

地球型系外惑星探査計画への取り組み ：第2の地球を探せ

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

芝井 広

〈名古屋大学大学院理学研究科 〒464-8602 名古屋市千種区不老町〉
e-mail: shibai@phys.nagoya-u.ac.jp

村上 浩

〈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: hmurakam@ir.isas.ac.jp

木星型巨大系外惑星の間接検出の成功を受けて、次なるステップとしての地球型系外惑星探査に向け、さまざまな計画がスタートしている。系外惑星の直接検出の困難さ、それを克服するために有効と考えられている2つの手法（スペースにおける可視光コロナグラフと赤外線ナル干渉計）とそれぞれの問題点、及び、「第2の地球探し」に向けての国内における取り組みについて紹介する。

1. はじめに

少し前までは、多くの天文学者は系外惑星の検出に懐疑的だったと言っても過言ではない。しかし、その存在は1995年の発見を契機としたその後の観測により今では揺るぎ無い科学的事実となった。現在までに100個を超える木星型巨大惑星が発見されている。本特集号からも分かるように、この成功に勢いを得て、現在、地上・スペースにおいて数多くの系外惑星検出計画が進行し、新たな計画も提案されている。ただし、その観測手法のほとんどが間接法と呼ばれるもので、惑星そのものの画像を得たり、スペクトルを調べたりするものではない。言うまでも無く、次のマイルストーンは惑星そのものを直接的に観測することであろう。木星型巨大

系外惑星の直接検出については、8～10 m 地上望遠鏡にとって最も重要な観測課題の一つとされている。しかし、木星よりさらに軽く小さい地球のような惑星¹を検出するのは直接法どころか間接法によってさえも難しい。系外惑星探査計画において、この困難だが最も重要なステップである地球型系外惑星の直接検出（第2の地球探し）に真正面から挑戦する計画がNASAのTPF (Terrestrial Planet Finder)やESAのDarwinである。例えば、TPFは近傍の約150個のFGK型星のまわりにおいて生命を育むことが可能な領域に位置する惑星からの光を直接検出する。さらに、惑星の軌道や物理的性質、特に惑星大気を調べ、生命の兆候となる証拠を集めることを主目的とする。最近では日本でもいくつかの系外惑星探査が行われるように

¹木星は太陽の約千分の一、地球は木星の約三分の一の質量である。

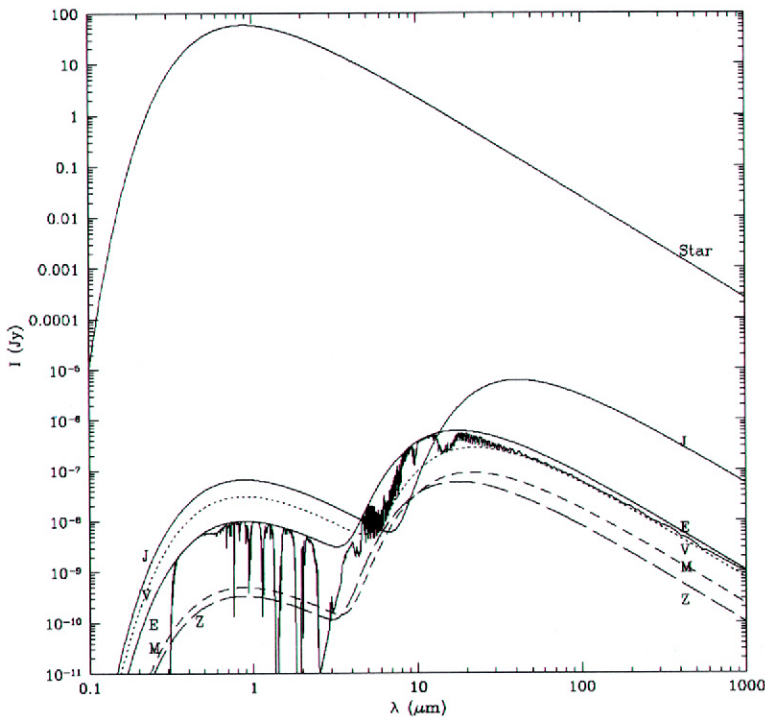


図1 太陽と惑星のエネルギー分布 (Traub & Jucks 2002¹⁾).

