

# 木星型系外惑星の直接検出を目指して ～ 次期赤外線天文衛星計画 SPICA ～

中川 貴雄 , SPICA ワーキンググループ

〈宇宙科学研究所 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉  
e-mail: nakagawa@ir.isas.ac.jp

系外惑星の正体を解明するためには、その姿を直接とらえ、その大気を分光観測する「直接観測」が必要である。系外惑星の直接観測の第一歩として、木星型系外惑星を次世代赤外線天文衛星 SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) により、直接観測する試みについて紹介する。

SPICA には、口径 3.5 m という大口徑望遠鏡を、4.5 K という極低温まで冷却して搭載している。そのため特に中間・遠赤外線領域において、画期的な感度と空間分解能を SPICA は達成することを狙っている。この SPICA に、中間赤外線用のステラー・コロナグラフを搭載することにより、木星型惑星の直接検出と分光が可能になると期待される。

SPICA は、2010 年ごろの打ち上げを目指している。現在はその実現の鍵を握る重要技術の開発を重点的に行っている。

## 1. 系外惑星系の直接観測

### 1.1. 直接観測の重要性

1995 年の 51 Peg における系外惑星の発見報告以来、ドップラー法、トランシット法などの間接法の成功により、太陽系外の惑星の発見が相次いだ(本特集の佐藤氏の記事を参照)。その結果、従来の惑星系形成理論では考えられていなかった「主星のごく近傍をまわる木星クラスの惑星」の存在が明らかになるなど、我々の惑星系に対する考え方は、大きく変わりつつある。

しかしながら、これらの発見は、どれも間接的方法によるものであるために、以下のような欠点も持っている。

1. 最も成功している間接法であるドップラー法では、惑星の質量と軌道に関する情報が得られるのみであり、惑星とその大気の組成に対する情報は得られない。
2. 間接法では、主星に近い惑星が選択的に検出されるため、惑星の軌道分布に対しては正

確な情報を得ることができない。

第 1 の欠点を克服するためには、惑星そのものを直接的に観測する必要がある。特に、分光観測を行い、その大気・地表の組成を明らかにすることが最も有効な手段である。

さらに、このような直接観測法では、間接法とは逆に、主星から離れた惑星を検出することが得意である。したがって、直接法と間接法の結果と組み合わせることにより、惑星系の軌道分布についてもより正確な情報が得られ、上記の第 2 の欠点も克服される。

このように、系外惑星系の真の理解のためには、系外惑星の直接観測を欠かすことができないのである。

### 1.2. 中間赤外線領域での高分解能観測

系外惑星の直接観測が重要であることは前述のように誰もが認めるところではあるが、その実現は、以下の 3 つの理由から、技術的には大変に困難である。

1. 系外惑星は大変に暗い。

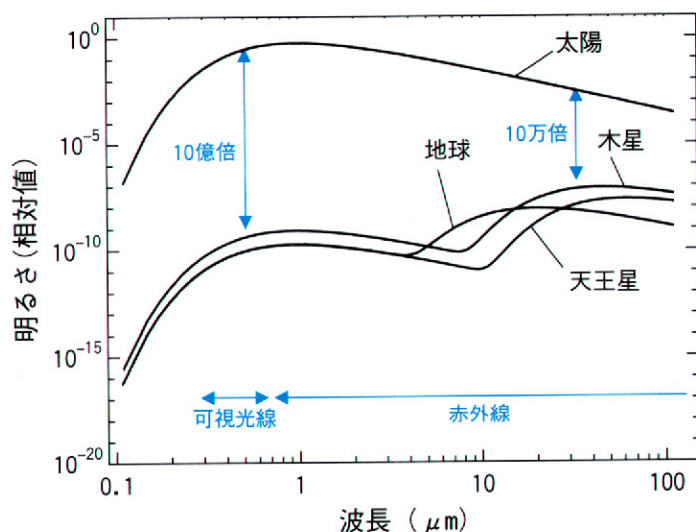


図1 遠方より見た太陽系。可視光線では、惑星の明るさは主星のわずか10億分の一であるが、中間赤外線領域では惑星(木星)の明るさは主星の10万分の一程度にまで上がる。

