

## 「2014年度最優秀研究者賞受賞記念論文」

原始惑星系円盤の高解像度観測から読み解く  
物理状態武藤 恭之<sup>1</sup>

2015年9月16日受領, 査読を経て2016年4月25日受理.

(要旨) 原始惑星系円盤は惑星形成の現場である. 近年, すばる望遠鏡やALMA 望遠鏡など, 地上の大型望遠鏡を用いた観測によって原始惑星系円盤の観測が大きく進展し, その新たな一面が明らかになってきた. 特に, 原始惑星系円盤は, 一般に「円盤」という時に考えるようななめらかな構造を持っているのではなく, 様々なスケールでの構造を持っていることがわかってきた. このような構造から何を読み取っていくか, 様々な研究が進められている. 本稿では, 原始惑星系円盤の観測に関する基本的な事項をまとめた上で, 筆者自身の関わった研究を中心に, 観測によって明らかになってきた円盤構造とその解釈について紹介する.

## 1. はじめに

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(塵)からなる円盤である. 原始惑星系円盤の中でダストが集積し, 原始惑星や惑星が形成される. また, 質量の大きな原始惑星は, 周囲のガスを捕獲することでガス惑星となる. この一連の過程を明らかにすることが, 惑星形成研究の大きな目標である.

惑星形成における大きな問題の一つとして, 原始惑星系円盤の姿がどのようなものか, 理論的な指標が存在しないということがある. 惑星形成は星形成からつづく一貫した過程であり, 原始惑星系円盤は, 星形成(分子雲コアの自己重力的な収縮)の副産物として自然に形成される. この意味では, 原始惑星系円盤は理論的には確実に存在するはずであるが, 一方で, 星形成の立場からすると, 原始惑星系円盤や惑星は「残りかす」にすぎない. 太陽系で最も重い惑星である木星でさえ, 太陽の質量のわずか1/1000である. もし, 星形成から惑星形成過程までを首尾一貫して追おうとすれば, 0.1 光年程度の拡がりを持つ分子雲コアから出発し, 星の長さスケールまでの全ての長さスケールを

分解しながら, かつ星の周囲で質量が星のわずか1%に満たない原始惑星系円盤も正確に解かなければならない. このような計算は(いずれ解決すべき問題ではあるが)大変な困難を伴う計算である. そこで, 惑星形成の理論的研究においては, 原始惑星系円盤の姿(物理的状態)を何らかの形で仮定したうえで論を展開するという手法がなされてきた. 例えば, 現在の太陽系における固体成分の分布をもとにした最小質量円盤モデル[レビューとして1]は, 多くの研究の標準的モデルとして利用されてきている.

一方で, 観測的に直接原始惑星系円盤の姿を探るという研究も盛んに行われている. 1980年代, 若い星のスペクトルエネルギー分布(SED)が, 赤外線から電波の領域にかけて明らかな放射の超過を持っているところから, 原始惑星系円盤の存在が確認され[2], その後SEDの分類[例えば3]によって円盤の進化を議論する, といったような研究が進められてきた.

近年では, 観測技術の向上により, 宇宙に存在する原始惑星系円盤を, 直接に画像として得ることが可能になってきた. 原始惑星系円盤は, 星形成領域に多く存在する. その典型的な距離は, おおむね140パーセク<sup>1</sup>程度であり, 例えば大きさ100天文単位程度の原

1. 工学院大学 基礎・教養教育部門  
muto@cc.kogakuin.ac.jp

1. 1パーセクは $3 \times 10^{18}$  cmであり, 銀河系内の星どうしの間隔が, おおむねパーセク程度の大きさである.

始惑星系円盤を空間的に分解しようとする、少なくとも0.数秒角程度、より詳しく原始惑星系円盤を観測しようとするれば、0.1秒角かそれを切る程度の空間分解能は必要になる。

もし、近赤外線(波長1ミクロン程度)において回折限界像が達成されたとすると、原始惑星系円盤を空間的に分解して観測するためには、少なくとも口径2 m程度の望遠鏡が必要になり、またさらに構造を詳しく調べようとするればより大型の望遠鏡が必要になる。可視光から近赤外線にかけての波長域では、1990年代より、大気の影響を受けないハッブル宇宙望遠鏡を用いたり、地上の大型望遠鏡に補償光学装置を搭載したりすることで原始惑星系円盤を空間的に分解して観測することが可能になった[例えば4]。

また、サブミリ波などの電波領域における観測によって円盤を空間的に分解しようとする、単純には口径数100メートル程度かそれ以上の大きさの望遠鏡が必要になりそうである。しかし、必ずしもそれは必要ではなく、電波干渉計の技術を用いることで、空間分解した観測が可能になっている。

こういった、直接に原始惑星系円盤の写真を取るといった観測技術が発展してきた結果、原始惑星系円盤のおおまかな構造のみではなく、様々な小さな構造が見えてきている。また、ガス成分が確かに存在していることも確認され、視線方向のガス速度の解析をもとに、原始惑星系円盤が(ほぼ)ケプラー回転をしていることも明確になってきた[例えば5,6]。

本稿では、まず2節で原始惑星系円盤とそこからの放射に関する基礎事項をまとめる。その後3節と4節で、すばる望遠鏡で得られた結果とALMA望遠鏡で得られた観測結果について、筆者の関係する共同研究を中心に、簡単に紹介していきたい。

