

論文の内容の要旨

ALMA Observations Revealing Disk Formation in Early Phases of Star Formation

(ALMA を用いた星形成初期段階における 円盤形成の研究)

氏 名 麻生 有佑

我々にとって最も身近な天体である太陽や地球がどのように形作られるのかは現代天文学における最も基本的な課題の一つと言える。過去の研究から星惑星系の形成過程に見られる T タウリ型星の周囲にはケプラー回転する円盤が見つかった。このような円盤は星形成の中で惑星の材料となる、分子流を駆動するといった重要な役割を果たすと考えられ、またその回転運動から中心星の力学質量を推定できるという重要性も持つ。理論からは T タウリ型星よりも若い原始星段階で円盤が作られる、または磁場が角運動量を抜き去るために原始星段階では円盤は作られないという対立した予想がなされていた。観測的にも原始星段階で円盤の描像は得られていなかった。その理由としては、原始星はエンベロープに覆われて中心星が可視光で観測できない、T タウリ型星に比べて原始星段階にある期間は 1 桁短いといった困難もあるが、最大の理由は分解能や感度の制限による定量的なケプラー回転の検出の難しさにある。すなわち、円盤状の構造や回転運動だけでは原始星円盤を同定したことにはならない。

このような背景の中、サブミリ波干渉計 (SMA) で原始星円盤の同定を目指す探査がなさ

れ、比較的進化した原始星 TMC-1A と L1489 IRS でケプラー回転を示唆する結果が得られた。しかし、空間分解能が粗かったためにケプラー回転とそれよりも急な回転則を区別できず、原始星円盤の同定には至らなかった。この先行研究を受け、本研究ではまずエンベロープと切り分けて原始星円盤を同定し、さらに原始星段階の円盤とエンベロープの力学及び構造を解明することを課題とした。力学についての解析的な理論では、円盤を含まないエンベロープは比角運動量が半径に依らず、自由落下すると予想されている。構造については、Tタウリ円盤の面密度は半径の冪関数で表現され、鉛直方向は静水圧平衡にある厚みで説明できることが知られている。

これらの課題を解決するために Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) を用いて、先行研究でケプラー円盤の存在が示唆された原始星 TMC-1A とさらに若い原始星 L1527 IRS を観測した。これら 2 天体は Taurus 分子雲にあり、その距離は 140 pc である。加えて、円盤がまさに誕生するような若い段階へと研究を拡張するために、Cycle 3 の観測期間で Serpens Main 領域の探査を行った。Serpens Main 領域までの距離は 429 pc である。これらの観測では 1.3 mm 連続波および CO 同位体の輝線放射を観測した。用いた手法の中では特に、構造の解明のために原始星円盤に対して連続波ビジビリティの 2 次元分布に注目した点が本研究独自かつ最も重要な点である。以下に主要な結果を述べる。

Cycle 0 期間には TMC-1A からの 1.3 mm 連続波、 ^{12}CO 2 – 1 輝線、 C^{18}O 2 – 1 輝線放射が観測された。連続波放射は $0''.5$ スケールの構造を示し、 ^{12}CO 放射が捉えた分子流におよそ垂直に伸びている。このことから連続波は TMC-1A 周囲の円盤状構造を捉えたと考えられる。 C^{18}O 放射の速度勾配は高速度では分子流に垂直なため円盤状構造の回転を捉えたと考えられる。一方、低速度では分子流に沿った方向にも速度勾配が見られ、回転と落下を捉えられたと考えられる。過去の研究では TMC-1A 周囲の速度勾配は単一の方角と考えられていたが、本研究によって 2 つの成分があることが初めて明らかになった。分子流に垂直な方向に切った C^{18}O 放射の位置速度図を用いて回転速度の半径依存性を調べると、高速度はケプラー回転で説明でき、その中心星質量は $0.68 M_{\odot}$ と見積もられた。低速度の指数はケプラー回転よりも急であり、遠心力が重力よりも弱いことを意味し、落下の描像を支持する。落下エンベロープとケプラー円盤からなる数値モデルと観測を比較することで、円盤とエンベロープの境の半径はおよそ 100 AU、エンベロープの落下速度は自由落下のおよそ 0.3 倍と見積もられた。これは解析的な予想に反し、エンベロープを支える力が働いていることを示唆し、磁場であれば 2 mG 程度の強度で説明できる。

