

氏 名 吉田 正樹

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2136 号

学位授与の日付 2020 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Magnetic Energy Transport through Chromospheric Spicule  
Revealed with Lyman-Alpha Spectro-Polarimetric  
Observation

論文審査委員 主 査 准教授 勝川 行雄  
准教授 青木 和光  
准教授 関井 隆  
教授 一本 潔  
京都大学大学院理学研究科  
講師 今田 晋亮  
名古屋大学宇宙地球環境研究所

(様式3)

## 博士論文の要旨

氏名 吉田 正樹

論文題目

Magnetic Energy Transport through Chromospheric Spicule Revealed with Lyman-Alpha Spectro-Polarimetric Observation

The solar chromosphere is an important layer to investigate heating mechanisms of the corona, since it is interfaced between the photosphere and the corona to transfer mass and energy. In the chromosphere, jet-like structures called spicules are observed everywhere and it is of great interest to understand how the ubiquitous phenomenon is relevant to the heating of the corona. For a wave heating mechanism, velocity field and magnetic field of the chromosphere are the critical physical quantities that need to be observationally determined to quantitatively evaluate the energy transported to the corona. To study the dynamics and magnetic properties of the upper chromosphere, the Chromospheric Lyman Alpha Spectro-Polarimeter (CLASP) sounding rocket experiment launched in September 2015 obtained spectro-polarimetric data of the hydrogen Ly $\alpha$  line (121.6 nm) in an unprecedented high temporal cadence of 0.3 s. CLASP performed sit-and-stare observations of the quiet Sun near the limb for 5 min with a slit perpendicular to the limb and successfully captured an off-limb spicule evolving along the slit. The Ly $\alpha$  line is well suited for investigating how spicules affect the corona because it is sensitive to higher temperatures than other chromospheric lines owing to its large optical thickness. Another advantage of this spectral line is that it is sensitive to the Hanle effect, namely the modification of the scattering polarization by the magnetic field. It is suitable to derive the field strength ranging from 10 and 250 G, which is in the range of typical field strength of spicules suggested by previous studies using other chromospheric lines in visible and infrared wavelength ranges. In this thesis, we report the first detection of high-frequency wave in Doppler velocity and of scattering polarization of Ly $\alpha$  line from the spicule, which can be used to constrain the magnetic field information via the Hanle effect, using the CLASP observation of the Ly $\alpha$  spicule.

From a time sequence data of Ly $\alpha$  line spectra, we found high-frequency waves with a period of  $\sim 30$  s and a velocity amplitude of  $2\text{--}3 \text{ km s}^{-1}$  propagated upward along the spicule with a phase velocity of  $\sim 470 \text{ km s}^{-1}$  using a wavelet analysis of the time sequence data of the Doppler velocity, in the early phase of the spicule evolution. In

contrast, in the later phase, possible downward and standing waves with smaller velocity amplitudes were observed. In addition that we found low-frequency oscillations with a period of  $\sim 240$  s and a velocity amplitude of about  $20 \text{ km s}^{-1}$ . Since the period is comparable with the observation time of CLASP, we could not detect the propagation of the low-frequency oscillations. The high frequency waves observed in the early phase of the spicule evolution would be related with the origin and the formation process of the spicules. Our analysis enabled us to identify the upward, downward and standing waves along the spicule and to obtain the velocity amplitude of each wave directly from the Doppler velocity for the first time which are relevant to quantitatively estimate the energy flux by the waves.

From the  $\text{Ly}\alpha$  spectro-polarimetric data, we found linear polarization Q/I signal (positive Q/I indicates polarization parallel to the limb) during the observing time is about +0.5% in the off-limb spicule. The linear polarization U/I ( $45^\circ$  counterclockwise direction from Stokes Q) signal changes in time from +0.5% to  $-0.5\%$ . The accuracy of the polarization signal is about 0.1–0.3%. The positive Q/I values indicate that  $90^\circ$  scattering of the incident radiation from the solar disk is dominant. The temporal variation observed in U/I can be considered to be due to the temporal variation of magnetic field vector (i.e., operation of the Hanle effect) and / or to the anisotropic properties of the radiation field. We have compared the calculated polarization signal with the observed one, assuming an axisymmetric radiation field. As a result, it was found that the calculation result and the observation result did not match, and the observation result could not be explained only by the axisymmetric radiation field. This means that in order to explain the observation of polarized signal in  $\text{Ly}\alpha$  line, it is necessary to consider not only the Hanle effect but also the temporal variation of the spicule and the radiation field.

