

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14244

研究課題名(和文) 高解像度・高感度サブミリ波観測で探る惑星形成領域の詳細構造

研究課題名(英文) Investigation of detailed structures in the planet-forming region by high-resolution and high-sensitivity submillimeter observations

研究代表者

塚越 崇 (Tsukagoshi, Takashi)

国立天文台・科学研究部・特任助教

研究者番号：20533566

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：惑星系形成過程の解明を目指し、形成中の惑星が期待される若い星TW Hyaが持つ原始惑星系円盤に対し、ALMA望遠鏡を用いた高解像度・高感度観測を行ってきた。円盤ダスト放射に対する多波長観測やミリ波偏光観測、分子スペクトル観測による円盤ガス成分の観測を通して、多角的な視点から円盤構造を調べ上げた。惑星形成に付随すると思われる、局所的なダスト集積の直接検出に世界で初めて成功するとともに、TW Hyaの円盤の複数の新しい描像を得るに至っている。また新しい画像合成法の開発・検証も行い、円盤データへの応用も進めてきた。着目度の高い研究成果についてはプレスリリース等を通じて広く社会に発信も行ってきた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界最先端装置の一つであるALMA望遠鏡を用いて、惑星系形成の母体である原始惑星系円盤の最も精巧な電波画像の取得に成功しており、複雑な円盤構造のテンプレートの一つとなっている。円盤内に局所的なダスト集積の証拠を初めて見出すなど惑星進化の新しい描像をもたらしており、社会的にも意義のある発見であることからプレスリリース等を通じて広く社会に発信を行なった。また、従来の円盤質量見積りの方を塗り替える結果など、今後の研究の発展に繋がる多くの成果を残している。さらに、電波望遠鏡データの新しい画像合成法の開発検証も行っており、将来の望遠鏡計画も含めて大きな波及効果が期待できる。

研究成果の概要(英文)：To reveal the formation process of planets, we have conducted high-resolution and high-sensitivity observations for a protoplanetary disk around TW Hya, one of the promising objects harboring young planets, using Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA). The detailed structures of the dust and gas in the disk have been investigated based on multi-wavelength, polarization, and molecular line observations. Several new insights of the disk structure have been highlighted including the first detection of a localized dust accumulation in the disk, which is likely responsible for the planet formation process. Moreover, a new imaging technique for radio interferometers has been developed and been verified based on the application to the actual ALMA data of protoplanetary disks.

研究分野：電波天文学

キーワード：電波天文学 原始惑星系円盤 惑星系形成

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

惑星系形成過程を解明する上で重要となるのは、その母体となる原始惑星系円盤の構造と進化を明らかにすることである。原始惑星系円盤は 10K ほどの冷たいガスと固体微粒子(ダスト)からなり、若い星の周りに遍在しているが、円盤内でどのように惑星が形成されているのかについては未だ謎に包まれている。円盤内における惑星形成の発端は、初期サイズ $1\mu\text{m}$ 以下のダストの合体成長や、それらの赤道面への沈殿の過程である。これらは円盤進化においてガスとダストを切り分ける重要な素過程であり、それに伴って円盤構造の多様性を生み出す。このような円盤ガスおよびダストの分布の多様性は、近年発見されている多様性に富む系外惑星系の要因になると考えられている。それゆえ、ダストとガスの分離過程に伴った**実際の円盤構造の変化を観測的に明らかにする事が重要**である。

円盤構造を調べる観測で主軸となっていたのは、近赤外線による高解像度観測であり、0.1 秒角(10-20au)を切る高解像度により、円盤内側の穴構造やギャップ構造といった複雑な円盤構造を明らかにしてきた。しかしながら、赤外線では円盤の密度や温度といった物理量を直接導出できないという問題があり、**電波を用いた高分解能観測が必要**とされていた。

そのような背景のもと、**若い星 TWHya に対する大型望遠鏡 ALMA を用いた観測研究を推進**してきた[1]。TWHya は円盤を保有する若い星の中で最も地球近傍にあり、円盤構造を詳細に調べるのに適した天体である。観測の結果、円盤ダスト成分に複数のギャップ構造を見出しており、内側のギャップでは、その幅と深さから海王星程度の惑星が存在していることが予言される。ミリ波のスペクトル指数からは、ギャップ内外のダストサイズが異なる様子が示唆されており、これは惑星によるダストギャップ形成の理論予想と矛盾しない結果となっている。一方、円盤ガス成分に対する観測では、複数の同位体分子が出す電波を観測し、円盤ガス成分の詳細な空間分布を明らかにしてきた。ダスト成分に対する観測の解像度より悪く、ギャップ成分に対応する構造は見えないものの、円盤内側でガスが減少している様子が見えつつある。これらはどちらも惑星形成に起因する構造と考えられ、円盤内における(原始)惑星の存在を強く示唆している。一方で、物理量の導出に様々な仮定を取り入れており、また解像度も不足していることから、**惑星起源を強く断定するには観測データは不十分**である。

