

極めて若い低質量原始星天体の激しい活動性

大小田 結 貴

〈理化学研究所開拓研究本部 〒351-0106 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: yuki.okoda@riken.jp



誕生して数1000年程度の若い低質量原始星の詳細観測が可能になった。アルマ望遠鏡の高感度・高分解能観測は、次々に新たな現象を見出し、我々の興味を刺激し続けている。最初期過程で円盤構造がすでに作られていること、現在のアウトフローとは全く別の方向に噴いたアウトフローの痕跡が残されていること、円盤・エンベロープ構造の外側で温度が上昇していることが明らかになっている。これらの観測成果は、原始星が乱流を伴う不均一なガス雲からつくられ、円盤は原始星とともに成長していくという描像を示唆する。つまり、低質量原始星の最初期過程は、これまで考えられていたものより激しく活動的で不安定であることがわかってきた。その後の星形成進化やその多様性、太陽系の環境を理解する上でも、最初期過程の探求は必要不可欠な研究テーマである。

1. はじめに

この20年ほどの間に、数多くの系外惑星が発見されてきた。それらは、連星系で形成されたものや、中心星の自転と逆向きに公転するものなど、幅広い多様性を持つことが知られる [1]。惑星系形成の舞台は原始惑星系円盤にあり、さらに遡ると原始星円盤に辿り着く。太陽系の成り立ちを理解する上でも重要なこれらの物理・化学構造は、長年にわたって興味を持たれ、その詳細構造の解明が待ち望まれてきた。アルマ望遠鏡の誕生により高感度・高分解能観測が可能になり、原始星天体の観測的理解は大幅に進展した。その大型プロジェクトでは、20天体に対して系統的な観測が行われ、原始惑星系円盤にも多様性があることが明らかになった [2]。この驚くべき観測結果は、多様性の起源が原始星誕生直後まで遡れるのではないかということを示唆する。

原始星形成進化の最初期過程は未だ新たな発見が続く。“原始星円盤はいつ作られるのか”、“原

始星の成長に伴い円盤はどのように進化するのか”、“そもそも誕生直後の原始星がどのように成長するのか”。本稿では、上記の3つの問いの答えの手がかりとなる、近年のアルマ望遠鏡観測研究成果について紹介する。誕生して数1000年以下の低質量原始星に焦点を当て、そこでの物理構造の分布・運動について述べる。具体的には第2章では、数1000年程度の原始星天体に付随する初期円盤の検出について述べる。これは原始星と円盤の共進化描像を示唆する。第3章では、原始星周り数1000 auスケールの観測成果を述べる。角運動量を抜き取る役割を果たすアウトフローによって、中心星にガスが降り積もり、原始星の成長が進行する。最初期形成過程においては、そのアウトフローの方向が劇的に変化している可能性が観測で示された。第4章では、5 auの超高分解能観測で有機分子分布の相違性を見出し、降着するガスの衝撃波を捉えた観測成果についてまとめている。本稿で述べる成果は、分子の回転スペクトル輝線が分子種によって特定の物理構造を選択

的に反映することを活用している。

2. 原始星と円盤の共進化

2.1 原始星円盤の観測

アルマ望遠鏡の大きな成果の1つとして、進化段階の進んだ (Class II) 円盤構造の発見に続き、厚いガスに覆われた若い進化段階 (Class 0/I) での円盤の存在を明らかにしたことが挙げられる [e.g., 3-8]. これは円盤形成、そしてそこでの惑星形成が考えられていたよりも早い段階で始まっていることを示す。原始星質量は、ケプラーの法則を用いて円盤の運動から求められる。アルマ望遠鏡は従来のものと比べて空間分解能が格段に高い。しかも、わずかに数 km s^{-1} の速度をドップラー効果で測定できる。原始星近傍では、原始星の放射によって温められたダストから分子が脱離する。そのようにして気相に現れる分子の回転スペクトル輝線 (以下、輝線と呼ぶ) を活用して、原始星周りの物理構造が調べられている。例えば、代表的な低質量原始星天体 L1527 では SO や CH_3OH の分子輝線を用いて、回転落下運動するガス (エンベロープ) と原始星円盤の境界となる遠心力バリアや、原始星円盤の運動などが調べられている [8-10].

