

特集「新・惑星形成論」

円盤ミリ波観測から制約する惑星形成論

植田 高啓¹

2021年12月17日受領, 査読を経て2022年1月20日受理

(概要) ALMA望遠鏡によって、ミリ波帯での原始惑星系円盤観測が飛躍的に発展した。2014年の長基線観測運用開始の直後は、数auスケールの高空間分解能を生かし、多数の円盤詳細構造を発見し、個々の天体の特徴付けが行われた。ここ数年は、これに加え、高感度を生かした大規模サーベイ観測によって、円盤の統計データも得られてきている。特に、比較的大きな円盤では、ダスト円盤のリング・ギャップ構造が普遍的に存在することが明らかとなり、詳細構造と惑星形成論を結びつけられるようになってきた。また、ダスト円盤と系外惑星系の統計的比較が可能となったことで、これまで注目されてきた進化中後期(≥ 100 万年)の円盤の質量が系外惑星系の典型的質量を下回ることが明らかとなり、惑星形成のスタート地点の理解に疑問を投げかけている。本稿では、ALMAによって得られたダスト円盤の統計データを中心に、円盤観測と惑星形成論の繋がりを概観し、今後のミリ波円盤観測の展望を述べる。

1. ミリ波で見る原始惑星系円盤

惑星系は、恒星の周りを回る原始惑星系円盤と呼ばれるガスとダストから成る円盤の中で形成される。主系列星周りの系外惑星が初めて発見された1995年以前、惑星形成論は、唯一の惑星系だった「太陽系」の成り立ちを理解するべく議論されてきた。しかし、1995年の系外惑星の発見以降、惑星形成論は、太陽系という1つの固有なシステムを理解するためのものから、「一般的にどのような惑星が形成されるのか」、「太陽系は宇宙の中でありふれた存在なのか、あるいは稀有なものなのか」を理解する方向へと変化した。特に、2009年に打ち上げられたケプラー宇宙望遠鏡によって、太陽系に存在しない非常に短周期で地球より重い惑星が宇宙に普遍的に存在することが明らかとなり、「より一般的な惑星形成論」の構築が試みられてきた。

このような惑星形成論の変遷の中で、惑星形成の舞台である原始惑星系円盤の理解も大きく変化して

きた。太陽系に基づいた古典的惑星形成論では、現在の太陽系の固体成分を動径方向距離の冪乗(-1.5 乗) でばら撒いた「最小質量円盤モデル」が確立され、原始惑星系円盤の典型例として惑星形成論の礎となった[1]。観測的には、ミリメートル帯の波長(以下、ミリ波)を用いた円盤観測によって、ダスト円盤の特徴付けが行われてきた。円盤観測は、用いる波長によって観測できる領域が異なる。近赤外線では、円盤表面で散乱された中心星放射を見ることになるため、円盤表面の構造を捉えられる。一方、ミリ波では、中心星放射は暗いため、ダスト円盤の熱放射を捉えられ、より直接的にダスト円盤の情報を知ることができる。2010年以前は、ミリ波望遠鏡が達成していた空間分解能はせいぜい20au程度で、現在の海王星軌道(~ 30 au)をようやく中心星から切り分けられる程度であった。ゆえに、ダスト円盤の動径分布は、概ね冪乗分布(と円盤外側で指数関数的に減少する包絡線をかけたもの)であると解釈されてきた[2]。

しかし、2014年に超高解像度イメージングを可能とする長基線の稼働が開始した大型電波干渉計

1. 国立天文台 科学研究部
takahiro.ueda@nao.ac.jp

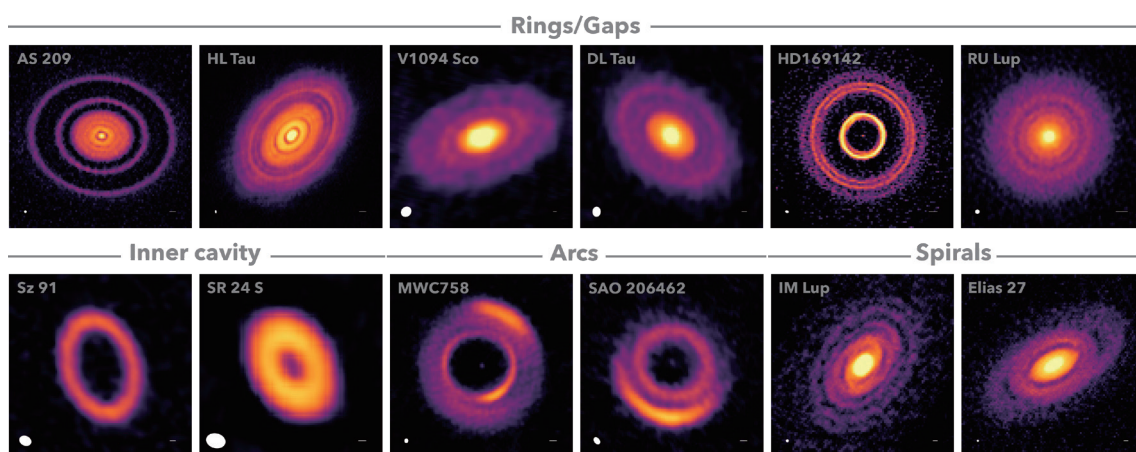


図1: ALMAによるダスト円盤観測の例([5]より改変). 各パネルの左下の白い楕円が空間分解能, 右下の白い実線が10auのスケールを表す.