なり、この流れを受けて、オリジナルな系外惑星探査計画や TPF/Darwin への参加の可能性を議論するワーキンググループ(JTPF Working Group：仮称)が設立された²。本稿では、系外惑星の直接検出方法と JTPF ワーキンググループ等における地球型系外惑星探査に向かったの取り組みについて解説する。

2. 直接検出の困難さ

木星型巨大惑星はともかく地球型惑星の直接撮像に至るためには、まだまだ多くの困難が横たわっている。それは、非常に高い感度、画像のシャープさ(解像度)、明るい恒星のすぐ近くの暗い天体を見る能力(コントラスト)の三者を同時に実現する必要があるからである。例えば、我々から

10 pc 離れたところから太陽系を見た場合、地球の明るさは可視光波長の V バンド(波長 $0.6 \mu\text{m}$) で約 29 等、中間赤外波長の N バンド(波長 $10 \mu\text{m}$) で約 20 等になる。地球・太陽間の角距離は 0.1 秒角しかない。これらは、それぞれの数値だけを見ると、現在の観測技術でもそれほど達成困難なものではない³。最大の問題は、太陽・地球の明るさの比である。図 1 は地球やその他の惑星と太陽のスペクトルエネルギー分布である。波長 $0.4 \sim 1 \mu\text{m}$ あたりの可視光(および約 $3 \mu\text{m}$ までの近赤外波長)では太陽からの光の反射が主となる

が、波長 $7 \sim 17 \mu\text{m}$ の中間赤外より長波長では惑星自体の熱放射の寄与があり、両者の明るさの比は多少緩和される。それでも、明るさの比は V バンドで約 10 桁、N バンドで約 7 桁に達する。これを上記の角距離で達成できる観測装置は現在のところ存在しない。

3. 中間赤外線における観測可能性

中間赤外線におけるコントラストの緩和は、確かに赤外線における系外惑星検出にとって魅力である。しかし、波長が長いと、同じ口径の望遠鏡を用いる限り低解像度の観測に甘んじなければならない。よって単一大口径望遠鏡よりも比較的小さな望遠鏡を離して並べる干渉計が有利である。中間赤外線波長において超高感度を得るためには、

² ホームページは、<http://www.cc.nao.ac.jp/jtpf/>。

³ すばる望遠鏡の可視光装置で約 3 時間積分して得られる感度や、同じく近赤外線装置で補償光学を用いた場合の解像度はこれらの数値と同じ程度か上回るくらいである。

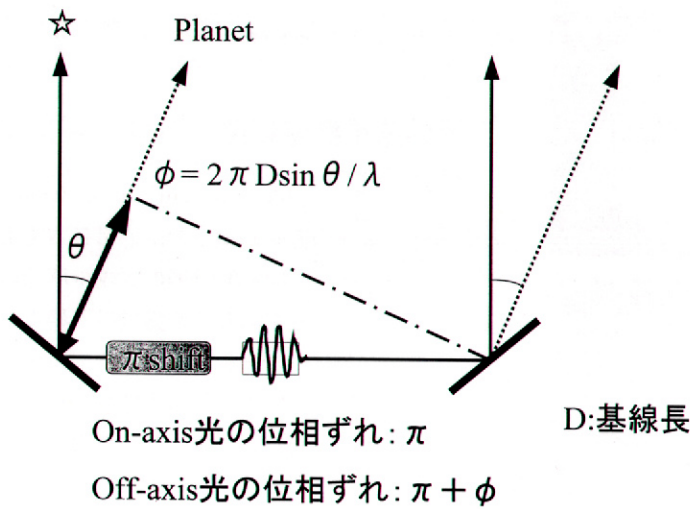


図2 ナル干渉計の原理。

地球大気・望遠鏡・観測装置の熱雑音から逃れるためにスペースに出ることが不可欠となる。そこで、系外惑星探査ミッションとしては赤外線スペース干渉計が有利であるというアイデアが出てきた。一番の問題となるコントラストの向上のためには、通常の干渉計と異なり、干渉計の対称軸上の天体については干渉光を打ち消す、いわゆるナル干渉計技術を応用する²⁾。明るい恒星をその対称軸上にぴったりと向けると恒星からの赤外光は打ち消され、そのすぐ近くに有る惑星からの赤外光は残るわけである(図2)。中間赤外波長域においては、地球大気に特徴的な酸素(9.6 μm のオゾン)や水(6~8 μm)の吸収バンドが比較的容易に検出できる。NASA/TPFの最初のアイデアもこれに基づいたものである。しかし、これにはいくつかの問題があることがわかった。一つは、恒星の周りには赤外線観測において雑音となる黄道光が意外に多くあり、惑星からの赤外光がこの背景光に埋もれてしまう可能性がある。黄道光の原因となるダストは惑星系形成の副産物であり、