2.2 非常に若い原始星の円盤

原始星天体 IRAS 15398-3359 は、赤外線宇宙望遠鏡 Herschel で得た Spectral energy distribution をもとに、最も若い進化段階である Class 0 に分類された [12]. 若い原始星天体の解明を目指して、アルマ望遠鏡の初期観測でターゲットに選択され、アウトフローとエンベロープ構造の分布・運動が調べられた [13]. 空間分解能 80 au で、 H_2CO と CCH の分子輝線が調べられ、原始星の北東と南西に伸びるアウトフローが明瞭に描き出された。その速度構造から力学的年齢は数 1000 年程度であることが明らかになった。一般的に若い原始星は誕生して 10^5 年以下と考えられていることから、IRAS 15398-3359 は Class 0 段階にあ

る原始星の中でも特に若い原始星であると言える。 H_2CO と CCH 輝線はアウトフローと同時にエンベロープの分布も捉えていた。エンベロープの速度構造が調べられ、その回転落下運動から原始星質量が $0.09 M_\odot$ より小さいことがわかった。また、独立して行われた、 C^{18}O 輝線の観測でも、原始星質量が $0.01 M_\odot$ より小さいことが示された。原始星円盤の半径は 20 au 程度と小さく、厚いガスに埋もれていることが推測された [14]. これらの観測 [13, 14] の分解能 (80 au) では、円盤構造を示すことは難しかったが、IRAS 15398-3359 が極めて小さい原始星質量を持つことがわかった。これほど小さい原始星質量の上限値は驚きの結果であった。なぜなら、それまで報告されていた若い原始星天体の質量は概ね $0.1 M_\odot$ より大きいものがほとんどであったからである。

この天体の原始星円盤は、空間分解能 30 au で行われた ALMA Cycle 2 の観測で初めて検出された [11]. CCH 分子および SO 分子の輝線の分布を調べたところ、CCH 輝線が原始星周りに広がって分布している (~半径 150 au) のに対し、SO 輝線は原始星近傍に集中して分布していた (~半径 40 au). 図1は SO 輝線の速度構造で、カラーが輝線強度を示す (Web 版はカラーで表示されているため、そちらをご参照頂きたい). 図1(b) はアウトフローの方向 (北東-南西) に沿った位置速度図を示す。図1(a) はそのアウトフローに垂直な方向 (P.A. 130°) に沿った位置速度図を示す。等高線は円盤半径を 40 au、原始星質量を $0.007 M_\odot$ と仮定したときのケプラー回転運動である。観測結果はこの等高線とある程度一致していることから、原始星質量は $0.007^{+0.004}_{-0.003} M_\odot$ と見積もられた。ごく最近、ALMA Large Project eDisk (Early Planet Formation in Embedded Disks) が本天体に対してより高分解能な観測 (空間分解能 20 au 程度) を行い、SO 輝線の回転運動を確認している [15]. そこでは原始星質量の下限値が $0.022 M_\odot$ と見積もられている。

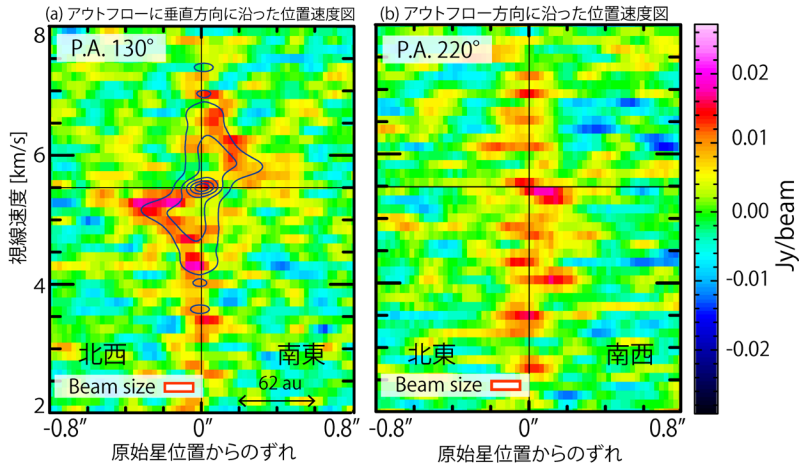


図1 原始星IRAS 15398-3359で検出したSO分子輝線の位置速度図。0"が原始星位置を示す。横線は速度 5.5 km s^{-1} を表す。これがSO輝線の系統速度(中心速度)である。カラー(Web版を参照。印刷版ではモノクロ)が観測結果で輝線強度を表す。(a)アウトフローと垂直方向(北西-南東)に沿って描いた位置速度図。等高線は遠心力バリアを40 au, 原始星質量を $0.007 M_{\odot}$, 視線方向に対する円盤面の傾きを 30° (90° が円盤面と天球面が平行な場合)と仮定した時のケプラー回転運動を表す。(b)アウトフロー方向(北東-南西)に沿って描いた位置速度図。これらの図は [11] から引用。

