

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.シユチェン大学、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