

原始星の「くしゃみ」を捉えたか？ ALMAで探る星形成初期段階の ダイナミックな磁束輸送過程



徳田 一起^{1,2}

〈¹九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744〉

〈²国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: tokuda.kazuki.369@m.kyushu-u.ac.jp

地球から約450光年（140 pc）に位置するおうし座領域のMC 27という分子雲コアは星形成初期段階に起こる現象を紐解くうえで非常に興味深い研究対象である。我々はALMA望遠鏡の初期科学運用の頃から様々な観測設定でMC 27の中に潜む原始星の姿を明らかにしてきた。本稿では現在通常の観測モードで達成しうる最高の解像度（約0.03秒角以下）で観測した結果を軸に、そのダイナミックな星形成過程について概観する。特に新しく判明した特徴は、原始星を取り巻く円盤から数天文単位の大きさを持つ「棘（とげ）」のような構造である。理論研究との比較から、この棘は円盤の縁で磁場が強くなった結果、原始星から離れる方向に浮力が働き（交換型不安定）、短時間で一気に磁束が外に追いやられたことで生じた可能性が浮かび上がった。これは、ほこりやウイルスを空気とともに瞬く間に押し出す人間の「くしゃみ」にも似ている。この不安定性が生じる条件を追求することで、星の誕生に関する重要な課題の一つである磁束問題を解決する足がかりとなる。また、原始星周辺の複雑な星周ガス構造の形成や円盤中の惑星の起源物質についての理解にも繋がると期待される。

1. 序論：星形成研究に残された課題

1.1 角運動量・磁束問題

太陽をはじめとする恒星は、分子雲の中で比較的高い密度の場所である分子雲コアが自身の重力で収縮することによって誕生する。ただし、この過程にはさまざまな困難が伴う。わずかに回転している分子雲コアは磁力線に貫かれている。系が持つ角運動量や磁束は保存量であるため、収縮する過程で原始星に持ち込まれる。角運動量と磁束がすべて原始星に持ち込まれると仮定すると、原始星や恒星の回転速度と磁場強度は観測と矛盾する。これを星形成過程における角運動量問題および

磁束問題と呼ぶ（詳しくは、富阪幸治氏 [1]・町田正博氏 [2] の天文月報記事などを参照）。

角運動量問題を解決するメカニズムとしては、「星の産声」とも称される双極分子流が有力視されており、1980年代から多くの原始星においてミリ波・サブミリ波観測で捉えられてきた [3]。一方、磁束問題に関しては、原始星円盤など非常に密度の高い領域で、磁場とガスの結びつきが弱まり長い時間をかけて準定常的に拡散する過程が有力視されている [4]。しかし、この現象は直接観測することが難しい点や、さらに後述するようにより短時間かつダイナミックに磁束を直接輸送する過程は理論的・観測的に深く検討されていない

ことを考えると、角運動量問題に比べて磁束問題の理解はまだ不十分であると言わざるを得ない。

1.2 最新のALMA観測によって明らかにされた原始星の星周構造と新たな課題

アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) の運用はすでに10年の節目を迎え、原始星が比較的成熟し惑星を形成しつつある段階の理解が飛躍的に進展した。高い角分解能の観測により、典型的には50天文単位 (au) を超える円盤の中に、リングやそれに沿った溝などの詳細構造が頻繁に捉えられている (例 [5])。しかし、すべての原始惑星系円盤が必ずしも大きなものではないことも知られつつある。複数の星形成領域にわたる多天体を観測した研究によれば、多くの円盤は大きさが10 au程度とコンパクトで、現在の観測の限界からは詳細構造を持たない (判別できない) ほど小さいものが多い (例 [6, 7])。円盤の質量やサイズに多様性があることは、原始星がまだ成長中のより若い段階の観測においても明らかになりつつある (例 [8]) ことから、星形成研究の枠組みの中で、この多様性の起源を明らかにする必要がある。

ALMAが稼働する前は、磁気制動という効果によって非常に効率的に角運動量が輸送されるために原始星円盤が形成されないという議論が特に理論研究者の間で盛んであった (詳しくは富田賢吾氏の天文月報記事参照 [9])。しかし、ALMAの初期科学運用で複数の原始星で比較的大きな円盤が観測され、理論的にもそのような円盤形成が起り得ることが示されたことから、観測と理論の不一致は解消されたように見えた。ところが、望遠鏡の科学運用開始直後は天体が明るく目立つものが観測対象として優先されることもあり、様々な天体に対して観測が進むにつれて実際には円盤が思ったよりも小さいものが大半を占めていることが明らかになったのだ。ここで円盤形成に