ダスト連続波からエンベロープ質量は、 $0.5\text{--}1.2 M_{\odot}$ [16, 17] と見積もられており、これは上記に述べた原始星質量と比べて極めて大きいため、今後もガスが降り積もり、原始星が引き続き成長することが期待される。

理論研究では、原始星誕生直後、最初期段階から円盤形成が始まり、重力的に不安定な段階を経ながらも原始星と共に円盤が進化していく描像が示されている。検出した円盤構造の質量をダストの温度を仮定して見積もると、20 Kで $0.006 M_{\odot}$ 、100 Kで $0.001 M_{\odot}$ であった。現実的な範囲内でダスト温度を変えても、円盤質量は原始星質量 $0.007 M_{\odot}$ とほとんど変わらない。一方、eDiskはダストの温度が20 Kのときに $0.0018 M_{\odot}$ 、47 Kのときに $0.0006 M_{\odot}$ と報告している [15]。図2では、IRAS 15398-3359のこれらの結果と他の原始星の質量値を比較する。横軸は原始星質量、縦軸は原始星円盤の質量を示す。赤色がIRAS 15398-3359、青色が比較的若い原始星(Class 0)、緑が比較的進化した原始星(Class I)を示している(図の色はWeb版を参照)。IRAS 15398-3359の

円盤を検出する以前は、 $0.1 M_{\odot}$ 以上の原始星質量を持つ天体で円盤構造が発見されることがほとんどであった。図2からわかるように、IRAS 15398-3359の原始星質量と円盤質量は他の天体に比べて非常に小さい。本天体の研究結果は、原始星が誕生して間もない段階から円盤構造が形成されることを示す。それと同時に、円盤が原始星と共に進化する共進化描像を観測的に示唆している。

図1で示すように、SO輝線の系統速度は 5.5 km s^{-1} である。天体はそれぞれの速度を持っているため、天体に付随する物理構造の運動を考えるときには中心とする速度が必要であり、それを系統速度と呼ぶ。これは以前報告された天体の系統速度 $5.0\text{--}5.3 \text{ km s}^{-1}$ [13, 14] とわずかに異なる。円盤構造を取り囲むエンベロープガスをトレースするCCH輝線の系統速度は 5.3 km s^{-1} で後者と一致する。これらの系統速度のずれは、最初期過程にある原始星近傍の複雑な構造を示しており、円盤構造へのガスの供給が不均一である可能性を示している。さらに形成された円盤の安定

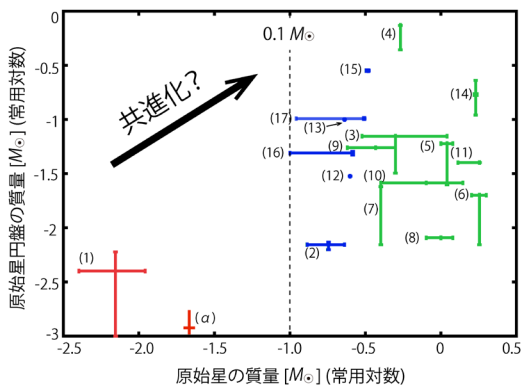


図2 本研究天体IRAS 15398-3359の結果と他の若い原始星天体を比較する。横軸は原始星質量、縦軸は原始星円盤の質量を示す。番号は各天体を示す。(1, α) IRAS 15398-3359 (α) はeDiskが報告するIRAS 15398-3359の結果。(2) L1527 IRS (3) L1551 IRS5 (4) TMC1 (5) TMC1A (6) L1489 IRS (7) L1536 (8) IRS 43 (9) IRS63 (10) L1551NE (11) HH111 (12) HH212 (13) Lupas3 MMS (14) BHB07-11 (15) IRAS03292+3039 (16) L1448 IRS2 (17) L1448C。(2), (12), (13), (15), (16), (17) は比較的若い天体。左の番号(1), (α) 以外は進化した天体。Web版では色分けされている(青色が比較的若い天体、緑色が進化した天体)。図は [11] から引用した。各天体の値の参考文献はそちらにまとめてあるため、ここでは省略する。

性を調べた。円盤の重力不安定性は、ToomreのQ値と呼ばれる指標で判断できる。Qが1より小さい場合、円盤自身の自己重力の効果が大きくなり円盤は分裂する。この場合、円盤は重力的に不安定であるとみなされる。IRAS 15398-3359の円盤において、Toomre Qの値はダストの温度が20 Kの時に0.4、100 Kで5と見積もられた。円盤内の温度にはばらつきがある場合、IRAS 15398-3359の原始星円盤は部分的に不安定であると示唆される。円盤の不安定性は、原始星へ降り積もるガスの間歇的降着を引き起こすことが期待され、先行研究で H^{13}CO^+ やHDOの分布から提案された描像 [17, 18] と矛盾しない。

