

2020 年度 第 50 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

本田 敏志 (兵庫県立大学 自然・環境科学研究所 天文科学センター 准教授)

8月25日 11:15–12:15 room 2

活動性を示す恒星の観測と今後への期待

恒星の可視光観測は最も基本的な観測であり、古くから盛んに行われてきました。多種多様な恒星について観測が行われ、その結果、恒星の誕生から最期まで進化についてもほぼ解明され、内部構造までも理解が進んでいます。近年では、系外惑星探査 (Kepler、TESS など) や、銀河系の構造や形成進化 (GAIA など) を主な目的とした、大規模な恒星の観測が行われています。これらは、恒星そのものの研究を主目的としたものではありませんが、得られた膨大な観測データは恒星研究にとっても重要なものであり、変光星の研究や星震学などに大きなインパクトを与えています。私たちは Kepler 衛星のデータからスーパーフレアを起こす星を発見し、そのような活動する星の観測を続けてきました。これまでに得られている結果は、太陽研究にも関連するものでありますが、まだ不明なことが多く今後さらなる観測が必要であることを示しています。講演では私たちが実際に行ってきたフレア星の観測などを紹介します。

堀田 英之 (千葉大学 理学研究院物理学研究部門助教) 8月26日 13:15–14:15 room 2

太陽ダイナモ問題解決に向けて

太陽黒点は11年の周期で変動しています。これはガリレオの観測以来、マウンダー極小期と呼ばれる期間をのぞいて400年以上にわたって継続しています。この11年周期維持の物理機構は未だに理解されておらず、「太陽物理学最大の問題」と呼ばれています。黒点は、太陽表面の中で強い磁場を持つ領域なので、太陽黒点11年周期は、太陽磁場11年周期の問題と考えることができます。太陽の磁場は、太陽内部で生成されていると考えられていますが、太陽内部はいかなる光を用いても観測できないために、数値シミュレーションによるモデリングが研究において重要な手段となります。太陽内部は、核融合反応の加熱により外側30%は、乱流的な熱対流で埋め尽くされています。この熱対流が磁場を生成し、11年周期を維持していると考えられています。この熱対流をできるだけ正確にモデリングし、理解することが11年周期解決の鍵となりますが、一筋縄ではいかず、現在も活発に研究が進められています。講演では、これまでの研究をまとめたのちに、太陽内部モデリングの何が難しいのかを説明し、今後の方向性について議論したいと思います。

太恒 1 深層学習を用いた乱流場の水平速度診断手法の開発

石川 遼太郎 (総合研究大学院大学 物理科学研究科天文科学専攻 D2)

太陽活動の 11 年周期と相関せず表面に普遍的に存在する小スケール磁場の形成過程として、表面の乱流的な運動による磁場増幅が理論的に提唱されている。観測的な検証が必要であるが、水平速度診断に多くの制限がある。現在は粒状斑の模様の変時間変化を追跡することで水平速度の推定を行う方法 (LCT) が広く用いられているものの、この手法では乱流のような小スケールの構造を捉えることができない。本研究では多次元の畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いた深層学習によって、幅広い空間スケールに対応した新たな速度診断手法を構築した。

CNN は入力画像に畳み込むフィルターを学習することで、画像の模様を検出する手法である。本研究では、観測可能な物理量である輻射強度や鉛直速度成分の空間構造 (画像データ) を入力として用いて、(1) 一枚の画像から水平速度場を推定するモデルと、(2) 時間的に連続した複数枚の画像から水平速度を推定するモデルを開発した。前者は一枚の入力画像に二次元のフィルターを畳み込むことで、粒状斑構造を学習して水平速度場を推定するモデルである。大きさの異なるフィルターが複数組み合わせられた分岐・結合を伴うネットワーク構造を用いることで、幅広い空間スケールに対応したモデルが実現され、予測と答えの相関係数 0.90 を達成した。さらに時間方向を含めた三次元のフィルターを使用したものが二つ目のモデルである。時間変化の学習も合わせて行うことで LCT の考え方も取り入れられている。このモデルでは相関係数が 0.96 まで向上し、粒状斑よりも小さい構造から大きい構造までパワースペクトル全体をよく再現できた。

以上の結果から、観測可能物理量と CNN を用いた深層学習によって、観測困難な乱流場における水平速度場の推定が可能になった。この手法と DKIST などによる超高空間分解能の観測を併せることで乱流場の理解が大きく進展することが期待される。

太恒 2 ディープラーニングの活用した太陽光球における水平速度場予測

正木 寛之 (千葉大学 融合理工学府先進理化学専攻物理学コース M1)

ディープラーニングを活用して太陽の放射強度から太陽光球での水平速度場を予測する手法を開発した。太陽プラズマの運動は黒点形成やフレアといった多くの現象と関連している。そのためプラズマの運動を調査するための様々な観測が行われているが、ドップラー効果を活用できる視線方向速度場と異なり、視線方向に垂直な成分は観測が困難である。ある程度時間が離

