

# SPICA-SCI によるトランジット系外惑星の観測

塩谷圭吾<sup>1</sup>・成田憲保<sup>2</sup>・山下卓也<sup>3</sup>・

## SCI チーム

〈<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所・赤外・サブミリ波天文学研究系 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1〉

e-mail: enya@ir.isas.jaxa.jp

〈<sup>2</sup> 国立天文台 太陽系外惑星探査プロジェクト室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: norio.narita@nao.ac.jp

〈<sup>3</sup> 国立天文台 TMT プロジェクト室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: takuya.yamashita@nao.ac.jp

次世代赤外線天文衛星 SPICA への搭載に向けて設計、基礎開発が進められている高ダイナミックレンジ装置 SCI を用いた、トランジット系外惑星の観測について述べる。発見済のトランジット惑星を高い精度で分光モニター観測し、トランジット、2次惑星食の前後で差分をとることで、惑星のスペクトルを取得する。系外惑星大気成分、温度分布、時間変動の解明、系外惑星の環の探査などを旨とする。SPICA-SCI は、極低温宇宙望遠鏡の安定性、大口径による集光力、同時観測できる波長帯域の広さなどにより、本研究に非常に適している。

## 1. イントロダクション

太陽系外の惑星を詳しく、系統的に調べることは、惑星の誕生と進化、多様性、さらに究極的には生命兆候にも迫りうる重要な課題である。Mayor & Queloz による発見以来<sup>1)</sup>、これまでに見つかった系外惑星は、Kepler 衛星のデータによる惑星候補も含めれば、数千個にもものぼる<sup>2)</sup>。ただしこれらの系外惑星のほとんどは、惑星によって主星がわずかにふらつくのドップラー効果で検出する視線速度法<sup>1)</sup>や、惑星が主星の前を横切ることによって生ずる主星のわずかな減光から惑星の存在を検出するトランジット法<sup>3)</sup>などの、間接的手法によっている。そのため系外惑星そのものの詳しい分光観測を実現し、大気組成などを明らかにすることは、系外惑星研究の分野における、次の大きなステップの一つと考えられる。

図1はトランジット法の拡張版ともいえるべき、

系外惑星の大気分光の原理を示すものである。モニター観測によって、トランジットや2次惑星食による減光の波長依存性を観測することで、惑星のスペクトルを測ることが原理的に可能である。この手法の特徴の一つとして、主星と惑星を空間分解して観測する必要がない点が挙げられる。この手法は系外惑星を発見するためではなく、発見済の惑星の大気を精査するためのものである点に注意されたい。

この原理を用いた先駆的な観測例は、観測しやすい惑星にごく限られるものの、すでに存在する。NASA が打ち上げた赤外線宇宙望遠鏡 SPITZER などを用いて、これまでにメタン、水、二酸化炭素、一酸化炭素の検出が報告されている<sup>4),5)</sup>。この手法においては、モニター観測によって極めて微小な変化を検出するため、観測の安定性が決定的に重要である。宇宙望遠鏡は、大気状態の変動の影響や、大気の透過帯

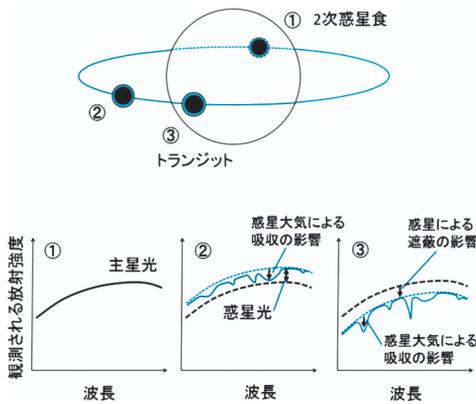


図1 トランジットする系外惑星系(上)と、観測されるスペクトルの模式図。惑星のスペクトルを、モニター観測におけるわずかな変化として検出する。ここで、惑星が主星の前面を通過する現象をトランジット、後ろ側を通過する現象を2次惑星食と呼ぶ。



図2 次世代赤外線天文衛星 SPICA.

