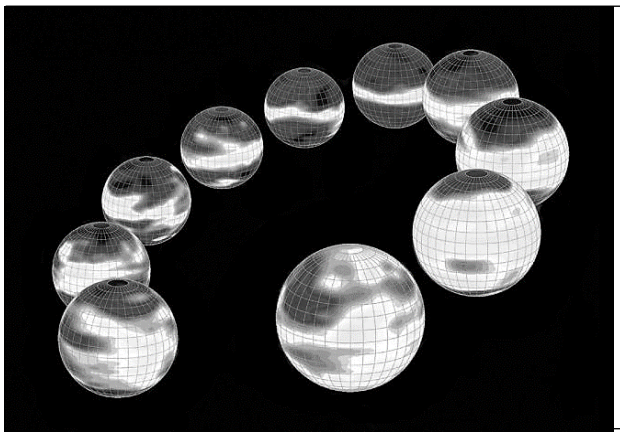
太陽圏研究部



研究テーマ・キーワード

- 太陽風と太陽圏 3 次元構造
- 惑星間空間シンチレーション（IPS）観測
- コロナ質量放出（CME）
- 太陽圏長期変動
- 宇宙天気予報
- 電波天文観測
- 電波望遠鏡・装置開発
- パルサー

太陽圏は太陽から吹き出したプラズマ（太陽風）や磁場に満たされた銀河空間に浮かぶ巨大な泡のようなものである。地球はこの中で生まれ、進化してきた。太陽風は宇宙時代の幕開けとともにその存在が確認されたが、その加速機構や宇宙空間での伝搬機構はまだ十分に解明されていない。そのため、太陽圏研究部では独自の観測装置を開発し国内 3 ヶ所に設置することで、地上から太陽風の 3 次元構造を捉え、太陽風の物理過程の解明に取り組んでいる。

地上観測の最大の特長は、長期にわたる安定運用であるが、これまでの観測の蓄積により太陽の活動周期と太陽風構造の関係を詳しく研究できるようになってきた。特に第 24 太陽活動周期の活動の落ち込みでは、これまでにない太陽風の構造やプラズマの特徴をいち早く捉えることに成功している。

近年、我々の実施している太陽風観測は、太陽圏の大規模構造シミュレーションの初期値として用いられたり、惑星・彗星ミッションなどで探査機の太陽風環境予測の基礎データとして用いられたりすることが多くなった。世界的に太陽風の 3 次元的な観測データの需要が増えてきたといえるであろう。また、定常的に観測データを取得するとともに、より発展的な研究に繋げられるように、次世代装置の開発も行っている。

2022 年度の主な活動

惑星間空間シンチレーション（IPS）システムを用いた太陽風観測

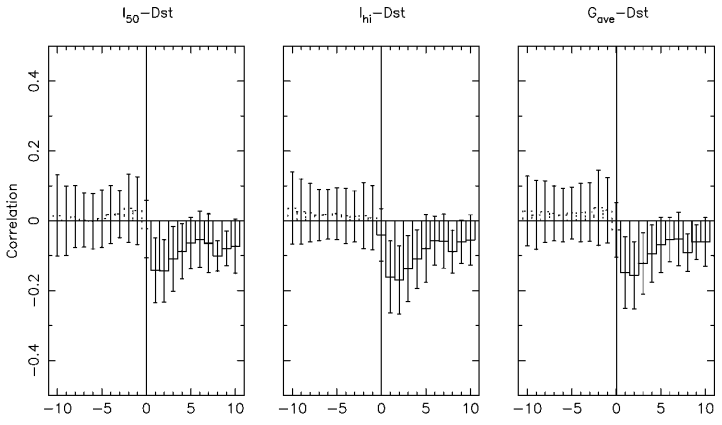
本研究グループでは 1980 年代より惑星間空間シンチレーション（IPS）の 327 MHz 多地点システムを用いて太陽風の遠隔測定を行ってきた。得られた IPS データを Tomography 法で解析することで、太陽風速度および密度ゆらぎの全球的な分布を精度よく決定できる。特に高緯度の太陽風は目下、飛翔体観測が行われていないため、IPS 観測は太陽風の全球的な分布に関する貴重な情報を提供する。現在我々が運用している IPS 多地点システムは、豊川、富士、木曽に設置された 3 つの大型アンテナで構成される。豊川アンテナ（太陽圏イメージング装置 SWIFT）は 3 つのアンテナ中で最も大型・高感度であり、2008 年から観測を開始し、毎日稼働している。また、富士、木曽アンテナは 2013–2014 年に受信機が更新され、感度が向上した。これら 2 つのアンテナは、山間部に設置されているため、冬期間は雪のため運用を中止する。よって、多地点観測による太陽風速度データは冬期間得られない。一方、太陽風密度ゆらぎのデータは豊川アンテナの観測から求められるため、1 年を通じて利用可能である。取得した IPS データは本研究所の ftp サーバを介して即時的に公開し、様々な国際共同研究プロジェクトに利用されている。今年度は 4 月上旬から豊川・富士・木曽の 3 つのアンテナによる IPS 観測を開始した。7 月 28 日に富士アンテナが駆動軸の故障のため停止したが、8 月 12 日に修理し、観測を再開している。ところが、9 月 14 日に木曽アンテナが駆動系の故障のため停止した。何度か修理作業を行ったが、今年度内には復旧に至らず、観測の再開は次年度に持ち越しとなった。