関する問題を再び議論する必要が生じてきたと言ってもよいだろう。

1.3 分子雲コアMC 27における原始星の星周構造

我々はおうし座領域 (距離: 約140 pc) にある分子雲コアMC 27に注目してきた。この領域では、ALMA観測により、約0.1秒角の解像度でサイズが約10 auのコンパクトな原始星円盤が明らかにされている [10]。そのため、この天体は星形成初期段階に生じた小さな円盤の起源を探るうえで格好のターゲットである。この分子雲コアは名古屋大学の4 m望遠鏡や野辺山45 m望遠鏡をはじめとするミリ波・サブミリ波の望遠鏡を戦略的に利用することで発見・特徴づけられてきた歴史のある天体である [11, 12]。スピッツァー望遠鏡が非常に低光度の天体を特定するまで [13]、星形成前の分子雲コアと考えられていた。ALMAの初期科学運用 (Cycle 0) でMC 27を観測した結果、2000 auにも及ぶ弓状の形をしたガス雲が原始星付近に存在することが初めて明らかになった ([14] および詳しい解説は筆者の過去の天文月報記事参照 [15])。原始星や高密度ガス雲同士の動的な相互作用がこのような複雑な構造を形成したことなどを議論し [16]、少なくともこれまで考えられていた古典的な球・軸対称ガス雲の収縮では説明できないことがわかった。当時は、新しいALMA観測から星形成描像の革新を予感させ、驚きを以て迎えられた (と認識していた)。ところが、最初の観測から約10年、若い原始星系で観測された同様のサイズの弓状構造は、単に原始星への降着流を示唆する“ストリーマー”として、(筆者らの最初の発見を差し置いて) 文字通り世界の“潮流”の一つになりつつある (例: [17, 18])。MC 27の弓状構造と様々な研究者が発見しつつあるストリーマーと称されるもの^{*1}が物理的に同一かどうかは議論すべき点であるが、原

*1 現状、ストリーマー自体に明確な定義はなく、単に原始星周辺を取り巻くアーチ構造をこのように呼称することが多い。一部の研究では速度構造の解析により原始星への降着流である可能性も示されている [19, 20]。

始星周辺の複雑な星周ガス構造に対して確度の高い天体物理学的な解釈を提示できなかったのは筆者らの至らなかった点であり、世界の潮流を牽引できず忸怩たる想いを抱えていた。

以上、これまでの背景、解決すべき課題をまとめると、

- 磁束問題が完全には解決されていない*2（**星形成分野の長期的な課題**）。
- ALMA 望遠鏡の観測により円盤サイズが多様性が明らかになっているが、特に 10 au 程度の小さい円盤の形成過程に関しては理解が十分でない（最新の観測で明らかになりつつある**惑星形成とも関連が深い分野横断的な新しい課題**）。
- MC 27 をはじめとする原始星天体で見つかりつつある弓状構造など複雑な星周構造の起源及びその星形成過程における役割・意義が不明瞭である（**筆者らが10年単位で取り組んできた課題**）。

に整理される。

2. 原始星円盤に付随する棘（とげ）構造

2.1 ALMA 観測

早速最新の結果について紹介しよう。図1は、MC 27 分子雲コアに存在する原始星を 1.3 mm 連続波（濃いガス中に含まれる星間ダストからの熱放射）で捉えた画像である。達成した角度分解能は 0.02 秒角であり、分子雲コアに埋もれた原始星で、かつミリ波の強度が 1 mJy 程度の非常に微弱な天体に対しては最も高い解像度を達成している。まず中心に存在する南北（上下）方向に伸びる相対的に強度が高い構造は、原始星周囲に形成された「円盤」にあたる。その長軸の大きさは