れた二枚の太陽観測の画像から、変位を取り出すことによって視線方向に垂直な速度場を推測する手法などが考案されているが、十分な精度ではない。一方で、プラズマの性質を探るために多くの数値シミュレーションが行われ、コンピューターの性能の向上などに伴って高い精度で太陽内部を現象を再現できるようになっている。本研究では数値シミュレーションとディープラーニングの技術を組み合わせて、太陽の放射強度の画像から対応する速度場を予測するためのコードを開発した。ニューラルネットワークの学習には本研究で独自に行った磁気流体シミュレーションの結果を用いた。これにより、実際の太陽の観測では得ることのできない物理量のデータを十分な量確保することができ、水平速度場に適応するようにネットワークを学習させることができた。今回開発したコードは放射強度を入力するとそれに対応する水平速度場の 2 成分を出力するものである。ネットワークを畳み込みニューラルネットワークのみで構成することにより、効率よく学習ができるようになっている。結果として、ネットワークが予測した速度場と数値計算によるものの間で 0.8 という高い相関係数を実現した。加えて、任意のピクセル数の放射強度画像から水平速度場を予測することができて、極めて高速に計算を行うことができるようになっている。

太恒 3 太陽黒点における磁場強度と力の関係について

石倉 秋人 (千葉大学 融合理工学府先進理化学専攻 M2)

太陽黒点の輻射磁気流体計算をおこない、強磁場黒点を支える力について調査した。黒点は太陽表面に表れる強磁場領域である。黒点の光球面での磁場強度は一般に 3000 G 程度であるが、これは静穏領域光球面のガス圧では支えきれない。では、黒点がどのような力学によって支えられているのか、これを考える必要がある。本研究では、我々のグループで独自に開発した輻射輸送磁気流体計算コード、R2D2 (Hotta et al., 2019) を用いて調査をおこなった。水平方向に 49.152 km × 49.152 km、鉛直方向に 6.144 km の計算領域を用意した。その中心に黒点モデルとなる磁場を置き、三次元輻射磁気流体計算を実行した。黒点深部、計算領域の下部境界での磁場強度を 4000 G、10000 G と変化させることで、黒点表面で発生する磁場を変化させ、その影響を議論した。深部磁場を 10000 G とした、より強い磁場が観測される黒点では、静穏領域と比べてその光球面が深い位置になる。太陽の成層により、ガス圧は深い位置でより強くなる。静穏領域光球面より強い深い位置でのガス圧が、強磁場黒点を支えていることがわかった。また、深い場所の磁場が強い場合、磁気張力は磁気圧力を打ち消す方向に働き、黒点を支える作用をする。深度磁場を 4000 G とした、比較的弱い磁場が観測される黒点の場合、磁気張力は全体の力のバランスに大きな影響を与えないということがわかった。

太恒 4 太陽表面における磁場要素の磁束、磁場強度、移動速度の関係

高畑 憲 (千葉大学 融合理工学府先進理化学専攻 M2)

太陽静穏領域の輻射磁気流体計算を行い、差動回転を模した強制流のある場合、太陽表面磁場の磁束、磁場強度、移動速度にどのような依存関係があるか調査した。これまでに Imada et al., 2018 によって、太陽表面では平均磁場強度の強い磁気要素ほど、速く経度方向に流されていることが発

見られている。平均磁場強度の強い磁気要素ほど太陽内部深くまで貫いていると仮定すると、強い磁場はより速い差動回転の影響を受け、より速く経度方向に流されると説明することができる。本研究では、この仮定の妥当性を検証するため、磁気流体計算コード R2D2(Hotta et al., 2019) を用いて輻射磁気流体計算を行った。まず、差動回転を模した流れとして、最大速度 2 km/s で深さの 1 次関数となる水平流をおき、約 27 Mm × 27 Mm × 5Mm の範囲で行った輻射磁気流体計算により磁場を生成した。次に、光球の 2 次元データに対し磁場強度や磁束の閾値を用いることで磁気要素を検出した。この操作を 36 時間分の計算データに適用し、述べ数百万個の光球磁場を自動的に検出・追跡し、磁場強度や磁束量ごとの流れ場を統計的に見積もった。結果として、大きな磁束量をもつ磁気要素ほど速く流されることがわかり、Imada et al., 2018 などでも用いられている仮定の妥当性を確認できた。

太恒 5 太陽高エネルギー粒子 (SEP) とコロナ質量放出 (CME) の関係性に対する統計的研究

木原 孝輔 (京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 D1)

太陽高エネルギー粒子 (Solar Energetic Particle; SEP) は、太陽フレアやコロナ質量放出 (Coronal Mass Ejection; CME) といった太陽の突発現象に伴い発生する。SEP はその発生源によって大きく 2 つに分けられ、太陽フレアのリコネクション時に加速されるものは Impulsive SEP、コロナ質量放出の衝撃波で加速されるものは Gradual SEP と呼ばれる (Reames 1999, 2013)。SEP は、高緯度を航行する航空機における被曝や人工衛星の障害など、社会基盤に与える影響が大きく、宇宙天気分野における重要な研究対象である。一方、これらの SEP がどのようなタイムスケールで地球へと到達し、継続するか、については明らかになっていない点が多い。

我々は、SEP がどのように加速され、どのように地球へと到

達するかを理解するため、Gradual SEP に着目し、CME と SEP の関係についての統計解析を行なった。SEP の発生有無に関わらず、高速で放出幅の広い CME を 257 例抽出し、太陽面上での詳細な発生位置を調査したのち、太陽から 1AU 離れた 3 方向の観測機器 (GOES、STEREO-A、STEREO-B) のデータを用いて >10 MeV プロトンの発生の有無を調べた。その結果、観測機器から見て、太陽面上の東経 20 度から西経 100 度で発生した CME は高い確率で SEP を伴うことが分かった。さらに、SEP の到達時間 (TO)、ピークの立ち上がり要する時間 (TR)、継続時間 (TD) の 3 つのタイムスケールを測定し、観測機器に接続する磁力線 (パークースパイラル) の太陽面での足元から見た相対経度及び CME 速度との相関を調べた。磁力線の足元付近では TO が短くなる傾向が見られたが、TR や TD ではこの傾向は小さかった。また、タイムスケールと CME 速度との間には、相対経度が大きいイベントでは CME が速いほど TR と TD が長くなり、相対経度が小さいイベントでは CME が速いほど TO が短くなる傾向が見られた。