宇宙天気予報や太陽圏科学のための国際共同研究プロジェクト

我々はカリフォルニア大学サンディエゴ校（UCSD）ジャクソン博士のグループと協同で、IPS データの Tomography 解析から時々刻々変化する太陽圏 3 次元構造を明らかにする研究に取り組んできた。その共同研究を通じて開発されたのが Time-dependent tomography（TDT）プログラムである。宇宙天気予報の精度を一層向上するため、IPS 観測データと ENLIL 太陽風モデルを融合させた解析システムも開発されている。これらプログラムは、NASA/Community Coordinated Modeling Center（CCMC）のサーバ上で利用可能になっているほか、韓国宇宙天気センター（KSWC）で地球に到来する太陽風を予報するためにリアルタイムで実行されている。英国 Met Office でも、宇宙天気予報のために IPS―ENLIL 解析システムの導入を検討している。IPS 観測が宇宙天気予報に有用であるとの認識が高まるにつれて、世界各地で IPS 観測を実施する動きが活発になっている。従来から IPS 観測を実施してきた日本、ロシア、インドに加えて、メキシコでも IPS 観測専用のアンテナが建設され、低周波帯の大型電波アレイシステム LoFAR（欧州）を用いた IPS 観測も実施されるようになった。今年度は、ISEE IPS 観測データの TDT 解析結果と LoFAR による Pulsar 観測で得られた Dispersion Measure（DM）の比較を行った。DM は Pulsar の視線に沿ったプラズマ密度の積分値であり、取得された DM データには太陽離角に依存した変動が見られていた。解析の結果、DM データの変動は TDT 解析で求めた太陽風密度の視線積分値とよく一致することが判明した。また、今年度は本研究所の IPS 観測データを使って、ポーランドの Bzowski 博士らの研究グループと太陽風の全球分布モデルに関する共同研究を行っている。Bzowski 博士らは、太陽圏における太陽風プラズマと星間中性粒子の電荷交換過程について研究を行っており、その研究において太陽活動とともに変化する太陽風の全球分布を決定するモデルが不可欠となっている。本研究で開発したモデルは、冬期間の IPS 観測がない時期を補完しつつ、太陽風の全球分布を正確かつ連続的に再現することが分かった。この成果は太陽圏境界域探査衛星 IBEX による観測データのよりよい理解に貢献するであろう。

g-value データを用いた太陽風擾乱の研究

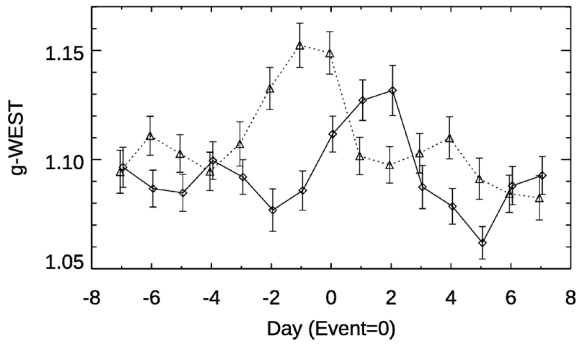
CME や太陽風相互作用領域（SIR）が到来すると地球周辺の宇宙環境（宇宙天気）は大きく変動し、その影響は地上の無線通信や電力設備にも及ぶ。よって、太陽風擾乱の到来を前もって知ることが求められている。IPS 観測は遠隔測定であることから、L1 点における飛翔体観測より早く地球に到来する太陽風の擾乱を検知する可能性がある。そこで我々は IPS 観測の宇宙天気予報への応用を目指して、太陽風擾乱の到来に伴って IPS データにどの様な変化があるかを調査した。ここで用いたのは太陽活動周期 23 および 24（SC23,SC24）の IPS 観測から得られた g-value データである。g-value は電波源の視線に沿った太陽風密度揺らぎの大きさの増減を表す量であり、静穏な太陽風は g =1、視線を擾乱が横切ると g>1 となる。まず、我々は g-value データを 1 日ごとに指数化し、地球付近の飛翔体で観測された太陽風密度および速度のデータと比較した。その結果、IPS 指数と太陽風密度および速度の間には弱いが有意な正の相関があることが判明した。その相関係数のピークは太陽風密度の場合、IPS 指数に対して時間差なし、速度の場合、1–2 日遅れで起こっていた。このことは IPS 指数の増加が、高速太陽風の前面で発生した圧縮領域に対応していることを示唆している。また、IPS 指数と Dst 地磁気指数と比較したところ、IPS 指数に対して 1–2 日おくれで小さいが有意な負の相関があることが分かった。さらに、IPS 指数を使って太陽風擾乱の発生率の年変化を求めたところ、太陽黒点の変化とは異なり、極大期と極小期に増加する傾向が見られた。これは CME と SIR の複合した効果で説明で