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)によって, 原始惑星系円盤の描像は大きく変わった. ALMA望遠鏡は, ミリ波・サブミリ波(およそ0.3から3mm程度)の望遠鏡で, 最大16km程度離れた複数のアンテナを組み合わせることによって, 最高で0.02秒角程度の角度分解能を実現している. 太陽系から比較的近い代表的な星形成領域であるおうし座星形成領域までの距離はおよそ140pc程度であるため, 0.02秒角の角度分解能は2.8auの空間分解能に相当する. ALMAはこの高い空間分解能によって, ダスト円盤はリングやギャップといった「詳細構造」を内包しており, 単純な冪乗分布ではないことを明らかにした[4]. 特に, 詳細構造の大規模観測を行なったALMA Large Program「The Disk Substructures at High Angular Resolution Project (DSHARP)」では, 比較的明るい(すなわち大きくてダスト量も豊富な)原始惑星系円盤20天体を5auスケールの空間分解能で観測し, 全ての天体で詳細構造を検出している[4]. 図1はダスト円盤の詳細構造観測の例である. 詳細構造は大きく分け「リング・ギャップ」, 「円盤内側領域の穴(inner cavity)」, 「弧状構造(arcs)」, 「渦状腕構造(spirals)」に分類される. 第5章でも述べる通り, 穴構造はリング・ギャップ構造の延長であると解釈されることが多い. リング・ギャップ構造は大きな円盤では普遍的に存在するのに対し, 弧状・渦状腕構造は比較的珍しいことがわかっている. 本稿では, こ

れ以降, 特に断りなく「詳細構造」と述べた時はリング・ギャップ構造のことを指すこととする. ALMAによる原始惑星系円盤観測の詳細については, 武藤氏が執筆された記事[3]も参照されたい.

ALMAは, この高い空間分解能に加え, 感度も非常に高く, 多くの天体を短時間ずつ観測する「サーベイ観測」でも目覚ましい成果を挙げている. Longらは, DSHARPが明るい天体のみに注目していることを考慮し, 暗い円盤も含むバイアスの少ないサーベイ観測(空間分解能16auで32天体)を行なった[6]. このサーベイから得られた重要な結論として特に2つの点が挙げられる. 第一に, 空間分解能に比べ十分大きい円盤(半径 ≥ 55 au)の全てで詳細構造を検出した. これはDSHARPによって示された詳細構造の普遍性と整合的である. そして第二に, ダスト円盤の多くは半径が50auに満たないコンパクトなものであることが明らかとなった. Longらの観測では, これらのコンパクト円盤で詳細構造は検出されなかったが, それは単純に空間分解能が十分でなかった可能性がある. 実際, 近年, コンパクト円盤においても詳細構造が発見されてきている[7, 8]. 次章以降では, このような最新のミリ波ダスト円盤観測を概観するとともに, 観測の解釈および惑星形成論との繋がりについて議論していく.

2. 円盤詳細構造が示唆する遠方巨大惑星の普遍性

第1章で述べたように、原始惑星系円盤の遠方領域($\geq 10\text{au}$)のダスト熱放射分布にはリング・ギャップ構造が普遍的に存在する。この詳細構造は惑星形成に密接に関係していると考えられ、その起源を説明するアイデアが多数提唱されてきている。しかし、多くの場合、いずれのアイデアに対してもそれを決定づける証拠は得られておらず、その理解は混沌としている。

2.1 円盤詳細構造の惑星起源説

それらのアイデアの中で最もよく議論されているのが、「惑星起源説」である。惑星が10地球質量程度以上になると、円盤ガスとの重力的相互作用により、その軌道にガス・ダスト密度のギャップを形成する。ガス面密度にギャップがあると、ダストの動径方向落下がギャップ外端で止まり、リングを形成する。

詳細構造の惑星起源説を証明する最もストレートな方法は、ギャップ中に存在する惑星(あるいはその周りに形成される周惑星円盤)を観測的に検出することである。この検出方法としては、惑星(と周惑星円盤)に降着するガスが放出する水素原子の輝線や周惑星円盤のダスト熱放射を観測する方法がある。しかし、ギャップ中の惑星を検出することは現在の観測精度をもってしても容易ではなく、水素原子輝線と周惑星円盤の両方が検出されているのはPDS 70cのたった1例のみである(図2)。水素原子輝線の検出は他に数天体があるが、PDS70c、および同じ中心星に付随するもう一つの惑星候補PDS 70bほど惑星降着起源が確からしい検出例はない。ギャップはこれまでに50個以上も見つかっていることを考え

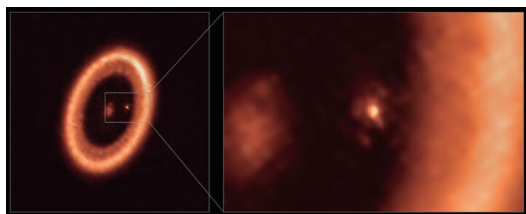


図2:PDS 70周りの原始惑星系円盤のダストギャップ中に検出されたPDS 70c周りの周惑星円盤の熱放射。Credit: ALMA(ESO/NAOJ/NRAO)/Benisty et al. 2021 [9].

