

ALMA 観測から見る原始星の力学進化

麻生 有佑 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

本研究ではケプラー円盤形成期にある 3 つの原始星 L1527 IRS, TMC1A, L1489 IRS に対して、アルマ望遠鏡を用いて ^{12}CO ($J = 2 - 1$)、 C^{18}O ($J = 2 - 1$) 分子輝線と 1.3 mm 連続波を観測した。 C^{18}O 放射と連続波は、 ^{12}CO 放射が捉えた分子流にほぼ直行した伸びを示し、円盤とエンベロープを含む円盤状構造を捉えているとわかる。位置速度図を用いて中心星からの距離に対する回転速度の分布を測定したところ、L1527 と TMC1A の高速度成分と L1489 の全体がケプラー回転で説明できるとわかった。本研究の 3 天体と、過去にケプラー円盤が同定されている原始星 11 天体では中心星質量が進化とともに増大する傾向が見られた。さらに、インフォールからケプラー回転への力学的遷移を示し、正確にケプラー円盤半径が測定されたと考えられる 6 天体には、進化に伴ってケプラー円盤半径が増大する傾向も見られた。これは進化とともに大きな角運動量が円盤へ持ち込まれるという古典的な星形成モデルに矛盾しない結果である。

1 Introduction

原始惑星系円盤は若い星の進化において重要な役割を果たす。星形成の初期では、質量や角運動量は原始惑星系円盤を通して中心星へ輸送される。一方で星形成の後期では、この円盤の中で惑星が形成される。古典的 T タウリ型星 (Class II) に対してはケプラー円盤が様々な観測から明らかになっている (e.g. Guilloteau & Dutrey 1998)。それよりも若い原始星 (Class 0, I) ではしばしば回転よりも動的降着 (インフォール) が卓越した円盤状構造 (e.g. Jørgensen et al. 2009) が見られ、最新の干渉計観測ではエンベロープに深く埋もれたケプラー円盤が検出された例もいくつかある (e.g. Takakuwa et al. 2014)。

ケプラー円盤は T タウリ型星や原始星に対して広く見られるにもかかわらず、原始星周囲のエンベロープからの形成過程は理論的にも観測的にも議論が尽きない。等温球が磁場なしで収縮する “inside-out collapse” などのモデル計算 (Terebey et al. 1984) から星・円盤形成の古典的な描像が得られている。これらの計算によれば、ゆっくりと回転する高密度分子雲コアでガスがインフォールを始めると、その中心でケプラー円盤を伴って星が形成される。インフォールするガスは角運動量を保存しているが、分子雲コアは外側ほど速く回転しているので、徐々に大きな角運動量が中心へ輸送される。Ohashi et al. (1997)

では、より進化した段階ほど回転速度は大きくなり、ケプラー回転が卓越してくるといふ、上述の古典的描像に矛盾しない結果が得られた。これらの観測的研究は進化過程の中でケプラー円盤が成長することを示唆するが、個々の天体の力学を空間分解するには至らなかった。原始星の周囲でどのように円盤が形成・進化するかを直接調べるためには、個々の天体に対して力学の空間分解が望まれる。

本研究では、個々の天体の力学を空間分解して調べるために、3 つの原始星 L1527 IRS(以下 L1527)、TMC1A、L1489 IRS(以下 L1489) に対してアルマ望遠鏡 (以下 ALMA) を用いて観測した。3 天体とも牡牛座分子雲に位置し、その距離は 140 pc である。L1527、TMC1A、L1489 の全輻射光度、全輻射温度ともにこの順で小さく、3 天体は赤外域の SED からそれぞれ Class 0/I, I, I に分類される。これらは L1527、TMC1A、L1489 の順により進化した段階にあることを意味する。

2 Observations

本研究では ALMA を用いて Cycle 0 期間 2012 年 11 月 6 日に L1527, TMC1A, L1489 を観測した。23 個のアンテナからなり、16 m から 285 m の uv を覆う extended 配列を用いた。この最小基線長では、7/7

