

ALMAによる原始惑星系円盤観測の概観

Review of observations of protoplanetary disks with ALMA

*百瀬 宗武¹*Munetake Momose¹

1.茨城大学理学部

1.The College of Science, Ibaraki University

The Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA) started its science operation in 2011. Thanks to its high sensitivity and mapping capability, ALMA has revealed detailed structure of nearby protoplanetary disks, providing us with new informations about the formation of a planetary system in general. In particular, long-baseline campaign observations of HL Tau with $\sim 3\text{au}$ resolution revealed ring-gap structure in the protoplanetary disk, demonstrating that ALMA will be a powerful tool for exploring disks around young stars. Possible origins of the ring-gap structure revealed in the disk associated with HL Tau will be presented in this talk. Observations of disks with deficient emission at near-infrared wavelengths (so called "transitional disks") will also be reviewed. It has been proven that these disks commonly show intriguing features, such as asymmetric distribution of emission and significant spatial variation of gas-to-dust mass ratio. I will discuss the importance of these features when one examines the generalized scenario for planet formation.

キーワード：アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計、原始惑星系円盤

Keywords: Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA), Protoplanetary disks

ALMA観測のとらえた原始星コアと原始惑星系円盤の揮発性物質

Observations of volatiles in protostellar cores and protoplanetary disks

*相川 祐理¹*Yuri Aikawa¹

1.筑波大学計算科学研究センター

1.Center for Computational Sciences, University of Tsukuba

近年のALMA観測で見えてきた星・惑星系形成過程における揮発性物質の組成やその進化について、関連する他の望遠鏡での観測や理論モデルとともに概観する。

太陽程度の質量の星は低温・高密度の分子雲コアの重力収縮によって生まれる。冷たい分子ガス中では、気相だけでなくダスト表面でも水素付加などの反応が起こっていると考えられる。実際、赤外線の吸収バンド観測によって水や二酸化炭素、メタノールなどの氷が冷たい分子雲や原始星コアで検出されている。しかし、赤外吸収で検出できる分子種は比較的存在度が高く（氷水に対して相対存在度が 10^{-3} 以上、気相の水素分子に対して 10^{-7} 以上）、明確な吸収バンドを持つものに限られる。原始星の誕生が誕生すると、それまでダスト表面に凍結していた様々な分子が原始星からの加熱によって昇華し、電波で観測できるようになる。原始星コア中心部では、ALMA以前の電波観測で既に様々な大型有機分子や炭素鎖分子が観測されていた(Ceccarelli et al. 2007; Sakai et al. 2008)。ALMAでの原始星コア観測では、まずScience Verification Programにおいて、最も簡単な糖であるGlycolaldehydeが検出された(Jorgensen et al. 2012)。一般的に原始星コア中心での大型有機分子の分布は非常にコンパクトであり(Taquet et al. 2015)、その存在度の定量的な評価にはALMAによる高空間分解能観測が必要である。Herschel やIRAM干渉計での観測ではコア中心で昇華した水分子の同位体比 $D_2O/HDO/H_2O$ 比も測られている(Coutens et al. 2014)。 HDO/H_2O 比が $\sim 1.7 \times 10^{-3}$ であるのに対し、 D_2O/HDO 比は $\sim 1.2 \times 10^{-2}$ と7倍高い値となっている。この重水素比は、星間空間での水の生成が分子雲形成時と高密度分子雲コアの2段階で起きたと考えると自然に説明できる(Furuya et al. 2016)。一方、一酸化炭素、炭素鎖分子、一酸化硫黄などのALMA観測では、原始星周囲での円盤形成過程が見えてきた(Sakai et al. 2014a; 2014b; Ohashi et al. 2014)。特に一酸化硫黄は、位置-速度図から原始星を取り巻くリング状に分布すると考えられ、分子雲から円盤へのガス降着による衝撃波領域をとらえている可能性がある。

