

偏光分光観測による太陽彩層ジェットの 磁場・電場診断

阿南 徹

〈京都大学理学研究科附属天文台 〒506-1314 岐阜県高山市上宝蔵柱〉

e-mail: anan@kwasan.kyoto-u.ac.jp



偏光は光源や媒質の非等方性によって生じるので、十分な非等方性があれば、偏光を観測し解釈することで光源や媒質のベクトル量を測定することができます。私たちは太陽の彩層における磁場と電場を測定する新たなプラズマ診断手法を開発することを目的に、飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡に偏光分光観測システムを開発し、彩層ジェットの電場の上限値と磁場を測定しました。その結果、磁場がジェットに沿っていること、中性水素が磁場に凍結していることを初めて観測的に明らかにしました。次期太陽観測衛星「SOLAR-C」がこの彩層磁場測定手法を発展させていくことでしょう。また、電場測定手法が確立されれば電場を用いた新しい太陽物理学が始まることが期待されます。

1. 太陽物理とプラズマ診断

1908年ジョージ・ヘールは黒点を偏光観測しゼーマン効果（ゼーマン効果などの偏光プロセスについては簡単に2章で紹介します）を用いて、黒点に強い磁場が存在することを発見しました¹⁾。これは地球以外の天体における磁場の存在を初めて示したもので、磁場を用いた宇宙物理学の幕開けとなりました。その後、太陽表面（光球）の磁場は詳細に測定され、太陽の磁場の極性が11年周期で変わることや、太陽外層大気で起こるさまざまな現象と磁場との密接な関係が明らかとなりました。

光球表面の上には厚さがおよそ2,000 km、温度が約10,000度の彩層と呼ばれる大気層があります。さらに上には温度が約100万度のコロナと呼ばれる大気層が広がっています。太陽物理の主要な問題としてコロナ加熱、太陽風加速、フレア、粒子加速というものがあります。これらについて、光球や太陽内部のガスの運動が磁気エネ

ルギーを増大させ、蓄えられた磁気エネルギーが彩層を磁気流体波や磁場構造の形で伝播し、コロナで磁気エネルギーを解放するという描像がいろいろな観測と偏光観測による光球の詳細な磁場測定を組み合わせることで得られています。

望遠鏡で空間分解することのできない大きさをもつ黒点程度の強い磁場が光球の黒点がない領域にあまねく存在し太陽大気の基本要素になっていることも、複数のスペクトル線を偏光観測することで明らかになりました²⁾。日本の次期太陽観測衛星「SOLAR-C」や建設中の地上大型太陽望遠鏡はこの小さく強い磁場を空間分解し詳細に観測することを科学目標の一つにしています。

このように偏光観測によるプラズマ診断手法によって太陽物理は切り拓かれていきました。私たちは新しいプラズマ診断手法を開拓し太陽物理を大きく進展させることを目的に研究を行っています。

彩層磁場の測定

彩層ではプラズマの内部エネルギーと磁気エネルギーが同程度なので、磁場構造とプラズマの運

動が相互作用します。また磁気流体波のファーストモード、スローモード、アルフヴェン波の間でモード変換します。よって磁気エネルギーが光球からコロナにどのように伝播されるか理解するためには、彩層の磁場を測定することが重要です。しかし、彩層のスペクトル線の幅は広いのでゼーマン効果による偏光の度合いは小さく、また散乱偏光や磁場が散乱偏光を変調させるハンレ効果(2章でシュタルク効果と共に簡単に説明します)が働き、偏光の解釈が難しいため、これまで偏光観測を用いた彩層磁場の測定は困難でした。

近年、装置の偏光測定精度の向上とハンレ効果の理論的解釈の進展³⁾により、ハンレ効果とゼーマン効果を用いた彩層磁場の診断が可能になり始めています^{4),5)}。彩層磁場診断手法の発展と確立、それを用いた彩層プラズマ現象の理解が、光球からコロナへエネルギーが伝播する過程を調べるうえで重要ですので、彩層磁場測定は「SOLAR-C」の最大の特徴となっています。

