

すばる望遠鏡による観測：円盤から惑星へ

田村元秀

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉
e-mail: hide@subaru.naoj.org

深川美里

〈東京大学／国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉
e-mail: misato@optik.mtk.nao.ac.jp

惑星は、恒星形成の副産物として星形成領域において生まれる。惑星が、実際にどのように生まれ進化するかを解明することは、星形成研究だけでなく、系外惑星の多様さの理解や我々の太陽系形成の理解にとって重要である。すばる望遠鏡とその観測装置（補償光学、赤外線コロナグラフ装置、赤外線分光器など）の登場によって本格化し始めた惑星形成の現場-原始惑星系円盤-の観測と若い惑星の直接検出に向けての取り組みを紹介する。

1. はじめに

この広い宇宙で人類はひとりぼっちなのだろうか？ それとも、地球や木星のような惑星が太陽系外にも有るのだろうか？ そこでは生命が育まれているのであろうか？ この何世紀にもわたって人々の心をとらえてきた問いに科学的に答えることが、10～20年のタイムスケールで現実になりつつある。

系外惑星の検出方法としては大別して、間接検出法と直接検出法がある。前者は、惑星が恒星に及ぼす影響を調べるもので、そのうちの1つであるドップラー法を用いて1995年に最初の確実な例が発見された¹⁾。もっぱらこの方法により、その後続々と巨大惑星が「間接」的に検出され、今日までに100を超える例が報告されている。従って今後は、(a) 惑星を「直接」に検出すること、(b) さまざまな間接方法による統計的研究、(c) 理論との比較などが最重要課題となるだろう。

いっぽう、我々の太陽系誕生の歴史を遡ると、太陽という恒星とそのまわりの原始惑星系円盤（ディスク）の形成に辿り着く。太陽系サイズ（約

100 AU）のディスクは1980年代に太陽近傍（典型的には150 pcの距離）の星形成領域にある若い星の周りにおいて、エネルギー分布などの観測からその存在が示唆され、恒星誕生のための角運動量と磁場の開放にとって不可欠な構造と考えられている。このディスクこそが惑星系形成の母体であり、その詳細観測により、惑星形成の進化の理解が得られ、あるいはそこで生まれたばかりの惑星を捕らえることができる。

この稿では、すばる8 m望遠鏡用観測装置の一つであるコロナグラフCIAO (Coronagraphic Imager with Adaptive Optics) を利用した直接撮像観測に焦点をあて、ディスクと系外惑星に関連する最近の成果と今後の計画を概観する。同じく、すばる望遠鏡を用いた系外惑星のトランシット法およびドップラー法の観測については、本特集、佐藤氏の稿を参照されたい。

2. 恒星とその星周構造の進化

恒星は分子雲から生まれる。太陽質量程度（0.3～2太陽質量）のいわゆる低質量星に関しては、分子雲コアから原始星・Tタウリ型星を経て主系

列星に至る星形成のパラダイムがすでに有る²⁾。すなわち、はじめ緩やかに回転していた低温高密度分子雲コアが自由落下して、星周円盤と落下するエンベロープに囲まれた原始星が出来る。その後はHR図上で林トラックに沿って準静的に収縮し、可視光で見え始めていわゆるTタウリ型星として認識される。質量の降着と放出のバランスにより中心星の質量やディスクに残る質量も決まる。ディスクは惑星系形成の現場であり、その中のダストの集積によって微惑星ができ、合体・成長、ガスの捕獲等を経て惑星が誕生する。一方、円盤の物質は中心星への降着、中心星からの放射やウインドによる影響、あるいは微惑星への成長によって消失してゆくと考えられている。

実際、1984年に打ち上げられた赤外線衛星IRASは周囲にダスト円盤が取り巻いていると考えられる主系列星（ベガ型星）を発見し³⁾、うち数天体についてはその後の撮像観測によりディスクの空間構造が詳しく調べられ⁴⁾、ベガ型星のディスクは惑星系形成の名残であるという解釈がもっともらしくなった。また、そのようなベガ型星の多くは太陽の2倍程度の質量を持つ中質量星であった。この事実と最近の若い中質量星の観測とを合わせ、中質量星も低質量星と同様の星形成過程を経てディスク構造を持つものと認識されてきている。このような惑星系円盤の形成と進化を探るためには、ベガ型星よりも若い段階の星周構造の解明が不可欠となる。

