

EXOPLANETS, AND SEARCHES FOR LIFE THERE

Motohide TAMURA^{1,2}

¹ Department of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan;

² Astrobiology Center, NINS, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Email: motohide.tamura@nao.ac.jp

(Received: 15, August, 2017 Acceted: 7, October, 2017)

(Abstract)

Since the first convincing detection of planets orbiting stars other than the Sun, or exoplanets, in 1995, our knowledge on exoplanets is extremely expanded both in quantity and quality; approximately 4000 exoplanets and new kinds of exoplanets unknown in our solar system are discovered. Various exoplanet detection methods are already successful including direct detection. Most recent detection of earth-like planets around nearby M-stars such as Proxima b and Trappist-1 b-g will be a tip of iceberg; there will be plenty of them around nearby M stars and they are the best targets for the life-signature finding on exoplanets in the next 10-20 years.

(Keywords)

exoplanet, earth-like planet, habitable zone, Proxima, Trappist, Subaru Telescope, HiCIAO, IRD

系外惑星と生命探査

田村元秀^{1,2}

¹ 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻

² 自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター

〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1

1. はじめに

1995年の発見[1]をきっかけに、太陽以外の恒星のまわりに約4000個もの惑星が見つかった[2]。太陽系内の8個の惑星(水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星)に対し、これらは「系外惑星」あるいは「太陽系外惑星」と呼ばれ、わずか20年ほどで現代天文学の最重要研究課題のひとつとなった[3]。

これは単に発見数の増加だけでなく、太陽系の惑星とは全く違う惑星、例えば、恒星のごく近傍を周回するために絶対温度1000度を超える灼熱の木星(ホットジュピター)、地球と海王星の中間サイズの惑星(スーパーアース)、海王星よりさらに外側の軌道を周回する木星の数倍以上の質量をもつ遠方巨大惑星など、いずれも太陽系には存在しないタイプの惑星の存在も明らかになった(図1参照)。

その結果、「太陽系や地球だけが生命を宿す特別な存在なのか?」、「第二の地球が多数存在し、そこには生命が存在するのか?」と言った、人類の根源的・普遍的な問いに対し、天文学的手法、すなわち望遠鏡を利用した観測によって科学的に答えようとする試みが本格化しつつある。

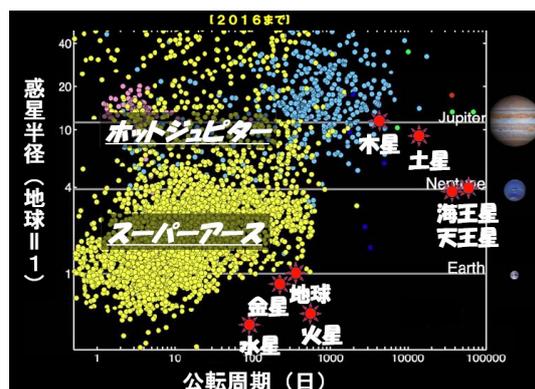


図1. 系外惑星と系内惑星の周期と半径の分布図

2. 系外惑星の探査方法

系外惑星の探査手法もこの20年で大きな進歩を遂げた。ただし、太陽系の広がりと比較すると、系外惑星は非常に遠方にあるため直接に画像に写すことは非常に難しい。海王星の軌道長半径に比べても、最も近い恒星でさえもその距離は約9000倍も離れている。そこで、惑星からの光を直接に捉えるのではない、間接的観測方法が最初に成功した。

2.1 ドップラー法(視線速度法)

惑星の公転運動によって、わずかながら恒星自体が周期的にふらつく。これを恒星光のドップラー効果を利用して測定するのがドップラー法である。視線速度法とも呼ぶ。視線速度の大きさKは以下の式で表わされる。

$$K[\text{m/s}] = 28m_2 \sin i [M_{\text{Jupiter}}] (P[\text{yr}])^{-1/3} m_1 [M_{\text{Sun}}]^{2/3}$$