エンベロープの散逸した原始惑星系円盤(Class II天体)においては、ALMAでの高空間分解能観測によって輝線強度の空間分布が明らかになってきた。円盤化学組成の理論モデルとしては、円盤を厚さ方向に光解離層、温かい分子層、凍結層の3層に分類する3層モデル(Aikawa et al. 1999; Aikawa et al. 2002; Bergin et al. 2007)が考えられてきたが、Rosenfeld et al. (2013)はCO観測で得られたchannel mapで、初めてこの鉛直構造を捉えた。また、半径方向に円盤を空間分解した観測も多く行われている。特に N_2H^+ や DCO^+ はリング状の強度分布を示し、COのsnow lineとの相関が示唆されている(Qi et al. 2013; Matthews et al. 2013; Oberg et al. 2015; Aikawa et al. 2015)。理論モデルによると N_2H^+ は円盤中心面での電離率を探る良い指標でもある(Cleaves et al. 2015; Aikawa et al. 2015)。より複雑な分子の観測としては、大型有機分子であるアセトニトリル(CH_3CN)の初検出が挙げられる(Oberg et al. 2015)。アセトニトリルは気相反応でもダスト表面反応でも生成されるが、ダスト表面反応まで含むモデルのほうが、同時に観測されたHCN、 HC_3N との存在比をよく説明できる。また、様々な輝線で詳細な観測、モデル化の行われている有名天体TW Hyaにおいては、HD輝線とCO輝線強度の比較などから、一酸化炭素がその昇華温度を超える温かい領域でも1-2桁減損している、つまりほとんどの一酸化炭素が化学反応によって他の分子に変換されているのではないかという議論が進んでいる(Favre et al. 2013)。理論モデルにおいては、数10Kの領域で一酸化炭素がより昇華温度の高い二酸化炭素、メタノール、炭化水素の氷に変換される現象が知られている(Aikawa et al. 1999; Bergin et al. 2014; Furuya et al. 2014)。一酸化炭素は通常、最も存在度の高い炭素系分子であるから、一酸化炭素の減損が明らかになれば、それは円盤内の炭素の主要形態の変化を意味する。

キーワード：星間化学、原始惑星系円盤、星・惑星系形成

Keywords: astrochemistry, protoplanetary disks, star- and planetary system-formation

原始惑星系円盤につくられる惑星形成過程の兆候

Signs on Protoplanetary Disks Created by Planet Formation Processes

*田中 秀和¹、金川 和弘²、村川 幸史³*Hidekazu Tanaka¹, Kazuhiro Kanagawa², Murakawa Koji³

1.東北大学・天文、2.シュチェチン大学、3.大阪産業大学

1.Astronomical Institute, Tohoku University, 2.University of Szczecin, 3.Osaka Sangyo University

惑星形成過程において原始惑星円盤に観測可能な様々な構造がつくられることが、理論研究から予言されている。よって、ALMA等の高解像度観測で多くの原始惑星円盤を観察することにより、惑星形成現場の貴重な情報が取得されることが期待される。

惑星形成初期におけるダスト成長過程は、円盤の温度や輻射場を大きく変える。ダストは輻射の主な吸収・放射源であり、その成長は光吸収係数を大幅に減少させるためである。ダスト成長が進行する時間は、円盤質量や温度によらずケプラー回転周期の数百倍程度と理論から予言されている。ダスト成長とそれに伴う光吸収係数の減少は、回転周期が短い円盤内側領域では急速に進むが、外側領域ではゆっくり進行する。このような円盤各所のダスト成長に伴い、円盤温度と輻射場がどのように変化するかを輻射輸送計算により調べた。その結果、ダスト成長が進行した内側領域と成長が遅れている外側領域との境界において、効率よく中心星光が吸収され、高温かつ高輝度なリング構造がつくられることが示された。このようなリング構造が観測されれば、ダスト成長時間を基準時計として用いることにより、円盤年齢を精度よく決定できる。

