

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月11日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14258

研究課題名(和文)ALMA望遠鏡で探る若い惑星とその形成母体である原始惑星系円盤の関連性

研究課題名(英文)Probing relationship between young planet and protoplanetary disk by ALMA

研究代表者

橋本 淳 (Hashimoto, Jun)

国立天文台・光赤外研究部・特任助教

研究者番号：20588610

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は大型電波望遠鏡ALMAを用いて遷移円盤天体の固体微粒子とガスの空間分布、および若い惑星に付随する周惑星円盤を詳細に解析することで、形成途中にあると考えられる若い惑星に関する知見を得ることである。ギャップ構造などのダスト円盤の詳細な構造は得られたものの、その構造を励起したと思われる惑星の直接検出には至らなかった。また、一酸化ガスの微細構造から惑星質量を間接的に見積もろうとしたが、ガス円盤自体にそのような微細構造を検出できなかった。一方、惑星との重力相互作用で生じたと考えられるガスの速度分散が増加している兆候や、内縁円盤が外縁円盤に対してねじれている構造などを発見することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

若い惑星(年齢100万年程度)の直接撮像は系外惑星の初期空間分布を明らかにする上で重要である。しかし若い中心星が明るすぎるため、直接撮像の成功例は極めて限られている。その代替手法として、惑星が形成母体の原始惑星系円盤に埋もれている際に生じるギャップ構造に着目して系外惑星の軌道半径や質量を見積もる方法が考案されている。本研究ではそれら間接手法に加え、惑星の軌道や質量に制限を与えるガスの速度分散や速度構造のケプラー回転からのズレを検出した。これら手法を用いることで、系外惑星の空間分布を間接的に明らかにすることができると考えられるため、学術的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research project is to investigate young forming planets by analyzing the spacial distributions of dust grains and gas in the protoplanetary disks, and the circumplanetary disks around them with ALMA. Though fine structures in dust disks have been obtained by this research, I failed to detect any circumplanetary disks and planets potentially inducing these fine structures. I also attempted to estimate the mass of planets by analyzing the gap structures in the gas disks; however, no gap structure can be found in the gas disks. On the other hand, both a potential increase of the velocity dispersion in the gas and a warped inner gas disk toward an outer disk possibly induced by planet-disk interaction has been found in this research project.

研究分野：天文学

キーワード：原始惑星系円盤 光赤外天文学 電波天文学

1. 研究開始当初の背景

地球や木星などの惑星は、年齢 100 万年程度の若い恒星に付随する原始惑星系円盤と呼ばれる固体微粒子とガスから成る円盤で形成されると考えられている。特に、形成中の惑星が円盤中に埋もれている場合、惑星と円盤との重力的相互作用により、円盤に溝や渦巻き構造が励起されると同時に、惑星には円盤からの質量降着で周惑星円盤が付随することが数値計算により予測されている(図1)。すばる望遠鏡を用いた観測では、実際に円盤に溝や渦巻き構造が発見され始めており (Hashimoto et al. 2011; 2012)、このような構造を持つ円盤を特に遷移円盤(ガスが豊富な原始惑星系円盤からガスが減少した残骸円盤への遷移段階にある円盤)と呼んでいる。このように、遷移円盤には今まさに形成途中の若い惑星が埋もれている可能性があり、我々の太陽系の起源や惑星形成を理解するための重要なサンプルであると認識されている。しかし、惑星自身の検出にはまだ成功しておらず、すばる望遠鏡を用いた溝構造に埋もれた惑星の大規模探査でも上限質量約 5-10 木星質量という制限を与えたと過ぎない (Uyama et al. 2017)。果たしてどのような惑星が遷移円盤を形成したのだろうか? 惑星そのものの検出は明るい主星のために一般に難しい。そのため、本研究では惑星が遷移円盤に励起する構造および惑星に付随する周惑星円盤に着目して惑星の物理的特性に迫る。特に周惑星円盤から惑星への質量降着は、惑星の最終的な質量を決めている可能性があり、質量降着率を見積もることで、惑星の最終質量に制限を与えることができる。

