

平成 30 年 6 月 23 日現在

機関番号：17701

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07086

研究課題名(和文) ALMA望遠鏡による連星の形成過程の解明

研究課題名(英文) ALMA Study of Binary Star Formation

研究代表者

高桑 繁久 (TAKAKUWA, Shigehisa)

鹿児島大学・理工学域理学系・教授

研究者番号：50777555

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：ふたつの星が互いの周りをまわっている双子の星「連星」がどのように形成されているのかを調べるため、究極のミリ波サブミリ波電波望遠鏡ALMAを用いて、「原始星連星」周囲の分子ガスと固体微粒子の円盤「周連星系円盤」の詳細観測を行った。原始星連星L1551 NEの観測では、周連星系円盤が2つの腕状の構造からなり、原始星連星に物質を供給していることがわかった。一方、別の原始星連星L1551 IRS 5の観測では、周連星系円盤の腕状の構造は見られなかった。これは連星の質量比や周連星系円盤の半径によって、周連星系円盤からの物質供給が異なっていることを示している。

研究成果の概要(英文)：To understand how twin stars orbiting around each other, binaries, form, we have performed Atacama Large Millimeter / submillimeter Array (ALMA) observations of circumbinary disks of molecular gas and dusts in protostellar binaries. We found that in the protostellar binary L1551 NE the circumbinary disk consists of two-arm features, and the materials in the circumbinary disk is being accreted onto the protostellar binary. ALMA observations of another protostellar binary, L1551 IRS 5, on the other hand, do not reveal such arm-like structures in the circumbinary disk. These results imply that mass accretion onto the protostellar binary should depend on the binary mass ratio and the centrifugal radii of the circumbinary disk.

研究分野：電波天文学

キーワード：連星系形成 ALMA望遠鏡

1. 研究開始当初の背景

星間空間に存在する分子ガスと固体微粒子「ダスト」からなる雲「星間分子雲」は、新たな星が形成される現場であることが知られている。実際、太陽のような単一の星については、これまでの観測、理論両面の研究によりその形成過程の概略が明らかになってきている。すなわち、星間分子雲中に高密度(水素分子のガス密度にして 10^5 cm^{-3} 以上)のガスの塊「分子雲コア」が形成され、この分子雲コアが重力収縮を起こして中心に新たな星「原始星」を生むというものである(e. g., Shu et al. 1987, ARA&A, 25, 23)。

一方、近年の赤外線や電波による観測から、原始星から成人の星「主系列星」に至るまで太陽質量程度の星の過半数は、ふたつの星が互いの周りをまわっている双子の星「連星」であることがわかってきている(Raghavan et al. 2010, ApJS, 190, 1)。したがって星形成をより系統的に理解するためには、単一の星の形成過程のみならず連星の形成過程を理解することが必須である。理論的には、回転している分子雲コアが遠心力の働きにより潰れたお饅頭のような構造となり、それがさらに分裂して連星系の元を作り出すと考えられている(Nakamura et al. 2003, ApJ, 594, 363)。その結果、双子の赤ちゃん星「原始星連星」とそれを取り巻くガス円盤「周連星系円盤」ができることになる。

2. 研究の目的

そこで本研究では、いくつかの原始星連星について周連星系円盤の観測を行い、その構造、運動の詳細を調べる。それにより、周連星系円盤の物質がどのように原始星連星に降り積もり、連星の質量や質量比を決めているのかを調べることを目的とする。

3. 研究の方法

本稼働を始めたばかりの究極のミリ波サブミリ波電波望遠鏡、アタカマ大型ミリ波サブミリ波望遠鏡(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array: ALMA)を用いて、これまでにない空間分解能、感度で原始星連星の観測を行う。このためにALMAの観測提案書「プロポーザル」を毎年4月下旬に提出し、厳しい国際審査を通過させて採択させる必要がある。同時にALMAによって既に観測された既存のデータ「アーカイブデータ」の検索も行い、原始星連星、周連星系円盤の画像を作成「イメージング」していく。

さらに国内の理論天文学者との共同研究の下、周連星系円盤の構造、運動の数値シミュレーションも行う。円盤の半径、連星の質量比や軌道長半径といった物理パラメータが異なった周連星系円盤の数値シミュレーションを行い、実際にALMAで観測された結果と比較することにより、周連星系円盤の物質がどのように原始星連星に降り積もり、連星の質量、質量比を決めているのかを調べていく。

4. 研究成果

(1) 原始星連星 L1551 NE の周連星系円盤の渦巻構造と質量降着(雑誌論文 5, 9; 学会発表 4, 6)