本講演では、これらの解析結果を詳しく紹介し、それらから得られる加速機構の描像について議論する。

太恒 6 超小型衛星で迫る太陽フレアからの熱的・非熱的放射の時間発展と粒子加速

長澤 俊作 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M2)

太陽フレアとは、わずか ~1000 秒程度で最大 10^{33} erg ものエネルギーを解放する太陽系で最も激しい爆発的現象である。このようなエネルギー解放は反平行成分を持つ磁力線同士が繋がぎ変わる磁気リコネクション機構によって磁場エネルギーが熱や粒子の加速エネルギーに変換されることで生じることが分かってきたが、未だモデルは確立していない。太陽フレアに伴う X 線の放射には、主に加速された電子と周辺プラズマとの制動放射による非熱的放射と、それに伴い加熱された高温プラズマによる熱的放射の 2 種類存在すると考えられている。そのため、X 線帯域でのスペクトル解析を元にこれらを分離し各々の時間発展を追うことは、フレアに伴う加熱、冷却および粒子加速の過程を理解する上で重要である。しかし、これまでの解析では RHESSI 衛星による ~10 keV 以上の硬 X 線観測データのみを用いるものが中心であり、特に熱的成分と非熱的成分の低エネルギー側のカットオフの決定精度が悪く、加熱・冷却過程の詳細な追跡や加速電子の持つエネルギーを正確に見積もることは難しかった (Holman+ 2011)。また、1~10 keV の軟 X 線帯域の観測データは GOES 衛星による 2 バンド (1.6-12 keV, 3-25 keV) のみであり、詳細なエネルギーバンド毎の解析は不可能であった。

そこで本研究では、2016 年から約 1 年間太陽全面からの 0.8-12 keV の軟 X 線観測を行なった超小型 CubeSat 衛星 MinXSS-1 (Moore+ 2018)、及び RHESSI 衛星の 10-100 keV

の硬 X 線観測データを組み合わせ、2016 年 7 月 23 日に発生した M クラスフレアを対象に XSPEC を用いてスペクトル解析を行なった。その結果、RHESSI 衛星のみを用いるよりも、熱的・非熱的成分を精度よく決定することが可能となり、得られたパラメータを元に熱電子の温度・エミッションメジャーの時間発展を高精度で求めることに成功した。また、フレアの発展に伴う abundance の時間変化についても調査を行なった。

本講演では以上の結果を紹介し、太陽フレアに伴う熱的・非熱的放射の時間発展及びその物理について議論する。

太恒 7 活動領域からのアウトフローと遅い太陽風の関連性の FIP 効果による検証、および突発現象への応用

井上 大輔 (京都大学 理学研究科宇宙物理学教室 M1)

太陽大気中では、約 10eV 以下の第一電離ポテンシャル (FIP) を持つ元素の割合がコロナ中で光球中と比べ大きくなる、という現象 (FIP 効果) が知られている。FIP 効果についての研究は Pottasch(1963) から始まり、太陽研究において長年取り組まれている問題の一つである。FIP 効果の現れ方の強さは、準定常的には太陽の強磁場な黒点近傍 (活動領域) の時間発展と共に変化すること (Widing and Feldman, 2001) や、太陽風中では、太陽風の速度によって異なることが知られている (von Steiger et al., 2000)。また、準定常的な場合の FIP 効果の現れ方の強さが時空間的に異なることを利用して、太陽風がコロナのどこから吹き出しているのか調べる試みもある (Brooks and Warren, 2011)。したがって、太陽大気での爆発 (太陽フレア) やそれに伴うジェット現象に対し FIP 効果の現れ方を検証すれば、それらがどこから吹き出しているのか理解を高められることが期待される。近年、太陽観測衛星「Hinode」等による高時間・空間分解能の分光観測により、突発現象の際にも様々な元素の輝線から元素組成比を調べることが可能になった。そのため、太陽フレアなどの突発現象に伴う FIP 効果やその強さの変動が発見されてきている (Dennis et al., 2015)。しかし、エネルギー規模などで区別される多種多様なフレアに伴う FIP 効果の現れ方について、統一的な評価は定まっておらず今後より詳細な研究が必要である。

発表者は、Hinode の分光観測で得られた突発現象に伴う FIP 効果の解析に取り組もうとしている。本発表ではその前段階として、同じく Hinode の分光観測により、活動領域の端から準定常的に吹き出すアウトフローと遅い太陽風の FIP 効果の現れ方の強さが一致していることを明らかにした、Brooks and Warren(2011) についてレビュー講演を行う。さらに、ジェットを伴うフレアでの FIP 効果の現れ方の検証を試みる自らの研究計画についても述べる。

太恒 8 低質量星におけるアルフベン波駆動の磁気回転風について

清水 公彦 (東京大学 総合文化研究科広域科学専攻 M1)