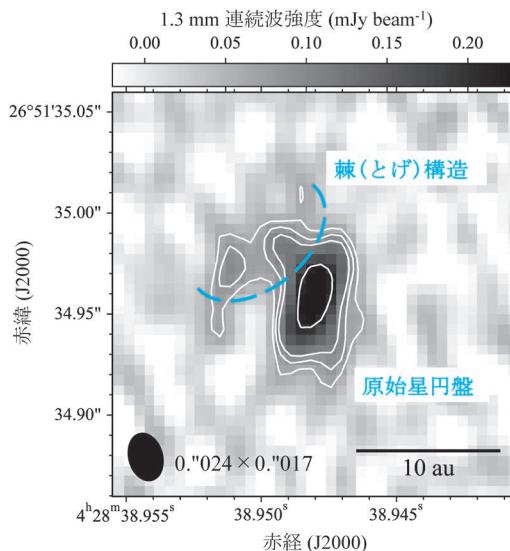


図1 MC 27分子雲コア中心部に存在する原始星の 1.3 mm 連続波画像。左下に示す楕円は合成ビームサイズを表し、0.02秒角程度を達成している。

10 au 程度であり、有名な原始惑星系円盤である HL Tau (100 au 以上) と比較しても十分に小さいことを改めて確認した。さらに放射強度としては非常に微弱であるが、中心の円盤から北東（左上）方向に複数の突起状の構造が認識できる。これを以下、「棘（とげ）」と呼ぶことにする。

1.3 mm の強度分布より、円盤の水素分子ガス質量はおおよそ 4×10^{-4} 太陽質量 (M_{\odot}) と見積もられる。棘構造はさらに軽く、 $10^{-4} M_{\odot}$ 程度であった。非常に微弱ではあるが、原始星円盤の質量の数 10% に相当する構造が存在することは明らかであり、ALMA 観測で明らかになった天体構造自体はこれ以上に説明することがないほど非常にシンプルである。しかし、このような棘構造が原始星の円盤に付随していることが確認されたのは初めてである。

*2 これまで議論されてきた磁束問題は原始星（主星）からその外側に磁束をどのように追いやるかを主に問題にしていた。これに関しては磁気拡散過程（オーム散逸と双極性拡散）が有効に働き既に解決されたとの見方もあるが、原始星の外側に溜まった磁場が最終的にどのような挙動を示すかまでは理解されていない。

2.2 棘構造の起源は？交換型不安定性による磁束輸送を捉えたか？

この棘構造の正体および起源は一体何であろうか？まず思いついたのが円盤が分裂した際に生じた破片、もしくは伴星に付随するもう一つの円盤であるという説だ。円盤が中心星の質量に対して重ければ (Toomre Q 値が小さければ) 円盤が重力不安定となり分裂してもよいだろう。しかし、この MC 27 中心星の質量は分子輝線観測データに基づく力学的解析から約 $0.2 M_{\odot}$ と導出されており [10], それに対して円盤は十分に軽く重力的には安定であると推定される。したがって円盤分裂を起源とする構造である可能性は低い。他に分子雲コアにおける分裂機構としては乱流分裂なども検討されている。これは 100-1000 au 以上の離れた連星/多重星系を生み出す機構としては有力である [21] が、このような非常に小さなスケールでの分裂構造を生み出すような提案はない。

そこで我々は分裂ではない機構で MC 27 における棘構造の起源の説明を試みた。ここでは交換型不安定性 (Interchange Instability) [22-25] という機構を検討する。これは磁気浮力不安定性の一種であり、太陽表面や銀河中心 [26] などで生じている有名なパーカー不安定性とは異なり、磁力線の形は変化せず、位置のみが入れ替わるモードを指す (詳しくは [27] などの教科書参照)。中心重力源に向かう磁気圧がガス圧に対して相対的に強くなると作用し、磁束が外向き (重力源とは反対方向) に輸送される [24]。図2は理論研究に基づいて、原始星円盤における交換型不安定性が起こる直前・直後の磁場とガスの位置の変化をまとめたものである。磁気拡散が働き円盤の淵に磁束が溜まった状態で分子雲コアから降着するガスが存在するシステムを考える (図2(a))。交換型不安定性が発生すると、磁束は円盤の端から一気に逃げ出し、図2(b) に示したように漏れ出した磁束と少量のガスが楕円形に近い形を保ちながら、磁気圧に押されて外向きに膨張する空洞を形