## 2. 原始惑星系円盤からの放射

原始惑星系円盤からの放射を大別すると、以下の三種類に分類される：

- 円盤ダストからの熱放射
- 円盤ガスを構成する分子からの輝線放射
- 円盤ダストによる散乱光

本節では、それぞれについて簡単に基本的な事項をまとめる。円盤の放射を理解するためには、その温度・

密度構造について知っておく必要がある。そこでまずは、原始惑星系円盤の物理構造(温度・密度構造)についてまとめた後、円盤からの放射についてまとめる。

### 2.1 円盤の大局的な物理構造

原始惑星系円盤の質量は、非常に不定性が大きい、星形成の副産物として出来るものであるから、少なくとも中心星の質量よりは小さいはずであろう。Hayashi et al. [1]による最小質量円盤モデルでは、ガス面密度は中心星から1天文単位の場所でおおよそ $1700 \text{ g/cm}^2$ であり、半径の1.5乗に従って面密度は小さくなっていく。この場合、もし円盤が半径100天文単位程度にまで広がっていたとすると、その質量はおおよそ0.02太陽質量程度となる。

次に、原始惑星系円盤の温度は、中心星からの輻射による加熱と、原始惑星系円盤の表面からの熱放射のつり合いによって決まる。おおむね輻射平衡温度によって円盤の温度が決まっていると考え、中心星から1天文単位程度離れた場所で300 K程度となる。中心星から遠いほど温度は下がることになるが、輻射平衡温度と考え、半径の0.5乗程度で温度が落ちていく。ここから、ある半径での音速(300 Kでおおよそ $1 \text{ km/s}$ 程度)はその場でのケプラー回転の速さ(中心星から1天文単位の位置で、中心星が1太陽質量程度のときに $30 \text{ km/s}$ )に比べて十分に遅いということがわかる。円盤の厚みは、中心星の重力と円盤の高さ方向の圧力勾配力のつり合いで決まり、その大きさは音速をケプラー角速度で割った程度の量であるから、円盤の半径に対する厚みの比(アスペクト比)は、おおよそ音速とケプラー速度の比の大きさ程度の量になる。したがって、円盤のアスペクト比は1より十分に小さく、円盤は幾何学的に薄いということが分かる。

### 2.2 円盤ダストからの熱放射

原始惑星系円盤中にあるダスト粒子は、その温度に応じて熱放射を出す。先述のように、原始惑星系円盤の温度は中心の星に近いほど高く、おおよそ数100–1000 K程度以上(1天文単位より内側)から、数10 K程度(100天文単位程度)に渡っている。したがって、円盤の中で中心星に近い場所ほど短波長で光ることになる。赤外線で円盤全体の明るさを(空間分解せずに)観測した場合、温度の高い、中心星に近い領域からや

ってくる放射が最も強い。一方、波長の長い電波で円盤全体の明るさを(空間分解せずに)観測すると、その放射の大部分は温度の低い外側円盤から放射されている。つまり、原始惑星系円盤全体の明るさを様々な波長で観測してSEDを求めることで、円盤の大まかな構造を推定することができる。質量あたりの放射量という点では短波長の方が大きい。一方で外側の円盤ほど放射領域の空間的な広がりは大きくなる。そのために、原始惑星系円盤は電波でもそれなりの放射量がある。

ダストからの熱放射を考える上で重要なのは、ダストの吸収係数(放射係数)である。これはダストの組成や温度、また大きさによって様々な値を取り、そのために現実の原始惑星系円盤の物理的構造を観測的に調べるためには大きな不定性がある。大まかな値としては、可視光から赤外線の領域ではダスト質量あたりの質量吸収係数で $10^3 - 10^4 \text{ cm}^2/\text{g}$ 程度の値を持ち、また電波の領域では $1 - 10 \text{ cm}^2/\text{g}$ 程度の値を持っている[例えば7]。したがって、最小質量円盤において中心星から数10天文単位以上程度離れた場所で考えると、原始惑星系円盤は近赤外線から中間赤外線では光学的に厚く、電波領域まで波長が長くなると光学的に薄いということになる。原始惑星系円盤におけるダストの量は、円盤全体を見通すことができる電波を用いて推定されることが多い。また、円盤面密度の動径分布のベキが $r^{-2}$ より浅い場合には、外側ほど大きな質量を持つことになるので、この点からも円盤のダスト量を電波の観測を用いて推定することは理にかなっている。ただし、もともとダストの量が多い、あるいは円盤にダストが集まっているような場所があったりすると、電波の領域でもダスト熱放射が光学的に厚くなることありうる。

### 2.3 円盤ガスからの輝線放射

原始惑星系円盤のガスは、輝線放射を出す。どのようなガスがどのような温度で存在するかによって、様々な輝線放射が様々な波長で観測される。温度の高い中心星の近傍からは、分子の振動回転輝線が、主に赤外線の領域で観測される。また、温度の低い円盤の外側の領域では、分子の回転輝線が、主に電波の領域で観測される。分子の振動回転輝線を空間的に分解して観測することは難しいが、分子の回転輝線であれば

電波干渉計を用い、空間分解して観測することが可能である。

ガス輝線は、そもそもガス成分がダストとは独立な原始惑星系円盤の構成物質であるという点のみでなく、連続波では得られない、円盤の速度に関する情報を持っているという点からも重要である。原始惑星系円盤のガスの視線方向の速度成分に応じて、ドップラー効果によってガス輝線の中心波長はずれるから、輝線の観測によって、ガス円盤の存在のみではなく、その円盤の回転運動の様子も知ることができる。ここから、円盤が天球面に対してなしている角度や、回転運動に基づいた中心星の質量の推定などを行うことができる。