太陽をはじめ、恒星はダイナモ効果により磁場を生成している。これらの磁場はコロナ加熱、恒星風、フレア、コロナ質量放出などの様々な現象をもたらす。このような恒星の活動の進化を理解することは天文学における重要な課題の一つである。恒星の自転と対流に夜恒星内部の流体運動が、恒星のいば増幅に大きく寄与する。そのため、恒星の自転の進化を理解する必要がある。

低質量星はその寿命の間にスピンドウンすることが知られているが、これには磁気制動という、恒星風による角運動量の損失が影響を与えている。磁気制動は回転率に応じて強くなることから、ある程度の年齢に達した低質量星の回転速度は初期の回転速度に依らず、時間の冪乗に比例する。これはジャイロクロノジーと呼ばれ、恒星の年齢の推定にも使われる。しかし、実際には古い星ではジャイロクロノジーから外れることもあり、原因を特定することは重要である。そのために恒星風と自転の関係を調べるために恒星が角運動量を失うメカニズムをモデル化する必要がある。

これまでの恒星風の理論的研究から、磁気制動トルクはアルフベン半径と質量損失率により規程されていることが知られている。よってアルフベン半径と質量損失率を同時に考慮したモデルを作る必要がある。そのためには彩層とその中の波動を解像し、恒星風の加速を十分にカバーできるだけの大きなシミュレーション領域が必要となる。

本講演では先の条件を満たした次元太陽風モデルを用いて磁気流体シミュレーションを行い、自転率への依存性を調べた先行研究 (Shoda et al. 2020) を紹介する。その上で先行研究では扱われていない、磁束管の形状を変化させた場合の磁気回転恒星風邪のシミュレーションを行い、質量損失率と磁気制動がどのように影響を受けるかを報告する予定である。

太恒 9 狭帯域フィルターを使った金属欠乏星搜索

岩崎 巧実 (甲南大学 自然科学研究科物理学専攻 M2)

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。その金属欠乏星の搜索方法に、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、金属欠乏星の捜索に有用である (Starkenburg 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、多くの金属欠乏星候補天体をまとめて見つけられることが期待される。本講演では、金属欠乏星の捜索に対する 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、および 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候補天体の捜索への利用についての議論を行う。また、2020 年 2 月に行った、兵庫県立大学西はりま天文台 2m なゆた望遠鏡を用いた金属欠乏星候補天体の追観測結果も合わせて紹介する。

太恒 10 多波長同時観測で迫るおうし座 UX 星で生じた巨大フレアの特徴

北古賀 智紀 (中央大学 理工学研究科物理学専攻 M1)

2009 年から稼働を開始した全天 X 線監視装置 MAXI は、90 分に一度全天を走査することで、最大規模の太陽フレアのエネルギーと比べて 4 - 7 桁も大きい恒星フレアを見逃さず検出することを可能にした (Tsuboi et al. 2016)。しかし、このような巨大恒星フレアの発生機構や性質は、未だに太陽ほど詳細に理解されていない。そこで我々は、フレアの同時多波長観測によって複数波長の情報を統合することで、恒星フレアの包括的理解を目指した。その方法として、フレアを頻度高く起こす恒星である、りょうけん座 RS 型連星のおうし座 UX 星を可視光、軟 X 線、電波の帯域で 2018 年から 2019 年の期間にモニター観測した。本発表では X 線望遠鏡 NICER (0.2-12 keV) と山口-日立 32, 34 m 電波干渉計 (6.7 GHz, 8.3 GHz) によって得られた結果について報告する。

我々は、おうし座 UX 星からのフレアの多波長観測に、2 度成功した。その結果、[1] 電波では 2 ヶ月もの期間でフレア減衰時も定常時も自転周期に対応した sin カーブの光度変動が見られる、[2] 一方、軟 X 線に周期的な変動は見られない、[3] さらに、1 つ目のフレアは、減衰中に電波 2 波長の強度比 (8.3 GHz / 6.7 GHz) が電波の光度曲線と反相する、とわかった。ここで、放射が sin カーブで変動する要因が自転による放射領域の見え隠れだと解釈すると、見え隠れする度合いから大まかな放射領域の高度を類推できる。つまり、結果 [1]-[3] より、星表面に近い成分から順に、電波の低周波、電

波の高周波、軟 X 線だと考えられる。本発表では、その放射領域の分布に関する議論を行い、加えて電波の放射機構についても考察する。

太恒 11 TESS と MAXI を用いた巨大恒星フレアにおける白色光フレアエネルギーと X 線最大光度の関係

岡本 豊 (中央大学 理工学研究科物理学専攻 M1)

巨大な磁気エネルギーの解放現象であるフレアは、太陽だけでなく近傍の恒星からも観測されており、M 型星のフレア放射エネルギーは大きいもので 10^{35} erg にも及ぶ。太陽で起こる彩層蒸発現象がこのような巨大恒星フレアに適応できるかを知る上で、多波長による同時観測結果の比較は重要である。太陽フレアでは、可視連続光 (白色光) 帯域での放射エネルギー (E_{WL}) と、1-8 Å における X 線の最大光度 (L_X) の間に、 $L_X = 10^{25}-10^{27}$ erg s^{-1} において、 $E_{WL} \propto L_X^{1.0}$ という関係にあることが報告されている (Namekata et al. 2017)。これは、非熱的放射の彩層・光球突入の結果放射される白色光フラックスの時間積分と熱的放射である軟 X 線フラックスが比例する、Neupert 効果を示していると考えられる。この関係が恒星でも成り立つのかを調べるために、6,000-10,000 Å の帯域で全天を測光観測している系外惑星探索衛星 TESS、及び 2-20 keV の帯域で全天を捜査観測している MAXI に着目し、同時観測されているフレアの調査を行ったところ、2018 年 8 月 16 日に dMe 型星のけんびきょう座 AT 星で生じたフレアが同時観測されていた。このフレアの 0.01-10keV における X 線の最大光度は $L_X = 7 \times 10^{31}$ erg s^{-1} という巨大なものであり、MAXI と TESS のデータから L_X と E_{WL} を求めた。さらに、X 線と可視光で恒星フレアを同時観測した先行研究 (Guarcello et al. 2019) のデータを基に、 $10^{29}-10^{30}$ erg s^{-1} における L_X と E_{WL} を求めた。その結果、太陽及び恒星フレアにおける $E_{WL}-L_X$ 関係は 6 桁にわたって $E_{WL} \propto L_X^{1.0}$ であった。このことは、恒星フレアにおいても Neupert 効果が成り立つことを示唆する。

