

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13595

研究課題名(和文) 分子雲コアから星団形成へ、そして原始星円盤の角運動量の起源を探る

研究課題名(英文) Revealing the initial conditions of molecular dense cores and investigating the origin of the angular momentum

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では星・惑星系の形成を、その母体となる分子雲コアの詳細な観測と、その後形成される原始惑星系円盤のミリ波偏光観測に着目し調べた。分子雲コアの観測から重力不安定によってコアが分裂し、複数の星が同時に誕生していく様子を明らかにした。また、円盤のミリ波偏光観測では、ダストのサイズによって偏光メカニズムが異なることを観測とモデルを駆使して明らかにした。また詳細な偏光モデルを作成し、観測と比較することで、原始惑星系円盤HD 163296では、リングとギャップではダストサイズが異なることを示した。さらに、この円盤では乱流が内側では小さくなっていることも明らかにできた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球を有する太陽系のような星・惑星系の形成を理解することは、太陽系や生命の起源だけでなく銀河形成などの宇宙論的な問題や宇宙の歴史を知るといった、宇宙科学の根源的な問いに答える。本研究は、星形成を起こす直前の分子雲コアを詳細に観測し、その物理状態を明らかにすることで複数の星が重力不安定によって誕生する様子を示唆した。さらに原始惑星系円盤ではミリ波偏光のメカニズムを新たに解明し、ダストサイズが偏光メカニズムを変える重要な要因であることを示し、実際にダストが円盤内で成長し惑星系形成を開始する様子を捉えた。

研究成果の概要(英文)：The formation of stars and planetary systems is investigated by detailed observations of molecular cloud cores and millimeter-wave polarization observations of protoplanetary disks. Observations of the molecular cloud core reveal how the core splits due to gravitational instability and how multiple stars are born at the same time. In the millimeter-wave polarization observation of the disk, we show that the polarization mechanism is different depending on the size of the dust by using observations and models. A detailed polarization model and comparison with observations show that the dust size of the protoplanetary disk HD 163296 is different between the rings and the gaps. Furthermore, it was found that the turbulence in this disk is smaller in the inner part of the disk.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：原始惑星系円盤 分子雲コア 星形成 惑星系形成 電波天文 偏光

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

太陽系のような星・惑星系は母体となる分子雲コアが重力崩壊することで形成すると考えられている。そのため、星形成を起こす分子雲コアの密度や温度、角運動量分布といった初期条件は、中心星への質量降着や、その周りで円盤を作る上で非常に大きな役割を果たす。そのため、星形成を起こす初期条件がすでに備わっている分子雲コアを詳細に観測することが重要となる。また、円盤でダストが成長することで惑星形成へと進むことが考えられるが、円盤内でのダストの分布はよくわかっていない。原始惑星系円盤のダスト分布を観測から明らかにすることは、惑星形成を調べる上でも重要となる。

2. 研究の目的

これまでの研究によって、化学進化の観点から星形成直前のコア(分子雲コア)を発見した。この分子雲コアの物理化学状態を丁寧に調べることで、太陽質量程度の星がどのように形成し、個々の星が質量を獲得するのかを知る。さらに角運動量分布をもとに惑星の誕生現場である原始惑星系円盤の形成・進化の解明につなげる。

3. 研究の方法

(1) ALMA 望遠鏡を用いた高解像度、高感度の観測によって星形成直前の分子雲コアを 2000 au スケールでガスの化学組成の様子やコアの運動、内部分裂の様子を明らかにする

(2) 原始惑星系円盤のミリ波ダスト偏光に着目し、偏光の起源を明らかにするだけでなく、円盤内でのダスト分布の様子を探る。

4. 研究成果

(1) 星形成直前の分子雲コアを ALMA で詳細に観測し、当初の予定通り、その物理状態を調べ論文として出版した (Ohashi et al. 2018a)。分子雲コアを CH_3OH と N_2H^+ の分子輝線を用いて観測したところ、分子雲コアを囲うように CH_3OH が分布していることがわかった。 CH_3OH 分子はダストの表面で生成され、何らかの方法で気相へと脱離すると考えられている。本研究では、宇宙線によって 2 次的に生成された紫外線がダストへ当たることで CH_3OH がガスへと解放されることを示すことができた。また、 N_2H^+ 分子の分布は 3mm ダスト連続波と似た分布をしており、分子雲コアの中でいくつかの塊を同定した。塊が 0.035 pc 程度の等間隔で分布していることから、分子雲コアがさらに重力不安定で分裂していることを意味する。これらは、分子雲コア内でいくつかの星が誕生していくことを示し、分子雲コアの分裂が連星や星団を形成する上で重要になってくることを示した。