参考文献

[1] Tsukagoshi, T. et al., 2016, *Astrophysical Journal Letters*, 829, 35

2. 研究の目的

ALMA を用いた観測研究をさらに発展させ、TWHya を取り巻く原始惑星系円盤のより精密な構造推定と物理量の測定を行う。円盤の物理構造を正確に評価するには、円盤ダストとガスを切り分けて観測することが重要であり、以下の目的を設定する。

- (1) これまでの観測研究をベースに新しい波長データを追加し、円盤ダスト成分の温度・密度構造およびダストサイズ分布を正確に解き、その物理構造を明確にする。
- (2) 円盤ガス成分の高解像度観測を行い、ガス成分の詳細構造を明らかにし、ダストで見られたようなギャップ構造の有無を明らかにする。
- (3) 上記で得られた観測データをベースに、放射輸送計算と疑似観測を用いて、円盤のダスト・ガス分布を包括的に記述する円盤モデルを構築し、円盤構造と惑星形成の関連を調査する。

さらに、新しい手法を用いた観測・データ解析を試み、それらを上記(1)~(3)へフィードバックさせることで、より堅実な物理量導出を行うことも目的とする。

- (4) 目的(1)で用いる、従来型の多波長観測によるスペクトル指数を用いた方法の他、近年提案されている電波偏光を用いた新しい手法を用いて、ダストサイズ分布の見積もりを堅実にする。
- (5) スパースモデリングを用いた超高解像度イメージ処理を行い、より円盤ギャップ内の惑星形成領域に迫る。

3. 研究の方法

本研究課題では、形成中の惑星が期待される原始惑星系円盤に対し、ALMA 望遠鏡を用いた様々な高解像度観測を行い、TWHya を取り巻く円盤構造を明らかにする。円盤のダストとガスの分布を独立な観測から明らかにし(研究計画 1,2)、両者を踏まえた放射輸送計算により円盤構造モデルを構築(研究計画 3)することで、円盤物理構造の包括的理解と、惑星形成と円盤構造の関係の解明を目指す。従来型の手法により早急な解析結果の導出を目指すほか、電波偏光によるダストサイズ測定(研究計画 4)や、疎性モデリングを応用した超高解像度イメージ合成(研究計画 5)等、新しい手法も取り入れる。これにより円盤物理量をより堅実に決定し、より惑星形成現場近傍での円盤構造についての観測的知見を蓄積するとともに、新しい解析手法の評価と応用についても取り組む。

4. 研究成果

(1) 高解像度・多波長観測による円盤ダスト成分の解明

円盤ダスト放射に対する観測研究では、ALMA 望遠鏡を用いた 2 周波観測により高感度かつ高い解像度での画像取得に成功した。そのうちの 1 周波数のデータでは、既存データの 3 倍以上という極めて高い感度が達成されており、それにより円盤内における 1au 程度の広がりを持つ局所的なミリ波超射を検出している(図 1)。円盤内におけるこのような微細構造は世界で初めての検出である。この微細構造は局所的にダストが集積している様子を示しており、微小なガス渦に囚われたダスト集積、もしくはすでに形成中の惑星に付随する周惑星円盤によるものであると考えられる。どちらも惑星系形成につながる重要な構造であり、切り分けのための今後の様々な観測に発展が期待できる。

多周波数データに対する解析では、アーカイブデータとなっている 1 周波数を追加し 3 周波数高分解能データを用いて、ミリ波スペクトル指数の詳細な動径方向分布を導出した。多くのデータを足し、さらにシミュレーションを用いて導出手法を吟味したことにより、非常に精度の良い分布の導出に成功している。得られたスペクトル指数の動径方向分布は、過去に見られていたギャップ構造に対応する局所的な増加が見られていたものの、その最大値はこれまでの見積りより小さく、やや平坦な動径方向分布が得られた(図 2)。これはギャップ近傍におけるダストサイズの変化が、これまでの見積りよりも均一であることを示している。一方、この推定では円盤温度分布を仮定することで物理量の縮退を解いており、より正確なダストサイズ分布の導出には追加の ALMA データを必要とする。どの周波数で取得するのが効率的か、実際の観測データをベースにした予想計算も行っており、今後より高い周波数(600~1000GHz)による ALMA 観測に繋げる考えである。