太陽系内外の両方においてその影響を避けることが難しい。星周ダストの量は恒星系によって異なるようであり、今後の赤外線ミッションのデータに基づき、黄道光・系外黄道光が系外惑星検出に及ぼす影響を定量化してゆく必要がある。2004年はじめに打上げ予定の宇宙科学研究所の赤外線ミッションASTRO-Fは、さまざまな星の赤外線超過の観測から、このような星周ダストの「進化」を統計的に明らかにするものと期待される。もう一つの困難は、やはり赤外線スペース干渉計に伴う技術的な壁の大きさである。特に、

6~7桁以上のナル干渉技術と高感度中間赤外線観測を実現するための低温工学技術との同時実現に至る道のりは遠い。新たに提案されている可視光コロナグラフ(次節参照)と比較すると、その技術的優位性はまだ明確でない。

4. 可視光における観測可能性

低温の惑星からのスペクトルは、可視光から近赤外線においては主星からの反射光が主となる⁴⁾。そのため中間赤外線よりさらに大きな9~10桁のコントラストを克服しなければならない。しかし、解像度や感度に関しては現在既に達成されている値なので、後はコントラストの問題だけという考え方もできる。このような高コントラスト観測を行う手段としてコロナグラフが有る。古典的なリオのコロナグラフ³⁾では、焦点面にオカルティングマスク、瞳面にリオストップを用意する。前者で主鏡からの回折光を瞳面の周辺部に集中させ、後者でそれを抑制することによって、明るい主星からの光を遮り、主星像のハローを低減する。その結果、通常の回折パターン(エアリーパターン)より高いコ

⁴⁾ 生まれたての惑星や主星のすぐ近くを周回する惑星(ホットジュピターなど)は、近赤外線波長に於いても熱放射を検出することができる。

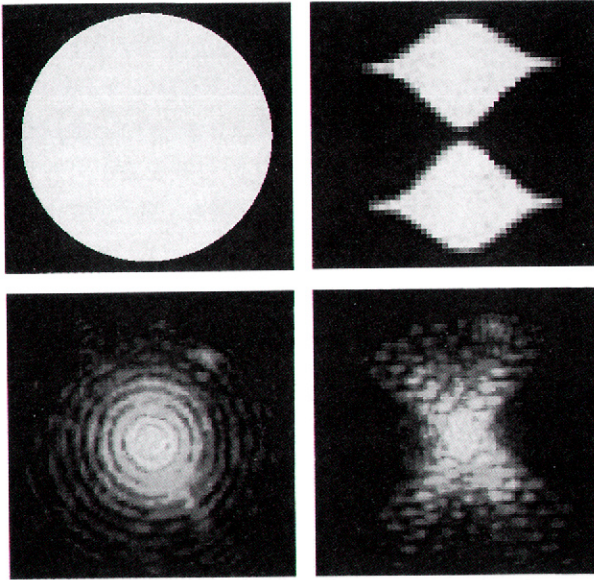


図3 円形開口と Spigel 瞳（ガウシアン開口）における瞳と対応する焦点像の比較 (Littman et al. 2002).

ントラストが得られる。最近では、ガウシアン型の開口を重ねた開口（シュパーゲル瞳、図3）⁴⁾や矩形開口⁵⁾を採用することによって、特定の軸方向にだけでも、10桁以上のコントラストを実現する検討も進んでいる。このような新しいタイプの可視光コロナグラフを利用した3~4 m クラス口径のスペース望遠鏡の場合、20 pc の距離から太陽系のような惑星系を見ると、巨大惑星（木星，土星，天王星）が、3 pc の距離からは地球型惑星（金星，地球，火星）が撮像できる。また、その大気を分光することで、可視光においても適切な生命の指標となる分子（とくに水と酸素・オゾンが重要）の存在の有無が議論できる。この場合は、軽量かつ高精度（惑星存在空間周波数領域での波面誤差が数 nm）の主鏡とその鏡面誤差を補正する宇宙補償光学の実現が鍵となる。いっぽう、20 m クラス以上のいわゆる次期地上巨大望遠鏡においても系外惑星探査は重要なテーマになると思われるが、地球大気揺らぎを補正する補償光学が最も重要な部分となる。おそらく、惑星探査に特化した数万以