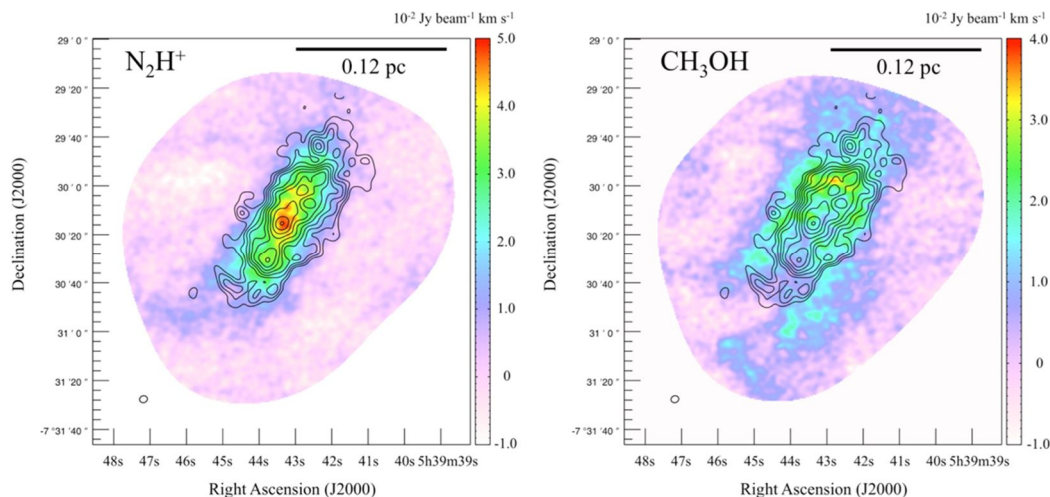


図 1 ALMA-ACA 合成データから得られた TUKH122 コア方向の N_2H^+ (右図) と CH_3OH (左図) の積分強度画像。速度範囲は $3.4 - 4.0 \text{ km s}^{-1}$ である。コントラストは 3mm ダスト連続波の分布を表す。(Ohashi et al. 2018a)

(2) 原始惑星系円盤 HD 142527 の詳細なミリ波偏光観測を行い、その偏光起源を探った。偏光を生み出す機構として、1. ダストの散乱、2. 磁場に整列したダストの熱放射、3. 輻射勾配に整列したダストの熱放射などが挙げられる。そこで、各メカニズムで予想される偏光ベクトルと実際に観測された偏光ベクトルを比較することで、偏光の起源を調べた。その結果、円盤のミリ波強度が強い領域では、ダストの散乱により、強度の弱い領域は、磁場に整列したダストの熱放射で偏光が説明できた。一つの円盤かつ同じ観測波長で異なる偏光メカニズムが生まれる理由として、ダストのサイズ分布が偏っていることを提唱した。これは局所的にダストが成長するこ

とで、偏った強度分布を観測で示すこととも一致し、偏光の起源としてダストサイズが重要であるという新たな描像を示すことができた。この結果は論文として出版した (Ohashi et al. 2018b)。

また別の原始惑星系円盤 HD 163296 に対しても、ミリ波偏光観測データを用いて、ダストのサイズ分布を調べた。この円盤はリング-ギャップ構造を持つことで知られているが、ミリ波散乱の観測でもリングやギャップ構造を同定している。そこで散乱を考慮した輻射輸送計算を行い、モデルを作成することで、観測結果を説明するダストサイズ分布を明らかにした。その結果、リングでは散乱が観測できないダストサイズ (100 ミクロンよりも小さいあるいは大きなダスト) が存在し、ギャップ領域では散乱が観測されるダストサイズ (~ 100 ミクロン) が存在すると観測を説明できることがわかった。さらに、偏光ベクトルと偏光強度を詳細に調べることで、ダストのスケールハイトにも制限を加えることができることが新たに分かった。HD 163296 円盤では内側ほどダストのスケールハイトが小さく、外側ではフレアしている必要があることが分かった。ダストのスケールハイトは乱流の強度に強く依存するため、円盤の内側ほど乱流が小さく、外側で強くなっていることを意味する。このように偏光観測と輻射輸送計算からリング構造を持つ円盤のダストサイズ分布だけでなく、乱流の様子まで明らかにすることができた。この結果も論文として出版した (Ohashi & Kataoka 2019)。

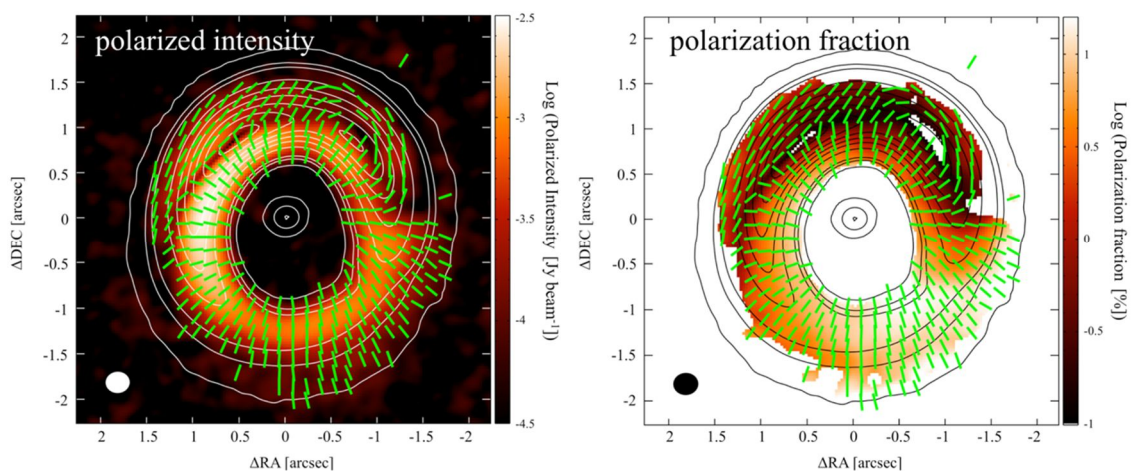


図 2 偏光強度と偏光率のマップを対数スケールで色分けして示す。等値線は 0.87 mm ダスト連続波の分布を示し、緑色のベクトルは偏光ベクトルである。(Ohashi et al. 2018b)