一方、惑星形成過程が進行し巨大ガス惑星が生まれると、その軌道に沿ってリング状にガス密度が低下したギャップ構造が形成される。多数の流体計算を行うことで、惑星がつくるギャップ構造を詳細に調べた。その結果、ギャップの幅については惑星質量の1/2乗に比例するという経験式を得た。円盤ギャップ構造が観測されそれが惑星に起因するものであれば、この経験式からそこにある惑星の質量を推定することができる。

円盤内側と外側とでは惑星形成過程の進行度合いが大きく異なるので、上記の高輝度リング構造とギャップ構造の両方が1つの原始惑星系円盤にみつかる可能性もあるだろう。そのような天体では惑星質量とその惑星の形成時間が同時測定され、惑星形成論に重要な制約を与えることができる。

キーワード：アルマ、原始惑星系円盤、ダスト、巨大惑星

Keywords: ALMA, protoplanetary disk, dust, giant planet

アルマによるTW Hya周りの原始惑星系円盤中のギャップとリングの観測

ALMA Observations of a Gap and a Ring in the Protoplanetary Disk around TW Hya

*野村 英子¹、塚越 崇²、川邊 良平³、石本 大貴^{4,1}、奥住 聡¹、武藤 恭之⁵、金川 和弘⁶、井田 茂⁷、キャサリン ウォルシュ⁸、トム ミラー⁹、バイ シューニン¹⁰

*Hideko Nomura¹, Takashi Tsukagoshi², Ryohei Kawabe³, Daiki Ishimoto^{4,1}, Satoshi Okuzumi¹, Takayuki Muto⁵, Kazuhiro Kanagawa⁶, Shigeru Ida⁷, Catherine Walsh⁸, Tom J Millar⁹, Bai Xue-Ning¹⁰

1.東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻、2.茨城大学理学部、3.国立天文台、4.京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室、5.工学院大学基礎・教養教育部門、6.シュチェチン大学、7.東京工業大学地球生命研究所、8.ライデン大学、9.クィーンズ大学ベルファスト、10.ハーバード・スミソニアン天体物理学センター

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2.College of Science, Ibaraki University, 3.National Astronomical Observatory of Japan, 4.Department of Astronomy, Graduate School of Science, Kyoto University, 5.Division of Liberal Arts, Kogakuin University, 6.University of Szczecin, 7.Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 8.Leiden Observatory, Leiden University, 9.Astrophysics Research Centre, School of Mathematics and Physics, Queen's University Belfast, 10.Institute for Theory and Computation, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics

近年の赤外線・電波観測技術の向上により、原始惑星系円盤の観測的研究が急激に進展している。すばる望遠鏡などの高空間分解能近赤外線撮像観測により、円盤内のギャップや渦状腕構造など、惑星形成を示唆する結果が得られてきた。また、大型ミリ波サブミリ波望遠鏡アルマによる高空間分解能・高感度観測は、円盤内の惑星形成領域の物理・化学構造を明らかにすると期待される。

本講演では、TW Hyaまわりの原始惑星系円盤のALMAによる観測結果を報告する。TW Hya円盤は我々の太陽系から最も近傍に位置する原始惑星系円盤で、これまで詳細な観測的研究がなされてきた。我々がALMAで336GHzダスト連続放射の観測を行った結果、ギャップとリング構造を発見した。これらの位置は、すばる望遠鏡の近赤外線撮像観測で見つかったギャップの位置と同程度であった。惑星によるギャップ形成の理論によると、観測されたギャップが惑星起源の場合、海王星よりやや重たい質量の惑星でギャップが形成された可能性がある。一方、ダスト表面の氷の焼結が起源とすると、COとCH₄の焼結領域の狭間にギャップが形成された可能性がある。

キーワード：原始惑星系円盤、ダスト放射、ギャップ・リング

Keywords: protoplanetary disks, dust continuum emission, gap and ring

ALMAを利用した金星大気力学および大気化学の研究

Solar system observations with ALMA: Understanding the dynamics and chemistry of Venus atmosphere