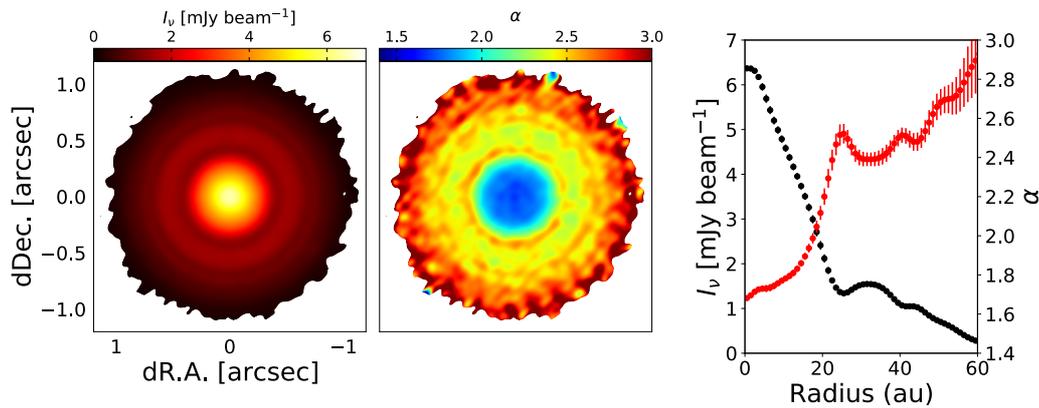


図 1 ALMA で取得した 3 周波数高分解能データにより作成した電波画像(左)と、ミリ波帯におけるスペクトルインデックス分布(中央)、およびそれらの動径方向分布(右)。

(2) 高解像度観測による円盤ガス成分の構造解明

分子スペクトル線による円盤ガス成分の観測では、ALMA 望遠鏡を用いた高感度観測を行い、一酸化炭素同位体分子をはじめ幾つかの分子の詳細な円盤内分布を明らかにした。およそ 10au を下回る解像度を達成しており、ガス円盤の分布を詳しく調べる観測において最も高い解像度である。観測の結果、ダスト円盤に見られる微細構造に対応したガス分布の変化が明らかになった。ダストギャップに対応するガスギャップ構造が見られたが、それらの位置は完全に同一ではなく、ガスとダストの分布が独立かつ複雑な構造を持つことを示唆している。化学反応計算を用いた解析を行ったところ、観測で得られたガス放射の強度分布は、中心星からの紫外線照射の影響を受けたことによる化学反応によって解釈可能であることが分かった。また、(1)で見出されたダスト集積の構造に対応する位置には、弱いガスギャップ構造が付随している様子が見られたが、その位置も完全には一致していなかった。この複雑なガスとダスト分布を解釈するため、惑星による円盤ギャップの理論シミュレーションを行ったところ、円盤のガス粘性に依存して惑星自体が中心星方向に落下することで、ダスト集積の位置とガスギャップの位置がずれることが分かった。また、ALMA の高感度を活かし、円盤に含まれる水の検出に向けた観測も推進してきた。理論的に予想されていた水の分子輝線放射の検出には至らなかったものの、十分な上限値が得られている。

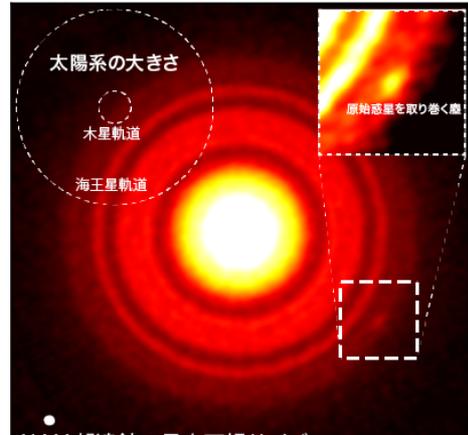


図 2 TWHyra を取り巻く原始惑星系円盤の電波画像。惑星の種となる微小電波源の拡大図を右上に示す。距離の参考のため、太陽と木星および海王星間に相当する距離を白線で示している。

得られたスペクトル指数の動径方向分布は、過去に見られていたギャップ構造に対応する局所的な増加が見られていたものの、その最大値はこれまでの見積りより小さく、やや平坦な動径方向分布が得られた(図 2)。これはギャップ近傍におけるダストサイズの変化が、これまでの見積りよりも均一であることを示している。一方、この推定では円盤温度分布を仮定することで物理量の縮退を解いており、より正確なダストサイズ分布の導出には追加の ALMA データを必要とする。どの周波数で取得するのが効率的か、実際の観測データをベースにした予想計算も行っており、今後より高い周波数(600~1000GHz)による ALMA 観測に繋げる考えである。