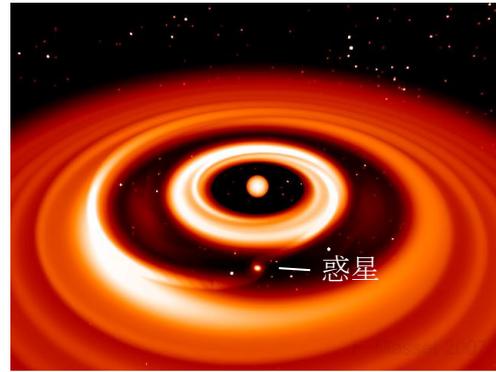


図1: 円盤内に埋もれた惑星と母体の原始惑星系円盤との重力相互作用の数値計算 (Frédéric Masset 提供)。

2. 研究の目的

これまでの観測的研究をさらに飛躍させるため、研究代表者は大型電波望遠鏡 ALMA を用いての電波観測に挑戦している。ALMA 共同利用サイクル 3 (平成 28 年 9 月に観測終了) では、研究代表者を中心に遷移円盤天体 4 天体の観測を行った (ID:2015.1.01301.S; PI: 研究代表者)。ALMA の観測では空間分解能は 0.1-0.2 秒角を達成している。観測データは本研究課題を開始する平成 29 年度初頭ごろから順次アクセス可能であった。本研究では、ALMA 共同利用サイクル 3 のデータを用いて、以下の 3 つのことを明らかにし、遷移円盤を形成した惑星についての知見を得たい。

- (1) 研究目的 1: 遷移円盤に溝や渦巻き構造を励起したと考えられる惑星に付随する周惑星円盤を探査し、惑星が存在する直接的証拠を掴みたい。
- (2) 研究目的 2: 惑星が励起する円盤中のガスの溝構造を詳細に解析することにより、惑星の軌道および質量についての間接的な情報を得る。
- (3) 研究目的 3: 惑星へのガスの質量降着に着目した近赤外線における追観測を行い、惑星への質量降着率を導出し、惑星の最終質量に制限を加える。

3. 研究の方法

(1) 惑星質量天体に付随する周惑星円盤からの固体微粒子連続波を検出した例は多くはなく、高感度の ALMA の観測によってようやく可能となってきた (e.g., OTS 44; Bayo et al. 2017)。この研究計画 1 では、当初、惑星質量天体だと思われていた FW Tau c (軌道長半径 330 天文単位; 質量 10 木星質量以下; Kraus et al. 2015) の観測結果に基づいて研究計画を立案した (2017 年 9 月に FW Tau b は惑星でないことが判明している: Wu et al. 2017)。FW Tau b の場合、波長 1.3mm における固体微粒子連続波の強度は 1.78 mJy である (Kraus et al. 2015)。一方、研究代表者らが観測した ALMA のデータの感度はおよそ 0.05 mJy 程度であるため、FW Tau b のような天体に付随する円盤からの固体微粒子連続波は 38 シグマ程度で有意に検出可能である。しかし、FW Tau b は実際には 0.1 太陽質量程度の小質量星であることが後日判明し (Wu et al. 2017)、見積もりが過大評価されていることが分かった。ここで、惑星質量天体 OTS 44 のケースだと固体微粒子連続波の強度は 0.1mJy であるため、研究代表者の ALMA サイクル 3 観測データではそもそも検出が難しいことになる。

(2) 惑星が円盤に埋もれている場合、円盤に溝や渦巻き構造が励起されることを述べた。よって、惑星の重力で形成されたガス円盤の溝構造を数値計算結果と比較することで、惑星の軌道と質量に制限を与えることが可能である。溝構造の面密度の減少具合は惑星の質量に依存するため、数値計算結果と ALMA の一酸化炭素ガスの観測データを詳細に比較することで、惑星の軌道と質量に制限を与える。この方法は、周惑星円盤からの固体微粒子連続波の検出 (研究計画 1) の有無に関わらず、惑星自身の情報を得ることが可能である。

- (3) 周惑星円盤へのガスの質量降着がある場合、水素原子の再結合線 ($H\alpha$ や $Pa\beta$ など) が

発せられると考えられている。惑星自身の熱放射よりも明るく輝くため、主星とのコントラストが軽減されることが知られており、PDS 70b の場合だと、H α と 1.6 μ m 帯のコントラストはそれぞれ約 10^{-3} と 10^{-4} である (e.g., Keppler et al. 2018)。したがって惑星検出が容易になるという利点がある。本研究計画 3 の遂行には、観測提案書を 8m 級望遠鏡に提出し、近赤外線での追観測を行う必要がある。

