

## 特集「ALMAで迫る惑星科学」

# ALMA による原始惑星系円盤の高解像度観測

武藤 恭之<sup>1</sup>

2019年6月14日受領, 査読を経て2019年7月11日受理.

(要旨) ALMA望遠鏡は、ミリ波・サブミリ波の波長帯で、これまでにない空間分解能と感度を兼ね備えた電波干渉計であり、近傍の星形成領域の中の原始惑星系円盤を、最小で数天文単位の空間分解能で観測することが可能である。従来の惑星形成の枠組みの中で、原始惑星系円盤は滑らかで軸対称な構造を持つことが仮定されてきたが、ALMA望遠鏡の登場により、円盤には様々な構造が存在することが明らかになってきた。本稿では、原始惑星系円盤からのダスト連続波放射の観測を中心に、高空間分解能観測でわかってきた原始惑星系円盤の構造について概観し、今後の課題として、円盤構造の統計・円盤形成初期における構造・データ解析手法の三点を提示する。

## 1. 惑星形成の初期条件としての原始惑星系円盤

原始惑星系円盤は、生まれたての星の周囲に存在する、ガスとダスト(シリケートなどの固体成分)から成る回転円盤である。この中で、ダストが成長することにより惑星が生まれると考えている。惑星形成は、太陽系の形成の文脈で、系外惑星の発見以前から研究されており、数十年にわたる歴史がある。20世紀終わりころまでは、我々の太陽系のみが観測可能な惑星系のサンプルであったので、惑星形成モデルについても、まずは太陽系と同じような惑星系を作る、ということの一つの大きな目標としていた。しかし、系外惑星が発見され、多様な系外惑星系の姿が分かってくると、惑星形成についても、より一般的にどのような惑星系ができるのか、という形に問題が変わってくる。

惑星形成の大きな問題の一つとして、その初期条件がどのような形で与えられるのかが理解されていない、ということがある。すなわち、原始惑星系円盤はどの程度の質量を持っており、どのような構造を持っているのか、という問題である。歴史的には、太陽系の惑

星の分布を基にした最小質量円盤モデル(例えば[1])がよく用いられてきたが、このモデルの下での惑星形成には、様々な問題点があるということが知られている。さらに、多様な系外惑星系が発見されてくると、我々の太陽系が一般的な惑星系の姿であるかどうかということにも疑問が生じ、さらにその問題は混沌としてくる。

原始惑星系円盤の姿を理論的に求めるということが大変に難しい問題であるということに納得するには、原始惑星系円盤の形成が起こる星形成の過程を考えると良いだろう。星は、星間空間の中でも密度の濃い分子雲コアと呼ばれる場所で、ガスが自己重力によって収縮することによって形成される。その際、大部分の質量は中心の星になり、いわば、重力崩壊の「残りかす」が原始惑星系円盤になる。簡単なオーダー計算として、星形成が起こる前には、現在の太陽の質量と同程度の量のガスが、宇宙空間に一樣にばらまかれたと考えてみよう。現在、太陽の周囲には1パーセク( $\sim 3 \times 10^{18}$  cm)に一つの程度の割合で星が分布している。そこで、もともと、太陽質量( $= 2 \times 10^{33}$  g)程度のガスが1立方パーセク程度の空間にばらまかれていたと考えると、その密度は $7 \times 10^{-23}$  g/cm<sup>3</sup>程度になる。これは、水素原子の数にして、およそ40個/cm<sup>3</sup>程度に相当す

1. 工学院大学 教育推進機構  
muto@cc.kogakuin.ac.jp

る<sup>1</sup>。現在の星間空間の水素原子の密度はおよそ1個/cm<sup>3</sup>であるから、この見積もりだけでも、星形成以前に存在していたガスのほとんどが星になっていなければならないということが分かるだろう。つまり、原始惑星系円盤の姿を、星形成の過程から完全に理解するという事は、星形成を95%以上の精度で理解しなければならない、ということになる。もちろん、星形成過程は長年にわたって研究されてきており、理解が進んできているという部分はあるが、この精度にまでは至っていないであろう。

## 2. 原始惑星系円盤撮像装置としてのALMA望遠鏡

原始惑星系円盤の姿を理論的に推定することが難しいということであれば、実際の観測に基づき、生まれたての星の周囲の構造を理解していく必要がある。そのための道具として、ALMA望遠鏡は画期的な観測装置であり、これによって原始惑星系円盤の姿を「写真」として空間分解してはっきりと捉えることが可能になった。ALMA望遠鏡は、最大で0.1秒角よりも良い空間分解能を出せる、ミリ波・サブミリ波(波長で1 mm程度かそれ以下)の電波望遠鏡である。まず、この望遠鏡がなぜ原始惑星系円盤観測に必要なかということを中心に述べておこう。