3. アウトフローの方向変化

3.1 過去に噴出した原始星アウトフロー

前節で述べたように、原始星天体IRAS 15398-3359は極めて小さな原始星質量や系統速度のずれなどの観点から、最初期段階を調べるうえでユニークな天体と言える。この天体周り数1000 auスケールにおいても、これまで見つかっていなかったエキセントリックな構造を示す興味深い観測結果が得られた [19]。

ALMA Large Project FAUST (Fifty AU Study of the chemistry in the disk/envelope system of solar-like protostars) は、13の低質量原始星天体に対して系統的な観測を行った。IRAS 15398-3359はそのターゲット天体の1つである。原始星周りの広がった構造を調べるため、12 mアンテナと7 mアンテナの観測データを合わせて解析が行われ、既に報告されているアウトフロー(北東-南西)とほとんど垂直な方向に、これまで知られていなかった構造が見つかった。図3(a)は H_2CO 輝線の強度分布で、左下(南東)に見えるアーク状の構造が新たに検出された構造である。この構造はSO, SiO, CH_3OH 輝線でも確認された。これらの分子は衝撃波のトレーサーとして知られる [e.g., 20-22]。特にSiOは通常、ダストのコアに存在し、アウトフローのような十分なエネルギーを持ったガスが周りの星間ガスに衝突した時に気相に放出される。衝撃が起こって間もない場合、原始星から左下(南東)に位置するアーク状の構造の線幅は、数 10 km s^{-1} に及ぶと期待される。しかしながら、実際にはどの分子輝線もその線幅は狭く $\sim 1 \text{ km s}^{-1}$ 程度であった。これは、速い速度成分が既に散逸していることを示しており、衝撃波が生じてから時間が経過したことを意味する。これらの結果から、アーク状の構造は過去に噴いたアウトフローの痕跡であると見られる。図3(b)では分子輝線分布が模式図で表されている。SO輝線は原始星の右上(北西)でもわ

ずかに検出され、 H_2CO 輝線と C^{18}O 輝線は原始星近傍において北西-南東方向に細く伸びる構造を示す。

過去のアウトフローの力学的年齢は、原始星からの距離 1200 au と速度 1.2 km s^{-1} から $\sim 5000 \times \cot(i)$ 年と見積もられた。ここで i は視線方向に対するアウトフローの傾きを表しており、 $i=90^\circ$ は、アウトフローが天球面に平行に噴出している場合に対応する。一方、ガスの散逸時間は以下の式で表される。

$$t_{\text{dis}} = \frac{8}{3} \frac{\rho}{\rho_1} \frac{r}{v}. \quad (1)$$

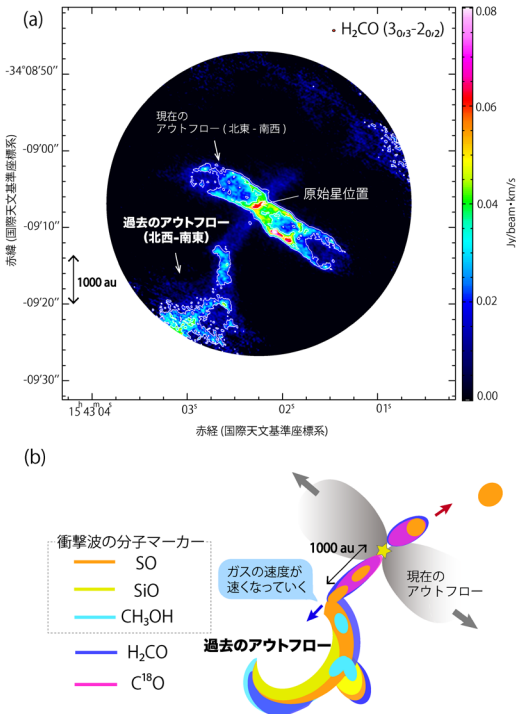


図3 (a) 原始星 IRAS 15398-3359 で観測した H_2CO 輝線の積分強度分布図 (表紙画像参照)。北東-南西方向に伸びる構造は現在のアウトフローを示す。原始星位置から左下 (南東) に位置するアーク状の構造は過去のアウトフローの一部。(b) 分子輝線分布の模式図。各分子輝線分布を色で表しており (Web 版を参照)、これら全てが過去のアウトフロー構造である。これらの図は [19] から引用。

衝撃波の速度 (v) とサイズ (r), 衝撃波を受ける前のガス密度 (ρ_1) に対する衝撃波を受けた後のガス密度 (ρ) の比で表すことができる [23]。速度を 10 km s^{-1} , 密度比を 10 と仮定すると散逸時間は ~ 4000 年となり、過去のアウトフローの力学的年齢と同等である。またこれらの年齢は、気相状態の SiO 分子がダストに吸着されるタイムスケール ($10^3\text{--}10^4$ 年) とも矛盾しない。