ALMA 観測により 0.2 秒角 (=30 天文単位に相当) をきる空間分解能で、原始星連星 L1551 NE のイメージを得た。観測データにはダストから放射される連続的な電波「ダスト連続波」(波長 0.9 mm)、および C^{18}O 分子からの電波放射「分子輝線」のデータが含まれている。我々のグループはこれまでもサブミリ波干渉計「SMA」、および ALMA の初期観測により L1551 NE の観測を行ってきたが、今回は ALMA のフルスペックでの観測であったため、これまでより 4 倍高い空間分解能でのイメージを得ることができた。その結果、L1551 NE の周連星系円盤の構造、運動の詳細を調べることができるようになった。

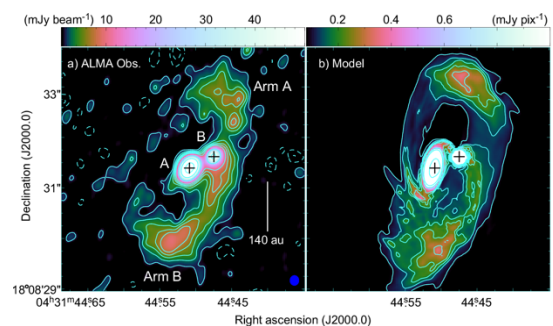


図1: ALMA 観測により得られた、原始星連星 L1551 NE の 0.9 mm ダスト連続波のイメージ(左)、及び数値シミュレーションのイメージ(右)。十字は原始星の位置を表す。

図1(左)に 0.9 mm ダスト連続波の観測結果を示す。中心のふたつ目玉の構造は、L1551 NE の連星系を構成するふたつの原始星の各々に付随する星周円盤の構造である(図中に示すように、それぞれの原始星を Source A、Source B と呼ぶ)。そしてそれら全体を大きく取り囲む半径 300 天文単位程度の周連星系円盤の構造が見られることがわかる。周連星系円盤はふたつの腕状の構造からなっている。一つは北西側に位置する構造(これを Arm A と呼ぶ)で、もう一つは南東側の構造(Arm B)である。Arm B は Source B 周囲の円盤と直接繋がっている。さらにこのふたつの腕は全体として西側に偏って分布しており、東側ではほとんど見られないことがわかる。これは、渦巻銀河などでよくみられる点対称の二つの腕状の構造($m=2$ のモード)とは違って、非点対称な渦巻きの構造、 $m=1$ のモードが存在していることを示している。

図2に C^{18}O 分子輝線の観測結果を示す。分子輝線はその「静止周波数」が決まっているので、実際に観測された周波数と静止周波数を比較しドップラー効果を適応することにより、視線方向の分子ガスの運動を調べることができる。このようにして分子ガスの視線速度ごとの分布を描いたものが図2である。図

中で青のコントラストは、青方遷移、すなわち我々に向かって運動しているガスの分布を示し、赤のコントラストは我々から遠ざかる運動、赤方遷移をしているガスの分布を示す。高速度成分(図2a)では、Source Aに付随する星周円盤のガスの回転運動がみられることがわかる。一方中速度成分では、Source Aの星周円盤と腕状の周連星系円盤を繋ぐようなガスの速度成分が見られる。これは周連星系円盤からSource Aの星周円盤へ向かって落ち込んでいるガス成分を表している。すなわちSource Aが周連星系円盤から物質を取り込み成長している過程をみているのである。一方低速度成分では、周連星系円盤の腕状構造に付随するガスの回転成分がみえている。

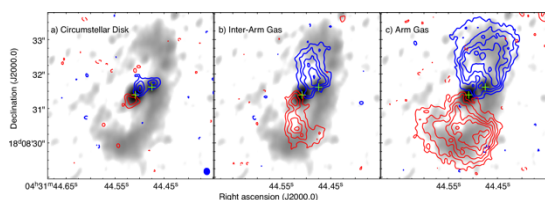


図2: C¹⁸O輝線でみた a)高速度、b)中速度、及びc)低速度での分子ガスの分布。青と赤のコントラストがそれぞれ青方遷移、赤方遷移した分子ガスの分布を表す。背景のグレースケールは0.9 mmダスト連続波のイメージ。

ALMAによって見出されたこのような周連星系円盤の構造、運動の物理的起源を明らかにするため、我々は国立天文台のスーパーコンピュータ ATERUI を用いた数値シミュレーションを行った。図1(右)に示す数値シミュレーションによるダスト連続波のイメージは、ふたつの腕、Source Bに繋がるArm Bの構造、さらにはm=1モードまでをよく再現している。同時に我々の数値シミュレーションは、Source Aに物質が落ち込んでいく様子も示している。

このように、我々のALMAの詳細観測及び数値シミュレーションは、原始星連星L1551 NEが周連星系円盤から物質を取り込み成長している過程を捉えている。

(2)原始星連星L1551 IRS 5周囲の周連星系円盤とL1551 NEとの相違(雑誌論文5, 9, 10; 学会発表4, 6)

