

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	阿南 徹
論文題目	Open a New Window of Plasma Diagnostics in the Solar Physics with Spectropolarimetric Observation (太陽物理における偏光分光観測を用いた新しいプラズマ診断手法の開拓)		
(論文内容の要旨)			
<p>これまでゼーマン効果を用いた太陽光球の磁場測定は詳細に行われ、太陽の諸現象には磁場が密接に関わっていることが明らかとなった。今後は、磁気圧優勢な上空大気 (彩層やコロナ) で磁場がプラズマにどのように働くかを定量的に評価することが、コロナ加熱問題をはじめとした様々な現象のメカニズム解明に重要である。一方、電場は磁気エネルギーの散逸、荷電粒子の加速などに働き、磁気リコネクションや粒子加速において重要である。さらに、部分電離プラズマの中性粒子が磁場を横切る際に電場が中性粒子にかかるので、部分電離プラズマである彩層プラズマのダイナミクスの理解において電場の測定は重要である。</p> <p>スペクトル線の偏光観測を用いて、磁場、電場、輻射場、速度場などの非等方性を測定する新しいプラズマ診断手法を開拓するため、飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡 (DST) を用いて、可視から近赤外の広い波長域 (400 nm - 1100 nm) で、高精度偏光観測 (SNで$10^3 - 10^4$) ができる偏光分光観測システムを開発した。DSTに既設の偏光解析装置は偏光精度10^{-2}を達成するのに30秒を要し、観測できる波長も630 nmだけであった。私たちは、可視から近赤外の広い波長域における偏光観測に適した波長板、大容量の画像を高速に取得できるCCDカメラ及び赤外カメラを導入した。さらに偏光解析装置を、連続的に波長板を回転させながら直交2偏光を連続的に撮像できる装置に改良した。これによって波長域400 nm - 1100 nmで観測される全てのスペクトル線で、空間サンプリング0.4秒角、積算時間30 - 60秒で偏光精度10^{-3}を達成する偏光分光観測が可能となった。また、太陽からの偏光を正しく導出するためには、DSTの装置偏光を正しく補正しなくてはならない。私たちはDSTの入射窓にとりつける偏光板自動回転装置を開発し、理想的な無偏光とされる太陽面中心の連続光と8種類の直線偏光のそれぞれをDSTに入射させ、焦点面における偏光状態を測定することで広い波長域 (400 nm - 1100 nm) におけるDSTの偏光モデルを構築した。</p> <p>これまで電気伝導率の高い太陽プラズマにおいて電場の強度は極めて小さく、偏光信号も小さいと推定されるため、電場はほとんど測定されてこなかった。しかし、電離度の低い彩層の中性粒子が磁場を横切る際に中性粒子にかかる電場は測定できると見積られる (Gilbert et al. 2002)。そこで私たちは、これまで測定されていない活動領域上空のジェット磁場の測定すると共に、強い電場が存在すれば電場を検出することを目的に、2012年5月5日DSTで開発した偏光分光観測システムを用いて、シュタルク効果に敏感で電場の測定が期待できる中性水素パッシュェン系列のスペクトル線を用いて活動領域ジェットの偏光分光観測を行った。電場測定の過去の研究では中性水素の主量子数が大きなエネルギー準位における原子偏向は無視されていたが、観測された活動領域ジェットの中性水素は過去の研究の仮定が成立しないことが明らかとなった。Casiniらが開発した原子偏向及び磁場と電場の効果を考慮した偏光プロフィール計算コードを用いて、活動領域ジェットは磁場に沿っていること、電場の効果を示す偏光信号が検出されないことを明らかにしたと同時に、中性水素が磁場を横切ることで中性水素にかかる電場の上限値を導出した。さらに観測された中性水素の速度と、電場の上限値から導出される中性水素が磁場を横切る速度の上限値を比較することで、中性水素は磁場に凍結していることをはじめて観測的に示した。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

太陽大気は磁場がドライブするダイナミックな現象で埋め尽くされている。そこには磁場を巻き込む激しいガスの対流、磁気波動・衝撃波、磁気リコネクションによるプラズマの加熱や加速、高エネルギー粒子の生成、等が生起しており、これらの連鎖によって太陽の高温大気、さらには惑星間空間の環境が形成される。太陽磁気プラズマ現象の基本物理過程を理解することは、広く天体プラズマ現象の解明や将来の宇宙環境予報にとって重要であり、そのためには、プラズマの温度や密度、運動に加えて磁場や電場といった物理量の確固たる計測が、次のステップを切り開く重要なマイルストーンであると考えられている。

申請論文は、彩層で形成されるスペクトルラインの高精度偏光分光観測によって太陽プラズマの新しい診断手法を開拓することを目的として、飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡に高精度偏光分光装置を開発し、これによって太陽縁で発生した彩層ジェット（磁場が駆動すると考えられるプラズマ噴出現象）の磁場と電場を導出した初めての試みであり、申請者が筆頭著者として科学雑誌に発表した2つの論文を柱としている。

第1論文では、高い空間分解能と世界でも有数の高分散大型分光器を備えた飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡に、新しく偏光解析システムを開発した報告である。速い偏光変調と高速なスペクトル画像の取得により、従来同天文台が備えていた偏光解析装置と比べて約100倍の効率で光子を集め、波長400～1100nmにある任意のスペクトルラインの高精度偏光分光観測を実現した。申請者はこの装置の制御システムを完成させ、望遠鏡による人為的偏光を補正するためドームレス太陽望遠鏡の偏光特性を注意深く評価し、光の強度に対して 10^{-4} の偏光を検出する精度を達成した。

第2論文は、この装置を用いて太陽縁で発生したプラズマの突発的噴出構造（彩層ジェット）の偏光分光観測をおこない、その磁場と電場の計測を試みたものである。電場に応答して比較的大きな偏光（スタルク効果）を示すと考えられる水素のパッシュェン系列の複数ラインを観測し、ゼーマン効果やハンレ効果による偏光も考慮に入れて、量子力学的原子偏向モデルを駆使して磁場のベクトルと電場の上限値を導いた。その結果、磁場はジェット構造にほぼ沿って存在すること、また、電場が検出限界以下であったことから中性水素が磁場を横切ることなく運動（磁場に「凍結」）していることを明らかにした。

申請者の開発した偏光分光システムは、可視～赤外域の波長範囲で任意のラインの観測を可能とし、今後太陽物理学において偏光分光によるプラズマ診断の新しい可能性を切り開くものとして高く評価できる。開発中には様々な技術的課題があったが、これを自らのアイデアで克服し、その過程において偏光に関わる光学システムについて深い知見を獲得した。さらにこれまで困難であった彩層の動的プラズマの磁場を計測し、それがプラズマの運動とほぼ平行であること、また部分電離プラズマ中の中性原子が磁場によい近似で「凍結」していることを始めて観測的に示したことの学術的意義は大きいといえる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成26年2月28日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降