A whiff of methane

太陽系外惑星にメタンの気配

Adam P. Showman

太陽系外惑星の研究は、どんどん洗練されてきている。このほど、ある太陽系外惑星の大気中に炭素を含有する分子が存在することが確認された。

Nature Vol.452 (296-297) / 20 March

太陽系の天体の多くは、大気中にメタンを含んでいる。地球、火星、土星の衛星であるタイタン、巨大ガス惑星である木星、土星、天王星、海王星の大気は、いずれも微量のメタンを含んでいる。メタンの存在量は少ないが、その存在は、惑星の形成、進化、気象、光化学的性質につき（地球の場合は生命についても）、重要な手がかりとなる。これまでに 270 個以上の太陽系外惑星が見つかったが、そのほとんどは、質量と軌道の特徴しかわかっていない。太陽系惑星は地球から非常に遠いところにあり、主星に比べてはるかに弱い光しか発していないため、観測に基づいてその組成を推定するのは極めて困難である。

けれども今回、Swain ら¹は、まさにそれを成し遂げた。彼らは *Nature* 3 月 20 日号 329 ページで、太陽系外惑星の大気中にあるメタン（CH₄）の検出に初めて成功したことを報告している。この惑星は HD 189733b とよばれており、すでに水蒸気検出されていた²。今回の観測では、水蒸気存在を改めて確認し、その存在量をより確実に推定することもできた。HD 189733b は、主星との距離が地球-太陽間距離のわずか 0.03 倍しかなく、強烈な光を浴びるため、大気の温度は 1000K に達する。このような太陽系外惑星は、「ホット・ジュピター（熱い木星）」とよばれている。

炭素を含有する分子が太陽系外惑星で見つかったのは、今回が初めてである。それが可能になったのは、HD 189733b が「トランジット惑星」だったからである。トランジット惑星とは、地球から見たときに、たまたま主星の前を周期的に通過（トランジット）するような位置関係にある惑星のことである。トランジッ

ト惑星は比較的検出しやすく、地上の小さな望遠鏡でも探し出すことができる³。HD 189733b が主星の前を通過するときには主星からの光の 2 パーセント以上をさえぎるため、惑星の半径を直接予想することもできる。ここで、主星からの光が惑星の大気中を通過する際に吸収される波長がわかれば、大気の組成の手がかりが得られるが、吸収量の微妙な変化を検出するのは非常にむずかしい。惑星の大気により吸収されにくい波長は地球に届きやすいが、吸収されやすい波長は地球に届きにくく、観測される全吸収量は大きくなる（図 1）。Swain ら¹は、HD 189733b の大気を透過してきた主星の光をハッブル宇宙望遠鏡に搭載された NICMOS カメラを使って観測し、惑星の赤外線スペクトルを得た。そのスペクトルは、惑星の大気中でのメタンと水蒸気の吸収特性をはっきりと示していた。

この測定から、惑星の挙動についてどんなことがわかるのだろうか？ 木星、土星、天王星および海王星のメタンの存在量はそれぞれ、太陽大気中の炭素 / 水素比（太陽大気中に含まれる炭素はすべて原子の形で存在している）の 3 倍、7 倍、約 30 ~ 40 倍に相当する。これらの値は、惑星が形成される際に、原始太陽系星雲のガス（その炭素 / 水素比は、太陽の炭素 / 水素比に近かったと考えられる）から炭素を受け取っただけでなく、炭素質の岩石や氷も大量に吸収していたことを示唆しており、惑星の形成について重要な手がかりを与えてくれる。太陽系外惑星についても、その炭素 / 水素比は、ほかの重い元素と水素の比と同様に、どれだけの量の固体材料がガスとともに集まっていったかを示す重要な手がかりとなる。

しかし、HD 189733b については、話はもっと複雑である。観測により推定されたメタンの存在量¹は、モル分率（水素を豊富に含む背景ガスに対するメタンの比率）でいうとわずか 5×10^{-5} 未満であり、主星の炭素 / 水素比の 10 パーセント以下しかない。それでは、炭素はどこにあるのだろうか？ 温度が 1000K 以上になると、炭素がメタンを形成するのは熱力学的に不利になり、酸素と結合して一酸化炭素 (CO) を形成したほうが有利になる。HD 189733b の温度はこの転移温度に近いので、当初から、炭素は主として一酸化炭素の形で存在しており、微量のメタンも検出できるだろうと予測されていた⁴。ゆえに、HD 189733b におけるメタンの存在量が太陽系の天体に比べてはるかに少ないという発見は、理論的に説明がつく。実際、スピッツァー宇宙望遠鏡による最近の観測データ⁶に基づいて構築された赤外線放出スペクトルのモデル⁵は、一酸化炭素の存在を間接的に示唆している。

