

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2023

課題番号：18K13590

研究課題名（和文）ALMA偏光観測による惑星形成過程の新展開

研究課題名（英文）Unveiling the planet formation by ALMA polarization observations

研究代表者

片岡 章雅（Kataoka, Akimasa）

国立天文台・科学研究部・助教

研究者番号：70749308

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ALMA観測を用いた原始惑星系円盤のミリ波偏光という新手法を用いて、惑星のもととなるダストの成長過程の制限を目指した。その結果、我々は多くの原始惑星系円盤においてサブミリ波における偏光が自己散乱という機構で説明できることを示した。更に多波長偏光観測やスペクトル解析との矛盾を解き明かすためにモデリングを進めた結果、原始惑星系円盤の固体物質は隙間を多く持つダスト集合体であることを示すことに成功した。本成果は、理論的に指摘されていた高空隙ダスタグリゲイトを経る惑星形成シナリオを示しており、理論観測両面から探る惑星形成研究を推進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

本成果は、日本が重要な一角を担う国際共同望遠鏡ALMAにおいて、惑星形成分野における科学成果を大きくリードすることにつながった。本成果は1970年代から太陽系形成論としてリードしてきた惑星形成理論を、更に観測からもリードし、世界における日本のプレゼンスを示した結果と考えている。惑星形成理論においては、2007年以降日本グループによって指摘されてきた高空隙ダスタグリゲイトを観測的に示した初めての成果となっており、その学術的意義は大きいと言える。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed to constrain the growth process of dust, which forms the basis of planets, using a new method of millimeter-wave polarization of protoplanetary disks observed with ALMA. As a result, we demonstrated that the polarization in the submillimeter wavelength can be explained by the self-scattering mechanism in many protoplanetary disks. Furthermore, by advancing modeling to resolve inconsistencies with multi-wavelength polarization observations and spectral analysis, we successfully showed that the solid material in protoplanetary disks is composed of dust aggregates with many voids. This result supports the planet formation scenario through highly porous dust aggregates, which had been theoretically suggested, and successfully promotes planet formation research by exploring both theoretical and observational aspects.

研究分野：天文学

キーワード：惑星形成 電波観測 偏光

1. 研究開始当初の背景

我々は、2015年にミリ波偏光観測によるダストサイズの新たな観測手法を理論的に提唱した。ダストサイズが観測波長と同程度である場合、散乱光が検出されることが期待される。原始惑星系円盤においてはダスト熱放射の自己散乱を利用することで、ミリ波偏光が検出できることがわかった(Kataoka et al. 2015)。研究開始当時、2天体において理論予測通りの偏光ベクトルが観測され、提唱したダスト散乱由来の偏光の実証に成功したところであった (Kataoka et al., 2016b, 2017)。これらの結果は、ダストサイズは $70\mu\text{m}$ - $100\mu\text{m}$ 程度であることを示しており、従来のスペクトル解析からの予測されるミリメートルからセンチメートルサイズのダストと大きく矛盾していた。

2. 研究の目的

偏光を用いたダストサイズ測定手法は従来のスペクトル指数と異なり、ダストサイズが光学的厚みに影響されない。本研究では、このALMA偏光を用いた新しいダストサイズ測定手法を使い、原始惑星系円盤のダストサイズを測り直すことを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、異なる進化段階の原始惑星系円盤のALMAによる多波長偏光観測を行うことでダストサイズを測定する。また、理論的にダストの合体成長計算から期待される偏光観測予測も行う。これによって、ダスト成長理論・すなわち惑星形成理論の制限を行うことを目指した。

4. 研究成果

多数の天体において、ミリ波偏光が検出された； IM Lup (Hull et al. 2018), HD 163296 (Dent et al. 2019), CW Tau, DG Tau (Bacciotti et al. 2018), AS 209 (Mori, Kataoka et al. 2019, 図1)。これらの天体は多くがサブミリ波では自己散乱が卓越するため、 $100\mu\text{m}$ オーダーのダストサイズが普遍的に存在することを示唆していた。

その一方で、自己散乱以外の散乱メカニズムとしてガス流に整列する機構も着目されてきた (Kataoka et al. 2019)。我々はHL Tauという原始惑星系円盤においてガス流整列と自己散乱のどちらもが寄与していることを発見した (Mori and Kataoka 2021)。その結果、自己散乱はサブミリ波から3mmの波長帯にかけて、広く卓越していることが判明した。この結果は、自己散乱の下の理論と矛盾していることがわかった (e.g., Kataoka et al. 2015)。

本矛盾を解き明かすため、モデリングを進めた結果、従来のコンパクトダストを用いたモデルではなく、高空隙ダストアグリゲイトを用いたモデルであれば結果を説明できることがわかった。その結果、HL Tauにおけるダストの空隙率は30%以上であることが判明した (Zhang et al. 2023, 図2)。本成果は、高空隙ダストアグリゲイトを示唆してきた理論予測 (e.g., Kataoka et al. 2013) と概ね一致しており、理論研究をさらに推し進める観測結果となった。

