

赤外線宇宙望遠鏡による 系外惑星スペクトルの観測

塩谷 圭吾¹, 中川 貴雄²

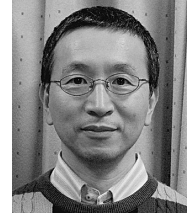
〈宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部・赤外・サブミリ波天文学研究系
229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉

¹ e-mail: enya@ir.isas.jaxa.jp

² e-mail: nakagawa@ir.isas.jaxa.jp



塩谷



中川

系外惑星系の観測研究は、発見の時代から系統的な観測の時代へ移行しつつある。赤外線宇宙望遠鏡は、撮像観測だけでなく分光観測によって系外惑星系の形成史を解明するため、今後いっそう重要になっていくだろう。2010年代には、Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics (SPICA)をはじめとする大型の赤外線宇宙望遠鏡が稼働する。このような大型望遠鏡を実現し、現在開発研究が進められている赤外線コロナグラフによる直接観測や、系外惑星が主星の前後を通過するトランジット現象を利用した観測などを行うことで、系外惑星系の形成過程の解明に大きく寄与する、系統的なスペクトル情報が得られるものと期待されている。

1. イントロダクション

現在の惑星形成論は、原始惑星系円盤が重力不安定を起こして直接に惑星を作るという「円盤分裂モデル」よりも、固体物質が先に集積し、その後に木星型の惑星が大気を獲得したとする「コア集積モデル」が優勢である。このモデルは、現在の太陽系の惑星系を再現するには大きな成功を収めたモデルである。しかし、(1) コア集積モデルが他の系外惑星系にも適用される普遍的な過程であるのかは自明ではなく、また (2) コア集積モデルでのカギとなる固体物質の集積と微惑星の形成、そしてその後のガス円盤の消失が観測的に証明されたわけでもない。これらの解明のためには、多くの系外惑星系の惑星形成の現場を観測し、チリ円盤とガス円盤の成長と消失を観測的に追うことが必要である。特に、ガス円盤に関しては、惑星が形成される領域（温度で数十 K から数百 K に相当）のガスの存在量と組成を調べる必要

がある。多くの分子ガスの観測が望ましいが、ガスの存在量として最重要なものはガスの主成分である水素分子あり、組成として注目すべきは、固体物質の量を左右するスノーライン（雪線）の形成とも関連して、水分子である。これらのスペクトル線は赤外線領域にあるが、地球大気の不透明な領域に相当するため、宇宙からの高分解能・高感度の赤外線分光観測が必要となる。

一方、円盤から惑星が形成される際の問題は、どのような惑星系がどこに作られるかということである。惑星が主星に及ぼすわずかな影響を観測する、ドップラー法やトランジット法などの間接的な方法は大きな成功を収めているが、主星に近い惑星を選択的に観測するため、惑星の分布の正しい姿をとらえることができない。そのためにはやはり、直接的に惑星を観測し、主星から遠い惑星の分布を調べる必要がある。

そして、この段階での問題は、惑星がどのような大気を形成しているかということである。惑星よ

り質量が大きな褐色矮星においても、大気中の塵の存在の有無によりスペクトルが大きく変化するなど、理論モデルからは予想されていなかったことが観測により明らかになった。木星型の巨大惑星の大気についても、果たしてわれわれの太陽系の木星や土星が典型的なものであるかどうかは自明ではない。これは、より小型の地球型惑星の大気の形成とも関連する問題である。これを観測的に解明するには、惑星大気の分光観測を欠かすことができない。特に、惑星大気中の分子の組成を解明するためには、やはり地球大気の影響を受けないスペースからの赤外線高感度観測が必須となる。