2. 系外惑星は、主星のすぐ近くに位置するため、両者を空間的に分離する観測が難しい。
3. 主星からの強い光が、惑星からの弱い光をかき消してしまう。

上記の困難のうち第1点については、最近の観測機器の性能向上により、可視光線や近・中間赤外線領域では、すでに十分に系外惑星が検出可能な感度が達成されている。すなわち、こと明るさに関する限り、系外惑星系の検出は可能になりつつあるのである。

第2の困難については、目的を木星型の検出におけば、比較的容易に解決される。たとえば、5 pcの距離にある星のまわりを、5 AUの距離で公転している木星型惑星を考える。すると、主星-惑星間の角距離は1秒角となる。この角距離は、可視光線と言えば、わずか口径10 cmの望遠鏡の回折限界に相当する。観測波長が長くなれば、それに応じて必要な口径は大きくなるが、いずれにせよ可視光線から近・中間赤外線領域では、達成可能な数字である。

最大の問題となり得るのは、第3の困難である。

図1を見ていただきたい。これは、私たちの太陽系を、非常に遠くから観測したときに、どのような明るさで太陽や惑星が見えるかを示したものである。ここでは特に太陽と惑星との明るさの比に注目してみる。惑星からの光は二つの成分で構成されている。可視光線～近赤外線では、惑星が主星からの光を反射している成分が見えている。一方、中間赤外線領域では、惑星自身からの熱放射が見えている。前者の反射光の場合には、惑星の明るさは主星のわずか10億分の一ということになり、直接検出は極めて難しい。一方、後者の熱放射の領域であれば、明るさの比は木星型の場

合で10万分の一程度にまで向上し、観測の実現性がはるかに高くなる。

以上より、系外惑星の直接観測には、中間赤外線領域での高感度・高分解能観測が、有効であることが分かる。

## 2. 次期赤外線天文衛星 SPICA

### 2.1. ミッションの概要

中間赤外線領域での高感度観測の最大の敵は、地球大気である。地球大気は、そもそも中間赤外線の広い波長範囲において、不透明である。さらに、透明な波長範囲においても、中間赤外線が大気の熱放射のピークに位置するため、大気の赤外線放射の揺らぎが、高感度観測の妨げとなってしまう。このように、中間赤外線領域での高感度観測のためには、地球大気の影響を逃れた宇宙からの観測が必須である。

そこで、系外惑星の直接検出を目的の一つとして、次世代赤外線天文衛星 SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) を提案している<sup>1)</sup>。



表1 SPICA ミッションの仕様

望遠鏡口径	3.5 m
望遠鏡温度	4.5 K
冷却方式	放射冷却 + 機械式冷凍機
主たる観測波長域	5 ~ 200 $\mu$ m
軌道	太陽-地球系 $L_2$ 周りのハロー軌道
衛星全重量	2.6 t
打ち上げ	2010 年ごろ

SPICA の概要を表 1 に、軌道上での SPICA の想像図を図 2 (表紙) に、それぞれ示す。SPICA の最大の特徴は、口径 3.5 m という大口径の望遠鏡、しかもそれを 4.5 K という極低温に冷却して搭載していることである。これにより、望遠鏡からの熱放射が大きな問題となる中・遠赤外線領域において、従来のミッションよりもはるかに高感度、高分解能の観測が可能となっている。

SPICA は、H-IIA ロケットにより、2010 年ごろの打ち上げを目指している。

## 2.2. ステラー・コロナグラフ

中間赤外線領域では系外惑星の直接観測が比較的容易になるといっても、主星と惑星の間には 10 万倍以上もの明るさの比があり、通常の観測機器では惑星の観測は困難である。そこで、SPICA では、主星の光を隠し、その周りの惑星からの光の検出を可能とする「ステラー・コロナグラフ」の搭載を検討している<sup>2)</sup>。

地上からの観測においても、すばる望遠鏡の CIAO (本特集の田村氏、深川氏の記事を参照) をはじめとして、ステラー・コロナグラフ観測機器が稼動し始めている。しかしながら、地上の観測機器では大気の影響が問題となり、ステラー・コロナグラフに大気揺らぎを補正する補償光学を組み合わせても、達成できるダイナミックレンジには

限界がある。

一方、SPICA のように宇宙からの観測であれば、大気擾乱がなくなる。そのため、ダイナミックレンジとしては、回折できるステラー・コロナグラフの原理的な値に、近い値が達成できる可能性がある。