以上広がった構造は 50%以上のフラックスが失われる (Wilner & Welch 1994)。 $^{12}\text{CO } J = 2 - 1$ (230.5380 GHz)、 $\text{C}^{18}\text{O } J = 2 - 1$ (219.5604 GHz) の分子輝線と 1.3 mm 連続波が Band 6 で 63 分 (on source) 観測された。相関器は Frequency Division Mode にして、4 つのスペクトルウィンドウを使用した。1 つのスペクトルウィンドウは 3,840 チャンネルを持ち、234 MHz を覆う。連続波は輝線放射のないチャンネルを用い、 ~ 920 MHz を積分した。観測から得られたビジビリティは Common Astronomy Software Applications を通してフーリエ変換、CLEAN された。この過程で、Briggs weighting (robust=0.5) を採用し、2 チャンネルを結合、最終的な速度分解能は 122 kHz とした (C^{18}O では 0.17 km s^{-1} に相当する)。CLEAN 後の合成ビームサイズは L1527 IRS では $\sim 0.8''$ 、TMC1A では $\sim 1.0''$ 、L1489 IRS では $\sim 0.8''$ である。パスバンド、ゲイン、フラックスキャリブレーターはそれぞれ J0522-364、J0510+180、Callisto である。

3 Results

連続波は 3 天体とも、 ^{12}CO 放射で捕らえられた分子流に垂直に伸びており、連続波が原始星周囲の円盤を捉えているとわかる。本研究では、連続波の長軸を各原始星に付随した円盤の長軸とし、また連続波放射が最大となる位置を中心星の位置とする。また、ダストのオパシティ係数 $\kappa(1 \text{ THz}) = 10.0 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ (Beckwith 1990) を用いて、原始星の典型的な幕 ~ 1 と温度 $T_c = 20 \text{ K}$ とガスダスト質量比 100 を仮定すると、連続波フラックスから L1527, TMC1A, L1489 のガス質量はそれぞれ $0.029 M_\odot$ 、 $0.030 M_\odot$ 、 $6.2 \times 10^{-3} M_\odot$ と推定できる。

$\text{C}^{18}\text{O } J = 2 - 1$ 放射は 3 天体とも連続波よりも広がった構造を示したが、連続波と同様にほぼ分子流に直行して伸びている。このことは C^{18}O がエンベロープのような原始星に付随した円盤状構造を捉えていることを意味する。図 1 は TMC1A の C^{18}O 積分強度図と平均速度図である。この図から TMC1A 周囲の C^{18}O 分子ガスは概ね分子流に直行する速度勾配を持つことがわかる。次に、円盤の長軸方向に

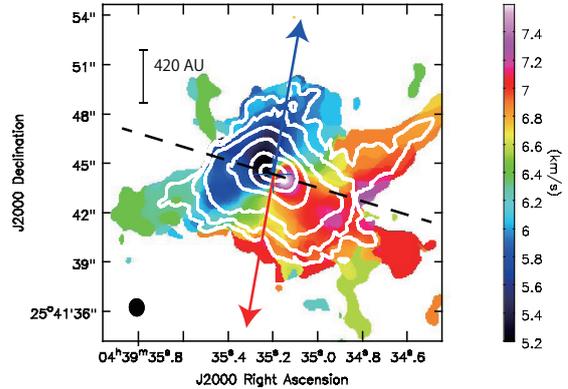


図 1: TMC1A の $\text{C}^{18}\text{O } (J = 2 - 1)$ 積分強度図 (コンタ) と平均速度図 (カラー)。コンタレベルは $-3, 3, 6, 12, 24, \dots \times \sigma$ ($1\sigma = 8.1 \text{ mJy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$)。十字は中心星の位置。左下の楕円は空間分解能。青と赤の矢印は TMC1A に付随した分子流の方向。黒の破線は連続波から決められた円盤の長軸方向。

