

隣の恒星プロキシマに発見！生命を宿せる惑星

東京大学大学院理学系研究科教授

自然科学研究機構 アストロバイオロジーセンター長

同 国立天文台教授 田村 元秀

1. はじめに：宇宙と生命？

「宇宙に生命を探す天文学」と聞くと皆さんは何を想像されますか？—なかには宇宙人やUFOなどを思い浮かべる方もいると思います。しかし、SETIとも呼ばれる知的生命探査は1960年頃から行われていますが、これまでに一度も成功していません。いきなり知的生命にアプローチするより、いろいろな生物を広く探査する方が確率的にも技術的にも有利と思われれます。

一方、天文学の新しい分野として「系外惑星天文学」という分野が、1995年の発見を一つの契機として急速に発展しました。その結果、太陽系で唯一生命を宿すことがわかっている地球と似た環境にあると考えられる惑星が、宇宙には数多くありそうなことがわかってきました。つまり、惑星自体の研究だけでなく、宇宙における生命の場として、系外惑星が脚光を浴びています。はからずも2016年になって、太陽に最も近い恒星プロキシマにも生命を宿すことが可能な惑星（プロキシマ b）が発見されました。ここでは、系外惑星の観測の現状とプロキシマ b の紹介をします。

2. わずか20年ほどで3,500個以上も発見された系外惑星

系外惑星探査は、現代天文学で最もホットな分野の一つです。太陽のような普通の恒星のまわりで最初に系外惑星が発見されたのは1995年でした。それからわずか20年ほどの間に、確実なものは3,500個、有力な候補も入れると既に5,000個を超える系外惑星が発見されてきました。天文学は太陽系の8個の惑星を超えて、望遠鏡で続々

と「新世界」を開拓していると言っても過言ではありません。しかも、驚くべきは発見数だけでなく、太陽系の惑星とは全く違う異形の惑星の存在が明らかになったことでしょう。

図1は系外惑星の軌道の大きさと質量の分布を表しています。「ホットジュピター」と呼ばれる絶対温度1000度を超える灼熱の木星、「スーパーアース」と呼ばれる地球と海王星の中間サイズの惑星、海王星よりさらに外側を周回する木星の数倍～10倍以上の質量をもつ「遠方巨大惑星」などは、いずれも太陽系には存在しない我々が知らなかったタイプの惑星です。そのため、このような惑星がどのようにして生まれたかは、太陽系を手本として構築された惑星形成理論そのままでは説明できません。

さらに、惑星の存在頻度についても多くのことが分かってきました。今では、ほぼ全ての恒星に何らかのサイズの惑星が存在するらしい、とも言

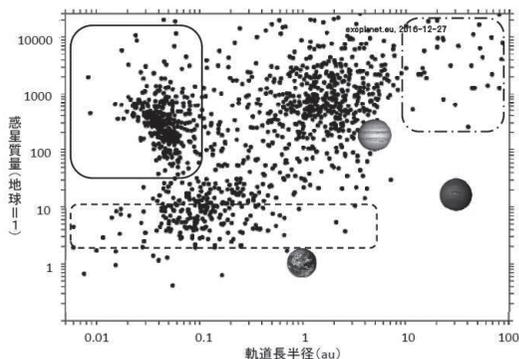


図1 系外惑星の軌道長半径と質量の分布図。太陽系の地球・木星・海王星の位置も示されている。実線はホットジュピター、破線はスーパーアース、一点鎖線は遠方巨大惑星のおおよその範囲。

われています。なかでも、2009年に打ち上げられたNASAのケプラー衛星によって、海王星・スーパーアース・地球サイズという「小さな惑星」は宇宙の中で圧倒的に数多いことが示されました。

3. 系外惑星検出のための多様な手法

では、このような多様な惑星は、どのようにして発見されてきたのでしょうか？太陽系内の惑星であれば人工衛星などを送ることもできますが、太陽系に最も近い恒星でも約4光年も離れており、望遠鏡で直接観測して惑星の存在を示すしか手段がありません。代表的な検出方法(図2)としては、①惑星の公転運動による主星自体の速度ふらつきを分光的に測定する手法(ドップラー法、視線速度法とも言います)、②主星の前面を惑星が通過する際の明るさの変化を精密に捉える手法(トランジット法)、③惑星の公転運動による主星自体の天球上での位置ふらつきを精密に位置測定する手法(アストロメトリ法)、④重力レンズの効果を利用してレンズ星を周回する惑星を検出

