

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17606

研究課題名(和文)電波観測による惑星形成理論の検証

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・理論研究部・助教

研究者番号：70749308

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：惑星はどのようにできたのだろうか。近年の天文観測装置の飛躍的發展により、ついに惑星形成の現場である原始惑星系円盤の観測が可能となってきた。本研究では、2011年に観測を開始したALMA望遠鏡を使ったミリ波偏光を用いて、惑星を形成途中の固体物質の特性に迫った。その結果、世界で初めてミリ波偏光観測を用いることで固体物質の大きさを測れることを理論的に示すことに成功した。更に、世界初のALMAによる原始惑星系円盤のミリ波偏光観測を行い、理論的に予言された偏光パターンを実証した。このことから、惑星形成途中の固体物質の大きさを、100ミクロン程度であることを突き止めた。

研究成果の概要(英文)：How do planets form? Recent astronomical observations have a great potential to answer this question by directly observing planet-forming disks. In this work, we have used the world-largest radio telescope ALMA to measure the solid materials in the disks, which are believed to be the seeds of planets. First of all, we have theoretically proven that the grain size can be constrained by millimeter-wave polarization observations due to scattering. Furthermore, we have performed ALMA polarimetric observations by ourselves and found the predicted pattern of polarization with ALMA for the first time. Moreover, by modeling the results of polarization, we have constrained the grain size to be 100 micron, which is much lower than expected.

研究分野：惑星形成

キーワード：惑星形成 電波観測 偏光 原始惑星系円盤 ガスト

1. 研究開始当初の背景

ダストの合体成長過程は、惑星形成の前期段階として重要かつ未解明過程である(図1)。ダストの合体成長理論は1970年代に太陽系形成論として構築されたが、理論的に多くの問題が残された。その一方で、1990年代からは原始星周囲の赤外線超過により原始惑星系円盤(以下、円盤)が観測されてきた。円盤は惑星形成の現場であるため、ダスト合体成長時の周囲の環境が明らかとなってきた。2000年代からは、SMAやCARMAといった電波望遠鏡により円盤を空間分解した観測がされてきた。ミリ波は成長途中のダストを直接観測できるため、ダストの合体成長理論を観測から直接確かめることが可能となった。2011年頃より、日本も参加する国際望遠鏡ALMAの初期科学運用によって円盤内のダスト分布が明らかになってきており、飛躍的にデータが増えていくことが期待される。このように、円盤の観測はALMAの登場によって非常に注目されていた。

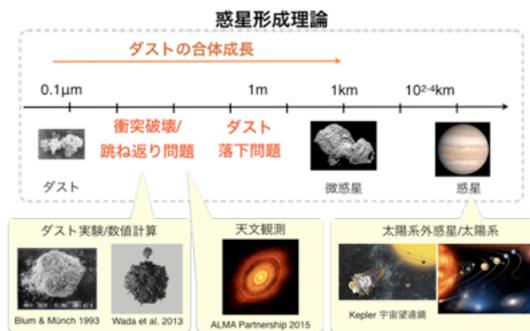


図1 惑星形成の概略図と観測的検証可能性

惑星形成は寿命数百万年程度の原始惑星系円盤の中で起こると考えられており、円盤の中でダストは互いに付着成長し惑星を形成する。原始惑星系円盤は近傍100pc程度の星形成領域に100個ずつ程度観測されており、赤外から電波望遠鏡による観測が可能である。その中でも特に、成長途中のダストのサイズを測ることができれば、ダスト成長の直接的な観測的実証になると言える。

原始惑星系円盤のダストのサイズはどのように推定されてきたのだろうか。原始惑星系円盤はミリ波帯で光学的に薄いと思われており、スペクトル指数を測ることでダストオパシティの傾きが分かる。このオパシティの傾きが星間空間のダストに比べて緩やかであったため、これを説明するにはダストの大きさがミリメートル以上である必要があるという解釈がされてきた(e.g., Beckwith and Sargent 1991)。ところが、近年のALMA望遠鏡の登場により状況が変わった。図2に示すように、ALMAの超基線分解能観測によって、従来は密度分布がスムーズだと考えられてきた円盤が、実際には今まで空間分解できていなかったリング構造の集合体であることがわかった。更に、これらのリングの一

