

太陽系外惑星探索の最前線

佐藤文衛（東京工業大学）

1. はじめに

太陽系は宇宙において普遍的なのか特殊なのか、第二の太陽系、第二の地球はあるのか—天文学に興味のある人もない人も、この種の疑問を一度は抱いたことがあるだろう。太陽以外の恒星の周りを回る惑星は「太陽系外惑星（または系外惑星）」と呼ばれ、1995年に初めて発見された。それ以来、世界中の天文学者達の精力的な観測によってこれまでに3000個以上の系外惑星が発見され、その数は今も増え続けている[1]。親星のすぐ近くを公転する灼熱の巨大ガス惑星“ホット・ジュピター”、非常に歪んだ楕円軌道を周回する“エキセントリック・プラネット”、地球の数倍から10倍の質量をもつ惑星“スーパー・アース”—宇宙には我々の想像を超える多種多様な系外惑星の世界が広がっている。また、近年の観測技術の発展によって地球程度の軽くて小さな惑星にも探索の手が及びつつある。ここでは、このように多様な系外惑星をどのようにして見つけるのかについて、最新の観測成果を交えながら紹介する。

2. 太陽系の惑星

系外惑星の話をする前に、まず太陽系の惑星のおさらいをしよう。太陽系には8つの惑星が存在する。太陽の近くを水星、金星、地球、火星という岩石でできた固体惑星（地球型惑星）が回っており、火星の外側には木星、土星というガスを主成分とする巨大ガス惑星（木星型惑星）が回っている。そしてさらにその外側には、氷を主成分とする巨大氷惑星（海王星型惑星）である天王星と海王星が回っている。地球と金星はほぼ同じ質量であり（金星は地球の約0.8倍）、木星、土星、天王

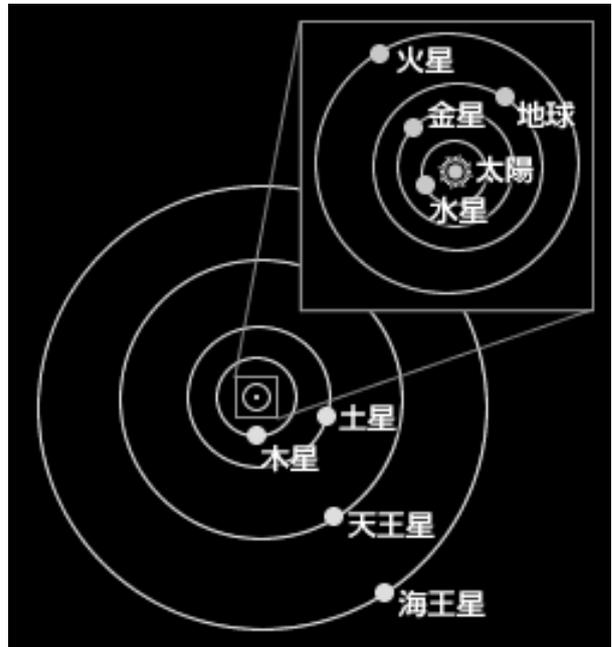
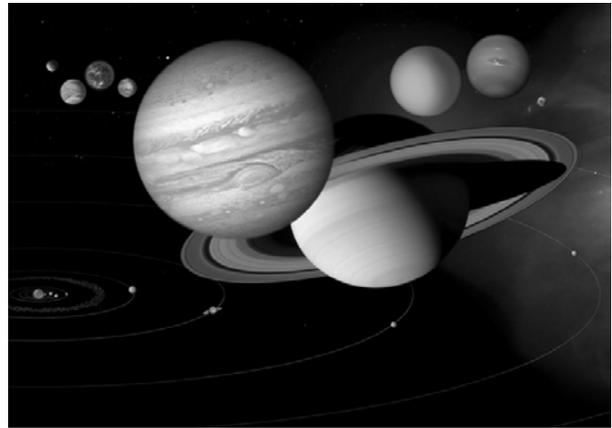