原始惑星系円盤からのガス放射は様々な分子で見つけられているが、最も代表的なものは一酸化炭素(CO)とその同位体の輝線である。同位体が異なれば円盤の中の分子の存在量が異なるため、光学的厚みも大きく異なる。したがって、様々なガスの同位体を観測することにより、原始惑星系円盤のガスの温度や密度を推定することが可能になる。

### 2.4 円盤ダストによる散乱光

先述の通り、原始惑星系円盤は可視光や赤外線の領域では光学的に厚い。一方で、中心星は温度が高いため、これらの波長で明るい。中心星の光は原始惑星系円盤の表面にある円盤ダストによって吸収・散乱される。原始惑星系円盤に吸収された光のエネルギーは、原始惑星系円盤の加熱に使われる。また、円盤表面で散乱された光のうち、観測者の視線方向に入った光は実際に観測することができる。中心星は主に可視光から近赤外線放射をするから、散乱光もこれらの波長で主に観測されることになる。

円盤ダストによる散乱光を観測するためには、すぐ近くにある中心星からの放射の影響を出来る限り低減させなければいけない。そこで、中心星の光を隠すためのコロナグラフや、星像を可能な限り安定させる補償光学装置を用いた観測が行われる。また、中心星の光は偏光していないが、散乱光は偏光しているという性質を用いた偏光差分撮像の手法により、近赤外線の領域で、非常に解像度の高い原始惑星系円盤の観測がなされ、様々な原始惑星系円盤の構造が明らかになってきた。

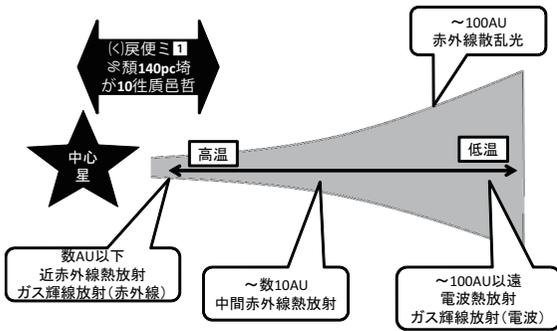


図1：原始惑星系円盤で観測される放射を表す概念的な図。空間分解能は、現状で得られている近赤外線および電波干渉計観測の典型的な空間分解能を示している。

## 2.5 多波長観測による原始惑星系円盤構造の解明

図1は、原始惑星系円盤からの放射をまとめた概念的な図を表す。基本的に、原始惑星系円盤の内側から外側にかけて、より長い波長で放射するということがまとめられるが、近赤外線の散乱光観測だけは例外で、中心星から100天文単位程度離れた場所からも放射がある。図1から、原始惑星系円盤の全体像を知るためには、いくつかの波長の観測を組み合わせなければならないということが分かるだろう。

本稿では、特に原始惑星系円盤の空間構造やそこから得られる円盤の物理量について議論する。現状での空間分解能は、可視光から近赤外線の領域の大型望遠鏡による0.1秒程度が最も良く、それと同程度の空間分解能がALMA望遠鏡によって、サブミリ波の領域で達成されつつある。そこで、以下の節では、すばる望遠鏡を用いた原始惑星系円盤の観測と、ALMA望遠鏡による観測について、特に筆者の関係した研究を中心に紹介する。

## 3. すばる望遠鏡によって明らかになった原始惑星系円盤の詳細構造

すばる望遠鏡は、ハワイ島のマウナケア山頂にある口径8.2 mの光学赤外線望遠鏡である。すばる戦略枠プロジェクト『SEEDS』では、HiCIAO/AO188と呼ばれる、大気の揺らぎを補正する補償光学装置と、中心星の光を遮るコロナグラフ装置とを搭載し、原始惑星系円盤や惑星の直接撮像観測が集中的に行われた。このプロジェクトは2009年より観測が行われ、現在、ほぼ全ての観測が終了した段階である。

筆者は、SEEDS プロジェクトに関わり、いくつかの原始惑星系円盤の観測について、主にデータの解釈に携わった。図2には、SEEDSプロジェクトによって取得された原始惑星系円盤の画像の一部を載せてい