*佐川 英夫¹、前澤 裕之²、西合 一矢²、青木 翔平³、中川 広務⁴

*Hideo Sagawa¹, Hiroyuki Maezawa², Kazuya Saigo², Shohei Aoki³, Hiromu Nakagawa⁴

1.京都産業大学理学部、2.大阪府立大学、3.Istituto Nazionale di Astrofisica、4.東北大学

1.Faculty of Science, Kyoto Sangyo University, 2.Osaka Prefecture University, 3.Istituto Nazionale di Astrofisica, 4.Tohoku University

Venus, a neighbor planet of the Earth, has atmosphere significantly different from that of our planet. It is covered by a dense CO₂ atmosphere and thick H₂SO₄ clouds. Although the planet itself rotates with a very slow speed (1.4 m/s), the Venus atmosphere moves about 60 times faster than the surface. Such a zonal wind (a.k.a. "super-rotation") governs the dynamics of Venus atmosphere below the cloud layer. On the other hand, different characteristics in the wind pattern appear in the upper atmosphere. One of the most predominant components of the atmospheric dynamics in the upper atmosphere is the sub-solar-to-anti-solar (hereafter, "SSAS") flow, driven by the thermal gradient between the dayside and nightside. It is considered that the superimposition of these two (zonal and SSAS) wind patterns is the key to describe the dynamics in the middle atmosphere (mesosphere) of Venus [Lellouch et al., 1997].

The wind in the Venus middle atmosphere has been investigated through the Doppler shift measurements of submm/mm CO absorption lines. Recent observations [e.g., Clancy et al., 2010, Moullet et al., 2012] revealed that the strengths of the zonal and SSAS flows (in a global scale) are highly time variable, and also localized significant inhomogeneity exists. Such temporal and spatial variability may be induced by activities of waves (gravity wave, for example), as predicted by GCM numerical simulations [e.g., Hoshino et al., 2012]. To advance the understanding on Venus dynamics, observational information with "high spatial resolution" and "high temporal resolution" are most required. Using single-dish submm/mm telescope often has a limitation in the spatial resolution (~10 arcsec, typically). Some improvement in the spatial resolution has been achieved by previous submm/mm interferometric observations but at the expense of the time resolution (~one day). Considering these facts, it can be said that ALMA is one of the most favorable facilities to study the atmospheric dynamics in Venus: ALMA provides a spatial resolution of sub-arcsec level with only a couple of minute's data integration, i.e., "snap-shot" of Venus map in submm/mm wavelengths.

In addition to the scientific interest on the atmospheric dynamics, understanding the chemistry (including the chemistry related to H₂SO₄-cloud formation) in the Venus atmosphere is also a scientific subject which has been debated for years. ALMA can be a very powerful tool for this scientific interest as well. Its high sensitivity enables the observations of minor species such as SO_x and HDO, and also its capability of observing at higher frequencies opens a door to the mapping of newly observed species such as HCl. HCl is an important reservoir for highly reactive chlorine (ClO_x) species. While HCl was detected from ground for the first time in 2010 at 625 GHz [Sandor and Clancy, 2012], its spatial and diurnal variations are still left unrevealed.

In this study, we review the new findings with respect to the atmospheric dynamics and chemistry of Venus during the ALMA early science operations. Encrenaz et al. (2015) successfully observed Venus with ALMA in the Cycle-0 semester. They obtained the distribution maps of CO, SO, SO₂, and HDO. The SO and SO₂ maps showed significant local variations and also day-to-day temporal variation. From their CO data, the wind map can be also derived [Encrenaz, in private communications].

Subsequently, in the Cycle-2 semester, we challenged Venus HCl mapping using Band-9 (625 GHz) configuration. Unfortunately the quality of observation was severely limited due to the very low elevation angle of Venus. Careful data reduction is on-going, and we will present the first results obtained from the ALMA Band-9 observations.