Cycle 1 期間には L1527 IRS からの 1.3 mm 連続波と C^{18}O 2 – 1 輝線放射が観測された。連続波は $0''.5$ スケールの構造を示した。連続波、 C^{18}O 放射ともに L1527 IRS に付随する分子流に垂直に伸びているので、円盤状構造を捉えていると考えられる。TMC-1A と同様に位置速度図の解析から半径 74 AU のケプラー円盤を同定し、その中心星質量を $0.45 M_{\odot}$ と見積もった。ダストの構造を調べるために連続波のビジビリティにも注目し、強度分布が長軸と短軸では明らかに異なることを示した。過去の研究のように信号雑音比を上げるためにビジビリティを方位角方向に平均化すれば、このような違いは見られなくなる。原始星円盤に対してビジビリティの 2 次元分布を明らかにした例は本研究が初めてである。本研究ではビジビリティを方位角方向に平均化しないことで 2 次元情報を保持し、円盤とエンベロープからなるモデルでフィッティングを行った。結果として円盤は T タウリ円盤のように静水圧平衡にある厚みを持ち、円盤とエンベロープの間におよそ 5 倍の密度ジャンプがあることがわかった。この密度ジャンプの半径はケプラー円盤半径 74 AU に誤差の範囲で一致し、この密度ジャンプがエンベロープから円盤への質量降着に起因する可能性を示唆する。 C^{18}O 放射も基本的には連続波と同じ構造で説明できる。ケプラー回転、静水圧平衡の円盤の厚み、ダストとガスが同様の構造を持つという点で L1527 IRS 周囲の円盤は T タウリ型星周囲の円盤に近いと言える。

Cycle3 期間には Serpens Main の中の 5 領域からの 1.3mm 連続波と ^{12}CO 2 – 1 輝線、 C^{18}O 2 – 1 輝線放射が観測された。これらの 5 領域は、過去の SMA モザイク観測で検出された 1.3 mm 連続波のうち *Herschel* で $70 \mu\text{m}$ 連続波が検出されていないものを中心に選ばれた。これらは高密度なダストはあるが、 $\lesssim 50 \text{ K}$ と冷たいことを意味し、星形成過程の中で極めて初期段階のファーストコアである可能性を示唆している。ALMA 観測では 12 個の 1.3 mm 波源が同定され、それらの進化段階を調べるために *Spitzer* と *Herschel* の観測データから全輻射温度 T_{bol} と全輻射光度 L_{bol} が見積もられた。すると ALMA 1.3 mm 連続波源のうち我々が SMM11a と名付けた天体は極めて冷たく ($T_{\text{bol}} = 23 \text{ K}$)、光度も極めて小さい ($L_{\text{bol}} = 0.05 L_{\odot}$) ことがわかった。この天体には ^{12}CO 双極分子流も付随している。これらの特徴は、ファーストコアの理論的研究から予想され、過去にファーストコア候補として同定された数個の天体ともよく似ている。このことから SMM11a は新たなファーストコア候補と考えられる。SMM11a の ^{12}CO 双極分子流を簡単な分子流モデルと比較することで、分子流はほぼ天球面に平行 ($i \sim 80^\circ$) に吹き出しているとわかった。ファーストコア候補に対して視線からの傾き角に制限を与えた例は本研究が初めてである。 C^{18}O 放射と連続波放射

の強度を比べたところ、 $C^{18}O$ 分子の存在量が星間空間よりも 4 桁近く少ないと推定された。これは低温のために $C^{18}O$ 分子がダストに凍結していることで説明でき、ファーストコア段階の理論シミュレーションに矛盾しない結果である。連続波ビジビリティから SMM11a は原始星 L1527 IRS、典型的な Class0 原始星である B335 と比べて、より球対称な構造を持つことがわかり、進化に伴ってエンベロープが扁平になる様子を捉えた可能性を示唆している。

星形成の分野では、T タウリ段階で見られるケプラー円盤についてそれよりも若い原始星段階での描像が得られていなかった。この課題に対して本研究では、原始星よりもさらに若いファーストコア段階から T タウリ段階までの円盤及びそれを覆うエンベロープについて、力学と構造という観点から次のような示唆を得た、(1) ファーストコアから原始星に至る間にエンベロープが扁平になる、(2) 進化に伴って中心星質量とケプラー円盤半径が増大する、(3) 原始星円盤を覆うエンベロープ内のインフォール速度は自由落下よりも遅い、(4) 原始星円盤と T タウリ円盤は似た力学と構造を持つ。

一方で新たな課題も生まれた。例えばケプラー円盤半径の進化は連星系かどうかにも依存すると思われ、単一星のみでの傾向を検証するためにもサンプルを増やす必要がある。新たなファーストコア候補の周囲に円盤は同定されなかったが、分子流を駆動するための円盤があると期待できる。回転を捉えるためにも凍結していない分子輝線をさらに高い空間分解能で観測することが望まれる。