

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：62616

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25887051

研究課題名(和文)量子論的ハンレ効果を用いた革新的な磁場診断手法の確立

研究課題名(英文)Establishment of the novel diagnostic tool of magnetic field via the Hanle effect

研究代表者

石川 遼子 (Ryohko, Ishikawa)

国立天文台・ひので科学プロジェクト・助教

研究者番号：00709636

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：太陽彩層～遷移層の磁場測定が可能になると期待される、量子論的ハンレ効果を用いた診断手法の確立を試みた。観測ロケット実験CLASP(平成27年度打ち上げ)で観測するライマン輝線(121.6 nm)の偏光スペクトルを計算しデータ解析を模擬することで、ハンレ効果に感度のある磁場強度範囲や解の不定性や縮退、大気モデルの依存性を調べた。本研究で最も重要な結論は、ハンレ効果によって生じる直線偏光のみからは、一意に磁場の3成分を決定することはできず、そのうちの1つを制限する別の観測が必要であることがわかったことで、CLASP観測計画の立案や将来計画検討に目処をつけた。

研究成果の概要(英文)：We established a procedure to infer the magnetic field using the Hanle effect, which will enable us to diagnose the magnetism in solar chromosphere and the transition region. By mimicking the inversion of the linear polarization profiles of the hydrogen Lyman-alpha line (121.6 nm) that is the targeting spectrum of the sounding rocket experiment CLASP (launch in FY 2015), we investigated the range of magnetic field sensitive to the Hanle effect, ambiguity and uncertainty in the inversion, and the influence of atmospheric model on the results. The most important result is that it is difficult to uniquely determine the magnetic parameters only from the CLASP observables (i.e., linear polarization profiles), and simultaneous measurements to constrain one of parameters are critically important. Based on our study, we completed the planning of the CLASP experiment including the coordinated observation with other instruments, and investigated the future direction of the Hanle diagnostics.

研究分野：太陽物理学

キーワード：太陽物理学 プラズマ・核融合 偏光 磁場

1. 研究開始当初の背景

彩層・遷移層は、6千度の太陽表面(光球)と100万度のコロナに挟まれた、1万~数10万度の大気層である。2006年に観測を開始した太陽観測衛星「ひので」によって、これらの大気層が、上空へ噴出するジェットや磁気流体波動などの動的現象で満ち溢れていることが明らかとなった(Shibata et al. 2007 *Science* など)。これらの動的現象は、コロナや宇宙空間へエネルギーを輸送していると考えられ、「彩層・コロナ加熱問題(なぜ、太陽表面に比べて高温の大気層が定在的に存在しているのか?)」を紐解く鍵を握っていると期待されている。次なるステップは、磁気流体波動で運ばれるエネルギー量や散逸機構、ジェットの発生機構を定量的に論じることである。そのためには、これら動的現象の担い手である、彩層~コロナの磁場情報が必須となる。

しかしこれまで、彩層やさらに上空の遷移層、コロナの磁場測定は、「ひので」をはじめ、ほとんど行われてこなかった。その理由は、彩層~コロナでは、光球よりも磁場が弱いこと、ゼーマン効果で生じる偏光信号が小さいこと、さらに、激しい熱的・非熱的プラズマ運動によるドップラー広がりがあること、その小さな偏光信号をかき消してしまうことにある。これを克服できると期待されるのが、ハンレ効果を用いた磁場診断手法である。ハンレ効果は、太陽大気非等方な輻射によって生じた散乱偏光が、磁場の強度や向きに応じて変調を受けるものである。具体的には、(1)太陽大気非等方な輻射場による不均一な原子の励起(population imbalance)、(2)輻射場の対称軸とは異なる磁場の軸での量子化による量子状態の混合(atomic coherence)、(3)磁場の強度と向きによる混合状態の緩和(ハンレ効果)という3つの過程で決まる量子状態を反映した直線偏光が生じ、その信号はドップラー広がりがかき消されることはない。近年、量子論的取り扱いまで含んだ輻射輸送計算が急速に進展し、様々なスペクトル線に対して、散乱偏光及びハンレ効果によって、どのような直線偏光が生じるかの計算が盛んに行われるようになってきた。