原始惑星系円盤は、中心星に力学的にも熱的にも強く支配されている系である。力学的には、原始惑星系円盤の物質(ガスとダスト)にかかる最も大きな力は中心の星による重力である。原始惑星系円盤中の物質は、星の周囲を回転することによる遠心力と星からの重力とが(ほぼ)釣り合うことで、中心星にすぐに落下せずに存在することができる。すなわち、原始惑星系円盤は、中心の星の周囲をほぼケプラー回転している差動回転円盤系である。また、熱的には、中心星からの輻射による加熱<sup>2</sup>と、円盤中のダストの熱放射による冷却が釣り合った系であり、中心星から遠ざかるほど温度が下がっていく。円盤の温度は、オーダーとしては、太陽系の惑星の表面温度と同じ程度であると考えればよく、中心星から1天文単位<sup>3</sup>程度離れた場所でおおよそ数100 Kだが、中心星から100天文単位程度離れた場所では数10 Kとなる。したがって、ウィーンの変位則により、原始惑星系円盤に存在するダストからの

熱放射は、中間赤外線から電波の領域で主に発せられるということになるから、観測波長として電波を選ぶことが自然である。

次に、原始惑星系円盤の距離と大きさから、円盤の撮像をするために必要な空間分解能を見積もってみよう。原始惑星系円盤は、星形成の初期に、およそ100万年から1000万年程度の時間だけ存在する。そこで、一般的な星の寿命を100億年とすれば、原始惑星系円盤を持つような星の割合は、星全体の1/10,000程度だと見積もれる。したがって、星同士の間の距離をおおよそ1パーセクとすれば、最も近い原始惑星系円盤は数10パーセクの距離にあるということになる。実際に、最も地球に近い原始惑星系円盤を持つ星であるうみへび座TW星(TW Hya)までの距離は、おおよそ60パーセクであり、原始惑星系円盤を持つ星が多く存在する星形成領域は、最も近いものでもおおよそ140パーセクの距離にある。原始惑星系円盤の大きさについては、惑星系の典型的な大きさとして、半径100天文単位程度としてみると、原始惑星系円盤を空間分解するとは、140パーセクの距離にある、大きさ100天文単位程度の構造を空間分解するということだと言える。そこで、望遠鏡に求められる空間分解能を14天文単位としてみよう。これは、典型的な星形成領域までの距離(140パーセク)にある天体を観測することを考えると、おおよそ0.1秒角かそれ以下の空間分解能が望遠鏡に要求されているということになる。

望遠鏡の空間分解能は、波長を $\lambda$ 、望遠鏡の口径を $D$ としたとき、おおよそ $\lambda/D$ によって与えられるので、0.1秒角の空間分解能を、波長1 mmの電波で実現するためには、望遠鏡の口径としておおよそ2 kmが要求されることになる。現実的には、口径数kmの望遠鏡を作製することはできないので、ALMA望遠鏡では、最大で10 km程度の距離を離して多数のアンテナを配置し、それぞれのアンテナからの信号を干渉させることによって、実質的に大口径の望遠鏡で観測したのと同じような画像を取得する。

\*1. 実際は、分子雲コアの密度はこの見積もりよりも1から2桁程度大きい。しかし、星どうしの間の距離を2倍変化させれば、ガス密度の見積もりが1桁程度簡単に変わるくらいの精度の議論である。

\*2. 円盤ガスの中心星への降着によるエネルギー解放も\*加熱に寄与するが、それが支配的となるのは中心星近傍で、かつ円盤中心面の領域のみである。

\*3. 1天文単位は太陽・地球間の距離で、 $1.5 \times 10^{13}$  cmである。

以上より、ALMA望遠鏡は、まさに原始惑星系円盤の様々な構造をとらえるのに最適な望遠鏡であることが理解できるだろう。実は、惑星が形成される現場の観測は、ALMA望遠鏡の重要な科学目標の一つとして位置付けられ、「原始惑星系円盤の構造をとらえることができるように」設計がされてきたという経緯がある。

### 3. ALMA望遠鏡による原始惑星系円盤の構造の観測

#### 3.1 初期科学運用における非軸対称構造の観測

ALMA望遠鏡は、2011年から科学運用観測が開始された。はじめは、アンテナ台数が少なく、アンテナ群もそこまで広い範囲に広がって置かれた状態ではなかった。そのため、ALMA望遠鏡の運用開始当初は、空間分解能は既存の電波干渉計と同程度であった。それでも、既存の電波干渉計に比較して感度が桁で優れており、初期観測運用段階においても様々な発見をもたらした。その代表的な例として、いくつかの原始惑星系円盤において、非常に強い非軸対称な放射が見いだされた。図1は、HD 142527という星の周囲の原始惑星系円盤からのダスト熱放射の空間分布である[2]。観測の結果、この円盤からのダスト熱放射には強い非軸対称性があり、ダストが円盤内において非常に偏った分布をしていることが示唆された。実際に、この観測を再現するダスト分布のモデルを検討したところ、ダスト熱放射が最も明るい場所は、暗い場所に比較して、ダストの量が70倍程度濃集しているであろう、という示唆を得られた[3]。

#### 3.2 原始惑星系円盤の超高解像度観測の科学試験観測

ALMA望遠鏡が、空間分解能という点でその実力を証明したのは、2014年に行われた長基線観測の科学試験観測においてである。これは、アンテナを10 km程度まで離れた観測で、科学的な議論に耐えうるデータを取得可能であることを実証するための観測である。原始惑星系円盤観測のターゲットとして、HL Tauという、おうし座の方向にある星形成領域にある円盤の中でも特に明るく若いものが選ばれた。