SC23におけるIPS指数I_{50}, I_{hi}, G_{ave}とDst指数の相関。

きる。SC24 では SC24 に比べ極大期の発生率が低かったが、これは SC24 の太陽活動の弱まりと一致している。これらの成果は g-value が太陽風擾乱の検出に有効であることを示している。

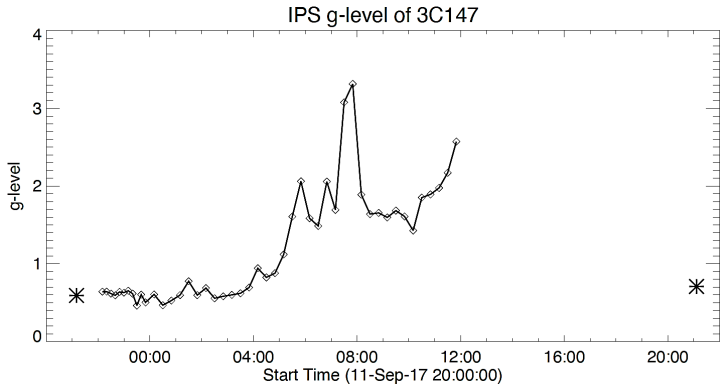
また、g-value の 1 日ごとの変化を太陽の東西に分けて計算し、ICME と SIR の典型的な g-value のプロファイルを Superposed Epoch Analysis により求めた。その結果、太陽西側 g-value の日変化において、ICME と SIR のプロファイルに明確な差が見られた。すなわち、ICME（点線）が-1–0 日で最大となるのに対し、SIR（実線）では+1–+2 日で最大となる。



SC23 における ICME と SIR の平均的プロファイル。

日欧の電波観測装置を用いた太陽嵐の連続観測

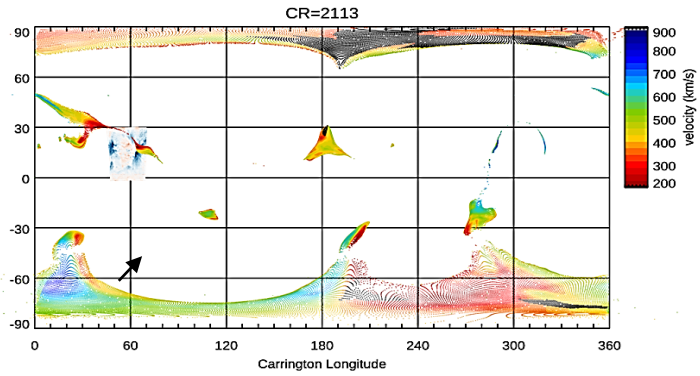
IPS 観測は電波の散乱現象を利用することで、惑星間空間を伝搬する CME を効率よく検出することができる。特に地球上の異なる経度に設置された電波観測装置による協調した連続観測は CME を高頻度に観測できる利点が指摘されている。本研究では、本研究所の IPS 観測装置と、欧州の電波干渉計 LOFAR で同時期に行われた IPS 観測データを組み合わせることで連続的な観測となった 2017 年 9 月 10 日から 12 日にかけて発生した CME 現象を、太陽圏の MHD シミュレーション（SUSANOO-CME）に取り込む実験を行った。対象となる CME は西のリムで発生したが、地球上の異なる経度に存在する ISEE のアンテナと LOFAR がほぼ同時刻に観測を行ったことで、IPS の反応を示す天体の分布は全天に広がっていたことが分かった。この IPS 分布は、広い角度幅を持った Spheromak を用いたシミュレーションによって再現され、そのシミュレーションは CME の地球への到来も再現できた。本結果は、多数の IPS 観測データを用いることで CME のグローバルな構造をより正確に再現できることを示唆している。