ここで、 m_2 は惑星質量、 i は軌道傾斜角、 M_{Jupiter} は木星質量、 P は公転周期、 m_1 は主星質量、 M_{Sun} は太陽質量である。例えば、木星と地球による太陽の振れ速度はそれぞれ12.5m/sと9cm/sである。したがって、太陽系のような惑星系をドップラー法で検出するためには、このわずかな速度変化を、高分散分光器を用いてそれぞれ数m/sと数cm/sの速度で測定する必要がある。この精度は分光器自体の波長分解能(数万程度)では足りないため、基準となる波長に対する相対的波長決定精度を向上させる超精密波長校正方法が鍵となる。これまで、ヨードなどのガスセルやトリウム-アルゴンなどのランプが用いられてきた。現在の最高性能を誇る分光器 HARPS[4]は、可視光で60cm/s程度の速度決定精度を持つので、太陽型恒星のまわりではスーパーアースは検出可能だが、地球型惑星の検出はまだ難しい。しかし、主星が軽い場合(M型星=赤色矮星など)はこの限りでは無い。ただし、恒星温度が

3000Kと低いため、放射エネルギーのピークが波長1ミクロン程度になるため、可視光での高分散分光観測は難しく、赤外線によるドップラー法が重要となる。すばる望遠鏡用赤外線ドップラー装置IRD (図2) は、8m級望遠鏡におけるM型星まわりの地球型惑星探査赤外線分光器として最初に開発されたものである[5]。レーザを利用した光周波数コムで波長校正を行うなど、最先端の赤外線技術を結集して完成された[6]。



図2. すばる望遠鏡用地球型惑星探査赤外線分光器IRD

2.2 トランジット法

いっぽう、惑星が恒星の前面を通り過ぎる時の明るさの変化を検出するのがトランジット法である。ドップラー法は軌道傾斜角によって観測される速度が変化するが、軌道がほぼ視線に垂直でない場合は、速度変化の検出が可能である。いっぽう、トランジット法は、視線がほぼ軌道平面内に無ければ、惑星は検出できない。この確率は、おおよそ主星半径 R_1 /軌道長半径 a で計算できる。惑星が主星から遠いほどトランジットが起こる確率は小さくなることに注意されたい。また、恒星の明るさ変化は以下の式で表わされる。

$$\Delta F/F = (R_2/R_1)^2$$

ここで、 R_2 は惑星半径、 R_1 は主星半径で、 $R_1 \gg R_2$ と仮定した。

前項と同様に、太陽系を遠方から眺めて、トランジット法により木星と地球を観測しようとする、確率は共に0.5%もない。しかし、恒星の明るさ変化は、それぞれ約1%と約0.08%となる。恒星の明るさをモニターする測光観測は、上記の分光観測よりも装置は小規模であり、とくに地上では口径10cm程度の小望遠鏡から中口径の望遠鏡まで世界中で多数のトランジットサーベイ観測が行われている。その結果、現在までに最も多くの惑星候補を発見している手法である。ただし、地上トランジット観測で0.08%の測光精度を達成することは非常に困難であり、地球型惑星に迫ることは難しい。

そこでNASAは2009年に、宇宙からのトランジット観測を実現すべく\$425Mを投じてKepler衛星を打ち上げた[7]。その結果、地上観測では同じ領域内に3個しか惑星は検出されていなかったが、約4年間で4000個を超える系外惑星候補を発見した。その結果、ほぼ全ての恒星に何らかの質量の惑星が存在す

ること、木星クラスよりもスーパーアースクラス〜地球サイズの小さな惑星の数が圧倒的に多いことを示した。さらに、ハビタブルゾーンにある惑星は、太陽型恒星の約10%に存在することを示唆した[8]。ハビタブルゾーンは生存可能領域とも訳されるが、恒星からの距離が適切で、惑星表面上で液体の水が存在しうる円環状の領域のことである。主星の明るさに応じて大きく変わり、太陽型星では地球軌道あたり(0.8-1.8 AU)であるが、後述するM型星まわりのハビタブル地球型惑星では0.1 AU以下に位置している。

