

氏 名 工藤智幸

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1121 号

学位授与の日付 平成 20 年 3 月 19 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Near-Infrared Imaging Observations of Protoplanetary  
Disks around T Tauri Stars in Taurus

論文審査委員 主 査 准教授 浮田 信治  
教授 川邊 良平  
教授 佐々木 晶  
准教授 北村 良美(JAXA 宇宙科学  
研究本部)  
准教授 中本 泰史(東京工業大学)

## 論文内容の要旨

我々の地球や木星のような惑星はどのようにして誕生したのだろうか。惑星系形成過程の解明は、天文学において最も重要なテーマの一つである。惑星誕生の様子を知るためには、太陽以外の恒星とその星周構造を観測することが必要である。若い星に円盤状の星周構造が伴うことは、1980年代のミリ波や赤外線における観測などから知られていたが、1983年に打ち上げられた赤外線天文衛星 IRAS は、分子雲に付随した若い星に普遍的に（円盤に起因する）赤外超過が観測されることを示した。1990年代には、ハッブル宇宙望遠鏡(HST)による可視光における直接観測により、太陽系スケール（100AUのオーダー）での円盤が直接観測されるに至った。これは、惑星誕生の現場と考えられ、原始惑星系円盤（Protoplanetary Disk）と呼ばれている。

原始惑星系円盤（以下、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作られると考えられる。これまでの研究では、いくつかの直接観測を除いては、様々な波長における天体のエネルギー分布（SED）を再現するように円盤のモデルを構築するという間接的な方法がとられてきた。しかし、このような間接的方法のみでは構造を一意に決めることは難しく、円盤内の詳細な構造を推測するのは困難である。例えば、もし中心星の近傍に惑星が形成されていくなれば、形成場所によって円盤の空間的な物質分布の様子が変化するはずである。つまり、円盤における惑星系形成を調べるには、円盤からの熱放射量の測定のみでなく、円盤を空間的に分解する直接撮像観測が不可欠である。しかし、円盤のサイズはせいぜい数100 AUであり、空間構造を分解するには近傍分子雲( $d=120\sim 200\text{pc}$ )で0.1秒角(12~20AU)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今のところ可視光と近赤外線を用いた観測だが、この波長帯では中心星が円盤に比べて明るすぎるといった問題が生じる。そこで、中心星の寄与を軽減できるコロナグラフの利用が不可欠になる。すばる望遠鏡は、大気揺らぎを抑える補償光学(AO)とコロナグラフカメラ(CIAO)というユニークな装置を備え、地上の8mクラス望遠鏡における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低質量星(0.1~2.0  $M_{\odot}$ )を観測対象として、近赤外線コロナグラフ撮像観測を行った。

本研究における観測は、年齢 $10^5\sim 10^7$ 年の前主系列段階にあるT Tauri型星について行った系統的観測のサブサンプルである。高解像度と統計的議論のため、近傍( $d=140\text{pc}$ )にあるおうし座の低質量星形成領域を対象としている。結果、計15天体の撮像観測を行い、3天体で円盤を分解した。うち2つ(FN Tau, CoKu Tau/4)は世界で初めて検出できた原始惑星系円盤である。また、HL Tauの円盤も現在のところ世界最高の解像度で描くことができた。観測で得られた解像度は平均約0.1秒角(距離140 pcの天体で約14AU)である。

HL Tauは、Class IからIIへと進化する途中段階にある、年齢約 $10^5$ 年の天体と考えられている。これまでの観測から、CO輝線による円盤状星周構造が半径2000AUにわたって存在することがわかっており、ミリ波干渉計のデータから半径150AUの円盤が見つかった。HSTの可視光観測では、星本体は星周ダストの吸収により直接見ることができなかった。近赤外線での

観測は、可視光と同じく、ダストによる散乱光を捉えることができるが、可視光より波長が長い  
ため、長波長では星本体まで見通すことができる。本観測は近赤外 3 色による最も高解像度の撮  
像結果であり、これまでで最も長い観測波長(L'-band:  $3.7\mu\text{m}$ )のデータである。その結果、中心  
星の周囲に大きさ 500AU のエンベロープ構造、さらに北東側には、アウトフローによって引き起  
こされたと考えられ U 字型の空洞の壁(cavity)が星の光を散乱して明るくなっているのを捉えた。  
南西側の赤いカラー構造は、ミリ波の円盤とほぼ同じサイズであることから、降着に伴う集積し  
たダストによって赤化している円盤領域に対応すると考えられる。

