

氏名（本籍・生年月日）	中村 佳昭（愛知県・平成 2 年 12 月 25 日）		
学位の種類	博士（理学）		
学位記番号	甲 第 121 号		
学位授与の日付	平成 3 0 年 3 月 2 0 日		
学位授与の要件	信州大学学位規程 第 5 条第 1 項該当		
学位論文題目	高エネルギー宇宙線の太陽の影と太陽磁場の研究		
論文審査委員	主査	宗像 一起 教授	竹下 徹 教授
		長谷川 庸司 准教授	三澤 透 准教授
		瀧田 正人 教授	

論 文 内 容 の 要 旨

太陽表面から出た磁力線は、太陽大気プラズマに凍結され、太陽半径の数倍の大きさに広がっている。さらに外側ではプラズマが急速に加速され太陽風として惑星間空間へ吹き出されており、このプラズマ流に引き伸ばされて、太陽磁場は惑星間空間から 100～数千天文単位程度まで広がっていると考えられている。この惑星間空間に広がった大規模な磁場構造の研究は、1958 年の Parker による磁場モデル提唱以降、1960 年代から 1970 年代にかけて先駆的な衛星観測が行われ、現在では惑星間空間の大規模磁場構造の基本的知識が構築されている。しかし、多くの衛星観測は黄道面内の地球近傍や他の惑星近傍での観測など限られた点での観測に過ぎず、大規模磁場構造の解明には未だ情報が不足している。一方、太陽近傍磁場の光学観測もおこなわれている。太陽から出ていく磁力線の源となる太陽光球面磁場は、ゼーマン効果を利用した地上の光学望遠鏡や衛星に搭載された光学観測機器で直接観測が続けられている。また、光球面から太陽半径程度の距離のコロナ磁場についても、電波などの偏波を利用した観測が行われている。しかし、太陽風加速が起きている領域や、コロナ磁場から惑星間空間のいわゆる Parker 磁場に接続する領域の磁場を定常的に観測する方法はなく、現状では Potential Field Model と呼ばれる磁場モデルを用いて補完するしかない。

一方で、太陽方向からの高エネルギー銀河宇宙線強度を観測すると、太陽によって宇宙線が遮蔽されるために太陽方向の強度に欠損が生じる。荷電粒子である宇宙線は太陽磁場の影響を受けるために、この欠損が太陽活動とともに変動することが、1957 年に Clark によって予測された。この強度欠損は「太陽の影」(Sun's shadow)と呼ばれ、その観測から太陽地球間の大規模磁場構造の情報が得られると期待される。1990 年代に入り、米国の Cygnus 実験や CASA 実験、日中共同研究の Tibet AS γ 実験が太陽の影の観測に成功した。

その後、Tibet AS γ 実験は、長期に観測された太陽の影と太陽活動の相関をシミュレーションで再現し、コロナ磁場が太陽の影に与える影響を初めて定量的に示した。他方、2011年には ARGO-YBJ 実験が、太陽の影の中心位置の南北方向のズレが Carrington Longitude に依存して変化する様子を観測し、地球近傍の惑星間空間磁場の变化から期待される結果と定性的に一致することを報告した。

本論文では、中国チベット自治区羊八井高原(標高 4,300 m、気圧 606 g/cm²)に設置された空気シャワーアレイ(Tibet-III)で2000年から2009年に観測された3 TeV以上の宇宙線の太陽の影の解析を行った。チベット空気シャワーアレイは、1999年以降観測エネルギーを従来の10 TeVから3 TeVに下げするために検出器の高密度化が行われ、太陽の影の中心位置の変化をより広いエネルギー領域で調べることが可能となった。太陽の影の解析は、影の深さ(強度欠損量)と中心位置のズレについて行われている。本研究で太陽の影の深さを解析した結果、10 TeVではシミュレーションが観測を良く再現出来ていたが、3 TeVでは2000年から2002年の太陽活動期の観測を十分に再現出来なかった。この観測とシミュレーションの不一致は、太陽活動期に太陽表面で頻発する Coronal Mass Ejection (CME) が地球に到達するまでの期間を解析から取り除くと解消されることが確認された。これは、太陽の影に CME 発生時の磁場変動の影響が現れていることを実験的に示す世界で初めての結果である。

他方、太陽の影の中心位置のズレの解析では、観測とシミュレーションを比較することで、太陽地球間の平均的な磁場強度を推定した。本論文では、惑星間空間磁場を Away セクター(磁力線が太陽から外へ向かう磁区)と Toward セクター(磁力線が太陽に向かう磁区)に分離し、それぞれで太陽の影の中心位置のズレをシミュレーションと比較した。その結果、東西方向の中心位置のズレの観測量は、ほぼ地磁気の影響のみで説明できることを確認した。一方で、南北方向のズレの解析から、シミュレーションで用いた太陽磁場モデルは、Away セクターで $1.54 \pm 0.21_{\text{stat}} \pm 0.20_{\text{sys}}$ 倍、Toward セクターで $1.62 \pm 0.15_{\text{stat}} \pm 0.22_{\text{sys}}$ 倍だけ磁場強度を過小評価していることが判った。これは、太陽の影の南北方向のズレから太陽地球間の平均太陽磁場強度を定量的に評価することが可能であることを示している。シミュレーションと観測値の差は、シミュレーションに用いた太陽地球間の惑星間空間磁場強度の差、すなわちコロナ磁場から惑星間空間に出てくる磁力線の総量(Open Magnetic Flux)の過小評価によるもので、太陽の影の観測から Open Magnetic Flux に関する重要な情報が得られることを示唆している。このように、本論文では3 TeV領域の太陽の影の深さと位置を、世界で初めて定量的なシミュレーションによって評価することに成功した。そして、これらの観測結果は、宇宙探査機が到達することの難しい太陽近傍から惑星間空間にかけての大規模磁場構造に関する新しい知見を提供している。