このように、宇宙からの中間赤外線観測は、(1) 高感度、(2) 高ダイナミックレンジ、が達成可能という二つの意味において、極めて重要なのである。

## 2.3. 他のミッションとの比較

系外惑星の直接検出に関して、SPICA の最大のライバルとなるのは、ジェームス・ウェッブ宇宙望遠鏡 (従来は NGST: Next Generation Space Telescope と呼ばれていた) である。ジェームス・ウェッブ宇宙望遠鏡は、口径 6 m クラスと、SPICA よりもさらに大きな口径を持っている。しかしながら、その主鏡は一枚鏡ではなく展開鏡となる。したがって、その像の質 (Point Spread Function) は、必ずしも系外惑星検出にとって理想的なものとはならない。

一方、SPICA では、一枚鏡を採用するため、口径ではジェームス・ウェッブ宇宙望遠鏡に劣るものの、像の質としては、系外惑星の検出により適したものになることが期待される。ただし、主鏡の鏡面誤差を補正する機構と、従来よりもダイナミックレンジを上げたステラー・コロナグラフの開発が鍵となるであろう。

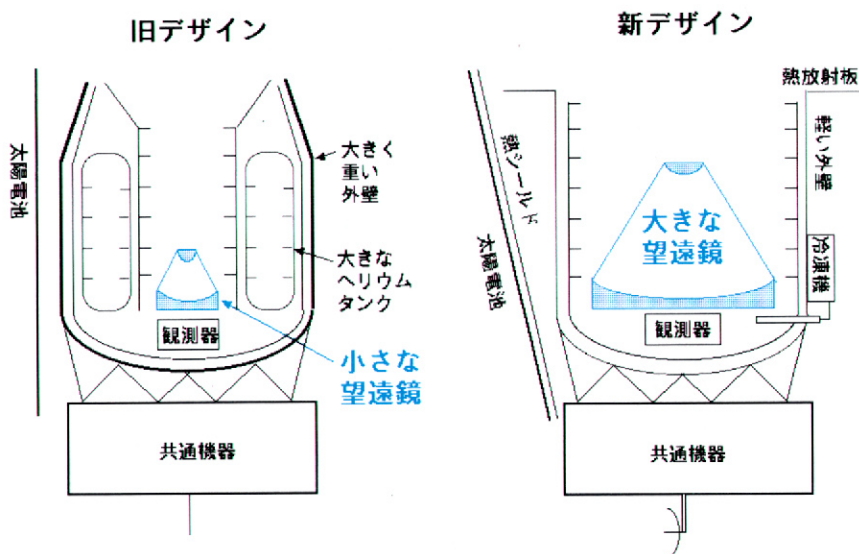


図3 従来型の赤外線天文衛星の構成（左図）と、SPICAの構成（右図）。SPICAでは、液体ヘリウムを搭載しないことにより、望遠鏡の口径を画期的に大きくすることができる。

さらにSPICAの特徴は、望遠鏡が4.5 Kという極低温にまで冷却されていることである。したがって、ジェームス・ウェッブ宇宙望遠鏡では望遠鏡からの熱放射が問題となるような長波長では、SPICAの方が優れた感度を達成することができる。

### 3. SPICAの技術的な特徴

#### 3.1. 冷却方式の改革

大口径の宇宙赤外線望遠鏡の実現は、従来の設計思想では非常に難しかった。宇宙からの赤外線観測では、高感度を達成するために観測機の冷却が必須である。この冷却に、従来の赤外線衛星では液体ヘリウムを用いていた。するとその保持のために、大きなヘリウム・タンクと重い真空容器が必要となる。したがって、衛星が大きく重くなり、限られた重量のもとでは、比較的小口径の望遠鏡しか搭載できなかった（図3の左図）。

一方、SPICAでは、液体ヘリウムを搭載せず、望遠鏡は常温の状態ですり上げられる予定である。液体ヘリウムがなければ、巨大なタンクは不要になり衛星は小型化される。さらに、打ち上げ時に

観測器が冷却されていなければ、無骨な真空容器外壁は不要になり、衛星は画期的に軽量化される（図3の右図）。これらの効果により、SPICAでは、一定の衛星重量でも、従来よりもはるかに大口径の望遠鏡の搭載が可能になる。