(3)放射輸送計算と疑似観測を活用した円盤ダスト・ガス分布モデルの構築

円盤モデルの構築と放射輸送計算については、放射輸送計算ツール(RADMC)の理解と応用を進め、複雑な円盤モデルの構築と観測データの再現を行い論文として出版した。若い星 Sz91 を取り巻く原始惑星系円盤に対し、ダストおよびガス両成分の ALMA による高解像度観測を実施し、その特徴的な円盤構造のモデル化に成功しており、手法が十分に確立できていることを実証した(図 3)。詳細な放射輸送計算の結果、Sz91 を取り巻く円盤に含まれるダスト成分は、厚みのあるリング状構造であるトーラスであることが分かった。一方、ガス成分はダストトーラスより動径方向にも鉛直方向にも遥かに広がった構造をしていることが分かった。ガス円盤の赤道面付近は、ダストトーラスによって作られた影により極めて低温となり、ガス放射が効率的に吸収されていることが示唆された。この結果を応用し、(1), (2) で得られた TWHya の円盤構造の結果を反映させたモデルの構築も行ってきており、新たに化学反応計算を取り入れた放射輸送計算の構築に繋げており、整備を進めている。

また、惑星形成過程に絡む化学反応ネットワークを多角的な視点で調べるため、惑星大気成分を調べる観測も推進してきた。キャリブレーションで取得された膨大な ALMA アーカイブデータを活用し、木星の衛星タイタンの大気成分を調べてきた。大気に含まれるアセトニトリルの窒素同位体比は、他の窒素化合物と異なる同位体比を示しており、宇宙線起源による窒素の解離プロセスを起点とする生成プロセスを持つことが示唆された。

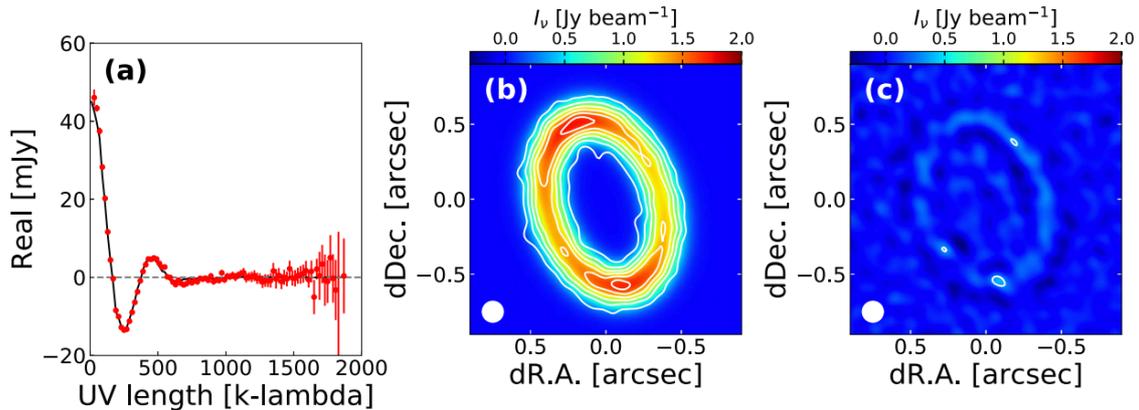


図 3 ALMA 望遠鏡の観測データと円盤モデル+疑似観測を用いた、Sz91 を取り巻く原始惑星系円盤のダストトーラスに対する観測再現結果。(a)は電波干渉計で得られるビジビリティデータ(赤点)で、円盤モデルから予想される放射の疑似観測で得られた予想(黒線)でよく再現されている。(b)はビジビリティから作成される電波画像で、こちらでも観測データ(コントラスト)はモデルデータ(カラー)でよく再現されていることがわかる。(c)は観測データとモデルデータの残差ビジビリティから作成した残差画像。

(4)電波偏光観測を活用したより正確な円盤ダストサイズ推定

電波偏光観測によるダストサイズ分布推定では、ALMA 望遠鏡を用いた TWHya の円盤に対する偏光観測の一部が実行され、そのデータ解析(画像作成)を完了した。当初の電波散乱による偏光と思われる成分が見えつつあるが、感度不足のため結論を得るためには追加データが必要である。その後の観測は望遠鏡トラブルにより未実行であるが、解析手法の向上や多様な視点からミリ波偏光画像の解釈を行う目的で、様々な天体の円盤偏光観測を行ってきており論文として出版している。例えば、若い星 HL Tau を取り巻く原始惑星系円盤に対する 3mm 連続波の偏光観測では、方位角方向に沿った偏光ベクトルを検出しており、これは輻射によるダスト整列の理論と整合的である。一方で、過去に取得された 1.3mm の偏光ベクトルは円盤短軸方向に並行となって