Mayor と Queloz が中型の地上望遠鏡による恒星スペクトルの精密なモニター観測によって、恒星スペクトルの揺らぎから、その周りに惑星が存在することを間接的に示して以来、われわれの太陽系以外の「惑星系」を観測することが現実のものとなった¹⁾。さらに、近年では、トランジット現象を利用した惑星スペクトルの抽出も、限定的ではあるが行われてきた^{2), 3)}。そしてついに 2008 年後半には、いくつかの系外惑星の直接観測が報じられた⁴⁾。これらの結果は、系外惑星観測研究が、発見の時代から系統的な観測へ移行しつつあることを示している。

これらの近年の発展を受け、本原稿では、原始惑

星系円盤の成長、惑星系の形成、大気の形成、ガス円盤の消失という、惑星系形成の重要な過程を観測的に解明する試みとして、スペースからの赤外線分光観測の重要性と可能性について議論する。

2. 2010 年代の赤外線天文衛星

系外惑星系を特徴づける目的において、宇宙望遠鏡による赤外線観測にはいくつかの重要な利点がある。それは、

(1) 主星と惑星の明るさのコントラストが、中間赤外域では惑星自身からの熱輻射のため、可視域に比べて数桁(も)緩和されると期待されること、

(2) 地球大気の透過帯域による制約を受けないこと、

(3) 大気揺らぎの影響を受けないため、非常に安定した観測が可能であること、などである。そのため赤外線宇宙望遠鏡は、今後、系外惑星のスペクトルを得るためにますます重要となっていくものと考えている。

Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics (SPICA)⁵⁾ は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が主導し、欧州宇宙機構 (ESA) などとの協力のもとに開発を進めている、あかりに続く次世代赤外線天文衛星である。

SPICA 望遠鏡の口径は 3.5 m である (図 1)。あ

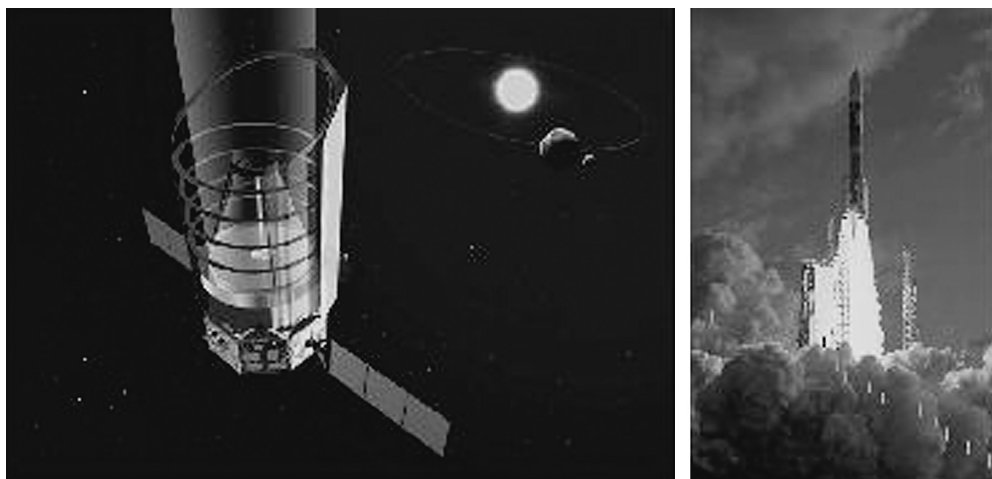


図1 軌道上の SPICA の想像図 (左) および HII-A ロケット (右)。 (JAXA 提供)

かりの口径が 68.5 cm であることを考えると、あかりから SPICA への飛躍がいかに大きいものであるかが実感できる。また、あかりは全天を広く観測するサーベイ観測のための衛星であるが、SPICA は通常のアステロイド型の望遠鏡であり、個々の天体、天域を目的に応じて観測するのに適している。SPICA 望遠鏡は、赤外線感度を大幅に向上させるため、軌道上面にて機械式冷凍機と放射冷却を利用して極低温 (5 K) に冷却して運用する。SPICA は HII-A ロケットを用いて、2017 年に太陽・地球 L2 ハロー軌道に打ち上げられる予定である。そして地上からは観測が困難な 5–200 μm の波長域を中心に、大口径による高解像度、高感度の赤外線観測を行う。SPICA は 2008 年度より、JAXA においてプリプロジェクト化することが正式に承認された。また欧州側では、ESA の将来計画を策定する Cosmic Vision 2015–2025 において、アセスメントフェイズへの選定を通過している（これらはいずれも、プロジェクトの成立性を証明する、いわゆるフェイズ A に相当する）。