部は光学的に厚いことがわかった。この結果は、ミリメートルサイズのダストだとして解釈してきた低いスペクトル指数は、空間分解されていなかった光学的に厚いリングによって実効的に低くなっていただけの可能性が高いことを示唆している。すなわち、**ダストサイズ解釈は根本的に間違っていた可能性がある**。更に、このような円環状の構造は他の円盤の高分解能観測でも見えてきている(e.g., Isella et al. 2016)。

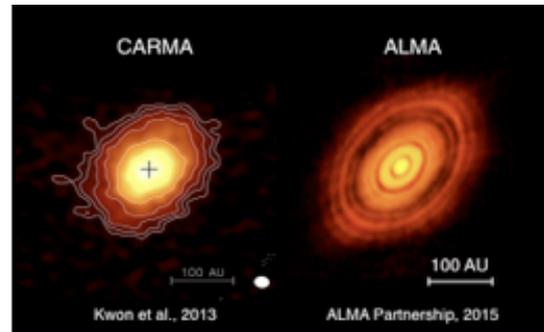


図2 CARMA及びALMAによるHL Tauの観測 (Kwon et al. 2013, ALMA Partnership 2015)

2. 研究の目的

従来の原始惑星系円盤のダストサイズ制限を根本から見直し、惑星形成におけるダストサイズを制限する。

3. 研究の方法

原始惑星系円盤の理論・輻射輸送・観測という多角的な方面から理論の考案及び実証を行う。

4. 研究成果

我々はミリ波偏光観測を用いた新しいダストサイズ測定方法を理論的に提唱した。従来ミリ波偏光は、磁場によって整列した非球形のダストからの輻射によって起こると考えられてきた。実際、銀河系や星形成領域のスケールではこの理論でうまく説明できていた。しかし、原始惑星系円盤からも同様のミリ波偏光放射が期待されていたにも関わらず(Cho and Lazarian 2007)、これまでの電波干渉系では偏光は未検出であった(Hughes et al, 2009, 2011)。これに対し我々は、ダストサイズが観測波長と同程度である場合、自己の熱輻射を光源として散乱偏光した光を検出することができる、**ダスト熱放射の自己散乱理論を提唱した。**輻射輸送計算の結果、原始惑星系円盤からはダスト自己散乱によるミリ波偏光が検出できることがわかった(Kataoka et al. 2015)。更に、今回提唱した散乱由来による偏光はダストサイズと波長が同程度の時のみ検出できることから、**散乱偏光の波長依存性を観測することでダストサイズが測定できることを示した。**

我々は本理論を元にALMA Cycle 3にプロ

ポーザルを提出し、Grade A (世界 Top 10%) で採択された。その結果、ALMA による初めての原始惑星系円盤の偏光観測を検出した(Kataoka et al. 2016b, 図 3)。更に、本結果が従来の磁場による整列由来ではなく、我々の提唱した散乱由来の偏光であることを実証した。更に我々は、ALMA Cycle 4 においての原始惑星系円盤 HL Tau を観測し、観測波長 1.3mm と 3.1mm という小さな違いでの、偏光の強い波長依存性を初めて観測した。この強い波長依存性は散乱偏光の特徴であり、このことから、この原始惑星系円盤のダストサイズは従来思われていたミリメートルやセンチメートル程度ではなく、100 ミクロン程度であることを示した(Kataoka et al. 2017)。