キーワード：金星、惑星大気、ALMA

Keywords: Venus, Planetary Atmosphere, ALMA

ALMAアーカイブデータ解析によるTitan大気中のCH₃CNの鉛直分布The vertical distribution of CH₃CN in Titan's atmosphere by the ALMA archive data analysis*仲本 悟¹、平原 靖大¹、飯野 孝浩²、中山 勇麻³*Satoru Nakamoto¹, Yasuhiro Hirahara¹, Takahiro IINO², Yuma Nakayama³

1.名古屋大学大学院環境学研究科、2.東京農工大学科学博物館、3.名古屋大学理学部地球惑星科学科

1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2.Nature and Science Museum, Tokyo University of Agriculture and Technology, 3.Department of Earth and Planetary Sciences, School of Science, Nagoya University

We report the analysis of CH₃CN (methyl cyanide) in Titan's atmosphere using the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) archive data ranging from 275 to 350 GHz. We developed a radiative transfer code for the multiple emission lines of CH₃CN in spherically symmetric distribution within the synthetic beamshape of ALMA, and derived the optimized vertical abundance profile for CH₃CN by the fittings of spectral line shapes. It was found that the abundance of CH₃CN readily increases around 200 km altitude, and then decreases along with the higher altitude. This result disagrees with various photochemical calculations for Titan's atmosphere, showing that the mole fraction of CH₃CN has a peak around 1000 km altitude. In contrast, our result is in reasonable accordance with that observed by the Cassini/Composite Infrared Spectrometer (CIRS) for the vertical distribution of HCN, which is as stable as CH₃CN from a chemical point of view. Our results also suggest the effect of Titan's atmospheric dynamics and seasonal change on the vertical profile of CH₃CN.

キーワード：ALMA、Titan

Keywords: ALMA, Titan

アルマ望遠鏡とそれを利用したエキサイティングな研究への招待

Invitation to ALMA and exciting research with it

*長谷川 哲夫¹*Tetsuo Hasegawa¹

1.自然科学研究機構 国立天文台

1.National Astronomical Observatory of Japan, National Institutes of Natural Sciences

アルマ望遠鏡 (ALMA = Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) は、ヨーロッパ (ESO加盟の16カ国)、北アメリカ (アメリカ合衆国、カナダ)、東アジア (日本、台湾、韓国) がチリと協力して、チリ北部アンデス山中の標高5000mのアタカマ高地に建設・運用する国際的な観測施設で、波長約3.5mmから0.32mmのミリ波・サブミリ波を観測する極めて高い能力で天文学観測に革命をもたらしつつある。アルマは、口径12mのパラボラアンテナ54台と口径7mのパラボラアンテナ12台を組み合わせた開口合成型の電波望遠鏡 (写真) で、アンテナの配置を変えることで、得られる電波画像の分解能を変えることができる。

2014年に行われた、長基線観測試験キャンペーンでは、アンテナの間隔 (基線長) を最大15kmまで広げて観測波長0.87mmで0.025" (3.5AU) の空間分解能を達成し、若いT Tauri星HL Tauを取り巻く原始惑星系円盤に多数のリング/ギャップ構造があることを描き出して世界の研究者を驚かせた (ALMA Partnership et al. 2015, ApJL 808, L3)。アルマは様々な原始惑星系円盤で、成長の初期段階にあるダストからの熱放射を高い感度と分解能で観測し、予想もしなかったような円盤の構造を次々に描き出している。また、分光観測では円盤中のガス成分 (主成分はH₂) に含まれる様々な分子の分布や運動をとらえ、snow lineや、中心星に向かって落ちていくガス中の化学反応による組成の変化が見いだされた。糖やシアン基を持つ分子などの生命に関連する分子も検出されている。アルマの観測によって、惑星形成の初期段階に関する私たちの理解は大きく進もうとしている。