上の超多素子で高 Strehl 比を実現し⁶⁾、かつ、安定した Point Spread Function の得られる補償光学が必須となるだろう。

5. 系外惑星探査に関するワーキンググループ

太陽系外惑星系の直接観測への関心は日本でも高い。ひとつには、すばる望遠鏡の完成で原始巨大惑星やその形成母体である原始惑星系円盤などの直接観測が行われつつあること（本特集の田村氏・深川氏の稿）や、いくつかの間接的系外惑星観測（同、佐藤氏の稿）が日本においても開始されたことがある。このような背景をもとに、系外惑星、特に木星型の系外惑星を直接に観測することを目的の一つとして、日本では次期赤外線天文衛星計画 SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) が検討されている⁷⁾。前述のように中間赤外線領域では恒星と惑星との明るさの比が比較的小さくなるため、SPICA ではこの波長域での観測に重点を置く。口径 3.5 m という大口径の望遠鏡と高機能コロナグラフを搭載することにより、近くの恒星系であれば主星から遠く離れた巨大惑星が直接に観測できることが期待される。特に、分光観測も合わせて行うことにより、惑星の大気の成分を明らかにすることもできる⁸⁾。ボイジャーが太陽系内の巨大惑星に対して行ったような分光観測が系外惑星に対して行えるのは驚異である。打ち上げは2010年頃を目指している。

もちろん、理論的研究基盤に関しては、これまでも系外惑星・惑星系形成に関する盛んな研究があることは言うまでも無い。現在、系外惑星研究に関する理論・観測交流の場の一つとして、天文台・東工大・宇宙研・東大の持ち回りで月一回の「系外惑星セミナー：惑星系を狙え」を開催している。

いっぽう、地球型系外惑星探査ミッションを日本において検討するワーキンググループが JTPF WG である。このワーキンググループでは、可視光コロ

ナグラフと干渉計のそれぞれの手法を検討している。特に、スペースコロナグラフは SPICA におけるコロナグラフの検討との共通部分が多い。ただし、主星に近い地球型惑星を狙うためには、高解像が得られる可視光でのスペースコロナグラフを利用した中口径可視光望遠鏡ミッションの具体的な検討が重要となる。このような望遠鏡は系外惑星探査と並行して別の視野で系外銀河の深撮像を行うほかに、別の時間に通常の紫外線・可視光・近赤外線スペース天文台として用いることが可能なので、一般天文学への寄与も期待される。干渉計に関しても、国立天文台の西川らによって、干渉計とコロナグラフを組み合わせた⁹⁾、新たな工夫で干渉計による系外惑星検出をより容易にするアイデアが生まれつつある。

地球型系外惑星検出は人類共通の興味であり、NASA/ESA は既に過去数年間にわたって検討を行って来た。これらの機関との国際協力のためにも、ワーキンググループは公式活動母体としての役割を果たすことが期待される。

系外惑星探査は天文学だけではなく惑星科学・地球科学・生物学・工学などの諸分野の興味をとらえる研究テーマだろう。より多くの人々の参加・協力を得て検討を進めたい。

参考文献

- 1) Traub W. A., Jucks K. W., 2002, Atmospheres in the Solar System: Comparative Aeronomy, Geophys. Monogr. 130, 369
- 2) Angel J. R. P., Woolf N. J., 1997, ApJ 475, 373.
- 3) Lyot M. B., 1939, MNRAS 99, 580.
- 4) Spergel D. N., 2001, astro-ph/0101142; Littman et al., 2002, SPIE, in press.
- 5) Nisenson P., Papaliolis C., 2001, ApJ, 548, L201.
- 6) Angel J. R. P., 1984, Nature 368, 203.
- 7) Nakagawa T., et al., 2000, ISAS Report SP-14, 189.
- 8) Tamura M., 2000, ISAS Report SP-14, 1.
- 9) Nishikawa J., et al., 2002, submitted.

Toward Direct Detection of Earth-Like Planets: Looking for other Earths

Motohide TAMURA

National Astronomical Observatory

Hiroshi SHIBAI

Nagoya University

Hiroshi MURAKAMI

The Institute of Space and Astronautical Science

Abstract: Various plans for detections of Earth-like planets have started after the success of the indirect detections of the Jupiter-like giant planets. Introduced in this article are the difficulties of the direct detections of extrasolar planets, two most promising methods for the direct detections (optical coronagraph and infrared nulling interferometer in space) and their technical challenges, and domestic activities regarding the "looking for other earths" projects.