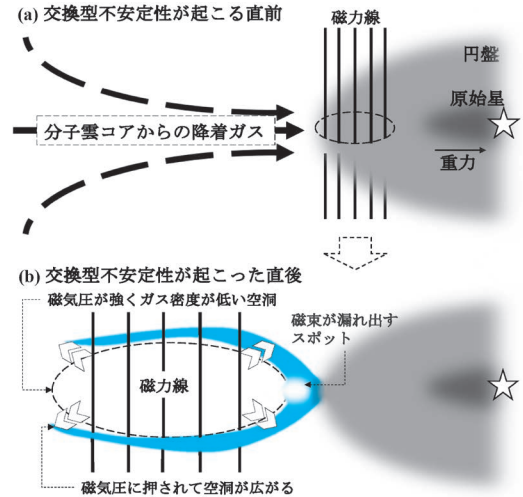


図2 交換型不安定性が起こった直前直後の原始星円盤およびその付近の磁場とガスの構造・配置を模式的に表した図。

成する (例: [28, 29])。

ALMA の連続波観測で捉えた棘はこの交換型不安定性によって生じたガス空洞 (図2(b) の青で示した部分) の淵の一部を捉えている可能性がある。原始星から遠く離れた外側部分は、検出限界を下回る程度のガスの量しか存在しないため観測では検出できず、結果として図1で示したような構造となる。筆者らはこの磁束を一気に吐き出す様子が、ほこりやウイルスを空気とともに瞬く間に押し出す「くしゃみ」に似ていることからこのように例えることにした。

2.3 「くしゃみ」は何回も起こったか？：MC 27 のALMA 観測から紐解く星形成の履歴

原始星の「くしゃみ」、すなわち交換型不安定性が起こったと思われる証拠は 10 au 程度の原始星円盤だけでなく、周辺数 1000 au に広がる分子雲コア中のガスにも履歴が刻まれていると筆者らは考えている。図3にこれまでの MC 27 のALMA 観測 [10, 14, 30, 31] で明らかにしてきたガスと特に温度が高い構造の分布 (正確には CO ($J=3-2$) の輝度温度であるが、光学的に厚い輝線であるため、その場所の運動温度を概ね反映し

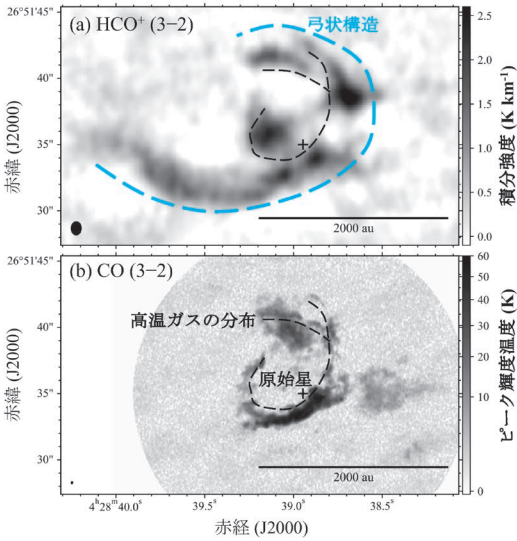


図3 筆者らの研究で明らかにされていた数1000 auスケールに及ぶ原始星周辺のガスの空間分布を示す。クロスマークは原始星の位置を示す。左下に示す楕円はそれぞれの観測の空間分解能を表す。弓状構造の外縁および高温ガスに沿った場所をそれぞれ青と黒色の点線で強調している。

ていると思ってよい)を示す。原始星の周囲に弓状構造が発達しており、その内部を取り巻くように温度が高く細長い構造が目立つ。その温度は30–60 Kであり、分子雲コアの平均的な温度である10 Kよりも有意に高い領域が存在することがみて取れる。

我々が提案するMC 27の最新の星形成シナリオは以下の通りである。まず、原始星形成、すなわち、円盤が形成された直後に交換型不安定性の最初のイベントが発生した。円盤の端から磁束が流出し、図2で示したようなリング状、もしくは弓状のガス構造を形成する。このリング状構造自体が概ね音速程度 (0.2 km s^{-1}) で外側に膨張 [28, 29] したと考えると、2000 auまで成長する時間は約5万年である。これは平均的な質量降着率が約 $4 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{年}$ で原始星が成長したとすると、現在観測から見積もられている星の質量 ($0.2 M_{\odot}$) となる。交換型不安定性が何度も生じ