The energy flux transported to the corona can be estimated by the observed velocity amplitude, propagation velocity, and the assumed spicule density obtained from previous study. The energy flux of the high-frequency wave was estimated to be about  $3 \times 10^4 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , indicating that it was insufficient to heat the quiet coronal region. On the other hand, the low-frequency oscillation, which could not be observed as the propagation, has the velocity amplitude an order of magnitude larger than the high-frequency wave. Assuming that the low-frequency oscillation has the same propagation velocity as the high-frequency wave, its energy flux is estimated to be about  $1 \times 10^6 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , indicating that it is sufficient to heat the quiet coronal region. From the above discussion, it is understood that the low-frequency waves are important for the coronal heating.

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏名 吉田 正樹

論文題目 Magnetic Energy Transport through Chromospheric Spicule Revealed with Lyman-Alpha Spectro-Polarimetric Observation

太陽コロナの加熱を理解するためには、6000 度の光球と数百万度のコロナの境界に位置する彩層を観測することが重要だと考えられている。その一つの理由が、コロナ加熱に必要なエネルギーは、彩層を介して光球からコロナに伝わるためである。彩層は動的なジェット現象であるスピキュールの集合であり、スピキュールの速度場・磁場を測定することで、光球からコロナへ輸送されるエネルギーフラックスを定量化することが重要である。しかし、従来の観測では速度場・磁場の測定精度が悪く、エネルギーフラックスの導出に不定性が大きかった。

このような状況を打開するため、出願者は、2015年に観測を行ったロケット実験 Chromospheric Lyman Alpha Spectro-Polarimeter (CLASP) で得られた紫外線域のライマン $\alpha$ 輝線(121.6 nm)の偏光分光データを用いて、スピキュールの速度・磁場を導出し、エネルギーフラックスを定量化する研究を行った。彩層を観測できるスペクトル線は可視光や赤外線にも存在するが、ライマン $\alpha$ 輝線はコロナに近いところで形成するスペクトル線であるため、彩層がコロナに及ぼす影響を調べる上で最も適したスペクトル線と言える。ライマン $\alpha$ 線は、また、ハンレ効果による偏光を観測することでスピキュールの磁場を測定できることが有望視されているスペクトル線でもある。しかし、ライマン $\alpha$ 線は地上からは観測できないため、CLASP 以前には、精密な偏光分光観測がなされていない。CLASP は5分間という限られた時間ながら、0.3秒という高時間分解能で分光データを世界で初めて取得することに成功した。

出願者は、まず、スピキュールから放射されるライマン $\alpha$ 線の分光データを解析し、ドップラー速度の時空間発展を導出したところ、30秒程度の周期と2—3 km/sの速度振幅を持ち、太陽大気の下層から上層に470 km/sの速度で伝播する高周波の波動現象を発見した。高周波波動はスピキュールの形成初期に顕著に見られるため、スピキュールの発端、すなわち、ジェットの駆動メカニズムと関連している可能性が示唆されている。また、同じドップラー速度の時空間発展において、240秒程度の周期でおよそ20 km/sの速度振幅を持った低周波の波動も同時にとらえられた。CLASP ロケット実験データを用いた本研究は、(1)低周波と高周波の波動を同時にとらえたこと、(2)波動の速度振幅をドップラー速度から得たこと、(3)時系列から波動の伝播速度を得たこと、の3点を同時に実現したことが新しく、これにより少ない仮定でエネルギーフラックスを定量的に評価することを可能にした。結果として、高周波よりも低周波の波動の方がコロナへ供給するエネルギーフラックスが大きいことを明らかにした。

出願者は、次に、スピキュールから放射されるライマン $\alpha$ 線の直線偏光を解析した。その

結果、(1) 直線偏光は太陽のリムに平行な方向が主であり、その大きさは約 0.5%であること、(2) 直線偏光の向きが時間的に変化していること、を明らかにした。ハンレ効果は、散乱偏光が磁場によって変調をうける効果のため、観測された偏光から磁場を求めるためには、散乱偏光の向き・大きさを把握する必要がある、すなわち、スピキュールにおける輻射場の非等方性の情報が必要である。出願者は単純な軸対称輻射場の場合の散乱偏光を計算しハンレ効果のモデルと観測を比較することで、ライマン $\alpha$ 線の偏光とその時間変化の観測結果は、単純な軸対称輻射場で発生する散乱偏光がハンレ効果で変調するだけでは説明できないことを明らかにした。スピキュールが放射するライマン $\alpha$ 線の偏光を 0.1—0.3%の偏光精度で測定したこと自身が初めてであり、その性質を観測的に明らかにしたことは、今後、散乱偏光とハンレ効果のモデル化やさらなる観測的研究を触発するものである。

出願者の研究は、今後の彩層スピキュール研究、及び、コロナ加熱のためのエネルギー輸送の理解に大きく貢献するものであり、また、CLASP ロケット実験で取得したデータの解析とそれに基づく解釈と議論など、論文作成の一連の過程を出願者が主体的に行っていることが認められた。以上の理由により、審査員全員一致で博士論文として合格であると判断した。