切った位置速度 (PV) 図を図 2 に示す。この図は円盤状構造の回転速度を反映するもので、系の速度から離れた高速度ほどコンパクトで中心に近いという分布は差動回転を意味する。一方で、系の速度に近い低速度では東で赤方偏移した成分や西で青方偏移した成分も見られ、これらは回転だけでは説明できない。L1527 と L1489 の C^{18}O 放射についても、概ね分子

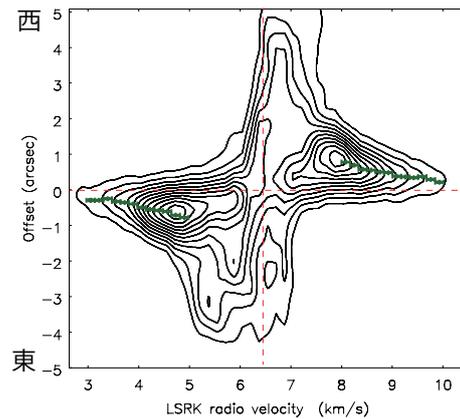


図 2: TMC1A の円盤長軸方向 (P.A. = 73° 、図 1 黒破線) の $\text{C}^{18}\text{O } (J = 2 - 1)$ 位置速度図 (PV 図)。コンタレベルは $-5, 5, 10, 15, \dots \times \sigma$ ($1\sigma = 8.1 \text{ mJy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$)。赤の破線は中心位置と系の速度を示す。

流に直行した方向に速度勾配が見られた。L1527 の

長軸に沿った位置速度図の低速度には、TMC1A と同様に純粋な回転では説明できない成分が見られたが、L1489 に対してはそのような成分はほとんど見られなかった。

4 Analysis

$C^{18}O$ 放射は回転を示したので、より詳細に回転速度を測定するために長軸に沿った位置速度図を用いた解析を行う。図 2 を見ると $V \lesssim 5 \text{ km s}^{-1}$, $8 \text{ km s}^{-1} \lesssim V$ では、速度を固定したときの放射の分布が位置方向に単峰形である。これは粗い空間分解能になされた結果であり、速度ごとに代表的な位置を測定すれば回転速度と半径の関係が得られると期待される。そこで輝度 I で重み付けした平均的位置 $x_m = \int I(x, v) x dx / \int I(x, v) dx$ を用いる。TMC1A に対して測定された代表点を図 2 に緑の点で示した。また、傾き角 (inclination angle) の補正をして $\log r - \log V$ 平面にプロットしたものが図 3 の緑の点である。図 3 の緑の点は $V \sim 8 \text{ km s}^{-1}$ で折れているように見える。また、3 章でも述べたように高速度と低速度では運動が異なると考えられるので、内側と外側で冪が異なる以下のような関数で χ^2 フィットする。

$$V_{\text{rot}}(r) = \begin{cases} V_b(r/r_b)^{-p_{\text{in}}} & (r \leq r_b) \\ V_b(r/r_b)^{-p_{\text{out}}} & (r > r_b) \end{cases} \quad (1)$$

フリーパラメーターは $V_b, r_b, p_{\text{in}}, p_{\text{out}}$ の 4 つである。TMC1A (図 4 緑) に対するベストフィットでは χ^2_{ν} (自由度で割った χ^2) は 1.6 となり、各パラメーターは $V_p = 2.7 \pm 0.03 \text{ km s}^{-1}$, $r_b = 88 \pm 0.8 \text{ AU}$, $p_{\text{in}} = 0.54 \pm 0.14$, $p_{\text{out}} = 0.85 \pm 0.04$ と推定された。ただし、各データ点をそれぞれの誤差内でランダムに振ることでフィッティングの誤差を得た。一般にパラメーターが多いと χ^2 は小さくなるので、単一の冪 ($p_{\text{in}} = p_{\text{out}}, V_b = 3.0 \text{ km s}^{-1}$) の場合と比較するために χ^2 ではなく、自由度で割った χ^2_{ν} を比較すると単一の冪のとき $\chi^2_{\nu} = 2.0$ なので、確かに 2 つの冪の方がより良く TMC1A 周囲の運動を表すと言える。L1527 に対しても同様の解析結果を図 3 に青の実線で示した。L1489 に対しては単一の冪の方が χ^2_{ν} が小さかった。冪がケプラー回転則 (1/2) に近い