4. 研究成果

(1) ALMA サイクル 3 観測データ (PDS 70, RX J1604.3-2130, Sz 91, HD 169142) を詳細に解析したが、周惑星円盤からの固体微粒子連続波の検出には至らなかった。さらに、ALMA サイクル 5 の観測データも本研究期間中にデリバリーされ、特におうし座 DM 星はノイズレベル 11 μ Jy であったが、周惑星円盤は未検出であった (図 2 ; Kudo et al. 2018)。一方で、このおうし座 DM 星においては、6 天文単位 (0.04 秒角) というこれまでにない高い空間分解能で円盤構造をとらえることに成功し、原始ミニ太陽系とも言える、我々の太陽系とよく似た円盤構造を描くことができた。具体的には、①おうし座 DM 星から 3 天文単位程度の半径のリングと、太陽からおよそ 3 天文単位の半径にある小惑星帯、②おうし座 DM 星から 20 天文単位程度の半径のリングと、太陽からおよそ 20 天文単位の半径にある天王星、③おうし座 DM 星から 60 天文単位より遠方に広がる淡い塵の分布と、太陽からおよそ 30 天文単位より外側に広がるエッジワース・カイパーベルト、以上 3 点が挙げられる。半径数天文単位の位置にリング構造を見つけた例としては、世界で 3 番目の成果である。この成果は 2019 年春季天文学会 (2018 年度) の記者会見にて広く公表した。

(2) ガス円盤のギャップ構造から惑星の質量に間接的に制限を加えることを試みたが、そもそもガス円盤に構造を検出することができなかった。図 3 はおうし座 DM 星の一酸化炭素ガス (^{12}CO 2-1) の強度図で、固体微粒子連続波のギャップ構造に対応する構造がないことが分かる。光学的に薄い C^{18}O 2-1 などのガスの観測が必要だと思われる。本研究期間中に観測されたサイクル 3 と 5 の採択課題では、そのような光学的に薄い C^{18}O 2-1 も観測したが、一般的に C^{18}O 2-1 は強度が弱く、有意な検出ができなかった。

(3) 周惑星円盤への質量降着をとらえるため、Keck 望遠鏡に搭載された近赤外線面分光装置 OSIRIS を用いて、水素再結合線の 1 つである $\text{Pa}\beta$ の観測を行った (Uyama et al. 2017)。観測天体はうみへび座 TW 星で、太陽系に最も近い原始惑星系円盤の 1 つであり (距離: 約 60 pc)、惑星との重力相互作用で形成されたと考えられている多重リングギャップ構造を持つ天体である (e.g., Andrews et al. 2016)。観測の結果、 $\text{Pa}\beta$ フラックスの 5σ 検出限界は $5.8 \times 10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ で、1 木星質量程度の検出限界であったが惑星の検出はできなかった。

(4) 当初想定していなかったが、惑星の存在を示唆するガスの運動に関する間接的証拠を本研究期間中にとらえることに成功した。1 つは周惑星円盤のガスの運動に起因する速度分散の増加である。母体の原始惑星系円盤のガスの速度構造と周惑星円盤のそれは異なるため、惑星が埋もれている場合、原始惑星系円盤の速度分散が局所的に増加する。そのような兆候を PDS 70 に発見した (Long et al. 2018)。また、RX J1604.3-2130 には、惑星の存在によって内縁円盤が外縁円盤に対して異なる軌道傾斜角を持つために生じると考えられる速度構造のねじれをとらえた (Mayama et al. 2018)。ガス円盤におけるギャップ構造以外にも埋もれた若い惑星の物理的性質 (質量など) に制限を加えることが可能な重要な観測結果である。本研究期間中にガスの速度構造に変化を与えた惑星の物理的性質を明らかにすることはできなかったが、今後、数値計算結果と詳細な比較を行い、惑星の物理的特性に制限を加えたい。特に PDS 70 に関しては、すでに近赤外線の観測で惑星の検出に成功しているため、近赤外線観測から導出した惑星の物理的特性と、電波観測による速度構造から導出したそれを比較して、矛盾しない結果を得ることは重要であり、引き続き本研究を継続してゆきたい。