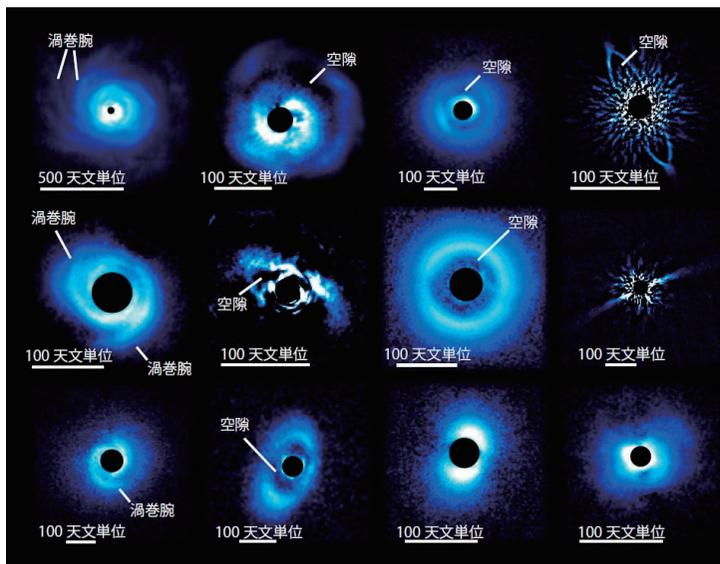


図2：すばる望遠鏡のSEEDSプロジェクトで得られた、様々な原始惑星系円盤の画像。国立天文台プレスリリースより。

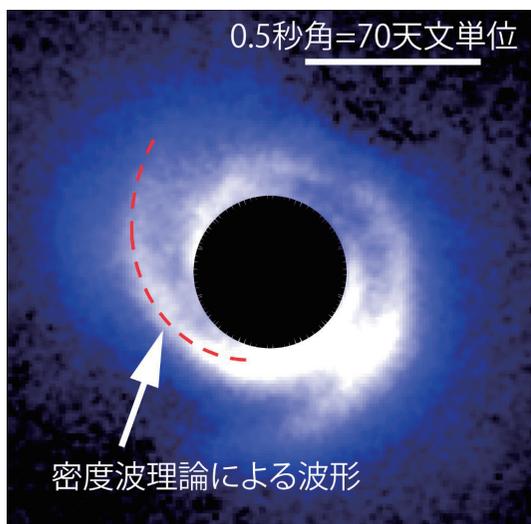


図3: すばる望遠鏡のSEEDSプロジェクトで得られた、SAO 206462周囲の原始惑星系円盤の様子と、密度波理論による渦巻き構造モデルのフィット。国立天文台プレスリリースより。

る。この図からわかるように、中心星から数10天文単位程度の場所で、空隙や渦巻きなど、様々な構造が見えているということがわかる。すばる望遠鏡で取得できるのは主に近赤外線のためであるから、この画像は原始惑星系円盤の表面からの散乱光の分布を表しているという点には注意が必要だが、原始惑星系円盤は、それまでに考えられてきた(仮定されてきた)ような、なめらかな円盤ではなく、非常に構造に富んだ存在であるということが明らかになってきた。そこで、こういった構造から何を読み取っていくかということが問題になる。

SEEDSプロジェクトの中で、筆者が特に深くかかわった観測として、原始惑星系円盤の渦巻き構造[8]について簡単に紹介する。

図3は、すばる望遠鏡によって得られたSAO 206462という星の周囲の原始惑星系円盤の画像である。この星は、地球からおおよそ距離140パーセクの位置にある、1.7太陽質量程度の星(Herbig F型と呼ばれる種族の星である)で、年齢が800万年程度と推定されている。すばる望遠鏡の観測により、SAO 206462周囲の円盤には、数10天文単位のスケールでの渦巻き状の構造が観測された。このような構造が何を意味しているのか、様々な可能性がありうると思われるが、一つの可能性として、円盤に立っている密度波だった

とするとどうだろうか、という視点から考察してみよう。

密度波とは、原始惑星系円盤のような、差動回転する円盤に立つ定常な音波である。この性質については、古くから様々な研究がなされてきており、標準的な教科書にも解説がされている[例えば10]。また、日本天文学会の『天文月報』の拙著[9]も参照にいただければ幸いである。

原始惑星系円盤の回転がケプラー回転であるような場合、密度波の形状は解析的に計算することができる。その形は波の励起位置(半径と角度の2パラメータ)・励起位置における円盤の音速・音速の動径方向分布のベキ指数の計4パラメータに依存する式として表される。逆にいえば、波の形状をフィットすることで、これらのパラメータに対して制限が付けられるということになる。今回観測されたSAO 206462の場合、波の励起位置は、観測された渦巻きの位置よりも中心星から遠い場所にあり、また、円盤の厚みと半径の比(アスペクト比)は0.1~0.2程度であろうという推定をすることが出来た。円盤の厚みは、何らかの方法によって温度を測定することが出来れば、そこから求めることのできる量であるが、今回用いた方法は、それらとは全く独立に、差動回転円盤の力学の理論に基づいているということに注意しておきたい。

SAO 206462の場合、円盤の厚みに関しては他の観測とは矛盾の無い値であった。また、波の励起位置が分かれば、ここから波のパターンが今後どのように回転していくかを予想することができる。つまり、密度波理論の予測と合うかどうか、長期間の構造の変化を調べることで、原理的には決着を付けられるはずである。

SAO 206462の観測論文で、密度波理論に基づく渦巻き構造の解析的な公式を提示した。この式は、純粹に理論的な研究の中では昔から知られていたものであったが[12]、実際の観測に適用したのはこれが初めてである。その後、他にも渦巻き状の構造を持つ原始惑星系円盤が発見され[13, 14]、同様の解析が行われると同時に、モデルパラメータの縮退の様子に関する解析[15]や、より詳しい波の形状の研究なども進んできた[16]。

我々の研究で提示した、密度波理論に基づく波の式は、厳密なことを言えば、原始惑星系円盤の中心面

のガスの観測に対して適用されるべきものである。これを、散乱光の観測に対して用いるということは、暗に中心面と円盤表面が同じ構造であることを仮定している(例えば、静水圧平衡のような状況が成り立っている)し、また円盤のダストの観測に対して適用しているということは、ガスとダストが同じように運動している(つまり、ガスとダストの間の摩擦が強い)ことを仮定している。これらの仮定は、理論的な計算や他の波長での観測によって、今後検証されていかなければならない。