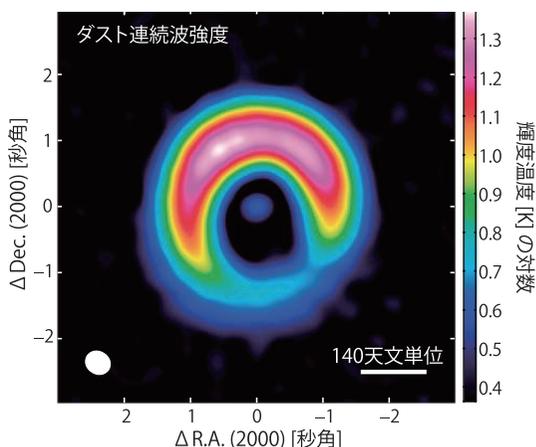


図1：HD 142527周囲の原始惑星系円盤からのダスト連続波放射。『遊・星・人』25巻36ページ掲載の執筆者による記事の図4左パネルの再掲。

観測の結果、図2に示すように、HL Tauの周囲には、たくさんのリング状の構造が存在することが見出された[4]。初期科学運用でも、構造を持った円盤がすでに観測されていたが、HL Tauの観測結果は、年齢が10万年程度の非常に初期の段階から、原始惑星系円盤は構造を持っている可能性があるということを示唆している。例えば、原始惑星系円盤にすでに惑星が存在していれば、その影響で円盤にリング状の構造が励起されるという可能性がある。HL Tauの観測結果についても、観測された構造が惑星が作るものであるとして解釈することが可能であることを、金川らが指摘した[5]。しかし、このような円盤進化の初期段階ですでに惑星が存在しているのだろうか、という点には疑問が残る。別の可能性として、原始惑星系円盤の温度構造を考えると、このようなリング状構造が、様々な分子が固体で存在する場所と気体で存在する場所の境界(雪線と呼ばれる)付近に生じる可能性があることが、Zhangら[6]や奥住ら[7]によって議論されている。その場合は、あらゆる原始惑星系円盤で特定の温度領域にリングが観測されるはずだが、果たしてそのようになっているのかということは、この観測の段階では不明であった。

初期科学運用から超高解像度観測の科学試験観測までの間に、原始惑星系円盤は、従来仮定されてきたような、軸対称で滑らかな、構造の無い円盤ではなく、多様な姿をしている可能性があるということが見えて

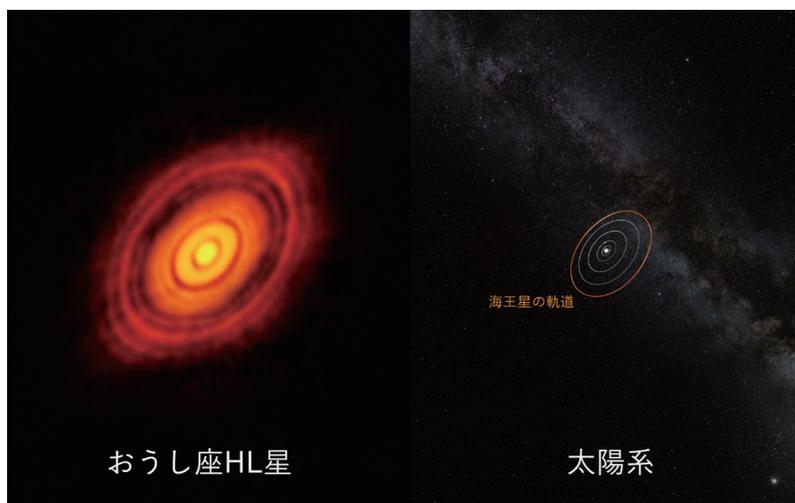


図2：HL Tau周囲の原始惑星系円盤からのダスト連続波放射（左）と、太陽系のスケール（右）の比較図。ALMA望遠鏡プレスリリース<sup>4</sup>より引用。Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)。