ると、ギャップの起源が惑星であると簡単には言えないことがわかるだろう。

2.2 系外惑星観測と円盤詳細構造の比較

ここで、惑星起源説が正しいという立場を取ると、1つの疑問が生まれてくる。「ギャップを作っている惑星は今後、観測されている系外惑星のようになるのか?」。もし観測されている詳細構造が惑星によるものだとすれば、詳細構造の分布と系外惑星の分布を比較することで、惑星進化後期過程(ここではガス捕獲開始後のことを指す)を観測的に制約できると期待される。図3は、2022年1月12日時点までに検出されている系外惑星(質量、軌道長半径、中心星質量がわかっているもののみ)と、ギャップを作っていると予想される惑星候補の質量・軌道長半径を比較したものである[10, 11]。惑星は、質量が重いほど幅が広く深いギャップを開けるので、ギャップの幅・深さから惑星質量を推定することが可能である[12]。ただし、ギャップの幅・深さは、惑星質量のみでなく、ガス円盤の乱流強度やスケールハイト(ガス温度によって決まる)にも依存することに注意が必要である。図3を見て分かる通り、現在ALMAで検出されている詳細構造を作っていると仮定される惑星の多くは、これまで見つかった系外惑星とは全く異なる。具体的には、軌道長半径が10から100au程度、質量が中心星の0.00001–0.001倍程度(中心星が太陽質量とすると、0.01–1木星質量程度)で、近年多数見つかっている軌道長半径が数auで質量が1–10木星質量の惑星「コールドジュピター」に比べ、小さくて遠方に位置する。

この系外惑星と円盤詳細構造を作る惑星候補の質量・軌道分布の矛盾について、幾つかの要因が挙げられる。第一に、円盤詳細構造を作る惑星候補の質量・軌道領域は、系外惑星観測では検出困難であるという点である。詳細構造を作る惑星候補は、トランジット法や視線速度法で検出するには中心星から遠すぎ、直接撮像法や重力マイクロレンズ法で検出するには小さすぎる。言い換えると、系外惑星観測ではこれらの惑星を検出できていないだけで、実際には存在している可能性がある。しかし、この解釈は、ギャップを作っている惑星候補が「これ以上質量・軌道的に進化しない」ということを前提にしている。

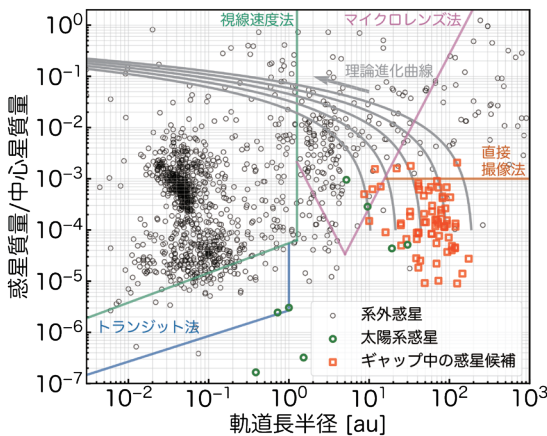


図3:系外惑星とギャップ中の惑星候補の軌道-質量分布の比較 ([11]を基に作成). 灰色の実線は理論的に予想される軌道-質量進化[13]を示す. 視線速度法・トランジット法(ケプラー望遠鏡)・重力マイクロレンズ法・直接撮像法の惑星検出限界のおおよその目安[10]を実線でプロットした.

実際には、これらの惑星は今後、円盤ガスを捕獲して質量が増加し、さらには円盤との重力相互作用によって軌道進化すると予想される。

そこで次に考えられるのが、これらの惑星候補が今後成長し、これまで検出されている系外惑星のようになる可能性である。しかし、残念ながら、最新の惑星軌道移動・ガス捕獲モデルを用いると、これらの惑星候補は観測されている系外惑星とは大きく異なるものとなりそうである。図3に、円盤ギャップを作る惑星の理論進化曲線[13]を図示した。惑星は円盤ガスを捕獲して質量が増加すると同時に、円盤ガスとの重力相互作用によって円盤内側方向に移動すると考えられている。このような理論モデルを用いると、円盤中の惑星候補と中心星の質量比は、軌道長半径が数auのときに 10^{-2} (おおよそ10木星質量)、0.1auのときに 10^{-1} (おおよそ100木星質量)、というとても重い惑星になってしまうことがわかる。一部のコールドジュピターは理論曲線上に存在しているが、ギャップは普遍的に存在しているのに対し、コールドジュピターの存在頻度はせいぜい10%未満であるということにも注意したい[14]。

ここで重要なのが、この理論進化曲線は、ガス面密度に寄らないという点である。惑星のガス捕獲・軌道進化効率はガス面密度に依存するため、惑星の質量・軌道進化にはガス面密度由来の不定性が存在す

る。しかし、ガス捕獲効率も軌道進化効率も共にガス面密度の1乗に比例するため、質量-軌道長半径曲線はガス面密度に寄らないのである(この曲線上のどこで進化が止まるかは面密度による)[13]。すなわち、ガス円盤構造がどうであれ、この理論モデルでは、ギャップ中の惑星候補は見つかっている系外惑星より非常に重い惑星になりそうである。

実は、「ギャップを作る惑星候補のその後の進化」だけでなく、「ギャップを作る惑星候補に至るまでの進化」でも似た問題が見受けられる。Nayakshinらは、様々なガス捕獲モデルに基づいてガス惑星の成長計算を行い、ギャップを作る惑星候補の質量進化と観測されている円盤の年齢を比較した。その結果、惑星のガス捕獲効率を1桁程度意図的に下げないと、惑星がガスを捕獲しすぎてしまい、円盤年齢の頃には、ギャップから推定される質量よりも圧倒的に重くなってしまう可能性が明らかとなった[15]。

これらの矛盾から2つの可能性が考えられる、1つは、現在我々が考えているガス捕獲モデルおよび軌道移動モデルに何らかの問題があるということである。そして、もう1つの可能性は、ALMAで見つかっている詳細構造は惑星起源ではないというものである。次章ではこの可能性について見ていきたい。