ただし、繰り返し述べているように、観測時には望遠鏡は冷却されていなければならない。そこでSPICAでは、以下の二つの方式を併用することにより、軌道上で望遠鏡を冷却する。

1. 放射冷却
2. 機械式冷凍機

特に1の放射冷却は重要であり、これを有効に働かせる構造と軌道とを選ぶ必要がある（詳細は後述）。効率的な放射冷却が働いている下で、2の機械式冷凍機を併用し、最終的には望遠鏡を4.5 Kまで冷却する。

ただし、ほとんどの熱は1の放射冷却で捨てるため、望遠鏡の冷却に必要なとされる冷凍機の能力はそれほど大きくはない。3.5 mという望遠鏡を4.5 Kに保つのに必要な冷却能力は、30 mW程度である。

このような冷却系構成をとるSPICAにとっては、



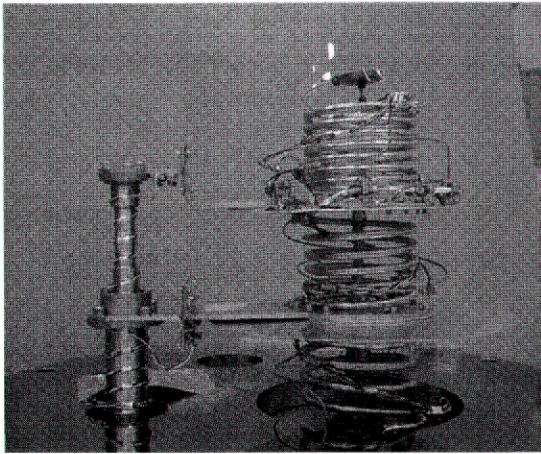


図4 SPICA 搭載に向けて開発中の機械式冷凍機

高信頼性、長寿命の冷凍機の開発が急務である。そこで、我々は重点的に冷凍機の開発に取り組んできており（図4）、実験室の中では、SPICAに必要な能力を引き出すことに成功している。

### 3.2. 放射冷却に適した軌道

上記のように、冷却方式が有効に働く軌道を選ぶことは、SPICA冷却系にとっては重要なことである。

そこで、SPICAの軌道として、「太陽-地球」系の平衡点の一つである $L_2$ （以下S-E $L_2$ と略記）（図5）を検討している（厳密には、S-E $L_2$ 周りのハロー軌道）。S-E $L_2$ では、大きな熱源であった地球の見かけの大きさが非常に小さくなり、かつもう一つの熱源である太陽とほぼ同じ方向になるため、熱的な遮蔽が容易になる。そのため、衛星への熱入力を大幅に減少させ、放射冷却を有効に働かせることが可能となる。

S-E $L_2$ は、地球から150万kmという遠方にあるが、遠方の割には比較的大きな重量の衛星を投入することができる軌道である。たとえば、標準的なH-IIAロケットを用いれば、SPICAをS-E $L_2$ ハロー軌道に投入することは、十分に可能である。

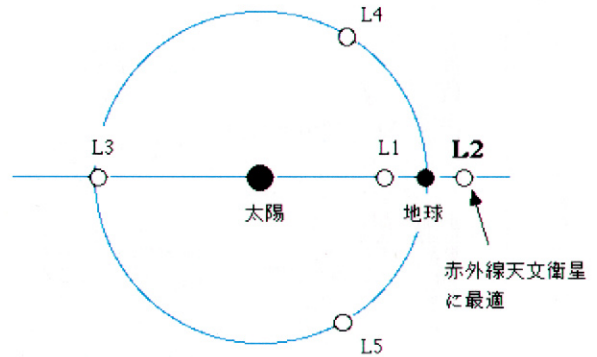


図5 太陽-地球系の五つの平衡点。このうち $L_2$ が赤外線天文衛星にとって最適の軌道。

## 4. SPICAの能力

### 4.1. SPICAの特徴

従来または近未来に計画されている赤外線天文衛星に搭載されている冷却望遠鏡の口径は、全て1m以下である（例えば、ASTRO-F望遠鏡は口径67cm）。これと比較すると、SPICAの3.5mという口径は、極めて大きなジャンプである。したがって、SPICAには天文学の広い分野での活躍が期待されている。