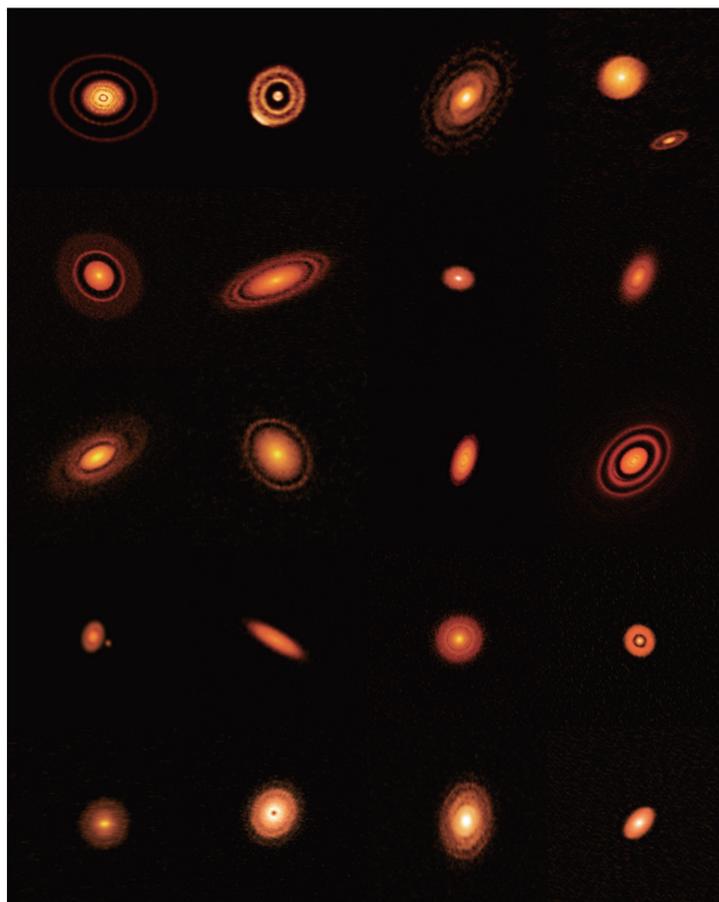


図3：ALMA望遠鏡大規模観測プログラムによる様々な原始惑星系円盤からの熱放射画像。ALMA望遠鏡プレスリリース<sup>5</sup>より引用。Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), S. Andrews et al.; NRAO/AUI/NSF, S. Dagnello。

<sup>4</sup> <https://alma-telescope.jp/news/press/mt-2000>

<sup>5</sup> <https://alma-telescope.jp/news/dsharp-201812>

きた。現実的な原始惑星系円盤とはどのような姿をしているのかという問題が、惑星形成における重大な問題として認識され、かつ、その疑問に(部分的にでも)答えることができる装置が使える状態にあるということが実証された。

### 3.3 様々な原始惑星系円盤の高解像度観測

ALMA望遠鏡の初期段階の観測では、いくつかの原始惑星系円盤が複雑な構造を持つことが分かった。次は、より多数の原始惑星系円盤を観測し、このような構造が様々な円盤に普遍的に存在しているのかどうかということが問題になる。この疑問に対する直接的なアプローチとして、まとまった数の天体の超高解像度観測がAndrewsらによって、ALMA望遠鏡の大規模観測プログラムの一環として行われた[8]。これは、それまであまり構造が無いと考えられてきた、20の近傍の原始惑星系円盤について、35ミリ秒角(およそ5天文単位)程度の空間分解能で電波強度分布をとらえたというものである。観測の結果、図3に示すように、多くの原始惑星系円盤にリング状の構造が存在していることが見いだされた。

リング構造の起源については定かではないが、一つの可能性として、全てのリング構造が原始惑星系円盤に形成されている惑星の影響による、つまり、リング

構造一つにつき、惑星が一つあると考えると、何が言えるだろうか。Zhangら[9]は、円盤中に存在する惑星がどのようなリング構造を作るかを数値計算によって調べ、惑星質量や円盤の温度・粘性などの物理量をパラメータとして、リング構造の幅や深さを表す経験的な関係式を求め、大規模観測の結果に適用した。これは、HL Tauにおける金川らの研究[5]の発展版というべきものである。

観測によって多数のリング構造が見つかったので、モデルと観測を比較することによって、原始惑星系円盤中に存在する「惑星」の分布がどのようになっているか、という議論を展開することができる。その結果、中心星から5-10天文単位程度以上離れた場所に存在する5木星質量以上の惑星は全体の6%程度しか存在しないであろうということが示唆された。このことは、遠方の巨大惑星が直接撮像観測であまり多く見つからないこと[10]と整合的である。さらに、10天文単位以上離れた場所に存在する海王星質量から木星質量程度の惑星が全体の半分程度を占めており、このような質量範囲の惑星が多く存在していることが示唆された。この質量・軌道長半径のパラメータ領域は、現在の系外惑星探査の手法で見つけにくい領域であり、今後の観測が期待される。

また、この大規模観測プログラム以外にも、様々な

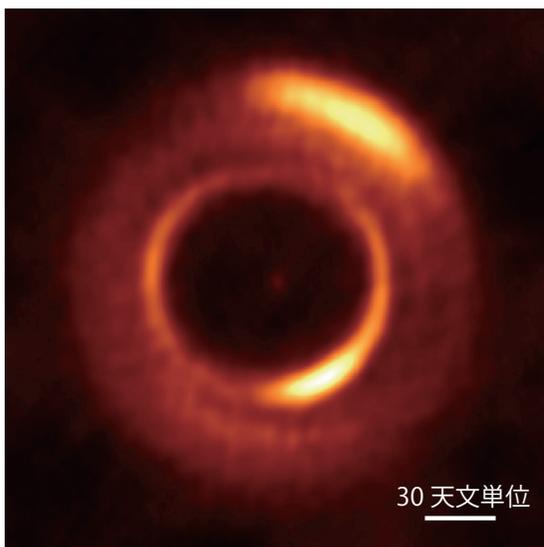


図4：MWC 758周囲の原始惑星系円盤のダスト連続波放射。ALMA望遠鏡プレスリリース<sup>6</sup>より引用のうえ、一部改変。Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), Dong et al.