他の観測を組み合わせることで、そもそもこの構造が密度波であるかどうかに加え、(密度波だとすれば)その起源にも迫っていくことができるだろう。すばる望遠鏡のデータを出版した時は、他にこれだけの空間分解能での観測が無かったこともあり、観測された渦巻き構造が密度波(=原始惑星系円盤中の音波)であったとしたらどのようなことを言えるのかということ、出来る限り観測データを直接使えるような形で解析した。

密度波は、本質的には音波であるから、その成因としては、円盤乱流や円盤中の惑星など、いくつかの可能性がある。渦巻き構造の起源を特定するためには、この構造の特徴を、別の波長の観測なども含めて多角的に捉えていく必要がある。すばる望遠鏡での観測の後、他の望遠鏡・波長での観測もなされており、例えばALMA望遠鏡(後述)を用いた観測からは、この円盤の南側にダストが集まっている領域が存在していることが示唆されており[17]、その構造とすばる望遠鏡で見えた渦巻き構造との対応が見えることが報告されている。もしかすると、円盤内の非軸対称な物質の分布が、密度波を励起しているのかもしれない。

## 4. ALMA望遠鏡によって明らかになった原始惑星系円盤の構造

### 4.1 ALMA望遠鏡の概要

ALMA望遠鏡は、南米チリのアタカマ高地に建設された大型の電波干渉計である。ALMAは、口径12 mのアンテナと7 mのアンテナを組み合わせ、これまでにない空間解像度と感度を達成することが可能である。現在、ALMAは全てのアンテナの建設が終了し

ており、装置性能の評価が行われている段階であるが、一部のアンテナや機能を用いた初期科学観測運用が2011年からすでに開始されている。初期科学観測運用の最初の段階(サイクル0運用)であっても、その空間分解能は既存の電波干渉計と同程度、感度はそれを遙かに凌ぐほどの性能があり、多くの科学的成果を導いた。そして、2014年には長基線のキャンペーン観測が行われ、0.02秒角から0.03秒角という、光赤外の望遠鏡に匹敵するほどの高空間分解能を、サブミリ波の観測で達成した。ALMA望遠鏡のデータは、科学性能実証のための観測によって得られたものであれば、データの質保証が確認されるとほぼ即時に、また通常の利用観測によって得られたものであっても、PIに対してデータが配信された一年後には、全世界に対してデータがアーカイブとして公開される。通常の利用観測に加え、アーカイブを用いた研究も活発になってきている。

ここでは、ALMAのサイクル0観測において筆者が特に関わったHD 142527という星の周囲の原始惑星系円盤のガスやダストの構造、また、長基線キャンペーン観測によって得られたHL Tauという星の周囲の高解像度のダスト連続波観測について紹介しよう。

### 4.2 HD 142527周囲の原始惑星系円盤におけるガス・ダストの構造

HD 142527は、年齢500万年程度の中質量星(およそ2.2太陽質量)であり、周囲に非常に特徴的な構造を持った原始惑星系円盤を持っている。この円盤は、これまでに多くの観測がされている。この天体の原始惑星系円盤は、数100天文単位程度にまで広がっており、近赤外線の散乱光で大きなスパイラル状の構造が見えている[18]。また、半径100天文単位程度の、ダストがほとんど存在しないと思われる「穴」が存在しており、中心星のごく近傍にはまた小さな円盤が存在しているものと考えられている[19]。穴やスパイラルとの関係は不明だが、中心星から13天文単位程度の距離に、M型星と思われる伴星が存在することが、観測的に示唆されている[20]。

この天体のALMAによるサイクル0運用の観測は、チリのグループ[21]と日本のグループ[22]において独立に行われ、データ解析などもそれぞれ独立に行われた。二つのグループでは、観測波長や輝線の種類が異

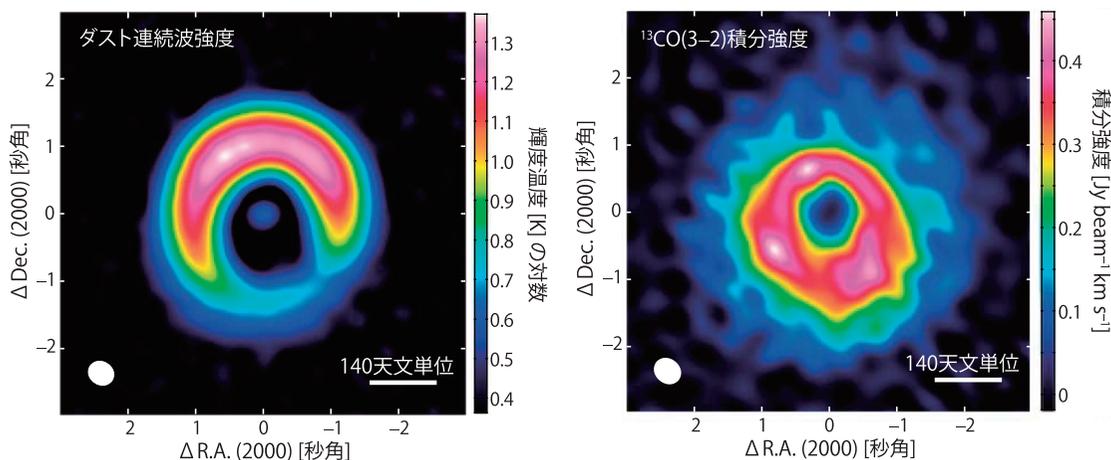


図4：HD 142527周囲の原始惑星系円盤の観測によって得られたダスト連続波(左)と $^{13}\text{CO}$ 輝線(右)の分布。[22]より引用・改変。

