

令和元年6月4日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05303

研究課題名(和文) 電波および近赤外線によるおおかみ座の超高分解能観測による連星形成過程の解明

研究課題名(英文) Binary formation in Lupus Molecular Clouds with high resolution NIR and Radio observations

研究代表者

齋藤 正雄 (Saito, Masao)

国立天文台・TMT推進室・教授

研究者番号：90353424

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：太陽のような星がどのくらいの頻度で連星として生まれるかを調べるために、おおかみ座星形成領域の誕生直後の若い星の連星探査観測を南米チリにあるアルマ望遠鏡で行った。37個の天体を観測したが、若い連星候補天体は1個しか見つからなかった。これは他の星形成領域と比べて極めて少なく、特異な環境にあることを示唆する。探査した天体の中には固体微粒子でトレースできる星周物質が2本の渦状腕のような構造を示していた。この天体のガスの運動は主として回転であるが、落下が噴き出しもありそうで、2本の渦状腕の生成と関連がありそうである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

私たちの太陽は現在単独星であるが、近傍の星を調べると多くの星は連星となっている。そこで、単独星と連星を決めるメカニズムを知ることは宇宙における単独星の誕生およびその周囲の惑星形成の理解につながる。生命の発生進化は多くの場合単独星で起こると考えられるので、本研究は宇宙における生命を育む惑星がどのようにできたかという理解へつながるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：We carried out an unbiased study with ALMA to investigate the binary properties at the early phase in Lupus molecular clouds and binary formation, a major mode of star formation in most nearby star forming regions. Surprisingly, our results indicate that the binary population in the early stages is very low and only one protobinary candidate was identified. It could be due to specific environment of this star forming region. Further, we found an interesting object that shows extended emission in continuum and the emission distribution appears to show two arms or spiral structure. We also detected molecular line emission toward this source having a velocity gradient roughly along the major axis of the continuum disk presumably suggestive of a rotating disk. Its kinematics is not simple Keplerian and infall or outflowing motion is suggested, which may explain the spiral structure.

研究分野：電波天文学

キーワード：電波天文学 星形成 連星

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

太陽のような星はどのように生まれたのだろうかというのは天文学でも非常に重要なテーマである。広視野の近赤外線カメラが利用できるようになり始まった近傍星形成領域の系統的な連星探査により、若い星の大部分は連星として誕生することがわかってきた。しかしながら、現在に至るまでわれわれの連星形成の理解はまだ稚拙なレベルである。例えば、原始星段階ではどのくらいの星が連星（原始連星）なのか、原始星連星の間隔はどのくらいかなど観測的にほとんど検証されていなかった。その理由として過去の原始連星の空間分解能は典型的に 100 AU 程度と連星のピーク間隔（40 AU）のものを分解できていない。まさに、形成初期段階における連星の高分解能探査観測が強く望まれていた。併せて、若い星の星周構造には円盤、リング、スパイラル構造など多様性が見つかったが、その多様性の原因はまだ分かっていなかった。

2. 研究の目的

本研究はアルマ望遠鏡によるおおかみ座の原始星の 0.3 秒角以上の超高空間分解能連星探査観測から 1) 原始星段階での連星の割合、距離分布を求め、2) アルマ望遠鏡の詳細観測にて星周物質の分布および運動から、原始（連）星円盤の向き、質量降着の仕方など形成メカニズムに重要なパラメータを求め、その形成過程の理解を深めるものである。

3. 研究の方法

最もよく研究されているおうし座と同じ最近傍で、同程度に活発な星形成活動を起こしているおおかみ座星形成領域に着目した。これまでに系統的な研究が無かったため、研究代表者および研究協力者は過去の多波長のデータをコンパイルし、おおかみ座の若い星をカタログ化することに成功し、バイアス無く原始星を同定できた（参考文献 1）。おおかみ座は超高空間分解能観測が可能なアルマ望遠鏡から好条件で観測できる天空に位置しているという利点もある。ただし、北半球から観測が難しいこともあり、原始星の観測的研究は遅れていた。そこで、研究代表者はおおかみ座の全原始星についてアルマ望遠鏡を使った原始連星探査観測を実施した。なお、空間分解能はこの手の観測では当時最も良い 30-40 AU 程度であり連星のピーク間隔であれば分解できるものに設定した（参考文献 1）

4. 研究成果

1) 観測データの連続波データおよび分子輝線データの解析を進めた。連続波データから 37 天体中 1 天体が原始連星候補天体であり、他領域と比べても極めて原始連星の割合が低いという結果になった（図 1 左）。唯一の原始連星候補天体の連星の距離は 90 AU 程度でピーク間隔より広いものであった。この連星が少ないというのは予想外の結果で、星形成初期の分子雲コアの角運動量分布による可能性が考えられる。おおかみ座はすぐ近くの超新星爆発によって星形成が誘発されたと考えられるため、環境がおうし座など他の星形成領域と違う可能性もある。