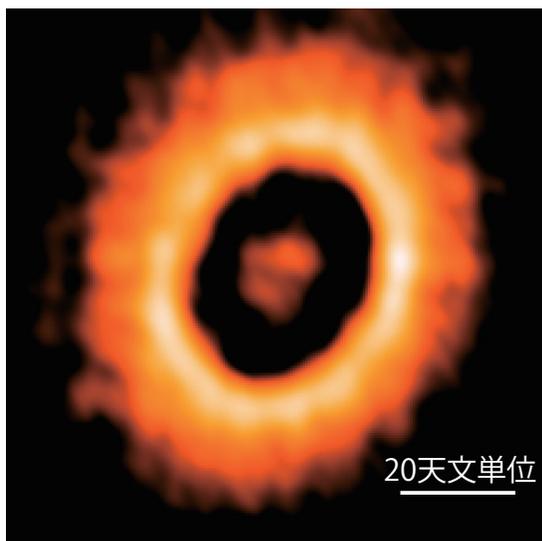


図5：DM Tau周囲の原始惑星系円盤のダスト連続波放射画像。

<sup>6</sup><https://alma-telescope.jp/news/mwc758-201806>

原始惑星系円盤の高解像度観測が行われている。その中で、筆者の関わったものの中から、興味深い構造を示す二天体を紹介する。

第一は、Dongらによる、MWC 758という、3.5太陽質量程度の比較的重い星の周囲の原始惑星系円盤の観測である[11]。図4には、この円盤からのダスト連続波の放射を示す。観測の結果、楕円状のリング構造をした原始惑星系円盤が見いだされた。その構造を詳しく調べると、リングは完全な円ではなく、楕円状をしていることがわかり、中心星の位置はその楕円の焦点の位置に対応していることが分かった。さらに、塵が集まって放射が明るく見えていると考えられる場所が二か所、円盤中に存在している。この天体は、近赤外線による撮像観測でも渦巻き状の構造があることが知られており、これまでのどの観測よりも複雑な構造をしており、非常に力学的に活発であることが示唆される。

第二は、工藤らによる、DM Tauという太陽質量の半分程度の星の観測である。DM Tauからの放射の、可視光から電波に渡るスペクトルエネルギー分布(SED)の解析から、この天体の円盤は、中心星から半径数天文単位程度の範囲にはダストが存在せず、中心星付近が穴のように見えることが予想されていた。しかし、ALMA以前の電波望遠鏡による観測では、穴構造は見つかったものの、その半径は20天文単位であり、予想された構造との食い違いが問題となっていた。ALMA望遠鏡による観測で、図5に示すように、実はこの円盤は、半径3天文単位程度の穴構造と、半径20天文単位のリング状構造が両方とも存在する、二重リング構造になっているということが見いだされた。ALMA以前の望遠鏡では、内側の半径3天文単位の円盤を空間分解することはできず、その存在がそもそも画像としてとらえられていなかったのである。半径3天文単位と半径20天文単位に、それぞれリング状の構造があるというのは、太陽からおおよそ3天文単位的位置に小惑星帯があり、おおよそ20天文単位的位置に天王星があるという、我々の太陽系の姿を想起させるものでもある。太陽系と系外惑星をつなぐという観点からも、「太陽系に似た構造を持つ原始惑星系円盤」としてのDM Tau周囲の原始惑星系円盤の存在は重要である。

## 4. 円盤の詳細構造観測の展望

### 4.1 原始惑星系円盤構造の統計的性質

原始惑星系円盤の高解像度観測は現在も進行中であるが、現在までに、数十程度の原始惑星系円盤について、空間分解能が0.1秒角を切るような高解像度観測がなされていると見られる。これらの観測は、全体としては明るい・大きいなどの条件を満たす、観測しやすい天体から順番になされている傾向がある。より一般的な円盤がどのような構造を持っているかということに答えるためには、もう少し高解像度観測のサンプルを増やしていく必要があるだろう。

低解像度の観測であれば、かなりの数の原始惑星系円盤がすでに観測されている。ALMA望遠鏡は、それまでの電波望遠鏡に比較して感度が非常に高く、空間分解能が0.3から0.4秒角程度であれば、1分程度の観測時間で、ダストからの熱放射を容易に受けることができる。この空間分解能は、典型的な星形成領域の距離(140パーセク)で、40天文単位から50天文単位の大きさに対応する。したがって、少し大きめの原始惑星系円盤であれば、数個のビームで空間的に分解する観測が可能である。このALMA望遠鏡の特徴を生かし、多少空間分解能を犠牲にして、星形成領域にある数十から数百の原始惑星系円盤を一気に観測するということが行われている。このような研究は、Ansdellらによるおおかみ座分子雲の観測[12]を皮切りに、様々な星形成領域で行われた。

特に、Ciezaらによるへびつかい座分子雲のサーベイ[13]は、総天体数にして297を数える観測で、様々な進化段階の円盤を含んでいる。そのうち、比較的若い天体を多く含む147天体に関する結果によると、10地球質量程度以上のダスト成分を持つ原始惑星系円盤は全体の1/3程度しかなく、また、半径30天文単位よりも大きな円盤は全体の15%程度しかなかった。その後、観測天体全ての統計がWilliamsらによって報告された[14]が、やはりダストの量が総じて少ないという結論は変わっていない。すなわち、大多数の原始惑星系円盤は小さくて軽く、また、ガス惑星のコアを作るのに十分な質量の物質が残っていない可能性がある。現在観測されている、様々な構造を持った「立派な」

原始惑星系円盤は、実は全体として見れば少数派であるのかもしれない。また、出来上がる惑星系としては、コンパクトな岩石惑星の系が多いかもしれない、ということも想像される。ただし、この結果はダスト連続波観測をもとにしたものであることには注意しなければならない。実際に観測しているのはダストからの熱放射であり、その明るさの情報には、ダストの温度・放射率・(面)密度が縮退している。この縮退を解くためには、複数の波長の観測を行うことで円盤の「色」を調べるなどの追加観測を行っていく必要がある。