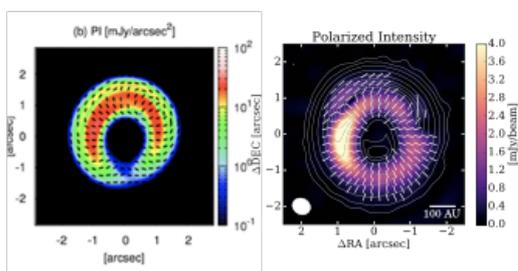


図3 (左) 我々の散乱偏光理論に基づいた、原始惑星系円盤 HD 142527 の観測予測。(右) 我々の ALMA 観測によって得られた偏光放射強度の図。偏光ベクトルが 90 度回転している箇所があり、我々の散乱偏光理論を裏付ける観測である (Kataoka et al., 2016b)。

本研究は、星形成領域及び原始惑星系円盤のミリ波偏光観測の常識を根本的に覆した。従来磁場の方向をトレースしていると思われていた研究が、実際にはダストの散乱であったため、物理的解釈が完全に異なる。観測面においても、世界初・第二の原始惑星系円盤の ALMA 偏光観測を我々がっており、我々がこの分野において世界をリードしている。実際、現在黎明期である星形成・惑星関連の ALMA 偏光観測論文のほぼ全てに我々の理論・観測は引用されている。更に、本結果は原始惑星系円盤におけるダストサイズが従来より 1-2 桁小さい 100 ミクロン程度であることを示唆しており、もしこれが一般的であれば惑星形成理論も大きな修正を迫られる。これらの研究は、理論・輻射輸送・観測を全て自分で行える上惑星形成及び偏光観測両方に明るい私ならではの成果である。

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 6 件)

以下すべて査読あり

[1] 偏光の ALMA 3 波長依存性を証明。
"ALMA Reveals Transition of Polarization Pattern with Wavelength in HL Tau's Disk"
Ian W. Stephens, Haifeng Yang, Zhi-Yun

Li, Leslie W. Looney, Akimasa Kataoka, Woojin Kwon, Manuel Fernández-López, Charles L. H. Hull, Meredith Hughes, Dominique Segura-Cox, Lee Mundy, Richard Crutcher, and Ramprasad Rao, *The Astrophysical Journal*, 851, 55 (2017)
DOI: 10.3847/1538-4357/aa998b

[2] 世界二例目の原始惑星系円盤の ALMA 偏光観測。偏光の波長依存性を証明。

"The Evidence of Radio Polarization Induced by the Radiative Grain Alignment and Self-scattering of Dust Grains in a Protoplanetary Disk"

Akimasa Kataoka, Takashi Tsukagoshi, Adriana Pohl, Takayuki Muto, Hiroshi Nagai, Ian W. Stephens, Kohji Tomisaka, and Munetake Momose, *The Astrophysical Journal Letters*, 844, L5 (2017)
DOI: 10.3847/2041-8213/aa7e33

[3] 世界初の原始惑星系円盤の ALMA 偏光観測。散乱偏光を実証。

"Submillimeter polarization observation of the protoplanetary disk around HD 142527"

Akimasa Kataoka, Takashi Tsukagoshi, Munetake Momose, Hiroshi Nagai, Takayuki Muto, Cornelis P. Dullemond, Adriana Pohl, Misato Fukagawa, Hiroshi Shibai, Tomoyuki Hanawa, Koji Murakawa, *The Astrophysical Journal Letters*, 831, 12 (2016)
DOI: 10.3847/2041-8205/831/2/L12

[4] ダスト合体成長理論による原始惑星系円盤の散乱偏光の理論予測。

"Investigating dust trapping in transition disks with millimeter-wave polarization"

A. Pohl, A. Kataoka, P. Pinilla, C. P. Dullemond, Th. Henning and T. Birnstiel, *Astronomy and Astrophysics*, 593, A12 (2016)
DOI: 10.1051/0004-6361/201628637

[5] 原始惑星系円盤 HL Tau のミリ波偏光観測の散乱による解釈。

"Grain Size Constraints on HL Tau with Polarization Signature"

Akimasa Kataoka, Takayuki Muto, Munetake Momose, Takashi Tsukagoshi, and Cornelis P Dullemond, *The Astrophysical Journal*, 820, 1 (2016)
DOI: 10.3847/0004-637X/820/1/54