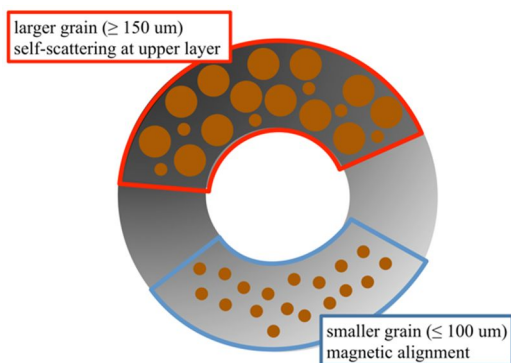


図 3 HD 142527 周辺の円盤の模式図。グレースケールの強度はディスクの強度分布を表す。赤と青で示された領域は、それぞれ自己散乱による偏光領域と、トロイダル磁場によるダストの整列による偏光領域を示し、これらの異なる偏光メカニズムは、粒径分布の違いによって説明できる。(Ohashi et al. 2018b)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 1件）

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 ~ 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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	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 Takekoshi Tatsuya, Fujita Shinji, Nishimura Atsushi, Taniguchi Kotomi, Yamagishi Mitsuyoshi, Matsuo Mitsuhiro, Ohashi Satoshi, Tokuda Kazuki, Minamidani Tetsuhiro	4. 巻 883
2. 論文標題 Nobeyama 45 m Cygnus-X CO Survey. II. Physical Properties of C18O Clumps	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 156 ~ 156
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab3a55	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 Nakatani Riuhei, Liu Hanyu 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, 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, Sanhueza Patricio, Sakai Nami, Kandori Ryo, Choi Minh, Hirota Tomoya, Nguyen-Lu 'o ' ng Quang, Tatematsu Ken ' ichi	4. 巻 856
2. 論文標題 Gravitationally Unstable Condensations Revealed by ALMA in the TUKH122 Prestellar Core in the Orion A Cloud	5. 発行年 2018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/aab3d0	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 Chen Hwei-Ru Vivien, Zhang Qizhou, Wright M. C. H., Busquet Gemma, Lin Yuxin, Liu Haiyu Baobab, Olguin F. A., Sanhueza Patricio, Nakamura Fumitaka, Palau Aina, Ohashi Satoshi, Tatematsu Ken ' ichi, Liao Li-Wen	4. 巻 875
2. 論文標題 Filamentary Accretion Flows in the Infrared Dark Cloud G14.225-0.506 Revealed by ALMA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 24 ~ 24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab0f3e	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 Sakai Nami, Hanawa Tomoyuki, Zhang Yichen, Higuchi Aya E., Ohashi Satoshi, Oya Yoko, Yamamoto Satoshi	4. 巻 565
2. 論文標題 A warped disk around an infant protostar	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 206 ~ 208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-018-0819-2	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

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Satoshi Ohashi
2. 発表標題 Observations for protoplanetary disks: From ALMA to ngVLA
3. 学会等名 next generation VLA workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Ohashi
2. 発表標題 Radial variations of grain size and turbulence in protoplanetary disks revealed by ALMA polarization
3. 学会等名 East-Asian ALMA Science Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Ohashi
2. 発表標題 Radial variations of grain sizes and dust scale heights of the protoplanetary disk around HD 163296 revealed by ALMA polarization observation
3. 学会等名 Planet Formation Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Ohashi
2. 発表標題 Understanding distributions of grain sizes and turbulence in protoplanetary disks
3. 学会等名 Science with the Submillimeter Array: Present and Future (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Ohashi
2. 発表標題 Radial variations of grain sizes and dust scale heights on the protoplanetary disk of HD 163296
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 Satoshi Ohashi
2. 発表標題 Grain size distributions in HD 163296 studied by ALMA polarization observation
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 Satoshi Ohashi
2. 発表標題 Radial variations of grain size in the HD 163296 protoplanetary disk revealed by ALMA polarization
3. 学会等名 Workshop on Polarization in Protoplanetary Disks and Jets (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大橋聡史、片岡章雅
2. 発表標題 原始惑星系円盤HD 163296のALMAミリ波偏光観測で探るダスト分布
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Ohashi
2. 発表標題 Different Polarization Mechanisms in Protoplanetary Disks
3. 学会等名 First TagKASI International Conference: Cosmic Dust and Magnetism (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
--	---------------------------	-----------------------	----