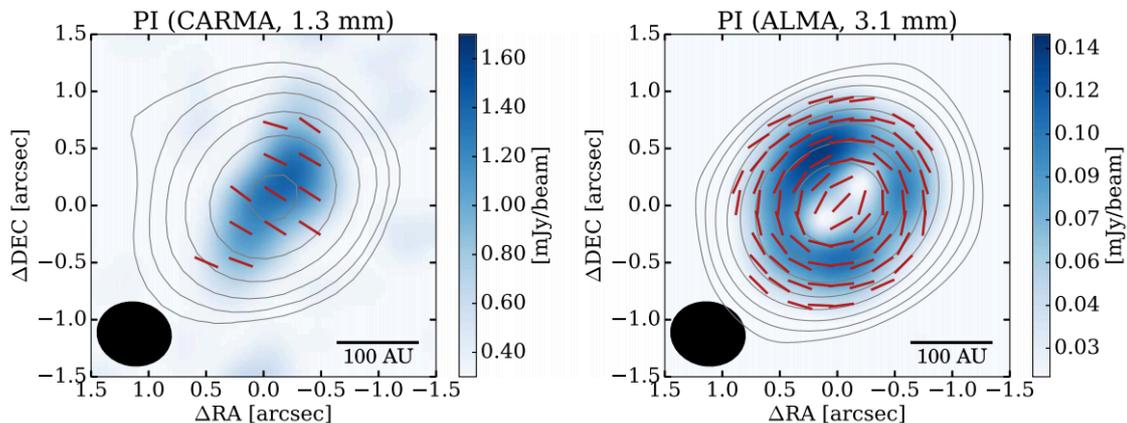


図 4 若い星 HL Tau を取り巻く原始惑星系円盤のミリ波電波偏光画像。コントラストはミリ波強度分布、カラーは偏光強度分布、ベクトルは偏光角分布を示す。(左)過去に CARMA 望遠鏡で得られた 1.3mm 帯の偏光画像。偏光角は円盤短軸方向に並行している。(右)我々の ALMA 観測によって新たに得られた 3.1mm 帯の偏光画像。1.3mm とは異なり偏光角は方位各方向に向いている。

おり、それとは全く異なる分布であることが分かった(図4)。放射輸送計算を用いて両者を説明可能な円盤モデルを推定したところ、円盤の最大ダストサイズがおよそ 100 μm 程度であると予想される。他の幾つかの円盤に対する偏光観測からもほぼ同様の最大ダストサイズが得られており、円盤にあるダストは典型的に星間空間に比べて成長していることを定量的に示した重要な結果となっている。

また、ミリ波サブミリ波における連続波スペクトルに対し、電波放射散乱の観点を取り入れた解析を行うことで、偏光観測に頼らずにダストサイズ分布に制限を加える手法を新しく試みてきた。ALMA のアーカイブデータを用いて TWHya の多波長観測のデータ解析を行い、円盤内側の放射における周波数依存性を調べたところ、スペクトル指数が周波数によって変化していることが分かった。放射散乱を考慮した放射輸送計算を行い放射のモデリングを行ったところ、特定の波長の電波が対応するサイズのダストによって効率的に散乱されることで、スペクトル指数の周波数依存性を説明できる可能性を示しており、これにより示唆される最大ダストサイズはおよそ 300 μm 程度である(図5)。またこれは同時に、従来行われていた散乱を考慮しない円盤質量導出手法に誤差が大きいことも示している。これまで見積もられていた様々な天体の円盤質量が数十倍変わる可能性を示唆しており、今後の観測研究に大きなインパクトを与える結果である。

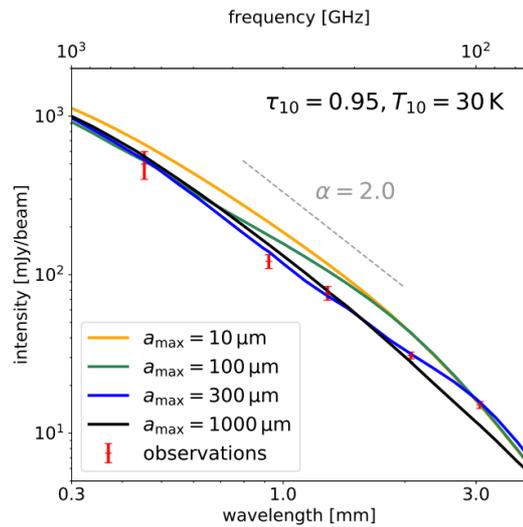


図5 ALMA アーカイブデータの解析で作成した TWHya のミリ波帯エネルギースペクトル分布(赤)。ミリ波散乱を考慮し、様々な最大ダストサイズを仮定した場合のモデル予想を線で示している。ダストサイズによってスペクトルインデックスが変化する様子が予想されており、TWHya の場合、300 μm 程度の最大サイズだとよく再現できる。