1万~10万度の彩層~遷移層から放射される輝線は、真空紫外線領域に多数存在する。その中でも最も明るいライマン輝線(波長121.6 nm)でハンレ効果が発生することが、スペインの研究グループによって示された(Trujillo Bueno, Stepan and Casini, 2011, *The Astrophysical Journal Letters*)。この理論的研究に着目した研究代表者を含む日本の太陽グループは、ハンレ効果を用いた彩層~遷移層の磁場測定技術の検証のために、観測ロケット実験 Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter (CLASP)を発足するに至った。研究代表者は、CLASPの心臓部とも言える偏光分光観

測装置の開発を担当する一方で、日本側プロジェクトサイエンティストも務めている。

真空紫外線は、大気によって吸収されるため、宇宙からの観測が必須である。そのため、真空紫外線での撮像や分光観測例は多くなく、偏光分光観測に至っては前例がない。当然ながら、偏光測定装置開発に必要な技術開発も進んでいない。そのような状況下において、我々日本の太陽グループは、アメリカ及びフランスと協力して観測装置の開発に着手した。偏光素子の基礎開発(Ishikawa et al. 2013, *Applied optics* など)から始め、観測装置の設計、製作等、順調に進め、世界初となる真空紫外線領域での偏光スペクトル取得が射程圏内に入りつつある。次なる課題は、取得された偏光スペクトルから、どのようにして磁場情報を引き出すのかという、データ解析方法の確立である。

日本が中心となって検討を進めている SOLAR-C 衛星をはじめ、現在開発が実施・検討されている望遠鏡及び観測装置の多くが、彩層・コロナ加熱機構の解明を最重要科学目的として掲げている。その実現のためには、ゼーマン効果に加え、ハンレ効果を用いた磁場測定が必須となっており、ハンレ効果を用いた磁場診断手法の確立は、CLASP 実験に留まらない重要な課題となっていると言える。

2. 研究の目的

ハンレ効果は新しい磁場診断手法として注目を浴びつつあるが、量子力学的取り扱いを必要とするため、一般の太陽物理学者にとって、その取扱いは敷居が高い。さらに、観測で得られる偏光スペクトルからハンレ効果を特定し、磁場情報に変換するためには、非等方な輻射場によってどの程度散乱偏光が発生するのかを正確に見積もることが重要となる。そのためには、適切な大気モデルを用いた非局所熱平衡輻射輸送計算が必須となる。これらの困難さから、ライマン輝線のように光学的に厚いスペクトル線から磁場情報を導出する手法は開発されていない。

本研究では、量子論及び非局所熱平衡輻射輸送計算を用い、CLASP 観測装置で得られると予想される偏光スペクトルを計算する。それを元に、逆問題を解きデータ解析を模擬することで、彩層~遷移層の磁場をどのくらいの精度で測定できるか、異なる大気モデルを選ぶことで磁場の決定精度がどの程度悪くなるかを調べ、ハンレ効果を用いた磁場診断能力を明らかにする。さらに、確実にベクトル磁場を求めるためのデータ解析手法、最適な観測領域、観測計画の立案を図る。また、ロケット実験 CLASP の先、紫外線の偏光分光観測を行う将来計画立案にむけて、磁場診断能力の観点から最適な観測スペクトル線は何か?についても議論する。

3. 研究の方法

本研究は以下2つのステップにより進めた。

第1ステップ: 太陽大気モデルが既知の場合での磁場測定性能の評価

ライマン α 輝線で生じるハンレ効果から、確実に求めることのできる磁場情報を精査する。この第1ステップでは、ハンレ効果(磁場によって散乱偏光が変調を受けるプロセス)に着目するため、大気モデルは既知とする。

太陽の静穏領域に対応する平行平板大気モデル FAL-C (Fontenla et al. 1993, *The Astrophysical Journal*) において、任意の太陽面上 ($0 < \mu < 1$, μ は太陽中心角度の余弦。太陽中心が $\mu=1$ 、太陽の縁が $\mu=0$ に対応する) にある、任意のベクトル磁場 (強度 B ・傾き角 θ_B ・方位角 χ_B) を観測する場合に生じるライマン 輝線の偏光スペクトルを計算し、データベースを構築する。まず、これにより、磁場パラメータ (B , θ_B , χ_B) に応じて、どのように偏光プロファイルが振る舞うかを確認する。さらに、データベースの中から抽出した偏光スペクトルに、CLASP 観測装置で想定される波長分解能やノイズを適用し、観測データを模擬する。そして、模擬した観測データに対して、データベースの中から良いフィッティング結果を与えるプロファイルを探すという逆問題を解く。これにより、ハンレ効果に感度のある磁場強度範囲、解の縮退及び不定性の有無、ノイズが磁場測定精度に与える影響を評価する。