FN Tau は非常に低質量 ( $0.1 M_{\odot}$ ) の古典的 T Tauri 型星 (Class II 天体) である。これまで  
に高解像度撮像は無く、SED から間接的に円盤の存在が示唆されていたのみであった。我々はコ  
ロナグラフを用い、この天体の周囲に半径  $r = 260\text{AU}$  のほぼ face-on 円盤を初めて検出した。M  
型星における円盤の最初の直接観測である。この円盤の表面輝度は  $r^{-2.5}$  で減少しており、他の T  
Tauri 型星と比べ散乱光の寄与が大きいことから、フレアした円盤であることが示唆される。直  
接観測から得られた半径と傾きを用い、過去の可視光～ミリ波に至る測光から、円盤のモデルを  
用いて質量を推定すると  $0.007M_{\odot}$  (主星質量の 6%) となった。これは数木星質量の惑星を形成  
するに十分な質量だが、面密度分布から惑星形成理論をもとに推定される、形成される惑星の  
質量は、巨大ガス惑星よりもかなり小さいと推定される。本結果は、最も軽い天体( $\sim 0.1M_{\odot}$ )に付  
随する唯一の撮像例であり、M 型星における惑星形成を調べる上で、今後最も重要な天体となる  
だろう。

CoKu Tau/4 は弱輝線 T Tauri 型星 (Class III 天体) に分類されている。我々の近赤外(JHKバ  
ンド)によるコロナグラフ撮像観測の結果、大きさ約 800AU のエンベロープ、長軸方向が約 230AU  
の傾いた円盤という星周構造を分解した。各バンドにおける長軸方向のプロファイルをとると、 $r$   
 $-1.0 \sim r^{-1.8}$  で減少している。通常、中心星からの輻射は  $r^{-2}$  で減少するはずであり、これは視線方  
向に奥行きをもつ星周物質を通った散乱光でなければ説明できず、球形状のエンベロープに囲ま  
れていることを示唆する。また、円盤のカラーが極端に青いことから、より進化の進んだ残骸円  
盤の性質に近いことも伺える。非対称性も大きく、既に形成されつつある伴星の影響を受けてい  
る可能性も否定できない。

一方で、近赤外線では円盤を検出できなかった天体もあり、その星周構造の明るさの上限値を  
求めることができた。観測的には、近赤外散乱光のコントラストは密度構造を直接反映している  
わけではないため、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て円盤  
の理解を深める試みも必要だろう。我々の結果は、これまで 4 段階に分類されている進化段階の  
うち、3 つの各段階(Class I ~ Class III)における円盤を直接分解した点で大きな意義を持つ。今  
後、観測例を増やすことで、星形成領域ごとの差違についても議論できるようになるだろう。本  
研究を展開することで、実存する円盤形態に基づいた惑星系形成の理解が進み、次第に我々の太  
陽系の「立ち位置」が見えてくるものと期待される。

## 論文の審査結果の要旨

我々の地球はどのようにして誕生したのかという疑問に答える惑星系形成過程の解明は現代天文学の最前線のテーマである。誕生まもない若い(年齢 $10^5\sim 10^7$ 年)星は、光・赤外線などの波長帯における放射エネルギー分布(SED)が特徴的な赤外超過を示すことから、塵とガスからなる円盤状の構造を伴っていることが間接的に知られるようになった(1980年代)。惑星はこの原始惑星系円盤と呼ばれる領域で形成されると考えられている。ところがこの構造は太陽系のサイズ程度、数百AU(天文単位)しかないため、数百光年の距離にある星・惑星形成領域は1秒角程度の広がりしかなく、従来の望遠鏡で観測することは大変困難だった。中心星が円盤に比べて明るすぎるといふ問題と、地上からの観測では大気による星像の乱れが観測最適地(例えばハワイマウナケア山頂)でも約1秒角弱あるためである。すばる望遠鏡ではこれらを克服するために、コロナグラフと呼ばれる、明るい中心星を隠しその周辺の暗い天体や構造を探ることが出来る観測装置(CIAO)と大気による星像の乱れを時々刻々と補正する波面補償光学装置(AO)の開発が行われた。出願者はこれらの装置を用いて星形成領域にある多数の若い星の周辺を直接撮像する観測プロジェクトに主体的に参加し、原始惑星系円盤が中心星からの赤外線を反射して輝いている様子を捉えることに成功し、以下のような観測的研究成果を挙げた。

観測は参照星と呼ばれる星周構造を持たない主系列星の画像とターゲット天体の画像とを比較して行われる。観測時における望遠鏡光学系の点光源に対する応答関数(PSF)を正確に求めることが鍵となる。まず出願者は当時まだ手探りの状況にあったといえる観測手法の検討を2002~2004年に行われた観測のデータを用いて詳細な解析を行い、参照天体に対して以下の条件を見出した。

(1) AOは可視光(R-band)で補償動作が行われるので、ターゲット天体とR-bandで等級差が0.3等以内であること。(2) ターゲット天体よりもS/Nの良い撮像を行っておくために、赤外の波長帯で同じもしくは少し明るいこと。(3) 観測時の大気変動の影響を同レベルとするために天球上でターゲット天体から15度以内にあること。(4) PSF参照星→ターゲット天体→PSF参照星の順で観測すること。2005年の観測では期待通りの観測性能を引き出すことに成功した。本論文に掲載されているような高品質な画像が安定して得られるように観測手法を確立したことが大いに評価された。