なっている。日本グループが取得したデータは、主に340 GHz帯におけるダスト連続波・ $^{13}\text{CO}$ ・ $\text{C}^{18}\text{O}$ の輝線データなどから成っており、ここでは特にこれらのデータについて述べる。

図4には、観測されたダスト連続波および $^{13}\text{CO}$ ガス輝線の分布を示す。観測の結果、ダスト連続波には明るさの強い非対称性が見られた。また、動径方向の明るさ分布も、天球面上で中心星からおよそ160天文単位程度離れた位置にピークを持つガウシアン状の構造をしており、「円盤」というよりも「リング」といった方がふさわしいような構造であった。一方で、ガス輝線の方には強い非対称性は見られず、また動径方向にもより広がった構造をしていた。原始惑星系円盤がここまでの顕著な非対称性を持ち、またガスとダストで大きく異なる分布をしているということは、ALMAによって初めて明らかになったことである。似たような構造は、他の円盤でも観測されており[23, 17]、ここでも原始惑星系円盤は決してなめらかな構造ばかりではないということが分かってきた。

ALMAによって、非常に質の良いガスとダストのデータが得られたので、この観測を再現するようなダストやガスの分布はどのようになっているのか、モデルを作って調べた[24]。しかし、非軸対称な円盤のモデルをいきなり作るのは大変な作業であるので、円盤の北側でダスト連続波が最も明るい方向と、円盤の南側でダスト連続波が最も暗い方向との二方向に焦点を

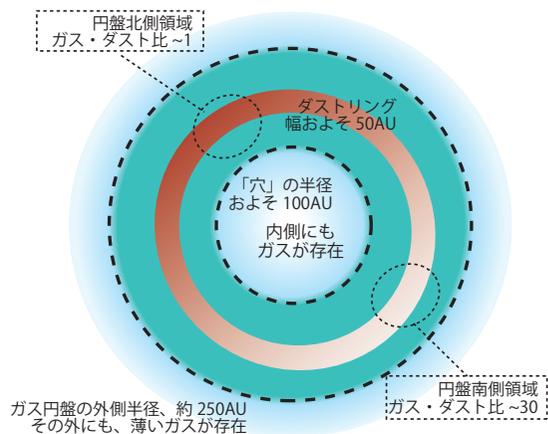


図5：HD 142527周囲の原始惑星系円盤のガス・ダスト分布のモデル。[24]より引用・改変。

絞った。そして、それぞれの明るさ動径分布を再現するような、軸対称のダストとガスの分布は何か、ということに注目し、HD 142527の周囲の原始惑星系円盤の非対称性に関する示唆を得ることを目標とした。図5には、モデル計算の結果得られた円盤の描像を示す。モデル計算の結果、北側のダストが明るい方向では、ダスト連続波も光学的に厚くなるほどにダストが多く集まっており、ダストの面密度にして南側の70倍もの量が集まっているということが示唆された。一方、ガスの分布に関しては、円盤の北側と南側で、面密度にそこまで大きな非対称性は無く、北側の方が南側に

比較して3倍程度の方が集まっていれば観測を再現できるということが分かった。また、ダストは動径方向に幅50天文単位程度の狭い領域に集まっているのに対し、ガスは100天文単位以上に渡る広い領域に分布しているということも分かった。特に、ダスト連続波がほとんど見えなくなっている、中心星から100天文単位の場所より内側の領域にも、ある程度のガスが残っていないといけない。ガスとダストの量の比は、星間空間では質量比でおよそ100:1程度であると言われるのに対し、この円盤の場合、北側の最もダストが集まっている場所では1:1に近づいているということも示唆された。そして、今回の計算で得られたモデルをもとに、円盤全体でのガス・ダストの総量を見積もってみると、星間空間に比較してガスに対するダストの量の割合が多くなっているということが示唆された。つまり、HD 142527周囲の原始惑星系円盤においては、何らかの形ですでにガスの散逸が起こっており、円盤進化の後期段階にあるのではないかということが示唆された。この段階で、円盤の北側の部分にダストが強く濃集している場所があるということは興味深く、このような場所で、もしかすると惑星が形成されつつあるのかもしれない。

### 4.3 HL Tau周囲の原始惑星系円盤に見出されたギャップ構造

2014年に、ALMA望遠鏡の高空間解像度観測の実効性を試験するため、長基線のキャンペーン観測が行われた[25]。その中で、HL Tauという星の周囲の原始惑星系円盤の観測が行われ、0.03秒(HL Tauの距離140 pcでは、4天文単位程度の長さスケールに相当する)を切るような高空間解像度のダスト連続波画像の取得に成功した[26]。その結果、図6に示すような多重リング構造が発見された。このデータは2015年2月に全世界に公開された。それ以来、関連する論文が数多く出版・投稿されている。日本のグループでも、データ公開と同時に、即座に筆者自身を含めた共同研究のグループを立ち上げ、様々な議論を行った。ここでは、筆者が関係したものとして、原始惑星系円盤と惑星の重力相互作用によるギャップ形成について簡単に紹介しよう。