この第1ステップの研究は、ハンレ効果による偏光スペクトル形成シミュレーションに精通し、この分野をリードする Trujillo Bueno 氏 (カナリア諸島天体物理学研究所) らと協力して実施した。

第2ステップ: 太陽大気モデルの不定性が磁場決定精度に与える影響の評価

ハンレ効果の本質は、非等方な輻射場によって磁気副準位間のポピュレーション分布が不均一となることにある。つまり、輻射場の非等方具合によってハンレ効果で生じる偏光度の絶対値が決定されることになる。当然ながら、輻射場の非等方性は、太陽大気温度や密度分布に応じて異なる。第2ステップでは、その定量評価を行った上で、異なる太陽大気モデルを解析に用いることによってどの程度の磁場の測定誤差が生じるかを調べる。

RH コード (Uitenbroek 2001, *The Astrophysical Journal*) を用いて非局所熱平衡を考慮した輻射輸送計算を行い、活動領域や静穏領域など、複数の大気モデルに対する輻射場の非等方性を求める。その非等方性を元に、生じる散乱偏光 (磁場がない場合に生じる偏光) そして任意の太陽面上にある任意のベクトル磁場 (B , θ_B , χ_B) を観測する場合に生じる偏光を求める。第2ステップの偏光の見積もりについては、後藤基志氏 (核

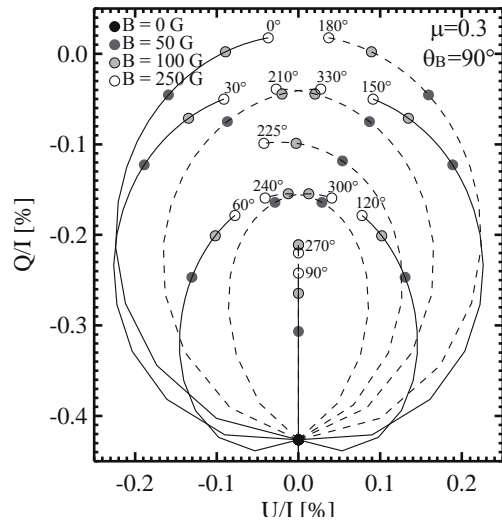


図1. 太陽縁近傍 ($\mu=0.3$) にある、太陽表面に水平な磁場 ($\theta_B=90^\circ$) が、様々な磁場強度、方位角を持つとき、どのような直線偏光が観測されるかを示したハンレダイアグラムである。各線は、方位角 (χ_B) を各線の近くに示された値で一定に保ち、磁場強度を増加させたときの軌跡を示している。

融合研究所) によって導出された解析解 (Goto et al., in prep) を用いる。そして、模擬した観測データで仮定した大気モデルとは異なる大気モデルを選んで逆問題を解いた場合に、結果として得られる解がどれだけ誤差を持つかを調べる。

この第2ステップの研究は、後藤基志氏、RH コードの開発者の Uitenbroek 氏 (米国国立太陽観測所) らと行った。

4. 研究成果

第1ステップ: 太陽大気モデルが既知の場合での磁場測定性能の評価

図1は、太陽表面に水平な磁場 ($\theta_B=90^\circ$) が、様々な磁場強度及び方位角を取るときに生じる直線偏光二成分 (Q/I と U/I) を示した、ハンレダイアグラムである。観測領域は太陽縁近傍とし、大気モデルは、一次元大気モデル FAL-C を仮定した。この図より、磁場強度、方位角に応じて、 Q/I , U/I いずれも