(5) 疎性モデリングを活用した高分解能画像合成法の開発・検証

疎性モデリングを応用したイメージ合成については、priism と呼ばれる画像生成ソフトが ALMA データ解析ソフト CASA に実装され、原始惑星系円盤への応用を通じたコミッションニングを進めてきた。ALMA データへの応用は一定の成果を上げつつあり(図6)、応用例の一部を記述した論文を投稿し、年度更新直後に受理されている。着目している天体 TWHya の円盤への応用も進めているが、観測データ量が多いこともあり、アルゴリズムの高速化への対応が必要となっている。

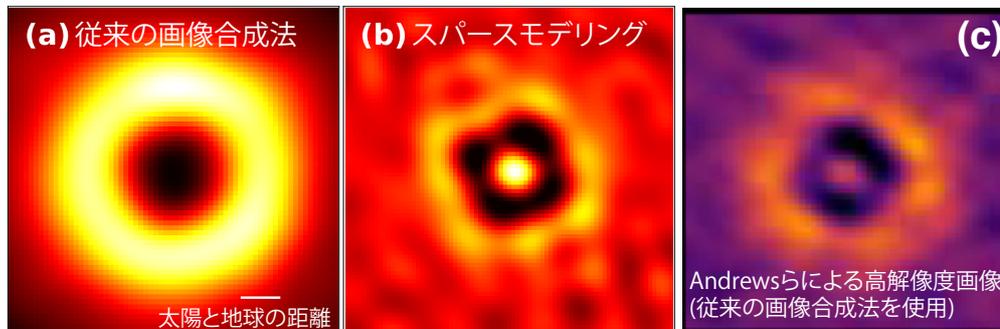


図6 ALMA 望遠鏡によって得られた原始惑星系円盤の中心部の電波強度画像。(a)従来の画像合成法(CLEAN)による画像。(b)同データに対しスパースモデリングを用いて作成した画像。(c)Andrewsら(2016)によって撮像された、同天体の高解像度電波強度図。従来の画像合成法を使用しているが、(a)で取得された画像よりも高解像度担っている。スパースモデリングによる予想(b)は、実際の分布を良く予言していることがわかる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 18件／うち国際共著 10件／うちオープンアクセス 19件）