域の制約を全く受けず安定した観測ができるという意味において、たいへん有利である。

## 2. 次世代赤外線天文衛星 SPICA

SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) は、宇宙航空研究開発機構が中心となって開発を進めている赤外線天文衛星である<sup>6)</sup>(図2)。SPICA ミッションでは口径3 m級の望遠鏡を太陽・地球L2ハロー軌道に打ち上げ、6 K以下に冷却して運用される。その結果、5-210 ミクロンをコア波長とする赤外波観測にお

表1 次世代赤外線天文衛星 SPICA の仕様

望遠鏡口径	3 m級
コア観測波長	5-210 ミクロン
望遠鏡温度	6 K以下
冷却	放射冷却+機械式冷凍機
軌道	太陽・地球L2ハロー軌道
打ち上げ	2020年代初頭

いて、従来よりもはるかに優れた感度と空間分解能を達成する。SPICAは日本が主導する国際共同ミッションであり、2020年代初頭の打ち上げを目指している。SPICAの主な仕様を表1に示す。

SPICAには複数の焦点面観測装置が提案されており、それらのレビューが段階的に進められている。2010年度には国内レビューが完了し、現在は、2011年5月から開始されている国際レビューが進行中である。

## 3. SPICA 搭載高ダイナミックレンジ観測装置—SCI

SPICA焦点面観測装置の一つとして、SPICA Coronagraph Instrument (SCI)が提案されている<sup>7)</sup>。SCIの設計および仕様を図3、表2に示す。SCIの最大の科学目標は、系外惑星の精査、特に赤外スペクトルに基づく大気の組成や状態、その進化や多様性を明らかにすることである。そのため提案当初から、柱となる観測として、1) コロナグラフによる木星型惑星の直接観測、2) トランジット系外惑星のモニター観測、という二つが設定されている。いずれの観測も、系外惑星のスペクトルを取得することができる。コロナグラフによる直接観測は主星から遠い惑星に適しており、逆にトランジット惑星の観測は主星に近い惑星が得意であり、両者は相補的である。

SCIでは星像のコントラストを高めるコロナグラフとして、特別に設計したバイナリー瞳マスクを用いる<sup>7)</sup>。詳細は本稿の趣旨から外れるので省略するが、バイナリー瞳マスクとは、光学系の入

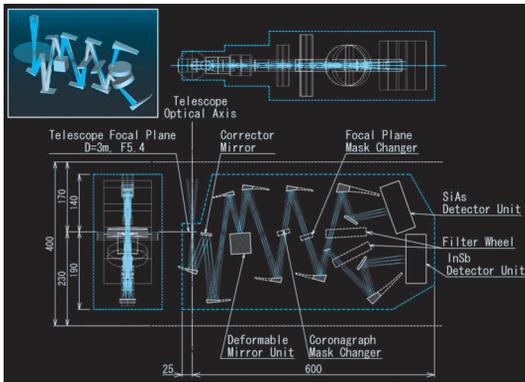


図3 SPICAへの搭載に向け基礎開発，設計が進められている高ダイナミックレンジ装置 SCI.

表2 SCIの仕様

観測モード	コロナグラフ撮像・分光, 非コロナグラフ撮像・分光
観測波長	3.5-27ミクロン (コロナグラフ) ~1-27ミクロン (非コロナグラフ)
コントラスト	10-4 @波長5ミクロン星像 (コロナグラフモードのみ)
波長分解能	~20, ~200 (分光モードのみ)
検出器	長波長チャンネル (5ミクロン以上) Si: As 検出器 (2k×2k 素子) 短波長チャンネル (5ミクロン以下) InSb 検出器 (1k×1k 素子)

射口の形を特殊なものにすることで星像を変化させ、所望のコントラストを実現するためのものである。いくつかのマスクを切り替えるためなどの目的で、SCI ではマスク交換機を用いる。そこにマスクなしというスロットがあり、それを用いることで、SCI はトランジット観測などのための非コロナグラフ撮像分光器となる。

SCIは、系外惑星大気において豊潤なスペクトルがある波長域をカバーするため、Si: As検出器を搭載する長波長チャンネルと合わせて、InSb検出器を搭載する短波長チャンネルをもつ。SCIのInSb検出器は、SPICAで唯一、その波長域で分光モニターに使えるものである。SCI内部に据えつけられたビームスプリッターによって、二つのチャンネルで、同時に一つの天体をモニターす