電場の測定

電場は荷電粒子を加速させたり、磁場を拡散させたりします。また、粒子が磁場を横切る際にその粒子は電場を感じます。もし電場を測定することができれば、粒子加速の現場や磁気リコネクションなどの磁場拡散・散逸プロセス、中性粒子の運動と磁場の関係を観測的に調べることができます。1990年頃、ピーター・フーカルらは偏光観測を用いてシュタルク効果を観測し、プロミネンスや彩層ジェット、フレア発生時に形成されるループの電場を測定しました⁶⁾。しかし、彼らは磁場の視線方向成分を測定できる円偏光の測定はしませんでした。また、観測された直線偏光の解釈ではシュタルク効果以外の偏光プロセスを考慮することはしませんでした。

彩層は電離度1%程度の部分電離プラズマです。理論的には中性水素は荷電粒子との衝突によって磁場に凍結していると考えられています。中性水素にかかる電場を測ることで、中性水

素が磁場を横切る速度(磁場に凍結している荷電粒子との速度差)を観測的に調べることができます。この中性水素の磁場への凍結の度合いは、彩層を伝播する磁気流体波の減衰、磁気リコネクションの効率、光球から浮上する磁場の量、彩層加熱率、力の釣り合いにおいて重要です。

シュタルク効果が大きい中性水素のパッシェン系列のスペクトル線を偏光観測できる装置は現在ありません。私たちは彩層の磁場と電場を測定するために、飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡に偏光分光観測システムを開発し、彩層ジェットの磁場と電場の測定に挑戦しました。

2. スペクトル線の偏光メカニズム

少し複雑ですが、ここではスペクトル線の偏光メカニズムについて簡単に紹介します。スペクトル線の偏光メカニズムには大きく分けて2種類あります。一つ目はスペクトル線の縮退していた成分が磁場や電場によって波長方向に分裂する効果です。それぞれの成分は違った偏光をもっているため、この効果によって波長ごとに違う偏光が観測されます。磁場による分裂をゼーマン効果、電場によるものをシュタルク効果と呼びます。

二つ目は原子偏向です。原子の励起状態の向きに偏りがあることを原子偏向と呼びます。原子偏向している原子から光が放射される時、その光は偏光し、スペクトル線全体が偏光します。非等方な輻射場による励起によって原子偏向しスペクトル線が偏光することを散乱偏光と呼びます。そして磁場によって散乱偏光の向きや偏光度を変調させる効果がハンレ効果です。

上記の効果の大きさはスペクトル線の波長やエネルギー準位の主量子数、角運動量子数に依存します。磁場や電場が強いともともと縮退していなかったエネルギー準位が相互作用し角運動量の結合の仕方が変わること、エネルギー準位の分離の仕方や原子偏向が変わります。原子偏向が変わること、散乱偏光度が変化したり、円偏光が

生成されたりします。この円偏光を生成するプロセスをアライメント-オリエンテーション変換と呼びます。

3. 広波長域偏光分光観測装置の開発

偏光を測定することで偏光を生み出す磁場、電場、放射場などを診断することができますが、光球・彩層の磁場診断以外は未開拓です。彩層磁場の診断も発展途上であると言えます。また、スペクトル線によって診断しやすい物理量や観測できる大気層が違います。私たちは偏光観測を用いた新しいプラズマ診断手法を開発・開拓するために、可視から近赤外の広い波長域にある任意のスペクトル線を高精度に偏光分光観測できるシステムを飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡 (DST) に開発しました。DSTは空気揺らぎを抑えるための工夫が施された有効口径60 cmのグレゴリー式反射望遠鏡です (図1)。世界でも有数な高い波長分解能をもつ垂直分光器と可視の全波長を同時観測可能な水平分光器が設置されています。

偏光解析装置

DSTにはもともと光球の磁場が測定できる偏光分光観測装置がありました⁷⁾。この装置は望遠鏡、回転する水晶でできた波長板、偏光ビームスプリッター、分光器、カメラによって構成されています。カメラで観測される明るさは波長板の回転角や波長板に入射する偏光に応じて変調するの