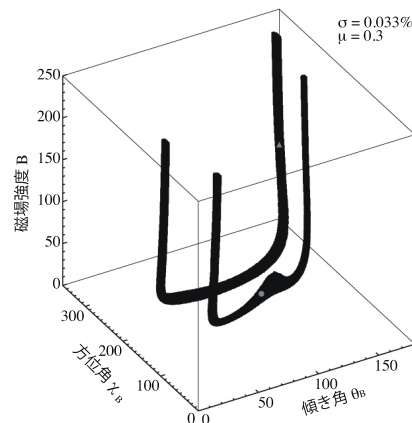


図2. χ^2 マップの例。黒で示された部分が、ノイズの範囲内で許容できるフィッティングを与える磁場パラメータを示す。灰色の丸が、観測の模擬に用いた磁場パラメータを示す。

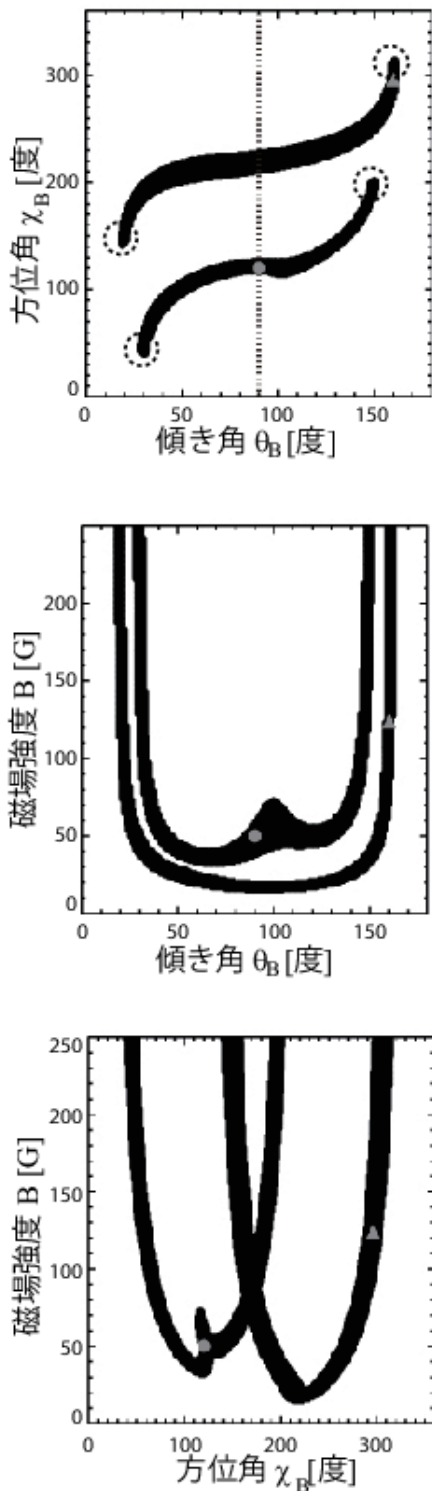


図3. 図2の χ^2 マップを二次元面に投影したものの。

0.5%ほどの幅で変化することがわかる。CLASP 実験では、最悪 0.03%程度のノイズが想定されており (Ishikawa et al. 2014, *Solar Physics*)、これらの違いは十分に検知できることがわかる。一方、ハンレダイアグラムが交わる点は、異なる磁場パラメータが同じ直線偏光 Q/I , U/I を与えることを示している。このことから、多くの場合において、逆問題を解いた際に、複数の解 (解の不定性) が存在すると推測される。

図2に、模擬した観測データとデータベ

ス内の偏光スペクトルの残差の二乗和 (χ^2) を計算した結果を示す。黒で示された部分が、観測を模擬した偏光プロファイルに対して 1σ レベルで統計的に確からしいフィッティング結果を与える (χ^2 が小さい) 磁場のパラメータ領域を、磁場強度 (B)、傾き角 (θ_B)、方位角 (χ_B) の3次元空間で示したものである。観測データの模擬に用いた偏光プロファイルを形成する磁場は、太陽表面に対して水平で、静穏領域磁場としてはやや強めの磁場強度を持つもので ($\theta_B=90^\circ$, $B=50\text{G}$, $\chi_B=120^\circ$) ある。また、観測データの模擬には、CLASP 観測装置で想定される波長分解能 (0.1, Narukage et al. 2015, *Applied Optics*) 及びノイズ (0.03%, Ishikawa et al. 2014, *Solar Physics*) を用いた。