3.2 方向変化の起源

円盤の角運動量の向きはアウトフローの方向を決める重要なパラメーターである。図4は、原始星コアから原始星段階への形成過程を模式的に表し、左図は母体となるコアの運動が剛体回転の場合である。一般的に考えられてきたこの描像では、アウトフローの方向は原始星の進化を通して変化しない。しかしながら、その最初期段階は原始星コア内のガス分布に偏りがあり、乱流運動を含むことが予想される。

実際、2.2節で述べたように、最初期段階にある原始星天体 IRAS 15398-3359 は、エンベロープ質量 ($0.5\text{--}1.2 M_\odot$) に比べて非常に小さい原始星質量 ($0.007 M_\odot$), 系統速度のずれ、間歇的降着などダイナミックな特徴を示す。近年、Class 0 段階にある 12 個の原始星天体に対して $\sim 50 \text{ au}$ から $\sim 5000 \text{ au}$ のスケールで回転運動が調べられ、その方向が原始星からの距離によって異なることが報告されている [24]。IRAS 15398-3359 でも、角運動量の向きは原始星からの距離に依存していることが指摘されており [25]、それは原始星コ

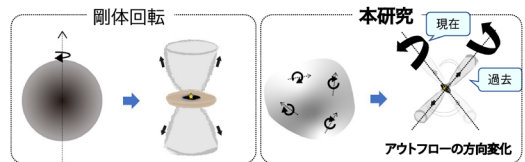


図4 原始星コアから原始星の形成過程の模式図。最初期形成過程では右の描像が考えられる。左は剛体回転する球状の原始星コアから原始星への形成過程を表す。

ア内で場所によって角運動量の向きが異なることを示唆する。

図4の右図で示すように、原始星コア内の角運動量の向きが不均一である場合、アウトフローの方向変化を引き起こしうると推測される。非常に小さい原始星質量 ($0.007 M_{\odot}$) を持つことから、原始星と円盤の全角運動量の向きは、異なる向きの角運動量を持つガス塊の降着によって、大きく変化する。なお、上記した2つのアウトフローに加え、南北方向にも1万 au スケールの大きなアウトフローが検出されており、大きな方向変化が複数回起こったことを意味している [26]。本研究に続き、ごく最近、別の天体においてもアウトフロー方向が大きく変化した兆候が指摘されていることは非常に興味深い [27]。近年の理論研究では、原始星を取り巻くガスの角運動量の向きとそこでの磁場の向きの関係がアウトフローの方向に影響を及ぼすことが示されている [28]。

4. 円盤・エンベロープ構造における降着衝撃波

4.1 有機分子分布の相違性

原始星における複雑な有機分子 (Complex Organic Molecules: COMs) は物質進化の手がかりとしてだけでなく、物理構造のトレーサーとしても重要視される。大質量原始星から低質量原始星まで幅広い天体で、有機分子が豊富に存在するコア (ホットコア/ホットコリノ) が検出され、COMs 輝線の分布が報告されている [e.g., 31–37]。そこでは、以下のような傾向が見られる。CH₃OH のような酸素のみを含む有機分子に比べて、NH₂CHO のように窒素を含む分子は原始星近傍に集中して分布する。ただし、HCOOH は例外であり、窒素を含まない分子にもかかわらず窒素を含む分子に似た分布を示す [e.g., 33, 34, 38]。一般的に、ダストの氷マントルに存在する有機分子は、氷の昇華温度である約 100 K 以上で一気に気相へと蒸発すると考えられている [39,

40]。この場合、有機分子分布は分子種に依存しない。つまり分子分布の違いを生み出さないことが期待される。このように、有機分子分布の違いは分子の生成過程の観点からも興味を持たれ、観測や化学モデルで研究が進められている [e.g., 35, 41–43]。

原始星天体 B335 でも上記の有機分子分布の相違性が見られた。この天体は、太陽から 165 pc の距離に位置 [44] する Bok Globule に存在し、Class 0 原始星 IRAS 19347+0727 を持つ。原始星近傍に有機分子が豊富なホットコリノ天体として知られる [31]。アルマ望遠鏡による 5 au の高分解能の観測で、HCOOH, NH₂CHO, CH₃OH, および CH₃OH の重水素化物である CH₂DOH が検出された [30]。図5は、B335 の原始星のごく近傍数 10 au における HCOOH, NH₂CHO, CH₂DOH, CH₃OH 輝線の積分強度分布図である。HCOOH と NH₂CHO の分布は原始星周りにコンパクトであるのに対し、CH₂DOH と CH₃OH の分布は直径 30 au より広がっている。原始星位置での強度が弱く穴のように見えるのは、ダスト連続波が光学的に厚いためである。