上記(1)の結果を受け、L1551 NEとは連星の質量比、軌道長半径、及び周連星系円盤の半径が異なった原始星連星L1551 IRS 5のALMA観測プロポーザルを提出した(表1参照)。このプロポーザルは本科研費研究期間の間2回採択された。しかし、実際の観測の機会になかなか恵まれず、観測が終了してデータが配信されたのは本科研費研究期間終了の2週間前であった。それまでの間、以前に観測されたL1551 IRS 5のALMAアーカイブデータの解析を進めた。

表1:原始星連星の性質の違い

原始星連星	質量比	軌道長半径	周連星系円盤の半径
L1551 NE	0.2	145 au	300 au
L1551 IRS 5	1	53 au	60 au

図3に0.9 mmダスト連続波のアーカイブデータのイメージを示す。図1のL1551 NEのイメージと比べてわかることは、L1551 IRS 5においてはL1551 NEで見られたような腕状の構造がみられないことである。さらに連星の個々の星に付随する星周円盤と周連星系円盤の区別も、L1551 NEの場合のようにはっきりしない。

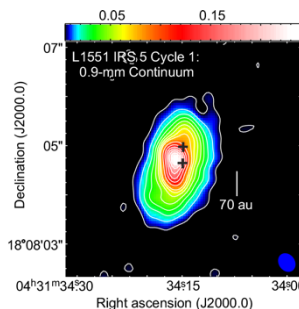


図3: L1551 IRS 5の0.9-mmダスト連続波のイメージ。

我々はL1551 IRS 5の場合についても数値シミュレーションを行い、連星の質量比が1のL1551 IRS 5の場合においては、L1551 NEで見られるようなふたつの腕状の構造は見られず、細かい多くの羽根状の構造になっている可能性を予見することができた。今後、配信された最新のALMAデータの解析、イメージングを進めていき、連星系の違いによって周連星系円盤の構造、運動、そして連星系の成長過程がどのように異なっているのかを調べていく。

(3)星周円盤と周囲の分子ガスの逆回転(学会発表1, 5, 7)

本科研費研究の一環として、赤外線による観測から原始星連星の一つと考えられていたIRAS 04169+2702(以降I04169)のSMAのデータ解析を行った。その結果、I04169では一つの星周円盤しか見られず、単一の星であることがわかった。しかしさらにガスの運動を詳細に調べてみたところ、半径200天文単位程度の星周円盤の回転の方向と、それより外側の半径1000天文単位程度の分子ガスの構造「エンベロープ」の回転の方向が真逆になっている可能性が示された。

このような、ある半径で回転の方向が反転するガスの運動は、単純な重力によるものでは説明がつかない。最も有力な解釈の一つは、ガスの運動に磁場の力が働いているというものである。原始星の周囲で円盤が形成される過程において、磁場が大きな役割を果たしていることは理論的には予言されていた。しかし観測的に、実際に磁場の効果によるガスの運動を同定することはできていなかった。回