3. 惑星工場としての円盤詳細構造

ここまで、見つかっている円盤詳細構造について、「惑星がギャップを空けその外端がリングとなる」という考えのもと話を進めてきた。一方、惑星が詳細構造を作るといふより、むしろ、「詳細構造が惑星を作っている」のではないかという考え方も存在する。

3.1 ダストの局所濃集による惑星形成

ダスト円盤のリング・ギャップ構造の存在は、ダストの運動を理解する上で重要な手がかりとなる。動径方向に滑らかな構造をもつ冪乗円盤中のガスは、中心ほど高温高密度であるため、中心星からの重力と遠心力に加え、内から外向きに圧力勾配力が働き、ケプラー速度よりも少し遅く回転する。一方ダストは、このガスの中をケプラー回転しているため、円盤ガスの向かい風を受けて角運動量を失い、中心星方向に落下する。この落下タイムスケールは非常に短

く、円盤中のダストの大部分は100万年を待たずにほとんどなくなってしまうと考えられ、「ダスト落下問題」として古くから知られている[16]. しかし、円盤ガスにギャップなどがあると、局所的な圧力極大地点が形成され、ダストは向かい風を受けずに落下が停止する。ダスト円盤中のリング・ギャップ構造は、このような圧力勾配力の変化によってダストの落下が止まっている領域があることを示唆している。ダストの落下が止まれば、その領域でダストの量が増加し、ストリーミング不安定性やダスト円盤の重力不安定性による微惑星形成が起こると期待される。このような背景から、円盤中のダストリングは、今まさに微惑星形成が起きている場所であると期待されている[17].

また、リング構造は、微惑星形成のみならずそれ以降の進化においても重要な役割を担っていると期待される。円盤遠方領域($\geq 10\text{au}$)では、微惑星集積によるガス惑星コアの形成タイムスケールがガス円盤の寿命より長くなってしまい、ガス惑星が形成されないという問題が知られている。円盤リング構造は、局所的に固体成分を濃集させることで、このコア形成問題の解決に繋がる可能性がある。実際、原始木星によって形成されたギャップの外端で、ダストが堰き止められることで、そのリング内で土星のコアが効率よく形成される可能性が指摘されている[18].

3.2 巨大惑星以外による円盤詳細構造の形成

しかし、この議論では、すでに形成された巨大惑星の存在が仮定されており、「その巨大惑星はどのようにして出来たのか?」という疑問が自然と生まれる。このような文脈から、これまで、巨大惑星を仮定せずにダストを局所濃集させる機構が多数提示されてきている。例えば、磁場と円盤ガスの相互作用によって生じる帯状流(zonal flow)が挙げられる[19]. 円盤動径方向に鉛直磁場の密度ムラが存在すると、磁束密度の高い領域では、磁気圧によってガスが跳ね除けられる。これによって磁束密度の高い領域はガスの低密度領域となり、その外側に圧力極大値を形成するのである。また、乱流の弱い円盤であれば、数地球質量程度の固体惑星がガス円盤と角運動量をやり取りすることによってガス円盤にリング・ギャップ構造ができる、というアイデアもある[20].

これらの機構は、ダストとガス円盤の両方にリング・ギャップが形成されるが、ガス構造が動径方向に滑らかであってもダスト円盤の詳細構造が形成される可能性もある。例えば、円盤中の様々な分子種の昇華線付近では、その分子の昇華や焼結によってダストの物性(特に付着効率)が変化することで詳細構造が形成される[21]. 他にも、ダスト-ガス間の摩擦がダスト円盤の重力不安定を促進する永年重力不安定性なども挙げられる[22]. 紙面の都合上、これらの機構について詳しくは触れないが、興味のある方は奥住氏および富永氏の遊・星・人記事[23, 24]等を参照してほしい。

このように、ダスト円盤の詳細構造を説明するアイデアは多数存在し、各々が惑星形成に密接に関連している可能性がある。これらを区別するには、ダスト円盤だけでなくガス円盤にも構造があるか、リングとギャップでダストサイズが異なるか、円盤乱流構造はどうなっているか等、多角的に分析する必要がある。

4. 惑星はいつ形成されるのか?

これまでダスト円盤の詳細構造の起源について触れてきた。もし詳細構造の起源が巨大惑星であるならば、その円盤の年齢までに巨大惑星が作られていることを意味する。一方、詳細構造が惑星を作っている現場ならば、寧ろその円盤の年齢が惑星形成のスタート地点であることを示唆する。このような観点から、円盤の時間進化に沿ったダスト円盤の理解が重要である。

原始惑星系円盤の進化は大雑把にいつて、原始星がエンベロープに埋もれたClass 0 段階(～数万年)、エンベロープから円盤への降着は続いているが原始星が近赤外線を確認できるClass I 段階(～数十万年)、円盤への降着がなくなり星と円盤のみとなったClass II 段階(～数百万年)に大別される(詳細な分類は系のエネルギースペクトル分布によって決まるが、本稿では割愛する)。円盤時間進化の大部分はClass II 段階が占めるため、これまでALMAで観測されてきた円盤の多くはClass II 段階のものである。Class II 段階は、星・円盤形成に伴うエンベロープからのガス降着が終了し、円盤が静々と進化するフェーズであるため、しばしば惑星形成のス