太恒 13 飛騨天文台 SMART-TEM 偏光キャリブレーション

山崎 大輝 (京都大学 理学研究科附属天文台 D1)

太陽フレアは太陽コロナで発生する磁気エネルギーの突発的 (~ 10 min) 解放現象である。太陽フレアの発生機構の理解には、< 60 sec の時間分解能で太陽大気の磁場データを取得する必要がある。SMART 望遠鏡搭載マグネトグラフ (TEM; Nagata et al. 2014) は、光球に感度のある Fe I (波長中心 6302.5 Å) に対して、 ± 160 , ± 80 m Å の 4 波長点で、~ 30 sec の時間分解能で測光精度 $\sim 3 \times 10^{-4}$ の偏光フルストークスプロファイルを観測し、光球ベクト

ル磁場データを取得している。本研究では、回転波長板式の偏光観測装置である TEM の機器偏光の較正（偏光キャリブレーション）のため、対物レンズの上流に直線/円偏光板（HN38/HNCP37）を設置して、TEM の光学系全体の偏光特性を表すポラリメータ応答行列（e.g. Elmore 1990）を取得した。その結果、TEM の理論偏光モデルがなく、要求精度を1桁以上上回る、偏光特性の視野内での空間分布が確認された（Yamasaki et al. 2019）。そこで、TEM の光学系を構成する偏光ビームスプリッタおよび、折り曲げ鏡の偏光特性の空間分布を個別に診断する実験を行った。ポラリメータ応答行列の空間分布は、偏光ビームスプリッタの固定に伴う内部応力に起因した透過率比 ~ 0.01 の円二色性と折り曲げ鏡への入射角に依存した遅延の分布に起因することが示唆され、これらを含む TEM の新しい理論偏光モデルを構築した。本講演では、TEM の偏光観測の原理および偏光キャリブレーションの概要とその結果について考察する。

太恒 14 京都大学飛騨天文台 SMART/SDDI を用いたフィラメント噴出・消失現象の3次元速度場の導出

木村 なみ (京都大学 総合生存学館 M1)

太陽活動など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（フィラメント・プロミネンス）の噴出現象は、太陽のプラズマを大量に惑星間空間に噴出するコロナ質量放出（CME）を伴うことも多く（Gopalswamy et al., 2003; Munro et al., 1979）、磁気嵐の原因の一つと言われている。しかし、フィラメント噴出と CME の関係性は、観測視野のギャップなどにより、未だ明らかになっていない。先行研究である（Morimoto & Kurokawa., 2003）では、飛騨天文台フレア監視望遠鏡（FMT）による $H\alpha$ 線を中心とした $\pm 0.8A$ の範囲にある3波長での観測データに対し、「クラウドモデル」（Beckers, J. M., 1964）を適応することで、フィラメント噴出現象の視線速度の導出に成功した。また視線に垂直な方向の速度と組み合わせることで3次元速度場の導出も可能となった。本研究では京都大学飛騨天文台の SMART/SDDI（Solar Dynamics Doppler Imager）（Ichimoto et al., 2017）を用い、2016年8月9日23:30UT から2016年8月10日3:30UT にかけて北東リム付近で見られたフィラメント噴出現象について詳細に調べた。このフィラメントは、太陽面に対し約150km/sの最大速度で噴出し、また関連して大規模なCME（速度370km/s）が8月10日4:00UT に発生している（Seki et al., 2020）ことがわかっている。SDDI による $H\alpha$ 線を中心とした $\pm 9^\circ A$ の範囲にある73波長での観測に、クラウドモデルを適応するこ

とで、観測可能な速度は $\pm 60\text{km/s}$ から $\pm 400\text{km/s}$ にまで拡大した。ここに、視線に垂直な方向の運動を組み合わせることで、フィラメントの3次元速度場を導出した。我々はさらにフィラメント内部のプラズマ塊の一つ一つに着目し、その視線方向や視線と垂直な方向の速度の時間変化を追い、噴出前後のフィラメントの構造の変化を詳細に調べた。本講演では、このフィラメント噴出で見られた微細構造の時間変化について報告する。

太恒 15 太陽の CaK 線撮像分光観測による紫外線放射の推定

田中 宏樹 (京都大学 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 M2)