する手法(重力マイクロレンズ法)、そして、⑤惑星そのものを画像に写したり分光したりする手法(直接撮像法)などがあります。前4手法が間接法で、惑星そのものを画像に捉えて検出するのではなく、その様々な効果を検出して、惑星存在を間接的に示すものです。直接撮像法については6節でふれます。

それぞれの手法には以下のような特徴があります。ドップラー法とトランジット法は恒星に近い重い惑星ほど検出しやすく、アストロメトリ法と直接観測は恒星から遠く重い惑星ほど検出しやすいのです。ドップラー法と重力マイクロレンズ法はこれまで地上での観測が主ですが、トランジット法とアストロメトリ法と直接観測は地上だけでなく人工衛星での観測も行われています。とくに、上述のケプラー衛星は大気揺らぎのない宇宙空間での超精密トランジット観測を実現し、小さな惑星まで含めて合計4,700個の惑星候補を発見しました。トランジット法は惑星と誤認する現象もあるので、発見段階では惑星候補と呼ばれていて、その後の確認観測が必要になります。

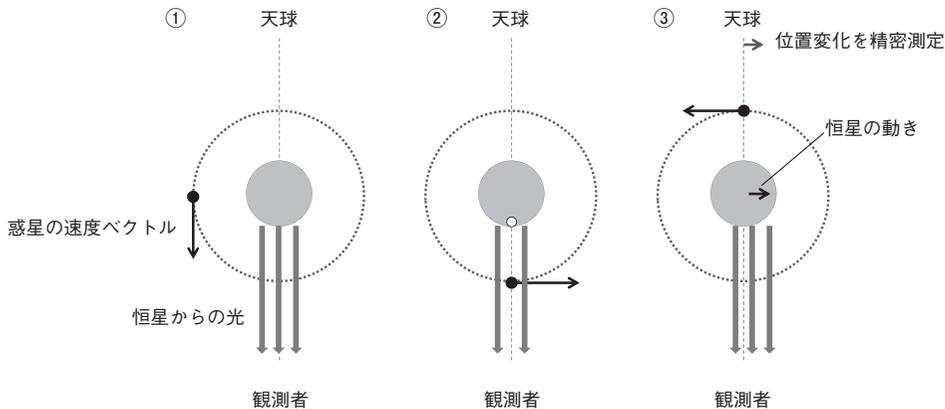


図2 3つの間接的系外惑星検出方法。

中心の大きな丸が恒星、その周りの黒丸が惑星。観測者は下方無限大の距離。天球は上方無限大の距離。また、簡単のために紙面内の円軌道とし、重心の位置ずれは図示していない。下方へ向かう太矢印は恒星からの光。長い黒矢印は惑星の速度ベクトル。短い黒矢印は恒星の動き(観測に関係する場合)。①ドップラー法。惑星が公転運動によって観測者に近づくと恒星が反対方向に遠ざかる。それによる恒星からの光のドップラー変移を測定する。②トランジット法。惑星が恒星の前面を通過する際に影(白抜き丸)となり、恒星の明るさが減少するのを検出する。③アストロメトリ法。惑星の公転運動によって恒星の天球上での位置がふらつく。その位置変化を精密測定する。図では惑星が左に向かうと恒星光が右側に微小移動する様子を強調してある。これら3つの現象はいずれも惑星の公転周期で繰り返される。なお、①は軌道面が視線と完全に垂直な場合、②は軌道面が恒星の大きさを考慮した視線上に無い場合にはどちらも観測されないことに注意。

4. 生命を宿せる惑星が見つかった

これだけ多数かつ多種多様な惑星が発見されると、当然、その中には地球のように生命を宿す惑星があると考えたくなります。とりわけ、木星や海王星のようなガスや氷でできている大きな惑星ではなく、地球あるいはスーパーアースサイズ、すなわち、地球質量の約1倍から約10倍未満の小さな惑星が注目されています。これらは地球に似た岩石惑星と考えられるからです。さらに、このような小さな惑星が、恒星から適当な距離にあれば、惑星表面の水が蒸発も凍結もせず、液体で存在し得る適当な温度にあると推定されます。生命の存在にとって、液体の水は普遍的に重要と考えられるため、このような領域をハビタブル（生命生存可能）ゾーン、そこに位置する惑星をハビタブル惑星と呼びます。もちろん、可能性があるだけで、生命が必ず存在するかどうかはわかりませんが、生命探査を行う上で最も有望な惑星と言えます。