図3は、図2を二次元面に投影したものである。 χ^2 マップが、細長い構造をしており、さらにそれらの細長い構造が複数本存在することがわかる。前者は、磁場強度と方位角、傾き角の3つのパラメータが縮退し一意に解を決めることができないことを示しており、後者は、解の不定性を示している。このように、磁場パラメータを一意に求めることは困難であることが明らかとなったわけだが、3つの磁場パラメータのうち1つを何らかの方法で制限することができれば、解の不定性及び縮退を回避することができることがわかる (例えば、図3上で、 χ_B (縦軸) を決めれば、ほとんどの場合で θ_B (横軸) を求めることができる)。

地上望遠鏡や IRIS 衛星による分光観測によって、彩層上部は、ファイブリルと呼ばれる筋状の構造で覆われていることがわかっており、その筋模様が磁力線の向きを示すと推測されている (Leenarts et al. 2012, 2013, *The Astrophysical Journal*)。CLASP が観測を行う際には、これら筋状の構造を、地上望遠鏡及び IRIS 衛星との共同観測で捉えることで方位角を推測することが最も容易であると結論づけ、研究代表者が中心となって、これらの観測装置との共同観測計画を立案するに至った。

本研究で明らかとなった以下の二点についても述べておく。

- 観測を模擬する際に仮定するノイズを増やし (もしくは減らし) ても、図2にみられるような、 χ^2 マップの細長い構造が複数本存在するという分布の仕方に変わりはなかった (χ^2 マップの細長い構造の幅が太く (狭く) なるだけ)。不定性及び縮退を解くという観点ではノイズの影響はないことがわかった。
- 傾き角と磁場強度に対する χ^2 マップを見ると明らかだが、同程度のフィッティング結果を与えるパラメータ領域が、50G 以上で磁場方向にまっすぐと伸びていることがわかる (図3中央)。これは、50G 以上の磁場強度にはライマン 輝線で生じるハンレ効果は感度がないことを示してい

る。このことから、CLASP 実験の最適な観測対象は、比較的磁場が弱いと推測される静穏領域であると結論づけた。

第 2 ステップ: 太陽大気モデルの不定性が磁場決定精度に与える影響の評価

図 4 は、4 種類の一次元大気モデル (Fontenla et al. 1993, *The Astrophysical Journal*) に対して計算したハンレダイアグラムである。図 1 と同様に、太陽縁付近にある水平な磁場を観測した場合に、方位角、磁場強度に応じてどのような直線偏光が見られるかを示したものである。ハンレダイアグラムの形状はいずれの大気モデルを仮定した場合でも同じであるが、取りうる偏光度が大きく異なることがわかる。また、これらのハンレダイアグラムは複雑に重なり合い、適切な大気モデルを用いないと、正しい磁場情報を得る事ができない可能性を示している。

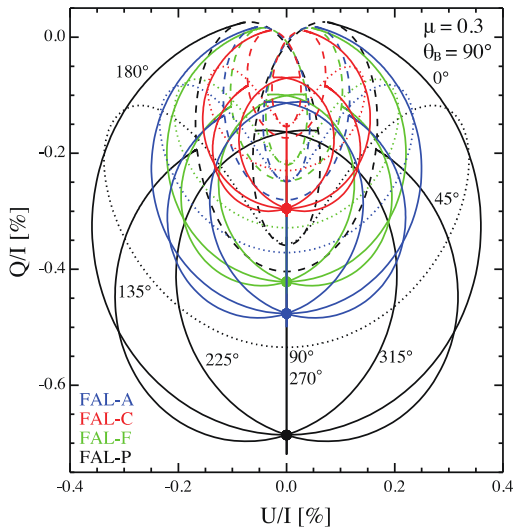


図 4. 4 種類の一次元大気モデルに対するハンレダイアグラム。図 1 と同じく、太陽縁近傍 ($\mu=0.3$) にある、太陽表面に対して水平 ($\theta_b=90^\circ$) な磁場を観測する場合を仮定した。FAL-P は活動領域、FAL-F はネットワーク領域 (静穏領域の中で比較的磁場の強い領域)、FAL-A はインターネットワーク領域 (静穏領域の中で磁場がほとんど見られない領域)、FAL-C はネットワーク領域とインターネットワーク領域を平均化したものを示す。丸印が、磁場がゼロの場合の散乱偏光を示し、各線は、方位角を一定にしたまま、磁場強度を増加させたときの軌跡。

