

氏 名 西川 貴行

学位 (専攻分野) 博士 (理学)

学位記番号 総研大甲第 1035 号

学位授与の日付 平成 19 年 3 月 23 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 Kinematic Structure and Ionization of Optical Jets  
Associated with Young Stellar Objects

論文審査委員 主 査 教授 安藤 裕康  
教授 渡邊 鉄哉  
助教授 兒玉 忠恭  
教授 松元 亮治 (千葉大学)  
教授 柴田 一成 (京都大学)

Optical jets and molecular bipolar outflows are two major manifestations of outflowing activities associated with young stellar objects (YSOs). It is not clear how these two outflow activities are related with each other. One of the major scenarios is that a collimated jet seen in the optical-IR wavelength entrains its ambient molecular material, allowing the molecular outflow to occur. In order for us to tackle this issue, it is crucial to understand how jets interact with ambient material.

In addition to the kinematics, mass loss rate and mass momentum transfer rate of a jet are key parameters to investigate how the jet interacts with the ambient material. However, the mass momentum is poorly known because the hydrogen density is not easily derived, as is different from the electron density that is measured from forbidden line emissions. If we assume that a jet is fully ionized, i.e. the electron density is nearly equal to the hydrogen density, the mass momentum of the jet derived from its optical emission lines is not sufficient to drive the molecular outflow associated with it. In contrast, recent studies have suggested that jets are almost neutral, indicating that a jet may have momentum sufficient to drive a molecular outflow.

In order to study the issues described above, we made slit-scan observations of H-alpha and [NII] 6583 Å emission lines toward two bright jets, HH 46/47 and the HL Tau jet, with Subaru Telescope. The large diameter of the telescope, together with the high spectral resolution of the spectrograph (High Dispersion Spectrograph, of  $R = 36000$  or  $\Delta v = 8 \text{ km s}^{-1}$ ) allowed us to study the kinematics of these jets in unprecedented detail. Furthermore, the slit-scan technique with a long slit provided us with kinematic information of the entire jets.

We find that, in both jets, the H-alpha emission traces both the main jet component ( $V_{\text{LSR}} = 160 \sim 180 \text{ km s}^{-1}$ ) and distinct lower velocity component ( $|V_{\text{LSR}}| \lesssim 120 \text{ km s}^{-1}$ ). The [NII] emission, on the other hand, is primarily associated with the main jet component and is much fainter or absent in the lower velocity component. In the HH 46/47 jet, the velocities of H-alpha and [NII] emissions lines match well in their main jet components. The lower velocity components are associated with one-sided bow shocks and with one of the H-alpha filaments that was previously identified with the Hubble Space Telescope. In HL Tau jet, the lower velocity component is

associated with individual knots, which is explained by the lower velocity emission arising in the laterals of bow shocks. While the main jet component is associated with the ejecta, the lower velocity component is produced as a result of the interaction between the ejecta and surrounding gas.

Observed H-alpha line profiles suggest that the shock velocities at the bow shocks and the H-alpha filament with respect to the ambient gas are 60-80 km s<sup>-1</sup> and 120-130 km s<sup>-1</sup> for HH 46/47 and HL Tau, respectively. These are markedly smaller than the three dimensional (3-D) velocities of the jets (~300 km s<sup>-1</sup>). The discrepancy between the shock velocity and 3-D velocity is explained if the ambient gas moves outward by ~200 km s<sup>-1</sup>. The velocity of the ambient gas measured in the HH 46/47 jet is similar to those of HH 47A and 47D, giant bow shocks ahead of the observed region.

Through detailed analysis, we concluded that the outward motion of the ambient gas is a result of prompt entrainment, i.e. a jet sweeps up ambient material at its ahead by a large bow shock, but not of turbulent entrainment, the other entrainment mechanism proposed to date. Indeed, our high spectral resolution slit-scan observations of H-alpha show that the main jet component has a uniform radial velocity of VLSR = 160 km s<sup>-1</sup> ( $\Delta V = 10$  km s<sup>-1</sup>) and did not show the presence of slow H-alpha components ( $|VLSR| \lesssim 120$  km s<sup>-1</sup>) along the edges of the jets. Such slow H-alpha emission was reported in previous observations and was proposed to arise from turbulent boundary layers between the main flow and the ambient gas. Our results indicate that H-alpha and [NII] originate from the main jet component (i.e. the ejecta), and also from bow shocks and H-alpha filaments, but not from turbulent mixing layers.

We also investigated the ionization fraction in the jets using the [NII]/H-alpha flux ratio. In the case of HH 46/47, the ratio is 0.2-0.5 in the main jet component and even higher in some other regions. Shock model calculations show that the ratio is sensitive to the ionization fraction of preshock gas if the shock velocity is less than 100 km s<sup>-1</sup>. The observed high ratio for HH 46/47 is expected if its main jet component is considerably ionized, although previous observations proposed a much lower ionization fraction of ~ 0.2. The [NII]/H-alpha flux ratio is significantly smaller than 0.2 in the one-sided bow shocks and H-alpha filaments, indicating that the gas surrounding the ejecta is rather neutral.