図1上 太陽系の惑星（図：NASA）

図1下 太陽系惑星の軌道

（図：国立科学博物館）

星、海王星はそれぞれ地球の約318倍、約95倍、約15倍、約17倍の質量をもつ。これらの惑星が、太陽の周りをほぼ円軌道で、かつほぼ同一平面上を回っている（図1）。

このような太陽系の惑星の特徴は、太陽系の形成過程と密接に関係がある。標準的な太陽系形成理論では、惑星は原始太陽の周りを

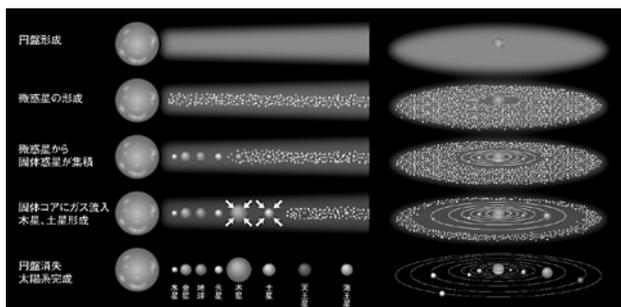


図2 太陽系の形成シナリオ
(図：理科年表オフィシャルサイト)

取り巻く塵とガスからなる回転円盤（原始惑星系円盤）の中で形成されたと考えられている。円盤の中で塵が衝突・合体を繰り返し微惑星となり、微惑星が合体して固体惑星となる。太陽から約3天文単位離れたところでは、低温のため水が氷として存在し、岩石と氷を材料に大きな固体惑星が形成され、それが周囲の円盤ガスを取り込んで巨大なガス惑星となる。さらにその外側では、氷を主成分とした巨大な固体惑星が形成されるが、成長に時間がかかるためにガスを取り込む前に円盤が散逸してしまい、ガス惑星ではなく巨大な氷惑星となる。このように考えると、太陽系の惑星の組成や軌道の特徴が自然に説明できるため、標準的な太陽系形成シナリオとして広く受け入れられている（図2）。しかし、太陽系とは異なる特徴をもった多数の系外惑星の発見によって、このシナリオは見直しを迫られることになる。

3. 系外惑星の見つけ方

さて、これまでに3000個も見つかっている系外惑星だが、どのようにして発見されたのだろうか。惑星は恒星とは違って自ら光り輝かないため、遠くの恒星の周りにはある惑星を直接検出することは通常とても困難である。例えば、太陽と木星の放射強度は可視光波長域で約9桁、赤外線波長域でも約4~6桁の開きがあり、太陽系を遠方から見ると木星

の光は太陽の光に埋もれてしまうため検出が非常に難しい。そのため、現在知られている系外惑星の大部分は、惑星が親星に及ぼす何らかの影響をとらえることによって間接的に発見されている。

3.1 惑星をもつ恒星のふらつきをとらえるー視線速度法

太陽系を例に考えてみよう。地球を始めとする太陽系の惑星は太陽の周りを公転しているが、実際は太陽も惑星からの引力をうけてわずかに動いている。正確には、惑星との共通重心の周りを惑星と同じ公転周期で回っている。太陽は太陽系最大の惑星である木星の影響を主に受け、木星との共通重心の周りを木星の公転周期である約12年で一周する。木星との共通重心はちょうど太陽の表面辺りに位置するので、太陽はちょうど自分の大きさの分だけ動くことになる。このときの太陽の公転速度は約12メートル毎秒である。また、太陽と地球を考えると、地球の引力による太陽のふらつきの速度は約10センチメートル毎秒である。