実は、ハビタブルな系外惑星であれば、既に数十個程度は発見されています。とりわけ、ケプラー衛星は、「地球サイズ」の小さなハビタブル惑星も20個程度発見しています。しかし、い

ずれも地球から数百光年以上と遠く、本当に水があるのかどうか、さらに生命の痕跡に迫るための詳細な観測ができません。したがって、なるべく近い恒星の周りにハビタブル地球型惑星を発見することが重要なのです。

5. プロキシマ b の発見

南天にあるため多くの日本人には馴染みがないのですが、ケンタウルス座アルファ星は、夜空を肉眼で見たときに全天で3番目の明るさを誇る恒星です（図3左上）。この星は単独星ではなく、太陽系の海王星くらい離れた軌道を周期80年で回る、2つの太陽に似た星からなる連星系です。さらに、1915年に、この星から2度角ほど離れた位置に約11等の暗い星が見つかりました（図3右下）。スコットランドのロバート・イネスが南アフリカで発見したものです。後に太陽系からの距離が4.24光年で、最も太陽系に近い恒星であることが確定しました。これがプロキシマ・ケンタウリ星で、最も近いという意味の「プロキシマ」とも呼ばれます。これほどに近い星でありながら可視光で暗い理由は、太陽質量の1/10程度の軽くて低温度の星（M型星、赤色矮星）だからです。ケンタウリ座アルファ星の連星（AとB）は太陽系に2番目に近い星で、これらは3重星系を構成していると考えられています。

プロキシマ星は最も太陽系に近い恒星だけに、これまで多くの天文観測が行われてきました。この星を周回するかもしれない系外惑星の探査も、実は色々なチームによって過去16年間ほど行われてきています。欧州南天天文台のチームがこれらのデータを基に惑星の兆候を見出し、世界最高精度の可視光視線速度分光器 HARPS を用いて2016年に入ってから3ヵ月強の集中的な観測を行いました。その結果確実な惑星であることが確認されました。この観測は、惑星の公転運動によって引きずられた恒星が人の歩く速さで周期的に運動するのを、光のドップラー効果を利用して超精密測定するものです（前述のドップラー法）。恒星という巨大天体が人の歩く速さで運動するこ

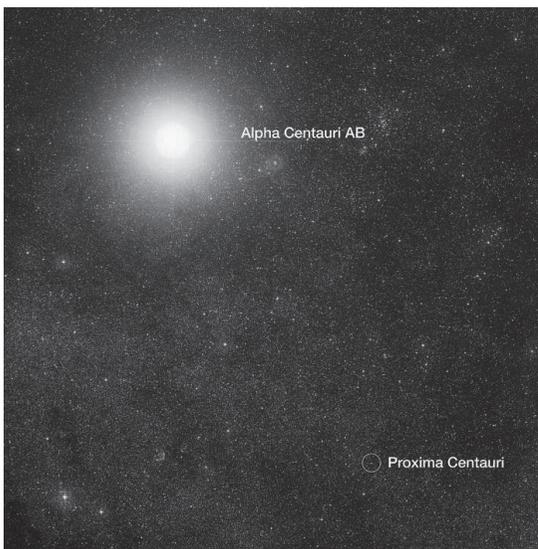


図3 ケンタウリ座アルファ星とプロキシマ・ケンタウリ星。クレジット：ESO。

とまでも測定できるのは驚異的ですが、これも観測技術向上の賜物です。プロキシマ星発見から約100年後の2016年8月25日にこれらの観測結果がネイチャー誌に発表され、惑星はプロキシマbと名付けられました。

プロキシマbは、ほぼ地球質量（1.3倍以上）という小さな惑星で、さらに、恒星のハビタブルゾーンに位置しています。太陽のハビタブルゾーンは地球軌道のあたりに位置しますが、プロキシマbの場合は、恒星自体が非常に暗いため地球-太陽間の距離の1/20程度という恒星に非常に近い位置になります。そのため惑星は恒星に対して常に同じ面を向ける潮汐固定状態となり、恒星に向いた面だけが温められると予想されています。その結果、「アイボール・アース」と呼ばれるような表面が一様でなく目玉のように見える異形のハビタブル惑星になるかもしれません（図4）。

