学位論文題名

Observational Study of High Mass Star Formation
with Very Long Baseline Interferometer

(超長基線干渉計を用いた大質量星形成についての観測的研究)

学位論文内容の要旨

宇宙における恒星の大部分は大質量星(> 8 太陽質量)を含む星団として誕生する。大質量星はその誕生過程において母体である星団形成雲に膨大なエネルギーフィードバックをもたらし、周囲の星形成に多大なる影響を及ぼす。従って局所的な星形成史を考える上で、個々の大質量原始星(HMYSO)の進化を理解することは必要不可欠である。しかしながら個々の大質量星形成過程についての観測的研究は未だに進んでいない。これは主に現行の電波望遠鏡および結合型電波干渉計の分解能(> 1 秒角)が不十分であることに由来する。一方近年の理論的な研究から個々の HMYSO は低質量星の場合と同様にガス円盤を通じた質量降着によって成長することが示唆されている。この場合、降着円盤から放出される原始星ジェット/アウトフローは駆動領域の物理量を調べる上で重要な手がかりとなる。特に原始星ジェットは予想される駆動領域が原始星近傍 1 au 以下であり、降着円盤内奥の状態を調べる数少ない手段である。

過去の観測から HMYSO に付随する大スケール(> 1000 au)のアウトフローは非常に質量が大きく、その大部分が母体雲からの巻き込みに由来することが示唆されている。また小星団からの複数のジェット/アウトフローが混じり合って形成されることから、非常に複雑な形状を示す。このように低分解能の観測では、円盤状態の手がかりとなる個々のジェット/アウトフローを捉えることは困難である。

これに対して超長基線干渉計(VLBI)は 1 ミリ秒角に達する超高分解能を持ち、個々の HMYSO 形成過程を空間分解可能な唯一の装置である。本研究は 1000 au 以下のスケールにおけるジェット/アウトフロー現象と星周構造の解明を目的とし、我が国の VLBI 装置を用いて 3 つの大質量星形成領域に付随する 22 GHz 水メーザーの観測を行った。 22 GHz 水メーザーはジェット/アウトフローによる衝撃波によって励起される輝線であり、ジェット/アウトフローの 3 次元運動と構造を詳細に観測可能であることが過去の VLBI 観測におい

て示されている。

本研究では先行研究によって提唱された HMYSO 進化に伴うアウトフロー進化説を検証するため、進化段階の異なる以下の 3 天体について観測を行った。IRAS 06061+2151(以下 I 06061)はごく小さな超コンパクト電離水素領域(UCHID)領域を伴い、質量降着の最終段階にあると考えられる天体である。G5.89-0.39 は O 型零年主系列星に伴う UCHII 領域であり、励起星に対する質量降着はすでに終了している。G353.273+0.641(以下 G353)は未だ核融合開始前のごく若い HMYSO の候補であり、活発な質量降着が予想される。進化説から推定されるアウトフローの特徴はそれぞれ (1) G353:ジェット優勢型 (2) I06061:ジェット / 広角アウトフロー複合型 (3) G5.89-0.39: 恒星風優勢型である。

I 06061 の観測は我が国の大学連携 VLBI 観測網を用いて行った。検出された水メーザーは UCHII 領域内の B3 型励起星が駆動する双極アウトフローによって励起されていることが明らかになった。また赤外線観測との比較から励起星がジェットと広角アウトフローの 2 重構造を持っていることを初めて発見した。さらにジェットの軌道上には他に 2 つの B 型 HMYSO が存在していることから、ジェットによる誘発的星形成の可能性が示唆された。

G5.89-0.39 については国立天文台 VERA を用いて観測を行った。メーザー源に対する年周視差計測の結果、同天体の距離が $1.28^{+0.09}_{-0.08}$ kpc と求まった。これは過去に報告されていた距離の 2/3 に当り、同天体の物理量が大幅に改訂された。また O 型励起星の周囲にリング状に分布するメーザー源が検出された。これらのメーザー源は降着円盤と恒星風の相互作用によって励起されていると考えられる。

G353 については VERA による長期 VLBI モニターに加えて、北海道大学苫小牧 11m 電波望遠鏡による単一鏡モニターも行った。2 年間のモニターの結果 2 度の間欠的なメーザーフレアが検出された。これらのフレアは衝撃波構造の顕著な変動を伴うことが VERA 観測によって示された。またフレア時にのみメーザー源の加速現象が観測された。これらの結果から G353 のメーザー源は原始星ジェットの間欠的な駆動によって励起されていることが示唆される。

3 天体のそれぞれについて推定された質量降着率は 1 年当り 10^{-5} から 10^{-3} 太陽質量程度であり、輻射圧問題に基づく理論的な予測と一致している。また検出されたアウトフロー構造は確かにアウトフロー進化説を裏付ける結果となった。水メーザー源の性質はアウトフロー進化に伴って以下の 3 つの型に分類される。(1) I 型: ジェット優勢期においてジェットとアウトフローキャビティの相互作用により励起される。(2) II 型: ジェット / 広角アウトフロー複合期において広角アウトフローによって励起される。(3) III 型: 恒星風優勢期において恒星風と降着円盤(もしくは円盤の名残)の相互作用によって励起される。特にジェット/アウトフロー複合型の天体は本研究によって初めて検出された。