4.2 分子輝線と温度構造

B335 で検出した上記4種類の分子は、速度構造の解析から円盤・エンベロープ構造を捉えていることがわかった。一度の観測で、HCOOH と CH₂DOH では4本、NH₂CHO では3本、CH₃OH では6本の輝線が検出された。これらを用いて、多輝線解析によって温度と柱密度が求められた。その結果を図6(a) に示す。図6(a) は、横軸が原始星を中心に円盤・エンベロープ構造に沿った (南北) 方向で、縦軸が温度を示す。分子ごとの温度分布を色 (図は Web 版を参照) で示し、線で表す分布が南北方向に沿ったダスト連続波の強度分布を示している。B335 の円盤・エンベロープ構造はほとんど視線方向と平行 (edge-on) であることが報告されている [e.g., 29]。そのため、我々は図6(b) の模式図のように、円盤・エンベ

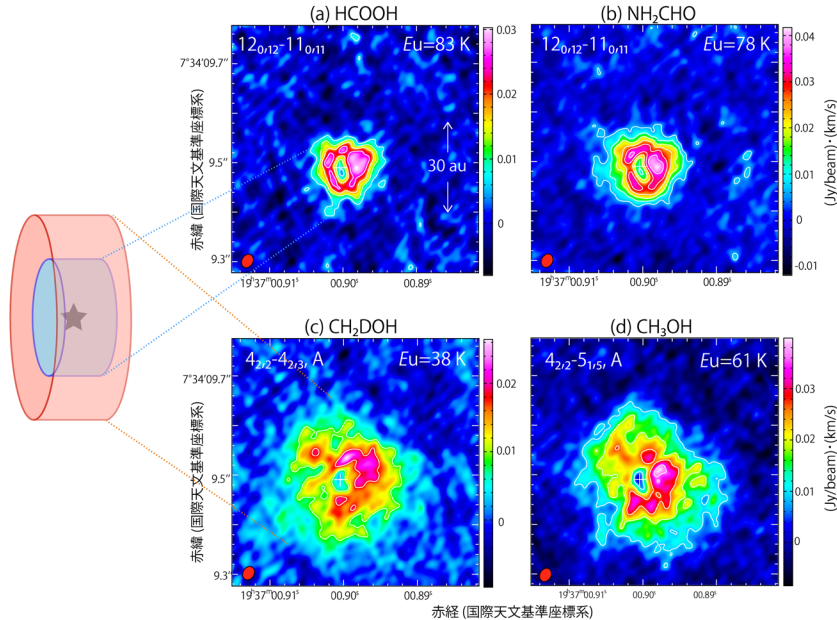


図5 原始星天体B335で検出した4種類の有機分子(HCOOH, NH₂CHO, CH₂DOH, CH₃OH)輝線の積分強度分布図。左は円盤・エンベロープ構造の模式図。HCOOHとNH₂CHOはより内側の構造のみを示す(Web版ではカラー表示)。B335の円盤・エンベロープ構造の傾きはほとんど視線方向と平行であることが知られる[e.g., 29]。図の一部は[30]から引用。

ロープ構造をほとんど真横から観測していることになる。

図6(a)で、どの分子も原始星のごく近傍(半径 $<0.''03$)では154–215 Kと高温を示す。しかし半径 $0.''06$ では、分子によって温度が大きく異なる。そこでは、広がった分布を示すCH₂DOHとCH₃OHは150–165 K、コンパクトな分布を示すHCOOHとNH₂CHOは75–112 Kと導かれた。分子輝線分布は奥行き方向にも同様の分布を持つと仮定すると、円盤・エンベロープ構造の温度分布は図6(b)のように表される。赤が比較的高温、青が比較的低温の範囲を示している。つまり、原始星から離れるにつれて一旦温度が下がり、外側で温度が上昇している。原始星のごく近傍は、原始星からの輻射熱で温められ、原始星から離れるにつれてその効果は下がり、温度は降下する。円盤・エンベロープ構造の外側で、温度上昇が起こる原因の可能性として、降着ガスによる衝撃波が