たとすると、それによって漏れ出てきたガスは周囲の星周物質と衝突し、衝撃波層に沿って温度の急上昇がもたらされる。これが図3(b)で示したような分子雲コアでは通常考えにくい温度を実現させる一つのアイデアである。この領域では温度の上昇だけではなく、SOやメタノールといった衝撃波領域と関連が深い分子種も原始星とは離れた場所で検出されている [32]。したがって、分子雲コアの中心部数1000 au以内においてダイナミックなガスの運動、異なる物理状態を持つガス雲同士の相互作用の履歴が残されていること自体は複数の傍証が得られていると言ってよいだろう。円盤の淵で見つかった数auの棘状の構造(図1)が上記の構造と同様な速度で発達したと考えると、我々が現在観測しているものは直近約100年以内の交換型不安定性によって引き起こされたイベントであると想定される。

このように何度も交換型不安定性が起こる様子は最近の3次元磁気流体計算においても示されている。図4に磁場に貫かれた分子雲コアから計算を始めて、原始星形成後2万年までを追跡した計算のスナップショットを示した。左図に示すように原始星形成60年後にリング構造は数100 au程度まで成長している。その後、約2万年後には最も大きいリング構造は原始星から1000 au離れた位置まで到達しており、内部ではより複雑な密度分布が見受けられる。尚、本計算では初期密度分布に $m=2$ のモードの対称性を課しているため、双極のリング構造がまず発達するような設定であるが、原始星形成直後に初期の密度分布にわずかな非対称性があれば、MC 27で観測されたような片側に伸びる弓状および棘構造の発達が予想され、現実的にはそのような状況の方が多いと考えられる。

以上、これまでの10年間の観測・理論的研究を総合すると、MC 27の星形成シナリオは(1)複数回「くしゃみ」をすることにより円盤に溜まった磁束を放出し、(2)それによって弓状や

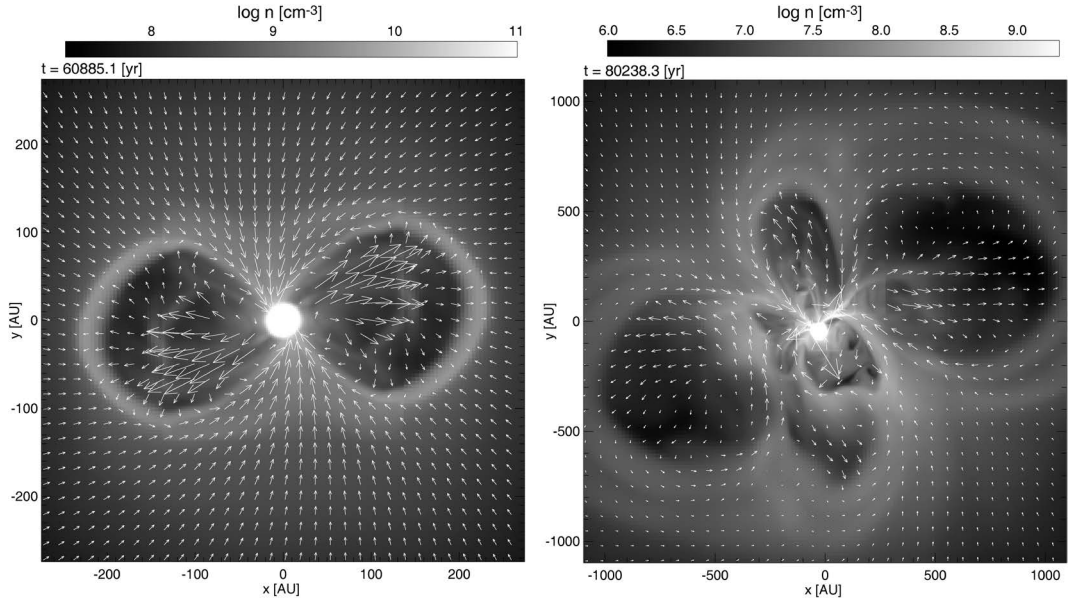


図4 3次元磁気流体計算 ([33] と類似の設定) で再現された交換型不安定性によって生じた星周構造の密度分布 (町田正博氏提供)。中心の明るい (密度の高い) 領域に原始星が存在する。ベクトルはガスの運動の向きを表し、長いほど速度が大きい。(左) 原始星形成60年後 (星形成前の分子雲コアから計算をスタートさせて6万年後) の様子。原始星の左右に生じている空洞の中の磁場は強くなっている。(右) 原始星形成から2万年後 (計算開始から8万年後) の様子。最も大きい空洞構造は1000 au程度まで広がっていることがわかり、大小様々なリング・バブル構造が発達している。