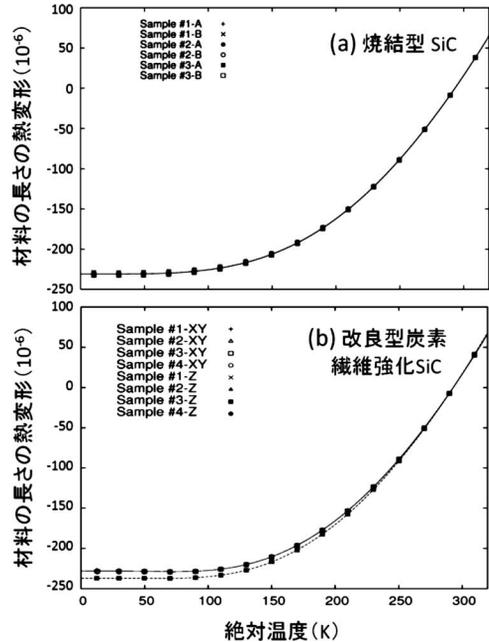


図4 SPICA望遠鏡材料候補の熱膨張特性. SPICAの温度域 (~5 K) では熱歪みは非常に小さい。

ることができる。(SiC)が提案されている<sup>7)</sup>。

#### 4. SPICA-SCI を用いたトランジット系外惑星の観測

系外惑星の大気中に存在する可能性のある分子による吸収線を、表3に示す。SCIの長波長チャンネル、短波長チャンネルの両方に、大気分子の吸収があることがわかる。これまでの赤外線宇宙望遠鏡SPITZERなどによる観測は、高温で巨大な(つまり観測しやすい)ガス惑星“ホットジュピター”を対象としており、これまでに検出できている吸収線も非常に限られていた。SPICA-SCIでは、SPITZERを大きく上回る集光力と広い波長域により、より多様な系外惑星について、より多くの大気分子を系統的に探査する。大気中に分子の存在を見いだすために必要な波長分解能は、注目する分子にもよるが、約20程度から可能となる。例えば太陽系においても、木星型惑星の大気は水素、ヘリウム、地球は窒素、酸素、金星は二酸化炭素などからなり、実に多様である。しか

し現段階では、太陽系以外の惑星大気についてのわれわれの知識は少ない。そのため、大型で非常に高い安定性をもつ、次世代の赤外線宇宙望遠鏡が切望されるのである。SPICA望遠鏡で使用予定の材料の極低温域での熱安定性は非常に高いため、高精度のモニター観測が可能となる<sup>8)</sup>(図4)。

膨大な主星光と合わせてわずかな惑星の影響を観測するため、系外惑星の大気分子の検出は、注目する分子にもよるが、高い安定性、高精度の解析が重要となる。特に、大気成分のうちオゾンは重要なバイオマーカーであると同時に、感度の面で非常に挑戦的な目標であると考えられている。期待される感度をざっと計算するため、仮想ターゲットとして距離5 pcにあるM5型矮星のハビタブルゾーン(主星-惑星間距離=0.1天文単位)にある岩石惑星を考える。地球半径の岩石惑星の幅1ミクロンのオゾン吸収線は1時間の積分でS/N比が約1となる。1回のトランジットの継続時間は2.3時間で、年間14-15回のトランジットのうちの半分イベントを3年間観測すると仮定すると、S/N比は7となり容易ではないが検出可能な値となる。波長15ミクロンの二酸化炭素吸収線は波長幅が4ミクロン程度と広いが主星のフラックス密度が小さくなるため、S/N比は10程度である。2次惑星食については、よりシグナルの多い巨大地球と呼ばれる半径が地球の2倍の岩石惑星を仮定し、同じく3年間の観測を行うと、惑星熱放射のS/N比はオゾン、二酸化炭素の波長について約10, 20となる。

さらに、波長分解能が数百程度あれば、大気中の温度の垂直構造についての情報が、原理的に取得できる。2次惑星食では惑星放射そのものを検出するので、星の光球吸収と同様の過程でスペクトルが形成される。固体惑星には固体表面があるので、その熱放射を低温の大気分子がスペクトル線吸収する。このため、大気中の温度構造がスペクトルに影響する。温度差が小さければ吸収が浅くなり、温度逆転層があれば場合によっては放射も

生じうる。

系外惑星のトランジット、2次惑星食のSPITZERによる観測結果からは、時間変動の可能性が示唆されている。広い波長域で同時に観測できるSPICA-SCIなら、惑星の自転、公転による時間変動、あるいはランダムな変動に、より迫ることができる可能性がある。

一方、太陽系の木星・土星・天王星・海王星には、環があることが知られている。惑星のリングを構成する物質は、その惑星を公転する衛星から供給されており、惑星の環の特性はその惑星を取り巻く衛星系の環境を反映していると考えられるが、系外惑星ではまだ環は発見されていない。系外惑星にリングを発見する方法として、高精度なトランジット観測は非常に有効である<sup>9)\*1</sup>。トランジット惑星の変光曲線に現れる環の兆候としては、トランジットの直前直後のわずかな( $10^{-4}$ オーダー)増光がある。これは環の粒子によって一部の光が回折されるため、その増光の大きさは粒子の大きさや観測波長によって異なってくる。また、トランジット自体の深さも粒子の大きさや観測波長によって変化する。環の粒子の大きさと観測波長によって、光の回折の特性が変わる。そのためSPICA-SCIを用いて幅広い波長域のトランジットを同時に観測することができると、環の大局的な特徴のみならず、環を形成している粒子の大きさの分布を特徴づけることも不可能ではなくなるはずである。