挙げられる。同様のアイデアは他の低質量原始星天体IRAS16293-2422Aでも報告されている[45]。

5. さいごに

この10年間、アルマ望遠鏡は若い原始星とその周りの構造形成について大きな威力を発揮した。その中で、誕生してまもない低質量原始星の姿は、予測していたものより活発で激しい活動性を持ち合わせるようになってきた。原始星が誕生するコアは、不均一・不安定な状態にあり、回転方向が大きく異なるガス塊が間歇的に降着する。原始星円盤は原始星の誕生とほとんど同時に形成され、降着ガスは円盤外縁部で衝撃波を発生させながら原始星を成長させていく。このような描像が見えつつある。ここで紹介した研究成果は、第1章で述べた3つの問いを紐解く端緒を示した。完全な理解を目指した活発な議論は続いており、引き続き観測的研究を続けることが求めら

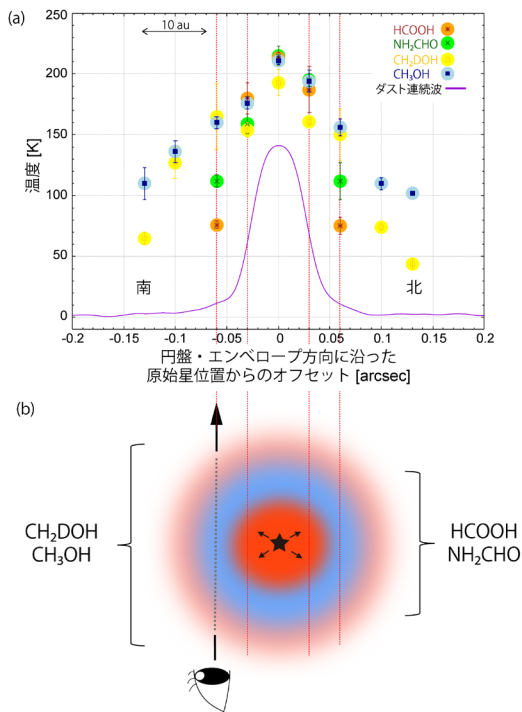


図6 (a) 原始星天体B335の円盤・エンベロープ構造に沿った温度構造. 各分子種で得られた温度分布を異なる色 (Web版を参照) で示している. 線で表す分布は円盤・エンベロープ構造に沿ったダスト連続波の強度分布を表す. (b) 円盤・エンベロープ構造における有機分子分布と温度構造の模式図. 分子輝線分布が視線方向 (観測者から黒い矢印方向) にも同等であることを仮定している. 比較的高温な領域を赤, 比較的低温な領域を青で示している (Web版を参照). 図で示すように, 観測者は円盤・エンベロープ構造を真横から観測しているため, 見積もった温度は視線方向の温度構造の平均値である. 図は [30] から引用.

れる. 惑星系への進化, そして究極的には太陽系の起源を解明する上でも, 物理構造と同時に化学構造の理解は不可欠であり, アルマ望遠鏡の高感度・高分解能観測は今後も重要な成果を出し続けると期待される.

2021年12月に打ち上げられたJWST (James Webb Space Telescope) の観測成果も次々に報告されている [e.g., 46-50]. 若い低質量原始星にお

いて, アルマ望遠鏡では捉えることが難しい高温の物理構造に加え, ダスト表面の氷に存在する化学組成まで明らかになりつつある [51]. アルマ望遠鏡と合わせてこのような最先端の望遠鏡を活用することにより, 新たな発見が生まれ, 星と惑星系の起源についての我々の理解を大きく前進させるであろう.

謝辞

本稿の内容は, 筆者が発表した論文および筆者の博士論文に基づいています. 共著者および共同研究者の皆様に深く感謝いたします. 本研究は, アルマ望遠鏡による観測データに基づいています. アルマ望遠鏡はESO, NSF (USA), NINS (Japan) による協同プロジェクトであり, NRC (Canada), NSC, ASIAA (Taiwan) ならびチリ共和国の協力で成り立っています. Joint ALMA ObservatoryはESO, AUI/NRAO, NAOにより運営されています. 本研究にご尽力いただいたアルマ望遠鏡の関係者の方々に感謝の意を表します. 本研究は科学研究費基金 (25108005, 18H05222, 19H05069, 19K14753, 20J13783) および日仏交流促進事業 (SAKURAプログラム) より支援を受けています. また, 筆者はフォトンサイエンス・リーディング大学院 (Advanced Leading Graduate Course for Photon Science; ALPS), 日本学術振興会特別研究員制度, 理研基礎科学特別研究員制度の支援に感謝します. 最後になりますが, 本稿執筆の機会を与えてくださった廿日出文洋氏に感謝の意を表します.