トランジット観測では、トランジット時とそれ以外の時間におけるデータの差を精密に比較することによって、惑星からの熱放射検出や惑星大気透過分光を行うことが出来る。これによって、いくつかの巨大惑星の大気の情報が見られるようになり、水・二酸化炭素・メタンなどの分子や水素・ナトリウムなどの元素などが惑星大気で検出された。後者は、主星に近いホットジュピターからの惑星大気散逸を見ているものと考えられている。

2.3 直接撮像・分光法

これらの大成功を収めているトランジット法もドップラー法も、惑星自体からの光子を主星からの光子と画像上で見分けていない、つまり直接に惑星を観測していない間接検出法である。これら2つの間接法は惑星からの光を直接に画像に収めるわけではなく、また、内側の系外惑星を検出しやすいというバイアスがかかる。他方、直接観測ではこの制約は無く、惑星の質量・温度・大気などさまざまな物理的情報を得られるため、究極の観測方法と考えられる。地上最大の8-10m望遠鏡でさえも完成直後は系外惑星の直接観測は出来なかった。しかし、最近の技術進歩、とりわけ地球大気の揺らぎをリアルタイムで補正する補償光学技術と明るい主星の影響を抑制するコロナグラフ技術や画像処理などにより、ついに直接観測が可能となった。図3は太陽に似た恒星をめぐる木星の数倍程度の重さの惑星の直接撮像に成功したすばる望遠鏡のHiCIAOによる画像である[9]。

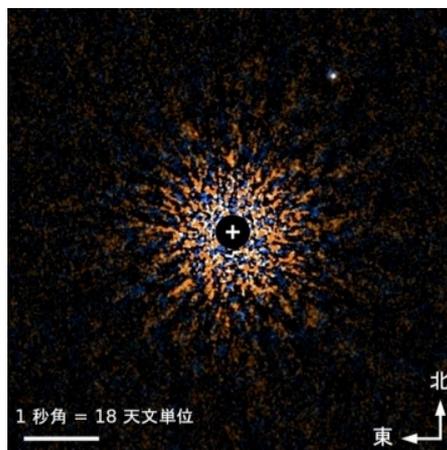


図3. すばる望遠鏡HiCIAOがとらえた系外惑星GJ504b

直接観測では撮像観測だけでなく分光観測も

可能で、惑星大気の特徴づけを、トランジットを起こさない惑星に対しても行うことができる。この観測と相性の良い装置が超補償光学系と面分光器であり、ジェミニ望遠鏡のGPI、VLT望遠鏡のSPHERE、すばる望遠鏡のSCEXAOとCHARISが現在、観測成果を挙げつつある。

2.4 原始惑星系円盤と惑星形成

系外惑星検出はもっぱら形成された後の主系列星まわりの惑星を狙うが、惑星形成そのものも大きな謎である。とりわけ、系外惑星は非常に多様であり、太陽系と比べても大きく異なることが分かった今、どのようにしてこのような多様な惑星が生まれたか、そもそも太陽系はどのようにして生まれたのかという惑星形成論を見直すべき時代に来ている。これらの問いに答えるのは、生まれたばかりの、あるいは、今まさに生まれつつある惑星誕生現場の詳細な観測が不可欠である。その先陣を切ったのが、すばる望遠鏡HiCIAOによる惑星の誕生現場（原始惑星系円盤）の詳細観測である。これにより、初めて太陽系スケールで多数の原始惑星系円盤の詳細構造が解明され、ギャップ構造やスパイラル構造の存在が明らかになった（図4）。これらは、惑星存在の観測的証拠と考えられるが、年齢100万年程度の前主系列星のまわりで既に巨大惑星が生まれていることは、標準的惑星形成論から見ると驚きである。前項の系外惑星そのものと本稿の系外惑星の誕生現場の観測はすばる望遠鏡戦略枠「SEEDSプロジェクト」の成果である[10]。百聞は一見に如かず、という系外惑星の直接観測の時代の幕開けを飾るものと言えよう。