という解析結果はケプラー円盤の存在を示唆し、 r_b からケプラー円盤半径は L1527 と TMC1A ではそれぞれ 90 AU, 70 AU、L1489 は $> 300 \text{ AU}$ と推定できる。L1489 のケプラー円盤半径は Yen et al. (2014) が 700 AU と推定している。さらに、 V_b と r_b から L1527, TMC1A, L1489 の中心星質量はそれぞれ $0.4 M_{\odot}$, $0.7 M_{\odot}$, $1.6 M_{\odot}$ と推定できる。加えて、L1527 と TMC1A では外側の冪がケプラー回転則よりも急で、遠心力が重力よりも弱いのでガスがインフォールしていることが示唆される。

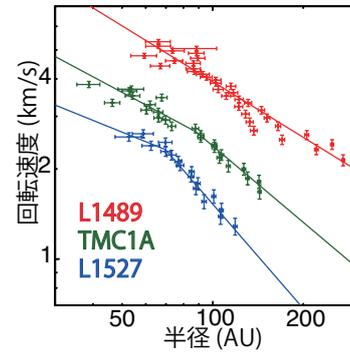


図 3: 位置速度図から測定した中心星からの距離 (半径) と回転速度の関係。実線はそれぞれの天体の χ^2 フィットの結果。

5 Discussion

本研究の解析から原始星の中心星質量とケプラー円盤半径を決定することができた。これらを過去の観測からケプラー円盤が同定されている原始星 (NGC1333, IRAS4A2, VLA1623A, R CrA IRS7B, L1551 NE, L1551 IRS5, TMC1, TMR1, L1536, Elias 29, IRS 43, IRS 63) と比較する。進化段階を比較するために T_{bol} と $L_{\text{bol}}/L_{\text{submm}}$ を用いた。ただし、 $L_{\text{bol}}/L_{\text{submm}}$ は R CrA IRS7B, L1536, IRS 43 については得られていない。図 4 にこれらの原始星の $L_{\text{bol}}/L_{\text{submm}}$ と中心星質量 M_* 、ケプラー円盤半径 R_{kep} を示した。特に VLA1623A, L1551 NE, L1551 IRS5 については最新の観測的研究からインフォールからケプラー回転への“力学的遷移”が同定されている (Murillo et al. 2013; Takakuwa et al. 2014; Chou et al. 2014) ので、他の原始星とは区別して赤の丸で示してある。

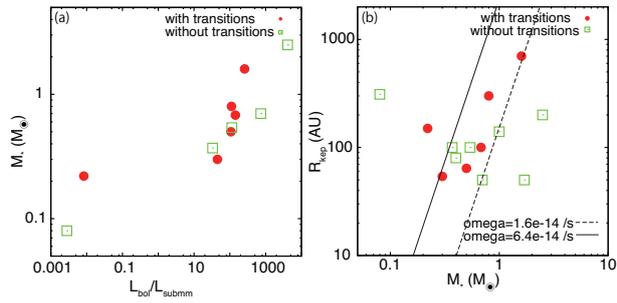


図 4: L_{bol}/L_{submm} と中心星質量の相関 (a) と、中心星質量とケプラー円盤半径の相関 (b)。赤の丸は本研究の 3 天体と、インフォールからケプラー回転への遷移がわかっている 3 つの原始星。緑の四角はケプラー円盤のみが見つかった原始星。(b) の実線と破線は古典的な星形成モデルに基づいた理論線。