2) 原始星候補天体の 1 つ J160115-415235 に付随する星周円盤からの連続波を検出した。この星周円盤の構造は軸対称ではなく、渦状腕のような構造が付随していることがわかった（図 1 右）。原始星候補天体の段階では連星を除き渦状腕はほとんど見出されておらず、興味深い天体ということがわかった。この天体は単独星と考えられるので、星周円盤が重く重力不安定性を起こして渦状腕が生成された可能性が高いが、下記に述べる中心星の質量および観測から求めた星周円盤質量はこのシナリオとは整合していないため、星周円盤が通常とは違う性質を持つ可能性が示唆される。

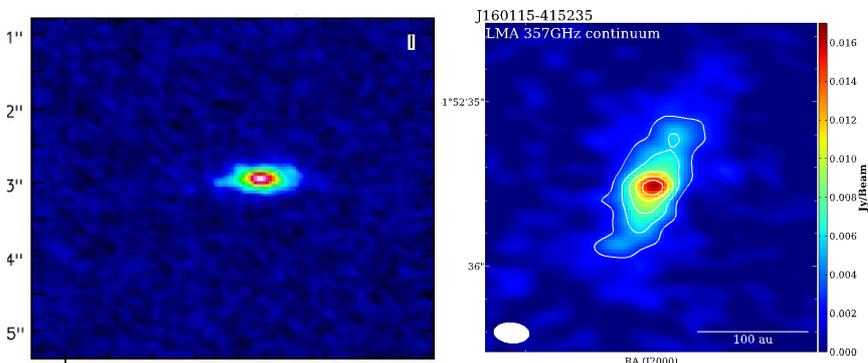


図 1: アルマ望遠鏡による 0.8 mm 連続波マップ左) 原始連星候補天体、東側に突き出ている部分が連星候補、右) J160115-415235

3) J160115-415235 から検出した CO(J=3-2)は複雑な力学構造を持ち、原始星候補天体を中心に回転しているようなガス円盤および中心星から離れた場所に位置し、重力的束縛をしていない成分を持つことがわかった。一方、同時に観測した HCO⁺(J=4-3)は濃いガスのみをトレースするため、中心星に付随した成分のみ検出できた。この成分は星の周りを回転しており、ケプラー回転と仮定すると中心星の質量が下限値として太陽の 1/10 程度と軽いことを突き止めた

(参考文献2) ただし、この場合星周構造が重力不安定性を起こして渦状腕が生成するには星周物質が1/100太陽質量以上の質量を持つ必要があるが、通常のダストの性質を仮定すると、星周物質はずっと軽い。したがってこの星周物質に含まれるダストの性質が通常と違うか、ダストとガスの重量比が違うかが示唆される。

4) 若い星には数十年にわたって明るくなるFU Oriタイプと数年明るくなるEX Oriタイプがあるが、この両者の関係は良くわかっていなかった。そこでおおかみ座のEX Oriタイプ星Ex Lupも同様にアルマ望遠鏡による高分解能観測を実施した。その結果ケプラー回転するような星周ガス円盤に加えて、非ケプラー回転成分を見出した。これらの成分はおそらく系から噴き出す分子流に付随したガスである。FU Oriタイプ星も類似構造があることから、FU OriとEX Oriタイプ星は密接な関係があることを突き止めた(参考文献3)。

参考文献

- 1) Saito, M. et al. (2015), in "Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year", in ASP Conference Series, Vol 499, 215
- 2) Saito Masao (2019), High Resolution ALMA Image of Young Stellar Objects in Lupus, American Astronomical Society, Seattle, USA
- 3) Hales, A. et al. (2018) The Circumstellar Disk and Asymmetric Outflow of the EX Lup Outburst System, Ap. J. 859, id.11

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 10 件)

研究代表者および研究分担者には下線

1) Takakuwa, Shigehisa, Tsukamoto, Yusuke, Saigo, Kazuya, Saito, Masao, Possible Counterrotation between the Disk and Protostellar Envelope around the Class I Protostar IRAS 04169+2702, Ap. J. 査読あり、865 巻、2018, id. 51
DOI: 10.3847/1538-4357/aadb93

2) Hales, Antonio. S., Pérez, Sebastián., Saito, Masao, et al. The Circumstellar Disk and Asymmetric Outflow of the EX Lup Outburst System, Ap. J. 査読あり、859 巻、2018, id.111
DOI: 10.3847/1538-4357/aac018

3) Aso, Yusuke, Ohashi, Nagayoshi, Aikawa, Yuri, Machida, Masahiro N., Saigo, Kazuya, Saito, Masao, et al. ALMA Observations of SMM11 Reveal an Extremely Young Protostar in Serpens Main Cluster, Ap. J. 査読あり、850 巻、2017、id. L2
DOI: 10.3847/2041-8213/aa9701

4) Tokuda, Kazuki, Onishi, Toshikazu, Saigo, Kazuya, et al. A Detached Protostellar Disk around a $\sim 0.2 M_{\odot}$ Protostar in a Possible Site of a Multiple Star Formation in a Dynamical Environment in Taurus, Ap. J. 査読あり、849 巻、2017、id. 101
DOI: 10.3847/1538-4357/aa8e9e