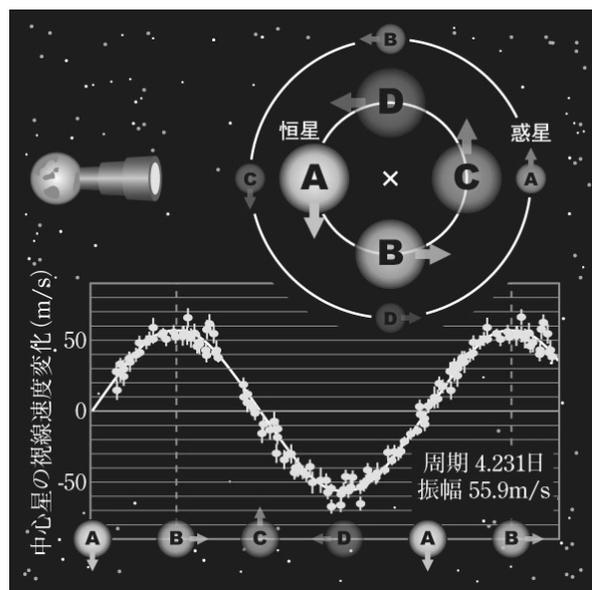


図3 視線速度法の原理
(図：理科年表オフィシャルサイト)

このような運動がもし他の恒星で観測されれば、惑星そのものは見えなくてもその恒星は惑星をもっているという間接的な証拠になるだろう。惑星をもつ恒星の天球面上での位置の変化を検出する方法を「アストロメトリ法」、観測者の視線方向に対する恒星の速度変化を検出する方法を「視線速度法」と呼ぶ(図3)。実際の観測では、高分散分光器と呼ばれる光を波長ごとに細かく分けて強度を測定できる装置を使って、恒星の視線速度変化に伴うドップラー効果による光の波長のわずかなずれを検出する。

1995年、ペガサス座51番星における系外惑星発見に使用されたのがこの視線速度法である。現在、世界最高と言われる測定精度は約1メートル毎秒であり、この精度だと太陽系の木星は楽に検出できるが、太陽系の地球は検出できない。しかし、地球質量程度の惑星が1天文単位でなく恒星のすぐそばを回っていれば、ぎりぎり検出することができる。我々が系外惑星探索に利用している国立天文台岡山天体物理観測所の188cm望遠鏡(図4)と高分散分光器HIDESでは、最高約2メートル毎秒の測定精度を達成している。これは、口径2m以下の望遠鏡では世界最高である。

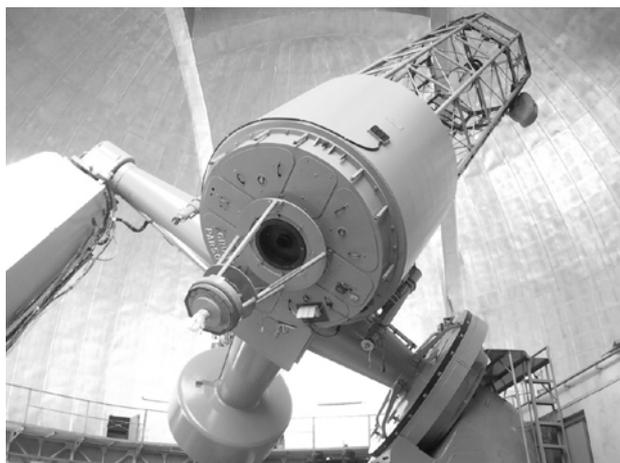


図4 系外惑星探索に使われる岡山観測所188cm望遠鏡(写真:国立天文台)

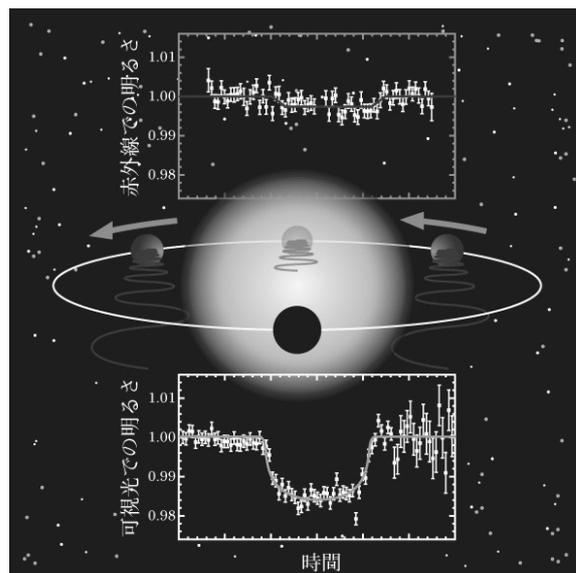


図5 トランジット法の原理

(図:理科年表オフィシャルサイト)