円盤から伸びる棘状構造など複雑な星周環境を作り出しつつ、(3) 円盤周囲の強い磁場がもたらす磁気制動の作用により効率的に角運動量を抜き取り、円盤を 10 au 以下と小さく保つシステムが実現した、とまとめることができる。

3. 「くしゃみ」は原始星でどれほど一般的か？

3.1 着想に至った経緯

順番は前後するが、MC 27の星形成過程において交換型不安定性が重要な役割を果たしているという着想に至った重要な結果の一つ紹介しよう。実は図1で示した観測が実行されたのは2017年である。恥ずかしながら筆者にはこの貴重なデータを世に公開できるようなアイデアは当時なく、そのまま7年近くお蔵入りになってしまっていた。しかし、筆者らは何も研究の手を止めてい

たわけではない。おうし座分子雲のMC 27のような孤立した分子雲コアの星形成モードだけではなく、星形成モードとして支配的でもある集団的な星形成の理解も深めるため、名古屋大学の立原研悟氏らとともにみなみのかんむり座領域の広域分子雲観測を進めていた [34]。その中で、IRS 2 という Class I 原始星 (MC 27 よりも進化が進んだ段階) 付近に直径約7000 au のリング構造を見出した (図5)。この巨大なリング構造はALMA のモザイク観測で広い地図を得たことにより初めて見出すことができた。ご覧の通り驚くべきほど真円に近く、研究会で発表した際は「まるで重力レンズ天体のようだ」と系外銀河研究者からは感想を頂いた。筆者もそう思った。

みなみのかんむり座領域は全体としておうし座領域よりも乱流が卓越した場所ではあるが、そのような乱雑な運動で真円 (に近い) リング構造の

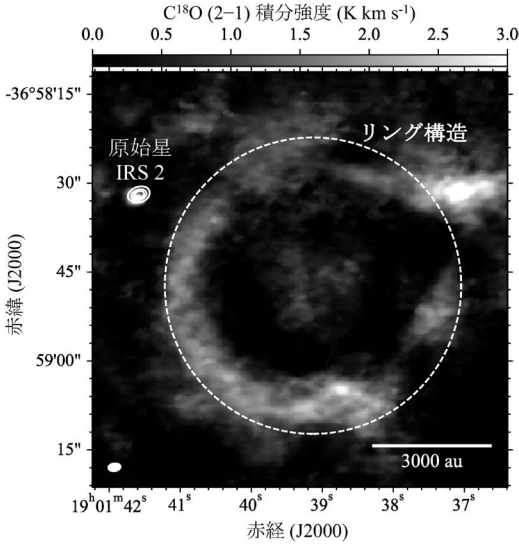


図5 みなみのかんむり座星形成領域のClass I原始星 IRS 2付近のガス分布の様子。観測輝線はC¹⁸O (J=2-1)である。左下に空間分解能の大きさの楕円を示す。等高線で示したものが1.3 mm連続波であり、原始星の円盤を捉えている。SO輝線も観測しており、円盤とC¹⁸Oリングを接続する場所に分布しており、リングと円盤は独立したものではないと見られる（詳しくは [35] を参照）。

ような綺麗な特徴を実現することは通常想定されない。原始星に近い場所に存在することから星形成に伴う現象が関連していると予想されること、その速度構造を解析すると膨張と考えてよい特徴が見られたことから、交換型不安定性によってこのIRS 2で見出されたリング構造の起源を説明するアイデアを着想した [35]。実はMC 27の初期ALMA観測の結果を契機の一つとして、数値計算でも複雑な星周構造の起源を交換型不安定性で説明する試みが進められており [29, 33]、理論的な基盤も十分に蓄積されていたことは付け加えておきたい。ただし、この不安定性は数値的な取り扱い次第（計算の解像度や原始星を模したシンク粒子導入の有無）で挙動が異なるなどの理由から、古くから理論的に知られていた現象ではあったものの理論研究者も現実に起こるかどうかが強い

