

氏 名 横 川 創 造

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第719号

学位授与の日付 平成15年9月30日

学位授与の要件 数物科学研究科 天文科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Aperture Synthesis Observations of Low-mass  
Protostars in the Taurus Molecular Cloud:  
Formation Processes of Protoplanetary Disks  
in Protostellar Envelopes

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 観山 正見  
教授 川邊 良平  
教授 林 正彦  
助教授 田村 元秀  
助教授 山本 智 (東京大学)

Formation process of a protoplanetary disk around a low-mass YSO is one of the most interesting issues in modern astronomy, which is deeply related to the origin of the solar system. Although previous survey observations of low-mass YSOs have revealed evolution from protostar phase to T Tauri star phase, such as dissipations of envelope gases, dust concentrations from envelopes to circumstellar disks, and expansion of accretion disks. However, the formation process of a protoplanetary disk, how and when the protoplanetary disk has formed, is not still understood.

In this thesis, I examine the structure and evolution of circumstellar envelopes and disks around protostars to reveal the formation process of a protoplanetary disk in a protostellar envelope through aperture synthesis observations of low-mass YSOs in the Taurus Molecular Cloud (TMC).

In the chapter I, since protoplanetary disks have large diversity of disk masses, radii and angular momenta, we tried to reveal one of the causes of the diversity: the outflow-triggered star formation in low-mass star-forming regions. We performed CS  $J=2-1$  and  $J=3-2$  observations of the class 0 protostar L1551 NE to investigate the interaction feature between L1551 NE and the outflow of the nearby protostar L1551 IRS 5, since L1551 NE is deeply embedded in the outflow of L1551 IRS 5. Significant CS emission around L1551 NE was detected at the eastern tip of the swept-up shell of the outflow of L1551 IRS 5, and the following new structures were successfully revealed: a compact disklike component with a size of 1000 AU just at L1551 NE, an arc-shaped structure around L1551 NE, open toward L1551 NE, with a size of 5000 AU, i.e., a bow shock, and a distinct velocity gradient of the dense gas, i.e., deceleration along the outflow axis of L1551 IRS 5. Since the age of L1551 NE is comparable to the timescale of the interaction, it is plausible that the formation of L1551 NE was induced by the outflow impact. This is a first case of the outflow-triggered star formation in low-mass star forming regions.

In the following chapters II and III, we presented the results of aperture synthesis observations of  $^{13}\text{CO}$  ( $J=1-0$ ) and ( $J=2-1$ ) line emissions toward the binary protostar L1551 IRS 5 and the single protostar HL Tau.  $^{13}\text{CO}$  ( $J=1-0$ ) observations of L1551 IRS 5 have revealed the centrally condensed envelope. The envelope shows infall and rotation motion toward the central sources. The infall velocity of the envelope is consistent to the free-fall velocity around a central mass of  $0.5 M_{\odot}$ , whereas the rotational velocity has a radial dependence of  $r^{-1}$ , suggesting the specific angular momentum of the gases has conserved during the contraction of the envelope. Furthermore, the  $^{13}\text{CO}$  ( $J=2-1$ ) observations of L1551 IRS 5 show a disklike structure in the central part of the envelope. A distinct velocity gradient is detected along the major axis of the structure, whereas no prominent gradient is detected along the minor axis, suggesting a purely rotating disk. The disk radius estimated to be 500 AU. This

radius is significantly larger than the centrifugal radius derived from the local specific angular momentum of the envelope of L1551 IRS 5, although a Keplerian disk is theoretically thought to form with the centrifugal radius in the envelope. Neither the gravitational interaction between the disk and the binary sources nor the turbulent viscosity in the disk seems a plausible mechanism to make such a large rotating disk.  $^{13}\text{CO}$  ( $J=1-0$ ) observations of HL Tau have revealed the extended infalling envelope. A velocity gradient of the emission clearly aligns the minor axis of the envelope, whereas no prominent gradient is detected along the major axis of the envelope, suggesting that the envelope around HL Tau is almost infalling. Even in  $^{13}\text{CO}$  ( $J=2-1$ ) imaging, a rotational disklike component could not be found, suggesting that a Keplerian rotating disk around HL Tau seems to be as small as 100 AU and is likely to be comparable to the typical centrifugal radius of the low mass YSOs in the TMC.

In the chapter IV, we presented the  $^{13}\text{CO}$  ( $J=1-0$ ) observations of the protostar Haro 6-5B. Although Haro 6-5B is considered as a protostar, only a compact disklike structure which exhibits rotation motion is detected with a tiny extended envelope, suggesting that most of the envelope has already dissipated. Since the rotation radius of Haro 6-5B is about 400 AU which is comparable to that of L1551 IRS 5, Haro 6-5B might be a binary protostars.

In the chapter V, we examine the physical properties of low-mass YSOs, both our samples and the data of previous studies, to reveal a formation mechanism of a protoplanetary disk. In the case studies of a binary protostar L1551 IRS 5 and a single protostar HL Tau as describe in the chapter II and III, the rotation disk around L1551 IRS 5 is clearly revealed, whereas that around HL Tau is not detected. Furthermore, the envelope around L1551 IRS 5 shows rotation motion with infall motion, whereas that around HL Tau shows almost only rotating, suggesting that the large amount of local specific angular momenta of envelopes might form a binary system and a large rotating disk. A comparison of the local specific angular momenta between single stars and binary systems, however, shows no obvious difference. These results suggest that differences between binary system and single star formations are quite subtle distinctions of physical properties of protostellar cores and envelopes.