実際に、大気モデルを取り違えると、どの程度、結果に誤差が生じるのか、ステップ 1 と同様に逆問題を解いた。実際のデータ解析を行う際には、活動領域と静穏領域を混同することはないため、静穏領域を特徴付ける二つの大気モデルである、FAL-A モデル (静穏領域の中でも磁場がほとんど見られないインターネットワーク領域を示した一次元大気モデル) と FAL-F (静穏領域の中でも比較的強い磁場が集まった領域を示した一次元大気モデル) の違いのみをここでは議論する。図 5 は、模擬した観測データに対して全ての取りうる磁場パラメータとの残差がノ

イズレベル以下のもの、つまり統計的に許容できるフィッティング結果を与えるパラメータ領域を示したものである。基本的には、図 2 と同じ手順を踏んでいるが、第 1 ステップで議論したように、方位角は別の観測から求めることができるとし、磁場強度と傾き角の 2 つのパラメータを求める逆問題を解くことを考えた。50G 以下に見られる χ^2 マップは、重なり合っており、そのずれはノイズによる不定性 (χ^2 マップのふくらみ) と同程度であり、生じる解の誤差は許容できる。一方、大気モデルを取り違えることによって 100G を超える強い磁場強度を持つ解も得られることもわかる。大気モデルの精査はもちろん、得られた結果の妥当性を確認する必要があることがわかった。

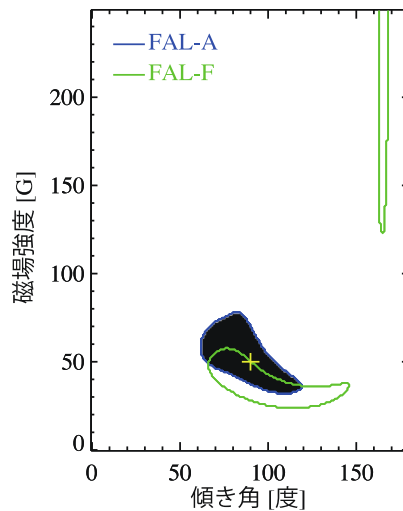


図 5. χ^2 マップの例。線で囲われた部分が、ノイズの範囲内で許容できるフィッティングを与える磁場パラメータを示す。黒が正しい大気モデルを用いて逆問題を解いた時の χ^2 マップを示している。観測の模擬には、 $B=50\text{G}$ 、 $\theta_b=90^\circ$ 、大気モデルは FAL-A を用いた。

本研究を取り巻く現状

CLASP は平成 27 年夏に打ち上げられ、約 5 分間の観測を実施し、世界初のライマン線の偏光スペクトルの取得に成功した。本研究計画を元に立案した、地上望遠鏡及び IRIS 衛星との共同観測も成功裏に完了した。現在、本研究を元にデータ解析を進めているところである。

本研究を元にした展望

ステップ 1 で明らかにしたように、磁場パラメータを一意に決めるには、直線偏光 2 成分以外に新たな観測量を加える、もしくはより直接的に、3 つのうち 1 つのパラメータに制限をつけることが必要で、最も簡単な方法として別観測から方位角を推測する方法を提案した。それ以外にも、本研究では、[1] ゼーマン効果由来の円偏光の観測を加える

ことで視線方向磁場強度に制限をつける、[2] 似たような大気層から放射され、ハンレ効果に感度の異なる複数のスペクトル線で同時に観測する、といった可能性も提案した。

ライマン輝線は、波長が短く、またスペクトル線幅も広いため、ゼーマン効果を検出することは困難であるため、観測ロケット実験 CLASP は散乱偏光及びハンレ効果で生じる直線偏光のみの観測に注力した。そんな中、電離マグネシウム線 (280nm) であれば、ハンレ効果で変調を受ける直線偏光に加えて、ゼーマン効果による円偏光が生じる可能性が高いことが、ステップ1の研究協力者でもあるスペインのチームによって明らかになった (Belluzzi and Trujillo Bueno, 2012, *The Astrophysical Journal Letters*)。現在、日米欧の国際共同研究チームは、観測ロケット CLASP の再飛翔 (CLASP2) を計画している。研究代表者は、CLASP2 の日本側 PI として、本研究で得られたマグネシウム線の有用性を探求すべく、計画を推進している。