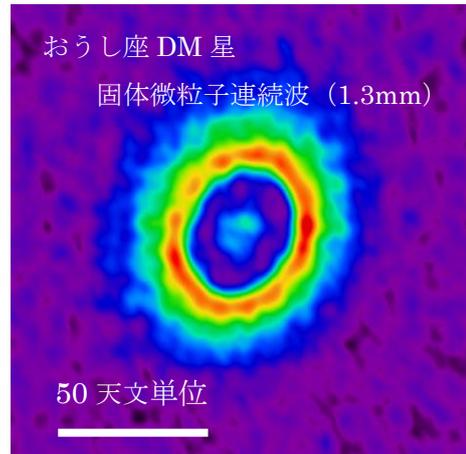


図2: ALMA で観測したおうし座 DM 星の 1.3 mm 帯の固体微粒子連続波画像 (kudo et al. 2018)。

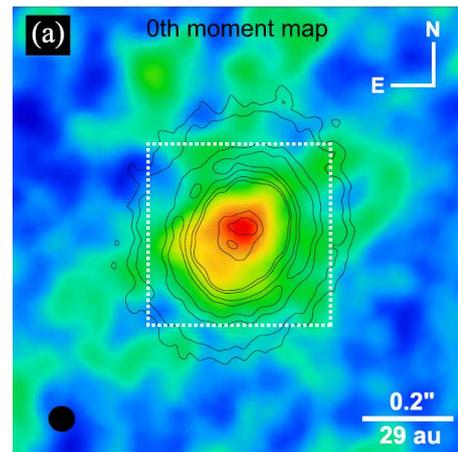


図3: おうし座 DM 星の一酸化炭素ガスの強度図 (kudo et al. 2018)。コントラストは図1の固体微粒子連続波の強度を示す。

<引用文献>

- ① Andrews 他、Ringed Substructure and a Gap at 1 au in the Nearest Protoplanetary Disk、ApJ、820巻、2016年、40—44
- ② Bayo 他、First Millimeter Detection of the Disk around a Young, Isolated, Planetary-mass Object、ApJ、841巻、2017年、11—14
- ③ Hashimoto 他、Direct Imaging of Fine Structures in Giant Planet-forming Regions of the Protoplanetary Disk Around AB Aurigae、ApJ、729巻、2011年、17—22
- ④ Hashimoto 他、Polarimetric Imaging of Large Cavity Structures in the Pre-transitional Protoplanetary Disk around PDS 70: Observations of the Disk、ApJ、758巻、2012年、19—24
- ⑤ Keppler 他、Discovery of a planetary-mass companion within the gap of the transition disk around PDS 70、A&A、617巻、2018年、44—64
- ⑥ Kraus 他、An ALMA Disk Mass for the Candidate Protoplanetary Companion to FW Tau、ApJ、798巻、2015年、23—26
- ⑦ Kudo 他、A Spatially Resolved au-scale Inner Disk around DM Tau、ApJ、868巻、2018年、5—13
- ⑧ Long 他、Differences in the Gas and Dust Distribution in the Transitional Disk of a Sun-like Young Star, PDS 70、ApJ、858巻、2018年度、112—133
- ⑨ Mayama 他、ALMA Reveals a Misaligned Inner Gas Disk inside the Large Cavity of a Transitional Disk、ApJ、868巻、2018年度、3—10
- ⑩ Uayama 他、The SEEDS High-Contrast Imaging Survey of Exoplanets Around Young Stellar Objects、AJ、153巻、2017年、106—132
- ⑪ Uayama 他、Constraining Accretion Signatures of Exoplanets in the TW Hya Transitional Disk、AJ、154巻、2017年、90—95
- ⑫ Wu 他、An ALMA Dynamical Mass Estimate of the Proposed Planetary-mass Companion FW Tau C、ApJ、846巻、2017年、26—30

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計14件)

- ① Tsukagoshi, Takashi 他10名 (9番目)、The Flared Gas Structure of the Transitional Disk around Sz 91、ApJ、査読有、871巻、2018年度、5—18
DOI: 10.3847/1538-4357/aaf4f1
- ② Kudo, Tomoyuki 他7名 (2番目)、A Spatially Resolved au-scale Inner Disk around DM Tau、ApJ Letter、査読有、868巻、2018年度、5—13
DOI: 10.3847/2041-8213/aaeb1c
- ③ Mayama, Satoshi 他17名 (11番目)、ALMA Reveals a Misaligned Inner Gas Disk inside the Large Cavity of a Transitional Disk、ApJ、査読有、868巻、2018年度、3—10
DOI: 10.3847/2041-8213/aae88b
- ④ Mizuki, Toshiyuki 他57名 (23番目)、Orbital Characterization of GJ1108A System, and Comparison of Dynamical Mass with Model-derived Mass for Resolved Binaries、ApJ、査読有、865巻、2018年度、152—167
DOI: 10.3847/1538-4357/aada82
- ⑤ Takami, Michihiro 他16名 (5番目)、Near-infrared High-resolution Imaging Polarimetry of FU Ori-type Objects: Toward a Unified Scheme for Low-mass Protostellar Evolution、ApJ、査読有、864巻、2018年度、20—35
DOI: 10.3847/1538-4357/aad2e1
- ⑥ Uyama, Taichi 他58名 (2番目)、Subaru/HiCIAO HK s Imaging of LKHa 330: Multi-band Detection of the Gap and Spiral-like Structures、AJ、査読有、156巻、2018年度、63—74
DOI: 10.3847/1538-3881/aacbd1
- ⑦ Yang, Yi 他54名 (4番目)、High-contrast Polarimetry Observation of the T Tau Circumstellar Environment、ApJ、査読有、861巻、2018年度、113—120
DOI: 10.3847/1538-4357/aac6c8
- ⑧ Dong, Ruobing 他57名 (8番目)、The Eccentric Cavity, Triple Rings, Two-armed Spirals, and Double Clumps of the MWC 758 Disk、ApJ、査読有、860巻、2018年度、124—137
DOI: 10.3847/1538-4357/aac6cb
- ⑨ Konishi, Mihoko; Hashimoto, Jun; Hori, Yasunori、Probing Signatures of a Distant Planet around the Young T-Tauri Star CI Tau Hosting a Possible Hot Jupiter、ApJ、査読有、859巻、2018年度、28—33
DOI: 10.3847/2041-8213/aac6d2
- ⑩ Long, Zachary C. 他25名 (12番目)、Differences in the Gas and Dust Distribution in the