確信が持てなかったという経緯がある。観測と理論が密に連携し、MC 27およびIRS 2の特徴的なガス構造の発見と現実的なシナリオの着想に至ったと言える。

3.2 理論と観測の現状から考える「くしゃみ」の普遍性と期待される波及効果

次に追求すべき疑問は、一体どのような条件が揃えば、この交換型不安定性が起こるのか？ということである。1.2節で述べたように、観測された円盤は小さいサイズのものが大半を占めており、これらが交換型不安定性による磁束輸送に関連して形成されたとすれば、すべての原始星とは言わずともかなり多くの系で頻繁に起こっていると期待したい。扱う現象は3次元の非線形磁気流体現象のため、その解明はまだ理論的にも発展途上ではあるが、現在の理解を述べておく。

大局的には分子雲コアが強い磁場で貫かれているほど交換型不安定性の発生条件を達成しやすい [33]。すなわち、自己重力に対して磁気張力で支えられているような状況（磁氣的亜臨界）ほど好ましい。実際MC 27においても中心部数3000 au程度に限定すれば、偏波観測 [36] などの結果を総合すると、磁氣的亜臨界と考えて矛盾がない結果も得られている。しかしながら、磁氣的超臨界（磁場が重力に対して相対的に弱い）状態の分子雲コアの進化計算でも交換型不安定性は起こっている [28, 37, 38] ことから、分子雲コア収縮初期の大局的な強い磁場は必ずしも必要条件ではない。また、交換型不安定をトリガーするきっかけとなる円盤外縁部の局所的な強磁場環境を実現するためには、磁気拡散に影響する電気抵抗の挙動の理解も重要である。そのためには円盤内でダストのサイズ分布によって決まるガスの電離度を知る必要があるだろう。むしろ、交換型不安定性が頻繁に起こることが期待されるのであれば、その条件から惑星形成の起源物質として不可欠なダストの性質に制限をつける新たな手法も開拓できるかもしれない。

主にALMA等の干渉計を用いた観測では、1.3節でも述べたようにストリーマーと称されるものが現在多数の系で見つかりつつあり、これらが交換型不安定性によって形成されたものかどうかは再考の余地がある。また筆者らとは独立に、原始星形付近におし座領域の原始星L1489 IRSにおいて分子輝線の観測でバブルのような構造が発見され、我々と同様に磁場起因で形成されたのではないかと論じられている [39]。この天体は双極分子流やストリーマーなどよく知られた星周構造も共存する系である。したがって、これまでよく知られていた原始星においても星周構造を見直すことにより、交換型不安定性による構造形成を各天体の星形成シナリオに位置付けることは十分可能であると期待される。今後、アーカイブデータなどを用いた研究で同じ着眼点を持った考察が増えることを期待しつつ、筆者らも星形成・および惑星形成の理解に繋げるための研究を引き続き行う予定である。

4. ま と め

星の形成を理解するためには、「角運動量問題」と「磁束問題」という2つの大きな問題を解決する必要があることが40年以上前から指摘されてきた。角運動量問題と密接に関係している、双極分子流は原始星の「うぶ声」としてよく知られていたが、今回提案した交換型不安定性により磁束を直接外側へ放出する「くしゃみ」は磁束問題に対する理解を促進しうる。また、若い星に付随する円盤の多くが大きさ10 au程度に留まっていると言う事実に対しても一つの解決策を提示し、さらには惑星形成の起源物質の理解にもつながる可能性がある。また、このMC 27で見つかったような数1000 auスケールの弓状構造自体は、近年様々な原始星天体で頻繁に見つかりつつあることから、我々の予想を超えて「くしゃみ」は頻繁に起こっているかもしれない。

謝 辞

この記事で紹介した一連の研究成果に関しては、国立天文台アルマ共同科学研究事業（2022-22B）等の支援を受けて行われた。町田正博氏らをはじめとする共同研究者の方には、本記事の元となった論文 [40] の執筆、および観測データ取得・解析、理論研究との比較など多大な貢献をして頂いた。最後に、この原稿を作成するにあたってお世話になった、2024年度の天文月報編集委員の岩崎一成氏にお礼を申し上げる。