高解像度の観測についても、今後、このようなサーベイ的な観測を通じ、構造による円盤の分類を行っていく必要があるだろう。リング構造の幅と深さ、非軸対称構造の大きさや強さなど、原始惑星系円盤の構造を観測的に特徴づけるパラメータには様々なものがある。多数の円盤でそれらの構造を特徴づけるパラメータを求めることができれば、それらが円盤の温度・密度などの物理パラメータとどのように関係しているかを明らかにしていくことができるだろう。さらに、その関係を円盤における物理的・化学的過程に関する理論から導かれる予測と比較していけば、円盤で何が起きているかの理解を深めていくことができるだろう。仮に、ギャップ構造が観測された多数の原始惑星系円盤のデータをもとに、冷たい円盤でギャップが深いという傾向が見いだされたとする。一方で、原始惑星系円盤の中の惑星が作るギャップ構造のモデルからは、円盤の温度が低いほど、同じ質量の惑星でも作るギャップが深いということが導かれる。この理論的な関係と、観測された円盤温度・ギャップ深さの関係が同じような傾向を持っているのかどうかということを検討することが、「何割くらいの円盤で惑星形成が起こるのか」という問題に対するアプローチの一つの方向性になりうるだろう。

ここで、原始惑星系円盤の高解像度観測を行う動機の一つとして、この観測が原始惑星系円盤における力学的な過程に直接迫る手段となりうる、ということを強調しておきたい。原始惑星系円盤における力学過程の時間スケールとしてケプラー回転の時間を取り、また、力学的な過程の結果として生じるケプラー回転から外れた運動速度の典型的な値として音速程度の速度を仮定すると、構造の典型的な空間スケールは、円盤半径の1/10程度以下の大きさであると見積もられる<sup>7</sup>。

この構造を空間分解して観測したいと思うと、例えば、中心星から100天文単位離れた場所での力学過程に迫るためには、10天文単位程度の構造を空間分解する必要が生じる。これは、距離140パーセクにある原始惑星系円盤の観測では、0.1秒角を切る構造になるので、ALMA望遠鏡の高解像度観測が必須である。

また、観測がいくら進んだとしても、それを解釈するような理論の整備がされていないと、観測の解釈ができなくなってしまう。すなわち、原始惑星系円盤に構造を生み出す物理的、あるいは化学的な過程を理論的に調べていくことも必要である。現状では、原始惑星系円盤と惑星の間の重力相互作用に関する研究は盛んに行われており、先述したZhangらの研究以前から、惑星質量と円盤構造(特にギャップ構造)のパラメータを定量的に結び付けようという試みがなされてきた。また、非軸対称構造についても、円盤に局所的に存在する渦構造を記述する解析解が知られており[15]、それを流体不安定性の結果として生じる渦構造と比較するような試みも、小野らによって行われている[16]。理論の立場としては、円盤で生じる様々な物理過程を調べ、観測可能量に関する予測を立てていくことが今後ますます重要になってくるだろう。

## 4.2 円盤形成初期段階における円盤構造と早い惑星形成

先述の通り、原始惑星系円盤のサーベイ観測により、小さくて軽い円盤が多いということが分かってきた。この理由は定かではないが、一つの可能性は、もともと実は原始惑星系円盤はそれほどの質量を持って生まれたものではなく、惑星の材料とするダストもあまり多くないということである。しかし、これとは全く逆の可能性もある。すなわち、原始惑星系円盤進化の比較的早い段階ですでにダストの成長、あるいは惑星の形成が起きているとされており、ミリ波放射をよく出すような、大きさ1 mm程度のダストの量がすでに減ってしまっている、という可能性である。

後者の可能性は、初期に惑星の存在しない原始惑星系円盤の存在を仮定する伝統的な惑星形成の枠組みでは考えられてこなかったことであるが、この可能性を示唆する別の観測もある。図6は、Sheehanらによる、

<sup>7</sup>これは、円盤の厚みと同程度の長さスケールである。

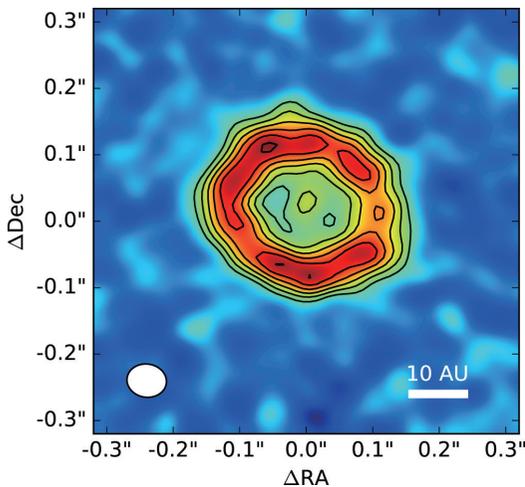


図6：WL 17周囲の原始惑星系円盤のダスト連続波放射。Sheehanらによる発見論文[17]の図1を転載。放射強度のコントアは、 $1\sigma = 36 \mu\text{Jy}$ として、 $4\sigma$ から $2\sigma$ おきに描かれている。観測ビームの大きさ(左下の精円)は、 $0.06$ 秒角 $\times$  $0.05$ 秒角である。(C)AAS. Reproduced with permission.

