

太陽系外惑星探査 -

「第2の地球発見」をめざして



研究室紹介

芝井 広*

Search for Extrasolar Planets: Toward Detection of Another Earth

Key Words : Exoplanets, Far-Infrared, Astronomy, Interferometer

1. 太陽系外惑星の発見史

私たち太陽系には「水・金・地・火・木・土・天・海」という8つの惑星がある(冥王星は惑星に含めないことが2年前の国際天文学連合総会で決議された)。太陽は我々の銀河系に約1000億個ある普通の恒星にすぎないことから、当然、他の恒星のまわりにも惑星が周回しているのではないか、その中には地球のような惑星があって、ひょっとしたら生命現象が進行しているかもしれないと想像が働くのは当然であろう。しかしながら恒星に比べると惑星は極めて暗く、小質量であるために、発見はきわめて困難であることも容易に理解できるだろう。例えば太陽系最大の惑星である木星でさえ、可視光では太陽の10億分の1の明るさであり、質量は約1000分の1しかない。「いわんや地球をや」である。実際1938年には「現時点で想定できる技術では太陽系外の惑星は検出できない」という研究論文が出版されたこともある。その後も多くの試みが行われ、数年に1度の頻度で「系外惑星発見か?」のニュースが流れたが、すべて間違いであった。

ところが1995年になって最初の発見があった。ペガサス座51番星という恒星の周りに木星の約半分の質量の惑星が周回しているというものである。驚くべきことにその周期は4日、恒星からの距離は0.05天文単位(1天文単位は太陽地球間の距離で約

1億5千万キロメートル)であった。つまり木星のような巨大ガス惑星が、太陽系の場合の水星(0.4天文単位)よりずっと近いところを高速で周回していて、恒星から照らされて1000K以上の高温になっているはずである。このような惑星の存在はほとんど予想されていなかったが、1996年にかけて同じような例が続々と発見され、ホット・ジュピター(熱い木星)と呼ばれるようになった。

この世紀の発見に成功した観測技術は「視線速度法」と呼ばれる。系外惑星を直接検出したわけではなく、系外惑星が周回することによって恒星が揺らされ(共通重心の周りを恒星も周回するため)、その速度変化をドップラー効果として測定するというものである。この速度変化は大きくても10メートル毎秒、つまり人間が走る速さ程度しかない(現在では数センチメートル毎秒の精度に到達している)。恒星の質量は良くわかっているため、観測した速度変化量と変化周期から、簡単な力学を用いて惑星の質量と軌道半径が求められる。2009年1月現在までこの方法で300個を超える系外惑星が発見されている。

2. 惑星形成過程の研究

太陽系では太陽に近い側に地球のような小さい岩石惑星があり、遠い側に木星のような大きいガス惑星があり、もっと遠方には天王星のような氷の存在が特徴的な惑星がある。この形成過程については、以下のような「コア・アクリション過程」が提唱された。惑星系の母体は「原始惑星系円盤」と呼ばれる。恒星ができるときに周囲に取り残されたガスと塵(固体微粒子)が円盤状に集まっているものである。ガスの主成分は水素分子である。一方、塵は炭素、酸素、珪素、鉄などさまざまな元素を含むが、質量の半分以上は「氷」と考えられている。



*Hiroshi SHIBAI

1954年6月生
京都大学大学院理学研究科物理学第二専攻博士後期課程中途退学(1982年)
現在、大阪大学 理学研究科宇宙地球科学専攻 教授 博士(理学) 赤外線天文学
TEL : 06-6850-5501
FAX : 06-6850-5542
E-mail : shibai@ess.sci.osaka-u.ac.jp

この原始惑星系円盤中で、まず塵が集まって惑星の芯「コア」を形成し、その後コアの重力でガスが堆積するというのが、「コア・アクリーション過程」であり、初期条件として原始太陽系円盤を与えて精緻な数値シミュレーションが行われ、太陽系の惑星形成を良く再現することができるようになった。