Transitional Disk of a Sun-like Young Star, PDS 70、ApJ、査読有、858巻、2018年度、112—133

DOI: 10.3847/1538-4357/aaba7c

- ⑪ Rich, Evan A. 他61名(4番目)、The fundamental stellar parameters of FGK stars in the SEEDS survey、MNRAS、査読有、472巻、2017年度、1736—1752
DOI: 10.1093/mnras/stx2051

- ⑫ Uyama, Taichi 他6名(3番目)、Constraining Accretion Signatures of Exoplanets in the TW Hya Transitional Disk、AJ、査読有、154巻、2017年度、90—95
DOI: 10.3847/1538-3881/aa816a

- ⑬ Liu, Haiyu Baobab 他15名(7番目)、A concordant scenario to explain FU Orionis from deep centimeter and millimeter interferometric observations、A&A、査読有、602巻、2017年度、19—28
DOI: 10.1051/0004-6361/201630263

- ⑭ Tang, Ya-Wen 他15名(15番目)、Planet Formation in AB Aurigae: Imaging of the Inner Gaseous Spirals Observed inside the Dust Cavity、ApJ、査読有、840巻、2017年度、32—38
DOI: 10.1051/0004-6361/201630263

[学会発表] (計12件)

- ① 工藤 智幸 他、DMTau に付随した au スケールの原始惑星系円盤検出、日本天文学会 2019 年春季年会、2018 年度

- ② 高橋 実道 他、輻射輸送計算による V1094Sco の原始惑星系円盤構造の理解、日本天文学会 2019 年春季年会、2018 年度

- ③ 本田 充彦 他、Herbig Fe 星 HD142527 円盤散乱光の 3 ミクロン帯偏光分光観測、日本天文学会 2019 年春季年会、2018 年度

- ④ 橋本 淳、ALMA observations of Transitional Disks、Workshop for Protoplanetary Disks and Exoplanets、2018 年度

- ⑤ 橋本 淳 他、遷移円盤天体 DM Tau における ALMA long baseline 観測、平成 30 年度～平成 34 年度 新学術領域研究「星惑星形成」キックオフミーティング、2018 年度

- ⑥ 小西 美穂子 他、ホットジュピターをもつ若い系 CI Tau まわりの遠方惑星の兆候探査、日本天文学会 2018 年秋季年会、2018 年度

- ⑦ 鶴山 太智 他、Subaru/HiCIAO による LkH α 330 の H,Ks バンド偏光観測: スパイラルと溝の検出、日本天文学会 2018 年秋季年会、2018 年度

- ⑧ Yi Yang 他、Investigations of FS Tau A Circumbinary Disk Structures from Near-infrared and Sub-millimeter Observations、日本天文学会 2018 年秋季年会、2018 年度

- ⑨ 塚越 崇 他、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、日本天文学会 2018 年秋季年会、2018 年度

- ⑩ 橋本 淳 他、A Spatially Resolved AU-scale Inner Disk around DM Tau with ALMA、日本地球惑星科学連合 2018 年大会、2018 年度

- ⑪ 小西 美穂子 他、J16394544 に付随する強度の非対称性をもつ多重リング円盤、日本天文学会 2018 年春季年会、2017 年度

- ⑫ 眞山 聡 他、連星に付随する原始惑星系円盤の近赤外観測、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年度

- ⑬ 鶴山 太智 他、質量降着を利用した非常に若い惑星の直接撮像探査 2、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年度

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<https://alma-telescope.jp/news/press/dmtau-201903>

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名：武藤恭之

ローマ字氏名 : Muto Takayuki

研究協力者氏名 : 小西美穂子

ローマ字氏名 : Konishi Mihoko

※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。