興味深いことに、Swain ら¹も Tinetti ら²も、HD 189733b の水蒸気の水素比は 5×10^{-4} であると推定している。この値は、惑星の酸素 / 水素比と炭素 / 水素比に重大な影響を及ぼすため、HD 189733b の形成と進化の過程を絞り込むことができる。どのようにして？ 太陽における元素存在比は、HD 189733b の主星のそれに近いと考えられており、 10^3 個の水素分子に対して約 1 個の酸素原子が存在している。同様に、 10^3 個の水素分子に対して約 1/2 個の炭素原子が存在している。HD 189733b では、炭素は主として一酸化炭素の形で存在していると推測されているが、この場合、酸素原子の半数は一酸化炭素を形成し、残りの半数は水を形成して、水の水素比は約 5×10^{-4} となる。この一連の論理によれば、HD 189733b における水の存在量の推定値が示唆する炭素 / 水素比および酸素 / 水素比は、太陽（と、おそらくは HD 189733b の主星）での値と整合性がある。HD 189733b の炭素 / 酸素比が不明であるため断定することはできないが、これらの値は、HD 189733b における炭素や酸素などの重い元素の存在量が主星に比べてあまり多くないことを示唆している。これは、太陽系の巨大惑星とは対照的である。

メタンの存在量は、この「ホット・ジュピター」の異常な気象の手がかりにもなる。大気の組成が化学平衡に達している場合、熱い昼側ではほとんどすべての炭素原子が一酸化炭素の形で存在しているのに対して、低温の夜側ではメタンの形が重要になってく

図1 メタンを検出する。地球から見た太陽系外惑星が主星の前を通過するとき、主星からの光のうち、惑星の大気に吸収されやすい波長（赤で示す）は、吸収されにくい波長（白で示す）に比べて地球に届きにくい。Swain ら¹は、ハッブル宇宙望遠鏡を使って「ホット・ジュピター」である HD 189733b の透過スペクトルを得て、惑星の大気にメタンが存在していることを明らかにし、水蒸気の確認した。

る。この惑星の昼夜の温度地図⁷は、温度をすみやかに均等化する速い風が存在を示唆している。メタンと一酸化炭素との相互変換に必要とされる時間は有限であるため、メタンと一酸化炭素の存在量（およびその空間的なばらつき）は、大気の温度と輸送の時間的尺度に関する情報を含んでいるはずである⁸。ただし、この情報を取り出すためには、さらなる観測とモデルの構築が必要である。

現在、太陽系外惑星の研究は、活気にあふれている。近年は、HD 189733b をはじめとするトランジット惑星の高精度観測がさかんに行われるようになり、「ホット・ジュピター」の物理的特性が明らかになってきた。太陽に似た主星のまわりを公転する太陽系外惑星が最初に発見されてから 13 年目を迎えた今、我々はいよいよ、太陽系外惑星を見つけるだけの段階から、このような惑星がどのような性質の天体であるかを本当の意味で明らかにしていく段階に来たのである。現在、これらの発見の立役者であるハッブル宇宙望遠鏡とスピッツァー宇宙望遠鏡は老朽化しつつあり、NASA のジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡などの次世代の研究基盤の開発が進められている。我々が目にしていく成果は、人類にとっての惑星の世界を、太陽系のはるか彼方にまで広げていく革命ののろしにすぎないものである。

Adam P. Showman, アリゾナ大学 (米)

- Swain, M. R., Vasisht, G. & Tinetti, G. *Nature* **452**, 329-331 (2008).
- Tinetti, G. *et al. Nature* **448**, 169-171 (2007).
- www.transitsearch.org
- Fortney, J. J., Saumon, D., Marley, M. S., Lodders, K. & Freedman, R. S. *Astrophys. J.* **642**, 495-504 (2006).
- Barman, T. S. *Astrophys. J.* (in the press); preprint available at <http://xxx.lanl.gov/abs/0802.0854>
- Charbonneau, D. *et al. Astrophys. J.* (submitted); preprint available at <http://xxx.lanl.gov/abs/0802.0845>
- Knutson, H. *et al. Nature* **447**, 183-186 (2007).
- Cooper, C. S. & Showman, A. P. *Astrophys. J.* **649**, 1048-1063 (2006).