ここで用いた 11 天体について年齢の指標と考えられる L_{bol}/L_{submm} と M_* の間に強い相関 (相関係数 0.85) が見られ (図 4a)、進化とともに中心星質量が増大することが示唆される。一方、 M_* と R_{kep} の間の相関は 14 天体全てでは弱い (相関係数 0.29) が、力学的遷移を示す 6 天体に注目すると強い相関 (相関係数 0.91) が見られる (図 4b)。これはケプラー円盤とエンベロープの境界を捉えていれば正確に半径を測定できるが、そうでない場合には正確な半径の決定が難しいためと考えられる。古典的な星形成モデル (Terebey et al. 1984) では、剛体回転する高密度分子雲コアが中心に近い領域から収縮していき (inside-out collapse)、以下の式のように収縮領域の質量から M_* が決まり、収縮領域の最大の比角運動量から R_{kep} が決まる。

$$R_{kep} = \frac{\omega^2 r_{inf}^4}{GM_*(r_{inf})} = \frac{\omega^2 G^3 \dot{M}^3}{16c_s^8} t^3 = \frac{\omega^2 G^3}{16c_s^8} M_*^3 \quad (2)$$

ω は剛体回転の角速度、 r_{inf} は収縮領域の半径、 G は重力定数、 c_s は音速である。音速を温度 10 K に相当する 0.19 km s^{-1} と仮定し、初期の角速度を過去の観測 (Goodman et al. 1993) から $(1.6 - 6.4) \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$ とした理論線が図 5b の実線と破線である。力学的遷移を示す 6 天体のうち 5 天体は、これらの理論線に矛盾しない。しかし一方で、磁場を含む理論シミュレーションではケプラー円盤の成長が止まった後も中心星質量は増大し続けるという予想もある (Machida et al. 2014)。本研究ではそのような傾向は見られなかったが、さらに観測的研究が進めばそのような傾

向が現れる可能性もあり、統計的に有意な結論を出すために力学的遷移を示す原始星の観測例を増やすことが望まれる。

6 Conclusion

本研究では ALMA を用いて 3 つの原始星 L1527, TMC1A, L1489 からの ^{12}CO ($J = 2 - 1$), C^{18}O ($J = 2 - 1$) 分子輝線と 1.3 mm 連続波を観測した。3 天体とも連続波と C^{18}O 放射は ^{12}CO 放射が捉えた分子流に直行した伸びを示し、原始星周囲の円盤状構造を捉えている。円盤長軸に沿った C^{18}O 放射の位置速度図から得られた、中心星からの距離と回転速度の関係は L1527, TMC1A, L1489 がそれぞれ $\sim 70 \text{ AU}$, $\sim 90 \text{ AU}$, $> 300 \text{ AU}$ のケプラー円盤を持つことを示唆する。さらに、インフォールからケプラー回転への力学的遷移が同定されている原始星 6 天体から、進化に伴う中心星質量とケプラー円盤半径が増大が示唆される。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

Reference

- Beckwith et al. 1990, AJ, 99, 924
- Guilloteau & Dutrey 1998, A&A, 339, 467
- Jørgensen et al. 2009, A&A, 507, 861
- Takakuwa et al. 2014, ApJ, 796, 1
- Terebey, Shu, & Cassen 1984, ApJ, 286, 529
- Ohashi et al. 1997, ApJ, 488, 317
- Yen et al. 2014, ApJ, 793, 1
- Wilner & Welch 1994, ApJ, 427, 898
- Murillo et al. 2013, A&A, 560, A103
- Chou et al. 2014, ArXiv e-prints
- Goodman et al. 1993, ApJ, 406, 528
- Machida, Inutsuka, & Matsumoto 2014, MNRAS, 438, 2278