参考文献

- [1] Xue, Y., et al., 2014, ApJ, 784, 66
- [2] Andrews, S. M., et al., 2018, ApJ, 869, L41
- [3] Tobin, J. J., et al., 2012, Nature, 492, 83
- [4] Murillo, N. M., et al., 2013, A&A, 560, A103
- [5] Yen, H.-W., et al., 2013, ApJ, 772, 22
- [6] Lindberg, J. E., et al., 2014, A&A, 566, A74
- [7] Ohashi, N., et al., 2014, ApJ, 796, 131
- [8] Sakai, N., et al., 2017, MNRAS, 467, L76

- [9] Sakai, N., et al., 2014a, ApJ, 791, L38
 [10] Sakai, N., et al., 2014b, Nature, 507, 78
 [11] Okoda, Y., et al., 2018, ApJ, 864, L25
 [12] Rygl, K. L. J., et al., 2013, A&A, 549, L1
 [13] Oya, Y., et al., 2014, ApJ, 795, 152
 [14] Yen, H.-W., et al., 2017, ApJ, 834, 178
 [15] Thieme, T. J., et al., 2023, ApJ, 958, 60
 [16] Kristensen, L. E., et al., 2012, A&A, 542, A8
 [17] Jørgensen, J. K., et al., 2013, ApJ, 779, L22
 [18] Bjerkeli, P., et al., 2016, A&A, 595, A39
 [19] Okoda, Y., et al., 2021a, ApJ, 910, 11
 [20] Mikami, H., et al., 1992, ApJ, 392, L87
 [21] Bachiller, R., & Pérez Gutiérrez, M., 1997, ApJ, 487, L93
 [22] Gusdorf, A., et al., 2015, A&A, 575, A98
 [23] Codella, C., et al., 1999, A&A, 343, 585
 [24] Gaudel, M., et al., 2020, A&A, 637, A92
 [25] Sai, J. I. C., et al., 2023, ApJ, 944, 222
 [26] Sai, J. I. C., et al., in prep
 [27] Sato, A., et al., 2023, ApJ, 958, 102
 [28] Hirano, S., et al., 2020, ApJ, 898, 118
 [29] Evans, I., Neal J., et al., 2023, ApJ, 943, 90
 [30] Okoda, Y., et al., 2022, ApJ, 935, 136
 [31] Imai, M., et al., 2016, ApJ, 830, L37
 [32] Jørgensen, J. K., et al., 2016, A&A, 595, A117
 [33] Oya, Y., et al., 2017, ApJ, 837, 174
 [34] Csengeri, T., et al., 2019, A&A, 632, A57
 [35] Okoda, Y., et al., 2021b, ApJ, 923, 168
 [36] Tychoniec, L., et al., 2021, A&A, 655, A65
 [37] Chahine, L., et al., 2022, A&A, 657, A78
 [38] Lee, C.-F., et al., 2022, ApJ, 937, 10
 [39] Herbst, E., & van Dishoeck, E. F., 2009, ARA&A, 47, 427
 [40] Ceccarelli, C., et al., 2023, Astron. Soc. Pacific Conf. Ser., 534, 379
 [41] Aikawa, Y., et al., 2020, ApJ, 897, 110
 [42] Garrod, R. T., et al., 2022, ApJS, 259, 1
 [43] Nazari, P., et al., 2022, A&A, 668, A109
 [44] Watson, D. M., 2020, Research Notes of the American Astronomical Society, 4, 88
 [45] Oya, Y., & Yamamoto, S., 2020, ApJ, 904, 185
 [46] Beuther, H., et al., 2023, A&A, 673, A121
 [47] Federman, S., et al., 2023, arXiv e-prints, arXiv:2310.03803
 [48] Harsono, D., et al., 2023, ApJ, 951, L32
 [49] Narang, M., et al., 2023, arXiv e-prints, arXiv:2310.14061
 [50] Ray, T. P., et al., 2023, Nature, 622, 48
 [51] Yang, Y.-L., et al., 2022, ApJ, 941, L13

ALMA's Revelations: Dynamic Structures at the Beginning of Low-Mass Star Formation

Yuki OKODA

RIKEN Cluster for Pioneering Research, Wako-shi, Saitama 351-0106, Japan

Abstract: It is now feasible to observe low-mass protostellar sources as young as a few 1000 yrs after birth. High-sensitivity and high-resolution observations with ALMA lead to a continuous stream of new discoveries, inspiring a feeling of curiosity. We find that disk structure is already formed at the early stage, that another outflow was ejected toward a direction significantly different from the current outflow direction, and that the temperature in the outside disk/envelope system increases. These observational results suggest that a protostar starts to form from the nonuniform parent core with turbulent motion. In short, these findings reveal that protostars in their earliest stages are more dynamic and unstable than previously expected. Exploring the earliest stage is essential for understanding the later evolution, the diversity in star formation, and the Solar System.