で、回転角と明るさの変調から入射した偏光情報を測定できるという仕組みです。これまでの装置では、波長板を22.5度ずつ回転させ、各回転角におけるスペクトルを撮像しました。そして、フォトンノイズなどを抑え、偏光精度1%を達成するのに30秒以上を要していました。また水晶の変調効率は波長依存性があり、限られた波長帯でしか効率的な偏光観測はできませんでした。

私たちは、可視から近赤外までの広い波長域で高い変調効率をもつAstropribor社製の広帯域波長板APSAWと可視に感度のあるProsilica社製のCCDカメラ (GE1650)、近赤外に感度のあるXenics社製の赤外カメラ (XEVA640)を導入し、広い波長域の任意のスペクトル線での偏光観測が可能な偏光解析装置に改良しました。また波長板を連続的に回転させながら、最大30 Hzで連続撮像できるようにも改良したので、偏光精度0.1%を可視なら30秒、近赤外なら60秒で達成できるようになりました。

望遠鏡偏光モデル

偏光解析装置は望遠鏡の焦点面近くにあります。望遠鏡には2枚の斜鏡が使われており (図1のニュートン鏡とクーデ鏡)、残念ながらコーティングの情報が残っていません。太陽の偏光を測定するためには、望遠鏡によって作られる装置偏光を正しく補正しなくてはなりません。これまでDSTの580 nmから660 nmの波長帯における装置偏光モデルが調べられてきました^{7),8)}。

DSTによる機械偏光は、DSTの入射窓に偏光板を取り付け、焦点面に設置された偏光解析装置を用いて、太陽を長時間偏光観測することでキャリブレーションします。DSTの入力と出力の偏光を比較するという事です。DSTの斜鏡の偏光特性を高精度に決定するためには、理想的な無偏光と数種類の直線偏光を入力することが必要です。

DST入射窓は地上23 mにあるため、偏光板を取り付けるだけでたいへんで、これまで一度に

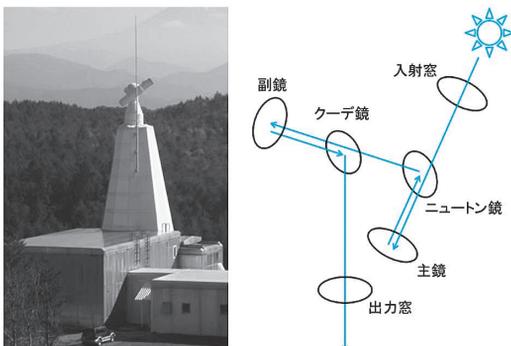


図1 ドームレス太陽望遠鏡の概観と光路図。

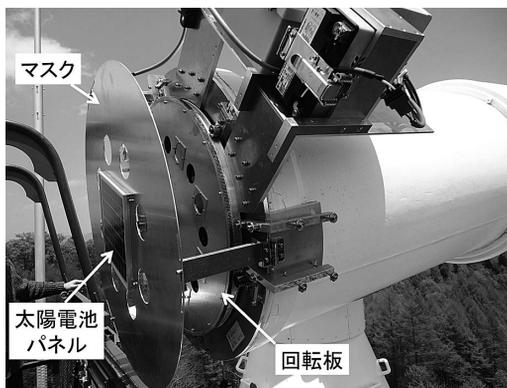


図2 入射窓に取り付けられた偏光板自動回転装置.

一つの偏光状態のデータしか取れず、必要なデータをすべてそろえることが困難でした。そこで飛騨天文台技術職員の木村氏、仲谷氏に協力してもらい、観測室から無線で地上23mのDST入射窓に取り付けられた装置を操作することで数種類の偏光を入射窓に入射させることが可能なシステムを開発しました(図2)。

装置は、八つの穴が空いた板(マスク)と無線で回転させることができ八つの向きのそろった直線偏光板と八つの穴が空いた板(回転板)で構成されています。マスクの穴を通った光が直線偏光板を通るとき、直線偏光を望遠鏡に入射できます。また、回転板を回転させることで直線偏光の向きを変えることができます。さらに、マスクの穴を通った光が回転板の穴を通るように回転板を回転させたとき、太陽光を望遠鏡に入射できます。黒点がない太陽中心の連続光は理想的な無偏光光源なので、このとき、理想的な無偏光を望遠鏡に入射させたことになります。以上のように一度に8種類の直線偏光と理想的な無偏光を入射することができる装置になっています。