3.2 惑星の影をとらえる—トランジット法

同じく太陽系を例に、別の現象を考えよう。地球からは時々、水星や金星の太陽面通過が観測される。この現象は、太陽と地球を結ぶ線上をちょうど水星や金星が横切ることによって起こるものである。この現象も系外惑星の発見に利用することができる。太陽をある恒星、水星や金星をその周りを回る惑星と考えればよい。ある恒星の周りを回っている惑星がその恒星の前を通過すると、その恒星から観測者に届く光が惑星によって一部遮られ、恒星は一時的に暗くなる(一般に恒星は地球から非常に遠い距離にあるので、太陽のように大きさをもった天体としては観測できない)。このような減光を示す恒星があれば、その恒星はやはり惑星をもっているという間接的な証拠になるだろう。これは、いわば惑星の影をとらえる方法である。こうして惑星を検出する方法は「トランジット法」と呼ばれる(図5)。

トランジットによる恒星の減光率は、惑星との断面積の比によって決まる。例えば木星の半径は太陽の約10分の1なので、木星の

トランジットによる太陽の減光率は約 1% である。同様にして、地球のトランジットによる太陽の減光率は約 0.01% である。地上からの観測では、大気の影響があるため 0.01% の測光精度を実現するのは難しいが、宇宙からなら可能である。

近年、ケプラー宇宙望遠鏡などによる宇宙からの超高精度トランジット観測によって、地球サイズに迫る小さな系外惑星が多数発見されている。その中の一つ、Kepler-22bは太陽に似た恒星を周回する、地球の約2.5倍の半径をもつ惑星である。この惑星の公転周期は約290日であり、惑星表面に水が液体として存在できる温度領域、いわゆるハビタブルゾーンに位置する (図6) [2]。もしかしたら、この惑星には海が存在しているかもしれない。

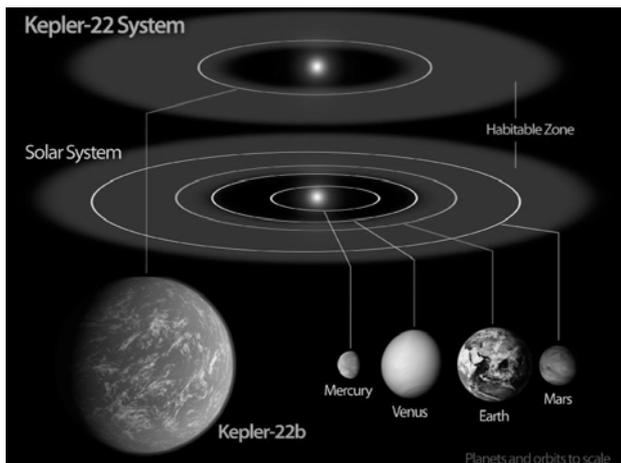


図 6 Kepler-22 系の軌道模式図 (図：NASA)

4. 系外惑星の特徴

上に述べた方法を中心として、現在までに 3000 個を超える系外惑星が発見されている。その大まかな性質を以下に簡単にまとめる。

質量は、地球の 2 倍弱程度から木星の 10 倍以上のものまで見つかった (これ以上軽い惑星は現在の観測精度の限界以下のため見つけられない)。これらは、大まかには木星のような巨大惑星と、海王星質量程度以下の惑星に分けられる。地球の数倍から 10 倍程度以下の質量をもつ惑星 (通称スーパーア

ス) も多数見つかり、軽い惑星ほど存在頻度が高い (図 7)。スーパーアースは太陽系には存在しないが、宇宙には豊富に存在する。同様の傾向は、トランジット法で発見された惑星の半径分布からも示されている。これらの小型惑星が、岩石惑星 (大きな地球) なのか、それとも薄い大気をもった氷惑星 (小さな海王星) なのかについてはまだよく分かっていない。

