層への成長を議論する。

1. Shibata, K., Nakamura, T., Matsumoto, T., et al. 2007, *Science*, 318, 1591

太陽 c2 恒星フレアによる元素合成の可能性の数値的研究 關 嵩覚 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M2)

現在さまざまな場所でリチウムの存在量が観測されているが、それに対する理論的な説明は未だ与えられていないものが

多い。それらに対する説明として、フレアによって水素やヘリウムが加速され大気中の粒子と反応することでリチウムが生成されるというモデルが提案されてきた (Ryter et al. 1970 など)。しかしこのモデルでは反応による二次粒子の効果を考えていない。一方で太陽フレアの X 線観測の結果が、フレアにおけるリチウム合成の可能性を示唆している (Kotov et al. 1996 など)。さらには近年見つけてきたスーパーフレアという最大級の太陽フレアの 10 倍以上のエネルギーのフレアが存在が、今まで考えられていた以上の元素合成反応が起こる可能性を与えている。またフレアが活発な星ではリチウム組成が多くなっているのではないかという提案もある (Honda et al. 2015)。

そこで本研究では、従来は考えられていなかった二次粒子の効果やリチウム以外の元素の合成、スーパーフレアの存在を考慮に入れたうえで元素合成計算を行っている。その結果としてフレアにおいて元素合成が起こっているのか、またそれが恒星の化学組成に対して寄与を与えうるのかを評価する。我々はこれらの効果を厳密に考える前段階としていくつかの仮定を置いたテスト計算を行った。具体的には、彩層蒸発によって生じた温度・密度の上昇したプラズマの熱運動に起因する元素合成のみを仮定し、考慮する核種、反応は 495 種の同位体とそれらが含まれる反応とした。また太陽組成を初期値とし、温度・密度の値をフレア及び光球～彩層の典型的な値を考慮したものに固定して計算を行った。本講演ではこのテスト計算の結果と今後の展望について述べる。

1. Ryter, C., Reeves, H., Gradsztajn, E., & Audouze, J. 1970, A&A, 8, 389
2. Kotov, Y. D., Bogovalov, S. V., Endalova, O. V., & Yoshimori, M. 1996, ApJ, 473, 514
3. Honda, S., Notsu, Y., Maehara, H., et al. 2015, PASJ, 67, 85

太陽 c3 ゼロ・低金属量星におけるコロナループ加熱 鷲ノ上 遥香 (東京大学 鈴木研究室 M2)

初代星は宇宙で最初に誕生した金属 (重元素) を含まない星であり、宇宙進化を探る上で重要な天体である。従来、典型的な初代星は質量が $10^{2-3}M_{\odot}$ (M_{\odot} :太陽質量) 程度の大質量星であると考えられてきたが、近年の理論研究では小質量初代星の存在も示唆されている [1]。質量が $0.8M_{\odot}$ 以下の星の寿命は宇宙年齢を越える為、このような小質量初代星は現在の宇宙で生き残っている可能性がある。しかしながら未だゼロ金属量星は発見されておらず、観測的な証拠は得られていない。

本研究では理論的側面から小質量初代星の性質を理解するため、ゼロ・低金属量星のコロナに着目した。一般的な恒星の特徴として小質量主系列星は表面对流層を持ち、この乱対流に起因して磁気活動が励起され、上空のコロナの加熱に結び付く。コロナの状態は熱伝導や輻射冷却との釣り合いによって決定されるが、低金属量環境下では輻射冷却の効果が抑制されるた

め、星の金属量によってコロナの特性に違いが現れると考えられる。先行研究 [2] では低金属量星における開いた磁場領域での恒星風駆動数値計算が行われており、金属量の少ない星ほど強い星風が吹き出ると報告されている。ところが、閉じたループ構造におけるコロナの金属量依存性については未だ明らかになっていない。コロナの X 線・紫外線放射はループ構造からの寄与が支配的であるため、コロナループの金属量依存性を理解することは、輻射の観点から初代星観測や初期宇宙進化を議論する上で不可欠である。本研究では Alfvén 波によるコロナループ加熱の 1 次元磁気流体数値シミュレーションを行い、ループの動的進化および物理量の金属量依存性を調査した。この結果、輻射冷却の抑制によって金属量が少ないほど高温・高密度のコロナが形成され、ループからはより強い X 線が放射されることが示された。本講演ではこれらの成果を含めた計算解析結果について紹介する。

1. Greif, T. H., Springel, V., White, S. D. M., et al. 2011, ApJ, 737, 75
2. Suzuki, T. K. 2018, PASJ, 70, 34

太陽 c4 機械学習と数値計算を用いた微小フレアの 検出およびエネルギー推定 河合 敏輝 (名古屋大学 太陽地球環境研究所 M2)