アルマは、2011年の初期科学観測開始以来、4期 (サイクル0-3) の観測プロポーザル公募による国際共同利用を行ってきた。最近1年に1サイクルのペースで観測プロポーザルの募集が行われ、毎年4月にプロポーザル切が設定されている。日本を中心とする東アジアは、建設・運用の4分の1に貢献し、それに見合う観測時間シェア (チリのシェア10%を除く90%の4分の1 = 全体の22.5%) を持っている。採用されたプロポーザルは、チリのアルマ観測所が提案者に代わり観測を行い、キャリブレーションを済ませたデータが提案者に届く。したがって、研究者はそれぞれ大学や研究所の研究室に居ながらにして、世界最先端の望遠鏡を使った研究を展開することができる。さらに、提案者のデータ占有期間 (データが届いてから1年) が過ぎた観測データは、アーカイブデータとして世界に公開されるので、その観測を提案したかどうかにかかわらず誰でも解析して論文を書くことができる。アーカイブ利用も含めると1件の観測データから数編の論文が書かれることも珍しくない。

アルマの科学運用において利用者とのインターフェイスとなるのが日米欧に作られたアルマ地域センター (ARC = ALMA Regional Center) である。日本では東京都三鷹市の国立天文台に東アジア・アルマ地域センター (EA-ARC = East Asian ARC) が設置され、観測プロポーザルの募集、採用されたプロポーザルの観測手順書準備、観測されたデータの品質確認と配達、アーカイブデータの公開などを行っている。またヘルプデスクや担当サポートサイエンティストを通じて、プロポーザル準備やデータ解析の相談に応じている。

このようにアルマは、惑星形成の研究に大きな変革とチャンスをもたらしている。1人でも多くの研究者が、アルマとそのデータを用いた研究に参加されることを期待している。

国立天文台 アルマ

<http://alma.mtk.nao.ac.jp>

東アジア・アルマ地域センター

<http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/forresearchers/ea-arc/>

アルマ観測所

<http://www.almaobservatory.org>

キーワード：惑星形成、原始惑星系円盤、電波天文学観測、ミリ波・サブミリ波

Keywords: Planet formation, Protoplanetary disks, Radio astronomy observations, Millimeter and submillimeter waves



アグリゲイトの焼結が引き起こす原始惑星系円盤のダストリング形成
Sintering-induced dust ring formation in protoplanetary disks

*奥住 聡¹、百瀬 宗武²、城野 信一³、小林 浩³、田中 秀和⁴

*Satoshi Okuzumi¹, Munetake Momose², Sin-iti Sirono³, Hiroshi Kobayashi³, Hidekazu Tanaka⁴

1.東京工業大学、2.茨城大学、3.名古屋大学、4.東北大学

1.Tokyo Institute of Technology, 2.Ibaraki University, 3.Nagoya University, 4.Tohoku University

The latest ALMA observation of HL Tau revealed spectacular concentric dust rings in its circumstellar disk. We propose the hypothesis that the multiple rings resulted from the sintering of icy aggregates in the disk. Sintering is the process that fuses particles consisting of an aggregate at temperatures slightly below the melting temperature of the particles. Sintering makes aggregates harder but less sticky (Sirono 1999; Sirono & Ueno 2008), thereby suppressing their growth through coagulation. In a protoplanetary disk, icy aggregates are thought to contain various volatiles such as CO and CH₄, each of which may cause the sintering of the aggregates in the vicinity of its snow line (Sirono 2011). We construct a simple model that takes into account sintering, coagulation, and radial drift (Adachi et al. 1976; Weidenschilling 1977) of composite ice aggregates in a protoplanetary disk. We find that the aggregates pile up in the sintering zones near the snow lines because smaller aggregates drift toward the central star more slowly. At millimeter wavelengths, the sintering zones are seen as bright, optically thick rings with a spectral slope of 2, whereas the non-sintering zones are seen as dark, optically thin rings of a spectral slope of 2.3-2.5. The observational features of the sintering and non-sintering zones are consistent with those of the major bright and dark rings found in the HL Tau disk, respectively. We also apply our model to the protoplanetary disk of TW Hya, for which latest ALMA observations suggest the presence of a pileup of dust near the CO snow line (Nomura et al. 2016).