また、[2]ハンレ効果に対する感度の異なる複数のスペクトル線での同時偏光観測の有用性についても、どのスペクトル線の組み合わせが最適かについて検討を開始した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

R. Ishikawa, A. Asensio Ramos, L. Belluzzi, R. Manso Sainz, J. Stepan, J. Trujillo Bueno, M. Goto, and S. Tsuneta, ON THE INVERSION OF THE SCATTERING POLARIZATION AND THE HANLE EFFECT SIGNALS IN THE HYDROGEN Ly γ LINE, *The Astrophysical Journal*, 査読有, vol.787, 2014, pp.159-169, DOI:10.1088/0004-637X/787/2/159

ISHIKAWA, Ryohko., ASENSIO RAMOS, Andrés., BELLUZZI, Luca., MANSO SAINZ, Rafael., ŠTĚPÁN, Jiří., TRUJILLO BUENO, Javier., GOTO, Motoshi., TSUNETTA, Saku., Toward the Inversion of the Scattering Polarization and the Hanle Effect in the Hydrogen Ly γ Line, 国立天文台年次報告 (欧文) Volume 17 Fiscal 2014, 査読無, pp.61, http://www.nao.ac.jp/contents/about-naoj/reports/annual-report/en/2014/e_061.pdf

石川遼子, ASENSIO RAMOS, Andrés., BELLUZZI, Luca., MANSO SAINZ, Rafael., ŠTĚPÁN, Jiří., TRUJILLO BUENO, Javier., 後藤基志、常田佐久、ライマン線で生じるハンレ効果を用いた彩層～遷移層の磁場診断手法について、国立天文台年次報告 第27冊 2014年度 (日本語), 査読無, 61,

http://www.nao.ac.jp/contents/about-naoj/reports/annual-report/ja/2014/j_061.pdf

〔学会発表〕(計 6 件)

R. Ishikawa et al., CLASP: A UV Spectropolarimeter on a Sounding Rocket for Probing the Chromosphere-Corona Transition Region, IAU XXIX General Assembly · Division E Science Meeting, 2015年8月10日、アメリカ合衆国・ハワイ州・ホノルル

R. Ishikawa and CLASP team, CLASP Sounding rocket experiment for probing the magnetic field in the upper chromosphere and the transition region, ISSI workshop: Sub-arcsec Observations and Interpretation of the Chromosphere, 2015年7月21日、スイス・ベルン

石川遼子、後藤基志、飯田佑輔、常田佐久、ハンレ効果を用いた磁場診断の大気モデル依存性について、日本天文学会 2015年春季年会、2015年3月20日、大阪大学 (大阪府、大阪市)

石川遼子、A. Asensio Ramos, R. Manso Sainz, J. Trujillo Bueno, L. Belluzzi, J. Stepan, 後藤基志、常田佐久、and the CLASP team, 量子力学的ハンレ効果を用いた彩層～遷移層の磁場診断手法の検討、日本天文学会 2014年春季年会、2014年3月20日～2014年3月22日、国際基督教大学 (東京都、三鷹市)

石川遼子、量子力学的ハンレ効果を用いた彩層～遷移層の磁場診断手法について、太陽研連シンポジウム「活動極大期を迎えた太陽研究の新たな展開---彩層プラズマ診断、宇宙天気、Solar-C...」, 2014年2月17日～2014年2月19日、京都大学理学研究科セミナーハウス (京都府、京都市)

Ryohko Ishikawa, New diagnostic tool for magnetic fields in low- β plasma: CLASP, The Seventh Hinode Science Meeting, 2013年11月12日～2013年11月15日、飛騨・世界生活文化センター (岐阜県、高山市)

〔その他〕

ホームページ:

<http://hinode.nao.ac.jp/user/ishikawa/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川遼子 (ISHIKAWA, Ryohko)

国立天文台・ひので科学プロジェクト・助教

研究者番号: 00709636