For the HL Tau jet, the observed [NII]/H-alpha flux ratio markedly vary

from one region to another: 0.1-0.7 at base of the jet, less than 0.1 in knot A,  $\sim 0.2$  in knot B,  $\sim 0.4$  in knot C, and  $\sim 0.7$  in knot D. Because the shock velocities of the HL Tau jet exceed  $100 \text{ km s}^{-1}$  in some regions, the ratio does not directly reflect the ionization fraction of preshock gas. At the knots A-D, the [NII]/H-alpha flux ratios increases from  $< 0.1$  to 0.7 with distance from the source. This suggests that the preshock density decreases with distance from the source. The ratio at the lateral of the bow shocks is less than  $\sim 0.1$ , suggesting that the ambient medium is almost neutral. At the base of the jet, the observed [NII]/H-alpha flux ratio decreases from 0.7 to 0.1 as the distance from the source increases. This suggests that the ionization fraction decreases with distance as a result of radiative recombination.

We compared the [NII]/H-alpha ratio in the main jet components of the HH 46/47 jet and HL Tau jet. The ratio for the HH 46/47 jet is higher (0.2-0.5) than that for the HL Tau ( $< 0.2$ ), indicating high ionization fraction. Such a difference suggests that the radiation from a nearby O star irradiates the ambient gas of the HH 46/47 system, which is located near the HII region Gum nebula, causing the high ionization fraction in the main jet component. Another possible interpretation is that radiative cooling by recombination is not efficient in the HH 46/47 jet because of its low density, thus allowing the high ionization fraction in the jet significantly away from the driving source.

本論文は3章よりなる。第1章は本研究の背景と目的を述べた導入部分である。誕生間もない若い星には双極分子流のほか光学ジェットが観測されている。しかしジェットがどのように加速され、星周物質とどのように相互作用をしているかは良くわかっていない。特に、光学ジェットから周辺ガスへの作用が乱流駆動なのか衝撃波駆動なのかは未解決な大きな問題である、さらに、ジェットの総運動量が、分子流を加速するのに十分かどうかは良くわかっていない。これらの重要な問題を解決するには、従来よりも高い空間分解能かつ、高い波長分解能の分光観測を行い、光学ジェットの詳細な速度構造を明らかにするとともに、光学ジェットの電離度を推定し、禁制線強度から求まる電子密度を水素量に焼きなおし、ジェットの運動量を算定する必要がある。これが本研究の主たる動機である。第2章は、天体HH 46/47の分光観測の概要、観測天体、解析方法、観測結果について述べられている。具体的には、すばる望遠鏡の高分散分光器(HDS)を用いて、 $H\alpha$ と[NII]6583の輝線を高い空間分解能、高い波長分解能でジェットの中心から周辺部分にわたる速度場を世界で初めて詳細に観測した。その結果、 $H\alpha$ 輝線は高速度成分(-180km/s)と低速度成分(-120km/s)を示し、しかも周辺に行くにつれて低速度成分が卓越していることを発見した。一方、[NII]輝線は高速度成分のみを示した。次に速度場とHST詳細画像との比較から、低速度成分がショック面のすぐ横や $H\alpha$ フィラメントに付随して不連続に分布することを示し、周辺ガスへの作用が衝撃波によって駆動されている可能性が強いことを示した。なぜなら乱流駆動の場合には、低速度成分がジェットの側面に沿って連続的に分布していることが期待されるからである。さらに[NII]と $H\alpha$ 輝線の比から電離状態を算定したところ、光学ジェットでは以前の観測に比べて電離度が高いことがわかり、電子密度から見積もられる水素量が減り、よってジェットの算定運動量が減るため、観測された光学ジェットだけでは分子流を加速するには不十分であることがわかった。

第3章は、天体HL Tauについて第2章と同様な観測解析を行ったことが述べられている。HL Tauの3つのノットでも、HH 46/47天体と同様に $H\alpha$ 輝線に高速度成分(-180km/s)と低速度成分(-120km/s)がみられる。この天体についてはHSTの画像データがないため、衝撃波モデルから予想される輝線輪郭と観測結果とを比較するという別の手法によって、やはり衝撃波駆動仮説と矛盾ないことを示した。また、ノット部分の[NII]と $H\alpha$ 輝線の比が、ノットが中心星から遠ざかるにつれて増加していることから、衝撃波通過前のガスの密度が距離に応じて減少していることを示した。HH46/47領域とは異なり電離度から算定した水素ガスの運動量は分子流加速に十分足りていることを示した。

以上、本論文は、HH 46/47とHL Tauジェット領域を、すばる望遠鏡のHDSを用いて、かつて無い高空間分解能および高波長分解能でスリット走査観測を行なうことにより、(1)光学ジェットが周辺のガスと衝突し、その衝撃波によって周りのガスの流れを駆動していること(2)光学ジェットの運動量が分子流加速に十分な場合と不足している場合があり、光学ジェットですべての分子流を加速出来るわけではない、

などの重要な結果を示した価値ある研究である。従って博士（理学）の学位を授与するに十分な内容であると認める。