しかし発見された系外惑星(系)のほとんどは太陽系とは様相が異なっている。このように多様な惑星系がどのようにして形成されるのかについて、上記の定説以外に「円盤不安定過程」が提唱されていた。二つの過程のどちらが実際の宇宙で優勢かはきわめて重要なテーマであり、観測によって区別することが出来ればすばらしい。我々の太陽系自身は「コア・アクリーション過程」説が有力だが、系外惑星系の観測からは「円盤不安定過程」を支持する証拠が続々と現れてきた。前者では木星の10倍以上の惑星は生まれませんが、実際に発見されていること[1](図1) 前者では恒星から遠方に木星のような巨大ガス惑星は生まれませんが実際に発見されていること[2]、後述のように原始惑星系円盤が不安定状態にあるかもしれない例があることなどである[3](図2)。もし「円盤不安定過程」が実際の宇宙で働いているとすると、系外惑星系はきわめて多様な様相を示すであろう。さらに我々の太陽系、そして地球は偶然の産物とは言わないまでも、宇宙では少数派かもしれない。

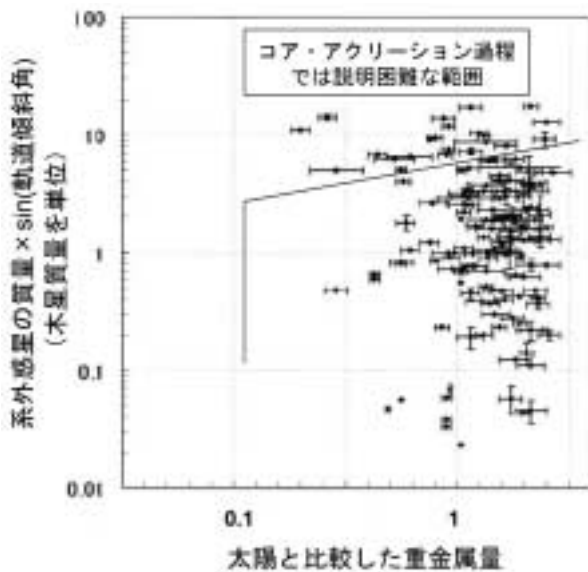


図1. 既発見の系外惑星の重金属量と質量の関係。斜線より上側は太陽系形成の定説であるコア・アクリーション過程では説明困難な範囲。円盤不安定過程では説明可能[1]。