6. 発見の意義と今後

プロキシマbという最も近い恒星、しかも、太陽型恒星とは大きく異なる赤色矮星を主星とするハビタブル地球型惑星が発見されたことは極めて大きな意味を持っています。ひとつは、赤色矮星のまわりの系外惑星の重要性です。系外惑星分野

では、このような軽い恒星まわりの地球型惑星の観測が今後いっそう進むと言われています。どの系外惑星観測手法においても、軽い恒星のまわりの方が軽い惑星は発見しやすいという制限があるからです。一方、赤色矮星のまわりのハビタブル地球型惑星の存在確率はまだよくわかっていません。ケプラー衛星の結果から、太陽に似た恒星がハビタブル地球型惑星を持つ確率はおおよそ10%と言われていますが、赤色矮星についてはケプラー衛星のデータだけでは推定が難しいのです。今回の発見からすると、赤色矮星のまわりのハビタブル地球型惑星は宇宙にありふれているかもしれないからです。

今後の赤色矮星のまわりのハビタブル地球型惑星探索にはいくつかの計画が有りますが、ここでは、NASAのテス衛星とすばる望遠鏡用の新型赤外線分光器IRD（図5）を紹介します。これらは、ケプラー衛星でも発見できなかった、「太陽系近く」の赤色矮星のまわりの地球型惑星探索に威力を発揮します。

2017年打ち上げ予定のテス衛星は、ケプラー衛星と同じくトランジット法、すなわち、恒星を周回する惑星による周期的な「影」を見つけます。可視光の明るさの変化を1/200等級まで精密に測

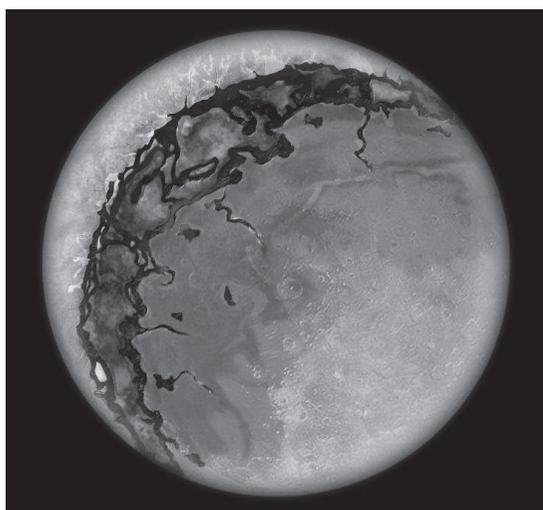


図4 アイボール・アースと呼ばれる惑星の想像図。常に恒星に照らされる高温の右側と、暗くて凍った左側。その境界領域が、水が液体で存在できる温度となる。クレジット：Beau.TheConsortium。

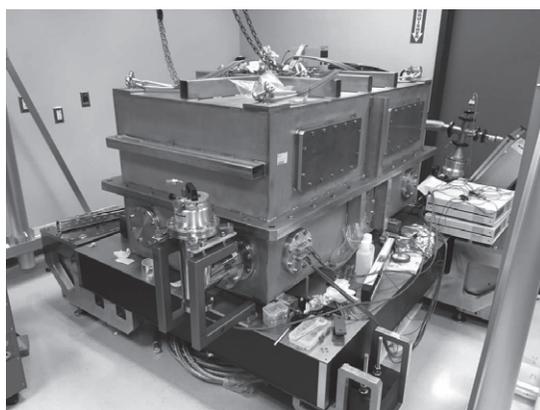


図5 すばる望遠鏡用赤外線分光器IRD。大型赤外線検出器、光周波数コム、セラミック光学系などさまざまな技術を用い、赤外線波長で初めて1m/sの精度を実現し、多数の赤色矮星まわりのハビタブル地球型惑星検出を目指している。クレジット：アストロバイオロジーセンター。

ることによって、地球のような小さな惑星を見つけることができます。これで発見された惑星は、2018年打ち上げ予定のハッブル宇宙望遠鏡の後継機である、ジェームスウェップ6.5m宇宙望遠鏡による赤外線トランジット観測の格好の観測対象となります。このような観測によって、惑星大気に水が有ることを確認することができると期待されています。