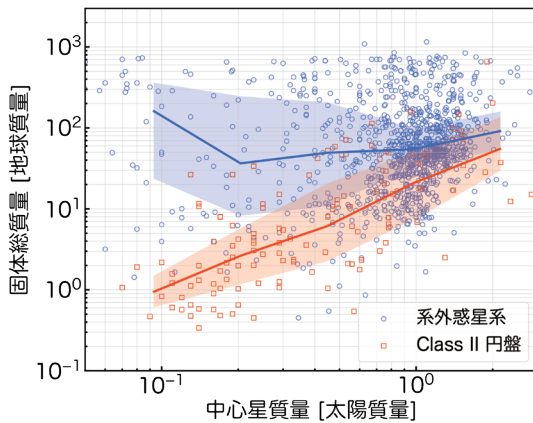


図4: 系外惑星系に含まれる固体総質量とClass II 円盤のダスト総質量の比較([25]を基に作成)。実線は中央値、半透明で塗られた領域は四分位範囲を示す。

タート地点と考えられている。しかし、近年、惑星形成はこのようなClass II 段階ではなく、もっと早く(Class 0/I 段階)に起こっているという「早期惑星形成仮説」が注目されている。

4.1 系外惑星系を作るのに必要な円盤質量

早期惑星形成仮説を裏付ける証拠の一つとして、「軽すぎるClass II 円盤の質量」が挙げられる。図4は、これまで発見されてきた系外惑星系の固体質量と、Class II 円盤のダスト質量を比較したものである。これを見ると、Class II 円盤のダスト総質量は、系外惑星系の固体質量より1桁弱以上小さいということがわかる[25]。この問題の1つの解釈は、円盤固体成分の多くはClass II 段階に入る前に微惑星・惑星へと成長している、というものである。実際、円盤質量のサーベイ観測をClass 0/I 円盤にまで広げると、平均的に、Class I 円盤では50地球質量程度、Class 0 円盤では150地球質量程度のダストが存在している可能性が指摘されており、Class 0/I 円盤の方がダスト質量という観点から惑星形成に望ましいと考えられる[26]。このような早期惑星形成は、Class II 円盤で普遍的に詳細構造が見つかっているという点とも整合的であると言える。

ただし、この考えに懐疑的な意見もある。例えば、系外惑星観測の検出バイアスが系外惑星の平均質量の過大評価につながっているという意見がある。図4では、これまで発見されてきた惑星の質量を比

較しているが、トランジット法や視線速度法は、質量の大きい惑星ほど検出しやすい。特に、ホットジュピターと呼ばれる非常に短周期の木星質量程度の惑星は、検出されている惑星の多くを占めるが、観測バイアスを考慮した存在頻度は1%未満であると考えられている。Muldersらは、このような観測バイアスを考慮してダスト円盤質量と系外惑星固体質量を比較し、これらの質量は同程度である可能性を示した[27]。しかしながら、観測バイアスを考慮しても両者の質量はせいぜい同程度であるため、もしClass II 円盤から惑星を作るとなると、固体成分を100%の効率で惑星にする必要があり、現実的であるとは言えないだろう。特に、近年惑星形成モデルとして有力視されているペブル集積モデルでは、ダスト質量の大部分を中心星落下によって失うため、惑星の固体質量の10倍以上のダスト質量が必要である。ペブル集積については本特集の小林氏の記事を参照して欲しい。

もう1つの解釈として、円盤の質量を大きく過小評価している可能性も指摘されている。円盤質量の見積もりには、円盤のミリ波フラックスが用いられる。円盤が光学的に薄いと仮定すると、このフラックスはダスト総質量とダストの吸収係数の積に比例するため、ダストの吸収係数を仮定することで円盤質量を求めることができる。しかし「円盤が光学的に薄い」という仮定は、暗に円盤はある程度軽いという仮定に対応しており論理的に矛盾をはらんでいる上、その裏付けもしばしば不十分である。近年の研究によって、ダストの熱放射を他のダストが散乱させる「ミリ波散乱」によって、円盤が見かけ上暗く見えることがわかってきた。この見かけ上暗く見える効果によって、光学的に厚いはずの円盤を光学的に薄いと勘違いしてしまう可能性がある。実際、筆者の研究では、ミリ波散乱を考慮することによって、TW Hya 周りの原始惑星系円盤の10au以内のダスト面密度が従来の予測の25倍ある可能性を示した[28]。また、ダストの吸収係数は、ダストのサイズ・組成によって大きく変わるため、その不定性も大きい。これらの効果を定量的に評価するには、ミリ波帯の複数波長(4波長以上)で高空間分解観測を行い、その波長依存性を調べる必要がある。しかし、そのような解析が行われた天体はごく限られている。今後、ALMAによる多波長高空間分解観測が出てくることで、よ

り現実的な円盤質量の統計的データが明らかとなってくるであろう。円盤中のダストサイズおよびミリ波の散乱については、片岡氏の次号掲載記事も是非参照してほしい。

4.2 若い円盤での惑星形成の可能性

また、早期惑星形成仮説を裏付けるかのように、近年のALMA観測によって、Class 0/I 円盤でも詳細構造が複数見つかってきている。特に、年齢が50万年より若いClass I 天体であるIRS 63では、5auの空間分解能で4本のリング・ギャップ構造が検出されている[29]。しかし、Class 0/I 天体はClass II に比べて数も少ないため、現時点でその統計的性質は明らかでない。ALMAのCycle 7では、このような若い天体の詳細構造をサーベイするLarge Programが行われている。今後、このようなプロジェクトをきっかけに、Class 0/I 天体での惑星形成の可能性について、統計的な議論が可能となるだろう。ただし、これまで述べてきたように、発見されている円盤詳細構造が惑星によって形成されているとは限らないことに注意が必要である。特に、Class 0/I 円盤は年齢が若いため、円盤形成時に生じた構造がまだ粘性拡散せずに残っている可能性がある。