キーワード：HL Tau、TW Hya、焼結、アルマ

Keywords: HL Tau, TW Hya, sintering, ALMA

HD 142527星周円盤からのダスト放射モデリング

Modeling of Dust Emission from Disk Surrounding HD 142527

*Soon KangLou¹、花輪 知幸²、武藤 恭之³、百瀬 宗武¹、塚越 崇¹

*KangLou Soon¹, Tomoyuki Hanawa², Takayuki Muto³, Munetake Momose¹, Takashi Tsukagoshi¹

1.茨城大学、2.千葉大学、3.工学院大学

1.Ibaraki University, 2.Chiba University, 3.Kogakuin University

We model the 870 μm dust continuum emission from the azimuthally-asymmetric disk around HD 142527 based on ALMA Cycle 0 observation. The disk is inflated, inclined by 27° to the line of sight, and its major axis is along PA = 341° . High resolution images in NIR scattered light (Fukagawa et al. (2006)) and MIR thermal radiation (Fujiwara et al. (2006)) indicate that the eastern side (PA = $341^\circ - 161^\circ$) of the disk is farther whereas the western side (PA = $161^\circ - 341^\circ$) is closer to us. In our model, we assume the radial surface density distribution of the dust disk to be gaussian, and the dust size distribution follows $a^{-3.5}$, where $a_{\text{max}} = 1 \text{ mm}$. At the observation wavelength, scattering opacity is 10 times larger than absorption opacity in our model (Aikawa & Nomura (2006)). Dust density, temperature, and radiative energy density of the disk are determined by M1 approximation method (Kanno, Harada, Hanawa (2013)).

The peak surface densities of dust, Σ_0 , at PA = 21° (the brightest region) and PA = 221° (the faintest region) are 0.8 g cm^{-2} and 0.008 g cm^{-2} , which are consistent with Muto et al. (2015). We cannot reproduce, however, the observed surface brightness in the northwestern region (PA = $291^\circ - 351^\circ$), i.e., the near side with about 80% brightness of PA = 21° , even with $\Sigma_0 = 1.25 \text{ g cm}^{-2}$. This is due to: (i) the heavy scattering; (ii) the dependence of the disk surface brightness on the viewing angle. We solve the problem by reducing the scattering opacity to 10% of its original value. Subsequently, the Σ_0 values for the brighter lopsided region (PA = $291^\circ - 71^\circ$) become about 50% lower than their original values, while for the remaining optically thin regions Σ_0 values do not change significantly. We will also discuss how such a scattering opacity can be realized.

キーワード：HD 142527、ダスト放射、モデリング

Keywords: HD 142527, Dust emission, Modeling

円盤・惑星相互作用によるギャップ生成の定量的モデル

Quantitative Modeling of the Gap Induced by a Planet in a Protoplanetary Disk

金川 和弘²、*武藤 恭之¹、田中 秀和³Kazuhiro Kanagawa², *Takayuki Muto¹, Hidekazu Tanaka³

1.工学院大学基礎・教養教育部門、2.シュチェチン大学、3.東北大学・天文

1.Division of Liberal Arts, Kogakuin University, 2.University of Szczecin, 3.Astronomical Institute, Tohoku University

Recent high resolution observations have revealed that protoplanetary disks are rich in structures. Especially, multiple ring-like structures are discovered in the disk around HL Tau by the long baseline campaign observations of ALMA.

Such structures may be connected to the dynamical processes that occur in the disks. One interesting processes that occur in protoplanetary disks is the gravitational interaction between a (already formed) planet and the disk. As a result of disk-planet interaction, planets induce gap and spirals in the disk. If such structures are found in real observations, they strongly indicate the existence of a planet embedded in the disk. The shape of the gaps and spirals can be used to infer the physical properties of the disk and the planet. The physical parameters of disks and planets that are derived based on the disk morphology are independent from those derived from other methods. It is therefore important to understand and model the disk-planet interaction quantitatively.