[6] 原始惑星系円盤のダスト散乱偏光を理論的に提唱。

"Millimeter-wave polarization of protoplanetary disks due to dust

scattering”

Akimasa Kataoka, Takayuki Muto, Munetake Momose, Takashi Tsukagoshi, Misato Fukagawa, Hiroshi Shibai, Tomoyuki Hanawa, Koji Murakawa, Cornelis P. Dullemond, *The Astrophysical Journal*, 809, 78 (2015)

DOI: 10.1088/0004-637X/809/1/78

[学会発表] (計 12 件)

[1]

“Millimeter-wave polarization of protoplanetary disks: alignment or scattering?”

Akimasa Kataoka [oral]

“Magnetic Fields or Turbulence: Which is the critical factor for the formation of stars and planetary disks?” (Feb. 6–Feb. 9, 2018 @ National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan)

[2]

“Measuring the grain size in protoplanetary disks by ALMA polarization observations”

Akimasa Kataoka [oral]

“The origin of galaxies, stars, and planets in the era of ALMA – A Symposium to honor Professor Anneila Sargent” (Nov. 29–Dec. 1, 2017 @ Caltech, Pasadena, U. S.)

[3]

“millimeter-wave polarization as a tool of investigating the planet formation”

Akimasa Kataoka [oral, invited]

“East-Asia ALMA Science Workshop 2017 – Korea” (Nov. 27–29, 2017 @ KASI, Daejeon, Korea)

[4]

“millimeter-wave polarization of protoplanetary disks: alignment or scattering?”

Akimasa Kataoka [oral, review, invited]

“Submm/mm/cm QUESO Workshop 2017” (Oct. 25–25, 2017 @ ESO, Garching, Germany)

[5]

“millimeter-wave polarization as a tool of investigating the planet formation”

Akimasa Kataoka [oral, invited]

“JpGU-AGU Joint Meeting 2017” (May. 20–25, 2017 @ Makuhari Messe, Chiba, Japan)

[6]

“Millimeter-wave polarization as a tool of investigating the planet formation”

Akimasa Kataoka [oral]

“East-Asian ALMA Science Workshop

2016-Taiwan” (Mar. 10–12, 2017 @ National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan)

2016

[7]

“Dust coagulation with porosity evolution”

Akimasa Kataoka [oral]

“Missing links from disks to planets” – Konkoly/MPIA workshop 2016 (Oct. 10–13, 2016 @ Konkoly Observatory, Budapest, Hungary)

[8]

“ALMA revolution on planet formation”

Akimasa Kataoka [oral, review, invited]

Japan-German planet & disk workshop (Sep. 25–30, 2016 @ Beach Hotel Sunshine, Ishigaki, Japan)

[9]

“Millimeter-wave polarization of protoplanetary disks due to dust scattering”

Akimasa Kataoka [oral]

Resolving planet formation in the era of ALMA and extreme AO (May. 16–20, 2016 @ ESO, Santiago, Chile)

[10]

“Dust coagulation with porosity evolution; effects on planetesimal formation and opacity evolution”

Akimasa Kataoka [oral, awarded]

“Workshop on Young Solar Systems” – 4th Session of the Sant Cugat Forum on Astrophysics (Apr. 18–22, 2016 @ Sant Cugat Hotel, Sant Cugat, Spain)

[11]

“Dust coagulation with porosity evolution; effects on planetesimal formation and opacity evolution”

Akimasa Kataoka [oral]

Planet Formation and Evolution 2016 (Mar. 7–9, 2016 @ University of Duisburg-Essen, Duisburg, Germany)

2015

[12]

“Planetesimal formation via fluffy dust aggregates”

Akimasa Kataoka [oral]

Workshop: Silicates in Space (Sep. 28–Oct. 1, 2015 @ Heidelberg University, Heidelberg, Germany)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

片岡 章雅 (Kataoka, Akimasa)

国立天文台・理論研究部・助教

研究者番号: 70749308