5) Aso, Yusuke, Ohashi, Nagayoshi, Aikawa, Yuri, Machida, Masahiro N., Saigo, Kazuya, Saito, Masao, et al. ALMA Observations of the Protostar L1527 IRS: Probing Details of the Disk and the Envelope Structures, Ap, J. 査読あり、849 巻、2017、id. 56
DOI: 10.3847/1538-4357/aa8264

6) Yen, Hsi-Wei, Takakuwa, Shigehisa, Chu, You-Hua, Hirano, Naomi, Ho, Paul T. P., Kanagawa, Kazuhiro D., Lee, Chin-Fei, Liu, Hanyu Baobab, Liu, Sheng-Yuan, Matsumoto, Tomoaki, Matsushita, Satoki, Muto, Takayuki, Saigo, Kazuya, Tang, Ya-Wen, Trejo, Alfonso, Wu, Chun-Ju, 1000 au exterior arcs connected to the protoplanetary disk around HL Tauri, A&A. 査読あり、608 巻、2017, id.A134
DOI: 10.1051/0004-6361/201730894

7) Takakuwa, Shigehisa, Saigo, Kazuya, Matsumoto, Tomoaki, Saito, Masao et al. Spiral Arms, Infall, and Misalignment of the Circumbinary Disk from the Circumstellar Disks in the Protostellar Binary System L1551 NE, Ap. J. 査読あり、837 巻、2017, id. 86
DOI: 10.3847/1538-4357/aa6116

8) Saigo Kazuya, Onishi Toshikazu, Nayak Omnarayani et al. Kinematic Structure of Molecular Gas around High-mass YSO, Papillon Nebula, in N159 East in the Large Magellanic Cloud: A New Perspective with ALMA, Ap, J. 査読あり、835 巻、2017、p108-118

DOI: 10.3847/1538-4357/835/1/108

9) Lim, Jeremy, Hanawa, Tomoyuki, Yeung, Paul K. H., Takakuwa, Shigehisa, Matsumoto, Tomoaki, Saigo, Kazuya, Formation of the Unequal-mass Binary Protostars in L1551NE by Rotationally driven Fragmentation, Ap. J. 査読あり、831 巻、2016、id. 90
DOI: 10.3847/0004-637X/831/1/90

10) Lim, Jeremy, Yeung, Paul K. H., Hanawa, Tomoyuki, Takakuwa, Shigehisa, Matsumoto, Tomoaki, Saigo, Kazuya, Rotationally driven Fragmentation in the Formation of the Binary Protostellar System L1551 IRS 5, Ap. J. 査読あり、826 巻、2016、id. 153
DOI: 10.3847/0004-637X/826/2/153

〔学会発表〕(計 6 件)

- 1) Saito Masao, High Resolution ALMA Image of Young Stellar Objects in Lupus, 2019, American Astronomical Society, Seattle, USA
- 2) Saigo Kazuya et al. Misaligned Circumbinary Keplerian Disks around the Protobinary B59 BHB11, 2019, American Astronomical Society, Seattle, USA
- 3) 齋藤 正雄, High Resolution ALMA Images of Young Stellar Objects in Lupus from the SOLA project, 2018、日本天文学会春季年会
- 4) 西合一矢, Barnard59 に付随する原始星連星系 BHB11、2018、日本天文学会春季年会
- 5) Saito Masao, Multiplicity At Early Stages Of Star Formation, Small Clusters. Observations Overview, 2017, “ Multiplicity At Early Stages Of Star Formation, Small Clusters. Observations Overview ”, Santiago, Chile
- 6) 西合一矢, JVLA による原始星 VLA1623 の 0.1 秒高分解能観測、2016、日本天文学会秋年会、愛媛大学

〔図書〕(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

Soul of Lupus with ALMA (SOLA)

<https://wikis.alma.cl/bin/view/Main/JAOSF>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：西合 一矢

ローマ字氏名：Saigo Kazuya

所属研究機関名：国立天文台

部局名：アルマプロジェクト

職名：特任助教

研究者番号(8桁): 30399290

(2)研究協力者

研究協力者氏名：de Gregorio-Monsalvo Itziar

ローマ字氏名：de Gregorio-Monsalvo Itziar

研究協力者氏名：Plunkett Adele

ローマ字氏名：Plunkett Adele

研究協力者氏名：Muzic Koraljka

ローマ字氏名：Muzic Koraljka

研究協力者氏名：Grellmann Rebekka

ローマ字氏名：Grellmann Rebekka

研究協力者氏名：高橋智子

ローマ字氏名：Takahashi Satoko

研究協力者氏名：Hales Antonio

ローマ字氏名：Hales Antonio

研究協力者氏名：Lopez Christian

ローマ字氏名：Lopez Christian

研究協力者氏名：Knee Lewis

ローマ字氏名：Knee Lewis

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。