

論文の内容の要旨

Morphological Diversity of Protoplanetary Disks Surrounding Intermediate-Mass Stars

中質量星の原始惑星系円盤における形態の多様性

深川 美里

星周円盤は、星の形成過程において、母体となる分子雲が角運動量をもつことから必然的につくられる構造である。星周構造のおおまかな進化に関しては、太陽質量程度の低質量星（Tタウリ型星）と中質量星（Herbig Ae型星）において、すでに理解が進んでいる。星の年齢が 10^5 年の段階では、中心の星と円盤を囲むエンベロープ構造（1000 AUスケール）が卓越するが、星が 10^6 年になるとエンベロープが散逸して円盤（100 AUスケール）のみが残され、観測されるようになる。この円盤は惑星形成の現場となることから「原始惑星系円盤」と呼ばれ、その性質を知ることが惑星形成過程を理解する上で重要となる。特に、撮像観測により描き出される空間構造は、温度、密度構造などを反映して変化していくはずであるから、円盤の形態の普遍性や進化を探ることで、惑星系形成理論に大きな制限を与えることができる。

円盤構造に関するこれまでの研究としては、天体のエネルギー分布 (SED) を再現するように構造のモデルを構築するという手法が一般的であった。しかしながらこのような間接的な方法によって構造を一意に決めることは困難であり、また、円盤内の詳細な構造を推測することは不可能である。そのため、円盤の撮像観測の重要性は以前より認識されており、ミリ波干渉計などによる観測が行われてきたが、サイズの小さい円盤を観測するには解像度が不十分であったため、我々は円盤の存在とその大きさ（半径）について知るのみであった。

円盤半径は大きくても数 100 AU であり、空間構造を分解するには 0.1 秒角程度の高解像度が必要となる。これを直接撮像で実現できるのは可視光、近赤外線での観測であるが、この波長帯においては中心星が円盤に比べて明るすぎるため、中心星の寄与を軽減するコロナグラフなしに

は観測が難しい。このため、限られた装置でのみ撮像が可能であり、空間分解例が極めて少ないのが現状である。すばる望遠鏡は、大気揺らぎを抑える補償光学装置とコロナグラフカメラを備え、地上からの撮像観測をいち早く可能にした。そこで我々は、円盤を検出してその形態を探ることを目的とし、主に前主系列段階にある中質量星（Herbig Ae 型星）を観測対象として、近赤外線（波長 1.65 ミクロン）コロナグラフ撮像観測を行った。Herbig Ae 型星は、惑星系形成の残骸円盤をもつとされる主系列星（ベガ型星）の前進化段階にあたり、したがって Herbig Ae 型星の円盤を知ることは、ベガ型円盤の起源、すなわち中質量星における惑星系形成過程への理解につながる。

観測は、年齢 10^6 – 10^7 年の前主系列段階にある Herbig Ae 型星 15 天体について行った。なるべく高い解像度を得るため、近傍（距離約 150 pc）の天体を多く選んだ。また、比較のために年齢 10^5 年の Herbig Ae 型星、Herbig Be 型星を 1 天体ずつ、さらに主系列段階にある中質量のベガ型星を 4 天体観測した。まず観測初期において、年齢 10^5 年の Herbig Ae 型星（VY Mon）の周囲に、大きさ約 2500 AU のエンベロープ構造をとらえた。このエンベロープの詳細構造は、中心星の Point Spread Function (PSF) を引き算して始めて見えてきた構造であり、PSF 引き算を円盤観測に適用するにあたってその有効性を確認し、画像解析手順を模索することにも役立った。そして、円盤検出を目的とした観測においては、Herbig Ae 型星 5 天体について円盤構造をとらえることに成功した。この観測で得られた解像度は平均約 0.1 秒角（距離 150 pc の天体で約 15 AU）であった。また、コロナグラフの使用により、星から 1 秒角離れた場所において中心星のハローの明るさはピークの 1000 分の 1 まで減少し、PSF 引き算によってさらに 2 桁暗い円盤構造まで検出することができた。

検出した 5 個の円盤のうち 3 個（HD 142527、HD 150193、HD 169142）については本観測によって初めて構造が分解された。また、2 個（AB Aur、HD 163296）についてはすでに可視光の観測で円盤がとらえられているが、より波長の長い近赤外線を用いると円盤の外側に存在するダスト雲を見通すことができるため、そのようなエンベロープを有する AB Aur については、本観測によって初めて明確なスパイラル構造が明らかとなった。