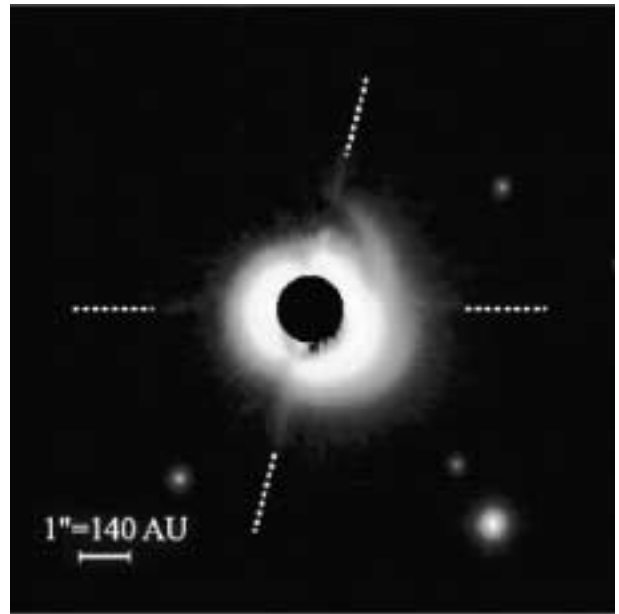


図2. 「すばる」望遠鏡による非対称円盤の検出例(観測波長1.6ミクロン)。中心の恒星はマスクで遮蔽されている[3]。

3. 原始惑星系円盤の詳細研究

このように系外惑星が多数発見され、さらに惑星系形成理論も精密化されてきたが、肝心の初期条件、すなわち原始惑星系円盤が十分にわかっているわけではない。原始惑星系円盤の性質としては、密度分布(円盤の厚みも含む)、組成分布、温度分布を知る必要がある。これらが精密にわかれば、シミュレーションによってどのような惑星系が形成されるかを予言することが出来る。しかし何しろ遠方の小さい現象(角度で1秒角以下)であるので、非常に高い解像度の観測が必要である。とりわけ円盤の密度分布を知るためには近赤外線(波長1 - 5ミクロン)の観測が必要であるし、温度分布を知るためには、遠赤外線(波長30 - 300ミクロン、テラヘルツ波とほぼ同じ)の観測が必要である。

遠赤外線が高解像度の観測をするためには、「干渉計」という技術を用いるしかない。例えば1秒角の解像度を得るためには、20m以上はなれた二つの望遠鏡のビームを干渉させる必要がある。それに加えて遠赤外線は地球大気を透過できないので、成層圏以上の高空に望遠鏡を打上げる必要がある。我々の研究グループは世界で初めてこの技術に挑戦してきた[4]。図3のようなFizeau型の干渉計(Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment :



図3 . 宇宙遠赤外線干渉計 F I T E。
ブラジル気球フライト基地内で試験中の様子。

FITE)を開発し、宇宙からの遠赤外線が到達できる高度約3万5千メートルまで大気球で打ち上げるものである。干渉光学系、姿勢制御系ともに4秒角解像度が達成できる性能を持つことが確認されるなど装置はほぼ完成した。科学観測用大気球(容積30万立方m)による打上げをブラジルで行う実験を昨年から進めており、本年冬には初実験を行う計画である。

また波長の短い近赤外線による高解像の観測はハワイ島にある「すばる」望遠鏡に搭載された新しい装置(HiCIAO/AO188)を用いて行う(SEEDSプロジェクト)。これは最新鋭のコロナグラフ装置(恒星の光を消して周囲の微かな赤外線を検出)で、原始惑星系円盤はもとより、多数の巨大ガス惑星を(間

接的にではなく)直接撮像することができると期待されている。

4 . さらなる発展

これらの研究の延長線上にあるのは、私たちの地球」というものの一般性と特殊性を知りたいということである。つまり私たちの地球はどのようにしてできたのか、宇宙では多くの地球のような惑星が誕生しているのだろうかということである。なかでも「生命現象」が地球という惑星の最大の特徴であり、系外惑星で生命現象(の痕跡)を発見することが遠くの大いなる目標であろう。

地球の歴史においては大気を酸素豊富状態に変えてしまったのは大繁栄した光合成植物である。従って系外惑星の大気を詳しく調べられるようになれば、その惑星における生命現象を検出できる可能性がある。これには赤外線による超高感度(光子100個のオーダーが検出可能)、超高解像度(0.1秒角以下)の観測が必要であるとされており、巨大な赤外線干渉計を宇宙に打上げる必要がある。米国のNASA、ヨーロッパのESA、わが国のJAXAなど世界各国でプロジェクトの具体的検討が行われつつある。またこれらのプロジェクトを支える研究分野として、「宇宙生命学(Astrobiology)」の充実・発展が望まれている。

参考文献

- [1] Matsuo, Shibai, Ootsubo, Tamura, 2007, *Astrophys. J.*, 662, 1282.
- [2] Marois, et al., *Science Express* Nov 13th, 2008; doi:10.1126/science.1166585.
- [3] Fukagawa, et al., 2004, *Astrophys. J.* 605, L53.
- [4] Kohyama, et al., 2008, in *Optical and Infrared Interferometry*, ed. M. Schöler, W. C. Danchi, F. Delplanck, *Proc. SPIE-7013*, pp. 70133O-70133O-10.