図1 原始惑星系円盤AS209のミリ波偏光画像。Mori, Kataoka et al. 2019より。中心付近で短軸に平行な偏光ベクトルが卓越しており、これは自己散乱が卓越していることを示す。

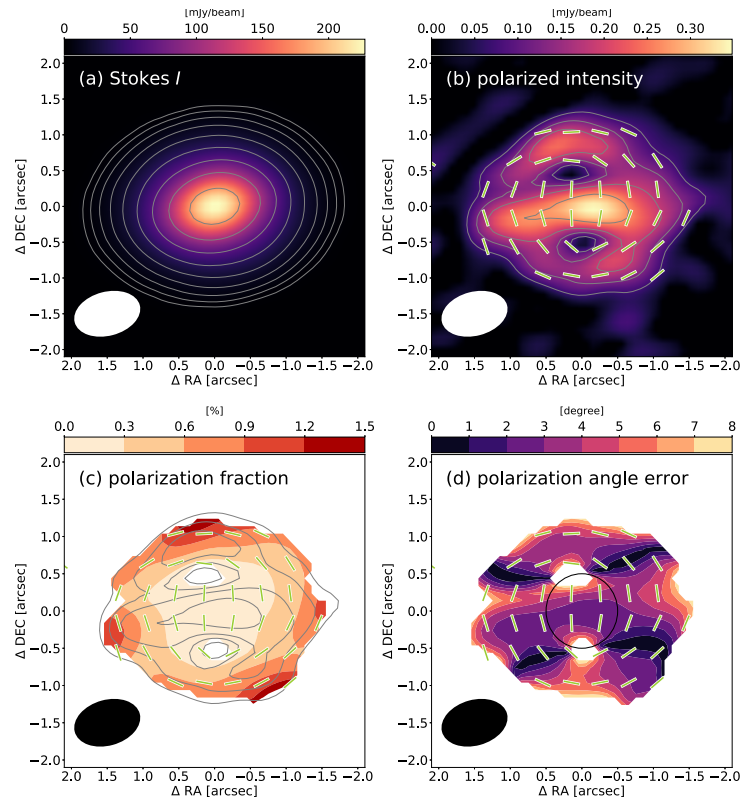
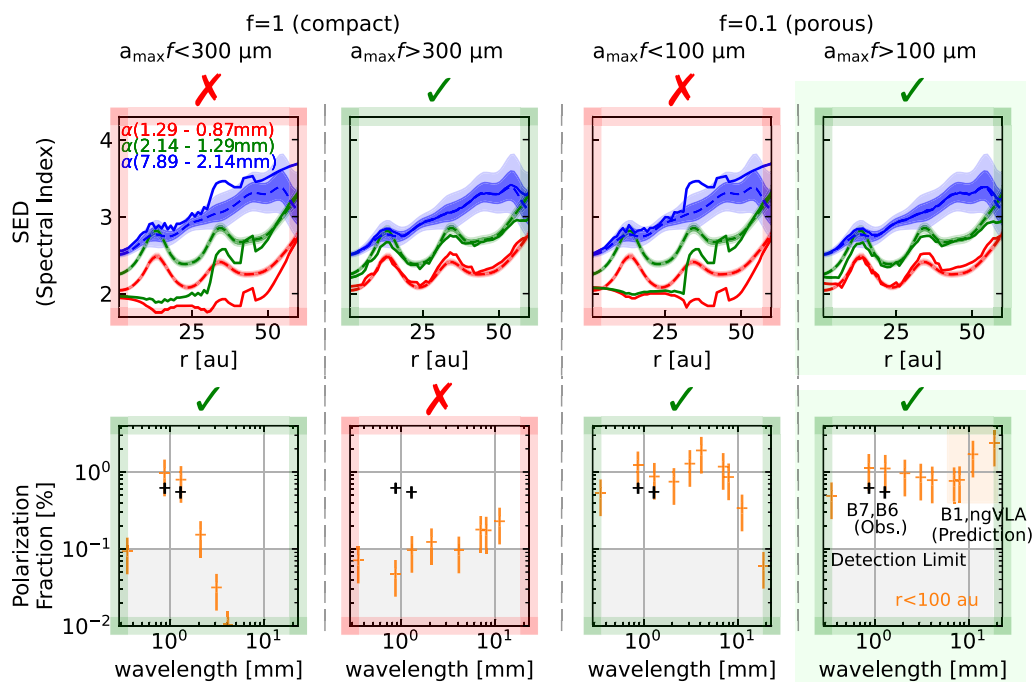


図2: 原始惑星系円盤HL Tauのモデリング結果(Zhang, ... Kataoka, ... et al. 2023)。偏光とスペクトルインデックスの両方を説明するためには、従来のコンパクトダストを用いた場合解がな