SPICA のほかに、2010 年代に稼働する大型の赤外線宇宙望遠鏡としては、遠赤外域での観測を行う Herschel 宇宙望遠鏡、(口径 3.5 m, 2009 年打ち上げ予定)、近赤外～中間赤外域の観測を行う James Webb Space Telescope (JWST, 口径 6.5 m, 2013 年打ち上げ予定) が挙げられる。SPICA は Herschel 宇宙望遠鏡と比較した場合、望遠鏡冷却の到達温度の違いにより、遠赤外域において～2 桁も優れた感度をもつことになる。また JWST との比較においては、そもそも遠赤外域での観測能力は SPICA のみが備えており、また、重複する観測波長域についても、やはり冷却の効果によって～18 μm 以上の波長域での感度において SPICA は優れている。さらに SPICA ではより広視野の中間赤外観測装置、高分散の赤外線分光器、分光機能をもつコロナグラフ観測装置など、JWST にはない機能の搭載が計画されている。

3. 系外惑星スペクトルの赤外線観測

系外惑星の観測においては、惑星よりも圧倒的に明るい主星が、惑星のすぐそばに存在することが障害となる。かりに太陽系を 10 パーセクの距離から見た場合、太陽と木星のコントラストは可視波長域で～10 桁、中間赤外域でも～6 桁もあり、離角は 0.5 秒角しかない。そのため、通常の観測では系外惑星は主星像のすそに埋もれてしまい、検出、分光などすることは非常に困難である。

この障害を克服して系外惑星系の形成過程を直接撮像、さらにその分光観測を可能にするため、赤外線宇宙望遠鏡用のコロナグラフの開発が進められている。ここで言うコロナグラフとは、主星像のすそを選択的かつ大幅に低減してコントラストを緩和するための、特殊な光学系のことである。SPICA に先だって打ち上げられる予定の JWST は、4 分割位相マスク方式などによるコロナグラフを搭載する。ただし、JWST では主鏡に分割鏡を採用しており、その継ぎ目が星像に複雑に影響するため、コロナグラフの性能には限界がある。また JWST のコロナグラフには分光機能がなく、撮像観測のみが可能である。

他方、SPICA においても、分光機能を併せ持つコロナグラフ観測装置を搭載すべく、開発が進められている。SPICA の主鏡は 1 枚鏡であり、このことはコロナグラフにとって大きな長所となる。この特徴を活かし、SPICA コロナグラフでは主星に対して 6 桁のコントラストをもつ惑星まで観測できることが、設計要求とされた。この値は JWST の場合と比べて～1 桁も高いものであり、木星型惑星が存在した場合にそれを系統的に検出するために必要な性能である。核となる観測波長域は、使用する Si:As 検出器の特性なども考慮して、3.5–27 μm となっている。分光機能の波長分解能としては、波長分散で～200 および～20 程度が想定されている。