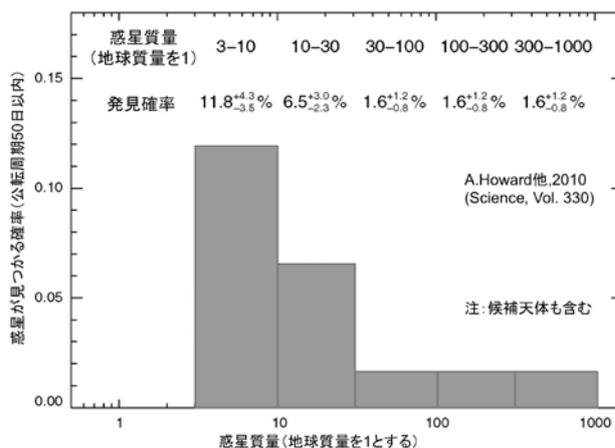


図 7 太陽型星周りの惑星の質量頻度分布 [3]

軌道についてはどうだろう。発見された惑星は、軌道長半径 0.02~6 天文単位の範囲に分布している。これより遠方の惑星は観測期間の限界のため現時点では見つけることができない (直接撮像では 10 天文単位以遠にもいくつか見つかった)。木星質量以上の巨大惑星は、非常に短い公転周期をもつもの (通称ホット・ジュピター) と、1 天文単位以遠に分布するものに分かれている。海王星質量以下の惑星は公転周期 30 日くらいに多く分布する。惑星の軌道の形は、太陽系惑星とは対照的に楕円軌道が一般的である。また、一つの恒星が複数の惑星をもつ場合も多く、巨大惑星は 30~50% が複数惑星系、低質量の惑星はそれ以上の割合で複数惑星系をなすと言われている。もちろん、太陽系も複数惑星系である。

5. 様々な「太陽」を巡る惑星

これまでに発見された系外惑星の大部分は、太陽に似た恒星、つまり、太陽程度の質量と年齢をもつ恒星を周回するものである(図8)。

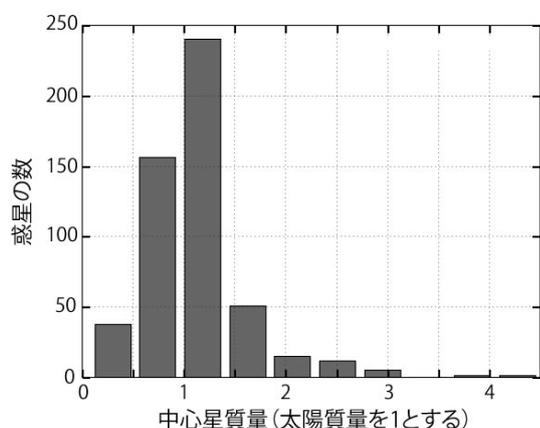


図8 惑星をもつ恒星の質量分布[1]

これは、天文学者が第二の太陽系や第二の地球の存在に関心があり、太陽に似た恒星を中心に系外惑星を探してきたから(そして観測技術的な面からも太陽に似た恒星は惑星を見つけやすいから)であって、他のタイプの恒星に惑星が存在しないということではない。

例えば、太陽より少し重い恒星が進化して太陽の約10倍程度の半径にまで膨張した「巨星」の周りでは、これまでに約120個の惑星が発見されている(ちなみに、このうちの約30個は我々のグループによる発見である)。最新の観測結果によると、巨大惑星の存在頻度は太陽の約2倍程度の質量をもつ恒星で最大となり、また、巨星の周りでは太陽類似星とは異なりホット・ジュピターがほとんど存在しない。さらに、我々のグループが最近発見した惑星系は、巨星の周りを二つの巨大惑星がお互い逆向きに公転しているかもしれない奇妙な惑星系であり、しかもこのような相互逆行の可能性のある惑星系はなぜか巨星の周りで見つかる傾向がある(図9)。