SPICAは特に、中間・遠赤外線領域での感度が高い。2010年前後には、前述のジェームス・ウェッブ宇宙望遠鏡や、ハーシェル宇宙望遠鏡など、口径3mを超える大型の望遠鏡を搭載する赤外線天文衛星が、欧米でも計画されている。しかしながら、これら欧米のミッションの望遠鏡は、SPICA望遠鏡ほどは冷却されていない。そのため、中間・遠赤外線領域では、望遠鏡からの熱放射のために、欧米のミッションの感度は劣化してしまう。

一方、SPICAは4.5Kという冷却望遠鏡を搭載するため、中間・遠赤外線領域でも、理想的な観測を行うことができるのである。

### 4.2. 木星型系外惑星の直接観測の可能性

それでは、当初に掲げた「系外惑星の直接観測」という目標をSPICAは達成できるのだろうか。

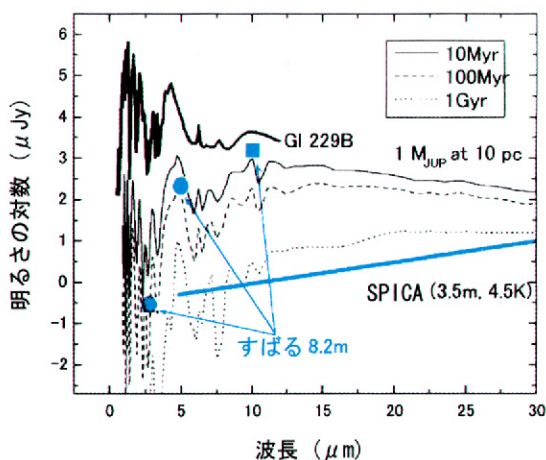


図6 SPICA 中間赤外線ステラー・コロナグラフの感度と、褐色矮星 (Gl 229B) や系外惑星 (10 pc の距離にある木星型惑星) のスペクトルとの比較<sup>2)</sup>。

図6にSPICAの検出限界(ステラー・コロナグラフにより、主星のハローを十分に落とした場合)と、系外惑星の予想される明るさとの比較を示す。惑星の明るさは生まれてからの年齢にもよるが、このように、10 pc までの距離にある主星の周りをまわる比較的的主星から離れた木星型の惑星であれば、SPICA ステラー・コロナグラフは、検出することができる<sup>2)</sup>。さらに、もし主星から遠く離れた地球型惑星が存在するのであれば、感度としては、その検出も可能である。

もう一つ重要な点は、図6に示された波長域には、惑星大気を探る上で重要な情報が数多く含まれていることである。惑星からの赤外線放射は、大気の多くのスペクトル線のために、黒体放射からかけ離れている。ここには、惑星大気の温度、組成など、極めて重要な情報が含まれている。これらを、SPICA ステラー・コロナグラフにより分光観測することができれば、系外惑星に関する情報は飛躍的に増えることであろう。

SPICA は、このように木星型の系外惑星を直接に検出し、惑星系の形成・進化の研究に極めて大きな貢献をすることが期待される。これは、科学的にも、技術的にも、将来の地球型惑星検出ミッション(本特集の田村氏・芝井氏・村上氏の記事を参照)につながる重要な成果となるであろう。

### 謝辞

SPICA プロジェクトは、SPICA ワーキンググループにより推進されているものである。特にステラー・コロナグラフについては、国立天文台の田村元秀氏に有用なコメントをいただいた。

### 参考文献

- 1) Nakagawa T., SPICA Working Group, 2002, *Adv. Space Res.* 30, 2129
- 2) Tamura M., 2000, in *ISAS Report SP 14, Mid- and Far-Infrared Astronomy and Future Space Missions*, ed. Matsumoto, T. and Shibai H. (ISAS, Sagami-hara) p.3

### Direct Observations of Exoplanets by SPICA

Takao NAKAGAWA and SPICA Working Group

*The Institute of Space and Astronautical Science,  
3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510,  
Japan*

**Abstract:** Direct observation of exoplanets is essential for understanding and characterization of the nature of exoplanets. We discuss the possibility of direct observations of exoplanets, especially Jovian planets, using the next-generation infrared space mission SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics). SPICA is optimized for mid- and far-infrared astronomy with a 3.5 m telescope cooled to 4.5 K. We plan to install a stellar coronagraph to SPICA to make the direct detection and spectroscopy of exoplanets. The target launch year of SPICA is around 2010.