1. 著者名 Notsu Shota, Akiyama Eiji, Booth Alice, Nomura Hideko, Walsh Catherine, Hirota Tomoya, Honda Mitsuhiro, Tsukagoshi Takashi, Millar T. J.	4. 巻 875
2. 論文標題 Dust Continuum Emission and the Upper Limit Fluxes of Submillimeter Water Lines of the Protoplanetary Disk around HD 163296 Observed by ALMA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 96～96
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab0ae9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Tsukagoshi Takashi, Muto Takayuki, Nomura Hideko, Kawabe Ryohei, Kanagawa Kazuhiro D., Okuzumi Satoshi, Ida Shigeru, Walsh Catherine, Millar Tom J., Takahashi Sanemichi Z., Hashimoto Jun, Uyama Taichi, Tamura Motohide	4. 巻 878
2. 論文標題 Discovery of An au-scale Excess in Millimeter Emission from the Protoplanetary Disk around TW Hya	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L8～L8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/2041-8213/ab224c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 塚越 崇	4. 巻 28
2. 論文標題 アルマ望遠鏡が若い恒星うみへび座TW星に見出した惑星形成の種	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本惑星科学会誌遊星人	6. 最初と最後の頁 207～212
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.14909/yuseijin.28.3_207	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 塚越 崇	4. 巻 73
2. 論文標題 惑星誕生のメカニズムを大型望遠鏡による観測で探る	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 国立科学博物館milsil	6. 最初と最後の頁 13～14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mori Tomohiro, Kataoka Akimasa, Ohashi Satoshi, Momose Munetake, Muto Takayuki, Nagai Hiroshi, Tsukagoshi Takashi	4. 巻 883
2. 論文標題 An Observational Study for Grain Dynamics in the AS 209 Disk with Submillimeter Polarization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 16 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab3575	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Soon Kang-Lou, Momose Munetake, Muto Takayuki, Tsukagoshi Takashi, Kataoka Akimasa, Hanawa Tomoyuki, Fukagawa Misato, Saigo Kazuya, Shibai Hiroshi	4. 巻 71
2. 論文標題 Investigating the gas-to-dust ratio in the protoplanetary disk of HD 142527	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 124 ~ 124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz112	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Mayama Satoshi, Perez Sebastian, Kusakabe Nobuhiko, Muto Takayuki, Tsukagoshi Takashi et al.	4. 巻 159
2. 論文標題 Subaru Near-infrared Imaging Polarimetry of Misaligned Disks around the SR 24 Hierarchical Triple System	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 12 ~ 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ab5850	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kim Seongjoong, Takahashi Sanemichi, Nomura Hideko, Tsukagoshi Takashi, Lee Seokho, Muto Takayuki, Dong Ruobing, Hasegawa Yasuhiro, Hashimoto Jun, Kanagawa Kazuhiro, Kataoka Akimasa, Konishi Mihoko, Liu Haiyu Baobab, Momose Munetake, Sitko Michael, Tomida Kengo	4. 巻 888
2. 論文標題 The Detection of Dust Gap-ring Structure in the Outer Region of the CR Cha Protoplanetary Disk	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 72 ~ 72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab5d2b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Iino Takahiro, Sagawa Hideo, Tsukagoshi Takashi	4. 巻 890
2. 論文標題 14N/15N Isotopic Ratio in CH3CN of Titan's Atmosphere Measured with ALMA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 95 ~ 95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab66b0	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ueda Takahiro, Kataoka Akimasa, Tsukagoshi, Takashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Scattering-induced intensity reduction: large mass content with small grains in the inner region of the TW Hya disk	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kanagawa Kazuhiro D., Nomura Hideko, Tsukagoshi Takashi, Muto Takayuki, Kawabe Ryohei	4. 巻 892
2. 論文標題 Model of a Gap Formed by a Planet with Fast Inward Migration	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 83 ~ 83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab781e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Notsu Shota, Akiyama Eiji, Booth Alice, Nomura Hideko, Walsh Catherine, Hirota Tomoya, Honda Mitsuhiro, Tsukagoshi Takashi, Millar T. J.	4. 巻 875
2. 論文標題 Dust Continuum Emission and the Upper Limit Fluxes of Submillimeter Water Lines of the Protoplanetary Disk around HD 163296 Observed by ALMA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 96 ~ 96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab0ae9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kim Seongjoong, Nomura Hideko, Tsukagoshi Takashi, Kawabe Ryohei, Muto Takayuki	4. 巻 872
2. 論文標題 The Synthetic ALMA Multiband Analysis of the Dust Properties of the TW Hya Protoplanetary Disk	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 179 ~ 179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab0304	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tsukagoshi Takashi, Momose Munetake, Kitamura Yoshimi, Saito Masao, Kawabe Ryohei, Andrews Sean, Wilner David, Kudo Tomoyuki, Hashimoto Jun, Ohashi Nagayoshi, Tamura Motohide	4. 巻 871
2. 論文標題 The Flared Gas Structure of the Transitional Disk around Sz 91	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 5 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaf4f1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kudo Tomoyuki, Hashimoto Jun, Muto Takayuki, Baobab Liu Hauyu, Dong Ruobing, Hasegawa Yasuhiro, Tsukagoshi Takashi, Konishi Mihoko	4. 巻 868