## 論文の審査結果の要旨

近年、若い星の周りに惑星を生み出す母体となる原始惑星系円盤が発見され、太陽系起源論を観測的に実証する上での観測的な基礎が与えられ、注目されている。これまで、若い星の周りの原始惑星系円盤は、野辺山ミリ波干渉計などにより、ガス成分とダスト成分の詳細な高空間分解能の観測が行われてきたが、連星系の周りでは、太陽系の大きさの10倍の巨大な回転ガス円盤の存在や、単一星の周りの円盤では、太陽系程度の大きさの円盤が星の進化に伴い半径が大きくなるような構造の進化などが明らかになってきている。これらの円盤は、若い星の前段階である原始星の時期一活発に中心星への質量降着が起きている時期一に星の形成とほぼ同時に形成されると考えられている。申請者は、低質量の原始星の場合、どのように原始惑星系円盤が形成されるかを明らかにするため、野辺山ミリ波干渉計を用いた観測研究を行った。

分子雲コアの重力収縮によってコア内部に形成される原始星は、濃いガスとダストからなるエンベロープに覆われている。エンベロープは落下運動を示し、エンベロープ自身が保持する比角運動量は保存されつつ収縮することが過去の観測から示唆されている。そしてエンベロープ内部で中心星の重力と遠心力が釣り合う半径の回転円盤、すなわち原始惑星系円盤を形成すると考えられている。しかしながら、これまでの観測ではエンベロープの回転落下運動は明らかになっているものの、その内部で実際に回転円盤が形成されているかどうか実証した例は無かった。その現状を打破するため、申請者はおうし座分子雲にあるエンベロープを伴う原始星 L1551 IRS 5 と HL Tau (これらの原始星は、明るい順に1番目と2番目) に対して、回転円盤成分の検出を目指した高空間分解能観測を試みた。なお、IRS 5 は近接連星であり、HL Tau は単独星だと考えられている。これら2天体は、おうし座分子雲でも特に良く研究されている天体であり、エンベロープの詳細な運動も既に研究されている。原始星を形成するガスは分子雲コアの内側から順に降着するため、本観測は降着前期ガスと降着後期ガスの比較を行える点でも斬新である。L1551 IRS 5 の  $^{13}\text{CO } J=2-1$  観測の結果、エンベロープ中心領域にコンパクトな円盤状構造の存在を明らかにした。円盤状構造は、IRS 5 のアウトフローに直交した方向 (エンベロープの長軸方向) に速度勾配を示し、円盤状構造が落下ではなく回転によりサポートされていることを示した。円盤状構造を検出できた主な要因は、 $J=1-0$  輝線観測に比べて高温・高密度領域をトレースすること、また空間分解能が高く広がった構造に対して感度を示さなかった点が多い。円盤状構造のサイズと速度勾配から、円盤の半径と中心星の質量を推定した結果、半径  $490 \pm 50$  AU, 中心星質量は  $0.6 \pm 0.2$  太陽質量であることが明らかになった。この結果は、エンベロープ内で実際に回転円盤が形成されていることをはじめて明らかにした点で重要である。一方で、HL Tau の  $^{13}\text{CO } J=2-1$  観測では、エンベロープの顕著な回転運動を捉えることは出来なかった。観測の空間分解能は  $3''$  (400AU に相当) なので、HL Tau の回転円盤半径は  $\sim 200$  AU よりも有意に小さいことが示唆された。

次に議論として、エンベロープの比角運動量から期待される遠心力釣り合い半径 ( $R_{\text{cen}}$ ) と実際に観測から得られた円盤半径 ( $R_{\text{disk}}$ ) の比較を行った。その結果、IRS 5 では、 $R_{\text{cen}} = 27-64$  AU なのに対して、 $R_{\text{disk}} = 490$  AU と大きな違いがあることが明らかになった。

一方、HL Tau では  $R_{\text{disk}}$  の上限しか得られなかったが、典型的な  $R_{\text{cen}}$  に比べて矛盾はない。IRS 5 の大きな円盤の解釈として、1) 連星の重力トルクの影響、2) 円盤内の粘性による膨張、3) 円盤を形成したガスとエンベロープを構成するガスでは異なる比角運動量を持つ、すなわち初期分子雲コアが非一様な回転則を持っていた可能性がある、という 3 つの解釈を示した。1), 2) は近年の理論研究から多少の困難があるため、申請者は 3) の可能性が高いと示唆した。3) の解釈が正しいとすると、IRS5 の分子雲コア内部の初期の角速度が大きかったために、連星系や大きな回転円盤を形成したことを示唆する。この点は、今後の星形成、惑星系形成の観測的研究の上で重要な 1 つのカギとなるものである。以上、申請者の研究成果は、エンベロープを伴う原始星内で回転円盤（原始惑星系円盤）の存在をはじめて明らかにしたものであり、惑星系円盤形成の理解に新たな知見をもたらしたものであり、高く評価できる。

審査委員全員の出席のもと、公開の論文発表会を行った。まず、申請者による論文内容の口頭発表を約 45 分間行い、引き続き審査委員および一般聴講者による質疑応答を約 30 分、また審査員だけによる質疑応答をさらに約 20 分行った。

申請者は、研究の背景、目的・意義、観測手法や独自性・独創性、また研究結果の要点と新たな知見、その重要性などについて、明確に説明した。質疑に対しては明快に受け答えした。

その後、審査員のみによる審議を行い、その結果、論文の科学的な価値を十分に認められること、出版済みの学術論文についても、申請者の寄与によるものか大きいこと、を確認することができた。さらに申請者の天文学的に関する学識や力量も十分であることを認識し、また論文が明快な英文で書かれていることから、語学力についても問題ないことを確認した。

以上の試験の結果、申請者は天文科学において、博士（理学）の学位を受けるに相応しい力量を持つものと認め、審査員全員一致により合格と判定した。