このような早期惑星形成の可能性は、太陽系の隕石からも示唆されている。太陽系の炭素質・非炭素質コンドライトと呼ばれる2つの隕石グループは、Cr, Ti, Moなどの同位体組成が互いに大きく異なることが知られている。この同位体異常は、これらの隕石の母天体が、起源の異なるダストから形成されたことを示しており、炭素質・非炭素質コンドライトは円盤中の異なる領域で形成されたと予想される[30]。この同位体二分性は、鉄隕石でも見つかった。鉄隕石はタングステン同位体組成から形成年代が推定されており、非炭素質コンドライトと同じグループに属する鉄隕石は円盤形成から30–180万年、炭素質コンドライトのグループは220–280万年程度で形成されたとみられている[31]。この隕石の年代的・空間的分離を説明するアイデアとして、円盤形成から100万年程度で、木星コアが円盤にギャップを開け、その内と外で材料物質を分けた可能性が指摘されている。太陽系隕石研究の詳細については本特集の脇田氏・荒川氏らの記事を参照されたい。このように、

進化早期段階の円盤観測は太陽系を含めた惑星形成を理解する上で今後より一層重要になってくるだろう。

5. 観測的円盤進化仮説

これまで見てきたように、ALMAによって個々の円盤の特徴付けが行われただけでなく、統計的なデータも得られてきた。このような多数の観測データをもとに、近年、円盤の多様な詳細構造を、1つの時間進化モデルとしてまとめた「観測的円盤進化仮説」が提唱されている。図5はそのような観測的円盤進化仮説の1例をまとめたものである[32]。この仮説は、具体的に以下の5つの段階に分けられる。(i)星形成に伴い、動径方向になめらかな円盤が形成される。(ii)円盤の中で、帯状流などの何らかのメカニズムによってダストが動径方向に濃集し、リング・ギャップ構造が形成され、惑星形成が始まる。(iii)惑星が十分な質量を持つと、ガス円盤にギャップを開け、その外縁にダストが濃集し始める。(iv)ギャップによって円盤内側領域へのダスト供給がなくなり、穴が開く。(v)外側円盤のダストはギャップ外縁へ濃集し、リング状となる。この仮説は、リング・ギャップ構造や円盤内側の穴状構造の繋がりを、シンプルなダスト円盤進化モデルでうまく説明している。しかし、この仮説はあくまで、観測されている円盤詳細構造を「もっともらしく」繋ぎ合わせただけにすぎないことに注意したい。もしこの仮説が正しいとすると、若い円盤ほど図5の左側のような天体が多く、年若い円盤ほど図5の右側のような天体が多い、といった特徴が出てくるはずである。今後、若い円盤の観測が進むことによって、このような仮説の妥当性も検証されるだろう。

6. 将来の円盤観測への期待

これまで見てきたように、ALMAによって、惑星形成に関して様々なことがわかってきたと同時に、新たな謎も生まれてきた。この章では、これまでの理解を踏まえ、今後のミリ波観測の展望を述べたい。

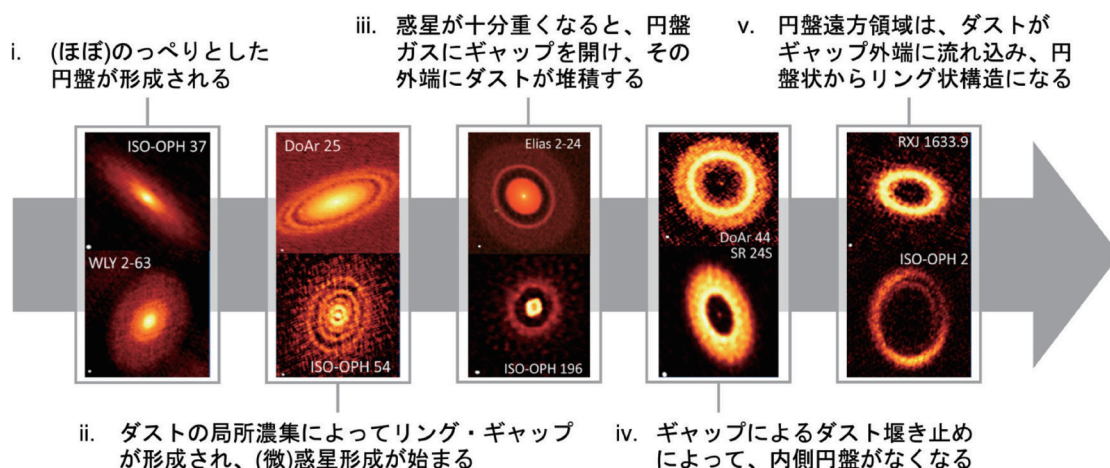


図5: ダスト円盤の構造進化の観測的解釈の例([32]より改変)。この解釈はあくまで複数の円盤観測を仮説に沿って並べただけであり、円盤の年齢などと整合性を保っているものではないことに注意したい。

6.1 円盤ガス構造の理解

本稿では主にダスト円盤のミリ波観測について紹介してきた。しかしながら、原始惑星系円盤を形作った材料である星間物質は、その質量の99%がガスであり、惑星形成を理解する上でガス円盤構造の理解は欠かせない。ダスト円盤の観測によってダストの絶対量やサイズについて制限が与えられてきたが、惑星形成論においては、「ダストのガスに対する量(ダストガス比)」や「ダストの流体力学的緩和時間(ストップタイム)」の方がより重要となることが多い。すなわち、ダスト円盤の理解のみでは、惑星形成は理解できないと言っても過言ではない。