## 5. 他の計画との関係

本特集の山下卓也氏の記事に述べられているように、次世代の超大型地上望遠鏡TMTも、系外惑星のトランジット、2次惑星食を観測して系外惑星の大気組成を調べるのに非常に有力である。SPICAとは観測波長域が異なるため、両者の相補的なデータを合わせることで、系外惑星大気の全体像がより明らかにできると考えられる。

\*1 天王星のリングも恒星の前を天王星がトランジットする際に発見された<sup>10)</sup>。

表3 SCIの観測波長域にある分子線の波長(単位はミクロン)

	SCI短波長 チャンネル側 (5ミクロン以下)	SCI長波長 チャンネル側 (5ミクロン以上)
H <sub>2</sub> O	1.13, 1.38, 1.9, 2.69	6.2
CO <sub>2</sub>	1.21, 1.57, 1.6, 2.03, 4.25	15.0
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1.52, 3.0	7.53, 13.7
HCN	3.0	14.0
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3.4	12.1
O <sub>3</sub>	4.7	9.1, 9.6, 14.3
HDO	2.7, 3.67	7.13
CO	1.57, 2.35, 4.7	—
O <sub>2</sub>	—	—
NH <sub>3</sub>	1.5, 2.2, 2.5 2.9, 3.0	6.1, 10.5
PH <sub>3</sub>	4.3	8.9, 10.1
CH <sub>4</sub>	1.65, 2.2, 2.31 2.37, 3.3	6.5, 7.7
CH <sub>3</sub> D	3.34, 4.5	6.8, 7.7, 8.6
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3.22, 3.34	6.9, 10.5
H <sub>2</sub> S	2.5, 3.8	7
SO <sub>2</sub>	4	7.3, 8.8
N <sub>2</sub> O	2.8, 3.9, 4.5	7.7, 8.5
NO <sub>2</sub>	3.4	6.2, 7.7, 13.5
H <sub>2</sub>	2.12	—
H <sub>3</sub> <sup>+</sup>	2.0, 3-4.5	—
He	1.083	—
Na	1.2	—
TiO	1-3.5	—
VO	1-2.5	—
FeH	1-2	—
TiH	1-1.6	—

将来の宇宙望遠鏡で、トランジット惑星の大気組成の観測ができるものとしては、NASAが開発中の JWST、欧州で提案されている EChO が挙げられ、SPICA-SCI と比較した場合、それぞれ一長一短である。いずれにしても、本稿で述べた手法は、既知のトランジット惑星についてのものなので、適切なターゲットを事前に見つけておくことが重要である。そのための取り組みについては、本特集の成田憲保氏の記事を参照されたい。

## 謝辞

本稿を執筆する機会を与えていただきました、天文月報編集委員会、特集関係者の方々に御礼を申し上げます。本稿で紹介した研究に関連する SPICA 関係者その他すべてのの方々に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Mayor M., Queloz D., 1995, Nature 378, 355
- 2) Borucki W. J., et al., 2011, ApJ 728, 117
- 3) Charbonneau D., et al., 2000, ApJ 529, L45
- 4) Tinetti G., et al., 2007, Nature 448, 169
- 5) Swain M., et al., 2009, ApJ 704, 1616
- 6) Nakagawa T., 2010, Proc. SPIE 7731, 77310O
- 7) Enya K., et al., 2011, AdSpR 48, 323
- 8) Enya K., et al., 2012, Cryogenics 52, 86
- 9) Barnes J. W., Fortney J. J., 2004, ApJ 616, 1193
- 10) Elliot J. L., et al., 1977, Nature 267, 328

### Study of Transiting Exoplanets with SPICA-SCI

#### Keigo ENYA

*Department of Astrophysics, Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Chuou-ku, Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan*

#### Norio NARITA

*Exoplanet Search Project Office, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-2 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

#### Takuya YAMASHITA

*TMT Project Office, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-2 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

#### SCI Team

Abstract: Study of transiting exoplanets using SPICA-SCI is described. Monitor observation of transit and/or secondary eclipse of exoplanets will provide spectroscopic information of the planets to understand the composition, thermal distribution of the atmosphere of exoplanets, their variability, search of rings around exoplanets, and so on. SPICA-SCI can be a powerful tool for this study.