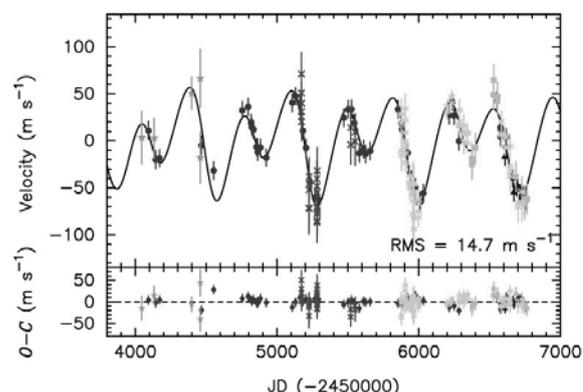


図9 岡山観測所で新たに発見した巨星を巡る2惑星系(図は中心星の視線速度変化。横軸ユリウス日、縦軸視線速度)[4]

太陽より軽い恒星の周りでも惑星は発見されている。特に、赤色矮星と呼ばれる低質量で低温の恒星は、低光度のため周囲のハビタブルゾーンが親星近くに位置し、また、親星が軽いため軽い惑星を検出しやすいという利点があるので、ハビタブルゾーンにある地球型惑星探索の対象として期待されている。

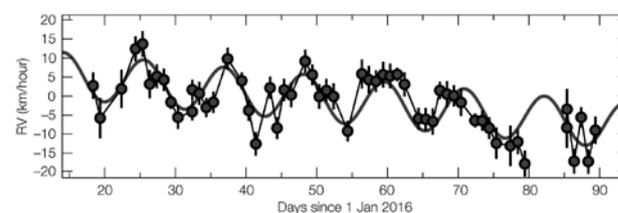


図10上 プロキシマ・ケンタウリbの想像図(図: ES0)

図10下 プロキシマ・ケンタウリの視線速度変化[5]

図 10 は、2016 年 8 月に視線速度法によってまさにそのような惑星の発見が報告されたプロキシマ・ケンタウリの惑星想像図と視線速度変化の図である。プロキシマ・ケンタウリは太陽から最も近い (4.2 光年) 恒星であり、質量は太陽の約 10 分の 1、表面温度は約 3000 度の赤色矮星である。見つかった惑星の質量は地球の約 1.3 倍で、岩石惑星と考えられる。また、公転周期は約 11 日で、ちょうどハビタブルゾーンに位置する。今後の追観測に期待したい。

6. おわりに

ここでは、系外惑星の主な発見方法と、それによって発見された系外惑星の主な特徴を紹介した。太陽に似た恒星を周回する惑星だけを見ても実に多様性に富んでいるが、太陽より重い恒星や軽い恒星、進化した恒星なども含めるとさらに多様な惑星系が宇宙には存在していることが分かる。数年後には系外惑星探索用の新たな宇宙望遠鏡が打ち上げられる予定であり、これまで以上に多くの重要な発見が期待されている。第二の太陽系、第二の地球はあるのか、そして、太陽系を含め、多様な惑星系がどのようにして形成され、進化してきたのかを明らかにすることが、系外惑星研究の使命である。

文 献

- [1] NASA Exoplanet Archive
<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>
- [2] Borucki, W.J. et al. (2012) “Kepler-22b: A 2.4 Earth-radius Planet in the Habitable Zone of a Sun-like Star”, *ApJ*, 745, 120
- [3] Howard, A.,W. et al. (2010) “The Occurrence and Mass Distribution of Close-in Super-Earths, Neptunes, and Jupiters”, *Science*, 330, 653
- [4] Sato, B. et al. (2016) “A Pair of Giant Planets around the Evolved Intermediate-mass Star HD 47366: Multiple Circular Orbits or a Mutually Retrograde Configuration”, *ApJ*, 819, 59
- [5] Anglada-Escude, G. et al. (2016) “A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri”, *Nature*, 536, 437

* * * * *