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おり、太陽活動が地球の気候に与える影響について研究されている（宇宙気候学）。太陽紫外線放射は、太陽活動と同期して、可視光（太陽総放射量）に比べて大きく変動しており、特に地球の電離層に影響を与えている。しかし、紫外線は地上に届かず、人工衛星による観測が必須なので、継続的な観測は1990年代以降に限られる。そのため、長期の紫外線放射の変動は明らかにされていない。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ことを利用する。CaK 線は、地上からの過去の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）] 本研究では、飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡（DST）の水平分光器による2010年8月22日、2012年8月1日、2018年5月5日の CaK 線の画像データと、人工衛星 SDO の紫外線観測装置 AIA による同日の紫外線 304 Å、1600 Å、1700 Å の画像データを用いた。DST の波長分解能を生かし、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。また、暗い領域と明るい領域で散布図の振る舞いの違いを調べた。その結果、紫外線の波長が長くなると、相関のいい波長幅は広くなることが分かった。また、波長幅が広いとき、明るい領域では、CaK 強度の増加に比べて、紫外線強度の増加が大きいことが分かった。輝線や短い波長の紫外線を再現するには、Mt. Wilson などの波長幅が狭いデータ、長い波長の紫外線を再現するには、Kyoto などの波長幅が広いデータを使う、領域ごとに再現の手法を変える必要があると考えられる。

太恒 16 太陽表面リム境界近傍におけるドップラー速度観測から迫る対流の三次元構造

森塚 章恵 (東京大学 理学系研究科天文学専攻 M1)

太陽光球面で見られる磁気対流は三次元構造を持つと知られており、その構造によって観測される吸収線の輪郭と偏移が変わる。光球面の波長偏移は光球面中心において対流の垂直方向運動に起因し、縁(リム)近くでは水平方向運動の影響を受ける。対流の三次元構造と視線方向の関係によって、光球面のドップラー速度が光球面中心からリムにかけて赤方偏移するように観測される現象(リム赤方偏移)が起こると考えられている。しかし、リム赤方偏移は太陽面中心からの半径に依存する関数として経験的に得られているだけで、対流の三次元構造が波長偏移に与える影響をリム境界まで精密に調べたものはなく、リム赤方偏移の定量的な説明はまだ確立されていない。

本研究では「ひので」衛星で観測される Fe I 630.15nm 吸収線の分光データを用いて、太陽面中心からリムにかけてドップラー速度を求めた。「ひので」衛星の高い空間分解能は、太陽面のリム境界まで吸収線の輪郭の観測を可能にし、さらに、太陽光球面では吸収線として見えていた Fe I 線がリムの境界から外側約 1 秒角以内において輝線として観測されている。そこで、吸収線と輝線のドップラー速度の差に着目して解析を行った。「ひので」衛星の波長校正の基準として用いられている吸収線に対して、輝線が青方偏移していることが分かった。輝線は対流の水平運動を真横から見ていることから平均速度はほぼゼロになると考えることができ、相対的に吸収線はリム近傍で赤方偏移していると考えられる。さらに、リム近傍で太陽面内の吸収線をバイセクター解析し、ドップラー速度の高さ構造を調べたところ、光球の下層部は上層部に比べてリム赤方偏移の影響が小さく、その速度差は最大で 500 m/s にもなった。速度差はリムに近づくにつれて広がっていくが、リムの境界近傍では逆にその差がほぼなくなることが分かった。本講演では、リム近傍におけるドップラー速度の観測から推測される対流の三次元構造について議論する。

太恒 17 太陽光球中の磁気リコネクションで発生するジェット状構造の形成機構

古谷 侑士 (京都大学 理学研究科附属天文台 D1)

太陽大気の色層・コロナでは足元に明るいループを伴うジェット現象(プラズマの噴出流)が観測されている。これらのジェットは、色層とコロナで空間スケールが大きく異なるが、空間スケールに依らず磁力線の繋ぎかえ(磁気リコネクション)によって統一的に説明される(Shibata et al. 2007)。このことから、色層・コロナのものよりも小さなジェットが太陽光球でも存在していると予測できる。しかし、光球でも磁気リコネクションは起こると期待されるが、色層・コロナと異なり光球は磁気エネルギーが優勢でないため、磁気エネルギーがジェットの運動エネルギーに高効率で変換されるかは非自明である。この問題を解決するため、講演者は太陽光球のパラメータを用いて三次元磁気流体計算を行った。数値計算の結果、光球では磁気リコネクションによりジェット状にプラズマが圧縮された

が、プラズマの噴出流であるジェットは形成されなかった。解析の結果、ジェット状にプラズマが圧縮された構造(ジェット状構造)は背景磁場に沿って伝搬する遅い衝撃波による圧縮で形成された見かけの構造であることがわかった。本講演では、光球でのジェット状構造の形成機構、および色層・コロナの明るいループを伴うジェットと比較した場合の共通点、相違点について発表する。

太恒 18 部分電離プラズマ中で起きる磁気リコネクションの数値的研究

富野 芳樹 (京都大学 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 M2)

約一万度の太陽色層には部分電離プラズマが存在し、ジェット現象などの突発的なエネルギー解放現象が頻繁に起こっている。これらの現象のエネルギー解放過程では磁力線のつなぎ替え(磁気リコネクション)が重要な役割を果たし、それに伴って生じる衝撃波がプラズマの運動に大きく影響していると考えられている(Shibata & Magara 2011 ほか)。そのため、磁気リコネクションで生じる衝撃波や磁場の構造を理解するための数値的研究(例 Yokoyama & Shibata 1998)は以前から行われてきた。また、部分電離プラズマの存在する色層でのジェット現象に関しても同様に数値計算(例 Martinez-Sykora et al. 2017)によって盛んに研究されてきた。それらの研究では電離成分(イオンと電子)と中性成分(中性粒子)の混在する色層を簡単のため一流体の電磁流体と近似している。しかし、電離成分と中性成分が混在している色層を一流体として扱うことの妥当性は十分に検証されていない。実際に部分電離プラズマ中での衝撃波の発展に関して、一流体として計算した場合と二流体(電離成分と中性成分)で計算した場合に磁場の構造や圧力の分布が異なる結果になることが一次元の数値計算では示されている(Snow & Hillier 2019)。