若い星の星周構造や系外惑星は、明るい星のすぐ近くに存在する暗い天体（構造）である。こうした天体を検出するには、高感度・高解像度だけでなく高コントラストが必要となる。したがって、直接撮像観測に成功した例は数えるほど、というのが現状である。これまではハッブル宇宙望遠鏡の独壇場であったが、地上8~10m望遠鏡における補償光学を用いた撮像が本格化しつつある。特に、すばる望遠鏡の装置ラインナップにはCIAOという補償光学とコロナグラフ機能を持つ赤外線

カメラが存在し、シャープ（解像度約0.1秒角）でコントラストの良い星像を得ることができる⁵⁾。

3. 中質量星（Herbig Ae/Be 型星）の星周構造

Tタウリ型星の中質量（2~8太陽質量）に相当する若い星はHerbig Ae/Be型星とよばれる。ベガ型星のうちディスク構造が直接確かめられているものにはスペクトル型がA型の天体が多いため、同じくA型の若い星の星周構造を調べることで、ベガ型星のディスクへの進化系列が得られると期待できる。著者たちはCIAOを用いてHerbig Ae型星の観測を進めており、これまでに数例のディスク撮像にも成功している⁶⁾。図1（表紙）は距離145 pcに存在するHD 169142の近赤外コロナグラフ画像である。HD 169142はHerbig Ae型星の中でも主系列に近い天体であり、エンベロープはすでに散逸してディスク構造のみが残されている段階にあると考えられる。中心星は直径わずか0.5秒角のマスクで隠されており、周囲には半径約180 AUのディスクがダストによる散乱光で見えている。画像は補償光学を用いて得られ、約15 AUサイズの構造を見分けることができる。検出されたディスクはマスクの端から単調に強度を減少させながらひろがっている。散乱光の強度はベガ型星のディスクに比べて1桁大きく、微惑星形成が進みつつある若いディスクであることを示している。このように空間的にディスクを描き出した観測からは、半径方向のダストの密度分布やダストのサイズなどを推定することができる。そうしたディスクの物理的な情報を、今後多くの天体に対して求めることでディスク進化の普遍的なパラダイムが得られるだろう。

4. 小質量星（T Tauri 型星）の星周構造

Tタウリ型星は我々の太陽と同程度の質量を持つことから、その原始惑星系円盤を調べることは、

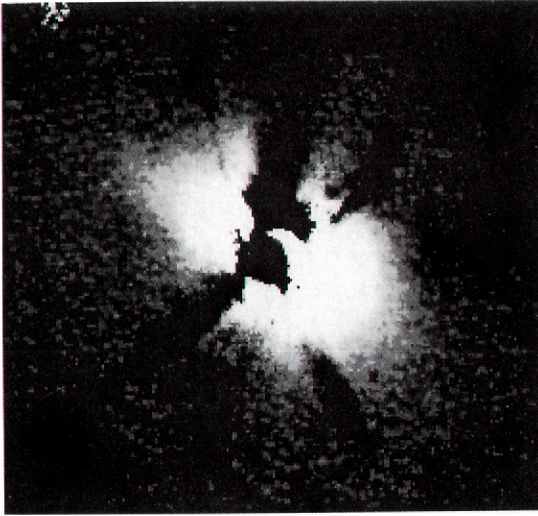


図3 GM Aur : 波長 $1.6 \mu\text{m}$ (Hバンド) でのコロナグラフ画像。直径 0.8 秒角のマスクを用いて撮像された。周囲に半径約 250AU のディスクがひろがっている。黒く抜けている部分は、副鏡のスパイダーと、参照星を引き算した際の影響である。

我々の太陽系が如何にしてつくられたかという問いに答えるという点で大きな意義を持つ。中質量星の場合と同様に、ディスクの詳細観測は大型望遠鏡・補償光学・コロナグラフなど観測機器の発展によってようやく可能になってきた状況にある。

図2(表紙)は神戸大学の伊藤氏らが観測した、おうし座分子雲(距離 140 pc)のTタウ型星 GG Tau のコロナグラフ画像である⁷⁾。GG Tau は4重星であり、うち2つはわずか 0.25 秒角 (35AU) しか離れていないが、補償光学を用いているおかげで 0.09 秒角の解像度が得られ、CIAO のマスクの中心付近で分離されて見えている。GG Tau のディスクはリング状構造になっており、これは中心にある2重星の重力攪乱により円盤の内側の物質が吹き払われたためと考えられている。一方、図3は同じおうし座のTタウ型星 GM Aur のコロナグラフ画像である。GM Aur は GG Tau とは異なり中心星は単独星であると考えられている。GM Aur のディスクはリング構造にはなっていない