本研究所（＊）と LOFAR（◇）による電波天体 3C147 の連続した IPS 観測による IPS 反応の強さ（g-level）の変化。

Hinode/EIS 観測と IPS 観測による plasma upflow と低速太陽風の関係に関する研究

太陽活動領域の両端で発生する plasma upflow（持続的なプラズマ上昇流）に関する研究を行った。upflow はその元素組成が低速太陽風と似ていることから、低速太陽風の発生源であることが示唆されている。我々は Hinode 衛星の極端紫外線撮像分光装置（EIS）によって観測された upflow の位置と Potential-Field-Source-Surface（PFSS）モデルによって計算された光球磁場を比較することによって、プラズマ上昇流と惑星間空間に開いた磁力線の関係について研究を行った。さらに IPS データを用いることで、開いた磁力線が繋がる太陽風速度を解析した。その結果、低速風と磁

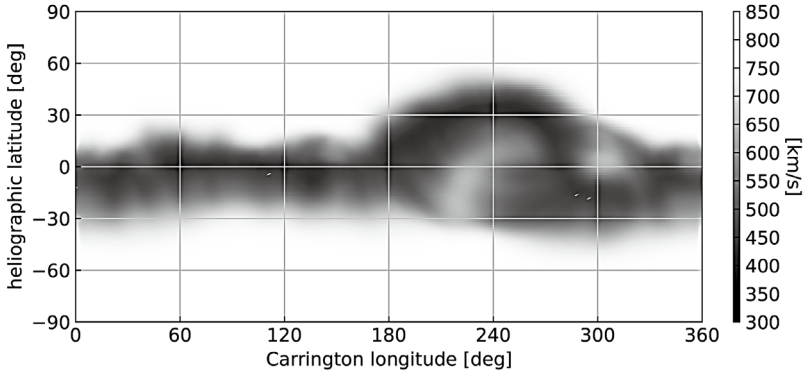


EIS データ（矢印）と開いた磁力線の足元の分布（1.01$R_\odot$）を重ねて表示したもの。色は開いた磁力線が繋がる太陽風速度を表す。

気的につながっている upflow が存在する一方で、閉じた磁場に閉じ込められた upflow も存在することが分かった。また閉じた磁場につながる upflow 領域では、非熱的速度と呼ばれる、スペクトル線幅の過剰な拡がりが開いた磁場領域に比べてより大きくなることが分かった。

IPS 観測データを用いた DCHB 太陽風速度モデルの最適化とその評価

太陽風速度を予測するモデルの一つである Distance from Coronal Hole Boundary（DCHB）モデルについて研究を行った。太陽風速度の経験的モデルとして、Wang-Sheeley-Arge（WSA）モデルが多くの宇宙天気予報に用いられている。しかし、WSA モデルよりも DCHB モデルの方が、観測される太陽風をよく再現できることが示唆されている。本研究では IPS 観測による太陽風速度データに対して、相関係数(ρ)の最大化を基準として、DCHB モデルのパラメータを最適化した。そうして、得られたモデル式から太陽風速度シノプティックマップを作成することで、IPS 観測データのどのような構造を再現できたかを評価した。DCHB モデルの太陽風速度算出のために、Air Force Data Assimilative Photospheric Flux Transport（ADAPT）による光球磁場データを使用し，PFSS モデルによるコロナ磁場の推定を行った。結果として、太陽活動極小期にはρ=0.81 であった。この高い相関は、「高緯度では高速度の太陽風，低緯度では低速度の太陽風が卓越する」という極小期における太陽風の 2 成分性を、DCHB モデルがよく再現できたからであると考えられる。このような緯度依存性のある太陽風速度分布という観点の評価は、IPS 観測による太陽全球面にあたる 2 次元的なデータとの比較により可能となったものである。



DHCB モデル最適化により得られた 2 次元太陽風構造。

次世代太陽風観測装置計画の推進

次世代太陽風観測装置の計画を推進した。2021 年度に科研費基盤研究 A が採択され、富士局用に全体の 5%の規模のコアアレイの建設が進められている。本年度はデジタルバックエンドの開発を継続して行い、64 チャンネルの信号をフロントエンド直下に設置される 8 台の AD モジュールでデジタル化し、光ファイバーで接続された FPGA アレイで最大 8 ビームをリアルタイムに合成できる系が完成・納入された。並行して、アンテナ系の開発を行い、2 種類の試作アンテナを開発した。

「未来の学術振興構想」提案に向けた活動を行い、JpGU2022 のユニオンセッションで地球惑星科学分野のヒアリングを受けた。また、天文宇宙物理学分野の将来計画をまとめた冊子にも計画の提案を行った。未来の学術振興構想には、超高層大気分野の「太陽地球系結合過程の研究基盤形成」に合流する形で提案を実現した。