参 考 文 献

- [1] 富阪幸治, 2000, 天文月報, 93, 604
- [2] 町田正博, 2012, 天文月報, 105, 262
- [3] 徳田一起, 2023, 天文月報, 116, 61
- [4] Nakano, T., 1984, *Fund. Cosmic Phys.*, 9, 139
- [5] Andrews, S. M., et al., 2018, *ApJ*, 869, L41
- [6] Cieza, L. A., et al., 2019, *MNRAS*, 482, 698
- [7] Long, F., et al., 2019, *ApJ*, 882, 49
- [8] Ohashi, N., et al., 2023, *ApJ*, 951, 8
- [9] 富田賢吾, 2013, 天文月報, 106, 442
- [10] Tokuda, K., et al., 2017, *ApJ*, 849, 101
- [11] Mizuno, A., et al., 1994, *Nature*, 368, 719
- [12] Onishi, T., et al., 1999, *PASJ*, 51, 257
- [13] Bourke, T. L., et al., 2006, *ApJ*, 649, L37
- [14] Tokuda, K., et al., 2014, *ApJ*, 789, L4
- [15] 徳田一起, 大西利和, 2015, 天文月報, 108, 739
- [16] Matsumoto, T., et al., 2015, *MNRAS*, 449, L123
- [17] Pineda, J. E., et al., 2020, *Nat. Astron.*, 4, 1158
- [18] Lee, J.-E., et al., 2023, *ApJ*, 953, 82
- [19] Kido, M., et al., 2023, *ApJ*, 953, 190
- [20] Harada, N., et al., 2023, *ApJ*, 945, 63
- [21] Offner, S. S. R., et al., 2010, *ApJ*, 725, 1485
- [22] Parker, E. N., 1979, *Cosmical Magnetic Fields. Their Origin and Their Activity*
- [23] Kaisig, M., et al., 1992, *ApJ*, 386, 83
- [24] Lubow, S. H., & Spruit, H. C., 1995, *ApJ*, 445, 337
- [25] Stehle, R., & Spruit, H. C., 2001, *MNRAS*, 323, 587
- [26] Fukui, Y., et al., 2006, *Science*, 314, 106
- [27] 柴田一成ほか, 活動する宇宙一天体活動現象の物理—(裳華房)
- [28] Zhao, B., et al., 2011, *ApJ*, 742, 10
- [29] Matsumoto, T., et al., 2017, *ApJ*, 839, 69
- [30] Tokuda, K., et al., 2016, *ApJ*, 826, 26
- [31] Tokuda, K., et al., 2018, *ApJ*, 862, 8
- [32] Favre, C., et al., 2020, *A&A*, 635, A189
- [33] Machida, M. N., & Basu, S., 2020, *MNRAS*, 494, 827
- [34] Tachihara, K., et al., 2024, *ApJ*, 968, 131
- [35] Tokuda, K., et al., 2023, *ApJ*, 956, L16
- [36] Fukaya, S., et al., 2023, *PASJ*, 75, 120

[37] Machida, M. N., et al., 2014, MNRAS, 438, 2278
 [38] Tsukamoto, Y., et al., 2023, PASJ, 75, 835
 [39] Tanious, M., et al., 2024, A&A, 687, A92
 [40] Tokuda, K., et al., 2024, ApJ, 965, 99

Sneeze of Baby Stars?: ALMA Studies of the Dynamic Process of Magnetic Flux Transport in Early Stages of Star Formation

Kazuki TOKUDA

¹ *Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kyushu University, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan*

² *National Astronomical Observatory of Japan, National Institutes of Natural Sciences, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: MC 27, a dense core in the constellation Taurus, is located at a distance of about 450 light-years (140 pc) from Earth and provides an interesting opportunity for the study of phenomena occurring in the early stages of star formation. We present the dynamic star formation processes observed with ALMA at the highest resolution achievable with standard observing modes. We have identified “spike”-like structures, a few astronomical units in size, extending from the protostellar disk. Comparative analysis with theoretical studies suggests that these features may result from a phenomenon known as magnetic interchange instability. This occurs when magnetic buoyancy, driven by enhanced magnetic fields at the edge of the disk, rapidly forces magnetic flux outward, similar to a sneeze expelling dust or viruses with a burst of air. Understanding the conditions that trigger this instability could provide crucial insights into solving the long-standing magnetic flux problem in star formation and subsequent planet formation.