

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14533

研究課題名（和文）ALMA偏光観測と輻射輸送計算で探る原始惑星系円盤のリング形成とダスト成長

研究課題名（英文）Ring formation and dust growth in protoplanetary disks studied by ALMA polarization observations and radiative transfer calculations

研究代表者

大橋 聡史（Ohashi, Satoshi）

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・研究員

研究者番号：50808730

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：原始惑星系円盤におけるダストの成長過程について、ALMA望遠鏡やVLAといった電波望遠鏡によるダスト連続波観測とダストの付着成長シミュレーションを行い、惑星形成の初期段階を観測と理論の両面から明らかにした。また、近年ALMAなどで観測されているリングの形成メカニズムの一つとして、ダストの成長前線を提案するに至った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

惑星形成の初期段階が従来考えられていたよりも大幅に早く始まっていることを提唱した。従来、惑星形成は中心の恒星への質量降着がほとんど終了し、原始惑星系円盤の静かな段階からゆっくりと始まると考えられていたが、本研究によって、惑星形成の始まりは、恒星の形成と同時期が始まっている可能性を示した。本研究は、惑星大気の主成分を決定する段階や、水のようなハビタブルな惑星がどのように形成されるのかといった、生命の起源にも大きな影響を与える。

研究成果の概要（英文）：We have studied the dust growth process in protoplanetary disks through dust continuum observations with radio telescopes such as ALMA and VLA and dust coagulation growth simulations, and clarified the early stages of planet formation from both observational and theoretical perspectives. In addition, we have proposed dust growth fronts as one of the mechanisms of ring formation recently observed by ALMA and other telescopes.

研究分野：天文学

キーワード：惑星形成 原始惑星系円盤 電波天文観測

1. 研究開始当初の背景

惑星は太陽系だけでなく多くの恒星で普遍的に存在することが近年の系外惑星探査で明らかになっている。系外惑星の発見は今年のノーベル賞で受賞されたように、このような惑星がどのように形成されるかは天文学の重要な研究の一つである。惑星形成の最初のステップは星間空間の小さなダスト(サイズ $0.1 \mu\text{m}$ 程度)が原始惑星系円盤において衝突合体しミリメートルからセンチメートルの大きさまで成長する過程である。

しかしながら、ミリメートルサイズのダストはガス抵抗を強く受け、角運動量を失い中心星へと落下する。落下のタイムスケールはダスト成長の時間よりも短く、大きなダストが円盤には存在しなくなることが指摘されている(中心星落下問題)。大きなダストを円盤に留めておくために、局所的にガス圧の極大値を作り、圧力勾配によってダストを一定の場所に留めさせ、ダストを成長させることが提案されている。

実際、近年の ALMA による高分解能によって、ダストの成長に関連すると思われる多様な構造が原始惑星系円盤で明らかになってきた。例えば、ALMA の史上最高分解能(0.035 秒角 5 AU)の観測で HL Tau 原始星の円盤ではいくつかのリング構造が見つかった。他にも ALMA の大型プロジェクト(DSHARP)による総計 20 個の代表的な原始惑星系円盤の高分解能観測(0.035 秒角 5 AU)によって、ほとんどの円盤でリング・ギャップ構造を持つことが示された(Andrews et al. 2018)。しかし、従来の撮像観測や温度や質量を測る観測では、これらの構造とダスト成長の関連を調べることは困難であり、惑星を形成する上で、リング構造がどのような役割を持つかや、リング構造がどのように形成されるかは明らかではない。ダストがどこで成長し、惑星形成へと進むのかは、実際にダストサイズをリングやギャップで測り、サイズの違いを調べることが重要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は ALMA 偏光観測と輻射輸送計算モデルを駆使することでダストサイズを測り、円盤構造とダスト成長を解明することである。また、惑星形成の始まりと考えられる、ダストの成長は、いつ、どのようにして開始するのかを、観測とシミュレーションによって明らかにする。

3. 研究の方法

惑星形成の開始を探るため、星形成が活発な若い原始星円盤(Class 0/I 天体)から、比較的進化が進んだ原始惑星系円盤(Class II 天体)までの広い年齢で、ALMA のアーカイブデータも含めた観測データの解析を行った。観測データを基にした円盤の強度分布を再現できるモデルの構築に取り組んだ。

また同時に、原始星円盤での観測を動機として、円盤におけるダストの付着成長計算と輻射輸送計算を行い、ダスト成長が実際の観測でどのように観測されるのかを調べた。

4. 研究成果

ダストの付着成長計算と輻射輸送計算を行ったところ、ダストの付着成長は 10 万年程度の早い段階で内側から進んでいくことがわかった。さらにダストの成長が進んで内側領域と進んでいない外側領域の境界は成長前線としてリング構造が観測されることを発見した。

ALMA 望遠鏡のアーカイブデータを用いてリングの位置と成長前線を比較すると、年齢 100 万年よりも若い原始星円盤に付随するリング構造は、この成長前線で説明できることがわかった。