本研究では部分電離プラズマ中で磁気リコネクションが起きた際に、一流体で計算した場合と二流体方程式で計算した場合の結果の違いを二次元の数値シミュレーションを用いて調べた。計算の設定は Zenitani & Miyoshi (2011) を参考にし、定常なリコネクションが起きるようにした。結果として電離成分の圧力にのみ衝撃波構造が生じる場合に、一流体での計算と二流体計算の結果の違いが生じることが確認された。本講演ではこれまでの結果と、色層で部分電離プラズマを一流体として扱える範囲に関して議論する。

太恒 19 太陽コロナを想定した磁気リコネクションの Hall MHD 計算

村上 享平 (名古屋大学 工学研究科電気工学専攻 M2)

太陽コロナは太陽の表面より高温であるが、その熱源は未解明である。太陽表面の対流エネルギーの1%でも散逸すれば説明できるがそのメカニズムは解明されていない。このコロナ加熱を説明するモデルの一つにナノフレアによるエネルギーの散逸がある。ひので衛星の観測結果から浮上磁場の間にナノフレアによるものと考えられる発光現象が確認されている。しかし、ひので衛星の性能ではナノフレアの詳細な磁力線の構造を観測することが難しい。コロナにおける磁気リコネクションの研究の多くは、電気抵抗のみを仮定しているため、コロナのような無衝突プラズマで有効なHall効果を考えていない。しかし、Hantao Ji & William Daughton et al 2011においてコロナは電気抵抗とHall効果の両方が有効であることが示されており、ナノフレア発生過程においてどちらが先に有効となるかは不明である。太陽内部で捻れた磁力線がコロナに浮上すると、電流層の周りの密度が急減し、Hall効果が有効になると考えられる。本研究では、Hall MHDを使用して浮上磁場でリコネクションするモデルの作成を目的とする。浮上磁場を再現するために、電流層に対して水平に重力を追加した。この重力は、磁場が浮上したときのループに沿った重力を表している。ループに沿った方向の重力成層を模擬することによってコロナ中で浮上磁場の密度が減少する状況を再現した。抵抗性MHDを用いて、重力の影響により密度が最も小さくなるループの頂点でリコネクションが発生することを確認した。また、重力を強くすることによりリコネクションが加速することがわかった。これは、密度が減少することで電流層が薄くなったためである。実際のコロナでは、プラズマの密度が低いためHall効果による加速も有効に働くと考えられる。従って、重力成層を考慮した計算にHall項を追加し、リコネクションが加速することを確認する。

太恒 20 飛騨天文台 SMART 望遠鏡を用いた光球 5 分振動由来の磁気流体波の彩層へのエネルギー輸送の観測的研究

白戸 春日 (京都大学 理学研究科宇宙物理学専攻 M1)

太陽大気加熱機構の理解には上層大気への波の伝播メカニズムの解明が重要である。

静穏領域では、光球の磁束管は非一様に分布し、彩層の磁場はネットワーク構造をしている。また磁束管は上空にいくほど膨張し、磁気圧とガス圧が同程度になる高さで層(磁気キャノピー)を形成する。光球で励起された音波は磁気キャノピーで磁気音波に変換される。これまでの観測から彩層の磁気ネットワーク周辺で音波の力が強い領域や弱い領域の存在が報告されている (Krijger et al. 2001; Kontogiannis et al. 2010a) が、その形成機構は、磁気キャノピーでの音波の反射やモード変換に起因するという理論的示唆しか得られていない。

今回紹介する Kontogiannis et al. (2014) で

は、理論モデルの観測的検証のため磁気キャノピーにおける磁束管と波の相互作用を調べた。Dutch Open Telescope (DOT, Rutten et al. 2004) による $H \alpha$ の撮像分光画像と Hinode 衛星の Solar Optical Telescope (Tsuneta et al. 2007) による光球磁場データを解析して 2 次元モデルと比較し、音波の磁気キャノピーへの入射角が、上層へ伝播する波のモードを決定する重要なパラメータであることを明らかにした。

我々は将来研究として、飛騨天文台 SMART-SDDI (Ichimoto et al. 2017) による $H \alpha$ 撮像分光観測データを用いて、静穏領域での光球から彩層への波の伝播についてより詳細な観測を行う予定である。SDDI は DOT よりも広視野ゆえ磁気ネットワークを様々な見込み角で観測でき、磁気音波の伝播方向がわかる。また、DOT が高々 $\pm 0.7 \text{ \AA}$ の 5 点観測であるのに対し SDDI では $\pm 9.0 \text{ \AA}$ を 73 点で観測するので、波長ごとの透明度の違いから光球-彩層間を高さ方向により詳細に解析できる。さらに、SDDI の長時間 (~10 時間) 連続観測から 5 分振動についての統計誤差を小さく出来る。この観測により波の伝播がより詳細にわかり、彩層の加熱機構解明の一助になると期待できる。本講演では先行研究のレビュー及び今後の研究計画について紹介する。

