

特集「比較惑星系形成論」

すばる望遠鏡と惑星系形成
：ベガ型星の観測を中心として田村 元秀¹

1. すばる稼働

文部省国立天文台が約9年の歳月をかけて、ハワイ島マウナケア山頂に建設してきた大型光学赤外線望遠鏡（以下、すばる）がついに稼働しはじめた。現在はまだ限られた装置を用いた試験観測のフェーズにあるが、大気ゆらぎを補正する補償光学機能なしでも0.2秒角を切る解像度を達成し、地上望遠鏡としては世界第一級の性能を実現している。今後、続々と第一期共同利用観測装置（計7台＋補償光学装置）や持ち込み型装置が望遠鏡に取り付けられ、可視光および波長1-5 μm の近赤外線はいうまでもなく、0.3 μm の紫外線から10-30 μm の中間赤外線に至る広い範囲の波長での観測が可能になる。

このような高い望遠鏡性能と多彩な観測装置との組み合わせのおかげで、すばるは天文学のあらゆる分野で目覚ましい成果をあげて行くと期待される。なかでも、我が国で伝統のある星・惑星系形成の観測は最も重要な研究課題の一つである。太陽質量程度のいわゆる低質量星の形成とそれに伴う惑星系形成の最近の理解は、これまでは、赤外線天文衛星IRASと高解像度ミリ波望遠鏡とハッブル宇宙望遠鏡（HST）の成果に依るところが大きかった。しかし、すばるをはじめとするケック・VLT・ジェミニなどの8-10m級地上大口径望遠鏡は、HSTが端緒を切った高解像度の可視光・赤外線観測をありふれたものとし、星形成の原始星段

階から主系列段階に至るまでの様子とその星周構造としての原始惑星系円盤形成から惑星系誕生までを連続的に詳らかにしてくれるだろう。この稿では、とくにTタウリ型星段階より後の星周構造、とりわけ、“ベガ型星”の星周構造に関して、これまでの重要な観測を振り返りながら、すばるの特徴を生かしたコロナグラフ観測装置で期待される観測について述べたい。

2. ベガ型星

IRASがその強度校正用に用いようとしていた主系列星に、予想もしていなかった遠赤外線超過を発見したのは1983年のことであった [1]。最初に発見されたのはこと座 α 星（Vega）であり、その後、12,25,60,100 μm のいずれかの波長で超過を持つ主系列星を総称してベガ型星、その現象をVega phenomenaと呼ぶようになった。IRASの解像度は低いため、その遠赤外線超過の原因（熱放射）であるダストの空間分布を直接に見分けることはできなかったが、この発見の報を聞いてすぐさま、SmithとTerrileが惑星のリングを観測するために製作した可視光コロナグラフを、ベガ型星の一つのがか座 β 星に向け、数百AUもの距離に広がっているedge-on scattering diskを見事に描き出した [2]。これにより、ベガ型星のまわりには原始惑星系円盤の残骸が存在するという考えが急速に広まり、他のベガ型星にもそのような構造が発見されるも

1 国立天文台 光学赤外線天文学・観測システム研究系

のと期待された。しかし、複数のグループがコロナグラフなどを利用した主系列星のサーベイ（それぞれ数十から100個程度）を行ったが、1997年までに直接観測に成功した可視光・赤外線観測は、BD+31°643（可視光コロナグラフ撮像）とSAO 26804（10 μ m撮像）に過ぎなかった。

1995年に打ち上げられたヨーロッパ他の赤外線宇宙天文台ISOは、その圧倒的な感度でIRASを凌ぐ成果をベガ型星についてもたらすものと期待されていたが、これまでのところこの分野に関してはIRASほど印象的な結果は出ていない。統計的な議論としては、主系列AFGK星のサンプル中、約1/3に超過有り、約1/3に超過無し、残りは不明と示唆しているが、これはIRASの結果（例えば、A型星の約半数に超過有り）からの推測と大きく変わらない。また、おおぐま座 β 星の星団メンバー9個の観測では、IRASがすでに発見したベガ型星の他には新しい赤外線超過星を見つけることができなかった [3]。しかし、Vega, Fomalhaut, SAO186777を60,90 μ mで空間的にかろうじて解像することができた [4]。

一方、がが座 β 星の詳細な観測も進み、なかでも画像安定化による（つまり、最低次の補償光学を利用した）ジョンズホプキンス大コロナグラフを用いたinner diskの観測や、HSTの可視光によるtilt diskの観測（とそれに基づく惑星存在の示唆）、中間赤外線カメラによるdisk cavityの観測などから、ディスクの詳細な空間構造が明らかになる一方、紫外線分光観測などから彗星とディスクの関係が議論された。これらの観測により、“ベガディスク”は単なるディスクの“残骸”ではなく、彗星により物質が供給されている必要性も示唆された。