太陽物理学における未解決問題の一つに、コロナ加熱問題がある。コロナを加熱するメカニズムとして有力な仮説が二つ存在し、それぞれ波動の散逸による加熱モデル、磁気再結合に伴う微小な爆発現象による加熱モデルである。後者の仮説に基づき、微小な爆発現象 (ナノフレア) によってコロナがどれだけ加熱されているかを推定することは、コロナ加熱問題の解決にあたって重要な課題である。そこで、本研究の目的は、ナノフレアの検出とエネルギー推定を高い精度で行う手法を開発することである。まず、ナノフレアによって加熱されたコロナループを一次元流体シミュレーションによって再現する。続いて、シミュレーション結果とスペクトル解析用データベース CHIANTI を用いて、コロナループのスペクトルの時間発展を取得し、それを衛星のフィルタに通すことで擬似的に観測する。様々なエネルギーおよび時間でフレアが発生するシミュレーションを多数 (> 3000) 実行し、それぞれについて擬似観測を行い、データセットを作成する。そして、シミュレーションにおけるフレアの入力と擬似観測の結果の対応を多層ニューラルネットワークに学習させる。それによって、実際に観測したコロナループの放射の時間発展から、発生したフレアの検出およびエネルギーの推定が可能となる。今回の発表では新たに、複数の観測機器 (Hinode/XRT, SDO/AIA) を用いて検出と推定を行なった。また、推定した結果を再度シミュレーションに入力・擬似観測を行い、放射の時間発展の再現度から精度を検証する。結果として、いくつかのコロナループ観測から、妥当と示唆される微小フレアの検出・エネルギー推定を行うことに

成功した。

1. T. Shimizu PASJ 47 251 (1995)
2. N. Nishizuka et al. 858 113 (2018)
3. E. Tajfirouze et al. 816 12 (2016)

太陽 c5 2017 年 9 月 6 日に大規模フレアを起こした活動領域のコロナ磁場外挿による不安定解析 山崎 大輝 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M2)

太陽フレアとは、太陽外層大気コロナ中での磁気エネルギー解放現象である。これまでの研究から、エネルギー解放を引き起こす物理的な素過程が磁気リコネクション (磁力線のつなぎ変え) であることはわかってきた [1] が、磁気リコネクションを駆動する物理は未だ明らかになっていない。また、大規模フレアに伴ってフィラメント (コロナ中に浮かぶ低温プラズマ) の噴出現象も確認されている。これらは、ともにコロナにおける磁場の不安定化とそれに伴うプラズマの力学非平衡化に起因する現象であり、コロナ磁場の情報が重要である。しかし、一般にコロナが希薄であるためコロナ磁場の直接観測はない。そのため、観測可能な光球磁場を境界条件としたコロナ磁場の外挿手法 [2] を用いた研究が行われている。

本研究では、2017 年 9 月 6 日に X9.3 クラスの大規模フレアが発生した活動領域 [3] について、コロナ磁場外挿手法を用いてコロナ磁場を再現した。また、再現されたコロナ磁場の電磁流体力学不安定の解析と彩層プラズマの速度場の時間発展の解析を行った。解析には、2017 年 9 月 4 日 UT0:00 から 9 月 6 日 UT12:00 までの SDO 衛星に搭載された HMI 望遠鏡による光球磁場データおよび、2017 年 9 月 4 日 UT0:00 から 9 月 5 日 UT6:00 までの飛騨天文台 SDDI 望遠鏡による彩層プラズマの速度場データを用いた。

本講演では、フレアに至る活動領域のコロナ磁場の不安定化とフィラメント噴出の前駆現象と考えられるプラズマ速度場の時間発展から推定された大規模フレアのシナリオについて発表する。

1. Shibata & Magara 2011
2. Wiegmann & Sakurai 2012
3. Yang, Zhang, and Zhu 2017

太陽 c6 宇宙天気予報研究のための太陽黒点分類機の開発 木原 孝輔 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M2)

太陽フレアとは、太陽大気において磁気エネルギーの解放を伴う爆発現象である。フレアはしばしばプラズマの放出や高エネルギー粒子の発生を引き起こし、停電や航空機乗員の被曝などの原因となる。そのため、フレアを事前に予報しようとする

研究が数多く行われている。しかし、大きく複雑な黒点がフレアを起こしやすいこと [1] は経験的に知られているが、発生のトリガーとなる現象は未だ解明されていない。そこで近年、膨大な量の太陽観測データを生かし、機械学習の手法を用いてフレアの発生を予報する試みがなされている。ここで機械学習とは、大量のデータの特徴を機械に処理・学習させ、未知のデータに対する判断を得る手法の総称である。

これまで、黒点周辺の画像特徴のみからフレアの発生を予報する研究 [2] が行われているが、黒点から抽出した磁場などの物理量を用いる [3] よりも予報精度は低い。しかし、太陽フレアのトリガー機構が未解明である以上、太陽画像には何らかの現象が隠されていると考えられ、画像を用いたフレア予報研究は重要である。そこで我々は、太陽画像から直接フレアを予報するのではなく、まず「大きく複雑な黒点がフレアに関連する」という経験則を用いて事前学習を行うことを試みた。その上でフレアを予報することで、先行研究と比べて高精度なフレア予報機を構築できる可能性がある。

本研究では、この事前学習にあたる段階として、機械学習を用いた黒点の複雑さ (マウントウィルソン分類、マッキントッシュ分類など) の分類機を開発した。本講演では、これまでの結果と今後のフレア予報機の展望を報告する。

1. Sammis, I., Tang, F., & Zirin, H. 2000, ApJ, 540, 583
2. Huang, X., Wang, H., Xu, L., et al. 2018, ApJ, 856, 7
3. Nishizuka, N., Sugiura, K., Kubo, Y., et al. 2018, ApJ, 858, 113