太恒 21 大質量星進化後期において繰り返し発生する爆発的質量放出現象の輻射流体力学シミュレーション

栗山 直人 (東京大学 理学系研究科天文学専攻 M2)

大質量星のなかには、超新星爆発の数十年前の恒星進化後期段階において、一時的な増光を伴う激しい質量放出を経験するものが存在する (e.g., Pastorello et al. 2019)。質量放出率は恒星風モデル (e.g., Vink et al. 2001) では説明できないほど高く、動力的な爆発 (超新星爆発ではない) によって増光と質量放出が引き起こされると考えられている。激しい質量放出が起きると高密度の星周物質が形成されるので、超新星イジェクタと星周物質の相互作用を熱源として輝く IIIn 型超新星 (Smith 2017; Schlegel 1990) の親星との関連も議論されている。現時点では、このような激しい質量放出を引き起こすエネルギー源やエネルギーが水素外層まで運ばれて爆発に至るまでの機構は完全には解明されていない。Kuriyama & Shigeyama (2020) 等において、水素外層にエネルギーが供給された際にどのような観測的特徴を示す爆発が起きるかについては議論されているが、いずれの先行研究でも 1 度きりの爆発が調査対象となっている。しかしながら、実際には爆発的質量放出現象は複数回発生することが観測から示唆されている (e.g., SN 2009ip Pastorello et al. 2013)。特に、一度爆発が起きると水素外層の密度構造は静水圧平衡時の構造から大幅に変化するために、2 度目以降の爆発では 1 度

目とは異なった観測的特徴を有すると考えられる。そこで我々は、恒星モデルの水素外層の底に2度渡りエネルギーを注入しその後の時間発展を1次元輻射流体力学計算することによって、立て続けに2度起きる爆発的質量放出現象を再現し観測的特徴を調べた。本講演では、2度の爆発それぞれでの光度曲線、有効温度、質量放出量等の差異を紹介するとともに、既知の観測事実との関連を議論する。

太恒 22 ニューラルネットを用いた closure 関係の研究

西河 笙太 (早稲田大学 先進理工学研究科 M1)

重力崩壊型超新星爆発とは、太陽のおよそ8倍以上の質量を持つ重い恒星が、その進化の最終段階に一般的に迎えると考えられている大爆発現象である。その現象は、一つの銀河で100年に1,2回起きると言われており、今までで累計6300個ほど観測されたことが報告されている。ニュートリノ輻射輸送方程式を解くことにより、超新星爆発シミュレーションを行うことができる。長倉らが用いているボルツマン方程式を解く輻射輸送シミュレーションは、スーパーコンピュータ「京」を用いても半年は時間がかかる。それゆえ、近似した輻射輸送方程式を解くことで計算時間を減らすことが多い。しかし、この近似手法の精度に限界があることが指摘されている。故に本研究の目的は、輻射輸送方程式の精度の高い近似手法を開発することである。従来は解析的な式を用いた近似が多く使われてきたが、本研究では深層学習を活用した近似手法を提案する。なぜここまで深層学習がここまで話題になっているのかについてそのアルゴリズムとその結果得られた近似式や関数の再現性について議論する。さらに自作ネットワークを組み関数形に fitting するか調べる。ニューラルネットワークへの入力ニュートリノのエネルギー密度とニュートリノエネルギーフラックスに基づいており、出力はM1-closure法と呼ばれる近似法である。まず検証としてシミュレーションしたM1-closureを教師として作成したモデルが学習されるか調べる。それに得られたハイパーパラメータで輻射輸送方程式を近似せず数値解析した結果を教師にして再現性を見る。その結果、M1-closureよりも良く近似できているかどうか検証する。この時にはM1-closure近似法と比較することで近似の精度を評価する。最後に、超新星物質の速度場、剪断、渦度のデータも入力に加え、近似法が改善するかを調べる。

太恒 23 Wolf Rayet 連星 WR102-1 の X 線長期モニター観測

長塚 知樹 (東京大学大学院 理学系研究科天文学専攻 M1)

Wolf Rayet (WR) 星は初期質量が $25M_{\odot}$ 以上の恒星の進化末期段階の星であり、強い恒星風を発生している。WR 星の多くは

連星系を成しており、伴星のほとんどはO型星やB型星である。WR 星の恒星風と伴星の恒星風が激しく衝突する際に衝撃波が発生し、これによってプラズマが加熱されてX線が放出される。そのX線光度やエネルギースペクトルは連星間距離、質量損失率、恒星風の速度に大きく依存する。よって、X線スペクトル解析からプラズマの物理量や吸収量の軌道位相による変化を調べ、WR 星からの恒星風の速度や質量損失率を推定することができる。

「すざく」による天の川銀河中心領域の6.7keV強度マップの中から、明るい点状天体が発見された (Hyodo+2008)。X線スペクトルの特徴からWR連星の可能性が示唆され、WR102-1と名付けられた。WR102-1は、2000年9月から2018年4月までに、XMM-Newton、Chandra、「すざく」によって、計11回、327ksec観測されている。我々は、これらのアーカイブデータを用いて長期スペクトル変動を調べたところ、鉄K輝線がドップラー偏移している兆候を見出した。これは、WR102-1がWR星風衝突連星である可能性を強く支持する結果である。さらに検出したドップラー偏移により、恒星から放出される物質の速度場に制限を与えられる可能性がある。本発表では、今回の解析結果から、WR星風衝突モデルに基づいたWR102-1のX線放射機構を考察する。