原始惑星系円盤中に存在する惑星は、周囲の円盤との重力的な相互作用によって円盤内に様々な構造を作

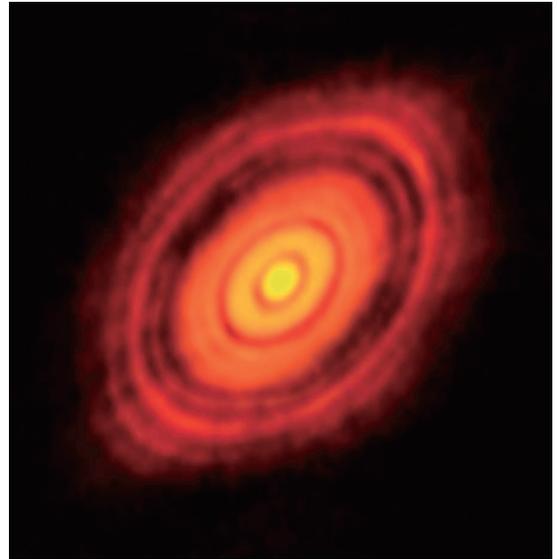


図6：HL Tau周囲の原始惑星系円盤に見出された多重リング構造。内側から2番目の細いリングが、中心星からおよそ30天文単位的位置にある。国立天文台プレスリリースより引用。

り出す。特に、木星質量程度の惑星の場合、その軌道の周囲のガスやダストを跳ね飛ばし、密度の薄い領域(ギャップ構造)を作る。円盤と惑星の相互作用によって出来るギャップの深さや幅が、惑星の質量や円盤の物理量とどのように関係しているのか、様々な計算がこれまでになされてきたが、議論があまり収束していない状況であった。

ギャップ形成は、原始惑星系円盤と惑星の間の、重力を介した角運動量交換の過程と捉えることができる。そこで、数値シミュレーションの結果を参考にしつつ、多くのパラメータを振った数値計算と角運動量保存則に基づいて、ギャップの構造を改めて見直すということが、シュテューベン大学の金川和弘研究員(研究実施当時は北海道大学所属)を中心として行われた[27, 28]。その結果、惑星があけるギャップの深さや幅は、惑星質量と中心星質量の比・円盤のアスペクト比・乱流粘性の三つのパラメータの適当な組み合わせによって表されるということが見出され、ギャップの深さや幅を非常に簡単な式で表すことができた。

HL Tauの観測では、図6の上でギャップに見えているような場所でも、実際には放射は観測されている。つまり、ギャップの底からやってくる放射も観測されている。また、異なる周波数帯のデータ(230 GHz帯

と345 GHz帯、実際はさらに100 GHz帯のデータがあるが、今回は使っていない)があるため、ダストの性質を仮定すると、比較的簡単にダストの面密度や温度を見積もることができる。ALMAの観測データから、中心星から30天文単位程度にあるギャップについてその深さを見積もるとおよそ1/3から1/7程度となった。ギャップの深さと惑星質量との間の関係式を用いると、このギャップがもし惑星によって形成されたと仮定するならば、その惑星の質量は少なくとも0.3木星質量よりも大きくなければならない、という制限を与えることができた。さらに、ギャップの幅から推定される惑星質量についても、深さから与えられる制限と無矛盾であることもわかった。ただし、これらの論文においても、ダストの空間分布とガスの空間分布は同じであるという大きな仮定をしているという点は注意しておきたい。

なお、ここでは惑星によるギャップ形成に注目した議論を行ったが、HL Tau周囲の円盤の構造については、力学的不安定性が起源となるという考え[31]や、いくつかの分子の状態変化に関連付けるアイデア[32, 33]もあり、決着はついていない問題である。

## 5. まとめと今後の課題

本稿では、原始惑星系円盤の高解像度観測から実際の円盤の物理状態をどのように見出していくか、自身の関わった課題を中心にいくつかの例を紹介した。具体的には、渦巻き構造から円盤の厚み(温度)に関する情報を引き出すためのモデルや、ギャップ構造から惑星の質量や円盤の厚みに関する情報を引き出すための手法を簡単に紹介した。

高解像度観測によって、原始惑星系円盤の様々な構造が見えてきている。そして、このような構造を作るような物理としては、円盤における力学的過程が一つの有力な可能性として挙げられるだろう。これまで、数値シミュレーションに頼るしかなかった原始惑星系円盤の力学的過程について、現実の円盤と比較できるレベルの観測データが出てきているという点は特筆すべきである。

その一方で、観測に応用しやすいモデルという点からすると、不十分を感じることが多い。例えば、うまくパラメータを選んで一つの観測を再現したという類

のモデルでは、その仮定の多さゆえ、結果としてどのようなことが分かったのかが不明確であることが多い。円盤構造のどの部分に注目するとどのようなことが言えるのか、(ある程度の)汎用性と簡便さ、そして何よりも予測可能性を持ったモデルの構築が必要である。また、様々な構造を持つ円盤が見つかった時、どの構造に注目して何を捨てるか、といったセンスも要求される。

本稿で紹介した、原始惑星系円盤の渦巻き構造やギャップ構造のモデルについては、観測データへの応用のしやすさという点に特に注意を払いながら作られたモデルであるが、その分で仮定も多く、気をつけて使わなければならない。例えば、原始惑星系円盤は、ガスとダストの二成分の系であるが、本稿で紹介したモデルは基本的にはガスの(面)密度分布に対して成立するものである。実際の観測は、現状ではダストの観測が主であるから、このモデルを適用する際には注意深い議論が必要になる(実際、Kanagawa et al.(2016)[28]では、モデルの適用可能性や他研究との比較に多くの紙幅を費やしている)。現状のモデルの制限を外し、より現実的なモデルを構築していくことが今後の一つの方向性となるであろう。