望遠鏡入射窓付近は外部電源がないため、バッテリーにより電源供給を行っていますが、極力バッテリーの重量を抑えるため、太陽電池を用いてフィルターの回転が停止している間は充電を行うようにしました。太陽電池パネルは太陽観測

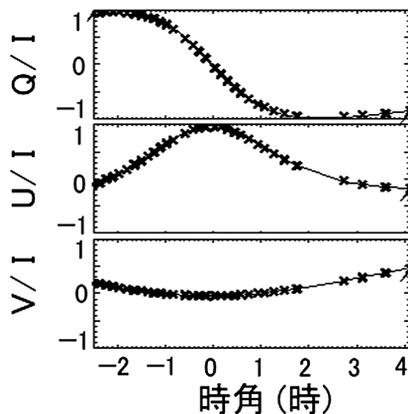


図3 直線偏光を望遠鏡に入射させたとき、焦点面で観測される偏光の時間変化(クロス印)とDST偏光特性モデルによるフィッティング(実線).

中必ず太陽に対して正対するため効率が良いです。太陽電池で電力供給し無線で操作するため、「小さな人工衛星」と呼んだりしながら製作しました。

この偏光板自動回転装置を用いてこれまで400 nmから1,100 nmの間の14波長で望遠鏡の偏光特性を調べました。図3は望遠鏡に直線偏光を入射させたとき、焦点面で測定される偏光の時間変化と望遠鏡偏光モデルによるフィッティングの様子です。IQUVはストークスパラメーターです。Iが明るさ、QとUが直線偏光、Vが円偏光の情報を表します。

4. 彩層ジェットの磁場・電場診断

私たちはゼーマン効果とハンレ効果を用いた彩層磁場の診断、さらに強い電場が存在すれば電場の診断をすることを目的に、2012年5月5日DST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のパッシェン系列のスペクトル線(表1)で活動領域のジェットの偏光分光観測を行いました(図4)。

DST偏光分光観測システムの科学目標は幅広いです。私もいろいろなテーマをもちながら、その日の太陽を見て、観測対象や研究目標を決めて

表1 観測した中性水素のスペクトル線.

波長 (Å)	上準位の主量子数	下準位の主量子数
10,049	7	3
9,229	9	3
9,015	10	3
8,863	11	3
8,750	12	3
8,665	13	3

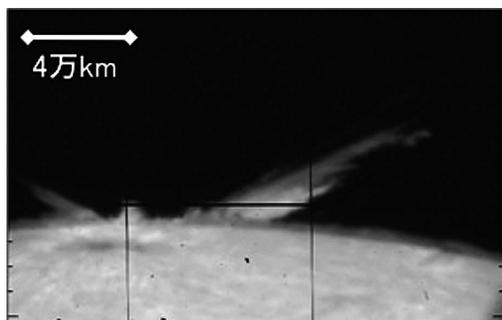


図4 H α スリット画像. 黒横線が分光器スリット. 太陽の縁に発生したジェット (サージ) にスリットを当て偏光分光観測した.

いました. 私は電場測定に強くひかれたので, 電場測定に適している中性水素のパッシェン系列のスペクトル線でいろいろ観測したりしていましたが, スペクトル線は弱く, なかなか検出できる現象はありませんでした. 2012年5月5日, 太陽を見ながら今日はどういう観測をしようか悩んでいるところ, 指導教官の一本氏に中性水素のパッシェン系列のスペクトル線にもう一度挑戦してみてもどうかと提案していただき, 観測していると運良く大きなジェットを捉えることに成功しました. そして, 中性水素のパッシェン系列のスペクトル線でも光っているジェットでした.