い。また、星を中心とした楕円からのずれが生じており、これは星からの光の前方散乱が効果的であるためと考えられる。すなわち、赤道面にそって完全に平坦でなくフレア構造を持ったディスクの北側が、我々に近い方に傾いていることで説明可能である。このように円盤の詳細構造が明らかになるにつれ、単純な円盤のイメージを超えたそれぞれの天体の個性が現れてきている。年齢や連星系であるかどうかなど星本体の性質と関連づけられたディスク進化の解明を目指して、今後も CIAO を用いた系統的撮像観測が必要であろう。

5. 星形成領域における惑星検出の試みと今後の計画

系外惑星の検出はこれまでの天文観測技術では非常に困難であった。その理由は、惑星は恒星に比べ非常に暗く、かつ、恒星のすぐ近くにあるためである。 8m 望遠鏡とコロナグラフを利用しても、ドップラー法で発見されているような主星に近い年老いた惑星の検出は難しい。直接検出成功へのひとつの有効な手段として、星形成領域や星団にある恒星の周りに、若くてより明るい惑星を数多く検出するというものがある。このような惑星は重力収縮の名残で赤外線波長では自ら輝いており、主星の反射光のみで微かに輝く惑星より検出しやすい。このような観測は CIAO の良いテーマとなる。

CIAO が本格的に稼働し始めた2001年度はハワイ・マウナケアの天気が非常に悪く、装置製作グループに与えられた観測時間の約半分は全く有意義なデータが取れなかった。しかし、2002年冬季から観測所大プロジェクト(PI: 国立天文台 林正彦氏)という形でおうし座分子雲に集中して、若い惑星と原始惑星系円盤を検出することを目指す観測を系統的に開始することが出来た。今期は、関連する提案と併せて約30天体もの撮像が行われた。ちょうど観測シーズンが終了したところであり、詳細な解析は今後を待たねばならないが、半数の天体において約 0.1 秒角の解像度で新しい星周構

造や伴星候補が見つかるなどの結果が得られつつある。改めてすばる望遠鏡の潜在能力の大きさを感している。

神戸大学の伊藤氏、名古屋市立大学の杉谷氏、国学院大学の小倉氏や著者たちはCIAOを用いて、おうし座よりも近傍（最小 65 pc）にあると考えられている分子雲 L1457 において同様の惑星探査を行っている。いくつかの伴星候補天体に対して、固有運動の確認や分光フォローアップを計画している。また、国立天文台の中島氏ほかは、ごく近傍の比較的若い恒星を選び出し、伴星型の褐色矮星と巨大惑星の検出を計画している。

Keck や VLT と異なり、すばる望遠鏡は単体では干渉観測機能は無い。しかし、同じくマウナケア山頂にある 3 ~ 10m 望遠鏡をファイバーで結合し光波干渉させることによって、すばる単体の解像度を約 2 桁向上させることができる。この計画は OHANA (Optical Hawaiian Array for Nanoradian Astronomy, ハワイ語で家族の意味もある) と呼ばれており、仏米日等の国際共同プロジェクトである。これによって、最大 0.001 秒角レベルでギャップなどのディスクの微細構造を描き、惑星の存在の間接的証拠を得ることができるだろう。

原始惑星系円盤からそこに生まれた惑星に至るまでを系統的に観測しよう、という試みは、すばる望遠鏡にとって最も重要なテーマの一つと言える。今後、スペースにおける長波長赤外線での高感度観測や惑星系形成理論との密接な連携をはかり、さらに惑星の材料であるダストの進化の理解と結びつけることによって、この分野は著しい展開を見せることが期待される。

参考文献

- 1) Mayor M., Queloz D., 1995, *Nature*, 378, 355
- 2) Shu F. H., Adams F. C., Lizano S., 1987, *ARAA*, 25,23
- 3) Aumann H. H., et al., 1984, *ApJ*, 278, L23
- 4) Augereau J. C., et al., 2001, *A&A*, 370, 447
- 5) Tamura M., et al., 2000, *SPIE*, 4008, 1153
- 6) Fukagawa M., et al., 2003, in prep.
- 7) Itoh Y., et al., 2002, *PASJ*, 54, 963

Observations with the Subaru Telescope: From Disks to Planets

Motohide TAMURA

National Astronomical Observatory

Misato FUKAGAWA

University of Tokyo

Abstract: Planets are born in star-forming regions as by-products of star-formation processes. The understanding of the formation and evolution of planets is important to understand not only the star-formation processes but also the variety of extrasolar planets and the formation of our Solar system. We introduce some recent observation results of the protoplanetary disks around young stars and some trials for direct detections of young extrasolar planets with the Subaru telescope and its instruments, in particular, adaptive optics and infrared coronagraph.