ALMA望遠鏡の登場によって電波の領域で原始惑星系円盤の非常に良い観測が得られるようになりつつある。ALMAは、今後の運用で高解像度観測も多く行われる予定であり、電波領域でのデータや天体数は増えていだろう。また、近赤外線の領域でも、さらに技術が進み、VLT望遠鏡やGemini望遠鏡において、良いデータが取得されている[15, 29, 30]。これからの課題として、このような多くの観測データをまとめあげ、「多波長・高解像度」の情報から得られる原始惑星系円盤の一般的な性質を引き出し、惑星形成の現場としての原始惑星系円盤の姿を明らかにしていくことが必要になるであろう。ALMAのデータはアーカイブが非常に充実しているとともに、データ解析のツールも提供がされている。また、Gemini望遠鏡のデータなども、比較的使いやすい解析ツールが提供されており、これまで観測の経験が少なくても、参入しやすい環境があると言える。理論の知識を背景に、最新の観測事実に基づき、惑星系形成の謎に迫っていきたいと考えている。

本稿は、日本惑星科学会2014年度最優秀研究者賞

受賞記念論文として執筆しました。推薦書を執筆していただいた井田茂氏、また大学院時代の指導教員であった犬塚修一郎氏には、特に感謝を申し上げます。これまでの研究は、数多くの方との共同研究無くしては成し得なかったものです。本稿で紹介した研究に関する主な共同研究者だけでも、橋本淳氏、Carol A. Grady 氏、深川美里氏、田村元秀氏、百瀬宗武氏、塚越崇氏、花輪知幸氏、西合一矢氏、金川和弘氏、竹内拓氏、谷川享行氏他、多数の方の協力によって成り立っています。また、筆者の遅筆ゆえに、編集長の和田浩二氏には大変なご迷惑をおかけしたことを、深くお詫び申し上げます。また、査読者の奥住聡氏には、有益なコメントをいただきました。筆者はこれまでに、日本学術振興会科研費特別研究員奨励費(07J02409, 10J02942)、研究活動スタート支援(24840037)、若手研究B(26800106)、文部科学省科研費新学術領域研究(23103004)他の助成を受けました。

## 参考文献

- [1] Hayashi, C. et al., 1985, in *Protostars and Planets II*, University of Arizona Press, 1100.
- [2] Rucinski, S. M., 1985, *Astron. J.* 90, 2321.
- [3] Meeus, G. et al., 2001, *Astron. & Astrophys.* 365, 476.
- [4] Burrows, C. J. et al., 1996, *Astrophys. J.* 473, 437.
- [5] Koerner, D. W. et al. 1993, *Icarus* 106, 2.
- [6] Dutrey, A. et al., 1994, *Astron. & Astrophys.* 286, 149.
- [7] D'Alessio, P. et al., 2001, *Astrophys. J.* 553, 321.
- [8] Muto, T. et al., 2012, *Astrophys. J. Let.* 748, L22.
- [9] 武藤恭之他, 2013, *天文月報* 106, 195.
- [10] Binney, J. and Tremaine, S., 2008, *Galactic Dynamics: Second Edition* (Princeton University Press)
- [11] Landau, L. D. and Lifshitz, E. M., 1959, *Fluid Mechanics* (Oxford: Pergamon Press)
- [12] Rakov, R. R., 2002, *Astrophys. J.* 569, 997.
- [13] Grady, C. A. et al., 2013, *Astrophys. J.* 762, 48.
- [14] Boccaletti, A. et al., 2013, *Astron. & Astrophys.* 560, A20.
- [15] Benisty, M. et al., 2015, *Astron. & Astrophys.* 578, L6.
- [16] Zhu, Z. et al. 2015, *Astrophys. J.* 813, 88.
- [17] Perez, L. M. et al., 2014, *Astrophys. J. Let.* 783, L13.
- [18] Fukagawa, M. et al., 2006, *Astrophys. J. Let.* 636, L153.
- [19] Verhoeff, A. P. et al., 2011, *Astron. & Astrophys.* 528, A91.
- [20] Biller, B. et al., 2012, *Astrophys. J. Let.* 753, L38.
- [21] Casassus, S. et al. 2013, *Nature* 493, 191.
- [22] Fukagawa, M. et al., 2013, *Publ. Astron. Soc. Japan* 65, L14.
- [23] van der Marel, N. et al., 2013, *Science* 340, 1199.
- [24] Muto, T. et al., 2015, *Publ. Astron. Soc. Japan* 67, 122.
- [25] ALMA Partnership, 2015, *Astrophys. J. Let.* 808, L1.
- [26] ALMA Partnership, 2015, *Astrophys. J. Let.* 808, L3.
- [27] Kanagawa, K. D. et al., 2015, *Astrophys. J. Let.* 806, L15.
- [28] Kanagawa, K. D. et al., 2016, *Publ. Astron. Soc. J.*, accepted.
- [29] Garu, A. et al., 2013, *Astron. & Astrophys.* 560, A105.
- [30] Rodigas, T. J. et al., 2014, *Astrophys. J. Let.* 791, L37.
- [31] Takahashi, S. Z. and Inutsuka, S., 2014, *Astrophys. J.* 794, 55.
- [32] Zhang, Ke et al., 2015, *Astrophys. J. Let.* 806, L7.
- [33] Okuzumi, S. et al., 2016, *Astrophys. J.* 821, 82.