2. 論文標題 A Spatially Resolved au-scale Inner Disk around DM Tau	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L5 ~ L5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aaeb1c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Mayama Satoshi, Akiyama Eiji, Panic Olja, Miley James, Tsukagoshi Takashi, Muto Takayuki, Dong Ruobing, de Leon Jerome, Mizuki Toshiyuki, Oh Daehyeon, Hashimoto Jun, Sai Jinshi, Currie Thayne, Takami Michihiro, Grady Carol A., Hayashi Masahiko, Tamura Motohide, Inutsuka Shu-ichiro	4. 巻 868
2. 論文標題 ALMA Reveals a Misaligned Inner Gas Disk inside the Large Cavity of a Transitional Disk	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L3 ~ L3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aae88b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ohashi Satoshi, Kataoka Akimasa, Nagai Hiroshi, Momose Munetake, Muto Takayuki, Hanawa Tomoyuki, Fukagawa Misato, Tsukagoshi Takashi, Murakawa Kohji, Shibai Hiroshi	4. 巻 864
2. 論文標題 Two Different Grain Size Distributions within the Protoplanetary Disk around HD 142527 Revealed by ALMA Polarization Observation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 81 ~ 81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aad632	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kataoka Akimasa, Tsukagoshi Takashi, Pohl Adriana, Muto Takayuki, Nagai Hiroshi, Stephens Ian W., Tomisaka Kohji, Momose Munetake	4. 巻 844
2. 論文標題 The Evidence of Radio Polarization Induced by the Radiative Grain Alignment and Self-scattering of Dust Grains in a Protoplanetary Disk	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L5 ~ L5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aa7e33	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Soon Kang-Lou, Hanawa Tomoyuki, Muto Takayuki, Tsukagoshi Takashi, Momose Munetake	4. 巻 69
2. 論文標題 Detailed modeling of dust distribution in the disk of HD 142527	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id.34-id.34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Higuchi Aya E., Sato Aki, Tsukagoshi Takashi, Sakai Nami, Iwasaki Kazunari, Momose Munetake, Kobayashi Hiroshi, Ishihara Daisuke, Watanabe Sakae, Kaneda Hidehiro, Yamamoto Satoshi	4. 巻 839
2. 論文標題 Detection of Submillimeter-wave [C i] Emission in Gaseous Debris Disks of 49 Ceti and Pictoris	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L14 ~ L14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aa67f4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 塚越崇	4. 巻 110
2. 論文標題 アルマ望遠鏡によるうみへび座TW星のサブミリ波多波長観測	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 天文月報	6. 最初と最後の頁 256 ~ 261
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 塚越崇
2. 発表標題 TW Hyaの原始惑星系円盤に付随する局所的なサブミリ波超過の検出
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塚越崇
2. 発表標題 ALMAを用いた二周波観測による TW Hya の原始惑星系円盤のスペクトル・インデックス分布の調査
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塚越崇
2. 発表標題 Discovery of a localized excess in the millimeter emission of the protoplanetary disk around TW Hya
3. 学会等名 ALMA2019: Science Results and Cross-Facility Synergies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塚越崇
2. 発表標題 Discovery of a localized excess in the millimeter emission of the protoplanetary disk around TW Hya
3. 学会等名 Planet Formation Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塚越崇
2. 発表標題 Science Highlights 4: Circumstellar disks, exoplanets and the solar system
3. 学会等名 ALMA Users Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塚越崇
2. 発表標題 High-resolution multiband imaging for the radial variation of the spectral index in the protoplanetary disk around TW Hya
3. 学会等名 ALMA EA science workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 塚越崇
2. 発表標題 TW Hya の原始惑星系円盤に付随する局所的なサブミリ波超過の検出
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 塚越崇
2. 発表標題 Sz91を取り巻く遷移段階円盤におけるフレアアップしたガス構造
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Tsukagoshi
2. 発表標題 Discovery of a localized excess in the millimeter emission of the protoplanetary disk around TW Hya
3. 学会等名 East Asia ALMA science workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Tsukagoshi
2. 発表標題 Discovery of a localized excess in the millimeter emission of the protoplanetary disk around TW Hya
3. 学会等名 Japan-Germany disk/planet formation workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 塚越崇
2. 発表標題 原始惑星系円盤分野でのALMA観測の実例紹介
3. 学会等名 ALMA太陽系ワークショップ
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 塚越崇
2. 発表標題 Submillimeter Multi-Wavelength Observations for the Protoplanetary Disk around TW Hya with ALMA
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 塚越崇
2. 発表標題 ALMAによる原始惑星系円盤観測
3. 学会等名 京都大学基研研究会「原始惑星系円盤」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 塚越崇
2. 発表標題 ALMAによる原始惑星系円盤の[Cl](3P1-3P0)輝線サーベイ観測
3. 学会等名 日本天文学会2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 塚越崇
2. 発表標題 ALMA観測結果レビュー
3. 学会等名 ALMA原始惑星系円盤ワークショップ
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

地上大型電波望遠鏡により、土星の衛星タイタンの大気成分の詳細な観測に成功
https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/press/z0310_00018.html
アルマ望遠鏡が若い恒星うみへび座TW星に見出した惑星形成の種
https://www.nao.ac.jp/contents/naoj-news/data/nao_news_0314.pdf
アルマ望遠鏡、惑星誕生の現場をピンポイントで特定
<https://alma-telescope.jp/news/press/twhya-201906>
地球型惑星の形成現場を描き出す～アルマ望遠鏡で捉えた原始ミニ太陽系～
<https://alma-telescope.jp/news/press/dmtau-201903>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	武藤 恭之 (Muto Takayuki)		
研究協力者	野村 英子 (Nomura Hideko)		
研究協力者	川邊 良平 (Kawabe Ryohei)		