WL 17という、年齢50万年以下と考えられる若い星の周囲の円盤からのダスト連続波放射の観測である[17]。この円盤には、半径13天文単位程度の小さなリング構造が見出された。先述したHL Tauも、同程度かそれ以上に若い星であると考えられてある。つまり、すでに構造を持った若い原始惑星系円盤が、複数見つかってきているのである。

このような観測を理解していくためには、原始惑星系円盤の形成過程を、星形成の段階から理解していく必要がある。分子雲の収縮から原始惑星系円盤の形成・進化までの全てのプロセスを、一つの数値シミュレーションで全て追うことは困難であり、何らかのモデルを介した理解が必要になってくる。その一例として、高橋らは、分子雲コアの収縮による星と原始惑星系円盤の形成、およびその後の原始惑星系円盤の進化について、ダストの運動まで含めて全ての段階を計算する一次元モデルを作った[18]。そして、分子雲の初期条件やダストの大きさなどで形成される原始惑星系円盤の姿がどのように影響を受けるかを解析したところ、ダストがある程度成長していれば、進化の初期段階であっても原始惑星系円盤はリング状の構造を持ちうることを指摘した。

これまでの原始惑星系円盤の観測では、原始惑星系円盤の形成初期の段階にある星はあまり観測されてこ

なかった。しかし、数天体ではあるが、構造を持った若い原始惑星系円盤が観測されてきたことで、「惑星形成の初期条件」は何かという問題の重要度が増してきているように感じられる。今後、ALMAでより多くの観測がなされてくることを期待したい。

### 4.3 高解像度画像を得るためのデータ解析手法

本稿の最後に、高解像度観測を目指すためのデータ解析に関して、少しだけコメントをしておこう。ALMA望遠鏡などの電波干渉計は、空間的に距離を離して置かれた多数のアンテナから得られた信号を干渉させることにより、高空間分解能を達成している。これは、非常に大雑把に言えば、大口径の望遠鏡のほとんどの部分を隠して小さな覗き穴を多数あけ、それぞれの覗き穴から得られる情報を組み合わせて全体の画像を復元する、ということである。つまり、電波干渉計で得られたデータは、大口径の望遠鏡で得られたデータに比較して情報が本質的に不足している。その部分を何らかの方法で補って初めて画像を得ることができる。より具体的には、電波干渉計で最初に得られるデータは、天球面上における電波強度の空間分布のフーリエ成分の(ごく)一部である。したがって、観測データから電波強度の空間分布画像を復元するためには、まず、不足しているフーリエ成分を何らかの方法で推定したうえで、フーリエ空間(干渉計を用いた観測ではuv空間と呼ばれる)から実空間にフーリエ変換をすることが必要になる。

不足したデータの推定には、ほとんどの場合「CLEAN」と呼ばれる手法が用いられる。これは、天球面上の電波強度分布を点源の集合と考え、観測された空間的なフーリエ成分が合うようにその点源分布を決めていく方法である。この方法は、電波天文学においては十分に確立された手法であるが、点源の存在する場所を解析者が指定するなどの恣意性もあり、画像復元の手法として最適であるかどうかは分からない。実際、最大エントロピー法などの統計的手法も有力であり、CLEAN法よりも高い解像度の画像を低いノイズレベルで実現できるという報告もある[19]。

また、原始惑星系円盤の構造は比較的単純であるので、観測で得られているフーリエ空間のデータを直接解析するという手法も用いられる。一般に、特徴的な長さスケールを持つ画像をフーリエ変換すると、その

長さスケールに対応するフーリエ成分に特徴的な構造が現れる。そこで、観測データとして得られるフーリエ成分を直接解析し、特徴的な構造を見つけることができれば、フーリエ逆変換に伴う不定性を伴わない形で空間構造を議論することができる。こうすることで、取得されたデータをより有効に使うことができ、実空間での画像から得られるよりもより多くの情報を引き出すことができることがある。実際に、こうした解析により、動径方向に10から30天文単位程度のスケールの構造を持った円盤が多数あることは、原始惑星系円盤の高解像度サーベイ観測が行われるよりも前に予想はされていた[20]。しかし、フーリエ成分は直観的にわかりにくく、ある程度事前に構造を予想しておかないと、このような解析を行うことができない。理論的に予測される様々な構造が、フーリエ空間でどのような情報として現れるのかという基礎的な研究が進展していけば、今後、より多くの情報を観測から引き出すことができるようになることを期待している。

## 5. まとめ

本稿では、ALMAによる原始惑星系円盤の高解像度観測を概観し、今後の展望を議論した。ALMA望遠鏡は、原始惑星系円盤に様々な構造が存在することをこれまでに明らかにしており、「軸対称で滑らかな円盤」という従来の惑星形成における円盤の描像は崩れてきているというべきであろう。現在、高解像度観測の科学試験観測からはおよそ5年が経過しており、最初の成果が揃ってきている段階である。今後は、これまでの様々な発見に立脚し、原始惑星系円盤の構造に関する統計を深めていく段階になるだろう。その上で、観測に基づいた原始惑星系円盤の描像を確立していくことが求められている。特に、原始惑星系円盤形成の初期段階での円盤の構造については、惑星形成の初期条件や時間スケールを制限するという観点から、今後、一層の観測が求められてくるだろう。