3. サブミリ波と中間赤外線

ベガ型星という興味深い現象を調べる上で、直接観測が進むのはがが座 β 星だけというフラスト

レーションの高い状況は、これまで比較的未開拓であったサブミリ波と中間赤外線の両波長での観測技術の向上から一転した。マウナケア山頂にあるJCMT 15m望遠鏡に搭載されたSCUBAは、サブミリ波における最初のカメラと呼べるもので、91素子・37素子の2種類のボロメータアレイを持ち、350/450 μ m帯と750/850 μ m帯の同視野・同時撮像を可能にした。個々の素子の感度も従来に比べ約1桁向上したため、多素子と高感度が相乗する形となった。その結果、Holland et al. (1998) と Greaves et al. (1998) は、4つの代表的ベガ型星（Fomalhaut, がが座 β 星, Vega, スペースエリダヌス座 ϵ 星）のまわりにことごとく、波長850 μ mにおいて星周構造を見つけだすことに成功した [5]。サブミリ波強度から推定されるダストの総質量は月の質量程度しかない。なかでも、エリダヌス座 ϵ 星（年齢5-10億年のK型星）には、半径60AU程度のクランピーなダストリングが存在し（図1）、その内側30AUは明らかにダストが少ない。このダストリングの形状は、最近太陽系で続々発見され

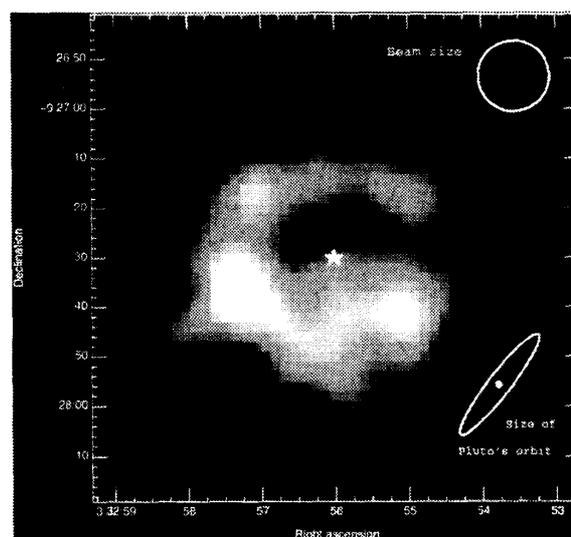


図1 波長850 μ mにおけるエリダヌス座 ϵ 星の星周ダストの熱輻射。中心の星印が恒星の位置。右上の円はビームサイズ（15秒角）、右下の楕円は恒星の距離（3.2パーセク）における冥王星の軌道を示す。（Greaves et al. 1998）

つつあるエッジワース・カイパーベルト (EKB) 天体の分布に類似しており、両者の関係、すなわち、Vega phenomenaは太陽系外のEKBを見ているという考えを支持している。

さらに、最近、高感度多素子を用いた中間赤外線カメラの開発が進み、マウナケアのケック望遠鏡とセロトロロのbronco望遠鏡では独立にベガ型星の一つHR4796A (年齢約1千万年のA型星) のまわりのダストディスクの直接撮像に成功した [6]。興味深いこと、波長 $20\mu\text{m}$ ではinner cavityを持つ半径約100AUのディスクとして見えるが、波長 $10\mu\text{m}$ ではコンパクトである。この低温ダストと高温ダストの分布は、それぞれ太陽系におけるEKベルトと黄道光ダストの分布に似ている。これらの観測により、ベガ型星の観測は最近になって一挙に進み出した。

4. コロナグラフとすばる用観測装置CIAO

(ステラー) コロナグラフは、明るい中心天体の光を焦点面に置かれたオカルティングマスクによって遮り、引き続き瞳面に置かれたリオストップにより星像の整形を行う装置である。これにより、明るい天体のすぐ近くの微光天体が観測可能になる。原理的には人工的に皆既日食を起こす太陽コロナグラフ [7] と同じものであるが、遠方の明るい天体を隠すために、マスクはごく小さなものを用いる。がが座 β 星のダストディスクの発見に使用されたコロナグラフのマスクの直径は7秒角にも相当する大きなものであった。ジョンズホプキンス大コロナグラフは2-3秒角もの小さなマスクを用い、がが座 β 星のinner diskの構造を描くこと、低温褐色矮星グリーゼ229Bの最初の発見などにつながった。このことからわかるように、ステラーコロナグラフの重要な点の一つは、いかにシャープな星像を得て、それをいかに小さなマスクで隠