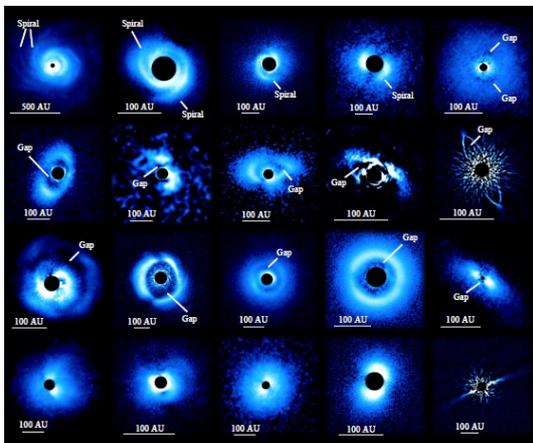


図4. すばる望遠鏡がとらえた原始惑星系円盤の微細構造（ギャップ、スパイラル構造）

3. 地球型惑星とハビタブル惑星

系外惑星検出は、発見の時代から統計と特徴づけの時代へ、また、巨大惑星からより小さな惑星へと向かっている。最近では、地球型惑星の観測に大きな関心が寄せられている。なかでも、惑星表面上で水が液体で存在しうるハビタブル惑星は、宇宙における生命を議論する上で最も興味深い対象となる。もちろん、ハビタブルゾーン以外にある惑星も重要だが、生命の痕跡を求めるような特

徴づけのための詳細観測は、ハビタブル惑星が最初の対象としてふさわしいだろう。

米国のケプラー衛星は宇宙からの大気揺らぎの無いトランジット観測を実現し、地球サイズのハビタブルゾーン惑星も約20例発見している。しかしながら、全て数100光年以上と地球から遠く離れており、近未来にこれらの観測を分光することは不可能である。例えば、2015年7月に発見されたKepler-452fは、太陽程度の主星から1AU程度の軌道をまわる1.6地球半径の惑星で、Earth Twinとも呼ばれている。はくちょう座の方向、約1400光年の距離にある。

一方、2016年8月には、最も近い恒星であるプロキシマ・ケンタウリにドップラー法でハビタブル惑星（Proxima b）が発見された[11]。主星であるプロキシマ・ケンタウリ（あるいは略してプロキシマ）は0.1太陽質量で0.002太陽光度しかないM型星である。表面温度も3050Kしかない。発見された惑星は周期11日で、質量下限値が1.3地球質量であった。その軌道長半径は0.05 AUであり、主星のハビタブルゾーンである0.04-0.08 AU内に位置している。地球に最も近い恒星にもハビタブル惑星が存在しているのである！

さらに、2017年2月には7個もの地球型惑星が恒星近くに並んだトラピスト1系（図5）も発見された[12]。この天体は地上トランジット観測で発見されたが、NASAのSpitzer望遠鏡による精密トランジット観測が決め手となった。トラピスト1は距離約40光年にある約0.1太陽質量で表面温度約2600Kしかない。7つの惑星Trappist-1 b,c,d,e,f,g,hは、0.76-1.13地球半径で0.01-0.06 AUに位置している。このうちの少なくともTrappist-1 f,g,hがハビタブルゾーン内にある。

複数の惑星系のトランジット観測は、惑星の半径の情報を与えるだけでなく、そのトランジット時間観測のズレから、惑星質量も求めることができる。その結果、Trappist-1 b,c,d,e,f,gは全て岩石惑星である。いっぽう、fは少し密度が軽いため水素を含む大気存在も予想されている。この天体は、2018年に打ち上げ予定の口径6.5m JWST宇宙望遠鏡にとって詳細なトランジット観測のための最も重要な観測対象になった。

さらに、上述のすばる望遠鏡のIRDや、2018年打ち上げ予定のNASAのTESSトランジット衛星によって、このようなM型星まわりの地球型惑星が多数検出できると期待されている。これにより、