い。その一方で、空隙率を考慮した場合、両方を説明する解がある。この結果は、惑星形成においてダスト集合体は高空隙ダストアグリゲイトとなることを示している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ueda Takahiro, Kataoka Akimasa, Tsukagoshi Takashi	4. 巻 930
2. 論文標題 Massive Compact Dust Disk with a Gap around CW Tau Revealed by ALMA Multiband Observations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 56 ~ 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac634d	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 Doi Kiyooki, Kataoka Akimasa	4. 巻 912
2. 論文標題 Estimate on Dust Scale Height from the ALMA Dust Continuum Image of the HD 163296 Protoplanetary Disk	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 164 ~ 164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abe5a6	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 Ueda Takahiro, Kataoka Akimasa, Zhang Shangjia, Zhu Zhaohuan, Carrasco-Gonzalez Carlos, Sierra Anibal	4. 巻 913
2. 論文標題 Impact of Differential Dust Settling on the SED and Polarization: Application to the Inner Region of the HL Tau Disk	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 117 ~ 117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abf7b8	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 Tatsuma Misako, Kataoka Akimasa	4. 巻 913
2. 論文標題 Rotational Disruption of Porous Dust Aggregates due to Gas Flow in Protoplanetary Disks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 132 ~ 132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abf5d9	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; 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
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 Ueda, Takahiro; Kataoka, Akimasa; Tsukagoshi, Takashi	4. 巻 893
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 125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab8223	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 Harrison, Rachel E.; Looney, Leslie W.; Stephens, Ian W.; Li, Zhi-Yun; Yang, Haifeng; Kataoka, Akimasa; Harris, Robert J.; Kwon, Woojin; Muto, Takayuki; Momose, Munetake	4. 巻 877
2. 論文標題 Dust Polarization in Four Protoplanetary Disks at 3 mm: Further Evidence of Multiple Origins	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab1e46	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 Zhu, Zhaohuan; Zhang, Shangjia; Jiang, Yan-Fei; Kataoka, Akimasa; Birnstiel, Tilman; Dullemond, Cornelis P.; Andrews, Sean M.; Huang, Jane; Perez, Laura M.; Carpenter, John M.; Bai, Xue-Ning; Wilner, David J.; Ricci, Luca	4. 巻 877
2. 論文標題 One Solution to the Mass Budget Problem for Planet Formation: Optically Thick Disks with Dust Scattering	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab1f8c	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 Tazaki, Ryo; Tanaka, H.; Muto, T.; Kataoka, A.; Okuzumi, S.	4. 巻 485
2. 論文標題 Effect of dust size and structure on scattered-light images of protoplanetary discs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4951
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz662	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 -

1. 著者名 Tazaki, Ryo; Tanaka, Hidekazu; Kataoka, Akimasa; Okuzumi, Satoshi; Muto, Takayuki	4. 巻 885
2. 論文標題 Unveiling Dust Aggregate Structure in Protoplanetary Disks by Millimeter-wave Scattering Polarization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab45f0	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 -

1. 著者名 Ohashi, Satoshi; Kataoka, Akimasa	4. 巻 886
2. 論文標題 Radial Variations in Grain Sizes and Dust Scale Heights in the Protoplanetary Disk around HD 163296 Revealed by ALMA Polarization Observations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab5107	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 -

1. 著者名 Akimasa Kataoka, Satoshi Okuzumi, Ryo Tazaki	4. 巻 874
2. 論文標題 Millimeter-wave Polarization Due to Grain Alignment by the Gas Flow in Protoplanetary Disks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab0c9a	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 -

1. 著者名 Yang, Haifeng; Li, Zhi-Yun; Stephens, Ian W.; Kataoka, Akimasa; Looney, Leslie	4. 巻 483
2. 論文標題 Does HL Tau disc polarization in ALMA band 3 come from radiatively aligned grains?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2371
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty3263	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; 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
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7件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Akimasa Kataoka
2. 発表標題 disk polarization
3. 学会等名 Five years after HL Tau: a new era in planet formation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akimasa Kataoka
2. 発表標題 Polarized dust emission in protoplanetary disks
3. 学会等名 Workshop on Polarization in Protoplanetary Disks and Jets (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akimasa Kataoka
2. 発表標題 Millimeter-wave polarization in protoplanetary disks
3. 学会等名 Ringberg Workshop: Turbulence and Structure Formation in Protoplanetary Disks 2019: Observation, Theory, and Experiments (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akimasa Kataoka
2. 発表標題 Exploring grain growth, radial drift, and magnetic fields by mmwave polarization
3. 学会等名 Great Barriers in Planet Formation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akimasa Kataoka
2. 発表標題 ALMA polarization observations towards protoplanetary disks
3. 学会等名 Polarimetry in the ALMA era: a new crossroads of astrophysics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akimasa Kataoka
2. 発表標題 Measuring the grain size and finding the magnetic fields by ALMA polarization
3. 学会等名 Planet-Forming Disks (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akimasa Kataoka
2. 発表標題 mm-wave polarization of protoplanetary disks: alignment of scattering?
3. 学会等名 Cosmic Dust and Magnetism 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018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
---------	---------