すことができるかにある。

宇宙望遠鏡とコロナグラフの組み合わせはこの点で非常に効果的である。実際、HSTに搭載されたNICMOS近赤外線カメラ分光器には簡単なコロナグラフ機構もあり、それを用いて上記のHR4796Aを観測したところ、中心星から0.65秒角のところまでの画像を得た [8]。その近赤外線画像には中間赤外線では熱放射として見えていたダストリングが散乱光としてくっきり写っており (図2)、リングの幅がたった17 AUであることがわかった。

さらに、シーイングの良いマウナケア山頂にあるIRTF 3m鏡用の赤外線カメラに付属して用いられるコロナグラフCoCoは、ドブラー法で発見された太陽系外惑星系の一つ、かに座51番星、にもダストディスクが存在することを示した [9]。この観測におけるシーイングは0.8秒角で、マスクの大きさは3秒角であった。

すばる用共同利用観測装置のラインアップには、ステラーコロナグラフとして最適化されたCIAO (チャオ) という近赤外線観測装置が含まれる [10]。CIAOはすばるの優れた結像性能を生かし、もっぱら補償光学システムと共に使用され、波長 $1\sim 5\mu\text{m}$ の近赤外線最適化されたコロナグラフ機能を

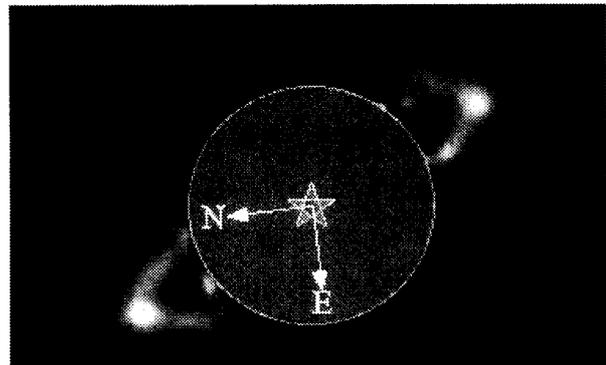


図2 波長 $1.6\mu\text{m}$ におけるHR4796Aのまわりのダストリング。中心円の内側 (半径0.65秒角) はコロナグラフの影響などで使えない領域を表す。放射状にのびる構造のいくつかはPSFの差し引きが不完全なことによる影響を受けている。カメラのピクセルスケールは0.076秒角。(Schneider et al. 1999)

持つ。これによって、補償光学なしでも0.5-1秒角のマスクを用い、補償光学を利用するとこれまでに前例の無い最小0.1秒角という小さなマスクが使用できる。装置のカメラ本体の解像度は波長 $2\mu\text{m}$ で約0.05秒角で、1時間積分の限界等級も約25等に達する。さらに、偏光観測やグリズムを利用した低分散（分解能数百）の分光観測も可能である。冷却した赤外線コロナグラフカメラは非常にユニークな観測装置で、世界の8-10m級望遠鏡にはこのような性能を徹底的に追及した装置はなく、すばるの目玉の一つと言えよう。

ベガ型星の可視光・近赤外線観測は、過去の例からもわかるように、明るい中心星の影響を除くコロナグラフが不可欠である。すばるのCIAOを用いれば、ベガ型星は近いものでは0.2AU、典型的には1AUの解像度で観測することができる。そして、近赤外線波長で星周構造からの散乱光をトレースし、中心星から数AUまでのダストの密度分布を求めることができよう。特に、ディスク中での惑星形成の間接証拠としてディスクの表面輝度の非一様性を調べることは重要である。さらに、ディスクの分光を空間的に行い、中心星からの距離との関係を調べることや、太陽系のEKB天体の分光結果と比較することも興味深い。もう一歩進んで、ディスク内で生まれた惑星そのものを直接に撮像できる可能性もあると考えている。

参考文献

- [1] Aumann, H. H. et al., 1984, ApJ, 278, L23.
- [2] Smith, B. A., & Terrile, R. J., 1984, Science, 226, 1421.
- [3] Abraham, P. et al., 1998, A&A, 338, 91.
- [4] Heinrichsen, I. et al., 1999, MNRAS, 304, 589.
- [5] Holland, W. S. et al., 1998, Nature, 392, 788;
Greaves, J. S. et al., 1998, ApJ, 506, L133.
- [6] Jayawardhana, R., et al. 1998, ApJ, 503, L79;
Koerner, D. W., et al. 1998, 503, L89.
- [7] Lyot, M. B., 1939, MNRAS, 99, 580.
- [8] Schneider, G. et al., 1999, ApJ, 513, L127.
- [9] Trilling, D. E., & Brown, R. H., 1998, Nature, 395, 775.
- [10] Tamura, M. et al., 1998, Proc. SPIE, 3354, 845.