今回観測したジェットは「サージ」と呼ばれるもので, 長さ100,000 km, 最大速度130 km/s, 寿命50分という典型的なサージでした. サージは理論的に光球から浮上してきた磁場ともともと外層大気にあった磁場が磁気リコネクションし, ローレンツ力や衝撃波によって浮上してきた彩層

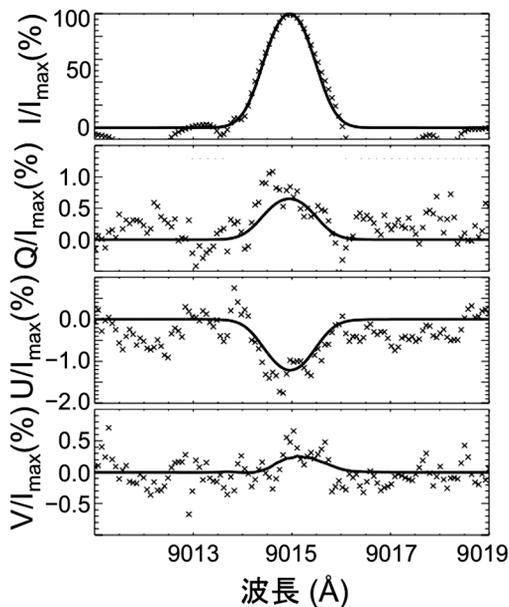


図5 観測されたストークスパラメーターIQUV (十字) のフィッティング (実線).

プラズマが磁場に沿って加速されるというモデルが提唱されています. 観測したスリットの位置から測定される磁場はジェットに沿っていることが期待されます. 彩層磁場の測定は近年可能になり始めた手法なので, これまで, 観測的にサージの磁場が測定されたことはありませんでした. また, ピーター・フーカルらはシュタルク効果のみを用いてサージの電場を35 V/cmと測定しました⁹⁾.

私たちは観測されたストークスパラメーターを共同研究者のロベルト・カッジーニ氏らが開発したコードを用いてフィッティングしました. コードにはゼーマン効果やハンレ効果など磁場に関するスペクトル線の偏光プロセスがすべて含まれています. 手始めに電場の効果は含めずにフィッティングしました.

図5はフィッティングの例です. QUVを見るとスペクトル線全体が偏光していることがわかります. これは輻射場の非等方性による原子偏向が原因で, 散乱偏光, ハンレ効果, アライメント-

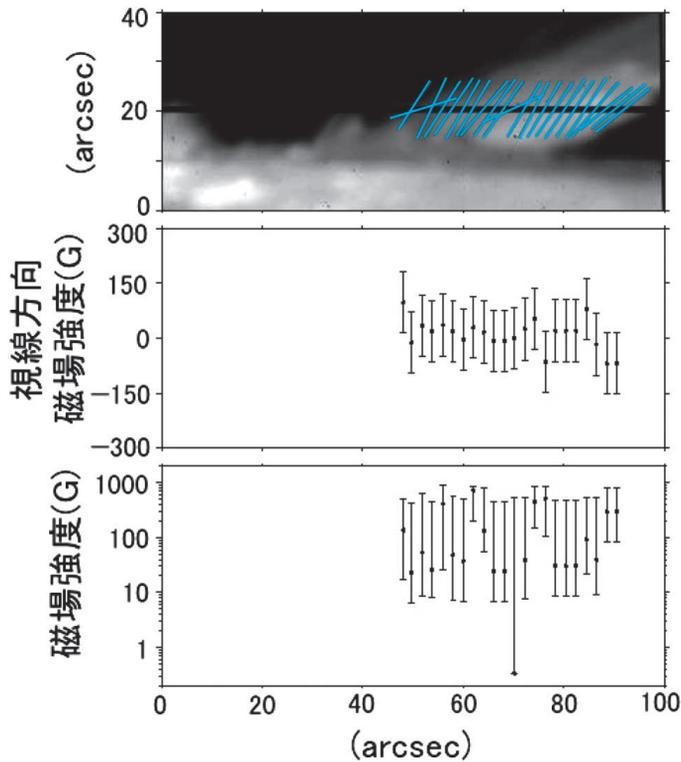


図6 サージの磁場方位角（上図，青線），視線方向磁場強度（中図），磁場強度（下図）分布．上図の背景は観測時のH α ストリットジョー画像．

オリエンテーション変換が効いています．ハンレ効果によって磁場の方位角が精度良く測定できます．条件によっては磁場強度も精度良く測定できます．

図6はフィッティングの結果として導出されたサージの磁場分布です．サージでは図5のような円偏光は一部分のみで観測され，大部分では円偏光は観測されませんでした．このことからサージの大部分では磁場は視線方向に垂直な方向を向いていることがわかりました．また，測定された直線偏光からハンレ効果によって磁場の方位角を決定することができました．ゼーマン効果が観測されなかったこと，加えてハンレ効果で診断しづらい磁場強度だったことから，磁場強度は精度良く測定できませんでした（図6）．