ガス円盤構造を理解するには、ガス分子の輝線を観測すれば良いが、円盤ガスの大部分を占める水素分子の輝線は非常に微弱であるため、観測することは容易ではない。このような観点から、代わりとしてCOの同位体などが円盤ガス質量のトレーサーとしてよく用いられる。しかし、輝線観測には高い波長分解能が要求されるため、その代償として空間分解能や感度を失う。また、COの水素に対する存在量は、円盤内での化学反応によって時間的・空間的に変化するため、COの輝線から円盤質量を見積もるには、精度の良い理論モデルが必要不可欠である。このような課題から、ガス円盤の構造を理解することは容易ではない。2021年にリリースされ

たALMA Large Program「Molecules with ALMA at Planet-forming Scales (MAPS)」の一連の論文では、10auスケールでのガス分子分布の特徴付けが行われた[33]。これによって、ガス分子についてもダストと同様に多数の詳細構造が存在していることが明らかとなった。今後は、このようなガス分子の観測データが増え、理論モデルが整備されることによって、ガス円盤の理解が深まることに期待したい。

6.2 ngVLAが切り拓く地球型惑星形成

ALMAによって原始惑星系円盤の理解は大きく変化した。しかし、現在のALMAの空間分解能は高々数au程度であり、多くの観測は中心星から10au以遠の円盤遠方領域に着目しているということを忘れてはならない。太陽系の地球型惑星や木星形成の観点からは、より高解像度で円盤内側領域を観測することが必要不可欠である。円盤内側領域を観測する上で、空間分解能と同時に課題となるのが円盤の光学的厚みである。原始惑星系円盤は、内側ほどダスト量が多く、光学的に厚いと考えられる。もし、円盤鉛直方向の光学的厚みが1を超えると、我々は惑星形成が起きていると考えられる円盤赤道面を見ることができない。実際、最小質量円盤モデルをもとに、ALMAの波長(0.87mm; Band 7)での光学的厚みを計算すると、15au程度で光学的厚みが1を超

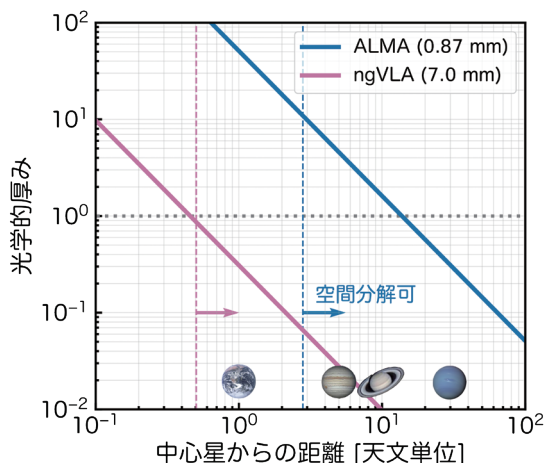


図6: 最小質量円盤をALMAおよびngVLAで観測した時の円盤の光学的厚み(実線)。ダストサイズは $100\mu\text{m}$ を仮定した。破線はALMAおよびngVLAの空間分解能の目安を示す(天体までの距離として140pcを仮定)。参考として現在の地球・木星・土星・海王星軌道をマークで示している。

え、地球軌道に至っては光学的厚みが50程度となってしまう(図6)。この空間分解能と光学的厚みの問題を克服し、地球型惑星形成現場の直接観測に期待がかかるのが、next generation Very Large Array (ngVLA)である。ngVLAは、現在運用されているKarl G. Jansky Very Large Arrayを拡張し、2030年代から運用開始予定の次世代大型干渉計である。ngVLAの観測波長はALMAよりも長い3mmから10cmで、空間分解能は(同じ波長で見た時に)ALMAの10倍ほど良い。図6を見ると分かる通り、この長い観測波長と高い空間分解能によって、ngVLAでは地球軌道の赤道面を空間分解して観測できると期待されている。

このngVLAの優れた性能を実演して見せたのが、図7である。図7は、原始太陽系円盤の中に存在する原始木星・土星・天王星・海王星がngVLAでどのように見えるか模擬観測したものである[34]。ngVLAによって、巨大ガス惑星が作るリング・ギャップ構造に加え、複数の局所的ダスト熱放射が検出されていることがわかる。この局所的ダスト熱放射は、原始太陽と巨大惑星のラグランジュ点に捕獲されたダストを示している。このように、ngVLAは、中心星のごく近傍を高分解能で観測でき、太陽系形成過程の解明に繋がると期待されている。

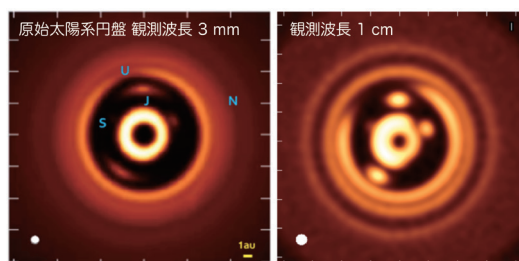


図7: 太陽系巨大惑星(木星, 土星, 天王星, 海王星)形成現場のngVLA 模擬観測イメージ([34]より引用)。

7. まとめ

本稿では、ALMAを中心とした原始惑星系円盤ミリ波観測について概観し、今後のミリ波観測の展望を議論した。ALMAの運用が開始してから数年は、観測しやすい明るく大きな天体の観測が中心となり、個々の詳細構造の特徴付けが行われてきた。詳細構造から、中心星から10au以遠に、海王星から木星質量程度の惑星が普遍的に存在することが示唆されるが、それらの惑星に惑星質量・軌道進化の理論モデルを当てはめると、これまで見つかってきている系外惑星とは異なる特徴を示すことが明らかとなってきている。この矛盾の原因として、(1)詳細構造はそもそも惑星起源ではない、(2)惑星進化モデルに何らかの間違いがある、(3)観測バイアスのため系外惑星観測では検出されていない、などが考えられる。(3)については、今後の系外惑星観測の検出精度の向上を待つことになるが、(1),(2)については、観測・理論的研究によって理解を深めていくことが重要となるであろう。