検出された原始惑星系円盤の典型的な半径は数 100 AU であり、その表面輝度は 1 平方秒あたり 10 等級から 18 等級の範囲に分布する。約 0.1 秒角の高解像度によって空間的に分解された円盤は様々な形態を示し、スパイラル状の円盤（AB Aur）、バナナ型の構造にアームが付随した円盤（HD 142527）、方位角方向に非一様で、かつ明るさが半径に応じて急勾配で変化する円盤（HD 150193）、また、リング状の円盤もあれば（HD 163296）、そういった構造のない、ごく普通と思われてきた円盤も検出された（HD 169142）。すなわち、SED 等を用いた研究から示唆されてきた描像とは大きく異なる円盤が、実際に多数存在することが明らかとなった。

この観測により近赤外線においてまとまったサンプルが得られ、ハッブル宇宙望遠鏡（HST）により撮像された 1 個を合わせると、合計で 6 個の原始惑星系円盤の像が得られたことになる。さらに、円盤未検出のサンプルを含めると、距離 250 pc 以内の撮像済み天体はこれまでの 2 倍に増え、14 天体となった（HST による可視光観測も含む）。そこで、円盤どうしの明るさの比較お

よび円盤検出率の考察を行った。観測された円盤は光学的に厚く、近赤外線での撮像は円盤上層のダストによる散乱光をとらえる。円盤の鉛直方向の高さが半径とともに増加する形状の場合、すなわちフレアしている場合には、円盤上層のダストは中心星からの光を効率良く受け止めることができるため、散乱光で観測されやすい。一方、フレア構造は円盤の温度分布に影響することから、天体の SED をもとにフレア構造の有無が予測されている。実際、円盤の検出率はフレア円盤と予測された天体で高くなっており、星の年齢や星周物質の量には依らない。加えて、散乱光で明るい円盤を持つ天体は、年齢とは無関係に、エンベロープが長く残存している天体であるという傾向が見られた。そして、それら散乱光で明るい円盤にはスパイラルアームが付随するという対応関係が得られた (AB Aur、HD 100546、HD 142527)。

スパイラルアームを持つ天体のうち、AB Aur と HD 100546 は単独星である可能性が高いことから、構造は円盤の自己重力不安定性が原因で生じていると推測される。この場合、円盤物質の中心星への質量降着によって円盤は次第に安定化するはずであるが、スパイラル構造にはエンベロープが付随していることを考慮すると、エンベロープから円盤への質量供給が弱い不安定性を長時間 (10^6 - 10^7 年) 維持する役割りを担っている可能性が示唆される。また、円盤が重すぎると、強い不安定性によってケプラー時間程度 (10^4 年以下) でスパイラルアームが分裂し、パターンが消滅してしまうと予測されるため、スパイラル円盤は 10^6 - 10^7 年の前主系列星に付随する円盤質量の上限を形成していると考えられる。スパイラル構造を持つ天体の割合を見積もるにあたって、ミリ波観測から推定される円盤質量は、これを基準にして重力不安定性の可能性を見積もるには不定性が大きい。そこで、本観測から得られた傾向、すなわちエンベロープの有無を基準にすると、最大でも Herbig Ae 型星の 10% 程度であろうと推測できる。標準的な惑星形成理論では、円盤中のダスト成長により惑星コアが形成されるが、この場合、円盤物質が散逸しないうちにガス惑星を作ることが難しいとされている。そこで、重い円盤の重力不安定性によって短いタイムスケールで惑星が形成されるとする仮説も提唱されている。本観測はそれらの中間の状態として、弱い不安定性によるスパイラル構造が存在することを示したものであり、このような円盤における効率的な惑星形成の可能性について、理論的研究を促すこととなった。

高解像度撮像観測によって原始惑星系円盤の形態が様々であることが分かり、現在我々が見ているこの多様性は、連星であるかどうか (HD 142527、HD 150193) や、初期円盤質量 (AB Aur、HD 100546) に依る可能性が高いことが分かった。特に AB Aur のスパイラル構造は、円盤半径全域にわたる顕著な構造としては初めての検出であったため、スパイラル円盤の存在を実証したとして、理論、観測両面で興味を喚起した。観測的には、散乱光のコントラストは密度構造を直接反映しないため、サブミリ波干渉計などによる多波長観測により、密度や温度情報を得、円盤の理解を深める試みが始まっている。本研究をきっかけに、実存する円盤形態に基づいた惑星系形成の理解の発展が見込まれる。