出願者は本博士論文の研究の観測として、牡牛座暗黒星雲に付随している原始星段階から前期主系列段階の低質量星(0.1~2太陽質量)合計15天体に対して波長1.2(J)、1.6(H)、2.2(K)、3.7(L')  $\mu\text{m}$ 帯の撮像観測を行い、3天体で円盤を検出・分解した。この内2つ(FN Tau, CoKu Tau/4)は世界で初めて検出した円盤で、HL Tauの円盤も世界最高の解像度(0.1秒角)で描くことが出来た。この種類の天体の観測例としては従来3天体しかなく、非常に貴重な観測結果となった。

FN Tauはこのタイプの星の中で最も軽い(0.1太陽質量)星で、その年齢は $10^5$ 年、そのSEDから間接的に円盤の存在が示唆されていた天体である。検出された円盤は半径260 AUのほぼface-on円盤で、このように軽い星の周囲でこれほど明るく広がった円盤は予想されておら

ず、また非常にのっぺりとした円盤であることも驚きを与えるものであった。画像を180度回転した後引き算する処理を施した画像には点源は存在せず、もし円盤内にH-bandで17等級の天体( $10^6$ 年経過した1木星質量に相当)があれば十分検出可能であることから、FN Tauに伴星は存在しないと推論した。厚み一定のフラットな円盤であれば反射光の面輝度は $r^{-3}$ で暗くなるが、観測された面輝度は $r^{-2.5}$ で減少しており、半径と共に厚みが次第に厚くなるフレアした形状であることが示唆される。観測から得られた円盤の形状のパラメータや可視光〜ミリ波の測光観測データを用いて円盤の質量を推定して、0.007太陽質量(主星質量の6%)を得た。これらの観測結果から现阶段の惑星形成理論を適応して、出来る可能性のある惑星質量は地球質量程度となると推論した。

CoKu Tau/4は、年齢 $10^6$ 年程度の星で、同種天体に比べると $8\sim 20\ \mu\text{m}$ の間で放射強度が約10分の1になっていることから、半径 $\sim 10$  AUに伴星起源によるギャップがあるのではと注目されている天体である。得られた画像には北西から南東方向に伸びた構造があり、距離 $110\ \text{AU} < r < 230\ \text{AU}$ では面輝度が $r^{-0.5\pm 0.1}$ 、 $230\ \text{AU} < r < 500\ \text{AU}$ では $r^{-1.3\pm 0.2}$ の依存性を持つことなどから、半径約230 AUの円盤とそれを取り囲む約800 AUのエンベロープを傾き約65度の方向から観察していることを明らかにした。更に波長JHKの3色の画像を比較し赤化の様子から、円盤部分では粒子サイズの大きなダストが、一方エンベロープではサブ・ミクロンサイズのダストが卓越していると推論した。特に円盤部分では進化段階が相当進んだ残骸円盤(例えばAU Micの円盤)に特徴的な青さとほぼ一致しているが、他方で若い段階にある象徴でもあるエンベロープをまとっているという結果は単純な星・惑星系形成シナリオでは説明が困難であるという意外な結果となった。

HL Tauは年齢 $10^5$ 年程度の若い星で、これまでのCO分子輝線観測から半径2000 AUの広がりを持つ円盤状星周構造やミリ波干渉計による連続波観測から半径150 AUのダスト円盤が見つかった。可視光の観測から北東方向に高速ジェットが噴き出しているなどの発見があり、特に注目されている天体である。ところが誕生後まだ $10^5$ 年程度しか経過していないため星周ダストは豊富に残っており、可視光観測では吸収のため星本体及びその近傍を直接見ることは不可能であった。本観測はH, K, L' 帯で高分解能画像の取得に成功した。その結果、中心星の周囲に500 AUのエンベロープ構造、北東側には高速ジェットによって作られたと考えられるU字型の空洞の壁が星の光を散乱して明るくなっているのを捉えることが出来た。また3色の画像の差分画像では、南西側にミリ波連続波で見えていたサイズの円盤領域と対応する構造を見出すことが出来た。

本論文は格段に高い空間分解能・高いコントラストを持つ直接撮像を実現させ、これにより原始惑星系円盤及びそれを取り囲むエンベロープの形状・物理的性質に関して驚きを与える新たな知見をもたらした。中心星を記述する質量・年齢が異なる3天体に付随するこれらの円盤の特徴から低質量における原始惑星系円盤の多様性とその進化過程について総合的に捉えようとした観測的研究である。本論文に示されたこれらの結果は出願者の優れた観測遂行の能力、データ解析力、その解釈のために必要な広範かつ高度な天文学・物理の背景知識等が備わっていることを示すものである。これにより審査委員会は全員一致で、本論文が博士論文として十分な価値を有し、合格であると判定した。