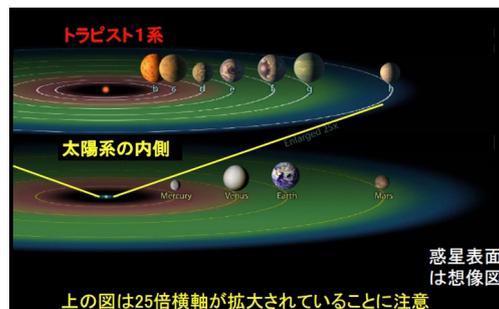


図5. トラピスト1系と太陽系との比較（NASA）

系外惑星観測に基づくアストロバイオロジー研究がさらに加速されると期待される。

さらに、2020年台後半に完成予定の地上30メートル級望遠鏡（TMTやELT）によって、M型星まわりの地球型惑星を最初に直接観測し、そこに生命の兆候（バイオシグニチャー）を探ることも可能になるだろう。有望なバイオシグニチャーとしては、酸素やメタンや光合成（クロロフィル）のレッドエッジが有名だが、M型星における光合成のレッドエッジについては、従来説である多光子過程などによる赤外線波長へのずれよりも、水中における進化過程では可視光の利用が有利と考えられるため、レッドエッジの変化が無い可能性も指摘しておきたい (6) [13]。

- (2017)
 13. Takizawa, K. et al. Red-edge position of habitable exoplanets around M-dwarfs. Scientific Reports, 7, 7561 (2017)

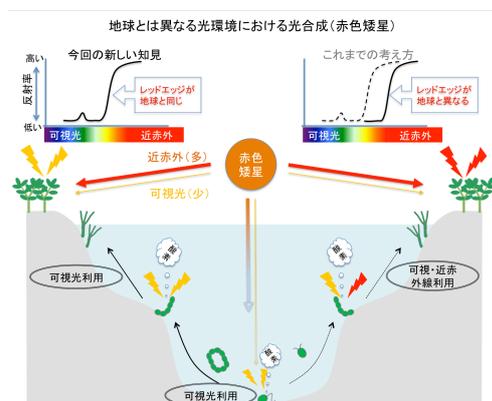


図6. M型星まわりの地球型惑星における光合成の新説 (滝澤謙二、アストロバイオロジーセンター)

謝辞 本稿に関連する研究には、基盤研究 (A) 15H02063よりの研究助成を受けました。

引用文献

1. Mayor, M. and Queloz, D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. Nature 378, 355–359 (1995)
2. Schneider, J. <http://exoplanet.eu/>
3. 田村元秀, 太陽系外惑星, 日本評論社 (2015)
4. Pepe, F. et al. Performance verification of HARPS: first laboratory results. SPIE, 4841, 1045-1056 (2003)
5. Tamura, M. et al. Infrared Doppler instrument for the Subaru Telescope (IRD). SPIE, 8446, article id. 84461T (2012)
6. Kotani, T. et al. Infrared Doppler instrument (IRD) for the Subaru telescope to search for Earth-like planets around nearby M-dwarfs. SPIE, 9147, id. 914714 (2014)
7. Borucki, W. et al. Kepler Planet-Detection Mission: Introduction and First Results. Science, 327, 977- (2010)
8. Petigura, E. A. et al. Prevalence of Earth-size planets orbiting Sun-like stars. PNAS 110 19273–19278 (2013)
9. Kuzuhara, M. et al. Direct imaging of a cold Jovian exoplanet in orbit around the Sun-like star GJ 504. Astrophys. J. 774, 11 (2013)
10. Tamura, M. SEEDS - Strategic explorations of exoplanets and disks with the Subaru Telescope -. Proceedings of the Japan Academy, Ser. B: Physical and Biological Sciences, 92, 45-55 (2016)
11. Anglada-Escudé, G. et al. A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri. Nature, 536, 437-440 (2016)
12. Gillon, M. et al. Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1. Nature, 542, 456-460