この観測では，すべてのストークスパラメー

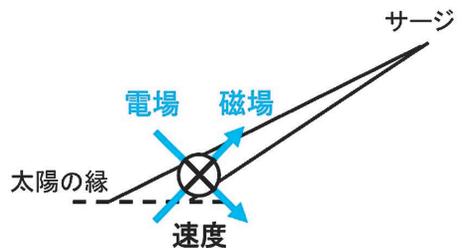


図7 サージに対する測定された磁場と速度場の向き．そこから推定される中性粒子が磁場をすり抜けるときに感じる電場の向き．

ターを磁場の効果だけで再現することができました．そして，磁場強度は10 Gから640 G，ジェットは磁場に沿って伸びていることが明らかになりました（図7）．

電場の存在を示す証拠は観測された偏光からは見つからなかったもので，私たちは電場の上限値を

推定しました。今回、直線偏光は散乱偏光とハンレ効果を用いて解釈できます。これらは、過去の電場測定についての研究で無視されてきた原子偏向による偏光です。私たちは世界で初めて原子偏向も考慮して電場の上限値を推定しました。原子偏向が観測され原子偏向も考慮して電場測定を行えば、シュタルク効果のみを考慮したときに比べておよそ1桁～2桁小さな電場を測定することができます。

図7で観測された磁場と速度場の向きを示します。サージが頂点に達し、視線に垂直な方向の横揺れも観測されなかったときのデータを解析しましたので、速度場は紙面に垂直な成分のみをもっています。中性水素が磁場を横切るときに中性水素にかかる電場の方向は速度場と磁場の外積から図7のようになると考えられます。この場の構成を元に電場の上限値を導出しました。

図8は磁場と電場が図7の向きをもつとき、電場の強度を変化させると偏光度がどうなるか原子

偏向を考慮して計算したものです。カッジーニ氏に依頼し計算してもらいました。電場が大きくなると、もともと縮退していなかったエネルギー準位が相互作用しあい、散乱偏光する効率が変わることで偏光度が変わります。サージの磁場強度が10 Gから640 Gだったので70 G, 200 G, 600 Gについて計算し、観測と比較することで電場の上限値をそれぞれ0.04, 0.3, 0.8 V/cmと導出しました。

磁場強度と電場の上限値から中性水素の磁場を横切る速度の上限値も導出できます。その結果、観測された中性水素の速度に対して中性水素が磁場を横切る速度は小さいことがわかりました。これは磁場が中性水素とともに運動していることを示しており、ローレンツ力を感じない中性水素が荷電粒子との衝突によって磁場に凍結していることを示しています。

5. まとめと展望

私たちは、偏光分光観測による新しいプラズマ診断手法を開拓し、太陽物理を大きく進展させることを目的に、飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡に可視から近赤外の広い波長域にある任意のスペクトル線を高精度に偏光分光観測できるシステムを開発しました。そして、太陽外層大気のエネルギー輸送を理解するうえで鍵となり、近年測定が可能になり始めた彩層の磁場を測定しました。同時にこれまでほとんど注目されてこなかった電場の測定を試み、電場の上限値から、中性水素が磁場に凍結しているという描像に矛盾がない結果を得ました。

彩層の磁場測定は近年可能になり始めた新しい手法です。私たちが観測したサージと呼ばれるジェットは磁場構造がまだ測定されていませんでした。私たちの観測によって、これまで理論的に予想されていたサージが磁場に沿うという事実を初めて観測的に明らかにしました。また、私たちが使った中性水素のパッシュェン系列のスペクトル