一方、日本のアストロバイオロジーセンターで開発したIRDは、最初の系外惑星発見でも活躍した可視光のドップラー法を赤外線波長に拡張したもので、赤色矮星の速度を1m/sの速度で測定し、それを周回する地球型惑星を発見できます。赤外線観測の威力は、図6で明らかのように、可視光では暗いM型星も、赤外線では非常に明るい天体になるからです。プロキシマbを含め、トランジットを起こさないと考えられる惑星はテスト衛星でも発見できないため、ジェームズウェップ宇宙望遠鏡でも追観測ができません。しかし、2020年代後半に完成予定の次世代30m地上望遠鏡(TMTなど)に系外惑星を直接撮像・分光するための特別な装置を準備することによって、その大気の成分を直接に調べることができます。これによって、水だけでなく、酸素、メタン、二酸化炭素などを検出できるでしょう。このような様々な生命の兆候(バイオマーカー)を、地球のような生命を宿す惑星の大気と直接に比較することは、系外惑星で迫るアストロバイオロジー(宇宙生物学)の最も大きなマイルストーンになると考えられます。

また系外惑星の直接観測を実現する重要な鍵が高コントラスト観測です。惑星は、明るい恒星の近くを周回しているため、遠くから見たときには明るい恒星の光に紛れて見えません。灯台の明るいサーチライトに目が眩むと、その横にいるホタルの灰かな光は見えないようなものです。これがコントラスト問題です。そこで、近年、明るい恒星の光を最新技術で抑制する技術が進み、6桁以上の高コントラスト天文観測が実現できています。その結果、すばる望遠鏡では太陽型恒星を周回す

る巨大惑星を直接観測することが可能になりました。いわば「第二の木星」の画像です(図7)。この技術をさらに進めて30m級望遠鏡にも応用することにより、上述のように「第二の地球」を画像として捉えることができるでしょう。

参考図書

「第二の地球を探せ!」田村元秀著 光文社新書
 「太陽系外惑星」田村元秀著 日本評論社
 「アストロバイオロジー」山岸明彦著 化学同人

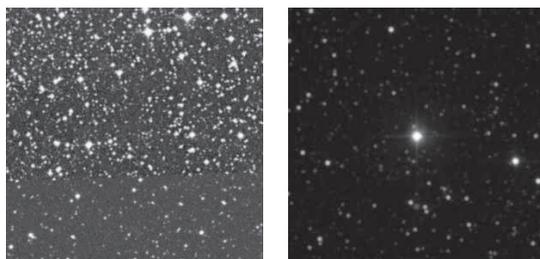


図6 恒星プロキシマの可視光画像(左)と赤外線画像(右)の比較。
 可視光では約11等と他の星ぼしと比べても目立たない恒星(視野中心より左寄りの星)だが、赤外線では約5等と明るく際立っている(視野中心の星)。惑星プロキシマbは間接法(ドップラー法)で発見されたもので、現在の観測技術では恒星と区別して直接撮像することができない。

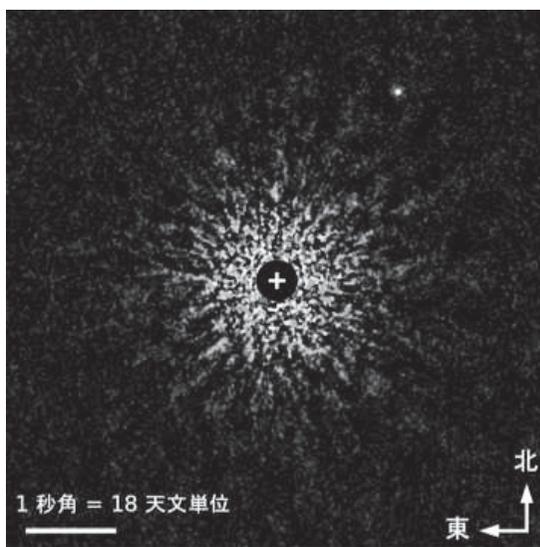


図7 すばる望遠鏡のHiCIAO近赤外線カメラで撮影された太陽系外の太陽型恒星を周回する巨大惑星GJ504b(右上の点)。
 クレジット: 国立天文台。