系外惑星の直接観測に向けたコロナグラフの方

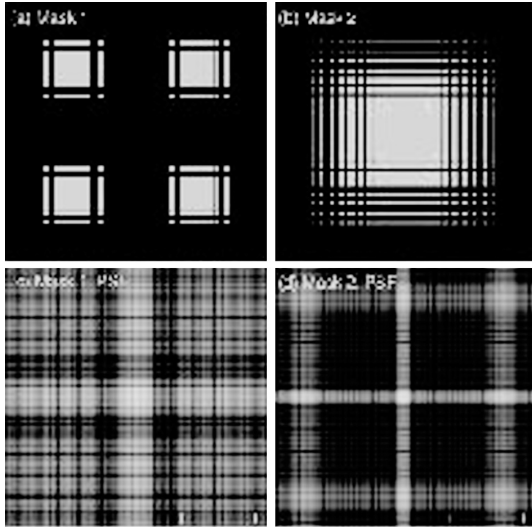


図2 マスクの設計解。上段はマスクの形状を示す。白い部分が透過部、黒い部分が遮光部に相当する。下段は期待される点源像。最適化条件として課したコントラストには 10^{-7} 。スケールバーは $20\lambda/D$ (λ は観測波長、 D はビーム径) に相当する。

式としては、さまざまなものが提案されているが、ここでは SPICA コロナグラフの基本解となっているバイナリー瞳マスク方式について簡単に紹介したい⁶⁾ (より詳しくは以前の天文月報記事を参照していただきたい⁷⁾)。バイナリー瞳マスク方式では、点源の像が光学系の入射口の形に依存することを利用して (フーリエ変換の関係)、入射口の形を特殊なものにすることで、高コントラストの像を実現する。この方式には、望遠鏡の指向性誤差に強いこと、単一のマスクが波長によらず機能すること、などの特徴がある。この方式のコロナグラフのコントラストは、原理的には SPICA の要求 (6 桁) を超えるものであるが、採択にあたっては実証実験が不可欠であった。原理検証を目的とした実験は、まずはより困難な赤外波長域ではなく、可視波長域にて He-Ne レーザー (波長 632.8 nm) を光源として行われた。図 2 はそのために設計されたバイナリー瞳マスク

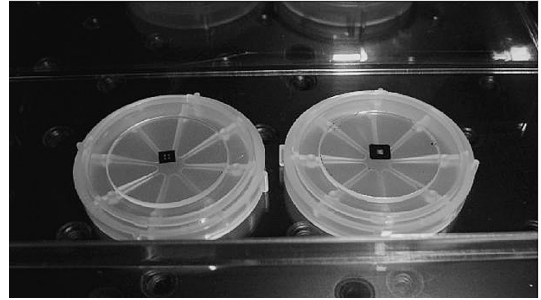


図3 電子ビーム描画による微細加工によって製作したマスク 1 (左) およびマスク 2 (右)。

と、シミュレーションによって求めた、期待される点源像である。マスクの効果によって、点源像の中心の周りに、エネルギー分布が抑制された四つ暗領域ができています。これらの設計をもとに、実験に用いるマスクが、産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門と共同で製作された (図 3)。BK 7 ガラス基板上に蒸着されたアルミニウム薄膜に対して、電子ビーム微細加工描画とエッチング/リフトオフの手法を用いて、開口部が形成された。

マスクは小型であり、開口部の外接円の直径が 2 mm に相当する。これらのマスクを用いて得られた点源像を、図 4 に示す。設計解である図 2 と見比べれば、これらの像が設計とたいへんよく一致をしており、コロナグラフが点源像のコアの形状を非常によくコントロールできていることがわかる。

この実験で確認されたコントラストは、マスク 1 では 2.7×10^{-7} 、マスク 2 では 1.1×10^{-7} であり、SPICA の要求を満たすことが実証されたことを意味する。

バイナリー瞳マスクの検証実験のほか、SPICA コロナグラフにおいては、より高性能のオプションとなる Phase Induced Amplitude Apodization 方式の実証 (バイナリー瞳マスク方式に比べて主星により近い領域まで観測可能、高感度)、極低温で稼働する能動光学系、赤外域での使用に向けた自立型マスクの開発などが進められている。