また、構造からどのような情報を引き出すかについて、理論的な研究や解析手法の研究を深めていくことも重要である。ALMA望遠鏡により、原始惑星系円盤の力学過程を直接観測できる段階に達している。そこで、理論的な研究としては、様々な物理過程がどのように観測量として反映されるかということ、デー

タ解析に使いやすい形でモデルを作っていくことが求められている。また、データ解析技術そのものについてもまだ進展の余地がある。ALMA望遠鏡の運用は、高解像度観測まで含めて、安定期に入ってきている。アンテナ間隔が現在の10倍になったり、アンテナ台数が二倍以上に増えるといったような、望遠鏡のハードウェアそのものの劇的な変化はしばらくは生じないであろう。そこで、より多くの情報を観測から引き出すためのデータ解析技術の開発も今後重要になってくる課題であると言える。

本稿では、紙面の都合から、原始惑星系円盤からのダスト連続波放射の観測を主として取り上げた。しかし、ALMA望遠鏡は、これ以外の観測も行うことができる。例えば、円盤に存在する分子ガスの輝線観測から、原始惑星系円盤におけるガスの量や運動状態を推定することができる他、感度を生かして様々な希少な分子種の発見をしていくことができる。また、電波の偏光観測も行うことができ、そこからダストの大きさの情報や円盤における磁場の情報を得ることもできる。特に、原始惑星系円盤の電波領域での偏光観測については、片岡らがダスト散乱による偏光という新しいメカニズムを提案[21]して以来発展してきたという経緯がある。今後も、ALMA望遠鏡によって原始惑星系円盤の様々な姿が明らかにされることを期待したい。

## 謝辞

本稿の執筆の声掛けをしていただいた、『遊・星・人』ゲストエディターの秋山永治氏に感謝をいたします。本稿で取り上げた成果のうち、執筆者の関係するものについては、多数の共同研究者の方の寄与が大きいものです。以下に、主な共同研究者の氏名を記し、謝意を表します。HD 142527の初期観測とモデル：深川美里氏(国立天文台)・百瀬宗武氏(茨城大学)・花輪知幸氏(千葉大学)・塚越崇氏(国立天文台)・スンカンロウ氏(茨城大学)。原始惑星系円盤と惑星の重力相互作用のHL Tauへの適用：金川和弘氏(東京大学)、田中秀和氏(東北大学)。MWC 758の高解像度観測：Ruobing Dong氏(ビクトリア大学)。DM Tauの高解像度観測：工藤智幸氏(国立天文台)・橋本淳氏(アストロバイオロジーセンター)・小西美穂子氏(大分大学)。

ロスビー波不安定性により励起される渦構造の解析：小野智弘氏(プリンストン大学)。円盤形成期における構造のモデル：高橋実道氏(国立天文台)。原始惑星系円盤の散乱偏光：片岡章雅氏(国立天文台)・百瀬宗武氏(茨城大学)。執筆者は、科学研究費補助金(19K03932・18H05441・17H01103・15H02074)および、国立天文台 ALMA 共同科学研究事業(2016-02A)による補助を受けています。

## 参考文献

- [1] Hayashi, C. et al., 1985, in *Protostars and Planets II*, 1100.
- [2] Fukagawa, M. et al., 2013, *Pub. Astron. Soc. Japan* 65, 6.
- [3] Muto, T. et al., 2015, *Pub. Astron. Soc. Japan* 67, 122.
- [4] ALMA Partnership, 2015, *Astrophys. J. Let.* 808, L3.
- [5] Kanagawa, K. D. et al., 2015, *Astrophys. J. Let.* 806, L15.
- [6] Zhang, K. et al., 2015, *Astrophys. J. Let.* 806, L7.
- [7] Okuzumi, S. et al., 2016, *Astrophys. J. Let.* 821, 82.
- [8] Andrews, S. M. et al., 2018, *Astrophys. J. Let.* 869, L41.
- [9] Zhang, S. et al., 2018, *Astrophys. J. Let.* 869, L47.
- [10] Bowler, B. P. and Nielsen, E. L., 2018, in *Handbook of Exoplanets*, 1.
- [11] Dong, R. et al., 2018, *Astrophys. J.* 860, 124.
- [12] Ansdell, M. et al., 2018, *Astrophys. J.* 828, 46.
- [13] Cieza, L. A. et al., 2019, *Mon. Not. Roy Astro. Soc* 482, 698.
- [14] Williams, J. P. et al., 2019, *Astrophys. J. Let.* 875, L9.
- [15] Kida, S., 1981, *J. Phys. Soc. Japan* 50, 3517.
- [16] Ono, T. et al., 2018, *Astrophys. J.* 864, 70.
- [17] Sheehan, P. D. and Eisner, J. A., 2017, *Astrophys. J. Let.* 840, L12.
- [18] Takahashi, S. Z. and Muto, T., 2018, *Astrophys. J.* 865, 102.
- [19] Pérez, S. et al., 2019, arXiv:1902.05143.
- [20] Zhang, K. et al., 2016, *Astrophys. J. Let.* 818, L16.
- [21] Kataoka, A. et al., 2015, *Astrophys. J.* 809, 78.