転方向の反転は観測的に同定しやすく、かつ最も直接的な磁場の効果の証拠と考えることができる。

この結果は、当初予定していた科研費研究の内容とは異なったものであるが、本研究により得た非常に面白い副産物である。現在、論文は審査員とのやり取りの最終段階に入っている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① Koch Patrick M., Tang Ya-Wen, Ho Paul T. P., Yen Hsi-Wei, Su Yu-Nung, Takakuwa Shigehisa, “Polarization Properties and Magnetic Field Structures in the High-mass Star-forming Region W51 Observed with ALMA”, *The Astrophysical Journal*, Vol. 855, 39, 19pp, 2018, 10.3847/1538-4357/aaa4c1 (査読有)
- ② Yen Hsi-Wei, Takakuwa Shigehisa, Chu You-Hua, Hirano Naomi, Ho Paul T. P., Kanagawa Kazuhiro D., Lee Chin-Fei, Liu Haiyu 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”, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 608, A134, 18pp, 2017, 10.1051/0004-6361/201730894 (査読有)
- ③ Aso Yusuke, Ohashi Nagayoshi, Aikawa Yuri, Machida Masahiro N., Saigo Kazuya, Saito Masao, Takakuwa Shigehisa, Tomida Kengo, Tomisaka Kohji, Yen Hsi-Wei, Williams Jonathan P., “ALMA Observations of SMM11 Reveal an Extremely Young Protostar in Serpens Main Cluster”, *The Astrophysical Journal Letters*, Vol. 850, L2, 6pp, 2017, 10.3847/2041-8213/aa9701 (査読有)
- ④ Aso Yusuke, Ohashi Nagayoshi, Aikawa Yuri, Machida Masahiro N., Saigo Kazuya, Saito Masao, Takakuwa Shigehisa, Tomida Kengo, Tomisaka Kohji, Yen Hsi-Wei, “ALMA Observations of the Protostar L1527 IRS: Probing Details of the Disk and the Envelope Structures”, *The Astrophysical Journal*, Vol. 849, 56, 15pp, 2017, 10.3847/1538-4357/aa8264 (査読有)
- ⑤ Takakuwa Shigehisa, Saigo Kazuya, Matsumoto Tomoaki, Saito Masao, Lim Jeremy, Hanawa Tomoyuki, Yen Hsi-Wei, Ho, Paul T. P., “Spiral Arms, Infall, and Misalignment of the Circumbinary Disk from the Circumstellar Disks in the Protostellar Binary System L1551 NE”, *The Astrophysical Journal*, Vol. 837, 86, 14pp, 2017, 10.3847/1538-4357/aa6116 (査読有)
- ⑥ Yen Hsi-Wei, Koch Patrick M., Takakuwa Shigehisa, Krasnopolsky Ruben, Ohashi Nagayoshi, Aso Yusuke, “Signs of Early-stage Disk Growth Revealed with ALMA”, *The Astrophysical Journal*, Vol. 834, 178, 23pp, 2017, 10.3847/1538-4357/834/2/178 (査読有)
- ⑦ Leung Gigi Y. C., Lim Jeremy, Takakuwa Shigehisa, “Tracing Infall and Rotation along the Outflow Cavity Walls of the L483 Protostellar Envelope”, *The Astrophysical Journal*, Vol. 833, 55, 19pp, 2016, 10.3847/1538-4357/833/1/55 (査読有)
- ⑧ Yen Hsi-Wei, Koch Patrick M., Liu Haiyu Baobab, Puspitaningrum Evaria, Hirano Naomi, Lee Chin-Fei, Takakuwa Shigehisa, “Stacking Spectra in Protoplanetary Disks: Detecting Intensity Profiles from Hidden Molecular Lines in HD 163296”, *The Astrophysical Journal*, Vol. 832, 204, 9pp, 2016, 10.3847/0004-637X/832/2/204 (査読有)
- 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”, *The Astrophysical Journal*, Vol. 831, 90, 13pp, 2016, 10.3847/0004-637X/831/1/90 (査読有)
- 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”, *The Astrophysical Journal*, Vol. 826, 153, (査読有)

20pp, 2016, 10.3847/0004-637X/826/2/153 (査読有)

- ⑪ Yen Hsi-Wei, Liu Haiyu Baobab, Gu Pin-Gao, Hirano Naomi, Lee Chin-Fei, Puspitaningrum Evaria, Takakuwa Shigehisa, “Gas Gaps in the Protoplanetary Disk around the Young Protostar HL Tau”, The Astrophysical Journal Letters, 820, L25, 7pp, 2016, 10.3847/2041-8205/820/2/L25 (査読有)

[学会発表] (計 8 件)

- ① Shigehisa Takakuwa, “ALMA Verification of Counter-rotating Protostellar Envelopes”, Star Formation with ALMA: Evolution from Dense Cores to Protostar, 2018 (招待講演、国際学会)
- ② 高桑 繁久、「ALMAによるHL Tauの最新の観測結果」、電波天文学によるサイエンスの到達点と未来を俯瞰する、2017年
- ③ Shigehisa Takakuwa, “CASA Users Committee Report”, ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2017 (招待講演、国際学会)
- ④ 高桑 繁久「天の川銀河における連星形成の多様性」、天の川銀河研究会 2017
- ⑤ 高桑 繁久 「Counter-rotating, Infalling Envelope around the central Keplerian Disk in IRAS 04169+2702」、京都大学基研研究会 原始惑星系円盤、2017年 (招待講演)
- ⑥ Shigehisa Takakuwa, “ALMA Study of the Protostellar Binary System L1551 NE; Spiral Arms, Infall, and Misalignment of the Circumbinary Disk from the Circumstellar Disks”, 2017 Asia-Pacific Regional IAU Meeting (国際学会)
- ⑦ Shigehisa Takakuwa, “Counter Rotation between the Disk and Envelope around IRAS 04169+2702”, East-Asian ALMA Science Workshop (国際学会), 2017
- ⑧ Shigehisa Takakuwa, “Torsionally-Excited CH₃OH Line as a Direct Tracer of the First Core with the ALMA Band 1 Observation”, ALMA Band 1 Science Workshop, 2017 (招待講演、国際学会)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高桑 繁久 (TAKAKUWA, Shigehisa)

鹿児島大学・理工学域理学系・教授

研究者番号：50777555