近年は、個々の特徴付けだけでなく、大規模サーベイ観測によって、円盤の統計的性質が明らかとなってきた。どうやら、(空間分解能に比べて)ある程度大きい円盤にはリング・ギャップ構造がほぼ必ず存在するというの間違いのないようである。しかし、円盤の大多数は半径50au以下のコンパクトなものであるということも同時に明らかとなった。これまでの観測の多くは比較的大きな円盤に集中してきたが、現在のALMAの高い空間分解能を用いれば、コンパクト円盤の詳細構造も今後続々と明らかになると期待される。

円盤の大多数はコンパクトであるということは、その質量も小さい可能性を示唆する。円盤質量のサーベイ観測から、Class II 円盤のダスト質量は系外惑星系を作るのに不十分であることがわかった。これは、より早期のClass 0/I 段階での惑星形成の可能性を示唆している。このような観点から進化早期段階の円盤観測は急務であると言える。円盤進化早期段階での惑星形成は、太陽系の隕石試料からも示唆されており、系外惑星系のみならず太陽系の形成を理解する上でも重要である。

以上のように、ALMAによるミリ波観測によって、ダスト円盤の理解は大きく進展した。しかしながら、原始惑星系円盤の質量の大部分はガスであり、ダストおよび惑星の進化は、ガスの存在量に強く依存する。ガス円盤構造の理解は、観測的にも理論的にも非常に複雑である。ALMAによって今後ガス円盤の観測データが増えることで、理論モデルが発展し、ガス円盤の理解が深まることを期待したい。

2030年代にはngVLAの運用が予定されている。ngVLAはALMAより長い(サブ)センチメートルの波長で、ALMAの10倍近い分解能で円盤を観測できると期待される。この長い波長と高分解能によって、これまでALMAでは見ることができなかった、「地球型惑星形成領域の赤道面」を直接観測できるだろう。一方で熱放射の弱い円盤遠方領域の探索には短波長のALMAが威力を発揮する。今後はこのような、ALMAと他の望遠鏡を組み合わせた多波長分析も重要になってくるであろう。

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奥住聡氏に感謝をいたします。また、本稿の執筆にあたりコメントを頂いた片岡章雅氏、荒川創太氏、図の作成にあたりデータを提供して頂いたCarlo F. Manara氏、Luca Ricci氏、および丁寧な査読をして頂いた百瀬宗武氏に感謝申し上げます。執筆者は、科学研究費補助金(JP19J01929)およびNINS-DAAD International Personal Exchange Program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] Williams, J. P. and Cieza, L. A., 2011, *ARA&A* 49, 67.
- [3] 武藤恭之, 2019, *遊星人* 28, 190.
- [4] Andrews, S. et al., 2018, *ApJL* 869, L41.
- [5] Andrews, S., 2020, *ARA&A* 58, 483.
- [6] Long, F. et al., 2019, *ApJ* 882, 49.
- [7] Yamaguchi, M. et al., 2021, *ApJ* 923, 121.
- [8] Ueda, T. et al., 2021, submitted.
- [9] Benisty, M. et al., 2021, *ApJL* 916, L2.
- [10] Bae, J. A. et al., 2018, *ApJ* 864, 26.
- [11] Wang, S. et al., 2021, *ApJ* 923, 165.
- [12] 金川和弘, 2015, *遊星人* 24, 332.
- [13] Tanaka, H. et al., 2020, *ApJ* 891, 143.
- [14] Wittenmyer, R. A. et al., 2020, *MNRAS* 492, 377.
- [15] Nayakshin, S. et al., 2019, *MNRAS* 488, 12.
- [16] Weidenschilling, S. J., 1977, *MNRAS* 180, 57.
- [17] Stammer, S. M. et al. 2019, *ApJL* 884, 5.
- [18] Kobayashi, H. et al., 2012, *ApJ* 756, 70.
- [19] Bai, X. and Stone, J. M., 2014, *ApJ* 796, 31.
- [20] Bae, J. A. et al., 2017, *ApJ* 850, 201.
- [21] Okuzumi, S. et al., 2016, *ApJ* 821, 8.
- [22] Takahashi, S. Z. and Inutsuka, S., 2014, *ApJ* 794, 55.
- [23] 奥住聡, 2019, *遊星人* 28, 286.
- [24] 富永遼佑ほか, 2019, *遊星人* 28, 172.
- [25] Manara, C. F. et al., 2018, *A&A* 618, 3.
- [26] Tychoniec, L. et al., 2020, *A&A* 640, 19.
- [27] Mulders, G. D. et al., 2021, *ApJ* 920, 66.
- [28] Ueda, T. et al., 2020, *ApJ* 893, 125.
- [29] Segura-Cox, D. M. et al., 2020, *Nature* 586, 228.
- [30] Budde, G., et al., 2016, *Earth and Planet Sci. Lett.* 454, 293.
- [31] Kruijer, T. S., et al., 2017, *PNAS* 114, 6712.
- [32] Cieza, L. A. et al., 2021, *MNRAS* 501, 2934.
- [33] Öberg, K. I. et al., 2021, *ApJS* 257, 1.
- [34] Ricci, L. et al., 2018, *Science with a Next Generation Very Large Array*, *ASP Conference Series* 517, 147.