他の天体との比較から I 型から II 型への移行は HMYSO による円盤加熱に伴って、水素燃焼より以前に起こると考えられる。このため II 型メーザーの力学年齢（または空間的な広がり）と円盤加熱には相関があると予想される。また他の研究も含め現状ではジェット/アウトフロー複合型天体は II 型メーザーによってのみ観測されるが、今後アタカマミリ波サブミリ波干渉計(ALMA)による直接観測が可能となれば、円盤加熱の定量的な情報が得られると期待される。

また本研究における G353 の長期モニター観測は、小口径の電波望遠鏡によって原始星ジェットの駆動が監視可能であるということを示した点で非常に重要である。今後こうした単一鏡モニターを ALMA 時代に可能となる高分解能の円盤観測と組み合わせる事で、ジェット駆動に合わせた円盤環境の変動を即座に捉えることができると期待される。

学位論文審査の要旨

主査	特任教授	藤本正行
副査	教授	羽部朝男
副査	教授	鈴木久男
副査	教授	小笹隆司
副査	助教	徂徠和夫

学位論文題名

Observational Study of High Mass Star Formation with Very Long Baseline Interferometer

(超長基線干渉計を用いた大質量星形成についての観測的研究)

太陽の8倍以上の質量を持つ大質量星は数こそ少ないものの、多くの恒星が形成される星団の中でその母体となる分子雲に対して紫外放射や質量放出などのエネルギーのフィードバックを通して、星形成の過程に多大な影響を及ぼすことが知られている。しかし、太陽近傍に大質量原始星が存在しないために望遠鏡の角度分解能が不足し、結果としてその形成過程についての観測はかなり不十分である。

本論文は、このような現況にある大質量星形成過程について、超長基線干渉計 (VLBI) を用いて原始星から放出されるジェットとアウトフローの観測を行い、進化段階に応じて細く放出速度の大きいジェットと広がり大きいアウトフローが放出されることを明らかにし、これまでに報告されていた理論的な研究結果と比較したものである。観測は、国立天文台の天文精測望遠鏡 (VERA) 及び本学の苫小牧 11m 電波望遠鏡を含む大学 VLBI 連携観測網 (JVN) の2つの VLBI 観測網を用いて実施し、水分子が放射するメーザースペクトル線を時間を追ってモニターしている。これらの VLBI 観測網の空間分解能は1ミリ秒角程度になり実スケールでは1000天文単位(1天文単位は太陽と地球の間の平均距離)以下となるため、数ヶ月間隔の観測によってメーザースポットを放射している密度の高い小さなガス塊(メーザースポット)が天球面上を移動していく様子を検出することができる。これまでに行われてきた VLBI 観測では、メーザースポットが原始星周りの降着円盤に付随するのがあるいはジェット/アウトフローに付随するのといったことが主な争点であったが、本論文ではモニター観測によって円弧状に並ぶメーザースポットが時間とともに動いて行く様子からこれらのスポットがジェット/アウトフローに付随することを明らかにし、さらに広がったアウトフローと細くコリメートされたジェットに切り分けた点がいへん重要である。

観測対象は、過去の研究から進化段階が異なると推定されている3つの原始星を選んで実施している。最も若い G353.273+0.641 については、苫小牧 11m 電波望遠鏡を単独で用いたスペクトルの強度変動の時変動モニターも併せて実施しており、VLBI によるモニター観測と併せて、2年間で2度の間欠的なフレア現象を起こしていることを発見し、このフレアが原始星から放出されるジェットが間欠的に駆動されることによって生じることを突き止めている。単一鏡と VLBI で強度変動が非常によく合っていることから、長期間且つ高い頻度で

の観測が VLBI 観測に比べて容易な単一鏡観測がフレアの発見に大きな効力を発揮することを示したことは、今後観測天体数を増やして統計的な研究へと発展させる際に極めて重要な方針を示したと考えられる。

また、進化段階が 3 つの中で中間にあたる IRAS 06061+2151 ではコリメートされたジェットと広角のアウトフローが共存することを観測的に初めて明らかにするとともに、ジェットの軌道上に 2 つの大質量原始星候補天体が存在することも明らかにし、ジェットが次世代の星形成を誘発している可能性を示した。さらに、ジェットが折れ曲がって伝播していく様子から、直接検出することが困難な密度が高く小さなガス塊が存在することを間接的に示した点もたいへんユニークな結果である。

進化の進んだ G5.89-0.39 については、メーザースポットが星の周りにリング状に分布していること、これらのスポットが降着円盤と恒星風の相互作用によって励起されていることを示した。また、VLBI 観測による時変動から年周視差の計測を行い、この天体までの距離の精密な測定も実施している。求められた距離は、過去の研究で報告されていたものの 2/3 程度となるために、同天体の物理量が大幅に改訂されることとなり、これまで矛盾していた点を解決したことも重要な研究結果である。

本論文では、ジェット／アウトフローの速度から、その根元にある降着円盤への質量降着率を導出するとともに、進化段階の異なるこれら 3 天体の観測結果を理論的な研究結果と比較し、これまでに提唱されているシナリオに沿った結果であることも検証している。これまでの VLBI 観測は個々のメーザースポットの局所的な運動の解明に重点を置いていたが、本論文は原始星から放出されるジェット／アウトフローに着目することで、より大局的な視点から大質量星形成過程の解明に迫ることができることを示した点、さらに日米欧が国際協力のもとに建設・運用するアタカマ巨大ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) を使った新しい研究への道筋を示した点で、同分野における貢献は非常に大きいものである。

よって著者は、北海道大学博士 (理学) の学位を授与される資格あるものと認める。