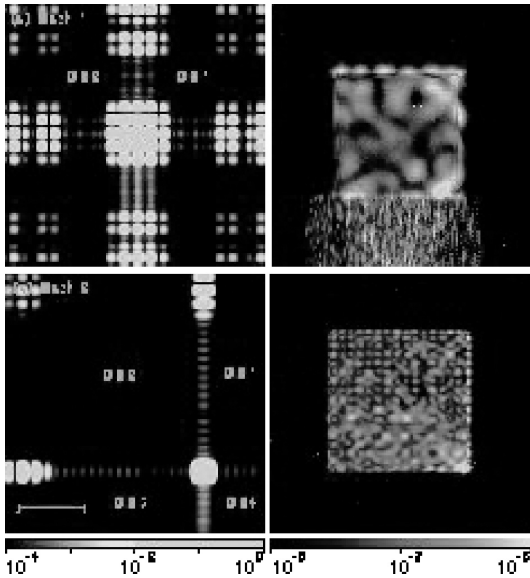


図4 実験で得られたコロナグラフ画像。右列はカメラ内散乱を防ぐため、遮光板を用いて暗領域のみを撮像した結果である。スケールバーは $10\lambda/D$ (λ は観測波長, D はビーム径) に相当する。

コロナグラフによる直接観測のほか、赤外宇宙望遠鏡を用いて、系外惑星がその公転によって主星の前後を通過するトランジットを利用する観測も、系外惑星のスペクトル情報を得る重要な手法であると考えられている。トランジットの最中とその前後をモニター観測し、惑星による主星光のわずかな遮蔽や吸収を計測することで、系外惑星を特徴づけるのである。この手法には、すでに先駆的な観測がある。近年、TinettiらはSPITZER赤外線宇宙望遠鏡を用いて、系外惑星HD 189733bの大気に水の吸収があると報告した²⁾。そのほかハッブル宇宙望遠鏡を利用して、同じくHD 189733bにおけるメタンの観測もなされている³⁾。この手法が使えるのは、観測者から見て惑星の公転軌道をほぼ真横から見込む位置関係になっている、ごく限られた惑星系についてのみである。しかし一方、系外惑星によるトランジット現象を系統的に発見することを第一の目的とした、COROT, KEPLARなどの衛星計画による成果

が、2010年代には多く利用できるようになってくると期待される。コロナグラフを用いる直接観測とトランジット法は、前者が比較的系外から遠い惑星の観測に、後者が主星に近い観測に適しており、相補的な関係にある。SPICAなどの大型の赤外線宇宙望遠鏡の高い感度、安定性を活かし、多数のトランジット惑星系を系統的に観測することで、系外惑星のスペクトルについての理解は大きく深まると考えている。また、SPICAが搭載する予定の中間赤外高分散分光装置は、JWSTにはない機能であり、水素、水分子などの観測を通じて円盤の組成、構造の解明にユニークな寄与をすると期待される。

参考文献

- 1) Mayor M., Queloz D., 1995, Nature 378, 355
- 2) Tinetti G., et al., 2007, Nature 448, 169
- 3) Swain M. R., Vasisht G., Tinetti G., 2008, Nature 452, 329
- 4) Kalas P., et al., 2008, Science 322, 1345
- 5) Nakagawa T., SPICA working group, 2008, Proc. of SPIE·7010, 70100H
- 6) Enya K., Tanaka S., Abe L., Nakagawa T., 2007, A&A 461, 783
- 7) 塩谷圭吾, 2007, 天文月報 100, 400

Spectroscopy of Exo-planets with Space Infrared Telescopes

Keigo ENYA and Takao NANAGAWA

Department of Infrared Astrophysics, Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510, Japan

Abstract: Observational study of exo-planetary system is going to phase of systematic study, from phase of discovery. Spectroscopy of exo-planets with space infrared telescopes will be more important. Large space infrared telescopes, e.g., Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics (SPICA), are planned to be launched and used in the 2010s. It's expected that such large space telescopes will provide information on spectrum of exo-planetary system via direct observation with coronagraph, transit monitoring, and so on.