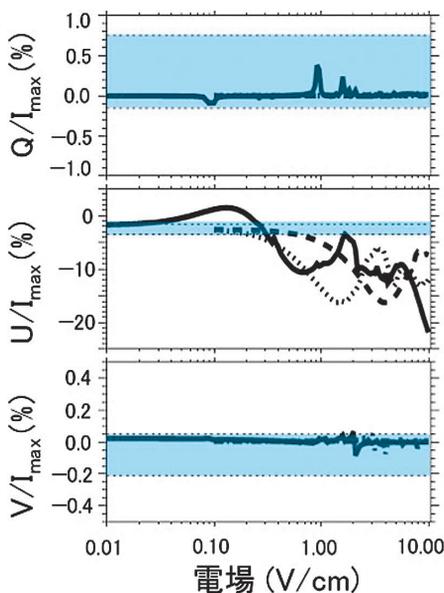


図8 偏光度の電場依存性。カッジーニ氏が開発したコードで磁場が70 G (実線), 200 G (点線), 600 G (破線) のときについて計算した。青い領域は観測された偏光度。

線は微細構造が多く、偏光スペクトルを計算するためにはとても複雑な原子モデルを使わなくてはなりません。その中で理論的に予想されていた結果を得られたことは、ハンレ効果を使ったこの磁場測定手法が正しいことを示すものです。これから、彩層におけるエネルギーの流れを理解するために、彩層磁場構造や磁気流体波の観測などを行っていきたく考えています。また、彩層磁場測定を大きな特徴の一つとしている2020年以降打ち上げ予定の「SOLAR-C」衛星の開発における科学的な検討などで、この手法は役に立つことでしょう。

本研究では電場による偏光シグナルを捉えることはできませんでしたが、これまで無視されてきた原子偏向による偏光が中性水素のパスシェン系列のスペクトル線に現れることを発見しました。統計的に調べていないので、過去の研究と直接比較することはできませんが、サージの電場は過去の研究でシュタルク効果のみを考慮して35 V/cmと測定されたのに対して、私たちは磁場が70 Gと仮定したとき上限値は0.04 V/cmと導出されました。今後、電場による偏光の検出を目指して、いろいろな現象を観測、また適したスペクトル線の洗い出しなどを行っていく予定です。もし、電場が測定できるようになれば、新しい太陽物理が拓かれると言っても過言ではないと考えています。

謝 辞

本稿の内容は筆者の博士論文、および投稿論文^{10), 11)}に基づいたものです。指導教官である一本 潔氏をはじめ、飛騨天文台の皆様たいへんお世話になりました。またアメリカ合衆国高高度観測所のカージーニ氏には拙い英語にもかかわらず親切に議論していただきました。この場をお借りして深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Hale G. E., 1908, ApJ 28, 315
- 2) Stenflo J. O., 1973, SoPh 32, 41
- 3) Trujillo Bueno J., et al., 2002, Nature 415, 403
- 4) López Ariste A., Casini R., 2002, ApJ 575, 529
- 5) Trujillo Bueno J., Asensio Ramos A., 2007, ApJ 655, 642
- 6) Foukal P., Hinata S., 1991, SoPh 132, 307
- 7) Kiyohara J., et al., 2004, SPIE 5492, 1778
- 8) Hanaoka Y., 2009, PASJ 61, 357
- 9) Foukal P., Behr B., 1995, SoPh 156, 293
- 10) Anan T., et al., 2014, ApJ 786, 94
- 11) Anan T., et al., 2012, SPIE 8446, 1C

Diagnosis of Magnetic and Electric Fields of Solar Chromospheric Jet through Spectropolarimetric Observations

Tetsu ANAN

Kwasan and Hida Observatories, Graduate School of Science, Kyoto University, Kurabashira, Kamitakara-cho, Takayama, Gifu 506-1314, Japan

Abstract: To open a new window of plasma diagnostics by using polarization mechanisms of spectral line, we developed a new universal spectropolarimeter on the Domeless Solar Telescope at Hida Observatory to realize precise spectropolarimetric observations in a wide range of wavelength in visible and near infrared. We observed full Stokes spectra of the Paschen series of neutral hydrogen in solar chromospheric jets, using the developed spectropolarimeter, and we measure magnetic field and upper limits of electric field. We concluded that the neutral hydrogen must be highly frozen to the magnetic field in jet.