In this poster, we present a series of numerical simulations and analytical theory of the gap formation by a single planet embedded in a protoplanetary disk. We quantify the shape of the gap structures in terms of the planet mass, disk scale height and disk viscosity. We first present the depth and the width of the gap can be determined by these three quantities. We have found that the gap depth is determined by a single parameter $K = q^2 / (h^5 * \alpha)$, where q is the mass ratio between the planet and the central star, h is the disk aspect ratio, and α is the disk viscosity parameter. We have also found that the gap width is determined by $K' = q^2 / (h^3 * \alpha)$. We have derived a simple formula that describes the gap depth and width in terms of K and K' . We apply our results to the ALMA long baseline campaign observations of the disk around HL Tau, and suggest that the planet mass is $< \sim 1$ MJ, if the observed gap is induced by (unseen) planets in the disk. We also present the model for the detailed profiles of the gap induced by a planet, which can be compared to observations if detailed gas structures are revealed in the near future.

キーワード：原始惑星系円盤、円盤・惑星相互作用、円盤直接撮像

Keywords: Protoplanetary Disks, Disk-planet Interaction, Direct Imaging Observations of Disks

ALMA望遠鏡によるデブリ円盤のガス/ダスト観測
ALMA Observation of Gas and Dust in Debris Disks

*小林 浩¹、樋口 あや²、石原 大助¹、百瀬 宗武²

*Hiroshi Kobayashi¹, Aya Higuchi², Daisuke Ishihara¹, Munetake Momose²

1.名古屋大学理学研究科、2.茨城大学理学部

1.Department of Physics, Nagoya University, 2.Ibaraki University

ダストが非常に少なくなった原始惑星系円盤が見つけられており、デブリ円盤とも呼ばれている。原始惑星系円盤のガス成分の散逸は惑星形成において非常に重要だが、多くのデブリ円盤ではガス成分を検出することは難しかった。しかしALMA望遠鏡の高感度、高分解能観測から、デブリ円盤のガスは検出可能になってきた。本研究では、AKARI衛星などによる赤外観測の結果をもとに、ガス成分の存在を示唆するデブリ円盤のサンプルをALMAサイクル1のアーカイブデータの中から探し出した。さらに、CO分子輝線観測がされた10天体を解析した結果、5天体においてCOガスが検出された。この中の1天体である49Cetは過去の観測でCOガスは検出されていたが、ALMAの高分解能観測により、COガスとダストの空間分布に違いがあることがわかった。その他の天体でもダストとガスについての比較を行う。

キーワード：原始惑星系円盤、デブリ円盤、ガス/ダスト

Keywords: protoplanetary disk, debris disk, gas/dust

アルマ干渉計を用いた海王星成層圏HCN($J = 4-3$)観測

The Spatially-resolved HCN($J = 4-3$) Interferometric Observation on Neptune's Stratosphere with ALMA Array

*飯野 孝浩¹、平原 靖大²、仲本 悟²、中山 勇麻³、高橋 透⁴

*Takahiro IINO¹, Yasuhiro HIRAHARA², Satoru Nakamoto², Yuma Nakayama³, Toru Takahashi⁴

1.東京農工大学科学博物館、2.名古屋大学環境学研究科、3.名古屋大学理学部地球惑星科学科、4.電気通信大学宇宙・電磁環境研究センター

1.Nature and Science Museum, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2.Graduate School of Environment, Nagoya University, 3.Department of Earth and Planetary Sciences, School of Science, Nagoya University, 4.Center for Space Science and Radio Engineering, The University of Electro-communications

ALMA array is a powerful tool to illustrate both the photochemistry and dynamics of gas giants' stratosphere thanks to its high spatial resolution and sensitivity. We have constructed the spatially-resolved HCN($J=4-3$) map of Neptune with archived ALMA data obtained during Cycle-0 season. From the doppler-shift analysis, stratospheric dynamics of Neptune's stratosphere showing the spatial difference is illustrated clearly. In this presentation, obtained result and possible driving mechanism of the dynamics will be discussed.

キーワード：ALMA干渉計、惑星大気、電波天文学

Keywords: ALMA array, Planetary atmosphere, Radio astronomy