続いて、代表的な Class 0/I 円盤である L1489 と L1527 原始に対して、ALMA 望遠鏡で多波長ダスト連続波観測を行ったところ、L1489 ではリング構造が半径 100au 領域で発見した。L1489 円盤の 100 au より外側ではダスト成長が進んでいないことも多波長解析の結果から示すことができ、成長前線によるリング形成シナリオと一致する結果が得られた。

一方で、L1527 円盤でも半径 20 au 付近でダストのクランプ構造を発見した。ただし、このダストクランプは、円盤の重力不安定性による分裂で形成された可能性が高いこともわかった。ただ、L1527 円盤の半径 20 au より外側ではダスト成長が進んでいないこともわかった。これは、付着成長のタイムスケールでは、この天体はまだ若いことと一致する。また多波長解析により、L1527 円盤の温度構造も詳細に得られ、ダストクランプの外側では急激に温度が減少していることを新たに発見した。この理由として、外側領域では、ダストクランプが中心星の放射を隠すため、円盤を十分に温めることができず、低温になっている可能性を示した。

これらの結果は、Class 0/I 原始星円盤で、すでに惑星形成がダストの付着成長によって開始している可能性を示し、従来考えられている惑星形成シナリオよりも大幅に早いことを示唆する結果となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Morii Kaho, Sanhueza Patricio, Nakamura Fumitaka, Jackson James M., Li Shanghuo, Beuther Henrik, Zhang Qizhou, Feng Siyi, Tafuya Daniel, Guzman Andres E., Izumi Natsuko, Sakai Takeshi, Lu Xing, Tatematsu Ken'ichi, Ohashi Satoshi, Silva Andrea, Olguin Fernando A., Contreras Yanett	4. 巻 923
2. 論文標題 The ALMA Survey of 70 μm Dark High-mass Clumps in Early Stages (ASHES). IV. Star Formation Signatures in G023.477	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 147 ~ 147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac2365	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, Codella Claudio, Sakai Nami, et al.	4. 巻 927
2. 論文標題 Misaligned Rotations of the Envelope, Outflow, and Disks in the Multiple Protostellar System of VLA 1623-2417: FAUST. III	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 54 ~ 54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac4cae	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, Kobayashi Hiroshi, Nakatani Riouhei, Okuzumi Satoshi, Tanaka Hidekazu, Murakawa Koji, Zhang Yichen, Liu Hanyu Baobab, Sakai Nami	4. 巻 907
2. 論文標題 Ring Formation by Coagulation of Dust Aggregates in the Early Phase of Disk Evolution around a Protostar	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 80 ~ 80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abd0fa	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, van der Marel Nienke, Hull Charles L. H., Dent William R. F., Pohl Adriana, Pinilla Paola, van Dishoeck Ewine F., Henning Thomas	4. 巻 900
2. 論文標題 Solving Grain Size Inconsistency between ALMA Polarization and VLA Continuum in the Ophiuchus IRS 48 Protoplanetary Disk	5. 発行年 2020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/abaab4	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 Tanaka Kei E. I., Zhang Yichen, Hirota Tomoya, Sakai Nami, Motogi Kazuhito, Tomida Kengo, Tan Jonathan C., Rosero Viviana, Higuchi Aya E., Ohashi Satoshi, Liu Mengyao, Sugiyama Koichiro	4. 巻 900
2. 論文標題 Salt, Hot Water, and Silicon Compounds Tracing Massive Twin Disks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L2 ~ L2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/abadc	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 Nakatani Riouhei, Liu Haiyu Baobab, Ohashi Satoshi, Zhang Yichen, Hanawa Tomoyuki, Chandler Claire, Oya Yoko, Sakai Nami	4. 巻 895
2. 論文標題 Substructure Formation in a Protostellar Disk of L1527 IRS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L2 ~ L2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab8eaa	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 Ohashi Satoshi, Kobayashi Hiroshi, Sai Jinshi, Sakai Nami	4. 巻 933
2. 論文標題 No Evidence of the Significant Grain Growth but Tentative Discovery of Disk Substructure in a Disk around the Class I Protostar L1489 IRS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 23 ~ 23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac6fcf	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 Ohashi Satoshi, Nakatani Riouhei, Liu Haiyu Baobab, Kobayashi Hiroshi, Zhang Yichen, Hanawa Tomoyuki, Sakai Nami	4. 巻 934
2. 論文標題 Formation of Dust Clumps with Sub-Jupiter Mass and Cold Shadowed Region in Gravitationally Unstable Disk around Class 0/I Protostar in L1527 IRS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 163 ~ 163
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac794e	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大橋聡史
2. 発表標題 Misaligned rotations of the envelope, outflow, and disks in the triplet protostellar system of VLA 1623 - 2417
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大橋聡史
2. 発表標題 ALMAミリ波偏光観測とVLAセンチ波観測による原始惑星系円盤IRS48のダストサイズ分布
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大橋聡史
2. 発表標題 原始星円盤におけるダスト成長前線によるリング形成
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------